

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25350545

研究課題名(和文)線量制御可能な体内挿入式微小X線源のための柔軟イオンビーム輸送管の研究

研究課題名(英文)Study on flexible ion beam transport tube for dose-controllable and body-insertable micro X-ray source

研究代表者

小島 隆夫 (KOJIMA, Takao)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・専任研究員

研究者番号：90211896

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)：まっすぐな絶縁体の細管にイオンビームを入射し、その出口を振って傾けた場合のイオン輸送量の変化(傾け角依存性=ガイド効果)を、さまざまな材質の細管で測定した。その結果、低エネルギーの多価イオンに対しては、ソーダライムガラス製の細管がイオンガイドとして最適であることを見出した。そこで、ゆるやかに曲がったソーダライムガラスの細管を作ってイオンビームを通し、ガイド効果・輸送効率を測定したところ、同程度の長さの直管を傾ける場合よりも、2倍以上大きな角度までイオンを輸送できる(ガイドできる)ことがわかり、簡易イオン偏向器としての応用の可能性が見えてきた。

研究成果の概要(英文)：Ion beam was injected into a thin straight insulating tube (capillary) of various materials, and the change in ion transmission (tilt angle dependency = guide effect) was measured by tilting the capillary. As a result, we found that a capillary made of soda-lime glass is optimal as an ion guide for low energy multiply charged ions. Therefore, we made a gently curved soda-lime glass capillary, injected the ion beam into the capillary, and measured the guide effect and transport efficiency. It was found that with a curved capillary the ions can be transported (guided) into an angle more than twice as large as in the case of tilting straight capillaries of the same length. The possibility of application as a simple ion deflector has come to light.

研究分野：原子分子物理学

キーワード：イオンガイド 絶縁体 キャピラリー ガイド効果 材質依存性 放電制御

1. 研究開始当初の背景

2002年、Stolterfohtらは多数のナノサイズ貫通孔(ナノキャピラリー)を開けた絶縁体フォイルにkeVエネルギーの多価イオンを照射し、フォイルを傾けてナノキャピラリーを通過してくるイオンを観測すると、フォイルを傾けた方向にイオンが偏向されて来ることを発見した[1]。彼らはこれを絶縁体キャピラリー(細管)による「イオンガイド効果」と呼び、最初期に細管内に入射したイオンが細管内壁に衝突することによって生じた帯電分布が、後続のイオンを出口に向かって偏向・ガイドさせたものであることをシミュレーション等によって示した。フォイルを傾けた際、初期イオン衝突による内壁の帯電は、実験者によって制御されているわけではないにもかかわらず、いわば“自動的に”後続イオンをガイドするように分布することから、彼らはこれを「自己組織化帯電分布」と呼んだ。

自己組織化帯電現象はより大きな絶縁体細管においても起こりうると考えた我々は、先細りガラス細管(テーパ型ガラスキャピラリー)を用いた多価イオンビームのガイド効果の実験研究を行った。入口径0.8mm、出口径数十 μm 、長さ約50mmのテーパ型キャピラリーに数~数十keVの多価イオンビームを通すと、細管の出口を $\pm 5^\circ$ 程度振って傾けても自己組織化帯電現象によってビームがガイドされ、ちゃんと偏向して通過して行くことがわかった(図1)[2]。

