

# 静電型イオントラップの開発

(環境計測) 三谷雅輝

## 1. はじめに

当研究室では現在、2原子分子イオンの解離性電離反応や解離性電子捕獲反応を調べている。これらの反応を調べるために2原子分子イオンを生成するのであるが、その際にイオンに与えられたエネルギーの一部が振動励起状態を作り出す。解離性電離反応や解離性電子捕獲反応の反応確率は分子イオンの振動状態に依存すると考えられる。しかし、振動状態を区別して、確率測定をすることは難しく、ほとんどなされていない。そこで振動基底状態にそろった分子イオンを作り出すために、ミリ秒のオーダーでイオンを蓄積するイオントラップを設計した。双極子モーメントを持つ分子イオンはこの方法で振動基底状態にそろえられる。実験に使用する2原子分子イオンには双極子モーメントをもち、同位体を使わない最も単純な2原子分子イオンである水素化ヘリウムイオンを使用する。

## 2. 設計

### 2.1. 真空

今回の目的である振動基底状態にそろった水素化ヘリウムイオンを作り出すためにトラップしなければならない時間、すなわち振動励起状態の寿命を図1から求めた。図1は水素化ヘリウムイオンの電子基底状態のエネルギーポテンシャルである[1]。水素化ヘリウムイオンの振動励起状態の寿命は表1のようになる。

一般的に、イオン源で生成された水素化ヘリウムイオンの振動励起状態は2~3のところピークをもつ。しかし、これはイオン源によって変わるので、今回はイオン源で生成される水素化ヘリウムイオンは第5振動励起状態にあると仮定して振動励起状態の寿命を計算した。

製作するイオントラップは静電型で、イオンを電位の箱の中に閉じ込めて往復させることにより冷却するための時間を得る方式である。

トラップされているイオンはイオントラップ内の残留ガスと衝突することで中性化したり、価数が変わったり、解離したりしてトラップ条件からはずれイオントラップを抜けていく。そのため、イオンビームを長時間トラップすることは、ビーム中のイオンの数の減少につながる。

そこで、2 keV 水素化ヘリウムイオンの残留ガスとの衝突断面積からトラップ内でのイオンの寿命を求めた。衝突断面積は解離断面積、電子捕獲断面積、イオン化断面積等の合計を  $1.5 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$  と仮定した。また、残留ガスの個数はトラップ周辺の真空度に比例する。そこで、真空度ごとにトラップ内でのイオンの寿命と先ほどの振動励起状態の寿命の2つを考慮して、入射ビームに対する振動基底状態にそろったビームの得られる割合をトラップ時間に対して求めると、図2のようになった。図2の横軸は

