

ゆらぎを補償した天体観測

国立天文台（光学赤外線天文学研究系）

家 正則

望遠鏡の解像力

望遠鏡の理論的な解像力は、口径 D と波長 λ で決まる回折限界 $1.2 \lambda/D$ ラジアンである。この値は、波長 $0.5 \mu\text{m}$ の可視光では、 5 mm 径の裸眼の瞳で約 25 秒角、口径 1 m の望遠鏡なら 0.1 秒角になる。ところが、実際には口径 10 cm 以上の望遠鏡の解像力はどれもほぼ 1 秒角程度であり、回折限界の解像力を実現できていない。

この原因は、地球大気のゆらぎにある。有害な紫外線から地表を守り、生物を育む温暖な環境をつくっている地球の大気。天体観測にとっては、我々が呼吸して恩恵に浴しているこの大気は、光を吸収・散乱し、波面を乱す厄介ものなのである。

ゆらぎの原因は大気中の温度むらとされている。温度むらは屈折率のむらとなり、天体からの光波面を乱す。地球大気に突入するまで平面であった波面が、大気中で凸凹にゆらいでしまうため、回折限界の結像が実現できないのである。

大気の揺らぎにより星像が揺れる様子を実測した例を第 1 図に示す。星像の揺れは、望遠鏡口径の中での波面の平均的傾きの変動によるものであり、大気の揺らぎの中でも最も振幅の大きい成分である。イメージダンシングと

呼ばれる星像の揺れの振幅は、大きい場合には数秒角にも達することがある。大気のゆらぎを取り除くには、まずこの星像の揺れを止めなければならない。このための装置をイメージスタビライザーという。

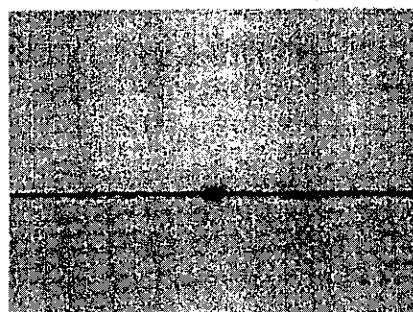
小型の望遠鏡の場合は、イメージスタビライザーを用いると画像の切れ味が格段に良くなるが、大型望遠鏡では星像を止めただけでは回折限界の解像力を達成できない。星像自体が大気のゆらぎでボケて広がっているためであ

る。これを直す技術を波面補償光学といふ。波面補償光学の概念とその開発の現状を紹介する。

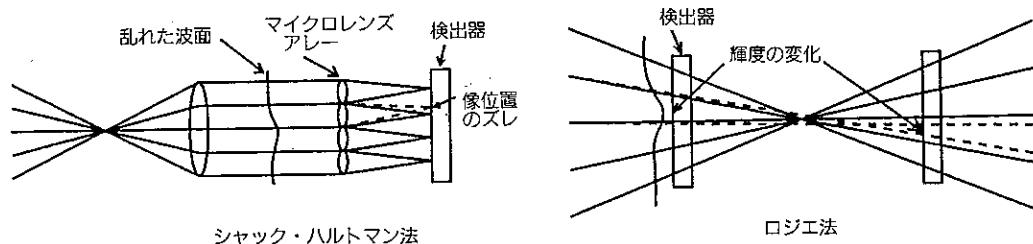
大気のゆらぎ

大気のむらによる波面の乱れの尺度長をフリード長 r_0 という¹⁾。つまり、波面が平面と見なせるのは幅 r_0 以下についてのみである。フリード長 r_0 は場所と時によって様々に変化するが、条件のよい場合には可視光で 30 cm 、悪い場合には 1 cm 以下となる。望遠鏡口径の回折限界の代わりに、フリード長で決まる回折限界 $1.2 \lambda/r_0$ ($=0.3\text{--}10$ 秒角) が、地上望遠鏡の実際の解像力を決めている。大気のゆらぎが仮に高さ 3000 m で起こっているとすると、たとえばフリード長 10 cm は角度 7 秒角に相当する。つまり、ゆらぎが共通と見なせる範囲は角度にして 1-20 秒角程度となる。この角度を等擾乱角度（アイソプラナティック角度）という。

