

■第1回日本放射光学会高良・佐々木賞受賞研究報告

軟 X 線から硬 X 線領域にわたる放射光ミラーに関する研究開発

三村秀和 (東京大学先端科学技術研究センター超精密製造科学分野)

1. 放射光科学と精密工学

はじめに、第一回の高良・佐々木賞の受賞は身に余る光栄であり、学会関係者の皆様、これまでの多くの共同研究者の皆様にお礼申し上げます。

私が所属する精密工学科は、現在では珍しい名前 of 学科となったが、昔は多くの大学に存在した学科名である。精密工学という学問は、私の専門とする精密加工に加えて、精密計測、精密機械、制御、材料、設計 (CAD, CAM) など、様々な工業製品の部品などを製造するための加工技術、工作機械、生産システムについて研究を行う学問である。様々な領域において名のとおりに精度向上が年頭であり、加工、計測、制御では、ナノレベル、原子レベルの精度の追求が行われている。

この精密工学は陰で放射光科学分野を支えている。例えば、放射光ビームラインに欠かせない超精密な位置決めステージの開発や理論構築は精密工学分野の研究者が行ったものである。精密機器が集まった放射光ビームラインの構築には精密工学の知識がとても役に立つ。放射光のビームラインの責任者の方々には勉強をしてほしいと思っている。最後に教科書を紹介するので参考にして頂きたい。

今回受賞対象となった放射光ミラーに関する研究開発は、精密工学における精密加工、精密計測、精密制御技術が土台となっている。本研究はまさに精密工学をベースとした研究者によって取り組まれたものである。研究内容の詳細については、各論文や解析記事で多く報告されていることから、受賞報告ということで論文や解説記事では書かない視点で本研究について報告する。

2. 硬 X 線ミラー (平面ミラー, 1 次元楕円ミラー)

私が博士課程 2 年生だった 2000 年、理化学研究所石川哲也先生と大阪大学山内和人先生の間で X 線ミラー開発の具体的な共同研究が始まった。大阪大学において高精度な X 線ミラーを作製し、SPring-8 の 1 km 長尺ビームライン BL29XU において完全なコヒーレンスを持つ X 線によりミラーの評価を行う体制である。2001 年の 2 月に初めてのビームタイムがあり、その後数年は 2 か月に 1 回というハイペースでミラーを評価した。将来のコヒーレンス X 線の利用を見据えた重要な研究であるとは、学生当時はわからなかった。

大阪大学においては、森勇蔵先生 (現:大阪大学名誉教授) の下、EEM (Elastic Emission Machining) による超精密加工法の開発が行われており、原子レベルの精度で加工が可能となっていた。それが私の学位論文の内容であった。

2001 年、山内和人先生の指導の下、私を含む多くの学生とともに X 線ミラーの開発が始まる。はじめの目的はシンプルで X 線反射像のムラをなくす平面ミラーを実現することである。2001 年の後半に現在につながる X 線を集光するミラーの開発にも取り組んでいる。

2001 年度中には、現在に至る X 線ミラーに関する研究開発の基礎の多くを確立した。EEM による X 線ミラー用数値制御加工システム、マイクロスティッチング干渉計、硬 X 線反射像の波動光学計算、硬 X 線平面ミラーの作製、硬 X 線集光ミラーの作製、ほぼ回折限界の 160 nm の X 線ライン集光と集光ビームウェストの波動光学現象の観察、2 枚の KB ミラー光学系による硬 X 線の 200 nm サイズの 2 次元集光、これらの成果を初めてのビームタイムからわずか 1 年間で実現した。これは両先生の先見の明の賜物であり、この研究開発スピードと成功体験は、以後の私の研究者活動のベースになっている。

一般的には、EEM があったから X 線ミラーが実現されたと考える方が多いと思う。しかし、現在では EEM 以外にも原子レベルで表面凹凸を制御可能な加工技術が複数存在している。精密工学の分野では「測定できないものは作れない」という言葉がある。実は高精度な表面形状を実現するためには如何に形状誤差を計測するかが重要となる。

