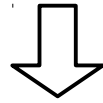


# 磁気混合流体による 円管内面精密加工に用いる工具形状の 磁氣的考察

池田・櫻井研究室、西田研究室  
平松信義

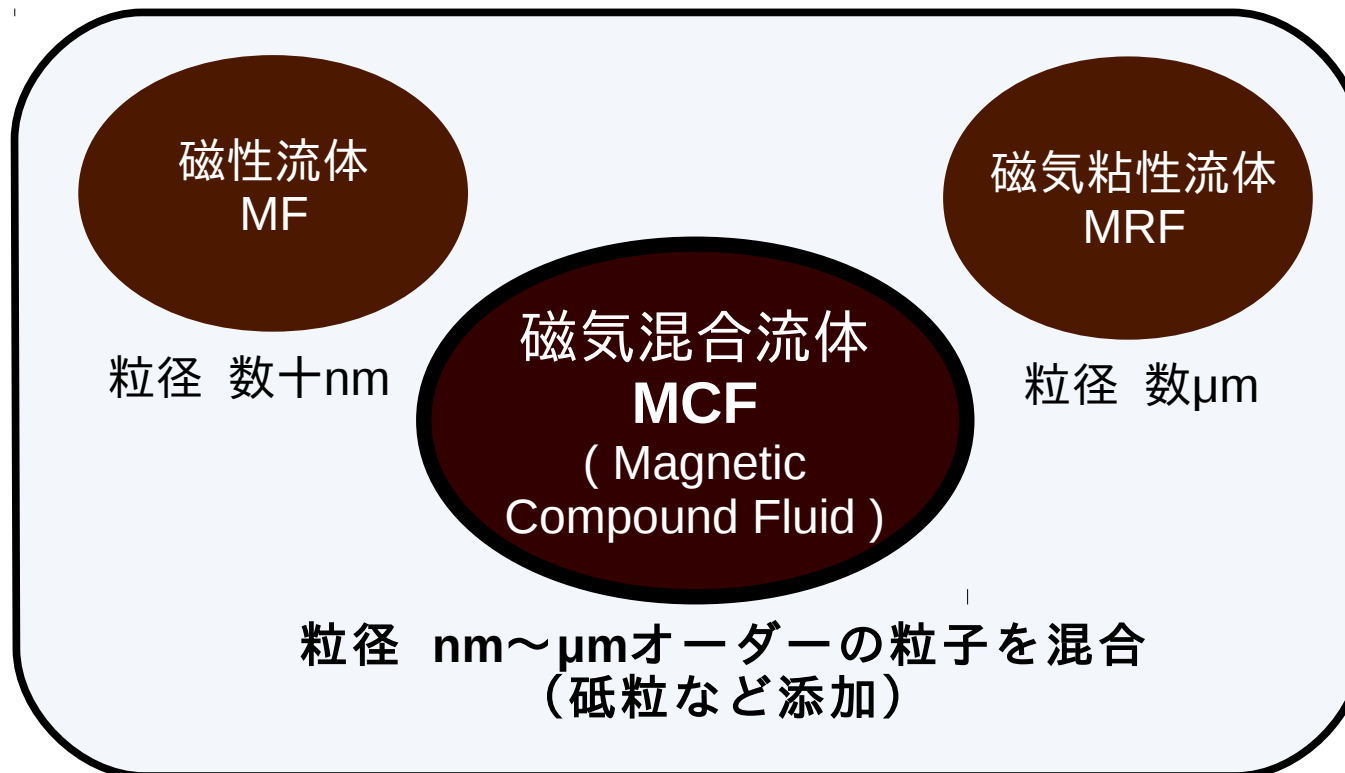
# ○研究の背景と目的

磁気混合流体（MCF）を用いた研磨加工の加工原理は分かっていない  
体系的な原理実験は難しい

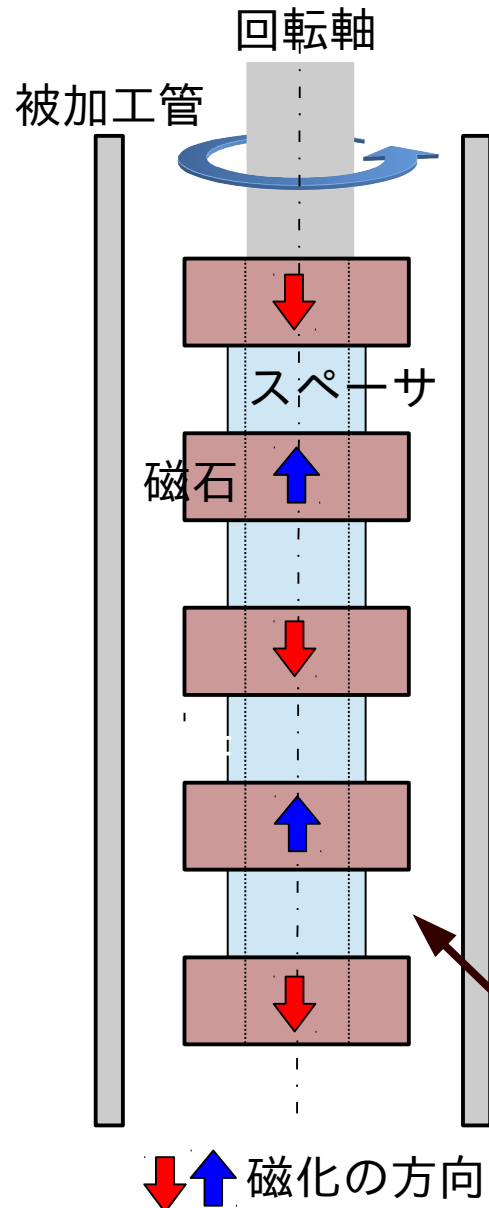


円管研磨に着目し、磁界シミュレーションを行った

磁気機能性流体



# ○工具の解析モデル

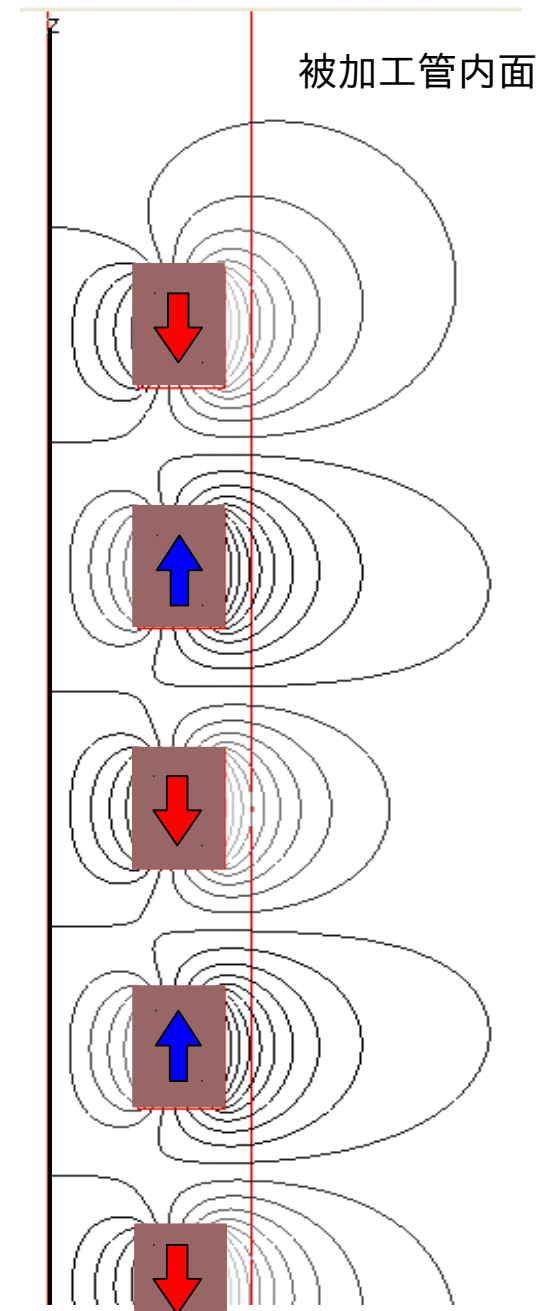


- ◆工具はリング状永久磁石を向かい合わせて積層したもの
- ◆モデルには回転対称性がある
- ◆磁界解析には Ansoft 社製 (現:ANSIS) 電磁界解析シミュレータMaxwell SV を用いた

