

ミューオン $g-2$ /EDM精密測定実験 に用いるミューオン蓄積磁石の製作時 における誤差磁場の系統的研究

小山駿¹

共同研究者：阿部充志²、齋藤直人²、佐々木憲一²、三部勉²

1, 東大理 2, 高エネ研

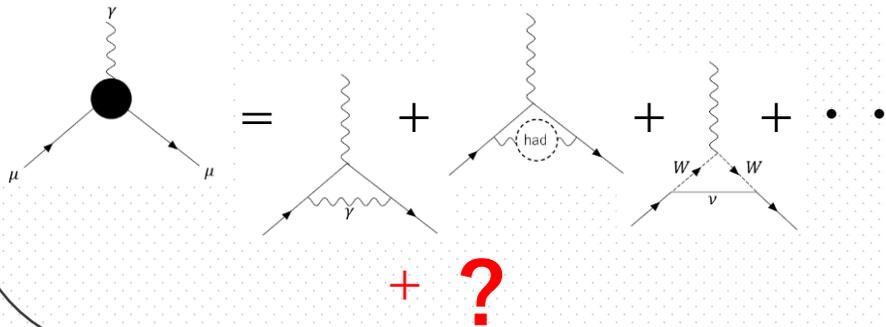
ミューオンg-2/EDM精密測定実験

g-2

ミューオンの磁気双極子モーメント $\vec{\mu}_\mu$ に現れる g 因子を精密に測り、標準模型からのずれを検証

$$\vec{\mu}_\mu = g \left(\frac{e}{2m_\mu} \right) \vec{s}$$

$$g = 2(1 + a_\mu^{QED} + a_\mu^{had} + a_\mu^{weak} + a_\mu^{BSM})$$

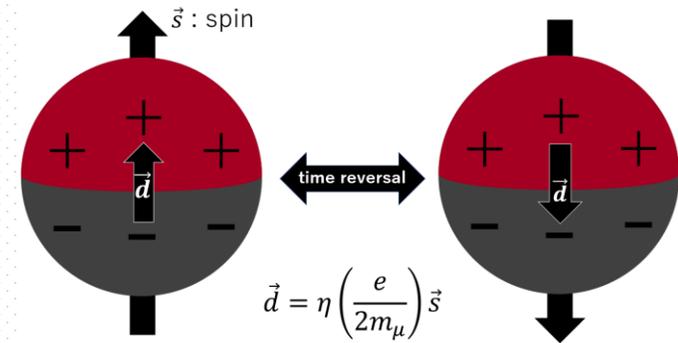


実験観測量：
$$\vec{\omega} = -\frac{e}{m_\mu} \left[a_\mu \vec{B} + \frac{\eta}{2} (\vec{\beta} \times \vec{B}) \right]$$

EDM

標準模型に現れないミューオンの電気双極子(EDM) \vec{d}_μ を先行実験を超える感度で探索→レプトンのCP violationの発見を目指す

$$\mathcal{H} \supset -\vec{d}_\mu \cdot \vec{E} ?$$



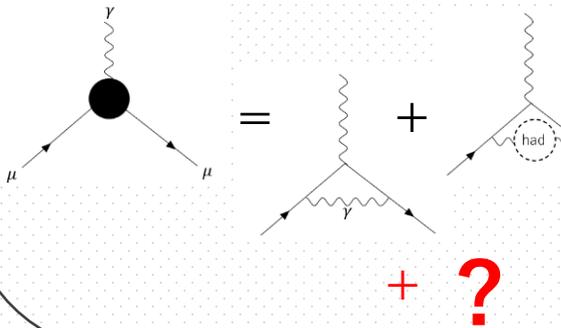
ミューオンg-2/EDM精密測定実験

g-2

ミューオンの磁気双極子モーメント $\vec{\mu}_\mu$ に現れる g 因子を精密に測り、標準模型からのずれを検証

$$\vec{\mu}_\mu = g \left(\frac{e}{2m_\mu} \right) \vec{s}$$

$$g = 2(1 + a_\mu^{QED} + a_\mu^{had} + \dots)$$



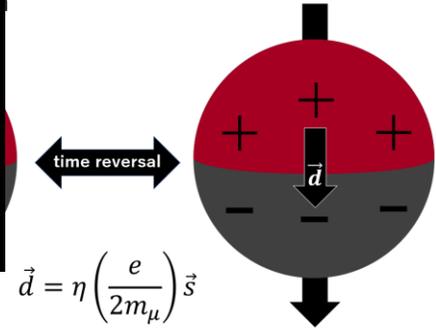
高精度な測定のために
高精度な磁場が必要

実験観測量：
$$\vec{\omega} = -\frac{e}{m_\mu} \left[a_\mu \vec{B} + \frac{\eta}{2} (\vec{\beta} \times \vec{B}) \right]$$

EDM

標準模型に現れないミューオンの電気双極子(EDM) \vec{d}_μ を先行実験を超える感度で探索→レプトンのCP violationの発見を目指す

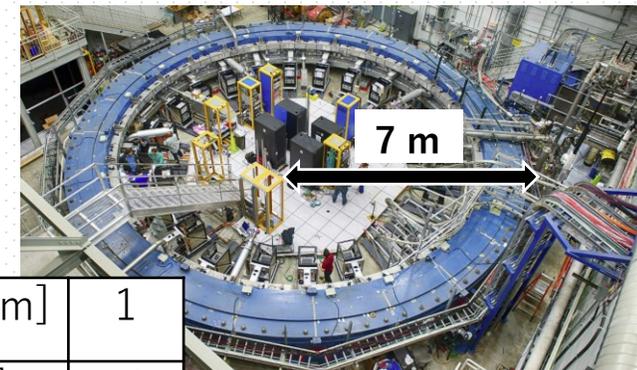
$$H \supset -\vec{d}_\mu \cdot \vec{E} ?$$



ミュオン蓄積磁石がつくる一様磁場

MRIの技術を利用しコンパクトな領域に蓄積することで先行実験を上回る**一様性**の磁場を設計可能

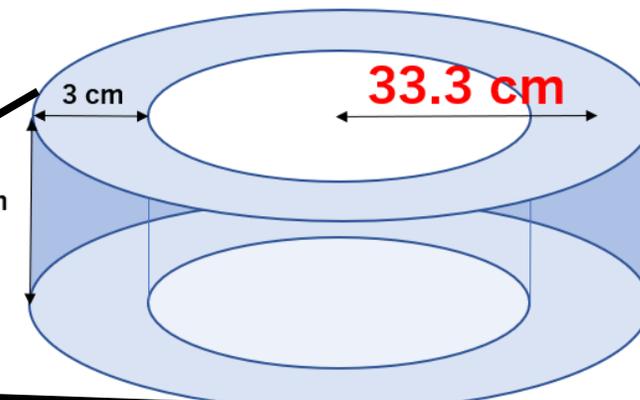
→系統誤差の低減



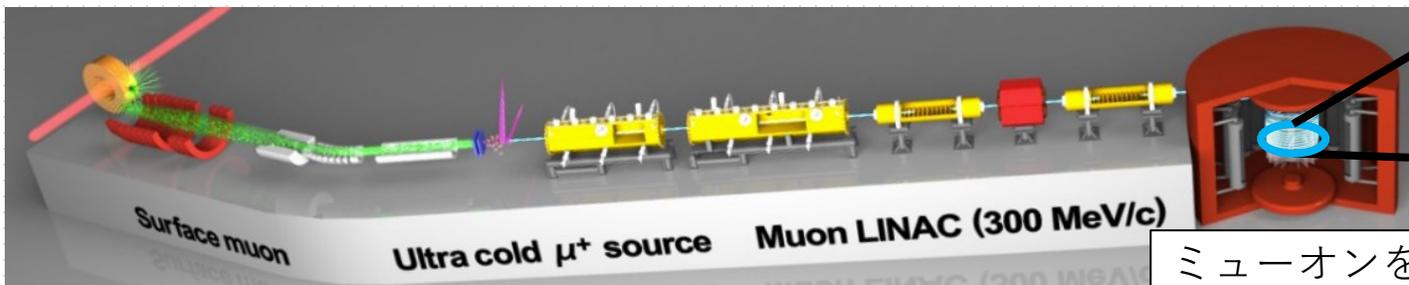
周回平均(peak-peak) [ppm]	1
局所(peak-peak) [ppm]	50

