連載講座

放射線イメージング技術の最前線 (第9回)

γ 線ラジオグラフィー, およびその他の放射線イメージング手法[†]

山本匡吾, 大島俊則*, 森 千鶴夫**

帝国ピストンリング株式会社

394-8511 長野県岡谷市神明町 2-1-13

*アロカ株式会社

181-8622 東京都三鷹市牟礼 6-22-1

**愛知工業大学電気工学科

470-0392 愛知県豊田市八草町八千草 1247

Key Words : gamma ray radiography, track detector, imaging plate, compton camera,
capillary plate proportional counter

1. はじめに

本連載講座の今までの各講座において述べられなかったいくつかの放射線イメージング手法について述べる。その一つは γ 線ラジオグラフィーである。この手法は後述するように、必ずしも放射線イメージング最前線というわけではないが、特殊な手法として実用的には産業界で今も極めて重要な位置を占めている。我が国はこの手法において、ラジオアイソトープ γ 線源の生産を含めて、先進的技術を有しているといえる。

その他の放射線イメージング技術として種々のユニークな手法があり、やはりここで触れておかなければならない。これらのいくつかには、

例えば霧箱のように必ずしも新しいとはいえない手法も含まれているが、放射線イメージング手法としては極めて独特なもので、放射線教育の面では大いに活用されている。また、他のいくつかについても現状では萌芽的で実用に供されていないものもあるが、これからの進展が期待できる手法として本稿に含めた。

2. γ 線ラジオグラフィー¹⁾

非破壊検査の分野において、 γ 線源はよく利用されてきた。しかし X 線源の性能が、強度、エネルギー、微小焦点、安定性、使い勝手のよさ、維持管理のしやすさなどの点において、改良されてくるにつれて、 γ 線源は狭隘な場所での使用に限られてくるようになってきた。しかし逆に言えば、そのことのゆえに今も貴重な検査方法として定着している。また一方では、¹⁶⁹Yb がそうであったように、新しい需要が新しい線源の開発を促したり、新しい線源の開発が新しい応用をもたらしたりする余地は大いにある。

2.1 γ 線源¹⁾⁻³⁾

表 1 にラジオグラフィーに用いられる γ 線源を示すが、我が国では、実質的に ⁶⁰Co, ¹⁹²Ir,

[†]The Front of Radiation Imaging Technique(9). γ Ray Radiography and the Other Imaging Methods. Masago YAMAMOTO, Toshinori OHSHIMA* and Chizuo MORI**: Teikoku Piston Ring Co. Ltd., 2-1-13, Shinmei-cho, Okaya-shi, Nagano Pref. 394-8511, Japan, *Aloka Co. Ltd., 6-22-1, Mure, Mitaka-shi, Tokyo 181-8622, Japan, **Department of Electrical Engineering, Aichi Institute of Technology, 1247, Yachigusa, Yagusa-cho, Toyota-shi, Aichi Pref. 470-0392, Japan.

表1 ラジオグラフィーに用いられる γ 線源

核種	^{60}Co	^{137}Cs	^{192}Ir	^{170}Tm	^{169}Yb	^{75}Se
半減期	5.27 年	30.0 年	73.8 日	128.6 日	32.0 日	119.8 日
γ 線エネルギー (keV)	1,173 1,332	662	296 ~604	52 ~84	63 ~308	66 ~401
適用範囲(Fe mm)	20~150	10~100	10~80	~3	1~10	4~28
供給源	国外	国外	国産	国外	国産	国外

^{169}Yb の3種である。このうち、後の二者は関係者の努力により国産化が確立し、一部は海外へも供給されている。各種プラントの配管の溶接部等は一般に狭隘であり γ 線源が重用される。 ^{192}Ir 線源は原研から千代田テクノル(株)が製造を引き継ぎ、2 mm ϕ $\times$ 2 mm ϕ の金属ペレット(使用時に約 370 GBq/個)として、2か月毎に年6回出荷し、日本アイソトープ協会がステンレス容器に溶接密封し、照射器に収納して出荷する。肉厚 10 mm 以下では ^{192}Ir でもエネルギーが高すぎるため、 ^{169}Yb が開発され、海外からも関心が寄せられている。この線源は、六ヶ所村の日本原燃の再処理工場の配管検査のために平成 13 年度をピークとして使用されたが現在は減少している。新しい用途開発が望まれる。

