

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24510116

研究課題名(和文)中性子共鳴吸収分光法を用いた高効率なマルチポイント同時非破壊内部温度測定法の開発

研究課題名(英文) Development of neutron resonance absorption spectroscopy for high-efficiency multi-point non-destructive temperature measurement

研究代表者

加美山 隆 (Kamiyama, Takashi)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50233961

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：即発線型中性子共鳴吸収分光法による温度測定法は、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、測定に時間がかかるのが課題である。これについて高効率化を図るため、温度情報が必要な複数の位置にそれぞれ別種の共鳴吸収核種を置いて解析することにより複数位置の温度情報を一度に得るマルチポイント同時非破壊内部温度測定法の開発を行った。また、共鳴吸収ピークの測定感度を高めるために、検出器の不均衡配置法を検討した。これらの結果、室温以上では数K内程度の精度で、複数核種を用いた同時非破壊温度測定が可能であることを実証した。

研究成果の概要(英文)：Neutron resonance absorption spectroscopy (N-RAS) with a pulsed neutron source can distinguish the dynamics of individual nuclides by their resonance peak widths That can identify the motions of a particular nuclide with its resonance energies, and analyze the dynamics of nuclides from the Doppler broadening of the resonance peaks due to their thermal motion. We applied this technique to the nondestructive thermometry of the object inside. In this study, we applied prompt gamma-ray type N-RAS, but it is inefficient for imaging because it needs spatial beam scan. If we put multiple nuclides each location, it can measure the temperature of the desired location at the same time. We measured the resonance absorption spectrum of a heated sample which was composed with multiple nuclides. The analyzed nuclides were Ta-181, Ag-109 and Sm-147 in the same sample object. Each nuclide indicates a good consistency. The difference between analyzed and sample temperature is under 5 K in each nuclide.

研究分野：中性子工学

キーワード：非破壊測定 温度 中性子 共鳴吸収 イメージング 加速器

1. 研究開始当初の背景

中性子共鳴吸収分光法 (Neutron Resonance Absorption Spectroscopy, N-RAS)は、中性子共鳴吸収即発線分析法と飛行時間法を組み合わせた分光法で、核種に固有な中性子共鳴吸収断面積を利用することで、核種毎にその量やダイナミクスを非破壊・非接触的に分析できる手法である。特に物質中のある特定同位体元素のみについての運動状態を実効温度というパラメータで決定することが出来る。実効温度はデバイモデルにより物質の温度に変換でき、これにより試料の実際の温度を測定することに利用可能である。さらに中性子をプローブとして利用するため物体内部の情報を得られること、また感度も通常の中性子散乱と比べて非常に高いということから、試料の回転やスリットを組み合わせることで実空間情報もあわせて得ることが出来れば、計算機断層撮像 (Computer Tomography, CT)法の技術を活用して、物体内部の非破壊・非接触の物体内部温度分布測定が可能となる。このように、対象物内における取得情報分布の可視化も可能なため、加速器中性子源をつかったパルス中性子イメージングの新しい手法として、J-PARC/MLF 施設をはじめとする各国の加速器中性子源においてもイメージング手法の一つとして取り入れられている。

我々は、本手法を用いた物体内部の非破壊温度分布イメージングを提案し、中型加速器中性子源施設(高エネルギー加速器研究機構、KENS)および小型加速器中性子源施設(北海道大学、HUNS)において実証してきた。温度分布の測定には、物体内部の温度情報に位置情報を付加してCT法により再構成する必要があるが、当初は位置情報の付加に試料の回転と中性子スリットの移動を組み合わせていた。しかしながらこれではスキャンに長時間を要するため、一つの改良として位置情報の付加に位置敏感型中性子検出器を用いた透過測定法を適用し、これによっても即発線型と同様な結果が得られることを示してきた。本手法はセンサー類のワイヤリングによる擾乱を受けずに非破壊的に物体内部温度分布を直接測定できるため、各種動作機器や材料製造工程の温度測定で産業的応用が期待されているが、現状においてもこのためにはまだ測定時間が充分な速さではない。

2. 研究の目的

本研究では上述の問題に対処するため、温度分布測定用の新しい2つの基礎技術を開発・検討することを目的とした。一つは、核種毎に吸収ピーク位置が異なるという中性子共鳴吸収断面積の特長を活かし、いくつかの核種を温度センサーとして必要な位置に設置し、それらの吸収ピークの解析により特定位置の温度を決定するというマルチポイント同時温度測定法(図1)である。これは飛行時間法によって必要なエネルギー領域の

