Technical
Survey

技術解説

補償光学

白井 智宏[†]

補償光学とは、光波の歪みを実時間で計測し補正する技術であり、その概念は、大気ゆらぎによってぼやけた天体像を実時間で改善することを目的として提唱された。現在、補償光学の応用分野は天文学を越え、医療や工業分野にまでその広がりを見せている。本稿では、補償光学系の仕組みを概説した後、眼底イメージング機器への応用例を紹介する。

キーワード：波面補正，画像回復，可変形鏡，液晶空間位相変調素子，補償光学制御，眼底イメージング

1. ま え が き

一般に、カメラや望遠鏡などの光学機器では、より鮮明に物体の像を取得できるものほど性能が良いとされる。しかし、どんなに高性能の光学機器を使っても、期待するほど鮮明な像を得られないことがある。例えば、地上から望遠鏡で天体を観測する場合、よく晴れた静かな夜であっても大気ゆらぎの影響により、取得される天体像は必ずぼやけてしまう。

補償光学とは、光波の歪みを実時間で計測し補正する技術であり、まさにこの例に示す問題を解決する手段として、すなわち、ぼやけた天体像を実時間で改善することを目的として提案された概念である¹⁾。その提唱から半世紀以上が経過した現在、光波面の計測・制御技術の進展に伴い、優れた性能をもつ補償光学系を手軽に構築できる環境が整いつつある。また、当初の目的である天文分野はもちろん、それ以外の分野にも、補償光学は応用され大きな成功を取ってきた²⁾。その一例となる眼底イメージング機器への応用では、補償光学を使って眼球光学系の歪みの影響を除去し、これまでにない鮮明な眼底像を、生きたまま実時間で取得することに成功している³⁾。

本稿では、最初に補償光学の原理を簡単に説明した後、実際の装置構成に関する最近の進展を紹介する。次に、補償光学系の制御法を、直感的に理解できるようにわかりやすく概説する。さらに、補償光学の最近の応用例として、2009年度に終了したNEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）助成事業「高精度眼底イメージング機器研究開発プロジェクト」の成果をいくつか紹介する。

2. 補償光学の原理

準備として、結像光学系における像形成のメカニズムを簡単に整理しておこう。自然光で照明された物体は、インコヒーレントに発光する理想的な点の集合と見なすことができる。結像光学系において、これらの理想的な点物体の像が同様に理想的な点となれば、その集合として物体と等価な像が形成される。しかし、大気ゆらぎなどの外乱の影響を受けると、点物体の像は必ずしも点にはならず、広がりをもった分布になってしまう。その結果、ぼやけた点の集合として像が形成されるため、物体の細部が再現されず不鮮明な像となってしまう。

このように劣化した像を改善するためには、点物体の像が点になるように、外乱の影響によって歪んだ光波面を元の状態に戻せばよい。天文観測の例で考えると、物体（天体）は極めて遠方にあるので、点物体（点と見なせる星）からの光は、望遠鏡の開口に到達するまでに理想的な平面波となる。しかし、外乱の影響により、歪んだ光波面が望遠鏡に入るため、理想的な点ではなく、ぼやけた点像が取得される。つまり、点物体からの光波面が常に平面波として望遠鏡に入るように光の波面を制御すると、外乱の影響によって劣化した像を改善することができる。

これを実現する補償光学系は、一般に、図1に示すように、光波の歪みを計測する「波面センサ」、その歪みを補正する「波面補正素子」、波面センサからの情報に基づき波面補正素子を制御するための信号を作り出す「制御装置」によって構成される。その基本動作は、入射波面の歪みを打ち消すように、逆向きの歪みを波面補正素子上に素早く形成するのみである。このとき、歪んだ入射波面は反射の過程で補正され、フラットな波面になる。その結果、この補償光学系を通して天体を観測すると、大気ゆらぎの影響が打ち消され、鮮明天体像が取得される。

ここで注意すべきことは、波面センサで計測する光の波

[†] 産業技術総合研究所 電子光技術研究部門

"Adaptive Optics" by Tomohiro Shirai (Electronics and Photonics Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba-shi)

