

# 日経サイエンス

SCIENTIFIC AMERICAN®日本版

2011 05

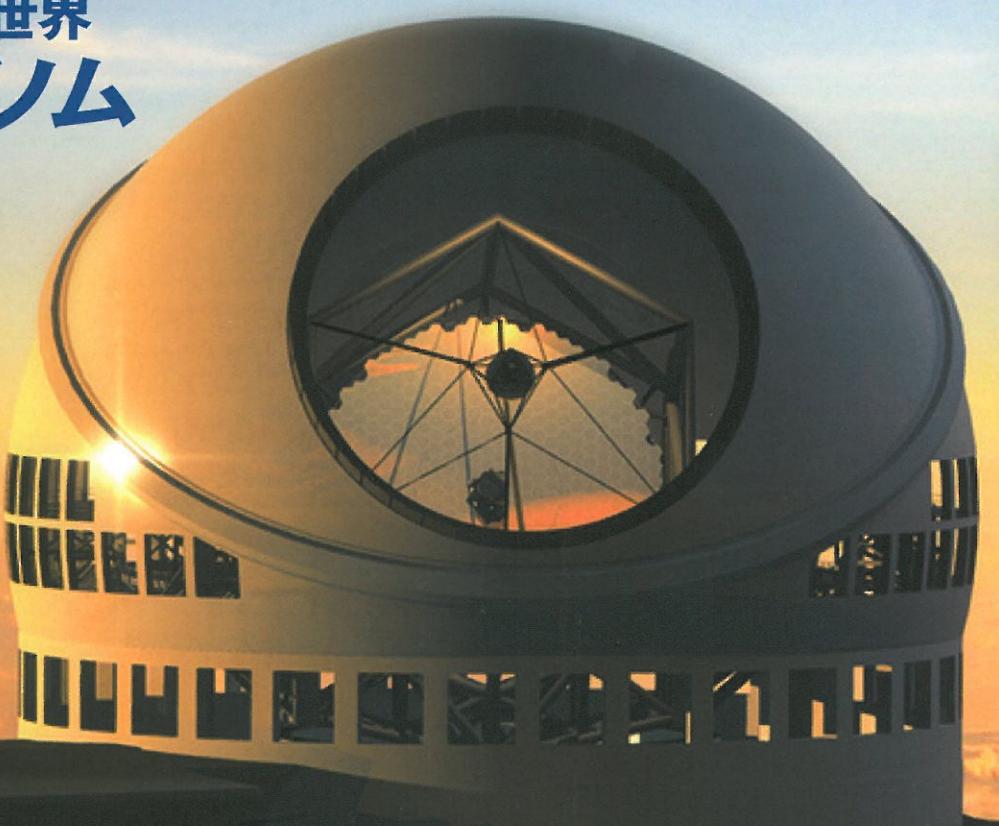
大学1年生に薦める本

## 史上最大の望遠鏡 「すばる」をしのぐ口径30mの望遠鏡

暗黒エネルギー解明や宇宙の一番星の観測、地球外生命探査に威力

核内の知られざる世界  
動き回るゲノム

肥満社会を  
ダイエット



身体を超えてつながる脳  
言語で変わる思考  
水産革命 200海里の生け簀  
米国のスーパー送電網

## ブックレビュー特集

大隅典子 香山リカ  
酒井邦嘉 濑名秀明  
はやのん 村山齊  
渡辺政隆

40th  
Anniversary

# 「すばる」を超える 史上最大の望遠鏡

ハワイ島の高峰マウナケア山頂、日本のすばる望遠鏡のすぐ近くに  
口径30mの史上最大の望遠鏡を建設する計画が動き出した

中島林彦（編集部）  
協力：国立天文台 TMT プロジェクト室

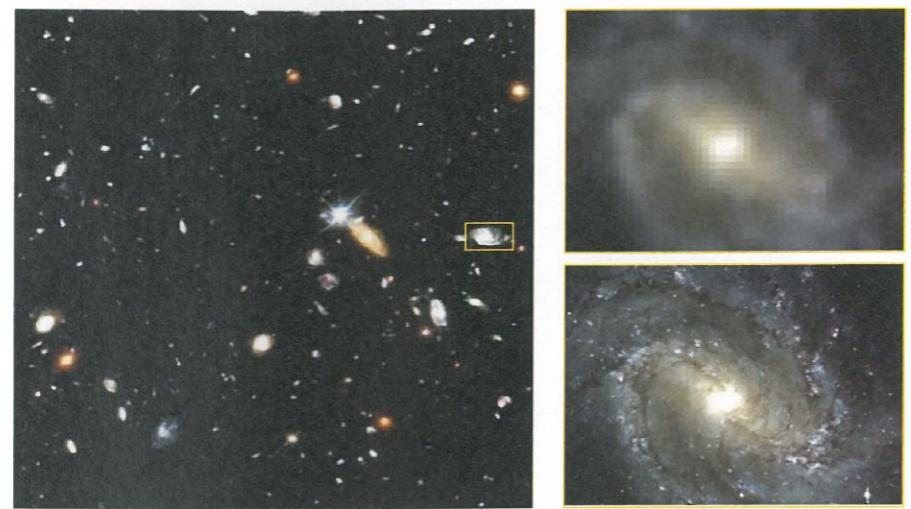
**夕陽に輝くTMT**　口径30mの望遠鏡TMTはハワイ島マウナケア山頂に建設される。半球ドーム上部に円形開口部があり、観測時、蓋を開ける（上はイメージイラスト）。観測に悪影響を与える風の乱れを抑制するため、ドームには通風用の大窓も多数ついている。

