

(様式 2)

議事録番号

提出 2021 年 4 月 5 日

## 会合議事録

研究会名：第 61 回 SPring-8 先端利用技術ワークショップ「物質科学における  
コヒーレント X 線利用の最先端研究とその将来展望」

共催：SPring-8 ユーザー協同体 (SPRUC) コヒーレント構造科学研究会、公  
益財団法人高輝度光科学研究センター (JASRI)

日 時：2021 年 03 月 29 日 (月) 13 時 00 分から 16 時 20 分まで

場 所：オンライン開催 (使用ツール：Cisco WebEx)

出席者：(議事録記載者に下線) (敬称略)

高山裕貴 (兵庫県立大)、石黒志 (東北大)、香村芳樹 (理研)、佐藤正寛 (茨城  
大)、戸川欣彦 (大阪府大)、岸根 順一郎 (放送大学)、水牧仁一郎 (JASRI)、大  
隅寛幸 (理研)、大和田謙二 (量研)、他 62 名 (産 35、学 12、官 6、海外 2、JASRI  
7)

計 71 名

議題：

第 3 世代光源の登場以降、X 線のコヒーレンスを利用した計測技術、特に回折  
イメージング技術の発展は目覚ましい。X 線タイコグラフィーの空間分解能は  
10 nm を切り、さらにエネルギー走査を付加することにより、高空間分解能に  
て実空間座標が紐づけられた X 線分光スペクトルの取得が可能となっている (タ  
イコグラフィー - XAFS)。近年では照射 X 線波面の空間構造をより積極的に制  
御した光 (構造光) に注目した測定法も開発され始めている。例えば、硬 X 線  
領域において波面が特異点を持つような光渦の生成に成功し、トポロジカルな  
欠陥に感性をもつ可能性が示唆された。

本ワークショップは、コヒーレント X 線利用の最先端の現状を知り理解を深めることで、今後のコヒーレント X 線利用を考える機会にすることを目的とし開催する。回折イメージングや光渦の生成・利用に関して、最近の研究成果を紹介していただき、最後にコヒーレント X 線の特徴を活用できる研究対象として興味深い、物質中に励起されるトポロジカルソリトンに関する研究をご紹介します。

議事内容：

#### プログラム

13:00-13:05 はじめに

座長：大和田 謙二 先生（量子科学技術研究開発機構）

13:05-13:35 「コヒーレント X 線の最先端利用～CDI とタイコグラフィー～」

高山 裕貴 先生（兵庫県立大学）

13:35-14:05 「コヒーレント X 線の最先端利用～タイコグラフィーXAFS の機能性材料解析への応用～」

石黒 志 先生（東北大学）

14:05-14:15 休憩

座長 岸根 順一郎 先生（放送大学）

14:15-14:45 「X 線の場の構造形成と利用」

香村 芳樹 先生（理研）

14:45-15:15 「トポロジカル光波による高速固体物性制御法の提案」

佐藤 正寛 先生（茨城大学）

15:15-15:45 「キラル磁性体に現れる巨視的なスピン位相秩序」

戸川 欣彦 先生（大阪府立大学）

司会：水牧 仁一郎 （JASRI）

15:45-16:15 総合討論

16:15-16:20 終わりに

水牧 仁一朗 (JASRI)

講演：

・「コヒーレント X 線の最先端利用～CDI とタイコグラフィー～」高山 裕貴 先生 (兵庫県立大学)

Coherent X-ray Diffraction Imaging (CDI)法、並びにその走査型であるタイコグラフィー法の紹介があった。次に、それらを用いた計測例が示された。CDI では酸化還元ガス雰囲気下での粒子形状の収縮や、複合酸化物中の元素局在を観測した結果が示された。タイコグラフィー法では位相 CT 観察例が示され、数ミクロン程度の試料の内部において、60nm 程度の粒子や孔までが明瞭に可視化されている様子が示された。これらは BL24XU にて運用中 (共用に開放) のことであった。最後に今後の展開として、組成分布の高感度イメージングやサブ秒スケールの組織構造変化の計測を狙ったダイナミクス・イメージングの開発状況についての紹介があった。

「コヒーレント X 線の最先端利用～タイコグラフィー-XAFS の機能性材料解析への応用～」石黒 志 先生 (東北大学)

タイコグラフィー-XAFS 法の原理・計測法について紹介があった。近年 XANES 領域から XAFS 領域へ拡張され、例として Mn を含む粒子の空間分解 XAFS 解析の結果が紹介された。次に、タイコグラフィー-XAFS 法の機能性材料解析への応用、化学状態イメージと高度情報処理との連携についてご紹介いただいた。Ce を含む触媒粒子の 3次元化学状態イメージングでは、Ce の化学状態の空間分布が可視化され、高度情報処理と融合することで酸素拡散の“形跡”を空間的に可視化することに成功した。また全固体電池では、正極活物質粒子内の Mn の化学状態イメージングの結果が紹介された。将来展開としては、次世代光源の登場により空間分解能の向上や計測時間の短縮が期待され、非一様な試料内の

