

太陽観測のための補償光学系の開発と展望

三浦 則明

〈北見工業大学 〒090-8507 北海道北見市公園町 165〉

e-mail: miuranr@mail.kitami-it.ac.jp



補償光学は大気揺らぎによる光波面の乱れを実時間で補正するものであり、地上太陽観測においても必須の技術となっている。本稿では、補償光学の原理、太陽用と夜用のシステムの違い、われわれが飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡用に開発している補償光学装置について解説する。また、装置を動作させるために内部で使われている技術と、装置性能の評価についても言及する。現補償光学の課題を明らかにし、装置の性能向上および広視野での波面補償を実現するための技術について議論する。

1. 補償光学とは

天体から地球に到達した光の波（光波）は、大気に入射する前まではきれいにそろった平行に進む波となっている（平面波という）。そのような平面波を望遠鏡で観測すれば、装置性能の限界で劣化のない天体像を観測することができる。ところが、地球大気の揺らぎはそのような平面波を乱してしまい、観測像の劣化を引き起こしてしまう。眼でものを見ることと対比させてみると（表1）、実は地上にある望遠鏡は「乱視」の状態にあるのである。天文学者は長年この望遠鏡の乱視に悩んできた。空間的に細かな構造を観測しようとしても画像がぼけてしまって見えないし、遠くの暗い天体を観測するときも光が散ってしまい観測できなくなってしまうからである。

この「乱視」を根本的に解決する方法が宇宙空

間で観測する方法であり、現在では多くの宇宙望遠鏡が打ち上げられ天文学の進歩に多大な貢献をしてきたのはご存じのとおりである。一方、地上望遠鏡は大口径化が容易であるとともに、最新の観測機器を搭載できるという重要な利点があり、地上の望遠鏡の性能を極限まで発揮させることは最重要課題といっても過言ではない。そのためにも、地球大気の揺らぎによる乱視状態を克服する技術が必須なのである。これが補償光学（Adaptive Optics；以下AO）と呼ばれる技術である。筆者は自分の研究を初学者や一般の方に紹介するときは、望遠鏡の乱視を矯正するための「メガネ」の研究と説明している。

AOそのもののアイデアはかなり古く、1953年Babcockによって提案され¹⁾、1970年以降盛んに天体望遠鏡への応用が行われるようになった。このあたりの歴史的な経緯は鶴田による記事²⁾があるので興味のある方はご一読をお勧めする。

1.1 原理

図1はAOの原理図である。AOは望遠鏡の焦点面に設置するもので、波面センサー、可変形鏡、制御系により構成される。望遠鏡からの光波はリレー光学系によってAO装置に入射し、可変形鏡

表1 地上望遠鏡と眼の対比.

	地上望遠鏡	乱視の眼
結像素子	主鏡, 副鏡	水晶体
検出素子	カメラ	網膜
揺らぎ原因	地球大気揺らぎ	角膜の凹凸

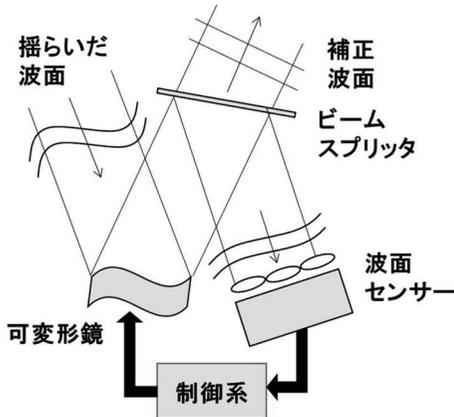


図1 補償光学の原理.

で反射されたのち再結像される。その途中で光波の一部がビームスプリッタによって分割され、それが波面センサーに入射する。波面センサーおよび制御系では、入射した光波面の形状を計測し、可変形鏡に印加する電圧分布を決定する。可変形鏡では実際に電圧を印加して鏡面形状を変化させる。その鏡面の凹凸を可変形鏡に入射する乱れた波面の形状と同じ形にすれば、反射した際に光波面の進み・遅れが補正され、平面波に戻るとするのがAOの原理である。

ただし、大気揺らぎは時々刻々変化するため、波面形状の計測から鏡面の変形までを、大気揺らぎが凍結しているとみなせる時間よりも十分に速く繰り返さないと十分な補償効果は得られない。これが天文用AOを開発するうえでの大きな技術的課題の一つである。AOの原理については、服部と早野³⁾や渡邊⁴⁾による最新の解説があるので、そちらも参考にされたい。

