

連載 (講義)

## イオンビーム分析概論 ( I ) (HEIS, MEIS, LEIS)

笹川 薫

(株)コベルコ科研 神戸市西区高塚台1-5-5

(2005年11月26日 受理)

イオンビーム分析概論( I )として、イオン散乱全般の入門的な内容を紹介する。イオン散乱分析を理解するために必要な5つの基本的な概念、弾性散乱因子、散乱断面積、阻止能、エネルギーストラグリング、およびチャネリング、について説明したのち、高エネルギーイオン散乱(HEIS)、中エネルギーイオン散乱(MEIS)、および低エネルギーイオン散乱(LEIS)についてそれぞれの特徴的な内容を紹介する。

## Introduction of Ion Beam Analysis ( I ) (HEIS, MEIS, LEIS)

Kaoru SASAKAWA

*Kobelco Research Institute, Inc., 1-5-5, Nishi-ku, Takatsukadai, Kobe*

(Received: November 26, 2005)

As an introduction of the ion beam analysis, I will introduce the elementary aspects of ion scattering analysis method of HEIS, MEIS and LEIS. I will explain these five important concepts, kinematic factor, scattering cross section, stopping power, energy straggling, and channeling, and also explain the characteristic aspects of each ion scattering analysis method.

### 1. はじめに

イオンビーム発生装置は、一般に、装置が大型である、放射線管理が必要である、基礎物理実験用である、などの理由により、主に大学や国の研究所で稼動しており、研究レベルでの利用は少なくないが、イオンビーム分析という観点からすると、日常的に分析にたずさわっている人の数は、電子分光や電子顕微鏡などの他の物理分析と比較すると非常に少ないと思われる。

しかしながら、イオンビームを用いた分析である、ラザフォード後方散乱分析(RBS : Rutherford Backscattering Spectrometry)や反跳粒子検出法(ERDA : Elastic Recoil Detection Analysis)や核反応分析(NRA : Nuclear Reaction Analysis)などは、工業材

料の分析にかなり使われている。また、工業製品の性能や品質の向上によって、分析への要求レベルが高くなってきており、従来は研究用と考えられていた中エネルギーイオン散乱(MEIS : Middle Energy Ion Scattering)や低エネルギーイオン散乱(LEIS : Low Energy Ion Scattering)も、実用材料の分析に活用されるようになってきている。

近年の薄膜テクノロジーの進展によって、原子レベルの深さ分解能で元素分布を調べることが要求されるようになってきており、汎用的な表面分析においては、低加速SIMS(Secondary Ion Mass Spectrometry)、角度分解XPS(X-ray Photoelectron Spectroscopy : X線光電子分光)、低加速イオンスパッタ、クラスターイオンスパッタ、などが注目される

ようになってきている。イオンビームを用いた分析では、中エネルギーイオン散乱(MEIS)や、高分解能反跳粒子検出法などが、原子レベルの深さ方向分析技術として注目されてきており、さらには、極浅領域における単結晶のダメージやひずみの評価にも応用されるようになってきている。

本稿では、イオンビームを用いた分析の入門編として、最初に各種分析法を簡単に紹介し、次にイオン散乱分析の物理的な基礎を説明したあと、高エネルギーイオン散乱(HEIS: High Energy Ion Scattering)、中エネルギーイオン散乱(MEIS)、低エネルギーイオン散乱(LEIS)の順に、主として実用分析の観点から詳細に説明する。

## 2. イオンビームを用いた各種分析法

### 2.1 用語

AES(Auger Electron Spectroscopy: オージェ電子分光)、XPS、SIMSに限らず、分析手法を略語で呼ぶことが多く、同一の分析手法に複数の略称が存在するために、初学者を悩ませることがある。XPSとESCA(Electron Spectroscopy for Chemical Analysis: 化学分析のための電子分光)は今でも良く使われるが、SIMSに対するIMA(Ion Micro Analysis: イオンマイクロアナリシス)やAESに対するSAM(Scanning Auger Microprobe: 走査型オージェマイクロプローブ)などはもう殆ど使われなくなってきているが、過去の専門書や文献ではIMAやSAMの略称のほうがよく使われていることもある。ちなみに、国立情報学研究所のオンライン学術用語集では、AES、XPS、およびSIMSのほか、ESCAが登録されているが、IMAとSAMは検索しても該当するものがなかった。