中性子スペクトルを1本測定するだけで温度および位置情報の両方が同時に得られるため、大幅に高速化された測定が可能となる。また、吸収断面積の大きい核種を温度センサーとして利用すれば少量で周囲の環境と十分に平衡になった温度情報が得られる。一方で、位置情報は大まかなものになるが、特に温度情報の必要位置が定まったような産業利用では適用可能と考えられる。

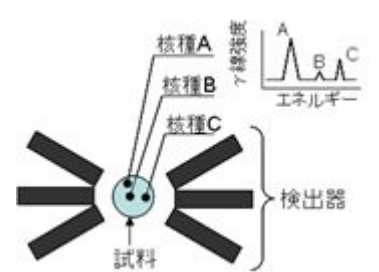


図1. マルチポイント同時温度測定法

温度分布測定の高効率化のために本研究で検討した2つ目の手法は、検出器不均等配置法である。前述のマルチポイント同時温度測定法は、ある特定の位置に中性子共鳴核種を投入するため、透過型N-RASではある限られた検出器のピクセルにのみ信号が入るため効率が悪くなる。一方で即発線型N-RASでは吸収により360°方向へ放出される即発線を捉えるため、検出器の広立体角配置化により効率は上昇する(図2)。本研究では、この検出器配置を不均等に変えることにより空間的な変調をかけることでS/N比を向上させる手法(図2)である。センサーとしての核種の配置位置により試料を透過してくる線の量が変化するため、不均等に配置されたセンサー群の信号強度はそれぞれで変化する。その中でホワイトノイズを一定と考えれば変調解析によりシグナル成分を分離することが可能となる。マルチポイント同時温度測定法では一箇所に投入する核種の量が少ないため、特にS/N比の向上が重要で、このような手法の同時適用は効果があると考えられる。

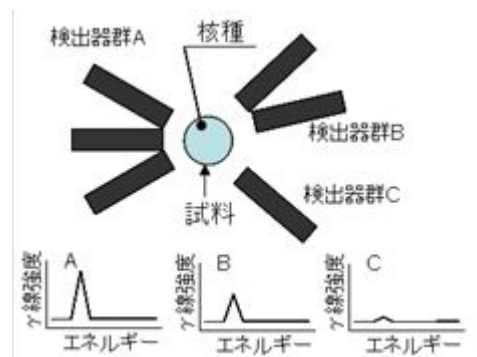


図2. 検出器の不均等配置によるスペクトルの変調

3. 研究の方法

(1) マルチポイント同時温度測定法

マルチポイント同時温度測定法では、複数の核種からの共鳴吸収シグナルを含むスペクトルをそれぞれの核種毎に解析して温度を決定するが、これまでの研究では、単一核種を用いた温度測定のみしか行われておらず、複数核種の共鳴ピークが混ざったスペクトルからでも正確な温度情報を得られるか、未だ確認されていなかった。そこで、温度センサーとして複数核種を用いた解析が可能であるかを検証するために、一定温度に保った複数核種を含んだ試料の共鳴吸収スペクトルを測定して、それぞれの核種から同じ温度を得られるかの実験を行った。

試料について、本研究では温度の均一性を保てるように温度媒体として不活性ガスを用いる新しい形式の高温炉を製作し、複数核種を重ねた形の試料を用いることで温度の同一性を確保しつつ、同じ場所に位置する複数核種からの共鳴吸収ピークを解析した。核種の選択に関しては、より正確な温度を得るために、共鳴ピークはできるだけ重ならず、分離した形であることが望ましい。さらに、統計の良い解析を行うには共鳴吸収断面積の大きい核種を選ぶ必要がある。従って、試料を選ぶ際に、基準として以下の条件を設けた。

- (a) 高温炉の設定温度の上限である 543 K でも固体のまま存在できるように、試料の融点が 543 K 以上であること。
 - (b) 中性子のエネルギーが 10 eV 以下において共鳴吸収ピークを持つこと。
 - (c) 中性子のエネルギーが 10 eV 以下の領域に持つお互いの共鳴吸収ピークが重ならず、ピーク間隔が開いていること。
 - (d) 共鳴吸収断面積がある程度大きいこと。
- これらの条件をある程度満たしている測定試料として、タンタル、銀、酸化サマリウム (Sm_2O_3) の組み合わせを用いることとした。試料サイズは、タンタル、銀、酸化サマリウムともに 38 mm × 38 mm で、厚さは 0.05 mm である。実験体系の概略図は図 3 に示す。中性子減速材から試料までの中性子飛行距離は 13.3 m となっている。検出器は即発線を計数するために BaF₂ シンチレータ検出器を使用した。

