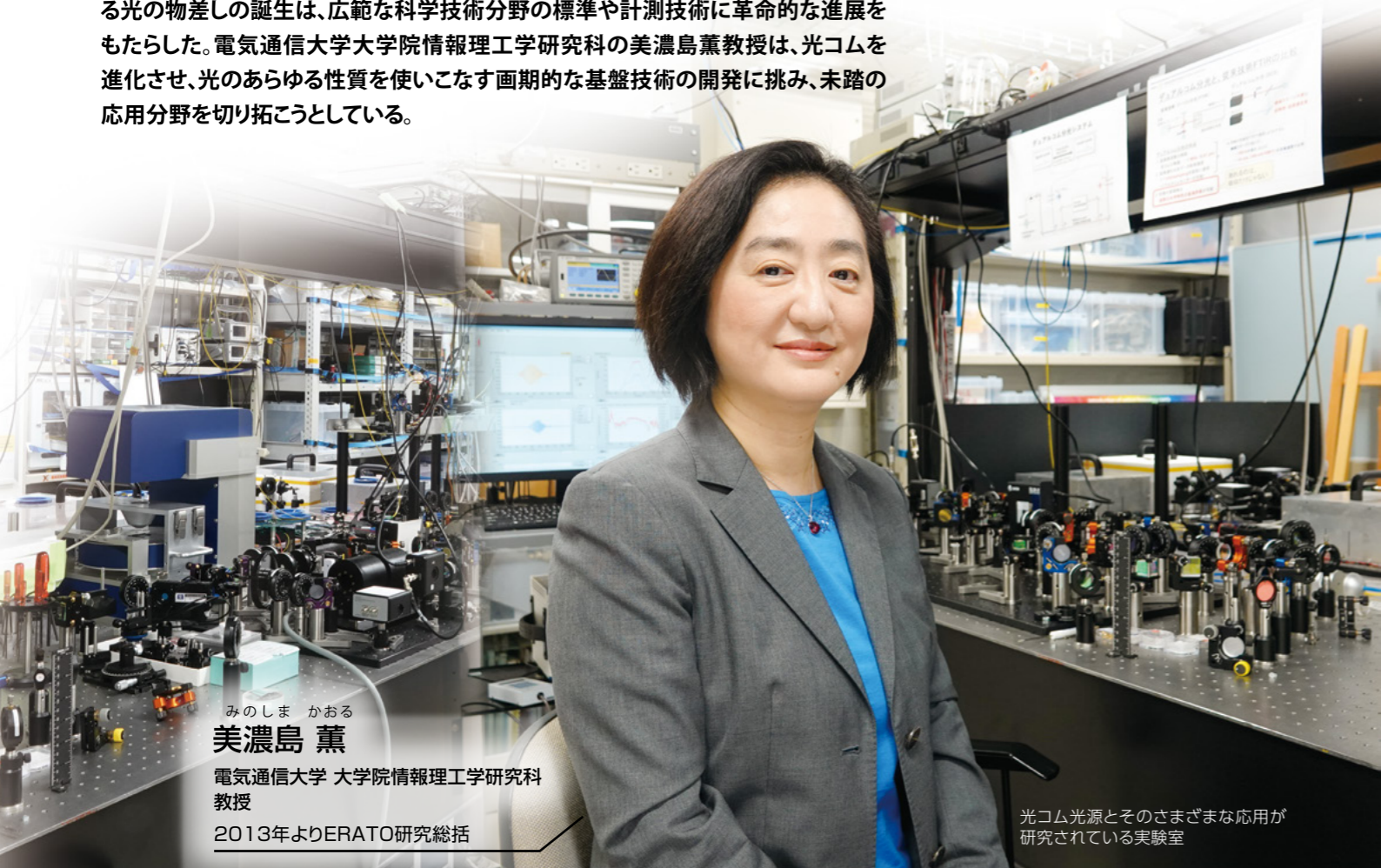


特集2

# 光の楽器をつくる 奏でる多彩な応用

「人類が手にした最も正確な物差し」と呼ばれる「光コム」。周波数を超精密に測定する光の物差しの誕生は、広範な科学技術分野の標準や計測技術に革命的な進展をもたらした。電気通信大学大学院情報理工学研究所の美濃島薫教授は、光コムを進化させ、光のあらゆる性質を使いこなす画期的な基盤技術の開発に挑み、未踏の応用分野を切り拓こうとしている。



