

8 m すばる望遠鏡から次世代 30 m 望遠鏡 TMT へ

補償光学の原理と進展

家 正 則

国立天文台は主鏡をコンピュータ制御し最高の画質を誇る 8 m すばる望遠鏡をハワイ島マウナケア山頂に 1999 年に完成した。10 年後には、大気の揺らぎによる像の劣化を実時間補償してその解像力を回折限界にまで高める補償光学装置とレーザーガイド星生成装置の開発により、すばる望遠鏡の視力はさらに 10 倍になった。この補償光学の原理と実際の装置構成、新たな展開と他分野への応用を述べる。すばるが成し遂げた初期宇宙史の解

明や太陽系外の惑星の探査をさらに進めるため、国立天文台は 2014 年度からマウナケアに口径 30 m の次世代超大型望遠鏡 TMT を国際協力で建設する。TMT 計画の概要とそのサイエンスについても解説する。

Keywords: active optics, adaptive optics, astronomical observation, atmospheric turbulence, deformable mirror, diffraction limit, large telescope, laser guide star, strehl ratio, wave front sensor

1. まえがき

ガリレオ・ガリレイは、屈折望遠鏡を自作して天体を観察し、「星界からの報告」を 1610 年に出版した。天体望遠鏡の歴史はここから始まった。1668 年にはアイザック・ニュートンが反射望遠鏡を試作し、19 世紀にはフラウンホーファーが色消しレンズを実用化した。19 世紀末には肉眼での観測から客観的記録の残る写真観測への移行が始まり、20 世紀前半にはウィルソン山天文台の 2.5 m 望遠鏡や、パロマー山の 5 m 望遠鏡が完成して、観測天文学が近代化した。1980 年代には CCD カメラの実用化^{1~3)}と大型メニスカス鏡、大型ハネカム鏡、セグメント合成鏡の開発が進み望遠鏡は飛躍的な進歩を遂げてきた^{4~7)}。

だが、望遠鏡の大型化で感度は格段に向上したものの、地上からの天体観測の解像力は大気の揺らぎのため角度の 1 秒角の壁を越えられない状況が続いた。この状態を打ち破ったのが、本稿で述べる「補償光学」技術である。大気の揺らぎを実時間補正して打ち消すハイテク光学技術の開発で、大型の地上望遠鏡は宇宙空間にあるハッブル望遠鏡をしのぐ解像力を実現できるようになった。その原理と実際を、すばる望遠鏡と次世代超大型望遠鏡計画を軸に解説する。

2. すばる望遠鏡

筆者は 1972 年に東京大学岡山天体物理観測所の口径

1.88 m の望遠鏡を用いて渦巻銀河の観測研究を始めた。最初は日本一の望遠鏡を大学院生の身で使えることに大いに感動した。だが、やがて海外の天文台での観測データには太刀打ちできないことを実感するようになった。

助手になり、東京大学東京天文台に異動後、1982 年から 2 年間の欧州留学の機会をいただいた。その間に次世代計画としてハワイのマウナケア山頂に、口径 8 m 級の世界最大の望遠鏡を建設しようという壮大な構想が持ち上がった。帰国した 1984 年夏に、大型望遠鏡の技術検討会の立ち上げを命ぜられ、以後 7 年間で 50 回開催した技術検討会の議論がすばる望遠鏡計画の根幹を決め、1991 年から建設が始まることとなった⁸⁾。

2.1 主鏡の製作

天文学者的な大ざっぱな見積もりでは、望遠鏡の値段は、その全体質量に比例する。望遠鏡の顔となる主鏡が重くなると必然的に全体が重くなるので、まずは主鏡をいかにして軽く作るのが課題となる。パロマー山天文台の 5 m 主鏡は、低膨張パイレックス・ガラスを蜂の巣構造の鋳型に流し込み、中空構造にして軽量化を実現した。だが、すばる望遠鏡ではより高い結像性能を実現するため、膨張係数がさらに 2 桁小さい米国コーニング社の超低膨張ガラスを採用した。このガラスは粘性が高く、パロマー方式は採用できない。軽量化するには極端に薄くするしかない。苦労の末、直径 8.3 m、厚さ 30

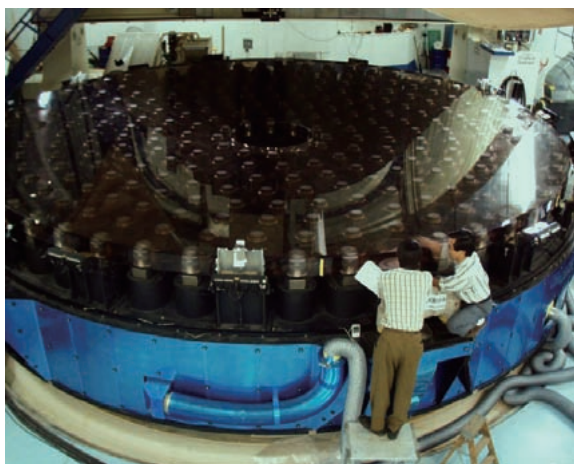


図1 世界最大で最高精度の8.2 m すばる主鏡が完成。蒸着前なので、264 個の支持機構が透けて見える。

cm のガラス円盤が4 年後にできあがった。ガラス材の研磨はピッツバーグのコントラベス社が担当した。鏡面を測りながら研磨を進めるには、主鏡の曲率半径に相当する30 m のスパンが必要である。同社は石灰岩の採掘坑の山腹地下に縦穴を掘り、すばる用の研磨施設を用意した。

有効径8.2 m の鏡で集めた光の80% 以上を焦点面上で0.1 秒角に相当するスポット内に結像させるには、設計形状の回転双曲面からの形状誤差を光の波長の14 分の1 以下に抑える必要がある。主鏡面の曲率中心からレーザー光を広げて鏡面に照射し、反射光を曲率中心に置いたレーザー干渉計で測定する。主鏡は球面とはわずかに異なるので、その分を補正するヌルレンズを通して干渉縞を計測する。ガラス鏡材の製造に4 年、研磨完了までにさらに4 年を要したが、1998 年7 月に世界最大かつ平方根二乗平均形状誤差13 nm (1/50 波長) という世界最高精度の8.2 m 鏡が完成した(図1)。

2.2 能動光学

完成した主鏡は軽量化のため厚さが直径の41 分の1 しかない薄い鏡である。観測時には望遠鏡を傾けるため、上手に鏡を支えないと光の波長のレベルでは簡単にゆがんでしまう。この鏡の弾性変形の性質を逆手にとって、鏡の支持力分布を常に計測し、能動的にバランスよく支えれば、鏡面形状を常に最適化できるはずだ。すばる望遠鏡ではこのように考え、「能動光学」と名付けた支持方式を採用した^{9,10)}。計算機シミュレーションの結果、鏡の支持は8 つの同心円上にほぼ均等に配置した264 点で行うこととした。1 点当たりの支持荷重は望遠鏡の姿勢により0~90 kg まで変化する。個々の支持装置はその支持力を1 万分の1 の精度で測定し制御できるアクチュエータが必要となった。国内メーカーが、音叉型水晶発振子の張力に応じた振動数変化から支持力を求める超高精度力センサを開発し、1 g の測定精度を達成した。観測中は適正な支持力分布になるよう、毎秒毎秒、支持力をコンピュータが制御する。図2 に、すばる望遠鏡の能動光学システムを示す^{9,10)}。

