



右

重川 秀実 *Shigekawa Hidemi*

筑波大学 数理物質系 教授
2019年～22年 A-STEP 代表研究者/
2004年～10年 CREST 研究代表者

左

岩谷 克也 *Iwaya Katsuya*

株式会社ユニソク 開発部 部長
2019年～22年 A-STEP 開発主担当者

高性能な半導体、効率の良い太陽電池、新機能材料の開発など、現代産業を推し進めてより豊かな社会を実現するには、ナノの世界を観察・制御する技術が不可欠だ。ナノの世界を超高速に捉えられる「時間分解走査トンネル顕微鏡(時間分解STM)」は非常に複雑で、これまでは計測の専門家しか扱えなかった。その常識を覆したのが、筑波大学とユニソクの共同研究を基に開発された顕微鏡だ。システムの簡易化・小型化を実現し、最先端顕微鏡において普及の糸口を開いた筑波大学数理物質系の重川秀実教授とユニソク開発部の岩谷克也部長に、開発の背景や道のり、これからの展望を聞いた。

特集

OVERVIEW

ナノの世界の超高速現象を捉える顕微鏡 産学連携で見やすく、使いやすく

超高速の電子の動きを可視化 科学・産業界に進展もたらす

それまで見えなかった世界が見えるようになることは、科学を発展させる大きな原動力となる。歴史を振り返っても、17世紀に望遠鏡が発明され、肉眼では見えない天体が観測可能になったことが地動説を後押しし、その後も膨張する宇宙の姿など驚くべき事実が明らかになってきた。また、顕微鏡が登場したことで、肉眼では見えない微生物や細胞を観察できるようになり、生命科学が大きく進展した。技術が進歩し、見えなかったものを高精度に見る道具ができることで、科学は新しい視界を得て、さらに先へと発展していくことができる。

科学者が見たいと求めるものの多くは、より遠く、より小さく、より速いものだ。2023年のノーベル物理学賞はアト(アトは1000京分の1)秒パルス光という極めて短時間だけ光を生成する手法を開発した3名の研究者に与えられたが、まさにこれは超高速な現象を捉える技術である。それ以前の1999年には、フェムト(フェムトは1000兆分の1)秒だけ光るレーザーを使って化学反応のメカニズムを明らかにし、フェムト秒化学という領域を作り上げた故・アハメッド・ズウェイル博士がノーベル化学賞を受賞している。

筑波大学数理物質系の重川秀実教授もまた、新しい視界を求め、挑戦し続けてきた1人だ。ナノサイズの世界の超高速現象を観察する技術の開発

に取り組んできた重川さんの研究成果を基に、走査トンネル顕微鏡メーカーのユニソクは「時間分解STM」の大幅な簡易化・小型化に成功した。時間的には1000億分の1秒、空間的には10億分の1メートルの解像度で、電子の動きまで可視化できる。最先端の顕微鏡が簡便に使えるものとなったことは、科学界や産業界に大きな進展をもたらさだろう。

分子の大きいものはおおむね10ナノ(ナノは10億分の1)メートル、原子は0.1ナノメートルというと、ナノというサイズがイメージできるだろうか。原子の構成要素である電子は、それよりさらに小さい。ナノの世界を観察する装置の1つに先鋭な探針(プローブ)で物質の表面をなぞり、表面の形状や性質を観察する

「走査プローブ顕微鏡(SPM)」と総称される顕微鏡がある。82年に発明され、86年にノーベル賞が与えられた。針先と物質の表面の相互作用を捉えて画像化する仕組みだ(図1)。

信号にはトンネル電流、原子間力、磁気力、表面電位などがあり、走査トンネル顕微鏡(STM)の場合は、プローブと物質の間に量子力学的な効果で流れるトンネル電流を検出して、物質表面の形状や電子の状態を把握する。この方式は導電性物質にしか使えないが、原子間力を利用する原子間力顕微鏡(AFM)であれば非導電性物質でも観察することができる。80年代のSTMやAFMの開発に始まり、00年前後からは電子顕微鏡を用いたナノテクノロジーの研究開発は一大ムーブメントとなっていった。