みのしま かおる  
**美濃島 薫**  
電気通信大学 大学院情報理工学研究所 教授  
2013年よりERATO研究総括

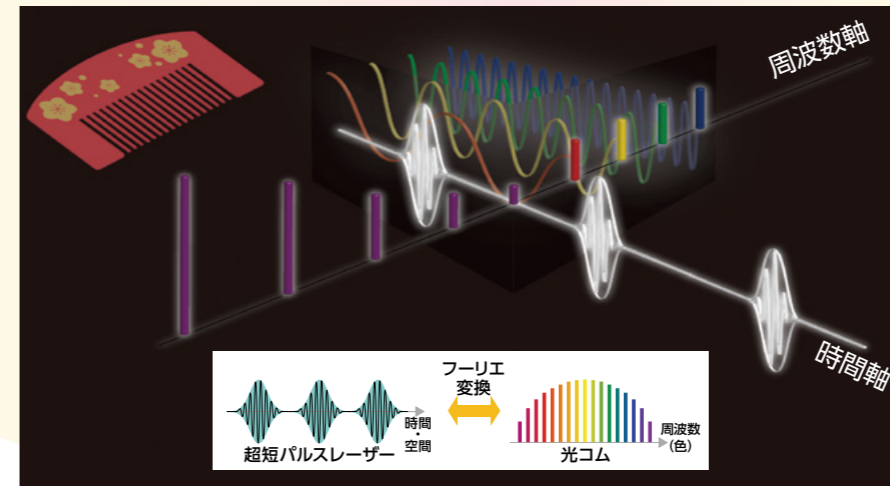
光コム光源とそのさまざまな応用が研究されている実験室

## ノーベル賞を超える 光のくしを求めて

自然界に満ちあふれる光は、古代より科学者の探究心をかきたててきた。光研究は「初めて」や「最高」と形容される発見や開発の宝庫である。波長、周波数、時間、空間、強度、偏光など、電磁波である光は多彩な側面を持ち、その利用法も多岐にわたるが、意外にも光を自在に操る技術は存在しない。「光を単なる情報伝達媒体ではなく、その本質

を生かし科学技術や産業で主役として活躍させるツールをつくるのが究極の夢です」と電気通信大学大学院情報理工学研究所の美濃島薫教授は語る。その夢を実現する技術が光コムだ。周波数軸上で、多数の非連続的な周波数ごとの強度分布（スペクトル）が精密かつ等間隔に並んだレーザー光源である（図1）。その形が「くし（コム）」に似ていることから、光コムと呼ばれている。規則正しく並ぶくしの歯を数えれば、極めて精密な物差しになる。

20世紀末に光コムが発明されるまで、光の周波数の絶対計測は至難の業だった。周波数が非常に高く、光の振動が検出できないことが直接測定を阻んでいた。周波数基準はマイクロ波で、光の周波数に比べて何桁も小さい。1ミリメートルの目盛りの物差しを使って、1キロメートルの長さ測定するようなものだ。世界中で光周波数絶対計測のための国家プロジェクトが競って行われていたが、その手法は非常に大がかりで、何台もの発振周波数の異なる装置



■図1 光コムは短い時間のみ繰り返し光る超短パルスレーザーの側面を持つ。極めて高精度に制御された超短パルス列が時間軸上で等間隔に並び、周波数の異なる多数の光で構成されるため、周波数軸上では、1つ1つの光のスペクトルがくし状に精密かつ等間隔に並んでいる。

を少しずつつないで測定していき、光の周波数に到達させるというものだった。「短い物差しをつないでも、やがてずれがたまり、不確かな測定結果しか得られません。世界中の科学者が長くて正確な光の物差しを待ち望んでいました」。1999年、人類は念願の物差しを手に入れた（図2・3）。米独の物理学者らのチームが、超短パルス発生するモード同期レーザーを光コムとして用いることに成功したのだ。それは思いもかけない革命的な異分野融合だった。光コムは、周波数で見ると、くしの歯1本1本が極限的に一定の周期で振動する超精密な連続波レーザーで、時間軸で見ると一瞬だけ超高速に光る超短パルスレーザーである。また、くしの歯の間隔やオフセット（くしの歯全体が間隔を保ったまま横にずれている量）はエレク

