

第2章

コヒーレント光が実現する世界

《光量子工学研究領域》

理化学研究所初の大型プロジェクト研究である「レーザー科学研究」（1975-1996）は21年間続き、数々の輝かしい成果をあげて終了した。その成果を継承するべく、新たに「レーザー物理工学研究室」の主任研究員として採用された緑川克美を中心として、1997（平成9）年から大型研究「コヒーレント科学」が発足した。コヒーレントとは光における概念で、レーザー光のように位相がマクロにそろった光をコヒーレント光とよぶ。緑川らは、物質のミクロな配列や構造をレーザー光によって制御し、それにより協調的な相互作用を誘起して、新しい特性や機能を有する材料やデバイスを作ること为目标に研究を開始した。

結果を先に述べておくと、1997年度より開始したこの「コヒーレント科学研究」では、光源としてのレーザーの高度化と、それを利用した電子・分子・構造の制御による各種新奇機能材料の開発とが有機的に結合することで、独創的な研究成果が誕生した。例えば、世界最高強度のコヒーレント軟X線光源の開発、最高効率の紫外LED素子の開発、位相制御を利用した蛍光2光子顕微鏡の実現などである。

そのほかにも、新奇な光源として世界で初めてナノ秒レーザーを用いた光注入型テラヘルツパラメトリック光源を開発した。これにより、特定周波数のテラヘルツ波の高出力化が可能になった。また、ナノサイエンスと光科学との融合領域を目指した近接場ナノフォトニクス研究により、世界に先駆けてDNAネットワークのイメージングを実現した。また、生体イメージング研究において、独自に開発した高性能レーザーと新規蛍光物質や高性能CCDカメラを用いて、細胞内の小胞などの動きをビデオレートで捉えることに成功した。このように、「コヒーレント科学研究」は、光関連研究において、長年にわたって継続的かつ活発な研究活動を展開した。

第1節 エクストリームフォトニクスまでの 光量子工学研究領域前史

超短パルスレーザー

「コヒーレント科学研究」で、緑川は「自由電子のコヒーレント制御」という概念を提唱し、当時、急速に立ち上がってきたフェムト秒高強度レーザーをその研究の中心に据えた。

レーザー開発の歴史を振り返ると、1960（昭和35）年にルビーレーザーが発明されたのち、そのパルス幅は急激に短縮化され、80年代半ばにはすでに5フェムト秒のパルスが実現していた。しかし、80年代までの超短パルスレーザーは

色素レーザーが中心で、パワーも小さく動作も不安定で信頼性が低かった。一方、テラワット (10^{12} = 1兆ワット) 級の高強度レーザーを得ようとする、体育館規模の巨大な施設が必要であった。

ところが、1980年代後半に超短パルスの発振・増幅に適したチタンサファイア結晶が作り出され、またそれとほぼ時を同じくして、チャープパルス増幅法という超短レーザーパルスの新しい増幅法が開発されて、状況が一変した。フェムト秒 (10^{-15} 秒 = 1000兆分の1秒) でテラワット級の超短パルス・高強度レーザーが卓上サイズで現実のものとなったのである。緑川らは、この技術を使えば卓上サイズでX線レーザーが実現できると考えた。そしてX線レーザーができれば、パルス幅もフェムト秒から一気にアト秒 (10^{-18} 秒 = 100京分の1秒) の領域に達することも可能になるはずであった。

一方で、フェムト秒レーザーは、レーザー加工の分野にも革新をもたらした。フェムト秒レーザーでは、材料の熱拡散速度に比べて十分に速く、エネルギーをレーザー照射部に限定して注入できるため、加工精度を向上させることができる。また、多光子吸収を用いることにより、線形吸収の存在しないようなバンドギャップの大きな材料にも対応できるばかりでなく、その大きな光電場による非線形効果を利用することにより、透明材料の内部の改質や加工も可能である。このような事実から、理研でもフェムト秒レーザーによる微細加工等の研究が同時期に始まっている。

レーザー光電場で軟X線レーザーの原理実証

例えば、1テラワットのレーザー光を直径 $10\mu\text{m}$ にまで集光すると、その光電場は $3 \times 10^{10}\text{V/cm}$ に達し、これは水素原子内のクーロン電場の約10倍に相当する。このような強い光電場下では、物質中の電子の挙動は、従来の摂動理論の範囲を逸脱し、さまざまな新しい現象が観測されるようになる。

こうした現象を研究対象とする物理領域は、英語では“Strong Field (強電場)”または“High Field Physics (高電場物理)”あるいは“High Intensity Physics (高強度物理)”という呼び名が定着している。歴史的には、1986年のアメリカ光学会 (OSA) による国際会議 (Topical Meeting on Short Wavelength Coherent Radiation: Generation and Application) において、原子や分子が光子を一度に複数個吸収する超閾電離が話題になったことが、この分野の始まりと言える。会議の表題からも分かるように、当初からコヒーレント短波長光源の開発との関わりが深かった。

緑川らは、レーザーで加熱した電子の衝突によるイオン化に替えて、レーザー光電場による直接イオン化という手法を導入し、世界に先駆けて、光電場電離形の軟X線レーザーの原理実証を成功させた。しかし、軟X線領域においてはレーザー共振器を構成するための高い反射率を有する鏡が存在しないなどの問題があって、実用化は困難であった。そこで、高次の非線形波長変換を用いて、コヒーレント軟X線を発生する方法に切り替えた。これが高次高調波である。