先行実験

要求される一様性	周回平均(peak-peak) [ppm]	0.1
	局所(peak-peak) [ppm]	1



本実験のミュオン蓄積領域

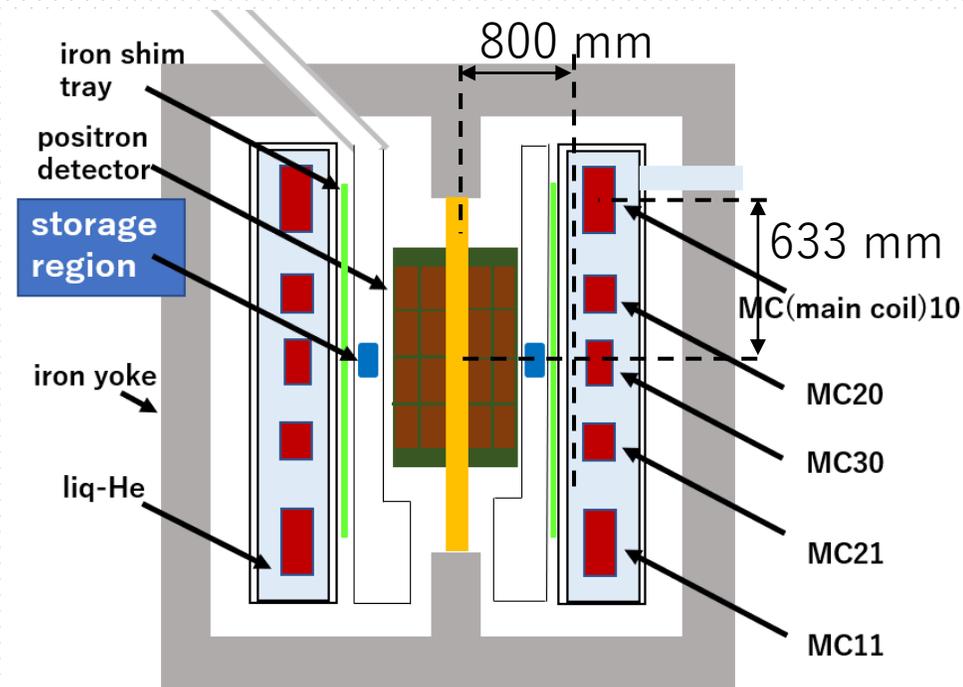


ミュオンを蓄積する
3 T 超伝導ソレノイド磁石

本研究の動機

動機

- 蓄積磁石を製作する際の製作誤差によって誤差磁場が生じ一様性を阻んでしまう
- 本研究で製作誤差によって生じうる誤差磁場の形状や強度を予測し、その後の磁場調整でどこまで一様な磁場を実現できるか評価した



ミュオン蓄積磁石内の主な構成要素

評価

製作

シミング

達成

実験開始
(2027)

要求される一様性を満たすには磁石の部材を μm の精度で設置する必要がある。しかし設計は 0.1 mm の精度が限界なので磁場調整が必須

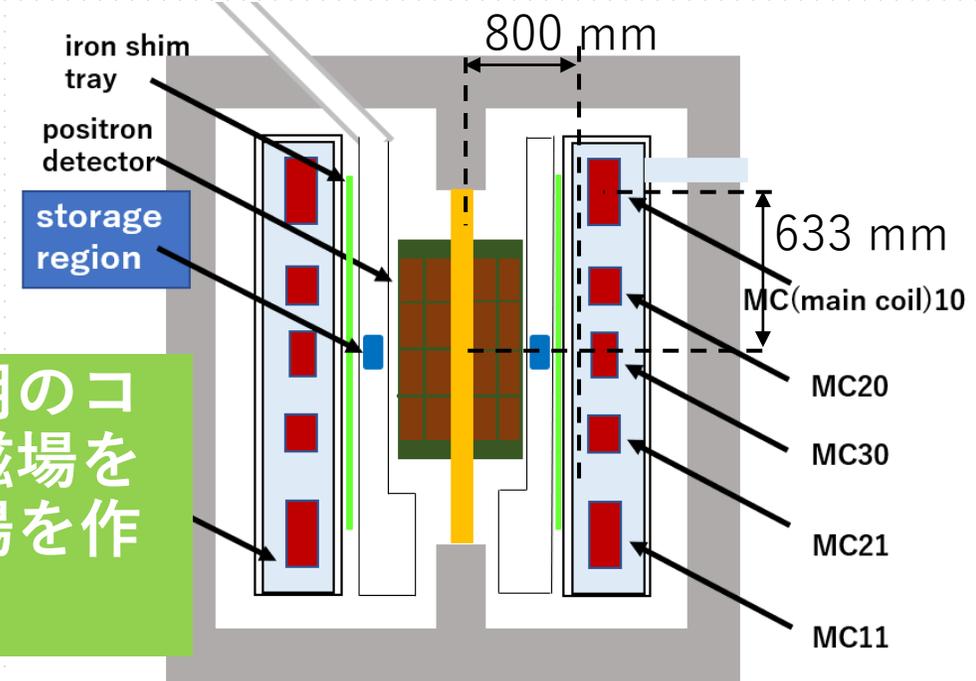
再度磁場を測定し要求精度を満たすことを確認

本研究の動機

動機

- 蓄積磁石を製作する際の製作誤差によって誤差磁場が生じ一様性を阻んでしまう
- 本研究で製作誤差によって生じうる誤差磁場の形状や強度を測定し、その後の磁場調整でどこまで目標磁場を実現できるか評価した

小さな鉄片や補正用のコイルを用いて誤差磁場を打ち消すような磁場を作り出し磁場を調整



ミュオン蓄積磁石内の主な構成要素

評価

製作

シミング

達成

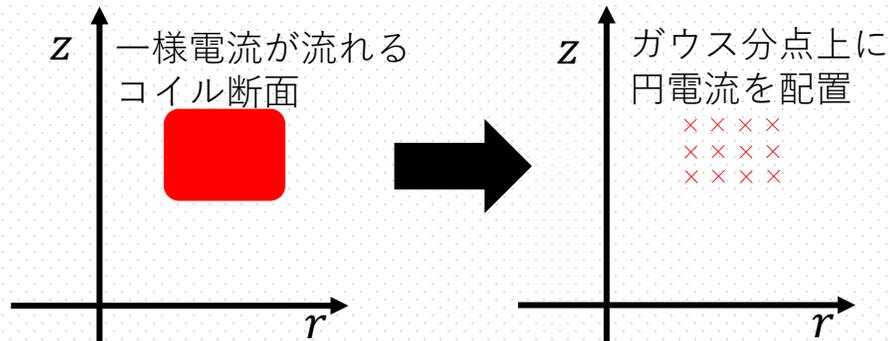
実験開始
(2027)

要求される一様性を満たすには磁石の部材を μm の精度で設置する必要がある。しかし設計は0.1 mm の精度が限界なので磁場調整が必須

再度磁場を測定し要求精度を満たすことを確認

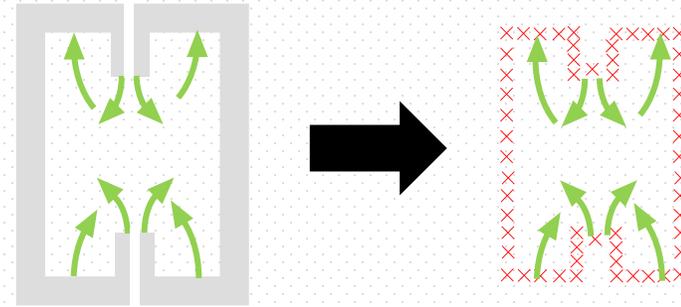
磁場計算時の磁石のモデルに関して

矩形断面のコイルが作る磁場
はガウス求積を用いて計算



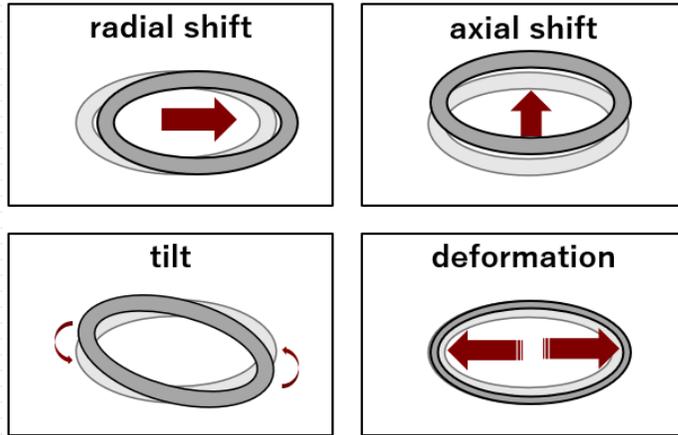
有限要素電磁場解析ソフト
Operaで鉄ヨークのつくる磁場
を計算

→磁場を再現するような軸対称
な線電流の集合として計算

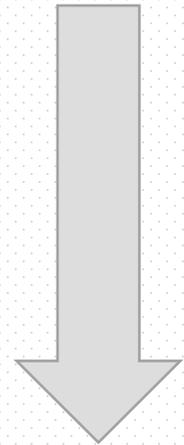


$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_{\text{coil}} + \mathbf{B}_{\text{yoke}}$$

