

全身MRI用磁石技術を応用した ビーム捕捉用超伝導磁石の精密磁場調整

杉田 萌、飯沼 裕美、大金 千織(茨城大学)
佐々木 憲一、阿部 充志、三部 勉、荻津 透、下村 浩一郎(KEK)

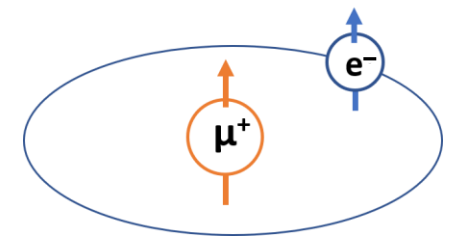
背景 - MuSEUM実験

J-PARCで行われている、基底状態における
ミュオニウム超微細構造(MuHFS)の精密測定実験。

先行実験では、超微細分裂 ν_{HFS} を12 ppbの精度で測定し
その結果から、ミュオンと陽子の磁気モーメント比 $\frac{\mu_{\mu}}{\mu_p}$ は120 ppbで決定した。

MuSEUM実験では、先行実験の10倍以上の精度での超微細分裂と
ミュオンと陽子の磁気モーメント比の測定を目指しており、
現在は高磁場(1.7 T)中実験のための全身MRI用超電導磁石を用いた装置開発を行っている。

ミュオニウム(Mu)



正電荷ミュオンと
電子の束縛状態

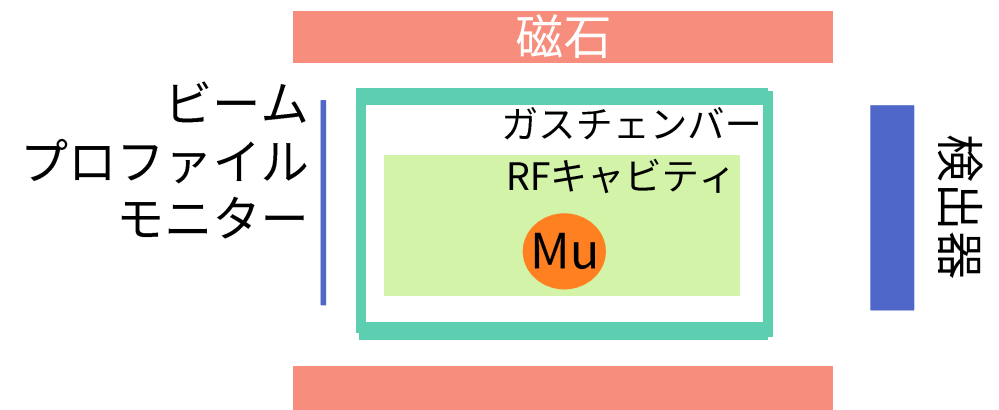
MuSEUM実験で要求される磁場

磁場強度： 1.7 T

ミュオン補足領域：
短径20 cm、長径30 cmの回転楕円体

均一度： 0.2 ppm (peak to peak) 未満

目的：高均一度かつ時間的に安定した磁場の調整

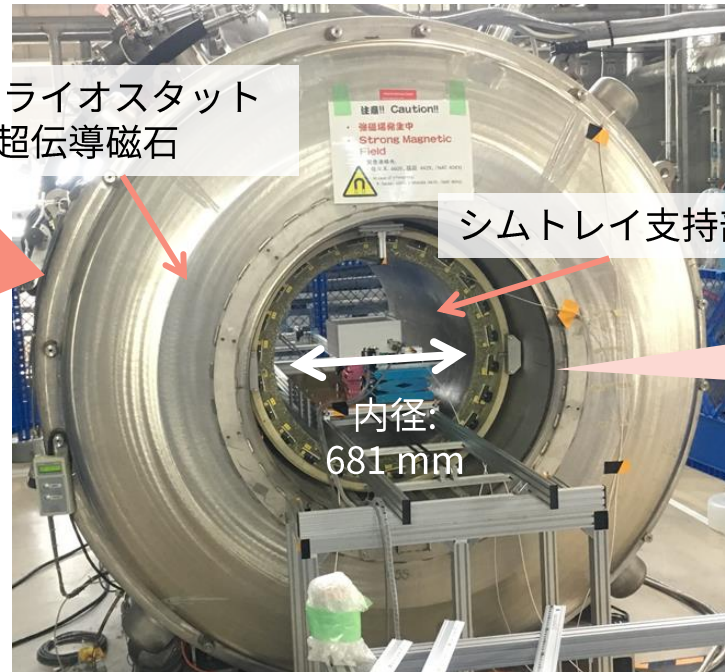


空間的均一度を調整するためには

一般的に、医療用全身MRI超電導磁石の静磁場を調整するには、鉄シム(鉄の薄片)を磁石内面に配置するパッシブシミングが行われる。
(医療目的で使用する際は、数ppm程度の均一度)



J-PARC NU1
MuSEUM実験で使用する
全身MRI超電導磁石



クライオスタット
+ 超伝導磁石

シムトレイ支持部

内径:
681 mm



シムトレイ

24本のシムトレイそれぞれに
24個のシムポケットがある

鉄シム (鉄の薄片)
厚さ: 0.05 mm/0.25 mm



シムポケット

鉄シムの配置と磁場の関係式

$$B(r) = \frac{\alpha}{r^3} \left\{ \frac{3(\overrightarrow{M} \cdot \vec{r})\vec{r}}{r^2} - M \right\}$$

