



JST ERATO

**百生量子ビーム位相イメージングプロジェクト
キックオフシンポジウム**

～量子ビームの位相を使って見えない世界を観る～

日 時 : 2015. 7.13 (月) 14:00～14 (火) 午前

場 所 : 東北大学片平キャンパス 片平さくらホール

平成 27 年 7 月 13 日 (月) (開場 : 13:30~)

14:00~14:05 挨拶 瀬谷 元秀 (JST 研究プロジェクト推進部長)

14:05~15:00

基調講演『JST-ERATO 百生量子ビーム位相イメージングプロジェクトの概要』
研究総括、X 線位相イメージンググループリーダー 百生 敦 (東北大多元研)

————— 休憩 —————

15:10~16:00

『中性子を用いた新しいイメージング技術の開発と位相イメージングへの期待』
中性子位相イメージンググループリーダー 篠原 武尚 (原子力機構)

16:00~16:50

『位相差電子顕微鏡にかける夢』
電子線位相イメージンググループリーダー 村田 和義 (生理研)

16:50~17:40

『新方式コンピュータトモグラフィと位相イメージング画像処理への挑戦』
位相画像解析グループリーダー 工藤 博幸 (筑波大システム情報系)

18:00~20:00 懇親会 (東北大学生協レストラン・萩)

平成 27 年 7 月 14 日 (火)

9:00~ 9:30

『電子線位相イメージング技術とその周辺』
永谷 幸則 (生理研)

9:30~10:00

『X 線・中性子位相イメージングのための回折格子の開発』
矢代 航 (東北大多元研)

————— 休憩 —————

10:10~10:40

『シンクロトロン放射光を利用した X 線イメージング』
星野 真人 (JASRI)

10:40~11:10

『X 線集光技術と位相イメージングへの応用』
高野 秀和 (東北大多元研)

11:10~11:40 『X 線・中性子回折格子干渉計による極小角散乱イメージング』
矢代 航 (東北大多元研)

11:40~11:45 閉会挨拶 百生 敦 (東北大多元研)



ごあいさつ

このたび、科学技術振興機構、戦略的創造研究推進事業（ERATO）のひとつとして、百生量子ビーム位相イメージングプロジェクトを発足させていただきました。平成27年2月から平成32年3月までの期間でプロジェクトを推進し、位相イメージングに関わる様々な側面から、学術探究から社会還元につながる広い視点を持ちつつ、この技術の発展と更なる新機軸の発信を行います。今回、このようなキックオフシンポジウムを開催させていただくことの本意は、本プロジェクトの内容を広く知っていただくことはもちろん、プロジェクトメンバーを核としながらも、広く共同研究の輪を広げ、よりよい成果へと邁進できるような仲間を増やすことにもあります。‘位相イメージングとは何か？’については本シンポジウムでの講演に耳を傾けていただき、且つ、我々に忌憚ないご質問をぶつけていただければ幸いです。先端計測技術の開発を目指しているプロジェクトですので、それにも増して将来それを使っていただくポテンシャルユーザーとのコミュニケーションは極めて重要と考えています。今回は産業界からも多くの方々に参加していただいておりますので、本シンポジウムの機会を我々のシーズと様々なニーズとのマッチングの機会であるともお考えいただいても構いません。皆様からの活発なご議論をいただき、引き続きご指導・ご鞭撻を賜れば幸いと存じます。

平成27年7月13日

JST/ERATO 百生量子ビーム位相イメージングプロジェクト

研究総括 百生 敦

JST-ERATO

百生量子ビーム位相イメージングプロジェクトの概要

百生 敦

東北大学多元物質科学研究所

E-mail: momose@tagen.tohoku.ac.jp

1895年のX線の発見当初から、X線透視画像は医療や非破壊検査などの分野で広く活用され続けています。ただし、生体軟組織や高分子材料などの軽元素からなる物質ではコントラストが弱く、X線透視画像の原理的問題として長く甘受されてきました。

