

SICORP 日本-ドイツ

「オプティクス・フォトンクス」領域 第1期 事後評価報告書

1 共同研究課題名

「超解像 X 線位相イメージングの開発」

2 日本一相手国研究代表者名（研究機関名・職名は研究期間終了時点）：

日本側研究代表者

百生 敦(東北大学 多元物質科学研究所・教授)

ドイツ側研究代表者

マーチン・ベルナー(カールスルーエ工科大学 微小構造研究所・上級研究員)※2019年8月より

3 研究概要及び達成目標

X 線位相イメージングは、通常の X 線画像ではコントラストが生成されにくい軽元素からなる物体(高分子材料や生体軟組織など)に有効である。Talbot 干渉計を用いる X 線位相イメージングでは、使用する格子の周期(数 μm)で空間分解能が制限されるという制約があった。この問題を克服するために発案した超解像 X 線位相イメージングを実験室装置で実現することを目的とした。日本側における光学系の発案と光学素子基本設計に基づき、ドイツ側は X 線リソグラフィにより三角位相格子を開発した。これにマイクロフォーカス X 線源からの球面波 X 線を照射して微分位相像を生成する。試料を移動させて微分位相像の計測を繰り返し、超解像微分位相像を取得した。ポリマー製のテスト試料を用いて、超解像 X 線位相イメージングの実証実験に成功した。

4 事後評価結果

4.1 研究成果の評価について

4.1.1 研究成果と達成状況

X 線位相イメージングに対する産業界からの注目は高い。しかし、空間分解能不足で満足な結果が得られないケースも少なくなかった。空間分解能に関するこの限界を打破する方策として、結像型 X 線顕微鏡と X 線 Talbot 干渉計の融合がある。ただし、この手法では、数十 nm の空間分解能が達成できるものの、同時に撮影できる視野が数 μm に限定される。そこで本研究課題は、結像型 X 線顕微鏡を用いない方式を日本側が提案した。使用する格子はドイツ側が製作し、これを用いて周期より高い空間分解能が得られる方式を研究し、 $1\mu\text{m}$ 以下の空間分解能、 5mm 以上の視野を持つ X 線顕微鏡を実現することを目標とした。

実際の開発では、非 Talbot 条件を採用し、三角位相格子に球面波 X 線を照射し、形成されたニードルビーム配列に対して試料をスキャンし、さらに下流に配置した振幅格子でニードルビーム配列の変位を解析する方式により、ポリマー製のテスト試料を用いて超解像微分位相像の取得に成功し、空間分解能評価結果 ($\sim 3\mu\text{m}$) から、空間分解能の改善と超解像 X 線位相イメージングの原理

が実証できた。ただし、達成できた空間分解能は格子周期を下回っているものの目標の $1\mu\text{m}$ には至らなかった。

4.1.2 国際共同研究による相乗効果

本課題は、イメージングに係わる X 線光学装置技術を有する日本側と、X 線光学素子に係わるマイクロファブリケーション技術を有するドイツ側との国際共同研究であり、双方の先端技術が融合することにより研究が大いに進展したといえる。本課題で謳った超解像 X 線位相イメージングの基本コンセプトは、日本側から提案したものであるが、X 線光学素子開発の観点ではこれまでになかった X 線格子開発の必要性を提起したものであり、ドイツ側に対して新しい格子製作プロセスデザインを考え、且つ、試みるきっかけを与えることができた。そして、カールスルーエ工科大学のシンクロトロン放射光施設 (KARA) の LIGA ビームラインにて三角位相格子の製作が行われ、微細加工技術を先鋭的に高度化する契機となり、顕著な相乗性を生むことができた。

4.1.3 研究成果が与える社会へのインパクト、我が国の科学技術協力強化への貢献

非破壊検査の手法として X 線検査法の導入が期待されている。例えば、自動車のような常に振動と力が加わるような接着部においては、細かなボイドの有無や分布の検査が必要となる。プラスチック材料等の接着技術の向上とその検査方法の確立が市場から求められており、高分解能を目指した本研究の技術の実用化が期待される。

本課題の実用化に向けては、撮影系の安定性の向上、撮影時間の短縮、適用先の市場調査など、解決しなければならない課題が多く残されている状況にある。今後も国際共同研究を継続し、より実用化に近いレベルに引き上げた後にライセンス化していただきたい。

なお、KIT の共同利用事業である Karlsruhe Nano Micro Facility では後継のプロジェクトが既に採択され、研究が開始されており、新しい展開を期待したい。

4.2 相手国研究機関との協力状況について

日独チームは本課題の研究開始前より技術交流があり、協力状況は非常に強固であった。それぞれ相手の研究室を訪問したり、国際会議のサテライトを開催する等、積極的な交流が見られた。コロナ禍でも約 3 か月毎にオンライン全体会議を開催し、その他個別の議論のための小規模な zoom 会議も行っており、かえって頻度的には増加して良い方向に向かったと考えられる。

本課題終了後においても、良好な協働関係を継続的に維持し、定期的な zoom 会議、あるいは、実験室およびシンクロトロン放射光施設での実験を共に企画・実施しており、新たな研究課題申請に向けての準備も始めていることから、今後のさらなる展開が期待される。

4.3 その他

本研究に関連して受賞した光・量子エレクトロニクス業績賞（宅間宏賞）は

応用物理学会の伝統ある賞で、X線位相イメージング研究の成果と意義が高く評価されたものである。今後実用化した時点でさらに高い評価が得られることが期待される。