図1 補償光学系の概念

面は、点と見なせる星（ガイド星）からの光波面であり、測定対象となる天体全体からの光波面ではないことである。つまり、ガイド星からの光波を利用して補償光学系を動作させ、その状態の補償光学系を使って、ガイド星の近傍にある目的の天体を観察することになる。なお、実際には波面計測に必要な明るいガイド星を見つけることが難しい場合が多いため、強力なレーザー光を使って高度90km付近のナトリウム層に人工的な星（レーザーガイド星）を生成し、これをガイド星として利用する⁴⁾。これは、補償光学系を他の分野に応用する際にも同様であり、必ず観察対象物体の近傍に、レーザーガイド星に対応する参照点光源を準備しなければならない。

3. 補償光学の実際

補償光学系の三つの構成要素には、いわゆる定番の組合せがある。天文分野では、波面補正素子として可変形鏡がよく利用される。ここで可変形鏡とは、図2に示すように、薄く柔軟な鏡の背面に伸び縮みする駆動素子が多数取り付けられ、電気的な信号に基づいて鏡面形状を変化させることのできる反射鏡である。可変形鏡には、他の原理を使って鏡面を変形させるものもあるため、本稿では図2のタイプを従来型と呼ぶことにする。波面センサについては、2次元レンズアレイによる焦点スポットの位置に基づき、局所的な波面の傾き分布を計測するシャック・ハルトマンセンサか、伝搬する光波の異なる面における強度差に基づき、波面の曲率を計測する波面曲率センサが利用される（図3）。制御装置については、現在では汎用的なパソコンを使用することが可能である。

一般に、補償光学系の性能と価格を決める重要な鍵は、波面補正素子にあると言われている。可変形鏡は、実現できる表面形状に制限があるため複雑な波面を補正することはできないが、大気ゆらぎによる波面歪みは比較的滑らかな成分が多いため、その影響を補正することは十分に可能となる⁵⁾。また、可変形鏡は高速に応答するため、1秒間に数百回以上の波面計測/補正を繰り返すことで、素早く変

図2 従来型の可変形鏡（Xinetics社製）

図3 各種波面センサの仕組み

動する大気ゆらぎの影響を効果的に除去することができる。しかし、従来型の可変形鏡の特徴に依存して、天文用の補償光学系は全体的に大型かつ高価格になっている。実際の大きさについては、例えば、国立天文台すばる望遠鏡のウェブサイト⁶⁾に掲載されている写真が参考になる。価格については一概に言えないが、大雑把な見積りで、図2に示す従来型可変形鏡一式だけでも1千万円は下らない。

補償光学系を天文以外の分野、特に、後述する医療分野に応用する場合、やはり小型で低価格であることが望ましい。そのためには、従来型の可変形鏡に代わる新しいタイプの可変形鏡や、液晶空間位相変調素子の利用が期待されている^{7) 8)}。

MEMS（微小電気機械システム）技術を応用した可変形鏡の製造コストは、従来型の1/10程度以下であり、さらにMEMS技術の特徴として全体的なサイズもかなり小型になる。しかし、静電駆動型のMEMS可変形鏡では、静電気の引力のみで鏡面形状を制御するため、実現可能な鏡面形状にやや制限がある。電磁駆動型の可変形鏡は、MEMS可変形鏡に比べるとやや高価であるが、従来型よりも十分に安価かつ小型であり、さらに、鏡面形状を柔軟に制御するこ

(a) 静電駆動型
(OKO Technologies社製)

(b) 電磁駆動型
(Imagine Optic社製)

図4 新しいタイプの変形鏡
(いずれも電源を除く本体部分(反射鏡面の直径は、共に15mm))

とができる特長をもっている。これらの可変形鏡の一例を図4に示す。なお最近では、ここで紹介した以外のタイプの可変形鏡も数多く提案されている。それらのほぼすべてを網羅した性能の比較研究も行われ、それぞれの特徴は一長一短であることが明らかにされている⁹⁾。

一方、液晶空間位相変調素子は、新しいタイプの可変形鏡と同程度に小型かつ低価格であることに加え、可変形鏡の駆動素子数に対応する画素数を多くとることができるため、可変形鏡に比べると格段に優れた波面補正能力をもっている。しかし、液晶素子の特徴として応答速度が遅く、大気ゆらぎのような素早い動きに追従した波面補正は不得意であった。この問題は、最近開発されたLCOS (Liquid Crystal on Silicon) 型の液晶空間位相変調素子¹⁰⁾ (図5) で改善され、まだ大気ゆらぎの補正には不充分であるものの、後述の医療分野など補正対象となるゆらぎが比較的遅い場合には十分な効果を発揮している¹¹⁾。

