



2. 観測を支える新技術

1. 補償光学



早野 裕

国立天文台 ハワイ観測所
y.hayano@nao.ac.jp

補償光学装置 (AO, Adaptive Optics) は、観測天体と地上望遠鏡の間にある大気ゆらぎの影響をリアルタイムで補正して、望遠鏡の理論的な角度分解能、すなわち回折限界角度分解能を達成する装置である。ここでは、約半世紀前にはじめてアイデアが発表された天体観測用補償光学装置の原理と現在に至るまでの歴史、そして補償光学に使われる主要なコンポーネントや要素技術について簡単に解説する。それから、すばる望遠鏡に搭載されている既存の補償光学装置と現在開発中のレーザガイド星補償光学装置の概要を述べる。また、今後補償光学技術がどのような方向に発展していくかという点について、最近のトレンドを紹介する。

■ 大気ゆらぎの影響によるぼやけた星像 ■

地上望遠鏡は地球大気を通して天体を見る。地球大気は暖められた地表によって対流運動をしたり、地球の自転運動や緯度ごとの日射量の違いによって地球規模的な循環運動をしたりする。それらの運動によって大気の大気ゆらぎ (大気ゆらぎ) が生じる。この大気ゆらぎは光には屈折率ゆらぎとして影響する。大気ゆらぎは地表から高度15kmあたりまで存在する。地上望遠鏡で星からの光を集めたとき、屈折率の異なる場所を通過するため、平面波から乱れた同位相面 (波面) になる。その結果、地上望遠鏡で得られる星像はぼやけてしまう。

望遠鏡の持つ理論的な角度分解能すなわち回折限界角度分解能は、観測する光の波長 λ と望遠鏡の鏡の直径 D との比 λ/D で表される。望遠鏡の直径、すなわち口径を大きくすると回折限界角度分解能は向上する。しかし、実際は大気ゆらぎの影響のため角度分解能はあるところでリミットされ、これをシーイングと呼ぶ。日本における典型的なシーイングは波長500nm (可視光、緑) で1~3秒角程度である。1秒角は $4.8 \mu\text{rad}$ である。口径8mのすばる望遠鏡のあるハワイ島マウナケア山頂では平均的なシーイングは波長500nmで約0.6秒角である。高度4,200mの孤立峰という好条件ではあるが、回折限界角度分解能である0.013秒角よりも10倍以上悪い。

大気ゆらぎの特徴を示すための重要な物理量としてFried長 r_0 とisoplanatic角 θ_0 を説明する。

まず、Fried長 r_0 とは、その範囲内では地上に到達し

た波面が平面波とみなせる長さである。シーイング θ と r_0 とは、 $\theta \sim \lambda / r_0$ という関係がある。またFried長の波長依存性は $r_0 \propto \lambda^{1.2}$ と表され、長い波長ほど大きくなる。マウナケア山頂のFried長は波長500nmの可視光で17cm程度、波長 $2.2 \mu\text{m}$ の近赤外線では約90cmとなる。次にisoplanatic角 θ_0 について説明する。ある星とそのすぐ近くにある星から来る2つの波面は、通過する大気ゆらぎがほとんど同一とみなすことができるためほぼ一致する。この条件を満たす範囲をisoplanatic角と呼ぶ。isoplanatic角の波長依存性は $\theta_0 \propto \lambda^{1.2}$ と表され、長い波長ほど角度が大きい。マウナケアでの典型的なIsoplanatic角は波長 $2.2 \mu\text{m}$ で20秒角程度である。したがって1つの星を使って補償光学を働かせると、半径約20秒角の視野範囲で星像が同程度に鮮明になる。

■ 補償光学の原理と歴史 ■

大気ゆらぎの影響を除去し、地上望遠鏡の回折限界角度分解能を達成しようというのが補償光学である。1953年にこの概念が発表された¹⁾。補償光学は、大気ゆらぎによって乱された星からの光波面を波面センサーで測定し、大気ゆらぎの変動が十分無視できる間に、望遠鏡と観測装置の間に置かれた波面補正鏡 (可変形鏡) を変形させて、乱れた光波面を平面波に戻すという働きをする。図-1に示したように通常フィードバック制御方式がとられている。波面を測定するための星をガイド星と呼ぶ。補償光学装置がアメリカ軍の人工衛星監視システムと

