学生と教師のための

電磁気学史

小林一夫

まえがき

物理学特に電磁気学を初めて学ぶときは得体の知れないことばに出くわし戸惑うことが多い。たとえば電荷とは何か、電流とはどういうものか、電場とは磁場とは、電気力線、磁力線などというものはあるのか、それはどういう概念なのか、電位とは電圧とは・・・・。これらは学ぶ方もそうであるが教える方もどのように教えるかは極めて難しい。いずれも見たり触ったりできないものであることが原因かもしれない。そういうときは、昔の人はどのようにして理解していったのかを知ることが手がかりになるかのしれないと思い、教える側も学ぶ側もそのへんは大いに知りたいところではある。そう思って物理学史・電磁気学史を紐解いてみると、易しい本はほとんどがエピソードの羅列であり、具体的にどのようにしてわかっていったのかは書かれていないことが多い。一方、専門書になると、科学者がどのような動機のもとにそのような考え方に至ったのかということが中心であったり、科学史上の新しい発見に重点が置かれ、学ぶ立場教える立場からするとかゆいところに手が届かないことが多い。我々が知りたいのは、例えば、どのような実験が行われたのか、その実験結果はどうだったのか、その実験結果からわかったことは何だったのか、それを今再現するとしたらどのようなこと可能なのかなど、要するに具体的な事実や考察が知りたいのである。科学者が論文を掲載するまでの動機ではなく、論文そのものに書かれている事実が重要なのである。そこにこそ、その研究が認められていったヒントが隠されているはずで、それが問題である。

一方、わかるとはどういうことかも重要である。わかるということが疑問に答えるということであるならば、それは疑問詞に答えることであろう。物理学を理解する上では、特にHow What Why が重要である。Howに答えるのは実験事実であろう、Whatに答えるのは概念形成でありWhyに答えるのは数学的理論であることが多い。物理学を理解するためには、物理学史上の事柄もこの疑問詞に答えるものとして整理することも必要であろう。

以上の観点で、学ぶもの・教えるものの立場から電磁気学史を著すこととした。したがって、記述の内容はできるだけ原典にあたり具体的な描写にこだわった。例えば、クーロンの実験、オームの実験については、実験装置の概要だけでなく、その詳細と大きさにもこだわった。さらに、実験結果のデータにもこだわった。そして何が明らかになったかを明確にするようにした。随所にそのような詳細な記述が見られるがそれがないと理解への手がかりとなることができないのである。理論が中心になるときはどうしても数学的記述が必要になるが、なるべく、【物理学生への註】という形で収めることとした。

長年教員をやってきたが、現役のときには多忙でまとまった仕事ができなかった。少しづつためてきたものをさらに徹底的に原典にあたって上記の考えを遂行した。

目次

はじめに
序　電磁気学の開始
第1章　静電気学の発展
Ⅰ　静電気学の開始・・・静電気学の現象に関する知識の整理と蓄積
　　ギルバートの静電気学・静磁気学とその後の発展
　1．ギルバートの静電気学
　2．ギルバートの静磁気学
　3．地球の磁石説
　4．ギルバート以後
　5．Otto von Guericke,1602-1686　の起電機の発明
　6．現象についてのその後の発見
Ⅱ．　電気現象を担う実体の発見
　1．電気現象が伝導することの発見　Stephan Gray(-1736)の研究 1
　2．導体（conductor)と絶縁体(electric per se)の名称
　3．電気には２種類あることの発見
　4．静電起電機の発展
　5．電気は蓄えられること　ライデン瓶＝蓄電器の発明
　（1）ライデン瓶の発明
　（2）ライデン瓶の改良
　（3）ライデン瓶の普及
　6．フランクリンの一流体説と電気量保存の法則
　（1） フランクリンの一流体説・・・電気の移動と電気量保存のめばえ
　（2）ライデン瓶によるフランクリンの実験
Ⅲ　電気現象の発見の拡大
　1．尖端放電の現象と雷雲が電気を帯びていること
　2．大気中の電気について
　3．接触電気の発見
　4．ピロ電気について　1756年
　5．帯電列について
　6．溶けた物質の帯電について・・・（摩擦によらない）自発的電気
Ⅳ　電荷の相互作用と電荷の移動・分布
　1．検電器の発明
　（1）電気感応の発見
　（2）電気盆の発明
　（3）検電器の発明と発展
　（4）ヴォルタの麦藁検電器・・・定量的測定
　2．電位概念の形成
　（1）コンデンサトレの制作と電位概念の形成
　3．逆二乗法則の発見　クーロンの業績
　（1）静電気力に関するクーロンの実験
　4．静電気学についての基本実験―マックスウェルの説明
Ⅴ　静電気学の本質的理論・ポテンシャル論
　1．電気学と力学の発展について
　2．ポテンシャルの導入
　3． ラプラスの方程式
　4．ポアソンの方程式

５．グリーンによるポテンシャル論の完成

第2章　動電気（電流）

Ⅰ　電流を取り出す
１．ガルバーニ電気の発見
２　接触電気
３　ヴォルタの電堆
Ⅱ．電流とその他の現象との関係
１　電流と化学変化・・・電気分解
（１）　デーヴィ以前の電気分解の研究
（２）デーヴィの電気分解
２　電流と熱・光との関係
３　ガルバーニ電気の磁気作用
（１）エールステッドの発見
（２）ガルバノメーター・マルチプリケーター
（３）ビオ　サバールの実験と法則
（４）ゼーベックの電流の磁気作用に関する研究
４．アンペールの研究
（１）アンペールの研究１
（２）アンペールの研究２
（３）アンペールの研究３．
５．グラスマンによる電流に働く力ーいわゆるビオ・サバールの法則
６．熱電気の発見
７．アラゴの回転磁界の発見
Ⅲ．電流について・・・実体の探求とその運動について
１　デーヴィの研究
２．オームの研究
（１）オームの実験的研究
（２）オームの理論的研究（1827年）
３．ポッゲンドルフによる起電力と内部抵抗の測定
４．ホートストンの研究
５．キルヒホッフの法則

第3章　　電磁誘導とエネルギー保存の法則

Ⅰ　電磁誘導の法則
１．ファラデー以前
２．ファラディと誘導概念
（１）ファラディの電磁誘導の実験
（２）アラゴの実験に関して
３．レンツの法則
４．ファラデーとレンツ
５．ノイマン　電磁誘導の法則の数式化
Ⅱ　エネルギー保存の法則と電磁誘導
１．エネルギー保存の法則
（１）仕事の原理と力学の法則
（２）電流の発熱作用に関するジュールの実験と法則
（３）「磁電気の熱効果と熱の仕事等量」

２．エネルギー保存の法則と電磁誘導の法則
（１）Helmholtzの「力の保存について」
（２）W.Thomsonの「電磁誘導の理論について」

第４章　電磁場

Ⅰ　ファラディの電気力線と磁力線
１．近接作用
２．誘電率の測定
３．電気力線
４．電気力線に関する諸現象
５．力線一般の概念の導入（１８４６年４月３日金曜日の講義）
（１）トムソンによる遠隔力と近接力の結果的同一性
（２）力線一般
６，ファラデー効果
７．反磁性体についての研究
８．磁力線の物理的実在ついて　（シリーズ２８）
９．ファラデーの結論（これまでのまとめ）
Ⅱ　トムソンと力線、磁場電場の理論
１．力線
２．トムソンの磁場の表現に対する重要な貢献
Ⅲ　マックスウェル
１．「ファラデーの力線について」
（１）研究の方法
（２）力線・・・その数学的定式化について
（３）ファラデーの電気的緊張状態について
（４）いわゆる「アンペールの法則」について
２．「物理力線について」
３　マックスウェルの理論の完成
（１）「電磁場の力学的理論」
（２）「電気と磁気についての論考」
Ⅳ　マックスウェルの後継者
１．電気の移動による磁気現象について（A.Rowland）
２．Halle　効果
３．電磁場のエネルギーはどのように移動するのか　Pointing
（１）直線電流
（２）導線を通ってコンデンサーが放電される場合
（３）ボルタ電池を含む回路
（４）熱電対などの回路
４．電磁波の発生とその確認　Hertz
（１）非常に速い電気的振動について
（２）有限の速度で伝わる電磁作用について
（３）Maxwellの理論に従った電気振動の力について
（４）電気力の放射について

第５章　電　子

Ⅰ　真空放電現象の探求
１．初期の研究　ファラデーとその後継者

（1）ファラデーの放電現象の研究
（2）ファラデーの後継者　Gassiot とPlucker
2.陰極線の研究・・・Hittorf ・Goldstein ・Crooks
（1）陰極線の発見と陰極線の直進性・・・Hittorfの研究
（2）陰極線の命名とその正体に関する議論　Eugen Goldsteinの研究
（3）陰極線の道筋を観察すること・磁気力による湾曲　Crookesの実験
Ⅱ　電子の発見
1．陰極線の正体
（1）陰極線の正体についての議論
（2）陰極線が荷電粒子であることの証明・・・J.J.Thomsonの実験と議論
2．電気素量（電子の電気量）の探求
（1）X線の発見と研究
（2）電気素量の測定ーTownsendの取り組み
（3）電気素量の測定ーJ.J.Thomsonの実験
（4）電気素量の測定ーH.A.Wilsonの研究
（5）電気素量の測定ーR.A.Millikanの研究
Ⅲ　電子論
1．電荷と電流概念の変遷
2．ローレンツの電子論
3．ドルーデの金属電子論
おわりに

序　電磁気学の開始

1600年　地動説論者ケプラーは、ティコ・ブラーエの元に行くためにグラーツを出発した[1]。ティコ・ブラーは惑星の運動について、当時最も信頼できるデータを保持していた。ケプラーはそのデータこそ彼の宇宙体系を証明するために必要であると感じていたのであった。

同年．地動説論者ジョルダーノ・ブルーノは長い放浪の果てに望郷の念たちがたく故郷に戻ったが、その新天文学のため故に焚刑に処せられた。そのとき、イギリスの医師ギルバートは「磁石について」[2]を執筆中であったが、その序文に次のように記した。

「私はこの高貴な科学、この新哲学が、他人の意見に追随すると宣言した人たちの判断によって、学術の非常識な破壊者の最大の者、書物学問にふける道化師、文法家、奇弁家、演説家、頭の悪い野次馬連によって、告訴され、ずたずたに引き裂かれ、侮辱されるのを、どうして黙っていることができようか。私はこの磁気科学の基礎を、諸君に、書物ばかりでなく、事物自体のなかに知識を求める真の哲学者、正直な人たちだけに献じたいのである。」（ダンネマン　4巻P212）[3]

ギルバートは「磁石について」において、地球が大きな磁石であること、その磁石の力故に天体の運動が行われるのであることを証明するためにこの大著を著した。その研究の姿勢は、上記に述べたように、先人の書物を絶対視することなくつねに実践を通して自然から学ぶと言うものであり、この姿勢こそが電磁気学の端緒を開いた。その精神はこの「磁石について」の中の特に電気に関する研究において大いに発揮された。彼の電気に関する研究は創造的な実験と観察とによって行われ、本人が述べる以上に豊かであり、後の電気学の発展に大いに貢献することとなった。まず、ギルバートの電気学から始めることとしよう。

第1章　静電気学の発展

I　静電気学の開始・・・静電気学の現象に関する知識の整理と蓄積
ギルバートの静電気学・静磁気学とその後の発展

1．ギルバートの静電気学

---

[1] アーサー・ケストラー　「ヨハネス・ケプラー」小尾信弥／木村博　河出書房

[2] W．ギルバート　‘De Magnete’ Dover Translated by P.Fleury Mottelay
磁石（及び電気）論　　板倉聖宣　訳・解説　仮説社

[3] ダンネマン　新訳大自然科学史　安田徳太郎訳・編　三省堂

電気についての記述は磁石論の第２章に詳細に書かれている。ギルバートは第1章での磁石についてのさまざまな論述の後に、第２章ではものをひきつける力には磁石以外に琥珀を含む幾つかの物体もまた惹きつける力が存在するがそれは磁石とは異なるものであることを注意した。そしてそれらの力はすべて琥珀が示す力と似ていると指摘した。

「というのは、磁石以外の物体の場合には、ものを引き寄せる著しい力は、磁石の場合と違ったやり方で現れるからである。それは琥珀の場合と似ているのである。」（以下この項は、磁石論、板倉聖宣訳、第２部第3章を参考）

そして、このことを研究する上で実験の重要性について述べる。

「琥珀や黒玉が籾殻をひきつける」ということについて「神秘的で難解な隠された原因や不思議に関するたくさんの本が生産されており、どの本を見ても琥珀や黒玉がモミガラを誘い寄せることが明らかにされている。しかし、それらの著者たちはこの問題を言葉の上で扱っているだけで、実験から何らの理由や証明を見出していない。それで彼らの陳述は、いかにも内密の、驚くべき難解で、秘密で、オカルト的なやり方で、事物を深い霧の中に隠すようなものでしかない。」

こうしてギルバートは実験から幾つかの結論を見出す。その第一は、**琥珀だけが物体を引きつけるわけではない**ということである。琥珀だけが小さな物体を引きつけるのではなく、じつに多くの他の物体も摩擦をすることによって引きつけることを示した。

「ダイヤモンド、サファイヤ、ルビー、イギリスの宝石（iris stone）オパール、アメジスト（紫水晶）ヴァンケンティーナ、プリストラ（蛍石）緑柱石、水晶も同じこと行う。さらに、ガラス、特に透明な光ったガラス、次に、ガラスや水晶の偽造宝石、アンチモンガラス、多くの蛍石、矢石類も引きつける。硫黄もまた引きつける。樹脂やワックス、堅い蝋、石黄も（弱いが）引きつける。引力はかすかではあるが、乾燥した空気の中では結晶塩、雲母、岩石の明礬もまた、引きつける。」

この記述からは、ありとあらゆるものを試してみたギルバートの科学に対する真摯な態度が伺われる。

こうして、「琥珀のせいだとされているこの吸引力は、琥珀という物質の何か特異な性質や類似関係から生じるのではな」く「多くの他の物質にも見出すことができ」その物質は非常に多様なのでより一般的な原因を考えなければならないとギルバートは言う。そこで、このように摩擦によって琥珀のように他の物質を引きつける物質をギルバートは電気的物質(electrics)と呼んだ。電気的物質は現在ではさらに広がっている。プラスチック製品はほとんどがそうである。そして、この電気的物質の力の原因は、電気的発散物（electric effluvia)であるとした。なお、金属などの土を多く含むものは摩擦によって引きよせることができず、電気的物質ではないものとして分類された。

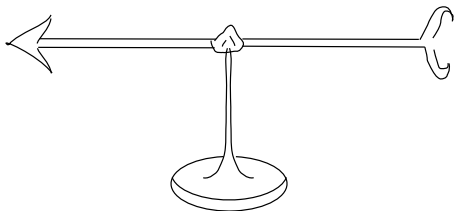
この力の一般性はこの力によってすべてのものが引きつけられることを確認すること

によっても裏付けられた。つまり、実験から引き出された第二の結論は　引きつけられる物質は、ほとんどすべてのものである、ということである。これら電気性物質が引き寄せる相手は電気性物質よりもさらに広範囲で、すべての物質が引き寄せられるということである。このことも勿論鉄などの一部しか引き付けない磁石とは大きく異なる。ギルバートは次のように述べている。

「これらの物質は、あらゆるもの、一麦わらやもみ殻だけではなく、あらゆる金属、木材、木の葉、石、さらには水や油でさえも引きよせる。つまり、私たちの感覚の対象となりうるもの、形のあるものならなんでも引きよせるのである」

こうのべて、これまではもみ殻や木くず以外は引かないと言われていたことを否定した。このギルバートの指摘はきわめて重要である。この事実をギルバートは無数の実験によって確認している。そして、発見されたこの事実は、電気力が磁石力と異なり、普遍的な性質を持っていることを示している。

このようなことを調べるとき、ギルバートは右図のような回転針（ベリソリウム）と呼ぶ装置を用いた。このような実験装置の考案は実験観察を基礎とする科学的研究においてはきわめて重要である。



(LOADSTONE AND MAGNETIC BODIES)より
図１

現在でも、電気のこのような性質については、ギルバート同様、自ら確かめてみる価値がある。そのとき上記の回転台は有効な手段である。様々な帯電している物体を回転台に載せ、物体を発電棒を近づけて引き寄せられるかどうかを調べてみるのである。この装置は、現在高校の物理教室で回転台と呼ばれているものときわめて類似している。むしろ回転台がギルバートによって発明されていたと考えるべきであろうか。右の図は現在発売されている発電棒回転台であり、上面の溝に静電気を帯びた棒を載せて実験を行う道具である。回転の摩擦が出来るだけ小さくなるよう工夫されている。

（ナリカのカタログより）
図２

ギルバートは、上述のように、液体もまた引き寄せられることを確認している。現在では水道の水を細く出し帯電した物体を近づけて物体の方向に引き寄せられることで確認する方法[4]が紹介されている。

その他、ギルバートは空気の乾燥と電気の性質についても詳細な観察を行っている。たとえば、電気現象は空気が乾燥しているときに起こりやすく長持ちがすると言う。彼の観測によれば、北風や東風のとき、これは欧州では空気が乾燥しているときであ

[4] 参考　（最新教育物理実験　中込八郎編　聖文社）

るが、そのときには電気が起きやすく電気現象は１０分も長持ちし、逆に湿気があるときは電気の性質は消えてしまう。つまり、南風やあるいは息を吹きかけるなど湿気を与えると電気現象は失われてしまうというのである。そして、この簡単に電気の作用が失われてしまうことも、永久的に持続する磁石の作用とは大きく異なっていると強調する。

ギルバートは、電気現象は「摩擦をして温める」ことによって生じると考えた。つまり磁石の力はいつも同じように働くが、電気的物質は気まぐれで、「摩擦をして温める」ことによってその性質が発現するというのである。現在でも高校の静電気実験の際に、摩擦によって「暖まる」と電気が起こると感じる生徒は多い。静電気現象の複雑さは、現在でも不明のところもあり、摩擦熱と電子の移動との関係は明瞭ではないし、熱との関係は一概に否定は出来ないかもしれない。また、熱された物体を近づけると電気的性質を失うことも観察していて、自分自身があたたまることとは別のことであるとも述べている。

２．ギルバートの静磁気学

ギルバートの序文にいうことに従えば新哲学とは実験哲学のことである。だから、実験事実、観察事実が重要である。確かに静電気学では彼の手法は大きな成果を上げた。しかし、肝心の地球が大きな磁石であるという彼の説は、実験観察によって直接証明することは当時の状況では不可能なことであった。彼の言明にもかかわらず、彼の地球の磁石説は、実験事実、観察事実から証明をすることはできなかった。ギルバートは後で述べるように、球形の磁石を作り出し、球形の磁石は地球の磁気と同じような性質を示すということによって、地球が大きな磁石である可能性を示したのである。あくまでも類推による可能性ではあったが、しかし、かれの地球磁石説は、その後、ガリレオをはじめ多くの人がこれを支持していった。それは地動説が受け入れられて行くとともにひろまったのである。

地球磁石説について説明する前に、磁石についてのギルバートの考えや、実験や観察が何であったかを明らかにしその当時の、磁石学の現象論についてまず明らかにしておこう。

静電気学の場合と異なり、磁石についてはギルバート以前にも多くの人がさまざまな実験を行い、また、観察を行ってきた。このように、様々な観察や実験が記録されてきてはいたが、中には、言い伝えを確認することもなくそのまま記述したりしていて、磁石に関する論述はかなり曖昧なことがあった。このような状況において、ギルバートは報告や書物を鵜呑みにせずたえず自らの実験や観察を行って確認するという新哲学、つまり実験哲学の立場を貫いた。このことが真に科学の発展を促したのであった。

ギルバートは磁石は鉄と基本的に変りはないことをまず確認した。「強力な磁石は磨かない鉄と外見が似ており、大部分は鉄鉱山で見いだされる」「同一の母体から一つの鉱脈の中で生み出された物」であり、「鉄分の豊富な最も良質の鉱石や最初から金属である鉄と、もっともすぐれた磁石は、いかなる点においても区別されず、冶金家で

も見分けることが出来ない。」つまり磁石と鉄は本性において同一であると述べたのである[5]。このことは、磁石についての重要な発見のひとつであった。

次に、磁石は常に二つの極を持っていることを述べている。

「どんな磁石にも（極を）見いだすことができる。その形が人工的なものか偶然的なものかに関わらず、また、その形が長いか平たいか、四角形か三角形か、磨かれているかどうかによらず、・・・磁石はいつもその極を持ち、その極の働きを示すのである。」

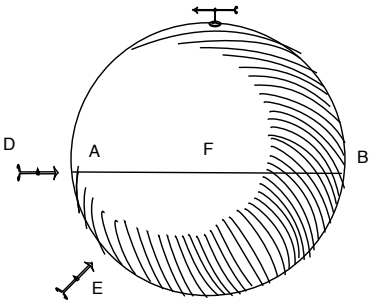


図1

このことを確認するために次のような実験を行った。つまり、まず、回転針を作成した。これは、短い鉄片（鉄線）を磁石につけて（磁化し）自由に回転できるようにしたものでありこれを利用して極を見つけることができる。つまり、回転針が極の位置に来れば回転針は垂直になり極と中心の方向を示す。

このギルバートの実験を板倉聖宣氏は現代に再現実験を行った。その結果が彼の著書に記述されている。

「磁石の上に鉄の針か鉄線をのせればよい。そうすると、その鉄の両端はその鉄自身の真ん中を中心に回転し、すぐに止まる。・・・
横たわっている針金に沿って線を引き、針金を他の場所に移し。毎回、その線の向きに沿って石の上に印を付ける。そうするとそれらの線はその石の上に、子午線のような円の方向を示すことになる。これらの線はすべて磁石の極のところで交わることが明らかになる。[6]」

そして、磁極の位置に来れば上記のように、回転針は垂直の方向を向くのである。このような実験を通して、磁石は常に２つの極を持つことを確認することができる。

また、昔からわかっていることだが、磁石は鉄を引きつける。逆にいえば、鉄以外のもの（次に述べる磁石を除いて）は引き付けない。これは電気とは大きな違いである。これをギルバートは次のような実験で確認した。

強い磁極を持った磁石にＮ極とＳ極の印を付ける。これを容器に入れて水に浮かす。磁極は（水面と平行に）水平になるようにする。磁極を確認したもう一つの磁石を用意し、Ｓ極をＮ極に近づける。磁石は近づいてくる。また、Ｎ極にＮ極を、Ｓ極にＳ極を近づけると、一つの石は他の石を退けることが見られる。

また、磁石を分割すると磁極は、切断面に新たに極ができることも確認した。

磁石においてａをＮ極、ｄをＳ極とする（次頁図１）。この石を切って二つの部分に分け、ａの側の部分を水の上に浮くようにおいた。ａのＮ極の点が前と同じように南に向かい、残りの部分のｄ点は北の方を向いた。（南の方を向く方をＮ極、北を向

[5] 山本義隆　磁力と重力の発見３　みすず書房

[6] 板倉訳　『磁石について』前掲書Ｐ33

く方をＳ極と呼ぶとすれば）。

さらに分割したとき図のようにｂ、ｃ、の点をとると、たとえば、ｃ点はａ点と反発し、ｂ点はｄ点と反発する。つまり、二つの磁石となる。この性質は、すべての磁石に見られるのであり、特定の磁石（エチオピア産の磁石）にのみ見られるのではない。

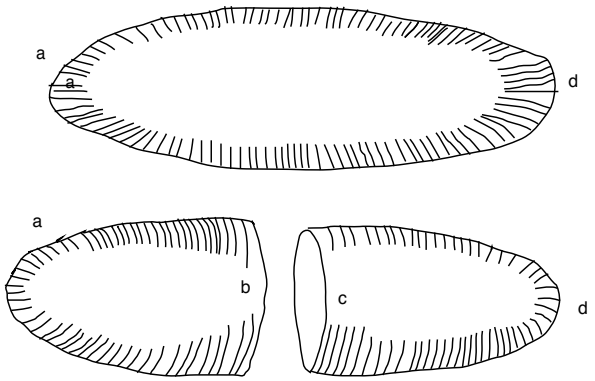


図１

磁石の力は磁極に近いほど強く引っ張ることも「エチオピア産の磁石は中国から輸入されたものと同じく極に近い部分ほど強く引きつけるので、ぐるっと回って最後には磁極が磁極と向き合うようになる。」と述べて確認している。

磁石の様々な性質の次に、ギルバートは現在では「磁化」と呼ばれる興味ある観察事実をのべている。それは、磁石の極の上に鉄の兜で武装させることによる新たに生じる効果についてである。その実験は次のように行われた。

まず第一に、磁石に鉄を装着することによりその作用が強力になることを記している。

半球の薄い鉄で作られた兜は最上級の鋼でありなめらかによく磨いてありこれを磁石の極の上に装着する。そうすることにより、このこの磁石は装着前には４オンス[7]の鉄をささえただけの磁石でも今度は１２オンスの鉄を持ち上げられるようになった。次に、ともに鉄の兜で武装した二つの磁石の場合、相互に引き合って他方を持ち上げるとき、それぞれ４オンスの鉄しか持ち上げられないものが、こうすると２０オンスの重さのものがもちあげられるのである。鉄の方も、裸の磁石よりも、鉄兜で武装した磁石の方にずっとしっかり結びついてより大きな磁石を持ち上げることが出来る。

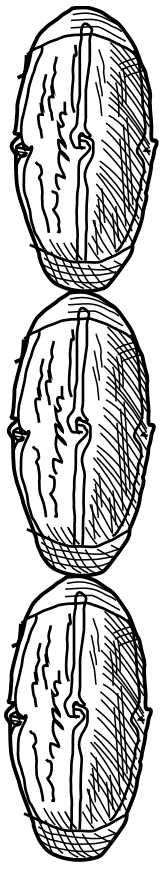


図２

鉄片は磁石の近くにあるとき、その磁石にくっついているかなりの量の鉄片を引きずり離すことができる。もっともこれは、鉄片が磁石に着いている鉄に接触しているときだけである。離れているときは近くにあってもてっぺんを引き離すことは出来ない。

第二に、武装した磁石が鉄片を励起して与える磁力（磁化）は、もとの裸の磁石が与える力（磁化）よりも大きいと言うことはない。ここに二つの鉄片があって、一つは武装した磁石によって励起させられ、もう一つは裸の磁石によって励起させられて物とする。そこで、もう一つの鉄片を近づけると、どちらの鉄片も同じ重さの物を持ち上げると言うことである。

第三に武装した磁石は確かに結合は強くより思いものが持ち上げられるようにな

[7] ２８ｇ

るが、それは接触している場合であり、遠くのものを引きよせる接合力は強くなく、一般的にはむしろ弱い。この実験は、重さも形も同じ二つのてっぺんで同じ距離で行わなければならない。あるいは回転針を用いて同様に実験する（回転心からある距離に武装した磁石を置き、次の同じ距離に裸の磁石を置くのである）

第四は、武装した磁石をつなげる実験。武装した磁石がもう一つ武装した磁石を持ち上げ、それがさらに第三の武装磁石を持ち上げるというように続ける。第四の石が第三の石にくっついてぶら下がることがある。この場合第一の磁石はどちらかというと弱くなる。

これらの実験はガリレオをして「うらやましい業績」と言わしめた。

図１

この磁石に鉄兜を装着する実験は、現在では、磁性体を磁場の中に入れると、磁区がそろい、強力な磁石になることによって理解されている。この現象は磁化と呼ばれていて、上記のギルバートの一連の実験はこの磁化に関するものである。この実験は現在はフェライト磁石を用いることによって容易に確認することが出来る。まず、市販のフェライト磁石の多くは、実は、その周りを鉄製の容器で覆われていて、まさに、鉄兜を装着されている形になっている。さらに、フェライト磁石の上にパチンコの玉を載せ、さらに、その上にもう一つのパチンコの玉を接触させて引き上げると、下のパチンコの玉は上のパチンコの玉にくっついたまま上昇することが見られる（図２）。これも、この磁化現象の表れである。

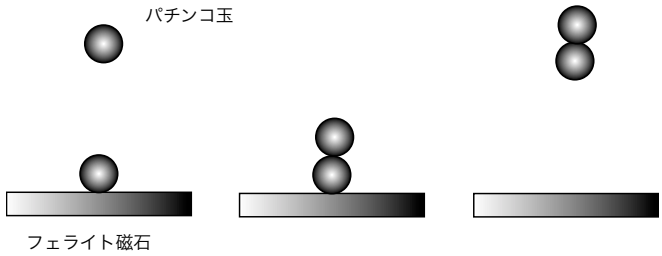


図２

３．地球の磁石説

コペルニクス説の支持者であったギルバートは、地球が太陽の周りを回る原動力を磁力に求め、地球が磁石であると考えることによって地球の運動を説明できるとした。この「磁石について」という書物全体の最終的なねらいがそこにあった。

「これまで全く知られなかった『かの巨大なる磁石＝万人の共通の母なる大地』の高貴なる本性をよりよく理解し・・・筆者は次のように計画した。すなわちまず手始めに一般の磁性体、石や鉄の材質を調べ、次に磁性を示す物質を調べ、さらに地球の手近な部分を調べ、磁気の実験に進み、地球の内部まで見抜こうというのです。」

「筆者は、最終的には地球の本性を学び知ろうと思って、山の高いところや海の深いところ、あるいは奥深い洞窟やかくれた鉱山から得られたたくさんの磁石を手に取り、徹底的に調べて

きました。」[8]

アグリコラが鉱山業に関する詳細な百科全書（デ・レ・メタリカ）を残すなど、十六世紀の初め頃には鉱山業は大いに発展を遂げていた。ギルバートが「磁石について」を書くことができた背景として、このような、鉱山業・製鉄業の発展があり、鉱山からたくさんの磁石を手に入れることができたこともあげることができる。そして、地球のあちこちから磁石を手に入れることができたことから、地球そのものが大きな磁石ではなかろうかという推論に確信を持った。そして、それには、コペルニクス説の裏付けとなることへの期待が込められていた。

ギルバートの、地球磁石説の論拠は「磁石は地球と同様に常に二つの極を持つこと」そして、「球形の磁石は、地球磁場に見られる伏角の様子を再現すること」にもとめた。

地球の磁場に伏角があることは、ノーマンによって確認されていた。磁化する前に精密に水平バランスをとった鉄心を磁化すると、その水平バランスを失い、斜めに磁針は傾く。これを伏角と言うが、その様子は右上の図に示してある。（磁石論第5部第1章②の図である）。この図はAとBは赤道であり、FDHは南半球を示している。赤道上では磁石の針は全く水平であり、南極、北極では垂直に立つ。これが地球の特徴である。ギルバート自身の報告では１５７６年のロンドンで７１°50’であったとしている。

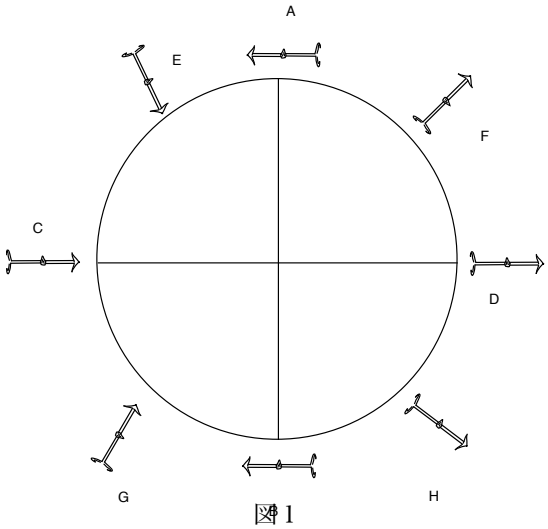


図1

それが、球形の磁石によって再現されることをギルバートは示した。ギルバートは、小さな磁化された回転針を用意した。回転針はすでに述べた[9]。この回転針を用いて、球形の磁石の磁場の様子を調べたのである。そして、必ず磁極が二つ存在すること、磁極からはずれたところでは伏角が存在し、赤道上では回転針は水平になることを調べた。まさに地球磁場の様子が再現されたのである。右図は、小鉄球（テスラ）の上での磁針の様子を示したものである。

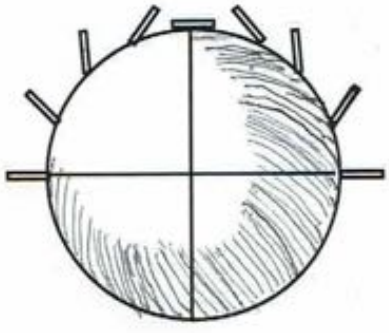


図2

このことを、ガリレオ・ガリレイは、彼の天文対話[10]（1632年　磁石論の32年後）

[8]板倉聖宣訳　磁石論　前掲書「はしがき」

[9] 4頁参照

[10] ガリレオ・ガリレイ　天文対話　青木靖三　岩波文庫

の対話第三日目の最後の部分で、印象深く語っている。ガリレオは言う。（丸い磁石ついて）「そして傾くというのはそのような針が極に近くあるいは遠く置かれることによって一定の指標に対して多くあるいは少なく傾き、中央の部分では軸に平行であるのに極そのものの上では垂直に立っていることを言っているのです。さらに鉄を惹きつける性能が真ん中の部分より両極の方でずっと近いこと、このことはすべての磁石においてそうであること」に注意しなさい。そして「これらの特性は全て全く磁石に固有のもので一つとして他の物質に属するものはありません」と強調する。だからこのような性質を持つものに出会ったら磁石だと認定するべきでしょうとたたみかけ、そうして、大地は磁石だと言わなければならないという。なぜなら磁石のすべての性質を持っているから。「磁針が大地の周りを持ち運ばれると北極に近づくほどいっそう傾き、赤道の方ではあまり傾かず、赤道の下ではついに平行になる」このことだけでも、地球が大きな磁石である証拠であろうと結論する。

ケプラーの「新天文学」は1605年、磁石論の5年後である。天体の間に物理的な理論を考えたケプラーは、もちろん磁石論から大きな影響を受けた。32年後の「夢」では次のように語られている。

「地球の磁力と月の磁力がそれぞれ正反対の方向に引く力によって打ち消されると、体のどちらの方向にも全く惹かれないというような状態になる。」「体が地球の磁力の及ぶ範囲を超えてなお遠くへ運ばれ、ついに月の磁力が強くなった状態で」つまり、「月の磁力権に近づいて月の引力が優勢になった状態」では体が楽になる。（山本義隆　磁力と重力の発見　3）

磁力は重力が現れる前に、離れたものが引き寄せるようなことを理解するには唯一の手がかりであったといえる。科学史において磁石論が果たした重要な役割であった。

４．ギルバート以後

ギルバートの磁石論は、その本の狙いである地球磁石説に関してはその後に大きな影響を与えたが、こと静電気に関しては単純には行かなかった。それは、静電気現象が極めて複雑で様々な要因が絡み、一筋縄では行かなかったことが主たる原因である。エミリオ・セグレは『古典物理学を作った人々』[11]において静電気学の研究の困難さについて次のように述べている。「こういう発見は決して優しいものではない。特にガラス管やごく簡単な静電起電機くらいしか使えなかったとしたらなおさらである。伝導や誘電や帯電、地球の等電位体としての役割などがみんなからみ合ってくる。・・・それに紐や糸はその成分に応じて導体にも不導体にもなる。空気の湿度その他の要素にも左右される。そういうものはそれらが大事だとわかっていれば初めて制御できるのでそうでなければ大変やっかいである。」後で述べるようにマックスウェル[12]は静電気

[11] セグレ　古典物理学を創った人々　久保亮五・矢崎裕二訳　みすず書房

[12] James Clerk Maxwell著　A Treatise On Electricity & Magnetism Dover

学の実験的なよりどころとして、７つの実験に絞っている。しかし、こうなるための困難は非常に大きかった。その苦難の歴史は、一つ一つの現象の実践による確認の蓄積であった。

ギルバート以後の静電気の現象の研究はまもなくフランシス・ベーコンがギルバートの実験を追試し電気的物質の確認を行ったが、ギルバートの結果と何ら変わることなく寄与できたことは何もなかった。ギルバートの３０年後には、ニコラウス・カベウスがギルバートの実験を繰り返し、白蝋、すべてのゴム、石膏などが電気的物質に加えられた。

この電気の現象に注目し探求したのは賢明で探究心の旺盛なR.Boyl(1627-1691)であった[13]。かれはいくつかの物質を電気性物質のカタログに追加した。さらにそれまで見逃されてきた電気引力に関する幾つかの条件にも注目した。追加されたカタログは、例えばテレピン油を十分に蒸発させた固いケーキ、また石油を蒸留した後の固形物、鉛のガラス。さらに、紅玉髄なども電気性物質であることを確認した。ガラスも保持するが弱いとした。次に、これらに励起した電気性は、摩擦する前に拭き取ったり暖めたりすることによって増大することを認めた。励起された物質は釣り合いにある鋼鉄製の針を動かし、その効果は、こすった後３分間は持続した。彼はまたダイヤモンドをのぞけば、表面をよく磨くことによっても効果を増大させることができるとした。電気は煙を容易に引きつけることも見た。次にこれらの引力は空気の存在によらないこと、つまり真空中でも作用することを実験によって確認した。電気的に励起した琥珀をガラスの中に入れた軽い物体の上方に設置して、ガラスの空気を抜き、この励起した琥珀をガラスの中の軽い物体に近づけると物体は引きつけられることを観察したのである。（これに対しベカリスは、空気を完全に抜けば引力は働かないだろうと反論した。）

ボイルは、電気的に励起した物体を糸で吊して、そのそばに、励起していない物体を近づけると励起した物体も引き寄せられることを観測し、電気的引力は相互作用であることを指摘した。（この当時は作用作用の法則はまだ確立されていなかった。）。暗闇でダイヤモンドを摩擦すると電気を帯び光を発した。（以上はプリーストリ　電気学の歴史[14])

ボイルの電気現象に関する観察について、カジョリは「物理学史　上　p134」[15]において次のように述べているのを付け加えておこう。

『ある程度乾燥した入れ毛の束が、一部の人の肉体に引きつけられると言うことを発見した。私は入れ毛をしていた二人の婦人のがおしろいを使う暇もなく、使いもしなかったのに、時に入れ毛がその頬に落ちかかり、しきりのその頬を打つのを、押さえ切れ３図にいるのを観察した。・・・私は彼女に取り外して自由な空気中に置いた入れ下の束の一つから、適当な距離を置いて彼女の温かい手をかざすように頼んだ。取り外した入れ下の下端が、ふらふらと動

---

[13] R.Boyl(1627-1691)の活動は1670年ころが隆盛であった

[14] Joseph Priestley “The History and present state with original experiment”Dover

[15] カジョリ　物理学の歴史（上）（中）（下）　武谷三男・一瀬幸雄訳　東京図書

きだし、彼女の手の方に引き寄せられた。』

ボイルの研究は、ギルバート以後に於いては卓越したものと言えるであろう。

アカデミー・デル・チメント[16]の活動は1670年頃から急速に衰えたが、電気現象については、電気の起こりやすさ（引き寄せる力の強さ）によって物質を次のように序列化したという報告を行った。序列化の内容は下記のとおりであるが、これらは現在では意味を持たないであろう。強い順に　黄色い琥珀、シーリングワックス、赤いダイヤモンド、白いサファイア、エメラルド、白いトパーズ、スピネルなどである。その次に透明な宝石、石、ガラス、水晶、白や黒の琥珀これらは弱いとされた。この他に、火花を観測から可視的電気大気であるとした。

なお、1660年にロンドン王立協会、1666年にフランスアカデミーなどが設立され、学問の中心の地位はそちらに移動していった。

偉大なニュートンもまた電気の研究を行っているが、中心的な役割を果たしたとはいえない。次のような観察をしている。２インチほどの丸いガラス板を真鍮の環の中に置きガラスを８分の一インチほどテーブルから離した。３回ほどガラスを素早くこすって、紙の小片をテーブルの上、ガラスの下に置くと、薄い紙の細片がガラスに引き寄せられ、テーブル上でしばらくの間様々な運動をした。ときにはガラスの上に飛び移たりしばらくそこにいたかと思うと、またおちて、さらにしばらくそこにいる。かと思うとまた飛び上がった。垂直に立つのもあれば、斜めになっているものもあった。指をガラスの縁を滑らせたとき、ガラスもガラスの下にある空気も動かなかったにもかかわらず、ガラスの下に下がっている紙は新しい動きを受けて彼の指の動きにしたがってあちこちに傾いた。ニュートンはこの観察を１６７５年に王立協会に報告した。さらに、ニュートンはこの実験を様々な条件の下に繰り返し、励起された物体から放出しされた電気的な流体は、ガラスを自由に通過できるとした。（プリーストリＰ１７　（参）カジョリ物理学史　上　p134）

こうして、電気現象については、少しずつ、経験事実が積み重ねていったのであり、その歩みは遅々としたものであった。

５．Otto von Guericke（1602-1686）ゲーリケ　の起電機の発明

現象の認識が実践によるものであるということは道具や実験器具の発明が重要な役割を果たすということである。静電気学においては、この時期重要な役割を果たしたのがゲーリケによって行われた起電機の発明であり、また、大きなガラス管の発電棒の発明である。これらの発明は1750年ごろおこなわれたが、静電気学の視野を広める重要な役割を果たした。特にゲーリケの静電起電機の発明はその後受け継がれて、１７４０年以降大きく発展をして静電気学を前進させた。

---

16 ガリレオの弟子トリチェリーとヴィヴィアーノを自然を実験の方法で研究するとした人たち。主として物理学　1657-1667年頃活躍　なおこの部分の記述は'The histry and present state of electricity' の第3版p.11による

ゲーリケの起電機の制作の過程と実験結果を述べておこう。

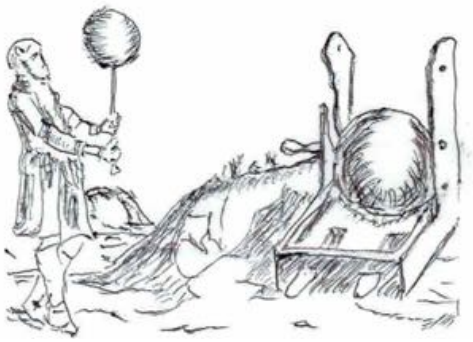


図1

『子供の頭の大きさぐらいのガラスの球を用意し、その中に乳鉢で砕いた硫黄を詰めて火の上で十分に熱してとかす。再びさめたところでガラス球を壊して取り除き、乾燥した場所においておく。一番いいのは、それに小穴をあけて通し鉄の棒や軸の周りに回転できるようにする。こうして球が用意される。』

『この球の中に込められた力をしらべるために、この球を地面から２０ｃｍ（1 palm）ほど高く設置した枠の中に収まるように、二つの支点によって支えられた軸に装着した。
そして、その下に、金や銀の箔、紙や木の葉など、いろいろな、小片を置いた。それを乾いた手で優しく１，２回こする。そうするとこれらの小片は引きつけられ、軸の周りに回転したときはそれにくっついた。』

『反発力は簡単に見られる。球を枠から離しすでに述べたように乾いた手でこする。そうすると小片は同様にくっつくだけでなく、それからもう一度はねとばされ他のものと接触するまではくっつくことがない。』

『リンネルの糸（亜麻糸）をその一方を強く結び球の近くに垂れ下がるようにする。指やその他のものでそれに触れてみると、糸は離れて指で触れることはできなくなる。もしも亜麻糸をテーブルやベンチにある木片に結びつけて１エル（1.25m）以上たれ下げる。そうしてその下のものに接触できるようにする。励起された球が木片の上１インチ（2.4ｃｍ）ほど離れたところに置くと、糸の下の部分はその近くに来た体などの方向に移動する。これは、そのパワーがリンネルの再下端部分にまで広がっていることを示している。なぜなら、それは体に引かれているか、引いているかを示しているからである。』[17]

静電起電機を用いた実験の結果として発見されたもので重要なものは、電気の引力の他に斥力が働くことであろう。

６．現象についてのその後の発見

上記のように、ゲーリケは幾つかの重要な発見をしていた。ゲーリケの他にも様々な人が電気の実験を行った。しかし、現象はきわめて複雑な様相を呈しているので、研究はなかなか進まなかった。その中でホークスビーは、次のようにゲーリケの起電機を巧妙に利用し、電気の引力と斥力の向きについての詳しい観察を行って、後に２種類の電気の発見につながる手がかりを得たのである。

彼はまず起電機によって電気的に励起されたガラスの球、または、円筒を用意した。次に、ワイヤーで輪を作りそのワイヤーに糸を結びつけた。励起されたガラス球にこの

[17] ゲーリケの項は、Magie “Source Book in Physics”Harvard University Press”参照

ワイヤーを近づけると、ワイヤーの糸はすべてガラス球の方向に向いた。この現象は起電機のガラス球の回転が止まっても４分間ほど続いた。ワイヤーの位置をガラスの上に置いてもガラスの下に置いても同じであった。さらに、ガラスの回転を水平にしても鉛直にしても同じであった。

次に、ガラス球や円筒の回転軸に糸を結びつけてガラス球を回転させて電気を起こしたとき、糸は軸から遠ざかるように発散した。[18]

（この実験は、現在高等学校において、起電機を用いてよく行われていることである。この現象を、引力と反発力の力の向きを確認する実験であったと言うことは、教育的である。）

ホークスビーのもう一つの発見は、ガラスの大きな電気力に伴って光が宿り音が伴うことを観察した。しかし、この現象はすでにピカールによって発見されていた（1676年）。ピカールは水銀気圧計をパリから　ポルト・サン・ミッシュルへ運ぶ途中、水銀が動くとトリチェリー真空内にポット輝く光が発生するのと認めたのである。ホークスビーは、釣り鐘型のガラスの器の下の水銀版中に浸した管を通じて真空中に上方から空気を憤進させ、空気が水銀を『ガラス容器の壁へものすごい勢いで吹き飛ばし、それが数多くの光を放つ小球となって元の場所へいっぱいに落ちてくるために、全体として火の固まりに見える』（カジョリ　上巻　ｐ１３５）と報告している。この現象については真空はあまり完全でなくても良いことがわかったが外気とほとんど変わらない程では生じなかった。真空の中で木とガラスの摩擦による淡い光を観察した。後には空気中でもガラス管の中の水銀を振ることによる発光を認めた。（1705年　『理学報告』）[19]

その他、オランダの一商人が電気石を加熱するだけで摩擦電気と同じ引力を生じることを発見したりしている[20]。こうして、様々な電気現象が実験的に発見され蓄積されてきたのである。一般に科学の研究の発展のためには、まずこのように現象に関する知識の蓄積が行われなければならない。その後にその背後にある本質に迫ることになるのであるが、その前にこれらの複雑な電気現象を担っている実体についての知識が集積されなければならなかった。

II.　電気現象を担う実体の発見

１．電気現象が伝導することの発見　Stephan Gray(-1736)(グレイ）の研究 1

電気現象を担う実体の研究は グレイによって行われた。彼は、王立協会のメンバーで

---

[18] プリーストリ　電気の歴史p19-

[19] Phil. Trans.-1705-Hauksbee-2129-35

[20] 関英男　電気の歴史　NHKブックス

あり電気の研究で活発に活動した。彼はこの電気現象を担う実体をエフルービアと呼んだが、この名称はもともとはギルバートが電気の作用を説明するために導入された仮想の粒子の名称であった。一方、グレイのエフルービアはその存在を実験的に確認されうるものであった。現在では電荷と呼ばれるこの実体は、まず物体を伝わることができることの発見から始まった。[21]

グレイが用いた、発電用のガラス管は、長さ３フィート５インチ（104ｃｍ）、直径は１インチと１０分の２（＝3.48ｃｍ）で中空のものである。ただし、この直径は平均の値であり、管はそれぞれの端のほうが中央より若干大きくなっていて、中央で１インチである。そして、それぞれの端にはコルクが取り付けられており管を使わないとき埃が入らないようにしてある。このガラス管を摩擦することによって発電させるのだが、何で摩擦したのかは論文には書かれていない。あまりこだわりはなかったように思われる。この発電用のガラス管はその後の多くの静電気の実験に使われた。ただ現在高校授業で使用される発電棒としてのガラス棒よりかなり大きいことは注意しておく必要がある。

最初の実験は、管の両端がコルクで止められているときと、開け放してあるときとで引力になにがしかの違いがあるかどうかを見ようとしたものである。おそらく、摩擦によってガラス管の内部から電気性物質が出るかもしれないということを懸念したのであろう。ダウンの毛を管の上端に備え付けて、管を摩擦して励起したときに、ダウンの毛が管によって引かれたり反発したりする現象を観察したが、栓があるときとないときでは違いは何も知覚できなかった。このとき、羽毛を栓として用いたコルクの平面の端に近づけると、コルクは羽毛を引き寄せたり反発したりを何度も行ったのでコルクが電気的性質になると思われた。そこで電気力は励起した管によってコルクに伝えられることが考えられた。

さらにグレイはコルクに小さな棒をつけた。羽毛は、この棒の端にも引き寄せられた。この棒を引き抜いたところ、引き抜かれた後も、羽毛は棒にくっついたままであった。このことから、電気的な性質は発電したガラス棒からコルクを通って棒の先まで移動し、棒の先に留まったことを示している。グレイはこのことを電気（彼はエフルービアと呼んだが現在は電荷と呼ばれる）が移動したと考えた。

グレイは、この電気的性質の移動を確認するために、約１インチと１０分の３(3.25cm)の直径で穴が通っている象牙の球を持ってきて、それを約４インチ(10cm)の長さの樅の木の棒につけ、他の端はコルクに挿した。そして、管を摩擦するとボールは羽毛をコルクがやったよりも活発に何度も引いたり反発したりするのを見た。それからもっと長い、はじめは８インチ(12.5cm)、後では１２インチ(30cm)の長さの棒の先につけたが効果は同じであった。このことから摩擦以外に伝導によって電気的性質になることが再確認された。この発見こそ電気現象を担う実体（電荷）の最初の発見である。グレイはさらに実験を続ける。

---

[21] Phil. Trans. 1731 Gray ‘A letter to Cromwell Several Experiments concerning Electricity’

『さらに、私ははじめに鉄の線を、次に真鍮の線をボールに固定し、他端をコルクに以前と同じように刺した。そして、樅の棒を利用したときと同じように引き合うことを見た。そして、その線の任意の部分に羽毛を近づけて置いたとき、それは引かれた。しかし、引力は、管に近くともボールのそれより強くはなかった。２から３フィート(10cm)の線を用いたとき、管をこすることによるそれの振動が生じ制御するのが困難になった。』

そこで振動の影響を防ぐために『ボールを長さ約３フィートの荷造り紐でガラス管に下げた。ガラス管を摩擦して励起したところ、象牙のボールは、自由に動けるようにした真鍮の薄片を引きつけたり反発したりした。それは、樅の棒でも、金属線でも同じであり、象牙のボールでもコルクのボールでも同じであった。』

このように電気が伝わることのできる物質はどのようなものがあるか、実験で確認した。その結果、髪の毛、絹、リンネル、ウール、紙、皮革、木材などが同様の電気を伝えて電気を帯びることを見いだした。

さらに、伝導によって金属が電気を帯びることを発見したことも重要である。金属はガラス管に荷造り紐で下げてガラス管を摩擦した。用いられた金属は貨幣や、スズの塊であったり、もっと大きな金属の塊であったりした。さらにショベル、トング、鉄製の火かき、銅製のケトル、冷たいあるいは熱い水、銀メッキのポット、フリントストーン、サンドストーン、ロードストーンチョークや幾つかの野菜なども用い、これらが電気を帯びることを確認した。これは、摩擦によってではなく、伝わることによって電気的性質を帯びる（帯電する）と云う新しい現象の発見であった。

次に、電気はどれだけの距離を伝わるかと云う実験に着手した。釣り竿を切って棒としたものを用意した。棒は２フィート７インチ(77.5cm)であった。太い方の端を切って、発電用ガラス管に５インチ(12.5cm)ほど挿入して連結した。ガラス管を電気的に励起すると、ステッキは真鍮の薄片を２インチ(5cm)以上引き上げた。棒の端には象牙の球を付けたが、コルクの球でも同じであった。次に、大きな釣り竿と木の棒をつないで、その尖端には鯨の骨をつなぎ、ガラス管に連結し、全体の長さは１４フィート(4.2m)となった。鯨の骨の細い方の先には半径１インチ(2.5cm)ほどのコルクのボールを付けた。他端にガラス棒を付け、真鍮の薄片をテーブルの上に置いた。電気を起こすと、真鍮の薄片は３インチ(7.5cm)ほど引き上げられられた。いろいろ工夫して１８フィート(5.4m)まで伸ばした。実験室で行うにはこれが限界であった。

そこで屋外に場所を変えて実験を行った。実験道具は、象牙の球を荷造り紐で吊すこととした。紐の長さは２４フィート(7.2m)で、バルコニーに上って吊した。その尖端にコルクのボールを付けて、真鍮の薄片をボードの上に載せた。反対側には、７～８インチ(20cm)の起電気用ガラス管を付けた。ガラスを摩擦し、真鍮の薄片が引かれたり反発したりするのを観察した。薄片は十分に活発に引きつけられたり反発したりしたので、疑いもなくもっと長いポールでも電気が伝わることは明らかであった。さらに実験を重ね、３４フィートまで行ったが、振動もあり風もあって薄片が飛んだりしたので、それ以上の高さで行うことは断念した。グレイは電気が長い距離伝わるかどうかを調べ

るために、荷造り紐の線を水平張った。梁には釘を打って、荷造り紐で輪を作り、紐を水平にして通して一方の端には象牙の球を下げ、他方には発電ガラス棒を付けた。真鍮の薄片を象牙の球の下に置いて、発電棒を摩擦したが、球は電気を帯びることはなく失敗に終わった。この失敗は、導体が電気逃がすことを認識するきっかけとなった。

実験に堪能なWhelerが前述の鉛直に電気が伝わる実験を聞き実験を繰り返した。その後、Whelerは水平に伝わる実験をしたいとグレイに提案をしたが、グレイは前回失敗した経緯を説明した。そして、グレイが、水平につり下げる環を荷造り紐にしたので、そこから電気が逃げたのではないかと考えていると説明すると、Whelerから、同じ太さの紐なので、電気が逃げやすかったのではないか、もっと細く丈夫な絹糸で輪を作ってやってみたらどうかと言う提案をし、その提案を受けて実験を繰り返した。１７２９年に、荷造り紐を絹糸の環で下げて水平にし、一方に象牙の球を下げ、その下に真鍮の薄片を置き、他方に発電棒を備えた。糸の長さは８０．５フィートの長さであった。発電棒を摩擦すると、真鍮の薄片は引き寄せられたり反発したりするのが見られた。そこでもっと遠くまで伝わるかどうかを確認するために荷造り紐を長くしたところ、糸の重みで絹糸が切れてしまった。そこでもっと丈夫で細い真鍮の針金を使用して糸を下げたところ、電気は伝わらなくなってしまった。初めは糸を細くしたから電気が逃げなかったと思っていたが、そうではなく、絹糸で吊したから電気が逃げなかったのだと気がついた。つまり、電気を伝えやすい物質と伝えにくい物質があり、金属は電気を伝えやすく、絹糸は電気を伝えにくいことが分かった。電気を伝えにくいものとしては、羽毛、絹、樹脂、ガラス等があることを確認した。[22]

こうして、電気を伝えるもの伝えないものがあることを理解したグレーは、人体が電気の良導体であることを認識し、実際に人体に電気をかけた最初の人となった（1730年）。

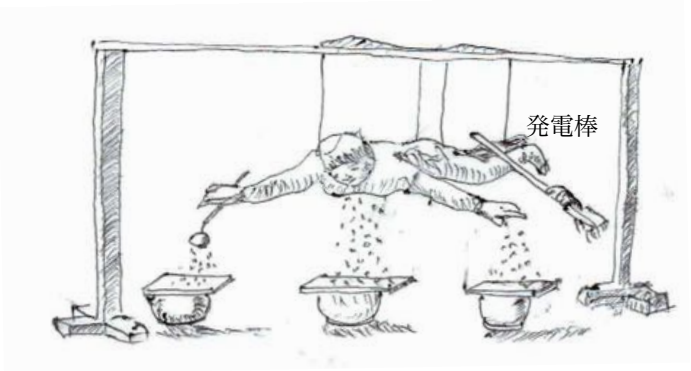


図1

「１７３０年４月８日　私は８歳か９歳ぐらいの少年を用いて下記のような実験を行った。彼の体重は、衣服を含めて４５ポンドと１０オンスであった。彼を二本の髪の毛で水平に吊した。衣服はよく乾かした。糸はそれぞれ１３フィートであった。端はループにした。それらは梁に取り付けた。足下は太く、フックがそれぞれ反対にペアになっていて、それぞれのペアから２フィートほど離れていた。これらのフックに線のループが掛けられた。吊した部分はその下部が床から２フィートほどであった。少年はこれらの線（紐）に顔を下向きにして、胸と足をその紐で支えた。それから、真鍮の薄片を、白い紙を貼った１フィートほどの丸い板の上に置いた。発電棒を摩擦して彼の足の近くに置いたところ、真鍮の薄片が活発に少年の顔に引き寄せられた。それは１０インチほど上がった。

[22] Phil. Trans.-1731-Gray 前出の論文

顔を上向きにしたところ、ショートヘアの髪の毛が引き寄せたが、顔ほどではなかった。次に、真鍮の薄片を足（靴やストッキングをはいていたが）の下に置き、発電棒を頭の近くに持って行ったところ、足が薄片を引き寄せたが、顔ほどではなかった。」Phil.Trans.1731(Priestley p43)

その後、発電棒を近づけるだけでなく、発電棒に接続されていた釣り竿を握らせて発電させたところ強く帯電したと言う実験を行っている。後にグレーは導体を樹脂の固まりの上に置くことによって絶縁できることを観察した。（カジョリ　上巻　ｐ１６３）

「彼（グレイ）は、少年を（絶縁体である）ロジンの塊の上に乗せて、髪の毛で釣りさげたと同様に強く帯電させることができた」（ Priestley p52）

絶縁台に人を乗せて起電気で帯電する実験は、高校の物理の実験でしばしば行われる。

【参考】　「最新　物理教育実験　中込八郎編　ｐ．２６４
実験５　人体による実験
【方法】
①　絶縁台に人を乗せ、この人は高圧発生装置の電極に手を触れさせておく。
②　次に、高圧発生装置を作動させると、電極に発生した電気は手を伝わって人体に蓄えられる。毛髪にも電気が蓄えられる。そして、同種の電気の間に働く反発力により、毛髪は逆立つようになる。」

２．導体（conductor)と絶縁体(electric per se)の名称

導体（conductor)と絶縁体(electric per se)の名称を考案し、さらにそれまでの「電気的物質」は絶縁体であり、「非電気的物質」は導体であることを実験的に明確にしたのはデサグリエ（Desaguliers)である。

彼は、グレイから常に報告を受け相談を受けていた。彼はグレイの実験に感銘を受けて、概念を整理し、特に導体（conductor)と絶縁体(electric per se)の術語を適用することを提案した。そして下記のような実験を繰り返し、導体は非電気的物質と同じものであり、絶縁体は摩擦すると電気を帯びるいわゆる電気的物質と呼ばれているものと同じであることを確認した。

彼はまず、麻の荷造り紐（Packthread)とガット線(Cat-gut)を用意し、その電気伝導度を調べた。具体的には、線の一方に象牙の球を用い（一般にはそのそばに軽い羽毛を備えておき電気を帯びると羽毛が反発されることによって帯電の状況を知る）糸の他方には発電用ガラス棒を近づけて、電気を通すかどうかを確認した。その結果、乾いたガット線はほとんど電気を通さず（つまり絶縁体であり）、麻の荷造り紐は一定程度の電気を通すこと（つまり導体であること）を確認した。

次に彼は次頁図１のような実験装置を考えた。絶縁体であるガット線に導体である荷造り紐を結びつけ、この紐は、他端には導体かどうかを判定する試料となる線（や物体）の上を渡して、象牙の球（Ivory ball)をつり下げた。試料が電気を通さない絶縁体であるなら、象牙の球まで電気は伝わるだろうし、電気を通す導体であるなら象牙

の球まで電気は通らないだろうと言うことから試料が導体か絶縁体かを調べたのである。その結果はいわゆる電気的物質と呼ばれているものは電気を通さないものであり、非電気的物質と呼ばれているものは電気を通す導体であることが確認された。

デサグリエの研究はそれまでの実験の結果を整理するのに大いに役立った[23]

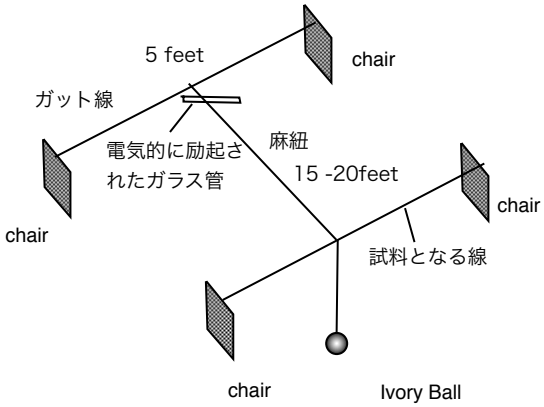


図1

３．電気には２種類あることの発見

電気には2種類あり、同種の電気は反発し異種の電気は引き合うことは、シャルル・デュフェイが1734年にPhilosophical Transactionに発表した論文で議論された。[24]。

Charles Dufay（デュフェイ）は、グレイの実験やホークスビーの実験に刺激され電気学の研究を行った。特に、グレイの前述の論文を読みその実験を追試した。その際、電気を通す紐はぬらしておいた方が電気がよく伝わること、途中糸を支持するには絹糸ではなくガラス棒を用いたところ、より遠くまで電気を運ぶことができたと報告している。彼はまた、少年を紐で吊し帯電させる実験を行った。それだけではなく、自分自身もまた紐で吊されて帯電してみた。このとき他の人が糸で吊されたDufayと接触しようとすると、刺すような痛みと火花を観測した。デュフェイは、糸で吊されるのは人間ではなく金属もまた帯電させることができ、帯電した金属に人間が指を近づけると人間と人間のときと同じように火花を発することを見た。その他、水を器に入れてガラス板に載せて、発電棒で帯電させる実験を行った。（グレイが示唆したことを再現したと言っている。）

この論文においてデュフェイは、電気に２種類あるとすれば様々な現象を説明することができると次のように述べている。

「ゲーリケは『真空についての実験』において、硫黄の球に電気を与えたところダウンの羽が反発するのを観察したが、同様の現象はガラス管によって生じさせられるだけではなく、それが何であってもすべての電気が起きた物体に共通に見られる現象であること、そしてそこには圧倒的多くの不規則な、あるいはそういって良ければ電気の実験の大部分に起こる気まぐれな運動を説明することができる簡単な原理があることを発見した。その原理はこうである。電気的な物体は電気的でないすべての物体を引き寄せる。そして、それらの物体が電気的な物体の近くに来るか接触することにより、たとえば金の薄片は初めはガラス管に引き寄せられ、近づく（接触する）ことによって電気的性質を獲得してその結果直ちに反発されることになるのである。そして、電気的性質を帯びている間は引き寄せられることはない。しかし、その物体がしばらく空気中に置かれ電気的な性質を失えば、結果的にガラス管にもう一度引き寄せられ

[23] Phil. Trans.-1740-Desaguliers-186-93.Experiments Made before the Royal Society

[24] Charles Dufay （1698-1739）1734年にPhilosophical Transactionに発表した論文Vol.38 p.258

ることになる。そして新しい電気を得れば再び反発することとなる。この原理を様々な電気的実験に適用すると多くの不明瞭で謎に満ちた実験事実が明確となる。」

「これに対してもっと一般的で注目すべきもう一つの原理を導入する。それは電気的物質に新しい光を当てる。この原理は、二つの異なった電気があると言うことである。そのうちの一つはガラス電気と呼び、もう一つは樹脂電気と呼ぼう。前者は、ガラス、水晶、宝石、動物の毛、羊毛などである。２番目は、琥珀、コーパル（天然樹脂）、ゴム、絹糸、紙その他多くのものである。二つの電気の性質は、例えばガラス電気は、同じガラス電気は反発し反対の電気つまり樹脂電気のすべては引き寄せる。だから発電ガラス管はガラスや水晶や動物の髪の毛が電気を帯びたていたら反発する。そして絹や紐や紙のようなものは電気を帯びたら引き寄せることとなる。琥珀は逆にガラスを引きつけることとなる。」[25]

前述のグレイは、デュフェイが行った金属を絹糸で下げて帯電する実験を聞きその追試を行った。火かき棒やトング、ショベルなどを絹糸で吊して電気を帯電させ、人間との間で火花が出ることを確認した。金属が導体であることを確認する実験である。グレイはさらに棒状の金属を帯電させ、暗闇で放電させた。このとき金属から光線束が放出されるのを見た[26]。グレイは、電気伝導によって器に蓄えた水に、電気を蓄えられることを確認し、その電気を増大させる可能性について述べている。これは後にライデンビンとなって実現されるが、彼はその予言をしたといえる。また、火花や音は雷のようであると述べているが、これはフランクリンの実験の予言ともいえる。さらに、電気による引力によって物体が太陽の周りを回る惑星のように運動すると言うことを述べている。静電気学におけるグレイの果たした役割は大きい[27]。

図１

ホークスビーが
利用した起電機

４．静電起電機の発展

静電気学が発展するには起電機の発展が不可欠である。当時の起電機の発展をここで概括しておこう。

起電機の発展はすでに述べたように、ゲーリケの発明から始まった。ゲーリケは硫黄球を用いたが、ホークスビーはニュートンの指摘を受けてガラス球を用いさらにウールの布で摩擦を行った。このガラス球は大きな車輪と一本の綱によって高速で回転されるようになっていた。しかし、実際の研究で用いられたのは大きなガラス管（electric　tube)で、その形状はグレイのところで述べたものである。デザグリエの1742年実験もグレイのガラス管を用いた。後年のフランクリンも初めは発電用のガラス管であった。

一方ドイツでは、デザグリエが実験を行っていた頃起電機が発展し静電気学に大き

---

[25] 1734年　Philosophical Transaction Vol.38）005Phil. Trans.-1733-1734-Fay-258-66

[26] Phil. Trans.-1735-Gray-16-24

[27] プリーストリより(p.73-77

な影響を与えた。1743年、ライプツッヒのHausen(1693-1743)(ハウゼン)がガラス管を摩擦する変わりにガラス球を回転させる静電起電機を作成した。それはホークスビーが用いたガラス球を最初に復活させたと言われている。

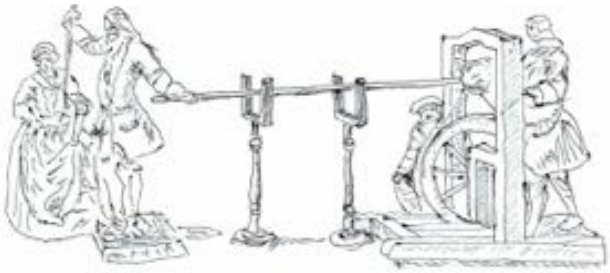
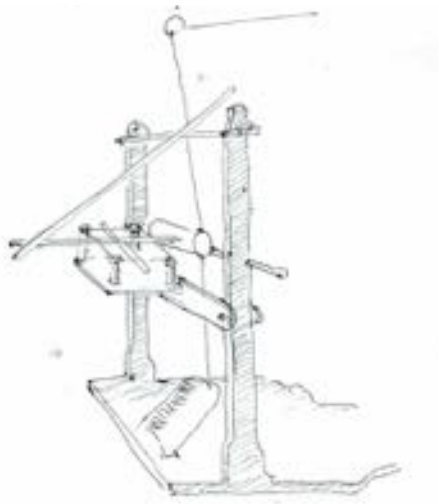


図１　　ダンネマン　６巻p２０

1744年。ドイツ　ヴィッテンバーグの物理学者Bose(1710-1761)（ボーゼ)は、ハウゼン同様にガラス球を用いさらにガラス球のそばに集電導体、つまりブリキ缶を付けた[28]。この集電導体を第一導体と呼ぶ。この第一導体は初めのうちは樹脂の塊の上に載った人間が支えていたが、その後、絹糸で水平の支えた。後では金属でガラス球を痛めないように糸の房を導体の先に付けた。右図１は１７４４年の起電機の図はボーゼの起電機である。球を利用する方法は、ライプツッヒでは直ちに広がった。1746年に ウィリアム・ワトソンが作製した装置は大きな車輪を回すことで複数のガラス球が回転する仕組みになっており、主導体（第一導体）として絹糸で吊るした剣と銃身が備えられていた。ライプツィヒ大学の物理学教授だったJ・H・ウィンクラーは、手で摩擦する代わりに革製のクッションに擦りつける仕組み(Priestry p.88)と、足踏み式の高速回転装置を導入した。ガラス板の両面に金属箔を貼ったものを起電力源と接続することで相当量の電気を溜めておけることが発見されると、この種の実験は容易になった。Winckler は、球と円筒形ではあまり変わらないことを確認した。彼の起電機は１分間に６８０回回転した。P.Gordonは球の変わりに円筒を利用した。彼の円筒は長さが８インチ、直径が４インチであった。それらは弓で回転させ、持ち運びが可能であった。（右図[29]のP.Gordonの起電機は手回しのようである）。金属の収集櫛はWilsonによってこの年1746年に装着された。(Priestry p.88)



Winckler 足踏みの高速回転装置*Phil. Trans.* 1744 **43**, 307-315, published 1 January 1744（18）

図２

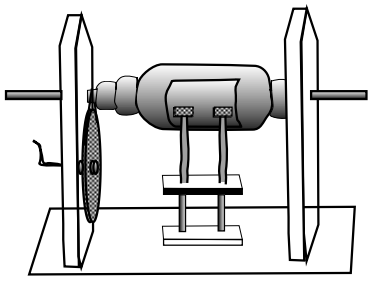


図３　　P.Gordon

1755年。ガラス球はガラス板に置き換えられた。1762年Cantonが表面に錫のアマルガムを吹き付けることによって摩擦具が改良された。彼は、水銀とガラスの間には水銀はマ

[28] Phil. Trans.-1744-Boze-419-21

[29] 図はインターネットを参考にした

イナスにガラスはプラスに帯電することを発見し、水銀と鈴の少量のアマルガムのクッションで球を摩擦することによって少ない摩擦で大きな励起を得たのである。起電機は、流行のような観を呈した。非常に大きな起電機が現れた。右の図は、Van Marumが1783年に制作した起電機である。これは1778年にデモンストレーション用として開発されたものを大きくしたものである。直径が1.65mの2枚のガラス円盤を使用し、摩擦具のクッションは水銀槽改良したものを用いて33万ボルトの起電力を得ることができた。（図はMarumが描いた機械の説明図と博物館(Teylers · Museum)に残っている実物の写真を参考にして描いたものである。）

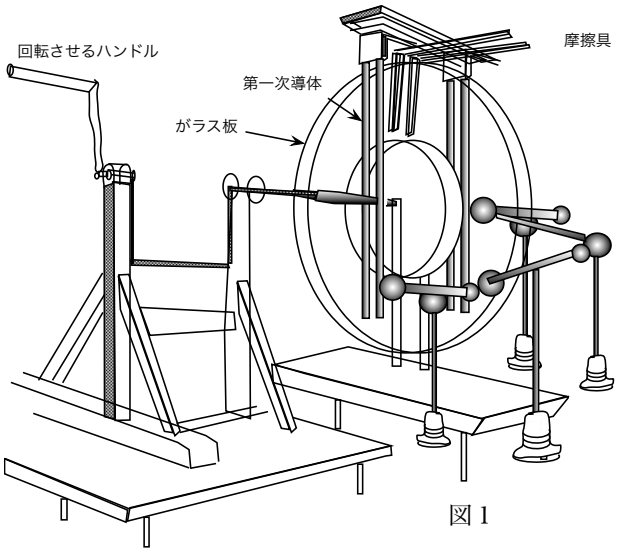


図 1

現在、高校の物理実験でよく使用される静電起電機は、Van de Graaff generator 型である。これは1929年開発された。これは、絶縁体のベルトによって上部の空洞の金属の内部に運び電場のないその空間で金属に放電して高圧の電場を得るのである。1931年には100万ボルトの電圧を得た。この電圧で粒子を加速するのに用いられたのである。その方式を、教材用に開発されたものが使用されている。

教育的な観点からすれば、電動で動くVan de Graaff generator 型の起電機も良いが、手動のボーゼの起電機も使い易いように思われるし教育的であるような気がする。

図 2

５．電気は蓄えられること　ライデンビン　蓄電器の発明

（１）ライデン瓶の発明

プリーストリーは言う『１７４５年の終わりから１７４６年の初めに掛けてこれまでの電気の全業績において有名でもっとも驚くべき装置、ガラスの中に電気のパワーを驚くほど集積させることのできるライデン瓶と呼ばれる装置の発見がなされた』と。しかし、ライデン瓶の決定的な役割は、まさに、電気が蓄えられるという認識を通して、実体としての電荷の概念が確立されたことによる。すなわち、電気現象は伝わっていくことの認識が高まる一方で、ライデン瓶の発明とともに電気が蓄えられることも認識され、この二つの現象から、電気現象を担う物質の存在がより確実なものとなってきたのである。その業績は、ライデン瓶の発明とともに、ライデン瓶を用いて行われた

フランクリンによる様々な実験と卓越した考察の結果であり彼の重要な業績であった。フランクリンはこの電気的実体を、electric atmosphere と呼んだ。電荷概念の端緒である。

プリーストリはライデン瓶の発見の経緯を次のように述べている。すなわちライデン瓶の発見はCuneus と Muschenbroeck の業績であるが、しかし実は、最初の発見者は１７４５年１１月にカミン大聖堂の司祭であるクライスト（von Kleist –1748）であると紹介している。そのクライストは自分の発見をベルリンアカデミーに次のように報告している。

『釘か細い真鍮の線を小さな薬瓶に挿入してそれに電気を与えると下記のような驚くべき現象を生じる。ただし、瓶は乾燥させておくか暖めておかなければならない。

まず一般に初めに瓶を手でこすっておく。その中にチョークの粉を入れておく。少量の水銀かワインを数滴その中に入れておくと実験はより成功する。この瓶に挿入した釘を起電機の電気を帯びたガラスかあるいは第一導体に接触させて引き離す。そうすると、この着火装置を手に持って５０歩ほど部屋の中を歩き回った後にもかなり長い放電が観測される。電気が十分に強いときには、それを持って別の部屋に行き、ワインに火を付けることができた。それが電気を帯びているとき、私の指かあるいは手に持った金の小片を釘に付けると、私の腕と肩に強烈な衝撃を受けた。この方法でスズの管や人間を通常の方法より強力に帯電することができる。瓶と釘を私が持っていた１５fweetの長さのスズの管に接触させると、その電気力がどれほど強いかは今までに経験したことがないほどである。この方法でボーゼ氏は二度と電気にさわろうとしなかった。このショックで二枚の薄いガラスが破損した。』[30]

ボーゼ氏はあの起電機の改良者である。

クライストは、この発見をすぐにライプツッヒのアカデミーの知り合いやベルリンの知り合いに送ったが、その記述の不完全さによって再現実験は成功しなかった。

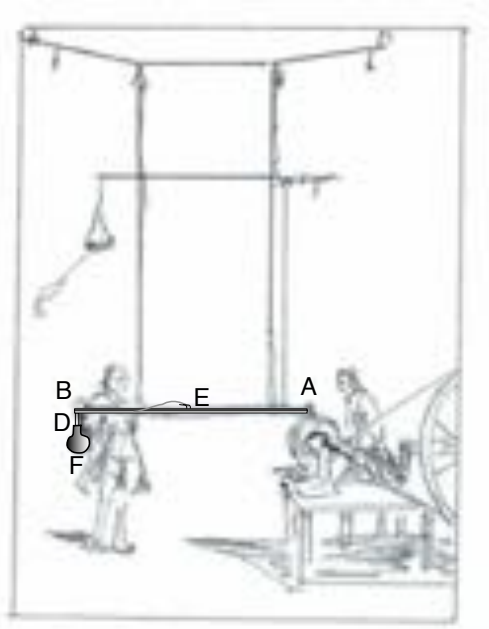
ノレ（Abbe Nollet)は、この発見の知らせを受けた。そして、１７４６年3月9日付けのダンツッヒのサミュエル　ウォルフ宛の手紙で、ライデンでの実験は、瓶に半分だけ水を入れてその中に釘を差し込んだダンツッヒのクライストのこの実験と原理的に類似していることを述べた。だからライデンでの実験が先に認知されなければ、ダンツッヒ瓶と呼ばれていたかもしれない。

さていわゆるライデン瓶の発見の様子は次の通りである。ムッセンブルグ教授(Professor Muschenbroeck)とその仲間たちは電気を帯びた物体は様々な物質を通して速やかに電気を失ってしまい、保持される電気は少なくなって小さな力になってしまう。そこで、電気を帯びた物体がすべての面で遮られるなら、しばらくの間はそれを保持することができ、それらはより強い力を受けることができるだろうと予想した。そして、ガラスはこの目的には最も都合がよい絶縁体であり、また、水は最も便利な非電気的物体（導体）であるので、初めに水をガラスの瓶に詰めて実験を行った。しかし、見かけは何にも起こらなかった。ところが、Cuneusが水を蓄えてその中に起電機の第一導

---

[30] The History and Present State of Electricity（第2版） 前掲書　p. 80

体からの細いワイヤーでつながれてあるグラスを一方の手で握り、別の方の手で導体を握ったところ、腕と胸に衝撃が走って驚いた。彼の頭では、電気は水の中にあると思っていたので全く予期しないものであった。同席していたアラマンド(Allamand)とムッセンブルク(Muschenbroeck)はこの実験を繰り返してオランダで論文を発表した[31]。また、ムッセルブルクは、次のような報告を、M.Reamur（レオミール）当てに送った。次の文はそれを見せてもらったノレの報告の中の手紙の引用部分である。



「私は、新しくしかし恐ろしい実験を報告しますが、あなた自身はそれを試さないよう忠告します。・・・電気の実験について幾つかの研究を企画しました。このために、青い絹糸で銃身（図のＡＢ）下げて、ガラスボールからなる起電機（それは非常に速く回転しその間手で摩擦摩擦するものであるが、）を銃身に接触させ、他方（図のＢ）に真鍮の糸を下げて、それをガラスのフラスコＤ、その中に部分的に水を蓄えておくものに差し込んでおいた。私は右手でフラスコの周りＦを持ち、左手でＥを持った。銃身から電気火花を得ようとしたのである。そのとたん、私の右手Ｆは、非常な衝撃を受けて、私の体は、光に打たれたような衝撃を受けた。フラスコは、薄いガラスでできていたのであるが、ふつうではわれませんでした。手はこの衝撃ではずれることはありませんでしたが、腕と全身は言い表すことのできない恐ろしい衝撃を受けました。私が受けたことは言葉では表現できません。・・・」

この手紙の中で、ムッセルブルクは『フランスの王冠をもらおうと、もう一度あの衝撃を受けようとは思わない』とのべている。（カジョリ　ｐ１６５）

ノレの報告書には、ムッセンブルクから教わって実験を行ったというM.Allamandの報告も引用されている。次の文はその引用文である。

「（同様の手続きを行って実験した後）君は、この桁外れのショックを腕と体全体に受けるでしょう。それは光の衝撃です。この衝撃を最初に受けたときは数分間は呼吸もできないほどです。実験を行ったムッセルブルクは、非常な衝撃を受けた二日後に私のところにきて2，3時間過ごしたのですが、その衝撃が未だに彼を動揺させていて、彼が試みたことについて、言葉にできない有様でした。」[32]

（2）ライデン瓶の改良

Watsonは、ライデン瓶の働きについて重要な考察を述べている。それは、中央の針金と結びついている銃身と外側のガラスに接触すると放電が起こるということは、針

31 以上　Priestry p.103-106　第3版　p.82-84第2版

32 （source Book より）

金とガラスとが回路をなしていると考えた。かれは、回路はライデン瓶の外側と中心の金属のフックを結びつける導体を置くことにより電気を導くと考えることが最も簡単な説明であるとする。そして、このように回路をなすことを理解するために、次のような例を考える。ある人が乾いた床の上に立って、十分にチャージされたライデン瓶を一方の手に持ち、もう一人の人は、最初の人と接触せずに、彼から６インチほど離れて立ち、ライデン瓶の鉄のフックに接触しているとする。彼らのどちらのショックを受けることはない。しかし、二人の人間がその間に針金を握れば、針金は電気を通し、乾いた床は電気を通さないので、ここに回路が完成され、二人の人間の体とその間の導線と瓶とフックの間に回路が形成されることとなる。このとき瓶に蓄えられていた電気は放電される、その結果その効果が現れるというのである。(1748年）[33]

回路が形成されることによって衝撃が起こされるとするなら、回路の初めと回路の終わりは電気の放出と電気の受け皿であり、そのいずれも導体である必要があるとBevisは考えた。そこで、最初に発見されたよりも電気の蓄積能力を高めるためには、ガラスの内側の水と金属だけではなくてガラスの外側の面にも薄い鉛やスズの箔を張ることを提案した。このように瓶の内部に水を入れて、外部に箔を張り実験をすると、蓄積能力が高まり、さらに箔のどの部分に触れても強い衝撃を受けた。

さらに、Watsonは、ライデン瓶の集積能力はガラス内部の物体の量に比例しないことを発見した。しかし、ライデン瓶を二つ以上並べて接続するとライデン瓶の数が多くなるほど衝撃が大きくなった。このことから、ワトソンは外側の金属箔の広さに電気は比例すると考えた。また、内側の導体は、ガラスに接触している部分が多ければ多いほど、また、密に接触すればするほど、蓄えられる電気量が多くなると言う経験に基づき、この結果ワトソンは瓶の内側と外側に口から１インチ程まで銀箔を貼った。こうして現在の形のライデン瓶が作られた[34]。

（３）ライデン瓶の普及

1746年4月　ノレはフランス国王の前に並んだ180人の近衛兵たちに手をつながせて、ライデンビンからの電気ショックを伝える実験を行った。同じ年、帯電した婦人が電気火花でアルコールに火を付ける実験を行うなど、電気現象は当時大いに流行した。カルトジオ会修道士は、パリの修道院で各人の間を鉄線で結んで、900フィートの長い列を作り、ライデンビンからの放電を受けると全員が一斉に衝動的に飛び上がった。ライデンビンの放電で鳥やその他の動物を殺した。

1748年には、ウォットソンはライデンビンを利用して電気の伝導速度を測定しよう

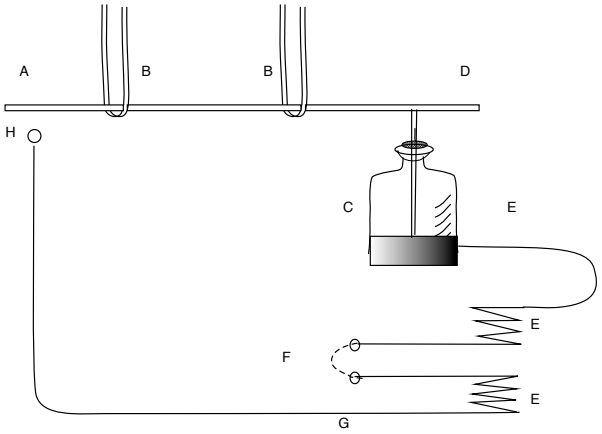
---

[33] Wm. Watson, F. R. S.Phil. Trans. 1748 **45**, 49-120, published 1 January 1748

[34] 1747年　読まれ　1748年　BevisとWatson　は共同で研究していた Preistry 第3版　p.114-116　第2版p.90

とした。Watsonは、回路を形成する時ライデン瓶が放電することから電気が移動する時間を測定しようとしたのである。しかし時間的差異は得られなかった。

「レイデンビンＣの内箔を絶縁的につるしてある伝導棒ＡＤに連結する。外箔から一本の針金が球Ｈにまで走っている。Ｆに一人の人間を挿入する。ＦとＨの針金の距離は、約12000フィートにおよんでいたにもかかわらず、Ｆにある観察者は、感受した電撃とＨにおける火花との間に何らの時間的差異を確定することができなかった。」[35]



電気速度を1本の針金で測定するウォットソンの実験

この試みはしかし後世の電気通信の嚆矢となる。

６．フランクリンの一流体説と電気量保存の法則

フランクリンは、ライデン瓶の実験において、帯電したライデン瓶が絶縁台の上で放電すると電気が打ち消されてゼロになることから一方の箔では電気流体の過剰が他方の箔では電気の火の空虚な状態であり、その電気量は少しも変化していないと説明した。また箔の内側と外側では電気量が反対の性質を持つことから、電気量の充実と空虚は性質が異なるとした。そして電気が過剰な方をプラスまたはポジティブ、不足の方をマイナス、ネガティブと呼ぶことを提案し、電気が満ちることをchargeその逆をdischareとした。フランクリンのこの考え方は電気量の保存の法則につながるものであり電気現象を担う実体の存在を明確にしたものである。これらの考察はボルタやクーロンに受け継がれ静電気学の画期的な発展につながっていった。フランクリンはDuFeyの二流体説の業績を知らず同様の結論を出したがフランクリンは過剰と不足に重点を置いたので一流体説となり、DuFeyは2流体説となった。フランクリンの一流体説は単に二種類の電気があると言うだけでなく、移動しやすい電気（電気大気と呼んだ）と移動しにくい物体（非電気的物体＝導体）の存在という物質の構造を深く認識したものであった。フランクリンのように一流体説を強く認識したのがボルタであり、移動における二種類の物体の違いを捨象し二流体説を採用したのがクーロンであった。

フランクリンの研究は1746年イギリスから来たスペンス博士が電気実験をするのをボストンで目撃したことから始まった。また、ロンドンの商人で王立協会会員のコリンソン氏からフィラデルフィアの図書館に電気実験に使用するガラス管と説明書が届いていた。フランクリンはこれを用いて実験を始め、その結果はコリンソン氏宛の手紙

---

[35] Wm. Watson, F. R. S.Phil. Trans. 1748 **45**, 49-120, published 1 January 1748

という形で報告された。1747年3月28日付　コリンソン氏あて最初の書簡では、「これほど、時がたつのを忘れさせた研究を一度もしたことはありません。それも皆、このほどの新しく送られてきた電気管のもたらした賜です。」という感謝の言葉から始まっている。フランクリンの研究は前述のウォットソンの研究と同じ内容であるが、ウォットソンより先んじていた。

（1） フランクリンの一流体説・・・電気の移動と電気量保存のめばえ

フランクリンは幾つかの研究の後、まとまった論述を1755年理学報告（Philosophical transaction)[36]に報告し掲載された。これにはフランクリンの一流体説について体系立てて説明されている。この報告書から始める。

その出だしの部分において、フランクリンは電気大気（electric atomosphere 現在の電荷に相当する)を導入し、次に、それに対して以下の三つの性質をあたえ、電気現象を説明した。

① 電気大気（電荷のこと）は、非電気物体（導体）の周りを漂っていて導体に伴われている。導体と電気大気は混じあって混在してしまうのではなく、分離していて、しかし、合わさって統一体をなしている。電気大気は互いに反発しあっている。このことは、つり下げられた二つのコルクのボールに電気大気を付与すると、電気大気は二つコルクに広がることから容易に分かる。
② 一つの電気大気は、互いの電荷と反発し合うだけではなく、電気大気を含んだ物体が互いに近づいたときは物体が反発し合う。力は、物体の各部分に働く。このことは以下の実験によって示される。
③ 電気が負になった物体、言い換えると、自然の状態よりも電気が奪われた物体は、正の状態と同じように、互いに反発し合う。（少なくとも相互に退け合うことからそのように見える。）このことは、負に帯電したライデン瓶の中心の線、絹糸によってつり下げられた二つのコルクボールの実験とその他の多くの実験から示すことができる。

このことを説明する三つの実験が紹介されているが、以下に述べる実験は、その三つの実験のうち第一のものである。

実験の準備

１５から２０本ほどの長さ3インチの糸の束を用意し、起電機であるガラス管（私のものは長さ５フィート直径が4インチ）の錫の第一次導体に下げた、この糸は若干湿らせておく。ただし、あまりぬらさないようにすることが注意点である。

実験１

ガラス管を励起し第一次導体の他端の近くに置いた。このとき、ガラス管と第一導体の間に火花放電を起こすと、糸の束は開く。

その理由は、それぞれの糸は、一次導体と同じように電気大気を得る。そして、電気大気は互いに反発し合い、さらに、互いの糸の大気によって糸同士も反発される。電気大気は一種類である。もし、幾つかの大気が混入するなら、糸は反発されず統合されて、垂れ下がる。

---

36 Phil. Trans.-1755-1756-Franklin-rstl.1755.0052-2

新しいガラス管を摩擦し、第一次導体に近づけ、さらに、近づけて放電をさせる。このときも、糸はもう少し開く。というのは、一次導体の電気大気は励起されたガラス管の電気大気によって反発され、反対の端の方に押しやられ、さらに、糸まで追いやられ、糸はさらに電気大気を得るからである。

この後、励起したガラス管を遠ざけるとそれに応じて糸は閉じる。それに応じた量だけで、それ以上ではない。なぜなら、第一次導体の電気大気は、全体として、加えられたり、減少したりせず、ガラス管を遠ざける分だけ、糸は閉じるからである。励起されたチューブを糸の下に持って行くと、それらは、少し閉じる。

それらは閉じる。なぜなら、ガラスチューブの大気は糸の電気大気を反発し、それらの一部分を一次導体に戻してしまったからである。それをさらに遠ざけると、糸はそれなりに開く。というのは、それが失った大気の一部が再びもどるからである。

実験２

ガラス管を励起させ、それを第一導体に近づける、反対側には糸を数本下げてある。そのままにすれば糸は広がる。ガラス管を遠ざければ、糸は閉じる。

導体のガラス管と反対側には、電気大気が集まるから糸は開く。遠ざければ、電気大気もなくなるから、糸は閉じるのである。

糸が開いているときにスパークさせれば、糸は閉じる。このときガラス管を遠ざければ、糸は開く。

（実験３ 同様な実験である。）

このようにフランクリンは、電気大気の考えから、実験の現象を見事に説明をすることが出来た。このことをもって実体としての電気大気（＝電荷）の存在が確立したといえるであろう。

（２）ライデン瓶によるフランクリンの実験

フランクリンがこの考えに到達したのは、コリンソンから送られた起電ガラス管による電気の実験を行ったことによるのであるが、さらに、ライデン瓶に電気をためながら、金属の尖端から電気が失われることや、その様子を暗闇で見ると明らかに金属の尖端から光が放出していることを認め、電気が一つの実体であること、電気は摩擦によって発生するのではなく移動するものであることを突き止めた。つまり電気量保存の法則の発見である。フランクリンはこの考えを応用してライデン瓶の諸現象の解明を行った。次に述べるのは、フランクリンがライデン瓶を用いて行った実験と、彼の一流体説に基づくその説明である。この実験はすでに1747年に行われたものであり、例によってコリンソンへ手紙で報告されている。[37]

［実験１］

電気を帯びたライデン瓶を絶縁体（ワックス）の上に置く。小さなコルクのボールを乾いた絹糸で吊し、手に持って、ライデン瓶のワイヤー（中心の金具）に近づける。初めは引き寄せられ、次に反発する。この反発の状態のとき、手を下げて、瓶の下部の方に持って行くと瞬間的に強く引かれる。

もしも、瓶の表面が中心の線と同じようにポジティブ（正）であるなら、電気を帯びたコル

37 The work of Benjamin Franklin p.192-194

クは中心の金属と同様に反発されるであろう。（つまり、瓶の下部の表面は中心とは異なって負になっている。）

［実験II］

右図１を参照。テーブルに刺した曲げられたワイヤー（ａ）から、小さなリネンの糸（ｂ）を電気的に励起した瓶（ｃ）から1インチの半分ほど以内のところに下げた。ワイヤーまたは瓶に指で繰り返し接触すると、接触する度に糸が瓶に引きつけられることが観察される。（これはビネガーの瓶かそのような腹がふくらんだ瓶がうまくいく）。ワイヤーに接触することによって上部から放電が起こるや否や、瓶の下部は、糸によって同じだけの量の電気が引き出される。（註　周りはガラス瓶であり完全な導体ではないので中心の導体の電気量の移動に対応して周りの電気量の移動がついていかず、若干の間、瓶が帯電することに原因があると思われる。小林）

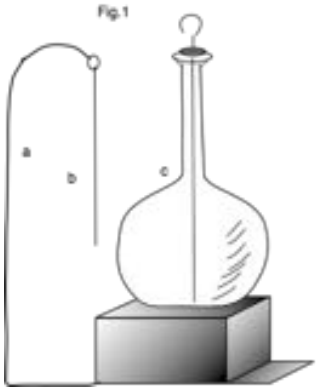


図１

［実験III］

右図２を参照。ワイヤーを瓶の底に備え付けた鉛（ｄ）に固定し、そこから上方へ折り曲げてその端を輪にしコルクｅに差し込んだワイヤーの端も輪にしておき、同じ高さにして、３から４インチほど離しておく。それから瓶を電気的に励起し、絶縁するためワックスの上に置く。コルクを絹の糸ｆで下げてこの二つの間に置くと、コルクは直ちに一方から他方に瓶の電気的励起がなくなるまで運動する。つまりコルクは、瓶のトップから電気をとってきて瓶の底まで電気的平衡状態が実現するまで運ぶ。

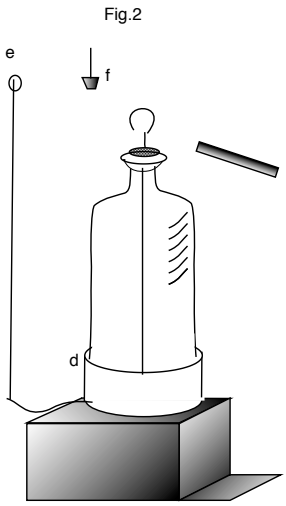


図２ Fig. 3

［実験IV］

右図３。電気瓶をワックスの上に置き、線ｇをＣの形にして、折り曲げたとき、上部が瓶のワイヤーに接触し、下部が瓶の底に接触する長さとなるようにする。取っ手として利用する棒はワックスで絶縁する。（ｈ）。この取っ手で、瓶の下部の底に触れて、上部のコルクの栓にさしてあるワイヤイーの近くに持って行く。その結果は、火花を放出し続け、電気的平衡が実現する。最初に上部に接触し、そして、そのまま、その他端を下部に近づけると、線の先から瓶の端に一連の火の流れが見られる。上と下に同時に触れると瞬間的に平衡が回復し、その曲がったワイヤーは連結を形成する。

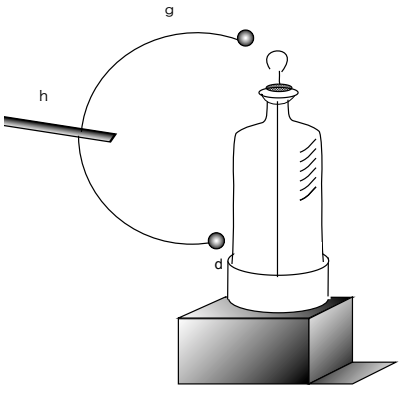


図３

［実験　V］

次ページ図１。薄い鉛（または紙）を瓶（ｉ）の周りに、瓶の底から若干上のところにまく。そのリングから、ワイヤーを前に出す。その他端をコルク（ｋ）のワイヤーに接触させる。そのようにすると下瓶はどのようにしても電気を帯びさせることはできない。平衡は決して壊されることはない。というのは、瓶の上部と下部が外部の線でつながれている間は、電気的な火は循環していて、瓶の底から何か取り出しても、トップから常に供給されるからである。

フランクリンの実験は、同様にして実験１１まで行われている。

1748年のコリンソンへの手紙では、ライデン瓶に関するさらにつっこんだ実験がおこなわれている。以下、その主な実験を紹介しよう。[38]

Fig.4

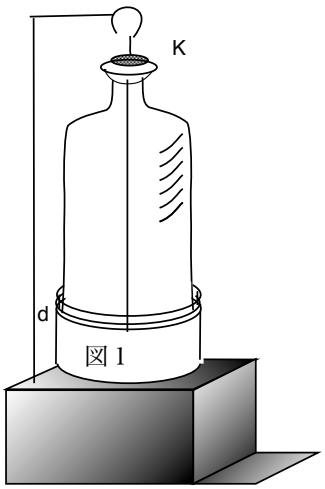


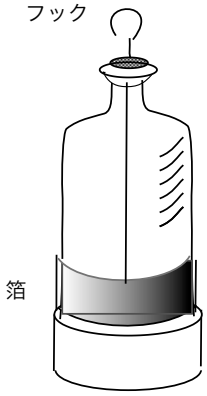
図１

① 帯電したライデン瓶のフックを一方の手で持ってから、ガラスをコーティングした箔に接触しても、箔を握ってからフックに接触しても同じだけのショックを受ける。

② チャージした瓶のフックに安全にさわり力を失わないためには、ライデン瓶を絶縁体の上に置かなければならない。

③ ライデン瓶をフックを持って箔の方を発電機の球に接触させても、箔を持ってフックを発電機に接触させても同じだけの強さでチャージする。

④ しかし、チャージの仕方が異なると、電気火の方向と爆発の方向が変わる。フックを通してチャージしたときは、放電はフックを通して行われ、箔を通してチャージするときは、箔を通して放電する。反対にはならない。入った方から出て行くのである。