4. 補償光学系の制御法

補償光学系の制御法を正しく理解するためには、厳密には数学的な取り扱いが必要になる。しかしここでは、その見えない部分の「仕組み」を直感的に捉えることができるように、できるだけ数式を使わずに説明したい。

すでに述べたように、補償光学系に必要な動作は、入射波面の歪みを波面センサで計測し、その歪みを打ち消すように波面補正素子の形状(可変形鏡の場合)、もしくは、位相分布(液晶空間位相変調素子の場合)を素早く制御することである。その制御を実際に行う際には、空間的側面と時間的側面とを分けて考える必要がある。

最初に空間的側面として、入射光の波面歪みを打ち消すように、それとは逆向きの「歪み」を波面補正素子に形成する方法を考える。波面補正素子として高分解能の液晶空間位相変調素子を使う場合、その方法は単純である。一般に、高分解能の液晶空間位相変調素子は、液晶ディスプレイと

図5 LCOS型液晶空間位相変調素子
(浜松ホトニクス社製)
(電源を除く本体部分(位相変調面の
大きさ: 16mm×12mm))

同様の感覚で使用でき、パソコンの画面上に表示した濃淡分布に比例した位相分布を、液晶素子上に実現することができる。そのため、波面センサで計測された波面歪みとは逆向きの分布を、液晶素子上に表示するだけで目的は達成される。なお、多くの場合、液晶素子の位相変調量は 2π ラジアンに制限されているが、フレネルレンズのように位相を折り畳んで表示することにより、実質的に 2π ラジアンを超える位相変調量を自由に実現することができる。

一方、波面補正素子として可変形鏡を使う場合、その取り扱いはやや面倒になる。可変形鏡では、比較的少数の駆動素子によって反射鏡面を変形させるため、複雑な形状を実現することは困難である。そのため、補正すべき入射波面の歪みとは逆向きの歪みを、あくまでも近似的に実現する方法を考える。その準備として、まずは個々の駆動素子が動くことによって鏡面形状がどのように変化するか、その影響を調べる。具体的には、 N 個の駆動素子に対して個別に一定電圧を印加し、それによって実現される鏡面形状を計測する。一般に円形開口内の表面形状(位相分布)は、ゼルニケ多項式*によって展開されるので、ここでは M 個の展開係数によって表面形状が記述されるものとする。以上により、駆動素子に加える電圧と、それに伴う鏡面形状の関係が明らかとなる。数学的には、印加電圧に対応する N 行の入力列ベクトルと、展開係数に対応する M 行の出力列ベクトルを結びつける $M \times N$ の影響関数行列が決定される。

実際の制御では、入射波面の歪みを打ち消すために必要な鏡面形状(展開係数)が与えられ、その形状を実現するための電圧分布を求めることになる。そのためには、影響関数行列の逆行列(これを制御行列と呼ぶ)を求め、展開係数を入力とする逆の演算を行えばよい。なお、正方行列では

* 単位円内で定義される直交関数系であり、光学分野においては、収差を表現する際によく利用される。単位円内で定義される任意の関数はゼルニケ多項式によって展開され、その展開係数はフーリエ級数展開と同様に関数の直交性を利用して決定される。

ない(つまり、 $M \neq N$)の影響関数行列に逆行列は存在しないため、実際には、その擬似逆行列を求めている。このように可変形鏡を使った補償光学系の制御問題は、基本的には行列演算に帰着される⁷⁾。

次に、制御の時間的側面を考えよう。時間的に変動する入射波面の歪みをうまく補正するためには、それに追従して素早く動作する補償光学系が必要になる。ただし、要求される応答速度は応用分野によって異なるため、その特性を定量的に評価しておくことが重要である。厳密には制御理論に基づく解析が必要になるが¹²⁾、ここではその概要のみを簡単に紹介する。