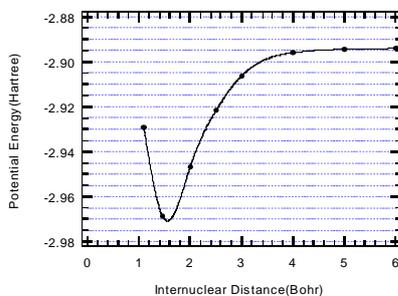


図1. HeH<sup>+</sup>のポテンシャルエネルギーカーブ

表1. 振動励起状態の寿命

state	(ms)
1-0	0.66
2-1	0.37
3-2	0.28
4-3	0.25
5-4	0.25

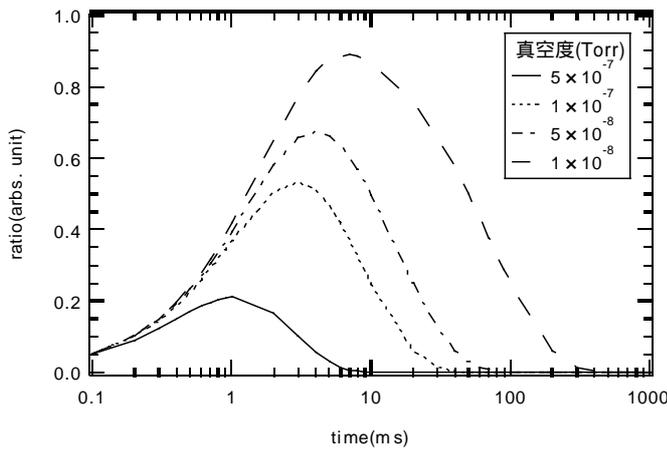


図2. 入射イオンの真空度に対する冷却割合

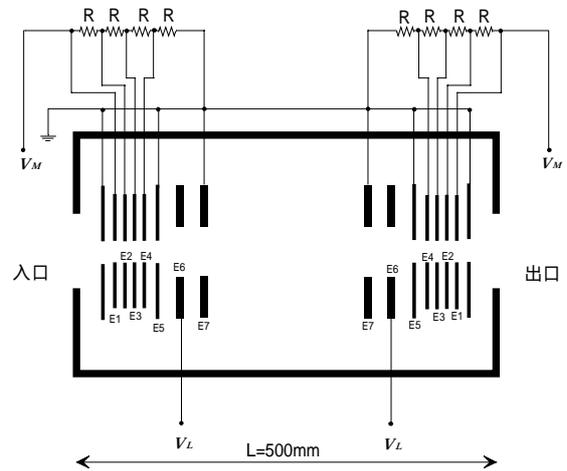


図3. イオントラップの電極配置断面図

イオンをトラップしている時間を、縦軸は入射イオンの量に対する冷却されたイオンの量の比を表しており、真空度ごとにグラフを書いている。横軸の単位は ms、真空度の単位は Torr である。

この結果から、目標とするトラップの到達真空度は  $5 \times 10^{-8}$  Torr とした。

## 2.2. トラップ

イオンの寿命の点から少しでもトラップ内の真空度を上げることが重要なので、トラップを小型化する必要がある。また、トラップ全体を 200 程度でベーキングするため、トラップには電磁石及び永久磁石を使わずに静電的なものを設計することにした。また、イオンビームをトラップ内で閉じ込めておくにイオンどうしの反発力で次第にビームが発散していくのでこれを集束させるためのレンズが必要となる。

そこで、図3のような電極配置を考えた。電極 E1 はイオンを反射させるためのミラー電極であり、この電極にイオンが十分止まるだけの電位  $V_M$  をかける。電極 E5 ~ E7 はイオンを収束させるためのレンズ電極で、電極 E5 には電位 0、電極 E6 には電位  $V_L$ 、電極 E7 には電位 0 を与える。このようにすると、電極 E1 と E5 の間の電場が歪み、ビームが発散する原因となるのでその間のトラップの軸上の電場が一定になるように補助電極 E2 ~ E4 をいれ、適当な電位を与える。

次に、トラップの電極配置からダクトや電極の表面積を見積もり、これから目標の到達真空度  $5 \times 10^{-8}$  Torr を実現するために排気性能 600 l/s のターボ分子ポンプを使用することにした。

## 3. シミュレーション

トラップ内でのイオンビームの軌道を、イオンビーム軌道シミュレーションソフトでシミュレートした。その結果、イオンビームがトラップ内を安定して飛行しつづける軌道がレンズ電圧によって2種類あることが分かった。その軌道を図4に示す。(a)の軌道はトラップ内を8の字を描いて往復するような軌道で、(b)の軌道はトラップ内を0の字を描いて往復するような軌道である。この2種類の軌道のうち、レンズ電圧が(a)1600 V の時の方が(b)1940 V のときより入射条件の許容範囲が広い。そこでレンズ電圧を 1600 V として、イオンビームがトラップ内で安定軌道を飛行するための入射条件を求めると、図5のようになった。図5の横軸はトラップの中心軸に直交する軸で単位は mm、縦軸はトラップの中心軸からの角度を mrad 単位で表したものである。図5は図中の点で描かれた平行四辺形のような図の内側の入射条件なら安定軌道を飛行することを表している。

