

ガラス円筒面チャネルによる 4MeV 炭素イオン集束効果の検証

Verification of focusing effect of 4MeV carbon ions using cylindrical glass channel

本橋 健次 ¹⁾	宮脇 信正 ²⁾	鳴海 一雅 ²⁾	齋藤 勇一 ²⁾
Kenji MOTOHASHI ¹⁾	Nobumasa MIYAWAKI ²⁾	Kazumasa NARUMI ²⁾	Yuichi SAITOH ²⁾

¹⁾東洋大学 ²⁾量研

（概要）

絶縁体曲面上での高速重イオンビームのガイド効果¹⁻³⁾を検証するため、ガラス円筒凸レンズと凹レンズを 1.2mm の隙間を挟んで対向したガラス円筒面チャネル（図 1）に、直径 1mm、エネルギー 4MeV の C⁴⁺イオンビームを入射し、入射イオンビーム軸に対するガラス円筒面チャネルの角度（図 1 のチルト角）を 0° と 2° に設定した際の、出射イオンのフルエンス（単位面積を通過した入射イオン数）を CR39 の照射痕密度により測定した。さらに、半導体検出器により出射イオンのエネルギー損失を評価した。また、事前に 31~74nC のイオンビームを入射した直後の透過フルエンス／入射フルエンス（以下、入射透過フルエンス比と呼ぶ）と、そうでない場合の入射透過フルエンス比を比較することにより、ガラス円筒面上のチャージアップによるガイド効果への影響を調べた。

その結果、0° では、イオンビームの入射透過フルエンス比は PHITS⁴⁾シミュレーションの予想値²⁾0.87 よりも低いため集束効果はないことが分かったが、チャージアップしない場合よりチャージアップさせた場合の入射透過フルエンス比が 13%増加したことから、入射透過フルエンス比の上昇には蓄積電荷が寄与していることが分かった。一方、ガラス円筒面チャネルを入射イオンビーム軸に対し 2° チルトさせた場合、回転方向と逆側に設置した面（今回は凹面）に電荷が多量に蓄積し集束効果が高まる（＝入射透過フルエンス比 1~1.5 以上）と共に、透過イオンビームのフルエンスがビーム断面の回転方向に一樣でなくなることが分かった。さらに、チルト角 0° と +2° の両方で、透過イオンのエネルギー損失はほとんどないこと（スペクトルのエネルギー変化は 1%未満である）ことが分かった。

以上の結果より、ガラス円筒面チャネルを入射イオンビーム軸に対しわずかにチルトさせることにより、ビームが入射する片側のガラス表面が帯電することによりガイド効果が生じ、その表面近傍でイオンビームの集束が起こることが確かめられた。我々のこれまでの研究^{1, 2)}では、-3° から +3° のチルト角範囲でエネルギー損失なく、幾何学的な上限値を上回る透過率でビームが透過することが実験的に分かっていたが、集束効果の有無は分からなかった。今回の研究結果により、凹面に近い側で集束効果の有ることが確かめられた。

キーワード：

ガラス円筒面チャネル、イオンビーム、ガイド効果

1. 目的

近年、数 MeV の H や He イオンが先細りのガラス毛细管を通過することにより集束することが見出され、注目を集めている⁵⁾。イオンビームがエネルギーをほとんど失うことなく、先細りのガラス管の出口まで到達することから、この現象はガイド効果と呼ばれている。そして、このガイド効果を応用すれば、電磁場を用いたビーム輸送系を準備しなくても、ガラス毛细管だけでイオンビーム径を数マイクロメートル程度まで圧縮することができるため、様々な分析・加工技術に応用できる可能性が広がる。例えば、毛细管を高精度のマニピュレーターで移動することにより、MeV 領域のイオンビームを簡単にナノ・マイクロメートルの精度で操作することが可能になるので、微細加工はもちろん、PIXE (Particle Induced X-ray Emission) のような元素分析を二次元で精度よく実現可能になる。しかしながら、先細りガラス毛细管では内壁の形状や表面状態を制御することが困難であるだけでなく、真空中に設置した場合に入口と出口の真空度に差を生じてしまうため、出射イオンビームの安定性や再現性に問題がある。例えば、毛细管の出口を大気中に、入口を真空中に設置する場合は言うまでもないが、毛细管全体を真空中に設置する場合でも、出口近くでは内壁からの脱ガスとコンダクタンスの悪さにより、入口近くより真空度は悪いと考えられる。さらに、イオ