レーザー光を結晶や気体に照射すると、光と原子や分子との非線形相互作用に

よって、元のレーザー光の整数倍の周波数をもつコヒーレント光が放出される。これが高調波発生という現象である。ただし、通常のレーザーを用いて原子に束縛された電子を励起しても、せいぜい数倍の周波数をもつ光しか放出されない。ところが、高強度の短パルスレーザーを照射すると、50-100倍の周波数（高次高調波）のコヒーレントな軟X線が発生可能であった。しかしながら、高次高調波は、その発見の当初は、変換効率ならびに出力ともに非常に低く、物理的関心は高かったものの、実用的な光源としては疑問視されていた。緑川は、位相整合に基づくエネルギー拡大則を考案して高出力化を実証し、多くの研究者の予想を覆して、軟X線領域の超高速コヒーレント光源としての地位を確立したのである。

「エクストリームフォトンクス」

理研中央研究所（当時）では、2005（平成17）年4月から基礎科学研究課題の一つとして緑川主任研究員（緑川レーザー物理工学研究室）をリーダーとして、先端光科学研究「エクストリームフォトンクス」を開始した。この研究は、それまで理研が独自に開発を進めてきた軟X線レーザーやアト秒パルス光源、近接場ナノ光源、テラヘルツ光源等に関するポテンシャルを活かし、これらの光源開発をさらに推進すると同時に、物理、化学、工学、生物、医科学の各分野にわたるさまざまな光に関する応用研究を融合させ、理研の総合性を活かした新しい光科学研究を開拓しようとするものである。

その概念を図1に示した。レーザー光源に関する科学と技術の進展により、従来の技術では到達できなかった軟X線やテラヘルツといった未開拓の光波領域においても、高性能のコヒーレント光源が生まれてきた。これらの光波は、専門家の間では“Extreme Wavelength（極端波長）”ともよばれている。また、高強度フェムト秒レーザーと物質の相互作用は、“Extreme Nonlinear Optics（極端非線形光学）”という分野を生み出している。一方、可視域近傍では、波長による回折限界を大きく破る近接場光学という分野が生まれている。

これら従来技術では到達しえなかった領域の光を発生・制御し、それらを、生体分子を中心とした物質系のダイナミクスのイメージングに応用する、というのが本研究の中心的課題であり、これを「エクストリームフォトンクス研究」と命名した。図1の左下から右上に走る赤い線が、波長による限界である。可視域で実現されているような極限的技術を、両極端の波長領域まで拡張するとともに、可視域においては波長限界を超えた技術の開発を進めることをイメージしている。本研究では、理研の融合的かつ学際的な研究環境を活かし、研究を有機的連携のもと総合的かつ効率的に推進するため、次のような五つのサブテーマの研究チームを設けた。

- (1)高強度軟X線アト秒パルス研究（緑川克美主任研究員）
- (2)リアルタイム生体イメージング研究（中野明彦主任研究員）
- (3)超高速分子マニピュレーション研究（田原太平主任研究員）
- (4)近接場ナノフォトンクス研究（河田聡主任研究員）
- (5)テラヘルツ光応用研究（川瀬晃道客員主管研究員）

先端光科学研究

～エクストリームフォトンクス研究の推進～

これまでの光科学技術は、可視光を中心とする限られた領域で行われてきた。本研究では、光を根本から見直し、光源の拡充（これまでにない波長の光、位相制御された光など）や光の新しい展開（近接場光、テラヘルツ光の新しい応用など）により、従来の光の限界を打ち破る。

→新しい科学分野を創成・牽引するとともに、新しい産業技術を支える基盤技術を開発

“新しい光は新しい科学・技術を創成する。”

理化学研究所で培ったポテンシャルを基に、“新しい光を造る”

新しい光により、これまで観ることのできなかった構造や現象を、“新しい光で観る”

さらに、構造や現象の制御により新しい機能や材料を、“新しい光で造る”

