

# テーパー型ガラスキャピラリーによる

## 多価イオンビームのガイド

吉安信雄研究室 島崎 隆宏

### 背景

多価イオンを固体表面に入射させると、自身の持つ大きな内部エネルギーの大部分を、標的のごく狭い領域に付与し、それによって数 nm の構造改質をもたらす。多価イオンの照射位置を nm の精度で制御できれば、ナノテクノロジーの分野（例えば、多価イオンのポテンシャルスパッタリングによる二次粒子の放出を利用した高感度な元素分析など）に応用することができる。

主な制御方法としては、電磁場レンズを用いて収束させる方法とイオンに微少な穴を通過させてカットする方法がある。しかし前者の場合、数 keV/unit 以下の低速なビームや、プラズマ形イオン源からの多価イオンビームのような、ビームの照射方向に垂直な速度成分を持つような速度にばらつきのあるビームを収束させるのは困難であり、後者の場合においても、エネルギー損失や価数の変換無しにイオンを通過させるのは困難であった。

だが、近年の N.Stolterfont ら[1]の研究により、多価イオンに絶縁体薄膜上の細孔（キャピラリー）を通過させても、通過前後でイオンの価数が変化せずに通過することが見出された。また、Ikeda ら[2]により、絶縁体であるガラスで作ったテーパー型（先端へ行くにつれて細くなっていく形状）の細管（キャピラリー）を通過させると、粒子密度が向上し得ることが見出された。

### 目的

本研究の目的は、プラズマ形イオン源である Tokyo-EBIT(Electron Beam Ion Trap)の低速高価数多価イオンビームを、ガラスで作製したテーパー型キャピラリーを用いて集束・制御することである。

### 原理

キャピラリーの内壁表面付近の電子の感じるポテンシャルは、イオンとの距離に伴い変化する。その二者がある程度まで近づくと、電子はポテンシャル障壁を乗り越えられるようになる。そのとき、移行する電子のエネルギーと同程度の、イオンのエネルギー準位、が占有されていなければ、イオンが内壁と接触する前に電子移行が起こりうる。

多価イオンの場合、電子はまず高励起状態、つまり主量子数の大きなエネルギー準位に移行する。その後、その電子は Auger 緩和により Auger 電子を放出しながら下の準位に落ちていく。そうした過程により内殻が満たされる。

内壁との接触前にイオンが中性化されなかった場合、内壁との接触の際に内壁表面で電荷交換を行い、中性化される。また、その際にも二次電子は放出される。

絶縁体の場合、金属に比べて自由電子が少ないので、帯電しやすくなる。

これらの過程により内壁の一部が帯電し、それによる反発力を受けて、後続のイオンはガイド（内壁との接触・接近や、それらの過程による価数の変換なしに通過、そして偏向）される（図1参照）。

