

物性研究所短期研究会

真空紫外・軟X線放射光物性研究の将来

日時：2013年5月28日(火)～2013年5月29日(水) 午後1:00～

場所：物性研究所本館6階 大講義室(A632)

研究会提案者：藤森 淳、木下 豊彦、雨宮 健太、奥田 太一、辛 埴、吉信 淳、小森 文夫

現在、大型の放射光施設である SPring8 やフォトンファクトリーをはじめとして、わが国の複数の放射光施設では、真空紫外・軟X線ビームラインの更新やエンドステーションの整備が進められている。これらの新しい実験ステーションでは、最新の技術を用いた光強度の増強、偏光特性の向上、波長領域の拡大や高エネルギー分解能化などにより、新物質や新物性の研究のための新しい実験手法が利用でき、精密な測定ができるようになると期待されている。しかしながら、整備計画と研究計画は各放射光施設が独自に立案し、各施設の関連研究者と議論を行っているのが現状であり、日本の放射光物性研究全体をみわたした検討はあまり行われていない。本短期研究会では、各放射光施設の整備状況と計画の報告に加え、大型の放射光施設として立案されている東北放射光施設構想の現状や海外の真空紫外・軟X線ビームラインの現状についても報告があり、日本の真空紫外・軟X線物性研究の将来について検討した。28日は81名、29日は71名の参加者があり、たいへん活発な議論があった。このような全国的な放射光物性研究の将来を関係者が一堂に会して検討し、それを物性研究コミュニティに発信できたことはたいへん意義があった。

プログラム

5月28日(火)

セッション1

- 13:00-13:25 01 雨宮 健太(PF)
軟X線深さ分解 XMCD による磁性薄膜の表面・界面の観察と磁性の制御
- 13:25-13:50 02 奥田 太一(広島大)
高分解能スピン分解光電子分光による固体表面スピン電子状態の観測
- 13:50-14:15 03 小嗣 真人(SPring-8)
放射光で見る L10-FeNi 磁性薄膜のナノスケール磁気物性
- 14:15-14:40 04 松田 巖(ISSP)
軟X線レーザーを用いた共鳴磁気光学カー効果実験に向けて
- 14:40-15:05 05 田口 宗孝(SPring-8)
共鳴X線磁気光学カー効果の理論

セッション2

- 15:25-15:55 06 大河内 拓雄(SPring-8)
光電子顕微鏡による磁気ダイナミクス研究と SPring-8 BL25SU における今後の計画
- 15:55-16:20 07 高橋 和敏(佐賀大)
SAGA-LS BL13 における時間分解光電子分光実験
- 16:20-16:50 08 早稻田 嘉夫(東北大多元研)
東北放射光施設計画の概要紹介
- 16:50-17:20 09 河田 洋(KEK)
ERL 計画及び cERL の現状

01 軟 X 線深さ分解 XMCD による磁性薄膜の表面・界面の観察と磁性の制御

雨宮 健太、酒巻 真粧子（高エネルギー加速器研究機構）

早いもので、軟 X 領域の深さ分解 XMCD (X-ray Magnetic Circular Dichroism) 法の開発から約 10 年が経過した[1]。この手法は、電子収量法による XMCD の測定において、電子の出射角によって実効的な脱出深度が異なることを利用して、原子層レベルの深さ分解能で表面・界面の XMCD スペクトルを内部層から分離することができるものである。当初は、Fe/Cu(100)における特異な表面磁性や、分子吸着や金属蒸着による表面磁性の変化などを「観察する」のが主眼であったが、最近ではアンジュレータの利用によって多少埋もれた界面でも感度よく観察ができるようになり、さらにそうした結果を磁性の「制御」に活かすことを念頭においた研究を進めている。

例えば最近、Ni/Cu(100)薄膜の表面に酸素原子が 1 層だけ吸着した状態に対して、表面の Ni 層が NiO に類似したスペクトルを与えることを明らかにしたが[2]、これは、NiO/Ni という非常に急峻な反強磁性／強磁性界面が作製できる可能性を示唆している。さらに最近、様々な厚さの Ni/Cu(100)上に成長させた Fe/Ni 多層膜に対して、Fe, Ni それぞれの層の磁気異方性を見積もり、面内方向の格子定数と比較することによって、面内方向に圧縮歪みを受けると Fe の面直磁気異方性が強まることを明らかにしたが[3]、この結果を活かせば、格子歪みを利用して Fe/Ni 多層膜の磁気異方性を制御することが可能になる。

本講演では、磁性の制御へつなげることを念頭におきながら、軟 X 線深さ分解 XMCD 法を用いた表面・界面観察に関する最近の研究結果を紹介する。

[1] K. Amemiya et al., Appl. Phys. Lett. 84 (2004) 936; K. Amemiya, Phys. Chem. Chem. Phys. 14 (2012) 10477.

