

# ガラスキャピラリによる収束 MeV イオンビームの応用

成沢 忠\* 根引 拓也\*\*

\*高知工科大学工学部電子・光システム工学科

\*\*高知工科大学総合研究所

〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口185

E-mail: narusawa.tadashi@kochi-tech.ac.jp

**要約：**これまでの研究で、MeV 領域の高エネルギーイオンビームをわずかなテーパーを持たせたガラス細管（ガラスキャピラリ）を用いてマイクロビームを生成することに成功した。また、このガラスキャピラリを真空と大気との接続に用いることで、イオンビームを大気中まで取り出すことにも成功している。今回はこれらの MeV マイクロビームを用いた実際の測定例を紹介し、ガラスキャピラリの有用性を説明する。

**Abstract :** We have succeeded to form the MeV micro-ion beams by means of tapered glass capillary optics. We have also applied this optics to carry out the ion beams into the atmospheric environment. In this case the glass capillary optics works as a focusing lens for the ion beams as well as the orifice for differential pumping. In this article, we report some examples of applications, i.e. the micro-beam RBS and in-air PIXE measurements.

## 1. はじめに

これまで私たちは 2 MeV  $\text{He}^+$  イオンビームをガラスキャピラリで収束したときの透過率の測定や、キャピラリ透過後の粒子のエネルギー測定を行ってきた<sup>1)</sup>。また、このガラスキャピラリを真空と大気との境界に設置することで、ガラスキャピラリを通して MeV イオンビームを大気中に取り出すことも試みてきた。ガラスキャピラリによる MeV マイクロイオンビームの生成、及び大気取出しが可能となったので、ここではマイクロビームを用いた実際の測定への応用を報告する。

一般的な MeV 領域の高エネルギーイオンビームの測定としては、ラザフォード後方

散乱分析 (RBS : Rutherford Backscattering spectrometry) や粒子励起 X 線放出分析 (PIXE : Particle Induced X-ray Emission) などが挙げられる。本研究では、これらの測定方法においても、ガラスキャピラリ生成のマイクロイオンビームが適応可能かどうかを検討した。また、大気中に取り出したイオンビームの利用としては、真空槽に入れることが困難な液体試料などを、大気中で直接 PIXE 分析によって組成分析が可能かを検討した。

## 2. マイクロビームによる RBS 測定

真空中でのキャピラリによるマイクロビームの測定例として、微細加工されたサンプルの

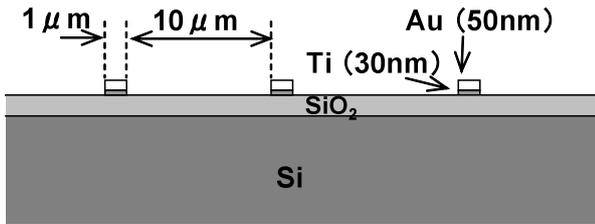


図1 ライン&スペースサンプル

RBS 法による 3 次元マッピング測定の結果を示す。この実験で用いたガラスキャピラリは入口内径が 0.8mm, 出口内径が約  $0.3\mu\text{m}$ , 長さは 50mm のものを用いた。したがって、キャピラリのテーパ角は  $\sim 0.5^\circ$  となる。検出器として SBD (Silicon surface Barrier Detector) を散乱角  $120^\circ$  のところに設置して使用した。サンプルとガラスキャピラリ先端の間隔は  $\sim 0.1\text{mm}$  である。使用した試料は図 1 に示すような Au/Ti のライン幅  $1\mu\text{m}$ , スペース幅  $10\mu\text{m}$  のパターンを持つサンプルである。これをピエゾステージによってスキャンさせて、RBS 測定を行うことで 3 次元マッピングを試みた。

図 2 に収束イオンビームによって Au ライン上で RBS 測定を行ったときの結果を示す。790 ch 付近に Au からのピークが現れている。また、500ch 付近から Si 基板からの散乱信号が立ち上がっている。この結果から収束ビームによって RBS 測定が可能であることが確認された。しかし図 2 の RBS スペクトルには Au と Si の間に本来ないはずの散乱強度が現れている。これらは入射イオンビームがガラス内壁との相互作用によってわずかにエネルギーを失ったためであると考えている。次に、同様のサンプルを用いてステージスキャンによる RBS スペクトルを測定したときの実験結果を図 3 に示す。図 2 のスペクトルを得た点を基準 a) として、ピエゾステージをスキャンさせて得られた RBS スペクトルの変化の様子が図 3 である。基準点から  $0.9\mu\text{m}$  動いた点 b) では、基準点のスペクトルとあまり大きな違いは見られない。し