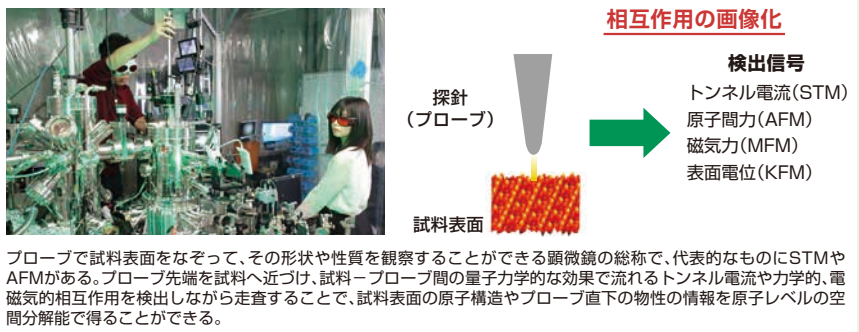
未知の物性発見や構造の変化 新しい材料開発に貢献

物質はナノサイズになると、光りにくかったものが発光したり、熱伝導率が変化したりするなど、通常の状態にはない性質を発現させることが多い。「変化を高精細に捉えることができれば、未知の物性の発見やナノの構造・形状を制御することで、これまでにない機能を持つ新材料や素子の創成が可能になるのです」と重川さんは語る。

23年のノーベル化学賞はまさにこの分野における功績だ。米国ナノクリスタルズテクノロジー社のアレクセイ・エキモフ氏と同国コロンビア大学のルイス・ブルース教授は、同じ化合物でも、ナノサイズになると、わずかな大きさの違いで発する光の色が変わることを発見した。米国マサチューセッツ工科大学のムンジ・パウエンディ教授は、ナノ結晶を安定的に製造する技術を開発したことに対して表彰されている。

このナノ結晶を製造する技術は、すでに照明や触媒、半導体素子などに応用されている。物質を構成する

図1 走査プローブ顕微鏡(SPM)



原子や電子などのふるまいによって発現する新しい物性は、半導体や太陽電池などの性能を向上させる色々な新材料の開発に直接的につながっていく。しかし、ナノサイズになると、1個の原子レベルの欠陥が特性に大きく影響する。そのため高精度な測定技術や、ナノスケールでの物質構造の制御につながる技術の開発には、これまで以上に大きな期待が寄せられている。

高い空間・時間分解能を融合 「人生を棒に振る」覚悟で臨む

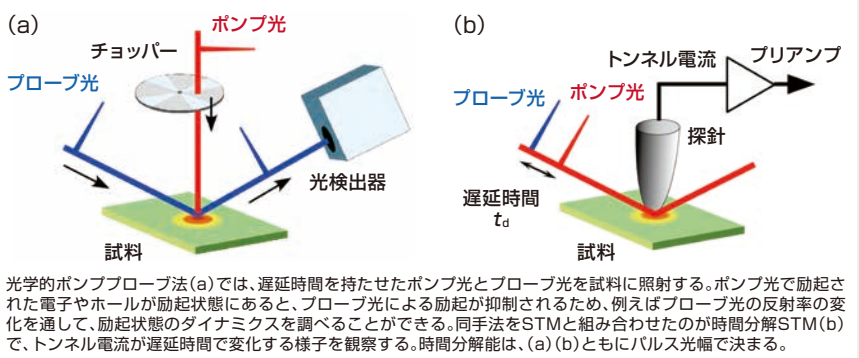
個々の原子まで見られるほど顕微鏡の解像度が上がっても、それだけでは十分ではない。例えば、現在の最先端の半導体素子の基本的なサイズは、わずか2ナノメートルの領域を指す状況にある。素子が小さくなるほどチップ上に多くの回路を集積できて半導体の性能が向上するが、反面ナノの世界ではごくわずかな構造の乱れでも欠陥につながってしまうと

いう問題がある。ナノの世界で起こることを正しく理解していかに精度高く制御できるかが、ナノ構造を用いた製品の品質を左右するのだ。

それだけでなく、例えば、光照射した試料中の電子の、運動やエネルギーのやり取りのような高速で瞬時に起こる現象、より正確に言えば、瞬時に見えるが実際には時間の経過を伴う現象を正しく把握することが重要になる。もちろん、それは容易なことではない。「STMは試料-プローブ間距離に非常に敏感なトンネル電流を使うため、空間分解能は高いのですが、時間分解能についてはミリ秒やサブミリ秒のレベルの計測にとどまり、電子などの高速なダイナミクスを見るには遅いのです」と重川さんはSTMの課題を挙げる。

これに対し、先にも述べたように、高い時間分解能で計測する「光学的ポンププローブ法」がある(図2a)。最初のパルス光「ポンプ光」を測定する物質に当てて状態を変化させ、物質表面の誘電率などの応答を測定す