1980年代の終盤、この問題を克服するためにX線位相イメージングの原理を着想し、実験的検証を開始しました。X線位相イメージングとは、X線位相コントラストを生成するだけでなく、デジタル画像計測とコンピュータ処理に基づき、物質によるX線の減衰と位相シフト（あるいは屈折）を分離して定量計測する技術です。位相シフトの相互作用は吸収の相互作用より約千倍大きいので、軽元素からなる物質でも撮影できるようになります。X線断層撮影法（X線CT）との融合による高感度三次元撮影も実現します。当初は、品質のよいX線が使えるシンクロトン放射光施設で研究を開始しました。その後、より実用性の高い方式を模索し、X線 Talbot 干渉計およびX線 Talbot-Lau 干渉計などを用いるX線位相イメージング開発を推進しています。軟骨描出能を利用したリウマチ診断装置が病院で稼動するに至っており、乳がん診断装置への適用も研究しています。また、非破壊検査装置の開発も進めているところです。

これらの活動が評価され、この度、ERATOによる百生量子ビーム位相イメージングプロジェクトを開始させていただきました。X線に加えて、中性子線や電子線などを用いた位相イメージング開拓を進め、更なる飛躍・新展開を目論みます。X線を用いた位相イメージングでは、とくに動的手法および顕微手法による生体軟組織やソフトマターのイメージング技術の開発に重点を置き、中性子線位相イメージングでは、磁性材料などの構造と磁気情報の同時可視化などに取り組みます。さらに、位相差走査透過電子顕微鏡や反射型位相差透過電子顕微鏡など、電子線を用いた位相イメージング技術の開発を進め、計算機・情報科学分野における最先端の画像解析技術なども導入します。これにより、素材からデバイス、実装体レベルまでの幅広い空間スケールでの三次元高感度可視化を、複数の量子ビームプローブを連携的に使用して実現し、素材産業（ソフトマテリアル、複合材料、etc.）、デバイス産業（エネルギーデバイス、電子デバイス、etc.）、医療産業等に貢献できる高度なイメージングプラットフォームを構築します。

中性子を用いた新しいイメージング技術の開発と 位相イメージングへの期待

篠原 武尚

日本原子力研究開発機構 J-PARC センター

E-mail: takenao.shinohara@j-parc.jp

中性子を用いたイメージング技術は、中性子の持つ高い物質透過能力や軽元素における断面積の大きさにより、大型の観察対象内部の構造や、水や液体等の観察に利用されてきた非破壊分析・観察技術の一つである。これまでの中性子イメージングが白色中性子を利用してきたのに対し、近年の中性子線源の増強や中性子検出器の性能向上によって単色中性子でのイメージング実験が実現可能となると、物質に対する透過率の中性子エネルギー毎の違いを利用した新しいイメージング技術（エネルギー分析型中性子イメージング）が注目され始めてきた。

たとえば、ブラッグ散乱による透過率の変化を利用するブラッグエッジ法は観察対象の結晶組織情報を反映するため、結晶構造の違いやひずみの空間的な分布を画像化することができる。共鳴吸収現象を利用する方法では原子核種に依存した熱の分布を調べることが可能となる。また、中性子の持つ重要な特徴である磁気モーメントを利用する磁場イメージング法は、磁性材料の内部や空間中の磁場を可視化する新しい手法として注目されている。

一方、中性子も物質波として振る舞うことから、回折格子干渉計を用いた位相イメージング法を導入することが原理的に可能であり、X線や電子線において高感度のイメージング技術としてすでに実用段階となっている同手法に中性子の持つ独特な性質を組み合わせることで、X線や電子線とは異なる応用研究の発展が期待される。

本講演では、中性子イメージング技術の現状について紹介するとともに、位相情報の導入により期待される中性子イメージングによる新しい展開について述べる。

Title : Development of new neutron imaging techniques and the prospect of neutron phase imaging

