

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 24 年 4 月 25 日現在

機関番号：22604
 研究種目：新学術領域研究（研究課題提案型）
 研究期間：2009 ～ 2011
 課題番号：21200051
 研究課題名（和文） 卓上静電型イオン蓄積リングの開発とマクロ分子科学への応用
 研究課題名（英文） Development of a tabletop electrostatic ion storage ring
 for macromolecular science
 研究代表者
 松本 淳 (MATSUMOTO JUN)
 首都大学東京・理工学研究科・助教
 研究者番号：10443029

研究成果の概要（和文）：周長約 0.8 m の超小型静電型イオン蓄積リング (μE -ring) を設計・製作を行った。単に小型化するだけでなく他研究施設へ可搬な装置を目指した。首都大に設置されている大きさ 10 倍のイオン蓄積リングを参考にし、イオンビームの安定周回条件をシミュレーションにより検討した。小型化に伴う要求される工作精度や組み上げ精度を考慮に入れながらイオン蓄積リング本体ならびにビーム制御系・粒子検出系の設計・製作を行った。

研究成果の概要（英文）：A table top electrostatic ion storage ring with the circumference of 0.8 m was designed and built. The design concept of the ring is not only miniaturization but also transportable for various research facilities outside of the university. Stability of ion trajectories in the ring was considered by ion optical simulations by referring from the electrostatic storage ring with ten times in size equipped at Tokyo metropolitan university. Then the tabletop electrostatic ion storage ring and its electric power supply and particle detector have been developed with taking care of accuracies of machining and assemblage due to the miniaturization.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	8,400,000	2,520,000	10,920,000
2010 年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
2011 年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
年度			
年度			
総計	23,800,000	7,140,000	30,940,000

研究分野：化学

科研費の分科・細目：基礎化学・物理化学

キーワード：クラスター，励起分子素過程，イオン蓄積リング

1. 研究開始当初の背景

近年、超高速分光技術の発展は目覚ましく、反応動力学実験の対象はフェムト秒を超えてアト秒の領域にまで入りつつある。このような技術的背景を鑑みると、遅い反応の観測は容易であるように思いがちである。確かに

ナノ秒からマイクロ秒領域における反応の観測は、以前よりはるかに容易になっている。しかし対象を孤立分子とした場合、ミリ秒から秒のオーダーの遅い反応の観測は決して容易ではない。遅い反応を周囲との相互作用のない状態で観察するためには、対象を真空

中に長時間浮かせておく必要がある。また、多くの場合「遅い反応」の実態は「たまにしか起こらない反応」であり、核や電子の動きが遅いわけではない。このような「遅い反応」は基礎的な化学反応の一形態であり（例えばシストランス異性化）、そのダイナミクスを調べることは非常に重要であるものの、技術的には困難な課題である。

イオントラップはミリ秒領域の遅い反応の研究に威力を発揮するが、反応動力学に関する知見を得ることが困難であり、中性の反応生成物を検出することもできない。イオンビームのレーザー分光は質量選別した化学種の電子状態や振動状態に関する知見も得ることができる優れた手法であるが、遅い反応、断面積の小さい反応の研究には適さない。

軽イオンの反応について、この問題はイオン蓄積リングを反応研究に利用するというアイデアにより一気に解決し、90年代には極めて基本的な反応（例えば $\text{HD}^+ + e^- \rightarrow \text{H} + \text{D}$, $\text{He}^+ + e^- \rightarrow \text{He}$ ）について決定的なデータが得られた。当時使われたリングは高エネルギーイオンビームを磁場で制御して蓄積する巨大な装置であった。その後、イオンの制御を静電場のみで行う静電型イオン蓄積リング（E-ring）が開発され、従来の磁場型リングでは困難であったクラスターのような重いイオンの蓄積が容易になった。E-ringのサイズは磁場型とは比較にならないほど小さく、孤立巨大分子研究の強力なツールとして注目されている。

