

財団法人 JKA 2024 年度

デュアル駆動放電加工機の開発による高精細仕上げ

レス加工と省エネルギー化に関する補助事業

報告書

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	放電加工 .....	3
1.1.1	はじめに .....	3
1.1.2	放電加工とは .....	4
1.2	深穴放電加工 .....	6
1.2.1	深穴放電加工の概要および問題点 .....	6
1.3	本研究の目的 .....	8
1.3.1	本研究の背景および従来研究との関連性 .....	8
1.3.2	本研究の目的 .....	8
1.3.3	本論文の構成 .....	8
第 2 章	D カット型形状電極による深穴放電加工の .....	10
加工限界	10	
2.1	緒言 .....	10
2.2	D カット型形状電極製作 .....	10
2.3	実験装置・条件 .....	13
2.3.1	形彫り放電加工機 .....	13
2.3.2	実験条件 .....	15
2.4	実験結果および考察 .....	16
2.5	第 2 章結言 .....	18
第 3 章	2D シミュレーション .....	19
3.1	緒言 .....	19
3.1.1	COMSOL とは .....	19
3.1.2	モデル作成・解析法 .....	21
3.1.3	シミュレーション条件・回転の様子 .....	23
3.2	シミュレーション結果 .....	26
3.2.1	円形状モデル .....	26
3.2.2	ドリル形状モデル .....	27
3.2.3	1/2D カット形状モデル .....	28

3.2.4	3/4D カット形状モデル .....	29
3.3	第 3 章結言 .....	31
第 4 章	3D シミュレーション .....	32
4.1	緒言 .....	32
4.1.1	モデル作成・解析法 .....	32
	35	
4.1.2	シミュレーション条件 .....	37
4.2	シミュレーション結果 .....	39
4.2.1	円形状モデル .....	39
4.2.2	ダンベル型形状モデル .....	43
4.2.3	1/2D カット形状モデル .....	48
4.2.4	3/4D カット形状モデル .....	52
4.3	第 4 章結言 .....	58
第 5 章	結論 .....	60
5.1	本研究のまとめ .....	60
5.2	今後の課題 .....	62
参考文献	.....	63

---

---

# 第1章 序論

---

---

## 1.1 放電加工

### 1.1.1 はじめに

放電加工の大きな特徴の一つとして、非接触加工のため加工反力が小さいことがあげられる。その特徴を活かして微細加工への応用が広まってきた。特に細穴放電加工が代表する加工である。細穴加工の用途として、航空機のジェットエンジンの細穴など各産業機器において多数必要とされており、放電加工技術の需要が増加していくことが予想される。

放電加工は、電極と被加工物の間で繰り返されるアーク放電により被加工物を溶融することで加工を行う。難削材の加工、高精度な微細加工、複雑形状の加工、深穴加工など行うことができる。一方で、深穴加工において、加工深さが深くなるにつれて気泡、加工屑の排出が滞り加工深さを得ることができない問題点がある。気泡、加工屑の排出効率を向上させることで、より深い加工深さを得ることができると予想される。これまで小林の研究では、電極形状を変えることによる加工深さの限界を調査し、D カット型形状電極を用いることでアスペクト比 10 以上の加工深さを得ることができた<sup>[1]</sup>。しかし、正確な D カット形状電極の加工深さ限界は分かっていない。

そこで本研究では、D カット形状電極における加工深さ限界を調査する。電極形状を変えることによって、加工深さが異なることは、極間の気泡および加工屑の影響が大きいと予想される。気泡および加工屑の排出を向上させるためには、極間の流体流れを把握することが有効であると考えられる。そこで、電極形状が極間の流れに与える影響についてシミュレーションソフトを用いて CFD 解析を行い、電極形状によって加工深さが異なる要因を考察したので報告する。

### 1.1.2 放電加工とは

放電加工は大きく「形彫り放電加工」と「ワイヤ放電加工」に分かれる。本研究では、形彫り放電加工について議論を進めていく。以下に放電加工の原理について簡単に説明する。図 1.1 は放電加工の原理を簡単な図で示している。

#### (1) 放電発生

電極と被加工物の間に電源から電圧印加し、電極を降下させる。電極と被加工物との極間距離はおおよそ数[ $\mu\text{m}$ ]まで接近し微小放電、アーク放電が発生する。

#### (2) アーク放電による被加工物溶融

アーク放電は、非常に電流密度の高い電子の流れとなっている。電子の流れは、融解点の高い金属でも蒸発もしくは融解するほどの高温の熱になる。この熱エネルギーの影響を受け、被加工物が溶融する。このとき、電極側も同時に熱による影響を受ける。これらの熱によって、周辺の加工液は急激に気化膨張し、溶けた被加工物と電極との間に大きな圧力をおよぼす。

#### (3) 加工屑の発生・飛散

放電が終わると、金属の溶融した部分が冷却され小さな加工屑となる。極間で爆発圧力、気化爆発によって溶融部が飛散しクレーターが生じる。

#### (4) 絶縁回復

加工屑が飛散、排出されるとまわりの加工液によって、高温の熱を冷ましていく。放電が発生したギャップでは絶縁回復が起こる。

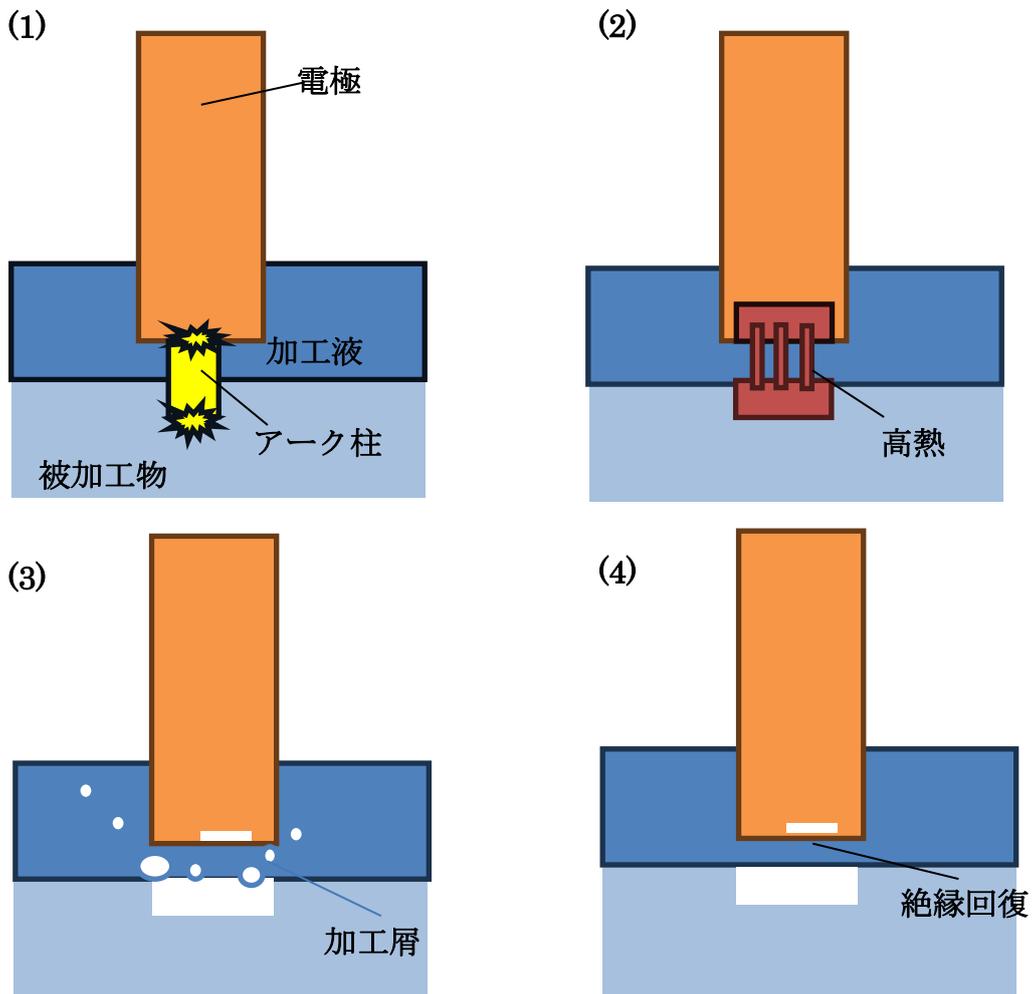


図 1.1 放電加工の原理

## 1.2 深穴放電加工

### 1.2.1 深穴放電加工の概要および問題点

一般的な深穴放電加工の概要および問題点を簡単に説明する。

ここでいう深穴とは、一般的に穴径に対して加工深さが 5 倍を超える穴のことを言う。(アスペクト比 ( $L/D \geq 5$ )) を指す。深穴加工の手順について以下に示す。

#### (1) 電極の用意

実際に得たい加工深さに合わせた電極を用意する。

#### (2) 放電確認

電極と被加工物をゆっくりと近づけていき、放電が正常に発生するかの確認を行う。

#### (3) 条件設定

回転数、放電持続時間などを設定し、加工を始める

#### (4) 加工後

加工終了後、回転状態のまま電極を上引き抜く。

深穴放電加工の問題点を以下に示す。

・加工深さが深くなるにつれて加工が停滞する。

→原因として、加工屑、気泡の排出効率低下が挙げられる。

図 1.2 に深穴放電加工の問題点を表した模式図を示す。

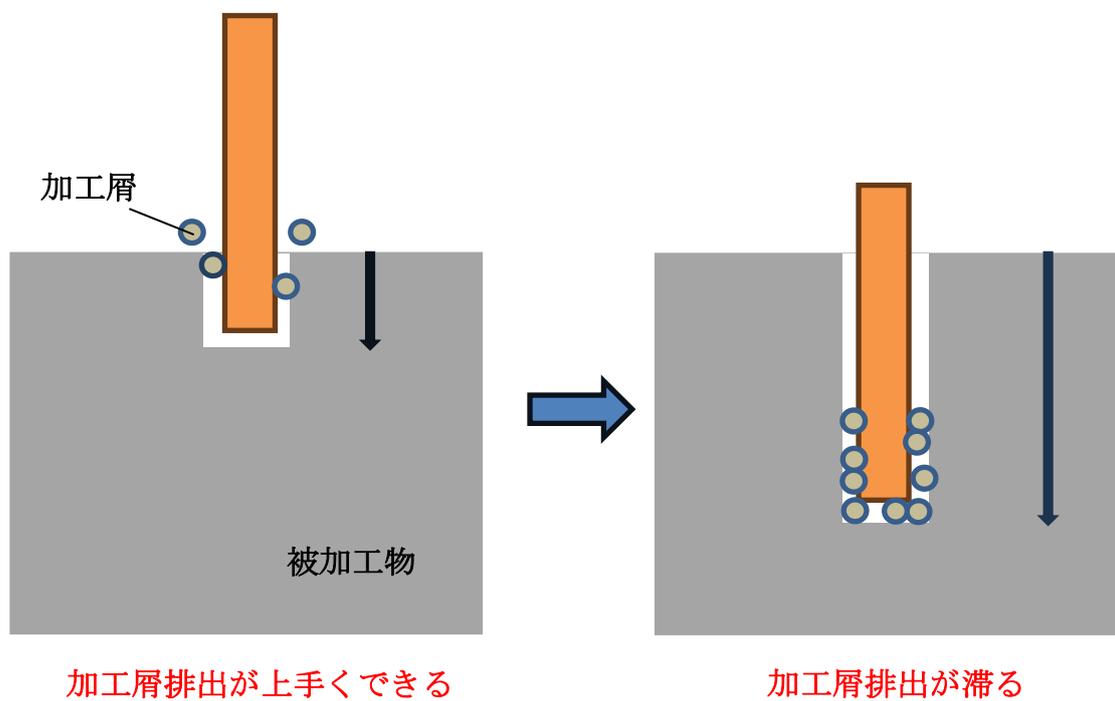


図 1.2 深穴放電加工の問題点

## 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

深穴放電加工において、加工深さが深くなるにつれて気泡、加工屑の排出が滞り加工深さを得ることができない問題点がある。気泡、加工屑の排出効率を向上させることで、より深い加工深さを得ることができると予想される。その改善案として、電極形状の検討が行われている。これまで小林の研究では、電極形状を変えることによる加工深さの限界を調査し、D カット型形状電極を用いることでアスペクト比 10 以上の加工深さを得ることができた。しかし、正確な D カット型形状電極の加工深さ限界は分かっていない。また、なぜ電極形状を変えることで高アスペクト比を得ることができるのか分かっていない。

### 1.3.2 本研究の目的

本研究では、D カット形状電極における加工深さ限界を調査する。また、電極形状を変えることによって、加工深さが異なることは、極間の気泡および加工屑の影響が大きいと予想される。気泡および加工屑の排出を向上させるためには、極間の流体流れを把握することが有効であると考えられる。そこで、電極形状が極間の流れに与える影響についてシミュレーションソフトを用いて CFD 解析を行い、電極形状によって加工深さが異なる要因を考察する。

### 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 5 章で構成されており、本論文の構成を示す。

第 1 章では、本研究の背景および目的を述べ、放電加工法や深穴放電加工について簡単に説明する。

第 2 章では、D カット型形状電極を用いて深穴放電加工を施し、加工深さ限界を調査したので報告する。

第 3 章では、従来の研究で用いられてきた電極形状の 2D モデルをシミュレーションソフト用いて作成し、流体解析を調査したので報告する。

第 4 章では，シミュレーションソフトを用いて電極形状の 3D モデルを作成し，流体の流れ場，気泡上昇の様子を解析したので報告する．

第 5 章では，本研究の結論を述べ，今後の課題について考察する．

---

---

## 第2章 D カット型形状電極による深穴放電加工の加工限界

---

---

### 2.1 緒言

ここでは、D カット型形状電極製作法について紹介した後、目標深さ 40mm とし深穴放電加工を行ったので、結果および考察を報告する。

### 2.2 D カット型形状電極製作

ここでは、実験に用いた D カット型形状電極の製作法を示す。小林は、市販の形彫り放電加工機を用い電極の形状製作を行った。D カット型形状電極とは、加工の先端部が「D」の形をした電極形状である。形彫り放電加工機を用いた D カット型形状電極の製作は、電極製作に時間がかかるという問題があった。そこで、製作時間短縮のため、切削加工による D カット型形状電極を製作する。電極工具製作には、SRM-20(Roland 製) (図 2.2.1) を用いた。この製作法により、従来、形状の製作におよそ 3 時間かかっていたのを 2 分に短縮することができた。以下に、電極製作の流れを簡単に示す。

#### (1) 治具製作

切削機で加工するにあたり、目標形状にあった治具を作成する必要がある。治具製作には、CAD ソフト、SOLIDWORKS 2019 でモデルを作成し、3D プリンターで製作する。

製作した治具を図 2.2.2 に示す。

#### (2) 切削加工

図 2.1.2 で示した切削機で加工を行う。工具には $\phi 4\text{mm}$ のエンドミルを使用した。製作した電極は、先端部 3/4D カット型形状電極、D カット部長さ 50mm である。放電加工機で示した電極、実際に実験で用いる切削加工機で製作した電極および顕微鏡拡大画像を図 2.2.3 に示す。



図 2.2.1 SRM-20 (Roland 製)

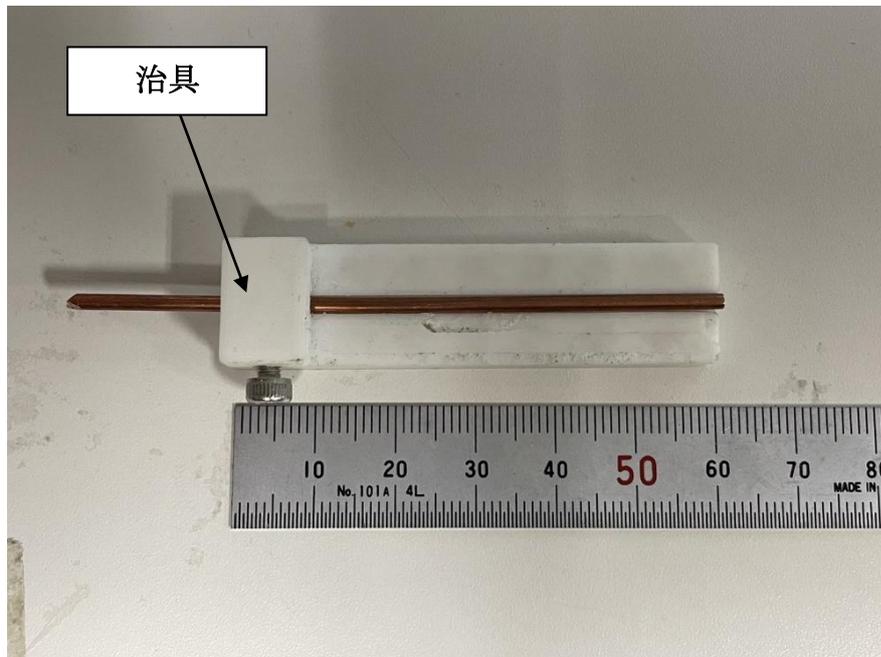
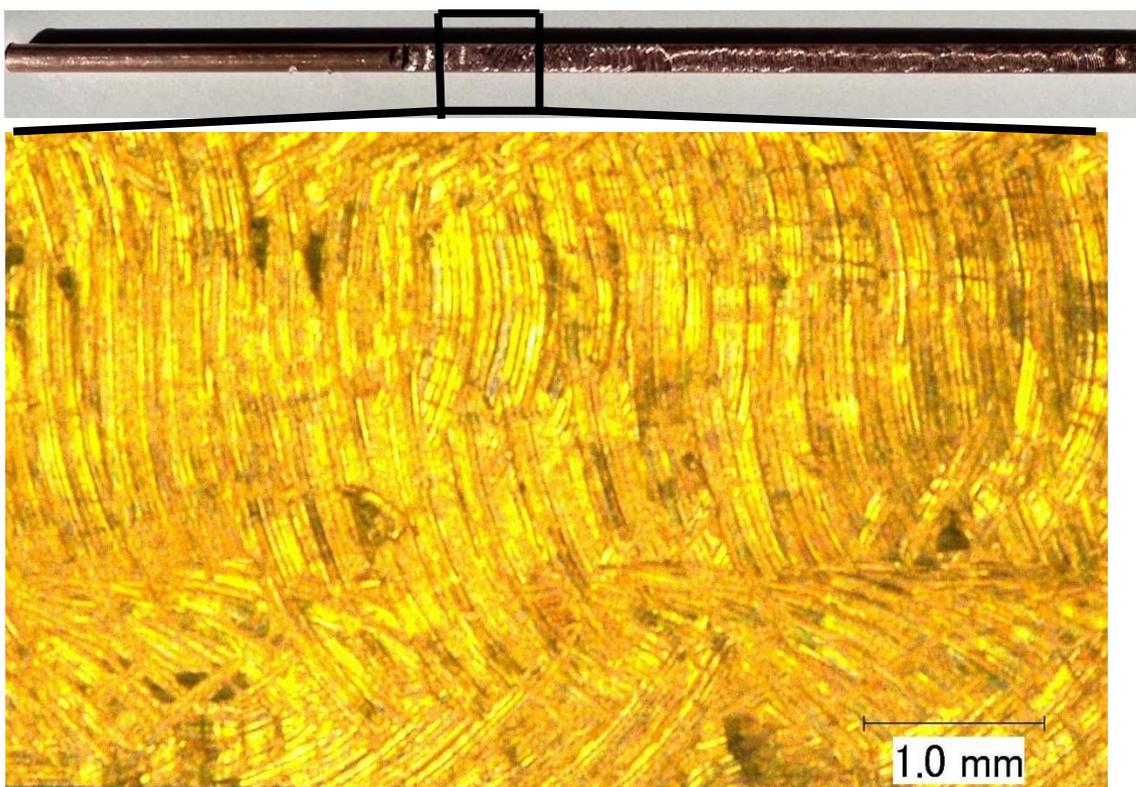


図 2.2.2 治具



(a) 切削加工による電極



(b) 放電加工による電極

図 2.2.3 工具電極

## 2.3 実験装置・条件

### 2.3.1 形彫り放電加工機

実験には，市販の形彫り放電加工機，計測にはレーザー変位計を用いて深穴放電加工を行った．図 2.3.1 に市販の形彫り放電加工機を示す．



図 2.3.1 市販の放電加工機

図 2.3.1 の右側にある制御装置で，電流，電圧，パルス幅などの実験条件を設定する．左側は主軸である．実験では，レーザー変位計によって主軸の変位を測定する．図 2.3.2 に測定に用いたレーザー変位計のパネルおよびセンサヘッドを示す．表 1 および 2 にそれぞれの仕様を示す．レーザー変位計の値を 1 s 間ごとに Excel に保存し，実験を行った．



図 2.3.2 レーザー変位計

表 1 レーザー変位計の仕様 (左: パネル)

モデル	LK-GD500
メーカー	KEYENCE
種類	表示パネル
最小表示単位	0.01 $\mu\text{m}$
表示範囲	$\pm 9999.99 \text{ mm} \sim \pm 9999.99 \mu\text{m}$ (6段階選択可)
表示周期	10回 / 秒

表 2 レーザー変位計の仕様 (右: センサヘッド)

モデル	LK-G150
メーカー	KEYENCE
基準距離	拡散反射: 150 nm, 正反射: 147.5 nm
測定範囲	拡散反射: $\pm 40 \text{ mm}$ , 正反射: $\pm 39 \text{ mm}$
光源波長	655 nm (可視光)

### 2.3.2 実験条件

実験条件を表 2.1 に示す.

