

中性子共鳴吸収分光を用いた物体内部の非破壊温度測定

NON-DESTRUCTIVE THERMOMETRY USING NEUTRON RESONANCE ABSORPTION SPECTROSCOPY

○加美山隆（北大院）
○ Takashi KAMIYAMA

Division of Quantum Science and Engineering, Graduate School of Engineering,
Hokkaido University, Sapporo 060-8628, Japan

Corresponding author: Takashi KAMIYAMA, E-mail: takashik@qe.eng.hokudai.ac.jp

Neutron resonance absorption spectroscopy (N-RAS) enables us to investigate the motions of a particular nuclide by analyzing the line width of resonance absorption spectrum. The effective temperatures extracted from the observed absorption spectrum have an asymptotic trend to coincide with the actual local temperature of the target nuclide with increasing temperature. It can associate with the computer tomography technique as non-destructive thermometry for a bulk object. This new method gives us the information of the 2-dimensional distribution as a tomogram. The experimental result using a pulsed neutron source shows well agreement with the actual temperature distribution inside the object, and the simulation of the experiment could reproduce the result correctly. The development of this new approach links to the new industrial application of neutron utilization as the remote-sensing and non-destructive thermometry.

1. 緒言

中性子共鳴吸収分光法（N-RAS：Neutron Resonance Absorption Spectroscopy）は、原子核が中性子を捕獲した際に放出する即発γ線を利用して物質中原子の熱振動の激しさを測定する手法である[1, 2]。以前よりこの即発γ線自体を計数・エネルギー分析することで、γ線放出核種の同定や定量を行う分析化学の研究が行われてきた。この場合には放出されたγ線の分析を行うので、中性子源には定常的な原子炉線源が使われる。これに対しN-RASでは、加速器を利用したパルス中性子源を用いて、中性子飛行時間法により吸収された中性子のエネルギースペクトルを得る。これにより物質中の原子核がどのエネルギーの中性子を共鳴的に強く吸収するかがわかり、その共鳴吸収エネルギー値より核種、即ち同位体の種類までが同定できる。また、共鳴吸収の断面積は一般的な散乱断面積に比べて一桁以上大きい場合が多いため、従来の中性子散乱を利用した分光器よりも短い時間で統計のよい測定が可能となる。

この N-RAS 分光器から得られる情報の最も大きな特徴

は、共鳴吸収ピークの半値幅の解析で物質中の特定元素の熱振動に関する情報を得ることができるという点にある。これは、共鳴吸収ピークのエネルギーが核種固有のものであり、そのピークの半値幅は原子の熱振動の激しさによって変化するという性質を利用する。つまり、N-RAS は物質中で或る核種がおかれた位置の実効的な温度を測定することができる。この実効温度は、十分に高い温度(概ね室温以上)で、物質の温度に漸近していく。これを利用すれば、N-RAS により高透過力を持つ中性子をプローブとした非破壊・非接触の温度測定が可能となる。

さらに、この N-RAS は散乱測定ではなく基本的に透過スペクトルの測定であるために、中性子スリット移動や対象物体の回転と組み合わせることで、物体に関する実空間位置座標で分解した一連の部分スペクトルを得ることができる。この分解されたスペクトルをコンピュータ

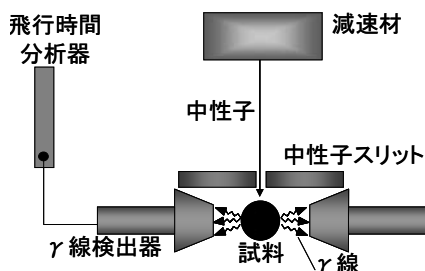


図 1. DOG の模式図

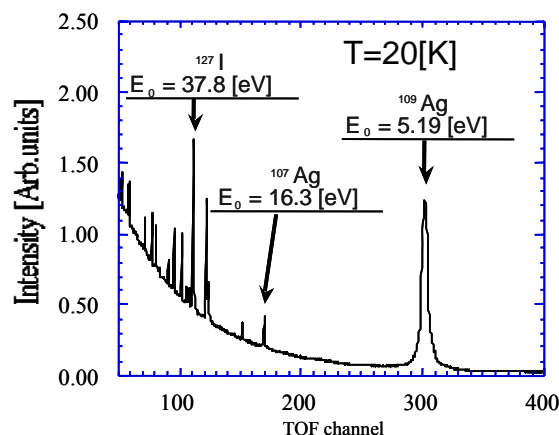


図 2. 共鳴吸収スペクトルの例(AgI)

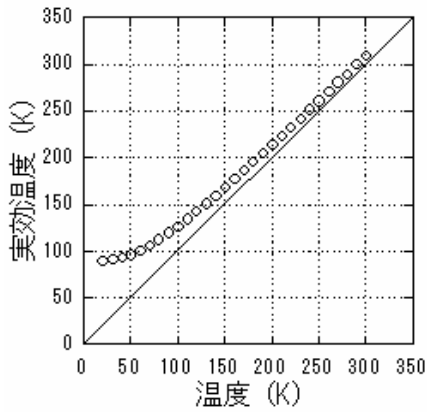


図3. 試料温度と実効温度の関係の例(^{181}Ta)

