

**立教大学学術推進特別重点資金 (立教 S F R)**  
**大学院学生研究**  
**2018年度研究成果報告書**

<b>研究科名</b>	立教大学大学院			理学研究科	物理学専攻		
<b>研究代表者</b> (2019年3月現在のものを記入)	在籍課程・学年・学生番号		氏名				
	<input type="checkbox"/> 博士前期課程 年	<input checked="" type="checkbox"/> 博士後期課程 2年 17RA004J	佐和 弘祥		印		
<b>指導教員</b>	所属・職名		氏名				
	理学部・教授		平山 孝人		印		
<b>自然・人文・社会の別</b>	<input checked="" type="radio"/> 自然	<input type="radio"/> 人文	<input type="radio"/> 社会	<b>個人・共同の別</b>	<input checked="" type="radio"/> 個人	<input type="radio"/> 共同	名
<b>研究課題</b>	低速多価イオン衝撃による希ガス固体表面でのポテンシャルスパッタリング過程の研究						
<b>研究組織</b> (研究代表者・共同研究者) ※2019年3月現在のものを記入	在籍研究科・専攻・課程・学年		氏名				
	研究代表者 理学研究科・物理学専攻 博士後期課程2年		佐和 弘祥				
<b>研究期間</b>	2018 年度						
<b>研究経費</b> (1円単位)	(支出金額) 492,093円 / (採択金額) 500,000円						

**研究の概要** (200~300字で記入、図・グラフ等は使用しないこと。)

固体表面への低速多価イオン衝撃では、入射多価イオンの持つポテンシャルエネルギーが固体表面へ移行した結果、固体表面からの粒子脱離が引き起こされることがある(ポテンシャルスパッタリング)。本研究では、固体中への電子的励起状態の生成が高い確率で粒子脱離につながる希ガス固体表面を標的とした低速多価イオン衝撃実験を行い、固体表面で散乱した入射イオン(散乱イオン)の価数分布と、固体表面より脱離した二次イオン(脱離イオン)の質量電荷比分布の同時計測を行う。測定結果をもとに、衝突で固体表面へ移行したポテンシャルエネルギーと脱離イオン種との関係を定量的に分析し、ポテンシャルスパッタリングが起きる過程を解明する。

**キーワード** (研究内容をよく表しているものを3項目以内で記入。)

[希ガス固体] [ポテンシャルスパッタリング] [多価イオン]

## 研究成果の概要 (図・グラフ等は使用しないこと。)

2 個以上の電子が電離したイオンを多価イオンといい、多価イオンはその価数分の電子を電離させる為に必要なエネルギーの総和で表される静電的内部エネルギー (以下、ポテンシャルエネルギー) を持つ。大まかな傾向として、 $q$  価の多価イオンは、 $q^2$  eV に比例したポテンシャルエネルギーを持ち、運動エネルギーが数 keV 程度の低速多価イオンでは、ポテンシャルエネルギーが運動エネルギーに比べて無視できない大きさとなる場合がある。このような低速多価イオンが固体表面へ衝突すると、運動エネルギーに加えてポテンシャルエネルギーが固体表面へ散逸することにより、運動エネルギーの散逸のみが支配的な衝突では見られない様々な現象が生じることが報告されており、新たな固体表面の加工手法・分析手法への応用が期待されている。

希ガス固体は、Van der Waals 力のみによって結合した固体であり、結合エネルギーが非常に小さいことから (Ne 固体では、1 原子あたり 0.02 eV)、固体中に電子的励起状態が生成されると高い確率で粒子脱離に結びつく。このことから、イオン衝撃によって脱離した粒子の観測を通して、イオン衝撃において固体表面へ散逸したエネルギーの大きさを分析することが期待できる。また、希ガス固体の電子構造は孤立原子の場合と類似していることから、イオン・電子・光子などと固体表面の衝突による相互作用過程を簡略化して考察できる資料として、いくつかの研究が行われてきた。