イオンビームを用いた分析も同一分析手法が異なる呼称をもつ場合がある。イオン散乱は、使われるエネルギー領域を高、中、低の3つに分けてそれぞれ高エネルギーイオン散乱(HEIS)、中エネルギーイオン散乱(MEIS)、低エネルギーイオン散乱(LEIS)と呼称されるようになってきている。そのため、HEISとRBS、MEISとHRBS(High-resolution Rutherford Backscattering Spectrometry: 高分解能RBS)、LEISとISS(Ion Scattering Spectroscopy: イオン散乱分光)、ICISS(Impact Collision Ion Scattering Spectrometry: 直衝突イオン散乱分光)、TOF-ICISS(Time of Flight Impact Collision Ion Scattering Spectrometry: 飛行時間型直衝突イオン散乱分光)、およびCAICISS(Co-Axial Impact Collision Ion Scattering Spectrometry: 同軸直衝突イオ

ン散乱分光)などが重なってくる。HEIS、MEIS、およびLEISはそれぞれのエネルギー領域(HEISはMeV、MEISは数10~数100 keV、LEISは数100 eV~数keV)のイオン散乱法の総称といった意味合いを持たせたものと推測される。

反跳粒子検出法(ERDA)は、一般には重いイオンを照射してそれより軽い原子を検出する手法、すなわちたたき出された原子(反跳原子)を分析する方法であるが、照射イオンのエネルギーによる分類は存在しない。高エネルギーでも、中エネルギーでも、低エネルギーでも反跳粒子分析は可能である。ただし、直衝突イオン散乱法では反跳粒子は検出できない。HEIS、MEIS、LEISがそれぞれERDAを含むものかどうか、現時点では著者は知らないが、いずれ明らかにしていきたい。

反跳粒子検出法(ERDA)は、水素分析に用いられることが多い。そのため、この場合をとくに水素前方散乱(HFS: Hydrogen Forward Scattering)と称して区別されることがある。HFSは、ERDAの一部である。

国立情報学研究所のオンライン学術用語集で検索したところ、RBSとPIXE(Particle Induced X-ray Emission: 粒子励起X線分析)(PIXESとなっていた)とISSが登録されていることがわかった。略語は記載されていないが、直衝突イオン散乱分光法(ICISS: impact collision ion scattering spectroscopy)も登録されていることがわかった。しかしながら、中エネルギーイオン散乱(MEIS)や反跳粒子分析(ERDA)や核反応分析(NRA)および加速器質量分析(AMS)などは検索しても該当するものがなかった。

### 2.2 各種分析法

イオンビームを用いた分析手法の用語とその概略をあらためて以下に簡単に紹介する。

#### HEIS (High Energy Ion Scattering) 高エネルギーイオン散乱

基本的にラザフォード後方散乱分析と同じ。

#### RBS (Rutherford backscattering spectrometry) ラザフォード後方散乱分析

RBSは、MeV領域のHまたはHeイオンビームを固体表面に照射し、散乱されたイオンのエネルギースペクトルを測定することにより試料を分析する方法である。標準試料無しで正確に定量することができ、非破壊で深さ方向の濃度分布がわか

る。感度は原子番号の2乗に比例して高くなり、重元素では100 ppm レベルまで検出できる。単結晶試料では、結晶軸に平行にイオンビームを照射することにより、結晶性、欠陥の深さ方向分布、置換サイトなどに関する情報が得られる。

#### ERD(A) (Elastic Recoil Detection (Analysis))反跳粒子検出法

ERDA は、イオンビームを固体表面に照射し、反跳によって放出された原子のエネルギースペクトルを測定することにより試料を分析する方法である。RBS では感度が低い軽元素に対して高い感度に検出できることが特徴である。He イオンビームを照射し、反跳水素を検出することによって、固体中の水素の深さ方向分析に用いられることが多い。原理的には数10 MeV の高エネルギーから数100 eV の低エネルギーまで全てのエネルギー領域で用いることができる。