Presenter : Takenao Shinohara

Affiliation : J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency

位相差電子顕微鏡にかける夢

村田 和義

生理学研究所

E-mail: kazum@nips.ac.jp

電子顕微鏡は波長の短い電子線を光源として用いることにより、光では見えないナノスケールの世界を我々に示した。しかし、こと生物試料の観察になると少々厄介である。生物試料は主に軽原子で構成され基本的に水和している。よって、電子線に対していわば無色透明であり、電子顕微鏡内のような高真空中では本来の構造を保つことができない。そのような試料を電子顕微鏡でどのようにイメージングするかをいゆる「生物電顕」の歴史である。前者については、重金属を吸着させることによって構造の可視化が行われ、後者については、試料を化学固定し樹脂で覆うことによってそれに近い構造の保持が試みられた。しかし、これらの方法はあくまで擬似的なものであり、生物試料本来の姿かたちを見ているわけではない。

そのような中、1984年にDubochetらによって試料の氷包埋法が提案された[1]。急速凍結により生物試料を非晶質氷の中に閉じ込め、これを凍ったまま電子顕微鏡内に持ち込んで観察する。いわゆる「クライオ電顕」の幕開けである。この技術により天然に近い生物試料の構造を画像化できるようになった。また、近年生理研の永山国昭教授のグループは、ピンホールのカーボン薄膜を対物レンズの後焦点面に挿入することによって、位相コントラストを積極的に回復させることに成功した[2]。しかし、この方法は構造物を光路に挿入するため、調整の手間やこのことによる情報のロス/劣化の影響が避けられない[3]。

本プロジェクトの電子線位相イメージンググループでは、これらの欠点を補い、より完成度の高い位相差電子顕微鏡の開発を行う。このことにより、これまで可視化することが困難であった生物試料をはじめとする有機材料の観察を容易にする。本講演では、これまでの生物および位相差電子顕微鏡の歴史を振り返るとともに、本プロジェクトで開発する新規位相差電子顕微鏡の構想を紹介する。

[1] M. Adrian et al., Nature 308 (1984) 32-36.

[2] K Nagayama, Eur Biophys J 37 (2008) 345-358.

[3] K Murata et al., Structure 18 (2010) 903-912.

Title : Dream on a phase contrast electron microscope

Presenter : Kazuyoshi Murata

Affiliation : National Institute of Physiological Sciences (NIPS)

新方式コンピュータトモグラフィーと位相イメージング 画像処理への挑戦

工藤 博幸

筑波大学システム情報系情報工学域

E-mail: kudo@cs.tsukuba.ac.jp

位相画像解析グループ（筑波大）は、ERATO『百生量子ビーム位相イメージングプロジェクト』において、新方式コンピュータトモグラフィー（CT）の研究と位相イメージング画像処理の研究を実施する。近年、幾つかの新方式CT装置の研究が精力的に行われおり、工藤らはX線を検査の関心領域(ROI)のみに照射して投影データを測定するインテリア(ローカル)CTと投影データの方向数を従来の1/10以下に削減して測定を行うスパースビューCTの研究を行ってきた [1],[2]。いずれも、医療用X線CTのみならず、本プロジェクトの主対象である位相画像を測定するマイクロCT・X線顕微鏡CT・透過型電子顕微鏡・中性子線CTにも有効である。一方、これらの新方式CTでは、被曝量低減・測定時間短縮・検出器やビーム幅の削減などが実現できる反面、不完全な投影データから画像再構成を行わなければならないと従来と比較してはるかに高度な画像再構成法の開発がキーとなる。

本発表では、画像再構成法の視点からインテリアCTとスパースビューCTの基礎と先行研究について解説し、更にERATOで実施する研究計画について述べる。位相イメージング画像処理に関しては、これまでの研究成果と、ERATOでの研究計画である位相アンラップや縞走査法の画像復元に代表される位相イメージングに固有の画像処理手法について述べる。

- [1] H.Kudo et al, Image reconstruction for sparse-view CT and interior CT - introduction to compressed sensing and differentiated backprojection, Quantitative Imaging in Medicine and Surgery, vol.3, pp.147-161, 2013.
- [2] 工藤博幸, 低被曝CTにおける画像再構成法 - 統計的画像再構成, 逐次近似画像再構成, 圧縮センシングの基礎, 日本医用画像工学会誌 Medical Imaging Technology, vol.32, pp.239-248, 2014.