1.2 太陽への適用

太陽観測においても、太陽物理学の課題を解決するうえで大気揺らぎによる像の劣化は深刻な問題である。このため地上の太陽望遠鏡にもAOを装備するのがすでに標準になりつつある⁵⁾。

太陽観測と夜の観測を比較して、太陽観測に必要なとされるAOの特徴を整理しておく。

(a) 太陽は非常に明るい天体であり、AO装置を

構築する際、多数の光学素子を使用したり、光波の分割を行ったりするだけの十分な光量がある。また、波面センサーに比較的な廉価な市販品の高速カメラを使用できる。このため費用や設計自由度の面でかなり楽になる。

- (b) 太陽は大きく広がった天体である。点光源ではないので、2.1節に述べるように波面センシングの計算量が非常に大きくなってしまふ。
- (c) 太陽面上には黒点や粒状斑などの特徴的な模様全面に分布している。この模様を用いて任意の場所で波面センシングが可能であり、夜のAOで用いられるレーザ参照星のような参照光源が基本的には不要である。
- (d) 通常、昼間の揺らぎは夜よりも大きい。揺らぎの空間サイズが小さく、そのため揺らぎの時間変動も速い。太陽望遠鏡の口径は比較的小さいが、制御速度の観点では大口径望遠鏡用AOに匹敵する性能が必要になる。

2. 太陽補償光学系

京都大学飛騨天文台60 cmドームレス太陽望遠鏡は地表の揺らぎを避けるため、地上22 mの塔上に設置されている。われわれはこの望遠鏡用のAO装置を開発している⁶⁾⁻¹¹⁾。望遠鏡に入射した光は真空筒を通過して地上2階の観測室に到達する。AOは2階の観測室に設置されており、揺らぎを補正した後、補正された光は2階または1階にある焦点面観測装置に向けて射出される。

図2は飛騨天文台で開発中の補償光学装置の全景である。1×3 mの台上に光学素子が配置されている。望遠鏡からの光は斜鏡によってAO装置に導かれ、リレー光学系によってTip-tilt (TT) 鏡と可変形鏡上で二度瞳共役像が結像される。ここで、TT鏡とは傾きが変えられるステージ上に平面鏡を貼り付けたものである。ビームが反射する角度を調整することで、像全体のずれを補正する。これの動作原理は可変形鏡の場合と同じであり、カメラで得られた太陽像から像全体のずれを

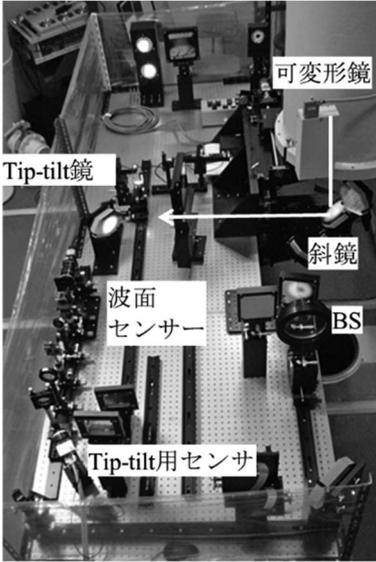


図2 飛騨天文台で開発中の補償光学装置.

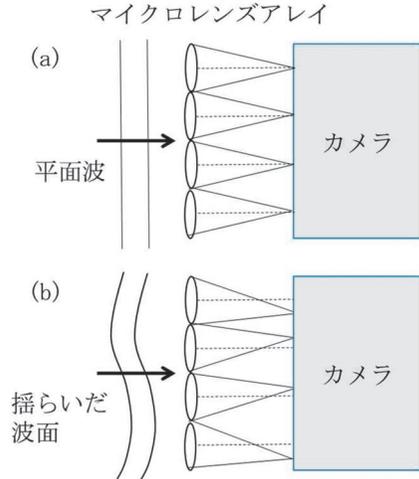


図3 シャック・ハルトマン波面センサーの原理. 平面波が入射した場合 (a) は像は各小開口の中心に現れる. 一方、揺らいだ波面の場合 (b) には局所的な波面の傾きに応じて結像位置がシフトする.

