

第14回 SPring-8 先端利用技術ワークショップ／第3回放射光・中性子の相補利活用セミナー

「量子ビームで観る物質の内部構造」会議報告

公益財団法人高輝度光科学研究センター
利用研究促進部門 星野 真人

1. はじめに

第14回 SPring-8 先端利用技術ワークショップ／第3回放射光・中性子の相補利活用セミナー「量子ビームで観る物質の内部構造」が、2017年2月17日に東京都新宿区の研究社英語センタービル地下2階大会議室で行われた。本ワークショップは、SPring-8 先端利用技術ワークショップという位置づけではあるが、放射光と中性子の相互利用展開を目的とした放射光・中性子相補利活用セミナー（第3回目）として開催された。なお、本ワークショップは、公益財団法人高輝度光科学研究センター（JASRI）と、一般財団法人総合科学研究機構（CROSS）との共催という形で行われた。

主催者の集計によると、本ワークショップの参加者数は計68名で、内訳は、産業界25名、学術界8名、公官庁35名ということであった。プログラムは、中性子利用実験施設（J-PARC）や放射光実験施設（SPring-8）に関して、イメージング・画像計測に関する研究内容を中心として、施設側からの実験施設や計測手法などの紹介に関する発表と、主にユーザー側からの各施設あるいは両施設を利用して得られた研究成果などに関する発表で構成され、合計9件の口頭発表が行われた（図1）。なお、CROSS 中性子科学センターの横溝英明センター長による冒頭のセミナー趣旨説明では、放射光X線イメージングと、まだ歴史の浅い中性子イメージングの相互利用の重要性について強調された。以下では、各発表の内容の詳細について報告する。

2. 会議報告詳細

J-PARC MLF／日本原子力研究開発機構の甲斐哲也氏からは、「エネルギー分析型中性子イメージング装置「螺鈿」の紹介と研究活動」として、中性子イメ

ージングについての紹介と、パルス中性子を用いたイメージング技術について紹介された。発表では、中性子とX線イメージングの違いについて、重元素に対する透過能力や、軽元素に対する高感度性、また元素識別性の観点から、分かりやすく解説された。また、世界初のパルス中性子イメージング装置であるJ-PARC ビームライン「螺鈿」で利用可能な、パルス中性子イメージングの特徴として、中性子エネルギーによって試料への到達時間（Time of Flight）が異なることを利用することにより、いわゆる静的な計測から動的計測への展開が可能であることが紹介された。その他、中性子反応のエネルギー依存性を解析（ブラッグエッジイメージング）することにより、結晶組織や組成の情報が得られることで、結晶組織情報の空間分布を画像化できることや、偏極子により片方のスピンの中性子を抜き出すことによる磁気イメージングなど、パルス中性子ならではの計測手法が紹介された。また、「螺鈿」では共用開始からまだ1年足らずということであるが、海外からのユーザーも多数来所していることなど、ビームラインの有用性について示された。実際の中性子ラジオグラフィ・CTの測定例では、エンジンシリンダの3次元像や、自動車ラジエータの断層像の



図1 セミナー会場の様子

紹介など、放射光 X 線イメージングでは透過率の観点から計測不可能な試料に関する計測例が紹介された。また、TOF 法を用いることで、パルス中性子の強度が高い部分と撮影タイミングを同期することにより、コイル中の冷媒の様子のライブイメージングの様子が紹介された。ライブイメージングでは、25 Hz (20 ms の露光時間) の時間分解能で測定できるということである。パルス中性子イメージングにおける空間分解能の展望としては、空間分解能を突き詰めていくようなことはしないで、むしろエネルギー依存のイメージングなど、パルス中性子ならではの計測を推進していきたいという考えを明らかにした。なお、空間分解能の追求に関しては、原子炉の方に任せたいというコメントも見られた。