評価した製作誤差の範囲



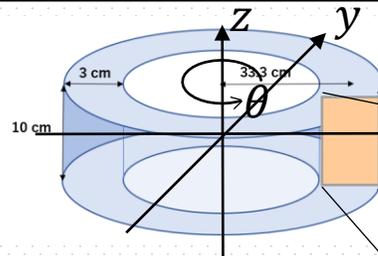
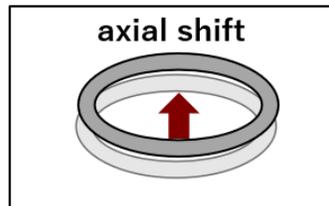
製作誤差	パラメータ	範囲	考える対象	数
傾き	天頂角	+/- 0.5 mrad	鉄ヨーク及び5つのメインコイル	6
	方位角	+/- π rad		6
変位	水平変位	+/- 0.5 mm		6
	軸方向変位	+/- 0.5 mm		6
コイル断面の変形	横幅変形	+/- 0.5 mm	5つのメインコイル	5
	高さ変形	+/- 0.5 mm		5
合計の自由度				34



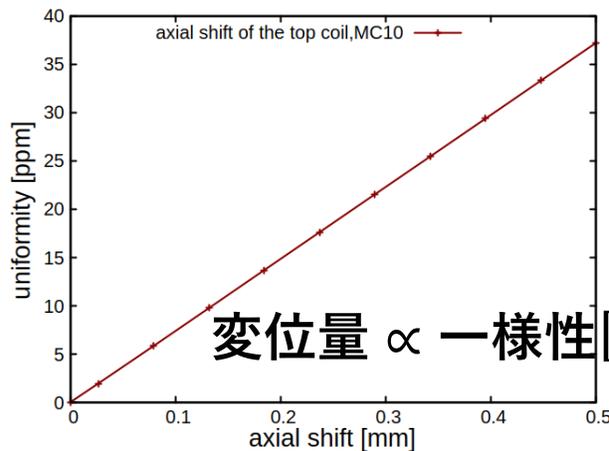
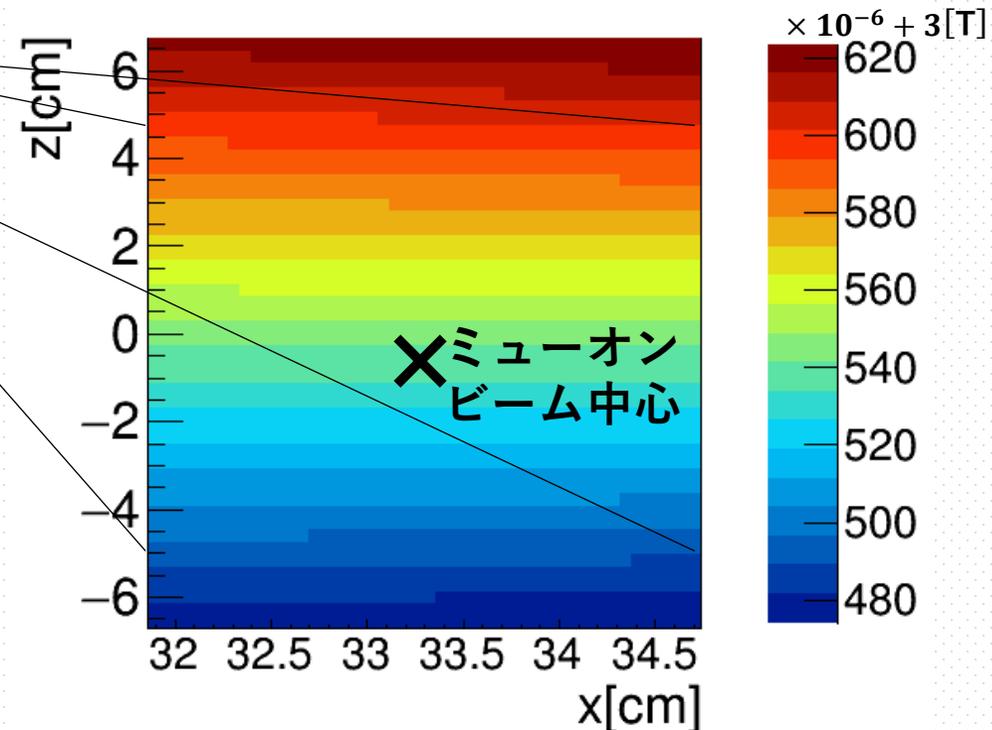
はじめに1つの製作誤差によって生じる誤差磁場を個別に調査した

経験的に予想される公差が0.1 mm程度なのに対し、製作誤差を過大に見積もることで実際の誤差磁場の強度を保守的に評価

製作誤差の個別評価^{*1}～軸方向変位



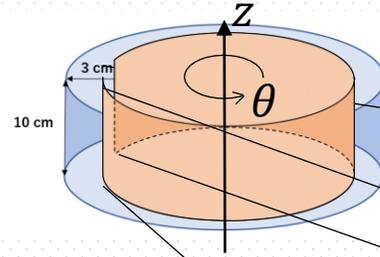
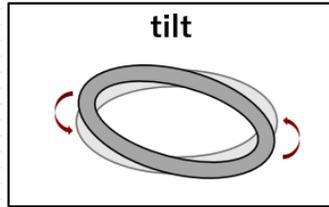
軸方向の勾配磁場



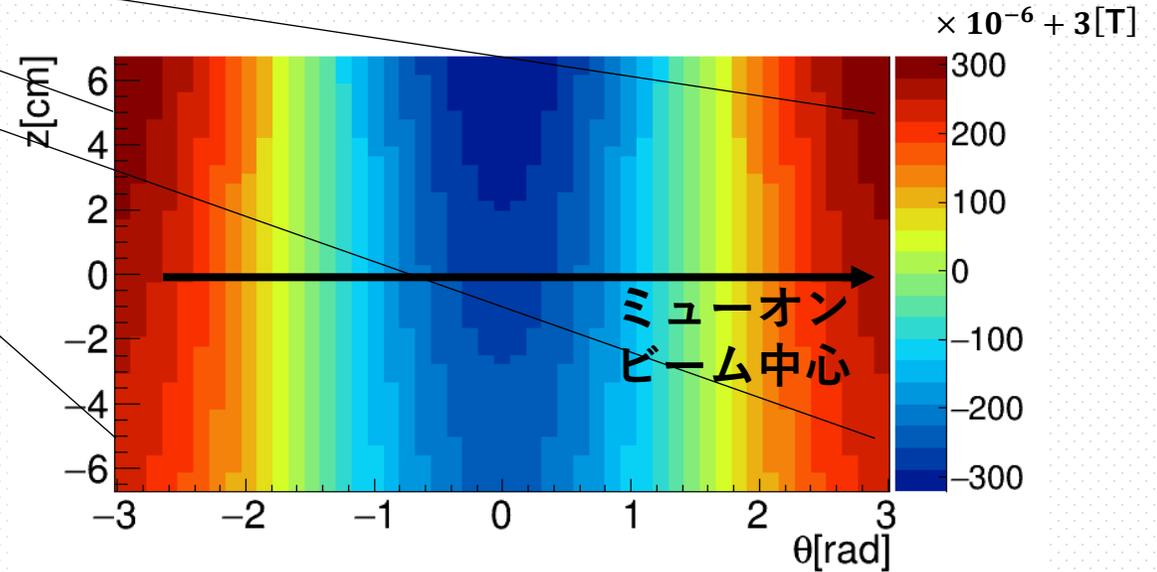
変位量 \propto 一様性 [ppm] = $\frac{B_z^{max} - B_z^{min}}{\langle B_z \rangle}$

最上部のコイルが0.5 mm 上部へ変位したときのビーム断面上の B_z の分布($\theta=0$)。コイルから遠ざかっていく領域下部の磁場が低くなることで軸方向に勾配をもつ誤差磁場が生じる