高均一度達成のための 新たなシミング手法

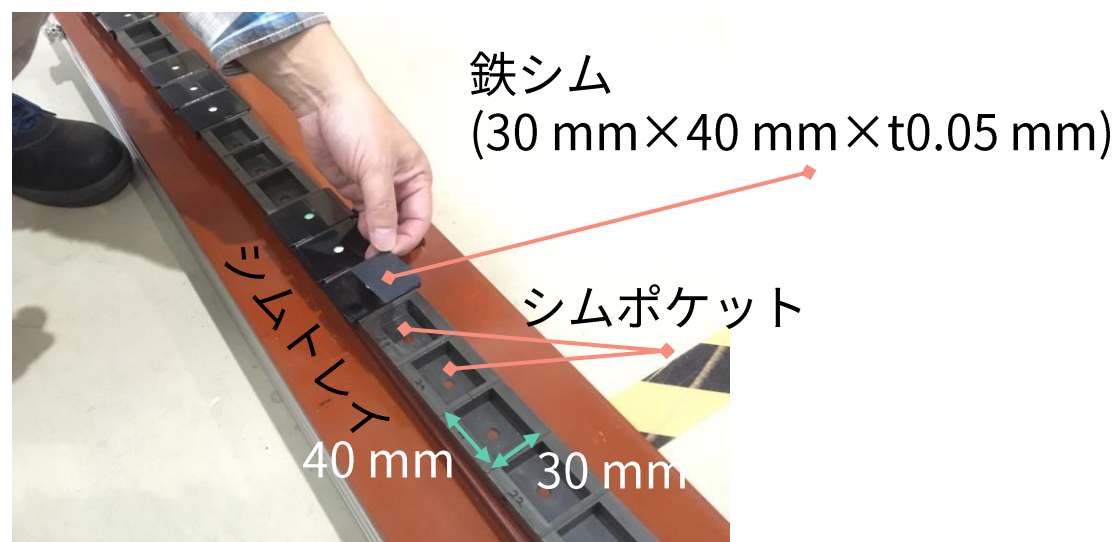
より高均一度(0.2 ppm)を目指して

2018年12月に1.7 Tにおけるシミングを行ったところ、30 cm球表面の空間均一度0.45 ppm (p-p) が到達限界だった。

さらに精度を上げた磁場調整を可能にするためには、鉄シム片を細分化する必要がある。

しかし、必要となる鉄片の最小寸法は磁石の製作誤差や周辺環境の影響によって変動するため、最適な最小寸法の鉄シムを予め用意することは難しい。

また、鉄の最小寸法を現行以上に小さくすると、シムポケットの大きさ(30 mm×40 mm)より小さくなってしまい、ポケット内で鉄シムが移動してしまう。

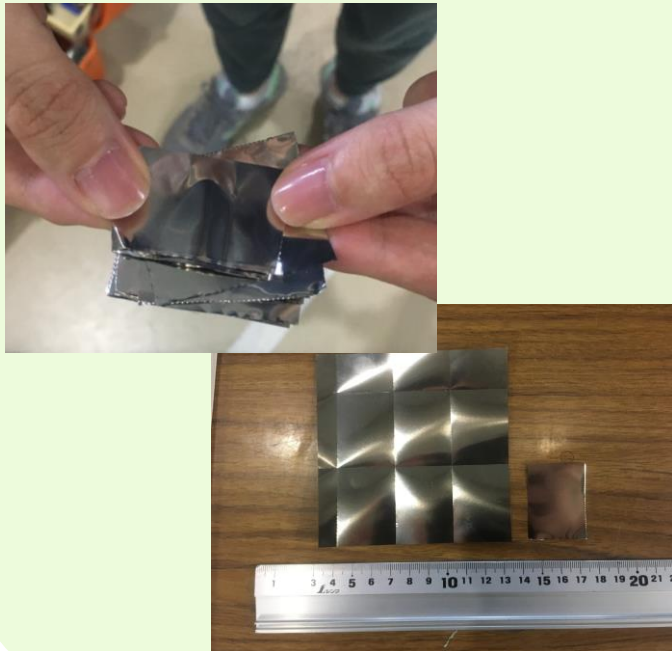


そこで、鉄よりも小さい磁化をもつ物質によるシミング手法の検討を行う。

より高均一度(0.2 ppm)を目指して

今回試験を行った、鉄より小さい磁化をもつ磁性体は次の3つ。

ニッケル：固体



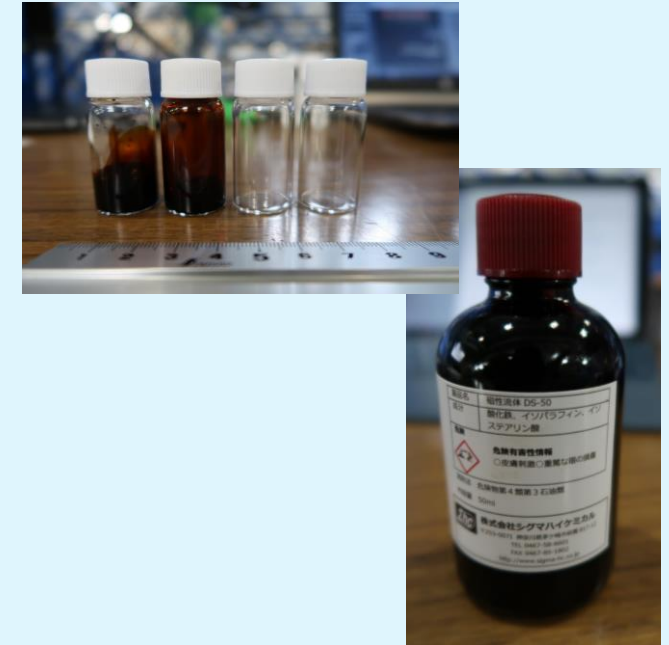
磁化が鉄の約0.3倍
飽和磁化(文献値)：0.6 Wb/m²

磁性パテ：半固体



一般的に磁化が鉄より小さい
量を任意で変更可

磁性流体：液体



磁性流体の磁化については第16回加速器学会年会で報告済み(THPH033)

磁性パテの磁化測定

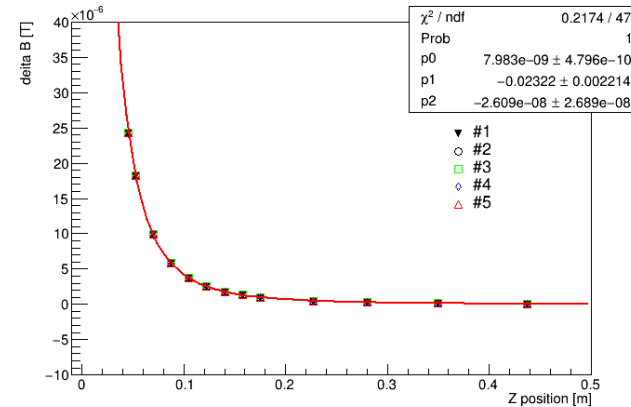
磁場は距離の3乗に反比例する(式(1))。この性質を用いて、磁性パテの磁化を測定する。