#### MEIS (Middle Energy Ion Scattering)中エネルギーイオン散乱

MEIS は、数10 keV から数100 keV のHまたはHe イオンビームを固体表面に照射し、散乱されたイオンのエネルギースペクトルと角度スペクトルを測定することにより試料を分析する方法である。エネルギースペクトルから試料の組成の深さ方向分布がわかり、角度スペクトルから表面近傍の構造解析や原子位置がわかる。表面近傍では原子層レベルの深さ分解能がある。

#### HR-RBS (HRBS) (High-resolution RBS) 高分解能RBS

HR-RBS は、数100 keV のHe イオンビームを固体表面に照射し、散乱されたイオンのエネルギースペクトルを測定することにより試料を分析する方法である。RBS で通常用いられる半導体検出器を磁場型検出システムに置き換えることによって原子層レベルの深さ分解能でRBS 分析ができる。

MEIS がトロイダル型アナライザ(静電アナライザ)と二次元検出器を用いてエネルギースペクトルと角度スペクトルが同時に得られるように設計されているのに対して、HR-RBS は磁場型アナライザと1次元検出器を用いてエネルギースペクトルを高い分解能と感度で測定できるように設計されている。

#### LEIS (Low Energy Ion Scattering)低エネルギーイオン

#### 散乱

LEISは数100 eVから数keVの希ガスまたはアルカリ元素のイオンビームを固体表面に照射し、散乱されたイオンのエネルギースペクトルと角度スペクトルを測定することにより試料を分析する方法である。シャドーコーンを利用して結晶表面の原子配列を調べるのに用いられる。以下に示すISS, ICISS, CAICISS, TOF-ICISS等の総称である。

#### ISS (ion scattering spectroscopy)イオン散乱分光

ISS は、基本的にMEIS の低エネルギー版で、静電型アナライザが用いられているため、中性粒子は検出されずにイオンだけが検出される。希ガスのイオンビームを照射した場合、固体内部で散乱された入射イオンは殆ど中性化され、イオンとして散乱されるのは最表面に限られるので、表面最外層に敏感な分析手法となっている。反跳粒子分析が可能である。

#### ICISS (Impact Collision Ion Scattering Spectrometry)直衝突イオン散乱分光

ICISS は、ISS が90度付近の散乱角で測定されているのに対し、180度方向に散乱されたイオンを測定する方法である。ISSの90度散乱と比べ、構造解析が容易(直感的に理解しやすい)であるが、180度散乱であるために散乱強度は低くなる。反跳粒子分析はできない。

#### CAICISS (Co-Axial ICISS): 同軸型直衝突イオン散乱分光, TOF-ICISS: 飛行時間型直衝突イオン散乱分光

CAICISSとTOF-ICISSは原理的に同一であるが、開発者により異なる名前がつけられたものである。ICISSはイオンしか検出されないが、CAICISSはすべての粒子が検出されるため、ICISSと比べて定量性が高く、最表面だけでなく表面下数原子層の情報も得られる。ただし、表面最外層に対する感度が相対的に下がるとともに、構造解析の際には多重散乱の効果を検討することが必要になる。

#### PIXE (Particle Induced X-ray Emission Spectroscopy)粒子線励起X線分光

PIXE は、MeV領域のHまたはHeイオンビームを固体表面に照射し、発生した特性X線のエネルギースペクトルを測定することにより試料を分析する方法である。電子線を照射した場合に比べて制動放射によるバックグラウンドが低いいため、軽元素

以外は SEM-EDS よりも高感度で分析することが可能である。RBS との同時測定により RBS の元素識別能の不足を補うことができる。

#### NRA (Nuclear Reaction Analysis)核反応分析法

NRA は、入射イオンビームを固体表面に照射し、核反応によって生じた粒子線や  $\gamma$  線のエネルギースペクトルを測定することにより試料を分析する方法である。共鳴型の核反応の場合には非常に狭いエネルギー範囲で核反応が生じるため、入射イオンのエネルギーを変えながら測定することによって、着目元素の深さ方向濃度分布を調べることができる。最も良く用いられているのは、6.385 MeV 以上のエネルギーの  $^{15}\text{N}$  イオンを照射して 4.43 MeV の  $\gamma$  線を検出する、水素の深さ方向分析である。

#### AMS (Accelerator Mass Spectrometry)加速器質量分析

AMS は、試料中の元素の同位体存在比を測定する方法で、試料の年代測定に用いられる。同位体存在比を調べたい試料からイオンを発生させ、そのイオンを加速器で加速することによって、質量分解能を高め、目的とする同位元素の量を精度良く測定することができる。