製作誤差の個別評価～傾き



↳ 周回方向二極磁場

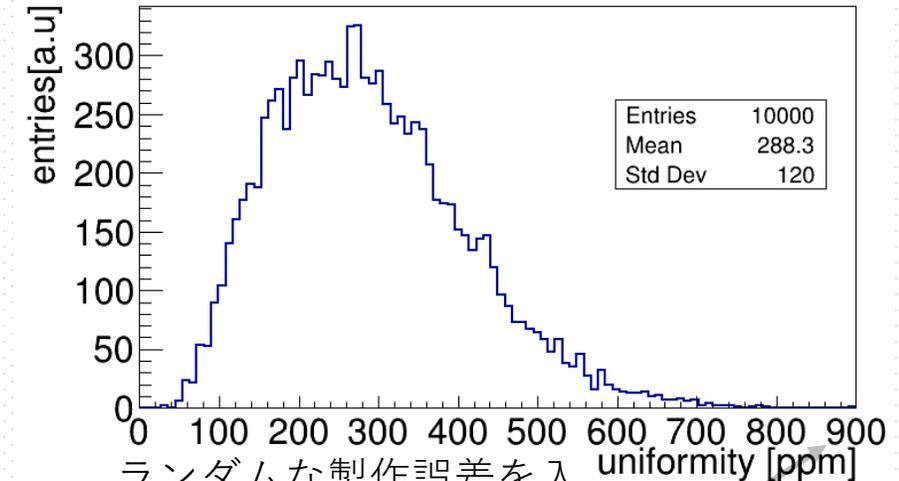
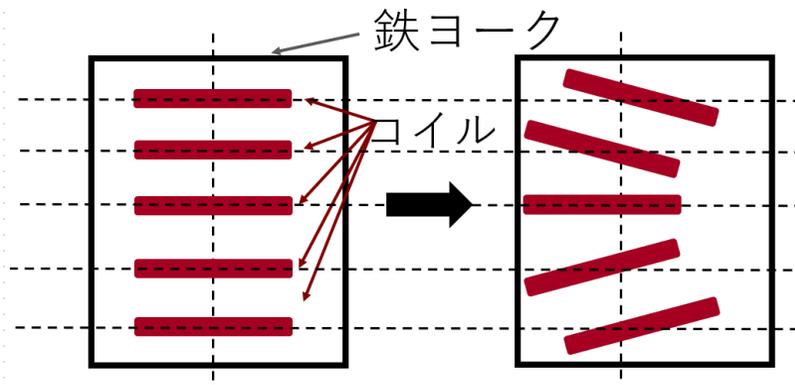


- 他の製作誤差についても同様に計算した
- コイルによる違いや鉄ヨークに製作誤差が生じた場合も計算した

最上部のコイルがx軸の方へ0.5 mrad 傾いたときの B_z の分布。描画領域はミュオンの中心軌道のサイクロトン半径(33.3 cm)の半径の円筒側面。傾いたコイルのつくる磁場の軸が傾くことで周回方向に B_z が $\pm 300 \mu\text{T}$ 変動する

モンテカルロ法による誤差磁場の調査

- 製作誤差を一様ランダムに選び、蓄積領域に発生しうる誤差磁場の強度を評価するために磁場の一様性の確率分布を調べた
- 一様性を大きく損ねるのは
 - コイルの傾き
 - コイルの水平方向の変位
 - この2つが下図のように生じると特に一様性が悪くなる方向に誤差磁場が重なる



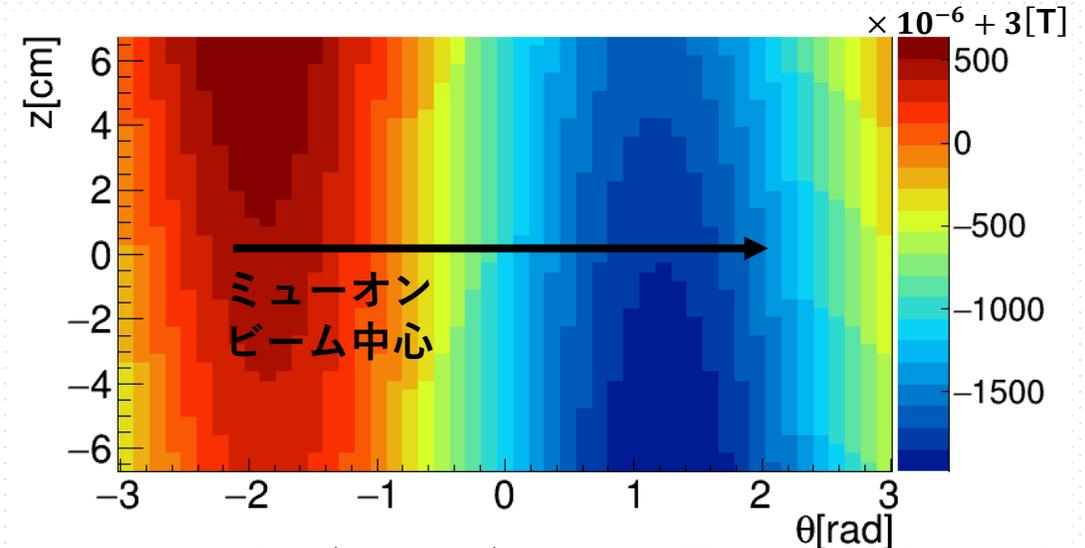
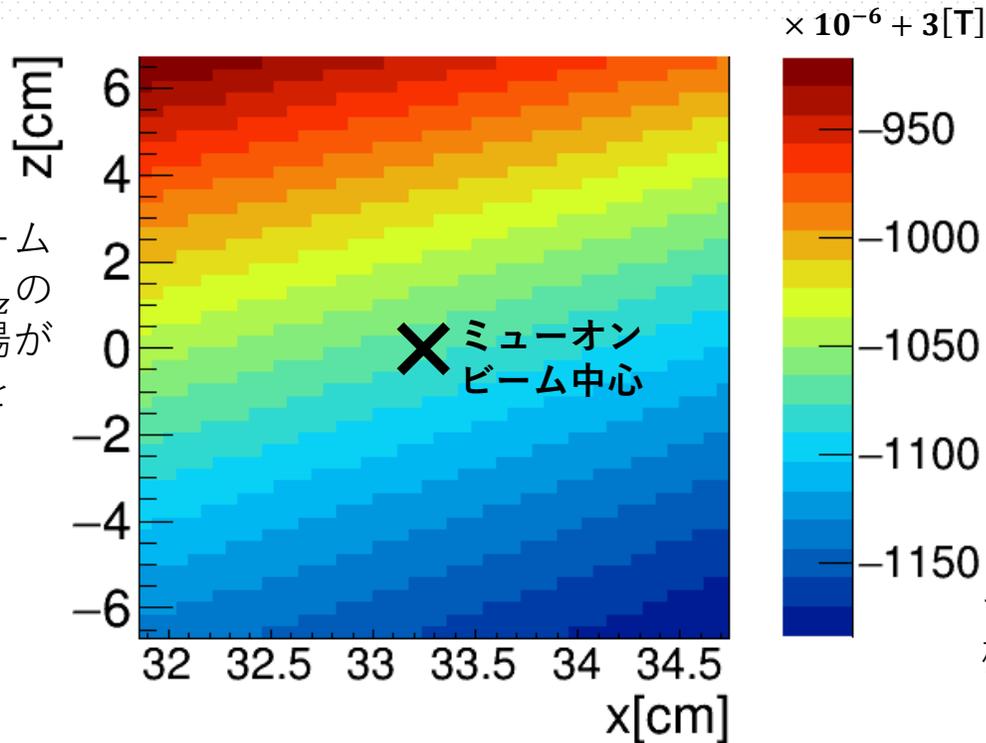
ランダムな製作誤差を入力したときの一様性のヒストグラム

897 ppm
(製作誤差を過大評価した上での1/10000最悪ケース！)

