

目 次

1	はじめに	2
2	解析手法	3
2.1	解析モデル	3
2.2	有限要素法にもとづく反復計算と変分法	4
3	被加工管内面での磁束密度の大きさ	5
4	解析結果と加工実験結果との比較	9
4.1	磁束密度と加工量との比較	9
4.2	磁束密度の勾配と加工量との比較	9
4.3	解析結果と加工実験結果との比較まとめ	13
4.4	鉄粉に働く力の概算	13
5	様々な寸法の工具についての体系的な解析	15
5.1	実験工具の設計	15
5.2	解析結果の応用	15
5.3	解析システム	16
5.4	工具の形状による磁束密度の特性への一般的な考察	16
6	おわりに	20

1 はじめに

近年、各種機能性流体における研究は活発化しており、一部で工業的に実用化されているものも少なくない [1]。今後は基礎研究と応用開発において、さらなる展開が期待されている。特に磁性体粒子と砥粒などを混合した磁気混合流体 (MCF: Magnetic Compound Fluid) を用いた研磨加工は、非磁性体の砥粒の挙動を磁界下で間接的に制御できる点で画期的であることから、様々な実用化に向けた取り組みが行われてきた。この研磨法は磁性体粒子が磁界のもとで磁気クラスタを構成し、磁気混合流体 (MCF) が見かけ上の高い粘度をもつことにより、被加工面との相対運動の結果、研磨が行われるというものである。以下磁気混合流体を MCF と略す。

MCF を用いた研磨法は砥粒の支持剛性と加工圧が通常のポリッシングやラッピングに比べ小さいことから加工変質の小ささに優れ [2]、かつナノメートルオーダーの研磨が可能である。また粒径の異なる磁性体粒子を混合することによって長く弾力性をもつクラスタ構造が構成でき、工具と工作物の間隔を磁気粘性流体 (MRF: Magnetic Rheological Fluid) を用いるときにくらべ広くとることが可能であるなどの利点もある [3]。したがって、複雑形状の表面を高い形状精度でかつ鏡面に仕上げる必要があるレンズ金型の研磨や、優れた表面粗さと高い平面度を達成しなければならない半導体や磁気記憶装置の分野では、MCF を用いた研磨加工へ注目が集まっている。しかしながら実験的に MCF を用いた研磨加工の有用性が立証されつつある今でもその正確な加工原理の理解には至っておらず、研磨実験を計画する際にも明確な指針が得られていないというのが現状である。

加工の際に磁気クラスタ中で砥粒に力が働くメカニズムとして、容易に推察できるものは次の二つである。一つは磁気クラスタの形成そのものに作用する磁束の影響である。磁気クラスタは磁束にそった方向に形成されるので、磁束分布により磁気クラスタおよびそれに含まれる砥粒に働く力は影響を受けると考えられる。また磁界および磁束密度が一定以上の強度でないと磁気クラスタ自体が生成されないことは既知である。もう一つは、磁束密度の勾配によりはたらく磁気浮力である。本研究で扱う MCF は透磁率の異なる複数の物質による粒子が液体中に存在しているため、磁束密度の勾配によって粒子に力が発生する。

そこで本研究では、すでに実験によってそのおおまかな特性が知られている永久磁石を用いた非磁性体円管の研磨加工 [4] に着目し、磁気シミュレーションにより求めた加工管内面各位置における磁束密度の大きさおよび磁束密度の勾配に対して評価を行った。またさらに加工原理への考察を深めるため、様々な寸法での同様の工具について体系的に磁界シミュレーションおよび基礎分析を行うシステムを構築した。なおその解析システムは塚田らの構築した反復計算プログラム [5] をもとにしたものである。

2 解析手法

磁界解析結果は電磁界シミュレーションソフトウェアパッケージである Ansoft 社 Maxwell SV により有限要素法に基づき近似計算したものであり、変分法によって解析結果の収束を判定した。とくに研磨工具は回転軸に対して回転対称な形状であるため、ソフトウェア内蔵の回転対称な 2 次元静磁場計算モジュールを用いた。

2.1 解析モデル

図 1 に示すように、本研究で研磨に用いる工具は回転軸と平行に着磁したリング状永久磁石を N 極同士、S 極同士向かい合わせたものである。その際、磁石同士の間隔を保つために非磁性体のスペーサを磁石間にはさみ積層した。加工の際は MCF を工具と被加工管の間に充填したうえで、被加工管を固定し工具を回転させる。被加工管は工具と同心である。リング状永久磁石にはネオジム磁石、被加工管とスペーサは非磁性体を想定した。

本研究で研磨を行う際に重要な役割を果たす MCF とはケロシンや水を溶媒とし、マグネタイトや鉄 (Fe) などの磁性体粒子、アルミナなどの非磁性体粒子、 α -セルロースなどを添加し懸濁したものである。MCF の特徴として磁場のもとで磁気クラスタとよばれる磁性体粒子が鎖状につながった構造を磁束線に沿ってもつことがあげられ、その磁気クラスタの長さや太さは磁界の強さの二次関数で近似できることが知られている [3]。

図 2 に示すのは磁束分布の解析例であって、磁束線は対向する磁極から反発しあい被加工管内面に向かう。このとき磁束線の方角に沿って生成される磁気クラスタが工具とともに動く。研磨は被加工管内面と工具および磁気クラスタの相対運動によって行われる。

MCF は磁性体粒子を内部に含み比透磁率 $\mu_r \geq 1$ であることが実験的に測定されている [6]。しかしながら今回のシミュレーションでは、MCF の比透磁率は十分に小さく、また体積も小さいため比透磁率を $\mu_r \simeq 1$ とする近似を行った。またスペーサ、被加工管、回転軸は非磁性体であると仮定をしている。

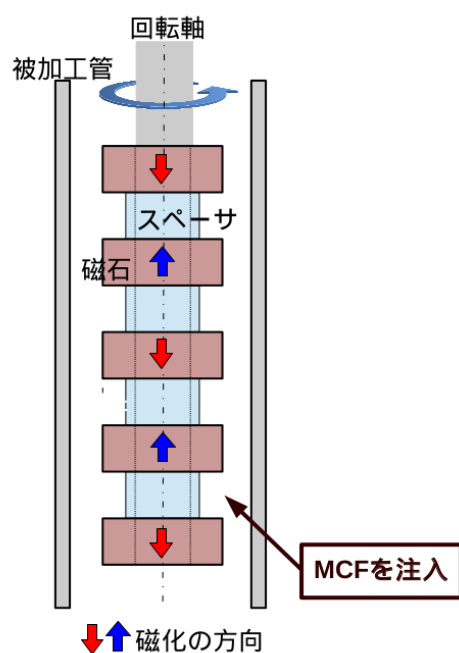


図 1: 研磨の様子の断面図

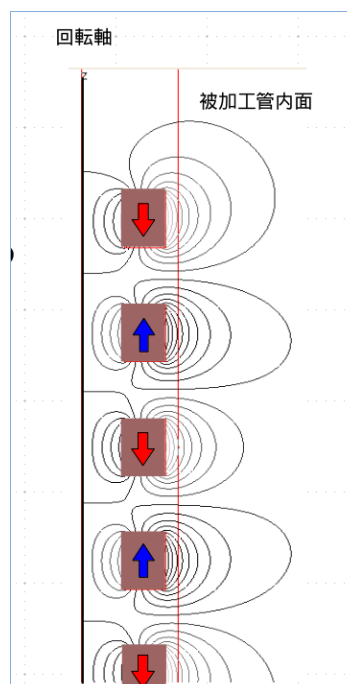


図 2: 磁束分布の解析例

2.2 有限要素法にもとづく反復計算と変分法

有限要素法とは微分方程式を数値的に解く際によく用いられ、無限自由度の場を微小な有限の領域で区切り計算を行う。これによって微分方程式を節点同士の差分方程式に置き換え、それを解くことにより近似的に数値計算を行うことができる。本研究では回転対称な静磁場についてマクスウェル方程式を解く際に2次元の有限要素法を適用した。本解析では特にエネルギー密度が高い領域を重点的に分割するアダプティブオートメッシュを使用し、動的に要素の分割数を増やしながらか計算を行っている。この反復法の過程で近似の精度を高めてゆき、ある収束条件を満たすまでくり返し計算を行った。この定式化は物理的に変分法に対応する。

