

## 3.2 冷中性子ビームによるラジオグラフィの基礎研究

小田 将広、玉置 昌義、田坂 完二  
名古屋大学 工学部

### 1. 緒言

中性子ラジオグラフィは中性子の発見とともに、その透過力が大きいことから、その応用として始まった。より高品位、高画質の画像を求めた結果、現在では高い中性子ビームを安定して供給できる原子炉が中性子源としては最も一般的になった。しかもそれには炉心まわりの減速材で熱平衡に達した、いわゆる熱中性子ビームを用いるのが主である。一方、中性子と物質の相互作用を表わす割合である断面積は入射中性子のエネルギーとともに変化することがよく知られている。中性子ラジオグラフィにこの熱中性子以外の中性子を用いることは中性子ラジオグラフィ技術の向上及び応用分野の拡大には不可欠であろう。つまり亜熱中性子、高速中性子、冷中性子などの多面的な利用である。国内で最も遅れていたのは冷中性子を用いたラジオグラフィであり、それは主として中性子源として適切なものが利用できなかったためである。強力な冷中性子ビームを得るための専用の中性子源が初めて設置されたのは1986年の京大炉であった。1991年には日本原子力研究所のJRR-3Mに設置され、一般に利用可能となった。JRR-3Mの冷中性子導管C2-3の末端に設置された冷中性子照射設備CNRFを利用して冷中性子ラジオグラフィ(Cold Neutron Radiography、以下CNR)に関する研究を行ってきた。筆者らは、一部平成3年度JRR-3中性子ラジオグラフィ研究会及び第4回中性子ラジオグラフィ国際会議[1]で発表した。本報告では更に継続して行った研究成果を述べる。以下に、冷中性子の透過量、透過率に着目した研究結果と、解像力の向上を図った研究結果について報告する。

### 2. 冷中性子との相互作用

ラジオグラフィで言う冷中性子は数meV程度のエネルギー領域のものである。熱中性子領域と異なり、冷中性子領域での相互作用率つまり断面積の中性子エネルギー依存性は熱中性子領域においてほど穏やかなものではない。基本的に中性子のエネルギーが下がるほど物質の断面積は増大していく傾向にある。更に一部の結晶性物質にはブラッグ・カットオフという断面積が激変する性質も重なってくる。概ねこの二つの性質が、CNRと熱中性子ラジオグラフィ(Thermal Neutron Radiography、以下TNR)を区別することになる。断面積が中性子エネルギーによりかなり変化するということは、すなわち中性子ラジオグラフィ像の使用する冷中性子ビームのスペクトルへの依存度が高い、ということでもある。また冷中性子が中性子導管により導き出

されていることから、そのスペクトルをマックスウェル分布のごときのもので仮定することも困難である。つまり冷中性子ビーム装置それぞれで異なった固有の像が得られるだろう。

CNRF (C2-3) のスペクトルと代表的な物質の断面積とを Fig. 1 に示す。断面積変

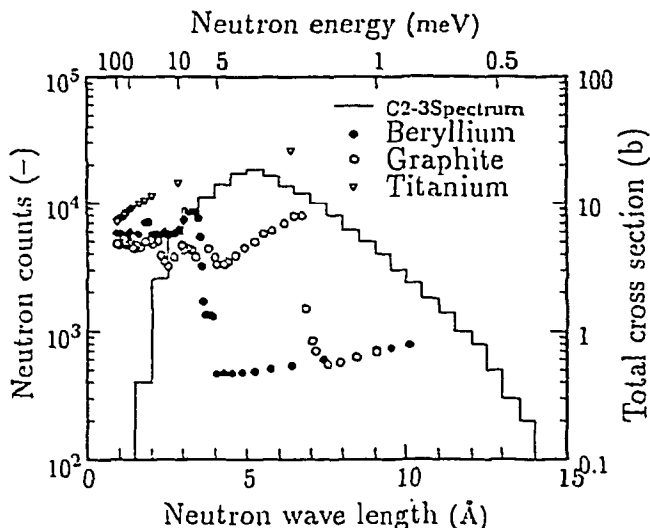


Fig. 1: C2-3 Spectrum and cross section curves of various materials

化を表わす際はエネルギーを軸に取る方が把握しやすいが、スペクトルのデータは文献 [2] のグラフにおいて波長幅で与えられていたため、そのデータを読み取って使用したので、ここでも波長を軸にとって表わしている。このようにブラッグ・カットオフをまたぐ形でスペクトルが広がっており、このことは、従来中性子ラジオグラフィーの基礎実験として行われてきた、透過率と厚さの指数関係から実効的な減衰係数（巨視的全断面積）を得る、という行程が物質によっては困難であることを示している。カットオフ以上のエネルギーが高くそれ故断面積も高い中性子は厚さとともに急速に減衰するが、カットオフ以下の断面積の低い中性子はあまり減衰せず、結果として中性子ビームのソフトニングが観察されることになる。そこでそのような現象の基礎的データを検討するために、実際に幾つかの物質について厚さと透過率の関係を中性子ラジオグラフィーを用いて取得し、評価したので、次章に述べる。

### 3. 被写体厚さと冷中性子透過率の関係

#### 3.1 散乱中性子の除去

被写体厚さと中性子透過率の関係を中性子ラジオグラフィーにおいて考えるとき、重要となるのは散乱中性子の問題である。中性子ラジオグラフィーはとにかく撮像系に応答を与える成分を全て検出する。更に透過量の評価のような定量的解析を行う場合

は、一般に全断面積による中性子ビームが指数関数的に減衰する関係に基礎をおく。以上から、本来像を成すべき成分は被写体を相互作用せずに透過した純粹透過成分のみであるべきであるが、実際には被写体で散乱したが撮像系に到達した中性子や $\gamma$ 線なども像形成に寄与することに留意する必要がある。