[2] K. Amemiya and M. Sakamaki, Appl. Phys. Lett. 98 (2011) 012501.

[3] M. Sakamaki and K. Amemiya, Phys. Rev. B 87 (2013) 014428.

02 高分解能スピン分解光電子分光による固体表面スピン電子状態の観測

奥田 太一（広島大学放射光科学研究センター）

スピン分解光電子分光法は光電子のエネルギーと放出角度に加えスピンの情報も観測する事のできる実験手法で、これまで磁性体の研究で大きな役割を果たしてきた。近年ラッシュバースピン分裂状態やトポロジカル表面状態などスピン軌道相互作用の誘起する非磁性体のスピン電子状態の研究が盛んになり、スピン分解光電子分光が再び脚光を浴びている。しかしながらこれらの表面バンドのスピン分裂の大きさは、磁性体のスピン交換分裂の大きさに比べ大変小さいため、より高いエネルギー及び角度分解能での実験が求められている。我々は従来の Mott 型スピン検出器に比べ格段に効率の良い VLEED 型スピン検出器を用いた高分解能スピン分解光電子分光装置を開発し、従来の約 10 倍でのエネルギー及び角度分解能 ($\Delta E \sim 8 \text{ meV}$, $\Delta \theta \sim 0.2$ 度)でのスピン分解光電子分光測定を実現した。この装置は低エネルギー放射光施設である HiSOR に設置され、放射光のエネルギー可変性や偏光可変性を利用した実験が行えるようになっている。講演では、高い分解能を活かした実験例を紹介する。また、高い性能をさらに活かすために最近もう一台の VLEED スピン検出器を導入する事により高分解能スピン 3 次元解析を可能にした。その性能評価についても紹介するとともに、更なる高度化に向けた将来展望についても述べる。



05 共鳴 X 線磁気光学カー効果の理論

田口 宗孝 (理化学研究所、放射光科学総合研究センター)

磁気光学効果は、固体中の磁氣的性質が光の偏りに及ぼす効果である。これまでは、光源として可視～赤外領域の光が用いられおり、磁性研究に磁気光学効果の測定がよく使われてきた。最近では、光源のエネルギー領域が拡大し X 線領域での磁気光学効果測定も行われるようになってきている。今や、直線偏光や円偏光の X 線を用いた磁気光学効果測定は磁性薄膜が示す多彩な磁性研究における最先端の測定手段の一つとなっている。これは、磁気光学カー効果や磁気光学ファラデー効果に磁気モーメントの大きさやその方向などの磁気構造に関する有用な情報が含まれているためである。さらには、X 線の共鳴領域で測定を行うことで元素選択的な磁気情報を取り出すことも可能であるため、多元素からなる多層膜にて見られる複雑な磁気構造の解明にもとても有効である。それ故、X 線領域での共鳴 MOKE の基本的な理解を得ることは、実験から得られた多彩な磁気構造の情報を正確に取り出すためにもとても重要なことである。

本講演では強磁性 Ni 薄膜に対する Ni の M 吸収端領域での共鳴 X 線磁気カー効果についてクラスター模型による理論計算を行ったのでその結果について紹介する。計算にはクラスター模型を用い、カー回転角や楕円率の計算にはコヒーレントな二次光学過程の表式を用いて行った。この解析から中間状態での寿命の効果や Fano 効果などの重要性が明らかとなったのでその詳細について述べる予定である。

06 光電子顕微鏡(PEEM)による磁気ダイナミクス研究と SPring-8 BL25SU における今後の計画

大河内 拓雄 (高輝度光科学研究センター/SPring-8)