Fitting function

$$B_z = \frac{P_0}{(z-P_1)^3} + P_2 \quad (1)$$

$$P_0 = 2 \times 10^{-7} \times m_z \quad (2)$$

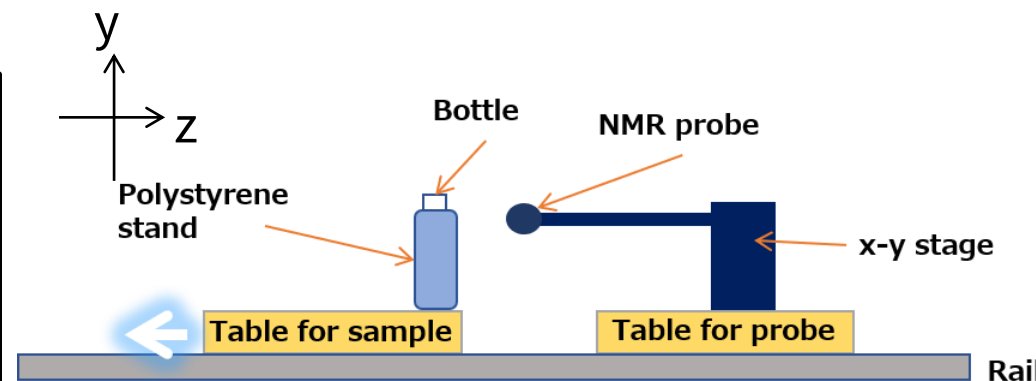
B_z : 磁場 m_z : 磁気モーメント
 z : プローブと磁性体の距離
 P_1 : z 方向オフセット
 P_2 : 磁場オフセット



磁性パテが作り出す磁場は左のグラフのようになる。
 P_0 には磁気モーメントが含まれているため、測定した磁場をフィッティングして算出した P_0 から、磁気モーメントが求められる。
 (磁化は単位体積あたりの全磁気モーメントの和)

磁性パテの磁化: $4.98 \times 10^{-2} \text{ Am}^2/\text{g}$
 → 鉄の約0.23倍

磁化測定



- ① ポリスチレンスタンドをサンプル用テーブルに固定する
- ② x-yスキャンを行い、磁場が極大になる位置を決定
- ③ サンプル用テーブルをz方向に変化させながら磁場測定

シミングで使用する素材の検討

液体の磁性流体と半固体の磁性パテが、磁場中でどのような振る舞いをするのか確かめるため、瓶に封入した状態で磁場中に設置し、形状を観察した。

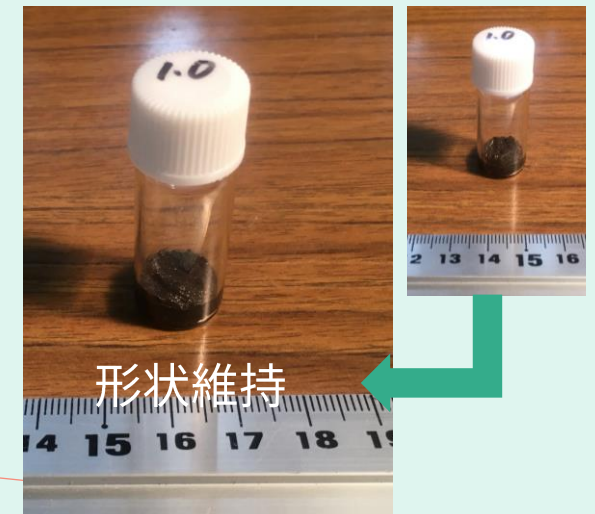
磁性流体



細長く成形した
磁性パテ



瓶の底に貼り付けた
磁性パテ



瓶の底に貼り付けた磁性パテならば、磁場中でも形状が維持されることが分かった。
→ **磁性パテ**を用いてシミングを行う。

シミングの流れ

① 磁場分布測定

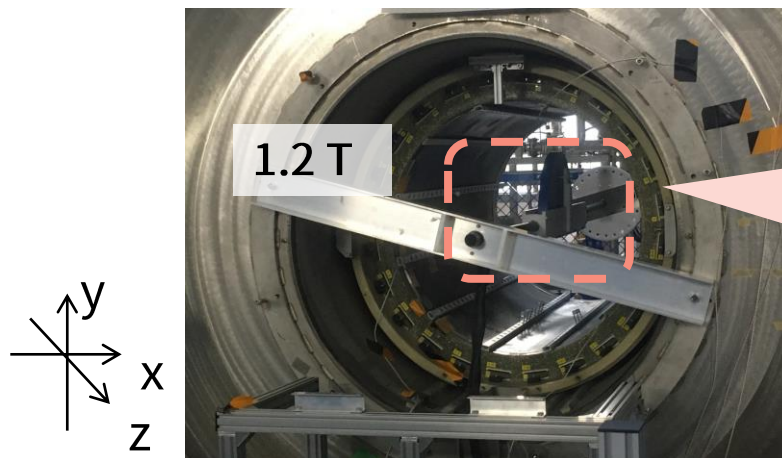
- 使用するフィールドカメラが1.2 T用のため、磁場強度は1.2 Tで調整
- フィールドカメラの直径が40 cmのため、磁石中心を原点とした40cm球表面で磁場測定を行い20cm-30cm回転楕円体表面上の磁場を内挿計算する