この点がかねてから問題とされ、幾つかの散乱中性子の影響除去法が提案されている [3, 4, など]。本研究においては、被写体と撮像系つまりコンバータの距離を離す方法を取ることによって、この影響を低減することを図った。撮像手法にはフィルム法を用いたので、以下撮像系とはフィルムとコンバータの装填された真空カセットのことを指すものとする。ここでフィルム法でのデータ処理について簡単に述べておく。使用したのは、フィルムに Kodak の SR、コンバータに Gd の 25 $\mu$ m 蒸着膜である。撮影したフィルムは JRR-3M 建屋内で現像処理した。フィルムの黒化度はドラムスキャン型デンストメータ (2605 型、(株) 阿部設計製) で測定され、256 階調にデジタル化されて、名古屋大学大型計算機センター内の大型計算機 (Facom M-1800/20) に入力される。測定された黒化度はオフセット成分であるベース濃度を減じられた後、別途求めた感度曲線により中性子照射量に変換される。この後必要であれば、入射ビーム分布補正 (TV 法で言うところのシェーディング補正) を施し、中性子透過率を求めて、その後必要な物理量を求めることとなる。

さて、一般に中性子ラジオグラフィーでは、もともと減速材中でほぼ等方的な方向を向いている中性子をコリメータによって (強制的に) 導き出しているため、コリメータの幾何学的寸法によっては完全に平行なビームは得られず、色々の斜め成分を持つ中性子ビームを用いることになる。そのため撮像系と被写体が離れていると、そのことにより画像がぼけてしまう、つまり鮮鋭度が低下する。そこで、鮮鋭度の高い像を得るためにできるだけ被写体を撮像系に密着させることが行われる。しかしこの場合には、上で述べたように、被写体で散乱された中性子もまた撮像系に到達し、透過中性子による定量的なラジオグラフィー像に重なるように被写体依存のじみ等を生じる。また全断面積から推定するよりも散乱成分の分だけ多くの中性子量によって像を生じさせていることになる。

定量的評価を行う際は鮮鋭度よりも透過量をいかに正確に評価するかが重要であるため、本稿で報告する実験では撮像系と被写体との距離を離して撮影を行った。実際の実験では最大 10cm まで離して撮影を行ったが、ビームの非平行性からくる不鮮鋭度は  $L/D$  比が 100 程度であることから 1mm である。距離を離すことにより、大きな角度のついた散乱中性子は撮像系全体にまばらに散らばり、大まかには距離の自乗で密度が低下していく。そこで距離を離して幾つか撮影した結果についてここで示しておく。ただしこれらの結果は、京都大学原子炉の E-2 熱中性子ラジオグラフィー設備において撮影された TNR のものである。Fig. 2 (a) にその結果を示す。撮影は距離を密着、1cm、5cm、10cm と変えて行い、被写体としては鉄のステップウェッジを撮影し、その厚さと中性子透過率の関係を示したものである。図から気付くことは、まず 1cm

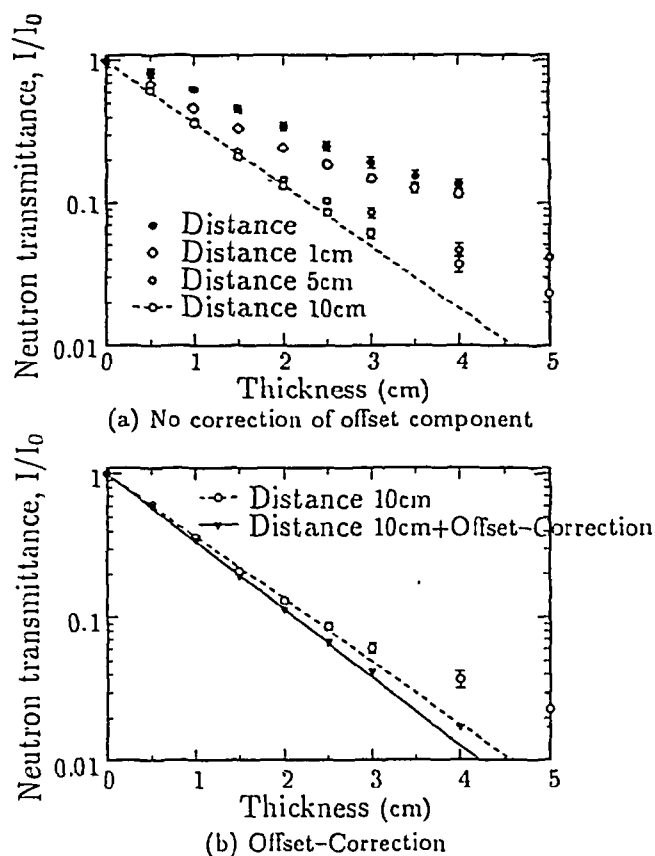


Fig. 2: Neutron attenuation curves of iron step-wedge by using TNR

離すだけでもかなり透過率は密着の場合と比べて小さくなり、5cm、10cmになると更に小さくなるが、この両者の差はかなり少なくなっている。この減衰曲線の差が散乱中性子の寄与を表わしているとすれば、5cm以上離せば実効的に散乱中性子の影響はかなり低くなる、とまず言うことができよう。この図から気付くもう一点は、図中の直線（点線及び実線）は誤差範囲で指数関数を近似して描いた結果だが、距離を離しても透過率 0.1 以下の指数関係からのずれはなくなることである。なお、別実験から撮像系の感度特性を検討したが、検出し得る最低の中性子透過率は高めに見積もって 0.01 程度と推定された。よって、その近傍の値はあまり信用はできないが、それ以上での値は信用できるものである。そして、このずれは  $\gamma$  線の影響とやはり散乱中性子の影響と考えられる。散乱線は密度がまばらになり顕著に見られなくなっても、除去されたわけではないので撮像場には存在する。したがってオフセット成分として減衰曲線に足し合わされていると考えることができる。 $\gamma$  線も同様である。そこで試みとして次のようなことを考えてみる。鉄の全断面積を  $1.05\text{cm}^{-1}$  とすると 5cm を透過した純粋透過成分の透過率は 0.005 となり検出限界以下である。従って 5cm のデータはオフセット成分によるものと考えることができ、例えば距離 10cm の場合のデータで検討すると、オフセット成分を 0.020 と仮定し、それを差し引いて減衰曲線を求め直し

