

コロナ禍での MAX IV でのリモート実験

坂本一之

大阪大学 大学院工学研究科 物理学系専攻

2020年1月30日に国際的に懸念される国際衛生上の緊急事態とWHOに宣言された新型コロナウイルス感染症は、同年2月11日に正式名称をCOVID-19と命名され、その1ヶ月後の3月11日には流行の拡大がパンデミックとみなされると表明されました。このCOVID-19のパンデミックに対処する方針として、多くの国がロックダウンに入りました。日本では、ロックダウンにこそならなかったものの、他国へ移動のみならず他都市への移動も制限されることとなり、多くの研究者が共同研究や研究発表などに関して、また大学教員は講義に関しても大幅な制約を受けることとなりました。大阪大学では、文部科学省のガイドラインに沿って2020年前期は講義と学生実験を全てオンラインで行い、同年後期からは受講者数を教室の収容人数の2/3を上限としての対面とオンラインを併用して行い、2021年度からは講義が収容人数の制限はあるものの基本対面で行われるようになってコロナ禍以前に戻りつつあります。研究に関しては、活動を後退させてはいけないという観点から、受入機関の了解があれば放射光施設の利用や共同研究のための国内の移動に大きな制約は当初からありませんでした（少なくとも私はなかったように感じました）。そのおかげで、パンデミック以降も国内の放射光利用や共同研究は以前とあまり変わることなく行うことができました。しかし、パンデミック以前は気軽に行けていたElettra、MAX IV、BESSY II、SOLEIL、SLS、PLS-IIなどの海外の放射光施設や、欧米やアジアの大学や研究機関には、海外でのロックダウンと日本からの厳しい渡航制限のため実質不可能となってしまいました。ロックダウン中は海外でも国間・都市間を移動ができないため、日本の放射光ユーザーのみならず海外のユーザーも放射光を利用した研究を継続できない状態となりました。この問題を解決するため、多くの放射光施設ではパンデミックにより来所出来なくなったユーザーに試料を送ってもらってZOOMなどで議論しながらビームラインスタッフが測定する方法や、ビームラインの測定PCへユーザーがリモート接続することによってユーザーが自らのオフィスにいながら測定する方法といったリモート実験が行われるようになりました。（放射光施設のリモート実験への取り組みに関しては、イタリアのElettraでビームラインサイエンティストとして活躍されておられるCNR-IOMの藤井純さんが執筆された昨年のニュースレターの記事をぜひご覧下さい。）

パンデミックが表明されてから1年過ぎたあたりから、COVID-19の陰性証明書や入国時（外国入国時と日本帰国時）の検疫隔離などが課されるものの、大阪大学ではどうしても必要な場合は海外出張が認められるようになりました。私の研究では、超高真空槽内で蒸着により作製した原子層厚さの試料を測定することが多いのですが、このような試料は一度大気に晒すとその物性が大きく変わってしまいます。そのため、作製した試料を郵送してビームラインスタッフにセットしてもらう方法でのリモート実験を行うことはほとんど不可能です。これは、実験を遂行するためには現地での試料作製が不可欠であることを意味し、大阪大学の“どうしても必要”に該当するということで久しぶりに海外放射光を利用することを考えました。幸いにも COVID-19 のために有効期間が延長された MAX IV の Bloch ビームライン（高分解能角度分解光電子分光用ビームラインで、現在稼働中の ScientaOmicron 社 DA-30 L 光電子分析器を備えたブランチと、建設中のスピン・角度分解光電子分光用ブランチに STM も併設されているビームラインです。ビームラインオプティクスやエンドステーションに関する詳細は <https://www.maxiv.lu.se/beamlines-accelerators/beamlines/bloch/> をご参照下さい）を用いる課題があったことと、スウェーデン政府による日本からスウェーデンへの入国禁止措置が2021年6月14日に解除されたことで、現地スタッフと打ち合わせてコロナ禍ではあるものの2021年10月末に学生と一緒にスウェーデンに向かうための準備を始めました。ところが、オミクロン株による感染者数の再増加により、スウェーデン政府が9月20日から同国への入国禁止措置を再び適応することになり（当初は10月31日までの予定でしたが、その後同措置は延長されました）、渡航を諦めざるを得なくなりました。ただ、Bloch ビームラインのスタッフがその前身である MAX I のビームライン 33 のスタッフだった Balasubramanian Thiagarajan 博士、MAX III のビームライン I4 のスタッフだった Johan Adell 博士と Craig Polley 博士、ビームライン I3 のスタッフだった Mats Leandersson 博士と、東北大学で博士号を取得した後にスウェーデン Linköping 大学（Roger Uhrberg 教授のもと）と MAX-lab でポスドク経験のある Jacek Osiecki 博士といったほとんど旧知の者だったおかげで、試料作製や手順を含めたリモート実験遂行の可能性を ZOOM と e-mail で綿密に打ち合わせることができました。特に Jacek は計画していた試料と類似した試料を作製した経験があること、彼が実験対象試料を作製するための原子蒸着源を自作できることと、有機分子の蒸着源をスウェーデン Karlstad 大学の Hanmin Zhang 准教授と Lars Johansson 教授からお借り出来ることがわかったことで、（1番の理由は課題の有効期間の再延長が不可だったことですが）リモート実験をすることを決断しました。