# ○工具の解析モデル

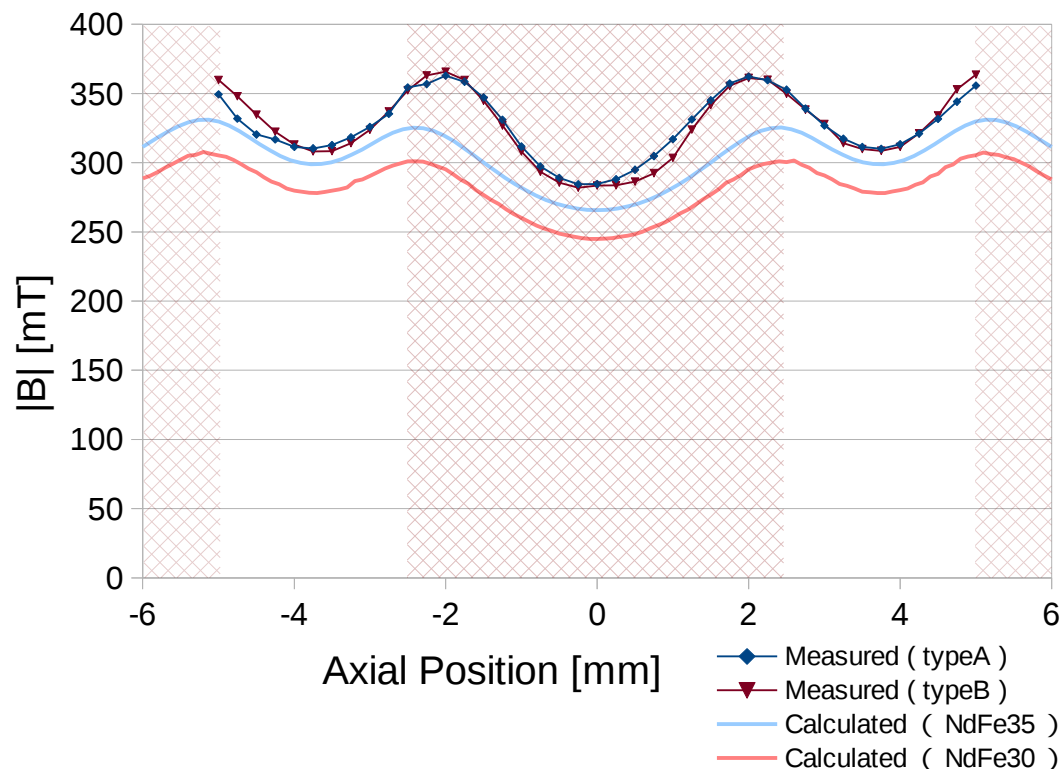
- ◆磁束は対向する磁極から反発しあい被加工管内面に向かう
- ◆磁束の方向に沿って磁気クラスタが生成され、工具の回転による管内面との相対運動によって研磨が行われる
- ◆磁石によって生起される磁界を分析することで、研磨工具の特性を評価する  
( 磁気的な効果について考察する )

回転軸



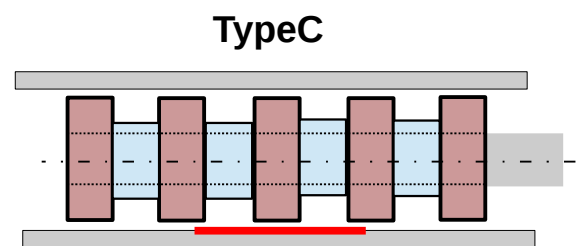
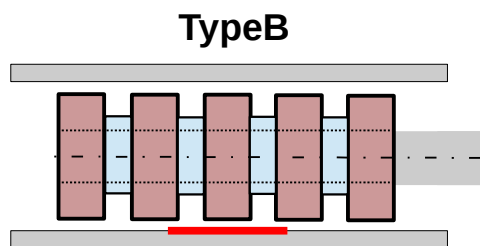
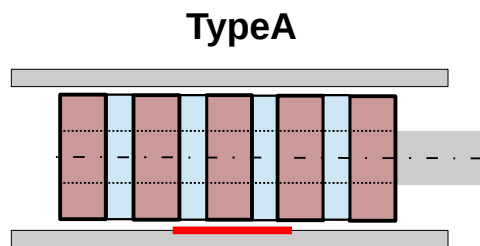
# ○解析の妥当性の検証

