連載講座

中性子イメージング技術の基礎と応用 (基礎編第3回)

中性子イメージング技術の原理†

玉置昌義

名古屋大学大学院工学研究科マテリアル理工学専攻 464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町

Key Words: neutron, neutron imaging, image detector, imaging method, neutron energy, converter, quantitativeness factor, neutron radiography

1. 中性子は何を見せてくれるか

人は知的好奇心から、あるいは已むに已まれぬ事情から、容器の中身やモノの内部構造を知ろうと、透視するためにいろいろ工夫を凝らしてきた。時代時代の科学技術を駆使することによって、物質の中身を透視するための技を発明し、放射線を利用する透視技術にまで至った。私達は、科学研究や産業最先端の現場において、様々な手だてを用いて非破壊的にモノの内部の透視検査をしている。また、私達に身近なところでは、健康診断と医療に役立つ診療放射線の分野で透視・断層撮影が進んでいる。

ここで扱う中性子イメージングは、中性子ラジオグラフィとして非破壊検査の分野において広く用いられてきた透視技術で、長い間盛んに行われているレントゲン撮影(X線透視技術)と並ぶ優れた技術である。レントゲン撮影では鉛の箱の中身は透視が困難であるのに対して、中性子イメージングでは鉛の箱をも透視できるという点に特徴がある。他方、水素(H)を多

く含むプラスチックの厚めの箱の中は透視が困難になり、レントゲン撮影には敵わないこともある。レントゲン撮影と中性子ラジオグラフィをそれぞれ用いて撮像した二つの画像は、鉛とプラスチックの箱の中身について相補的な情報を持っている。

今回の講座では、この中性子イメージングに 基礎事項を、中性子透視像を例に示して紹介し たい。本講座基礎編第1・2回の中性子物理の 基礎と中性子科学分野の進展を念頭において進 めていく。

2. 中性子イメージングによる透視画像を 見よう

デジタルカメラで撮った写真1は,ご存知の大学入試センター試験の英語ヒアリングに用いられたICプレーヤーである。関心は人それぞれであるが、中が透視できたらと思う人もいるであろう。そこで、本講座の中性子イメージング用被写体の代表例として使わせてもらうことにする。本器の詳細は、大学入試センターのホームページにある」。

ここでは話の都合上,はじめからタネ明かしをしておく。IC プレーヤーの外観の表と裏の写真を写真1の上段に,ネジを外した内側の表・裏双方の写真を同下段に示す。たくさんの部品からできていることがわかる。

Principles of Neutron Imaging Technology.

Masayoshi Tamaki: Nagoya University, Graduate School of Engineering, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi Pref. 464-8603, Japan.

[†]Fundamentals and Applications of Neutron Imaging (Fundamentals Part 3).



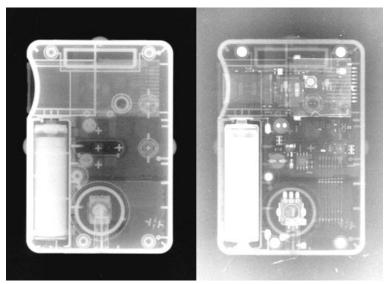
写真1 大学入試センター試験用 IC プレーヤー

これを放射線で透視するとどうなるか。この IC プレーヤーの中性子と γ 線による 2 種類の 放射線透視像を,写真 2 に示す。これは日本原子力研究開発機構の JRR-3M に設置された熱中性子ラジオグラフィ施設(thermal neutron ra-

diography facility: TNRF)を利用して撮像した。二つの画像は同一物の透視像なので一見同じような画像である。しかし,少し目を凝らしてみると,細かいところにかなり違いがあることに気付く。左側の写真は,中性子のみに感じる検出器で撮った透視写真である。これに対して,右側の写真は, γ 線のみに感じる検出器で撮った透視写真である。中性子源(原子炉)から引き出された中性子ビームの中には γ 線がいくらか混ざっているので,その γ 線による透視像を得たものである。

以下,IC プレーヤーの外観(写真 1)と中性子及び γ 線による透視像(写真 2)とを比較しながら,中性子イメージングの特徴を示そう。まず,写真 2 の左側の中性子透視像の方を見る。

