

京都大学	博士（工学）	氏名	金田 実
論文題目	液体分子線法を用いた高速荷電粒子線と液体標的の衝突相互作用に関する実験的研究		
（論文内容の要旨） 本論文は、MeV 領域の高速荷電粒子線と液体物質との衝突相互作用を解明するための新しい実験手法の開発を行った一連の研究成果についてまとめたものである。液体分子線法を導入することで真空環境に液体標的を作成し、高速荷電粒子線に対する体系的な阻止能測定と高速荷電粒子線照射によって放出される二次イオンの質量分析を可能にした実験手法の詳細と理論解析手法、および得られた研究成果について詳述しており、全6章からなっている。 第1章は序論であり、高速荷電粒子線と液体標的の衝突相互作用について実験的な解明を進める意義について述べている。まず、物質に与えるエネルギー付与過程とそれにより影響を受ける領域は物質の相（気体と固体、液体）に依存して変化すること、特に液体の場合には空間的・時間的スケールが非常に幅広くなることを述べている。次に、この事実は高速荷電粒子線照射により高エネルギー密度・高電離密度領域であるイオントラックが形成されることに由来し、イオントラック形成過程を理解する上で液体の阻止能測定と二次イオン質量分析が不可欠であることを述べている。さらに物質に付与されたエネルギーの緩和過程について言及し、イオントラック形成やスパッタリングおよびラジカル反応に至る諸過程を時間軸に沿って整理している。 第2章は物質と高速荷電粒子線の衝突相互作用に関する理論的背景について記述している。まず、エネルギー損失を特徴付ける阻止能理論について説明し、高速荷電粒子線の場合には標的の電子系との衝突によるエネルギー損失、即ち電子的阻止能が支配的であることを述べている。次にエネルギー損失とイオントラック形成およびトラックの空間スケールについて説明している。更に、二次粒子生成機構として検証対象となるクーロン反発モデル、熱スパイクモデルおよび衝撃波モデル について詳述している。 第3章は本研究の遂行を可能とした真空環境への液体標的導入法である液体分子線法について述べている。まず液体分子線法の流体力学的性質を理論的に評価するとともに熱力学的性質に関する定式化を行い、液体分子線の表面温度や蒸気圧について定量的評価を行っている。さらに、液体分子線を真空に導入しても高速イオン照射実験を可能とする真空環境が確保出来ることを明らかにしている。			

京都大学	博士（工学）	氏名	金田 実
第4章は液体標的阻止能測定法の構築について述べている。まず、液体分子線標的を透過した荷電粒子線のエネルギースペクトルと透過粒子の散乱角度分布の測定データから阻止能を導出する方法について説明している。次に、構築した本手法を用いて液体エタノール標的の実験を行い、世界初となる高速陽子線に対する阻止能の測定結果を述べている。得られた阻止断面積は広い分野で使用されている汎用の阻止能コードSRIM2008の値よりも約10%大きいことを明らかにしている。さらに本手法の適用範囲について理論的な検討を行い、放射線治療や放射線生物学で重要となるブラッグピーク領域での阻止能測定が可能であることを明らかにしている。さらに、標的径と入射エネルギーを適切に選択することで、ヘリウムや炭素線などの種々の入射イオンについてもブラッグピーク領域をカバーするエネルギー領域まで阻止能測定が可能であることを明らかにしている。 第5章は高速荷電粒子線照射による液体標的からの二次イオン飛行時間質量分析法の構築について述べている。まず、液体表面から蒸発するガス分子の影響の定量的評価を行い、実験槽内および質量分析器内の真空を適切に管理することで質量分解能の向上が可能であることを明らかにしている。次に、2.0 MeV He^+イオンをエタノールと水標的に照射した実験結果について述べ、(1)正のクラスターイオンの場合はプロトン付加正イオン、負イオンの場合はプロトン脱離負イオンが支配的であること、(2)気体標的の場合に最大の割合を占める解離片を含むクラスターイオンは液体の場合には生成されないことを明らかにしている。これらの実験結果を検討し、ピコ秒オーダーの高速で進行する液体内のプロトン移行反応によって生成されること、およびその反応は孤立した分子の解離よりも速い時間スケールで起きているものと解釈している。さらに、スパッタリング機構について議論を深め、液体からの二次イオン生成はクーロン反発モデルや熱スパイクモデルに因るものではなく、イオントラック内で発生する衝撃波に因るものであることを明らかにしている。これは、電離によって発生した二次イオンとその周囲に存在する標的分子間の超高速イオン-分子反応によって、電子系に付与されたエネルギーが運動エネルギーに変換されて衝撃波を発生させていると解釈している。一方、高速度の重粒子線照射など電離密度が高い場合にはクーロン反発による二次イオン生成が優先的になることを明らかにし、氷標的に対する核分裂片照射実験などの過去の一連の研究結果を矛盾なく説明している。 第6章は本論文の総括であり、得られた主要な研究成果について要約している。			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、液体物質を標的とする MeV 領域の高速イオン衝突に関する実験的研究で、液体標的実験手法の構築と、液体物質へのエネルギー付与過程とイオントラック形成および液体分子クラスターイオン生成機構についての研究成果をまとめたものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

- 1) 液体分子線法を用いた液体標的実験装置をイオン加速器ビームラインに構築し、これまで類例の無い高速イオン (H^+ , He^{2+}) と液体物質との衝突諸過程に対する研究を世界に先駆けて行った。
- 2) 液体標的透過後の粒子のエネルギースペクトルと散乱角度分布を測定し、測定スペクトルに Moliere 多重散乱理論を用いた解析法を新規に考案し、透過領域における液体分子線の標的径を精密に決定するとともに広範なエネルギー領域にわたる阻止断面積を導出することに成功した。
- 3) 飛行時間法による二次イオン質量分析により、液体標的から放出される二次イオンの効率的収集、蒸発ガス分子との衝突による飛行時間スペクトルの変化について理論的に定量評価し、イオンの照射位置、実験槽内および飛行時間分析器内の真空環境を適切に制御することで高い質量分解能を可能とし、分解片イオンの質量分離およびクラスターイオンのサイズ分離に成功している。
- 4) 固体標的に対して構築されてきたイオントラック構造の解析手法を世界で初めて液体標的に適用することで、二次イオン生成機構はイオントラック内で発生する衝撃波や圧力波によるものであることを示した。すなわち、電離により生成するイオンと標的分子間の超高速イオン-分子反応により発生した衝撃波により表面から脱離する衝撃波モデルで実験結果を説明することに成功した。

以上のように本論文は、真空内の液体物質に対するイオン衝突研究を可能とする汎用性の高い実験手法を構築するとともにその有用性を実証したもので、学術上、實際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 24 年 5 月 17 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。