本研究では、希ガス固体表面を標的とした低速多価イオン衝撃における、ポテンシャルエネルギーの散逸過程を定量的に分析するため、希ガス固体表面へ入射イオンを浅い角度 ( $\leq 5^\circ$ ) で衝突させ、固体表面で散乱した入射イオン (散乱イオン) と脱離した二次イオン (脱離イオン) を同時計測する実験を行なった。この実験では、散乱イオンについてはその価数を、脱離イオンについてはその質量電荷比を測定することで、衝突によって固体表面へ散逸したポテンシャルエネルギーと、衝突によって脱離したイオン種を定量的に結びつけた分析を可能としている。

本研究では、昨年度までに報告者が中心となって開発を行ってきた実験装置を用いた。装置の開発状況と、性能評価実験を通して得られた知見について、学術会議での報告 [2, 4, 5, 6] を行うとともに、国際会議 [4] のプロシーディングスとして英文論文を X-Ray Spectrometry 誌に投稿した [1]。

昨年度までに開発した実験装置は、特定の角度に散乱した散乱イオンを選択して、価数測定を行う構成であったが、性能評価実験の結果、固体表面での散乱角度が想定以上に幅広く分布していることが明らかになった。このため、イオン脱離現象の散乱角度依存性を観測するためには、観測する散乱角を少しずつ変化させて多数回の測定を行う必要があった。また、この構成では観測可能な散乱角度の範囲が狭く ( $0^\circ \sim 4^\circ$ )、実際に起きている現象を観測しきれていない可能性があった。これらの問題を改善するため、本年度は散乱イオン検出機構の改良を実施し、観測可能な散乱角度の上限を拡張 ( $4^\circ \rightarrow 10^\circ$ ) すると共に、散乱角度分布と価数分布を同時に測定することが可能となった。この装置改良の概略について、学術会議での報告を行なった [3, 6]。

改良した実験装置を用いて行なった、Ne 固体表面を標的とした 3, 6 keV Ar<sup>6+</sup> 衝撃実験では、散乱イオンの価数分布・散乱角度分布が入射イオンの運動エネルギーによって変化することが明らかになった。価数分布については、入射イオンの運動エネルギーが 6 keV の場合は 0~2 価 (0 価は中性原子を表す) に分布していたのに対し、3 keV イオンの場合は 0~3 価に分布していた。いずれの場合も、強度が最大となる価数は 1 価であった。なお、この傾向自体は改良前の実験装置でも確認されていたものである。散乱角度分布については、6 keV Ar<sup>6+</sup> 入射の場合は、散乱 Ar<sup>0</sup>:  $3.0^\circ$  にピーク、散乱 Ar<sup>1+</sup>:  $0^\circ \sim 10^\circ$  の範囲で一様に分布、散乱 Ar<sup>2,3+</sup>:  $6.0^\circ$  にピーク、との結果が得られ、3 keV Ar<sup>6+</sup> 入射では、散乱 Ar<sup>0</sup>:  $1.0^\circ, 3.0^\circ, 5.0^\circ, 8.5^\circ$  にピーク、散乱 Ar<sup>1+</sup>:  $3.0^\circ, 5.5^\circ, 8.0^\circ$  にピーク、散乱 Ar<sup>2,3+</sup>:  $2.5^\circ, 5.0^\circ, 8.0^\circ$  にピーク、との結果が得られた。上記に示した結果のうち特筆すべき点として、3 keV Ar<sup>6+</sup> 入射の場合に、散乱角度分布が複数のピークから構成されている点、ピーク位置・個数が散乱イオン価数によって変化する点が挙げられる。これは、固体表面へイオンが衝突する際、入射イオンがたどる軌跡が複数に分かれていること、たどる軌跡によって入射イオンがポテンシャルエネルギーを失う過程が異なることを示唆していると考えられ、固体表面と入射多価イオンの相互作用過程を考察するために有用な情報として期待できる。なお、固体表面での入射イオン軌跡が複数に分かれたことには、Ne 固体の結晶としての特性が反映されていると考えることができ (イオンビームが結晶列に対して平行に入射、または固体の層間を通過できるように入射した場合にこのような現象が生じる)、このことは 6 keV Ar<sup>6+</sup> 入射の場合に、散乱角度分布が 3 keV 入射の場合に対して単純な構造を示すことにも表れている (入射イオンの初期運動エネルギーが大きいため、イオンが固体表面の結晶構造を破壊してしまう) と考えられる。