Title : Challenges to Computed Tomography Based on New Principles and Image Processing for Phase Imaging

Presenter : Hiroyuki Kudo

Affiliation : Division of Information Engineering, Faculty of Engineering, Information and Systems, University of Tsukuba

電子線位相イメージング技術とその周辺

永谷 幸則

自然科学研究機構 生理学研究所

E-mail: nagatani@nips.ac.jp

透過電子顕微鏡による観察において、電子を散乱しにくい軽い元素より構成される無染色の生物試料を高いコントラストで観察したい、あるいは試料内の微細な電磁場分布を可視化したい、等を実現するには、試料を透過した電子線の位相分布を可視化する「電子線位相イメージング」が有効である。これを実現する方法として、デフォーカス法、電子線ホログラフィ法、位相差電子顕微鏡法などが開発されてきた。特に、電子線被曝で容易に壊れてしまう無染色生物試料に対し低い電子線被曝量で高い位相コントラストを得ようとするとき、位相分布の低周波数帯域をどれだけ取得できるかが重要となり、生理学研究所では微細加工したアモルファス炭素薄膜を位相板として用いるゼルニケ位相差法やヒルベルト位相差法を開発してきた。

本講演では、これらの位相イメージング技術を概括し、各手法の構成、コントラストが生成される原理、取得された像の意味を解説する。特に、現実的なセットアップの位相差法では避けられない、光源サイズの有限性、位相板の中心穴径の有限性、位相板の位置の横ずれや縦ずれなどがコントラストに与える擾乱を検討し、さらには取得コントラスト像への数理的な処理によりこれらの擾乱を事後に補正、あるいは既知情報により情報回復する方法なども紹介する。

Title : Electron Phase Imaging Technologies

Presenter : Yukinori Nagatani

Affiliation : National Institute of Physiological Sciences (NIPS)

×線・中性子位相イメージングのための回折格子の開発

矢代 航

東北大学多元物質科学研究所

E-mail: wyashiro@tagen.tohoku.ac.jp

×線、中性子は物質との相互作用が小さいため、光学素子は一般に伝播方向に十分に厚い必要がある。×線、中性子回折格子干渉計で用いられる吸収型回折格子についても同様で、厚さが十 μm 程度かそれ以上でなければならない。一方で、空間コヒーレンスの要請から、周期は μm 程度かそれ以下である必要がある。したがって、非常に高アスペクト比の構造が不可欠である。さらに材質についても、×線用については、原子番号の大きい元素、中性子用については、吸収断面積の非常に大きいガドリニウムのような元素を使用しなければならない。加えて、イメージングに使用するためには大面積化できることが求められる。

×線用の回折格子を例にとると、このような高アスペクト比構造を実現するために、当初から×線リソグラフィと金めっきの技術が利用されてきた。この方法によりすでに面積 100 mm 角[1]、厚さ 200 μm 程度[2]の回折格子の作製が技術的に可能であるが、放射光利用に伴うコストがかかるという問題があった。そこで、高アスペクト比構造体を Si のディープエッチングにより作製し、溝を金めっきで埋める方法が提案された[3]。しかしながら、めっきを利用しているため、不均一な増幅による歩留まりの悪さの問題が依然として存在する。さらに中性子用（ガドリニウム格子）には、これらの方法は適用できない。

そのため、我々は金属ガラスなどの新材料を用いた回折格子の開発を進めている[4]。この方法は、歩留まりおよびスループットの高い低コスト作製法であり、さらに中性子用も実現できるなど、将来有望と考えている。

[1] D. Noda et al., Jpn. J. Appl. Phys. 46 (2007) 849-851; D. Noda et al., Microsyst. Technol. 14 (2008) 1311-1315; D. Noda et al., J. Electrochem. Soc. 156 (2009) H229-H302.

