

磁気記録を利用した 電磁石磁場マッピング手法の開発

武藤 史真, 青木和也, 上利恵三, 秋山裕信, 家入正治,
石田正紀, 伊多波辰徳, 倉崎るり, 里嘉典, 澤田真也, 白壁義久,
高橋俊行, 高橋仁, 田中万博, 豊田晃久, 広瀬恵理奈, 皆川道文,
森野雄平, 山我拓巳, 山野井豊, 渡辺丈晃
(高エネルギー加速器研究機構)

第22回 日本加速器学会年会 2025/08/08

本研究は、第一三共「はばたく次世代」応援寄付プログラムの支援を受けています。

磁気記録を利用した 電磁石磁場マッピング手法の開発

1. 加速器電磁石の磁場測定はとても大変
2. より簡単な方法として磁気記録を使えないか？
3. 磁気記録を使った磁場の測定原理
4. 現状の測定精度と今後の課題

研究背景・課題

研究背景

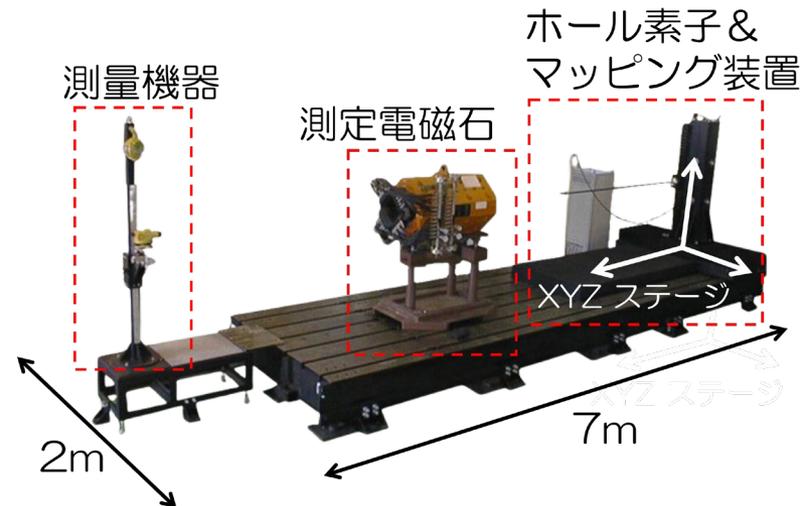
- 大型の電磁石（特にスペクトロメータ）には複雑な形状のものも多く、磁場測定には大変な時間、労力が必要である。
- 磁場マッピングを行うには、ホール素子を走査できるステージが必要になるが、電磁石ごとに専用のマッピング装置をつくるのは現実的ではない。
※しかもアーク形状電磁石の場合には2方向からホール素子を挿入せねばならない

課題

- 解体や移動が難しい大型磁石や、放射化電磁石は磁場マッピングできない。
- より手軽、低コストな磁場マッピング手法が求められている。



J-PARCで運用されているスペクトロメータ



KEKに実在する大型電磁石用 磁場測定器

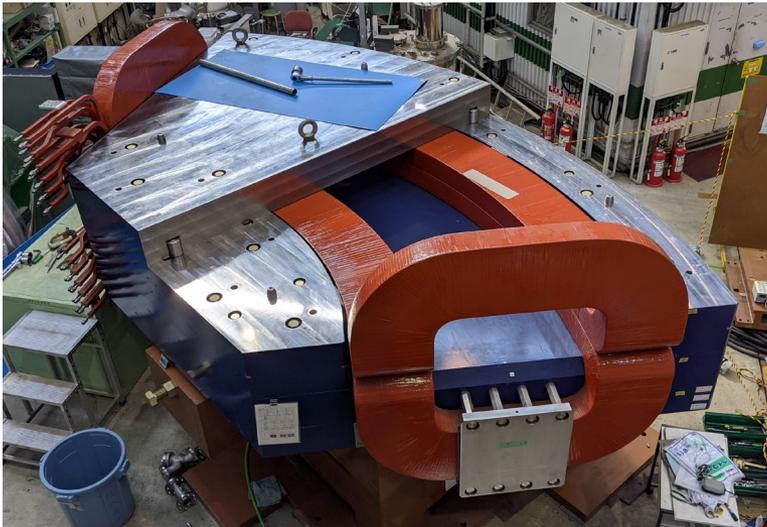
研究背景・課題

研究背景

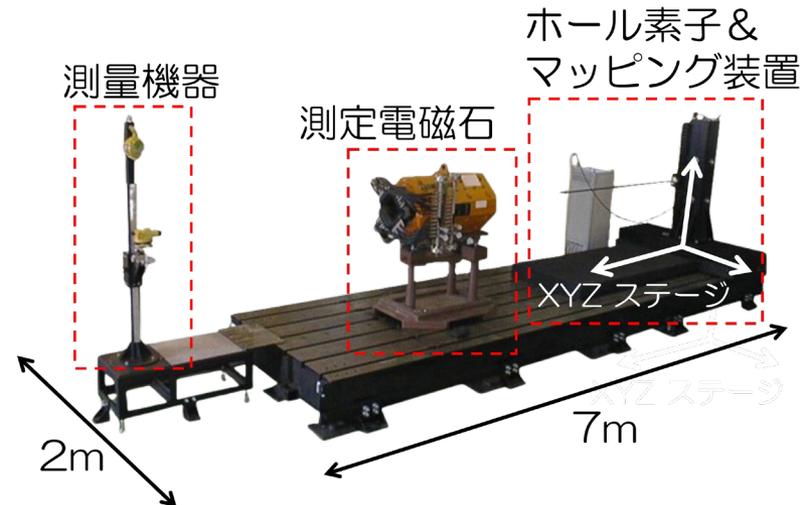
- 大型の電磁石（特にスペクトロメータ）には複雑な形状のものも多く、磁場測定には大変な時間、労力が必要である。
- 磁場マッピングを行うには、ホール素子を走査できるステージが必要になるが、電磁石ごとに専用のマッピング装置をつくるのは現実的ではない。
※しかもアーク形状電磁石の場合には2方向からホール素子を挿入せねばならない

課題

- 解体や移動が難しい大型磁石や、放射化電磁石は磁場マッピングできない。
- より手軽、低コストな磁場マッピング手法が求められている。

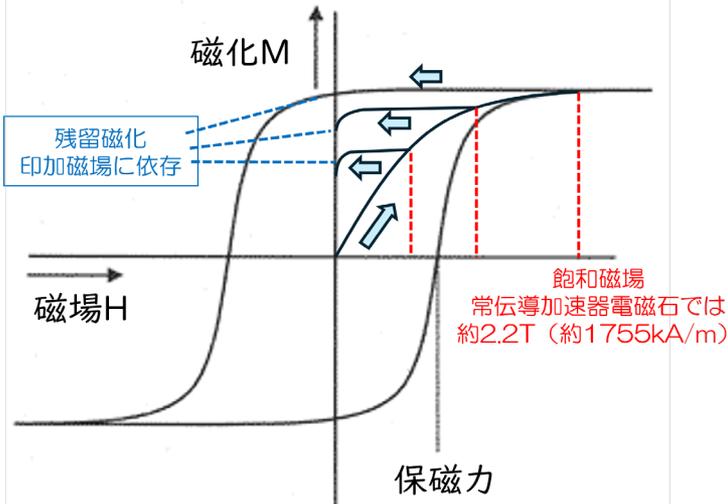
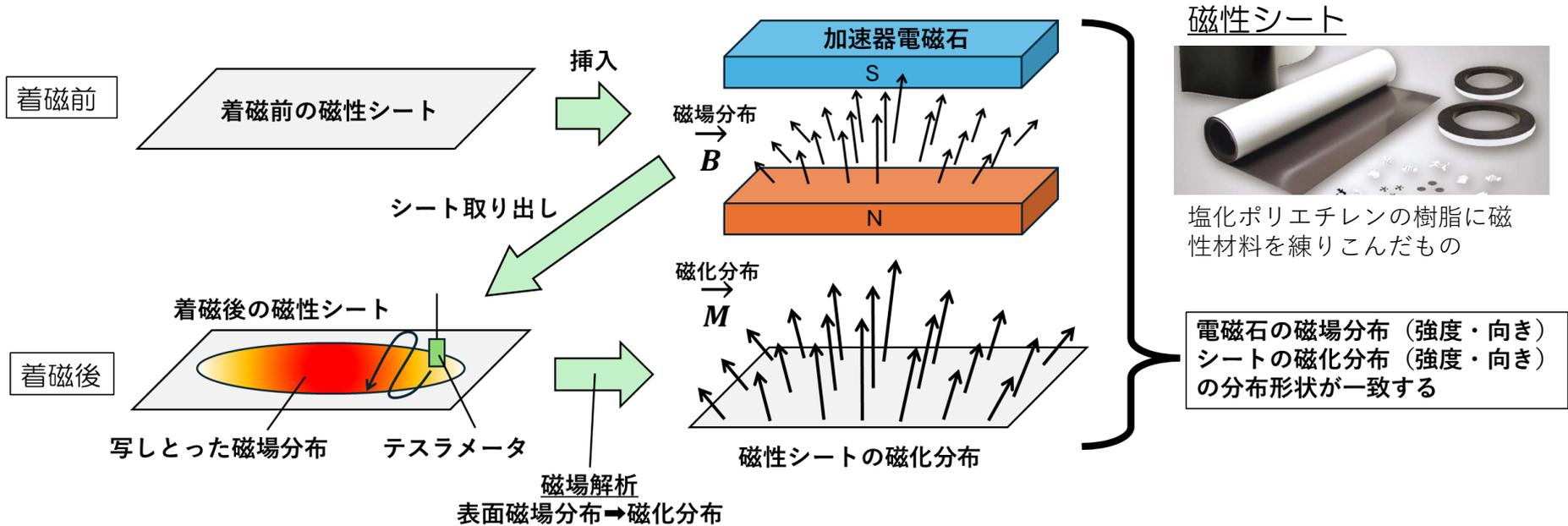


