

Swiss Light Source でのリモート計測体験記

小林 正起

東京大学 大学院工学系研究科 電気系工学専攻

東京大学 大学院工学系研究科 スピントロニクス学術連携研究教育センター

要旨

2019年末から続く新型コロナウイルス感染症によるパンデミックにより、国内出張および海外渡航の制限がかかり、国内外での放射光実験が困難な状況が生じた。この状況下においては海外の放射光施設へ直接赴いて実験を実施することが困難なために、リモートで放射光施設でのビームを用いた計測を行えるシステムの開発・整備が急速に発展した。スイスの放射光施設 Swiss Light Source ではもともとビームラインサイエンティスト用に整備していたリモート接続システムをユーザーが使用できるようにして、国外からでもビーム実験を実施可能となった。本記事では、著者が実際に体験した、スイスの放射光施設 Swiss Light Source の軟X線ビームライン ADRESS における軟X線角度分解光電子分光のリモート実験について紹介する。

0. はじめに

著者は 2011 年 4 月より、Swiss Light Source (SLS) の軟X線ビームライン ADRESS に日本学術振興会特別研究員として滞在しする機会を得た。SLS ではビームラインサイエンティスト Dr. Vladimir N. Strocov の指導のもと、当時、建設が完了した直後の軟 X 線角度分解光電子分光 (SX-ARPES) エンドステーションにて、SX-ARPES により強磁性半導体 (FMS) や鉄系超伝導体の電子状態を調べる研究を行った。2017 年 3 月より現職に着任した後も Strocov 氏との共同研究を続けており、年 1~2 回の頻度でビームタイムを獲得し、FMS や遷移金属酸化物などの機能性電子材料を用いた薄膜・ヘテロ構造の電子状態解析の研究を行なっている。本記事では、ADRESS ビームラインや SLS でのリモートシステムについて紹介し、2020 年および 2021 年に行なったリモートでのビーム実験の体験について述べる。

1. ADRESS ビームライン

軟X線は 100 – 2000 eV 程度のエネルギー帯の X 線であり、このエネルギー範囲には 3d 遷移金属の 2p 内殻準位や酸素及び窒素等の軽元素の 1s 内殻準位が存在しており、3d 遷移金属化合物における磁性、金属絶縁体転移や超伝導並びに巨大磁気抵抗などの特異な物性の起源を調べる研究において重要なエネルギー領域である。真空紫外-軟X線領域の輝度が高い中型の放射光施設は世界中に多く存在している：イギリスの Diamond, フランスの SOLEIL, イタリアの ELETTLA, ドイツの DESY-HASYLAB、スイスにある SLS、台湾の National Synchrotron Radiation Research Center (TPS) とブルックヘブンの National Synchrotron Light Source (NSLS-II) などが例として挙げられる。現在、日本では新しい中型の第3世代放射光施設である NanoTerasu の建設が進められている。

スイスにある Paul Scherrer 研究所の放射光施設である SLS には全部で 12 のビームラインがあり、ADRESS (Advanced REsonance Spectroscopy) はそのうちの軟X線専用ビームラインである。このビームラインでは APPLE II 型の挿入光源[1]を採用しており、縦横の直線偏光に加えて左右円偏光を利用することができます。エネルギー分解能に関係する回折格子は、現在、刻線間隔が 800 line/mm のものが主に使用されており、1 keVにおいて分解能 $E/\Delta E > 10\,000$ (Cu L 吸収端で 100 meV 以下) が達成されている。ADRESS には軟X線発光分光 (Super Advanced X-ray Emission Spectrometer: SAXES) と軟X線光電子分光 (Soft X-ray Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy: SX-ARPES) (図 1) の 2 つのエンドステーションが連なっている[2]。下流にある軟X線発光分光装置での実験の際には、軟X線光電子分光装置のマニュピレータ及び再集光ミラーを退避させることで光を下流まで通す仕様になっている。再集光ミラーは特徴的な Hexapod (Oxford-FMB 社製)と呼ばれる六本足の台で制御されており、その精度は並進移動に対して 1 μm、回転移動に対して 1 mrad と高精度でかつ位置の再現性も良く、エンドステーションの切り換え時に再集光ミラーの調整にはほとんど時間が掛からない。再集光後の試料上でのスポットサイズは、SX-ARPES で 34×74 μm, SAXES で 3.9×52 μm である[2]。

