

英国での10年、 そして日本の次の10年？

あらかし・とおる

1997 理化学研究所 国際フロンティア研究システム 基礎科学特別研究員
1998 名古屋大学大学院理学研究科化学専攻 博士 (理学)
1999 埼玉大学 理学部基礎化学科 解析化学大講座 助手
2001 McMaster University, Dept. of Chemistry, Research Associate
2003 NC State University, Dept. of Physics, Research Associate
2006 NC State University, Dept. of Physics, Visiting Assistant Professor
2001-2007 LBNL, Advanced Light Source, Visiting Research Scholar
2007 豊田中央研究所 分析・計測部 研究員
2008-2012 SPring-8高輝度光科学研究センター 光源・光学部門 外来研究員
2012 Diamond Light Source, Senior Beamline Scientist
2023 分子科学研究所 極端紫外光研究施設 (UVSOR) 主任研究員



2023年1月1日付で極端紫外光研究施設 (UVSOR) に主任研究員として着任しました。施設付きのポジションのため、UVSORのスタッフの皆さんと共同利用実験を推進することが主務となります。もう岡崎に来て半年以上が経った8月ですが、まだ紹介できるような成果もありませんので、UVSORとのこれまでの関わりと研究歴、これから進めたいことについて書かせていただこうと思います。

最初のUVSORとの関わりは、大昔の学生時代に(故)関一彦先生のご指導の下、当時の軟X線吸収分光ビームラインを利用した実験です。2回目の縁は、現在の主担当であるBL4U STXMを建設する際にアドバイザーとしてエンドステーションの仕様決定などを行った約10年前になります。プロフィールの通り、1箇所に腰を落着けてというよりは自分の興味に任せて点々として来ました。お陰で、北米、欧州、学術、民間と色んな環境で研究に従事することができました。いつも多くの方に助けていただいて何とかやって来られたと感じています。多くの友人と共同研究者が自分の1番の財

産だと思っています。直近は最長の約10年間、英国の放射光 (Synchrotron Radiation: SR) 施設、Diamond Light SourceにてSoft X-rayからTender X-rayのエネルギー領域をカバーする走査型の顕微分光ビームラインにて、建設・立上げ・運用に従事して来ました。同様の経験は、SPring-8の豊田ビームラインに次いで2回目でした。Diamondは世界の主流である第3世代の中規模施設の一つで、周長が約500 mで蓄積リングのエネルギーが3 GeVとなります。日本の大型施設、SPring-8 (~1 km / 8 GeV) やUVSOR (750 MeV / ~50 m) と比べればそのサイズ感などが分かるかと思いますが、よく似た経済規模で島国の英国にはDiamondが唯一のSRに対して、日本には大小含めて10個もあるのは非常に興味深いと思います。さて、どちらが正しい・賢い選択なのでしょうが、我々は、その特徴を活かしているのでしょうか？ 現在、新しい施設が東北大キャンパスに立ち上がりつつありますが、世界の状況を見渡した上で、日本の放射光のあり方を考え直す良い機会ではないでしょうか？

このUVSORとの3回目の縁は、これまでにお世話になった方々へ恩返しできるように、自分の経験を活かして少しでも貢献できるよう尽力したいと思います。そのために、無理難題をお願いすることもあるかと思いますが、ご協力のほどどうぞよろしくお願い致します。

さて研究歴ですが、学生時代はX線吸収分光法 (XAS) を使った機能性有機材料の電子状態・構造研究を行っていました。RIKENのポストドク時代を過ごしたグループは、国際的 (Max Planck Institute for Polymer ResearchのProf. Wolfgang Knoll氏が率い、約半分の構成員は日本人以外)、学際的 (生物・物理・化学と異なる分野の出身者で構成) 環境でした。また、走査型プローブ顕微鏡の研究者に囲まれて過ごしました。SpectroscopyからSpectro-Microscopyに進むことにし大学を辞めて北米に渡ったのは、September 11後の2001年11月でした。

STXM (Scanning Transmission X-ray Microscopy) は図1にありますように、単色化したX線をZone

plate (ZP)と呼ばれる透過型回折格子(またはミラー)によって試料に集光し、試料を走査しながら透過したX線の強度をモニターすることでイメージングします。STXMの特徴が発揮されるのは、試料に含まれる元素の吸収端領域で入射X線のエネルギーを走査し、(試料イメージ) × (エネルギー)の3Dデータを計測・解析するSpectro-Microscopy(あるいはHyperspectral imaging)を行うことにあります。例えばポリマーや生体試料の主要構成元素である炭素の吸収端で測定を行えば、元素選択性だけでなく、試料中の化学結合を弁別した化学状態マッピングが可能です。これまでNASA Stardust Projectのような微量で貴重な試料のマイクロ・ナノ分光分析と、高分子の相分離構造・界面をイメージングするようなケミカルマッピング分析を行って来ました。

