

## ■ 会議報告

# 7th International Conference on Inelastic X-ray Scattering (IXS2010) の報告

石井賢司 (日本原子力研究開発機構)

2010年10月11日から14日までフランスグルノーブルの World Trade Center において、7th International Conference on Inelastic X-ray Scattering (IXS2010) が行われた。この会議は3年ごとに日米欧いずれかで開催されており、淡路島で開かれた前回の IXS2007 に続く本会議は、ESRF のお膝元であるフランスのグルノーブルが開催地となった。招待講演者29名を含むおよそ150名の参加者が集い、文字通りの(共鳴・非共鳴) X線非弾性散乱に加え、核共鳴非弾性散乱、コンプトン散乱を用いた最近の成果について活発な議論がなされた。

本会議に先立ち ESRF の非弾性 X線散乱に関係したビームライン見学が行われた。筆者が見学した中で、利用分野の広がりという観点で印象に残ったビームラインとして ID26 を紹介したい。このビームラインは、硬 X線領域の吸収・発光の測定を目的としている。発光用の分光器には5つのアナライザーが搭載されており、高効率での測定ができそうである。また、入射 X線のエネルギーが2.4-27 keV と硬 X線ビームラインとしてはかなり低いところからカバーできており、一部の4d遷移金属の L吸収端やアクチナイドの M吸収端での実験が可能である。研究分野は、物理に限らず、化学、生物から応用材料にまで広がっている。本会議においても、このビームラインを利用

した結果として、P. Gratzel 博士 (ESRF) による白金触媒の研究や、J. Yano 博士 (Lawrence Berkeley National Lab.) による光合成系タンパク質複合体内の  $Mn_4Ca$  クラスターの研究が報告された。

さて、本題の会議についてであるが、冒頭のセッションが Introductory Talks となっており、その分野を代表する研究者によって前回の会議からの3年間での進展状況が紹介される点がこの会議の特徴の一つである。まず、C. C. Kao 博士 (SLAC) が電子励起を対象として非共鳴非弾性 X線散乱 (NIXS)、共鳴非弾性 X線散乱 (RIXS) を中心に講演を行い、NIXS での非双極子遷移を利用した dd 励起の観測などを紹介した。続いて A. Q. R. Baron 博士 (理研) が meV 分解能での原子ダイナミックスの測定について、NIXS と核共鳴非弾性散乱 (NIS) の比較を行いながら講演した。

その後は研究分野ごとに分類され、Correlated electron systems, Liquid and gas phase studies, Earth and planetary science, New scientific frontiers I, II, 3d transition metal compounds I, II, Chemistry and biology, Liquid and glasses, Magnetism, Superconductivity and related phenomena, Elements and advanced materials のセッションがあった。

今回の会議で最も目を引いたのは、軟 X線領域の共鳴



図1 会議参加者による集合写真。

非弾性 X 線散乱 (RIXS) である。ESRF, Swiss Light Source (SLS) においてエネルギー分解能が向上したことによる大きな進展があり、3 年前の第 6 回会議と比べて発表件数が急増していた。これまでは、バンド間遷移や遷移金属の dd 遷移など、単に電子状態を調べる手法であったのが、物性と直結した素励起が研究対象となり、さらに、その運動量依存性まで観測できるようになってきている。まず、B. Keimer 博士 (Max Planck Institute) から、銅の L 吸収端を用いた銅酸化物高温超伝導体の磁気励起に関する研究と Ti の L 吸収端を用いた軌道励起の研究についての講演があった。特に銅酸化物高温超伝導体については、Y 系を中心に一気に研究が進んでいる感じがした。RIXS では中性子非弾性散乱のような大量の単結晶試料を必要としないという利点があり、それが急速な研究進展の一因となっているのであろう。また、磁気励起については、低い励起エネルギー領域に強い中性子非弾性散乱と高い励起エネルギーに強い軟 X 線非弾性散乱がおよそ 100 meV ぐらいでオーバーラップしており、ほぼ同じ物理量を観測できる測定手法なので、相補的な利用が重要であるとの指摘もあった。また、SLS のビームライン担当者である T. Schmitt 博士からも磁気・軌道励起に加えて、それらがカップルした複合励起に関して研究結果が紹介された。G. Ghiringhelli 博士 (Politecnico di Milano) 博士の講演では、ESRF での 10 m のアームを持った軟 X 線 RIXS ビームラインの建設計画が紹介されており、今後の展開に注目したい。一方、アジア地域からは、T. Tokushima 博士 (理研) から液体や溶液の測定結果が示された。また、D. J. Huang 博士 (NSRRC) から台湾の NSRRC でも同種の装置の建設が最終段階にきていることが紹介された。