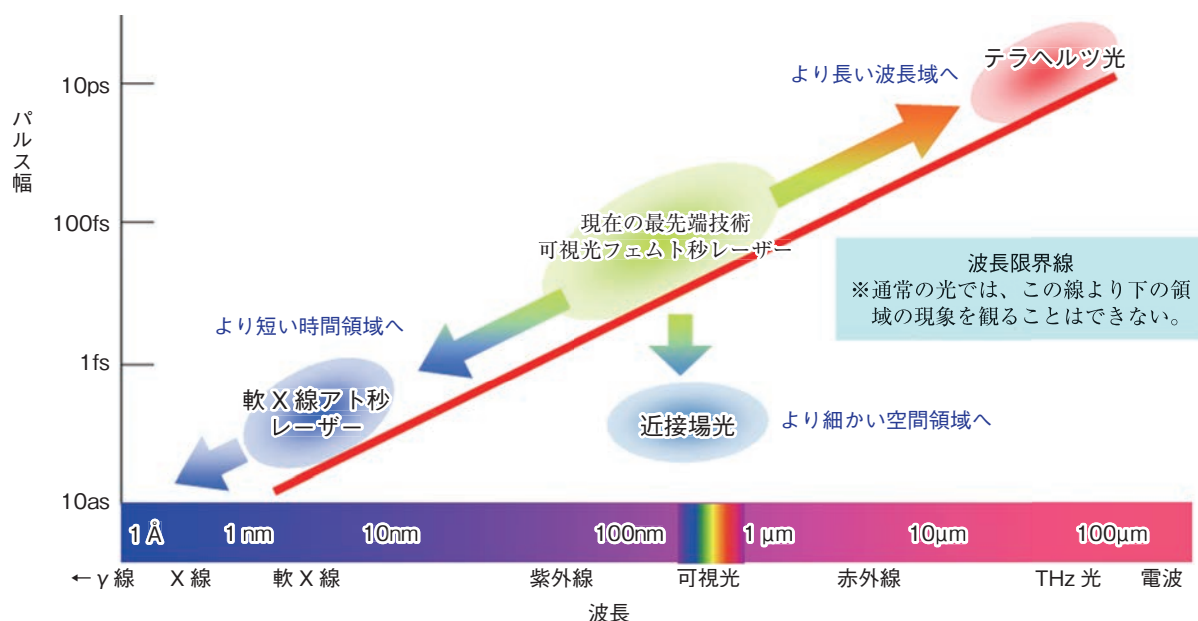


図1 エクストリームフォトンクスの概念

本研究の開始にあたっては、前年に分子科学研究所長を辞して理研中央研究所長に着任した茅幸二の強力なバックアップもあり、分子科学研究所との連携研究を強く推進することになった。そして、毎年、春は和光で、秋は分子科学研究所に近い蒲郡で、共同のシンポジウムを5年にわたって開催してきた。

この研究は、先端光科学研究領域として基幹研究所（2008-2013年）にも引き継がれ、2010年4月から第2期を開始するにあたっては、それまでフロンティア研究システムの一貫として仙台地区で推進されてきた「テラヘルツ光研究」を取り込み、新たに、エクストリームフォトンクス研究グループとテラヘルツ光研究グループによる2グループ8チーム体制となった。

- エクストリームフォトンクス研究グループ

- 高強度軟X線アト秒パルス研究チーム（緑川克美）

- ライブセル分子イメージング研究チーム（中野明彦）

- 超高速分子マニピュレーション研究チーム（田原太平）

- 近接場ナノフォトンクス研究チーム（河田聡）

- 分子反応ダイナミクス研究チーム（鈴木俊法）

- テラヘルツ光研究グループ
 - テラヘルツ光源研究チーム (伊藤弘昌)
 - テラヘルツイメージング研究チーム (大谷知行)
 - テラヘルツ量子素子研究チーム (平山秀樹)

第2節 光量子工学研究領域の誕生

社会に役立つ光の研究

2011(平成23)年12月の基幹研究所所長会議において、独立行政法人の第3期中期計画(2013-2018年)に関連した基幹研究所各領域の組織改編に関する検討状況の報告があった。その中で、次期中期の新たな研究基盤として、先端光科学研究領域を發展させた「光学」が予定されていると報告された。そこでは、最高水準の研究基盤の開発・整備・共用・利用研究の推進を図り、さらには、光・量子ビームに関する基盤技術を集めて、工学的研究の中核とすると位置付けられた。

2012年11月7日の理事会議において、先端光科学研究領域準備室(室長、緑川)の発足が決まった。その後、準備室の名称は「先端光科学」から「光量子工学」研究領域準備室に変更することとなった。新たに入った「工学」の文字は、理研においてはぜひとも工学を体現し実施するセンターが必要である、という野依良治理事長と緑川準備室長の強い意志を反映させたものであった。

研究成果を社会に役立てるには、実験室内だけでなくさまざまな現場でも働くような実用的な装置を作る必要がある。かつての理研は、研究成果をそうした形にする高い工学の能力を備えていた。野依理事長は、今こそ工学を前面に押し出す必要があると考え、「光の研究は社会に役立つだろうね」と緑川に念を押ししたのだった。

そして2013年4月1日、光量子工学研究領域が発足した。それまで基幹研究所に属していた先端光科学研究領域2グループ8チーム、先端技術基盤部門の物質評価チームを除いた3チームと一つの特別ユニットに、新しく三つのチームを新設して再編成し、合計3グループ15チームでスタートを切った。英語名は、RIKEN Center for Advanced Photonics、略称RAPとした。

四つの研究方向

レーザーを中心とした光科学研究は、幅広い分野にわたっている。そうした中で、RAPは四つの方向を中心に基礎研究を展開することに決めた(図2)。一つ目の方向は、レーザー光の強力な光電場で電子を加速・加熱することにより、短波長光・アト秒パルスを発生する研究である。これはまた、高強度場物理あるいは極端非線形光学とよばれる領域でもある。二つ目は、レーザー光を用いて原子・分子の動きを止める、いわゆる「レーザー冷却」の研究であり、これは超精密計測・分光の分野である。