- 被加工管内面での磁束密度の大きさについて  
実験値と計算値での比較（工具TypeA,B）



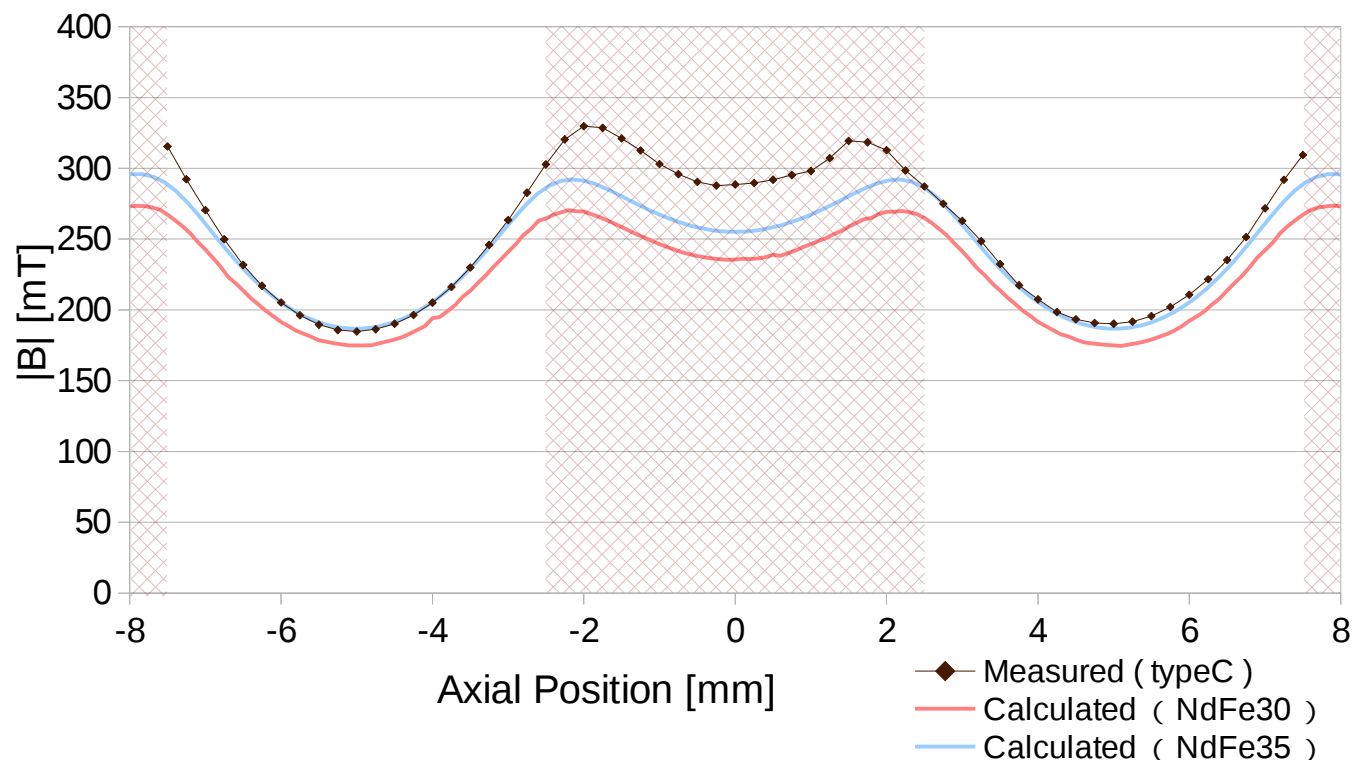
磁石の間や磁極の間では  
よく対応がとれている

[実験値出典] 西田研究室 和田



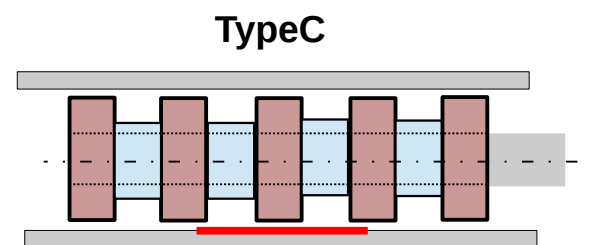
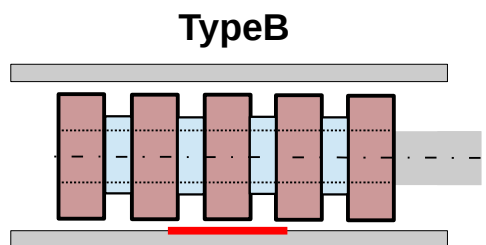
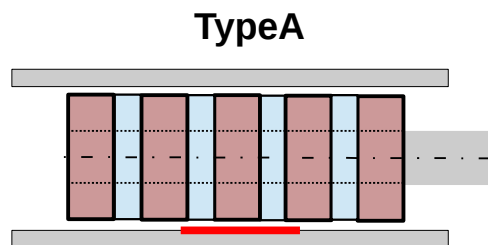
# ○解析の妥当性の検証

- 被加工管内面での磁束密度の大きさについて  
実験値と計算値での比較（工具TypeC）



適切に物理パラメータを選ぶと、最大相対誤差は12%程度

妥当な解析結果が得られた



# ○解析の妥当性の検証

## ●鉄粉の体積あたりの力の概算

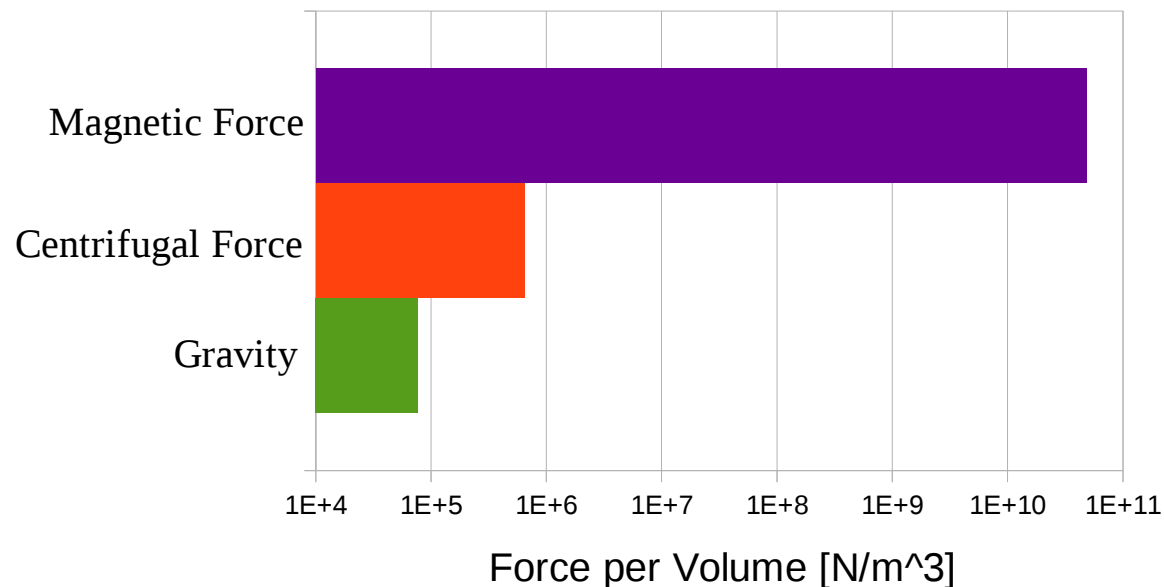


表. 諸元\*

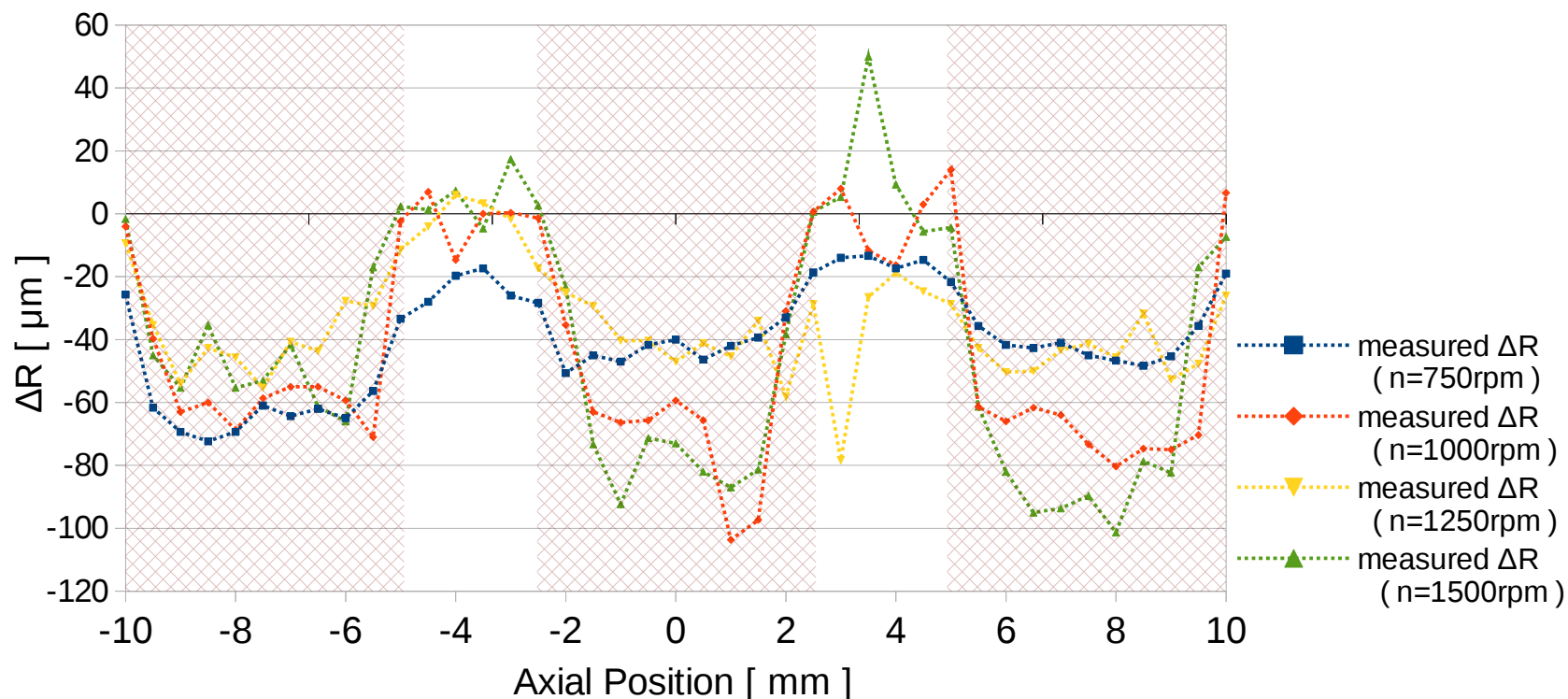
工具タイプ	Type α
工具回転数 [rpm]	1000
外径 (鉄粉) [μm]	1.2
密度 (鉄粉) [g/cm3 ]	7.86
透磁率 (鉄粉)	2000