Fig. 1 は、平面ミラーの形状誤差プロファイルである。表面粗さ評価用の顕微干渉計で計測された 5.1 mm × 3.8 mm 領域の形状プロファイルを約 30 枚つなぎ合わせて算出している。表面粗さ用の干渉計は元々高い空間分解能と計測精度を持っている。そのデータをつなぎ合わせることで、ミラー全領域において、0.1 nm レベルの測定精度と 30 μm の空間分解能を実現した。本手法を開発したのは初めてであり Microstitching Interferometry (MSI) と命名された。現在、X 線ミラーに限らず様々なミラー、レンズの測定に適応されており一般化している。

2002 年 3 月に学位を取得しそのまま大阪大学に残り 2010 年 12 月に大阪大学を退職するまで、硬 X 線集光ミラーの集光サイズの微小化に一貫してとりくんだ。全反射条件での集光ミラーの限界である 25 nm 集光 (15 keV) を実現したころ、山内和人先生が代表の科研費特別推進研

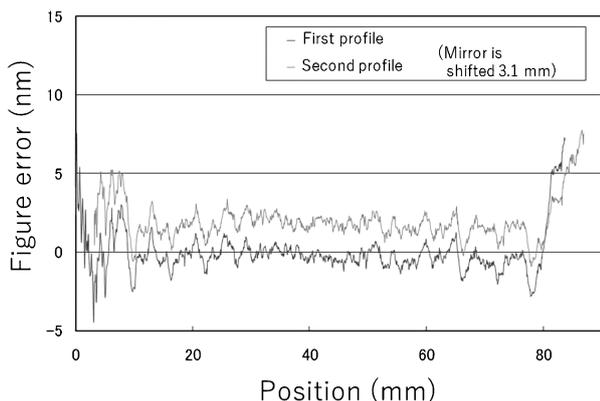


Fig. 1 Reproducibility of figure measurements in Microstitching Interferometry.

究「硬 X 線 Sub-10 nm 形成と顕微鏡システムの構築」が 2006 年 7 月からスタートした。硬 X 線 Sub-10 nm 集光の実現には高 NA を実現するため多層膜集光ミラーが必要となる。また、入射角度の大幅な増大に伴って 1 nm を上回る形状精度がミラーに求められる。そこで、集光ビーム波面を焦点面近傍の強度プロファイルから位相回復法によって求め、形状誤差を算出する。そして、前段に置かれた形状可変ミラーによって波面を制御し Sub-10 nm 集光を実現する。

急峻となる X 線ミラー形状計測、多層膜成膜装置、形状可変ミラー、集光ビーム計測法、X 線集光波面の計測と、各要素技術の研究において優秀な博士学生が担当したことでプロジェクト開始からわずか 2 年半で 7 nm 集光ビームを見ることになる。

ここから裏話である。助教だった私が完全に責任を持ったのは硬 X 線集光装置である。このプロジェクトでは、原子レベルで平坦なシリコンウエハから切り出したマイクロブリッジをナイフエッジとして走査し、散乱 X 線強度により直接集光プロファイルを測定する。そのため、集光装置は 1 nm 以下で位置が安定し、ドリフトがなく、高精度なアライメントを行う必要があった。機械設計が得意ではなかったが私が責任をもって開発した。

精密機械を設計するためには基本原理がありそれは精密工学である。遊びゼロの原理、力線最小化の原理、熱変形最小化の原理など精密機械設計の基本原理に忠実にしたがい設計を行った。また、採用する日本製の汎用の小型自動ステージの位置決め精度やドリフト量などは 1 nm レベルで安定していることも設計前に確認していた。装置安定のためには常設が不可欠であると考え、1 km 長尺ビームライン BL29XUL の長尺ハッチへの長期常設をお願いした。温度ドリフトを抑制するために、ハッチ内の温度を 0.01 度レベルで安定するシステムを構築し、その中で部品を一晩置き、実験温度環境の下一人で組み立てを行った。精密な工作機械の組み立てに沿った方法である。私が阪大

