

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月18日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21360459

研究課題名（和文） 中性子/γ線複合型CTによる多元多重データ可視化と非破壊データマイニングの可能性

研究課題名（英文） Visualization and mining of multi-dimension data obtained by neutron/gamma-ray coupled CT

研究代表者

加美山 隆 (KAMIYAMA TAKASHI)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：50233961

研究成果の概要（和文）：中性子共鳴吸収分光法とコンピュータ断層撮像を組み合わせたN-RAS/CTは、核種や温度の断層内分布を非破壊で可視化することができるが、空間分解能の低いことが問題となる。これを、加速器中性子源から放射されるγ線(X線)を利用し同一ビームライン上で高空間分解能γ線ラジオグラフィを行うことで高空間分解能化した。また、シャッター機能を付加した中性子イメージンシファイアを使うことにより、エネルギー分解した中性子イメージから材質特定と分布のイメージングを行った。

研究成果の概要（英文）：Neutron resonance absorption spectroscopy (N-RAS) using a pulsed neutron source can be applied to time-of-flight (TOF) radiography analysis can be reconstructed as the tomograms of nuclide distributions using computed tomography (CT). The problem is that the available spatial resolution is not sufficient for radiography imaging. In this study, we combined the neutron and gamma-ray (X-ray) radiography, which utilize the gamma-rays (or X-rays) at the same time as the neutron pulse is emitted, to improve the spatial resolution of the quantitative reconstruction of the neutron tomogram. And, we applied the neutron image intensifier with the shutter function to the Bragg edge radiography of material distribution.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	8,500,000	2,550,000	11,050,000
2010年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2011年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
年度			
総計	14,800,000	4,440,000	19,240,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード： 加速器、量子ビーム、ラジオグラフィ、中性子、γ線、CT、非破壊分析

1. 研究開始当初の背景

加速器を用いるパルス中性子イメージングでは、入射中性子のエネルギーに依存した対象物の断面積を利用して様々な情報を得ることが可能である。申請者らは加速器パルス中性子源を用いた共鳴吸収CT法(N-RAS/CT)の開発を行ってきた。これによ

り、核種や温度の断層分布の非破壊断層イメージングに成功した。しかし、これまでのところ、CTによる再構成像の空間的な分解能は中性子線源強度の問題で高精細にすることが難しかった。一方で、加速器線源では中性子と同時にγ線(X線)も発生するため、高精細なイメージング用検出器が利用できる

γ 線測定を同一のビームライン上で行い、 γ 線イメージから空間情報を補間することで、中性子共鳴吸収イメージングの空間分解能を補うことができるのではないかとこの着想を得た。さらに、この高エネルギー γ 線を利用したイメージングでは物質の特定までは不可能だが、パルス中性子分光イメージング法の手法を利用すれば、 γ 線で得た高精細なイメージに関して物質の解析を行うことが可能となる。このように相補的な中性子/ γ 線イメージングを同一ビームライン上で行い、双方の利点を活かした多元的なデータ解析で実空間に対応した重層的なデータの可視化を行うことによりデータマイニングする技術を開発することは、加速器を用いる量子ビーム利用技術の科学・工業・医療分野への普及に寄与することが期待できる。

2. 研究の目的

本研究は、加速器を用いたパルス中性子源から出る高エネルギー γ 線(X線)も利用して同一のビームライン上で中性子および γ 線イメージングを行い、それぞれ単独のイメージングに欠けている情報を補完して多元化する手法で、一方のみでは不可視なデータのデータマイニングを行うことを目指す。まず、従来の N-RAS/CT で不十分である空間分解能を補うため、同一ビームライン上で γ 線 CT を併用する中性子/ γ 線複合型断層撮像手法を開発することを第一の目的とする。さらに、 γ 線イメージングでは可視化できない情報をパルス中性子イメージングから補完し、中性子と γ 線の相互補完に関する手法を検討することを第二の目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、まず北海道大学工学部付設の小型加速器(45MeV 電子線形加速器)の中性子ビームラインで実験を行うことを範として、ビームラインに適当な γ 線(X線)のターゲットについてシミュレーションおよび実験による検討を行った。

