

第 61 回放射線化学討論会  
 ガラスキャピラリー光学系による紫外線マイクロビーム  
 細胞照射システムの開発：  
 微小距離でのプロファイル測定とエネルギー評価

東邦大学大学院理学研究科  
 理化学研究所仁科加速器科学研究センター

河村 俊哉\*, 金 衛国  
 池田 時浩

1 はじめに

先端出口径がミクロンオーダーであるガラスキャピラリーを用いることでイオンビームやレーザー光を容易にマイクロビーム化することができる。近年、先端出口径がミクロンオーダーのガラスキャピラリー（ガラス製の細い注射針，Fig. 1）を用いて、量子マイクロビームを生成する研究が進んでいる。2003 年の高知工科大学のグループによる  $H^+$  ビームの報告<sup>1)</sup> から始まり、2006 年には理化学研究所などのグループが  $Ar^{8+}$  ビームの生成に成功した<sup>2)</sup>。応用面では、ガラスキャピラリーなしでは困難な MeV イオンビームによる液体中の表面改質や、培養液中の生細胞や大腸菌への照射などの例がある<sup>3)</sup>。

上記経緯とともに、現在、筆者の所属する東邦大学量子エレクトロニクス教室と理研の共同研究チームはガラスキャピラリーを用いた量子マルチマイクロビーム生成法の開発を行っている。テーパ型ガラスキャピラリーに可視光レーザーを入射し、その透過特性や集束効果の評価を行い、ガラスキャピラリーに入射した光の振る舞いや性質を調べてきた<sup>4)</sup>。水中飛程が数  $10\ \mu\text{m}$  である数 MeV イオンビームは停止寸前に高い阻止能を持つ。ここでキャピラリー光学系を顕微鏡下

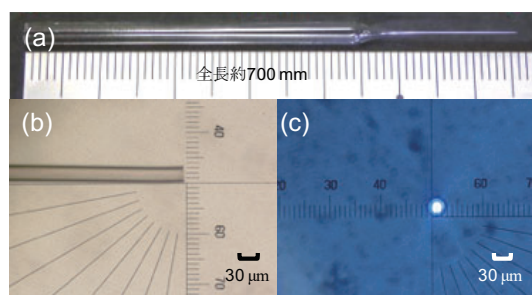


Figure 1. Photographs of tapered glass capillary: (a) The whole capillary; (b) side view of the capillary outlet; (c) front view of the capillary outlet.

で用いることで標的に先端を近づけることが可能になり、ピンポイント照射が実現できると考えられる。イオンビームが細胞を貫通せず、イオンビームの照射位置検出器を用いることができず、照射位置を保証できないことが問題点として挙げられる。そこで 2017 年度より、ガラスキャピラリーを用いた微小標的（細胞など）へのイオンマイクロビームピンポイント照射を想定した研究を開始し、ガラスキャピラリーに可視光レーザーと MeV イオンを同時入射し、イオンビーム照射前照準装置の開発を行ってきた。

エネルギーの高い紫外線や X 線をガラスキャピラリーに通し、マイクロビーム化することが実現できれば、イオンビームなしで照射に対する応答を得ることができる。このように、イオンビームなしで細胞等の微小標的にダメージを与えるようなガラスキャピラリーを用いた装置が実現した場合、テーブルトップで

Development of UV microbeam irradiation system by glass capillary optics: profile and beam energy measurement at micro-meter order irradiation distance  
 Shunya KAWAMURA\* and Wei-Guo JIN (*Department of Physics, Faculty of Science, Toho University*), Tokihiro IKEDA (*RIKEN Nishina center for Accelerator Based Science*),  
 〒274-8510 千葉県船橋市三山 2-2-1  
 TEL: 047-472-5930, E-mail: 6418002k@st.toho-u.ac.jp

