

マイクロビーム技術が探る新しい世界



研究室紹介

飯田 敏行*

Micro-beam technology researches in new field

Key Words : Micro-beam technology, Micro-focus X-ray beam, ECR plasma

1 はじめに

私達の研究室は、平成 17 年度の工学研究科の改組によって、電子情報エネルギー工学専攻から新しく統合された電気電子情報工学専攻に移り、研究室の名称も核融合工学講座から先進ビームシステム工学領域に変わることになった。研究室名称の変更は、研究の方向を将来のエネルギーを目指した核融合研究から、より基礎的な高機能ビーム源の開発とその応用研究にシフトしようと考えた結果である。具体的な研究テーマとしては、(1)マイクロイオンビームやマイクロフォーカス X 線等の高品質ビームの生成と制御及び応用、さらに、(2)ECR プラズマ生成型多価イオン源の開発とその応用、である。これらのビーム源やビーム技術を利用して、材料の精密分析や加工、新材料の創成や関連プロセス技術の開発、さらにガン治療を見据えた先端医療応用や単細胞マイクロビーム照射実験によるバイオ分野への研究展開を図っている。また、放射線(ビーム)も研究対象の一つであり、(3)平成 23 年 3 月 11 日の東京電力福島第 1 原子力発電所の事故以来、福島県の放射能汚染地域の復旧支援活動に積極的に協力し、福島から送られてくる種々の放射能汚染試料の分析を行っている。(1)と(3)については主に飯田と佐藤文信助教、(2)については主に加藤裕史准教授が担当している。現在の研究室所属の学生数は、大学

院生が 10 名、学部生が 4 名である。以下に、研究室で取り組んでいる研究例を紹介する。

2 マイクロ X 線ビーム照射装置の開発と単細胞照射実験

図 1 に、研究室で製作した小型マイクロ X 線ビーム発生装置の概略図を示している。装置の大体の大きさは 60cm × 70cm × 60cm で、光学防振台上に設置した。X 線発生部は、蛍光 X 線分析装置(XGT-5000)を改造して製作した。マイクロフォーカス X 線管のターゲットには Rh を用い、最大管電圧は 50kV、最大管電流は 1mA、電子ビームの最小径は約 30 μm φ である。また、さらに細い X 線ビームを発生させるために、ターゲットからの X 線をガラスキャピラリーに通して引き出した。ガラスキャピラリーは中空のガラス管で、X 線はこの管中を全反射しながら輸送される(図 2 参照)。ガラスキャピラリーの長さは 100 mm で、入口と出口の管径はそれぞれ 100 μm φ、30 μm φ である。ナイフエッジ法によるビームプロファイル測定(特性 X 線の測定)から、ガラスキャピラリーの出口から 2mm の位置で、約 12 μm φ の X 線ビームが得られることを確認した。また、Au-M 特性 X 線(2.12keV)、Au-L 特性 X 線(9.7keV)、そして Zr-K 特性 X 線(15.8keV)に対するビームの発散角は、それぞれ約 11mrad、約 2.5mrad、約 2.3mrad であった。この結果は、臨界角の 2 倍がビーム発散角にほぼ等しく、X 線がガラスキャピラリー中を全反射して輸送されていることを示している。

この X 線照射装置で細胞を照射する。ガラスキャピラリーは真空容器内にあり、マイクロ X 線ビームは 4 μm 厚のポリエチレンフィルムを通して大気中に取り出される。照射細胞試料は XYZ 可動ステージに置かれ、細胞の様子を対物レンズと CCD



*Toshiyuki IIDA

1949年5月生

大阪大学 工学部 原子力工学科卒業
(1973年)

