

特集 光学技術の新しい挑戦 ——オプトウェア温故知新——

望遠鏡

能動光学と

補償光学

国立天文台
家 正則

1. ガリレオからパロマーまで

ガリレオが自作した望遠鏡で木星や土星を観察した1610年が天体望遠鏡の始まりとされている。この時以来、宇宙を見る人類の目の大きさは着実に増大してきた。レンズを用いる屈折式望遠鏡は、1897年にヤーキス天文台に完成した101cm望遠鏡が最大で最後となった。屈折式は望遠鏡の筒が長く扱いにくいのと、色収差を完全には除けないため、これ以後の大型望遠鏡はすべて反射式望遠鏡となった。1917年にウィルソン山の257cm望遠鏡が完成し、1948年にはパロマー山の508cm望遠鏡が完成した。1970年代以降も大型望遠鏡が10台ほど建設されたが、ソ連の6m鏡以外はすべて口径4.2m以下であった。これは、精度の良い望遠鏡をつくる技術の限界が4m級であったためである。この間に光検出器が乳剤写真からCCDなどの半導体検出器に発展したことは天文学にとっては幸いであった。望遠鏡を大きくしないでも検出効率の改善により、実質的に観測能率を大幅に向上させることができたからである。

だが、CCDの登場により、光検出技術も1980年代中頃には成熟の域に達した。検出技術ではこれ以上の大幅な改善が見込めなくなつたため、集光力増強の必要性が再び高まり、1980年代後半から21世紀に向けて8m級の大望遠鏡を建設しようという機運が盛り上がって来た。

2. 8m「すばる」望遠鏡計画

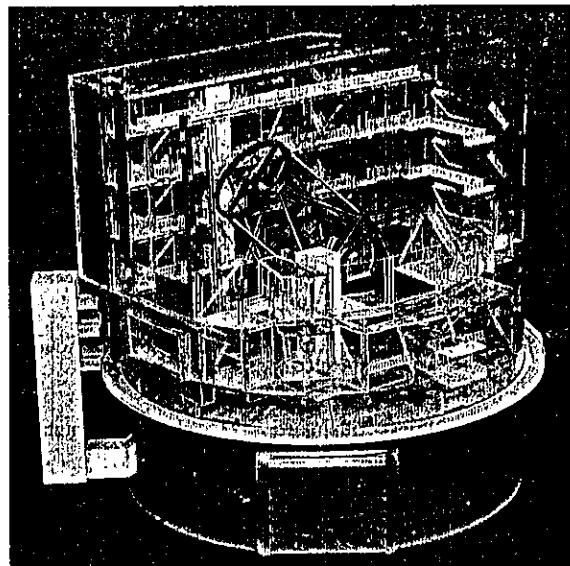


図1 「すばる」望遠鏡とドームの模型

近年の観測天文学は宇宙の果てに迫ろうとしている。膨張宇宙論によれば、遠い天体ほど高速度で我々から遠ざかっている。遠い天体はそれだけ過去の姿を我々に見せてくれる。このような天体からの光はドップラー効果により大きく赤方偏移しているので、赤外線での観測能力が重要となる。宇宙誕生の謎を解き明かすためには、可視光だけでなく赤外線での観測もできる大型の望遠鏡が必要である。

文部省(現立天文台)は、一枚鏡としては世界最大の大型光学赤外線望遠鏡(JNLT: 愛称「すばる」)の建設に、1991年度から着手した。光学系は主鏡口径8m, F/2, のリッチ・クレチアン系で、マウントは経緯台方式、ド

ーム上部は望遠鏡に同期して回転する。1998年度の完成をめざしている(図1)。建設予定地は地球上で最も天体観測に適しているハワイ島のマウナケア山頂(海拔4200m)である。この望遠鏡の主鏡は、直径8mに対して厚さがわずか20cmの超低膨張ガラスで作る。常識やぶりの薄さだが、鏡面がたわまないようにコンピュータ制御の264個のアクチュエータでバランス良く支える。この技術を「能動光学」と呼んでいる。「すばる」望遠鏡に比肩する望遠鏡計画は、欧洲南天天文台(VLT計画)、米国のカリフォルニア大学連合(ケック望遠鏡計画)、米国国立天文台(ジェミニ計画)などで推進されているが、欧洲南天天文台の計画でも能動光学が採用されることになっている。また、この技術の応用として、大気のゆらぎによる星像のゆれやぼけを直す「補償光学」の研究も進められている。「すばる」望遠鏡を例にとって、能動光学と補償光学を中心としたハイテク技術について解説しよう。