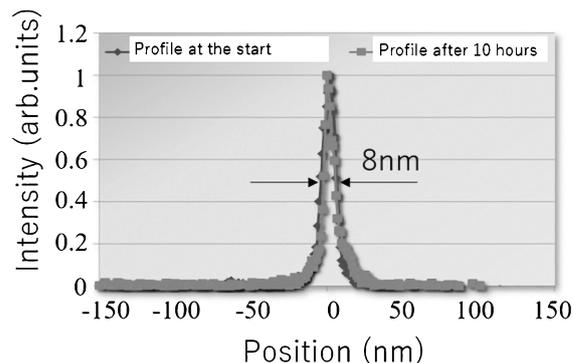


Fig. 2 Sub-10 nm hard X-ray beams.

を離れるまで本集光装置については 1 本のねじ回しも私以外にさせなかった。

2008 年の 2 月には 20 nm サイズの 1 次元集光を確認し、その春のビームタイムで波面計測、形状可変ミラーも機能させ 10 nm 以下の集光サイズを確認した。紆余曲折はあったが、最後、ハッチ内の音源を探し出し、何かの制御ボックスのファンの線を抜いたところ、集光サイズが小さくなり 10 nm を下回ったことを鮮明に覚えている。

2009 年には、2 枚のミラーによる KB 集光システムに改造をし、2 次元での Sub-10 nm 集光に取り組んだ。2009 年後半のビームタイムにおいて 2 次元で 8 nm × 8 nm のサイズを確認した。

2010 年、Sub-10 nm ビームの利用研究や多層膜 3 次元光反射による 1 nm 集光など、次の研究を議論していたところ、東京大学への異動の話が決まった。異動直前、2010 年の 12 月には蛍光 X 線、透過 X 線、散乱 X 線による Sub-10 nm 空間分解能の顕微観察を確認し、Fig. 2 のように長期安定の硬 X 線 Sub-10 nm 集光システムを完成させた。

X 線自由電子レーザーの集光は、国家プロジェクトであるので東大異動後もしっかりと進めるように山内和人先生から言われていたので、SACLA 発振のタイミングに合わせて、1 μm 集光、その 2 年後、2 段集光による 50 nm 集光のシステムの開発に成功した。

2013 年の SACLA での集光実験後、二度と播磨に来ることはないだろうと思っていた。なぜなら、東京大学で取り組もうとしていたミラーは軟 X 線領域のミラーの開発であり SPring-8 は軟 X 線のビームラインは少なく、大阪大学における一連の研究成果の達成感で全く悔いがなかったからである。

3. 軟 X 線ミラー（回転体ミラー、電鍍ミラー、自由曲面ミラー）

2011 年 1 月東京大学の精密工学科に異動し研究室を持つ。しばらくは放射光から離れ、本郷キャンパスに引きこもって、新しく精密なものづくりの研究をしたいと考えて

いた。出口として軟 X 線ミラーを対象とした。平面に近い硬 X 線集光ミラーと異なり、軟 X 線用のミラーは湾曲している。軟 X 線領域は、レーザープラズマ、高次高調波 (HHG) など優れたラボ光源があるので放射光施設に行かなくても実験ができる。将来はラボの軟 X 線光源を持つことを計画していたが、理研石川哲也先生の紹介で東大理学部の中内薫先生と話ができて、同じキャンパスにある HHG 施設を使ってもよいということになった。回転楕円ミラーによる HHG の軟 X 線集光を出口として研究がスタートした。

