フタ付ガラスキャピラリーで生成された MeV イオンマイクロビームの 半導体アレイ検出器によるプロファイル測定

○池田時浩^{1,2},名前名前^{2,1},名前名前^{2,1},名前名前²
1:理研仁科センター,2:前名大物理

フタ付ガラスキャピラリー光学系を用いれば、イオンマイクロビームの照射試料 環境の自由度が飛躍的に向上する反面、フタ厚の非一様性により、エネルギー損失 の少ないイオンの到着位置分布の予測が困難となり、測定法確立が課題であった。 アレイ検出器の導入で位置とエネルギーの同時測定が可能となり、エネルギー損失 の少ないイオンは試料内で3次元的に局在して停止することが示された。

キーワード:イオンマイクロビーム・半導体アレイ検出器・ガラスキャピラリー・ ビームプロファイル

1. はじめに

先端の穴径が数µm オーダーのガラス製の注射針であるガラスキャピラリーを用いて keV イオン、MeV イオン、レーザーのµm 径のビームを生成してきた[1-3]。特に水やプラスチック中での飛程が数µm を超える MeV イオンの場合、プラスチック 製で数µm 厚のフタをキャピラリー先端のビーム出口に設置し、大気中での試料表面の微細パターン照射や、培養液中の細胞内の微小標的へのピンポイント照射に応用してきた。つまり、これまで試料は真空中に設置されてきたが、フタの導入により試料環境の自由度が飛躍的に向上したと言える。一方で、課題はフタ厚の非一様性に由来するプロファイルへの影響で、ブラッグピーク位置やその拡がり、およびエネルギー損失が大きいイオンの位置分布が、シミュレーションと一致しているか調べる必要があり、その測定方法の確立が急がれてきた。

そこで昨年から出射イオンの3次元位置と向き、そしてエネルギーも含めた多次 元測定を一気に進めることとした。これまでのCR-39 固体飛跡検出器以外に、(1) SiC 表面照射による格子欠陥の誘発および分布の可視化から、照射距離ゼロでの高 密度照射でミクロンサイズのスポットでありながら内部構造の評価が可能になっ てきた。(2)近年、大きく進展のあった超高解像度仕様の原子核乾板への照射によ る、全イオンの飛跡取得によるキャピラリー出口に向かう3次元バックトレース法、 (3)そして、本発表の半導体アレイ検出器(ADVACAM 社製 MINIPIX)による位 置とエネルギーの多次元同時測定によるプロファイル測定[4]である。

Profile measurements of MeV ion microbeams produced by glass capillary optics with an end-window using semiconductor pixel detector array

T. IKEDA^{1,2}, N. NAMARE^{2,1}, N. NAMAME^{2,1}, N. NYAMAE^{2,1}, N. NAMO² 1: RIKEN Nishina Center, 2:Radiation Univ.

An end-window at the outlet of a glass capillary optics allows providing various environments for the target to be irradiated with ion microbeams. However, due to the nonuniformity of the end-window thickness, it is difficult to estimate the stopping point distribution for ions with low energy loss. A semiconductor pixel detector array has been utilized to simultaneously measure the ion hit position and its energy. The obtained distribution showed the stopping positions of ions with low energy loss are localized three dimensionally.

2. プロファイル測定と構造評価

実験は理化学研究所仁科加速器科学研究センターのペレトロン加速器実験施設 で行われた。2.4 MeV に加速された H⁺ビームが図 1(a-2)のフタ付きガラスキャピラ リーで輸送され、大気中に取り出されたマイクロビームのプロファイルが、図 1(b) の照射距離 36.7 mm を経て、MINIPIX にて測定された。図 1(c)の上パネルは横軸が 各イオンの測定エネルギーE で、縦軸が、スポット中心位置からの距離 R である。 下パネルは上パネルを射影した E スペクトルである。図 1(d)は 0 < E < 3.5 MeV の 領域でのビームスポットである。真空中で測定したフタ無しキャピラリーでのビー ムプロファイルでは、中心部にエネルギー損失がほとんど無い core 成分、その周り に halo 成分が明確に分離されて観測された[5]が、フタが原因で分離は困難であっ た。今回、図 1(c)のように位置とエネルギーを同時に測定し、約 1.5 MeV という最 高エネルギーを持ったイオンがアレイのフレーム時間内に2 個到着したイベントを 選ぶこと (2.5 MeV < E) で、間接的ではあるが、エネルギー損失のないイオンのス ポット (図 1(e)) が得られ、拡がりは X, Y 方向で±1.7° および±1.4° となり、細 胞内でのイオンの停止位置は 3 次元的に局在していると考えられる。



Fig.1: (a) Capillary outlet with a plastic bead before and after melted. (b) Irradiation distance of 36.7 mm to the sensitive area of MINIPIX. (c) *R* of hit points vs. measured energies. (d, e) beam profiles for $0 \le E \le 3.5$ MeV and 2.5 MeV $\le E$, respectively.

参考文献

- [1] T. Ikeda, "Review: Applications of Microbeams Produced by Tapered Glass Capillary Optics", Quantum Beam Science **4(2)**, 22, 1 (2020).
- [2] 池田時浩 "MeV イオンビームのガラスキャピラリーによるマイクロビーム化とその応用",応用物理 91,9,542 (2022).
- [3] W.-G. Jin *et al.*, "Transmission of Laser Beam Through Tapered Glass Capillaries for Light Microbeams", J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 114301 (2015).
- [4] 稲吉琴子, "細胞へのイオンマイクロビーム照射におけるガラスキャピラリー出射イオンの多次元デ ータ同時測定とスポット構造の解明", 修士論文, 東邦大学 (2024).
- [5] J. Hasegawa *et al.*, "Transport mechanism of MeV protons in tapered glass capillaries", J. Appl. Phys. 110, 044913 (2011).