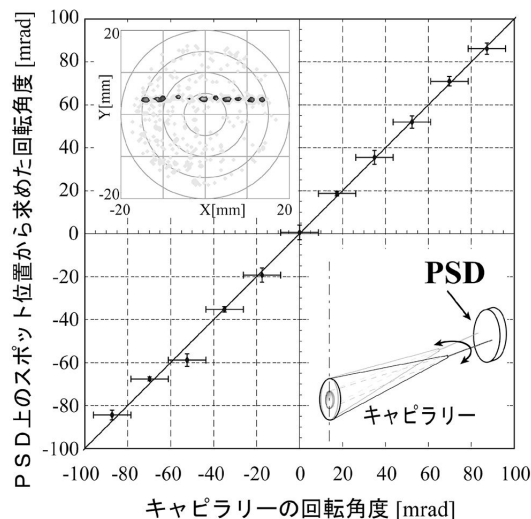


図1. テーパ型キャピラリーのガイド効果

長さ50mmのテーパ型ガラス細管においても自己組織化帯電現象によるイオンガイド効果が観測されたことから、まっすぐな管の出口を振るのではなく、ゆるやかに曲げた細管にビームを通した場合にも同様のガイド効果が期待できると考えられた。ゆるやかな曲管で十分な輸送効率のガイド効果が確認できたならば、柔軟な素材の細管を用いることによって、イオンビームの方向を(ある範囲で)自在に変えることができるようになるかもしれない。より長い管でのビームガイドを技術的に確立すれば、偏向電磁石や静電

式偏向器を使わずにビームを任意の方向に導くことが可能になり、照射装置の小型化や、構造物の内部に挿入して使用する微小X線源など、さまざまな応用が期待できると考えられた。

2. 研究の目的

(1) イオンガイドに適した絶縁体素材を見出す。また、イオンビームの条件(エネルギーや強度)によって最適な素材が変わる場合は、イオンビームの条件と最適素材の物理特性との関係を探り、明らかにする。

(2) 使用するイオンビームのガイドに最適な素材で緩やかに曲がった細管を作り、ガイド効果と輸送効率を検証する。さらに、さまざまな曲率、さまざまな長さの曲管でガイド効果を観測し、曲率と長さの整合点を見出す。簡便なイオン偏向輸送器としての実用に耐えうるだけの輸送効率を得られたならば、輸送されたビームの価数分布・角度広がり・エネルギー分布なども調べていく。

(3) 柔軟素材の細管でのイオン輸送をテストし、検証する。片側に曲がった場合だけでなく、S字型に曲がった場合、さらにはビームを通しつつ曲げ方(曲率)を変えた場合など、自在偏向器としての可能性を探る。

3. 研究の方法

本実験研究は、理化学研究所の低速多価イオン実験施設(平成26年度まで)と首都大学東京の多価イオン実験施設(平成27~28年度)において、それぞれのECRイオン源からの多価イオンビームを用いて行われた。

(1) ガイド効果の材質依存性

同じサイズ(長さ50mm、内径1mm程度)で材質の違う直管(細管)を用意し、ほぼ同じ条件のイオンビームを通しつつ出口を振って細管を傾けて通過電流を測定し、ビームを安定に輸送できるか、また、どの程度の傾け角までイオンビームを輸送できるかを素材ごとに観測する(図2)。ビーム条件を変えて同様の観測を繰り返し、ガイド効果における材質とビーム条件の相関も調べる。

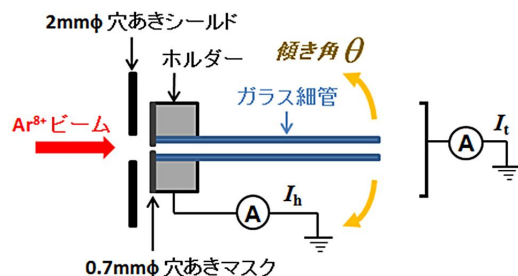


図2. ガイド効果の材質依存測定

(2) 曲管のガイド効果

上記(1)で見出した、低エネルギー多価イオンのガイド輸送に適した絶縁体素材を用

いていくつかの曲率に固定した曲管を作成し、多価イオンビームを入射してガイド輸送されたイオンを観測する。その際、偏向角を図3のように定義する。なお、直管のイオンガイド能力と比較するため、製作する曲管は(1)で使用した直管とほぼ同じ径、同じ長さにする。

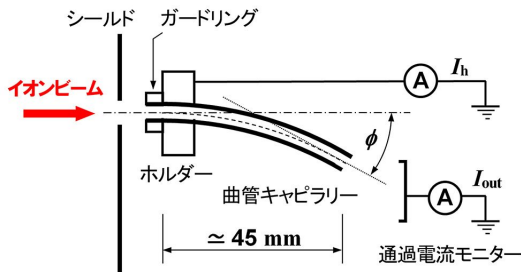


図3. 曲管のガイド効果測定

(3) 柔軟な曲管のガイド効果

テフロンなどの柔軟素材の細管を用いていくつかの固定した曲率で上記(2)と同様の実験測定を行う。ただし、柔軟な素材は自身の形状を保持できないので、アルミ製のホルダーにそれぞれの曲率で溝を切り、そこに柔軟素材細管をはめ込んで固定して使用する。良好な輸送効率が得られれば、S字カーブを試し、その後はより長い細管を自在に曲げる場合などを試していく。