着任前から、UVSORが二つの共同利用研、基生研、生理研に隣接し、分子研内にも多くの生命科学の研究者を抱えたユニークな研究環境にあることに着目し、UVSORのような低エネルギー帯域の光を使った生命科学を進められないかと考えていました。そ

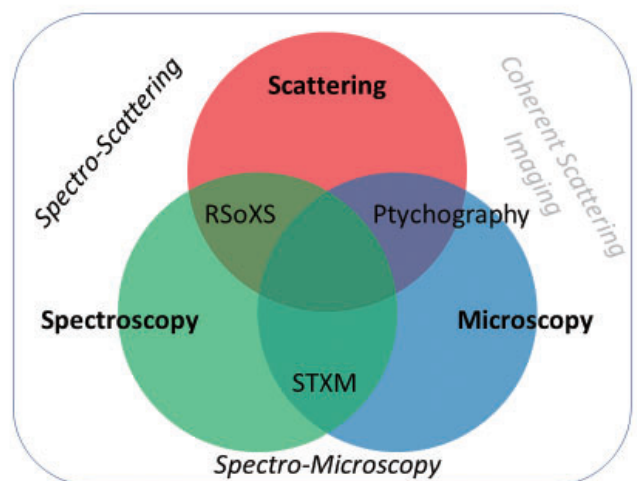
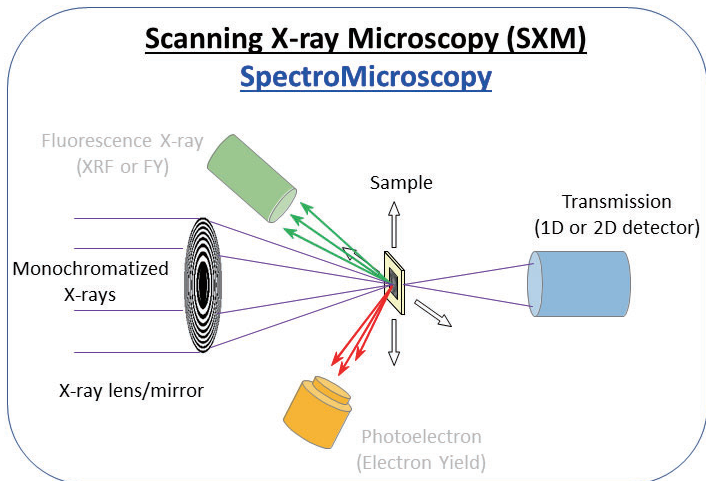
のため、岡崎3機関の連携が始まることに着任したことは、これ幸いと思っただ次第です。

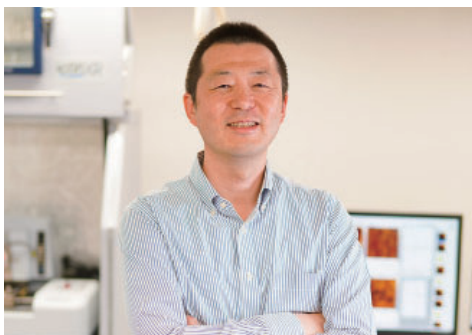
今後、BL4Uでは大テーマとしては生命科学研究に軸足を置きつつ、現在のユーザーから要望のある試料環境整備と透過法以外の検出法の開発を行います。実空間のイメージング手法であるSTXMの場合、その空間分解能は集光素子のZPにより決まり、炭素のK吸収端がある300 eV(～4 nm)では実用上は30 nm程度で、使用するX線の波長で決まる理論的な限界を約10倍下回っています。この現状を打破するための方法としては、コヒーレントなX線を利用したPtychographyがあります。現在のUVSORで推し進めるのに適しているのは、イメージングではなく小角散乱(SAXS)と考えています。STXMと同様なXASをベースにした散乱コントラストを利用すれば、バイオ・ソフトマテリアルについても、中性子散乱における重水素ラベルのような染色は不要となり、X線のエネルギーを選択することで電子密度自体はほぼ同じポリマーのような有機分子を見分けることが可能です。このコンセプトを示したのが図2です。

Spectro-Scatteringとして軟X線共鳴散乱(RSoXS)、Spectro-MicroscopyとしてのSTXMを両輪にして、コヒーレントX線利用については、Spectro-Ptychographyなどのテスト実験を他施設と共同で行い、次期施設での利用に備えたいと思います。

