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

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

Principles of Neutron Imaging Technology.

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。

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¹⁾。

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。

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

RADIOISOTOPES



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 radiography 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

より, 与具2の圧側の中任丁逸悦係の力を足 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²⁾ 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 線一物質相互作用

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・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。

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

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。





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



(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

撮像法	像形成プロセス	コンバータ	特徵	
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	

表1 中性子イメージング直接法と間接法の比較



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10⁶ 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 · keV
共鳴中性子	keV ⁻ eV
熱中性子	eV ⁻ meV
冷中性子	meV
極冷中性子	$\rm meV$ - 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5)

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 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	$0.60~\pm~0.01$	$0.46~\pm~0.04$	$0.056~\pm~0.002$
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

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 子科学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

- 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)
- 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)