大気のゆらぎは乱流状態であり、コルモゴロフの法則に従う。これは波数 k の乱流のエネルギー密度が $k^{5/3}$ に比例するという法則である。このコルモゴロフ・スペクトルを持つ乱流の場合、 r_0 は波長の^{5/6}乗に比例するから、 $0.5 \mu\text{m}$ の可視光で 10 cm の時でも、波長 $5 \mu\text{m}$ の赤外線なら r_0 は 1.6 m にな



第 1 図 イメージダンシング。国立天文台岡山天体物理観測所の 188 cm 望遠鏡の CCD カメラで捕らえた星像の揺れの軌跡。10 秒間にわたる星像の揺れを表示したもので、この図での揺れ幅は 0.2 秒角程度であった。画面中央には 10 秒間露出の星像が表示されている。この時の星像直径は約 1 秒角であった。



第2図 波面測定におけるシャック・ハルトマン方式（左）とロジエ方式（右）の原理

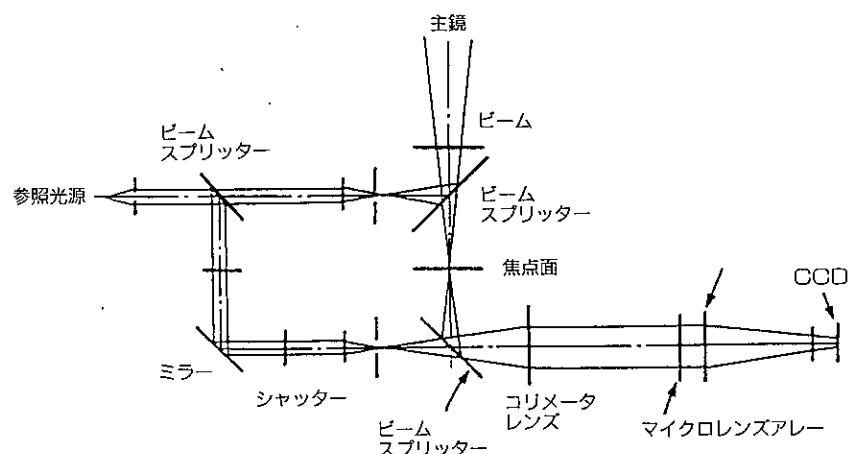
る。つまり、大気のゆらぎは短い波長ほど著しいということになる。ゆらぎの時間スペクトルも広い範囲にわたっている。ビデオレートよりも速い300Hz程度までの変動成分があることが確認されている。

波面測定

望遠鏡の主鏡に入射する波面の乱れを測定する具体的な方法を考える。波面の二次元的な測定法としては、シャック・ハルトマン法とロジエ法が有力視されている（第2図）。

シャック・ハルトマン法は波面の一次微分を測定する方法である。望遠鏡の焦点の後ろに置いたコリメータレンズで主鏡の像をつくり、そこにマイクロレンズアレーを置いて、1つの星の像を焦点に多数結ばせる。波面のゆらぎが無ければ、多数の星像は碁盤の目のような規則正しい配列になる。波面が揺らぐと、この配列が変形する。この変形を測って、空間的に積分してやると、もとの波面を測定することができる²⁾（第3図）。

ロジエ法は波面の二次微分を測る方法である。焦点の少し手前と少し奥で星のピンボケ像をつくる。波面のゆらぎがなければ、どちらの像もそれぞれ一様な明るさの像となる。波面が揺らぐと、波面の曲がり具合に応じて、焦点が前後に移動する。このため、ピンボケ像の中に明るさのむらが生じる。



