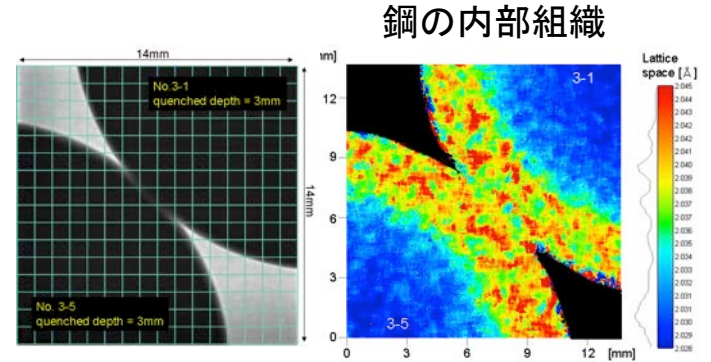
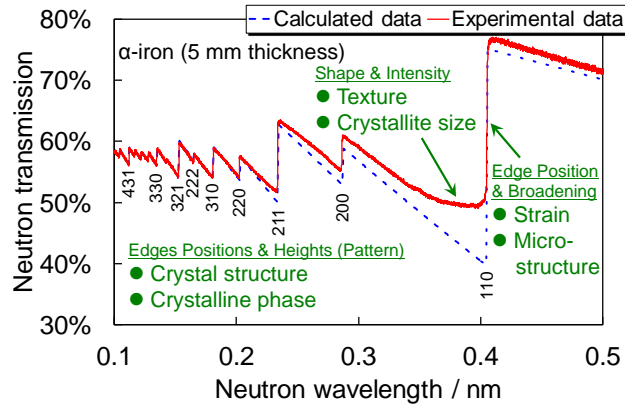


J-PARCにおける偏極パルス中性子イメージングを利用した 磁気製品内部磁場評価のための技術開発

(JAEA) 廣井孝介、篠原武尚、蘇玉華、及川健一、原田正英、甲斐哲也
(CROSS) 林田洋寿、Joseph Don Parker

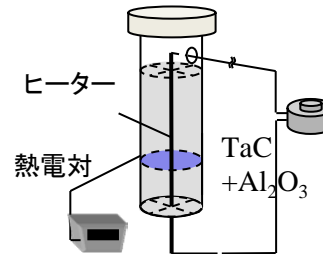
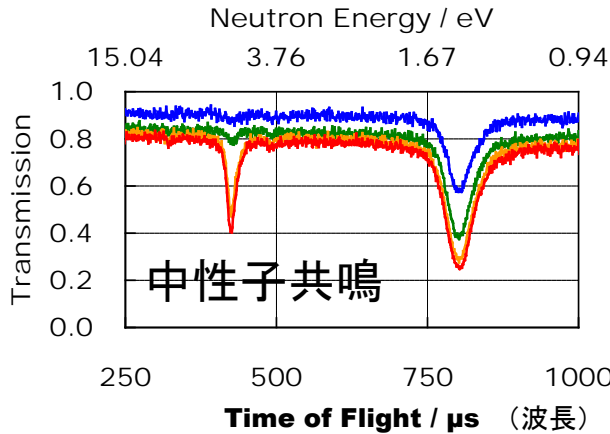
エネルギー分析型中性子イメージング

ブラッグエッジ
 残留応力(歪)
 結晶粒サイズ
 結晶粒異方性

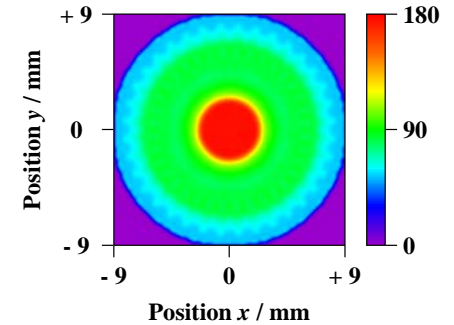


鋼の内部組織

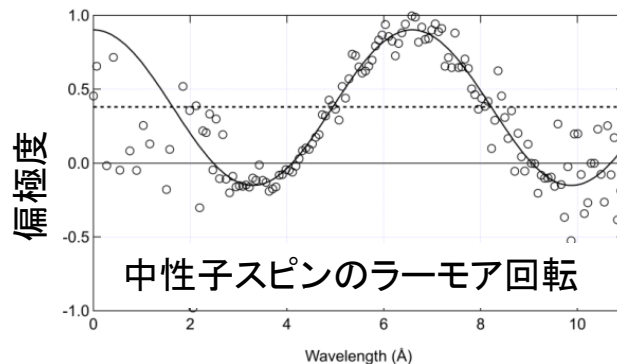
共鳴吸収:
 元素分析
 温度測定



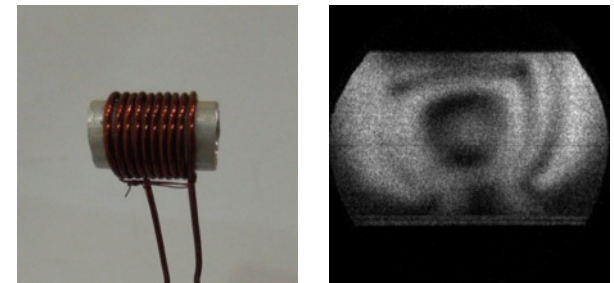
物質内部の温度 (°C)



偏極中性子;
 空間磁場の強度
 ベクトル方位

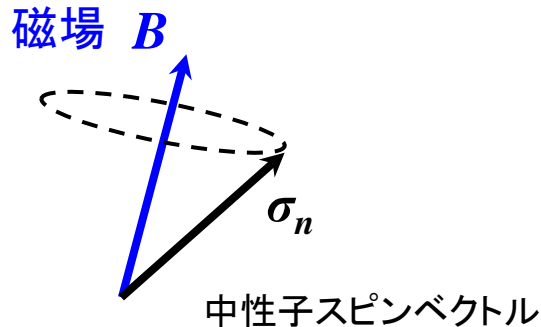


コイルで発生した磁場



偏極パルス中性子磁気イメージング

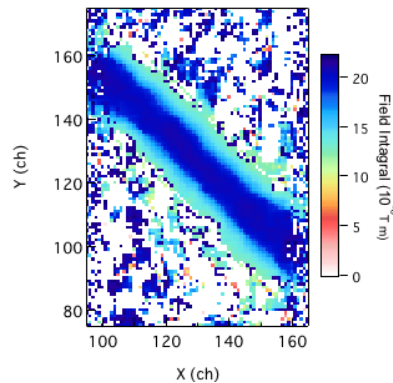
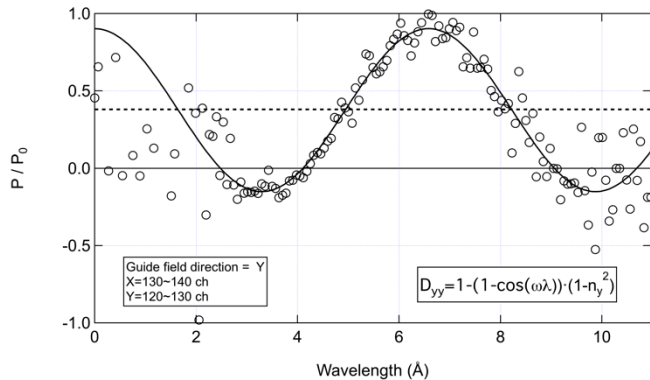
中性子スピンの磁場中での歳差回転を利用した磁場の定量化



