

PF 研究会「X線干渉計と縦型ウィグラーを用いた超高感度画像計測の現状と将来展望」開催報告

九州シンクロトロン光研究センター 米山明男

X線を用いた非破壊観察は、医療用のレントゲン撮像やX線CTから、空港におけるセキュリティーチェックや工場の異物検査に至る様々な分野で幅広く利用されています。一般にはX線の吸収率の違いを利用して被写体内部の密度分布を画像化していますが、1990年代以降はX線を「波」として捉え、被写体を透過した際に生じた位相の変化（位相シフト）を利用して高感度に密度分布を画像化する「位相コントラストX線イメージング法（位相イメージング法）」が活発に研究・開発されています。これまでに、様々な位相シフトの検出方法が開発されていますが、単結晶のX線回折を利用してX線の分波・反射・結合を行う「X線干渉計」を用いた位相イメージング法が現在のところ最も高感度と考えられています。

X線干渉計の安定な動作には干渉計を構成する単結晶X線光学素子を μrad レベルで超精密に回転制御することが不可欠です。しかし、耐振動特性を優先して水平面内でX線光学系を展開した場合、通常の放射光（横発散）では観察視野が大きく制限されてしまいます。一方、PFのBL-14に設置されている縦型ウィグラーから放射される放射光は、世界で唯一の縦発散ですので、数 cm 角の広い視野で被写体の超高感度な三次元観察を行うことができます。この特徴を活用して、現在BL-14Cには2個の単結晶ブロックから構成されたX線干渉計（分離型干渉計）を採用した位相イメージングシステムが常設され、最大観察視野 $5 \times 3 \text{ cm}$ 、密度分解能 0.5 mg/cm^3 で非破壊の三次元観察を行うことが可能になっています。これまでに、小動物の各種臓器や腫瘍の無造影可視化、及びヒト胚子の高精細な解析等のバイオメディカルへの応用に加え、リチウムイオンバッテリー（LIB）の電解液イオン濃度のオペランド観察などの産業利用、南極古氷中に含まれるエアハイドレートの三次元可視化などの地球環境への応用など、様々なオンリーワン計測が行われてきました。

今後、BL-14の縦型ウィグラーが更新・改良された場合、オンリーワンの本計測法が更に発展・展開すると大いに期待されます。本研究会では、バイオメディカル、産業利用、地球環境、考古学、食品、画像解析、新規イメージング法と非常に幅広い分野の方々に本計測法を用いた観察例や関連する最新のご研究をご紹介頂き、縦型ウィグラーの更新によりどのような新しいサイエンスの展開が期待できるのかという点について、分野を超えた積極的な検討議論を行いました。

本研究会は、当初2020年3月に高エネルギー加速器研究機構（KEK）での開催を予定していましたが、新型コロナウイルス感染予防の観点から一時的に延期し、改めて2020年10月8日（木）から10月9日（金）午前の1.5日に渡って、PF研究会では初めてとなるKEKとオンライン会議を組み合わせ開催致しました。なお、オンライン発表者のPC切り替え時における混乱防止のため、初日はKEK（小林ホール）での発表を、2日目はオンラインでの発表をメインとして発表プログラムを組みました。

本研究会の参加者は延べ60名で、KEKで参加された方は20名、オンラインで参加された方は40名でした。研究会後のアンケートでは、本開催形式について「参加しやすい」「気軽に参加できる」など多くの方に評価して頂きました。その一方で、「質問のタイミングが難しい」「個別に質問できない」など質疑応答に関して支障があり、今後はチャットを併用するなど改善の必要があることが判りました。

研究会1日目は初めに物質構造科学研究所の小杉所長にご挨拶を頂いた後、放射光実験施設の船守施設長にPFの現状や将来の方向について、BL-14の縦型ウィグラーの更新に関する計画や状況などをご説明して頂きました。その後、PFの兵藤氏からBL-14Cのユーザー利用などに関してご報告頂きました。最初のご講演として、KEKの阿部氏からは超伝導ウィグラーの設計における磁場や熱対策などの具体的な手法について九州シンクロトロン光研究センターのウィグラー設計を例としてご紹介頂きました。PFの平野氏からはX線干渉計の基礎的な原理と、アボガドロ数の精密計測や動力学的な理論検証への応用などに関してご紹介頂きました。

続く午後セッションでは、京都大学の山田先生から京都コレクション（ヒト胚子）と位相イメージングへの応用のご紹介を、同大学の山口氏からは京都コレクションを対象として胚子の筋骨格形成過程の解明に関するご講演を頂きました。豊橋市自然史博物館の一田氏からは紡錘虫（フズリナ）の示準化石及び古地球環境解析における重要性と位相イメージング及び九州シンクロトロン光研究センターにおけるマイクロCT計測の結果について、日立の高松氏からは鉛蓄電池及び熱化学電池を対象としたオペランド計測により電池セル内の電解液濃度をリアルタイムで計測した結果についてご講演頂きました。休憩をはさみ、産総研の竹谷氏からはクライオ計測システムとその応用として南極古氷に含まれるエアハイドレートの観察結果についてご講演頂きました。その後、米山からX線サーモグラフィーについてご紹介した後、PF-UAが主催となって展示企業のショートプレゼンテーションとして、ご出展頂いた各社から製品や技術に関してご紹介頂きました。