現在、大阪大学 大学院工学研究科 電気電子情報工学専攻 先進電磁エネルギー工学コース 教授 工学博士 放射線工学、放射線計測

TEL : 06-6879-7909

FAX : 06-6879-7363

E-mail : iida@eei.eng.osaka-u.ac.jp

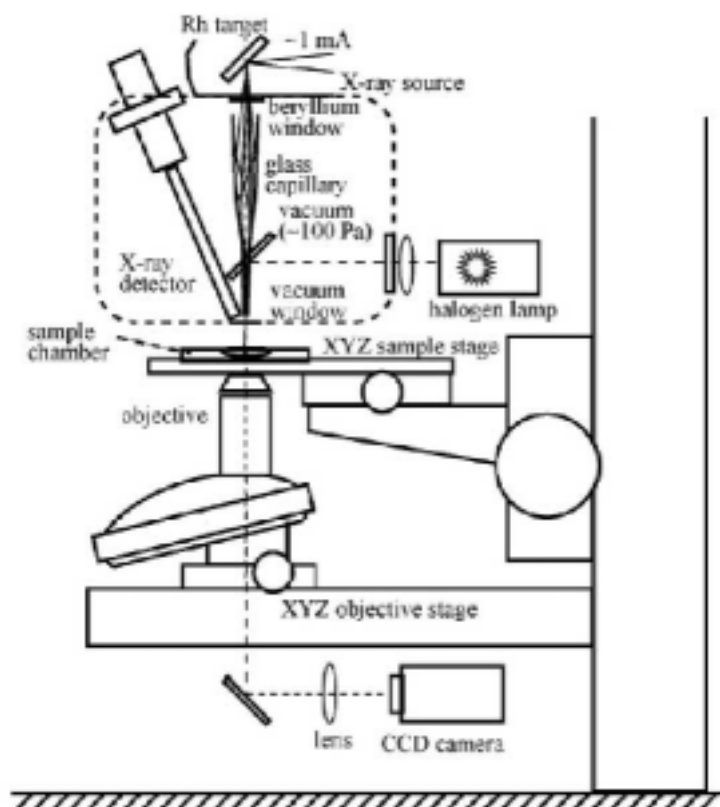


図1 マイクロX線ビーム照射装置の概略図

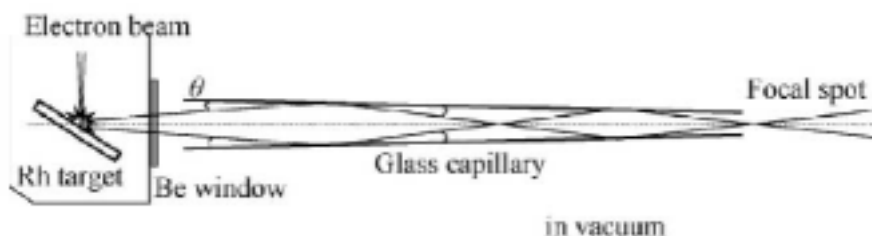


図2 ガラスキャピラリー中の全反射によるX線の輸送

カメラで観測することができる。このシステムでは、マイクロX線ビームと対物レンズの光軸を合わせるために、対物レンズもXYZ可動ステージ上に設置している(図1参照)。

標的細胞へのX線エネルギー付与のシミュレーション計算を、光子電子輸送計算コードEGS4を用いて行った。シミュレーション計算では、標的細胞を直径 $10\mu\text{m}$ の水球とし、深さ 0.5mm の水層の底にあるとした。低エネルギー領域のX線はほとんど水層で吸収される。また、水中では光電効果によって高速電子が生成され、その飛程が数 μm 程度であることから、水中での電離領域はX線ビーム径よりも広がる。図3に、X線ビーム径を $0.5\mu\text{m}\phi$ とした場合の電離領域のシミュレーション計算結果

の例を示している。X線のエネルギーが高くなるにつれて、高速2次電子による電離領域が広がっているのがわかる。本照射装置による標的細胞の最大吸収線量率は約 0.05Gy/s であった。この吸収線量率は、細胞レベルでの放射線影響を調べるのに十分な強度である。