JASRI の上杉健太朗氏からは、「SPring-8 イメージングビームライン」ということで、SPring-8 の共用ビームラインでイメージング・画像計測が可能なビームライン (BL20XU、BL20B2、BL47XU、BL28B2、BL40XU) に関する紹介が行われた。各ビームラインの典型的なスペックと、ユーザー利用実験における実際の応用事例について、いくつか紹介があった。応用事例としては、近年の画像計測効率などの向上により可能となってきた 4D-CT の一つとして、ゴムの引っ張り試験時においてゴム内部で生じている現象の時分割 CT 計測や、1 CT 計測あたりに要する時間をより短くした高速 X 線マイクロ CT 計測による、人工呼吸条件化における生きたマウス胸部の CT 計測など、高輝度な放射光 X 線ならではの測定について紹介された。また、より高空間分解能画像計測法である X 線顕微鏡による測定例として、小惑星探査機「はやぶさ」が持ち帰ったイトカワ粒子における、鉄の吸収端を挟んだデュアルエネルギー測定の結果などが紹介された。SPring-8 における放射光 X 線イメージングのまとめとしては、各試料に対して最適な計測条件あるいはビームラインの利用の重要性が強調された。また、今後の課題としては、高分解能画像計測と、それとは画像計測の原理上相対する広視野計測との両立を目指した計測への取り組みを行っていくことが示唆された。

理化学研究所光量子工学研究領域の横田秀夫氏からは、「非破壊イメージングと画像処理による多次元情報可視化」というタイトルで、画像処理や情報処理

を駆使することで、見えないものを観るための研究への取り組みが紹介された。近年多次元化が進む情報 (例えば、4 次元：空間的 3 次元情報 XYZ に時間軸 T を加えたもの、あるいは、3 次元情報 XYZ に波長軸 λ を加えたもの、5 次元：ボクセル動画、3 次元情報 XYZ に時間軸 T および波長軸 λ を加えたもの) を、人間が理解できる情報へ置き換えるための可視化技術が紹介された。また、Image based modeling として、例えば CT 計測によって得られた 3 次元像において、計測対象内部における空隙の存在を確認後、その空間的情報を元に計算機シミュレーションにより、その材料が持つ機能解析へ展開していくという試みが紹介された。情報の可視化という観点では、複数情報からの 3 次元解析、あるいは異なるモダリティ (例えば X 線イメージングと中性子イメージング) からの情報処理により、単独モダリティの計測よりも、より多くの情報を引き出すことができるとして、定量的な画像処理および Registration 処理の重要性が示された。その一つの例として、人体のボクセルモデルの構築についての紹介があった。複数情報からの情報解析においては、異なるモダリティ間でも計測対象を同じ姿勢で計測を行う必要があるため、計測対象の配置あるいは位置を一致させる必要がある。そのための工夫の一つとして、人体用の石膏の型を用いることにより、1 mm 以下の精度で位置合わせが可能であることが紹介された。また、ネズミなどの実験動物のような、異個体あるいは異種間の比較においては、異なるモダリティによる撮影情報の統合解析として、相関解析を用いる手法が紹介された。その一方で、上記のような複合計測においては、撮影条件などに対する計測情報に関する記述の規格化が必要であることが示された。

JASRI の星野 (筆者) からは、「高エネルギー X 線マイクロ CT による文化財の非破壊 3 次元イメージングと X 線位相 CT による生体軟組織の 3 次元定量イメージング」というタイトルで、現在 SPring-8 で行っている放射光 X 線マイクロ CT に関する話題提供として、鉄や銅を含むような文化財試料に対する 200 keV 高エネルギー X 線マイクロ CT と、通常の吸収コントラストによる計測では、十分な画像コントラストが得られない生体軟組織に対する X 線位相 CT と、その応用事例に関する紹介を行った。200 keV 高エネルギー X 線マイクロ CT では、白色放射光を用いて、適