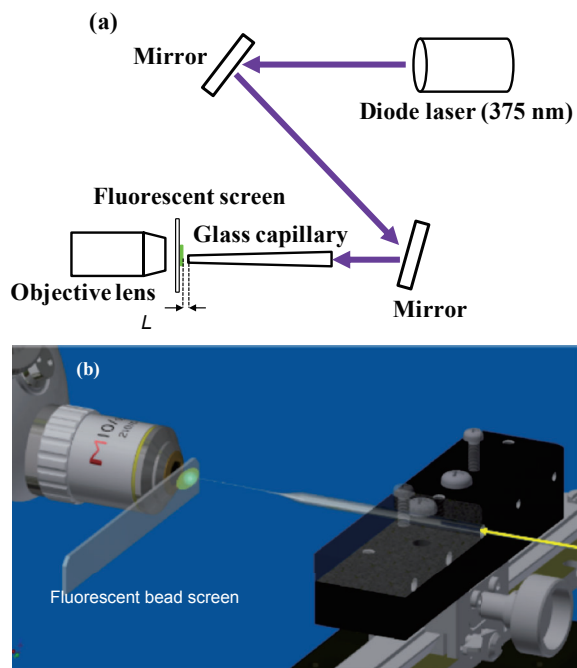


Figure 2. Experimental setup for beam profile measurement (a) and expanded view around bead screen (b).

細胞応答を得るような照射実験が可能となる。2018年度より、イオンビーム無しの紫外線マイクロビーム細胞照射システムの開発を開始した。まずは波長 375 nm の UV-A に相当するレーザーを使用し、エネルギー評価および微小距離でのビームプロファイル測定を行った。

## 2 実験

実験は全て東邦大学量子エレクトロニクス教室にて行われた。

### 2.1 ビームプロファイル測定

微小な細胞核へのピンポイント照射を想定しているので、本研究では、照射距離 ( $L = 17 \mu\text{m}$ ) を設定し、数  $\mu\text{m}$  厚の透過型極薄蛍光ビーズスクリーン上のスポット画像解析からスポット径を定義した。スポット画像解析では、画像輝度を入射光強度に変換し、 $x$  方向、 $y$  方向それぞれで強度 50% の点を探し、座標を  $x_{\min}$ ,  $x_{\max}$ ,  $y_{\min}$ ,  $y_{\max}$  とし、スポット径は以下の式で

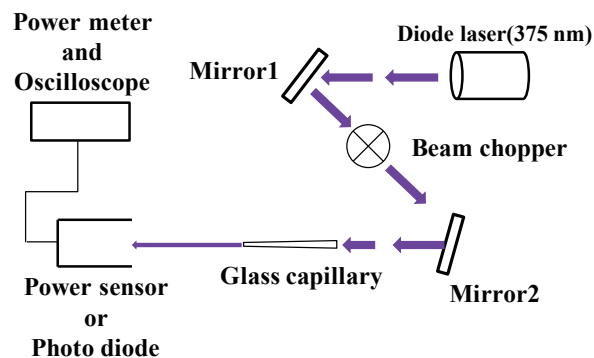


Figure 3. Experimental setup for beam energy measurement.

定義した。

$$D = \frac{(x_{\max} - x_{\min}) - (y_{\max} - y_{\min})}{2}$$

$$= \frac{D_W - D_H}{2}$$

$$(D_W = x_{\max} - x_{\min}, D_H = y_{\max} - y_{\min})$$

ここでビームプロファイル測定のセットアップを Fig. 2 に示す。ビームプロファイル測定では、出口径の異なるガラスキャピラリーを用意し、それぞれでスポット径を求めた。

### 2.2 ビームエネルギー評価

ガラスキャピラリーが光学系として、どのような性能を持っているか評価するためにガラスキャピラリー出射後の紫外線レーザーマイクロビームのエネルギー評価を行なった。また、出射後のビームエネルギー密度を求め、そこから density enhancement を見積もった。ビームエネルギー評価実験では、パワーセンサーよりレーザービームパワーを測定し、その後、パワーセンサーをフォトダイオードに置き換え、その先に繋いだオシロスコープよりパルス幅を得た（この時のパルス波高はパワーセンサーで得たビームパワーに相当したものである。）パルス化し得られたビームパワー、パルス幅から積分エネルギーを求めた。ここで測定セットアップを Fig. 3 に示す。また、得られたビームエネルギーをガラスキャピラリー出口面積で割り、ビームエネルギー密度を求め、density enhancement を見積もった。