た場合を Fig. 2 (b) に示す。この場合は Fig. 2 (a) よりも指数関数に一致している。

以上から、散乱中性子の影響は距離を離すことで低減できるが、中性子透過率が0.1以下の領域では、その他の $\gamma$ 線、感度特性といった問題と広がって一様化された散乱中性子の影響が現れてくると言うことができる。

なお CNR 実験では、実験体系上の都合から密着と5cm離れたの場合で撮影を行った。また、オフセット成分の補正のために被写体近傍に十分な厚さの $B_4C$ 入りゴム板を設置し、その影の部分の値をオフセット成分として差し引くという方法を用いた。

### 3.2 ビームの平行度測定

前節で被写体と撮像系との距離を離すことによる画像鮮鋭度の低下について触れた。しかし冷中性子照射設備では中性子導管を用いているために、従来で言う $L/D$ 比という概念が直接は無い。つまり中性子導管を用いて冷中性子源から照射設備まで冷中性子を導いており、中性子導管内では中性子の全反射によって中性子を導いてくるからである。そのためコリメータの様には $L/D$ 比が定義できない。中性子導管の中を中性子が反射するときの全反射する臨界角は中性子の波長によって異なるため、冷中性子ビームはその波長に依存した方向性を持っている。そこで、実効的なビームの平行度を定義し、測定することをまず行ったので、これについて述べる。

入射するビームが方向のばらつきを持っていると、そのばらつきに応じて被写体の影となるべき部分にもビームは回り込むことができる。ビームの回り込みの影響の無い部分を本影と呼ぶが、撮像系と被写体の距離を離していくと、本影の大きさはある一定の割合で小さくなっていく。

ここです。この場合の平行度を、ビームの実効的なばらつき角を頂角とする二等辺三角形の高さと底辺の比と定義する（つまり、頂点から出る中性子の方向は実効的に全て二等辺三角形の中に含まれる）。この平行度はダイバージェント型コリメータを持つ中性子ラジオグラフィ設備の $L/D$ 比に相当するものである。中性子導管は全反射により中性子を導き出すから、ある反射角 $\theta$ で中性子は導管の壁で全反射される。しかし鏡面が向かい合っていることを考えると、導管出口付近では実質的には鏡面を角 $\theta$ をなして透過していると考えることができる。しかも実際の撮影に走査式を用いていることも考慮すると、上述の $L/D$ 比の定義は妥当であると考えられる。走査式とは、フィルムから見ると、走査方向に常にビーム源があることになるからである。この場合頂角の大きさは $2\theta$ となる。ビームには様々な波長の中性子が混合しており、様々な頂角があるので、スペクトルから実質的な頂角、つまりばらつき角が決まる。このようにして定義した平行度を測定するために、被写体として中性子吸収物質でできた板に開けた円を考え（板の厚さは無視する）る。穴の直径を $a$ 、被写体と撮像系の距離を $l$ とし、平行度をわかりやすいよう $L/D$ とする。固有鮮鋭度が充分小さいとする

と幾何学的関係から撮像系上の本影の大きさ  $w$  は、

$$w = a - (L/D)^{-1} \cdot l \quad (1)$$

と表わすことができる。したがって  $L/D$  つまり平行度は、距離を変えて撮影することにより、本影の大きさと距離の関係から得ることができる。

実際の被写体には薄さ 1mm の Al 板に 25 $\mu$ m 厚の Gd 箔を貼り付け、直径 2mm の穴を開けたものを用いた。Fig. 3 に測定結果を示す。二本の線が描かれているが、これはそれぞれ本影の大きさを水平方向に測った場合と垂直方向に測った場合について示している。これにおいて距離 0mm の場合の本影の大きさがどちらも 2mm になっていないが、これは工作精度、設置精度及び平行度の定義の問題などがあると考えられる。しかし平行度は傾きによって定めるので、この場合このことはあまり重視しないものとする。直線の傾きから求めた平行度は、水平方向で 102、垂直方向で 78 であった。これから、ビームの平行性による幾何学的不鮮鋭度は、先に述べた実験条件である距離 5cm の場合、水平方向で 0.5mm 程度、垂直方向で 0.6mm 程度となり、被写体の大きさ（幅 1cm、長さ 4cm 程度）に対して充分小さいことが確認された。

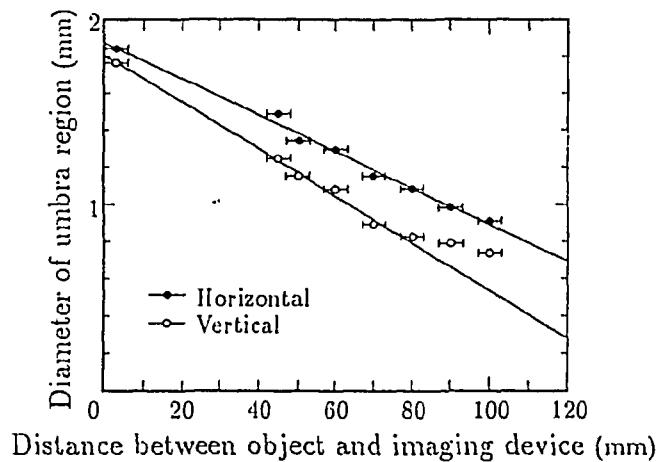


Fig. 3: Measurement of  $L/D$  ratio of CNRF

### 3.3 被写体厚さと冷中性子透過率の関係

Fig. 4 に CNR で鉄のステップウェッジを撮影した場合の厚さと透過率の関係を、距離を二通り変えた場合について示す。5cm 離れた場合はオフセット補正がしてあり、先のデータはそれをしていない、という違いはあるものの、両者の差は 3.1 で見た TNR の場合に比べて小さいことがわかる。これは散乱中性子によるにじみの効果が CNR の場合、TNR よりも少ないということである。これはステップウェッジのプロファイル