本照射装置を利用して実施した単一細胞のX線マイクロビーム照射実験の例を紹介する。照射細胞として、線維芽細胞AG01522Bを蛍光ガラス基板上で培養した。蛍光ガラス基板は、蛍光ガラス線量計として利用でき、X線による吸収線量を紫外線励起蛍光量から推定することができる。図4に、線維芽細胞のマイクロX線ビーム照射実験結果の例を示している。線維芽細胞に 3Gy のX線照射を行った。

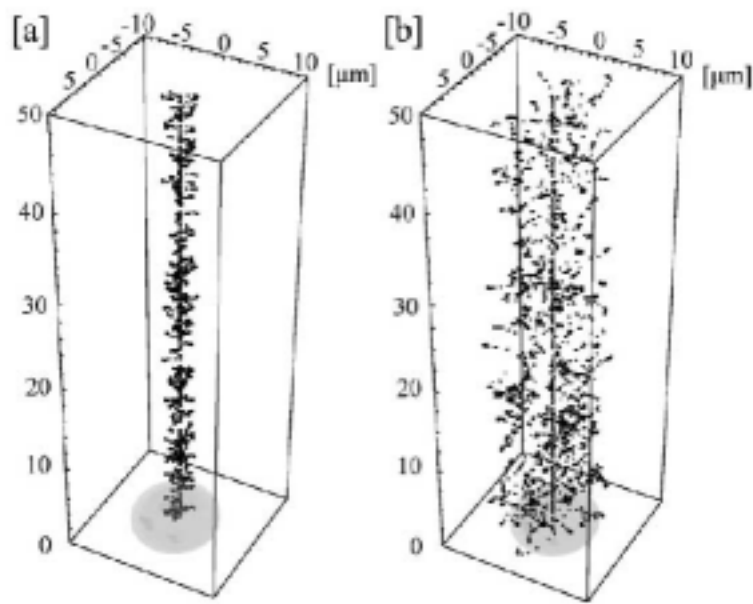


図3 水中でのX線誘起高速2次電子の拡がりの例 X線エネルギー：10keV[a]，20keV[b]

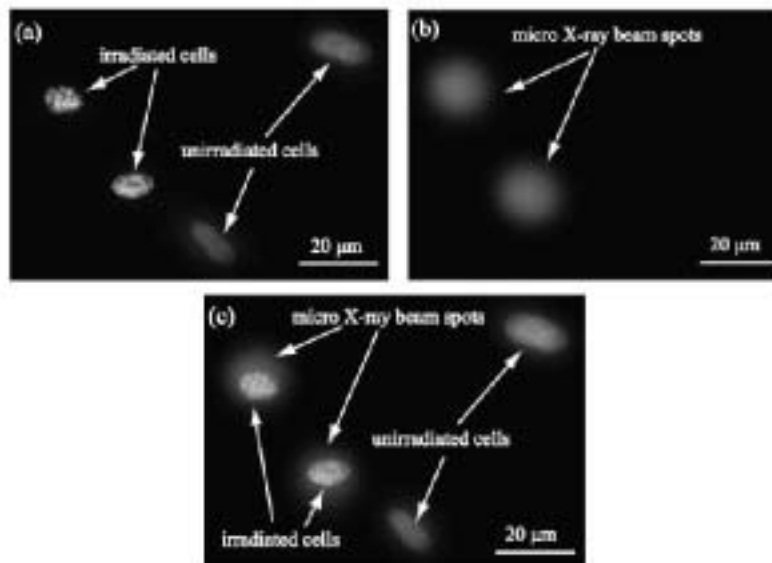


図4 線維芽細胞のマイクロX線ビーム照射実験結果の例
(a) 照射細胞と非照射細胞の観測像 (b) 蛍光ガラス基板のマイクロX線ビームスポット像 (c) (a)と(b)の合成画像

X線照射後、蛍光抗体染色法で標的細胞の照射影響について調べた。DNA二重鎖切断損傷を検出するために、細胞核内のヒストンH2AXのリン酸化抗体(γ -H2AX)を蛍光顕微鏡で観測した。細胞核の染色では、全ての細胞核から蛍光が認められるが、 γ -H2AXによる蛍光はX線標的細胞核のみに、斑点状に明るく観測された。また、標的細胞と同じ位置に蛍光ガラス基板からの蛍光(X線ビームスポット)が確認された。図4に示しているこれらの結果は、X線マイクロビームが標的細胞に正確に照射されて