アーク形状を持つ大型スペクトロメータ



KEKに実在する大型電磁石用 磁場測定器

磁性シートによる磁場測定の概要



- 残留磁化は印加磁場に比例するので、
電磁石の磁場分布を磁性シートの磁化分布として写し取ることが出来る。

磁性シートに求められる要件

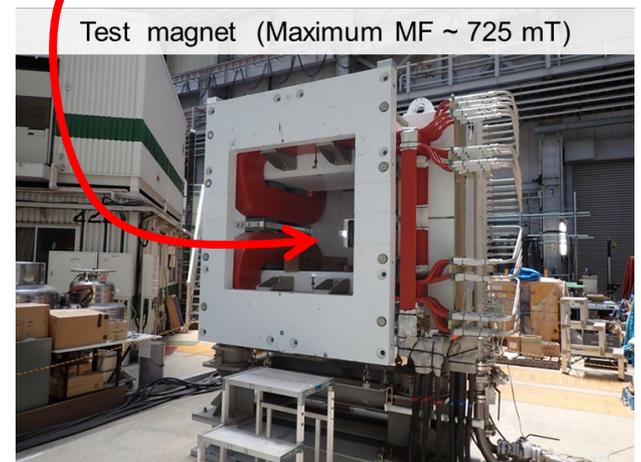
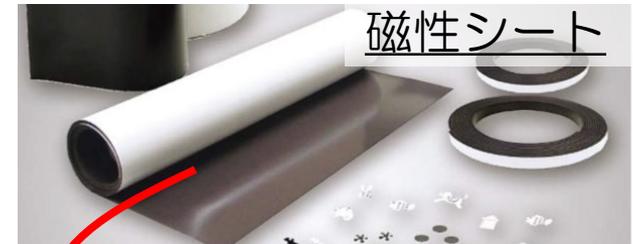
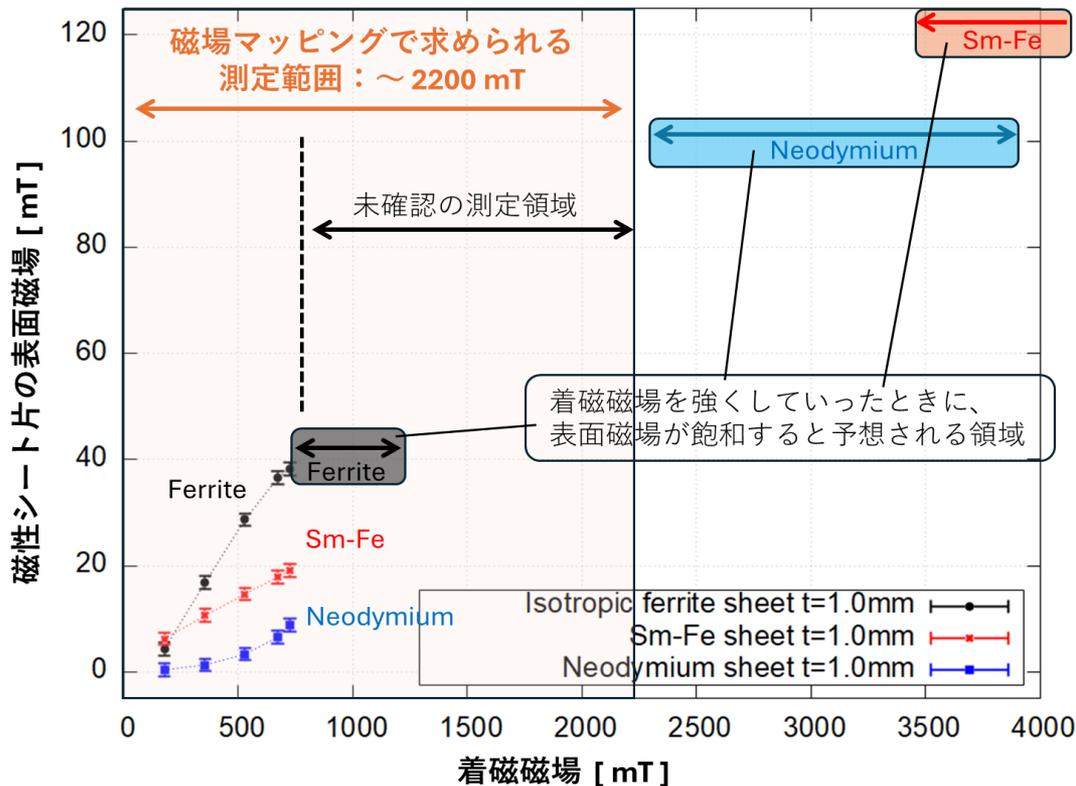
- 測定レンジ：～2.2 T \rightarrow 最大磁界：1755 kA/m
- 磁性体の保磁力 iH_c は最大磁界の $1/5 \sim 1/3$
 \rightarrow 高い保磁力：350 kA/m以上のシートが必要
- **なるべく薄く (1mmくらい)、広い (数m \times 数m) 形状折り曲げ可能だとなお良い**

磁性シートの選定

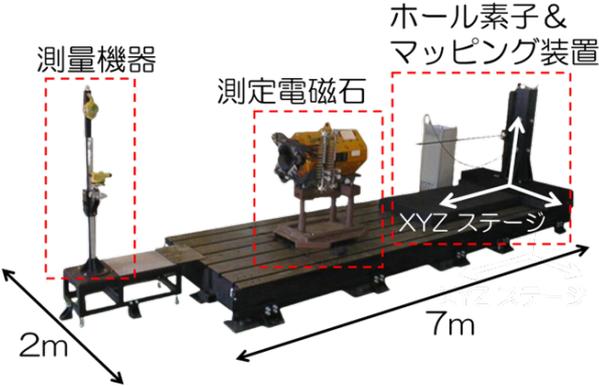
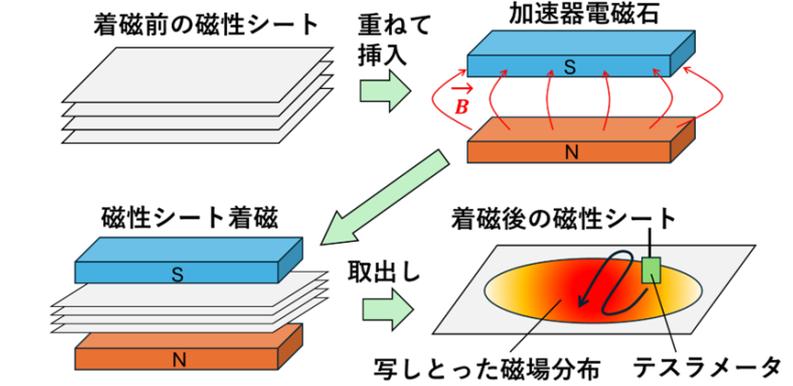
- メーカーカタログ^[1]を参考に3種類の磁性シートを用意した。
- 低磁場領域ではフェライト
高磁場領域ではサマテツ、ネオジムを有力な候補として選定した。
- 磁性材料の一様性確認も実施済み。

磁性材料 シート厚: 1 mm	飽和磁場 [T]	保磁力 iHc[kA/m]	表面磁場 [mT]
選定基準	> 2.2	> 350	大きいほど◎
フェライト(等方性)	0.7~1.2	190	44
ネオジム	2.3~3.9	620	100
サマリウム鉄	3.4~5.8	920	120

[1] 株式会社マグナ 製品カタログVol.30 (2024.6改訂)

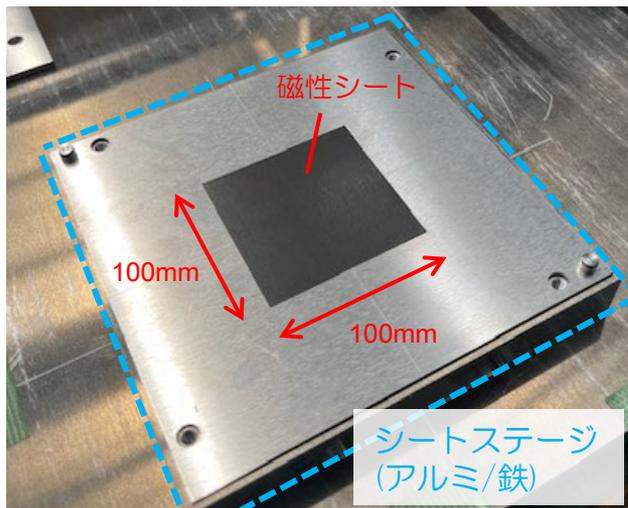
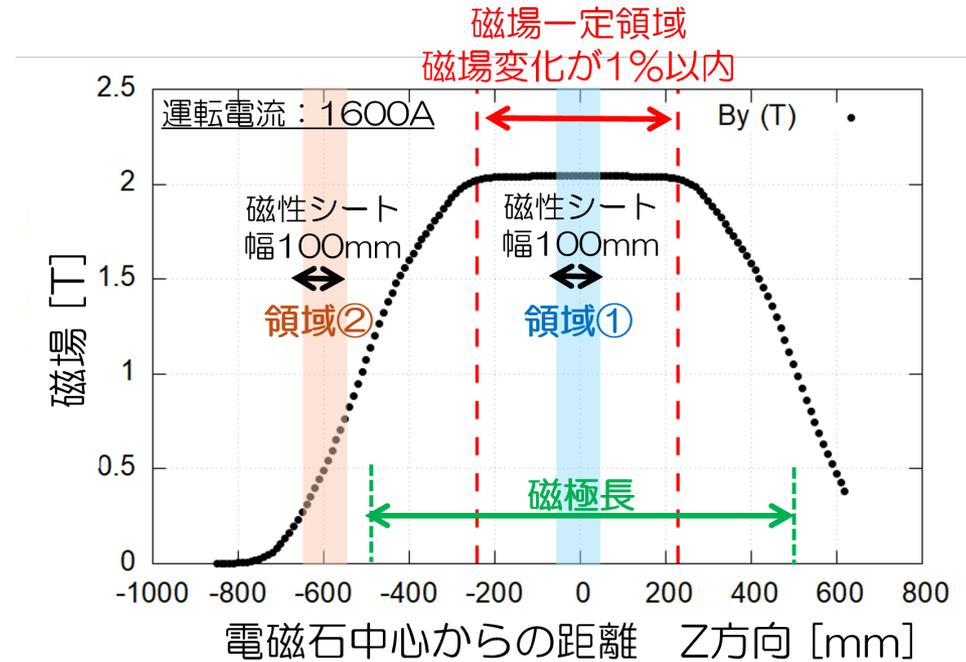
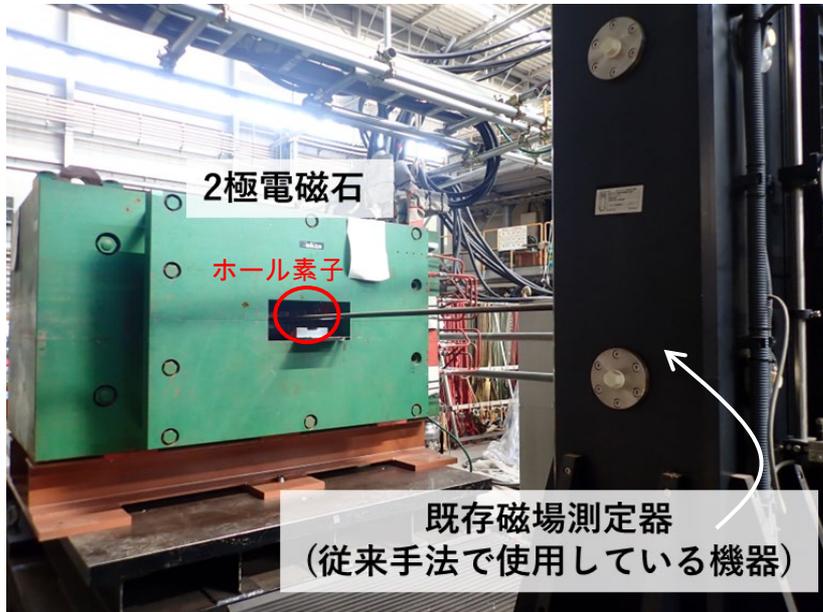


