

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05015

研究課題名(和文) 気相および溶液中における重イオンビームと生体分子の反応初期過程の比較

研究課題名(英文) Comparison of initial reaction processes of heavy-ion beams and biomolecules in the gas phase and solution

研究代表者

間嶋 拓也 (Majima, Takuya)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50515038

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：MeVオーダーの高速重イオンと生体分子の複雑な反応初期過程の解明を目的に、気相と溶液中の異なる環境下における生成イオン種の比較と、解離ダイナミクスに関する実験的研究を行った。気相実験では、多重電離度合いに依存した解離過程を明らかにした。液滴を用いた実験では、装置の改良により安定かつ高密度な真空内液滴標的を構築し、微量な生成イオンの分析を実現した。さらに同時計測技術を駆使することにより、液滴表面からの生成イオンを選択的に検知する手法を確立した。純エタノール液滴による原理実証を経て、グリシン分子に対する気相実験と水溶液液滴に対する結果の比較を行い、その違いを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

重イオンビームは生体に対して特異な照射効果を与えることが知られており、その反応機構の分子レベルでの解明が求められている。重イオン衝突においては、多重電離の寄与が重要になると予想されるが、これまでその詳細は不明であった。本研究によって、その基礎となる孤立分子の反応過程を明らかにした。また、実験の難しい液相標的に対する測定手法を確立し、反応生成物イオンを捉えることができるようになった。例として、負イオンの生成物について、各種の特徴的な生成イオンが検出された。今後、生体内で高速重イオンが誘起する一連の反応をシミュレーションするための出発点となる基礎的な情報を提供するものである。

研究成果の概要(英文)：To elucidate the complex initial process of reaction between MeV-energy heavy ions and biomolecules, we have studied product ions and dissociation dynamics of biomolecules in the gas phase and solution. In the gas-phase experiment, we have observed the variation of the dissociation process depending on the multiply ionized state. In the droplet experiment, a stable and high-density droplet target in a high vacuum has been developed, enabling sensitive analysis of produced ions. We have established a method to detect secondary ions generated at the droplet surface by suppressing an enormous amount of background originated from vapor molecules by using a coincidence measurement. After the demonstration of the measurement using ethanol droplets, we have compared the results of the gas phase and droplet experiments for glycine molecules.

研究分野：放射線物理

キーワード：高速重イオン イオンビーム 生体分子 微小液滴 分子解離 多重電離 質量分析

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

MeV オーダーの運動エネルギーを持った高速イオンが物質内を通過すると、その飛跡に沿ったナノレベルの狭い領域に大きなエネルギーが付与される。標的の原子・分子は電離・励起され、分子解離や結合の組換えが誘起される。これにより生体内では DNA 損傷が引き起こされ、放射線障害につながる。粒子線治療は、逆にこの特徴をうまくがん治療に利用した応用例である。なかでも、重イオンビーム（重粒子線）は高 LET（線エネルギー付与）放射線とされ、高い生物学的効果比などの線質効果が知られている。これは高密度なエネルギー付与に起因する現象と考えられるが、ナノ領域で高速に進行する反応を観察することは難しく、分子レベルの具体的な反応初期過程は良く分かっていない。重イオン衝突では、高いエネルギー付与に伴って様々な反応チャンネルが開くため、低 LET 放射線と比較して複雑な反応が誘起されると予想される。また多重電離の寄与の可能性も重要になる。このような反応は理論的な予測も困難である。衝突に伴う孤立した 1 個の生体分子の反応過程も詳細は不明であり、溶液中の反応初期過程は多くが未知である。

申請者はこれまでに、重イオン衝突に伴って生成されるイオン生成物の分析を目的に、気相および液滴中の分子標的に対する 2 つの測定システムを開発してきた。まず気相実験では、衝突によって分子から放出される二次電子の個数をイベント毎に直接計数できる装置を開発し、重イオン衝突における多重電離分布と、多重電離状態に依存した解離過程の分析を可能としてきた [1]。また、溶液中の衝突反応で生成されるイオン生成物の分析を目的に、微小液滴を高真空中に導入する技術を開発し、液滴表面から放出される二次イオンに対する質量分析手法の適用を実現してきた [2]。