今日、巨大分子イオン研究分野は急速に発展している。この広い研究領域をカバーするには世界のリングの数はあまりに少なく、建設中、計画中のリングを含めて十指に満たないのが現状である。汎用機器としての発達を妨げている原因の一つがそのサイズである。周長 8 m の装置は、加速器のセンスでは極めて小型と言えるが、分子科学のセンスではまだ十分に大きい装置である。

2. 研究の目的

本研究の第1の目的は、静電場によるイオン制御のスケールリング則を利用して、超小型、可搬のイオン蓄積リング（ $\mu\text{E-ring}$ ）を製作し、その性能を評価することである。現有のE-ringで可能であった種々の実験が $\mu\text{E-ring}$ でも実行可能であることを検証していく。第2の目的は $\mu\text{E-ring}$ 独自の研究を始めることである。小型であることの利点を生かして短寿命遅延過程の研究（one-pass ビーム実験とE-ring 実験のギャップを埋める）や光誘起解離ダイナミクス研究を推進したい。本研究の第3の目的は、 $\mu\text{E-ring}$ の可搬性を利用し、従来E-ring実験の対象にはできなかった学外施設における持ち込み利用の可能性を探ることである。ケーススタディーとして学内の多

価イオンビーム装置と連結し、蓄積寿命測定や衝突実験を行う。リングの操作性を向上させることにより、将来的目標である放射光照射実験によるイオン冷却速度の精密測定や巨大共鳴の観測に向けて準備を進めたい。さらに、小型、一体型であることの利点の一つであるリング温度の制御性について、予備的データの収集を行う。

3. 研究の方法

本研究では、首都大学東京に設置されている静電型イオン蓄積リングの約 1/10 の大きさの静電型イオン蓄積リングを製作することである。イオン蓄積リング内でイオンが周回運動するということは、イオンの運動エネルギーと電場の強さによって定まる閉じた軌道が存在することである。静電波によるイオン制御のスケールリング則を利用し、リングを構成する各々の電極を 1/10 に縮小すれば、イオンビームは同じ条件で周回するはずである。しかし、この原則はビームの中心軌道について成り立つものであり、イオンビームは必ずしも平行ビームとはならず中心軌道から外れたイオンがこの軌道の周りを中心に振動する運動する（この振動をベータatron振動という）。ビームを効率よく周回させるためには、中心軌道の最適値を求めるだけでなく、ベータatron振動の安定条件を検討する必要がある。それゆえ、まず縮小した静電型イオン蓄積リングのイオンビームの軌道シミュレーションから行った。

次にイオン軌道シミュレーションソフト・SIMIONを用いたシミュレーションを行った。このソフトは、実際に電極を配置しそれらに電位を印可したときに生じる電場を計算し、そこをイオンがどのように飛行するかシミュレーションするものである。マトリックス計算では電極端部の電場は理想的に途切れるのに対し、SIMIONでは、電極端部の電場の漏れなど周囲の環境に合わせて計算を行うことができるため、より実際に即した条件で軌道を評価することができる。

これまでに行ったマトリックス計算による安定周回条件の計算とSIMIONによる電場・イオンビーム軌道のシミュレーションの結果を用いた再帰的な最適化から卓上静電型イオン蓄積リングの仕様を決定した。この仕様にもとづき実際の電極の設計・製作を行った。

4. 研究成果

(1) 静電型イオン蓄積リングについて

図1に静電型イオン蓄積リングの概略図を示す。リングはレーストラック型をしており、二つの160度偏向電極と四つの10度偏向電極によりイオンビームを周回させる。10度偏向電極をスイッチすることでイオンビーム