回転楕円ミラーを作製するためには転写技術が必要となる。大阪大学で X 線ミラーの研究と平行して JST さきがけの支援の下、高精度電鍍法の研究に取り組んでおり、東京大学でさらに発展をさせたいと考えていた。回転楕円ミラーは内面が反射面となる竹輪形状をしている。提案した作製方法は次の通りである。まず、回転楕円ミラーの反転形状を持つマンドレルと呼ぶ棒形状をナノ精度の加工と計測により作製する。それを高精度電鍍法により転写する。そして、内面の形状誤差を波面計測により高精度に測定し形状を修正する。世界的に見ても競合はおらずナノ精度の加工、計測、転写技術の開発を10年以上は楽しむつもりで本テーマを設定した。精密工学の知識に基づき、すべてのプロセス装置を学生と一緒に設計開発をした。これは Sub-10 nm 集光装置の成功の自信が活かされている。

2011年に2名の B4 が配属され3名で研究室がスタートした。JST 先端計測や科研費、財団関係などの予算を獲得し、少しずつ装置を整備し、毎年配属される学生の教育を重視した。予算の関係もあり海外の国際会議は学生に行かせても私は行かない時が多かった。一方、複雑な3次元形状のミラーの作製にはレンズ・ミラー製造メーカーの助力が不可欠であり、訪問した複数の候補から夏目光学株式会社を選ばせていただいた。2012年頃から月1回訪問し情報交換を行っていた。当時、夏目光学は非球面、自由曲面の形状のレンズ、ミラーの製造を次のビジネスターゲットとしており研究室の目標にも合致した。

幸い配属された多くの学生が博士課程に進学し、彼らの努力により研究が順調に進展した。2016年度には博士学生6名を含む12名の学生が所属する研究室となった。学位論文の内容と学生の教育を考え、HHG 以外にも SPring-8 および SACLA における軟 X 線集光も研究対象として広げ、両施設で軟 X 線集光システムの開発を進めることとなった。当時 SACLA で軟 X 線ビームライン BL1 が立ち上がったのは幸いであった。

2015年頃には Fig. 3 に示す回転楕円ミラーが作製できるようになった。マンドレルの加工、計測、電鍍、波面計測の開発において、学生の努力により多くのブレイクスルーがあった。また、リング集光ミラーと回転体ミラーの2段集光の発明など、将来の実用化を念頭に様々な技術の特許出願を進めた。

一連の成果の結果、2015年回転楕円ミラーによる HHG 集光、2016年には SPring-8 において400 eV の軟 X 線を回転楕円ミラーにより160 nm に集光している。2017年 SACLA でも100 eV の FEL を500 nm に集光した。ウォルターミラーの開発も進め HHG と FEL の両施設でシングルショットの結像イメージングシステムを開発した。

SACLA, SPring-8 の両施設には教育面にも尽力いただき、結果的に4名の博士学生が SACLA 大学院生研究支援プログラムでお世話になった。また、JASRI の研修生として2名の博士学生がお世話になった。

2018年から回転体ミラーの製造技術の夏目光学への技術移転を本格的に開始し、現在は製造販売に至っているが技術移転は難しく未だ終わっておらず高精度化を進めているところである。

一方で、2019年3月に、X 線天文学分野の名古屋大学の三石郁之先生から X 線望遠鏡用の電鍍ミラーが作製できないかとの相談があった。太陽観測プロジェクト FOX-SI 用のミラーを最初のターゲットとした。長さ200 mm、直径60 mm のウォルターミラーである。すぐに大型化にとりかかると夏目光学との協力の下、1年で試作ミラーの作製に成功した。この X 線望遠鏡用ミラーは、20秒角の角度分解能を持つと評価されており、2024年打ち上げ予定のロケット型 X 線望遠鏡への搭載が予定されている。

実は、この X 線望遠鏡用のミラーの評価は SPring-8 の1 km 長尺ビームライン BL29XUL で行っている。大型ウォルターミラーの全面を照明し特性を評価するためには長尺ビームラインが最適であり、上流にゾンプレートを設置し1 km 飛ばすことでビームを拡大している。11年前に硬 X 線 Sub-10 nm 集光プロジェクトを行っていた場所に、X 線望遠鏡用の電鍍ミラーを評価するという、全く違う形で戻ってきたことは感慨ひとしおであった。