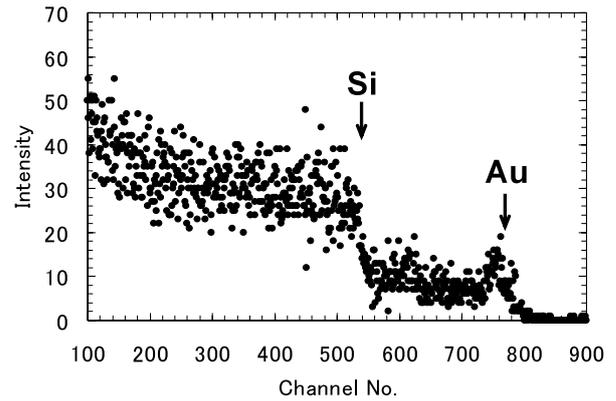


図2 Au ライン上での RBS スペクトル

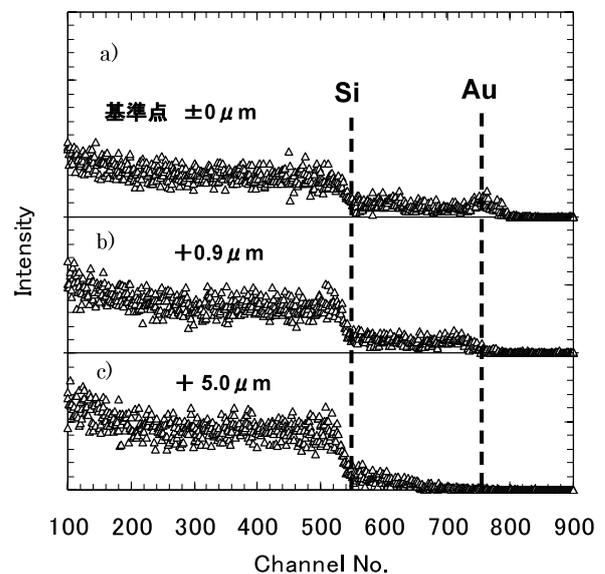


図3 ステージスキャンによる RBS スペクトルの変化

かし、ステージをさらに動かして c) のように  $5\mu\text{m}$  移動させると、完全に Au のピークは消失する。これは基準点ではラインの上にあったキャピラリ先端部分が、スペースの間に入ったためである。このときの Au ピークの強度変化を図 4 に示す。この結果から、本測定における横方向分解能は  $1.6\mu\text{m}$  程度であることがわかる。分解能を決めている要因はキャピラリの出口径とキャピラリ先端-サンプル間距離である。いずれにしても、ここで示した測定例によって、ガラスキャピラリを用いることによって横方向分解能  $\sim 1\mu\text{m}$  程度の RBS 測定が可能であることが実証された。RBS は本来  $\sim 10\text{nm}$  の深さ分解能を持っていることから、上記の結

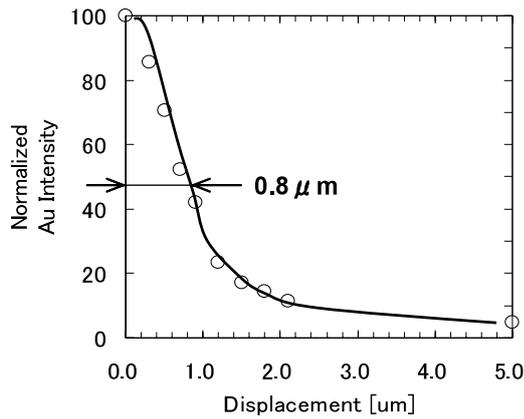


図4 Auピークの強度変化

果はRBSによって非破壊的に3次元マッピングが可能なことを示すものである。

### 3. 大気中PIXE測定

この測定で用いたガラスキャピラリは入口内径が0.8mm、出口内径が10~20 $\mu$ mで長さが30mm程度である。したがって、テーパ角は $\sim 1^\circ$ である。Alパイプにモールドしたキャピラリは4軸のゴニオメータ上に置いた。このゴニオメータは並進2軸、回転2軸の4軸調整機能を持っている。キャピラリの入口と出口で測定したビーム電流値はそれぞれ10nAと200pAとなり、これは入口と出口の面積費に比べて30倍程度大きな値となっている。