2. SLS でのリモート計測システム

SLS では NoMachine [3]を用いてビームラインのパソコンへ接続し、リモートデスクトップ操作ができるように整備されている。ビームラインのパソコンでは、バルブやシャッターのインターロックに関連する数値の確認とビームラ

インの制御、またはビームライン毎に専用の測定システムの操作が可能である。コロナ禍の前には、実験中のユーザーからビームライン担当者へ問い合わせがあった際に、ビームライン担当者が自宅またはオフィスから外部パソコンでビームラインのパソコンへリモートアクセスして、現場に赴くことなくトラブルを解決するなどに使われていた。コロナ禍以降では、ビームライン担当者の許可が得られれば、ユーザーも NoMachine を用いてビームラインのパソコンへリモート接続することが出来るようになった。著者はこのシステムを用いて日本にある自宅のパソコンからスイスの ADRESS ビームラインのパソコンへ接続して、実験を行なった。

3. SX-ARPES エンドステーション

ADRESS の SX-ARPES 装置は、半球型の光電子分析器 Phoibos 150 (SPECS 社製)を採用しており、広い運動エネルギー範囲に渡って均一な角度分解光電子分光イメージを得ることが可能である。X線の侵入長と光電子の検出深さを考慮して光電子放出量を稼げるよう、分析器は鉛直から 20 度の角度（試料に対して入射角が 70 度）で設置されている [図 1(b)での $\alpha=20^\circ$]。試料を乗せるマニュピレータは CARVING を用いており、独立した三軸の併進移動と三軸の回転 [図 1(b)の x, y, z, Tilt, Theta, Phi] が可能でその精度は並進に対して 10 μm 、回転に対して 0.05 度である。輸送チェンバーには測定チャンバーの他に準備チャンバーと繋がっており、そこではガス雰囲気下での加熱やイオン銃によるスペッタリングを行うことが可能である。

SX-ARPES 装置での実験については、SLS のソフトウェアチームが開発した独自のユーザーインターフェースが用いられている。リモート計測において特にユーザーインターフェースが重要だったので、紹介する：

- (1)搬送用インターフェース（図 2(a)）。搬送位置や試料固定のためのネジ締め位置などが予め設定されており、ボタンを選択することで位置を変えられる。輸送チャンバーと計測チャンバー間のバルブの開閉や真空度、試料位置の座標が表示されている。試料位置を記憶すれば、その位置を中心に回転操作を行うことが可能である（回転中心からのずれを考慮して、常に同じ位置にビームが当たるように面内座標を動かして試料位置を補正する）。
- (2)試料位置調整用カメラシステム（図 2(b)）。ビームライン上流方向から試料を映したカメラ。ビーム位置に画面上の十字マーカーを置くことが出来る。
- (3)計測用インターフェース（図 2(c)）。計測には Phoibos の計測アプリケーシ

ョンそのものではなく、ソフトウェアチームが開発したユーザーインターフェースが用いられている。計測インターフェースではリアルタイムでの計測が可能で（図 2(c)）、こちらは試料の位置調整などに用いられる。また、ベクトル指定で測定を設定できて、例えば入射光のエネルギー依存性を測定する場合はエネルギーの欄に〔(初期値) : (エネルギー間隔) : (最終値)〕のように入力する。光のエネルギーや角度依存性などをベクトル計測した場合、データは3次元のブロックデータとして保存される。また、複数の測定を一度に設定することが可能で、ロングスキャンにも対応している。ロングスキャン中にビームダンプがあると、途中で測定を止めて、ビームが回復した際にその測定から再開するように設定されている。