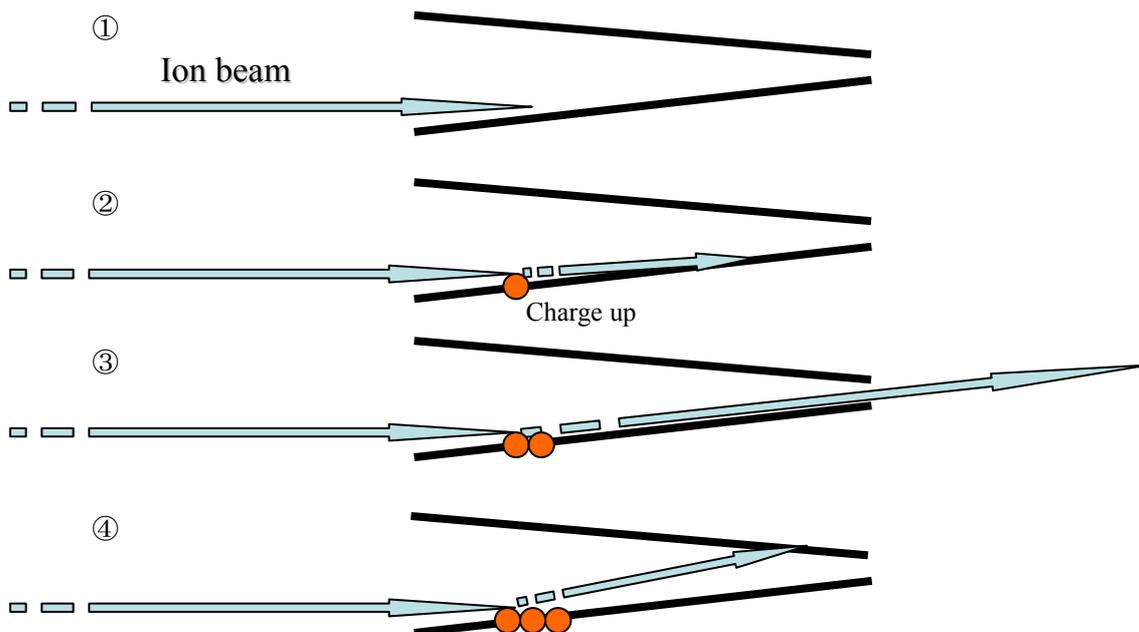


図1.帯電によるガイドの概略図

- ① イオンビームがキャピラリーに照射された直後は、イオンは内壁に接近・接触し、内壁の一部を帯電させつつ中性化させられる。
- ② イオンビームの強度が弱い場合、適度な帯電状態になるまでに十分～数十分ほどかかることもある。
- ③ 内壁が帯電すると、後続のイオンがガイド（キャピラリーの通過前後で価数を保持し、偏向）されて通過する。
- ④ さらに帯電すると、イオンが偏向させられる角度が大きくなりすぎて再度内壁に衝突し、通過できなくなると思われる。

## 実験装置

図2の左の装置でガラス管を熱し、重りで引き伸ばしてキャピラリーを作製し、SEM（Scanning Electron Microscope：走査型電子顕微鏡）で先端の径と通過の障害となる物質（ガラス自身や埃）の有無を確認し、キャピラリーホルダーにセットする。ホルダーの一番右にはファラデーカップと同様のものをセットする。

右上の画像は実際に使用したキャピラリーの先端のSEM像で、その径は約50 $\mu\text{m}$ である。

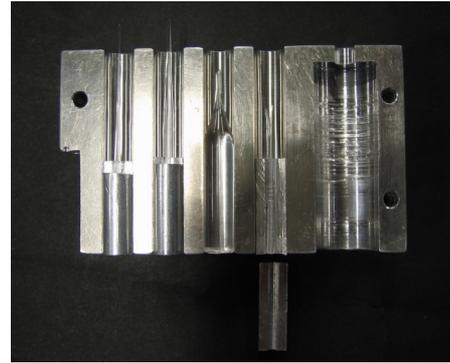
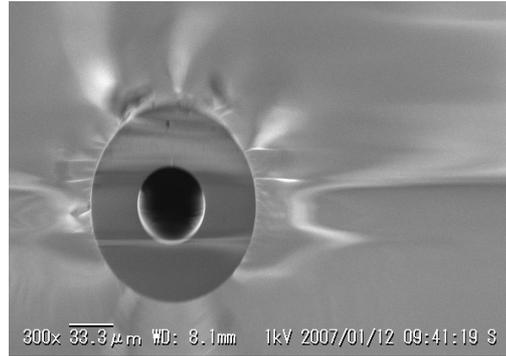
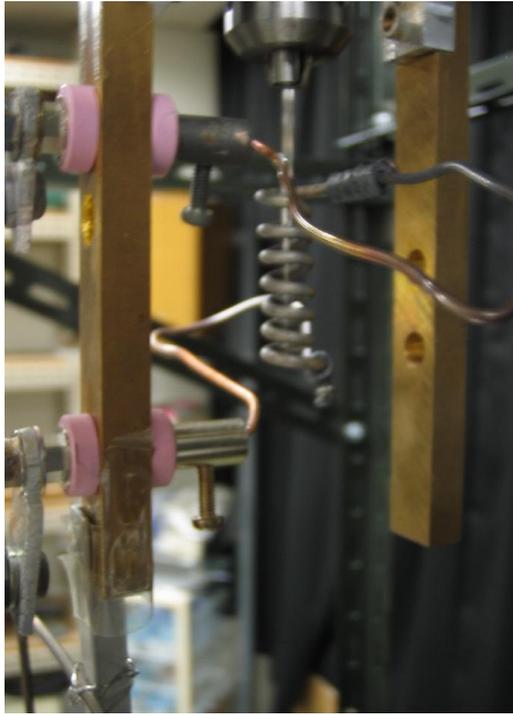