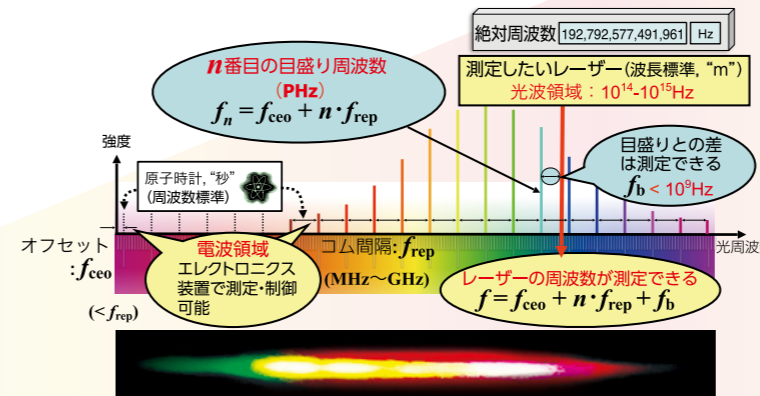
トロニクスで扱うことのできる電波やマイクロ波周波数で、くしの歯自体は光周波数であり、これらが一体としてつながっている。このように、超精密と超高速、エレクトロニクスと光技術という、従来異なるものとして、歴史的にも独立に発展してきた科学技術分野が融合した。「周波数は時間や空間など多次元の物理量に高精度に相互変換することができます。光コムは秒とメートル、光波と電波をつなぎました。一見無関係に見える値や量を、たった1本の物差しで測れるようになったのです」。光周波数の測定精度は飛躍的に向上し、2005年に光コムは異例の速さでノーベル物理学賞を受賞した。光コムは単なる「周波数の物差し」とど

まらないと確信し、「ノーベル賞を超える」光コムを追求することを決意した。

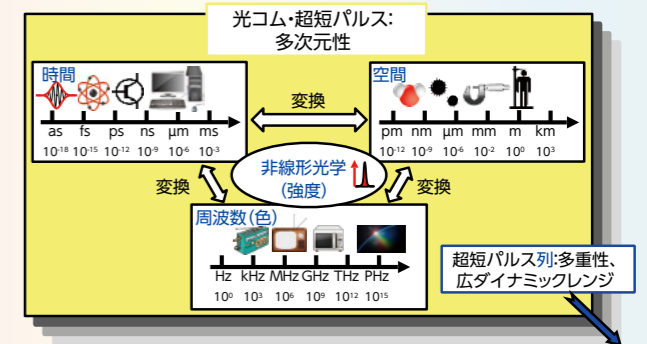
## 物差しから楽器へ 練習曲を弾きこなす

光コムを物差しから楽器に進化させることが美濃島さんの目標だ。「電子楽器のシンセサイザが音の強さや音程、リズムをさまざまに組み合わせ、たった1台で多様なジャンルの音楽を奏でられるのは、音が規則的に並ぶ鍵盤があるからです。光コムを鍵盤として、シンセサイザのように光の優れた性質を自由自在に操り、その潜在能力を極限まで引き出せるツールに高めたい」と、「知的光シンセサイザ」をERATOプロジェクト名に掲げた。

