

放射線で温度を測る

加美山 隆

Kamiyama Takashi

1. はじめに

我々は温度という量を日常的に体感する。気温や体温あるいは湯加減等で感覚的にも把握できるし、温度計を使えば簡便に定量化可能な物理量である。科学的には、温度の高低は熱エネルギーの伝達される方向で決められる。この熱伝導の過程では、より高い温度を持つ物質中の原子・分子の熱運動のエネルギーが、低い温度にある原子・分子に分配されていき、最終的に両者の平均エネルギーが一致したところで熱平衡状態に達する。つまり大まかには、原子・分子の熱運動エネルギーの指標が温度といえる。温度が高ければ原子や分子は活発に運動しており、その平均的な運動エネルギーが大きい。ここから、原子・分子の熱運動を測定することが、直接的な温度測定と結びつく。

しかし、身近な温度測定法は大部分間接的である。室内にある液柱温度計では、温度指示用の赤いアルコールが空気分子とガラスの壁を介して接触しており、それらの間の熱エネルギーの遣り取りで全体が熱平衡に達した時のアルコールの体積変化を可視化・換算し温度として読み取る。非常に簡単かつ巧妙なからくりではあるが、温度計の接触による擾乱も発生するし、何より空気を構成する原子・分子の熱運動を直接計測しているわけではない。これに対し、非接触型の放射温度計は、物体が放射する熱放射を赤外線センサーで受光し、センサーの温度変化を熱電対で計測する。この方式はより直接的に対象物の熱エネルギーを測定しているが、物体表面から放出される放射の測定では物体内部の温度に関する情報は残念ながら得られない。このように、一見簡単に思える温度測定でも、突き詰めると課題が残る。それでは直接的に物体内部の温度情報を収集できる

手段はあるのだろうか。

ここで考えられるのが、放射線、特に侵入能力が高い中性子の利用である。うまい具合に、中性子は物質との相互作用が他の放射線に比べて弱く、中性子ビームを測定対象物に照射しても対象物の温度は上がらない。これらの利点から、中性子を物体内部の温度測定に利用する手法が考えられた。それが、中性子共鳴吸収分光法による温度測定法である。

2. 中性子共鳴吸収分光法

レントゲン写真を撮るように中性子ビームを物体に照射して、透過してきた中性子の強度をエネルギー毎に記録する、つまり中性子透過スペクトルをとると、物質の中性子断面積に応じて透過強度の増減が起こる。比較的高い中性子エネルギー領域 (>500 meV) の断面積には核種により異なる複数の鋭いピークが現れるが、これは中性子の共鳴吸収と呼ばれる (図1)。これは中性子が原子核に吸収されたときにできる複合核のエネルギー準位に対応しており、適当なエネルギーの中性子が試料に入射するとそれが共鳴的に吸収されるために生ずる。同時

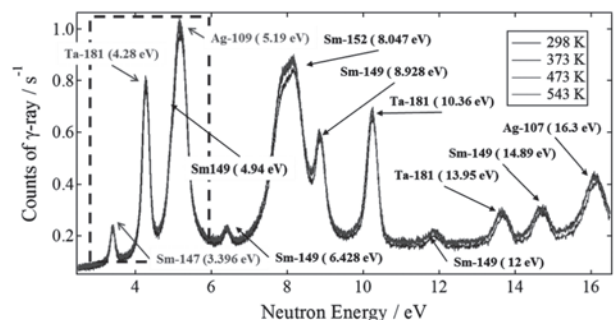


図1 Ag, Sm, Ta を含む薄板試料の中性子共鳴吸収スペクトル
図中点線内は温度解析に用いた領域を示す

に、この複合核は短時間のうちに余剰のエネルギーを即発 γ 線として放出する。実際のスペクトル測定では、即発 γ 線を記録する方法と中性子透過スペクトルを記録する方法の2種類がある。

共鳴吸収の線幅には核種の局所運動によるドップラー効果が影響するため、原子の熱運動が激しく、中性子吸収の際に中性子との速度差によるドップラー効果が大きい場合ほど中性子共鳴吸収の線幅が広がる。逆に熱運動が小さければ線幅が狭まることから、この線幅を温度と関連付けられれば、中性子共鳴吸収測定を原子の熱運動を直接測定する温度計として利用可能となる。当然ながら、中性子は物体内部の原子とも相互作用しているので、測定値は物体内部の情報も含んでいる。

共鳴吸収線幅と核種温度の関係は、ドップラー効果を考慮した Breit-Wigner の共鳴吸収断面積の式¹⁾から次式で近似される。

$$\bar{\sigma}(E) \approx \frac{1}{\Delta\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} dE' \exp\left[-\left(\frac{E'-E}{\Delta/2}\right)^2\right] \sqrt{\frac{E'}{E}} \sigma(E') \quad (1)$$

