

連載講座



中性子イメージング技術の基礎と応用（応用編第1回）

中性子イメージングの非破壊検査での役割[†]

池田 泰

財団法人ファインセラミックスセンター材料技術研究所
456-8587 愛知県名古屋市中熱田区六野 2-4-1

Key Words : neutron, neutron imaging, nondestructive testing, radiography,
honeycomb structure, detonator of rocket, turbine blade

1. 非破壊検査の課題と中性子イメージング

20 世紀の後半から今日に至る数十年間は、人類史上にとって、画期的な科学・技術や産業・社会システムの進歩、医学・生命学の進歩のあった時代であろう。

このような高度な社会・生命・環境を維持するためには、人類はその安全性について並ならぬ努力と精力を果たさねばならない。建設あるいはもの作りにおいて、検査や品質評価は、従来はともすれば軽視されがちで、経済的効率を優先するあまり、とかく問題発生後の後追い作業に追いやられてきた感がある。しかし、近年、製造物責任（PL; product liability）法の制定を含め、製造者の責任が強く求められる時代に進化し、たとえ十分とは言い難いとしても、企業や人々において、品質保証、安全保証がその企業の命運を担い、これを軽んずれば社会から大変厳しい批判を受けることになると認識されてきた。日本のもの作りの優秀さは品質の高さであり、それを維持することが、グローバルな経

済競争を生き抜くための最大の力で、ISO（International Organization for Standard）認証の取得も、このための努力と認識されている。

しかし、一方で建築偽装問題や新幹線トンネル剥離問題、プラント・原子炉の配管・構造物などの耐震性や経年劣化など、我が国社会を脅かす大きな問題が続発し、継続していることも事実である。

このような状況の中で、非破壊検査はますます重要な役割を果たさねばならない。特に社会インフラ・プラントの維持・保守検査では破壊検査を行うことが困難な場合が多く、非破壊検査が重要な手法として頼られている。非破壊検査の目的は、第一に検査対象物の欠陥（きず）を検出することである。しかし、それに留まらず、第二にその欠陥の大きさを計測し、時にはそれに掛かる応力を計算した上、その欠陥の危険度を評価することである。第三には、その欠陥の経時的変化・進展を計測し、その対象物の寿命予測・余寿命についてできるだけ正確な情報を提供することである。この作業のため、非破壊検査では、破壊試験で用いられる実応力・環境負荷による保証試験の代わりに、破壊力学や応力解析と組み合わせた評価が必要となる。保証試験では、欠陥の有無を検知することなく、実負荷により強度や寿命を直接保証する。非破壊検査では、欠陥サイズの検知から、その健全

[†]Fundamentals and Applications of Neutron Imaging (Applications Part 1).

Neutron Imaging in Nondestructive Testing.

Yasushi IKEDA : Japan Fine Ceramics Center, 2-4-2, Mutsuno, Atsuta-ku, Nagoya-shi, Aichi Pref. 456-8587, Japan.

表 1 非破壊検査の対象分野・対象物

対象分野	対象	検査装置
発電所	原子炉本体 ボイラー 熱交換機 配管 送電関係	移動型
プラント	圧力容器 燃焼器 反応塔 配管 石油輸送管	
建築・土木構造物	橋梁 トンネル ビルディング	
輸送機器	航空機 ロケット 自動車 船舶 鉄道車両	両方
工場製品	電子機器・部品 鋼管・鋼板 ダイキャスト 食品	据置型
農水産物	果物 真珠	
輸送人・物	空港 港湾	

表 2 非破壊検査の対象部位・材料・形状と用いられる検査技術

検査の対象・部位	外観・形状	目視検査 寸法計測 レーザ計測
	表面	光学検査 浸透探傷 磁気探傷
	近表面	超音波 赤外線 マイクロ波 渦電流 磁場計測
	内部	音響 超音波 X線 γ線 中性子線 MRI
対象材料	鉄鋼・溶接・金属	超音波 放射線 渦電流 磁気探傷 浸透探傷
	コンクリート	音響 超音波 赤外線 放射線
	プラスチック	光 放射線
	セラミック ガラス	光 放射線 超音波 渦電流
	カーボン	光 放射線 超音波 渦電流
	半導体 電子部品	放射線 超音波 MRI
	食品	光 放射線 赤外線
材料形状	農産物・海産物	光 放射線 赤外線 超音波
	膜	光 放射線 赤外線 超音波
	積層材	放射線 赤外線 超音波
	複合材	放射線 赤外線 超音波 渦電流

性や寿命を推定する。このような推定は保証試験のような決定的な保証が難しい。しかし、健全性評価のデータが蓄積され、データベースの構築、研究と経験の豊富化により、その評価の精度を高めることができる。