ンビームと内壁の相互作用が極めて狭い管内で生じるため、その物理過程を実験的に明らかにすることが難しかった。実際、ガイド効果の要因として、面チャネリング⁵⁾、小角多重散乱⁶⁾、帯電助型鏡面反射⁷⁾など、いくつかのモデルが提唱されてきたが、定量性のある実験的証拠が乏しく、どれも定説には至っていない。

このような問題点を克服するため、本課題責任者は図1のように、ガラス円筒凸レンズと凹レンズを約1mmの隙間を挟んで対向したイオン流路「ガラス円筒面チャンネル」を開発し、これを用いた MeV 級炭素イオンビームの集束効果の検証実験を進めてきた。その結果、これまでに 4MeV 炭素イオンがエネルギーを損失することなくチルトさせたガラス円筒面チャンネルを高い透過率で通過する現象を見出した。この結果は、円筒曲面の動径方向にイオンビームが集束されたことを示唆している。本研究では、その集束効果を実験的に確かめることを目的とした。その際、集束効果は入射イオンビームと透過イオンビームのフルエンス（＝測定時間内に単位面積を通過したイオンの数：単位 cm^{-2} ）の比によって評価した。このフルエンス比は、従来、入射イオンと透過イオンの強度比（＝フルエンス率の比）及び入射穴と出射穴の面積比から計算（間接測定）によって求められてきたが、本研究では固体飛跡検出器の一種である CR39 に、入射イオンと透過イオンを一定時間照射した際に生じた照射痕（ピット）の面密度から直接測定することを試みた。

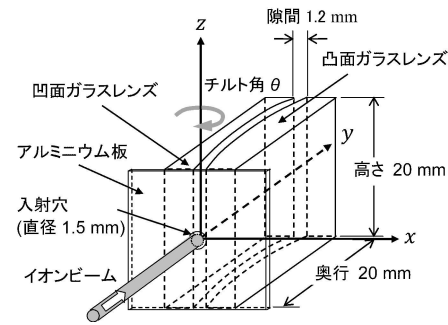


図1 ガラス円筒面チャンネルの構造

2. 実施方法

図1のような曲率半径157mm、奥行き20mmのガラス円筒凸レンズと凹レンズを1.2mmの隙間を挟んで対向したガラス円筒面チャンネルに、直径1mm、エネルギー4MeVの C^{4+} イオンビームを16秒間入射したときの、入射イオンと透過イオンのフルエンスをCR39の照射痕面密度により測定した。すなわち、透過イオンフルエンスと入射イオンフルエンスの比（入射透過フルエンス比）から集束効果を評価した。また、その集束効果へのチャージアップの寄与を調べるため、ガラス円筒面チャンネルにイオンを入射し続け、一定量の電荷を蓄積することによる入射透過フルエンス比の変化を測定した。さらに、半導体検出器により出射イオンのエネルギー損失を評価した。なお、集束効果とエネルギー損失の評価は、ガラス円筒面チャンネルの入射ビーム軸に対するチルト角 θ を変えて行った。なお、本研究の施設共用申請段階では、 C^{4+} イオンビーム強度を実際より1桁以上小さく見積もっていた。そして、入射イオンビーム強度が弱い状態でチャージアップ時間を長くすると、真空中の残留ガス吸着によりガラスの表面状態が変化し、イオンビーム透過に不安定性を招くと考え、チャージアップ時間は100～200s程度を予定していた。しかし、実際の実験では C^{4+} のイオンビーム量が安定して強かったため、当初予定していたビーム量(1nC)の30倍以上に設定することが可能になった。ただし、蓄積時間を伸ばしたため、当初予定していた1pCと1nCの比較ではなく、蓄積なし(0C)と数十nCの比較に変更した。