⑤ このことを証明するためには、同じようにフックからチャージした二つの瓶をそれぞれ手に持って、フックを近づけても放電もショックも受けないことから分かる。というのはこれらのフックは、電気火を放出する傾向にあり、両方とも受け取らないからである。一方の瓶をガラスの上に置き、フックをもって持ち上げて、その箔の部分を他方のフックの部分と接触させると、爆発とショックが起き、両方の瓶は電気を失っている。

⑥ 実験を変えて、二つの瓶の一方はフックから充電し、他方は箔を通して充電する。箔を通して充電した瓶のフックを通して充電した瓶の箔に接触させても、放電やショックは行われない。その逆も同様である。ガラスの上に一方の瓶を起き、この瓶をフックを持って他方の瓶の箔にこの瓶の箔を接触させると、火花と衝撃を受けて放電する。

⑦ 二つのライデン瓶を同じようにチャージして机の上に置き、その間にコルクボールを下げる。コルクボールははじめ引き寄せられその後反発される。その反発は、二つのライデン瓶から同様に行われる。次に、一方のライデン瓶をフックから充電し、他方のライデン瓶を金属箔の方から充電したときは、コルクボールは、一方に引き寄せられ他方は反発される。これを繰り返すと、ライデン瓶の電気は放電される。

⑧ 我々が使うchargeあるいはdischargeと言う言葉は、通例に認められていて、他の人の要求にもかなうものである。我々の見解は、チャージと呼ばれているときは、これ以上電気火が入らない状態であり、それ以前はdischargeと呼ぶ。chargeの状態では導体に入ったり放出される小さな放電、（爆発と呼ぶところのものよりも100分の５よりも小さい、）も起こらない。

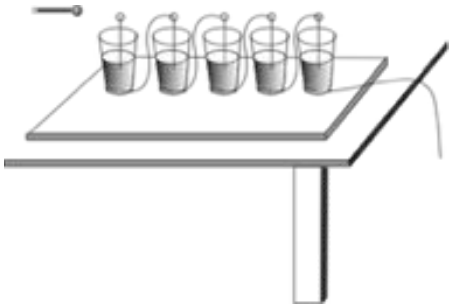
放電（爆発の際）の際、電気の一部が瓶から出て他の瓶に移動しない場合、人間が絶縁体（ワックス）の上に載っていてライデン瓶のフックにさわっていれば、瓶はdiscargeされて人

38 The work of Benjamin Franklin p.196-201

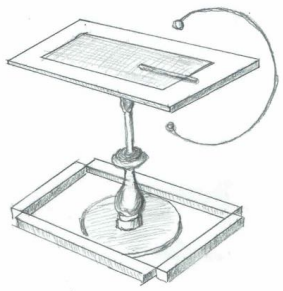
間がchargeされる。なぜなら電気は失われずに他のところに移動するだけであるからである。

⑨　一方、他の物体から電気が移動されなければchargeとは言わない。絶縁された瓶は床や金属箔と連結することなくchargeされることはない。

⑩　ライデン瓶を幾つか下げる。一番上のライデン瓶は、発電機のガラス球やガラス棒にフックを接触し、その下のライデン瓶は、上のライデン瓶の底の箔とライデン瓶のフックを接触させ、以下同様につり下げる。（いわゆる直列に接続する）一番下は床に接触させ、発電機の床と同様とする。



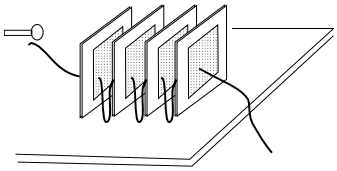
このとき、すべてのライデン瓶は同様に帯電し、それは、一番上のライデン瓶を単独で帯電させたと同じだけの電気が、すべてのライデン瓶に同時に帯電させることができる。なぜなら、一番上のライデン瓶はフックの部分は発電機から電気をもらうが、箔の部分は、下のライデン瓶のフックから電気をもらい、いか同じことを繰り返すからである。こうして、一気に同じ電気をすべてのライデン瓶の帯電させることができる。（右図のようにしても同じである。）



フランクリンの電気スクエア

⑯　ボトルの持っている力、ショックを与える能力は、ガラスそのものの中にあるのである。二つの面に接触している導体は、ただ、電気を与えたり受け取ったりするだけなのである。

⑱　次に、両面に箔を付けたガラス板を何枚も用意し、ライデン瓶を連ねて下げた初めの方の実験のように、何枚も連結した実験をおこなった。これもライデン瓶と同様に、両端を帯電するとすべてのガラス板が一方は＋に他方は－に帯電することを確認した。このガラス板を何枚も直列に連結したものを、フランクリンはバッテリーと呼んだ。



バッテリー

上記のように、フランクリンは、電気的気体は、生成したり消滅したりするものではなく、右から左へと移動するものであるという電気量保存の法則を確立した。と同時に、電気量と電気量に働く力との区別を認識し、導体には電気量が蓄えられ、間に挟まっているガラスには力、いわばエネルギーが蓄えられると考えた。こうして、電気現象を担う実体としての電気大気（＝電荷）の確立とその相互作用についての認識が深まったことはフランクリンの重要な業績であり、これらは一方ではボルタの業績へ、他方はクーロンの仕事へと引き継がれることになる。

III　電気現象の発見の拡大

フランクリンの研究により、電気現象を担う実体としての電荷（電気大気）の概念が明確となった。この研究を出発点として、電荷はどのような相互作用のもとにどのような移動・分布を行うのかという本質的な法則の解明が行われるのであるが、それと同時に、静電気に関する他の様々な現象も発見されてきた。本質的な法則の研究の前に、どのような諸現象が研究されたのか概括しておこう。本質的な理解は、これらの現象の一部に特化してあるいは一部を捨象してより深い理解に到達していったのである。

１．尖端放電の現象と雷雲が電気を帯びていること

フランクリンの有名な凧の実験は1752年に王立協会で報告された。これ以前に、1747年7月11日　コリンソン宛第2信において、先の尖った金属物体が電気の火をあるいは引き寄せたりあるいは追い払ったりする効果を発見した。尖端放電の現象は、雷雲が電気を帯びていることを証明する実験に使用され、また、その後、避雷針の発明につながった。[39]

1749年のコリンソンへの手紙[40]において、フランクリンは稲妻の本性が電気火花と同一のものとの仮説を立てた。彼はまず、導体が電気を帯びているとき、電気を帯びていない（電気を失った）導体が近くに来るとスパークをとばすことから考察を始めた。さらに、ライデン瓶の経験から、水は電気を蓄えることを考慮に入れて、水が電気を蓄えるなら水滴つまり雲も電気を含んでいると考えることができるし、他の電気を帯びていない雲などと接触すると、そこで放電を起こすことは十分にあり得ると考えた。電気はお互いに反発する傾向にあるから、放電を行えば水蒸気は凝縮し雨となって落ちるとも予想された。フランクリンは電気と気象現象について次のようにリアルな描像を描いた。

海は自ら水でできていて導体であり、一方、塩分は絶縁体である。この二つが海の表面で摩擦すれば、電気を帯びた水蒸気が海から蒸発し雲となることが考えられる。このことは、暗い海を見ていると、表面が輝くことがあることからも確認することができるとした。こうして、海から蒸発し電気を帯びた雲は、山脈まで運ばれる。山は乾燥していて一般に電気的には不足しているから、水蒸気は失って反発力を失い凝縮して雨となって降らせる。電気を帯びた雲が、広々とした土地を渡り、高い丘、高い木、高い塔、高い頂、船のマスト、煙突など、突出した物や場所は電気が不足している状態（負の状態）であるから、雲から電気を引き、そこで雲は電気を失う。であるから、木下の場所は雷雨のときは危険である。そこは多くの動物や人間にとって致命的となる。開放されているところは安全である。着物が濡れているとき、閃光があなたの頭上をおそっても水をかぶっていて閃光が体の表面を伝わり、大地に導かれるなら安全である。逆に体が乾いていて、閃光が体の中を通れば危険である。ぬれた猫は放電によって助

39 The work of Benjamin Franklin p.181-182

40 The work of Benjamin Franklin p.211-223

かるが、乾いたネズミのときは、致命的となった。

フランクリンの凧の実験はけっして思いつきではなく、このような考察のもとに行われたのである。

1749年11月7日の手紙では、電気と稲妻の間の類似性を示すと同時にそれを示す実験の方法を提案した。[41]

電気流体は次の諸点で稲妻と一致しする。（1）光を出す（2）光の色（3）進行の折れ曲がり（4）素早い行動（5）金属で伝導される（6）爆発の際のばりばりという音ないし騒音（7）水中や氷の中でもながらえる（8）物体を通過する際その物体を引き裂く（9）動物を殺す（10）金属を溶かす（11）燃えやすい物質を発火させる（11）硫黄のようなきな臭いにおい』稲妻は瓶内の電気流体のように、尖ったもので引き寄せられたり退けられたりするだろうか？

このように、この両者は我々がすでに比べることのできたすべての具体点で一致するのだから、実験をやって見る必要性がある、として次のような実験を提案した。

『どこか高い塔か尖塔のてっぺんに、人間一人と電気台とを納められる一種の歩哨小屋をもうけ、台の中央から鉄の棒を出し、これを小屋の戸を突き抜けて上方へ曲げ20ないし30フィート（6．1〜9．2m）ぐらい上方へ延ばし、その先端を非常に尖ったものとする。もしも、電気台を清潔に、しかも乾燥したままに保てば、その上にたつ人間は、稲妻雲らしいのが低空で通過する際、鉄棒がその雲から電気火を引き寄せて、その人間が伝導するので、帯電して火花を発することがあるだろう。』『もしもこれらのことがこの通りならば、尖端の持つ力に関するこの知識は、家々や教会や船その他を、稲妻の衝撃から庇護することで、人類に有用なものとなるだろう』[42]

コリンソンは、この書簡集が王立教会ではまともに受け取られなかったので、王立教会の奥書なしで出版した。それにもかかわらず、この書簡集は評判を呼び、非常に多くの人に読まれた。

1752年ダリバールがフランス国王のお声掛かりで、パリ近郊のマルリー・ラ・ヴィルで実験に成功した。１３mの高さの棒をその根本で絶縁して、小さな掘っ立て小屋の中に置いたテーブルに突っ立てた。ダリバールは一人の老竜騎兵に雲を見張るように言いつけた。ガラス瓶に載せた真鍮線が棒から電気火花を引き寄せるために整備された。1752年5月10日、雷雲が現れた。竜騎兵が真鍮線を棒に近づけると火花が光り、生きのいいばりばりという音が聞こえた。焔（ほのお）があがり、硫黄のきな臭いにおいは明らかに地獄のものだった。恐怖に駆られた竜騎兵は真鍮線を落とし周りにいたものたちに村の牧師を呼んでくれと金切り声を上げた。牧師はこの竜騎兵よりも勇敢で一人で実験を始め棒から火花を得た。彼はこの結果をダリバールに知らせた。『フラン

41 F．カジョリ　物理の歴史（上）p．169

42 The work of Benjamin Franklin p．237

クリンの考えは絵空事ではなくなった。』『ここでは立派な現実となった。』[43]

1752年　フランクリンは、フィラデルフィアの気象条件のため小屋での実験を行うことができなかったので、凧を用いて実験を行った。彼は、息子一人を伴って、ボストン郊外の広場に出かけて物置小屋の中に入って凧を揚げ実験を行ったのである。息子一人のみを連れて行ったのは、失敗したときのあざけりが怖かったのであろう。失敗すれば名声を失う危険があった。このときの実験はコリンソンへ手紙で報告され、その後、王立協会へ提出された。

コリンソンへ　　電気凧

1752年12月21日　王立教会で読み上げられる

フィラデルフィア　1752年10月19日

拝啓

ヨーロッパからの多くの発行物において、高い建物に垂直に立てられた金属の棒によって雲から電気を引き寄せるフィラデルフィアの実験の成功が報告されているが、それと、同じ内容だが、もっと簡単な方法で行ったより厳密な実験が次に述べるようにフィラデルフィアで成功した。

二本の軽いヒマラヤ杉で作られた挽き割り板を十字にして、その腕の長さを、一枚の大きな薄絹のハンカチ伸ばしたときその角にくる長さとし、棒の尖端にハンカチの角を結びつけ凧を作った。紙で作るように、適切な尾と輪と線を付けて空にあげるが、紙ではなく絹で作っているので雷雨にぬれたり風に当たっても破けずに耐えることができる。十字架の上端には鋭く尖った針金を、木より1フィートより長く上方に固定した。凧を揚げる糸はより糸（電気を通す）で一方、手元の部分には電気を通さない絹のリボンを結びつけ、より糸と絹のリボンのつなぎ目には鍵を堅く結びつけた。

この凧は風のある雷雨が現れる時に、絹のリボンが濡れたりしないようにドアや窓のような覆いの中にいる人によってあげられた。そして、そのより糸が窓や戸に触れないように注意しながら持っていた。雷雲が凧を覆うやいなや、尖端が電気火を雷雲から引き、凧と、すべてのより糸が電気を帯び、より糸のほどけた繊維が逆立ち、指の方に引きつけられた。そして雨が凧や糸をぬらしたときは、電気の火を自由に通すようになったので、蝶番を鍵に近づけると十分な流れを見られた。この鍵によってライデン瓶は十分に電気を充電した。そして、このようにして得られた電気の火でアルコールを燃やしたり、通常ガラス瓶やガラス管を摩擦することによって行われる電気の実験をすべて行った。そして、光と電気のそれが全く同じであったことが完全に示された。Bフランクリン[44]

---

43 カジョリ　p.171-173

44 カジョリp172　参照　The work of Benjamin Franklin）p. 295

２．大気中の電気について

フランス人のル・モニエは1752年に雷雨がなく空に雲が全くない晴天の時も大気は電気を帯びていることを発見した。この空中電気に関する正確な実験はAbbe Mazeas によって1753年に行われRoyal Society に報告された。[45]

Abbeの実験装置は370feetの長さの鉄のワイヤーを、地面から90feet高さに水平のおいた。一方の端は非常に高い城の部屋、そこに長さ5feet絹の糸で結びつけた。そこから町の教会の尖塔まで引き、そこで同様に8feetの長さの絹糸で結びつけた。さらに雨に濡れないようにした。電気を受け取るために大きなkeyをこのワイヤーの端に付けた。6月17日実験を開始した。空中電気は電気の兆候を示さない湿度の高い日を除いて、明け方から、夕方の7時8時まで毎日かなり感じた。乾燥した天候の時は、線は３から４ライン以下ぐらいの距離で小さな物体を引きつけた。一般に最も強く電気を帯びたのは、7月の空は晴れた非常に暑い日であった。このとき、導体を埃に10から12ラインの距離に近づけたとき、埃は垂直上方にたった。それはちょうど、鉄粉に磁石を近づけたときのようであった。7月27日午後2時、彼は地平線に雷雲がわき上がるのを見た。急いで実験装置に駆け寄り、keyを埃に近づけた。それは雲が天頂に近づくに比例して、力は増大した。雲がワイヤーを覆うほどになると、埃は動き続け、やがてすべて紙から引きとばされた。やがてワイヤーから火花が見られたが、まだ、雷も稲光もなかった。

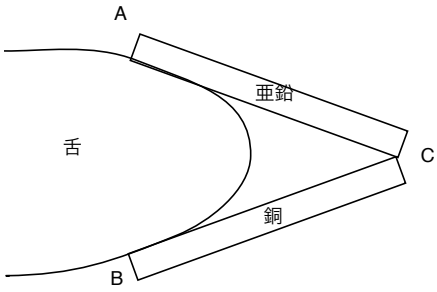
10ライン（＝10／40インチ＝6mm）の距離で埃が動く程度は数千ボルトである。現在の観測によれば空中電気の起電力は１ｍに付き１００ｖであるから、90feet（0.3×90＝27m）の高さでは2700VになりAbbeの実験結果は妥当である。

空中電気の測定は、その後凧を用いた実験などが行われた。また、検電器の発達とともに空中電気の測定は続けられた。空中電気を測定する検電器については、後述する。

３．接触電気の発見

1750年　ズルツァーが、後年には接触電気現象であると判明する現象の発見を行った。

1751－52年『ベルリン科学アカデミー論集』にズルツァーの論文の一部は、次の通りである。



接触電気の最初の実験

「二つの金属片、鉛片および銀片を、それらの端が一つの面を作るように、相互に結合して、その間に舌の先を入れると、緑礬の味にかなり近い、一種の味を感じるであろう。しかし、一つ一つの金属片は単独ではこの味の痕跡すら持っていない。さてこの二つの金属をこのように結合したために、どちらかの金属に分解が起こって、分解された微粒子が舌に押し入ると

[45] Abbé Mazeas, F. R. S.　Phil. Trans. 1753 **48**, 377-384, published 1 January 1753

いうことはありそうなことではない。したがって、これらの金属の結合によって、二つの金属の一つ、または、その双方において、それらの微粒子に振動がおこり、この振動が舌の神経を必然的に興奮させて、上に述べた味覚を引き起こすと推論しなければならない。」（ダンネマン７巻p 143）

この実験は、その後、舌によるバッテリー検査としてしばしば使われることになる。

その後実験は、スズまたは亜鉛のカップを持ってきてそれを銀の台の上に置き、カップに水を満たした。そしてある人が舌の先を水のところへ持っていったとき、銀の第二手を触れたところ、舌ははっきりと味を感じた。手を台から離すと、その水は全く味がなかった。（ダンネマン　7巻ｐ１３６）

４．ピロ電気について　1756年

エピーヌスは、フランクリンの一流体説を支持した。また、トルマリン（電気石）について次のような実験を行った。

まず、トルマリン（電気石）の一般的な性質を述べた上で、さらによく知られている

性質として、あつい石炭の上にそれを置くと、灰を引き寄せたり反発したりする現象が見られることを述べ、それについての観察を述べている。この現象は、宝石商が、石の耐性を確認するために熱するときに発見されたと述べている。また、トルマリンの他にも示すことも述べている。

トルマリンの電気の法則として

1 トルマリンは常に正と負を同時に持つ。一つの面が正ならば他の面は常に負であり、またはその逆となる。 この法則は実験によって簡単に確認される。

2 トルマリンは、沸騰したお湯に入れて取り出したときが、トルマリンの電気は活発である。低い温度やあまり高い温度では、電気は生じるが弱い。沸騰したお湯に入れて、全体的に冷え切るまでの間、電気を持っていた。(preistry p.367)

現在はピロ電気については次のように確認されている。電気石や水晶その他（異極鉱など）を加熱してその温度が変化している間結晶体表面の特定の部分に電気が現れる。電気石ではその結晶軸の両端に正負の電気が現れる。ただしこの帯電は温度が変化している間だけのことで、温度が一定になれば電気は消失する。温度が上っている間に正電気を帯びる端は温度が下がっているときは負電気を帯びる。ピロ電気の現れる状況を実験してみるには結晶体を加熱しその温度が変化しているとき鉛丹（赤）と硫黄の粉末を結晶体の上にふるいかけるのが便利である。鉛丹は負に硫黄は正に集まる。

結晶構造によって初めから存在する分極がある場合には、一般には表面には反対の電荷が付いていて電気を示さないが温度が変わる時自発的な分極が変わるので、電気を示すことがある。これがピロ電気（pyro-electrocoty)である。[46]

５．帯電列について

---

[46] ピロ電気については佐藤穂純　物理学３　ｐ４５　高橋「電磁気学」p. 69

1757年　スウェーデンのWilcke　は、「反対の電気に関する学位論文」を発表した。この中で摩擦電気に関する重要な発見を行った。硫黄とガラスを摩擦すると強力な電気が生じるが、ガラスは正の硫黄は負の電気が生じたのである。同様に硫黄と封蝋を摩擦すると、封蝋には正の硫黄には負の電気が生じた。布で木を摩擦すると木には常に負の電気が生じた。木とガラスを摩擦するとガラスには正の電気が生じた。硫黄と金属を摩擦すると硫黄には常に正の電気が生じた。硫黄は鉛と摩擦すると負になるが、硫黄が負になるのはこのときだけであった。鉛は金属の中では良い導体ではない。この実験を通して、次のような表を得た。このうちの二つを摩擦すると、列の初めの方が正の電気を後の方が負の電気を生じる。これを帯電列という。

なめらかなガラス、木綿、羽の柄、木材、ワックス、荒いガラス、鉛、硫黄、その他の金属

これらの順序はしかし、時々入れ替わることがあり、物質だけではなく表面の状態によることもあることが示された。上記の例ではガラスがそのようになっている。[47]

その後、この帯電列はヤングやファラデーによって研究された。ヤングの帯電列は次の通りである。

ガラス、綿、羽毛、封蝋、金属、樹脂、絹、硫黄

６．溶けた物質の帯電について・・・（摩擦によらない）自発的電気

Wilckeのもう一つの重要な発見は、溶けた物質の摩擦によらない自発的帯電の発見である。彼は導体の上に置かれた陶器の器の中に硫黄を入れて溶かした。それを冷やして硫黄を取り出すと強く帯電していることを発見した。絶縁体の上で冷やしたときは帯電しないことも発見した。彼はさらに、上に述べた状況で陶器の替わりにガラスの器に硫黄を溶かして冷やした。このときは、導体か絶縁体かによらず強く帯電した。もっとも導体上で冷やした方が絶縁体上で冷やした方より強く帯電した。これらの場合ガラスは常に正に帯電し硫黄は常に負に帯電した。このことによって、摩擦によらず帯電が起こることがあることを証明したのである。（Preistry p273より）

1759年Aepinusは、Wilckeの実験の追試を行った。つまり、金属のカップの中に硫黄を熱して溶かし冷やした。このときは電気は帯びていなかったが、金属のカップから硫黄を取り出すとカップと硫黄は反対の電気に強く帯電することを発見した。特にこのときカップの方は強く電気的性質を持つことを見た。Aepinusが、「硫黄をカップの中に戻すと電気は消え、取り出すとまた復活する」と述べていることは、重要なことである。

---

[47] Preistry.前掲書p275より

IV　電荷の相互作用と電荷の移動・分布

フランクリンの電荷の保存法則により、電気現象を担う実体としての電荷の概念が明確となった。それらは電気大気あるいは電気流体と呼ばれた。その電荷はどのような相互作用のもとにどのような移動・分布を行うのか、これを明らかにすることが次の仕事である。

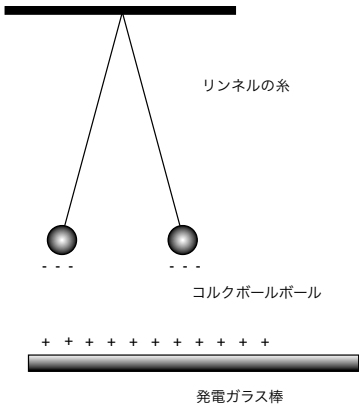
実体の電荷の分布や相互作用、移動などを合理的に調べるには、第一に、現象を数量的に表現されなければならない。量的にとらえ、数学的に処理することにより、言葉で表現する以上に正確で微妙なニュアンスを表現できる。勿論言葉による現象の説明の重要さは当然である。第二に、様々な現象を実体の運動から説明するためには、まず様々な連関の中から特徴的な運動を取り出すこと、つまり、本質的な運動とその現象形態を明らかにすることが必要であり、そのためには、幾つかの現象を捨象しなければならない。IIIで述べたように、静電気現象は様々な様相を呈している。これらは複雑な要素が絡んでいるので、この中から本質をえぐり出す典型的な現象を取り出し研究することが肝要である。これはボルタによって行われた。第三に、未知の運動形態を理解するためには、多くの場合、その運動を理解するモデルが利用される。数量的に把握された現象の理解のモデルは数学的なモデルであり、その論理展開によって、相互作用と運動を把握可能となることが多い。これはクーロン、キャベンディシュ、ポアッソン、グリーンなどによって行われていった。

１．検電器の発明

電荷の分布などについての本質的な理解のためには、定量的な測定が不可欠であった。検電器の発明とその発達は、新しい電位概念の導入へとつながり、本質的な理論形成への重要な一歩となった。

（１）静電誘導[48]の発見

静電誘導の法則の発見は検電器の発明・発展を促した。1753年　Cantonは、Franklinから刺激を受けて実験を行い、その結果をPhil.Trans. に発表した[49]。静電誘導の発見の端緒である。

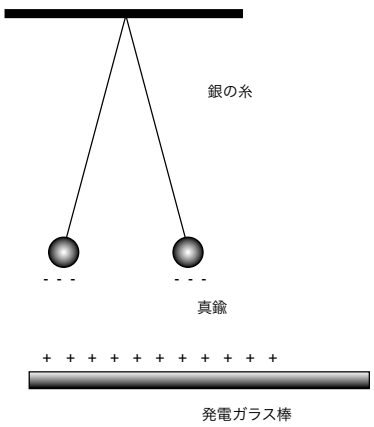


Cantonは、天井か都合の良いところにリンネルの糸を結び、それにコルク球を下げた。リンネルの糸は、現在では不導体の属するが、当時の、静電気の研究においては、一般に導体の役割を果たすとされていた。一方、静電気においても絶縁体としての役割を果たす物は絹糸であっ

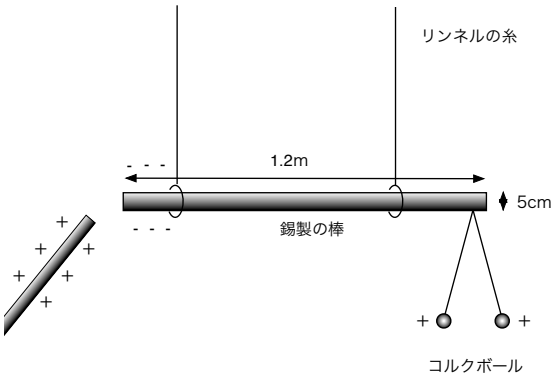
48 電気感応とも言うが、高校の教科書等では静電誘導が一般的である

49 Phil. Trans.-1753-Canton-rstl.1753.0053

た。この長さは8から9インチ（約20ｃｍ）のリンネルの糸に一対のコルクボールを付けて、静かに接触したままにしておく。このコルクボールの下約１ｍのところに発電ガラス棒を帯電させて下から近づける。するとコルクボールはお互いに反発しあって離れる。これをCantonはコルクボールの電荷が発電棒の電気によって退けられリンネルの糸を伝わって逃げていったのでコルクボールは負に帯電し、反発したと考えた。ガラス棒を静かに離すとコルクボールは互いに近づいて接触するようになるが、このことはガラス棒を遠ざけたので電気が戻ってコルクボールは電気を帯びなくなったと考えられるとしている。さらに、Cantonはこの実験をリンネルの替わりに銀の糸を用い、コルクボールの替わりに真鍮のボールを用いるとより成功すると述べている。またガラス棒の替わりに樹脂の棒を用いても同様であるとしている。さらにリンネルの替わりに絹糸を用いたときはガラス棒をもっと近づけると開き、その後遠ざけると開いたままであるがやがて静かに閉じることを見ている。これは、絹糸がリンネルよりも電気を通しにくいことから説明できるとした。



次にCantonは、長さ4から5フィート（約1.2m）直径が2インチ（5ｃｍ）のスズでできた金属棒を用意し、天井から絹糸で下げた。絹糸で下げたのは勿論絶縁をよくするためである。この金属棒の一端に先の実験と同じように、リンネルの糸でコルクボールを二つ下げた。そしてガラス棒を発電させて、そのコルクボールと反対側に近づけた。このとき二つのコルクボールは反発して離れた。ガラス棒を遠ざけるとコルクボールは閉じて初めと同じように接触した。次にガラス棒を金属棒に接触させた。このときもコルクボールは反発して開いた。ガラス棒の替わりに樹脂を用いても同じである。またライデン瓶の金属部分（瓶の中心のワイヤー部分）を接触させても同じように開かせることができた。ガラス棒で開かせたときガラス棒を離しても開いたままであるが、電気を帯びた樹脂をコルクの下から近づけると、コルクはさらに開いた。これは、ガラス棒から得た電気を樹脂電気が引きつけてコルクボールをより正に帯電させたからであると考えられる。Cantonはこの実験からやがて検電器を考案することとなる。



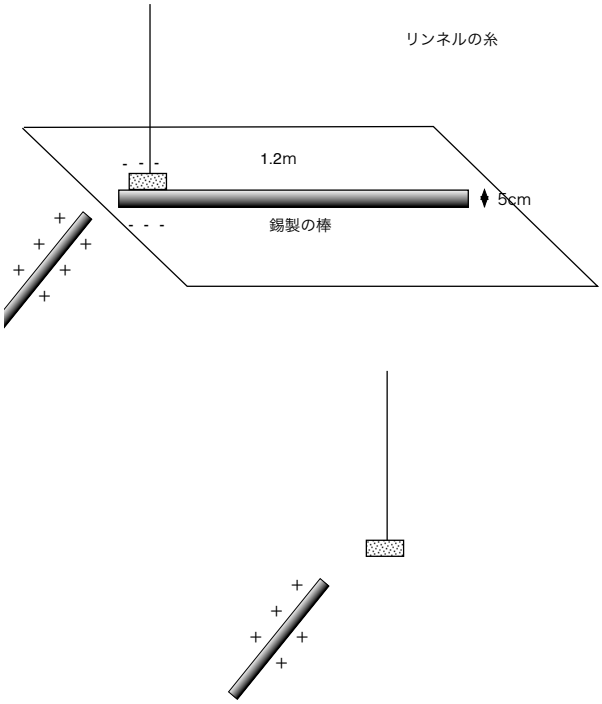
AepinusはCanton同様次のような実験を行った[50]。

50 Preistry前掲書第3版 p.298-302

「一本の金属棒をとってそれをガラス台の上に置き、その一端に帯電体を近づけた。ただし帯電体は金属棒から若干の距離を持つようにしておいた。そうすると金属棒の帯電体に向かっている一端は実験に使用した帯電体と反対の電気を示し、これに反し他端は同一の電気を示した。」

また、

「ガラス棒の上に置いた金属棒に、帯電体に直性接触させた。そうすると帯電させようとする金属棒はその全体にわたってそれに接触させた帯電体の有するのと同じ種類の電気だけを示した。」



Aepinusはこのことを次のようにして確認した。つまり金属棒の一端の上に小さな物体（導体）を置き、この物体に絹の糸を付けた。そしてこの物体の電気を調べたのである。例えば、右図のように絶縁した金属に絹糸のついた物体を置き、この金属にガラス棒を近づけ絹糸のついた物体を静かに離してその電気を調べ、導体の正負を確認したのである。

さらに、Aepinusは、導体と不導体の物体の間には根本的な相違は存在せず、この相違は抵抗あるいは伝導度が物体によって相違することに基づくだけであるとした。つまり導体は抵抗が非常に小さい物体であり、不導体は抵抗が非常に大きい物体であるとした。このため不導体による放電は非常な時間がかかる。このことはよく観察されることである。

Aepinusはライデン瓶の考察に対して重要な一歩を進めた。ライデン瓶はフランクリンが言うようにガラスの両面に導体を貼り合わせ導体に正負の電気が蓄えられる物であるがガラスは不浸透性が重要であるのであるからガラスの替わりに空気でも可能である考えて、二枚の金属板を間に空気以外に何も挟まずに向かい合わせて設置し、それに電気を蓄えてそれを金属で繋ぐと放電することを確認したのである。

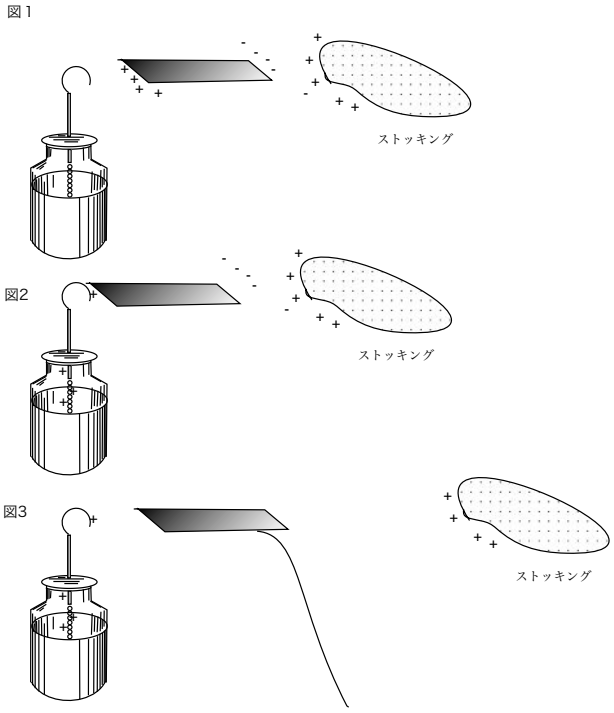
さらにこの2枚の金属板の中央に凸の部分を作り、電気を蓄えるとその部分で放電が起こることを観察し、これが雷の現象と似ていることを注意した。

（2）電気盆の発明

1765年Francesco　Cinga　は、ライデン瓶を充電する新しい方法を発明した[51]。それはCantonとWilckeの理論、つまり、電気はお互いに反発し、特に平面のときには反発が強

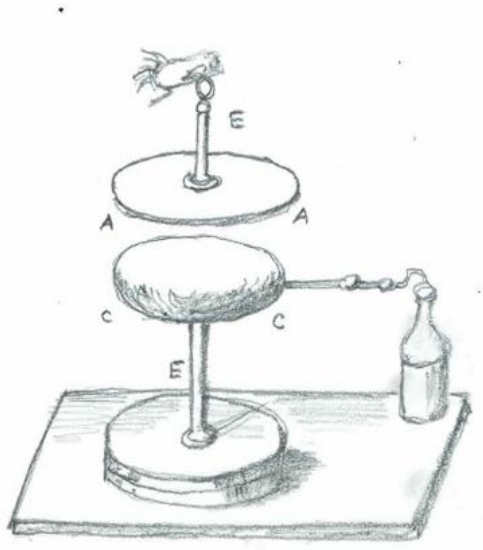
[51] Pancaldi Volta Science and culture in the age of enlightenment princeton university press　p.98-99

く、逆の電気のときには取り込むと言う性質を利用した物であった。Cingaはなめらかな表面を持った鉛の板を用意し、ストッキングのような帯電した物体を近づけた（図１）。このときその反対側にライデン瓶の中心の金属線を近づけて放電を起こす。（図２）。次にストッキングを離して鉛の板に指または地面と接続している（図３）。地面との接続を止めて初めにもどし、ストッキングを近づけてその反対方向にライデン瓶を近づけると再び放電を起こす（図１）。この方法を繰り返すことによってライデン瓶を充電できることを発見した。



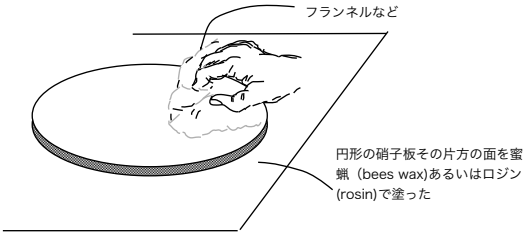
この新しい方法の理論は次の通りである。電気を帯びたストッキングを近づけると金属の中心部分ではないところではあるが金属板の反対側の部分から外に向かって電気があふれ出し、あふれ出した電気がライデン瓶の中心の導線を通って充電される。このときストッキングを離すと金属は負となる。指を近づけると放電をして金属には（正の）電気が移動し、金属は再び中性となる。以下同様にして充電するのである。

1775年．ボルタはフランクリンの電気スクエアとAepinusの硫黄とカップの実験からヒントを得て「電気をくみ出す永久機関」と称された電気盆を作成した。その構造は右図のように、鎧装（シールド）と呼ばれる金属（AA’)と、樹脂でできた塊(cake)オプションとして第二金属を樹脂の下に置くものであった。（ただしこの第二金属は意味を持たないことが後に分かった。）ボルタの改良はガラスや硫黄の替わりに樹脂を用いたことである。次にシールドＡA’として金属板ではなく、木製の板に金箔を貼った物や中空の金属を用いて軽く扱いやすいように工夫した。この金属を操作する絶縁棒は電気が失われないようにガラスをワック



スでコーティングし、装置全体はなめらかな曲線とした。尖端放電を防いだのである。

次の説明は、もう少し簡潔になった電気盆の説明である[52]。



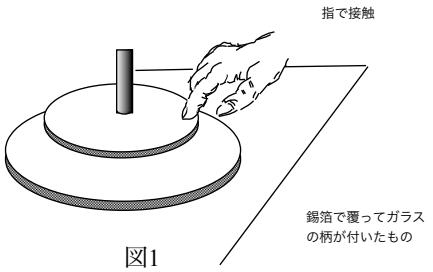


図1

「この装置は円形のガラスの板からできていて、直径は約8インチであり、その片方の面を蜜蝋(bees wax) または、ロジン(rosin)で15分の一インチほどの厚さに塗ったものである。このワックスを塗った面は乾いた温かいフランネルなどで非常に強く帯電させることができる。彼はその上に、円形の同じ大きさの錫箔で覆ってガラスの柄がついたものを垂直にして置いた。数秒間後、この柄のついた物体に指で接触し、ガラスの柄を持って引き上げる。蝶番をこの錫箔に近づけると放電する音が聞こえて火花が見える。そして、小さな痛みを感じる。板を元の位置に戻して数秒間置き、以前の同様に指で錫箔に接触して再び取り去る。はじめと同じように蝶番に接触させると同じ現象が生じる。」

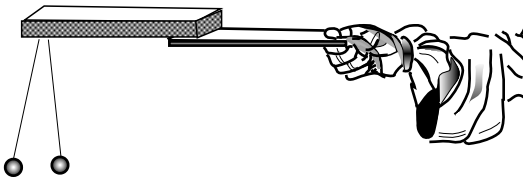


図2

ボルタは、普通の直径5インチ（１２ｃｍ程）の物から、持ち運びに便利な直径が2インチ（５ｃｍ）の小さい電気盆、さらに、テーブルほどの大きさの電気盆を考案した。大きな電気盆は機械装置によって上下するように工夫された。このような大きな装置はボルタだけではなく、多くの人によって工夫された。

（3）検電器の発明と発展

Ｇｉｌｂｅｒｔは、帯電の有無を確定するために回転針を用いたことはすでに述べた。Stephan Grayはコルクボールに羽毛を近づけて羽毛の動きで電気が帯びているかどうかを調べた。電気を帯びているときは羽毛はコルクボールに引き寄せられてからその後反発することを観察することによって判定したのである。コルクボールはときによっては象牙のボールであることもあった。

羽毛は風によってかなり影響を受けるのでWhelerは羽毛や試し糸の替わりに木髄を用いた。

1753年、Cantonが静電誘導を発見した。帯電体の近くに金属を置くと金属には電気が発生した。帯電体に近い側には帯電体と逆の電荷、遠い側には帯電帯と同じ電荷が発生し、金属が帯電体に引き付けられる現象を確認したのである。この静電誘導の現

[52] 1776年Philo.Trans　William Henley　によるボルタの電気盆の説明

象をもとに1754年、Cantonは検電器を考案した[53]。

彼の検電器は、前頁図２のように、木片の板にリンネルの糸でコルクボールや木髄のボールを下げた物である。Cantonによれば、これは空中の電気を調べる物で、あらかじめ負に帯電させて開かせておき開き方が小さくなれば空中の電気は正であり、開き方が大きくなれば負であるとした。例えば励起された琥珀や樹枝に近づけて、開き方が大きくなりなれば負に帯電していることが分かるというような具合である。

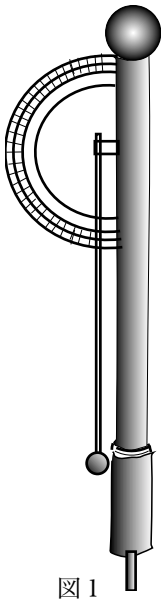
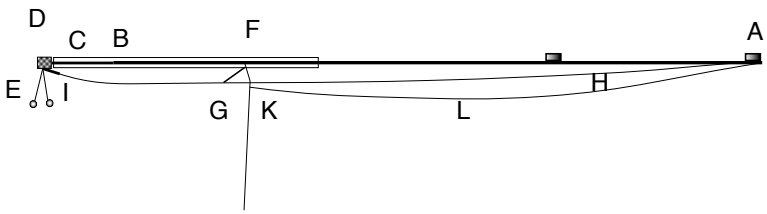


図１

このCantonのelectrometerはHenleyによれば次のように使用された。たとえば、Cantonのelectrometerを絶縁しておきこれを初め正に帯電させておく。これに正の電気を近づければ木髄は互いに反発し合い開きはさらに大きくなる。負の電気を近づければ開きは小さくなる。このことを用いて電気の正負を判断するのである。

Henleyはまた独自にelectrometerを作成した。右図１[54]がそれで、後年Voltaは始めはこの検電器を利用して研究した。

1776年、Cavalloは空中電気を観測する検電器を考案した。下の図２はこの装置の図である[55]。左端の部分に検電器が付けられている。Ｄはコルクで E は木髄でリンネルの糸で下げられている。ＡＢは普通の釣り竿でこの左端にガラス管Ｃが付けられている。このガラス管は封蝋（sealing wax）でコーティングされ絶縁されている。HGIはより糸で、FGで支えられている。より糸の端Iにピンがあり、それをコルクＤに差し込むと検電器は絶縁されなくなる仕組みである。これで空中電気を観測するときはピンIをコルクＤに差し込み、Aを下にして検電器のある他端の方を空に差し出すのである。数秒間そのままにしてHを引いてピンを抜き検電器を絶縁して検電器の開きを観測するのである。



次頁の図１は、雨の日の空中電気を測定する方法である図２ABCIはガラス管で約2．5フィートである。ジョウゴDEで覆われていて雨から守っている。ABは封蝋でカバーされている。ＦＤは真鍮の線をよじっていろいろな方向に張り巡らした物で、雨を受け止めやすくしている。この部分はガラス管に固定されそこから細い糸が管の中を通って強いワイヤーAGとつながっている。AGはAのところでコルクに差し込まれてガラス管と

---

[53] Phil. Trans.-1761-Canton-rstl.1761.0073にPhilo.Tran.1754.P.783に示した、と記述されているが確認できず

[54] 図２図３図４はPhil. Trans.-1774-Henly-rstl.1774.0018

[55] Phil. Trans. R. Soc. Lond.-1777-Cavallo-rstl.1777.0007

強く固定されている。Gにはリングがあり、敏感な木髄の球が下げられている検電器となっている。CBを窓枠に固定しFを少し上にして窓の外に突き出す。雨の日はしばしばこの道具は帯電して検電器は開くことが観察される。この方法なら雨のときの電気を観測する際に危険は伴わない。

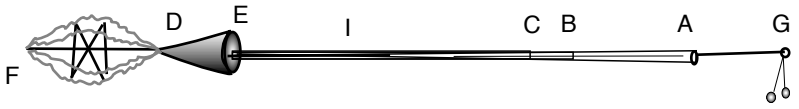


図1

検電器は1787年になると決定的な進化を遂げた。Bennetが1787年にPhilosophical Transactionにガラスの容器に入った金箔を使用した新しい検電器を発明し報告した[56]のである。それは、器を備えた導体の箔検電器であり、ボルタの麦わら検電器とともに電位概念の形成につながる重要な進歩であった。

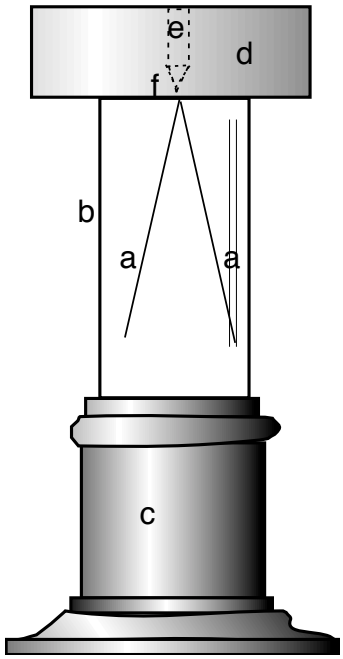


図2

右図２はその装置である。これはまず２枚の金箔（aa)からできている。この金箔はガラス容器ｂの中にある。この容器の足下cは木製かまたは金属製である。最上部には金属製のcap　dがあり平面になっていて、そこにサンプルを置いてその電気を測定する。このキャップはガラス筒より1インチほど直径が大きい。その縁は4分の3インチほどガラスに並行に垂れ下がっていて、雨などを切って十分絶縁できるようになっている。この内側にはもう一枚の縁があって円筒に被さるようにしてある。幅は外側の半分である。絹やベルベットを用いてガラスの円筒に密着するようにしてある。このキャップは密着してあるが何かあったら取り外しが出来るようになっている。キャップの中央にはスズの管eが下がっている。このスズの管には小さな釘(peg)　f　が付けられている。この釘は上半分は円筒で下の方はフラットになっている。このフラットの部分に2枚の金属箔がのりやガムやワニスで付けられている。この箔はガラスの中央に来るように設置された。・・・このようにすれば、風の影響で箔が動くようなことはなく精密に電気を調べることが出来る。・・・このキャップの上に様々な物を載せて電気を測定した。

（４）ヴォルタの麦藁検電器・・・定量的測定

ヴォルタは麦藁検電器を作成したが、それはそれまでの検電器を改良したものであった。

麦藁検電器は真鍮の棒、その頂点には小さな丸いボールが付けられているのであるが、

[56] Phil. Trans. R. Soc. Lond.-1787-Bennet-rstl.1787.

その棒の下部に、長い麦藁を付けた物である。その棒の下部と麦藁はガラスの器で覆われていて、周りの空気の流れから守っている。導体が電気を帯びていなければ麦藁は重力によって垂直に垂れ下がっている。この導体が電気を帯びた物体に接触すると電荷が導体に広がって、麦藁が反発しあって広がる。麦藁の広がりはガラスに貼られた二枚の目盛りによって測定される。下部の鉛の板はガラスに接触している。

ベンネットの金箔の検電器の方が感度は良かったが、ボルタの検電器は目盛りを付けることにより電気を量的に測定できることが利点であると主張した。

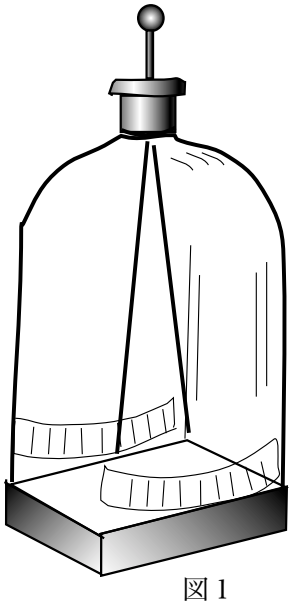


図1

「従来の検電器を改良して、細い針金の代わりに、長さほぼ2インチの非常に細い、乾燥した麦藁を用いる。麦藁は小さい環によって、非常に動きやすくつり下げねばならない。このことが非常に重要な点であって、この麦藁は無帯電状態では、その全長にわたって、互いに接触していなければならない。」（ダンネマン　第７巻　p.148）

Bennetとボルタの検電器はそれまでとは本質的に異なったものとなっていた。それは、作用を受ける部分は箔となっていて導体であった。さらに、その周りを導体の器が取り巻いているのである。このことによって、検電器で測定されるものは電気量ではなく電位であることになったのである。そのことはボルタの検電器の使い方に現れている。例えば、ボルタは、検電器にメモリを付けた。ボルタは、その当時バラバラであった各種の検電器の目盛りを統一したが、その方法は二つの検電器を並列につなぎ、箔の開き具合から検電器の性能を比較したのである。こうすると、このとき等しいのは検電器に帯電している電気量の大きさではなく、検電器の箔の電気の強さ（現在の電位）であった。こうして器を備えた導体の箔検電器は電気の強さつまり現在の電位の概念を導き出すことになり[57]、このことがさらに電気量の概念を明確にすることになり静電気現象の理解に関する次の重要な一歩となったのである。

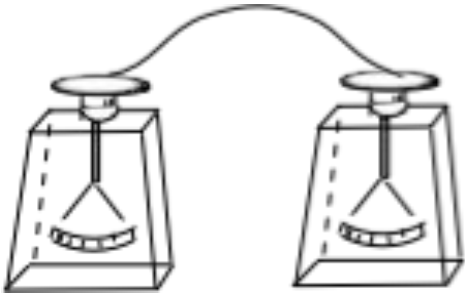


図2

２．電位概念の形成

（１）電位概念と電気量の関係を示す実験と考察

ボルタは電気量(quantity　of　electricity)と電気の強さ(intensity of electricity)（現在の電位）との区別を認識し、その関係について考察した。以下はボルタが行った実験とそ

[57] 導体をつないで等しくなるのは電位である。

の考察をである。

直径がひとしい二つの金属棒を用意する。一方の長さを１フィート他方の長さを5フィートとする。初めの１フィートの長さの金属棒を検電器で６０°になるように帯電する。この金属棒を5フィートの金属棒と接続して、検電器で測定すると検電器は10°を示す。つまり、電気の強さ（電位）は6分の１となったのである。この実験では電気量は逃げないから一定であり、一方接続により1フィートの長さの金属が6フィートの長さの金属となり、箔の開きは6分の1つまり、電気の強さ（電位）は6分の一となった。このとき、同じ電気量を蓄えるのに電位が小さくなる金属は電気容量が大きいと考える。今の場合、電気容量は6倍となったことを示している。彼は、フランクリンによれば電気は表面に帯電するのであるから、電気容量が大きくなるのは、体積ではなく表面積であることを注意している。前に述べたようにフランクリンは、電気を蓄えるには形によらないとして薄い板状の蓄電器（電気スクエア）を考案したりしていて電気が表面に帯電することを示してた。

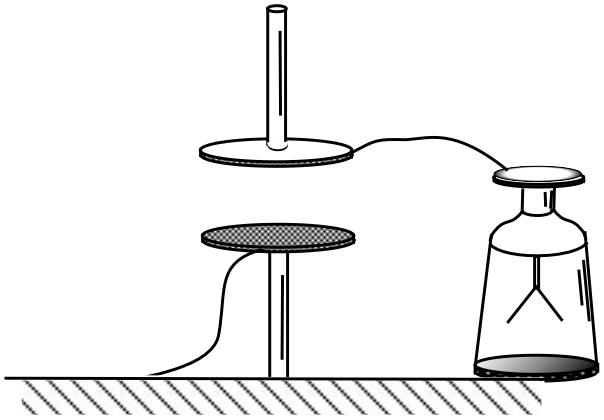


図１

次にヴォルタは重要な一歩を進める。つまり同じ導体でも環境によって電気容量が異なると言うのである。初めに導体を樹脂板の上に置く場合と完全に空中に置くのとのでは電気容量が異なることを観察する。次に近くにもう一つの金属を置くことによっても容量は変化することを確認する。このように二つの金属からなる場合をボルタはconjugate conductor と呼んだ。このことを確認するためにボルタは次のような実験を行った（図１）。すなわちまず電気盆の金属板を用意する。これにはガラスの取っ手が付けられていて、その取っ手は樹脂で絶縁されている。これに電気をためて検電器と接続する。このとき60°の角度で検電器の箔が開いた。この電気盆の金属板を接地した金属板に近づけると徐々に60°から50°、40°、30°などと小さくなっていくのが観測される。このとき電気盆の金属板の電気は絶縁されているから不変であり、一方電気の強さ（電位）は徐々に小さくなっていくことがわかる。電気の強さ（電位）は金属の電気容量の増加によって減少するのであるから、この場合共役（conjugate)された二つの金属は近づくことによって電気容量が増加し電気の強さ（電位）は減少したと考えることが出来る。電気量が変わらないことはもう一度金属を引き離すと検電器の開き方が初めと同じ開きの60°まで戻ることからもわかるとした。

ボルタはまた、二枚の金属板に同じ種類（例えば正）の電気を蓄えて、金属板を近づけると、金属板に繋いだ検電器の開き方から、電気の強さ（電位）が増大することを確認した。このときは、二枚の金属板は二つで一つの金属板の役割を果たし、金属が

小さくなったことに対応すると考えた。つまり金属を小さくすると電気容量が小さくなり電気の強さ（電位）が大きくなることと対応していると言うのである。

次に、二枚の金属板に違う電気（正と負）を蓄えさせて近づけると金属に接続した検電器の箔の開き方が小さくなる（電気の強さ（電位）が低くなる）ことを確認した。これは、一方を接地した前述の実験と同じで、電気容量が増大し、電気の強さ（電位）が低くなると説明できることを示した。

こうして、様々な現象から、電気の量と電気の強さ（電位）の違いを関係を明らかにすることができたのである。ボルタは次のようにまとめる。

３２．容易に次のことがわかる。電気容量が大きいところではどこでも、それに比例して電気の強さは弱くなっていることである。だから、強さは容量に反比例する。ここで、強さという言葉によって、次のことを意味することとする、すなわち、帯電している物体の電荷を物体のすべての部分に行き渡る能力であり、あるいは、引力は斥力の電気的性質の強さであり、何よりも、箔検電器の箔を上昇させる度合いである。

このようなボルタの研究は現代風に式でまとめるとつぎのようになる。まず、金属に電気量が蓄えられているときは、電気の強さ（電位）が存在し、その大きさは電気量に比例するとする。その時、状況によって変化するので、おなじ電気量でも電位が異なる。そこで、電気量をQ、電気の強さ（電位）をφと表し、電気容量をCで表現すれば

$$\phi = \frac{Q}{C}$$

となる。二枚の金属板によるときは金属の電気容量は金属板の間の距離に反比例することをボルタは結論した。さらに、表面積が大きいときは容量は大きいこと、樹脂などが近くにあるときも電気容量が増大することになる、となるだろう。そして、二枚の金属板によるconjugateされたもの（コンデンサー）の電気容量は面積Sと金属間の距離ｄに関係して

$$C = \varepsilon \frac{S}{d}$$

となる。εは比例定数である。

最後に電気の移動は電圧の大きい方から小さい方に向かうとして、次のような例を挙げている。例えば、発電機において第一導体からライデン瓶に移動させライデン瓶を充電させるような場合である。この場合、第一導体は電気を受けるが電気容量は小さい。一方、ライデン瓶は電気容量が大きく、電気を受け取っても電気の強さ（電位）は上がらず、一般に、第一導体からライデン瓶の方に電気が移動すると考えることが出来る。さらに、第一導体は電気量は少ししか持っていないので充電を続けるためには発電機から常に補充しなければならないのである。

このことに関連して、ボルタと同時代のキャベンディシュも、次のように述べている。

「電気を完全に自由に伝導させる任意の個数の物体同士を、導体で繋いだとしよう。電気流体はすべての物体で同じように圧縮されることは明らかである。もしそうでなければ電気流体は圧縮された物体から圧縮されていない物体に圧縮量がすべての物体で均等になるまで移動するからである。」[58]

つまり電気量はこの圧縮量（電気の強さ）の差によって力を受けて移動することがわかる。こうして、電位と電気量に働く力の間には

$$F \propto V' - V$$

の関係があることが推察される。この圧縮量の差と電気の移動に関する考察こそ後にグリーンの研究へとつながっていく。圧縮量はグリーンにおいてポテンシャルと命名された。（なお、キャベンディシュはオームの法則をほぼ発見していた。）

（2）電位概念の応用＝コンデンサトレの制作

コンデンサトレとは、少ない電気量でも箔を大きく開かせるように工夫した装置である。つまり電気量はそのままで、電気容量を小さくすることによって箔の開き方を大きくし、観察できるようにしたものである。

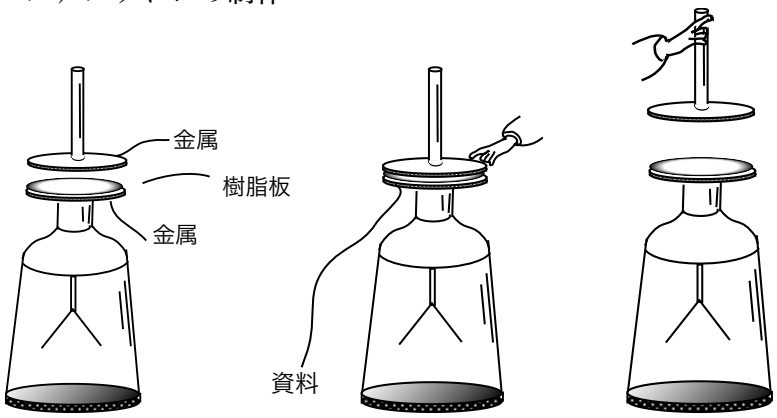


図 1

装置は、電気盆のようなもので、電気盆に使用された厚い樹脂円盤扁円塊のかわりに、非常に薄い樹脂板を載せたものに箔検電器を装着したものである。多くの場合検電器の金属板の上面に薄い樹脂を塗って使用する。

この装置の使用方法は、まず、測定をする電気を電気盆の下の金属と接続する。例えば、空中電気を測定するなら、空中につきだした金属棒と検電器の金属板（電気盆の下の金属板）を接続するのである。測定する金属を検電器から離して、その後、起電盆の上部の金属を静かに引き離せば、弱い電気であっても箔検電器は開き電気を測定することが出来る。（引き離すことによって電気容量が小さくなることが原因である。）

ボルタによれば、空中電気は単に検電器に接続するだけでは箔が開くことは見られないが、この方法であればかなり大きく開くことが確認され、正負が判断できると言う。このコンデンサトレは、空中電気だけでなく微少な電気を測定するのに威力を発揮した。特にその後接触電気と呼ばれる二枚の金属を接触させるだけで生じる起電力を測定するときにも重要な役割を果たした。

この接触電気の実験を後年トムソン（ケルビン卿）が再現実験を行った。トムソンの実験は

[58] 太田浩一著　「マックスウェルの渦　アインシュタインの時計」　p.18

丁寧な報告があるのでその実験装置を報告しておこう。[59]

彼によれば、二つの同じような金属板に、できるだけ均等な薄いワニスの膜を塗りつけ、そのうちの一つを直接検電器に接続させた。（右図１）

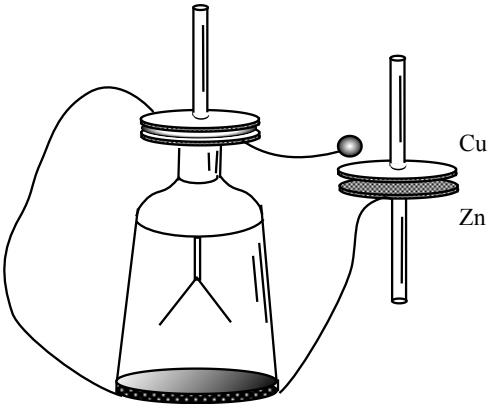


図１

右図のように銅と亜鉛の金属板を接触させ亜鉛は箔検電器の外側、つまり、検電器の上の金属板に接続されている。上の銅板を引き上げて、検電器の上部の盤に接触させ、銅板の電気を箔検電器に拡散させる、銅板と亜鉛盤は引き離されるので電圧が高くなり、一方検電器の上部は距離が非常に近いので電圧は低く、電気は銅板から検電器の方に移動する。亜鉛盤の方の電気を逃がし、電気が逃げた銅板をもう一度亜鉛盤に接触させると、接触電気が生じる。上記と同様に行えば、銅板から検電器に移動が起こる。100回ほど繰り返して、十分検電器に電気が蓄えられてから、箔検電器に載せてある円盤を取り除くと、検電器の電圧が上昇し、箔が開くことになる。

なお、ボルタは、この装置の使用において、樹脂板を完全に放電することが特に重要であり、そのためには太陽光線に当てることがかなり有効であることを発見し報告している。

３．逆二乗法則の発見　クーロンの業績

ボルタが検電器を用いて電気張力の概念を確立しコンデンサーの理論を構築しているころ、電気量の間に働く力を直接に測定するという偉大な業績がクーロンによって遂行された。

電気量の間に働く力が距離の二乗に反比例するという法則そのものは、プリーストリ(Joseph Priestley 1733-1804)によってすでに預言されていた。プリーストリは、フランクリンが金属の箱の中には電気力が存在しないことを実験で示したことから、ニュートンの法則との関連で、同種の電気の間には距離の2乗に反比例する力が働くと推論したのである。（古典物理学を作った人々ｐ153）(Preistry前掲書p732)。また、キャベンディシュは、3乗より少ない乗数の逆数の力が働いていることを、1771年にすでに発表していた[60]。次の年には、極めて高い精度で逆二乗の法則を実験から確認していたが発表はされなかった。スコットランドのジョンロビンソン（John　Robinson）はすでに逆二乗の法則を実験で直接確認した。ただ、何年も自分の結果を公表しなかった。こういうわけで、クーロンの有名な実験は、その当時の機運に乗って、クーロンの精密な実験技術により逆二乗の法則を確認するという当時の暗黙の期待に応えたものであると

[59] William Thomson Mathematical and Physical Papers Volume 6　p. 110

[60] An attempt to explain some of the Principal Phenomena of Electricity, by means of an Elastic Fluid Read Dec. 19, 1771 and Jan. 9, 1772.　キャベンディシュ論文

いうことができる[61]。

クーロンは、物体の摩擦に関する研究（摩擦におけるクーロンの法則　F=μN　）さらに、微妙な力の測定に適したねじれ秤に関する研究などを行っていた。摩擦に関する研究について言えば、フランスアカデミーは1781年懸賞募集を行い、クーロンの研究が受賞したのである[62]。アカデミーが懸賞募集をしたのは、フランス大革命の直前で文化経済産業軍事とも爛熟期にあり、そのなかで、諸機械の性能向上、耐久性向上のための障害の一つが摩擦であったからである。（摩擦の話　会田載宗）。この卓越した実験技術の持ち主に、逆二乗法則確認の実験の期待がかかっていたのである。

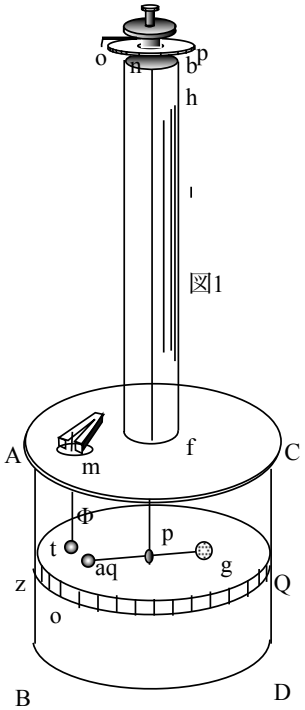


図1

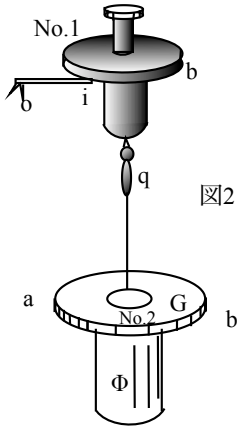
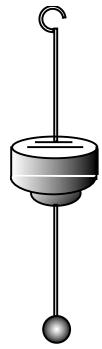


図2

図３



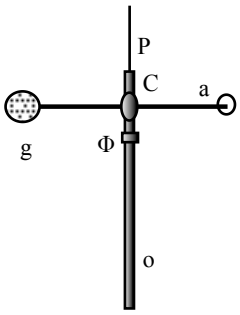


図４

（１）静電気力に関するクーロンの実験

フランスアカデミーが、船舶用羅針盤の最良の構造に対して賞金を懸けた。これを機会にクーロンは磁気学にそして電気学の分野に足を踏み入れた。1785年に彼が発明したねじり秤によって、電気力磁気力の精密な実験が行われた。(ダンネマン第６巻p.60）

クーロンの実験は1785年に行われ1788年に公表された。詳しくなるが、実験がどのように行われたのかを示すためにクーロンの論文を紹介しよう。実験装置は右図のとおりである[63]。

ガラス円筒ABCDは直径が12インチ、高さが12インチ、その上に直径13インチのガラスの板がつけてある。それでガラスの容器全体を覆っている。この板には二つの穴があけてあり、そのうちの一つは中央にあり図の f で示してある。その上には高さが24インチのガラス管を付けた。接着剤は、ガラス器具に用いる普通の物を用いた。

その上端ｂには、ねじりマイクロメーターを付けた。図２に詳細してある。上部№１には、ミルｂ、メモリioそしてクランプqをつけた。これは部品№2の穴Gにフィットする

[61] 摩擦の話　会田範宗　岩波新書791　p.50

[62] ダンネマン　第６巻　p.60

[63] Source Book in Physics Magie p.408 Coulomb

ようにした。この№2には360度の目盛りを振った円盤abと銅の筒φから成り立っている。その筒は部品№３のHにフィットするようにされている。部品３は前頁図1の円柱fhまたはガラス管の上端部の内部に封印された。部品№1のクランプｑは、固形のクレヨンホルダーの端のような形をしているがリングｑによって閉じられている。このホルダーはその端に非常に細い銀線を噛んでいて、その銀線の他方の端は点Pで銅または鉄の円筒形Poのクランプで咥えられている。その上端Pは分かれていて部品φがスライドすることによって閉じるようになっている。この小さな円筒形はC点で広くなっていて、その中を穴が通っている。そこに図１のように、針agが挿入されている。この円筒形の重さは銀線が切れないでしっかり伸びるような適切な大きさとなっている。針は前頁図１のようにagにおいて水平に、閉じた大きな円筒容器のほぼ中央にある。針はスパニッシュワックスに浸けた絹の棒で、ｑからaまで１８ライン（line =1/40 inch）の長さの円筒形であった。この針の先には小さな木髄の直径が2から3インチの球が着けてある。ｇ点にはテレピン油に濡らした紙片を縦に付けた。これは、水平にする重りの役割と、a点のボールの振動を抑える役割をしている。

カバーACには2番目の穴mが空いている。この2番目の穴には小さな円筒形Aφtが差し込まれていて、その下部φｔ部分はワックスシェラックでできている。ｔの部分には別の木髄のボールでできている。この器の周りには針の高さのところに円周ｚQが360度に分けて目盛りが振られている。最も簡単のために360度に目盛りを打った紙のテープを針の高さのところに貼り付けた。

この装置を使用するために、穴mが円周ｚoQの最初の目盛りになるようにセットした。マイクロメーターの目盛りoiをこのマイクロメーターの最初のところにくるようにした。このマイクロメーターの縦の線ｆｂを針agが円周zoQのはじめと一致するようにした。穴mを通して別のボールｔを円周zoQの最初の目盛りのところに置いた。
実験は次のように行う。

前頁図４の道具を用いて、穴mからボールｔに電気を与えた。ｔはボールaと接触していた。ピンは二つのボールを同じ電気に帯電させた。その結果お互いに反発した。マイクロメーターのインデックスを回してzoQの目盛りを測定した。一方マイクロメーターのねじりpnoからねじりの角度を測定した。

この実験装置を用いた実験結果は次の通りである。
実験１　ボールaは36度移動した。（ねじりは36度、距離も36度である）
実験２　下げ糸のマイクロメーターのねじりは126度、二つのボールの差は１８度であった。（したがって、ねじりは140度、距離は　18度）
実験３マイクロメータ　567度　差は　8度　つまり、ねじり距離は575度、距離は８度）

実験２は実験１に対して、距離が半分、（18/36）　力は140/18＝3.9倍

実験３は実験１に対して、距離は（8/36＝0.22）約4分の一　力は　275/36＝15.9倍
逆二乗の法則は成り立っているといえる。

次に、引力について実験を行っている。引力を測定するには、ねじりばかりを用いるこの方法では不都合である。まず反対の電気量を付加する困難があり、付加したとしても引力によって二つの球が接触しないようにしなければならないということが困難であることがその原因である。そこでクーロンは次のような実験を工夫した。

実験装置は右図のようなものである。絹糸で一方は金箔の軽い紙を他方はワックスを付加したバランスを下げ、金属球に蓄えられた電荷で金箔に蓄えられた電荷を引く力を測定しようとするものである。

まず、バランスを下げる絹糸は繭から取り出したもので、80グレインの重さに耐えるものだが、非常にねじりやすくその復元力は無視できることに注意する。ちなみに、もし、3インチの絹糸で真空中で重さと直径が知られている円盤を水平に下げたとき、ねじれの力を計算してみよう。1784年版のアカデミーに載っているねじりの力に関する論文の中の次の公式

$$M = \mu \frac{D^4}{l} \theta$$

によって計算することができる。その結果は、腕の長さが７から８ライン（1ライン＝１／４０インチ）棒を回転軸の周りに１回転させるときの力は、1グレインの60分の一より大きくはない。さらに、もし、絹糸の長さが、この倍になれば、力は120分の一グレインとなる。そこで、この糸で水平にさげ、針が静止し糸が全体としてねじれていないとき、ある力でねじるときには、角度が20度から30度くらいであるとすれば、振動の周期に何の影響も与えず、振動を起こす力は一グレインの１００分の１以下である。こうして絹糸のねじれは、振動周期に影響を与えず、振動周期は電気による引力のみが関係し引力を周期から計算することが出来るのである。

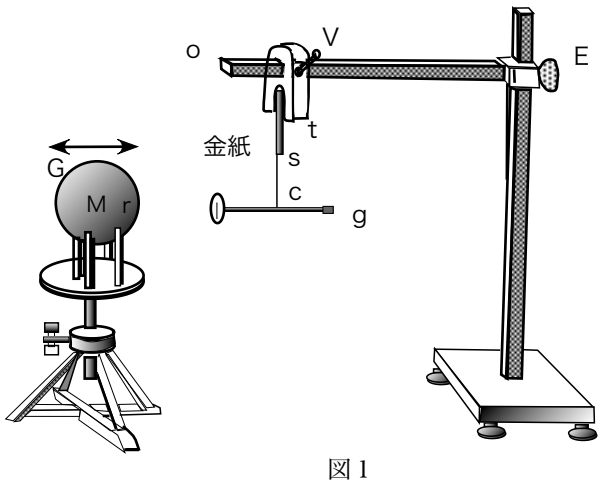


図１

では、実験はどのように行われたか。まず、実験装置は次の通りである。図２において、針lgは長さが７から絹の糸をシェラックで固めたものであり、scは一本の繭からとられた絹糸で長さは７から８インチある。端lには針に垂直に直径が８～１０ライン（ライン＝１/４０インチ）の小さな円盤が垂直に付けられている。その円盤は、金箔の紙から切り取ったもので非常に軽い。絹の糸は小さな棒stの最下点sにおいて結びつけられている。棒stは、炉で乾燥され、シュラックあるいはスパニッシュワックスで塗られている。この棒はクランプによってｔで固定されていて、このクランプは棒ｏＥ上

をスライドでき望む場所においてねじＶで固定できる。

Ｇは銅かまたは型紙をスズで覆った球形の導体である。これはスパニッシュワックスでコーティングした4本の硝子で垂直に支えられている。そして、端は、絶縁を完全にするために長さ4インチほどのスパニッシュワックスの棒になっている。四つの棒の下の部分は図に示したような、少し動くテーブルで出来ている。その高さは実験に適するように調整する。棒Ｅｏもまた、ねじＥで望みのところで固定できるようになっている。すべて準備が出来たところで球Ｇをその中心Ｍとｒを結ぶ線上に数インチ離れたところに円盤ｌがくるように設置する。ライデン瓶でｌを帯電させ静電誘導で反対に帯電した導体を用いてＧを帯電させる。この結果お互いは引き合うこととなる。

大きさは金属球Ｇは１フット、円盤ｌは７ライン、シュラック針ｌｇは直径がlimeである。円盤の中心から球の表面まで、棒ｏＥに０，３，６，９，１２inchの目盛りを付けた。球はプラスに円盤はマイナスに帯電させた。

実験結果は次の通りである。

実験№	プレートから球の中心まで	１５回振動した時間
実験１	９inch	20”
実験２	18inch	41”
実験３	24inch	60”

理論的には、球の表面の電荷は球の中心に集まったと考えて良い。力と周期の関係は

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{f}}$$

つまり　$f \propto \frac{1}{T^2}$ 一方、予想は $f \propto \frac{1}{r^2}$　であるから　$T \propto r$　となるはずである。上の表に理論値を書き加えれば次の表の通りである。

	距離	周期・実験値	周期・理論値
実験１	９inch	20”	20
実験２	18inch	41”	20×２＝40
実験３	24inch	60”	20×24/9=53.3

実験３がはずれている。しかし、実は、少量の電気量は時間とともに失われていくので、それを測定すると、１分間に４０分の一づつ少なくなり、実験２のときはあまり時間はたっていなかったが実験３の時は４分ほど時間がかかっていたので電気量は１０分の１ほど失われてしまったと考えるべきである。したがって力は１０分の９となったと考えられるから、それを考慮に入れると

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{f\times\frac{9}{10}}} = \sqrt{\frac{10}{9}}\times 2\pi\sqrt{\frac{I}{f}} = \sqrt{\frac{10}{9}}\times 53.3 = 56.2$$

となり、誤差は１０分の一となる。
（クーロンの論文では誤差を正確に考慮して理論値は５７秒であると述べている。）
クーロンほどの実験家でも、このくらいの誤差は生じるほどこの実験は難しいといわなければならない。

次にクーロンは、磁石による磁気のクーロンの法則を実験で確認している。この実験では、細長い棒磁石を用いて磁石の極を確認するところから始めている。磁石におけるクーロンの実験の成功は、細長い線状の磁石の磁極の位置を明確にしたことにある。クーロンによれば、磁石の極は棒の端から10（line）のところにあったと述べている。
（棒の磁化が完全に一様であれば、磁極は棒の端にあるはずであるが、棒の磁化は少し一様からはずれるのが普通であるから、実験で確認しなければならなかったのである。このことの理論は、ポアソンやグリーンによって示されるが、そのことについては後述する。）

４．静電気学についての基本実験―マックスウェルの説明[64]

静電気学の発展は、クーロンの逆二乗の法則の発見とその後のポテンシャル論によって、本質的な発展を遂げる。その説明に入る前に静電気学の基本的な実験についてマックスウェルがその教科書で述べているので、ここで、このことについて述べておきたい。

静電気学についてマックスウェルは、彼の教科書「電磁気学論」において、静電気学を構築するための７つの基本的実験事実をあげている。マックスウェルの掲げた実験事実は明白なものではあるが、このようなスマートなまとめができるようになるためには、長い、紆余曲折のある困難な道のりをたどらなければならなかった。それは、電気現象がきわめて複雑で、かつ微妙な内容を持っているからである。

〔実験１〕【2種類の電気】

一片のガラスと、一片の樹脂を用意する。これらはそれぞれ電気的な性質を示す。これらをこすり合わせて、摩擦面を密着させて一緒にしておく。このときは、それらは電気的な性質を示さない。それらを引き離してみよう。それらは今やお互いに引き合う。
２つ目のガラスを用意し、２つ目の樹脂と摩擦させるとする。そし

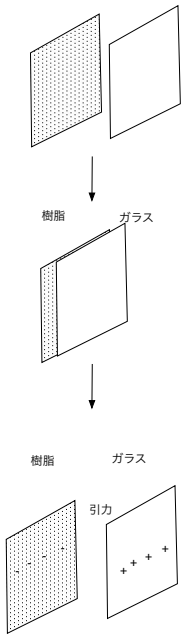


図１

[64] Treatise electricity and Magnetism Maxwell

てそれらを以前のガラスや樹脂のそばにつり下げるとする。そのとき、次のことが観測される。

（1） これらが二つともガラスの時は反発し合う。

（2） ガラスと樹脂は互いに引き合う。

（3） 二つとも樹脂の時は、反発し合う。

このことから同種（ガラス同士、樹脂同士）の電気は反発し合い、異種の電気は引き合うことが分かる。このようにしてガラスに帯電した電気をガラス電気、樹脂に帯電した電気を樹脂電気と呼び、また、ガラス電気を正の電気、樹脂電気を負の電気と呼ぶ。このとき正と負の言葉は、数直線のどちらを正とするかと同様に、便宜的に決めたものである。

ただし、場合によっては、電気を帯びていない物質が電気を帯びている物質に引かれることがある。それは電気が誘導されるからである。（静電誘導と呼ぶ)

〔実験２〕【金属容器内に電荷を於けば金属の表面はその電荷を帯びる、静電誘導】

右図１のように金属製の中空の器が白い絹の糸で下げられているとし、そして同じような糸でその容器のふたをつり下げ、容器に触れることなくふたを開けたり閉めたりすることができるとする。

ガラス片と樹脂片を同じように下げて前のように電気を帯びさせた。

容器は初めは電気を帯びていいない。ガラスの片はその中に糸によって容器に触れないように下げられている。ふたを閉めると容器の外側はガラスの電気によって帯電させられていることが分かるであろう。このとき容器の外側の電気量はガラス電気（正の電気）を帯びていることがわかるし、ガラスが容器の内部のどの部分にあってもガラス内部に下げられたガラス電気に等しいことが分かるであろう。

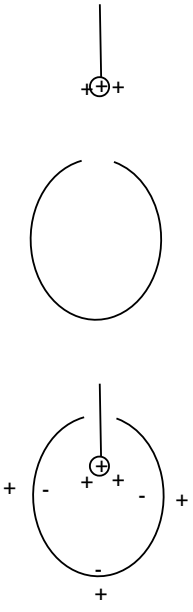


図１

ガラスを容器に触れずに取り出せばガラスの電気は依然と変わらず容器の電気は消え失せているであろう。この現象は静電誘導と呼ばれる。同様な現象は器の外に電気を帯びたガラスを置いたときにも見られ、このときは近くには樹脂電気が遠くにはガラス電気が生じることがわかる。

〔実験３〕【電荷は金属線を移動する。電気伝導】

器の中にガラスを入れたときは、外側はガラス電気となり、内側は樹脂電気となる。この状態で、２つ目の金属を用意し、絹糸でそれの近くに吊し、さらに金属線を同様に吊し、金属容器と２番目の金属を接続する。2番目の金属帯はガラス電気に帯電し、容器の電気量は消滅する。電気状態が容器から金属球へ金属線を通して移動したことが分かる。この線を電気伝導体と呼ぶ。金属球は伝導によって帯電したと呼ぶ。

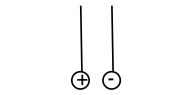
〔実験４〕【導体と絶縁体の区別。金属は導体である】

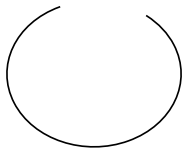
ガラス棒や樹脂の棒、絹糸などを金属線に代わりに用いると電気は移動しない。それ故これらは不導体と呼ぶ。不導体は、電気実験においては電気を帯びている物体を電気を失わないように支えるのに用いる。これらは絶縁体と呼ぶ。

金属は良導体である。空気、ガラス、樹脂、グッタペルカ、パラフィンなどは良い絶縁体である。しかし後でわかるようにすべての物体は電気伝導に対して抵抗の役割を果たす。そしてすべての物体は何らかに電気を通す。したがってそれは程度の差である。このテーマは電気の運動を扱うときに考察されなければならない。現在のところでは、良導体と良い絶縁体の二つに分けることとしよう。

実験２では金属容器内に不導体の空気によって絶縁されたいるはずであるが、電気を帯び物体が金属に電気を生じさせている。このように伝導ではなしに媒質が電気的効果を伝えるとき、その媒質をファラデイによって誘電体(Dielectric　medium)と呼ばれた。

実験３においては電気容器が導線を通して第2金属に電気を生じさせた。金属線を取り外して内部のガラス片を取り出し、ガラス片は十分離した。このとき2番目の物体はガラス電気を示した。しかし容器はガラスを取り去ったときは、樹脂電気を持っている。この金属球と金属の容器を導線で接触させるとすべての電気は消えるので、金属球と金属容器には反対の電気が同じだけ帯電していたことが分かる。





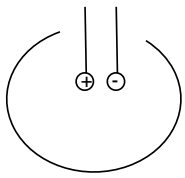


図１

〔実験５〕【プラスとマイナスの電気を金属容器内におくと金属表面の電気はその差となる。電気効果の代数和】

実験２において、樹脂と摩擦したガラスを絶縁した金属容器内につり下げる。外側の電気の様子はつり下げられたガラスの位置には関係しない。さて、ガラスで摩擦した樹脂を同じ容器に入れて、接触しないでおくと、容器の外側には電気が生じない。このことから、ガラス電気と樹脂電気は大きさが同じで反対の電気であることが分かる。何らかの方法で帯電させたある数の物体を容器に入れる。このとき、容器の外側の電気は、電気量の代数和で示されることが分かる。ただし樹脂電気は負であるとして計算するのである。こうして、幾つかの物体の電気効果の代数和を（つまり電気量の代数和を）電気量に影響を与えることなく求める実際的方法を得ることができる。

〔実験６〕【金属容器を内部の電荷と同じ電荷に帯電させる方法】

２つ目の絶縁された金属容器を用意しそれをＢとする。帯電したガラスを最初の容器Ａに入れた。容器Ｂには帯電した樹脂を入れておく。二つの容器を実験３のように金属線でつなぐとすべての電気は消滅する。

次に金属線を取り払い電気を帯びたガラス片をＡより取り出し、同様に電気を帯び

た樹脂をＢより取り出す。するとＡは樹脂電気に、Ｂはガラス電気に帯電していることが分かる。もしもガラスと容器Ａをより大きな絶縁された容器Ｃに入れると、Ｃの外側には電気は示されない。このことは容器Ａの電気とガラスの電気が同じ大きさで反対であることを示している。Ｂと樹脂の場合も同様である。

こうして電気状態を変えることなく電気を帯びた物体の電気量と正確に同じ大きさで反対の電気量に器を帯電させることができる。このようにしてある量の電気量を単位として幾つかの容器をそれと同じ大きさの電気に帯電させることが出来る。

〔実験７〕【単位の電気の任意の倍数の電気を得る】

容器Ｂを正の電気に帯電させる。それをまず単位の電気量としよう。それをより大きな容器Ｃの中に接触させることなく入れるとする。Ｃの外側には正の電気が生じる。さてＢをＣに接触させたとしよう。外部には電気は見られなくなる。今ＢをＣに触れずに取り去ったとする。そして十分遠くへ持ち去ったとするならばＢは完全に電気を持たず、Ｃは単位の正の電気量だけ持っていることが分かる。こうしてＢからＣへ電気を移動させる方法を得る。

今Ｃを帯電させておき、Ｂを再チャージさせＣに内側から接触させ取り出すと、Ｂは電気を失いＣは２倍の電気を得る。この手続きを繰り返せばより高い帯電を得る。この実験によって単位の電気の任意の倍数の電気を得ることができる。電気学を数学的に扱うときこの実験が理論の結果の正確さをあたえる。

Ⅴ　静電気学の本質的理論・ポテンシャル論

静電気学と静磁気学について、まず様々な現象を発見し整理することから研究は始まった。そのような段階はギルバートによって行われその後幾人かの研究者によって補足された。静電気学における現象論的段階と言うべきものであろう。研究はさらに進みこの現象を担う実体の発見へとつながった。それはグレイが電気は伝導することを研究したことに始まる。次にライデン瓶に電気が蓄えれることフランクリンによってその電気が保存されることが明らかにされ、電気現象を担う実体としての電荷の存在が確立された。これは当時は「電気大気」あるいは「電気流体」と呼ばれたが内実は現在の電荷と変わるところはない。ただ電気大気と呼ぶときは電気粒子が運動して気体のように振る舞っているイメージを保持していた。

その後ボルタの検電器とそれによって導入された電気の強さ（電位）の概念によって、コンデンサー理論が完成されたが、これは電荷がどのように振る舞うかという新しい研究への大きな一歩であった。一方電気粒子の間にはどのような力が働くのか、もっと言えば万有引力と同じようにその力は距離の逆二乗の法則によるのではないかと言うことが予測され、そのことがクーロンの精密な実験などによって直接的に確かめられた。このように静電気学の研究は電荷という実体がどのように相互作用し、運動し、どのように分布するかという研究の新しい段階に入った。

１．ボルタの電位とクーロンの法則

ボルタは電気張力（電位）の概念を導入した。金属（導体）の内部においては電気張力は一定であり、その電気張力と電気量さらに金属の電気容量は

$$\phi = \frac{Q}{C}$$　V：電位　　Q:電荷（電気大気）　　C:金属の電気容量

の関係にあると言うことを実験的に示した。また彼は電荷は電位（電気張力）の高い方から電位（電気張力）の低い方へ力を受け移動すると考えた。つまり電位の差が力に比例するというのである。このボルタの考えと同様の考えを当時のキャベンディシュが持っていた。このボルタの理論とクーロンの逆二乗の法則とは一見相容れないように思えた。なぜならボルタの概念は電気大気の圧力が力の原因であるとし、逆二条の法則を与えるような構造を考えることが難しかったのである。

一方静電気学の発展とともに力学もまた大きな発展を遂げていた。ラグランジュは任意の形体の物体が任意の場所にある一点におよぼす引力にたいする一般式を求めた。彼は個々の質点からなる系のおよぼす引力は、一つの関数の偏微分係数として示される成分に分解できることを示した[65]。つまり力はある関数の差で与えられるというのである。しかもその関数を$\frac{1}{r}$に比例するものを取ればそれは万有引力の形を与えるというのである。確かに、$\frac{1}{r}$をｒで微分すれば$-\frac{1}{r^2}$が得られるから十分予想されることではあった。

物理学生への註

例えば、力をある関数の偏微分で表現されるとする[66]。その関数をφとすれば、力のｘ成分は

$F_x = -\frac{\partial \phi}{\partial x}$で与えられることである。このφを$\phi = G\frac{Mm}{r}$とすれば、

$$F_x = -\frac{\partial}{\partial x}\phi = -\frac{\partial}{\partial x}G\frac{Mm}{r} = G\frac{Mm(x-x')}{r^3} = G\frac{Mm}{r^2}\cos\theta$$

となり、力の成分は関数の微分で表されることがわかる。

ラグランジュの導入した関数の最大の利点は計算をするにおいてこの関数φは、二つ以上の物体からの力が働く場合はそれぞれの関数の和を用いればよいことがわかったことである。この関数φを電気張力とみなせばボルタやキャベンディシュの考えと一致する。この関数はラプラスによってラプラスの方程式から必然的に導かれることが示された。

---

65 ダンネマン第８巻p.127–128

66 偏微分とは、いくつかの変数がある内の一つに注目し他の変数は定数であるように扱うことである。（高校生へ）

物理学生への註

ラプラスの方程式とは次のようなものである。

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}\phi+\frac{\partial^2}{\partial y^2}\phi+\frac{\partial^2}{\partial z^2}\phi=0$$

$\phi=\int G\frac{Mm}{r}dv$を代入すればこの式を満足することは容易にしめすことができる。

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}\phi+\frac{\partial^2}{\partial y^2}\phi+\frac{\partial^2}{\partial z^2}\phi=\frac{\partial^2}{\partial x^2}\int G\frac{Mm}{r}dv+\frac{\partial^2}{\partial y^2}\int G\frac{Mm}{r}dv+\frac{\partial^2}{\partial z^2}\int G\frac{Mm}{r}dv=0$$

また、逆に、ラプラスの方程式を極座標に変換して$\phi=G\frac{Mm}{r}$を導いている。

$$x=r\sin\theta\cos\varphi \qquad y=r\sin\theta\sin\varphi \qquad z=r\cos\theta$$

$$0=\frac{1}{r}\left\{\frac{\partial^2\phi}{\partial\theta^2}+\frac{\cos\theta}{\sin\theta}\frac{\partial\phi}{\partial\theta}\right\}+\frac{1}{\sin^2\theta}\frac{\partial^2\phi}{\partial\varphi^2}+r\frac{\partial^2 r\phi}{\partial^2 r}$$

ϕが角度の関係しなければ

$$r\frac{\partial^2 rV}{\partial^2 r}=0$$

$$V=A+\frac{B}{r}$$

ラプラスはクーロンと親交もあった。さらにラプラスはボルタの理学報告のコンデンサトレについての論文を読みボルタを王立科学アカデミー推薦している。おそらく電気張力とラプラスの方程式との関連について考察したのではないかと想像されるのである。

４．ポアソンの方程式

ラグランジュやラプラースの議論は万有引力についてであったがこれを電気力・磁気力に応用したのがポアッソンであった。ポアソンはクーロンの逆二乗の法則から出発して、導体内部で電荷が力を受けないことなどを利用して導体表面の電気分布を計算した。さらに電荷（電気流体）が連続的に分布するときはラプラスの方程式ではなくポアソンの方程式にならなければならないことを示した。簡単に言えば連続的に質量や電荷が分布するときはそこでは力は$\frac{1}{r^2}$にならないのである。このとき関数φは

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}\phi+\frac{\partial^2}{\partial x^2}\phi+\frac{\partial^2}{\partial x^2}\phi=-\rho$$

を満足しなければならない。この式をポアソンの方程式と呼ぶ。ラプラスの方程式は考えている領域の内部に電荷が存在しないとき（外部には存在するが）に成り立つ式で、考えている領域の内部に電荷が存在し微少部分をとるとき、つまり電荷密度が存在するときはポアソンの方程式が成り立つことになる。後のグリーンの業績はまさに

このポアッソンの方程式を解くことにあった。

1824年　ポアソンは「磁気の理論に関する論文」を発表した。それは磁石が小さな二種の磁気からなる分子磁石の集まりと考えて考察された。まず、1個の分子磁石による磁位は次のようにして求まる。いま、磁気量を＋m、－mとして、その中心からの距離 r の点Pにおける磁位をφとする。＋m、－m、からの距離をそれぞれ r_1， r_2 とする。このとき点Pにおける磁位（電位に対応する概念）は

$$\phi = k\frac{m}{r_1} - k\frac{m}{r_2}$$

となる。Poissonはこれを積分して、

１．一様に磁化している場合は、磁石の極は両端であること。

２．磁荷が一様でないときは、磁石の極は両端からずれること

を示した。

物理学生への註

$\phi = k\frac{m}{r_1} - k\frac{m}{r_2}$　において、分子磁石の中心から点P迄引いた線 r と、－mから＋mまで引いた線 d の間の角度をθとすると、磁石は十分に小さく距離 r は長いとき、

$$r_1 = r_2 + d\cos\theta$$

となる。これを上の式に代入して近似式を用いれば、

$$\phi = k\frac{md}{r^2}\cos\theta = md\left(n_{dx}k\frac{\partial}{\partial x}\frac{1}{r} + n_{dy}k\frac{\partial}{\partial y}\frac{1}{r} + n_{dz}k\frac{\partial}{\partial z}\frac{1}{r}\right) = \vec{P}\bullet grad\phi$$

$$\vec{P} = \left(md_x, md_y, md_z\right) \qquad \phi = \frac{k}{r}$$

これを積分すれば、

$$V = \iiint \vec{P}\cdot gard\left(k\frac{1}{r}\right)dv = \iint k\frac{\vec{P}}{r}\cdot dS - \iiint \frac{k}{r}div\vec{P}dv$$

ここで部分積分を用いた。こうして、磁位は、表面の磁化と内部の磁化の発散の積分で与えられることとなる。特に

$$div\vec{P} = 0$$

のときは、表面の磁荷のみが磁石の磁位として役割を果たす。クーロンの実験のように細長い針金の磁石のような場合は磁化が一定であれば針金の両端に磁化が集まったようになり磁極は針金の端であることになるが、磁化が一定でなければ針金の端から少しずれたところ磁極が現れることとなる。（「エーテルと電気の歴史」p.60-62）

５．グリーンによるポテンシャル論の完成

１８２８年　グリーンは論文「電気磁気理論に対する数学解析応用に関する試論」[67]を発表した。グリーンはその論文の序文の中で

---

[67] ‘Mathematical Papers of the Late’　Green

「自然界に存在するほとんどすべての引力および斥力というのは次のようなものである。つまり、考察しようとする任意の点ｐ（ｘ ｙ ｚ）にすべての物体Ｓから働く力によって生じる効果（つまり合力）は、点ｐの位置の関数φを座標（ｘ ｙ ｚ）で偏微分することによって表されることはよく知られている。・・・・この関数を簡単のためにポテンシャル関数と呼ぶことにする。」

と呼び、史上初めてポテンシャルという言葉を導入した。このポテンシャルはもちろんボルタ、キャベンディッシュによって導入された「電気の強さ」＝電位のことである。

（１）グリーンはまずポアッソンが行ったと同様な仕方でポアソンの方程式を導き出した。（上記参照）。
（２）次に、金属内においては電位が一定であることを説明した。
（３）ライデン瓶に関するフランクリンの実験を説明した。

物理学生への註
電位をＶとすると、電位と力の関係

$$F_x = -q\frac{\partial V}{\partial x} \qquad F_y = -q\frac{\partial V}{\partial y} \qquad F_z = -q\frac{\partial V}{\partial z}$$

があり、さらに、導体内では平衡状態であるから、力は働かない。したがって、

$$F_x = -q\frac{\partial V}{\partial x} = 0 \qquad F_y = -q\frac{\partial V}{\partial y} = 0 \qquad F_z = -q\frac{\partial V}{\partial z} = 0$$

である。したがって、

$$dV = \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial z} = 0$$

これを積分して、

$$V = const$$

つまり導体内では電位は一定であることが確認されたのである。こうして、ボルタ以来の、電位概念が数式的に表現されたわけである。

さらに、グリーンは表面電荷と表面付近の電位の変化の間の関係式を次のように求め次の結論を得た。

$$\sigma = \frac{\partial \varphi}{\partial n} + \frac{\partial \varphi'}{\partial n'}$$

これはガウスの法則にほかならない。
グリーンは、この結果を用いて、ライデン瓶に蓄えられる電荷についての議論を展開している。グリーンの導体系における電位分布に関する理論は、後年MaxwellのTreatise において完成された形で叙述されることになる。なお、グリーンの論文は冒頭に有名なグリーンの公式を提示して、この公式を用いてポアッソンの方程式が解けることを示している。グリーンの公式は次のとおりである。

$$\int(\varphi\nabla^2\chi - \chi\nabla^2\varphi)dv' = \int\left(\varphi\frac{\partial}{\partial n}\chi - \chi\frac{\partial}{\partial n}\varphi\right)dS'$$

なおグリーンはライデン瓶についての様々な性質を導き出している。

ガウスもまた、ポアッソンの方程式を積分して、ガウスの法則を見いだしている。ガウス

の法則は

力×一周の表面積＝一定

と与えられるが、この内容はファラデーの電気力線の概念と一致するものであった。

物理学生への註

ポアソンの方程式を積分すると

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}\phi+\frac{\partial^2}{\partial x^2}\phi+\frac{\partial^2}{\partial x^2}\phi=-\rho$$

$$\iiint\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}\phi+\frac{\partial^2}{\partial x^2}\phi+\frac{\partial^2}{\partial x^2}\phi\right)dv=-\iiint\rho dv$$

である。この左辺の体積積分を面積積分に変えれば、

$$\iiint\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}\phi+\frac{\partial^2}{\partial x^2}\phi+\frac{\partial^2}{\partial x^2}\phi\right)dv=\iint\frac{\partial\phi}{\partial x}dy\,dz+\iint\frac{\partial\phi}{\partial y}dz\,dx+\iint\frac{\partial\phi}{\partial z}dx\,dy$$

であるから、

$$\iint\frac{\partial\phi}{\partial x}dy\,dz+\iint\frac{\partial\phi}{\partial y}dz\,dx+\iint\frac{\partial\phi}{\partial z}dx\,dy=Q$$

これを現代流に書けば

$$\iint\mathbf{E}\cdot d\mathbf{S}=Q$$

である。これがガウスの法則である。（正確にはこれを微分の形で示したもの）。Eは電場でありこれはベクトル表記であるが、このような表現は後年のMaxwellまで待たなければならなかった。

こうしてそれまでの様々な静電気現象はポテンシャル論によって余すところなく説明された。一方で、このポテンシャル論では説明しきれない新しい現象＝電流がボルタの電池の発明によって登場するのである。

第2章　動電気（電流）

静電気現象の理解は、結局正の電気と負の電気2種類の電気の間に距離の自乗に逆比例するクーロンの力が働いて様々な現象を引き起こすことに帰着した。さらにクーロン力は空間の一点の座標を変数とするポテンシャル（電気の場合は電位）と呼ばれる関数の座標についての微分で表現され、静電気現象はガウスの法則と同一のポアソンの方程式を解くことになった。ポアソンの方程式はグリーンの方法で様々な条件の下で解くことができ、ここに静電気学は確立した。

この静電気学の領域に入らない電気現象が、ガルバーニの発見に端を発した。

I　電流を取り出す

１．ガルバーニ電気の発見

二つの金属の単なる接触が後に電気として認められる作用を発生することは、すでに述べたように1750年にズルツァーによって発見されていた。それは亜鉛と銅の二枚の金属板で舌を挟んだとき特有の感覚が生じたというのであった（第１章　p 36）。イタリアの科学者はこの現象と本質的に同じ現象を異なった形でセンショーショナルに発見し、回路を閉じることによって生じる新しい電気現象を発見した。ただ、回路を閉じることによって生じる現象としてはライデン瓶の放電現象があることを思い出しておこう。

1780年、ガルバーニは下記のような一連の観察と考察を行った。この観察と考察は電気生理学と電流に関する研究の二つの分野に道を開いた。彼は皮を剥ぎ取ったばかりの蛙の足がその付近で放電を起こす毎に痙攣を起こすことを観察した[68]。一匹の蛙を解剖して、それを起電機の置いてあるテーブルの上に置いた。ところが彼の助手の一人がメスの先で蛙の股神経に偶然にごく軽く触れたときに、間接の全筋肉はまるで強烈な痙攣に襲われたかのように収縮した。これは起電機の極から火花を飛ばしているときに起こった。（この現象は起電機の帯電のために、足に起こった電気配分（静電誘導）が放電の瞬間に変化を受けてそれを神経が感じたと言うことであるろう）。

ガルバーニはこの発見をきっかけとして様々な実験と考察を行い、1791年に「筋肉運動に対する電気の作用についての論文」[69,70]を発表し、それまでの研究の成果をまとめた。この論文は第１章「筋肉運動に対する人工電気の作用について」第２章「筋肉運動に対する空中電気の作用について」第３章「筋肉運動に対する動物電気の作用について」第４章「若干の憶測と結論」となっている。第１章は上記１７８０年の発見