2日目はオンラインの発表が中心で、初めに筑波大学の工藤先生から圧縮センシングやスパースモデルリングを活用した少数投影における再構成法や深層学習の試用に関するご講演を頂きました。その後、東北大学の橋本氏からは縞走査法におけるステップングエラーをトータルバリエーション (TV) を活用してソフトウェア的に低減する手法に関するご講演を、山形大学の湯浅先生からは位相イメージングにおける像再構成の概要のご講演を頂きました。休憩をはさみ、PFの西村氏から KEK で開発している 2次元検出器 SOIPIX の現状とイメージングへの試用結果に関するご講演を、北里大学の Lwin 先生からは生体試料をエタノール固定することでコントラストを増強する方法と脳の白質組織の可視化に適用した結果に関する紹介を、KEK の亀沢氏からは硬さの新しい評価方法として X線エラストグラフィーのご講演を頂きました。最後に、日清製粉グループの篠崎氏からは冷凍パスタやニンジンの観察結果と官能評価と対応付けした結果に関するご講演を頂きました。

1.5日間にわたり多くの方々非常に興味深いご講演を頂き、X線干渉計とそのイメージング法の重要性、有用性、そして将来性を改めて認識致しました。今後はバイオメディカル、地球環境、産業応用 (デバイスや材料)、考古学、食品等への応用から、X線検出器等のハードウェア、そして画像処理に至る多種多様な分野の方と連携し、オンラインの本計測法を研究連携の苗床や拠点 (ハブ) として、より発展させることが非常に重要かつ必要であると強く感じました。新しい縦型ウィグラー光源を迎えて本法の再構築・再飛躍の折には、関係各位に是非ご協力頂ければ幸いです。

コロナウイルスの影響により一時は中止も危ぶまれた本研究会ですが、PF 世話人の本田氏、岸本氏、兵藤氏、平野氏、PF 秘書室の高橋氏、林氏の多大なるご協力の下に開催することができました。この場を借りて深くお礼申し上げます。

(研究会ホームページ)

<https://www2.kek.jp/imss/pf/workshop/kenkyukai/20201008/index.html>



図1 オンラインの集合写真 (カメラ ON の方のみ)

プログラム

10月8日 (木)

- 10:30-10:35 趣旨説明
- 10:35-13:40 挨拶 小杉信博 (KEK 物構研・所長)
- 10:45-10:55 「PF の運営方針」
船守展正 (KEK 物構研・放射光実験施設長)
- 10:55-11:10 「BL-14C の状況報告」 兵藤一行 (KEK 物構研)
- 11:10-11:40 「超伝導磁石の精密磁場設計手法と応用」
阿部充志 (KEK 超伝導低温工学センター)
- 11:40-12:00 「X線干渉計と X線光学」
平野馨一 (KEK 物構研)
- 13:00-13:30 「位相イメージングのヒト発生学への展開」
山田重人 (京都大学)
- 13:30-13:50 「位相差 X線 CT を用いたヒト胚子筋骨格系の三次元可視化」 山口 豊 (京都大学)
- 13:50-14:10 「X線位相イメージング法の微化石、特に紡錘虫類の古生態研究への応用の可能性」
一田昌宏 (豊橋市自然史博物館)
- 14:10-14:30 「位相コントラスト X線イメージングによる蓄電・発電デバイスのオペランド計測」
高松大郊 ((株) 日立製作所 研究開発グループ基礎研究センター)
- 15:00-15:30 「温度制御下での位相コントラスト X線 CT 測定: 低温条件下におけるガスハイドレートの三次元観察」 竹谷 敏 (産総研)
- 15:30-15:50 「X線サーモグラフィによる熱伝搬可視化の試み」 米山明男 (九州シンクロトロン)
- 15:50-16:50 企業展示各社のショートプレゼンテーション

10月9日 (金)

- 9:00-9:30 「CT 画像再構成法の技術革新と深層学習への期待」 工藤博幸 (筑波大学)
- 9:30-9:50 「縞走査法を用いた干渉縞 X線イメージングにおける高速・高精度なエラー補正手法の提案」
橋本 康 (東北大学多元物質科学研究所)
- 9:50-10:10 「BL-14C で世界に先駆けて実現された位相コントラスト CT と屈折コントラスト CT」
湯浅哲也 (山形大学)
- 10:30-10:50 「二次元半導体検出器 SOIPIX シリーズの PF における応用状況と今後の開発」
西村龍太郎 (KEK 物構研)
- 10:50-11:10 「位相コントラスト X線 CT によるエタノール固定ラット脳の白質イメージング」
Thet Thet Lwin (北里大学)
- 11:10-11:30 「位相イメージングを用いた X線エラストグラフィの基礎的検討」
亀沢知夏 (総合研究大学院大学)
- 11:30-11:50 「位相コントラスト X線イメージング法による食品の観察」
篠崎純子 (日清製粉グループ本社 R&D・品質保証本部基礎研究所)
- 11:50-12:00 まとめと将来展望