3 被加工管内面での磁束密度の大きさ

表 1 に本研究で用いた工具寸法の一覧を示し、図 3、図 4、図 5、図 6、図 7 に工具の模式図を示した。被加工管内面での磁束密度の大きさについて、2 通りの工具形状の計測実験結果と磁界シミュレーションでの解析結果を比較し、解析結果の妥当性を検証した。なおこの計測実験は西田ら [4] によるものである。図 8 に TypeA, TypeB の被加工管内面での軸方向の磁束密度の分布を、図 9 に TypeC での磁束密度の分布を示す。磁束密度の分布図で青色のハッチングで示した領域は磁石がある領域に対応し、模式図で赤色で示した線分は分布図においてプロットした領域である。また図 3、図 4 に工具 TypeA, B における工具の模式図を、図 5 に工具 TypeC における工具の模式図を示し、解析の際に設定した磁石の物理特性と計測に用いた永久磁石の物理特性を表 2 にそれぞれ示す。表 2 中で Material N-40 は磁石の製造もとである二六製作所が公開したものである。NdFe30 と NdFe35 は Maxwell SV の内部データベースの中から類似の材質を引用したものである。この 2 種類の材質を用いてシミュレーションを行った。

おおむね工具 TypeA, TypeB, TypeC ともにより対応がとれており、磁石のなかほどと磁石と磁石の間では特により対応がある。最大相対誤差は 12%程度であった。しかし磁石の端面周辺に対応する領域で解析値と測定値ともに磁束密度の大きさが最大値をとっているが、その軸方向位置には 0.5mm 程度のずれが確認できる。また TypeA,B はスペーサの寸法のみが異なるが、スペーサは非磁性体であるため測定された磁束密度の分布にその影響は現れていない。

実測値については着磁方向の分散、残留磁束密度のばらつきの影響をうけ、測定位置が磁極に近く位置ずれによる磁束密度変化は大きく現れる。さらにガウスメータのプローブがもつ大きさや形状による影響や磁石の面取りの影響も受ける。それでも解析結果との誤差は最大となる位置でも 12%程度であった。定性的にも磁界強度分布の傾向は一致しており、実験結果を評価する上で十分な確度の解析結果であると判断した。

Tool Type	Number of Magnet	Size of Magnet [mm]	Size of Spacer [mm]
TypeA	5	13 × 6 × 5	13 × 2.5
TypeB	5	13 × 6 × 5	8 × 2.5
TypeC	5	13 × 6 × 5	8 × 5
Type α	5	12 × 6 × 5	12 × 2.5
Type β	5	12 × 6 × 3	12 × 1.5

表 1: 工具寸法

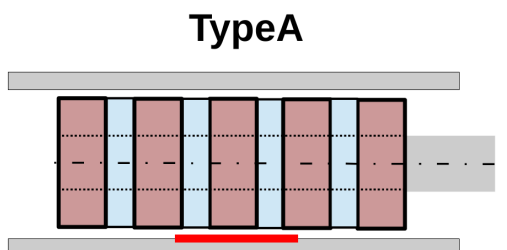


図 3: 工具模式図 (TypeA)

TypeB

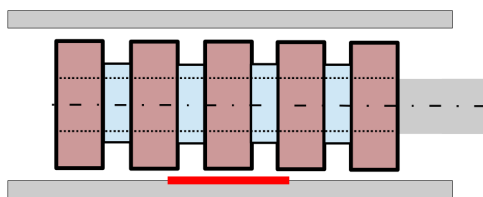


图 4: 工具模式图 (TypeB)

TypeC

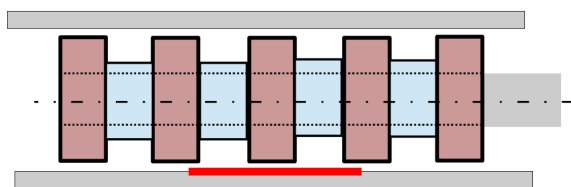


图 5: 工具模式图 (TypeC)

Type α

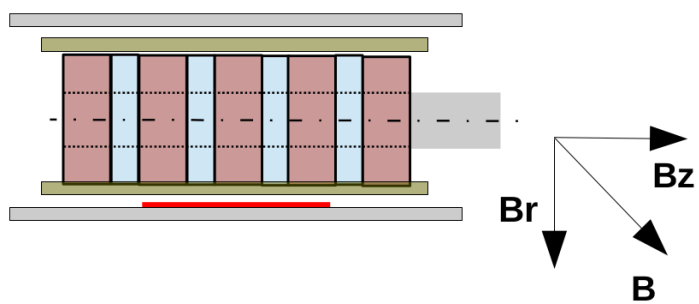


图 6: 工具模式图 (Type α)

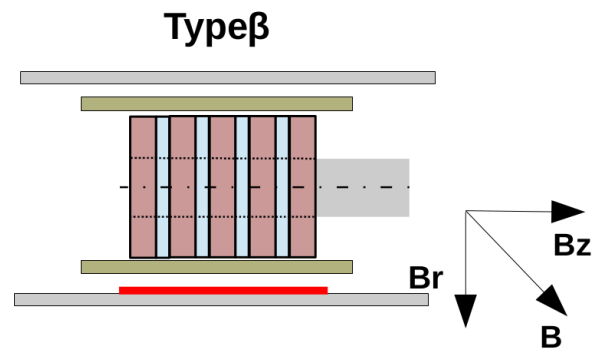


図 7: 工具模式図 (Type β)