このようにして得られた大気中マイクロビー

ムが実際にPIXE測定として用いることができるかどうかを確認するために、まず組成のわかっている4元化合物半導体のGaInNAsをサンプルとして測定を行った。図5に2MeV He<sup>+</sup>と4MeV He<sup>++</sup>イオンビームを大気中で照射したときのGaInNAsからのX線スペクトルを対比して示す。図から明らかのように、4MeV He<sup>++</sup>を照射した場合のスペクトルの方が2MeVのスペクトルよりもはっきりと元素を確認することが出来る。当然ながらこれはイオン化断面積の差異による。4MeVのスペクトルではGaInNAsからではないと考えられる3つのピークが現れている。ピーク(A)はSiのエネルギーと一致するので、これはガラスキャピラリ自身からのX線であると考えられる。先端近くのガラス内壁の厚みは約10 $\mu$ m程度なので、キャピラリ内で発生したSiのX線は内壁を透過することが出来る。ピーク(B)はArのエネルギーと一致するので、大気中のArガスからのものであると考えられる。ピーク(C)はFeのピークであり、このピークは周囲のステージなどから発生したものと考えられる。

次に大気中測定ならではの例として、液体試料の測定結果を示す。図6は液体試料を測定したときのキャピラリ(A)、X線検出器(B)、

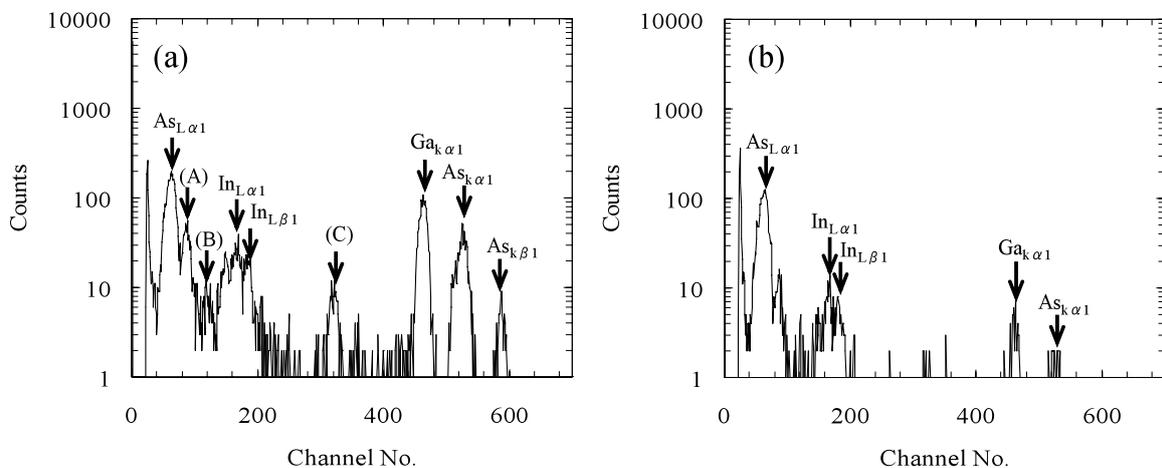


図5 大気中PIXEによるGaInNAsの測定

(a) 4MeV He<sup>++</sup> (b) 2MeV He<sup>+</sup>

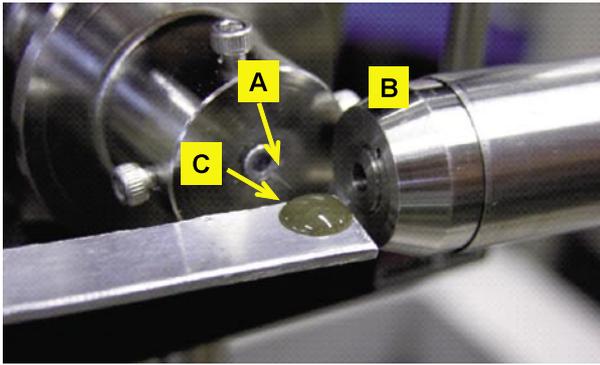


図6 液体試料の測定 (A) キャピラリ先端 (B) X線検出器 (C) 液体試料；ヘドロ

液体サンプル (C) の写真である。サンプルには海底ヘドロを用いた。サンプルとキャピラリ先端までの距離は $\sim 1$  mm である。検出器とサンプルの距離は出来る限り近づけたが、検出器等の構造のため $\sim 2$  cm 程度の間隔がある。