の入射・掃き出しが行われる。10度偏向電極

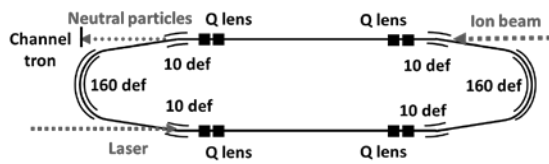


図1：静電がイオン蓄積リングの概略図

の近くになる四組の静電型四重極レンズ（Qレンズ）によりイオンビームの収束を変化させ長時間安定して周回できるよう調節する。

(2) 卓上静電型イオン蓄積リングのマトリックス計算によるビームパラメータの検討

イオンビームの軌道シミュレーションは、加速器で一般的に使われている転送行列からイオンビームの周回安定条件を導出した。この方法は、荷電粒子の運動方程式を解くところから出発する。荷電粒子がどのように中心軌道（進行方向）と直交する面内で運動するかを Twiss パラメータより記述する。このパラメータは 3 つの関数で構成されている。ビームの広がりを表す β 関数、ビームの広がりの変化率を表す α 関数、ビームの角度広がりを示す γ 関数である。10度・160度偏向電極、Q レンズ、ドリフト領域に対応する行列要素をイオンビームが通過する順番で1周分掛け合わせ周回分の行列要素を導出する。この行列からビーム軌道が安定となる条件を求める。計算プログラムでは水平・垂直方向についてこの条件を求め、両方向とも安定となる条件を求めた。この安定条件は、Q レンズの対（収束・発散）の制御電圧の関数として求められる。

まず、TMU E-ring のサイズを単純に 1/10 に縮小して計算を行った。その結果、 α 関数の変化はなく β 関数は 1/10、 α 関数は 10 倍となった。しかし、理論的には β 関数の平方根がビーム径の縮小倍率となるために、ビーム径は単純に 1/10 ではなく 1/3 程度にしかならない。したがって、各電極を 1/10 に縮小するとイオンビームが電極にかなり接近または触れてしまう可能性がある。実際に Q レンズを例にとると、1/10 に縮小した場合、電極の間隔が 2.5 mm に対してビーム径は 2.3 mm 程度まで広がるのがわかった。このためイオンビームと電極の間隔を適切な大きさにするために、Q レンズの機能を維持したままレンズ長と電極の間隔を変化させる必要があった。10度偏向電極、160度偏向電極についても、ビーム径と電極に印可する電圧のバランスを取りながら電極の長さや間隔を変化させ、最適化を試みた。

Ar^+ を 20 keV の初期エネルギーでリング内に入射したときの、各電極の寸法と印可する電圧を表 1 に示す。それぞれの電圧は軌道計

算に対応した電場を放電しない適切な電極

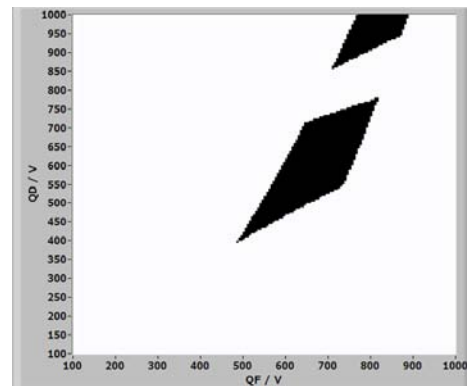


図2 Ar^+ を 20keV で入射したときの周回安定条件の Q レンズの電圧依存性

間隔のバランスを考慮に入れて決定した。この時のイオンビームの周回安定条件を図 2 に示す。Q レンズの収束・発散部の電圧の組み合わせにより 4 つの安定領域が存在することがわかった。今回、Q レンズに印可する電圧が低くビーム径の変化が一番小さい領域 1 を採用することとした。初期のビームエミッタンスを $15\pi \text{ m} \cdot \text{rad}$ としたときのビーム径の変化の様子を図 3 に示す。レーストラックの面内のビーム広がりは約 5.4 mm で、Q レンズの電極間隔 10 mm より小さく、レーストラックに垂直方向の広がりは 4.8 mm で、Q レンズ、10度・160度偏向電極にイオンビームが触れることはない。また、入射イオンのエネルギーを $15 \cdot 10 \text{ keV}$ の場合にも同様のシミュレーションを行った。その結果、安定周回条件は入射エネルギーが低くなるにつれて Q レンズに印可する電圧は低くなり、イオンビーム径は 20 keV の場合を概ね一致することがわかった。したがって、リングの各電極の電圧を適切に設定することで 20 keV より低いエネルギーのイオンでも蓄積可能である。