磁力が支配的であることが  
確かめられた

重力と遠心力の影響は小さく、  
磁気的な考察のみで十分

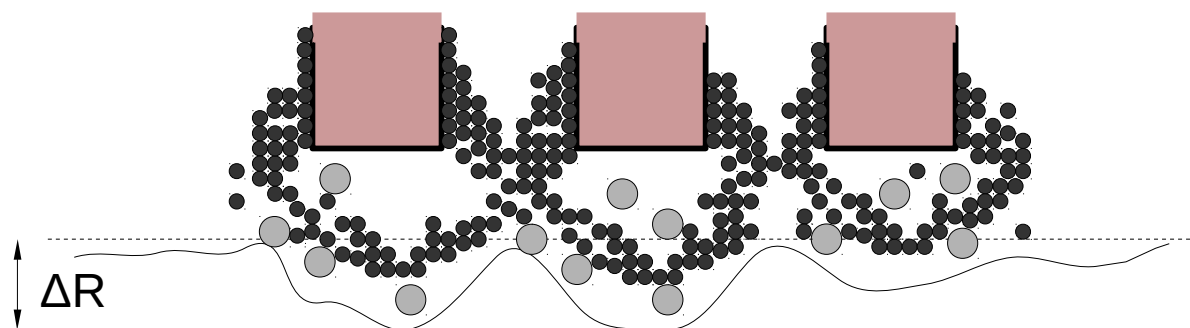
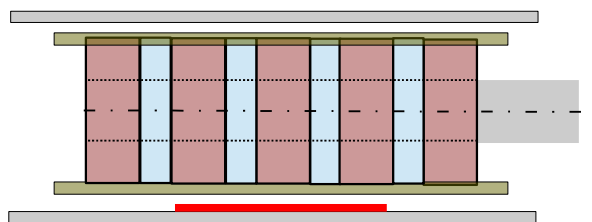
# ○加工実験との比較

●内径変化量



[ 実験値出典 ] 西田研究室 西野 ( 加工時間 20分 )

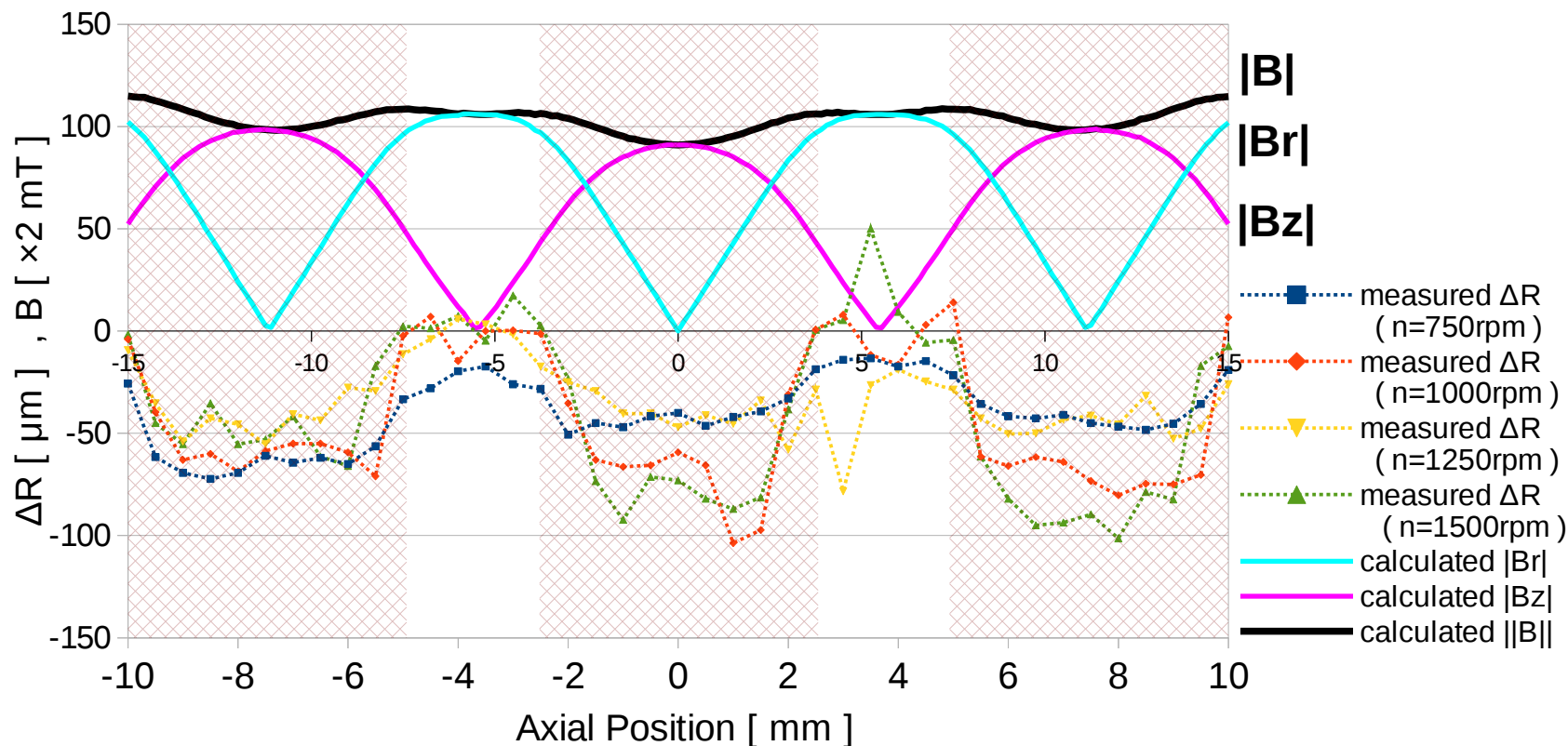
Typeα



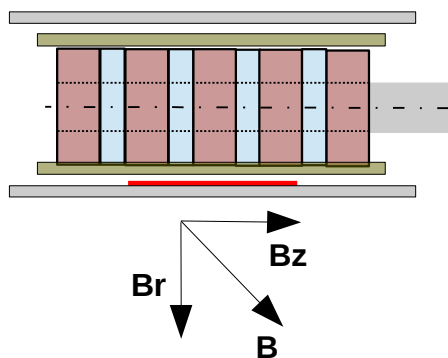


# ○加工実験との比較

●被加工管内面での磁束密度分布と内径変化量の比較 (Typeα)