3. 能動光学

3.1 能動光学の原理

望遠鏡の鏡面は設計形状からの誤差が光の波長の約14分の1以下になるように保つ必要がある。8mの望遠鏡で約30nmという誤差になるが、これは単純にスケールアップすると直径80kmの土地を0.3mmの誤差で地ならしすることに相当する。望遠鏡はいろんな姿勢に傾けるため、自重のかかる方向は一定していない。鏡の支え方が安易だと、鏡が変形するため良い像が得られない。

これまででは自重変形を小さくするため、主鏡のガラス材を十分に厚くして「堅くて変形しない」鏡にするのが常識であった。ところが、大型望遠鏡の場合これではガラス材が重くなり過ぎ、鏡を支える構造物も大きく重くなり、コストが「天文学的な数字」になってしまう。鏡を軽くできれば、全体が身軽になる。だが軽くし過ぎると、鏡が柔らかくなり変形してしまう。「能動光学」方式では「少し柔らかめ」の鏡を用いる。柔らかさを逆手にとって、いつも設計どおりの鏡面になるように制御しようというのが発想の原点である。

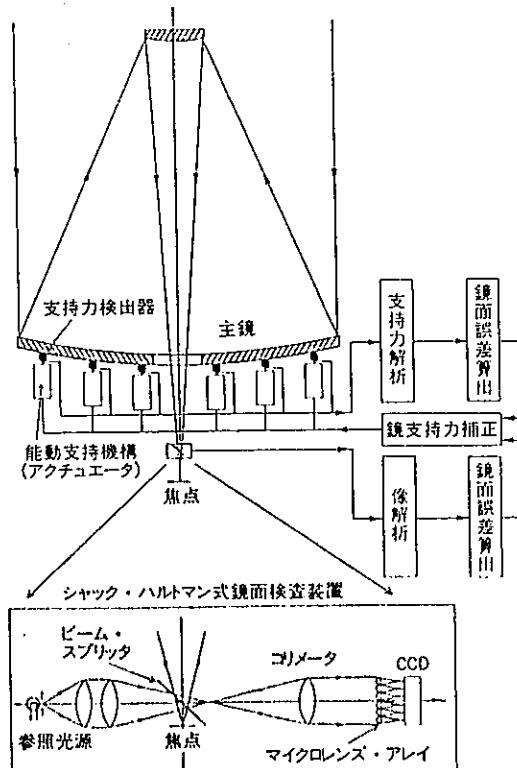


図2 能動光学システムの構成原理

能動光学の原理を図2に示す。鏡面の形状誤差を「測って」、鏡の形を「直す」ようにフィードバック回路を構成するというのが基本的な原理である。鏡面の測定には光学測定と機械測定の独立な2つの方法を用いる。光学的方法としては、シャック・ハルトマン型鏡面測定装置を用いて比較的明るい星を観測し、鏡の変形の様子を直接測る。光学的測定は大気の乱流による誤差を除くために、およそ1分間の平均を取る。機械的方法としては、鏡を支える力の分布をセンサでモニタし、正しい力分布との差から鏡面変形を計算する。支える力の誤差と鏡面の変形量は「フックの法則」により関係づけられるから、正確な推定ができる。機械的な測定は間接的だが、高速度でサンプリングを行えるという利点がある。天体を追尾中は時々刻々と支持力を調整する必要があるので、常に機械的な測定をもとに制御を行い、ときどき光学的な測定で校正するという2重のサーボ機構が「す

ばる」望遠鏡では考えられている。「すばる」の能動光学機構は図3のようなものになる。

能動光学では、姿勢の変化に伴う鏡の変形だけでなく、温度変化に伴う変形など時間変化の比較的遅い成分や、研磨誤差など変化しない成分をまとめて補正することができる。これは、従来の望遠鏡にはできなかった芸当である。