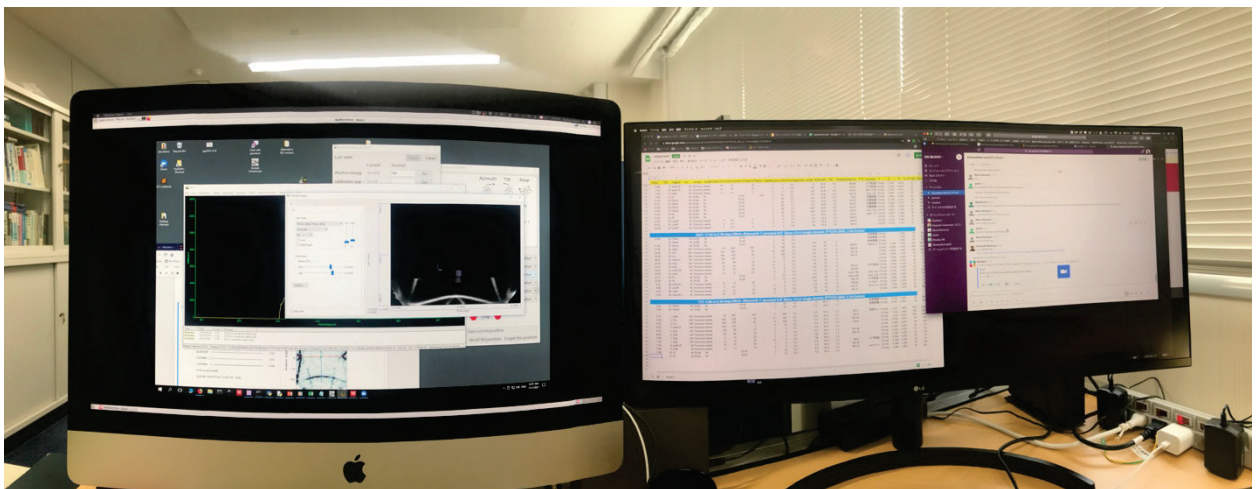
スウェーデン時間の10月27日8時から11月1日8時まで（日本時間の10月27日15時から11月1日16時まで、10月最終日曜日に夏時間から冬時間に変わるため開始