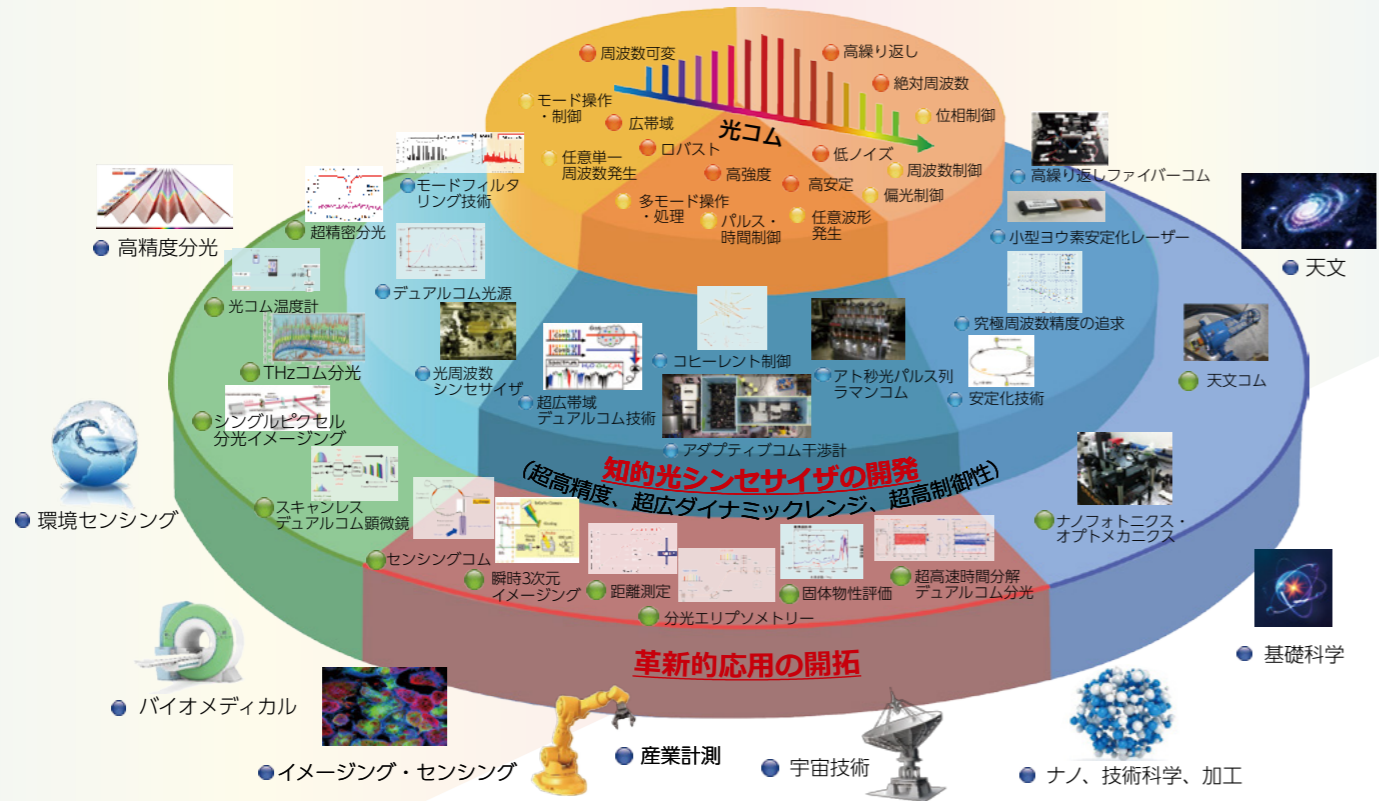
目指すコンセプトとして、美濃島さんは光コムを基盤とする科学技術プラットフォームを描いた（図4）。「あらゆる既存の科学技術分野で、光コムを使ったらどうなるかを考えてみました」と美濃島さん。応用基礎技術まで一歩踏み込み、「光コムでできることを具体的に示すことで、これまで光コムに縁のなかった分野を呼び込みたい」という狙いだ。周波数の精密性だけに注目する欧米中心の研究潮流とは一線を画し、光のあらゆる性質を使い尽くす観点から広範な分野への応用可能性を世界に先駆けて示したことは、「何もないところに山をつくったようなもの」と美濃島さんは例える。国際会議で講演すると「光



■図2 周波数絶対値を付与された光コムは、長くて正確な光の物差しである。1つの物差しの中に異なるサイズの目盛りがあるように、光コムも異なる基準を持っている。周波数軸上では、光周波数（サブPHz:ペタヘルツ）、スペクトル幅が $10^4$  (THz:テラヘルツ)、コム間隔 (GHz:ギガヘルツ)、オフセット周波数 (MHz:メガヘルツ以下) などがある。くしの歯を数えることで、幅広い帯域の光の周波数や広範囲の時間、距離を精密に測定できる。



■図3 光コムは時間、空間、周波数の多次元性を持っている。マイクロ波から可視光、X線などを切れ目なくつなぐだけでなく、秒の定義とメートルの定義や、エレクトロニクスと光技術など、一見異なる量や分野を高精度かつ広範囲に切れ目なくつなぐ。



■図4 科学技術プラットフォームとして「知的光シンセサイザ」の構築を目指す。光コム(1段目)技術の高度化とともに、知的光シンセサイザの開発(2段目)と革新的応用の開拓(3段目)の研究開発を進めてきた。光コムへの応用は、当初は周波数計測・標準など限定的だったが、美濃島さんは新たな研究潮流を生み出そうと、これまで光コムに無縁だった科学技術分野を含め、応用可能性をゼロから描き、実在することを示してきた。