3.2 鏡面測定装置とアクチュエータ

鏡面測定用シャック・ハルトマン装置の一例を図4に示す。この装置に内蔵されたマイクロレンズ・アレーは、主鏡の像を約300個の領域に分割し、その各々の部分からの光をそれぞれ焦点面に結ぶ働きをする。このため、この装置で星を観測すると、約300個の星像が焦点面上に結ばれる。鏡が局所的に変形するとその部分で反射された光線の向きが変化するから、焦点面上の星像の位置が移動する。従って、300個の星像の配置がずれる様子から、鏡面の変形状態を測定することができる。国立天文台で試作したシャック・ハルトマン装置は鏡面のわずか数nmの凹凸を測定できることが確かめられている。

鏡が局所的に「つるつる」に磨かれていれば、細かい変形は本来小さいはずである。また仮にあってもそのような細かい変形を直すのは困難である。ここで注目するのは大きな変形である。鏡面の変形は、ガラス円盤の基本的な変形の重ね合わせと見なすことができる。実際には30種類ぐらいの変形パターンまで考慮すれば十分である。鏡の変形パターンは基本的な光学収差のパターンにも対応している。

能動光学を実現するには正確な支持力の制御が必要である。支持方式としては、油圧や空気圧を利用する流体支持法と、てこやばねを利用する機械支持法がある。流体支持法は流体のシールと圧力弁の精度が問題となる。モータ駆動のバネを用いる方法は計算機制御に適している。

任意の姿勢にある鏡の重量は、鏡の光軸方向（アキシャル）成分と鉛直面内で光軸に垂直な（ラジアル）成分とに分けて支える。アキシャル方向の力は0.01%の精度が必要なのに対し、ラジアル方向の力の誤差は0.2%ぐらいまで許される。そこでJNLTでは、精度はやや低い

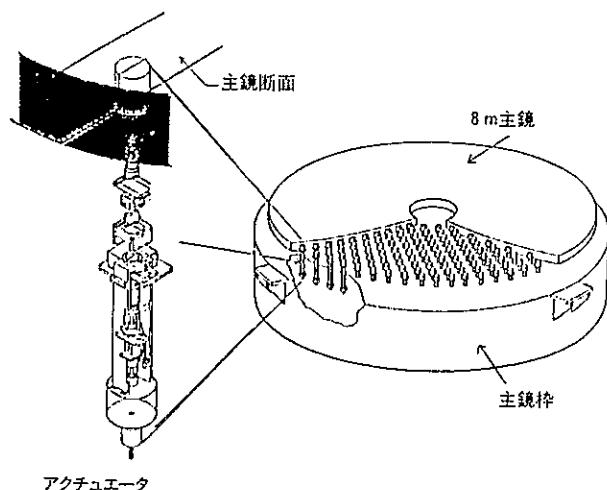


図3 「すばる」望遠鏡の能動光学機構の概念図
直径8mの薄鏡は264個のアクチュエータで常に最適状態に支えられる

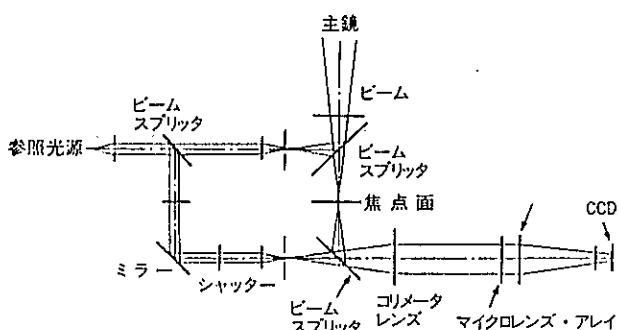


図4 国立天文台で開発したシャック・ハルトマン型波面解析装置

が機械的に常にバランスがとれるでこの方式をラジアル支持に採用し、アキシャル支持は高精度のばね方式を採用することにしている。鏡の裏面からガラスにボケットを掘り、アキシャル支持とラジアル支持を同時に実現するアクチュエータの作用点をガラスの重心面に合わせる。通常ラジアル支持は鏡の周辺で行うが、薄鏡の場合これでは曲げモーメントが生じて、かなり大きな変形を招くことになる。重心にアクチュエータを置く方式を採用しているのは「すばる」望遠鏡だけである。

支持点が264個の場合、各点の受け持つ自重は90kg重となる。鏡面を補正するための力のゆとりを考えると0-150kg重の範囲にわたり、15g重以下の誤差で力を制御できるアクチュエータの開発が必要である。JNLT研究グループではそのようなアクチュエータの試作に成功した。

