

## ■ 会議報告

## 第9回 X線非弾性散乱国際会議 (IXS2015) 参加報告

岡本 淳 (台湾 NSRRC)

IXS2015は2015年11月22日から26日にかけて台湾NSRRC(台湾新竹市)にて行われた(図1)。1992年にポーランドのKrakowで開催された第1回から数えて国際光年の2015年は第9回となる。参加総数は155名で、日本からは22名が参加した(図2)。NSRRCは、台湾唯一の放射光施設であるTLS(Taiwan Light Source)を運営しており、新竹市の半導体産業・文教地区である科学園区に位置している。正門前の通りの向かいには台湾の名門国立大学である交通大学、清華大学があり、利用研究者だけでなく運営に関わる研究室も多い。

4日間の会議は、硬X線領域での共鳴・非共鳴非弾性散乱(RIXS/NIXS)、軟X線領域のRIXS、Compton散乱、それらの理論研究、XFEL、高分解能RIXS装置の開発、エネルギー材料のIXS研究、高圧条件でのIXS研究といったトピックで構成された。

最初にJ. van den Brink氏(IFW Dresden)が、この10年におけるスピン・軌道の動力学研究における軟X線、硬X線領域のRIXS研究の進歩について基調講演を行った。進歩の理由として、高温超伝導銅酸化物、スピン軌道相互作用によるMott絶縁性を示すIr酸化物という興味深い物性を示す研究対象があったことを述べ、次のホットトピックとしてRIXSによる超伝導ギャップ研究を提示した。これを受けて、硬X線領域RIXS/NIXS研究については、Ir L<sub>3</sub>端RIXSによるIr酸化物のdd励起構造解析についてM. Moretti氏(ESRF)が、Cu K端RIXSによる高温超伝導酸化物のスピン、電荷励起については石井

賢司氏(JAEA)が中性子散乱との比較を講演した。A. Baron氏(RIKEN)はSPring-8 BL43LXUのmeV分解能IXS装置による高温超伝導酸化物のフォノン研究について講演した。光学系の開発ではY. Shvyd'ko氏(Argonne国立研究所)が、入射光エネルギー5-10 KeVでエネルギー分解能0.1 meVを目指したIXS分光器UHRIXについて講演した。

軟X線領域RIXS研究については、W.-S. Lee氏(SLAC)が高温超伝導銅酸化物のdd励起の高分解能RIXSによるCu 3d電子構造解析と、電子ドーブ領域でのParamagnon分散に関する研究について講演した。特に電子ドーブ領域のparamagnonとノンドーブ反強磁性体でのmagnon、ホールドーブ領域のparamagnonを比較することで、高温超伝導銅酸化物の相図での量子臨界点がホールドーブ領域と電子ドーブ領域の双方に存在することを示唆したのは興味深い。

Compton散乱については、J. Duffy氏(Warwick大)が強磁性を示す超伝導体UCoGeのスピン、軌道磁性についてXMCDとの比較研究を講演し、UとCoのスピンモーメントが反平行であることを示した。平岡望氏(NSRRC)は、SPring-8 BL12XUで開発したBent Laue分光器による10 keVの入射光でE/ΔE=5000-10000の超高分解能Compton散乱測定と、それで観測したグラフェンのバンド・ギャップ観測について報告した。

理論研究については、T. Devereaux氏(SLAC)が基調講演で、これまで報告されてきた強相関物質の素励起の



図1 会場のNSRRC Activity Center。奥に見えるのがTPSの入口。



図2 IXS2015参加者集合写真。

RIXS スペクトル解析において、電子 phonon 結合の寄与を考慮する必要があることを述べた。M. van Veenendaal 氏 (Northern Illinois 大) は、レーザーポンプ・プローブで電荷秩序が数100 fsec で解ける現象について、ボンド間の電荷 flip を考慮したモデルを用いて、単純な熱的ゆらぎとの違いを議論した。五十嵐潤一氏 (茨城大) は、tight binding モデルによる  $\text{Sr}_2\text{IrO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{IrO}_3$  の Ir  $L_3$  端 RIXS で観測される集合励起の解析について述べた。高橋学氏 (群馬大) は、純鉄の硬 X 線非共鳴 Raman 散乱で観測された MCD について解析し、入射角と磁化の角度に電気双極子、スピン磁気双極子、軌道磁気双極子遷移過程の比率が依存することから、角度が  $0^\circ$  で XAS での MCD シグナルが、 $135^\circ$  で Fe 3d spin モーメントに比例した MCD 積分強度が得られることを報告した。遠山貴己氏 (東京理科大) は電子ドープ高温超伝導銅酸化物 RIXS の低エネルギー励起について、磁気励起とみなした Lee 氏とは異なり、電荷励起スペクトル強度が強まるとの見解を示した。F. de Groot 氏 (Utrecht 大) はクラスターモデル計算を元に、X 線吸収分光 (XAS) スペクトルと軟 X 線発光分光 (XES) スペクトルの畳み込みで遷移金属 2p3d 遷移の RIXS スペクトルを解析する手法について紹介した。

