

符号化開口マスクを用いた（磁気）コンプトン散乱イメージング測定法の開発

研究代表者 兵庫県立大学大学院・理学研究科 准教授 小泉 昭久

共同研究者 兵庫県立大学大学院・理学研究科 大学院生 大塚 悠生

共同研究者 高輝度光科学研究センター(JASRI) 主幹研究員 辻 成希

共同研究者 高輝度光科学研究センター(JASRI) テニユアトラック研究員 水野 勇希

1. 研究背景と目的

近年、放射光を使用したイメージング測定が広く行われるようになっており、特に、産業界の利用や期待が増している。今後、体積の大きい試料の非破壊測定や、動作環境下での測定などにおける高エネルギーX線利用の要望が高まるものと予想される。

イメージング測定の代表的な手法としてはX線CTが挙げられる。CT法の中にも様々な測定法があるが、基本的には、試料を透過したX線の減弱係数の投影像を多数の方向で撮像し、コンピューター・トモグラフィー(CT)により解析的に断面画像を再構成するものである。低エネルギーX線を用いる場合には、大きい試料、重元素を含む試料は測定が難しく、また、試料サイズを測定視野に合わせて加工する必要がある。高エネルギーX線を用いる場合には、試料中の軽元素相のコントラストがつきにくい。いずれの場合でも、多数方向の撮像にあたって試料を回転させるため、配線・配管を施した状態での測定には、何らかの工夫が必要になる。

一方、本研究ではX線CTとは異なる測定手法として、コンプトン散乱によるイメージング測定を提案する。この測定では、入射ビームとして115 keVの高エネルギーX線を用い、エネルギー：～90 keVの散乱X線を計測する。これにより、体積の大きい試料でも、加工することなく測定可能と考えられる。また、CT測定と異なり、試料を回転させる必要もないため、試料に配線や配管を施し、動作環境下における測定も可能になるであろう。ただし、現状の測定方法には、改善すべき問題点がある。

現在、コンプトン散乱のイメージング測定は、次のような方法で行われている。ピンホール・カメラと同様な測定法で、75 μm の穴（現状）を通して、2次元検出器でイメージ画像を取得するものである[1,2]。入射ビームの縦方向は、Ni屈折レンズにより10 μm に集光されており、横方向は1mm程度に広げられているので、測定に必要な入射強度は得られている。入射ビームに対して垂直方向に試料を移動させて測定しているため、縦方向については10 μm 程度の空間分解能が見込まれるが、横（面内）方向の空間分解能はピンホールの大きさに依存する。ピンホール径を小さくすれば空間分解能は向上するが、観測強度が弱くなり、従って、計測時間が長くなってしまう。即ち、「空間分解能の維持・向上」と「観測強度の増加、計測時間の短縮」は、両立しない問題であることが改善すべき点である。

そこで、本研究では、コンプトン散乱のイメージング測定に符号化開口マスクを導入し、空間分解能を低下させることなく、観測強度の増加によるS/N比の向上、測定時間の短縮

化を図ることを目的とした。さらに、入射ビームとして円偏光 X 線を用いた磁気コンプトン散乱測定にも、符号化開口マスクを適用し、磁性体内部における磁化分布のイメージング測定を試みた。

2. 測定・解析方法

2.1 符号化開口マスクについて

本研究で用いる符号化開口マスクとは、天文学の分野で考案された技術である[3]。電波望遠鏡で観測する X 線やガンマ線などの短波長の電磁波は屈折率が低く、レンズでの結像が難しいため、レンズのない望遠鏡の絞りとして利用されてきた。現在では、デジタルカメラなどの民生品や、医療用撮像システム、放射線廃棄物や汚染検査用などのガンマ線検出器等、広く応用されている。イメージング測定における利用としては、蛍光 X 線を用いた研究例[4]が報告されているが、放射光を用いたイメージング測定に利用した研究は未だ報告されていない。実際の符号化開口マスクには様々なパターンを持ったものが多数存在しているが、本研究で用いる Modified Uniformly Redundant Array : MURA について以下に示す[5]。

MURA による符号化開口マスクは、平方剰余という数学的な計算から得られる“0”と“1”の配列を二次元配列に拡張し、配列中の“0”を遮蔽部に、“1”を開口部に対応させることによりデザインされたものである（図 1 参照）。これを用いて作製したマスクでは、マスク全体の面積に対する開口部の割合が、～50%にできる。従って、ひとつの開口部のサイズを、ピンホール・カメラの穴と同程度の大きさにすれば、原理的に、空間分解能を維持したままで、開口部の数だけ観測強度を増加させることが可能になる。ただし、図 1 の配列パターンを忠実に再現したマスクを作製することは難しいため、実際には、配列の 1 行・1 列毎に遮蔽部を追加して作製した。図 2 に、厚さ：500 μm の Pt 板に、パルス・レーザー加工を用いて作製した符号化開口マスクの写真を示した。各穴の径は 50 μm で、420 穴の開口部が設けられている。