---

68 ダンネマンの大自然科学史　7巻ｐ１３８

69 Source Book in Physics Magie p.408　p.420- Galvani

70 Abhandlung die Krafte der electri Galvani.pdf　ガルバーニ論文　Ostwald's Klassiker　Nr.52

についてである。第２章は空中電気の影響を調べたものである。皮を剥いだ蛙、並びに温血動物の足を雷雨の日に神経でもってぶら下げて、鉄の針金でその足と地面を連結した。稲妻の光が目を射た瞬間に筋肉は激しい痙攣を示した。第３章は最も重要であるので引用しておこう。

「嵐の時を通じて大気電気の力の研究の後、穏やかな日に於いても電気的な力について研究したいと切に感じた。それゆえつぎのことを観察した。蛙を用意し、それを真鍮のコイルにつり下げて真鍮のフックは螺旋の線を通して鉄製の格子に結びつけた。その格子は家を囲む庭の境界面にあった。稲妻が光ったときは、蛙は常収縮した。空がかなり晴れていてもそうであったので、それは空中電気が原因であると確信した。そこで希望を失わないでいろいろな方法で筋肉の収縮が見られることを実験で確認しようとした。いろいろな時間に、何日も動物を適当に接地して観察したが、ほとんど筋肉の収縮運動は見られなかった。ついに待ちくたびれて鉄格子に付けられたフックに押しつけて、大気の状態や電気の状態によって筋肉運動が起こるかどうかを観察した。するとそれらの条件に全く関わりなく、鉄格子に押しつけたときは収縮運動を行うことを確認した。」

こうして、空中電気が原因ではない筋肉の収縮運動を確認したガルバーニは、鉄格子に接触することが原因と考え次のような重要な発見に至る。

「密閉した部屋に動物を持って行って鉄の板に載せた。鉄板に付けておいた螺旋のコードに動物を押しつけると同じような収縮運動が起こった！私は別の金属を別の時間に繰り返し行った。結果は同じであった。金属が異なったときは収縮が少し異なったぐらいであった。ある時は活発で別の時は鈍い運動を示した。次に電気を通さないガラス、ゴム、樹脂、石、乾いた木等で行ったが筋肉は収縮も運動もしなかった。このような結果から電気は動物そのものの中に存在するという結果が自然に導き出されてきた。我々は現象が起きている間電気が神経を流れて筋肉にこのような現象を起こさせること確信を持った。このような電気の流れはライデン瓶による電気の流れと同じものであろう。」

２　接触電気

ヴォルタは、ガルバーニの論文を見たとき、かれはすでに電気盆（1775年）の制作、箔検電器やコンデンサトレの制作（1780年）、大気電気の研究や電気張力に関する研究（1782年）などで優れた功績をたてていた。ガルバーニは生物電気は二つの面があることを強調した。すなわち一つは蛙やその他の生物学的器官は電気を測定する精密な道具として利用できること、二つめはそれだけではなく、それら（蛙や生物的器官）は電気を供給すると言うことである。ヴォルタは最初はガルバーニの見解を支持した。とくに第一の電気を測定する機関としての生物学的感覚を利用するということは、大いに研究した。彼はズルツァーの実験を繰り返し行い拡張した。ヴォルタは導線で連結した錫箔と銀貨で舌を挟んだときに強い酸味を感じた。導線をのぞいても結果は同じであった。今度は2枚の金属板を額と口蓋に接触させ、光の感覚も引き出した。ヴォルタは1792年頃にはカエルの足やその他の生理学的器官例えば彼自身の舌などを利用して弱い電気を測定した。これらは彼の麦わら検電器よりはるかに鋭敏であった。ボル

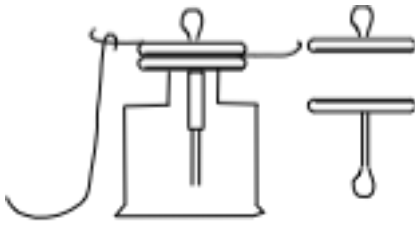
タによればその測定できる張力の大きさは彼の検電器の一目盛の0.0002の大きさであった[71]。

これらの実験を通して、金属は単なる導体ではなく、異なる二つの金属の接触によって電気が発生するという考え方がヴォルタの中で大きくなっていった。これらの実験においては神経はただ興奮しただけにすぎない。この興奮を引き起こした原因は金属そのものに求められるべきである。「金属が電気の本来の発生者であり、神経そのものは受け身である」[72]。しかもその興奮は金属に接触している間持続した。それは、ライデン瓶のそれとも異なる新しい現象であることが予見された。

起電力の原因は二枚の金属板にあると考えたヴォルタは、金属板の接触によってのみ起電力が生じることを確認することにした。そのために彼自身が開発した鋭敏な箔検電器とコンデンサトレを用いて実験した。このことについて次のように述べている。

「金属板を互いに接触させてから、非常に鋭敏な検電器に近づけると、金箔片はいくらか開いて、それによって若干の電気があることを示すであろう。この電気は今試験している金属、およびこの金属と接触させた他の金属の性質に応じて陽または陰であろう。」[73]

そして、この実験で陽または陰を確認するためには、まずその電気を検電器に与え、検電器の箔を開かせる。次にこの検電器に摩擦したガラス棒または樹脂棒を近づけ、金箔の開きが大きくなるか小さくなるかをしらべた。大きくなれば同種の電気であり小さくなれば異種の電気であるというわけである。この接触電気の実験は極めて微妙であることは、後年ケルビン卿が追試を行って確認したときの記述によってもわかることはすでに述べたところである。次の図はボルタによるコンデンサトレの図であり、この装置を用いて接触電位差を測定した。



この図は、すでに述べた前述のケルビン卿の論文に掲載されている図とほとんど同じである。

こうしていくつかの金属の接触によって発電が起こることを確認すると同時に、摩擦電気がそうであったように帯電の強さに序列があることを確認した。たとえば亜鉛板と銅板では接触の後には、亜鉛は陽電気、銅板は陰電気を示した。銅をスズまたは鉄と接触させると程度は落ちるが銅は同じく陰電気を帯び、スズと鉄ではスズは陽の鉄

---

[71] Pancaldi “Volta” p.180

[72] ダンネマン第７巻　P149　ボルタ動物電気に関する手紙　Ostwald’s Klassiker 114巻

[73] ダンネマン　第７巻　p.161　ガルバーニ電気の諸研究 Ostwald’s Klassiker 114巻

は陰の電気に帯電した。最後に金または銀を銅と接触させると、銅は今度は陽電気を、金と銀は陰電気を帯びた。

こうして次の帯電列を配置した[74]。

＋　亜鉛　鉛　スズ　鉄　銅　金　銀　石墨　－

次にボルタはコンデンサトレの箔の開き方によって、これらの金属の電気差を測定し、その結果を１８０２年の物理年報（Anneren der Physik)[75]p.443に報告した。その結果は次の通りであった。

亜鉛－鉛　＝５
鉛－すす＝１
スズ－鉄＝３
亜鉛－鉄＝９

このことから、二つの項の電気差は互いが隔たることが大きいほど大きいことが明らかになった。

電気を通す導体は金属だけではないことはすでに知られていたので、接触電気は湿った物体に関しても生じるであろうことは十分に予測できた。ボルタは１７９６年の論文において次のように述べている。

「私が乾いた導体または第一種の導体と呼んでいる種々の導体と、湿った導体または第二種の導体の接触は、電気流体を刺激しそれにあるきまった運動を与える。」[76]

１７９９年の論文においてはさらにより精密な測定を行い、その結果起電力の大きさによって次の次の四つの場合に分類されることが分かった。つまり一番差が大きいのは二つの異なった金属の接触であり、次の大きいのは金属と湿った導体の接触であり、３番目は異なった湿った導体の接触であり、４番目は似たような湿った物体の接触であるとした。

３　ヴォルタの電堆

１７９９年までのボルタの研究は、非常に弱い電位差の測定によって接触電位差を測定することであった。例えば後年トムソンが追試したような、コンデンサトレと何らかの方法で電気を繰り返して蓄える方法（ダブラー）とを併用すること、などによって研究された。

１７９９年にボルタが下記の動物電気に関するニコルソンの論文を読んでから彼の研

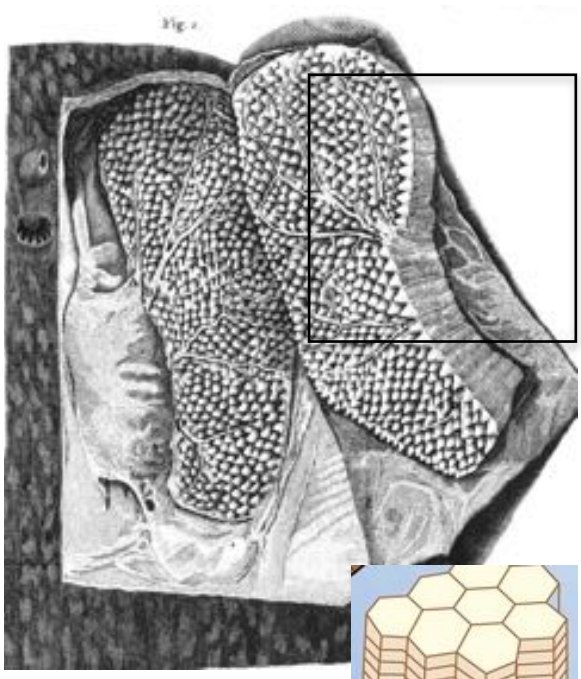
---

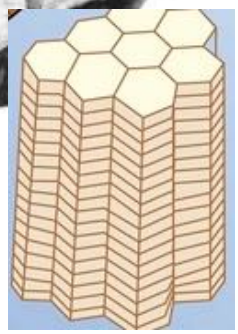
74 ボルタ　動物電気に関する手紙（前出）

75 Annalen der Physik1802

76 ボルタ　ガルバーニ電気に関する諸研究（前出）

究は一変した。この論文に刺激されて、いわゆるバッテリーの発明へ向かうこととなったのである。バッテリーという言葉はもともとフランクリンによるコンデンサーを直列に接続したものであったが、ボルタによって発明されたバッテリーはガルバニッシュバッテリーと呼ばれることとなった。





ニコルソンの論文はシビレイの発電機構を解明するという課題に取り組んだものである。シビレイの発電機構は500から1000個の柱を含み長さは１インチぐらいで、直径は0.2インチでその中に多くの横断する膜があることを認めた。その膜の厚さは0.0033インチであり膜と膜の間は0.0017インチであった。かれはシビレイの発電機構をボルタの起電盆とおなじ構造であると考えた。つまり二枚の膜が交互に接触していて、その間の距離を引き離すと電気が起こり、膜の間の距離が大きくなれば起電力は大きくなるととした。これは電気量がそのままで電気容量が小さくなることによって大きな起電力を得ると言う方法であり、コンデンサトレの原理そのものである。つまり、シビレイは筋力を使ってこの膜を引き離して電気容量を小さくし、大きな起電力を生じると考えたのである。(Pancaldi “Volta”p.199)

ボルタはこのニコルソンの研究を読んだのち動物電気の発生を模したバッテリーの発明を行った。ニコルソンは動物電気の発生機構を研究したが、ボルタは、新しい装置の開発に向かったとのである。開発のいきさつは詳しくはわかっていないが、前後関係から推察するに下記の通りではないかと思われる。

ボルタがニコルソンの研究から刺激されたのは次の２点であると思われる。第一に、すでに述べたように、動物電気の発電機構をヒントに新しい発電機を作るという課題を設定した。機械装置を工夫することを得意とするボルタにとって、動物電気を模した発電機の工夫は魅力あるテーマであったのであろう。第二には直列に接続することによって弱い電気を強くすることができるのではないかということである。ニコルソンはシビレイの発電機構を並列と考えた（二枚の膜が複雑にかみ合っていると考えた）がボルタは直列と考えたのである。接触電気の張力は極めて小さかったが直列に接続することで大きな張力を得られるかもしれないと考えた。さらにズルツアーの実験を通して動物電気は持続すると認識していたボルタは、ニコルソンのコンデンサーの放電のような持続しないライデン瓶の放電ではなく、持続する電気を発生する装置を組み立てるということが大きな魅力として浮かんできたのであろう。

ボルタは次のように考えたのだろう。まずなじみのズルツアーの実験を考えてみる。この実験は二枚の金属板と舌の三つの部分からなる。これはガルバニーの実験とも共通する機構である。これを直列に接続する。はじめは二種類の金属板を接触させそれを直列に第３番目の金属で結んだ。しかしこれでは起電力は生じなかった。そこでズルツアーの実験にもっと忠実に、接続をする第３番目を金属の代わりに湿った導体（つまり第二種の導体）とすることとした。つまり二枚の金属板に間に湿った導体を置きそれを直列に並べたのである。ここで決定的な進歩が行われた[77]。

このように、第1種の導体の間に第2種の導体を介在させ連結して輪道を作ることによって作用するものをガルバーニ電堆（ガルバニッシュバッテリー）と呼んだ。一対の接触電気の張力を、電堆（バッテリー）とすることにより幾倍にも強めた。1800年にこのいわゆる電堆についてイギリス王立協会に報告をしたが、この発明の重要さは他のどんなものも及ばないとさえ言われる。次の文章はこの報告についての部分的な引用である。[78],[79],[80]

「ミラノのコモから　1800年5月20日

長い間ご無沙汰をしていましたので、こうしてまたあなた方ロイヤルソサエティの方々に、私がこれまでに行ってきた二つの異なった種類の金属を単に接触させるだけで引き起こされる電気的励起について報告できること、同時に、溶液または溶液を含んで湿っていることによって導体となっているものと金属との接触によって引き起こされる電気的励起に関する実験について報告できることを嬉しく思います。それらの結果の最も重要なものは、結局は次のような装置を組み立てたことです。そして、その装置によって作り出されるその装置の腕の部分（arms)等に発生する不均衡などを含むその他の現象を報告いたします。その装置はライデンビンに似ています。もっと言えば、弱い蓄電器に似ています。それは、止むことのないあるいは、放電の後にすぐにそれ自身によって蓄電されるような、制限のない蓄電を供給する電気流体の永久の作用・衝撃とも言うべきものです。しかし、一方ではこれらのものとは本質的に異なっています。それは、一つにはこの作用が引き続く故に、もう一つにはその構造の故にです。つまりふつうのライデン瓶や蓄電器は絶縁体の板を「非電気物体」つまり導体の間に挟んだものですが、それとは異なる構造を持っているのです。そうです、これから私が話そうとしている装置、そして、疑いもなくあなた方を驚かせる装置は、ただ、幾つかの種類の良導体をある仕方で組み合わせたものなのです。３０，４０，６０，あるいはそれ以上の銅片、できれば銀が望ましいが、それに、スズ、できれば亜鉛が望ましい、そして、それから水（水とはいっても純水より溶液、例えば塩水あるいは灰の水が望ましい）を厚紙または皮に湿らせたものを同じ数だけ金属の間に挟み、この三つの導体を次々と同じ順番に並べたものが、私の新しい装置です。この装置は私が述べたように、ライデン瓶や蓄電器の電気的不均衡によって生じる効果と同じような効果、つまり、十分に強い力でチャージされ、そのチャージが通り抜けることができる距離を火花を

---

77 このような実験を行ったことはパンカルディが述べている。Pancaldi “Volta”p200-201

78 ボルタ　ガルバーニ電気に関する諸研究

79 Phil. Trans. R. Soc. Lond.-1800-Volta-rstl.1800.0018

80source book

発しながら爆発音を出すような効果を蓄電池などに比べればかなり弱いものですが同じような効果をつくりだします。効果は同じでも効果の強さは非常に弱く帯電した蓄電器なみです。しかし、巨大な容量の蓄電池であるといえます。これらの蓄電池より非常に優れている点は、外からの手段でチャージをする必要がないということです。そして、それはつなぐことによって何回でも不均衡を生じることができます。」

次にこの装置とさらに「類似の最も注目すべきものについて」詳しい説明をする。

「私の装置のいくつかのバリエーションについて研究しましょう。ここで続いて記述するのは私が考えたすべてではなく、より興味深くかつ有用で、益がある、つまり、簡単で手早く構成することができ効果は確実でより長くそれを維持できる方法であります。これらの有用性を有し、その形態は、以前に述べた柱状の装置とはかなり異なった、しかし、より大きな装置であるという利点も有する。この新しい装置を前頁の図81-1でしめし、それを'crown of cup'と呼ぶことにします。

いくつかのカップまたは鉢、これらは非金属性、例えば、木製、陶土あるいはクリスタルガラス（小さな水飲み用グラスか鉢は非常に適している）で作られたものですが、これに水を半分入れる、あるいは塩水や灰汁ならよりベターです。それらを短い金属製のアークで連結する。アークの一方の端Aには銅を、できれば銀でかぶされている銅がベターですがそれを鉢の液体の中に入れる。そしてアークの別の端Zはすずまたは亜鉛がつけられているが、それは、隣の鉢の中に入れます。二つの金属は液体に浸っている部分のどこかの個所で、はんだ付けにしておきます。」

「こういう仕方で、30,40,60の鉢が直列につなげられ全体として新しい装置が作られる。それは基本的にすでに述べたカラムと同じ構成を持っている。」

この装置の一方の手を鉢に浸し他方の手の指を残りの鉢のどれかに浸すことによってしびれを感じることができる。しびれは鉢の相互の隔たりが大きいほど大きいことが

わかるのであった。この感覚はしびれだけじゃなく、味覚視覚聴覚に影響を与えることが分かった。この感覚は、このバッテリーのどこかを開くと静まり、閉じていると持続するだけでなくますます強くなってしまいには耐えがたくなってきた。それは電気流体が間断なく循環していると感じられた。[81]

ボルタの研究の特徴の一つに、問題をえぐり出す実験装置を工夫することにある。電気盆の発明や、コンデンサトレの制作、そして、このボルタバッテリーの制作である。このボルタバッテリーの発明は、電流を定常的に取り出すことが出来るという点で、電流に関する研究が飛躍的に向上した。

一般的に、新しい実験装置の開発は、研究を飛躍的に高める。それは人間認識の基本的なあり方である。つまり、人間は自然に対して道具を工夫し自然を変革し、それを通して認識を深めていくのである。特に、実験装置によって、新しい物体、あるいは、もっと普遍的な実体を定常的に取り出せるようになったとき研究は飛躍的に前進する。静電気における起電気の発明はその一つの例である。たとえば、素粒子研究における加速器の発明などもその例であると考えられる。いずれにせよ、電流を取り出すことができたボルタのバッテリーは、その後の研究を飛躍的に前進させた。

[81] source book p.427　参照

II. 電流とその他の現象との関係

新しく発見されたボルタ式の電気とはどういうものかは様々な連関の中で認識されていかなければならない。以下にそれがどのように行われていったかを見ていこう。まず初めには、化学変化との連関で電流がとらえられていった。

１　電流と化学変化・・・電気分解

この事情を理解するために、当時の化学研究の状態をまとめておこう。

年表に示した通り、近代化学の基礎となったと考えられるラボアジェの金属酸化の研究は１７７５年に発表された。それは、質量保存の法則を重要な手がかりとし、酸化現象は酸素と金属の結合であることを明らかにした。さまざまな化学変化を理解するうえで定量的研究を基礎に据えることができるようになったのである。そして、１７８９年、フランス革命のただなかにおいて、「化学の教科書」を著して、ボイル以来の元素概念の確立を図った。ラボアジェは、元素をそれ以上簡単な物質に分解できないものとし、酸素、水素、窒素、炭素、硫黄、リンをその意味で元素とした。しかし、アルカリ類、アルカリ土類の金属灰に類似している物質は酸素の化合物であると推測した。このことは後で電気分解で証明されることとなる。また、この当時（１７８４年）、キャベンディッシュが水は水素と酸素からだけでできていることを示していることも忘れられない[82]。

その後、１７９９年から１８０２年にかけ、プルーストが化学反応における定比例の法則を発表した。１８０８年ドルトンの「化学の新体系」の発表によって定比例の法則が確立され、倍数比例の法則もまたこの本の中で出現している。これらの説はいずれも原子論を前提としたものであった。さらに１８１６年にはゲイリュサックが気体の反応から倍数比例の法則を容積比で示し、窒素の五段の酸化系列の表を明らかにした。

この化学反応の理論と原子論の発展は、電流による電気分解の現象を通して原子の結合と電気力との間の深い関係についての考察を生むこととなった。特に、電気分解を研究したデーヴィは次のように述べている。

「化学的に互いに結合するすべての物体は、その接触によって陰極に帯電した状態を示す。元素の最小微分子が、自由に運動すると仮定するなら、この理由から、それらは接触において現れるおのおのの電気力のために互いに引き合わねばならないだろう。したがって電気と化学親和力の関係はきわめて明瞭である。」[83]

このような考え方はすでにベルセーリウスによって述べられている。つまり、二種類の荷電は本来原子に固有のものであるとしている。もともと、フランクリンの一流体説でも、物質の中に電気流体が充満していると考えられているのであるから当然ではある。

---

[82] 水素と空気を電気火花で爆発させると容器の中に水が生み出され、反応の際に体積が5分の1だけ減少する　Henry Cavendish, Phil. Trans. 1784 **74**, 119-153, 1784 Experiments on air p.6

[83] 大自然科学史7巻ｐ221

こうして、電流を電気分解との関連で理解されることが始まった。

（1）　デーヴィ以前の電気分解の研究

ヴォルタの電堆が発表されるとすぐに、ニコルソンとカーライルが水の電気分解を行った。1800年5月のことだった。ニコルソンはボルタの電堆の発明を聞くとすぐに、（ロイヤルソサエティに論文の第一報が掲載された）、自分も作成して電堆の実験を行い、ボルタの結果を再確認し、その結果をすぐにニコルソンジャーナルに載せようとした。ニコルソンは自身のシビレイエイの研究がボルタによって引用されたことに光栄を感じていた。ボルタの報告のように、電堆の電気が、電気の流れであることを確認し、その両端は静電気と同じものであることをも金箔検電器とダブラーを利用して確認した。良導体の時は自由に流れるが、ガラスや不導体の時は電気はストップしてしまうことから、さらに、この実験を遂行するとき、実験の最中に、接触を完全にしようとして、同僚のカーライルが輪道を閉じる針金と上端の金属板を一滴の水で湿らせてみた。そのとき接触した線の周りから小さな気泡が発生するのを見た。このガスは非常に少なかったが明らかに水素ガスのにおいがした。これは水が酸素と水素の結合であるという当時の知見からして、水が分解されたことを予感させた。そこで二人は共同して水を満たした管の中に、二つの真鍮の針金をさして、ガルバーニ電流を通じた。針金の両端の距離は1インチと３／４であった。管の中では直ちに銀につないだ針金の尖端から、小さな気泡の流れが生じ、他方の尖端は曇り始めた。そのガスは水素であることがわかった。ニコルソンはさらに研究を続け水の電気分解を確認したが、ボルタがすでに行っているかもしれないと考え、ボルタの完全な論文が発表されるまで発表されなかった。しかし、ボルタの論文に電気分解については報告がされなかった。

ニコルソンの論文のこの部分のところの初めのところで次のように述べている。

「最初水素ガスが発生したのを見たときから、私たちは直ちにこの実験において水の分解を期待した。ところが、水素だけが一方の針金の末端で発生し、酸素はそれからほぼ２インチ離れた、他方の針金と化合するということは、私たちを少なからず驚かせた。そこで私は酸化しにくい金属を用いて反応を研究した。すなわち、私は内径1/4インチの短い管の中に、二本の白金線を固定した。この装置を電堆と連結したときに、銀（陰極）と連結した針金から、こまかい気泡の非常にさかんな流れが生じ、また、亜鉛（陽極）と連結した針金からも、前者より弱いガスの流れが生じた。銀の側から生じたガスの大きな流れは水素で、亜鉛の側から発生する小さな流れは酸素であると、推察するのは自然であった。研究はこの期待を実証した。」（ダンネマン大自然科学史7巻ｐ194）[84]

1800年には、すでにリッターが、硫酸銅の水溶液の電気分解をおこなった。また、ベルセーリウスは1803年塩の水溶液の電気分解を行っている。しかし、電気分解の圧倒的な成果はデーヴィの研究によるところが大きい。（ダンネマン大自然科学史第７巻

[84] Philosophical Magazine Ser 1 V7-8 p.337 1800 Experiments in Galvanic Electricity

p.200）

（２）デーヴィの電気分解

デーヴィは電気分解に関する研究を大いに発展させた。彼はまず電流と化学反応の連関について考察を深めた。1801年1月に発表された「ボルタの新しいガルバニック装置と類似した金属片と液体からなる幾つかのガルバニック結合について」[85]と言う論文に於いて、ボルタの電堆の本質は（接触作用ではなく）化学反応であることを主張している。デーヴィは次のように論述する。

ボルタの通常の電堆に於いては、二枚の金属と一枚の流体で湿した層からなるが、このことは、発電の原動力が、二枚の金属の接触電位差に起因すると考えられてきた。しかし、私は、二枚の湿った層と一枚の金属によっても同様のガルバニ効果を生み出すことを見いだした。このことは、発電の原動力は化学変化であることを示している。例えば、金と銀は、電気的には差はわずかであり、ガルバニ効果を示すときは小さいが、希硝酸塩の流体を湿らせた布を用いることにより大きな効果を引き出すことがわかり、接触電気よりも化学反応のその原因があることが予感されると述べている。

デーヴィは、彼自身の装置を三つ紹介している。最初の例は一番弱いが、ヴォルタの電堆にもっとも似ている。

よく磨いた錫、大きさは一片が1インチほどの正方形で厚さが１／２０インチである。これと同じサイズのウールの布を、そのうちの幾つかは水を湿らし、他は希硝酸の溶液で湿らせたものを次の順序に積み上げる、すなわち、錫、酸、水の順番を繰り返すのである。そして、20組ほど積み上げれば、弱いがガルバニ電堆を形成する、その作用は、感覚でようやく感じることが出来る。そして、普通の水に通せばゆっくりではあるが、酸化する錫の板に接続した線からは水素が、他の例えば銀の板を置きそれと結びつけた線からは酸素が発生することがわかる。

この電堆に於いては、垂直に汲みあげるので酸性の液体で湿らせた布は下に、水で湿らせた布は上にする必要がある。こうしないと、酸性の液体は重いので、混ざり合ってしまうので合う。

亜鉛を用いるときは、水に含まれている空気が急激に酸化作用を起こすので、三つの布を使用する。一つは硫酸カリ溶液で湿らせたもの、二番目は硫化カリ溶液、そして三番目はこれらより特別に重い酸化物の溶液である。このときは、一番下に亜鉛、酸化溶液、硫酸化カリ溶液、硫化カリ溶液の順番で組み立てる。これらを20個ほどくみ上げれば、前述のものより作用は大きくなる。

さらに強力にする第3番目の方法は、それぞれ異なる溶液を含ませた二種類の布を用意し、接触させ、それに、金属の板を挿入して異なる二つの化学反応を起こさせて、金属板を繋ぐことにより、起電力を生じさせるのである。さらに、二種類の液体を、半浸透性の膜で（例えば膀胱膜で）区切り、同様の実験を行った。いずれにせよ、1種類の金属と2種類の溶液から異なる二つの化学反応を起こさせそれによって起電力を生じさせることが出来ることがわかる。このことから、起電力の原因は、二種類の金属による接触ではなく、異なる物質の化学反応によることが原因であることがわかるのである。

---

[85] Phil. Trans. R. Soc. Lond.-1801-Davy-rstl.1801.0022

1807年デーヴィはバーカリアンレクチュア[86]において、電気分解の研究成果を述べた。そこでは、それまでの電気分解にまつわる様々な過ちが解決された。例えば、水の電気分解によって硝酸、塩酸、ソーダあるいは電気酸？等が作られるというようなことが言われていたが、それらは水の不純物が原因であることを突き止めた。純粋の水は酸素と水素に分解されるだけであった。次に、電気の作用による物体の成分の移動についてと言うことで、電気分解の様子を示す次のような実験を行ったりした。すなわち、二つの管を用意し、一方には蒸留水を入れ、他方には硫酸カリウムの溶液を入れ、その間を細かい繊維の石綿で接続した。その石綿を液体が滲み出るようにした。それを、蒸留水にリトマス紙をつけて色の変化で測定した。このような装置を使って、硫酸カリウムの溶液を陰極に接続し、純粋の水を陽極に接続した。そして弱いアンモニアの溶液を中間のところに置いた。それによって、硫酸が蒸留水の陽極にアンモニアの溶液を通過せずに伝わることが出来ないようにした。１５０の電極対を用いて実験を行った。5分もたたないうちに酸は陽極付近に集まり、30分で十分に明白な結果が得られた。(p.24)

このような実験を多数繰り返し、デーヴィは次のような結論に達した。

「水素、アルカリ物質、金属、そしてある種の金属酸化物はマイナスに帯電した金属表面に引き寄せられ、正の金属表面からは反発させられる。そして反対に酸素や酸性の物質は正に帯電した金属表面に引き寄せられ、負に帯電した金属表面からは反発させられる。これらの引力と斥力は電気親和力の通常の作用を破壊するだけの十分なエネルギーを持つ」（p.28–29）

1808年には、上記の電気分解の研究に加えて、アルカリ金属　アルカリ土類金属の発見が行われた[87]。

デーヴィはまず第1に常温において飽和したカリやソーダの水溶液を、ガルバーニ電池を用いて分解しようとした。ところが作用をどんなに強めても、水だけが影響を受けて、多量の熱を発生し激しい沸騰を行って、水素と酸素だけが発生した。

デーヴィの具体的報告は次の通りである。

「最初に行ったことは固定アルカリを分解することであった。カリとソーダの水溶液を常温で飽和させ強力な電池（電気）で作用させた。その電池は**Royal　Institution**（王立科学研究所）にあったボルタの電堆で、一つは大きさが12インチ平方の銅板と亜鉛板からなる24対のもの、同様に6インチの100対のもの、4インチの150対のものであった。溶液は明礬と硝酸である。しかしこれらの場合、強力な作用は溶液の水にだけ作用し、水素と酸素だけが多くの熱と強い発泡を伴って発生しただけであった。（p.3)」

「水の存在は、分解を阻止するように思われたので、カリを火で溶かして使用することとし

[86]Phil. Trans. R. Soc. Lond. 1807 97, 1-56, published 1 January 1807

[87] Phil. Trans. R. Soc. Lond.-1808-Davy-rstl.1808.0001

た。ガスメーターからでる酸素をアルコールランプの炎に作用させて、白金のスプーンに入れたカリに吹き付けた。アルカリはしばらくは赤くなって、やがて完全に液化した。スプーンを電池（6インチ100対）の正極に接続した。そして、白金線を負の極に接続した。（p.5)」

この装置によって明白な現象が現れた。カリは電気をよく通すようになり、伝導が保障されるや否や、非常に明るい光が負極の白金線に現れた。そして火柱が、それは可燃性の物質の発生によると思われるが、接触点から立ち上った。

「正負を入れ替えると、白金のスプーンは負に帯電し、生き生きとした一定の光が反対の点に現れた。そこには炎はその周りには現れなかった。気体の泡が、それは空中で燃えるのだが、カリを通して立ち上ってきた。（p.5)」

彼はカリの残留物の中に金属の塊を見つけたがそれは白金の粒子であった。

「私は、熱によってカリを溶かして電気を通し、この燃えやすい物質を集めることが出来ると思って、幾つかの実験を行ったが、成功しなかった。そこでこの目的のために、電気によって溶かして分解する両方の作用を行うことを考えた。

発火によって完全に乾燥させたカリは不導体である。しかし、非常に少量の蒸留水、それによって塊が壊れない程度であるが、それを添加すれば電気を通す。そしてこの状態の時、強い電気力によって容易に融解し分解した。

少量の純粋のカリを数秒間大気にさらすと、カリは水分を引き、表面は導体となるがそれを、絶縁された白金の上に置く。この絶縁された白金の板は、６×４インチの250対の極板の電池の陰極に繋いだ。一方、バッテリーの正極に繋がれている白金線は、アルカリ（カリ）の上部表面と繋ぐようにした。装置全体は（水中ではなく）大気中に置かれた。

この状態で、まもなく盛んな作用が引き起こった。カリは電極の両方で溶け始めた。上部の表面では激しい発泡が起こった。下部では、そこは陰極の表面であるが、粘性の流体が自由にならずにいた。金属光沢を持った小さな粒子、より正確に言えば見た目はより水銀のように見える、そのうちの幾つかは、出来ればすぐに爆発的に明るい炎を上げて燃えてしまう、(p.5)」

「これらの球は多くの実験でまもなく私が探し求めていたもので、カリの基礎をなす金属であることを知った。」

デーヴィは化学結合について次のように述べている。
「化学的に互いに結合するすべての物体は、その接触においてあらわれるおのおのの電気力のために、互いに引き合わねばならないだろう。したがって、電気力と化学親和力の関係はきわめて明瞭である。両者はつまり同じものであると仮定してもよかろう。」

次の1808年にはデーヴィは石灰、マグネシア、ストロンチウムなどの電気分解に成功し、アルカリ土類金属の発見が行われた。[88]

[88] 以上　ダンネマン大自然科学史7巻p.210-217参照

２　電流と熱・光との関係

1805年　つまり前ページのデービーの研究より２，３年前、リッターは、ボルタの電堆によって金属を灼熱することに成功し、次のような観察を述べている[89]。すなわち直径4インチの金属板対400個からなる電堆と、8インチの直径で金属板対100個からなる電池を比較したとき、前者は2インチの金属線を赤くしたが、後者は8インチの金属線を灼熱した。つまり、灼熱する能力は金属板の面積に関係することが予測された。

1821年　デーヴィは、数百の金属板対からなる電池を組み立てるとアルカリを溶融することを認めたことはすでに述べた。さらに2000対の電堆を利用したときは、中間箇所において炭素尖端を用いると非常にまぶしい光が現れたことを確認した。これはその後アーク灯として照明に利用できるようになった。アーク灯は彼によって改良され安全灯として炭鉱内における災害の数を非常に減少させた。（ド・ラ・リーブはデーヴィより先んじていた。）[90]

３　ガルバーニ電気の磁気作用

（１）エールステッドの発見

デンマークの物理学者エールステッドは、1820年7月21日に出版された論文[91,92]で、電流の磁針に対する作用について画期的な発見を報告した。彼は論文の冒頭に、「数年前何人かの著名な物理学者が試みた際、この現象（電気と磁気との関連）見いだせなかったのは、回路が開いていたためである」と述べているが、電気の磁針に対する作用については、すでに多くの物理学者に期待されていたことであった。例えば、1805年に、アシェットJeanNicolas Pierre Hachette)とデソームス(charles-Bernared Desormes)は、自由につり下げられたボルタの電堆が地磁気の方向に向くかどうかを決定しようと試みたが結果は得られなかったと報告しているし、それ以前にも落雷によりナイフやフォークが磁気を帯びたという報告もあり、フランクリンはライデン瓶で釘を磁化することを試みていた。それがヴォルタの発明によるガルバーニ電気（回路が閉じた電流）の発見によって可能になったのであった。（エーテルと電気の歴史上　p.100）

エールステッドの発見は1819－1820年の冬に彼が「電気ガルバーニ効果および磁気」に関する講義をしているときに、雷雨の間に磁針に認められた変化が、彼の探していた効果への手がかりを与えるだろうという考えが浮かんだ。この考えに導かれて、彼は開いた回路ではなく、閉じたガルバーニ回路で実験してみなければならないと考え、電流が磁針付近の針金を通過するとき、磁針に何らかの効果が生ずるだろうかというアイデアを持った。最初かれは磁針と直角に針金を置いたがなんの効果もえら得なかった。講

89　Annalen der Physik1805.pdf p.490

90 ダンネマン大自然科学史7巻p.222

91 Zur entdeckung des elektromagnetismus Oersted Seebeck

92 近代科学の源流　物理篇１　北海道大学図書刊行会　1974年発行 p.89

義ではこの否定的結果が示されたが、講義終了後針金を磁針と平行に置こうというアイデアが浮かんだ。それを試みると磁針の著しいふれが観測され、磁気と電流の間の関係が発見された（エーテルと電気の歴史　p.101）。これを受けて次のような実験を行った。

「我々が使用したガルバーニ装置は、20個の長方形の銅の槽から成り立っており、それぞれ長さ・高さとも約12インチ（＝２５ｃｍ）幅2　1/2インチ（＝６ｃｍ）であった。各槽には２枚の銅片が取り付けてあり、その銅片は、隣接する槽の溶液に浸してある亜鉛板を支える銅の棒に付けられるように曲げてある。槽を満たしている水には、その重さの1/60の硫酸と、やはり1/60の硝酸とが混合されており、おのおのの槽の中に浸してある亜鉛板は一辺が10インチの正方形であった。しかし、導線を赤熱する程度であれば、もっと小さな装置でも間に合うであろう。」

ガルバーニ装置の相対する二つの端が金属の線によって結合されているものを考えよう。これを簡単に接続導体または接続導線と呼ぶことにする。そして、この接続導体の中やその周辺で起こる効果は電気相克（electric　conflict）と呼ぶことにする。（※＋の電気流体とマイナスの電気流体が導線の中では反対方向に運動していると考え、その二つの流れが導線の中で結合と再結合を繰り返し移動すると考えそのとき引き起こされる効果が電気相克であるとした。

実験結果は次の通りである。

①導線が磁針に平行になるように水平に置く。このときガルバーニ装置の負の極（陰極）に近い方の接続導線の下では、磁針（Ｎ極）は西のように触れるであろう。針金と磁針の距離が増大するときふれは減少する。ふれの大きさは装置による。

②接続導体は、数本の導線を束にしたものでも良いし、あるいは数片の金属の帯びでできていても良い。作用の大きさに関したことをのぞけば、金属の性質によって結果が変化することはない。

③接続導線の作用は、ガラス・金属・木・水・樹脂・陶器・石を通り抜けて、磁針へと及ぶ。導体と磁針の間にガラス板・金属板あるいは木板をもってきても効果が消えることはなかった。この3つを全部合わせてもその作用は弱まるようには見えなかった。電気盆・斑岩の板・陶器を持ってきたとしても、効果は消えることなく、陶器に水をいっぱいに満たしても同様であった。静電気では、このようにすべて通り抜けることはないので電気相克による作用と2種類の電気によるいずれか一方の力による作用とは異なっている。

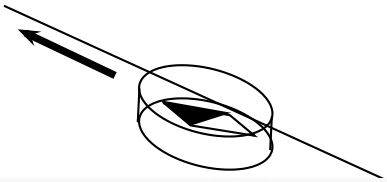
④磁針の下に導線があるときと磁針の上に導線があるときでは振れの向きだけが逆になる。

これをより簡単に記述するためには、次のような表現を用いる。その上に負電気がくるような距離は西に振れ、下に来るような磁極は東に振れる。

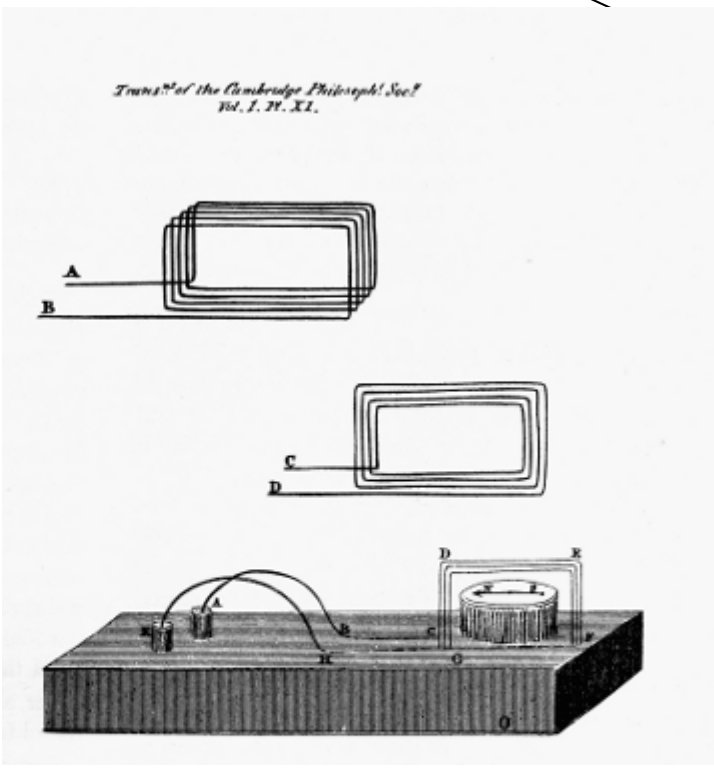
・・・・・

⑥水平面ないで平行に磁針と導線を置くとき、磁針を伏角面内で振れさせる。
⑩磁針の代わりに真鍮の針を用いても、接続導線の作用によって動かされることはない。ガラスやゴムラックの針もまた同様である。

電流（ガルバニー電気）の導線の周りに方位磁石を置いて、その作用の様子を見ることは、中学生や高校生の基本的な実験として重要である。

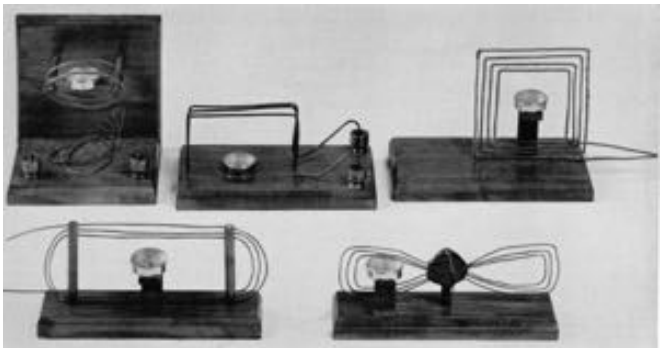


このとき作用が円形を描くこと。さらに、間にどんな物を挟んでもほとんど影響はないこと（透磁率がほぼ１に近いこと）などを確認することも大切ではないか。



（２）ガルバノメーター・マルチプリケーター

エールステッドの発見の2ヶ月以内に、Schweiggerはエールステッドの効果を彼が発見したときよりも拡大する方法を発見した。それは単に直線状の電流の近くに磁石をおいてその偏りを見るのではなく、線を直方体の形に何重にも巻き、その中心に磁化した針（磁針）をつり下げるという方法であった。このことによって、針の偏りは格段に大きくなった。それは巻き数を多くすればするほど効果は大きくなった。Schweiggerはこの装置をmultiplierと呼んだ。彼はそれを１８２０年9月１６日*Literary　Gazette*に発表した。（ダンネマン第７巻p,235)



Schweiggerが発見してまもなくPoggendorfが1821年に作成し、イギリスにおいてはames Cummingが同様な装置をgalvanometerとして発表した。その後NobiliやBois-Reymondによって改良された。このときPoggendorfは、導線に絹糸を巻いて被覆した。こうして、40回から50回も巻き圧縮することが出来、その中心に可動磁針を据えた。multiplierあるいはgalvanometerは、その後

の電磁気学の発展に重要な貢献をすることとなった。

（３）ビオ　サバールの実験と法則

エールステッドが電流（ガルバーニ電気）の磁気作用を発見し報告したのが、1820年7月21日であり、その報告を受けて、ビオ（Jean Baptiste Biot 1774-1862）とサバール（FelixSavart1791-1841）は協力して電流が磁石に及ぼす力の法則を研究しそして同年10月30日に報告した[93]p.392。ビオとサバールの二人はともにCollege de France の物理学教授であった。報告は、エールステッドが作用の向きなどに注目したのに対して、力の大きさに注目したものである。以下はその報告の概要である。

ビオ＝サバールの両氏は、1820年10月30日の科学アカデミー例会の席上で、一辺の論文を朗読した。その論文はヴォルタの装置の両極に接続した金属線が、磁化された物体に作用する際に成立する物理法則を、精密な測定方法によって決定することを目的としたものであった。

実験装置と方法　2重接触法（ダブルタッチ法）によって磁化された、長方形の棒や円柱状の鋼鉄線などを生糸で吊した。それらを、電堆の両端に接続した金属導線からいろいろな距離は方向に置いて、一定回数降らせたときの振動時間と止まったときの釣り合いの位置を観測した。地磁気の作用は、導線の作用と組み合わせたり、離れた場所に置いた磁石の反作用によって相殺したり弱めたりした。実験には面積10ｃｍ平方の極板10対を持つ電池を使用した。（つまり１０Ｖぐらい　注）測定は近くから遠くへ遠くから近くへと交互に行うことにより、時間経過とともに変化する周期への影響を相殺することとした。時間は1/2秒刻みの優秀なクロノメーターによって測定した。

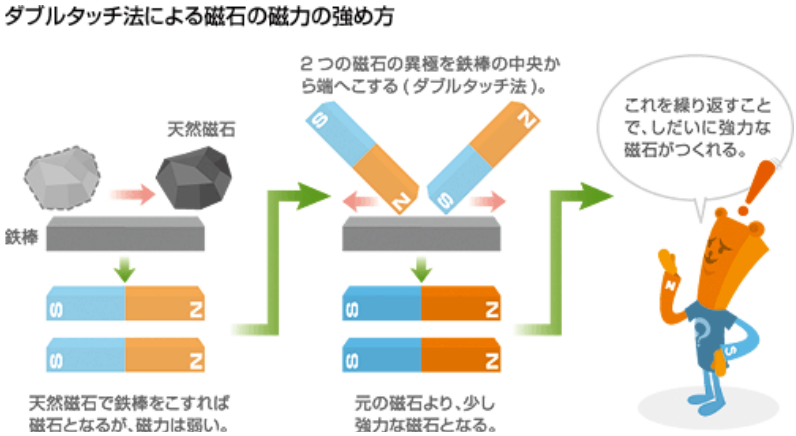
結果　N極あるいはS極の磁気分子に働く力はその点から導線の軸に垂線を引くと、働く力はこの垂線と導線の軸のいずれにも垂直となり、その力の大きさは距離に反比例する。N極S極の微分子は反対の方向に力を受ける。

ビオサバールの法則は式で書けば次のようになる。

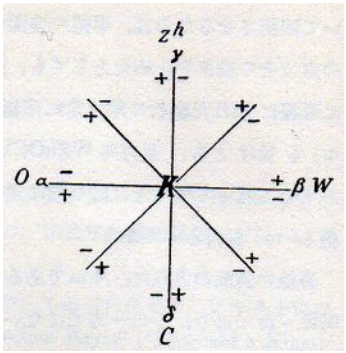
$$H = k\frac{i}{r}$$

（以下に　ダブルタッチ法の説明をインターネットから引用した）

[93] Annalen_der_Physik Bio-Savart1820

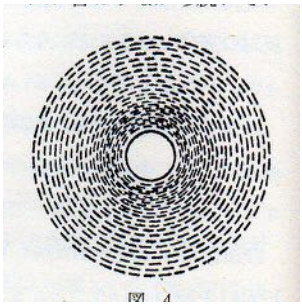


（4）ゼーベックの電流の磁気作用に関する研究



エールステッドの研究をさらに拡張したのがゼーベックであった[94]。

ゼーベックは太い導線の周りの様子について次のように考える。中心のKは電池に繋がれた太い導線で、その周りに、磁石の鋼鉄線をおく。OZWCの向きに回転をさせたとき、＋m（つまりN極）はその方向に移動するが、－m（つまりS極）はその反対方向に移動する。結局、導線の近くでは、N極であるとかS極であるとかいえず、その両方を持っている。つまり、近傍の各点では右図のようになっていると考えるべきである。「これらのことから、閉じている導線は、その中心が導線の中央を通っているようなある単一の磁気作用圏を持つということ」が考えられる。（ゼーベックは電流が流れると導線そのものが周りの磁気圏と反対の磁石になると考えていた。）



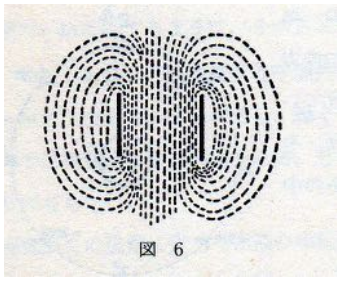
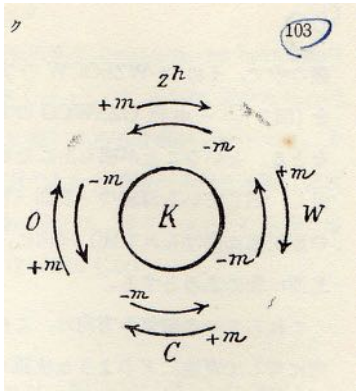


図 6



かれは、このことを示す実験として、この導線の周りに鉄粉を配置した。「鉄粉は鉛直におかれた閉じた導線の周りに円形に並ぶことになろう」として、その結果を図示している。同様に、平板の導体を平行に並べたときの、鉄粉による磁界の様子もまた報告している。これらは、その後ファラディに大きな影響を与えた。

[94] Zur entdeckung des elektromagnetismus Oersted Seebeck

４．アンペールの研究

（１）アンペールの研究１

アンペールは、エールステッドの発見の知らせを受けた1週間後（9月18日）2本の平行の針金に流れる電流による相互作用についての実験結果を学士院の会合で報告し、10月2日にアカデミーへ報告した[95]。その続きは、10月9日、11月6日[96]である。そのアカデミーへの報告では、まず電流の仕組みについての独自の見解を示し、電流には正の電気の流れと負の電気の流れがあるが、混乱を避けるために正の電気が流れる向きを電気量が流れる方向であると定義することとし、したがって例えば電池に導線を説即したときは電池の外の導線では水素が発生する極（つまり正の極）から酸素が発生する極（つまり負の極）へ流れ、電池内では、逆に負の極から正の極に流れると定義した。このように電流の定義を定めたことは、次の発見に大きな貢献をすることとなった。つまり、電流が磁石に与える作用について、つぎのように表現した。「電流が観測者の足元から頭の方へ流れるものとし、しかも顔を磁石の方へ向けたと考えるならば電流の作用によって磁石の北を指す方の端が、必ず、観測者から見て左手の方向となる」これは現在アンペールの法則と呼ばれているが、正しくはアンペールの表現と言うべきかもしれない。

次にアンペールは、電流と電流の相互作用について研究を行った。アンペールは相互作用は基本的に物体と物体の間の相互作用は、直線的で作用反作用の関係にあるべきであると言う思想を持っていたので、電流間の相互作用を調べてみようと考えたのは当然である。（エールステッドは、電流が磁石に影響を与えるなら磁石もまた電流に作用を及ぼすはずであるとして実験を行い発見を行っている。このことからもアンペールの発想には必然性があると言うべきであろう。）アンペールの行った実験は右図の通りである。この図においてABは固定された導線であり、CDの導線は上端を中心に振動できるようになっている。このCDの上の方の中心にカウンターバランスを取り付けて、微弱な力でも導線が反応できるように工夫した。装置は、微弱な風でも動いてしまうので、全体をガラスの器に入た。電源は二つ必要かと考えたが、実際は導線ABとCDを接続することで一つで間に合うことがわかった。この導線の接続に仕方によって電流を同じ向きに流したり反対向きに流したりすることが出来た。その結果

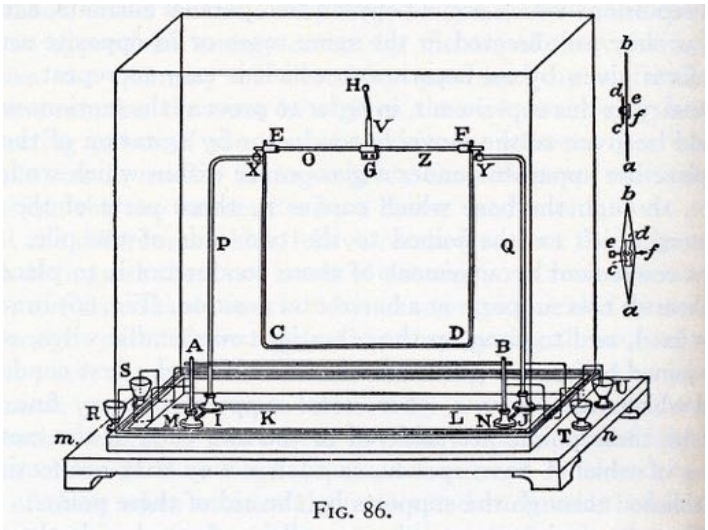


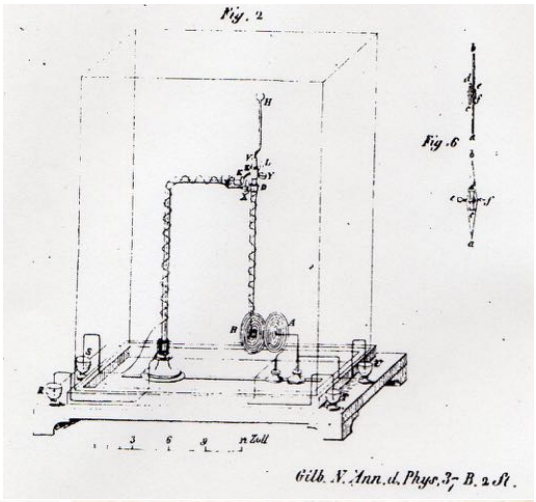
FIG. 86.

---

[95] Annalen der Physik 1821ampere p.113

[96] Annalen der Physik 1821ampere p.225

電流が同じ向きに流れているときは、引力が働く。
電流が反対向きに流れているときは、斥力が働く。
この結果は、静電気と似てはいるが、静電気では同種の時は反発で、異種の時は引力であるのでこの点では大きく異なっている。



次にアンペールはこの電流の相互作用と、二つの磁石の間に働く相互作用の関係を調べる。円形の電流を考えたとき、それら同じ向きにあるとき引き合い反対の向きにあるときは反発することから、円形の電流と磁石の間に類似の関係があることみとめ、右図のような装置によって二つのソレノイドの間の相互作用を調べた。こうして磁石が電流に還元できる確信をえた。その精密な理論は数年後（1826年）に発表されることとなる。

（2）アンペールの研究２

アンペールはエールステッドの発見を聞き、その後一週間ほど追実験を行いながら、最初の報告を1820年9月18日に行った。その後1822年には、電流と磁石の類似性を確認するために、導線を可動にすることを考えた。右の図は、鉛直の軸を中心として水平移動する可動コイルである。

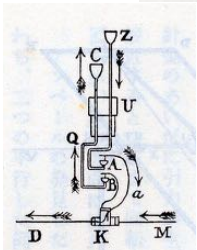


図 46
アンペールの可動的導線をつるす装置[3]

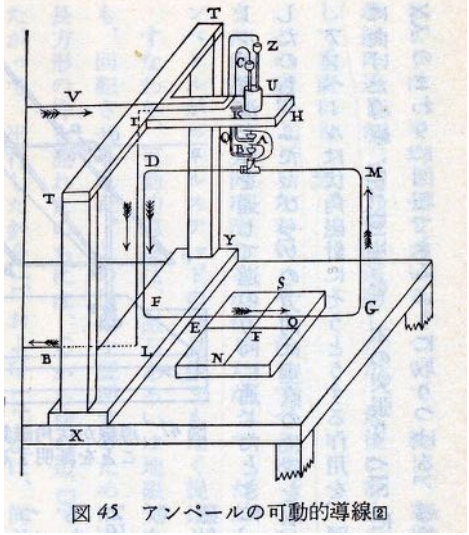


図 45　アンペールの可動的導線[2]

「可動的導線に磁石を作用させたとき、導線が数回振動した後、磁石の両極を結ぶ線と直角をなす位置に置いて静止することを発見した。この際磁石の南極は、静止したときは常に電流の左にあった」（ダンネマン）「地磁気だけが作用する場合は、導線はその平面が子午線を直角に切る位置をとることを示した。」

次に、水平軸を中心に回転する可動コイルを作成した。（右図）。電流を長方形の導線に通じた。長方形は運動したが、最後に静止の位置をとって、その平面は伏角磁針の方向に対して垂直になった。（ダンネマン7巻ｐ。２４６－２４８）

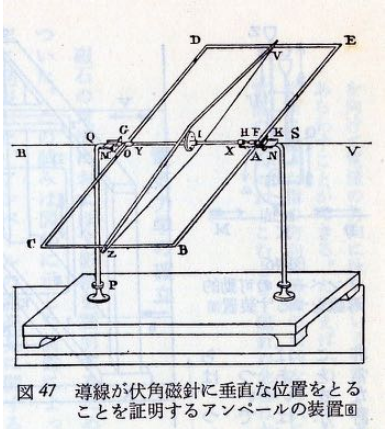


図 47　導線が伏角磁針に垂直な位置をとることを証明するアンペールの装置[6]

これらのことから、閉曲線を作る電流は、その囲む面を磁石とする磁石板と同等の働きをすることが予想された。このことは次の1827年の論文で明らかにされた。こうして、磁石と磁石の作用は電流と電流の作用に置き換えられることが予想され、磁石の性質は電流の性質に還元され、電流と電流の相互作用が本質的な事柄であるという確信をアンペールが持つに至ったことは想像に難くない。

（3）アンペールの研究３.

1822年から電流と電流の間の相互作用の研究が本質的であると考えたアンペールは1827年にはその研究の成果をまとめた有名な論文「実験から一意的に導かれた電気力学的現象の数学的理論について」[97]を発表した。

その方法について、アンペールは冒頭で次のように述べている。「さまざまな事実を観察し、出来る限りそれを行うときの状況を変化させる。この精確な測定という最初の仕事に続いて、その結果から実験にのみもとづいた一般法則を演繹する。そして現象を生み出す力の本性についてはいかなる仮説をも作らずに、この法則からこれらの力の数学的な値、つまり力を表す式を演繹する。これがニュートンが歩んだ道である。・・・そしてこれこそ私が電気力学の現象を研究するにあたって、つねに私を導いてきた方法なのである。」（広重徹「電気力学を進めた人たち」）[98]

すでに述べたように、電流をふたつの導体を同じ向きに流れるときは、互いに引き合い、反対に流れるときは反発した。これを、ニュートンの万有引力と同じく、力は二つの導線の要素を結ぶ直線の方向に働き引力と斥力で示すことができ、作用反作用の関係を満たすことが分かるであろう。そこでアンペールは、このことを確認すべく、次に示す4つの実験事実によって、二つの電流要素間に働く力の表式を求めることに成功した。

第1の実験事実　電流の方向を逆転すると、電流の効果は逆転する。

このために、図のような可動コイルを作成した。このコイルは前述のコイルと異なり、地磁気の作用を受けないようにコイルを二つ組み合わせ、地球磁気の影響などを相殺することとした。近づける導線を図のように途中で折り曲げて結びつけ力の作用を調べると、このときは全く作用が示されなかった。このことから反対に流れる電流は作用が反対であることが分かる。さらに、この実験によって、導線が生じる磁場を打ち消す方法が明らかとなった。

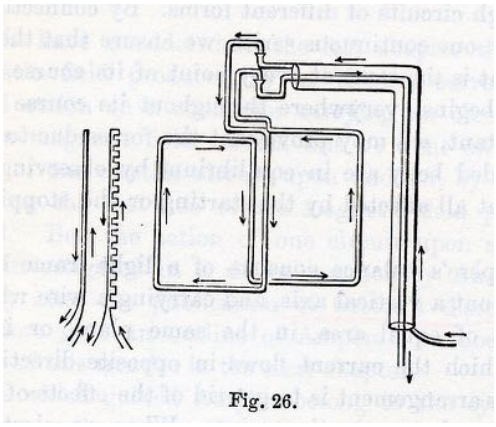


Fig. 26.

[97] THÉORIE MATHÉMATIQUE DES PHÉNOMÈNES ÉLECTRO-DYNAMIQUES UNIQUEMENT DÉDUITE DE L'EXPÉRIENCE André-Marie AMPÈRE 1827

[98] 広重徹　相対論の形成　みすず書房　ｐ．３５

第2の実験事実　くねくねと小さく波打つ回路を流れる電流の効果は、直線に流れる電流と同じ作用を持つ。

同じ図の中で、往復のうちの一方を波打つ電流としてその効果を調べると、やはり何の影響もないことが分かる。したがって、電流の影響は導線の始めと終わりを結んだ直線の導線で表すことができる。

第3の実験事実　閉じた回路が他の回路の要素に働く力はその要素の方向（つまり電流の方向）と直角の方向に働く。

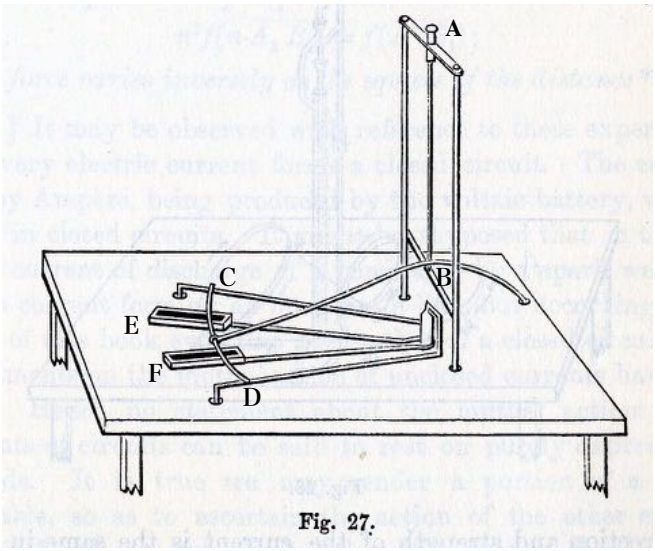


Fig. 27.

右図のようにＡＢを軸として弧ＣＤが回転するようにした。ＥとＦは水銀だまりで、少し盛り上がって、弧ＣＤと接触し、弧ＣＤに電流が流れ、かつ、弧ＣＤはなめらかに動くようにした。弧ＣＤに電流を流し、この近くに、磁石や閉回路で造った回路を持ってきたが、弧ＣＤは弧の方向には動かなかった。つまり、弧は電流と直角方向にのみ力を受けることが分かる。

第4の実験事実　二つの回路要素に、働く力はすべての大きさを比例して増大させたとき、電流の強さを変えなければ影響を受けない。

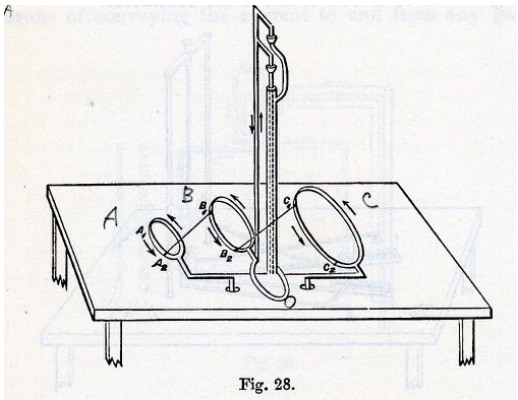


Fig. 28.

右図のように相似形の電流A，B，Cがある。Ｂは自由に回転できる。ＡとＣは固定されている。はじめに、A，B，Cをすべて同じ大きさとし、距離もＡＢ＝ＢＣとすれば、AはＢに、ＣもＢに作用しその大きさは等しく向きは反対であるから、Ｂは動かない。次にAの大きさをはじめのｎ分の１としＡＢ間の距離をｎ分の１とする。また、Ｃをｎ倍とし、ＢＣ間の距離はｎ倍とする。このときも、ＢがこれらのA，Cから力を受けて釣り合う。このことから、距離と大きさをすべて比例させ電流を同じとするときは、力の大きさが変わらないことが分かる。

この四つの事実から次のことが分かる。はじめに、電流と電流の間には二つの要素

を$d\vec{s}_1$、$d\vec{s}_2$、それらを結ぶ線を$\vec{R}$、電流の強さを$\vec{I}_1$、$\vec{I}_2$とする。電流要素間に働く力は、ニュートンの例に習ってまず作用反作用を満足し、両要素を結ぶ直線に沿って作用するとする。実験２によって、考えている向きに直角成分は力に影響を与えないことがわかる。したがって、力は平行の成分だけ、言い換えれば内積だけが効果があるとする。

これらの実験事実からAmpereは電流要素の間に働く力は

$$\vec{f} = CI_1I_2\vec{R}\left[\left(d\vec{r_1}\cdot d\vec{r_2}\right)\frac{2}{R^3} - \left(d\vec{r_1}\cdot\vec{R}\right)\left(d\vec{r_2}\cdot\vec{R}\right)\frac{3}{R^5}\right]$$

または

$$\vec{f} = \frac{I_1I_2dsds'}{R^n}\left(2\cos\varepsilon - 3\cos\theta\cos\theta'\right)$$

であると結論した。

物理学生への註

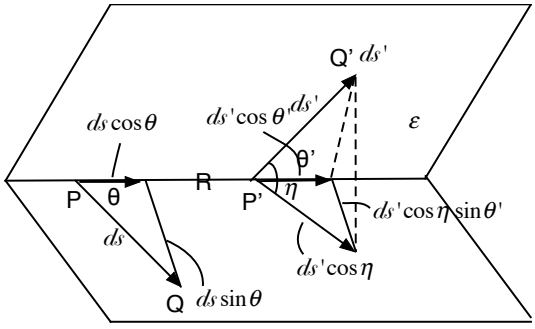
いま$d\vec{s}$、$d\vec{s'}$を結ぶ方向を$\vec{R}$とする。$d\vec{s}$、$d\vec{s'}$の$\vec{R}$方向の成分は$ds\cos\theta$, $ds'\cos\theta'$であり、$\vec{R}$方向に垂直な成分は、一つは$ds\sin\theta$であるがもう一つは内積をとるために同じ平面に投影してからとるので、$ds'\cos\eta\sin\theta'$である。R方向に関する力はR方向の成分の内積であるので

$$dsds'\cos\theta\cos\theta'$$

であり、R方向と直角方向の成分による力は

$$ds\sin\theta ds'\cos\eta\sin\theta' = dsds'\sin\theta\sin\theta'\cos\eta$$

である。この二つの部分からなるので、一般的には次の式が考えられる。



$$\vec{F} = \frac{I_1I_2dsds'}{R^n}\left(\sin\theta\sin\theta'\cos\eta + k\cos\theta\cos\theta'\right)$$

ここでηは面と面の間の角であるが、これをｄｓとｄｓ’の線分の直接の間の角εで表現すれば

$$\cos\varepsilon = \cos\theta\cos\theta' + \sin\theta\sin\theta'\cos\eta$$

の関係があるから、これを使って上の式を変形すれば

$$\vec{f} = \frac{I_1I_2dsds'}{R^n}\left(\cos\varepsilon + h\cos\theta\cos\theta'\right)$$

となる。

註1　$\cos\varepsilon = \cos\theta\cos\theta' + \sin\theta\sin\theta'\cos\eta$の説明

$$d\vec{s}\cdot d\vec{s'} = ds\cdot ds'\cos\varepsilon$$

一方　軸の方向をz、それに垂直な面をｘ，ｙとして（ｄｓのy成分はないことに注意）

$$d\vec{s} = \left(ds\sin\theta, 0, ds\cos\theta\right) \quad d\vec{s'} = \left(ds'\sin\theta'\cos\eta, ds'\sin\theta'\sin\eta, ds'\cos\theta'\right)$$

これから内積をとれば

$$d\vec{s}\cdot d\vec{s'} = dsds'\sin\theta\sin\theta'\cos\eta + dsds'\cos\theta\cos\theta'$$

$$\therefore \cos\varepsilon = \sin\theta\sin\theta'\cos\eta + \cos\theta\cos\theta'$$

註2　$\cos\varepsilon = -R\dfrac{d^2R}{dsds'} - \dfrac{dR}{ds}\dfrac{dR}{ds'}$ の説明

$$\cos\varepsilon = \left(\frac{dx}{ds},\frac{dy}{ds},\frac{dz}{ds}\right)\cdot\left(\frac{dx'}{ds'},\frac{dy'}{ds'},\frac{dz'}{ds'}\right) = \frac{dx}{ds}\frac{dx'}{ds'} + \frac{dy}{ds}\frac{dy'}{ds'} + \frac{dz}{ds}\frac{dz'}{ds'}$$

$$= -\frac{d}{ds'}\left\{(x-x')\frac{dx}{ds} + (y-y')\frac{dy}{ds} + (z-z')\frac{dz}{ds}\right\}$$

$$= -\frac{d}{ds'}\left(R\frac{dR}{ds}\right) = -R\frac{d^2R}{dsds'} - \frac{dR}{ds}\frac{dR}{ds'}$$

これから上の式は

$$dsds'\cos\varepsilon = \left(d\vec{s}\cdot d\vec{s'}\right) \qquad dsds'\cos\theta\cos\theta' = -\left(\frac{d\vec{s}\cdot\vec{R}}{R}\right)\left(\frac{d\vec{s'}\cdot\vec{R}}{R}\right)$$

ただし、$\cos\theta = \dfrac{ds}{R}$　　$\cos\theta' = -\dfrac{ds'}{R}$

の関係式を用いて

$$\vec{f} = \frac{I_1I_2}{R^n}\left(\left(d\vec{s}\cdot d\vec{s'}\right)\phi(R) + \left(\frac{d\vec{s}\cdot\vec{R}}{R}\right)\left(\frac{d\vec{s'}\cdot\vec{R}}{R}\right)\varphi(R)\right)$$

となる。

実験（4）から、$d\vec{r}_1$、$d\vec{r}_2$ と $\vec{R}$ が同じ割合で大きくなっても変わらない。このためには、n=2とおいて、

$$\vec{f} = CI_1I_2\vec{R}\left[\left(d\vec{s}\cdot d\vec{s'}\right)\frac{A}{R^3} + \left(d\vec{s}\cdot\vec{R}\right)\left(d\vec{s'}\cdot\vec{R}\right)\frac{B}{R^5}\right]$$

となる。ただし力はRの方向を向いているとしている。

次に実験（3）から、$\vec{f}$ の $d\vec{r}_1$ の方向の成分は回路 $d\vec{r}_1$ に沿って積分したときは、ゼロにならなければならない。$d\vec{r}_2$ を固定して考えるので $\vec{f}\cdot d\vec{r}_2$ が完全微分でなければならない。その結果、

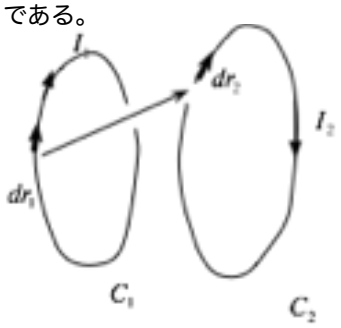
$$\left(d\vec{s}\cdot d\vec{s'}\right)\left(d\vec{s'}\cdot\vec{R}\right)\frac{A}{R^3} + \left(d\vec{s}\cdot\vec{R}\right)\left(d\vec{s'}\cdot\vec{R}\right)^2\frac{B}{R^5}$$

が完全微分でなければならない。

ここで、簡単のために結論からさきに述べると、完全微分の形は次のとおりである。

$$d\left\{\frac{1}{2R^3}\left(d\vec{s'}\cdot\vec{R}\right)^2\right\}$$

これを計算すれば次のようになる。



定常電流に作用する力

$$d\left\{\frac{1}{R^3}\left(d\vec{s}'\cdot\vec{R}\right)^2\right\}=\frac{1}{R^3}d\left(d\vec{s}'\cdot\vec{R}\right)^2+\left(d\frac{1}{R^3}\right)\left(d\vec{s}'\cdot\vec{R}\right)^2$$

$$=\frac{2}{R^3}\left(d\vec{s}'\cdot\vec{R}\right)\left(d\vec{s}'\cdot d\vec{R}\right)-\frac{3}{R^4}(dR)\left(d\vec{s}'\cdot\vec{R}\right)^2$$

$$=\frac{2}{R^3}\left(d\vec{s}'\cdot\vec{R}\right)\left(d\vec{s}'\cdot d\vec{R}\right)-\frac{3}{R^4}\frac{\left(\vec{R}\cdot d\vec{R}\right)}{R}\left(d\vec{s}'\cdot\vec{R}\right)^2$$

$$=\frac{2}{R^3}\left(d\vec{s}'\cdot\vec{R}\right)\left(d\vec{s}'\cdot d\vec{R}\right)-\frac{3}{R^5}\left(\vec{R}\cdot d\vec{R}\right)\left(d\vec{s}'\cdot\vec{R}\right)^2$$

$$=\left(d\vec{s}'\cdot\vec{R}\right)\left\{-\frac{2}{R^3}\left(d\vec{s}'\cdot d\vec{s}\right)+\frac{3}{R^5}\left(\vec{R}\cdot d\vec{s}\right)\left(d\vec{s}'\cdot\vec{R}\right)\right\}$$

つまりA=2　B=-3である。上の式変形では次を利用した。

$$dR=d\sqrt{(x-x')^2+(y-y')^2+(z-z')^2}=\frac{2\left((x-x')dx+(y-y')dy+(z-z')dz\right)}{2\sqrt{(x-x')^2+(y-y')^2+(z-z')^2}}$$

$$=\frac{\vec{R}\cdot d\vec{R}}{R}$$

$d\vec{s}'$ は定数で、$d\vec{s}=-d\vec{R}$ である。

結果は

$$\vec{f}=CI_1I_2\vec{R}\left[\left(d\vec{s_1}\cdot d\vec{s}'\right)\frac{2}{R^3}-\left(d\vec{s}\cdot\vec{R}\right)\left(d\vec{s}'\cdot\vec{R}\right)\frac{3}{R^5}\right]$$

これはまた、

$$\vec{f}=\frac{I_1I_2dsds'}{R^2}\left(2\cos\varepsilon-3\cos\theta\cos\theta'\right)$$

とも表現される。以上が、アンペールが導いた電流要素間の力である。[99]（Whittaker　「エーテルと電気の歴史」より）上記の方法はアンペールの方法とは異なるが、いずれにせよ、アンペールが実験により導いた条件を満足する力の表式はこの形で表現されることがわかる。

アンペールは、実験的に、コイルが磁石と同じ役割を果たすことを見た。Ampereのこの論文の後の方では、このことを理論的に計算して、いわゆる磁石版の定理について述べている。

「２°変形せずに閉じたボルタ回路の作用は、私の公式によって計算すると、同じ強度の磁気要素が回路を端とする任意の面上に一様に分布し、磁気要素の軸が至るところで面に垂直になっているときつくりだすものとまったく同じである。」[100]

---

[99] Theorie Mathématique des Phénomènes électrodynamiques Ampere 1826　または「マックスウェルの渦　アインシュタインの時計」　太田浩一　p.41

[100] 上記90　Ampere著p.147 または「マックスウェルの渦　アインシュタインの時計」p.45

このことは、板磁石と同じ形をした導線を用意し、導線に電流を流してできる磁場の様子を鉄粉で観察したときと磁石版の作る磁場の様子を鉄粉で観察したときと全く同じような模様ができることで簡単に確認することができる。

このようなことから、Ampereはふつうの磁石も分子電流の集まりであると考えて、磁石を一掃し、（つまり電流一元論ともいうべき見解）、すべてを電流と電流の直接の作用によると考えた。そして、その力を上記の式に求めたのである。

アンペールの理論のように、それ自身で完結される理論は、いわば本質的な理論である。こういう理論は、以前にも述べたように、それに含まれない現象を一定程度捨象して成立する。その、捨象される現象が少なければ少ないほど、より質の高い広い範囲にわたる本質的な理論といえる。この点で、アンペールの理論は、まもなく発見される磁場や電流の本性についての内容を捨象した、比較的狭い範囲で成り立つ程度の高くない理論であり、より高いマックスウェルの理論に包括されることになる。

５．グラスマンによる電流に働く力ーいわゆるビオ・サバールの法則

アンペールの理論は広く支持されたが、２０年近くも後の1845年にグラスマンによって重要な反論がなされた。グラスマンは次のように指摘する。すなわち、アンペールの理論は実験から演繹されていると言われるが、しかし一つ重要な仮定を含んでいる、それは、要素間に働く力は電流要素を結ぶ直線の方向に働くと仮定である。しかし例えばビオ・サバールの実験を見ても必ずしもそのように見えない事実もあり、また実験で確認されることは常に電流全体と電流全体であり、電流要素同士に働く力は必ずしも上記の電流要素間の直線の方向に働く必要はない。アンペールの仮説から生じる疑問点は、何よりもまずその法則の複雑さに現れていると彼は言う。さらにグラスマンは次のようにも指摘する。今、二つの電流要素が平行であったとする。このときアンペールの式

$$\vec{f} = \frac{I_1 I_2 dsds'}{R^2}\left(2\cos\varepsilon - 3\cos\theta\cos\theta'\right)$$

に代入すると、ε＝0，θ＝θ’であるから、

$$\vec{f} = \frac{I_1 I_2 dsds'}{R^2}\left(2 - 3\cos^2\theta\right)$$

となるが、この式は $\cos^2\theta = \frac{2}{3}$ のところで力がゼロになってしまうことを示している。この結論はグラスマンには不条理のように思われた。

グラスマンによれば、実験事実は力は導線に対して垂直に働くことを示しているのであり、さらに、電流が磁石の磁極に及ぼす作用はビオ・サバールの実験からこれもまた電流と直角の方向に作用していることを示している。つまり、電流の周りにそれに直角方向に磁気作用を生じ、さらにその磁気作用から作用を受ける電流要素に働く力は電流要素に直角方向でありその結果二本の導線は引き合うことを示している。グラスマンはこの線分の向きに直角方向の作用を研究し、外積という新しい演算を考案した。グラスマンが電流の作用を研究したのが１８４４年であるが、同じ年に、外積に関する

研究も発表されていることから外積の概念と電気力学の研究との間の関連性が推察されるのである。

物理学生への註

グラスマンの考えを現代風の式にすれば、まず、電流が、ある点の磁荷に働く磁気作用は、

$$\vec{H} = A\frac{id\vec{s}\times\vec{R}}{r^3}$$

これは、大きさだけを書けば

$$H = A\frac{ids\sin\theta}{R^2}$$

となり、いわゆるビオ・サバールの法則を示している。これを直線で積分すればビオ・サバールが測定した磁気作用が r に反比例することをしめしている。

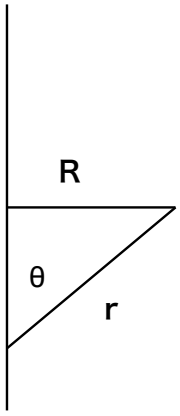
この磁気Hが電流要素 $d\vec{x'}$ に作用した結果受ける力は、

$$d\vec{f} = \frac{i'd\vec{s'}\times\vec{H}}{r^3}$$

この二つを組み合わせれば、

$$d\vec{f} = \frac{i'd\vec{s'}\times\vec{H}}{R^3} = A\frac{ii'd\vec{s'}\times\left(d\vec{s}\times\vec{R}\right)}{R^3}$$

となる。この式はグラスマンが初めて書いた式である。



アンペールの式と比較すると次のようになる。アンペールの力は

$$d^2\vec{F} = CI_1I_2\vec{R}\left[\left(d\vec{s_1}\cdot d\vec{s_2}\right)\frac{2}{R^3} - \left(d\vec{s_1}\cdot\vec{R}\right)\left(d\vec{s_2}\cdot\vec{R}\right)\frac{3}{R^5}\right]$$

$$= CI_1I_2\left[\frac{1}{R^3}ds\vec{r_2}\times\left(d\vec{s_1}\times\vec{R}\right) + d\left\{\frac{\vec{R}}{R^3}\left(d\vec{s_2}\cdot\vec{R}\right)\right\}\right]$$

と変形される。ここで

$$\frac{1}{R^3}d\vec{r_2}\times\left(d\vec{r_1}\times\vec{R}\right) = \frac{1}{R^3}\left(d\vec{r_2}\cdot\vec{R}\right)\cdot d\vec{r_1} - \frac{1}{R^3}\left(d\vec{r_2}\cdot d\vec{r_1}\right)\cdot\vec{R}$$

また、

$$d\left\{\frac{\vec{R}}{R^3}\left(d\vec{s'}\cdot\vec{R}\right)\right\} = d\vec{R}\left(\vec{R}\cdot d\vec{s'}\right)\frac{1}{R^3} + \vec{R}\left(d\vec{R}\cdot d\vec{s'}\right)\frac{1}{R^3} - \frac{3}{R^5}\vec{R}\left(\vec{R}\cdot d\vec{s'}\right)\left(\vec{R}\cdot d\vec{R}\right)$$

$$= -d\vec{r_1}\left(\vec{R}\cdot d\vec{s'}\right)\frac{1}{R^3} - \vec{R}\left(d\vec{s}\cdot d\vec{s'}\right)\frac{1}{R^3} + \frac{3}{R^5}\vec{R}\left(\vec{R}\cdot d\vec{s'}\right)\left(\vec{R}\cdot d\vec{s}\right)$$

である。ただし、$d\vec{s'}$ を固定し、従って、$d\vec{R} = -d\vec{s}$ とおいた。その結果、

$$d^2\vec{F} = CI_1I_2\vec{R}\left[\frac{1}{R^3}d\vec{s'}\times\left(d\vec{s}\times\vec{R}\right) - d\left\{\frac{\vec{R}}{R^3}\left(d\vec{s'}\cdot\vec{R}\right)\right\}\right]$$

この式でｄｒ₁について一周の積分を行えば完全微分の項はきえて、

$$d\vec{F} = \oint CI_1I_2\left[\frac{2}{R^3}d\vec{s}'\times\left(d\vec{s}\times\vec{R}\right) - d\left\{\frac{\vec{R}}{R^3}\left(d\vec{s}'\cdot\vec{R}\right)\right\}\right]$$

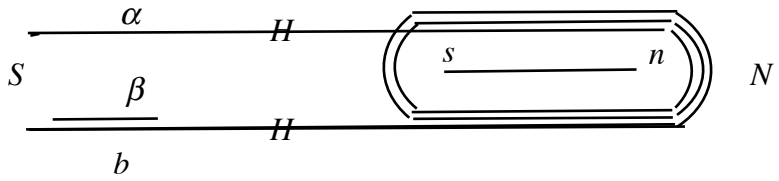
$$= CI_1I_2\oint\frac{2}{R^3}d\vec{s}'\times\left(d\vec{s}\times\vec{R}\right)$$

となる。つまり、グラスマンの式とは完全微分だけが異なるのであるが、グラスマンの考えははじめから導線方向の力はないとしているのである。

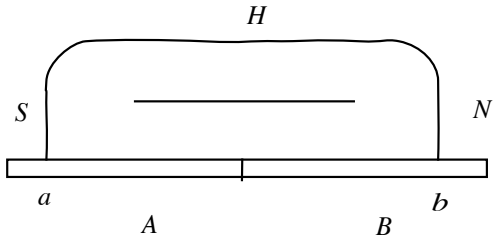
現在はグラスマンの考え方が使われている。現在ビオ・サバールの法則と呼ばれているものは、むしろグラスマンの法則と呼ぶほうが適切かもしれない。[101]

6．熱電気の発見

温度差によって電流が発生することの発見も重要である。特に、オームは彼の法則を発見するにあたってこの熱電流を用いた。発見は1822年ゼーベックによってなされた[102]。ゼーベックは電気と化学反応と磁気作用の相互作用を考察し、金属だけで液体の化学反応なしに磁気作用を行う現象を追求した。彼は、ガルバニ電流が生じるのは金属の接続に際して、一方に液体が挟まれていることが原因であるが、このことは、二つの接点の間に差があれば電流を生じさせることが出来るのではないかと考えたのである。そこで様々な試みをしているとき、次のような現象に遭遇した。つまり、下図のように、螺旋状に巻いた銅のテープの両端の間にビスマスを挟んだのである。そして、一方の接点を手で押さえた（つまり、図のαを下に下げてβに接触させ上から手で押さえた）。このとき微少ではあるが電流が生じることを確認したのである。



このことを彼は、手で押さえたとき温度の変化が起こりそれが原因ではないかと考えた。さらに装置を工夫して、下図のようにした。



---

[101] マックスウェル　アインシュタインの時計（前掲著）　p．48　参照

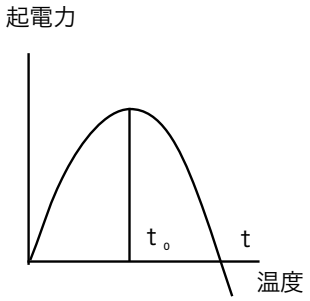
[102] Magnetische_polarisation_der_metalle Seebeck.pdf

二つの接点のうち、一方を塩と雪の寒剤で冷却しても同じ結果が得られた。この作用は、異種の金属の両接触点における温度差が大きければそれだけ強力であることが明らかになった。アンチモンとビスマスの棒をハンダ付けした場合は遙かに強いふれを示した。[103]

こうしてゼーベックは次のように結論した。

「これらのすべての実験から私は、これらの金属回路の中に磁気が生じる最初のそして最も重要な条件は二種類の金属が接触する点で温度の差があることであると結論した。」

ゼーベックの発見は現在熱電対として様々な分野で利用されている。ところで、この現象については、温度差がある程度増大すると起電力が減少することが発見された。この現象は熱電逆変と呼ばれ１８２７年　Cummingによって発見された。この現象はカミングの他にベクレルなどによって発見されているが、そのことをW.Thomsonが報告している[104]。それは次の通りである。熱電対の一方の接続部分を常に冷却しておいて、多様の接続部分の温度を上昇させ、流れる電流をガルバノメーターで測定すると、温度の温度の上昇にもかかわらず、電流は減少して、やがて止まり、それから逆方向に流れるようになるというものである。この様子を模式的に示すと、右図のようになる。横軸が温度、縦軸が起電力である。



熱起電力と逆の効果は、ペルティエ効果（Peltier effect）と呼ばれ、異なる金属を接合し電圧をかけると、接合点で熱の吸収・放出が起こる現象で、1834年、ジャン＝シャルル・ペルティエによってはじめて観察された。[105]

７．アラゴの回転磁界の発見

1824年11月アラゴは回転磁界についての発見を行った。それは、振動する磁石の針の下またはその周りに銅板を置くと磁石と銅板は触れることなく磁石の振動を周期は変えずに弱める働きがあることである。その作用は、その間の距離を縮めると急激に大きくなった。それは金属であればよく木やガラスを近づけてもあまり効果は認められなかった。この結果はゼーベックによっても追試された。彼によれば大理石の上で磁石が振動するときは112回振動する間に45°から10°まで減少するが、亜鉛板のときは71回で、銅板のときは62回で減少することが確認された。

さらに1825年には、箱に入れた磁石の針の下で、銅板を回転させると、かなりの速さ

[103] ダンネマン７巻　p. ２６１も参照

[104] W.Thomson 1857年　Phil. Trans　p.549 On the electro-dynamic quality of metalsより

[105] Annales_de_chimie_et_de_physique 1834 .p.371 Nouvelles Expériences sur la Caloricité descourans électriques ; Jean Charles Athanase Peltier

で回転することを確認した[106]。ハーシェルやバベジによってこのことが追試された、彼らは銅板などを馬蹄形磁石の上に置き、磁石を回転させると銅板もまた同じ方向に運動することを確認したのであった[107]。さらに、銅板に放射状に切り込みを入れると、その効果は小さくなった。これらの現象は、ファラデーによって解明されるまでは、謎のママ残されたのであった。

III. 電流について・・・実体の探求とその運動について

アンペールは電磁現象を電流と電流の間に働く力に限定し、そこからすべてを説明しようとした。それは一定程度の成功を収め、矛盾なく説明できる本質論的な理論を完成させた。本質的な理論は常にそうであるが、現象と実体についてある程度切り捨てることによって成立する。19世紀の終わりにトムソンはもはや物理学で説明できないものはない、若干の例外を除いてと言ったが、結局はその例外が新しい理論を創出させた。アンペールの理論が確立されたときに切り捨てられた実体と現象についての研究こそがその後の電磁気学の理論をより高度に発展させることにつながったのである。その一つが電流の実体に関するオームの研究であり、もう一つが電場と磁場についての相互作用の現象と実体に関するファラデイの研究である。ファラデイの研究は電磁気学について広範な変革をもたらすもので、次の章で取り上げることとして、ここでは、電流に関するオームの研究を取り上げる。もちろんどの研究にも先達はあるものである。

1　デーヴィの研究

デーヴィが金属内を流れる電流に関する研究を行いそれを発表したのは1821年、「電気による磁気現象の研究。並びに、伝導能力と温度との関係に関する電気的物体の性質について」[108]であった。デーヴィは、導線を流れる電流の発生する熱量と接続する電池の大きさに基づいて、電流の流れやすさを検査した。その結果、導線が一種類の金属で出来た針金の伝導能力は、その長さに反比例し、同じ長さのときは体積に比例すること（つまり断面積に比例すること）、そして断面の形にはよらないことがわかった。断面の形によらないという事実は、導線を何本かをばらしても、一本にまとめても同じ電流が得られることを示し、電流は導体全体を通過し表面に沿って流れるのではないことを示していると指摘した。さらに温度との関係も調べ、温度が高くなると反比例して伝導率が悪くなることを発見した。しかし、回路についての知識が明確でないため必ずしも期待された結果は得られないことが多かった。

オームの研究はデーヴィのこの研究が下敷きとなった。さらに電気のこのような移動

---

[106] ダンネマン　第７巻 p.258

[107] Philosophical Magazin 1825 p.98 ‘On the Magnetism developed by Rotation’ Herschel

[108] Phil. Trans. R. Soc. Lond.-1821-Davy-rstl.1821 p.425-439 ‘Farther Reseaches On the magnetic phenomena produced by Electricity’

のしかたは、1822年にフーリエが「熱の解析的理論」[109]において示した熱の移動の仕方と同様であることをオームは見抜いた。オームはフーリエの理論から大きな影響を受けたが、まずはデーヴィの実験結果の確認から行ったと思われる。

２．オームの研究

（１）オームの実験的研究

1826年にオームは「ヴォルタの装置とシュバイガーのマルチプリケーター（電流計）を用いて金属の伝導に関する法則の決定」[110]と題する報告を行った。初めに、同じ長さ、太さの材質の異なる金属線をボルタの電池に繋いで導線の近くにおいた磁石を用いて電流を測定した。

その結果は、銅1000に対して、金574、銀356、亜鉛333、真鍮280、鉄174、白金171錫168、鉛97となった。これらはデーヴィの実験結果を確認するとともにより定量的に確認することが出来たといえる。次に材質は同じだが、太さの違う針金例えば半径が0.12と1.4の直線を用意し、それぞれが同じ効果を示す長さを測定した。その結果、長さが断面積に比例するとき同じ伝導率を持つことを確認した。（つまり、電気伝導は断面積に比例することになる。）

これらの実験を通して使用した電池は銅と亜鉛を硫酸に浸したものであったが、不安定で力が波を打つことに大いに悩まされた。そこで、ポッゲンドルフが薦めてくれた熱電池（thermomagnetishen Kette,thermo-electric battery)を用いて実験を行ったところ電流が安定し、障害になっていた電力の浪打はもはや痕跡もなく、電流計の針は回路を閉じている間はまるで止まってしまったかのように、少しも動かなかった。この装置を持ちいて、伝導に関する法則を明確に確認する結果を得ることが出来た。そこでオームはこの実験装置について詳しく述べている。

オームは電流の強さを測るためにねじりばかりを用いた。磁針を金の細片（長さ5インチ）で吊した。円筒形の金属線ではなく平たい板状のものを使ったが、非常に優秀で3回ひねってもきちっと元の位置に戻った。

つり下げられた磁石は太さが0.8line（1．6mm)長さが2inchである。細くて短いために慣性モーメントが小さく振動しにくい。ぴたっと静止したのはそのせいであろう。その先端には象牙で目盛りを指示するものがついている。ガラス容器で包まれて風の影響を受けないようにしている。dcbabb'a'b'c'd'は　aとa'を熱源とする熱電対である。（右下図）。aは、氷水を入れて0度に冷やし、一方a'は水を沸騰させて常に100度に保つようにする。測定する針金は図のm,m'（水銀が入れられている）にその端を入れて測定する。導線bcは、地磁気の子午線と一致するようにおく。uu'は目盛りであり、lは、レンズである。

ねじりの頭を反対側にねじると、元の位置に戻る。磁針をゼロ点に戻るのに必要な

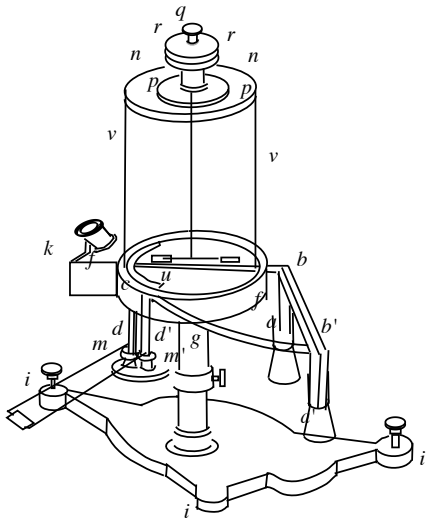
---

[109] 'The Analytical Theory of Heat' Joseph Fourier 1822,英訳　1878　Dover 2007

[110] Source Book in Physics Magie p.465 Ohm's Law　Annalen_der_Physik_und_Chemie-ohm .pdf p.137

ねじりの回転の度合いを測定する。目盛りは1回転を100等分した。これは原理的には現在の電流計と変わるところはない。

次に、太さが同じで（７／８ライン　1ラインは約０．２ｃｍ）で、長さが２　、　４、６、１０、１８，３４，６６，１３０インチの長さを持った導線を8本用意した。　これを回路の一部(mm')に挿入して電流の強さを測定した。測定結果は下記の通りである。



実験№	導体番号	1	2	3	4	5	6	7	8
	導体の長さ	2	4	6	8	18	34	66	130
1	角度	326.75	300.75	277.75	238.25	190.75	134.5	83.25	48.5
2		311.25	287	267	230.25	183.5	129.25	80	46
3		307	284	263.75	226.25	181	128.75	79	44.5
4		305.5	271.5	259	224	178.5	124.75	79	44.5

オームは導体の長さ（抵抗Ｒ）と角度（電流の強さＩ）の関係は次の式で与えられることを見いだした。$I=\frac{a}{l+b}$ ここでa=7285，6965，6885，6800　b=20.25として計算すると次のようになる。[111]

理論値

実験№	導体番号	1	2	3	4	5	6	7	8	
	導体の長さ	2	4	6	8	18	34	66	130	起電力a
1	角度	327.42	300.41	277.52	257.88	190.46	134.29	84.46	48.49	7285
2		313.03	287.22	265.33	246.55	182.09	128.39	80.75	46.36	6965
3		309.44	283.92	262.29	243.72	180	126.91	79.83	45.82	6885
4		305.62	280.41	259.05	240.71	177.78	125.35	78.84	45.26	6800

[111] 表の中の理論値は筆者小林の計算値を用いた。オームの計算と殆ど変わらない

理論値と実験値はよく一致していることが分かる。実験１，２，３，４は、熱電対の温度差によるものである。したがって、それは電池の起電力に関係すると思われる。ｂは常に一定で、長さ以外の回路の定数であると考えられる。aは起電力に関係した量である。これは上の結果は式で書けば

$$i=\frac{a}{\alpha(l+b)}=\frac{E}{\alpha L}\ \text{ただし}\quad E:\text{起電力}$$

となる。$L=b+l$は、回路の抵抗を長さで表現したものであり、$\alpha L=R$を抵抗とすれば、

$$i=\frac{E}{\alpha L}=\frac{E}{R}$$

で、いわゆるオームの法則となる。この式は電流は断面積Sに比例することを考慮に入れれば、

$$i=\rho\frac{SE}{L}\quad \rho\text{は電気伝導度}$$

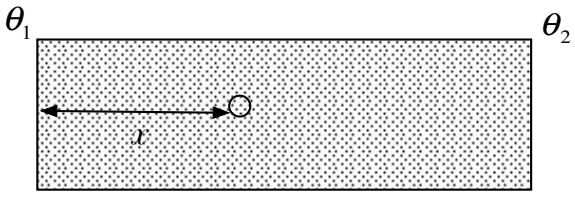
とも書くことができる。いずれにせよオームが行ったのは、抵抗が長さと断面積と材質に関係することを示したことである。その意味は次の理論的研究で明らかにされた。

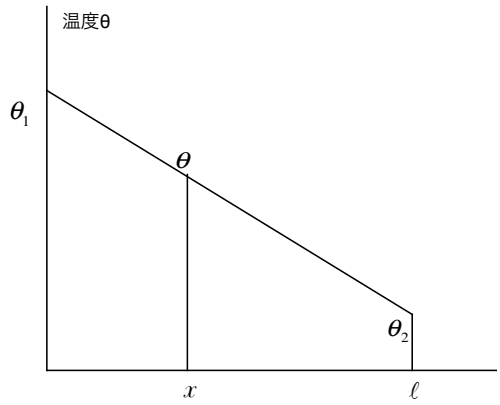
（２）オームの理論的研究（1827年）[112]

オームはまず、電流の強さは熱の流れと類似の傾向があるとの推論から出発する。熱の流れについてはフーリエの「熱の解析的理論」[113]が発表されており、極めて大きな影響を与えていた。それによれば流れる熱の量は次の式で与えられる。

$$\frac{Q}{t}=\lambda\frac{\theta_2-\theta_1}{l}S$$

$\frac{Q}{t}$は熱の流れで、$\theta_2-\theta_1$は温度差　lは長さ、Sは面積である。一様な物体を熱が流れるとき、例えば右上の図のｘの位置の温度をフーリエは次のように表し、グラフ（右図）[114]で表現した。





