

氏名(本籍)	あら い ひで ゆき (群馬県) 新井秀幸(群馬県)		
学位の種類	博士(工学)		
学位記番号	博乙第2472号		
学位授与年月日	平成22年1月31日		
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当		
審査研究科	数理物質科学研究科		
学位論文題目	<b>Suppression Mechanism of Electron Emission under Fast Cluster Impact on Solids</b> (高速クラスターの固体衝突における電子放出の抑制機構)		
主査	筑波大学教授	理学博士	工藤博
副査	筑波大学教授	理学博士	高田義久
副査	筑波大学准教授	博士(工学)	藤田淳一
副査	産業技術総合研究所近接場光応用工学研究センターチーム長 工学博士		栗津浩一

### 論文の内容の要旨

加速器等で加速されたイオン(原子)を固体に入射させると、イオンと固体原子系との相互作用の結果として表面から二次粒子が放出される。このうち固体表面より放出される電子は二次電子と呼ばれ、固体内部での物理現象を観察するための手掛かりとして1900年頃のJ.J. Thomsonによる電子の発見直後から研究が行われてきた。入射したイオンのもつエネルギーと運動量は、弾性あるいは非弾性衝突によって固体内電子へと移行し、それらを受けとった固体内電子や、その後のカスケード衝突によって生成された電子の一部が固体表面から放出することで二次電子として観測される。

上記のような二次電子についての実験は単原子イオン入射によるものが主であったが、1990年代以降の加速器技術の進展により複数の原子が集合した粒子、すなわち分子を含めたクラスタービーム入射による系統的な実験が可能になった。このことはそれまでの入射エネルギーやターゲットの種類(原子番号など)といった変数に、クラスターの構成原子数 $n$ が加わったことを意味する。クラスター入射ではnm程度の狭い領域に複数の原子が入射することになるが、その結果得られるスパッタリング収量や阻止能などは単純にそれまでの単原子入射の $n$ 倍にはならないことが見出された。この効果は入射原子同士が近いことに起因するため、近接効果などと呼ばれている。近接効果は当初水素クラスターにおいて見出され、やがて炭素などの重イオンからなるクラスターについても同様の結果が観測された。特に二次電子収量に関しては大幅な抑制効果(1原子あたり30%以下へ抑制)が報告された。抑制の原因について、例えば入射クラスター内の先行する原子によって標的電子が散乱されるため、後行の原子が散乱することのできる標的電子が減り、二次電子収量が減少するという露払い(sweeping-out)効果などが提案されている。また、これ以外にも入射粒子の荷電状態の低下や、散乱電子が入射クラスターの分子軌道に取り込まれるといった効果も検討されている。しかしどのモデルも実験結果を全て説明するには至らなかった。ところが、最近になって筑波大のグループによる実験から、抑制効果は電子の生成過程ではなく、輸送過程あるいは表面脱出過程にあることが示唆さ

れた。

本学位論文の研究では、以上のような背景のもとで、輸送・表面脱出過程での抑制効果に対する新たな知見を得ることを目的として始められた。実験では、電子収量が大きく違う絶縁体 KCl と導体 HOPG（層状グラファイト）を用いてクラスター誘起二次電子のエネルギー分光を行った。クラスター誘起二次電子収量の  $n$  依存性の解析から、近接効果の主な要因を絞り込んだ。このうち表面脱出過程では、クラスター入射によって表面より放出される電子量が増加した結果、表面が帯電することによって電子放出量を抑制する効果が考えられた。これが原因であれば KCl においては HOPG の約 10 倍の二次電子放出があるために、表面でのより強い帯電が生じるのでクラスター入射における抑制は HOPG に比べて大きく現われるはずである。しかしながら、今回の実験では両者に有為な違いが見られなかったことから、表面脱出過程については抑制効果の主な要因では無いことがわかった。

絶縁体試料に特有の照射現象としてトラックポテンシャルがある。入射粒子が試料中を通過する際にはその軌跡に沿って正孔が形成される。この正孔によってトラックポテンシャルが誘起される。絶縁体では導体に比べて緩和時間が長いため、二次電子収量にこのトラックポテンシャルの影響が現われる。これについては、軽イオンを表面散乱させた際に放出される二次電子収量に、トラックポテンシャルによる抑制が現れることを京大グループが観測している。今回の実験においては、このトラックポテンシャルが試料を通過しているクラスター構成原子の各軌跡に沿って複数形成されていることが予想される。もし近接効果の主要因がトラックポテンシャルであれば、導体の HOPG に比べて KCl ではより強い抑制が生じるはずである。だが、これについても今回の観測結果により、トラックポテンシャルは近接効果の主要因ではないことが明らかになった。

以上の考察の結果、固体中を通過するクラスター原子が誘起した動的ポテンシャルによって輸送過程での二次電子が攪乱を受けることにより、二次電子収量に抑制が生じるというモデルを導いた。このモデルによって、(1) 二次電子収量の強い抑制、(2)  $10\text{\AA}$  を越える距離でも発現する抑制効果、(3) 前方放出電子の高いエネルギー領域で抑制、という特徴的な観測結果のすべてを説明することができた。またクラスターが誘起するウェイクポテンシャルの式に現われる干渉項によって、近接効果が抑制から増加に転ずる可能性も示唆された。これらのことから、本研究はクラスター誘起による電子励起・電離に関連する現象、すなわち電子放出あるいは電子的阻止能は荷電粒子の誘電応答として統一的に理解できることを示した。

## 審 査 の 結 果 の 要 旨

原子クラスターの近接効果は従来のビーム・物質相互作用の枠を超えた新規性に富む現象であるがゆえに、歴史的にはまず数値計算による解析が容易な弾性散乱過程すなわちスパタリング現象、放射損傷等の核的阻止能に関連する近接効果が世界中で研究された。これに対して、電子的阻止能との単純な関係が予想される電子放出現象に関しては、その顕著な抑制現象にもかかわらず 90 年代から理解が進まなかった。高速クラスター実験の可能な施設に限られる（国内では高崎量子応用研究所と筑波大の 2 ヶ所、世界でも約 10 ヶ所の実験施設）ことも一因として考えられる。

本学位論文の研究では、高速クラスター衝突特有の二次電子放出の抑制効果の解明を目的として進められた。筑波大のクラスター加速系（タンデトロン）を有効利用し、十分なマシンタイムを確保して試行錯誤による装置開発と改良を行い、精度の高いクラスタービーム誘起の二次電子分光測定を遂行している。特に、新たに製作した二次電子利用のビームチョッパー系を使用することにより、 $0.1\text{pA}$  領域の微弱クラスターイオンビームでの電子分光実験を可能とした。また、絶縁体 KCl のマクロな帯電を避けるために適切な温度制御条件のもとで実験データが取得された。本研究はこれらの高度な実験技術と装置開発に支えられた部分が

大きい。

本研究により、電離および電子励起、したがって電子的阻止能に関連する近接効果が誘電応答モデルにより統一的に理解できることが示されたといえる。本研究は、原子物理、放射線工学分野に、従来の単原子（あるいはイオン）衝突現象とは異なる多体系間の高速衝突について新たな知見をもたらしたのみでなく、クラスタービームの際立った特徴に基づく物質加工、生物・医学等への応用など、粒子線応用技術の基盤的知識の拡大に寄与した点を高く評価できる。

よって、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。