

高分解能 X 線顕微鏡の実現を目指して



若 者

松 山 智 至*

Toward a goal to develop high-resolution X-ray microscopes

Key Words : X-ray microscope, X-ray mirror,
Elastic Emission Machining

1. はじめに

今回、助教として働き始めてちょうど任期が一巡(6年目)した機会にこの「生産と技術」への寄稿の機会を頂いた。ちょうど良い機会であったので、これまでの研究を振り返るとともに今後の展望について述べたい。

2. 顕微鏡の発展と「X線顕微鏡」

顕微鏡は1590年に初めて眼鏡職人のJanssenらによって作られたと言われている。初めは単なる珍しい器具でしかなかったようだが、1600年後半から生物の構造を見るための道具として使われ始めている。そして今日に至るまで顕微鏡開発は続けられ、いわゆる普通の顕微鏡である実体顕微鏡や蛍光顕微鏡、共焦点顕微鏡等へと発展していった。一方で、光の波長という越えられない限界(つまり分解能の限界)にも人類は到達した。これを乗り越えるために電子顕微鏡や走査プローブ顕微鏡の開発が成された。すでに最新の電子顕微鏡では原子が見えるまでに分解能が向上している。ここ最近の顕微鏡開発の流れとして、分解能だけではなく、如何にして見たい物・現象を見るかにその開発の中心が移っているように思われる。

筆者が開発を進めているX線顕微鏡は、顕微鏡開発の中では比較的新しい方向性の一つである。可

視光の波長よりも短いX線で顕微鏡を開発することは、分解能の点で優れているということは言わずもがなであるが、一方で、短波長の光という特性を生かすことで、可視光では見ることはできなかった物・現象を見ることができるようになる。ご存知のようにX線領域ではほとんどのものが透明であり、内部を透かして見ることができる(例えばレントゲン写真)。また、エネルギーの高い光であるために、物質の内殻電子を直接励起できる。これを利用した蛍光X線分光、X線光電子分光、X線吸収分光は、元素識別や状態分析を可能とする。このような素晴らしい性質を持つX線を顕微鏡として応用できれば、これまでの顕微鏡では見ることはできなかった物質の内部構造や、元素組成・化学結合状態などが高分解能で観察できるはずである。

3. X線顕微鏡開発の難しさ

一般的にX線顕微鏡の開発は困難を極める。なぜならX線領域ではほとんどすべてのものが透明であるため、レンズやミラーを普通に作ったとしてもほとんどすべて貫通してしまうからである。また、波長が短いということはわずかな製作誤差でもX線の軌道は乱される。例えば、波長500nm程度の可視光であれば、波長の十分の一(つまり50nm)程度では、レンズやミラーの製作誤差は問題とならない。一方で、X線は波長0.1nm程度であるため、作製の際に許される許容誤差は原子サイズオーダーとなる。つまり、X線顕微鏡の性能はほとんどこの製作誤差に依るところが大きく、その開発は大変難しくなることを理解していただきたい。当然、市販の光学素子などは使えるはずもなく、顕微鏡開発者が自力でレンズやミラーを作る必要がある(世界中を探せば、レンズやミラーを特注で作製してくれる会社は存在するが、数百~数千万円以上の値段とな



* Satoshi MATSUYAMA

1980年7月生
大阪大学 大学院工学研究科 精密科学
・応用物理学専攻 博士後期課程修了
(2007年)
現在、大阪大学 大学院工学研究科 精密科学・応用物理学専攻 山内研究室
助教 工学(博士) 超精密加工, X線光学
TEL: 06-6879-7286
FAX: 06-6879-7286
E-mail: matsuyama@prec.eng.osaka-u.ac.jp

る)。これは、レンズ職人でなければよい顕微鏡が開発できなかった大昔と酷似していると思っている。逆に言えば、超精密加工・計測技術が大活躍する研究領域であり、技術とアイデアで世界トップの顕微鏡が開発できる場でもある。

4. 超精密 X 線非球面ミラーとは

上記2つの困難さを克服するために、筆者は超精密な非球面ミラーの開発をすすめた。上述したように、X線領域では単純なレンズやミラーは機能しないが、全反射現象を利用した全反射ミラーであれば何とかX線の軌道を変化させられる。さらに、非球面形状（例えば楕円形状）を持つことで、X線を集光させることができる。作製の困難さを克服するために、筆者の所属する研究室で開発されたユニークな超精密加工技術であるEEM (Elastic Emission Machining) を用いている。筆者の指導教官であっ

た山内和人教授らによって開発されたEEMは、微粒子と被加工物の界面で起こる化学反応を利用した局所研磨技術の一種であり、X線ミラーを作製するには最適な手法である。加工された表面は原子レベルで平らになり、かつ、この加工現象をコンピュータで制御しながら実施することで、製作誤差1nm（波長の四分の一の誤差に相当）のX線ミラーを作製することに成功している（図1）。これは世界最高の精度であり、この誤差レベルであればほとんど理想的な顕微鏡を開発可能である。

5. 走査型 X 線顕微鏡と結像型 X 線顕微鏡

現在、筆者は2種類のX線顕微鏡の開発を進めている。一つ目は、走査型X線顕微鏡である。これは走査型電子顕微鏡（SEM）のように、X線集光ビームと走査技術によって拡大像を得る手法である。分解能はいかに小さなX線ビームを作るかで決まる。