112 The Galvanic circuit investigated mathematically G.S.Ohm 1827

113 'The analytical theory of heat ' Joseph Fourier 1822

114 フーリエにおいては縦軸と横軸は反対である。前掲書p.49 参照

$$\theta = \theta_1 - \frac{\theta_2 - \theta_1}{\ell} x = \theta_1 - \frac{F}{\lambda S} x$$

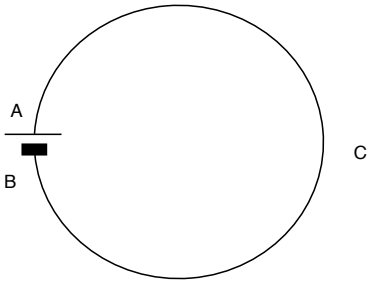
これらのフーリエの熱に関する表現は、オームの実験の電気の移動と電気張力[115]（電位）と類似の結果を示している。オームの法則は

$$i = \sigma \frac{E}{l} S$$

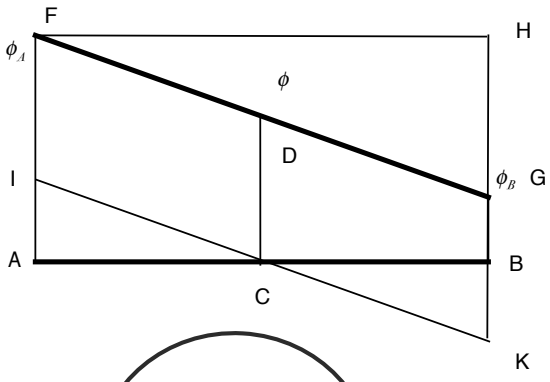
であるが、起電力は電位の差であるとして次のように変形できる。

$$i = \sigma \frac{\phi_1 - \phi_2}{l} S \quad \rightarrow \quad \phi_1 - \phi_2 = i \frac{l}{\sigma S} \quad \rightarrow \quad \phi_2 = \phi_1 - i \frac{l}{\sigma S}$$

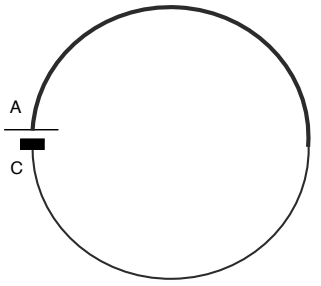
こうして、オームは、電流もまた熱の移動と同様の現象であるとして、温度に対応する概念として電位＝電気張力、温度差に対応するものとして起電力＝電圧の概念をあてた。このことによって、導体内部の電位についても議論することが出来るようになった。さらにオームはフーリエの議論を利用してグラフで表現することを試みた。



オームはまずはじめに、電池の両端を円形状に一様な導線で結ぶ場合を議論する（右図）。これを、フーリエに習ってグラフで示せば次ページの図のようになる。右図[116]においてAとBは電池の両端でありABは導線の長さを示す。ACは途中までの長さである。AFは電池の点Aの電位（電気張力）ϕ_Aを示す。GBは電池の別の点Bの電位ϕ_Bである。その差FA－GBがこの回路の起電力である。FGの傾きが電流の強さを決めることになる。FとGを結んだ線が、導線内部の電位を表すこととなる。例えばDはC点での電位を表している。今は直線ABで表された高さが電位の基準としているが、どこを基準とするかは任意であるから、例えばC点の電位をゼロとすれば、ICKで表される直線が求める直線となる。



回路が二つの金属導線から出来ている場合は右図のようになる。ABは一つの導線、BCも一つの導線でそれぞれ異なった材質でできていてBで接続されている。したがってBでは接触電位差がある。この場合は、縦軸に電位横軸に位置を表すグラフで書けばFig２のようになる。ここで、FG＝ABとHI＝BCは



---

[115] オームはspannung と呼んだ。電位のことである。英訳ではpotential となっている。Green の論文はオームの次の年である。　p．105 参照

[116] この図はオームの論文の図を左右入れ替えていくぶん簡略化して書いてある。

異なる金属であることを示す。この二つの金属の接触電位差はＧＨである。Ａ点、Ｃ点は電池の両端でありA点の電位ϕ_AとC点の電位ϕ_Cは異なり$\phi_A = AF$ $\phi_C = CI$である。ＧＨがG'H'となる場合は、ABの材質とBCの材質が異なる場合である。起電力は同じであるからKFは変わらない。

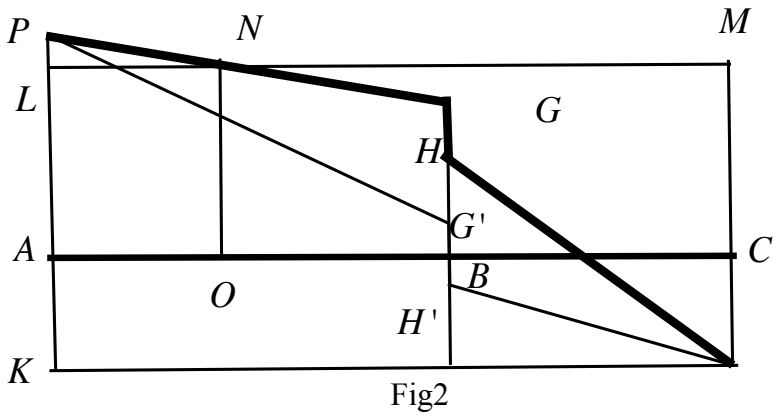
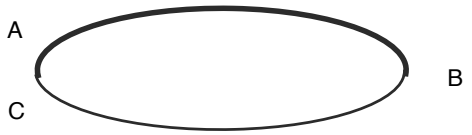
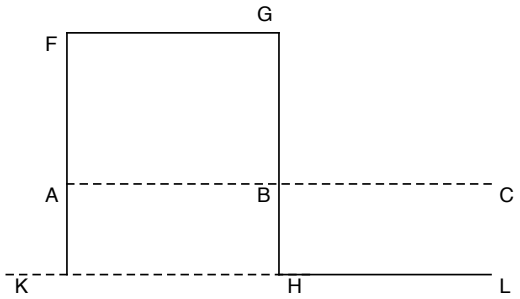


Fig2

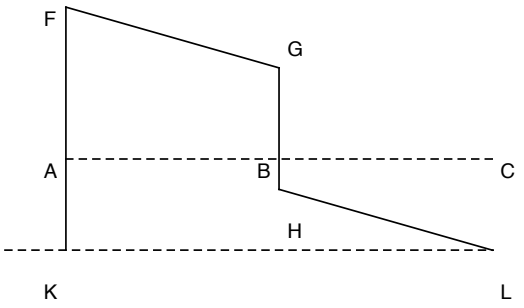
オームの論文には書いてないが、オームの実験で行った熱電対の場合について考察してみよう。電池は存在せず二種類の金属導線を結びつけただけで温度差がなければ右図のようになる。このときはA点とB点での接触電位差は同じなので、A点での電位ＫＦ、Ｂ点での電位ＧＨは同じで上がった分だけ下がるのでFG間とHL間に傾きはなく電流は流れない。（右図）。



しかし、A点とB点の温度に違いがあると、A点での電位差とB点での電位差は等しくなくなり[117]、その結果右下の図のようになり電流が流れる。



このように、縦軸に電位（電気張力）を取り横軸に位置をとったグラフは電流の流れ方や各点の電位を理解するには都合が良い。このグラフは現在でも教科書に採用されている図である。ただし、現在は水の流れと対応されることが多いが、オームのように割り切って縦軸は電位を横軸は位置を表すグラフであるとしたほうが余計な混乱を引き起こすことは少ないかもしれない。



さて、上図（Fig2)において電位を式で表してみよう。一様な導線における電位の式は次の通りである。

$$\phi = \phi_0 - i\frac{l}{\sigma S} = V_0 - iR \qquad \frac{l}{\sigma S} = R$$

[117] 最後の金属電子論のところでこのことが議論される。

オームは$\frac{l}{\sigma S}$を還元された長さと呼んでいるが、今で言う抵抗のことである。初めの電位をϕ_Iとし、終わりの電位をϕ_Fとすれば、

$$\phi_F = \phi_I + i\frac{l_1}{\sigma_1 S_1} + \phi_G - \phi_H + i\frac{l_2}{\sigma_2 S_2} = \phi_I + iR_1 + \phi_G - \phi_H + iR_2$$

これを変形して

$$-\left(\phi_F - \phi_I\right) + \left(\phi_G - \phi_H\right) = -i\frac{l_1}{\sigma_1 S_1} - i\frac{l_2}{\sigma_2 S_2} = -iR_1 - iR_2$$

$$\left(\phi_F - \phi_I\right) - \left(\phi_G - \phi_H\right) = i\frac{l_1}{\sigma_1 S_1} + i\frac{l_2}{\sigma_2 S_2} = iR_1 + iR_2$$

この式で左辺は全体の起電力を表している。これをEと書けば

$$i = \frac{E}{\frac{l_1}{\sigma_1 S_1} + \frac{l_2}{\sigma_2 S_2}} = \frac{E}{R_1 + R_2}$$

となる。仮に導線以外の抵抗（電池内部の抵抗）を$\frac{l_1}{\sigma_1 S_1} = R_1 = r$とすれば、

$$i == \frac{E}{r + \frac{l}{\sigma S}} = \frac{E}{r + R_2}$$

ここで$r + \frac{l}{\sigma S} = R$を全抵抗とすれば、回路に流れる電流は

$$i = \frac{E}{R}$$

で与えられる。

次にオームは、ボルタの電堆と熱電対について議論している。熱電対の起電力はボルタの電堆に対して100分の１からときには1000分の１と非常に小さいにも関わらず大きな電流が得られるが、これは回路全体の抵抗がきわめて小さいことによると見抜く。それに対し、ボルタの電堆は、起電力は比較的大きいがその内部の抵抗（溶液の抵抗）も大きいので、電流がそれほど大きくならないことを指摘した。このことから、電堆を繋いで起電力を大きくしても流れる電流が大きくならないというデーヴィが発見した事実を次のように説明する。起電力がE内部抵抗がｒのｍ個の電池からなる電堆を、抵抗Rに繋いだとき、流れる電流は上記の式から

$$i = \frac{mE}{mr + R}$$

となるが、これは変形してさらにｒ＞Rを用いれば、

$$i = \frac{mE}{mr + R} = \frac{E}{r + \frac{R}{m}} \to \frac{E}{r}$$

となる。この結果は、デーヴィの観察※を、つまり、電池を沢山つないでも一定以上の

電流にならないということを示しているとオームは指摘した。

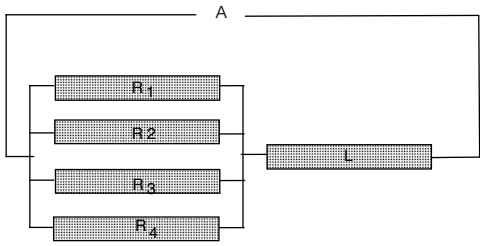
オームはさらに抵抗の並列について議論する。並列に（分割してとオームは言っているが）繋いであるときは、流れる電流は次の式で与えられるとする。

$$i=\frac{E}{R_1}+\frac{E}{R_2}+\frac{E}{R_3}+\frac{E}{R_4}=\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_4}\right)\cdot E=\frac{E}{R}$$

したがって、右図のような回路の時は

$$\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_4}=\frac{1}{R}$$

とおいて、$i=\frac{E}{L+R}$ となるというのがオームの結論である。



（※）デーヴィは1821年の論文において[118]、

「ずいぶん以前に電堆のプレートを増やしていったとき少なくとも初めは繋いだ線に与える熱は増大することから電流は増大するように見えた。しかし、それはある限界以内のことで、限界を超えると量は増大するよりもむしろ先細りになるようであった。こうしてロンドン協会の2000枚の電池でも二枚の銅板からなる電池10個分とそれほど変わらないことがわかった。」

と述べている。この現象はデーヴィにとっては不可解なものであったが、オームの法則により明らかになったのである。

３．ポッゲンドルフによる起電力と内部抵抗の測定

オームの法則が発表されてもすぐには広く知られることとはならなかった。一つには、オームの研究の実験部分（第一論文）については知られることがなかったので、理論的なものだという受け取られ方をしたのかもしれない。このことについて、例えばベルリン大学のドーフェ教授は次のようなことを紹介している。

「ベルリンの＜科学批判年報＞誌上では、オームの理論は、空想の巣を丸出しにしたものと呼ばれた。まったく表面的にしか観察しない場合でも、この理論を少しでも支持するような事実を見つけ出すことは、決してあり得ないとまで言われたのである。年報の執筆者はさらに続けて、『事実の世界を尊厳の目で見るものは（オームの）この論文が、癒やすことのできない幻想の産物であり、その唯一の努力が、自然の尊厳から人も眼をそらすことにあるとして、この本に背を向けなければならない』[119]とさへ述べているのである。」

オームの研究が受け入れられなかったのは、この紹介にあるような不幸な批判が原因であったのであろう。ところで、現在学校教育ではオームの法則は当たり前のこと

---

[118] Phil.Trans.1821'Farther Researches on the Magnetic Phenomena Produced by Electricity' p.437 Humphry Davy

[119] 東京図書　科学普及新書　F.カジョリ　物理の歴史（中）武谷三男　一瀬幸雄訳p.127
原文は　Memory of Joseph Henry 1880. p.489

として教えられている。しかし、発表当時は全く事情は異なっていたのである。実験事実を踏まえた丁寧な指導が必要とされる所以である。

オームが発表した次の年1828年には、同じ電気張力に対してグリーンがポテンシャルの名称を与え静電気学を完成させた。1831年にはファラディが電磁誘導の法則を発見、電気分解の法則、自己誘導の法則などを発表し、1834年にはレンツが電磁誘導の法則についてのレンツの法則を発表した。1836年にはダニエル電池が作成され、オームを悩ませた電力の波打ち現象が改善された。このダニエル電池が現在の電圧の単位ボルトの原型となった。1840年にはジュールがダニエル電池を用い発熱量が抵抗と電流の2乗に比例することを示した。このジュールの実験においてはオームの法則が大きな役割を果たしている。オームの研究はその後、ポッゲンドルフ、フェヒナー、ファラデー、ホイートストンなどのよって支持され徐々に受け入れられて1841年には英語訳が出版された。米はヘンリーはこの訳からオームを知り賞賛した。オームの法則が出るまでは電流の強さとか電流の量とか曖昧な概念で用いられていたのであった。

1841年ポッゲンドルフは、ガルバニ電堆の（つまり電池の）起電力を量的に決定する方法と題して、起電力を決定する上でのオームの法則の有効性について発表している[120]。ポッゲンドルフは言うまでもなく、オームが研究を行う上で重要な貢献をした人物である。

ポッゲンドルフのこの論文の冒頭で、オームの法則は次の分数$i=\frac{E}{R}$で表現されるものであるとして、このことによって抵抗の概念が一般的になったと云っている。ところで、この式$i=\frac{E}{R}$において、起電力Eは電流の原因ではあるが、状況においていろいろと変わるものである。例えばガルバニ電池においても、いろいろな種類があり、それぞれの起電力の大きさは決めることが出来ない。むしろ、オームの法則によって起電力を決定する方が合理的である。そして、オームの法則によって起電力を決める方法として次のような方法が用いられてきたことを記述している。つまり、ある電池と固定された抵抗（例えば内部抵抗）があり、さらに、l_1 、l_2 を与えられた抵抗であるとする。（長さに比例する）、この抵抗を繋いだときの電流をi_1、i_2とすると、次の式が得られる。

$$i_1=\frac{E}{r+l_1}:i_2=\frac{E}{r+l_2}$$

この式から起電力と内部抵抗を求めることが出来る。結果は

$$E=\frac{i_1 i_2}{i_1-i_2}\left(l_1-l_2\right)$$

となる。この方法は現在でも高校の実験でよく行われる方法である。

もう一つ、Fechnerがおこなった方法として次のような方法を紹介している。すなわ

---

[120] Annalen der Physik und Chemie-1841-54　p.161　‘Methode zur quantitativen Bestimmung der elektromotorischen Kraft inconstanter galvanischer Ketten’; von J. C.Poggendorff.

ち、電池を二つ同じ向きと反対向きに接続するのである。同じ向きに繋いだときは、

$$i_p = \frac{E_1 + E_2}{r_1 + r_2 + R}$$

反対向きに繋いだときは

$$i_A = \frac{E_1 - E_2}{r_1 + r_2 + R}$$

これから、

$$i_p + i_A = \frac{2E_1}{r_1 + r_2 + R} \qquad i_p - i_A = \frac{2E_2}{r_1 + r_2 + R}$$

したがって、

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{i_p + i_A}{i_p - i_A}$$

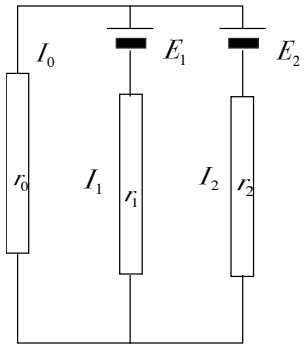
これから、安定した電池と比較して求める電池の起電力がわかる。ポッゲンドルフは、二つの電池を繋いだときに流れる上記の式 $i_p = \frac{E_1 + E_2}{r_1 + r_2 + R}$ が正しいことを実験によって確認した。

実験はグループ電池とダニエル電池について、まず個々に起電力と内部抵抗を上記の方法で測定し、次にそれらを直列に接続した場合の起電力と内部抵抗を同様に測定し、理論値と実験値を比較した。結果は次の通りである。

	起電力	抵抗
グループ電池	25.79	5.08
ダニエル電池	15.78	13.73
直列に繋いだときの理論値	41.57	18.81
直列に繋いだときの実験値	41.62	18.91

（註）理論値は $E = E_1 + E_2 = 25.79 + 15.78 = 41.57 \quad r = r_1 + r_2 = 5.08 + 13.73 = 18.81$

ポッゲンドルフは、電池を並列に繋いで起電力を求める方法を考えた。たとえば右図のように電池を二つ並列に接続しそのときの電流を求めた。そして、$I_2 = 0$ のときは



$$E_2 = \frac{r_0}{r_2 + r_0} E_1$$

となり、抵抗の値から起電力を求めることができるのである。これはいわゆるポテンシオメーターの原理である。この結果は現在ならキルヒホッフの法則を用いて簡単に導かれるが、

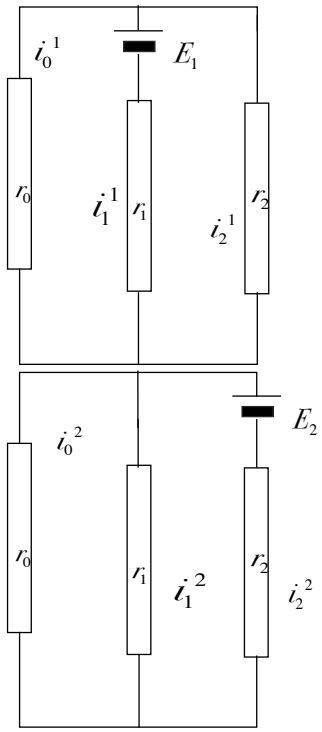
キルヒホッフの法則[121]はまだ確立されていなかった。

物理学生への註

ポッケンドルフは回路について重ね合わせの原理を使用した。彼のやり方を見てみよう。まず、電池が一つだけあるとして電流を計算し、次に、その結果をそれぞれ重ね合わせることによって電流を求めるのである。起電力、抵抗、電流が図の通りであるとする。計算の簡単のために $S=\frac{1}{r_0}+\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_2}$ とする。

まず、E_1 だけがあるときは、合成抵抗は

$$R=r_1+\frac{1}{\frac{1}{r_0}+\frac{1}{r_2}}=r_1+\frac{1}{S-\frac{1}{r_1}}=r_1+\frac{r_1}{Sr_1-1}=\frac{{r_1}^2S}{S-r_1}$$



これから

$$i_0{}^1=\frac{E_1}{r_0r_1S}\qquad i_1{}^1=\frac{E_1\left(Sr_1-1\right)}{\left(r_1\right)^2S}\qquad i_2{}^1=\frac{E_1}{r_1r_2S}$$

同様に E_2 だけがあるときは

$$i_0{}^2=\frac{E_2}{r_0r_1S}\qquad i_1{}^2=\frac{E_2}{r_1r_2S}\qquad i_2{}^2=\frac{E_2\left(Sr_2-1\right)}{\left(r_2\right)^2S}$$

電池が二つあるときは、重ね合わせによって、

$$I_2=-i_2{}^1+i_2{}^2=-\frac{E_1}{r_2r_1S}+\frac{E_2\left(Sr_2-1\right)}{\left(r_2\right)^2S}$$

ここで $I_2=0$ とすれば、

$$E_2=\frac{r_0}{r_2+r_0}E_1$$

この式によって、電池の起電力を求めることが出来る。

4．ホートストンの研究

「ボルタ回路の定数を決めるためのいくつかの道具とその手続きに関する説明」[122]と題して1843年に発表されたこの論文は、それ以前の数年間に渡って電流の法則について研究してきたいろいろな道具と手順について説明したものであるが、この際重要な役割を果たしたものとしてオームの法則の重要性について強調している。

---

[121] キルヒホッフの法則はp.106を参照

[122] Charles Wheatstone The Bakerian lecture.'An account of several new instruments and processes for determining the constants of a voltaic circuit' Phil. Trans. R. Soc. Lond. 1843 p.303-327;

「私が記述しようとする道具とその手続はボルタの回路についてオームが確立した法則に基づくものである。この美しく包括的な法則はまだ一般的には受け入れられていないのだが、・・・私にとっては、この法則から導かれる主要な説明と結果を前提としなければ研究を記述し説明をすることができなかったであろう」

この論文のホイートストンの研究などによって、オームの法則が広く受け入れられることになっていった。論文では、オームの法則は簡潔で美しくしかも幅広く適用できる法則であるがまだ十分に理解されていないとしてその内容をまず簡潔に説明している。

「起電力とは閉じた回路においては電流を生じる原因であり、回路が閉じていないときには電気的な張力を引き起こすものである。抵抗は電流が通過する物体によってその流れに逆らうものを意味し、それは通常の電気易動度と逆数の関係になる。
回路の任意の部分の作用が増大したり減少したりしたとき、あるいは起電力や抵抗が増大したり減少したりするとき回路全体の任意の断面を通過する電気の量な同じである」

次に断面積を通過する電気量（電流）は回路のすべての部分で同じであるとしその強さは起電力の和に比例し、抵抗の和に反比例する。式で書けば、

$$\text{電流の強さ}=\frac{\text{起電力の和}}{\text{抵抗の和}} \quad \cdots\cdots \quad I=\frac{E}{R}$$ [123]

この式から、抵抗を挟まないで、同じ電池をｎ個繋いだときには、（電池の内部抵抗をｒとして）

$$I=\frac{nE}{nr}=\frac{E}{r}$$

となり、流れる電流は一個の場合と同じになることを示した。次に、熱電対の時には、金属しか抵抗が無く非常に小さいので起電力が小さいにもかかわらず電流が大きいことが示した。ボルタ回路では抵抗が大きい（液体なので）起電力は大きいことと述べている。電池をｎ個繋いだときと一個の時は、挟む抵抗が小さいときは流れる電流が同じであるが、抵抗が大きいときは違いが現れる。挟む抵抗をRとすれば、

$$I=\frac{E}{r+R} \qquad I=\frac{nE}{nr+R}$$

電池の内部抵抗を具体的に考察してみる。今、電池の極板の広さを S ,極板間の距離を D ,抵抗率を P とし、繋ぐ金属の太さを s 、長さを l 抵抗率を ρ とするとき、n 個の電池を繋いだときの電流は、$r=\frac{nPD}{S}$　$R=\frac{\rho l}{s}$ であるから、次の式で表される。

$$I=\frac{nE}{\frac{nPD}{S}+\frac{\rho l}{s}}$$

[123] ホイートストンはIではなくFと用いているが、現代の記述に従った

このとき電流の強さは回路のどこでも等しいこと[124]を注意している。さらに二つの抵抗を並列に繋いだときは、電流が分かれることを考慮に入れて、

$$R = \frac{rr'}{r + r'}$$

となることも確認している。

次に、ホイートストンは、術語の重要性を強調し、まず起電力をを生じる装置を、それがボルタの電池であれ、ボルタのバッテリーであれ、熱電対であれそれらをすべてRheomotor[125]と呼んだ。それは回路について考察する場合においては同様に振る舞うためである。次に、電流の強さを測定するものはその構造に関係なくRheometerと呼ぶ。電池の起電力などを測定するためには、連続的に変化できる値のわかった抵抗が欠かせないとホイートストンは考えた。そこで、長い導線を円筒状に巻き、それの端を伸ばして、金属線に巻くと言う構造を考えた（右図）。この二本の円筒のうち一本は真鍮製で他方は木製である。巻線はむき出しなので真鍮製の棒に巻いてある部分は抵抗がなくなり、木にまかれば部分の導線の長さが抵抗の値となる。これを回転させ導線の長さを調節し例えば電流の値を一定にした。このように抵抗の値を正確で可変的なもの（可変抵抗器）として一定の電流を実現するものをrheostatと呼んだ。

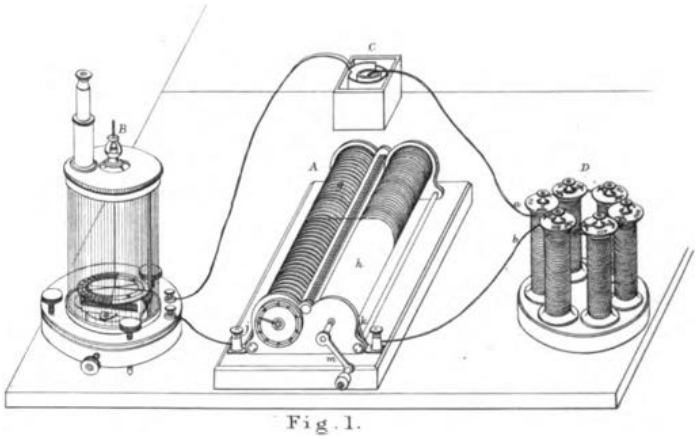


Fig. 1.

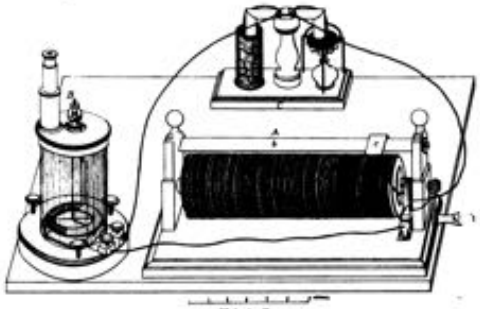


Fig. 2.

rheostatには、もう一つの型があった。それは一般に抵抗の値が小さい場合に簡便に用いられるようにしたもので、木製の部分の巻線だけを用い、その円筒形に平行に金属の板を渡しその金属製の板にライダーを付けたものである。このライダーの位置を調整することによって任意の抵抗を取り出すことができる。

[124] キルヒホッフの法則によって確立された

[125] Rheoは「流れ」

この仕組は、今でも高校の授業などで用いられている。（前ページ右下の図、ナリカ製　すべり抵抗器）

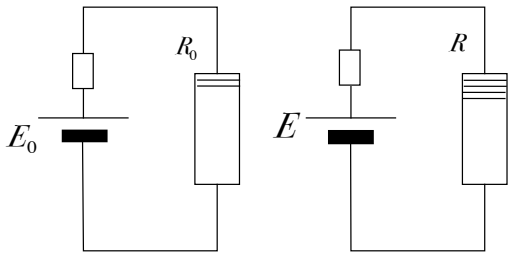
rheostatの使い方は例えば次の通りである。

【起電力を測定する】

まず最初に、電池を二つ用意する。一方は基準の電池 E_0 であり他方は測定する電池 E である。この電池に導線をつなぎ、電流を測定すると、一般には異なる値となるが、rheostatを使って測定する側の電流を調節して同じ電流が流れるようにする（例えばgalvanometerの角度が45°）。このときは次の式が成り立つ。

$$i_1 = \frac{E_0}{R_0} \qquad i_1 = \frac{E}{R} \qquad \frac{E_0}{R_0} = \frac{E}{R}$$

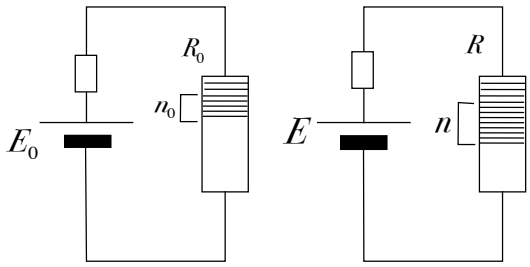
このときにrheostatの巻き数をそれぞれ記録しておく。次に、それぞれrheostatの巻き数を多くして、電流が４５°から４０度になるようにし、その時の巻き数を測定し n_0 、n とする。その時基準の電池には $r_0 = kn_0$ の抵抗が、測定する電池に対しては $r = kn$ の抵抗がつけくわわったことになる。４０度のときの電流は同じで i_2 であるとする。このときは、それぞれの回路に流れる電流は同じで



$$i_2 = \frac{E_0}{R_0 + r} = \frac{E_0}{R_0 + kn_0}$$

$$i_2 = \frac{E}{R + r} = \frac{E}{R + kn}$$

つまり



$$\frac{E_0}{R_0 + kn_0} = \frac{E}{R + kn}$$

となるが、この式を変形すると

$$\frac{R_0}{E_0} + \frac{kn_0}{E_0} = \frac{R_0}{E} + \frac{kn}{E}$$

故に

$$\frac{kn_0}{E_0} = \frac{kn}{E}$$

つまり

$$E_0 = n_0 k \qquad E = nk$$

同じ電流から同じだけ下げたとき、付け加えた抵抗の値と起電力は比例する。抵抗の値は、回転数で測ることができる。起電力が同じ時は、同じ電流が流れるようにし

たときから、同じ長さ（回転数）だけ回したときは同じ電流が流れる。
　例えば、さまざまな大きさの電池（仕組みは同じだがスケールが異なる電池）を作ってその起電力を測定してみよう。次はその実験結果である。それぞれ４５度から４０度へ変化したときの巻き数である。

非常に小さい電池・・・・・・30回
銅の円筒の高さ3．5インチ直径2．5インチ・・・30回
銅の円筒の高さ6インチ直径3．5インチ・・・・・30回

つまり、電池の起電力は電池の大きさには関係なく同じであることがわかった。この方法でその他のさまざまな電池の起電力を測定している。その一例を挙げておこう。

ビスマスと銅の熱電対で温度が32°Fと212°Fの場合・・・8回
標準電池、亜鉛のアマルガムと硫酸銅溶液、銅板の場合・・・757回

熱電対と電池の起電力の比は　1：94．6　である。

【電池の内部抵抗を求める】
　電池の内部抵抗をRとし、それを導線につなぎその導線抵抗 r （rheostatを含む）に流れる電流を測定する。起電力をEとすればそのとき流れる電流は

$$i=\frac{E}{R+r}$$

次に、おなじ電池をもう一個用意し、電池を並列につないだとき、流れる電流は

$$i_1=\frac{E}{\frac{R}{2}+r}$$

rheostatを調節して例えばλの値だけ増加させたときは

$$i_1'=\frac{E}{\frac{R}{2}+r+\lambda}$$

　λはレオスタットの回転数だけ減少した抵抗である。
　上のiとi_1'二つの電流が等しくなるようにすれば

$$\frac{E}{\frac{R}{2}+r+\lambda}=\frac{E}{R+r}$$

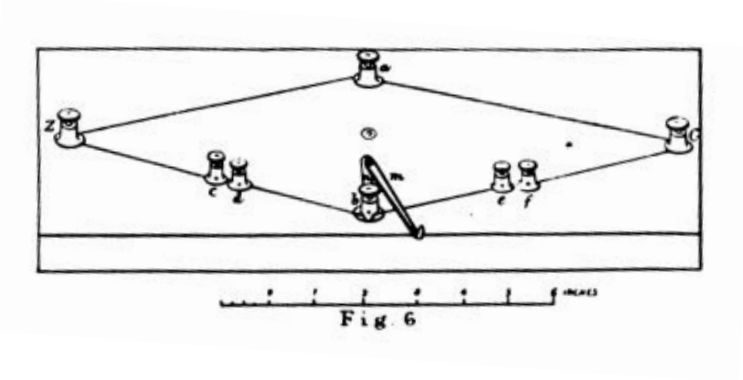
$$R+r=\frac{R}{2}+r+\lambda$$

$$R-2\lambda=0$$

　これで内部抵抗を求めることが出来る。

【ホイートストンブリッジ回路】

ホイートストンブリッジ回路は抵抗の値を標準となる抵抗と比較して決める装置の一つである。下図のように同じ長さ、同じ太さの導線を張る。ZとCに電池をつなぎ、aとｂの間に検流計をつなぐ。左右対称であるからab間には電流は流れない。Zb間には切れ目cdを入れ、bC間にも切れ目を入れて、そこに測定する抵抗とrheostatを入れる。再び電流が流れなくなったとき、測定する抵抗とrheostatの抵抗の値は同じである。または、cd間に未知の抵抗、ef間にほぼ等しい既知の抵抗を入れ、ｍを動かして長さを調整し抵抗の値を測定する。つまり、現在のように比例式ではなく、比較する抵抗と同じになるように組み立てられたものである。

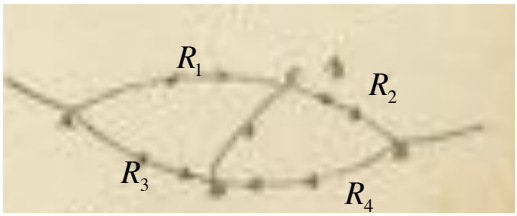


５．キルヒホッフの法則

キルヒホッフの有名な法則は1848年の論文[126]の注で述べられた。キルヒホッフはノイマンの高弟で、ノイマンの課題に答えたものであり、発表されたのはこの論文においてである。この論文は平たい円形の銅板を流れる電流の様子について研究したものである。円盤内の電流の向きを、円盤内の２点間を導線で結び電流が流れない線（等電位線）に直角であることによって確認している。現在高校で行われる２次元の電流を調べる実験と同じである。また、ポテンシャルに対応するものとして、$U=\log r$ も導入している。この際、抵抗の測定に苦労したキルヒホッフは、ホイートストンブリッジを用いて測定する方法をとった。この時、ホイートストンとは少し異なり、四つの抵抗の比例関係を利用した。右図は、この論文のキルヒホッフの描いた図である。この時、$(AC):(BC)=(AD):(BD)$ の関係があることを示したのである。（　　）は抵抗を表しているから、この式は

$$(AC):(BC)=(AD):(BD)$$

$$R_1:R_2=R_3:R_4$$



R_1 は測定する抵抗、R_2 はレオスタッットである。この式を、キルヒホッフは次の二つの定理をもとにして証明した。基本の二つの法則は次の通りである。

---

[126] キルヒホッフの回路についての法則　Ueber den Durchgang eines elektrischen Stromes durch einen Ebene,insbesondere durch eine kreisförmige kirchhoff Ann.der Phys. 64 1845 p.497

ある系が導線から成り、完全に任意の方法で結びつけられており、ガルバニ電流が流れているときは、

I　完全に任意の方法で互いに結びつけられている導線で系が作られていてそこを電流が流れているとすると、もしも導線1,2,...μがある点で合流するならば、

$$I_1 + I_2 + \cdots + I_\mu = 0$$

ここでI_1, I_2.....はそれぞれの導線を流れる電流の強さを表し、すべての接点を向かう向きを正として計算する。

II　もし　導線 1,2,$\cdots\mu$が閉じた形を作っているならば、

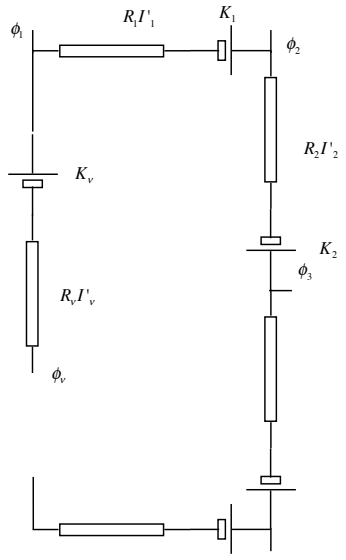
$$I_1R_1 + I_2R_2 + \cdots + I_\mu R_\mu = \text{回路の起電力の和}$$

である。ここで$R_1, R_2\cdots$は導線の抵抗、I_1, I_2,... はこれらを流れる電流の強さを表している。そしてそれらの向きをプラスとして計算する。

1の説明としては、月並みだが次のように云っている。すなわち、

「導線1,2,$\cdots\mu$の結節点に電気が出て行くと同じように入ってくるからである」

IIの説明としては、



「ϕを電位として

$$\phi_1 - R_1I'_1 + K_1 = \phi_2$$
$$\phi_2 - R_2I'_2 + K_2 = \phi_3$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$
$$\phi_\nu - R_\nu I'_\nu + K_\nu = \phi_1$$

が成り立ち、もとに戻るとゼロとなるので

$$R_1I'_1 + R_2I'_2 + \cdots = K_1 + K_2 + \cdots\cdots + K_\nu$$」

この定理を用いて上記のホイートストンブリッジ回路では、

$$I_1 + I_2 = 0, \qquad I_1R_1 - I_3R_3 = 0$$
$$I_3 + I_4 = 0, \qquad I_2R_2 - I_4R_4 = 0$$

これから、

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

これは、現在の高校の教科書によく乗っている説明である。

第3章　　電磁誘導とエネルギー保存の法則

アンペールは、電気現象の基本要素を電流要素に限定し、その電流要素間に働く力を実験によって定め、それによってすべての電気現象を説明しようとした。まず、基本的な現象を取り上げ、基本法則を確立し、そこから、偶然に左右される要因を取り除いて現象を演繹的に説明しようとするやり方は、物事の本質的な理解の方法であり、成熟した理論であるといえる。実際には、閉じた体系は世の中に存在しないので、このような理論を確立するときには必ず幾つかの現象が切り捨てられる。切り捨てられる現象が少なければ少ないほど、理論の成熟度は高度である。その点でニュートンの力学は、極めで高度な理論体系である。また、近年の量子力学も成熟した高度な理論体系で、それぞれ本質論的な発展を成し遂げたといえる。ニュートン力学や、量子力学のようにきわめて広範囲になりたつ理論だけが本質的な理論ではなく、限られた狭い範囲で成り立つ本質的な理論体系ももちろん存在し、それらが重層的に発展して、より広い、より高い本質的な体型に発展するのである。その意味ではアンペールの理論は、狭い範囲で成り立つ、あまり成熟していない、本質理論体系であったといえる。

アンペールの理論が確立されていくと同時に、アンペールの理論に当てはまらないような現象もすでに発見されようとしていた。一つはアラゴの発見であり、オームの法則もまたアンペールの理論からは説明できないような要素を持っていた。ゼーベックの熱電気もまたそうであり、ゼーベックの鉄粉による磁界の様子の図は、その後アンペールの理論を超える重要な発展のきっかけとなっていった。それらはやがて、ファラディの研究からマックスウェルの理論体系まで、もう一つの本質的な理論の発展となっていくのである。現象から一段高いところの本質的段階の理論を構築するためには、その対象（実体）を特定しなければならない。マックスウェルの理論においてそれは電場、磁場であった。以下では、現象の整理から電場磁場の導入そしてマックスウェルの理論の完成まで話を進める。

しかし、マックスウェルの理論もまた、当然のことながら限られた範囲での本質的な理論であるのであって、一層より広い本質的理論の発展は、相対性理論である。しかしそれは、我々の対象外である。

Ⅰ　電磁誘導の法則

1．ファラデー以前

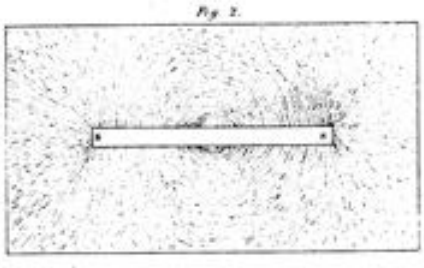
場の理論はファラディの電磁誘導現象の研究をもって始まる。どんな理論もそうであるが、新しい理論が発見されるにはそれ以前の研究が手がかりとなっている。ファラディの研究も、それ以前のゼーベックの磁界に関する研究や、アラゴの回転する円盤に関する研究が重要な端緒となっている。これらについてはすでに述べたところであるが、簡潔に振り返っておこう。

1820年エールステッドによって、電流がその周りの磁石に影響を与えることが発見された。それはとりもなおさず、電流の周りに磁気作用が生じることを意味している。そのことは、同年ビオとサバールによって研究をされたがその時は磁極に働く作用として扱われたものであった。さらに、1821年2月に、ゼーベックによって発表された論文「ガルバニー回路による磁気作用について」[127]においては、電流の周りの磁気作用の様子が磁石や鉄粉によって明瞭に示された。彼の実験結果は、ファラデーの研究に大きな影響を与えることとなった。つまり、磁気作用をファラデーは磁力線として捉えていくことになるのである。ずっと後になって、ファラデーは磁力線について次のように述べている。

「3071[128]磁力線は、非常に小さな磁石をその長さの方向に動かしたときに描く曲線によって決めることができる。磁針は常に線の接戦の方向になっている。あるいは、その線を横切る導線が磁力線の方向に動くならその導線に電流は生じないが、その他の任意の方向に動くなら電流は生じる、・・・磁石や電流の周りやその間にあるこれらの線の方向は、一般的には鉄粉を用いることによって容易に示すことができる。」

また、マックスウェルは、「物理的力線」[129]のはじめのページにおいて、次のように述べている。

「こうして、もしも、磁石の近くで紙の上に鉄粉を巻いたなら、その鉄粉は誘導によって磁化され、その結果反対の極は結びついて、これらの繊維は、力の方向を示すであろう。この実験によって与えられた磁力の美しい図は、力線が何か実在のものであるという考え方に自然に導いていく」

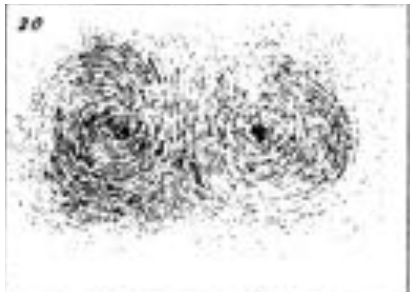


127 Uber den Magnetismus der galvanichen Kette 1821 Seebeck　近代科学の源流　物理学編1　自然科学原点シリーズ　北大図書刊行会物理篇

128 ファラデーのExperimental research はパラグラフ（段落）に通し番号が振られていてそれでその段落に位置を知ることができて便利である。第3巻シリーズ28

129 p.175参照

前頁の図と右図はファラデーによる鉄粉の様子である。これらの図を見ると、確かに力線によって何か物理的実在を示しているようにも思われる。



ファラディに大きな影響を与えたもう一つの研究は、アラゴの研究[130]である。１８２４年、アラゴは、磁石と鉄以外の磁気を帯びない金属の間に作用が存在することを発見し、その作用は引力や斥力では説明できないことを指摘した。

アラゴの発見はファラディによれば次のように要約される。

「８１．磁針あるいは磁石を銅板の平行面内に回転し得るようにつるし、銅板を磁石あるいは磁針の近くで回転すると、磁石は板の運動に従おうとするし、または磁石を回転すればその運動に従おうとする。そしてその効果は相当に強く、幾ポンドもの磁石または板が回転させられるのである。もし、磁石と板が互いに相対的に静止していれば、わずかな効果、すなわちわずかな引力や斥力その他のいかなる効果も発見されない。これがアラゴー氏によって発見された現象である。」[131]

アラゴの実験は当時の電気力学では説明のできないことであった。そしてこれらの研究がファラデーの電磁誘導の法則の発見に大きな影響を与えていくのである。

２．ファラディと誘導概念

ファラディは、電気がその付近に電気を誘導する能力を持つのであるから、同様に、電流もまた、その近くに電流を誘導(induction)する能力を持っているだろうとし、そして、確かに、電流は周りに磁化作用を及ぼすことがアンペール等によって発見されているのであるから、磁気もまた電流を誘導するだろうと考えた。ファラディは言う。

「２．電流による感応[132]（induction）（誘導）の、ある種の効果は既に認められ記述されている。たとえば磁化作用の諸効果、アンペールの行った銅の円盤を扁平螺旋に近づける実験、彼が電磁石を用いて繰り返した特殊なアラゴーの実験・・・などである。けれども、これらが電流による感応（誘導）の生じる効果の全部であるとは思われない。」[133]

つまり、電流が、あるいは磁気が電流を誘導する効果を期待したのである。そして、

---

[130] アラゴの研究はｐ．96でも触れている。

[131] Faraday Experimental research N0.1　para８１　ファラデー「電気実験」（上巻）古典化学シリーズ　矢島祐利　稲垣瑞穂共訳　内田老鶴圃新社 p.29

[132]「induction」は矢島祐利　稲村瑞穂共訳では、「感応」と約されているが高校の教科書などでは「誘導」と表現されている。以下引用の場合は「感応」の後ろに（誘導）を補う。それ以外は「誘導」を用いる。

[133] Faraday Experimental research N0.1　para１　古典科学シリーズ10電気実験p.3

たとえばアラゴの実験はその一つの表れであるとして、電流による電流の誘導はアラゴの現象につきるものではないとも考えた。このように、現象と現象の間の連関を執拗に追い求める方式はファラディの研究方法の際だった特徴であり、それはまた、科学的理解の王道でもあった。広重徹は、「電磁場理論の成立」において次のように述べた。

「・・・、電流の感応（誘導）現象は電気と磁気との相互関係を根本的に追求する意味で問題になっているのである。”通常の磁気から電気を得ようと期待することが、電流の感応（誘導）効果の実験的研究に対して種々の場合に私を励ました。”ということからもその点ははっきり伺える。つまり、ファラディが感応を取り上げたのは、ここに静電気と動電気、磁気と電気との相互関係を追求する足がかりを洞察し、その統一的な把握によって電磁現象の本質をきわめ得るものと考えたからに他ならない。」[134]

しかし、ファラディの研究における特徴は、何よりも実験を通して自然に迫るその姿勢であった。つぎにファラディの実験研究を紹介しよう。

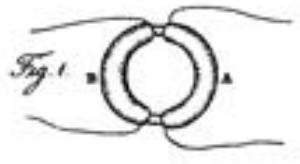
（1）ファラディの電磁誘導の実験

ファラデーが行った実験を、電気実験からの概要で紹介していこう。

【実験１】二つの導線を隣接して木の円筒に巻き、コイルを作り、一方に電池をつないで電流を流し、他方にガルバノメーターをつなぎ電流が生じるかを見た。１２０対の極板の電池に２０３フィートの長さのコイルを巻き付けたが、木炭に通せば放電で輝くほどでも、電流は生じなかった。しかし、接続するときは一瞬、微弱な電流が見られ、切断の時も検流計は逆方向に微弱に振れた。

この一瞬の電流は、ライデン瓶の衝撃による電流に似ていると感じたので検流計ではかろうじて関知できる作用ではあるが、磁針を磁化させることは出来た。

【実験２】数フィートの導線でW字型の二つの導線を作り、一方に電流を流し、他方に検流計をつなぎ、近づけたり遠ざけたりしたとき、検流計（ガルバノメーター）は近づけるときと遠ざけるときで反対に振れた。近づけるときは、アンペールの実験から期待される同じ向きとは逆向きであった。電流相互の感応によっては、永続的感応作用を起こすことはなかった。



【実験３】丸形の軟鉄を接合させ図のような装置を作る。Bに検流計をつなぎ、Aには電池をつないだ。接続したときに検流計は鉄なしの場合の１０倍振れた。が、持続せず、針は直ちに戻った。接続をたつと反対方向に振れた。

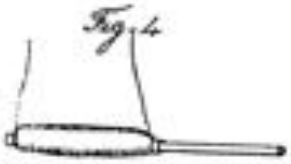
【実験４】複螺旋をボール紙製の中空の円筒の周囲に作り、一つは検流計に一つは電池につないだ。前の実験と同様に行ったが反応は認め難かった。しかし、この中空のボール紙に軟鉄棒を入れたときは強力に検流計に作用した。

---

[134] 広重徹科学史論文集1相対論の形成p.15

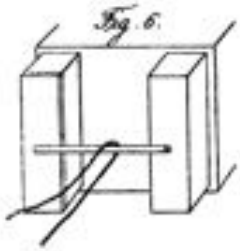
鉄の棒を銅の棒に入れ替えてみても、中空の時と効果は変わらなかった。

【実験５】同様の効果は通常の磁石によっても起こすことができた。図２のような装置で中空の螺旋に軟鉄を挿入する。24インチの棒磁石を馬蹄形磁石のようにし、他の極を鉄棒に接触させて軟鉄を一次的に磁石にする。磁石を接触させたり離したりすることによって、電流を生じさせることができた。



【実験６】図４のように、中空のコイルに、磁石を挿入したり出したりすることによっても電流を生じさせることができた。

【実験７】王立協会の強力な磁石を用いれば、図６のように、軟鉄棒に針金を半周だけさせても、磁石との接触をしたりすれば、電流が流れる。場合によっては磁極に触れないで近づけただけでも流れた。

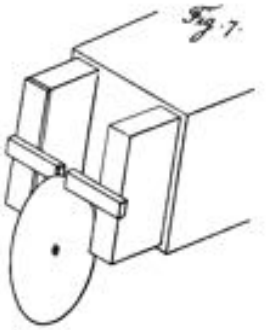


【実験８】軟鉄ではなく銅の場合は、中空と変わらなかった。

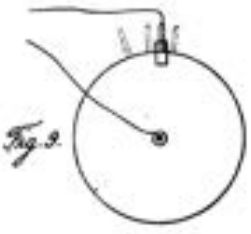
これらの実験のうち特に実験３、実験４、実験６などは高校の教育現場でよく用いられているものである。

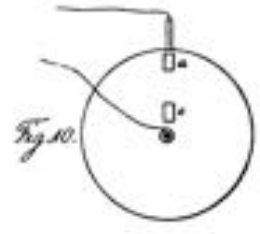
（２）アラゴの実験に関して[135]

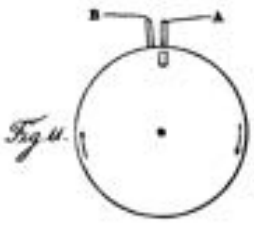
アラゴの実験を追試をしたハーシェルは、銅板は一時的に磁石になると考えたが、アラゴやアンペールは賛意を示さなかった。ファラデイはアラゴの実験は、銅板内の電流が生じていることを示していると考えて、「磁石から電気が得られたので、私はアラゴ氏の実験を新しい電源にしてみようと考えた。」つまり、磁石と導体の相対的な運動から、導体の内部に電流が生じたと考えて、まず、それを測定しようと言うのである。

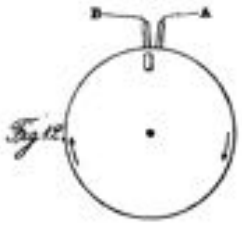


ファラディの最初の実験は右図の図７に示されている。磁極の間で円盤を回転させ、導体である円盤内の２点から電流を取り出そうというのである。図９．図１０は、中心と縁に導線をつなぎ、その中間に磁極をおいて電流をと









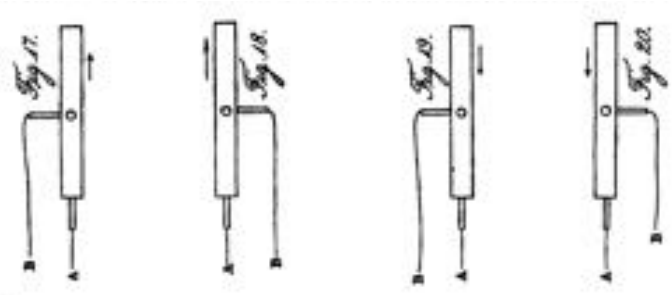
[135] Experimental researches in electricity　第1集　Phil. Trans. R. Soc. Lond. 1832　para81

りだした。図１１においては電極A,Bは円盤の周辺で磁石の位置との間にさまざまなさまざまな工夫をした。円盤内に書いてある四角は磁石である。

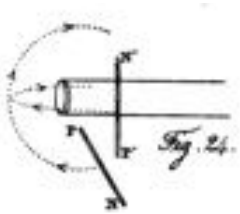
これらの実験の結果は、はじめの実験においては、円盤の中心から周辺に向かって流れることを示し、次の実験からは、周辺に流れた電流が左右に分かれることを示した。

この結果から彼は次のように推論する。

「101　さて回転板というものは、金属片を磁極間に直角に横切らせる簡単な実験の単なる別の形式であって、この場合、電流が運動の方向とは直角に発生し、磁極のある場所を横切るということは明瞭となる。このことは次の簡単な実験によっても十分に示される。すなわち厚さ1/5インチ、幅1.5インチ、長さ12インチの銅板を・・・図16の矢印の方向にひくとたちまち検流計の針の北極・・は東向きに偏倚し、針金Aが負電気、Bが正電気を受けたことを示した。」（ファラデー電気実験より）

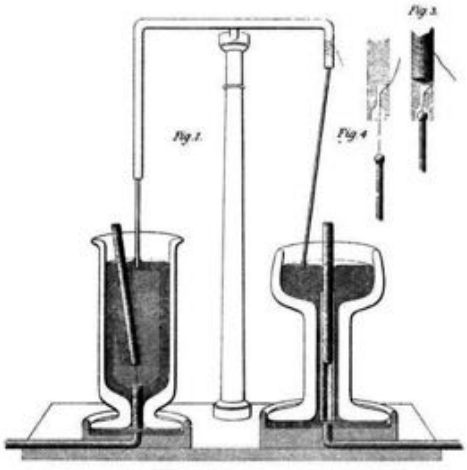


さらに同様の実験を繰り返した。右図のA,Bはガルバノメーターに繋ぐ電極であり、丸印は磁石、矢印は導体を動かす方向である。これらの結果ファラデーは次のようにまとめる。



「114　磁極、運動する針金・金属および発生された電流の向きの間に成立する・・法則は表現は困難ではあるが至極簡単である。・・

図24にPNで示した水平の針金は・・・その運動の方向が下から上に向かう曲線と一致しているとき、・・・または、点線に沿って磁力線を同じ側で切るように動かすならば、針金の電流はPからNへ向かう。これを逆に動かせば、電流は反対に流れる。」



ここで電磁誘導は導体が磁力線を横切ることによって説明された。

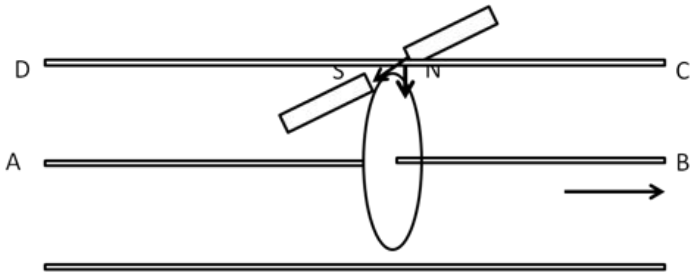
この結果についてファラデーは貴重な指摘をしている。彼は自分が1821年に発見した電磁回転の現象と比較をした。（この発見をデーヴィに断らずに発表したと言うことで、ファラデーは電磁研究から遠ざけられたという。）1821年のファラデーの発見とは、右図のようなものである。この図の右側は中央の磁石の周り

を電流が流れる導線が磁石から力を受けて回転するというものである。このときの電流の向きと磁石の磁気の向きと導線が受ける力の向きが全く同じであるというのである。つまり電流が磁気から受ける力によってこの現象を説明できるとしたのである。[136]

その後ファラデーは地球磁場から金属の運動に電流が生じることを確認した。

1832年の第二論文[137]において磁気誘導によって生じる電流の向きについて重要な考察を述べている。それは、ファラデーが誘導電流の実験を行った最初の頃の実験、つまり、電流と電流による誘導電流の発生についてである。ファラデーは第一論文において、次のような現象を確認している。(19)針金同士を近づけるときに感応される電流は、誘導を及ぼす電流とは逆の向きであり、針金同士が遠ざかる時に感応される電流は、誘導を及ぼす電流と同じ向きに流れた。

これらはアンペールの理論によっては説明できなかった。つまり、アンペールの理論によれば、同じ方向に流れる電流要素は引き合うので、同じ向きに流れると考えられていたのである。これについて、ファラデーは、磁力線の切断によって説明する。たとえば、第二論文の(233)以降では次のように説明する。右図において、導線ABにAからBへ電流が流れている。この導線に別の導線DCを近づけるのである。このとき磁気の強さは円形になっていて、DC線上では、図のように向こうから手前に磁力線がある。DCを近づけると、磁力線を横切るので、前の規則によって電流は、C→Dの方向に流れる。遠ざけるときは反対となる。



以上がファラデーによる説明である。たしかにこの関係を説明することは難しくはないが慣れなければややこしい。

ファラデーはこの第2論文においてもう一つの重要なことを発見している。それは、導線として、いろいろな金属を試しているのである。その結果は、流れる電流は次の順で大きくなっている。大きい順に、銅・亜鉛・鉄・錫・鉛である。（鉄については慎重な実験を行っている。）この順番はとりもなおさず電気伝導の高い順である。このことからファラデーは次のように結論する。すなわち、どの金属の導体にも同じような起電力が生じているのであって、電流の大きさは電流の流れやすさに関係しているのであると。そして、そうであれば、金属が周りにある必要はなく、非金属の場合でも起電力は生じているのであって、非金属の場合電流が生じないのは、非金属が電流を流さないからに他ならない。

---

[136] 古典科学シリーズ10電気実験　para121

[137] 古典科学シリーズ10電気実験 p.47

このファラデーの考察は重要である。すなわち金属の有無にかかわらず電流の周りには磁場があってその磁場から電流ではなく起電力を得ることができることを示しているからである。ここに、電流と電流の相互作用とは別に、その間に場の存在の可能性が示唆されていると考えることができる。

３．レンツの法則

レンツの論文[138]は1833年、すなわちファラデーの論文の次の年に発表された。

レンツは、ファラディの誘導磁電力の方向について、第一論文を読んで、誘導電流の向きを次のように規定していることに要約した。すなわち、

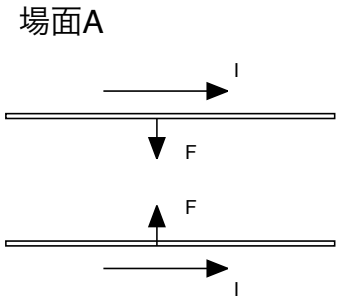
１）ある導線の近くに平行にガルバーニ電流がある。その導線を近づけたとき、導線の中に逆向きに電流が誘起し、遠ざけるときには、同じ向きの電流が誘起される。

２）磁石は、その近くで動いている導線の中に、導線の運動によって磁力線を切断する方向に依存するような電流を誘起する。

である。レンツは、このように、同じ現象に対して二つの表現があるのは望ましくなく一つの規則によって表現すべきであるとする。それは、アンペールの理論のように、電気力的誘導のあらゆる実験は、ガルバニ電流の相互作用に還元されるものでなくてはならないと考えたからである。次のような法則を提案する。すなわち、磁電現象（magnetoelektrishe Ercheinung）は次のような法則によって電磁現象（elektromagnetische Ercheinung）に「還元」されると[139]。内容は次の通りである。

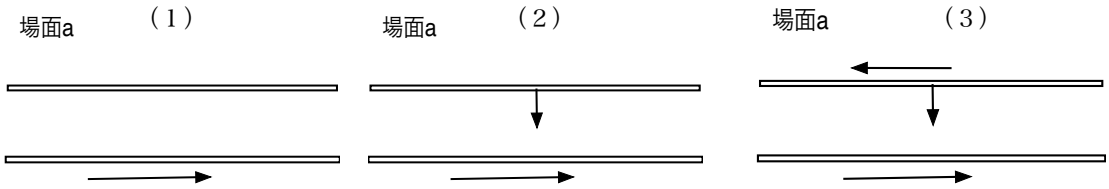
「もし、金属導体が、ガルバーニ電流あるいは磁石の付近で動くならば、この運動している導体の中には、電流が生じる。そして導線の中に生じるその向きは次のようなものである。すなわち、もしも、導線が静止していて、そのようなことが起こったなら、導線の中に生じる運動（電流）は、その導線が、静止しているとき運動する（力を受ける）方向と反対方向である。」（近代科学の源流）

言っていることは、次の通りである。いま電流が他の電流あるいは磁場の近くにあり力を受けるとする。そのときの場面をＡとする。次に、電流が流れていない導線が電流あるいは磁場の中でにあるとする。このときは力を受けないが、強制的に（力学的に）運動を起こすと、導線に電流が生じる。この場面をａとする。規則はこうである。場面Ａが存在するときはそれに対応する場面ａが必ず存在し（1）、場面ａにおいて導線を場面Ａにおける力の方向に動かすとき（2）、Ａのとき導線に生じている電流と反対向きに電流が生じる（3）。



[138] 近代科学の源流 自然科学原点シリーズ 北大図書刊行会物理篇 p.143 またはAnnalen der Physik 1834 p.483

[139] レンツは還元されると述べているが、内容的には関連づけられると言うべきであろう。



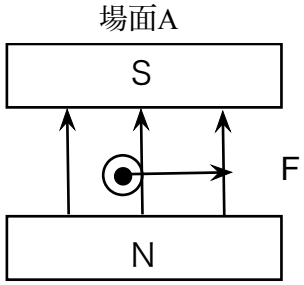
レンツは論文において多くの例をあげているが、ここでは代表的な例を考えて理解の助けとしよう。

例１。電流と電流との関係である。（これについては上記に述べた)

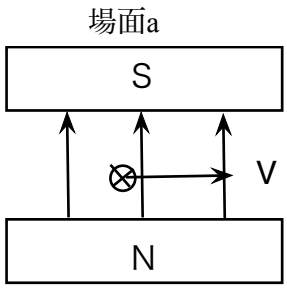
アンペールによれば、場面Aように、二本の導線に同じ方向に電流が流れているときは、引力が働く。それに対する場面（a）は、流れている導線の近くに流れていない導線を置くことである。場面ａ（1）。導線を力学的に運動させると導線の中に電流が生じる。そのときの向きは、Ａにおいて引力が働く方向つまり近づく方向に移動させると、電流はＡと反対方向、つまり、反平行の方向に生じるのである。

（A）において電流が反対方向に流れているなら、導線に働く力は反発力である。したがって（a）において遠ざかる方向に導線を動かすと同じ方向に電流が流れることとなる。

これらのことはファラディによって実験済みのことである。



例２。右図のように、磁場の中に電流が流れている場合を場面（A）としよう。このとき、手前から向こうに電流を流せば、左から右方向に力Ｆが生じている。場面（ｂ）は、磁石の中に電流が流れていない導線をおくのである。このとき導線を左から右に移動させると、電流は場面（A）とは反対方向につまり向こうから手前に流れる。



レンツの法則は、マックスウェルによって、より明確に表現されることとなった。レンツの法則をマックスウェルはtreatiseにおいて次のように述べている。

「もしも、定常電流が一次回路Ａに流れていて、そして、Ａが動くかまたは２次回路Ｂが動けば２次回路Ｂに電流が誘導される。この誘導電流の向きは、次の通りである。（Ａが動く場合は）Ａに作用する電磁力によって、Ａの運動（相対運動）が妨げられるように誘導電流の向きが決まる。Ｂの場合も同様である。」

このマックスウェルの表現が現代のレンツの法則として受け継がれている。

４．ファラデーとレンツ

レンツは、ファラデーの電磁誘導の法則の説明が、二つの原理から成り統一性を欠くこと、さらに、基本的に、電流と電流の間の関係として定立されるべきであるとの基本路線に基づいて彼の法則を築いた。（レンツの頭には、アンペールによる「見事な」

電流の磁石説があり、すべて電流の相互作用に帰着されるべきと考えたのである。

しかし、ファラデーは、第２論文において彼の発見した法則は磁力線の切断によって統一的に説明されることを示していた。さらに重要なことは、電流や磁場が直接電流を誘導するのではなく誘導されるのは起電力であることを実験によって明確にしていた。このことは、電流と電流が直接関係するのではなく、間に場が存在することを示唆するものであるとファラデーには思われたのであり指導原理となっていった。

５．ノイマン　電磁誘導の法則の数式化

ファラデーの電磁誘導の現象の発見とそのレンツの表現が発表されたのは、1832年、1833年頃であった。それから約10年後の1845年に、F.ノイマンによって電磁誘導についての数式的表現が与えられた。電磁誘導の法則は、レンツによれば運動と反対方向に力がはたらくように起電力が生じうること、さらにファラデーによれば、起電力の大きさは導線が横切る磁力線の数に比例することであったが、ノイマンはこの条件を満足するものとして下記の式を基本原理とした。

$$Eds = -Bvds$$ [140]

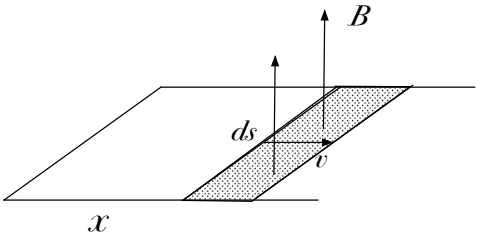
となる。ここでｄｓは導線の要素の長さ、ｖは導線の移動する速さ、Bは磁気作用（磁場）の強さである。比例定数は１とおいた。vds これは長さdsの導線が掃く面積であり、$Bvds$ は導線が横切る磁力線の数を示すこととなる。したがってファラデーの法則そのものである。

※高校生への註

右図のように、磁場Bの中で導線ｄｓを速度vで移動するとき、一秒間に$Bvds$の磁力線を横切るので、回路には$V = Bvds$の起電力が生じる。面積xdsを通過する磁力線の総和は$\phi = Bxds$でありこれを磁束と呼ぶ。起電力は

$$V = -Bvds = -B\frac{dx}{dt}ds = -\frac{d\phi}{dt}$$

で与えられることとなる。これが電磁誘導のノイマンの法則である。なお、上記の式でBが一定であるとしたが、Bが時間とともに変わる場合も同様に表現できる。



※物理学生への註

56の式は、現代風にベクトルで書けば

$$dV = -\left(\vec{B}\times\vec{v}\right)\cdot d\vec{s}$$

となる。（ノイマンは$dV = -\left(d\vec{s}\times\vec{B}\right)\cdot\vec{v}$と書いているが同じことである。）これを積分すれば、一周の起電力が求まる。

---

[140] この式はノイマンが書いた式とは少し異なっている。ノイマンの式はBの代わりに力となっていて、力が速度に比例するとなっている。あとの議論は変わらないので現代風に書き換えておくこととする。

$$V=\int dV=-\int\left(\vec{B}\times\vec{v}\right)\cdot d\vec{s}=-\int\left(\vec{B}\times\frac{d\vec{x}}{dt}\right)\cdot d\vec{s}$$
$$=-\frac{d}{dt}\int\left(\vec{B}\times\vec{x}\right)\cdot d\vec{s}=-\frac{d}{dt}\int\vec{B}\cdot\left(\vec{x}\times d\vec{s}\right)=-\frac{d}{dt}\int\vec{B}\cdot d\vec{A}$$
$$=-\frac{d}{dt}\phi$$

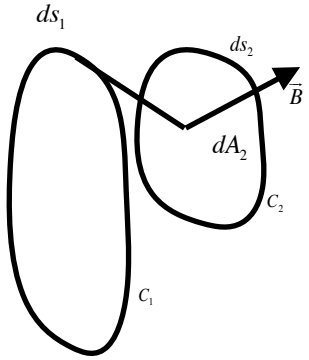
ここでAは面積、ϕは磁束を表す。ここで時間による微分を外に出したがそれは次の事情による。

ノイマンは、導線に生じる起電力は、導線が動くことによるだけではなく、導線の近くの磁石が運動することによっても生じることに注目する。磁石の運動は、静止した導線はどのようにして感じるか、それはノイマンによれば、磁気作用の変化によって感じるとするのである。さらに、磁気作用（磁場）の強さが時間とともに変わることによっても起電力が生じるということはファラデーの実験からも知られていることであった。

物理学生への註

ところで、導線のところに作られる磁気作用はビオ・サバールの法則（グラスマンの法則）によって与えられる。

$$dB=\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{id\vec{s_1}\times\vec{r}}{r^3}$$



これを s_1 について一周の積分を取れば

$$B=\int\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{id\vec{s_1}\times\vec{r}}{r^3}$$

磁束は dA_2 の面積分であるから

$$\Phi=\int B\cdot dA_2=\iint\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{id\vec{s_1}\times\vec{r}}{r^3}dA_2$$

これは、関係式 $\frac{d\vec{s_1}\times\vec{r}}{r^3}=-rot\frac{d\vec{s_1}}{r}$ と　ストークスの定理　$\int rot\vec{A}\cdot d\vec{S}=\oint\vec{A}\cdot\vec{ds}$　を用いれば、

$$\Phi=\int B\cdot dA_2=\iint\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{id\vec{s_1}\times\vec{r}}{r^3}dA_2=-i\iint\frac{\mu_0}{4\pi}rot\frac{d\vec{s_1}}{r}dA_2$$
$$=-i\iint\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{d\vec{s_1}}{r}d\vec{s_2}=-i\iint\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{r}d\vec{s_1}d\vec{s_2}$$

となる。ここで、$M=\frac{\mu_0}{4\pi}\oiint\frac{1}{r}ds_1\bullet ds_2$ と置けば、上の式は、

$$V_2=-M\frac{d}{dt}I_1$$

となる。Mは、ノイマンのポテンシャルと呼ばれるが、それは相互誘導係数に他ならない。

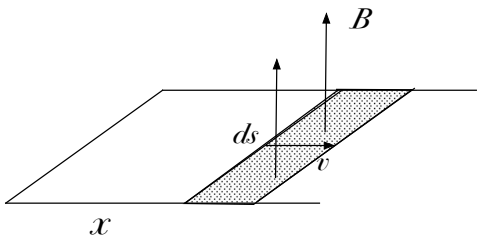
ノイマンはこの論文において、電磁誘導とエネルギーとの関係の置いて重要な指摘をしている。つまり、

「誘導による積分電流に対する起電力は運動する導線に誘導される活力の減少に等しい。」

右図に置いて回路に流れる誘導電流をIとする。このとき、⊿x だけ移動したときの仕事量は

$W = IsB\Delta x = IsBv\Delta t$

これを磁束で表せば、$\Phi = BS = Bsx$ であるから、



$W = I\Delta\Phi = I\Phi' - I\Phi$

で表される。ノイマンはこれが活力（つまり運動エネルギー）の減少に等しいというので、

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv'^2 = I\Phi' - I\Phi$$

となるというのである。これからポテンシャルエネルギーは

$$U = I\Phi$$

となることが期待される。I は電流 Φ は磁束である。

物理学生への註

$\Phi = -i\int\int \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{r}d\vec{s_1}d\vec{s_2}$ であるから、

$$U = i_2\Phi = -i_1 i_2 \int\int \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{1}{r}d\vec{s_1}d\vec{s_2} = i_1 i_2 M$$

となる。

ノイマンが指摘したように、電磁誘導の法則はエネルギー保存の法則と深く結びついている。そしてこのことはレンツの法則にも含まれていたと考えられるであろう。エネルギーと電磁誘導の関係を、次に詳しく調べることとしよう。

Ⅱ　エネルギー保存の法則と電磁誘導

ノイマンが電磁誘導の法則の数式化を行っていた頃、マイヤー、ジュール、ヘルムホルツがエネルギー保存の法則を確立していた。（ファラデーも認めるようになっていた）。ジュールは１８４０年、電流が発生する熱量についての研究を行い発熱量が電流の自乗に比例するという重要な法則を見出し、さらに、１８４３年には電磁誘導の効

果を用いて電流を発生させその熱量を測定するという実験を行っていた。これは、ノイマンが電磁誘導の法則を確立する１年前であった。（なお、キルヒホッフの法則はノイマンの誘導起電力に関する法則と同じ年である。）このように、エネルギー保存の法則は電磁誘導の法則を理解する上でも本質的な役割を果たしたが、このことについてマックスウェルはその教科書において[141]次のように述べている。

「さらに、偉大で科学的に重要な一歩が、ヘルムホルツの「力の保存について」と、そしてまた、その直後に、ヘルムホルツとは独立に確立されたトムソン（ケルビン卿）の仕事によって進められた。彼らは、ファラディによって発見された誘導電流はエールステッドとアンペールによって発見された電磁力の法則から、エネルギー保存の法則の原理によって数学的に導くことができることを示した。」

そこで、ここではエネルギー保存の法則の発展について概略を述べることにしよう。

１．エネルギー保存の法則

ヘルムホルツの力の保存についての物理学的論述は１８４７年に出版された[142]。その冒頭部分において、エネルギー保存の法則は「導出は二つの出発点のいずれかから始めることができる。」として、仕事の原理、すなわち「無制限に仕事力を引き出すことは不可能であるという命題」か、自然界におけるすべての作用は斥力及び引力からなるという命題からなるとしている。後者は現在では正確ではないので、ここでは仕事の原理から話をはじめよう。

（１）仕事の原理と力学の法則

仕事の原理は、古くは、アリストテレスに遡る。Dugas　の『力学史』によれば、アリストテレスは、天体についての論考の第３章において、仮想速度の原理の萌芽が見られるとしている[143]。より重要なのは「力学の諸問題」と呼ばれる書物である。これは、アリストテレスの書と言われてきたが現在では、アリスってレスの後継者によるものである。そこでは、仮想速度の原理が発展させられ明確に述べられている。つまり、作用のpowerは重さと運動の速度の積で与えられるとして、これを用いて、テコの原理を、重さ×速度が一定であることによって説明している。

１３世紀のヨルダヌスによって、静力学は大きく発展する。その『ヨルダヌスの原理』と呼ばれるものこそ、仕事の原理である。すなわち「ある与えられた荷重Wをhの

---

[141] A treatise on electricity & magnetism　Art.542,543,その前でノイマンの電磁誘導の法則の数式化とノイマンポテンシャルを紹介している

[142] ヘルムホルツ　「力の保存についての物理的論述」 世界の名著 ６５ 現代の科学１ 中央公論社 p.231

[143] Dugas" A history of mechanics “ Dover p.231

高さまで持ち上げることができるあるものは、この荷重Wをn倍のものを高さhの$\frac{1}{n}$だけ持ち上げることができる」

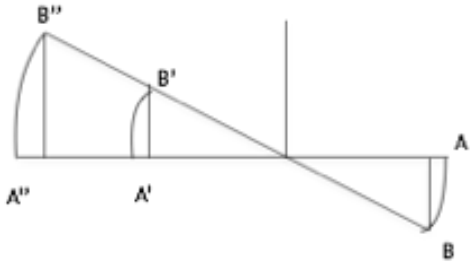
という命題であり、これを基礎としている。このあるものこそ、『仕事』あるいは『エネルギー』に相当するものであることは明白である（『近代科学の源流』伊東俊太郎）[144]。

ヨルダヌスの原理によってテコの原理は次のように証明された。

下図において、ABにおし下げる仕事は、A',B'に持ち上げる仕事に等しく、それは、A''B''の仕事に等しい。重さをW',W''とし、高さをh',h''とすれば、

$$W'\times h'=W''\times h''$$

となって、テコの原理を説明した。



1586年　ステビン[145]は、『吊り合いの原理』を表して、滑車と斜面上の物体の釣り合いを議論し、その時永久機関は可能の原理を利用した。すなわち斜面上に鎖をかけた時、永久機関不可能の原理により、鎖は自動的に運動し続けることはなく、したがって斜面の長さと比例する重さが釣り合うことを示した。

1594年　ガリレオは、「レ・メカニケ」[146]において、仕事の原理を全面的に活用した。すなわちこの論文の冒頭において、機械を工夫することによって何でもできるように工夫することができると思い込んでいるがそれには一定の制限があり、小さな力でモノを動かすことができてもその時は長い距離を移動しなければならない。例えて言うなら、ある物体を持ち上げる時、細かく砕いて持ち上げれば小さな力ですむが結局は回数を増やさなければならない。機械の効用は細かく砕かずに持ち上げるようにすることであるが、依然として力は長い距離を移動しなければならない、と説明している。また、この時、斜面について言うなら移動距離とは垂直上方への移動であることを注意している。

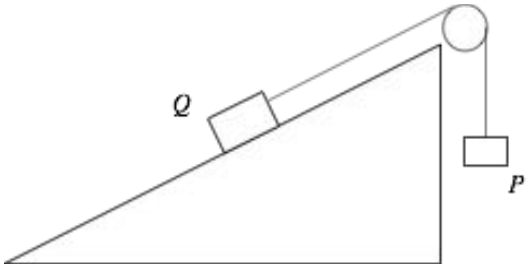
---

144 近代科学の源流　伊東俊太郎著　中央公論社　自然選書　この部分はp.234-240
ヨルダヌスについては　Dugas" A history of mechanics " Dover p.38−46

145 ステビンについては　Dugas" A history of mechanics " Dover p.123−128 マッハ　力学　講談社 p.29

146 ガリレオ　世界の名著　中央公論社　p.211　レ・メカニケ

右図において、おもりPがh(m)下がる時、Qは垂直上方への距離が$\frac{h}{2}$(m)上昇したとすれば、PはQの半分の大きさで釣り合うこととなる。ガリレオの業績は、仕事量は力と力の方向への移動距離の積で表されることを注意したことにある。



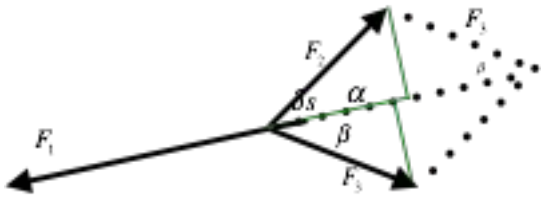
1684年にライプニッツは活力の概念を導入した[147]。彼によれば、ある高さから落下した物体は、再び同じ高さまで戻るということを前提する。高いところから低いところへ落下した仕事と、低いところから高いところへ上昇した時の仕事は同じはずであるが、同じ高さに上昇するためには速さは二乗にならなければならない。（速さが二倍になるだけでは二倍の高さに上ることはできない。）このことから、仕事をする能力は、mv^2で表される。運動による仕事をする能力を活力と呼ぶこととした。

1717年　ジャン・ベルヌーイは、平衡状態において、仮想仕事の原理が一般的に成り立つことを発見した[148]。仮想仕事の原理とは、ある平衡状態のある系に対して、無限小の束縛条件に反しない、変位を与えた時、その変位に伴う各力の仕事の和がゼロとなることである。仕事は力かける力の方向への移動距離で与えられる。無限小をとる理由は、有限の変位をとると平衡状態が変化することによる。式で書けば

$$W = \sum W_i = \sum F_i \delta x_i = 0$$

である。

仮想仕事の原理は静力学の一般的な法則を含む。例えば、仮想仕事の原理から力の平行四辺形の法則を導き出すことができる。（マッハ　力学）[149]



例えば図のように三つの力が働いて静止しているとしよう。この時、図のδsのように無限小の仮想変位を考える。

この時仕事の原理は次のようになる。

$$-F_1 ds + F_2 ds\cos\alpha + F_3 ds\cos\beta = 0$$

この式において、$F_2\cos\alpha + F_3\cos\beta$は平行四辺形の対角線の長さを表していることがわかる。

1783年　ダニエル・ベルヌーイは『動水学』(Hydrodynamica)において「活力」(vis viva)の保存が用いられ、議論した。それは、次の式で表現されている。

---

147 近代科学の源流Ⅱ　北大図書刊行会　p.16 ライプニッツ

148 Dugas" A history of mechanics " Dover 該当部分はp.231

149 マッハ　力学　講談社　p.53

$$h=\frac{v^2}{2}$$

hは深さであり、vは流れ出る水の速さである。これは力学的エネルギー保存に合致する。

1788年　ラグランジュは解析力学を発表した。彼はまず静力学を研究し、仮想仕事の原理を基礎に据えた。仮想仕事の原理は代数的に扱うことができるので、力学を幾何学的なものから代数的なものに変化させることができた。このことから幾何学的な座標成分xの代わりに広義の座標q_rを用いて、運動方程式を変形させ、運動方程式の拡張に成功した。

物理学生への註

例えば、幾何学的な座標成分xの代わりに広義の座標q_rを用いれば$\delta x_i=\sum_r \frac{\partial x_i}{\partial q_r}\delta q_r$であるから、仕事の原理は

$$W=\sum W_i=\sum F_i\delta x_i=\sum_{i,r} F_i\frac{\partial x_i}{\partial q_r}\delta q_r=\sum Q_r\delta q_r=0$$

となる。ここで$\sum_{i,r} F_i\frac{\partial x_i}{\partial q_r}=Q_r$を広義の力と呼ぶ。（山内　一般力学）

次により一般的に、力が働いて釣り合っていない時を考える。この時は、仕事の分だけ活力が増大することが、ベルヌーイの考察で明らかとなっている。このことを式で書けば

$$\sum m\frac{dv}{dt}dx-\sum Q_r\delta q_r=0$$

ベルヌーイに従って変形すれば

$$\sum m\frac{dv}{dt}dx-\sum Q_r\delta q_r=\sum mvdv-\sum Q_r\delta q_r=\sum d\left(\frac{1}{2}mv^2\right)-\sum Q_r\delta q_r=d\left(\sum\frac{1}{2}mv^2\right)-\sum Q_r\delta q_r=0$$

となる。そこでこの活力（現代流に言えば運動エネルギー)を一般座標で表現する。

$$m\frac{dv}{dt}\delta x=m\frac{d^2x}{dt^2}\delta x=\sum m\frac{d^2x}{dt^2}\left(\frac{\partial x}{\partial q_r}\right)\delta q_r=\sum m\left(\frac{d}{dt}\frac{dx}{dt}\right)\left(\frac{\partial x}{\partial q_r}\right)\delta q_r$$

$$=\sum\left[m\frac{d}{dt}\left\{\frac{dx}{dt}\left(\frac{\partial x}{\partial q_r}\right)\right\}-\frac{dx}{dt}\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial x}{\partial q_r}\right)\right]\delta q_r=\sum\left[m\frac{d}{dt}\left\{\frac{dx}{dt}\left(\frac{\partial\frac{dx}{dt}}{\partial\frac{dq_r}{dt}}\right)\right\}-\frac{dx}{dt}\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial x}{\partial q_r}\right)\right]\delta q_r$$

$$= \sum \left[m \frac{d}{dt} \left\{ v \left(\frac{\partial v}{\partial \dot{q}_r} \right) \right\} - v \left(\frac{\partial v}{\partial q_r} \right) \right] \delta q_r = \sum \left[m \frac{d}{dt} \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v^2}{\partial q_r} \right) \right\} - m \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v^2}{\partial q_r} \right) \right] \delta q_r$$

$$= \sum \left[\frac{d}{dt} \left\{ \left(\frac{\partial \frac{1}{2} m v^2}{\partial \dot{q}_r} \right) \right\} - \left(\frac{\partial \frac{1}{2} m v^2}{\partial q_r} \right) \right] \delta q_r = \sum \left[\frac{d}{dt} \left\{ \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_r} \right) \right\} - \left(\frac{\partial T}{\partial q_r} \right) \right] \delta q_r$$

すなわち

$$\delta W = m \frac{dv}{dt} \delta x = \sum \left[\frac{d}{dt} \left\{ \left(\frac{\partial T}{\partial q_r} \right) \right\} - \left(\frac{\partial T}{\partial q_r} \right) \right] \delta q_r$$

である。ここで $T = \frac{1}{2} m v^2$ である。上の式は一般化力が

$$Q = \frac{d}{dt} \left\{ \left(\frac{\partial T}{\partial q_r} \right) \right\} - \left(\frac{\partial T}{\partial q_r} \right)$$

であることを示している。

特に位置エネルギーが $\delta U = \sum Q \delta q_r$ である時は、

$$\frac{d}{dt} \left\{ \left(\frac{\partial T}{\partial q_r} \right) \right\} - \left(\frac{\partial T}{\partial q_r} \right) + \frac{\partial U}{\partial q_r} = 0$$

で与えられる。これはラグランジュの運動方程式と呼ばれるものである。

1807年ヤングは、この活力に対して初めて『エネルギー』という表現を与えた。

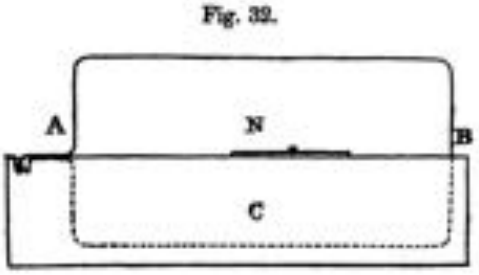
（2）電流の発熱作用に関するジュールの実験と法則

前述のヘルムホルツの論述においても、電気現象とエネルギーの関係がかなりの部分を占めていることからわかるように、この両者の関係は不可分である。その端緒を開いたのが、1840年のジュールの論文である。この論文の科学史上の重要性は極めて大きい。

電流が熱を発生することは、ボルタの電池が発明された当時から重要な関心事であった。しかし、その発熱量を具体的に測定することはジュールが初めて行ったのである。ジュールは論文の冒頭において、発熱が抵抗に比例することは一般的に信じられていることでそのことは確信するが、しかし抵抗だけが発熱の原因ではないだろう、という予想の元に実験を行った。この科学史上重要な論文「電気の金属的導体と電気分解に

よる電池における熱の発生について」[150]の概要を以下に紹介しよう。

まず彼は、この仕事を進めるに当たって最も重要なガルバノメーターの説明から始めている。それは、図３２のＡＢのように銅の線を直角に折り曲げたものである（マルチプリケーター）。この線は長さは１２インチで幅は６インチである。これは縦の位置が揺るがないように木のブロックＣで抑えらえている。図のＮは磁石で$3\frac{3}{4}$インチの長さであり、非常に細い針で目盛りを打った板の上に固定してありその磁石の先の方にメモリを示す。



比較的大きな矩形の形をした導線で検流計が作られているので、針の振れの角のタンジェントは電流の大きさにほぼ比例する。さらにファラディの電気分解の法則に従って、電気の量を測定する。それは、１時間の間に電気分解によって得られる化学等量をグレインで表現したものを用いて、それを度（degree）と呼ぶこととする。つまり電流の大きさを電気分解による物質の量で表現することとした。

用いた温度計はガラス棒に目盛りを打ったもので、目盛りは間隔が広く正確である。温度計は上端を支えて垂直に保って置いた。温度は華氏で１０分の１まで測ることができた。

与えられた金属の線の発熱量の正確を期すため、細いガラスの中にコイル状にして入れた。コイルの先は引き出して小さな渦巻きにして隙間を小さくし木綿の糸で巻いた。この道具を水で満たされたガラス瓶の中に入れた（図３３）。Ａは導線のコイルである。Ｂはガラスの瓶、Ｔは温度計である。電流は発生する酸素または水素によって測定される。
温度は外部の影響を考慮に入れるため、冷えていく温度を測定しておく。

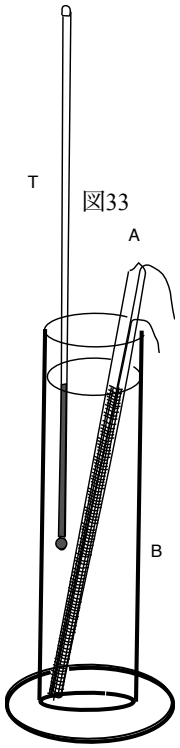


図33

実験１　発熱が抵抗の値に比例すること（異なった抵抗で同じ大きさの電流を流している）

①１/２８インチの太さの導線と１/５０インチの太さの導線を用意した。その抵抗を直接測定したとき、３.４対１.２７であった。一方、これらの導線をコイルにして二つのガラス瓶の中にそれぞれ入れて直列に接続し電流を流した。電流の大

[150] On the Heat evolved by Metallic Conductors of Elec- tricity, and in the Cells of a Battery during Electrolysis. By James Peescott Joule,. [' Pliilosophical Magazine,' vol. xix. p. 260.]
ジュール論文集p.60　scientificpapers01joul

きさは、１.１Ｑであった。このとき１時間の温度の上昇は、３.４度対１.３度であった。

② 鉄の線と銅の線を用いた。やはりコイル状にして、１.２５Ｑの電流を１時間流した。温度上昇は６度と５.５度であった。抵抗の値は６対５.５１であった。

③ 導線と水銀を比較した。この場合は温度上昇は４.４度と２.９度であった。抵抗の比率は４.４対３である。

これらのことから、抵抗の大きさと発熱量は比例することが確認された。ジュールの結論を述べておこう。

『その他の結果からも同様な性質を正確に得られた。これらはすべて次の事実を確信させた。すなわち、ある与えられた量のボルタの電気が、金属の導体を与えられた時間通過するとき、それによって」発生する熱の量は、常に抵抗に比例する。それは、長さや太さ形や導体の種類によらない。』

実験２　発熱量が電流の二乗に比例すること

次の実験は、電流の大きさと発熱量であるが、これは電流の自乗に比例することが予測されるとジュールはいう。なぜなら、上記の法則によれば、抵抗の電流に対する効果は、一つは、流れる電気の量が増えることと、さらに、電気の移動速度が大きくなるので、電流の大きさは二つの量に関係するからである。

実験結果は下の表の通りである。

検流計の針の振れ	電流の大きさ	３０分の熱の発生(実験値)	電流の２乗の比	１時間に発生した熱量（実験値）	電流の２乗の比
16	0.43			1.2	1.00
31.5	0.92	3	2.9	4.7	4.58
55	2.35	19.4	18.8		
57.66	2.61	23	23.2		
58.5	2.73	25	25.4	39.6	40.31

最も左の検流計の振れはだいたいの電流を示し、正確には電気分解で求めた２列目の電気分解による電流の大きさが電流の値を正確に示している。３０分の場合と１時間の場合いずれも発熱量と電流の２乗の比はかなり良い値で一致していることが分かる。ただし比較するために３０分のデータの電流の二乗の比には一定の値をかけ算してある。ここでもジュールの結論を述べておこう。

『ボルタの電流が、金属の導体に沿って移動する時、与えられた時間に発生する熱量は、導体の抵抗と電流の二乗の積に比例する。』式で書けば、

$$Q = Ri^2t$$

Qは発熱量　Rは抵抗　iは電流　tは時間

となる。

実験３　電池の内部抵抗による発熱量について

さらにジュールは、電池の内部抵抗により発生する熱を次のようにして求めた。まず、電池の内部抵抗を電池に既知の抵抗をつなぎその電流を求めることにより、オームの法則によって求めた（起電力は知られていないので、二つの抵抗を用いる。）。次に、電流が流れていない時の化学反応の発熱量をファラデーの実験結果を利用して求めておく。さらに、電流が流れている時の発熱量を測定し、化学反応の発熱量をそれから差し引いて求めたのである。これらの幾つかの異なる電池を用いて実験を繰り返した。内部抵抗がわかり電流が分かれば、上記の実験の結果から発熱量がわかるので比較ができる。

結果は次の通りである。

① 内部抵抗　0.293　電流　1.8　発熱量理論値　2.03
　発熱量実験値　全発熱量　4.6　化学反応の発熱量　2.5　発熱実験値　2.1
② 発熱量理論値　2.12　　発熱実験値　1.85
③ 発熱量理論値　2.08　　発熱実験値　2.13
④ 発熱量理論値　1.0　　発熱実験値　1.2
⑤ 発熱量理論値　3.46　　発熱実験値　3.35
⑥ 発熱量理論値　1.82　　発熱実験値　1.7

これらの結果からジュールは次のように結論した。

『ボルタの作用によってあるペアの間に与えられた時間内に生成した熱は、ペアの間の導体の抵抗と電流の強さの二乗の積に比例する。』

こうしてこの法則$Q = Ri^2t$は、一般的な意味を持つ。このことから、次のように結論する。

『与えられた強さのガルバニックペアの電極が単純な導体に接続されている時、回路全体に発生する熱は、導体の抵抗が何であっても、起電力の強さと流れる電気量に比例する』

式で書けば、発生する熱量は、

$$U = i^2Rt + i^2rt = (r+R)i^2t = iVt$$

抵抗が並列に接続されていても

$$dU = \left(i_1{}^2Rdt + i_2{}^2Rdt + i_3{}^2Rdt\right) + i^2rdt = \left(V_1i_1dt + V_1i_2dt + V_1i_3dt\right) + V_0idt$$

$$= V_1dt\left(i_1 + i_2 + i_3\right) + V_0idt = V_1idt + V_0idt = Vit$$

こうして一般に次の式が成り立つ。

$$Vidt = ri^2dt + Ri^2dt$$

この式の左辺は、起電力が供給する熱量を表し、右は、各抵抗が消費する熱量を表している。

（3）「磁電気の熱効果と熱の仕事等量」

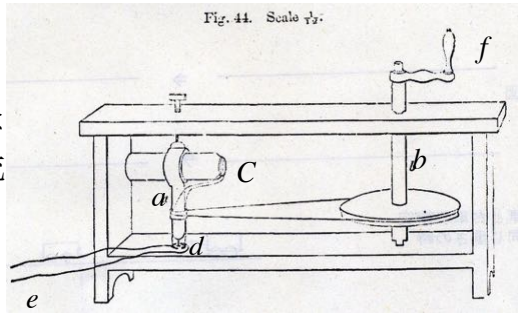
ジュールは上記の論文ののち1843年に、「磁電気（電磁誘導）の熱効果と熱の仕事等量」[151]という論文を発表し、仕事と熱の関係を明確にした。この論文の冒頭においてジュールは次のように述べている。

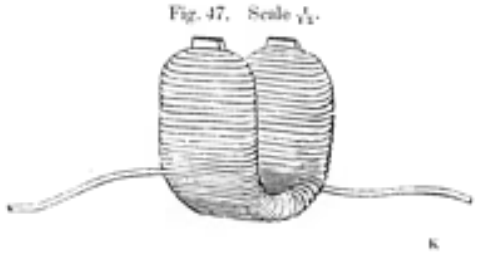
「磁電機（発電機）によって生じた電磁力は回路全体を通して他の原因によって生じた電流と同様に同じ熱的な性質を有するということは当然のことであると私は信じている。そして、熱が物質ではなくて振動の状態であると考えるならば、（電磁誘導による発熱でさえも）単純な機械的な作用から導かれると考えてなぜいけないのか。つまり、永久磁石の前でコイルを回転させるような機械的な仕事が熱に変わると考えてはいけないのだろうか」

それに対して、熱は生成されるのではなく移動するだけであるという考え方が根強く存在するという。例えば磁電機の場合は、コイルの中にある金属部分の熱が移動するだけであり、ボルタの電池の場合は電気分解のとき電解溶液から潜熱が移動すると考えるのである。そして、この考えは電流によって熱が奪われるというペルチエ効果によって裏打ちされているようにさえ思われる。そこで決定的な実験を遂行したとジュールは述べている。これがその論文である。この論文の趣旨は、磁電気の内部にも熱が発生するのでそこからは熱が奪われるのではないこと、磁電気に作用する仕事と回路全体に発生する熱量とが比例することを示し、熱の仕事当量を求めているのである。

ジュールの実験は次の通りである。

まず、右図の C の部分に電磁石を装着する。Cを水平に回転させるが、その付け根の部分dは整流器になっていて、それを通して交流を直流に変換しeの部分に、電流計（Galvano-meter）などを装着する。回転する電磁石の周りには右図のような電磁石を装着する。この磁石に電流を流し、磁場を生じさせ、その中でCを回転させるのである。ハンドル f を用いて、回転させるが、１分間に６００回ほどである。どんなに断熱をよくしても、熱は少しずつ出てしまうので、電流を切って磁場をゼロとし、自然に失われる熱を計測してそれを差し引いて、実際に発生する熱量を測定する。





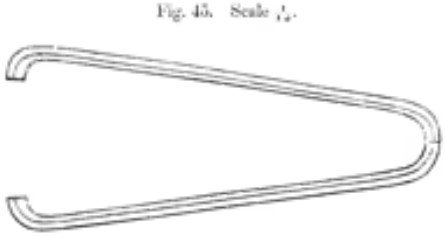
電磁石

[151] On the Calorific Effects of Magneto-Electricity, and on the Mechanical Value of Heat. By J. P. Joule, ジュール論文集p.123

実験の結果は下記の通りである。

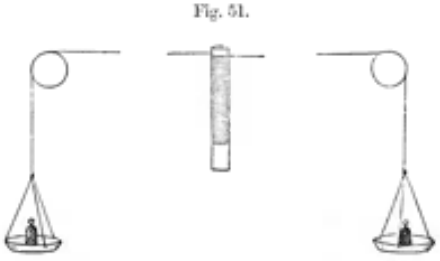
1	2	3	4	5	6	7	8
実験No.	電磁誘導電流	実際に発生した熱量	鉄の中の電流に対する補正	補正された熱	２列目の数値（電流）の自乗	２列目で与えられた電流に対応するボルタ電流に対する発生熱量	7列×1.33
Ｎｏ．１	0.177	0.10	0.02	0.08	0.062	0.040	0.053
Ｎｏ．２	0.902	1.84	0.28	1.56	1.618	1.040	1.383
Ｎｏ．３	0.418	0.45	0.09	0.36	0.348	0.224	0.298
Ｎｏ．４	1.019	2.39	0.28	2.11	2.065	1.327	1.765
Ｎｏ．５	0.236	0.10	0	0.10	0.111	0.071	0.094
Ｎｏ．６	0.340	0.21	0	0.21	0.230	0.148	0.197