### 2. 研究の目的

本研究ではこれらの測定技術を、生体分子に適用することにより、気相および溶液中の 2 つの異なる環境において、高速重イオンが誘起する分子反応過程を比較し、その特徴を調べる。主な項目は以下の通りである。

- (1) 多重電離に伴う孤立生体分子からの生成イオンの測定：真空中に孤立した気相標的に対し、重イオンを照射する。多重電離状態に依存した生成イオン種を調べる。
- (2) 生成ダイナミクスの解析による反応機構の考察：上記の気相実験において、同時に生成される複数のイオン種と多重電離度合いを衝突毎に記録する。さらにクーロン爆発によって放出される解離イオンの向きと運動エネルギーの情報から解離ダイナミクスを明らかにする。
- (3) 微小液滴内の生体分子からの生成イオン分析：アルコール液滴や、生体分子を溶解させた微小液滴を標的として、衝突に伴う生成イオン種の分析を行う。気相実験での結果と比較し、相による反応生成物の違いを調べる。

### 3. 研究の方法

気相分子を標的とした実験装置の概略図を図 1 に示す。グリシンなどの生体分子を標的として導入するときには、真空中で 100~200°C 程度に加熱し、昇華させた。加えて、水やアルコールなどの常温で液体の物質を気相標的として導入するシステムも構築した。これらの分子に対して重イオンビームを照射し、解離イオンの飛行時間と検出位置、多重電離に伴う放出電子個数、入射イオン価数の同時測定から、多重電離に伴う単分子反応過程を調べた。

次に、本研究で構築した、真空中微小液滴を標的とした実験装置の概略を図 2 に示す。大気圧下で作成した微小液滴を、直径 200  $\mu\text{m}$  の穴から真空中に吸引させる。3 段の差動排気領域を設けることにより、高真空領域への導入を可能にした。これに重イオンビームを照射し、液滴の表面近傍で生成・放出される二次イオンを、飛行時間測定法を用いて質量分析した。純アルコール

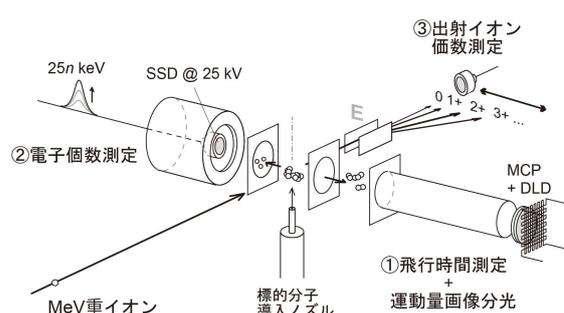


図 1 気相分子標的に対する実験装置。

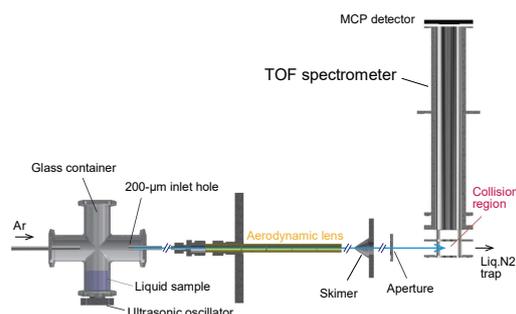


図 2 微小液滴生成部と高真空槽への搬送部。

液滴や、生体分子を溶解させた水溶液の微小液滴を作成し、孤立分子から生成される解離イオンと比較した。

これに加え、連携研究者を中心に開発されてきた液体分子線を標的とした実験も行い、グリシンやプロリンなどの生体分子の水溶液からの生成イオンと気相標的からの生成イオンの比較も行った。