SPring-8 BL25SU の軟 X 光電子顕微鏡(SX-PEEM)では、マイクロ/ナノ構造体や薄膜の磁気ダイナミクス研究を進めている。この装置では、パルス幅 40~50 ps の放射光パルスをレーザーや高周波などの励起源と同期させることにより、約 100nm の空間分解能で時間分解磁気イメージングが可能である。現在は主に GdFeCo 垂直磁化薄膜の、磁場を用いないレーザー誘起高速磁化反転のダイナミクス解明を目指した研究が進行している。同時に、高周波や短パルス電流による磁区/磁壁運動の高精度観測を目的とした広範囲の測定技術開発も行っている。

さらに本講演では、本年度冬期から開始する BL25SU のアップグレード改造について紹介する。BL25SU は軟 X 線ビームラインとして共用開始から 15 年間運用し、高いエネルギー分解能($E/\Delta E > 10,000$)とツインヘリカルアンジュレーターによる円偏光スイッチングによって 300 報以上の原著論文をはじめとした数多くの成果を挙げてきた。SPring-8 では BL39XU や BL37XU など硬 X 線ビームラインのナノビーム化が進んでいるが、今回は本ビームラインでも 100nm 以下のナノビームアプリケーションブランチを新設し、磁石材料の微小組織内の元素別磁気測定(走査型 X 線顕微鏡)などの新規研究を展開する。既存ラインについても、デッキ上から床上へ再配置することで振動問題を解決し、微小試料の角度分解光電子分光や光電子回折を主力としたマイクロビーム利用を可能とするための基盤整備を行う。PEEM ステーションについても、高縮小比の放射光利用による統計精度の向上や、光チョッパー導入による実験ステーション横断的な時分割測定システムの利用環境構築など今後の開発の指針を紹介する。



09 ERL 計画及び cERL の現状

河田 洋 (高エネルギー加速器研究機構、ERL 計画推進室)

PF の次期光源計画として、回折限界硬・軟 X 線であると同時にサブピコパルス光源である ERL をベースにした根源の実現を目指して、2006 年度に ERL 計画推進室が発足した。厳しい予算状況の中、ERL の開発研究を進め、特にそれらの要素技術を確認する cERL の建設を進めてきている。機構として本当に cERL の建設を行うか否かを議論するために 2010 年 4 月に「ERL 評価専門委員会」を開催し (http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/erl_hyouka/index.html)、その技術開発方針と予算、マンパワーの実現性を評価頂き、2012 年度末までに運転を開始する計画を開始した。現在に至るまでの間には震災もあり若干遅れたが、1 ヶ月遅れで電子ビーム調整のための試運転に辿りついた。

当初、5GeV-ERL 計画で開始したが、運転経費、建設費の削減そして広く放射光コミュニティのエネルギー領域をカバーするために、3GeV 計画に変更すると同時に、2 回加速の特殊運転モードで前人未到の高繰り返し回折フリー限界光である共振器型 XFEL(XFEL-O) も射程にのせた計画に成長してきている。http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/database/ERL_CDR_full_text.pdf

4 月 15 日の週から電子ビーム運転(入射部のビームテスト運転)に向けて超伝導空洞の冷却を開始した。15 日の週は超伝導空洞の冷却とエージング等を行い、4 月 22 日から 26 日に、順にビームテスト運転を開始した。先ず 4 月 22 日には電子銃からの 390kV の電子ビームを確認し、23 日には 390keV の電子ビームが超伝導空洞を通過、24 日には入射部超伝導空洞の一つの 2 セル空洞だけに RF パワーを投入して、加速、そして、25 日には所定の 5MeV 迄の加速に成功した。26 日には 5MeV の電子ビームオプティクス調整を行なった上で、マクロパルス(1msec)で電流を増強も成功している。非常に順調に立ち上げを開始している。講演では、ERL 計画概要と今後の cERL での加速器技術の開発計画とそれを用いた利用研究に関して紹介する。

10 共鳴軟 X 線回折による遷移金属酸化物の磁気構造研究

和達 大樹 (東大工)