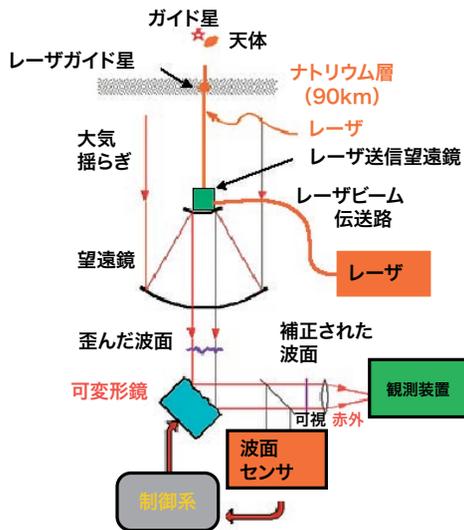


図-1 補償光学装置の概念図

して実用化されはじめたのは1970年代後半に入ってからであった。その後、1980年代後半から天体望遠鏡用に別途独立に開発が進められ、欧米の4m級望遠鏡で試験観測が開始された。すばる望遠鏡をはじめ地上の8～10m級望遠鏡が相次いで建設された1990年代後半、補償光学は必須装置として開発・装備されるようになってきた。マウナケアでは、すばる望遠鏡(口径8m)、Keck望遠鏡(有効口径10m分割鏡)、Gemini望遠鏡(口径8m)、チリではVLT (Very Large Telescope) (口径8m)で補償光学装置を使って天文学的成果がでてきている。

望遠鏡の鏡の直径をD、望遠鏡の設置場所の平均的なFried長を r_0 とすると、望遠鏡に入射した光波面を $\sim (D/r_0)^2$ 個の小開口に分割して波面を測定し、 $\sim (D/r_0)^2$ 個の駆動点数を持った可変形鏡で補正をすると、理想的に平面波を復元できる。この波面の分割数を補償光学の素子数と呼ぶ。観測波長が500nm ($r_0 = 17\text{cm}$)の場合、観測波長 $2.2 \mu\text{m}$ ($r_0 = 90\text{cm}$)に比べて必要な素子数が約30倍多い。

大気ゆらぎの変動スピードは、大気ゆらぎの移動速度 v (風速)がFried長 r_0 を通過する時間 $\tau = r_0/v$ で代表される。たとえばマウナケア山頂では、観測波長500nmの可視光で $r_0 = 17\text{cm}$ 、上空大気の風速を20m/sと仮定すると、典型的な時間は $\tau = 8.5\text{ms}$ となる。大気ゆらぎの変動をフリーズするためにはミリ秒以下の測定が要求される。観測波長 $2.2 \mu\text{m}$ では $r_0 = 90\text{cm}$ なので、約5倍変動が遅くなる。

小開口あたりの光量を観測波長 $2.2 \mu\text{m}$ と500nmとで比較すると、面積比30倍、駆動速度で1/5倍となり、

全体で150倍と圧倒的に $2.2 \mu\text{m}$ のほうが光量が多くなる。したがって、現在稼働中の補償光学装置のほとんどが近赤外線観測のために使われている。可視光よりも分割数(素子数)が少なく、駆動速度を遅くできるからである。

実際には、稼働中の8～10m級望遠鏡の近赤外線用補償光学装置は、12～14等星までガイド星として使うことができ、それ以上暗い星は光量不足で補償光学装置が動作しない。明るいガイド星が近くにある場合にのみ、補償光学装置を使って暗い天体を観測することができる。使用できるガイド星の周囲のisoplanatic角範囲内、すなわち補償光学の視野が、補償光学の使用できる天域で、全天に対するこの天域の割合をスカイカバレッジと呼ぶ。観測波長 $2.2 \mu\text{m}$ で数%程度である。残りの90%以上は補償光学が使用できない天域である。