計測し、それを打ち消すようにTT鏡の傾きを調整する. われわれのシステムではTT鏡で像全体のずれを補正するループと可変形鏡を用いて高次の波面誤差を補正するループの二つが独立して動作している. それらの動作をネットワーク経由で操作できるようになっている⁹⁾⁻¹¹⁾.

2.1 波面形状計測

太陽AOの場合は前述のようにセンシングの対象が広がった物体であるため、波面センサーとしてはシャック・ハルトマン型にはほぼ限定される. この型のセンサーの原理を図3に示す. 瞳の共役面にマイクロレンズアレイを置いて開口全体を多数の小開口に分割する. その結像面にカメラを置いて画像を取得すると、そこには多数の太陽像が2次元状に並んで観測される (個々の像を小開口像と呼ぶ). このセンサーに平面波が入射すると、対象物体はその小開口の中心に結像される. 一方、揺らいだ波面が入射した場合には、個々の小開口での波面の傾斜が異なることになり、小開口像はその傾斜に応じて本来の位置から空間的にずれて観測される. 逆に、その小開口像のずれ量を測れば、その小開口の位置に対応する瞳上の位置

での局所的な波面の傾斜を求めることができる. 得られた波面傾斜を空間的に接続していけば、波面位相分布全体を再現できることは直感的にわかっていると思う. 実際にどのように波面形状を求めるかは3.1節をご覧ください.

そこで、問題は各小開口像のずれ量をどのように計測するかになる. 対象が恒星のような点状の物体であれば、各小開口での重心を計測すればよい. これに対して、太陽は大きく広がった天体であり、小開口像全体に太陽表面の模様が分布する (図4). このようなケースでは、重心計算が適用できず、位置ずれ計測のために相関演算を用いるのが標準である. あらかじめ基準となる小開口を設定し、その中でターゲットとなる模様 (たとえば黒点) を決めておく. その模様が他の小開口の中のどの位置に存在しているかを相関値で評価しながら探索するのである.

相関演算は比較的重い処理であるため、これがシステム全体の性能を決めるボトルネックとなる. 早くから太陽AOに成功したアメリカのSacramento Peak天文台では、この相関計算の部

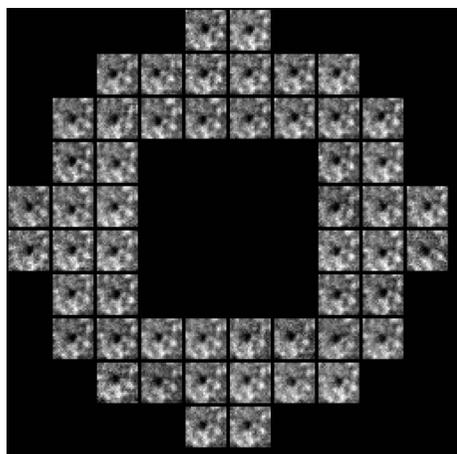


図4 太陽シャック・ハルトマン波面センサーで観測される画像の例（シミュレーション）。小黑点が各小開口上でずれを伴って観測される。

分に複数DSP（デジタル シグナル プロセッサ）による並列処理を導入していた⁵⁾。近年では、市販PCの性能の向上によって、小開口の数が多いと多くなければ1台のPCでも十分な速度での計算が可能となってきた（3.3節参照）。

2.2 可変形鏡

可変形鏡には、圧電素子、MEMS、バイモルフ、電磁型などさまざまな原理に基づくものがあり、どの型を使うかは観測対象に応じて最適なものを選ぶ必要がある^{4), 9)}。現装置に使っている可変形鏡は、圧電素子が電圧を印加すると伸縮するという性質を利用している。薄膜に金属を蒸着したものを鏡面（直径77 mm）とし、その薄膜の裏に圧電素子をアクチュエータとして97個格子状に配置したものである。この可変形鏡は、素子の応答速度が速いという特徴があるが、可動範囲があまり大きくないので、大きな揺らぎには対応できないという欠点もある。

一方、現装置の前に開発していたプロトタイプシステムでは電磁型の可変形鏡を使っていた。これは薄膜の裏に小さな磁石を張り付けておき、アクチュエータとしてコイルを使うものである。このコイルに流す電流の向き・大きさを変えれば磁