第3図 国立天文台で試作したシャック・ハルトマンカメラ

むらの出具合いは前ピンの像と後ピンの像では逆になるから、これを測って、空間的に2階積分してやれば、波面が求められる。ただし、積分の境界条件として、望遠鏡の端での波面の傾斜を同時に測定する必要がある³⁾。

波面の乱れは様々な表現が可能である。ここでは、円盤に対する完全直交関数系であるツェルニケ展開法を採用しよう（第4図）。この場合、通常最も振幅の大きいのが波面の傾斜成分である。波面の傾斜は焦点面での星像の位置ずれを生じる。その次には波面の曲率変化成分と非点収差成分が大きい。波面の曲率変化は星像のピンボケを起こし、非点収差は星像を楕円にしてしまう。以下順に高次の波面変化モードになるに従って、振幅は小さくなるが、星像の乱れ方は複雑になってゆく。

「ブレンビー」望遠鏡

最も振幅の大きい波面の傾斜成分を補償できれば、焦点面での星像の揺れが止められる。

最近、宣伝されている「ブレンビー」カメラの一種である。商品化された「ブレンビー」は電気的な画面切り出し処理をビデオレートで実現することにより、画像のぶれを小さくしている。天体観測でも、記録した画像を後で処理して位置合わせすることは従来から行われてきた。だが、さらに一步進めて、記録する前に実際に焦点面での星像のゆれを光学的に補償して止めてしまおうというのが、イメージスタビライザである。

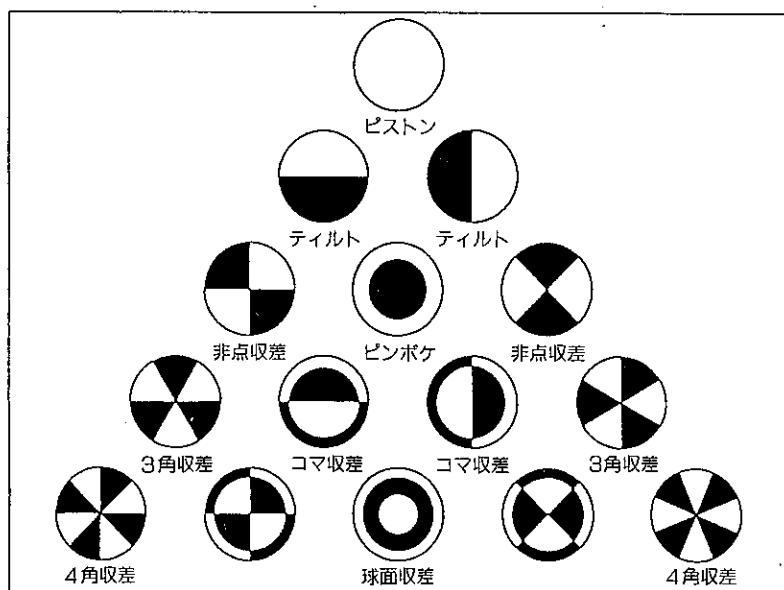
第5図は東京大学理学部の高遠徳尚、早野裕の両君、通信総合研究所の西川淳氏と筆者が共同開発した、国立天文台岡山天体物理観測所188cm望遠鏡用のイメージスタビライザである。原理的には、焦点面での星像の重心位置を4分割ホトダイオードで検出し、補正用の平面鏡の傾きを調整するピエゾ素子に、星像重心位置の補正量信号をフィードバックするというシステムで

ある(第6図)。

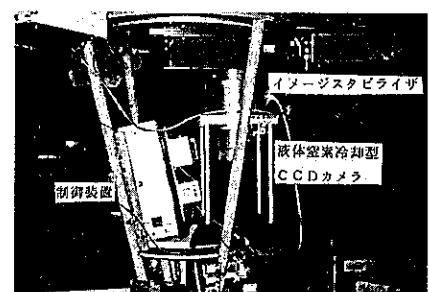
この装置を作動させて星を撮影すると、作動させない場合と比べて、星像の揺れを約1/4にすることができた(第7図)。撮影した星像の直径で測ると、約3割方小さく絞り込むことができた。3割しか効果がないのかと思われるかもしれないが、これは理論的な期待どおりの値であり、システムとしてはきちんと動作していることが、ス