ラジオグラフの高い分解能を達成するには、高い比放射能の線源を得ることが必須であるため、安定濃縮同位体を用いるが、これらは国外からの輸入である。安定濃縮同位体は今後の特異な性質を持つ材料の研究開発等に欠かせないと思われるが、我が国としてもこのような分野にも注意を向ける必要があるように思われる。

2.2 γ 線ラジオグラフィーにおける検出器と画像処理

放射線(X線、 γ 線)透過試験における検出器として、フィルム、イメージングプレート(IP)、フラットパネルセンサ(FPS)の三者を比較した報告⁴⁾がある。その評価を表2に示すが、現場への適応性においては、フィルムが

表2 放射線透過試験における代表的な検出器の特性

検出器の種類	フィルム	IP	FPS
感度(撮影時間)	○	◎	◎
解像度	◎	○	○
ダイナミックレンジ	○	◎	○
リアルタイム性	△	○	◎
画像の耐劣化性	○	◎	◎
検出器の柔軟性(可撓性)	◎	○	△
検出器の軽量性	◎	◎	△
計測の作業性	△	◎	◎
データ保存スペース	△	◎	◎
現場への適応性	◎	○	○

註 IP: イメージングプレート

FPS: フラットパネルセンサ

最も優れていると結論付けている。理由としては、解像度と検出器の柔軟性が挙げられる。フィルムは露出条件の設定が適切であれば、解像度は確かに優れているといえるであろう。IPに関しては、データの操作によって必要部分の濃度勾配(いわゆる γ 値)を大きくしたり、濃度を擬似カラー化したりすることができるため、露出条件の設定はフィルムよりも緩やかで、解像度においても現在ではフィルムに劣るとはいえないほどである。逆に、データをかなり任意に操作できるため、欠陥検査の保証の客観性が弱くなる面がある。この点が、JIS規格化を遅らせている理由でもある。現場への適応性に関しては、2.3で述べるように、 γ 線ラジオグラフィーは管などの狭隘な場所に線源を挿入し、

対象物の外側にフィルムなどを巻きつけて使用する場合がありますので、柔軟性（可撓性）は欠かせない特性である。この点では、IP にはフィルムと同等の柔軟性が望まれる。

このようなことから、フィルム濃度のデジタル化が進展している⁵⁾。すなわち、フィルムの良さを活かし、かつ最近のパソコンの性能の向上及びデジタル処理ソフトの開発を積極的に取り入れようというわけである。数社からフィルムデジタイザが発売されている。解像度は 500 dpi (1 個のピクセルの大きさ $50 \mu\text{m}$) と高分解能であり、階調度は 12 bit である。濃度範囲は 0.0 ~ 4.0, 有効読取範囲 14×17 インチを約 6 秒で読み取る。雑音除去（平滑化）、コントラスト強調、濃度範囲の選択、濃度の平坦化（イコライズコントラスト）、エッジ検出、キャリブレーション、フィルタリング、などに威力を発揮している。しかし、デジタルラジオグラフィーが真に普及するためには、この手法による検査のより積極的な規格化が望まれる⁶⁾。

2.3 γ 線ラジオグラフィーの現場への適用⁷⁾⁻⁹⁾

図 1 に現場への適用を模式的に示すが、(a) は複雑な形状の肉厚弁箱の溶接部分の検査への適用である。あらかじめ、線源案内管を固定設置し、フィルムを設置したあと線源を導入する。このような複雑な場所へは γ 線源でなければ適用できない。(b) は一体型熱交換器の胴部最終周継ぎ手の溶接部の検査で、二つの管の間の狭隘な場所への適用である。(c) は超音波探傷試験が困難な厚肉のステンレス鋼の溶接部に対し、大容量 (3.7 TBq) の ^{192}Ir を用いて水中撮影を行う例（外国）である。配管内の水をバルーンで排除している。

平成 8 年における γ 線透過試験装置の台数は ^{60}Co が 209 台、 ^{137}Cs が 25 台、 ^{192}Ir 726 台、その他が 30 台である。我が国では、放射線施設外の構造物の検査への適用は、使用場所の一時の変更の措置に基づいてなされているが、放