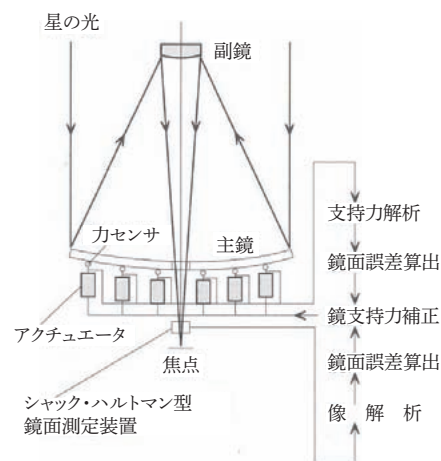


図2 すばる望遠鏡の能動光学システム。

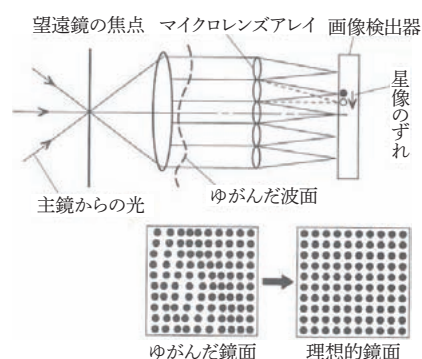


図3 シャック・ハルトマン型鏡面測定装置の原理。

実際には、毎晩観測開始前に明るい星を光源として、鏡面測定装置で光学的に鏡面形状を計測し、最良星像が得られるよう力制御ループを校正する。筆者らが開発したシャック・ハルトマン型^{11,12)} 鏡面測定装置(図3)は、望遠鏡の瞳面に置いたマイクロレンズアレイで主鏡を約200 個の小部分に分割し結像するカメラで、明るい星を撮影すると焦点面上に各小部分からの光が結像して約200 個の星像ができる。鏡が理想的な光学面になっていれば、200 個の星像が基盤の目のようにきちんと並ぶ。星像の並びに乱れがあれば、その向きと変位量から鏡の対応する部分のゆがみを求めることができる。各アクチュエータの支持力を変化させたときの鏡の応答は事前に調べてあるので、鏡面形状の誤差分布さえわかれば、アクチュエータの支持力をどう修正すればよいかは、簡単な行列計算で求めることができる。これが能動光学方式の原理である。

2.3 ミラーシーイング

1989 年秋にすばる望遠鏡の1/13 模型で能動光学方式の実証実験の一環として鏡面の測定精度を検証した。人や車の外乱が少ない夜間のほうが、測定精度が上がるだろうと考え、鏡の形状の24 時間連続測定を行った結果が図4 である。驚いたことに予想とは全く逆で、夜間になると測定値がばらつく結果となった。最初は戸惑ったが、温度変化を合わせてブ

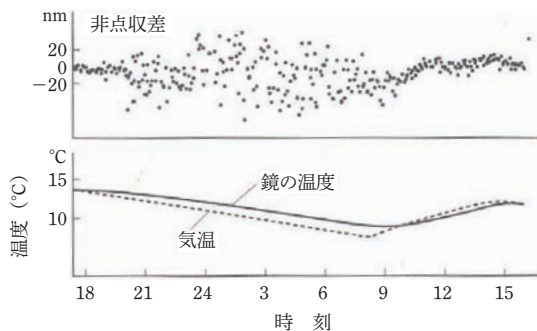


図4 鏡面からの陽炎（ミラーシーイング）の発見。

ロットしてみても、重要な事実が判明した。夜間気温が下がると鏡も冷えるが、鏡は必ず気温より遅れて冷える。このため、夜間は鏡のほうが気温より温かい状態になり、鏡面からの陽炎で測定値がばらつくことが確認されたのである¹³⁾。この測定論文は世界中の天文台に衝撃を走らせた。なぜなら、世界中の望遠鏡が夜間、主鏡から立ち上る揺らぎ越しに天体観測をしていたことを、この論文は指摘したからである。すばる望遠鏡では、この現象を避けるため、熱容量の大きい主鏡を昼間から冷却して、鏡の温度が夜間気温より高くないようにすることにした。

2.4 すばる望遠鏡による観測成果

初期調整を終え、7台の第1期観測装置も次々に立ち上がり観測が安定に進み始めたのは2002年ごろからである^{14~17)}。

すばる望遠鏡はさまざまな観測に利用されているが、その中でもほかの8m級望遠鏡にはない広視野主焦点カメラを駆使した、遠宇宙の撮像観測が華々しい成果を挙げた。図5はそのような観測で発見された、赤方偏移7.0、距離にして129億光年のかなたにある銀河である。この天体は2006年から4年間にわたり、人類が見た最も遠い銀河となった。137億年前のビッグバンで始まった宇宙は、急激に膨張し冷えた

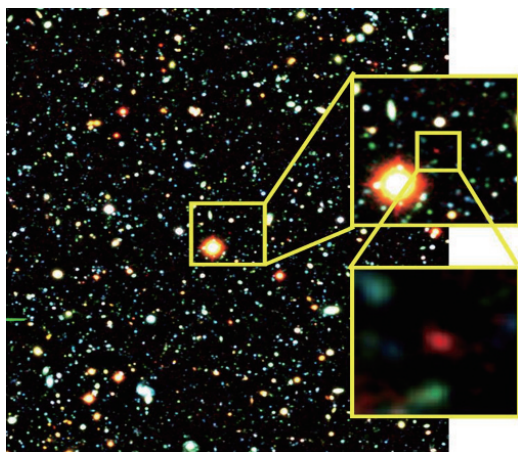


図5 距離129億光年の最遠銀河の一例。この銀河の姿は129億年前の姿である。水素原子のライマン α 輝線（波長121nm）が波長968nmに赤方偏移していることから、赤方偏移が7.0であることが確認された^{19,21)}。

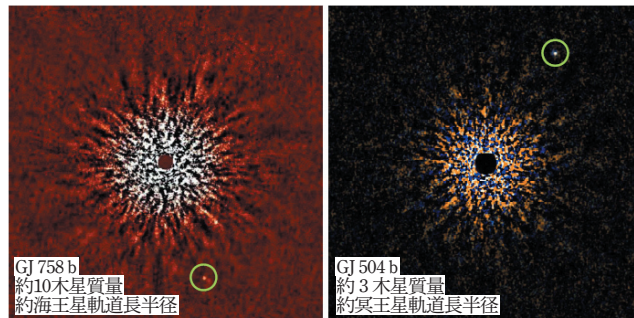


図6 太陽系外惑星の撮影に成功。

が、やがて生まれた星からの紫外線で温められて、銀河間空間の水素が電離したと考えられている。すばる望遠鏡による一連の観測から、この宇宙の夜明け現象（宇宙の再電離）は今から129億年前、ビッグバンから8億年後の時代に起きたことがわかってきた。この分野の研究は日本がリードしている^{18~22)}。

すばる望遠鏡のもう1つの大きな成果は、太陽系外の惑星の撮影に成功し始めていることであろう²³⁾。図6に、その実例を示す。このような観測が可能になった鍵を握るのが次章で紹介する補償光学という技術である。補償光学で星像を回折限界にまでシャープにして、その光をマスクで遮蔽すると、星からの光を反射してかすかに光る惑星が見えてくるという寸法である。

