

はみ出せ，光波シンセシス

芦原 聡

はじめに

光波シンセシス研究グループの「シンセシス (synthesis)」は「合成」を意味する英語であり，音の合成や化学合成を指す際に用いられる．音を重ねてさまざまな音色を作る音楽のシンセサイザーになぞらえると，周波数の異なる光を重ねて光電場の時間波形を操る波形整形器は光のシンセサイザーとよぶことができよう．同様に，空間モードの異なる光を重ねて光電場の空間分布を操ることも可能である．われわれは，光のパラメーターである周波数・振幅・位相・偏光の時間・空間分布を制御する技術を「光波シンセシス」とよび，主題として扱ってきた．本稿では，現在の光波シンセシスを俯瞰し，分野の未来を展望する．

1. 光波シンセシスの現在

1.1 時間領域の光波シンセシス

超短パルスレーザーの波形整形器¹⁾では，回折格子とレンズによって超短パルスレーザーの光を周波数ごとに空間展開し，フーリエ面に配置した空間光変調器で振幅・位相を変調する．それらを再びレンズと回折格子で一本のビームに重ね合わせることで，光電場波形の制御された光パルスが生成される．この波形整形器は，極短パルス発生のための精密な分散補償²⁾，物質のコヒーレント制御^{3,4)}などに活用されてきた．より一般化されたベクトル波としての波形整形も可能である．すなわち，時々刻々の電場をその振動面（偏光方向）まで含めて制御することができる⁵⁾．これら任意波形整形を可能とする土台には，モード同期発振というレーザー技術がある．モード同期によって，レーザー共振器内で発振する無数の縦モードが，一定の位相関係で重ね合わせられる．こうしてはじめて，ピコ秒～フェムト秒の超短パルス発生や任意波形整形が可能となるのである．なお，昨今進展の著しい光周波数コムは，縦モードの周波数を精密に安定化させたモード同期レーザーである．シンセサイザーの観点からみると，素材となる無数の周波数成分の単色性を向上させたものといえる．

1.2 空間領域の光波シンセシス

光の振幅・位相の空間分布を制御するには，液晶材料などを用いたいわゆる空間光変調器が用いられる．例えば，干渉計測やレーザー増幅器における波面補償，光の並列性を生かした情報処理システムの研究などで活用されてきた．空間的な分布をもつ光は，数学的には，空間モードの異なる複数の光の重ね合わせとしても表現できるため，その生成は光波シンセシス（光波の合成）といっても差し支えないだろう．

近年ホットな話題は，らせん状波面をもつラゲール・ガウスビームである⁶⁾．円偏光が物質のスピン角運動量と相互作用することがよく知られているが，ラゲール・ガウスビームのらせん状波面が物質の軌道角運動量と数学的に同等な表現をもつため，光と物質の間での軌道角運動量のやりとりに興味もたれている⁷⁾．らせん波面を利用した，微粒子の周回運動操作やらせん構造の光造形など，マクロなスケールで光と物質の相互作用を制御する技術は，今まさに大きく進展している．偏光状態に空間分布のあるビームはベクトルビームとよばれる⁸⁾．例えば，光電場の振動面（直線偏光の方向）がビームの中心から放射状に分布するラジアル（軸対称）偏光ビームは，高 NA の対物レンズで光を絞ったとき，光軸方向に振動する電場ベクトルを生成する．この Z 偏光とよばれる性質を利用すると，結晶や分子の配向を区別した計測が可能となる．

光の振幅・位相・偏光の空間分布を制御するための素子として，メタ表面が盛んに研究されている．メタ表面とは，光の波長よりも細かな構造を利用して，物質の光学応答を操作した人工的な物質であるメタマテリアルの二次元版である．メタ表面によって実現する極薄のレンズである「メタレンズ」や回折光学素子としての活用が進んでいる．

光の空間分布を回折限界以下のサイズで制御するためには，やはり人工構造に頼らざるを得ない．金属微細構造に宿る表面プラズモンモードを用いると，電磁場を光の波長以下の空間に局在させることができる．プラズモニクスを活用した（近接場）顕微鏡，物質の光吸収・発光の増強などが盛んに研究されてきた．