スカイカバレッジを向上させる方法が1985年に提案された²⁾。明るいガイド星が見つからない方向にレーザーを使って人工的に明るい星を作成し、それを補償光学のガイド星に使うのである。高度15～20kmの大気のレイリー散乱を利用する方式と高度90km幅10kmのナトリウム中性原子層を励起する方式(図-1参照)の2種類がある。ナトリウム層を使ったレーザーガイド星は1980年代後半に人工星作成実験が実施され、1990年代に入ると、補償光学に利用できるレーザーの開発が進められ、Lick天文台3m望遠鏡、Calar Alto天文台3m望遠鏡で試験が行われてきた。Lick天文台では現在も天文観測に用いられている。また、Lick天文台の技術をもとにKeck天文台10m望遠鏡のレーザーガイド星が開発され、2001年12月にレーザー照射の試験に成功し、2004年6月から天文観測用に使われ始めた。ヨーロッパではチリにあるVLTでも2005年観測開始を目標に開発を進めている。すばる望遠鏡では、レーザーガイド星を2006年までに開発する計画を進めている。

■ 可変形鏡：表面形状を変形できる鏡 ■

可変形鏡は補償光学装置の重要な部品の1つである。光波面の進み遅れ(位相)を補正する機能を持ち、透過、反射の両タイプがある。透過タイプには液晶位相変調パネルがあるが応答速度、透過率が不十分なこと、1偏光面のみ位相補正が可能なため天文用途以外で利用されることが多い。反射タイプには圧電素子や静電力を用いて鏡を変形させる方式がある。現在主に利用されている可変形鏡は以下の2種類である。

★フェースプレート鏡

連続した薄い鏡に複数の積層圧電素子を取り付けて、それぞれの素子に異なる電圧をかけて押し引きして鏡を

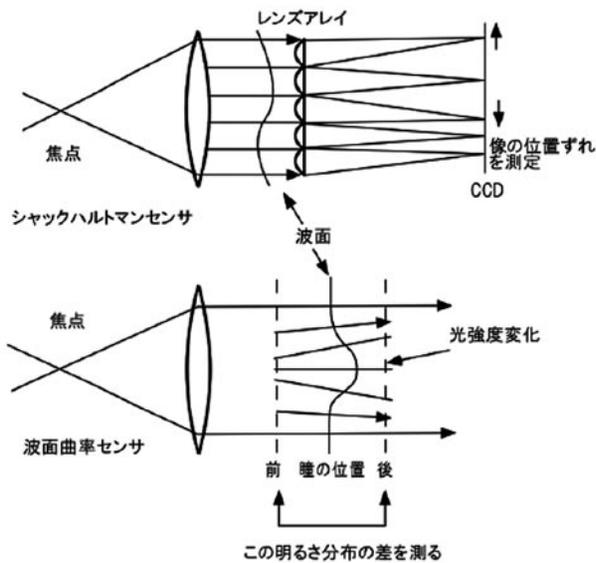


図-2 波面センサ方式

変形させる。数十素子から数百素子が製品として購入可能である。

★バイモルフ鏡

垂直方向の電圧に対して、横方向に伸縮特性が正反対の薄い圧電素子板を2枚貼り合わせて作成する。一方が縮み、もう一方が伸びるので、鏡面に曲率をつくることができる。圧電素子板の電極を分割して、それぞれ異なる電圧をかけて、鏡の形状を制御する。後述する曲率波面センサと組み合わせて使用すると性能がよい。

最近では、Micro-electro-mechanical system (MEMS)の技術を用いた超多素子小型可変形鏡が開発されてきている。

■ 波面センサ：望遠鏡に入射した波面を測定する装置 ■

波面センサは望遠鏡に入射した星からの光波面を小開口に分割して、各場所の波面の傾き、曲率などを測定する。測定頻度は毎秒100回から1,000回である。そのため、1測定、1小開口あたりの光子数は大変少なく、高感度センサが必須となる。代表的な波面センサは以下の2つである。