表 2.1 実験条件

電極(+)/被加工物(-)	Cu( $\phi$ 2 mm) / SKD61(t = 50mm)
電源電圧	100 V
放電電流	4 A
軸回転数	1000 rpm
パルス幅 / 休止時間	10 $\mu$ s / 10 $\mu$ s

実験に使用した SKD61 を図 2.3.3 に示し, その組成を表 2.2 に示す.



図 2.3.3 SKD61

表 2.2 SKD61 の組成

	C [wt%]	Si [wt%]	Mn [wt%]	Cr [wt%]	Mo [wt%]	V [wt%]
SKD61	0.40	1.0	0.4	5.2	1.3	1.0

## 2.4 実験結果および考察

図 2.4.1 に 3/4D カット型形状による深穴放電加工の加工深さの変位と加工時間の変位を示す。今回は、加工深さ目標を 40mm として加工を行った。結果は、主軸変位 40mm 加工することができた。しかし、加工が進行していく中で図に示した赤丸の部分で主軸変位が上がる様子も見られた。これは、気泡や加工屑排出が滞り、加工屑がたまつたためと考える。そのため、D カット型形状電極を用いて深穴放電加工したとしても、継続して加工を行うことはできず、加工深さ限界があると考えられる。表 4 に主軸変位および電極消耗の関係、図 2.4.2 に実験後の電極および顕微鏡拡大画像を示す。表 4 より電極消耗長さを考慮すると、実際の加工深さは 37.54mm だと考える。

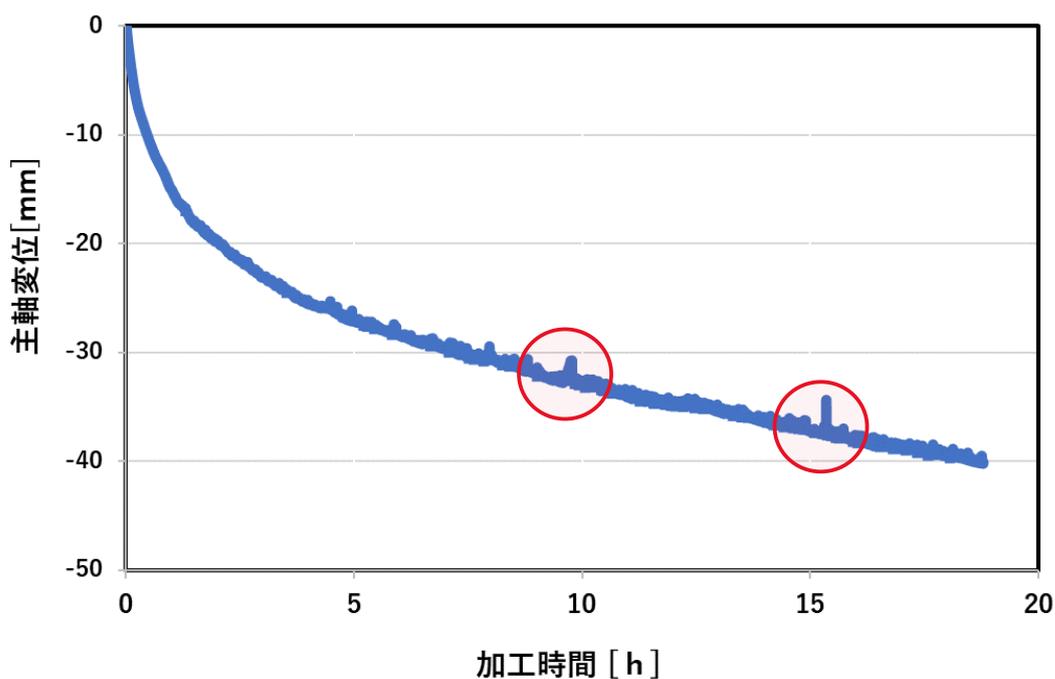


図 2.4.1 3/4D カット型形状電極による加工深さの変位と加工時間の関係

表 4 主軸変位および電極消耗

形状	3/4D カット型形状
主軸変位	40 mm
実験前 D カット部 長さ	49.70 mm
実験後 D カット部 長さ	47.26 mm
消耗長さ	2.46 mm

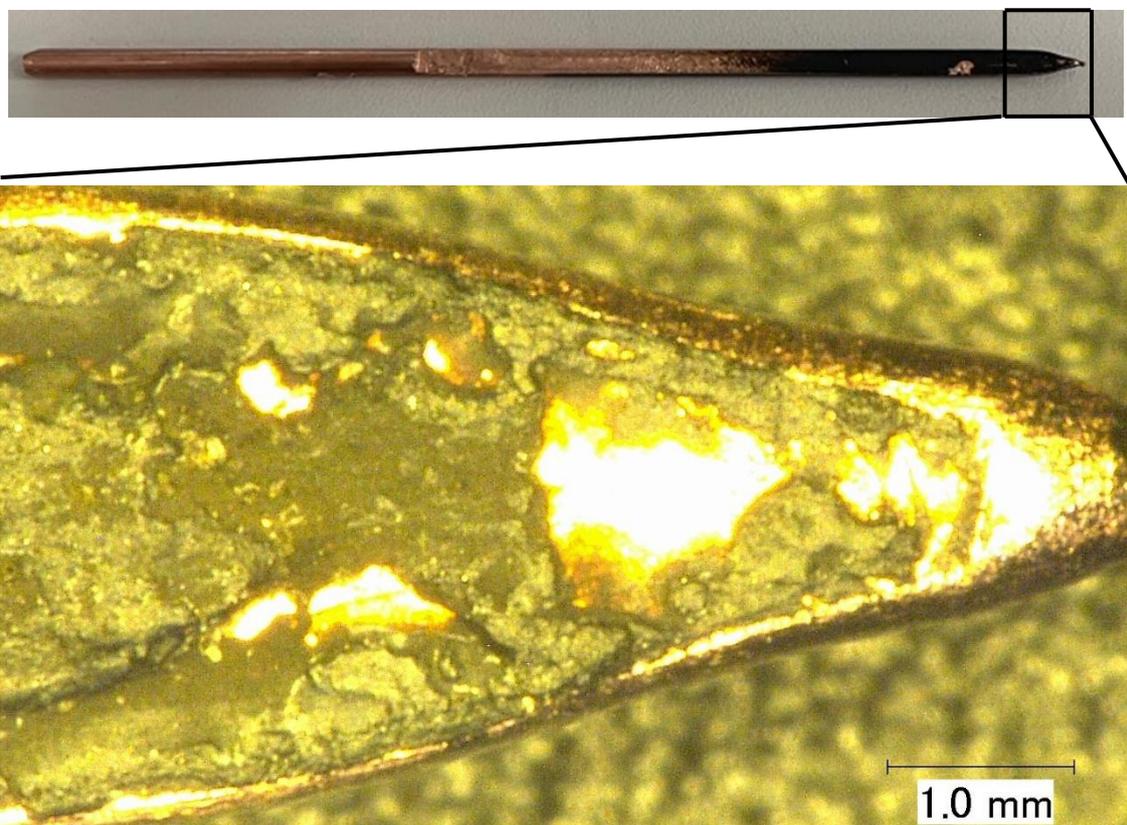


図 2.4.2 深穴加工後の電極

## 2.5 第 2 章結言

本章では、D カット形状電極製作法の提案および加工深さ限界を調査した。以下に結果をまとめる。

- ・切削機を用いて D カット型形状電極製作を行うことによって、1 つの製作時間を 3 時間から 2 分に大幅に短縮することができた。
- ・3/4D カット形状を用いることで、主軸変位 40mm加工を行うことができた。
- ・加工が進行していくにつれて、加工が停滞する様子が確認された。その結果から、加工深さ限界は存在すると考える。

---

---

## 第3章 2D シミュレーション

---

---

### 3.1 緒言

ここでは、シミュレーションソフト、COMSOL の説明および流体解析の解析法について紹介する。その後、2D モデルを用いたシミュレーションを行ったので、結果および考察を報告する。

#### 3.1.1 COMSOL とは

今回のシミュレーションには、COMSOL Multiphysics(ver6.1)（以下 COMSOL と記述する）を用いた。COMSOL について簡単に説明する。COMSOL とは物理シミュレーションソフトウェアの一種である。COMSOL の大きな特徴を以下に示す。

(1) マルチフィジックス解析（2 種類以上の物理現象を組み合わせた解析）ができる。

私たちの社会では、複数の物理的現象が互いに影響を及ぼしている。こうした複雑な現象を一つの支配方程式のみで正確に把握することは困難である。互いに影響しあう複数の物理現象を計算に組み込むことでより実際の現象に近い結果を得ることができる。これを実現するのが COMSOL である。COMSOL では、2 種類以上の物理現象を無制限かつ事由に組み合わせて解析を行うことができるため、実現象に即したシミュレーションが可能である。

(2) 試行錯誤的に進めていくことができる

COMSOL はモデルの作成、条件設定、解析を一つのソフトで行うことができる。条件設定する手順が決められていないため操作手順を自分で決定することができる。使用者が自分で操作したモデルを保存することができ、分かることからモデルを作成していける。モデルツリーやレポート作成機能などがあり、使用者にとって最適な手順書を作ることもできる。

### (3) 解析モジュールが豊富

COMSOL には、流体力学、電磁気学、音響学および熱力学などたくさんの物理現象を解決するためのモジュールが豊富に存在するため汎用性が高い。また、COMSOL の基本モジュールだけでなく、流体解析に特化した CFD モジュール、回転機械のシミュレーションに特化したミキサーモジュールなどの目的に沿ったモジュールを追加することでより詳しい解析が可能である。

今回のシミュレーションでは、CFD モジュールを用いて流体解析を行った。CFD モジュールを用いることで層流および乱流の単相流および混相流の流れをモデル化することができ、複雑な流れを解析できる。また、他のモジュールと組み合わせることで流体構造の相互作用などもシミュレーションを行うことができる。

### 3.1.2 モデル作成・解析法

2D モデルを用いた、流体解析法、モデルの作成について説明する。

今回は、先行研究で用いられている、円形状、ドリル形状、1/2D カット型形状、および 3/4D カット型形状の 2D モデルを作成し、流体の流れ場が形状によってどうなるのかを解析することを目標とした。

流体の解析は、流体運動の支配方程式と呼ばれるナビエ Stokes 方程式 (NS 方程式) を解いていく作業である。以下に、方程式を示す。

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-p + K] + F \quad (3.1.1)$$

$$\rho \nabla \cdot u = 0 \quad (3.1.2)$$

$$K = \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) \quad (3.1.3)$$

ここで、 $u$ [m/s]は流体速度、 $p$ [Pa]は流体圧力、 $\rho$ [kg/m<sup>3</sup>]は流体密度、 $\mu$ は流体動粘度である。ナビエ Stokes 方程式(3.1.1)の左辺は慣性力、右辺は、圧力、粘性力、流体に加えられる外力を示している。式(1.1)は、常に連続方程式 (3.1.2) と一緒に解いていくことになる。ナビエ Stokes 方程式は、流体の運動量の保存を表しており、連続方程式は質量保存を表している。これらの方程式を解いていくことが流体解析の中心となる。これらに、モデルにとって最適な境界条件を設定し解いていくことで、流体の速度、圧力が予想される。

次に、モデルの形状作成法について説明する。モデルの作成では、COMSOL のジメオトリ機能を用いて形状作成を行った。図 3.1.1 に作成した円形状、ドリル形状、1/2D カット型形状および 3/4D カット型形状を示す。モデル作成から計算までの流れは以下のとおりである。

- (1) モデル形状作成 (ジメオトリ機能)
- (2) 材料設定
- (3) 境界条件, シミュレーション条件設定
- (4) メッシュ作成
- (5) 計算

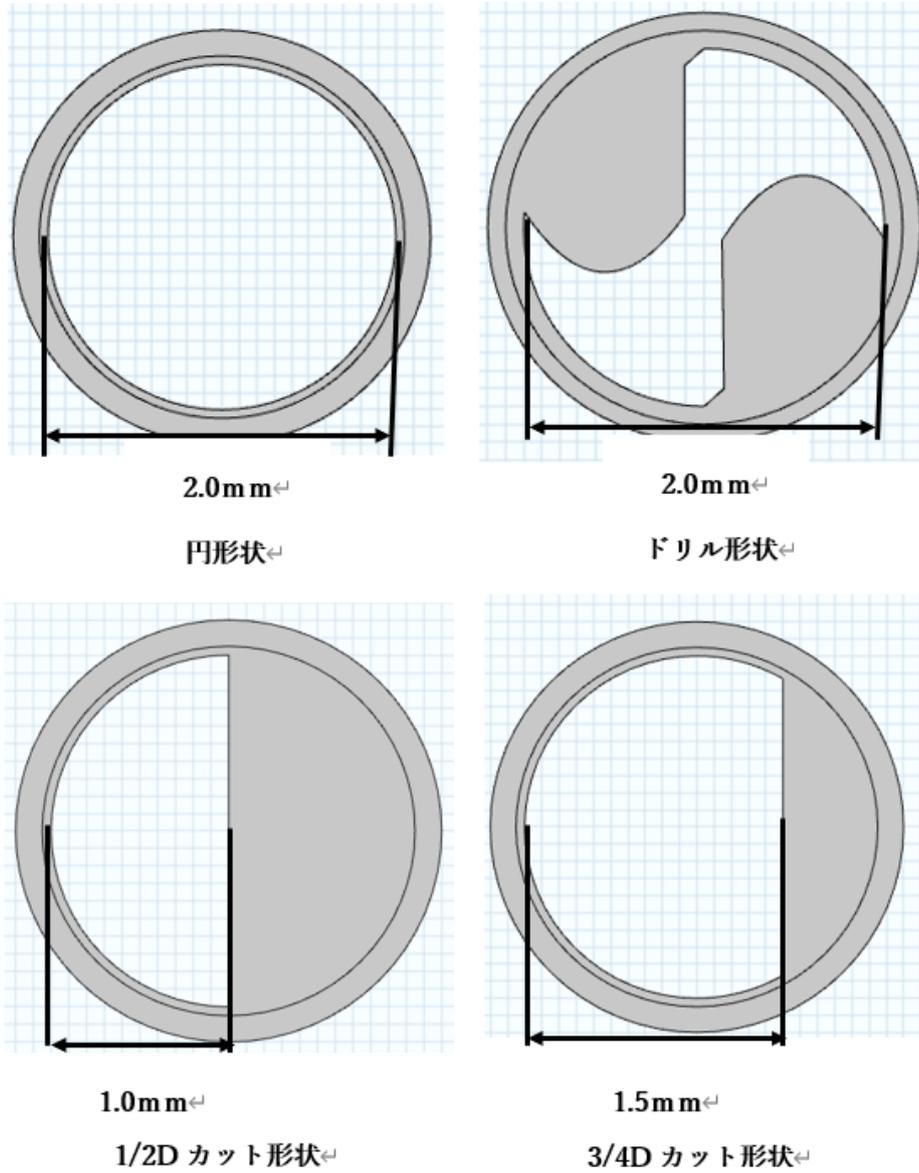


図 3.1.1 2D モデル

### 3.1.3 シミュレーション条件・回転の様子

図 3.1.1 に示したモデルを用いてシミュレーションを行った。次にシミュレーション条件について説明する。今回のモデルの材料は Water (水) とした。次に、COMSOL の移動メッシュ機能を用いて回転速度 104rad/s とした。これは、先行研究と速度を合わせるためである。

次に、境界条件の設定である。今回のシミュレーションは、形状を回転させた時の流体の流れ場を解析することが目的である。形状部分の周りを水① (内円) で囲む。この部分を回転させるために、外周部分を水② (外円) で囲む必要がある。水① (内円) 部分の領域を回転させることで形状の回転を再現し、流体の流れ場を解析した。2D 形状を反時計回転させることで流体の流れ場をシミュレーションした。図 3.1.2 にドリル形状のモデルを示す。

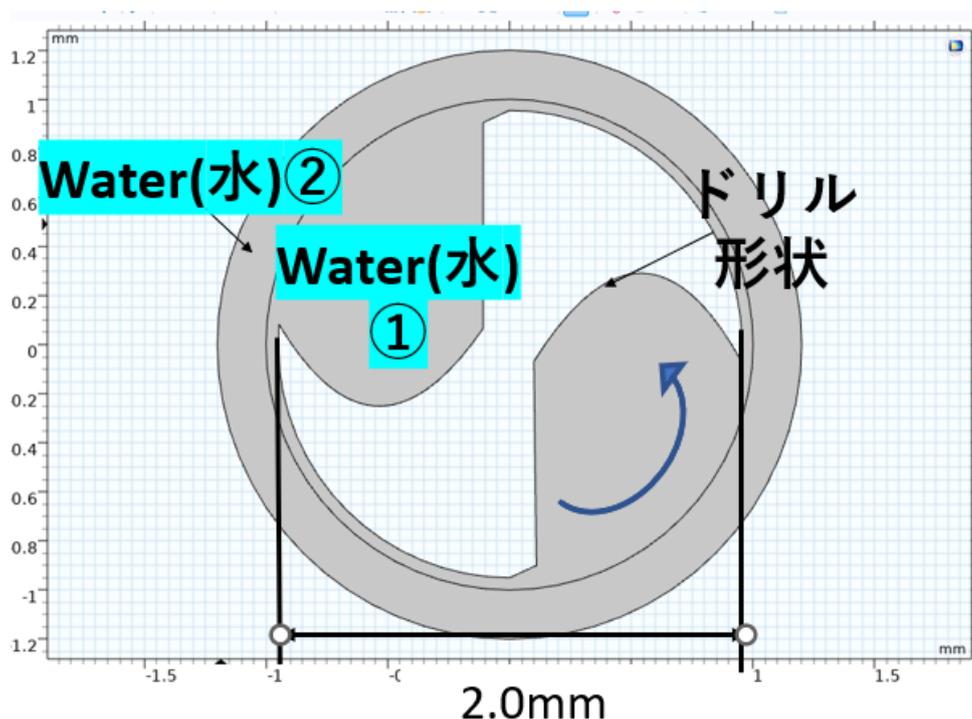


図 3.1.2 シミュレーションモデル (ドリル形状)

最後に、メッシュの作成を行う。COMSOL のメッシュ作成には、自分で、作成を行う「ユーザー制御メッシュ機能」と自動でメッシュを作成してくれる「フィジックス制御メッシュ機能」の 2 つがある。今回は、フィジックス制御メッシュ機能選択し、要素サイズの設定で「より細かい」とした。

図 3.1.3 にドリル形状のメッシュ作成画像を示す.