コムがこれほど応用範囲の広い万能なツールであるとは知らなかった」と反響が大きく、世界的にも高い評価を受けているという。

「いわば楽器そのものを良くする研究として、光コム光源の高度化はもちろん必要ですが、それだけではなく、光コム能力を引き出し、さまざまな応用に使えるところまで引き上げるような観点から、光コムに特化した基礎研究や技術開発を一体として包括的に進めていくことが必要です」と、「知的光シンセサイザの開発」と「革新的応用の開拓」の2本柱を立てた。光コムは多彩な性質を余すことなく生かす「知的光シンセサイザの開発」は、楽器を弾きこなす技術の開発である。「革新的応用の開拓」は、光を使いこなすことで可能となる応用の道筋を示す基礎研究で、練習曲を弾くようなイメージだ。

### 2つの光源で固体物性を評価 立体計測や天体観測の道具に

ERATOプロジェクトの代表的な成果の1つは、デュアルコム分光による固体

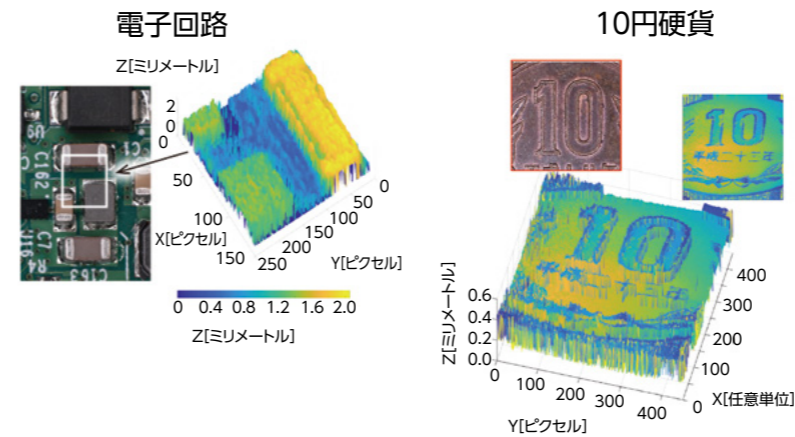
材料の物性評価システムだ。周波数がわずかに異なる2つの光コムを用いて、広帯域の光周波数信号を取得する次世代の分光手法で、高分解能、高精度、高速、広帯域測定を実現する。気体の分光分析に注目されてきたデュアルコム分光の多様な可能性を示すため、美濃島さんは固体材料の詳細な物性評価に使うことに挑戦し、世界で初めて成功した。たった一度の測定で、材料を透過した光の全ての波長情報を取得できる。材料の屈折率や吸収、複屈折、光や電磁場の印加によって動的に変化する特性の他、材料の厚さや複雑な形状や構造を、精密かつ高速に複雑なモデルの仮定なく測定する。この成果を実用化するため、従来は2台の光コムを制御する難しさから広範な普及が妨げられていたのに対し、1台のレーザー共振器から2つの光コムを発生するデュアルコムファイバーレーザーの開発に取り組んで、簡便でありながら高性能で安定したデュアルコム光源の技術確立した。

距離の測定の精度向上でも成果を上げた。光の飛ぶ時間を基に距離を測定する場合、気圧や気温による光の屈折

率の変化や揺らぎが誤差の原因となり、補正操作が必要となる。気温が1度変化すると1メートル当たり約1マイクロメートルの誤差が生じてしまう。光コムは超短パルス列が常に等間隔を高精度に保つ性質を利用して、美濃島さんは「環境変動に追従する物差し」を開発し、飛んでいる光自身に屈折率を測定して「自己申告」させ、リアルタイムに揺らぎを高精度に補正することを実現した。

天体の動きを知るには、地球に到達した光波長の微小な変化を高精度で観測する必要がある。プロジェクトチームの力を結集して天体観測用に最適な光コム(天文コム)を開発し、国立天文台ハワイ観測所岡山分室の望遠鏡に装備された高分散分光器に組み込んだ。日本で初めて光コムを基準とした天体の分光観測に向けて大きな一歩を踏み出した。太陽系外惑星や第二の地球の発見につながると期待される。

瞬時3次元イメージングは、光コムならではの他に類を見ない技術だ(図5)。微小なものから巨大なものまで、さまざまなサイズの物体の3次元画像を、1マイクロメートル以下の高精度で、超高速

