

氏 名	すずき やすふみ 鈴 木 康 文
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	論 工 博 第 3228 号
学位授与の日付	平 成 9 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
学位論文題目	STUDIES ON INTERACTIONS OF FAST MOLECULAR IONS WITH SINGLE CRYSTAL SURFACES (高速分子イオンと単結晶表面との相互作用に関する研究)
論文調査委員	(主 査) 教 授 万 波 通 彦 教 授 藤 本 孝 教 授 今 西 信 嗣

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は  $\text{HeH}^+$ 、 $\text{H}_2^+$  等の高速分子イオンと単結晶表面の相互作用の研究をまとめたものである。3部、9章より構成されている。

第1部では、本論文全体に共通する現象の基礎、研究方法を概説している。序論となる第1章では、2原子分子イオンの解離の運動学、表面外を高速で運動する点電荷に対する表面価電子の動的応答、分子イオンの解離片に対する動的応答、単結晶表面に小角度で入射したイオンの鏡面反射散乱、イオン誘起2次電子放出過程等について述べ、以下の議論の基礎となる現象の解説を行っている。

第2章は研究に用いた  $\text{SnTe}$  (001) 結晶の製作法、イオン散乱測定装置、各種測定法を概説している。

第2部は高速分子イオンの散乱現象を扱ったものである。先ず、第3章は高速  $\text{H}_2^+$  が表面で小角散乱されたとき、分子イオンの解離でできた  $\text{H}^+$  のエネルギー、散乱角度分布の異方性から、散乱中に分子イオンの解離で生じた  $\text{H}^+$  の対が表面に平行に向くことを見だし、それが表面の連続面ポテンシャルにより生じたトルクによることを明らかにしている。

第4章では、0.8~2.5MeV の  $\text{HeH}^+$  が単結晶表面に入射するとき、解離とそれに続くイオン化で作られた  $\text{He}^{2+}$  イオンと  $\text{H}^+$  イオンのエネルギー・散乱角度分布を測定し、解離でできた  $[\text{He}^{2+}-\text{H}^+]$  対が表面に平行に向くこと、さらに、 $\text{He}^{2+}$  の表面動的鏡像ポテンシャルにより  $[\text{He}^{2+}-\text{H}^+]$  対はイオン進行方向に揃うことを見いだした。加えて、 $\text{He}^{2+}$  と  $\text{H}^+$  の相対速度の観測から、 $\text{HeH}^+$  の解離過程においては、先ず、 $\text{HeH}^+$  の励起による解離が起こり、続いて  $\text{He}^+$  (または  $\text{He}^0$ )、 $\text{H}^0$  解離片の電子損失が起こると結論している。

第5章では、これまでの測定結果をもとに、 $\text{HeH}^+$  の解離散乱のコンピューターシミュレーションを行い、解離散乱した  $\text{H}^+$  のエネルギー・散乱角度空間における分布を求め、実験との比較から 1MeV  $\text{HeH}^+$  と電子衝突による励起断面積を  $10^{-16}\text{cm}^2$  程度と推定している。

第6章では第5章のシミュレーションを更に高度化し、 $\text{HeH}^+$  の電子衝突における励起状態は励起エネルギーが最も少ない  $1s\sigma$ 、 $a^3\Sigma^+$ 、 $A^1\Sigma^+$  であると結論し、電子衝突による 1MeV  $\text{HeH}^+$  の電子衝突に

おける励起断面積が、 $10^{-16}\text{cm}^2$ であることを求めた。

第7章は  $\text{H}_2^+$  表面散乱で生じた  $\text{H}^+$  のエネルギー損失の測定とその解析をまとめたものである。解離で生じた  $\text{H}^+$  対のエネルギー損失はこの対と等速の  $\text{H}^+$  のエネルギー損失の2倍より大きいとの測定結果を得た。この結果の解釈のために、イオン・表面衝突におけるエネルギー損失が、表面とイオンの衝突径数（表面からの距離）に依存する価電子集団運動による近接効果であることを理論的に求め、観測した  $\text{H}^+$  対のエネルギー損失を定性的に説明している。