当なアブソーバを挿入することにより、200 keV に中心エネルギーを持った白色 X 線スペクトルが利用できることを紹介した。実際に文化財試料への応用例についても紹介し、15 μm 程度の画素サイズで、数 10 mm 径の鉄や銅を含む試料の 3 次元計測が行えることを紹介した。一方で、生体軟組織の測定では、組織を構成するのが主に H、C、N、O といった軽元素であり、水 (1 g/cm^3) に近い密度を有していることから、例えば 25 keV の X 線を用いた場合でも、吸収コントラストだけでは、それらの構造を十分な画像コントラストで可視化することはできない。このような場合、位相情報を用いた画像計測の方がより高感度で測定することが可能であり、僅かな密度差に起因する構造を可視化することができる。発表では、この位相イメージングの簡単な原理説明と、実際に X 線位相 CT を用いたユーザー実験における計測例として、水晶体におけるタンパク質濃度 (屈折率) 分布の 3 次元計測などについて紹介した。X 線と中性子の相互利用という観点からみると、中性子は文化財を構成する鉄や銅のような比較的重い元素に対しては高い透過性を示す一方、生体軟組織を構成する軽元素に対しては、高い感度を得られるということで、X 線で測定している試料 (例えば、上記の水晶体のたんぱく濃度分布) を中性子で測定してみても良いのではないかというコメントが寄せられた。

東京藝術大学の田中真奈子氏からは、「X 線と中性子イメージング技術を用いた非破壊分析による日本の鉄鋼文化財の材料特性と製造方法の解明」ということで、火縄銃や日本刀のような鉄鋼文化財に関する非破壊分析へ向けた放射光 X 線イメージングおよびパルス中性子イメージングの相互利用に関する発表が行われた。SPring-8 における 200 keV の X 線マイクロ CT を用いた計測では、実験室系の X 線 CT 装置では測定することができない、微小な非金属介在物の分布や配向を非破壊で 3 次元的に観察できることが示された。非金属介在物は日本古来の鉄製品に良く見られるもので、それを調べることで、その鉄製品がどのように作られたかに関する端緒が得られるとのことである。一方で、同じ試料に対して、パルス中性子のブラッグエッジイメージングを適用することで、X 線イメージングからでは得ることができない、結晶配向・結晶子サイズ・歪みなどの鉄の結晶組織に関する

情報が得られることが紹介された。放射光 X 線イメージングとパルス中性子イメージングによる非破壊での計測で得られた結果と、従来法として、いわゆる破壊検査である金属組織観察の結果を照らし合わせることで、X 線や中性子による非破壊計測でも鉄鋼文化財の材料特性や、製造・加工技術に関する情報が十分得られそうだという展望が示された。火縄銃や日本刀以外にも、佐賀城跡から出土した和釘の研究への応用も紹介され、特に中性子を用いた測定前には、文化財試料の放射化のリスクを未然に防ぐために、蛍光 X 線で金属組成を確認するなど、貴重な文化財試料ならではの注意点も紹介された。

招待講演である Helmholtz Zentrum Berlin (HZB) の John Banhart 氏からは、“Use of neutron and X-ray imaging techniques to explore complex materials and systems” というタイトルで、複合材料などに対する中性子および X 線イメージングの利用に関する講演が行われた (図 2)。HZB の Institute of Applied Materials のヘッドである Banhart 氏は、様々な試料に対し、そのスケールや必要な空間分解能に応じて、様々な量子ビームイメージング手法を用いていることを紹介した上で、放射光 X 線イメージングと中性子イメージングを取り上げ、その簡単な原理や応用例について紹介した。X 線と中性子を用いた Dual modality tomography による測定例では、容器中の砂の隙間を水で満たした試料の測定を取り上げた。X 線による測定では、砂のような吸収物体に対しては、最適なコントラストが得られるように高いエネルギーの X 線を用いて測定を行うことができるが、その反面、高エネルギー X 線では水に対するコントラストが得られなくなり、その分布を可視化することができなくなってしまう。この課題に対して、中性子イメージングを併用することにより、水への高い感度とその他の部分に対する高い透過率を利用することにより、水の分布だけを抜き出した測定ができることが示された。X 線で得られた砂の 3 次元分布と、中性子で得られた水の 3 次元分布を合わせることで、砂と水の混合構造に対する 3 次元可視化ができることが紹介された。また、放射光 X 線イメージングを用いた測定例では、その高輝度性を生かした測定として、加熱過程におけるメタルフォーミングプロセスのライブ観察 (1,250 fps) や、液体アルミナ合金 (liquid