従来手法との比較

	①ホール素子による磁場測定 (従来の測定方式)	②磁性シートによる磁場測定 (本研究で新たに開発)
概要	 <p>ホール素子 & マッピング装置</p> <p>測定電磁石</p> <p>XYZ ステージ</p> <p>2m</p> <p>7m</p> <p>KEKに実在する磁場測定器を例として挙げる。電磁石をアライメントする定盤が必要であり大掛かりな測定が必要</p>	 <p>着磁前の磁性シート</p> <p>重ねて挿入</p> <p>加速器電磁石</p> <p>S</p> <p>N</p> <p>磁性シート着磁</p> <p>取出し</p> <p>着磁後の磁性シート</p> <p>写しとった磁場分布</p> <p>テスラメータ</p> <p>磁性シートを重ねて挿入し磁場を記録することで、3次元磁場マッピングが可能。シートは固定したままでよいので大掛かりな測定装置は必要ない</p>
3次元磁場測定に要する時間	数週間～数ヶ月 × 磁石の解体・再設置に要する時間がほとんどを占める	◎ 3日～1週間程度で測定可能と見込む
放射化電磁石の測定	△ スポット測定は可能	◎ 3次元磁場マッピング可能
1回の測定コスト	× 数百万円 (主に人員コスト)	◎ ～20万円 (磁性シート購入費用)
測定精度	◎ 10^{-3}	— 不明(本研究で確認する)

電磁石での磁性シート着磁試験

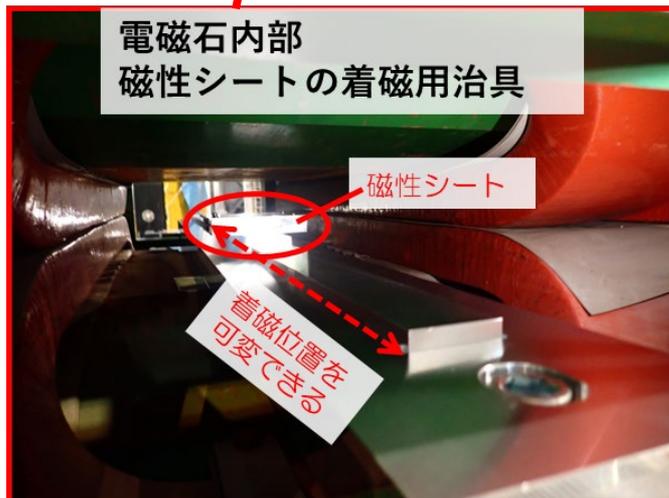
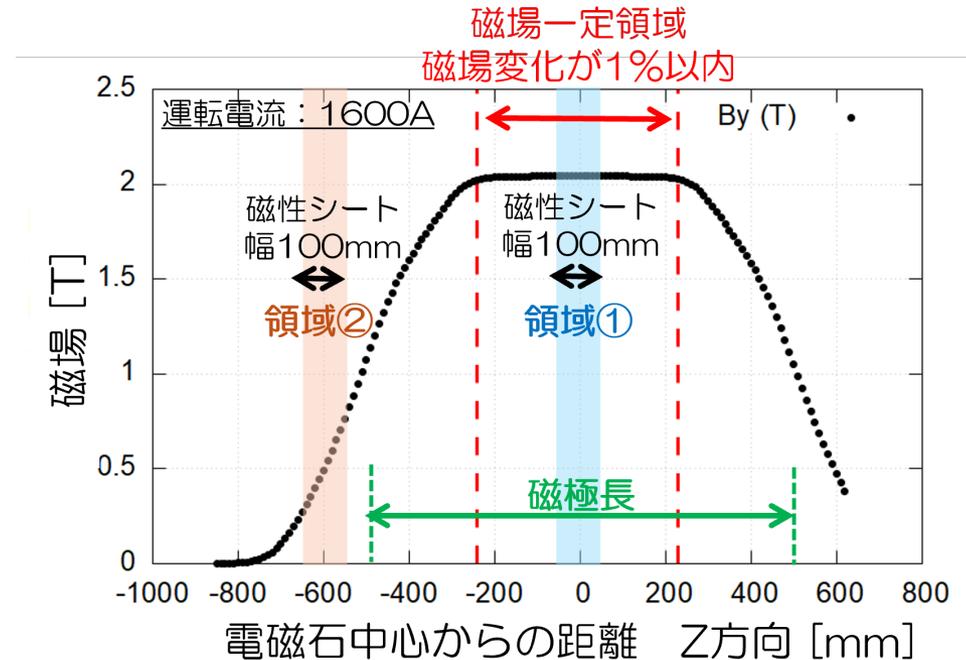
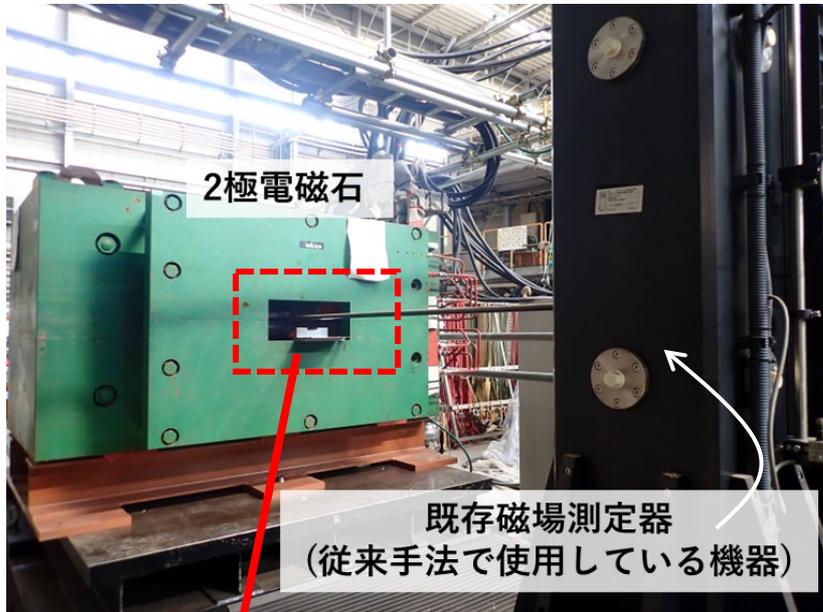
- 磁性シートの着磁に使用する電磁石の磁場分布をまず従来手法で確認した。



- 電磁石中心部 (領域①) は磁場が一定であるため、磁性シートを一様に着磁できる。
→ 着磁強度と磁化強度の対応を調べるのに向いている領域
- 電磁石端部 (領域②) はシート幅内で大きく磁場が変化する領域。
→ 一枚のシートで偏りのある磁場分布から磁化分布を推定できるか確認する。

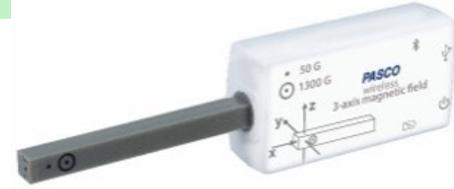
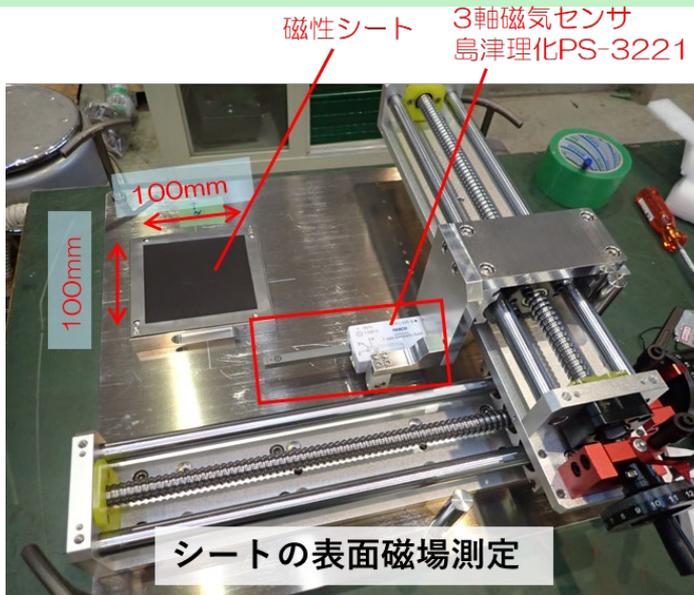
電磁石での磁性シート着磁試験