IC プレーヤーの箱や支持構造体は、プラスチック (ABS 樹脂) 製である。Hを多く含んでいるので、中性子を強く散乱する。そのため中性子を通し難く、厚みの違いがはっきり写る。たとえば、外殻の箱周部、ネジ締めのための孔周り、丸い音量調整ツマミ等である。これに対して、締め付けの鉄製ネジは、Hに比べて中性



(a) 中性子による透視像

(b) γ線による透視像

写真 2 IC プレーヤーの放射線透視像

子の散乱・吸収が弱いので、中性子は比較的透過しやすく、かなり透過長さがあるのに、先ほどのプラスチック製のネジ孔周りほどはっきりとは写らず、いくらか透けている。これが中性子の物理的性質に基づく中性子イメージングの特徴である。

これに対して、右側の γ 線透視像(大まか にはレントゲン像と同等)で、まず目に付くの が鉄製のネジの部分である。密度の大きな金属 なのでγ線はほとんど散乱・吸収され、明る い灰色にはっきりと写っている。同様に電子回 路のハンダ付けの丸い塊も白くはっきりと写っ ている。先ほどの中性子透視像とは大きく異な る。更によく見ると、収納された乾電池をはじ め、挿入口に差し込まれたメモリー・スティッ ク・ロム(プラスチック中に埋め込まれた記憶 素子),数々の電子部品など,0.1 mm ほどの 厚みの金属がよく写っている。これはγ線の 金属との相互作用が非常に大きいことを示して いる。タネ明かし用の内部写真(写真1)と比 べれば推定できる物がたくさんある。対応付け はこの程度にするが、読者も一度試みて欲しい。 印刷した写真はいくらか縮小されているが、元 は数十 µm の画素サイズの 16 ビットデジタル 画像であり、コンピュータ画面上で拡大・明る さ調整などの画像処理をすると, 更に詳細な構 造が見える。

しかし、このような薄物の金属が写るということは、言い換えれば、γ線の金属透過力が弱いことを表しており、鉄のネジやハンダ部分のように少し厚みを増すと、γ線はほとんど透過できず、画像は単なる白黒の影絵になってしまい、内部構造にかかわる情報を示すことはできなくなる。そのとき中性子の透過力の強さが補完情報を引き出してくれる。そのことは、稿を進める中で、順次中性子イメージングの特徴として明らかになる。

ここでは少し将来にわたる中性子イメージング技術の進歩の可能性と夢を述べてみよう。まず乾電池を見ると,その充放電の際には化学変

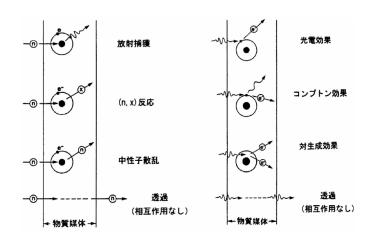


写真 3 0.40+/-0.02 nm の単色中性子で透視撮像した 10 mm 厚さの鉄溶接部

化と、それに伴う構造変化及び電池内物質移動を生じるので、その様子が中性子の吸収・散乱の強度変化を通して可視化されると期待できる。電池機能の不具合も非破壊的に検査できる可能性がある。その基礎研究はすでに進められている。

次に金属部品のネジやハンダを例にする。一般に金属のように結晶構造を持つ物質は、粒子波の性質を持つ中性子と干渉性散乱を起こすので、特定の波長域の中性子を用いてイメージングを行えば、結晶構造やその歪み具合などの情報を可視化できる。その例として、最新の研究20から、0.40+/-0.02 nmの単色中性子で透視撮像した10 mm厚さの鉄の溶接部透過像を写真3に示す。中央上部の黒い部分には、0.40 nmのBraggカットオフ面(110)が紙面上に配向した結晶粒群、中央下部の明るい部分には(110)面の配向を含まない結晶粒群、そして左右の中間色の鉄母材部分には等方的結晶粒群が、それぞれ主に占めることを可視化情報として写し出している。