日没迫るハワイ島の高峰マウナケア山頂（標高約4200m）。あかね色に染まった雲海の向こうに、約100km先のマウイ島のハレアカラ山（標高3055m）が島のように浮かぶ。別世界の風景のようなマウナケア山頂には、日本のすばる望遠鏡や米国のケック望遠鏡、ジェミニ望遠鏡など口径8～10mの世界の名だたる望遠鏡が集まり、夜の観測に備えてドームが開く。9年後、2020年のマウナケアでは、それらの大望遠鏡ドームをはるかにしのぐ巨大ドームが完成、夕刻になると、すばる10台分以上の鏡の面積を持つマンモス望遠鏡TMTがドームから姿を見せることになる。直径30mに達するTMTの主鏡は、夕暮れ空を映し出し、日没を迎えると、遠い宇宙からの光をとらえ始める。その光を詳しく調べることで、人類は宇宙の様々な謎を解く手がかりを得るだろう。本格的に動き始めた史上最大の望遠鏡計画を紹介しよう。

天文学は激動の時代を迎えており、宇宙には正体不明の暗黒エネルギーが満ち、そのため宇宙膨張は当初考えられていたように減速しているのではなく、加速していることが明らかになった。宇宙には、これまた正体不明の暗黒物質も膨大な量が存在し、銀河の形成などに大きな影響を及ぼしていることがわかつた。さらに最近、ケプラー宇宙望遠鏡によって、宇宙には地球に似た固体惑星が多数存在しているらしいことが判明した。地球外生命が存在する可能性は以前よりはるかに高くなっている。

では暗黒エネルギーや暗黒物質の正体は何か？ 地球外生命はどの惑星にいるのか？ そうした問題の多くに答えを出してくれそうなのが30m望遠鏡TMTだ。「30m」とは、望遠鏡の心臓部、天体の光を受けるお椀形の大鏡（主鏡という）の直径のこと、望遠鏡の口径とほぼ等しい。主鏡が大きいほど、たくさんの光を集められる。TMTは“Thirty Meter Telescope”に由来する。この主鏡で集めた光を、いくつかの鏡（副鏡や第3鏡）を介して観測装置に導く仕組みだ（右ページの図）。建設地はハワイ島マウナケア山頂、すばる望遠鏡のすぐとなり。国際共同プロジェクトで日米、カナダのほか、経済発展著しい中国とインドも主要メンバーとして参加する見通しだ。

日本にとってTMTはすばるの後継となる望遠鏡だ。すばると比べると集光力は約13倍、天体の解像力は約4



**ハッブルをはるかにしのぐ解像力** ハッブル宇宙望遠鏡のよく知られている成果の1つに、長時間観測で宇宙初期の多数の銀河を撮影した深宇宙探査がある（左）。ただ、得られた画像の中の個々の銀河を拡大するとほけた像になる（右上）。TMTに補償光学装置を組み込めば、同じ銀河を細部まで鮮明に見ることができる（右下はイメージ）。ハッブル後継のジェームズ・ウェップ望遠鏡と比べても遙かに高い解像力で、集光力ではジェームズ・ウェップをはるかにしのぐ。

倍向上する。とはいって、その性能をイメージするのはなかなか難しいので、たとえ話で表してみよう。地球上の望遠鏡は大気の揺らぎで天体像がぼけるのが問題だが、近年、補償光学という技術（35ページの図）によって、揺らぎの影響を取り除き、軌道上の宇宙望遠鏡に匹敵する鮮明な天体画像が得られるようになった。この技術を導入することで、すばるはハッブル宇宙望遠鏡並みの解像力を獲得した。ただ、非常に遠くにある宇宙初期の銀河はハッブルやすばるをもってしても、すりガラスを通して眺めたようなぼけた像しか得られない。TMTは、より先進的な補償光学技術を導入することで、その優れた解像力を遺憾なく發揮、超遠方の銀河の姿を鮮明にとらえることができるだろう。

これまで説明したのはTMTの集光力についてだが、望遠鏡の性能を測るもう1つの指標である解像力については次のたとえ話がわかりやすいかもしれない。もし東京にTMTがあって富士山に箭先を向ければ、山頂を歩くアリまで見える。すばるだったら山頂の