ペクトルアナライザでも確かめられている。

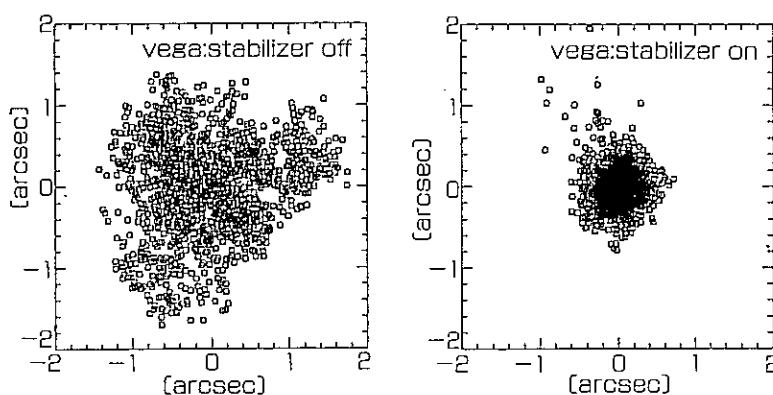
観測した夜は比較的大気の乱れが少なく、補正なしの星像直径は2秒角程度であった。これはフリード長5cm程度に相当し、188cm望遠鏡の場合、望遠鏡口径の中に約 $(188/5)^2 = 1400$ 個の独立な波面があることに相当する。ツェルニケ展開でいうと、随分と高次の成分まであることになるから、2方向の波面の傾斜を直しただけでは完全な補償にはならない。それでも、波面誤差の中では傾斜成分の振幅が最も大きいため、3割もの改善効果が認められたのである。



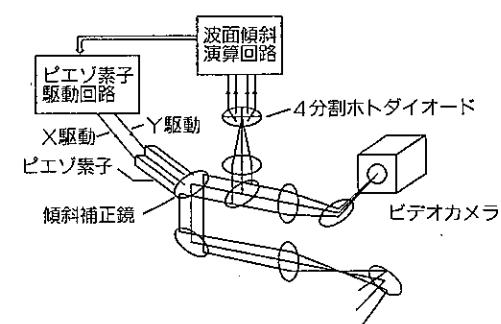
第4図 波面のツェルニケ展開における低次基本モード。各モードは円盤の基本変形モードであり、基本的な光学収差にも対応している。