- 磁性シートの着磁に使用する電磁石の磁場分布をまず従来手法で確認した。



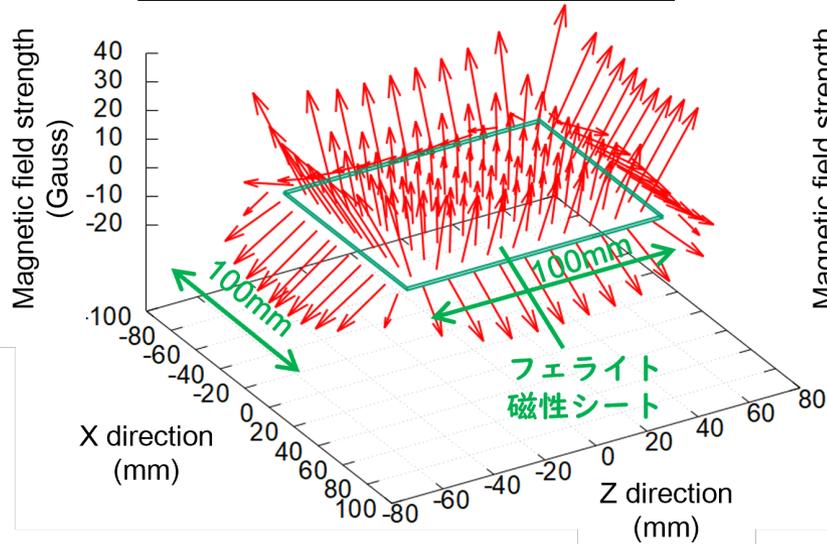
- 電磁石中心部（領域①）は磁場が一定であるため、磁性シートを一様に着磁できる。
→着磁強度と磁化強度の対応を調べるのに向いている領域
- 電磁石端部（領域②）はシート幅内で大きく磁場が変化する領域。
→一枚のシートで偏りのある磁場分布から磁化分布を推定できるか確認する。

磁性シートの表面磁場測定

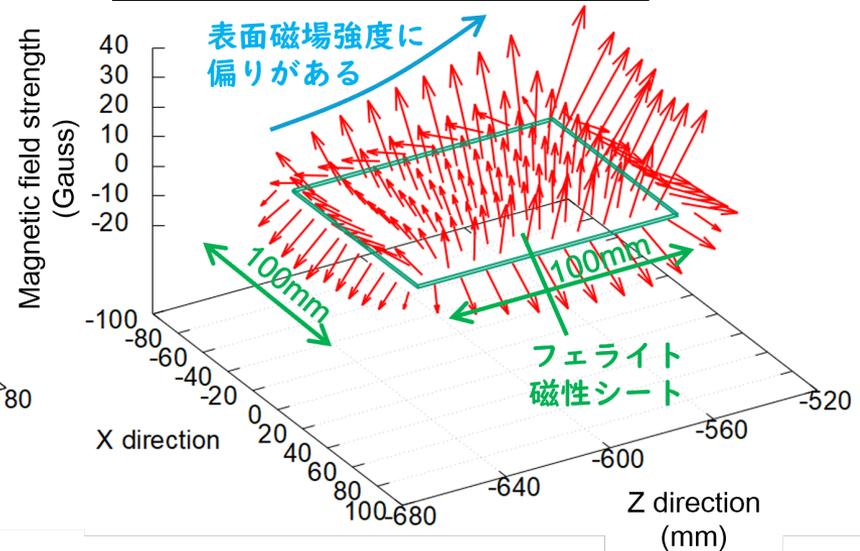


測定範囲	0~50[G] 0~1300[G] (2レンジ)
分解能	0.01[G](50Gレンジのとき) 1[G](1300Gレンジのとき)
最大サンプリングレート	100 Hz
対応ソフトウェア	SPARKvue および Capstone
データログの使用	可能
接続性	Bluetooth 5.2 または USB 2.0
本体重さ	約56g

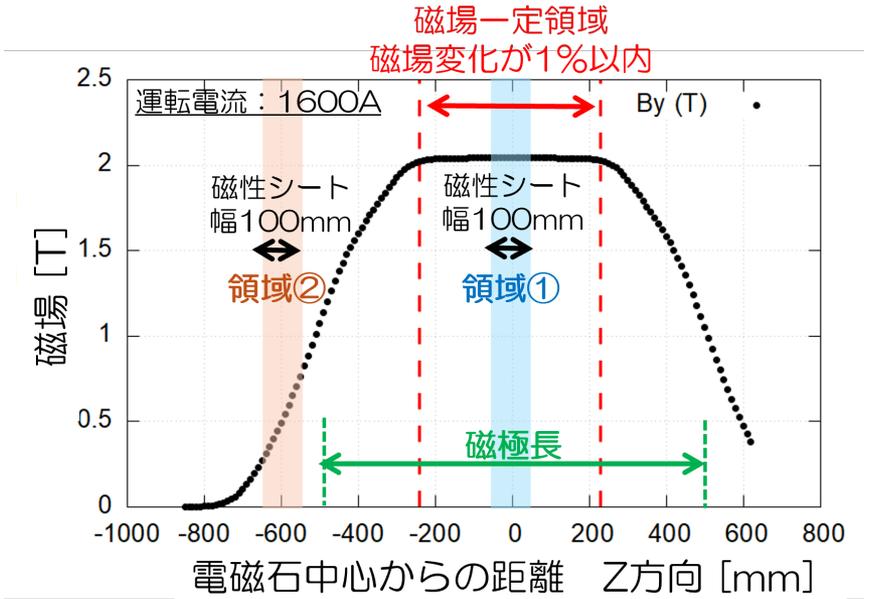
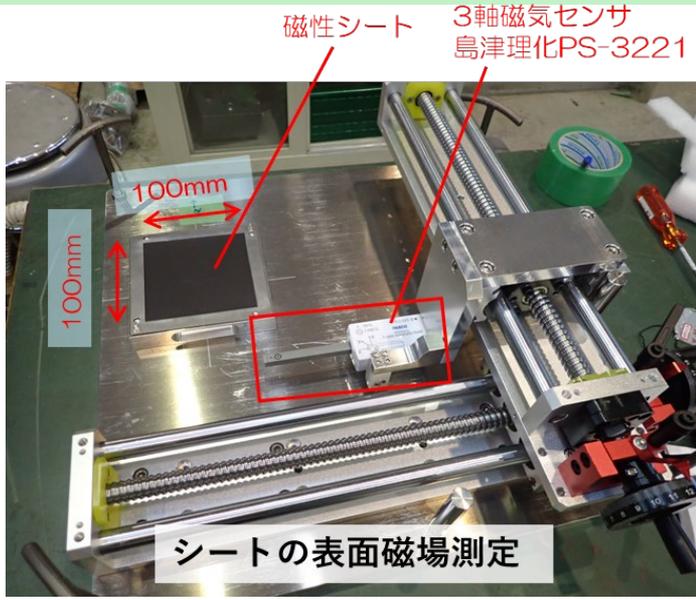
領域①で着磁した磁性シートの表面磁場