実験１は、電磁石の形が上記のものと異なっていた（右図）。実験２は上記のようなU字型のコイルを用いた。実験３、実験４は磁場を作る磁石に流す電流の大きさを変えるために電池の数を変えた。実験５では、電流計を外して行ったなどである。このように磁場の強さを様々に変化させるなどして実験を繰り返し、上記の結果が得られた。この結果から、例えば５列と６列を比較すれば、『磁電機（発電機）のコイルに発生する熱量は、電流の二乗に比例する』ことが確認された。さらに７列、８列に示したように、ボルタ電流と誘導電流の間はほぼ同じであり比例している、若干の相違は、誘導電流が変動しているせいである。



このことから、ジュールは、発電機自身に熱が生じ抵抗にも熱が生じるのであるから、抵抗に発生する熱は発電機のコイルから抵抗のほうに移動するのではなく、発電機自身に発生してさらに抵抗を含む回路全体に発生するのである、ということを確認した。そして、その発生した熱量は、明らかに、コイルを手で回した機械的な仕事が原因であるとしたのである。

次に、ジュールは、この機械的な仕事が、熱を発生するとして、費やされた仕事と発生する熱との数量的関係を調べることとする。そのために、ジュールは、手で回す仕事を、滑車を通して重りで回転させる仕事に換算することとした。さらに電流が生じないときの補正も行った。



まず、すでに行った実験と同じように、磁場の強さを決め、さらに１分間で６００

回回転するように、重りを決める。そうすれば、手回しで600回回転させたときと同じ電流が流れるので仕事を計算することができる。実際は正確に６００回転にすることは難しいので、電流の値で補正する。生じる電流がわかれば、その時の仕事を換算することができるのである。

例えば、磁場を作る外側の電磁石に、５対の電池をつないで、１分間に概ね６００回回転させると、電流計の針は２４°１５′傾き、０．９８３の電流が流れる。このようにするには重りを５ポンド３オンスにすれば良いことがわかる。さらに、磁場の強さをゼロとした時には２ポンド１３オンスの重りが必要であることがわかるので実質２ポンド６オンスの重さであったことがわかる。（１ポンド＝１６オンス）。そして、この落下速度は、１５分間で517フィートであった。

	電磁石回転数/分	検流計の振れ（度）	室温	差の平均	水温		熱の増減
					後	前	
電池入	600	22	58.93	0.17	58.20	60.00	1.80
電池切	600	0	59.60	0.40	60.02	59.98	-0.04
電池入	600	24	59.55	1.23	59.90	61.67	1.77
電池切	600	0	59.45	0.19	59.78	59.50	-0.28
電池入	600	24.75	58.30	0.05	57.35	59.35	2.00
電池入	600	22	57374	0.32	57.28	58.83	1.55
電池切	600	0	58.35	0.49	58.83	58.85	0.02
電池入	600	21.33	58.73	0.78	58.83	60.20	1.37
平均電池入	600	22.82		0.51			1.70
平均電池切	600	0		0.36			-0.10
補正結果	600	22.8	0.902				1.84

上の表によれば、６００回回転の時の正確な値は、検流計の振れは22.8でありそれは0.902の電流が発生したことを示し、その時の発熱量が1.56°上昇である。一方、重りを落下させる場合は電流が0.983であったから、おもりが落下するときの温度上昇は

$$\Delta T = 1.56° \times \frac{0.983^2}{0.902^2} = 1.85°$$

と計算で求めることができる。これは、コイルの部分だけの計算である。おもりを落下させたときの全体の発熱量を求める。そのために全体の抵抗を求める。

コイルの抵抗：全体の抵抗＝１：１.１３

であった。ここで、電流による発熱量は$Q = Ri^2$であるから、発熱量は抵抗に比例するので、温度上昇は、

$$1.85 \times 1.13 = 2.09$$

となる。ところで、この計算は電流が流れる導線部分の温度上昇であるが、実際には、それ以外の部分の温度上昇もあるので、それらを補正する必要がある。まず、回転する電磁石の鉄の部分に発生する熱量の部分（回転部分の温度に換算すると0.33）そして整流子のところでのスパークの熱量（回転部分の温度に換算すると0.04）。これらの他の部分でで発生した熱量が測定している回転部分に発生したとした時の温度の上昇に使われたとすると、（つまり、すべての熱が回転部分の水当量1.114ポンドの温度上昇に使われたとすると）その時の温度上昇は

$$2.09 + 0.33 + 0.04 = 2.46$$

となる。したがって、２ポンド６オンスの重り２個（つまり４ポンド１２オンス）が517フィート落下した時に発生する熱量は、1.114ポンドの水を2.46°F上昇させるのに等しいことがわかる。これは4.8J/calとなる。

註　これを現在の単位に変換して、熱の仕事当量を求めてみよう。

12オンス＝$\frac{12}{16}$ポンド＝0.75ポンド

1ポンド＝454g＝0.454kg

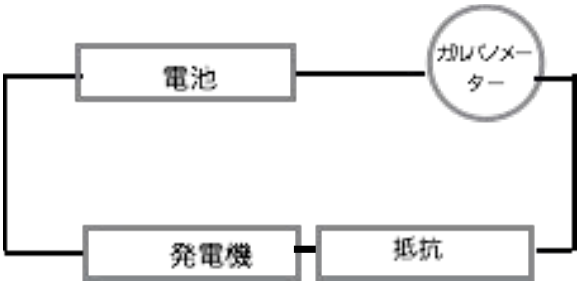
1℉＝$\frac{1.0}{1.8}$℃　１フィート＝0.3048m

これを　JQ(cal)=W (J)　に代入すると次のようになる。

$$J \times (1.114 \times 454g) \times \left(2.46 \times \frac{1}{1.8}°C\right) = (4.75 \times 0.454kg) \times 9.8 \times (517 \times 0.3048m)$$

これからJを求めると、J=4.8 を得る。

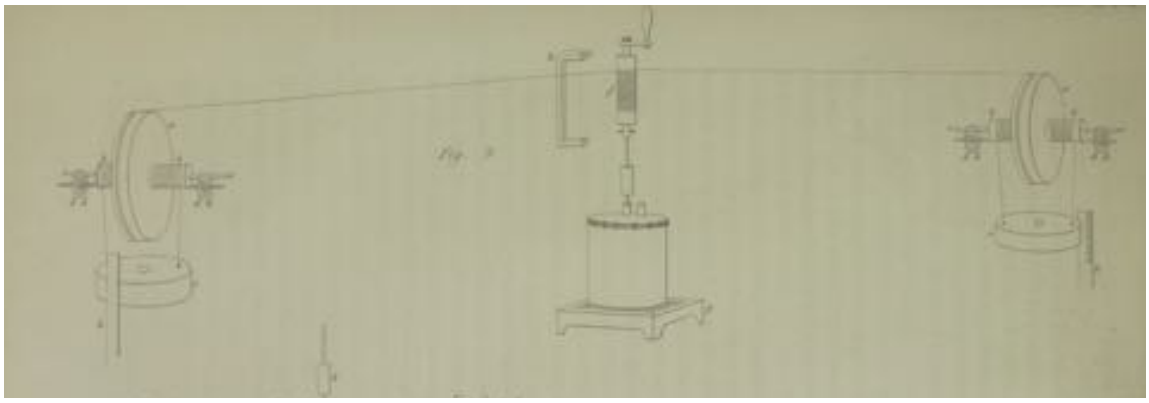
これは、熱がコイルで発生することを示し、同時に費やされた仕事量に比例することを示している。



なお、ジュールは、整流子のところにガルバノメーターだけでなく、さらに、電池をつなぎ、電池と発電機の両方の電圧をかけて、抵抗で発熱する量を測定している。

発電機の向きが同じ時は、電流が強められ、反対の時は電流が弱められるが、いずれにせよ、抵抗での発熱量は、$Q = Ri^2$で与えらることを確認している。

その後、ジュールの仕事当量を測定する実験は電磁誘導ではなく直接水をかき混ぜる方法で繰り返し行われた[152]。下図はその実験装置を示したものである。この完成された実験が教科書に掲載されている有名な羽根車の実験である。



ヘルムホルツは、ジュールの実験は、当初、精度について疑問があるとしていたが、その後『同じ研究者のその後の、完成された実際知識と鉄のような勢力を持って完成された実験は、（１kgの水を１℃あげるの必要な仕事は）４２５kg（を１m引き上げる）を与える』と述べた。

なお、１８４２年５月、マイヤーは「無生物界における力についての考察」を書き、世界のエネルギーが一定であるという原理を明らかにした。また、発生する熱は失われた仕事量と同等であるとし、発生する熱量に相当する仕事量を見積もった。これはジュールよりも早かった。

２．エネルギー保存の法則と電磁誘導の法則

（１）Helmholtzの「力の保存について」

１８４７年ヘルムホルツは「力の保存について」[153]の論文をベルリン物理学会において発表し、エネルギー保存の法則を明瞭にした。この論文の約半分は、電磁現象とエネルギーとの関係であり、電磁気学の発展に大きな貢献をした。例えば、マックスウェルは彼の教科書において、ノイマンの仕事を簡単に紹介した次の項（A543）において「科学的に偉大な次のステップはヘルムホルツの力の保存についてであり、その後、ヘルムホルツとは独立になされたトムソン卿の仕事である。」として、エネルギー保存の法則の電磁気学に果たした役割の重要性を述べていることは既に述べたとおりである。

---

[152] 近代科学の源流　物理学編 II　p.48 ジュール
‘on the Mechanical Equivalent of Heat ‘Philosophical Tran.vol.140.1850 p.61

[153] ヘルムホルツ　「力の保存についての物理的論述」 世界の名著 ６５ 現代の科学１ 中央公論社 p.231

この論文の概要は次の通りである。まず、序論において基本原則を与える。つまり『自然物体を相互にどのように組み合わせても、そこから無制限に仕事力を引き出すことは不可能であるという命題から出発する』。さらに自然界の作用がすべて引力及び斥力に帰着すると述べているが、これは場を含んだような自然像には当てはまらない。§１では、活力の保存の原理について総括している。活力の保存の原理は系の物体が始めの位置から第二の位置に移る際に得られた仕事は第二の位置から元の位置に移る際に失われる仕事と常に同一であることを要求する。例えば、質量m速さｖの物体が高さhまで上昇したときした仕事と高さｈだけ落下したときの仕事は等しいという。このとき仕事量は mgh である。一方、高さ h だけ落下したときの速さは、$v=\sqrt{2gh}$ である。このことを利用してHelmholtzは次のように言う。

「質量ｍの物体が垂直に高さ h まで自由に上がるためには $v=\sqrt{2gh}$ の速度を必要とし、それが落ちてきたときは再びこの速度に達する。かくして、

$$\frac{1}{2}mv^2=mgh$$

である。したがって、 mv^2 なる量（活力量）の半分が仕事量の尺度に代用される。・・・私はとして $\frac{1}{2}mv^2$ なる量を活力の量と名付けるとしよう。」

今ではこの量は運動エネルギーと呼ばれている。

§２において現在の力学的エネルギー保存の法則をのべている。そのためにまず『張力の和』（位置エネルギー[154]）$=U=-\int F\,dr$ を導入し、これを用いて活力の保存を次の形に変形した。

$$\frac{1}{2}mV^2-\frac{1}{2}mv^2=W=-\int F\,dr=U$$

$$\frac{1}{2}mV^2=U+\frac{1}{2}mv^2$$

このことから、活力の保存は位置エネルギー（張力の和）と運動エネルギー（活力）の和が一定になることであることを示したのである。

「張力（位置エネルギー）の量における消失はつねに活力（運動エネルギー）の取得に等しく、前者の取得は後者の消失に等しい。すなわち存在する活力と張力の和は常に一定である。この最も一般的な形において、われわれはこの法則を力の保存の原理と名付けることができる。」

---

[154] 張力はポテンシャルであるからポテンシャルエネルギーと呼ぶべきである。「位置エネルギー」の言葉の出処は不明

こうして、力学的エネルギー保存の法則を定式化し一般化した。

§３において、様々な力学現象について、エネルギー保存の原理を調べている。（１）重力の影響における運動について（２）摩擦がない時、あるいは、非弾性衝突がない時（３）完全に弾性的な固体及び流体の運動。内部に摩擦がない時。これらのときにはエネルギー保存を満たすことは最も早くから認識され利用されてきたと指摘する。さらに、波の伝わり方。広がることにより振幅が小さくなること、光の反射、屈折における境界の粒子の運動は、両媒質において同じであるという仮定も、活力の保存つまりエネルギー保存の法則から導き出されたことは既にフレネルによって指摘されていること、その他、輻射に関するエネルギー保存の議論を展開している。

次に§４においては、熱の仕事当量つまり、力学的エネルギーが熱に転換することについて議論されている。非弾性的衝突の場合や摩擦がある時は、力の絶対的な喪失があるが、この場合でも、摩擦によって熱、あるいは、電気が発生し、間接的に『力』（エネルギー）を表していることを考慮すべきであるとし、問題は失われた機械的仕事がいつも一定の熱が発生するかどうかであるとして、ジュールの実験における不屈の努力を高く評価している。さらに、熱が不滅でただ移動するだけなのか、それとも発生するものなのかという議論を提出し、鉄を槌で叩くと熱が発生することや、氷が摩擦で溶ける実験（デービィ）で、熱は発生するという議論に分があると主張した。電磁誘導によって、発生する熱は、コイルから運ばれるのではなく、コイル自身の中にも発生するというジュールの実験を紹介し、熱の量は機械的仕事によって絶対的に増加させうる、と結論する。従来熱量と呼ばれてきたものは、ひとつは熱運動の活力の量に対応しもう一つは原子内の張力に対応するとし、前者は自由熱、後者は潜熱と呼ばれるとする。さらにクラペイロンとホルツマンの研究を通して、熱の仕事当量を見積もっている。

次の§５．§６で、エネルギー保存の法則と電磁気学との関連が丁寧に議論されていて、電磁気学に大きな一石を投じている。

§５ではまず静電気のエネルギーについて議論している。まず電気量がe',e''の時、その間に働く力は、

$$F=\frac{e'e''}{r^2}$$

である。これらが、距離Rからrに移る際のエネルギー（活力）の増加はdrとFの向きが同じ時は正、反対の時は負であることを考え、引力の時は、

$$U_r-U_R=\int_R^r F\,dr=\int_R^r \frac{e'e''}{r^2}dr=-\frac{e'e''}{r}+\frac{e'e''}{R}$$

となる。無限遠から、rまで移動した時は、

$$U_r-0=\int_R^r F\,dr=\int_R^r \frac{e'e''}{r^2}dr=-\frac{e'e''}{r}+0$$

より、

$$U_r = -\frac{e'e''}{r}$$

である。これは、ガウス（あるいは、グリーンの）のポテンシャル $\phi_r = -\frac{e}{r}$ に関係したエネルギーでありポテンシャルエネルギーと呼ばれる。ポテンシャルを用いればポテンシャルエネルギーは

$$U_r = e'\phi$$

で与えられる。
こうして、活力の増加はポテンシャルエネルギーの差で与えられることとなる。

次に、電池による電流について、考察を進めている。ここでは、ジュールによって進められた考察とほぼ同一の内容となっている。ジュールによれば、すでに述べたように、化学作用がボルタの回路を維持する場合、ボルタの電池に発生する熱は、電池内部の化学過程によるよりも少ないことが発見された。熱の残りは接続している導体の内部に発生しているか、あるいは回路の中に電磁エンジン（モーター）がある場合は熱の一部分はエンジンの機械的仕事として計算されることがわかった。つまり、式で書けば

化学作用によるエネルギー（一定）
＝電池内部に発生する熱＋導線に発生する熱＋モーターの機械的エネルギー

例えば、もしもボルタ電池の電極が初めは短く太い銅線で接続されていて、そして後では長い細い銅線で接続されているならば、電池内の亜鉛が 1 グレインあたりとけ出す時、電池内に発生する熱量は初めの場合の方が後の場合の方よりも大きい。1 グレインの亜鉛がとけ出す時、電池内に発生する熱と銅線に発生する熱の総和は両方の場合において等しい。これはジュールによって実験で直接に証明された。

上記の式を具体的に書けば、

$$Q = RI^2dt + W$$

である。ここでRは電池を含む回路の全抵抗である。仕事がなければ（W=0）

$$Q = RI^2dt = VIdt$$

ここでもちろん、$RI = V$ を用いた。これは、起電力Vの電池が I の電流を流す時は、$VIdt$ の熱を生じることを意味している。一方の金属が溶解し、他方が沈殿する時、起電力が発生するが、それぞれの金属が溶解する時に一当量あたり発生する熱量を、a_1, a_2 とすれば、

$$Q = kIdt\left(a_1 - a_2\right)$$

となる。ただし、a_2 の方は、沈殿するので、負であるとしている。この二つの式を比較すると、

$$IVdt = kIdt\left(a_1 - a_2\right)$$

である。ヘルムホルツはこのことを、「科学的に発生するはずの熱は電気的に発生した熱に等しい」と述べている。ところで上の式は

$$V = k\left(a_1 - a_2\right)$$

と変形できる。つまり、aとVは比例することを示している。aは、いわば化学反応の強さを示していると考えられるから、化学反応の強さすなわち「親和力」は電圧で表現されることとなる。

物理学生への註

現在は、化学反応に伴う起電力は、ギッブスの自由エネルギーと呼ばれものので記述される。それは等温等圧条件下で非膨張の仕事として取り出し可能なエネルギーとして表現される。

$$dG = -S(T,p,N)\,dT + V(T,p,N)\,dp + \sum_i \mu_i(T,p,N)\,dN_i$$

ここでμは化学ポテンシャルと呼ばれ、等温等圧の時は、

$$dG = \sum \mu dn$$

である。そして、起電力をVとすれば、

$$dG = VdQ = VFdn$$

$$V = \frac{dG}{dQ} = \frac{dG}{Fdn} \quad F:\text{ファラデー定数} \qquad n:\text{モル数}$$

Qは電気量である。

第６章では、磁気、および電磁気の力当量を議論している。今、前述の電池から供給されるエネルギーが導線の熱エネルギーと仕事に使われる式を考察してみよう。

電池の供給するエネルギー＝導線の発するジュール熱+磁気作用による仕事

であったが、ここで磁気作用の導線に対する仕事は

$$W = Fds = IlBds = Id\left(lBs\right) = Id\phi$$

である。ϕとは磁束のことである。上の式は、

$$IEdt = RI^2dt + Id\phi$$

であるから、この式を変形すれば

$$I = \frac{E - \dfrac{d\phi}{dt}}{R}$$

が得られる。電池がない場合は、

$$I = -\frac{1}{R}\frac{d\phi}{dt}$$

である。つまり、磁束の時間的変化は起電力を示すことがわかる。

ところで、ノイマンによるノイマンポテンシャル

$$\iint \frac{1}{r} ds_1 \bullet ds_2 = \frac{4\pi}{\mu} M$$

を用いれば、このϕは

$$\phi = \int B \bullet dS = \int rotA \bullet dS = \oint A \cdot ds = \frac{\mu_0}{4\pi} \iint \frac{I_1}{r} ds_1 \bullet ds_2 = \frac{\mu_0}{4\pi} I_1 \iint \frac{1}{r} ds_1 \bullet ds_2 = MI$$

（つまり磁束は誘導係数に電流をかけたもので与えられるの）であるから、上の式は

$$I = -\frac{1}{R}\frac{d\phi}{dt} = -\frac{1}{R}\frac{dMI}{dt} = -\frac{M}{R}\frac{dI}{dt}$$

最後の等号はMが時間とともに変化しない場合のときである。このMを相互誘導係数と呼ぶ。

物理学生への註

この部分について、マックスウェルは、次のように議論している[155]。すなわち、電流を速度と考えて、電磁エネルギーを運動エネルギーを参考にして次のように定めた。（速度の二次の同時式であるとしたのである。）

$$U = T = \frac{1}{2} L_1 I_1^{\,2} + M I_1 I_2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^{\,2}$$

起電力は、電流に関する力と考えて、ラグランジュの一般力の式から

$$V_1 = F_1 = \frac{d}{dt}\frac{\partial}{\partial \dot{Q}_2} T - \frac{\partial}{\partial Q_2} T = \frac{d}{dt}\left(L_2 I_2 + M I_1\right)$$

となる。ただし、$\dot{Q}_2 = I_2$　とした。これを電池を含む回路の式について考えれば

$$E_1 = I_1 R_1 + \frac{d\left(L_2 I_2 + M I_1\right)}{dt}$$

である。ここで、電池がなければ、E＝0　さらに、自己誘導係数 L_2 を無視すれば

$$0 = I_1 R_1 + \frac{d\left(M I_i\right)}{dt}$$

$$I_1 R_1 = -\frac{d\left(M I_i\right)}{dt} = -M\frac{dI_1}{dt}$$

となる。

（２）W.Thomsonの「電磁誘導の理論について」

---

[155] James Clerk Maxwell著　A Treatise On Electricity & Magnetism Dover　A.543

1848年の論文　「電磁誘導の理論について」[156]において、トムソンは、エネルギー保存の法則を用いて電磁誘導の法則を簡潔に導いている。それは内容的には、前年のヘルムホルツの論文とほぼ同じであった。

トムソンによれば、電磁誘導の法則はノイマンによって見事な形式にまとめられているが、この定理の簡単な先見的な説明が「電磁誘導が作用している相対的な運動を起こすのに費やされる仕事の量はその導線に生じる電流によって失われる力学的効果と等しい」という原理を基礎としていることで説明ができる、とした。この際失われた力学的効果は、ジュールによれば熱となって発生する。そして電流の二乗に比例することが知られている。

説明はこうである。今電流と電流の間に働く力があるとして、その力はある関数Uの微分で与えられるとする。それはまた、考えている導線の電流にも比例するから、仕事は一般に

$$W = i\frac{dU}{dr}dr = idU$$

で与えられることになる。

一方発生する熱量はジュールの法則により、

$$Ri^2dt$$

である。この二つは等しいから、

$$idU = Ri^2dt$$

従って、

$$i = \frac{1}{R}\frac{dU}{dt}$$

を得る。

ここでUはファラデーの磁束ということとなる。

---

[156]'On the theory of electro-magnetic induction'Mathematical_and_Physical_Papers1 Kelvin p. 91

第４章　電磁場

大陸の電気力学が電流と電流の間の力の研究であったのに対して、ファラディやマックスウェルは、その間の空間に電場や磁場といった場の存在を考えた。確かに、電流と電流の間の力を研究するに当たって、場の存在を考慮に入れずとも研究を進めることができたのであるから、彼らにとっては不必要な存在であったかもしれない。しかし、それ以外の存在を初めから不必要なものと決めつける立場は、科学を推進させる一般的な有り様から考えると必ずしも正当な考えとはいえない。科学的な理解というものは、すでに述べたように多様なものであり、例えば疑問詞Howに相当する現象を探求する理解もあれば、whatに相当するそこに何があるのか構造はどうなっているのかと言った実体にたいする理解もある。さらに、whyに相当する基本的な法則と限定された実体の運動法則を演繹的に展開する本質的な理解もある。理解の発展に応じて様々な局面があり得るのであるから、初めから、遠隔作用のみが最高の理解であるとする大陸学派の行き方は、偏狭であったと言わざるを得ない。それに対し、そこに何があるのか、作用はどうなっているのかを極めようとしたファラデーの態度は、一つの可能性を秘めた挑戦であったといえる。たとえ、結果的に意味を持たなかったとしても、そのような探求の方向は追求すべき方向であった。以下では、電場と磁場について追求したファラディとマックスウェルの研究をたどってみよう。

Ⅰ　ファラディの電気力線と磁力線

１．近接作用

それは電気分解の研究から始まった。ファラデー以前の電気分解の説明は、極から分子にはたらく引力や斥力によって説明されていた。例えばグロトスによる説明は、ファラデーの電気実験によれば次のとおりである。

「481　1805年、グロトス(Grotthuss)はヴォルタ電気による液体の分解の説明を行っている。彼は電堆を電磁石のような吸引及び排斥の作因と考え、極は引力及び斥力を持っているものとした。樹脂電気[157]を出す極は水素を吸引して酸素を排斥し、一方ガラス電気を出す極は酸素を吸引して水素を排斥する。したがって、水の粒子の各元素は反対方向に働く引力及び斥力の支配下にあり、その作用の中心は互いに逆向きに対立している。電流の経路中に位置する水の分子に対するそれぞれの力の作用は、その力の及ぼされる場所において距離の２乗に逆比例し、こうしてこのような分子に対して一定の力が作用していると述べられてある。彼は元素が互いに離れて現れることを、介在する粒子間に分解及び再結合が連続的に生ずることに起因すると説明し、おそらくは両極においてまさに分離しようとしているそれらは、そこの２種の電気に結合し、その結果気体になるであろうと考える。」

---

[157] 樹脂電気は負、ガラス電気は正である。

ファラデーはこの見解に反対する。彼は、電気分解に対しては、ファラデーの法則を発見していた。それによれば、電気分解によって生じる物質の量は電気の強さによるのではなく、そこを流れる電気の量によって決定されるということである。

「377　電気化学分解のこの例に対して、また、おそらく全ての場合において、次のことが結果されよう。すなわち化学的能力は磁気力と同様に、通過する電気の絶対量に正比例する。」

このことから、電気分解にとって重要なのは、極ではなく、そこを通過する電気量が決め手であることである。

そこで、極が重要でないことを示すために、分解される物質内に極がない場合を作り出したのである。それは右図７[158]のように、電気分解の回路の途中に空中放電を行う部分を差し込んだのである。この実験においてはどこが極なのか明快ではなくなる。特にさらに図10のようにした場合は放電をする両端（ｎ、ｐ）が極なのか放電受ける中央部分のリトマス紙の部分の端（ａ、ｂ）が極なのか明らかではない。にもかかわらず、リトマス紙において電気分解が行われていることは、リトマス紙が変色することから明らかである。さらに、このリトマス紙をいくつもつないだ実験を行った。こうすると、極がどこであるかはますます不明確となるのである。（右図１１）

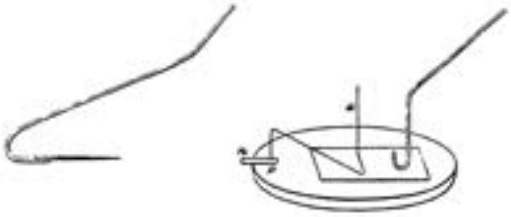


Fig. 7.

Fig. 10.

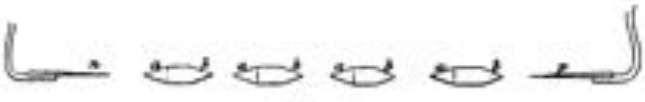


Fig. 11.

こうして、極が明確でない場合について実験を重ねていって、さらに、今度は、極と言われている部分は単に境界面にすぎないことを確認する実験を行った。

次頁右図12は硫酸マグネシウムを電気分解する実験である。ｅは白金、cdは純水、c以下は硫酸マグネシウムの溶液である。ａは仕切板、bはもう一つの極である。ここで電流を流すとマグネシウムが析出するが、それは、cの純水と溶液の境界面に析出するのである。つまり境界面が極となるのであるが、それは極と呼ぶには不都合である。

158 図はExperimental research に引用されている図に振られている番号をそのまま用いた。

まして、引力や斥力の極とは到底考えられない。こうしてファラデーは次のように結論する。

「493　電気化学分解が、両極からのいかなる直接的な吸引及び排斥にもよらないということは空気中での実験から明白であるように思われる。その場合、発生される物質は、いずれの極の周囲にも現れず、ただ電流の方向に従って分解物質の終端に発生させられる。あるいは析出させられる。」

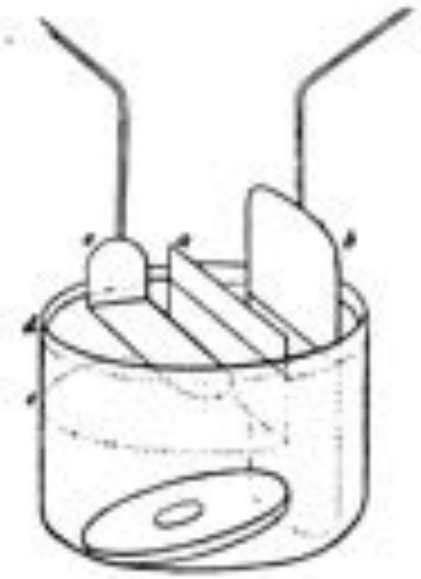


Fig. 12.

こうして現象の本質は、分解の「効果は電流の方向に従って励起させられた内部粒子の作用によって生じるもの」[159]である、とする。そしてこの作用は、粒子の配列に依存し、配列が安定する方向に移動すると考える。つまり遠隔力に対する近接力の提案である。ただしこの近接作用は粒子間の配列や力に依存しているのである。

さらに１８３７年第１１シリーズでは、電流の流れによる励起という考えから、一歩前進して、「第一段階として感応（誘導）が生じ、分解は第二段階で現れ」[160]ると考えることとした。

誘導はすでに述べたように「そのすぐ近くにある物体に何らかの特殊な状態を誘導するよう保持している力能」のことである。そして普通の誘導も電気分解の時の誘導も同じ連接粒子の作用であり、電気的遠隔作用の間に挟まる物質の影響を通して以外には決して生じ得ないものである。そして固体では電気分解が生じないが、液体では生じること、この二つの現象は連続していると考えたのである。

ファラデーは次のように云う。

「1164　電解質が液体であるときには、電流に対して容易に元素を析出するにもかかわらず、固体であるとその元素を発生しないという一般的事実を発見した際、私は感応作用（誘導作用）の説明への道が開かれたと感じ、類似していない多数の諸現象も同一法則の下に従わせうると考えた。
・・・電解質が固体ならばいずれの場合にも普通の感応（誘導）を生じ、電解質が流体ならば反対作用の妨害なしに化学作用及ぶ分解を生ずる。・・・従ってこの場合も電解作用におけるように、第一段階として感応（誘導）を示し、分解は第二に現れなければならない。
・・・

159 段落518

160 段落1164

これによって私は通常の感応（誘導）それ自身はすべての場合において連接粒子の作用であり、電気的遠隔作用は間に挟まる物質の影響を通して以外には、決して生じ得ないものであると推定するに至ったのである。」

「そしてこの連接粒子は、（磁石と同じように）分極状態にあると信じている。」

だから

「電気誘導は絶縁体あるいは電媒質の連接粒子の作用であることを導き出そうというわけである。（電媒質（di-electric*)なる語を使って、電気力が通過して作用するところの物質を言い表すこととする。）」[161]（*di は通過するの意）

こうして、電解質のあらゆる効果は特殊な分極状態にされた粒子の作用であるとみられ、感応（誘導）とは連接粒子の作用であり電気的遠隔作用（通常の感応）は間に挟まる物質の影響を介す以外には生じ得ないと推測した。そして、導体と不導体は連続的に移行するものであり、不導体とは、第一段階の感応が生じただけでの状態で、導体とは、第二段階の電気が交代して移動していく状態であるとした。

この事実を明瞭に示す物体がある。それは右図に示す鯨脳である。ファラデーによれば、

「1322　鯨脳（spermaceti）（右図[162]）を検査してみたところ　これは電媒質（dielectricity)であって、それを通して感応（誘導）が生じることがわかった。

1323　しかるに鯨脳は一方また導体で、非常にわずかな程度であるが一歩一歩伝導が進んでいくのを追跡することができる。そして電気力がその中にある距離だけ進んだときに強制力を取り去ると、電気力がその経路を戻って最初の場所に再び現出するようにすることさえできるのである。」

こういう連接粒子の作用は、局所的な作用を表現することはできたが、しかし、その内実には粒子間での遠隔作用を含んでいて首尾一貫とした理論とはなっていなかった。この矛盾を解決するきっかけとなったのが次の真空の誘電率に対する考察であった。

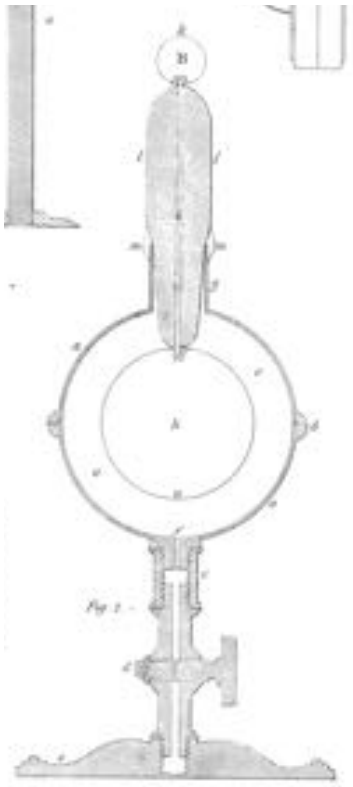
２．誘電率の測定

ファラデーは、静電誘導における媒質の役割を明らかにすることとして、誘電率の概

[161] 段落1168

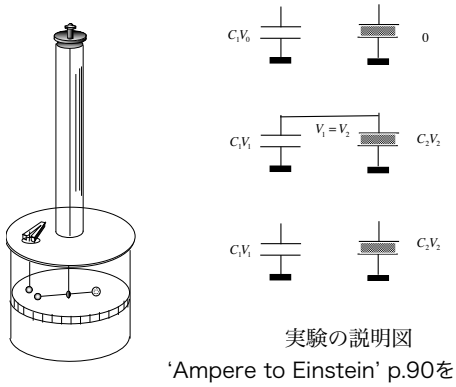
[162] spermacetiの図はインターネットによる　tonywu.photoshelter.com/image/

念に到達した。その実験装置は、右図に示したとおりである。これは、ライデン瓶の変形で、中間の空間（c）に測定する物質を容易に入れられるように工夫し、内部の球(a)の電圧や電気量が測定できるようにしたものである。この装置を二つ用いて、同じ電圧の時媒質によって蓄えられる電気量が異なることを求めたものである。



実験は次のように行う。aaとhnが二つの金属球でその間に測定する誘電体を挿入する。液体は容易であるがガラス等は難しい。気体は球体下部の栓から注入しこれを真空ポンプにつなげは気体の圧力を下げることができる。上部の金属球Bに電圧をかけ帯電する電気量を測定する。実験は二つの同じ装置の上部を連結して、蓄えられる電気量の比を測定した。この原理は右下の模式図で示した。模式図の左に電圧をかけて帯電させ、上部を連結してその後電気量を測定する。電気量の測定にはクーロンの捻りばかり（右図・前出）を利用した。

実験は極めて困難で数多くの注意と手際の良さが要求される。ファラデーでさえこの実験には 1 年以上の歳月を要した。[163]



実験の説明図
‘Ampere to Einstein’ p.90を参考

実験結果は重要である。

最初のシェラックによる測定では、
1.47　1.50　1.55　1.49

ガラスは実験が難しかったが、
最大が1.45　最小が1.22　平均が　1.38となった。
その他のものもほぼ同様であった。

気体（空気）の結果はさらに重要である。次頁右の表は実験結果を示している。通常の気圧30inchHgで数回測定してから、気圧を下げて14inchHgの値を測定しさらに通常に戻してからさらに気圧を下げて3.4inchHgで測定、最後に通常の気圧に戻した。その結果通常の空気を希薄化して行って、放電に至るまで気圧を下げても、帯電する電気量は変わらなかったということである。

圧力（inchHg）	クーロン計の振れの角度
30	88
30	88
30	87
14	87
30	87
3.4	81
30	81

空気をどんどん薄くしていっても誘電率が変わらないとい

[163] Olivier Darrigol ‘Ampere to Einstein’ p.89

う実験事実は、空気の分子と分子の間すなわち真空にも誘電率が考えられ、このことは、真空中を伝わる作用の存在、その独立性を示し、この作用の独立性を表す力線の概念がファラデーの心の中に芽生えてきた。その描像は、後出の1846年の講演の中で語られることとなる。

３．電気力線

作用が隣接粒子によって行われる（現代風に言って局所的なものである）とするならば「効果は明らかに電気によって引き起こされた誘導であり・・・そしてこの誘導は力線の中においてのみ生じるものである。」と考えられる。「その力線は多くの実験においては直線上で」あるが、一方、これらの実験からは「その環境に従って多少なりとも曲線状をなしている」ことにファラデーは気づく。そしてこのこと、つまり作用が直線ではなく曲線であることが、近接作用（隣接粒子による作用）の重要な証拠と考えたのである。そしてその曲線状の近接作用を示すものとして、力線の概念がふさわしいとされた。

「私はここに単に感応の場合の力の方向を言い表すための一時的便法として、誘導力線という語を用いようと思う。」

この感応力線（誘導曲線）のイメージは、

「磁針の一続きにつながった状態または一つの曲線または直線上の磁石をなしている粒子の状態を考える方がよりよく類似している。」

要するに鉄粉による磁力線を念頭に置いたものである。このイメージを元にファラデーはさらに次のように述べる。

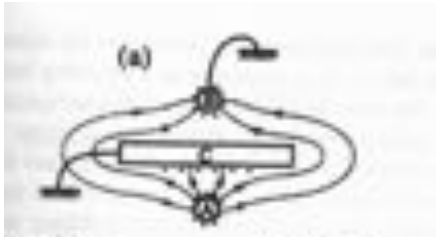
「全体の作用が相連接した粒子の作用であり、それらの粒子は互いに連関し、電媒質を通して、感応面と被感応面間に考えられる力線においてのみでなく、それらの力線の側方にも関連しているのである。」[164]

力線の側方にも関係しているというファラデーの着眼は、それまでの遠隔力が対象を結ぶ直線方向であることを考慮すると本質をついた重要なものであった。

「1304　私は、感応（誘導）力線あるいは力の曲線という言葉を、単に一般的な意味において、すなわちちょうど磁力線についていうのと同様の意味に用いてきた。線は想像上のものであり、それらの中のいずれの部分の力もいうまでもなく複合した力の合成力である。またどの分子も、連続的なそれら自身の張力及び反作用によって、すべての方向にあらゆる分子とも関連

[164] 以上段落1231

を持っている。横向きの力は単に感応力線に対して角度をなした方向に考えたこの関係に過ぎないし、現在ではその言葉以上の何事も意味しない。分極という言葉に関しては、さしあたっては、同一分子が異なる二つの部分に正反対の能力を得るに至るような力の配置を意味することとしよう。」



こうして導入された誘導力線は、次のような性質にまとめることができる。

① 線の方向に誘導が発生し、誘導は線の方向の引力に関係し、側方の横向きの反発力に関係する。

「1297 限界をなす二つの帯電した伝導性の表面を結ぶ線中には真っ直ぐに向いた感応力（誘導力）が発生されると考えられるが、この誘導力はそれらを示す線の伸長または反発に相当して側方のまたは横向きの力を伴うし、また電媒質の粒子中に存在することろの感応（誘導）の方向の引力は横向きの斥力または反発力を伴うのである。」

② 感応は粒子の分極状態によって構成される。

「1298 感応は粒子に分極状態において構成されるものである。」「この分極状態はこの作用を支持している帯電した物体によってもたらされる。粒子はすなわち正負の点または部分を作り、それらは相互に且つ感応表面や粒子に対して対称に配置されるものと考えられる。この状態は強制的のものでなければならない。というのはこれは力によってのみ発生・支持され、力が取り去れるやいなや通常の静止した状態に戻ってしまうからである。」

③ 導体の表面電荷が感応を支持する。

「1301 導体の全電荷はそれらの表面上にある。なぜならば必ず感応作用を伴う以上、この際に必要な感応状態を支持する媒質は表面から始まっているからである。もし胴体が中空であり、空気が何か他の電媒質を含んでいるとしても、内部の表面には少しの電気も現れ得ない。なぜかといえば内部の電媒質は種々の方向に働く反対作用の結果、分極状態をとると考えることはできないからである。」

４．電気力線に関する諸現象

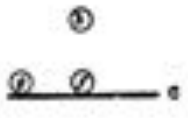
この、感応力線（誘導力線）、力の曲線を確認する現象、または実験をファラデーは様々に紹介している。

① 感応が金属を通り抜けて作用することはない。（つまり感応力線は金属を通り抜けられない。）[165]

Ampere to Einstein' p.95より

[165] 前ページの図は From Ampere to Einstein p.95 より引用

金属「板を拡大して直径1.5インチまたは２インチにすると、ｆでは搬送球に少しも電荷が与えあられないが、それを近くのｇとかあるいは中央上方ｈに接触させると、電荷が与えられる。・・・したがって感応は金属を通してではなく、周囲の空気または電媒質を通り、曲線状をなして生起したことは明瞭である。」右図９（1221）



② 真鍮の半球も同様に誘導曲線を通さない。

右図11は帯電したシェラックの上に真鍮の半球を載せたものである。iからpまでの点に搬送球をおいて、帯電の様子を調べる。ｉからｍまでは減少するがｎｏと大きくなりpで小さくなる。これは半球によって力が乱されていることを示している。（1224）

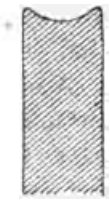


Fig. 9.

③ 感応力線は先端部に密集するのでそこで感応は強くなる。

「1302 電気的の影響に関する既知の形式も、今進めつつある感応の粒子的見解と完全に一致する。帯電された円筒は（帯電条件を完全に支配するところの）周囲の導体によって、中央部よりも両端においてより強く影響される。それは両端は中央部よりも多数の感応力に相対しているからであり、そしてまた、先端は球形よりも高度の条件中にあるというのは、周囲の導体に対する関係上、先端における方がそれと比較すべき球表面の相等しい面積におけるよりも多数の感応力が集中するからである。ここにおいて特に側方または横向きの力の作用が了解される。この力は斥力に相当する力を持つものである。その結果、電媒質を通して走る感応力線は、ちょうど先端、円筒の両端または突出した部分に密集しなければならない。」

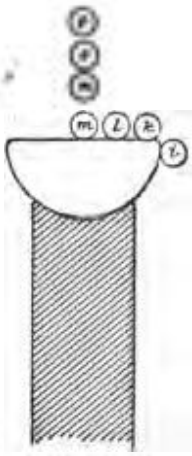


Fig. 11.

④ ガラス容器にテレビン油を入れて絹布の小片を入れる。起電機で帯電すると絹布は帯となって電極の針金と針金を結ぶ。

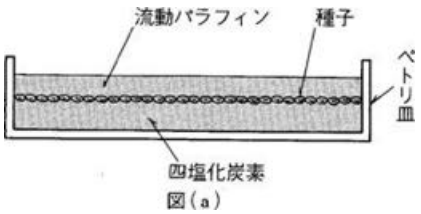
1350 感応化における電解質中の分極粒子の状態の説明として、私は一つの実験を述べたい。ガラス容器の中に精留した清澄なテレビン油を入れ、二本の針金を挿入する。針金は液面に接するところをガラス管に通しておき、先は球にするか尖端にしておく。ごく清潔な乾燥した白い絹布を小片にさきそれらを液体中に入れる。そして一方の針金を普通の起電機で帯電し、他方を接地させる。すると絹片は直ちに液体のあらゆる部分から集まってきて、小片からできた帯となって針金と針金を結ぶ。・・・電気を与えるのを停止した瞬間に帯は脱落し、その片々は離散してしまう。

このことについて、現在の高校では、次のような実験がよく行われる。

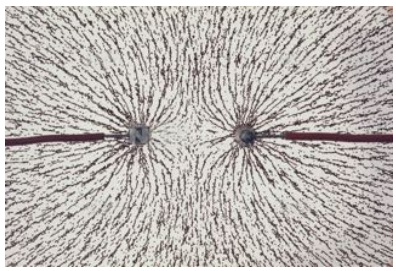
◆電気力線を示す実験

教科書（啓林館）p.15図12と同様に，電気力線の様子を示す実験を紹介する。直径15〜20cmのペトリ皿に四塩化炭素を入れ，その上に流動パラフィンを注いで，草花(小町草など)の細かい種子をなるべく均等にばらまく。すると，前の図(a)のように，種子が2つの液体の境界に並ぶ。

このペトリ皿に電極を入れて，1000V程度の高電圧を静電気もしくは交流で与えると，絶縁体の種子は誘電分極によって双極子となり，電界によって回転したり，互いの異極どうしがつながったりして，結果的に電気力線の方向に並ぶことになる(図(b))。



図（a）



---

⑤　伝導　すでに述べたように、電流の流れによる励起という考えから、一歩前進して、第一段階として感応（誘導）が生じ、分解は第二段階で現れると考えることとした。ところで分解は伝導の一形態であるから、伝導の形態を研究すれば、感応曲線の様子を知ることができる。その例として放電現象を取り上げる。

「1351　放電がそれ以前の感応の結果であることを認めるならば、その多くの実例がいかに明瞭に曲線状の感応を示し、感応線の発散及び側面作用を表しているか、」

その具体的例として、「521　極として２本の針金を大きな部分につけておくような簡単な場合においても、作用線は曲から急激に拡散しなければならない」と以前の例を再度紹介している。

さらに、この現象をより可視的に見られる現象として、ブラシ放電を上げている。1449において、長さ6インチ内外のブラシ放電が空中に発生している場合には次頁図４のような形をしている。ところが塊状の導体を近づけると閃光の端は次頁図７，８，９のような形をとる。「これらは鉄粉が磁力線を示すのと同様に、それらの曲線を示す。」

ファラデーの考えによれば、ブラシ放電は、放電が起こる直前に、気体内部がある分極状態になっているとしているのである。

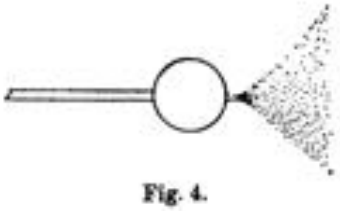


Fig. 4.

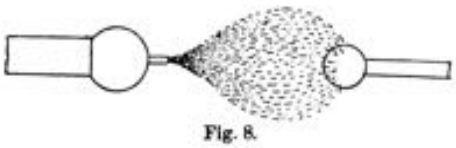


Fig. 8.

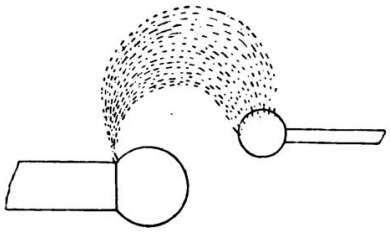


Fig. 7.

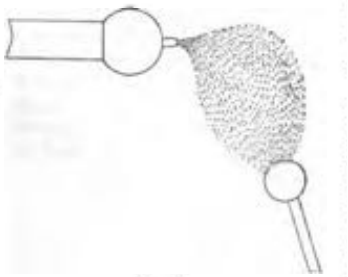


Fig. 9.

５．力線一般の概念の導入（１８４６年４月３日金曜日の講義）

ファラデーの研究は1838年で一旦休止する。集中した研究による疲労からか、講演等は続けたが、実験的研究はしばらく行われなくなった。その間、若き天才、W.トムソンが若干17歳でフーリエの熱理論と電気に関する理論との間の連関についての論文[166]を発表した。

（1）トムソンによる遠隔力と近接力の結果的同一性

トムソンは、フーリエの論文[167]を引用する。例えば、その§97、98において、単位面積を通過する熱量は次のように与えられる。すなわち、二つの面の温度を、a ,b とし、その間の距離を e とすれば麺を通過する熱量は $K\frac{a-b}{e}$ で与えられる。その結果、隣接する二枚の等温面を通過する熱量は $Q=-K\frac{dv}{dz}\omega dt$ となるとした。ｖは温度差、ω は面積、ｚは距離の差、ｄｔは時間である。このことからトムソンは、点状の熱源から放射状に出て行く熱量は、半径を r としすれば球の表面積は $\omega=4\pi r^2$ であるから単位時間あたり

$$A=-4\pi r^2\frac{dv}{dr}$$

となり、このことから温度は

$$v=\frac{A}{r}$$

となることを示した。この式は v 電をポテンシャルとすればクーロンの法則に他ならない。

---

166 'On the uniform motion of heat in homogeneous solid bodies, and its connexion with the mathematical theory of electricity' Cambridge Mathematical Journal,Feb.1842

167 'The Analytical Theory of Heart' 前出

物理学生への註

$A=-r^2\frac{dv}{dr}$ のうち $\frac{dv}{dr}$ は単位距離あたりの電位差つまり電気作用の強さ（電場の強さ）を表している。

それが、$\frac{dv}{dr}=-\frac{A}{r^2}$ であるからこれはクーロンの作用を示している。こうなる理由は、熱量ならば、面を通過する熱量が一定であること、電気ならば、面を通過する電気力線の数が一定であることを示している。なお、W.Thomsonは力はポテンシャルで表現されるとしているらしくポテンシャルの形に変形して議論している。

トムソンはその後、この議論は、ファラデーの電気力線の議論に似ていることに気がついた。例えば、ファラデーによれば、その力線の管は、電気力に接し、二つの導体を結び、それぞれの導体の表面に符合が反対の同じ量の電気量が対応することを見た。これはまさにフーリエの理論と符合することがわかる。1845年の論文[168]では、ファラデーの論文について、トムソンは次のように述べている。

「ファラデーの電気実験研究第11集の中の静電誘導の研究において、電荷に働く引力や斥力は、ある距離離れて作用するものではなく、電気を帯びた物体を取り巻く媒質の連続する粒子の作用を通じて伝わるものである、その媒質は電気作用を通すという意味でdielectric（誘電体）と呼ばれる。」

「彼の理論では次の仮定が基本的である。すなわち、ある金属Aの表面の任意の部分αをから、力の合力が接線方向になるような線によって金属Bの上まで投影させよう。その時、この投影に誘導される事によって生じる電気量は大きさが同じで性質が反対の量が誘導される。このように定義された線はファラデーによって誘導作用曲線と呼ばれた。」

「ファラデーによって採用された誘導作用の伝達の仮説は必然的にその効果はその間を通過する絶縁媒質（誘電体）の性質に依存するという考えに導かれていった。」

そして既に述べた実験を引用して

「空気の誘電率は密度や温度とな全く独立であった。さらに、一般的に気体や蒸気であれば誘導作用は不変であることからすべての気体は誘導に対して同じ容量を持つと結論し、一方誘電体が固体であるときは気体のときよりも大きく、固体の物質に依存することを見出した。」

こうして、W.Thomsonは作用がその間の媒質に依存することを見出したあと、この結果を数学的に表現するならば、次のようになるという。つまり、いま導体球Aを閉じた導体球Bの中に絶縁して置いたとする（145頁のファラデーの実験のように）。この

---

168 ‘On the mathematical theory of electricity in equilibrium’ W.Thomson　Cambridge and Dublin　mathematical Journal Vol.11846 p.75

ときBの面のポテンシャルはゼロであるがAの内部のポテンシャルは一定でありその大きさは媒質に依存するということであると。

このトムソンの議論に刺激を受けたファラデーは1845年から活動を再開する。

（2）力線一般

１８４６年４月３日金曜日の講義は、ホイートストンが受け持っていて導線を伝わる電信の速度とその測定方法についての話をする予定であった。しかし、実験研究では優秀なホイートストンではあったが講演は苦手であったらしく、講演会の直前にパニックに陥り急遽ファラデーが代役を務めることとなった。さすがのファラデーもホイートストンの内容を伝えることは難しく、時間が余ってしまって、止むを得ず、当時彼が心に描いていた力線についての彼のアイデアを述べる仕儀となった。そして、求めに応じて、その内容を後日、リチャードフィリップスあてに手紙で送った。それはフィロゾフィカルマガジンに1946年に掲載された[169]が、その内容は当時のファラデーの力線についての考察を示したものとして貴重なものとなった。

講演の一部を紹介しよう。

「実験哲学に於いてわれわれは、与えられた現象から様々な種類の力線を認めることができる；重力の力線、静電誘導の力線、磁気作用の力線、そしてその他の力学的な性質を担うものも多分含まれるであろう。電気と磁気作用の力線は重力の力線と同様に空間を通過して作用するものであるということは多くのことから考えられる。私は物質の介在粒子が存在するとき、それらは力線を通って力を運ぶ役割を担っているが、それらがないときは力線はその間の空間を通過するだけである。そして、それらに関係するすべての事象においてこれらの力線には揺れあるいは横振動の性質を持つものとして受け取ることができるような仕方で影響を与えることができると考える。」

かれの考えによれば、宇宙は電気の、あるいは磁気の、そしてその他の種類の力（例えば重力）の力線の網の目のようなものであった。力線の結び目には物質が存在する、それは原子分子であるが、空間を通り抜ける力の中心の役割を果たす。錯乱が起こった時、力線は横方向に振動しエネルギーをその線に沿って伝える。それはちょうどロープを波が伝わるのに似ている。その速さは急激であるが有限である。光は多分その現れであろう。

ファラデーは物質を構成する粒子（原子分子）の間にさらに無限に微小な粒子からなるエーテルを考える。そして、力線はそのエーテル粒子も結びつけると考える。このことはおそらく、空気を希薄にしていったとき誘電率が変わらないことからえた描像であろう。（真空も誘電体であるということ）。エーテルは考えるが、しかし振動はあくまでも力線自身の振動であり、力線の振動を説明する不可量物体[170]としてのエー

---

169 LONDON, EDINBURGH AND DUBLIN PHILOSOPHICAL MAGAZINE A N I) JOURNAL OF SCIENCE. MAY 1846. LIV. Thoughts on Ray-vibrations. By Michael FARADAY

170 エーテルは不可量物体ではあるが多くに人は普通の力学的流体のように計算されるものとしていた。エーテルというときはそういう物体であることを考慮しなければならない。

テルは仮定しない。ファラデーはそのようなエーテルの存在は疑わしいものであると考えていた[171]。

物質を構成する粒子がある時、それは力線を通して力（エネルギー）を運ぶ役割を果たす。しかし、粒子がない時、力線は空間を通り抜けている。その種の振動は、偏光についての素晴らしく変化に富んだ美しい現象を説明するだろう。

力線は、作用の中心に向かったりそれから離れた方向に引き起こすのであるが、振動は、横方向の振動である。力線の端に於いて生じる変化は他の点の変化の原因となる。光の伝達においては時間を必要としている。だから放射一般の伝達もまた時間を必要とするだろう。そして、力線の振動によって放射現象を説明するならばそのような力線の振動の伝達一般もまた時間がかかる必要がある。だから重力のような作用も一見時間がかからないように見えるが、それは瞬間的に伝わると感じられるだけで、上で述べたように重力においても力線の撹乱は、時間がかかって伝わると考えるべきだと主張するのである。

こうして、力線として、電気力線、磁力線、重力の力線などを考えるファラデーは、今まで考察してきた電気力線だけでなく磁力線の実在性とその役割についての研究に取り掛かった。そして、磁力線の光の偏光との関係をまず追求したのである。

6，ファラデー効果

1845年11月に発表された電気の実験的研究第19シリーズ[172]において、ファラデーは磁力線の光に対する影響を研究するが、その冒頭は次のように始まる。

「2146　私は長い間一つの意見、それは今ではほどんど確信となったが、そして多くの学者の普通の意見だとは思うが、次のような意見を持っている。すなわち、物質の力が構成される様々な形は明白な一つの起源からなること、あるいは別の言葉で言えば、連関と相互依存性を持っていて、一つから他方への転換があり、その作用の間には力の同等性が保たれているという意見である。」

これは上記の力線に関する見解を率直に述べたものである。そして、この揺るぎない確信のもとに、磁力線が光に影響を与えるはずだという見解を持ち、不屈の実験が開始された。

磁力線(line of magnetic force ,magnetic line of force ,magnetic curve)は磁石の極から出てたの極へ入るか、電流の周りを同心円を描くものであり、電気力線(line of electric force)は二つの物体を結び誘導作用を生じさせる曲線とする。さらに、diamagneticという言葉によって、磁力線が通過す

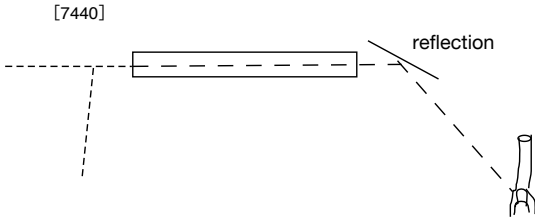
---

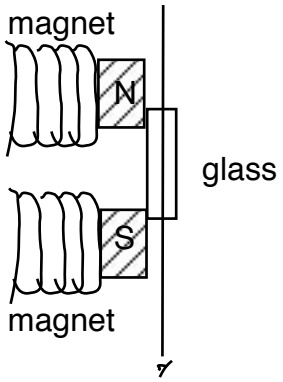
171 'Faraday,Maxwell and the Electromagnetic Field ' Nancy Forbes and Basil Mahon Prometheus Books p. 102

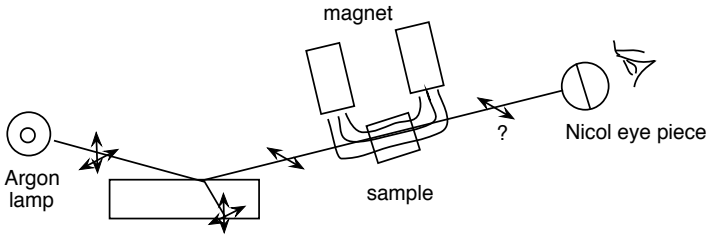
172 Michael Faraday, Esq., D. C. L., F. R. S.I. Experimental researches in electricity.—Nineteenth seriesPhil. Trans. R. Soc. Lond. 1846 136 1-20; doi:10.1098/rstl.1846.000

る物体を意味し、通常の鉄や磁石が示す磁気的状態を示さないものを指すとする。

実験は次のとおりである。（2150段落）。アルゴンランプから出た光をガラスの表面で反射させ、その偏光光線をニコルの接眼レンズで回転を見る。反射鏡と接眼レンズの間に二つの強力な電磁石の極を置く。それは、馬丁磁石の形をしたものか、または、二つの円筒形の磁石の異なった極を置いたものであった。極の間の距離は約２インチほど離れている。偏光光線と同じ側になる時は、そのそばを通るようにする。その向きは平行かそれに近いものとする。二つの極の間に透明な物質を置き、それを偏光光線と磁力線が同時に同じ方向に通過するようにする。（2151段落）ここで、透明な物質として、かつて作成した重ガラスの一種、珪酸化ホウ素の鉛ガラスを用いて実験を行うこととした。このガラスによって最初に光と磁気との関係が明らかになったのである。（2152段落）このガラス片は２インチ平方で、厚さが0.5インチで平面で縁をよく磨いたものである。これをdiamagneticの物体とし、極の間に置いた。初めはまだ電流による磁気はかけないものとする。その結果、偏光はガラスや水やその他の物質をそのまま通過する。このような状態で、接眼レンズを回転させ偏光が消光するようにする。すなわち像が見えなくなるようにし、ガラスなどは動かさないようにする。この状態において電流を流して電磁石の力を大きくする。すると直ちにランプの像が見えるようになる。磁場をかけている間それは見え続ける。電流を流すのをやめれば、すなわち磁気をなくせば直ちにその像は消える。（２１５３段落）電磁石の28から56ポンドあるいはそれ以上の強さでなければ、この現象は見ることができない。（2154段落）この現象は回転的である。なぜなら接眼レンズを右または左に回転させると消光を引き起こし、それ以上回転させると像がまた見えてくるのである。





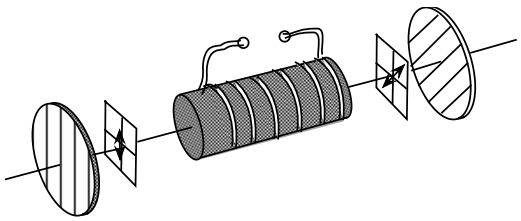


ファラデーはこの次の節で像の回転の方向を示している。その回転の方向は、磁力線の向きに常に右ネジの方向であることが丁寧に説明されている、さらに、磁力線と反対方向に光が進むときは、回転方向は反対になることが示される。

つまり、磁力線が光の偏光面に対して、磁力線の向きと光の進行方向が同じ方向にあ

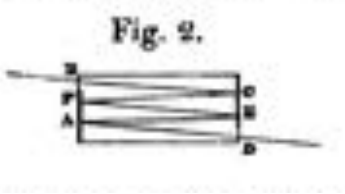
るときは、常に、右回りに回転を生じさせることが明らかとなった。光の進行方向が反対のときは反対方向である。

次にファラデーは、コイルを巻いたガラスを用いて実験を行った。鉄や磁石を間に挟まず直接電流と光の関係を調べようとしたと言っている。しかし、今から見れば、コイルによって磁場を作るのであるから、上記の実験と異なるところはない。とりあえず彼が行った実験の一つを紹介しておこう。



（2195段落）用いた装置は次のとおりである。最初は長いコイル（導線の直径は0.03インチ長さ1240インチの導線で、直径が0.4インチ長さ65インチ）を用いた。この長いコイルに蒸留水を満たした。そして偏光の方向においた、その結果接眼レンズを通して調べると、この装置を通して炎の像が接眼レンズを通して見えた。接眼レンズを像が消えるように回転させた。コイルの電流を流すと像が再び現れた。電流を流している間それは続き、電流を止めると消えた。この実験によって光は電気力（つまり電流だけによる磁場）によって影響を受けたことがわかった。

ファラデーはさらに磁場の影響と複屈折との違いを明らかにした。すなわち、複屈折を行う物質による偏光面の回転と、複屈折は行わず磁気による磁力線による回転を比較したのである。



光を反射するようにガラスの面を銀メッキしてし、一部分をメッキを剥がして光を通るようにする。右下から光を入れ左上から光を出す。出てくる光の偏光の角度を測定する（右図）。複屈折による場合は右から左へ行く場合と左から右に行く場合では回転が逆になるので、反射ごとに打ち消し合い、偏光は結局最後の光一回となる。それに対し、磁場をかけて変更させた場合は偏光の方向は、磁場によって決まるので、右から左に行く場合も左から右に行く場合も同じ方向に回転させられるから、偏光の角度は、通る道筋の長さに比例することとなる。上記の場合は角度は５倍となる。

実験データによれば、通常の複屈折による回転は12°で、磁場の場合は60°。理論と実験はよく一致した。

ファラデーが結論的に述べている部分は興味深い。

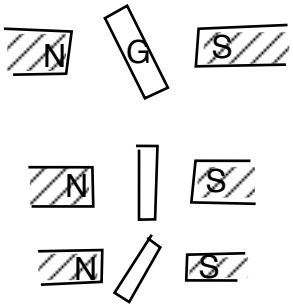
（2227節）もし、磁気力がこれらの物体（鉄以外のdiamagneticの物体）を磁化するならば、光を用いて透過する磁気を調べることができるであろう、そして物体の力についての研究を大きく推し進めるであろう。しかし、それらを磁化するのでないならば、これらの物体の分子の状態は磁化された鉄の状態と明確に区別されなければならないし、それは新しい磁気的な状態であると言える。すなわち、このような状態の物質が持っている力と作用の様式は、物質の新しい磁気作用の様式である。

（2229節）多分この状態は、電流になろうとする電気張力の状態と言える。一方、アンペー

ルの理論に従って言えば、磁石は電流が流れている状態である。鉄心をコイルの中に入れたときはその中に電流が流れていると信じられている。そして、コイルに垂直の面で電流が回転している。diamagneticの物体が同じ位置に置かれたときは、同じ面内に回転する力を受けるであろうが、それは張力の状態でありまだ電流にならない状態であると考えられる。

ファラデーの洞察力は鋭い。そして、ここに次の研究すなわちdiamagneticな物体の磁気に関する状態についての研究を行う動機が示されている。

７．反磁性体についての研究



電気の実験的研究　20シリーズ[173]は反磁性体についての研究つまり、diamagneticな物体の磁気に関する状態についての研究である。効果は十分大きな磁力と完全な制御を必要とすることから電磁石が用いられた。試料として重いガラス棒などを用い、磁石の二つの極の間に長さ6から8インチの絹糸で下げた。電磁石に電流を流すと、ガラス棒は磁石の極の間に垂直な方向に向いて静止した。

この性質は、ほとんどの非磁性が程度の差はあれ示すことがわかった。彼は、従って人間もまた反磁性を示すであろうと推察した。

二つの磁石ではなく、一方の極だけを用いて実験を行うと、物体は極から反発していくことが示された。ファラデーはこの性質を、磁気の強い方から弱い方へ物体は力を受けると表現した。[174]

電気実験的研究25[175]シリーズは様々な気体の磁性を調べているが、特に、酸素は、磁性が弱い方から強い方へ移動する反磁性とは異なる性質を持つことを確認した[176]。こうして二つの磁性が発見された。

８．磁力線の物理的実在ついて　（シリーズ２８）[177]

以前は磁力線を磁石の力の表現として表した。例えば、非常に小さい磁石あるいは鉄粉の模様によって示されるとした。しかし、磁力線は方向だけを決めるのではない。その量にも関係している。それは極や正負の二重の性質を持った力あるいは、運動している導線によって誘導される電流の方向にも関係している。つまり、磁力線は磁石の作

---

173 Experimental_Researches_in_Electricity(3)

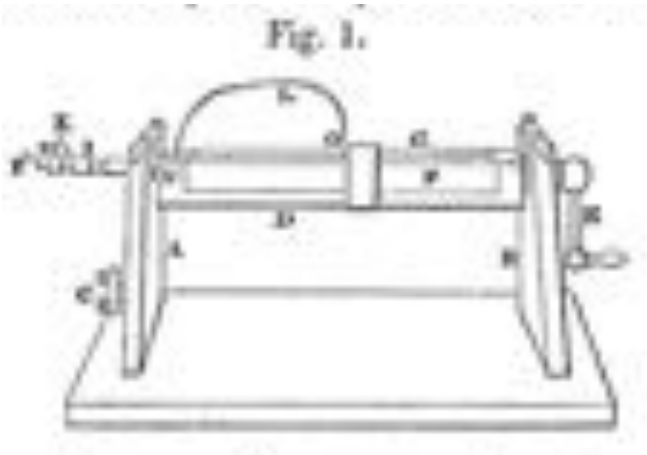
174 （実際植物もまた反磁性を示すことは容易に確かめることができる。（最近は、ネオジムの磁性によって簡単に示すことができる））

175 Michael Faraday, II. Experimental researches in electricity. —twenty-fifth series　Phil. Trans. R. Soc. Lond. 1851 141 7-28;

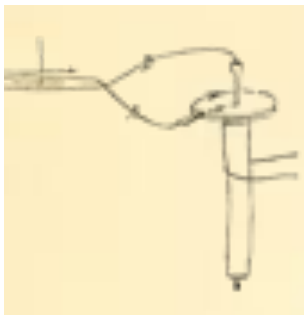
176 常磁性の発見である

177 Experimental_Researches_in_Electricity(3)　　Michael Faraday, III. Experimental researches in electricity.—Twenty-eight series　Phil. Trans. R. Soc. Lond. 1852 142 25-56

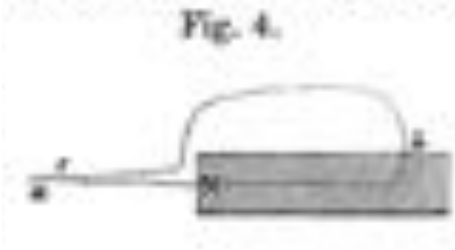
用によって認識されるか、そこを横切る導体によって認識される。後者は全体的に磁石に働く作用と異なっていて磁石の引力と斥力によっては決して示されない。それは違った作用でありそれによって力線の性質を表現することはできない。そこで、今の場合力線の性質の見方と結果は運動する導体による方法を発展させ適用することとする。



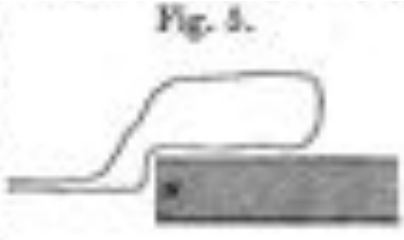
このように考えて、次のような実験（右図）を行い、導体内部の磁場の向きを決めることに成功した。実験装置は右図の通りである。要は二枚の大きな磁石を狭い間隔で並べて、その間に、導線を通し、磁石と導線を別々に回転できるようにしたものである。



この実験を行う前に、ファラデーはすでに1831年のノートの中に、次のような重要な実験事実を記述している。それは、磁石の上に銅板を乗せて回転させる実験である（右図ファラデーのノートによる）。まず銅板と磁石を紙を挟んで絶縁した上で、図のように、銅板の中心と縁を導線で検流計につなぐ。初めは銅板と磁石を一緒に回転させたところ、検流計が触れ起電力が生じたことがわかった。次に、磁石と銅板を別々に運動させることとし、磁石を固定して銅板だけを回転させた。この時も初めと同様に電流が生じることがわかった。



この実験事実は極めて重要である。すなわち、磁石を回転させても回転させなくても同じ磁場が生じていることがわかるからである。こうして棒磁石の回転と磁場との関係から「棒自身の中に存在しているところの磁気と棒との特異な独立性が明瞭にされた」（電気研究　220）のである。

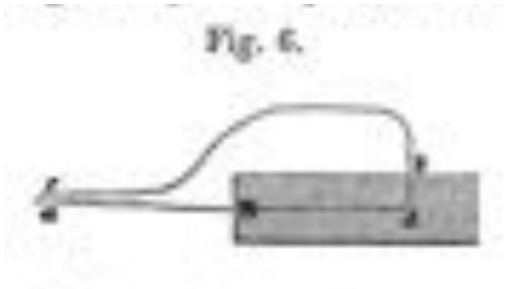


ここでファラデーは次のように実験を進める。基本的には右図（Fig４）のように導線を磁石の中央まで導き、それから、外部を通って、元に戻るようにしたのである。

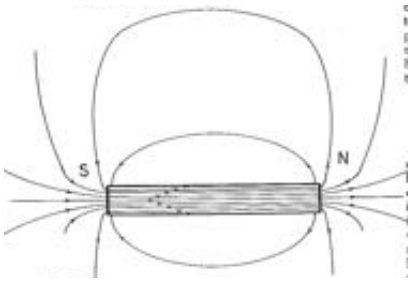
初めに（Fig.5)、導線は内部を通さずに磁石の外部で閉じるようにした。この時は、磁石を回転させても、導線を回転させても、同時に回転させてもいずれの場合も電流

は生じなかった。さらに外部導線の形はどうであっても、この場合は電流は生じなかった。

次に（Fig６）、導線を二つに分けて、軸になるところの導線と、外部の導線とした。そして、軸になる部分（図のａd）だけを回転させたが、電流は生じなかった。



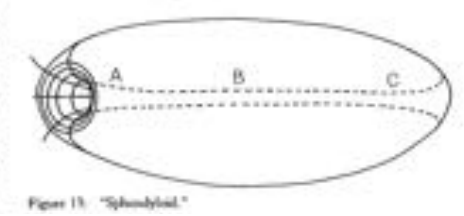
さらに、磁石を固定し、導線ad,cbを回転させた。この時は、起電力が生じた。逆に、導線は固定し、磁石を回転させた。この時も起電力が生じた。さらに、導線の磁石を同時に回転させた。この時は起電力が生じなかった。導線dbは磁石そのものによって代用させても結果は同じである。



このことからファラデーは次のように結論する。図５においては、磁石を回転させても起電力（電流）は生じなかった。次に導線adbc全体を回転させても起電力は生じなかった。にもかかわらず、図６の場合はcbを回転させると起電力が生じ、cbを固定し、dbを回転させても起電力が生じたのである。つまり、cdに生じた起電力とdbに生じた起電力は打ち消しあう方向に生じたのである。

このことから、磁石の内部の磁場は、外部と反対であり、もっと言えば、導線adbcは回転しても起電力が生じないのであるから、磁場に対して閉じた曲線となっているということである。こうして、磁石の作る磁力線は閉じた曲線を形成していることが実験的に確認されたことになる。

こうしてファラデーは結論する。この実験によって、磁石の内部に存在する磁力線は外部に存在する磁力線と同じである。つまり、量として、外部と内部は同じ磁力線がある。従ってすべての磁力線は磁石からどんなに離れていても閉じた曲線をなし、そのある部分は磁石を通過する。そしてその形は紡錘形であり、sphondyloideと表現した。イメージとして右図の通りである。



９．ファラデーの結論（これまでのまとめ）

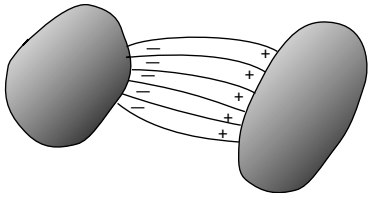
ファラデーは、電気分解の現象の探求を通じて、電気分解を生じる作用は電極からの遠隔力ではなく、隣接する粒子の相互作用の結果が電気分解において重要な役割を果たすものでありその際電流が大きな役割を果たしているとして、作用は局所作用であ

る認識する。

作用が局所的であるということは、その作用（電気力）は一般に直線とはならず曲線を描くはずである。そのことをファラデーはいくつかの実験で確認した。

一方、固体においては電気分解は生じないが、電気の作用によって誘導現象が生じている。このことについて、ファラデーは、液体の場合の電気分解と固体の場合の静電誘導とは同一現象の二つの現われで連続的に移り変わるとした。つまり、液体の場合も固体の場合も、第一段階としてまずは誘導現象を生じ、第二段階として液体においては分解を生じるのであろう。不導体は第一の段階が生じただけのもので、導体は電気が交代して移動していく段階である。誘導も連接粒子の作用であり、そして、磁石と同様に分極していると考えた。

このことから、誘導効果は物質によって異なるはずであるとして、誘電率の測定が行われた。その結果、同じ電圧においても物質によって誘導される電荷の量が異なることが実験的に確認された。このとき、気体においては誘電率はほとんど等しく、特に、それは圧力に関係しない、つまり、物質をどんどん薄めていっても、誘電率が変わらないことが確認されたのである。このことから真空もまた誘電率を持つことが理解された。またこのことは、電気力線の独自性という考えに導かれていった。



誘電体の中に生じた誘導は、それは明らかに力線において生じるものであろうが、生じた誘導分極も曲線となることから力線は一方では誘導線であるというという二重の意味を持っていることになる。そして、

（1）力線の方向に誘導が発生し、誘導は力線の方向に関係している。言い換えれば、力線の方向に分極状態が形成され、誘導は粒子の分極状態によって構成される

（2）導体の表面電荷が誘導を支持する。力線の両端では同じ量の（反対の）電荷が感応を支持している。電荷は電気力線のもとでもある。

（3）横向きの力は反発力に関係している。

とした。

一方、磁石も力線という形で表現できることから、ファラデーは重力も含めた力線一般という概念に到達した。彼によれば、原子は力線の結節点であり、原子のないところも力線に埋め尽くされていて、磁力線も電気力線も（あるいは重力の力線も）お互いに同一の起源を持ち相互に転化するものであること、という大胆な仮説を導入することとなった。そして光はその力線の振動であるとしたのである。

磁力線が光に影響を与えることはファラデー効果として確認することができた。この実験から磁力線はある種の回転力を兼ね備えていることが予想された。また、原子が力線の結節点であるなら、普通の物質も磁気の影響を受けることが予想された。それは反磁性体、常磁性体として、結実した。

磁力線もまた、物理的実在であるとの考え方を支持する証拠の一つとして、磁気誘導

線は閉じた曲線を描くといいう仮説を立て実験的に明らかにした。

ファラデーは力線には、力線と誘導線の二重性が有るが、これは一般に物理量には強さと量の２種類あることと無関係ではないと強調するようになる。これは力線の二重性を理解する上で重要であり、マックスウェルに受け継がれていく。

Ⅱ　トムソンと力線、磁場電場の理論

１．力線

1847年、トムソンは、磁場についての新しい理論を展開した。タイトルは「電気力、磁気力、そして電流力の力学的表現について」[178]である。

トムソンは、ファラデーが磁力線は回転の性質を持つということを示した実験に興味を示した。さらに、力線それ自身が応力（縦方向に張力、横方向に圧力）を持つことに着目した。一方、当時、ストークスによって流体の応力についての研究[179]がなされたことを知った。天才トムソンはこれらが直ちに結びつくことを予感し、論文を上記のタイトルで発表した。

論文の内容は、粘性流体に於いて、①弾性体であること②圧縮しないことを条件にして、歪（変位）の関数で完全微分から導かれる量として（つまりポテンシャルで表現されるものとして）力を求めることであった。もう少し言えば、電磁気学の量をそのような歪（変位）で表現しようということであった。変位をα、β、γとして、完全微分の３つの形を与えた。その結果クーロンの力①、変形の回転による力（磁気力）②、同じ回転の力であるが電流の磁化作用に対応する力を得ることができた。

物理学生への註

上記の力の、完全微分の形と得られた力は次のとおりである。

①　$\alpha dx+\beta dy+\gamma dz=d\phi_1$　力（変位）は　$\vec{F}=\dfrac{\vec{r}}{r^3}$

②　$\left(\dfrac{d\beta}{dz}-\dfrac{d\gamma}{dy}\right)dx+\left(\dfrac{d\gamma}{dx}-\dfrac{d\alpha}{dz}\right)dy+\left(\dfrac{d\gamma}{dy}-\dfrac{d\alpha}{dz}\right)dz=d\phi_2$ 力（変位）は　$\vec{A}=\dfrac{\vec{m}\times\vec{r}}{r^3}=rot\dfrac{\vec{m}}{r}$

$$\vec{B}=rot\vec{A}=rot\frac{\vec{m}\times\vec{r}}{r^3}=rotrot\frac{\vec{m}}{r}$$ ・・・磁荷による磁場

③　$\Delta\alpha dx+\Delta\beta dy+\Delta\gamma dz=\phi_3$　力（変位は）　$\vec{A}=\dfrac{d\vec{l}}{r}-\dfrac{1}{2}grad\dfrac{d\vec{l}\cdot\vec{r}}{r^3}$

---

178 Cambridge and Dublin Mathematical Journal V.II 1847 ‘On a Mechanical Representation of Electric , Magnetic,and Galvanic Forces ‘W.Thomson

179 Transaction of the Cambridge Philosophical Society ‘On the theory of the Internal Friction of Fluide in Motion’ Stokes

力は　$\vec{B} = rot\vec{A} = rot\dfrac{d\vec{l}}{r} - rot\left(\dfrac{1}{2}grad\dfrac{d\vec{l}\cdot\vec{r}}{r^3}\right) = rot\dfrac{d\vec{l}}{r}$ [180]・・・電流による磁場

W.Thomsonの考えはおおよそ次のとおりであると思われる。まず、ストークスの粘性流体についての方程式は、

$$\rho\frac{D\alpha}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{3}\mu\frac{\partial}{\partial x}div\vec{V} + \mu\Delta\alpha$$

$$\rho\frac{D\beta}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{3}\mu\frac{\partial}{\partial y}div\vec{V} + \mu\Delta\beta$$

$$\rho\frac{D\gamma}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{3}\mu\frac{\partial}{\partial z}div\vec{V} + \mu\Delta\gamma$$

ここで、平衡状態の弾性連続体では、左辺はゼロであり、非圧縮性の条件から、

$$div\vec{V} = 0 \qquad \left(\frac{\partial\alpha}{\partial x} + \frac{\partial\beta}{\partial y} + \frac{\partial\gamma}{\partial z} = 0\right)$$

となる。これらの条件より上の式は、

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu\Delta\alpha \quad 0 = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu\Delta\beta \quad 0 = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu\Delta\gamma$$

となる。この式から

$$\frac{\partial p}{\partial x}dx + \frac{\partial p}{\partial y}dy + \frac{\partial p}{\partial z}dz = \mu\left(\Delta\alpha dx + \Delta\beta dy + \Delta\gamma dz\right)$$

となるが、力（圧力p）が完全微分であるとするなら、

$$\mu\left(\Delta\alpha dx + \Delta\beta dy + \Delta\gamma dz\right)$$

が完全微分でなければならない。つまり問題の非圧縮性で平衡状態の条件は

$$\frac{\partial\alpha}{\partial x} + \frac{\partial\beta}{\partial y} + \frac{\partial\gamma}{\partial z} = 0 \quad \cdots\cdots ①$$ と、

$$\mu\left(\Delta\alpha dx + \Delta\beta dy + \Delta\gamma dz\right)$$が完全微分・・・・②

この二つを満たす力（変位）を見つけることである。W.Thomsonが見つけた結果が上記①から③である。

こうして、トムソンは、磁力があるベクトルの回転で表されることを数学的に示して見せたのである。これは、ファラデーの光の偏光面に対する磁力線の効果（ファラデー効果）を一定程度解明するものとなったと同時に、力線についてのファラデーの考え方を一定程度支持するものとなった。

２．トムソンの磁場[181]の表現に対する重要な貢献

（１）ソレノイダルとラミナー

---

[180] Darrigol ‘From Ampere to Einstein’ Oxford

[181] On the potential of a closed Galvanic circuit of any form 055cambridgeanddub

トムソンは長い直線上の一様な磁石をソレノイダルと呼んだが、この場合は両端を除けば湧き出し口は存在しない。一般に湧き出し口が存在しないものをソレノイダルと呼ぶ（註）。ファラデーの磁気誘導線は閉じた曲線であるから、基本的にソレノイダルである。

磁石が横に並んで面を形成するときはラミナーという。ラミナーのときは磁石板を形成する。

註　湧き出し口がないことは　$divH = 0$　で与えられる。一方、任意のAに対して
$divB = divrotA = 0$ が成り立つから

$$\vec{B} = rot\vec{A}$$

となるAが存在する。磁気誘導線ではどこでもベクトルAが存在する。Bが磁束密度（磁気誘導）のとき、Aをベクトル・ポテンシャルと呼ぶ。*rot* は回転を意味するので、磁気誘導線はベクトル・ポテンシャルの回転で表せることがわかった。こうしてFaradayの磁気誘導線が何かの回転になっていることが示された。

（２）アンペールの磁石板の定理とW.Thomson

アンペールの磁石板の定理。今磁石がNSのペアになっている（双極子）として、そのポテンシャルを計算する。このとき、磁石板の場合にはポテンシャルは立体角で表現することができる。アンペールの考えによれば、磁石板はその周りを電流が流れていることと同じであるから、ガルバーニ回路もまた立体角で表現される。

註　式で書けば、

$$H = grad\ \phi = -grad\ i\Omega$$

Ωは立体角である。

（３）BとHの違い

マックスウェルは、W.Thomsonの議論を元に磁石の中に楕円体の空洞を作りその磁場の強さを計算して、楕円体が磁場の方向に長いときはそれは磁場の強さHと等しくなり、磁場の方向と垂直な方向に平べったい場合はその中の磁場の強さは磁束密度（磁気誘導）Bになることを議論した。[182]

（４）コンデンサーに電気が蓄えられているときのエネルギーと導線を電流が流れているときのエネルギー[183]

電気が移動するとき仕事が$W = V\Delta Q$であり、$V = \frac{Q}{C}$より、

---

[182] Maxwell Treatise A.399 Vo.2 p.24 Dover

[183] ‘On Transient Electric Currents’ (W.Thomson) Philosophical magazine 1853

$$U = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C}$$

また、電流が磁束の周りを流れているときの仕事が$W = \Phi\Delta I$ 、Φが電流に比例することから

$$U = \frac{1}{2}LI^2$$

とした。さらに、コンデンサーを含む回路は電気振動をすることを議論している。

物理学生への註

Thomson の電気回路の振動の理論をMKS単位系で書けば

$$i = -\frac{dQ}{dt} \qquad -d\left(\frac{1}{2C}Q^2\right) = d\left(\frac{1}{2}Li^2\right) + Ri^2dt$$

$$\frac{Q}{C}dQ - Lidi - Ri^2dt = 0$$

$$\frac{Q}{C} - L\frac{di}{dt} - Ri = 0 \qquad \frac{Q}{C} + L\frac{d^2Q}{dt^2} + R\frac{d}{dt}Q = 0$$

$$R = 0$$

$$\frac{Q}{C} + L\frac{d^2Q}{dt^2} = 0$$

$$Q = Q_0 \sin\omega t \qquad \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$L\omega^3 = \frac{1}{C}\omega \qquad T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{LC}$$

である。

III　マックスウェル

色彩の研究の後、マックスウェルは電磁気学に深い興味を抱いた。彼はツテをたよってトムソンと出会い、互いに尊敬の念を抱いた。マックスウェルはトムソンに電磁気学を研究するにあたって何から始めたらよいか尋ね、トムソンは彼に必要な文献の一覧を紹介した。その中にはもちろんファラデーの「電気実験」があったことは疑いようもない。（トムソンの返事は現存しないが）。当時、ファラデーの力線についての研究は、ほとんどの研究者に取り上げられることはなかった。唯一、真剣に取り上げたのはトムソンだけであった。にもかかわらずマックスウェルはファラデーの研究は十分に検討するに値すると感じた。それは彼の実験が正確だったからだけではなく、彼の研究姿勢が誠実であったからである。「電気磁気論」[184]においてマックスウェルは言う。

「ファラデーが彼の実験的研究において使用した方法は、彼の考えが真実であるかどうかを試す絶え間ない実験から成り立っている。そして、実験によって得られた結果からそのアイデアは豊富になっていく。ファラデーは、彼の実験の失敗もまた成功とともに示し、成熟した考え

---

[184] A treatise on Electricity and Magnetism ここでは　広重徹　相対論の形成ｐ．94にならって「電気磁気論」と訳すこととする

と同様に、未成熟な考えもまた示している。だから読者は、彼の力量より劣っていると感じても、彼に称賛よりも共感を感じるのである。そして、機会があれば彼もまた発見者になろうと思うのである。」

ファラデーの研究が受け入れられなかったのは、彼の論述が数学で示されなかったからであるが、マックスウェルはしかし、ファラデーの論述はその背後に十分な数学的思考があることを見て取った。そして、マックスウェルが試みたのは、まさにファラデーの感じたことを数学で表現することであった。電磁気学研究の最初の論文「ファラデーの力線について」の冒頭にその試みを示している。

1．「ファラデーの力線について」

Maxwellの電磁気学についての最初の貢献は、1855年と1856年の二回に分けて発表された。第一部は「ファラデーの力線について」[185]であり、第二部[186]は、「ファラデーの電気的緊張状態について」である。この第一部こそ、ファラデーの力線についてマックスウェルの考察が語られている。

（1）研究の方法

まず電磁気学の現状について、不十分な点を挙げている。それは何よりも誘導現象の理論的解明が重要であるとして、次のように述べている。

「導体の表面の電荷分布に関する法則は実験から解析的に求められる；そして、磁気の数学的理論な部分の幾つかの部分は確立されている。一方、その他の部分では実験的データが求められている；電流の伝導に関する理論と導体の相互作用の理論は、数学的な形式に書かれているが、科学の他の分野との関連はまだである。静電気と電流との間の関係だけではなく、二つの間の引力と誘導の間の関係も結びつけられなければ電気理論は先に進めることができない。」

さらに、理論がこれらの法則を正確に満たすためには、ファラデーのような物理的描像だけでなく、その数学的形式が知られなければならないとして、次のように述べる。

「科学の効果的な研究の初めのプロセスは、それまでの研究の結果を演繹し単純化して心に描いたものでなければならない。この単純化は結果的には純粋に数学的形式をとるか、物理的仮説の形式をとるものである。」

「数学的形式においては、説明すべき現象の物理的イメージは失われる。そして、与えられた法則によって道筋を追うのだが、しかし、対象の絡み合ったより広い現象には広げることはできない。一方で、物理的仮説を採用する時は、媒介物を通じてのみ見ることとなる。そして、事実を正しく見ることを妨げ、軽率にも、部分的な説明を助長する仮説を取りがちである」

---

[185] On Faraday's Lines of Force scientificpapers01maxwell Part1の記載なし

[186] Part II On Faraday’s “electro-tonic state” scientificpapers01maxw Part2 と明記

こうして、物理的イメージを損なわないようにしながら数学的記述を展開しようとする試みとして、この論文の目的を示す。

物理的な考察を得るためには、物理的類推という方法になじまなければならない。物理的類推というのは、一つの科学の法則ともう一つ他のそれとの間に部分的な類似性があるものをいう。すべての数学的科学は、物理法則と数量の法則との間にある関係を基礎としているものであり、したがって、精密科学の目的は、自然の問題を数量的操作によって量を決定する問題に還元することである。一般的なアナロジーを適用することを通して、異なった二つの現象の間に同じ数学的類似性を見つけることが有用である。

ファラデーの電気力線・磁力線について考察するときに、その巧妙な構築にのみ眼を奪われがちであるが、実は数学的記述を行う前段階のイメージであるという側面の重要さを見逃している、とマックスウェルは考える。後で述べるように、彼の電磁場についての最後の論文や有名な教科書「電磁気学論考」においては、電気力線や磁力線の巧妙な仕組みについてはもはや見ることはできず、電場や磁場を数式で説明しているがマックスウェルにとっては、それは当然の帰結である。現在でも、電場や磁場を数式で説明をするとき、はじめに一種の流れを仮定してそのイメージをもとに数式を確立する方法がよく行われるが、このやり方こそマックスウェルがたどった研究の方法であった。

（2）力線・・・その数学的定式化について

ファラデーの力線は二つの側面を持っている。それは一つは力線であり一方では誘導線である。この区別は、電気現象にも磁気現象にも両方に現れる一般的な特徴であり、一方は強さを、もう一方は量を表している。マックスウェルはまず素朴な力線を導入する。

「物体が何らかの方法で帯電されているとき、例えば小さな物体が正に帯電して与えられた場所に置かれたとき、ある方向に力を受ける。もし、小さい物体が負の帯電しているときは正反対の方向に同じ力を受ける。

同じ関係は磁石にも生じていて、小さな磁石の北あるいは南の間にも成り立っている。もしN極がある方向を向くときはS極は反対方向に移動する。

このようにして、空間の任意の一点を通る一本の線を見つけることができる。そしてそれは、正に帯電した粒子に作用する力の方向、あるいは、N極に働く力によって示され、負の電気を持った粒子やS極はその反対方向となる。」

しかし、これでは力の向きを示すことはできるが、問題は誘導現象である。そこで、マックスウェルは、誘導曲線を説明するために力線ではなく力管の概念を導入する。

「曲線を単なる線ではなく、非圧縮生流体を運ぶ断面積が変化する細い管であると考える。そうすれば流体の速度は断面積に反比例するのが、それによって、管の断面積を調節して、力の方向と同様に力の強さを管の中の流体の運動によって表現できる。」

ここでいう流体とは全く仮想的な流体であることは特に注意する必要がある。

「それは単に、数学的記号だけを用いるより、よりわかりやすくより物理的に、問題に対して応用できる純粋数学のある定理を確立するために用いる想像上の性質の集合体である。」

単位の管は同じ量だけ流すものであるとして、管の数で量が表現されることに注目する。次に、強さを表現するために流体の速度の概念に注目する。単位の流量を運ぶ管の数と流体の速度の二つの概念によって電気現象が表現できそうなので、これらの量の間の数学的関係を調べておこうというのである。

まず、流体の速度は単位菅（単位の流量 1 を運ぶ管）の断面積 S_0 に反比例する（$v=\frac{1}{S_0}$）。今、一様に分布する力線がある時、断面Sを流れる流量がｑであるときは次の式が成り立つ（$q=v\times S$）。このときの力管の数をNとすれば、１本あたり１の流量であるからN=qであるので、単位面積あたりの力管の数N_0は

$$N_0=\frac{N}{S}=\frac{q}{S}=v$$

であるから、単位面積当たりの力線（力管）の数は速度と等しいことになる。これから次の式が導かれる。

$$q=vS=N_0S$$

すなわち、電荷の量は、力線の数に比例するということである。これは「導体の表面電荷が感応を支持する。力線の両端では同じ量の（反対の）電荷が感応を支持している。」というファラデーの考え方を示している。

中心から放射状に出る時は

$$q=N_0S=N_0\times 4\pi r^2=v\times 4\pi r^2$$

$$v=N_0=\frac{q}{4\pi r^2}$$

を得る。速度は強さを示しているから、これは力線（力管）の概念から逆二乗の式が導かれることを示している。

ファラデーは、媒質によって力の強さが変わることを指摘した。これは誘電率の存在であるが近接作用を支持するものである。このことを流体モデルで表すためにマックスウェルは「媒質の流れに対する抵抗」という概念を導入した。つまり、抵抗によって流れの速度が変わり力の大きさ（場の強さ）が変化すると定めたのである。

ポテンシャルは電気学では重要な概念であるが、流れの考え方では、ポテンシャルは流体の圧力である。速度を保つためには、流体の後ろから前よりもより大きな圧力

を必要とする、そうして、圧力の差は抵抗と釣り合うようになる。圧力の差が大きければ流れの速度は大きくなる[187]。

流れの中に湧き出し口がある場合はエネルギーを持つとして、次のように議論する。

（30）　同じ結論には、それぞれのセルに単位の仕事がなされることからも到達する。今、それぞれの湧き出し口Sの中で、S単位の流体が圧力 p 抗しているので、流体によって抵抗を克服してなされる仕事は Sp である。S' の管の端となる吸い込み口では、S' 単位の流体が圧力 p' の元で吸い込まれてなくなっていくので、この圧力によって流体に働く仕事は $S'p'$ である。従って流体によってなされる仕事は全体で、

$$W = \sum Sp - \sum S'p' = \Sigma q\phi - \Sigma q'\phi'$$

と表現される。あるいはもっと簡単に、吸い込み口は負の湧き出し口であると考えて、

$$W = \Sigma(Sp) = \Sigma q_i \phi_i$$

と表現できる。

これは既に知られている結論を流体モデルで説明したに過ぎない。

（3）ファラデーの電気的緊張状態について（第２部）(26)

電気的緊張状態（electrotonic state)は、電磁誘導の際ファラデーが導入した概念である。この概念が、マックスウェルの電磁気学の上で重要な役割を果たすことになる。第一部の終わりで、マックスウェルは、ファラデーの電気的緊張状態について簡潔にまとめている。

「60　ボルタの電気感応と同様に磁電気感応の下にある針金は、ある特殊の状態にあるように思われる。というわけはこの針金は、通常の状態にあれば生ずるはずの電流を阻止するし、感応の影響をなくしておけば通常の状態では持っていないような電流を生ずる力を持っているからである。・・・これをあえて電気緊張状態と名付けた。」

さらに第二部の冒頭では次のように述べる。

・・電流は、導体の周りの電気や磁気現象の変化のみによって引き起こされる。そして、これらが一定である間は、導体には何の効果も見いだすことができない。・・・電流や磁石が取り除かれたり消滅したりすることによって電流は生じるのである。・・・ファラデーは誘導電流の発現と磁石と電流が置かれている状態の概念を結びつけた。この状態は、それが乱されない限り認知されることはない。この状態について彼は、電気的緊張状態と名付けた。

要するに、作用が働かなければそのままの状態を維持し、作用が働けば変化するような、力学的に言えば運動量に相当するような電気的状態が存在するというこ

[187] 圧力の差によって運動するという考え方はボルタの電位の概念に通じるものである。

と、このような状態を電気緊張状態というとしたのである。作用を起電力とすれば起電力は

起電力＝電流の方向に存在する電気緊張状態の時間的変化

となる。この電気的緊張状態が実はトムソンが磁力線が回転している変位で表現できるとしたその変位であることをマックスウェルは示した。

物理学生への註

つまり、磁束$\vec{B} = rot\ \vec{A}$と於いたときの$\vec{A}$が電気的緊張状態を示すというのである。まず、磁場の強さHは、磁束密度Bに比例するとして、

$$H = \frac{1}{\mu} B$$

である。次に、後で議論するように、磁場と電流に関するアンペールの法則（正確にはマックスウェルの法則）

$$rotH = i$$

が成り立つ。今、閉じた磁束線を考える。トムソンに従って$\vec{B} = rot\ \vec{A}$とする。
第一部の流体理論によれば、磁場の強さはH、磁気流体の単位面積あたりの流れの量は磁束密度Bであるから単位面積当たりの仕事は次の式で与えられる。

$$W = HBdl \qquad (F = H \qquad v = B)$$

これは、単位面積についてであるから、全仕事は

$$W = \sum HBdlS = \iiint HB\,dl\,dS = \iiint HB\,dx\,dy\,dz$$

である。ここに上記のトムソンの式 $\vec{B} = rot\vec{A}$ を代入すれば

$$U = \iiint \left\{ \left(rot\vec{A} \right) \cdot \vec{H} \right\} dxdydz = \iiint \left\{ div\left(\vec{A} \times \vec{H} \right) + rot\vec{H} \cdot \vec{A} \right\} dxdydz$$
$$= \iint \left(\vec{A} \times \vec{H} \right) dS + \iiint \left\{ rot\vec{H} \cdot \vec{A} \right\} dxdydz = \iiint \vec{i} \cdot \vec{A} dxdydz$$
$$\because div\left(\vec{A} \times \vec{H} \right) = \left(rot\vec{A} \right) \cdot \vec{H} - rot\vec{H} \cdot \vec{A}$$

ただし、十分遠方で$\vec{A} \times \vec{H} = 0$とする。つまり、

$$U = \iiint \vec{i} \cdot \vec{A} dxdydz$$

となることがわかる。ここで、ヘルムホルツの例にならって、磁場のエネルギーの減少が電流のする仕事に等しいとする。電流のする仕事はジュールの法則から

$$W_e = IVdt = \iiint iE\,dtdxdydz$$

であり、　磁気のエネルギーは

$$U = \iiint \vec{i} \cdot \vec{A} dxdydz$$

である。磁気のエネルギーが減少した分だけ、電流によって熱に変わるから、

$$-\Delta U = W$$
$$-\Delta\iiint \vec{i}\cdot\vec{A}dxdydz = \iiint iE\,dt\,dx\,dy\,dz$$
$$-\frac{\Delta}{\Delta t}\iiint \vec{i}\cdot\vec{A}dxdydz = \iiint iE\,dx\,dy\,dz$$