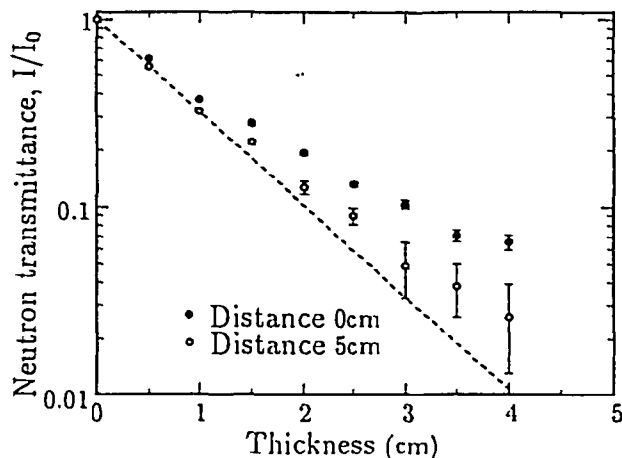


Fig. 4: Setting to be apart from the detector

からも顕著にわかることである。密着の場合の CNR と TNR の Fe ステップウェッジのプロファイルを Fig. 5 に示す。TNR の場合ステップのエッジ部や厚いステップ部（黒

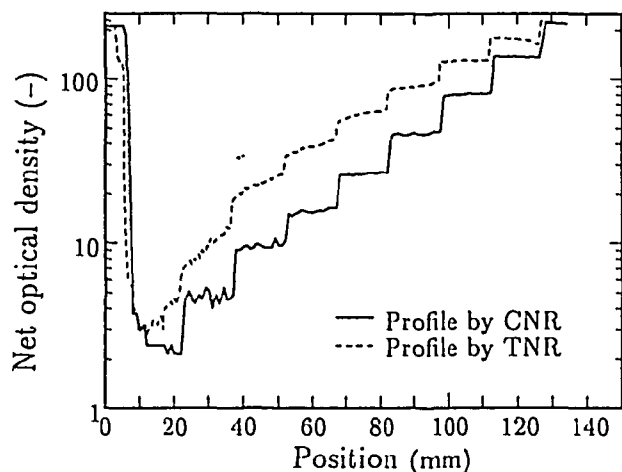


Fig. 5: Comparison between CNR and TNR profiles

化度の低い部分) においてプロファイルの歪みが見られる。一方 CNR の場合は各段は鋭角な階段状を成しており、見かけ上散乱中性子によるにじみなどの影響はないようである。Barton [5] はベリリウムとビスマスのフィルタにより生成した冷中性子ビームを用いて、やはり散乱線量の少ないことを述べ、主にブラッグ・カットオフによる(散乱)断面積の低下と自己遮蔽によるものと考察しているが、ここでもより広いスペクトルを持つ冷中性子ビームで同様の効果が(定性的に)観察された。

再び減衰曲線の Fig. 4 に戻る。この図からわかることは、距離 5cm の場合であって

も、中性子透過率の高いところで指数関係から外れて下に凸の弧を描いていることである。さきに見たように透過率が充分低いところでは、撮像系に関する因子のために関係が歪む。しかしこの図では透過率がそれほど低くない部分から指数関係からのずれが始まっている。つまりこのずれは、CNRにおける冷中性子スペクトルのソフトニング（低エネルギー側へのシフト）が見られていると考えられる。鉄は0.005eVにブラッグ・カットオフを持っている。その断面積変化はそれほど大きいものではないが、最大で約60%程断面積が低下している。また冷中性子束もカットオフ近傍で最も高くなっている。したがって透過する厚さが増すほどカットオフ以下のエネルギーを持つ断面積の低い中性子の割合が高くなり、実効的な断面積が低くなっていくのであろう。他の物質について見た結果をFig. 6に示す。検討した物質は鉄の他にグラファイト、

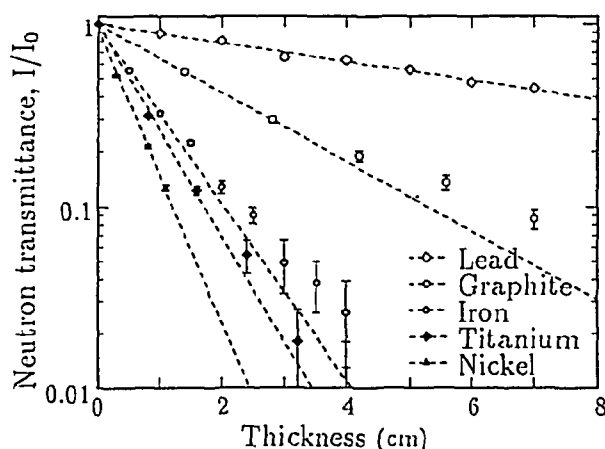


Fig. 6: Neutron attenuation curves of various materials

ニッケル、鉛、チタンである。これらはチタンを除き、いずれもブラッグ・カットオフを持つ物質である。ここでは、グラファイトに大きな弧が見られる。グラファイトは0.0018eV付近に比較的大きなブラッグ・カットオフを持つためである。ニッケルは比較的大きな透過率の厚さの撮影であったので、ソフトニングの影響が見られるかどうかはわからない。鉛の場合は指数関数を良く満たしているように見られる。これはカットオフが比較的短波長側にあり、かつカットオフによって断面積が低下した後の断面積変化が緩やかであるからであると考えられる。またその実効的な断面積もTNRの場合よりも小さくなっており、CNRの特徴としての透過力の増大が見られる。チタンはブラッグ・カットオフを持たず、 $1/v$  則的に断面積が増加していく物質だが、測定範囲ではほぼ指数関係を持つと見ることができる。誤差範囲ではあるが（低中性子透過率ではオフセット成分を差分することによる誤差の増大が目立つ）、わずかに弧を描いているように見られるが、これは $1/v$  則的に変化する断面積によるハードニング（高エネルギー側へのシフト）と見なせるかも知れない。これについては更に詳細な検討が