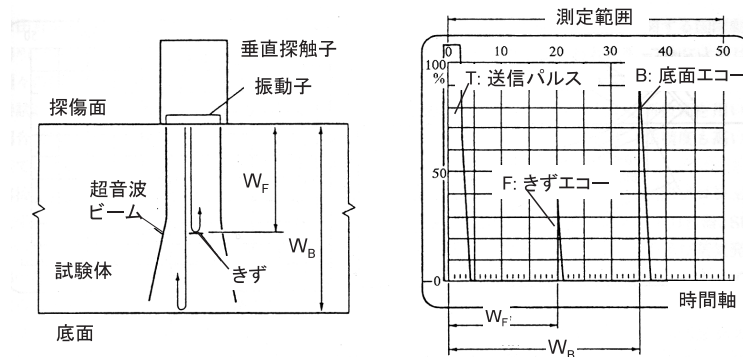
本シリーズで取り上げられる“中性子イメージング検査法”は、X線やγ線と同類の放射線検査に分類される。この検査法は内部構造を可視化し、その欠陥や不具合を検査する目的で使用される。最近の他の非破壊検査でも対象物の画像化が進んでいるが、精度と正確さにおいては放射線検査は現在も抜きん出た存在であることに変わりがなく、最後の診断を任される

ことが多い。

これらの非破壊検査の技術は対象物や検査条件・検査環境に応じて実に様々である。大別すると表1のように各種の分野と対象に広がっている。また、対象の検査部位も外観・形状、表面、近表面、内部のように各部があり、それにより検査方法が異なっている。材料の種類や形状によっても検査方法は異なってくる。表2にどのような検査方法が適用されるかを大まかに記述している。また、検査はその目的によっても手法が異なってくる。表3に検査の目的についてまとめた。

表3 非破壊検査の種類と目的

検査の種類	検査の目的
供用前検査	供用前に行われる検査で、安全・健全性の保証と確認
供用中検査・モニタリング	供用中の異常、損傷、劣化の断続的・連続的モニタリング
定期検査	供用の一定期間後に、稼働停止で行われる検査で、稼働による損耗、腐食、亀裂、劣化を検出し、健全性維持のための対策・処置を行う。
インライン検査	生産ラインに組み込まれた製品の全数検査による品質管理
オフライン検査	生産ラインから一定割合で抜き取り検査し、ラインの健全性を確保

図1 超音波垂直法の原理¹⁾

2. 非破壊検査技術の概要

各種の非破壊検査の中にも、更に幾通りかの手法があり、それぞれの対象物、対象条件に最適と考えられる方法が採用されている。これらの詳細については参考書を参照して頂きたいが、ここでは簡単に各種の原理と概要を解説し、非破壊検査についての理解の一助としたい。

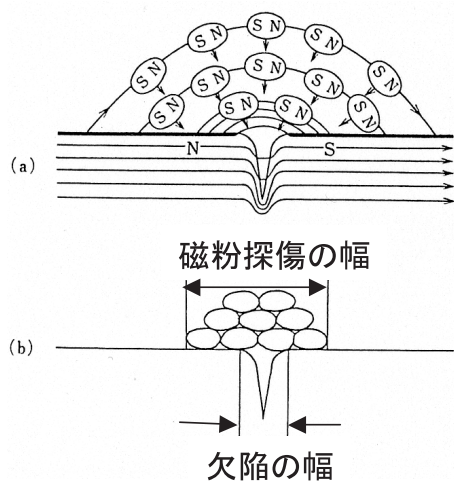
2・1 放射線探傷試験 (RT: Radiography Test)

中性子イメージングの他に、X線・ γ 線、粒子線、電子・陽電子線イメージングが考えられる。放射線源を使用し、透過データを画像として検出し、2次元・3次元の画像データを作製し、判別・評価する。従来、検査規格が写真フィルムに限られたことから、デジタルイメージングが伸び悩んできたが、溶接以外では徐々にデジタル化が進んでいる。透過法の他、反射法も研究されている。欠陥の検出目標サイズは通常

0.5～1.0mmであるが、微小線源により数 μm の検出も可能である。RTは本シリーズのメインテーマであるので、詳細を次回(次号)に取り上げる。

2・2 超音波探傷試験 (UT: Ultrasonic Test)

非破壊検査の中で、最も大きなシェア(40%程度、ちなみにX線は20%程度)を占める。図1に垂直法の原理を示した¹⁾。振動子から試験体へ超音波を送波し、内部の欠陥により反射された欠陥エコーを検出する。水を音響カプラーとして使用し、非接触で検査できる。固体中での音速が速いため、高速の検査が可能。最近では医療超音波のように、探触子がアレイ又はエリアになっているタイプも開発され、高速・高効率化が進んでいる。垂直法の他に、斜角法や表面波・SH (Shear Horizontal) 波法、TOFD (Time Of Flight Diffraction) 法、板波法など各種検査法が研究開発されている。剥離