3.3 実証実験

鏡面測定用シャック・ハルトマン装置と三菱電機の協力を得て試作した高精度アクチュエータを直径62cm、厚さ2.1cmの薄型球面鏡と組み合わせて、能動光学方式の実証実験を1989年秋から国立天文台で行った。この実験では、まず実際に62cm鏡の支持力を調整することによって、理論どおりに鏡面変形を矯正できるかどうかを試みた。アクチュエータが9本しかないと、複雑な変形を完全に矯正することはできないが、基本的な変形モードは数値シミュレーションどおりに矯正できることが示された(図5)。アクチュエータ数の多いJNLTでは、原理的にはより一般的な変形も矯正できる。どこまで直すかは精度と時間の兼合いで決めることになる。複雑な系の制御となるので、日本で発展の著しいニューロネットワーク制御の考え方を取り入れることを検討している。

4. 補償光学

4.1 シーイング

望遠鏡の解像力の理論的な限界は、観測波長 λ と望遠鏡の直径Dの比で決まる。これは回折限界と呼ばれ、およそ $1.22\lambda/D$ ラジアンである。例えば、直径1mの望遠鏡では回折限界は 5×10^{-7} ラジアン、つまり星像半径で約0.1秒角になる。ところが、実際に1m級の望遠鏡で得られる星像の直径は1秒角以下にはなかなかならない。これは、大気中の温度の揺らぎが屈折率をわずかに変化させ、かけらうのように星の像を乱してしまうためである。このようなかけらうの強さのことを、シーイングと呼んでいる。

かけらうを完全に無くすには、宇宙空間か大気のない

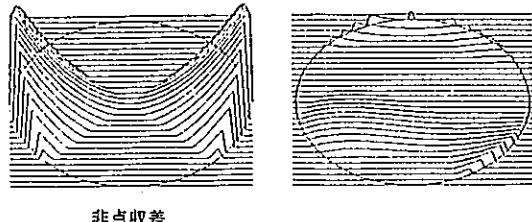


図5 能動光学による62cm鏡面の非点収差の矯正例
変形量が正の部分のみを表示
(左)矯正前の非点収差 (右)矯正後の残存収差

月面に行く必要があると考えられてきた。「大気の揺らぎを測って直すことができれば、地上からでも大望遠鏡の回折限界の分解能が得られる」という補償光学の概念は、1953年にバブコックが提案した。「補償光学」は技術的には「能動光学」を高速化したものと位置づけることができる。

口径10cm程度の小望遠鏡で星を観察すると、大気の乱れの影響で星像があちらへこちらへとふらふら跳るのが分かる。口径1m以上の大望遠鏡では、星の位置の踊りかたは小口径の望遠鏡の場合に比べて目立たないが、星が全体にふやけて見える。これは、小望遠鏡で見えるランダムな星像の踊りが、大望遠鏡では多数重ね合わさるためである。光線の束が揃っていると見なせるのは、可視光ではせいぜい20cmぐらいまでである。つまり8mの望遠鏡の中には、約1600個のバラバラな光線の束がやってきている。このバラバラな光線の束を一つに揃えようというのが補償光学である。このような揺らぎの完全な補償を行うには1kHzぐらいまでの補偿能力が要求されることになる。

天体からの光線の束が、あるいは光を波動と考えるとその波面が、どう揺らいでいるかを測ることが、補償光学の第1歩である。光波面の揺らぎの測定法としては、前述のシャック・ハルトマン法がよく用いられている。こんどは鏡面の縫を測る代わりに、光波面がどの部分でどれだけずれているかを時々刻々測ることになる。微かな星を光源として高速でこのような測定をすることは決して容易ではないが、半導体技術や光増幅技術の進歩によ