(3) SIMION による電場・イオンビーム軌道のシミュレーション：マトリックス計算で最適化した電位配置を電極形状とともに SIMION に入力しシミュレーションを行った。このま

表 1 各電極の寸法と Ar^+ を 20keV で入射したときの印可電圧の最適値

160度偏向電極	
軌道半径	25 mm
電極幅	5 mm
電極高さ	40 mm
印可電圧	$\pm 4.2 \text{ kV}$
10度偏向電極	
軌道半径	62 mm
電極幅	4 mm
電極高さ	40 mm
印可電圧	$\pm 1.3 \text{ kV}$
四重極レンズ (Q レンズ)	
ボア径	10 mm
長さ	20 mm
印可電圧	$\pm 0.65 \text{ kV}$

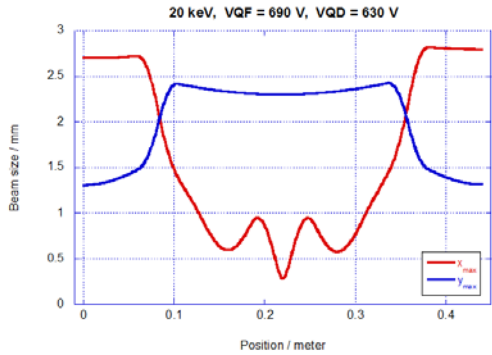


図3 周回上のビームサイズ (半径)

ま計算を行うとビームが収束する点がマトリックス計算で得られる結果とは異なり、安定周回させることができなかつた。SIMIONによる電場の計算結果を見たところ、電場が電極外側にせり出すような形状をしており、それが静電レンズの役割をしてしまうため、イオンビームが意図しない場所で収束してしまうことがわかった。そこで、電場補正用電極をSIMIONのシミュレーションに組み入れマトリックス計算で得られた結果を再評価した。160度・10度偏向電極の端部にグラウンドの電位を持たしたφ4 mmの穴を持つ板を置くと、概ねマトリックス計算で得られたイオンビームの軌道が得られた。このように実際に即した電極配置を用いてSIMIONに入力し計算し、その結果をマトリックス計算に用いてと再帰的にシミュレーションを行い、電極の形状や印可する電圧を最適化した。最適化した結果を図4に示す。シミュレーション上ではビームを直線部中央より軌道中心から±1mm、発散角±0.2°でスタートした場合、電極に当たらずに周回し続けた。また、イオンの入射条件を変化させてTwissパラメーターからイオンビームのエミッタンスを見積もった。その結果、使用予定のイオン源のエミッタンスを持ったビームをリング内に入射した場合でも蓄積可能だということがわかった。

(4) 卓上静電型イオン蓄積リングの設計・製作：各電極は、装置の軽量化と焼きだしを効率よく行うためにアルミニウムを用いて製作を行った。その他、絶縁材は低ガス放出で約200°Cの焼き出しに対応できるようにアルミナ、カプトンを用いた。図5にμリングの電極部の写真を示した。

①10度偏向電極：TMU e-ringでは平行平板型電極を使用していた。しかしながら、イオン



図4 Ar⁺を20 keVで入射したときのSIMIONのシミュレーション結果

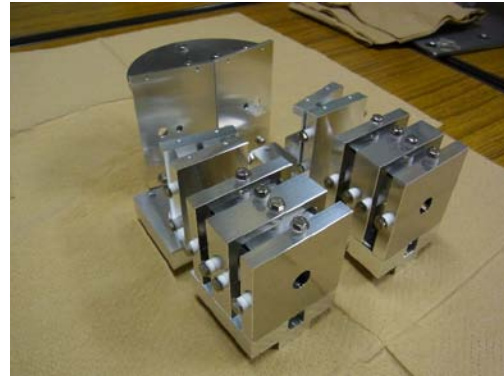


図5 μE-ring 電極部 (160度偏向電極, 10度偏向電極, Qレンズ)