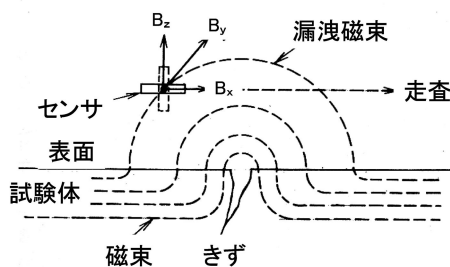
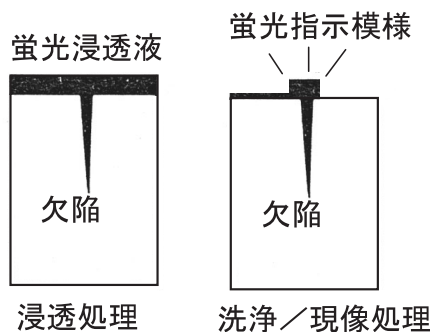
図2 磁粉探傷の原理²⁾

のような欠損のない欠陥検出に強い。多孔質体や複雑形状品が苦手である。欠陥の検出目標は通常1 mm程度、ただし、セラミックス用の集束形ビームでは100 μm の欠陥の検出も可能である。音速や減衰測定法も研究されている。

RTとUTは内部の検査が可能なることから、体積検査と呼ばれることがある。

2.3 表面探傷試験

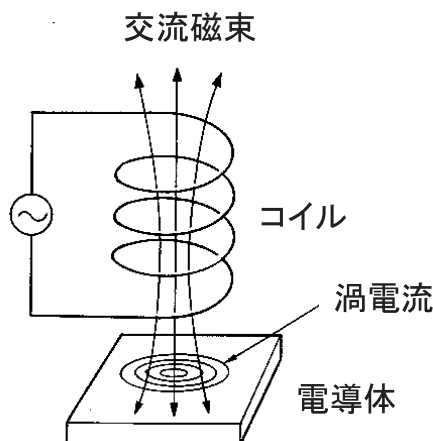
材料・部品にとって、表面は最も応力集中が掛かりやすいこともあり、従来から、目視検査が重視されてきた。通常の裸眼検査では数百 μm のきずが検出限度とされているので、それより微小な欠陥は顕微鏡に頼ることになる。しかし、これでは能率が大変落ちてしまうので、表面の微小なきずを大きく表示する検査法が開発されている。磁粉探傷試験(MT: Magnetic particle Test)と浸透探傷試験(PT: Penetrant Test)がある。磁粉探傷試験は図2に示すように、鉄などの強磁性体に通电して磁化させると、表面のきず部分に磁界が発生し、磁粉を含んだ検査液を塗布すると、きずのところに磁粉が集まり、欠陥指示模様を示す。この模様を目視、または高速の自動カメラでとらえることにより、高速・高感度の検査が可能である²⁾。

図3 漏洩磁束探傷の原理³⁾図4 蛍光浸透探傷の原理⁴⁾

この磁気利用探傷法には、指示模様の代わりに、ホール素子や磁気テープなどのセンサーを用いた漏洩磁束探傷法(MT: Magnetic-field Test)がある。図3に、きず近傍に生じる漏洩磁束の概念図を示した³⁾。強磁性体の試験体の周囲に交流・直流磁場を発生させ、試験体を磁化する棒鋼、鋼管、鋼板、ビレット、冷間鍛造品などに欠かせない高速検査法となっている。

浸透探傷は非磁性体のアルミニウム合金やセラミックスに適用できる。最も簡単なカラーチェックの他、蛍光浸透探傷という高感度な方法もある(図4)⁴⁾。表面きずの内部に高浸透性の蛍光液体を浸透させ、表面を洗浄した後、紫外線を当てるときず中に残存した蛍光液体が発光し、欠陥指示模様を呈する。これを目視、又は高感度カメラでとらえ、欠陥を検出する。

これらの表面探傷法は、条件がよければ十数 μm の幅の割れ目を検出できる。部品の形状は問わないが、部位によっては検出できない場合

図5 渦流探傷法の原理⁵⁾

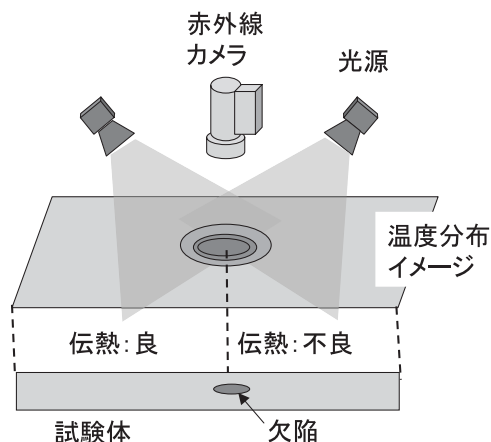
もあり、試行試験が重要である。

2・4 渦流探傷試験 (ET:Eddy Current Test)

