

## 静電型イオントラップ内のビーム軌道に関する研究

(環境計測)

横田敦

### 1. はじめに

本研究室では分子イオンを振動基底状態に冷却し、衝突解離実験を行うことを目的として、静電型イオントラップの開発に取り組んできた。製作したイオントラップは分子イオンを目的とする数十～数百 msec のオーダーで蓄積することができる性能を持つ。蓄積されたイオンは時間と共に減少する。減衰結果から蓄積されたイオンは、入射直後に失われるもの、比較的初期に失われるもの、安定に蓄積されるものに分けられることがわかった。イオントラップの蓄積効率を高めるためには、それらの振る舞いの原因を解明する必要がある。イオンの振る舞いの違いはトラップ内のビーム軌道の違いに起因していると考えられるため、本研究ではトラップ内のイオンビーム軌道を実験的に調べることでイオントラップの性能を評価することを目的としている。

### 2. イオントラップの概要及びイオン蓄積実験

静電型イオントラップの概略図を図 1 に示す。イオントラップは反射電極、反射補助電極、およびアインツェルレンズから構成され、全長は約 500 mm である。トラップに入射されたイオンビームは、反射電極間を往復運動する。アインツェルレンズを設置することでイオンビームは安定に往復運動を続け、イオンはトラップ内に蓄積される。また反射電極からアインツェルレンズまでの電位勾配を一定に保つために反射補助電極を設置してある。

イオンビームの蓄積は、図 2 で示す実験装置で以下のように行った。イオン源(I.S.)で発生させたイオンビームをイオン源直後に設置した水平の平行平板デフレクターの電圧をスイッチングすることでパルス化する。トラップの出口側電極にはあらかじめパルスビームを跳ね返すだけの電圧を印加しておき、トラップにパルスビームを入射させる。出口側電極によって跳ね返されたパルスビームが入口側からトラップの外へ逃れる前に、入口側電極の電圧を約 100 nsec で立ち上げる。これによってパルスビームがトラップ内で周回運動を始める。パルスビームの時間幅

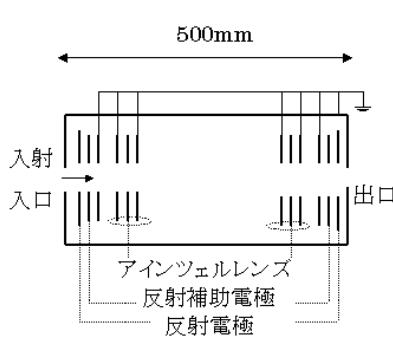


図 1 イオントラップ概略図

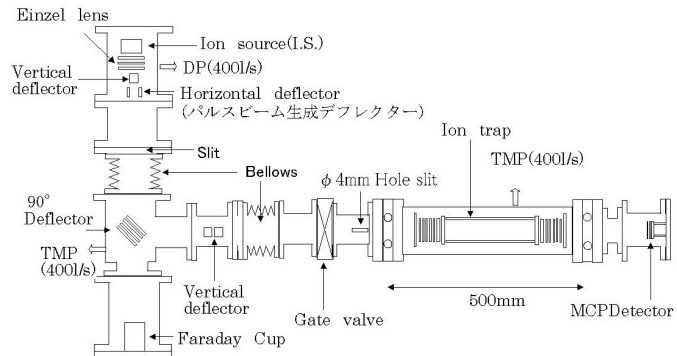


図 2 実験装置全体図

はトラップ内でのイオンの周回時間と同じに設定した。

今回使用した 1.2keV-Ar<sup>+</sup>イオンの場合、パルス幅は約 12 μsecである。トラップ内に閉じ込められたAr<sup>+</sup>イオンは周回運動を繰り返し、トラップ中の残留ガスとの電子捕獲衝突により中性化される。ここで生成される中性Ar数はトラップ内の蓄積イオン数に比例する。すなわち中性Arのカウント数を測定することで、間接的にトラップ内のイオン個数を測定することができる。