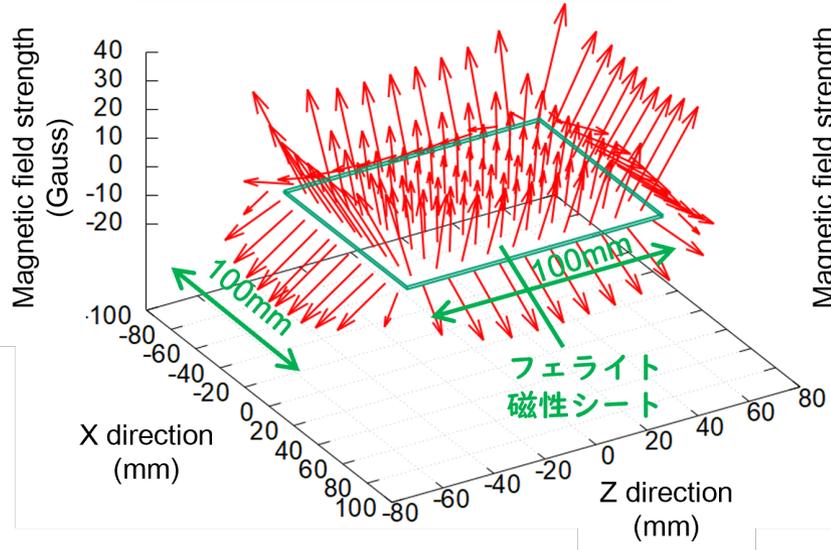
領域②で着磁した磁性シートの表面磁場



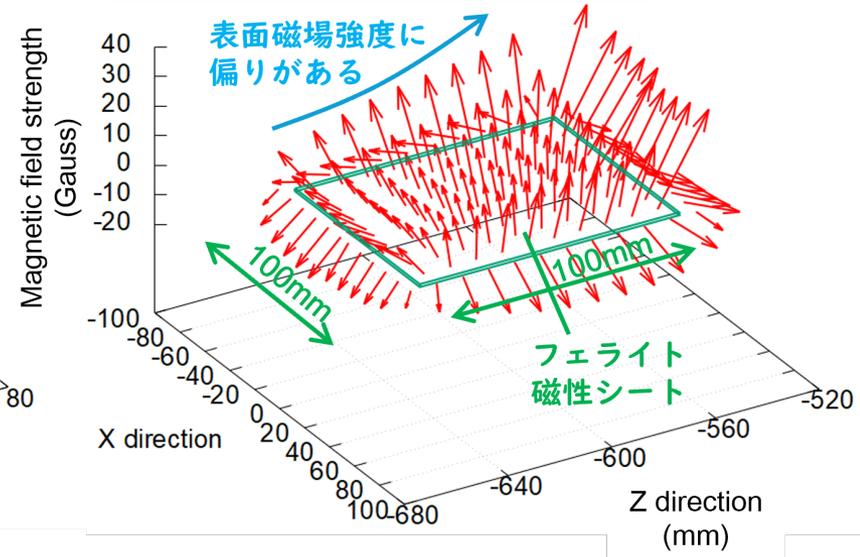
磁性シートの表面磁場測定



領域①で着磁した磁性シートの表面磁場



領域②で着磁した磁性シートの表面磁場



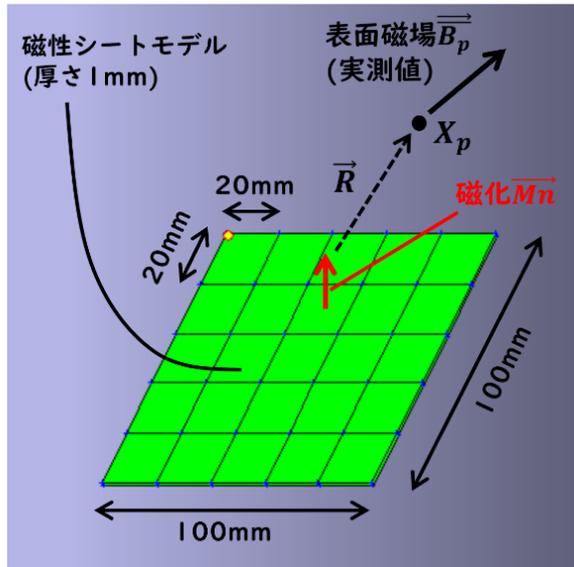
表面磁場情報をもとにした磁化分布解析

順問題：磁石磁化を設定 → 周囲の磁場分布を計算

逆問題：磁石磁化を計算 ← 周囲の磁場分布を設定

使用ソフトウェア

株式会社フォトン PHOTO-Series MAGTZ



- 磁性体モデルを要素分割し、要素内で磁化一定とする。
- 表面磁場 \vec{B}_p は各要素磁化からの磁場を合算したもの。

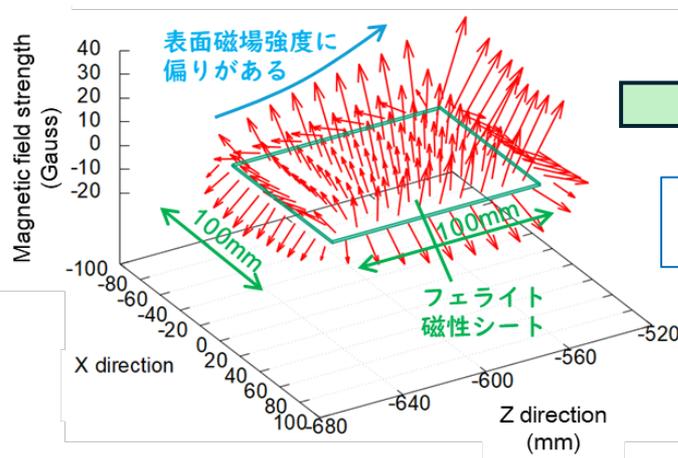
$$\vec{B}_p(\vec{X}_p) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\text{rot } \vec{M}_n(\vec{X}_p) \times \vec{R}}{|\vec{R}|^3} dV$$

- 表面磁場の測定点pごとに、計算値と表面磁場を比較し、下記の残差二乗和が最小となるように \vec{M}_n の組合せを求める。

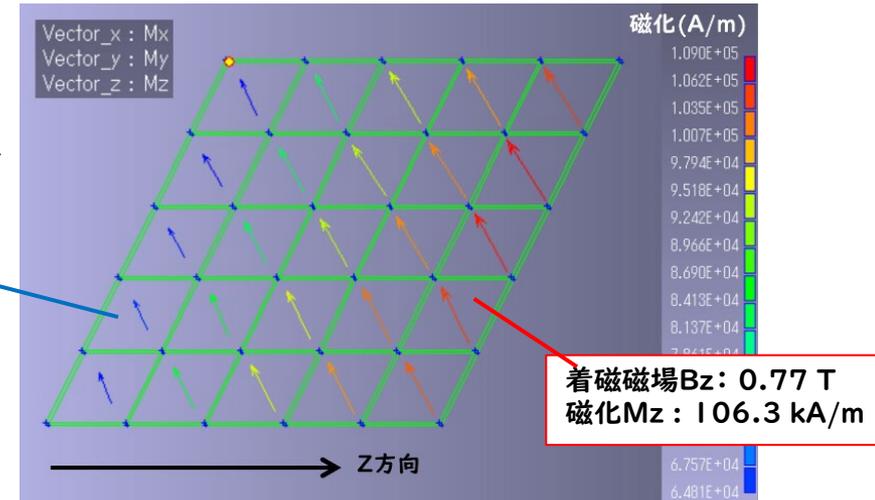
$$\Psi = \sum_{pi} \frac{1}{2} (B_{pi} - \bar{B}_{pi})^2$$