表面探傷法の中に属するが、導電性材料に適用する電磁誘導利用の渦流探傷法がある (図5)⁵⁾。導電性試験体にコイルによる交流磁束を接近させると、試験体中に渦電流が発生し、コイルにインピーダンス変化が生じる。このインピーダンス変化を交流ブリッジによって検出する。試験体に欠陥が存在するとインピーダンス変化が生じ、欠陥の大きさ・深さに依存した信号として検出される。この方法は非接触で、極めて高速に試験ができることに特徴があり、また、細管内のきず検査にも適用できるため、鋼管、鋼材の他、熱交換機の細管検査にも利用される。

2・5 赤外線サーモグラフィ (Infrared thermography)

試験体の熱伝導を利用した検査方法で、大面積や遠くからの大きな物体の検査に適している。図6に原理を示した⁶⁾。この方法は外熱法のように外からランプ等で加熱する方法と、通電あるいは日照等による加熱のように、熱源を使用しない場合がある。

図6 赤外線サーモグラフィの原理⁶⁾

3. 中性子による放射線透過検査の特徴

中性子イメージングを非破壊検査技術として採用する場合には、X線や γ 線等と同類の放射線透過検査として考えるのが最も普通である。放射線の透過力に対する認識についてはX線の発見以来100年以上の歴史があり、 γ 線も電磁波であるというその本質がX線と同類であることから、発生源、透過力などの相違があるとはいえ、ほぼ両者は同じように論じられ使用されてきた。エネルギーが高いほど透過力が強く、厚い対象物の検査が可能になる。

一方、中性子イメージングはその歴史は浅く、国内で撮影されるようになってから、30年程度にしかない。X線・ γ 線の線源が比較的安価で、小型・可搬性があるのに比較し、中性子源は研究用原子炉や、加速器が必要であり、コストがかさむことに加えて、誘導放射能の発生などの問題があり、プラントなど現場での検査には向いていない。したがって検査の対象物としては持ち運びの可能な製品の検査が主用途になる。しかしながら中性子イメージングの特徴は熱中性子が原子核との相互作用に起因する核特有な減弱係数を示すために、X線・ γ 線に比べ、異なる画像で特殊な結果を示すことがある。すなわち、中性子はH(水、有機物)やB, Li等の軽元素で減弱が大きく、また、Cd, Sm,

Gd など特殊に中性子吸収の大きな元素が存在し、これらの元素・物質の検出が容易である。

これに比較し、Al, Fe, Cu, Pb など一般の金属構造材料において減弱が小さい。そのため、こうした金属に対しては 100 kV 付近の X 線よりも透過性が強く、厚い対象物の可視化が可能である。特に、これらの金属容器中の水、有機物の可視化が容易である。

上の特性を利用すると、後に述べるように、宇宙ロケットの起爆管や弾薬・ロケットなど火工品と呼ばれる製品の検査では、従来の X 線・ γ 線に比較して中性子イメージングがより有効で、重要な位置を占めている。また、金属製タービンブレードの空気冷却路を阻害するセラミックスの詰まりの検査、航空機やヘリコプターのアルミニウム製翼・胴体の腐食など、限定された対象物ではあるが、中性子イメージングが X 線・ γ 線や他の検査法に比較して有利な分野がある。

このため、中性子イメージングは X 線イメージングの補完技術として採用され、非破壊検査法において最初から中性子イメージングの採用には至らない場合でも、X 線・ γ 線が困難な場合にしばしば検討の対象となる。

以下に中性子イメージングを含む放射線による非破壊検査の特徴を、他の検査法と比較してまとめた。

- (1) 強い透過力と高い識別性能により欠陥検出感度が高い。
- (2) 検査結果が画像データであり、判別が容易である。
- (3) 透過画像が対象物の真の姿の投影で、構造・欠陥データとして信頼性が高い。
- (4) 対象物の形状、寸法にあまり左右されない。複雑構造・形状に対応できる。
- (5) 欠陥が存在する位置に検出感度があまり影響されない。表面でも、近表面でも、内部深くでも検出が可能である。
- (6) 放射線エネルギー・撮影時間を変えることにより、材質の変化をカバーできる。

