

連携したアウトプット型学習です。文系・理系を問わず、高校生たちはスケッチブックに放射線についての学びを手描きでまとめ、その内容を街頭で行き交う人々に直接語りかける活動を行いながら、学びを深めるとともに没入感を育んでいます。この新しいアプローチはまた、科学に距離を感じている方々にも効果があることが明らかになってきました。聴き手は高校生たちの真摯な言葉に心を動かされ、一方で語り手である高校生たちは聴き手からの称賛を通じて自己肯定感を著しく高めています。その結果、語り手と聴き手の間で科学的リテラシーが自然と醸成されるという好循環が生まれています。

大阪市東淀川区相川を拠点とするNプロジェクトの教育効果は、すでに隣接する吹田市にも広がりを見せています。これは小さな一歩かもしれませんが、確実に社会の変化が進行している証左です。このたびの受賞を契機に、新たな人脈を広げ、Nプロジェクトの「真の目的である社会変容過程の解明」に向けて、文理融合の学際型研究基盤を一層強化していきたいと考えています。

略歴：

06年3月 大阪大学大学院理学研究科博士課程修了 博士（理学）取得
06年4月（独）放射線医学総合研究所 博士研究員
07年4月（独）放射線医学総合研究所 研究員
11年1月 京都大学原子炉実験所 助教
18年10月 京都大学複合原子力科学研究所 助教
現在に至る

研究分野：

放射線物理、合成高分子、理科教育、安全管理

今回から ONSA レクチャーシリーズと銘打って、その道の専門の先生に執筆をお願いして講義に近い方式で、高度の専門内容を分かり易く解説していただきます。最初は岩瀬先生にイオンビームの基礎から応用までをお願いしました。

高エネルギーイオンビームと物質の相互作用 —基礎過程から材料改質への応用まで— (第1章) 高エネルギーイオン照射の特徴

大阪公立大学・客員教授 ONSA・参与 岩瀬彰宏

1. はじめに

高エネルギーの電磁波（紫外線、X線、 γ 線）や電子ビームは、高分子材料の改質のほか、農業分野や医療分野などにも多く活用されている。一方、イオンビームに関しては、比較的低エネルギー（500keV以下）のイオン注入による半導体改質はすでに実用化されて久しい。これらの研究開発に関しては、ONSAの研究会やシンポジウムでも、いままで多く取り上げられている。それに対して、高エネルギー

ギーイオンビーム（～MeV 以上）の無機材料改質分野への利用は、一部、パワー半導体改質など実用化が行われているが、社会実装化は、まだまだ途上であると思われる。筆者は、日本原子力研究所（現日本原子力研究開発機構）、大阪府立大学（現大阪公立大学）、大阪ニュークリアサイエンス協会、若狭湾エネルギー研究センターと、所属はいろいろかわったが、長年にわたり、一貫して国内外の多くのイオン加速器を用いた高エネルギーイオンビームと無機材料の相互作用の基礎過程、高エネルギーイオンによる材料改質・分析の研究に携わってきた。そこで、この機会に、8 回にわたり筆者の研究内容を中心に、わかりやすく解説してみたい。初回である今回は、材料改質や材料照射損傷研究の立場から、高エネルギーイオン照射の特徴について解説する。第 2 回、第 3 回は、イオン照射効果を記述するいろいろな物理的パラメータについて解説し、それ以降（第 4 回―第 8 回）は、高エネルギーイオン照射を用いた無機材料の表面硬度改質、磁性改質、光学特性改質、超伝導特性改質について、今までに得られた成果を紹介する予定である。

2. 加速器によるイオンビーム照射の特徴

放射線（量子ビーム）は、真空中や媒体中を伝搬するエネルギー形態であり、物質に放射線を照射するということは、その物質にエネルギーを与えることに他ならない。材料の機能を制御する材料改質法として多く用いられるのは材料に熱エネルギーを与える熱処理、歪エネルギーを与える機械的加工などがある。これに対して、放射線による材料へのエネルギー付与の特徴は、その付与総量がわずかでも、量子ビームの 1 個 1 個が、物質中の電子を励起・電離したり、原子を結晶格子の位置から弾き出したりできることである。従って、従来の材料改質法とは全く異なる効果が期待できる。