RIXS による動力学研究では、M. Dean 氏 (Brookhaven 国立研究所) は、SACLA と LCLS で行った、光励起した  $\text{Sr}_2\text{IrO}_4$  の磁気相関と磁気秩序構造の研究について報告した。2次元  $\text{IrO}_2$  面内の Neel 相関が数 psec で回復したのに対し、3次元長距離磁気秩序は回復するのに数 100 psec を要したことを示した。A. Pietzsch 氏 (HZB) は、SLS の ADDRESS ビームラインで行った f sec での酸素原子周辺の水分子の構造、電子構造の変化について報告した。

エネルギー材料の IXS 研究については、その場もしくは動作中 (in-situ/operando) の XES 研究が取り上げられた。J.-H. Guo 氏 (ALS) は Co ナノ触媒、B. Barbiellini 氏 (Northeastern 大) は  $\text{LiFePO}_4$  電池、丹羽秀治氏 (筑波大) は非白金燃料セルの鉄フタロシアニンを対象に、電気化学反応に対応する電子構造の解析について紹介した。

会議で注目されたトピックに、軟 X 線領域の高分解能 RIXS 装置の開発がある。SLS (Swiss Light Source) が 2008年に 130 meV ( $E/\Delta E \leq 10000$ ) を達成して以来、強相関電子系物質の dd 励起やスピン、軌道、格子の集合励起の観測を目標に、高分解能軟 X 線 RIXS 装置の開発は世界の放射光施設で進められてきた。これら軟 X 線領域の装置開発の歴史と現状について、G. Ghiringelli 氏 (Milano 工科大学) が基調講演を行い、エネルギー分解能の向上で詳細なスペクトル構造観測が可能になっただけでなく、挿入光源と多層膜による偏光解析技術の進展で、入射光と散乱光での偏光解析が可能となったことが、強相関電子系物質の素励起研究に大きく貢献していることを強調した。RIXS 測定には高分解能とともに高い統計性が必要

である。SLS での高分解能 RIXS 測定ステーションを管理する T. Schmitt 氏 (PSI) は、回折格子や CCD 検出器の性能をあげることで、測定効率をこの 2年で 4倍に上げたことを報告した。N. Brookes 氏 (ESRF) は、彼の担当する ID32ビームラインで Ghiringelli 氏の協力で立ち上げた RIXS 装置 ERIXS が、会議直前の実験で Cu  $L_3$  端 (930 eV) で 35 meV,  $E/\Delta E$  で 30000 を達成したことを報告した。まさに次元の違う性能といえる。van den Brink 氏が指摘した超伝導ギャップの大きさは 70 meV であり、近い将来、研究成果が報告されるものと思われる。ESRF 以外の放射光施設でも NSRRC (D.-J. Huang 氏) だけでなく、NSLS-II (I. Jarrige 氏), Diamond (K.-J. Zhou 氏), ALS (Y.-D. Chuang 氏), MAX-IV (S.-W. Huang 氏) 等で、軟 X 線領域で  $E/\Delta E$  が 30000 以上を達成する高分解能 RIXS 装置の建設状況が報告された。日本は角度分解光電子分光による占有電子状態の研究や強相関電子系物質の生成には非常に優れているが、軟 X 線領域 RIXS 研究では装置開発も含めて世界に大きく立ち遅れており、非常な危機感を持って対応する必要があると実感した。

NSRRC は 2009年から 3 GeV の第 3 世代放射光施設である TPS (Taiwan Photon Source) を、現在稼働中の TLS の同敷地内に建設中である。2014年12月31日に最初の放射光の試射に成功し、2016年末までの第一期ビームライン建設で、7本のビームラインの立ち上げ、調整、ユーザー開放を計画している。三日目の昼休みに TPS サイトツアーが行われ、これら 7本のビームラインの見学が行われた (図 3)。IXS に密接に関係するものとしては 41A があり、軟 X 線領域で  $E/\Delta E \geq 40,000$  を目指した高分解能 RIXS ステーションを建設中である。

まとめて A. Bansil 氏 (Northeastern 大, USA) は、SLAC (USA) で行われた 2013年の会議から 2年間で、実験、理論、技術で X 線非弾性散乱研究が大きく進歩したことに言及した。次回の IXS 会議は、2017年にドイツの放射光施設 DESY, PETRA III で行われる。2年後、世界各地で開発された装置による、新しい X 線非弾性散乱研究結果が報告されることを期待する。



図 3 TPS サイトツアー。05A1蛋白質構造解析ステーションにて。