必要である。

このように、鉄とグラファイトの結果は、ソフトニングという CNR の特徴を示している。つまり定量評価において重要となる全断面積が特定できない。もちろん断面積のライブラリと計算により単一物質の全断面積は計算可能である。しかし未知物質、複合物質などを扱う場合、特に CT (Computed Tomography) を行う場合、問題を生じさせると考えられる。従って CNR を更に有益なツールとしていく際には、このソフトニング問題をうまく処理する必要があると考える。

#### 4. CNRF での TV 法及び冷中性子 CT

本稿では、一般的な TV 撮像法により、冷中性子 CT を行った結果について述べる。この一部は始めに述べたように既に発表しているが、ここではまず、CNRF における TV 法 CT という点から実際の実験を行う上で生じた問題点について述べ、続いて冷中性子の透過力に着目した冷中性子 CT について述べる。

##### 4.1 CNRF での TV 法による撮像

CNRF では、冷中性子導管を用いて中性子を導いているために、照射野が非常に限定される、ということがある。導管サイズは  $2\text{cmW} \times 5\text{cmH}$  である (周辺部は中性子束が一様でなくなって来るため、実際使用できる範囲はもう少し狭まってくる)。一般にラジオグラフィーをする被写体は数 cm 角以上の寸法であり、従って CNRF で CNR を行うには走査という処理が必要となる。一次元の走査処理を加える (通常横方向) ことで、例えばフィルム法なら照射野はフィルム幅  $W \times 5\text{cmH}$  まで大きくなる。しかし TV 法で用いる TV カメラ (この場合 SIT 管) は蓄積型ではないので、走査という処理は構造上不可能である。そこで画像処理的に走査を行うことになり、そのための装置として (株) 日本リサージュ製の画像処理装置が (TNRF と兼用であるが) CNRF には設置されている。

この装置により画像処理的に走査を行うのだが、問題は走査に関するパラメータの決定である。そのパラメータとは単位画像幅、積算フレーム数、画像合成速度、試料走査速度、とでも言うべきものである。画像処理による走査は次のような手順による。まず電子的に単位画像幅に画像が制限され、設定された積算フレーム数分が積算される。その単位画像が画像合成速度により定まる割合で、画面上に並べられていく (合成されていく)。このとき試料台を同期して送り、被写体について走査された像が得られるようになっている。

しかし、経験的にはではあるが、この撮像法には幾つか問題点がある。まず、画像合成と試料台の送りは同期しているが、その速度は互いに独立している。したがって画像合成速度と試料走査速度の選択により、画面上の走査範囲は画面の縦横比から定ま

る本来の範囲とは違う値になり得る、つまり縦に対し横が伸びたような像や縮んだような像が合成されてしまうのである。また、単位画像幅内で積算を行っているが、その積算中も試料台は移動している。従って試料走査速度が速い場合、移動する物体を撮影中積算するために尾を引くがごとく、画像ににじみが生じ、特にエッジ部のプロフィールが著しく歪む。これは例えば 15cm 程度の範囲を 15 秒程度で走査する場合にも生じる。走査による画像に出るこのにじみについては経験的にパラメータ設定法を明らかにする必要がある。

#### 4.2 TV 法による冷中性子 CT

CT を行う場合の撮像系は、中性子ラジオグラフィーの場合、TV 法が最も一般的である。それは再構成計算処理において、TV 法のような電子撮像法での多数のデータを計算機に入力する作業が最も容易だからである。

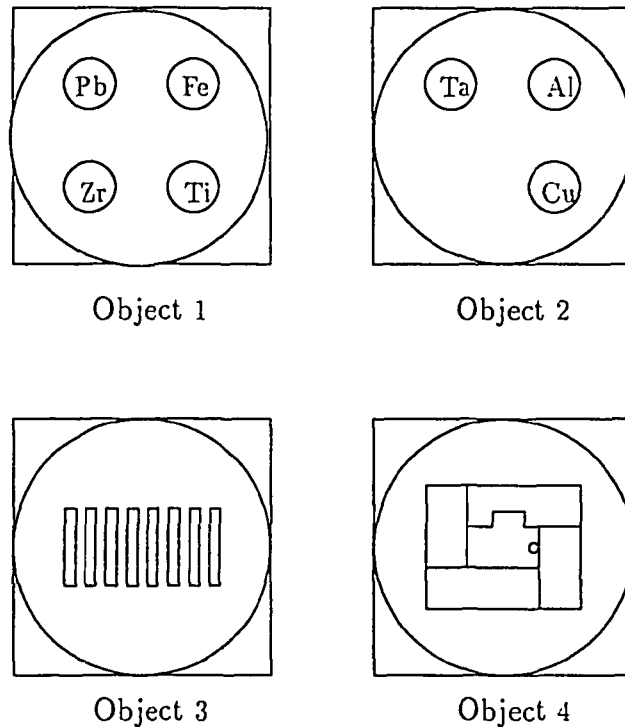


Fig. 7: Objects for neutron CT

上で述べたように、中性子透過率が低い領域では、物質によってはソフトニングを生じ、実効的な全断面積が低下する。また実験上の問題では、前節で述べたにじみの問題も生じた。にじみの問題は CT 用の投影データの解析の時点で明らかになった問