材料改質（特に有機材料）によく用いられる放射線（量子ビーム）は高エネルギーの電磁波（X 線、γ 線）、電子線である。これらの量子ビームは、エネルギーをある範囲で変化させることはできるが、ビーム種は一種類（光子、あるいは電子）に限られる。これに対して、加速器からのイオンビームの場合、イオン種は、水素イオン（プロトン）からウランイオンまで非常に多種である。これら単原子イオンだけでなく、複数の原子が 1 つかたまりとして飛んでくるクラスターイオンビームも利用可能である。また、エネルギー範囲も、keV から GeV まで、非常に広範囲に選ぶことができる。さらに、イオン照射実験では、照射量（材料に照射されるイオンの総個数）、イオンビーム電流（単位時間に照射されるイオンの個数に相当）も広い範囲で変えることができる。これらイオンビーム側のパラメータに加え、照射中のターゲット材料の温度も、極低温（10K 以下）から高温まで選ぶことができる。しかも、加速器によるイオン照射実験では、これら照射に関する多くのパラメータ（イオン種、エネルギー、照射総量、ビーム電流、照射時の温度）を、それぞれ独立に制御して照射できることが大きな特徴である。我々はこれを「シングルパラメータ実験」と呼んでいる。

また、イオンビーム照射実験は、以下のような特徴も併せ持つ。電磁波や電子線と比べて、イオンビームは、ターゲット材料との相互作用が大きい。従って、短時間での照射効果蓄積が可能となる。この特徴を利用して、長期の使用期間において各種放射線を浴びる原子力関連材料や太陽電池などの宇宙関連機器の放射線耐性を、イオンビーム照射を用いて短時間で模擬すること（いわゆる加速試験）が可能となる。通常のイオン照射効果研究に用いられるエネルギーでは、照射による残留放射能が少ない、あるいはほとんどない、というのもイオンビーム照射の利点である。照射された試料の取り扱いが簡単で、ホットラボ設備が不要なため、原子力関連材料の中性子照射効果を模擬する手段として有効である。

さらに、スリットと収束用电磁石を組み合わせることにより、イオンビームの大きさを、ミクロン、あるいはサブミクロンにまで制御することが可能である。このビーム（マイクロビームと呼ぶ）を利用することにより、ある特定の場所だけの局所的な材料改質が可能となる。

最後に、イオンビーム照射実験では、X 線回折（XRD）、電子顕微鏡（TEM, SEM）、電気抵抗、原子間

力顕微鏡 (AFM)、ラザフォード後方散乱 (RBS) などの測定法と組み合わせることにより、照射効果の「その場」(*in-situ*) 測定が、比較的簡単に実施できることにも触れておきたい。「その場」測定のうち最も簡単な手段は、電気抵抗測定である。抵抗測定用に成形した試料を照射チェンバー内に取り付け、電流・電圧端子をチェンバー外にとりだすことで、照射中、あるいは照射直後の電気抵抗の照射量依存性や試料温度依存性のデータを得ることができる。試料に磁場をかけることができれば、ホール係数や磁気抵抗、超伝導体の磁場下臨界電流なども「その場」で測定可能となる。筆者らは、原子力研究所 (現日本原子力研究開発機構) や理化学研究所のイオン加速器を用いて、金属や酸化物超伝導体中に生成された格子欠陥 (格子間原子、原子空孔) が熱拡散を起こさない極低温 (10K 以下) でイオン照射し、「その場」電気抵抗測定による照射効果研究を行った。また、筆者は、米国立アルゴンヌ研究所 (ANL) において、2 台の加速器 (タンデム加速器とイオン注入器) からの 2 種類のビームをターゲットに同時に照射することにより、重イオンを照射しながら軽イオンによる RBS 「その場」測定を行った経験もある。