### 3. イオン散乱分析の基礎

イオン散乱分析法は、真空中で、イオンビームを固体試料に照射し、固体の表面や内部に存在する原子によって散乱されたイオンもしくは中性粒子のエネルギースペクトルや角度スペクトルを測定することによって表面の組成や原子配列、内部の組成や原子配列、表面から内部にかけての組成や原子配列の変化、などに関する情報を得る方法である。

HEIS, MEIS, および LEIS の個々の説明の前に、これらのイオン散乱分析に共通の物理概念を説明する。ただ説明するだけだと、専門書を読むのとかわらず、わからないところにぶつかるとそのまま放り投げてしまうかもしれない。そうならないための試みの 1 つとして、イオンビームを用いた分析法についてあまり馴染みのない人が疑問に思うであろうことを想定した Q&A を説明の間にはさむことにした。正しい回答になっていないところも多々あると思われるが、説明の補足になり、理解の助けになることを期待している。

イオン散乱分析における次の 5 つの基本概念、(1)

弾性散乱因子：元素同定の基礎、(2)散乱断面積：定量の基礎、(3)阻止能(エネルギー損失)：非破壊深さ分布分析の基礎、(4)エネルギーストラグリング：深さ分解能の基礎、および、(5)チャネリング・ブロッッキング：構造解析の基礎、を順に説明する。

Q：イオン散乱分析ではなぜ、イオンが用いられるのか？

A：エネルギーの揃った粒子を照射する必要から、イオンビームが用いられている。

Q：エネルギーが揃っていれば中性粒子でもかまわないのか？

A：半導体検出器や飛行時間法による計測では、粒子の価数によらず全ての粒子が計測されるので、中性粒子を照射しても問題はない。これに対し、磁場や電場を用いた計測では、中性粒子はエネルギー分析できないため、散乱された粒子の価数が入射粒子の価数に依存する場合には、問題となる可能性がある。例えば、トロイダル型分析器を用いた低エネルギーイオン散乱(ISS)で中性粒子を照射した場合、散乱粒子は中性のまま、分析できない可能性がある。

#### 3.1 弾性散乱因子

イオン散乱分析では、元素の種類は、散乱されたイオンまたは中性粒子の運動エネルギーから判別する。イオン散乱過程の模式図を Fig. 1 に示す。散乱された粒子の運動エネルギー  $E_1$  は、入射粒子の運動エネルギー  $E_0$  と質量  $M_1$ 、標的原子の質量  $M_2$  と散乱角  $\theta$  から計算することができる。

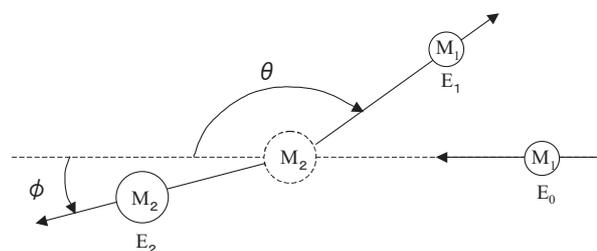


Fig. 1 Schematic diagram of an elastic collision between a projectile of energy  $E_0$  and mass  $M_1$  and a target mass  $M_2$  at rest. The projectile is scattered in the direction of  $\theta$  with energy  $E_1$ , and the target is recoiled in the direction of angle  $\phi$  with energy  $E_2$ .

入射イオンの衝突前のエネルギー  $E_0$  と衝突後のエネルギー  $E_1$  の比を弾性散乱因子  $K$  (Kinematic factor) と呼ぶ。弾性散乱因子は、エネルギーと運動量の保存則から計算され次式であらわされる[1]。

$$K = E_1/E_0 = \left( \frac{(M_2^2 - M_1^2 \sin^2 \theta)^{1/2} + M_1 \cos \theta}{M_2 + M_1} \right)^2 \quad \dots (1)$$

