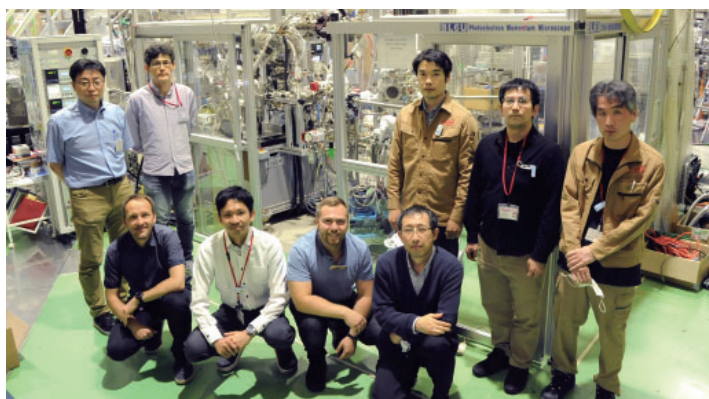


吾唯足るを知らず ——電子スピンを観る装置を創りたい



まつい・ふみひこ

1995年 東京大学理学部化学科卒業

2000年 同大学大学院理学研究科博士後期課程修了、博士（理学）

2000年 奈良先端科学技術大学院大学物質創成科学研究科助手、07年助教

2011年 チューリッヒ大学物理学科客員研究員

2013年 奈良先端大准教授

2018年 分子科学研究所主任研究員

2021年 分子科学研究所・総合研究大学院大学教授

最前列右が筆者

2018年4月に主任研究員として分子研極端紫外光研究施設に着任し、UVSORの一員に加えていただき、スタッフの皆さんと全く新しい概念の光電子運動量顕微鏡を立ち上げてきました^[1]。この度、研究室を主宰する機会を頂き、21年末に再スタートを切りました。まずは岡崎に来るきっかけを作っていた小杉信博前施設長と菅滋正大阪大学名誉教授、応援し続けていただいた川合眞紀前所長、そして分子研の皆様にお礼申し上げます。

これまでを振り返ると、装置造りの苦労が色々と思い出されます。卒論はAuger電子分光*の制御電源の製作でした。プリアンプの電位変調用の絶縁コイルが入手できず困っていたところ、当時太田俊明教授の研究室の横山利彦講師に「試料に変調をかければ絶縁が不要」とアドバイスをもらい、いざ回路を組んでみるとさっぱりスペクトルが取れません。しばし悩み、原因を特定し、さらにコンデンサーで絶縁コイルを代用することを思いつきました。

秋葉原のガード下に通い、電源を組み上げ、横山さんに報告に行くと、よくぞこの安価な回路で正規品並みのスペクトルを取った、ということで合格点をもらい、無事卒業できました。以後そのような繰り返しでアカデミックに残る自信が形成されていった気がします。

学位取得後、奈良先端大の大門寛先生に助手として採用していただきました。信州の精密加工業者が初めての出張先となりました。表示型分析器、通称大門アナライザーの心臓部分の切削の依頼のため、加工手順の説明用に何枚もスケッチを手描きしたことを思い出します。表示型分析器は試料から飛び出した電子の角度分布を一度にスクリーンに投影するユニークなエネルギー分析器です。原子配列の立体写真撮影やフェルミ面の運動量空間での原子軌道配列の可視化など、この分析器ならではの解析法^[2]の開拓に携わりました。そんな中で自分の創案だといえるのが回折分光法です。例えば磁性

Ni薄膜から飛び出したAuger電子の角度分布には原子構造を反映した回折模様が得られますが、分析を工夫すると回折強度と励起原子の位置とを一対一対応させることができます。そうして原子位置ごとに分離した情報と放射光によるX線吸収分光法とを組み合わせ、原子各層別の磁気構造を可視化しました^[3]。表面の原子軌道と薄膜内部のスピンとのバランスを崩すと磁性の向きがガラッと変わる機構を解明しました。