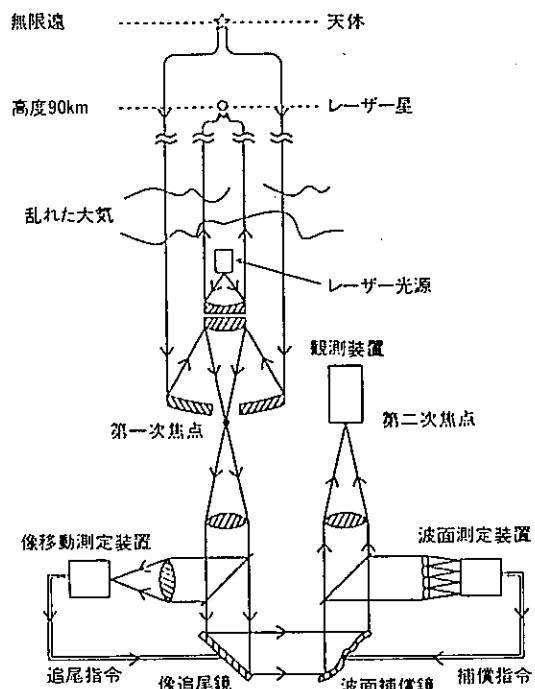


図6 捕償光学システムの概念

レーザー星を作り、波面測定装置で大気の揺らぎを実時間測定する。イメージスタビライザーと捕償鏡を用いて波面を補正すると、望遠鏡の回折限界に迫る解像力を達成できる。

り波面を測定できる高速高感度カメラが開発されつつある。

4. 2 捕償鏡

能動光学の場合と違って、捕償光学では波面の誤差を高速に直す必要があるので、主鏡を矯正変形させたのでは時間的に間に合わない。焦点後の光学系がつくる主鏡像の位置に薄くて柔らかい鏡を置き、この鏡面を波面誤差と逆向きに変形させる。1枚続きの薄い鏡を、多数のアクチュエータで裏から押し引きする方式が主流である。変形させるアクチュエータとしてはピエゾ素子が用いられる。

別的方式としては、多数の小さな鏡を独立に駆動する方式(セグメント方式)もあるが、個々の鏡の位相を合わせるのが大仕事である。液晶型の位相変調素子を用いる方式も考えられるが、偏光を作りため応用範囲が限ら

れる。波面測定装置で測った波面誤差分布から、捕償鏡のアクチュエータの制御量を計算するには、高速計算機か専用パイプラインプロセッサを用いる。

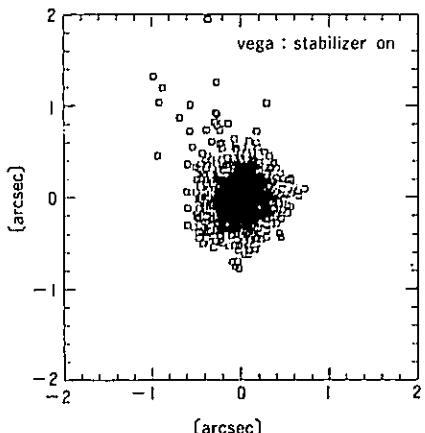
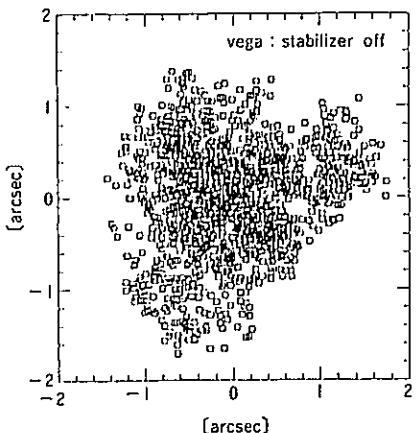
4. 3 レーザーガイド星

捕償光学が天文学で実用になるかどうかは、波面測定ができるかどうかにかかっている。実際に観測したい天体が十分明るければ、その天体を波面測定の光源として用いる。観測したい天体が暗いときには、近くの明るい星を光源として用いる。波面測定用の星と目的天体とは、大気の揺らぎが共通である必要がある。このためには、目的天体と波面測定用の星とは角度にしてできれば10秒角以内にあることが必要である。任意の方向に波面測定用の明るい星を作れないだろうか。

地表から約90kmの上層大気中に、ナトリウム原子の密度が濃い厚さ10kmくらいの層がある。ナトリウム原子を励起する波長589nmの強力なレーザーをこの層に当てれば、ナトリウム原子が発光して十分に明るい人工のレーザー星を任意の方向に作ることができる可能性がある。これとは別に、高出力のパルスレーザービームを望みの方向に打ち上げ、高度数kmの大気からのレイリー散乱光のみをタイミングを合わせて受ける方式も開発されつつある。これらの技術が実用化されれば、地上の望遠鏡でも大気の揺らぎを意識しないで観測することが可能となる。

