核データ部会セッション「ミューオンの物質内輸送とその学際的応用」

（2）負ミューオンを用いた非破壊元素分析

(2) Nondestructive elemental analysis with negative muons

二宮　和彦[1]

[1]大阪大学大学院理学研究科

1. 負ミューオンを用いた非破壊元素分析の原理

負ミューオン（ミュオンともいう）は、電子と同じ電荷を持ち、電子の 200 倍の質量を持つ素粒子である。負ミューオンが物質中に停止すると、負ミューオンは電子と同じように原子核の周りに軌道を作り、ミューオン原子と呼ばれる原子系を形成する。負ミューオンは電子の200倍の質量を持っていることから、ミューオン原子は電子の特性 X 線の 200 倍のエネルギーを持ったミューオン特性 X 線を放出する。

本講演では、ミューオン特性 X 線を用いた新しいタイプの元素分析法について紹介する。よく知られている蛍光 X 線分析では、X 線のエネルギーが低いために試料の深部の分析が難しく、また軽元素に対する定量性が低いという制限がある。それに対しミューオン特性 X 線は、軽元素由来であっても高エネルギーの X 線であり、ミリメートルを超える物質の深部から放出されたものも検出可能である。さらに負ミューオンは大型の加速器施設で生成する必要があるが、負ミューオンの利用施設では一般的に電磁石によりエネルギーの選別を行っており、負ミューオンの物質への入射エネルギーを選択することで、負ミューオンの停止深さを制御することができる。これらの特性により、ミューオン特性 X 線による元素分析では、非破壊で位置選択的な、さらに軽元素を含めた定量的な分析が可能である。

2. 負ミューオンを用いた元素分析の例：考古学試料の分析

ミューオン特性 X 線に素分析のデモンストレーションとして、我々は江戸時代に製造された天保小判に対する分析を行った[1]。江戸時代の小判は、表面近傍に質量パーセントで 90%を超えるような金の含有量の多い層が存在し、それにより見事な金光沢を作っているが、実際に内部の金の含有量は天保小判では 57%程度であり、残りは銀でできた合金である。

我々は茨城県東海村の J-PARC 内にある、ミューオン実験施設（MLF/MUSE）において負ミューオン照射実験を行った。負ミューオンの入射エネルギーを変化させながら、ミューオン特性 X 線の強度をゲルマニウム半導体検出器により測定し、金と銀の標準合金をから得た検量線をもとに、図 1 に示すように天保小判の 2~300 μm の深さ範囲での金の含有率を非破壊で決定した。この結果は他の破壊分析により決定した金の含有率とも一致した。

講演では本手法の原理や実験の詳細について、また考古学試料以外への応用例についても紹介する。

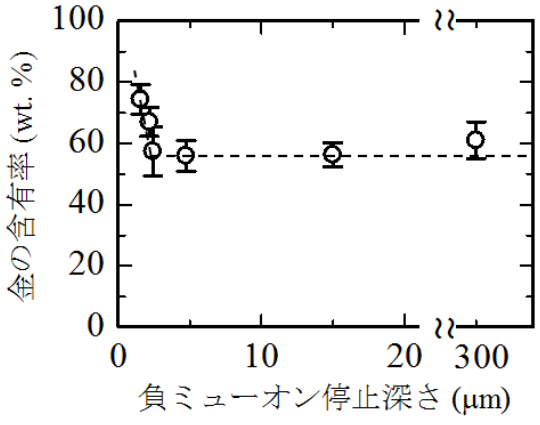

図 1：ミューオン特性 X 線測定により決定した天保小判の金の含有量の深さ依存

[1] K. Ninomiya *et.al., Anal. Chem.*, **87** (2015) 4597

Kazuhiko Ninomiya[1]

[1] Graduate School of Sci. Osaka Univ.