図 1 (a) 肉厚弁箱の溶接部分の γ 線検査, (b) 一体型熱交換器の胴部最終周継ぎ手の溶接部の検査, (c) 厚肉管溶接部の水中 γ 線撮影

射能の上限が 370 GBq 以下に制限されているため、照射時間が長くなり、実質的に適用できない場合が出てくる。諸外国は漏洩線量又は管理区域の線量で規制している。また、線源収納容器として、鉛、タングステン合金が使用されるが、それ以上に遮蔽能力が高い劣化ウランの使用は我が国では法規制上実質的に不可能である。作業者の被ばく線量は、一人あたり年間 1 mSv 前後で、370 GBq 以下の規制のある我が国と他国との間に大きな差はない²⁷⁾。このようなことから、関係者からは、管理区域の線量を規制の基準とし、かつ劣化ウランを使用できれ

図2 Kr ガス中での光電子、オージェ電子の霧箱観察像

ば、線源強度を増量でき、撮影時間の短縮が図れ、小型軽量化することが可能で、撮影姿勢の自由度が増し、作業性の向上を図ることができる。結果として作業従事者の被ばく線量の低下にもつながるとの主張がある。現在検討されている法改正はプラスに働くことになろう。

3. その他のいくつかの放射線イメージング法

3.1 霧箱

霧箱は現在、放射線教育あるいは放射線PA（パブリックアクセプタンス）の一環として、小・中・高校の生徒に対して、あるいは一般の方々に対して大いに活用されている。これは拡散霧箱と呼ばれるタイプであるが、もとは1897年にウイルソンが発明した膨張霧箱である。拡散霧箱を用いて α 線の飛跡を初めて観察すると¹⁰⁾、「放射線を見た!」というある種の感動がある。これは、小学生でも、大学生でも、主婦の方々でも同じである。「放射線」と聞いただけで「まあ怖い!」と大げさに言ってみせるテレビのアナウンサに引きずられることなく、「放射線? わたし見ましたよ!」との気持ちだが、霧箱の飛跡を見た人の心に定着するに違いないと思われる。それほど印象的で大きな効果がある。

現在、霧箱は科学研究にはほとんど用いられていないが、過去には、陽電子の発見などに大いに活躍した。図2は膨張霧箱を使ったやや珍

しい像¹¹⁾であるが、Augerが1926年にオージェ効果の発見として発表したもので、Krガスに20 keVのX線を入射させた場合の霧箱写真である。図中、 $P_K S_L T_M$ とあるのは、20 keVのX線が最初(P)に、KrのK電子(結合エネルギー14.3 keV)を光電効果で電離し(下方への飛跡)、次(S)にオージェ効果でL電子を放出し(右下方への飛跡)、3番目(T)に2個のL殻空孔へのM殻からの遷移に伴う2個のMオージェ電子(小さなハート形)が鮮明に写し出されている。

3.2 イメージングプレート(IP)

現在、放射線イメージングにおいては、IPは極めて大きな役割を果たしている。検出器そのものについては、本講座に詳細にレビューされている¹²⁾。富士写真フイルム(株)が発明したIPは、従来X線や中性子の回折・イメージング、放射線医療のイメージングなどにおいて広く使われてきたX線フィルムを、ほぼ置き換えてしまうほどの変革をもたらした。高い感度、広いダイナミックレンジ、データのコンピュータ加工の容易さ、数百回の繰返し使用ができること、などの大きな特徴を有し、この発明は、もう少し発明者の名前が前面に出ているならば、当今のメーカー所属の方のようにノーベル賞受賞にも匹敵すると思われる。X線フィルムの100倍から1000倍もの高い感度を有している。

筆者の一人はこの高い感度を知った時、これならば周辺環境放射線を遮蔽箱で少なくして、その中で露出すれば野菜や肉などに含まれる自然放射能からの放射線イメージを得ることが可能なのではないかと考え、約1か月間露出して読み取った像が図3である¹³⁾。放射性物質は私達の身のまわりの全ての場所に存在すること、私達の体の中にさえ存在することを、はっきりと可視的に示すことができ、放射線のPAに大いに役立っている。この像の形成に寄与している放射線は、 ^{40}K からの β 線(最大エネルギー1.325 MeV)である。カリウムは生体にはNa-