東京大学生産技術研究所 E-mail: ashihara@iis.u-tokyo.ac.jp

2. 光波シンセシスの未来

光波シンセシス技術の未来にはいくつかの方向性が考えられる。まず、光波の究極的な制御技術の追求である。究極的に周波数を安定化した光周波数コム、モノサイクルレベルの極短パルスの電場波形の自在な制御、高純度の高次ラゲール・ガウスビームなどが挙げられる。次に、こうした光波シンセシス技術を、X線からテラヘルツ域に至る幅広い波長域で実現する試みがあるだろう。さらには、光波シンセシスを幅広い分野で活用するためには、光の非専門家にも使える技術へと仕立て上げることも必要である。これは、光のあらゆるパラメーターを一括制御する、ユーザーフレンドリーな光シンセサイザーといえる。

シンセサイズされた光波を活用する知恵の創出も加速するであろう。特に、光-物質相互作用の自由度の拡大により、新たな計測、新たな物質制御が可能となると期待される。超短パルスの波形整形による物質の量子制御（量子情報処理、化学反応制御、相転移誘起など）は、科学者の長年の夢である。これまでも熱心に研究が行われてきたが、今後、使用できる光波の波長域の拡大、強い光電場による非摂動的な光-物質相互作用の導入、物質科学サイドのイノベーションなどによって、大きな進展がもたらされる可能性を秘めている。レーザーピンセットに代表される光の放射圧の利用は、光波制御技術のみならず、多彩な光-物質相互作用を駆使することにより、対象をマイクロメートルサイズの誘電体微小球からナノ物質へと広げている。近い将来、気相原子のレーザー冷却とレーザーピンセットのギャップを埋める、メゾスコピック領域の物質操作に挑戦する日が来ると期待される。これらは「従来の光」では叶わなかった物質操作であり、光の新たな可能性をひらくという意味で、科学としての醍醐味に溢れる。

光波シンセシスは、コヒーレントな光源であるレーザーに深く根ざしており、その意味で、量子エレクトロニクスと光学の融合領域といえる。そのため、光学の枠にとらわれず、そこから大きくはみ出し、量子エレクトロニクスに深く入り込むことによってこそ、革新を生み出すことができるといえよう。また、光波シンセシスを活用する新たな知恵を生み出す上では、光学・量子エレクトロニクスの範疇からみ出し、物質科学・生命科学・エレクトロニクス・エネルギーなどの分野に入り込んでいく開拓精神が求められるだろう。多様な研究者が、光の可能性を拡大する光波シンセシスという見方に触れ、それぞれの切り口、それぞれのはみ出し方でその活用を図ることで、ユニークな学術・技術が生まれるのではなかろうか。

次の時代を切りひらくため、今日の光波シンセシスからみ出し、超えて行こう。量子に思いを馳せる、宇宙に思いを馳せる、暗黙の前提と考えていたレーザー技術からあえて離れてみる、学術色の強いこの分野で起業を画策するなど、切り口はまだまだありそうだ。

文 献

- 1) M. M. Wefers and K. A. Nelson: J. Opt. Soc. Am. B, **12** (1995) 1343-1362.
- 2) 山下幹雄, 山根啓作, 森田隆二: 応用物理, **76** (2007) 154-159.
- 3) M. Shapiro and P. Brumer: Phys. Rep., **425** (2006) 195-264.
- 4) B. Kohler, J. L. Krause, F. Raksi, K. R. Wilson, V. V. Yakovlev, R. M. Whitnell and Y. J. Yan: Accounts Chem. Res., **28** (1995) 133-140.
- 5) T. Brixner and G. Gerber: Opt. Lett., **26** (2001) 557-559.
- 6) 尾松孝茂: 光学, **42** (2013) 586-596.
- 7) K. A. Forbes and D. L. Andrews: Opt. Lett., **43** (2018) 435-438.
- 8) 小澤祐市, 佐藤俊一: 応用物理, **82** (2013) 27-32.