3d 遷移金属酸化物への実験手法として、最近共鳴軟 X 線回折(図 1)が急速に発展してきた。2p から 3d への吸収端のエネルギーの X 線を用いて回折実験を行うことで、3d 電子の軌道や磁気の情報を得ることができる手法である。2p 内殻の大きなスピン-軌道相互作用を用いることで通常の X 線散乱では強度の弱い磁気の情報が見られること、大きな共鳴により中性子散乱に比べ試料の体積がはるかに小さくても有効であることなど、これまでの散乱のデメリットを大きく克服した手法である。講演ではこの手法を用いて解明した、電荷整列を示すマンガン酸化物 $\text{Pr}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{MnO}_3$ 薄膜と $\text{Pr}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{MnO}_3/\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ 超格子の相転移[1]について議論する。図 2 に示すように、超格子では積層方向の 1 次元の相分離のため、大きなヒステリシスが観測されている。X 線自由電子レーザーを用いた今後の時間分解測定の実現にも触れたい。

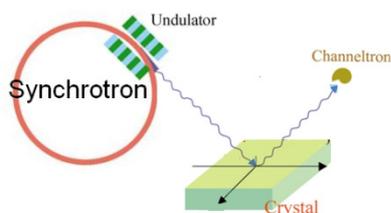


図 1: 共鳴軟 X 線回折の概念図

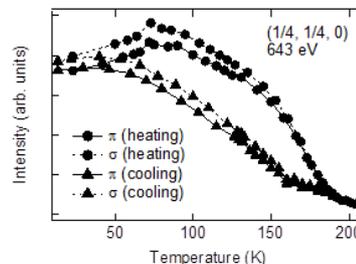


図 2: $\text{Pr}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{MnO}_3/\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ 超格子の整列ピーク(1/4, 1/4, 0)の強度の温度変化

[1] H. Wadati *et al.*, arXiv:1111.4725v1, arXiv:1304.0337v1.

13 遷移金属化合物の L 端共鳴非弾性 X 線散乱の理論

遠山 貴己 (京都大学基礎物理学研究所)

$3d$ 遷移金属化合物の遷移金属 L 吸収端での共鳴非弾性 X 線散乱(RIXS)では、内核 $2p$ 電子の $3d$ 軌道への励起を経て、 $3d$ 軌道間の電荷励起($d-d$ 励起)が観測される。また、 2 マグノン励起を伴った同一 $3d$ 軌道内励起が低エネルギー領域に現れる。最近、これらの励起に加えて、スピン反転励起(マグノン励起、パラマグノン励起)が観測され始めた。この励起はコア・ホールのスピン・軌道相互作用に起因することが知られている。銅酸化物高温超伝導体の母物質では、非弾性中性子散乱と一致する単一マグノン励起が観測されている。ホールドーピングされた YBCO 系ではドーピング依存性の小さなパラマグノン励起が報告されている。講演では、まず、 $t-t'-J$ 模型に対して高速衝突近似のもとで計算された RIXS スペクトルと YBCO 系の実験結果との比較を行い、パラマグノン励起の小さなドーピング依存性について考察する。電子ドーピング系に対する計算からはパラマグノン励起がドーピングとともに高エネルギー側に移動すること、ドーピングされたキャリアに由来する電荷励起が見えやすくなることを提案する。さらに、 $3d$ 遷移金属化合物の金属状態の RIXS の特徴を明らかにするため、鉄系ニクタイト系超伝導体[1]およびクロム[2]の反強磁性金属状態に注目する。 5 バンド・ハバード模型の乱雑位相近似に基づいて、 $3d$ 軌道の動的スピン・電荷感受率を計算し、 L 吸収端 RIXS スペクトルを求めた。スピン波励起の強度は、多軌道性による高エネルギー側の粒子・ホール励起よりかなり小さいが、実験的には観測可能と期待される。これらの結果に基づいて、 L 吸収端 RIXS の今後の発展方向について議論する。

[1] E. Kaneshita, K. Tsutsui, and T. Tohyama, Phys. Rev. B **84**, 020511(R) (2011).

[2] K. Sugimoto, Z. Li, E. Kaneshita, K. Tsutsui, and T. Tohyama, Phys. Rev. B **87**, 134418 (2013).