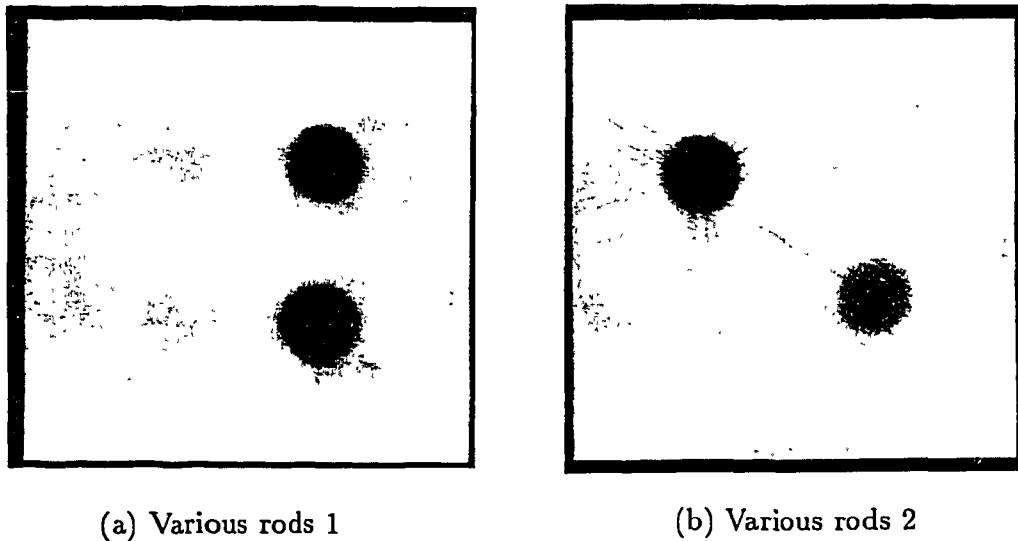


Fig. 8: Example of NCT by using TV method 1

題であったため、CTにもその影響が現れた。そこで、ここでは再構成はにじみの影響がなるべく現れないように行ない、CT像の議論は全体的なもののみについて行う。

投影データの処理は以下の手順で行った。走査して得られた各投影データはS-VHSビデオに録画される。投影データのA/D変換はImageΣ（日本アビオニクス社製）で行い、256階調のデジタルデータにした後、名古屋大学大型計算機センターの大型計算機に入力し、各種補正の後、CT像再構成を行った。再構成手法はSheppとLoganのフィルタを用いたコンボリューション法である。CT像は同計算機センター内にある画像処理装置FIVIS（Fujitsu Integrated Visual Information System）によりコントラストが最もついた状態で、再びS-VHSビデオに録画され、ビデオプリンタ（VY-200、（株）日立製作所製）で出力される。

Fig. 7にCTに用いた被写体についてまず示しておく。続いてFig. 8 (a)、(b)に各種物質の直径1cm円柱を配した（被写体1、2）CT像を示す。円柱の内部が、上側が下側より薄くなっている様子が見られるが、これが前節で述べたにじみの影響である。片側に現れているのは、再構成を半回転で行ったため、これを全回転で行うと、中心が高く周辺が低くなる。CT値をできるだけ保存するために半回転で再構成を行ったのである。この図から鉄、銅と比べてチタン、タンタルといった物質は冷中性子CTで断面積が高く評価されていることがわかる。熱中性子領域ではチタン、タンタルは鉄や銅より断面積が低いが、 $1/v$ 則で変化するため冷中性子領域では断面積の大小が逆転

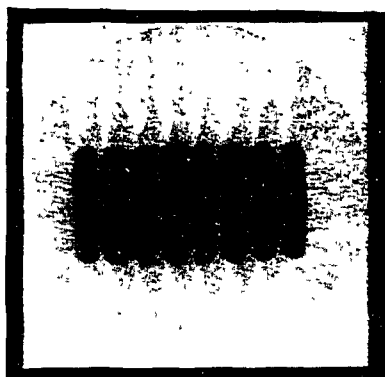


Fig. 9: Example of NCT by using TV method 2

している。

Fig. 9に薄さ2mm、長さ15mmの鉄の板を8枚並べた被写体（被写体3）のCT像を示す。またCNRの透過力を示す例として、次にFig. 10 (a)に同じ被写体のビーム側の方に厚さ60mmの鉛ブロックを設置した場合のCT像を示す。鉛は熱中性子に対してもあまり断面積は高くないが、冷中性子に対しては、既に見たように更に断面積が低下するため、このようなCTも可能となる。Fig. 10 (b)に同条件のTNR-CTの場合を示す。再構成はなされているものの、アーチファクトが多数発生し、画像自体も不鮮明なものとなっており、熱中性子ではこのCTは困難であることがわかる。

このように投影データに含まれるにじみ効果のため、例示的な結果しか示すことができないが、CNRを用いることの効果を示された。

#### 4.3 フィルム法による簡便な中性子CT

前節でのCTは撮影後の処理の簡便さから撮像法にTV法を採用したが、TV法では標準のレンズでは画素サイズをあまり細かく取れないこと、蛍光コンバータを用いていることから来る分解能の限界などデメリットがある。処理法を改善し、フィルム法でも簡便にデータ処理ができるのであれば、CTには静止画しか必要ではないから、TV法よりフィルム法の方が、解像力で優れている面があるなど望ましい。

