

財団法人 JKA 平成 29 年度

工具折損回避機構の工作機械への展開に関する

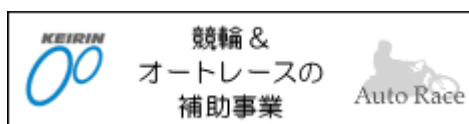
補助事業 報告書

微小径ドリル工具の折損回避時における

主軸送り制御の試み

新潟大学教育学部金属加工研究室

平尾 篤利



目次

第 1 章	序論	3
1.1	はじめに	3
1.2	微小径ドリルの特徴	3
1.2.1	ドリルのねじれ折損	4
1.2.2	ドリルの曲げ折損	5
1.3	本研究の目的	5
1.3.1	本研究の背景および従来研究との関連性	5
1.3.2	本研究の目的	6
1.3.3	本論文の構成	6
第 2 章	ねじれ折損の回避	7
2.1	はじめに	7
2.2	磁気継手を用いたトルク伝達機構	7
2.3	微細穴加工機	9
2.3.1	加工部	11
2.3.2	送り部	12
2.4	磁気継手の磁束密度	13
2.4.1	磁束密度の測定	13
2.4.2	磁束密度の測定結果	15
2.5	伝達トルクと折損トルク	17
2.5.1	伝達トルクの測定	19
2.5.2	伝達トルクの測定結果	20
2.5.3	従動軸(小)と伝達トルク	21
2.6	従動軸(小)の磁束密度と伝達トルク	22
2.7	まとめ	24
第 3 章	曲げ折損の回避	25
3.1	はじめに	25
3.2	磁気継手の脱調と主軸送り制御	25
3.3.1	実験結果	26

3.3.2	追加実験および結果	27
3.3	回転計を用いた主軸送り制御	28
3.3.1	主軸送り制御方法	28
3.3.2	オペアンプによる反転増幅回路	29
3.3.3	回転計による主軸送り実験	32
3.3.4	実験結果および考察	33
3.3.5	アナログ信号による制御実験	35
3.4	まとめ	36
第4章	結言	37
4.1	本研究で得られた成果	37
参考文献		38

第1章 序論

1.1 はじめに

近年、精密機器や医療機器等では微小径穴を有する小径ノズルや吸着部品など多く用いられており、微小径穴を高精度、高能率で加工する技術が求められている。微小径穴の加工法には、レーザ加工、切削加工および放電加工があげられる。この中で切削加工は、加工速度や加工精度において優れており、微小径穴加工によく用いられている。

切削加工の中でも、微小径ドリル穴加工は加工時間やコストの面で他の加工法を上回るため、最も多く利用されている。しかし、微小径ドリル穴加工は、ドリル径に対して高アスペクト比の深穴加工を行うため、ドリルの折損が起こりやすいという課題がある。深穴加工では切削屑排出が困難となり、切削トルクが上昇し、ドリル工具の折損が発生しやすく、これが製品製作の歩留まりやドリルの加工能率を著しく低下させている。そのため、微小径ドリルの折損回避の要求が高まっている。

本研究では、磁気継手を用いた非接触動力伝達機構を用いることでねじれ折損の回避を試みる。また、主軸送り制御を行い、曲げ折損の回避を試みる。

1.2 微小径ドリルの特徴

ドリルは小径になるほど、以下の特徴があげられる。

- ①切り屑詰まりによるラジアル方向の負荷トルク(以降、切削トルク)の増大
- ②ドリル径に比べて過大な送り量が原因となるドリルの座屈現象
- ③切り屑の絡みつきによる切削抵抗の増大
- ④切れ刃摩耗によるスラスト力の増大
- ⑤被切削材の不均一性による切削力の変化

このように、様々な要因により加工中にドリルの折損が生じやすくなる。これらのことから、微小径ドリルでは、加工中に起こる折損予知が非常に困難である。加工中の微小径ドリルの折損は、加工能率・加工精度・安全性などの

観点から，回避する必要がある．

1.2.1 ドリルのねじれ折損

ドリルのねじれ折損は，切削屑詰まりによる切削トルクの増大により発生する．切り屑排出溝の中間や根本以外の部分で折損することが多い 16 切り屑排出溝の中間で折損することが多い．軸に対して， $\pi/4$ [rad]をなす面で最大引張応力が働くため，折損断面は軸に対して，ほぼ $\pi/4$ [rad]となる⁽¹⁾．ねじ折損によるドリルの折損箇所および折損形態を図 1.1 に示す．

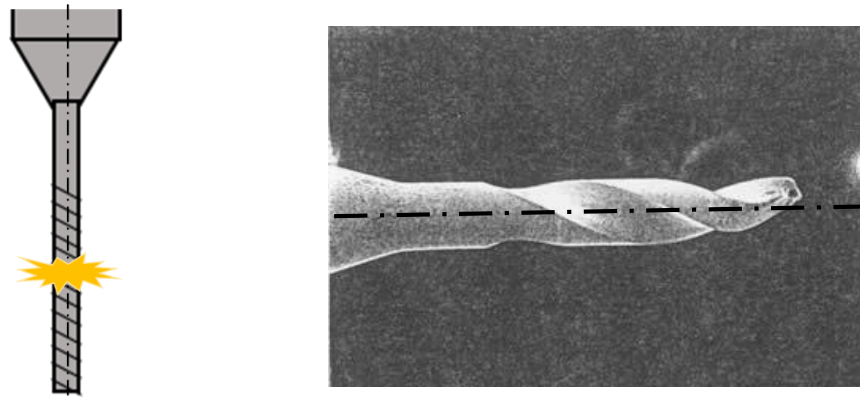


図 1.1 ねじれ折損の折損箇所および断面⁽²⁾

1.2.2 ドリルの曲げ折損

ドリルの曲げ折損は，スラスト力の増大によるドリルの座屈現象により発生する．ドリルの折損は，ドリルの根元付近で起こることが多い．また，ドリルには曲げによる引張応力が発生するため，ドリルの折損断面は軸に対して $\pi/2$ [rad]となる⁽¹⁾．曲げ折損によるドリルの折損箇所および折損形態を図 1.2 に示す．

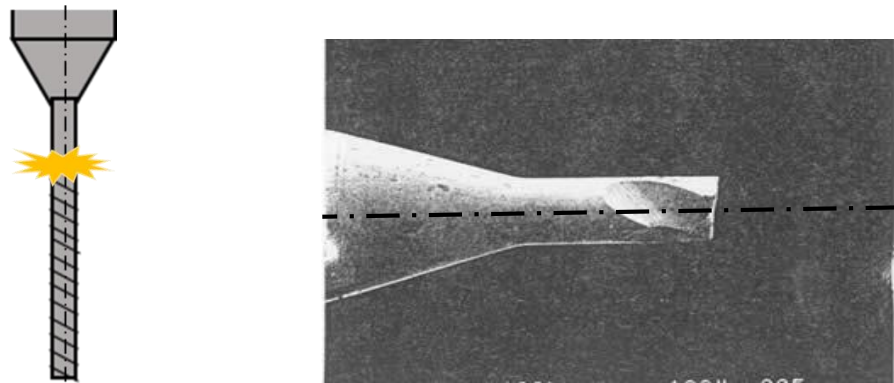


図 1.2 曲げれ折損の折損箇所および断面⁽²⁾

1.3 本研究の目的

1.3.1 本研究の背景および従来研究との関連性

微小径ドリルの折損の発生率を小さくし，加工能率や加工精度を向上させる研究は数多く行われている⁽³⁾．ドリルの折損を直接的に回避するためには，トルクリミッタを用いる方法が一般的である．トルクリミッタとは，定められた値を超えるトルクが生じた際に，トルクの伝達を遮断して機械を保護する安全装置のことである．動力伝達機構のなかには，安全装置として，トルクリミッタ機能を含むものがある．

主なトルクリミッタとして，破壊式や滑動式のトルクリミッタがあげられる．破壊式においては，許容せん断応力を超えるせん断応力が作用すると，これらの部材が破壊されて，トルクの伝達を遮断する．一般的に安価であるが，トルクの調整に部品の交換が必要であり，管理が容易ではない．また，破断後にも部品の交換が必要である．滑動式においては，クラッチと同じ原理で，向かい

合う 2 枚の摩擦板の間に作用する摩擦力によってトルクを伝達する。このとき、設定したトルク以上のトルクが作用すると、滑りが生じてトルクの伝達を一部遮断する。摩擦板は、摩擦により消耗品するため、交換が必要である。また、摩擦力は温度や湿度、摩擦板の状態によって変化するため、正確なトルクを設定することが難しい。

トルクリミッタの中でも、永久磁石式のトルクリミッタは、非接触で動力を伝達することができるため、磨耗がないという特徴がある。また、設定できる伝達するトルクに限界はあるが、正確にトルクを設定することが可能である。

1.3.2 本研究の目的

本研究では、切削トルクとスラスト力の増大に着目することで、ドリルの折損回避を試みる。微細穴加工機は、磁気継手を用いたトルク伝達機構により、非接触で動力伝達を行う。トルク伝達機構には、磁気継手の特徴を利用したトルクリミッタ機能を持たせる。

