螺鈿における 位相イメージング開発の現状

JST ERATO百生量子位相ビームイメージングプロジェクト

<u>関義親</u>¹, 篠原 武尚¹, J.D. Parker², 松本 吉弘², 日野 正裕³, 佐本 哲雄⁵, 矢代 航⁵, 百生 敦⁵ ¹JAEA, ²CROSS, ³京大複合研, ⁵東北大多元研



・導入

Talbot-Lau干渉計による位相イメージングの特徴 原理・測定感度・空間分解能 J-PARC 螺鈿におけるTalbot-Lau干渉計の高度化

- 磁気有感型Talbot-Lau干渉計の開発 偏極中性子による磁気位相イメージング 磁性体材料イメージング
- 小型・中型中性子源への手法展開
 KURでの開発(共同利用)
- ・まとめ

Talbot-Lau 干涉計



Fresnel回折場→ G2位置にG1と同じ周期の強度分布:<u>自己像</u> 試料による自己像の歪みをG2との<u>モアレ縞</u>で検出



- 吸収コントラスト像
- 微分位相コントラスト像 (屈折)
- ・ ビジビリティコントラスト像(小角散乱)

中性子位相イメージングの手法の比較

• Si単結晶干渉計 Φ



• Diffraction Enhanced Imaging $\partial \Phi / \partial x$



• 伝播法 ^{∇²Φ}



- ・格子干渉計 *OTALBOT-Lau* 干渉計) DIFKRF0 (G0) DIFKRF1 (G1) DIFKRF2 (G2) 検出器 (TALBOT-Lau 干渉計) DIFKRF0 (G0) DIFKRF2 (G2) 検出器
- 散乱長密度分布のエッジ,変化を感度よく検出
- 空間コヒーレンス要求が低い + コヒーレンスフィルタ機能
 → 光源を絞らなくてよい
- ・ 時間コヒーレンス要求も低い
 - → 白色ビームでも機能
- 格子の面積だけ大視野化が可能

測定される物理量:微分位相コントラスト像

微分位相イメージングは光線の<mark>屈折</mark>を測定する



測定される物理量:微分位相コントラスト像

微分位相イメージングは光線の屈折を測定する



→ 散乱長密度分布の微分量

測定される物理量:微分位相コントラスト像

微分位相イメージングは光線の屈折を測定する



測定される物理量:ビジビリティコントラスト像

ビジビリティイメージングは"微小構造"に起因する小角散乱を測定する



測定される物理量:ビジビリティコントラスト像

ビジビリティイメージングは"微小構造"に起因する小角散乱を測定する



Talbot-Lau干渉計の空間分解能

- 原理的にはG2のピッチ *d*₂ ≃ 10 µm
- collimationによる2次光源サイズと検出器分解能によるblurringを受ける



$$\Delta_{s} = \sqrt{\left(\frac{R_{2} - R_{1}}{R_{0} + R_{2}}\right)^{2}} D^{2} + \left(\frac{R_{0} + R_{1}}{R_{0} + R_{2}}\right)^{2} w_{d}^{2}$$
(a)

• 螺鈿の現状のセットアップでは, Δ_s = 180 μm

J-PARC 螺鈿における中性子Talbot-Lau干渉計の高度化

• 波長分解型 Talbot-Lau干涉計

Talbot-Lau 干渉計J-PARC パルス中性子源白色ビームでも機能エネルギー分析型中性子イメージング装置「螺鈿」

- → 広波長領域を高波長分解能測定 位相分散を避けつつ,高精度・高コントラスト位相イメージング 波長依存性を活かした定量的解析
 Y. Seki et al., EPL 123 (2018) 12002.
- 磁気有感型 Talbot-Lau 干涉計
 - 偏極中性子による磁気位相イメージング 磁気ポテンシャル 磁気的位相シフト

 $V_{\text{mag}} = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}(\vec{r}) \quad \Rightarrow \quad \Phi_{\text{mag}} = \frac{\mu B m \lambda D}{2\pi \hbar^2}$