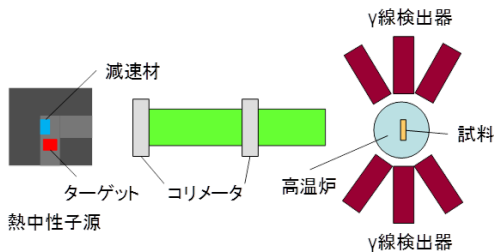


図 3. 実験体系図

(2) 検出器不均等配置法

検出器不均等配置法では、試料に対する検出器の位置の違いが信号強度に与える影響

を検討することで、その可能性が評価できる。そこで、本研究では試料の基本形状である円筒形について、試料による信号の減衰を解析的にシミュレートするコードを製作して効果の検討を行った。現状で試料の直径は 20 mm 程度である。

4. 研究成果

(1) マルチポイント同時温度測定法

図 4 に、試料温度 298 K ~ 543 K で得た試料の共鳴吸収スペクトルを示す。図からはそれぞれの共鳴ピーク幅の温度変化は確認しづらいが、拡大すると温度の上昇に伴い、ピーク幅が広がってくるのが分かる。また、各核種とも図に示すエネルギー範囲でも複数の共鳴吸収ピークが見られており、線幅によってはピーク裾の重なりなどで解析結果に影響が出てくると考えられる。今回の研究では、比較的ピークの重なりが少なく、またピークがシャープである、中性子エネルギーが 10 eV 以下に存在する Ta-181 の 4.28 eV 共鳴、Ag-109 の 5.19 eV 共鳴、Sm-147 の 3.396 eV 共鳴に対して解析を行った。なお、Ag-109 の 5.19 eV における共鳴ピークは Sm-149 の 4.94 eV 共鳴と重なっているが、Sm-149 の 4.94 eV 共鳴は Ag-109 の 5.19 eV 共鳴に比べて共鳴吸収断面積が非常に小さいことから解析に与える影響は少なく、またこのような重なりがある場合の解析可能性について評価できると考え、このピークを選択した。また、Sm-147 の 3.396 eV 共鳴は Ta-181 の 4.28 eV 共鳴、Ag-109 の 5.19 eV 共鳴よりも共鳴ピークの値が小さいが、共鳴吸収断面積の値が解析にどのような影響を与えるのか調べるために、この共鳴ピークを選択した。

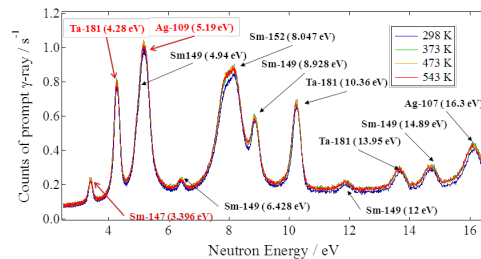


図 4. 各温度における共鳴吸収即発線スペクトル

各温度に対して得られた共鳴吸収スペクトル中の Ta-181 の 4.28 eV 共鳴に対して共鳴吸収解析コード REFIT を用いてフィッティングを行った。ドップラー拡がりの評価モデルは理想ガスモデルを利用した。理想ガスモデルでは、ドップラー効果を計算する際に必要なパラメータは、実効温度とデバイ温度である。Ta のデバイ温度を 240 K とし、各核種の面密度のパラメータを固定し、実効温度をフィッティングパラメータとしてスペクトルフィッティングを行うことで実効温度を求めた。なお、共鳴パラメータは JENDL-4.0

の値を使用している。また、フィッティングには分解能関数として今回実験に使用した北海道大学熱中性子源の中性子パルス関数を畳み込む必要があるが、これは熱中性子源をモンテカルロシミュレーションした結果から導出した関数を用いた。フィッティングの一例として、373Kにおける結果を図5に示す。REFITコードによるフィッティングは良く実験値と一致しており、ここから共鳴吸収ピークのドップラー拡がり幅を得ることができた。このドップラー拡がり幅を温度 T_M に換算し、高温炉で設定した試料温度 T_S と比較した結果が図6である。図より両者の温度はよく一致していることがわかる。この場合の温度は5K内の精度で決定することができた。