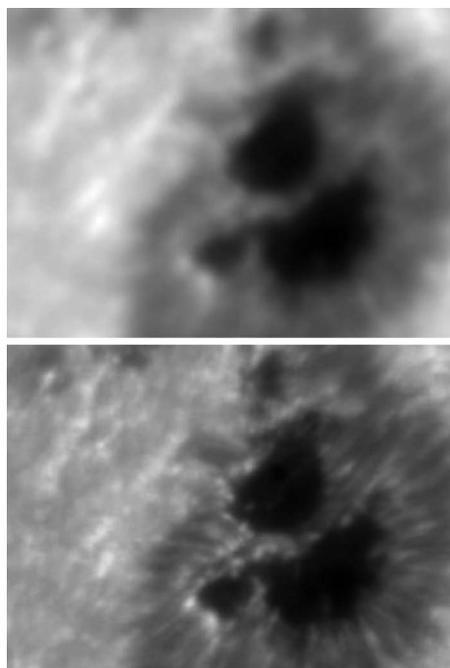


図5 観測された太陽黒点像：(上) AOなし，(下) AOあり。

石と反発したり、引き合ったりして任意の形状に鏡面を調節できる。この型のミラーは可動範囲が大きいですが、応答速度が少し遅いという問題点があった⁹⁾。

2.3 観測結果例

図5は太陽AOの動作がない場合（上）と動作ありの場合（下）に得られた太陽黒点の画像である。観測日時は2015年9月12日9:05 JST、波長は430 nm、視野はおおよそ40×30秒角である。このとき装置はおおよそ1,000 Hzで動作していた。波面センシングに用いたターゲットは中央三つの黒点暗部の中央部の明るい領域である。特にこの付近で像が鮮明になっているのがわかる。

3. システムの舞台裏

3.1 ゾーン制御かモード制御か

AO装置の制御において重要なのは、計測された量（太陽AOの場合は各小開口における位置ずれ量）から、可変形鏡に印加する電圧をどのよう

に決定するかという問題である。これにはゾーン制御とモード制御の二つのやり方がある^{12),13)}。

ゾーン制御では、あらかじめ可変形鏡の個々のアクチュエータに既知電圧を印加し、波面センサーの各小開口における位置ずれ量に与える影響を計測しておく。AO動作時には、計測された位置ずれ量から印加すべき電圧分布をこの関係を用いて逆算するのである。あるアクチュエータへの電圧値が、その周り（ゾーン）にある局所的な小開口像の計測のみから実質的に決まるのでゾーン制御と呼ばれる。この方法は非常に簡単なので夜用のAOでは主流となっている。ただし、お気づきのように波面形状そのものは求めていない。

これに対して、モード制御では波面形状を一旦求め、これを再現するように可変形鏡への印加電圧を決める。このとき、離散的な位置ずれ量の情報から波面の形状を完全に復元するのは無理なので、既知の直交関数系の線形和として近似的に表すのが普通である。望遠鏡のような円形の開口中でこのような直交性をもつ関数系としてはゼルニケ多項式¹⁴⁾（図6上段）が有名である。そのような関数形の個々の形状をモードと呼び、入力された波面をいくつかのモードに分解して表現することになるので、モード制御と呼ぶ。個々のモードを可変形鏡で表現するための電圧値をあらかじめ決めておき、得られた各モードの係数値に応じてそれらを加減して、印加電圧を決定する。

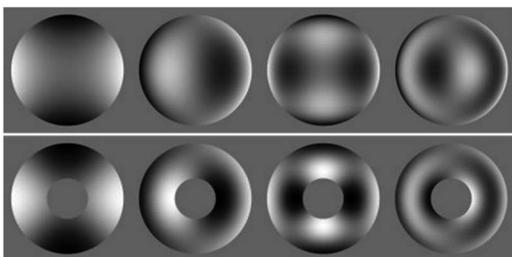


図6 上段：ゼルニケ多項式。左から3次非点収差，3次コマ収差，5次非点収差，5次コマ収差。白が波面が進んでいるところ，黒が遅れているところを表す。下段：対応するKL関数。