µ:磁気モーメント B:磁場 λ:波長 D:試料厚さ m:中性子質量

- 磁性体材料応用イメージング

- J-PARCから国内小型・中型中性子源への位相イメージングの普及
 - → 可搬型Talbot-Lau干渉イメージングシステムの構築 京大複合研 KUR で開発を開始

磁気有感型Talbot-Lau干渉計の 開発

J-PARC 螺鈿における Talbot-Lau 干渉計







中性子吸収格子の開発

• Gdベース金属ガラスインプリンティング法

- 金属ガラス Gd₆₀Cu₂₅Al₁₅
- 周期 9 μm
- Gd実効厚さ 12 µm
- duty 比 (transmission : absorption) 0.48 : 0.52
- 面積 ≤ 20 × 20 mm
- → 格子形状の精密なコントロールが可能 大面積化困難
- ・ 金属Gd真空斜め蒸着法
 - 周期 9 μm
 - Gd実効厚さ 9 µm
 - duty 比 (transmission : absorption) 0.36 : 0.64
 - 面積 20 × 20 mm → 60 × 60 mm 大面積化





偏極 Talbot-Lau干渉計 セットアップ

- G0 上流にpolarizer, spin flipper を設置. • → 偏極方向をスイッチ
- $\lambda = 5 \text{ Å} (\Delta \lambda / \lambda = 30\%)$ •
- CCD camera ٠



Det.



サンプルによるモアレ縞の位相シフト



サンプルなし



サンプルによるモアレ縞の位相シフト





サンプルによるモアレ縞の位相シフト





• 微分位相コントラスト像

spin-up

spin-down

(spin-up – spin-down)/2





Nuclear	Al	Fe	Ni
potential [neV]	54	211	243
Magnetic potential [neV]		±132	±38

微分位相像の波長分解解析

微分位相像(projected)の波長依存性 微分位相 $\Psi \propto \lambda^2$



波長分解解析

1. Ψ(λ)の2π-wrapping を補正



2. 放物線fitting 中心波長での微分位相 $\Psi \equiv \Psi(\overline{\lambda})$ を計算



2 mm

х

電磁鋼板サンプル

熱処理加工による磁区構造の変化

t = 0.25 mm



EM-CCD camera

熱処理なし



→ 熱処理によって磁区の向きがそろう 局所的な補助磁区も可視化



小型・中型線源での展開

小型・中型中性子源での展開

京大複合原子力科学研究所 KUR

- 低速中性子線評価ポート CN-3
- Continuous beam
- Thermal neutron flux ~ 10⁶ n/cm²/s @ 1 MW

位相イメージング実験のための環境を整備

- 可搬型干渉計ステージ
- (可搬型CCDカメラ+暗箱)
- → J-PARC RADEN用のTalbot-Lau干渉計($\bar{\lambda}$ = 5Å)を用いてビームライン特性の評価







Beam

小型・中型中性子源での展開

- J-PARC 螺鈿用のTalbot-Lau干渉計($\overline{\lambda}$ = 5 Å)を用いて評価実験を開始
- 検出器 RPMT
- モアレ縞のvisibility分布



→格子領域平均 19%

アルミロッド(φ5mm)の微分位相像



40 min. x 5 step, pixel size 0.22 x 0.22 mm² → 位相決定精度 2π × 0.02 rad 螺鈿波長分解測定時とほぼ同等

• 干渉計の最適化が必要

吸収格子(G2)の短波長対応 \rightarrow Gd スパッタによる製作を開始.

微分位相値測定のための実効波長の決定

40 min. x 5 step



まとめ

- Talbot-Lau干渉計は、吸収像では見えにくい 散乱長密度勾配・微細構造分布を可視化する。
 微分位相像~1 neV/100 μm, ビジビリティ像空間相関長 1-100 μm
- J-PARC 螺鈿 での Talbot-Lau干渉計の高度化
 波長分解型 → 高精度・高確度位相測定
 偏極型 → 磁気位相イメージング

物質中の磁気ポテンシャル分布の測定

- ・ビジビリティ像により、電磁鋼板の磁区構造のサイズを可視化できる.
- 螺鈿での技術開発 → 国内の中型・小型線源での手法の普及 京大複合研 KURで開発を開始 ビームライン特性の評価 Gd スパッタ吸収格子開発