4. これから

回転体ミラーの作製は難しい。主として7名の博士学生の努力により論文に掲載できる性能は出せているが、理論的な回折限界集光は実現していない。転写精度の向上には限界があるので、内面修正を基本として研究開発を進めている。硬 X 線ミラーのところでも述べたが、回転体ミラー内面の形状計測が重要である。

話は変わるが新しい研究について紹介したい。20年間も放射光について勉強したので、ふと、放射光を使うと面白い「精密加工学」の研究ができるのではと考えた。上司の国枝正典先生が可視光領域で高速カメラによる放電加工の観察をしており、SPring-8 が開発を進めていた100 keV 以上の高エネルギー X 線を利用すれば、工業の中心である金属材料に関する機械加工やレーザ加工の現象が観察できるとの発想に至った。Fig. 4 は SPring-8 の BL05XU の100 keV の X 線で撮像したドリル加工の高速

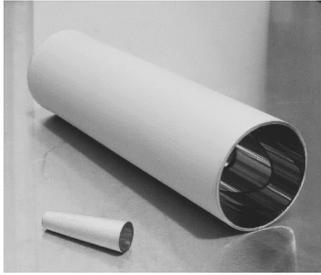


Fig. 3 Axisymmetric X-ray mirrors.

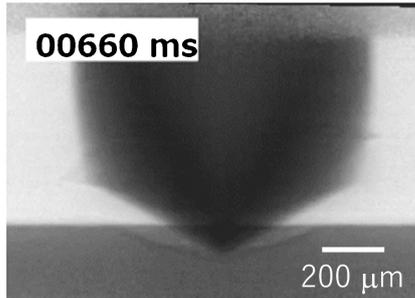


Fig. 4 High-speed imaging of drilling using 100 keV X-rays at SPring-8.

X線撮像の一コマである。金属内部のドリル工具の詳細な挙動の観察に成功した。この動画を見て感動しない加工の研究者はおらず、現在、理研放射光科学研究センターのチームリーダーを兼務し本研究を精力的に推進している。

今後、回転体ミラーや自由曲面ミラーなどの次世代のミラーの高精度化を進めるとともに、この高エネルギー X線による高速撮像を武器に新しい精密工学，精密加工学を開拓し、放射光利用研究の裾野を広げたいと考えている。あとは大学教員としては人材育成が重要である。次の時代の人材は育成できそうなので、次の次の時代までの人材を供給できたらと考えている。

多くの研究者は年齢が上がると研究の目新しさがなくなる。昔の誰かがやった研究の継続的な研究では学生のモチ

ベーションは低い。一方で見方を変えると、日本の大学教員は新しい研究に挑戦できる良い環境である。なぜなら卒論や修論においては、学位や投稿論文を気にせずに挑戦的なテーマを設定できるからである。卒論，修論では、挑戦した結果，よい成果が得られずとも卒業，修了できる。むしろ，新しい研究は指導教員もよくわからないので，学生も自ら考えるしかなく，モチベーションも高く，教育効果も高くなる。その結果，学生が研究者を志し博士課程の進学につながると考えている。これからも守りに入らず，私自身もよくわからない挑戦的な研究テーマを学生達に提案し一緒に挑戦していきたい。

最後に学生時代から放射光分野に入り数えきれないほど多くの方々にお世話になった。すべての方に深く感謝申し上げる。また，最後に約束の「精密工学」の教科書を参考文献に挙げる¹⁾。

参考文献

- 1) 中沢 弘：理工学講座 精密工学，東京電機大学出版局(2011)。

● 著者紹介 ●



三村秀和

東京大学 先端科学技術研究センター教授

E-mail: mimura@upm.rcast.u-tokyo.ac.jp

専門：超精密加工，X線光学

【略歴】

1997年大阪大学卒業，2002年同大学院博士課程修了，博士（工学）。2004年同大学院助手，2011年東京大学大学院系研究科准教授，2023年1月同大学院教授。同年4月から現職。

この間2004年より理化学研究所（SPring-8）客員研究員兼務，2022年10月より理化学研究所チームリーダー兼務。