実験はトラップ内の真空度  $1.9 \times 10^{-8}$  Torrの条件下で、トラップ後方約 180 mmに設置したMCP検出器で中性Arを検出した。さらに時間経過に対する中性Arのカウント数をMCSで記録した。その結果を図3に示す。横軸は蓄積開始からの時間を表しており、測定間隔は 1 msecである。縦軸は出口側から逃げてきた中性Ar数を表している。図3に見られるように、蓄積時間の経過とともに中性Ar数が減少する様子が確認されたが、その傾きは蓄積時間帯で異なることがわかる。減少傾きの違いは図中に示した領域 I、II、IIIに分類される。領域 I は 0 msecから 1 msecであり、この区間ではトラップへ入射されるイオンの中で発散成分を強くもつイオンが多く混入されているため、グラフは急激な減衰を示す。領域 II は 1 msecから約 30 msecであり、この区間ではトラップへの入射条件を変えると、傾きが変化することが確認されている。領域 III は 30 msec以上であり、最も緩やかな減衰が表れる。この区間は入射条件に依存しない一定の傾きを持つことから、Ar<sup>+</sup>イオンの電子捕獲反応のみが行われる安定した領域といえる。

本研究ではこの時間経過に対する減少傾きの違いが、イオンビームのトラップ内での軌道の変化を反映していると考え、周回軌道を実験的に調べることを目的とした。

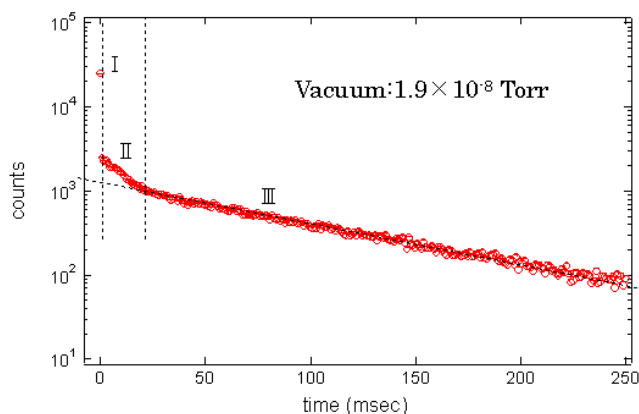


図3 トラップ開始後の中性 Ar 数測定結果

### 3. イオンビーム軌道測定実験

イオントラップから逃げてくる中性粒子の位置は、トラップ内を飛行しているイオンの位置を反映している。すなわちある特定の時間幅に逃げてきた中性粒子の分布はトラップ内のイオンビーム軌道を反映していると考えられる。そこでイオンビームを蓄積した際にトラップから逃げてくる中性粒子の 2 次元位置分布を異なる時間で測定することにより、イオンビーム軌道の時間変化の評価を行った。

前節の実験セットアップからMCP検出器のアノードを位置測定が行えるウェッジ&ストリップアノードに変更した。検出器からの信号はアンプでパルスの整形・増幅が行われた後、Analog-to-Digital Converter (以下ADC)でデジタル化され、コンピュータに位置情報が保存される。ここで本実験では、ある特定の蓄積時間帯に逃げてきた中性粒子の位置分布を調べるために、ADCへ接続されるゲート信号の遅延時間と測定時間幅を制御した。測定結果の一例を図4に示す。ここでX軸、Y軸はそれぞれビーム進行方向を基準として、水平方向と鉛直方向を表して

いる。また高さ方向はカウント数を表している。図 4(a)はトラップに蓄積せずに通過させたときの  $1.2 \text{ keV} \cdot \text{Ar}^+$  イオンビームの測定結果、図 4(b)は、蓄積開始後 40 msec から 50 msec までに得られた中性 Ar の測定結果である。(a)では幅の広いビームが観測され、(b)では幅が狭まる。これは中心軸付近のイオンビームだけが蓄積され続けるからだと考えられる。