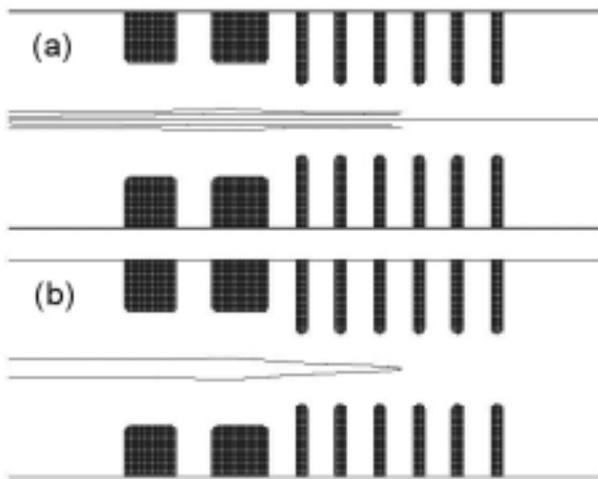


図 4. トラップ内の出口側電極付近のビーム軌道  
 イオン種:Ar<sup>+</sup> エネルギー:2keV V<sub>M</sub>=3200V  
 (a)V<sub>L</sub>=1600V (b)V<sub>L</sub>=1940V

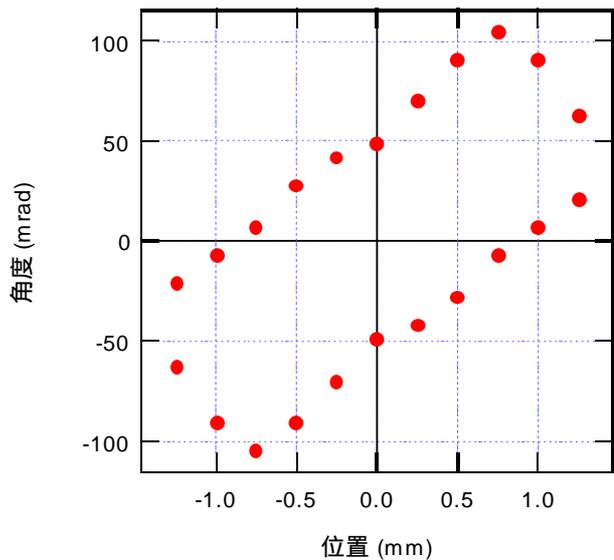


図 5. イオンビームの入射条件

## 4. 実験

実際に製作したトラップの写真を図 6 に、実験装置の全体図を図 7 に示す。図 6 の下の 1 群の電極が入り口側の電極で、上の 1 群の電極が出口側の電極である。また、一番下のフランジは極板に電圧を導入するためのものである。イオン源で 1.2keV の Ar<sup>+</sup>イオンを発生させた後、レンズでビームを平行にする。その後、ウィーンフィルターで目的のイオン種のみを選別し、デフレクターを用いてイオンビームをトラップに導く。

### 4.1. 真空

まずはじめに図 7 のバルブを閉じてトラップだけを切り離れた状態で、排気性能 600 l/s のポンプで真空を引いてみたところ、トラップの入り口の外側につけた電離真空計で測定された到達真空度は  $9 \times 10^{-7}$  Torr であった。これとトラップの電極によるコンダクタンスを考慮してトラップの内部の真空度を見積もると  $9 \times 10^{-8}$  Torr になる。

次に、装置全体をつないでビームラインの真空度を見たところ  $3 \times 10^{-6}$  Torr であった。

### 4.2. イオンビーム実験

トラップに電圧をかけずにイオン源で発生したイオンをトラップの後方にあるセラトロンで検出した。セラトロンの有感面積は直径約 10 mm である。これによりトラップにイオンを導くことが可能であることが分かった。

次に、トラップの出口側の電極に電圧をかけてみると、セラトロンが検出する粒子数が  $7 \times 10^4$  cps から  $3.5 \times 10^3$  cps に減少することを確認した。粒子数が 0 にならなかったのはイオン源を出たイオンがトラップに到達する前に中性化しているものが存在しているためである。そこで中性粒子がどの地点でどの程度生成されているか知るために磁石を使ってイオンビームを曲げセラトロンに到達する中性粒子の数を計測した。

中性粒子が発生しているのはイオン源付近であることが分かった。イオン源からトラップまでの間で中性化するイオンの数はビームラインの真空度から見積もると入射粒子の 0.04 %程度である。