3. 結果及び考察、今後の展開等

(1) 半導体検出器による透過イオンのエネルギー分析結果
図2に入射イオンと透過イオンのエネルギー分析結果を示す。チルト角 θ が 0° と $+2^\circ$ において、図2のエネルギースペクトルのピーク位置と幅から、入射イオンビームと透過イオンビームのエネルギー差は1%以内であり、エネルギー損失はほぼないことが分かった。すなわち、透過イオンビームは入射時のエネルギーを維持していることが分かった。

ここで、 $\theta = 2^\circ$ のとき、幾何学的に直線軌道で透過できるイオンビームの割合は45%である⁵⁾。一方、PHITSコードによるシミュレーションでは $\theta = 2^\circ$ のとき透過率87%が得られているのに対し、実験ではほぼ100%が得られていることから、その差の約13%は散乱以外のチャージアップ等による影

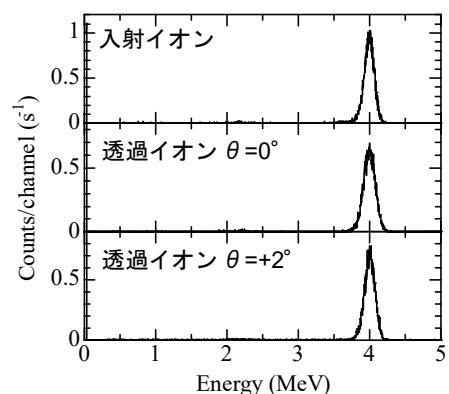


図2 入射イオンと透過イオンのエネルギー分布

響が含まれている可能性がある。したがって、単純計算により大雑把な内訳を見積もると、約45%が素通りのイオン、7% (= 55% × 13%)がチャージアップ等の影響を受けたイオン、残りの48%が散乱イオンということになる。なお、透過率は $\theta = 0^\circ$ のときのイオン量で規格化しているため、 0° のときの内訳を見積もることはできない。

(2)CR39による透過イオンビームの集束効果の測定結果実験はチルト角 $\theta = 0^\circ$ と $\theta = +2^\circ$ で行い、それぞれの場合について、チャージアップ前後のイオンビーム入射透過フルエンス比を測定した。入射イオン電流量を単純に時間積分することによって見積もった蓄積電荷量は $\theta = 0^\circ$ のとき31nC、 $\theta = +2^\circ$ でのとき74nCである。なお、チャージアップ中の透過電流量やガラス円筒面チャンネルに流れた電流量を正確にモニターしてはいない。更に、二次電子や入射イオンビームの荷電変換等も含めた正確な測定はしていない。したがって、これらの電荷蓄積量はあくまでも見積値である。入射イオンビームのフルエンス率は $8.9 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ である。

図3は、一例として、チルト角 $\theta = +2^\circ$ のときの透過イオンビームのCR39照射痕を二値化処理によって赤い点で表した顕微鏡写真である。図の左側がガラス円筒面チャンネルの凹面側、右側が凸面側に相当する。この図から、凹面側の方が凸面側より照射痕の面密度、すなわちフルエンス、が高いことが分かる。そこで、図3のように、照射痕全体を $50\mu\text{m}$ 四方の正方形で区切り、それぞれの領域のフルエンスを測定した結果を図4に示す。左の図が $\theta = 0^\circ$ で、右の図が $\theta = +2^\circ$ の結果である。また、黒丸がチャージアップ前の結果を、赤丸がチャージアップ後の結果を示している。なお、図4の縦軸 F は透過イオンフルエンスを入射イオンフルエンスで割った値（集束率）であり、 $F > 1$ の場合にイオンビームが集束したことを表している。これらの結果から、次のようなことが分かった。