これまでに、加工部に磁気継手を用いたドリルの折損回避の研究はされているが、磁気継手の脱調を利用し、送り部の制御を行う研究はされていない。

本研究では、磁気継手を用いることでドリルのねじれ折損の回避を試みる。また、磁気継手の脱調を利用し、主軸送りの制御を行うことでドリルの曲げ折損の回避を試みる。

1.3.3 本論文の構成

ここでは、本論文の構成を説明する。本論文は第 1 章から第 4 章で構成されており、本論文の構成を示す。

第 1 章では、研究背景およびドリルの折損要因について述べる。

第 2 章では、ドリルのねじれ折損の回避方法について述べる。

第 3 章では、ドリルの曲げ折損の回避方法について述べる。

第 4 章では、本研究における成果について述べる。

第2章 ねじれ折損の回避

2.1はじめに

ここで、動力伝達に用いるトルク伝達機構について述べる。本機構では、磁気継手を用いて非接触で動力を伝達する。非接触で動力伝達を行うことには、様々なメリットがある。接触式であるギアやベルトと比べると摩耗が少ないため、メンテナンスサイクルが短く、微細ごみの発生が少ない。また、駆動音が非常に静かである。そして、過大な負荷が生じた場合、磁石が空転し、トルクリミッタの働きをする。この働きにより、微小径ドリルの折損の回避を行う。

ドリルは加工中、切削トルクにより、ねじれながら回転運動をする。この切削トルクが、ドリルの折損トルクを超えたとき、ドリルが折損に至る。このことより、折損トルク以上の切削トルクが発生した際、ドリルへのトルク伝達を遮断し、ドリルの回転を停止することができれば、ドリルの折損の回避が可能と考えられる。

以上のことから、ドリルのねじれ折損を回避するために、磁気継手を用いたトルク伝達機構により、動力の伝達を行う。本章では、このトルク伝達機構について述べる。

2.2磁気継手を用いたトルク伝達機構

本機構では、ラジアル方向に着磁を行った大小異なる磁気継手を使用する。図 2.1 に磁気継手の配置を示す。この磁気継手を縦方向に配置し、駆動軸からの動力を互いに向き合った磁石の磁力により伝達する。伝達されるトルクのことを以降、伝達トルクと呼ぶ。また、伝達トルクは駆動軸と従動軸の距離に依存している。駆動軸と従動軸の距離を以降、伝達距離と呼ぶ。

従動軸が駆動軸に追従しようとする力よりも大きな負荷がかかると、磁気継手は空転し、動力の伝達が停止する。本機構は磁気継手の脱調を応用し、伝達トルクを制御する。

今回、磁気継手にはエフ・イー・シー社製 MagTran 式非接触カップリングを

用いる。駆動軸に対し、従動軸は自由に変更することができる。今回使用する従動軸を従動軸(大)とする。駆動軸を図 2.2 に、従動軸(大)を図 2.3 に示す。また、駆動軸と従動軸(大)の仕様を表 2.1 に示す。

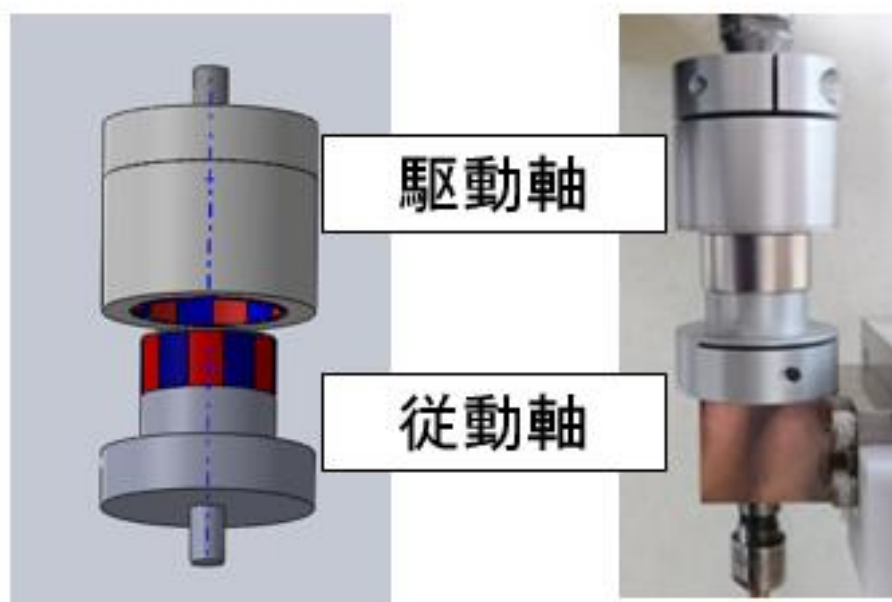


図 2.1 磁気継手の配置

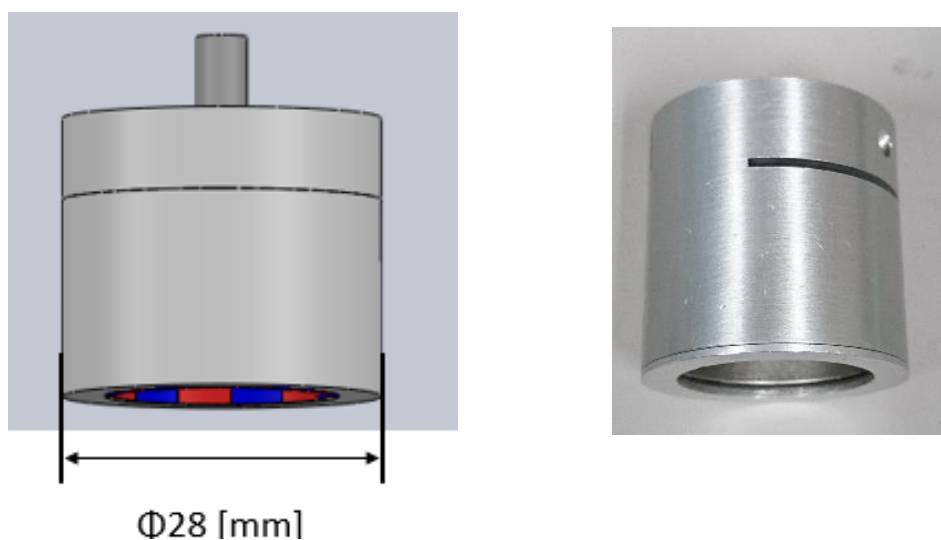


図 2.2 駆動軸

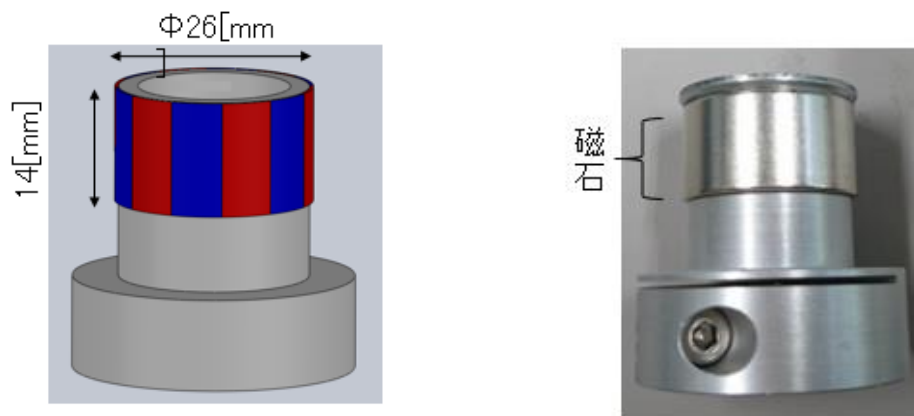


図 2.3 従動軸(大)

表 2.1 駆動軸

	磁極数	内径[mm]	外径[mm]
駆動軸	12	28	38
従動軸(大)	12	16	26

2.3 微細穴加工機

今回使用した実験装置の全体を図 2.4 に示す. 本加工機はドリル加工を行う加工部と被加工物を送る送り部で構成されている. 加工部には, ドリル回転用の磁気継手を設置している. 次項にそれぞれの駆動方法について述べる.