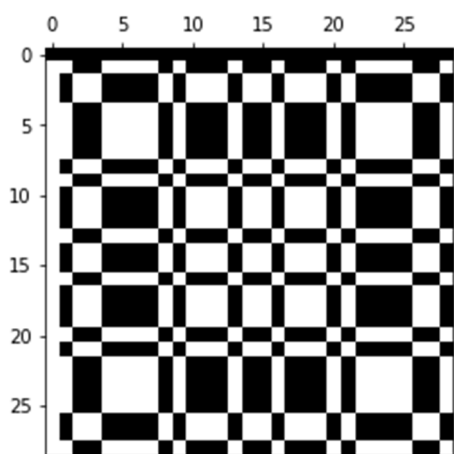


図 1 MURA による配列パターン



図 2 作製した符号化開口マスク

2.2 実験配置

2.2.1 コンプトン（電荷）散乱イメージング測定

ここで、先ずコンプトン散乱についての説明を行っておこう。コンプトン散乱は、一般には、光（X線）と静止した電子との散乱として説明されている。この場合、入射 X 線のエネルギーの一部は、散乱により動き始める電子の運動エネルギーとして使われ、従って、散乱後の X 線は、入射 X 線より低いエネルギー値の線スペクトルとして観測されるはずである。しかしながら、実際の物質中では電子は静止しておらず、常に運動している。電子が静止しているときに比べて、近づいてくる電子（遠ざかる電子）と散乱した X 線は、ドップラー効果により、エネルギーが高く（低く）なり、その結果として、広いエネルギー幅をもったスペクトルとして観測される。拡がりのあるエネルギー値を運動量に変換したものをコンプトン・プロファイルと呼ぶが、その解析から電子の運動状態を調べることが可能である。コンプトン・プロファイルの幅は、物質を構成している元素によって異なり、軽元素ではプロファイル幅が狭く、原子番号が大きくなるにつれ、徐々に幅が広がっていく。また、散乱強度は元素の電子数に比例する。このような特徴を利用すれば、プロファイル幅を考慮した解析から、軽元素と重元素を区別したイメージング測定が可能になると考えられる。

この特徴を活かした測定を行うために二次元 CdTe 検出器を用いる。これは、一素子のサイズが $250\mu\text{m} \times 250\mu\text{m}$ で、 80×80 素子を並べたものである。素子数は限られているが、現在のところ、各素子で真にエネルギー分解能を有している唯一の二次元検出器である。従って、観測強度について積分値だけではなく、エネルギー・スペクトルの測定が可能であることが、通常の CT 測定に使用されている検出器とは異なる点である。上述したコンプトン散乱の特徴を利用した元素別のイメージング測定に加えて、試料からの蛍光 X 線も同時に観測できるので、試料の計測位置の深さと元素の種類にもよるが、試料中の元素分布について、相補的なイメージ画像も得られるはずである。

実際のコンプトン散乱のイメージング測定には、SPring-8 のビームライン BL08W を利用した。図 3(a)(b)に、符号化開口マスクと二次元 CdTe 検出器を用いたイメージング測定の実験配置図と実験ハッチ内の写真を示しておく。入射ビームは、エネルギー：115 keV の直線偏光 X 線である。入射ビームの縦方向は、断層像の深さ方向の分解能に相当するため、縦方向の小さなビームを利用する必要がある。そのため、Ni 屈折レンズを利用して縦方向のビーム集光（縦×横= $0.01 \times 2\text{ mm}$ ）を行った。試料により鉛直 90° 方向にコンプトン散乱された X 線は、符号化開口マスクを通して二次元 CdTe 検出器で計測される。これにより、素子毎に、エネルギー・スペクトルが得られる。

試料上の視野の大きさや、空間分解能、拡大率、観測強度は、試料と符号化開口マスクの距離： d_1 と、符号化開口マスクと検出器の距離： d_2 で決まるため[4]、発光点が 1 点となるように針を試料として測定を行い、 d_1 、 d_2 についての条件を決定した。その結果については、“3. 実験・解析結果”に示す。