最後に、生命科学を含めた複雑・不均一系を対象とした研究を進める上で、Correlative Microscopy/Imagingといった複数の相補的な手法を駆使して研究を進めることは必須となります。放射光自体が、先端計測手法のショーケースですが、更に、電子顕微鏡、走査型プローブ顕微鏡、レーザー分光・顕微鏡と協調して行くことが必要でしょう。ビームラインにこれらの手法を実現することも重要だと思えます。試料の光照射損傷の軽減、ウェットな試料の測定、温度・湿度・pHの制御といった試料環境の整備については、岡崎3研究機関を中心に意見を集約し、相補的な手法の利用も含めて計画を進めて行きたいと思えます。

生命科学のフロンティアにUVSORをフル活用して挑み、その先に将来の「生命光科学研究拠点」が見えればと望んでおります。





原子の世界の先に

みなと・たけとし

2005年に東京工業大学にて大学院博士課程を修了し、博士（理学）の学位を取得。理化学研究所基礎科学特別研究員、東北大学助教、理化学研究所基幹研究所研究員、京都大学特定准教授を経て、2020年より分子科学研究所主任研究員。

2020年6月に分子研に着任し、表面や界面における物性や化学反応を走査プローブ顕微鏡（Scanning Probe Microscopy：SPM）などの先端的な測定技術で解明する研究活動を進めています。

化学反応の理解は、古くから人々が目指すものであり続けています。振動分光などの分光法を用いた解析が伝統的に用いられており、化学反応は分光データから頭の中で想像するものでした。SPMは、原子分解能を有する顕微鏡として注目を浴び、これまで想像のものであった化学反応を実像で示してくれることから、化学の新しい世界を拓けました。その後、電子状態、振動状態、スピン状態、反応ダイナミクスを原子レベルで測定できることも示され、更に発展を続けています。より複雑な系の研究を展開するためには、不安定な環境での測定を実現し、多要素の中から必要な情報を抽出する技術の確立が求められます。私は、エネルギー移動に関わる複雑系を対象として、SPMを中心とした新しい解析技術を用いて、物性や化学反応を解明する研究を分子研で進めたいと考えております。

私は、研究活動を始める前から、事象を極限まで理解する研究を進めたいと思っていました。現象を綺麗に表現

できる理論研究などに興味を持ちましたが、科学と人間社会とのつながりを理解したいと考え、工業的な化学反応をどうすれば制御することができるか、という研究を始めました。さらに研究を深めるには、化学反応の機構を理解することが望ましいと考え、調べてみると、反応機構を直接観察することは極めて難しいため、間接的な情報からの議論が進められていることに気付きました。様々な経験をした今では、この間接的な情報に基づく議論が非常に重要であり、直接的な情報と共に議論することによって、俯瞰的な考察ができることを深く理解していますが、当時の私は、より明瞭な情報を求め、確実な証拠を得る方法がないか調べました。そこで出会うのがSPMです。SPMは直接的で決定的なデータを示してくれるため、それまで推測で進めていた議論に、SPMの結果を加えることによって、論理的に正しい議論が可能となると感じ、魅了されました。このSPMを用いた研究で、原子レベルで物性や反応機構を解明する事に成功しました。このような成果は、SPMの持つ原子分解能を生かしたものであり、原子レベルでの直接解析こそがSPMの象徴だと考えていました。

一方で、私は仙台で東日本大震災を

被災した経験などから、自らが持つ能力を復興に役立てたいと考えたことを一つのきっかけとして、蓄電池などのエネルギーシステムに関わる研究を始めました。私に何ができるか考え、エネルギーシステムの基礎的な物性や反応機構を極限レベルで解明すれば、技術発展に寄与できると考えました。また、未知の世界である固液界面、電極電解液界面の世界を究極的な手法で解析し、潜む自然の摂理を明らかにすることは極めて重要であると考えました。そこで、エネルギーシステムを解明する研究を考えましたが、調べてみると、これらの系が想像以上に極めて複雑であることに気付きました。例えば、最先端蓄電池では、キャリアイオンと反応する活物質、電子伝導を高める導電剤、活物質と導電剤を固定化する結着剤などが混ぜられた合剤（合材）電極が使用されています。ここに、溶媒、カチオン、アニオン、添加物が混ぜられた電解液が接触しています。この事実を知った時、私は「これだけ複雑な中で起きている反応の中身を本当に理解できるのだろうか」と困惑しました。しかし、これまでSPMの対象とは考えにくかったこのような複雑系で起きる事象を、もしSPMで解析することができれば、解明が望まれていな