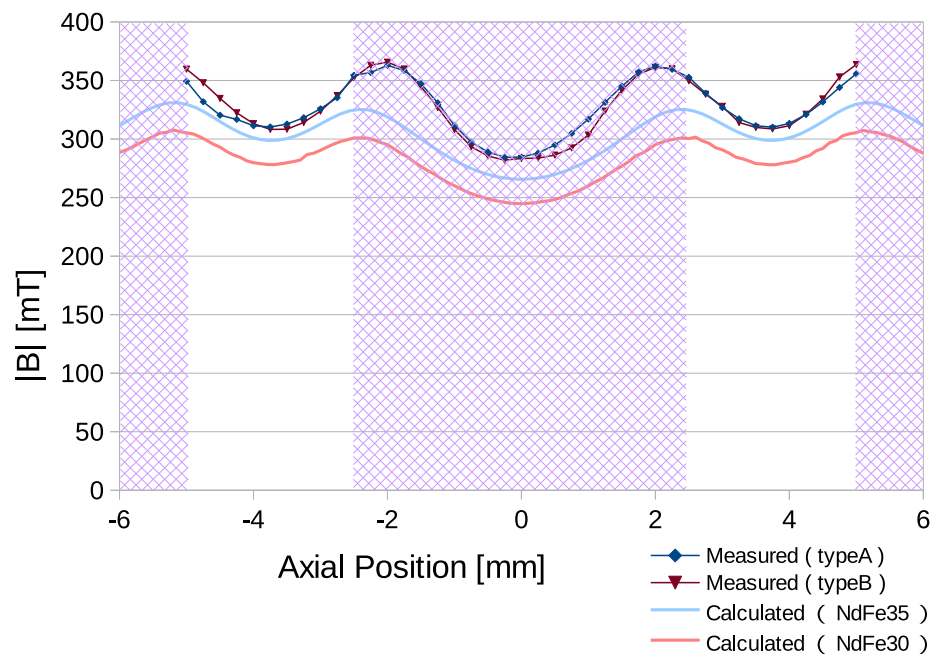


図 8: 被加工管内面における磁束密度の大きさの分布 (TypeA,B)

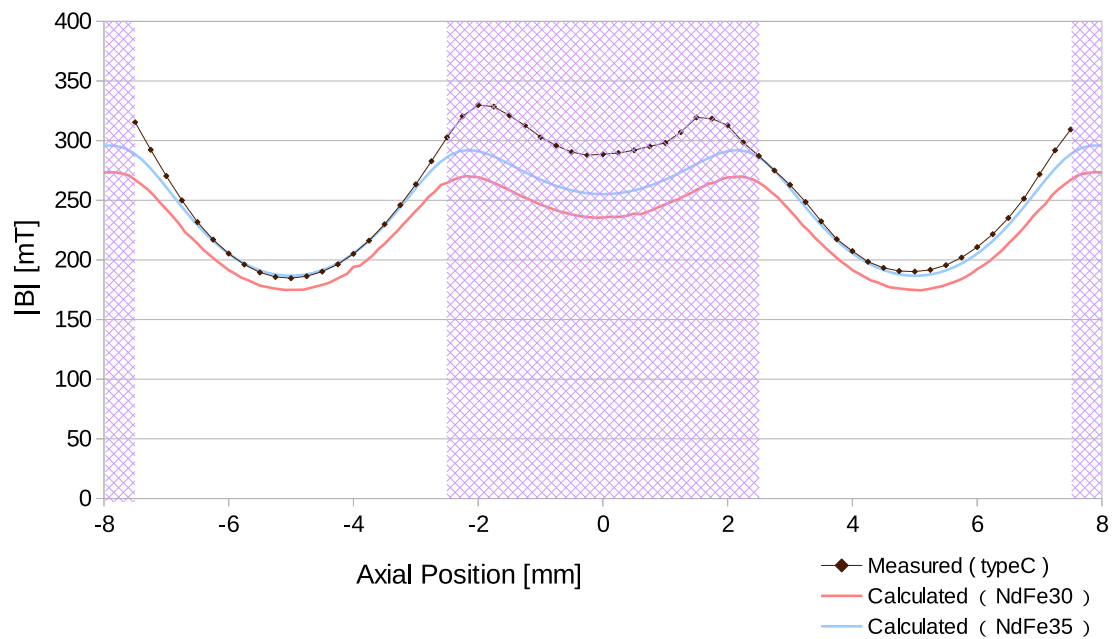


図 9: 被加工管内面における磁束密度の大きさの分布 (TypeC)

	Relative Permeability μ_r	Magnetic Retensivity B_r [T]
Material N-40*	-	1.25 ~ 1.32
Model: NdFe30	1.045	1.10
Model: NdFe35	1.099	1.23
	Magnetic Coercivity bH_c [A/m]	Magnetic Coercivity iH_c [A/m]
Material N-40*	≥ 859000	≥ 955000
Model: NdFe30	828000	-
Model: NdFe35	890000	-
	Maximum Energy Product BH_{max} [J/m ³]	
Material N-40*	302000 ~ 334000	
Model: NdFe30	-	
Model: NdFe35	-	

表 2: 磁石の磁気特性

4 解析結果と加工実験結果との比較

加工原理への考察を行うため、2種類の工具において加工量と磁場解析結果をそれぞれ比較した。加工実験は楠ら [7] によるもので 20 分間、工具の回転数は 750rpm, 1000rpm, 1250rpm, 1500rpm のそれぞれにおいて加工をおこなっている。また工具 Type α についての解析結果を用いて MCF に含まれる鉄粉に働く様々な力を概算し評価した。

4.1 磁束密度と加工量との比較

図 11 に工具 Type α での磁束密度の大きさの径方向成分 B_r , 軸方向成分 B_z , その大きさ B と加工量を比較したグラフを示した。なお工具 Type α について模式図を図 6 に示し、その寸法を表 1 に示す。図 10 に模式的に示したように、内径変化量は加工量に対して符号が反転したものに対応する。すなわち内径変化量が負に小さければ小さいほど、加工量は大きいことを意味する。

図 11 からわかるように被加工管内面での磁束密度の大きさが磁石のなかほどで小さくなっているのに対し、加工量は大きくなっている。また逆に磁束密度の大きさが大きくなっている磁石の間で加工量は小さくなっている。表 3 に磁束密度の径方向成分と軸方向成分、磁束密度の大きさと加工量の組み合わせについて、工具回転数 750rpm, 1000rpm, 1250rpm, 1500rpm それぞれ相関係数を求めたものを示した。なお後で鉄粉に働く様々な力を概算する際には、磁場の強さを $1.6 \times 10^5 [\text{A/m}]$ 程度とした。

磁束密度の大きさに関して、すべての回転数について加工量と負の相関があることがわかる。すなわち磁束密度の大きさと加工量の間に直接的な関連性をみいだすことはできないことが分かった。また磁束密度の軸方向成分に関しては加工量と正の相関があることがわかる。

同様に図 14 に工具 Type β での磁束密度の分布と加工量、図 7 に模式図を示し、寸法を表 1 に示す。また表 3 に相関係数を示した。工具 Type β でも磁束密度の大きさと加工量の間に直接的な関連性をみいだすことはできない。

4.2 磁束密度の勾配と加工量との比較

図 11, 図 14 に工具 Type α , Type β それぞれでの磁束密度の大きさの径方向への微分係数と加工量について比較したグラフを示した。磁束密度の大きさの径方向への微分係数は磁束密度の勾配に対応しており、式 1 に示したように磁束密度の勾配は磁気浮揚力と近似的に比例関係にあることが知られている [1]。なお後で鉄粉に働く様々な力を概算する際には、磁場の強さの径方向への偏微分係数を $1.1 \times 10^8 [\text{A/m}^2]$ 程度とした。