図3 イメージングプレートで観察した, 豚肉, パナナ, しょうが中の ^{40}K からの β 線分布像

K ポンプとして神経の信号伝達に欠かせない元素である。

3.3 固体飛跡検出器

飛跡検出の手法は, 岩石表面の光学顕微鏡観察, 電子顕微鏡観察から見出された技術で, 自発核分裂における核分裂片の飛跡をもとに, 岩石などの年代測定に適用された。その後 CR-39 などのように α 線にも感度の高いプラスチックフィルムが開発されてから極めて多方面において用いられている。図4は, 飛跡検出器がマクロオートラジオグラフィーに応用できることを示した図で, 37 kBq の ^{239}Pu (窒化物) を静脈注射したマウスの, 厚さ $40\ \mu\text{m}$ (乾燥前) の全身凍結乾燥切片に, CR-39 のプレートを24時間露出してエッチングし, 黒い布の上に置くと, エッチピット密度に対応した白い濃淡像として ^{239}Pu の分布像が X 線フィルム法に比べてもほとんど遜色のない鮮明な像として得られる¹⁴⁾。この方法は, 露出時間が X 線フィルム法

図4 ^{239}Pu を投与したマウスの全身凍結乾燥切片からの α 線分布をCR-39 エッチピットで観察した像

に比べて数十分の1と短いこと, 通常の光には感光しないので暗室操作が不要であること, 飛跡の数を計測することにより, 画像のみならず定量情報が得られることなど, 多くの特質が挙げられる。

3.4 コンプトンカメラ^{15) - 17)}

γ 線の放出源そのもののイメージを得る装置はガンマカメラと総称され, 主に医療分野において, シンチグラフィーや SPECT (Single Photon Emission Computer Tomography) として多用されている。原子力施設等においても遠隔部の放射能分布を知る必要性が生じつつある。一般に, これらの分野において使用されているほとんど全ては, 機械的なコリメータを用いたもので, 高い空間分解能を得るためには, コリメータの開口率を小さくせざるを得ず, 検出効率は本質的に低く抑えられてしまう。この検出効率を改善する目的で, コンプトン散乱現象を利用した, いわゆるコンプトンカメラの開発が行われつつある。

入射 γ 線のエネルギーを E_γ , 散乱 γ 線のそれを E_γ' , 散乱角を θ とすれば次の関係がある。

図5 (a) コンプトンカメラの構成原理図, (b) コンプトンカメラで得られた線源分布再構成イメージ図

図6 (a) リングコンプトンカメラの模式図, (b) M形の ^{64}Cu 線源の撮影像

$$E_{\gamma'} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{E_{\gamma}}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (1)$$

したがって、散乱角 θ は次の式で表される。

$$\theta = \cos^{-1} \left[1 - \left(\frac{E_{\gamma}}{E_{\gamma'}} - 1 \right) \frac{m_0 c^2}{E_{\gamma}} \right] \quad (2)$$

あるいは、

$$\theta = \cos^{-1} \left[1 - \left(\frac{E_{\gamma}}{E_{\gamma} - E_e} - 1 \right) \frac{m_0 c^2}{E_{\gamma}} \right] \quad (3)$$

ただし、 E_e は反跳された電子のエネルギーである。医療診断などの場合には入射 γ 線のエネルギーは通常既知であるから、散乱 γ 線のエネルギー $E_{\gamma'}$ を知れば式(2)から、また、 E_e を知れば式(3)から、散乱角 θ を求めることが可能となる。更に、散乱角 θ と散乱 γ 線の飛行方向を知ることにより、入射 γ 線の飛行方向、すなわち線源の位置を推定することが可能となる。ただし、線源位置の情報は、点として

与えられるわけではなく、散乱 γ 線の方角を軸として、頂角が θ の円錐面上のいずれかにある点として与えられることになる。

これらの状況を、図5に示した。(a) は、第1の位置検出器で位置 A と E_e を知り、第2の検出器で位置 B と $E_{\gamma'}$ を知れば、入射 γ 線のエネルギー E_{γ} は E_e と $E_{\gamma'}$ の和として得られるため、式(2)あるいは式(3)から、位置 A 及び B の延長線に対する角度 θ が求められる。しかし、(b) に示すように、1 個の事象では角度 θ が描く楕円弧（円錐面の切断線）がわかるだけで、(a) の線源位置 C を特定するには、C から放出される γ 線のいくつかの楕円弧の交点 D として求める必要がある。もし線源の γ 線のエネルギーが既知であれば、第1、第2の検出器のどちらかがエネルギー分解能を有して