計算値
表面磁場実測値

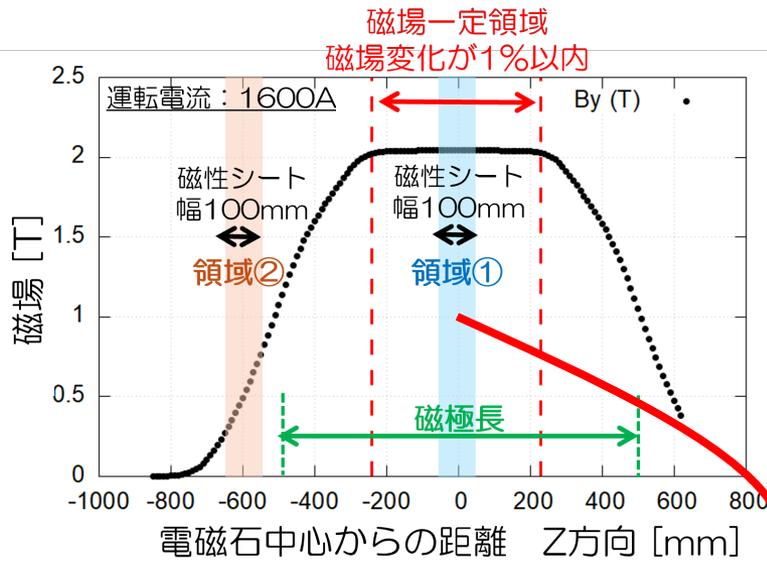
※分割数を多くしすぎると解が安定しない



着磁磁場 B_z : 0.35 T
磁化 M_z : 64.3 kA/m



磁性シートの磁化-磁場校正曲線



(1) 磁場vs磁化の校正曲線を作成する

領域①で磁性シートを均一に着磁



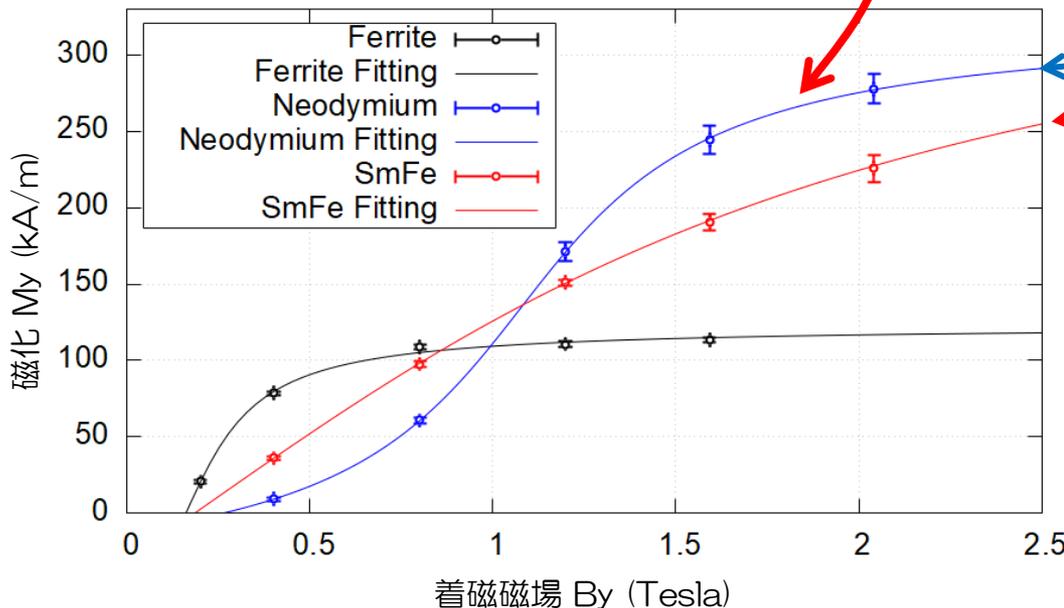
この結果をもとに校正曲線を作成
磁化→磁場に変換できるようにする

(2) 実際に磁化→着磁磁場に変換、精度を求める

領域②で磁性シートを不均一に着磁

→シート要素ごとに磁化が異なる。

→各磁化量から校正曲線に基づいて着磁量を
計算し、真の着磁量とのズレを確認する。



ネオジウム、SmFeは飽和点が高い
強磁場でも適用可能

校正曲線

$$M(x) = A \tan^{-1}(Bx + C) + D$$

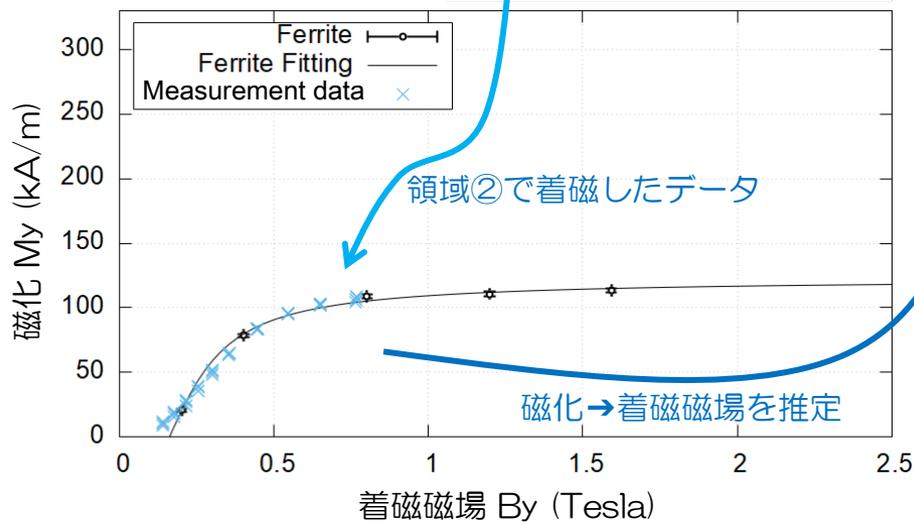
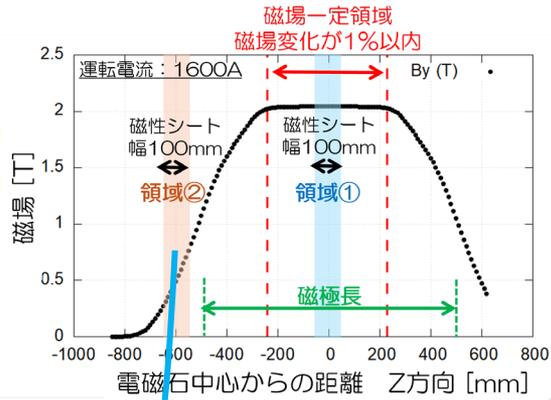
フィッティングパラメータ

A: 飽和磁化量

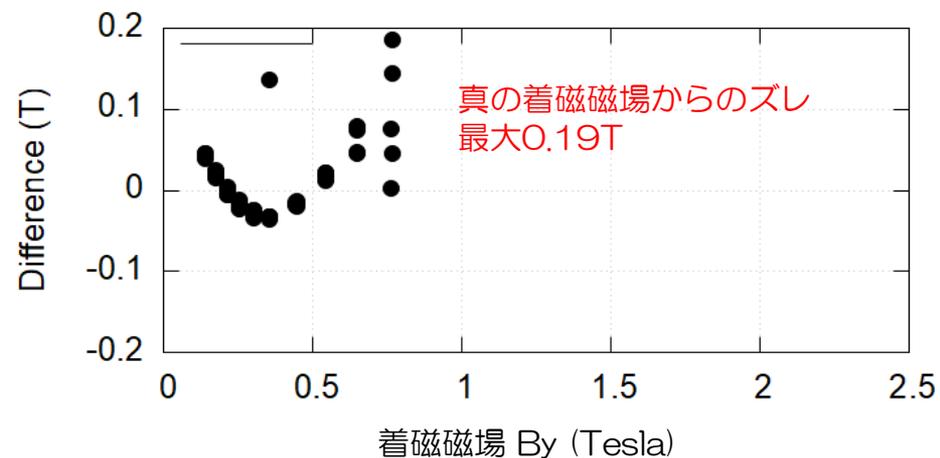
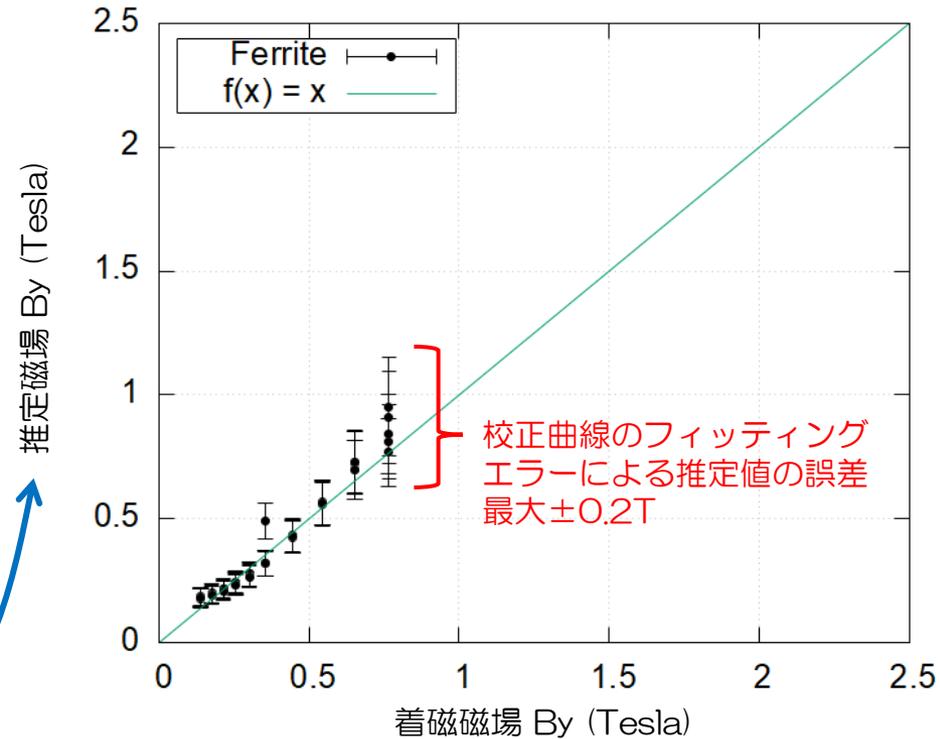
B: 磁化遷移パラメータ

C, D: 残留磁化補正

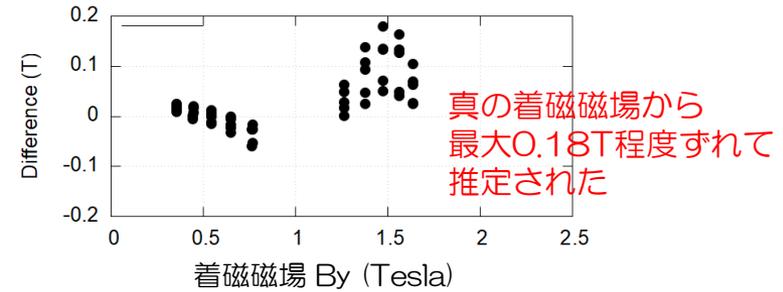
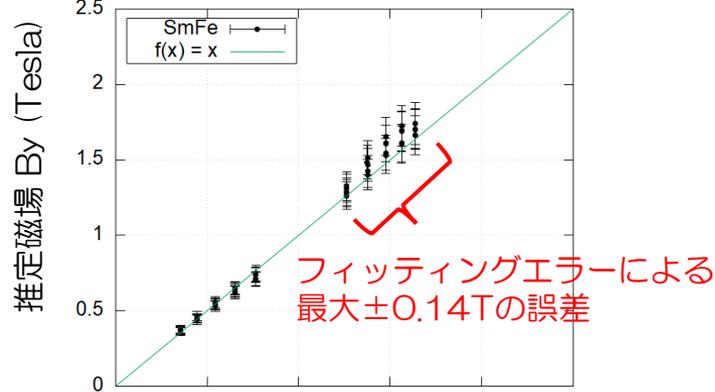
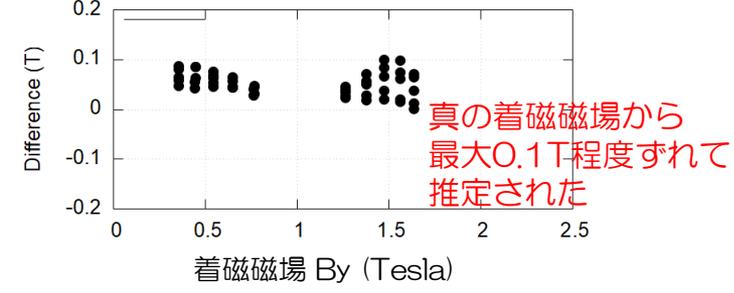
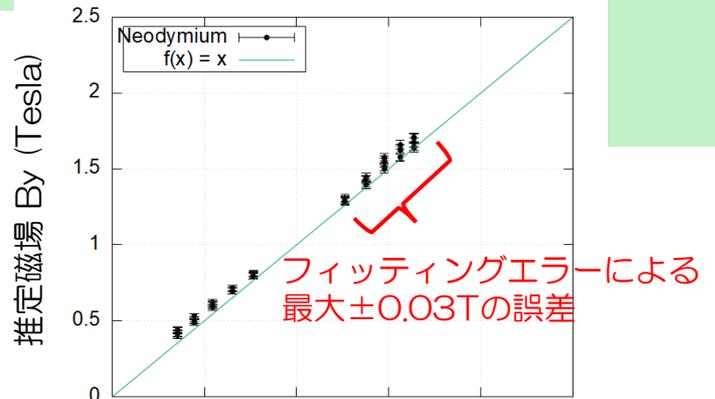
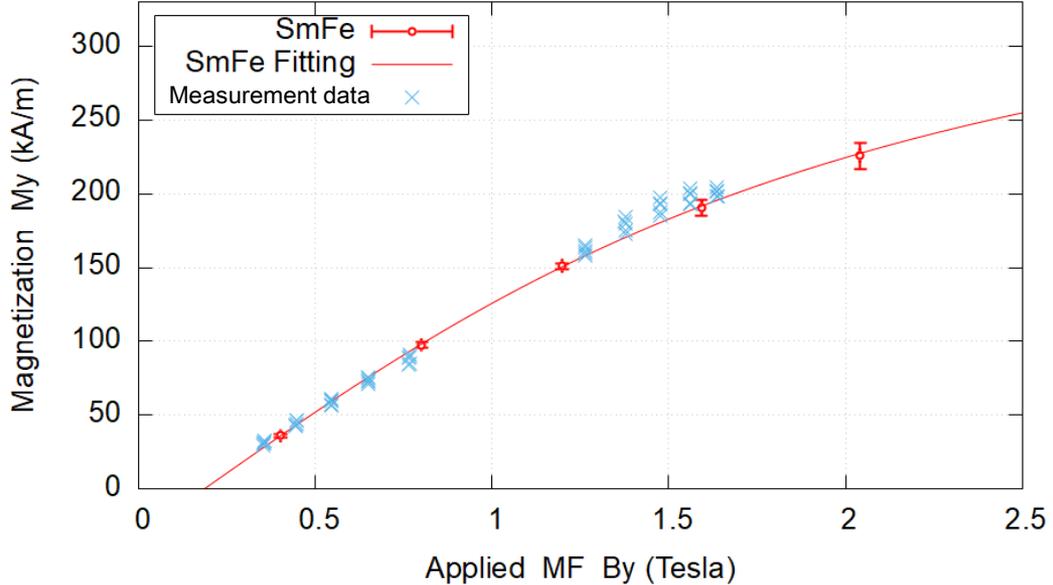
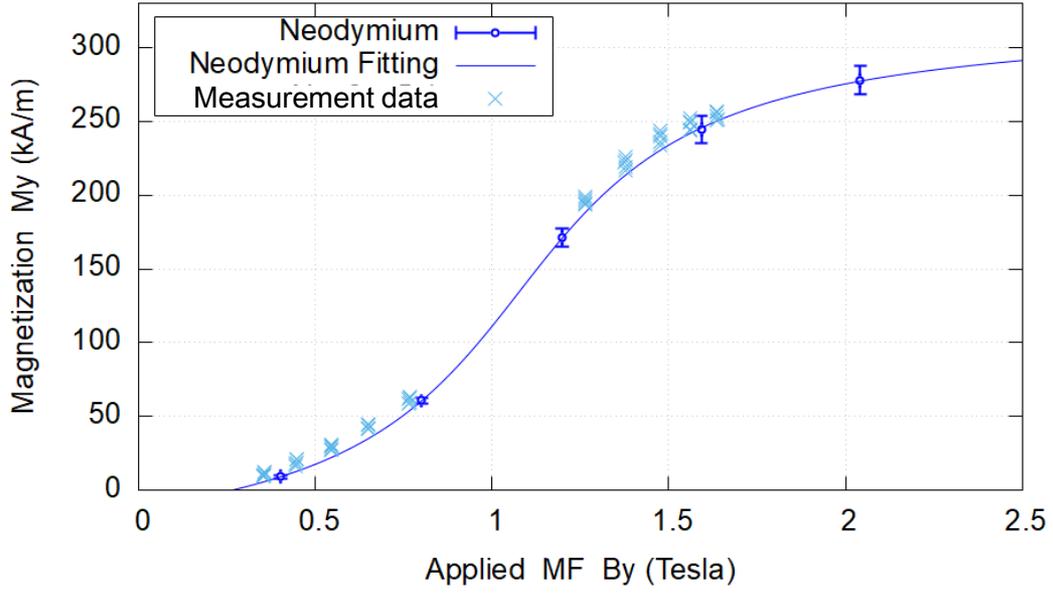
磁化分布推定結果 (フェライト)