CTには、その再構成方法にもよるが、通常のアプローチでは経験上半回転で最低20程度の方向からの撮影を必要とする。1枚のフィルムに1角度で撮影を行えば、20枚ものフィルムの撮影、現像、計算機への入力処理が必要となる。更に再構成計算は回転軸の位置出しが必要であるから、これらデータ間の位置補正も行わねばならない。

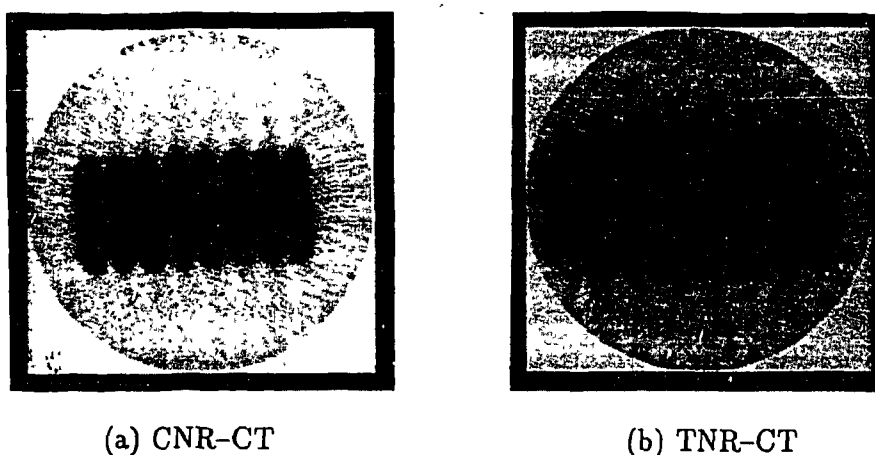


Fig. 10: Comparison between CNR-CT and TNR-CT

これは想像以上に面倒な処理であり、処理時間を大幅に増大させてしまう。また投影データ数を増やせばそれに比例して処理時間も長くなってしまふ。この点がCTにフィルム方を用いる際の問題点あるが、逆に言うと、これを解決すれば、フィルム法による高解像度のCTも可能となるわけである。つまり処理フィルム枚数を少なくすればよい。

CNRFの冷中性子導管は既に述べたように、照射野が $2\text{cmW} \times 5\text{cmH}$ と狭いものである。そのために走査が必要であるわけだが、走査をしなければ、導管サイズの画像が1枚のフィルム上に多数撮影できる。つまり照射野を狭くして1枚のフィルム上に、例えば20回撮影ができれば、上で述べたように投影データの数はそのまま、処理フィルムを1枚にすることができる。また各投影データ（撮影場所）間の位置関係も厳密に決まったものとするのが可能である。これら極めて単純な措置によりデータ処理は大幅に簡便となるのである。

しかし実際このことを実行するには幾つか問題がある。まず照射野を狭くする点であるが、これはCNRFにおいて撮影を行う場合は既にかなり狭められているので、それほど困難ではない。しかし一般的な設備では、中性子を完全に遮蔽し、 $\gamma$ 線等外乱となるものを出不さない条件を簡便に設定することは多少の困難を伴うだろう。したがってフィルム法CTは中性子導管を用いる冷中性子独自のもの、と言えるかも知れない。

もう一つはシャッターのスピードで、低中性子束の設備ならそれほど問題ではない。しかしCNRFの場合、炉が20MW定常運転時 $2.0 \times 10^8 \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ [2]という高中性子束

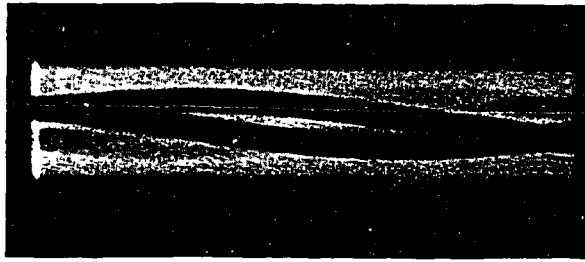


Fig. 11: Projection data obtained by using film method

で、例えば撮像系が Gd25 $\mu$ m 蒸着膜と KODAK の SR との組み合わせでは、照射野分で黒化度 3 程度を得るのに要する照射時間は 4~5 秒程度である。現在の CNRF のシャッターは全閉-全開-全閉の走査には十数秒を要し、非走査の撮影は不可能である。従ってもっとレスポンスの良いシャッターシステムを組み込む必要がある。

本稿で報告する実験時は、そのようなシャッターシステムを組み込まなかったため、試験的に簡便なフィルム法による CT を行うという観点から、走査式撮影で行っている。つまり回転軸を走査方向に平行にとり、被写体を回転軸方向に一様な形状とする。走査は連続的に行うが、被写体の回転は離散的に、ある時間間隔毎に行う。この場合、回転しているときの像はぼけてしまうが、回転していないときの像は、被写体が軸方向に一様であるから、あたかも走査していないがごとくに撮影される。こうして一走査で半回転分回転させれば、近似的に連続してサイノグラム状になった投影データ群が得られる。これは一定間隔で投影データが並べられたものだから、読み取り時も一定間隔で読み取れば良く、回転軸のずれもほとんど生じないため、データ処理は容易であった。

Fig. 11に得られた投影データの像を示す。これは4種の物質の直径1cmの円柱を配した被写体1のもので、前節で示したCT像の被写体と同様のものである。ただし円柱の配置は若干異なっており、右上Pb、右下Zr、左上Fr、左下Tiとなる。角度数は40個/半回転であった。Fig. 12に再構成結果を示す。なお、図中の白黒のパターンは再構成像上で1mm間隔のサイズを表わしている。CT像は鮮鋭度が良くないが、これは、撮影体系の都合上撮像系と被写体をあまり近づけることができなかつたため、この場合約9cm離れており、不鮮鋭度を3.2で求めた平行度から求めると約1mmとなる。