図7 (a) キャピラリープレート・ガス比例計数管を用いた撮像装置, (b) α 粒子の飛跡の撮像

いればよい。

図6(a)はコンプトンカメラによる γ 線イメージングの実証試験用に作製されたもので, (b)は, 線源として ^{64}Cu (511 keV 消滅 γ 線を放出)を含んだMの文字の線源(縦横5 cm)の撮影例である。この方法によって2次元像を得ることが可能であることを示している。しかし, コンプトン散乱現象における束縛電子によるドップラーブロードニングや検出器のエネルギー分解能による散乱角度の誤差などの問題があり, 機械的のコリメータを併用したハイブリッド式などが提案されている。全天空の γ 線点線源の分布測定など, 有望な利用分野が考えられている。

3・5 キャピラリープレートを用いた撮像型ガス比例計数管¹⁸⁾

キャピラリープレートは, 直径100 μm の鉛ガラスのキャピラリーを1万本ほど束ね, 直径20 mmの板状にしたもので(図7(a)参照), 表と裏の両面に金属を蒸着して電極にしている。構造はマイクロチャンネルプレートとよく似ているが, 比例計数ガスの中で動作する。この型の検出器は桜井¹⁸⁾が独自に開発したもので, キャピラリーの中で比例的な電子なだれが起きるため, ガス比例計数管と同等のエネルギー分解能を有する。図7(a)は, Xeガス+5%メタンガスを封入し, ガス増倍中に生じる発光を光学的に観測するようにしたシステムで, 図7(b)に示すように, α 線の飛跡や電子の飛跡が明瞭に得られる。この方法は全電荷ないし全発光が放射線のエネルギーに比例しているため, 特定のエネルギーの放射線のみを選んで, その位置分布像を得ることが可能である。また, X線によって放出される光電子の方向がわかるため, X線の偏向の検出も可能である。

3・6 シンチレーティングファイバ飛跡検出器¹⁹⁾

クラッドを含めて300 μm 角, 長さ30 cmのシンチレーティングファイバ330本を並べて, 10 cm $\times$ 30 cmのシート(図8(a))を作り, それを図8(b)のように600枚積み上げて, 図8(c)のような10 cm $\times$ 10 cm $\times$ 20 cmの検出部を構成している。相互に直角方向の2組の端面に現われる光の分布を, 最終的にはCCD素子を経て, 時間, 位置, 強度の情報が取り込まれる。図9は高エネルギー加速器研究機構陽子シンクロトロン実験施設において進められているハイペロン陽子散乱実験において得られた図で, ファイバに下から入射した π^+ 中間子がファイバと相互作用をして Σ^+ ハイペロンを生成し($\pi^+ + p \rightarrow K^+ + \Sigma^+$), 生成した Σ^+ のうち, あるものは崩壊する前に, あるいはファイバブロックから飛び出す前に, ファイバ中の別の水

図8 (a) 正方形ファイバ1本の断面とファイバシート1枚の形状, (b) ファイバシートの積上げ模式図, (c) 完成したシンチレーションファイバブロック, 左右の白い正方形の部分にイメージ増幅管を取り付ける

素（陽子）と散乱する。最後に、散乱した後の Σ^+ のうち、ファイバブロックの中で崩壊するものを観測し、 Σ^+ であることを同定する。ファイバブロックは、 Σ^+ の生成体であり、散乱体であり、検出器である。Image LとImage Rは飛跡を左右の直角方向から観測しているので、飛跡の3次元の構成が可能であり、核子の実験に威力を発揮する。

図9 $\Sigma+p$ 弾性散乱の候補となる事象, Image L, Image R は左と右のイメージ増幅管からの像

3.7 X線屈折コントラスト法, 位相コントラスト法²⁰⁾

X線の複素屈折率 n は、自由電子近似の範囲では次の式で表される、 $n=1-\delta-i\beta$ 。1- δ は屈折率の実部で、 β はX線の減衰に寄与する部分であり、共に無次元量である。 δ は近似的に、 $\delta=1.35 \times 10^{-23} \rho \text{ (kg/m}^3\text{)} \times \lambda^2 \text{ (m}^2\text{)}$ で表される。ただし、 ρ は密度、 λ はX線の波長である。光の領域では屈折率1- δ は1よりも