次いで、X線イメージンシファイアを導入し、N-RAS/CT 用分光器と同一ビームライン上に設置して、N-RAS/CT による核種分布の実験と同サイズの試料セルの高精細な X線ラジオグラフィ画像を取得した。この X線イメージから計測される空間情報を用いて N-RAS/CT 測定時の CT 再構成用データを補完し、そのデータを用いて再度 CT 再構成を実施した。

さらに、異なる種類の材質から構成された試料について、加速器パルス中性子源を用いた波長分解型中性子ラジオグラフィおよび X線ラジオグラフィを行い、X線ラジオグラフィでは得られない対象物内部の物質構成に関して中性子イメージングの立場から補完

した。

4. 研究成果

(1) 北大電子線形加速器を用いた高エネルギーX線イメージング用線源の検討

北海道大学の 45MeV 電子線形加速器では、小型パルス中性子源として N-RAS/CT 法の開発が行われてきた。図 1 に北大の N-RAS/CT 装置の模式図を示す。これにより、核種分布や温度分布の CT に成功している。しかし、即発 γ 線型の装置で中性子スリットを利用するため、CT による再構成像の空間的な分解能は高くない。一方で、同じビームラインで発生する高エネルギーX線を利用したイメージングでは核種分布・温度分布の測定はできないが、被写体を高空間分解能でイメージングすることができる。この空間情報を中性子イメージングに補完することで、CT の再構成精度の向上を図ることが可能となる。そこで、ここでは北大加速器中性子源による高エネルギーX線の発生をシミュレートおよび実測し、高エネルギーX線イメージング用のターゲットの最適化を行うと共に X線/中性子線ビームラインの共用化についての検討を行った。

シミュレーションでは、X線源のターゲット元素をタングステン、鉛、銅とした。X線イメージングへのノイズ、機器へのダメージを避けるため電子線エネルギーをターゲット元素の光核反応閾値以下(タングステン・鉛・銅: 6MeV、銅: 9MeV)として、ターゲット厚さの最適値を計算した。北大加速器では、電子線方向に対し、 90° 、最短 5m の位置にビームを取り出す必要がある。そこで次に、板状のターゲットを電子ビームに対し回転