3. 大気の揺らぎを打ち消す補償光学

本章では補償光学の歴史と原理を述べる。

3.1 補償光学の歴史的経緯

すばる望遠鏡はサイトのよさと能動光学系のよさに加えて、精密でスムーズな望遠鏡の追尾性能の実現、主鏡やドーム内での陽炎の発生を抑える熱管理、望遠鏡周辺での気流の乱れを最小にするドーム設計と通風機能などの、システム設計の結果、平均で0.6秒角の星像サイズを達成している。国立天文台岡山天体物理観測所の1.88m望遠鏡や、東京大学木曽観測所の1mシュミット望遠鏡での星像サイズは1.0~3秒角程度であるから、すばる望遠鏡の画質は、これまでになくすばらしくシャープなものである¹⁷⁾。

だが、すばる望遠鏡を真空の宇宙空間に運んで観測することができれば、理論的には直径8.2mの望遠鏡であれば、近赤外域で0.06秒角の画質（回折限界像）が実現するはずである。理想的な状態に比べると10倍も劣化した画像になるのは、変化の速い大気による光波面擾乱については固有振動数の低い主鏡²⁴⁾では補正できないからである。

能動光学の考えを一步進めて、大気揺らぎに対処するための専用の小型可変形鏡を焦点面近くに組み込めば、大気の揺らぎも打ち消すことができるはずである。このようなシステムを補償光学システムと呼んで能動光学とは区別している。補償光学の原理そのものは、1953年に米国の天文学者バブ

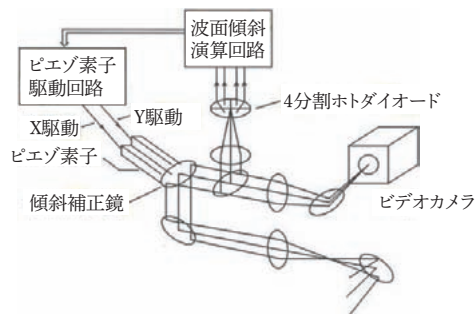


図7 イメージスタビライザの原理。

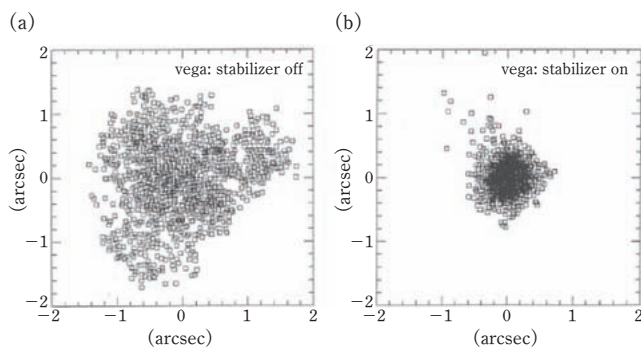


図8 イメージスタビライザによる星像追尾。(a)追尾 OFF 時、(b)追尾時の星像中心位置の分布を示す。

コックが提案した²⁵⁾ のが最初である。当時はそのようなアイデアを実用化する技術がなかったが、1970 年代後半からソ連の衛星を監視する望遠鏡の解像力を向上させる技術として、米国で実用化研究が秘密裏に進められていた。システムが完成しかけた 1980 年代末ごろ、天文学研究の立場からよりスマートで安価なシステムが独自に開発・公表された²⁶⁾。また、このころソ連との冷戦が終結したこともあり、1991 年に防衛関連で開発された技術は公開され^{27~31)}、天文学での補償光学技術が一斉に花開くこととなった³²⁾。

3.2 国立天文台での予備開発

筆者のグループでもすばる望遠鏡の建設と並行して、1990 年代の前半から補償光学系の開発研究を進めた。図 7 は最初に早野裕氏（現・国立天文台助教）が開発したイメージスタビライザの概念図である³³⁾。4 分割フォトダイオードの出力バランスから星像重心の位置ずれを計測して小型の平面鏡（ティップ・ティルト鏡）の傾きをピエゾ駆動素子で高速補償して、星像がぶれるのを止める装置である。制御軸数は 2 つだけだが最も簡単な補償光学系である。このシステムで星像重心位置が止まった様子を図 8 に示す。

高遠徳尚氏（現・国立天文台准教授）は、口径 10 cm の薄板ガラスに 36 個の積層型ピエゾ素子を接着して可変形鏡を自作し、補償光学系のシステム設計の端緒を開いた。

さらにグループは高見英樹氏（現・国立天文台教授）を中心として、三鷹の国立天文台内で補償光学系のプロトタイプを 1990 年代に作り³⁴⁾、その性能測定などを経て、すばる

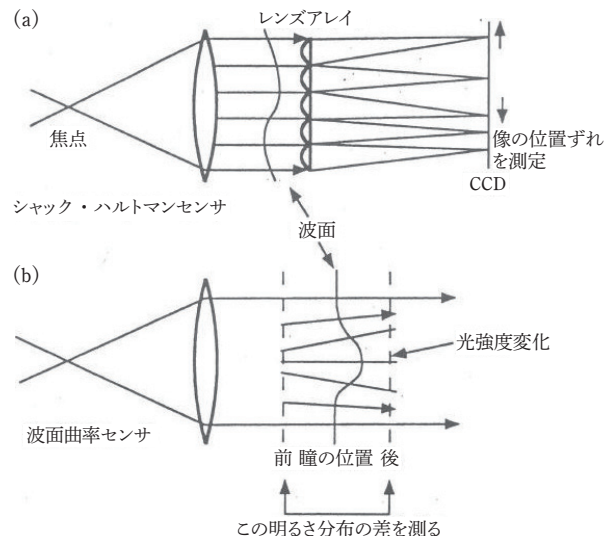


図9 波面測定法。波面の傾斜ベクトル分布を測るシャック・ハルトマン法(a)と、波面の曲率分布を測る曲率センサ法(b)。

望遠鏡の第 1 世代 36 素子補償光学系の製作に進んだ^{35,36)}。

3.3 フリード長

無限遠の天体からの電磁波は地球の大気に入射するまでは、ほぼ平面波として伝搬する。だが、大気中の温度揺らぎによる屈折率のムラのため、地上に到達するまでには波面が乱れてしまう。ある波長 λ で見たとき、2 つの光線の波面位相差が無視できない大きさになる間隔をフリード長 r_0 と呼ぶ。フリード長は波長 λ の 1.2 乗に比例することが知られている。口径 D の望遠鏡で観測するとき、波面擾乱のない真空中では空間解像力は回折限界 λ/D で決まる。擾乱大気を通しての観測では、空間解像力は λ/r_0 となる。この大気による解像限界を天文学ではシーイングと呼んでいる。すばる望遠鏡サイトでのシーイングは最良で 0.2 秒角の記録があるが、通常は 0.6 秒角程度である。口径とフリード長の関係は、口径内に位相が異なる $(D/r_0)^2$ 個の独立な光波面があることを意味している。

3.4 波面センサ

波面測定には波面の局所的勾配（波面の 1 階微分ベクトル）の分布を測る方式（図 9(a)）と波面の局所的曲率の分布を測る方式（図 9(b)）が実用化されている。前者の代表は鏡面測定の節でも紹介したシャック・ハルトマンカメラと呼ばれる装置である。マイクロレンズ群が作る明るい星の像位置の変位を測り、その情報から波面の擾乱を計算する。

後者は文字どおり曲率センサと呼ばれる装置であり³⁷⁾、望遠鏡瞳面の前後で測った光束の照度ムラから、波面の局所的曲率（波面の 2 階微分スカラー）の分布を測る。

3.5 可変形鏡

波面補正用の可変形鏡としては、ピエゾ素子駆動のものが天文では多用されている。積層型ピエゾ素子を用いる方式（図 10(a)）とバイモルフ型ピエゾ素子を用いる方式（図 10(b)）がある^{38,39)}。MEMS (Micro Electro Mechanical