RIXS による磁気励起の観測は理論的にも興味を持たれているようで、理論の口頭発表 3 件のうち 2 件が遷移金属 L 吸収端の RIXS による磁気励起に関する内容であった。J. van den Brink 博士 (IFW Dresden) からは、single magnon などのスピン反転を伴う励起では内殻、L 吸収端の場合は 2p 軌道におけるスピン軌道相互作用が重要であることが指摘され、さらに、具体的な計算結果が示された。M. W. Haverkort 博士 (Max Planck Institute) は、磁気励起について、磁気モーメントの向きと X 線の偏光との間にある現象論的な関係を導いた。磁気モーメントの向きと偏光との関係は、共鳴弾性散乱の場合は Hannon ら研究が良く知られているが、それを非弾性散乱にまで拡張したものである。この結果は、磁気励起の選択則として実験家にとって有用となるであろう。

以下では、主に海外の研究者の口頭発表の中で、印象に残ったものを列挙していく。分野に偏りがあるが、筆者の理解した範囲での報告ということでご容赦いただければと思う。

硬 X 線の RIXS, REXS については、硬 X 線の高い物

質透過能を利用した高圧下の実験の報告が 2 件あった。J.-P. Rueff 博士 (SOLEIL) は valence fluctuation が圧力下超伝導の起源として提案されている重い電子系  $\text{CeCu}_2\text{Si}_2$  について、partial fluorescence yield (PFY) を用いて吸収スペクトルの圧力依存性を高精度で測定し Ce の価数状態を議論した研究が紹介された。一方、J. Kim 博士 (APS) からは、スピン転移を示す  $\text{FeBO}_3$  について、約 70 GPa の圧力までの価電子励起を Fe の K 吸収端の RIXS で測定した研究が紹介された。フェルミエネルギー近傍の電子状態を高圧下で調べられる実験手法は限られており、運動量の情報までとなると皆無である。その意味で、RIXS は高圧下での電子状態の研究手法として期待できる。その他、K.-D. Tsuei 博士 (Taiwan NSRRC) からはマルチフェロイック物質である  $\text{LiCu}_2\text{O}_2$  についての報告があった。一方、理論に関しては、T. Devereaux (SLAC) から複数の軌道を取り入れたクラスターにより銅酸化物高温超伝導体の Cu の K 吸収端での RIXS スペクトルを計算した結果が示された。クラスターによる理論計算では、計算機の発展に伴いサイトや軌道の数が徐々に増えてきており、RIXS スペクトルのより詳細な議論が可能となってきている。

一方、非共鳴非弾性 X 線散乱を用いた格子振動の研究については、M. Upton 博士 (APS) が超伝導体  $\text{YCa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ , J. Bouchet 博士 (CEA) がウラン、F. Weber 博士 (ANL) が CDW を示す  $\text{NbSe}_2$ ,  $\text{TiSe}_2$  について報告した。電子励起に関しては、P. Abbamonte 博士 (University of Illinois) から今年のノーベル物理学賞の対象となったグラフェンに関する発表があり、X 線非弾性散乱から得られた誘電率から電子のスクリーニング効果や電子相関の大きさの議論がなされた。また、N. Hiraoka 博士 (NSRRC) からは遷移金属酸化物の dd 励起に関する系統的な角度依存性の測定結果が示された。