ここで電流は共通であるので

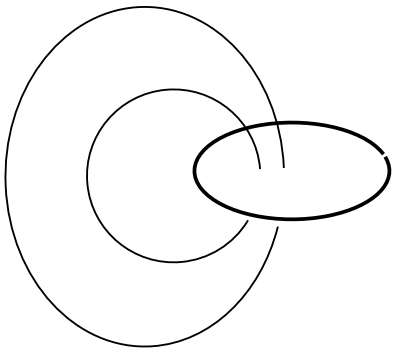
$$-\iiint \vec{i}\cdot\frac{\partial}{\partial t}\vec{A}dxdydz = \iiint i\vec{E}dxdydz$$
$$\therefore\quad -\frac{\partial}{\partial t}\vec{A} = \vec{E}$$

となることがわかる。つまりファラデーが予想した通り、電磁的なある量の時間変化が力の原因になることが分かったのである。

このことから、トムソンのベクトルポテンシャルこそ、ファラデーの電気的緊張状態であることが示された。

（4）いわゆるアンペールの法則　・・・一周の磁圧[188]＝一周の内部の電流について

この法則はアンペールの法則と呼ばれているが実際はこの論文(26)でマックスウェルが明瞭に示したものである。



「もし、閉じた電流によって生成された磁力線を調べるならば、それらは、電流を取り巻く曲線を描き、そして、閉じた力線に沿って磁化の力の強さの総和は、電流の量にだけ関係するであろう。閉じた電流に対する磁力線の数は、電流の形とともに量にも関係するであろう。しかし、それぞれの力線全体に渡った単位のセル[189]の数はそれが取り囲む電流の強さによって測れるであろう。」

式で書けば

電流の強さ＝電流を取り巻く磁場の強さ×電流を取り巻く一周の長さ

である。マックスウェルは、磁力線と「磁気の強さの総和」（＝磁気のセルの数、すなわち、現在の磁圧）の概念を付け加えることによってこの法則に到達した。

物理学生への註　積分で表示すれば

$$\oint H\cdot ds = \sum I_i$$

トムソンによれば磁気ポテンシャルは立体角によって測られる

---

188 磁圧＝磁場の強さ×距離

189 「セル」とは力線の一部で仕事が１となる長さをもつもの

$$\phi = I\Omega$$

一周したときは立体角が４πだけ異なることから

$$\phi' - \phi = I\Omega' - I\Omega = I(\Omega' - \Omega) = 4\pi I \qquad \because \Omega' - \Omega = 4\pi$$

である.マックスウェルによれば、

$$\int H \cdot ds = \phi' - \phi$$

であるから、

$$\int H \cdot ds = \phi' - \phi = I\Omega' - I\Omega = 4\pi I$$

$$\int H \cdot ds = 4\pi I$$

となる。これがマックスウェルの法則である。彼は、特に、新しいことを付け加えたという気持ちがなかったのであろう。特にこのことを新しい法則として強調はしていないが後のマックスウェルの方程式の一つとなる。さらに、この定理によりマックスウェルは、電流と磁場の関係式

$$\oint H \cdot ds = \int rotH \cdot dS = \int i \cdot dS$$

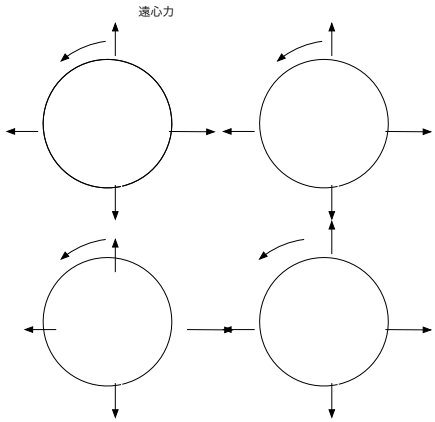
$$\therefore i = rotH$$

を導いた。

２．「物理力線について」[190]

1861年から1862年にかけて、マックスウェルは、トムソンがかつてやったように、媒質の運動から、電磁気の基本的現象を導くことを試みた。トムソンがやったのは、固体の変形に伴う応力の結果として、力線を導く出すことであったが、マックスウェルは、流体概念を用いて遂行した。

上記タイトルによるPart1は1861年に発表。Part1のタイトルは「分子渦理論の磁気現象への応用」である。その内容は、トムソンの固体内での変形による説明では、なぜ磁力線が力線の方向に縮み、横方向に膨らむのかが説明できないのに対し、磁力線内で流体が回転していてその遠心力によって、横方向への膨らみを説明しようとしたものである。このような流体の回転運動は先の論文「ファラデーの力線について」のイメージとは異なる。電気力線と磁力線の違いがあるから当然ではあるが、マックスウェルの目的は最終的には数式で表現することであるから、このような柔軟性は意味のあることである。



遠心力による圧力は、一般に

---

[190] On Physical Lines of Force

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2}\rho v^2$$

で与えられることから出発する。このような力線がたくさんあって、平均の横方向の圧力、縦方向の圧力を計算するのである。ここで速度ｖは磁場の強さに対応していて、したがって密度ρは透磁率μに対応する。これに基づいて応力を計算した。

$$p - p_0 = \frac{1}{2}\mu H^2$$

単位のとり方によっては４πが現れる。

物理学生への註

（参考）前述のDarrigol によれば[191]、応力（圧力など）は速さを磁場の強さに対応させて

$$\sigma_{xx} = \frac{1}{4\pi}\mu H_x H_x - p$$

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{4\pi}\mu H_x H_y$$

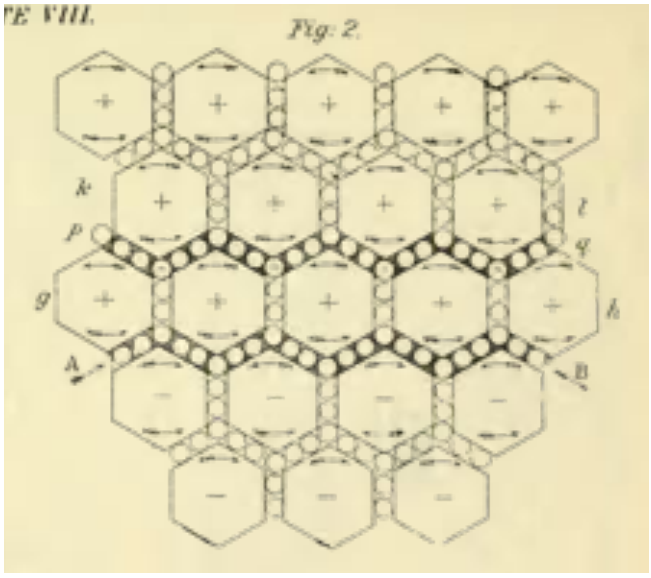
などを利用して、$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu H_i H_j$

これから力を求めれば

$$f_i = \partial_j \sigma_{ij} = -\partial_i p + H_i \partial_j \left(\mu H_j\right) + \mu H_j \left(\partial_j H_i - \partial_i H_j\right) + \mu \partial_i \left(\frac{1}{2} H_i H_i\right)$$

となる。初めの項は、磁化に働く力、次の項は電流に働く力を現す。
残りの二つはマックスウェルの応力テンソルとなっている。

こうしてマックスエルは磁力線に関する考察から、必要な力を導き出すことができた。



Part2は同じ1861年に出された。Part1では、磁場の様子にだけ目を向けてきたが、電荷、電流の存在は具体的には考慮しなかった。電流の磁場への影響、磁場の電流への影響が次の課題である。右の図を見て、マックスウェルは言う。渦と渦の境目は、反対向きの運動をしているので、これだけでは矛盾を含んでいる。そこで、この境目に、電荷をおけばそれはちょうど遊び車のような役割を果たすであろう。渦の回転と遊び車の運動を考察するとき、回転の仕方によっ

[191] Electrodynamics from Ampere to Einstein p.148

ては、遊び車は同じ位置には存在せず移動してくことが可能である。遊び車が電荷であるとすれば、それは電流となる。

上記のモデルによれば、渦のエネルギー（磁場のエネルギー）が電場を移動する電荷のエネルギーに変わることを示唆しているのでその量を計算する。その結果は、磁場の変化が電場に等しいことがわかる。

物理学生への註　磁場が速度で表現できるとして運動エネルギーの形をしているとする。

$$U_{mag} = \frac{1}{2}\int \mu H^2 \, dV$$

を得る。これを微分すれば渦が失うエネルギーが求まる。

$$\frac{dU_{mag}}{dt} = \int \mu H \frac{dH}{dt} dV$$

一方電荷が移動する際に失うエネルギーを計算する。粒子に働く力を $\vec{F}$ として計算すれば

$$\frac{dU_i}{dt} = \int \vec{F} \cdot \rho \vec{\imath} dV = \int \vec{E} \cdot \vec{\imath} dV = \int \vec{E} \cdot rot \vec{H} dV = \int \vec{H} \cdot rot \vec{E} dV$$

失ったエネルギーと得たエネルギーが等しいことから $-\frac{d}{dt}U_{mag} = \frac{d}{dt}U_i$

$$rotE = -\mu \frac{\partial H}{\partial t}$$

が得られると考えられる。（小林）

この論文のPatr3は1862年に出た。このPatr3では変位電流が導入され、光の伝達速度が計算された。ファラデーの目的が達成されたのである。Part2の議論において、誘電体の場合は、電流ではなく変位電流となることから説明したのである。

マックスウェルの考え方によれば、磁場の変化によって磁場に垂直な方向に電流が生じることになる。ところで、電流が抵抗を克服して流れれば、エネルギーを失うこととなるが、絶縁体のように、抵抗を克服せずにただ偏るだけであるならばエネルギーは電場として蓄えられることとなる。磁場が運動であるとすればそれによって電気の変位が生じることとなる。電気変位と電場の関係式は一般に

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$$

と書くことができる。Dは変位でありEが力であるから ε の逆数が弾性定数となる。一方、媒質の｀密度｀（仮想的密度）は透磁率 μ で表現される。このような弾性体を伝わる波の速さは、応力と密度との関係から $v = \sqrt{\frac{T}{\rho}}$ であるので、応力は誘電率に、渦の密度は透磁率に関係するから、波の速さは、

$$v=\sqrt{\frac{1}{\varepsilon\mu}}$$

となることを示した。もちろん、誘電体には真空を含める。

しかし、その後「電磁場の力学的理論」「電気磁気論」においては、媒質の考察を抜きにマックスウェルの式からもっと一般的な方法で光の速さを求めている。

3　マックスウェルの理論の完成

（1）「電磁場の力学的理論」[192]

マックスウェルは、この一連の研究の初めに当たって次のように述べていた。

「科学の効果的な研究の初めのプロセスは、心に描像が形を描いた最初の研究の結果を演繹し単純化するものでなければならない。この単純化は結果的には純粋に数学的形式をとるか、物理的仮説の形式をとるものである。」

物理的イメージを損なわないようにしながら数学的記述を展開しようとする試みたのである。そして、具体的な力線のイメージをとことん追い求めながら、ついには、物理的イメージでは補いきれないところまで進めてきたマックスウェルは、とうとう物理的イメージを捨てて数学的表現を完結させるところまできた。論文「電磁場の力学的理論」においては力線のイメージを捨てて数学的関係式に還元した。そしてこれらは電磁気学論考において洗練された表現（ベクトル解析）にまとめられたのである。

「電磁場の力学的理論」においては、電磁気学を場を用いて表現する準備として、自己誘導と相互誘導の関係式のエネルギー的考察から始めている。そこでは興味深い考察がなされているのではじめに紹介しておこう。

二つの回路の誘導に関する次の式の考察から始めている。

$$V_A=R_Ai_A+\frac{d}{dt}\left(L_Ai_A+Mi_B\right)$$

$$V_B=R_Bi_B+\frac{d}{dt}\left(Mi_A+L_Bi_B\right)$$

ここで、Rは抵抗、Lは自己誘導係数、Mは相互誘導係数である。なお、（　）の中の式

$$p_A=L_Ai_A+Mi_B$$

$$p_B=Mi_A+L_Bi_B$$

をマックスウェルは電磁運動量と呼んでいるが、このことは後で考察する。

起電力に電流を乗じると単位時間あたりのエネルギーを生じることから、上の式を次のように変形する。

---

[192] A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field　scientificpapers1　or Wipf and Stock Publishers

$$V_A i_A + V_B i_B = R_A {i_A}^2 + i_A \frac{d}{dt}\left(L_A i_A + M i_B\right) + R_B {i_B}^2 + i_B \frac{d}{dt}\left(M i_A + L_B i_B\right)$$

$V_A i_A + V_B i_B$ は単位時間にする仕事である。
この式の中で

$$H = R_A {i_A}^2 + R_B {i_B}^2$$

は、電流による発熱を示す。残りは

$$i_A \frac{d}{dt}\left(L_A i_A + M i_B\right) + i_B \frac{d}{dt}\left(M i_A + L_B i_B\right)$$
$$= \frac{1}{2}\frac{d}{dt}\left(L_A {i_A}^2 + 2M i_A i_B + L_B {i_B}^2\right) + \frac{1}{2}\frac{dL_A}{dt}{i_A}^2 + \frac{dM}{dt} i_A i_B + \frac{1}{2}\frac{dL_B}{dt}{i_B}^2$$

と変形することができるが、このうち、

$$E = \frac{1}{2}\left(L_A {i_A}^2 + 2M i_A i_B + L_B {i_B}^2\right) = \frac{1}{2} L_A {i_A}^2 + M i_A i_B + \frac{1}{2} L_B {i_B}^2$$

は、L_A, M, L_B が変化しないで電流の変化によるエネルギー部分で、電流の周りの磁場のエネルギーである。さらに、

$$W = \frac{1}{2}\frac{dL_A}{dt}{i_A}^2 + \frac{dM}{dt} i_A i_B + \frac{1}{2}\frac{dL_B}{dt}{i_B}^2$$

は、L_A, M, L_B が変化するときの仕事を表す。

特に、コイルの形を変えずに相対的位置が変化するときは、

$$W_{rel} = \frac{dM}{dt} i_A i_B$$

となる。

ここで $\frac{dM}{dt} = \frac{dL_A}{dt} = \frac{dL_B}{dt} = 0$ のときには電流は力学的仕事をすることはできず、電流の強さに無関係である。言い換えれば、コイルの形や相対位置が変化しないときは、電流の強さは変化しない。これは、電流が慣性の性質を持つことであり運動量の役割を果たしていることを示している。マックスウェルは次のように言う。

「もし、起電力の抵抗を受けない部分がそれが作用する限り働き続け、電流が持続する力学に対応させれば電磁運動量と呼ぶべき状態を生成すること、そして、この運動量が電流の外の状況に依存するということを受け入れるならば、電流の誘導と電磁引力は力学的論法で説明することができることがわかる。

私が電磁運動量と呼んだものはファラデーが回路の電気的励起状態と呼んだものである。すなわちその変化は起電力の作用と関係し、それは運動量の変化が力学の作用と関係するのと同じである。」

このあとで、場の基本的な法則を列記しているが、これは後の「電気磁気論」で述

べていることとほぼ同じであり、「電気磁気論」では洗練されたベクトル解析の形で表現されているので、「電気磁気論」のところで光の伝搬の議論も含めて述べることとしよう。ただ、電気変位については重要なので以下に紹介する。

「電気変位

電気変位は考察している物体を電気が通過するかどうかに関係なく、物体を構成する分子（小さな塊）あるいは粒子の側面に相対する電気から構成されるものを言う。」

註この後に次のように続けられている。

「物体の一部の要素 $dxdydz$ の表面 $dydz$ 現れる電気量を $fdydz$ としよう。したがって、f は x に平行な電気変位の成分である。こうして、f,g,h を x,y,z に平行な電気変位を表すとすることができる。

全電流を得るためには電気変位の変化を電流 p,q,r に付け加えることができる。全電流を p',q',r' とするとき、

$$p' = p + \frac{df}{dt} \qquad q' = q + \frac{dg}{dt} \qquad r' = r + \frac{dh}{dt}$$

$$\rightarrow \ \vec{C} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

を得る。」[193]（註　最後のベクトルの式は参考のために付け加えた）

これを見ればわかるが電気変位は物質内の電荷の移動を示している。Maxwell（ファラデーも）は真空は誘電体であると考えていたので、エーテル内でも同じことが起こっていると考えたと思われる。このことは次の「電気と磁気についての論考」の記述から推察される。

（2）「電気磁気論」

マックスウェルのこの本は、それまでの電磁気学について網羅的にかつ詳細に議論されていて現在読んでも示唆に富んだ教育的な書物である。彼自身の電磁気学に対する貢献は上下二巻の下巻にようやく述べられている。その部分を以下に紹介しよう。

マックスウェルは述べている。

「私の提唱する理論は、電磁場の理論と呼んでもよいだろう。というのは、それは電気的磁気的物体の近傍の空間に関係しているからである。また、それは動力学的理論と呼んでも良いだろう。というのはその空間には、観測される電磁気現象を生み出す物質が運動状態で存在することを仮定しているからである。」

「電磁場とは、電気的・磁気的条件にある物体を含めて、それを取り囲んでいる空間の部分である。」

それはどのような種類の物質で満たされていてもよいし、あるいはまた、ガイスラー

---

[193] Dynamical Thery of The Electromagnetic Field の（55）節

管[194]や他のいわゆる真空の場合のように粗大な物質を全く排除しようとしてもよい。しかしながら、光や熱の波動を受けて伝達させるのに十分なだけの物質は常に残されている」この物質をマックスウェルはエーテル性の物質であると考えた。この物質は小さな物質ではあるが、エネルギーを相手に与えることができることから、粗大物質（つまり原子や分子）と匹敵する密度を持っていると考えた。

ファラデーにおいては、電場磁場は電気力線、磁力線で表現される何か（実体）であり、その振動は光であった。マックスウェルはエーテルを考えたが、その運動形態は、ファラデーの力線の考え方を数式化した方程式群で表現された。彼の記述の仕方はハミルトンによって開発されたベクトル解析の方法であり、エーテルの具体的な描像は捨象されている。

①　電磁運動量

まず、はじめに最も基本的な量としての電磁運動量Ａ（ベクトルポテンシャル）を定義している。

「場の与えられた点における、ベクトルＡ概念が導き出されるであろう。我々はこのベクトルをその点の電磁運動量と呼ぶ。この量は、場からすべての電流を突然取り除くことによってその点に生成されるであろう電場の強さの時間積分によって与えられるものである。」

電場の強さと時間の積を電磁運動量と呼ぼうというのである。力と時間の積は力積と呼ばれ、それは運動量の変化に等しいことを思い出しておこう。

註　$\vec{A}=\int\vec{E}\,dt$。それは、磁気誘導のベクトルポテンシャルと一致する。回路の電磁運動量は、回路の周りのＡの線積分である。$p=\int\vec{A}\cdot d\vec{s}$」

この二つの式から　$\dfrac{dp}{dt}=\int\dfrac{d\vec{A}}{dt}\cdot d\vec{s}=\int\vec{E}\cdot d\vec{s}=\phi'-\phi$　を得るが、これは　運動方程式　$F=\dfrac{dp}{dt}$ に対応している。

---

②　いくつかの基本式

Ａ：磁気力の式・・・磁力線が回転の性質を持つということ。言い換えれば磁束密度はベクトル・ポテンシャルAの回転としてから得られるということ

註　これは、ベクトル・ポテンシャルAの一周の積分は、その回路の磁束に等しい。といいうことと深い関係にある。

$$\vec{B}=rot\vec{A}\quad\cdots\quad(\mathrm{A})^{195}$$

---

[194] ｐ．219　参照

[195] 式の右側の（　）付きアルファベットはtreatise での記号である。

$$\int \vec{A}\cdot d\vec{s} = \int rot\vec{A}\cdot d\vec{S} = \int \vec{B}\cdot d\vec{S} = \Phi \quad \Phi：磁束$$

B：電流の式・・・磁場Hの一周の積分（磁場の強さ×距離）は内部の全電流に等しい

これは、高校の教科書などではアンペールの法則と呼ばれているが、マックスウェルによって定式化されたものである。

$$\vec{C} = rot\vec{H} \quad ・・・ \text{(E)}$$

「ファラデーの力線について」第一部の後半に出ている。$\vec{C} = \vec{J} + \dot{\vec{D}}$と組み合わせれば

$$\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = rot\vec{H}$$

C：起電力の式・・・電場の強さで表現。ファラデーの電磁誘導の法則を含む

註　下の式の右辺第１項は導線が磁力線を横切るときの電場、第二項は場の時間的変化による起電力による電場を表している。最後にポテンシャルからの電場を表現している。

$$E = v \times B - \frac{\partial A}{\partial t} - grad\phi \quad ・・・ \text{(B)}$$

磁束の変化が起電力に等しいということと、$E = -\frac{\partial A}{\partial t}$の式が同じであることを示しておこう。次の式

$$\int \vec{A}\cdot d\vec{s} = \int rot\vec{A}\cdot d\vec{S} = \int \vec{B}\cdot d\vec{S} = \Phi$$

を時間で微分すれば、

$$\int \frac{d}{dt}\vec{A}\cdot d\vec{s} = \int \frac{d}{dt} rot\vec{A}\cdot d\vec{S} = \frac{d}{dt}\int \vec{B}\cdot d\vec{S} = \frac{d}{dt}\Phi$$

$-\frac{d}{dt}\vec{A} = \vec{E}$を代入すれば

$$-\frac{d}{dt}\Phi = \int \frac{d}{dt}\vec{A}\cdot d\vec{s} = \int \vec{E}\cdot d\vec{s} = V$$

これが高校の教科書などに出てくる電磁誘導の法則である。

D：電気変位の式　電場の強さと電束密度（電気変位）の関係　（誘電率）

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$$

E：電気抵抗の式（オームの法則　$J = \frac{V}{R}$）

$$\sigma E = I$$

F：全電流の式　全電流は伝導電流と変位電流からなる。

変位が生じることは電気が移動することである。（変位電流＝電気変位の時間変化）

$$\vec{C} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

G：自由電気の式　誘導線を電荷がささえるファラデーの法則（ガウスの法則）
　電荷は磁力線の数で測られる

$$\rho = div\vec{D}$$

H：電気の連続の式　ある領域を流れ出る電気量はその領域の電気量の減少に等しい

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div\vec{I} = 0$$

③　物体が受ける力学的力
　電流が磁場から受ける力

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B}$$

　電気量が電場から受ける力

$$\vec{F} = e\vec{E}$$

　磁気量が磁場から受ける力

$$\vec{F} = -m \cdot grad\phi$$

　電気量が電場から受ける力　磁気量mが磁場から受ける力をまとめて表す。

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} + e\vec{E} - m \cdot grad\phi \quad \cdots \quad (C)$$

④　その他
　磁化の式

$$\vec{B} = \vec{H} + 4\pi\vec{I} \quad \cdots \quad (D)$$

⑤　エネルギーの表式

　電場のエネルギー　　$E = \frac{1}{2}\int \varepsilon E^2 \, dV$

　磁場のエネルギー　　$E = \frac{1}{2}\int \mu H^2 \, dV$

物理学生への註　エネルギーの式
①　電場
　静電気のエネルギーは電気量とポテンシャルの積で与えられるが、電場に変換すると次のようになる。

$$W = \frac{1}{2}\iiint \rho\phi dxdydz = \frac{1}{2}\iiint div\vec{D}\,\phi dxdydz$$

$$= \frac{1}{2}\iiint \vec{D}\,\phi dS - \frac{1}{2}\iiint \vec{D} \cdot grad\phi dxdydz$$

$$= -\frac{1}{2}\iiint \vec{D} \cdot grad\phi dxdydz = \frac{1}{2}\iiint \vec{D} \cdot \vec{E} dxdydz = \frac{1}{2}\int \varepsilon E^2 \, dV$$

②　磁場
　磁場のエネルギーは、磁束に電流をかけて得られることがHelmholtzなどによって明らかにされてきた。磁束はベクトル・ポテンシャルで表現できるのでエネルギーは次のようになる。

$$T=\frac{1}{2}I\Phi=\frac{1}{2}I\int\vec{B}\cdot dS=\frac{1}{2}I\int rot\vec{A}\cdot dS=\frac{1}{2}I\sum\iiint\vec{A}\cdot d\vec{s}$$

$$=\frac{1}{8\pi}\sum\iiint\vec{A}\cdot rot\vec{H}d\vec{S}d\vec{s}\qquad\because I=\int i\,dS=\frac{1}{4\pi}\int rot\vec{H}\cdot d\vec{S}$$

$$=\frac{1}{8\pi}\sum\iiint\vec{H}\cdot\left(rot\vec{A}\right)dxdydz\qquad\because div\left(\vec{H}\times\vec{A}\right)=\vec{A}\cdot rot\vec{H}-\vec{H}\cdot rot\vec{A}$$

$$=\frac{1}{8\pi}\sum\iiint\vec{H}\cdot\vec{B}dxdydz$$

$rot\vec{H}=4\pi\vec{i}$ としたので、8π が現れたが、MKS単位系なら係数は$\frac{1}{2}$である。

マックスウェルは、これらの方程式群は、幾つかの量を消去すればより簡単になるだろうが、それぞれに物理的な意味を持つものであり、あえてすべて書き出した、この中の式を簡略化して得るものより失うものの方が大きいと述べてもいる。

615］[196]これらは、これまで考察してきた量の主要な関係であるとみなすことができる。それらは、これらの量の幾つかを消去するために結合することができる、しかし、現在の我々の対象は数学的形式において簡潔さを得ることでなく、我々の知識のすべての関係を表すことである。有効な概念を表現する量を消去することは我々の研究のこの段階では得ることよりもむしろ失うことの方が多いであろう。

ヘルツやヘビサイドは、場の性質を強調するためにポテンシャルをすべて捨象して簡単な4つの式とエネルギーの式の全部で６個の基本式にまとめ上げた。

ただ、マックスウェルのノートには、次の四つの定理がまとめらている[197]。これは、ヘビサイドやヘルツによってまとめられた現在のマックスウェルの方程式とほぼ同じ内容である。ここでは、わかりやすく積分表示とした。（ヘルツの式は後出）

定理Ａ　電流を取り巻くように閉曲線を描くと、その閉曲線上での磁気強度の積分は4πを掛けた電流に等しい。

$$\int\left(J+\frac{\partial D}{\partial t}\right)dS=\oint\vec{H}\bullet d\vec{s}$$

定理Ｂ　電流回路が磁力線を取り巻いており、理由はどうあれその磁力線の数が減少すると、起電力が回路一周に作用し、起電力の総和は単位時間あたりの磁力線の減少数に等しい。磁力線の数は磁気強度の面に直交する成分に面積要素と磁気誘導係数を乗じて積分した量で定義することができる。

$$V=-\iint\frac{\partial B}{\partial t}dS+\oint\left(\vec{v}\times\vec{B}\right)\bullet d\vec{l}$$

定理Ｃ　誘電体に起電力が作用すると、いわゆる電気分極が起こる。帯電した計のエネルギーが分極した内部にも存在するなら、誘電体の内部にも起電力の方向に電気変

---

[196] Maxwell　treatise A615

[197] 以下の部分は太田浩一著「マックスウェルの渦アインシュタインの時計」ｐ．１５６−１５７　からの引用である。

位があると考えなければならない。その変位の大きさは空間の各点で起電力に比例し、誘電体の性質に依存する。

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$$

定理D　電気変位が増加あるいは減少するとき、その効果は正あるいは負の方向の電流の作用と同等である。

$$\vec{C} = \vec{J} + \dot{\vec{D}}$$

物理学生への註：電磁波の速度

マックスウェルは、treatise において、方程式から光の速さを計算している。それを紹介しよう。

まず、

$$J = -\varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + rot\vec{H}$$

さらに、

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t} - grad\phi$$

これを上の式に代入すると

$$J = -\varepsilon \frac{\partial}{\partial t}\left(-\frac{\partial A}{\partial t} - grad\phi \right) + \frac{1}{\mu} rotrot\vec{A}$$

$$J = -\varepsilon \frac{\partial}{\partial t}\left(-\frac{\partial A}{\partial t} - grad\phi \right) + \frac{1}{\mu} graddiv\vec{A} - \frac{1}{\mu}\Delta\vec{A}$$

（$rotrot\vec{A} = graddiv\vec{A} - \Delta\vec{A}$ より）

最後の式で $J = 0$ とし、式の rot をとれば $rotgard = 0$ より

$$0 = -\varepsilon \frac{\partial}{\partial t}\left(-\frac{\partial rotA}{\partial t} \right) - \frac{1}{\mu}\Delta rot\vec{A}$$

$$0 = \varepsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2}\vec{B} - \frac{1}{\mu}\Delta\vec{B}$$

これから、$\vec{B}$ が光の速さで伝わることを示している。

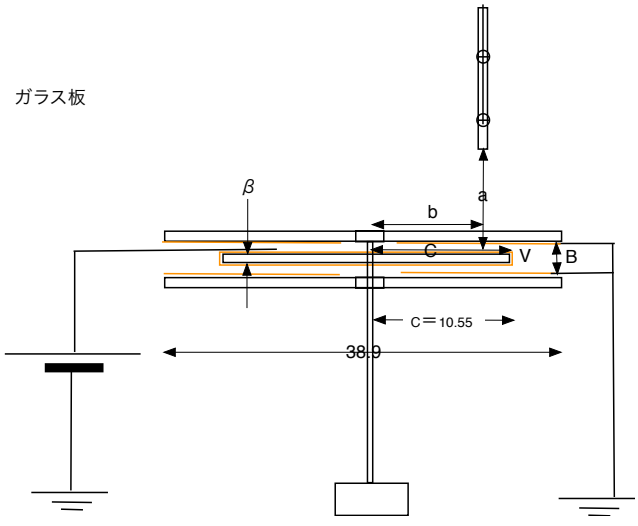
Ⅳ　マックスウェルの後継者

Maxwellの「電気磁気論」は、その後に大きな影響を与えた。新しい「電磁気学」の出現は多くの人に衝撃を与えた。後述する真空放電の研究などで有名なHittolfは、「すでに高齢になったにも関わらず、Maxwellのtretiseを勉強しようと試みたが、慣れない式や概念（ベクトル解析）のためにマスターできず、それですっかり意気消沈してしまった。Munsterの彼の友人たちは、彼に、保養のためにハルツへの旅を進めた。出発前に友人達が彼の旅行かばんを点検したところ、なんと、James　Clerk　Maxwell　著　”Treatise on Electricity and Magnetism ”全２巻が中から現れた」というエピソードをSommerfeld がその著書　電気力学　の中で紹介している。このMaxwellの著作が与えた影響を具体的に以下で検討してみよう。

１．電気の移動による磁気現象について（A.Rowland　１８７６年）

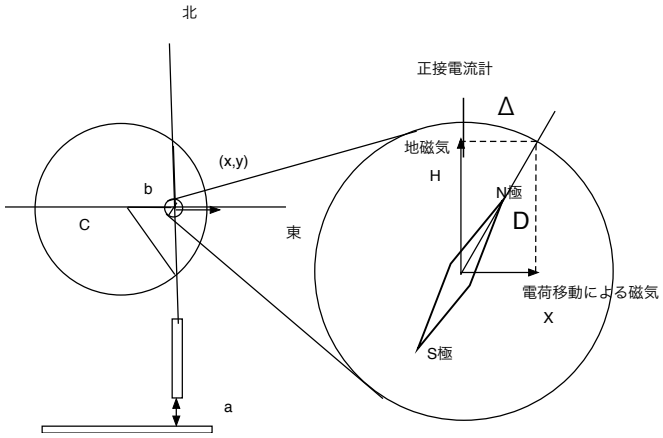
Baltimore にあるJohns Hopkins 大学のA.Rowlandは、電荷が移動することよって生じる磁気効果についての実験について発表した。A.Rowlandによれば、それは、Maxwellのtreatise　の７７０節において、表面電荷の運動による磁気効果の計算が書かれているが、しかし、そのような作用の存在は今まで実験的理論的に証明されていないのでそれを実験的に証明しようとするものであった。まず、例によって実験装置から説明しよう。

「直径が21.1ｃｍ厚さ0.5ｃｍのエボナイトの円盤を用意する。それを、一秒間に６１回回転させる。円盤の一つの側の0.6ｃｍ離れたところに直径が38.9ｃｍで中央に7.8ｃｍの穴を持つガラス板を固定する。エボナイト円盤は両面を金メッキしそして、ガラス板は一方のサイドに金メッキした環状のリング上のものを用意する。リングの外側の直径は24.0ｃｍで内側の直径は8.9ｃｍである。メッキされた側の側面は回転する円盤の方に向いているかあるいはその反対であるが、一般には回転する円盤の方を向いているので問題は容易に計算することができる。そして電気を帯びることについて不確定性はない。外側の板は一般にアースされている；そして内側の円盤は電池に接続されている、その点は縁の三分の一ミリメーター以内でありそちらの方を向いている。縁は広いので、点はそれと縁の間に電位差がなければ放電は行われない。電池と円盤の間には交換機が付けられているので円盤の電位を正あるいは負に意のままに変えることができる。実験装置のすべての部分は非磁性体である。



円盤の表面の上方に壁から突き出た部分から非常にデリケートな無定位の針が電気の作用からと空気の流れの作用からの影響を真鍮の筒によって受けないようにしてある。二つの針は長さが1.5ｃｍでその中心は互いに17.98ｃｍ離れている。目盛の読みは望遠鏡によって行われる。鏡を観測するためにある筒の開口部は、円錐形の金属によって電気作用の影響を受けないようにしてある。鏡はその頂点に付けられている。これらは完璧に成し遂げられたので電池を充電したり円盤の電荷を反対にしたりするときに明白に電気作用はなかった。針は円盤から十分離れているので円盤の作用は、下の針のほうが上の針よりも何倍も大きかった。針の方向はその下の円盤の運動の方向である。それは、軸から針の方へ引いた動径に対して直角の方向である。針は実験室の壁から下げられている。回転している円盤はその下のテーブルに置かれているので、針は振動から影響を受けることはない。」

ローランドの実験装置は、二つの磁針を反対向きに上下に離して付けた無定位電流計であったが、ここではわかりやすく、正接電流計に置き換えて説明しよう。正接電流計は、地磁気Hと測定する電荷移動による磁場Xを直角方向にして、方位磁石の向きを測定することによって求めるものである。



$$X = H\tan\theta \quad \cdots \quad (1)$$

この方位磁石は回転する金メッキしたエボナイトの円盤の縁に近いところに設置する（右図）。円盤を回転させると、電荷の移動によって東西の方向に磁場が生じ、この磁場を、地球磁場と比較するのである。もっともこのままでは地球磁場が大きすぎ測定が困難である。地球磁場の大きさを相殺して小さくするために、無定位電流計を使用したのである。

次に、装置において、中間の金メッキしたエボナイトの円盤に電荷を与えなければいけない。上下のガラス板の金属部分はアースして電位は0（あるいは仮にV'）とする。円盤には電池から電位Vボルトを与えるが、直接接触するのではなく若干の距離 l だけ離して放電させる。電池は大きなもので48ｃｍの高さで、それを9個直列に接続した。電位差をこの時の放電の長さによって求めておく。（トムソンの実験式 $V - V' = 117.5(l + 0.0135)$ を用いる。）この電位差から、表面の電荷密度を次の式 $\sigma = \dfrac{V - V'}{2\pi(B - \beta)}$ によって与えられる。（円盤の縁はもう少し複雑であるが、それはMaxwellのtreatiseに与えられてる。ここでは省略）β は円盤の厚さである。

さて、各点での表面電荷密度が磁石の針のところに生じる磁場の強さの水平方向の成分を理論的に計算しなければならない。回転する円盤の各部分によって生じる磁場をすべて加え合わせ円盤全部による磁場を求めるのであるから積分しなければならな

い。その結果をX_0とする。さらに、実は円盤の縁はより分布が強くなることがMaxwellによって知られている。それを利用して、円盤の縁の部分の回転による磁場の強さをX_1とすると、

$$X = X_0 + X_1 \quad \cdots \quad (2)$$

（註　X_0　X_1は次の複雑な式なので解説は省略する。結果は

$$X_0 = \frac{8\pi N\sigma a}{v}\int_{-(C+b)}^{C-b}\int_0^{y'}\frac{(b+x)}{\left(a^2+x^2+y^2\right)^{\frac{3}{2}}}dxdy$$

$$= \frac{8\pi N\sigma a}{v}\int_{-(C+b)}^{C-b}\frac{(b+x)\sqrt{C^2-(b+x)^2}}{\left(a^2+x^2\right)\sqrt{a^2+C^2-b^2-2bx}}dx$$

$$X_1 = \frac{NE}{v}\frac{ak}{2b\sqrt{C'b}}\left\{\frac{2-k^2}{1-k^2}E(k)-F(k)\right\}$$

$$k = \frac{2\sqrt{C'b}}{\sqrt{a^2+(C'+b)^2}}$$

ここで*E(k),F(K)*は、完全楕円積分の一次と二次の項である。）

（１）の式は実験値であり、（２）の式は理論値である。この二つの値が一致するかどうかを調べようとするのである。

円盤は一秒間に61回回転させる。回転の速度はサイレンとの比較によって測定された。円盤の回転によって円筒形内の磁石の針は外側または内側に振れある角度をなして静止した。帯電させる電荷の種類（正負）によって磁針の触れる角度は反対となった。

ところでRowlandは、磁石の針が二つ反対に付けてある無定位電流計を用いたのであるから、若干式は異なる。無定位電流計とはいっても、上の磁針の磁荷m'と下の磁針の磁荷mは異なるので、それを測定することを行った。磁石を同じ向きに繋いで地球磁場内で振動させたときと反対向きに繋いで振動させたときの振動数（前者をn後者をn'とする）から求めたのである。それを利用して正接電流計の（１）の式の代わりにRowlandは次の式を用いた。

$$X - X'\frac{n^2-n'^2}{n^2+n'^2} = \frac{n'^2}{n^2+n'^2}\frac{\Delta}{D}H = \frac{n'^2}{n^2+n'^2}H\tan\theta \qquad (1)'$$

この式でDは筒の中心からスケールまでの距離、Δは振れの読み、$\frac{\Delta}{D}=\theta$はねじりの角度である。X、X'は下と上の磁針に働く力である。Hは地球磁場の大きさである。

また、理論値も、上下の磁針に働く力を求めなければならないから、磁場の強さに磁荷の大きさを掛けた式を用い、（１）と比較するために

$$X - X'\frac{n^2-n'^2}{n^2+n'^2} \qquad (2)'$$

の形で求めておく。XとX'は理論的に計算するのである。

Rowlandははじめは定性的な結果しか得られず、定量的な値は極めて不十分であった。円盤に筋を入れるなど様々な工夫の結果、また数週間に数百回の測定を行うなど実験にたいする熟練の結果ようやく満足できる結果が得られた。最初の実験の定性的な結果が得られた部分は次のように述べられている。

「意味のある結果が得られたのは数週間の試みの後であった。しかし、数量的な結果は一度得られた以外は失敗した。数多くの週を費やし数百回観測したが、円盤の電荷を入れ替えるごとに針はいつもそれに答えてきた。また、ポテンシャルを０から引き上げると作用は引き下げたときと反対になった。電気の交代による針の振動は10から15ｍｍでありしたがって平衡点は5か7.5ｍｍ変化した。この量は、電荷と、運動の速度と針の敏感さによってかわった。」

ローランドの実験結果の一つは、実験値（１）'は

$$X-0.99X'=\frac{1}{315000}=0.00000317$$

理論値（２）'は、

$$X-0.99X'=\frac{1}{286000}=0.00000349$$

となることが示された。他の実験結果も含めて同様であり、満足できる結果を得ることができた。それにしても、よく、こんな困難な実験を理論的計算を含めて遂行できたものだと感嘆する他はない。

２．Halle　効果（１８７９年）[198]

現在では、半導体のhole の振る舞いを理解する上で欠かすこのとできないHall 効果であるが、このHallの研究も学生であったHallがMaxwellのtreatiseを勉強していく上で疑問に感じたことから行われたものであった。Hallの論文の冒頭には次のように書かれている。

大学の最後のときのある日、Maxwellのtreatiseをローランド教授の講義と同時に読んでいたとき第二巻のｐ１４４[199]の次の部分に注意を惹かれた。

「次のことに注意しなければいけない。つまり、電流が流れている導体を磁力線を横切って動かす力は電流に作用するのではなく、それを運ぶ導体に作用するのである。もしも導体が回転する円盤であったり液体であったりするときしたとき、それはこの力に従って運動する、そして、この運動はそれが運ぶ電流の位置の変化を加えるか否かである。しかし、もし、電流それ自身が固定された固体の導体あるいは導線の網を通る任意の道筋を選べるなら、一定の磁気力がその系に働くとき、導体を通って流れる電流の道筋はいつまでも変化しない、しかし、誘導電流とよばれる遷移する現象が徐々に収まった後は、電流の分布があたかも磁気力が働かないのと同じである。電流に働く力はただ起電力だけである。その起電力は、この章で対象とする力学的な力と区別すべきものである。」

---

[198] On a New Action of the of the Magnet on Electric Currents.　BY E. H. HALL, Fellow of the Johns Hopkins University.

[199] Dover の第３版ではp.157 501］で、Hallの論文について言及されている。

Hallは、導線自身は磁場から影響を与えられないのであり、電流が通っている導線が力を受けるのであるからこの部分は自然な仮説ではないと考えられた。彼は、自分の先生であるRowland にこのことを聞くと、Rowland先生は、自分もMaxwellの記述には疑問を感じていたのだが、忙しくてそのことを確かめることができないと言われた、そこで、Rowland先生の指導を受けながら次のような実験を行った。

実験の目的は次のような考え方に基づくものである。つまり、「固定された導体の中の電流はそれ自身磁気作用の影響を受けるものであり、その電流は導線の一つの側に引き寄せられそしてそれゆえに抵抗が増大する」というものであった。しかしこの考えは実験では抵抗には磁気は影響しないことが明らかとなった。それは、電流が非圧縮性流体のように運動していることを示していることによると考えられた。しかし、この場合でも導体の中では応力状態が存在し、電流が流れている導線の側面に押し付ける圧力が存在すると考えられた。このことから、この問題を研究するには、導体の両側面の間の電位の差を調べることが重要であることに気がついた。これは、Rowland先生が以前に行った実験を繰り返して行うことによって得られた。そして最終的には次のような実験をおこなった。

金属板として、金の細長い板を用意する。それは、幅が２ｃｍで長さが９ｃｍでガラス板の上に敷いたものである。接触を完全とするために、金箔に板の両端は下面をよく磨いた真鍮の厚い板をしっかりと押し付けて密着させる。この二つの真鍮（両端）は、一個のブンゼン電池からの導線で結び付けられている。金箔の細い板の真鍮で覆われていない部分の長さは5.5ｃｍであり、その抵抗はだいたい２Ωである。高抵抗のトムソン電流計をこの金箔の細い板の中央部分（両端は真鍮でその中央部分）の側面の端の向かい合った点に結び付けられている。金属箔の部分のガラスプレートには磁石の一つの極を平らにして柔らかいセメントでしっかりと固定し、磁石のもう一つの極は金属箔の細い板の上方約６mm以内に近づけておく。

ここで記述されている高抵抗のトムソン検流計とは、要するに現在の電圧計に相当するものである。抵抗を大きくすることによって微弱な電流を取り出しそれを測定することによって電位差を測定する。

実験は上記のような装置で１１月１２日に行われた。とりあえずラフに行われたが、それでも十分正確なものであった。

実験結果は次のとおりである。電池によって金箔を流れる電流 I とトムソン検流計を流れる金箔を横に流れる電流 i の測定値と磁石の強さ B の関係を比較し、理論と比較した。つまり、電流 I が磁場 B の中を流れて垂直方向に受ける力は

$$F \propto IH$$

これが電場による応力と釣り合う、つまり、横方向の起電力に比例するから

$$V \propto IH$$

この電圧をトムソン検流計を流れる電流 i によって測定する。オームの法則から、

$$iR = V \propto IH$$

Rは電圧を測定するための大きな抵抗である。上の式から、$\frac{IH}{i} = const$ が得られ実験でこれを確認する。実験結果は次のとおりである。

金箔を流れる電流 I	磁場の強さ H	トムソン電流計を流れる電流 i	$\frac{IH}{i} = const$
0.616	11420	0.00000232	3.03E+09
0.249	11240	0.00000085	3.29E+09
0.389	11060	0.00000135	3.19E+09
0.598	7670	0.00000147	3.12E+09
0.595	5700	0.00000104	3.26E+09

ここで磁場の強さは地球磁場の倍数である。結果はほぼ一定であり、理論通りであることがわかる。こうして、磁場は電流に直接作用を及ぼすのであって、導線に直接作用するのではないことがわかった。Maxwellの記述は誤りであると言える[200]。

３．電磁場のエネルギーはどのように移動するのか　Poynting（１８８３年）

エネルギーがどこに存在するのかという問に答えることは簡単ではない。運動エネルギーは運動している物体に備わっているとすることは自然ではあろうがポテンシャルエネルギーはどうであろうか。電気エネルギーも私が高校生時代に教わったところでは、「電気エネルギーは電流自身にあるとか、その周りの電磁場にあるとかいろいろ説がある」などのように表現されていた先生もいた。しかし、Maxwellの電磁気学によればそれは電磁場に備わったものであることは明白であるが、未だに、授業においてこのことを強調されることはめったにない。まして、そのエネルギーがどのように移動するのかについては明白に語られることはない。ところで、１８８３年のポインティングの論文は明確にこの事について議論しているのであり、この論文について理解しておくことは重要であろう。ポインテイングの論文の冒頭は極めて教育的である。

「電流が存在する空間は場を有しているとみなされるが、そこではエネルギーがある点において電池や発電機熱電気などによって電気磁気のエネルギーに変換され、一方、場の別の部分においてこのエネルギーは電流によって熱に、あるいは電磁力によって仕事に、あるはその他エネルギーに変換される。以前は、電流は導体にそって流れるあるもので、導体の方向にながれ、導体の各部分に現れるエネルギーは導体を通って電流によって運ばれていくものと仮定されていた。しかし、ファラデーとMaxwellに従えば、エネルギーを引き出す一次回路から電流の誘導と電磁作用がある距離離れた点において存在しているとき、現象の発露においては導体の周りの媒質が重要な役割を果たしているのである。もしも、エネルギーの運動の連続性を信じるならば、つまり、エネルギーがある点で消滅し別の点で発現するときエネルギーは間の空間を通

[200] 第3版のこの部分には訂正が記されている。

り抜けなければならないとするならば、周りの媒質は数なくともエネルギーを有していること、そして、エネルギーはある点から別の点に移動できることを結論しなければならない。」

このことを基礎にしてMaxwellは、媒質の中に何らかのエネルギーが存在することを研究し、場の任意の点でのエネルギーが電場と磁場の強さと物質の誘電率と透磁率に関係する表現を与えることに成功した。これらの表現は全エネルギーを説明するものである。Maxwellの理論によれば、電流は本質的に導体の中あるはその周りのエネルギー分布に依存し、変化を伴い、場の中を通して連続的に運動するものである。

Maxwellの理論から出発すれば、自然に次のような疑問にあたる、すなわち、電流に関するエネルギーはどのようにして点から点につわたっていくのか、道筋はどうなっていて、どのような法則に従って電気や磁気の存在が認められたところの回路の部分から熱やその他のエネルギーに変換する場所へ移動するのかということである。

PoyntingはMaxwellの理論、つまり電磁場は次のエネルギーを持つことから始める。

$$E=\varepsilon\frac{\mathbf{E}^2}{8\pi}+\mu\frac{\mathbf{H}^2}{8\pi}$$

これを時間で微分して、アンペールの法則とファラデーの電磁誘導の法則を用いて変形して、エネルギーは磁場と電場に垂直方向に進行することを示した。電場に垂直であることから、それは等電位面内を移動すること、更にまた磁場に垂直であることから等電位面の中でどの向きに進行するかが定められるのである。

物理学生への註
具体的に計算してみよう。

$$\frac{\varepsilon}{4\pi}\iiint\mathbf{E}\frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t}dxdydz+\frac{\mu}{4\pi}\iiint\mathbf{H}\cdot\frac{\partial\mathbf{H}}{\partial t}\,dxdydz+\iiint(\mathbf{C}\times\mathbf{B})\cdot\mathbf{v}\,dxdydz+\iiint\mathbf{E}\cdot\mathbf{K}\,dxdydz$$
$$=\frac{1}{4\pi}\iint(\mathbf{E}'\times\mathbf{H})\cdot d\mathbf{S}$$

最初の二つの項はエネルギーの単位時間あたりの変化を示している。第３項は電磁力による単位時間あたりの仕事量を示している。この量は電流の運動に変化する。四番目の項目は熱や化学変化に変換されるものを示している。

左辺はこうして閉じられた表面の内部の単位時間あたりの得られてたエネルギーを示している。右辺は、エネルギーは磁場と電場に垂直方向に進行することを示している。

このことを利用して具体的な例について検討してみよう。

（1）直線電流

この場合は、導線の近いところや導線内部では磁力線は導線の軸の周りに円形を描く。断面のすべての面で同じように流れるなら、電気力線は導線にそっている。図１の

A,Bは導線を示し、電流はAからBに流れる。この円の接平面は電場Eと磁場Hの両方を含む。そして、エネルギーは面に垂直に面を通って流れる。つまりそれは中心に向かう動径の方向である。いま軸に垂直な二つの平面によって区切られる部分を取り出してみよう（図２）。断面部分からはエネルギーは流れない。なぜなら、その平面内には電場は存在しないからである。したがって全エネルギーは導線の外側の面を通って流れ込む。そしてその量はそこで抵抗によって発生する熱量である。と言うのは電流は一定で他の部分はエネルギーは変わらないからである。この場合発生する熱量は流入するエネルギーと等しいことを確認しておくのは意味があることである。

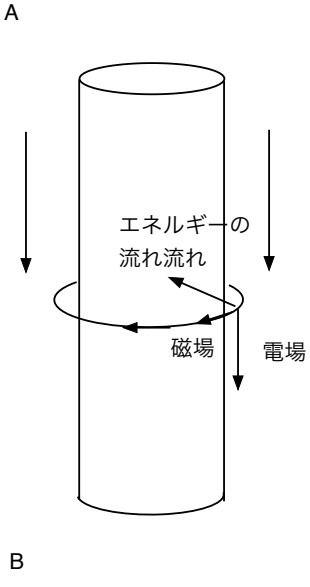


図１

今ｒを導線の半径とする。ｉは電流でHを表面の磁場の強さであるとする。Eを電場の強さとし、Vを二つの点の間の電位差とする。長さｌのときの表面の面積は $2\pi rl$ であるから、一秒間に外から入るエネルギーは

$$\frac{S\times E\times H}{4\pi}=\frac{2\pi rlEH}{4\pi}=\frac{2\pi rVH}{4\pi}=\frac{4\pi iV}{4\pi}=iV$$

$\because$

$$4\pi C=rotH$$

$$4\pi i=\iint 4\pi CdS=\iint rotHdS=\oint Hds=2\pi rH$$

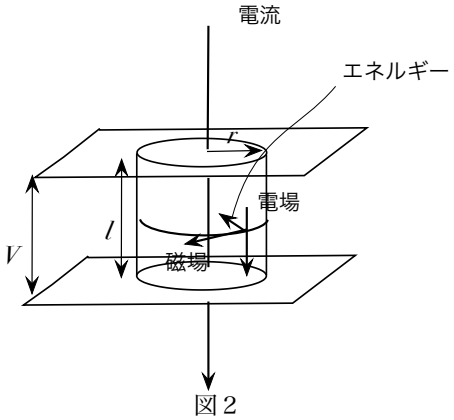


図２

これは流入したエネルギーが発生するジュール熱に等しいことを示している。

したがって、エネルギーは導線にそって流れるのではない。そうではなくて導線の周りの誘電体（不導体）から入り込むのである、そして、入り込むや直ちに熱に変換するのである。そして、導線の中央にまで達するが、そこでは、磁場はないのでエネルギーは移動が止まる、つまりそれまでにエネルギーはすべて熱に変わってしまっている。

（２）導線を通ってコンデンサーが放電される場合

二枚の平行コンデンサーを大きな抵抗の導体で放電する場合。図３のAとBをコンデンサーの二枚の極板とする。Aを正にBを負に帯電させる。放電を行う前の等電位線の断面図を図のように示しておく。エネルギーの主な部分は二枚の極板の間の誘電体の部分に存在する。しかし、幾つかのエネルギーは電場の存在するところに存在する。AとBの間には電場がAからBにどこでも水平面に垂直になっている。AとBを抵抗の大きい細い導線で結ぶ、その結果力線と抵抗がポテンシャルの減少と同じになるようにす

る。この抵抗の調整によって電流の流れによって等電位面が乱されなかったとする。線は非常に細く放電は非常にゆっくりであったということである。

放電が行われている間、電流は矢印の方向にLMNと流れた。そして同時に変位電流がBからAに流れた。電流は磁力線に囲まれている。その向きは右回りの法則に従う。

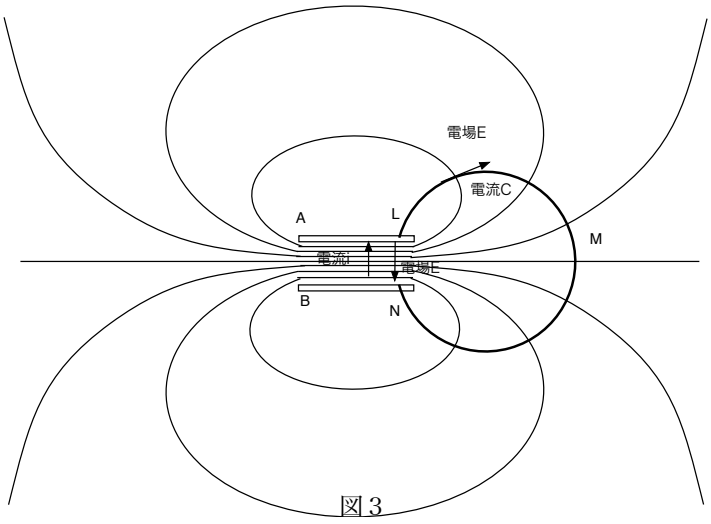


図３

さて、エネルギーは常に電場に対して垂直の方向に流れるのであるから、等電位面内にある。そして磁力線に対しても垂直であるからエネルギーの流れの方向は導線のすべての側面で内側に向いていて、熱に変わる。放電がゆっくりならば考察している時間においては定常であると考えられる。しかし、AB間に於いては、電流の向きと電場の向きは逆である。磁場は電流に依存するのであるから同じ向きであり電場が反対になるのであるから、エネルギーの向きは逆につまり外側に流出する向きである。AB間の電場の緊張状態は放電することによって徐々に弱まり、エネルギーは等電位面に沿って移動し、導線内に入って熱となる。

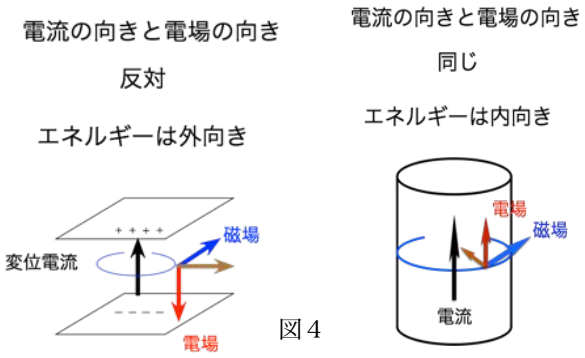


図４

（議論　小林による考察・・・導線内の熱に変わらない場合（抵抗が非常に小さい場合）は、電流による磁場のエネルギーが生じるので、コンデンサー内部の電場のエネルギーは電流の周りの磁場のエネルギーに変換されることを示していると思われる。このことから次の式が成り立つ。

$$-d\left(\frac{1}{2C}Q^2\right)=d\left(\frac{1}{2}Li^2\right)+Ri^2dt$$

これはトムソンの式である。この場合のエネルギーの移動は導線内ではなく空中を伝わることとなるがどうだろうか。）

（３）ボルタ電池を含む回路

電池内部における等電位面の様子は複雑であろうが次のように仮定する。すなわち、金属と溶液の境目でポテンシャルが急激に変化するということである。接触電位差を考えれば妥当な仮説だと言える。図の数字は、電位の概ねの様子を表している。亜鉛板と酸性溶液との間にポテンシャルの差があり、溶液に入ると、ポテンシャルが一気に

高くなる。溶液で徐々に降下し、溶液と銅板との間で一気に下る。その後導線内で徐々に電位が降下する。等電位線を図示すれば図５のようになる。すなわち亜鉛と酸性溶液の接触面からから出て、一つは酸性溶液中に、次は、ここでは密集しているが酸性溶液と銅板の間に、残りは回路を垂直に垂直に入る。こうして、電流は亜鉛板から出発し酸を通って銅板に向かうのであるが、亜鉛と酸の間では向きは電場の向きと反対になり[201]、残りの酸性溶液中と動線の内部では電流の向きと電場の向きが一致する。したがって、亜鉛と酸の間の媒質は前述のコンデンサーのときと同じ様相を示し等電位線に沿って外側にエネルギーを放出する。そして、そこでは常に新たな電気変位を酸から亜鉛に向かって創出している。

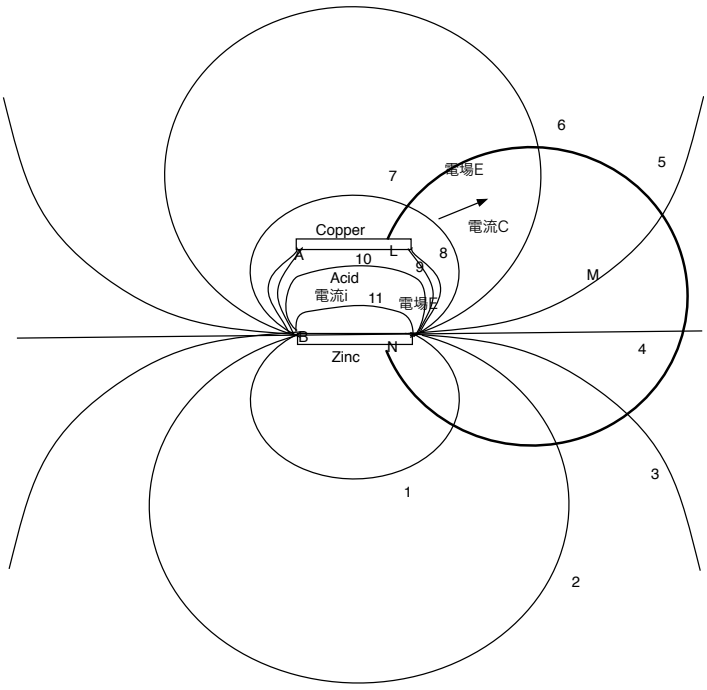


図５

この放出されたエネルギーは一つは酸の中に収斂すし、そこで熱となる。その一部は酸と銅の間に向かい、水素を発生させるエネルギーとなる。残りは回路に向かい、そこでジュールの法則に従って熱となる。

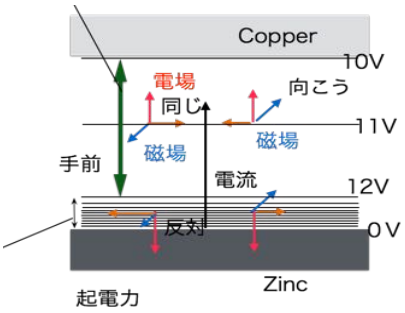


図６

（註　亜鉛板と酸の間では電場の向きと電流の向きが反対になっているので外側にエネルギーが移動することを示している。）

ボルタ回路について興味のある二つの例について述べる。一つは、海底ケーブルによって電池を用いて電流を流すことである。電池の亜鉛板を接地して、導線の周りは鞘で覆い電位を０とするのである。導線内部は常に電位は０よりも高いとする。鞘の電位を０とすることにより等電位線は、右図のようになるであろう。この時電流を維持し、導線の先端で信号を受け取るなどの仕事を行うエネルギー

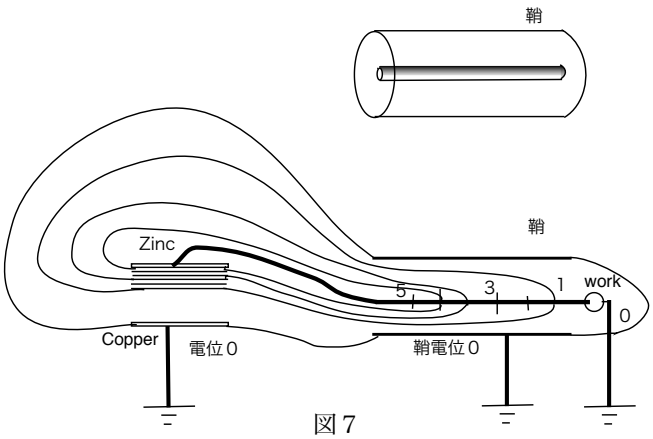


図７

[201] 電場の向きと反対に電流が流れるのは拡散によるのであろう。（エントロピー増大）

は絶縁された物質を通過する。中心の核の部分はエネルギーが移動する手段を与えている。（金属線の周りの物体の電位が０になることにより、等電位線が鞘の中に閉じ込められる形になり、エネルギーは等電位線に沿って流れるので、この場合は結局導線の周りをエネルギーが移動することになる。

二つ目は、回路がただ熱を発生する簡単な場合についての考察である。このときは電場のエネルギーは導線内に移動し様々な変換が行われ最終的には熱や光となって外に出ていく。もしも、Maxwellの理論が正しければ、結局電磁エネルギーに戻るのであるが、しかし、最初の電場のエネルギーとは異なり、今度は決まった速度で波を打つようなエネルギーとして放出されるのである。具体的に言えば、例えば電気による発光のような場合である。これは、興味あることである。つまり取り巻く媒質からアークやフィラメントの方へ電磁エネルギーが移動し、そこにおいてエネルギーが変換され再び初めのエネルギーと同じ形の電磁エネルギーとなって放出されるのだが、今度は我々の感覚で捉えることのできる見える形となっているのである。（形態は同じだがエントロピーが増大したと考えるべきだろう（小林））

（４）熱電対などの回路

熱電対の場合を考えてみよう。右図のように二つの金属AとBがあり、hotとcoldの二点で接触しているとする。この二点は外部から温めたり冷やしたりするのである。

図のように（反時計回りに）電流が流れるとき、hotの部分で電位が上昇し、Bの中では徐々に電位が下がり、coldの点でhotのところでよりは小さいが、電位が急に下り、そしてAのところで徐々に下がる。hotのところで熱は電磁エネルギーに変換される。ここではエネルギーは外に放出される、と言うのは電流の向きと電場の向きが逆であるからである。（Bの方が電位が高くAの部分のほうが電位は低い。）ここから出たエネルギーは、等電位線に沿って伝わりABの各点でジュール熱に変換する、さらのその他の幾つかのエネルギーはcoldの点に移動しペルチエ効果を生じる。（coldの点では電磁エネルギーが熱エネルギーとなるので、電流を流し続けるためには、冷却させる必要がある。）

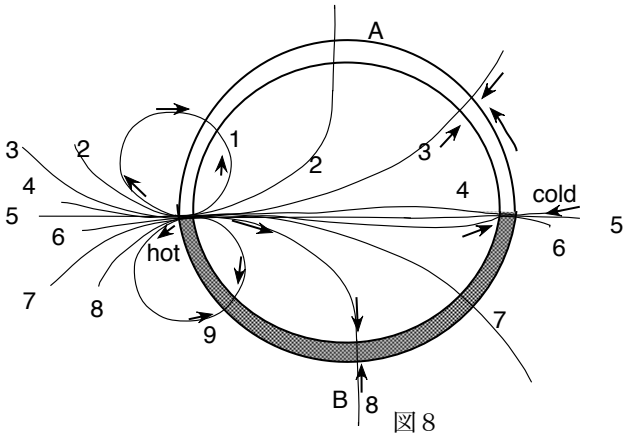


図８

次のこの回路をすべて同じ温度にしてBの一部に電池を入れて電流を流すことを考える。右の図がそれである。C点はhotでD点はcoldである。電流を流すと、C点では温度が下がる傾向にあり、D点では温度が上がる傾向にある。AからBに移動する時、C点では電位が急に上昇しD点では電位が急に減少する。C点で上昇しその後は徐々に減少していくのであるから、C点の前後では同じ電位になるところがある。そのようなことを考えると、この場合の等電位線は次ページ図９のようになる。

エネルギーの流れは矢印のようになる。C点では電場と電流が逆向きなのでエネルギーを放出し温度が下がる傾向にあり、D点ではエネルギーを吸収し温度が上がる傾向にある。電池はエネルギーを放出しその他の点はエネルギーを吸収する。

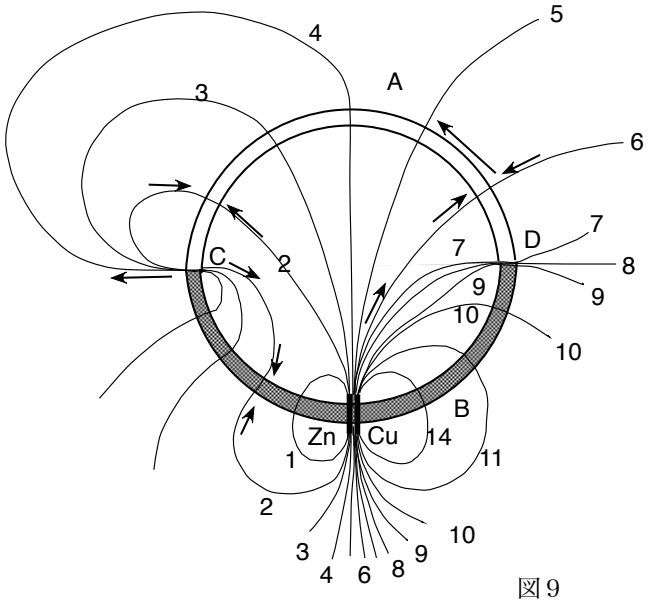


図9

ポインティングのこの議論は極めて重要である。我々が授業で電場のエネルギーについて教えるときに、エネルギーの流れが以上のようになっていることを意識していることは極めれ稀である。このことに関する認識の不足は、事柄を正確につかむ上で大きな欠陥となっている。その結果、指導上あやふやな言動を行うことになり、生徒諸君に誤った概念をもたせることになっているようにおもわれる。少なくとも、理解する上で十分な内容に達していないことは明らかで、このことが最初に述べた電磁場のエネルギーについての不確定な表現となっていることと無関係ではない。

４．電磁波の発生とその確認　Hertz[202]

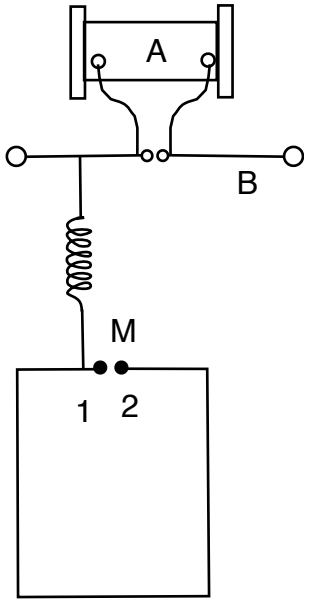
（1）非常に速い電気的振動について（１８８７年）[203]

Maxwellの理論の重要な帰結は電磁波の予言であるが。しかし、Maxwell自身は光の電磁波説を述べているが電磁波の発生についての具体的な議論については行っていない。Hertzは導線を伝わる電気現象と導線の空隙に起こる火花放電について実験的考察を進めていくうちに、空間を伝わる電磁波の存在に気づいていった。その電磁波はMaxwellの理論がもっとも適切でなおかつその理論をより簡潔に表現することに成功した。ここでは、まずHertzの実験的研究を追うことを主眼としながら、理論について概要を述べることとする。参考にするのは、「電気力の伝搬について」と題する論文

[202] UNTERSUCHUNGEN ÜBER DIE AUSBREITUNG DERELEKTRISCHEN KRAFT.
この論文は英訳がある。061Electric_Waves.pdf

[203] Ueber sehr elektrische Schwingungen

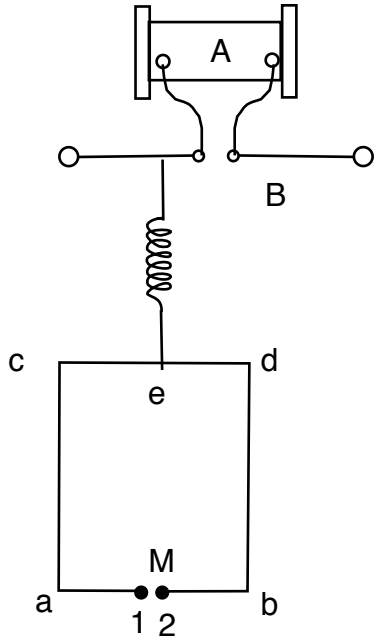
集第２巻に収録されている論文である。この論文集の１は、序章の意味を持ち論文集全体の大まかな描写となっている。我々は第２章「急激な電気振動について」（Annalen der Physik1887) の論文から見ていくこととしよう。



これまでに、導線の自己誘導とコンデンサーの電気容量によって導線の中に電気振動が生じることは知られていた。ライデン瓶の放電が振動現象を示すことはその代表的な例であった。Hertzはより速い振動を起こすことによって生じる様々な現象を研究しようとしたのである。

「ある条件のもとでそのような（非常に早い）振動をおこす事ができ、そのような振動はある強さのもとでは遠隔作用を観察できることを示している」

研究しようとしている振動は１秒間に$\approx 100\times 10^6 = 10^8$くらいの振動であり、これは音響の振動と光の振動の中間に値する。通常の誘導コイルによる火花放電に付け加えて、Riessのsprak-micrometerを使用した。micrometerは空隙の隙間を調節し火花を観測するものである。右図のAは誘導コイルであり、Bは放電路、Mはmicrometerである。誘導コイルを作動させると放電路で放電が起こるだけでなくつながっている導線全てで行われ、micrometerでも放電が行われる。さらに実験を遂行するためにもっと強力なラウムコルフの誘導コイルと大きなブンゼンの電池を用いて火花を大きくして実験を行った。

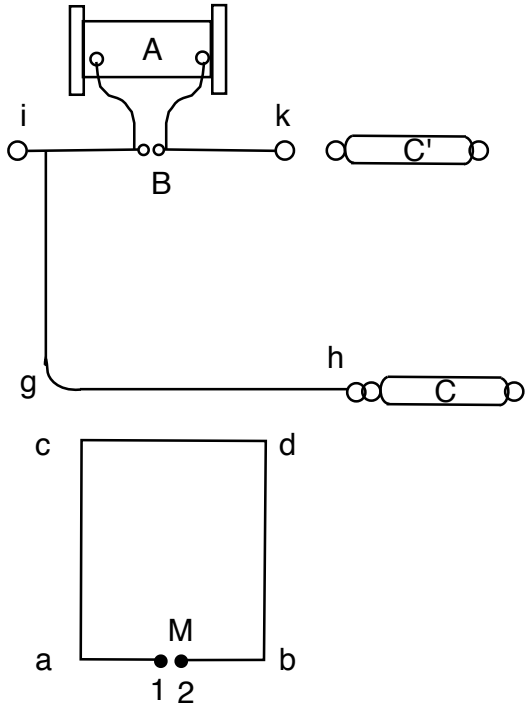


この実験において、二次コイルと接続される部分の位置がMでの放電に大きな影響を与えることがわかった。すなわちMの近くではなく、そこから離していくとだんだん小さくなり、図７のように、反対の位置にまで来ると全く放電しなくなる。さらにそのeの位置から少しずれると放電が起こることがわかったのである。これは、おそらくMの１と２に衝撃が到達するのが同じだと電位差が生じないで時間がずれると生じるからだとHertzははじめは考えた。しかし、間もなく、それでは説明できない事実がわかった。つまり図７のように接続してMに放電が起きないようにした時、Mの１または２のどちらかに金属を接続したところまた放電が開始したのである。これは、電位の衝撃が伝わるのに時間差があるという考えでは説明できないのであった。さらに同じ導体をMの反対の方に接続すると放電は再び消えたのである。「枝のうち一つを数センチメートル切り取りそのかわりコイルを挿入すると火花が発生する。

同じ長さのコイルと他方の枝に同様に挿入すると火花が消える」ことから、金属（球）だけでなく、コイルもまた同様の働きを示すことがわかった。これらのことからHertzは電気振動が原因でありeとMの左右で振動が同じ時に火花が消滅すると考えた。

電気振動の共振が原因であるとするならば弱い力でも生じさせることができるので、例えば直線の一部の近くで弱い振動を起こしても火花を起こすことができるほどの強い振動を得ることができるかもしれないという予想のもとに、次のような実験を考えた。

つまり、今までと同様に二次回路を考えるが今度は一次回路とは切り離され、独立の回路とした。このマイクロメータを備えた閉じた回路こそが、その後の電波を受信する回路となるのである。



「この考えを解決するために、私は観察された電気的運動が隣接する導体の中に対応する大きさで見られないかどうかを調べることにした。」

この実験を行うために、最初の実験で分岐に使用した矩形の回路をもう一度使用する。ただし、今度は誘導回路として使用するのである。（このマイクロメーターを備えた閉じた回路こそ、その後の電波を受信する回路となったのである）。右図の導線ikのiの近くから導線ighを図のように伸ばすのである。二次回路abcdをghとcdが平行に参なるように置き、その間の距離は3ｃｍであった。誘導コイルAによってBに火花放電を起こす時、誘導コイルの導線と離れている二次回路のマイクロメーターの導線は離れているにも関わらず、マイクロメーターMに放電が起こることを観察した。

この放電の原因は電磁誘導か静電気力であるが、静電気力ではあり得なかった。なぜなら、導線を伝わる電流が小さく従って蓄えられる電気量も小さいにも関わらず活発な放電が見られたからである。この現象を更に詳しく調べるために、右図のようにｈに導体Cを接続した、放電は極めて活発となった。しかし、この導体Cをｇに接続しても放電は活発にならなかった。静電気力が原因ならｈとｇでは同じになるはずであるから、Cの静電気力がMの放電の原因ではないことは明らかである。放電の原因が静電気力ではなく電気誘導であるとしてもその電気の移動が振動的であることがもう一つの大きな要因として関係しているのではないかという想像が働く。「私はそこで協力は振動を生じさせるために適切になるように条件をさまざまに工夫した」。一つは、図８において、ｋにも導体C’を接続した。そして、Bの間隔を調節した。C’は初めの導体C

とほぼ同じ大きさとした。この結果、火花は再び非常に活発となった。Mのノブを調整して火花が生じる距離を測定すると、始めよりも大きくなった。導体C'を接続して生じるそのような効果は振動的な効果である。と言うのは、Cからの放電をC'が受ける事による効果であると考えることができるからである。振動的効果である仮定するならば、一次導体を矩形ではなく直線状にしても同じことが起こるのではないかと考えて、実験装置を図２で示されるものとした。すなわち、導線を直線として強力な振動が生じるようにしたのである。一次導体の導線の太さを2ｍｍとし、両端の導体CC'の間の距離は３ｍであった。その中央に誘導コイルを接続した。誘導される二次回路は以前と同じで横が80ｃｍ縦が120ｃｍであった。この場合は二つの導線の間を50ｃｍに引き離しても長さ2ｍｍの火花を観測することができた。距離を長くすると急激に弱くなったが1.5ｍの距離でも連続的な火花を観測することができた。この二つの系の間を人が移動してもなんの妨げにもならなかった。この放電はCC'に蓄えられた電荷による静電気力ではなく、二次導体の矩形に流れる電流によることは例えば矩形の半分を取り去ってしまえば放電は起こらなくなってしまうのである。

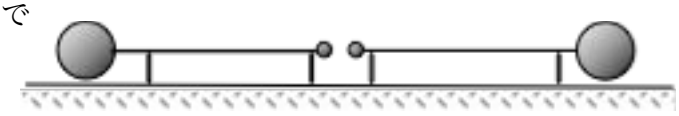


図1

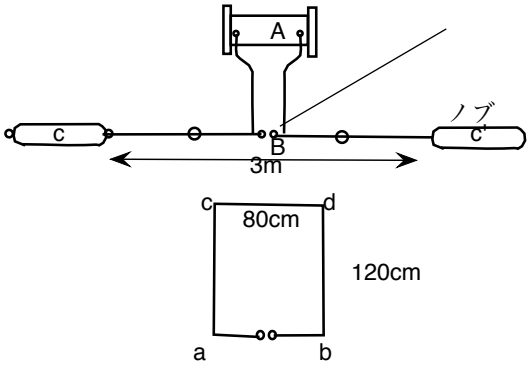


図2

二次回路を閉じた回路ではなく開いた直線状にしても同様の現象は生じる。例えば一次回路の導線より若干短い直線の導線の端に、直径10ｃｍ程度の導体球を中央にマイクロメータを取り付け二次回路とし、一次回路二次回路を平行に置くのである。

この実験の解釈には注意が必要である。すなわち、今度は回路が閉じていないので静電気からの影響は無視できないからである。事実一次コイルの放電器のノブを引き離し放電を行わないようにする時でも二次コイルのミクロメーターには弱いが火花を確認することができる。これらは静電誘導の効果を表している。この効果を取り除くためにはミクロメータのノブのところに湿った糸を張り渡せばよい。大きめの抵抗は急激な振動では球を帯電させるには電流が少なく、電磁誘導効果は比較的影響が受けないからである。また二次回路が遠くはなれたところでは、静電誘導の減少のほうが電磁誘導の減少より大きいのでこの場合も有効である。ここまで述べてきた二次回路と云われているものこそ、現在の受信機の原始の形態である。

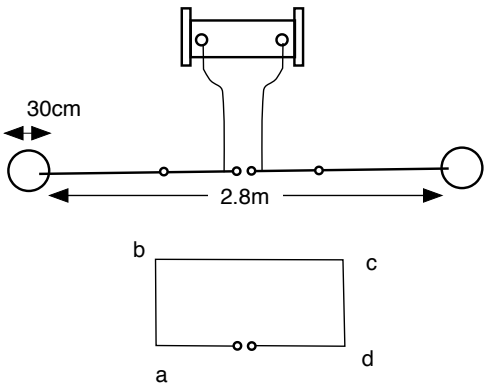


図３

次にHertzは、二次回路に生じさせる原

因は一次回路の電磁的効果だけではなく振動の共鳴が大きく関係していることを調べている。

前ページ図３はその実験装置で、ab、cdの長さは一定にしておいて、横方向の長さを色々変え、自己誘導係数を変化させ共鳴の様子を探る。右のグラフは、その実験結果である。

横軸は導線全体の長さであり、縦軸は二次回路の放電の長さである。マイクロメーターを調整して安定して放電する最大の長さを求めた。測定値は常に不確定であったがこの不確定さによって結果の一般的な性質を損なうものではない。この結果はいわゆる共鳴曲線である。

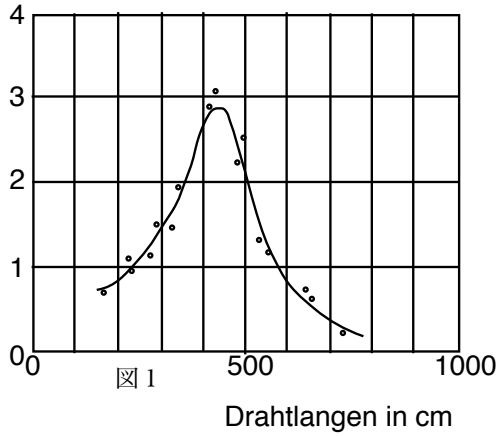


図１

閉じた回路で振動が起こる場合、前進する波と反対方向への波の重ね合わせによって定常波が生じる。定常波はいわゆる節を構成するが、Hertzはこの節を次のように測定した。

まず小さな絶縁された導体球を導線の近くに持っていくのである。小さな球の平均のポテンシャルは導線のその近くの部分のポテンシャルと感知できるほど差ができることはない。ノブと導線との間の放電はその部分が平均より十分大きな振動によって生じるポテンシャルによって行われるのである。こうして、活発な放電は節の部分でしか得ることができない。つまり小さな絶縁された導体球を持っていった時放電が起こる場所が節である。

Hertzは最後に導線内を伝わる波の理論的考察をしているが、それについて簡単に見てみよう。手がかりは、W.Thomson,v.Helmholtz,Kirchhoffが証明した開かれた誘導コイルとライデン瓶の放電による振動についての理論である。彼らの理論[204]によれば、導線内の振動の周期はｃｇｓ単位系では

$$T = \pi\sqrt{LC}\,/\,c$$

となる。ここで、Lは自己誘導係数、Cは（端の球の）電気容量、ｃは光の速さである。まず、端の球の半径は15ｃｍであるから、$C = 15cm$ である。（ｃｇｓ系においては半径そのものである。ちなみにMKS単位系では、$C = 4\pi\varepsilon r\left[F\right]$ である。導線は半径が5ｃｍ長さが $l = 150cm$ であるからノイマンの公式 $L = \iint \frac{\cos\theta}{r} dsds'$ を用いて、これはMaxwellの式によって $L = 2l\left(\ln\frac{4l}{d} - 0.75 \right) = 1902cm$ となった。これらのLCの値を用いて計算すれば、

$$\pi\sqrt{LC} = 531cm$$

[204] ｐ．167参照

となる。これに光の速さを代入すれば、振動数は$4.77\times10^{2}\times10^{6}$秒となる。これは我々の最初の値と矛盾しないことがわかる。こうしてHertzは、導線を伝わる電気の振動について観測と実験が一致することを見た。さらに、この実験によって重要な副産物が得られた。それは、閉じた導線の回路に空隙を作りマイクロメーターを用いて空隙を調整することにより導線の付近の電場の様子を共振の現象を利用して観察することができるということである。このことが次の実験で大きな発展を遂げることとなる。

（2）有限の速度で伝わる電磁作用について（１８８８年）[205]

１８８８年にはさらに重要な一歩が進められた。「有限の速度で伝わる電磁作用について」（Annalen der Physik 1888)がそれである。この実験はまさにその題名の通り電磁波の伝わる速度が光の速さと同じであり、電磁波が光の一種であることを示唆する研究である。

実験装置は右図のとおりである。

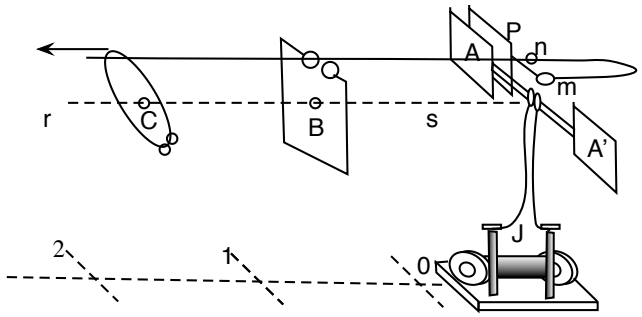


図1

「一次導体A,A'は二枚の真鍮の板からできている、一辺は40ｃｍである。それは60ｃｍの導線で結び付けられている。導線の中央に強力な誘導コイルJによって振動的な火花放電を生じている。導体は床から1.5m高さであり導線は水平に張られている。基準線としてｒｓで水平な直線を表すとする。さらに、火花の空隙から45ｃｍ離れた基準線の上にゼロ点として点を決める。（0）」

この導線に波を起こすのである。PはAと同じものでできていて、Aに蓄えら得ている電荷によってP上に電荷が誘導され、その結果が導線ｍｎと伝わっていくのである。AとPの距離を調整することによって、波の強さを調整することができる。

「実験は大きな講義室で行われた。そこでは基準線から12m以内にはなんの備品も置かないこととした。実験期間中暗くした。

二次導体はあるときはCでそれは35ｃｍの半径の円、またあるときはBで60ｃｍの辺を持った正方形であった。火花の空隙はネジで自由に調整できるものが付けられた。両方の火花の空隙はこれで調整できる。正方形のBの場合はレンズを使用した。両方共一次導体の振動と共鳴した。電気容量と自己誘導係数によって３つの導体の振動数を1.4×10^{8}Hzとした。」（註これは普通の振動数の半分である。）

実験は、この導線を伝わる波と放電から直接伝わってくる電磁作用の干渉を調べ、導線を伝わる波の速度から電磁作用の伝わる速さを測定しようとするのである。

---

[205] üeher die Ansbreitungstgeschwindiglveit der elektrodynamisehen Wirkungen Hertz

まずは導線を伝わる波の速さを測定する。それについては、Hertzの測定の以前に幾つか測定が行われていて、おおむねその値が得られていた。

「1850年にFizeauとGounelle,は非常に正確な方法を用いてこの速度の値が鉄線の場合は$100{,}000km/s=1.0\times10^{8}m/s$銅線の場合は$180{,}000km/s=1.8\times10^{8}m/s$であることを見出した。1875年W.Siemensはライデン瓶の放電を用いて、鉄線においては$200{,}000km/s=2.0\times10^{8}m/s$から$260{,}000km/s=2.6\times10^{8}m/s$であることを見出した。他の実験結果も同様な結果となった。」

Hertzの実験は次のとおりである。

「我々の実験ではｎからの導線は窓を突き抜けて60m空気中を通過してその端は接地した。特別な実験においてはこれで十分であった。この導線の近くに円形の金属導体の線を持ってくると、誘導コイルの放電によって、この円形に小さな放電が生じる。火花の強さはAとPの間の距離の変化によって変わる。導線を伝わる波の周期は一次導体の振動の周期と同じであるが、このことは、近くに持ってきた二次導体によって知ることができる。すなわち、このことによって大きい場合も小さい場合も他の金属回路より強力な火花が生じる。波が距離や時間において規則正しいと言うことは定常波の形によって示すことができる。これらのことをするために、私達ははじめの位置からの距離を自由にできるように線の端を決められるようにしておくことが必要である。そして、その近くに二次コイルをその面が線を含み、火花の空隙が線の方を向くようにする。その結果導線の端において二次導体のながの火花は非常に小さくなるのを見た。それらは導線の中を視点に向かって移動する時それに従って増大していった。しかし、ある距離のところではそれらは減少して0に近くまで小さくなったがその後再び大きくなった。こうして我々は節（の点）を見つけた。そうやって、つまり、線の全体の長さ（ｎ点から測るのだが）はこの長さの倍数にし、実験を繰り返して、波の波長を測定するならば、全体の長さは節によって別々の波に分けられることがわかった。それぞれの節の点を十分の注意して分別して定め、その位置を紙馬で示すならばこれらの距離がほぼ等しいことがわかり、実験はかなりの程度正確であることが認められた。」

「我々の特別の場合において、基準線においてゼロ点からの距離が８ｍあるいは5.5mいずれかの距離の長さで導線を切った時、節の点は非常に明瞭になった。前者の場合（8mの場合？）節の点を紙馬を用いて決めたが、そのときは-----0.2m、2.3m、5.1m、そして8mであった；後者の場合はゼロ点から測って-----0.1m、2.5m、そして5.5mであった。このことから、自由導線の半波長は2.8mより大きくズレることはないと言える。我々はPから数えた最初の波長が残りよりも小さく現れるが、板の存在と曲がった導線を考慮に入れれば驚くことはない。振動の周期は$1.4\times10^{-8}s$であり波長（今の場合節から節まで）は今の実験で2.8mであるから導線を伝わる波の速さは$2\times10^{8}m/s$となる。$v=\dfrac{2.8}{1.4\times10^{-8}}=2.0\times10^{8}m/s$」

次に空気中を直接伝わってくる電気作用、磁気作用を測定する。測定は、矩形と円形の二次導体を用いるが、今度は伝わってくる作用の方向と二次導体の置き方が問題となる。次の図はこの二次導体の置き方を示したものである。

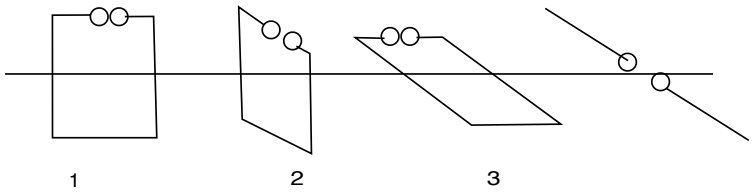


図1

二次導線に火花が生じる理由は、一つは静電気力、もう一つは電流による電磁誘導の力である[206]。

「1番目の配置では二次回路に火花は生じない。2番めの配置ではギャップが水平面の上でも下でも生じた。ただし、ギャップが基準線を含む水平面の中に来たときは生じなかった。一次回路からの距離が大きくなる時、火花は最初は急激に後ではゆっくりと減少していった。最大の12mになった時これ以上講義室は大きくなれないのであるが、この位置の時は二次回路の中の空隙の反対側の部分の電気的な作用にその主たる部分が負っている。全力は静電気の部分と電磁気の部分に分けられる。短いところでは前者の静電気部分が後者の場合は電磁誘導の力が優勢であることは疑いない。」

二番目の位置では電磁誘導の力が働かないはずであるが、中心の位置から少しでもずれれば微弱な力が働くので、実験的には上記のようになるのであろう。

電磁力を見るには、二次回路の面を水平にしてその中心を基準線に置く。これを第三の位置と呼ぶ（上図1参照）。特に円形導線（右図2）を用いてその中心を基準線のゼロポイントに置くとする。火花ギャップをゆっくり回転させるとギャップのすべての位置において活発な放電が行われた。その放電は最も大きいときはギャップが一次導体に面したときで6mmに達した。その後小さくなりギャップが最も遠い位置ではだいたい3mmであった。導体が静電気力だけの影響であるならばベースラインの間の位置にあるとき消滅するはずである。静電気による影響の上に電磁力による影響が重ね合わさったとし、そしてここでは電磁力の影響が大きいと考えることができる。なぜなら電磁力は一周して同じ方向に働いて一定

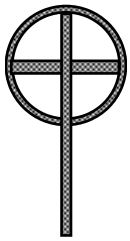


図2

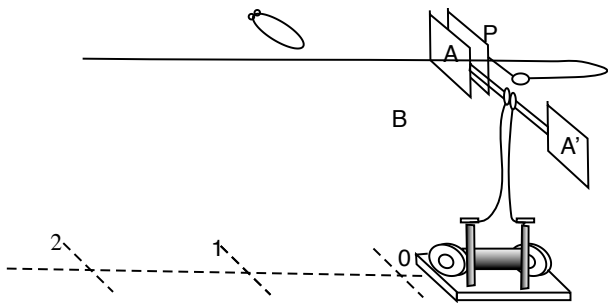


図3

[206] このような説明は古い考え方が入っている。Hertzは後でマックスウェルの方程式からのみでこれらの現象を説明している。

の積分値を持つからである。この生産力はギャップの位置とは無関係である。それに対して静電気力はAA'の向きに依存する。

さて、われわれの目的に対しては次のことが重要である。火花ギャップが基準線から右または左に90°回転させたとき、火花は全体として電磁誘導の力が起原となり閉じた回路で0とならない。であるからこの特別な位置において電磁気効果を研究することができる。それは一次導体の近いところでもそうである。

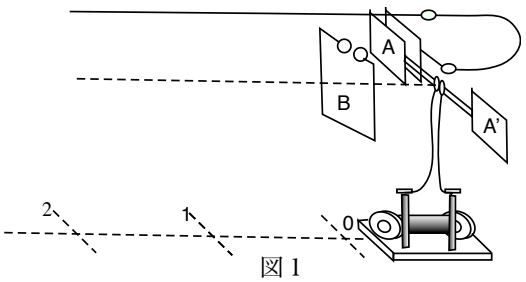


図1

これらの装置を用いて、導線を伝わる波と、直接伝わる作用とを干渉させることとする。一つの方法は次のとおりである。

矩形Bを二番目の配置のようにしてゼロ点に置きしたがって放電ギャップは最上位になる。導線の中の波は何の影響も与えない（図１）；一方直接作用（空気を伝わる作用）は2mmの長さの放電を生じる。もしBを垂直の軸の周りに回転させ第一の配置にするとするならば、今度は逆に一次振動は直接的影響を与えない（図２）；しかし、導線の中の波はPをAに近づけることによって、長さが2mmの火花を火花を誘導する。その中間では両方の原因によって火花が生じる、そして、位相のそれらの差に応じて互いに強くなるか弱くなる。そのような現象は実際観察することができる。

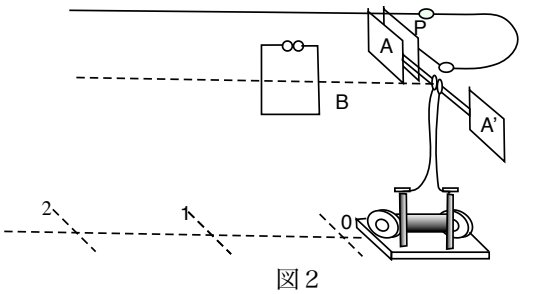


図2

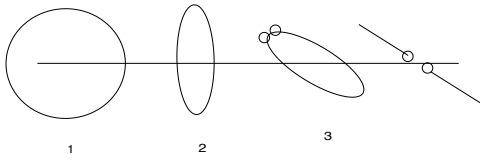


図3

さらに次のような実験も可能である。

二次回路としてC（円形コイル）を第三の配置において（図３参照）干渉を生じさせようとすれば、まず、直線をこれまであったところから取り除いてAまたはA'のそばを通りCを通る水平面内に置く。特に、絶縁されたトングでつかみCの一つの側と別の側面のそばを交互に導線を通したときは効果的である。観測された結果は次のとおりである。----もし波が板Pが置かれている側にそって通っているとき（右図4）存在していた火花が消滅するするなら、反対側を通った場合（右図5）は今まであった火花を強めることとなるのである。（AA'が作る磁場に

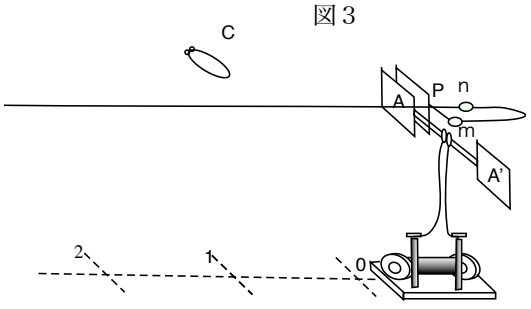


図4

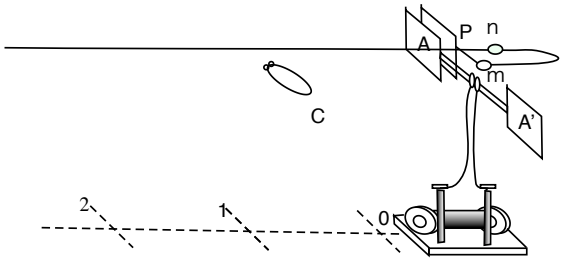


図5

よる電磁誘導と導線が作る電磁誘導を重ね合わせる。AA'の作る磁場は前ページの図４図５で変わらないが、導線が作る磁場は反対となる）。両方の結果は円形の火花空隙の位置がどこであっても常に起こる。

火花空隙の位置によらないという事実は、振動の向きがここでは電磁気力によって決定されるという我々の仮定を確信させるものである。今述べてきた干渉現象はｍとｎの間の導線の長さが100ｃｍから400ｃｍ取り替えた時符号は反対となった。

実験結果は、7.5ｍの距離ごとに干渉の符号が＋からーに変わる。このことから7.5ｍ進む毎に電磁作用は導線の波を乗り越えていくことがわかる※。前者が7.5ｍ進む間後者は $7.5-2.8=4.7m$ 進む。この距離は $1.4\times10^{-8}s$ 間の間に進む距離であるから空気中を進む作用の速さは320，000ｋｍ/ｓであることがわかる。

物理学生　高校生への註

二つの波を重ね合わせると、振幅が距離の正弦波となる進行波ができる（下の式）。これから見ると、4.47ｍおきに節となる。

$$A\sin 2\pi\left(\frac{t}{T}-\frac{x}{\lambda_1}\right)+A\sin 2\pi\left(\frac{t}{T}-\frac{x}{\lambda_2}\right)$$
$$=2A\sin 2\pi\frac{1}{2}\left\{\left(\frac{t}{T}-\frac{x}{\lambda_1}\right)+\left(\frac{t}{T}-\frac{x}{\lambda_2}\right)\right\}\cos 2\pi\frac{1}{2}\left\{\left(\frac{t}{T}-\frac{x}{\lambda_1}\right)-\left(\frac{t}{T}-\frac{x}{\lambda_2}\right)\right\}$$
$$=2A\sin 2\pi\frac{1}{2}\left\{\frac{2t}{T}-\left(\frac{1}{\lambda_1}+\frac{1}{\lambda_2}\right)x\right\}\cos 2\pi\frac{1}{2}\left\{\frac{1}{\lambda_2}-\frac{1}{\lambda_1}\right\}x$$

$$=2A\sin 2\pi\frac{1}{2}\left\{\frac{2t}{T}-\left(\frac{1}{\lambda_1}+\frac{1}{\lambda_2}\right)x\right\}\cos 2\pi\frac{1}{2L}x$$
$$\frac{1}{L}=\frac{1}{\lambda_2}-\frac{1}{\lambda_1}$$
$$\frac{1}{7.5}=\frac{1}{2.8}-\frac{1}{\lambda_1}$$
$$\lambda_1=\frac{7.5\times2.8}{7.5-2.8}=4.47$$

この値を使えば、

$$v=\frac{4.47}{1.4\times10^{-8}}=3.2\times10^{8}m/s$$

こうして、実験によって次のような結論が得られる。

１．直接作用は、電場の作用と電磁作用の二つがあるが、電場の作用は急激に減少し遠いところでは、電磁作用のみが生き残ること。

２．電磁作用は、その速度がほぼ光の速さと一致すること。

このことから、Hertzは、Maxwellの理論が他の理論より優位の位置にあるという確信を持つに至った。Hertzは次の「Maxwellの理論に従った電気振動の力について　１８８９年」で理論的な考察を遂行していった。

（3）Maxwellの理論に従った電気振動の力について　（１８８９年）[207)]

実験的研究においてMaxwellの理論に確信を持ったHertzは、この論文においてMaxwellの理論の全面的展開を行った。その概要を見てみよう。

まず冒頭で次のように述べる。

「私がこれまで行ってきた『速い電気振動の実験』の結果はMaxwellの理論が他のすべての理論よりも優れているという位置づけを与えてきた。にも関わらず、私はこれまでこれらの実験について初めには古い理論で解釈を与えてきた、つまり、現象を一部分は静電気力で他の部分は電磁気力による共同作用によって説明するという方法である。Maxwellの理論にとってその純粋な観点からはそのような区別はなじまない。このことから、現象をこのような古い考えを持ち込まないで純粋にMaxwellの理論によって説明できることを示したいと思う。この試みが成功するためには、静電気力が別に伝わるという、Maxwellの理論に於いては意味のないことを同時に解決する必要がある。」

Hertzはまず、エーテルのみ存在する空間を考える。そして、そのエーテルの運動を記述する方程式として次の４つの式をアプリオリに仮定する。エーテルの運動を記述するのにファラデーやMaxwellは巧妙な仕組みを考えたが、Hertzはそれを一切否定し、純粋にエーテルが従う運動方程式と考えたのである。Sommerfeld　はこの立場は当時Maxwellのエーテルについての複雑な模型に悩まされていた人々から熱狂的に受け入れられたとした。また、ボルツマンは、これらの方程式の美しさに対して、”これを書き記したのは神であろうか”と書いた。その4つの式は（１）真空の変位電流による磁場の式。（電流の周りの磁場の式）、（２）ファラデーの電磁誘導の式　（３）は磁極が存在しない時磁力線が閉じているという式、（４）は電荷が存在しない時電気力線が閉じているという式である。Hertzはこれらの式を説明の必要のない公理として与えた。

物理学生への註

そのHertzが書いたマックスウェルの式は次のとおりである。

$$(1)\begin{cases}\dfrac{1}{c}\dfrac{dH_x}{dt}=\dfrac{dE_z}{dy}-\dfrac{dE_y}{dz}\\[2ex]\dfrac{1}{c}\dfrac{dH_y}{dt}=\dfrac{dE_x}{dz}-\dfrac{dE_z}{dx}\\[2ex]\dfrac{1}{c}\dfrac{dH_z}{dt}=\dfrac{dE_y}{dx}-\dfrac{dE_x}{dy}\end{cases}\qquad(2)\begin{cases}\dfrac{1}{c}\dfrac{dE_x}{dt}=\dfrac{dH_y}{dz}-\dfrac{dH_z}{dy}\\[2ex]\dfrac{1}{c}\dfrac{dE_y}{dt}=\dfrac{dH_z}{dx}-\dfrac{dH_x}{dz}\\[2ex]\dfrac{1}{c}\dfrac{dE_z}{dt}=\dfrac{dH_x}{dy}-\dfrac{dH_y}{dx}\end{cases}$$

---

[207] Die Kräfte elektrischer Schwingungen behandelt nach der Maxwell’schen Theorie

$$(3)\frac{dH_x}{dx}+\frac{dH_y}{dy}+\frac{dH_z}{dz}=0 \qquad (4)\frac{dE_x}{dx}+\frac{dE_y}{dy}+\frac{dE_z}{dz}=0$$

※（1）と（2）は全く対称に書かれているように見えるが、右辺の添字が入れ替わっていることに注意

次にHertzは、エーテルのエネルギーを表す式として、次の表式を導入する。すなわち単位体積あたりの電場のエネルギーとして

$$E_{電場}=\frac{1}{8\pi}E^2\Delta V \quad (\text{cgs}) \quad \cdots \quad E_{電場}=\frac{1}{2}\varepsilon E^2\Delta V \quad (\text{mks})$$

磁場のエネルギーとして

$$E_{磁場}=\frac{1}{8\pi}H^2\Delta V \quad (\text{cgs}) \cdots \quad E_{磁場}=\frac{1}{2}\mu H^2\Delta V\,(\text{mks})$$

を与えた。ただし、体積⊿Vに場が一様に分布している場合である。

（註）MKS単位系を用い、成分で電場磁場の強さを用いれば

$$E_{電場}=\frac{\varepsilon}{2}\int E^2 d\tau=\frac{\varepsilon}{2}\int\left(E_x{}^2+E_y{}^2+E_z{}^2\right)d\tau \qquad E_{磁場}=\frac{\mu}{2}\int H^2 d\tau=\frac{\mu}{2}\int\left(H_x{}^2+H_y{}^2+H_z{}^2\right)d\tau$$

積分表現は一様に分布していないときである。

Hertzは、この二つのエネルギーを合わせて時間微分し、Poyntingが示したエネルギーの流れを簡潔に導出してみせる。

（物理学生への註）Hertzがやったことを、MKS単位系を用い現代的に書けば次の式である。

$$(1)\ \mathbf{H}\frac{\partial\mu\mathbf{H}}{\partial t}=\mathbf{H}rot\mathbf{E} \qquad (2)\ \mathbf{E}\frac{\partial\varepsilon\mathbf{E}}{\partial t}=-\mathbf{E}rot\mathbf{H}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left\{\frac{1}{2}\int\left(\mu\mathbf{H}^2+\varepsilon\mathbf{E}^2\right)d\tau\right\}=\int\left(\mu\mathbf{H}\frac{\partial\mathbf{H}}{\partial t}+\varepsilon\mathbf{E}\frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t}\right)d\tau$$

$$\mu\mathbf{H}\frac{\partial\mathbf{H}}{\partial t}+\varepsilon\mathbf{E}\frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t}=\mathbf{H}rot\mathbf{E}\ -\mathbf{E}rot\mathbf{H}=div\left(\mathbf{H}\times\mathbf{E}\right)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left\{\frac{1}{2}\int\left(\mu\mathbf{H}^2+\varepsilon\mathbf{E}^2\right)d\tau\right\}=\int div\left(\mathbf{H}\times\mathbf{E}\right)d\tau=\int\left(\mathbf{H}\times\mathbf{E}\right)\cdot d\vec{\omega}$$

電荷、電流を除いた分だけ極めて簡潔な表現となっている。

次にHertzは、上記のマックスウェルの式４つを解くことにチャレンジする。一般的に解くのではなく、実験に特化した問題を解く。そのために、直線電流あるいは二つの導体球を並べたものを扱うので円筒座標系(ρ,z,t)を導入した。ρは中心軸からの距離、ｚは軸方向の座標、今の場合軸に対して対称系なので変数はこの二つである。次にHertzはHertzポテンシャルと呼ばれるΠを導入する。

$$\Pi=El\frac{\sin(mr-nt)}{r}$$

Πは結果的には、双極子が構成するあるベクトルで時間で微分するとベクトル・ポテンシャルになるようなものであった。これは、ｒが十分近いところでは、

$$\Pi = -El\sin\frac{nt}{r}$$

この場合は、$\phi = \frac{d\Pi}{dz} = -El\sin nt\frac{d}{dz}\left(\frac{1}{r}\right)$は双極子のポテンシャルであり、従って原点に近いところでは振動する双極子のポテンシャルとなる。いわば、伝達速度は無限大といえる。ｒが十分大きいところではQは、

$$Q = Elm\cos(mr - nt)\sin^2\theta$$

であり、これは、非常に大きいところでは力はどこでも力の原点から引いた動径ベクトルに垂直になっていて、伝播は純粋に横波である。その大きさは、

$$E = \sqrt{E_\rho{}^2 + E_z{}^2} = Elm^2\sin(mr - nt)\sin\theta / r$$

で与えられることがわかった。距離が一定のところでは軸に近づくに連れて減少する。

「こうして、振動から直接伝わってくる作用の波は、振動源に近いところでは静電気力のように、そして、十分遠いところでは$\frac{1}{r}$によって減少する純粋な横波であることがわかる。これはまったく我々の実験結果と一致する。」

さらにこの式から波は光の速さで進むことも確認された。

Hertzは横軸に進行方向縦軸に電流と双極子の振動方向をとりその時の電気力線の様子を作図することを行っている。次の図は、$\frac{1}{8}$周期ごとに$\frac{1}{2}$まで取ったものである。

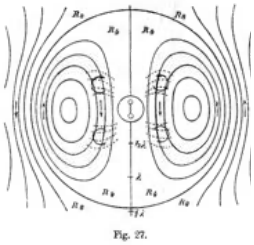


Fig. 27.