aluminum alloy)などのメタルフォーミングプロセスの高速度イメージング(最速 105,000 fps、250 μ s 露光)が紹介された。また、Swiss Light Source (SLS)の TOMCAT ビームラインや BESSY-II の EDDI ビームラインで行っている fast in-situ tomography として、Al-Mg 合金におけるバブル核生成および成長過程の定量化のための時分割トモグラフィが紹介された。計測例とともに、高速画像計測を支える高速画像検出器として、SLS で開発された GigaFRoST を用いた高速トモグラフィ(時間分解能 20 Hz)についても紹介があった。しかし、このような高速計測では、1 データの量が 36 TB に及ぶなど、高速・ハイスループット計測ならではの課題も指摘された。一方で、中性子イメージングに関しては、軽元素に対する高感度性を利用して、電気分解過程における水素イオン(H⁺)の拡散の様子オペランド計測への応用例が紹介された。また、高速中性子トモグラフィにおける feasibility 測定では、植物の根周辺の水管理への応用を目指したウォーターフロントの移動に関する測定への取り組みも紹介された。



図2 講演を行う Helmholtz Zentrum Berlin の John Banhart 博士

九州大学の戸田裕之氏からは、「構造用金属材料の損傷・破壊挙動の 3D イメージング」というタイトルで、現在 SPring-8 を利用して行われている構造材料の疲労破壊評価に関する研究の紹介が行われた。冒頭では、疲労破壊評価を行うために開発を行ってきた、その場観察用の特殊な材料試験機の紹介が行われ、実際にそれらの試験機を SPring-8 のイメージングビームラインに持ち込んで、目的的材料試験を行っていることが示された。構造材料の破壊挙動計測の実施例と

して、組成が同じフェライト相とマルテンサイト相から成る二相鋼の X 線マイクロ CT による破壊観察を例として紹介し、マルテンサイト相がポイド成長により割れることにより、材料としての破壊につながることを解明したということが詳しく紹介された。また、航空機用高強度アルミニウムの破壊試験では、析出水素ポアの成長と破壊に関する新しい知見が得られたことが紹介された。一方で、構造材の歪みの 3次元可視化技術により、膨張の起源の解析を目的としたナノポイドのマルチスケール観察においては、空間分解能に関してスケールリングする際に不連続点があることが紹介され、その不連続点のギャップに関しては、現在 SPring-8 で開発を進めている 30 nm 空間分解能を目標とした X 線ナノ CT により、埋めることができるだろうという認識が示された。結晶組織の 3D イメージングでは、X 線マイクロ CT と X 線回折(XRD)を組み合わせることにより、多結晶から成る材料の各結晶粒の 3次元形態と、結晶方位測定を行っていることが紹介された。引張試験と組み合わせることにより、結晶粒の局所変形挙動の解明につなげていることが示された。今後の展望としては、計測データ内に埋もれた更なる情報を引き出すことにより、構造材料における各種現象に対して統合的理解が得られていくであろうという見解が示された。

東京理科大学理工学部建築学科の兼松学氏からは、「量子ビームのコンクリート工学分野への応用」というタイトルで、高性能化・高機能化・合理化・環境配慮性能の向上が求められているコンクリートに対して、主に中性子イメージングを用いた非破壊定量計測の展開に関する発表が行われた。特に、ひび割れ部分の修復という課題のために、ひび割れ近傍の水分挙動を測定する必要があることが示され、中性子ラジオグラフィを用いた水分可視化定量イメージングに関する研究紹介が行われた。その一つとして、モデル粗骨材を利用した計測では、骨材に対して水分が吸い付き回りこむような挙動を示すということが分かったという研究成果が紹介された。中性子ラジオグラフィでは検出器の画素サイズが 150 μ m という一方で、より高い空間分解能が必要な場面においては、X 線マイクロ CT による計測も取り入れているとのことである。X 線マイクロ CT の高分解能測定により、より細かい領域におけるミクロな水分移動の検証に利用してい