- フィッティング誤差：最大±0.2T
→ 今後キャリブレーションデータを増やすことで改善可能
- 推定磁場のズレ：最大0.19T
→ 表面磁場の測定点数を増やす/精度を上げる
測定時の気温管理等で改善可能と考える。



磁化分布推定結果



まとめ・今後の計画

- ・複雑形状の電磁石、放射化電磁石をより手軽に磁場マッピングできる手法として、磁性シートの磁気記録を使った測定手法を検証している。
- ・この手法に適した3種類の磁性シートを選定し、H-M曲線を測定した。ネオジム、SmFeは2.2T以上の強磁場でも使用可能だと確認できた。
- ・校正点不足ではあるが、磁性材料ごとに、ホール素子による磁場測定値と、磁性シートの磁化強度から推定した磁場値を比較し、その推定精度を確認した。

今後の課題

・フィッティングエラーの改善

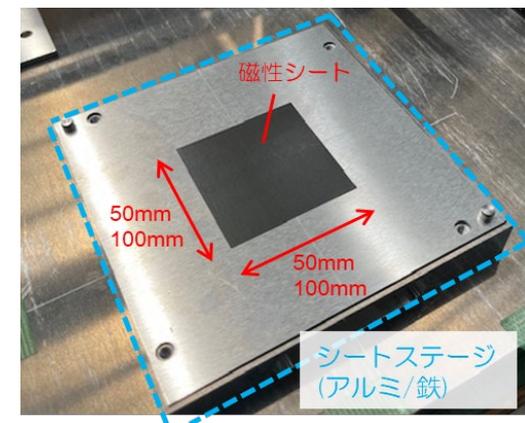
着磁磁場vs磁化強度の対応関係のデータ量不足により、フィッティングエラーが大きくなっている。磁場強度の傾向を見る程度にしか使えない。

→校正点を増やしてエラーの小さい対応表を作る。

・表面磁場測定精度の改善

①測定時の気温管理、測定点数/位置の管理を検討する。

②測定ステージをアルミから鉄に変更することで、表面磁場強度を強くするバックヨーク法を検討している。
→低磁場領域での測定精度改善を期待している。



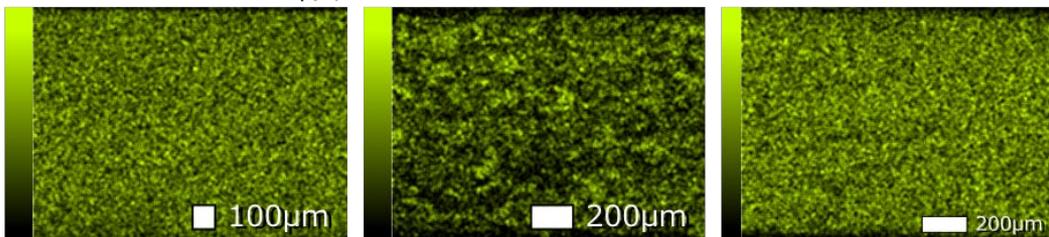
Back up

磁性シートの均一性確認

- 磁性シート断面をSEM/EDSを用いて元素分析、磁性材料存在率の分布を確認した。

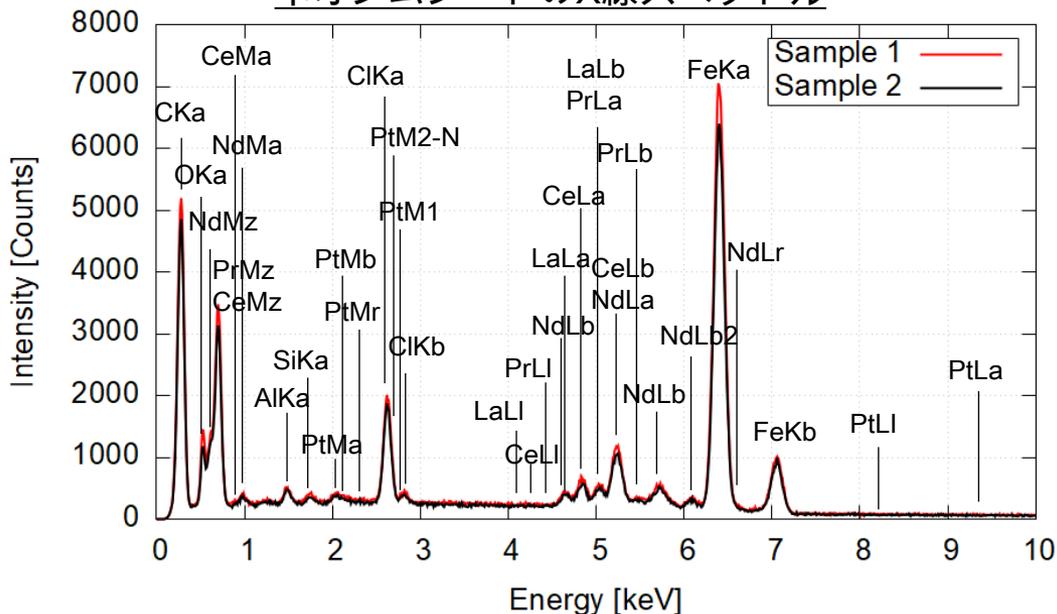
磁性材料に含まれるFeの存在率

フェライトシート断面 ネオジムシート断面 サマリウム鉄シート断面



- 黄色が濃いほどFe元素の存在率が高いことを示す。
- シートによって均一性は異なるが 1mm^2 程度のスケールでは十分均一であることを確認した。

ネオジムシートのX線スペクトル



Sample 1 半定量値 成分表

元素	ライン	Mass%	Atom%
C	K	43.29±0.20	75.86±0.34
O	K	5.62±0.11	7.39±0.14
Al	K	0.36±0.02	0.28±0.02
Si	K	0.17±0.01	0.13±0.01
Cl	K	2.28±0.03	1.36±0.02
Fe	K	34.34±0.22	12.94±0.08
La	L	1.24±0.05	0.19±0.01
Ce	L	3.39±0.08	0.51±0.01
Pr	L	2.03±0.07	0.30±0.01
Nd	L	6.82±0.12	1.00±0.02
Pt	M	0.47±0.04	0.05±0.00
合計		100.00	100.00
Map_007_wholespectrum			フィッティング係数 0.0103