その後、各所の放射光施設でビームラインの整備や立ち上げに参加しました。その成功も失敗も、みな現在UVSORでの光電子運動量顕微鏡の開発につながっていることを実感します。大門先生の元上司であった菅先生に、UVSORに光電子運動量顕微鏡を導入するにあたり、装置造りの経験者を探している、と誘われました。光電子運動量顕微鏡は表示型分析器に電子顕微鏡を組み合わせたような装置です。このチャンスは誰にも渡せない、と意気込んで岡崎にやってきました。ドイツ語で書かれた特許を読み込

*電子線やX線で内殻準位を励起し生成された内殻空孔を埋める二次過程として放出されるのがAuger（オージェ）電子です。Auger電子分光法は表面の組成や化学状態を調べる手法です。

み、開発者のTuscheさんやSPECS社を足繁く訪ねるところから始まり、無事装置の立ち上げにこぎつけました。これまで取り組んできた表示型分析器との違いは、電子顕微鏡をフル活用することで、表面を顕微 (microscope) 観察し、1 μm 径の領域を選んで3次元運動量 (momentum) 空間の電子状態が計測できる点です。図1は昇進後に測定した第一号の成果です^[4]。グラファイトの電子構造は6回対称だというのが「常識」ですが、顕微機能で局所的に観察すると最表面の積層の終端によって鏡面对称の2つのドメインが存在することがわかります。従来の測定では両方の積算を見ていたのですが、光電子運動量顕微鏡を使うとグラファイトの単原子層ステップの境界が見えてくるのです。

さて、洛西・龍安寺の知足の蹲踞をモチーフとして、物性科学の計測法開拓における着想を具象化 (図2) してみました。深淵な手水鉢には物性の不思議さが湛えられ、笕から注がれるstimulationによって水面が波立っています。蹲踞の四方には禅語「吾唯足を知るuncertainty principle」をなぞるようにエネルギー (平衡) と時間 (遷移)、位置 (局在) と運動量 (遍歴) が対置されています。私の場合、笕 (beamline) から注がれる放射光を駆使し、いかに物性の妙を掬い取るか、柄杓 (detector) に独自性を追求し、手法開発を行ってきました。隣り合う軸を組み合わせれば、顕微分光法 $E \times r$ や回折ダイナミクス法 $t \times k$ など新たなアプローチが生まれます。実際、回折分光法 $E \times k$ を創案する過程でこの図を作りました。この図でブレインストーミングしてみるのも楽しいものです。対角にMomentum $\times$ Microscopeの関係が潜んでいますね。

先に原子層分解の磁気構造の研究に

ついて触れましたが、相転移・相分離におけるせめぎ合いの物理を解き明かすには光電子運動量顕微鏡でスピンの世界を可視化するのが一番です。スピンは電子同士の相互作用を規定する基本物理量の一つで、磁性や超伝導にとどまらず、分子の対掌性や量子情報の分野にも顔を出します。現在、光電子運動量顕微鏡で電子のスピンを実・逆

空間で可視化する仕掛けを構築していますが、これが完成するとスピノ科学のフロンティアが切り拓かれます。五十にして天命を知るはずが、未だ吾唯足るも知りません。良い装置を創り出すと、想定していない応用が果てしなく展開できると信じ、まだまだ突っ走っていきます。この大仕事、乞うご期待。