$$\frac{d\sigma_n}{dt} = \gamma_n \sigma_n \times B \quad \gamma_n: \text{磁気回転比}$$

$$\varphi = \omega_L t = \frac{\gamma_n}{\nu} \int B \cdot ds = \frac{\gamma_n m \lambda}{h} \int B \cdot ds$$

ラーモア歳差回転角度



$$\frac{P}{P_0} = 1 - (1 - \cos \varphi) \cdot (1 - n^2)$$

P : 偏極度

n : 量子化軸と磁場の方向余弦



質透過性 → バルク状物質内部の磁気情報を取得可能
 駆動中の磁気実用製品内部の磁場分布を定量的
 空間磁場との相互作用 → 物質/空間中の磁場を定量化
 イメージングできる可能性
 数cm ~ 数十cm

「実用製品中の熱・構造・磁気・元素の直接観察による革新エネルギー機器の実現」



2次電池

イオン移動、組成変化、凝集・偏析、**局所発熱**
結晶粒・構造変化



非破壊かつ稼働状態で観察

熱交換器

結晶構造変化
局所ひずみ
局所発熱・冷却
気体・液体変化
液体流動

触媒

組成変化、
凝集・偏析、
局所発熱



モーター

局所発熱
構造変化
局所ひずみ
漏洩磁場

稼働状態の実製品の直接観察技術を実用化

⇒ **製品の性能向上への貢献・エネルギー利用の高効率化**

基礎技術の開発

エネルギー分析型イメージング技術の高度化
X線・ミュオンビームを用いた観察技術の開発

実用機器の観察

モデル機器の評価→静止状態の実用機器の評価→稼働状態での評価

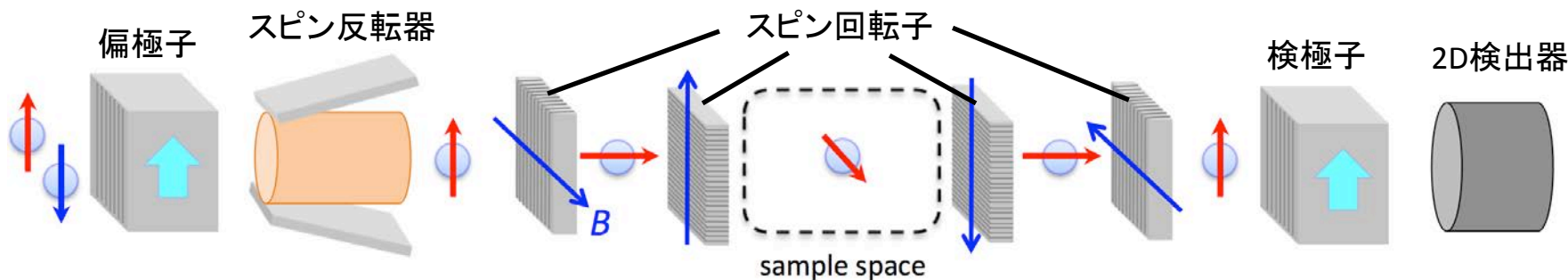
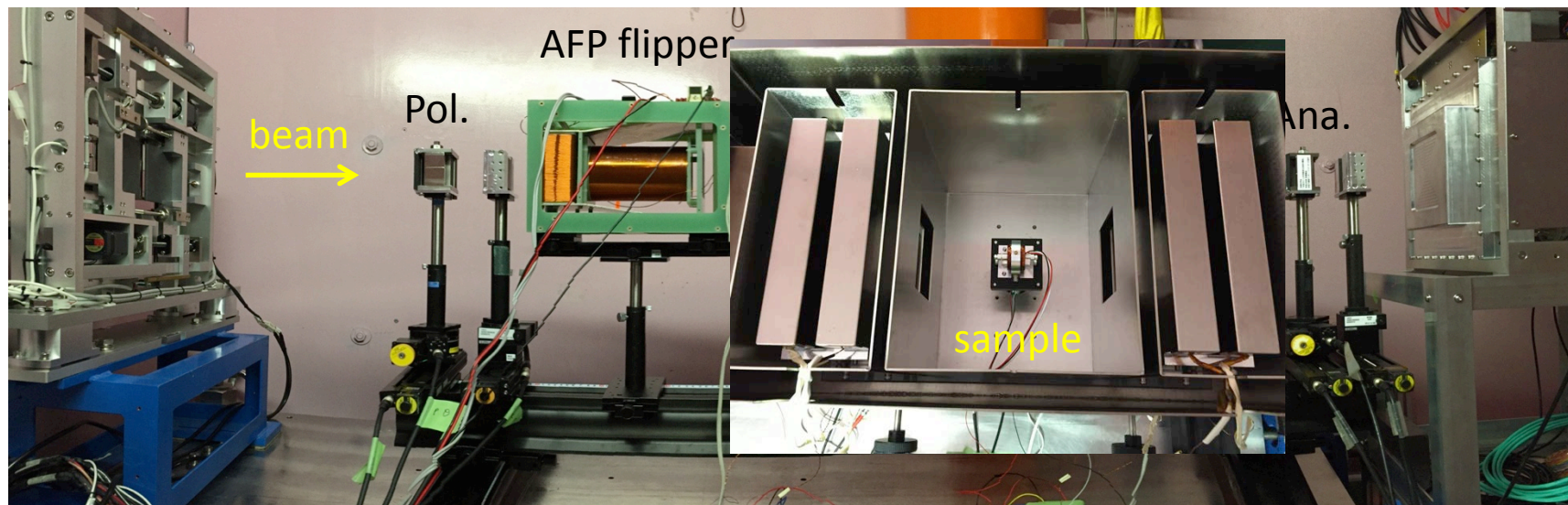
- ・小型モデルモーターに対する偏極磁気イメージング
 - 磁場方向情報のイメージング
 - 強度情報の定量化に関して(シミュレーション)
 - 電流印加状態での測定