14 加速器ベース光源とレーザーベース光源の協働が切り開く新物性科学

腰原 伸也 (東工大 理工学研究科 物質科学専攻)

昨今の大型放射光光源とパルスレーザー光の組み合わせ技術の進展、コンパクトな高強度超短パルスレーザーによる X 線、パルス電子線発生技術の進歩、加えて X 線自由電子レーザーの登場、さらには高感度 2 次元 X 線、電子線検出器の導入によって、ピコ秒時間スケールはもとより、場合によってはフェムト秒スケールの構造変化を、オングストロームスケールでとらえることすら可能となってきた。我々はこの 5 年間、動的 X 観測装置を用いて、電荷移動錯体における光誘起強誘電性発現の構造科学的確認に続いて、その前駆現象としてのナノスケール CT ストリングダイナミクスの観測、強相関電子系 Mn 酸化物において光励起以外では実現不可能な新しい物質相 (Hidden Phase) の発見にも成功した。加えて、結晶のみならず溶液等の不規則系においても、物質系を適宜選択すれば時間分解局所構造解析と電子・スピン状態解析が同時に可能となるような技術 (動的 X 線分光測定法) も登場し、光触媒などの応用上も重要な反応過程のナノスケール構造ダイナミクスを議論する段階に至っている。また動的電子線回折や軟 X 線を用いることで、硬 X 線では困難な、ナノサイズ有機薄膜結晶の動的変化の観測も可能となりつつある[1]。以上の背景に基づき本講演では、時間分解構造解析技術の動向ならびにその物質科学的意味合いを実例に基づきながら解説する。そして時間が許す限り、非平衡状態にある物質の特性を最大限活かして行く上で、加速器ベースの各種ビーム源とレーザー光源の協働が生み出す果実の意味合い、さらには今後急速な発展が期待される軟 X 線領域の動的構造科学が果たす役割に付いて議論したい。

[1] M.Gao et al., Nature **496** (2013) 343-346.



15 軟X線自由電子レーザーによる表面化学反応の in-transit 観測

小笠原 寛人 (SLAC 国立加速器研究所)

The descent of soft X-ray free-electron laser brought new possibilities for the study of surface chemistry. Now we can follow the evolution of the bond distortions, weakening and breaking, using x-ray emission spectroscopy resonantly tuned to the core level with ultrashort soft x-ray pulses currently only available at Linac Coherent Light Source, SLAC National Accelerator Laboratory. In this presentation, I will give a brief introduction of our laser pump/soft x-ray FEL probe studies at SLAC and a future perspective in this field. At SLAC, we followed the ultrafast evolution of the bond distortions, weakening and breaking in the fs-laser stimulated desorption of CO from Ru(0001) using x-ray emission spectroscopy resonantly tuned to the oxygen core level. Different adsorption configurations were characterized by selective observation of electronic structure by x-ray emission spectroscopy comparing the measured time dependent energy shifts of the molecular orbitals in the valence band with theoretical results [1,2,3].

- [1] M. Dell'Angela, T. Anniyev, M. Beye, R. Coffee, A. Föhlisch, J. Gladh, T. Katayama, S. Kaya, O. Krupin, J. LaRue, A. Møgelhøj, D. Nordlund, J.K. Nørskov, H. Öberg, H. Ogasawara, H. Öström, L.G.M. Pettersson, W.F. Schlotter, J.A. Sellberg, F. Sorgenfrei, J.J. Turner, M. Wolf, W. Wurth, A. Nilsson, *Science* 339 (2013) 1302.
- [2] T. Katayama, T. Anniyev, M. Beye, R. Coffee, M. Dell'Angela, A. Föhlisch, J. Gladh, S. Kaya, O. Krupin, A. Nilsson, D. Nordlund, W.F. Schlotter, J.A. Sellberg, F. Sorgenfrei, J.J. Turner, W. Wurth, H. Öström, H. Ogasawara, *Journal of Electron Spectrosc.* 187 (2013) 9.
- [3] M. Beye, T. Anniyev, R. Coffee, M. Dell'Angela, A. Föhlisch, J. Gladh, T. Katayama, S. Kaya, O. Krupin, A. Møgelhøj, A. Nilsson, D. Nordlund, J.K. Nørskov, H. Öberg, H. Ogasawara, L.G.M. Pettersson, W.F. Schlotter, J.A. Sellberg, F. Sorgenfrei, J.J. Turner, M. Wolf, W. Wurth, H. Öström, *Phys. Rev. Lett.*, 110 (2013) 186101.