★シャックハルトマンセンサ

この方式は最も一般的に使用されている波面測定方式の1つである。図-2の上図に示したように、入射瞳位置

で光波面をレンズアレイによって小開口に分割し、それぞれのレンズによって結像された星像の位置を測定する。平面波を入射したときの各基準星像位置とのずれ量がそれぞれの小開口における波面の傾きに比例する。この波面の傾き分布から波面形状を求めることができる。星像の検出には1kHz程度の高速読み出しで低読み出し雑音のCCDが使われる。星像の位置を測定するには、小開口ごとに最低4画素必要となる。現状の画素数は100×100素子程度、読み出し雑音が2～5電子数である。画素数の向上が波面センサの多素子化を可能にする。どこまで暗いガイド星を使用できるかは、読み出し雑音によって制限されている。

★波面曲率センサ

望遠鏡焦点から離れた場所の星像は円形開口状に広がって見える。そのなかに明暗のパターンが見られる。大気ゆらぎや望遠鏡の光学収差によって開口内に波面の曲率が生じ、それぞれの小開口部分で無収差のときの望遠鏡焦点より焦点位置が長くなったり短くなったりする。この場所ごとの焦点位置のばらつきによって明暗が現れてくる。この原理を応用して、図-2の下図に示したように、入射瞳位置の前後等距離の位置で小開口ごとの明暗の差を測定し波面の曲率を導くことができる。曲率を発生できるバイモルフ鏡と曲率センサは小開口のパターンを一致させるととても制御性がよい。したがって、曲率センサはシャックハルトマンセンサと比較して少ない素子数で同程度の性能が出せる。また素子数が少ないためより暗いガイド星でも波面測定ができるという利点がある。

■ 制御計算機：波面情報から可変形鏡を制御する ■

波面センサで測定された波面情報をもとに平面波にもどすよう可変形鏡を制御するのが制御計算機である。制御ループは毎秒100回から1,000回程度の演算を高速に行う。フィードバック制御が動作しているときは、波面誤差が微量になるため、可変形鏡への制御信号は波面センサ情報と線形関係の範囲内という仮定が成り立つ。典型的な例として、300個の波面情報が得られる波面センサと150分割の可変形鏡を持った補償光学装置では、300行1列の波面センサ信号ベクトルに150行300列の制御行列を左から掛け算して、150行1列の可変形鏡への制御信号ベクトルを算出している。1kHzの制御ループの計算量は毎秒4500万回の積算和で、現在のCPUの性能では問題ない量である。制御行列は補償光学を使用する前に、人工光源で平面波を補償光学装置に入射し、

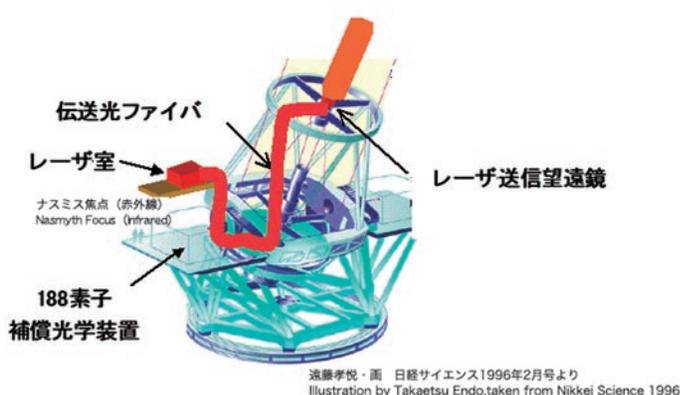


図-3 すばる望遠鏡レーザガイド星補償光学装置の概要

可変形鏡の各素子を順番に変形させる。それぞれ変形させたときの波面センサ測定信号を記録する。これが可変形鏡と波面センサの応答行列である。この逆行列が制御行列となる。応答行列の精度と制御行列の推定精度が安定した制御をもたらす。

計算された可変形鏡への制御信号をもとに適当な制御調節器を用いて可変形鏡を駆動する。すばる望遠鏡の補償光学装置ではすべての素子に対して単純なゲイン共通の積分調節器を用いている。ただ、多入力多出力なシステムであるため、時間方向あるいは波面の空間方向に最適なフィルタを用いるなど、さまざまな最適制御を行うことが可能である。