図 10 (a) 周辺よりも密度の大きな円柱物体に入射角 θ_0 で入射した X 線が屈折する様子, (b) 周辺物質より密度が大きいレンズ状の物体で X 線が屈折する様子と検出器位置における X 線の強度分布, (c) 密度がより小さいレンズ状の物体で X 線が屈折する様子と検出器位置における X 線の強度分布

大きく例えば水では 1.33 である。しかし X 線の領域では 1 よりも小さく, δ の値は 5.8×10^{-7} である。しかし, 1 に極めて近いので, ほとんど屈折しないと考えてよい。ところが, 減衰を表す β の値は 6.0×10^{-10} 程度であるため, X 線の減衰現象よりもむしろ屈折現象を利用したほうが感度が 3 桁ほど高いといえる。屈折は位相の変化をもたらすのでこれを利用することも考えられる。生体の軟組織の若干の密度の変化(がん組織など)においては X 線の吸収ではほとんど観測できず, 屈折や回折を使うほうが有利である。

屈折を利用する方法の原理図を図 10 に示す。

図 10(a)は周辺よりも密度が大きい円柱状の物体の端に単色の X 線が入射した場合の屈折の様子を示す。入射角 θ_0 よりも大きな出射角 θ_1 になる。通常の光の場合には $\theta_0 > \theta_1$ である。X 線が試料から出るときにも再び屈折される。したがって, (b)に示すように, 試料の中に密度のより大きな部分(図中ではレンズ状に示している)がある場合には, 検出器の位置における X 線の強度分布が試料の境界において明瞭になる。反対に, 試料中に密度の小さな部分があれば (c), 反対側に屈折され, 試料の境界における強度分布も異なって現れる。しかし, 屈折率は 1 に極めて近いため, 試料物体と検出器との距離が近い場合には, この強度分布はほとんど現れず, 通常の X 線の吸収の相違をみる像になる。距離を 5~7 m 程度に離すことによって, 屈折に伴う物体の境界での X 線の強弱の分布が現れる。

図 11(A)に, 放射光を Si 311 面 2 結晶モノクロメータで単色光 (30 keV) にした X 線を使って得た豚の肋骨の末端部の屈折像(a)を示した。試料とフィルムとの距離は 5 m である。種々の輪郭の様子が極めて明瞭に現れている。(b)には, 試料とフィルムを密着させて得た像を示す。この場合には距離が近すぎて屈折の効果はほとんど現れず, X 線の吸収の効果を見ているに過ぎず, 吸収が少ないため詳細な像は得られないことがわかる²²⁾。

位相差コントラスト法は, 本講座の第 5 回にその原理について詳述されている²³⁾ので, ここではそれを使った例を図 11(B)に示した²⁴⁾。(a)は放射光 (12.4 keV) を使って, ラットの小脳の部分を位相差コントラスト法で撮影したものであり, 密度情報が示されている。(b)は単純な吸収法によるものであるが, ほとんど何の情報も得られていない。

3・8 IP とマルチピンホールコリメータを用いた 3 次元カメラ²⁵⁾

イメージングプレート(IP)は高空間分解能,

図11 (A) 豚の肋骨の末端部の放射光X線写真：
(a) X線屈折コントラスト法，(b) 通常の透過X線写真法
(B) ラットの小脳の放射光X線写真：
(a) 位相コントラスト法，(b) 通常の透過X線写真法

図12 (A) マルチピンホールカメラ，(B) 同カメラを使った γ 線暴露過程と逆投影過程

高感度であるため、ピンホール γ カメラのコリメータを極めて小さくすることが可能となった。これに伴い、多数のピンホールコリメータを2次元的に配列させてマルチピンホールコリメータ構造とすることが可能となり、検出効率の改善と γ 線放射体の3次元撮像を行う試みがなされている。

図12(A)に、IPの上に置かれたマルチピンホールコリメータを示す。10×10×2 cmの鉛板に19×19個のピンホールを配列させたもので、個々のピンホールは高さ8.5 mmの円錐形で、頂点(図では下方)のピンホール径は0.5 mm、底面(図では上方開口部)の直径は4.8 mmである。(B)は撮像過程で、(a)は線源からの γ 線の暴露過程を示す。(b)はIP上に得られた位置と強度の情報、及びコリメータの幾何学的な位置情報から、上空の3次元ボクセル空間上に逆投影をする様子を示す。直径6 mmの薄い円盤状の ^{57}Co 線源($9.6 \times 10^5 \text{ Bq}$)を用いて、その線源の撮像を行った結果を図13