図7に乾燥させたヘドロ (a) と液体のヘドロ (b) からの X 線スペクトルを示す。全体的には良い一致が見られるが、いくつかのピークで X 線強度の違いが見られる。特に Cl の K 線の強度は (a) の方が (b) よりずっと強い。このような違いが出る理由は明らかではないが、ひとつの可能性としては乾燥した試料の場合には元素の濃度が高くなってしまいうため、(a) のようにカウント数が多くなると考えられる。対照的に (b) のように水の中で濃度が薄められ

ている場合は、イオンビームが水中を進む間にエネルギーを失い、X線の発生断面積も小さくなってしまったと考えられる。また両方のスペクトルにおいて Si の強度は同じくらいの大きさとなっている。これは先にも述べたように、ガラスからの X 線であることを示唆している。以上のように、ガラスキャピラリを用いることで大気中での X 線検出が可能になったことがわかったが、定量的な測定を行うためには実験条件の最適化 (イオン種、エネルギー、試料の設置方法など) を必要とする。

#### 4. まとめ

ガラスキャピラリによる収束 MeV He イオンビームを使うことによって、真空中での RBS 測定及び大気中での PIXE 測定が行えることがわかった。これらの結果は、ガラスキャピラリが収束レンズやイオンビームの大気取り出し機構として有効であることを示している。しかし、RBS 測定においてはノイズ成分の除去、PIXE 測定においては特性 X 線放出効率の向上などが課題として残っている。これらについては、さらに高精度の位置決め機構を採用することや、イオンビームの種類、エネルギーなどを最適化することによって解決することが可能であると考えている。

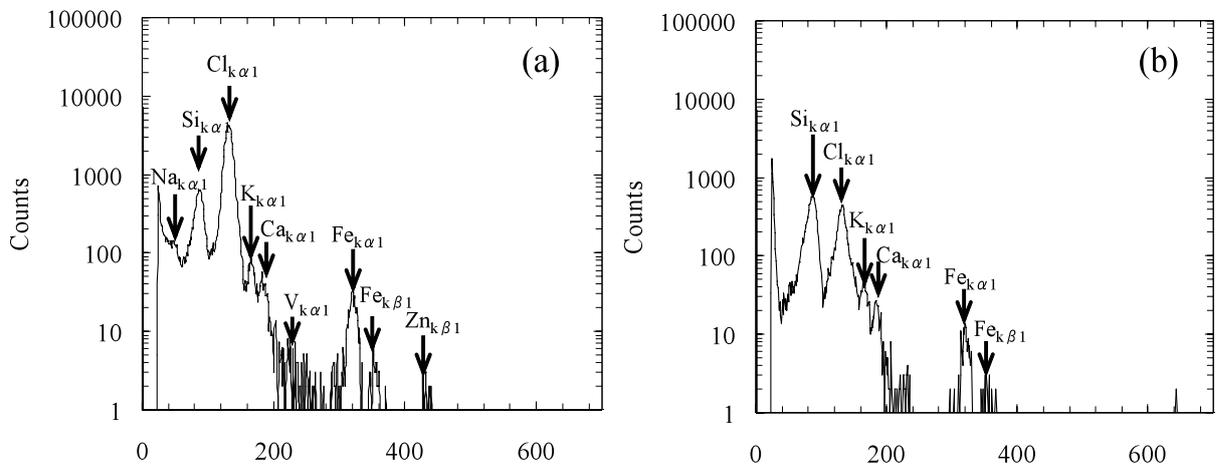


図7 大気中 PIXE によるヘドロの測定 (a) 乾燥ヘドロ (b) 液体ヘドロ

## 参考文献

- 1) T.Nebiki, T.Yamamoto, T.Narusawa,  
E.J.Teo, M.B.H.Breese and F. Watt : J.  
Vac. Sci. Technol. A 21(5), 2003, 1671-1674.