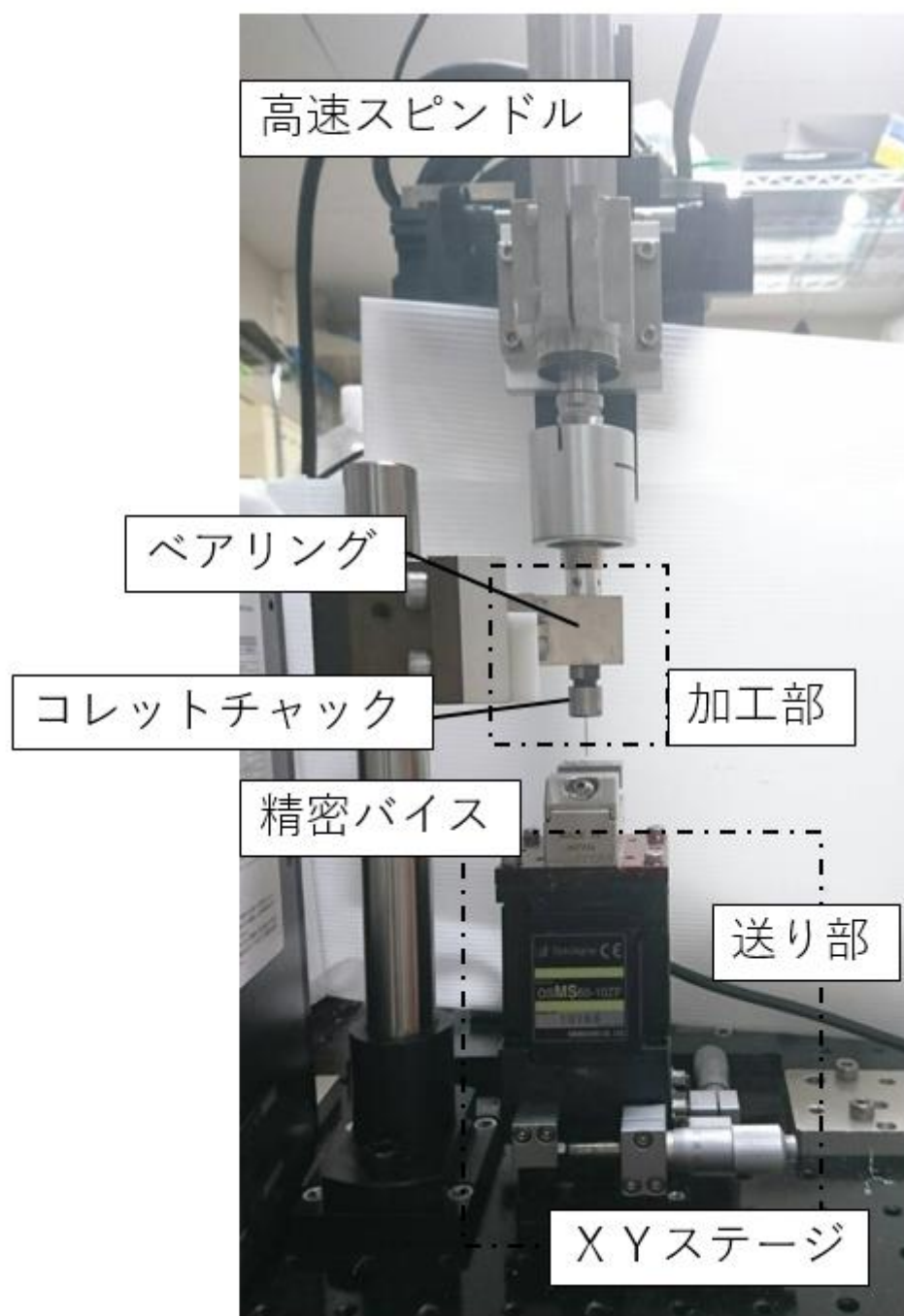


図 2.4 微細穴加工機全体図

2.3.1 加工部

高速スピンドルには、ナカニシ社製 EM-3060 を使用する。高速スピンドルの仕様を表 2.2 に示す。微小径ドリル加工において、高速回転が必要である。図 2.5 に示す専用コントローラユニットを用いることで、5000～60000[rpm]の回転数を容易に設定することが可能である。モータの軸と、コレットチャックに磁気継手を設置し、動力の伝達を行う。加工部の拡大図を図 2.6 に示す。コレットチャックは図 2.6 に示すようにベアリングで支持している。微小径ドリルに過大な切削トルクがかかったとき、駆動軸と従動軸(大)の間で動力を遮断し、ドリルに折損トルク以上の負荷トルクがかからないようにする。最適な伝達距離を採用することで、微小径ドリルの折損の回避が可能になると考えられる。

表 2.2 高速スピンドルの仕様

型式	ナカニシ社製 EM-3060
回転速度[rpm]	5000～60000
最大出力[w]	350
スピンドル精度[μm]	1



図 2.5 高速スピンドル専用
コントローラユニット



図 2.6 加工部の拡大図

2.3.2 送り部

送り部には、速度調整が容易なステッピングモータを用いた Z 軸ステージを用いる。また、制御にはシグマ光機製 2 軸ステージコントローラ SHOT-302GS を用いる。SHOT-302GS を図 2.7 に示す。被加工物は精密バイスで固定する。精密バイスは手動 XY ステージに固定しており、ステージの移動により位置決めを行う。



図 2.7 SHOT-302GS 外観

2.4 磁気継手の磁束密度

磁束密度の大きさは、磁力の強さを測る指標になる。また、磁気継手の伝達トルクを測定する上で、磁気継手の表面の磁束密度の変化が重要になる。そこで、磁気継手の磁束密度を測定した。

2.4.1 磁束密度の測定

ガウスメータを用いて磁気継手の磁束密度を測定した。測定に使用したガウスメータの仕様を表 2.5，外観を図 2.8 に示す。

磁束密度の測定器を図 2.9 に示す。ガウスメータのプローブを固定し、ステッピングモータに取り付けた磁気継手を回転させた。駆動軸，従動軸に対して、 2.88° ごとに測定を行った。

表 2.5 ガウスメータ仕様

型式	KANETEC 社製 TM-701	
測定レンジ 分解能	測定レンジ[mT]	分解能[mT]
	0~200.0	0.1
	200.1~1500.0	1
測定精度	±5%	



図 2.8 ガウスメータ

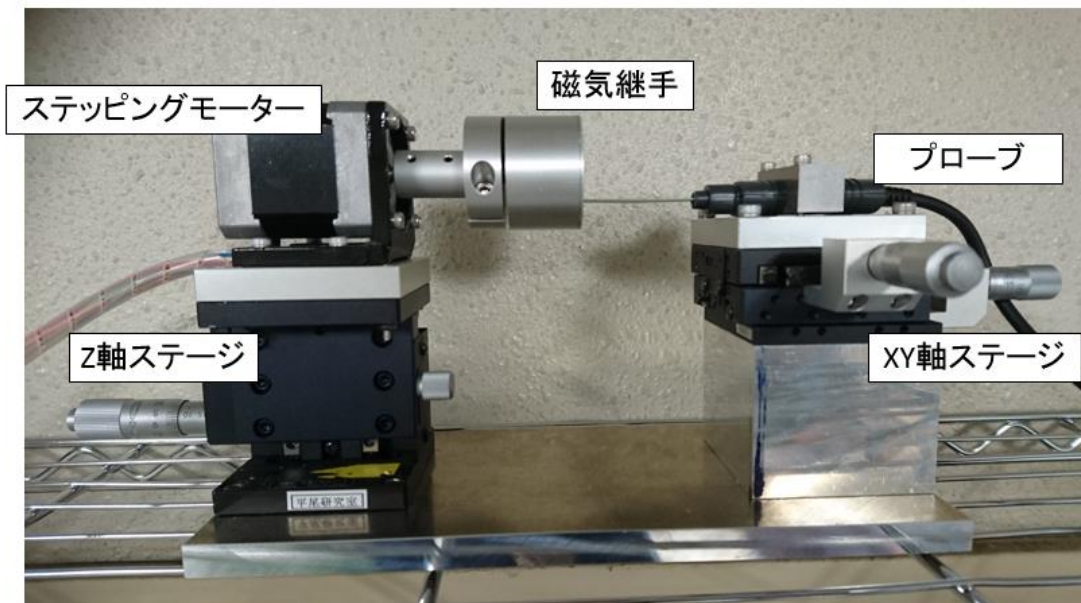


図 2.9 測定器

2.4.2 磁束密度の測定結果

図 2.10 に駆動軸の表面磁束密度分布の測定結果を示す. 図 2.10 より磁束密度は正弦波状に変化し, 約 60° の周期となっている. N 極の山が 6 個, S 極の谷が 6 個ずつ確認でき, 分極数が 12 であることが分かる.

図 2.11 に従動軸(大)の表面磁束密度分布の測定結果を示す. 駆動軸と同様に, 磁束密度は正弦波状に変化し, 約 60° の周期となっている. N 極の山と S 極の谷はそれぞれ 6 個ずつ確認でき, 分極数が 12 であることが分かる. 磁束密度の最大値は約 $300[\text{mT}]$ である.