- ・偏極磁気イメージングによる交流磁場の測定
 - 小型ソレノイドコイルを用いた検証試験 ($f \sim 50\text{Hz}$)
 - 高周波測定 ($f \sim 1\text{ kHz}$)

磁気イメージング実験体系

MLF BL10 NOBORU

μNID



偏極子・検極子: 積層湾曲型磁気スーパーミラー

スピン反転器: AFP型スピンπフリッパー

スピン回転子: Mezei型 π/2フリッパー

2次元検出器: 計数型2次元検出器 μNID

磁気シールド材質: パーマロイB

中性子偏極度

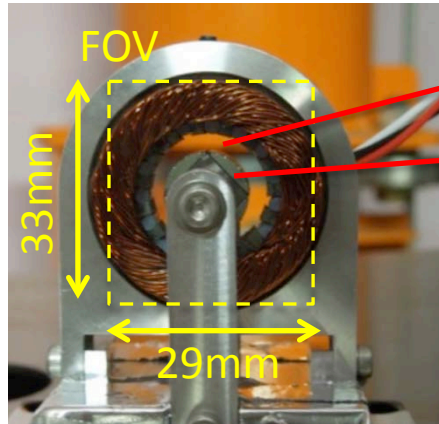
$$P = \frac{I_+ - I_-}{I_+ + I_-}$$

I_+ : スピンアップ強度
 I_- : スピンドウン強度

SFにより極性を切り替え偏極度を見積もった

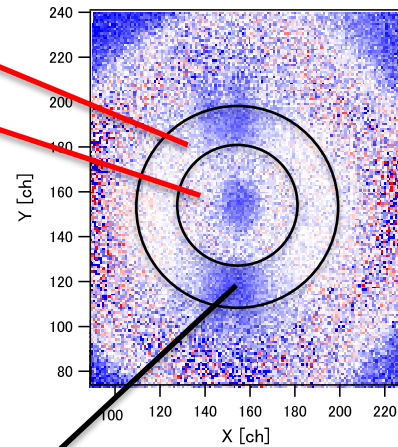
モーター試料の偏極度分布像

試料: 小型モデルモーター

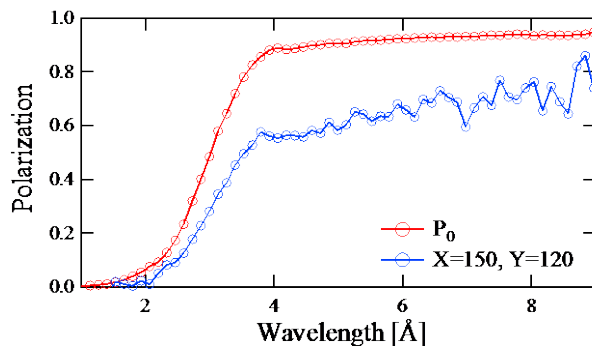
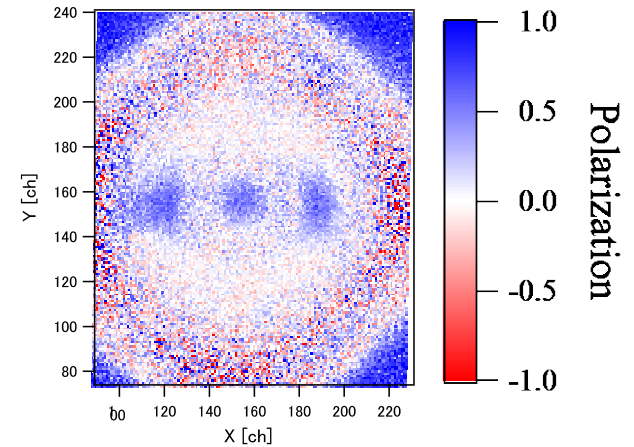


偏極度分布像 ($\lambda = 5.4 \text{ \AA}$, 1 ch = 0.2 mm)

偏極方向: X



偏極方向: Y



偏極度の波長依存性に明確な振動が見られない
 → 磁場が強すぎて(振動周期が短すぎて)波長分解しきれていない

偏極度の値は試料がないときの値から変化している

$$P / P_0 = 1 - \underbrace{(1 - \langle \cos \varphi \rangle)}_{= 0} \cdot \sin^2 \theta = \cos^2 \theta$$

(θ : 偏極軸と磁場のなす角)

振動現象が観測できなくても偏極度には磁場の角度情報が残っているはず

偏極方向解析による磁場角度分布の定量化

偏極度分布の偏極方向依存性

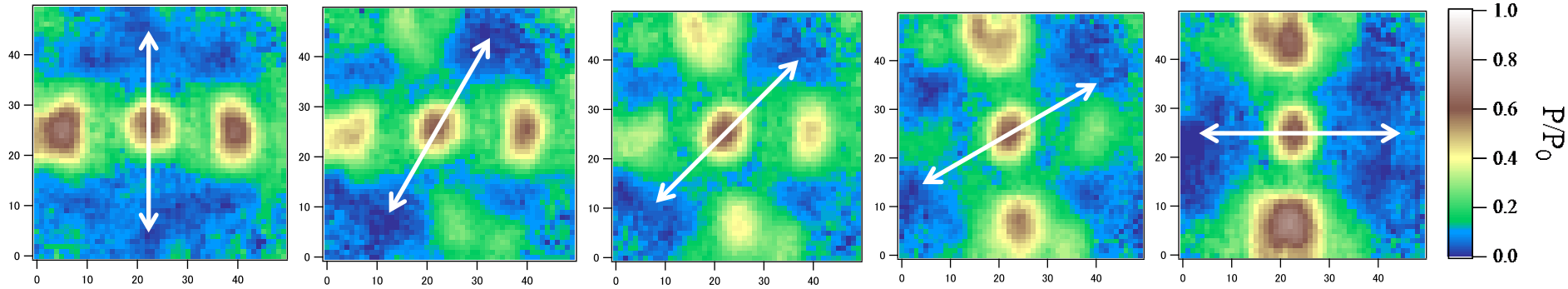
Y軸方向(0°)