図2.キャピラリー製作装置（左）とSEM像（右上）とキャピラリーホルダー（右下）

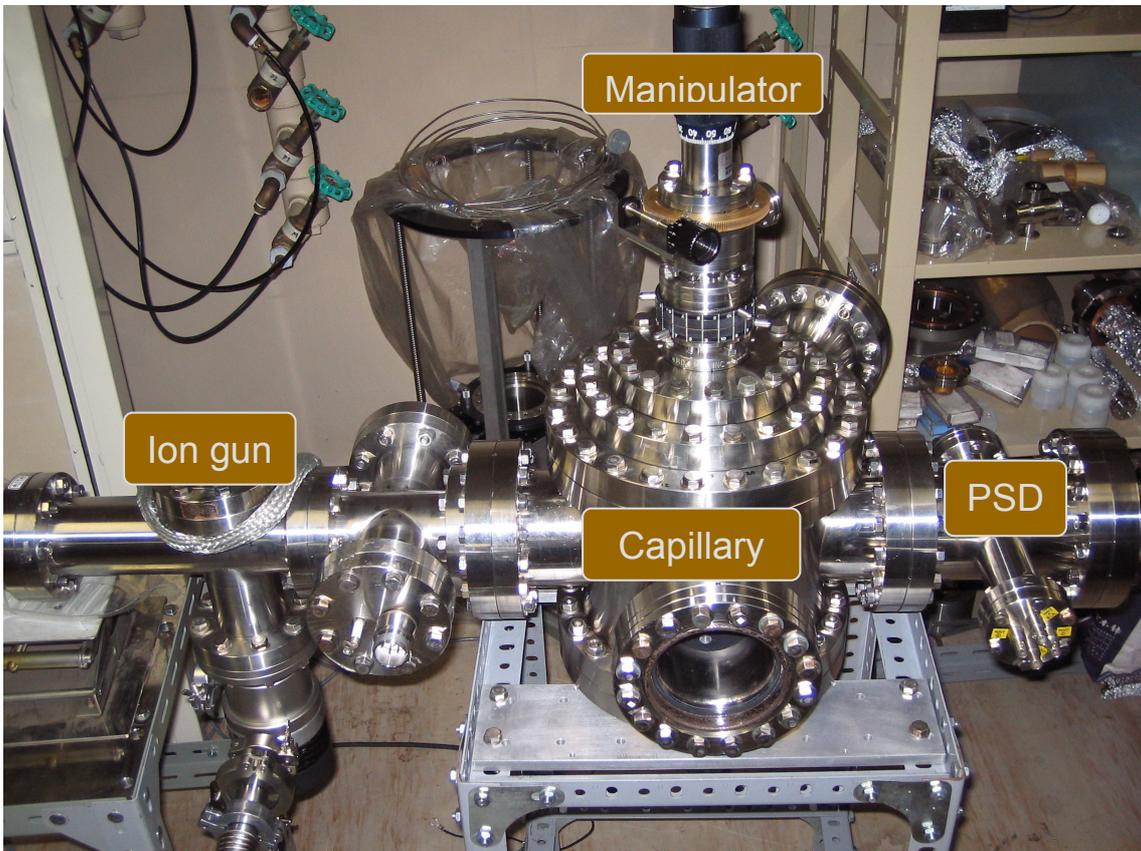


図3.実験装置

## 実験方法

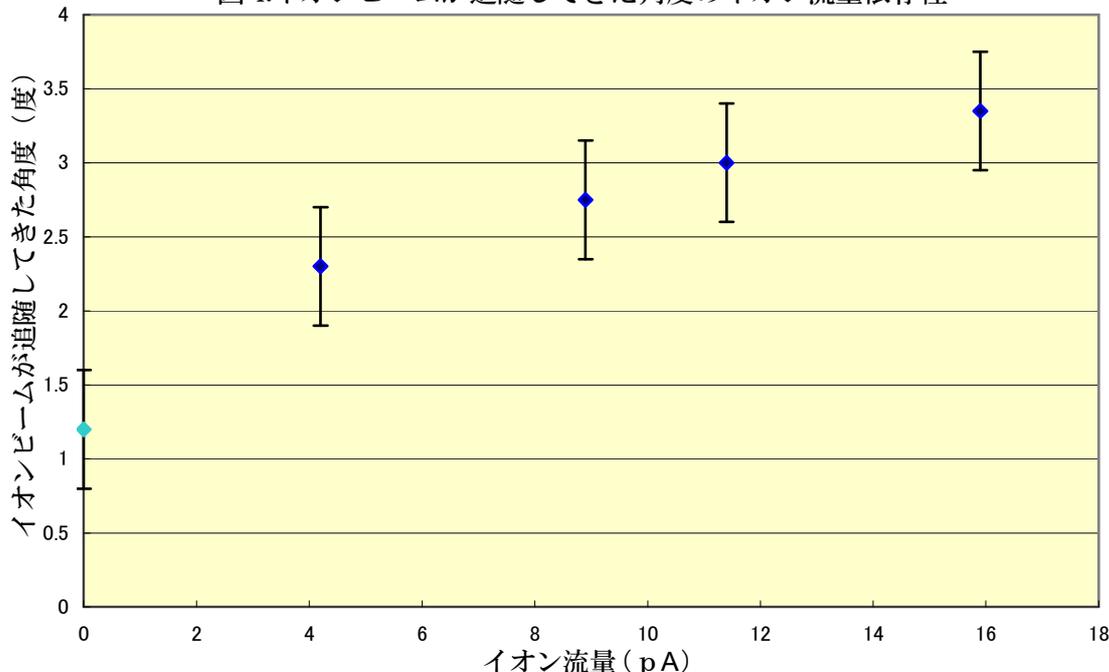
イオン銃によって一価のイオンビームを照射し、キャピラリーを通過させ、PSD (Position Sensitive Detector: 二次元位置敏感検出器) で通過してきたイオンを検出、映像化する。通過イオンの分布像と時間変化を見、通過イオン量の変動が大方終了した後、帯電を解除するために30分間放置する。それらを繰り返すことによって測定した。

また、ビームがキャピラリーに入射する際のイオンの量 (イオン流量) はイオン銃のフィラメントへの電流値で制御し、ビームの入射角度はマニピュレーターによりキャピラリーホルダーの向きを変えることで変更し、運動エネルギーは引き出し電圧で変化させた。

## 結果と考察

イオンビームが追隨してきた角度はイオン流量の増加に伴い増加した。また、幾何学的にイオンが通過し得る角度 (約1.2度) を初期値とすれば、最終的には収束しそうである。

図4.イオンビームが追隨してきた角度のイオン流量依存性



## 今後の方針

イオンビームの追隨してきた角度の運動エネルギーへの依存性は、イオン流量が正確に測定できないのが原因で測定できなかった。そこで、正確にイオン流量を測定する方法を得た上で、再度イオンビームの追隨してきた角度の運動エネルギーへの依存性を測定する。

また、キャピラリーの射出口径やイオンの価数 (potential energy) を変えるとどうなるかを調べる。それらを通して絶縁体への知見をさらに深めたい。

### 参考文献

- [1] N. Stolterfoht: Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B203, 246 (2003)
- [2] 池田時浩: 原子衝突研究協会第31回研究会 P19 (2006)