このようにモード制御は比較的複雑な処理を行うので利点がないように見える。実際、教科書にも多くのシステムがゾーン制御で動いていると書いてある¹³⁾。ところが、太陽AOでは現在の多くのシステムがモード制御で動いている。これは太陽波面センシングにおいては、スポットではなく広がりのある像を観測する必要があること、およびその像の分解能を保つため小開口のサイズをあまり小さくできないことにある。つまり、波面計測のための小開口の数を増やすことができず、ゾーン制御するには計測点の数が不足しがちなためである。われわれは両方のコードを実装し観測に適用することで比較実験を行ったことがある（ノートによると2007年）。どちらもAO動作は機能したのであるが、ゾーン制御では動作が不安定だったのに対し、モード制御では高い安定性が確認された。ゾーン制御では局所的に大きな揺らぎが入ってきた場合、それを表現しようとして局所的に大きな電圧値となって鏡面の端のほうから動作がおかしくなったのだと考えている。一方、モード制御のほうは比較的低次のモードだけを用いて波面推定をするので、細かな揺らぎ成分を捨てることになる。このため、局所的な揺らぎに対して強かったのだと判断している。

3.2 最適な関数系は

ゼルニケ多項式の低次項の関数形状は、焦点外れ、非点収差、コマ収差などの古典的な収差に対応しており、また解析的に表現できるため光学の分野では古くから利用されてきた¹⁴⁾。ゼルニケ多項式は周辺部ほど急激に変化する成分をもっており（図6上段）、光学系において軸から外れるほど収差が急激に大きくなるという性質に合致している。そのため、ゼルニケ多項式を光学系の収差に適用することには強い理由づけがある。

しかしながら、大気揺らぎの場合は大きく広がった揺らぎの一部を望遠鏡の開口で切り取って観測しているだけなので、開口の周辺部で特に揺らぎが強くなるわけではない。つまり、ゼルニケ

多項式が大气揺らぎを表現するのに最適とは言えないと考えられる。

この問題に対処するため、Karhunen-Loève (KL) 直交関数系を用いる方法がある^{15), 16)}。KL関数系では関数の形状は決まっておらずユーザが各自の環境に合わせて設計する。また、解析的に定式化できないので数値的に関数の形を定義しなければならない。図6下段はドームレス太陽望遠鏡用に筆者が設計した関数系の一部である。ゼルニケ多項式と比較すると周辺部の変化は緩やかになっている。また、円形開口ではなく、輪帯状開口において直交するように設計したため中心部は表示していない。2016年のSPIE国際会議でさまざまな天文台のAOの概要を聞いていると、KLとゼルニケの使用はほぼ半々という印象を受けた。

KL関数系を用いる効果を図7に示す。このグラフは入力波面をKL関数系およびゼルニケ多項式で表現したときの残存誤差を、用いた項数に対して表している。つまり、値が小さいほど波面をよく表現できていることになる。ゼルニケ多項式では21項で最小になり、その後は項数を増やしても逆に誤差が増えていくだけである。これに対して、KLを用いた場合は全領域でゼルニケ多項式よりも優れており、65項で最小となっている。

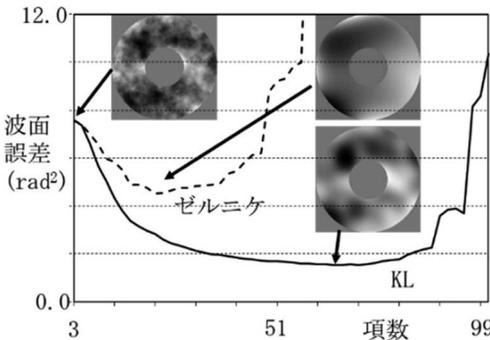


図7 ゼルニケ多項式(点線)とKL関数系(実線)を用いた場合の波面表現能力の比較。入力波面位相(左図)をそれぞれの関数系を用いて表現したときの残存誤差をプロットしたもの。誤差最小になったときの波面形状を右に示す。

入力した波面(左の画像)と比較すると、非常によく波面を再現できているのがわかる。

3.3 装置の性能をどう見積もるか

AO装置は実は古典的な制御システムである。例えば、ロボットを転ばないように二足歩行させるとか、白線からはみ出さないよう自動車を自動走行させるなどと同じ問題なのである。このため、システムの性能を評価するための理論体系は非常に整備されている。専門的な話になるので深くは述べないが、システムの時間的な性能を決める要因は、波面センサーに使用するカメラのフレームレートと露光時間、画像取得してから電圧印加までの計算時間、電圧印加の命令を発してから実際に鏡面が変形するまでの時間遅れ、である^{12), 13)}。このうち計算時間以外はハードウェアで決まってしまうものであり、目的とするAOシステムに必要な性能をもつ装置をそろえる必要がある。