エネルギーの揃った入射イオンビームを入射し、決まった角度のところに設置したエネルギー分析器でエネルギースペクトルを測定することにより、標的原子の質量がわかる。たとえば、2 MeV の  $^4\text{He}$  イオンを照射し、散乱角 170 度のところに設置した分解能 16 keV の分析器に入ってきた粒子のエネルギーが 505 keV であれば標的原子の質量が 12 であることがわかり、730 keV であれば標的原子の質量が 16 であることがわかり、それぞれ炭素、酸素と同定することができる。しかしながら、散乱イオンのエネルギーが高くなると、質量数の変化に対する散乱イオンのエネルギーの変化が小さくなって、隣接原子を識別できなくなる。たとえば、分析器に入ってきた粒子のエネルギーが 1.8 MeV の場合、標的原子の質量は 151 となるが、エネルギー分解能 16 keV に相当する質量の誤差の範囲が  $\pm 7$  くらいになって Nd, Sm, Eu, Gd が特定できない。このように、散乱イオンのエネルギーが高い領域では標的原子の候補が増えて、元素が特定できなくなる。

Q: 後方散乱とは?

A: 入射粒子が散乱される方向(角度)で定義され、散乱角が 90 度より大きい場合をいう。

Q: 後方散乱分析(RBS)で散乱角を 90 度以下にすることはできないのか?

A: MEIS や LEIS では、原子配列を調べる都合上、あるいは、散乱断面積を大きくしたり、深さ分解能を上げたりする目的で、50 度くらいの散乱角で測定されることがある。

Q: 50 度の散乱角だと前方散乱分析と呼ぶのが適切ではないのか?

A: 次に説明する反跳粒子を検出する反跳粒子分析(ERDA)を前方散乱分析と呼ぶことがあるため、後方散乱分析(RBS)で散乱角が 90 度以下になっても前方散乱とは呼ばない。

入射イオンに衝突された原子  $M_2$  は反跳によって

運動エネルギーを得る。入射イオンのエネルギー  $E_0$  と反跳粒子のエネルギー  $E_2$  の比を弾性反跳因子  $K_r$  (添え字の r は recoil の頭文字) と呼ぶ。弾性反跳因子  $K_r$  は次式であらわされる[2]。

$$K_r = E_2/E_0 = \frac{4M_1M_2}{(M_2 + M_1)^2} \cos^2 \phi \quad \dots (2)$$

弾性散乱因子  $K$  と弾性反跳因子  $K_r$  をあらわすこれらの式は、高エネルギーから低エネルギーまですべてのイオン散乱にあてはまる。

Q: 反跳粒子も分析に使われるのか?

A: 反跳粒子を検出する分析法として反跳粒子分析法(ERDA)がある。ERDA は後方散乱分析で感度が悪い軽元素や、後方散乱では分析できない水素の分析に用いられる。

Q: 後方散乱で軽元素の感度が悪い理由は?

A: 次節で説明するが、イオン散乱分析の感度は散乱断面積に比例し、その散乱断面積は入射イオンと散乱原子の原子番号の 2 乗に比例する。したがって、原子番号が小さい軽元素は感度が悪い。

Q: 軽元素に対して、反跳粒子分析(ERDA)が後方散乱分析よりも感度が高い理由は?

A: 反跳粒子分析では、標的原子を効率良く弾き出すため、および、散乱粒子と反跳粒子を識別しやすくするため、照射イオンとして Si や Cl などの比較的重い元素が用いられる。つまり、反跳粒子分析では入射イオンビームに原子番号が大きい原子を用いるので、後方散乱分析よりも散乱断面積が大きい感度が高くなっている。

Q: 反跳は、入射イオンの質量の方が小さくても生じるはずであるが、反跳粒子分析で、入射イオンより軽い元素しか分析されないのはなぜ?

A: 反跳粒子を検出するために前方に設置された分析器の入り口には、反跳粒子より何桁も多い散乱粒子を止めるために、薄膜フィルターが置かれる。入射イオンより軽い反跳粒子だけが通り抜けられる薄膜フィルターを用いることによって、反跳粒子だけを検出することができる。入射イオンによって弾き出された重い原子を分析するためには、軽いイオンを止めて重い粒子を通すフィルターが必要だが、適当なものがない。