■ レーザガイド星： 波面測定用参照星を人工的に作る ■

レーザガイド星は、任意の方向にガイド星を作ることができるため、スカイカバレッジを大幅に拡大できる。レーザガイド星を生成する装置は、主にレーザ本体、レーザビーム伝送系、レーザ送信望遠鏡から構成される。すばる望遠鏡のレーザガイド星補償光学装置の概要を図-3に示した。レーザは安定した場所に設置されたレーザ室に格納され、光ファイバを用いてレーザビームを伝送し、望遠鏡副鏡の裏側に設置したレーザ送信望遠鏡でナトリウム層を照射する構成になっている。

高度90km 幅10kmのナトリウム層を利用したレーザ

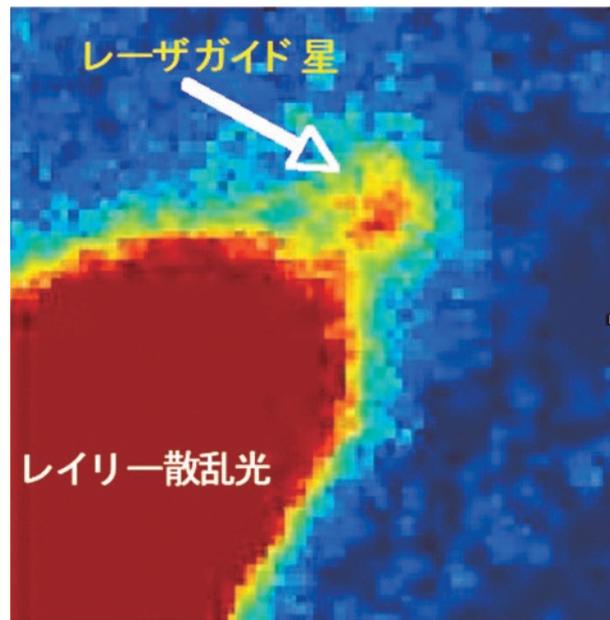


図-4 通信総合研究所（現在 情報通信研究機構）の1.5m望遠鏡にて実施されたレーザガイド星の生成予備実験

ガイド星はナトリウムD線(589nm)に波長を合わせた5~20W級のレーザを照射する。ナトリウム層に作成されたレーザガイド星はレーザビーム照射地点から見るとほぼ点光源となる。またレイリー散乱は高度30km以上で十分暗くなるためレーザガイド星と分離することは容易である(図-4参照)。

ナトリウムレーザガイド星の生成実験当初は色素レーザが用いられてきたが、近年の固体レーザ技術の発展により、高出力全固体和周波レーザが実用になりつつある。和周波レーザとは、波長1,064nmと1,319nmの2つのYAGレーザを非線形結晶で合わせて、周波数(波長の逆数)の和である589nmを発生させるものである。アメリカ合衆国の空軍研究所やレーザメーカーが開発を精力的に進めている。一方、私たちも理化学研究所と共同で開発を進めており、出力4Wを2004年中に達成し、出力10Wの技術的な目処が立っている。

■ すばる望遠鏡の補償光学装置 ■

現在稼働中のすばる望遠鏡用補償光学装置は、波長2.2μmで望遠鏡の回折限界角度分解能(約0.06秒角)を得ることを目的として製作された。可変形鏡は36分割のバイモルフ鏡を使用し、同じパターンに分割された36素子曲率波面センサで毎秒約2,000回波面測定および補正をしている³⁾。2000年11月末に初めて星の光を使った補正に成功し(ファーストライト)、2.2μmで0.06秒