4. 研究成果

(1) ガイド効果の材質依存性

ソーダライムガラス (SL)、ポロシリケイトガラス (BS)、カリウムソーダ鉛ガラス (PSL)、テフロン (PTFE) の4つの素材の直細管でガイド効果の観測を試みた。ソーダライムガラス管とテフロン管に8 keVの Ar^{8+} イオンを入射した場合の通過電流の傾け角度依存性を、それぞれ図4および図5に示す(横軸は時間で、図4においては150秒毎に0.5°ずつ、図5においては500秒毎に1°ずつ細管の傾け角を変えている)。図4のソーダライム管ではきれいな山形の分布になっているのに対し、図5のテフロン管では、とくに0°付近で通過イオン電流が非常に不安定になっている。このような不安定さは他の素材の細管でもしばしば観測された。入射するイオンビームの条件を変えると、小さ

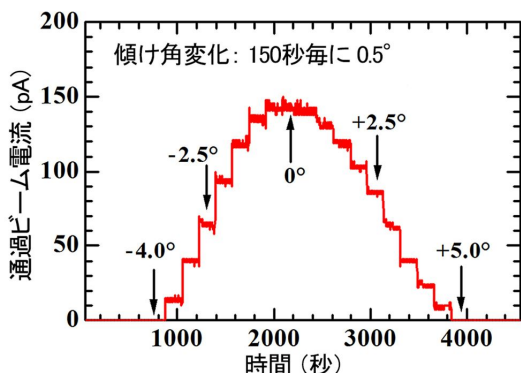


図4. ソーダライム直管のガイド効果

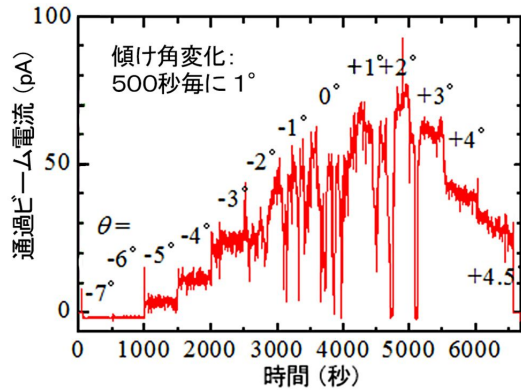


図5. テフロン直管のガイド効果

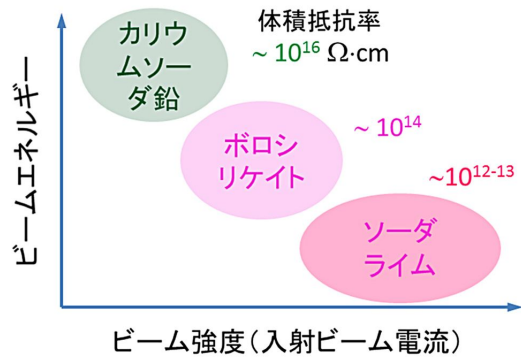


図6. ビーム条件と適合ガイド細管素材

い傾け角にもかかわらず、ビームがまったく通過しなくなる等の現象も見られた。そこで、ビーム電流とビームエネルギーを系統的に変えてガイド効果の安定度を観測したところ、それぞれの素材が得意とするイオンエネルギーと強度は、おおよそ図6のような関係になっていることがわかった。これは各素材の抵抗率によって決まっていると考えられた。以下にそのメカニズムを説明する。