#### 4. 研究成果

(1) 測定に先立ち、真空内に導入する液滴サイズの微小化と、液滴導入量の増強および安定化を目指して、液滴生成部の改良を行った。具体的には、液滴生成法として、超音波霧化装置を導入し、霧化部およびそれに接続されるガスラインを全て閉鎖系とした (図 2)。搬送ガスの種類や流量、圧力を制御し、生成条件を最適化した。これにより測定感度が向上され、後で示すようなごく微量の生成物イオンの検出も可能となった。

衝突領域に導入した液滴のサイズは、高速重イオンが液滴内を透過した際のエネルギー損失量から、およそ直径数 100 nm~数  $\mu\text{m}$  程度であることが分かった。さらに光学的な測定によって、液滴生成時の液滴サイズを確認するために、Mie 散乱理論に基づいたレーザー回折実験システムを構築した。図 3 に、1.6 MHz の振動数で生成した水液滴の散乱光強度分布の測定結果を示している。直径 1  $\mu\text{m}$  に対する計算結果とよく一致しており、イオンビームによる真空内の測定結果と矛盾しないことを確認した。

(2) 気相の多原子分子のモデル分子としてアセチレンおよびエタン分子を用い、多重電離に伴う解離ダイナミクスの特徴を調べた。図 4 に示すような解離イオン間の相関関係から、解離における分子構造と電荷配置の対称性、または解離パターンに依存して、解離イオンの放出運動エネルギー分布が複雑に変化する様子を系統的に明らかにした。さらに、分子内の水素原子をフッ素原子に置換した分子標的を用いることにより、重原子の効果についても検証した。

(3) 液体分子線を用いた実験が連携研究者を中心に行われ、グリシンおよびプロリン、ヒドロキシプロリン分子を溶解させた標的からの生成物イオンの質量分析の結果を得た。比較のため、気相の同分子からの生成イオンの測定も行った。その比較から、溶媒効果による分子解離反応の抑制を確認した。また、水溶液環境では溶媒の存在による特異な解離生成物の生成を示唆する結果も得られた。

(4) 微小液滴を用いた実験では、最初に、純アルコール液滴を用いて測定装置の構築および高度化を行い、MeV エネルギーの高速重イオン衝突による各種液体試料からの正・負の二次イオン質量分析測定を安定的に行えるシステムを確立した。エタノール分子は、生体分子に比べて構造が単純であるが、CC 結合や水素結合を含み、様々な種類の解離イオンの生成や二次的反応の検証が可能であるため、溶液内における多原子分子の反応の特徴を調べるためにも適した標的である。その結果から、図 5 に示すよう、プロトン移動に伴うクラスターイオン生成や、単分子解離による生成物に加え、2 分子以上の反応に伴う反応生成物イオンが生成されること

