

令和 4年 5月 25日

若手研究者海外挑戦プログラム報告書

独立行政法人日本学術振興会 理事長 殿

受付番号 202080270

氏 名

島村勇徳

(氏名は必ず自署すること)

若手研究者海外挑戦プログラムによる派遣を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。
なお、下記記載の内容については相違ありません。

記

- 1 派遣先: 都市名 Grenoble (国名 フランス共和国)
- 2 研究課題名 (和文) : X線1 nm集光のためのミリサイズ小型多層膜ミラーの作製
- 3 派遣期間: 令和 4年 1月 6日 ~ 令和 4年 5月 23日 (138日間)
- 4 受入機関名・部局名: X-ray Optics Group, Instrumentation Support and Development, European Synchrotron Radiation Facility (ESRF, 欧州大型放射光施設)
- 5 派遣先で従事した研究内容と研究状況 (1/2 ページ程度を目安に記入すること)

【研究内容】 病院のレントゲン写真で見える内部構造に加え、X線は元素・化学結合等の情報も非破壊取得できる。この情報の分解能は原子スケールに迫る1 nmが理論上可能であり、X線を微小な点に集めることで実現される。そのため、高分解能を目標に集光素子が研究されてきたが、実際には素子の微小な欠陥や制約で1 nm分解能は達成されていない。本研究では新たに「ミリサイズ小型多層膜ミラー」を提案し、X線の極限集光を目指す。派遣先のESRFは世界有数の研究施設であり、非常に「明るい」X線を発生させ、顕微鏡に應用するX線顕微鏡を備える。顕微鏡に必要な集光鏡は自作され、後述の多層膜を製造する世界随一の研究部門が設けられている。この部門にて多層膜技術を習得すると共に、提案する小型ミラーに新設計の多層膜が作製可能か、検討した。

【研究状況】 未公開情報も含め、多層膜技術を習得することができた。一方、小型ミラーに新設計の多層膜を作製できる判断材料は得られたものの、この小型ミラーの設計が複雑なため、ESRFの装置では対応できなかった。概ね事前の目標を達成した他、予期しない進展が生まれた点もあり、以下4点の結果に分けて報告する。

1つ目に、多層膜装置の設計・較正手法を学んだ。日本の所属研究室では単一元素でしか反射膜を現状作製できない一方で、ESRFでは多数の元素を使用し、これらを積層することで多層膜とできる。大型集光鏡を対象とした多層膜作製装置の内部で観察・作業し、説明を受けながら現地研究者の作業に同伴した。また、現在始動が進められている新多層膜装置の作業を手伝い、装置内の駆動ステージ・真空排気性能・成膜性能の較正作業を緻密に体験した。構成要素を一つ一つ動作・性能確認しつつ、工場出荷時と施工後の違いを丁寧に調べる作業が印象的だった。2つの装置の作業を比較し、多層膜を作製する前の調整作業が最も重要に感じられた。本装置は自身の装置と異なる駆動方式・安定化手法を採用しており、重視する設計方針の違いを感じながら作業にあたった。

2つ目に、多層膜の作製プロセスを俯瞰した。作製には加工と評価が含まれる。加工について、成膜条件の較正手法を概観し、ステージ駆動速度を始めとして必要なパラメータを最適化しながら多層膜を作製した。評価について、X線の反射率を測定することで多層膜構造を確認する手法や具体的な分析ノウハウを学んだ。一方で、体験した手法は小型ミラーの長さにはやや難しく、小型ミラーの多層膜構造を別手法で確認する必要性を感じた。

3つ目に、多層膜の欠陥がX線集光に及ぼす影響について、経験則に基づく理論を学んだ。日本の研究者に聞く多層膜より、とある材料の組合せであれば各層が従来の半分程度薄くても作製できる手法を確立しており、未公開データを参照しながら自身の疑問を解消する機会を得られた。また、その他議論により新設計の薄い多層膜を作製できる可能性が向上した。

4つ目に、多層膜に限らず、ESRFで行う既存のX線集光鏡の評価方法を学び、自身が開発した鏡にも使用した。集光鏡を原子スケールで評価する技術や工夫について議論した他、多層膜ではない自身の小型ミラーを持ち込み、実際に計測した。ESRFでの集光鏡の表面形状の評価は、クリーンルーム内で厳しく環境を制御しながら行われている。日本での計測と概ね一致した結果が得られ、これまでに開発した評価手法の妥当性が示された。また、極限の精度が求められる本分野では基盤の清掃方法は重要なノウハウだが、こうした点についても意見交換した。