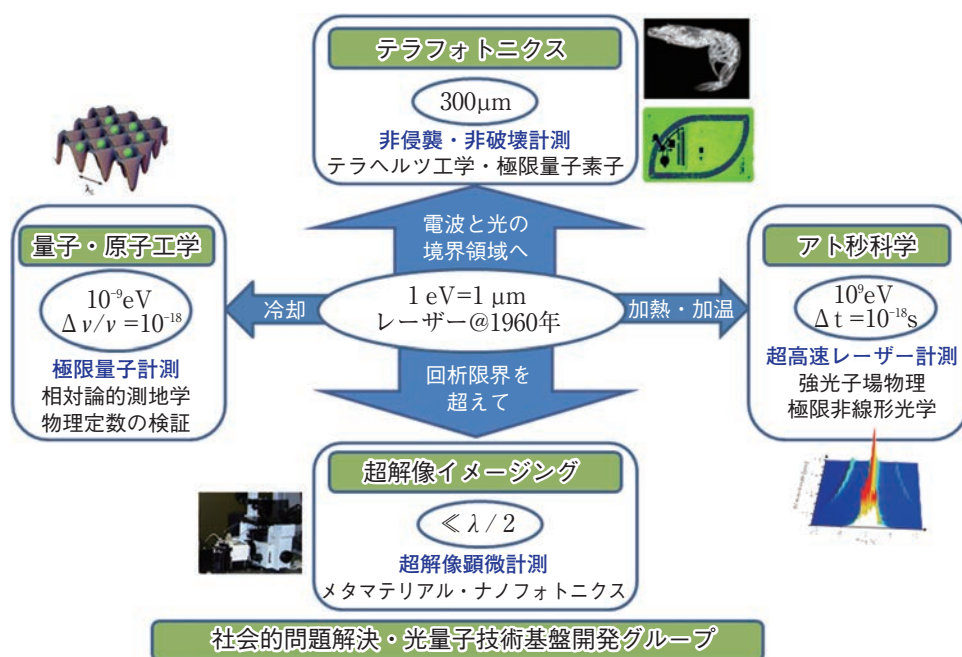


図2 RAP四つの研究方向

一方、古典的な光学においては、光で物体を見るときは光の回折に基づく限界があり、光の波長の半分程度までしか識別できない、というのが常識であった。その限界を破り、可視光でナノメートルサイズの対象を識別しようとする試みがあり、それが近接場光学や超解像顕微法等の研究である。これが三つ目の方向である。そして第四の方向は、電波と光の間をつなぐテラヘルツ光の研究である。レーザーが出現する前の1954（昭和29）年にマイクロ波の増幅器としてメーザーが発明された。すると、多くの研究者は、次のターゲットは光の増幅であると考え、電波と光の中間領域にあるテラヘルツ光の研究は、主流から置いてきぼりをかう羽目になった。しかし、近年、そのユニークな特性が新たな注目を浴びるようになってきている。

これらの研究を推進するために、RAPでは、光のポテンシャルを極限まで追求する「エクストリームフォトニクス研究グループ」と、電波と光の間をつなぐ「テラヘルツ光研究グループ」に加えて、あえて「研究」という文字を名称から外した「光量子技術基盤開発グループ」を新たに設置し、より工学を意識した体制を構築した。特に、光量子技術基盤開発グループでは、研究室で開発されたレーザー光源や測定装置等が、実験室外の過酷な環境でもきちんと動作するよう、必要な条件を実現するための技術開発を主要な業務とした。以下に3グループの構成と各チームのリーダーを記す。

光量子工学研究領域 緑川克美領域長

エクストリームフォトニクス研究グループ 緑川克美グループディレクター
アト秒科学研究チーム 緑川克美チームリーダー
超高速分子計測研究チーム 田原太平チームリーダー
ライブセル分子イメージング研究チーム 中野明彦チームリーダー

近接場ナノフォトニクス研究チーム	河田聡チームリーダー
分子反応ダイナミクス研究チーム	鈴木俊法チームリーダー
生命光学技術研究チーム	宮脇敦史チームリーダー
時空間エンジニアリング研究チーム	香取秀俊チームリーダー
画像情報処理研究チーム	横田秀夫チームリーダー
テラヘルツ光研究グループ	大谷知行グループディレクター
テラヘルツ光源研究チーム	南出泰亜チームリーダー
テラヘルツイメージング研究チーム	大谷知行チームリーダー
テラヘルツ量子素子研究チーム	平山秀樹チームリーダー
光量子技術基盤開発グループ	和田智之グループディレクター
光量子制御技術開発チーム	和田智之チームリーダー
先端光学素子開発チーム	山形豊チームリーダー
中性子ビーム技術開発チーム	大竹淑恵チームリーダー
技術基盤支援チーム	山形豊チームリーダー

見えないものを、見えるように

RAPでは、光の可能性を極限まで追究し、今まで見えなかったものを見ようとしている。例えば、電子の動きを捉えるアト秒パルスレーザー、メタマテリアルによる光の操作、蛍光タンパク質を用いた環境モニタリング、超高精度な光格子時計による相対論的な測地学……。見ることができれば、それを理解し、制御することにも近づく。一方、RAPでは、新しい光技術を研究の世界だけのものとして、實用可能な装置を作るところまで進め、社会に役立てることを強く意識している。領域名に「工学」が入っているのは、そのためである。