ピンポン球くらいの大きさのものを見分けるのが精一杯だ。

地上の望遠鏡は大気の揺らぎで天体像がぼけるのが問題だが、近年、補償光学という技術（35ページの図）によ

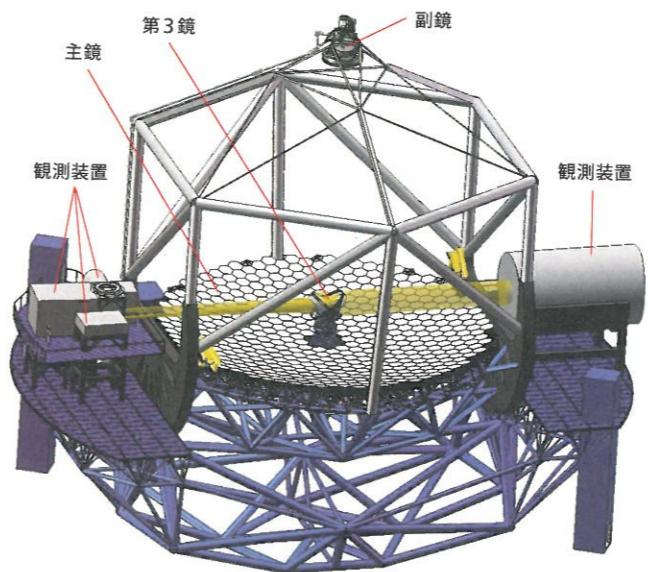
りて、揺らぎの影響を取り除き、軌道上の宇宙望遠鏡に匹敵する鮮明な天体画像が得られるようになった。この技術を導入することで、すばるはハッブル宇宙望遠鏡並みの解像力を獲得した。ただ、非常に遠くにある宇宙初期の銀河はハッブルやすばるをもってしても、すりガラスを通して眺めたようなぼけた像しか得られない。TMTは、より先進的な補償光学技術を導入することで、その優れた解像力を遺憾なく發揮、超遠方の銀河の姿を鮮明にとらえることができるだろう。

### 3大望遠鏡の時代

TMTは差し渡し1.5mの六角形の鏡を492枚組み合わせて直径30mの主鏡とする。建設費は約10億ドル。うち米カリフォルニア工科大学とカリフォルニア大学が共同で1億ドル、米インテルのムーア名誉会長（Gordon Moore）が創設したムーア財団が2億

## 500枚の鏡を組み合わせて口径30mの巨大望遠鏡を実現

TMTプロジェクトはカリフォルニア工科大学があるカリフォルニア州パサデナにオフィスを置き、参加研究機関が定期的に集まって望遠鏡本体の詳細設計や望遠鏡に取り付ける観測装置の開発などに取り組んでいる。各国の分担はまだ確定していないが、日本は主鏡など主要な光学系について中心的な役割を果たしたいとの希望を表明している。米国は敷地整備や運用



**第3鏡で光を観測装置に** 主鏡で受けた光は望遠鏡の先端の副鏡に集められ、副鏡から第3鏡を経て観測装置に送られる。観測装置は複数台あり、観測の目的に応じて使い分ける（上の図は第3鏡を回転させて左右の観測装置に光を送っている様子）。

ドルを出資することが確定している。残り約7億ドルは米政府や日本、カナダ、中国、インドなどで出し合う予定だ。順調に進めば2013年に建設開始、2019年末に完成する。

国立天文台は先行してTMTの主鏡を構成する六角形の鏡の試作を進めており、その第1号が完成した。主鏡には2つの技術が必要になる。1つは鏡の温度が変化しても膨張や収縮が起こらないゼロ膨張ガラスの技術、もう1つは大きな鏡を単純な球面ではない形状（非球面）に磨く技術だ（38～39ページの図）。日本には両技術で世界トップレベルのメーカーがあり、試

システムなど、カナダは望遠鏡ドームなどを担当する方向だ。主鏡については中国やインドも関心を示しており、品質とコストの両方の観点から分担が検討されることになる。

望遠鏡本体は高さ51m、幅60m。主鏡直径が約1/4のすばる望遠鏡と比べると高さと幅が約2倍なので、主鏡の大きさの割にはコンパクトだ。望遠鏡を風雨から守るドームは半球状で高さ56m、直径66m。15階建てビルに匹敵する高さだが、それでも主鏡の大きさの割には小さい。一般的な望遠鏡ドームは2つに割れて望遠鏡の視野を確保するが、TMTでは半球ドームの上部に、蓋をスライドさせて開閉する円形開口部を備える。望遠鏡の裏側にあたる部分には、通風のための大窓を多数設け、風が円形開口部から通風窓に抜ける設計にした。風の乱れが抑制されるので、観測画像の揺らぎが少なくなる（ドームが相対的に小さいことも風の乱れを抑制するのに役立つ）。

TMTでは主鏡で受けた天体の光を、主鏡上方30mにある副鏡に集め、その光を主鏡中央に配置した第3鏡に送る。第3鏡では光を約90°曲げ、望遠鏡をはさんだ両側の台上にある観測装置に導く。主鏡を構成する六角形の鏡の厚さは4.5cm。厚いように思えるが、主鏡直径が30mなので比率から考えれば紙のように薄い（口径8mのすばるの主鏡の厚さは20cm）。それでも当時としては大変な“薄さ”だった。鏡が薄いので主鏡重量がサイズの割に軽くなり、望遠鏡の構造や駆動機構への負担もそれほど大きくない。鏡は放置しておくと自重や温度変化の影響で微妙に歪み、天体像も歪む。そこで、鏡を保持する支柱群に与える力を制御し、鏡が歪まないようにする。支柱は各鏡につき27本、鏡は全部で492枚。つまり約1万3000本の“指”で紙のように薄い主鏡を裏から操るわけだ。鏡どうしの位置関係も微妙にずれるので、鏡面に凹凸ができないよう、各鏡の位置関係を常にモニターし、“指”的長さを微調整する。

国立天文台

の8m級望遠鏡VLTがあるパラナル山のすぐ近くだ。

2020年代、天文学はこれら3つの大望遠鏡によって切り開かれることになる。このうち北半球の夜空を観測するのはTMTだけ。また、3つのうち先陣を切って観測を始める可能性が高いのがTMTだ。