Sample 2 半定量値 成分表

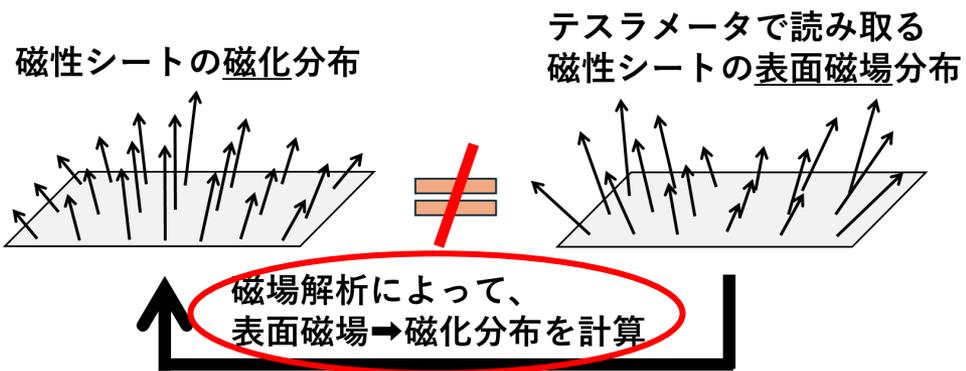
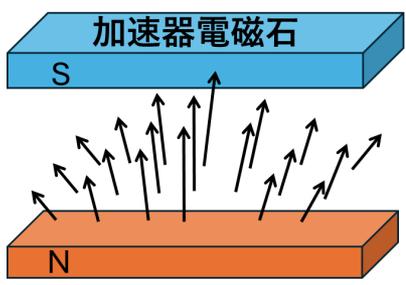
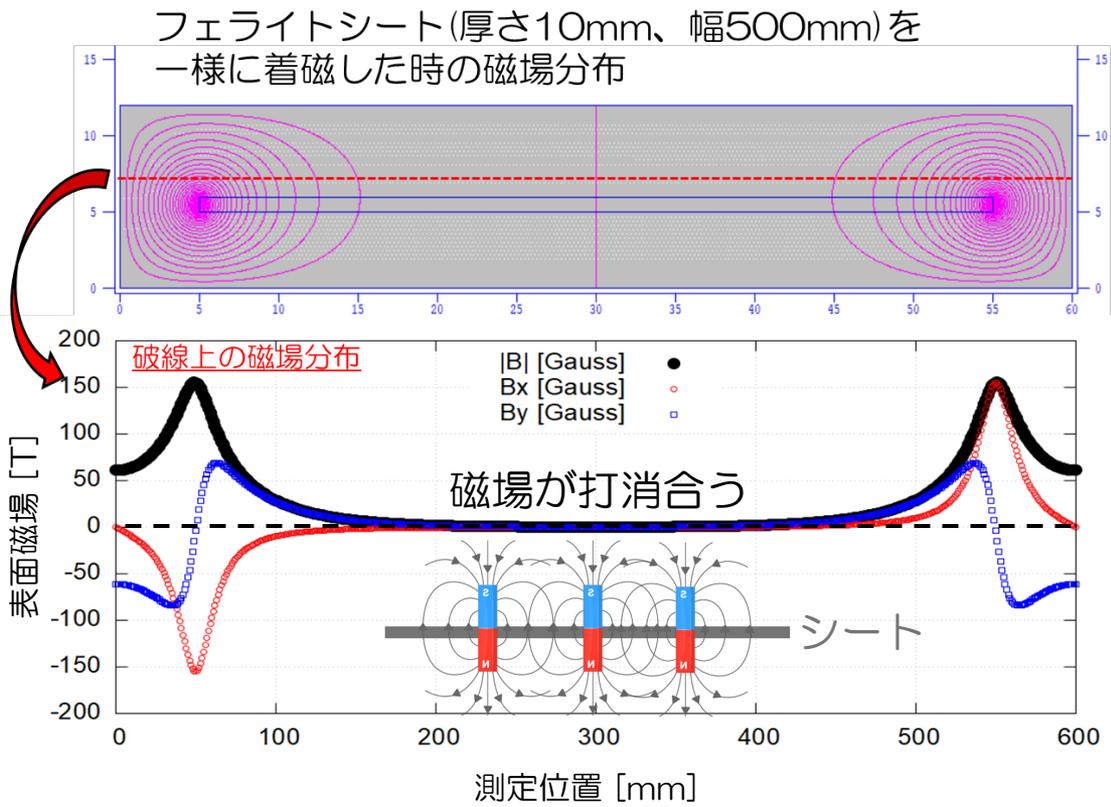
元素	ライン	Mass%	Atom%
C	K	44.61±0.21	77.07±0.36
O	K	5.03±0.11	6.52±0.14
Al	K	0.36±0.02	0.28±0.02
Si	K	0.15±0.01	0.11±0.01
Cl	K	2.32±0.04	1.36±0.02
Fe	K	34.30±0.23	12.75±0.09
La	L	1.31±0.06	0.20±0.01
Ce	L	3.06±0.08	0.45±0.01
Pr	L	1.77±0.07	0.26±0.01
Nd	L	6.66±0.12	0.96±0.02
Pt	M	0.43±0.04	0.05±0.00
合計		100.00	100.00
Map_005_wholespectrum			フィッティング係数 0.0106

同一試料内において半定量値の高い再現性が確認されており、Fe以外も十分均一と推測できる。

磁性シートを使った磁場測定の記事

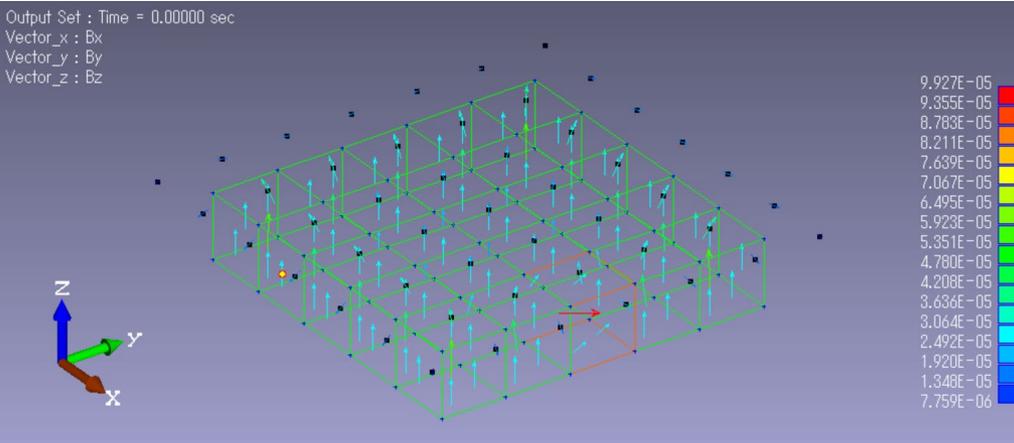
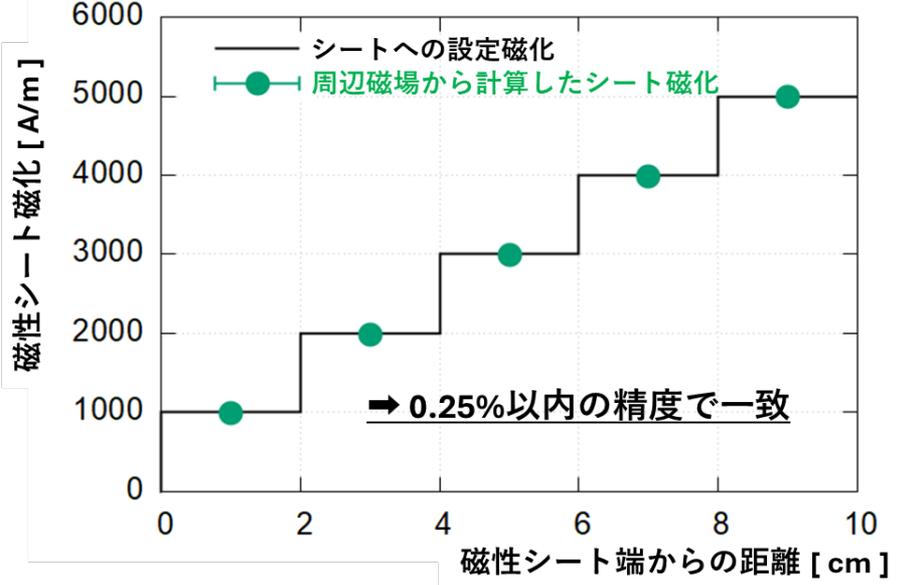
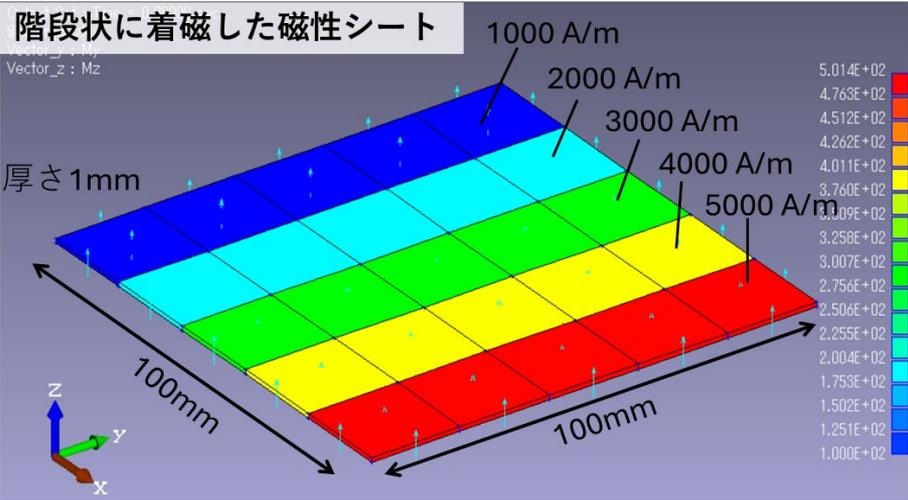
課題：表面磁場の空洞化現象

- シート中央部では磁場の打ち消しあいが発生
- 一様に着磁しているのにシート中央では表面磁場がほとんど見えなくなる
- 表面磁場から電磁石磁場を直接読み取することは不可能
- 表面磁場分布 → 磁化分布の解析が必要になる。



表面磁場分布→磁化分布への変換

- 磁化分布に偏りがあっても推定できるのか？
→階段状に着磁した磁性シートをモデリングし、磁化分布を推定してみた。



- シートの一部だけ着磁方向を変えた場合でも問題なく推定できた。
- この手法を使えば、シートの表面磁場から電磁石のBx、By、Bzをそれぞれ推定できる。