基本的には、補償光学系を構成する各要素について、入力と出力の関係を特徴付ける伝達関数を求め、最後に系全体の伝達関数を評価することで、時間応答特性(周波数特性)を解析する。一例として、図1に示す補償光学系をブロック図で表現すると図6(a)となる¹³⁾。これは、入射光の波面歪みを入力として、波面センサでは補正後の残留波面歪みを測定し、この残留波面歪みを小さくするように波面補正素子を駆動するフィードバック制御(閉ループ制御)系を表している。

波面センサの伝達関数 $H_{WS}(s)$ は、検出器による積算時間と計算機による時間遅延の効果を考慮して決定される。制御装置の伝達関数 $H_{CC}(s)$ は、可変形鏡を利用する場合、駆動素子への印加電圧を生成するためのDA変換や計算機による時間遅延の効果を考慮して決定される。波面補正素子の伝達関数 $H_{WC}(s)$ は、素早く動作する通常の変形鏡の場合には、1に近似される。このとき、この閉ループ制御系全体の伝達関数 $H(s)$ は、

$$G(s) = H_{WS}(s) H_{CC}(s) H_{WC}(s)$$

とおき、 $X(s)$ を入射波面の歪み、 $M(s)$ を波面補正素子による補正とすると、

$$H(s) = M(s) / X(s) = G(s) / [1 + G(s)]$$

となる¹³⁾(s は複素周波数に対応するラプラス変数)。

一般に制御系は、上述の閉ループ制御と開ループ制御に分類される。開ループ制御では、図6(b)に示すように、波面センサで計測された入射光の波面歪みを補正するように波面補正素子を制御する。この場合、波面センサは波面補正素子の前に設置されるため、その光学系は単純であり安定して動作する特長をもつが、閉ループ制御とは異なり残留波面歪みを計測しないので、波面補正の精度は保証されない。一方、閉ループ制御は、波面補正の精度は高いが、光学系が複雑でありかつ条件によっては不安定になることもある。

現在は、応用分野を問わず、可変形鏡を使ったほぼすべての補償光学系に、閉ループ制御が採用されている。しかし、液晶空間光変調素子を使った補償光学系では、液晶素子の波長依存性に起因して、通常の開ループ制御ではうまく補償光学が機能しない状況が発生する。実際、参照光と

図6 補償光学系の基本ブロック図

イメージング光の波長差が大きい場合には、閉ループではなく開ループ制御を利用すると、精度および安定性の面で効果的であることが示されている¹⁴⁾。

5. 眼底イメージング機器への応用

最近では、高出力レーザや最新の光ディスクシステムなど、補償光学を天文以外の分野に応用する研究開発が盛んに進められている。その中から、特に注目を集めている眼底イメージング機器への応用について、筆者が関わった最近の研究開発プロジェクトの成果をいくつか紹介する。その前に、眼底イメージング機器と補償光学との関係を簡単に整理しておこう。

眼底カメラ、SLO (Scanning Laser Ophthalmoscope/走査レーザ検眼鏡: 鋭く絞ったレーザ光を走査して眼底像を取得する装置)、およびOCT (Optical Coherence Tomography/光コヒーレンス断層画像化装置: 光の干渉性を利用して網膜の断層像を取得する装置)に代表される眼底イメージング機器では、眼球の外部から内部を照明し、眼球光学系を通して眼底を観察する。そのため、角膜や水晶体に存在する複雑な歪み(高次収差)の影響を避けることができず、これらの機器の分解能が制限されていた。ここで外部から照明された眼底を天体と考え、角膜と水晶体を大気層と考えると、補償光学を利用することにより鮮明な眼底像を取得できることがわかる。その重要性にいち早く気づき、眼底カメラを対象としてこれを世界で初めて実証した先駆的な研究が、1997年に米国の研究グループによって行われた¹⁵⁾。それ以来、補償光学を利用した各種眼底イメージング機器の研究開発と、それを使った臨床研究がにわかに注目を集めるようになっていく。

さて、ここで紹介する研究開発プロジェクトでは、生活習慣病の合併症を早期診断することを究極の目標として、補償光学を利用した超高分解能の眼底イメージング機器の実用化を目指していた。京都大学眼科を中心に、産業技術総合研究所および企業3社が参加する医工連携のプロジェクトであり、2005年度から2009年度までの5年間、