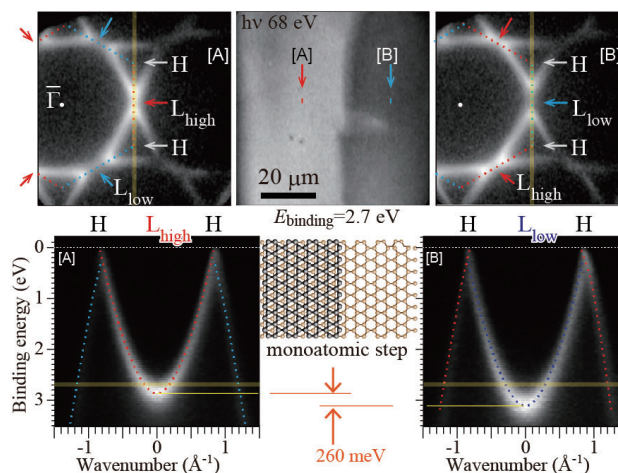


図1 光電子運動量顕微鏡で観たグラファイト表面の電子状態と顕微像。価電子帯の等エネルギー断面 (上段左右) は表面垂直軸 Γ 点を中心に3回対称となる。領域[A]と[B]とはHLHの価電子帯分散 (下段左右) で底のエネルギーの異なる放物線状バンドが現れる。L点2.7 eVでの顕微像 (上段中) では両者にコントラストが生じ単原子層ステップを可視化できる。この対称性の破れからグラファイトを劈開するエネルギーを算出できる。

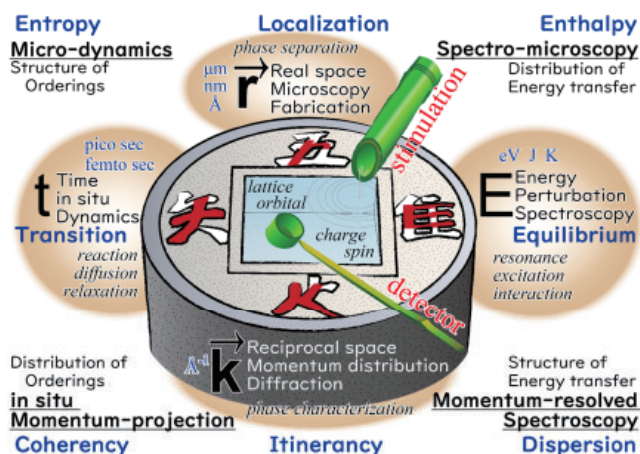


図2 物性計測における知足の蹲踞。対角の $r \cdot k$ や tE は「色即是空Fourier transform」の関係になっている。

[1] F. Matsui et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **59**, 067001 (2020).

[2] 松井文彦・松下智裕・大門寛「光電子分光詳論」丸善出版 (2020).

[3] F. Matsui et al., *Phys. Rev. Lett.* **100**, 207201 (2008).

[4] F. Matsui and S. Suga, *Phys. Rev. B* **105**, 235126 (2022).

自己紹介および 今後分子研で展開したい研究について

おおにし・ひろし

1987年東京大学大学院理学系研究科化学専攻修士課程修了（指導教員：岩澤康裕教授）、1993年博士（理学）。1989～1996年東京大学大学院理学系研究科助手、1996年同講師、1997～1999年同助教授、1999～2004年（財）神奈川科学技術アカデミー極限表面反応プロジェクト研究室長、2004年より神戸大学大学院理学研究科教授。



「有限の厚さをもつ固液界面のオペランド分子科学研究」を実施するクロスアポイントメント教員として2021年11月に着任しました。任期は2026年10月までの5年間で、クロスアポイントメントの比率は分子科学研究所25に対して神戸大学75です。分子科学研究所が大学共同利用機関であることを活かして、所内外のたくさんの方々と協働したいと思っております。どうかご支援をお願いいたします。

気体と固体が接する界面でおきる化学反応の研究（Gerhald Ertl, 2007年）にノーベル化学賞が授与されてから15年が経過しました。二つの物質が接触する場所である界面の研究を新しいステージに導くことが求められています。界面が有限の厚さ（0.001–1 μm ）をもつことを明確に意識して、ひとつひとつの分子（サイズ0.001 μm ）を見ていく分子論的な研究と、より大きな空間スケール（0.01–1 μm ）で界面の両側を見る連続体的な研究を統合していくことが重要です（図）。