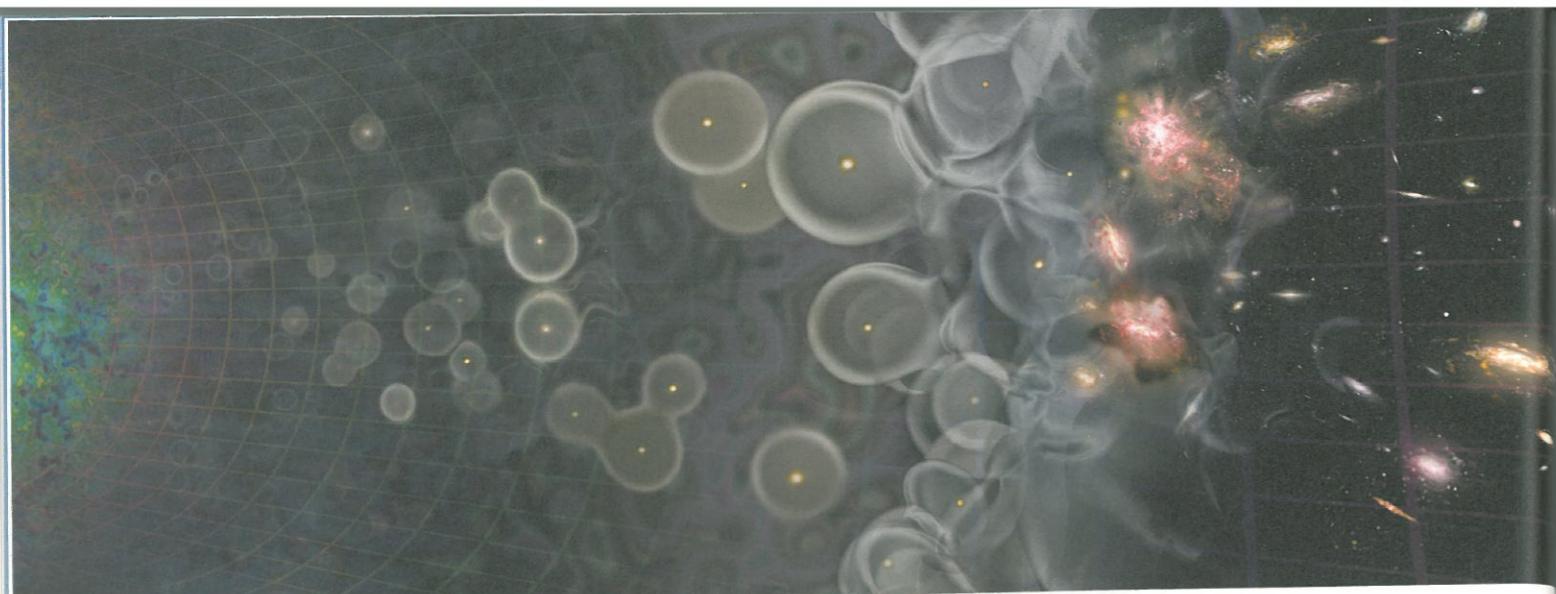
### 暗黒エネルギーに迫る

ではTMTでどんな新たな宇宙の姿が見えてくるのだろう？ 1つは暗黒エネルギーの正体に迫れうことだ。TMTによる暗黒エネルギーの観測を説明するには、話を暗黒エネルギーの

### KEY CONCEPTS

#### 天文学を変える望遠鏡

- 日米が中心となり、口径30mの超大型望遠鏡TMTをハワイ島のマウナケア山頂に建設する計画が動き始めた。TMTは暗黒エネルギーの正体解明や宇宙で最初にできた星の観測、地球外生命探査などに威力を発揮する。
- TMTは差し渡し1.5mの鏡を約500枚組み合わせて主鏡とする。日本は、培ってきた最先端の光学関連技術を生かして主鏡の製造を担う考えだ。



JEAN-FRANCOIS PODEVIN

**初期宇宙を探る** 初期宇宙の歴史のイメージ図。左から右に時間が流れます。宇宙誕生から約40万年後、宇宙が冷えて中性の水素原子ができると、光がまったくない暗黒時代が訪れます。銀河のもととなるガス雲の中で初代の星々が誕生し、輝き始めた。そうした星の光を受け、宇宙に漂う水素ガスは再び電離され、現在のような宇宙の姿になった。TMTは初代の星々の輝きを世界で初めてとらえるかもしれません。

発見から説き起こす方がわかりやすい。

発端は超新星の観測だった。超新星は星の大爆発の際の輝き。爆発のメカニズムの違いによって、輝き方が複数タイプに分かれる。このうちIa型は爆発の際の明るさ（絶対光度）と輝き方の時間変化が、どの超新星もほぼ同じ。そこで輝きの時間変化を観測してIa型だとわかれれば、それらは絶対光度が同じはずなので、見かけの光度が暗いものほど遠くにあることがわかる。一方、

#### TMTの主な観測テーマ

- 太陽系の惑星や大型衛星の大気構造や成分、天候、火山活動
- 原始星コアの形状やジェット
- 惑星系の形成プロセス
- 系外惑星の直接観測（主星との距離が1/10までの惑星を探索；現在観測可能な水準との比較。以下の項目も同様）
- 金属欠乏星（天の川銀河だけでなく、近くの銀河まで探索）
- ブラックホール（5倍遠くのもの、2桁軽いものまで検出）
- 近くの銀河の星形成史（100倍暗い星の年齢を調査）
- 銀河の力学・化学構造の進化（さらに30億年昔まで進化を遡る）
- 遠方の超新星（1.5倍遠い距離まで探索）
- 宇宙初代星のガンマ線バースト
- 宇宙の元素の進化（2桁高い精度で元素量を測定）
- 物理定数の時間変化