16 雰囲気X線光電子分光法を用いた触媒反応研究の現状と将来

山本 達 (東京大学物性研)

X線光電子分光法(XPS)は、元素選択性・定量性・化学的環境に敏感といった特徴を持ち、物質表面の電子・化学状態を分析する上で非常に強力な手法である。しかし、気体雰囲気下では電子は散乱のため平均自由行程が短く、従来 XPS 測定は真空中に限られていた。これに対し、現実の触媒反応は大気圧もしくはそれ以上の圧力の気体雰囲気下で進行している。これまで超高真空中の単結晶表面を用いる伝統的な表面科学的手法により得られた知見が気体圧力が十数桁も異なる現実の反応条件下に外挿できるのかという問題("Pressure gap")が指摘されており、気体雰囲気下の化学反応をその場で *in-situ* または触媒動作条件下 *Operando* で観察することのできる実験手法の開発が強く求められている。近年、第3世代高輝度放射光源の発展と多段差動排気型電子レンズ利用した新たな電子分光器の開発により、数 Torr から 100 Torr の気体雰囲気下での XPS 測定が可能になってきた。[1-4]

本講演では、この雰囲気下光電子分光法(Ambient pressure XPS; AP-XPS)の原理、及び世界の AP-XPS を用いた最新の研究動向を紹介し、講演者らが現在 SPring-8 東京大学ビームライン BL07LSU において導入を進めている AP-XPS 装置を含めた今後の研究展望について述べたい。

- [1] M. Salmeron and R. Schlögl, *Surf. Sci. Rep.*, 63, 169-199 (2008).
- [2] S. Yamamoto, H. Bluhm, K. Andersson, G. Ketteler, H. Ogasawara, M. Salmeron, A. Nilsson, *J. Phys.: Condens. Matter*, 20, 184025 (2008).
- [3] S. Kaya, H. Ogasawara, L.-Å. Naslund, J.-O. Forsell, H. S. Casalongue, D.J. Miller, A. Nilsson, *Catalysis Today*, 205, 101-105 (2013).
- [4] D.E. Starr, Z. Liu, M. Hävecker, A. Knop-Gericke, H. Bluhm, *Chem. Soc. Rev.*, in press (2013).

17 *In situ*オペランド軟 X 線発光分光の将来構想

原田 慈久 (東大物性研)

この数年で、軟 X 線発光分光は急激な高分解能化競争が始まり、エネルギー分解能が $E/\Delta E > 5000$ もしくは 100 meV オーダーの様々な素励起を観察することが可能となった。偏光依存性も取り入れることでマグノン、スピノン、オービトンの分散や対称性、内殻励起に伴う局所的な振動励起などが議論されるようになった[1,2]。一方で、測定対象を選ばないというこの分光法の利点を最大限活かすために、従来の固体材料から溶液、固液界面、ガス吸着、触媒反応などへ測定対象を拡張するための装置開発も世界中で精力的に行われている。薄膜を用いる方法[3]、ジェットを用いる方法[4]などにより、高真空を必要とする軟 X 線分光に大気圧の気体や溶液を導入することが可能となり、元素弁別した電子状態観測が行われ始めている。本講演では、世界に先駆けて超高分解能軟 X 線発光分光器と *in situ*/オペランド分光を組み合わせた東大ビームライン BL07LSU の HORNET ステーションのこれまでの取り組みについて紹介し、さらに測定の自由度を広げるための差動排気システムの導入と今後の研究の狙いについて説明する。

18 軟 X 線吸収分光法による溶液中の電気化学反応のオペランド観測

長坂 将成 (分子科学研究所)

溶液中の電気化学反応を理解するうえで、電気二重層を含む電解質溶液の構造を調べるのが重要である。軟 X 線吸収分光法(XAS)は液体・溶液の局所構造を調べる上で有用な手法である。最近、我々は透過法による液体の XAS 測定を可能にする液体セルを開発した[1]。そして様々な液体・水溶液の局所構造を C-K, N-K, O-K 端の XAS 測定から明らかにした。本研究では、この液体セルに電極を備えることにより、電位変化による電解質溶液の局所構造変化をオペランド観測することが可能な XAS 測定システムを開発することを目的とする。そして硫酸鉄水溶液の電気化学反応における、鉄イオンの価数変動を Fe-L 端の XAS 測定により調べる。