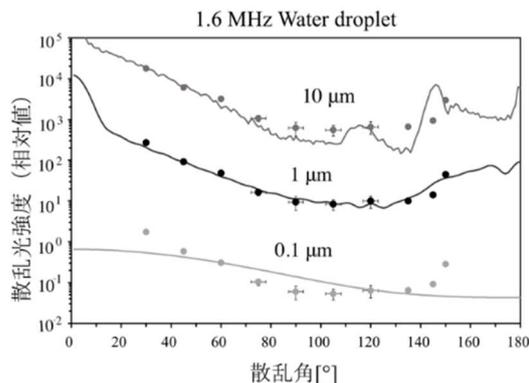


図 3 散乱光強度の角度分布。実験結果 (●, ○) と計算結果 (実線) の比較。

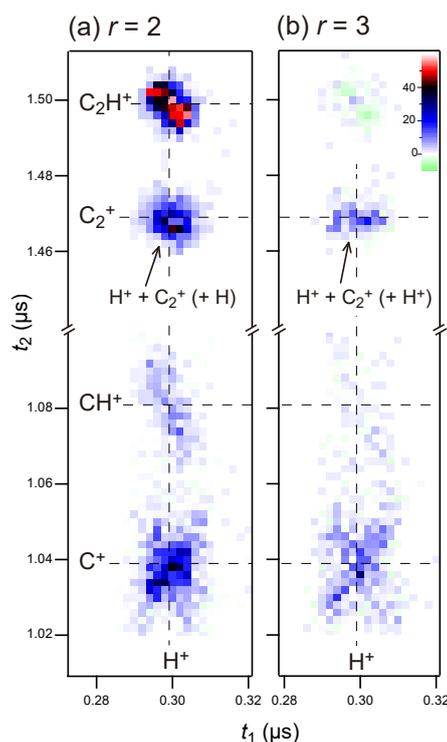


図 4 二重および三重電離条件におけるアセチレン分子の解離イオン相関図。

を確認した。また、高いエネルギー付与に伴う、プラズマ化学過程に起因する分子種も検出され、重イオン衝突の特徴について新たな知見を得ることができた。さらに、メタノール、1-, 2-プロパノールについても同様の結果を得た。

これらの測定の中で、液滴から放出される生成イオンのうち正の解離イオンについては、蒸気の気相分子由来の解離イオンが同時に大量に生成されるため、その信号に埋もれ、検出感度や信頼性が著しく下がってしまう問題が明らかになった。この問題を解決するため、新たに、前方散乱イオン相関測定法を開発した。これにより、埋もれていた正の解離イオン種の分析が可能になると同時に、サブミクロンサイズの液滴との衝突に関する知見を選択的に得られることを明らかにした。

(5) アミノ酸分子であるグリシン分子を気相標的として実験を行い、二次電子個数との同時測定から、多重電離にも伴う解離パターンを調べた。図6に示すように、多重電離の度合いの増加に伴う解離イオン分布の変化を定量的に明らかにした。解離分布が多重電離に強く依存することに加え、過去の電子照射や紫外線照射と比較して、内部エネルギーへの高いエネルギー付与の効果も確認できた。次に比較のため、グリシン分子を溶解させた水液滴に対して、前述のエタノール液滴で確立した測定手法を適用し、炭素イオン照射に伴う正・負の各二次イオン種の収量を得た。負イオンでは、プロトン脱離したグリシンが強く観測され、解離イオンとしては  $\text{OH}^-$ ,  $\text{CN}^-$ ,  $\text{OCN}^-$ ,  $\text{COOH}^-$ などが生成されることが分かった。正イオンでは、プロトン付加したグリシン分子が強く観測された。解離イオンでは、主に気相分子の1重電離でも生成されていた  $\text{CH}_2\text{NH}_2^+$ が主に検出された。気相分子においては、さらに水素脱離した  $\text{CH}_2\text{N}^+$ が同程度の強度で生成され、加えて、多重電離に伴う小さな解離片も多数検出されたが、液滴表面の反応ではそれらの生成は大きく抑制されることが分かった。

<引用文献>

- [1] T. Majima et al., Phys. Rev. A 90, 062711(1-8) (2014).
- [2] T. Majima et al, J. Phys.: Conf. Ser., 635, 012021(1-6) (2015).