$t = 0$

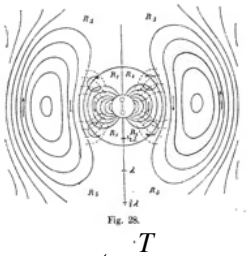


Fig. 28.

$t = \frac{T}{8}$

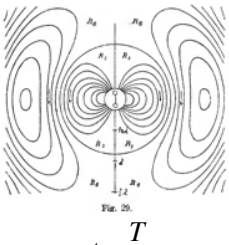


Fig. 29.

$t = \frac{T}{4}$

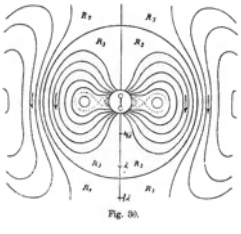


Fig. 30.

$t = \frac{3T}{8}$

t=0では電流が最大で双極子の電気量は0である。その後は双極子より電気力線が見られる。

（４）電気力の放射について（１８８９年）

前述の論文において理論的考察を進め十分遠方では空間を波動として進む横波であることを得たHertzは、直ちにそれを実験的に確認することを行った。そのことの論文が「電気力の放射について」である。

実験装置は右図のとおりである。図35と図36の左側（a）は一次導体の図である。図36の右側（b）は二次導体である。一次導体は直径3ｃｍ、長さ26ｃｍの真鍮の円柱棒を、長さ半分のところで切断し、その間を火花間隔とする、その向かい合った端に

直径２ｃｍの金属球を極として付けてある。誘導コイルには小型のコイルのほうが便利であった。そえでも、一次導体の球の間には1～２ｃｍの長さの火花を与えることができた。実験のためにには３っmの長さの火花を用いた。

電磁波を探知する二次導体は、一つはこれまで用いたような隙間のある円形の導体を用いた。直径は7.5ｃｍ太さは1ｍｍの導線で隙間には直径数ｍｍの真鍮の球を付け、他端は尖らせた。火花の長さな１ｍｍの100分のいくつかである。

もう一つの二次導体は、長さ50ｃｍ直径５ｍｍの真っ直ぐな二本の針金を端と端を５ｃｍとなるようにし、

ここから導線を伸ばし、マイクロメーターがついた火花間隙に

繋いだ。二本の導線は凹面鏡の焦線の位置に置いた。

壁との反射波と直接波の合成によって、壁との距離によって強さが変わる。壁からの距離が8～15ｃｍのときに強くなり、45ｃｍのときは弱めあう。そこで、一次導体において導線を置く焦点の位置は壁から12.5ｃｍとした。（つまり凹面鏡の焦点は12.5ｃｍとなるようにした。）

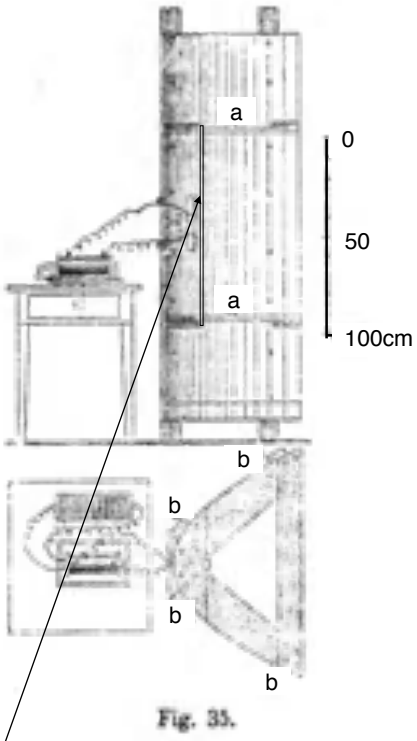


Fig. 35.

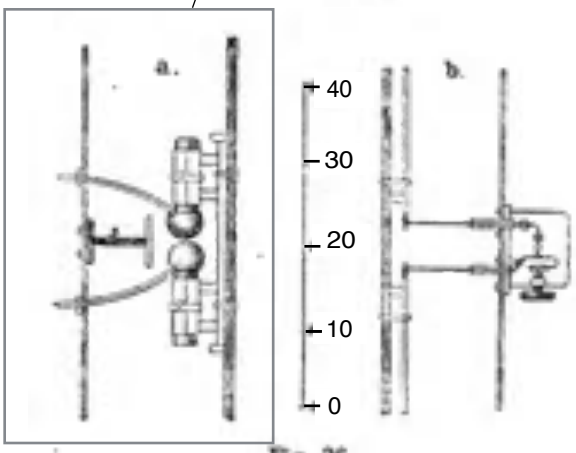


Fig. 36.

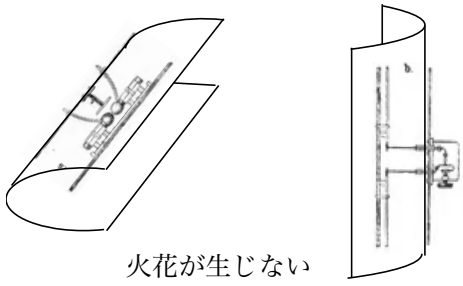
二次導体を、この第一の凹面鏡とまったく同様の鏡を作り、直線の50ｃｍの長さの二本のを導線をこの焦点の位置においた。この装置を利用すればその最大距離は16mであった。さらに反射の実験の結果によれば20mでも火花が得られるということは疑いようもない。

伝播の直進性

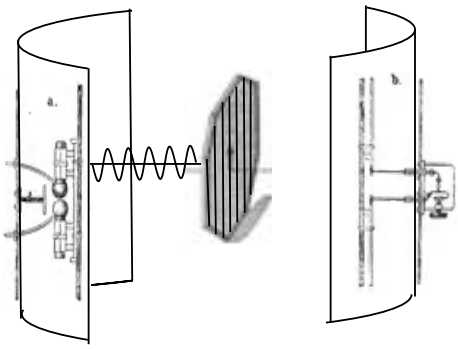
このふたつのかがみの間に高さ２ｍ幅１ｍの亜鉛板の衝立を垂直に置くと、火花は生じなくなる。その間を人が（助手が）通過するときは、火花は弱くなる。絶縁体を置いたときは何の影響も与えないことがわかった。影ができるということは電磁波は直進することがわかったのである。

伝播の偏り

この輻射線（電磁波）が光学と同様に直線に偏っていることは、この発生方法から疑いようがないものであるが、実験によっても証明することができる。発振器の焦線を傾けていくと火花は小さくなり、90°

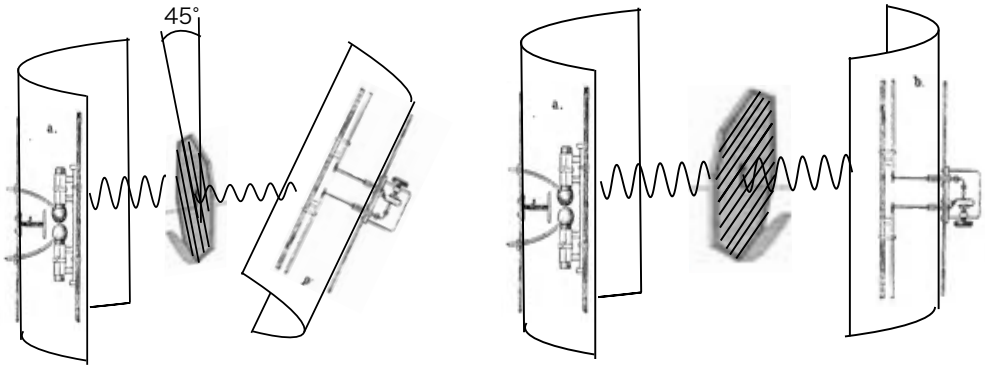

火花が生じない

になると距離を小さくしても火花は生じない。（右図）



次の実験は、間に偏光板を置く実験である。

「高さ２m、幅２mの八角形の木枠を作り、それに太さ１mmの導線を貼った。すべての導線を互いに平行にし３cm間隔にした。二つの鏡の焦線を並行になるようにし、導線の衝立は輻射線に直行するように挿入した時、衝立は二次導線の火花を妨げることはなかった。しかし輻射線に対して、衝立の導線が焦線に並行になるように置くと、衝立は輻射線を完全に遮断した。従って。通り抜けるエネルギーについて考えると、衝立は、この輻射線に対して、電気石板が直線偏光に対するのと全く同じように振る舞うのである。」



弱い火花が生じる　　火花が生じる

上の図のように木枠を45度にして挿入すると、直角にした二次導線に火花が生じた。これは直行するニコルの暗い視野が、電気石片を適当な位置に挿入することによって明るくなることに相当する。

なお、磁気の振動面は電気の振動面に対して直角であるので、輻射面の振動を決めるには、電場の振動か磁場の振動面かを決めなければならないことは明白である。

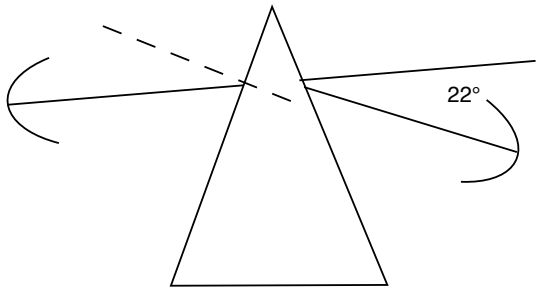
反射

「大きなへやに二つの凹面鏡を隣り合わせに置き、その開口を同じ方向に向け前方３mの一点で集まるようにした。受信機の火花は暗いが、そこに高さ２mはば２mの衝立を置けば壁（衝立）から反射された輻射線によって活発な火花が生じた。衝立の角度を変化させると火花は消えた。」

屈折

絶縁媒質内に入るときに屈折が検出されるかどうかを調べるために、アスファルトのような材質、いわゆる硬質ピッチでかなりおおきなプリズムを作らせた。底面は二

等辺三角形であるが、その１辺は1.2m、頂角は約30°であった。プリズム全体の高さは1.5mであった。プリズムは約600ｋｇであった。



発振器は屈折面の一つにむけて、プリズムから2.6mのところに置いた、そして、屈折面に65°の角度で入射するように配置した。・・・プリズムの底面の重心を中心として2.5mの円を書き、受信機をその円に沿って動かす。偏角が11°から35°で火花が発生し22°で最大であった。

これらの実験を通して、「これまで述べてきた実験は、光、輻射熱、電気力学的波動が同一であるということについての疑いを除くのに極めて適したものである。今後は、光学の領域でも電気の領域でも、この同一性を確信を持って受け入れることから引き出される利点が十分に利用されるであろう。」と述べている。

第５章　電　子

実体としての電磁波の存在の確認は、Hertzの実験と真空における振る舞いについての理論的考察によって明らかにされてきた。一方、電荷については、その客観的実在性は静電気学の初期から確立されて来てはいたが、その具体的な実体については必ずしも明確とはならなかった。フランクリンやボルタによって電荷は金属内に気体のように存在し、それは圧を持つものとして理解された。圧の差によって電荷の移動が議論されたのである。ボルタによって電池が発明され電流が扱われるようになった。この時は、電気分解の現象が主流となったが、例えばデーヴィは、電気の引力によって化学反応を理解した。エールステッドによって電流が磁気作用を伴うことが発見された時は、電気相克つまり正の電気塗布の電気が反対側に乗り越えていく運動と考えられたが、アンペールにおいては、電流が電荷の移動であるかどうかは明確に主張されなかった。それは電流要素の考え方と相入れられないことも有り慎重な態度となった。ウェーバーにおいては電流は荷電粒子の運動であるとの認識はかなり明確にされて、それが大陸での電気力学の基礎となっていったが、ただ、Weberに置いてさえも、導線内の電流は正と負の電気が反対に移動するようなイメージであり、必ずしも、正確な理解は得られていなかった。荷電粒子の存在が実験的に確認されたものではないのでそれはやむを得ないものであった。アンペールと同時代のイギリスのデーヴィの弟子のファラデーは電流こそが電気分解の主役であることを明らかにした。ファラデーは、誘電体の分極と電流とは本質的に同じものであるとみなした。一方そのころオームの画期的な研究が行われたオームの理論は電流が導線内を流体のように移動すること示すものでありそれはフーリエの熱理論を応用したものであった。しかし、なかなか、受け入れられなかった。マックスウェルはファラデーの考えを受け継ぎ、真空もまた誘電体であるとの考え方から、真空の中の分極を考えたために変位電流を導入することはできたが、電荷の移動との間に明確な関連を定めることはできなかった。このことが電流が電荷の移動であると受け入れることを難しくした。このことはHertzが電磁気を理論を立てる上での一定の不十分さとなった。電流として電荷の移動を実際に見ることができないという状況は電流に対する理解を困難にしていった。このような歴史的事情を考えると、現在、教育の現場で、電流が電子の移動であるというような考えが受け入れられない生徒が多くいても全く不思議な事ではないように思われる。歴史的には電流が電子の移動であるという認識はどのように行われていったのであろうか。

Ⅰ　真空放電現象の探求

1．初期の研究　ファラデーとその後継者

研究の出発点は、多くの場合現象の確認から行われる。それは、ギルバートが述べたように書物の中のみからだけを研究対象とするのではなく、事物の中に真実を求めようとす

る姿勢にほかならない。ファラデーの電気の実験的研究はまさにその点に大きな価値がある。後年、電子として認識されるような事物の発見も現象に誠実に取り組むファラデーの姿勢が出発点であった。

（1）ファラデーの放電現象の研究

ファラデーの放電現象の研究は、彼の「感応理論」の確認のために行われた。ファラデーの感応理論とは、近接粒子の理論であり、要するに、現在の場の理論に該当する。つまり、さまざまな電気現象は、電気力線とその作用によるもので、絶縁体の場合は近接粒子の作用による分極によるものであると考える。そして、その電気力線の作用は、絶縁体だけではなく導体にも作用を起こすべきものであった。このことからファラデーは次のように考える。「絶縁に反するものは放電である。放電なる一般用語によって意味される作用または効果は、現在我々が知る限り数種の仕方で生じる」[208]。それはファラデーによれば４つに分類される。すなわち、何の化学的作用を含まない単に伝導（金属による伝導）と呼ばれるもの、これは変位を伴わない。第二は電解放電と呼ばれる。これは化学作用を伴いある程度まで変位するものである（電気分解による伝導）。第三の仕方は火花放電またはブラシ放電であり、その経路中の電媒質粒子の急激な変位があるために崩壊性放電（disruptive discharge)と呼ばれる（いわゆる空中放電）。第四は対流とか運搬放電(conductive discharge)とする（これは、例えば電気を帯びたチリなどによって空気中を移動する放電）。これらの放電現象について研究を進めていくのであるが、われわれは特に第三番目の崩壊性放電（disruptive discharge)についての部分を見ていくこととしよう。ここにはその後の電子の発見につながる研究の発端がある。

崩壊性放電（disruptive discharge)は、さらに火花放電、ブラシ放電及びグロー放電の３つに分類されるとして、それぞれの放電に対して精密な実験と考察が行われる。

第一に、火花放電に対する研究が行われるが、ファラデーは、この研究にはハリスの研究が重要であるとして紹介している。そこでは空気を媒介としたとき、電極の電気量と、空気の圧力密度・電極間の距離に関係し、空気の圧力が小さければ放電する電極間の距離は大きくなる。（簡単な反比例をなすとしている）。ただし、感能力（電場の強さ）は、気体の希薄度にはかかわらず一定であることを強調している。ファラデーの火花放電に関する実験において重要なものは、様々な気体における放電に関する実験である。実験装置は次頁図１のとおりであり、器ａは下部から空気が抜かれて圧力が調整できるようになっている。そして、二つの放電ｕとｖを持ち、距離ｕを調整し一定距離vに於ける放電の変化を調べるものである。この実験はなかなか一定の結果を得ることができず、さまざまな要因によるものではあるのであろうが、ガスの種類によって放電の距離が変わることは明白であるとした。さらに重要なことには、放電の火花の色は気体によって特有なものであることが確認された。例えば、空気中では強い光と青みがかった色で通過する。そして、電気量がさほど大きくない時には、しばしば経

[208] experimental recearch 1319　1838年

路中に薄い部分、あるいは暗い部分を持っていることが見られる。また、窒素中では火花は非常に美しく、空気中と同じ外見を呈する。酸素中の火花は窒素中や空気中よりも白く、水素中では非常に見事な真紅の色を呈している等々である。

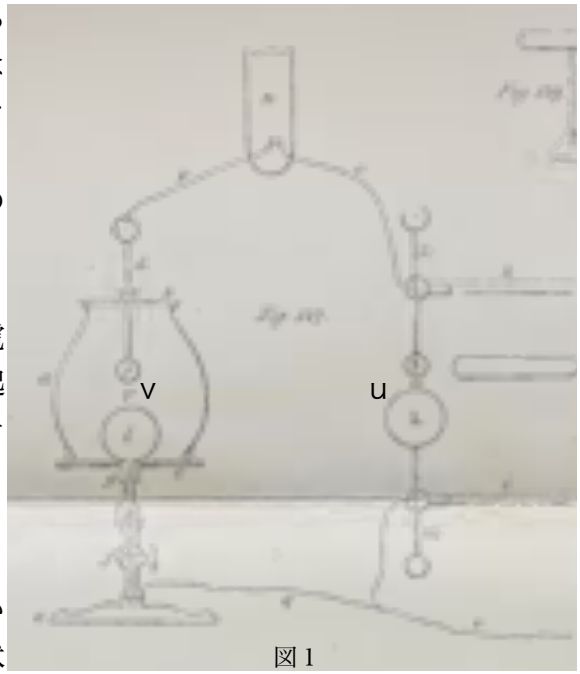


図１

第二の放電はブラシ放電はコロナ放電とも呼ばれている。それは、たとえば、起電機の正の主導体に連結した絶縁導体で、起電機から外側に突出した直径０．３インチの棒を持つもので、その先を丸くするかまたは小球で終われせておくと良好に得らる。それは低い鈍いカタカタいう音とともに、球面からわずかの距離に短い円錐状の輝いた部分が現れ、その外に急に青白い樹枝状のブラシがかすかに動きながら広がりブラシ放電となる。その性質を高めるためには、大きな導体面をその先端に近づけて感能力を増大させるか、端をさらに小さくするか、または前述のように木のような不良導体にする。あるいは起電機と導体との間にブラシ放電を発するような尖端を持った第二導体を置いて、それとの間に火花放電をさせる。また、尖端の周囲の空気を加熱するか空気ポンプにより多少希薄にしても良い結果が得られる。単一のブラシは自分の幅の８倍から１０倍位まで広がり、その存在は瞬間的であり、完全円錐状の根を持っている。（1428）

第三の放電はグロー放電と呼ばれる。「グローとして現れる破裂性放電の形は非常に特殊でありかつ見事であある。」「・・・端を丸くした、直径0.3インチの棒を、自由大気中の中で正に帯電した時その端から美しいブラシを出す。」ことはすでに述べた。「ところが時々それば消えて静かな燐光的な連続グローがその場所に生じ、針金の端全体を覆い、金属表面から空気中にごく短い距離に広がっていた。」つまり、始めは金属の表面を覆うような燐光的な連続的な光がグローである。ブラシからグローへの変化は、気体の希薄化によって起こり、その様子はファラデーによって次のように記述されている。

さらにグローの発生の様子を次のように述べている。

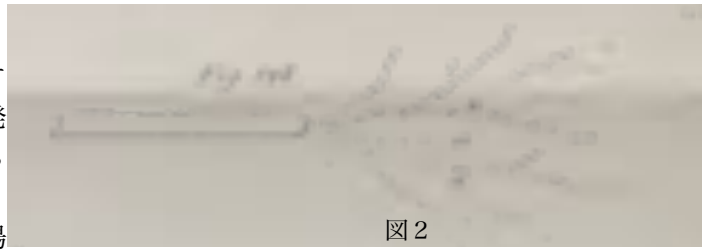


図２

「（起電機の極が）直径0.2インチの棒のときはグローはより容易に発生した。さらに細い棒で、先を尖らない円錐形のときは更にもっと早く生じた。（半径が小さくなれば電場

は強くなる）鋭い尖端を用いたときは空気中でブラシを得ることはできなくなりグローのみであった。正のグローと正の星状火とは事実上同じものである。」

「空気の希薄化はグロー現象を驚くほど素晴らしく促進する。直径２インチ半の真鍮球を空気ポンプの容器の中で正の感応体にしておき圧力を水銀柱で4.4インチに減少すると、直径2インチの面積がグローで覆われこれを少し調節したところ、グローは球全体に広がった。直径1.25インチの真鍮の球を用い、負の感応体である尖端を用いて正の被感応体とし、高度に希薄化した場合の現象は美しかった。グローは正の球の表面に生じ、徐々にその光輝を増し、ついには非常に光るようになった。そしてあたかも低い炎のように燃え上がり、半インチあるいはそれ以上の高さになった。ガラス瓶の側面に触れるとこの柔らかく光る炎は影響を受け、環状になって球の上の冠のようになり、しなやかそうな様子で比較的ゆっくりと・・・回転した。」（1529）

グローとブラシの違いはブラシは一見連続的に見えるが本質的には断続的な現象であり、グローは連続的な現象であり例えば断続的な証跡の可聴音と聞くことはできないものである。

グローは、正極のグローと負極のグローがあるが、この間の様子は特筆すべきである。

「直径0.3インチの真鍮棒をガラスの球状容器の両端から挿入し、それらの端を接触させ、それらの周囲の空気を極めて希薄にしておく。次に起電機からそれらを通して放電を行い、その最中にそれらの棒端を引き離した。この分離の瞬間に、負の棒の端を覆って連続的なグローが現れたが、生成の端は全然真っ暗であった。距離を増すと、紫色の流れまたは霧というようなものが正の棒の端に現れ、たちまち外側に向け、すなわち負の棒の方に向かって進んでいった。これは間隔が大きくなるに連れて伸びるが、負のグローとは決して一致することなく、いつでも必ず短い暗黒の部分をそれらの間に持っていた。この場所は負の棒から約1/10インチまたは1/20インチほど離れているが、明瞭にその位置も大きさも不変であり、負のグローが変化してもなお不変であった。・・・正の紫色の雲が、端を引き離すのにしたがって、消えたり伸びたりするのに反して、この暗黒部分及び負のグローだけは不変のままでいる。」（図133）（1544　1838年）

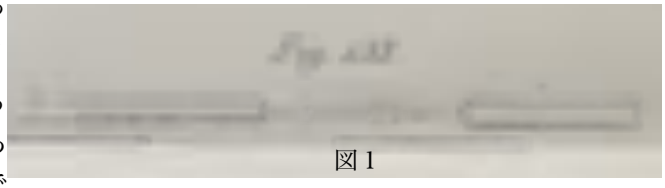


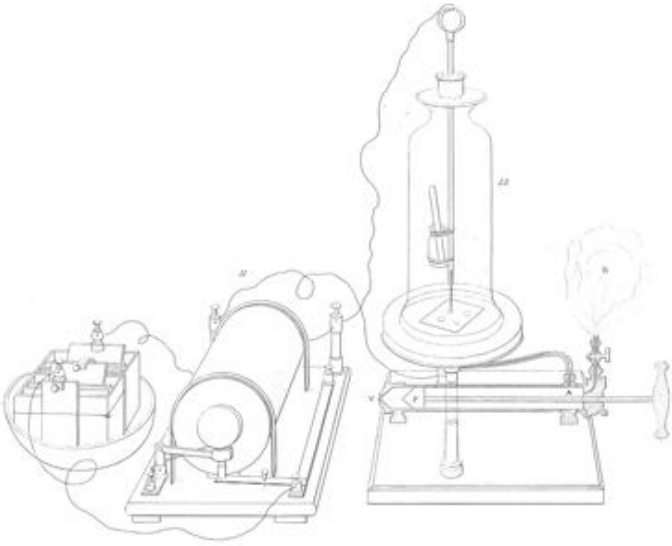
図1

ファラデーは、この暗部は電気の移動がないところではなく流れの形態によって光らないところであるとした。

（２）ファラデーの後継者　Gassiot とPlucker

グロー放電に関する研究は、ファラデー以後はなかなか進展しなかった。ファラデーは圧力を水銀柱で4.4インチまで下げたが、当時の技術では、圧力をこれ以上下げることができなかったのである。

ファラデーの1838年の研究から１０年以上経た1852年の論文[209]においてW.R.Groveは、気体放電の研究で新しい局面を作り出した。Grove　の研究の目的は、ファラデーは電流が液体を通過する際の化学変化を研究したのに対して、電気が気体を通過するときの化学変化について研究を試みたものであった。その時の副産物としてその後に影響を与えたことは、起電機として今までの静電起電機あるいは電池を繋いだものではなく、M.Ruhmkorff（ルームコルフ）が発明した誘導起電機を用いたことであった。Groveが用いた実験装置は下図のとおりである。図中の左下にバッテリーにつながれたルームコルフの誘導起電機がある。その右側台上のポンプは、真空ポンプであり、このポンプを用いてその上の硝子の器の空気を抜き取り、観測するガスを右端の袋の中に入れておいてこの空気の代わりに注入するという仕組みである。ガスは水銀柱で３分の一インチぐらいであり、器の中の（写真用）銀板上に於ける化学変化を観測するというものであった。このとき、彼は、十分に真空の時は、いろいろな気体においてどんなものでも、横方向の黒い縞模様が見えることを報告している。この縞模様の放電は、その後の研究者の興味を引くこととなる。いずれにせよ、ルームコルフの誘導起電機を用いたこともこの後の放電の研究に画期的影響を与えたのである。



このGrove の研究を受けて、Gassiotがトリチェリーの真空における放電の研究を行ったのは、1858年であった[210]。Gassiot　は、真空放電において横縞がGroveによって最初に発見されたとし、その興味ある現象を探求しようとした。装置は次頁右図のとおりである。つまり、ガラス管に水銀を詰めて、倒立させ真空を作り、その中の放電の様子を観察したのである。この方法により真空度を高めるのに成功した。放電はM.Ruhmkorffの誘導電機と同様の仕組みを持つもの（Mr.Ladd作）であった。Gassiotの報告を見てみよう。

---

[209]Phil. Trans. R. Soc. Lond. 1852 142 87-101 W. R. Grove, Esq.,　On the electro-chemical polarity of gases

[210] Phil. Trans. R. Soc. Lond. 1858 148 1-16; P. Gassiot, The Bakerian Lecture.—On the stratifications and dark band in electrical discharges as observed in Torricellian vacua

「管は水銀で満たした。c点に固定した栓は自由に曲がる管によって真空ポンプに接続した。装置のボールから空気を引いた時、水銀は管の中で沈んだ。この方法でトリチェリの真空が作られた。管の中の水銀はｄの位置まで減少した。」

「11.最初の実験において放電はトリチェリの真空の中で一様な白い光を示すことはなかった、しかし、絡み合った不規則な形をした線状の形を示した。始め水銀で満たされていたとき、管の中では空気は殆どなかったように思われたのだが、小さな泡が3から4分間放電を続けた跡で出続けた。そして、水銀は管の中を上昇していった。」

この事実は、水銀も十分吟味しなければならないことを示している。

「12.トリチェリーの真空の中である条件のもとで縞模様が形成されることをこの実験は示していると私には思えたので、同様な装置を注文して作成した、」

例えば図２のAのような場合では、十分に注意して水銀を満たし、管の中の水銀は沸騰させた。そして真空ポンプに繋いでトリチェリの真空を作った。この装置を、Grove電池によって励起させたコイルによって放電した。上部の導線は負である。この時は明確な縞模様が成り立っていて、正の導線から暗部にまで広がっていった。こうしてこのような実験を条件を変えて幾つか行ったのである。

「18.これらの管（図２）はA,B,C,D,Eのようにして、Aに於ける縞模様は私の最も良い水銀装置に於いて得られたものとほぼ同じものであった。Bに於いては、放電は円錐形で、縞模様は見られる、しかし、若干複雑で不明瞭である。Cに於いては放電は波を打った線状で縞模様は見られない。Dに於いては放電は明瞭で、明るく白いが、縞模様は見られない。Eに於いては縞模様は明瞭ではっきりしている。」

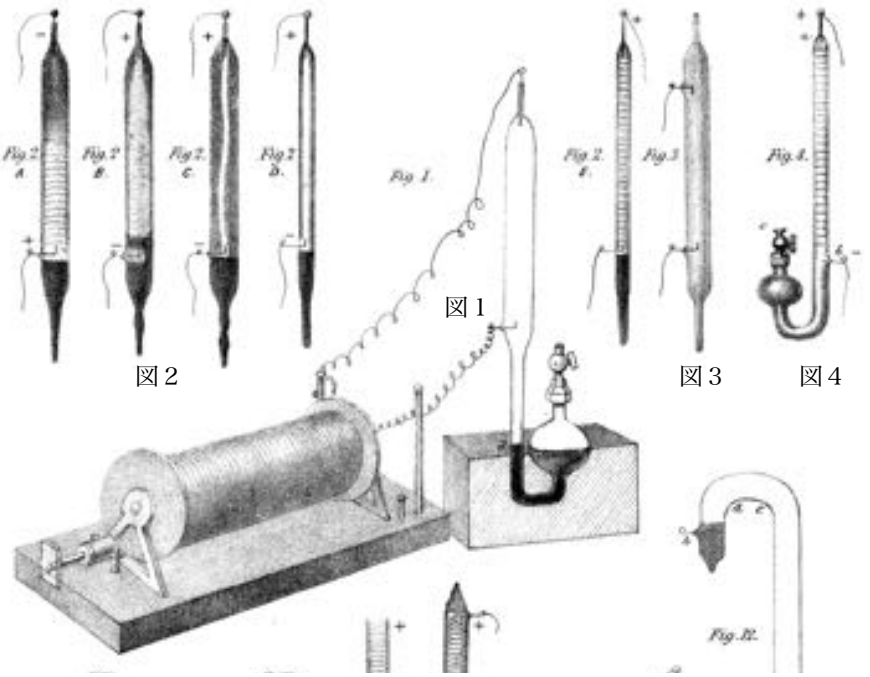


図１

図２　図３　図４

これらのABCDEの違いは今では真空度の違いによることが確認されているが、Gassiotは明確にそのようには述べていない。Gassiotの興味は縞状の模様であり、当時の研究者にとって主たる研究対象はこの縞模様の状況であった。

ところで、現在の理科教育（物理教育）に於いては、クロス真空計が用いられている。図はナリカのクロス真空計である。性能は、真空度で表して左から（50/10/3/1/0.1/0.02mmHg）の6種 である。それぞれの真空度における放電の様子は、50mmHg（ひも状放電）、10mmHg（帯状放電） 、1.0mmHg（帯状放電）、0.3mmHg（ガイスレル真空）、0.1mmHg（テスラ真空）、0.02 mmHg（クルックス真空）となっている。これを上述のGassiotの観察結果と比べると、論文の図１のABCとCross真空計の関係は

50mmHg（ひも状放電）→C
10mmHg（帯状放電）→B
1.0mmHg（帯状放電）→B
0.3mmHg（ガイスレル真空）→A

にそれぞれ対応している。

図１

同じ1858年に、Gassiot とは独立にドイツではPlucker（プリュッカー）が放電の研究を行った[211]。この時重要な役割を果たしたのが、Hrn.Geissler（ガイスラー）が作成したいわゆるガイスラー管である。ガイスラーは卓越した水銀による真空技術とガラス細工の技量を活かして、様々な形のガラス管に少量の様々な気体を封入して各大学に収めた。この管をルームコルフの誘導コイルによって放電させ、さまざま色や形の鮮やかな光を生じさせたのである。

プリュッカーは、この論文において磁石の影響、陰極線につながる発見、気体のスペクトル分析等重要な研究を行っているが、スペクトルの研究から紹介しよう。

気体放電のスペクトルの研究に用いられるいわゆるガイスラー管は、上図のように、両脇が少し膨らんでいてそこに電極を封入し、その中間部分は細い管になっているものである。

さて、Pluckerは上記の論文の終わりの方の66節『電気的流れのスペクトル』においてスペクトルの見え方について次のように述べている。

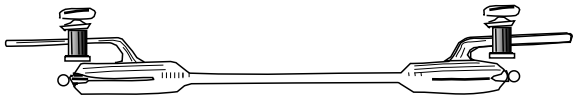


図２

「管の中に僅かに残っている気体や蒸気の性質によって非常に多くの種類の美しいスペクトルを示すことがわかる。これらのスペクトルは共通して太陽光と同じように連続的ではない。そうではなくて、色は明るい線と暗い線に別れている。それぞれのガスは特有のスペクトルを持つ。」

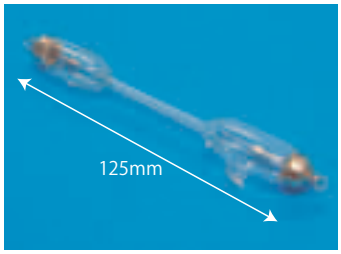
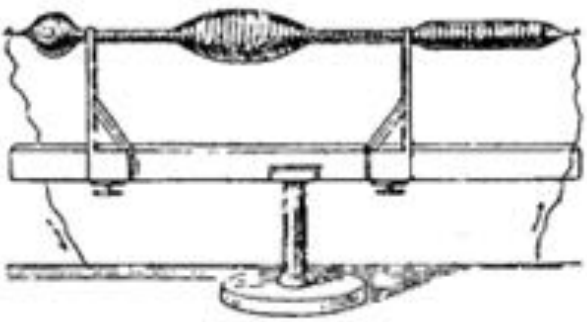


図３

としている。６７節では次頁右図のようなガイスラー管

[211] 1858年 Annalen der Physik 1858-103 p.88“On the Action of the Magnetic upon the Electrical Discharge in Rarefied Gass" Plucker

を用いたとして次のように言う。このような管を通して放電を行うと、管の各部分において光の強さだけでなく光の色も異なって見える、例えば、管のある部分では赤く、他の部分では紫色そして管の中間部分では弱い色であるというふうに。したがって、中に入っている気体の状態が異なっているときは異なった光を出したふうに見える。これに付け加えて、多くの場合に、管の細い部分を通過する時強い磁石をそばに持っていくと管の光は、始めは赤あるいは紫であったのが緑や青に変化するのである。このように、同じ気体でも条件によって異なった光を発するかのようであるが、しかし、目に見える色の印象が何であれ、管全体のすべての部分において、スペクトルの色は同じである。ただ、（スペクトルの）色の強さが変わるだけである。管全体には同じ種類の気体があるのでありしたがって、気体の発するスペクトルと管の中の気体は対応することがわかり、このことから、スペクトルの分析をすることによって管の内部の気体を決めることができる、という。気体放電を行っている場合、管の細い部分のほうが光が強い。そこで、Pluckerは、化学反応は起こさないほどのほんの少量（１ccほど）の気体をつめて、間に毛細管ほどの細い部分を持つ管に封入した。これが現在用いられているガイスラー管である。これを垂直にして、ルームコルフの誘導コイルで放電させ、Fraunhoferが行った方法でスペクトル分析を行った。つまり、フリントガラスプリズム（それは望遠鏡の対物レンズの方に置く）の屈折角は４５°であり、望遠鏡の接眼レンズは一定の割合で弱くなるように交換していった。放電管とFraunhoferのレンズとの間は４ｍｍであった。



Rurka Geisslera.

この装置を用いて水素ガスを観察した結果は彼の論文の７０節で述べているが、おおむね次のとおりである。つまり、水素ガスは比較的かんたんなスペクトルをもっていて、幅のほぼ等しい５つの帯から成り立っている。Aは明るい紫色の帯で、スペクトルの限界を超えている。Bはは３つの緑の線でそれ自身は限られているが緑の方に伸びている。Dは反対側の方が区切られている。CはBとDの間にある。一番端には緑の明るい縞模様のEがある。以上がPluckerの観測であった。分子など不純物が入っていたせいだろうか、その後のバルマー系列の様子とはかなり異なるように思われる。

スペクトル分析は、Fraunhoferの後、Bunsenや Kirchhoffによって発展させられたが、気体の放電に適用したのはPluckerの大きな業績である。

さて、ガイスラー管を利用しての気体放電からスペクトルの研究に発展していった方向はこのくらいにして、放電そのものの研究に目を向けよう。彼の観察は次のとおりである。

「これらの管、この管は約２ｍｍの太さと４００ｍｍの長さを持っていて若干の水素ガスが残留しているのだが、その中の光の層の性質によって、およそ、４００個の明るい場所と暗い隙

間の完全な規則性を持って管の端から別の端まで互い違いになっている。そこでは、陰極の近く（熱極の近く）では、暗部を見ることができる。」

「熱極（陰極）の近くでは、それに向かって放電が行われるのだが、同じ光を生じる物質を通過してしまうのでそれ自身は集積されない。しかし、一定の暗部を発生させ、その部分は、太い管の中でしばしば80mmの長さに達する。この暗部は、今まで見てきた層状の光（陽極光）と、陰極（つまり熱極）の周りに生じ、それを取り囲む一種の大気を明確に分けている。この陰極の周りに生じる注目すべき光については後で述べることにしよう。」

ここで言う層状の光とは、前述のGassiotによって観測されたあの層状の光のことである。（参考のために、佐藤瑞穂著「物理学3」の中の、ガイスラー管に相当する0.27mmHgの時の様子を右図に示しておこう。ここでは、放電の様子は、縞模様を生じる陽極の光と陰極の光とそれを分けるファラデー暗部の３つの部分からなるとしている。このうち陰極の光については論文の後ろの方で述べると言っているが重要な発見を行っている。それを見てみよう。

「３５．最後の実験で使用したガイスラー管はまた、美しい緑の光を出すことがわかった。それはまた非常に謎めいたものでもあった。最初は、私は「補色」かと思ったが、しかし、一般的な観点からみて支持できないので、その考えはすて、ガラス自身の燐光であると考えざるを得なくなった。しかし、それにも関わらず、問題の光は（ガラス自身が光るのではなく）燐光は管の内部に存在しているのである；しかも、管の内部の凹凸に正確に従うようにその内部に密着して存在するのである。そうして、ガラス自身に存在するかのようにさえ見えるのである。この解明は磁石を用いることによって最初に与えられた。磁石の極を変えると、光は陰極の近くで前方と後方を入れ替える、そして、磁力線によって形成された面がガラスに触れる場所に光は集められる。もしも、管を移動することによってこの磁力面が新しい場所でガラスに触れるならば、直ちにその場所に緑の光が現れる。」

こうして、陰極の周りの陰極光とさらに、陰極近くのガラスの燐光の存在が確認され、その燐光は、磁石によって影響を受けることがわかったのであった。

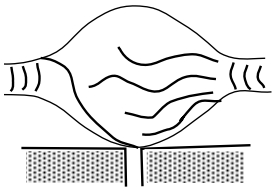
Pluckerのこの論文の最大の狙いは、ガイスラー管の中の現象が磁石によってどのような影響を受けるかを調べることであった。彼は放電が磁石に作用によって影響を受けるであろうということは初めから確信を持っていた。と言うのは、すでにDavyによって、電池によるアークが磁石による影響をうけることが発見されていたこと、Aragoによって気体放電は磁石の 影響を受けることが予言されていたからである。

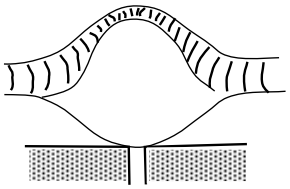
「９．次には、我々の本来の対象、つまり、薄い気体の空間のなかの放電に対する磁気の作用について戻ることとしよう。はじめに、実験を記述するために、大きくて真っ直ぐな鋳鉄の磁石を、刻みを入れて二つの重い、高さ４cm、幅１３cm、長さ２ｃｍ　の形にした、苦労して手に入れた円形の半分の錨を互いに向き合わせ、その間に真鍮の板を通して４ｍｍほど離した。

この半錨の上にガイスラー管を置き一つはその軸の赤道部分に、別には、第二には普通の方向に置く。
１０．もしも、それを通して電流が流れている自由に動ける導線を、管の赤道の位置に持って来るならば、その導線はアンペールの電流の方向におうじてそれぞれ垂直に下の方向へ力を受けるか、上の方向に反発させられる。」

として、それと同じことがガラス管の中に生じるであろうというのである。

「１１．270mmの長さの管、それはその中央で楕円形の形に膨らませたもの（管の幅は12mm、その中央は52mm）でその赤道部分磁石の隙間のうえに置いた。この管はその中に少量の含んで置き、白金を溶かして両端に付けたものを通して放電を行ったとき明るく輝く赤い光を生じた。もともとの管の中では明確な境界を持った光の層が示されている、その楕円球の入り口の付近では球形の層状をしたものが場所を占めていて、その中でそれは歪んでいて、そして、楕円形の中心では平面を通って通り抜けている、つまり、曲面が変わるという意味である。
二重の流れと電磁気力による二重の原因が、かなり異なった状況を引き起こす。その規則についてはこれ以上取り上げることはできない。」


（図１）

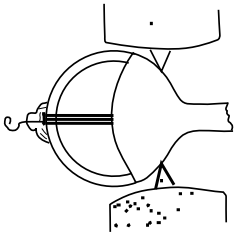

（図２）

この現象を、磁石の近くを通る導線が受ける力と比較している。

「二つの場合において、楕円球の中の電気的流れは二つの異なった斥力（図２）が働く。その引力の場合（図１）、光の流れは、電極の正の側から下へ楕円形の中へ向いて動き、ますます明るくなる。」

次に、

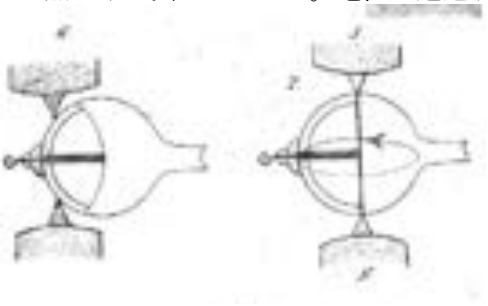
「２０．図３のような、幅（太さ）が10mmで、二つの端に直径35mmのガラスの球を溶接した。白金の電極を両端の球の中に中央に来るまで突き出させる。電磁石の上に二つの錨を載せる。錨の端の面は完全にきれいに仕上げられていてそれらの面の中央は先端が尖っている円錐形がネジで止められている。熱極（陰極）を含んだ管の球は円錐形の極の上に付けられこれらの点の間にあり、管は水平に置かれる。磁石が励起される前には、紫色の光が管全体に広がりガラス管の表面に薄い膜として現れる緑色の光に囲まれている。磁石が励起されると発散された光は水平面に集められ明るい一様な光る円盤となり、ほとんど円形の明瞭な凹面のアーチによって管の方に向いて区切られている。そのアーチの中央に白金の電極の点がある。」


（図３）

２１．次に、管を、水平の位置したまま、しかし、もはや電極を通過しないようにする（図６）。この時、現象は同じであるが、ガラスの緑色の層にかこまれた紫色の水平の円盤が、ガ

ラス管の方に凸面となったアーチによって区切られている点だけが異なっている。電極を通過する点は同じである。

２２．電磁石の極を引き離して円錐をガラス球の直径の位置に来るようにする。ガラス管は水平にする（図７）。磁石を励起すれば円盤は以前のようにできる。円盤の周りには（ガラスの内側に）美しい緑の線ができる。



Pluckerは、上記のように、磁石によって縞模様が変化し、特に、陰極の周りにおいたときには、その境界面は磁力線と一致すると述べている[212]が、今では、管の中の状態はプラズマ状態であり発光は電子が分子に衝突することによって行われるのであり、磁力線と一致すると単純に言い切れるかどうかは明確ではない。

いずれにせよ、Pluckerの研究により、陰極光、陽極光、ファラデー暗部の他に、陰極の周りのガラスの燐光、磁気による影響など幾つかの重要な発見がなされた。

２．陰極線の研究・・・Hittorf ・Goldstein ・Crooks

（１）陰極線の発見と陰極線の直進性・・・Hittorfの研究

Pluckerの研究の約１０年後に、Pluckerの研究は彼の学生であったHittorfによって引き継がれた。そして、気体放電の研究の新しい局面が切り開らかれた。観察はより正確になり、新しい実験事実も発見され、理論的な議論にも耐え得るような状況となってきたのである。何よりも、真空度を上げることにより、気体放電の研究に大きな変化をもたらした。その変化は研究の中心がそれまでの気体の種類に依存する放電の状態に関する研究から、陰極の周りの「蛍光」あるいは「燐光」の研究に目を向けたことに有った。彼の師のPluckerはすでに述べたようにファラデーの研究を高く評価していた。したがってその弟子であるHittorf もまた、ファラデーの研究を受け継いでいくことになる。そのことは、彼の論文[213]の中で、ファラデーの電気実験の一説[214]を引用していることからもわかる。そしてこの引用の後に次のように続けた。

「長い間、この文は注目をあびることはなかった。50年代になって、ルームコルフの装置を用いて希薄な気体のガラス管を放電する現象が再び注目された」

こうしてHittorfの研究は、ルームコルフの誘導コイルの発明によるより高い起電力と、ガイスラーの水銀真空ポンプによって作成されたいわゆるガイスラー管を利用した放電現象を封入された気体に着目するのではなく、真空の度合いをより高くすること

---

212 プリュッカーは陰極の周りの光は質量のない磁石から成り立っていると考えた

213 Annalen der Physik und Chemie 136 1869 Ueber die Elektricitatsleitung der Gase;von W.Hittorf

214 215頁で引用した1544の部分

としたのである。ガイスラー管の放電の様子は、真空度があまり高くない時は基本的には図１のようである。つまり、陽光と陰極の周りのグロー、そしてその二つの間の暗部（ファラデー暗部）に別れる。真空度が比較的高ければ陽極には縞模様が現れる。

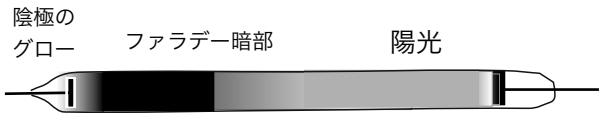


図１

Hittorfはさらに気圧を下げていった。ガイスラー管の気体の圧力が2ｍｍ以下になると上記のこの現象は急激に変化した。つまり圧力の減少とともに陰極の周辺の一部に見られていたグローが陰極全体に広がっていって、さらに電極の周りだけでなくその周りの空間にも広がり、赤い陽光を正の電極の方へ押しやっていったのである。Hittorfは次のように述べる。

「９．グローが密度の減少によって陰極の表面上を広がるだけでなく、取り囲む空間にも広がっ ていく。陰極の周りを取り囲んでいる青色の覆いの厚さは、圧力が２mm以下になった時、すみやかの増加し、もっと希薄になったときには覆いはもっと厚くなり管を覆い尽くす。」

両極、つまり陰極と陽極の二つの光は縞模様をしめす。しかし、陽極光の縞模様の数は管のサイズ、有効な電気の量、気体の性質や圧力等に依存して変化するのであるが、一方の陰極の光の層は一定であることは注目すべきことであった。つまり、陰極の光は常に３つの部分からなっているのである。陰極に密着している部分は光の層は狭い幅を持っていて非常に弱い。その外側には、暗いままであるがしかし明確な層がある、これは、ヒットルフによって陰極暗部と呼ばれた、そして、この層の終わりのところからより特徴的に陰極光あるいはグローと呼ぶべき光の層が始まる。右図-4はヒットルフの論文の図ではなくGoldsteinの論文[215]の図であるが、この様子がうまく図示されている。図の下部が陰極部である。その陰極部の上部に暗部があるがこれがファラデー暗部でありこれを経てその上の陽光柱となる。陽光柱は縞模様を呈している。

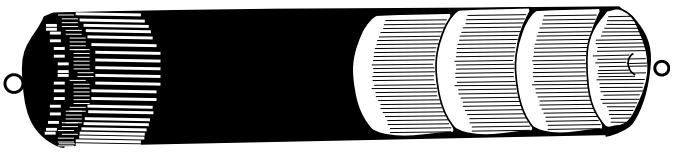


図２

さて、陰極においてはその周りのガラスが蛍光を示すことが知られていて、これはすでにHittorfの先生のPluckerによって発見されていたが、陰極の光（グロー）との間に関係があることも予測されていた。この蛍光についてHittorfは更に詳しく研究した。まず、ガラス管の発する蛍光は、陰極とガラス管との間に液体あるいは固体の物体を置いた時影を生じることを観察した。

[215] Phlosophical magazine 1880 "On a new Discharge in Rarefield Gass" By Dr.Eugen Goldstein この図はトレースしたものである

「１０．どの固体や液体の物質も、それが導体であれ絶縁体であれ、それが陰極の前に置かれれば蛍光を遮る、蛍光は陰極とその物体の間にあるのである。直線が曲げられることはない。」

このように影を生じることから、陰極から発生した（目に見えない）何かが、管の中にグローを発生させ、ガラスには蛍光を発生させ、しかも、その何者かは直進することを観測から推察された。更に重要で奇妙なことには、この直進は、陽極の位置とは無関係であるということである。この事情をHittorfは次のように述べている。

「二つの長さの非常に異なった脚（辺）をもち直角に曲がったガラス管を取る。そしてその端に二つの等しい点状の電極を固定する。管の中の気体を十分に希薄化し、そうしておいて陰極の光を通過させる。もしｂ（長い脚の電極）を陰極であるとしたとき、陰極の光は完全に長い辺に達する。一方、a（短い脚）を陰極とすると光は短い足にとどまり管の曲がりに従うことはない。もし、点状の陰極から出て長いところのガラスの壁に蛍光をもたらすとしたならば、グロウ光が直進的に進むことは明白に思える。そのような状況のもとで、グローが満ちている空間の中にとにかく物体があると認められるとき、明確に明るい輝きを蛍光の壁の上に生じるもの、それは陰極からその表面までやってくるのだが、その陰極を頂点とする円錐状の光を遮る。われわれは、このことから、次に、直線状の道筋あるいはグローの光の放射について述べ、陰極のそれぞれの点を光円錐の頂点のように受け取れることをしめす。」

このことについて、若干状況は異なるがGoldsteinの論文の中の図によって示しておこう。陰極から出た目に見えない何者かの線が陽極の位置とは無関係に直進していることを示している。

この何者かは、後にゴールドスタインによってKathodestrahlen(陰極線)と呼ばれた。そしてこの陰極線の正体は現在では電子であることが明らかになっているが、そのことがわかるまでには激烈な論争が繰り広げられた。

（２）陰極線の命名とその正体に関する議論　Eugen Goldsteinの研究

Hittorfの論文から約10年後の1879年にCrookesの論文とGoldsteinの論文が発表され、Hittorofの研究は大いに発展させられた。特にGoldsteinが陰極線の存在を明確にしたことは特筆すべきことである。Crookesの論文より若干早く議論されているので、Goldsteinの研究を先に紹介しよう。[216]

Goldsteinは、通常のガイスラー管が示す3つに別れた様子（すでに紹介した図-4）から、さらに真空を勧めていった時の様子を次のように述べている。

「排気を暗部が現れたこの時点よりさらに進めるならば、正極の層はゆっくり正極の方へ退いて行き、同時に陰極の光の線は正極の層が退くよりもより急激に伸びていく。我々はこ

[216] 1879年のCrookesの論文に次のように書かれている。
「この論文が印刷に回っている間、Eugen Goldsteinによる二つの論文に注意が引かれた、それはベルリンロイヤル・アカデミーに1876年5月4日、1876年11月23日の論文で、この論文で報告された結果の幾つかが予期されていた。」

うして暗部が消えるのを見る、そして、陰極の光は正極の光がはじめにあったところまで達する。」

「もし、今、更に排気を続けるならば、正の層は更に退いて行き、陰極の線は伸び続けその伸びは正の層が退くよりも早い。陰極の線は今やこの正の層を貫いて行く、一方その陰極線の性質は不変のまま残り、それが貫く正の光のそれと混合することはない。」

この陰極線が、正の光（陽光）を貫いていく様子は次の実験で明確にされている。まず、正極の位置に関係なく陰極線がまっすぐ出ていくことを観察している。

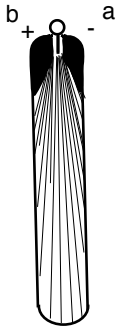


図1

「図３は別のケースを示している。ａは管の断面を完全には占めていず、その側に陽極ｂを余地を残したものである。

だから、陰極の光の線は近くの正極の上を通過しないで、陰極の光が、図で示されているように、正極の位置に関係なく管の長さ全体に直線状の線として広がっていく。」

このことを確認した上で、陰極線が正極を貫いていくことを次のような3つの管からなる装置を用いた実験で確認していく。

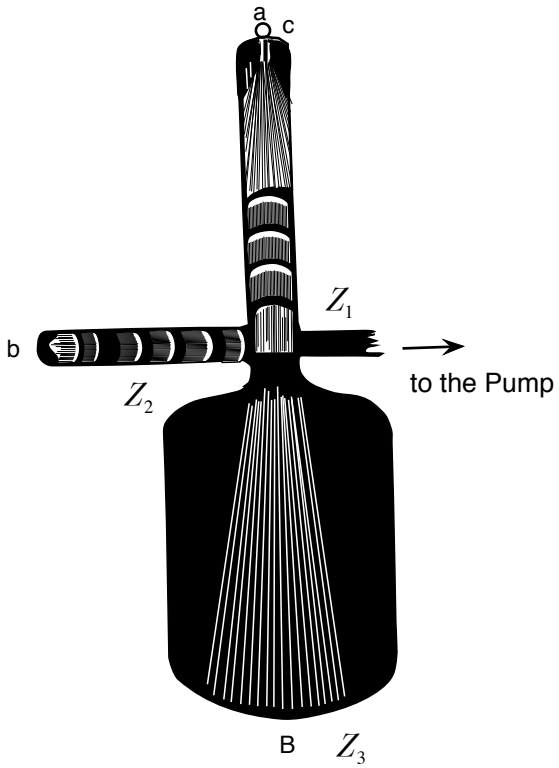


図２

「陰極の光が正極の光を貫くことの証明はいろいろな方法で得られる（図2）。この図は、３つの円筒からなる容器の断面図を示しているのであるが、その中で、陰極ａはその周りを溶けたガラスで面を覆った細い線の部分となっている。もしも、ａの近くの線ｃを正極とした時、正極の近傍を除いては正の光は明確には見られず、ただ、極度に希薄なところでのみ見られる。しかし陰極の光は正極の影響を受けずにａから直線的に到達できる限り容器全体に広がっていく。線束は３つの円筒の中で最も広いもの、その直径は円筒の間の接合部分に開かれているところで測られるのだが、そこを通り抜ける。排気をさらに進めると、線束は壁Bまで通り抜ける、そして線の端はそこで円盤の形をした明るい緑色の燐光を励起する。その円盤は壁Bによって線束の断面である。もし、今、ｃが誘導コイルから切り離され二番目（Z_2）[217]の中のｂが正の電極であるとし、一方ａを陰極のままであるとしたならば、長い縞模様の正の光の円柱のかたちをなす。それはZ_1の口から数センチメートルのところから始まり、完全にZ_2を満たし、陽極ｂに達する。Z_3は以前のように正の光は存在しない；しかし、青い陰極の光束とBの表面上に燐光が以前のように残っている、このことは、陰極光が正極光に入り通り抜けていくことを確実に示している。」

[217] （Z_2）の表記は訳者の追加である。

ここでは陰極線は陽極の位置と関わりなく、陰極から放射状に発せられることが述べられている。そして、陽光の光と関係なくそれを貫いて進むことを示している。この様子はまた別の実験を観察することによっても示されている。

暗部は、しばしば確認されるように、広がっていくことによって明るさが失われていく陰極線の延長（終端）であることを表していない。陰極線は直線上の放射の性質を持っていて、固体の壁によって終端となる。それらは、それ故、角で曲がることができない（図１）。曲がった管の中の放電によって得られる様子は、図２のようであり、そこで、暗部が陰極線の延長であると考えることはできないこと、そして、直線的な放射の特性をそれ自身持っていないこと示す説明は必要としないだろう。

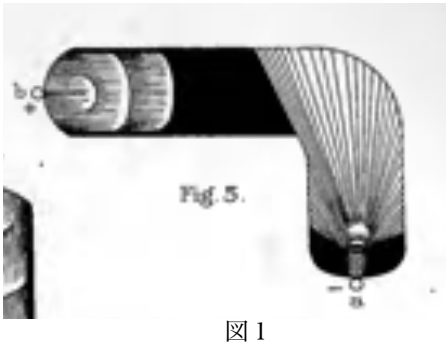


図１

従って、陰極線の流れが最初の正の層へ伝搬していくとするならば、二つの間の流れはある距離を経て新しい形態に変化させられると仮定することが必要である。

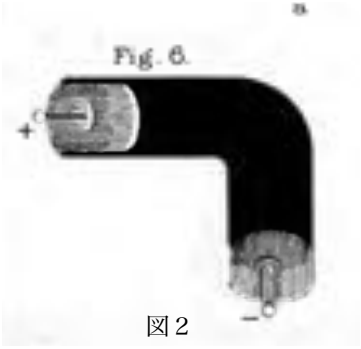


図２

流れの状況によって新しい形態が出現することは、図３のような管を用いて放電したときに、α部分にあたらくし陰極が発生することから確認することができた。

排気がすすみ、気圧が下がっていくと、気体放電は、その最も特徴的であった陽極柱の光が消滅していき、管には何も見えなくなり、ただ、管の表面に緑色の「燐光」あるいは「蛍光」が見られるだけとなる。この「燐光」は陰極から放射される「陰極線」がガラスにあたって発生させられるものであることが認識されていく。この陰極線について更に次の性質が付け加えられた。すなわち、一つは、「陰極線は陰極である極板が平面である時それに垂直に出ていくこと」もう一つは、「磁気力によってまげられることである。」最初の極板の面に垂直であるということは、1880年の論文では次のように表現されている。[218]

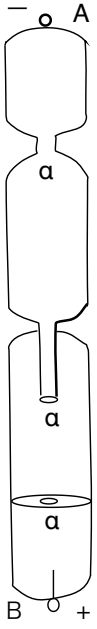


図３

「陰極aを平らな表面とした時、その表面を円筒の軸に垂直に置き、その近くに気体を置かないようにする。この装置においてaが離れている他の端にある正の極ｂに向かって線を発する時ｂに向かっていく線と全く同じ道を正確にたどる。線は、表面ａから直線的に表面に垂直に曲がらず直接にｂに向かって進む。」

また、同じ188頁に、磁石による影響を次のように述べている。

「今、放電は実際に正極から陰極への単一の流れを形成すると仮定しよう。し

[218] Phlosophical magazine 1880 "On a new Discharge in Rarefield Gass" By Dr.Eugen Goldstein p.179

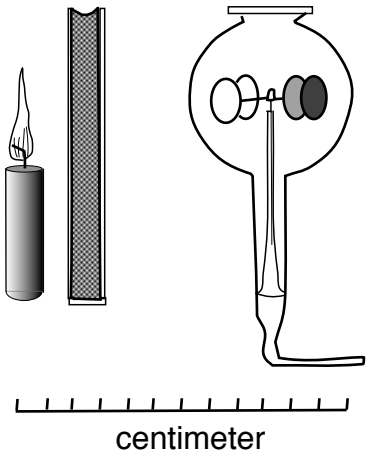
たがって、磁石はその放電に作用しなければならない、例えば、それは中央の位置（赤道）において膨張できる柔軟な導体がその端を固定したときのように」なるだろうと言っている。さらに

「しかし、もしも、磁石が一つの端で固定され他の端は自由に動く場合は、このような導体の運動は磁化された陰極線に正確に対応するであろう。そして、そのような一つの点から放射される線状の導体の束は磁化された時は一点から放射された光の束の形を正確に表すであろう。」

結局Goldsteinによれば、「陰極の光とそれに引き続く陽光とは同じ種類のものであった。それぞれの層はその前面で出発する線束を含んでいた、そして、磁石によって曲げられること、影を作ること、グロー光として蛍光を生じるという同じ効果を示すことができた。一連の層の見かけの違いは度合いの違いであり、放電管の形や圧力の仕方によって変えることができるのであるとした。より詳しく言えば、管の断面積を小さくすることによってその狭い場所に新しい陰極ができるかのように陰極の光を供給した。」[219]とまとめることができる。Goldsteinの研究と軌を一にして更に印象深い実験を展開したのが次に述べるCrookesであった。

（3）陰極線の道筋を観察すること・・・磁気力による湾曲　Crookesの実験

Crookesは、前年にラジオメーターの研究を行っていて、真空放電の現象もこのラジオメーターの現象と関係があるのではないかという動機で研究を始めた。ラジオメーターは右図のような装置であり、金属面にすすを塗ったほうが熱を吸収しやすく、その熱によって分子運動が激しくなりその分子の衝突によって軽い羽根車が回転するものである。このラジオメータの金属表面の分子の運動と陰極との間に似た現象が生じていると考えた。すなわち、



「よく知られているように、陰極の周りには暗部が生じている。私はこの極を覆っている暗部は何らかの仕方でラジオメーターを動かす分子の圧力の層と関係があるのではないかと思う。以下の実験はこの仮設を確かめるものである。」

つまりCrookesは陰極の暗部は分子の運動が激しいところではないかと考えたのである

Crookesの研究を決定的に推し進めたのは、強力な真空ポンプの発明である。それはスプレンゲルポンプ(Sprengel pump)と呼ばれ、次ページ図１のような構造をしたもので、1mPa（約1×10 $^{-8}$atm）未満の高度な真空を作り出すことができるものであった。

[219] ELECTRODYNAMICS FROM AMPERE TO EINSTEIN Olivier Darrigol p.280

Crookesは下図２のような管を用いて少しずつ気圧を下げて放電を行った。実験の観測の結果を次のように述べている。

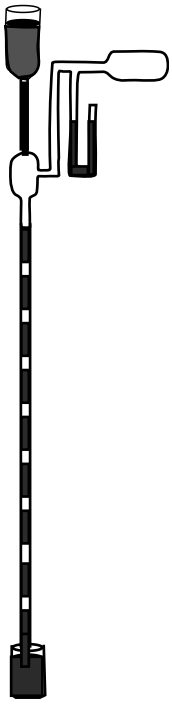


図１

「ガラスバルブ（図１）はガラスの中に端を絶縁されたアルミニウムの線を備えたもので、端の外側は輪になっていて内側はアルミニウムの極となっている；正極（右）は線であり陰極（左）は直径が約10mmの円盤である、前面はむき出しで背面は雲母で覆われている。バルブ（ガラス管）は完全に乾燥された空気が詰められSprengel真空装置によって排気された。誘導コイルは68mmの長さの火花を生じることができる。円盤は特別な場合を除き負である。」

このガラス管の空気を抜いていき、放電の様子を観察するのであるが、その記述は、気圧と陰極のグローの様子が克明に記述されていてわかりやすい。Crookesは次のように述べている。すなわち、圧力が20mmHgのとき、柔らかい紫色のハローが陰極の円盤の端の方に現れ始めた（グロー光）。排気を続けるとこのグローは厚くなっていき、表面の別の部分も覆うようになり、圧力が15mmHgになるまでは円盤の前面をすべて一定に覆い尽くしていた。このように、排気が進んでいった時は円盤状を覆っていくグローが生じていくのであるが、詳しく調べてみると、グローと金属の間には非常に小さい間隔が見られ、接触していないことがわかる。その概略は次のとおりである。

「487 ・・・圧力が7.5mmHgとなったときは、グローは厚くなり、暗部は容易に見えるようになる。更に進み、圧力が1.6mmHgのときは、暗部は1mmの半分程度になりグローは非常に明るくなった。排気がさらに進むと陰極の円盤の周りに現れるグローの強さは減少し、暗部の幅は広くなっていく。圧力が0.078mmHgのときは暗部は8mmとなる。」

この記述は、Hittorf が2mmHg以下になると、グローが速やかに増大すると言ったことと合致している、そして、その記述はより詳しいものとなっている。

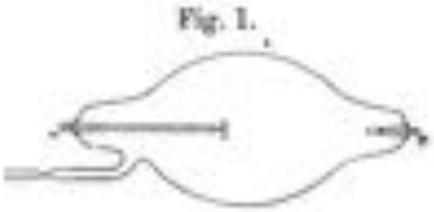


図１

Crookesは、更に真空度を上げて、このグローが緑の燐光を発生することを観察した。これはHittorfとEugen Goldsteinが研究したものと同じであったが、彼らの論文をこの論文が印刷に回ってから知ったと述べている。Crookesの観察は次のとおりである。ただし陰極は還付の形をしたものとしている。（次ページ図１参照）

「510 排気による気圧が30M（M=1atm×10^{-6})になるとき、新しい現象が現れる。暗部は広がっていってガラス管をほとんど埋め尽くす。焦点がわかるようであった紫色の光が非常に弱くなって追跡するのが困難になる、しかし、注意してみると低い排気のときに見られた焦点を超えて収束していることがわかる。線が衝突する管の部分において緑黄色の光の弱いス

ポットが弱いけれども明確に観察される。さらに排気が14Mとなり、カップをコイルの陰極とする時カップからの放射は直径が約７mmの明るい緑色のスポットの光によって表される。そして焦点はほとんど追跡できない。管の残りの部分はほどんど真暗であるが、陰極から最も離れたところのその部分において暗黒部の縁を持った弱い光が見える。反対側の極においてカップを正にした時、管は黄緑色の光で美しく照らされた。（輝いた）。」

この緑色の燐光が、金属の表面から垂直に発せられるのだということは、凹面を形成している場合にはその焦点に集まることから示されているとCrookesは説明した。凹面から発せられた時はその焦点に集まるということは、次の図のような実験装置を用いて確かめている。（右図-1参照）。そして、次のように述べている。

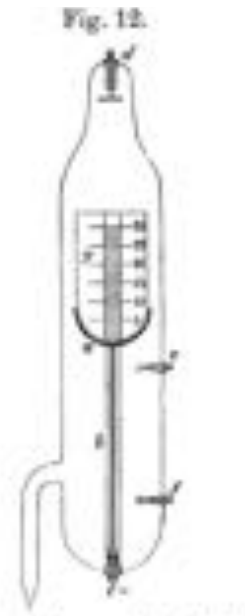


図１

「515 真空が進むと、半球ａ、それは線ｃによって陰極となっているのだが、その付近においてよく見られる現象が生じる。暗部はそのサイズが大きくなり凹面から中心に向かって広がっていく。その時、光はより濃く明るくなっていく。排気が進むことによりこのグローは小さく明るくなり、半球の軸に沿った明るい狭い線を形成する。明るい点は目盛の11mmのところ（半球極の曲率中心の位置）に形成され、それは陰極から出た気体分子が表面に垂直に放射されていることを示している。半球の凹面から暗部の縁の明るいところまでは11mmであった。この時の気圧は106Mである。」

次に、平面から出た線が明確な影を作ることからも平面に垂直に放射線が出ることを示していると主張した。つまり、もし、高温の平面から光が出るときのように各点から光が放射状に発するならば、いわゆる半影が生じるのであるがそれが見えないから平面から垂直に出ているのであるというのである。右図２はこのことを確認するための実験を示したものである。ｅとｈは円盤の形をした電極である。ｆとｇはどちらかと言えば点状の電極である。ｃやｄはそこに星状の雲母などを置いてある。ｂはウラニウムガラスであり（厚さ0.5mm）片面に雲母を貼り付けてある。ｅを陰極としてcの星状の障害物の影をｂで観察したときとｆを陰極とした場合のそれを観察した時は、円盤ｅを電極としたときのほうが影が明確であったというのである。

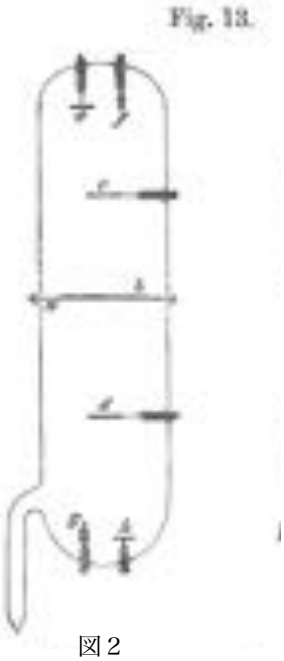


図２

「526 だがしかし、真空が十分高くなって陰極の周りの暗部が管の大きさを飲み込むほど大きくなると、ｃとｂのどちらが正極であってもｅ が陰極であれば、緑の燐光とｂの上に投影されるｃの放射の現象はほとんど変わらない。見かけはほとんど同じである、そして、陰極からの放射の影はｆかｈかどちらか

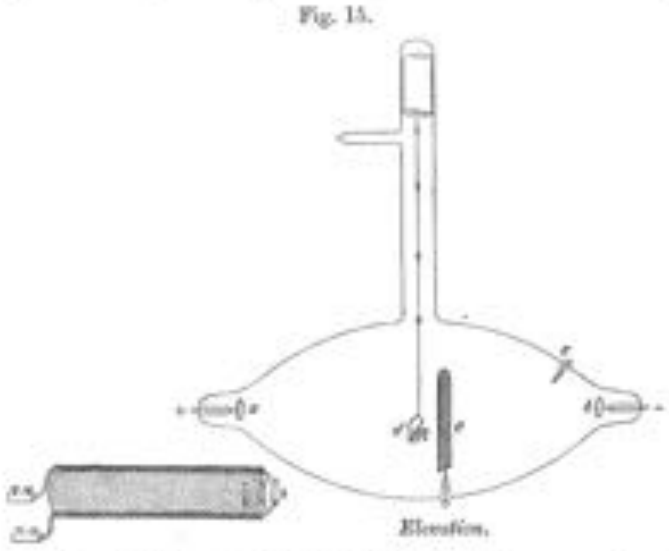
を正の極としてもその明確さと強さにおいて同じである。事実、正の極は減少に対してほんの少しか全く関係しない。

「527　最も明確な影は平板の電極ｅとｈによって放出されたときの影である。点状の電極fとｇから放出されたときの影は弱くその輪郭は不確定である。」

Crookesの研究で最も特筆すべきは、陰極線の道筋を明確に示したことであろう。もっとも、Crookesは陰極線とは考えず、それは電気を帯びた荷電分子であると考え、荷電分子であるから一定の運動量を持つものであり、力学作用を行うものとした。それは、原因は異なるがラジオメーターと同じ効果生じ、その運動は軽い羽根車で観察できるものと考えた。そこでガラス管内に軽い羽を吊るして荷電分子の運動を観察することにした。具体的には卵型のガラス管の中にそれを吊るして陰極線をあてたのである。（図-15）。

「541　コイルのスイッチを入れた時、薄いガラスの膜は蛍光を発すると同時に反対側に動かされることが観察される。これは物質が分子の衝突によって動かされているかのようであった。次の実験は力学的作用を明確にするために考案されたものである。
大きな、卵型をした硝子の器（図-15）のそれぞれの端にアルミニウムの電極ａとｂをつけ、ｃ点に点状のアルミニウムの電極を挿入する。ｄには小さな探知装置を備え付けられガラス管から突き出された装置によって管の中央付近の場所に適切に持っていけるように下げられている。インディケーターは直径が8mmの小さなラジオメーターの毛針からできていて、2mmの雲母の羽を通し、微妙にガラスカップの上の針によって支えた。スクリーンは幅は12mm、高さが30mmの平たいアルミニウムの板を切り出し、ｅ点で、その字句の側面から少しのところにバルブの中に立てた。ガラスを通るアルミニウムの線によってバルブの中に据え付けられた。そのことによって、必要な時はｅを極として利用することができる。

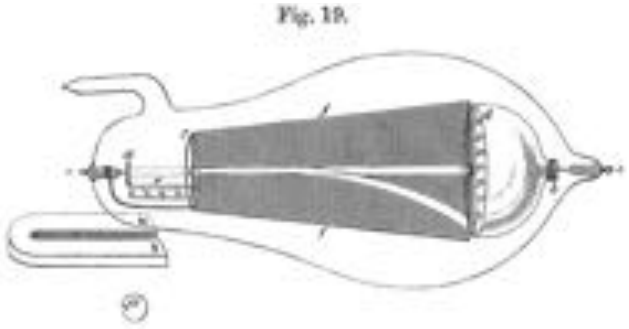
その結果、微かに羽が動くことが観察されると同時に羽は燐光で光った。このことにより、それまでは陰極線の道筋は影を通して観察されていたが、逆に、明るく光る道筋を観察することが期待された。特に、磁石によって陰極線が曲げられることが期待されるので、その効果は大きいものがあった。更にこの陰極線の道筋を明示するために軽い羽を下げる方法ではなく、一枚の燐光で光る板を用いることとした。



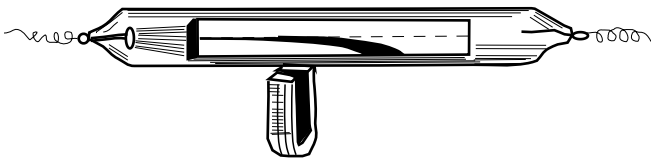
「556　別の実験はこの点を調べるために適用するように作られた。陰極の周りの暗部の大きさ、緑の蛍光の出現、様々な気体の異なった圧力のもとでの磁気による曲がり具合との間の関係を決定するためのものであった。

　私は観測された現象を記述する簡便な方法として磁石によって曲がった影について話をしてきた。しかし、実際に曲げられているのは陰極から駆動される分子の道筋であり、その分子が表面に衝突することによって引き起こされる光の道筋である。影は、分子の道筋にある障害物の効果である。

影の代わりに光の道筋を用いた実験装置について記述しよう。Fig19に装置を示してある。」

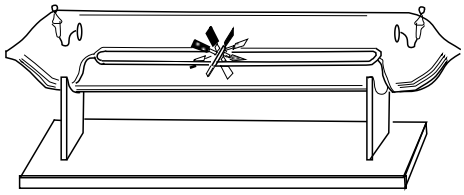


「極はaとｂにある。陰極ａはアルミニウムの平たい円盤でその中に切れ目が入れてある。極ｂはアルミニウムの輪である。ｃはその中央に直径が1mmほどの小さな穴が開いている。ｄはドイツガラスの平たい板で、縦に１mm間隔で目盛りが刻まれている。ｅはミリメートルの目盛をもった雲母である。目盛ｅは排気が進んだときの暗部の厚さを測るためのものである。ｃの中の穴は極ａから出て目盛ｄの上に光の点が投影されるようにするためのものである。目盛ｄは磁石によって曲げられた時ａから出てｃを通ってｄに達する光の曲がりを測定するためものである。ｆｆは雲母の垂直なスクリーンで光線の運動の平面の中にあり、蛍光の粉で覆ったものである。この上で、その軌跡の道筋は磁石が存在しない時は真っ直ぐで、磁石が存在する時は曲線となる」



　この装置は今日の理科の教室にはどこにでも存在する有名なものである。右の図は、教材メーカーMax　Kohl社(1905年）のカタログから取ったものである。（トレースした）。この装置はしかしながら上記のCrookesの論文の図とは若干異なっている。

　Crookesは、ガラスに燐光作用を起こすものを電気を帯びた分子であると考えた。そして、それは力学的効果を示すとして、その効果をわかりやすくするために羽根車の装置を考案した。それが右下の図で表された装置であり、これもまた、現在の学校の多くの理科室には備えられているものである。しかしながら、この力学的効果は実は、電気を帯びた分子の衝突効果ではなく、まさに熱作用によるラジオメーターの効果であるこ



とがその後StarkとJ.J.Thomsonによって証明された[220]。Crookesのこの研究において、真空の度合いと陰極の様子が論文の最後の方で報告されている。興味深い観察なので紹介しておこう。

「558　排気161M=0.12mmHg。暗部の厚さ＝8.5mm　幾つかの緑の蛍光が陰極の近くで見られる。しかし、投射された像はスクリーンｄの上にはまだ見られない。
559 排気102.6M＝0.077mmHg。暗部の厚さ＝12mm。緑のスポットの光が中央で明るく端で消えるようにスケールｄの上に見える。スポットは約直径5.5mmであった。スポットの中心は、磁石を遠ざけた時はスケールの上で18.3mmであった。磁石を置いた時光のスポットは5mm下に曲げられた。あるいは距離では13.3mmであった。
磁石は近くまで持ってくれば容易により多く曲げることができる、しかし、他の気体においてスケールの外に光が曲げれられるようなより大きな変更を得るということは当を得ているとは思えない。
560 排気が55.2M＝0.0419mmHg。暗部の厚さは15mm。緑の蛍光は、バルブの中で増大している。スクリーン上の光のスポットは、よく見られるがしかしきざみの像はみられない。磁石はスポットを最後の実験と同じ位置まで引き下げた。」
561 排気が30.5M＝0.0140mmHg。暗部の厚さは16mm、しかし非常に弱くなってきた。スクリーン上の光のスポットはより明るくなり、境界が明瞭になったきた。磁石はスポットを目盛の上で6.8だけ下げた。曲がりは11.5mmであった。より大きな排気はしたがって分子の軌跡をより平坦にした。
562 排気が26.3M＝0.0140mmHg。暗部の厚さは25mmしかし正確に測るにはますます困難になった。バルブは非常に緑で、ただ小さな青い光が陽極の近くで見ることができた。光のスポットはスケールの上で18.3で一定を保っていた。それは非常に明るいが輪郭は明確ではない。磁石をスポットの位置に押し込むと8.5だけ沈んだ。曲がりは9.8mmであった。
563　排気が9.7M＝0.0073mmHg。暗部は今消える、そして、管全体が影の部分を除き明るい黄緑色となった。光のスポットはもはや特定の形をしていない。しかし、目盛の上に緑の光のスプラッシュと結び付けられているのかも知れない。」

Crookesの観察は興味深いが、この成功はひとえに高性能の真空ポンプを用いて高度な真空のもとに実験を行ったことにある。

II　電子の発見

1．陰極線の正体

（1）陰極線の正体についての議論

---

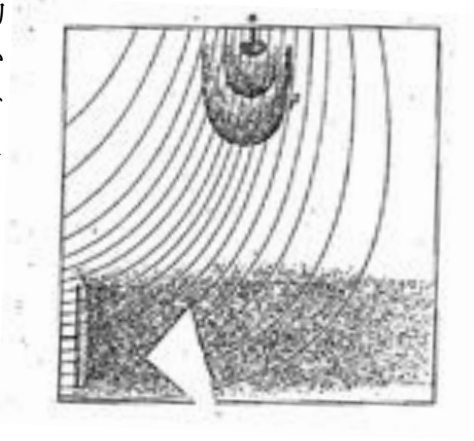
220 `Nottix uber die mechanische Wirkung der Kathodenstrahlen' H.Stark.Ann.der Phys 1900 iii p.101
'Conduction of Electricity through Gasses' Cambridge Physical series J.J.Thomson 1903 p.630
Stark はラヂオメーター効果が消えるほど真空度を高めるとこの効果が消えることを実験で確認、J.J.Thomsonは理論的に電子では車が回るほどの運動量が存在しないことを計算した。

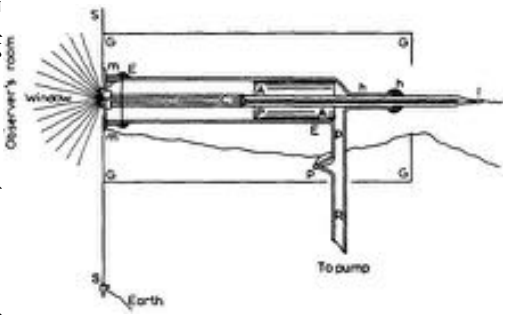
この時まで、陰極線は次のような性質を持っていると考えられた。[221]

(a) 線は陰極から放出され、排気された管を電流が通るように通過する。
(b) 線は直線状に進む。
(c) 線はガラスに蛍光（or燐光）を引き起こす。
(d) 線は磁場によって曲げられる。
(e) 線は一般に電極に垂直に放出される。
(f) 線の性質は陰極の物質によらない。
(g) 線は化学反応を引き起こす。
(h) 線は薄い膜にfocusされるなら膜を赤熱させる。（エネルギーを与える。）
(i) 線は力を与える、あるいは、運動量を運ぶ。

最後の現象をCrookesは水平の線の上に羽根車を載せて回転させる装置を工夫して紹介した（前ページの図）。ただし、この現象が運動量によって回転するというCrookesの説明は、前述のようにJ.J.Thomsonによって後年否定されている。

陰極線について、Crookesは、荷電分子の流れであるという描像を描いていた。彼は分子が陰極に衝突した時陰極から電荷を受取り、電場の作用で分子の流れを生じそのことによって陰極線が生じると考えた。この考えは上記の陰極線の性質をうまく説明できるように思えた。しかし、これにはいくつかの異論があった。特に、Goldsteinは、気体の圧力が0.0008mmHgぐらいの時は、平均自由行路の距離は約6ｍｍであることを示し、陰極からの暗部が6ｃｍもあることを説明することは困難であることを示した。（もっとも、Crookesは川の流れのように進むので衝突は避けられると主張する。）Goldsteinは、衝突が始まって光りだすと今度は到達まで１５０回も衝突し、直進することは困難であるとも主張した。このような議論と、当時、Hertzの研究で電磁波の存在が明らかになり、そのインパクトもあって、この陰極線も電磁波ではないかという議論が起こった。この議論はWiedemann,Hertzなどのドイツの学者によって主張された。この電磁波説も多くの点で陰極線の性質を表すことができたが、電磁波は磁石によって曲げられないこと、金属の表面のどこからも放出されることなどが困難として残った。しかし、磁石による影響はファラデー効果なども有り、まったくないとはいえない事情もあり、決着はなかなかつかない様相を示していた。特にHertzは薄い二枚の平板の中に陰極線を飛ばし直進する実験の際、平板の中の等電位線は直進する方向と全く関係ないような形を示すことを示し、陰極線は荷電粒子





[221] David L.Anderson 著'The discovery of the electron' 1964 p.24 を参照にした

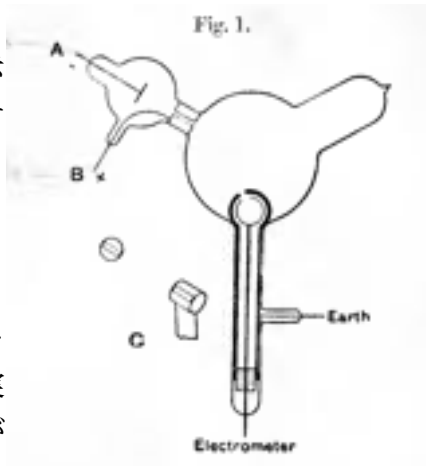
ではないことを主張した。（前頁右図の中の曲線は等電位線、下部の左側の極から右に真っすぐ伸びている影のように示されている部分は陰極線を示している。等電位線と陰極線は全く関係がないように見え、このことから、陰極線は荷電粒子ではないと主張した。）

更に、Hertz の弟子のLenard は、Crookesの管を用いてその窓の部分にアルミ箔を用い、陰極線がそのアルミ箔を通り抜けて広がることを観察した。これは陰極線が分子のような大きなものではなく、分子の間を通過できる波長の短い電磁波ではないかという説の根拠となった。

陰極線の正体が荷電分子なのかあるいは電磁波の一種なのかという議論の他に、新たな微小な荷電粒子であるという説がJ.J.Thomsonによって主張された。それは新しい物体の導入であり、いわば実体論的観点というべきものであった。

（２）陰極線が荷電粒子であることの証明・・・J.J.Thomsonの実験と議論

J.J.Thonsonは、Crookes管を用いた実験でこの議論に終止符を打った。「陰極線」と称したこの論文[222]は極めて重要なので以下に詳しく見てみよう。この論文の目的として、陰極線の本性を明らかにしたいということである。ドイツの学者は一般的にこれはエーテルの振動（つまり電磁波）であると述べ、もう一つは負電荷をもった荷電物質粒子の道筋を示すものだという見解が有るが、荷電粒子説はエーテル理論に比べて理論的結果を予言しやすいことから荷電粒子説を検討することにしたとしている。

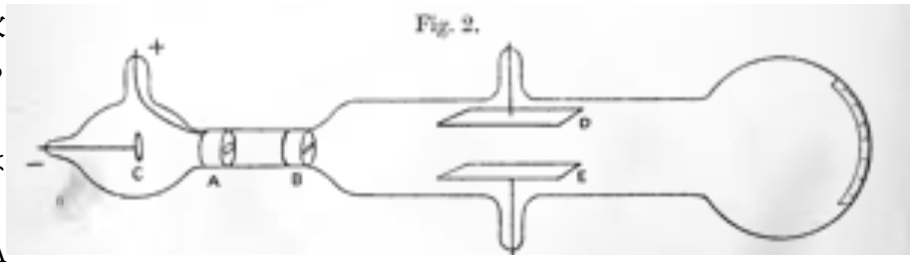


最初に、この線が負に帯電した粒子であるならば、容器の中に入れば負を示すことが期待できるとし、それはすでにPerrinによって証明されていることを挙げている。右図-1はThomsonによってPerrinの実験を改良したものである。Aは陰極Bは陽極であるが陰極線は真っすぐ進み管球内に入る。磁石によって磁場を掛けると陰極線は曲げられる。その終点は燐光を発するので、陰極線がどこに行っているかがわかる。磁石の強さを変えることにより、陰極線の終端をもう一つの円筒の入り口に入るようにする。この円筒は外側が接地され内側はelectrometer（検電器、電位計）に繋がれている。入り口に陰極線が届いた時は、1.5μFのコンデンサーを1秒間に20ボルトほど電位を高める多量の電気が得られることがわかった。（Thomsonはこの「電荷の莫大さに驚いた」と言っている。）。

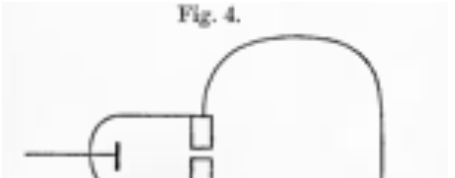
次にThomsonが行った実験は、Hertzによって否定された電場によって陰極線が曲がることの確認であった。ThomsonはHertzの実験を繰り返して、確かに陰極線は直進することを確認したが、実験を繰り返すことによって「曲がりが生じないのは陰極線によっ

[222] Phylosophical Magazine (5),44,293-316(1897)'Cathode Rays' 東海大学出版会から日本語訳が出ていてとても便利である。（８巻「電子」に収録）

て希薄気体に電気伝導性が与えられることによるものであることがわかった」のであった。そこで次のような実験を行った。（右図２）。Cが陰極で陽極はAでありスリットが入っている。Aは金属栓でアースされている。もう一つのアースされた金属栓Bに開けたスリットを通り抜けた後二枚の平行アルミ板を通る。この板は長さが5ｃｍ幅2ｃｍ間隔は1.5ｃｍであった。陰極線は更に通り抜けてガラスにあたり燐光を示す。間の外側に物差しの目盛を貼り付けて振れを測定する。二枚のアルミニウム板には蓄電池の両端につなぐと陰極線は曲げられる。上の板を正にすると線は上に上がる。電位差が２ボルトであっても確認することができた。曲がりが生じるのは良い真空のときに限られる。電池の接続を続けているとやがてもとに戻り曲がりがなくなるが、これは、あいだの空間に電気が流れて、アルミの板がイオンに覆われてしまうからであると考えられた。



次の実験は、磁場による陰極線の曲がり方である。Helmholtzのコイルの中に図のような釣鐘状の容器を置き、線がこの容器内を通過するときに写真を取ることによって道筋を決定するものである。（右図４で示されている。現在市販されている装置は右下図のようなもので、周りの二つの円形のコイルがHelmholtzのコイルである。これは島津製作所のカタログから引用した。この装置を扱う時写真で取るというのは良い方法である。特に現在はデジタルカメラがあるので便利である。）釣り鐘容器にはガラス板が入れられていて板には区分が書き込まれている。さて、陰極線は曲がりながら幅広い扇形となった。ガラス板上の燐光も一様には分布せず幾つかの線になっている。（実際、現代市販されている装置でも、筋は少しずつ広がっている。）陰極線の筋を見ることができるのは、容器の中に若干の気体があるからであるが、その気体の種類を（水素、空気・・・）に変えても道筋は無関係であった。



「陰極線は負電気の電荷を伴っており、静電気力によってあたかもその線自体が負に帯電しているかのごとく曲げられ、磁気力によってもこの線の道筋に沿って動く負に帯電した物体が磁気力から受けるのとちょうど同じような作用を受けるから、この線は物質粒子によって荷なわれた負の電荷である。」

Thomsonはこの実験から陰極線の道筋の半径が求まるのであるから、他の要因も考慮に入れて電荷や質量を求めている。まず、基本的な考え方をしめそう。はじめに、この陰極線は荷電粒子であるから、その粒子の質量をm、電荷をeとする。もちろん、一種類の荷電粒子からなるとする。「一定時間内に線束の任意の断面を通り過ぎる粒子の数をNとする」この時運ばれる電気量Qは

$$Q = eN$$

で与えられる。このQは、電気計（電位計）で測ることができる。次に、陰極線が衝突する部分は熱を発生することが知られている。運動エネルギーが熱に変わるとするならば、そのエネルギーをWとして、

$$W = N \times \frac{1}{2} mv^2$$

次に、磁束Hによって曲げられるが、その曲率を測定できる。曲率半径を ρ とすれば、

$$m\frac{v^2}{\rho} = eHv$$

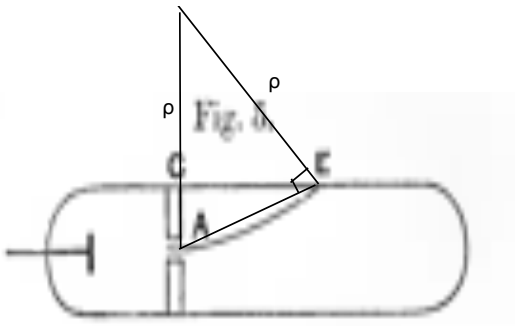
この式から e/m を求めることができる。

$$m\frac{v^2}{\rho} = eHv \rightarrow mv^2 = eHv\rho \rightarrow \frac{m}{e} = \frac{\rho H}{v}$$

$$W = N\frac{1}{2}mv^2 = N\frac{1}{2}eHv\rho \rightarrow v = \frac{2W}{NeH\rho} = \frac{2W}{QH\rho}$$

$$\frac{m}{e} = \frac{\rho H}{v} = \frac{\rho H}{2W} QH\rho = \frac{\rho^2 H^2 Q}{2W}$$

これらの量を実験によって決めるのだが、Thomsonは３つの場合について行った。ここでは、第一の場合だけを紹介しよう。用いられた管は前頁の図２のようなものである。ただし、図２に於ける金属板EとDは取り付けていない。まずCから出た線はBに落ちるようにして線のエネルギーを求める。Bの外側の円筒はアースされていて内側の円筒は電気計に接続されている。電気計のふれによって電気量Qがわかる。円筒形の後ろに熱電対が置かれていてそれによってエネルギーが測定される。次にこの管全体をHelmholtzのコイル（平行に置かれた円形のコイル）の中に置かれた。Helmholtzのコイルは磁束密度が計算される。陰極線の曲率は、右上の図５のAEが円弧であることから求めることができる。



$$(\rho)^2 = (\rho - AC)^2 + CE^2$$
$$0 = -2\rho AC + AC^2 + CE^2$$
$$2\rho AC = AC^2 + CE^2$$
$$2\rho = AC + \frac{CE^2}{AC}$$

実験結果は下の表のとおりである。この表において、中央のIと記されている量は、$I = \rho H$ のことである。Thomsonの値は右下の表の右から2番めのe/mで与えられている。現在知られているe/mの値は

$$e/m = 1.76\times10^{11}\ {}^{C}/_{kg}$$

であり、これをcgsemuに変えて[223]逆数を取れば

$$m/e = 0.57\times10^{-7}\ g/emu$$

となり、実験値は現在の値より若干小さい。しかし実験の方法（熱を測定する方法など）から見て妥当な値のように思われる。この他に二つの方法を用いて実験を行っているが、それは、ここでは割愛しよう。

Tube 1.