[2] J. Mohr et al., AIP Conf. Proc. 1466 (2012) 41-50; M. Ruiz-Yaniz et al., Phys. Rev. A 91 (2015) 033803.

[3] 例えば、野田大二他、日本機械学会論文集 77 (2011) 691-697.

[4] W. Yashiro et al., Appl. Phys. Exp. 7 (2014) 032501.

Title : Development of Gratings for X-ray and Neutron Phase Imagings

Presenter : Wataru Yashiro

Affiliation : Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials (IMRAM), Tohoku University

シンクロトロン放射光を利用した X 線イメージング

星野 真人

公益財団法人 高輝度光科学研究センター

E-mail: hoshino@spring8.or.jp

X 線イメージング技術は、その透過性を活かした非破壊計測など、様々な分野で利用されている。特に、放射光を X 線光源に用いた X 線マイクロイメージング技術は、放射光の特徴でもある高輝度ビームおよび単色性を利用して、高空間分解能計測、高時間分解能計測、定量計測など、幅広い研究分野において利用されている。大型放射光施設である SPring-8 では、イメージングビームラインを中心に様々な X 線マイクロイメージング実験が行われている。

例えば、中尺偏向電磁石ビームラインである BL20B2 では、光源からエンドステーションまでが 200m 以上あることを利用して、大面積かつ平行な X 線ビームを利用したイメージング実験が行われている。X 線タルボ干渉計を用いた X 線位相差 CT も利用することが可能であり、生体軟組織の高感度 3 次元非破壊計測や、高い定量性を活かしたデンストメトリーおよびその応用計測が行われている。最近では、固定されていないいわゆるフレッシュな試料の測定も行うことが可能であり、外力を加えたときの形状変化やそれに伴う僅かな密度変化を捉えることができるようなダイナミック計測も始められている。

定量計測が可能な一方で、放射光特有の高輝度という特徴を活かした時分割イメージングも放射光 X 線を用いたアプリケーションの一つである。通常、放射光 X 線ビームは、ビームラインの分光器を介することで単色化されるが、分光器を介さない白色 X 線は、偏向電磁石からの放射光スペクトルをほぼそのまま利用することができる。一方で、全反射ミラーによる高エネルギー成分のカットや吸収フィルターにより、実験目的に応じてある程度スペクトルを絞ることも可能である。これにより、時分割イメージングが行えるだけの X 線強度を得つつ、ある程度の定量性を確保することも可能である。高速回転ステージや高速カメラを併用することで、高速 X 線マイクロ CT による時分割 3 次元計測を行うことも可能である。

発表では、放射光を用いた X 線マイクロイメージングについて、上記の X 線位相差 CT や高速イメージングなど実測例を交えながら紹介する。

Title : X-ray micro-imaging using synchrotron radiation

Presenter : Masato Hoshino

Affiliation : Japan Synchrotron Radiation Research Institute

X線集光技術と位相イメージングへの応用

高野 秀和

東北大学多元物質科学研究所

E-mail: hidekazu.takano.c3@tohoku.ac.jp

X線を集光した微小領域に位相変調分布がある場合、その平均勾配が波面傾斜をもたらすため、微小領域の遠方場回折像（集光点から広がった像）強度の一次モーメント移動量を求めることにより微分位相が求まる。要するに、集光領域に微小プリズムがあると近似して、その屈折角を求めるということである。この手法では、走査光学系であるために測定時間を要するが、高い空間分解能と微分位相感度を得ることができる。一次モーメントを求めるためにはエリアセンサーやマルチピクセル検出器を使用するのが一般的であるが、0次元検出器（強度検出器）を用いた簡便かつ高速な測定系をこれまでに開発している[1]。