30°

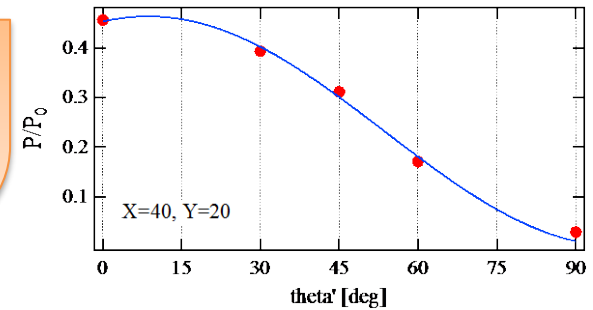
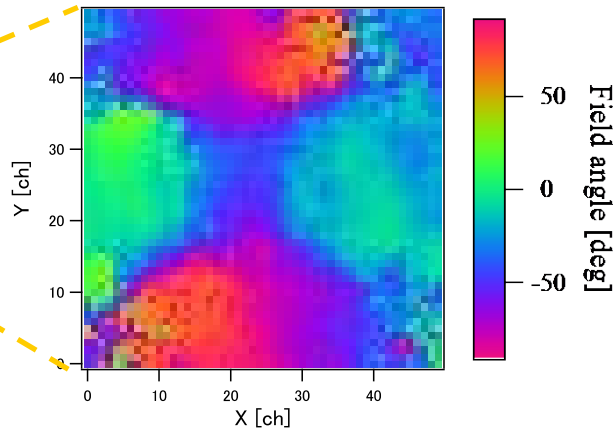
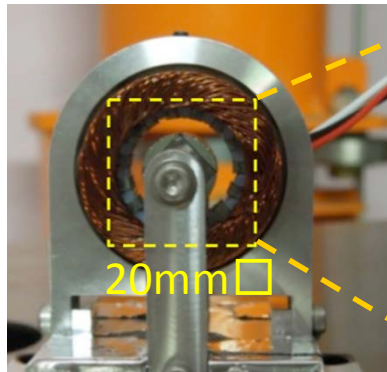
45°

60°

X軸方向(90°)



磁場角度分布像



$$P / P_0 \propto \cos^2(\theta' + \alpha)$$

θ' : 偏極角度

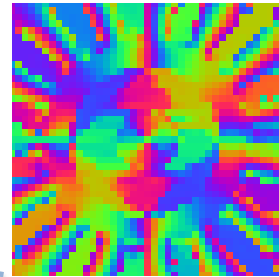
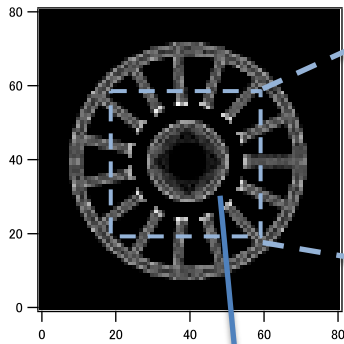
α : Y軸からの磁場の傾き

緑色領域の磁場はY軸方向、赤～紫色領域はX軸方向を向いている

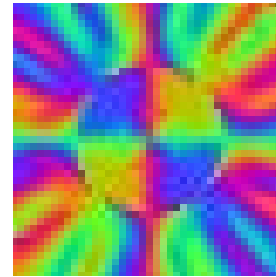
モーター内磁場分布のシミュレーション(日立製作所)



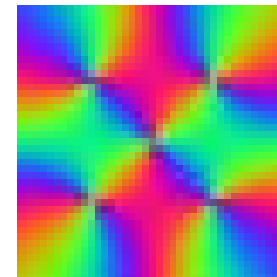
磁場角度分布 (1 ch = 0.5 mm)



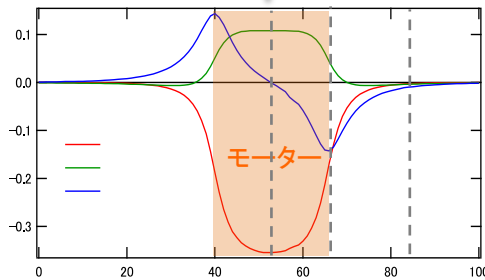
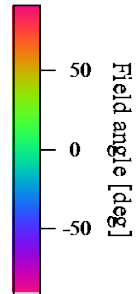
モーター中心部



モーター端部



モーター端部 +5mm



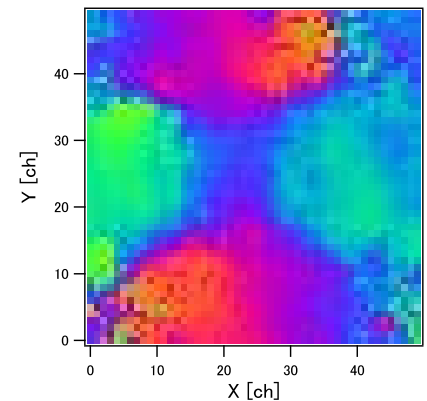
ビーム経路中の磁場分布

モーター外部にローター磁石からの漏れ磁場が存在している

磁場の分布はビーム経路中で一様ではない

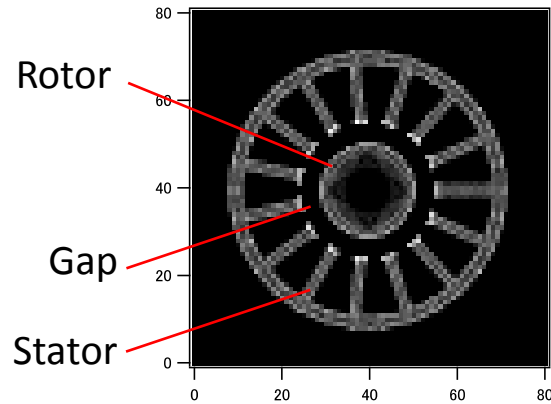
実験により得られた角度分布像はモーター内部の分布より、漏れ磁場の分布を強く反映した結果になる