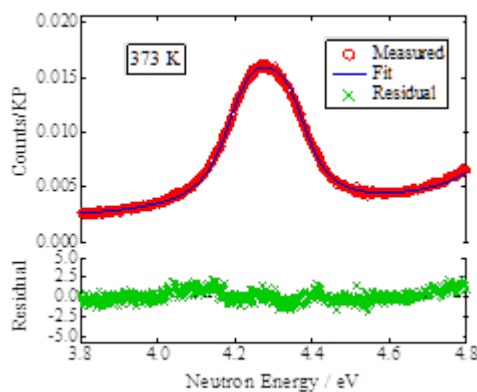


図5. 373 KにおけるTa-181の4.28 eV共鳴吸収に対するフィッティング

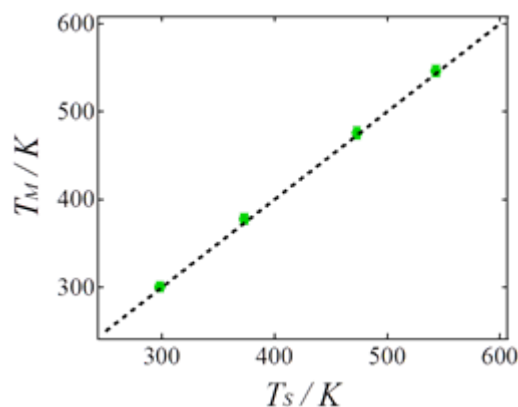


図6. Ta-181の共鳴吸収解析で得られた温度 T_M と実際の試料温度 T_S との関係

次に、Ag-109の5.19eV共鳴吸収についての解析結果を示す。この場合もTa-181と同様の手順で解析を行った。Agのデバイ温度は225 Kである。ただし、この共鳴吸収ピークにはSm-149の4.94 eV共鳴吸収ピークと重なってしまっているため、その領域のデータはフィッティングから除外して計算した。フィッティングの例は図7に、温度に変換した結果は図8に示す。図7のフィッティングもよく実験結果を再現できていることがわかる。温度に変換した結果もTa-181の場合と同様、よく実際の温度と一致している。

この場合の解析温度は6K以内の精度で得られた。ただし、フィッティングに関する誤差が若干Ta-181より大きくなっている。

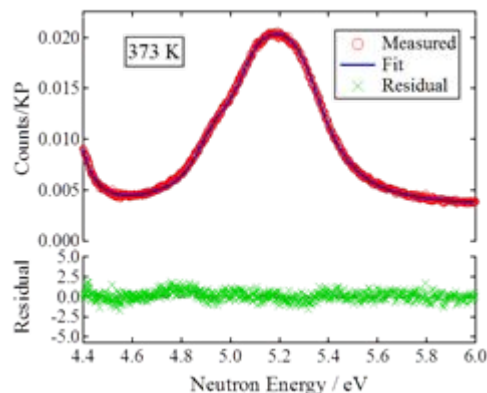


図7. 373 KにおけるAg-109の5.19 eV共鳴吸収に対するフィッティング

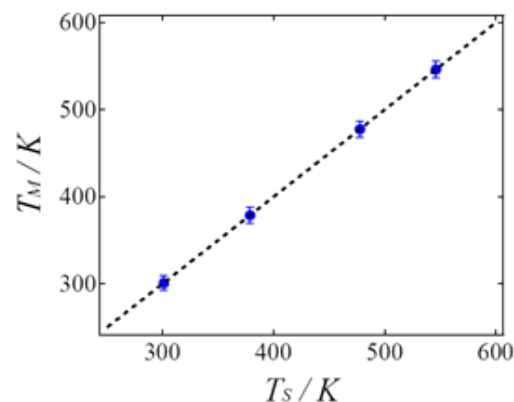


図8. Ag-109の共鳴吸収解析で得られた温度 T_M と実際の試料温度 T_S との関係

最後に、Sm-147の3.396eV共鳴吸収についての解析結果を示す。この場合も前述2核種と同様の手順で解析を行った。Smのデバイ温度は180 Kである。フィッティングの例を図9に、温度に変換した結果を図10に示す。Sm-147の3.396 eV共鳴吸収は、Ta-181の4.28 eVやAg-109の5.19 eVの共鳴吸収に比べて断面積が著しく小さく、測定データも他の2種に比べて統計的に悪いものとなっている。しかしながら、図9に見られる通り、フィッティング結果は良く測定値を表しており、ここから得られる温度情報も図10にあるように、フィッティング時の誤差は大きくなっているものの、他と遜色ない精度で得られている。この場合の解析温度は4 K内の精度で実際の温度と一致していた。