図7 補償光学と走査レーザ検眼鏡を融合したAOSLO光学系

NEDOの助成事業として研究開発が進められた¹⁶⁾。その中から、ニデック社と浜松ホトニクス社が重要な役割を果たした、補償光学(AO: Adaptive Optics)とSLOを融合したAOSLOに関する成果を紹介する。

試作したAOSLOの光学系の模式図を図7に示す。波面センサにはシャック・ハルトマンセンサが、波面補正素子にはLCOS型の液晶空間位相変調素子(以下、LCOS-SLM)が使用されている(いずれも浜松ホトニクス社製)。イメージング用の入射光(SLD/スーパーluminescentダイオード、中心波長840nm)はLCOS-SLMを経由して、眼底上にフォーカスされる。眼底からの反射光は、同じ経路を逆向きに進み、光検出器(APD/アバランシェフォトダイオード)の直前に置かれたピンホール上に再びフォーカスされる。ここで眼底上の輝点を2次元的に走査すると、共焦点の効果によりコントラストの高い眼底像が取得される¹⁷⁾。ただし、眼球光学系の収差の影響を受けて、眼底および検出器にフォーカスされる輝点が歪むため、取得される眼底像の分解能は制限される。

その影響を除去するために補償光学系を動作させる。そのための準備として、波面測定用のレーザ(LD/レーザダイオード、波長780nm)を眼に入射し、眼底上に輝点(参照点光源)を形成する。眼底上の輝点は一様に散乱され、角膜や水晶体などの眼球光学系の収差の影響を受けて歪んだ波面が眼から出射される。その光波の歪みを波面センサで計測し、それを打ち消すようにLCOS-SLMの位相を素早く制御する。その結果、イメージング用の光波についても収差の影響が除去され、光検出器上に理想的な輝点を形成することができるため、高分解能の眼底像を取得することが可能となる。

試作装置の基本性能を表す一例として、一般的な眼底カメラによる眼底写真とAOSLOによる眼底像を図8に示す。それぞれの右側には、ほぼ同じ場所および同じ領域を拡大した図を掲載している。通常の眼底写真とは異なり、AOSLOでは視細胞を個々に識別できるほど鮮明な眼底像

図8 眼底像の比較

図9 AOSLOによる健常眼の眼底像

が取得されている。

網膜は10層からなる層構造をしており、その厚さは約200 μm である。表層部には血管および神経線維層が、下層部には視細胞層が存在するが、通常の眼底カメラでは、それらを識別することは不可能であった。しかしAOSLOでは、図9に示すように、焦点を網膜の表層部に合わせる

図10 AOSLOによる糖尿病網膜症例の眼底像
(矢印の部分は毛細血管瘤)

と血管と視神経線維層が、下層部に合わせると視細胞層が鮮明に描出される。画像の一辺は約 $500\mu\text{m}$ であるため、この画像から視細胞の大きさは約 $3\mu\text{m}$ であると評価される。これは、補償光学の効果により、収差の影響がほぼ完全に除去された理想的な眼底像に対応する（ただし、走査ミラーの特性により、画像周辺部に歪みが生じている）。

一方、試作したAOSLOにより、生活習慣病の合併症の超早期診断に有効と考えられる臨床データも取得されている。例えば、糖尿病と診断されているが眼底カメラによる眼底写真やOCT像では、糖尿病網膜症が認められない症例においても、図10に示すように、AOSLOで観察すると初期段階の微小な毛細血管瘤が描出されることが明らかとなった。糖尿病網膜症の診断では毛細血管瘤の同定が重要となるが、それが困難な場合も多い。AOSLOにより非侵襲的に毛細血管瘤を検出できれば、糖尿病網膜症の超早期診断が可能となる。

6. む す び

すばる望遠鏡の知名度とそこから発信された輝かしい成果の数々により、補償光学の重要性は広く一般に浸透してきたと思われる。また、眼底イメージング機器へ応用をきっかけとして、補償光学の新たな可能性を追究する試みが、最近、特に注目を集めていることも事実であろう。しかし、補償光学を天文以外の分野に応用する具体的な研究開発となると、欧米諸国における積極的な取り組みとは裏腹に、国内での動きはやや鈍いと言わざるを得ない。