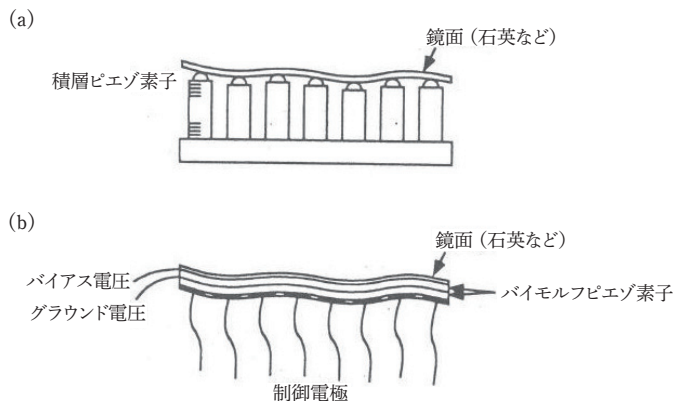


図 10 可変形鏡の動作原理。積層ピエゾ駆動方式(a)とバイモルフピエゾ駆動方式(b)。

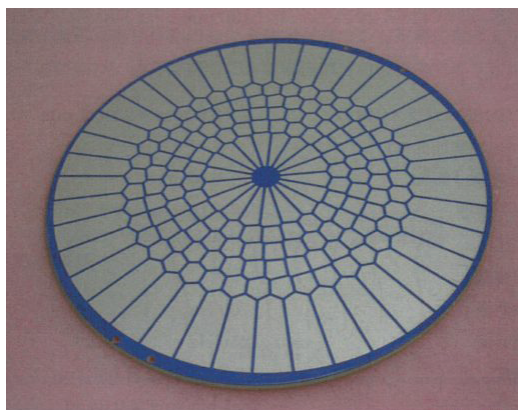


図 11 すばる望遠鏡 188 素子バイモルフピエゾ駆動可変形鏡の電極配置⁴¹⁾。

System) 素子を用いた、よりコンパクトなシステムも開発されている。液晶型変調素子を用いたものもあるが、天体観測には適さない。図 11 は、すばる望遠鏡の第 2 世代の補償光学系用に開発した 188 素子バイモルフピエゾ駆動の可変形鏡の電極配置の例である。国立天文台で設計し、フランスのメーカーに特注して製作した。

3.6 補償光学系システム

大気を単純化して 1 層と近似し、その風速を v としたとき変動の時間尺度 t は $t = r_0/v = \lambda^{1/2}/v$ となる。大気変動の時間スケールに合わせて計測と制御を行うには、近赤外線から可視光では 10~1 ms 秒程度のスピードで行う必要がある。つまり、観測波長が 1/2 になると、独立な位相の数が 4 倍となり、位相変化の速さが約 2 倍となる。つまり、補償光学の計測と制御は、観測波長が短いほど細かく素早く行う必要があり、ほぼ波長の 3 乗に反比例して困難となる。このような事情のため、現時点での補償光学系は近赤外域での実用化が主であり、可視光域での実用化は今後の課題となっている⁴⁰⁾。

図 12 にすばる望遠鏡 188 素子「補償光学系」のシステム構成を示す^{41~44)}。高解像観測をしたい目的の「天体」のそばに明るい「ガイド星」がある場合、そのガイド星の光の揺らぎを「波面センサ」で高速測定する。測定はダイクロイックフィルタで可視光を波面センサに送り、赤外線は観測装置に

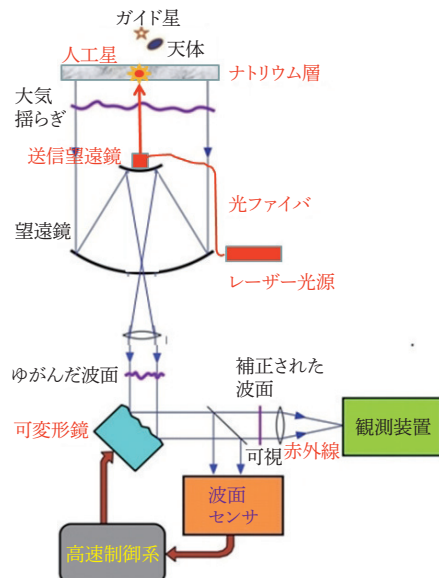


図 12 すばる望遠鏡 188 素子補償光学系のシステム構成。

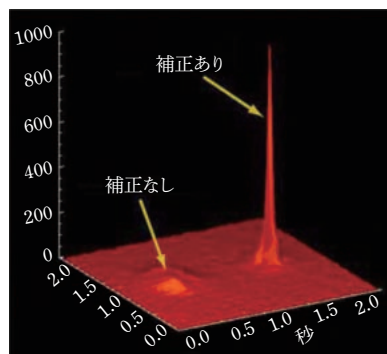


図 13 星像の輝度分布。補償光学による補正なし(左)と補正あり(右)では、星像がシャープになり中心の輝度が向上する。

送る。波面センサの測定結果は、高速制御系により、「可変形鏡」で波面揺らぎを実時間補償するための駆動信号に変えられる。可変形鏡は波面を時間遅れなく打ち消し、観測装置へ送られる光の波面は補正されたものとなる。その結果、観測装置には回折限界の高解像画像が結像されることになる。

3.7 補正像とストレール比

2006 年 10 月の試験観測で実際に、補償光学系を動作させて恒星を撮影したのが図 13 である。「裸眼」では 0.6 秒角に広がった星像となるのが、「補償光学眼鏡」をかけると 0.06 秒角と、像の大きさが 1/10 にシャープになることが確認できた。さらには、補償光学使用時と非使用時の星像の強度分布の違いに着目してほしい。補償光学を用いると星像が小さくなった分、中心に光が集まり輝度が上がるため、コントラストが格段に良くなるのがわかる。

このことを定量的に表現する指標をストレール比と呼ぶ。ストレール比は、理論的な回折限界像の場合の中心強度で規格化した、実際の星像の中心強度で定義する(図 14)。図 15 はオリオン大星雲のトラペジウム領域の画像だが、(a)は 1999 年にすばる望遠鏡完成直後に撮影したもので、「裸眼」

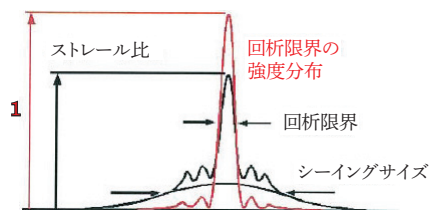


図 14 ストレール比の定義。補償光学を使わない場合、星像の中心輝度のストレール比は大気状態に依存するが、通常のシーイングの場合は 0.01 程度でしかない。補償光学がよく利くとストレール比は 0.8 程度に達する。