ビームがこの電極を通過する回数はイオン蓄積中の方が圧倒的に多いため、蓄積中のイオンビームの軌道に沿って曲率を持つセクター型電極とした (軌道半径：62.6 mm, 電極の高さ：38mm)。また、4つの内の一つはビーム入射部のゲートの役割をし、もう一つはイオンビームの掃き出しに使用する。イオンビームの入射・掃き出し時には、電極に印可している電圧を高速でスイッチンググラウンド電位に落とす必要がある。このためこれらの電極の静電容量が最小となるように、極力コンパクトな設計とした。

②160度偏向電極：160度偏向電極は、イオンビーム軌道半径25 mm, 電極の高さ40 mmとした。20 keVのイオンビームを蓄積するとき、これら電極間に最大10 kV近くの電位差がかけられる。超高真空であっても放電が起こらないような設計を検討した。電極の高さ40 mmは、電極内でイオンビームがこの方向に最大5 mm程度広がるというシミュレーション結果をもとに決定した。これによりイオンビームの通る場所では、ほぼ平行に均一な電場が形成され、通常電極の上下に付けられる電場の補正電極を置く必要がない。

③静電型四重極レンズ (Qレンズ)：Qレンズは、一般的にビームと電極が十分離れていれば、その電極の形状を円で近似することができる。今回の設計したイオン蓄積リングでは、電極のボア径が10 mmなのに対してイオンビームの直径が約5 mmの大きさとなり、SIMIONによる電場のシミュレーションでもその歪みの影響が出始めていた。したがって、周回による歪みの蓄積に起因するビーム透過率の低減を押さえるために、電極の形状を原理どおり双曲線とした。

④ベースプレート：イオン蓄積リングを構成する電極を固定するベースプレートは480 mm × 200 mmの一枚板で作られている。いくつかのフランジを連結してビームラインを構成する既存のTMU e-ringとは大きく異なる点である。ベースプレートを一枚板とす

ることによりフランジの締め付けによる組み上げ誤差がない。縮小設計による工作精度の要求とトレードオフとなる。10 度・160 度偏向電極、Q レンズは、アライメントを取りやすいようプレート上に溝を掘り、そこにはめ込む構造とした。これにより工作精度に近い精度でアライメントが可能となる。ベースプレートには、イオンビーム蓄積用電極のほか、配線用端子台、焼き出し用ヒーター、ビーム強度測定用ファラデーカップなどの付属品も容易に取り付けるために、板上にレーザー光学台のようなねじ穴を格子状に配置し、それぞれの製作段階で適切な治具や測定部品を適宜配置できるよう設計した。

⑤真空チャンバーの設計：イオンビームを長時間にわたり周回させるためには、真空チャンバー内を超高真空 (10^{-9} Pa 台) に保つ必要がある。この真空度に保てば、20 keV のイオンは数秒間蓄積可能だと TMU E-ring の実験結果からわかっている。このような超高真空を到達・維持するためにはベーキングが不可欠だ。温度を均一に素早く上げるため、当初アルミニウム製真空チャンバーを採用する計画した。 μ リングの大きさは約 50 cm × 約 20 cm の矩形であり、一般的に使われている太鼓型の真空チャンバーを使った場合には無駄な空間が多くベーキングの効率が悪くなる。そこで、直方体の形状をした「角チャンバー」の採用を検討した。太鼓型のチャンバーでは超高真空に対応したアルミニウム合金を使用したコンフラット型 (ICF) フランジが存在するものの、矩形フランジではそのような製品が安価で存在しなかった。そこでチャンバーはステンレス製とし矩形フランジ部分はスズシートを挟んで真空を保つ構造とした。チャンバーにはイオンビーム入射部、電流導入端子、真空計、直線導入器、真空ポンプなどを接続するため ICF152 フランジ 2 カ所、ICF70 フランジ 12 カ所、ICF34 フランジ 4 カ所設置した。

