

■第34回日本放射光学会年会・放射光科学 合同シンポジウム (JSR2021) 企画講演報告

企画講演 1 『次世代放射光施設計画の推進状況(3)』

内海 渉

(量研 量子ビーム科学部門 次世代放射光施設整備開発センター)

企画要旨

令和元年度から本格的にスタートした「官民地域パートナーシップ」による次世代放射光施設(軟X線向け高輝度3 GeV 級放射光源)の整備が、令和5年度の完成を目指して着実に進行している。東北大学青葉山新キャンパスにおける基本建屋の建設と並行して加速器コンポーネントの製作が鋭意進んでおり、各ビームラインの設計・製作も開始された。計画の進捗状況と今後の見通しなどについて学会員に報告する。

企画参加人数 221名

講演構成

1. 次世代放射光プロジェクト概況 内海 渉 (量研)
2. 基本建屋新築工事の進捗状況
鈴木一広 (光科学イノベーションセンター)
3. 加速器開発整備の進捗 西森信行 (量研)
渡部貴宏 (高輝度光科学研究センター・量研)
田中 均 (理研・量研)
4. 共用ビームライン進捗状況 高橋正光 (量研)
5. コアリジョンビームラインの設計と建設の進捗状況
中村哲也 (東北大学・光科学イノベーションセンター)
6. 東北大学国際放射光イノベーション・スマート研究センター
村松淳司 (東北大学)
7. 次世代放射光施設の放射線安全の検討状況
小西啓之 (量研)

講演概要

はじめに、内海が「次世代放射光プロジェクト概況」と題して、次世代放射光施設の目指すもの、官民地域パートナーシップの枠組み及び整備役割分担、光源としての加速器の主要諸元などをあらためて概説した後、第1期整備ビームラインとして10本を整備予定であり、そのうち7本をコアリジョンビームラインとしてパートナー機関が整備、3本を共用ビームラインとして量研が整備する予定であることをその概要リストとともに説明した。新型コロナの影響により、基本建屋の建設工事に関して、当初予定より若干の遅れが生じたものの、その後は順調に進捗しており、建屋が一部竣工する令和3年12月頃から加速器設置作業を開始し、令和5年12月にファーストビーム、令和6年度から共用開始というスケジュールで進んでいる。

続いて光科学イノベーションセンターの鈴木一広氏によ

り、基本建屋新築工事の進捗状況についての講演が行われた。建設地は、東北大学青葉山新キャンパスの南端部、約55,000 m²の敷地であり、平成31年3月に敷地造成工事が着工、令和2年3月には基本建屋新築工事が着工された。同年12月末現在の工事進捗率は約20%で、実験ホールの床コンクリート打ちがほぼ終了し、まもなく鉄骨工事・屋根・外壁工事が開始される予定である。地盤として不適当な表土約5メートルを除去した後、支持力が得られる深度まで「深層混合処理工法」による地盤改良が実施された。次世代放射光施設は蓄積リングの曲率が大きいため、実験ホールの幅がSPRING-8に比べても大きく、ビームラインに干渉することなく建屋の屋根をいかに支えるかが問題となっていたが、蓄積リング加速器トンネルの天井部にV字柱を構築することでこれを解決した。また、床や壁の要所にエキスパンションジョイントを配置することにより、加速器やビームライン機器への変形や振動が伝わりにくい構造設計がなされている。

加速器整備開発の進捗状況に関しては、発表者を代表して量研の西森信行氏が講演を行った。次世代放射光施設における加速器の設計・製作思想(機器のコンパクト化、少人数での運転維持管理、合理的な設計・製作、将来軟X線FELへの拡張への配慮、スケジュール厳守)が述べられた後、加速器チームから基本建屋設計に対して提案・実施された振動対策や温度対策、LED照明耐放射線対策などが紹介された。続いて、加速器要素技術開発の進展についての報告があり、蓄積リング加速器空洞開発に関し有害高次モード(HOM)吸収体を入れて0.9MV加速に必要な120 kWを達成したこと、市販熱カソードを用いたコンパクト高性能電子銃を開発したこと、などが説明された。機器製作は順調に進んでおり、本年12月から順次基本建屋への搬入が開始される。