いることを示している。このように、顕微鏡の視野内で細胞へのX線照射効果をその場で観察することができる。

3 福島原発事故関連の放射線・放射能に係る救援活動

文部科学省からの福島原発事故関連の放射線に係る救援要請(例えば福島県緊急被ばくスクリーニング専門家派遣協力依頼)や学協会の専門委員会等を通して福島より送られてきた種々の放射能汚染試料

の分析依頼に積極的に対応してきた。約10か月が経過した現在は、原発事故直後に比べれば依頼件数はずっと少なくなっているものの、Cs放射能の分析作業は今も続いている。この間で使用してきた放射能計測装置と放射能分析の事例を表1にまとめている。表にも記述しているように、市販の典型的な

計測装置を利用するだけでなく、目的に応じて独自に工夫製作した装置を用いて対応した例もある。それらのケースについては、学協会（応用物理学会、日本放射線安全管理学会、日本原子力学会、日本アイソトープ協会主任者部会年次大会他）等で研究成果として発表を行っている。

表1 福島原発事故関連で使用している放射能計測装置と放射能汚染分析の事例

放射能計測装置	計測装置の特長と福島原発事故関連で放射能汚染分析に利用した事例等
Ge 半導体検出器	種々の野菜、植物、土壌、ダストサンプラース紙等に含まれる放射性核種の同定と放射能濃度の定量測定に利用している。
対向型 NaI(Tl)シンチレーション検出器	プローブ2台を対向させ、両方の信号を加算してCs γ 線検出効率の改善を図っている。また、容積の大きい汚染試料の厚さを圧縮できるようにして検出感度の向上を図っている。さらに、両プローブ間の計数率の差から、試料の放射能濃度の均一性の評価を行っている。種々の植物、穀類、土壌等に含まれる ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 放射能濃度の定量測定に利用している。
イメージングプレート	イメージングプレートそのものを加工し、それ用の独自のリーダーを製作して様々な試料の放射能分布の測定を行っている。種々の植物の表面及び内部の放射能分布、土壌内部の放射能濃度分布の測定に利用している。
GM 管式及び NaI シンチレーション式サーベイメータ	市販のサーベイメータを表面汚染のスクリーニングに使用している。GM サーベイメータについては、Cs 放射能汚染測定のための最適な使用方法と計数率と表面放射能汚染密度との関係について考察検討を行っている。シンチレーション式サーベイメータについては、核種同定（スペクトルスコピー）にも利用できるような改造方法について検討している。
液体シンチレーション検出器	様々な放射性Cs 汚染物質を液体シンチレータカクテルに混入し、 β 放射能の検出特性について調べている。土壌や植物の放射性Cs の吸脱着の測定に利用している。
蛍光ガラス線量計	独自の形状の蛍光ガラス線量計とそれ用のリーダーを製作して、主に土壌中のCs 放射能濃度分布の測定を試みている。フェーディングがほとんどなく環境に対しても安定である蛍光ガラス線量計の特長を生かしている。
プラスチックシンチレータ	放射性Cs からの β 線を検出する目的で、薄いプラスチックレータ板と小型PM あるいはAPD を組み合わせたCs β 線用プローブを開発している。植物や土壌の表面のCs 放射能汚染測定に利用している。
フォトダイオード	放射性Cs からの β 線検出用の小型で安価な検出器を開発している。このような小型の β 線検出器を植物表面に多数貼り付け、植物中のCs 放射能移行の観測に利用している。

4 おわりに

先進ビームシステム工学領域の研究活動の一端を紹介した。これらの結果は研究室の学生諸氏及び共

同研究者の方々の協力によって得られたものであり、この場を借りて改めて御礼申し上げる次第である。