② 鉄シムの配置計算

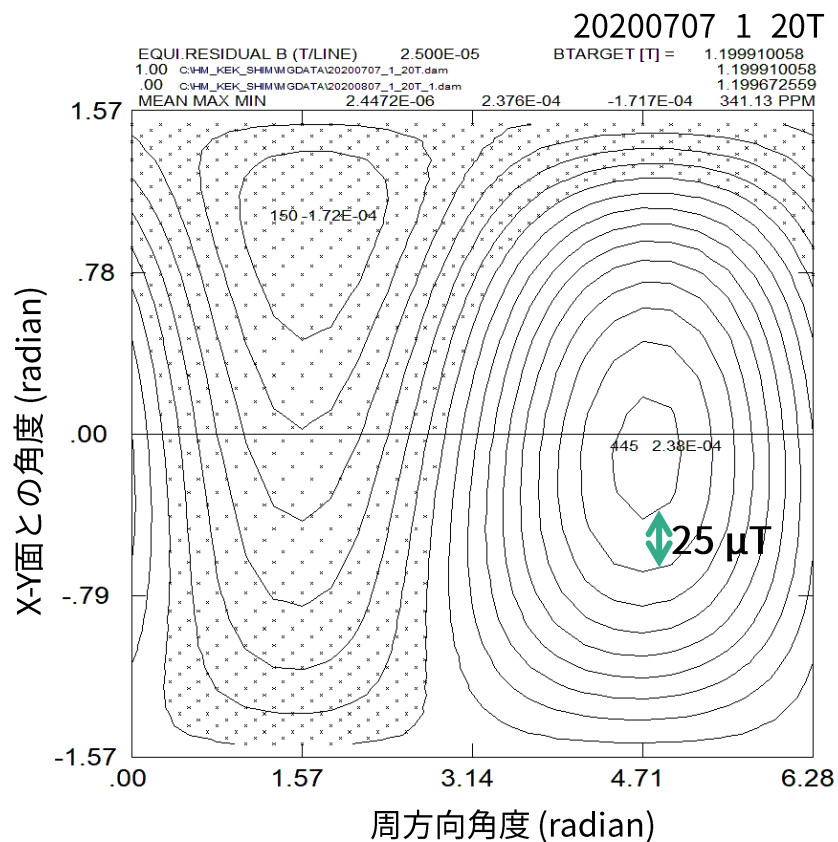
③ 鉄シム配置

①～③を
くり返す

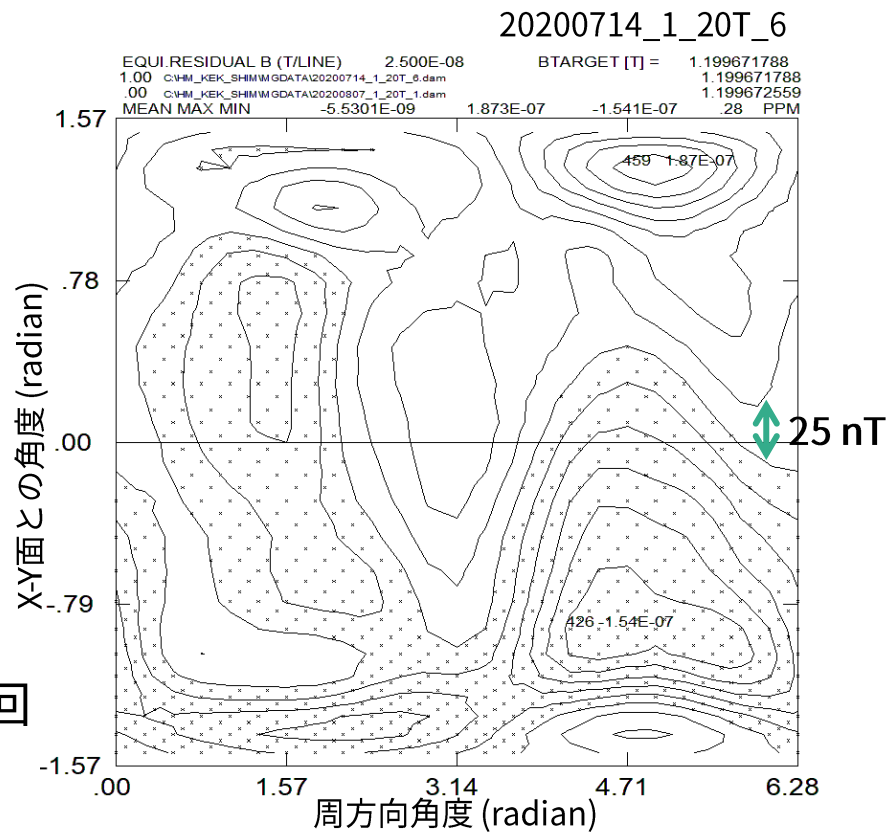
今回は、鉄シムに加えてニッケル・磁性パテでも①～③を行いシミング作業を行った。



シミング(鉄シム)



鉄シムによる
シミング作業6回



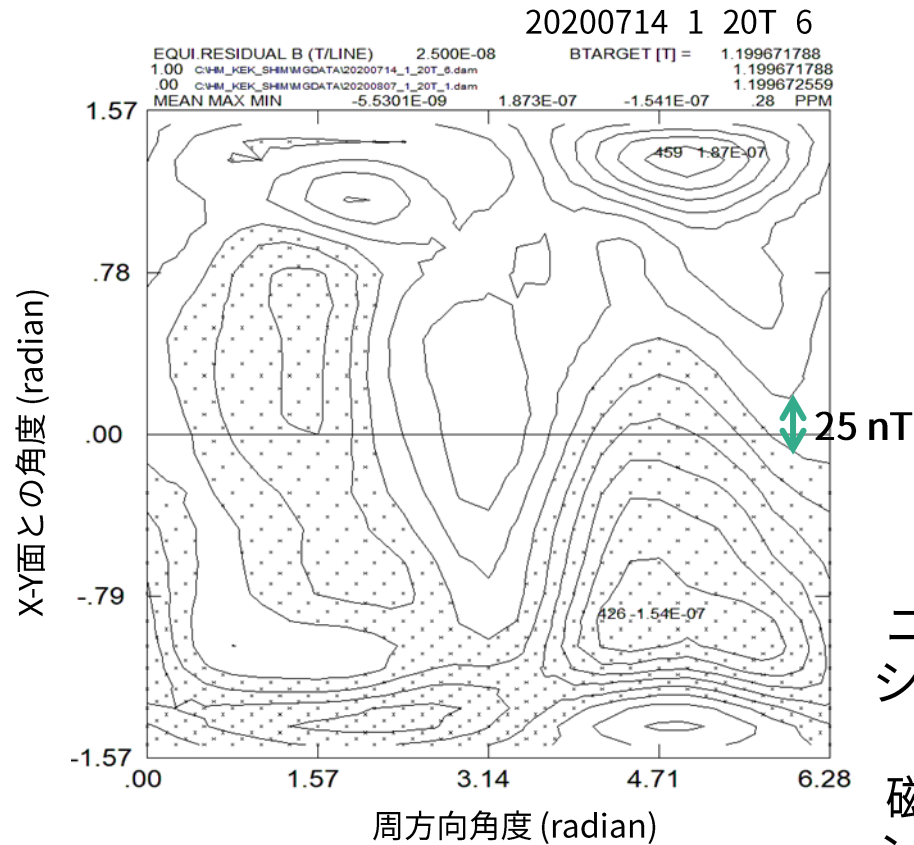
シミングなし
 最大：1.200082058 T
 最小：1.199672058 T
 均一度：341.13 ppm (p-p)

鉄シム
 最大：1.199671942 T
 最小：1.199671601 T
 均一度：0.28 ppm (p-p)

※到達限界
0.45 ppmを得たのは30cm球表面で、範囲が異なる。

Fig. 20 cm -30 cm回転楕円体表面の内挿磁場分布(メルカトル図法)