図 11, 図 14 から分かるように、磁石の端に対応する領域では磁束密度の勾配が大きくなっているのに対して加工量は小さい。また磁石のなかほどに対応する領域ではその逆に、磁束密度の勾配が小さくなっているのに対して加工量は大きい。このことから磁束密度の勾配と加工量是对応がとれておらず、磁気浮揚力は加工量と関連性があるととらえることが難しいことが分かった。

$$\begin{aligned} F_{mb} &= v \mathbf{M} \cdot \nabla \mathbf{H} \\ &\propto \nabla M \end{aligned} \quad (1)$$

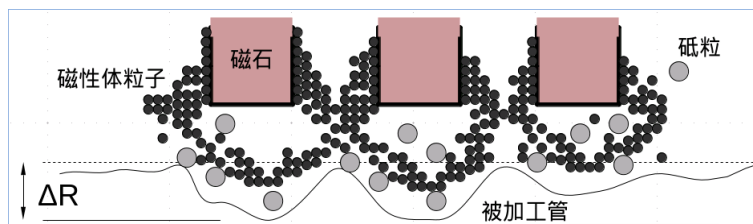


図 10: 内径变化量模式図

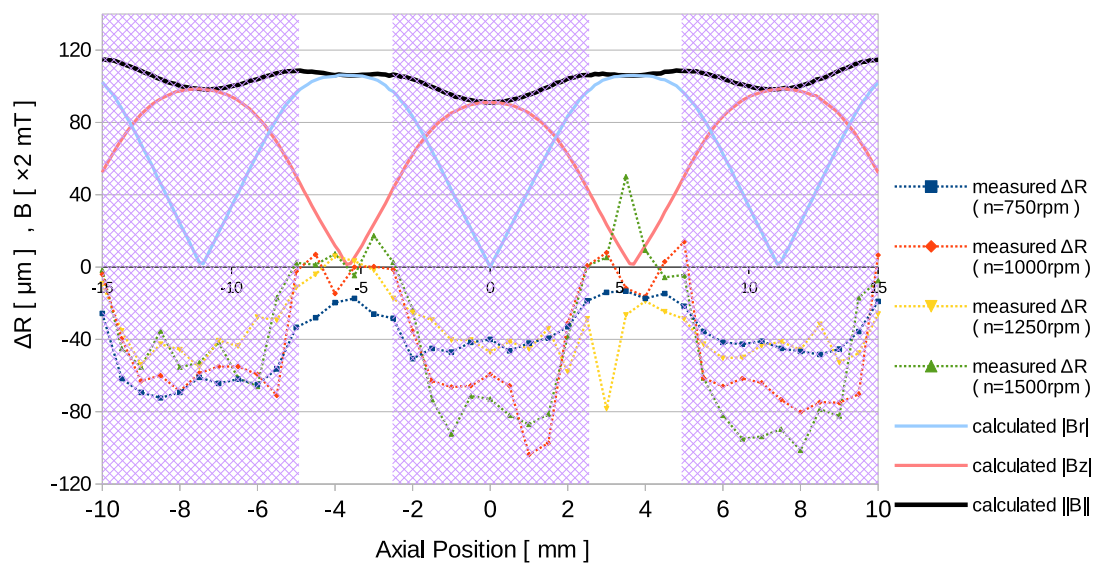


図 11: 研磨加工による内径変化と磁束密度 (Typeα)

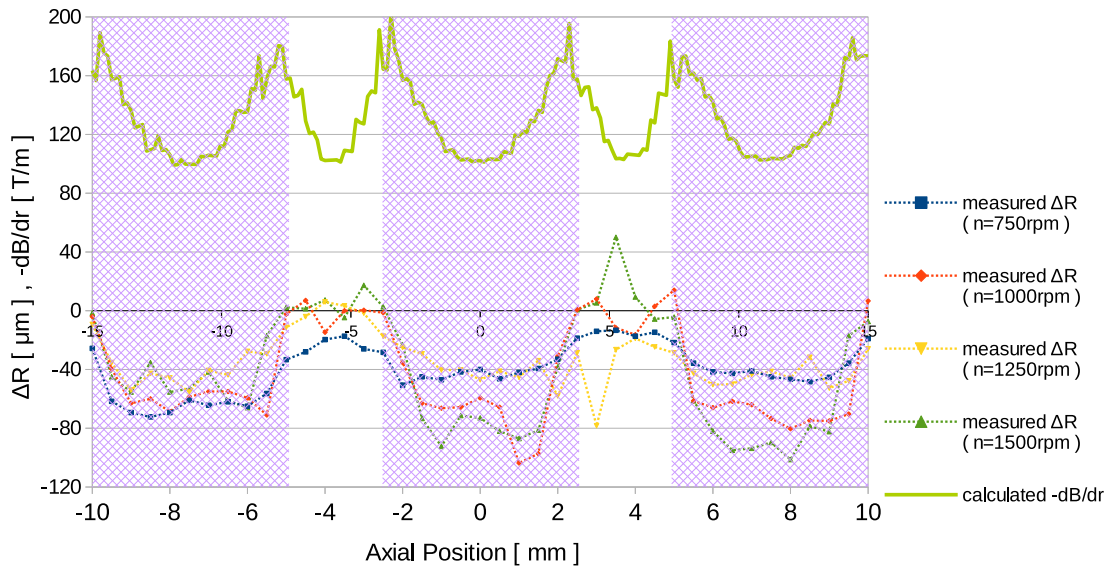


図 12: 研磨加工による内径変化と磁束密度の勾配 (Type α)

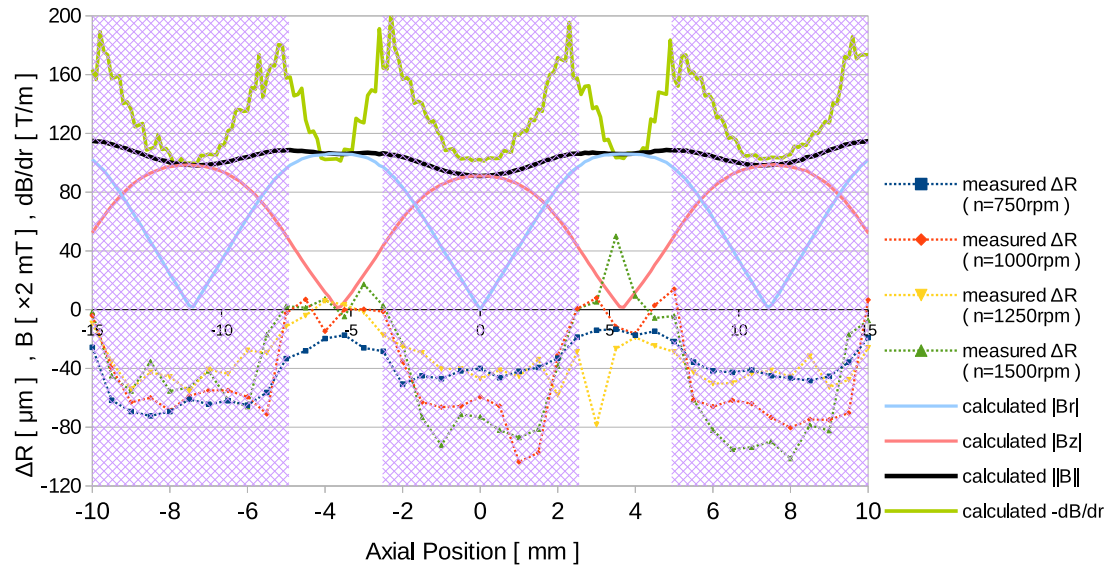


図 13: 研磨加工による内径変化と磁場諸量 (Type α)