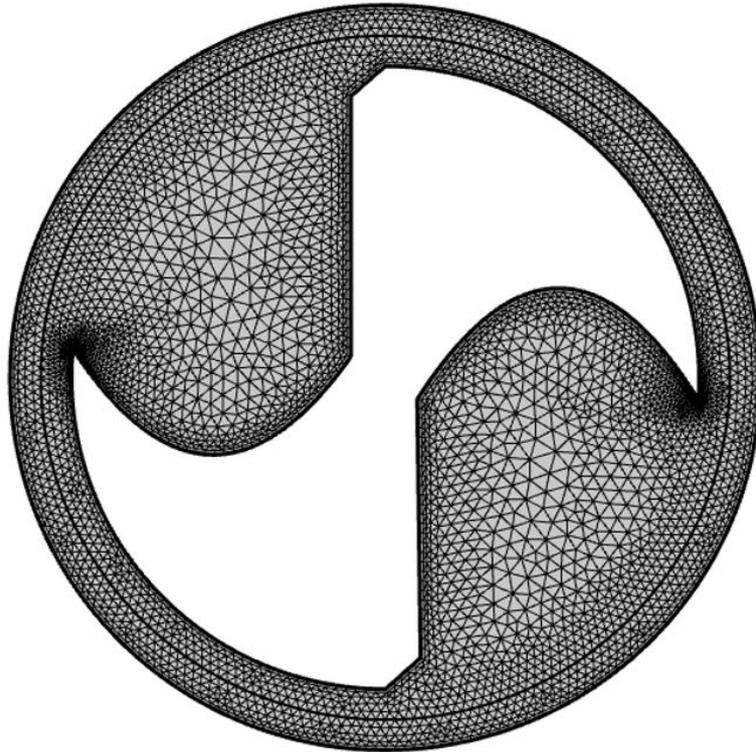


図 3.1.3 メッシュ作成 (ドリル形状)

シミュレーション時間は、0.01 s 刻みの 1 s までの時間シミュレーションを行った。回転角は 0.01 s で  $60^\circ$  , 0.06 s で  $360^\circ$  (1 回転)である 0.001 s 進んだところを初期値として与えた。図 3.1.4 にドリル形状を用いた 1 回転分のシミュレーション結果の様子を示す。

ここまで示してきた流れで円形状, ドリル形状, 1/2D カット型形状および 3/4D カット型形状の 2D モデルシミュレーションを行った。

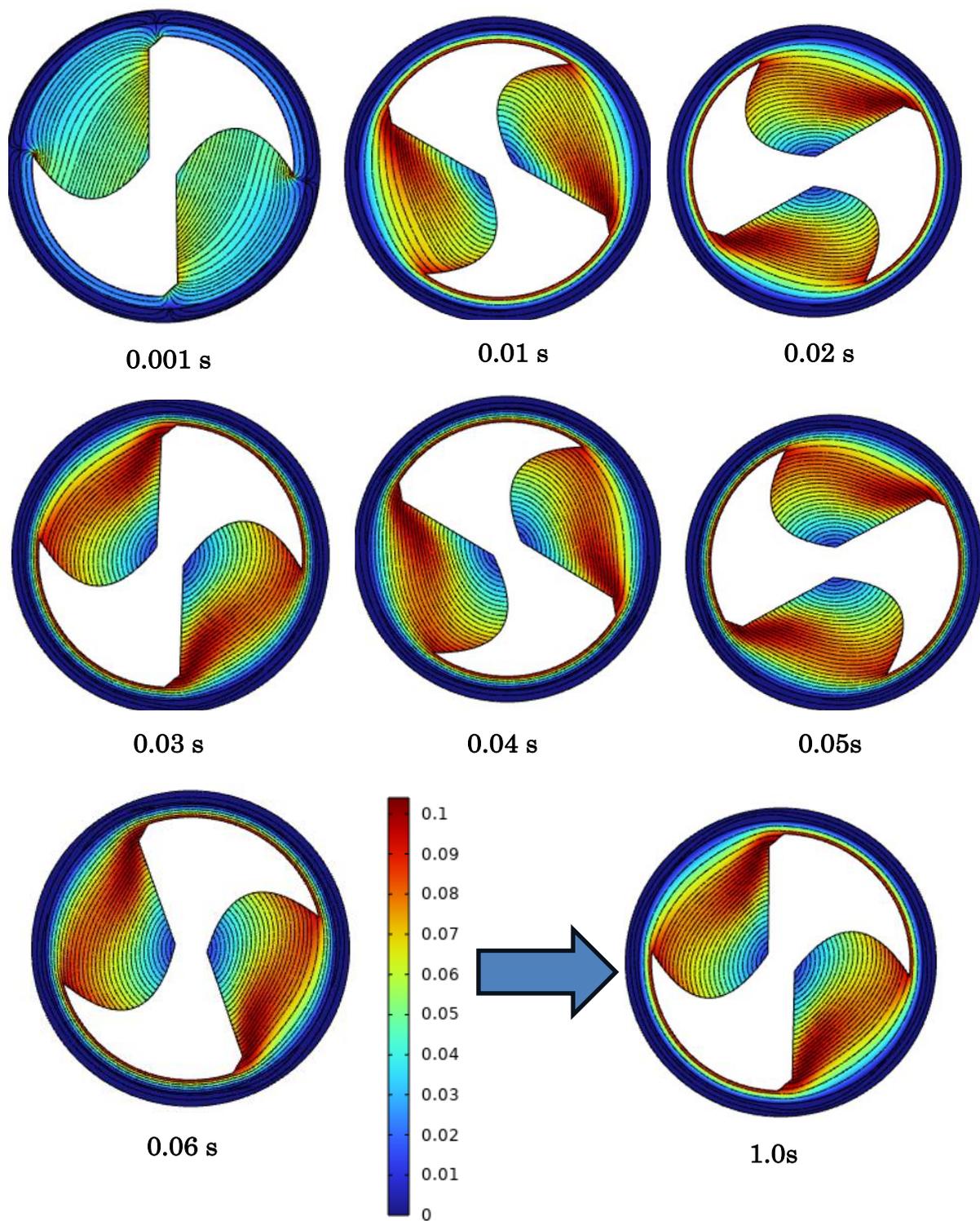


図 3.1.4 1回転の様子（ドリル形状）

## 3.2 シミュレーション結果

### 3.2.1 円形状モデル

円形状モデルの 0 s ~ 0.02 s, 1 s のシミュレーション結果を図 3.2.1 に示す。図の赤くなっている部分が速度速く、青い部分が速度遅い部分である。シミュレーションの結果から、円周状に沿うような形で速度が速くなっている様子が確認できた。遠心力が働き、速度が速くなっていると考えられる。速度の単位は [m/s] である。

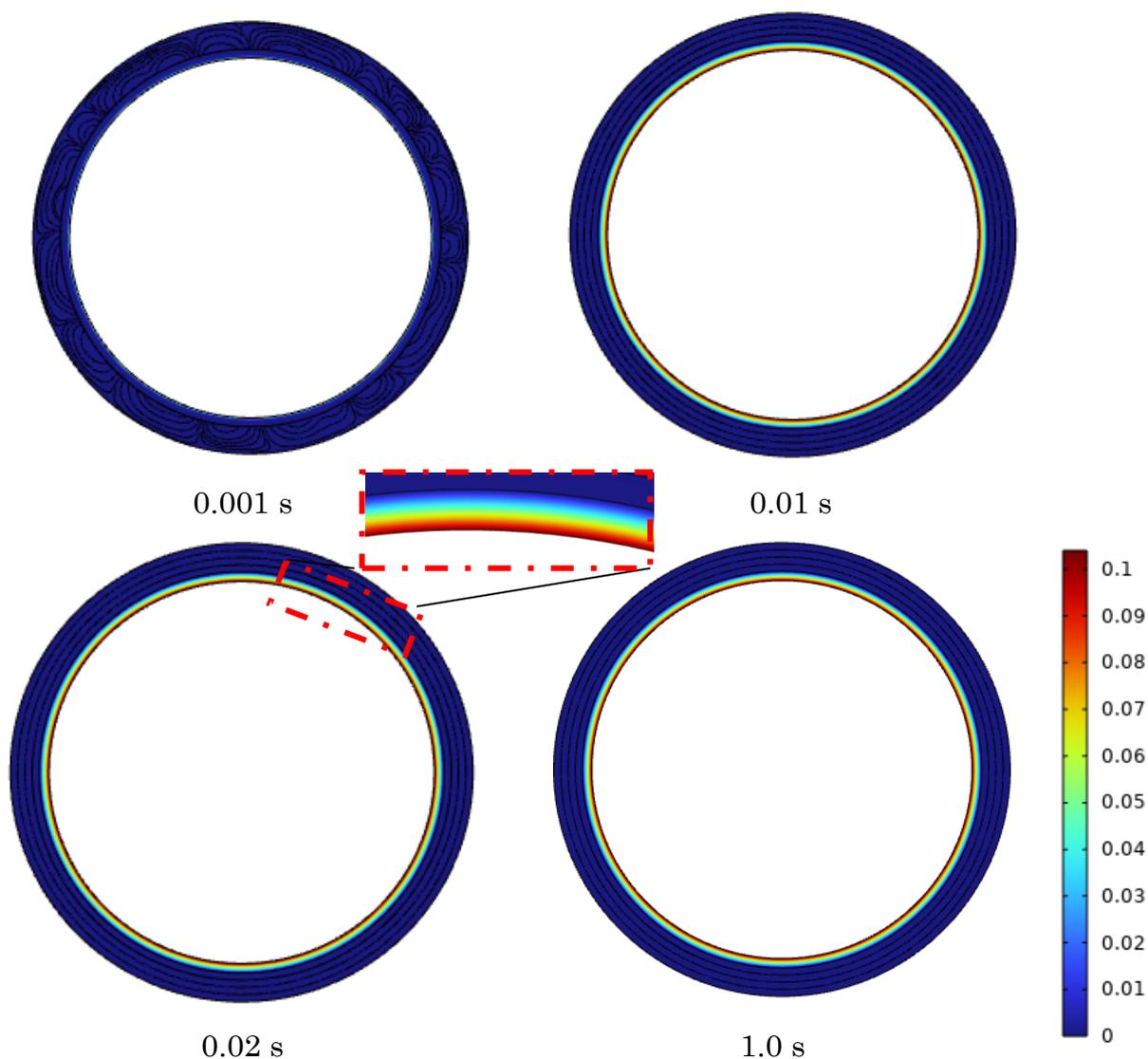


図 3.2.1 シミュレーション結果 (円形状)

### 3.2.2 ドリル形状モデル

ドリル形状モデルの 0s~0.02s, 1s のシミュレーション結果を図 3.2.2 に示す。シミュレーションの結果から、形状に対して中心部の速度が遅く、外周部の領域において速度が速くなっている様子が確認できた

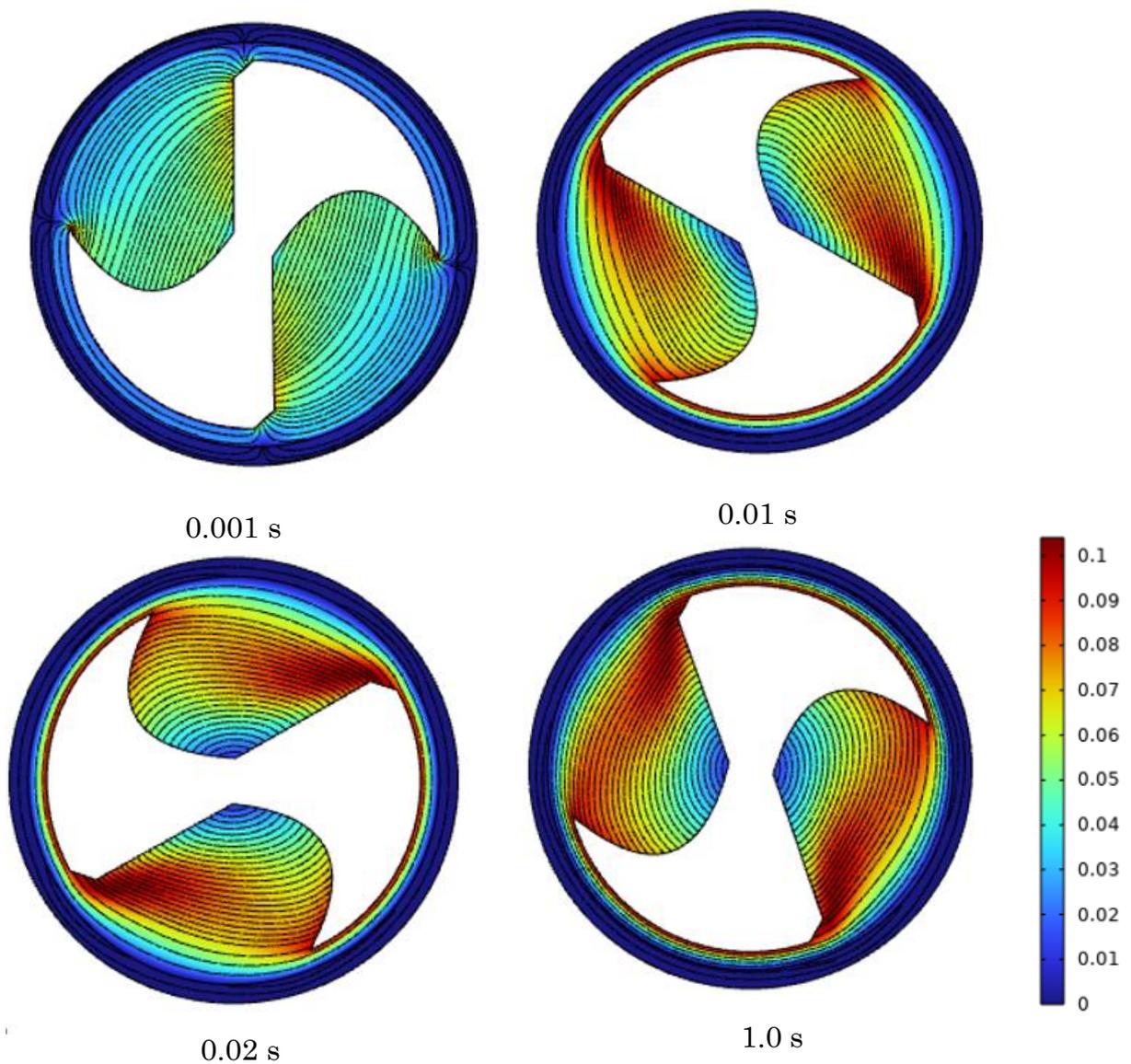


図 3.2.2 シミュレーション結果（ドリル形状）

### 3.2.3 1/2D カット形状モデル

1/2D カット形状モデルの 0s~0.02 s, 1 s のシミュレーション結果を図 3.2.3 に示す. シミュレーションの結果から, 形状の中心部の速度が遅く, 外周部の領域において速度が速くなっている様子が確認できた.

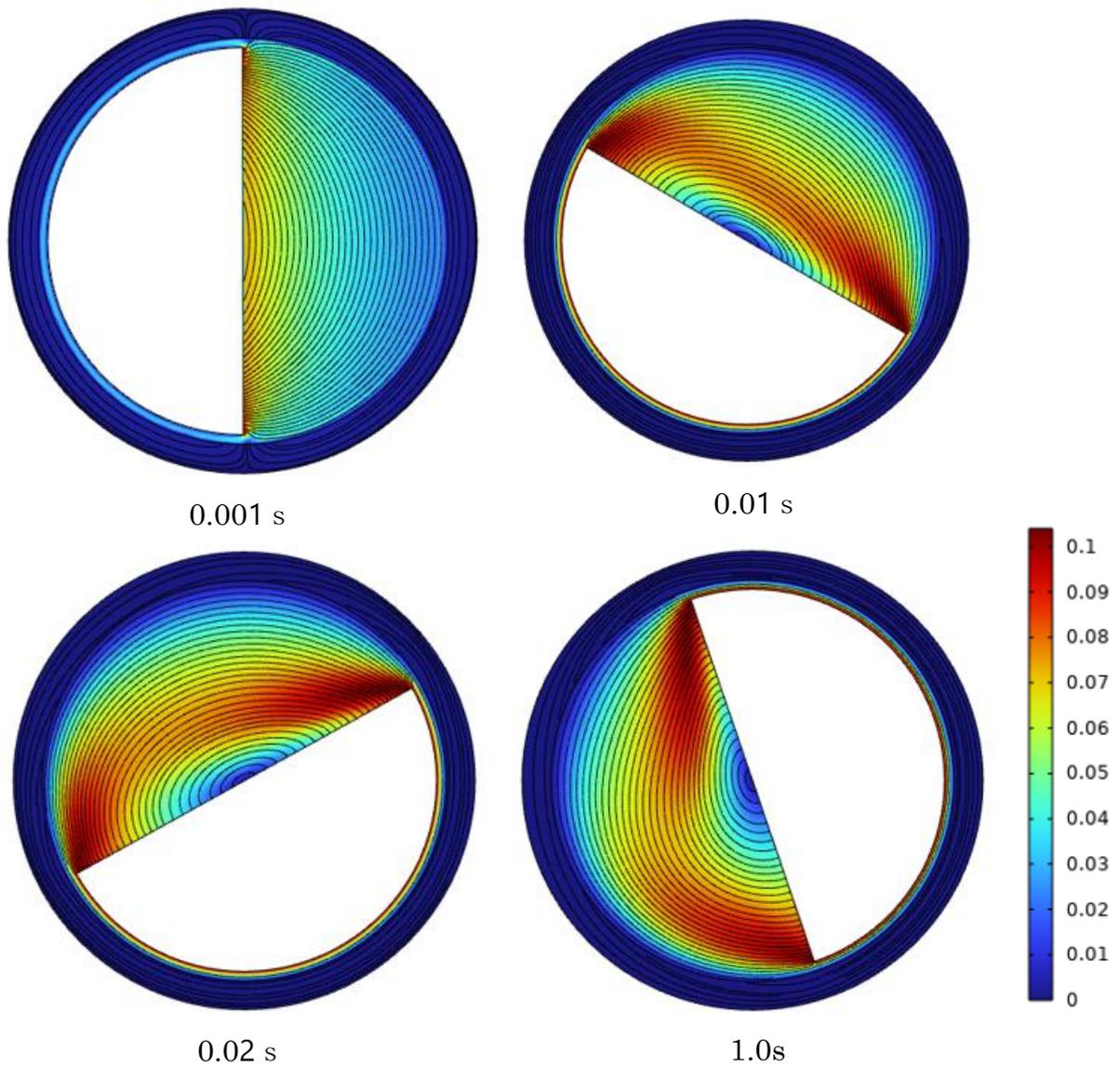


図 3.2.3 シミュレーション結果(1/2D カット形状)

### 3.2.4 3/4D カット形状モデル

3/4D カット形状モデルの 0 s～0.02 s, 1 s のシミュレーション結果を図 3.2.3 に示す. シミュレーションの結果から, ドリル形状, 1/2D カット形状と似ており, 中心部の速度が遅く, 外周部の領域において速度が速くなっている様子が確認できた.