実験は UVSOR-III の軟 X 線アンジュレータビームライン BL3U で行った。液体薄層は 2 枚の Si_3N_4 メンブレン(100 nm 厚)で挟み、外側の空間を流通するヘリウムの圧力を調整することで、液体層の厚さを $20 - 2000 \text{ nm}$ の範囲で制御可能である[1]。この液体層に電位変化のための電極を設置した。作用極は金を蒸着した Si_3N_4 メンブレンを用いた。対極には白金メッシュを用いて、参照極には飽和 KCl 溶液で満たした Ag/AgCl 電極を用いた。液体層は常圧のヘリウムの周りであるため、電気化学反応の XAS によるオペランド観測が可能である。

この測定システムを用いて硫酸鉄水溶液の Fe-L 端の XAS 測定を異なる電極電位で行った。電位上昇による Fe(II)から Fe(III)への酸化過程が、電位変化に対して非線形に起こるのに対して、電位下降による Fe(III)から Fe(II)への還元過程は、線型の変化をすることが分かった。以上の XAS 測定の結果と異なる掃引速度のサイクリックボルタメトリーの結果を比較することにより、この酸化還元過程のメカニズムについて考察する予定である。

また液体層を 20 nm まで薄くすると、固液界面を強調した XAS 測定が行える。電気化学反応における、電極の固液界面の局所構造を元素選択的に測定することはこれまで難しかった。本測定システムを用いた電極固液界面のオペランド観測の可能性についても議論する予定である。

[1] M. Nagasaka *et al.*, J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **177**, 130 (2010)



21 SSRL ARPES ビームラインの現状と将来

橋本 信 (SLAC National Accelerator Laboratory)

SSRL の BL5-4 はアンジュレーターと NIM(normal incidence monochrometer)からなる高分解能 ARPES 専用のビームラインである。これまで、高温超伝導体を主とした強相関物質およびトポロジカル絶縁体などの電子状態の研究に用いられてきた。現在、最先端の ARPES 実験環境を実現するため、新たな分枝ビームライン、BL5-2 及び偏光制御可能なアンジュレーターの建設が進行中である。PGM (plane grating monochrometer)を用いたこの分枝ビームラインは 20 – 200 eV をカバーし、BL5-4 (7 – 35 eV)と相補的な ARPES ビームラインとなる。また、この新たな ARPES エンドステーションでは、PLD 及び MBE で作成された酸化物薄膜の *in-situ* ARPES 測定、さらにはスピン分解 ARPES も可能になる計画である。BL5-4 の現状とあわせて、このような BL5-2 の計画を紹介する。

22 あいちシンクロトロン光センター-BL7U の現状

伊藤 孝寛^{1,2}、中村 永研^{2,3}、曾田 一雄¹、野本 豊和³、田淵 雅夫²、朝倉 博行²、竹内 恒博⁴、
渡邊 信久^{1,2}、桜井 郁也²、真野 篤志^{2,3}、岡本 渉^{2,3}、野内 三夫³、竹田 美和^{3,2}、馬場 嘉信^{1,2}
(¹名古屋大学工学研究科、²名古屋大学シンクロトロン光研究センター、
³科学技術交流財団シンクロトロン光センター、⁴名古屋大学エコトピア科学研究所)

あいちシンクロトロン光利用センター(AichiSR)は、平成 25 年 3 月に共同利用を開始した産学行政の共同研究拠点である愛知県「知の拠点あいち」の中核施設であり、名古屋大学シンクロトロン光研究センターが中心となり立ち上げを進めてきた。AichiSR は当初整備ビームラインとして硬 X 線 XAFS、軟 X 線 XAFS、真空紫外分光、小角散乱、粉末回折、表面界面の 6 本を有しており、3 月から 3 本のビームラインの共同利用が開始され、残りのビームラインについても順次共同利用を開始すべく整備をすすめている。中でも真空紫外分光ビームライン BL7U は、AichiSR において材料化学状態・構造分析ビームラインとして位置づけられるアンジュレータビームラインであり、 $h\nu = 35 \sim 1000$ eV で分解能 5000 以上、試料位置における光フラックス 10^{12} photons/sec 以上を目標とした光学設計に基づき、分光系の立ち上げ、調整を行なっている。