Type α	750rpm	1000rpm	1250rpm	1500rpm
B_r	-0.65	-0.74	-0.54	-0.80
B_z	0.81	0.82	0.62	0.87
B	-0.34	-0.57	-0.34	-0.63

表 3: 相関係数 (Type α)

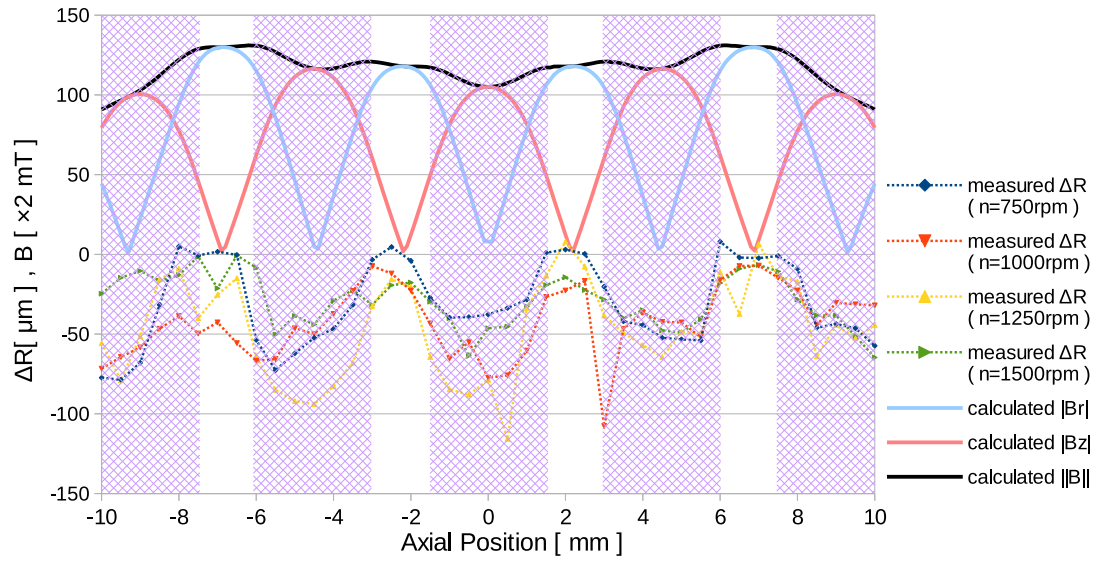


図 14: 研磨加工による内径変化と磁束密度 (Type β)

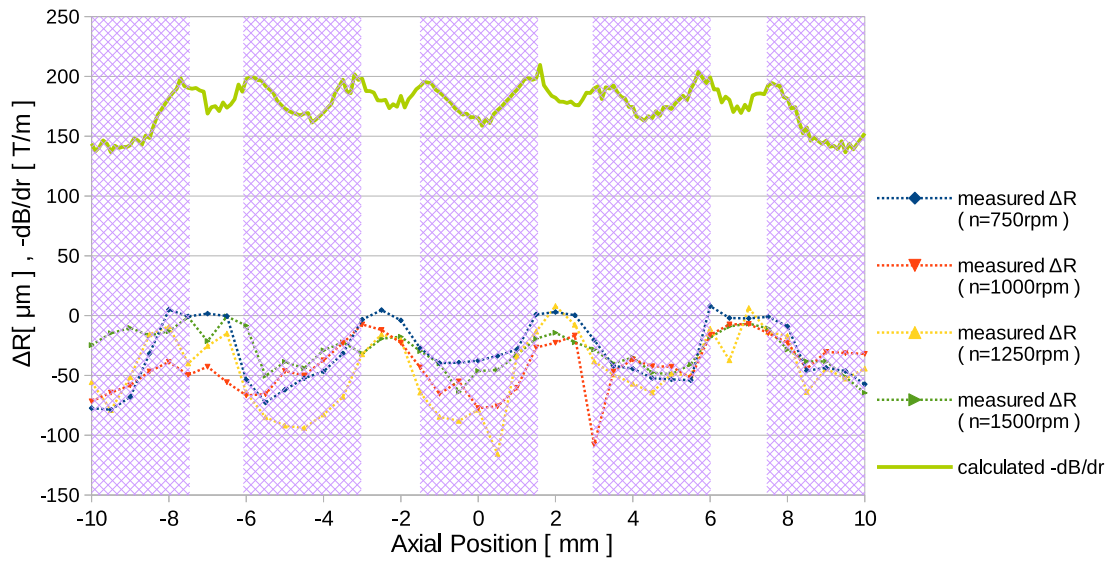


図 15: 研磨加工による内径変化と磁束密度の勾配 (Type β)

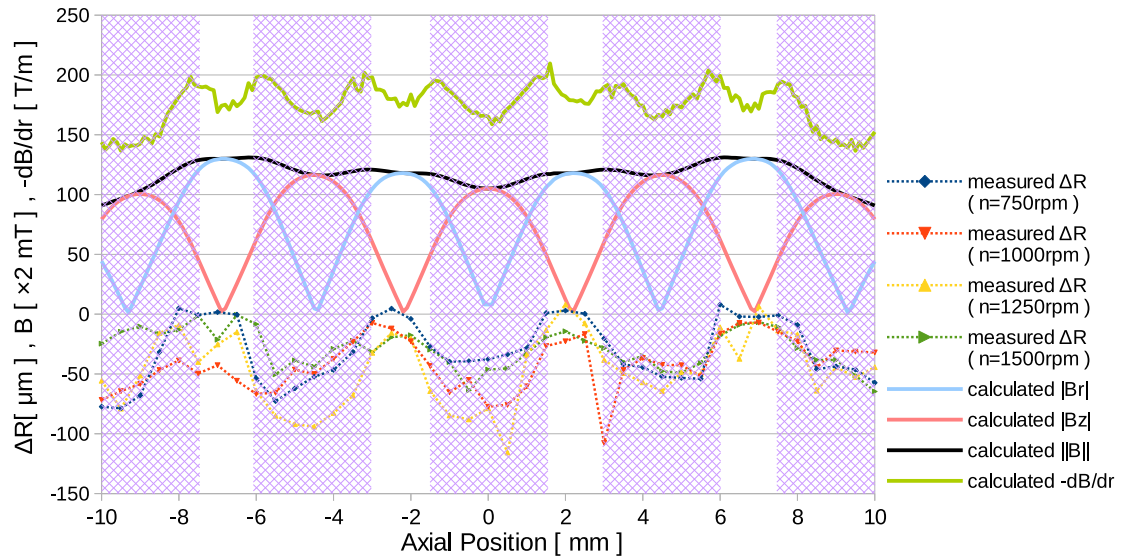


図 16: 研磨加工による内径変化と磁気諸量 (Type β)

Type β	750rpm	1000rpm	1250rpm	1500rpm
B_r	-0.77	-0.38	-0.67	-0.64
B_z	0.78	0.42	0.71	0.63
B	-0.52	-0.30	-0.38	-0.50

表 4: 相関係数 (Type β)

4.3 解析結果と加工実験結果との比較まとめ

磁束密度の大きさと加工量との間に関連性を見出すことはできなかった。同様に磁束密度の大きさと加工量との間についても関連性がないことが分かった。これら2つはネガティブな結果であって、これまでの実験結果と解析結果との比較のみでは加工原理への直接的な理解へは至ることができないと言えた。