シミング(鉄シム+ニッケル+磁性パテ)



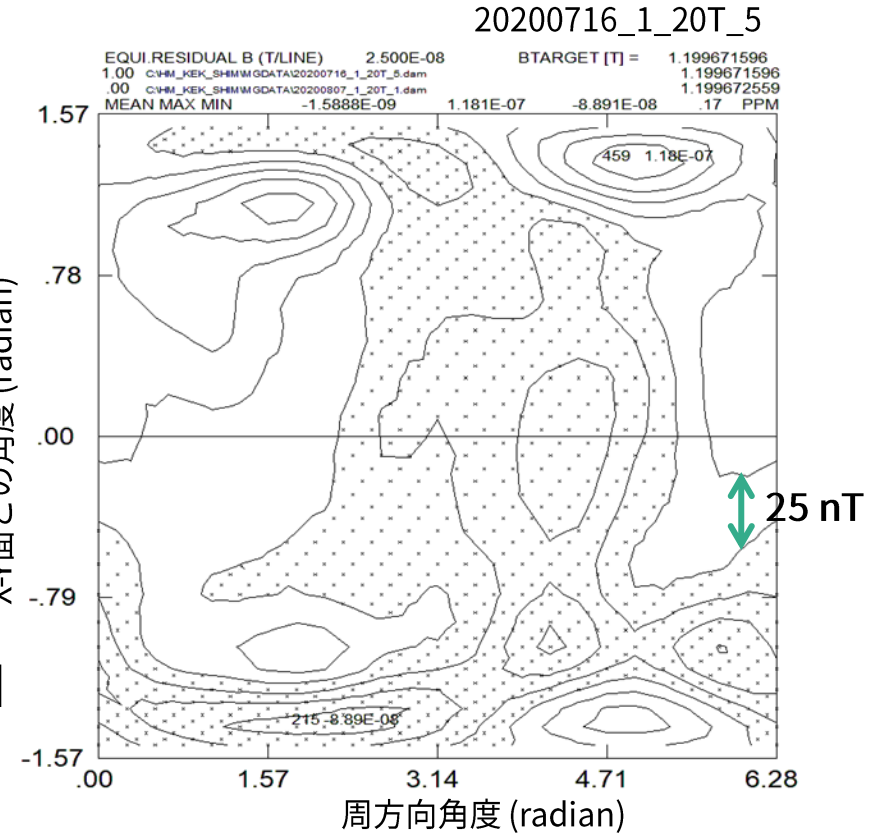
鉄シム

最大：1.199671942 T

最小：1.199671601 T

均一度：0.28 ppm (p-p)

ニッケルによる
シミング作業2回
+
磁性パテによる
シミング作業2回



鉄シム+ニッケル+磁性パテ

最大：1.199671685 T

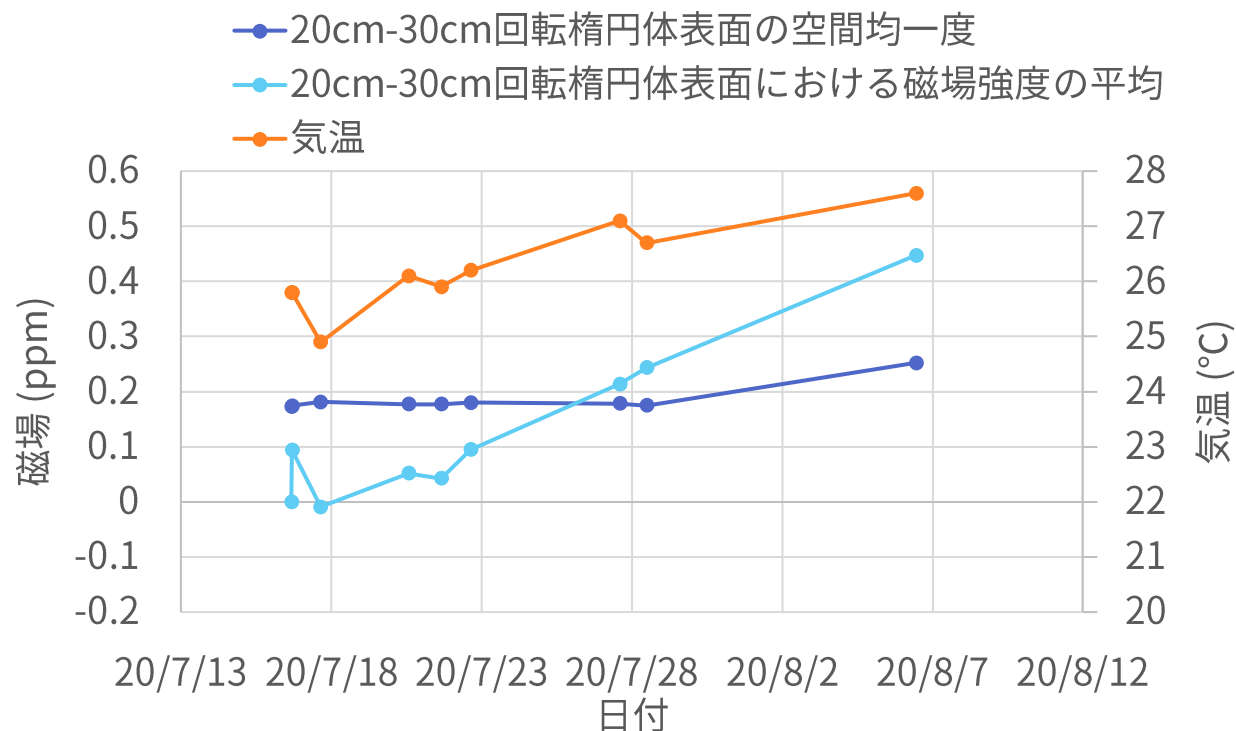
最小：1.199671478 T

均一度：0.17 ppm (p-p)

目標の
0.2 ppmを
達成

Fig. 20 cm -30 cm回転楕円体表面の内挿磁場分布(メルカトル図法)

議論



議論1 – 長期安定性について

- 7月16日から7月29日にかけて、20cm-30cm回転楕円体表面における空間均一度は0.2 ppm以下を満たしており、安定性が確認された
- 磁場強度の平均値は、気温の上昇とともに大きくなっている
- 8月6日は空間均一度が0.25 ppmと均一度が悪くなった
 - 原因については検討中で、再測定を予定している