AichiSR BL7U におけるエンドステーションは VUV-SR XAS および PES 測定を行う試料分析槽と試料表面評価・処理槽から構成される。光電子分析器は MBSscientific 社製 A-1 アナライザーを用いており、広い光電子取り込み角度($\sim 38^\circ$)、MCP2 次元検出を合わせた高効率測定が可能である。試料温度は試料冷却用 GM 冷凍機により 8 ~ 400 K の範囲で制御可能である。講演では試料表面評価・処理系の仕様も併せて紹介する。



23 PFにおけるVUV-SXビームライン整備計画

組頭 広志 (KEK-PF)

現在、PFにおいては、挿入光源ビームラインであるBL28、BL2、BL13、BL16にリソースを集中し、「PFの特性を生かしたサイエンス」を発展させるためのUV-SXビームラインおよびエンドステーションの整備計画を進めている。具体的には、BL28では強相関電子系などの固体物性研究を推進するために、挿入光源を更新し、偏光切り替えを用いた高性能角度分解光電子分光ステーションとして整備する。BL13では、挿入光源を更新することで、主に内殻分光を用いた表面化学研究用ビームラインとして整備を進めている。また、ブランチラインを新設することで、BL16と併せたエンドステーションの最適化を検討中である。

BL2では長直線部を有効活用して、VUVとSXを高いレベルで融合することにより、高分解能・高強度を保ちながら、広いエネルギー領域の光を利用することが可能な表面・界面物性研究用のビームラインとして整備を進めている。具体的には、新規にVUV領域アンジュレーター(30-300 eV)を追加設置し、既存のSX領域(300-2000 eV)のものとタンデム配置で使用することにより、広いエネルギー範囲をカバーしたVUV-SXビームライン(BL2A、BL2B)を建設中である。BL2Aにおいては、エンドステーションとしてin-situ高分解能(角度分解)光電子分光・X線吸収分光専用ステーションを設置し、機能性材料の表面・界面物性の研究を推進する。これにより、主に、Liイオン電池等のエネルギー変換材料、ユビキタス元素からなるグリーンデバイスなどの環境材料、元素戦略に基づいた革新的電子材料、酸化物ヘテロ構造などの新機能性材料、の研究を推進していく予定である。

24 UVSOR-IIIにおける真空紫外物性研究の現状と将来 at UVSOR-III

木村 真一 (分子研 UVSOR 施設)

UVSORは、2003年度と2012年度の2度の改造によって、電子ビームのエミッタンスが紫外光の回折限界である15 nm-radに達している[1]。また、フルエネルギー入射の開始と放射線遮蔽シールドの完備により、ビーム電流300mAでのトップアップ運転を行なっている。これらに改造によって、1 GeV以下の小型放射光源に分類される中では、最も輝度が高い光源加速器の1つになった。現在は主力光源として6台の真空紫外・軟X線アンジュレータが稼働しており、そのビームラインとして、固体や薄膜の角度分解光電子分光、軟X線顕微鏡、液体の吸収分光、気体の光電子分光等の研究が推進されている。最も古いアンジュレータラインであるBL5Uでは、FEL実験と併用した円偏光アンジュレータと定偏角球面回折格子分光器(SGM-TRAIN)が約18年前から使われてきたが、2012年度補正予算で、光源・分光器・エンドステーションのビームライン全体の更新が認められた。このビームラインでは、光源にAPPLE-II型アンジュレータ、分光器にMonk-Gillieson型可変偏角不等間隔平面回折格子分光器、エンドステーションにスピン・角度分解光電子分光装置を設置し、励起光エネルギー20-200 eVで電子スピンと軌道対称性を分離した三次元角度分解光電子分光を行う計画である。また、光を試料上で直径10 μm以下に絞ることができる顕微光学系も設置し、従来の固体や表面などの均質な試料以外の機能性材料の電子構造研究への拡張も可能にする。このビームラインは、2014年度にユーザー利用を開始する予定である。

[1] 加藤政博、放射光 24, 175 (2011).