4.4 鉄粉に働く力の概算

工具 Type α について磁石側面から 1mm の位置での磁束密度の大きさと勾配を用いて、MCF に含まれる鉄粉に働く様々な力を概算し評価した。鉄粉に働く磁力 f_{grav} 、遠心力 f_{cent} 、重力 f_{mag} について体積あたりの力 N/m^3 の概算結果を可視化し、常用対数スケールで表したものを図 17 に示す。また計算式と具体的な計算結果についても式 2、式 3、式 4 に示し、表 5、表 6 に計算の際に必要な諸量をまとめた。

鉄粉に働く重力や遠心力と比較して磁力が支配的であることから、磁気的な効果のみを考えた本シミュレーションの妥当性が間接的に確認できる。

$$f_{grav} = \rho g$$

$$\begin{aligned}
&= (7.86 \times 10^3) \times 9.8 [\text{N/m}^3] \\
f &= 7.70 \times 10^4 [\text{N/m}^3],
\end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
f_{cent} &= \frac{\rho R \omega^2}{2} \\
&= \frac{(7.86 \times 10^3) \times (15 \times 10^{-3}) \times (\frac{1000 \times 2\pi}{60})^2}{2} [\text{N/m}^3] \\
&= 6.46 \times 10^5 [\text{N/m}^3],
\end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
f_{mag} &= \mathbf{M} \cdot \nabla \mathbf{H} \\
&= \mu_0 \chi \mathbf{H} \cdot \nabla \mathbf{H} \\
&= (4\pi \times 10^{-7}) \times 2000 \times (1.6 \times 10^5) \times (1.1 \times 10^8) [\text{N/m}^3] \\
&= 4.83 \times 10^{10} [\text{N/m}^3].
\end{aligned} \tag{4}$$

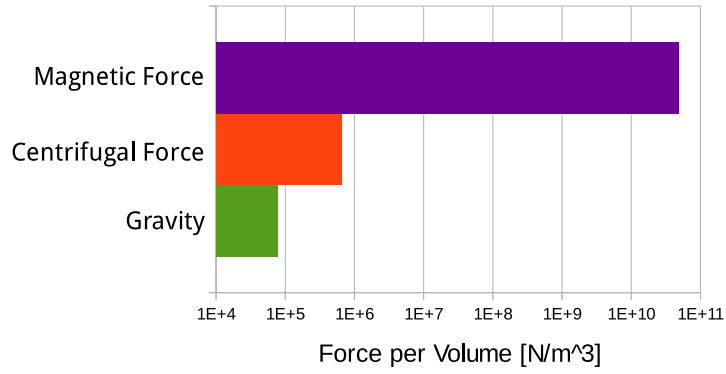


図 17: 磁性体粒子に働く力の概算

Tool Type	α	External Radius $R[\text{mm}]$	15
Intensity of Magnetic field $H[\text{A/m}]$	1.6×10^5	Partial Derivative $-\frac{\partial H}{\partial r}$	1.1×10^8
Number of Revolution [rpm]	1000	Magnetic Susceptibility χ	2000
Particle Size $d[\mu\text{m}]$	1.2	Density $\rho[g/cm^3]$	7.86

表 5: 鉄粉および工具諸元

Gravitational Acceleration $g[\text{m/s}^2]$	9.8	Permeability of Vacuum $\mu_0[\text{H/m}]$	$4\pi \times 10^{-7}$
--	-----	--	-----------------------

表 6: 物理定数

5 様々な寸法の工具についての体系的な解析

前章で述べたようにこれまでの加工実験結果と磁場解析結果との比較では加工原理への直接的な理解には不十分であることが分かった。

ここで原理への理解を深めるために解析結果との比較を前提として適切な実験工具を設計できないか考える。もし様々な寸法の工具について網羅的に計算を行いそれぞれ比較を行えるならば、それにのっとって適切な工具の設計を行うことができる。この観点から本研究では網羅的な解析システムを構築した。

5.1 実験工具の設計

研磨においてある磁気的な特性が加工原理への考察で重要な役割を果たすと予想されるとき、適切に工具を設計することでその特性が加工量の空間分布に著しい影響を与えるような工具を、本システムでは設計することができる。この工具を用いた加工実験は実際にその予想が正しいかどうか検証するのに便利である。またいくつかの磁気的な特性のうちどれがもっとも寄与が大きいかなどを考える際にも、本システムを適用することができる。

5.2 解析結果の応用

磁気機能性流体とは一般に磁場のもとで機能性をもつ流体の総称であり、磁気混合流体 (MCF) もこれに含まれる。これは逆に磁場のごく小さな領域ではその機能性を持たないとも言える。これから磁束密度がごく小さな領域が大きいような特性をもつ工具は応用上重要ではないことが予想される。この観点から研磨を行う領域で磁束密度があるしきい値を下回るかどうかについて評価を行う。図 18 に例として磁石の間隔を変えた際の磁束密度の分布と磁束密度のしきい値について示した。今回の磁束密度のしきい値は 0.18T 程度としたが、これは実験的におおよその値を見積ったものである。[5]

図から磁束密度の大きさに関して 0.18T を下回っている領域がある工具が存在することがわかる。この工具について磁気機能性流体の応用上は重要でないとして、工具設計の際の考察の対象から除外することができる。すなわち本システムでは、磁束密度の大きさにあるしきい値を設定しそのしきい値を下回る領域が大きな工具について実用上は重要でないとして除外し、設計する工具に関して絞り込みを行うことができる。

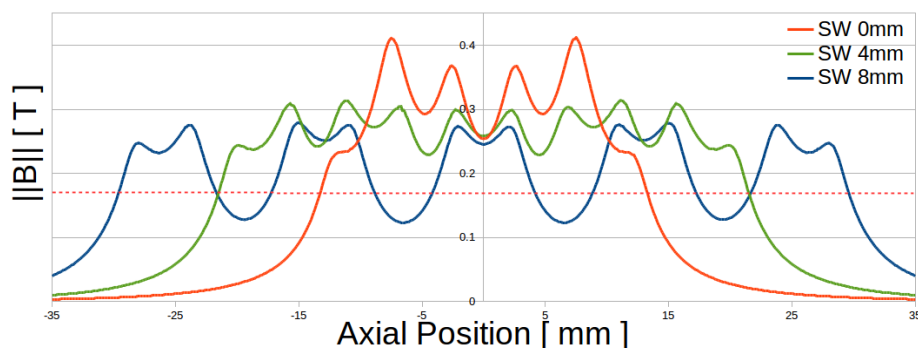


図 18: 解析結果の応用

5.3 解析システム

図 19 に解析システムのデータの流れを示す。このシステムでは解析パラメータの設定と計算、基礎分析を自動で行うことができる。これによって様々な工具間での体系的な比較を行うことができるようになった。なお解析システムは DOA (Data Oriented Approach) にのっとり構成し、塚田らの作成したシステム [5] にくらべデータとプログラムについてそれぞれ再利用性を高くすることに成功した。具体的には任意の位置での磁束密度分布とそれをもとにした解析量などを、一括して後から取り出すことができるようにした。解析可能なモデルについても前研究を引き継ぎ自由度の拡大を行ったことによって、工具の幾何学的な自由度を網羅することができるようになった。プログラミングはおもに c 言語をもちいて行っているが、Maxwell SV での連続計算を行う際にはマクロ言語である KMmacro[8]、データの出力の際は Maxwell 2D PostProcess の内部マクロ、解析結果の分析の際には一部 R 言語 [9] を用いている。