また、IC プレーヤー中に数多く含まれる電子回路のうちに生じた不具合も、さほど遠くない時期に、可視化情報として引き出せるようになろう。たとえば、電子回路に長時間電流が流れると局所的に H などの不純物が集積するが、これに起因する不具合も中性子イメージングで画像化できる可能性がある。更に、メモリーの



(a)中性子一物質相互作用

(b)γ線-物質相互作用

図1 放射線と物質との相互作用

IC 回路微細構造の可視化をはじめ、究極的には、スピンの向きをそろえた偏極中性子ビームを利用することで、メモリー素子構造の可視化を通じて記憶内容も読み出せるようになるかもしれない。また、IC プレーヤーの作動中に、中性子イメージングで実時間撮像すると、偏極中性子のスピンとの相互作用で、電流の流れる様子を可視化できることも夢ではない。

以下に中性子イメージングの基礎事項を紹介する。中性子イメージングにおける像形成に関わる各種中性子2次元検出器の詳細は、本講座基礎編第7回で述べる予定である。また、中性子イメージングの材料工学への応用は、本講座応用編第4回(2007年7月号)でいくつかの事例を紹介する。

3. 中性子イメージングとは

3・1 物質との相互作用による減衰の利用3)

中性子や γ 線と物質の相互作用の物理的基礎については本講座基礎編第 $1\cdot 2$ 回で述べた。それを簡略化して図 1 にまとめた。その内,図 1(a) 中の相互作用せずに透過する中性子を 2 次元検出器で画像として表したのが中性子イメージングである。他方,図 1(b) のように透過してくる γ 線や X 線を捕らえるのがいわゆる X 線ラジオグラフィである。このような相

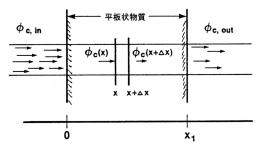


図2 物質中における相互作用による中性子の減衰

互作用により、中性子の強度は物質中を通過するとともに減衰する。

厚さ X_1 の物質を透過する際に起こる相互作用による減衰は、図 2 のように表される。その結果、入射中性子強度($\phi_{c,in}$)と透過中性子強度($\phi_{c,out}$)の最も単純化された関係は以下の式で与えられる。

$$\phi_{c, \text{ out}} = \phi_{c, \text{ in }} \exp(-\mu X_1)$$

ここで得られる係数 μ は減衰係数あるいは減弱係数といわれるもので、中性子の場合は、巨視的全断面積に対応付けられる。物質の中性子巨視的全断面積が核種によって様々な値をとるとともに、その物質の結晶学的構造にも大きく影響される。この減弱係数の差異から 2 次元中性子透過像が形成され、物質の種類や構造が非破壊的に判別可能となる。

<u>イメージングプレートを用いた撮像原理</u>

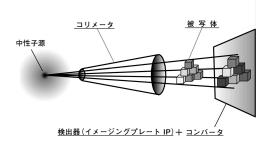


図3 中性子イメージングシステムの構成3)

3・2 中性子イメージングシステムの構成

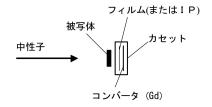
物質と中性子の相互作用による減衰を2次元 分布画像として取得するのが中性子イメージン グ技術である。その基本構成モデルを図3に示 す。ここでは、研究開発最前線において汎用化 されているイメージングプレートを用いる撮像 系について図示した。

基本構成は、中性子源、コリメータ、被写体、 コンバータ及び検出器(ここではイメージング プレート)からなっている。

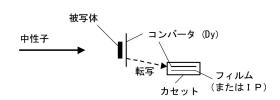
4. 中性子イメージング手法の分類

4・1 中性子の検出

物質を透過してきた中性子の2次元分布を、中性子に不感なX線フィルムやイメージングプレート (Imaging Plate: IP) などの画像記憶媒体に画像化するためには、コンバータを用いる必要がある。コンバータの核的特性に応じた撮像手法は二つの方法、"直接法"と"間接法"に分類される。その基本構成を図4に示した。両者の違いは、画像検出器(フィルムあるいはIP)がコンバータとともに、直接中性子照射場に置かれるか否かである。直接法では、図4(a)で示すようにGdやLiのような中性子との核反応による即発放射線でフィルムやIPを感光させ、撮像後、現像あるいは読み取り器により画像化される。これに対して、間接法では、図4(b)のように中性子との核反応によって生じ