Fig. 13 (a)にもう一つのCT像を示すが、これは厚さ5mmの鉄の板で製作した被写体で内部に直径0.9mmのナイロン糸を配したもの(被写体4)である。さほど鮮鋭度は良くないが、板に作った幅3mm、深さ2mmの切り欠きやナイロン糸、更に鉄板を張り合わせたエポキシ樹脂系接着剤が明確に再構成されている。この被写体をTV

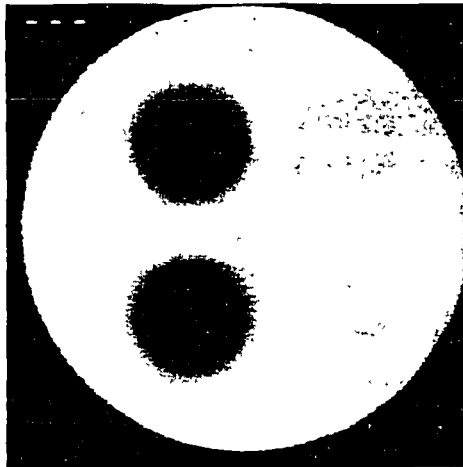
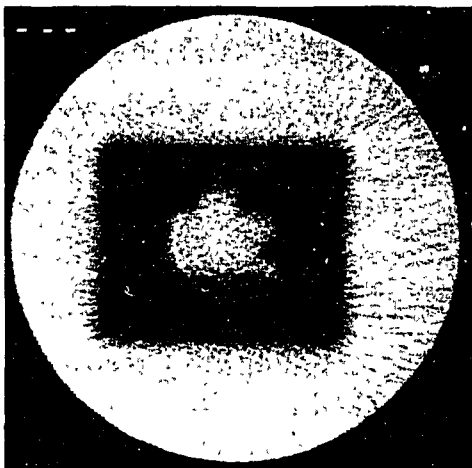
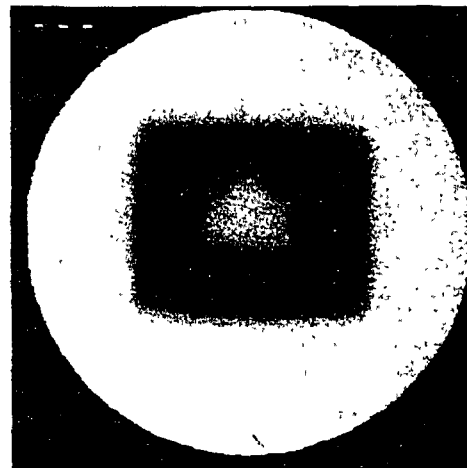


Fig. 12: NCT image by using film method



(a) Film method



(b) TV method

Fig. 13: Comparison of film method-NCT and TV method-NCT

法による CT で行った例を Fig. 13 (b) に示すが、両者を比較すると、TV 法 CT の方が明らかに像質は悪く、フィルム法 CT の優位性が示された。

シャッターシステムや被写体と撮像系間の距離の問題などを改善して行ったフィルム法 CT (ただし実験は京都大学原子炉実験所の京大炉に設置された冷中性子導管 CN-2 出口にて行った) では、フィルムの読み取りアパーチャー (つまり画素サイズ)  $100\mu\text{m}\times 100\mu\text{m}$  で分解能  $300\mu\text{m}$ [6] が得られ、アパーチャーを小さくすることで容易に更なる解像力の向上が期待できることがわかった。

## 5. 結び

JRR-3M の CNRF を用いたラジオグラフィーの基礎実験から、以下のような特徴が確認された。

まず、CNR では、装置の中性子ビームの平行性はそれほど良くないが、被写体からの散乱線によるじみ等の影響が TNR に比べ小さい。従って、分解能的、或いは形状的観察に適しているといえることができる。

CNR の定量的な解析を行う場合、物質の全断面積の中性子エネルギー依存性から来るスペクトルの変化が生じることを考慮すべきである。

CNRF における TV 法走査式撮影は、パラメータによっては信頼性を欠く画像となり、選択を慎重に行う必要がある。これらは概ね走査時間を遅くすることで達成される。

CT を行うにあたっては、CNRF のような冷中性子導管は照射野が限られていることから、簡便なフィルム法を容易に適用することが可能であり、それにより TV 法で CT を行うよりも画質、分解能を向上させることが可能である。

## 謝辞

実験においては研究炉部炉技術開発室の鶴野晃氏、松林政仁氏、放射線照射協会の安藤均氏にお世話になりました。この場を借りて感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] Oda, M., et al., "Basic research of cold neutron computed tomography at Japan Research Reactor-3M", in Barton, J. P. ed., *Neutron Radiography(4)*, pp.603-609, Gordon and Breach Publishers, 1994.
- [2] 鈴木正年 他, "JRR-3M 中性子導管の特性測定", JAERI-M92-201, 日本原子力研究所, 1993.



- [3] Kobayashi, H., et al., "Macroscopic cross section measurements and defect detection in materials using neutron radiography technique", *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 29, No. 11, pp.1045-1053, 1992.
- [4] Tamaki, M., et al., "Basic research on quantitative neutron radiography using neutron absorbing honeycomb collimator", in Barton, J. P. ed., *Neutron Radiography(4)*, pp.833-844, Gordon and Breach Science Publishers, 1994.
- [5] Barton, J. P., "Radiographic examination through steel using cold neutrons", *British Journal of Application Physics*, Vol. 16, pp.1833-1839, 1965.
- [6] 小田将広 他, "写真法による簡便な高解像度中性子 CT の開発", 日本原子力学会 1992 年秋の大会, K32.
- [7] Kobayashi, H., "Preliminary study for cold neutron radiography", in *Proceedings of the 3rd Asian Symposium on Research Reactor:ASRR-III*, pp.589-596, Japan Atomic Energy Institute, 1991.