表 7 に計算を行った工具寸法パラメータについて示した。なおそれぞれの組み合わせをとるとのべ 15000 通り以上の工具形状になりうるが、そのすべてについて網羅的に解析を行った。

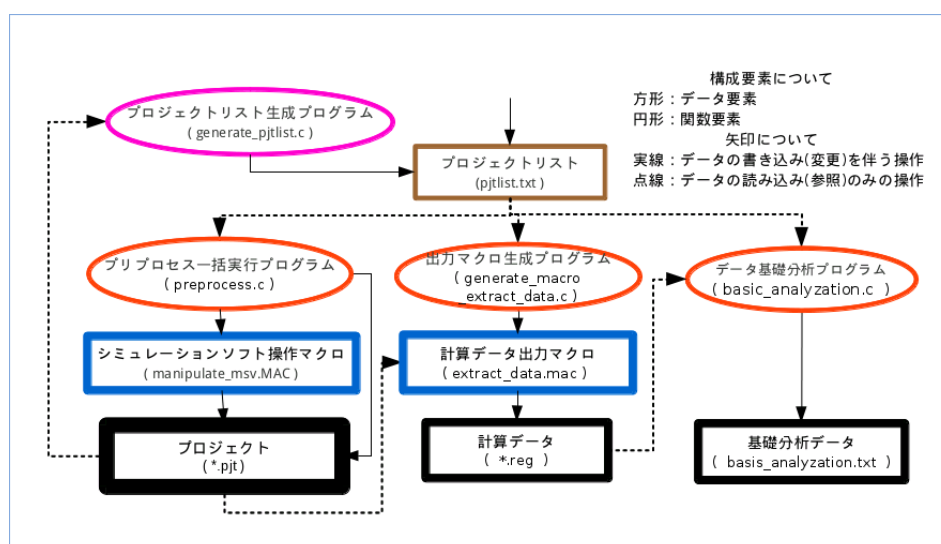


図 19: 構成要素関連図 (DFD: Data Flow Diagram)

Number of Magnet	3	4	5								
Width of Magnet [mm]	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Internal Diameter [mm]	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
External Diameter [mm]	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Width of Spacer [mm]	1	2	3	4	5	6	7				

表 7: 工具寸法のとりうる値

5.4 工具の形状による磁束密度の特性への一般的な考察

次に円管内面における磁束密度の大きさの分布について、解析値のグラフへの可視化を行った。円管内面研削での工具形状については、磁石の個数を含めて、磁石の厚さ、内半径、外半径、スパー

サの厚さ, 合わせて5つのパラメータが存在する. また被加工管の内半径も工学的な要請にあわせて変化しうるので, データの取り出しの際に適切に設定を行った. これら合わせて6つのパラメータの変化に対し磁束密度の大きさの分布への考察を行った.

図20に被加工管内半径(磁石外側面との距離)を変化させた際の磁束密度分布を示した. 磁石外側面との距離が小さくなるほど磁束密度は一般に大きく, 磁極周辺での極大が特に鋭くなり磁石なかほどと磁石の間での極小もはっきりと分かる. これは磁極との距離が小さくなるためだと考えられる.

図21に工具に用いる磁石の個数を変化させた際の磁束密度分布を示した. 軸方向位置が2.5mm付近では磁石の個数が1つの場合では磁束密度が0.25T程度であるのに対して, 3つや5つの場合では0.3T程度と磁束密度が20%程度大きくなっていることが分かる. しかし磁石の個数が3つと5つの場合を比較しても大きな差はないと言える. したがって磁石の間で磁極が対向している領域周辺では磁束線が互いに反発しあい, 磁束密度の大きさが磁石が単独で存在しているときに比べ大きくなっていることが確認できた.

図22に磁石の内半径を変化させた際の磁束密度分布を示した. 内半径が小さくなることで磁石の体積が大きくなり磁束密度も一般に大きくなることが分かる.

図23に磁石の厚さを変化させた際の磁束密度分布を示した. 磁石の厚さが大きくなると, 磁石の体積が大きくなり磁束密度の大きさは大きくなる. また磁石の厚さが小さくなると, それぞれの磁石なかほどに対応する領域に磁場の極小点が現れなくなる. 図20でも, 工具磁石と被加工管内面との距離を大きくすると同様に磁石なかほどでの極小がはっきりとしなくなるため, 磁石なかほどで極小が存在するかどうかは磁石の幅に対する工具磁石と被加工管の距離の比に依存していることが考えられる.

図24にスペーサの厚さを変化させた際の磁束密度分布を示した. スペーサの厚さが大きくなるにつれて磁束密度の大きさは小さくなり, 磁石が単独で存在する場合の磁束密度に近づく. スペーサの厚さが大きくなるとその中央での磁束密度の大きさは小さくなり, スペーサが存在しない場合磁束密度の大きさの極小点は存在しなくなる.