断層撮像(CT: Computer Tomography)の手法で再構成することにより、温度として示される物体断層内部の核種ダイナミクス情報を非破壊・非接触で評価することが可能となる[3, 4]。この場合、共鳴吸収核種1個1個が温度センサーであるといえる。また、共鳴吸収ピークは測定領域に含まれている核種の絶対量に比例する強度を持っているため、共鳴核種の存在量やその断層分布を求めることができる。つまり、この手法は核種分布と温度分布を同時に測定可能な新しい分析法といえる。

2. 中性子共鳴吸収分光器

N-RASでは、加速器を用いたパルス中性子線源を使って入射中性子のエネルギーを決定する飛行時間法を利用する。図1に、高エネルギー加速器研究機構のパルス中性子源KENSに設置されていた共鳴吸収分光器DOGの模式図を示す。パルス中性子源から中性子ビームはスリットを通して試料に入射するが、ビームと90度方向に γ 線検出器が配置されており、共鳴吸収により出る即発 γ 線はこれにより検出される。DOGの中性子飛行距離は9.53mで、飛行時間測定の最小時間幅は31.25ns、200eVを超える共鳴吸収ピークも検出可能であった。図2に測定されたスペクトルの一例を示す。共鳴吸収ピークは存在核種に対応した鋭いピークとして観測されているが、 γ 線のカウント数で記録されるため、正方向のピークとなる。核種の実効温度は、この共鳴吸収ピークをドップラー効果が含まれるブライト=ウィグナーの式で解析して得られる。図3に、Ta原子の実効温度と試料温度(平均温度)の関係を示す。実効温度は温度が高くなるにつれ試料温度に漸近していくことが判る。このことから、対象物体の温度が十分に高ければ実効温度のまま物体の温度として近似できることになる。

3. 中性子共鳴吸収断層撮像 N-RAS/CT

先に述べたように、中性子共鳴吸収スペクトルの測定では物体に関する実空間位置座標で分解した一連の部分スペクトルを得ることが可能である。そこで、それぞれの部分スペクトルについて、ブライト=ウィグナーの式で解析し、部分スペクトル内の平均値として実効温度を求め、

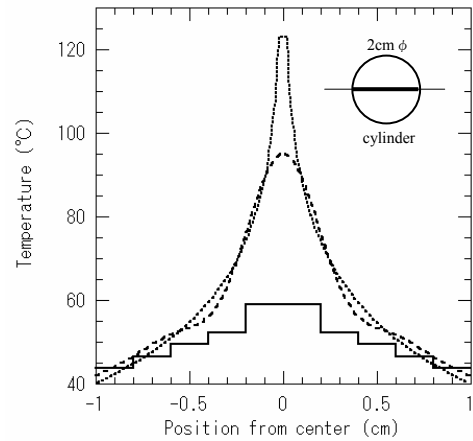


図4. N-RAS/CT測定によるTaを均一に含む円柱状試料の断層直径方向の温度分布。実線は4,28eVの共鳴ピークのフィッティングによる実効温度。破線はその再構成結果。点線は実際の温度分布。

この値についてCTの手法で再構成することにより、物体断層内部の温度分布を評価することが可能である。これをN-RAS/CTと呼ぶ。図4に、共鳴核種であるTaを均一に含む円柱物体の解析例を示す。実際の円柱内部では、中心から外周に向けて約80°C下がる温度勾配が存在する。円柱の直径は20mm、測定では2mmのスリットを使用し、円柱対称のため試料の回転は省略して30°毎12角度のデータとして補外してフーリエ法により再構成した。再構成された結果は、実際の試料内部の温度変化について中心部を除いてよく再現している。試料中心部の差は、スリットサイズで制限される空間分解能による。一方、不均一にTaを含む物体に対する測定では、Taを含まない領域の温度を例えば0と設定することで、Taを含む領域の温度のみが再構成され、それとともに、Taの分布についても情報が得られることになる。

4. 結言

加速器パルス中性子源で実施される中性子共鳴吸収分光法N-RASは、単独あるいはCT法を組み合わせることで、測定対象物体内の核種や温度を非破壊・非接触に分析する手法である。中性子利用の課題としては特に線源の問題が挙げられるが、よりアクセスのし易い小型加速器の利用を念頭にN-RASによる分析法の開発を進めているところである。

REFERENCES

- [1] K. Kaneko, T. Kamiyama, Y. Kiyonagi, T. Sakuma, S. Ikeda; J. Phys. Chem. Solids, 60(1999), 1499-1502.
- [2] K. Tokuda, T. Kamiyama, Y. Kiyonagi, R. Moreh, S. Ikeda; Jpn. J. Appl. Phys., 40 Part 1 (2001), 1-4.
- [3] T. Kamiyama, H. Noda, J. Ito, H. Iwasa, Y. Kiyonagi, S. Ikeda; J. Neutron Research, 13 (2005), 97-101.
- [4] T. Kamiyama, J. Ito, H. Noda, H. Iwasa, Y. Kiyonagi, S. Ikeda; Nucl. Instrum. and Methods A, 542 (2005), 258-263.