第5図 岡山天体物理観測所188cm望遠鏡に装着したイメージスタビライザ



第7図 星像重心の動きの分布。(右)イメージスタビライザ動作時、(左)非動作時。



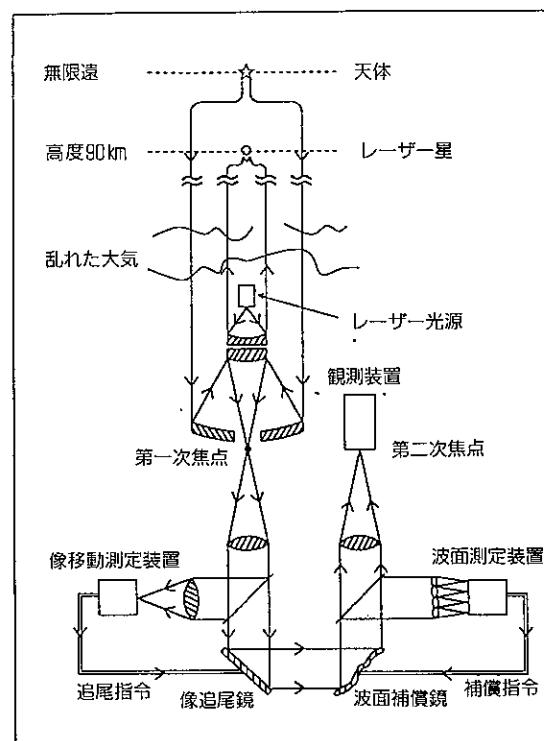
第6図 イメージスタビライザの動作原理

波面補償光学

イメージスタビライザの次には、波面乱れの高次成分まで一度に直す装置の開発が望まれる。このような装置を波面補償光学装置と呼ぶ⁴⁾。筆者のグループでは、波面補償光学の試作装置の開発に取り組んでいる。ここで目指すのは、シャック・ハルトマン光学系に高感度高速カメラを取り付けて波面測定を行い、高速プロセッサで必要補正量を計算し、補償用薄鏡を変形させる多数のピエゾ素子を実時間で駆動する、サーボシステムである（第8図）。

原理的には構築可能なサーボシステムであるが、天体観測に実用化するにはどこまで暗い星にまで使えるかが勝負となる。0等星から地球大気外へ到達する光量は、可視域でおよそ光子1000個/秒/cm²/Aである。フリード長30cm、波長域3000A、大気・望遠鏡・検出器での損失による減光率0.1、測定間隔0.003秒としても、波面測定に使える光子数は0等星で70万個、10等星では70個にしかならない。70個の光子をS/N>5で測定しようとすれば、雑音レベルを光電子数11個以下にする必要がある。高感度低雑音の高速カメラの開発がその成否の死命を握っている。

等擾乱角度が1分角としても、その中に確実に入って来る星はせいぜい14等星である。10等星までが、波面測定の光源として使えたとして、等擾乱角度内に10等星を含む天域は全天の1%以下でしかない。そこで、実在の星を頼りにするのは諦めて、人工の星を任意の方向につくろうという構想がある。強力なレーザー光を打ち上げて大気中の分子・原子による散乱光を光源として利用しようという考え方である。特に高度95km程度の上層大気中にあるナトリウム層に、ナトリウムD線



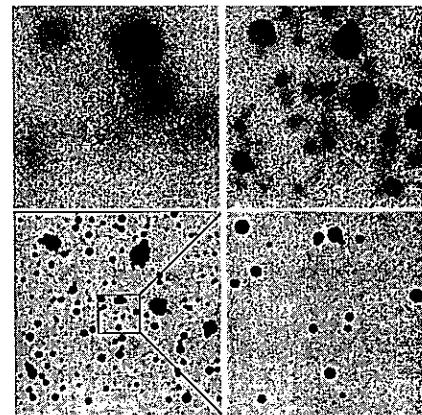
第8図 補償光学装置の概念図。イメージスタビライザ部、補償光学部、レーザー星発生装置からなる。

(波長590nm)にチューニングしたレーザーを照射し、ナトリウム原子を発光させて人工星をつくる試みが注目されている⁴⁾。

21世紀の望遠鏡

補償光学の技術に似た技術として、能動光学という望遠鏡技術がある。国立天文台では1991年度から8年計画で、ハワイ島の海拔4200mのマウナケア山頂に、口径8mの大型光学赤外線望遠鏡を建設する計画に着手した。この望遠鏡では主鏡のガラス材を薄い皿型にし、鏡の形状を常に測って、多数の鏡支持機構で常に最良の形状に保つことを、計画している。この技術を能動光学といいう⁵⁾。

補償光学が大気の速いゆらぎを直すことを目的にしているのに対し、能動



第9図 補償光学シミュレーション。8m級望遠鏡において、星像の大きさが(左上)3秒角、(右上)1秒角、(左下)0.3秒角、(右下)0.03秒角の場合の星々の見え方を表したもの。補償光学が実現すると、右下図のような回折限界の解像力が達成される。