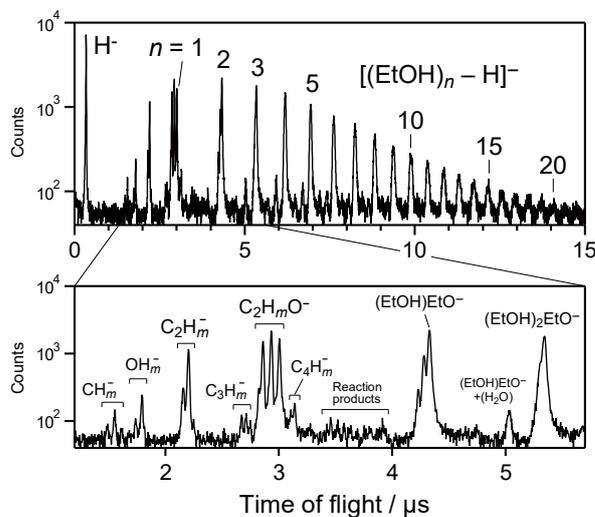


図5 エタノール液滴から放出される負の二次イオン種の質量スペクトル。

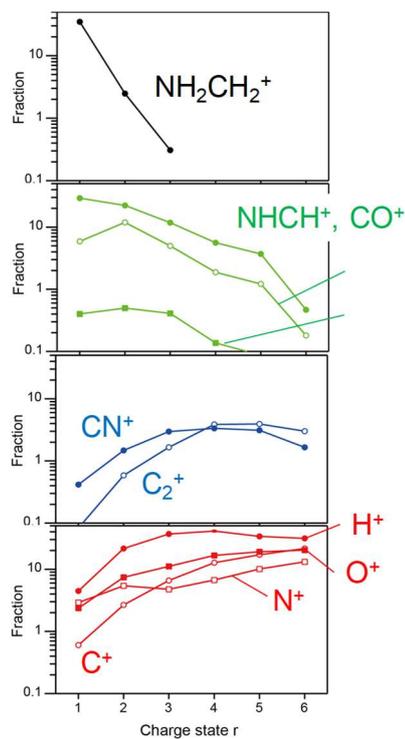


図6 多重電離されたグリシン分子からの生成イオン割合の、多重電離度合いに対する依存性。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yoshida S., Majima T., Tsuchida H., Saito M.	4. 巻 49
2. 論文標題 Kinetic energy distributions of the fragment ions from multiply ionized C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> as functions of the charge state of the intermediate states	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 X-Ray Spectrometry	6. 最初と最後の頁 177 ~ 183
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/xrs.3084	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kitajima Kensei, Tsuchida Hidetsugu, Majima Takuya, Saito Manabu	4. 巻 72
2. 論文標題 Effects of electronic stopping power on fast-ion-induced secondary ion emission from methanol microdroplets	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The European Physical Journal D	6. 最初と最後の頁 169 ~ 169
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjd/e2018-90218-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kitajima Kensei, Tsuchida Hidetsugu, Majima Takuya, Saito Manabu	4. 巻 150
2. 論文標題 Secondary electron-induced biomolecular fragmentation in fast heavy-ion irradiation of microdroplets of glycine solution	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 095102 ~ 095102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5081883	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Majima Takuya, Murai Taro, Yoshida Shintaro, Saito Manabu, Tsuchida Hidetsugu, Itoh Akio	4. 巻 421
2. 論文標題 Fragmentation of multiply ionized CF <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> F induced by charge-changing collisions with fast carbon ions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 International Journal of Mass Spectrometry	6. 最初と最後の頁 25 ~ 32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1016/j.ijms.2017.05.017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshida S., Majima T., Asai T., Matsubara M., Tsuchida H., Saito M., Itoh A.	4. 巻 408
2. 論文標題 Kinetic energy distributions of product ions from singly and multiply ionized C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> molecules induced by 0.8 MeV C <sup>+</sup> collisions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms	6. 最初と最後の頁 203 ~ 208
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1016/j.nimb.2017.03.100	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kitajima Kensei, Majima Takuya, Nishio Tatsuya, Oonishi Yoshiki, Mizutani Shiori, Kohno Jun-ya, Saito Manabu, Tsuchida Hidetsugu	4. 巻 424
2. 論文標題 Mass spectrometric study of the negative and positive secondary ions emitted from ethanol microdroplets by MeV-energy heavy ion impact	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms	6. 最初と最後の頁 10 ~ 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1016/j.nimb.2018.03.029	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nomura Shinji, Tsuchida Hidetsugu, Kajiwara Akihiro, Yoshida Shintaro, Majima Takuya, Saito Manabu	4. 巻 147