時間と終了時間が1時間異なっています)のビームタイムに備え、実験手順などの詳細を前々日と前日の2回、日本からの参加メンバー(私と学生2人)とビームラインスタッフ(主に Jacek と Craig)で ZOOM を用いた最終打ち合わせを行いました。ビームタイム中の連絡は Slack を、打ち合わせは ZOOM を用い、測定、光エネルギーの変更と試料位置の調整などは自分の PC から ThinLinc client を使ってビームラインの測定用 PC にアクセスして行いました。また、logbook は Google drive に置いてある Excel ファイルに記入することで、日本メンバーと現地スタッフで情報を共有しました。(これら全ての情報を同時に把握するために、日本メンバーは全員自らの PC に外部ディスプレイを接続して実験を行いました。図は測定中の私の PC の様子です。) 試料は、こちらから送ったレシピに沿って真空蒸着により Jacek に作製してもらい、その評価は Slack にあげてもらった LEED 像で確認しました。試料作製後の準備槽から測定槽へのトランスファーもリモートでできないため、現地スタッフ(主に Jacek と Bloch ビームラインのポストドクの Khadiza Ali 博士)に行ってくださいました。ここまでは Slack や ZOOM でやり取りをしながら先方に全てやってもらったのですが、トランスファー後は日本メンバーの仕事です。まずは(通常のオンサイトでの実験と同様)アンジュレーターギャップやグレーティングを調整して光エネルギーを測定に用いる値に合わせ、試料が焦点位置に来るようにマニピュレーターの位置と角度(x , y , z , θ , ϕ)を調整します。試料位置を調整した後は一度粗くフェルミ面を測定し、試料の電子状態から試料の評価を行います(ここでダメなら再度試料を作ってもらわないといけないのですが、今回のビームタイムではそのようなことはありませんでした)。フェルミ面測定で確認した試料は、その後より詳細な価電子帯・フェルミ面の測定、仕事関数、内殻準位の測定を行いました。仕事関数を測定するときは試料にバイアスをかけないといけないため、ここでも現地スタッフに手伝っていただきました。今回のビームタイムでは、蒸着源が作製でき、試料作製の経験がある Jacek がスタッフとしていてくれたおかげで実験が非常スムーズに進みました。同様の経験があるスタッフがいなければ試料作製に時間がかかり、計画していたデータを全て取ることは不可能だったと思います。

海外放射光施設を利用したリモート実験を行って、私が感じたメリットとデメリットについて述べたいと思います。今回のビームタイムは条件を変えながらの測定が多かったため、日本からの参加者3人で24時間体制を敷いて遂行しました。これは現地で行うのと同様のシステムですが、24時間営業のコンビニや自動販売機があって深夜でも買い物できる日本で行うリモート実験の方が夜番にとっては夜食の購入が容易であるなどのメリットがあるかもしれません。また、今回リモートで行ったような実験は、試料作製やトランスファーなどは真空槽に触れながら行うため現地での作業が必要ですが、測定自体は(仕事関数の測定以外は)PCで制御するだけですので、測定が順調であれ

ば基本的に実験者がどこにいても同じことだと感じました。つまり、蒸着や劈開が不要な試料であれば長時間の移動を伴う出張をせずに自らデータを収集できます。移動での疲れや研究費をセーブできるのもリモート実験のメリットかもしれません。（以前は海外出張を理由に会議を休めるのもメリットだと感じていましたが、パンデミック以降のオンライン会議システムの構築によりこのメリットは残念ながら消失したようです。）ただ、これまで現地のビームラインスタッフや研究分野の近いスタッフとの雑談などで研究の新しいアイデアや新しい共同研究の種が生まれる機会が消失するというは大きなデメリットだと感じました。今後はこのようなメリット・デメリットをバランスにかけ、各研究者が個人の判断でオンサイト実験かリモート実験かを選択することになるでしょう。（私にとってはメリットの方が大きいため、これからもオンサイトでの実験を主とする予定です。）

最後になりましたが、我々の初めてのリモート実験に対し、詳細な打ち合わせをしていただき、早朝や深夜での試料移動などビームラインでの作業で世話になりましたMAX IV Bloch ビームラインのスタッフの皆様、特に Jacek と Khadiza に感謝し、ここで筆を擱くことにいたします。



図：測定中の大阪大学の私のオフィスの様子。左のディスプレイには Bloch ビームラインの測定 PC の画面が映っており、右のディスプレイには測定条件などを記した Logbook (Excel ファイル) と Slack の画面が映っている。