(7) CT(断層撮影)のような多方向からの投影画像データを利用できる。

欠点としては、

- (8) 放射線管理、被ばく管理、検査者の資格が必要で、法的規制が厳重である。
 - (9) 透過試験であるため、放射線が透過し難い対象物は検査が困難である。
 - (10) 装置コストが比較的高い。特に中性子のように原子炉、加速器が必要となると、中性子イメージングだけではコスト競争は不可能に近い。
 - (11) 中性子イメージング検査では誘導放射能が発生することが問題であり、一般のフィールド検査には用い難い。
- などがある。

4. 産業における非破壊検査の現状と中性子イメージングの適用可能性

非破壊検査の現状について、表 2 にまとめているが、もう少し付け加えて、現状の技術レベルと中性子イメージングによる適用可能性について、かなり独断的であるが、検討してみたい。非破壊検査の必要な分野としては、鉄鋼業、溶接、プラスチック・複合材料、電子部品・セラミックス、航空・宇宙産業、コンクリート構造物、発電設備、食品、美術品その他など広範囲の分野がある。幾つかの代表的な分野と例について考察する。

4.1 鉄鋼業

これには棒鋼、鋼板、鋼管、鋼線、レール、橋梁等々種があり、非破壊検査の中心とされてきた。製造ラインでの欠陥検出・合否判定が目的であり、特に高圧配管や石油輸送管に代表される大口径鋼管の検査は全数の厳しい検査が実施される。製造ラインでの鋼板・鋼管の検査では、まず、検査速度が重視される。60 ~ 120 m/min の高速で製品を検査しなければならない⁷⁾。更に熱間圧延では 1 000 °C 以上の高温での実施が要求される場合もある。検出目標の欠

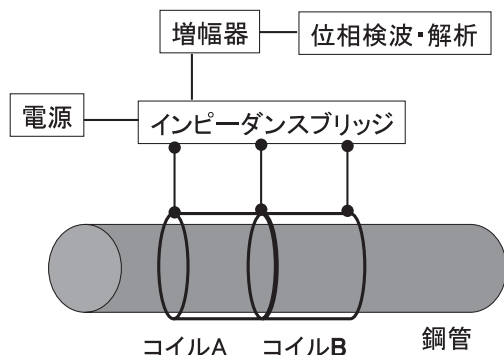


図8 鋼管の製造ラインにおける渦流探傷法の概念図¹⁰⁾

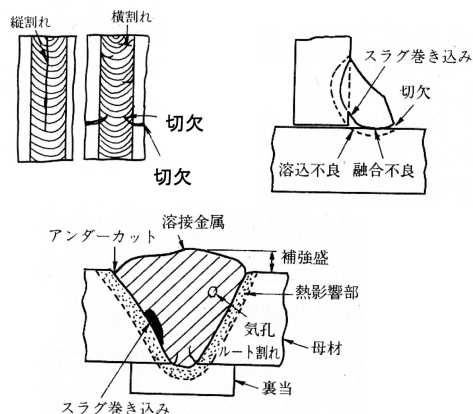


図9 溶接欠陥の例¹¹⁾

表5 溶接の探傷法⁸⁾

欠陥の種類	探傷法
構造上の不連続(欠陥・気孔)	X線・γ線、超音波、磁粉探傷、浸透探傷、顕微鏡検査
非金属介在物・スラグ巻き込み	
融合不良	
溶け込み不良	
アンダーカット	外観目視検査、X線、曲げ試験
亀裂	外観目視検査、X線・γ線、超音波、磁粉探傷、浸透探傷、顕微鏡検査
表面欠陥	外観目視検査、磁粉探傷、浸透探傷、その他

超音波は複数個の探触子で対象物をカバーできるように配置し、探触子と対象物の非接触での超音波伝播を可能にするため、水流を用いて音響カップリングする。欠陥があれば受信器に欠陥信号が表れ、異常が検出される。図8の渦電流検査では、図に示すように円筒状のコイルA・Bを用いて鋼管中の欠陥によるインピーダンスの変化を検出する。非接触で、高温、高速の検査が可能である。いずれも既存技術の延長であり、コスト的に放射線に比較し安価で信頼性も高い。

4.2 溶接

材料として鋼、ステンレス合金、アルミニウム、チタンなどがあり、構造として高压容器・

配管、造船、橋梁、航空機など広範囲である。図9に溶接欠陥の種類¹¹⁾、表5に探傷法を示した。溶接は構造物の安全性確保のため、厳しい検査が要求される。表面の如何なる欠陥も見逃されないと言うことで、外観目視（肉眼）検査を始め、顕微鏡検査も行われる。磁粉探傷や浸透探傷では数十 μm のきずが検出される。また、内部欠陥に対しては、従来X線が最も得意とする分野で、検査データが画像で出され、きずの寸法/形状が精密に検出でき、データの改竄がないところから、最も信頼性の高い検査として評価されてきた。検出欠陥の寸法は材厚の2%程度は必要とされる。