2. 論文標題 Dissociation of biomolecules in liquid environments during fast heavy-ion irradiation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Journal of Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 225103 ~ 225103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi:10.1063/1.5009367	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 間嶋拓也, 北島謙生, 大西佳樹, 斉藤学, 土田秀次, 伊藤秋男	4. 巻 103
2. 論文標題 高速重イオン照射に伴う微小液滴からの正負二次イオン質量分析手法の開発	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 放射線化学	6. 最初と最後の頁 51-54
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Nomura, H. Tsuchida, R. Furuya, T. Majima, and A. Itoh	4. 巻 389-390
2. 論文標題 Fast Heavy-Ion Radiation Damage of Glycine in Aqueous Solution	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms	6. 最初と最後の頁 28-32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nimb.2016.11.019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計44件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 T. Majima
2. 発表標題 Fragmentation of multiply ionized polyatomic molecules in fast heavy ion collisions
3. 学会等名 TMU Symposium on Physics of Highly Charged Ions (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Yoshida, T. Majima, T. Asai, H. Tsuchida, and M. Saito
2. 発表標題 Systematic study of kinetic energy distributions of fragment ions from multiply ionized C <sub>2</sub> H <sub>2n</sub> (n = 1-3) as functions of the charge states
3. 学会等名 19th International Conferences on the Physics of Highly Charged Ions
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 間嶋拓也
2. 発表標題 真空内サブミクロン液滴への重イオン照射：生成物イオンの質量分析とナノサイズ効果
3. 学会等名 大阪大学産業科学研究所附属量子ビーム科学研究施設平成30年度成果報告会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 間嶋拓也, 磯部真志, 吉田慎太郎, 土田秀次, 斉藤学
2. 発表標題 高速重イオン衝突によるグリシン分子の多重電離と解離過程
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 磯部真志, 間嶋拓也, 土田秀次, 斉藤学
2. 発表標題 MeV重イオン衝突によって気相分子から生成される解離負イオンの測定
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水谷汐里, 間嶋拓也, 北島謙生, 斉藤学, 土田秀次
2. 発表標題 MeV重イオンとエタノール液滴の衝突: 放出二次イオン種に対する液滴サイズ効果
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 北島謙生, 土田秀次, 間嶋拓也, 水谷汐里, 斉藤学
2. 発表標題 高速イオンによる液滴のトラック内反応に関する研究
3. 学会等名 フォーラム 21 - イオンビームを用いた物理とその応用 -
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Mizutani, T. Majima, K. Kitajima, M. Saito, and H. Tsuchida
2. 発表標題 Coincidence measurements of secondary ions and forward-scattered projectiles in fast heavy-ion collisions with microdroplets
3. 学会等名 第19回「イオンビームによる表面・界面解析」特別研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Mizutani, T. Majima, K. Kitajima, M. Saito, and H. Tsuchida
2. 発表標題 Collisions of heavy ions with liquid ethanol droplets: coincidence between secondary ions and forward-scattered projectiles
3. 学会等名 量子理工学教育研究センター第19回公開シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 磯部真志, 間嶋拓也, 土田秀次, 斉藤学
2. 発表標題 高速重イオン衝突によって気相グリシン分子から生成される解離負イオンの測定
3. 学会等名 量子理工学教育研究センター第19回公開シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 水谷汐里, 間嶋拓也, 北島謙生, 斉藤学, 土田秀次
2. 発表標題 MeVイオン衝突によるエタノール液滴からの二次イオン放出: 液滴透過イオンとの相関測定法の開発
3. 学会等名 原子衝突学会第43回年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 北島謙生, 間嶋拓也, 斉藤学, 土田秀次
2. 発表標題 高速イオンによるメタノール液滴の二次イオン生成過程: 電子的阻止能依存性
3. 学会等名 原子衝突学会第43回年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 磯部真志, 間嶋拓也, 土田秀次, 斉藤学
