

アイソトープ総合部

【専任教員の研究紹介】

素粒子であるミュオンを利用した非破壊元素分析研究 二宮 和彦

現在、日本国内では多くの加速器施設が稼働しており、放射光、中性子を利用した量子ビーム研究が進められている。それらとくらべると知名度は低いですが、近年ミュオン（ミュオン、ミュオン粒子ともいう）を利用した量子ビーム研究も進められている。

ミュオンは素粒子の一つであり、加速器施設で 10^6 /s 程度の強度をもつビームを作ることができる。電子と同じ負電荷をもっており、その質量は電子のおよそ 200 倍で、2.2 マイクロ秒で電子とニュートリノに崩壊する。その特異な性質から物質研究や素粒子研究で利用されている。今回は、筆者が中心となって開発を進めてきた非破壊元素分析研究について紹介する。

ミュオンを物質中に照射すると、 α 線と同じように入射エネルギーに応じた特定の深さで停止させることができる。そして停止位置に存在する原子に捕獲され、その負電荷ゆえに原子核と束縛してミュオン原子軌道を作る。その結果、図1に模式的に示すようなミュオン原子を形成する。ミュオンは電子の200倍の質量を持つために、ミュオン原子軌道は電子のつくる原子軌道に比べてはるかに束縛エネルギーが大きく、停止したミュオンはすべてミュオン原子を作る。さらにミュオン原子を形成したのちに、高エネルギーの「ミュオン特性 X 線」を放出する。ミュオン特性 X 線は原子に固有のエネルギーを持っているために、そのエネルギー測定から元素の特定が可能である。ミュオン特性 X 線は高エネルギーゆえに透過能が高く、ミュオンを物質の特定の深さに停止させることが可能であるという特性から、非破壊で三次元的に、軽元素であっても物質内部の元素分析が可能となる。

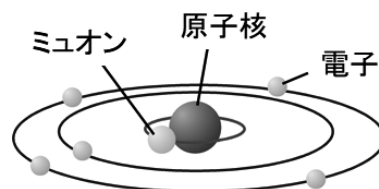


図1：ミュオン原子の模式図

筆者はこの分析法の開発に寄与してきたが[1]、本稿ではより応用的な事例研究について紹介する。この分析法は貴重な試料、具体的には文化財の分析に最適である。文化財、特に地中から得られた埋蔵文化財は、表面が劣化している。例えば、青銅（銅を主成分として、スズや鉛を含む合金）は出土したときには酸化により緑色をしていることが多いが、製造時は金色から黄色の色彩を持ち、金属光沢がある。製造時の成分を調べることは、技術の伝搬や材料の流通等を調べる上で重要であるが、表面の酸化層の影響がなく、内部の金属層のみを非破壊で分析することは難しい。筆者らは古墳時代の銅鐸にミュオン元素分析法を適用し、その内部分析に成功した[2]。図2にミュオンの入射エネルギー（分析深さ）ごとのミュオン特性 X 線のスペクトルを示す。ミュオンの入射エネルギーを高くすることで、酸素のピークが消失しており、これはミュオンが表面の酸化層を完全に突き抜けて、内部に残っている金属層のみを分析できていることを示している。さらに重要なことは、酸化層と金属層で X 線強度比（分析対象の元素組成比に対応）が異なることである。これは表面分析では製造時の正しい組成を得られないことを意味している。

ミュオン元素分析法はミュオンの発生装置、すなわち加速器施設の利用が必要で、蛍光 X 線分析のようにハンディな装置で分析できるものではないが、本稿で紹介したように分析対象によっては極めて有効な手法となる。

[1]K. Ninomiya, J. Nucl. Radiochem. Sci., **19**, 8-13 (2019).

[2]齋藤努 他, 文化財科学, **88**, 43-46 (2024).

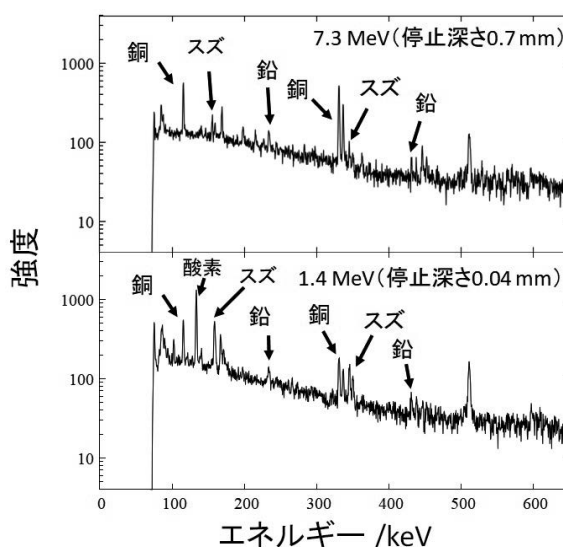


図2：銅鐸に対し異なるミュオンの入射エネルギー（ミュオンの停止深さ）で得られたミュオン特性 X 線スペクトル。