しかし、近年超音波その他の技術の進歩はめざましく、放射線から新しい技術に移行しつつ

あることは否めない。超音波においては、全波形保存処理など、検査者個人のその場の一時的な判断に頼らず、全データを保存処理できるようになり、その信頼性が高まった。また、斜角法やSH波法等進んだ技術が開発され、従来超音波が到達しにくかった部位まで到達させ、検査ができるようになっていく。放射線は透過試験であり、線源と検出器を対象物を挟んで対向させる必要があるが、超音波は反射試験であり、片側からの検査で間に合う。また、金属製対象物の厚さが厚くてもそれほど苦にならない。

一方、中性子イメージングについては、その画像分解能とコストを考慮するとき、材厚欠損の画像化に頼る単純な方法では、先行技術を越える可能性は非常に低い。Gdなどによる造影剤使用で、表面欠陥など端部が表出している欠陥の検出は可能性があるが、X線と比較してどうかの問題がある。仮に強力な冷中性子ビームが利用でき、欠陥の影響で波長が変化し、それによりコントラストの変化が生じることがあれば、面白いかもしれない。

磁粉探傷と浸透探傷は表面の十数 μm の異常部の検出が可能になる。いずれも、検査コストが安価で、大面積の検査が可能である。

4.3 プラスチック/複合材

この分野ではCFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics), GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastics) に代表される複合材やファイバーの代わりに粒状の物質を混流した素材等が考えられる。これらの素材の多くは、有機物の接着剤で接合した構造の製品になる。素材の良否と接着の良否、経年劣化の検査が対象となる。従来は手軽な超音波が適用されてきたが、複合材は全体にわたって多孔質であるため超音波の散乱体となり、うまく検査できない悩みもある。近年、赤外線サーモグラフィや渦電流による検査も進歩している。赤外線では、広範囲な領域の迅速な検査が可能とされ、航空機の機体などに適用されている¹²⁾。

放射線の場合は、剥離のような材質欠損ではない欠陥の検出が困難であるが、造影剤の使用が可能であれば、剥離の隙間に注入することにより非常に高感度な検査となり、保守検査で実施されている。中性子の場合もGdによる造影剤の使用により、接着不良などの検出が可能であろう。ただしX線に代わり中性子が必要になるかどうかは、水分の検出をどこまで必要とするかに掛かっていると考えられる。単なる欠陥の検出ではなく、水分の浸透とか含有を検査するのであれば、中性子イメージングの働きが大いに期待される。プラスチックは中性子の散乱が大きいため、その影響も考慮が必要になる。

4.4 電子部品/セラミックス

セラミックスでは検出に要求される欠陥の寸法が10 μm 程度と小さく、従来の放射線や超音波では検出が困難であった。微小焦点X線 (Micro-focus X-ray: MFX) とデジタル画像検出器の開発や、超音波では集束形の探触子と水浸法が開発されて、このような微細な欠陥の検出が可能になった。セラミックスは、ベアリング、高温材料の搬送用ローラー、圧延用ロールなどの構造材料や、自動車用エンジン部の電流制御基板やコンピュータ・IT関連の電子部品などに用いられ、精密な検査が要求されている。電子基板の検査では、ハンダのボイド検査が重要である。ハンダ接合は最近ますます微小化され、100 μm 以下のハンダボール中の数 μm のボイドの検査が重要となっている。これらの電子基板ではMFXが分解能、検査速度共に優れていて、多用されている。MFXでは数倍から100倍以上の倍率によるその場撮影が可能で、その場で目視判定もしくは自動判別される¹³⁾。

中性子イメージングでは、拡大撮影が困難であり、また、誘導放射能を考慮すると、現在のMFXに代わるとは考えられない。しかし、先に述べたように、Gd, Cd, B, Liなど特定の元素を含む材料・構造があった場合、誘導放射能が問題なければ適用できる可能性がある。

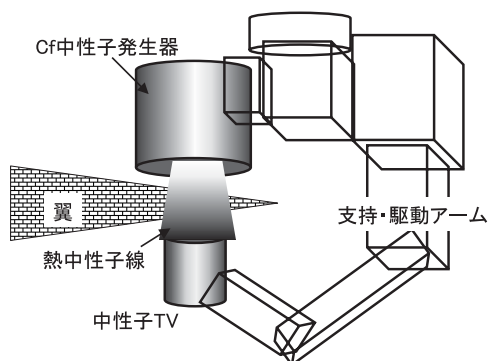


図10 航空機検査用の中性子イメージング装置略図¹⁴⁾

4・5 航空/宇宙産業

航空機は、高強度アルミニウム合金、マグネシウム合金、銅合金、炭素などの繊維強化複合材などによる構造物である。結合には、溶接よりはリベット・ボルトによるファスナー結合法が用いられている。繰り返し応力により、亀裂が表面に達している場合が危険で、検査は光ファイバー内視鏡による目視をはじめ、渦電流、浸透などの表面検査法によっている。オーバーホール時の検査では、放射線・超音波も用いられている。ハニカム構造の複合材では、接着部の剥離検出に赤外線も用いられている。