量研の高橋正光氏からは、国が整備を行っている3本の共用ビームライン進捗状況が報告された。3本の共用ビームラインは、BL02U:軟X線超高分解能共鳴非弾性散乱(RIXS)ビームライン、BL06U:軟X線ナノ光電子分光(ARPES)ビームライン、BL13U:軟X線ナノ吸収分光(XMCD)ビームラインであり、「次世代放射光施設ビームライン検討委員会」においてラインアップが決定され、「次世代放射光施設利用研究検討委員会」における、想定される利用研究やエンドステーション機器、光学系技術などについての議論や助言などをもとに、量研が設計・製作を進めている。講演では、各ビームラインの目的、製作が開始されている挿入光源、設計が進行している

光学系の詳細が紹介されるとともに、今後のビームライン整備スケジュールが示された。

一方、パートナーが整備を担当しているコアリションビームラインについては、東北大学及び光科学イノベーションセンター所属の中村哲也氏が講演を行った。コアリションビームラインのラインナップは、軟 X 線ビームラインが 3 本、テnder X 線の利用も含む硬 X 線ビームラインが 4 本である。利用ニーズを踏まえた対応として、1 本のビームラインを同時利用可能な複数ビームラインに分岐する技術の導入をはかることが紹介された。この分岐技術により、先端性重視の 7 本のメインビームラインに加え、利用効率重視で強力な DX 化を推進するブランチビームラインを最大 8 本追加する計画である。コアリションビームラインの設計・製作は、東北大学国際放射光イノベーション・スマート研究センターと光科学イノベーションセンターとが中心となり、理研、JASRI、東大物性研などの協力により行われている。

引き続き、その国際放射光イノベーション・スマート研究センターの概要について、東北大学の村松淳司氏による講演が行われた。同センターは、東北大学の学内共同利用組織として令和元年10月1日に設置され、新学術の創発と未踏研究領域を開拓する、社会連携に基づき未来価値創造を支援する、海外施設/大学との国際研究ネットワークを構築する、世界トップレベルのグローバルリーダーを育成することをミッションとしている。エンドステーションの設計や整備から、産業界によるエンドステーション活用まで、サイエンス面の学術の全面的な協力を牽引するとともに、「リサコン4極構想」において、国外のリサーチコンプレックス間の連携のハブとなり、国際的規模で、施設と連携する大学を通して、次世代放射光施設を活用した研究・教育、人材育成を実現することを目指している。講演では、センターにおける横幹、基幹、展開の3つの研究部門及びそれらを構成する14の「スマートラボ」の概要が紹介された。また、これらとは別に光科学イノベーションセンターとの共同研究部門である「放射光次世代計測科学連携研究部門」も設置されている。

最後の講演では、量研の小西啓之氏により、次世代放射光施設における放射線安全・放射線管理の検討状況が報告された。国内の他の放射光施設と同様、次世代放射光施設も運転開始前に「放射性同位元素等の規制に関する法律 (RI 規制法)」に基づく放射線発生装置の使用許可申請を行い、それに伴う施設検査に合格する必要がある。国内の既存放射光施設では実験ホールは放射線管理区域になっており、ユーザーは事前に放射線業務従事者登録されていることが求められ、これが特に産業界の放射光利用に対する大きなハードルの一つとなっている。講演では、次世代放射光施設では、ユーザーの利便性向上と産業利用を含む利用分野の拡大を図るため、放射線業務従事者でなくとも可能な限り放射光実験に参加できることを目指して種々の検

討を行い、規制当局との種々の協議を行っていることが紹介され、現行の問題点とその解決策案、遮蔽設計の状況などについての説明がなされた。

企画講演 2 『硬 X 線回折・散乱による物性研究の最前線』

若林裕助 (東北大学)

企画趣旨

放射光実験技術は光源・検出器・解析法の進歩に伴い、常に進歩を続けている。回折・散乱分野でも、2000年代以降高性能な二次元検出器が普及した事で技術上のボトルネックが一つ解消し、それに伴って新たな解析技術がここ数年の間に進歩してきた。