作業はいずれも一工程が一日かかるような作業であり、例えば成膜条件の較正のみでも一週間要した。滞在したX-ray Optics Groupは15人規模の部局であり、各々が専門家である。自身の研究を紹介して全体からフィードバックを受けた他、開発してきた自身の方法と比較しながら議論する機会を上記4点全てで得られた。滞在期間中は2つの国際学会に参加・発表し、その内容について同僚と議論を深めた。

6 研究成果発表等の見通し及び今後の研究計画の方向性 (1/2 ページ程度を目安に記入すること)

【研究成果発表】 以下2つの理由により、一部内容を除いて現在発表は予定していない。1つ目に、滞在先の装置の仕様では小型多層膜ミラーを作製できず、結果として公表できるものは多くない。新しい知識を生む「研究」としての成果は厳密には得られておらず、検討段階に留まっている。2つ目に、自身の研究目標達成に不可欠な技術習得を第一の目的としているが、その技術の多くは文献等で閲覧できない秘匿情報である。工学分野では、科学的でない装置固有のパラメータや工夫を論文として公開しないことが見受けられるが、個人的な利用目的という名目で、これら情報を今回現地で取得できた。得た情報はESRFの非公開情報のため、成果公表は困難である。

一方で、多層膜を施さない小型ミラーの計測内容は、自身が開発した手法やESRFの計測技術の妥当性を相互に示すものであり、原子スケールの再現性・正確性が求められるX線集光素子の分野では重要な成果である。今後この検証結果を論文として公表する可能性があり、継続して議論していきたい。

【今後の研究計画の方向性】 今回の滞在により、X線を極限集光できる小型多層膜ミラーは作製可能だとする根拠がある程度得られた。習得した技術から、所属研究室保有の成膜装置の設計を見直し、多層膜作製装置に改造する。多層膜に使用する材料についても、日本で経験したことがない知見を得た。基本的な装置動作の試験や簡易的な多層膜の作製実験を通じて改造した装置の試験を行い、新設計の多層膜作製に挑戦する。

7 本プログラムに採用されたことで得られたこと (1/2 ページ程度を目安に記入すること)

以下3点挙げる。1つ目に、自身の研究の発展に対して深い洞察を得たことである。上記内容以外にも、現地の繋がりを最大限に活用した経験をした。その一つが、自分がかねてより影響を受けたX線顕微鏡ID16を、普段公開されない場所も含め、端から端まで技術見学したことである。一つの集光素子から始まった自身の研究はX線顕微鏡として既に応用を進めており、自身による顕微応用デモ、施設内での使用の在り方、ユーザーのニーズを考える段階に達している。この点、ID16は多彩なX線分析方法を可能にし、規格化されたインターフェースでユーザー利用を容易にしており、開発段階ではなく製品として完成していた。ESRFをユーザーとして使用する博士学生とお互いに研究を半日かけて紹介し、私のX線顕微鏡の可能性について議論する機会も得られ、X線分野で最先端を走る競争を肌を感じられた。

2つ目に、研究風土の違いを実感できたことである。裁量労働制を採用するものの、多くの人は9時-17時、平日のみの勤務で帰宅する。その分、業種が細分化され、例えば、日本では装置の保守保全・装置の条件出し・装置を使った科学的な業績出しは全て私1人で行わなければならないが、ESRFではその全てに技術職員・エンジニア・科学者を割り当てている。装置も企業から購入した高価なものを使用しており、人・モノ・財源で到底及ばないと感じた。研究資源以外では、滞在した部門は風通しが良く、毎日コーヒブレイクで談笑する等、日本で見かけない落ち着いた雰囲気を感じた。物流や納品に要する時間、数ヶ月に一回の1~2週間程度の長期休暇等で進捗が生み辛い場面もあったが、方針の差異を感じて新鮮だった。

3つ目に、異国に「住民」として滞在できたことである。短期留学は何度か経験したが、全て学生として大学に滞在しており、留学生として住居等に何らかの恩恵を受けてきた。今回は後ろ盾の無い個人として長期滞在中。通常1年以上住む際に必要な書類手続きが要求され、賃貸契約を締結しないものの仏国に連帯保証人を準備することもあった。その一方、非英語圏を活かして仏語で生活し、住民がどのように普段過ごすのか観察しながら日々を送っていた。美食や歴史ある建造物、欧州特有の雄大な自然を時に噛みしめつつ、人種や政治的な分断も垣間見た体験は、「観光客」の立場では不可能だった。現地に馴染めた経験は、今後の糧になると感じる。