このように、実験装置の改良により、散乱イオンについてはこれまで以上に詳細な情報を得ることが可能となったが、脱離イオンについては現状では十分な質のデータが得られていない。主な問題としては、散乱イオンに対する脱離イオンの同時計測を行うと、両者を独立に測定した場合に比べて脱離イオン飛行時間スペクトルの分解能が著しく低下することが挙げられる。この原因を探るため、独立に測定した脱離イオン・散乱イオン飛行時間スペクトルに

**研究成果の概要 つづき**

基づいて、同時計測実験での飛行時間スペクトルを再現するモンテカルロシミュレーションプログラムを開発して、様々な測定条件に対してどのような同時計測スペクトルが得られるかを考察した。このシミュレーションの結果、入射イオン電流量が過大(数 pA 程度)である場合に、実際に測定されたような分解能の低いスペクトルを再現でき、イオン電流量を数 10 fA に抑制することで、高分解能のスペクトルが得られることが明らかになった。これらのシミュレーションによる考察と、実験装置の改良により得られた結果は、国内学会[3]にて報告済みである。

(以上)

**研究発表** (研究によって得られた研究成果を発表した①～④について、該当するものを記入してください。該当するものが多い場合は主要なものを抜粋してください。なお、成果発表を確認できる資料を合わせて提出してください。)

- ①雑誌論文 (著者名、論文標題、雑誌名、巻号、発行年、ページ)
- ②図書 (著者名、出版社、書名、発行年、総ページ数)
- ③シンポジウム・公開講演会等の開催 (会名、開催日、開催場所)
- ④その他 (学会発表、研究報告書の印刷等)

① 雑誌論文

[1] H. Sawa, S. Uchida, H. Ueta, T. Hirayama, “System for coincidence measurements of the ions desorbed and projectiles scattered from noble gas solid surfaces by slow multiply-charged ion impacts”, submitted to X-Ray Spectrometry (in review).

② 図書

該当なし

③ シンポジウム・公開講演会等の開催

該当なし

④ その他 (学会発表)

国内学会 (口頭発表)

[2] 佐和弘祥, 渡辺峻也, 植田寛和, 平山孝人, 「Ne 固体表面への低速多価イオン衝撃における反射イオン・脱離イオン同時計測を用いたポテンシャルスパッタリング過程の理解」, 原子衝突学会 第 43 回年会, 2018 年 10 月, 京都大学宇治キャンパス, H2 [Hot topics 講演(招待講演)].

[3] 佐和弘祥, 渡辺峻也, 植田寛和, 平山孝人, 「Ne 固体表面への低速 Ar 多価イオン衝撃における散乱イオン・脱離イオン同時計測 II」, 日本物理学会 第 74 回年次大会, 2019 年 3 月, 九州大学伊都キャンパス, 15aK201-11.

国際会議 (ポスター発表)

[4] H. Sawa, S. Uchida, H. Ueta, T. Hirayama, “Coincidence Measurements of Scattered and Desorbed Ions from Solid Ne Surfaces by Slow Ar<sup>q+</sup> Ion Impact”, 19<sup>th</sup> International Conference on Physics of Highly Charged Ions, September 2018, Lisbon, Portugal, PA4.

国際会議 (口頭発表)

[5] H. Sawa, S. Uchida, H. Ueta, T. Hirayama, “Ion desorption from solid Ne surfaces induced by grazing incidence of slow multiply-charged Ar ions”, 13th International Symposium on Electron Beam Ion Sources and Traps, October 2018, Shanghai, China, [Invited Talk].

[6] H. Sawa, S. Uchida, H. Ueta, T. Hirayama, “Coincidence study of scattered and desorbed ions from solid rare gas by slow multiply-charged ion impact”, TMU Symposium on Physics of Highly Charged Ions 2018, December 2018, Tokyo, Japan.