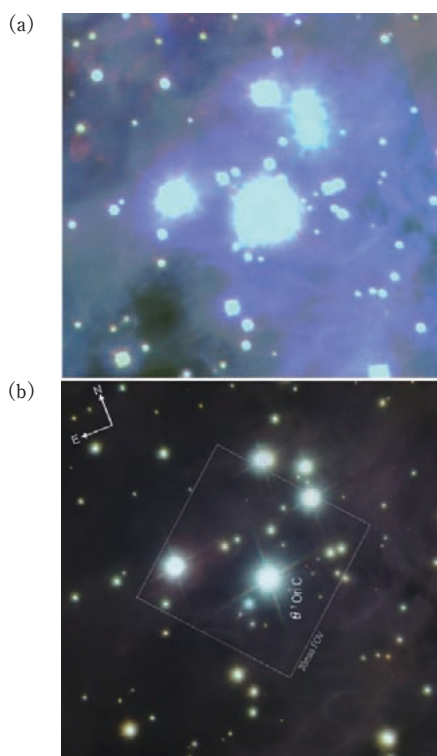


図 15 オリオン大星雲のトラペジウム領域。1999 年のすばるファーストライト時の赤外線画像(a)と 2006 年の補償光学系完成後の赤外線画像(b)。星像直径が 0.6 秒角から 0.06 秒角に改善された。

画像に相当する。(b)が 2006 年に補償光学系を通して撮影した「眼鏡使用」画像に相当する。解像度の違いは明白であろう。

図 16 はすばる望遠鏡 188 素子補償光学系による星像補償の性能実績を示す。ガイド星が 10 等星より明るい場合のストレール比は 0.6 を達成している。暗いガイド星では補償性能が劣化するが 16 等星でもストレール 0.2 を実現している。

4. レーザーガイド補償光学系の開発

補償光学装置を動作させるには、観測したい天体のそばにある明るい星をガイド星として利用する(図 12)。観測したい天体のそばに適切な明るいガイド星がない場合は、揺らぎの測定ができないため、せっかくの補償光学系を使えない。すばる望遠鏡の第 1 世代の 36 素子補償光学系は、そんな悩みを抱えていた。実際、筆者の研究分野である遠宇宙の観測

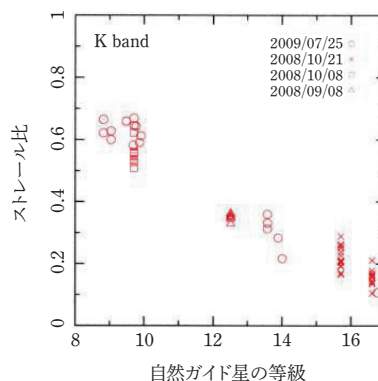


図 16 すばる望遠鏡 188 素子補償光学系の 2 μ m 近赤外 K バンドでの補償性能⁴³⁾。

は、そもそも銀河系内の明るい星がないところを選んで観測するため、筆者は第 1 世代の補償光学系を使う機会が全くなかった。そんな状況を改善するために開発したのが、「レーザーガイド星生成装置」である。

4.1 ナトリウムガイド星

レーザーガイド星生成装置は、地球上空 90 km の高さにあるナトリウム層を波長 589 nm のナトリウム D₂ 線で発振するレーザーで照射する(図 12)。レーザーに照射されたナトリウム原子は励起され、同じ波長のオレンジ色の光を放つので、レーザーパワーを上げれば十分に明るい「人工星光源」となる。その光波面の揺らぎを測定して補償光学系を動作させることができる^{45,46)}。すばる望遠鏡は 188 素子補償光学系にこのレーザーガイド星生成装置を追加開発したため、ほぼ任意の天体の観測に補償光学系を使うことができるようになった⁴²⁾。

図 17 に製作したレーザーガイド星生成システムの構成を示す。ナトリウム D₂ 線で発振するレーザーは(独)理化学研究所の固体デバイス研究ユニットが開発した。波長 1064 nm と 1319 nm の 2 周波の NdYAG 赤外レーザー光を、非線形結晶で混合するとその和周波のレーザーが 589 nm となることを利用している。2005 年には出力 5 W のレーザーを発生させることができ、七夕の夕方にマスコミを招いて口径 10 cm の望遠鏡からレーザーを発射して、彗星や織り姫星を実際にレーザーポイントするデモを行った。幅 15 cm のレーザービーム中の塵や大気分子からの散乱光があるため、間近でなら肉眼でビームが見える。レーザービームの先端を見ると、上空 90 km でナトリウム層が発光して「人工星」ができていることが確認できる(図 18)。

4.2 レーザーガイド補償光学の時代

レーザーガイド星生成装置と補償光学系のシステムが完成したことにより、すばる望遠鏡の赤外線観測の視力は約 10 倍に改善され、ハッブル宇宙望遠鏡をものぐほどもなった。このシステムはすばる望遠鏡の場合約 7 億円かかったが、約 400 億円の望遠鏡の視力を 2% 弱の追加投資で 10 倍に改善できたことになる。

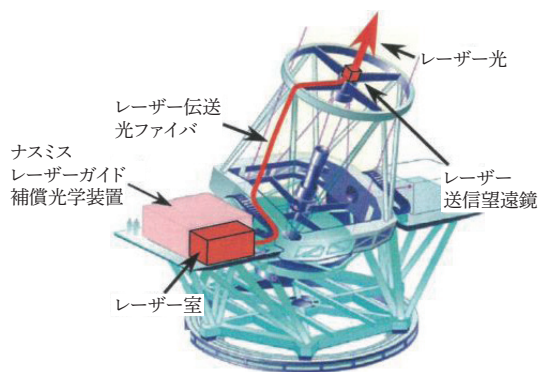


図 17 レーザーガイド星生成装置の概念図。

この装置開発はすばる望遠鏡だけでなく、マウナケア山頂の2台のケック望遠鏡とジェミニ望遠鏡でも、独立に並行して行われた。目的は同じだが補償光学もレーザーガイド星生成装置もそれぞれが異なる技術で開発した。図 19 は 2014 年 5 月のある夜のマウナケア山頂での観測風景である。レーザービームが飛び交う様子は一時代前の天文台では想像できなかった光景である。

5. 補償光学の新たな展開

補償光学はこのように威力を発揮するハイテク技術だが、いくつかの弱点もあり、その解決に向けた試みが始まっている。

5.1 視野の狭さ

ガイド星からの光を測定して乱れを直しているのですが、ガイド星とそのごく近くの天体の画像はきれいになるが、ガイド星から離れるに従って、補正が甘くなるという問題がある。近赤外線の場合、補正がよく利くのはガイド星から半径 30 秒角以内である。補正がよく利く視野範囲を等波面離角 (isoplanatic angle) と呼ぶ。等波面離角は近赤外線では 30 秒角程度、可視光では 10 秒角以下となる。

実際には、観測したい天体のそばに十分に明るいガイド星がある幸運な確率は 1% 程度でしかない。レーザーガイド星生成装

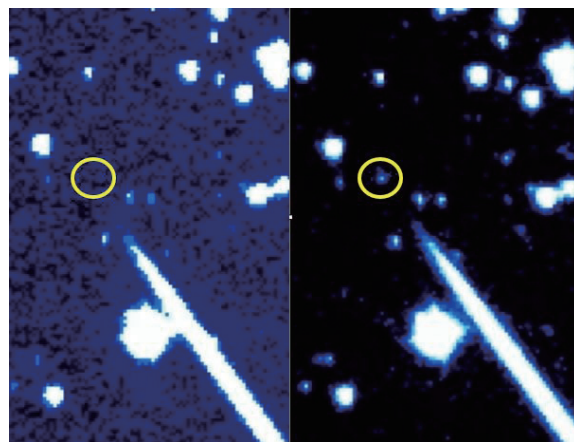


図 18 高度 90 km で光るレーザーガイド星 (右)。左の画像ではレーザーの周波数をナトリウム D_2 線から 100 万分の 1 ほどずらしているため、上空のナトリウムが励起されない。右の画像では周波数を D_2 線に同調させているので、上空のナトリウムが励起され光る⁴⁷⁾。この実験で上空に「人工星」ができていることが確認できた。