自己組織化帯電分布が適切な電場を形成し、ガイド効果が発現するためには、帯電と放電がうまくバランスしていなければならない。本報の第1節においては「最初期のビームが細管の内壁に衝突したことによる帯電」と説明したが、実際には、後続ビームがガイドされているときでも、ある割合で入射ビームの一部が常に内壁に衝突して帯電電荷を供給し続けている(細管が傾いているとき、入射イオン量よりも通過イオン量が少ないのはそのためである)。この供給電荷と、素材を通して放電していく電荷とのバランスが、その細管のガイド特性を決める。抵抗率の大きい素材では放電が遅いので、少ない入射ビーム電流でもすぐに帯電する。帯電量が増えると、その電荷の作るポテンシャルは高くなる。入射ビームによる電荷供給がさらに増えると、ポテンシャルがビームエネルギー(正確にはビームエネルギー÷イオン電荷)を超えてしまい、後続ビームをブロックしてしまう。したがって、抵抗率の大きい素材の細管は、比較的エネルギーが高く、強度(ビーム電流)の小さいイオンビームをガイドするのに適している。いっぽう、抵抗率の

小さい素材では放電が速いので、ある程度大きな電流を入射しないと、なかなか電荷が溜まらず、帯電電荷の作るポテンシャルも高くない。それゆえ、抵抗率の小さい素材の細管は、比較的低いエネルギーで、ある程度の強度を持ったイオンビームをガイドするのに適していると考えられる。本研究で用いた各細管素材の室温での大まかな体積抵抗率は $SL : 10^{12.5}$, $BS : 10^{14}$, $PSL : 10^{16}$, $PTFE : > 10^{18}$ $\Omega \cdot m$ であり、図6に示された素材と適合ビーム条件との相関は、上述のメカニズムと合致している。これは、絶縁体によるイオンガイド現象を様々な条件のビームに応用していくうえで、非常に重要で有益な知見である。実験の詳細を含めて、近く論文として発表すべく準備を進めている。

なお、図6の中にテフロンが含まれていないが、これに関しては後述する。

(2) 曲管のガイド効果

上記(1)の実験観測により、低エネルギーの多価イオンビームに対してはソーダライムガラスが非常によいガイド特性を示すことがわかったので、ソーダライムガラスで曲管を作成した。断面を円形に保ったままガラス細管を曲げるのは非常に難しいが、浜松ホトニクスで製作されたガラス曲管は、湾曲部の断面もほぼ円形を保っており、また、正確な曲率で曲げられている。曲管によるイオン輸送の典型的な結果を図7に示す。図7(a)は図4に結果を示した直管と同じ内径/外径、同じ長さの曲管に、図4の場合と同じ8 keV の Ar^{8+} イオンを入射した場合の結果である。図4で見たように、直管を傾けた場合にはせいぜい 5° 程度がガイドできる限界だが、図7(a)では偏向角 $\phi = 9.6^\circ$ であるにもかかわらず、入射イオンのおよそ6割が安定に輸送されている。図7(b)はより径の太い

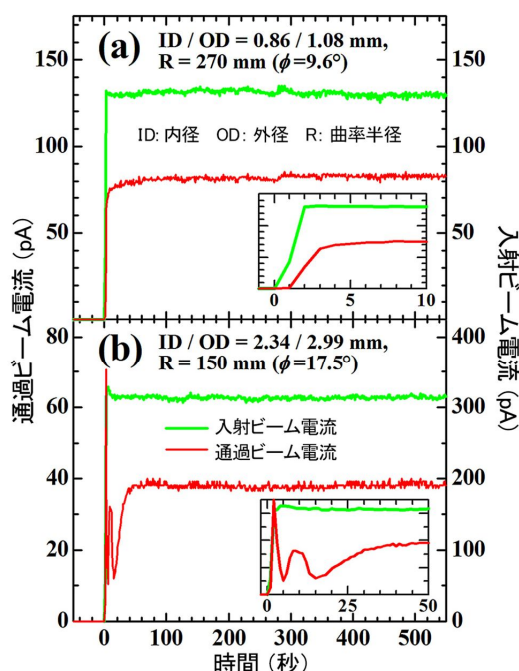


図7. ソーダライム曲管のガイド効果

曲管だが、長さは図4の直管と同じ50 mm。図7(a)の曲管よりも湾曲がきつく、 $\phi = 17.5^\circ$ にもなるが、それでもなお入射イオンの1割程度が安定に輸送されている。曲管を用いると、直管を傾けるよりもずっと大きな角度まで安定に、比較的高い効率でイオンを輸送できることが示された。これを簡易ビーム偏向器として応用できれば、装置の小型化、低価格化にもつながるし、微妙なビーム軸合わせなどは、コンポーネントとコンポーネントの間を細管でつなげることで済ませられるようになるかもしれない。この素晴らしい結果は下記の雑誌論文で報告済である。