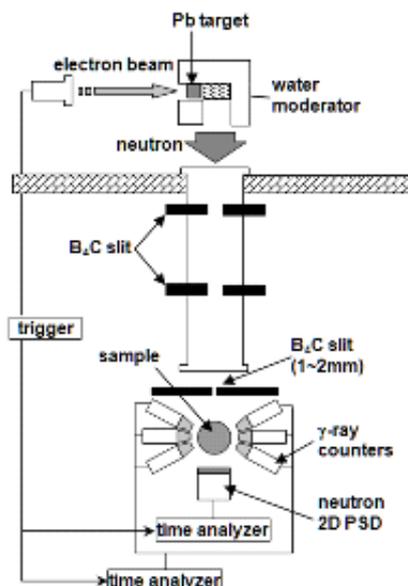


図 1. 北大の N-RAS/CT 分光器の模式図。

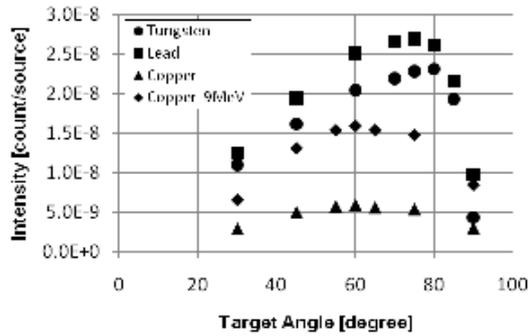


図2. 電子ビーム直角方向に対するターゲット角度と高エネルギーX線強度の関係。

させ、北大ビームラインで得られるX線強度を計算した。計算コードにはMCNPXを用いた。

ターゲットの厚さを変化させていくと、一定以上の厚さでは、透過してくる電子線に大きな変化が見られなくなった。変化が見られなくなった最初の厚さをターゲットの厚さとした。6MeV電子線に対しては、タングステン1.8mm、鉛3.0mmとなり、銅4.4mm、9MeV電子線に対する銅6.5mmとなった。ターゲットを回転させることで得られた高エネルギーX線(2MeV以上)の強度変化を図2にまとめた。角度は、ビームとターゲットのなす角の大きさで表した。ピーク強度、高分解能な像が得られる広角側(電子線の照射面積が小さく、線源として小さくなる)での強度の両方において鉛が最適なものとなった。ただし、強度の差、融点、熱伝導などを考慮すると、タングステンが実際には安定した線源として利用できると考えられる。また、X線の発生に特化したターゲットでは厚さが薄いため中性子の発生量に問題があり、最適性を求めたビームラインの共用化のためにはターゲットの交換機構が必要と考えられる。一方で、中性子線源として使用中のターゲットでは鉛のブロックの前にタングステンプレートを挿入しており、これがX線の発生に寄与すると期待できる。このため、本研究では従来使用している中性子発生用ターゲットをX線用ターゲットに共用することとした。

(2) γ 線ラジオグラフィによるN-RAS/CTイメージの高空間分解能化

中性子共鳴吸収分光法(N-RAS)を利用したイメージングでは、中性子スリットを利用して位置分解された一連のスペクトルを取得するため、中性子スポットサイズの制約を受け、1~数mm程度の空間分解能となってしまう。しかしながら、産業応用その他の分野の要請ではさらに空間分解能を高めることが求められている。そこで、ここではより高い空間分解能(<0.1 mm)の空間分解能を持つ γ 線イメージング用ターゲットをN-RASビ-

ームライン上に設置し、対象物の高精細な空間像を取得することで、N-RASの結果のCT再構成の空間情報を増加させ、N-RAS/CTの空間分解能を向上させる研究を行った。

図3は先にN-RAS/CTで核種分布の測定を実施した試料と同一のサイズ(円周方向)を持つ試料セルを、北大線形加速器のN-RASビームライン上で得られる γ 線(X線)を利用して撮影した画像である。N-RAS測定時には1mmサイズの中性子スリットを移動させて測定した一連の投影スペクトルから、図4点線

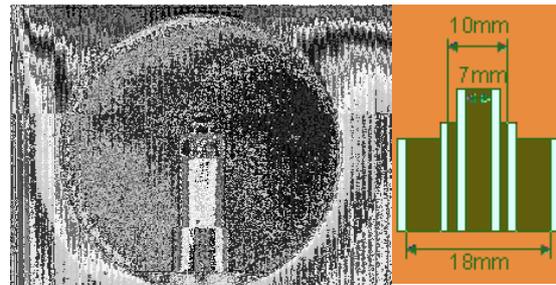


図3. N-RAS/CTと同サイズ試料の γ 線ラジオグラフィ像。

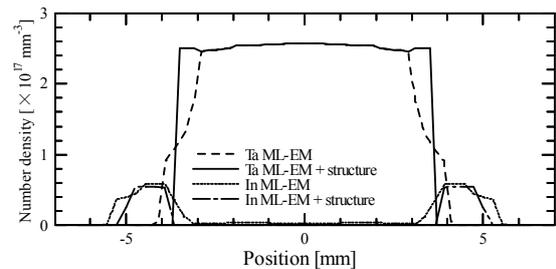


図4. N-RAS/CTによる核種分布のCT再構成結果。点線はN-RAS/CTのデータのみ使用。実線は γ 線ラジオグラフィの結果を加えたもの。

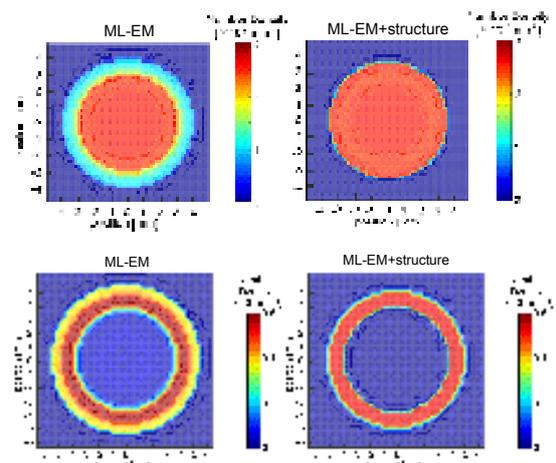


図5. 核種分布のCT再構成結果の断層像。左図上下はN-RAS/CTのデータのみ使用。右図上下は γ 線ラジオグラフィの結果を加えたもの。

のように断層内の核種分布を再構成した。一方図3から得られた断層像のサイズを考慮してN-RAS/CTのデータを再構成した結果が図4の実線である。N-RAS/CTのデータのみではスリット位置と核種位置の差によって、分布に大きななまりが生じているが、 γ 線写真のデータを組み合わせることによって境界が非常にシャープに得られることがわかる。この結果を2次元イメージにして表したのが図5であるが、 γ 線の情報を加えた右側の図(上下)の方が元の試料の核種分布とよく一致することが分かった。