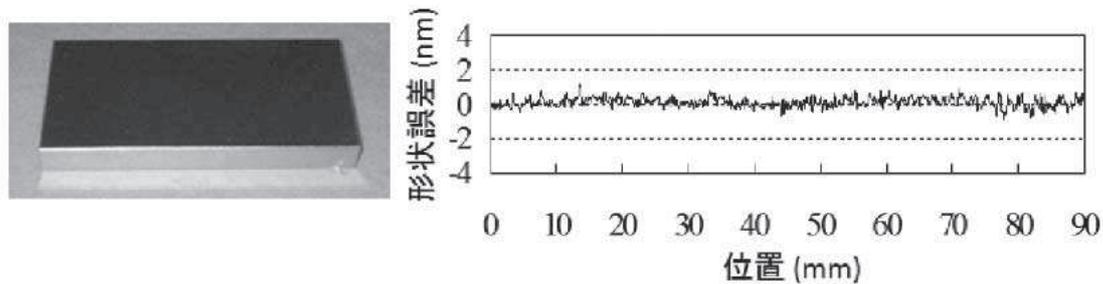


図1 作製した楕円ミラーとその製作誤差。測定した形状から理想的な楕円形状を引くことで誤差を算出した。

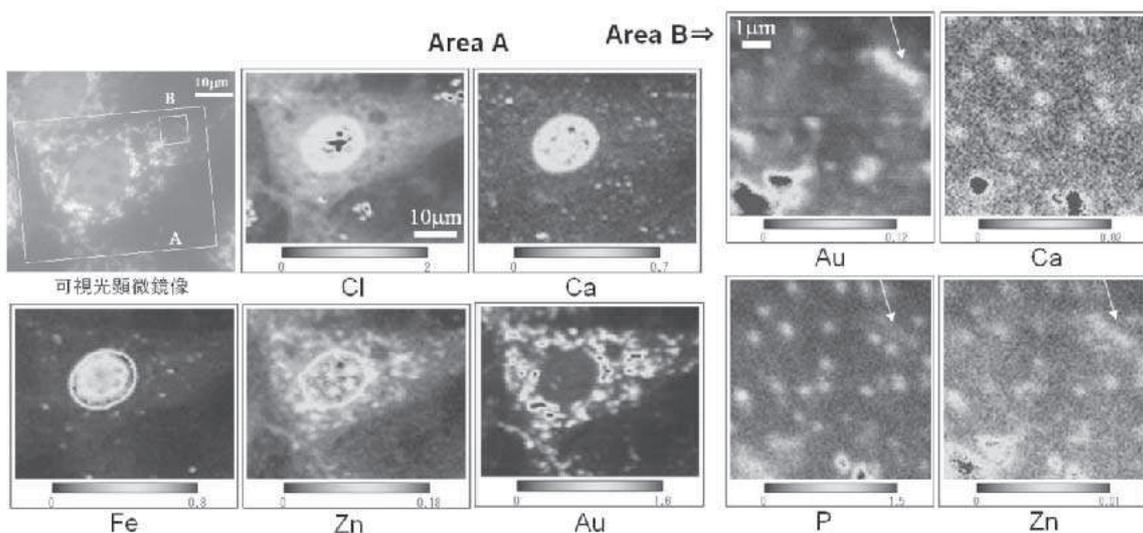


図2 走査型蛍光 X 線顕微鏡による細胞内元素分布の観察。A領域の丸い部分は細胞核。B領域の矢印で示したものはミトコンドリア。

最小ビームサイズは波長や集光素子の開口数・製作誤差によるが、筆者が用いるX線ミラーは製作誤差がほとんど無視できるため、これまで30nm（ほとんど理想値）の分解能が実現できている^[1]。本顕微鏡は様々なX線分析との融合が容易なため、例えば筆者はこれまで蛍光X線顕微鏡なる試料中の元素分布を可視化できる顕微鏡を開発している。これによって、細胞内やミトコンドリア内の元素分布を可視化することに成功した（図2）^[2]。二つ目は結像型X線顕微鏡である。これはいわゆる結像を行う普通の顕微鏡であって、筆者の場合は収差を補正するために、2枚の楕円ミラーと2枚の双曲ミラーを用いている。X線を集光する場合と同じで、X線を結像するためにも製作誤差のないミラーが必要であり、ほとんど誤差のない4枚の非球面ミラーを作製することに成功している。現在のところ、50nmの分解能で結像させることができているが^[3]、顕微鏡システムとして物を見るにはあと1-2年は必要ではないかと思っている。

6. 今後の展望

本開発は、ようやく物を見ることができるよう顕微システムの開発が完成しつつある状況である。今後、システムの完成とともにユーザーフレンドリーなシステムへと改良を加えなければならない。最終的には、多くの人から使ってもらい、様々な分野で役立っていきたいと考えている。また、極限の性能を持つX線顕微鏡の開発にも挑戦したいと考えている。

今のところ、顕微鏡性能はまだ理論的な限界には到達していない。この理由はミラーの製作精度が今一歩足りないところが大きい。この限界を突破するには既存技術の精度向上だけではおそらく難しく、ブレークスルーとなる技術の開発が必要となると思っている。

謝辞

本稿執筆の機会を与えて頂きました大阪大学大学院工学研究科の森田瑞穂教授に深く感謝致します。また、本研究を進めるに当たり、御指導と御協力を頂いた山内研究室のメンバーと共同研究者の皆様に感謝致します。

参考文献

- [1] Matsuyama, S. *et al.* Development of scanning x-ray fluorescence microscope with spatial resolution of 30nm using Kirkpatrick-Baez mirror optics. *Review of Scientific Instruments* **77**, 103102 (2006).
- [2] Matsuyama, S. *et al.* Trace element mapping of a single cell using a hard x-ray nanobeam focused by a Kirkpatrick-Baez mirror system. *X-Ray Spectrometry* **38**, 89 – 94 (2009).
- [3] Matsuyama, S. *et al.* Hard-X-ray imaging optics based on four aspherical mirrors with 50 nm resolution. *Optics express* **20**, 10310 – 9 (2012).