一方、計算時間はアルゴリズムやコードの最適化によって短縮が可能である。われわれはAO用の計算機に8コア/16スレッドのCPUをもつものを使用している。この性能を最大限に発揮するため、マルチスレッドプログラミングによる並列処理のコードを開発した。これによって計算時間をおよそ半分に削減することができた。この点については参考文献15を参照されたい。

システムの性能を表す一つの例として誤差伝達関数を計算した結果を示しておく(図8)。揺らいだ波面が入力されたとき、AOシステムによって

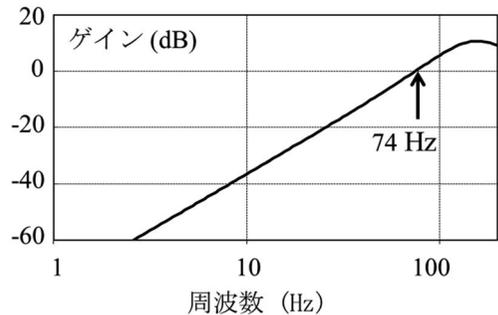


図8 AOシステムの誤差伝達関数(理論計算による)。

補償しきれず残った波面誤差の対数を入力波面が時間変化する周波数に対してプロットしたものである。誤差がゼロになるのが理想であり、このグラフは対数をとっているため、マイナスの大きな数値になるほどAOの効果があることを表している。入力波面が速く変化するほど（周波数が高くなるほど）AOの性能が低下してきて（ゲインがゼロに近づいてきて）、74 HzになるとゼロになりAOの効果なくなることがわかる。これがシステムの時間的性能の目安となる周波数である。

3.4 可変形鏡の時間性能

可変形鏡の時間的性能としてカタログにはミラーの応答時間が掲載されている。ただし、この数値をそのまま用いてシステムを評価すると誤った結果を与える可能性がある。重要なのはシステムが電圧印加の命令を発してから実際に鏡面が変形するまでの時間遅れである。システムの見積もるためにはこれを実測しておくのがよい。われわれは波面センサーに用いている高速カメラを用いて、電圧印加後、実際に画像上に変化が現れる時間を実測した。図9は5回の測定を重ねたものである。ソフトウェアから命令を発行してからミラーが動き出すまでのむだ時間0.26ミリ秒、変形し終わるまでさらに0.31ミリ秒かかっている。後者がカタログに記載されているミラーの

性能に対応する。

われわれのシステムではPCからUSB (3.0) 経由でコントロールボックスに信号が送られ、そこからアンプに信号が転送され、実際に鏡に電圧が印加される。この信号転送とそれぞれのエレクトロニクス動作にかかる時間が前記のむだ時間に対応する。このため、インターフェースやハードウェアの構成が変わるとこの時間も変わる。試しにケーブルをUSB (2.0) 端子に挿してステップ応答を測ってみたところ、むだ時間が1.5倍ほど長くなることを確認した。

4. 今後の展開

4.1 装置の性能向上に向けて

AOを用いてももちろん揺らぎを完全に除去することはできず、波面誤差が残る。このような波面誤差が生じる原因として、(a) 波面センサーの小開口数が少ないことによる計測誤差、(b) 可変形鏡のアクチュエータ数が有限であることによる鏡面形成誤差、(c) システムの動作速度不足による計測してから鏡で補正するまでの時間遅れ、の三つが太陽AOでは主要因である。

われわれはAOシステムの性能を検証するためシミュレーションを行った。計算機上でAOシステムを模擬し、計算機上で発生させた揺らぎ波面を入力として、補償しきれなかった波面誤差を評価する。図10が結果の例である。入力波面がお