Gas.	Value of W/Q.	I.	m/e	e.
Air	4·6 ×10[11]	230	·57×10[-7]	4 ×10[9]
Air	1·8 ×10[12]	350	·34×10[-7]	1 ×10[10]
Air	6·1 ×10[11]	236	·43×10[-7]	5·4×10[9]
Air	2·5 ×10[12]	400	·32×10[-7]	1·2×10[10]
Air	5·5 ×10[11]	230	·48×10[-7]	4·8×10[9]
Air	1 ×10[12]	285	·4 ×10[-7]	7 ×10[9]
Air	1 ×10[12]	285	·4 ×10[-7]	7 ×10[9]
Hydrogen	6 ×10[12]	205	·35×10[-7]	6 ×10[9]
Hydrogen	2·1 ×10[12]	400	·5 ×10[-7]	9·2×10[9]
Carbonic acid	8·4 ×10[11]	260	·4 ×10[-7]	7·5×10[9]
Carbonic acid	1·47×10[12]	340	·4 ×10[-7]	8·5×10[9]
Carbonic acid	3·0 ×10[12]	480	·39×10[-7]	1·3×10[10]

もう一つ興味のある実験を行っている。それは、前頁の図2で示したような装置で、一様な電場をかけた場合と磁場を掛けた場合を比較するものである。わかりやすいように記号は現在よく使われているもので表すこととしよう。

一様な電気力強度（つまり電場の強さ）Eの下で陰極線が通り過ぎる距離を l 速さを v とすると、線がこの距離を横切る時間は l/v であらわされる。電場Eの方向（yとする）の速度は

$$v_y = at = \frac{eE}{m}\frac{l}{v}$$

電場Eから出るときの角度のtanは

$$\theta \approx \sin\theta \approx \tan\theta = \frac{v_y}{v} = \frac{eE}{m}\frac{l}{v}\cdot\frac{1}{v} = \frac{eE}{m}\frac{l}{v^2}$$

一方、磁力が働くときは、

---

[223] $1C=10^{-1}$cgsemu　$1kg=10^{-3}g$ を用いて計算する。

$$v_y = v\sin\varphi = \frac{eH\rho}{m}\cdot\frac{l}{\rho} = \frac{eHl}{m}$$

$$\varphi \approx \sin\varphi = \frac{eHl}{m}\cdot\frac{1}{v} = \frac{eHl}{mv}$$

電場による偏向θと、磁場による偏向φが同じ時は$\sin\theta = \sin\varphi$として、

$$\frac{eE}{m}\frac{l}{v^2} = \frac{eHl}{mv}$$

$$v = \frac{E}{H}$$

これをθの式に入れて

$$\theta = \frac{eE}{m}\frac{l}{v^2} \qquad v = \frac{E}{H}$$

$$\theta = \frac{eEl}{m}\frac{H^2}{E^2} = \frac{e}{m}\frac{H^2 l}{E} \rightarrow \frac{m}{e} = \frac{H^2 l}{E\theta}$$

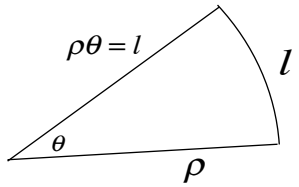
となる。Thomsonのこの導き方は若干複雑である。普通高校の教科書ではわかりやすく行っている※。この方法で求めたThomsonの実験結果は下の表のとおりである。

※高校生への註
現在普通に行われているのは、角度が同じであるということは力が釣り合っていることであるから

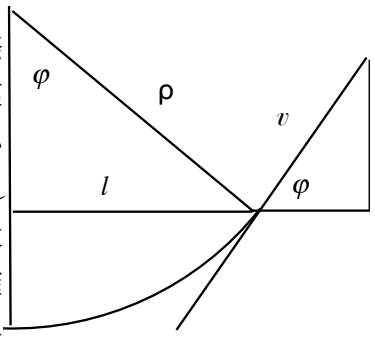
$$eE = evH$$

であり、これから $v = \frac{E}{H}$ をえる。一方、運動方程式から $m\frac{v^2}{\rho} = eHv \rightarrow mv^2 = eHv\rho \rightarrow v = \frac{\rho He}{m}$

$$\frac{E}{H} = \frac{\rho He}{m} \qquad \frac{m}{e} = \frac{\rho H^2}{E} = \frac{H^2}{E}\frac{l}{\theta}$$



この方法で求めたほうが、熱を測定する前述の方法より正確な結果が出そうであるが、実際は、あまり正確には出ていない。Thomsonは、この事実は極板間より外れたところでも磁場は存在するにもかかわらず、この計算結果にはその効果について考慮に入れていないことが原因であるとし、m/eの値は実際より大きくなっているはずと指摘している。確かに現在の正確な値はm/e=0.57×10^{-7}g/emuであり、一方、実験結果は例えば一番上で、m/e=1.3×10^{-7} g/emu であり倍近くなっている。



Gas.	θ.	H.	F.	l.	m/e.	e.
Air	8/110	5·5	1·5×10^{10}	5	1·3×10^{-7}	2·8×10^{3}
Air	9·5/110	5·4	1·5×10^{10}	5	1·1×10^{-7}	2·8×10^{3}
Air	13/110	6·6	1·5×10^{10}	5	1·2×10^{-7}	2·3×10^{3}
Hydrogen	9/110	6·3	1·5×10^{10}	5	1·3×10^{-7}	2·5×10^{3}
Carbonicacid...	11/110	6·9	1·5×10^{10}	5	1·5×10^{-7}	2·2×10^{3}
Air	6/110	5	1·8×10^{10}	5	1·3×10^{-7}	3·6×10^{3}
Air	7/110	3·6	1×10^{10}	5	1·1×10^{-7}	2·8×10^{3}

この実験を通してThomsonは次のような結論を得ている。

「これらの決定によって、m/eの値は気体の性質には無関係であること、及びその値10^{-7}は今まで知られていたこの値の最小値で電解の際の水素イオンの値である10^{-4}とくらべても極めて小さいことがわかる。」

周知のように現在ではm/eの値ではなく、e/mの値を用いるのが慣例であり

$$e/m=1.76\times10^{11}c/kg$$

である。ところで、m/eが小さいということは、ｍが小さいかｅが大きいか（あるいはその両方）であるが、Lenard の実験によれば、陰極線が物質を通過することからその平均自由行路が計算され、それは1/2㎝であることから普通の分子の平均自由行路よりも桁外れに大きく、粒子の大きさは普通の分子に比べてずっと小さいものでなければならないと結論されていた。こうして、陰極線は分子よりもずっと小さな荷電粒子であるという結論に達した。

Ｔｈｏｍｓｏｎは次に化学元素の構成について考察を進めている。すなわち、それまでは、化学元素は例えばProutによれば、様々な元素の原子は水素原子が集まったものと考えるのだが、このままの形ではこの仮説は維持できない。しかし、もし、水素の代わりにこの未知の物質Xを分子の構成物であるとすれば、今知られている事実の範囲でこの仮説に矛盾することはないと主張する。そしてこの未知の物質（粒子）をcorpuscleと呼ぶことを提案した。もちろんこれは今で言う「電子」（electron)のことである。

２．電気素量（電子の電気量）の探求

（１）X線の発見と研究

実は、Ｊ.Ｊ.Ｔｈｏｍｓｏｎの上記の論文が発表される以前の、１８９５年（明治２８年）にW.C.RoentgenによってX線が発見され[224]センセーションを巻き起こしていた。この報告によれば、まず

「１．大きなRuhmkorffコイルを用いて、Hittorfの真空管あるいは十分に排気されたLenardの装置、Crookesの装置、または類似の装置を通して放電をおこし、装置の管をうすい黒い板紙のおおいでかなりピッタリとおおっておく。完全に暗くした部屋の中で白金シアン化バリウムを塗った紙のスクリーンを装置の付近に持っていくと、放電のたびごとに、スクリーンの塗装面が放電装置に面するか否かに関係なくスクリーンが明るく輝く」

ことを観察した。蛍光は装置から２ｍ離れたところでもなお認められた。まず最初に気がつくことは光を通過させない黒い板紙を通過することである。さらに調べると、殆どの物体に対してこの作用因は透明であることがわかった。１０００頁の本も通過する。2から３ｃｍの樫の木材もほんの少ししか吸収しない。そして

「手を放電装置とスクリーンの間に置くと、手のかすかに暗い影の中に手の骨のもっと暗い影が見える。」

---

[224] Annalen der Physik ,64,p.1,p12(1898) Ueber eine neue Art von Strahlen Ⅰ物理学会に報告されたのは1895年、日本語訳は　物理学史研究刊行会編　物理学古典論文叢書７”放射能”　に収録　この節の「」は物理学古典論文叢書による。

銅、銀、鉛、金、白金は厚くない時、例えば白金の厚さが0.2mm以下の時は、この作用は透過する。厚さ1.5mmの鉛に対しては不透明である。厚さが大きくなれば不透明度が大きくなる。密度に関係するかと思ったが、必ずしも明確な結果はいられなかった。（現在では、電子密度が大きな影響を与えることが分かっている）。この作用因をX線と呼ぶこととする[225]。次に蛍光物質であるが、始めに用いた白金シアン化バリウムだけではなく、他にもガラス・方解石などが蛍光を示すことがわかった。特筆すべきは写真乾板がX線に感じやすいということである。次に重要な性質は、このX線は殆どの場合直進したことである。特に、陰極線は磁石によって屈折させられるが、X線においては「多大の努力にも関わらず、磁石によって、非常に強力な磁場の中においてさえ、X線の屈曲を得ることに成功しなかった」。物質を通過するときはほとんど屈折を示さないというこのX線の直進性からX線が放出される箇所が特定できた。こうして、「放電装置の壁の蛍光の最も強い場所が、すべての方向に広がっていくX線の主要な起点とみなされなければならない」ことがわかった。すなわちX線は陰極線が蛍光物質に衝突するところから発するということがわかったのである。このことから「X線は陰極線と同じものではないが、放電装置のガラス壁内で陰極線によって作り出される、という結論に達する。」

この報告の直後になされた報告IIでは、X線に対してもう一つの重要な性質が報告されている。すなわち

「X線が帯電体を放電させうるということを私は知っていた。」「**空気中におかれば正または負に帯電した物体は、X線で照射されると、放電し、それは線の強度が強ければ強いほど急激に起こる**」[226]

ということであった。この陰極線の衝突によってX線が発生し、X線が衝突することによって放電が起こるという現象は、Millikanの実験などにおいて重要な役割をはたすことになるが、それは次に述べることとする。ただし、この事実は、現在、学校において放電の実験を行う上で十分留意しなければならない事柄である。

このW.C.RoentgenによるX線の研究は、前述のJ.J.Thomsonの研究の前になされている。J.J.Thomsonが電子概念に到達するために、このX線の研究は実は重要な役割を果たした。すなわち、X線が気体に放射されると気体は絶縁体になったり帯電したりすることが示されるが、そのときに、X線の吸収は「伝導度とほとんど同一オーダーである」ことを、J.J.Thomsonの弟子のRutherfordが発見した[227]。このことから、

---

[225] 他の線と区別するために用いた。

[226] Annalen der Physik ,64,p.1,p12(1898) Ueber eine neue Art von Strahlen II 物理学会に報告されたのは1895年、物理学史研究刊行会編　物理学古典論文叢書７”放射能”　p.12

[227] Rutherford　"On the Electrification of Gases Exposed to Roentgen Rays Phil.Mag.43(1897) p.241

J.J.ThomsonはX線の吸収は、X線はその原子の帯電を変化させること、そして、吸収される物質の原子の量に依存することから、原子の中に存在する荷電のあり方を変化させられる荷電粒子は原子一個あたり一個程度と洞察した[228]。こうして原子には単位の電荷（の整数倍）が存在し、それは、原子を構成する原子よりもずっと小さい荷電粒子が担うという考えがJ.J.Thomsonの中で明確に考えられるようになったと推察される。そしてX線はこの原子の中の荷電粒子（電子）に作用すると考えたのである。このような、X線の研究が電子の発見に繋がったという考察は、宮下晋吉氏[229]の強調しているところである。

（２）電気素量の測定ーTownsendの取り組み

J.J.Thomsonの陰極線の研究はe/mを求めることができたが、J.J.Thomsonの言うcorpuscleすなわち現在の電子の電気素量ｅまたは質量mを定めることはできなかった。特に電気素量ｅは、これが求まればファラデーの法則とあわせてアボガドロの定数を定めることができるものであった。アボガドロの定数は、1873年（明治6年）ころには石鹸の膜の厚さあるいは油膜の厚さから10^{23}から10^{25}ぐらいと見積もられてはいたが、より詳しい値は未定であった。ｅの決定はアボガドロ数を決める上でも重要なことであった。

ｅの測定はまず、J.J.Thomsonの弟子のTownsendにより直接求める方法が提案され遂行された。そしてその研究はJ.J.Thomson、H.A.Wilsonに受け継がれ、集大成がMillikanの実験である。最終的には、教科書で取り上げられるMillikanの実験の詳細を述べるが、まずはTownsendの実験の紹介である。

Townsendの論文は1898年（明治31年）Philosofical Magazine に掲載された[230]。まず、実験装置の解説を行いながら、実験の内容を紹介していこう。

まず、電気分解によって生じる気体はしばしば電気を帯びているという事実から始める。Townsendはこの前にすでに報告した実験において、硫酸や水酸化カリ水溶液の電気分解によって生じる気体は電荷を帯びていて、泡状の液体がグラスウールを通過して霧状になってもかなりの確率で電荷が残っていること確認している。さらに凝縮して雲になる時、電荷を帯びることなしに雲が生成されないという性質があることを観測した。このことは蒸気の凝縮は電荷と結びついていることを示している。つまり帯電した気体の中で雲が生成される時は、水滴は電荷のキャリアの周りに形成されるという事実を明確に示している。このことから１個の電荷に一つの霧の粒ができるとが考えられた。（ただし、この仮説は必ずしも正確とはいえなかった。このことは、後の実験においてこの仮説に基づかない実験を考案することにつながっていくのである）。

---

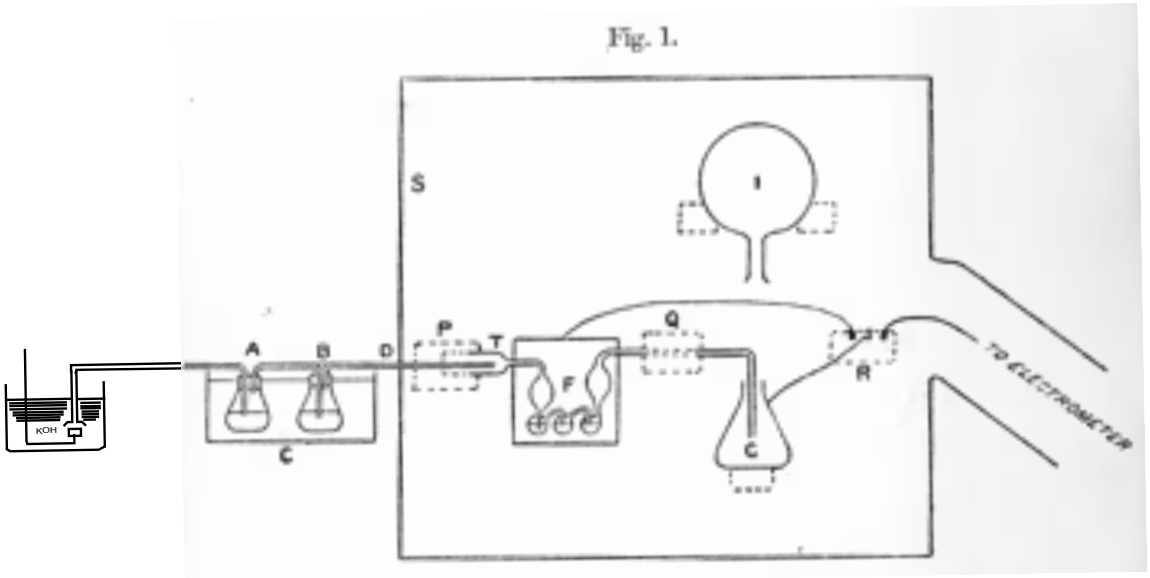
228 上記16)の論文のnote

229 宮下晋吉　科学史研究　第Ⅱ期　第20巻（№139）1981年秋　頁153　「J.J.Thomsonの陰極線の研究　(I) –イオンから電子へ、現代的構造形態へ-（「電子の発見」の研究、第III部）」

230 Phil.Mag. 45 1898 p125 Electrical Property of Newly Prepared Gases By John S.Townsend

下図は、Townsendの論文に掲載されている図ではあるが、ただし、一番左の電気分解の装置の図はわかりやすいように付け加えた[231]。

この図を用いて実験の概要を述べよう。正に帯電した酸素と水素が希硫酸の電池から最初に泡になり小さなフラスコAの中のヨウ化カリの溶液をとおり、それからBの中の蒸留水を通る。AとBは水槽の水Cに浸けられているので実験が遂行される間温度は一定に保たれている。Aは発生するオゾンを取り除くためである。Bによって気体は電荷を帯びた霧を生じその霧は輸送管Dを通って運ばれる。Dは大きな金属のスクリーンS



の中にあるパラフィンのブロックPの中に繋がっている。ブロックPは図に示されているように、湿気がパラフィンにとどまって絶縁を壊さないようにしてある。湿気を帯びた気体はパラフィンのトンネルPとQの間にある３つの硫酸の管Fに繋がっている大きな管Tの中に入り、気体が酸を通過し泡になったあと通常の条件でBから運び出された水蒸気をきれいにし、さらにその霧もまた完全に取り除かれる。この時取り除かれる水分は二つの部分からなる。すなわち、水滴の霧と空気の中の飽和水蒸気量である。管の中の重量の増大はこの二つの原因によって生じる。したがって、Fを通過する気体を飽和するのに必要な水蒸気の重量を全体から差し引けば、純粋に霧の重量が得られる。

Fを去った気体は絶縁された誘導体の一つに入る。これには二種類あり、小さい方のGは酸素をあつめるため、大きい方のIは水素を集めるために用いる。誘導体と管は両方共錫箔で囲われておりパラフィンのブロックの中で水銀のカップに接続されていて、したがって、いずれも容易に絶縁された電位計に接続することができる。電位計のよみに電気容量を掛けることによって電気量を測定することができる。ただし、電気量はFだけでは取り除くことができないのでGにもたまり、従って、電気量はFとGの和となる。

水滴の大きさは次の式から得られる。高校生への註

---

[231]荒木源太郎　原子物理学　培風館昭和３９年４月（第二版）p.３０の図を参照にした。

$$6\eta av=\frac{4}{3}\rho a^3 g \rightarrow v=\frac{2}{9}\frac{\rho a^2 g}{\eta}$$

ここで、ηは粘性係数、aは水滴の半径ρは水滴の密度vは水滴の落下速度である。

正の酸素の落下する速度は3分間で10ｍｍであった。これは水滴の半径に対して6.8×10^{-5}を与える。そして、負の酸素の落下速度は4分間で18ｍｍであった。これによる水滴の半径は7.9×10^{-5}をあたえた。こうして大きさがわかればそれぞれの水滴の重さを知り、そしてこれで対応する霧の重さを割れば１ｃｍ^{3}当たりの水滴の数を求めることができる。一方、１ｃｍ^{3}の電荷は測定できるので、水滴の数で割れば一個あたりの電荷を求めることができる。

こうして、正のときの電荷は2.4×10^{-10}であり負のときの電荷は2.9×10^{-10}で与えられることがわかった。実験の誤差を考えに入れるとこれら二つはおおむね3×10^{-10}に等しいと言うことができるであろう。

高校生への註
運動方程式は、速度に比例する抵抗を　$-kx$
重力を　mg
さらに最終的には等速度運動をするので加速度は0である。

$$F=ma \rightarrow mg-kx=0$$

ここで

$$k=6\eta av \qquad m=\frac{4}{3}\rho a^3$$

を用いれば上記のようになる。

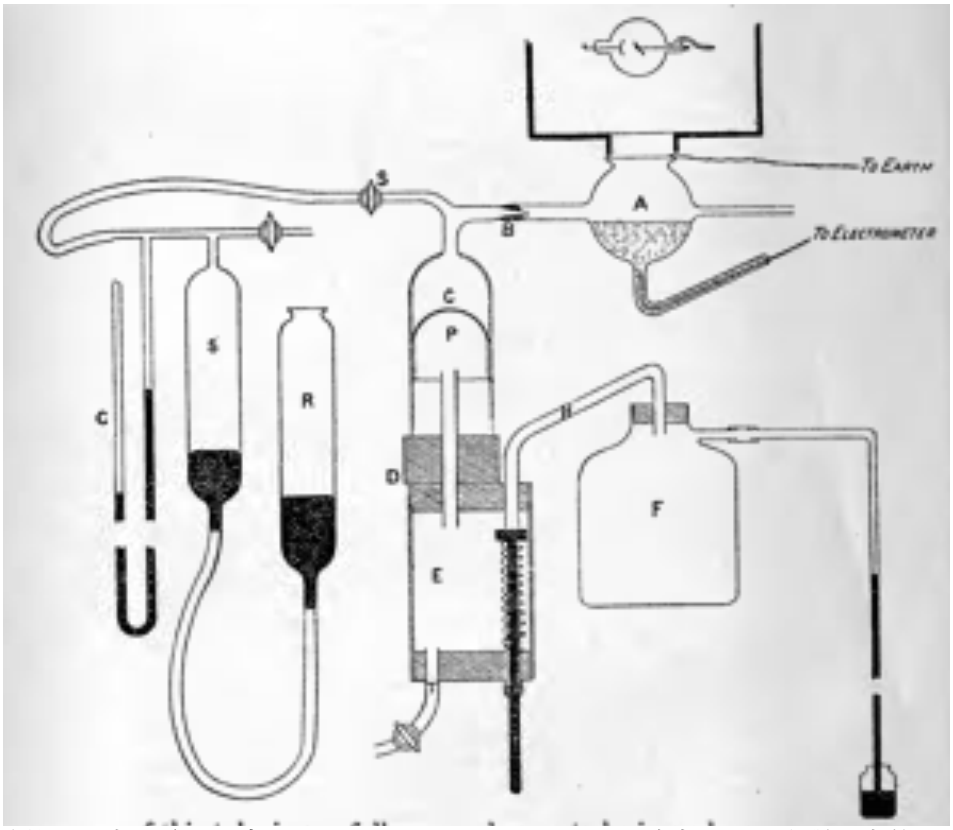
（３）電気素量の測定ーJ.J.Thomsonの実験

J.J.Thomsonもまた、電子の電荷を測定した。Thomsonはもともと X線の照射による電荷の発生は微小な荷電粒子すなわちThomsonの言うcorpuscle（現在の電子）の存在と不可分に結びついていた。そこでThomsonはX線の照射によって発生する荷電粒子の電荷を測定することとした。測定方法は、Townsend　が行った電子の電気量の測定方法とC.T.R.Wilsonが発見した荷電粒子による霧の発生の現象を組み合わせたものである。

用いられた方法についての理論は次のようなことである。レントゲン線に晒された気体を既知の起電力によって作用しさせ、その結果気体を通過して流れる電流を測定する。その電流値は積nevの値と一致する。ここでｎは気体の単位体積のイオンの数、ｅは一つのイオンの電荷、そしてvは正と負のイオンの平均の速度である。

トムソンの弟子Rutherford（Phil.Mag.vol.xlivp.422,1897)は多くの実験により単位の電位差（電場＝1）のときのvの値を測定した。これらの値を用いて気体を通過する電流を測定することにより積neが与えられる（$I=env$より)。したがって、もしｎが決められるならば、ｅの値を得ることができる。ｎを求める方法は次のとおりである。

「私がｎを決めるのに用いた方法はC.T.R.Wilsonによって発見されたこと、すなわち、気体がこれらの線にさらされていない時には雲ができないように膨張した埃のない空気をレントゲ



ン線が通過する時に雲が生成されることによっている。ある確定された膨張が突然埃のない気体に生じた時、断熱膨張により気体の温度の低下によって生じた水の量を計算によって知ることができる。その気体がレントゲン線に晒された時生じたイオンは周りに水が凝縮する核としての役割をはたすように思える。私は、すでに示したように、ある半径よりも小さな表面が帯電している球では、凝縮を生じる電荷の効果はそれを阻止する表面張力の効果ととのバランスすよりも大きいであろう。したがって、荷電イオンは核のように振る舞う非常に小さな水滴を生成するであろう。もし、それぞれのイオンが水滴に対して核のように働くならば、さらに、単位体積あたり凝縮する水の量と水滴の大きさがわかるならば、水滴の数つまり、気体の単位体積のイオンの数を決めることができる。研究の一つの課題はこうして水滴の数を決めることとなる。これをｎとすれば、探求する電気量はｎｅとなり、ｅを決めることができるようになる。」

霧の水滴の大きさを決めるのは困難であった。二つの方法が試みられた。最初は光学的な方法で水滴の大きさを決めることを試みた。アーク灯の細い光線を霧を通しそれをスクリーンで受けた時、幾つかの色の輪が見られた。これらの輪が回析によって生じたとしたなら、リングの大きさは液滴の大きさに還元できるだろうと考えたが、しかし、この方法は失敗した。つまり、大きさを光学的な方法で測定することはできなかったのである。

大きさを決めるために最終的に用いられた方法は霧が沈んでいく速度を測定し次の式から半径を用いる方法である。

$$v=\frac{2}{9}\frac{ga^2}{\mu}$$

ここでvは速度、ｇは重力加速度、μは粘性係数、ａは半径である。

次に、装置について説明しよう。Pはピストンで、EとFの真空により押し下げることによってCを膨張させる。SとRはその膨張を調整する。

「Aは、その中で霧の落ちる速度を測ることによって気体の電気的伝導度が測定できる容器である。それは、直径が36mmの球場のガラスの管でその上部がアルミニウムの板で覆われている；濡れた吸い取り紙がその板の下の部分に置かれ電流が吸い取り紙からこの容器の中の水の水平面まで流れている。吸い取り紙は、レントゲン線が垂直に当たる金属の表面の近くで生じる異常な帯電を取り除くためにアルミニウムに接して置かれものである。ランジュバンによればこの異常な帯電は表面が湿っている時は実際上生じないのである。

X線を生じるコイルと電子ビームの焦点のバルブは大きなイオンタンクの中に置かれ；そのタンクの底は穴が開けられAの上に支持されており、アルミニウムの窓によって閉じられている。容器Aはこの窓の下におかれ線を出すバルブはその窓の上方に距離をおいて置かれ、そのためにタンクから出てAに入った線はあまり広がらない。」

「タンクとAの頂点のアルミの板はアースされていてかつ象限電位計に接続されている。象限電位計の他の部分は水の表面Bに接続されている。この表面は電池の極に接続されて帯電している、電池の別の極はアースしてある。表面を帯電した後電池からの接続を切りレントゲン線が照射されていないときに漏れがあるかないかを調べることによって装置の絶縁状態を調べる。絶縁が良ければ線を照射すると荷電の漏れが始まる。もれの割合をX線を照射したときに1秒間に通過する電気量は系の電気容量が知られていれば知ることができる。」（・・系の電気容量は別途測定しておく・・・）」

もし、X線を照射したときに、電位計によって電位Eの1秒間の変化$V=\frac{\Delta E}{\Delta t}$を観測するならば、１秒間に流れる電流は$I=CV$で与えられる。一方、断面積を通過する電気量は速度をu_0　とし、この時単位体積にｎ個の帯電粒子があったとすれば１秒間に通過する電気量は断面積をＡとすれば、流れる電流Iは

$$I=neu_0EA$$

であるから、これが電気系に流れる１秒間の電気量に等しいので

$$CV=C\frac{dE}{dt}=neu_0EA$$

を得る。（Vは単位時間あたりの電圧の変化）

例えばJ.J.Thomsonは、電位計の電気容量Cは$C=38$ 極板の面積Aは$A=\pi\left(1.8\right)^2$　eは測定すべき電気量、u_0 は単位電位勾配における速さでRutherfordによってすでに測定されていて、$u_0=1.6\times3\times10^2=4.8\times10^2$　である。半径が求まっていてそれから粒子一個の量がわかり、過飽和の状態から水蒸気量が分かるので単位体積あたりの粒子の数は

$$n=\frac{q}{\frac{4}{3}\pi a^3}=2.94\times10^4$$

である。$\frac{dV}{dt}=\frac{1}{300}E$ として[232]上記の式に代入して

$$\frac{38}{300}E=\pi\left(1.8\right)^2\times4\times10^4\times e\times4.8\times10^2\times E$$

これから、$e=6.3\times10^{-10}esu$ を求めた。さらに、もともとXを照射しないときにも若干の電荷が存在していたとしてそれを補正し、最終的には

$$e=7.4\times10^{-10}esu$$

をえた。このような実験を幾つか行った結果は例えば次の表のとおりである。右から二番目の欄は照射されないときに含まれていたものを補正しない値である。これの平均は

$$e=7.3\times10^{-10}esu$$

となると結論している。

J.J.Thomsonは、その後X線を照射するのではなく紫外線を照射して同じような結論を得ている[233]。

Expansion.	Temp.	Current through gas.	Rate of fall of cloud.	e uncorrected for nuclei present without rays.	e corrected.
1·36	16	·243 E	·09	$6·7\times10^{-10}$	7·6
1·36	16	·133 E	·147	6·4	7·2
1·38	16	·143 E	·156	7·3	8·4
1·36	16	·196 E	·104	6·3	7·4
1·36	16	·115 E	·125	5·0	6·0

（4）電気素量の測定ーH.A.Wilsonの研究

電子の電気量の決定はH.A.Wilsonによって大きな進歩を遂げた。1903年（明治36年）に発表された論文[234]では、霧の中の水滴の数を数える方法ではなく、水滴に電場を掛け変化した速度を観察する方法に変えたのである。Wilsonは次のように述べる。

「TownsendやJ.J.Thomsonの実験では、霧の水滴にすべて一個づつ電荷が与えられると仮定されているが、実際は、霧の粒はそれぞれ一つとは限らず、二個かそれ以上のイオンをもつものが若干含まれるものである。」

そこで、水滴がイオンを一個含むものを特定して、それの運動に着目することによって求めることができれば、この不確定要素を取り除くことができると考えたのである。実際、まず一個の霧の水滴の速さ、つまり、電荷e、質量mを持つ水滴の空気中の落下速度を測定するのである。これをv_1としよう。この水滴に鉛直方向の場の強さXが水滴に作用させて水滴の速度を変化させて観測するのである。電場Xを加えると水滴に働く

---

232 象限電位計の1分間のメモリの変化が9であることから求めたようだが詳しいことはわからなかった

233 On the Masses of the Ions in Gases at Low Pressures Phil.Mag.(5) 48,p.547(物理学古典論文叢書参照)

234 H.A.Wilson　Philosophical Magazine 1903　65　p.429

力はXeになる。従って、水滴に作用する力の合力Fは重力と合わせて、F=Xe+ｍｇとなる。この時速度は変化してv_2になったとする。力と速度が比例するから、

$$\frac{mg}{mg+Xe}=\frac{v_1}{v_2} \quad \rightarrow \quad e=\frac{mg\left(v_2-v_1\right)}{Xv_1}$$

ところで　J.J.Thomsonの論文によれば、

$$m=3.1\times10^{-9}v_1^{\frac{3}{2}}$$

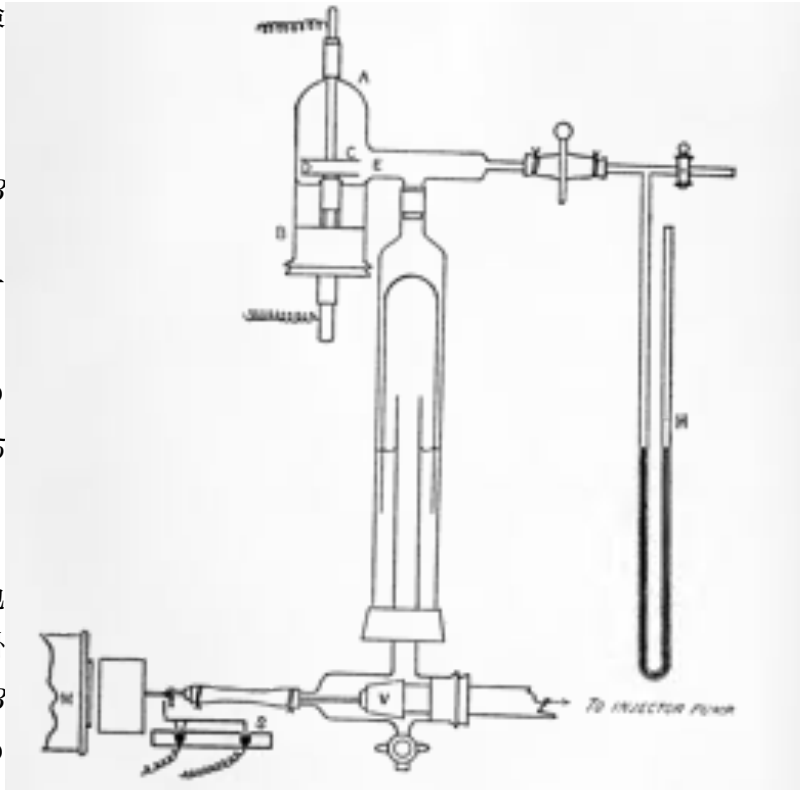
であるから、

$$e=\frac{mg\left(v_2-v_1\right)}{Xv_1}=3.1\times10^{-9}v_1^{\frac{3}{2}}\frac{g}{X}\left(v_2-v_1\right)v_1^{-1}=3.1\times10^{-9}\frac{g}{X}\left(v_2-v_1\right)v_1^{\frac{1}{2}}$$

となる。もし、Xが知られていれば、v_1とv_2を測定すればｅを絶対的に決めることができる。

強いレントゲン線では霧の水滴の中のいくつかはほかのものより大きいものがある。事実、しばしば数個集まったと思われるような比が　$1:2:3$　に近いものが現れる。したがって、いくつかは電荷を１個、いくつかは２個となっていることがわかる。これは強いレントゲン線のときに電荷が大きくなるJ.J.Thomsonの観察と合致する。

「私の方法の原理的に優れていると思われる点は霧の中の水滴の数を見積もる必要がないということである。あるいは、それぞれの水滴が１個のイオンを持っていると言うことを仮定する必要がないということである。これらの見積もりは実際近似的になりがちであり、水滴が一個以上のイオンを持つ危険性を持っている。」



実験の装置は右図のとおりである。ガラス管ABは直径が4ｃｍであり長さが10ｃｍである。その下部はインドゴムで止められている。CとDは真鍮の円盤でそれぞれ直径は3.5ｃｍである。観察される霧はこの間にできる。これらの間には小さな電池によって$2000V$の電圧が掛けられる。ガラス管EはABの側面に密着され円盤の

間の空間を望みの量に突然に膨張できる装置を備えている。小さな水銀のマノメーター（*H*)は膨張を測定するために用いられる。（膨張装置はC.T.R.Wilsonの親切により借りることができた）

装置は、バルブVが、それは開くことによって突然の膨張を引き起こすのだが、磁石Mによって急激に引くことができるようになっている。管ABの中の円盤の下の空間は水で満たされ従って円盤の間は水蒸気の過飽和の状態となった。

レントゲン線をABの近くで作動すれば、線はABの間を通過する。磁石に電流を通せば、突然に膨張が生じる。こうして円盤の間に霧が生じ、上方から下方へ液滴が落下する。電場を掛けないときのこの速さを測定し、更に電場を掛けて液滴の速さを測定すれば上記の数式より電荷eを得ることができる。

以下は実験結果の一例である。円盤の間の距離は　d＝0.45ｃｍ　用いた電位差は1800volt　落下時間は次の表のとおりである。

X=0.		X=133 E.S. units.	
	secs.		secs.
(1)	23·6	(2)	17·8
(3)	23·3	(4)	16·9
(5)	23·9	(6)	17·0
(7)	23·8	(8)	17·2
Mean...	23·65	Mean...	17·22

これから落下速度を求めると

$$v_1=\frac{0\cdot45}{23\cdot65}=0\cdot0190\ \frac{\text{cm.}}{\text{sec.}}$$

$$v_2=\frac{0\cdot45}{17\cdot22}=0\cdot0262\ \frac{\text{cm.}}{\text{sec.}}$$

この結果を用いて電荷と質量を求めると

$$e=3\cdot1\times10^{-9}\sqrt{\frac{v}{X}}(v_2-v_1)v_1^{\frac{1}{2}},$$

$$e=\frac{3\cdot1\times10^{-9}\times981\times0\cdot0072\times(0\cdot019)^{\frac{1}{2}}}{13\cdot3}$$

$$=2\cdot3\times10^{-10}\ \text{E.S. units.}$$

$$m=3\cdot1\times10^{-9}\times v_1^{\frac{1}{2}}=8\cdot1\times10^{-12}\ \text{gram.}$$

となる。

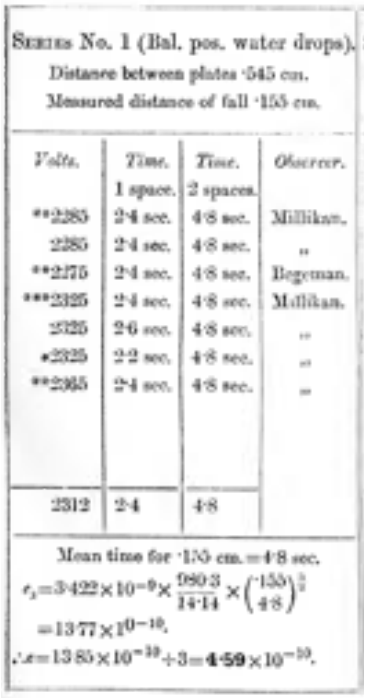
（５）電気素量の測定ーR.A.Millikanの研究

R.A.Millikanの研究の動機は単に電気素量を測定するというだけでなく、できるだけ精密に測定するということに有った。彼は、初期の研究[235]において次のように述べている。

---

[235] Phil.Mag.Vol.19 No110 Feb.1910 p.209 A New Modification of the Cloud Method of Determining the Elementary Electrical Charge and the most Probable Value of that Charge

「すべての物理定数において、主要で重要なものとして受け入れられているものは二つある。その内の一つは光の速度で理論物理学の中の基本的な式の中に多く現れるものである、そして、もう一つは要素的な電荷（電気素量）であり、その知識はそれによって原子や分子の絶対的な質量を決定したり、物質のある質量の中の分子の絶対的な数を決めたり、与えられた温度の分子の運動エネルギーを与えたり、その他多くの重要な物理的量を与えるものである。光の速さは二万分の一の正確さで知られている一方で、電気素量の値は最近に至るまで極めて不確定である。」



SERIES No. 1 (Bal. pos. water drops).
Distance between plates ·545 cm.
Measured distance of fall ·155 cm.

Volts.	Time. 1 space.	Time. 2 spaces.	Observer.
**2285	2·4 sec.	4·8 sec.	Millikan.
2285	2·4 sec.	4·8 sec.	"
**2275	2·4 sec.	4·8 sec.	Begeman.
***2325	2·4 sec.	4·8 sec.	Millikan.
2325	2·6 sec.	4·8 sec.	"
*2325	2·2 sec.	4·8 sec.	"
**2365	2·4 sec.	4·8 sec.	"
2312	2·4	4·8	

Mean time for ·155 cm. = 4·8 sec.

$v_1 = 3{\cdot}422\times10^{-9}\times\frac{980{\cdot}3}{14{\cdot}14}\times\left(\frac{{\cdot}155}{4{\cdot}8}\right)^{\frac{3}{2}}$

$= 13{\cdot}77\times10^{-10}$,

$\therefore e = 13{\cdot}85\times10^{-10}\div3 = \mathbf{4{\cdot}59}\times10^{-10}$.

つまり電気素量は様々な物理量を決める上で重要な役割を果たしているにも関わらず、その精度は極めて不充分であるというのである。１９１０年（明治43年）のこの論文では、液滴を替えないで追跡することによってH.A.Wilsonの実験の欠点を補おうとしている。そして一つの結論として、最初に電場を掛けて静止していた液滴が電場を取り除くことによって落下するその速度を測定すことにより不確定要素を取り除くことができるとして次のような式※と右図のような実験結果を得ている。

$$e = 3.422\times10^{-9}\frac{g}{X}v_1^{\frac{3}{2}}$$

右図の表からの結論としては電気素量（電子の電気量）は

$$e = 4.59\times10^{-19}\text{esu}$$

である。

※高校生への註

電場が働いていない時の速度をv_1とすると、

$$kv_1 = mg$$

電場Xが働いているときの速度をv_2とすれば、

$$kv_2 = mg + eX$$

この二つから

$$\frac{kv_1}{kv_2} = \frac{mg}{mg+eX} \rightarrow \frac{v_1}{v_2} = \frac{mg}{mg+eX}$$

ストークスの法則と球の体積の法則を用いれば

$$6\pi\eta a v_1 = \frac{4\pi a^3\rho}{3}g$$

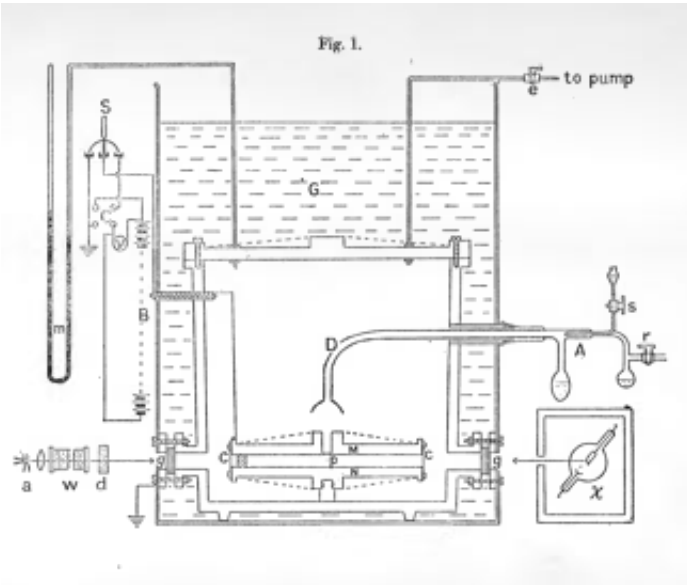
$$v_1 = \frac{4\pi a^3\rho}{3\times6\pi\eta a}g = \frac{2a^2\rho}{9\eta}g \quad m = \frac{4\pi a^3\rho}{3}$$

これから、

$$e=\left\{\frac{4\pi}{3}\left(\frac{2a^2\rho}{9\eta}\right)^{\frac{3}{2}}\right\}\frac{g}{X}\frac{(v_2-v_1)v_1^{\frac{1}{2}}}{\rho}$$

となる。電場を掛けたときには速さが0であるから、この式に $v_2=0$ を代入すれば、上記の式が導かれる。

この実験の後、液滴の追跡という方法を取るには水滴ではなく油滴のほうが望ましいという改良がなされた。そしてその後、油滴を用いて測定する方法が改良を重ねながら追求されていった。



次に紹介するのは1911年（明治44年）のPhysical Review に載った論文[236][237]である。題名からわかるように電気量を決定しアボガドロ数を決めようという論文である。論文の順序とは異なるが、始めに、イメージが持ちやすいので、実験装置について説明しておこう。右の図は、その実験装置の図である。[238]

Dは真鍮の容器である。左端のmはマノメーターであり、容器内の圧力を測定するものである。中央下のMとNは正確に作られたコンデンサーである。この中の気体は対流が生じないように温度を一定にする。そのために容器DはGas-engine oil の中に入れておいて実験中は0.02℃の違いがないようにした。左下のaはアークでコンデンサー内の気体の様子を観察するために光を入れなければならないが、光を入れると温度が変化するのでwとdで熱を吸収する工夫をしてある。Aから霧吹きで油滴を入れる。χはX線発生装置である。油滴の落下あるいは上昇の速度は、eyepieceの中の二本のHair Line を用いた。

---

[236]Physical Review　32ｐ．349-　"On the elementary electrical charge and the Avogadro constant"　R.A.Millikan

[237] この論文についての解説は、例えばシュポルスキー「原子物理学」などに詳しい。シュポルスキーの本に掲げら得ている実験の表はこの論文からのデータの引用である。ただし、実験の図は、私の本と同様に1917年のPhl.Mag.に掲載された論文の図を用いている。

[238] この図は、この論文ではなく1917年にPhil.Mag.に発表された"A New Determination e,N,and Related Constants" に掲載されたものであるが、霧吹きの様子が違っているだけである。こちらのほうがわかりやすいので載せることとした。（上述のようにシュポルスキーも同様である。）

次に、この実験を遂行する理論について述べよう。まず、自由に落下する場合と、電場によって強制的に落下する場合について考慮して次の式が成り立つことはすでに述べられている。ただし電場による力の向きは重力の向きと反対であるとしている。

$$\frac{mg}{mg-Fe_n}=\frac{v_1}{v_2} \qquad \rightarrow \qquad e_n=\frac{mg}{Fv_1}\left(v_1+v_{21}\right)$$

これをもっと便利な形に書けば

$$e_n=\frac{mg}{Fv_1}\left(v_1+v_2\right)=\frac{mg}{F\dfrac{d}{t_g}}\left(\frac{d}{t_g}+\frac{d}{t_F}\right)=\frac{mgt_g}{F}\left(\frac{1}{t_g}+\frac{1}{t_F}\right)$$

ここでt_gは重力によって線の間の距離dの間を落下する時間であり、t_Fは、その距離を電場Fの下に上昇して通過する時間である。

同じ液滴がn'の電荷が付け加えられた時はその時の上昇時間をt_F'として次の式が成り立つ。

$$e_{n+n'}=\frac{mgt_g}{F}\left(\frac{1}{t_g}+\frac{1}{t_F'}\right)$$

したがって、付け加えられた電荷は次のようになる。

$$e_{n'}=e_{n+n'}-e_n=\frac{mgt_g}{F}\left(\frac{1}{t_g}+\frac{1}{t_F'}\right)-\frac{mgt_g}{F}\left(\frac{1}{t_g}+\frac{1}{t_F}\right)=\frac{mgt_g}{F}\left(\frac{1}{t_F'}-\frac{1}{t_F}\right)$$

つまり、液滴上の電荷は

$$e_n==\frac{mgt_g}{F}\left(\frac{1}{t_g}+\frac{1}{t_F}\right)\propto\left(\frac{1}{t_g}+\frac{1}{t_F}\right)$$

で与えられ、付け加えられた電荷は

$$e_{n'}=e_{n+n'}-e_n=\frac{mgt_g}{F}\left(\frac{1}{t_F'}-\frac{1}{t_F}\right)\propto\left(\frac{1}{t_F'}-\frac{1}{t_F}\right)$$

で与えられることがわかる。

次頁の表は、実験結果の一例である。この表の、左の欄外の三角の印は、X線を照射するなどして、油滴の荷電が変わったところである。（この印はその脇の横線とともにR.A.Millikanの論文にはなく、説明のために補ったものである）この表は次のように見る。例えば、

$$e_{n'}\propto\left(\frac{1}{t_F'}-\frac{1}{t_F}\right)$$

であるから、この縦の欄の中の値の一番小さいものをさがせば、0.005348が見つかるので、たとえばこれを 1 とする。そうすれば、0.03234は6、0.03751は 7 などの値が得られる。これは、油滴に帯電している電荷変化を示している。同様に

$$\left(\frac{1}{t_g}+\frac{1}{t_F}\right)$$

の値から、油滴に帯電している電荷そのものの数を求めることができる。この値は、表の中にはないが計算で求めることができる[239]、例えば表の一番上の欄で言えば

TABLE IV.

Drop No. 6.

t_g Sec.	t'_{F_1} Sec.	t_{F_1} Sec.	t_F Sec.	$\frac{1}{t_F}$	$\left(\frac{1}{t_F}-\frac{1}{t_F'}\right)$	n'	$\frac{1}{n'}\left(\frac{1}{t_F}-\frac{1}{t_F'}\right)$	n	$\frac{1}{n}\left(\frac{1}{t_g}+\frac{1}{t_F}\right)$
11.848	39.9	80.2	80.708	.01236				18	.005366
11.890	11.2	22.4	22.366		.03234	6	.005390		
11.908			22.390	.04470				24	.005371
11.904	11.2	22.4	22.368		.03751	7	.005358		
11.882	70.6	140.4	140.565	.007192				17	.005375
11.906	39.9	79.6	79.600	.01254	.005348	1	.005348	18	.005374
11.838			34.748		.01616	3	.005387		
11.816			34.762	.02870				21	.005376
11.776			34.846						
11.840			29.286						.005379
11.904	14.6	29.3	29.236	.03414	.026872	5	.005375	22	
11.870	69.3	137.4	137.308	.007268				17	.005380
11.952	17.6	34.9	34.638	.02884	.021572	4	.005393	21	.005382
11.860					.01623	3	.005410		
11.846			22.104	.04507				24	.005386
11.912			22.368		.04307	8	.005384		
11.910			500.1	.002000				16	.005387
11.918			19.704		.04879	9	.005421	25	.005399
11.870			19.668	.05079					
11.888			77.630		.03874	7	.005401		.005390
11.894	38.9	77.6	77.806	.01285				18	
11.878	21.0	42.6	42.302	.02364	.01079	2	.005395	20	.005392
11.880					Means		.005386		.005384

Duration of exp. = 45 min.,
Plate distance = 16 mm.,
Fall distance = 10.21 mm.,
Initial volts = 5,088.8,
Final volts = 5,081.2,
Temperature = 22.82° C.,
Pressure = 75.62 cm.,
Oil density = .9199,
Air viscosity[1] = 1.824×10^{-4},
Radius (*a*) = .000276 cm.,
b/*a* = .034,
Speed of fall = .08584 cm./sec.,
$e_1 = 4.991 \times 10^{-10}$.

表に於いて一番左の $t_g = 11.848$、左から4番目の $t_F = 80.708$ より

$$e_n \propto \left(\frac{1}{t_g}+\frac{1}{t_F}\right)=\frac{1}{11.880}+\frac{1}{80.708}=0.084175+0.01236=0.096535$$

[239] シュポルスキーの本では補われている。

となる。これを0.005348で割れば、18.05となり、最小単位の18倍となる。これが欄の一番上の右から二番目の値である。逆に、0.096533を18で割れば0.00536となり、これが、欄の一番上の右端の値である。

n'とnの関係は図の折れ線（これも原論文には書かれていない）で示しておいたが

$$18+6=24$$

$$24-7=17$$

などであり、電荷が変化する様子がわかる。

Ⅲ　電子論

１．電荷と電流概念の変遷

我々は、１６００年のギルバートの議論から電気現象の探求の歴史を開始した。始め、電気現象はエフルービアと言われる現在の電場と電気量の渾然とした概念と結び付けられていた。つまり、摩擦するとエフルービアが流出し、その流れによって引力が生じると考えたのである。その後、電気現象の探求が進められていくうちに、斥力と引力の作用が発見され、さらに、その作用のもととなる原因が物体を伝わって移動することがわかった。こうして、電気現象を担う実体としての「電気流体」が探求の中心となっていったのである。電気流体は移動すること、さらに、一種あるいは二種の流体があること、電気流体はライデン瓶などに蓄えることができることなどが発見され、さらに、ボルタの箔検電器の発明により、移動を決定する電位の概念が形成されていった。この、電気流体の移動を探求する上での決定的な道具はボルタによって発明された電池であった。電池の発明による定常的な電気流体の移動は、発明されるとすぐに電気分解に結び付けられていった。ここに、化学変化と電気現象の間に密接な関係があることが予想された。一方電流が磁気作用を伴うことが、エールステッドによって発見された。エールステッドはこの時電気相克（ "electric conflict."）の考え方をしていたが、それは、物質の中では正の電気と負の電気が固く結びついているが、電気が流れるときにはその結びつきが結合再結合を繰り返しながら進んでいき、その時周りに渦上の歪みを生じそれが磁石に作用すると考えた。この正の電気と負の電気が結びついているという考えはフランクリンの考えを思い出させるものであった。

ところで、エールステッドの発見はアンペールへと受け継がれていくが、アンペールは電流についての具体的イメージの構築には慎重であった。それは、アンペールの理論が電流要素間の作用を扱っていて、要素に分解しても良いという電流とはどのようなイメージを構築したらよいかは簡単なことではないように思われのだろう。アンペールが慎重な態度を取ったことは理解できないことではない。例えば、分子が同じ向きに集まる時は物体の表面を電流が流れているというような主張は、実際に磁石の表面を電流が流れているわけではないのであるが、アンペールの慎重な態度だからこそ主張す

ることのできたプラスの面だったかもしれない。このようなアンペールの慎重な態度に対して、大胆に電流とは電気の物質的な流れであると主張したのがオームであった。同じ流体と言ってもフランクリンやボルタのイメージは気体に近いが、オームは液体の流れをイメージした。もっと正確に言えば、当時熱を研究したフーリエの熱量を参考にしたものである。フーリエの理論の温度は電位に対応され熱流は電流に対応された。熱量も断面積に比例するが、流れる電流もまた断面積に比例し、まさに、具体的な物質的なイメージを持った物理的流体であった。しかし、オームの法則は暫くの間認められることにはならなかった。オームの法則が受け入れられるに従って、大陸のアンペールの後継者たちは、電流を荷電粒子が金属内を移動するものとするイメージを持つようになっていった。この電流に関する描像は、アンペールの法則が、ニュートン力学を規範としたものであり、ニュートン力学は力は質量を持った物体（粒子）に作用するものであったことから考えれば自然なことであった。こうして、力が作用するのは電流要素ではなく内部の荷電粒子に作用するものとなり、その完成形は、ウェーバーによって与えられた。ウェーバーは、導線内を反対に移動する正負の荷電粒子に働く力を計算することによってアンペールの法則を導くことに成功したのである。

大陸でアンペールからウェーバーに理論が発展していく間、イギリスのファラデーは、電気分解の現象から電流の研究を始めていた。ファラデーは電気分解は電流なしには存在しない電流と密接な関係を持つこと現象であることを主張した。すなわち、電気分解は静電気による力の結果生じるのではなく電気の移動と結びついているとしたのである。この主張は一つは電気の移動と電気分解によって発生する物質の量は比例することによって得られたのである。ファラデーによれば、電気現象は誘導が基本であり、誘電体においてはそれは電気変位を生じるが、導体においては、エールステッドのように、結合再結合を繰り返すことによってどこまでも伝わって移動するものでそれが電流であるとする。ファラデーはさらに、分極の研究を通して物質の誘電率を測定し、真空にも誘電率があることをつきとめ、真空とは不導体と同じ性質を持つものとされた。そして、そこでは局所的にはたらく作用が前提とされ、力線概念が導入された。このことがMaxwellが電磁気学を完成させる上で重要な役割を果たした。

Maxwellの電流に関するイメージは、あくまでもファラデーの研究がもととなっている。つまり誘電体の分極の延長が電流であるというイメージである。誘電体は小さな導体の分子からできていれ、導体はどこまでも電荷が移動していくような誘電体である。導体の中の電流はコンベクション電流であり、誘電体内で分極を行う際移動する電流は変位電流である。しかも、真空もまた誘電体であるから、真空内にも電気変位を考える必要があり、したがって真空もまた荷電粒子を含んでいると考える。Maxwellにとっては真空も誘電体も同じ媒質（media）であり（真空の場合はエーテル）、媒質は分子（小さな絡まりのイメージ）からできており、分子の周りに荷電粒子が存在するとして電磁気学の基本法則を打ち立てようとする。しかし、やがて、このような描像はMaxwellの理論からは捨象され、それらはすべて媒質の運動を表現する基本法則の中に抽象的に組み入れられることとなった。Maxwellによれば、媒質は次の方程式群を満足する。

① 電場と時間の席は電気運動量（ベクトルポテンシャル）である。
② 磁束はある量の回転である。磁束線は常に閉じていて、湧き出し口がない。
③ 電気力は磁気の中での運動と電気運動量の時間変化とポテンシャルの勾配で与えられる。
④ 全電流はコンベクション電流と変位電流の和で与えられ、磁気の強さの回転の中止にある。
⑤ 物体の受ける力は磁場の中にある物体に流れる電流と磁荷、電場の中にある電荷に比例する。

特に最後の式は、電流に働く力、電荷に働く力、磁荷に働く力が渾然となっている。これは、物質粒子が電流的電荷的磁荷的性質を兼ね備えたものであるとの認識に立っていることを示している。少なくともそのような形式で物体に働く力が示されている。以前にHallの業績を述べた時Hallがマックスウェルの教科書の中に次の文章が有りそれを奇異に感じたことを述べた。

”次のことに注意しなければいけない。つまり、電流が流れている導体を磁力線を横切って動かす力は電流に作用するのではなく、それを運ぶ導体に作用するのである。”

物理学生への註
①から⑤までに対応する式は下記のとおりである。

① $\vec{A} = \int \vec{E}\, dt$

② $\vec{B} = rot\vec{A} \qquad div\vec{B} = 0$

③ $\vec{E} = \vec{v} \times \vec{B} - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - grad\Phi$

$$rotE = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

④ $J + \frac{\partial D}{\partial t} = rot\,\vec{H}$

⑤ $\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} + e\vec{E} - m \bullet grad\Omega$

電流と導体の間にどのような関係があるのか明確ではない。事程左様に電荷の位置づけがマックスウェルにおいては明確ではなく、それにもかかわらず理論として成立しているのは、概念を数式的に表現されているからに他ならない。更に理解を困難にしているのは、真空もまた誘電体であるとし、分極構造を持っているとしたことである。

この事態を打開したのはHertzであった。Hertzは、物質のない真空における電気的磁気的状態について議論した。マックスウェルにおいては、真空中の媒質（エーテル）の状況は、誘電体からの類推によって構成するために、マックスウェルが物理的意味を持つとされる様々な量が残されていたが、Hertzはそのような真空に対する物理的な描像は捨象した。そして、必要最小限の物理量によって媒質（エーテル）の状況を記述することとした。ポテンシャルは古い遠隔作用を含むものとして捨象し、電場と磁場だけを用いてエーテルの状況を記述したのであ。このような姿勢は「Maxwellの理論はマックスウェルの方程式である」というヘルツの言葉によく表されて、当時の物理学者に歓迎されたとゾンマーフェルドの電磁気学に書かれている。

こうしてヘルツはエーテルに対する次の性質を与えるところから電磁気学を始める。まず、エーテルの誘電率、透磁率は１であると定めた。まず、媒質の物理的実在を可能にするために、（１）電場磁場のエネルギーをさだめた。つぎに、（２）電場の変化、磁場の変化による相互作用の式を導入した。さらに（３）電荷や磁荷がないことを記述する式を導入した。

物理学生への註

Hertzの議論は既に述べたとおりであるが理解しやすいように再録しておこう。（１）（２）（３）を式で書くと次のようになる。これらの式の中にはポテンシャルは入らない。ポテンシャルは物理的には意味のない補助的な量であるとされたのである。

（１）エネルギーの式

$$U=\frac{1}{8\pi}\mathbf{E}^2+\frac{1}{8\pi}\mathbf{H}^2$$

（２）電場磁場の関係式

$$\frac{1}{c}\frac{\partial H_x}{\partial t}=\frac{\partial E_z}{\partial y}-\frac{\partial E_y}{\partial z}\qquad \frac{1}{c}\frac{\partial H_y}{\partial t}=\frac{\partial E_x}{\partial z}-\frac{\partial E_z}{\partial x}\qquad \frac{1}{c}\frac{\partial H_z}{\partial t}=\frac{\partial E_y}{\partial z}-\frac{\partial E_z}{\partial y}\qquad -\frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}=rot\mathbf{E}$$

$$\frac{1}{c}\frac{\partial E_x}{\partial t}=\frac{\partial H_y}{\partial z}-\frac{\partial H_z}{\partial y}\qquad \frac{1}{c}\frac{\partial E_y}{\partial t}=\frac{\partial H_z}{\partial x}-\frac{\partial H_x}{\partial z}\qquad \frac{1}{c}\frac{\partial E_z}{\partial t}=\frac{\partial H_z}{\partial y}-\frac{\partial H_y}{\partial z}\qquad \frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}=rot\mathbf{H}$$

（３）更に電荷がないので

$$\frac{\partial H_x}{\partial x}+\frac{\partial H_y}{\partial y}+\frac{\partial H_z}{\partial z}=0\qquad div\mathbf{H}=0\qquad \frac{\partial E_x}{\partial x}+\frac{\partial E_y}{\partial y}+\frac{\partial E_z}{\partial z}=0\qquad div\mathbf{E}=0$$

これが、真空の媒質の式である。この式の中には、Hertzが遠隔作用を示すしたポテンシャルの項は削除されている。たしかに、電磁場を表すならば以上の式で十分である。

さらに、誘電媒質の中では、以上の式の中に誘電率あるいは透磁率が書き加えられる。さらに、電流や電荷が存在する時は上の（２）の式は

$$\begin{aligned}&\frac{1}{c}\mu\frac{\partial H_x}{\partial t}=\frac{\partial E_z}{\partial y}-\frac{\partial E_y}{\partial z}\\ &\frac{1}{c}\mu\frac{\partial H_y}{\partial t}=\frac{\partial E_x}{\partial z}-\frac{\partial E_z}{\partial x}\\ &\frac{1}{c}\mu\frac{\partial H_z}{\partial t}=\frac{\partial E_y}{\partial z}-\frac{\partial E_z}{\partial y}\end{aligned}\quad\rightarrow\quad -\frac{1}{c}\mu\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}=rot\mathbf{E}\qquad\begin{aligned}&\frac{1}{c}\varepsilon\frac{\partial E_x}{\partial t}=\frac{\partial H_y}{\partial z}-\frac{\partial H_z}{\partial y}-4\pi\lambda\frac{1}{c}E_x\\ &\frac{1}{c}\varepsilon\frac{\partial E_y}{\partial t}=\frac{\partial H_z}{\partial x}-\frac{\partial H_x}{\partial z}-4\pi\lambda\frac{1}{c}E_y\\ &\frac{1}{c}\varepsilon\frac{\partial E_z}{\partial t}=\frac{\partial H_z}{\partial y}-\frac{\partial H_y}{\partial z}-4\pi\lambda\frac{1}{c}E_z\end{aligned}\quad\rightarrow\quad \frac{1}{c}\mu\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}=rot\mathbf{H}-4\pi\lambda\frac{1}{c}\mathbf{E}$$

電流はここでは電場によって表現されている。

こうしてHertzによって、真空の媒質の電気的状態、物質中の媒質の電気的状態が簡潔に示されることとなった。つまりHertzの考えでは、真空での媒質（エーテル）の電気的状態がまず決められ、媒質中の電気的状態は媒質の物質によって影響を受けて様々に変形されるものであると考えたのである。そして電荷や電流は、この電場や磁場によって

$$\rho=\varepsilon\left(\frac{\partial E_x}{\partial x}+\frac{\partial E_y}{\partial y}+\frac{\partial E_z}{\partial z}\right)\qquad\qquad \mathbf{I}=4\pi\lambda\frac{1}{c}\mathbf{E}=rot\mathbf{H}+\frac{1}{c}\mu\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

などとあらわされることとなった。

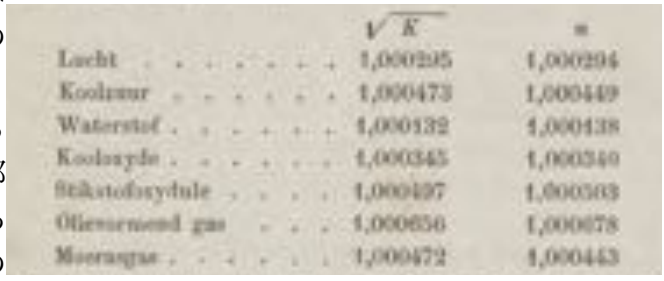
つまり電荷や電流はエーテルの特異点のような存在であった。できるだけ不必要な物理量は排除するというHertzの立場からは、このような場一元論的行き方に必然性があったように思われる。そして、この真空での媒質（エーテル）の電気的状態をアプリオリに与えられるという考え方が、場の概念を明確にし（つまり、何か別のものから説明されるのではなく自己運動するものとして与えられ）、他のものとの相対的関係を明らにしていった。この他のものこそ電荷であり、そのことを明確に捉えたのがローレンツである。

２．ローレンツの電子論

Hertzがマックスウェルの方程式における遠隔作用の残滓を残している（とHertzが考えた）ものを排除してエーテルの電気的状態を電場と磁場の方程式としてアプリオリに捉えたのに対して、ローレンツは、光の屈折率から気体の具体的イメージと結びつけてエーテルち物質の関係を捉えた。1880年の論文[240]では次のように述べている。

「Maxwellの理論はまだ、光の伝播、反射、屈折に適用されていない。私が研究したことは広く事実と照合することによって、私は屈折率と密度との関係を導いた。
私は物質の分子の間にはエーテルが存在するとし試みの仮定としてこの物質の性質を、分子に直接に接している近傍以外では真空におけると同一であるとした。」

気体においては、誘電率はほぼ１に近いことがしられている。ローレンツ自身が整理した気体の屈折率と誘電率との表は右下の図の表のとおりである。この表からみても、誘電率はほとんど１に近く、気体分子の誘電率に対する影響はほとんどない。誘電率の大部分は主としてエーテルの誘電率であることがわかる。このことと、その当時の気体分子運動論の分子に対しるイメージから、分子の間の空間にはエーテルが常に存在すると考え[241]、そしてこのエーテルの電気的性質は気体分子に影響されないものでエーテルそれ自身の持っている性質であると言う考えに導かれていった。



	$\sqrt{K}$	n
Lucht	1,000295	1,000294
Koolzuur	1,000473	1,000449
Waterstof	1,000132	1,000138
Kooloxyde	1,000345	1,000340
Stikstofoxydule	1,000497	1,000503
Olievormend gas	1,000656	1,000678
Moerasgas	1,000472	1,000443

ローレンツはもともとは、ウェーバーの電気力学、すなわち、荷電粒子にはたらく力の理論から出発していた。そこで、自己運動をするエーテルと相互作用をする分子、電荷の運動に注目する。Hertzにおいては、単にエーテルを規定するだけの存在であった電荷は、エーテルの他に運動する電荷をイメージするローレンツにとっては、荷電粒子

---

[240] Annalen der Phisik　247 1880 p.641Ueber die Beziehung zwischen der Fartpflanzungeschwindigkeit des Lichtes und der Koeperdichte; von H. A. Lorentz».

[241] 広重徹科学史論文集1相対論の形成ｐ．110　なお、広重氏のこの論文集に収められている「ローレンツ電子論の形成と電磁場概念の確率」その他の論文は、この章全体において参考にさせていただいた。

は客観的物理的実在でなければならなかった。ローランドの実験は、電荷の運動が電流となることを示していて、まさに、荷電粒子の運動としての実在性を示していた。さらに、当時の陰極線の研究[242]は、そのような実在の荷電粒子として微小な粒子の存在を要求をしていた。こうした状況のなかでローレンツは論文「運動している物体における電気的光学的理論に対する試論」[243]を発表する。この論文（「試論」と呼ぶ）の基礎となるはじめの部分においてローレンツは次のように述べる。

「運動物体内の電気現象の基本方程式を得るために、私は近年多くの物理学者によって主張されている一つの説に加担した。すなわち、すべての物体内に電気を帯びた小さな質量を持った粒子が存在していること、そしてすべての電気的過程がこれらのイオンの位置と運動によっているということを仮定したのである。」[244]

すでに述べたように、ローレンツの立場は、エーテルの自己運動とともに、エーテルと相互作用し独立に存在する荷電粒子、つまり、電気を帯びた小さな質量を持った粒子の存在を仮定した。

「電媒質の分子がそのような粒子を内在していて、一定の平衡の位置に結び付けられて、外からの電気力が働く場合にのみその位置を変位されるという考えは否定される理由が存在しないように思われる。こうしてまさにこのような物体の電気分極が成立しているのである」

こうして、次に、理論構成について記述する。

「イオン理論は自分の目的に甚だよく適合した。なぜならこらは十分満足が行く程度にエーテルに対して透過性を方程式に導入することを得せしめたからである。もちろんこれらは二つのグループに分けられた。
最初は、イオンの電荷（charge)、位置、運動によってエーテルの状態がどうなるかを表現しなければならない；それから二番目にエーテルが帯電した粒子にはたらく力によって示さなければならない。すでに引用した私の論文において、ある仮定のもとにダランベールの原理つまり経路の選択によって、ある形式を導出した、それはまたラグランジュの方程式のMaxwellの応用と同様なものである。ここでは、簡単のために基本方程式それ自身を仮説として導入することとする。」

つまり、イオンの間の空間のエーテルはMaxwellの方程式に従うものとし、荷電粒子に作用する力は粒子の置かれている場所の媒質の状態に依存する関数として表現されるものとした。

---

[242] ローレンツの下記の論文（33）が出た年は陰極線に関するPerrinの論文が出ている。2年後にはJ.J.Thomsonの陰極線に関する論文が出る。

[243] VERSUCH EINER THEORIE DER ELECTRISCHEN UND OPTISCHEN ERSCHEINUNGEN IN BEWEGTEN KÖRPERN VON H. A. LORENTZ, 1895. インターネットに英訳がある。

[244] 武谷三男 「量子力学の形成と論理」p．96 から。この論文（ローレンツの試論）の引用部分はこの武谷氏の著作の訳を参考にしたところが多い。

「即ちここに仮定された法則はGaussが1845年にWeberにあてた有名な手紙の中で電気力学理論に対して設置した要請に相当するものである。」

荷電粒子にはたらく力という考えはWeberやクラウジウスよって導入されたものであるが、その法則とは主要な点においては異なるものである。例えば、この荷電粒子にはたらく作用、即ち、粒子Aの近傍に依存する粒子Bからの作用は後者の運動に依存するがその時の運動とは依存しないとする。

この理論構成に従えば、エーテルの満足する法則と荷電粒子が受ける力とに分けられる。

この内、A。エーテルが満足する法則は、

１．電荷による電気変位。これは、電荷がない場合と、空間に電荷が分布されている場合に分けられる。電荷がない場合は電束線は閉じた曲線を描き、電荷密度がある場合は、電束線の数が電荷密度に比例する。

２．磁気の変位。これは、単位磁気がないので常にソレノイダルである。（磁力線は閉じた曲線を描く。）

全電流はコンベックス電流（荷電粒子の流れ）と電気変位の変化の和となる。

荷電粒子の流れの電流＝電荷×速度

３．電流の周りの磁場

一周の磁気力はその集の内部を通過する全電流に等しい。

４．一周の起電力は（導線がない場合でも）その中の磁束の変化に等しい。

B。荷電粒子が受ける力は、

５．電場から荷電粒子が受ける力＝電荷×電場

磁場から荷電粒子が受ける力＝電荷×速度×磁場

の二つの力の和である。

と整理されたのである。

物理学生への註

ローレンツの論文に比較的忠実にその内容を紹介しておこう。

まず、イオン間のエーテルは電気と磁気の二つの変位がある。まず電気変位 $\mathbf{d}$ は、積分で表示すれば

$$\int \mathbf{d}_n \, d\sigma = Q = \int \rho \, d\tau$$

で与えられる。ここで、Qは任意の閉じた空間σの内部の電荷である。

イオン間のエーテルが純粋のときは、$\rho = 0$ .Gaussの公式 $\int \mathbf{d}_n \, d\sigma = \int div\,\mathbf{d}\, d\tau$ を利用して、

$$div\,\mathbf{d} = 0$$

一般に、空間に電荷が分布している場合は、イオンの電荷の空間密度をρとするとき

$$div\mathbf{d}=\rho \quad \cdots\cdots ①$$

を得る。磁気誘導$\mathbf{B}$の場合はソレノイダルであるから、

$$div\mathbf{B}=0 \quad \cdots\cdots ②$$

次に、全電流は電荷の移動にともなう電流（convection　current)と電気変位の和であるが電荷の移動に伴う電流は

$$i=\rho v$$

で与えられる[註]ことがわかる。

註　いま、ｅをイオン一個の電荷であるとする。面Sで囲まれた領域の中にあるこのイオンがｖで動いているとしよう。ここで、導線の断面積がｄSであるとする。この断面を1秒間に通過する電気量を電流Ｉとすると、断面積Sをｄｔの時間

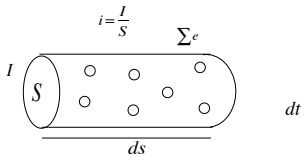
に通過する電気量は

$$Idt$$

これは断面積S長さｄｓの体積の中に含まれている電気量であるから、

$$Idt=\sum e \quad \cdots\cdots \text{(A)}$$

ところで速さｖとｄｓとの間には



$$ds=vdt$$

$$ds=vdt$$

の関係があるから、（A)の式に代入すれば

$$I\frac{ds}{v}=\sum e$$

したがって

$$Ids=\left(\sum e\right)v=\sum ev$$

単位電面積あたりの電流（電流密度）をｉとすれば、

$$i=\frac{I}{S}=\frac{\left(\sum e\right)v}{Sds}=\frac{\left(\sum e\right)}{V}v=\rho v$$

Maxwellによれば全電流密度は電荷の移動にともなう電流と電気変位の時間的変化によってあたえられるので、

$$\mathbf{C}=\mathbf{i}+\dot{\mathbf{d}}$$

磁気変位Bは$div\mathbf{B}=0$を満足するが、さらに、上記の全電流との関係では

$$\frac{1}{\mu}rot\mathbf{B}=\mathbf{C}=\mathbf{i}+\dot{\mathbf{d}} \quad \cdots\cdots ③$$

となることが知られている。ファラデーの電磁誘導の法則は、磁場の変化が電場を生じるという式

$$-\frac{1}{\varepsilon}rot\mathbf{d}=\frac{\partial}{\partial t}\mathbf{B} \quad \cdots\cdots ④$$

こうして①から④の式が自由なエーテルを表す式となる。

もしも、物質が静止していて、かつ、変位ｄが時間と独立である時、①と④は

$$div\mathbf{d}=\rho \qquad rot\mathbf{d}=0$$

が得られる。これからPoissonの式が求まる。すなわち、 $rot\mathbf{d}=0$ より

$$\mathbf{d}=-\varepsilon grad\phi$$

これから、

$$-\varepsilon divgrad\phi=\rho$$

$$\Delta\phi=-\frac{1}{\varepsilon}\rho$$

が得られる。

つぎの理論構成は、単位体積の物質にはたらく力を求めることである。力はポテンシャル関数の微分に電荷を掛けたものとして与えられるから、例えば、力のｘ成分は

$$f_x=-\rho\frac{\partial}{\partial x}\phi$$

で与えられる。ベクトルで書けば、

$$\mathbf{f}=-\rho\left(\frac{\partial}{\partial x}\mathbf{i}+\frac{\partial}{\partial x}\mathbf{j}+\frac{\partial}{\partial x}\mathbf{k}\right)\phi=\rho\mathbf{E}$$

$$\mathbf{E}=-\left(\frac{\partial}{\partial x}\mathbf{i}+\frac{\partial}{\partial x}\mathbf{j}+\frac{\partial}{\partial x}\mathbf{k}\right)\phi$$

⊿Vの体積領域の中にN個の電荷があるとした時に⊿Vに働く力は⊿V×ρ＝Ne　とすれば、

$$\mathbf{F}=-\rho\Delta V\left(\frac{\partial}{\partial x}\mathbf{i}+\frac{\partial}{\partial x}\mathbf{j}+\frac{\partial}{\partial x}\mathbf{k}\right)\phi=Ne\mathbf{E}$$

したがって、一個の荷電粒子にはたらく力は

$$\frac{\mathbf{F}}{N}=\frac{Ne\mathbf{E}}{N}=e\mathbf{E}$$

となる。例えば、⊿V'に一個の荷電粒子が有った時、Poissonの式からφを求めれば、

$$\phi=\frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{\rho'}{r^2}\Delta V'=\frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{e'}{r^2} \qquad e'=\rho'\Delta V'$$

ここでe'はeとは別の部分にある電荷を示している。この場合、eとe'の間に働く力は

$$\mathbf{F}=e\mathbf{E}=-egrad\phi=e\times\frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{e'}{r^2}=\frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{ee'}{r^2}$$

これはクーロンの法則にほかならない。

次に導体物質内部の電流が受ける力を求める。電流が受ける力は次の式で与えられることは知られている。今、長さｄｓの導線が受ける力をFとすれば、

$$F=Id\mathbf{s}\times\mu\mathbf{H}=iSd\mathbf{s}\times\mu\mathbf{H}$$

$$=\rho\mathbf{v}Sds\times\mu\mathbf{H}=\frac{Ne\mathbf{v}Sds\times\mu\mathbf{H}}{V}=Ne\mathbf{v}\times\mu\mathbf{H}$$

ここでNは長さｄｓの導線内の荷電粒子の数である。したがって、一個にはたらく力はFをNで割って、

$$\frac{F}{N}=\frac{Ne\mathbf{v}\times\mu\mathbf{H}}{N}=e\mathbf{v}\times\mu\mathbf{H}$$

これが一個の荷電粒子が受ける力である。したがって、運動している荷電粒子が受ける力fは

$$\frac{\mathbf{F}}{N}=e\mathbf{E}+e\mathbf{v}\times\mu\mathbf{H}\quad\cdots⑤$$

これがいわゆるローレンツの式である。ローレンツはこの後、電子にする仕事が電場磁場のエネルギーの減少に等しいこと、さらに、エネルギーの流れがPoyntingベクトルで表されることを示した。

３．ドルーデの金属電子論

電流に関するこれまでの様々な見解は、ドルーデの金属電子論によって一定の決着がつけられた。今日、例えば高等学校の教科書など議論されるイメージは、このドルーデの論文[245]に則ったものである。さらに、それまでの電流の概念では説明ができなかった幾つかの問題もこれによって解決されていった。以下に、この論文の内容を紹介する。ただし、P.Drudeは金属内部にはいくつかの種類の荷電粒子があると仮定して議論を進めているが、ここでは、移動する荷電粒子は一種類（つまり電子だけ）であるとして簡潔に述べたい。

P.Drudeによれば、気体分子の運動エネルギーは温度によって決まること[註1]、次に、このことから気体の圧力は運動エネルギーつまり温度によること[註2]が示されることを出発点とする。

註1　$\frac{1}{2}m_1u_1^{\,2}=\frac{1}{2}m_1u_{1x}^{\,2}+\frac{1}{2}m_1u_{1y}^{\,2}+\frac{1}{2}m_1u_{1z}^{\,2}=\frac{3}{2}kT$　k はボルツマン定数

註2 $p=\frac{1}{3}nmu^2=\frac{2}{3}n\frac{1}{2}mu^2=\frac{2}{3}n\alpha T=nkT=\frac{N}{V}kT$　nは単位体積あたりの分子の数

もう一つ、基本的な関係式は気体の拡散についてのものである。それは例えば、分子がある物理量を持っているとして、（例えば運動エネルギー＝温度）それが単位面積を通過して移動する（拡散する）量は

$$\textbf{通過する物理量}=\frac{\textbf{平均の速度}\times\textbf{平均自由行路}\times\textbf{分子密度}}{3}\times\textbf{距離による物理量の変化}$$

で与えられることをも用いた。

（物理学生への註）各分子がある物理量QをGという値だけ持っている時、単位時間に単位面積を通過する物理量Qはu:分子の平均の速度　l ;平均自由行路　N;単位体積あたりの分子の数　G;分子が担う物理量
x ;距離　として

$$Q=\frac{ulN}{3}\frac{\partial G}{\partial x}$$

が成り立つということである。

---

[245] Annalen der Phisik　306 1900 p.576 "Zur Elektronentheorie der Metalle"; P.Drude.

結果は、ある量の拡散する大きさはその量を持っている分子の運動の激しさと分子が衝突しないで進む距離さらに、分子の密度に比例することが示されている。

この考え方を、熱の流れと電気の流れに適用して、熱伝導率と電気伝導率の比が温度に比例する普遍定数になることを示した。つまり熱伝導が大きい時は電気伝導も大きいというよく知られた経験事実を証明することができたわけである。

（物理学生への註）

上記の式を熱の流れに適用する。求めるQは熱の流れでWとする。Gは運動エネルギーで

$$G=\frac{1}{2}mv^2=\alpha T$$

これを代入すれば

$$W=\frac{ulN}{3}\frac{\partial G}{\partial x}=\frac{ulN}{3}\frac{\partial \alpha T}{\partial x}=\frac{\alpha ulN}{3}\frac{\partial T}{\partial x}=\kappa T$$

$$\kappa=\frac{\alpha ulN}{3}$$

ここでκは熱伝導率である。

一方、電気伝導は次のようになる。つまり、熱による不規則な運動に電場による運動が付け加わると考える。電場による運動は運動方程式から

$$m\frac{dv}{dt}=eX$$

$$v=\frac{eX}{m}t$$

したがって平均の速度は

$$\bar{v}=\frac{eX}{2m}\tau$$

ここでτは不規則な運動によって衝突する間の時間である。つまり、不規則な運動をしているとき衝突と衝突の間のじかんであり、この間電場の方向に運動する平均の速さを示している。不規則な熱運動の平均は0となり流れに寄与しない。このτは平均自由行路を用いると

$$\tau=\frac{l}{u}$$

で表される。ここでuは不規則な分子の運動（熱運動）であり、温度によって、

$$\frac{1}{2}mu^2=\alpha T$$

で与えられる速度のことである。このことを考慮に入れて電場の方向の平均の速度を表せば

$$\bar{v}=\frac{eX}{2m}\tau=\frac{eX}{2m}\frac{l}{u}=\frac{eX}{2m}\frac{lu}{u^2}=\frac{eX}{4}\frac{lu}{\alpha T}$$

これが一個の粒子の平均の速度であるから、電流は

$$j=e\bar{v}N=e\frac{eX}{4}\frac{lu}{\alpha T}N=\frac{e^2}{4}\frac{lu}{\alpha T}NX=\sigma X$$

したがって

$$\sigma=\frac{e^2}{4}\frac{lu}{\alpha T}N$$

を得る。ここでσは電気伝導度である。熱伝導率と電気伝導率を比較すれば、

$$\frac{\text{熱伝導率}}{\text{電気伝導率}}=\frac{\kappa}{\sigma}=\left(\frac{\alpha ulN}{3}\right)\div\left(\frac{e^2}{4}\frac{lu}{\alpha T}N\right)=\frac{4}{3}\left(\frac{\alpha}{e}\right)^2 T$$

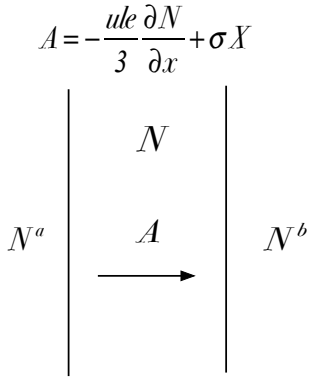
つまり熱伝導率と電気伝導率が比例することがわかる。

また、そのことが成り立つのは熱や電気を運ぶものが一種類の物質つまり電子であることを示していることも指摘した。

さらにP.Drudeはいくつかの議論をしているが、ここでは、以前から我々が取り上げてきた接触電位差と、熱起電力について議論しているのでそれを紹介しよう。

（1）接触電位差

今右図のように電子密度の異なる金属aとbが有りその間に移行層があるとしよう。金属aでの電子密度をN^a、金属bでの電子密度をN^bとする。移行層の電子密度は距離xに依存するが、それを単にNと表現しよう。もちろんNはN^aからN^bへ変化していく。議論は金属を接触した時は、この移行層の中での拡散による電子の移動と電場による電子の移動が釣り合ったとするのである。つまり電荷の密度の電場と密度による拡散が同じくなって接触部分で電位差が生じるというのである。これは高校生でもわかるかもしれないので、本文の中で展開しよう。



電子の流れは、拡散による流れと、電場による流れがあるが、拡散による流れは、

$$\frac{ule}{3}\frac{\partial N}{\partial x}$$

で左向きである。（Nがaからbへ行くに連れて大きくなっているとする。）

一方電場による力が左から右に働いて流れは右向きであるとする。

$$\sigma X$$

この二つの合成が流れであるから、

$$A=-\frac{ule}{3}\frac{\partial N}{\partial x}+\sigma X$$

を得る。ここで平衡状態になった時は流れがなくなったときであるから、$A=0$とおいて、

$$0=-\frac{ule}{3}\frac{\partial N}{\partial x}+\sigma X$$

これからXを求めれば

$$X=\frac{ule}{3\sigma}\frac{\partial N}{\partial x}=\frac{4\alpha\sigma eT}{3e^2\sigma N}\frac{\partial N}{\partial x}=\frac{4\alpha T}{3eN}\frac{\partial N}{\partial x}$$

ここで

$$\sigma=\frac{e^2}{4}\frac{lu}{\alpha T}N \qquad lu=\frac{4\alpha T\sigma}{e^2N}$$

を用いた。これからaとｂの電位差を計算するには、この電場Xを積分すれば良い。

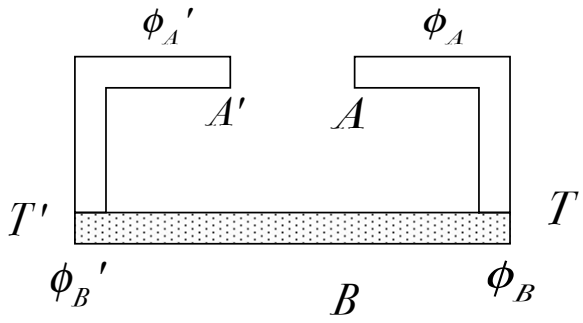
$$V_a-V_b=\int_a^b X\,dx=\int_a^b\frac{4\alpha T}{3eN}\frac{\partial N}{\partial x}dx=\int_a^b\frac{4\alpha T}{3eN}dN=\frac{4\alpha T}{3e}\log\frac{N_b}{N_a}$$

したがって、二つの電子密度の異なる金属の接触面では密度の違いによる電位差が生じることがわかる。しかも、その電位差は、温度にも関係する。このことが、次の、温度差による起電力、つまり、いわゆるゼーベック効果の説明を可能にする。

（２）熱電気（ゼーベック効果）の説明

熱電気はオームがその法則を研究するときに用いた方法であるが、その説明はこのドルーデの理論によって明確に説明された。

熱起電力は右図のようなものである。右図のAA’間に起電力が生じその間に測定するものをはさみ、それを流れる電流を測定してオームは実験を行った。



さて、異なる金属が接触している部分の温度がそれぞれT、T'であるとしよう。このとき次の関係式が成り立つ。

$$\phi_A-\phi_B=\frac{4\alpha T}{3e}\log\frac{N_B}{N_A}$$

$$\phi_A'-\phi_B'=\frac{4\alpha T'}{3e}\log\frac{N_B}{N_A}$$

$$\phi_B'-\phi_B=(\phi_B'\phi_B)$$

ここで最後の式はB’とBの間の電位差であるが、これは非常に小さいとして

$\phi_B'-\phi_B=(\phi_B'\phi_B)\approx 0$ とすれば、

$$\phi_A'-\phi_A=(\phi_A'-\phi_B')+(\phi_B'-\phi_B)+(\phi_B-\phi_A)$$

$$=\frac{4\alpha T'}{3e}\log\frac{N_B}{N_A}+(\phi_B'-\phi_B)-\frac{4\alpha T}{3e}\log\frac{N_B}{N_A}$$

$$=\frac{4\alpha T'}{3e}\log\frac{N_B}{N_A}-\frac{4\alpha T}{3e}\log\frac{N_B}{N_A}=(T'-T)\frac{4\alpha}{3e}\log\frac{N_B}{N_A}$$

$$\phi_A-\phi_B=\frac{4\alpha T}{3e}\log\frac{N_B}{N_A}$$

つまり、起電力は温度差に比例することが導かれる。

P.Drudeの金属電子論によって一定の終わりとしよう。しかし、P.Drudeの議論は電子がすべて同じ速度で運動しているために速度分布を考えないという不十分な点を残している。速度分布を考えた議論はローレンツによって行われた。ローレンツはMaxwellの速度分布を利用しているが、金属電子の速度分布は現在ではフェルミ分布を利用しなければいけないことが分かっている。いずれにせよ、電子はその大きさからして量子力学の対象であり詳しく議論するためには量子力学を完成を待たなければならない。量子力学で電子を扱ったからと言って、電子のすべてを理解し尽くしたことにはならない。「電子といえども汲み尽くすことはできない」のである。

結局、すべての学問は常に発展を遂げているのであり、完成形は存在しない。理解もまた、常に動的で発展的な様相を示し続けるのもので、そういう意味では「探求の過程」とはある意味の真実を伝えているのかもしれない。

おわりに

電磁気学の歴史を追求してきた。それは学問を理解するためにあるいは指導を行うためには、その問題がどのようにして解決されてきたのかを具体的に知る必要があると感じられたからであった。しかし、同時に、科学というものはどのようにして発展したのかという一般論もまた、科学を理解したり研究したりする上では必要なことのように思われる。また、科学の発展は終わりのない「探求の過程」であるという観点からもそうである。そこで、終わりに、科学の発展の一般論についてまとめてみたいと思う。

科学の発展によって得られた自然界全体の知見をもとに、物質の存在様式にたいしては次のような一般的な原則を確認することができる。

物質は無限に多くの連関の中に存在していて、さらに運動・変化を属性として有するものである。そしてこのような連関の中にあり、運動や変化を属性として持つ物質は、階層やグループや類などを形成し[246]、生成し、発展し、消滅する性質を持ち、独自の法則を有する。

このような特徴を持つ物質であるからそれに対する人間の認識は連関を通じて行われる。そのように連関を通して実践的に理解することこそ科学的理解である。連関を無視し、絶対的な信心を基礎とするのは信仰である。科学とは連関を通して行われるこのような理解であることを具体的に見てみよう。

電場は、電荷に対して作用を及ぼす。$F = eE$。Eは電場、Fは力eは電荷である。つまり電場とは電荷が受ける力として理解される。しかし、それだけではなく、電場は、電気量から影響を受けるという側面を持つ。このときの電場は電束密度Dを用いて$Q = \oint D \cdot dS$と表現される。Dは電場の電束密度と呼ばれ、Qは電気量、SはQを取り囲む面積である。このように、同じ電場でも、どういう連関の中で理解するかによって異なった表現を見せる。さらに続けよう。電場はポテンシャルとの関係で言えば$E = -grad\phi$で与えられる。また、相対性理論によれば、運動している座標から電場を

---

[246]地球は太陽系を構成している。太陽は恒星であり、恒星が集まって星団を形成し、恒星や星団が集まって銀河を形成している。銀河は単独で存在することもあるし、集団で存在することもある。銀河の集団は、銀河群、銀河団と呼ばれ、銀河団や超銀河団の分布が網の目状の宇宙の大規模構造を形成している。網の目の間の空間には銀河がほとんど存在せず、超空洞（ボイド）と呼ばれている。

われわれの地球は、巨視的物体からできている。巨視的物体は、多くの場合、固体液体気体からなる。これらは、微視的な分子や原子からなり、原子や分子はさらに小さな素粒子からできている。このように自然は階層をなしていて、それぞれの階層に応じた物質からなり、それぞれの階層に応じた固有の法則に従って運動したり変化したりしている。

物質は、上記のような大きさによる階層構造持つだけでなく、固体地球、液体の海洋、気体としての大気のように、また、生命体のように、地球の表面上に局在しながらグループを形成し、それ独自の法則をもって運動し、存在している。

記述すれば、磁場が生じることが分かる。$E_y = \frac{E_y - c\beta B_x}{\sqrt{1-\beta^2}}$。つまり電場は磁場と同等であり見方の違いと言うことになる。（$\beta = \frac{v}{c}$, B は磁束密度、 c は光速、 v は観測者の速度である。）ポテンシャルとの関係で言えば、ベクトルポテンシャルＡを含めれて、$E = -grad\phi - \frac{\partial A}{\partial t}$ となり、さらに、変動する電場は、光となることが分かっている。このように電場は、様々な連関の中で様々にその姿を変えるのであり、表現も異なるのである。

こうして物質は様々な連関を持つものであり、したがって、連関によって規定される。この規定された物質を物体と呼ぼう。物体は例えば電子、例えば原子例えば天体などのように一般に階層やグループや類などを形成する。そして特有の現象と法則を伴っている。このように現象や法則を伴い一定の階層やグループを形成するような規定された物質を特に実体と呼ぶこととしよう。

自然のこのような構造を考えるならば、それを認識するには次のような特徴があるといえる。

自然界にはお互いに連関したどのような現象があるか。（How,いかにと言う認識）
どのような物質がその現象を担っているのか。実体の認識。（what、何がと言う認識）
実体がどのような運動と法則でその現象を引き起こすのか。（Why、なぜと言う認識）

この三つの認識の仕方は「はじめに」のところで触れたようにわれわれがいわゆる「わかる」ときのパターンでもある。このような自然界に対する認識の様式は武谷三男氏が三段階論と呼んだものに似ているが、ここでは自然に対する理解の仕方であると言うことにしよう。

現象とは、第一義的には人間の感覚によるが、さらに、個人的集団的実践を通して、認識されたものである。実践は一般に法則を適用して行われるものであるから、実践による認識とは法則を含むものであり、その意味で本質的理解を含んでいることを意味する。つまり現象は本質を媒介とする。

本質とは、一般に、法則的理解のことであり、普遍的、必然的、不変的なものである。法則は物質の多様な存在を認識するものであるから、人間認識の多様な発展を前提としさらにその実践を前提とする。したがって、本質的（法則的）理解には、人間認識の多様性を援用することが必要であり、多様性を豊かにしていくことが求められる。

現象（実践）から、本質的理解に進むためには、連関を担う客観的な物質（実体）を把握しなければ、机上の空論となる。その意味で、実体についての探求は常に必要とされる。

ここで留意しなければならないのは、運動と物質と連関を統合的に認識するためには認識されない（統合されない）部分を切り捨てなければならないこと、つまり無限の

連関と運動の中からそのカテゴリーの物質と運動を切り出し他を切り捨てなければならないこと、そうでなければ法則は認識できないことである。切り捨てられた部分は、そのカテゴリーに対しては矛盾となり、次の新しいカテゴリー認識の出発点となる。エンゲルスは次のように述べている。「個々の現象を理解するためには、我々はこれを普遍的な連関からきりはなし、孤立させたままでこれを考察しなければならない、そしてそうした場合にこそ交替変化する諸運動は、一つが原因他が結果として現れることになるのである。」これは認識の問題であると同時に、客観的な物質のカテゴリーの存在様式の特徴でもある。つまり、一つの主要な運動からはみ出た物質が次の新しいカテゴリーを形成するのであり、矛盾が発生や発展の原動力であるといわれる所以である。また物質の発展の度合いによっては、成熟した本質的な法則もあれば、表面的な未成熟な法則もある。

電磁気学の歴史においては、現象は実験であり、実体は、電荷（電子など）、電場（電磁波）などであり、法則はアンペールの法則、マックスウェルの法則、ローレンツの法則などである。法則は適用範囲の狭い法則もあればかなり普遍的な法則もある。「分かる」ということはこのようにして自然を認識していく重層的な過程であり終わりのない探求の過程である。