(a) 直接撮像法



(b) 間接撮像法

図4 中性子イメージング直接法と間接法の概要

る同位体が、比較的短い半減期で崩壊放射線を放出するDyやInなどをコンバータとして用い、被写体を透過してきた中性子の2次元分布を、放射化の形で記憶させる。照射後そのコンバータをフィルムあるいはIPに密着して感光させ、2次元像として写し取るので、転写法とも言われる。転写後、フィルムの現像あるいはIPの読み取りで画像化される。両方法の特徴を簡略に表1にまとめた。

IPが、フィルムと異なり繰り返し使用できるという特徴を活かして、直接法には、Gdを混ぜた中性子検出専用のイメージングプレート (BAS-ND) が商品化され、積分型中性子 2次元検出器として、中性子科学の諸分野で広範に用いられている。他方、間接法には、Dyを混ぜた γ 線不感処理式の中性子専用イメージングプレート (Dy-IP) が開発され、核燃料棒、核破砕ターゲット棒及び核融合材料などの照射後非破壊試験に利用され始めている。

現在では、研究開発の分野では X 線フィルムは次第に用いられなくなってきており、IPを用いる直接法と間接法、更には後に触れるデジタル電子画像取得法が主流になっている。しかし、中性子ラジオグラフィを用いる非破壊検

表 1	中性子イ	メー	-ジン	ノク	"直接法	ح	間接法の」	北較
-----	------	----	-----	----	------	---	-------	----

撮像法	像形成プロセス	コンバータ	特 徴	
直接法	コンバータと検出器を直接	Gd, Li, B	(長所)	
	中性子照射し、核反応による	など	画像取得所要時間が短い	
	即発2次放射線を利用して		(短所)	
	直接イメージする		場合によってはγ線カブリが生じやすい	
			コンバータの放射化の問題が少ない	
間接法	コンバータのみを中性子照	Dy, In など	(長所)	
	射した後、蓄積した RI の崩		γ線の影響が生じない	
	壊2次放射線を検出器に転		熱、熱外両領域で利用可	
	写して間接的にイメージす		(短所)	
	る		転写など所要時間が長い	
			放射化コンバータの冷却時間(数時間)が	
			必要	

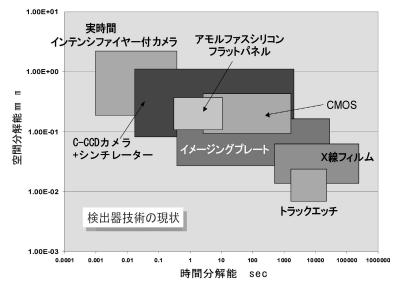


図5 各種中性子2次元検出器の特性比較4)

査の現場では、デジタル技術の導入が始まったとはいえ、X線フィルムによる中性子イメージングが主流であり、その世代交代にはかなりの年月がかかりそうである。

4·2 中性子画像化法 (フィルム, トラック エッチ, IP, 電子式撮像)

中性子イメージングに用いられる画像化用 2 次元検出器には、シート形状の X 線フィルム や IP のほかに、電子式画像検出器として様々 な検出器が開発され実用化されている。その概要を示すために、中性子検出器の時間分解能及び空間分解能をパラメータにして示した(図5) 4 。これは、スイスのポールシェラー研究所(Paul Scherrer Institute: PSI)のスポレーション中性子源に設置されている NEUTRA(Neutron Transmission Radiography system)という熱中性子ラジオグラフィ施設の特性値を用いてまとめたもので、中性子束が 10^6 n cm $^{-2}$ のオーダーで、中性子ビームの平行性を表す

(L/D) 比が 500 程度の場合のグラフ軸数値であることに留意する必要がある。

4・3 複合的撮像技術 (断層撮像法,フェーズコントラスト法,干渉性散乱法など)