最悪ケースの誤差磁場

- 一様性の最悪ケースにおける誤差磁場の分布を調べた
- 周回方向に大きな二極成分をもつ誤差磁場が存在

蓄積領域のビーム断面における B_z の分布。誤差磁場が断面上で勾配をもっている

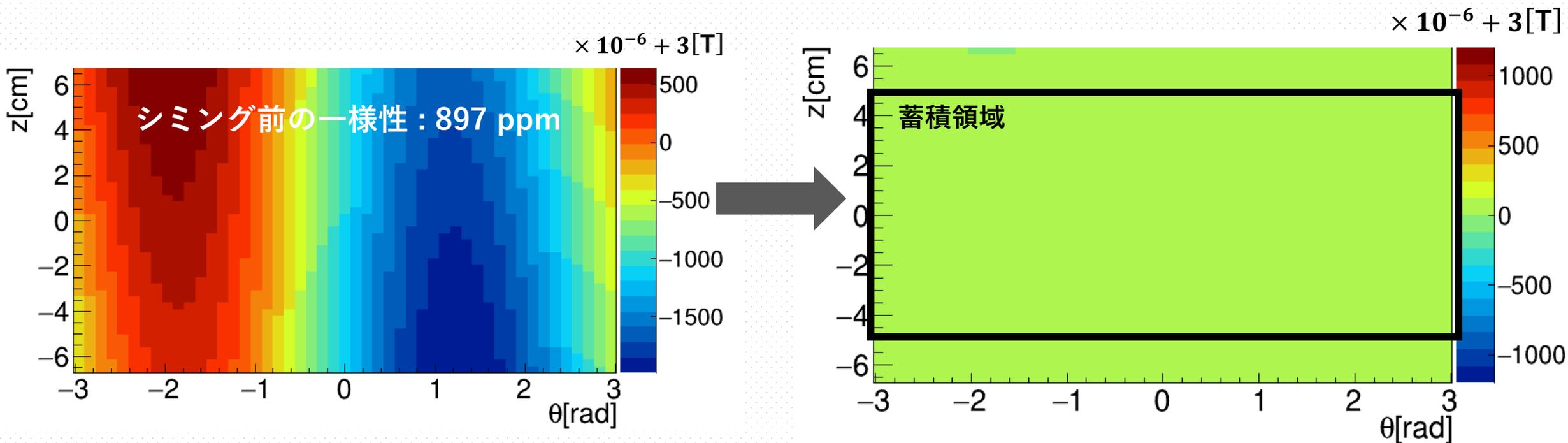


サイクロトロン半径(33.3 cm)の円筒側面の B_z の分布。誤差磁場が周回方向に $-2200 \pm 1300 \mu\text{T}$ 変動している

実際は二段階で磁場を調整する(シミング)。最悪ケースを含めた全ケースに対して、一様磁場にシミングできるか考察した

シミング計算(磁場調整)の結果

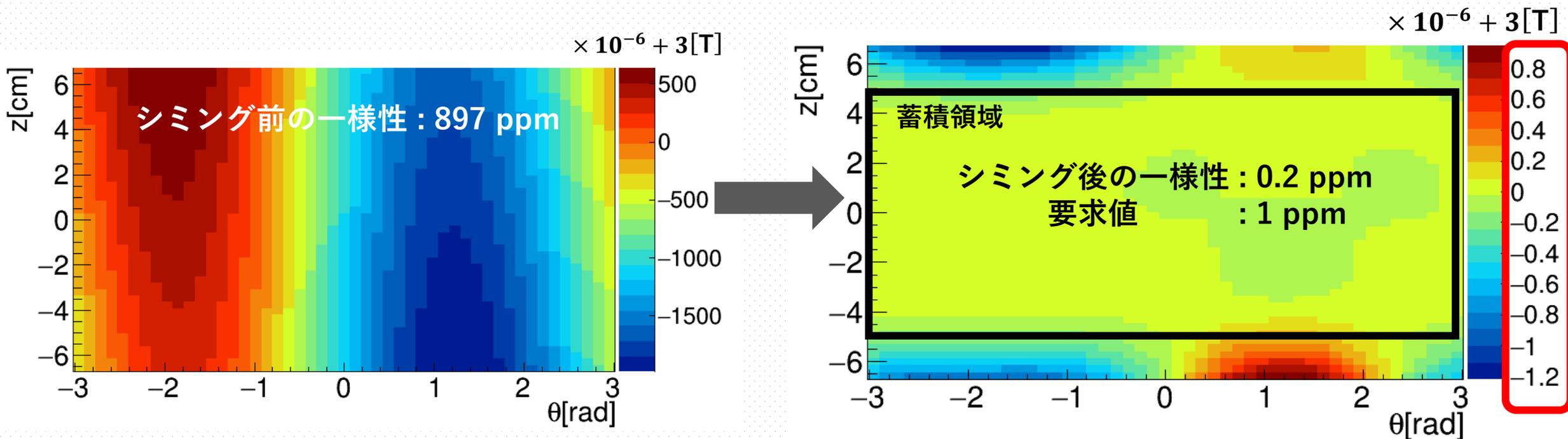
要求値を満たす一様性の B_z に調整できた



サイクロトロン半径(33.3 cm)の円筒側面上における B_z の分布。シミングによって B_z の分布が一様になっている

シミング計算(磁場調整)の結果

要求値を満たす一様性の B_z に調整できた



サイクロトロン半径(33.3 cm)の円筒側面上における B_z の分布。シミングによって B_z の分布が一様になっている

シミング後に残る $B_{x(y)}$ とその許容値

B_z は一様になったのに対し、
 $B_{x(y)}$ が $100 \mu\text{T}$ ほど残る

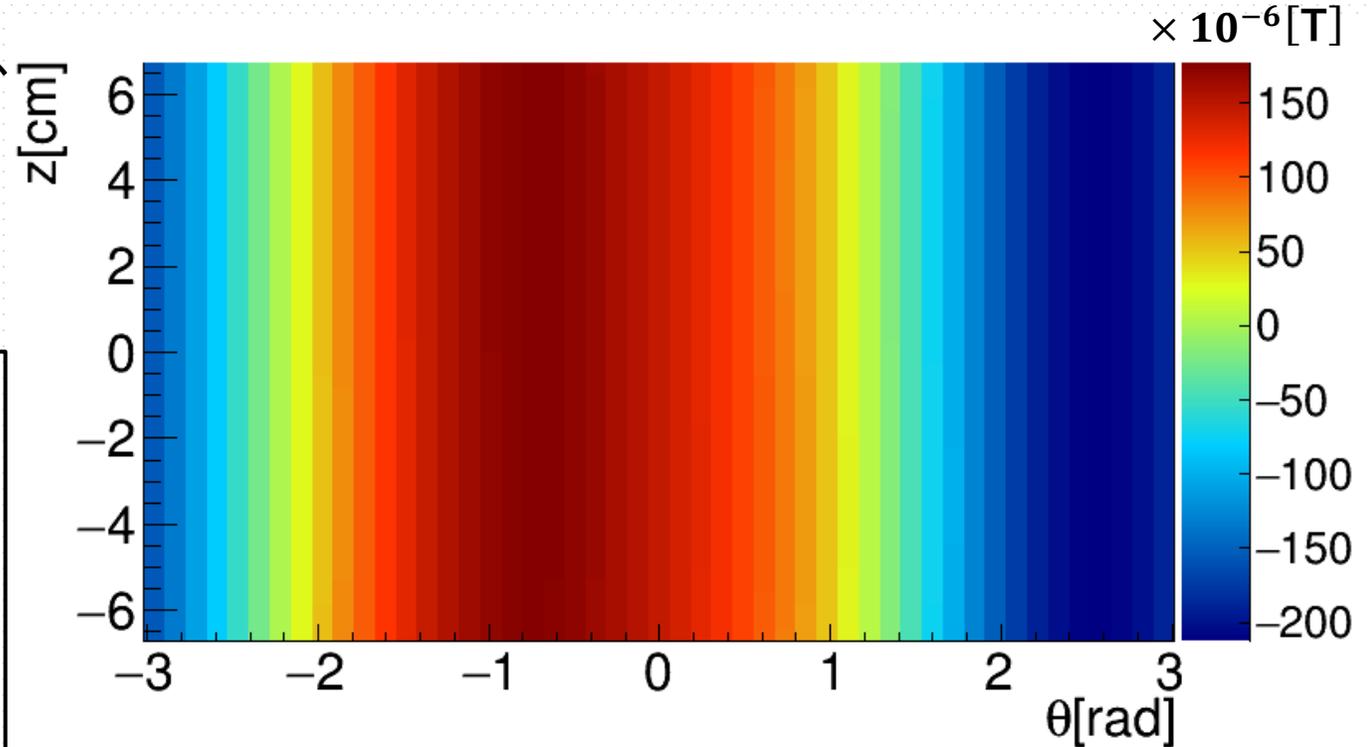


$B_{x(y)}$ の許容値 $\sim 10^{-2}\text{T}$

- 全体の磁場軸が傾く
- ミューオンの公転面が傾く
- 軸方向に振動
- 検出器のアクセプタンスを外れる
- データの質悪化



OK!

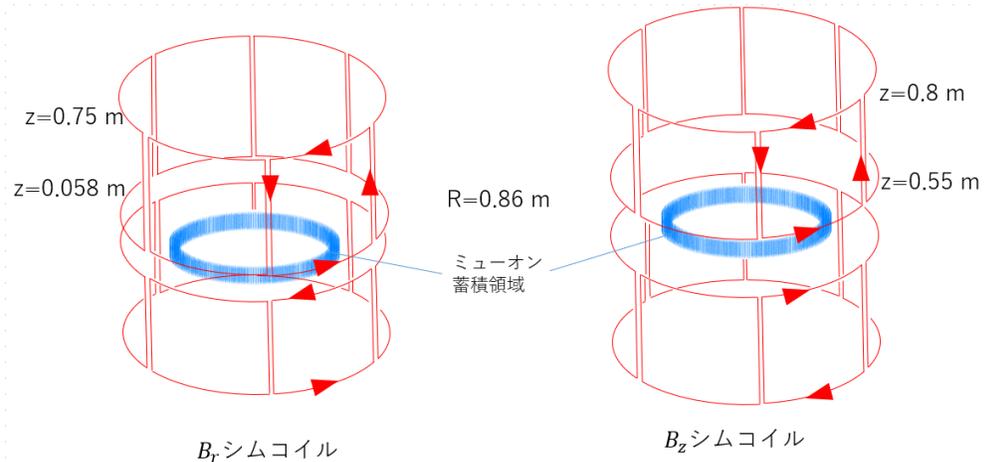


サイクロトロン半径の円筒側面上における B_r のカラーマップ。反対方向に符号が逆の B_r が生じていることから B_x のような水平方向に貫く誤差磁場があることが読み取れる