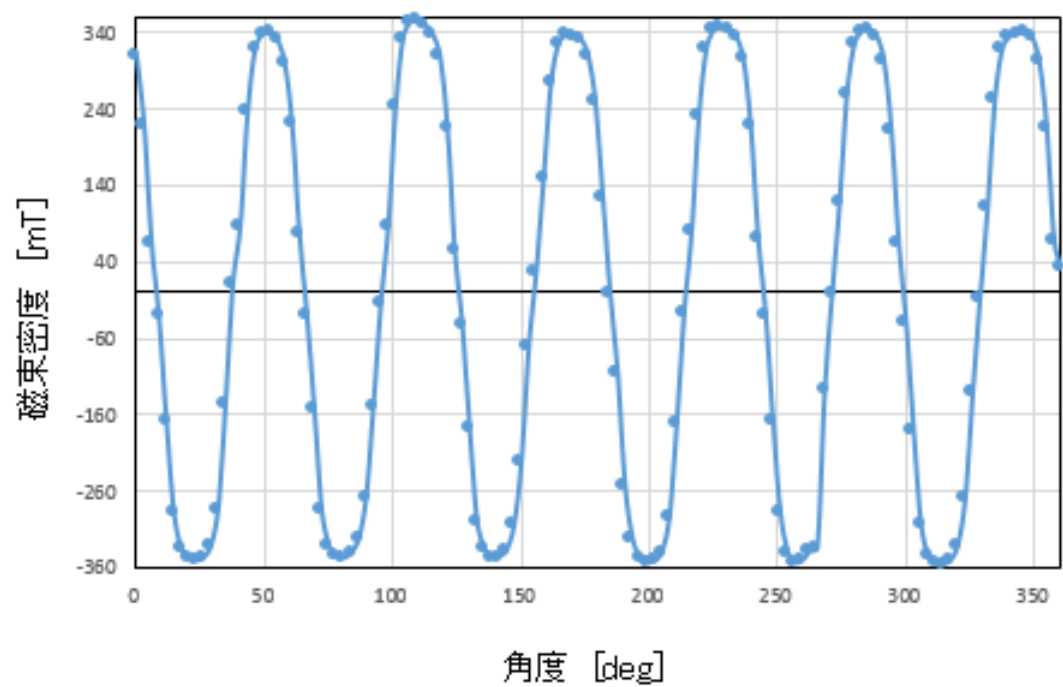


図 2.10 駆動軸の磁束密度

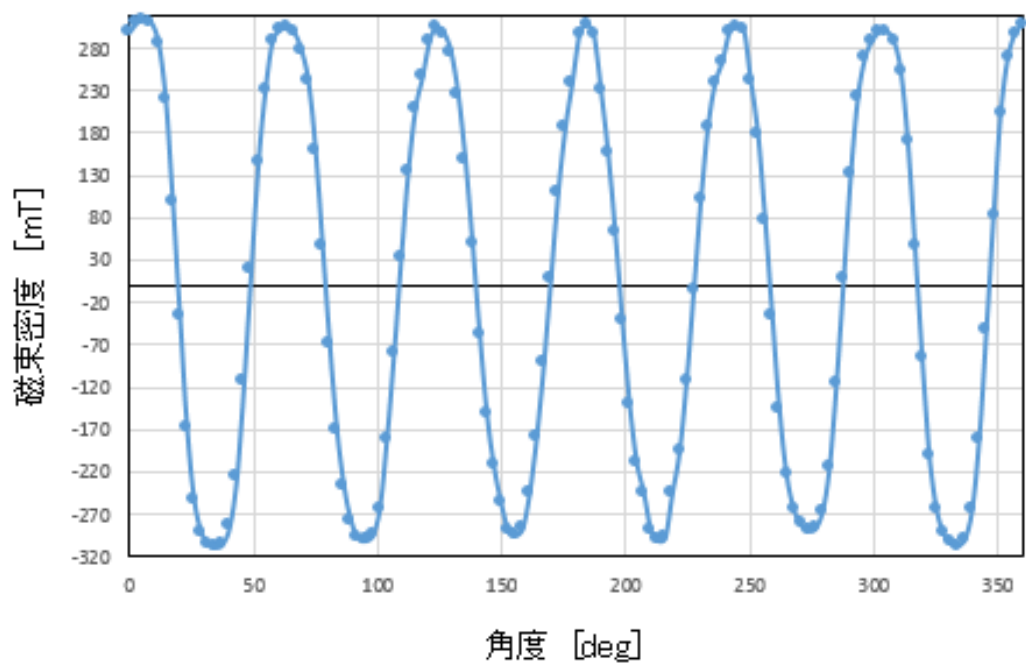


図 2.11 従動軸(大)の磁束密度

2.5 伝達トルクと折損トルク

ドリルの折損を回避するためには，磁気継手の伝達トルクをドリルの折損トルクよりも小さく設定する必要がある．そのためには，使用するドリルの折損トルクと磁気継手の伝達トルクを明らかにする必要がある．

本研究では， $\phi 0.5$ の高速度鋼のドリルを用いて微細穴加工を行った． $\phi 0.5$ の高速度鋼の折損トルクは $1.874[\text{N} \cdot \text{cm}]$ である．折損トルクは以下の実験式 (2.1) により決定した⁽⁴⁾．実験式を式(2.1)に示す．また，ドリルの直径と折損トルクの関係について表 2.4 と図 2.12 に示す．

$$T_b = 12.35D^{2.72} \quad (2.1)$$

T_b : ドリルの折損トルク $[\text{N} \cdot \text{cm}]$

D : ドリルの直径 $[\text{mm}]$

表 2.4 ドリル径と折損トルク

ドリル直径[mm]	折損トルク [N・cm]
0.1	0.024
0.2	0.155
0.3	0.467
0.4	1.022
0.5	1.874
0.6	3.078

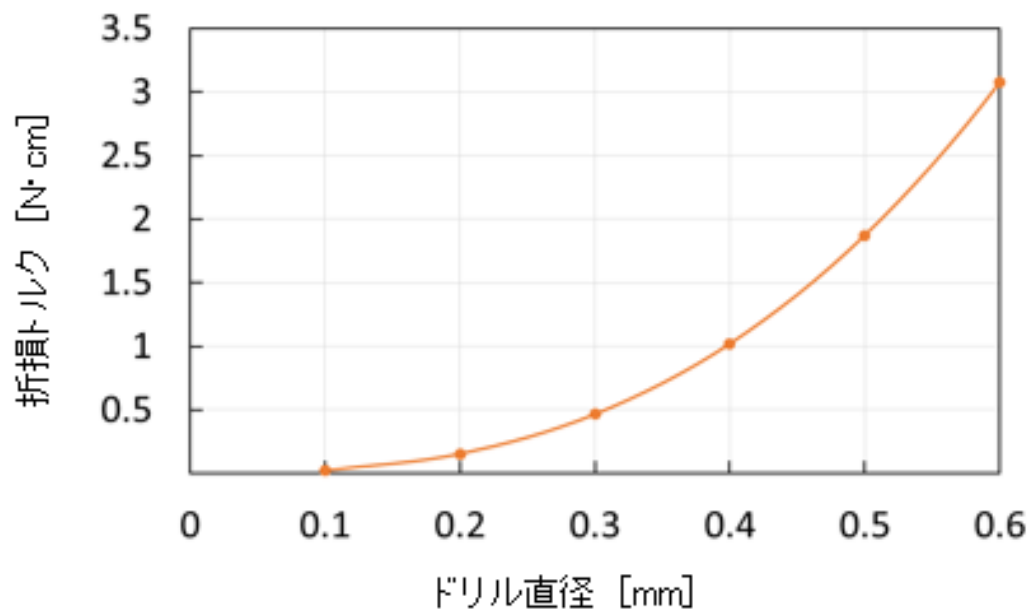


図 2.12 ドリル直径と折損トルク

2.5.1 伝達トルクの測定

磁気継手は駆動軸と従動軸が重なる面積が大きくなれば、大きなトルクを伝達し、重なる面積が小さくなれば、小さなトルクを伝達する。つまり、伝達トルクは磁気継手同士の距離に依存する。

ドリルの折損を回避するためには、磁気継手の伝達トルクを明らかにする必要がある。ドリルの折損トルクよりも磁気継手間の伝達トルクが小さくなることで、ドリルの折損を回避することができる。駆動軸の下面と従動軸の上面との距離が 0[mm]となる地点を基準とし、0.5[mm]刻みで駆動軸の中に従動軸を送り込み、伝達されるトルクを測定する。伝達トルクの測定には、トルクレンチを使用した。

伝達トルクの測定方法を図 2.13 に、実験に使用したトルクレンチの仕様を表 2.6 に示す。磁気継手の伝達トルクが 15[N・cm]よりも小さい場合には、CN15SGK のトルクレンチを、15[N・cm]以上のときには、CN36SGK のトルクレンチを用いて測定を行った。

表 2.6 トルクレンチの仕様

測定範囲 [N・cm]	型名	測定可能範囲 [N・cm]	最小目盛 [N・cm]
0～15	CN15SGK	1～15	0.2
15～	CN36SGK	4～36	0.5



図 2.13 伝達トルクの測定方法

2.5.2 伝達トルクの測定結果

伝達トルクの測定結果を図 2.14 に示す. 高速度鋼のドリル折損トルク T_b は, 式(2.1)から $\phi 0.3$ で $0.467[\text{N} \cdot \text{cm}]$, $\phi 0.5$ で $1.874[\text{N} \cdot \text{cm}]$, $\phi 0.6$ で $3.07[\text{N} \cdot \text{cm}]$ となる.