置を開発したため、任意の天体のそばにレーザーガイド星を発生させて、補償光学装置を使うことができるようになったが、等波面離角を大きくして視野を広げたいところである。

だが、レーザーガイド星は高度 90 km の高さで光る光源であり、レーザーガイド星より上空の揺らぎは測定できない。また有限距離にあるため、レーザーガイド星で測定できる大気の領域は、レーザーガイド星を頂点とし望遠鏡の主鏡を底面とする円錐領域でしかない。これを円錐効果と呼ぶ。円錐の外側の領域の情報を得るには複数のレーザーガイド星を配置する必要がある。

さらにレーザーは望遠鏡から打つため、望遠鏡から見てい

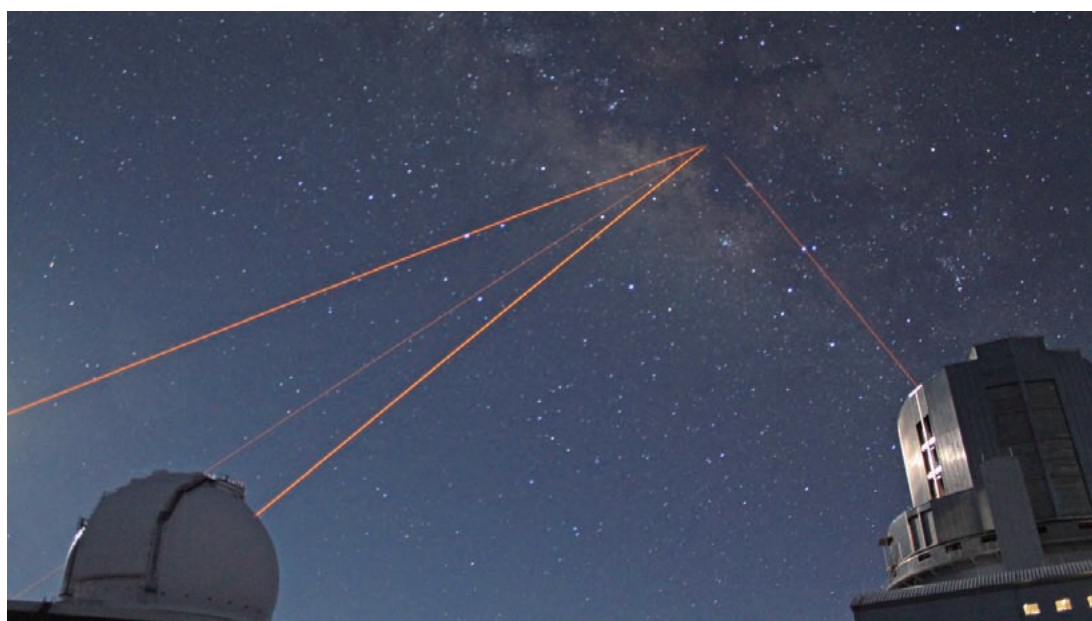


図 19 2014 年 5 月の観測風景、すばる望遠鏡、2 台のケック望遠鏡、ジェミニ望遠鏡がいずれも独自のレーザーガイド星補償光学系で銀河系中心領域の観測を競っている。レーザーガイド星補償光学技術は最先端の大型望遠鏡では必須のハイテク技術となっている (D. Birchall 撮影)。

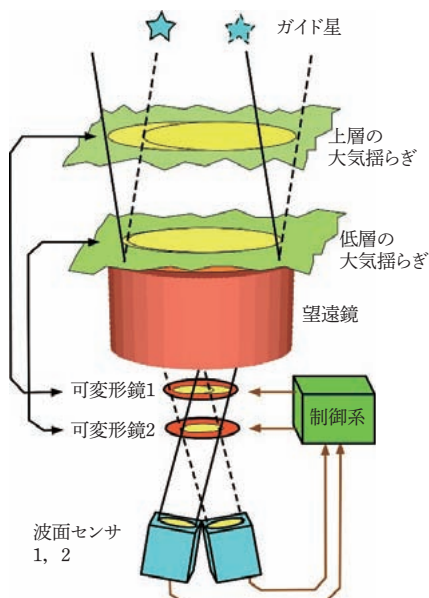


図 20 多層共役補償光学系の概念。

ると、望遠鏡自体が揺れてもレーザーガイド星は止まったままに見える。このため、レーザーガイド星とは別に視野内の本物の星をモニタして、望遠鏡の揺れ成分は独立に測定する必要がある。

5.2 断層写真法と多層共役補償光学

より本質的な問題は、大気の揺らぎが1層では近似できないことである。実際の大気揺らぎの高さ分布の測定からは、乱れの原因となる層は多数あり、それぞれが異なる方向に風とともに流れていることが知られている。可変形鏡1枚で補償できるのは全体をひとまとめにした成分だけでしかない。完全な補償を行うには、原理的には多数の層の乱れを分離して計測し、それぞれを直す必要がある。

これらの困難を克服して、補償光学の性能を向上させる試みや補償視野を広げる試みに向けてさまざまなアイデアと提案がなされている。

図 20 は多層共役補償光学系というアイデアを示す。これは複数のガイド星からの光の乱れの計測から上層大気と低層大気の乱れを分離し、大気乱れの立体的把握を行い、上層と下層の乱れをそれぞれ光学的に共役な位置に配置した可変形鏡で補償しようというシステムである。複数のガイド星の測定結果から大気の乱れを立体的に再現する手法は医療で使われているコンピュータ断層撮影 (Computed Tomography: CT) と通じるところがあるため、断層写真補償光学という呼び方がわかりやすいかもしれない。必ずしもうまい具合に観測したい天体の周辺に複数のガイド星があるわけではないので、後述の TMT では 5 個または 13 個のレーザーガイド星を観測したい天体の周辺に発生させて実現するシステムの開発を計画している。

5.3 接地境界層補償光学

また、大気擾乱の高さ分布の中では地表付近の「接地境



図 21 新型 TMT ドームの完成予想図。

界層」の乱れが一番大きい。通常の補償光学では高さ方向に積分した乱れを1枚の可変形鏡で修正するが、可変形鏡での補正をこの接地境界層に合わせると、補償効果は限定的なものになってしまうが、20 分角の広い視野に対して改善が可能となる。すばる望遠鏡では副鏡を可変形状鏡に置き換え、この接地境界層の揺らぎを直すことで、通常 0.6 秒角のシーイングを 0.3 秒角程度に改善する計画が検討されている。回折限界像が得られるわけではないが、望遠鏡の普段の視力をさらに改善できるメリットは大きい。

5.4 天文学以外への応用

天文学で補償光学技術が開発され始めてからまだ 20 年にならない。20 世紀は電子を制御した時代だった。光を制御する技術は一体どこへ行くのだろうか？ 近年リモートセンシング、網膜診断、光通信、レーザー加工、レーザー核融合などさまざまな分野への応用が検討されている。

実際に例えば医療分野では眼底撮影⁴⁸⁾に、補償光学の原理を導入して、網膜を細胞レベルで撮影できるカメラが国内でも開発されている。また、国立天文台の補償光学チームは基礎生物学研究所との共同研究として、顕微鏡に補償光学機能を組み込む研究開発にも取り組んでいる⁵¹⁾。