そこで本稿では、他分野の読者がこの分野に容易に参入できるように、補償光学系の表面的な仕組みのみならず、制御法を中心とする見えない部分の仕組みについてもわかりやすく概説したつもりである。また、補償光学の眼底イメージング機器への応用については、純国産の成果に絞って、その一部を紹介した。本稿がこの分野の隆盛の一助になれば幸いである。

なお、本稿で触れることのできなかった眼底イメージング機器以外への応用例¹⁸⁾や、欧米諸国における研究開発動向^{19) 20)}については、拙著記事を参照して頂きたい。

最後に、5章をまとめるにあたり有益なご助言をいただいた、京都大学眼科の大音壮太郎先生と吉村長久教授、ニデック社の大島進氏、および浜松ホトニクス社の井上卓氏に感謝する。

(2011年1月28日受付)

〔文 献〕

- 1) H.W. Babcock: "The possibility of compensating astronomical seeing", Publ. Astron. Soc. Pac. **65**, 229-236 (1953)
- 2) 例えば, U. Wittrock, ed.: "Adaptive Optics for Industry and Medicine", Springer, Berlin (2005); C. Dainty, ed.: "Adaptive Optics for Industry and Medicine", Imperial College Press, London (2008)
- 3) J. Porter, et al., ed.: "Adaptive Optics for Vision Science", Wiley-Interscience, Hoboken (2006)
- 4) F. Roddier, ed.: "Adaptive Optics in Astronomy", Cambridge Univ. Press, Cambridge (1999), Chap. 11
- 5) F. Roddier, M. Northcott and J.E. Graves: "A simple low-order adaptive optics system for near-infrared applications", Publ. Astron. Soc. Pac. **103**, 131-149 (1991)
- 6) http://www.naoj.org/j_index.html
- 7) 白井智宏: "バイオ・医療のための補償光学技術－生活習慣病に挑む超高解像眼底イメージングを中心として－", 第40回サマ－セミナー「命と光－光学とバイオ・医療との関係－」論文集56-63, 応用物理学会 (2006)
- 8) 白井智宏: "眼科医のための補償光学概論", 医学のあゆみ, **224**, 580-584 (2008)
- 9) N. Devaney, et al.: "Correction of ocular and atmospheric wavefronts: A comparison of the performance of various deformable mirrors", Appl. Opt., **47**, 6550-6562 (2008)
- 10) 井上卓: "波面制御素子としての液晶空間光変調器と補償光学", 光技術コンタクト, **45**, 251-257 (2007)
- 11) T. Shirai, et al.: "Adaptive optics with a liquid-crystal-on-silicon spatial light modulator and its behavior in retinal imaging", Jpn. J. Appl. Phys., **48**, 070213 (2009)
- 12) 文献4), Chap. 6
- 13) 文献3), Chap. 5
- 14) K. Takeno and T. Shirai: "In vivo retinal imaging using liquid crystal adaptive optics with different color illumination", Proc. SPIE **7550**, 75502H (2010)
- 15) J. Liang, D.R. Williams and D.T. Miller: "Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics", J. Opt. Soc. Am., **A 14**, 2884-2892 (1997)
- 16) <http://www.kuhp.kyoto-u.ac.jp/~ganka/NEDO/>
- 17) 白井智宏: "AOSLO－補償光学と走査レーザ検眼鏡の融合が拓く新しい世界", 医学のあゆみ, **224**, 589-593 (2008)
- 18) 竹野耕平, 白井智宏: "医療・工業分野への応用を目指す新しい補償光学", 光技術コンタクト, **45**, 244-250 (2007)
- 19) 白井智宏: "補償光学技術の新しい展開－医療・工業分野への応用を目指して－", 光アライアンス, **17**, 1-7 (2006)
- 20) 白井智宏: "液晶空間光変調素子を利用した補償光学技術", 光学, **36**, 136-142 (2007)

しらい ともひろ 1994年, 北海道大学大学院工学研究科電子工学専攻博士課程修了。同年, 通産省工業技術院機械技術研究所勤務。2001年の改組を経て, 現在, (独)産業技術総合研究所電子光技術研究部門光画像計測グループ長, 統計光学, 補償光学, 生体医用光学の研究に従事, 博士(工学)。