なお、図7の中の小図は、入射ビームをONにした直後の入射ビーム電流と通過ビーム電流の立ち上がりを拡大したものである。通過電流の立ち上がりが入射電流より遅れており、湾曲のきつい管では振動のような複雑なふるまいをしたりするのは、自己組織化帯電分布の形成過程に対応していると考えられる。湾曲がきついほど、後続イオンを安定にガイドする帯電分布を形成するのに時間がかかり、かつ、その過程も複雑になるであろうことは、容易に推察できる。こうした立ち上がりのふるまいを系統的に観測し、理論計算シミュレーションと比較すれば、絶縁体細管内での自己組織化帯電分布の形成過程に関するさらに詳しい知見が得られるものと期待される。その方向の研究も鋭意進めていく予定である。

(3) 柔軟な曲管のガイド効果

研究開始当初は、柔軟細管の素材としてテフロンを想定していた。真空中で使用可能な素材であり、かつ、様々なサイズのチューブを容易に入手することができるからである。図5のテフロン直管と同じ内径/外径でほぼ同じ長さのテフロン曲管に、図5と同様の8 keV の Ar^{8+} イオンを入射した実験結果を図8に示す。測定開始から100秒後にビームが入射されている。全電流(入射電流の目安)と通過ビーム電流の立ち上がりは図中の小図に拡大して示してある。曲率半径 $R=150$ mm ($\phi = 17.5^\circ$) でも100 mm (26.7°) でも通

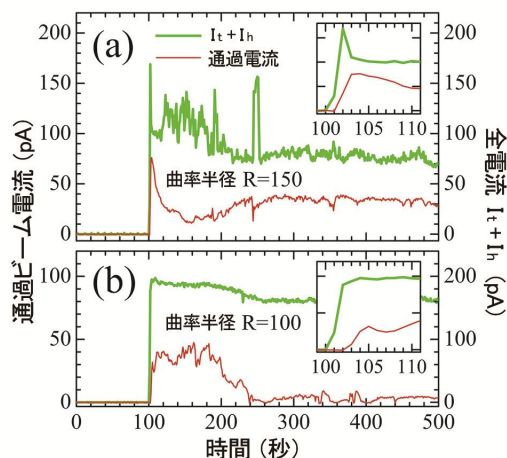


図8. テフロン曲管のガイド効果

過電流はハッキリ観測されており、曲管を用いることによってかなり大きな角度まで(図8(b)では30°近くまで)イオンを輸送できることが確認できた。図8(a)では元のビーム(全電流)が不安定なため、それを反映してか、通過ビーム電流もあまり安定ではない。図8(b)では元のビームは比較的安定だが、ビーム入射から100秒測定開始から200秒)くらい経過すると、急速に通過電流が減衰してしまう。

すでに(1)で見たように、図5のテフロン直管においてもビーム輸送の顕著な不安定性が観測された。また、これまでにS字曲管によるビーム輸送を何度か試みているが、かなり曲率のゆるいS字曲管でも望ましい結果は得られていない。テフロンの抵抗率は(1)で用いた他の3つのガラス素材と比べてもさらに数桁大きく、keV エネルギーのイオンのガイドにはあまり適していない。また、テフロン表面に数十keVのイオンを照射すると、微細な針状構造群ができるという報告もある[3]。これらのことを考慮すると、柔軟イオンガイド細管としてテフロン管を使うのは、あまり得策ではないと思われる。そこで、方針を転換し、以下の選択肢の検討・試行を並行して進めている。