機体のアルミニウム腐食を検査するために、中性子イメージングが実用化されている。アルミニウムが腐食し、水酸化アルミニウムを発生させる。この水酸化アルミニウムはX線によっては検出が困難である。米国の空軍基地での検査では、 ^{252}Cf 中性子源を用い、中性子TVを用いて、主翼や胴体の腐食の状況を検査している。図10に検査装置の略図を示した¹⁴⁾。中性子イメージングが活躍している検査例としては、他にヘリコプターのローターの検査がフランスやハンガリーなどヨーロッパで行われ始めている。

非破壊検査ではないが、空港での荷物・貨物検査に中性子イメージングが利用されているようである。これは爆発物、麻薬などの検出を目

的としたセキュリティ検査であり、X線とタイアップして行われる。中性子は鉛や鉄など重金属を容易に透過するため、内部に隠されたプラスチック火薬や麻薬を検出することができ、この分野の今後の重要性を考えると、その役割は重要である。

航空機用のガスタービンブレードの検査では、中性子イメージングが非常に重要な役割を果たしている¹⁵⁾。タービンブレードは高温に耐えるため、ガス冷却を行っているが、流路にセラミック質の異物が存在する可能性があり、それにより冷却能力が低下するとブレードが破損するため、全数検査により、その健全性を確保しなければならない。形状構造が複雑で放射線検査以外には検査手段がない。X線ではブレードの構造は鮮明であるが、異物の検出が度々困難である。これに対し、中性子では構造も鮮明に可視化し、異物も確実に検出できる。このため、中性子イメージングはこの分野では貴重な検査技術となっている。

宇宙用ロケットには、発射後、各段を切り離す分離ボルトや、姿勢制御用の火工品と呼ばれる火薬を鋼管内に充填した部品を多用している。これらの火工品が正常に発火するかどうかは、火薬の充填が良好であるかどうかにかかっている。この充填の良否を確かめるには、放射線検査しか方法はない。しかも、内部に充填されるのはいわゆるプラスチック製高分子火薬であるため、通常のX線検査では十分な感度が保証されない。このため、中性子イメージングが現状では唯一の検査手法となっている¹⁶⁾。

以上、この分野では中性子イメージングの実用例も多く、他の章で詳しく解説がある。今後の一層の技術発展が期待されている。

4・6 コンクリート構造物

新幹線や地下鉄のコンクリートトンネルの安全性が、社会的問題となったことは記憶にまだ新しい。阪神淡路大震災におけるビルや高速道路の崩壊も生々しい現実である。コンクリート

の劣化評価や健全性評価にはいろいろな方法があり、どれが最も信頼性が高いか、現在もなお研究が進められている段階である。材質評価ではなく欠陥検出という立場からの非破壊検査に的を絞る、その課題を取り出すと、内部の鉄筋の腐食損傷とコンクリートの剥離が挙げられよう。鉄筋の腐食検査は、放射線透過検査が可能な場合には比較的問題はない。しかし、対象物の大きさ、構造から従来の放射線では歯が立たない場合も多い。

一方、剥離に関しては、機械的な打音法が最も多用されてきた。熟練者に頼るこの方法は相当確実ではあろうが、決して十分とはいえない。最近、サーモグラフィを用いる検査車両が製作されたと聞いているが、その速度が大変遅いとも聞いている。この分野で中性子イメージングが何か役立つことができるとしたら、壁内の水分の検出であろうが、水は容易に壁の外にしみ出してくるので、高価な中性子イメージングの必要はないかもしれない。

4・7 発電設備・プラント

火力・原子力の発電プラントの安全・健全・高稼働率は社会エネルギーインフラとして、その重要性は言を俟たない。放射線、超音波、渦電流、各種表面検査、赤外線、マイクロ波など様々な検査方法が試みられている。

この中で、中性子イメージングの適用性については、この場合は現場でのフィールド検査と考えられ、検出感度、検査速度、誘導放射能、コスト、作業難度等を考慮すると、現状技術に代わるものとは考え難い。ただし、検査ではなく、高温水や二相流を可視化・モニタリングする場合には、 ^{252}Cf を使用した中性子イメージングが役に立つかもしれない。