走査型顕微鏡の空間分解能は集光サイズで決まるため、集光素子は極めて重要な要素技術である。硬X線領域における集光素子の性能はここ数年で大幅な向上を遂げており、非球面斜入射多層膜ミラーや多層膜ラウエレンズにおいて10 nmより優れた性能が達成されている。我々もこれまでに独自開発の多層膜ゾーンプレートやラウエレンズ、全反射型ゾーンプレートを作製し、高いX線集光性能を実現した[2,3]。

本発表ではX線位相イメージンググループの専任研究員として従事するにあたり、これまでのアクティビティを中心に、特に、走査X線顕微鏡を用いた位相定量法の開発とその要素技術であるX線集光素子の開発について紹介を行う。

[1] H. Takano et al., Jpn. J. Appl. Phys. 52 (2013) 040204.

[2] H. Takano et al., Appl. Phys. Express 3 (2010) 076702.

[3] H. Takano et al., J. Synchrotron Rad. 21 (2014) 446.

Title : X-ray Focusing Techniques and Application for Phase Imaging

Presenter : Hidekazu Takano

Affiliation : Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials (IMRAM), Tohoku University

X線・中性子回折格子干渉計による極小角散乱イメージング

矢代 航

東北大学多元物質科学研究所

E-mail: wyashiro@tagen.tohoku.ac.jp

X線回折格子干渉計は、高感度X線イメージングが実現できるX線位相イメージング法の一つで、実験室の低輝度X線源の利用も可能であることから、近年大きな注目を集めている。X線回折格子干渉計の別の長所として、吸収像、微分位相像だけでなく、ビジビリティコントラスト像という第三の画像も一回の撮影で取得できることが挙げられる[1,2]。最近この第三のコントラスト画像が、これまで描出できなかった部位の描出を可能とするものとして、バイオメディカルイメージングから工業製品の非破壊検査にわたる広い応用分野で関心を集めている。

我々は、このビジビリティコントラストの起源が、解像できないスケールのランダムな微小構造であることを理論的・実験的に証明し、ビジビリティコントラストから微小構造の構造パラメータを定量的に取得する方法を提案した[2]。さらに、ビジビリティコントラストと(極)小角X線散乱(Ultra-Small-Angle X-ray Scattering)強度の散乱角依存性の関係も定量的に明らかにした。これにより、従来は平行性の高い微小ビームを走査することによってしか取得できなかった(極)小角X線散乱の実空間分布が、低輝度X線源からの大面積X線ビームによって短時間で画像化できるようになった。

本手法は、(極)小角X線散乱に異方性がある場合にも適用可能であり、トモグラフィも実現できる。また最近の研究によって、表面敏感配置でいわゆるGISAXS(Grazing-Incidence Small-Angle X-ray Scattering)の実空間イメージングも可能であることが示された[3]。これらの方法は小角中性子散乱(SANS)イメージングにも応用可能である。本講演では、本手法の開発の現状と今後の展望について紹介する。

[1] F. Pfeiffer et al., Nature Mat. 7 (2008) 134.

[2] W. Yashiro et al., Opt. Exp. 18 (2010) 16890; W. Yashiro et al., Phys. Rev. B 84 (2011) 094106.

[3] W. Yashiro and A. Momose, Jpn. J. Appl. Phys. 53 (2014) 05FH04.

Title : Ultra-Small-Angle-Scattering Imaging using X-ray and Neutron Grating interferometers

Presenter : Wataru Yashiro

Affiliation : Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials (IMRAM), Tohoku University

お問い合わせ先 : ERATO 百生量子ビーム位相イメージングプロジェクト HQ
東北大学多元物質科学研究所

(TEL/FAX: 022-217-5617 (中野、小林、浅沼) ; email: erato-hq@onyx.tagen.tohoku.ac.jp)