たがってどう変わってきたのかを調べ、そこから膨張速度の時間的推移を明らかにする（中島林彦「すばるで迫る暗黒エネルギー」日経サイエンス2008年3月号、別冊日経サイエンス『宇宙大航海』に収載）。すばるは稼働から約10年がたつが、補償光学装置の導入などで性能が向上し、観測装置の更新も進んでいる。近く、すばるの主焦点に取り付ける新型カメラが完成、暗黒エネルギーの観測に威力を発揮すると期待されている。

すばるの国際プロジェクトなどを受け、2020年代に始まるTMTの観測では、さらに信頼性の高い方法で膨張速度と、その変化を決める。いわば暗黒エネルギー観測の決定版になる。まずTMTの集光力を生かし、様々な距離にある多数の銀河（クエーサーなどを含む）を観測、それについて後退速度を調べる。そして10年後にまた同じ観測を行ってデータを比較すると、10年間で各銀河の後退速度がどれほど増したのかがわかる。これにより宇宙膨張の歴史がわかる。

Ia型超新星や銀河分布などから求めた膨張速度は、様々な仮定の上での推定値だが、TMTによる観測で得た膨張速度は仮定を含まない確定値。暗黒エネルギーの物理的な特性を定める上で重要な役割を果たすだろう。その正体が定数、つまりアインシュタイン

## TMTを支える技術 1 人工の星を見て視野クリア

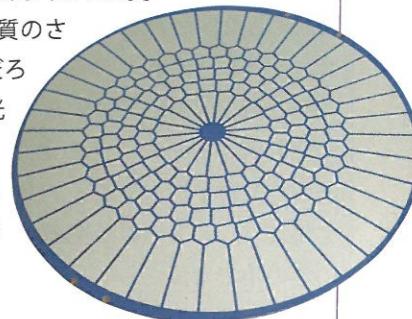
TMTの優れた解像力を生かすのに不可欠な技術、それが補償光学だ。その原理を簡単に説明しよう。

天体は点光源とみることができ、放射された光の波面は球状（球面波）に宇宙を広がっていくが、地球到達時、その球面の半径は数十光年、場合によっては100億光年にもなるので、波面は実質的には平ら、つまり平面波になる。その平面波の波面は地球の大気圏に入ると乱れて凹凸ができる。大気は場所ごとに微妙に密度が違う、光の速度は大気密度の違いで変わるからだ。波面に凹凸があるということは、同時に星から出た光でも、地上に到達する時刻は場所によって（つまり望遠鏡の主鏡上の各場所で）微妙に違ってくることを意味する。この波面の凹凸が天体像のボケの原因だ。

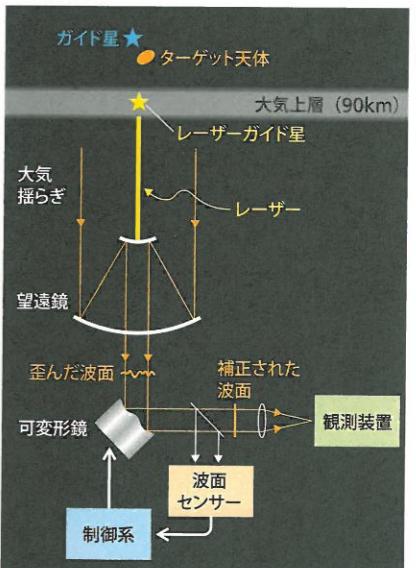
ではどうやって波面の凹凸を消すか？ 原理的には、主鏡で集めた凹凸波面の光を、観測装置に導入する前の段階で、うまい凹凸がついた鏡で一度、反射させれば、凹凸が相殺されて平面波に戻る。例えば天球上で、観測したい遠くの銀河（ターゲット天体）のすぐ近くに、素性がわかっている星（ガイド星）があれば、両者はほぼ同じ大気の領域を通過するので、同じようなボケ具合の像が得られる。そこでガイド星の像がシャープな点になるように鏡に凹凸をつけなければ、ターゲット天体から光も

平面波に戻る。このように補正する光学技術を補償光学という。ただターゲット天体のすぐ近くにガイド星が存在しない場合も多い。そこで現在、望遠鏡からレーザービームを上空に照射、大気上層のナトリウム原子を励起させて光らせ、人工のガイド星を作る手法が研究されている。

TMTがファーストライトを迎える2020年頃には、現在より格段に進歩したシステムになる。複数のガイド星やレーザーガイド星を用いて、広い視野で星像のブレを補正したり、可変形鏡の分割区画数を増やし1秒間当たりの変形回数を増すことで、画像の質のさらなる向上が実現したりするだろう。現在、大型望遠鏡の補償光学系は特定の観測に限って用いられるが、TMTでは補償光学系を用いた観測が基本になると考えられている。