硬 X 線の回折・散乱は、X 線の透過力の高さも手伝って実験技術に比較的制約が少なく、計測技術として工夫をする余地が大きい。また、散乱過程に紛れが無く、構造を仮定すれば散乱強度分布を計算するのは極めて容易である。この側面は、解析手法の工夫のしやすさに直結している。解析手法の進展は、情報科学やトポロジーなどの数学的技法の活用が広がった事、あるいは第一原理計算によって計測とは別の方向からの物理的要請を解析に取り込む事が実質的に可能になってきたことなど、色々な方向性での進歩が見られる。

本企画講演は、主に 20 keV 以上の X 線を用いた回折・散乱の実験・解析技術の現時点での最前線を示すことで、今後の光源の進歩に向けた準備の出発点を与える事を狙って企画された。

企画参加人数 約190名

講演構成

1. はじめに 若林裕助 (東北大)
2. 精密電子密度解析による価電子密度の直接観測 澤 博 (名大)
3. 負熱膨張材料の局所構造解析：全散乱データ解析と光電子分光の相補利用 東 正樹 (東工大)
4. 高圧高温での熔融鉄 高圧技術と欠損データ復元による密度・音速決定 桑山靖弘 (東大)
5. 鋭い回折ピークを持つ液体：ガラス化しやすさのトポロジカルな分類 小野寺陽平 (京大)
6. 鉄の酸化被膜形成過程 微弱信号の解析による高時間分解能計測 若林裕助 (東北大)
7. The role of coherence, disorder and temperature in the photo-induced phase transition in VO₂ Simon E. Wall (Aarhus Univ., Denmark)
8. おわりに 足立伸一 (高工研)

講演概要

はじめに企画提案者の若林が、本企画講演の趣旨説明を行った。

最初の 2 つの講演は無機結晶に関する話題であった。名大の澤博氏より、内殻電子を差し引いて、外殻の 2p や 3d 電子の分布を可視化した結果が示された。単結晶構造

解析と同様のデータを高い散乱ベクトルまで測定し、高角側の反射のみを用いて原子位置を正確に決める。実験的に得た散乱振幅から、こうして求めた内殻からの散乱振幅を差し引く事で、外殻電子のみの情報を取り出せることが紹介された。得られた電子密度は、遷移金属の3d軌道が周辺の酸素のp軌道と混成している様子を可視化していた。続いて東工大の東正樹氏より、pdf解析とHAXPESを組み合わせて、BiやPbを含むペロブスカイト型酸化物の負熱膨張の起源を探った結果を紹介いただいた。Biは三価と五価、Pbは二価と四価しか取らず、それに応じてBサイトの価数も大きく変わり、大きな体積変化が生じる。特に PbCrO_3 では電荷ガラス状態とも言うべき価数の乱れた空間配置が、圧力によって溶ける事で極めて大きな体積変化が実現する事が紹介された。

続いての2講演は液体に関連する講演であった。東大の桑山靖弘氏からは、地球の外核の組成を知るための高温・高圧実験に関する報告があった。地球の外核は溶融鉄が主体である事が知られているが、密度と音速以外の情報が得られない。一方、実験室で作製可能な高温・高圧の溶融鉄の密度の測定には大きな不確定性が残っていた。この困難は、圧力装置によって高い散乱ベクトルの領域が計測できない点に起因した。ここでは実空間と逆空間の両側の拘束条件を用い、計測できる範囲の情報を全て活かした密度算定法を作り、非弾性X線散乱によって求めた音速の情報とあわせて鉄の状態方程式を構築した。京大の小野寺陽平氏の講演では、液体のガラス化しやすさを決める要因について、数種の液体/ガラスの散乱強度分布から液体構造を求め、ガラスにならない構造的な特徴を見出す手順が紹介された。パーシステンスダイアグラムを用いて液体構造/結晶構造のトポロジーを比較すると、ガラス化しない Er_2O_3 液体では結晶とのトポジカルな類似性が高い事が指摘された。