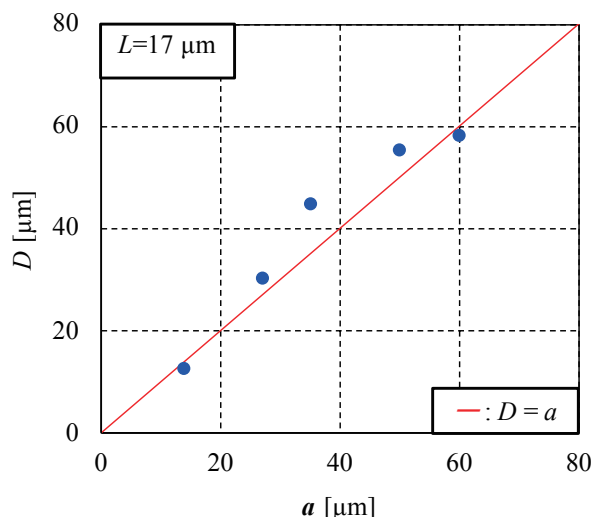


Figure 4. Spot diameters,  $D$  (FWHM) for glass capillaries with different outlet diameters,  $a$ . The input laser wavelength was 375 nm.  $L$  is irradiation distance.

### 3 結果

#### 3.1 ビームプロファイル測定

照射距離  $L = 17 \mu\text{m}$  におけるキャピラリー出口径  $a$  に対するスポット径  $D$  の関係を Fig. 4 に示す。Figure 4 の示す結果より  $L = 17 \mu\text{m}$  におけるキャピラリー出射後のビームスポット径  $D$  は出口内径  $a$  の大きさとほぼ同等な大きさであることがわかった。出口内径はマイクロフォー焦接眼レンズ内のスケールを用いて出口外径を測定し、出口外径と出口内径の比 (1:0.6) から求めた。

#### 3.2 ビームエネルギー評価

出口内径が  $7.2 \mu\text{m}$  のキャピラリーを本評価で使用した。また、培養液中での照射を想定し、キャピラリー先端にはフタをつけた。レーザーの出力は 2 mW とし、キャピラリーインプット、キャピラリーアウトプットでの 1 パルス当たりのビームエネルギー (パルス幅 10 ms) およびビームエネルギー密度を Table 1 に示す。以上の結果からガラスキャピラリーを用いて、細胞にダメージを付与するのに十分なパルスエネルギー ( $2.74 \mu\text{J}$ )<sup>5)</sup> を得られることがわかった。また大きな density enhancement も確認された。

Table 1. Result of beam energy measurement.

	beam energy $\mu\text{J}/\text{pulse}$	energy density $\mu\text{J}/\text{mm}^2/\text{pulse}$
Input	21.9	27.9
Output	2.74	67300

### 4 まとめと展望

ビームプロファイル測定においては、照射距離  $17 \mu\text{m}$  でスポット径がキャピラリー出口内径とほぼ同じ大きさの円形スポットが得られた。これは、微小距離で円形開口を平行ビームが入射する時のフレネル回折のように、高次の縞が消えているシャープなスポットであった。またビームチョッパーを導入することでエネルギーの制御も可能である。ビームエネルギー評価においては、ガラスキャピラリーを通して細胞にダメージを付与するのに十分なエネルギーが得られた。以上 2 つの結果からガラスキャピラリー光学系による紫外線マイクロビーム照射システムが実現可能になると考える。今後、システムの開発に向けて、出口径の異なるガラスキャピラリーを用いてそれぞれのキャピラリーにおけるエネルギー密度、density enhancement を調べ光学系としてのキャピラリーの性能を評価する。

#### 〈参考文献〉

- 1) T. Nebiki, T. Yamamoto, T. Narusawa, M. B. H. Breese, E. J. Teo, F. Watt, J. Vac. Sci. Technol., A21 (2003) 1671.
- 2) T. Ikeda, Y. Kanai, T. M. Kojima, Y. Iwai, T. Kambara, Y. Yamazaki, M. Hoshino, T. Nebiki, T. Narusawa, Appl. Phys. Lett., 89 (2006) 163502.
- 3) 池田時浩, 総説 ガラスキャピラリー光学系のビーム通過特性とマイクロビーム応用, 原子衝突学会誌, 10 (2013) 125.
- 4) W.-G. Jin, T. Minowa, T. Ikeda, J. Phys. Soc. Jpn., 84 (2015) 114301.
- 5) L. Lan, S. Nakajima, K. Komatsu, A. Nussenzweig, A. Shimamoto, J. Oshima, A. Yasui, J. Cell. Sci., 118 (2005) 4153.