Table. シミングで使用した磁性体の量

	体積 (cm ³)	質量 (g)
鉄シム	904.9	7125.3
ニッケル	2.6	23.1
磁性パテ	(体積不明)	2.2

議論2 – 新素材を使用したシミング

- シミングで使用した磁性パテの最小単位は0.010gで、鉄シムの2 mm×3 mm×t0.05 mm片に相当する
- 磁性パテだからこそ、微細な磁場調整が可能であるといえる

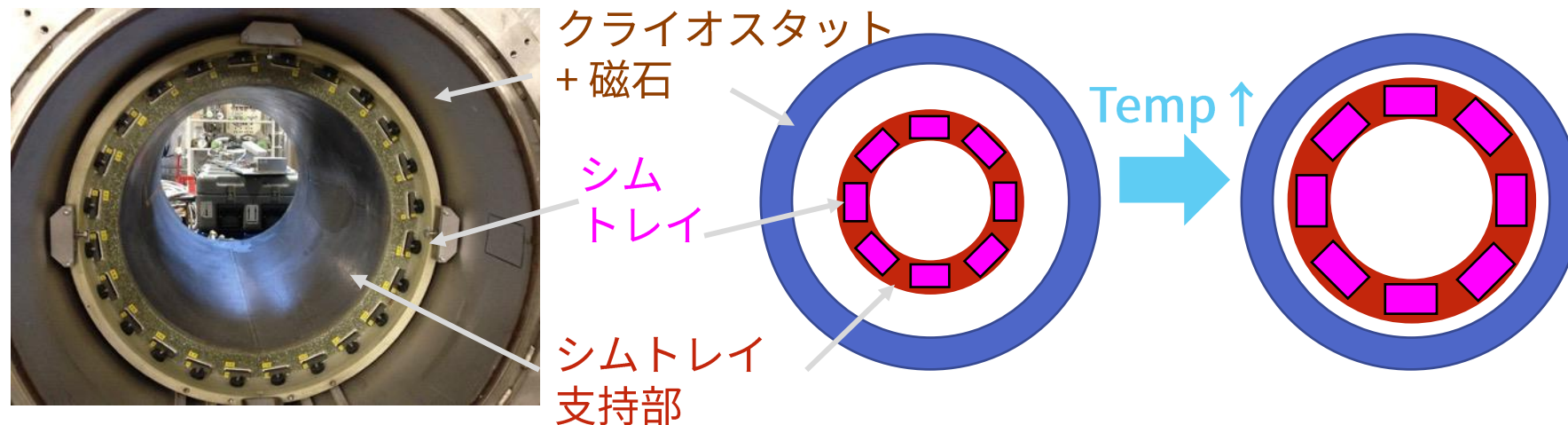
磁場の時間的安全性

磁場の時間変動要因

温度変化は磁場の時間変化の大きな要因であり、考えられる温度影響は次の2つ。

A) 支持部の熱膨張による鉄シムの位置ずれ

鉄シムが磁石中心から離れる → 中心磁場上昇



B) Bloch $T^{3/2}$ 則による鉄シムの磁化変化

温度の上昇により鉄シムの磁化が減少

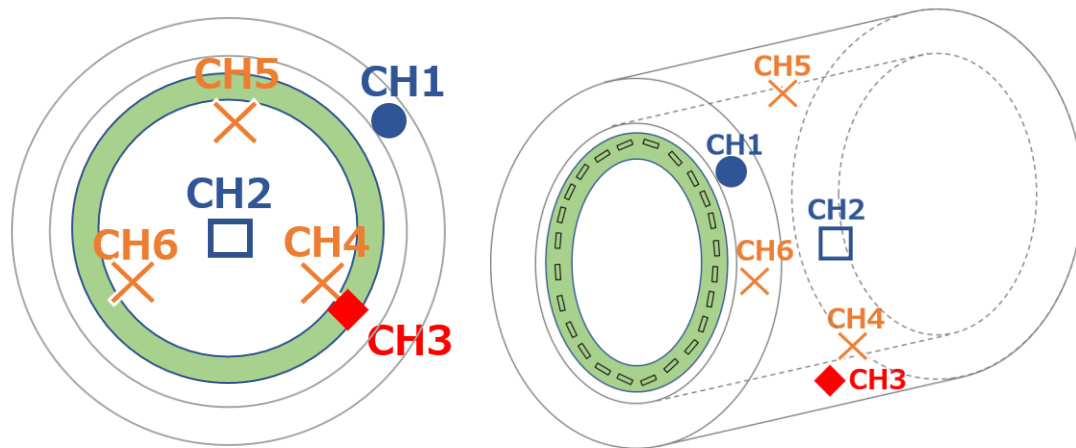
→ 鉄シムに引き寄せられる磁束が減少 → 中心磁場上昇

$$M(T) = M(0)(1 + CT^{3/2})$$

温度が上昇すると、中心磁場の強度は上がる

磁場強度の温度依存性測定

全身MRI用超電導磁石に埋め込まれた傾斜磁場コイルに電流を流し、ジュール熱で温度上昇を引き起こした状態で、磁石中心における磁場強度を測定する。



熱電対による温度測定箇所

CH	測定対象	
1	気温	
2	プローブ付近の温度	
3	鉄シム	B) Bloch $T^{3/2}$ 則
4	支持部表面	
5	支持部表面	A) 熱膨張
6	支持部表面	