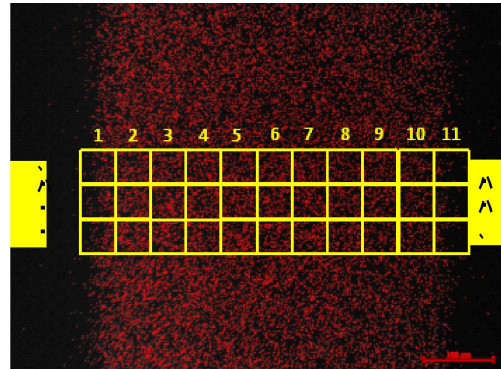


図3 チルト角 $\theta = +2^\circ$ のときの透過イオンビームのCR39照射痕を二値化処理によって赤い点で表した顕微鏡写真

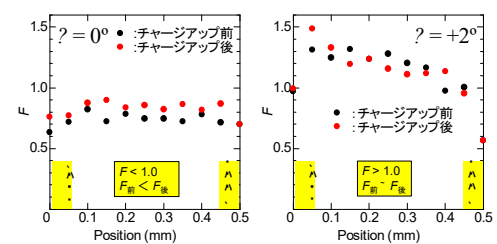


図4 透過イオンフルエンスの入射イオン

1. $\theta = 0^\circ$, チャージアップ前では、入射透過フルエンス比はビーム断面のチルト方向に沿ってほぼ一様で、0.75程度であった。この値はPHITS予想値0.87よりも低い集束効果はないことが分かった。
2. $\theta = 0^\circ$, チャージアップ後では、入射透過フルエンス比はビーム断面のチルト方向に沿ってほぼ一様で、0.85程度であった。この値はPHITS予想値0.87よりも低い集束効果はないことが分かったが、チャージアップ前よりは増加しているため、入射透過フルエンス比の上昇には蓄積電荷が寄与していることが分かった。
3. $\theta = +2^\circ$, チャージアップ前では、入射透過フルエンス比はビーム断面のチルト方向に沿って右下がりの傾向（凹面側で高く、凸面側で低い）を示し、ほぼ全域で1以上に達したため、集束効果があることが分かった。
4. $\theta = +2^\circ$, チャージアップ後では、入射透過フルエンス比はビーム断面のチルト方向に沿って右下がりの傾向（凹面側で高く、凸面側で低い）を示し、ほぼ全域で1以上に達したため、集束効果があることが分かった。さらに、左端(0.05~0.10mm)では入射透過フルエンス比がチャージアップ前よりも高いことから、凹面側で電荷蓄積による入射透過フルエンス比の向上が認められた。

以上の結果から、結論として、ガラス円筒面チャンネルをチルトさせることにより、回転方向と逆側に設置した面($\theta = +2^\circ$ の場合は凹面)に電荷が多量に蓄積し集束効果が高まることが分かった。すなわち、数MeVのイオンビームに対し、集束効果を高めるには、凸型より凹型のガラス表面が適していることが分かった。この結果は従来のガラス毛细管を用いたイオンビームガイドにも当てはまると予想されるため、今後、内壁が凹型のガラス毛细管を用いることにより、電磁場を用いない集束イオンビームの輸送制御法を確立することができると期待される。

4. 引用(参照)文献等

- 1) K. Motohashi, Y. Saitoh, N. Miyawaki, and Y. Matsuo, Jpn. J. Appl. Phys. **52** (2013) 076301.
- 2) K. Motohashi, N. Miyawaki, Y. Saitoh, K. Narumi, and S. Matoba, Jpn. J. Appl. Phys. **56**, 046301 (2017).
- 3) N. Stolterfoht and Y. Yamazaki, Phys. Rep. **629**, 1 (2016).
- 4) T. Sato, K. Niita, N. Matsuda, S. Hashimoto, Y. Iwamoto, S. Noda, T. Ogawa, H. Iwase, H. Nakashima, T. Fukahori, K. Okumura, T. Kai, S. Chiba, T. Furuta, and L. Sihver, J. Nucl. Sci. Technol. **50**, 913 (2013).
- 5) T. Nebiki, T. Yamamoto, T. Narusawa, M. B. H. Breese, E. J. Teo, and F. Watt, J. Vac. Sci. Technol. A **21**, 1671 (2003).
- 6) T. Ikeda et al., Surf. Coat. Technol. **206** (2011) 859.
- 7) G. Y. Wang et al., Sci. Rep. **5** (2015) 15169.