本機構の伝達トルクは磁気歯車間の距離が $0[\text{mm}]$ のとき, $0.5[\text{N} \cdot \text{cm}]$ のトルクを生じる. このトルクは $\phi 0.3$ の高速度鋼のドリルの折損トルクより大きいいため, $\phi 0.3$ 以下のドリルには使用することができない. $\phi 0.5$ の高速度鋼の折損

トルクは $1.874[\text{N} \cdot \text{cm}]$ であるため、折損の回避は可能である。しかし、磁気継手の距離を少し近づけただけで、伝達トルクが大きくなってしまうため、正確なトルクを設定することが難しい。そのため、より微細な伝達トルクの制御が必要である。

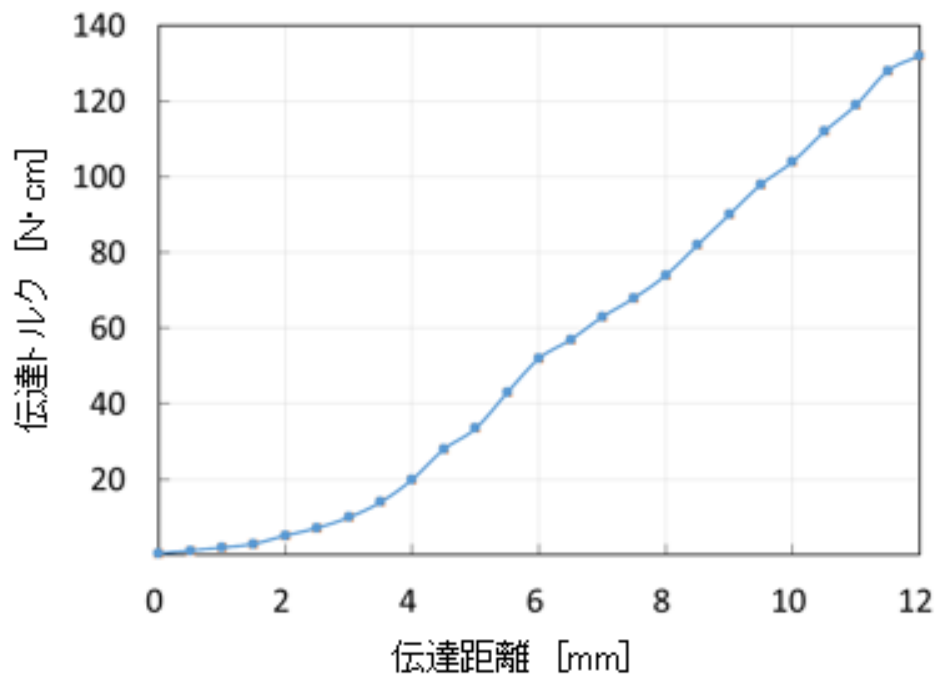


図 2.14 従動軸(大)の伝達トルク

2.5.3 従動軸(小)と伝達トルク

磁気継手は駆動軸と従動軸が重なる面積が大きくなれば、大きなトルクを伝達する。これは、磁束(Φ)が磁束密度(B) $\times$ 面積(s)の関係が成り立つためである。このため、対向面積が大きくなれば磁束は増大する。磁束の増大は、そのまま伝達トルクの増大となる。

このことより、従動軸を小さなものに変更することで、より微細な伝達トルクを制御できると考え、磁束密度と伝達トルクの測定を行った。

2.6 従動軸(小)の磁束密度と伝達トルク

新たな磁気継手を図 2.15 に示す．新たに使用するものを従動軸(小)とする．

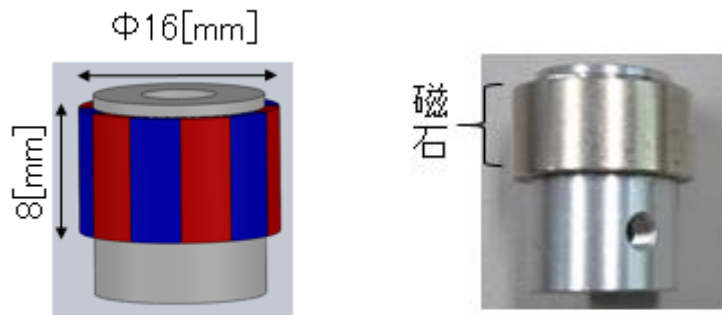


図 2.15 従動軸(小)

図 2.16 に従動軸(小)の表面磁密度分布の測定結果を示す．従動軸(大)と同様に磁束密度は正弦波状に変化し、約 60° の周期となっている．N 極の山が 6 個、S 極の谷が 6 個ずつ確認でき、分極数は 12 といえる．磁束密度の最大値は約 $230[\text{mT}]$ であり、これは従動軸(大)よりも小さいため、より微細な伝達トルクの制御が可能だと考えられる．

同様に、伝達トルクの測定を行った．測定結果を図 2.17 に示す．従動軸(小)を用いることで、 $\phi 0.3$ のドリル折損を回避することが可能となる．また、従動軸(小)の最大伝達トルクは $2.4[\text{N} \cdot \text{cm}]$ である．これは $\phi 0.5$ ドリルの折損トルクよりも大きいため、 $\phi 0.5$ ドリルの折損回避も同様に行うことができる． $\phi 0.6$ 以上のドリル工具においては、従動軸(大)を用いることで折損回避が可能となる．しかし、 $\phi 0.2$ 以下のドリル工具の折損トルクは従動軸(小)で制御できるトルクよりも小さいため、今回使用した従動軸では折損回避が困難である．

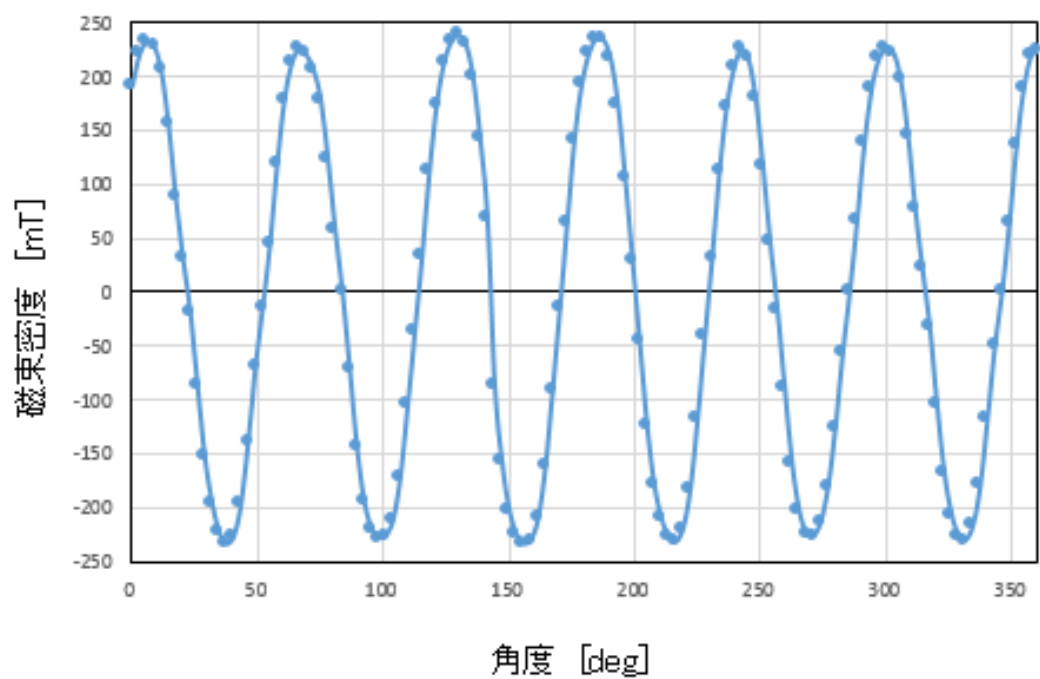


図 2.16 従動軸(小)の磁束密度

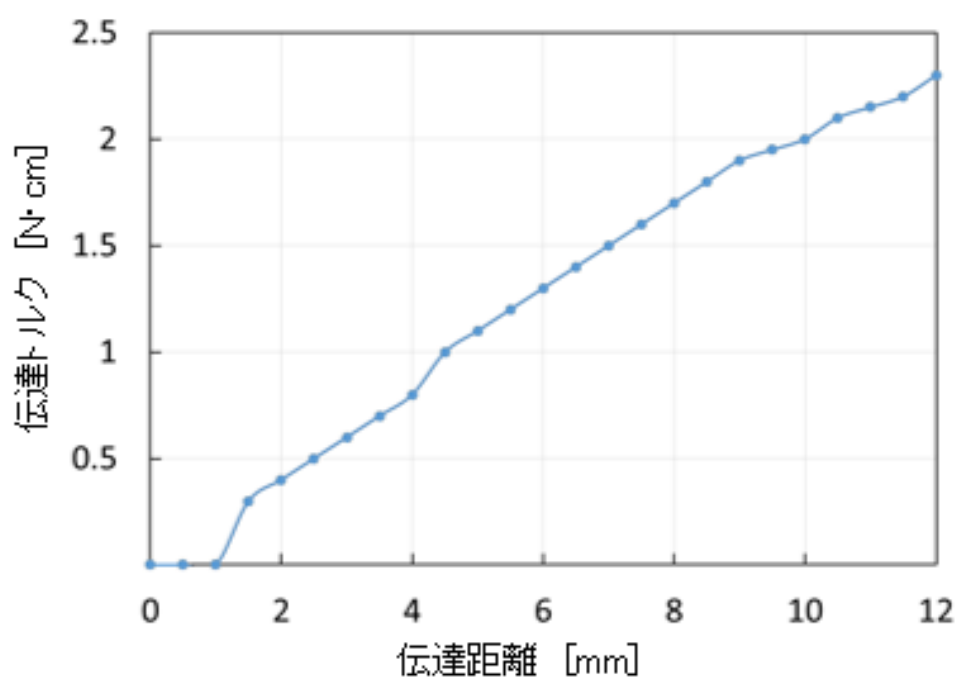


図 2.17 従動軸(小)の伝達トルク

2.7 まとめ

磁気継手を用いたトルク伝達機構により，ドリルのねじれ折損の回避を試みた．従動軸(小)を用いることで $0.4\sim 1.8[\text{N}\cdot\text{cm}]$ の伝達トルクを制御することができる．このとき， $\phi 0.3\sim \phi 0.5$ 高速度鋼ドリルの折損トルクは $0.467\sim 1.874[\text{N}\cdot\text{cm}]$ である．磁気継手の伝達トルクを折損トルクよりも小さく設定することで，ドリルのねじれ折損の回避が可能となる．