2. 発表標題 MeV重イオン衝突によって気相グリシン分子から生成される解離負イオンの測定
3. 学会等名 原子衝突学会第43回年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 北島謙生, 間嶋拓也, 斉藤学, 土田秀次
2. 発表標題 高速イオンとメタノール液滴の衝突における二次イオン収量の電子的阻止能依存性
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Majima, S. Yoshida, M. Matsubara, H. Tsuchida, and M. Saito
2. 発表標題 Fragmentation dynamics of multiply ionized acetylene: dependence on the charge state of intermediate ions
3. 学会等名 30th International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Kitajima, T. Majima, S. Mizutani, M. Saito, and H. Tsuchida
2. 発表標題 Mass spectrometric study of negative secondary ions emitted from ethanol microdroplet surfaces by fast heavy ions
3. 学会等名 30th International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Nomura, H. Tsuchida, A. Kajiwara, T. Majima, and M. Saito
2. 発表標題 Fast ion-induced dissociation of biomolecules in liquid water environments
3. 学会等名 8th International Symposium Atomic Cluster Collisions (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 間嶋拓也
2. 発表標題 真空内微小液滴への重イオン照射：反応生成物イオンの質量分析的研究
3. 学会等名 第60回放射線化学討論会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 北島謙生, 間嶋拓也, 水谷汐里, 斉藤学, 土田秀次
2. 発表標題 MeVイオン衝突によるエタノール液滴中の放射線分解とラジカル重合
3. 学会等名 原子衝突学会第42回年会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 水谷汐里, 間嶋拓也, 北島謙生, 斉藤学, 土田秀次
2. 発表標題 レーザー回折法による液滴サイズ評価システムの構築
3. 学会等名 原子衝突学会第42回年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 野村真史, 土田秀次, 梶原章弘, 間嶋拓也, 斉藤学
2. 発表標題 水溶液中の生体分子の高速重イオン放射線分解における抑制効果
3. 学会等名 日本原子力学会2017年秋の大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 北島謙生, 間嶋拓也, 水谷汐里, 斉藤学, 土田秀次
2. 発表標題 エタノール液滴からの高速イオン誘起反応中間体の検出
3. 学会等名 第11回分子科学討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉田慎太郎, 間嶋拓也, 松原正弥, 磯部真志, 土田秀次, 斉藤学
2. 発表標題 高速イオン衝突により多重電離した炭化水素分子の解離イオン運動量画像分光
3. 学会等名 第11回分子科学討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 梶原章弘, 野村真史, 間嶋拓也, 今井誠, 斉藤学, 土田秀次
2. 発表標題 高速重イオン衝突によるアミノ酸分子分解への水溶液環境の効果
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 北島謙生, 間嶋拓也, 水谷汐里, 斉藤学, 今井誠, 土田秀次
2. 発表標題 高速重イオンによるメタノール液滴中の放射線分解とラジカル反応
3. 学会等名 量子理工学教育研究センター第18回公開シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 間嶋拓也, 松原正弥, 吉田慎太郎, 磯部真志, 土田秀次, 斉藤学
2. 発表標題 高速重イオン衝突におけるW(CO)6分子への内部エネルギー付与の評価
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 土田秀次, 野村真史, 梶原章弘, 間嶋拓也, 斉藤学
2. 発表標題 高速重イオン照射による液体内生体分子の分解
3. 学会等名 日本原子力学会2018年春の年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Majima
2. 発表標題 Positive and negative ion emission from ethanol droplets induced by fast ion collisions in vacuum
3. 学会等名 12th Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 K. Kitajima, T. Majima, Y. Oonishi, H. Tsuchida, and A. Itoh
2. 発表標題 Formation of protonated and deprotonated cluster ions from ethanol droplets induced by fast carbon ions
3. 学会等名 27th International Conference on Atomic Collisions in Solids (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 S. Nomura, H. Tsuchida, R. Furuya, T. Majima, and A. Itoh
2. 発表標題 Fast heavy-ion radiolysis of glycine molecules in liquid water environments