Δ はドップラー拡がりと呼ばれるパラメータで、

$$\Delta = \sqrt{\frac{4Ek_B T}{M/m}} \quad (2)$$

と表される。ここで、 E は中性子のエネルギー、 k_B はボルツマン定数、 T は温度、 M は標的核の質量、 m は中性子の質量である。中性子共鳴吸収による温度測定では、(1) 式の断面積を用いて、測定された中性子共鳴吸収スペクトルに測定分解能を畳み込みながら温度 T をパラメータフィッティングしていくという方法を採用する。

3. 中性子共鳴吸収分光法による温度測定

先に示した図1は、共鳴吸収が起きる複数の核種を含んだ薄板状試料について即発 γ 線法を適用した共鳴吸収スペクトルである。この測定から、図中点線領域に含まれる ^{109}Ag , ^{147}Sm , ^{181}Ta の共鳴吸収を温度解析した結果を図2に示す。横軸を試料の保持温度、縦軸を解析で得た温度にとると、傾き1の直線が温度の期待値となるが、図から中性子共鳴吸収による測定が良く試料温度を再現することが分かる。

それでは物体内部の温度はどのようにして得たらよいだろうか。これにはCTによる断層撮像の応用

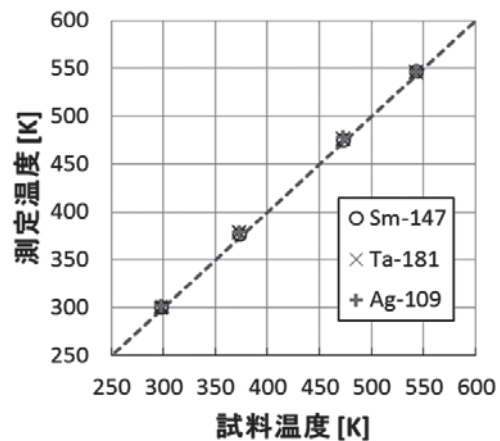


図2 中性子共鳴吸収線幅から求めた Ag, Sm, Ta の温度解析結果

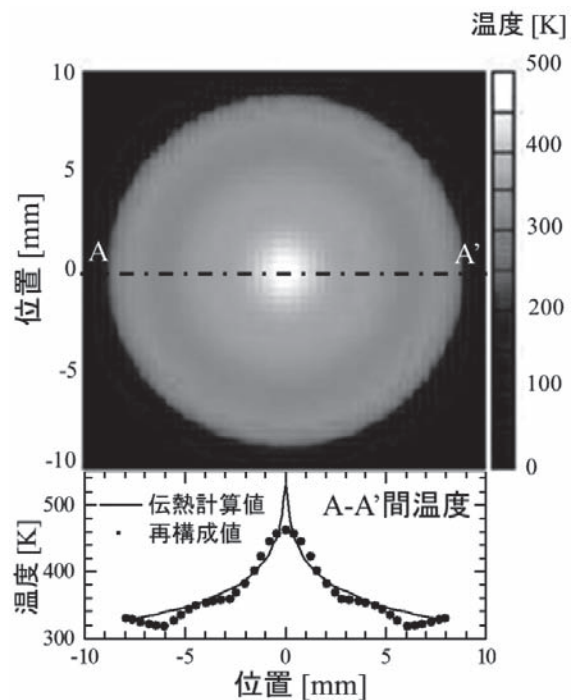


図3 中心部に熱源のある円筒状試料断面内の温度分布

が考えられる²⁾。図3は、中心部のヒーターにより加熱された円筒状試料内の温度分布を、 ^{181}Ta の共鳴吸収の解析から CT 断層再構成した結果である。中性子スリットの移動を併用して位置情報を付加した測定の解析から、温度分布の数学的な再構成が可能となる。図3では、高い空間分解能が必要な中心部を除いて、ある程度温度分布が再現されており、物体内部の温度の影響を持つ中性子測定の特長が明らかである。

4. おわりに

中性子による温度測定は、原子の熱運動を直接観測しているという大きな特徴を持つ。更に、中性子が通過した領域の温度情報を含むことから、物体内部の温度測定に利用することも可能である。応用への展開が期待されるところだが、測定施設の特殊性や解析の難しさ等、まだ実用化には大きな努力が必要である。読者諸兄には温度測定の基本に立ち返っ

て興味をお持ちいただければ幸いである。

参考文献

- 1) F. H. Fröhner, *JEFF Report 18*, NEA/OECD (2000)
- 2) 加美山隆, 非破壊検査, 第57巻6号, 273-277 (2008)

(北海道大学 大学院工学研究院 応用量子科学部門
物質量子工学分野)