自分自身の研究を含めて、これまでにおこなわれてきた研究の多くは、分子論的界面または連続体的界面のどちらか片方に焦点をあてて深掘りするものでした。有限の厚さをもつ界面の研究を進めるこ

とで新しいステージをひらくことが目標です。

具体的には（1）太陽光と水を使って水素をつくる光触媒と（2）低摩擦を実現する潤滑油をターゲットに選んで研究をはじめました。分子科学研究所が保有する世界最先端の計測評価技術を活用し、界面が機能を発揮している状態での計測評価（これをオペランド計測といいます）を進めつつあります。

光触媒は50年ほど前に日本で発明された技術であり（本多健一・藤嶋昭, 1971）、持続可能なエネルギー供給と炭素循環をめざす高性能な光触媒を日本の研究者が次々に見出してきました。水を分解して水素ガス（ H_2 ）をつくる収率や、二酸化炭素（ CO_2 ）を水で還元して一酸化炭素（ CO ）を作る収率は50年前には考えられなかったほど高くなりました。しかし「どうして収率を高くすることができたのか？」がわかっていないので、より収率の高い光触媒を設計するための指針がありません。試行錯誤に頼って開発をすすめるを得ない状況が続いています。

試行錯誤に頼る事情は潤滑油でも同じです。蒸気圧の低い有機溶媒（長鎖の炭化水素など）にごく微量の添加剤（濃度100 ppmのカルボン酸など）を

加えると、低摩擦の状態を長く維持できる潤滑油になることは1960年代から知られています（Frank Bowden・David Tabor）。微生物などによって自然に分解される性質を商用潤滑油に付与するために、炭化水素を別の化合物（エステルなど）に置き換えることが現在求められています。しかし「微量の添加剤がどのように界面をカバーして摩擦をやわらげているのか？」がわからないので、生分解性潤滑油に有効な添加剤の分子設計が進みません。

水と光触媒が接する界面や、潤滑油と固体が接する界面をオペランド計測する方法を工夫してこれらの問いに答えています。問いに答えることで社会実装可能な高性能光触媒や生分解性潤滑油の開発をサポートすることも当然狙いますが、その一方で「ここには未発見のおもしろいサイエンスがある」という直感に駆られて研究を進めています。これらの界面が機能を発揮するしくみを専門家でない方々に納得していただくレベルで説明する。新しいサイエンスを掘り出す出発点はここにあると信じています。

このような研究を進めていくためには、国内外の大学などに属する研究者だけでなく、企業で開発研究を進める方々と尻をたたいたり、たたかれたりする協働が

必要です。多才な教員職員に加えて最先端の実験室機器とUVSORをあわせもつ大学共同利用機関である分子科学研究所が、協働を広げていくうえで予想以上に有利な立ち位置にあることが着任から半年のあいだにわかってきました。装置開発室にはすでに何度もお世話になりました。まず自分が分子科学研究所を使いまくる。さらに、分子科学研究所に縁の薄いセクター（分子科学の周辺領域や企業）の研究者と技術者が分子科学研究所を使うチャンスをつくる。ここにも注力していきます。

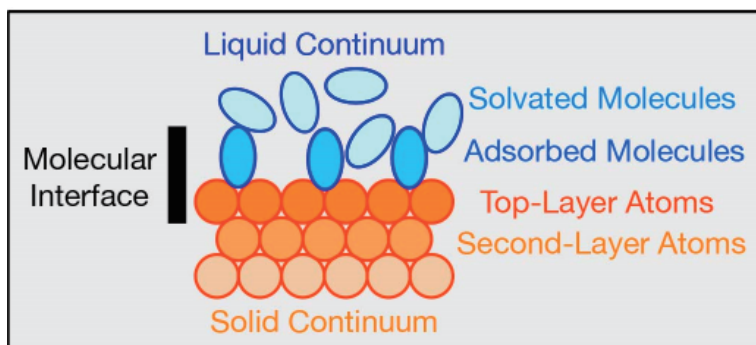


図 有限の厚さをもつ固体－液体界面。