構造因子の分類が進めば理論との融合も視野に入るようになるだろうとの期待が示された。本研究は理研ビームラインで実施されているが、手法の開発や高度化がメインであり、現状では材料科学にまで手を広げることが難しく、そのような計測主体のビームラインが必要だろうとの見解が示された。また対象とするエネルギー領域の拡大も重要であるとの指摘があった。

「X線の場の構造形成と利用」香村 芳樹 先生（理研）

X線の位相を見て実際に役立てたいとの立場から講演があった。まず、構造光の利用の観点から、周期構造を持つ光の利用や欠陥構造を持つ光の利用について概要が示された。最近の取り組みとして、結晶の持つらせん転位の構造を X線位相へ転写することに成功した話題、またラディアル・ヒルベルト変換顕微鏡を開発して光学異性体由来の波面に転写されたトポロジカル欠陥のキラリティを可視化（波面を診断）することに成功した話題が紹介された。最後に、歪んだ結晶で生じる X線横滑り現象の紹介とその応用・将来展望が紹介された。

「トポロジカル光波による高速固体物性制御法の提案」佐藤 正寛 先生（茨城大学）

理論の立場からトポロジカル光波の応用に関して紹介がなされた。まず、渦光を用いた磁性体の制御について紹介があった。渦光の紹介から始まり、それらをキラル磁性体に照射するとそのビームサイズによってスキルミオンやスキルミオニウムが生成されることが理論的に示されたことが紹介された。次に、同じトポロジカル光波ではあるが、光渦とはタイプの異なるベクトル光の利用について紹介があった。ベクトル光は集光するとその集光点ではドーナツ状の強度分布となり、中心の特異点（暗点）では縦（光進行）方向に振動する磁場ののみが残るため、その特性を用いた様々な分光実験の可能性が提唱された。

「キラル磁性体に現れる巨視的なスピン位相秩序」戸川 欣彦 先生（大阪府立大

学)

キラル磁性体では巨視的にコヒーレントなスピン位相が実現されている。キラルスピンソリトン格子などキラル磁気秩序の紹介、それらに関連して示される物性、例えばソリトン閉じ込めによる磁気抵抗の離散化、それらの再現性（構造回復性）があるといった、興味深い特性が紹介された。キラルスピンソリトン格子と光との相互作用による欠陥制御（生成・消滅、転写等）の可能性、光を用いたソリトン制御の現状など、非常に盛りだくさんの内容が紹介された。

総合討論：

CDIの実施環境について：

CDIについては、その実施可能であるビームラインが基本的には理研 BL や専用 BL であり、かつ、それらのセットアップが常設でないことを踏まえ、CDI用セットアップが常設されていて一般共同利用が可能であるビームラインの整備（硬・軟両方）が必要であるとの意見が出された。共同利用として CDI をやってゆく中で、いろいろな技術的課題が見えてくるだろうとの意見があった。

世界で高輝度の中型放射光施設が建設され CDI が広く普及しつつある現在、CDI は計測対象勝負の局面に移行しつつあるように思われる。そのため SPring-8 においてもユーザーに広く CDI の環境を提供し、応用可能な領域を開拓する必要があるように思われる。その際、装置担当者や解析アルゴリズムの開発、光学系、試料準備環境（FIB、SEM）等の整備をセットで考える必要があるだろう。

リモート環境について

CDI 手法開発の立場からは現場での作業が大事でありリモートに馴染まないが、通常の XASF、XRD などでは積極的に行ってゆくべき。CDI も技術が枯れて汎用化が進めば、そういった方向にも進むかもしれない。代行が可能となってきた CDI 手法もあるが、結果の解釈や像再構成の所で若干調整が必要と

なる局面もある。そのあたりを整備できれば簡便に利用できるようになるかもしれない。

#### 構造光について：

高コヒーレント光源が実現される近未来においては、波面制御が行いやすくなると思われる。これにより、例えば、従来の平面波利用からもう一段進んだ構造光の利用が考えられる。ただし、構造光の利用には様々なハードルがあることがこれまで SPRUC の 3 期 5 年にわたって行ってきた議論から明らかになってきている。今回の研究会においても、理論的考察からプローブと計測対象との構造（スケール）上のマッチングが極めて重要であるがそれにより興味ある情報が得られることが示された。観測対象次第で全く新しい研究分野が拓けてくることも期待できるため、継続的な研究開発のためのプラットフォームの確保を期待したい。

#### まとめ：

今回の研究会では様々な視点から最新の話題が提供されたが、これらを横断するキーワードであるマルチスケールや位相欠陥、位相特異点、あるいは局在などに注目した研究開発は、新分野の開拓に繋がると期待される。コヒーレントビームの利用はマルチスケール構造解析や位相欠陥・位相特異点・局在現象等の可視化に力を発揮すると考えられる。