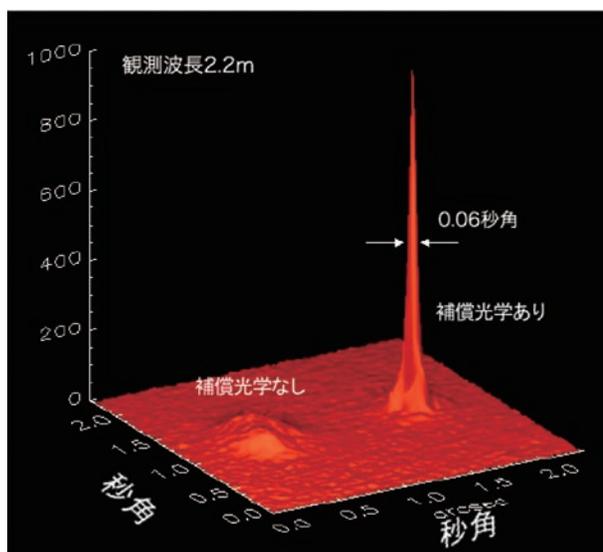


図-5 すばる望遠鏡補償光学装置による星像の改善

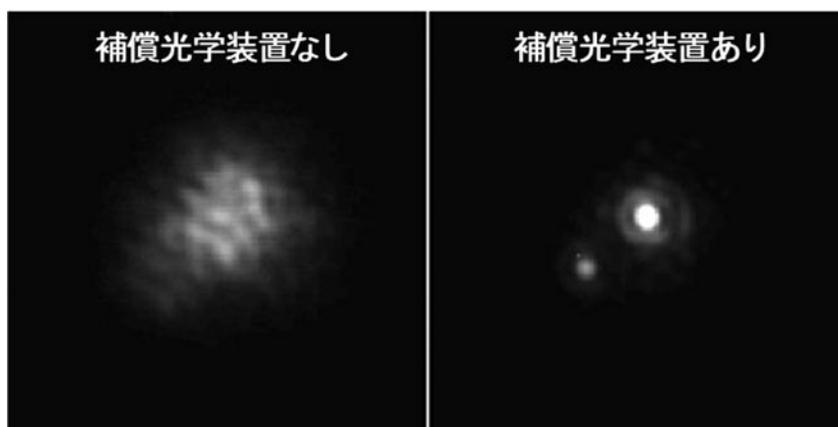


図-6 補償光学装置により0.31秒角離れた二重星の分離

角の分解能を達成することが確認された(図-5)。性能評価および細かい調整の後、2002年4月から一般共同利用観測が開始し、天文学的な成果が次々と出始めている。図-6は、0.31秒角離れた二重星を補償光学装置を使って分離することに成功した例である。補償光学装置を使用しないときは、二重星は重なってしまい分離できていない。

現在、私たちは188素子の曲率波面センサおよび188分割のバイモルフ鏡を持った補償光学装置へのアップグレードを進めている。これにより、波長 $1\mu\text{m}$ でも望遠鏡の回折限界角度分解能を達成できることが期待される。また、スカイカバレッジをひろげるためにレーザーガイド星の導入を進めている。2005年末に188素子補償光学装置のファーストライト、2006年末にはレーザーガイド星による補償光学装置のファーストライトを予定している⁴⁾。

■ これからの補償光学 ■

最近では、1つのガイド星を使った補償光学装置は古典的補償光学と呼ばれるようになってきている。次世代の補償光学は多様化してきており、Extreme AO、MCAOなどが提案されている。

Extreme AOは超多素子補償光学装置で、素子数が1,000以上、波面誤差残差が波長の数分の一まで高精度な補正を目指す。また、多素子であるので、可視光でも十分望遠鏡の回折限界角度分解能が達成できる。Gemini望遠鏡、Keck望遠鏡、VLTなどがExtreme AOの概念設計を開始している。

MCAOはMulti-conjugate Adaptive Opticsの略である。古典的補償光学では1つのガイド星、1つの波面センサ、1つの可変形鏡を用いているため、一方向の大気

ゆらぎの影響しか補正できない。MCAOでは複数のガイド星（レーザガイド星を含む）を用いて、大気ゆらぎの高さ方向の情報を獲得し、複数の大気ゆらぎの高さに共役（conjugate）な位置に可変形鏡を配置し、それぞれが対応した高さにある大気ゆらぎを補正する。したがって、複数のガイド星がある広い範囲で大気ゆらぎを補正できる。現在Gemini望遠鏡が視野2分角のMCAOを開発している。