$B_{x(y)}$ に関する議論

しかしデータ解析の面から考えると余計な要素は最小化したいが、

- 2種類のシムコイル(補正コイル)を計画
- 詳細設計が進行中



補正のために
 $B_{x(y)}$ の測定が
必要

$B_{x(y)}$ が $B_z=3$ Tに
比べ小さいため
測定が困難！

* $|\vec{B}|$ はNMRプローブにより測定

$B_{x(y)}$ の検出方法

新しい $B_{x(y)}$ 検出方法を検討中

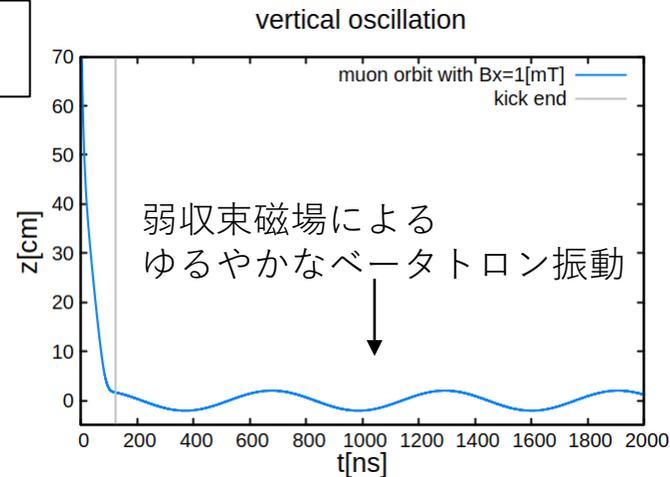
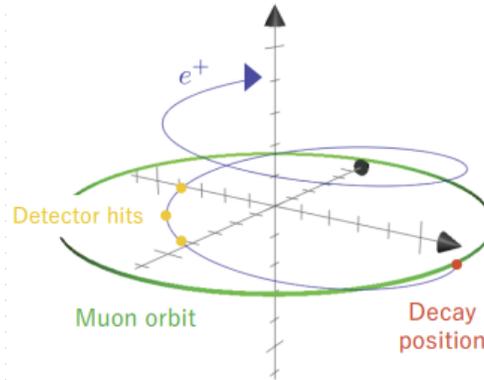
崩壊陽電子をtrack back

ミューオンの崩壊点を推定

ミューオン軌道再構成

公転面の傾きを検出

$B_{x(y)}$ を推定



*1 mTの B_x がある場合のシミュレーションによるミューオンの飛跡計算の結果。初期条件はビームの代表点を選んだ

$B_{x(y)}$ の検出方法

新しい $B_{x(y)}$ 検出方法を検討中

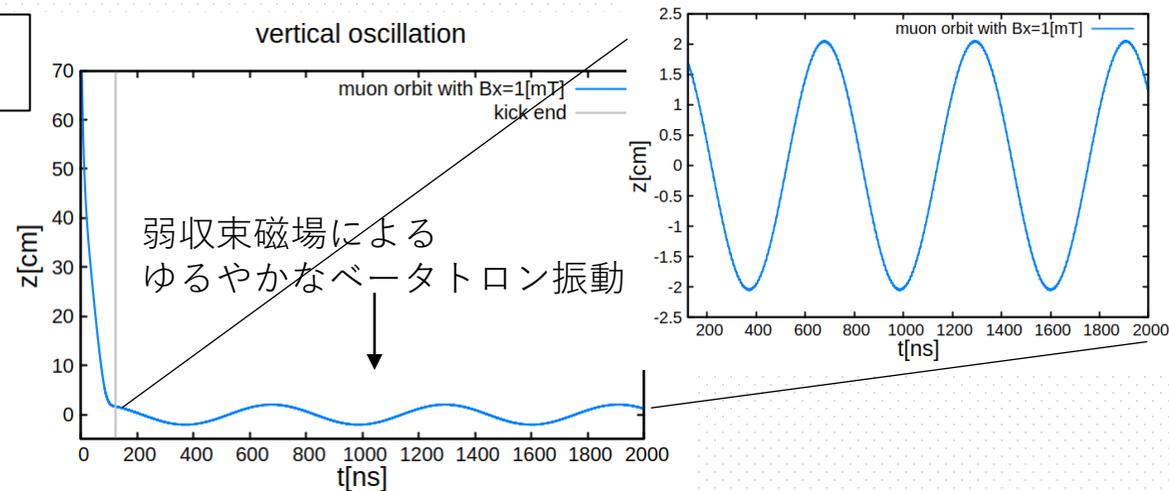
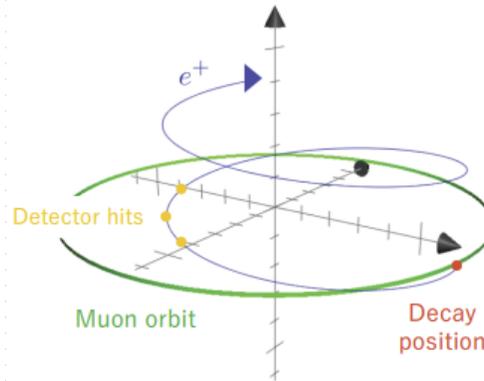
崩壊陽電子をtrack back

ミューオンの崩壊点を推定

ミューオン軌道再構成

公転面の傾きを検出

$B_{x(y)}$ を推定



*1 mTの B_x がある場合のシミュレーションによるミューオンの飛跡計算の結果。初期条件はビームの代表点を選んだ

$B_{x(y)}$ の検出方法

新しい $B_{x(y)}$ 検出方法を検討中

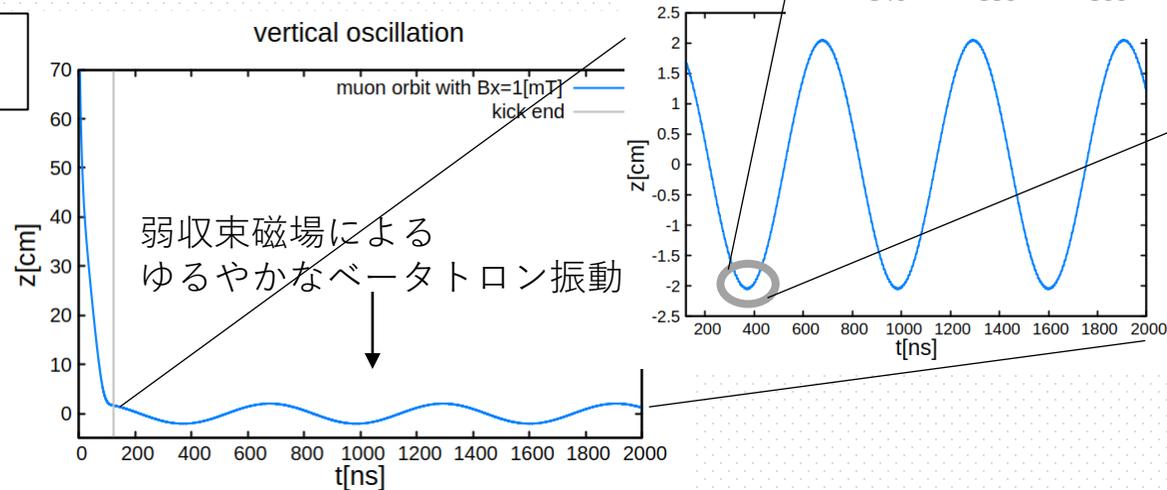
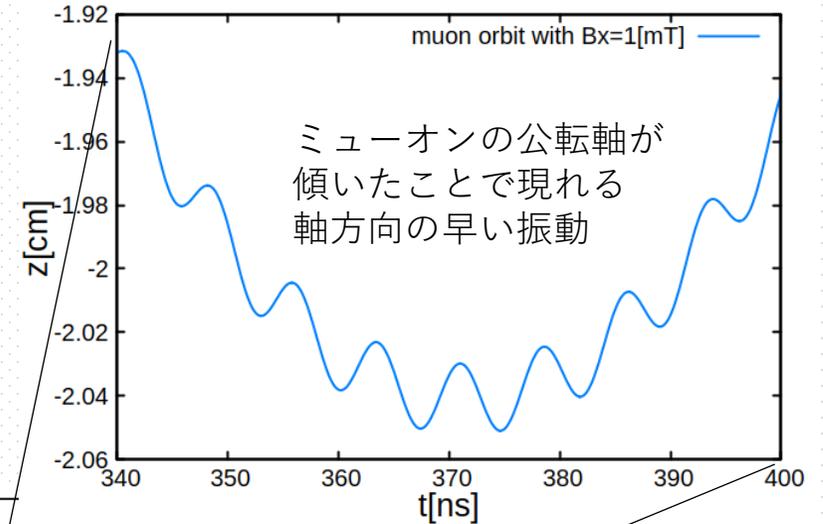
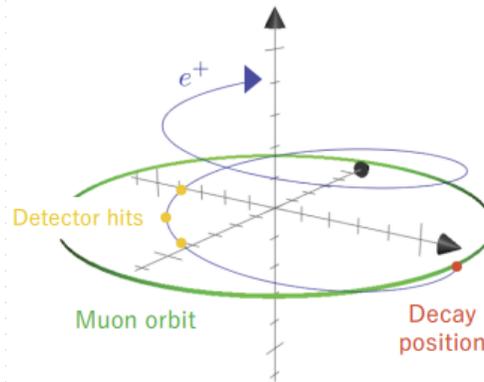
崩壊陽電子をtrack back