中性子イメージングの非常に重要な役割として、別に原子炉の燃料管理がある。これは特殊な分野であるが、原子力発電には欠かせない技術であり、詳細は本講座応用編第7回で取り扱われる。実のところ中性子イメージングの開発

の必要性は、この原子力分野で始まったと言って良い。原子炉燃料ピンのペレットの形状・寸法と被覆材中での装填状況・間隙距離はピンの健全性には不可欠な検査要素であり、また、ペレットの濃縮度管理も不可欠である。これらの検査はX線でもある程度可能ではあるが、特に濃縮度などは中性子でなければ判定することができない¹⁷⁾。また、研究目的が主であるが、使用済み燃料の燃焼度、燃焼による形状や寸法の変化などの測定にも用いられてきた¹⁸⁾。通常のX線検査は、強い γ 線の下での適用は不可能に近い。燃料ピンが組み合わさった燃料バンドルの検査、撮影も中性子で行われた。特に、模擬暴走実験で、燃料バンドルが溶融した状態を熱外中性子でトモグラフィ撮影したことがある。原子力は反原発の風潮も強く、また、確実に現状技術で安全性を確保しなければならないことから、安全技術の開発が困難な側面も強い。しかし、今後の脱石油を考えると、非常に重要な技術であると考えられる。

4・8 食品・薬品・化学製品

食品中の異物検査はラインに組み込まれて全数/抜き取り検査が必要であり、X線によるデジタル透視検査が広く用いられている。中性子線の適用は放射化の問題があり、食品には許されないであろう。

4・9 美術品・考古学遺物

筒の中の教典や絵画に使用された絵の具の成分に対して、中性子イメージングはX線とは異なる画像を提供するので、重要な可視化技術として用いられている¹⁹⁾。

5. おわりに

本稿では、非破壊検査の概要と、中性子イメージングの適用可能性について解説した。ここでの検査例はほんの一例で、関心のある読者には(社)日本非破壊検査協会(JSNDI: The Japanese Society for Non-destructive Inspection)

などからの雑誌，報告書，発表等を読んで頂きたい。下記に同協会の参考書を記す。

- (1) 日本非破壊検査協会誌(月刊)「非破壊検査」
- (2) 日本非破壊検査協会大会講演概要集(年2回)
- (3) 日本非破壊検査協会編「非破壊検査の最前線」
- (4) 日本非破壊検査協会編「新非破壊検査便覧」
日刊工業新聞社
- (5) 日本非破壊検査協会編「日本非破壊検査協会
50 年史」
- (6) 非破壊検査関係の教科書・単独本，例えば，
土門 斉・越出慎一，やさしい非破壊検査
技術，工業調査会，1996 年

文 献

- 1) 日本非破壊検査協会編，日本非破壊検査協会 50
年史，p.83(2002)
- 2) 日本非破壊検査協会編，新非破壊検査便覧，p.470，
日刊工業新聞社(1992)
- 3) 日本非破壊検査協会編，新非破壊検査便覧，p.517，
日刊工業新聞社(1992)
- 4) 日本非破壊検査協会編，新非破壊検査便覧，p.542，
日刊工業新聞社(1992)
- 5) 日本非破壊検査協会編，新非破壊検査便覧，p.379，

日刊工業新聞社(1992)

- 6) 阪上隆英，非破壊検査技術の最前線(赤外線サー
モグラフィ)，CD 版，2 巻 1-83，日本非破壊検
査協会(2002)
- 7) 土門 斉，越出慎一，やさしい非破壊検査技術，
p.43，工業調査会(1996)
- 8) 土門 斉，越出慎一，やさしい非破壊検査技術，
p.140，工業調査会(1996)
- 9) 日本非破壊検査協会編，日本非破壊検査協会 50
年史，p.193(2002)
- 10) 日本非破壊検査協会編，新非破壊検査便覧，p.394，
日刊工業新聞社(1992)
- 11) 土門 斉，越出慎一，書籍名(7)より，p.146
- 12) 阪上隆英，(6)より，2 巻 1-88
- 13) 小泉和人，平嶋龍介，池田 泰，水田安俊，日
本非破壊検査協会第 3 回放射線シンポジウム講
演論文集，p.148(1999)
- 14) Barton, J.P., Bader, J.W. and Stokes, J.A., Neutron
Radiography(4), p.133, Gordon & Breach Sci-
ence Publishers, USA (1992)
- 15) -19) 日本非破壊検査協会編，中性子ラジオグラ
フィ写真集，(1995)，他に Neutron Radiography
(Proc. of World Conf. on Neutron Radiography),
No.1-No.4, Gordon & Breach Science Publishers,
USA, etc.等