⑥超高真空ポンプの検討：蓄積リング内に長時間イオンビームを保持するためには、残留ガスとの衝突を極力抑える必要があるため、真空チャンバー内を 10^{-9} Pa 台の超高真空にする必要がある。チャンバーには真空ポンプの引き口として 2 つの ICF152 フランジがあり、片方に 300 L/sec のターボ分子ポンプをもう片方に 75 L/s のイオンポンプを設置した。 10^{-9} Pa 台の超高真空は 3 段階の排気を行い達成する。まずスクロールポンプにより 1 Pa 台までの粗挽きを行い、ターボ分子ポンプで 10^{-8} Pa 台まで排気を行う。ここで約 200 °C でベーキングを行う。ベーキング後の 10^{-8} Pa 台前半の真空での残留ガスの主成分は水素分子である。水素分子は軽いためターボ分子ポンプの排気速度は極端に小さくなる。そこでゲートバルブによりターボ分子ポンプを真空チャ

ンバーから切り離しイオンポンプで排気する。これにより 10^{-9} Pa 台の超高真空を得る。⑦ビーム制御部：ビーム制御用電源には、小型の高圧電源モジュールを使用し日本 NI 社 LabView より制御するシステムを構築した。電源モジュールはリングのそれぞれに印可する電圧を元に最大電圧を以下のように決定した：160 度偏向電極 (+5 kV, -5 kV:各 2 台、合計 4 台) 10 度偏向電極 (+2 kV, -2 kV:各 4 台、合計 8 台)、Q レンズ (+1 kV, -1 kV:各 8 台、合計 16 台)。これらのモジュールは 0 ~ 10 V の制御電圧を入力することにより出力電圧を制御することができる。また、ビーム入射部の 10 度偏向電極は、イオン入射時にビームを直進させ、蓄積時にはビームを偏向する必要があるため BEHLKE 社製高圧スイッチングモジュールを入れた回路を自作し電圧切り替えを可能とした。

⑧イオン入射部の設計：リングを超高真空に保ったままイオン源を接続するために、作動排気機能を持った真空槽を設計した。設計にあたりイオン源からリング内へイオンビームを効率良く輸送できるようシミュレーションを行った。この結果を元に現在、設計を行っている。

(5) 研究総括と今後の展望

既存の静電型イオン蓄積リングの縮小にあたりビームの輸送特性や電極形状を再検討に時間がかかり、当初の予定から遅れてしまった。しかしながら、装置の縮小化に伴う設計・製作上の問題点を浮き彫りにその対策を検討した。今後、装置を汎用化するにあたっての道筋を切り開いた。今後は、イオン源に接続し実際にイオンを周回させ設計どおり性能が出ているか検証していきたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① B. Wales, T. Motojima, J. Matsumoto, Z. Long, W.-K. Liu, H. Shiromaru and J. Sanderson, “Multiple ionization and complete fragmentation of OCS by impact with highly charged ions Ar^{4+} and Ar^{8+} at 15 keV q^{-1} ”, *Journal of Physics B*. **45**, 045205 (2012). 査読有
- ② J. Matsumoto, A. Leredde, X. Flechard, K. Hayakawa, H. Shiromaru, J. Rangama, C. L. Zhou, S. Guillous, D. Hennecart, T. Muranaka, A. Mery, B. Gervais, A. Cassimi, “Multiple-ionization and dissociation dynamics of rare gas dimer induced by highly charged ion