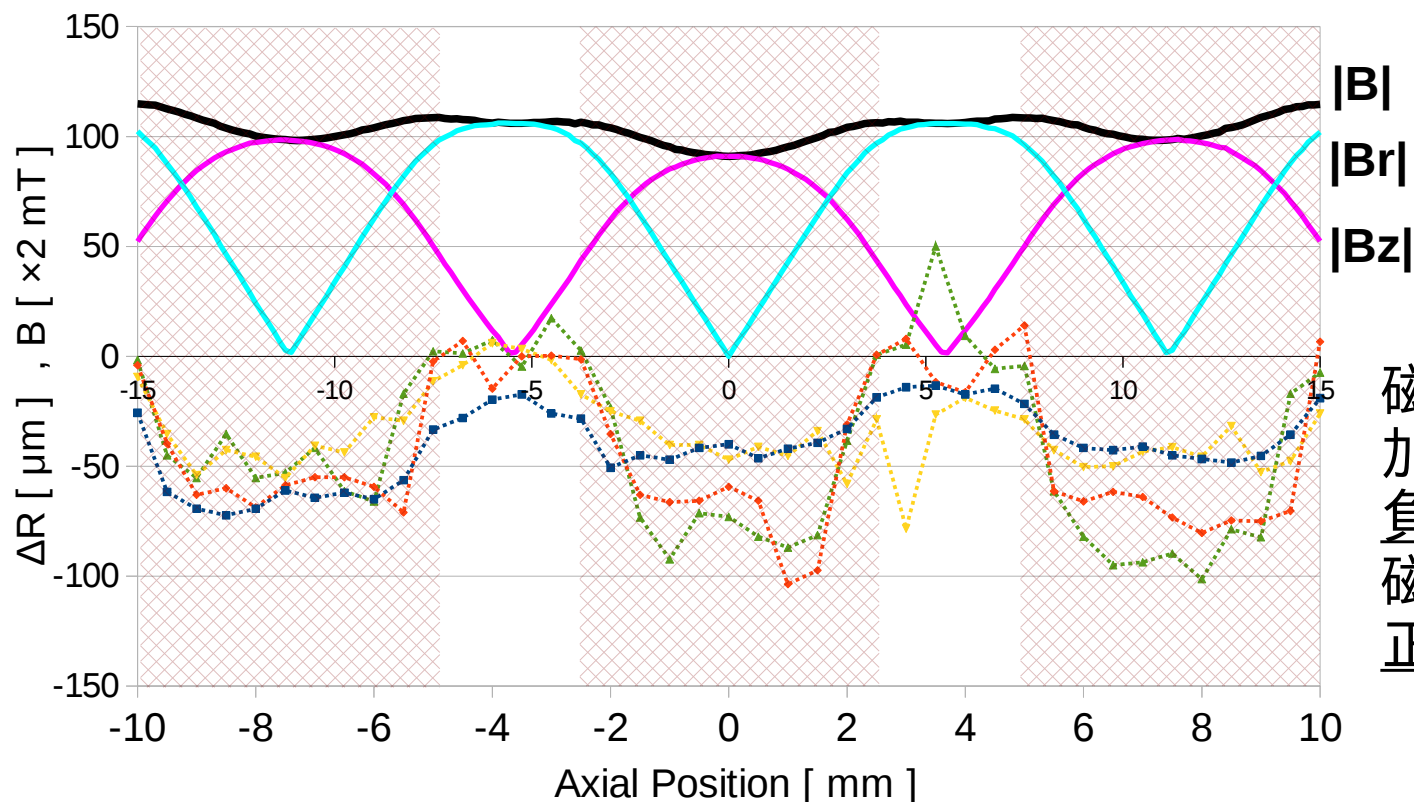
Typeα



磁束密度の各成分、大きさについて  
相関係数を求めた

# ○加工実験との比較

## ●被加工管内面での磁束密度分布と内径変化量の比較（Typeα）



磁束密度の大きさと加工量との間には負の相関、軸方向の磁束密度  $B_z$  との間には正の相関がある

Type α

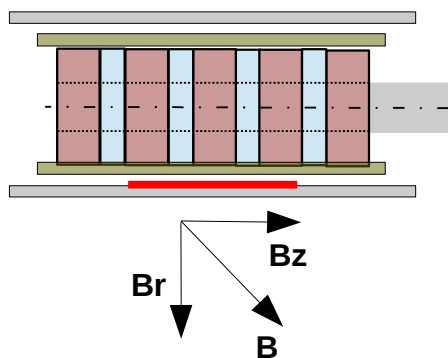
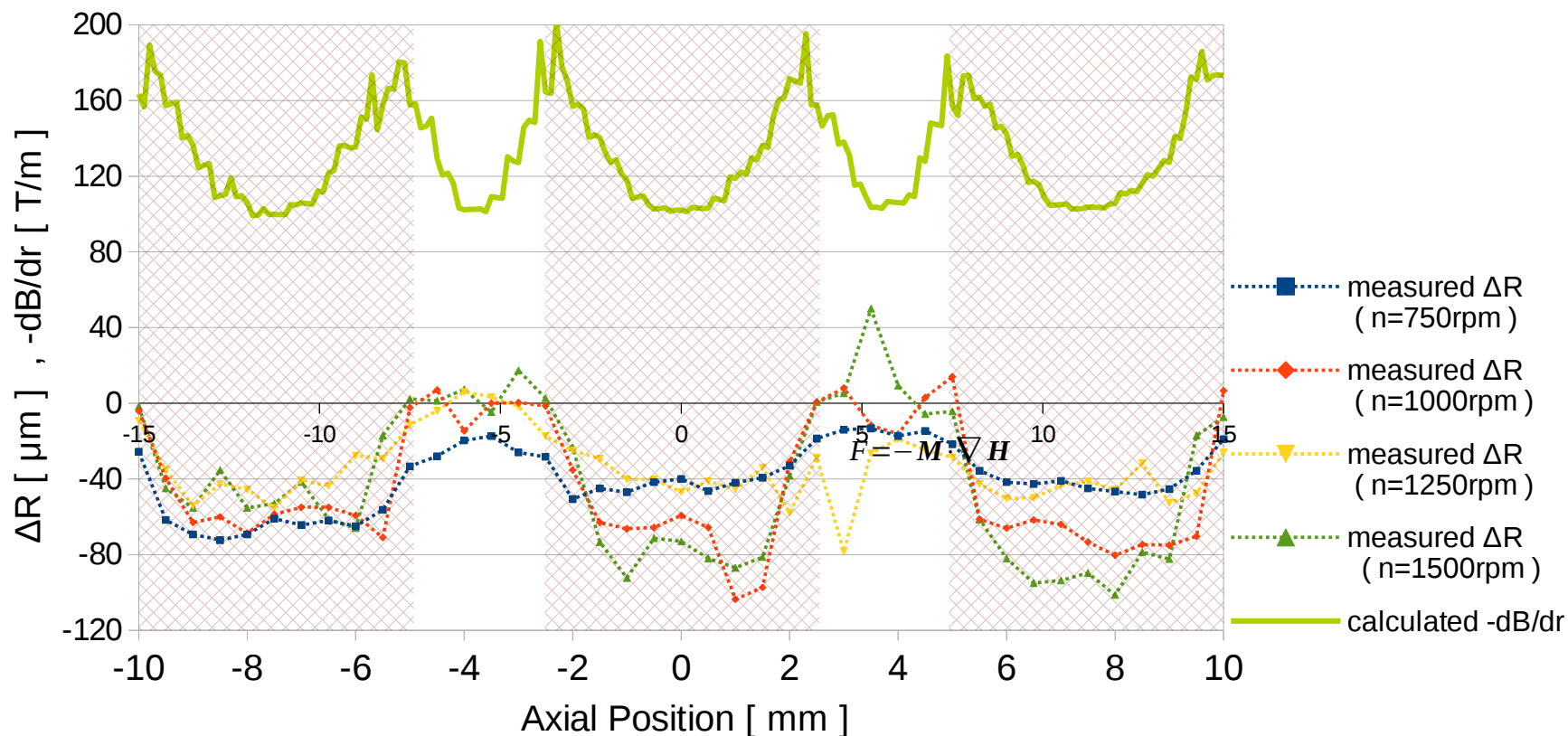


表. 相関係数

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

# ○加工実験との比較

●被加工管内面での磁束密度の勾配と内径変化量の比較 (Typeα)