6. TMT 計画

すばる望遠鏡をはじめとして現在、世界中で 8~10 m クラスの望遠鏡は 10 台余りが稼働している。だが、世界中の天文学者は次世代を目指して、より大きな望遠鏡の建設を構想してきた^{49~52)}。筆者たちも口径 30 m の三非球面光学系採用の JELT (Japan Extremely Large Telescope) 望遠鏡をハワイに建設する構想を打ち出し、国産のゼロ膨張セラミクスで鏡を作る基礎開発を進めた^{52~54)}。天文学界からは支持を得たが、建設経費を考えると日本単独では無理があり、2006 年に国際協力での早期実現を目指すこととした。

国立天文台はすばる望遠鏡の成果をさらに発展させるた

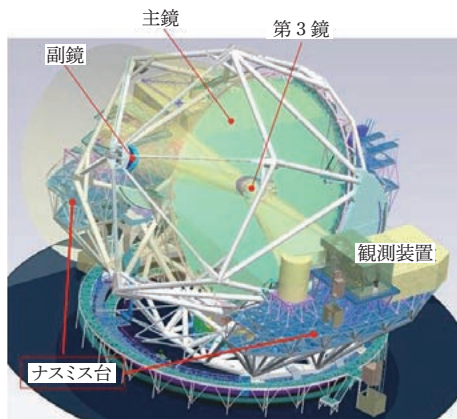


図 22 TMT30m 望遠鏡の構造.

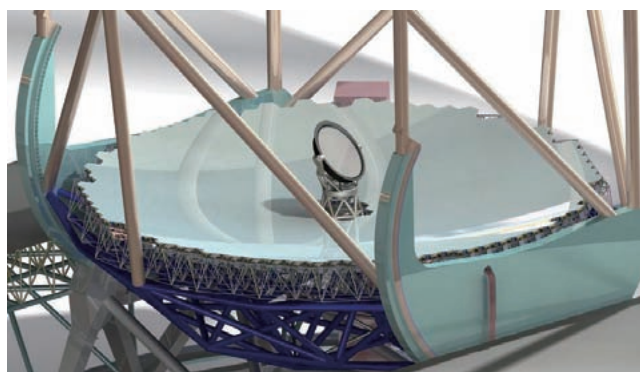


図 23 492 枚の部分鏡から成る直径 30 m の主鏡.

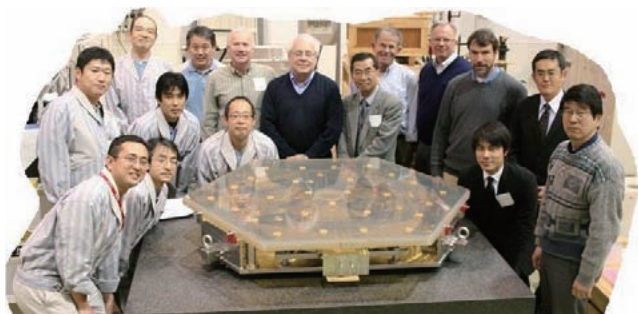


図 24 セグメント鏡試作第 1 号.

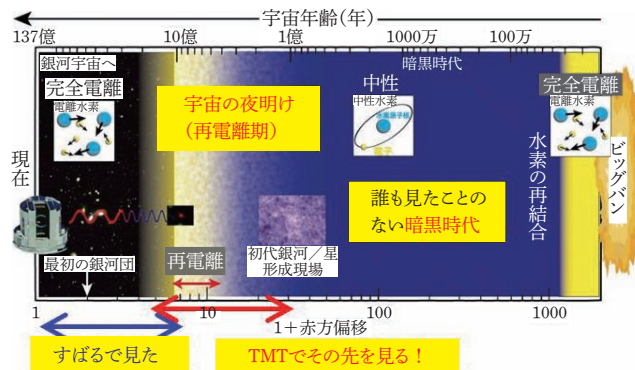


図 25 初期宇宙の歴史.

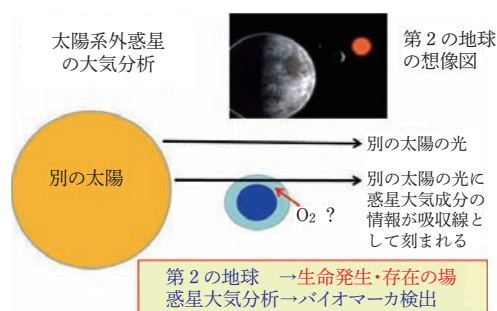


図 26 第 2 の地球と生命存在の兆候の探索.

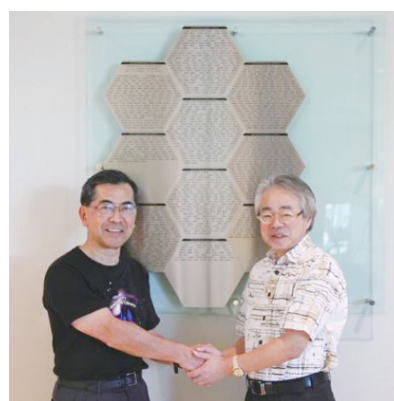


図 27 ハワイ観測所での TMT 第 1 期寄付者銘板の掲示.

め、米国、カナダ、中国、インドとの国際協力事業として、ハワイ島のマウナケア山頂域に口径 30 m の主鏡をもつ次世代超大型望遠鏡 TMT (図 21) を建設する計画に着手している^{55~57)}。

TMT 国際合意書に署名した日本、中国、カリフォルニア大学とカリフォルニア工科大学は、2014 年 5 月 6 日に TMT 国際天文台 (Thirty Meter Telescope International Observatory: TIO) を非営利法人として設立した⁵⁷⁾。インドは 2014 年秋、カナダは 2015 年春に、そして全米科学財団は 2018 年以降に参加予定であり、2014 年 10 月 7 日には山頂にて起工式を行い、建設に着手した。

日本はこの望遠鏡の本体構造の設計製作 (図 22)、492

枚のセグメント鏡の鏡材製作 (図 23)、セグメント鏡の非球面研磨の一部 (図 24)、観測装置製作の一部を分担する。完成は 2022 年以降になるが、口径 30 m の主鏡をもち、高度なレーザーガイド補償光学系を備えた TMT の解像力は、ハッブル宇宙望遠鏡の 13 倍、すばる望遠鏡の 3.5 倍となる。すばる望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡が撮影できる最も暗い天体は 28 等級に相当するが、TMT では 32 等級の天体まで捉えることができると期待されている。

この望遠鏡はすばる望遠鏡で垣間見始めた初期宇宙の時代に切り込み、最初の星や銀河が生まれた宇宙の夜明けの時代 (ビッグバンから 2~7 億年) の宇宙の歴史を解明すること (図 25) と、太陽系以外の恒星を巡る惑星を具体的に観測

して、その大気分析から生命存在の兆候を探ること（図 26）、さらには 21 世紀最大の謎とされるダークエネルギーの正体に迫ることなどがその主なミッションとなると期待されている。

TMT 計画については、関係学会だけでなく、広く一般の方からも応援していただいている。国立天文台 TMT 推進室では応援寄付者の名前を刻んだ銘板を用意するキャンペーンを行っているが、2014 年 3 月までの時点で 1700 名の寄付をいただき、第 1 期の寄付者銘板を現在はハワイ観測所ロビーに掲示中である（図 27）⁵⁸⁾。1 口 1000 円でハワイ山頂に名前が残るお得なキャンペーンなので、本誌読者諸氏の応援を期待している。