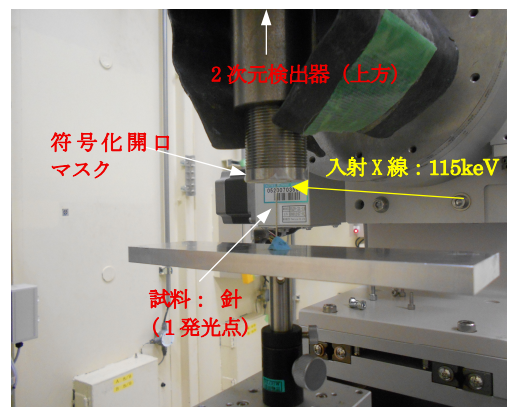
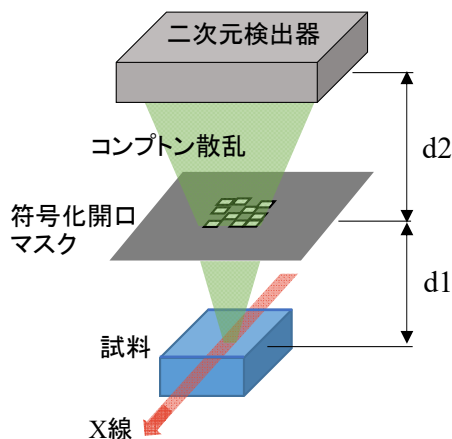


図 3 (a) コンプトン散乱イメージング
測定の実験配置

(b) 実験ハッチ内の写真

2.2.2 磁気コンプトン散乱イメージング測定

入射 X 線に円偏光を用い、強磁性体（フェリ磁性体）の試料において測定を行う場合には、磁性を担う電子のみのコンプトン・プロファイルを観測することが可能であり、磁気コンプトン散乱測定と呼ばれている。従来の磁気光学イメージングでは、レーザー光などを用い、ファラデー効果やカー効果を計測することにより、また、放射光 X 線を用い、X 線磁気円二色性（XMCD）を計測することにより、磁区構造などを観察している。この場合、試料表面付近の磁区構造を観測することは可能であるが、バルク試料の内部における磁区構造を観測するのは容易ではないと考えられる。一方、上記の磁気コンプトン散乱を応用すれば、高エネルギー入射 X 線を用いるため、磁性体内部の磁気イメージング画像を取得することができるものと期待される。

磁気コンプトン散乱測定もビームライン BL08W で行われており、エネルギー : 182 keV の入射 X 線を用いて、後方（ $\sim 178^\circ$ ）にコンプトン散乱された X 線を、エネルギー分解能を有する SSD 検出器で計測している。強磁性体 Fe を試料としたときの磁気効果（電荷散乱強度に対する磁気散乱強度の比）は、およそ 2% である。磁気効果は入射 X 線のエネルギーに比例するため、上記のように高エネルギー X 線を利用しているが、入射 X 線のエネルギーが高くなれば、コンプトン散乱された X 線のエネルギーも高くなる。磁気イメージング測定にも、上記の符号化開口マスクを利用するので、その閉口部の遮蔽能力を考慮すると、入射 X 線のエネルギーとしては電荷散乱によるコンプトン散乱イメージングと同様に 115 keV とする方が、観測データのバックグラウンドを抑えることができると考えられる。しかし、通常の測定に比べて入射 X 線のエネルギーが低下するため、磁気イメージング測定において得られる磁気効果も低下することになってしまう。この点を改善するため、図 4 のように、水平 90° 方向にコンプトン散乱された X 線を計測する実験配置で測定を行

うことにした[6]。この場合には、入射 X 線の円偏光度が高ければ良いというわけではなく、円偏光と直線偏光の割合により磁気効果が増加する条件がある。“3. 実験・解析結果”の項では、実際に観測された磁気効果の向上について報告する。