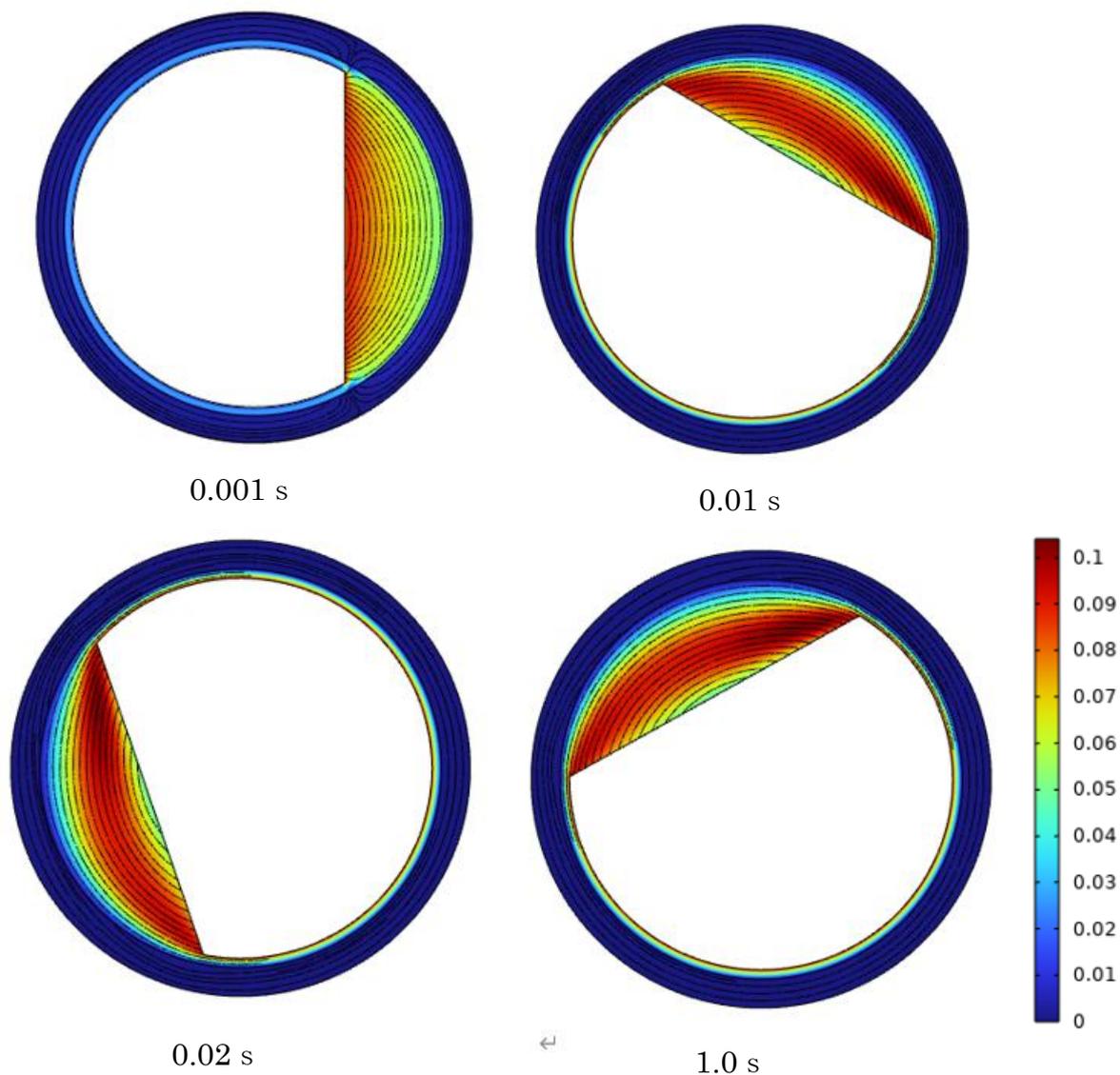


図 3.2.4 シミュレーション結果 (3/4D カット形状)

ここまでの円形状モデル，ドリル形状モデル，1/2D カット型形状モデル，3/4D カット型形状モデルのシミュレーション結果を加工屑排出の点から考える．D カット型形状モデル，ドリル形状の速度が速い外周領域で加工屑が動き排出に繋がっていると考える．速度が遅い中心部分に加工屑がたまっていると考える．

実際の深穴放電加工の結果と比較していく．図 3.2.5 に電極形状による加工深さの変位と加工時間の関係を比較したグラフを示す<sup>1)</sup>．図 3.2.5 より丸棒型形状電極に比べて，ドリル型形状電極，D カット型形状電極は高アスペクト比を得ることができている．この要因として，ドリル型形状電極，D カット型形状電極では攪拌作用が働き，気泡および加工屑が効率的に排出されたことが関わっていると考えられる．シミュレーション結果と比較して考えると，円形状モデルと比べて，ドリル型形状，D カット型形状の極間のスペースが広い部分で攪拌作用が大きく働いて気泡，加工屑の排出に繋がっていると考える．

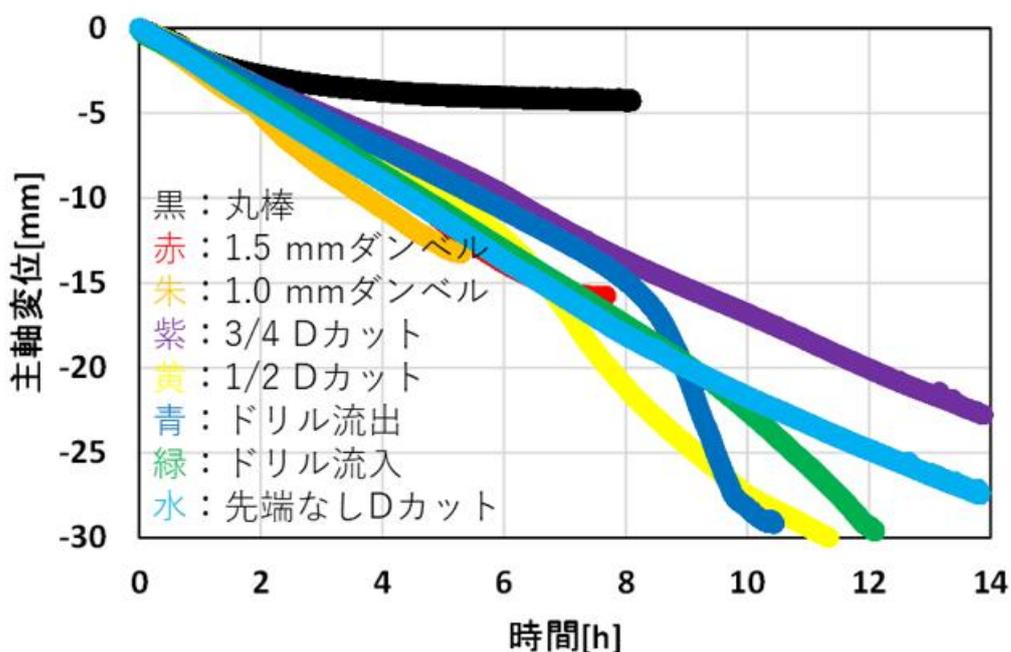


図 3.2.5 全工具電極の加工深さの変位と加工時間の関係

出典：小林慎一：工具電極形状が高アスペクト比深穴放電加工へ及ぼす効果，  
(2022)新潟大学卒業論文， p 48

### 3.3 第3章結言

本章では、シミュレーションソフト COMSOL の説明、流体解析法、モデル作成法について説明した。また、円形状モデル、ドリル形状モデル、1/2D カット形状モデルおよび 3/4D カット形状モデルの 2D モデルを作成し形状を回転させることによる流体の流れ場を調査した。以下に結果を要約する。

- ・シミュレーションによって、電極形状の違いが極間の流速に及ぼす影響を確認することができた。
- ・円形状モデルを解析した結果、円周状に沿うような形で速度が速くなっている様子が確認できた。遠心力が働き、速度が速くなっていると考える。
- ・ドリル形状モデルを解析した結果、形状に対して中心部の速度が遅く、外周部の領域において速度が速くなっている様子が確認できた。
- ・1/2D カット形状モデルを解析した結果、形状に対して中心部の速度が遅く、外周部の領域において速度が速くなっている様子が確認できた。
- ・3/4D カット形状モデルを解析した結果、形状に対して中心部の速度が遅く、外周部の領域において速度が速くなっている様子が確認できた。
- ・加工屑排出の点から考えると、速度が遅い中心部に加工屑がたまり、速度が速い外周部で加工屑が攪拌され排出に繋がっていると考える。
- ・丸棒型電極に比べて、ドリル型形状電極、D カット型形状電極が高アスペクト比を得られている理由をシミュレーション結果から考察すると、極間のスペースが広い部分で攪拌作用が大きく働いて気泡、加工屑の排出に繋がっていると考える。

---

---

## 第4章 3D シミュレーション

---

---

### 4.1 緒言

第 3 章では、円形状モデル、ドリル形状モデル、1/2D カット形状モデルおよび 3/4D カット形状モデルの 2D モデルを作成し形状を回転させることによる流体の流れ場を調査した。極間の流速に及ぼす影響を確認することはできたが、気泡、加工屑排出に及ぼす影響を正確はあきらかにされなかった。

そこで、本章では 3D モデルを作成しシミュレーションを行った。ここでは、3D モデルを用いた流体の解析法、モデル作成法を紹介する。また、円形状モデル、ダンベル型形状モデル、1/2D カット形状モデルおよび 3/4D カット形状モデルを作成し流体解析を行ったので報告する。

#### 4.1.1 モデル作成・解析法

3D モデルを用いた、流体解析法、モデルの作成について説明する。今回は、先行研究で用いられている、円形状、ダンベル型形状、1/2D カット型形状、および 3/4D カット型形状の 3D モデルを作成し、流体の流れ場が形状によってどうなるのかを解析することを目標とした。また、実際にモデルの中に気泡を設定することによって、形状を変えることによる気泡の上昇の様子を解析した。

今回のシミュレーションは、気相と液相部分が混在した流れ、混相流のシミュレーションである。混相流のシミュレーションでは、単相流のシミュレーションと比べて、密度差が大きくなり流れが複雑となるため難しい。

混相流モデルを解析する上での基本は、界面を取得することである。界面とは、2 つの相の境界を表す用語である。界面取得には VOF 法 (Volume Of Fruction method) を用いている。これは液体と気体の割合を 0~1 で表す方法である。もしモデル内がすべて気体で満たされていれば 0、液体で満たされていれば、1 となる。この割合のことを体積比率という。今回のシミュレーションでは、この体積比率を見ていくことで、気泡がモデルのどこに多く存在するかを計算し、考察していく。

解析に用いている方程式を以下に示す.

$$\rho_1 \frac{\partial u_1}{\partial t} + \rho_1 (u_1 \cdot \nabla) u_1 = \nabla \cdot [-p + K] + \varphi_1 \rho_1 + F \quad (4.1.1)$$

$$\rho_1 \nabla \cdot u = 0 \quad (4.1.2)$$

$$K = \mu_1 (\nabla u_T + (\nabla u_1)^T) \quad (4.1.3)$$

$$\frac{\partial \varphi_2 \rho_2}{\partial t} + \nabla \cdot \varphi_2 \rho_2 u_2 = -m_{21} \quad (4.1.4)$$

$$u_1 + u_{slip} - \frac{D}{\varphi_2} \nabla \varphi_2 = u_2 \quad (4.1.5)$$

$$D = \frac{\mu_T}{\rho_1 \sigma_T} \quad (4.1.6)$$

$$\rho_1 \frac{\partial k}{\partial t} + \rho_1 (u_1 \cdot \nabla) k = \nabla \cdot \left[ \left( u_1 + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho_1 \varepsilon + S_k \quad (4.1.7)$$

$$\begin{aligned} & \rho_1 \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho_1 (u_1 \cdot \nabla) \varepsilon \\ & = \nabla \cdot \left[ \left( u_1 + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho_1 \frac{\varepsilon^2}{k} + C_\varepsilon S_k \frac{\varepsilon}{k} \end{aligned} \quad (4.1.8)$$

$$\mu_T = \rho_1 C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.1.9)$$

$$S_k = -C_k \varphi_2 \nabla p \cdot u_{slip} \quad (4.1.10)$$

$$P_k = \mu_T [\nabla u_1 : (\nabla u_1 + (\nabla u_1)^T)] \quad (4.1.11)$$

液相速度[m/s]	$u_1$	有効気体密度[kg/m <sup>3</sup> ]	$\varphi_2 \rho_2$
気相速度[m/s]	$u_2$	モデル定数	$C_\mu$
乱流運動エネルギー[kg/m <sup>3</sup> ]	$k$	体積比率	$m$
乱流散逸率[m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]	$\varepsilon$		
圧力[Pa]	$p$		
粘性係数	$\mu$		
渦粘性係数	$\mu_T$		

2D シミュレーションと同様、流体の支配方程式であるナビエストークス方程式(4.1.1)を解いていくことが基本となる。この式を解くことによって、液相の流れの速度を求めている。気相部の速度は、スリップモデルとし求めている(4.1.5)。気相の体積比率は、有効気体密度を用いた、輸送方程式(4.1.4)を解くことによって導いている。圧力分布は、混合平均連続方程式(4.1.7)を解くことにより求めている。

また、今回のシミュレーションは乱流現象を考慮したモデルとしている。乱流モデルタイプを RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes) とした。RANS は代表的な乱流の計算方法である。一つ一つの乱流の動きを詳細に追うのではなく、流れを「時間の平均場」に絞り計算する方法である。そのため、直接計算する方法に比べて、計算規模を大幅に下げることができる。時間の平均場を求める上で、考慮すべき点がある。それは、流れの性質である「乱れ」の影響である。これを RANS では、「渦粘性」というモデルで反映していく。流体流れは、流れの中の速度差によって流れが乱れ、流れの抵抗が増えた状態となる。これが不規則な流れを及ぼす要因となる。この抵抗力は「レイノルズ応力」と呼ばれている。これが、流れ場を時間平均という粗視化をした時に現れる力である。レイノルズ応力の比例係数を渦粘性係数という。粘性力の比例係数である粘性係数は「物質の種類に依存する物理量であるが、渦粘性係数は流れの状態によって決まる物理量である。

この渦粘性係数を計算することで、「乱れ」の影響を考慮していくことが必要となる。その計算方法として代表的な  $k-\epsilon$  モデルを今回用いた。このモデルでは、渦粘性係数(4.1.9)を乱流運動エネルギー、乱流散逸率から求めている。乱流運動エネルギーは流れの乱れの強さ、乱流散逸率とは乱れが消えていく速さを表している。

モデル形状作成法および計算までの流れについては、2D モデルと同様なので省略する。作成した、円形状モデル、ダンベル型形状モデル、1/2D カット形状モデルおよび 3/4D カット形状モデルを図 4.1.1 に示す。モデルの大きさについて表 5、ダンベル型形状を図 4.1.2 に示す

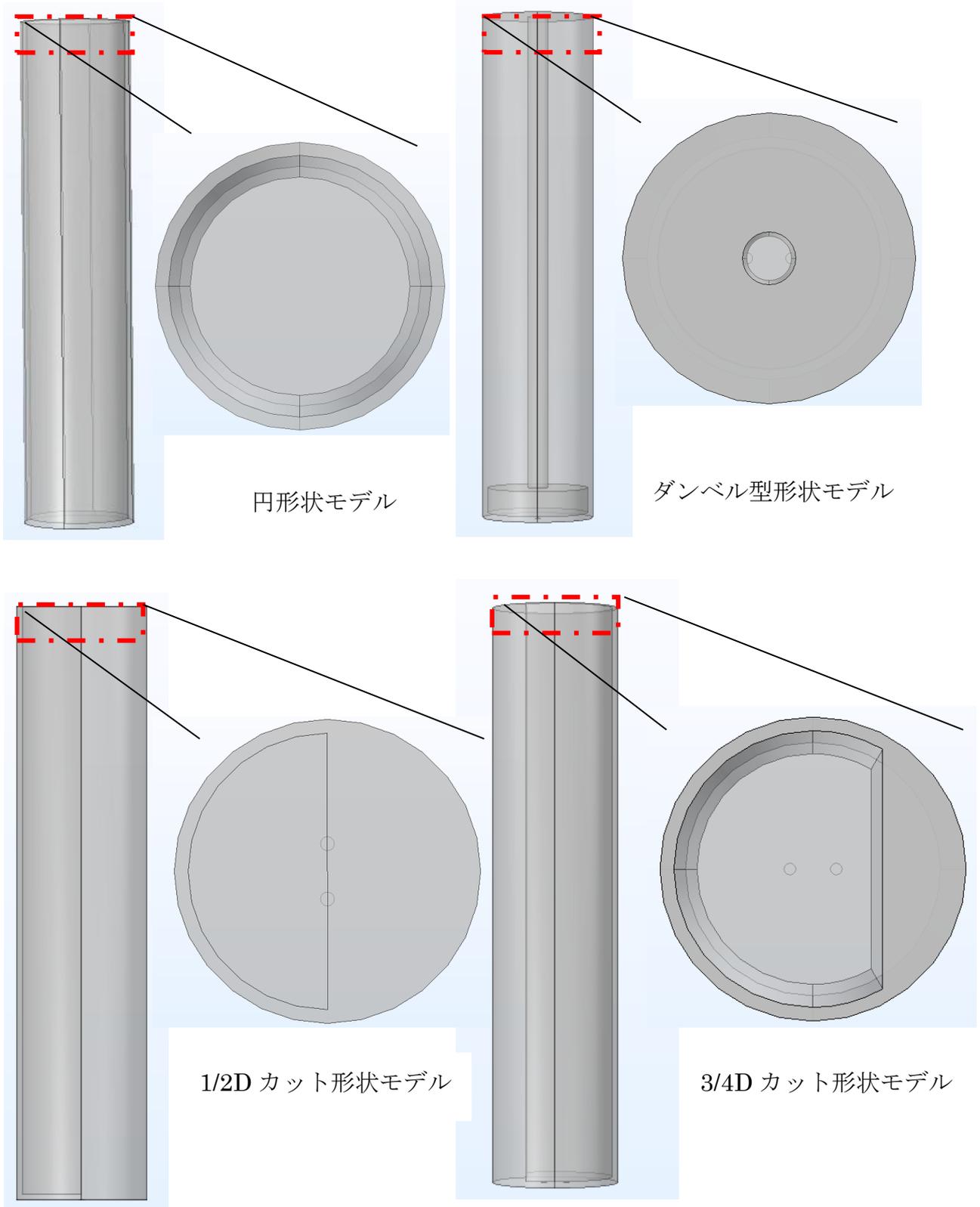


図 4.1.1 3D モデル

表 5 モデル大きさ

外円筒直径	2.2 mm
外円筒高さ	10.1 mm
内円筒直径 (電極)	2.0 mm
内円筒高さ (電極)	10.0 mm
すきま (極間)	0.1 mm
ダンベル部直径	0.4 mm
ダンベル段の長さ	0.5 mm