## 5. 結論

真空度が当初の見積もりよりも悪くなったが、これはダクトの取り付けやその作業のためのスペース



図 6. イオントラップの写真

を確保するために、ポンプからトラップまでの距離が想定していたものよりも長くなってしまったためである。しかし、この真空度でもまだ十分使用には耐えうる量の振動冷却されたイオンが取り出せると考えられる。

トラップの出口側の電極に電圧をかけてイオンを跳ね返すことが出来たので、入り口側でも同様にイオンを跳ね返すことが出来ると考えられる。よって、極板に電圧をかけることによる放電等の問題はないと考えられる。

また、中性粒子のほとんどはイオン源付近で発生しているので、トラップの直前に中性粒子を取り除くための装置をつければライン上で発生する中性粒子も取り除くことが出来る。そしてライン上の真空度を1桁向上させ、イオンビームを直径2 mm程度に絞れば、セラトロンに到達する中性粒子の入射粒子に対する割合は0.0002 %程度に抑えることが出来る。

一方、1回のトラップで捕捉されるイオンの入射粒子数に対する割合は0.001 %程度である。現在利用しているイオン源から発生させることの出来るイオンビームの量は5 nAで、これは個数に直すと $3 \times 10^{11}$ 個である。これより1回でトラップされるイオンの個数は $3 \times 10^6$ 個程度となる。従ってトラップにイオンを捕捉し、トラップ中のイオンの減衰による中性粒子の数を数えることでこのトラップの性能を知ることが出来ると考えられる。

参考文献

[1] William H. Miller and Henry F. Schaefer III, J. Chem. Phys.53, 1421 (1970)

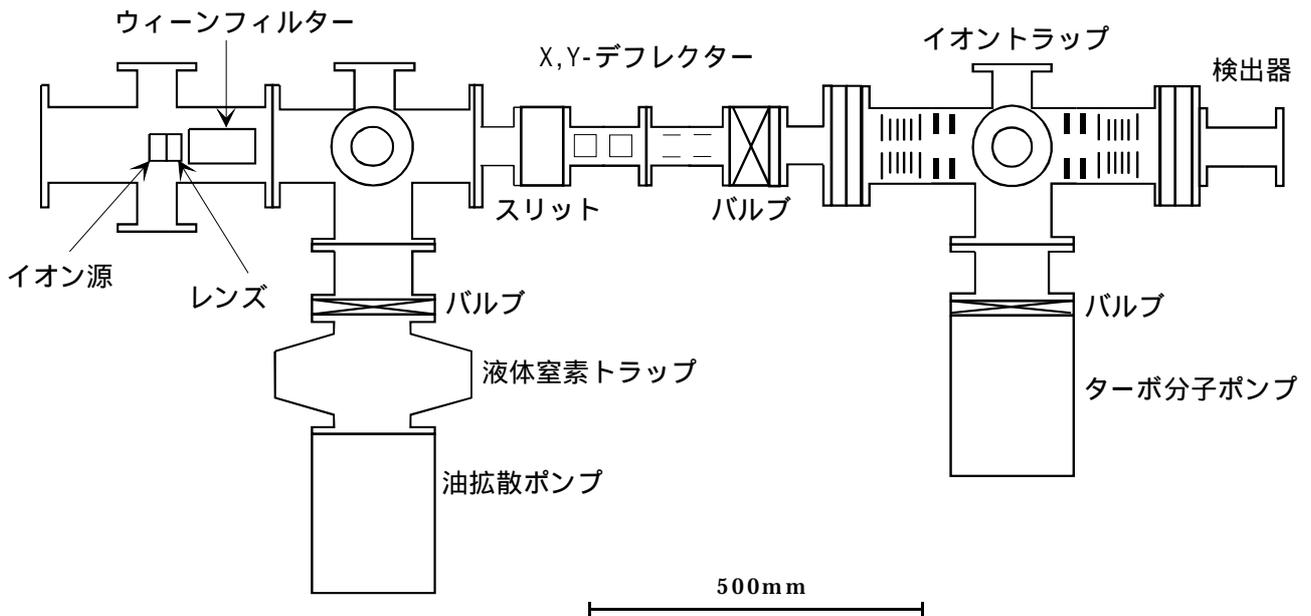


図 7. 実験装置の全体図