以下の項目について必ず記入してください。（公開されません）

実施報告書提出日	2019 年 5 月 18 日 提出期限は原則 5 月 30 日必着です。											
課題責任者	本橋 健次 （東洋大学理工学部生体医工学科）											
利 用 施 設	施設	装置（ビームポート、ライン名等）										
	イオン照射研究施設	3MV タンデム加速器（TC ビームライン）										
成果公表の予定	共用施設を利用した年度の翌年度の 4 月 1 日から起算して 2 年以内に論文発表等で成果を公表し、公表後速やかに「成果公表連絡票」により発表資料等の写しを添えて報告してください。 定められた期間内に成果が公表されなかった場合は、成果非公開課題の利用料金が適用され、お支払済みの利用料金との差額をお支払いいただきます。また、今後の利用課題の採択及び利用時間の配分を決定する際に重要な判断基準となりますので、ご承知をお願いします。											
発表形式 (該当を○で囲む)	原著論文、総説、プロシーディングス、書籍、雑誌、社内報、 ☒ 学会、研究会、セミナー、シンポジウム、講演会、報告会、プレス発表、 特許出願等											
誌名/講演会名	日本物理学会 2019 年秋季大会											
投稿/発表時期 (該当を○で囲む)	3 ヶ月以内 ☒ 6 ヶ月以内 1 年以内 2 年以内 発表の予定が立たない											
	発表の予定が立たない場合はその理由と今後の計画 例：「論文になる十分な結果が得られなかったため再実験を行う予定」、「複数回の実験が必要で次回の課題終了後に発表予定。」等											
公表にあたって	本研究を論文発表等で成果を公開する場合は、論文等に「量子科学技術研究開発機構の施設共用制度」にて行ったことを明記してください。 英文の場合は、以下を参考にしてください。 This work was performed under the Shared Use Program of QST Facilities.											
学位論文等の件数	機構の施設共用制度をより一層発展・充実させるためには、共用施設を用いて行われた研究成果が科学技術発展への寄与や成果の社会への還元が図られていること、そして施設共用が原子力の人材育成に寄与していること等を、外部に向けて発信することが求められています。 そのため共用施設を用いて行われた研究に係る学位論文等の件数が重要な指標の一つとなりますので、該当がある場合は以下にご記入願います。 <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>集計期間*</td> <td>平成 30 年 4 月～平成 31 年 3 月</td> </tr> <tr> <td>学位論文（博士）</td> <td>0 件</td> </tr> <tr> <td>学位論文（修士）</td> <td>0 件</td> </tr> <tr> <td>学位論文（学士）</td> <td>0 件</td> </tr> <tr> <td>学術論文</td> <td>0 件</td> </tr> </table> * 集計期間は、施設供用が行われた年度の 1 年間		集計期間*	平成 30 年 4 月～平成 31 年 3 月	学位論文（博士）	0 件	学位論文（修士）	0 件	学位論文（学士）	0 件	学術論文	0 件
集計期間*	平成 30 年 4 月～平成 31 年 3 月											
学位論文（博士）	0 件											
学位論文（修士）	0 件											
学位論文（学士）	0 件											
学術論文	0 件											

＜施設共用制度に関するアンケート調査＞

この調査は施設共用制度にて高崎研照射施設をご利用いただいた皆様に施設の利用に関する質問にご回答いただき、今後の本制度におけるユーザー支援内容の検討材料とさせていただくことを目的として実施するものです。ご回答いただいた内容につきましては、個々の回答者が特定されないよう十分に配慮したうえでデータの集計・分析を行い、今後の運営に役立たせていただきます。

【1】今後の施設利用に関するご希望について

放射線業務従事者の教育を実施、または、仲介（紹介）して頂きたい。

【2】ユーザーズオフィスの対応を含めた実験課題申請等の申請手続きについて

申請手続き（特に、採択後の実験計画に関する手続き）をもう少し簡素化できないでしょうか？

【3】ユーザーサポートについて、又は必要と考えられることについて

放射線管理に関する評価（IRAC 計算等）のサポート

【4】施設利用に係る感想・改善を希望することについて

利用料金の見積り額を提示して頂けると助かります。（できれば時間制ではなく定額制にするなど。）

【5】その他

＜アンケートにご協力いただきありがとうございました。＞