「補償光学・位相共役」解説小特集号によせて

有賀 規

郵政省 通信総合研究所 (〒184-8795 東京都小金井市貫井北町4-2-1)

On the Topical Papers of Adaptive Optics and Phase Conjugation Technologies

Tadashi ARUGA

Communications Research Laboratory, Ministry of Posts and Telecommunications
4-2-1 Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795

(Received December 14, 1998)

最近活発に行われている研究分野の中に光波面の制御に関する技術がある。レーザー光を含む光は、光子(photon)又は光波(lightwave)として取り扱うことができるが、今回小特集のテーマとして取り上げられた補償光学と位相共役は後者に属するもので、光を波として扱い、波面を制御したり、生成したりする技術である。補償光学は英語ではadaptive opticsと呼ばれている。日本語の補償光学の名称が最適であるか否かは分からないが、最近一般に用いられているので、この用語を用いることにした。adaptive opticsの一般的な概念は、比較的速い応答時間且つ実時間での光波面の制御、光波面の歪みの補正である。adaptiveの他にactiveという言葉もよく用いられるが(例えばactive optics等として)、この場合は、遅い応答又は静的な制御として定義されている。大型望遠鏡の主鏡のたわみの補正等はこの範疇に入る。一方位相共役は、英語ではphase conjugationと呼ばれている。特に光の場合optical phase conjugationの語も用いられる。その言葉通り、位相が共役な状態又はそのような光波(位相共役波)の生成を意味する用語として用いられてきている。

歴史的な背景を見ると、先ず補償光学はアイデアそのものはかなり古くに提案されており、天体観測での画像のぼやけを引き起こす大気ゆらぎによる光波面の歪みを補正することが考えられた。レーザーが登場してからは、レーザー光が大気中を伝搬する際、大気ゆらぎの影響を受けてビームが分散したり、波面が乱れてコヒーレンシが悪くなったりすることを補正する研究が行われた。1970年代の終わり頃から具体的に実験装置が製作され、1980年代になってから活発に研究開発が行われた。特に米国において、大出力レーザー光の地上-宇宙伝送に関連する研究として軍を中心に、重要課題として取り上げられ、最先端の技術が開発されてきたと聞く。今現在、実際にどの程度のレベルまで達成されているかは分からない。1990年代になって、東西の冷戦状態が解けてからは、この技術

が一般にリリースされ、特に天文学者を中心とするグループによって、世界的にも、さらに加速されて研究が進んでいる。補償光学の技術は、核融合等の高エネルギーレーザーの分野にも応用できるので、研究分野が広がっている。

一方位相共役は、その現象は1972年ロシアのゼルドビッチ等によって誘導ブリルアン散乱の実験で発見されたもので非線形光学効果に基づいた技術である。すりガラス板のような歪媒質を伝搬したゆがんだ光ビームでも、位相共役光を生成して逆方向に伝搬させると元に戻った時には、ゆがみが補正される。位相共役光は、一つの魔法のような能力を持つ光として、発見以来今日までその発生の手法や応用が数多く提案され、研究が進んできている。

補償光学と位相共役について技術の概要を述べておくことにする。補償光学は前述のように、ゆらぎ媒質中を光が伝搬する際、媒質の屈折率の変動によって生ずる光波の波面(又は位相)の歪を、実時間且つ能動的に補正する技術である。一般に用いられている方法は、光波面の歪を波面センサー(wavefront sensor)と呼ばれるセンサーで検出し、この信号を基に可変形鏡(deformable mirror)を制御する。可変形鏡は、言葉通り、鏡の表面の形が変えられる反射鏡であるが、実時間で歪んだ波面と等価な反射鏡面を生成すれば、反射された光波は波面の歪が補正されて出力されるという原理である。波面センサーの信号による可変形鏡の制御はフィードバックループを用いて行う。大気中伝搬のゆらぎの補正の場合、光の波長によってゆらぎの強さや周波数が異なるので、使用する装置のパラメーターも変わってくる。波長が短い程、波面の歪は空間的に細かく、振幅が大きくなり且つ変動の周波数も高くなるので、より多素子でダイナミックレンジの大きい高速応答の波面センサーと可変形鏡及び制御装置が必要となる。従って、短波長程ゆらぎの補正は難しくなる。また、素子数が十分多ければ実際の光波面の歪により近い状態の反射鏡面の歪を

生成できるが、素子数が多くなる程、制御が困難となるので最適の素子数の設定が必要となる。伝搬媒質が大気以外の場合も、補正の原理は同じである。また、高出力レーザーを用いる場合の反射鏡の熱変形やビームの熱レンズ効果等を補正するのにも補償光学が有効であり、反射面の材料や可変形鏡の構造の改良も含めて、研究が盛んになってきている。

位相共役は、その状態を表す式を電場で見ると、位相の時間成分はそのまま空間成分が反転している。従って入射光に対して、位相共役光は波面が同じで反対方向に進む一つの複製波である。入射光の電場の複素共役をとって、時間 t を $-t$ に置き代えた状態でもある。これは映画やテレビの画像を逆送りにした画面を見ていることに相当し、このことから、“時間反転波”(time reversal wave)とも呼ばれる。従って、光の伝搬路に歪があっても、位相共役光として歪媒質中を伝搬して戻ってきた時には、歪が自動的に補正されているという原理である。位相共役光の生成には、誘導ブリルアン散乱、縮退4波混合等の光波混合、フォトリフラクティブ効果(photorefractive effect)等多くの技術が用いられてきている。いずれの場合も、光波の入力によって非線形媒質内で形成された一種の回折格子によってプローブ光が逆方向に反射されると、その反射光が位相共役になることを利用している。一般の鏡と比較するため、共役を引き起こす非線形媒質の部分は位相共役

鏡(phase conjugate mirror)と呼ばれている。位相共役技術はその応用範囲が広いことから、非線形結晶の改良も含めて、伝送画像の歪補正や高出力レーザーのビーム性能の向上等、多くの研究が行われてきている。

本解説小特集では、補償光学と位相共役とをまとめて取り上げ、関連分野での世界第一線の方々に解説をお願いした。まず、補償光学では世界的に有名なハワイ大学のRoddier教授に補償光学についての歴史的背景を含む基礎的なことから最新の天文学への応用の状況を解説していただいた。天文学とともに利用が盛んに研究されている高出力レーザー分野での補償光学系について電気通信大学の植田教授に執筆いただいた。位相共役では、その概要と歪画像補正への応用について、中国の物理研究所(助教授)から通信総合研究所の特別研究員として来日して研究している同僚の王氏に、特に高出力レーザー用の位相共役技術について大阪大学の中塚教授と吉田氏に、各々執筆していただいた。

筆者は関連分野の研究に携わっているということで本解説小特集号のまとめ役を依頼された次第である。補償光学・位相共役の研究やその応用領域は広く、全体をカバーすることはできないが、本解説小特集によって、この分野での研究の動向や技術の概念が理解でき、今後のレーザー研究の参考にしていただければ幸いである。