- ・他の、抵抗率がガラスに近い柔軟樹脂のチューブを探す。
- ・テフロン等の柔軟樹脂チューブの内側にガラスもしくはガラスに近い電気特性の物質をコーティングする。
- ・微細なガラス繊維で編んだスリーブをテフロン等の樹脂チューブに挿入し、疑似ガラス管として使用してみる。

(4) その他

絶縁体細管によるイオンガイド現象は、自己組織化帯電分布の形成によって“自動的に”生じるものだが、それゆえにビーム条件等によってはうまく機能せず、輸送が不安定なったり、後続ビームがブロックされてしまったりすることがしばしばある。絶縁体細管イオンガイドをビーム輸送コンポーネントに応用するとなれば、こうした不確かさ・不安定さは取り除かれなければならない。そのひとつの方法として、自己組織化過程に積極的に介入することを考えた。細管の出入口付近の外周に電極とリレーを取り付け、溜まった電荷を接地電位へ定期的に強制放電する。放電のタイミングをうまく選べば、ガイディング電位が適切なレベルに保たれ、不安定性を取り除くことができるのではないかと考えたのである。グループ内に長い研究の蓄積がある先細り型ガラス細管を用いて予備的な実験をあれこれ試行したところ、良好な結果を得ることができた(下記の雑誌論文にて発表済)。これは絶縁体細管イオンガイドの応用に向かったの大きな一歩であり、今後この方式を曲管でのイオンガイドに適用し、検証実験を進めていきたいと考えている。

<引用文献>

- [1] Stolterfoht et al, Phys. Rev. Lett. **88** (2002) 133201.
- [2] Ikeda et al, Appl. Phys. Lett. **89** (2006) 163502.
- [3] Kitamura et al, Surf. Coat. Technol. **206** (2011) 841-844.

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2件)

Tokihiro Ikeda, Takao M. Kojima, Yoshio Natsume, Jun Kimura, and Tomoko Abe, Stable transmission of slow highly charged ions through tapered glass capillary with active discharging method for sub-micron sized beams, Applied Physics Letters, 査読有, 109 (2016) 133501.

<http://dx.doi.org/10.1063/1.4962727>

Takao M. Kojima, Tokihiro Ikeda, Yasuyuki Kanai, Yasunori Yamazaki, Ion guiding in curved glass capillaries, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 査読有, 354 (2015) 16-19.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2014.11.031>

(学会発表)(計6件)

横川貴一, 小島隆夫, ガラス直管における多価イオンビームの偏向における抵抗率と適合イオン電流の相関, 日本物理学会第72回年次大会, 2017年3月17-20日, 大阪大学豊中キャンパス(大阪府・豊中市)

小島隆夫, Ion Beam Guiding with Straight and Curved Insulator Capillaries, 第15回「イオンビームによる表面・界面解析」特別研究会, 2014年12月5日, 筑波大学(茨城県・つくば市)

小島隆夫, Ion beam guiding with straight and curved glass capillaries, 11th Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics, 2014年10月6-8日, 東北大学片平キャンパス(宮城県・仙台市)

小島隆夫, Ion guiding in curved capillaries, 26th International Conference on Atomic Collisions in Solids, 2014年7月14日, デブレツェン(ハンガリー)

小島隆夫, 直線ガラス細管による多価イオンビームガイドの材質依存性, 日本物理学会第69回年次大会, 2014年3月27-30日, 東海大学湘南キャンパス(神奈川県・平塚市)

小島隆夫, Ion beam guiding with straight and curved insulator capillaries, 23rd International Seminar on Ion-Atom Collisions, 2013年7月19-22日, 北京(中国)。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小島 隆夫 (KOJIMA, Takao)
理化学研究所・仁科加速器研究センター・
専任研究員
研究者番号: 90211896

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

池田 時浩 (IKEDA, Tokihiro)
理化学研究所・仁科加速器研究センター・
専任研究員
研究者番号: 80301745

金井 保之 (KANAI, Yasuyuki)
理化学研究所・原子物理特別研究ユニット・
専任研究員
研究者番号: 00177487

(4) 研究協力者

()