図 13 直径 6 mm の円盤状 ^{57}Co 線源によって実験的に得た像情報から再構成した線源像

に示す。水平方向の分布についてはおおむね線源形状に合致しているが、垂直方向については空間分解能が低く、2 方向からの同時撮像の試みが進められている。

3・9 原子間力顕微鏡による超高分解能荷電粒子線ラジオグラフィー²⁶⁾

CR-39 固体飛跡検出器上の微小なエッチピットの測定に原子間力顕微鏡 (AFM) が用いられている。イオン照射した CR-39 のエッチングをごく短時間にとどめ、その表面を AFM で観察する手法で、高い位置分解能で荷電粒子飛跡の画像化が可能となる。

CR-39 に厚さ $3.8\ \mu\text{m}$ の銀メッシュ ($10\ \mu\text{m}$ グリッド) を密着させ、タンデム加速器からの $1\ \text{MeV}$ の炭素イオンを照射し、エッチングして表面を AFM で観察した (図 14(a))。メッ

図 14 CR-39 固体飛跡検出器上のエッチピットを原子間力顕微鏡で観察した像: (a) 銀メッシュ ($10\ \mu\text{m}$ グリッド) の影, (b) He イオンによる 1 個のピット像, (c) ホウ素中性子捕捉療法におけるホウ素化合物のがん細胞内への捕捉の様子のピット像による観察

図 15 放射線作業における一人あたりの年平均被ばく線量 (世界平均)

シュの穴に相当する部分にのみエッチピットが密集して生成しており、高分解能で画像化できている。図 14(b)は、1 MeV の He イオンを照射し、エッチングの時間を短くして観察したピットの形状で、半値幅は 30 nm であった。ピットの頂点や中心を位置として決めれば分解能はナノメートルになり、電子顕微鏡や写真乾板を用いた像の分解能 (20 ~ 40 nm) を上回る。

ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT: Boron Neutron Capture Therapy) は、腫瘍のある場所へ集積する性質を持つホウ素化合物を患者に投与しておき、集積した時点で外部から熱中性子照射をし、 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反応でできる高エネルギーの α , Li を利用して、腫瘍細胞に選択的にダメージを与える治療法である。治療の効果はホウ素化合物が細胞内でどのように分布しているにかかっており、分布の情報が必要とされている。ホウ素薬剤を投与したラットの脳腫瘍組織を取り出し、凍結切片試料を作製し、CR-39 上に載せ、熱中性子を照射した。試料の X 線透過像と AFM によるピット像を重ね合わせたのが、図 14(c)である。細胞とピットとの位置関係を調べる手法として期待される。

表 3 放射線作業従事者の年平均被ばく線量 (単位: mSv)

年	1985 ~1989	1990 ~1994
ブラジル	3.30mSv	1.40mSv
カナダ	4.51	3.39
中国		1.26
台湾	1.52	0.38
フランス	0.18	
ガボン		20.48
ドイツ	1.16	1.41
インド	3.12	1.84
インドネシア	1.53	0.95
日本	1.19	0.83
メキシコ	6.23	5.58
パキスタン		5.19
スウェーデン	0.48	
タイ		0.78
英国	1.18	0.76
米国	1.70	3.27
ソ連	6.55	
世界	1.44	1.58

4. 放射線イメージングにおける被ばく線量^{9), 27)}

図 15 は、国連 UNSCEAR 2000 Report に示された大まかな使用分野別の世界の放射線透過試験装置を使用する撮影作業従事者一人あたりの年平均の被ばく線量 (mSv) である。どの分野の作業従事者も年代と共に被ばく線量はほぼ減少している。線量管理された工業ラジオグラフィーの作業従事者の数はほぼ 11 万人であるが、図からは工業ラジオグラフィーの分野の作業者の被ばく線量が特に多いわけではないことがわかる。

しかし、国別にみると表 3 に示すようにかなり相違がある。発展途上国では、世界平均の 10 倍以上の線量を浴びているところもあるが、教育と経済性の問題なのであろう。このような放射線管理の面での国際協力的な仕事は、一見地味ではあるが重要な仕事であろう。