磁気浮揚力は近似的に以下の式で表すことができる\*

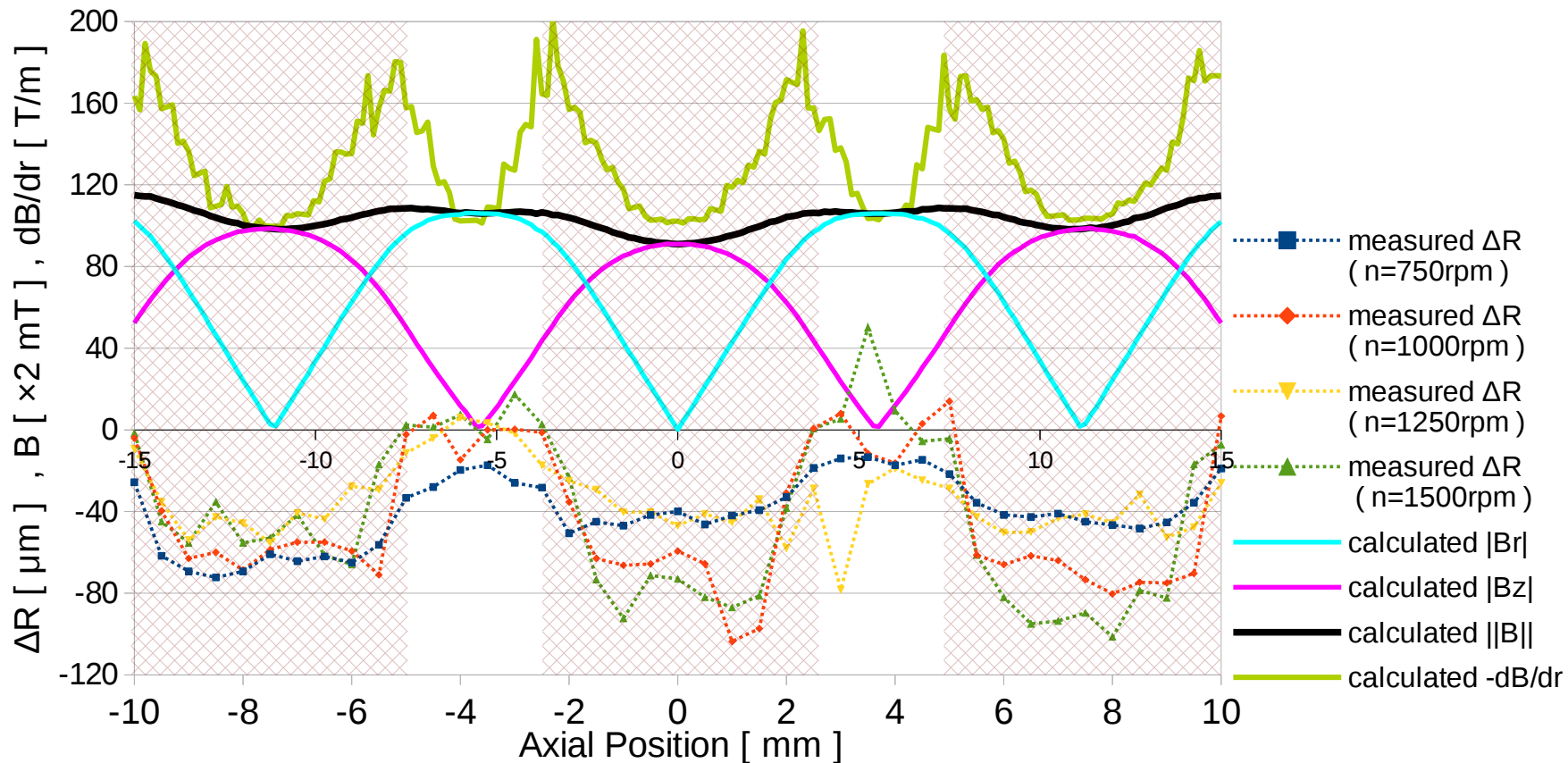
$$F = -\mathbf{M} \cdot \nabla \mathbf{H} \propto \nabla B_0$$

\*山口, 磁性流体, 森北出版 pp.99 (2011)

加工量との対応はとれていない

# ○加工実験との比較

## ●被加工管内面での磁束密度分布と内径変化量の比較 (Typeα)

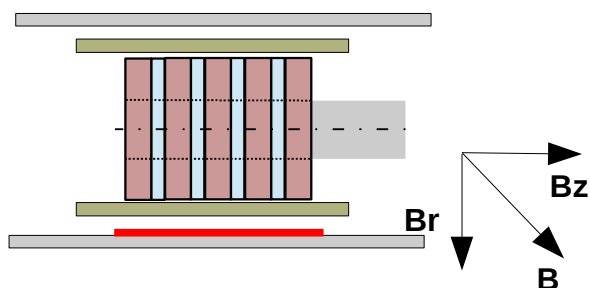
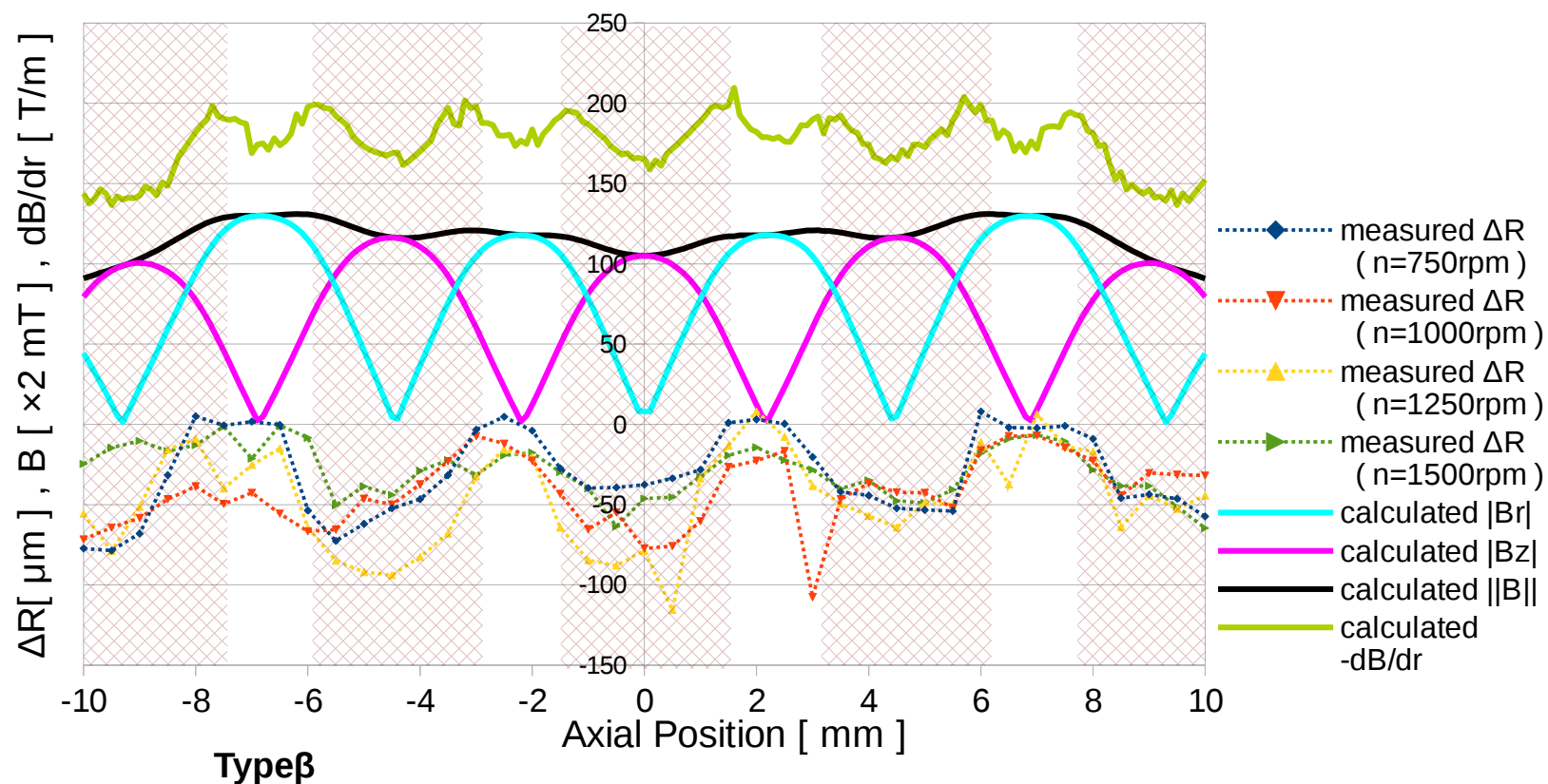