(4)データ解析アプリケーション。ADRESS では、測定後に保存される2次元または3次元データを即座に表示・解析するための MATLAB[4]ベースのアプリケーションが用意されている。このアプリでは、3次元マッピングの2次元切り出し (ex. Fermi 面マッピング)、共通バックグラウンド除去、Fermi 準位を基準とした結合エネルギー補正、などが可能で、処理したデータを保存することも出来る。

4. 薄膜試料におけるリモート計測

ADRESS の SX-ARPES 装置では、板型のサンプルホルダー（通称オミクロンタイプ）を採用している（図 3）。幸い、著者の研究室で同型のサンプルホルダーを使っているので、日本で試料を準備して、それを SLS へ郵送した。当時は、コロナ禍で海外への郵送に時間を要しており、国際速達便を使っても日本から SLS へ届くまでに約 2 週間かかった。

リモートでのビーム実験に際して、現地のポスドク研究員の Dr. Prokopios Constantinou が、試料ホルダーを Load Lock チャンバーへ入れて（図 3(a)）、メインのマニピュレータへの搬送（図 3(b)）、試料準備チャンバーでの薄膜試料のアニーリング、および試料の位置出しのサポートを担当した。著者は、デュアルディスプレイを使って自宅のパソコンから計測用のパソコンおよびビームライン制御用のパソコンへリモート接続し（図 4）、Skype で現地の方と連絡を取りながら実験を実施した。試料をメインチャンバーへ搬送して試料位置を出した後は、ユーザーインターフェースを用いてオンラインからの操作だけで測定を実行することができた。リモート実験では、試料交換などは現地スタッフがいるスイス時間の日中になるようにして、それ以外の時間は長時間測定をかけるよう

にして実験を進めた。

リモート実験では現地に行くのとは勝手が異なる点がいくつかあると感じた。まず、薄膜試料の表面処理や試料交換など現地の人の協力が必要不可欠であることが挙げられる。現地の方の勤務時間中に長時間計測できる状態にするする必要があるため、測定可能かわからない・表面処理が難しいような挑戦的な試料はリモート実験にはあまり向かないように思った。また、時差がかなり辛いと感じた。日本ースイスでは時差が7時間（サマータイム中）あり、日本に滞在して実験ができるために体内時計は日本時間のままなので、ビームタイムに合わせて休むことやスイス時間の夜から測定ができる状況（日本時間で明け方）は身体的な疲労が大きかった。

以上の点は困難であったが、リモート計測の良い点もあると思った。リモート実験では、Zoomの画面共有などを利用すれば多くの人と実験状況を共有できた。画面共有により、実験中に共同研究者と相談しながら測定する、または複数の学生に実験に参加してもらうことが可能であった。特に、放射線従事者登録をしていない研究者・学生に放射光実験の様子を共有できたことは、得難い経験だったようだ。また、現場に行く必要がないので、出張準備や移動のための時間が節約でき、旅費もからないことは利点だと感じた。リモート計測では、はじめは思うように実験ができなかったが、リモート実験に慣れてきてデータを順調に得られるようになってからはとても効率の良い実験であると思えた。

5.まとめと所感

リモート接続での Swiss Light Source での SX-ARPES 実験は、時差や試料の搬送などの困難さはあるが、便利で効率的な測定方法のように思われる。特に画面共有を利用して共同研究者に実験に参加してもらえることは、利点のように思えた。リモート実験では、現地スタッフに協力をしてもらうために、測定しやすい試料構造の選定や表面処理条件の確立などの事前準備が重要になる。著者は、2020年と2021年で2回のリモート実験を行ったが、リモート接続に登録するパソコンを一台ではなく複数台にして、何人かでオペレーションをするべきだったことは反省点である。SLSではソフトウェア専門のチームがあり、非常に使いやすい洗練されたユーザーインターフェースが準備されていたので、リモート計測を無理なく実施することができた。