一般に中性子分光型イメージングでは空間分解能の悪いことが指摘されるが、このように線源からの γ 線(X線)を利用して同一のビームラインで γ 線イメージを取得することで、中性子分光型イメージングの欠点を補完できることが示された。この結果は通常の γ 線イメージングでは得られない中性子による情報を重畳して非破壊分析に利用できることも示しており、両者の長所を組み合わせたイメージングを展開できると考えられる。

(3) 中性子分光型ラジオグラフィによる X線ラジオグラフィ画像の多元情報化

中性子分光型イメージングでは、先に述べているように中性子飛行時間法で位置毎のスペクトルを取得・解析することで γ 線イメージングでは得られない情報を可視化することができる。しかしながら高空間分解能の測定では飛行時間法が十分に適用できるだけのスピードを持つ高速度カメラが存在しないため、限られた空間分解能のイメージしか取得できない。この欠点を幾分か回避できる機器として、中性子イメージンシファイアにシャッター機能を持たせたブランキング型と呼ばれるイメージンシファイアが開発されたので、それを利用したイメージングについて検討を行った。

図6にこのイメージンシファイアの動作についての説明図を示す。中性子パルスは北大線形加速器の繰り返しに合わせて50Hzで繰り返し中性子パルスを生成し、試料位置にて図のようなエネルギースペクトルとなる。ブランキング型のイメージンシ

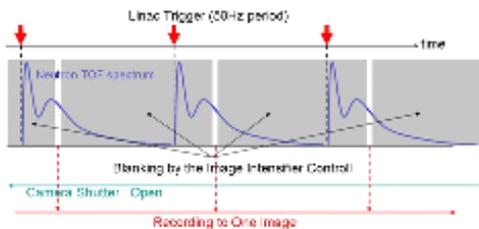


図6. ブランキング機能付中性子イメージンシファイアの動作。

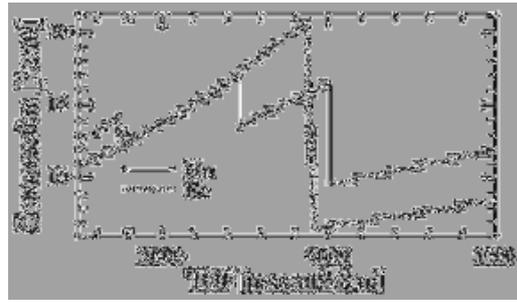


図7. CuとFeに対する中性子全断面積。

シファイアはこのうちの一部を加速器繰り返しに対し同一のタイミングで切り出し、試料に照射する。この中性子エネルギーに対する一連の透過画像は、シャッターを常時オープンに保った高精細デジタルカメラに蓄積される。最終的に、積算されたデジタルカメラの画像が高空間分解能のある中性子エネルギーに対する透過画像として得られる。この方式では、記録用カメラはシャッターオープンに保っておけるため、一般に市販されている高精細カメラをそのまま利用することが可能となる。一方で、中性子の1パルスに対してシャッターが一瞬オープンになるだけなので、大部分の中性子は無駄になってしまうという欠点がある。また、イメージンシファイアのシャッターオープン時間はあまり短くできない(この時点で数 msec)。そこで、ここでは中性子のブラッグエッジスペクトルの差を利用して、物質識別が可能となるかどうかを例として実験を行った。