本研究領域を開始するにあたって、領域長の緑川は、研究内容が専門外の人達にも分かるような標語を考えた。それが“Making the invisible visible”、「見えないものが見えるようにする」である。われわれは、何を見たいのか。それを見ることによって何がもたらされるのか？ 例えば、非常に高速で動くものや現象がある。創立まもない理研では、辻二郎主任研究員が高速度映画記録による高速現象の解析研究を進め、弾丸の動きなども記録された。レーザーが発明されて以降、科学者はレーザーの作る超短パルスを用いて、分子や原子の挙動を捉えることに成功した。そして、今、次の課題は、原子や分子を構成する電子の動きを捉えることである。それがアト秒科学であり、化学反応の本質的理解につながる可能性が高い。また、そうした電子を制御することで、ペタ（1000兆）ヘルツ領域で動作する超高速電子デバイスの可能性も拓かれる。

また、先進国における共通の問題の一つが医療費の高騰である。これを抑制する手段として重要なのが、生体情報を非侵襲で得ることである。赤外レーザーやテラヘルツ光による生体の非侵襲計測は、その役割を果たすものと期待されている。一方、わが国ではトンネルや橋梁といった1960年から1980年代の高度経済成長期に造られた大型のコンクリート構造物の多くが、今後10年から20年でその寿命を迎えようとしている。こうした大型インフラの検査は、大量生産された

工業製品の抜き取り検査とは異なり、一つとして同じ状況のものはなく、現地での非破壊診断が不可欠である。RAPでは、レーザー、テラヘルツ光そして中性子ビームといったさまざまな光・量子ビーム技術を駆使した非破壊検査法を開拓し、この課題に挑戦している。

さらに大きなスケールでは、地球そのものの活動を捉えることにも挑戦している。わが国は、10年程度ごとに地震や火山の噴火といった大きな自然災害に見舞われてきた。これまでさまざまな手法でその予測が試みられてきたが、まだまだ不十分である。RAPは、そこに全く新しい光技術で挑戦したいと考えている。この研究領域で開発してきたものに超高精度の光格子時計があり、重力ポテンシャルに敏感に反応し、標高差を1cm以下の精度で短時間に計測することが可能になった。つまり、時間を測るのではなく、標高差を精密に測れるようになった。この技術を利用することにより、火山におけるマグマ活動の観測、地下資源の探査といった時計のイメージからは思いもつかないような応用が生まれようとしている（図3）。

各地点に設置される光格子時計は、これまでにない堅牢な時間の基準を与える一方で、「量子水準点」として機能する。光ファイバーによってつながる「量子水準点」群は、ダイナミックな標高差の変動や、地下で起こっている空洞やマグマだまりによる重力の変化を、数時間から数十年にわたる広範な時間スケールで、正確に、かつ空間的にマッピングすることを可能にする。

基礎科学研究で築いてきた技術を、これまで直接見ることができなかった物体の内部を透視する技術へと応用することで、社会が直面する課題の解決に寄与することができる。「見えないものを見えるようにする」という本研究領域の目標は、このような形で社会と結びついていく。

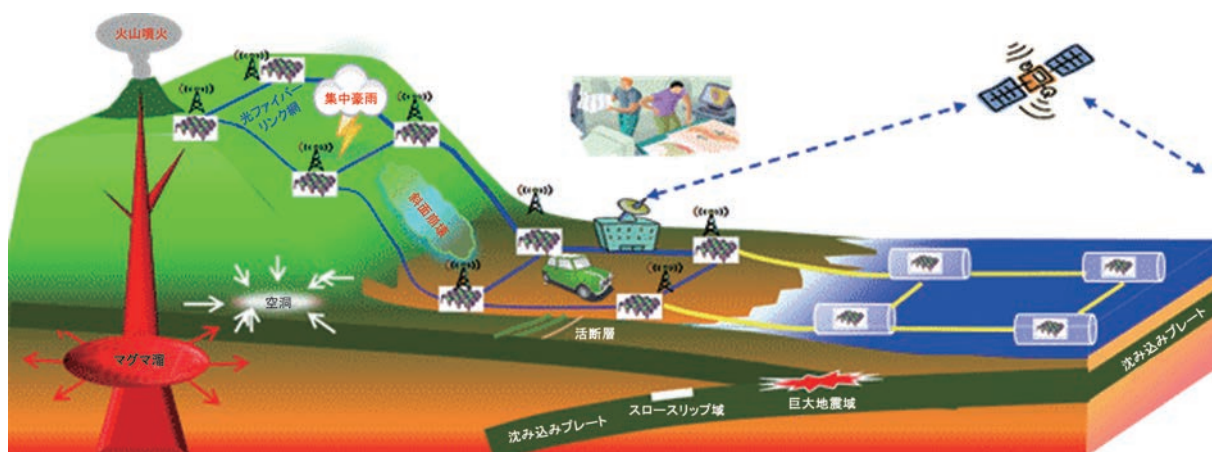


図3 光格子時計ネットワークの実装による未来の社会

第3節 RAPの足跡

国内外のさまざまな研究機関との連携

2013（平成25）年9月10日、理研は中国科学院上海光学精密機械研究所（SIOM）と協力協定を締結した。そして、理研-SIOM連携研究ユニット（杉岡幸次ユニットリーダー）を2014年1月1日に設置した。SIOMは、中国を代表するレーザー研究機関であり、それまで緑川レーザー物理工学研究室では博士研究員を受け入れてきた。これを機会に、超短パルスレーザー加工に関する共同研究をさらに発展させるべく、連携研究室を発足した。長年にわたり、レーザー開発と応用研究において、研究交流を進めてきており、連携研究室の設置により、レーザー科学研究や関連技術開発に拍車がかかることが期待される。