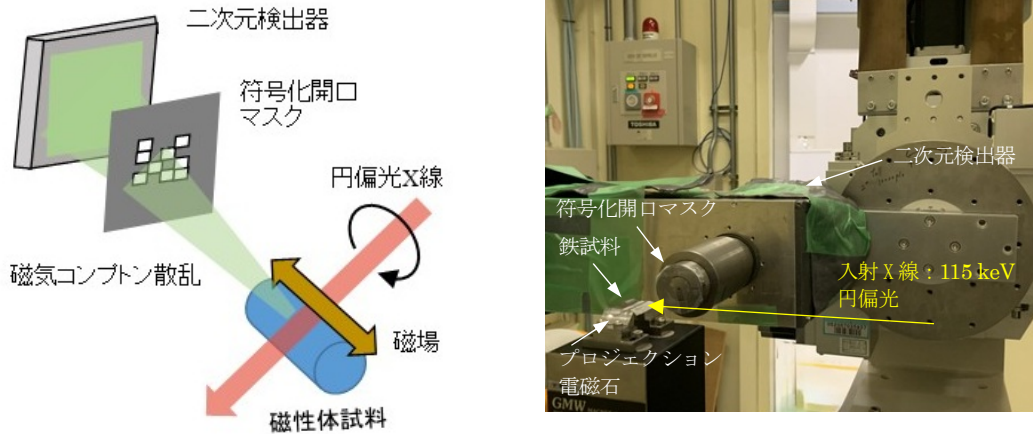


図 4 (a) 磁気コンプトン散乱イメージング 測定の実験配置 (b) 実験ハッチ内の写真

2.3 最尤推定-期待値最大化 (ML-EM) 法による解析

次に、測定で得られた観測データから、イメージ画像を求める解析方法について説明しておきたい。ピンホール・カメラのように開口穴が一つの場合、反転画像にはなるが、観測データそのものがイメージ画像となっている。しかし、符号化開口マスクを用いた場合には、多数の開口穴を通過してきた散乱強度が重なり合って観測されるため、そのままのデータがイメージ画像にはならず、再構成解析を行うことによりイメージ画像を求める必要がある。そのような解析方法の一つが、最尤推定-期待値最大化法（以下、ML-EM 法）である。では、ML-EM 法の解析手順について、図 5 を参照しながら順を追って説明してみ

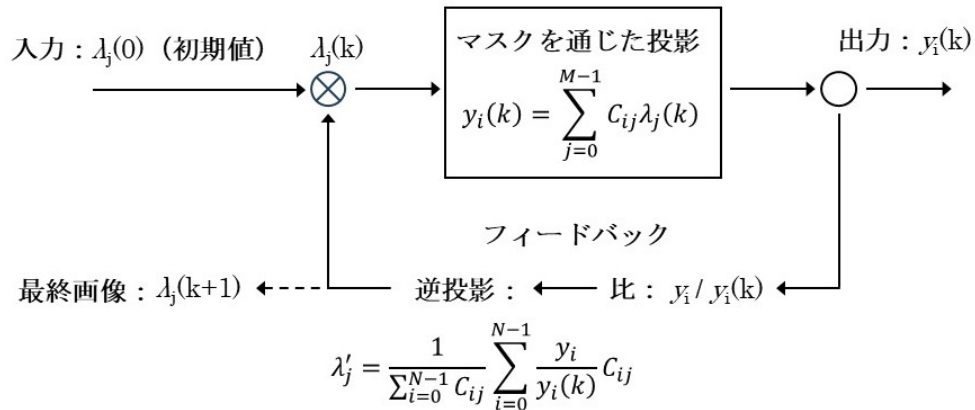


図 5 ML-EM 法の解析手順

よう[7]。 λ_j は解析画像の入力値で、画像のサイズは、実験条件や解析に用いるコンピュータの能力によって決める $n \times n$ 配列(=M)であるが、解析では配列を 1 次元変数にして、通し番号 j で表している。同様の解析過程を繰り返し行い、逐次的に最終画像に近づけていくため、初期値としては $\lambda_j(0)$ の値を、一様な値、例えば、全て 1 とする。ここで、括弧内の数字は繰り返しの回数を意味している (0 は初期値の意味)。各画素子の入力値が、符号化開口マスクの穴を通じて、検出器の各素子に投影された値を $y_i(k)$ としており、 i は通し番号で表した検出器の各素子に対応している。 C_{ij} は、画素子 j と検出器素子 i の間の検出確率を意味している。投影された $y_i(k)$ で、検出器で実測されたデータ： y_i を割ることにより比の形にしたうえで、その比を逆投影して λ'_j とする。 $\lambda_j(k)$ に λ'_j を掛けて $k+1$ 番目の入力値 $\lambda_j(k+1)$ に更新する。この過程を繰り返しながら、検出器の投影データを実測データに近づけてゆくのであるが、繰り返しの打ち切りについては、経験的に決められているのが現状である。従って、最終的に得られる解析画像は、打ち切ったときの $\lambda_j(k+1)$ になる。

3. 実験・解析結果

3. 1 コンプトン（電荷）散乱イメージングの結果

はじめに、図 3(a)の実験配置における測定試料と符号化開口マスクの距離： d_1 、符号化開口マスクと検出器の距離： d_2 を決めるための測定を行った結果を示す。この測定では、試料として針を用いた。この場合、針先でコンプトン散乱された強度を観測することになり、実験条件としては 1 発光点となる。1 点で散乱された X 線は、符号化開口マスクの各開口穴を通して検出器で計測されるので、検出器の観測画像は、図 6(a)のように、符号化開口マスクと同様なパターンを示す。§2.2.1 で、測定に用いた検出器は、素子ごとにエネルギー分解能を有していることを述べたが、各素子のデータの和として得られたエネルギー・スペクトルを図 6(b)に示す。横軸は、チャンネル数 (ch) のままであるが、図中の赤色の部分がコンプトン散乱による測定強度である。