リモート実験は、現地の装置を知っている方や放射光実験の経験が豊富な方には、とても効率的で良い方法であるが、初心者にはハードルが高い。また、挑

戦的な実験では、現地に赴いて実験をする必要がある場合もあるように思われる。リモート実験の経験を通しての私見としては、リモート計測にも一長一短があるので、今後は、現地へ赴くチームとリモートで参加するチームとのハイブリッドのような形式を選択できると良いのではないかと思う。

参考文献

- [1] S. Sasaki *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, **331**, 763 (1993).
- [2] V. N. Strocov *et al.*, J. Synchrotron Radiation **17**, 631 (2010).
- [3] <https://www.nomachine.com/>
- [4] <https://jp.mathworks.com/products/matlab.html>

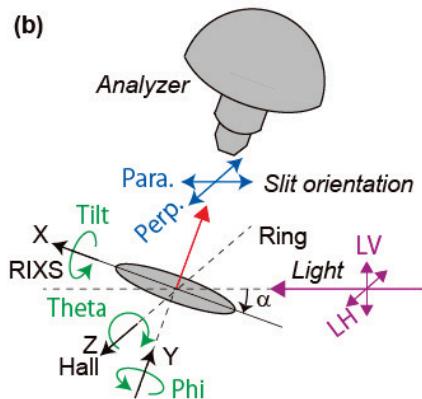
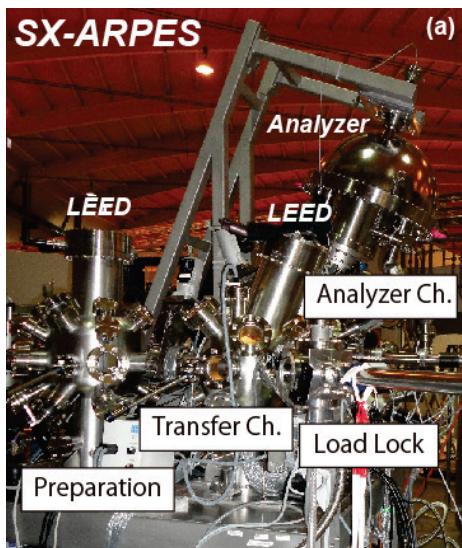


図 1. ADDRESS ビームラインの SX-ARPES エンドステーション. (a)光電子分光装置. (b)測定配置図. 6 軸のマニピュレータが備わっている.

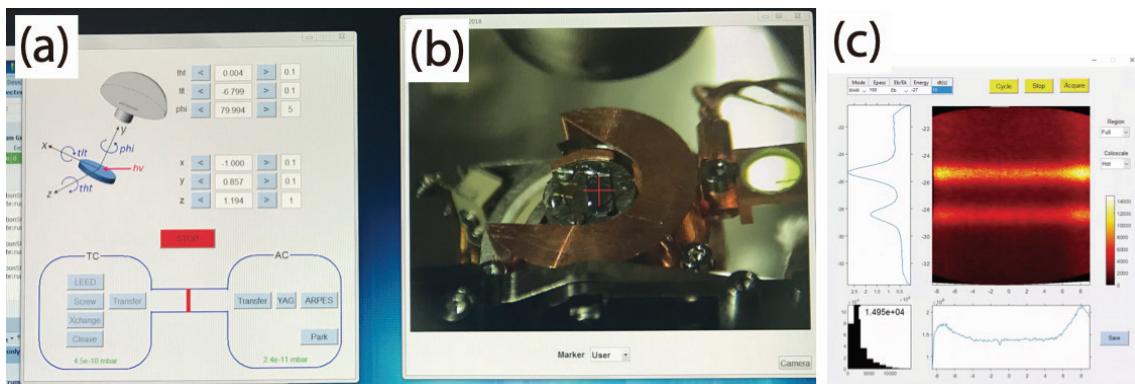


図 2. ADDRESS でのユーザーインターフェース. (a)試料搬送用インターフェース. (b)試料位置調整用カメラシステム. 十字のマーカーの位置がスポットを表す. (c)計測システム. ARPES のイメージをリアルタイムで確認できる.