光学は望遠鏡の自重変形、温度変化による変形や光学調整誤差をまとめて直すことを目標にしている。能動光学と補償光学は、その具体的な目標が違うが、基本的には共通の原理に基づいている。この分野での技術的な進展が著しいことを考えると、21世紀に建設される中型・大型の望遠鏡には、能動光学方式による最良状態の鏡面の実現と補償光学による大気の揺らぎ補正とが、標準の装備となるように思われる。

補償光学が実現すると、地上の8m級大型望遠鏡は高価な宇宙望遠鏡の3倍ほどの解像力を達成できるはずである（第9図）。完全な補償でなくとも、

ある程度の補償ができれば像を小さくできるから、背景夜空光に比べてコントラストが上がり、検出限界も深くなる。分光器もコンパクトなものにすることができるようになるので、安価で効率のよい観測を行うことができる。

補償光学技術への投資は、このような意味でコストパフォーマンスの高い投資と言えよう。

参考文献

- 1) J. W. Hardy : "Instrumental Limitation in Adaptive Optics for Astronomy", SPIE. Proc. Vol. 1114, p. 2-13, 1989.
- 2) T. Noguchi 他 : "Shack-Hartmann Wavefront Analyzer", Publ. Astron. Obs., Vol. 1, p. 49-55, 1989.
- 3) F. Roddier 他 : "A Simple Low-Order Adaptive Optics System for Near-Infrared Applications", Publ. Astron. Soc. Pacific, Vol. 103, p. 131-149, 1991.
- 4) H. W. Babcock : "The Possibility of Compensating Astronomical Seeing", Publ. Astron. Soc. Pacific, Vol. 65, p. 229-236, 1953.
- 5) M. Iye : "Active Optics Experiments with a 62cm Thin Mirror", SPIE. Proc. Vol. 1236, p. 929-939, 1990.
- 6) 家正則 : "能動光学と補償光学", 光技術コンタクト、第29巻、10-18頁、1990。

ISDNの全貌 情報通信シリーズ 第3回 平成3年9月4日(水)

衛星通信の発展と流れ 情報通信シリーズ 第4回 平成3年9月17日(火)

情報通信技術の発達はビジネススタイルやライフスタイルを大きく変えつつあります。そんな中で新たなビジネスチャンスや応用が期待できます。情報通信シリーズの第3回、第4回ではこれから情報通信のポイントとなるISDNや衛星通信に関してその現状や動向を豊富な事例をまじえて解説します。企業の情報化を担当するビジネスマンにおすすめできるセミナーです。

プログラム

9月4日(水)	10:00~11:30	山本 武(NTT企業通信システム本部大阪営業部長) 「ISDNの特徴と利用法」
	13:00~14:30	村岡洋一(早稲田大学理工学部情報学科教授) 「ISDNの製品動向と技術動向」
	15:00~16:30	直井 学(NTT企業通信システム本部大阪営業部担当部長) 「ISDNの利用事例」
9月17日(火)	10:00~11:30	森永規彦(大阪大学工学部通信工学科教授) 「衛星通信の発展動向」
	13:00~14:10	清水 明(日本電気無線サブグループ技師長) 「衛星通信の技術動向」
	14:30~15:30	森田好和(日本通信衛星営業本部本部長代行) 「衛星通信のビジネス」
	15:40~17:00	山本平一(NTT無線システム研究所所長) 「移動体衛星通信」

実施要領

- 会場 千里国際情報事業財団セミナールーム(大阪・梅田・阪急グランドビル15階)
- 受講料 一般 22,000円 S III会員 20,000円(資料代・消費税含む)
- 定員 80名(定員になり次第締切)
- 主催 財団法人 千里国際情報事業財団
日本経済新聞社
- 事務局 〒530 大阪市北区角田町8-47 阪急グランドビル15F
財団法人 千里国際情報事業財団
phone : 06-373-5518 Fax : 06-313-0357