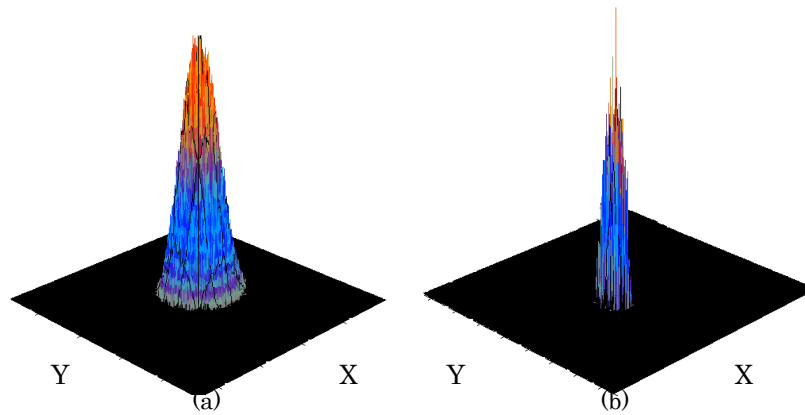


図4 2次元位置スペクトル(a) 蓄積せずに通過させた  $1.2 \text{ keV} \cdot \text{Ar}^+$  イオンビーム  
(b) 蓄積開始後 40 msec から 50 msec までに得られる中性 Ar

前述した中性 Ar 数の傾きが変化している 3つの時間帯における中性 Ar の位置スペクトル測定を行った。測定時間帯は領域 I、II、III の中の時間と対応する蓄積開始後 0 msec から 1 msec まで、3 msec から 13 msec まで、40 msec から 50 msec までとした。

位置スペクトルの X 軸、Y 軸に対する対称性を確認するため、全カウントを X 軸、Y 軸に対してそれぞれ射影し、積分値をプロットした。その結果より中性 Ar の位置スペクトルは、半値幅の等しい二次元ガウシアンであることが確認された。そこでスペクトルの解析は強度分布の中心からの距離に対する関数で表す。ただし測定時間帯を変えるとカウント数は変化する。以上を考慮し、位置スペクトルの中心座標からの中性 Ar 数を動径分布で表し、さらにカウント数の最大値を 1 で規格化した比で表すことにより、蓄積時間ごとの中性 Ar の密度分布の比較を行った。その結果を図 5 に示す。横軸が検出器中心からの距離、縦軸が動径分布のカウント比である。図 5 より蓄積時間の経過とともに検出される中性 Ar の密度分布は中心へとシフトすることが見て取れる。これはトラップ中を周回運動する微小な発散角度成分を持つイオンが、周回運動を繰り返すうちに安定軌道から外れトラップから失われた結果、軸付近のイオンのみが蓄積され続けたためであると考えられる。

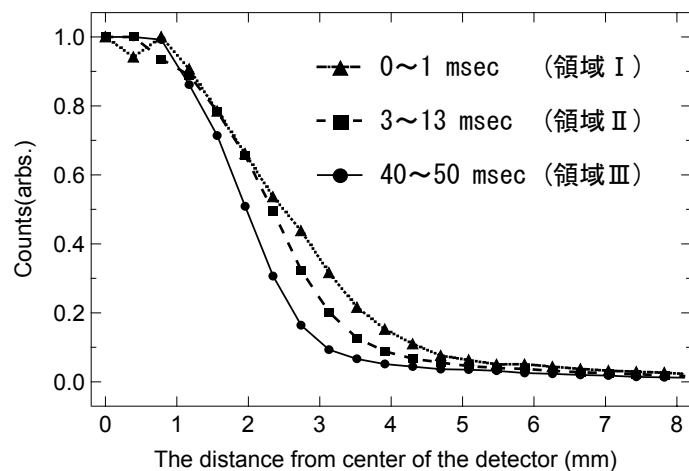


図5 検出器中心からの距離に対する中性 Ar 密度分布

#### 4. シミュレーション計算との比較

前節の実験結果は、微小な発散角度を持ってトラップに入射し、蓄積開始後 50 msec 以内に安定な軌道から外れてしまうイオンの存在を示唆している。その確認として SIMION.ver7.0 を用いてシミュレーションを行った。方法を以下に示す。