ミューオンの崩壊点を推定

ミューオン軌道再構成

公転面の傾きを検出

$B_{x(y)}$ を推定



誤差磁場として $B_{x(y)}$ があることで全体の磁場の軸が傾き、ミューオンの公転軸も傾く

*1 mTの B_x がある場合のシミュレーションによるミューオンの飛跡計算の結果。初期条件はビームの代表点を選んだ

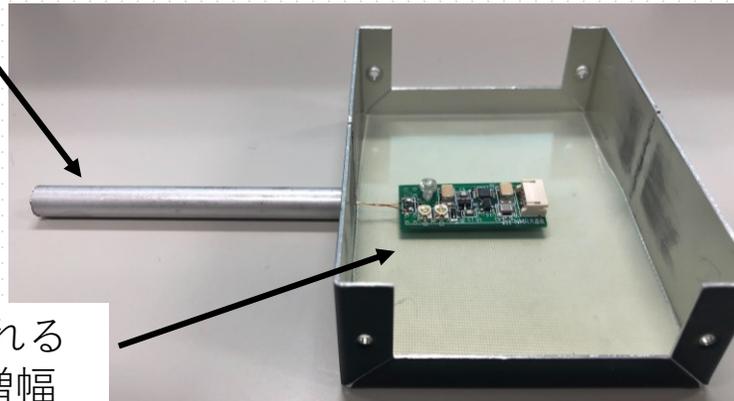
磁場精密測定器の研究開発の現状

- 一様磁場実現のための磁場測定器(NMRプローブ)を開発中
- 現在、測定器同士の干渉によるノイズの軽減に取り組んでいる

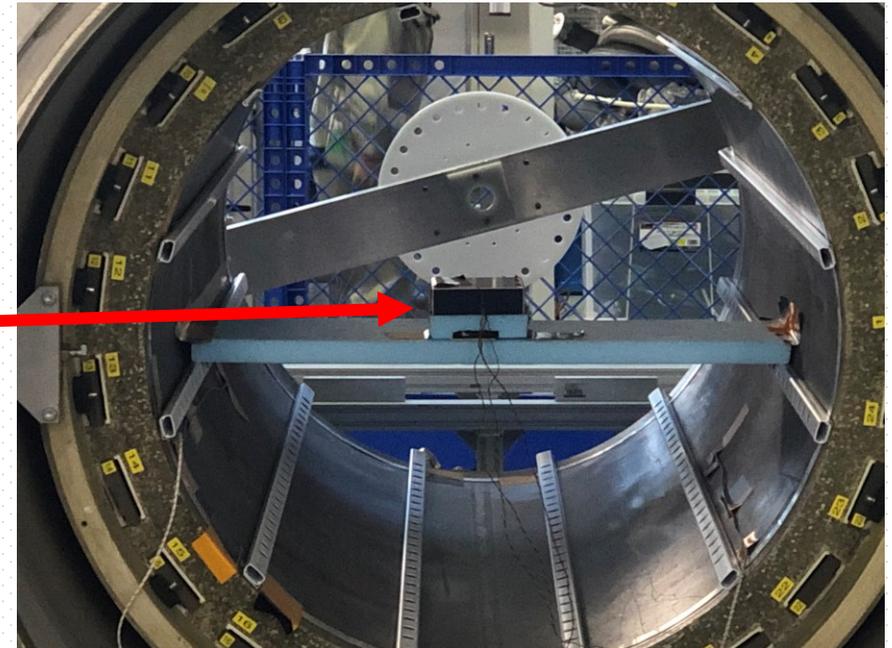
MuSEUM実験用1.7 T 磁石で開発試験を行っている

RFコイルを囲むアルミパイプ

NMRプローブ



RFコイルに流れる高周波信号を増幅する共振回路



まとめ・今後の展望

まとめ

- g-2/EDM精密測定実験のためのソレノイド磁石における誤差磁場発生要因のうち主要なもののひとつである製作誤差について発生しうる誤差磁場の強度を調査した
- 一様性を最も乱す最悪ケースを含めて鉄片を用いたシミング(磁場調整)で要求値を下回るまで一様性を向上できることを確かめた

今後の展望

- 鉄片を用いたシミングの後に残る $B_{x(y)}$ の検出方法について検討する
- 一様磁場実現のための精密磁場測定器の研究開発を進める



Backup

シミング計算の概略

1. 目標磁場の配列 \mathbf{B}_{TG} (磁場測定点の数の要素数 n) を決定
2. 磁場を測定 (\mathbf{B}_{MS}) し誤差磁場 $\mathbf{B}_{ER} = \mathbf{B}_{TG} - \mathbf{B}_{MS}$ を計算
3. 鉄シムの体積の配列 \mathbf{V} (シムポケットの数の要素数 m) と磁場測定点につくる磁場との関係を表す応答行列 \mathbf{A} を求める (一般に $\mathbf{B} = \mathbf{A}\mathbf{V}$)。
4. 誤差磁場 \mathbf{B}_{ER} を打ち消すような鉄シムの配列 \mathbf{V} を $\mathbf{V} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}$ により求める
5. その際、妥当な精度および鉄シムの体積で解を得るために特異値分解を利用する
6. $\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^t = \sum_{i=0}^{\min\{n,m\}} |\mathbf{u}_i\rangle \sigma_i \langle \mathbf{v}_i|$ 特異値分解 (\mathbf{U}, \mathbf{V} は unitary 行列、 \mathbf{S} は対角成分に特異値が並ぶ対角行列に零ブロック行列が結合した $n \times m$ 行列、 $|\mathbf{u}_i\rangle$ は \mathbf{U} の基底、 $|\mathbf{v}_i\rangle$ は \mathbf{V} の基底、 σ_i は特異値)
7. 適切なモード n_{tr} で計算を打ち切り $\mathbf{V} = \sum_{i=0}^{n_{tr}} |\mathbf{v}_i\rangle \frac{1}{\sigma_i} \langle \mathbf{u}_i | \mathbf{B}_{ER} \rangle$ として配置を計算
8. 必要なら \mathbf{V} 中の制約条件 (正かつ定めた最大量を超えてはいけない) を満たさない要素に対して体積を修正
 1. 修正した鉄シムの配置がつくる磁場 $\mathbf{B}_{MM} = \mathbf{A}\mathbf{V}$ で計算
 2. 誤差磁場を $\mathbf{B}_{ER} \rightarrow \mathbf{B}_{ER} - \mathbf{B}_{MM}$ に更新
 3. 7に戻る
9. \mathbf{V} 中の全ての要素が制約条件を満たし、配置した鉄シムによって磁場の一様性が要求値を満たすことを確認。必要なら目標磁場 \mathbf{B}_{TG} を変更し 1 に戻る

詳細は以下の論文を参照してください

A. Mitsushi, "Passive shimming of MRI static magnetic field using regularization of truncated singular value decomposition," Magn. Reson. Med. Sci., vol. 16, no. 4, pp. 284–296, 2017