これらを用いる中性子イメージングは, 中性 子の持つ光学的性質と取得画像間の数学的諸関 係を組み合わせた複合的な画像処理により、高 度化された中性子イメージング手法へと発展し ている。まず、コンピュータトモグラフィ(computer tomography: CT) といわれる,画像再 構成により被写体の断面を画像化する中性子断 層撮像法がある。また,物質表面における中性 子の屈折を利用して画像のコントラストを強調 するフェーズコントラスト法も中性子イメージ ングに取り入れられてきている。更に,物質波 としての中性子の干渉性散乱という中性子光学 的な特性を活かした,物質の結晶構造に関わる 情報を画像化する方法も確立されようとしてい る。更には、中性子と電磁波(X線・γ線)と の2重イメージング法も画像情報の高度化のた めに開発されている。

4・4 中性子エネルギー群による分類と特徴 (高速中性子, 共鳴中性子, 熱中性子, 冷中性子, 及び極冷中性子)

核反応により発生する中性子が、物質との相互作用を繰り返しながらその運動エネルギーを失う減速過程を利用して、必要なエネルギー領域の中性子ビームを作ることができる(表 2)。それぞれのエネルギー領域の中性子で、その特性を活かした中性子イメージング法が確立されている。

図6は、大きな中性子吸収断面積を持つ元素の内で、原子炉などの中性子系において制御棒や検出器に用いる代表的な物質の全断面積の中性子エネルギー依存性を、熱中性子領域から共鳴中性子領域にわたって表している。meVオーダーの熱中性子領域では大きな断面積を示し、エネルギーが高くなると断面積はゆっくりと小

表 2 中性子の分類

領域名	エネルギー領域
-	_
高速中性子	$MeV \cdot keV$
共鳴中性子	keV · eV
熱中性子	$\mathrm{eV}\cdot\mathrm{meV}$
冷中性子	meV
極冷中性子	meV - μeV

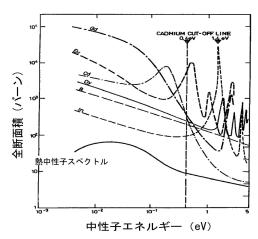


図6 大きな吸収を持つ元素の中性子全断面積の エネルギー依存性

さくなるが、eV オーダー前後のエネルギーでは鋭くて大きい共鳴吸収断面積を示す特徴がある。これら元素の内の幾つかは、中性子イメージング2次元検出器のコンバータとして広く利用される。

これに対して、核分裂、核破砕及び核融合炉の主要な構成材料である幾つかの元素の内、特徴的な物質の全断面積を冷中性子領域から熱中性子領域にわたって示したのが図7である。冷中性子領域で断面積の急激な変化が見られるが、これが結晶性固体の特性である中性子の干渉性散乱に由来するBraggカットオフである。これらは中性子イメージングの被写体を構成する構造材料としても多用され、冷中性子領域でのイメージングにはそのエネルギー、すなわち波

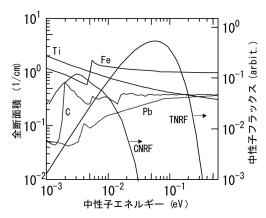


図7 冷中性子領域における中性子全断面積のエネ ルギー依存性

長を慎重に選択する必要がある。

4.5 中性子イメージングの定量性50

中性子イメージングの実施に際しては、中性 子ビームのエネルギースペクトルの影響に加え て, 実際の照射場における定量性を妨げる成分 として、図8に示すような散乱中性子とγ線 があり、これらの影響を評価して直達中性子に よる画像を得る必要がある。この散乱中性子の 影響を除去・軽減する方法の代表的なものを図 9にまとめた。図9(a) は従来法で散乱線除去 を施さない場合、図9(b) はコンバータから試 料を十分離し、散乱線の寄与を平坦にすること で試料の写り込まれていない部分から散乱線の 寄与を推定除去する方法。試料の解像度が問題 にならない場合に有力な方法である。図9(c) は試料の前後に Cd 等のグリッド状やハニカム 状の吸収体を置き, 散乱線を吸収除去する方法。 取得画像に映し込まれない試料の部分があるこ とと, 幾何学的に散乱線が除去できない部分が あるという欠点がある。図9(d) は Cd 等のグ リッド状や点状の吸収体を被写体や被写体のな い部分に配置するが、その寸法は本影部分が無 くならない程度にコンバータ試料より離して設 置する。本影部分に撮像される信号が、その近 傍のγ線を含めての散乱線の信号であるとし て推定除去する方法。図9(c) と同様, 取得画