図 6 のようにフィールドフリー領域のトラップ中心から 1.2 keV-Ar<sup>+</sup>イオンを  $r$  と  $\theta$  の値を変えて、発射させる。ここで  $r$  はイオンと軸までの距離であり、 $\theta$  はイオンが軸に対してもつ角度である。 $r$  を 1 mm ずつ、 $\theta$  を 0.2 mrad ずつ変えていき、ある時間以上蓄積され続けるイオンの初期  $r$ - $\theta$  分布を求めた。

実験の測定時間と対応する蓄積時間 1 msec 以上と 50 msec 以上蓄積され続ける初期  $r$ - $\theta$  分布の結果を図 7 に示す。横軸が  $r$  で縦軸が  $\theta$  である。黒色で塗りつぶした部分が 50 msec 以上蓄積される範囲であり、ハッチで囲った部分が 1 msec 以上蓄積、50 msec 未満蓄積される範囲である。トラップ軸からの距離が 1 mm までは  $\theta$  が 3 mrad 程度まで広がっても、イオンは蓄積され続ける。この領域を安定軌道領域 A とする。 $r$  が 1 mm より大きくなると、 $\theta$  の値に依存せず蓄積されない領域がある。これを不安定軌道領域 B とする。 $r$  が 1.5~1.8 mm の場合、 $\theta$  が大きい領域で 1 msec 以上蓄積されるが、時間の経過とともに失われてしまうイオンが確認された。これを準安定軌道領域 C とする。領域 C 中のハッチで囲った範囲内のイオンは数 msec あるいは数十 msec 蓄積された後に、安定軌道から外れ電極に衝突してしまう。これらのイオンが時間経過とともに失われるイオンである。これは図 3 に示した領域 II の減少と対応していると考えられる。

周回軌道によるイオン損失が確認される  $r$  と  $\theta$  は図 7 よりおよそ  $r = 1.5$  mm で  $\theta = 2$  mrad 程度である。トラップ中心から検出器までの距離はおよそ 500 mm なので、蓄積時間で損失するイオンは検出器の半径 3.0 mm 付近に検出されることをシミュレーションは示す。一方実験結果からも、図 5 より半径 3.0 mm 付近でのイオン損失が確認されており、シミュレーション結果と一致している。

以上のシミュレーション結果より、トラップ効率を高めるためには図 7 に示される安定領域 A の分布にあうようなビーム径と発散角度をもつイオンビームをトラップ中心に入射できればよい。

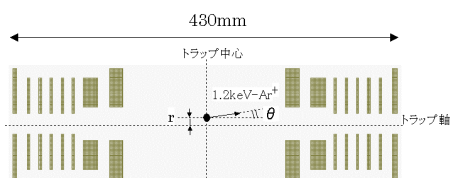


図 6 イオン軌道シミュレーション概念図  
 $r$ : イオンのトラップ軸からの距離  
 $\theta$ : トラップ軸に対するイオンの仰角

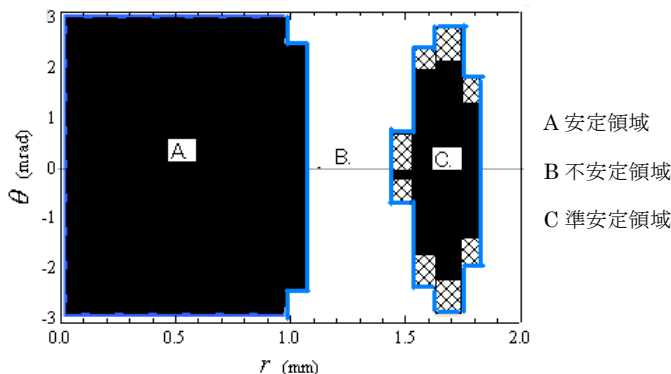


図 7 シミュレーション結果