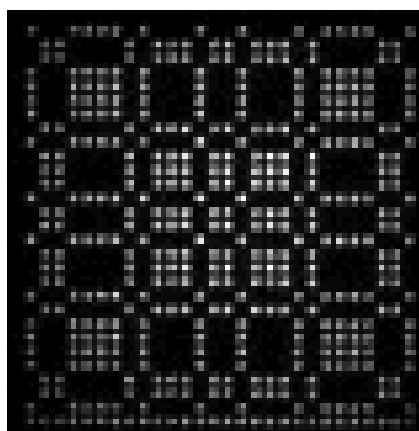
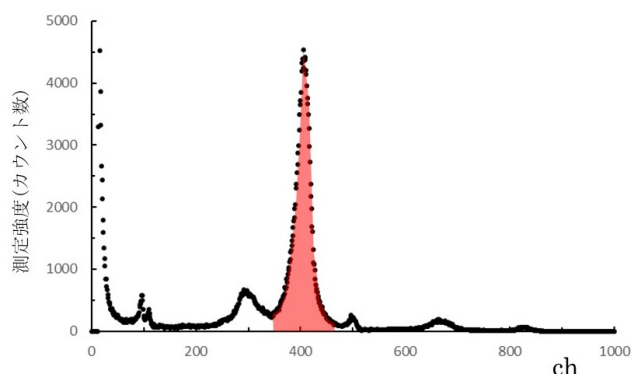


図 6 (a) 検出器における観測画像



(b) 検出器で得られたエネルギー・スペクトル

素子毎に抽出したコンプトン散乱強度を解析に用いるデータ (y_i) とし、ML-EM 法を用いて解析するのであるが、 $d1$ 、 $d2$ の値が正確でなければ、1 点に収束した解析画像は得られない。初期値としては、スケールを用いて実測した値を入力したが、解析画像が 1 点に収束するように $d1$ 、 $d2$ の値を調整し、最終的に図 7(a)のような結果が得られた。これにより、測定条件としての $d1$ 、 $d2$ を決めることができ、以降の測定における位置の基準とした。従って、この針を用いた測定は、実験を行なう毎に、最初に実行する必要がある。

では、この測定・解析結果から、符号化開口マスクを用いることにより、観測強度が増強したかどうか、また、空間分解能が維持されているかどうかを検証してみよう。比較のために、ピンホールを用いて、針を測定した観測データを図 7(b)に示しておく。

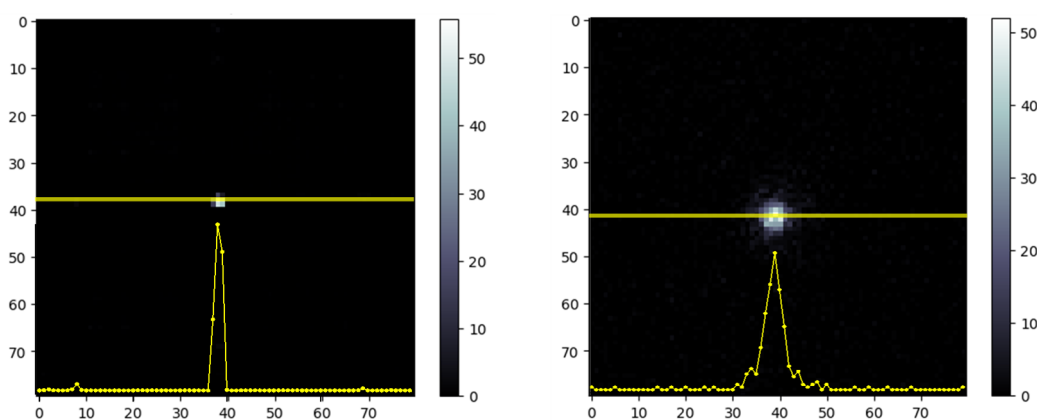


図 7 (a) 符号化開口マスクを用いた観測データの ML-EM 法による解析画像 (b) ピンホールを用いて測定された観測画像

ピンホールを用いた観測データの積分値は～3000 カウントであるのに対し、図 6(a)に示した符号化開口マスクを用いた観測データの積分値は～716000 カウントであった。これにより、同じ時間で計測された観測強度が～238 倍になっていることが確認できた。空間分解能については、図 7(a)および(b)の強度分布幅から推定してみた。図中の黄色線は、針の位置における散乱の強度分布を示したもので、各ピークの半値幅を比較した。図 7(a)の画像では、ML-EM 法による解析において、1 画素の大きさを $60\mu\text{m} \times 60\mu\text{m}$ としており、図中の半値幅が～2 画素分であることから、空間分解能を～ $120\mu\text{m}$ と推定した。一方、図 7(b)のピンホールによる観測画像では、検出器が符号化開口マスクを通して試料を見込む視野の大きさから、画像の大きさを $3.45\text{mm} \times 3.45\text{mm}$ とすると、図中の半値幅が検出器の～4 ピクセル分であることから、空間分解能を～ $170\mu\text{m}$ と推定した。これより、符号化開口マスクを用いても、空間分解能は維持されているものと考えられる。