最後の2つの講演は、全く時間スケールが異なる時間分解測定に関わる話であった。東北大学の若林より、20ms分解能のX線反射率測定を通して、鉄の酸化被膜形成過程の研究結果を報告した。不可逆に進行する化学反応の経過を見るためには、繰り返し測定ができず、一度のイベントを高速で測定する事が求められる。短い露光時間の写真で信頼できる実空間構造情報を引き出すため、ベイズ推定を用いた解析で、被膜形成の最初の1秒間でだけ膜の形成過程が異なっている事を示した。最後はデンマークのAarhus大学から、Simon Wall氏によるXFELを用いた研究報告があった。 VO_2 は有名な金属-絶縁体転移を示す酸化物であるが、大強度のレーザーを照射する事で絶縁相から金属相に100fs以下の時間で切り替わる。この過程が全体的なコヒーレントな原子変位によるのではなく、構造の乱れを含むことがXFELを用いた散漫散乱の測定で示された。相転移の途中経過をブラッグ反射のみで見ようとすると転移前後の状態の体積分率を見るだけになってしまう。

う。この限界を、格子系が追い付かない速さでの励起と、散漫散乱による乱れの測定によって乗り越えた計測が示された。

KEKの足立伸一氏から、硬X線回折という、ある意味一番伝統的な放射光利用がどう進んでいるかが示された。他のプローブとの相補利用も有効であろうから、多様な放射光の活用が広がると良い、という趣旨のまとめの言葉を頂いた。

オンライン開催となった印象を述べておきたい。講演者側としては、そもそも会場の雰囲気と呼ぶべきものが醸成されないためか、その場での調整が難しい。これは発表時間が長い場合や、最初や最後の挨拶で特に気になった。会場の側からは、やや質問が出づらかったかもしれない。その一方で、事務局の集計では200人近くもの参加者がいたとの事で、集客には有利であったと思われる。なによりも、海外からの講演を企画に入れる事ができた。午後のセッションは、ヨーロッパでは朝のセッションとなり、お互いの負担が無い。これは今後も使うべきメリットであると思われる。

放射光利用の一つの柱であるX線の回折・散乱は、ほぼあらゆるものを測定でき、試料環境の自由度も高い。近年の解析法の進歩が加わり、さらに発展を続けている。今回の企画が、皆さんの次の計画に役立てば幸いである。

企画講演3『食品科学における放射光の利用研究』

上野 聡 (広島大学)

瀬戸秀紀 (高エネルギー加速器研究機構)

企画趣旨

食品は、一般に多成分で構成され、存在状態も液体からエマルジョンなどのコロイド、そして結晶やガラス状態の固体までさまざまな形態で存在している、いわゆる複雑系である。近年、食品科学についても放射光など量子ビームを利用した研究例が増え、昨年1月には、PF研究会「量子ビームを活用した食品科学」(2020年1月28日-29日、KEK研究本館)が開催され好評を博した。そこで本企画講演では、放射光を用いた研究を数例紹介し、食品科学の放射光利用について一般会員に周知をはかることを目的とする。

企画参加人数 96名

講演構成

1. 「放射光を利用したX線CTによる冷凍食品の品質特性評価」 小林りか (日大・生物資源)
2. 「量子ビーム小角散乱による食品タンパク質構造解析の新展開」 佐藤信浩 (京大・複合原研)
3. 「放射光などによる食品系の微細構造解析」 合谷祥一 (香川大・農)
4. 「ホウレン草中のCaのXAFSを用いた非破壊化学状態分析」 阿部 仁 (KEK・物構研)
5. 「放射光によるチョコレートの結晶多形変化のその場

「観察」 上野 聡 (広島大・統合生命)

講演概要

はじめに企画立案者の上野が、本企画講演について簡潔に趣旨説明を行った。

その後、小林りか氏より、冷凍食品の品質特性評価に放射光 X 線 CT の手法を用いた研究について紹介いただいた。冷凍操作に伴う品質劣化には、直接または間接的に食品成分の結晶化が影響を及ぼすため、食品中の氷結晶の生成状態および成長挙動の理解が重要である。また、氷以外の部分、すなわち食品成分が凍結濃縮を受けた部分が、冷凍下でどのような状態にあるのかという情報も重要である。これらの情報を、放射光 X 線 CT により氷を直接観察し、また、凍結濃縮層中の成分の分布を X 線線吸収係数の若干の違いを捉えることで得られた知見が紹介された。まず、放射光 X 線 CT によって直接イチゴの冷凍組織の観察を行い、イチゴでは過冷却によって氷のサイズは微細なものとなるが、品質は劣化するという従来の理解とは異なる現象が起きていることを明らかにした。さらに、X 線線吸収係数の観察により、高野豆腐において、タンパク質由来と考えられる線吸収係数のほかに、油由来と考えられる線吸収係数が観察され、冷凍貯蔵中の豆腐内では氷の再成長に伴う氷以外の成分からの脱水によって、濃縮相内でも親水的な成分と疎水的な成分の相分離が起き、このミクロな相分離がタンパク質の凝集や硬さの増加を引き起こす可能性が示された。