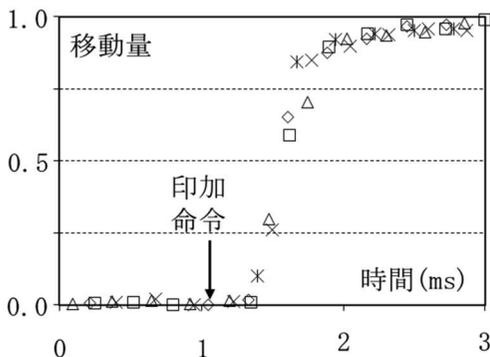


図9 AOシステムでの可変形鏡のステップ応答。ソフトウェア上で電圧印加命令を発行してから実際に表面が変形する時間を計測したものの。

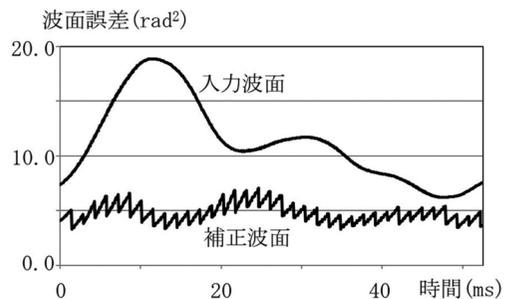


図10 揺らいだ波面が入力されたとき、AOシステムで補正された後の残存波面誤差をプロットしたものの。

およそ 105 Hz で時間変動しているのに対して、AO適用後の誤差は細かなのぎり歯状となっている。可変形鏡が変形した直後は波面誤差が小さくなるが、計算や鏡の変形に時間がかかる間揺らぎの変化によって誤差が大きくなっていき、鏡が変形するとまた誤差が小さくなることを繰り返しているためである。この繰り返しの周波数がシステムの動作周波数になっており、図は 800 Hz の場合である。見てわかるとおり、AOを適用した場合でも誤差は特定の値の周りで変動しているだけで、大きくゼロに近づくことはない。この値がシステムの性能を規定する目安となる。この値に占める上記の要因の割合は、(a) 21%、(b) 12%、(c) 67%であった。つまり、時間遅れが最も大きな原因であり、システムの時間性能を向上させることがシステム全体の性能を改善する近道であることがわかった。計算速度の改善、可変形鏡とPCのインターフェイスの見直しなどを含めて、検討を進めているところである。

4.2 広視野化に向けて

通常のAOでは、図11に示すように、黒点Aを観測する場合、地表層と上空層の揺らぎを合わせたものを波面センサーで計測し、地表層の共役面に置いた可変形鏡によってその両者をまとめて補正する。このように黒点Aを用いてAOが動作しているとき、黒点Bはどのように観測されるかを考える。黒点Aと黒点Bからの光波が通過する領域に着目すると、地表層揺らぎは共通であるが、上空層では揺らぎ層の異なる領域を通過する。このため、黒点Bでは揺らぎの影響は完全に除去されないことになる。この効果（非アイソプラナティック性という）は二つの黒点が離れるほど顕著になる。

太陽観測の例を見てみよう。図12は右端にある黒点を基準としてAOを動作させて観測したものである。視野の横幅はおおよそ 100 秒角、観測波長は $H\alpha + 0.5 \text{ \AA}$ である。参照点である右端の黒点の周りでは細い筋模様など比較的細かな構造が

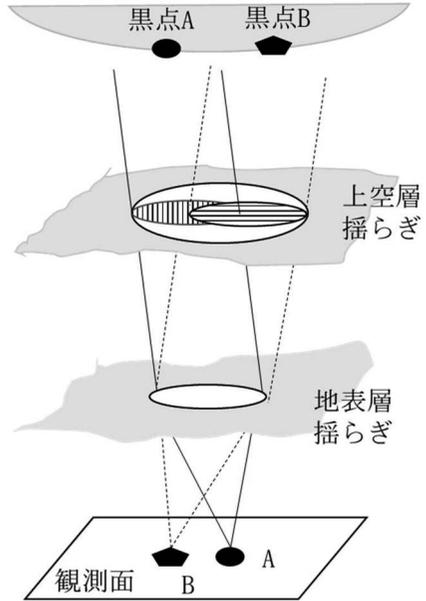


図11 観測対象が異なると上空揺らぎ層を通過する領域が異なる。このため、黒点Aの方向の揺らぎと黒点B方向の揺らぎの状態は両者が離れるほど異なる。

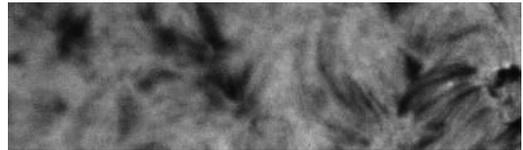


図12 太陽AOにおける非アイソプラナティック性の効果。右端にある黒点を参照としてAOを動作させた場合、そこから離れるほどAOの効果が低下する。

見えるが、離れるに従って細かな構造が見えなくなっている。これが非アイソプラナティック性の効果である。太陽の活動領域には1分角を超えるものも少なくない。太陽物理の研究のためにはこのように広い視野でも地球大気の揺らぎなく観測することが必要であり、広視野で有効に働くAOが重要になってくる。そのような要求に応える技術として多層共役AOと地表層AOがある。