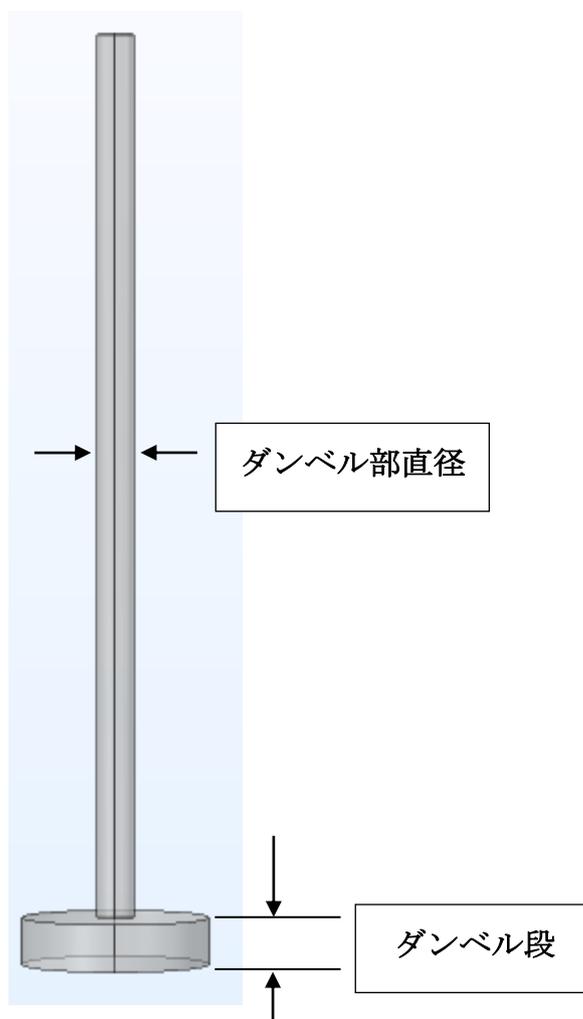


図 4.1.2 ダンベル型形状

#### 4.1.2 シミュレーション条件

図 4.1.1 に示したモデルを用いて、シミュレーションを行った。次にシミュレーション条件について説明する。今回のシミュレーションの目的は、放電加工によって発生した気泡の動きおよび流体の流れ場を調査するため、混相流のシミュレーションを実施する。そのため材料設定の段階で液相部、気相部 2 つの材料を設定する必要がある。今回は、液相部分を Water(水)、気相部分を Air(空気)とした。

次に、境界条件の設定について説明する。今回モデルの中に気泡を設定するため、気泡の流入口、流出口を設定する必要がある。流入口においては、モデル底面に 2 つの気泡流入口を設定し、気泡の注入を行った。流出口は、モデル上部に設定した。また、内円筒部を回転させ、外円筒部分は「固定壁」とし、回転しない部分として解析を行った。図 4.1.3 に 1/2D カット形状モデルを示す。表 6 にシミュレーション条件を示す。

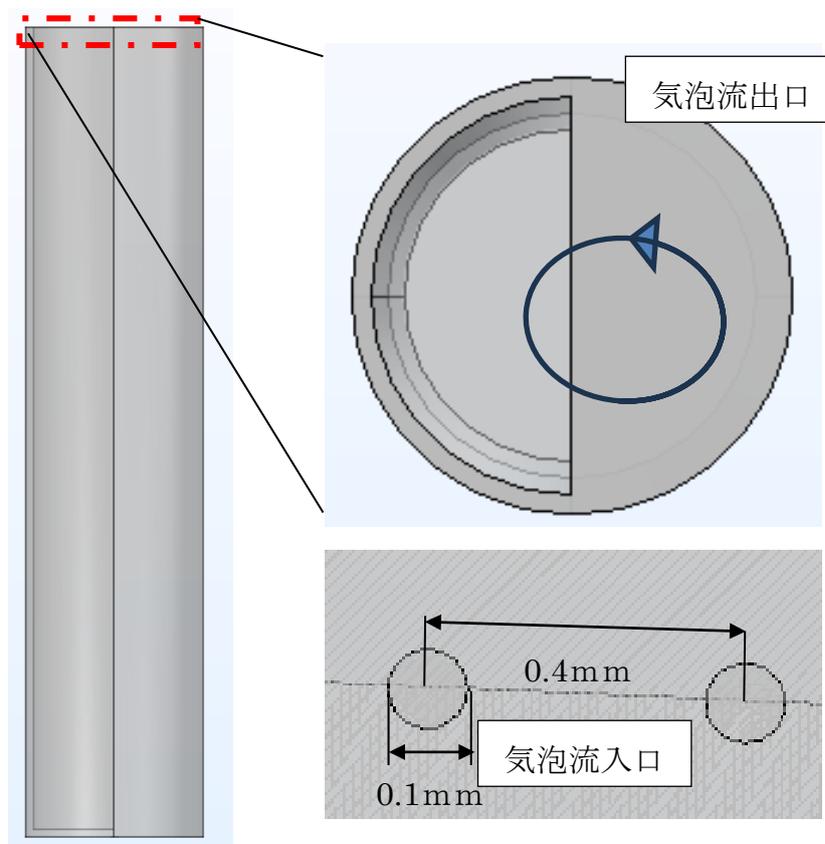


図 4.1.3 1/2D カット形状モデル

表 6 シミュレーション条件

気泡直径	1.0 mm
気体質量流束	$1 \times 10^{-4}$ [kg/(m <sup>2</sup> ・s)]
回転速度	10.4, 52, 104 [rad/s]

最後に、メッシュの作成を行う。2D モデル同様に、フィジックス制御メッシュ機能選択し、要素サイズの設定で「普通」としてメッシュを作成した。図 4.1.4 にメッシュ作成画像を示す。

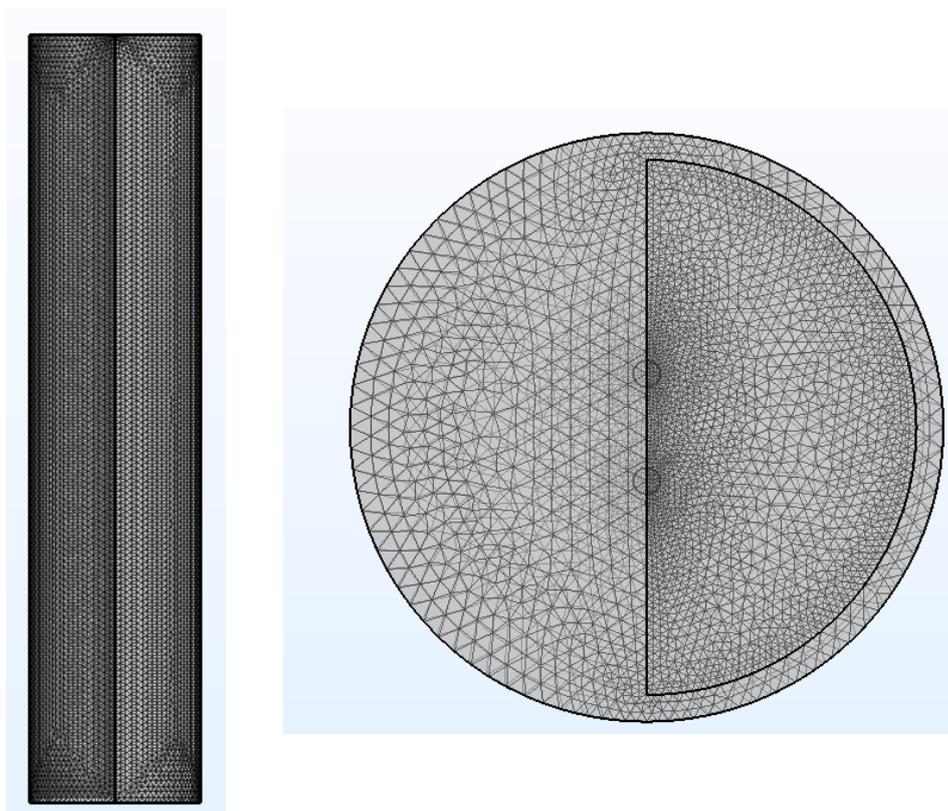


図 4.1.4 メッシュ作成画像（1/2D カット形状モデル）

シミュレーション時間は、0.01 s 刻みの 1 s までの時間シミュレーションを行った。回転角は 0.01 s で 60°，0.06 s で 360°（1 回転）である 0.001 s 進んだところを初期値として与えた。ここまで示してきた流れで円形状、ダンベル型形状、1/2D カット型形状および 3/4D カット型形状の 3D モデルシミュレーションを行い、流体の流れ場、気泡上昇の様子を解析した。

## 4.2 シミュレーション結果

### 4.2.1 円形状モデル

回転速度 10.4, 52, 104 [rad/s]それぞれの 0.02 s 時の流体流れ場のシミュレーション結果を図 4.2.1 に、回転速度 10.4, 52, 104[rad/s]それぞれの気泡の体積比率のシミュレーション結果を図 4.2.2～図 4.2.4 に示す。

図 4.2.1 では、流れ場を流線で表している。この結果から、回転方向に対して流れ場が生じている様子が確認できた。この流れが生じることで、気泡、加工屑に対して攪拌作用が働いていると考えられる。

図 4.2.2～図 4.2.4 では、気泡の濃度が高くなっているところが赤、気泡の濃度が低くなっているところを青で表している。これらの結果から、気泡の上昇している様子が確認できた。また、回転速度が上がるにしたがって、気泡の上昇、排出が効率的に行われている様子が確認できた。しかし、全てのモデルで 1 s 時に気泡が全体的に充満している様子が確認できた。この結果から、気泡および加工屑が効率的に排出されているとは言えないと考える。