人体に対する被ばくの問題ではないが、放射

光を使った蛋白質結晶の研究などでは, 試料への照射線量が問題となる²⁸⁾。極めて微小な部分に強度の大きな X 線束をあてるため, 放射線損傷が起きる。局所的ではあるが, $10^5 \sim 10^6$ Gy に達するため, 液体窒素や液体ヘリウムで冷却したり, 損傷緩和剤を使用したりするが試料の変質は避けられない。このような問題は, より微小な部分をより詳細に観察する方向に向かうにつれて一層問題になるであろう。

5. ま と め

本稿では, 今までに触れてこなかったいくつかの放射線イメージング手法について述べた。 γ 線ラジオグラフィーは実用技術として定着しているが, 新しい γ 線源の開発や検出器としてのイメージングプレートの使用, フィルムの黒化度のデジタル情報への変換, などの新しい動きがある。その他, やや古い手法, 一応は実用されているが今後の改良を要する手法, あるいは, まだ実用にはなっていないが今後大いに期待できそうな手法などを含めていくつかを紹介した。

謝 辞

γ 線ラジオグラフィーに関しては, (株)千代田テクノルの山林尚道氏から, CR-39 エッチピット像については放射線医学総合研究所の石樽信人氏から, 原子間力顕微鏡に関しては東京大学の高橋浩之氏から, それぞれ貴重な資料情報を頂いた。ここに感謝致します。

文 献

- 1) 山林尚道, 私信, 及び“原研史”(発行予定)
- 2) 今橋 強, 非破壊検査, **46**, 788-791(1997)
- 3) 山本武夫, 非破壊検査, **46**, 792-795(1997)

- 4) 加藤 潔, 非破壊検査, **49**, 152-157(2000)
- 5) 木下義高, 非破壊検査, **45**, 725-730(1996)
- 6) 加藤 潔, 非破壊検査, **45**, 738-741(1996)
- 7) 高野栄四郎, 他, 非破壊検査, **46**, 796-801(1997)
- 8) 大岡紀一, 非破壊検査, **46**, 784-787(1997)
- 9) 釜田敏光, 非破壊検査, **46**, 803-808(1997)
- 10) 放射線利用振興協会で拡散霧箱のキットを取り扱っている
- 11) Burhop, E. H. S., The Auger Effect, p.2, Cambridge Univ. Press(1952)
- 12) 高橋浩之, *RADIOISOTOPES*, **53**, 381-388(2004)
- 13) Mori, C., *RADIOISOTOPES*, **48**, 589-599(1999)
- 14) Ishigure, N., *RADIOISOTOPES*, **34**, 37-38(1985)
- 15) 瓜谷 章, 放射線, **25**, 87-92(1999)
- 16) Uritani, A. et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-40**, 972(1994)
- 17) 平澤雅彦, 他, 放射線, **28**, 195-201(2002)
- 18) 桜井敬久, 放射線, **25**, 27-37(1999)
- 19) 家入正治, 他, 放射線, **25**, 69-78(1999)
- 20) 鈴木芳生, 他, 非破壊検査, **48**, 346-351(1999)
- 21) 鈴木芳生, 他, Spring-8 利用者情報, **8**, 20-23(1998)
- 22) Mori, K. et al., *J. Synchrotron Rad.*, **9**, 143-147(2002)
- 23) 安藤正海, 杉山 弘, 洗 鼎昌, *RADIOISOTOPES*, **53**, 95-105(2004)
- 24) Momose, A., *J. Synchrotron Rad.*, **9**, 136-142(2002)
- 25) 瓜谷 章, *Isotope News*, **No.597**, 2-5(2004)
- 26) 雨宮邦招, 他, 第 11 回放射線夏の学校テキスト(平成 11 年 8 月 4 日～6 日, 於 かんぼの宿 松島), 及び同テキスト(平成 12 年 7 月 19 日～21 日, 於 名古屋市民御岳休暇村)
- 27) Sources and Effects of Ionizing Radiation UN-SCAR 2000 Report Vol.1, p.533, 及び p.607(2000)
- 28) O'Neill, P. et al., *J. Synchrotron Rad.*, **9**, 329-332(2002)
- 29) 藤井正司, 非破壊検査, **50**, 698-703(2001)
- 30) 坂下勝則, 非破壊検査, **50**, 704-709(2001)