3. 学会等名 27th International Conference on Atomic Collisions in Solids (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 K. Kitajima, T. Majima, Y. Oonishi, H. Tsuchida, and A. Itoh
2. 発表標題 Protonated and deprotonated cluster ions emitted from liquid microdroplets induced by MeV-energy ion irradiation
3. 学会等名 18th International Symposium on Small Particles and Inorganic Clusters (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 T. Majima, S. O. Yoshida, M. Matsubara, T. Asai, H. Tsuchida, M. Saito and A. Itoh
2. 発表標題 Coincidence measurements between multiple ionization and fragmentation of polyatomic molecules in fast ion collisions
3. 学会等名 12th Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 S. O. Yoshida, T. Majima, T. Asai, M. Matsubara, H. Tsuchida, M. Saito and A. Itoh
2. 発表標題 Deformation of multiply charged C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> ions produced in charge-changing collisions of 0.8-MeV C <sup>+</sup> ions
3. 学会等名 18th International Conferences on the Physics of Highly Charged Ions (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 間嶋拓也, 吉田慎太郎, 松原正弥, 村井太郎, 土田秀次, 斉藤学, 伊藤秋男
2. 発表標題 高速重イオン衝突におけるCF <sub>3</sub> -CH <sub>2</sub> F分子の多重電離および解離過程
3. 学会等名 日本物理学会2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 松原正弥, 吉田慎太郎, 間嶋拓也, 土田秀次, 斉藤学
2. 発表標題 高速イオン衝突による窒素分子解離時の運動エネルギー放出分布II: 荷電変換条件に対する依存性
3. 学会等名 日本物理学会2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 野村真史, 梶原章弘, 間嶋拓也, 今井誠, 斉藤学, 土田秀次
2. 発表標題 水溶液環境下にあるアミノ酸の重イオン放射線分解: 入射粒子種依存性
3. 学会等名 日本物理学会2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 北島謙生, 間嶋拓也, 大西佳樹, 土田秀次, 伊藤秋男
2. 発表標題 高速イオン照射下におけるエタノール液滴内での分子間プロトン移動反応
3. 学会等名 第10回分子科学討論会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 間嶋拓也, 北島謙生, 大西佳樹, 斉藤学, 土田秀次, 伊藤秋男
2. 発表標題 高速重イオン照射に伴う微小液滴からの正負二次イオン質量分析手法の開発
3. 学会等名 第59回放射線化学討論会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 K. Kitajima, T. Majima, Y. Oonishi, S. Mizutani, M. Saito, and H. Tsuchida
2. 発表標題 Mass spectrometric study of secondary ions emitted from ethanol microdroplets induced by fast carbon ions
3. 学会等名 第17回「イオンビームによる表面・界面解析」特別研究会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 S. Nomura, A. Kajiwara, T. Majima, M. Saito, and H. Tsuchida
2. 発表標題 SIMS study of fast-heavy ion radiolysis of proline in aqueous solution
3. 学会等名 第17回「イオンビームによる表面・界面解析」特別研究会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 野村真史, 梶原章弘, 間嶋拓也, 斉藤学, 土田秀次
2. 発表標題 液体ジェットを用いた生体分子含有水溶液の高速重イオン放射線分解
3. 学会等名 フォーラム 21 - イオンビームを用いた物理とその応用 -
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉田慎太郎, 松原正弥, 間嶋拓也, 土田秀次, 斉藤学
2. 発表標題 高速イオン衝突におけるC <sub>2</sub> H <sub>2</sub> 分子の解離イオン-中性解離片間の運動量ベクトル相関
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 [10]野村真史, 梶原章弘, 間嶋拓也, 今井誠, 斉藤学, 土田秀次
2. 発表標題 水溶液環境下におけるプロリンの重イオン放射線分解
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 土田秀次, 野村真史, 梶原章弘, 間嶋拓也, 斉藤学
2. 発表標題 真空内液体ジェットを用いた水溶液中の生体分子の高速重イオン照射損傷
3. 学会等名 原子力学会2017年春の年会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻量子ビーム科学(3-1)加速器グループ  <a href="http://www.nucleng.kyoto-u.ac.jp/Groups/Gr3/">http://www.nucleng.kyoto-u.ac.jp/Groups/Gr3/</a></p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	土田 秀次  (Tsuchida Hidetsugu)  (50304150)	京都大学・工学研究科・准教授    (14301)	