文 献

- 1) J.A. Tyson: ApJ, 257, L1 (1982).
- 2) C.D. Mackay: SPIE Proc. 290, 159 (1981).
- 3) M. Iye *et al.*: Tokyo Astron. Obs. Rep. 21, 140 (1988).
- 4) R. Wilson: Reflecting Telescope Optics I (2004).
- 5) R. Wilson: Reflecting Telescope Optics II (2001).
- 6) J. Nelson and T. Mast: SPIE Proc. 1236, 47 (1990).
- 7) G. Chanan *et al.*: Applied Optics 37, 140 (1998).
- 8) 山下泰正, 小平桂一, 家正則: 精密工学会誌 53, 49 (1987).
- 9) M. Iye: Astrophysics Space Sci. 160, 149 (1989).
- 10) M. Iye *et al.*: SPIE Proc. 1236, 929 (1990).
- 11) J. Hartmann: Zeitschrift fur Instr. 20, 17 (1900).
- 12) B. Platt and R.V. Schack: J. Refractive Surgery 17 PMID11583233 (2001).
- 13) M. Iye *et al.*: Publ. Astr. Soc. Pacific 103, 712 (1991).
- 14) 小平桂一: 宇宙の果てまで (文芸春秋, 1999).
- 15) M. Iye *et al.*: PASJ 52, 9 A851 (2000).
- 16) 家正則: すばる望遠鏡 (岩波書店, 2003).
- 17) M. Iye *et al.*: PASJ 56, 381 (2004).
- 18) N. Kashikawa *et al.*: ApJ 648, 7 (2006).
- 19) M. Iye *et al.*: Nature 443, 186 (2006).
- 20) 家正則: パリティ 23, 4 (2008).
- 21) M. Iye: Publ Japan Academy, Ser. B. 87, 575 (2011).
- 22) T. Shibuya *et al.*: ApJ 752, 114 (2012).
- 23) 田村元秀, NHK「サイエンス ZERO」取材班: 地球外生命体を探せ (NHK 出版, 2011).
- 24) 家正則: パリティ 5, 52 AO (1990).
- 25) H.M. Babcock: Publ. Astr. Soc. Pacific 65, 229 (1953).
- 26) F. Merkle *et al.*: ESO Messenger 58, 1 (1989).
- 27) R.Q. Fugate *et al.*: Nature 353, 144 (1991).
- 28) R.A. Humphreys *et al.*: Opt. Lett. 16, 1367 (1991).
- 29) C.A. Primmerman *et al.*: Nature 353, 141 (1991).
- 30) D.V. Murphy *et al.*: Opt. Lett. 16, 1797 (1991).
- 31) T. Jeys *et al.*: Appl. Opt. 28, 2588 (1991).
- 32) 家正則: 光学 22, 408, (1993).
- 33) 早野裕彦: 光学 24, 91 (1995).
- 34) H. Takami *et al.*: PASP 106, 182 (1994).
- 35) 高見英樹: パリティ 17, 22, (2002).
- 36) H. Takami *et al.*: PASJ 56, 225 (2004).
- 37) F. Roddier: Appl. Opt. 27, 1223 (1988).
- 38) F. Roddier: Adaptive Optics, Cambridge Univ. Press (1999).
- 39) S. Oya *et al.*: SPIE Proc. 7015, 166 DM (2008).
- 40) 家正則: 科学 77, 938, (2007).
- 41) 家正則ほか編著: シリーズ現代の天文学 15, 宇宙の観測 I 光・赤外天文学, 第 7 章 (日本評論社, 2007).
- 42) Y. Hayano: SPIE Proc. 7736, 21 LGS (2010).
- 43) Y. Minowa *et al.*: SPIE Proc. 8447, 1 (2012).
- 44) <http://subarutelescope.org/Observing/Instruments/AO/index.html>.
- 45) L.A. Thompson and C.S. Gardner: Nature 329, 229 (1987).

用語解説

補償光学

望遠鏡などの光学撮像系の結像は光路中の大気の大気温度ムラにより劣化する。時々刻々変化する像の乱れをリアルタイムで計測して補償することで結像性能を改善する手法とシステムを指す。光波面の乱れを測る波面センサーと波面乱れを直す可変形鏡、それらを制御する高速制御系から成る。

ストレール比

望遠鏡や顕微鏡などの光学撮像系の結像性能の指標。回折限界の理論的な点像分布関数の中心強度で規格化した実際の中心強度で定義される。すばる望遠鏡の補償光学系では波長 $2\mu\text{m}$ でストレール比 0.6 を実現している。

レーザーガイド星

補償光学では、観測対象となる天体のすぐそばにある明るい恒星の光の揺らぎを測定して、波面の乱れを直すことで空間解像力を改善する。だが、観測したい天体のすぐそばに偶然、十分に明るい星がないと補償光学を使えなかった。望遠鏡からナトリウム D_2 線で発振するレーザービームを放ち、高度 90 km のナトリウム層を光らせて、「人工星」を発生させ、その光の揺らぎを測ることで補償光学を任意の観測対象について使用できるようにする。この人工星をレーザーガイド星と呼ぶ。

シーイング

点光源と見なせる恒星を地上の望遠鏡で結像すると、地球大気の乱れの程度に応じて、星像がぼやける。ぼやけた星像の直径を角度の秒単位で表し、シーイングと呼ぶ。シーイングは大気状態により変動するが、マウナケア山頂での最頻値は約 0.6 秒角、国内の天文台では 2 秒角程度である。

回折限界

点光源を完璧な光学系で結像したとしても、光が波の性質をもつために、その像は有限の大きさとなる。口径 D の望遠鏡で撮影した点像の大きさは波長 λ では $1.22\lambda/D$ の広がりをもつことが光の回折理論から確かめられている。この大きさを回折限界と呼ぶ。

- 46) R. Foy and A. Labeyrie: Astron. Astrophys. 152, L29 LGS (1985).
- 47) N. Saito: Optic Letters 32, 1965 (2007).
- 48) J. Liang *et al.*: J. Opt. Soc. Am. A., 14, 2873 (1997).
- 49) 家正則監修: 21 世紀の宇宙観測 (誠文堂新光社, 2002)
- 50) P. Dierickx *et al.*: SPIE Proc. 5489, 391 (2004).
- 51) Y. Tamada *et al.*: Intern. J. Optomech. 8, 89 (2014).
- 52) M. Iye *et al.*: SPIE Proc. 5489, 417 (2004).
- 53) K. Nariai and M. Iye: PASJ 57, 391 (2005).
- 54) M. Iye: IAU Symp. 232, 381 (2006).
- 55) 家正則: 日本機械学会誌 112, 36 (2009).
- 56) 家正則: 学士會報 904, 54 (2014).
- 57) 家正則: 天文月報 107, 11, 587 (2014).
- 58) <http://tmt.nao.ac.jp/>

(2014 年 8 月 17 日 受理)

Profile



家 正 則 (いえ まさのり)

(共)自然科学研究機構国立天文台教授。TMT 国際天文台評議会副議長。東京大学理学博士。1977 年東京大学助手となり、93 年より現職。すばる望遠鏡を構想から完成まで推進。最遠銀河の発見など初期宇宙史の研究と、天体観測技術開発により、仁科賞、東レ科学技術賞、紫綬褒章、日本学士院賞などを受賞。著書多数。