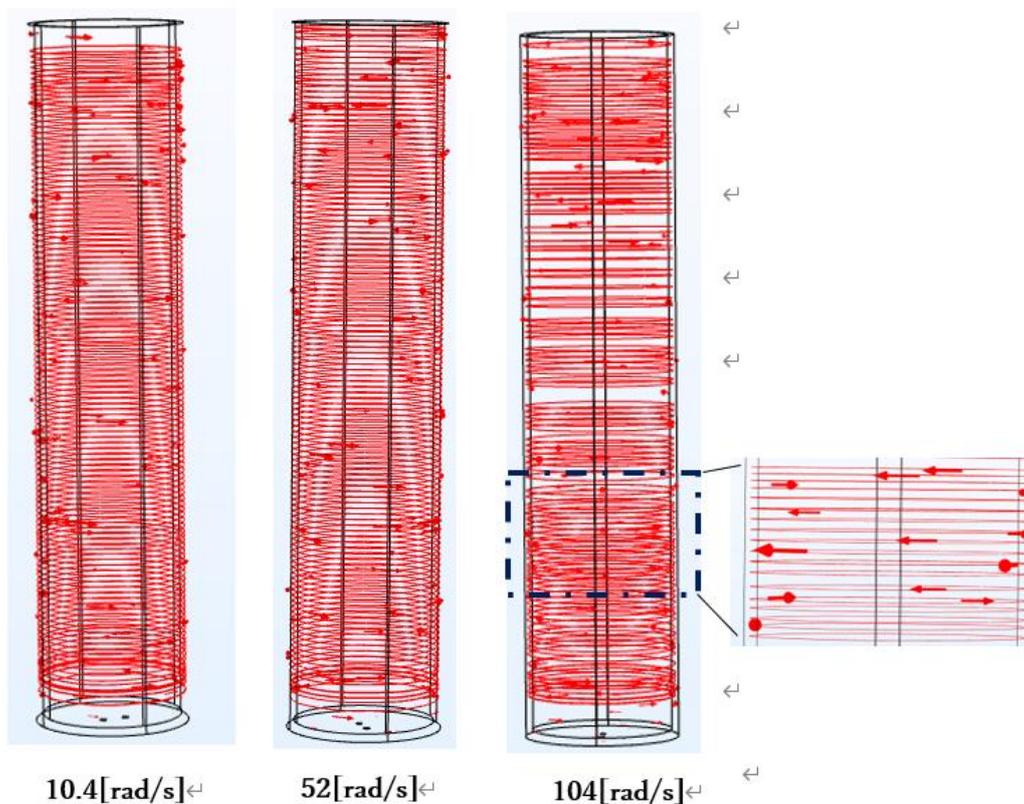


図 4.2.1 流体の流れ場（円形状モデル，0.02 s）

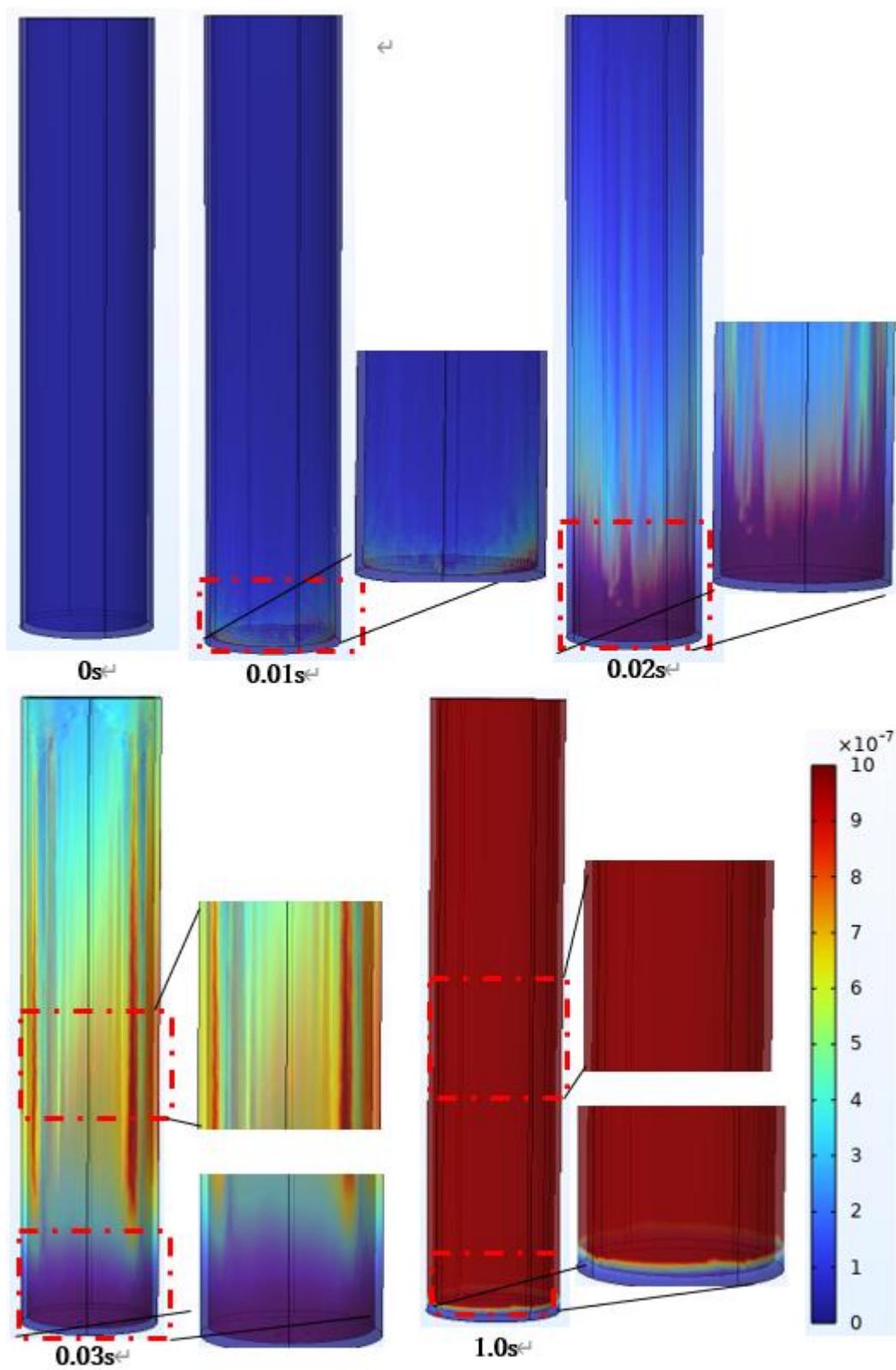


図 4.2.2 気相体積比率（円形状，10.4rad/s）

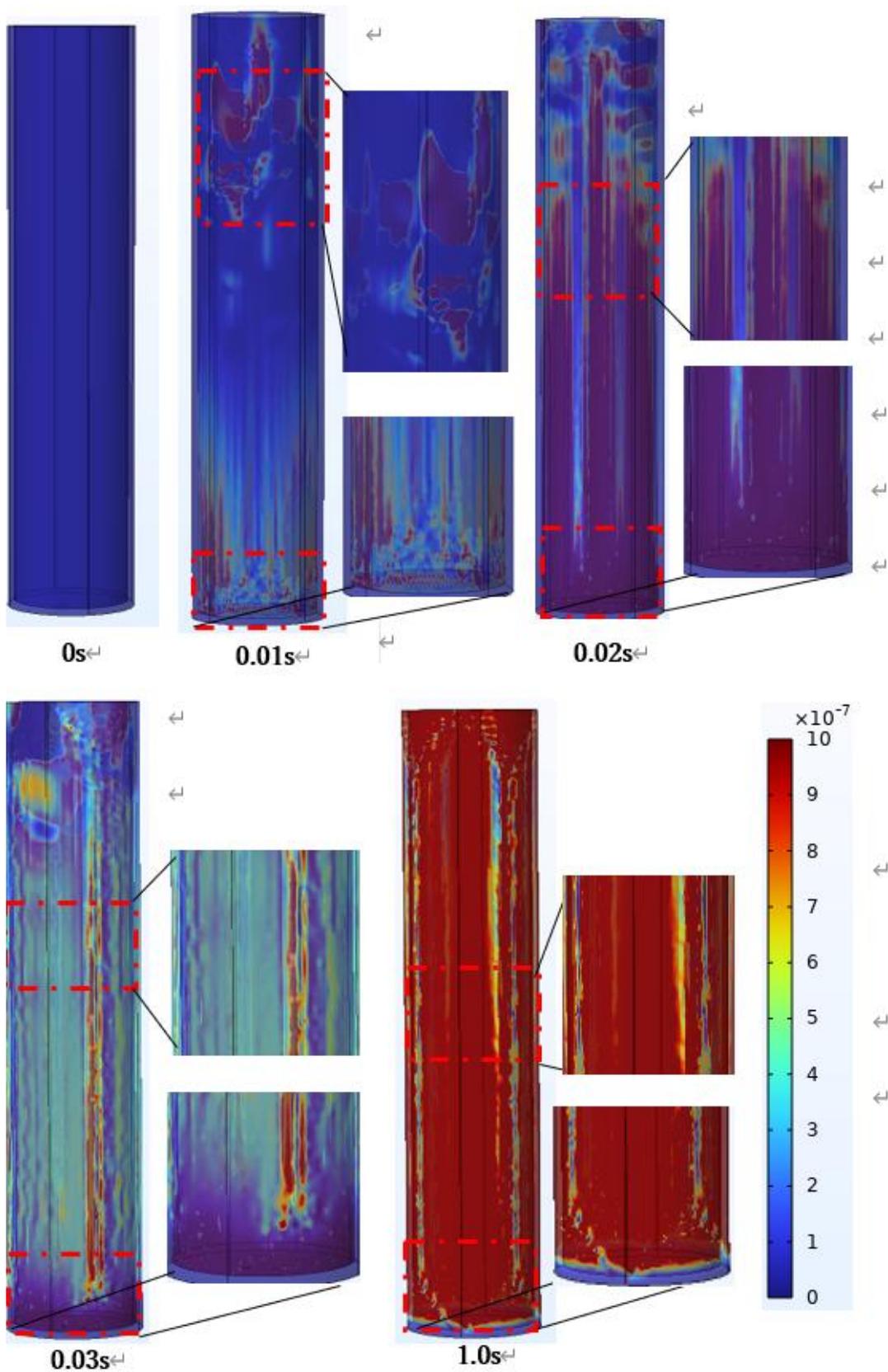


図 4.2.3 気相体積比率（円形状，52rad/s）

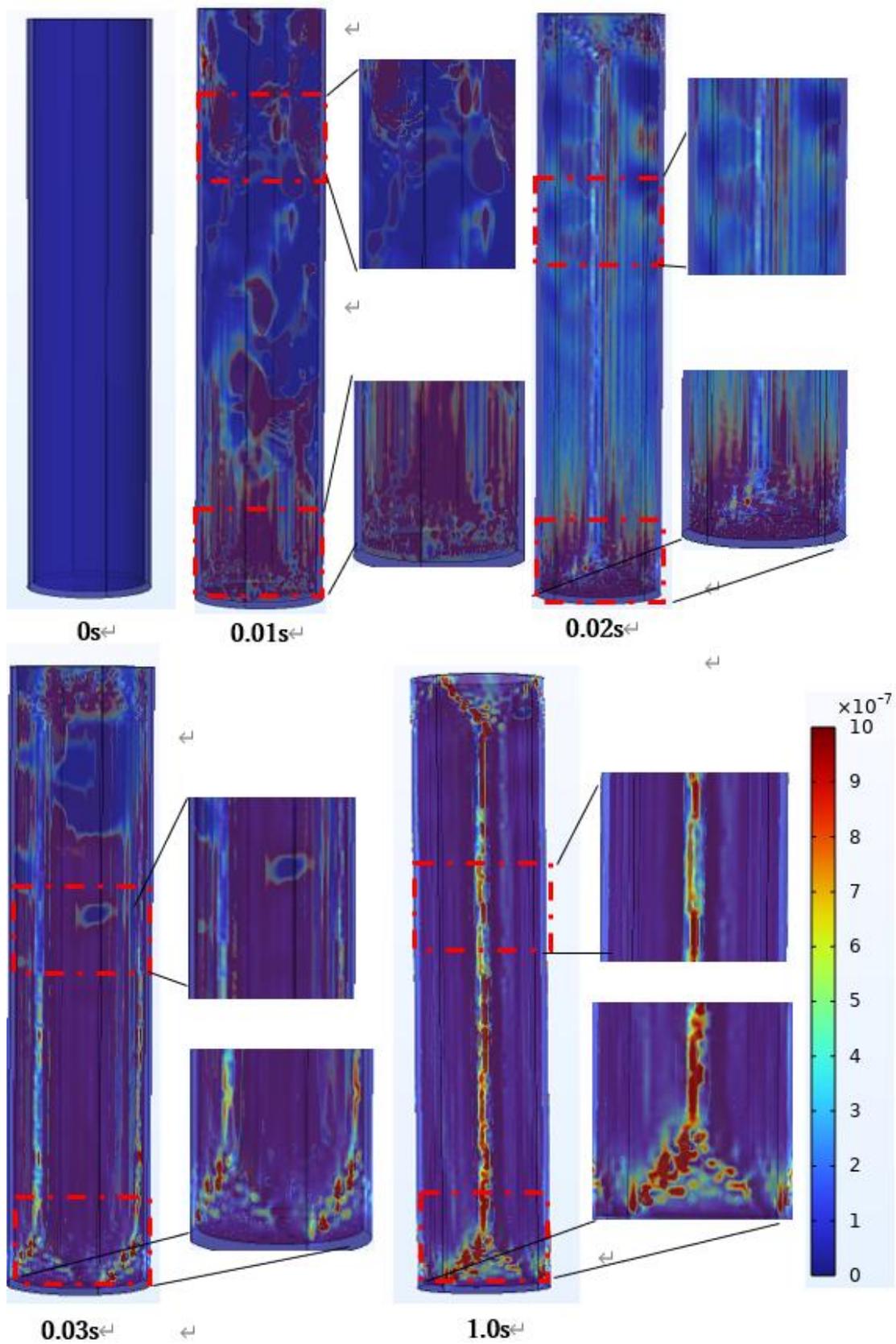


図 4.2.4 気相体積比率 (円形状, 104rad/s)

#### 4.2.2 ダンベル型形状モデル

回転速度 10.4, 52, 104[rad/s]それぞれの 0.02 s 時の流体流れ場のシミュレーション結果を図 4.2.5 に、回転速度 10.4, 52, 104[rad/s]それぞれの気泡の体積比率のシミュレーション結果を図 4.2.6～図 4.2.8 に示す。

図 4.2.5 より回転方向に対して流れ場が生じている様子が確認できた。この流れが生じることで、気泡、加工屑に対して攪拌作用が働いていると考えられる。

図 4.2.6, 図 4.2.7 より、気泡の上昇している様子が確認できた。円形状同様、1 s 時に気泡が全体的に充満している様子が確認できた。この結果から、時間が経つにつれて気泡および加工屑が効率的に排出されているとは言えないと考える。

図 4.2.8 の結果より、1 s 時に気泡が全体に充満している様子が、回転速度が 10.4, 52[rad/s]のシミュレーション結果と比べて見られなかった。この結果から、気泡が 2 つのモデルと比べて効率的に排出されていると考える。回転速度を上げることが気泡の排出に繋がっていると考えられる。

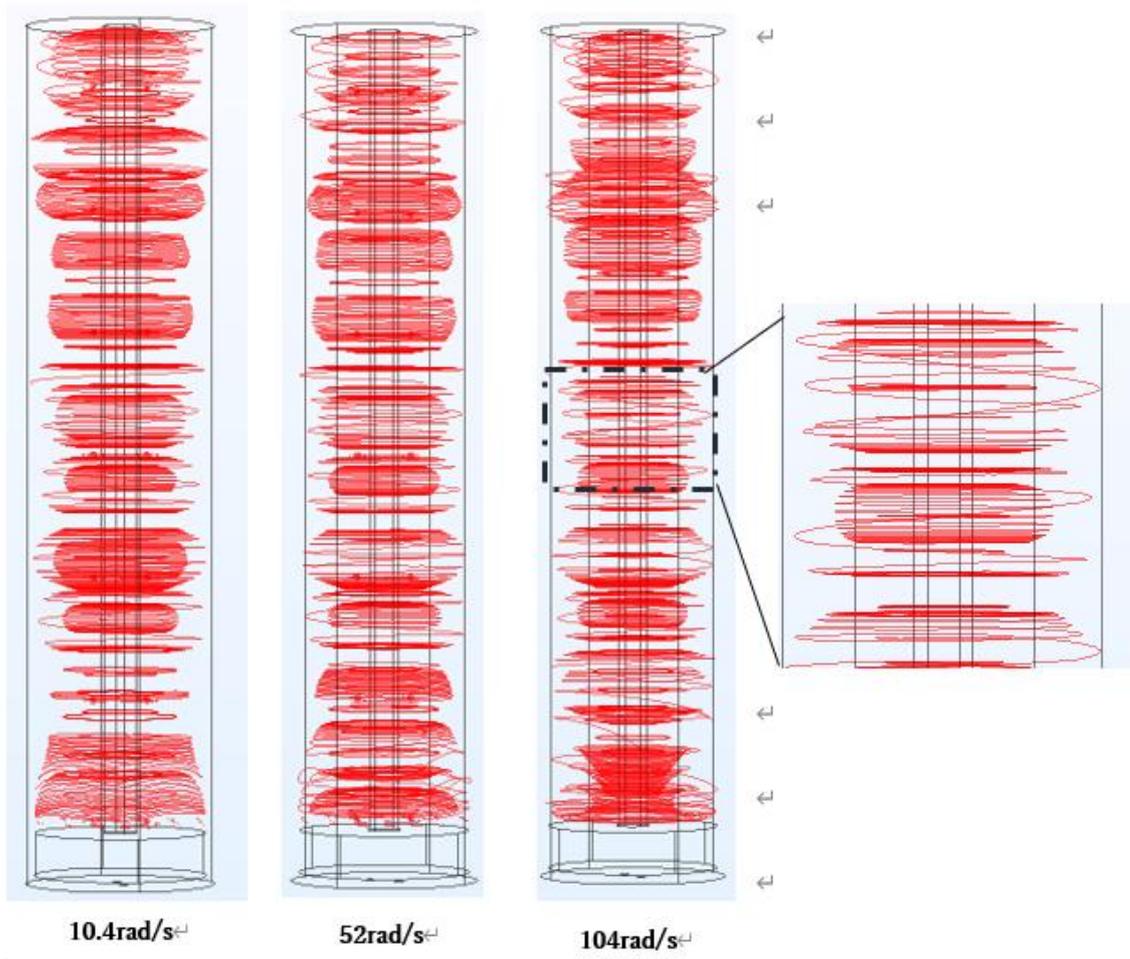


図 4.2.5 流体の流れ場（ダンベル型形状，0.02 s）

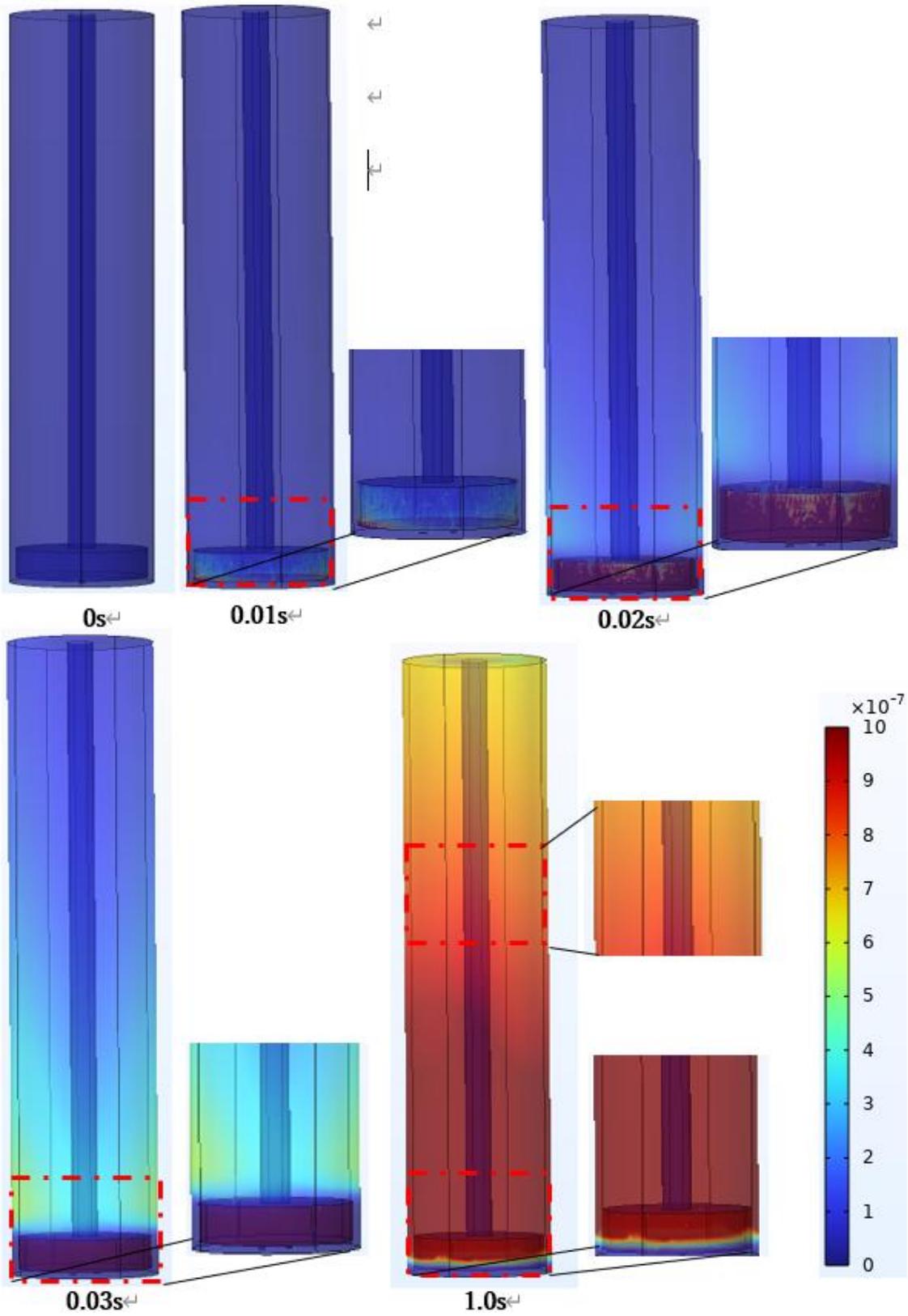


図 4.2.6 気相体積比率 (ダンベル型形状,  $10.2 \text{ rad/s}$ )

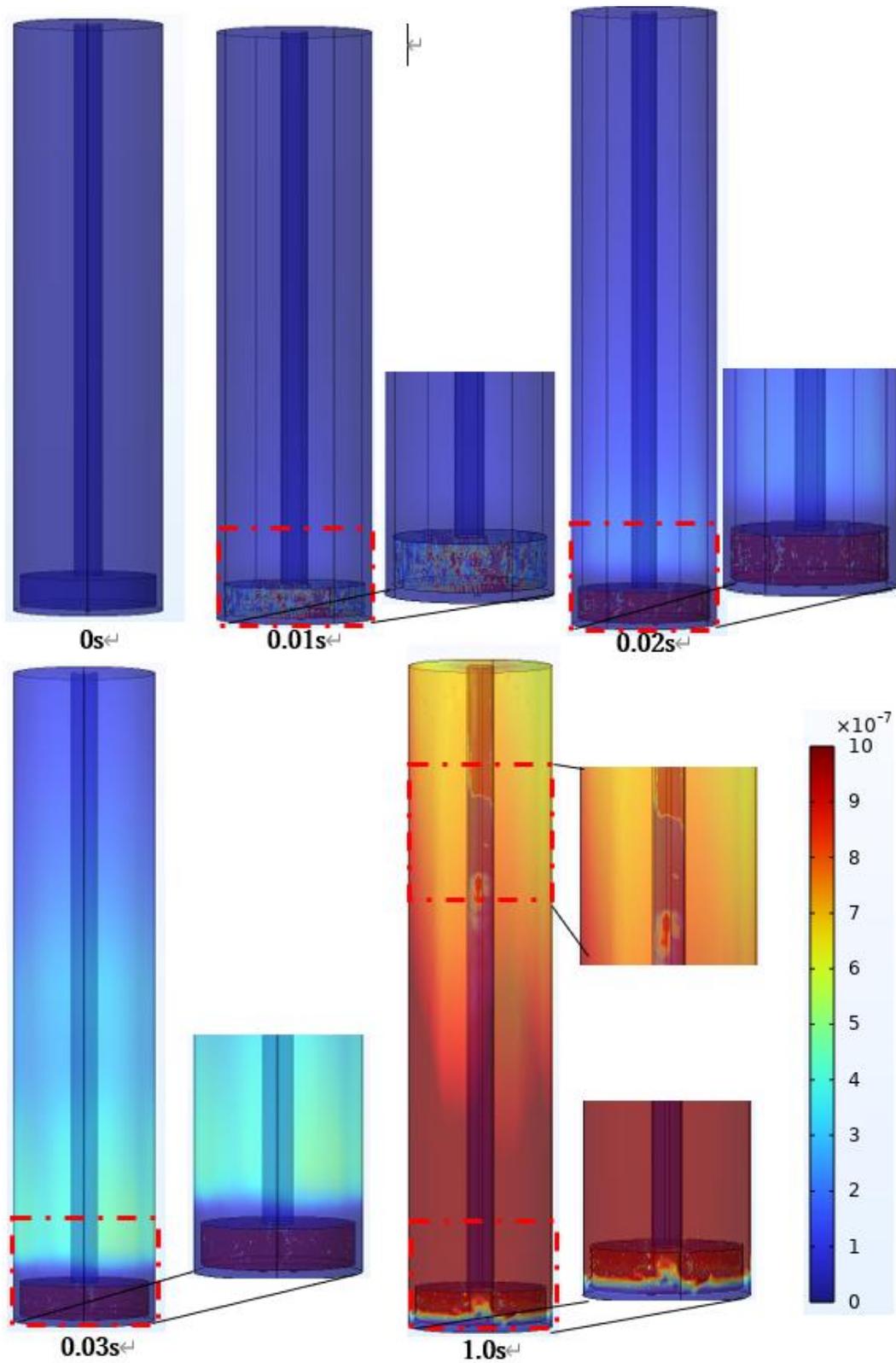


図 4.2.7 気相体積比率 (ダンベル型形状, 52rad/s)