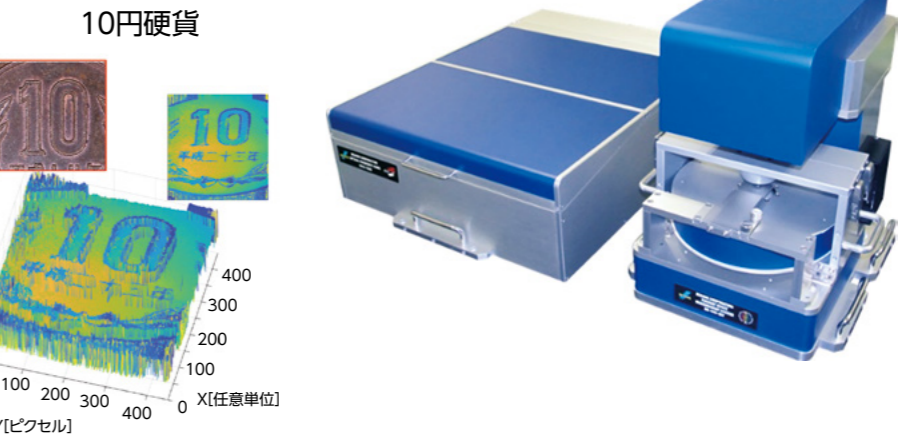


■図5 周波数(色)が時間と共に規則的に変化する光コムを測定対象に照射する。反射により戻ってくる光は距離によって色が異なることを利用して、光自身が同時に多点の距離情報を抽出し、形状情報を瞬時に得る新しいイメージング手法を開発した。非常に小さな物体でも、大きな段差がある物体でも、精度を落とすことなく測定でき、超高速現象も捉えられ、カメラ解像度の3次元像を瞬時に得られる。

カメラのように一瞬で撮影できる。周波数が時間と共に規則的に変化する光コムを測定対象に当てると、物体の凸凹に応じて反射光で時間のずれが生じることを利用し、色の変化として検出する仕組みだ。撮影時間はわずか数10フェト(1フェトは1000兆分の1)秒のため、超高速現象も捉えられる。「光が持つ空間、時間、色の性質同士を、瞬時に光自身が情報交換する技術をかかって考案したのですが、当時は大きく高強度なレーザーを使う必要がありました。光コムを使うことで小型化が可能となり、従来技術では避けられない精度と範囲と速度の3つのトレードオフも解消され、実用化に大きく近づいています」。

### 応用の種が芽吹く 誰もが楽器の弾き手に

ERATOプロジェクトから生まれた数多くの応用の種は、今まさに芽吹いたところだ。「計測から伝送、処理、表示、加工や治療まで、光の性質をそのまま使い尽くす一貫通の技術確立したい」と美濃島さんは熱く語る。「光コムを使った環境センシングなら、極微量の有害物質を検出し、さらに光の力で浄化までできるようなことが考えられます。医療分野では、呼気に含まれる極微量の物質をセンシングして病気を初期段階で発見して、さらには光の治療と組み合



■図6 ネオアークと共同開発したデュアルコム分光法による測定装置のプロトタイプ。周波数がわずかに異なる2台の光コム光源(左)をファイバー接続により測定装置本体(右)に入力する。幅260ミリメートル、奥行き360ミリメートル、高さ400ミリメートル。

わせるなど、さまざまな処理を光だけで完結できる可能性を持っています」。描いた科学技術プラットフォームに点在する研究テーマを、1つ1つ埋めるように研究開発し、それが実在することを証明してきた。「一般的な研究資金では確実な個別の研究テーマに切り崩さざるを得なかったでしょう。光の利用を根源から変革するこの研究は、ERATOでなければできませんでした」と振り返る。異分野から集結した若手研究者の貢献も大きいという。「光コム自体が異分野融合で、柔軟な発想が生きる分野です。世界をリードする技術に発展させてくれると、若手研究者には大いに期待しています」。光コムが登場によって、国家プロジェ

クトレベルだった光周波数の測定装置も、今や大学院生が作製できるまでに。光コムへの応用は当初の予想を超えて拡大しているが、光コム光源自体を使いこなすのに高度な知識と技術が必要で、まだ十分には普及していない。楽器の弾き手が増えてほしいと、ネオアーク(東京都八王子市)と共同で、デュアルコム分光法による汎用的な測定装置のプロトタイプを作製した(図6)。「光技術をエレクトロニクスのように日常生活に欠かせない身近な存在にして、人類が光の優れた性質の恩恵を受けられるようにしたい」と美濃島さんは願っている。「知的光シンセサイザ」が誰もが使える楽器になるのは、そう遠くない未来だ。



美濃島研究室では学生や若手研究者たちが日々切磋琢磨している。研究室の立ち上げと同時にERATOプロジェクトが発足し、美濃島さんは学生や若手研究者と共に光コム研究の最先端を走り続けてきた。