2013年9月13日には、小型中性子源システムによる橋脚や路盤等のインフラストラクチャーの非破壊検査技術開発における協力を目的として、土木研究所と連携協力協定を締結した。協定に基づき、相互に緊密に連携し、小型中性子イメージングシステムをはじめとした、光量子技術の研究、開発を推進することになった。

2015年2月25日には、慶應義塾大学SFCと大阪市立大学と理研三者の間で連携・協力協定を締結した。本協定の目的は、先駆的な研究成果に基づく社会実装プログラムの創成と実証・実践により、健康増進・高齢者自立支援社会の構築を推進することにある。特に健康情報ビッグデータに関する課題を解決するため、相互の人材交流、共同研究、人材育成等の連携・協力を進めていく。

参画する機関はこれまで、疾患の発症を予知するための早期シグナル検出技術の開発やその小型測定装置の開発、一般市民参加型の検診研究、ビッグデータ解析技術の開発、ICT（情報通信技術）基盤の構築等に取り組んできた。

2016年5月13日、スペインのカナリア天文物理研究所との間で、共同研究等の研究協力、人材交流、合同シンポジウム開催等に資することを目的とする覚書を締結した。今後、カナリア諸島において、宇宙マイクロ波背景放射の広域偏光観測を行うミリ波望遠鏡を用いた観測実験を開始するなど、研究協力の進展が期待される。

2016年5月26日には、カナダ国立光学研究所（INO）およびレーザーフォトリクス光学センター（COPL）と共同研究等の研究協力、人材交流、合同シンポジウム開催等に資することを目的とする覚書を締結した。幅広い研究協力の進展が期待される。

若手人材の育成

RAPは、若手研究者の主導による光量子工学研究領域セミナー（RAPセミナー）を毎月1回開催してきた。本セミナーでは、光科学技術をさまざまな問題を解決する基盤技術として用いることを意識し、光科学に限らず、生命科学や天文学など幅広い分野から外部講師を招き、若手研究者を中心に社会的課題等につ

いて議論することを目的としてきた。2014年度は、理研内の連携促進をはかるため理研内各センター長に講演を依頼した。2015年度からは、トムソン・ロイター引用栄誉賞を受賞した世界的に著名な外部講師によるセミナーを実施している。これまでに、RAPセミナー後に梶田隆章（2015年物理学賞）、大隅良典（2016年医学生理学賞）の2名の講師の先生方がノーベル賞を獲得している。

大学院生の教育については、「フォトンサイエンス・リーディング大学院（ALPS）」（東京大学大学院・理学系研究科と工学系研究科が連携して開催している博士課程学位プログラム）において、本研究領域のチームリーダー達が半期にわたって講義を行い、産・学・官の広い分野で活躍する博士人材の育成に貢献してきた。

また、2015年5月15日、(株)トプコンと連携推進のための協定を締結し、共同研究を通じて企業で活躍する若手研究者の教育も行っている。

組織改革

2015年3月末をもって、ライブセル分子イメージング研究チーム、近接場ナノフォトニクス研究チーム、分子反応ダイナミクス研究チームが終了した。また、フォトン操作機能研究チーム（田中拓男、2014年4月1日）、眼疾患クラウド診断融合連携研究チーム（2014年4月1日）、生細胞超解像イメージング研究チーム（中野、2015年4月1日）、量子オプトエレクトロニクス研究チーム（加藤雄一郎、2016年9月1日）が設置された。

2015年2月27日、中性子工学施設が完成した。それまでは仁科加速器研究センターRIBF棟の地下スペースに間借りしていた理研小型中性子源システム（RANS）を移設し、本格的な研究を開始した。

国際評価

2014年3月2日から3月4日、第1回光量子工学研究領域アドバイザー・カウンシルを開催した。

2016年7月31日から8月2日、第2回光量子工学研究領域アドバイザー・カウンシルを開催した。

第4節 これまでの研究成果

世界最高出力の孤立アト秒パルスレーザーを開発

孤立アト秒パルスを発生させる方法である高次高調波発生の励起レーザーに、波長の異なる二つのレーザーを時空間で合成・制御した2波長合成レーザーを使用し、これに独自手法である高調波エネルギースケールリング法を組み合わせることで、軟X線領域（光子エネルギー30eV）においてパルス幅500アト秒、瞬間出力2.6GWの世界最高強度アト秒パルスの発生に成功した（2013年）。従来法と比較すると、100倍以上の高出力化を実現し、さらに励起レーザー光からアト秒