■ 宇宙望遠鏡との共存 ■

地球周回軌道に打ち上げられた宇宙望遠鏡と補償光学装置が装備された地上望遠鏡との優劣について考えてみる。宇宙望遠鏡の利点は邪魔な大気がないことである。それゆえ、大気ゆらぎがないばかりか大気の吸収、発光もない。一方、地上望遠鏡は宇宙望遠鏡に比べて安価、大型化が容易、大型で安定した高精度の天体分光観測装置が搭載できるといった利点がある。逆に宇宙望遠鏡は高コスト、大型望遠鏡化は困難、高精度の分光装置は搭載困難という不利な点がある。また地上望遠鏡では可視光あるいは広視野の補償光学装置は複雑で高価、大気ゆらぎだけでなく変動する吸収や発光の影響がある、天候に左右されるなどの不利な点がある。このように宇宙望遠鏡と地上望遠鏡は相補的な関係であり、8～10m級望遠鏡とハッブル宇宙望遠鏡との関係がまさにそのような様相を示している。将来、超大型望遠鏡（口径30m級分割鏡）とJames Webb宇宙望遠鏡（口径6.5m分割鏡）は相補的な役割を分担するであろう。

■ 天文学以外への応用 ■

近年、補償光学の技術は天文学以外にも応用されてきている。ガイド星すなわち基準光源が、レーザを用いるなど非常に明るいケースもある。また、制御速度も1Hzから数kHzと多彩である。それゆえ、多様な波面センサ、可変形鏡、制御方式などが開発されていく期待が持たれる。また、安価で小型、低電力な補償光学装置という開発概念も生まれるであろう。一例として、高出力レーザのキャビティー内の熱レンズ補正や横モード再形

成、レーザ核融合でレーザを非常に小さな領域に集光させる場合などに可変形鏡が用いられている。また、人間の目に対する応用も盛んである。以前は角膜の凹凸や水晶体の不均一性によって網膜細胞を細かく分解して見る事ができなかったが、補償光学装置を使うと、網膜細胞の1つ1つを分解して観察することが可能になった⁵⁾。

■ おわりに ■

天文用補償光学技術は、4m級望遠鏡を用いた実験的観測を経て、8～10m級望遠鏡で天文学的成果を出し始めるようになった。現在、すでに30～100m級の超巨大望遠鏡計画が検討されてきている。補償光学技術はこのような超巨大望遠鏡計画の重要な要素技術の1つである。望遠鏡の理論的境界分解能は高くなり、補償光学装置に要求される素子数、ガイド星（レーザガイド星を含む）の数も桁違いに大きくなる。そのため補償光学技術の成熟と発展が鍵となることは間違いない。また、宇宙望遠鏡の大型化においても、鏡面形状を設計どおりに保つために、低速の補償光学技術が必要であるという検討もされつつある。望遠鏡による観測天文学はビックサイエンス化しつつあり、それに伴い補償光学も巨大システムになりつつある。

一方、天文学以外の分野に補償光学技術を応用する傾向はさらに強まるであろう。その際、低コスト、小型化が迫られ天文用補償光学装置とはまったく異なった方向に向かう可能性があり、補償光学技術はますます多様性を持つようになるであろう。

参考文献

- 1) Babcock, H. W.: Publication of the Astronomical Society of Pacific, Vol.65, No.386, pp.229-236 (1953).
- 2) Foy, R. and Labeyrie, A.: Astronomy and Astrophysics, Vol.152, No.2, pp.L29-L31 (1985).
- 3) Takami, H., Takato, N., Hayano, Y., Iye, M., Oya, S., Kamata, Y., Kanzawa, T., Minowa, Y., Otsbo, M., Nakashima, K., Gaessler, W. and Saint-Jacques, D.: Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.56, No.1, pp.225-234 (2004).
- 4) Hayano, Y., Takami, H., Gaessler, W., Takato, N., Goto, M., Kamata, Y., Minowa, Y., Kobayashi, N. and Iye, M.: Proceedings of the SPIE, Vol.4839, pp.32-43 (2003).
- 5) Roorda, A. and Williams, D. R.: Nature, Vol.397, pp.520-522 (1999).

(平成16年11月5日受付)