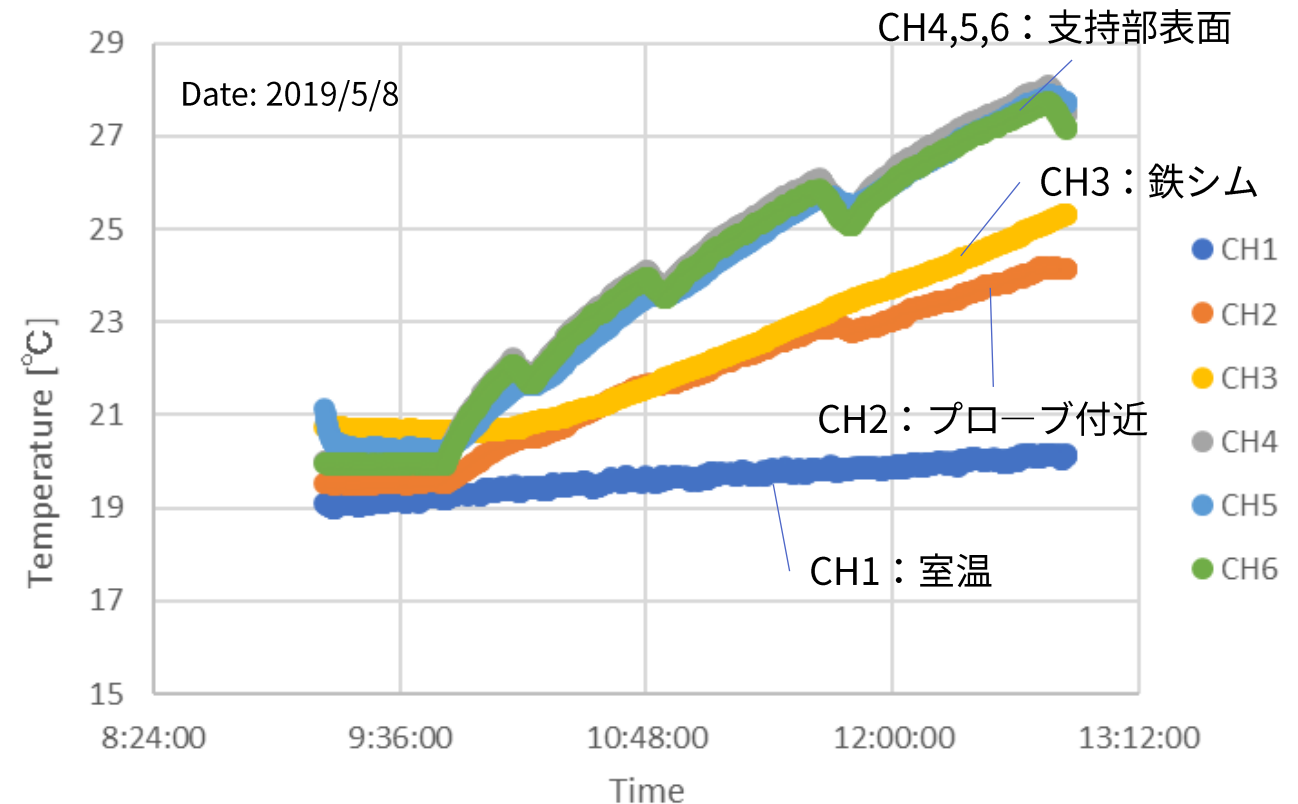


Fig. 傾斜磁場コイルに通電した際の各部の温度変化
横軸は時刻を、縦軸は温度を示す。

磁場強度の温度依存性測定については
第16回加速器学会年会で報告済み(THPH033)

結果 - 磁場強度の温度依存性

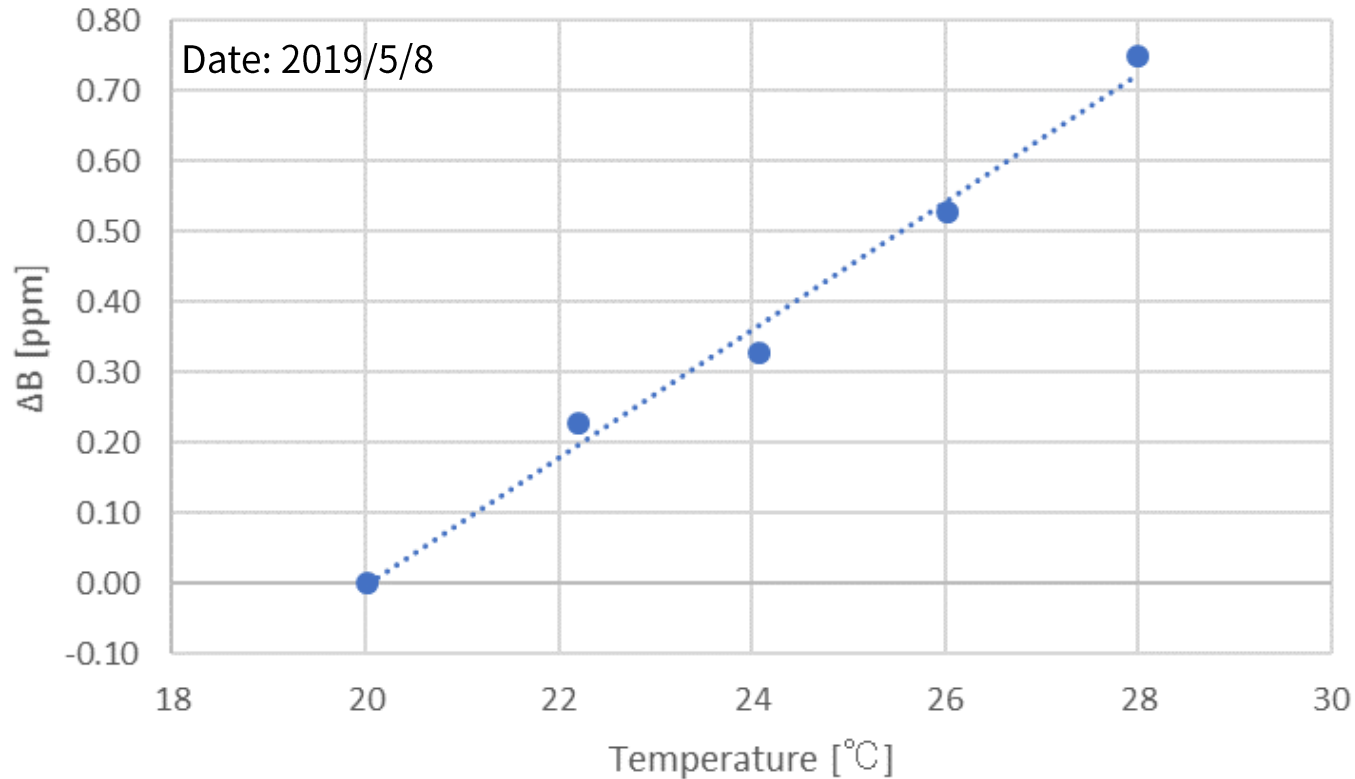


Fig. 支持部表面温度(CH4)と磁場強度の相関
横軸はジュール熱により加熱した支持部表面の温度を、縦軸は
磁石中心の1点における磁場強度の変化量(ppm)を示す。

磁場強度の温度依存性：0.09 ppm /°C
時間的に0.2 ppm (p-p) で磁場強度の安定性を保つには、**±1.1°C**未満で温度を制御する必要があることが分かった