**飛び交うレーザービーム** 日米欧はマウナケア山頂にある大型天体望遠鏡などを用いてレーザーガイド星による補償光学系（下右はその概念図）の開発を競っている（下左の写真）。レーザー光を出しているのは左から順に、すばる、ケック、2つおいてジェミニ北の各望遠鏡。補償光学系の中核装置の1つは高速で表面の凹凸を変化できる可変形鏡。例えば、すばるで用いている最新の可変形鏡（上の写真）は直径9cmで、全体が188区画に分割され、それぞれの区画が毎秒200回上下して、大気の揺らぎによる波面の凹凸を相殺する。これによって解像力は10倍向上した。



（Albert Einstein）が提唱し、後に自ら「我が生涯、最大の過ち」と語ってその存在を否定した宇宙定数のようなものなのか、それとも時間などとともに変化するものなのか、答えが出る可能性がある。

## 宇宙の一番星を見る

月面のホタルの光をとらえられるTMTなら、宇宙で最初に誕生した星、“宇宙の一番星”的輝きを見ることができるかもしれない。一番星とは何か、宇宙の歴史に沿って少し説明しよう

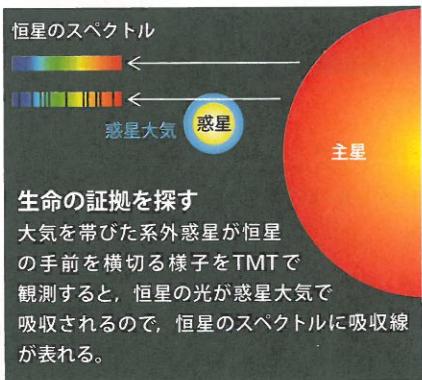
（左ページ上のイラストを参照）。約137億年前、宇宙が誕生した。当時、宇宙は超高温で、陽子や電子、光子、暗黒物質粒子という正体不明の粒子などが混ざり合っていた。光子は電荷を持つ粒子（陽子や電子）の影響を

受けるので宇宙をまっすぐに飛べず、そのため宇宙全体が不透明になっていた。40万年後、宇宙はかなり温度が下がり、陽子は電子と結びついて、電気的に中性な水素原子になった（割合は少ないがヘリウム原子もできた）。すると光子は、荷電粒子がなくなった宇宙を直進するようになり（宇宙は透明になり）、光は四方に放射された。その時の光を、私たちは宇宙マイクロ波背景放射として観測している。

その後、宇宙は光を放つものがない暗黒時代に入った。その暗黒の中で、暗黒物質粒子や水素原子が重力によって集まり、ガスの雲が生まれた。ガスの雲の中では、さらに水素原子の集中が続き、至るところで星が誕生、星の中心部が一定の温度圧力まで高まると、核融合反応が始まって明るく輝き始めた。これが宇宙の一番星であり、そうした一番星を多数含むガスの雲が銀河のタマゴだ。

宇宙の一番星、銀河のタマゴができるのは宇宙誕生から2～4億年後だと考えられている。その後、銀河のタマゴどうしが集まって成長し、そうした中で星が生まれば爆発し、その中から新たな星が誕生するというサイクルが続いた（A. ロブ「宇宙の暗黒時代を探る」日経サイエンス2007年2月号、別冊日経サイエンス『宇宙創世記』に収載）。

ただし、このシナリオはスーパーコンピューターのシミュレーションなどから推定されたもの。現在、高い信頼



性で観測されている最古の銀河は宇宙誕生から約8億年後のもので、これはすばるが発見した。つまり宇宙の一番星から、すばるが発見した最古の銀河までの4億年間は謎が多い。

TMTなら、すばる10台分以上の集光力を生かして、さらに暗い天体、つまり、より遠くにある、より古い時代の天体を観測できる。宇宙の一番星を見つけ出し、銀河がどのようにして生まれ育ったのか、明らかにしてくれるだろう。暗黒物質が銀河の進化に果たした役割も詳しくわかつてくると期待されている。

### 地球外生命を探る

TMTは地球外生命探査にも威力を発揮する。地球外生命が存在する可能性が高いのは地球と同じような大きさの岩石惑星であって、恒星からほどよい距離にあり、液体の水が存在し得る環境になっているものだ。地球外生命探査では、まずそうした条件を満たす惑星（ハビタブルゾーンに入る惑星）を探し、リストアップした惑星について生命の兆候を調べる。つまり地球外生命探査の第一歩はハビタブルゾーンに入る惑星を探し出すことだ。このあたりから話を始めよう。

太陽以外の恒星で惑星（系外惑星）が最初に発見されたのは1995年。ペガス座51番星という恒星の光スペクトルの解析から、その恒星が惑星の重力でふらついていることがわかった。

現在までに約500個の系外惑星が見つかっているが、最初のものも含め、多くは恒星のふらつきの観測から見つかった。そうした系外惑星のほとんどは木星のような巨大ガス惑星だったが、近年、ハビタブルゾーンに入っている可能性がある地球に似た2つの系外惑星が、約20光年彼方の恒星グリーゼ581で発見され注目を集めている。