レーザー星を観測したい天体の周間に複数個並べることができれば、大気の擾乱のようすを「断層写真」の手法を用いて「立体的に」測定することができるはずである。高層大気用、中層大気用、低層大気用といくつかの捕償鏡を組み合わせれば、広い視野にわたり大気の揺らぎを完全に補償することも原理的には夢ではない。トモグラフィー法とも呼ぶべきこのような新しいアイデアに基づく研究も構想されている。国立天文台ではこの第一歩として、望遠鏡ドームの内部での大気揺らぎとドーム外の上層大気の揺らぎとを同時に分離測定できる全く新しい測定装置を開発し、その試験観測に成功した。このような装置はまだ世界中どこにもないものである。

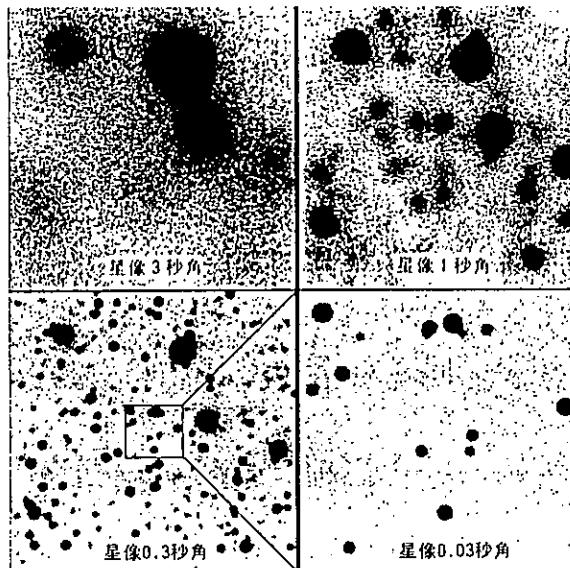
4. 4 捕償光学の効能



◀図7 イメージスタビライザーによる像改善例
(東京大学理学部の高遠徳尚氏作成)

▼図8 星像の大きさと星の見え方

(左上) 曲型的な3秒角の星像、(右上) 1秒角の星像、(左下) 能動光学での0.3秒角の星像、(右下) 検出光学が実現したときの0.03秒角の星像。視野は25秒角四方。可視角は10秒角を想定。



波面の揺らぎを完全に補償するのを全補償と呼ぶ。これに対し、波面の揺らぎのうちのごく大まかな成分のみを補償することを部分補償という。国立天文台では補償光学の手始めとして、平面鏡を高速で駆動して波面の傾きを補償する装置を開発した。働きとしては商品化された「ブレンピー」カメラと似ているが、動作原理は全く異なる。この装置は星像の揺れを止めるので、「イメージスタビライザー」と呼ばれている。図7に「イメージスタビライザー」を用いた時と用いなかった時の星像の大きさの違いを示す。波面補償がおおまかで良い赤外線の場合、「イメージスタビライザー」を用いるだけでもかなりの像改善になる。

補償鏡を用いた補償光学の試みは1970年代から始められたが、軍事研究やレーザー光の絞り込みをねらった開発を中心であり、天体観測への応用は本格的には進まなかった。1990年代になって、ESO（欧洲南天天文台）が口径3.6mの望遠鏡に補償光学試作装置を取り付けて観測し、解像力が劇的に改善されたことを示した。この試作機は赤外線用の装置で19個のアクチュエータを持つものであったが、国立天文台では可視光用の補償光学試作機の開発に取り組んでいる。

能動光学/補償光学の効果をシミュレーションにより示したのが図8である。国内の観測所での平均的な星像の大きさは岡山天体物理観測所で2.3秒角、木曾観測所で2.7秒角と言われている。条件の良いハワイの既存の

望遠鏡では平均0.7秒角程度を達成しているところがある。能動光学で鏡の変形を除去できれば、大気が安定した夜には星像が0.3秒角程度になるはずである。微かな星の観測には解像力がものをいうことが分かる。補償光学が実現すると、望遠鏡の口径で決まる回折限界の解像力を達成することができる。JNLTの場合、これは可視光では0.02秒角に相当する。図8には補償光学が実現して、星像が0.03秒角にまで小さくなつた時の星像の見え方をスケールアップして示した。