現在の解析法ではモーター内部の角度情報がモーター外部の漏れ磁場の情報に上書きされてしまう

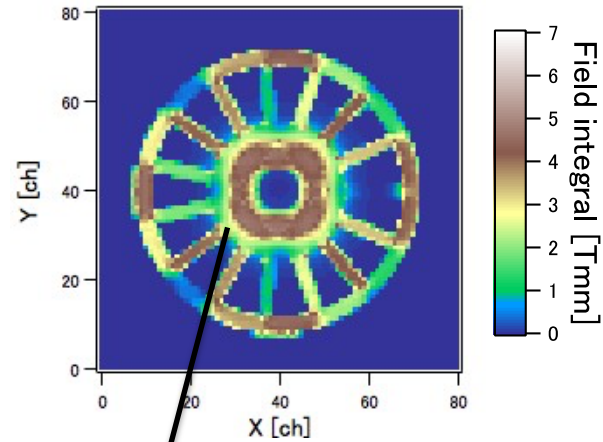


実験結果

磁場強度の定量化に関する検討

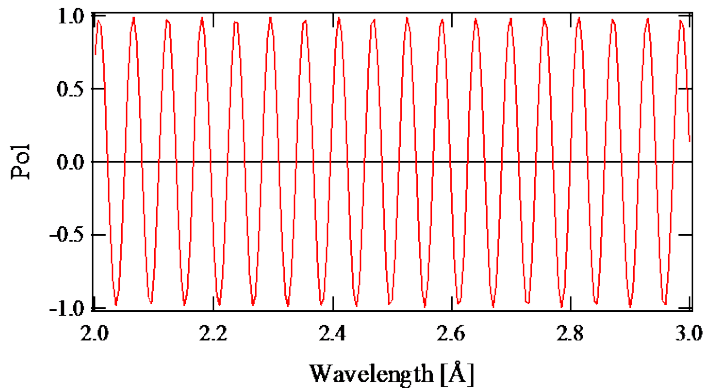


磁場積分強度分布



磁場積分強度: 2.36 Tmm

偏極度シミュレーション



$$\varphi = \omega_L t = \frac{\gamma_n m \lambda}{h} \int B \cdot ds \quad \text{予想振動周期}$$

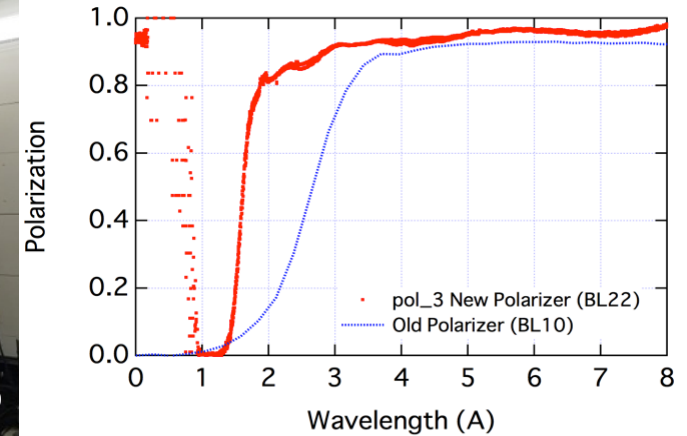
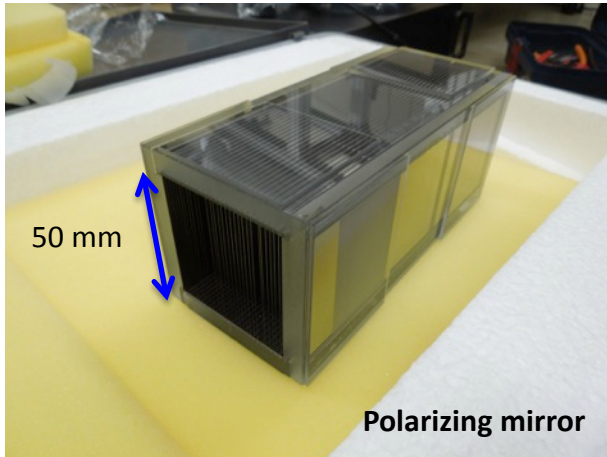
シミュレーションで得られた振動周期は予想周期と一致

→ 振動が観測できれば磁場強度情報は正確に定量化可能

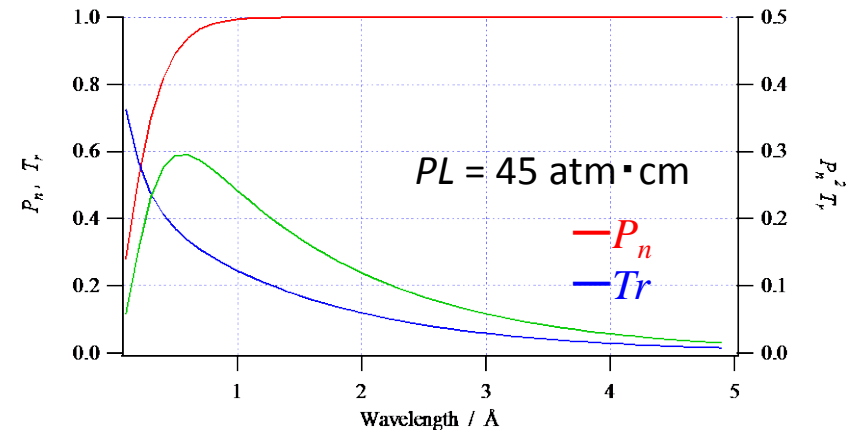
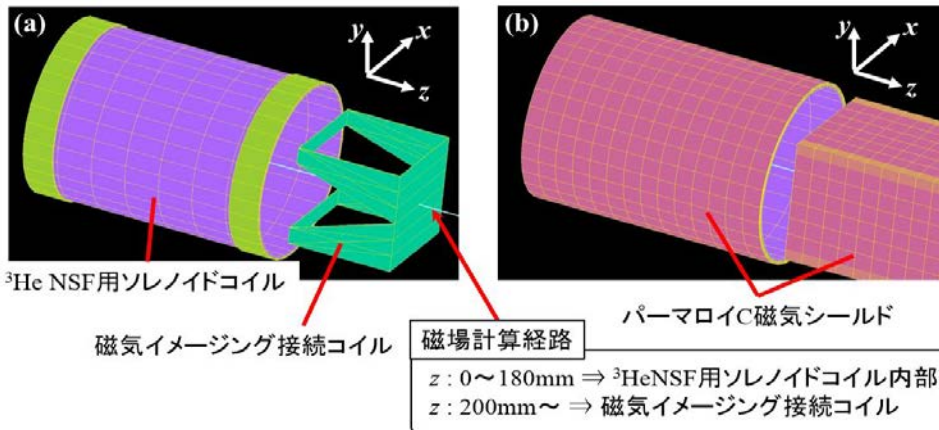
モーター中の強磁場を解析するためには $\Delta\lambda < 0.01 \text{ \AA}$ のパルス幅が必要
→ より波長の短い偏極中性子による偏極度解析

短波長偏極実験のための準備状況

イメージング用偏極装置(磁気ミラー)@BL22“螺鈿”



BL22専用 ^3He スピンフィルター (SEOP)