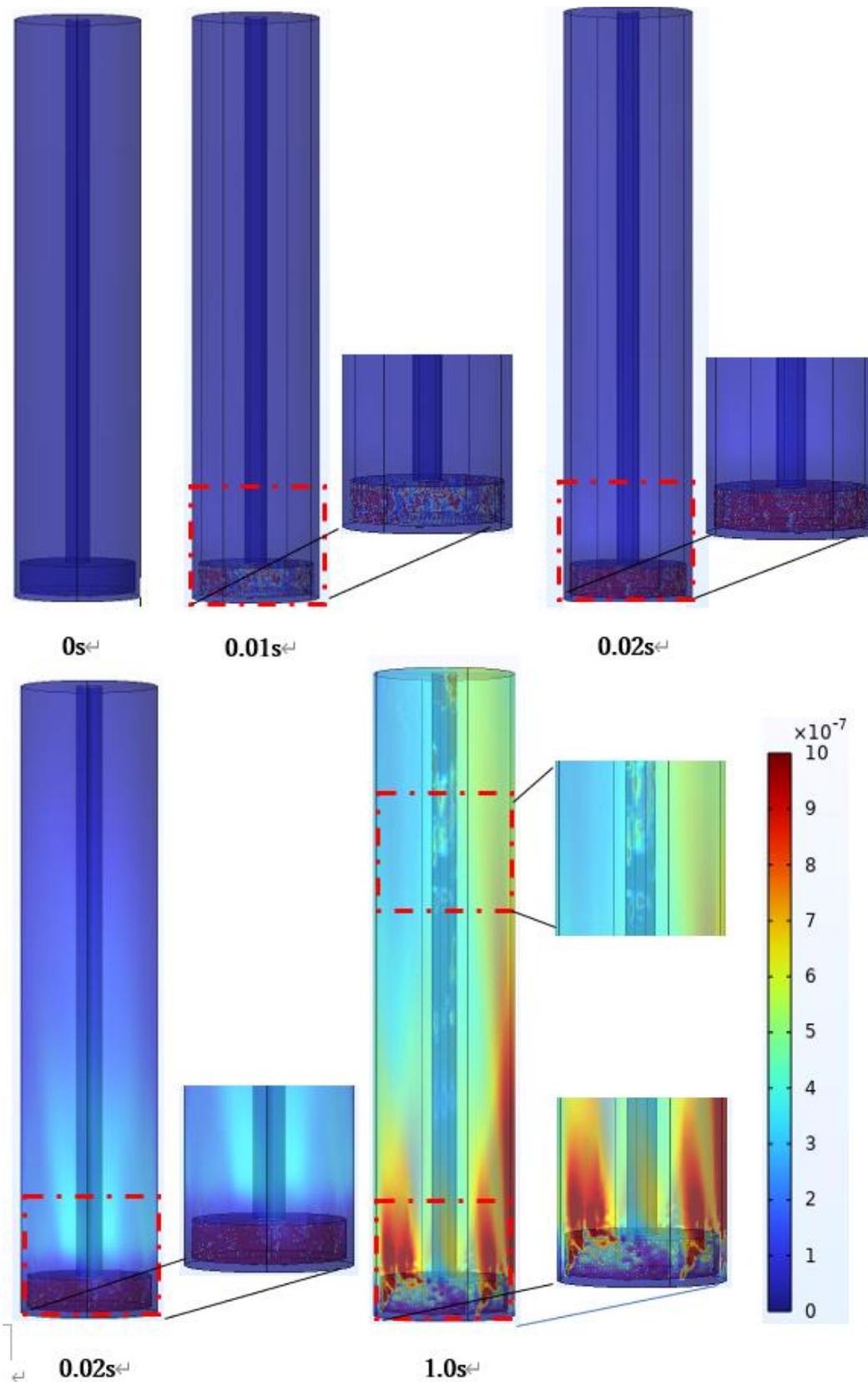


図 4.2.8 気相体積比率（ダンベル型形状，104rad/s）

### 4.2.3 1/2D カット形状モデル

回転速度 10.4, 52 [rad/s]それぞれの 0.02 s 時の流体流れ場のシミュレーション結果を図 4.2.9 に、回転速度 10.4, 52[rad/s]それぞれの気泡の体積比率のシミュレーション結果を図 4.2.10, 図 4.2.11 に示す。

図 4.2.9 より、円形状、ダンベル型形状同様に回転方向に対して水平方向に流れ場が生じている様子が確認できた。この流れが生じることで、気泡、加工層に対して攪拌作用が働いていると考えられる。

図 4.2.10, 図 4.2.11 より、気泡の上昇している様子が確認できた。また、回転速度が上がるにしたがって、気泡の上昇、排出が効率的に行われている様子が確認できた。また、円形状モデル、ダンベル型形状モデルでは、1 s 時に気泡が全体に充満している様子が確認できたのに対して、1/2D カット形状モデルでは、全体に充満している様子はなく、D カット部中心に気相濃度が高い様子が確認できた。この結果から、円形状、ダンベル型形状に比べて気泡が効率的に上昇、排出していると考えられる。

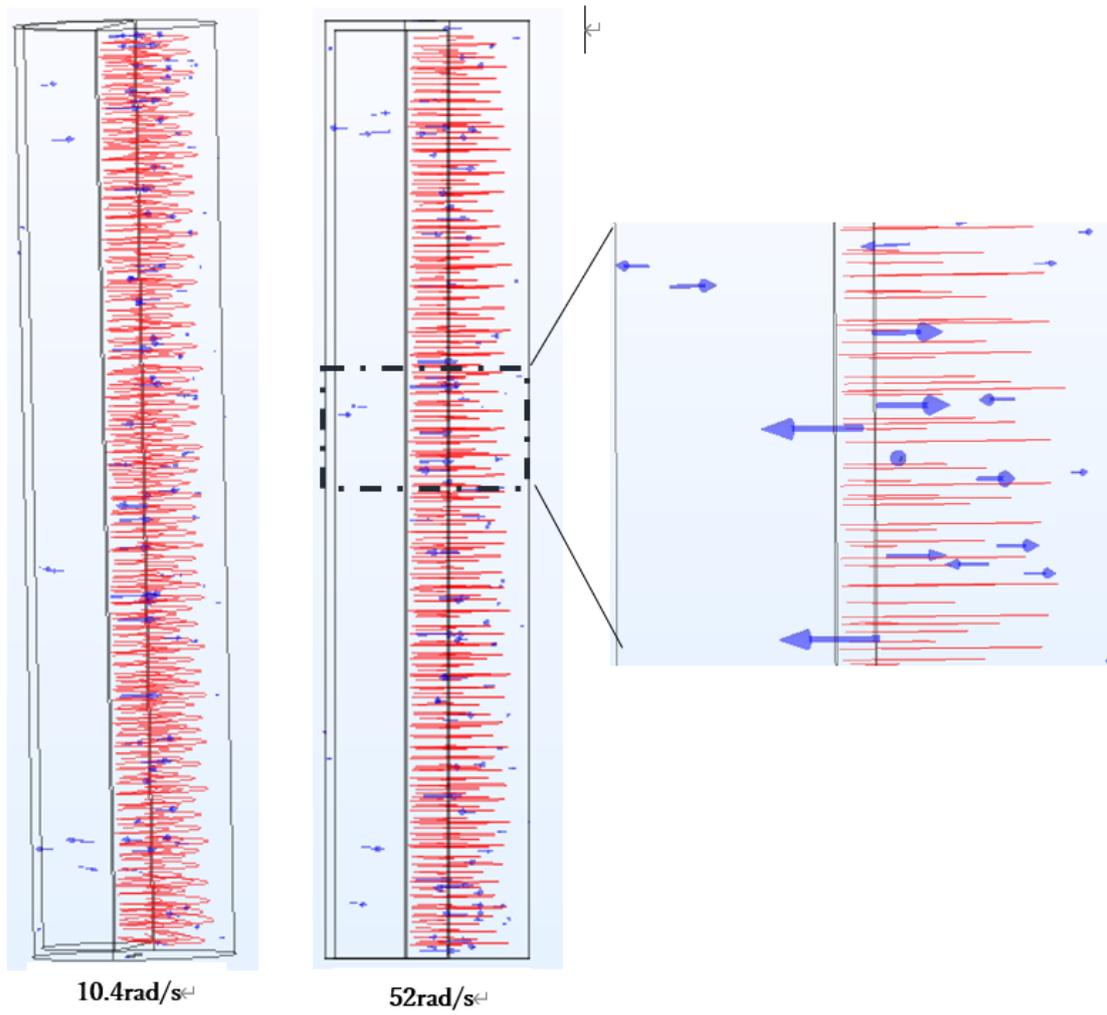


図 4.2.9 流体の流れ場（1/2D カット形状，0.02 s）

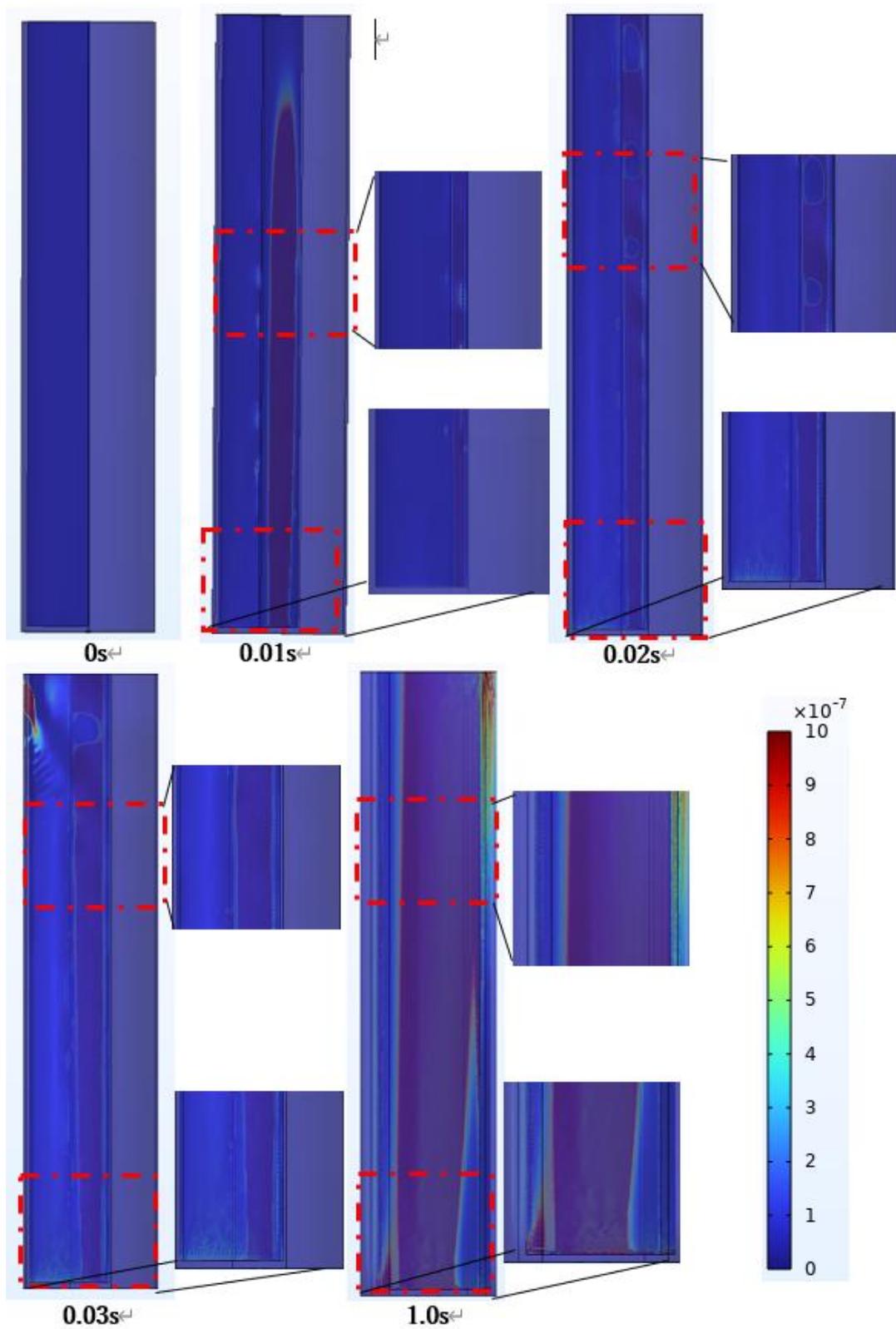


図 4.2.10 気相体積比率 (1/2D カット形状, 10.4rad/s)

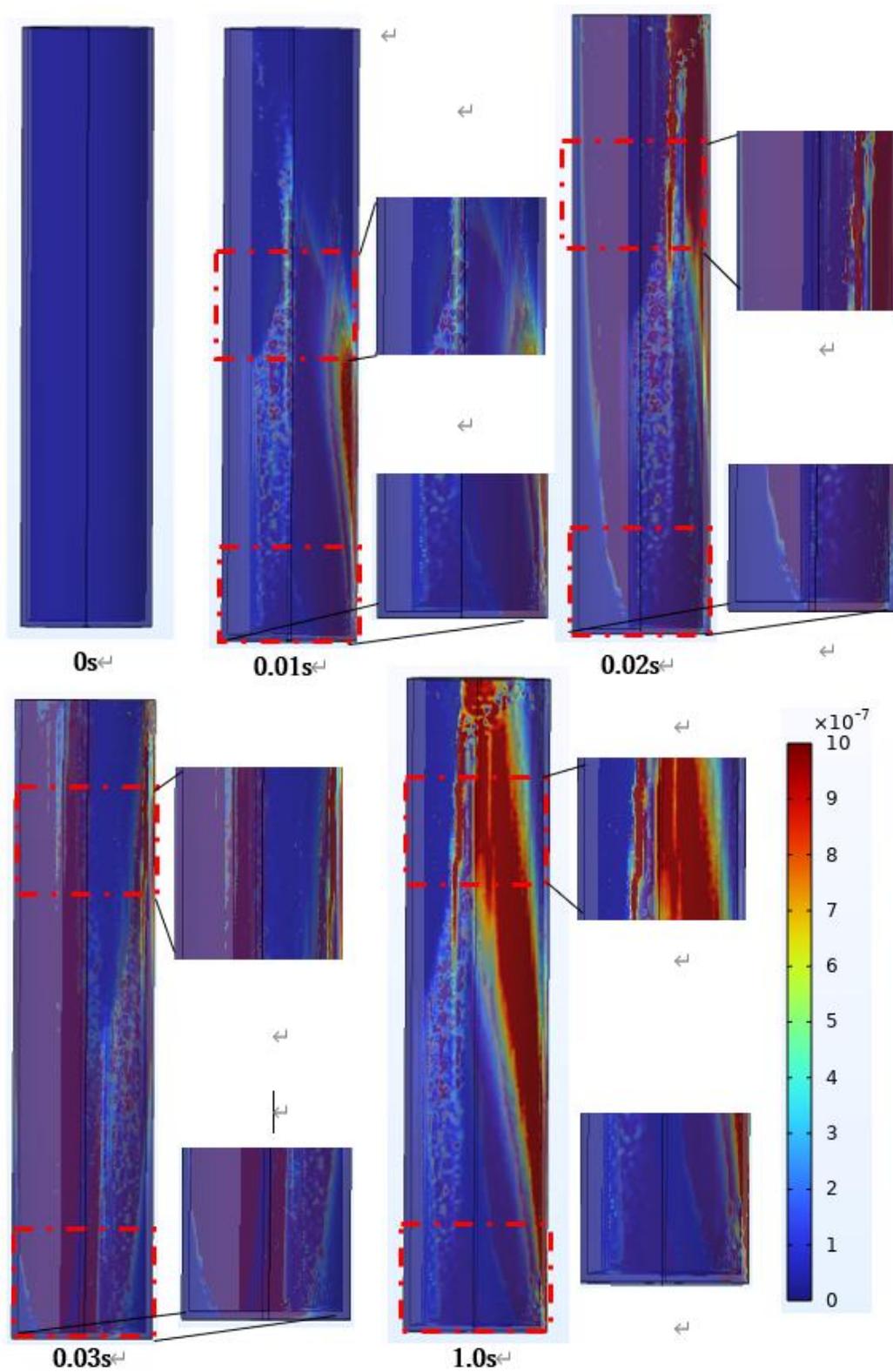


図 4.2.11 気相体積比率 (1/2D カット形状, 52rad/s)

#### 4.2.4 3/4D カット形状モデル

回転速度 10.4, 52 [rad/s]それぞれの 0.02 s 時の流体流れ場のシミュレーション結果を図 4.2.12 に、回転速度 10.4, 52[rad/s]それぞれの気泡の体積比率のシミュレーション結果を図 4.2.13, 図 4.2.14 に示す

図 4.2.12 より、これまでのモデル同様回転方向に対して水平方向に流れ場が生じている様子が確認できた。この流れが生じることで、気泡、加工層に対して攪拌作用が働いていると考えられる。

図 4.2.13, 図 4.2.14 より、気泡の上昇している様子が確認できた。また、回転速度が上がるにしたがって、気泡の上昇、排出が効率的に行われている様子が確認できた。また、1/2D カット形状モデル同様、1 s 時に気泡が全体に充満している様子はなく、D カット部中心に気相濃度が高い様子が確認できた。この結果から、円形状、ダンベル型形状に比べて気泡が効率的に上昇、排出していると考えられる。

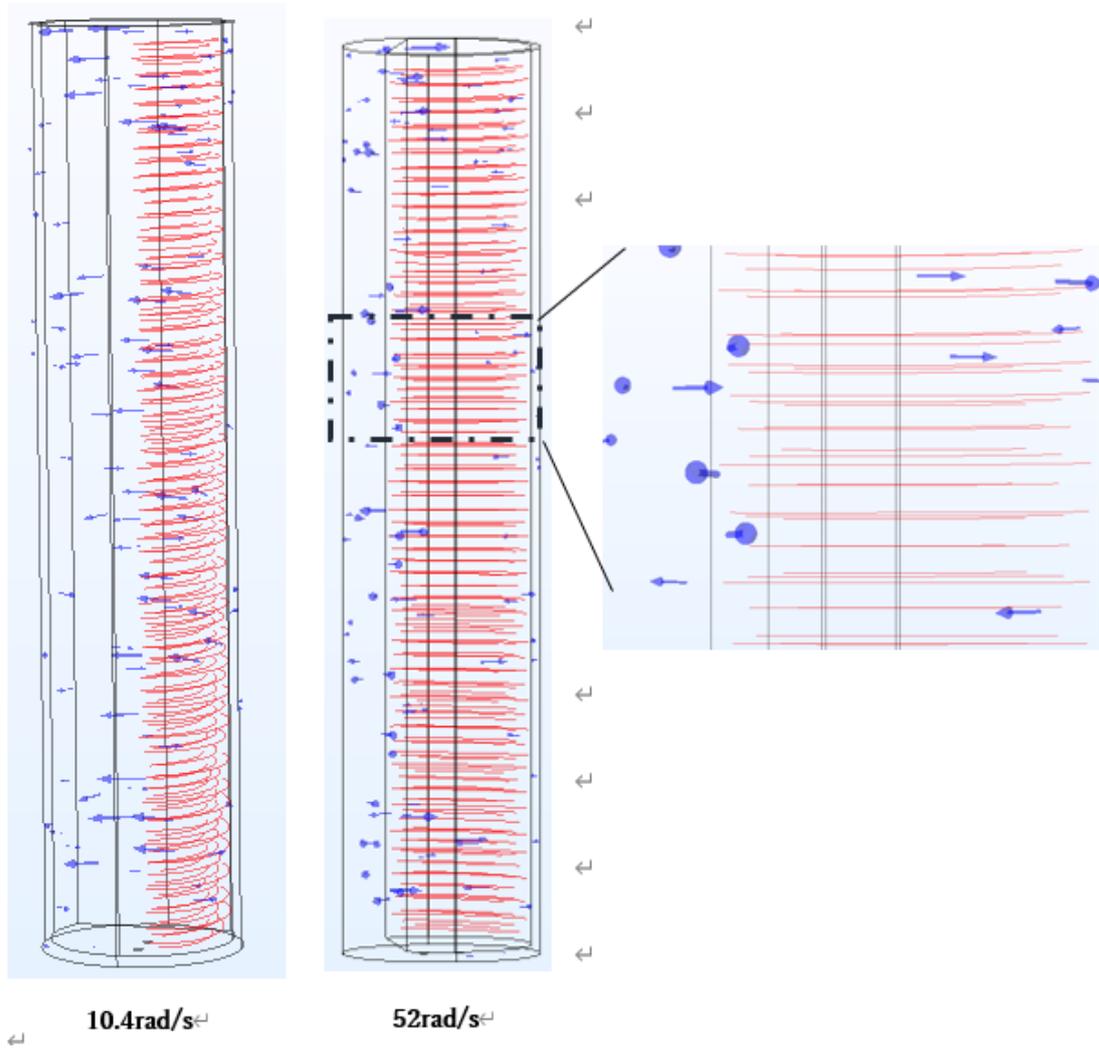


図 4.2.12 流体の流れ場 (3/4D カット形状, 0.02 s)