$\phi 0.6$ 以上のドリルについては，従動軸(大)を用いることで，折損回避が可能となる．

第3章 曲げ折損の回避

3.1はじめに

曲げ折損はスラスト力の増大によって発生する。ドリル加工時において、切削トルクおよびスラスト力は一定に増加する。しかし、切削トルクはスラスト力に比べて早く増加傾向を示す⁵⁾。切削トルクがスラスト力よりも早く増加することから、切削トルクの増大に着目し、主軸送りの制御を行うことで、スラスト力が増加する前に、送りを停止できると仮定した。切削トルクの増加は磁気継手の脱調により検知が可能である。本報告では、脱調を利用し、主軸の送り制御を行うことでドリルの曲げ折損回避を試みる。

3.2磁気継手の脱調と主軸送り制御

ドリルに過大な切削トルクがかかると、磁気継手の脱調が起こる。脱調が起こると従動軸の回転が停止する。従動軸の脱調を確認したら、送りを停止することで、スラスト力が増大する前に曲げ折損の回避が可能だと仮定し、検証を行った。

主軸制御には、シグマ光機製 2 軸ステージコントローラ SHOT-302GS を用いる。従動軸が回転している間は信号を入力し、入力中は送りを行う。脱調が起こったときには入力を停止する。本実験では、ファンクションジェネレーターを用いて信号を入力し、目視において脱調を確認したら入力を停止する。また、伝達距離を 5.5[mm]とすることで、伝達トルクを 1.2[N・cm]に設定する。このとき、 $\phi 0.5$ 高速度鋼ドリルの折損トルクは 1.874[N・cm]であるため、ねじれ折損の回避が可能である。実験条件を表 3.1 に示す。

本実験では、20 回の加工を 1 セットとし、2 セット計 40 回加工を行った。板厚 4[mm]の Al 板を切削油なしで加工する場合、貫通する前にドリルの折損が起こる。そのため、本実験ではドリルの貫通に関わらず、磁気継手の脱調が起こるまでを一回の加工とした。

表 3.1 主軸送り実験条件

ドリル径[mm]	0.5
材質	Al
板厚[mm]	4
回転数[rpm]	6000
送り速度[mm/min]	3,5,7
切削油	なし
試行回数	20 回×2 セット

3.3.1 実験結果

実験結果を表 3.2 に示す．送り速度が 3.0[mm/min]のとき，すべての試行で貫通に至る前に，磁気継手の脱調が起こった．このとき，脱調を確認したら主軸の送りを停止することで，ドリルの曲げ折損を回避することができた．

送り速度が 5.0[mm/min]のときも同様にすべての試行で貫通に至る前に，磁気継手の脱調が起こった．また，脱調を確認したら主軸の送りを停止することで，ドリルの曲げ折損を回避することができた．

送り速度が 7.0[mm/min]のとき，すべての試行で貫通に至る前に，磁気継手の脱調が起こった．しかし，1 セット目の加工では 16 回目に，2 セット目の加工では 18 回目にドリルが折損を起こした．ドリルの折損は磁気継手の脱調後に起こったため，ドリルはスラスト力による曲げ折損だといえる．それぞれ終盤の加工でドリルの折損が起こった要因として，ドリルの疲労が考えられる．折損に至らなかった加工において，ドリルのたわみが確認された．このたわみによる疲労が蓄積されて，ドリルの折損が起こったと仮定し，追加実験を行った．

表 3.2 主軸送り実験結果

送り速度 [mm/min]	1 セット目	2 セット目
3	○	○
5	○	○
7	16 回目折損	18 回目折損

3.3.2 追加実験および結果

追加実験でも同様の条件で実験を行い、20 回の実験を 1 セットとし、2 セット計 40 回加工を行った。実験結果を表 3.3 に示す。追加実験でも、すべての試行で貫通に至る前に、磁気継手の脱調が起こった。また、すべての加工でドリルは折損に至らなかった。このとき、ドリルに過度なたわみは確認されなかったため、送り速度 7.0[mm/min]の折損は、主軸制御を行う応答が悪かったことにより、たわみが発生したことが原因だったと考えられる。そのため、主軸応答に優れた制御を行うことで、ドリルがたわむ前に主軸送りを停止することができれば、送り速度 7.0[mm/min]のときも折損回避が可能になると予測される。

表 3.3 主軸送り追加結果

送り速度 [mm/min]	3 セット目	4 セット目
7	○	○

これらの結果より、磁気継手の脱調に着目し、主軸制御を行うことで、ドリルの曲げ折損の回避が可能であるといえる。また、主軸の送り速度が 5.0[mm/min]よりも大きいとき、回転計を用いて、より高感度の制御を行うことでドリルの曲げ折損を回避できると考えられる。

3.3 回転計を用いた主軸送り制御

より高応答の主軸送り制御を行うために、回転計を使用する。回転計の外形を図 3.1 に、仕様を表 3.4 に示す。回転計を用いることで、回転数に応じてパルスを出力することができる。このパルスをステージに入力することで、ステージの制御を行う。

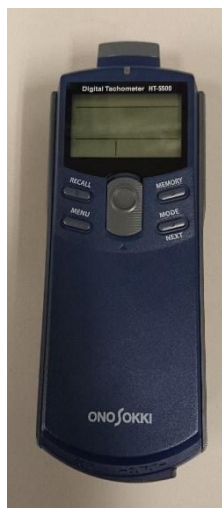


図 3.1 回転計外形

表 3.4 回転計仕様

型式	小野測器製 HT-5500
測定範囲[rpm]	6～99999
反射検出距離 [mm]	20～300
測定精度[mm]	(表示値×±0.02%)±1 カウント
出力	4.5V 以上

3.3.1 主軸送り制御方法

ドリルの曲げ折損の回避を行うために主軸送りの制御を行った。コントローラにより、ステージに入力するパルス数を設定する。ステージはステッピングモータによって稼動しているため、ステージの移動量は入力パルス数に依存する。そのため、送り速度に関わらず、主軸送りの制御を行うことができる。ドリルが回転している間は主軸の送りを行う。切削トルクが増大し、磁気継手が脱調すると、主軸の送りを停止する。制御の手順を以下に示す。

- ① ステージに入力するパルスを設定する
- ② ステージに 200 パルス入力し、ステージを移動させる
- ③ 回転計からの信号を確認する
- ④ 入力が確認できたら②～③を繰り返す

3.3.2 オペアンプによる反転増幅回路

6000[rpm]のとき，回転計から出力されるパルスを図 3.2 に示す．

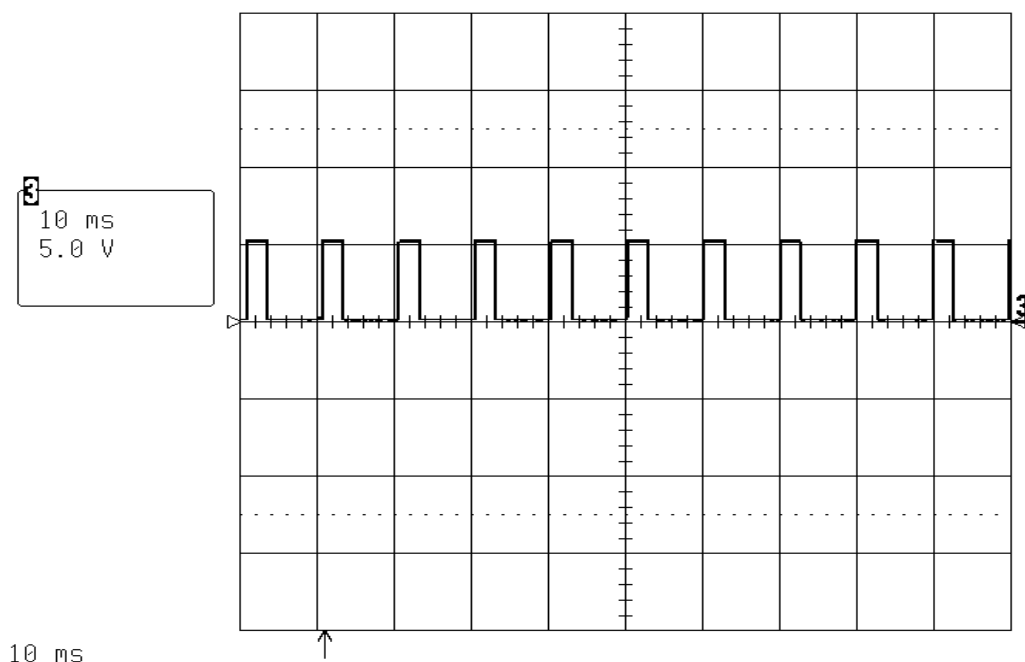


図 3.2 回転計のパルス信号

回転計からは電圧 5[V]，周波数 100[Hz]のパルスが出力される．周波数は回転数に依存しているため，回転数に応じて変化する．コントローラは常に Hi になっており，0[V]以下