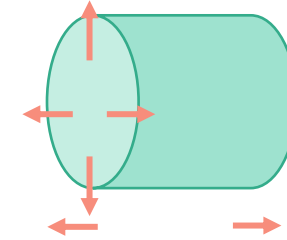
磁場強度の温度依存性測定については
第16回加速器学会年会で報告済み(THPH033)

シミュレーションモデル

支持部の熱膨張による鉄シムの位置ずれ、ブロッホ $T^{3/2}$ 則による磁化の変化がどのような比率で起きているのか確かめるため、磁場強度の温度依存性について計算する。

A) 支持部の熱膨張による鉄シムの位置ずれ

支持部は熱膨張により周方向と長手方向に広がると仮定し、熱膨張率 8×10^{-6} ($^{\circ}\text{C}$)を用いて支持部の熱膨張を計算。



B) ブロッホ $T^{3/2}$ 則による鉄シムの磁化変化

ブロッホ $T^{3/2}$ 則より(式(3))、温度上昇に伴って発生する鉄シムの磁化変化を計算。

$$M_s(T) = M_s(0) \left(1 - CT^{\frac{3}{2}}\right) \dots\dots (3)$$

M_s : 自発磁化 T : 温度 C : 定数

鉄シムの位置ずれと鉄シムの磁化が磁場強度の温度依存性関わるため、鉄シムの分布について条件を変えて計算を行った。

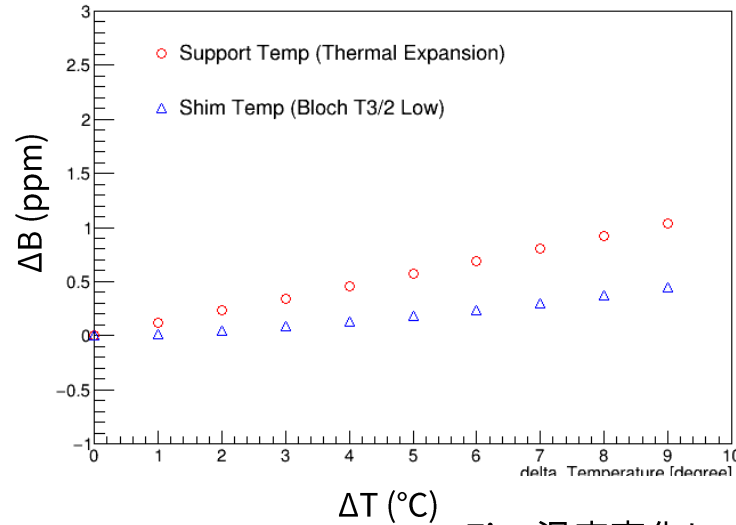
条件① 鉄シムが全ポケットに同じ量だけ入っている状態

条件② 鉄シムが実際のシミングと同様の分布をしている状態

※ どちらも鉄シムの総量は 1174.62 cm^3

シミュレーション結果と実験結果の比較

条件① 鉄シムがすべてのポケットに均等に配置されている状態



条件② 鉄シムが実際のシミングと同様の分布をしている状態

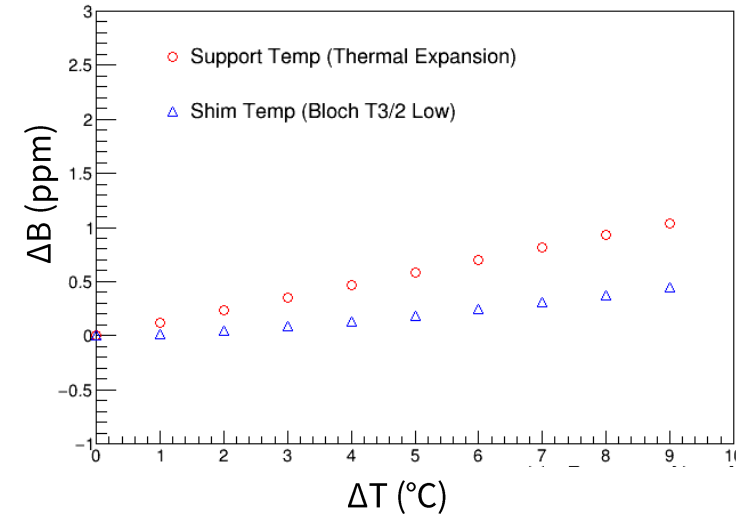
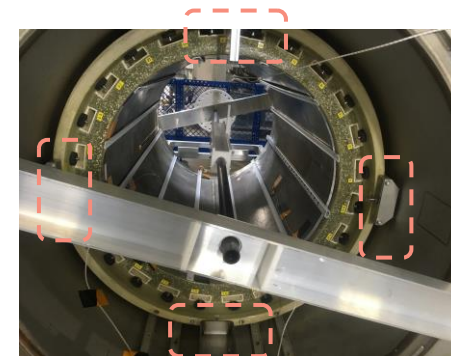


Fig. 温度変化による磁場の変化(シミュレーション)
横軸は温度の上昇量を、縦軸は磁石中心の1点における磁場の変化量(ppm)を示す。

	条件① (ppm/°C)	条件② (ppm/°C)	実験 (ppm/°C)
熱膨張	0.115	0.116	-
ブロッホT ^{3/2} 則	0.049	0.049	-
合計	0.164	0.165	0.09

- 鉄の分布は磁場強度の温度依存性に影響しない(誤差 0.4%)
- 熱膨張とブロッホT^{3/2}則は約2：1の比率で起きている
- 実験値と計算値のオーダーが一致
 - シミュレーション上では熱膨張の支配が大きい
→支持部が全8か所固定されているため、熱膨張が計算ほど起きていない可能性がある



まとめと今後の展望

高均一度達成のための新たなシミング手法

- 従来の鉄シムを使用したシミングに加え、ニッケルと磁性パテを使用したことで 0.17 ppm (p-p)を達成した (目標：0.2 ppm(p-p)以下)
- 磁性パテをシムポケットに収納可能な容器について検討を行う
- 長期安定性について、均一度が変化する要因を探る

温度変化に伴う磁場変動

- シミュレーションの結果より、温度による磁場強度変化の要因として 支持部の熱膨張とブロッホ $T^{3/2}$ 則が大きく占めていると考えられる
- 鉄の分布は磁場の温度依存性に影響しないことが分かった
- 今後は熱膨張率の厳密な値の検討や、温度上昇のばらつきを反映したシミュレーションを行う