### 3.2 散乱断面積

微分散乱断面積(単位立体角あたりの散乱断面積)は、MeV オーダーの He イオンを入射させた場合、照

射イオンの原子核と標的原子の原子核との間のクーロンポテンシャルによる散乱であると仮定して、古典力学によって計算できる。それが次に示すラザフォードの式である。ここでEは入射イオンのエネルギー、 $Z_1$ と $Z_2$ はそれぞれ入射イオンと標的原子の原子番号、 $\theta$ は散乱角である[1]。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left( \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E} \right)^2 \frac{4}{\sin^4 \theta} \frac{\left\{ \left[ 1 - \left( \frac{M_1}{M_2} \right) \sin^2 \theta \right]^{1/2} + \cos \theta \right\}^2}{\left[ 1 - \left( \frac{M_1}{M_2} \right) \sin^2 \theta \right]^{1/2}} \quad \dots (3)$$

この式からわかるように、散乱断面積は、原子番号の2乗に比例する。したがって、例えばホウ素(Z=5)と砒素(Z=33)とでは感度は40倍くらい違う。また、散乱断面積は入射イオンのエネルギーの2乗に反比例するため、入射イオンのエネルギーを2 MeVから500 keVまで下げると散乱断面積は16倍になる。散乱角依存性も大きく、180から90度になると散乱断面積は4倍になる。

Q: 高エネルギーイオン散乱では、入射粒子の原子核と標的原子の原子核はどのくらいまで近づくのか?

A: 原子核間の最近接距離は、入射粒子の運動エネルギーとクーロンポテンシャルエネルギー( $Z_1 Z_2 e^2 / d$ )が等しくなる距離(d)である。2 MeVのHeイオンをシリコンに照射した場合の最近接距離は、 $2 \times 10^{-5}$  nmと計算される。

Q: 高エネルギーイオン散乱で、後方に散乱される粒子は、入射粒子に対してどのくらいの割合か?

A: 衝突径数の値として近似的に最近接距離を用いると、断面積は $(2 \times 10^{-5} \text{ nm})^2 = 4 \times 10^{-10} \text{ nm}^2$ となり、原子の大きさ $1 \times 10^{-2} \text{ nm}^2$ よりも8桁くらい小さい値である。したがって、2 MeVのHeイオンをシリコンに照射した場合には、およそ、10の8乗個に1個の割合で散乱されると考えられる。

Q: 照射イオンのエネルギーが低くなって、最近接距離が原子核から遠ざかると、軌道電子による核電荷の遮蔽が散乱断面積の値に影響しないのか。

A: 最近接距離が内殻電子の軌道半径と同じくらいになると、照射イオンの原子核に対するクーロンポテンシャルは、内核電子による遮蔽のために小さくなる。すなわち、散乱断面積の計算式(3)

によって計算される値よりも小さくなるはずである。

いろいろな補正式が提案されているが、Meierらは、次のような補正式を提案している[2]。

$$\sigma_{SC} = \sigma(\theta) F \quad \dots (4)$$

$$F = 1 - 0.049 Z_1 Z_2^{4/3} / E$$

### 3.3 阻止能

高エネルギーや中エネルギーの軽いイオンが固体中を通過するとき、固体中の電子との非弾性衝突による励起やイオン化過程によってそのエネルギーを失う。このときイオンが失うエネルギーはイオンが通過した距離に比例する。この単位距離あたりに失うエネルギーがわかれば、エネルギースペクトルを深さスケールに変換することができる。

イオンが固体中で失うエネルギーを、入射イオンの側から表現したものがエネルギー損失である。固体の側からは、エネルギーを損失させることによって入射イオンが深いところまで侵入するのを阻止することから、阻止能と呼ばれる。

阻止能は、単位長さあたりのエネルギーであらわされる場合や、単位面積の物質あたりエネルギーであらわされる場合がある。単位長さあたりの阻止能を用いて深さスケールに変換すれば深さプロファイルが得られる。しかしながら、未知の材料では単位長さあたりのエネルギーで表した阻止能は使えないため、単位面積の物質あたりの阻止能(たとえばeV/atoms/cm<sup>2</sup>)が使われる。

阻止能の値として、測定値と理論計算から求められた、次のような経験式が用いられている。

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{S_{LOW}} + \frac{1}{S_{HIGH}}$$

$$S_{LOW} = A_1 E^{A_2}$$

$$S_{HIGH} = \left( \frac{A_3}{E/1000} \right) \ln \left[ 1 + \left( \frac{A_4}{E/1000} \right) + \left( \frac{A_5 E}{1000} \right) \right] \quad \dots (5)$$