の電圧を受け取り，信号が Lo になった際に稼働するように設定されている．このため，オペアンプを用いて信号を反転させる⁽⁶⁾．今回，使用した回路を図 3.3 に示す．

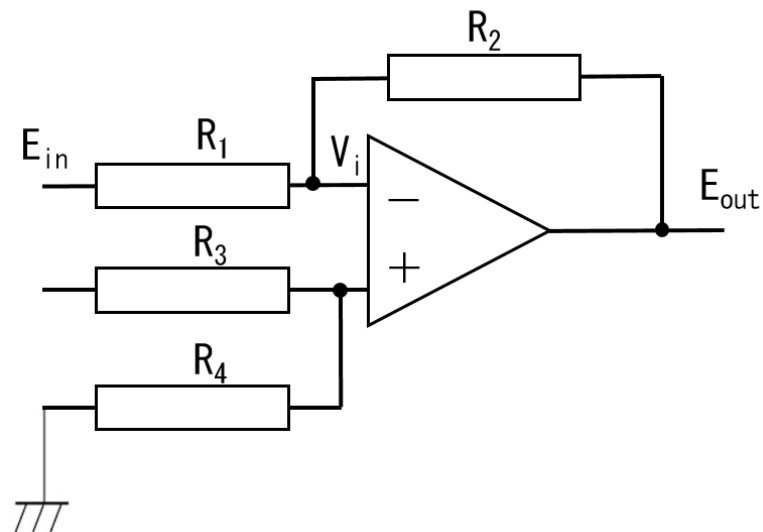


図 3.3 反転回路図

このとき，抵抗の値はすべて $1.0\text{k}\Omega$ である．回路を介すことで，パルスが反転される．反転されたパルスを図 3.4 に示す．

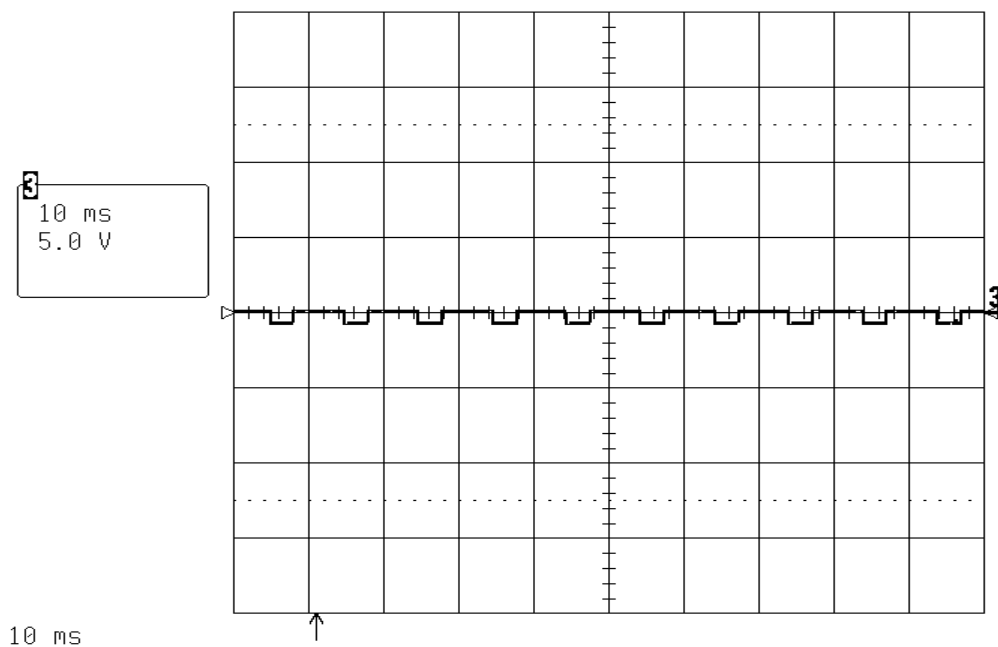


図 3.4 反転後のパルス

パルスが反転されていることが分かる．しかし、回路を介すことでパルスの電圧が低くなってしまい、十分な電圧をコントローラに入力できなくなってしまった．そのため、回路の抵抗値を変えることで、電圧を 10 倍に増幅させる．理論式を式 3.4 に示す．

オペアンプの出力が能動的範囲にある場合、 V_i は 0V と同値である．オームの法則より、 R_1 に流れる電流 I_1 は

$$I_1 = \frac{E_{in}-V_i}{R_1} = \frac{E_{in}}{R_1} \quad (3.1)$$

となる．

また、入力端子のインピーダンスが非常に大きいため、電流はすべて R_2 に流れるため、

$$I_1 = I_2 \quad (3.2)$$

となるように出力電圧 E_{out} が動作する．これを式にすると

$$I_1 = \frac{V_1-E_{out}}{R_2} = -\frac{E_{out}}{R_2} \quad (3.3)$$

となる．式 3.1～3.3 の方程式を解くと

$$E_{out} = -\frac{R_2}{R_1} E_{in} \quad (3.4)$$

となり、2 つの抵抗の比で増幅率が変化する．このことより、 R_2 の抵抗を 10k Ω に変更した．

抵抗を変えた際のパルスの出力を図 3.5 に示す．電圧が 10 倍になっていることがわかる．回路を介すことで、コントローラがパルスを認識できるようになった．

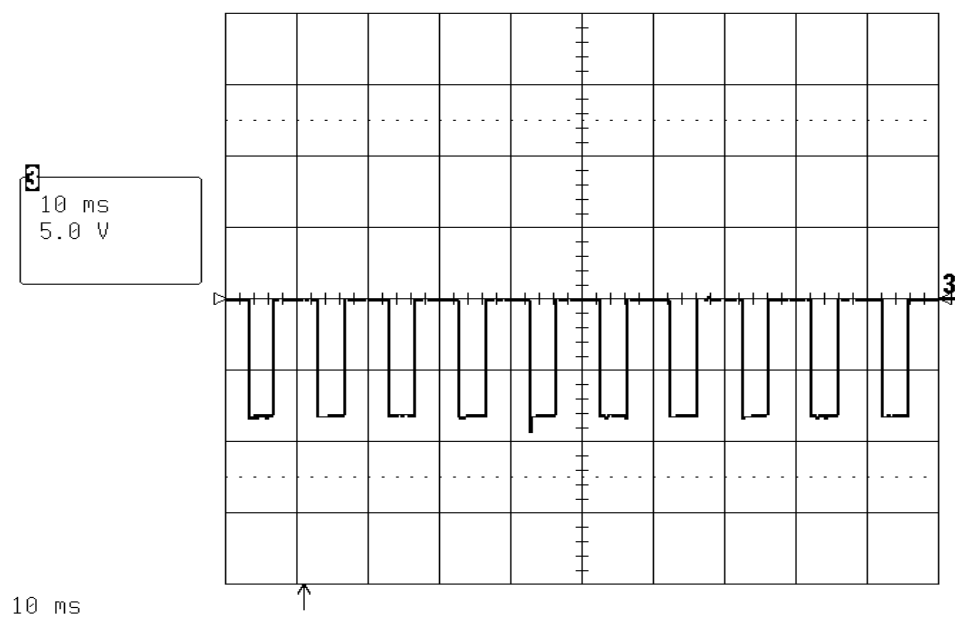


図 3.5 反転増幅後のパルス

3.3.3 回転計による主軸送り実験

回転計を用いることで，ドリルの曲げ折損の回避が可能か検証を行った．また，伝達距離を 5.5[mm]とすることで，伝達トルクを 1.2[N・cm]に設定する．このとき， $\phi 0.5$ 高速度鋼ドリルの折損トルクは 1.874[N・cm]であるため，ねじれ折損の回避が可能である．実験条件を表 3.5 に示す．

表 3.5 回転計を用いた主軸送り制御実験条件

ドリル径[mm]	0.5
材質	Al
板厚[mm]	4
回転数[rpm]	6000
送り速度[mm/min]	3,5,7
切削油	なし
試行回数	20 回×2 セット

3.3.4 実験結果および考察

実験結果を表 3.6 に示す.