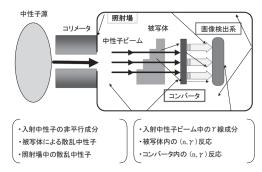


図8 照射場における定量性を妨げる成分

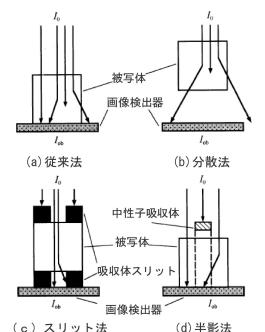


図 9 散乱中性子線除去配置法の比較

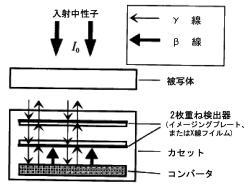


図 10 γ 線の影響を除去するためにイメージング プレート (IP) 又は X 線フィルムを 2 重 に設置した直接法

	μτ [cm ⁻¹]		
撮像システム配置	Fe	Cu	Al
通常方式	$0.60~\pm~0.01$	$0.46~\pm~0.04$	0.056 ± 0.002
拡散方式(除去無)	$0.96~\pm~0.02$	$0.81~\pm~0.01$	$0.095~\pm~0.004$
拡散方式(除去後)	$1.07 ~\pm~ 0.01$	$0.86~\pm~0.01$	_
チャネル方式	$1.14~\pm~0.09$	$0.92~\pm~0.07$	$0.10~\pm~0.04$
本影方式·A	$1.05~\pm~0.03$	$0.74~\pm~0.03$	$0.11~\pm~0.01$
本影方式·B	$1.08~\pm~0.03$	$0.89~\pm~0.03$	_
本影方式-C	$1.044 \; \pm \; 0.015$	$0.873 ~\pm~ 0.048$	$0.0876 ~\pm~ 0.0017$
ハニカム方式	$0.91~\pm~0.03$	$0.93~\pm~0.05$	$0.09~\pm~0.02$
γ 線	$0.92~\pm~0.03$	_	_
総合評価	$1.03~\pm~0.09$	_	_
BNL-325	1.12	0.96	0.10

表 3 γ線の影響を除去するために用いられる各種配置によって求めた中性子減弱係数 μτ の比較

像に映し込まれない試料の部分があることが欠点である。いずれの方法も決定的なものではなく、状況に応じて選択使用される。また、γ線の影響を除去する方法として代表的なものは、図4(b)で示した間接撮像法であるが、直接法でも図10のように2重の X 線フィルム、あるいは IP を用いて両画像の差分から中性子成分のみの画像を取り出す方法もある。実際には、これらの評価方法はそれぞれの実験体系に則して工夫される。表3に、種々の方法で評価された中性子減衰係数をいくつかの物質について比較してみると、工夫の効果が見て取れる。

5. おわりに

中性子イメージングの基礎の詳細は、Harms らの教科書⁶⁾、Neutron Radiography Handbook⁷⁾などを参照してほしい。また、日本アイソトープ協会刊行の"中性子による計測と応用"⁸⁾が本講座の前身とも言えるもので、中性子におけるイメージングの位置付けを知る上で役に立つ。

文 献

- 1) 大学入試センターホームページ (http://www.dnc.ac.jp/)
- 2) 玉置昌義,日本原子力学会 2007 年春の大会予稿 集(投稿中)
- 3) Harms, A. A., Principles of Nuclear Science and Engineering, Research Studies Press (1987)
- 4) PSI (http://neutra.web.psi.ch/)
- Tamaki, M. et al., Nucl. Instrum. Methods A, 377, 102-106 (1996)
- Harms, A. A. and Wyman, D. R., Mathematics and Physics of Neutron Radiography, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, The Netherlands (1986)
- Von Der Hardt, P. and Röttger, H. (eds.), Neutron Radiography Handbook, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, The Netherlands (1981)
- 8) 日本アイソトープ協会,中性子による計測と利 用,丸善,東京(1999)