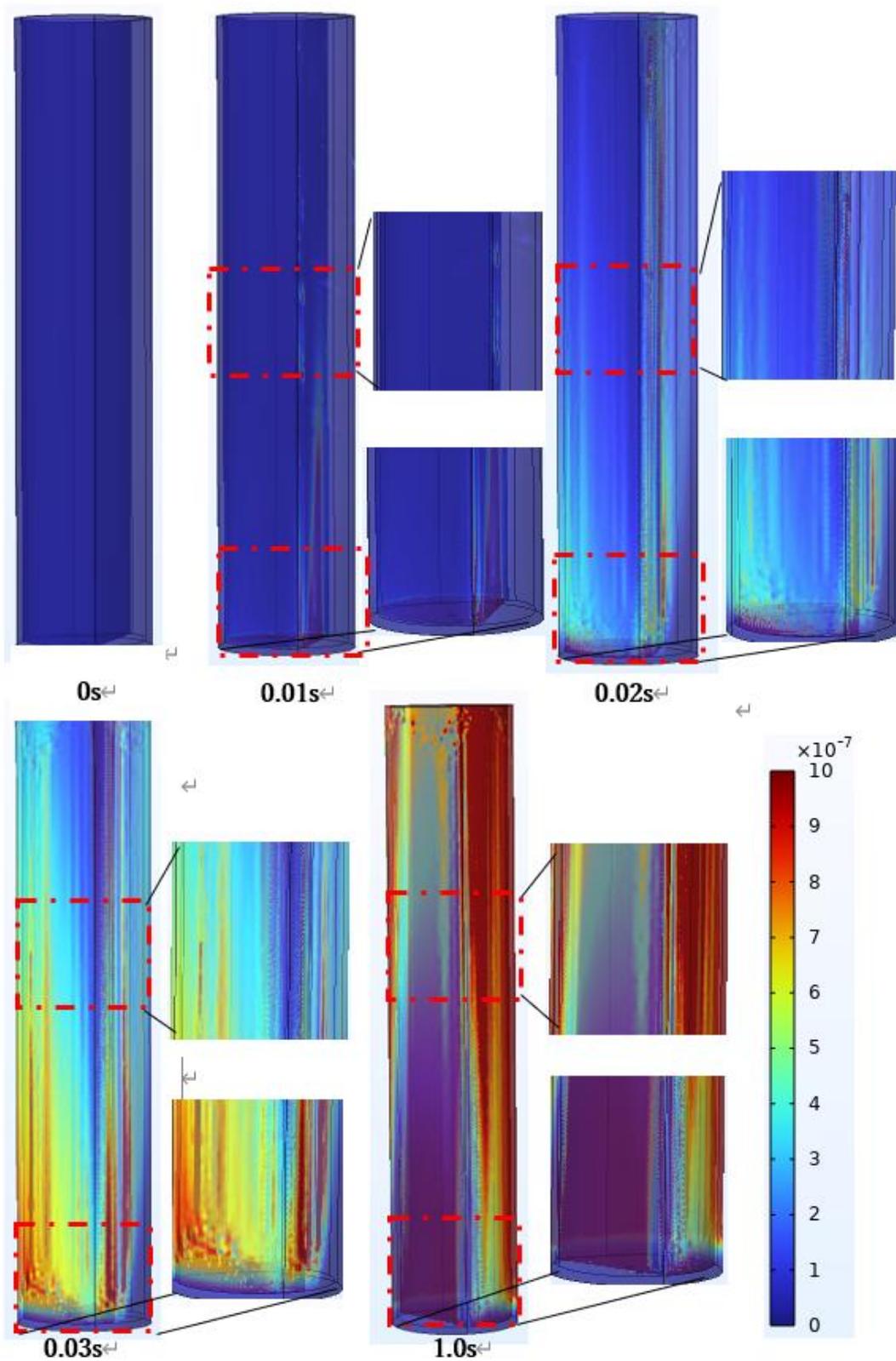


図 4.2.13 気相体積比率 (3/4D カット形状, 10.4rad/s)

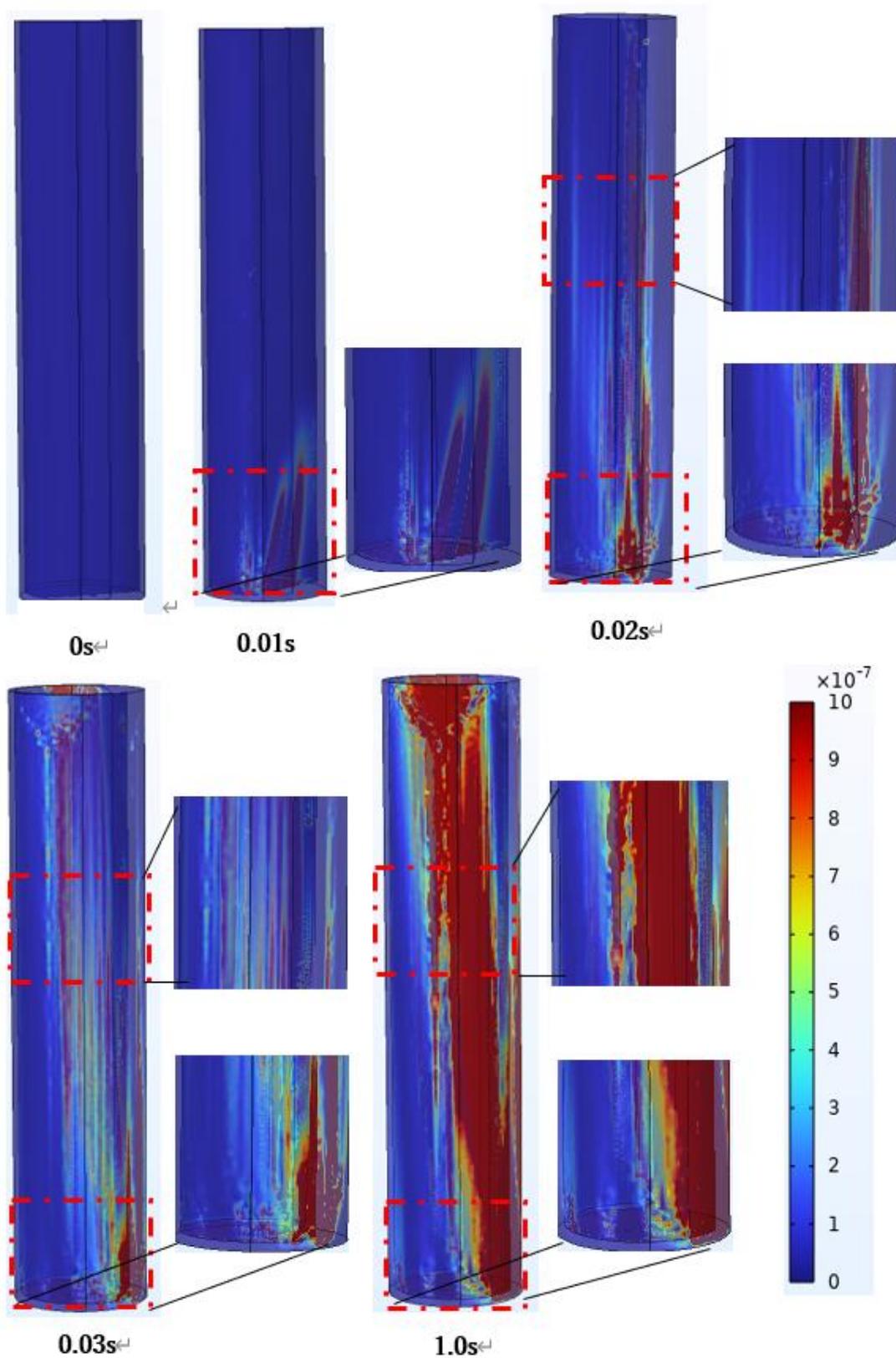


図 4.2.14 気相体積比率 (3/4D カット形状, 52rad/s)

気泡の上昇する原因について考察する。図 4.2.15 に円形状モデルの回転速度を与えていないモデルの 0 s, 0.3 s~0.5 s 時のシミュレーション結果を示す。このモデルでは、0.3 s 間だけ気泡を流入させている。気体質量流束はこれまでのモデルと同じである。

この結果から、気泡が上昇する様子が見られた。0.3 s 時のシミュレーション結果より、気泡が全体に充満している様子が見られた。この状態が、気泡が効率的に排出されていない状態だと考える。0.4 s, 0.5 s 時シミュレーション結果より気泡の体積比率が低くなっている様子が確認できた。気泡が排出されたと考えられる。よって、気泡が上昇する要因の一つは浮力によるものであると考えられる。

また、回転させることで、気泡の上昇が効率的に行われている様子も見られた。よって、気泡が上昇する要因に回転させることによる攪拌作用が関係していると考えられる。1/2D カット形状モデル、3/4D カット形状モデルでは気泡が全体に充満する様子は確認できなかった。この結果より、D カット形状を用いた場合、回転させることによる攪拌作用が強く働き気泡の排出に繋がっていると考えられる。

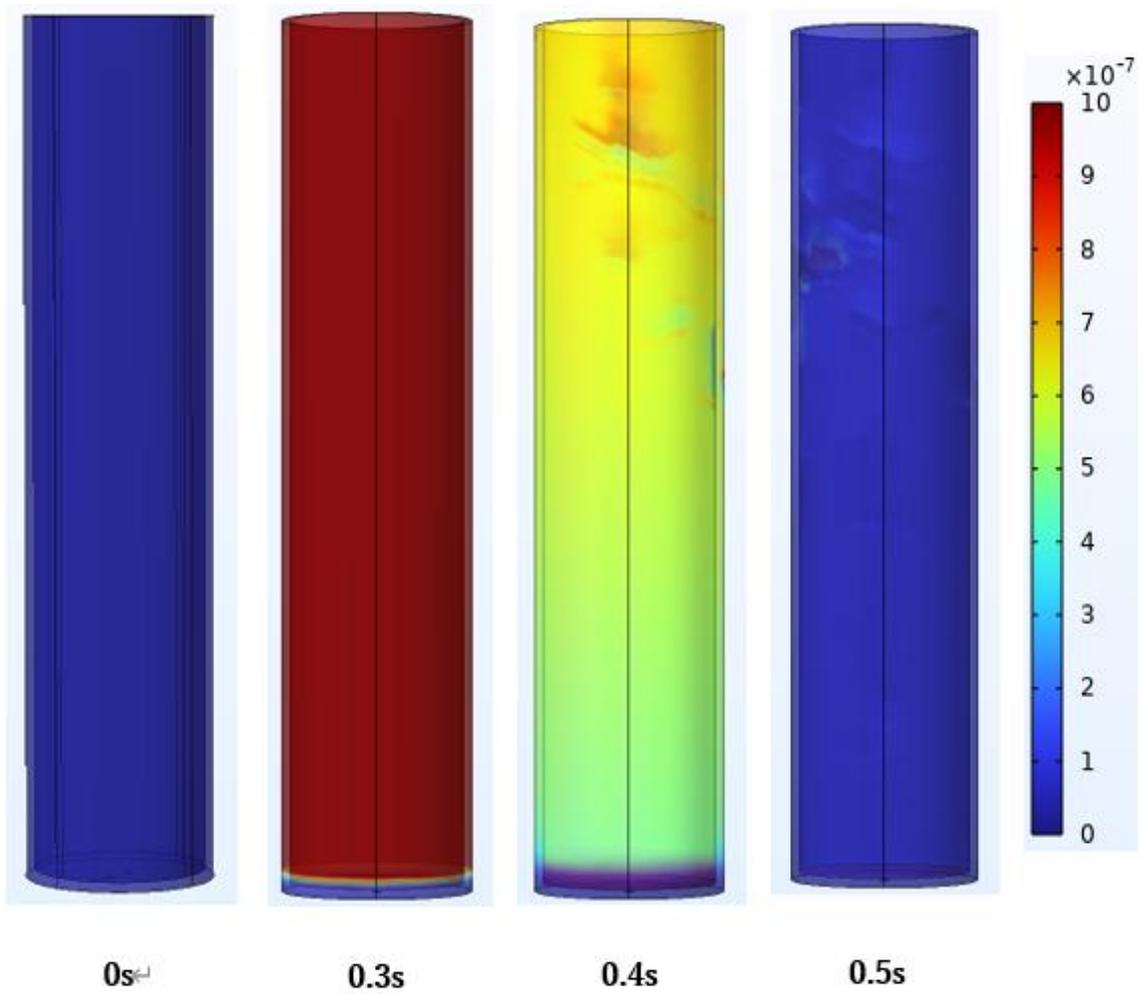


図 4.2.15 気相体積比率（円形状，回転なし）

### 4.3 第4章結言

本章では、COMSOL を用いた混相流モデル解析法、モデル作成法について説明した。また、円形状モデル、ダンベル型形状モデル、1/2D カット形状モデルおよび 3/4D カット形状モデルの 3D モデルを作成し形状を回転させることによる流体の流れ場、気相の体積比率を調査した。以下に結果を要約する。

- ・円形状モデルを解析した結果、回転方向に沿って流れ場が生じている様子が確認できた。回転速度を上げるにしたがって、気泡の上昇、排出が効率的に行われている様子が確認できた。

- ・円形状モデルの 1 s 時のシミュレーション結果より、気泡が全体的に充満している様子が確認できた。このことから、気泡が効率的に排出されていないと考える。

- ・ダンベル型形状モデルを解析した結果、回転方向に沿って流れ場が生じている様子が確認できた。回転速度を上げるにしたがって、気泡の上昇、排出が効率的に行われている様子が確認できた。

- ・ダンベル型形状モデルの 1 s 時のシミュレーション結果より、回転速度 10.4, 52[rad/s]の時、気泡が全体的に充満している様子が確認できた。このことから、気泡が効率的に排出されていないと考える。

- ・1/2D カット形状モデルを解析した結果、円形状、ダンベル型形状同様に回転方向に沿って流れ場が生じている様子が確認できた。回転速度を上げるにしたがって、気泡の上昇、排出が効率的に行われている様子が確認できた。

- ・1/2D カット形状モデルの 1 s 時のシミュレーション結果より、円形状、ダンベル型形状と比べて気泡が全体に充満している様子ではなく D カット部中心に気相濃度が高くなっている様子が確認できた。このことから、円形状、ダンベル型形状に比べて気泡排出が効率的に行えていると考える。

- ・3/4D カット形状モデルを解析した結果、他のモデル同様回転方向に沿って流れ場が生じている様子が確認できた。回転速度を上げるにしたがって、気泡の上昇、排出が効率的に行われている様子が確認できた。

- ・ 3/4D カット形状モデルの 1 s 時のシミュレーション結果より，円形状，ダンベル型形状と比べて気泡が全体に充満している様子ではなく D カット部中心に気相濃度が高くなっている様子が確認できた．このことから，円形状，ダンベル型形状に比べて気泡排出が効率的に行えていると考える．
- ・ 円形状モデルで回転速度を与えない条件でシミュレーションを行った結果，気泡が上昇している様子が確認できた．これは，浮力によるものだと考える．
- ・ 回転速度を与えないモデルで 0.3 s 時のシミュレーション結果より，気泡が全体的に充満している様子が確認できた．この状態が気泡排出が滞っている状態であると考ええる．
- ・ 1/2D カット形状モデル，3/4D カット形状モデルでは気泡が全体に充満する様子は確認できなかった．この要因として，回転することによる攪拌作用が強く働いていると考える．

---

---

## 第5章 結論

---

---

### 5.1 本研究のまとめ

本研究では、D カット型形状電極の加工深さ限界を調べるため、加工深さ 40mm を目標に深穴放電加工を行った。その後、電極形状を変えることによって加工深さが異なる原因を考察するため、シミュレーションソフト COMSOL を用いて 2D モデルを作成し、流体の流れ場を調査した。最後に 3D モデルを作成し、流体の流れ場および気相体積比率を解析した。このことから、加工層および気泡排出効率の良い電極形状を考察した。

#### 1) D カット型形状電極による深穴放電加工

・D カット型形状電極を用いて深穴放電加工を行った。その結果、主軸変位 40mm の加工を行うことができた。加工が進行していくに従い、加工が停滞する様子が見られた。このことから、加工深さ限界は存在すると考える。

#### 2) 2D モデルを用いたシミュレーション

・COMSOL を用いて円形状モデル、ドリル型形状モデル、1/2D カット形状モデルおよび 3/4D カット形状モデルの 2D モデルを作成し、流体の流れ場を調査した。その結果、全てのモデルにおいて外周部の速度が速く、中心部の速度が遅くなっている様子が見られた。加工層排出の点から考えると、速度が遅い中心部に加工層がたまり、速度が速い外周部で加工層が攪拌され排出に繋がっていると考える。また、円形状に比べてドリル型形状、D カット形状が高アスペクト比を得ることが分かっている。その要因として極間のスペースが広い部分で攪拌作用が働き気泡、加工層排出に繋がっていると考える。

### 3) 3D モデルを用いたシミュレーション

・COMSOL を用いて円形状モデル，ダンベル型形状モデル，1/2D カット形状モデルおよび 3/4D カット形状モデルの 3D モデルを作成し，流体の流れ場および気相体積比率を調査した．その結果，円形状モデル，ダンベル型形状モデルでは気泡が全体に充満している様子が見られた．気泡が効率的に排出されていないと考える．1/2D カット形状モデル，3/4D カット形状モデルでは気泡が全体に充満する様子が見られなかった．気泡が効率的に排出されているからだと考える．よって，D カット型形状電極が深穴放電加工を行う上で優れている電極だと考える．

## 5.2 今後の課題

今後の課題を以下に示す.

### 1) 加工屑を考慮したシミュレーション

本研究では 3D モデルを作成し, 流体の流れ場, 気相体積比率を調査することで加工屑および気泡排出が効率的に行える電極形状を考察してきた. 加工屑を実際にモデルの中に追加することで, さらに詳しいシミュレーションができると考えるので検討していきたい.

## 参考文献

- [1] 小林伸一：工具電極形状が高アスペクト比深穴放電加工へ及ぼす効果, (2022)新潟大学卒業論文
- [2] 宮本卓武, 市川智彦, 夏恒：微細放電加工による穴加工の深さ限界に及ぼす電極形状の影響, 精密工学会春季大会 (2013), pp.519-520.
- [3] Atsutoshi HIRAO, Hiromitsu GOTOH, Takayuki TANI : Effect of Electrode Shape on High Aspect Ratio Deep Hole Drilling by EDM , Procedia CIRP 113, (2022), pp.262-266
- [4] 町田昌史, 宮本卓武, 夏恒：微細穴の放電加工における極間の加工液流れ解析, 精密工学会秋季大会 (2013), pp.981-982.
- [5] 大谷和菜, 酒本昌子, 夏恒：深穴電解加工における電極先端形状が加工精度に及ぼす影響, 電気加工学会全国大会 (2021), pp.25-28.
- [6] 橋口真宜, 計測エンジニアリングシステム株式会社, COMSOL Multiphysics Ver.4.2 超速入門
- [7] The CFD Module User's Guide-COMSOL Multiphysics