次に、上記で決定した実験条件のもとで、厚さ $300\mu\text{m}$ の Fe と厚さ $200\mu\text{m}$ の Al の薄板を交互に重ねた試料について測定・解析した結果を図 8 に示す。白色の部分 Fe を表しており、間の暗い分が Al に対応している。図中の下方向から X 線を入射しており、上

に進むに従って、解析結果の強度が少しずつ減少しているが、これは X 線の試料による吸収のために、散乱強度が減衰したことを意味していると考えられる。Fe の代わりに、Ag の薄板を用いた試料では、このような減衰効果が、より顕著に表れており、高エネルギー X 線を用いた場合であっても、測定試料に重い元素が含まれていれば、X 線吸収による散乱強度の減衰は、免れられないものと考えられる。

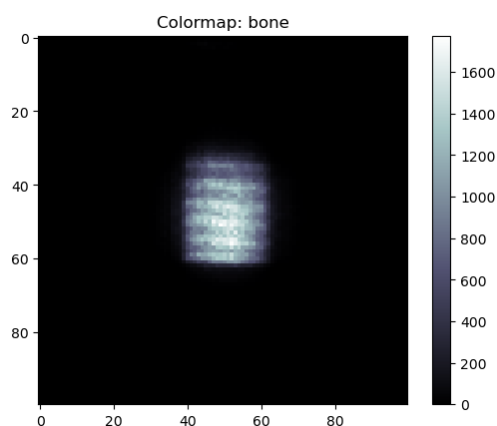


図 8 鉄とアルミの薄板を重ねた試料の解析画像

図 8 の解析画像のコントラストについては、当初の予想に比べて良いとは言えない。

解析画像の画素数は 100×100 であるが、解析範囲を視野の大きさである $10.4\text{cm} \times 10.4\text{cm}$ に設定しており、1 画素の大きさが $104\mu\text{m} \times 104\mu\text{m}$ となっている。画素サイズが大きいため画像的に粗くなっていると考えられるが、より細かい画素にすると、全画素数が増加し、通常のパソコンによる解析においては、メモリー不足と解析時間の長時間化が問題になる。この点については、十分なメモリーを搭載したワークステーションの利用などにより改善されるものと考えられる。それ以外にも、解析プログラムの問題として検出確率 C_{ij} の精密化も考えられるが、現状の解析においては、画素 A_j の位置で散乱された X 線が各開口穴を通して検出器 y_i で観測される確率 C_{ij} を、 $d1$ と $d2$ の比で決まる拡大率も考慮して決めるように改善している。

一方、解析条件だけでなく、実験的条件も、解析画像のコントラストに影響すると考えられる。§2.2.1 で述べたように、この測定に用いた二次元検出器は、各検出素子がエネルギー分解能を有する Cd-Te 検出器であるが、1 素子のサイズが $250\mu\text{m} \times 250\mu\text{m}$ であり、符号化開口マスクの開口穴径 $50\mu\text{m}$ に比べて、かなり大きい。通常、符号化開口マスクを用いた測定では、マスクの開口部の大きさに対して、検出器の 1 素子サイズは、同等か小さいものが使用されており、コントラストが悪い原因は、開口部と検出器素子のサイズの関係にあるかもしれない。現状では、素子毎にエネルギー分解能を有する二次元検出器で、素子サイズがより小さいものを入手するのは難しいが、電荷散乱によるイメージング測定に限れば、全散乱強度を用いた解析を行うことを前提に、素子サイズの小さい通常の二次元検出器を用いた測定・解析を行うことで、上記の検証を行うことは可能であると考えられる。

3. 2 磁気コンプトン散乱イメージングの結果

磁気コンプトン散乱を用いた磁気イメージング測定により、磁性体内部の磁化分布を観測可能であるか確認するため、典型的な強磁性体である Fe の多結晶（直径：5mm、長さ：

9.45mm の円柱) を試料とした。試料へ磁場を印加するためには、図 4(b) の写真に示したプロジェクション電磁石を用いた。通常、磁気コンプトン散乱測定は、入射 X 線の円偏光の向きを固定し、磁場を偏光の向きに対して平行および反平行に印加し、それぞれの向きにおける散乱強度の差から磁気散乱強度を求めている。偏光の向きと磁場が平行の場合の散乱強度を $I_{\uparrow}$ 、反平行の場合の強度を $I_{\downarrow}$ とすると、磁気効果: R_{mag} は、 $R_{\text{mag}} = \frac{I_{\uparrow} - I_{\downarrow}}{I_{\uparrow} + I_{\downarrow}}$ で与えられる。§2.2.2 でも述べたが、Fe を試料とした測定では、後方散乱 ($\sim 178^\circ$) の実験配置において、入射 X 線のエネルギーを 182 keV とした場合には、 $R_{\text{mag}} = 2\%$ が得られている。磁気イメージング測定においては、図 4 に示したような 90° 散乱の実験配置を採用し、入射 X 線のエネルギーを、コンプトン (電荷) 散乱イメージング測定のとくと同様に、115keV とした。後方散乱の測定条件で、入射エネルギーを 115keV とした場合の磁気効果は、 $R_{\text{mag}} = 1.44\%$ 程度と予想されるが、 90° 散乱の実験配置を用いることにより、 $R_{\text{mag}} = \sim 2.5\%$ を達成しており、約 1.7 倍の磁気効果の向上を得ることができた。