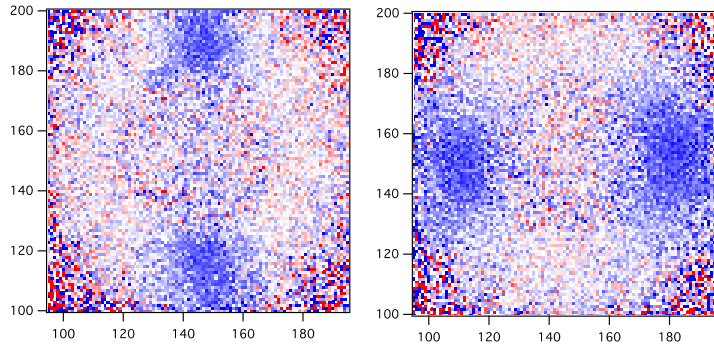
現在SEOPのためのソレノイドコイルおよび ^3He セルを設計・製作中

電流印加状態における偏極度分布像

実験により得られた偏極度分布

X方向偏極

Y方向偏極

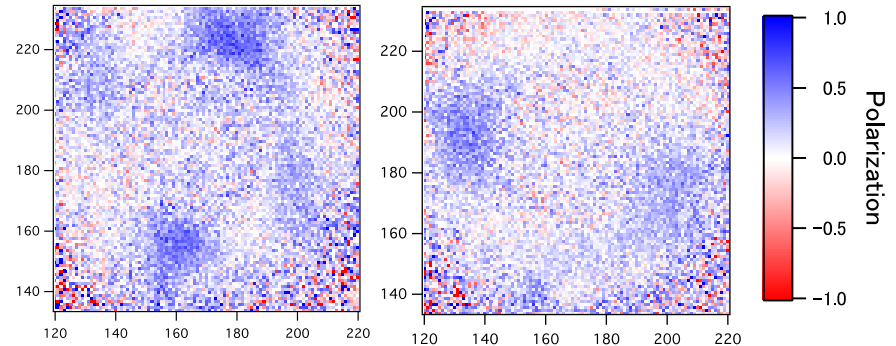


電流印加



X方向偏極

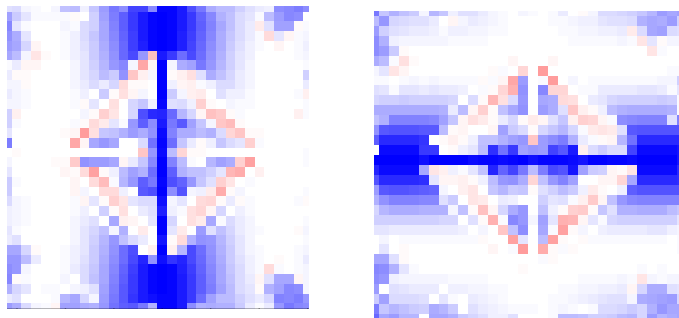
Y方向偏極



偏極度シミュレーション

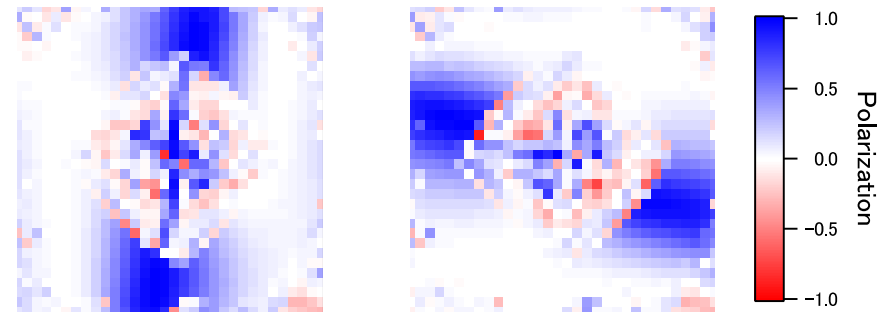
X方向偏極

Y方向偏極



X方向偏極

Y方向偏極



電流印加により偏極度分布は変化し、その傾向はシミュレーションにより再現可能

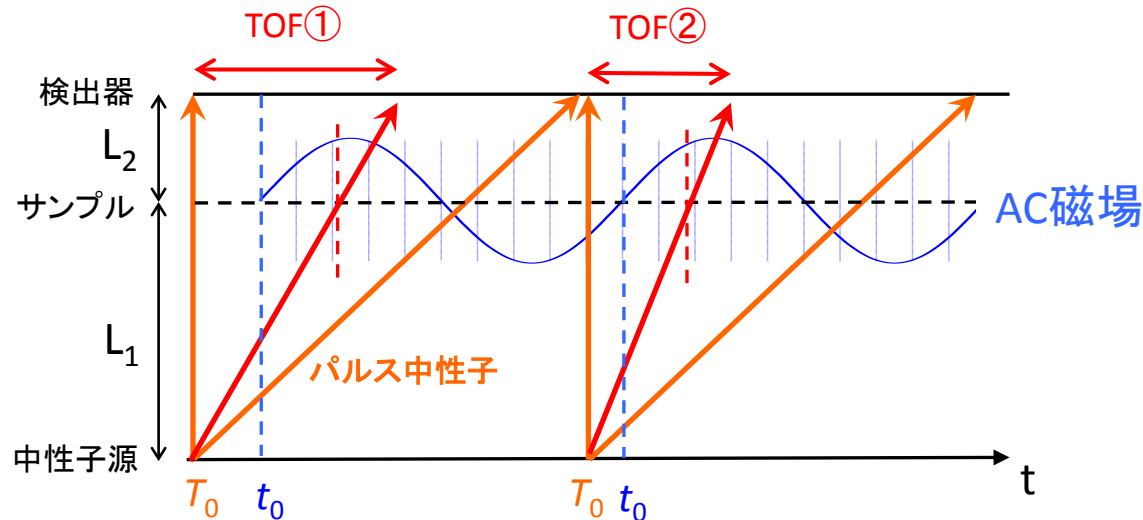
→ 偏極度の分布の変化からモーターの回転状態の定量化が可能か検討中

- ・小型モデルモーターに対する偏極磁気イメージング
 - 磁場方向情報のイメージング
 - 強度情報の定量化に関して(シミュレーション)
 - 電流印加状態での測定

- ・偏極磁気イメージングによる交流磁場の測定
 - 小型ソレノイドコイルを用いた検証試験 ($f \sim 50\text{Hz}$)
 - 高周波測定 ($f \sim 1\text{ kHz}$)