シミング計算時の諸条件・結果

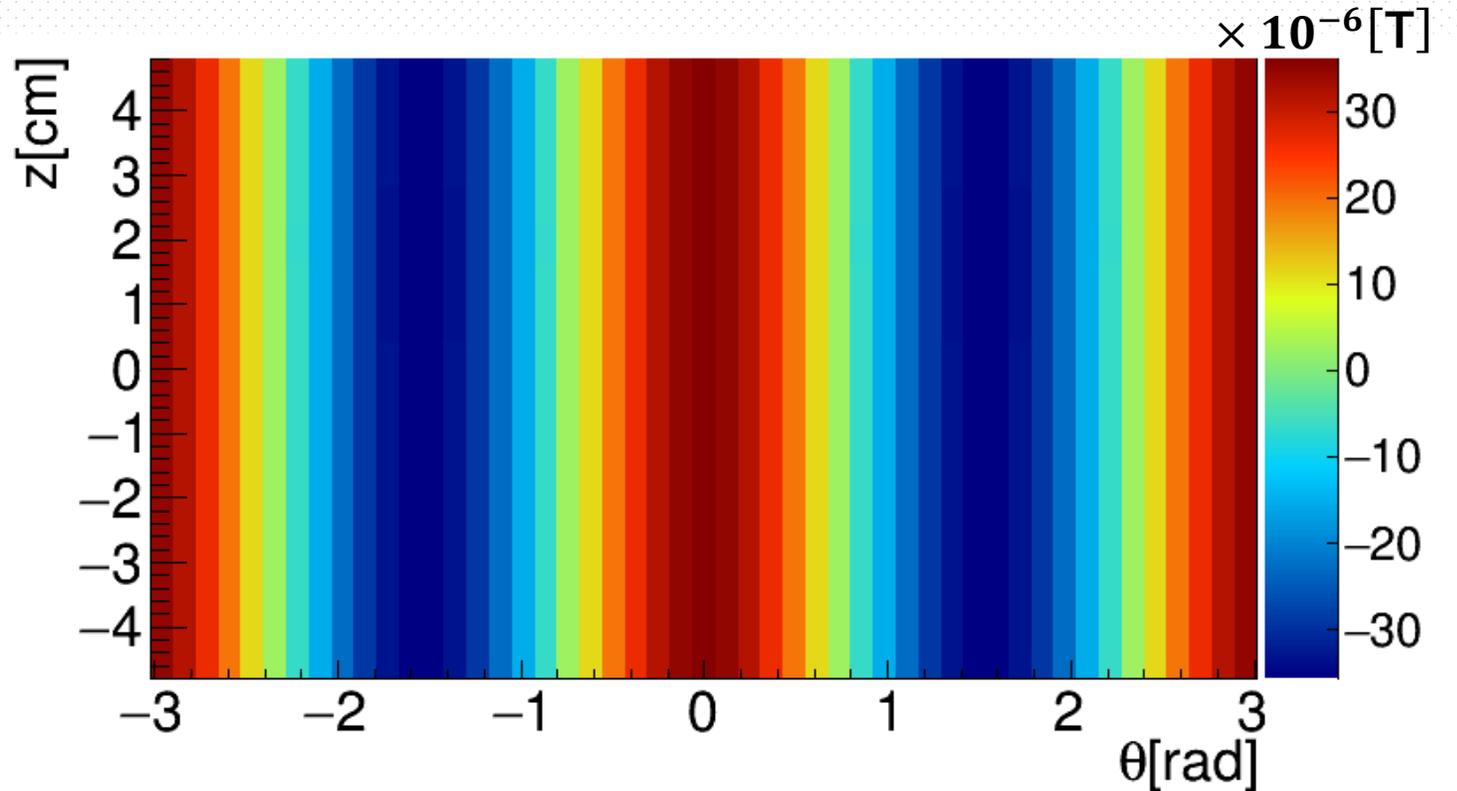
	量	単位	
最大繰り返し計算回数	600	回	
1 ポケットあたりの鉄の最大量	21	cc	
目標磁場強度	3	T	
打ち切りモード数	98	モード	
磁場測定点	半径方向	5	点
	軸方向	10	
	周回方向	100	
シムポケット	周回方向	40	個
	軸方向	24	
	半径	0.65	m

最悪ケースの具体的な製作誤差

製作誤差		鉄ヨーク	MC10	MC11	MC20	MC21	MC30
全体の変位	x変位 [mm]	0.06	0.45	0.05	-0.23	0.35	-0.32
	y変位 [mm]	0.36	0.46	0.36	-0.23	-0.31	-0.27
	z変位 [mm]	0.23	-0.39	-0.21	0.37	0.02	0.29
傾き	天頂角 [mrad]	-0.34	0.44	0.39	-0.39	0.36	-0.16
	方位角 [rad]	1.27	1.10	4.22	4.60	5.76	0.41
コイル変形	内径 [mm]	-	0.22	-0.34	0.47	0.47	0.31
	外径 [mm]		0.22	0.12	0.39	0.39	-0.06
	軸方向全幅 [mm]		0.32	-0.50	0.23	0.23	-0.03

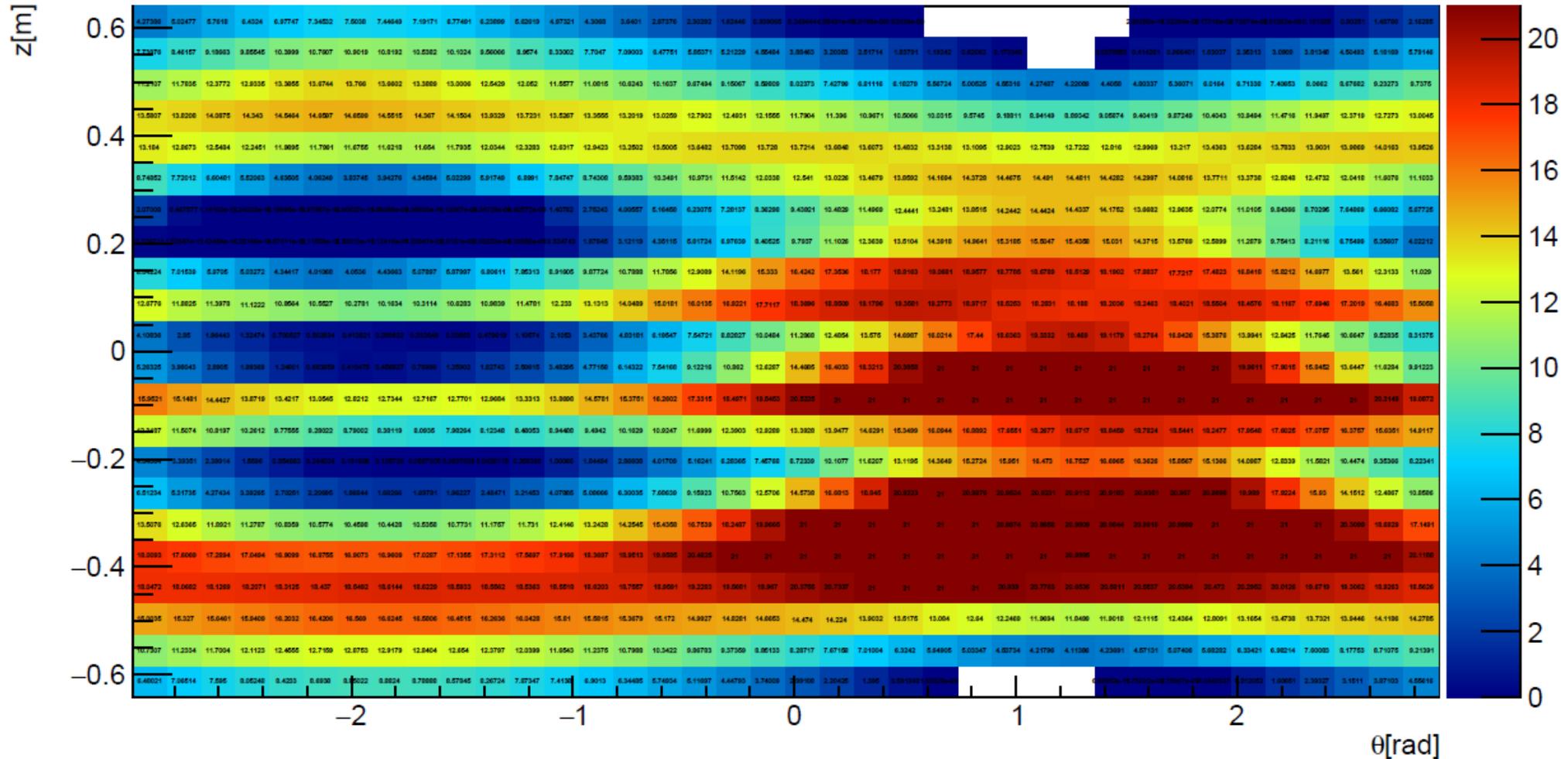
$B_{x(y)}$ が残る理由

B_r 成分は B_z と同時にシミングすることができない。
その中でも放射状に広がる
周回方向一様な B_r は
0.1 μT 以下までシミングされる
が $B_{x(y)}$ は B_z と結びつきやすい。
今回考慮した製作誤差は周回方向
に主に二極の誤差磁場を生じるが、
四極以上の誤差磁場(例えばコイル
が十字架のように周回方向に
変形した場合に発生する)をシミング
するときも、四極の B_r 成分が
シミングしきれずに残る。



最上部のコイルの半径が周回方向に ± 0.1 mm楕円
変形したときの誤差磁場をシミングした後の B_r の分
布

最悪ケースのシミング時の鉄の配置



図中の数字は各シムポケットに収納する鉄片の体積[cc]。
全体の鉄片の使用率は49%。