磁性に関する研究では、A. Juhin 博士 (Utrecht University) が K-edge の RIXS における MCD について報告した。鉄の K 吸収端の pre-edge に対応するエネルギーの左右円偏光 X 線を入射し、2p-1s の発光を測定すると (終状態は L-edge の吸収と同じ)、数%の MCD が観測されるそうである。一般に、3d 電子系の K-edge の MCD は非常に小さいが、この方法を使えばその欠点を補うことができそうである。

会議の最後の講演者であった Huotari 博士 (University of Helsinki) からは、炭素の 1s-2p 吸収に対応する X 線ラマン散乱を使ったトモグラフィーによるイメージングの結果が報告された。基本的に散乱強度が小さい X 線非弾性散乱はイメージングとは程遠い実験手法と考えていたが、実際にそれが示されたことは驚きであった。1s-2p 吸収の違いを通じて  $sp^3$  軌道と  $sp^2$  軌道を容易に区別できるようなので、有機物に対して威力を発揮できるイメージング手法となりそうである。

ポスター発表は講演会場のすぐ隣のフロアで行われた。Chemistry and Biology, Correlated Electron Systems, Earth and Planetary Science, Functional Materials, Liquids, Glasses and Gases, Magnetism, New Scientific Frontiers, Superconductivity and Related Phenomena の各分野に分類され、全部で80件程度の発表があった。ポスターは会議の期間中常時貼り出されていたため、コーヒーブレイクの時間などにも議論が行われていた。

昼食は会場内で食べることができ、フランスらしくワインが振舞われ、活発な議論がなされていた。また、会議のバンケットは13日の夜に、グルノーブル郊外の小さな城で開かれた。歴史を感じさせる良い場所で、夜中の12時

近くまで続いた。一応、筆者も参加したが、バンケットの次の日の朝一番（という最悪の時間？）に発表することになっていたので落ち着かなかったことと、時差ぼけで眠かったこととで、特に後半はあまり落ちていて楽しむことができなかった。

今回の会議は、順番からすれば、おそらく3年後の2013年に北米で開かれることになるであろう。筆者は2004年の Argonne の会議から参加しているが、実験装置の高性能化や研究分野の広がりなど、3年間での X 線非弾性散乱の発展は著しい。次の3年間の発展にも期待したい。

## 一口メモ

### プリムラ

サクラソウ科プリムラ属の宿根草であり、春を告げる代表的な花である。欧米では数種のプリムラ（セイヨウサクラソウ）があり、非常に多くの花色をもつので園芸種として愛好されている。日本でよく出回っているのは花色が豊富なポリアンタ、ボリューム感のあるオブコニカ、早咲きのマラコイデス、矮性のジュリアンである。暑さに弱いので夏は涼しいところに置き、株が腐らないようにする。一方、日本各地に自生するニホンサクラソウはプリムラの一つで学名では“*Primura sieboldii*”である。このほか、日本の山野にあるものとしてはオオサクラソウ、ハクサンコザクラ、エゾコザクラ、ユキワリソウ、コイワザクラなどがある。

昨年は政治と経済が激動して不安定な年でしたが、鈴木・根岸両先生のノーベル化学賞受賞、はやぶさの奇跡的な帰還、さらには絶滅種となっていたクニマスの生存の確認は明るい話題を日本社会に提供してくれました。本年はどのような年になるのかわかりませんが、科学・技術分野での予算はほぼ希望通りになりそうですので、日本から世界に質の高い研究成果が発信されることを期待しましょう。ところで、私は昨年末に、2050年までに30名の日本人ノーベル賞受賞者の出現を期待して文部科学省とJSTが企画・実施しているSSH（スーパーサイエンスハイスクール）指定校2つの高校の発表会に出席し、課題内容の高い発表を聞きました。今後、大学関係者にとっては彼ら・彼女らの独創的な能力を大学教育の中でどこまで伸ばしてあげられるかは重要な課題となるでしょう。

(No. 97, K. Ohshima)