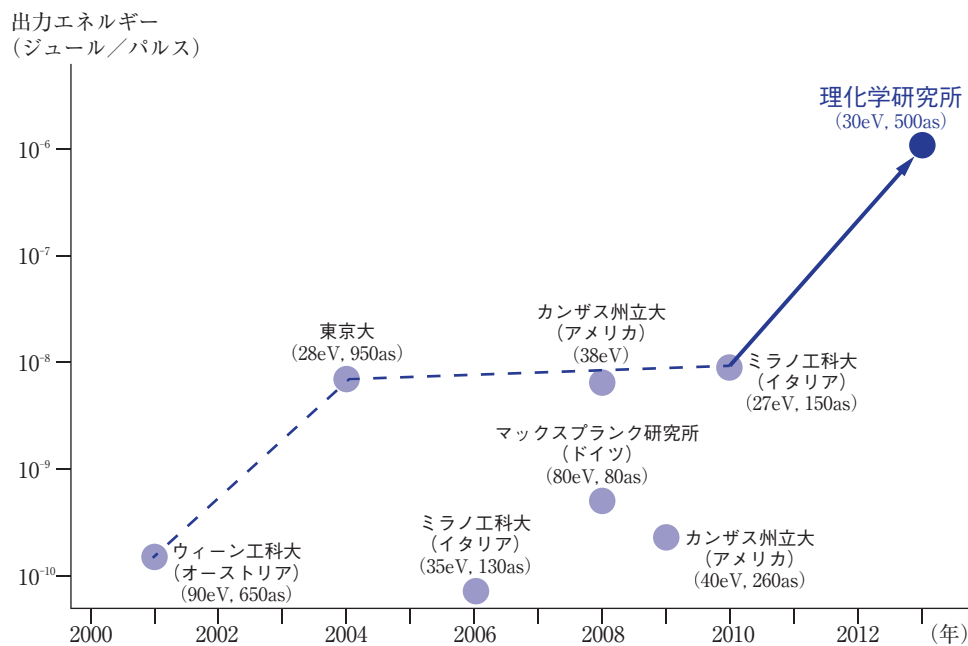


図4 各研究機関が開発した孤立アト秒パルス光源の出力エネルギーと年代ごとの推移

パルスへの変換効率も10倍以上改善した(図4)。これまで観測できなかった光イオン化に伴う分子内の電荷移動や、アト秒領域での非線形光学現象の観測が可能となり、未知の研究領域の開拓に大きな前進がもたらされると期待される。

光学顕微鏡と走査トンネル顕微鏡を融合させて、1.7nmの分解能を達成

光学顕微鏡と走査トンネル顕微鏡(STM)の融合である先端増強ラマン分光法(tip-enhanced Raman spectroscopy: STM-TERS)によって、1.7nmの空間分解能で、カーボンナノチューブの形状と光物性の同時測定に常温大気中で成功した。フォトンを用いる本手法は、超高真空極低温環境という特殊環境を必要とせず、光触媒反応や多様な電池材料などの電気化学反応機構の解明や生体材料などの分析に有効である。

世界で初めて、液体表面近くの電子移動反応をリアルタイムに観測

光を当てて化学反応を起こし、そのすぐ後に別の光を当てて、液体表面での電子の変化を初めて観測した。詳しく言うと、まず、水溶液表面近くに存在する、かご状のアミン分子(DABCO)やヨウ素原子負イオンに、60フェムト秒(フェムトは1/1000兆秒)の時間幅をもつ紫外域のレーザー光パルス照射した。これにより、これらの分子や原子の電子が溶媒である水の中へと移動する反応を開始させる。次に、その過程を第2の紫外線パルス(60フェムト秒)を照射して、リアルタイムに観測したのである。この第2のパルスを照射するタイミングを変えることで、液体から放出される電子の時間的変化を捉えることができ、さらにその速度と角度を詳細に測定することで、分子や原子の周りの溶液環境や電子移動反応の速さや移動方向を解明することができた。実験と並行して、共同研究グループが、溶液中におけるDABCO分子の電子状態や電子移動反応の理論モデ

ルを作成し、その量子力学的計算により、実験結果を定性的に再現することができた。このように、理論からも実験結果が裏付けられた。

次世代時間標準「光格子時計」の高精度化に成功

理研のある和光市と東京大学本郷との間で光ファイバーによる高精度周波数伝送を実施し、光格子時計を17桁の誤差精度で評価することに成功した。それとともに、低温環境内で時計遷移分光を行うクライオ型光格子時計を開発し、黒体輻射光によって生じる時計の不確かさを抑制して、18桁の誤差精度を実現した。

高精度な原子時計の実現は、計量標準である「1秒の再定義」に迫るだけでなく、従来の時計の概念を超えた新しい応用可能性を秘めている。例えば、離れた場所にある2台の原子時計の重力による相対論的な時間の遅れを検出することで、土地の高低差を測る「相対論的測地技術」へと展開することができる。また、物理定数の恒常性の検証などを通して、新しい基礎物理学的な知見や、そこから派生する基盤技術の開発が期待される。

1000兆分の1秒の時間遅延を観測

独自に開発したアト秒自己相関計（アトコリレーター）と、高強度アト秒パルス列レーザーを用いて水素分子をイオン化し、並行して開発したアト秒非線形フーリエ分光法を用いて、世界で初めてアト秒精度で分子内の電子波束を直接観測することに成功した。さらに、分子振動波束の生成過程が、従来考えられていた時間よりはるかに長い1-2フェムト秒となることを実証した。これは、分子を光でイオン化する際に、その遷移は瞬間的に起こるとするFranck-Condonの原理を覆す発見であり、化学反応の電子レベルでの理解など、未知の研究領域の開拓が可能になると期待される。