- impact”, *Physica Scripta*, **T144**, 014016 (2011). 査読有
- ③ T. Sato, T. Majima, Kenro Hashimoto, Kouhei Hashimoto, Y. Zama, J. Matsumoto, H. Shiromaru, K. Okuno, H. Tanuma, and T. Azuma, “Microhydration of the methylene blue cation in an electrospray ion source”, *The European Physical Journal D*, **63**, 189-194 (2011). 査読有
- ④ K Hayakawa, J Matsumoto, H Shiromaru and Y Achiba, “Dissociation of methanol dications produced by electron capture with and without transfer ionization”, *Journal of Physics B*. **44**, 075207 (2011). 査読有
- ⑤ J. Matsumoto, A. Leredde, X. Flechard, K. Hayakawa, H. Shiromaru, J. Rangama, C. L. Zhou, S. Guillous, D. Hennecart, T. Muranaka, A. Mery, B. Gervais and A. Cassimi, “Asymmetry in Multiple-Electron Capture Revealed by Radiative Charge Transfer in Ar Dimers”, *Physical Review Letters*, **105**, 263202 (2010). 査読有
- ⑥ A. E. K. Sundén, M. Goto, J. Matsumoto, H. Shiromaru, H. Tanuma, T. Azuma, J. U. Andersen, S. E. Canton and K. Hansen, “Absolute Cooling Rates of Freely Decaying Fullerenes”, *Physical Review Letters*, **103**, 143001 (2009). 査読有
- ⑦ K. Hayakawa, J. Matsumoto, H. Shiromaru and Y. Achiba, “Isotope effect in the dissociation of methanol dications produced by collision with Ar⁸⁺”, *Journal of Physics: Conference Series*, **163**, 012046 (2009). 査読有

[学会発表] (計9件)

- ① J. Matsumoto, M. Goto, T. Majima, H. Tanuma, T. Azuma, H. Shiromaru “Lifetime of metastable chain-form hydrocarbon anions stored in the TMU E-ring”, 3rd International Workshop on Electrostatic Storage Devices (2009.6, Aarhus, Denmark)
- ② T. Majima, K. Hanada, E. Kawaguchi, M. Goto, J. Matsumoto, H. Shiromaru, H. Tanuma, T. Azuma, “State dependent lifetimes of metastable O₂ measured by the TMU E-ring”, 3rd International Workshop on Electrostatic Storage Devices (2009.6, Aarhus, Denmark)

- ③ J. Matsumoto, M. Goto, Y. Zama, T. Majima, H. Tanuma, T. Azuma, H. Shiromaru, Y. Achiba, “Detection of the metastable chain hydrocarbon anions by an electrostatic ion storage ring”, XXVI International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions (2009.7, Kalamazoo, US)
- ④ T. Majima, K. Hanada, E. Kawaguchi, M. Goto, J. Matsumoto, H. Shiromaru, H. Tanuma, T. Azuma, “Lifetime measurement of the a¹Π_u metastable state of O₂⁺ using an electrostatic ion storage ring”, XXVI International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions (2009.7, Kalamazoo, US)
- ⑤ 松本淳、後藤基、座間優、間嶋拓也、田沼肇、東俊行、城丸春夫、阿知波洋次「準安定C₄H⁺、C₆H⁺の検出と寿命測定」第38回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム(2010.2,名古屋)
- ⑥ 間嶋拓也、川口瑛司、花田勝彦、後藤基、松本淳、城丸春夫、田沼肇、東俊行、「静電型イオン蓄積リングを用いた酸素イオン準安定状態の寿命測定」, 日本化学会第90春季年会(2010.3, 東大阪)
- ⑦ 松本淳、「イオン蓄積リングによる炭素クラスター負イオンの蓄積と寿命測定」(招待講演), 理研シンポジウム 第1回広がる原子分子物理研究: 宇宙空間における原子分子進化過程 (2010.12, 埼玉).
- ⑧ 松本淳、橋本浩平、間嶋拓也、城丸春夫、阿知波洋次、「卓上静電型イオン蓄積リング(μE-ring)の開発」, 日本化学会第91春季年会(2011.3, 横浜).
- ⑨ J. Matsumoto, G. Ito, T. Majima, H. Tanuma, T. Azuma, H. Shiromaru, “Lifetime measurements of chain hydrocarbon anions and electron detachment”, 4th International Workshop on Electrostatic Storage Devices (2011.7.9, Gatlinburg, Tennessee, USA)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本 淳 (MATSUMOTO JUN)

首都大学東京大学院・理工学研究科・
助教
研究者番号：10443029

(2)研究分担者

間嶋 拓也 (MAJIMA TAKUYA)
京都大学大学院・工学研究科・助教
研究者番号：50515038

(3)連携研究者

なし