交流磁場の測定方法

中性子が通過してきた位相を知るため中性子発生時間(T_0), 飛行時間に加え交流信号発生時間(t_0)を記録しておく必要がある

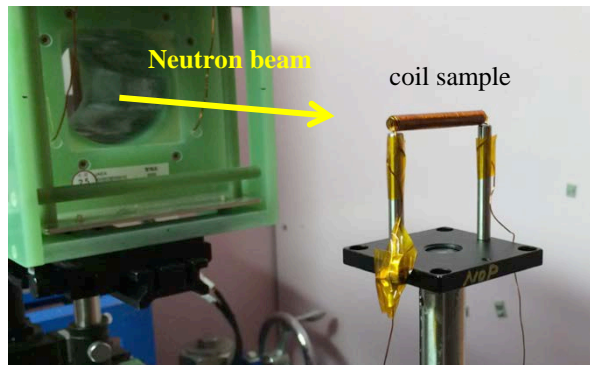


これらを記録しておけば検出された中性子が通過してきた交流磁場の位相を測定後のイベントデータから計算できる

$$\text{Phase} = \frac{2\pi}{T_{ac}} \left\{ \frac{L_1}{L_1 + L_2} TOF + (T_{ac} - \Delta t) \right\} \quad \Delta t = t_0 - T_0$$

T_{ac} : 交流磁場の周期

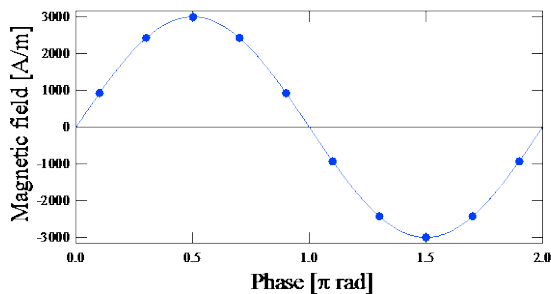
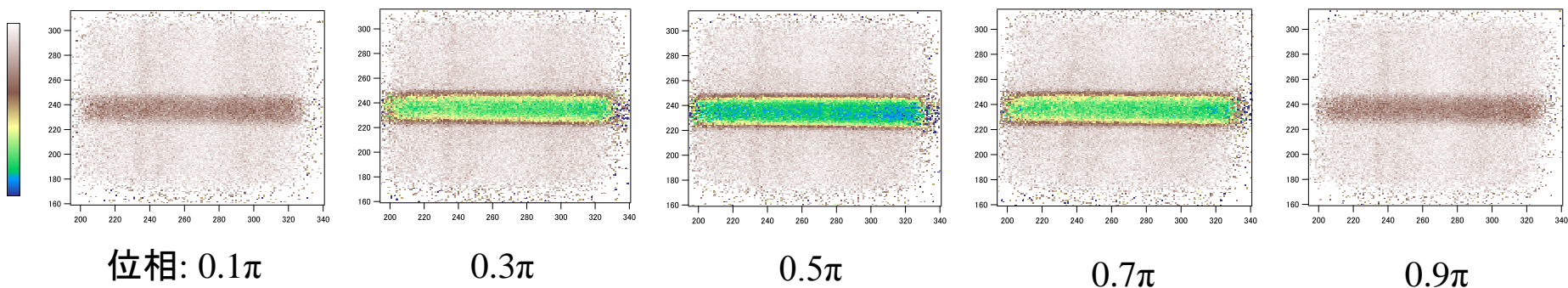
偏極イメージングによる交流磁場観察



AC電流: $f = 52.5\text{Hz}$, $I_{\text{peak}} = 1.5\text{A}$
 測定時間: $5\text{h} \times 2$

AC電流の開始時間を記録
 → 中性子が通過してきた交流磁場の位相を計算

$\lambda = 4.2 \text{ \AA}$ における偏極度分布像



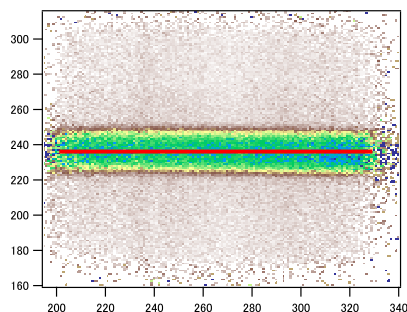
各位相における磁場の予想値

- ・コイル部分に明確な偏極度の変化が観測された
- ・磁場が強い位相ほど偏極度が大きく変化
 → 交流磁場強度の位相に依存した変化を反映

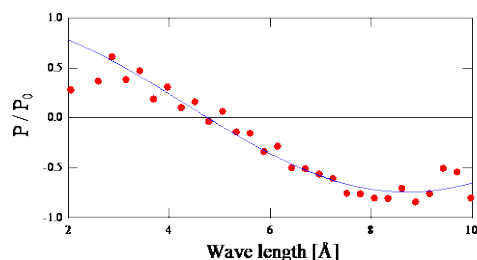
交流磁場に対する偏極度解析

試料コイル中心(経路長4mm)領域の偏極度の波長依存性を解析

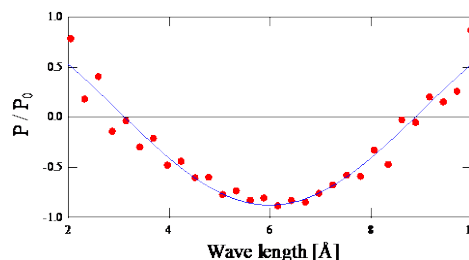
コイルの長さ方向の磁場は均一と仮定してx方向のデータを足し合わせ、その平均値を見積もった



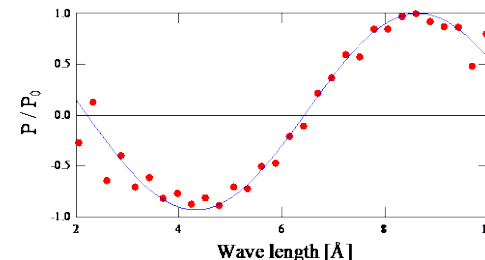
$$P/P_0 = 1 - (1 - \cos\varphi) \cdot (1 - n^2)$$



位相: 0.15π



0.25π

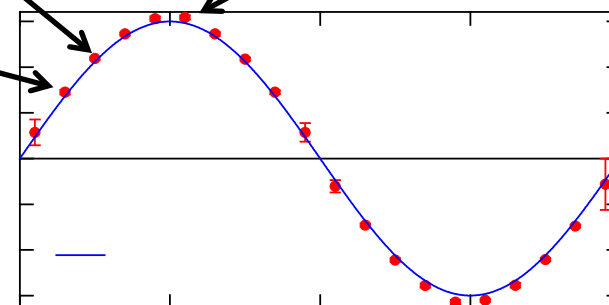


0.55π

位相 $0 \sim 2\pi$ で交流磁場の正弦波形が再現されることが確認できた

コイル方向の磁場強度も予想値とほぼ一致
(予想値との差は平均で1.7G程度)