ゴルジ体シス槽は小胞体に接触し積荷タンパク質を受け取る

小胞体からゴルジ体のタンパク質輸送機構の新たなモデルを提案した（図5）。独自開発の高速高感度共焦点顕微鏡システム（SCLIM）を用いて、COP II小胞の被覆タンパク質と、ゴルジ体のシス槽およびトランス槽のタンパク質を異なる

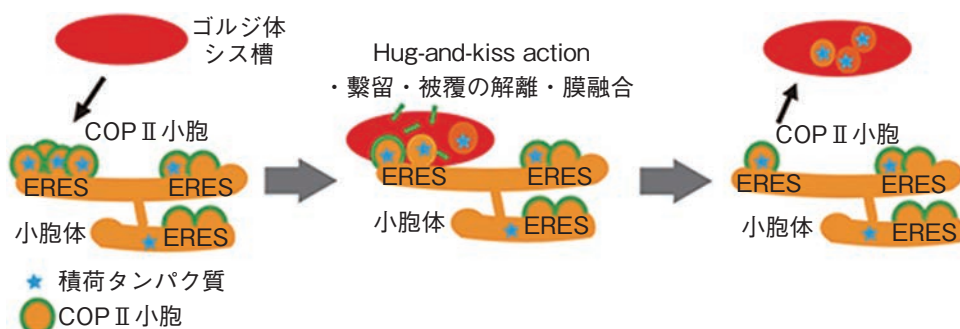


図5 新しい小胞体からゴルジ体への積荷タンパク質の輸送モデル

ゴルジ体のシス槽は①ERESのCOP II小胞に接触し、②それによりCOP II小胞のシス槽への繫留、被覆タンパク質の解離、小胞とゴルジ体の膜融合が起こる（Hug-and-kiss action）。その結果、③積荷タンパク質は小胞体からゴルジ体へ輸送される。

蛍光タンパク質で標識し、その挙動をライブイメージングで詳細に調べ、シス槽がCOP II小胞に接近し接触すること、シス槽の接触に伴って蛍光標識したCOP II小胞の被覆タンパク質の蛍光シグナルが減少することを発見した。この結果、従来説のようなCOP II小胞が細胞内を漂って標的となるシス槽へと運ばれるのではなく、シス槽が小胞体に接触して積荷タンパク質を受け取ることで輸送が行われるという新しい可能性が見えてきた。

室温で2次元のテラヘルツ波像を高感度に可視化

高効率に波長を変換する非線形光学素子として、独自に育成した有機非線形光学結晶DASTを用いて、「高感度リアルタイムテラヘルツ波イメージングシステム」を開発した。これによって、室温にて高感度にテラヘルツ波像を観測することに成功した。テラヘルツ波は光と電波の中間に位置する周波数帯域の波で、双方の特性を併せ持つ。そのため、非破壊検査、セキュリティチェック、医学および生物学的検査、農業、エレクトロニクス、物理計測、産業用オンライン製品モニタリング、火災時の生存者の探索など、多様な分野での応用が期待されている。

小型中性子源で内部を可視化

道路や橋といった社会インフラの非破壊検査の需要が増えている。こうした中、従来は透過法によってのみ可能だった内部の非破壊観察において、高速中性子ビームの対象物からの反射を検出することにより、内部を可視化する新手法（いわば反射法）が開発された（特許出願済）。実験とシミュレーションによる検証、装置の小型化、中性子線量の低減化等の技術開発を進め、産業界等との連携により運搬可能なシステムを開発すれば、全国の老朽化した橋梁等の大型構造物の非破壊診断も可能になり、国土の強靱化に大きく貢献できる技術といえる。

車両に積み込んだ可搬型加速器中性子源から中性子を入射し、橋を透過した中性子を車両からのアームによって、橋の下に設置された検出器で検出する透過型に対し、後方散乱（反射）型は、中性子源と測定対象の間に設置した検出器で、反射して戻ってくる中性子を測定する。後者では車両からのアームが不要となるため、当初の想定では不可能だった空港の滑走路やトンネル壁の計測が可能となる（図6）。

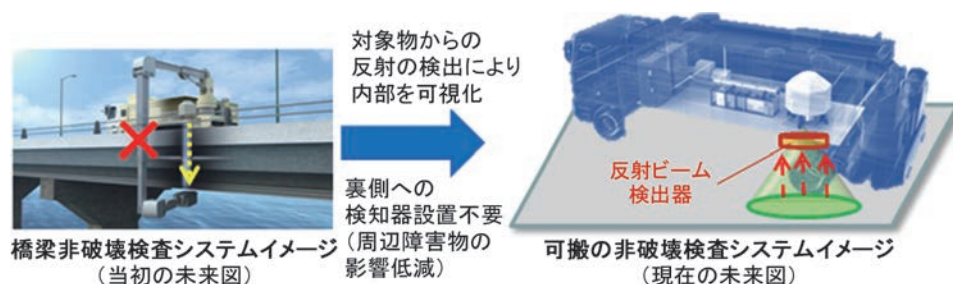


図6 中性子による橋の非破壊検査法のイメージ