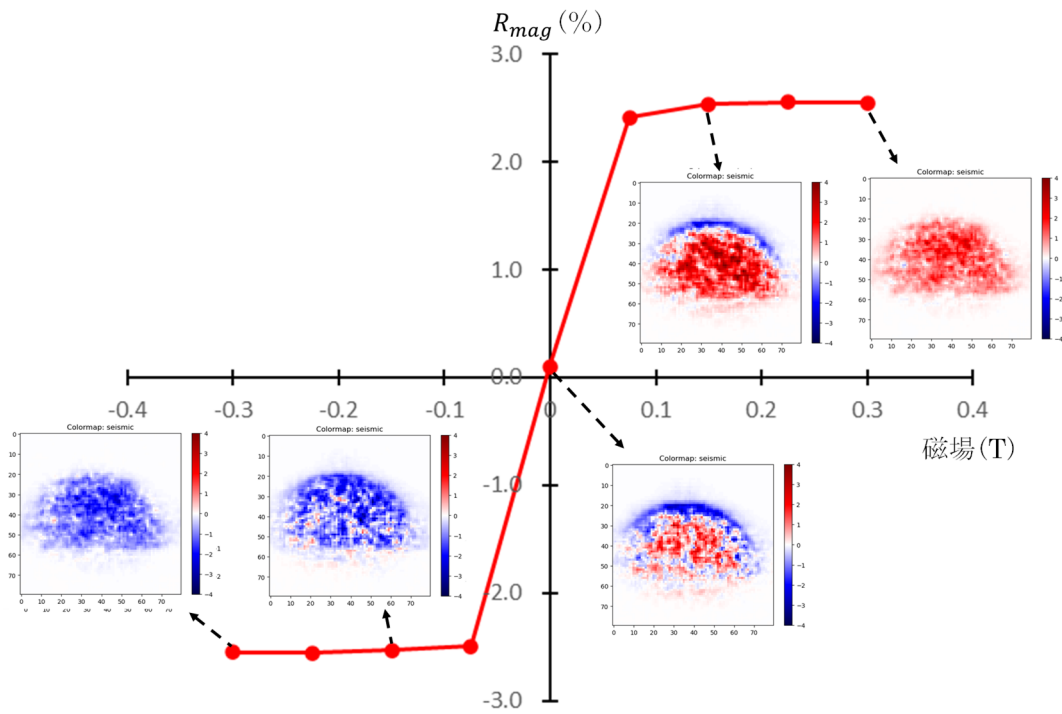


図 9 鉄試料で測定した磁気効果と磁気イメージング画像

図 9 に、Fe の円柱状試料において、磁場を変化 (負 $\Rightarrow$ 正) させながら測定したときの磁気効果と磁気イメージング画像を示す。試料の磁化は、磁場: 0.075T 以上でほぼ飽和しており、磁気効果としては、上記のとおり 2.5% を記録している。各磁場における磁気イメージング画像は、 $I_{\uparrow}$ におけるデータを解析した画像から、 $I_{\downarrow}$ の解析画像を差し引いて求めたものであるが、入射 X 線は、円柱を横にした状態の上側に照射されているため、解析で得

られた画像は半円の形状となっている。画像中の赤い部分と青い部分は、磁化の向きが反転していることを意味している。特に、興味深いのは、磁場：0T および 0.15T のときの磁気イメージ画像で、円柱の側面と内部で磁化の向きが異なっていることが分かる。磁場：0T においては、その状態で磁化を打ち消しあっており、また、磁場：0.15T の画像において赤と青の隙間で、僅かではあるが、白く見えている部分は、磁壁を意味しているのかもしれない。ただし、磁場を反転したとき、対応する正負の磁場における磁気効果の大きさは同じであっても、磁化分布をみると、赤と青が反転した画像にはなっていない。試料が完全に均質で、格子欠陥や応力、形状の非対称性なども無ければ、磁場反転したときに、磁化も反転した分布を示すものと期待されるが、この試料は多結晶体であり、理想的な試料条件にはなっておらず、磁場の向きに対して非対称な磁化分布になったものと考えられる。