ここまで、高エネルギーイオン照射の特徴 (利点) について述べてきた。その中で、イオンビームはターゲットとの相互作用が大きいということを挙げたが、これはイオンがターゲット中でエネルギーを大きく失い、ターゲットの奥深くまでは侵入できない、ということでもある。数 MeV のイオンの場合、侵入深さ (レンジという) はせいぜい $10\mu\text{m}$ 以下となり、照射効果もその深さまでにしか現れない。従って、厚いバルク試料全体の改質はできない。しかし、厚さ数 μm 以下の薄膜デバイスの改質には十分である。また、バルク試料の表面数マイクロ m だけを改質できるという利点もある。

3. 筆者らの用いたイオン加速器とイオン種・エネルギー

多種多様なイオン種、広範囲のエネルギーでの照射が可能なことは、イオン照射実験の大きな特徴であることは上に述べたとおりである。しかし、用いる加速器が少ないと、エネルギー範囲やイオン種も限られる。そこで筆者らは、表 I で示すように、国内外の多くのイオン加速器を用いて、幅広いエネルギー、イオン種による系統的な照射実験を行ってきた。次回以降の記事で、その結果を解説していく。

なお、次回以降は、以下のような内容を予定している (多少の変更の可能性有)。

第 2 章 高エネルギー照射効果を記述するパラメータ 1 (原子との弾性衝突)

第 3 章 高エネルギー照射効果を記述するパラメータ 2 (電子励起)

第 4 章 合金の硬度改質 1 (稀薄合金)

第 5 章 合金の硬度改質 2 (金属間化合物)

第 6 章 金属間化合物の磁性改質

第 7 章 酸化物の磁性、超伝導特性改質

第 8 章 透明酸化物の光学特性改質

表 I 筆者らがイオン照射実験に使用した加速器、イオン種、エネルギー

設置機関	加速器	イオン種	エネルギー (MeV)	特殊実験 殊ビーム
JAEA 東海	バンデグラフ タンデム	H, He, C, N, Ne, Ar C, O, F, Si, P, Cl, Sc Ni, Br, Kr, I, Xe, Au	0.5-2.0 15-200	極低温照射、 電気抵抗、RBS「その場」 測定、高温照射
QST 高崎	タンデム、 シングルエンド イオン注入器	H, He, C, Al, Cl, Fe, Ni, I, Au, C ₄ , C ₈ , C ₆₀ , Au ₂ , Au ₃ H, He C, Fe, Ni, Co, Ag	0.5-16 1-2 0.05-0.38	高温照射、 マイクロビーム、 クラスターイオン
理研	リングサイクロトロン	C, Kr, Mo, Xe, Ta, Bi	700-3840	GeV 重イオン照射 電気抵抗「その場」測定
奈良女子大	タンデム	O, Si	1-3	
若狭湾エネ研	タンデム、 イオン注入器	He He, Ar	2 0.05-0.18	
住重アテックス	サイクロトロン	He	2.9-5.9	
ドイツ GSI	リニアック	Au, U	2200-2710	GeV 重イオン照射
フランス Orsay	タンデム	C ₆₀	30	クラスターイオン
米国 ANL	タンデム イオン注入器	He He, Ne, Ar, Cu	1.5 0.1-0.8	2 重イオン照射、RBS 「その場」測定

参考文献

- ・日本語による解説記事を紹介します。さらなる詳細については、各解説記事の引用文献をご覧ください。Ctrl キーを押しながら各 URL をクリックすることにより解説記事を読むことができます。

極低温照射や、電気抵抗「その場」測定に関しては

- ・岩瀬彰宏、岩田忠夫、仁平 猛 日本物理学会誌 Vol. 48, No. 4, 274-278 (1993)
<https://doi.org/10.11316/butsuri1946.48.274>

- ・岩瀬彰宏 金属学会会報 までりあ、第 37 巻 第 6 号 470-478 (1998)
<https://doi.org/10.2320/materia.37.470>

軽イオンと重イオンの同時照射による RBS「その場」測定については

- ・岩瀬彰宏 金属学会会報 までりあ 第 41 巻 第 1 号 20-27 (2002)
<https://doi.org/10.2320/materia.41.20>

高エネルギー重イオン照射場における無機材料の挙動に関しては

- ・岩瀬彰宏、石川法人、知見康弘 金属学会会報 までりあ 第 45 巻 第 6 号(2006) 456-463.
<https://doi.org/10.2320/materia.45.456>