◆磁束密度の大きさと加工量との間には負の相関がある

◆磁気浮揚力と加工量は対応がとれていない

# ○加工実験との比較

- 被加工管内面での磁束密度分布や磁束密度の大きさの勾配と内径変化量の比較（工具Typeβ）

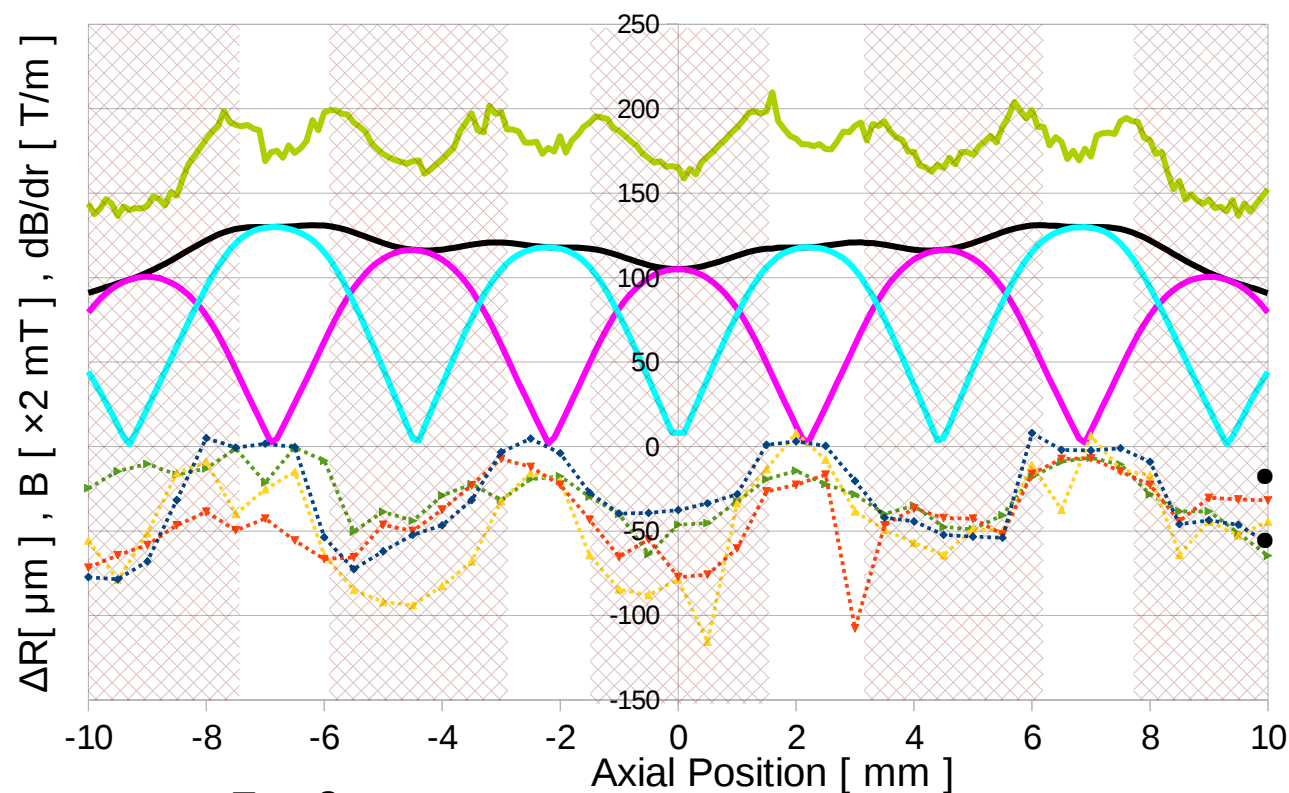


磁石幅、間隔を変えた工具についても同様に分析を行った



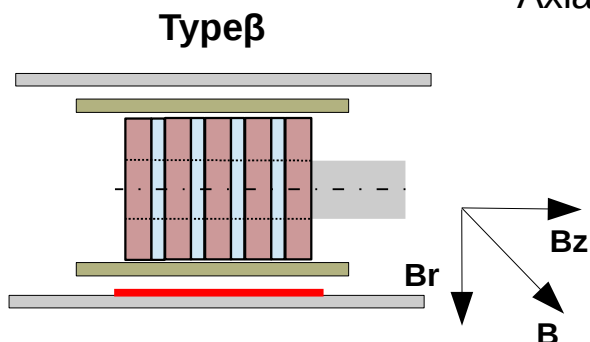
# ○加工実験との比較

- 被加工管内面での磁束密度分布や磁束密度の大きさの勾配と内径変化量の比較（工具Typeβ）



磁束密度の大きさと加工量との間には負の相関、軸方向の磁束密度 $B_z$ との間には正の相関がある

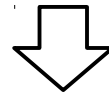
加工量と磁束密度の勾配には対応がとれていない



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

# ○解析システム

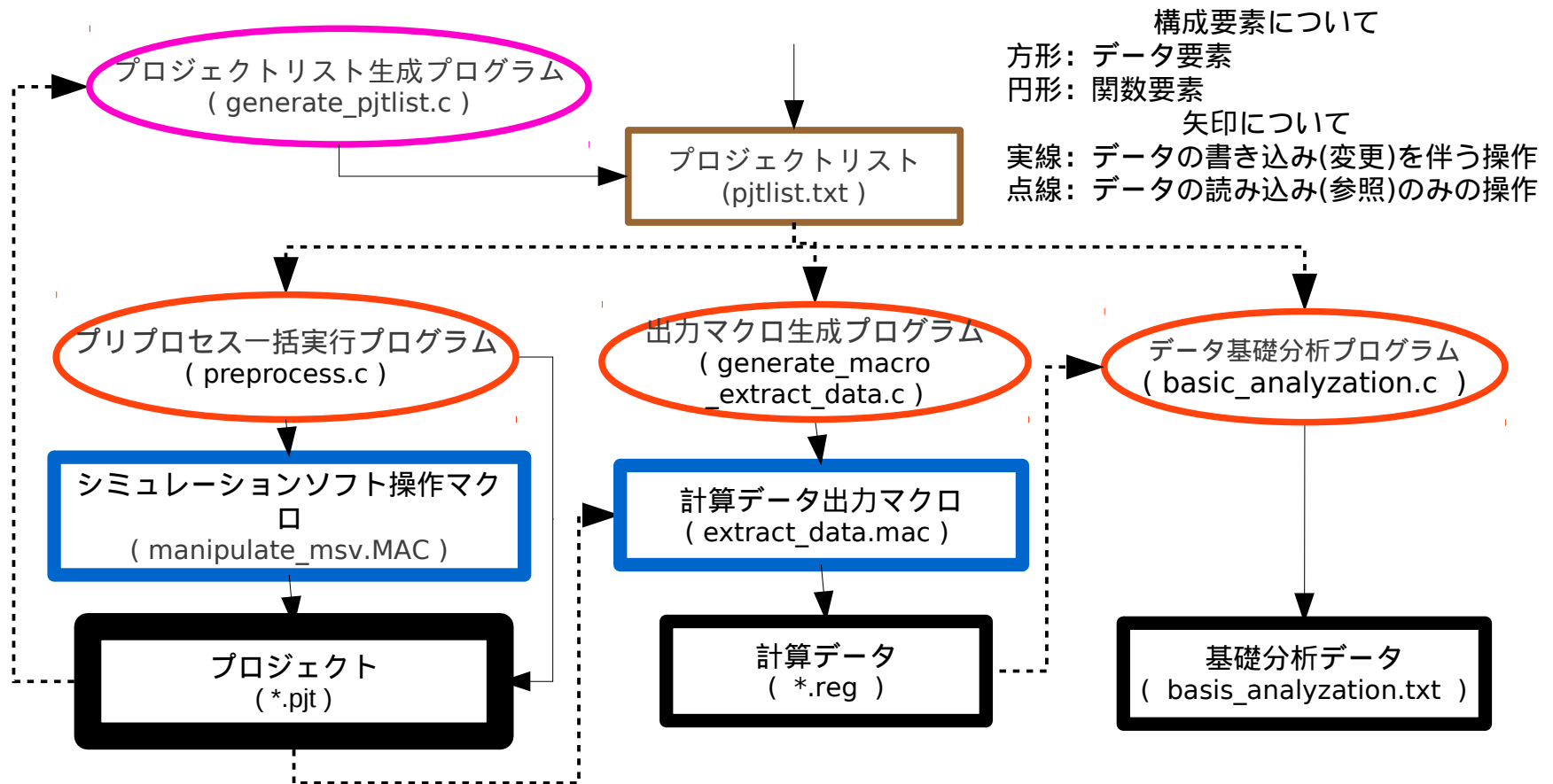
- さらなる加工原理への理解のため、  
また工学的な応用を目標として、  
様々な工具寸法での解析などを自動で行う  
解析システムを構築した。



- ◆計算条件の設定と数値計算、計算データの基礎分析を  
体系的に行える
- ◆手作業では行うことのできない量の膨大な種類の  
工具形状について分析を行うことができる