佐藤信浩氏からは、量子ビーム小角散乱による食品タンパク質構造解析について紹介された。SAXS 測定により小麦タンパク質グリアジンの凝集構造の特徴や水和凝集体の濃度変化や塩化ナトリウムの添加がもたらす構造変化について報告され、さらに、小麦タンパク質複合体グルテンの構造解析に向けたコントラスト変調 SANS 測定の結果が紹介された。また、SAXS により明らかとなった大豆タンパク質グリシニンおよび β コングリシニンの加熱変性の温度依存性や、凝固剤添加時の凝固過程の追跡の結果についても紹介された。

合谷祥一氏からは、(1) マイクロ X 線 CT による油調済みパン粉の微細構造解析、(2) デンプンの糊化及び老化の解析、についての研究結果が紹介された。(1) については、パン粉・油及び空気元素組成と密度及び各元素の X 線質量吸収係数からそれぞれの X 線線吸収係数を求め、CT 画像のピクセル強度との相関性から、パン粉・油及び空気領域を同定し、油ぎれの良い裸麦添加パン粉の空孔は、撥水・撥油構造として注目されているダブル・リ・エ

ントラント様の構造であることが推測される結果が報告された。(2) については、放射光ではなく Nano-viewer (リガク) の X 線回折測定結果が紹介された。デンプンの糊化及び老化を广角散乱測定により、凍結乾燥などの処理をせず、生の状態で測定した結果が紹介され、もち米デンプンの糊化に対する D-プシコース・トレハロースおよびショ糖の存在下では、D-プシコースが澱粉糊化の温度上昇を妨げ、老化を抑制することが判明した。さらに最後に、茹でうどん中のデンプンの状態を广角 X 線散乱測定結果について紹介があり、茹でうどんの表面近傍では散乱ピークが観察されず、糊化が完全に進んでいることが確認されたが、中心部では弱いながら散乱ピークが観察され、糊化が不十分であることが確認された。また、茹で延びにおいて、デンプンの糊化の状態は変化しないことが判明した。

阿部 仁氏からは、元素選択的な非破壊化学状態分析手法である XAFS を用いた、食品中元素の化学状態分析の実例が報告された。ホウレン草にはシュウ酸が含まれることから、難溶性のシュウ酸 Ca の形で Ca が含まれていると推測されていた。この課題を、XAFS を用いた化学状態分析により実態解明を試みた測定結果について紹介された。Ca K 吸収端の XAFS スペクトルの特徴的な構造がシュウ酸 Ca と良く一致し、ホウレン草の Ca が確かにシュウ酸 Ca であることが判明した。このように、1 本の XAFS スペクトルから、それがシュウ酸 Ca であることを初めて直接的に明らかにし、人体吸収率についても化学の視点から議論できることを示した。今後は、他の葉野菜や豆類等にも展開し、「XAFS による食品科学」を進めていく抱負が語られた。

上野 聡は、チョコレート工場におけるテンパリング装置の中でどういう結晶化が生じているかを調べるため、せん断応力の印加+温度変化(テンパリング)を同時に引き起こす装置系により、放射光時分割 X 線回折測定にてチョコレートモデル系の多形転移挙動を調べたことが報告された。その結果、せん断応力の効果は、多形によらず結晶化を促進することで、V 型以外の結晶多形がテンパリングにより消去され、結果的に V 型多形のみが生き残ることが判明した。

最後に、共同企画者の瀬戸秀紀氏より、まとめの発言があり、食品は複雑系の極みであるが、それ故に挑戦しがいのある研究テーマであることが指摘された。最後に、来年日本で開催予定の「Neutron and Food」国際会議について紹介された。