がら、これまで不明であった物性や反応機構を解明にすることで技術発展に寄与し、潜む自然の摂理も明らかにできるため、新しい世界を拓けると考えました。そこで私は、SPMなどの手法を蓄電池系への適用する技術を構築し、原子レベルでの解析理論を展開する事で、今まで不明であった蓄電池材料の物性や蓄電池の反応機構を解明できることを示してきました。

分子研では、これまでの研究をさらに発展させて、より複雑で未開拓のエネルギーシステムを対象として、事象を極限まで理解する研究を進めたいと考えております。例えば、私は革新型電池であるフッ化物イオンシャトル二次電池の研究を進めてきました。この電池系は、既存のエネルギーデバイスを越える極めて高いエネルギー密度

を有する系ですが、新しい系であるため、多くの物性や反応機構が不明であり、性能発展の妨げとなっています。このような未知な系から得られる難解な情報を解析する技術を構築し、材料物性や反応機構を解明することで、その姿を明らかにしたいと考えています。この研究にはSPMを用い、最終的には原子レベルでの情報を直接得る事を目指しますが、目標の達成のためには、SPMの象徴であった原子分解能には必ずしもこだわらない方がいいだろうと考えております。原子レベルの情報が与えるインパクトと明快さは、私のみならず多くの人々を魅了してきましたが、複雑系の中で明らかにすべき物性や反応機構の解析のためには、原子分解能が現時点では達成できないような事象についても取り組むべきと考

えています。もちろん原子分解能が得られる系については、原子分解能で解析しますが、そうでない場合にも、研究対象にはならないと諦めるのではなく、物性や反応機構を解明できる手法を確立したいと考えております。この原子分解能という象徴を越えて次のステップに進むことは、時間を要することであり、困難な道のりとなりますが、開拓精神を持って挑戦し、未踏な複雑系の理解を分子研で成し遂げたいと考えています。

分子研にはこのような難易度の高い研究に挑戦できる環境があり、隠された原理や概念を解き明かす研究を目指して進めていきたいと考えております。

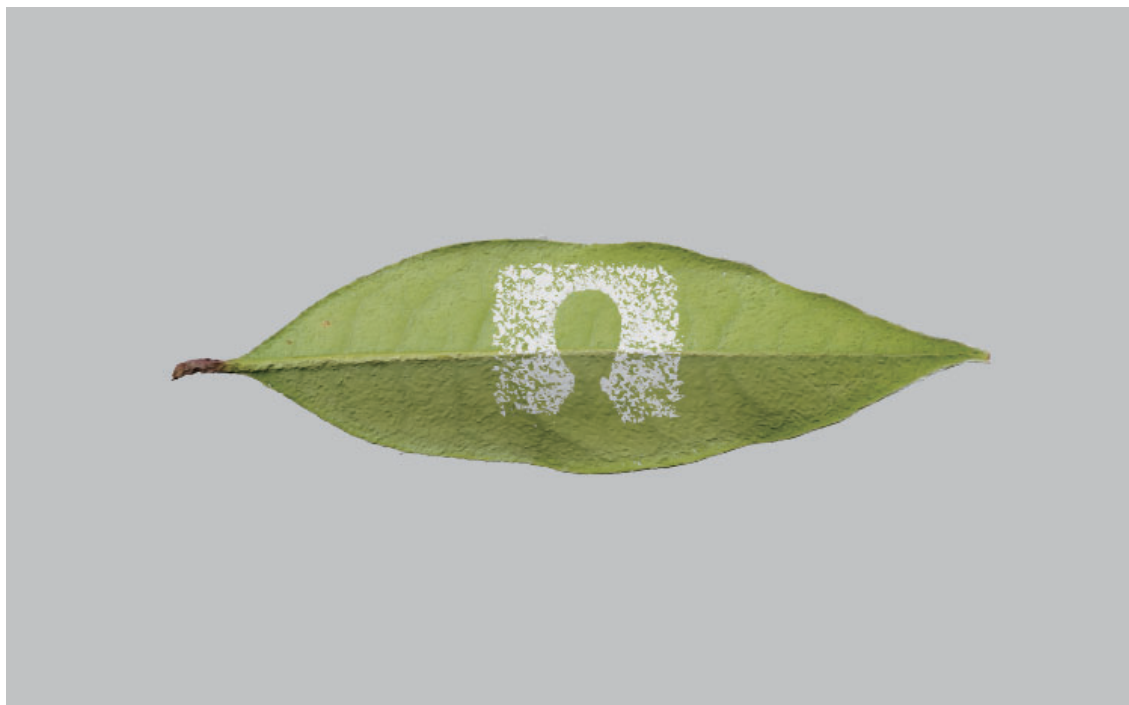


イラスト 櫻井崇史