第3部では  $\text{H}_n^+$  ( $n=1, 2, 3$ ) 分子イオンに誘起された固体からの2次電子放出現象の研究をまとめている。最初の第8章は、 $0.3\sim 0.8\text{MeV}$ /核子の  $\text{H}_n^+$  入射により  $\text{SnTe}$  (001) 表面から放出される2次電子について研究したものである。同じ速度の  $\text{H}^+$  入射の時と較べて、 $\text{H}_n^+$  ( $n=2, 3$ ) 入射では2次電子の発生量は  $n$  倍より大きくなる事実を解離片による固体内価電子電子密度変動（動的遮蔽）の重なりに伴う阻止能の増加と、分子イオン解離に伴う  $\text{H}^0$  のイオン化により生じた電子によるとして説明している。さらに、入射角  $\theta$  に依らず、 $\text{H}_n^+$  による2次電子収率  $\gamma_n(\theta)$  が、従来、正しいとされていた関係式  $\gamma_3(\theta) = 2\gamma_2(\theta) - \gamma_1(\theta)$  を近似的にしか満足しないことを示した。

第9章では、より低速の  $7\sim 12\text{keV}$ /核子の  $\text{H}_n^+$  ( $n=1, 2, 3$ ) が  $\text{SnTe}$  の (001) 面に入射したときの2次電子収率  $\gamma_n$  の測定および結果の解析である。測定した2次電子収率  $\gamma_n$  は  $n\gamma_1$  より小さい。イオンの速度が価電子の速度に較べて遅い時、価電子によるイオン電荷の動的遮蔽は起こらず、イオンから固体へのエネルギー移行は主にイオン・電子の弾性衝突による電子の励起によって起こる。弾性衝突過程においてイオンに散乱された電子波の干渉を考慮してイオン阻止能に近接効果が表れることを計算し、表面近傍で固体に付与されるエネルギーから2次電子収率  $\gamma_n$  の  $n$  依存を説明している。

## 論文審査の結果の要旨

高速分子イオン、クラスターイオンを用いたイオン注入法は表面改質、半導体素子作製などの応用面から注目されている技術である。一方、分子イオンの散乱現象はイオン・固体相互作用の基礎を研究する有力な方法である。分子イオンが原子イオン群に解離した当初は、原子イオン間隔は  $0.1$  ナノメートル程度で、これらが固体、表面に誘起する現象は、単独の原子イオンの照射効果の和とも、分子イオンの時とも異なる。これは近接効果と呼ばれる。本論文は、高速分子イオンと固体表面の相互作用を、解離原子イオンの近接効果に注目して研究した結果のまとめである。得られた主な知見は以下の通りである。

1. 高速  $\text{HeH}^+$  の結晶表面における反射散乱：高速の  $\text{HeH}^+$  分子イオンが結晶表面に小角度で入射するとき、分子イオンの解離により生じた  $[\text{He}^{2+} - \text{H}^+]$  対は固体内に入ることなく反射される。表面価電子との衝突による分子イオンの励起に伴う原子イオンへの解離、解離原子イオンのイオン化を経て反射される過程を明らかにした。この過程で、解離片の対は表面と平行になり、更に、解離片の動的鏡像ポテンシャルの近接効果により  $[\text{He}^{2+} - \text{H}^+]$  対の向きはイオンの進行方向に揃うことを示し、又、 $1\text{MeV}$   $\text{HeH}^+$  の電子衝突による解離断面積を決定した。

2. 高速  $\text{H}_2^+$  の結晶表面における反射散乱：小角散乱された  $\text{MeV}$   $\text{H}_2^+$  が2個の  $\text{H}^+$  に解離する過程を明らかにし、表面近傍を運動する  $\text{H}^+$  イオン対のエネルギー損失に近接効果があること、それがイオ

ン対の間隔，表面からの距離に依存することを示した。

3. 水素分子イオンによる結晶表面からの2次電子生成： $H_n^+$  ( $n=1, 2, 3$ ) 照射により固体表面近傍で発生した2次電子の収率を固体内阻止能の近接効果で説明した。これに加えて，高速分子イオンでは，解離過程で放出された電子による2次電子の寄与があることを明らかにした。

以上要するに，本論文は分子イオンの解離片が固体外で誘起する近接効果を小角散乱で，固体内部での近接効果を2次電子生成過程において解明したもので，その成果は，学術上，応用上寄与するところが少なくない。よって本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

また，平成9年2月25日，論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果，合格と認めた。