今後の系外惑星探査では、もう1つの観測手法、恒星の手前側を惑星が横

## TMT前史 群雄割拠の時代を経て 3プロジェクトに集約

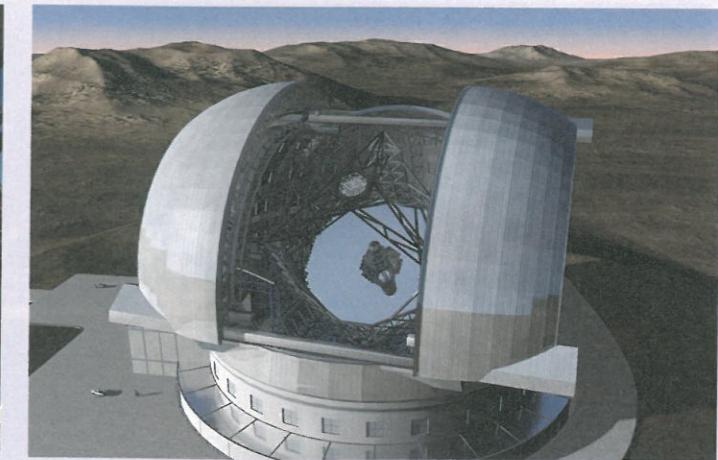
3つの巨大望遠鏡プロジェクトの出発点は約10年前、すばるなど口径8m級望遠鏡が世界各地で続々と動き始めた頃に遡る。すばるの稼働は1999年。口径8.2mは単一鏡の望遠鏡として当時、世界最大だった。その時まで、日本には1960年に完成した国立天文台岡山天体物理観測所の口径1.88mの望遠鏡（完成時は世界第6位の大きさ）だけ。すばるは日本の天文研究者の悲願だった。

同じ1999年、全米天文学研究大学連合を中心とするグループもマウナケア山頂に口径8.0mのジェミニ北望遠鏡を建設、2002年には、それと対をなす同口径のジェミニ南望遠鏡を南米チリのパチョン山（標高約2700m）に完成させた。一方、欧州は1998年から2000年にかけて、やはり南米チリのパラナル山（標高約2600m）に8.1mの望遠鏡4台からなる超大型望遠鏡VLTを建設した。

各国の望遠鏡の口径がほぼ横並びだったのは、一枚鏡で作れる望遠鏡の現実的な上限が8mだったからだ。同口径の望遠鏡であれば、ライバルに先んじて観測を始めなければ天文学の新発見はなし得ない。そこで各国の建設レースが繰りひろげられ、結果、ほぼ同時期に稼働することになった。

ただ、口径8mが望遠鏡の終わりではないことも明らかだった。8mでは宇宙の最も遠くを詳しく見ることはできないからだ。一枚鏡では8mを超える望遠鏡は難しいが、多数枚の鏡を組み合わせれば1つの巨大な鏡面を実現できる。複合鏡だ。8m望遠鏡の観測が軌道に乗ったのを受け、各国はこの複合鏡方式による巨大望遠鏡の建設を検討し始めた。

手本はあった。すばる望遠鏡のとなりにある米国のケック望遠鏡だ。ケックは差し渡し1.8mの六角形の鏡36枚を組み合わせた口径10mの望遠鏡2台から



なる。1台目は1993年、2台目は1996年に稼働した。複合鏡方式の主鏡は一枚鏡の主鏡と比べて技術的難度が高くなる。ケックを建設した米カリフォルニア工科大学とカリフォルニア大学は、様々な工夫と試行錯誤を積み重ねた末、これらの問題を克服した。

ケックは、すばるやジェミニ、VLTなどの8m望遠鏡群に先行して観測を開始。ハッブル宇宙望遠鏡が発見した興味ある天体について、その集光力を生かして天体の組成などを詳細に調べ、次々と大きな成果を上げた。

1990年代後半、日欧はまだ8m級望遠鏡が稼働していないため、ケックの集光力は圧倒的だった。ケックの成功を目にした他の米国グループや日欧が、次世代望遠鏡として複合鏡方式による超大口径の望遠鏡の採用を検討し始めたのは自然な流れだった。

複合鏡は組み合わせる鏡を大きくし、枚数を増やせば、原理的には単一鏡よりも大きな望遠鏡ができる。基本的に主鏡が大きくなるほど性能がよくなるが、一方で建設費は高くなり、技術的難度が増し、実現に時間がかかる。各国がそれぞれ検討を進めるうち、期せずして1つのイメージが浮かび上がってきた。それが口径30m級の望遠鏡だった。

日本の計画もその1つで、当初、国立天文台を中心に口径30mの望遠鏡を単独で建設する検討を進めていた。それがJELT（Japan Extremely Large

Telescope）だ。形が異なる14種類の扇形の鏡798枚を組み合わせて主鏡とし、新しい加工技術と素材を用いて製作することで大幅なコスト削減を実現する算段だった。しかし、様々な工夫を重ねても建設費は試算で1000億円を切ることができなかった（すばる望遠鏡は約400億円）。そこで単独での建設を断念、2007年、国際共同による同サイズの望遠鏡の建設へと方針を大転換した。

米国では当初、ケックとジェミニのグループがそれぞれ口径30mの望遠鏡計画を推進、カーネギー天文台とアリゾナ大学などが約25mの巨大マゼラン望遠鏡GMTの実現を目指していた。カナダは20mの望遠鏡構想をあたためていた。

### 建設費の問題が統合促す

これら各陣営の悩みも建設費だった。最終的に米国のケックとジェミニの両グループ、カナダ、そして日本は協力して1つの30m望遠鏡を建設することに落ち着いた。それがTMTだ。TMTは当初、ハワイ島マウナケアのほか、南米チリの高地アルマソネス山も有力候補地だった。国立天文台を中心とする日本の研究グループは2007年、「すばる望遠鏡との連携観測が可能なハワイに建設するならTMTに加わる」との意向を表明、2009年、参加研究機関の間での協議の結果、ハワイに建設することが決まった。