図2 光学的ポンププローブ法と時間分解STMの模式図

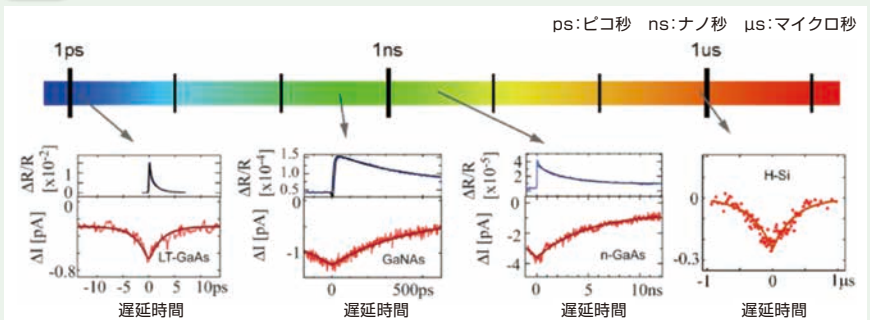


る方法だ。ポンプ光で対象を刺激し、次の光「プローブ光」の反射率や吸収率などの時間変化を測定することで刺激に対する試料の応答を見る。2つの光の遅延時間を変えることで、ポンプ光照射で励起され緩和していく過程で何が起きているのかがわかる。ただし、空間分解能は、通常、光の波長などにより制限されるため、STMのレベルにまで精度を上げることはできない。

各方法に一長一短があるわけだが、現在求められているのは高い空間分解能と時間分解能を併せ持った測定技術だ。「そこで私は、両者を融合させた顕微鏡(図2b)を実現しようと考えました。このアイデアを研究者仲間と話した時『そんな大変なことに取り組むと人生を棒に振るぞ』と言われました」と振り返る。00年から、重川さんは科研費で基礎研究を開始した。その後、ナノ構造・超高速現象の解析制御の研究へと展開し、04年からは社会実装を見据えて、ユニソクと共にJSTのCREST「フェムト秒時間分解走査プローブ顕微鏡技術の開拓と極限計測」研究課題をスタートさせた。

以降、ナノスケール量子ダイナミクスイメージング、電子の磁性運動を示す「スピン」の可視化技術、サブサイクル時間分解STM法の開発と、テーマを展開させながら研究開

図3 デジタル的な遅延時間変調法により実現した広範囲に渡る時間分解信号の例



デジタル的な遅延時間変調法の導入により、遅延時間を広範囲で高速に変調させて計測できるようになった。原理的な分解能は超短パルス光のパルス幅で決まるため、フェムト秒レベルといった短時間で状態変化する材料から、マイクロ秒を越えたより長い時間をかけて状態変化する材料まで、幅広い時間領域で応答する試料を対象とした計測も可能。円偏光を用いたスピン計測も実現している。

発を進めてきた。10年には、STMと超短パルスレーザーとの組み合わせにより、世界で初めて半導体ナノ構造の時間分解測定に成功するなど、それぞれのフィールドで着実に成果として結実させている(図3)。

ユニソクと30年の付き合い 強い絆があって実現した装置

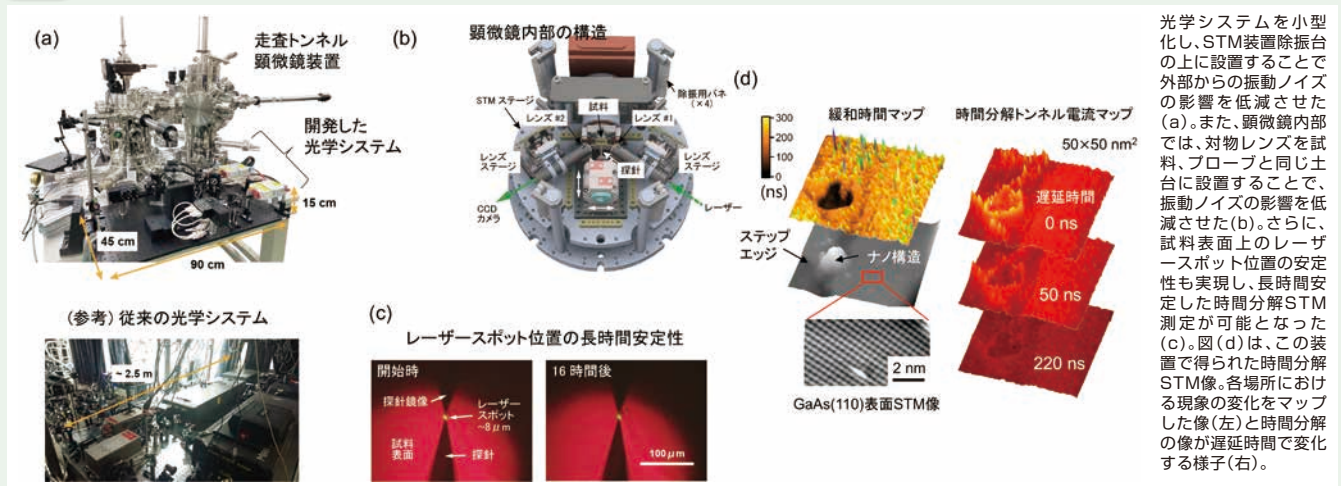
重川さんの研究成果を基に、ユニソクは19年にJSTのA-STEP「時間・スピン分解走査マルチプローブ顕微鏡」の採択を受け、時間分解STMの製品化に乗り出した。その背後には、重川さんとユニソクとの協力関係が欠かせなかったという。ユニソクは大気中で使用できる国産初のSTMや、極低温超高真空STMといったユニソクで高品質な顕微鏡を世に送り