2種類以上の元素からなる系の阻止能は加性が成り立ち(Bragg則)、組成比で按分して算出される。化合物の阻止能についてもBragg則が成り立ち、組成比で按分して算出される。

阻止能は、元素によって異なるだけでなく、入射イオンの種類やエネルギーによっても異なる。深さ方向分解能は、測定システムのエネルギー分解能が同じであれば、阻止能が大きいほど良い。例えばSiを分析する場合、2 MeVと数100 keVのHeイオンとでは阻止能は2倍くらい異なるため、同じエネルギー分解能の検出器では、数100 keVのHeイオンを用いたほうが、良い深さ分解能のスペクトルが得られるということがわかる。また、MeV領域では、水素イオンはHeイオンよりも阻止能が小さいことから、同じエネルギー分解能の検出器で分析した場合、Heイオンの方が良い深さ分解能のスペクトルが得られることになる。

### 3.4 エネルギーストラグリング

入射イオンの固体中におけるエネルギー損失は、それぞれ独立した衝突過程で生じており、統計的な変動が生ずる。同一の入射エネルギーで同一の厚さだけ透過しても、失うエネルギーはある平均値のまわりに分布する。この現象はエネルギーストラグリングと呼ばれる。このエネルギーストラグリングは、エネルギー分析器に関係なくエネルギー分解能を低下させる。

エネルギーストラグリングはボーアによって始めて計算され、次の式であらわされている[1]。

$$\Omega_B^2 = 4\pi(Z_1 e^2)^2 Z_2 N t \quad \dots (6)$$

ここで $\Omega_B^2$ は分散で、エネルギー分解能 $\delta E$ は $2.35 \Omega_B$ となる。

半導体検出器を用いる高エネルギーイオン散乱では、エネルギーストラグリングの影響は比較的小さい。これに対して、電場や磁場を用いて散乱イオンのエネルギーを高い分解能で測定できる中エネルギーイオン散乱では、このエネルギーストラグリングによる分解能の低下をきちんと評価しておかなければならない。

### 3.5 チャネリング

単結晶に高エネルギーのイオンを照射した場合、入射イオンの入射方向を、単結晶の対称性の高い面や軸に正確に合わせると、散乱イオンの強度は減少する。散乱強度が減少するのは、入射イオンが結晶面あるいは結晶軸に沿って微小角散乱を繰り返しながら進むために原子核との衝突確率が低下するためで、この現象はチャネリングと呼ばれる。

照射イオンの入射軸が{100}, {111}, {110}等の低指数面に一致したときに散乱強度の減少は著しい。

表面近傍におけるアラインドスペクトルとランダムスペクトルの強度比 $X_{\min} = H_A/H$ は、結晶性の評価に用いられる。結晶性が高いほど $X_{\min}$ は小さくなる。 $X_{\min}$ を正確に求めるためには、照射するイオンビームの平行性や正確な軸合わせが重要である。

ランダムスペクトルは、アラインドスペクトルの測定のようにチャネリングが生じる軸にきちんと合わせる必要がなく、容易に測定できそうに思われる。しかしながら実際に測定してみると、高指数の軸や面に合うことが多い。したがって、低指数面に合わせた後、ランダムになる方向に所定の角度だけ傾けて測定することが必要となる。

### 参考文献

- [1] W. K. Chu, J. W. Mayer and M. A. Nicolet : Backscattering Spectrometry (Academic Press, 1978)
- [2] L. C. Feldman and J. W. Mayer : Fundamentals of Surface and Thin Film Analysis (Elsevier Science Publishing, 1986)
- [3] L. C. Feldman, J. W. Mayer and S. T. Picraux : Material Analysis by Ion Channeling (Academic Press, 1982)

つづく

### 著者コメント

用語については、専門家に聞きながら、統一していきたいと考えています。ちなみに、ERDAについては著者の目にしたのものだけでも7つくらいありました。

5つの基本概念のうち、阻止能、エネルギーストラグリング、およびチャネリングについては、時間と紙面の都合により、簡単な記述になっています。次回、詳しく説明するとともにQ&Aを追加する予定です。