図7にCuとFeの中性子断面積の一部を示す。横軸は北大施設で飛行距離を3.8mにと

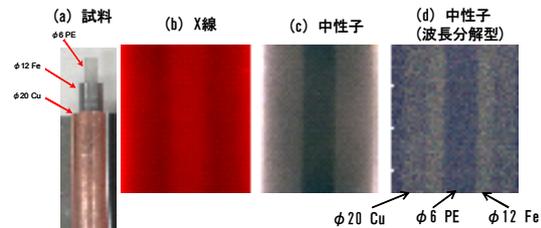


図8. 各種ラジオグラフィの結果。(a)試料、(b) γ 線ラジオグラフィ、(c)中性子ラジオグラフィ(全波長域)、(d)ブラッグエッジ強調ラジオグラフィ。

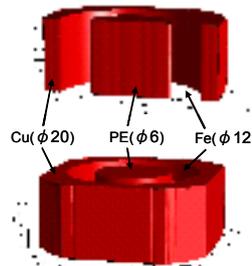


図9. ブラッグエッジ強調ラジオグラフィ画像のCT再構成結果。

ったときの時間である。ここから飛行時間 4ms 前後の中性子の透過率の Cu と Fe に対する違いを利用して、両者を識別するイメージングを行った。

図 8 に測定結果を示す。図中 (a) が測定した 3 重円筒試料であり、中心にポリエチレン (PE)、内円筒に Fe、外円筒に Cu という構成になっている。これにイメージを γ 線 (X 線) ラジオグラフィで得たのが (b)、中性子ラジオグラフィ (全波長積分) で得たのが (c) であり、両者は PE 部に差があるものの、Fe と Cu の境目は確認できない。一方、ブラッグエッジの差を利用して Fe と Cu の断面積の違いを強調したイメージが (d) となる。この場合には Fe と Cu で差が得られており、両者の区別が可能である。この画像の正当性を確認するため、この画像を円筒対称の物体ということで補間して CT 再構成したのが図 9 である。一般に投影画像の濃淡が正しく得られないと CT 再構成は不可能となるが、この図 8 (d) の画像は正しい輝度関係を保っているため、図 9 のように正しく 3 領域に CT 再構成が可能であった。

このように対象物内の構成物が分かっている場合には、それがどのように内部で分布しているかを、ここで評価したブラッグエッジ分光型ラジオグラフィとその CT で確認することが可能である。一般的な γ 線ラジオグラフィで困難な材質の識別も中性子分光型ラジオグラフィと組み合わせることで、不可視な情報をイメージデータの上に重ねることができる技術が確認されたと考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

1. T. Kamiyama and Y. Kiyanagi, Time-of-flight neutron radiography with a blanking-type image intensifier, Physics Procedia, Vol. 26, 2012, pp.231-237, 査読有
2. T. Kamiyama, D. Tsukui, H. Sato and Y. Kiyanagi, Accelerator-based neutron tomography cooperating with X-ray radiography, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Vol. 651, 2011, pp.28-31, 査読有

[学会発表] (計 6 件)

1. 加美山 隆, 後神 進史, 木野 幸一, 持木 幸一, 古坂 道弘, 鬼柳 善明, 「真空管式イメージンシファイアを用いたパルス中性子イメージング用検出器の高度化」、日本原子力学会 2012 年春の年会、2012 年 3 月 20 日、福井大学
2. T. Kamiyama, S. Goko, H. Sato and Y. Kiyanagi, "Development of camera-type

time-of-flight neutron imaging devices", 1st Asia-Oceania Conference on Neutron Scattering, 2011/11/23, Tsukuba, Japan

3. T. Kamiyama and Y. Kiyanagi, "Accelerator-Based Neutron Tomography Using Vacuum Tube Type Image Intensifier with Blanking Function", 2011 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 2011/10/24, Valencia, Spain

4. T. Kamiyama and Y. Kiyanagi, "Time-of-flight neutron radiography with a blanking-type image intensifier", The Second meeting of The Union for Compact Accelerator-Driven Neutron Sources, 2011/7/7, Indiana University, Bloomington, US

5. T. Kamiyama, D. Tsukui, H. Sato and Y. Kiyanagi, "Accelerator-based Neutron Tomography Cooperating with X-ray Radiography", 9th World Conference of Neutron Radiography, 2010/10/4, Kwa Maritane, South Africa

6. 津久井大輔, 加美山隆, 佐藤博隆, 鬼柳善明, 「北大 LINAC を用いた高エネルギー X 線イメージング用線源の検討」、日本原子力学会 2010 年秋の大会、2010 年 9 月 17 日、北海道大学

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加美山 隆 (KAMIYAMA TAKASHI)
北海道大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 50233961

(2) 研究分担者

鬼柳 善明 (KIYANAGI YOSHIKI)
北海道大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 80002202