出してきたメーカーだ。重川さんは92年頃から代々同社の製品を用いており、付き合いは30年に及ぶ。

この縁は単なる研究者とメーカーという関係にとどまらない。創業者である故・長村俊彦氏は優れた研究者でもあり、重川さんもかつてはユニソクの社屋に泊り込み、温度を変えながらシリコン表面の構造変化をSTMで観察するなどの実験を長村さんと共に行っていた。共著論文も複数発表している。長村さんが率いるユニソクは、まさに「同志」だったと重川さんは振り返る。「長村さんはアイデアが豊富な方で、一緒にさまざまな議論をしながら新しい実験の検討などを進めることができました。こちらの無理な注文も聞いてくださり、協力関係は深まっていきました」。

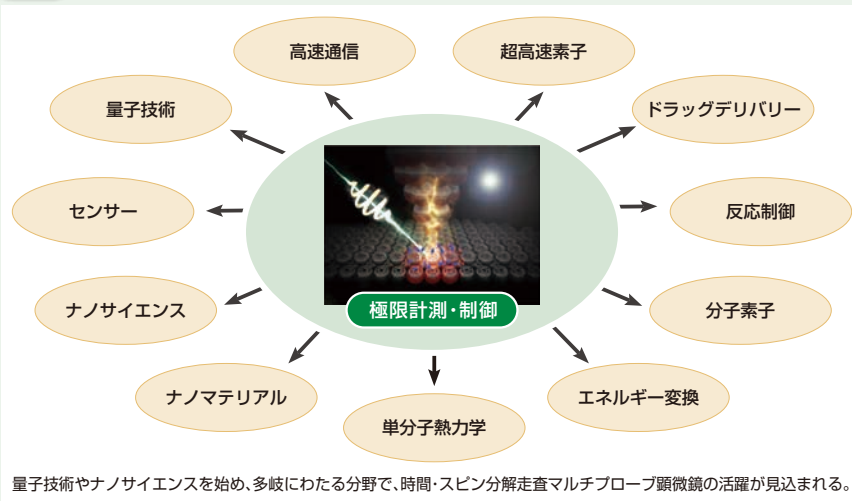
その後は、同社開発部の岩谷克也

図4 A-STEPで開発した時間分解STM装置と時間分解STM像



光学システムを小型化し、STM装置除振台の上に設置することで外部からの振動ノイズの影響を低減させた(a)。また、顕微鏡内部では、対物レンズを試料、プローブと同じ土台に設置することで、振動ノイズの影響を低減させた(b)。さらに、試料表面上のレーザースポット位置の安定性も実現し、長時間安定した時間分解STM測定が可能となった(c)。図(d)は、この装置で得られた時間分解STM像。各場所における現象の変化をマップした像(左)と時間分解の像が遅延時間で変化する様子(右)。

図5 極限計測・制御法の開発と多様な分野への展開



量子技術やナノサイエンスを始め、多岐にわたる分野で、時間・スピン分解走査マルチプローブ顕微鏡の活躍が見込まれる。

部長を中心に連携が続いてきた。もともとSTMの研究者ではあったが、光学的ポンププローブ法については詳しく知らなかったという岩谷さん。ところが同社に転身してきて間もなく、宮武優現社長からA-STEPの担当に指名された。「そこから論文や解説記事、特許の書類などを読んで必死に勉強しました」と岩谷さんは苦笑するが、重川さんは未知の分野でも前向きに取り組む岩谷さんの姿勢に、協力し合える相手だと確信したという。