補償した場合の像の中心強度は補償なしの場合よりはるかに高い。光をより集中することができるため、望遠

鏡の効率も向上する。従って、以前より暗い天体が観測できるようになつたり、より短時間で撮影できるようになる。像がシャープになるため、分光観測でも分光器の入り口のスリットを狭めることができる。このため、分光器そのものを小型化して安定で安価なものにすることができる。

天体を観測するとき、観測装置の量子効率を ϵ 、望遠鏡の口径をD[m]、観測波長を λ [m]、焦点面での星像の大きさを θ [ラジアン]とすると、背景光雜音が無視できる場合には、信号雜音比(S/N比)は $\sqrt{\epsilon}D/(\lambda\theta)$ に比例する。1980年代に光検出器が乳剤写真からCCDなどの半導体撮像素子になったことにより、 $\sqrt{\epsilon}$ は約7倍になった。現在は4m級の望遠鏡が主流であるが、1990年代には「すばる」など8m級の望遠鏡が完成し、人類の目の大きさDは2倍になるであろう。「すばる」ではその主鏡に能動光学方式を採用することにより、条件の良い時には $1/\theta$ を約3倍にすることができるであろう。さらに補償光学が実用化されれば、 $1/\theta$ が約30倍になる。これらのハイテク技術を取り入れたこれからのはるかは、今までの望遠鏡の常識を大きく変えるものとなるであろう。21世紀の観測天文学で能動光学や補償光学の果たす役割は大きい。

5. 望遠鏡の周辺技術

大型望遠鏡の性能を最大限に發揮するためには、「能動光学」や「補償光学」など望遠鏡本体のハイテク技術開発に加えて、周辺技術にも大きな開発要素が必要とされている。設置場所は晴天率が高く、シーディングが良く、赤外線観測に有利な乾燥した場所でなければならない。「すばる」望遠鏡はこの点では、地上では最良の条件を有しているマウナケア山に設置されることになった。せっかく良い場所によい望遠鏡ができるても、その望遠鏡を入れるドームがいい加減では、良い星像は得られない。「すばる」望遠鏡では、ドームの内部からの全ての熱を追放し、ドーム内部で空気の揺らぎが発生しないように工夫する。このことは、実際は大変困難なことで

あるが、主要な部分の冷却機構や風通しのよい構造を工夫することで、考えられる対策を講じている。

口径8mもの鏡のアルミメッキも大仕事である。せっかくの鏡もほこりで壊ってしまっては台無しである。風の強い山の上で鏡をほこりからどう守り、クリーニングするかについても、地道な研究が続けられている。望遠鏡は光を集め装置だが、その光を料理するための観測装置、光検出器、解析用計算機とデータ処理ソフト、そして優れた観測テーマ……、これらが一体になって、初めて良い成果につながる観測が可能となる。

「すばる」望遠鏡計画は日本の基礎科学分野が世界に誇れる大計画の一つである。経済大國となった日本であるが、基礎科学研究の予算は国力に比してまだまだ不充分である。多くの研究者・技術者の努力により、世界が注目するビッグ・プロジェクトとなった「すばる」望遠鏡計画の早期完成に向けて、皆様のご理解ご支援をお願いする。

Telescopes

—Active and Adaptive Optics—
by Masanori Iye,
National Astronomical Observatory

The invention of telescopes in 17th century opened a new era for human beings to observe the universe. The size of telescope had grown ever since and the 508cm reflective telescope was built in 1948 at Mount Palomar Observatory. Constructions of still larger telescopes of 8m size are now under way. This was made possible by the development of new Telescope Technologies. SUBARU Telescope to be built on Mauna Kea, Hawaii, makes use of "active optics" concept, where the surface shape of a very thin 8m mirror is accurately adjusted by hundreds of computer-controlled actuators. The success of the active optics led astronomers to exploit the possibility of adaptive optics, that aims to compensate the wavefront distortion produced by atmospheric turbulence. The merits and the working principles of the active optics and the adaptive optics are reviewed.

〈著 者〉 イエ マサノリ (国立天文台)

〈連絡先〉 0422-41-3713