4. まとめと今後

コンプトン散乱によるイメージング測定としては、従来、ピンホール測定法かスキャニング測定法が用いられていたが、これらの測定法において課題となっていた「空間分解能の維持・向上」と「観測強度の増加、計測時間の短縮」を両立させるため、符号化開口マスクを導入し、その効果を検証した。針状試料の測定から、ピンホール測定法に比べ、符号化開口マスクを利用した測定において、200 倍以上の観測強度の増加と空間分解能の維持が確認された。解析においても ML-EM 法によるプログラムを作成し、機能することを確認したが、大きいサイズの試料を測定した場合には、解析画像のコントラストが充分とは言えず、まだ、改善の余地がある結果となった。現在のところ、その原因は、測定に用いる検出器の素子サイズにあると考えているが、電荷によるコンプトン散乱測定であれば、素子サイズが $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ 以下の検出器を利用することも可能であり、今後、確認の測定・解析を行いたい。ただし、この場合には、素子毎にエネルギー・スペクトルを測定することはできないため、コンプトン・プロファイルの解析による元素別のイメージ画像解析を行うことはできない。

一方で、入射ビームに円偏光 X 線を用いた磁気コンプトン散乱による磁気イメージング測定も試みた。この測定では 90° 散乱の実験配置を採用することにより、磁気効果が向上することを確認した。Fe 多結晶試料を用いた磁場依存性の測定では、試料内部の磁気イメージング画像を導出し、磁化分布が磁場により変化する様子を捉えることに成功した。磁気イメージング測定においては、検出器のエネルギー分解能は必須であるため、上記の問題も考慮すれば、将来的に、小さい素子でありながら、十分なエネルギー分解能を有する二次元検出器の開発が望まれる。

謝辞

本研究は、公益財団法人 JFE21 世紀財団の助成を受けて実施いたしました。ここに深

く感謝申し上げます。また、放射光実験は、公益財団法人 高輝度光科学研究センター (JASRI) の承認を受けて実施いたしました。(課題番号：2024A1139、2024B1230、2025A1125、2025B1234)

参考文献

- [1] N. Tsuji, Y. Tsuji, Y. Uchimoto, H. Imai, and Y. Sakurai, Appl. Sci. **11**, 3851 (2021).
- [2] T. Miyazawa, N. Tsuji, D. Fujioka, T. Kaneko, Y. Mizuno, Y. Uchimoto, H. Imai, and Y. Sakurai, Appl. Sci. **13**, 10753(2023).
- [3] E. CAROLI, I. B. STEPHEN, G. DI COCCO, L. NATALUCCI, and A. SPIZZICHINO, Space Science Reviews **45** (1987) 349-403.
- [4] A. Haboub, A. A. MacDowell, S. Marchesini, and D. Y. Parkinson, Rev. Sci. Instrum. **85**, 063704 (2014).
- [5] S. R. Gottesman, and E.E.Fenimore, Appl.Opt. **28**, 4344(1989).
- [6] N. Sakai, M. Seigo, Y. Kakutani, N. Hiraoka, and A. Koizumi, J. Synchrotron Rad. **7** (2000)326-332.
- [7] 篠原広行、桑山 潤、小川 互、橋本雄幸、連続講座◆断層映像法の基礎 第 32 回.

成果報告 (学会発表等)

- ・ 小泉昭久、大塚悠生、水野勇希、辻 成希 「高エネルギーX 線コンプトン散乱に符号化開口マスクを適用したイメージング測定法の開発」
日本物理学会 2024 年 年次大会 (2024 年 9 月 北海道大学)
- ・ 小泉昭久、鈴木宏輔 他「コンプトン散乱研究会の活動 2024」
SPRING-8 シンポジウム 2024 (2024 年 9 月 九州大学)
- ・ 小泉昭久、大塚悠生、水野勇希、辻 成希 「SPRING-8 BL08W における符号化開口マスクを用いたコンプトン散乱イメージング測定法」
日本放射光学会 第 38 回年会 (2025 年 1 月 つくば国際会議場)
- ・ 大塚悠生、辻 成希、水野勇希、小泉昭久
「符号化開口マスクを用いた磁気コンプトン散乱イメージング測定法の開発」
日本物理学会 2025 年 年次大会 (2025 年 9 月 広島大学)
- ・ 小泉昭久、鈴木宏輔 他「コンプトン散乱研究会の活動 2025」
特定放射光施設シンポジウム 2025 (2025 年 9 月 東北大学)
- ・ 大塚悠生、辻 成希、水野勇希、小泉昭久
「符号化開口マスクを利用した磁気コンプトン散乱によるイメージング測定法」
技術・人材マッチング交流会 (2025 年 12 月 先端科学技術支援センター)
(主催：兵庫県立大学 播磨理学キャンパスキャリアセンター)