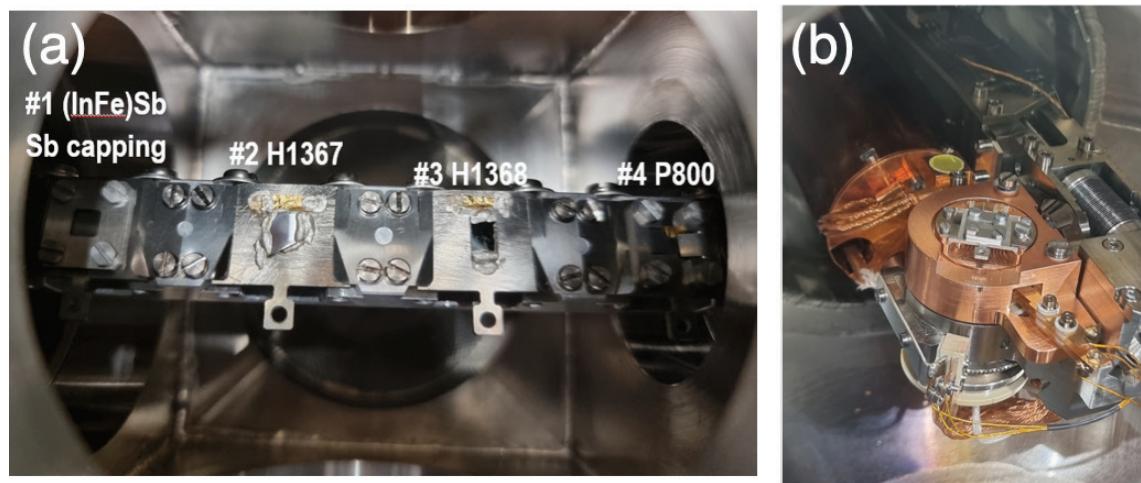


図 3. SX-ARPES 装置での試料搬送. (a) Load Lock チャンバー. (b)メインマニピュレータへの試料搬送.

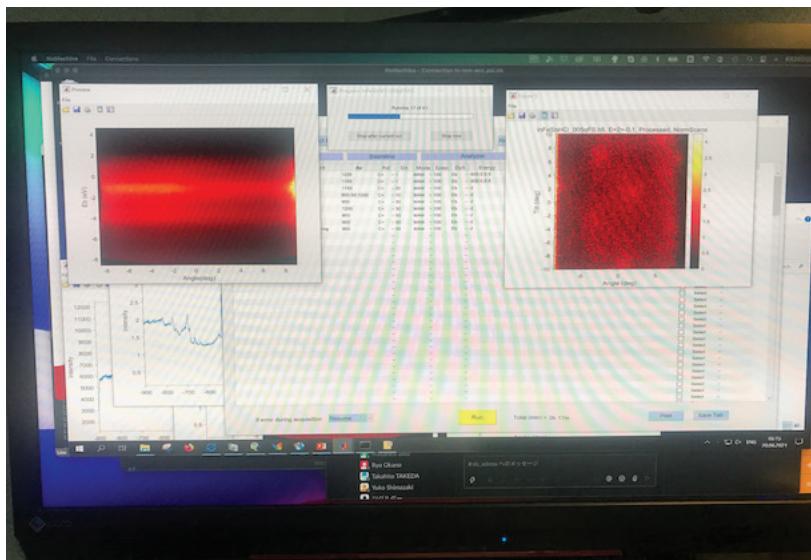


図 4. リモート実験中のデスクトップの様子.