# ○解析システムの構成

◆前任者の連続計算システム\*を引き継ぎ、  
データベース化や工具形状の自由度追加など改良を加え、  
分析モジュールの追加を行った。

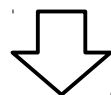


図：構成要素関連図（DFD: Data Flow Diagram）

\* 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)



# ○解析システム



- ◆システムの保守性、計算データの再利用性が高まった。
- ◆幾何的に可能な工具形状を取り尽くすことができるようになった。
- ◆現在、15,000通り以上の工具寸法の組み合わせについて解析を終了している。

表：工具のとりうる寸法

磁石の個数	3	4	5								
磁石の厚み [ mm ]	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
磁石の内半径 [ mm ]	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
磁石の外半径 [ mm ]	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
磁石の間隔 [ mm ]	1	2	3	4	5	6	7				

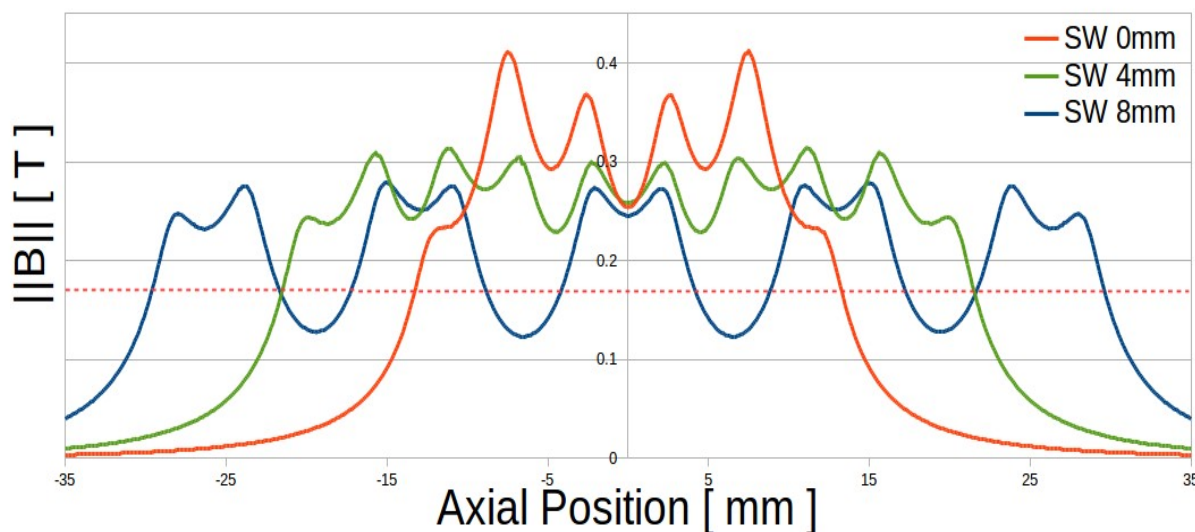
# ○解析システムの応用例

## ● 磁束密度の大きさの分布についての考察

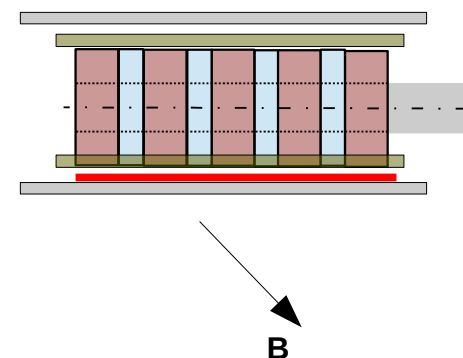
磁場が小さな領域は磁気機能性流体の応用上重要でない。



効率の良い加工が行える工具形状を、絞り込む。



磁気機能性流体:  
磁場のもとで機能性をもつ。

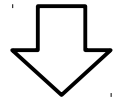


図：磁石の間隔を変化させた際の磁束密度の大きさの分布

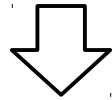
# ○解析システムの応用例

## ● 工具の磁場分布特性の体系的分析

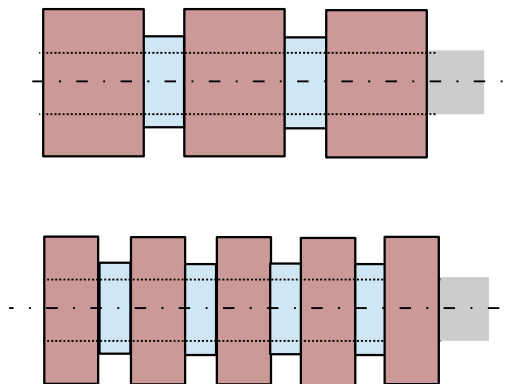
さまざまな寸法の工具の磁場分布について体系的に評価できる。



異なる磁場分布特性をもつ工具での対照実験が可能  
目標となる特性をもつ工具を選択可能



実験工具の設計の際の指針となる。



特性A：ほぼ同じ  
特性B：著しく異なる

# ○まとめ

- 磁束密度の大きさについての測定実験との比較から、解析結果が物理的に妥当であることを確認した。
- 加工実験との比較から、定量的に加工原理への考察を行った
  - ◆磁束密度の大きさは加工量と負の相関関係にあり相関係数は  $-0.6 \sim -0.3$  程度であった
  - ◆磁気浮揚力は加工量との対応がとれていない
- さらなる加工原理への考察と、工学的な応用を目標として、解析システムを構築した
  - ◆効率のよい研磨ができる工具形状をしぼりことができる
  - ◆実験工具の設計の指針を得ることができる

# ○補助資料

## ●工具寸法

	Number of Permanent Magnet [ mm ]	Size of Permanent Magnet [ mm ]	Size of Spacer [ mm ]	Size of Tool Cover [ mm ]	Internal Diameter of Fined-Tube [ mm ]
<i>Type A</i>	5	$\phi 13 \times \phi 6 \times 5$	$\phi 13 \times 2.5$	-	15
<i>Type B</i>	5	$\phi 13 \times \phi 6 \times 5$	$\phi 8 \times 2.5$	-	15
<i>Type C</i>	5	$\phi 13 \times \phi 6 \times 5$	$\phi 8 \times 5$	-	15
<i>Type <math>\alpha</math></i>	5	$\phi 12 \times \phi 6 \times 5$	$\phi 12 \times 2.5$	$\phi 12 \times \phi 14$	15
<i>Type <math>\beta</math></i>	5	$\phi 12 \times \phi 6 \times 3$	$\phi 12 \times 1.5$	$\phi 12 \times \phi 14$	15

# ○補助資料

## ●被加工管内面での磁束密度と加工量の相関係数

Type $\alpha$	n=750rpm	n=1000rpm	n=1250rpm	n=1500rpm
$ B_{\perp} $	-0.65	-0.74	-0.54	-0.8
$ B_{//} $	0.81	0.82	0.62	0.87
$  B  $	-0.34	-0.57	-0.34	-0.63

Type $\beta$	n=750rpm	n=1000rpm	n=1250rpm	n=1500rpm
$ B_{\perp} $	-0.77	-0.38	-0.67	-0.64
$ B_{//} $	0.78	0.42	0.71	0.63
$  B  $	-0.52	-0.3	-0.38	-0.5

# ○補助資料

## ●表. 磁石の磁気特性と設定パラメータ

◆被加工管、スペーサ、回転軸は非磁性体であり、MCFの比透磁率は十分に1に近いとした。

	Relative Permeability $\mu_r$	Magnetic Coercivity $bH_c$ [A/m]	Magnetic Coercivity $iH_c$ [A/m]
Material: N-40*	-	> 859000	> 955000
Model: NdFe30	1.045	828000	-
Model: NdFe35	1.099	890000	-

	Magnetic Retensivity $B_r$ [T]	Maximum Energy Product $BH_{max}$ [J/m <sup>3</sup> ]
Material: N-40*	1.25 ~ 1.32	302000 ~ 334000
Model: NdFe30	1.10	-
Model: NdFe35	1.23	-

\*二六製作所公開データより引用