→ 各位相における交流磁場強度の定量評価に成功

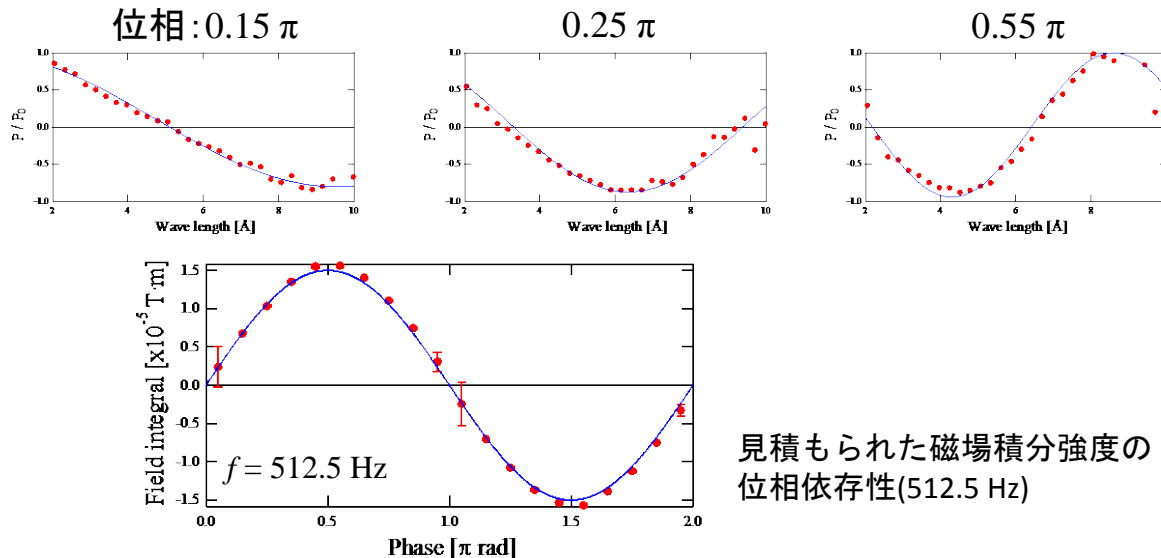
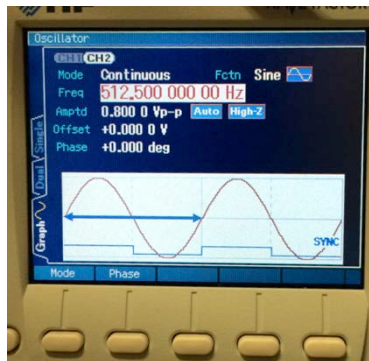


π

高周波磁場の測定結果

512.5 Hz

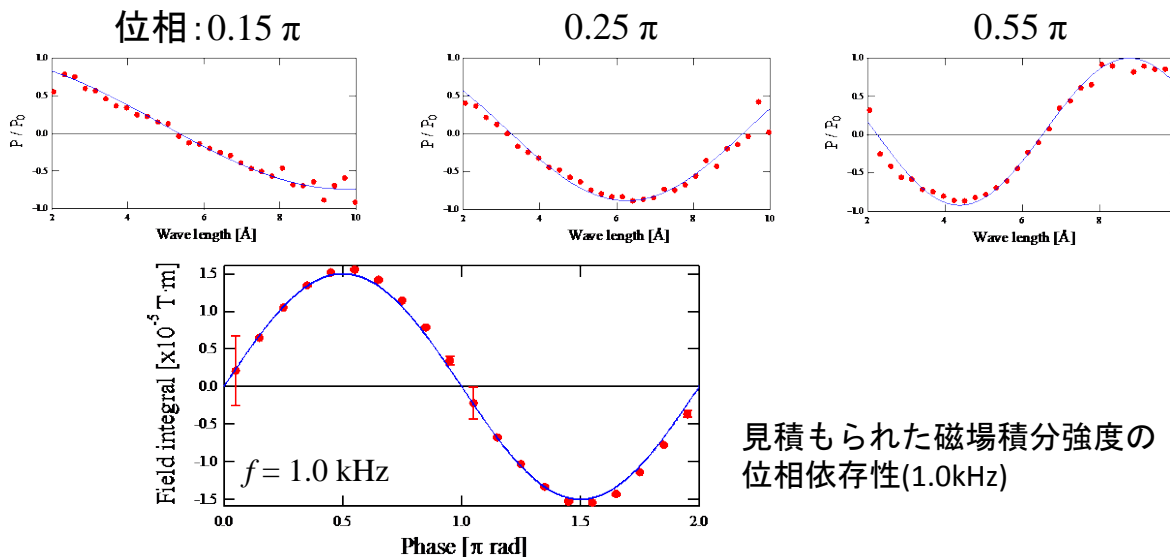
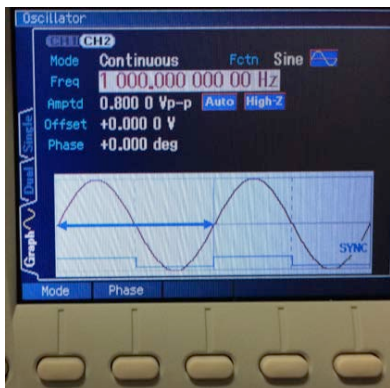
各位相における偏極度の波長依存性(512.5Hz)



見積もられた磁場積分強度の位相依存性(512.5 Hz)

1.0 kHz

各位相における偏極度の波長依存性(1.0kHz)



見積もられた磁場積分強度の位相依存性(1.0kHz)

まとめ



<モーターに対する偏極磁気イメージング>

- 偏極方向を変化させそれに伴う偏極度の変化を解析することで**磁場強度に関係なく角度分布情報を定量化する手法を試験した**
 - 磁場の角度分布はビーム経路中で変化しており、**本手法で得られる情報はモーター外部の漏れ磁場の分布に近いことが確認された**
- 偏極度シミュレーションにより $\Delta\lambda < 0.01 \text{ \AA}$ 程度のパルス幅による偏極度解析が**できれば、強度情報の定量化が可能であることが確認できた**
 - BL22にて短波長中性子を偏極するための偏極装置を準備中
- モーターに**直流電流を印加すると偏極度分布像も変化し、この傾向は偏極度シミュレーションでも再現可能**
 - 今後は偏極度分布像の変化から駆動状態を観察する方法を検討する

<交流磁場測定>

- 交流信号のスタート時間を記録することで、交流磁場の周期的変化をイメージングする手法を試験した
 - **1kHzの交流磁場まで測定可能であることが確認できた**