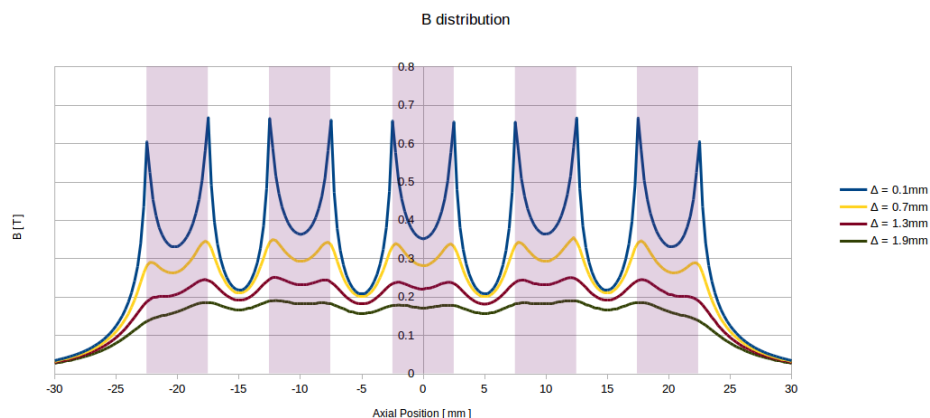


図 20: 被加工管内半径(磁石外側面との距離)を変化させた際の磁束密度の大きさの分布

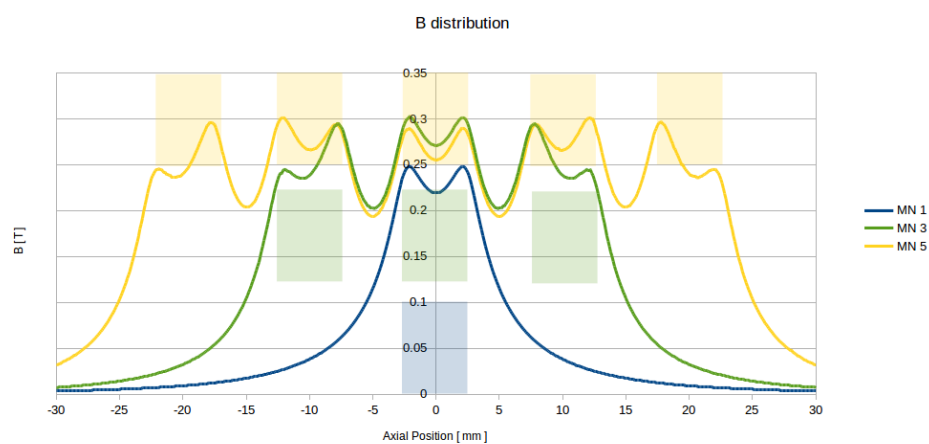


図 21: 磁石の個数を変化させた際の磁束密度の大きさの分布

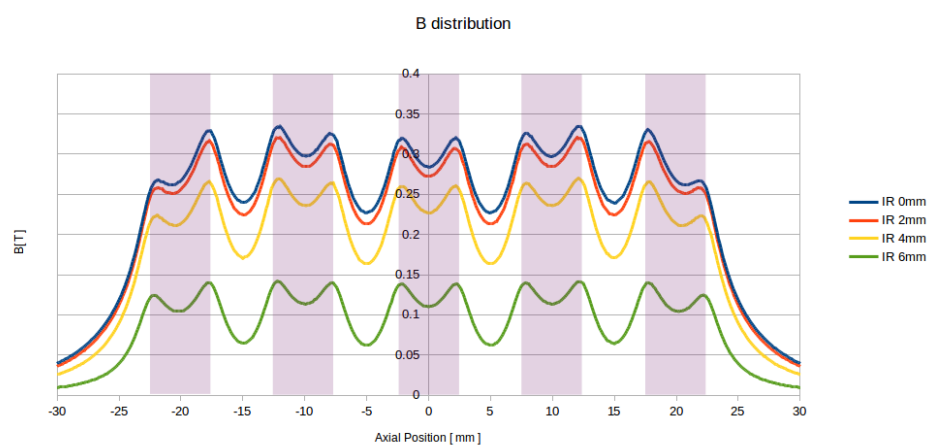


図 22: 磁石の内半径を変化させた際の磁束密度の大きさの分布

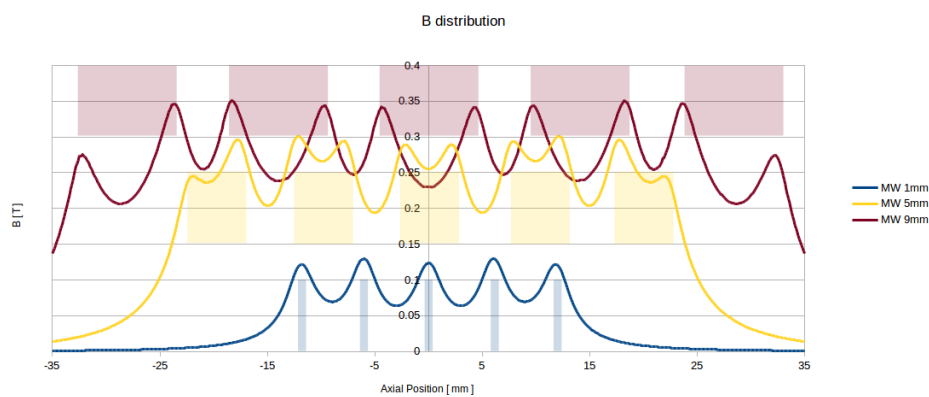


図 23: 磁石の幅を変化させた際の磁束密度の大きさの分布

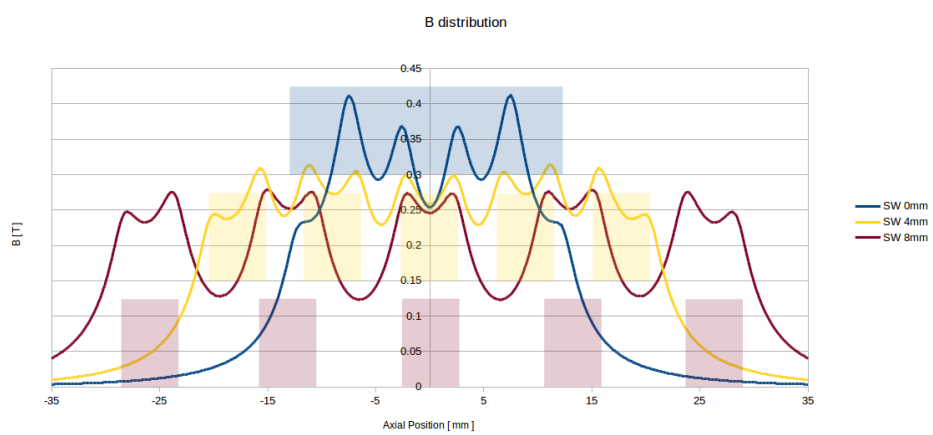


図 24: 磁石の間隔を変化させた際の磁束密度の大きさの分布

6 おわりに

本研究では磁気解析システムの構築及び分析を行った。加工面各点における磁束密度および磁束密度の径方向への勾配に関する評価を行った結果、いずれも1対1に単純に加工原理を説明できないことが分かった。よって本研究の成果をもとに、軸方向の磁束密度分布や、面的な磁束密度分布、さらにこれらの複合的な関係性を評価し、実験的加工量との対応を調査することが不可欠であると考えられる。

謝辞

本研究において直接的にご指導いただいた池田先生をはじめ、所属研究室の西田先生、櫻井先生にこの場を借りて深く御礼申し上げます。また実験データの提供および様々なアドバイスと試料の作成をおこなってくれた西田研究室の学生の協力なくして本研究は行うことができませんでした。そして様々な面で本研究への協力を惜しまず実質的な共同研究者であった塚田君への感謝の意を示します。

参考文献

- [1] 山口博司 (2011) . 磁性流体, 森北出版.
- [2] 安永暢男, 高木純一郎 . 精密機械加工の原理 工業調査会
- [3] 島田邦雄 (2008) . 機能性流体力学 (12), 機械の研究, Vol.60, No.9, pp.974-978 .
- [4] Hitoshi Nishida, Kunio Shimada, Ichiro Yoshino (2012). Study of Micro Processing for Inner Tube Walls Utilizing Magnetic Compound Fluid *Journal of Japanese Society for Experimental mechanics*, vol 12, No 4, pp.361-368 .
- [5] 塚田, 池田, 平松, 櫻井, 西田. 磁気機能性流体を用いた円管内面マイクロ加工のための磁界解析 第38回 日本応用磁気学会学術講演会 講演番号: 2aF-2 (2014).
- [6] Kunio Shimada, Hideo Oka (2005) . Magnetic characteristics of magnetic compound fluid (MCF) under DC and AC magnetic fields *Journal of Magnetic Materials*, 290 - 291 , 804 - 807 .
- [7] 楠裕也 (2013). 磁気機能性流体を用いた垂直円管内面加工の基本特性, 富山高等専門学校 (本郷キャンパス) 専攻科特別研究論文集, 平成 25 年度, pp.9-14.
- [8] ベーカー街の物置/KMmacro, www.geocities.jp/trick_room/kmmacro.html#26 .
- [9] The R project for statistical computing, www.r-project.org .