また、ユニソクには重川研究室の出身者が数名在籍している。彼らはこの分野に精通しており、光学システムやソフト開発などプロジェクトで重要な役割を果たした。A-STEPで開発された時間分解STM装置は、重川さんの高い時間分解能測定を可能にする研究成果を活用しながら、レーザーの動作を全て電氣的に制御することで光学システムを大幅に簡便にし、操作を容易化したものだ。光学システムの小型化と、顕微鏡内部にレーザー集光レンズを設置できるようにしたことで、高分解のデータの取得に欠かせない長時間安定性についても大幅な向上を図ることができた(図4)。

従来の装置は光学システムが大規模かつ複雑で、高度な知識と技術を持つ専門家でなければ扱えなかった

ことが利用拡大の障害となっていたが、今回の実用化によってその壁が取り払われたことになる。重川さんとユニソクとはお互いに研究力、技術力に対する理解と信頼があり、良好な人間関係も構築できていたという。「それらに裏打ちされた強い絆があってこそ、この装置は実現できたと思います。夢を描き、諦めず考え続け、パートナーと信頼関係を築く。それが新しい景色を見ることにつながりました」と重川さんは開発の日々を総括する。

生命の不思議を観察し 医療への応用も進める

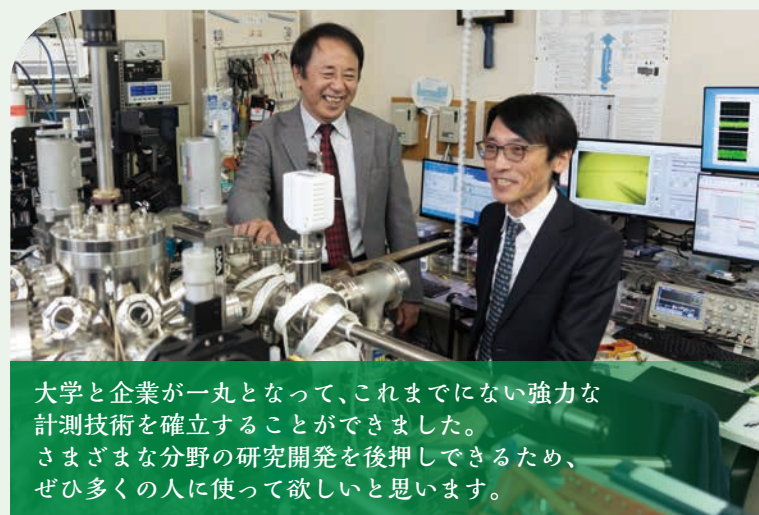
重川さんとユニソクは今後も共同研究を続け、光学システムのAFMへの応用を図っていく予定だ。この強力な計測技術の利用の拡大に向けて、時間分解AFMへの展開をすでに進めているという。「今後は、装置のレンタルサービスを開設して国内外の利用者に実験環境を提供していきたいと考えています。さらに世界的に活況を示している電場駆動型時間分解STM

の光学システムも簡易化し、製品化することを目指します」と岩谷さんは企業としての展望を語る。

一方の重川さんは、現在、時間分解STMを携えてライフサイエンス分野で、単一細胞レベルの計測・研究にも取り組んでいる(図5)。一見、全く異なる分野だが重川さんの探究心の根っこには、宇宙や生命のように謎に包まれているものへの興味関心がある。「生き物は、少し体温が変化するだけで体にさまざまな影響が出て、生体の反応が変わりますが、それは細胞がどのような働きをするためなのか。この宇宙ができたことのもろ不思議さと、小さな細胞から生命が育まれていくことのもろ不思議さは、つながっているのかもしれない」。

純粋な科学的な興味から細胞の観察に向かい、現在はがん細胞の挙動に注目しているという重川さん。その研究は今後、特定の細胞や細胞内の分子へ薬物を送り届けるドラッグデリバリーなどへの応用も期待されている。「新技術を簡単に使えるようにできたことで、人生を棒に振るどころか、さらに多くの未知の現象を知ることができています。これから多くの方々に装置を使っていただき、計測分野の研究コミュニティが大いに盛り上げられればいいですね」と重川さんはこの顕微鏡がもたらす研究の未来に期待を寄せている。

(TEXT: 桜井裕子, PHOTO: 石原秀樹)



大学と企業が丸くなって、これまでにない強力な計測技術を確立することができました。さまざまな分野の研究開発を後押しできるため、ぜひ多くの人に使って欲しいと思います。