表 3.6 パルス信号による実験結果

送り速度 [mm/min]	1 セット目	2 セット目
3	3 回目折損	6 回目折損
5	5 回目折損	2 回目折損
7	6 回目折損	3 回目折損

送り速度が 3.0[mm/min]のとき, すべての試行で貫通に至る前に, 磁気継手の脱調が起こった. しかし, 1 セット目は 3 回目に, 2 セット目は 6 回目の加工でドリルが折損した.

送り速度が 5.0[mm/min]のときも同様にすべての試行で貫通に至る前に, 磁気継手の脱調が起こった. しかし, 1 セット目は 5 回目に, 2 セット目は 2 回目の加工でドリルが折損した.

送り速度が 7.0[mm/min]のとき、すべての試行で貫通に至る前に、磁気継手の脱調が起こった。しかし、1セット目の加工では6回目に、2セット目の加工では3回目にドリルが折損を起こした。どの加工においても、ドリルの折損は磁気継手の脱調後に起こったため、ドリルはスラスト力による曲げ折損だといえる。

目視で送りを停止したとき、送り速度 3.0[mm/min],5.0[mm/min]の加工でドリルは折損起こさなかったが、回転計による制御ではドリルが折損を起こした。また、送り速度 7.0[mm/min]のとき、目視で送りを止めたときよりも早く折損が起こっている。目視で送りを停止したときよりも精度が悪くなった原因として、制御に用いた信号がパルスであったことがあげられる。ステージは 200 パルス移動したあとに、コントローラへの入力を確認し、入力が Lo のとき再び移動する。しかし、入力されるパルスは回転数に依存しているため、脱調により回転数が少なくなると低周波数のパルスが入力されてしまう。低周波数のパルスは、波長が大きいため、回転が停止した後も入力が続いてしまうことがあったと考えられる。このため、回転計から入力する信号をパルスからアナログ信号に変えて再実験を行った。回転計から出力されるアナログ信号を図 3.6 に示す。また、パルス信号と同様に反転増幅したアナログ信号を図 3.7 に示す。

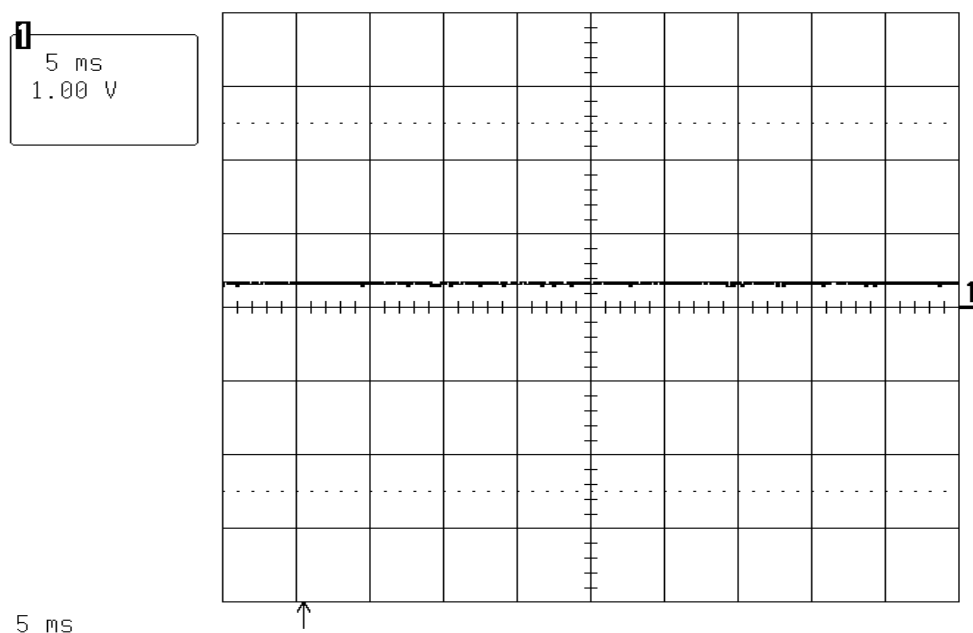


図 3.6 回転計のアナログ信号

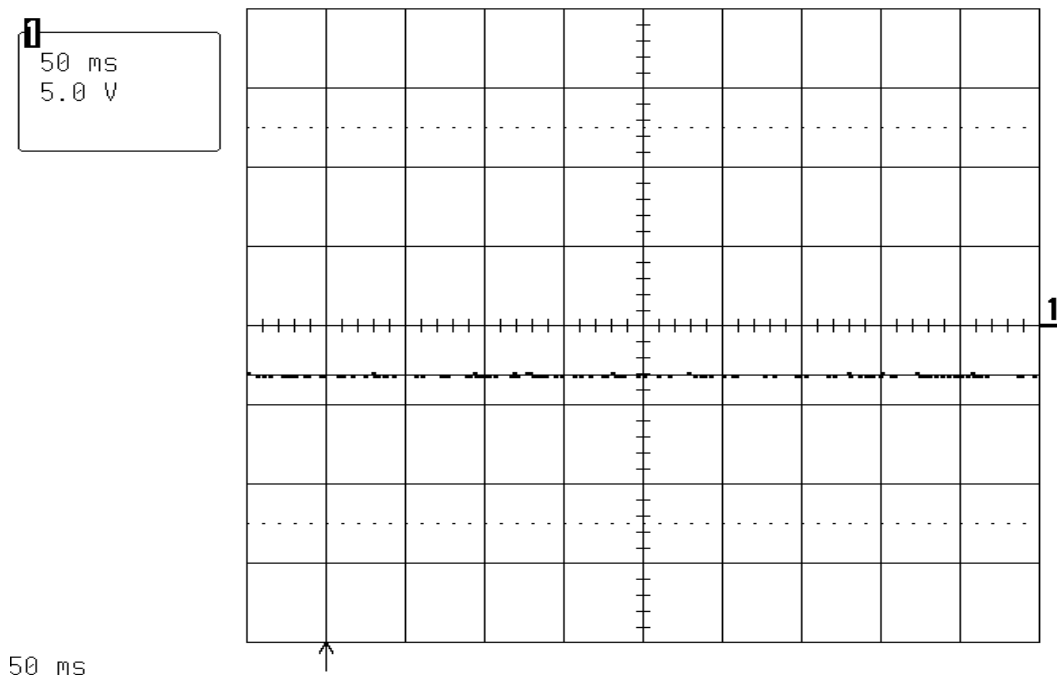


図 3.7 反転増幅後のアナログ信号

3.3.5 アナログ信号による制御実験

追加実験でも同様の条件で実験を行い，20 回の実験を 1 セットとし，2 セット計 40 回加工を行った．実験結果を表 3.7 に示す．追加実験でも，すべての試行で貫通に至る前に，磁気継手の脱調が起こった．また，すべての加工でドリルは折損に至らなかった．

表 3.7 アナログ信号による実験結果

送り速度 [mm/min]	1 セット目	2 セット目
3	○	○
5	○	○
7	○	○

実験結果より，回転計からのアナログ信号を出力し，制御を行うことでドリルの折損の回避が可能だといえる．

3.4 まとめ

磁気継手の脱調に着目することで、曲げ折損の回避を試みた。切削トルクは、スラスト力よりも早く増大するため、ドリルの曲げ折損が起こる前に、磁気継手の脱調が起こる。磁気継手の脱調直後に、主軸送りを停止することでドリルの曲げ折損回避が可能だと分かった。より定量的な制御を行うために、回転計を用いて制御を行った。回転計からのアナログ信号をコントローラに入力して、制御を行うことで、ドリルの折損回避が可能となった。

第4章 結言

4.1 本研究で得られた成果

磁気継手を用いた非接触トルク伝達機構を有する，微細穴加工機により，微小径ドリルの折損の回避について検証を行った．

第 2 章では，本加工機の特徴である非接触トルク伝達機構の特性について述べた．磁気継手の表面磁束密度分布と伝達トルクを測定し，磁気継手の特性を明らかにした．また，切削トルクの増大に着目することで，ドリルのねじれ折損の回避を試みた．

第 3 章では，主軸送りの制御について述べた．切削トルクがスラスト力よりも先に増大することを利用し，ドリルの曲げ折損の回避を試みた．切削トルクの増大は磁気継手の脱調により察知することが可能である．このため，回転計で磁気継手を監視し，回転数に応じたアナログ信号をコントローラに入力することで，制御を行った．脱調直後に主軸送りを停止することで，ドリルの曲げ折損の回避が可能となった．

参考文献

- (1)大久保修，稲崎一郎，青山藤詞郎，清水哲：微小径ドリルの折損原因の究明と折損予知に関する研究 日本機械学会論文集(C 編)51 巻 471 号(昭 60-11) 2929
- (2)http://www.uniontool.co.jp/product/drill_router/index_040703.html
- (3)西原正嗣：小径ドリル加工の切削特性に関する研究(2010)
- (4)穴加工用工具のすべて 大河出版
- (5)大林陽一：プリント基板の小径ドリル加工(1994)精密工学会誌 60(12), 1796-1800
- (6) http://www.ele-lab.com/tips_opamp3.html