るということが紹介された。しかし、本報告でも既に述べたように、比較的高いエネルギーの X 線によるマイクロ CT 計測では、コンクリート内の水を可視化することは困難であるので、NaI 造影剤を用いることで、水部分のコントラスト強調を図るといった工夫も紹介された。また、コンクリートの爆裂現象（火災により過熱されたコンクリートの表面が飛び散る現象で、特に高強度化したコンクリートで顕著に現れるとのこと）の解明に関する話題が提供され、中性子によるイメージングとして、京都大学原子炉実験所における観察例が紹介された。この爆裂現象に関しては、SPring-8 における X 線マイクロ CT を用いて観察することはできないかという質疑応答が行われた。SPring-8 では、サイズとして 50 mm 程度までのコンクリートに対する測定可能性が示されたが、この爆裂現象を引き起こすには、コンクリート単体ではなく、10~20 mm スケールの骨材が入っていることが必要条件になるとの見解が示された。

産業技術総合研究所省エネルギー研究部門のムンソクス氏からは、「次世代エンジン開発への X 線噴霧計測技法の適用」というタイトルで、次世代エンジン開発へのアプローチとして求められる従来型噴霧・燃焼モデルの見直しのための、超高速 X 線イメージングによる噴霧計測への応用に関する発表が行われた。冒頭では、高速・高密度領域となるノズル近傍における噴霧計測の実現が、現時点における重要な課題であることが示された。X 線を用いることのメリットとして、可視レーザーによる噴霧のイメージングでは、散乱成分により計測が困難であることが示された上で、X 線の高い透過性能および屈折コントラストによるコントラスト強調効果により、より高精度（高い空間分解能）で計測が可能であることが示された。放射光を用いた超高速のパルスイメージングでは、白色のアンジュレータ光が利用できる SPring-8 の BL40XU において、放射光のフィリングパターンに同期し、シングルバンチを利用することにより、100 ps の露光時間で、2 μm の空間分解能で噴霧の様子を観察できることが紹介された。現状の課題として、ノズルから出てきた噴霧のみに関しては、SPring-8 におけるパルスイメージングでも実施可能とのことであるが、ノズル内部における内部流動の観察には、ノズルを透過できるだけの高いエネルギーが必要であることが示され、現状で

は、アメリカの APS でしか実施することができないことが示された。これは、BL40XU では、ヘリカルアンジュレータを用いているため、利用できる最大エネルギーが 16 keV に制限されてしまうためであり、目的とする計測には、ビームフラックスと高エネルギーの両立が求められるという見解が示された。一方で、中性子イメージングの可能性についても検討してみてもというコメントも会場から寄せられていた。中性子イメージングを用いることで、特にノズル内の液体流動の可視化に関して展望が拓けてくるのではないかと思われる。ただし、セミナー冒頭の甲斐氏の講演で示されたように、パルス中性子イメージングの時間分解能は数 10 Hz 程度ということで、超高速パルスイメージングへの展開にはまだ課題が残されていると言える。

3. おわりに

本セミナーでは、施設側とユーザー側の各講演者が、それぞれの専門の話題を提供することにより、放射光 X 線イメージングと中性子イメージングの相互利用への理解が深まったものと思われる。今回で第 3 回目の放射光・中性子利活用セミナーの開催であるが、今後もこのような場が提供されることにより、特に放射光ユーザー側にとっては、これまで X 線を用いた計測により得られた知見に対して、中性子という新しい側面からのアプローチにより、計測対象に対する更なる理解が進むのではないかと期待される。

星野 真人 HOSHINO Masato

(公財) 高輝度光科学研究センター 利用研究促進部門
〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1
TEL : 0791-58-0833
e-mail : hoshino@spring8.or.jp