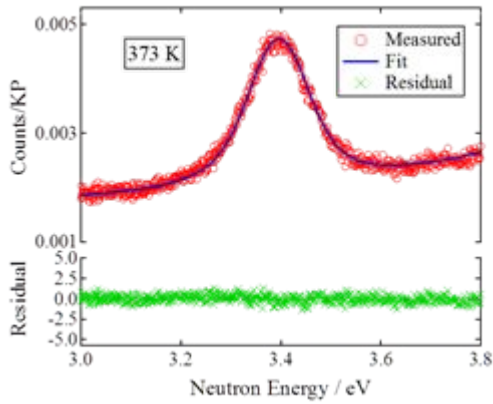


図 9. 373 K における Sm-147 の 3.396 eV 共鳴吸収に対するフィッティング

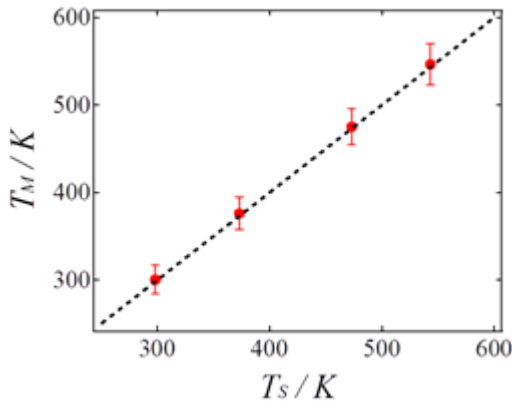


図 10. Sm-147 の共鳴吸収解析で得られた温度 T_M と実際の試料温度 T_S との関係

以上の様に、3 種類の共鳴吸収核種が同時に存在する試料から得られた共鳴吸収スペクトルを核種毎に解析することにより、試料の温度をかなり精確に決定することができた。したがって、適当な核種を温度センサーとして被測定物に組み込み、必要な位置の温度を得るというマルチポイント同時温度測定法の原理が実証できたものと考えられる。今回の結果は、共鳴吸収ピークが重なる場合や共鳴吸収断面積が小さい核種の場合でも得られており、様々な核種の組み合わせを比較的自由に選択できることが期待できる。

(2) 検出器不均等配置法

円筒状試料内部の位置 (x, y) を変えた場合の、検出器方位に対する即発線試料内通過距離の変化を計算した。図 11 には例として幾つかの試料位置に対する計算値を示す。 (x, y) は、ビーム軸に直交する方向を x 、ビーム軸に沿う方向が y である。試料サイズは直径 2cm、検出面は試料中心から 5 cm に位置する。それぞれの曲線は、試料のビーム軸上の位置を変えた場合に対応する。この結果を見ると、試料内通過距離は試料と検出器間の位置の関係によって変化しており、試料を回転させて統計良くスペクトル強度が得られる場合には、この距離と巨視的断面積の積に係して、ピーク強度が変化することになる。

そこで、この試料方向周期を持つ強度変化を考慮することにより信号成分をノイズから分離することは可能性がある。一方で周期成分は試料中心に核種があるほど小さくなるので、適用範囲が極めて限られると考えられる。分光器の設計時に検出器の初期配置を決めるだけなので、比較的容易に実現可能な方法であるが、線に対する試料の吸収能が高いなど、限定された状況で利用可能である。試料内の通過距離が大きいほど分離しやすいので、検出器を 3 次元配置する場合に上下方向の試料位置情報が得られる可能性もある。

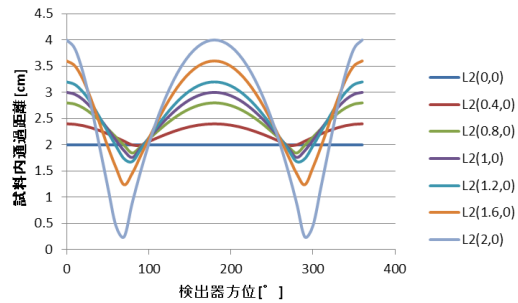


図 11. 検出器方位の変化による試料内線通過距離の変化

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)

[学会発表](計 2 件)

1. 田中聖一郎, 長谷美宏幸, 大沼正人, 加美山隆, 「即発線型中性子共鳴吸収分光法による複数核種を用いた同時温度測定」、平成 26 年度日本鉄鋼協会・日本金属学会両北海道支部合同冬季講演大会開催、2015 年 1 月 29 日、室蘭工業大学(室蘭市)

2. 田中聖一郎, 長谷美宏幸, 原かおる, 大沼正人, 加美山隆, 「即発線型中性子共鳴吸収分光法による複数核種を利用した温度測定」、日本中性子科学会第 14 回年会 (JSNS2014)、2014 年 12 月 11 日、北海道立道民活動センター「かでの 2・7」(札幌市)

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