多層共役AOとは、複数枚の可変形鏡を使用し、そのうち1枚を地表層、他の可変形鏡を上空揺ら

ぎ層の共役面に置く。図11の例では、可変形鏡の1枚は地表層の白い円内の揺らぎを、もう一枚は上空層の大きな白い円内の揺らぎを補償するように動作させる。これによって広い視野での揺らぎ補償を実現する。太陽AOでも多層共役AOを用いた観測結果が報告され始めている¹⁷⁾。

一方、地表層AOは地表層の白い円内の揺らぎのみを補償するものである。この場合、上空層の揺らぎはそのまま残るので、望遠鏡の性能限界を引き出すには至らない。しかしながら、大気揺らぎで最も影響が大きいのは地表層であり、これを補償することで広い範囲で揺らぎの影響が軽減された像が得られる¹⁸⁾。

両者に共通して必要となるのが地表層と上空層の揺らぎによる波面位相を分離して決定する技術である。このために使われるのがトモグラフィ波面計測技術である¹¹⁾。これを実現するには、太陽の場合、従来のAOより小開口の視野を広く取ったシャック・ハルトマン型のセンサーを使う。そこで従来と同様の処理を複数の参照点において行うものである。これによって、さまざまな方向で大気揺らぎの状態を計測しておき、計算によって地表層と上空層の波面位相を分離する。

しかしながら、十分な精度で波面推定をするためには多くの参照点が必要になる。さらに、視野を広くしていくためには参照点の数が視野の自乗で増えていく。問題は参照点の数に比例して計算時間がかかるため、大気揺らぎの変化に追従することができなくなる点である。現在は、コードの最適化を進めるとともに、波面計測にGPU（グラフィックス プロセッシング ユニット）を導入すること、ハードウェアの改善などを並行して検討を進めている。

謝 辞

太陽AOの開発にあたり、望遠鏡時間、共同観測、資金、装置制作などでお世話になっている飛騨天文台のスタッフの皆様へ深く感謝いたします。

また、AOのソフトウェアを開発してくれてきた北見工業大学の学生・卒業生諸君にも心より感謝いたします。

参考文献

- 1) Babcock H. W., 1953, PASP 65, 229
- 2) 鶴田匡夫, 1997, 第4・光の鉛筆(新技術コミュニケーションズ)
- 3) 服部雅之, 早野裕, 2015, 光学44, 370
- 4) 渡邊誠, 2017, 計測と制御56, 435
- 5) Rimmele T. R., Marino J., 2011, Living Rev. Solar Phys. 8, 2
- 6) Miura N., et al., 2006, Opt. Rev. 13, 338
- 7) Miura N., et al., 2007, Opt. Rev. 14, 159
- 8) Miura N., et al., 2009, Opt. Rev. 16, 558
- 9) Miura N., et al., 2012, Proc. SPIE 8447, 84474
- 10) Miura N., et al., 2014, Proc. SPIE 9148, 914831
- 11) Miura N., et al., 2016, Proc. SPIE 9909, 99092
- 12) Roddier F., 1999, Adaptive Optics in Astronomy (Cambridge Univ. Press)
- 13) Hardy J. W., 1998, Adaptive Optics for Astronomical Telescopes (Oxford Univ. Press)
- 14) 久保田広, 1964, 光学(岩波書店)
- 15) 三浦則明, 2015, 光学44, 379
- 16) Dai G.-m., 1995, JOSAA 12, 2182
- 17) Schmidt D., et al., 2017, A&A 597, L8
- 18) Tokovinin A., 2004, PASP 116, 941

Development of an Adaptive Optics System for Solar Observations and Future Prospects

Noriaki MIURA

Kitami Institute of Technology, 165 Koencho, Kitami, Hokkaido 090-8507, Japan

Abstract: Adaptive optics is an indispensable technique for ground-based solar observations in order to correct wavefronts perturbed by atmospheric turbulence in real time. In this article, I review the principle of adaptive optics, differences between day- and night-time systems, and an adaptive optics system that we are developing for the Domeless Solar Telescope of Hida Observatory, Kyoto University. I also describe techniques used inside the system and evaluation of system performances. Clarifying prospects of our system, I discuss improving system performance and implementing wide-field compensation of wavefront errors.