こうした流れを受け、2010年、中国とインドがTMTに参加する方針を固めた。

一方、カーネギー天文台、アリゾナ大学などによるGMTはオーストラリアと韓国が参加して計画を進めている。GMTは直径8.4mの鏡を7枚組み合わせて口径24.5mの主鏡を作る（左上は完成予想図）。建設費は約7億ドルだが、予算獲得はTMTより少し遅れている。

欧州は当初、予算の制約を度外視して技術的に可能な最大の望遠鏡を追求、超大型望遠鏡OWLの構想をまとめた。“OverWhelmingly Large telescope”から取ったOWLだ（Overwhelmingは「圧倒的な」という意味）。差し渡し約1.6mの六角形の鏡を約3000枚組み合わせて口径100mの主鏡を実現する（R. ギルモツィ「100m級超大型望遠鏡に挑む」日経サイエンス2006年8月号）。

だが、この案は天文学的な建設費のため日の目を見ず、規模を大幅縮小した欧州超大型望遠鏡E-ELTに落ち着いた。E-ELTの主鏡の直径は42mで、TMTと同サイズの六角形の鏡を1000枚組み合わせて実現する（右上は完成予想図）。鏡の総面積はTMTの2倍、GMTの3倍で、日米を大きくリードしようというもうろみだ。建設費は約15億ドルで欧州各国が拠出する。

非常に意欲的な計画だが、鏡は大きくなるほど技術的難度が高まり、克服すべき課題も増える。そのため目標性能を達成できるのか不明確な部分がある。完成時期はTMTやGMTより数年は遅くなる見通しだ。

## TMTを支える技術 2

### ゼロ膨張ガラスと高度な磨きの技

TMTの主鏡は温度変化で膨張や収縮が起きないゼロ膨張ガラスという最先端材料を用いる。一般にガラスは温度が上ると膨張し、下がると収縮する。それによって主鏡の形状が微妙に変化し、天体像が歪む。そのため、できるだけ膨張しない低膨張ガラス材料の開発が長年続いてきた。その究極がゼロ膨張ガラスだ。ゼロ膨張ガラスには複数のタイプがあるが、中でも優れた特性を持つのがガラスセラミックスというタイプ。ガラスとは逆の熱特性、つまり温度が上がると収縮し、下がると膨張する特性を持つ結晶が、ナノメートルのレベルでガラス内に析出している。両者の膨張・収縮具合がうまく合うことで温度による体積変化が相殺される。ガラス相に対する結晶相の析出比率を最適にするため、きめ細かな温度制御を行うなど高度な技術とノウハウが必要だ。

現在、世界トップレベルのゼロ膨張ガラスを製造しているのは日本のオハラと独ショット、米コーニングの3社。TMTについて日本はオハラ製のガラスセラミックタイプの採用を働きかけている。TMTでは主鏡を構成する差し渡し1.5mの六



角形の鏡を、予備品も含めると600枚近く製造しなければならない。それだけの枚数の超高品质のガラス材を、限られた期間で安定供給する能力を持つ企業はほかにはないと考えられるからだ（ただ、中国やインドはロシア製を用いた主鏡の生産も含め検討している）。

ゼロ膨張ガラスは天文分野のほか半導体や液晶の製造分野で幅広く用いられる。半導体チップや大画面液晶などは、大型のレンズや鏡を組み込んだ露光装置を使って回路パターンを焼き込むが、レンズや鏡は光を当てるとき温度が上がる。焼き付けのパターンに狂いが出ないようにするには、ゼロ膨張ガラスが不可欠になる。また製造現場で使う精密な物差し（ガラススケールやブロックゲージ）の材料としても需要が高い。オハラではこうした分野向けに製品を供給しており、ゼロ膨張ガラスの量産に関して豊富なノウハウと大がかりな設備を持っている。

3つの超大型望遠鏡のうち欧州超大型望遠鏡E-ELTの主鏡もゼロ膨張ガラスを用いることが決まり、メーカー各社が対応を検討している。米国の巨大マゼラン望遠鏡GMTではオハラの低膨張ガラスが採用された。ゼロ膨張ガラスと比べると、ある程度は膨張収縮が起こるが成型性に優れ、大型のものが製造しやすい。GMTのグループはコストと性能とのバランスから低膨張ガラスを選んだ。GMTの主鏡は直径8.4mの鏡を7枚組み合わせて作るが、1枚目はすでに完成、2枚目の製造にかかる。オハラはその2枚目向けのガラス材を製造中だ。

#### 液晶露光装置で培った技術

TMTの主鏡の形状は単純な球面ではなく、回転双曲面という非球面。主鏡を構成する492枚の六角形の鏡は、その非球

力ギ据る温度制御 ゼロ膨張ガラスの製造は神奈川県相模原市にあるオハラの本社工場で行う。ガラスとセラミックスの原料粉末をよく混合し、1500～1600℃の高温で溶解して型に流し込む（左）。いったん冷やして固めた後、再び温度を上げ、それから約3週間かけてゆっくり冷やす。その温度制御はノウハウのかたまりだ。全体の工程は3ヵ月以上になる。

#### たわませて研磨 非球面の作り方には2通りある。

1つはガラス材に力を加え、たわませた状態で球面の研削（砥石で削る）と研磨（研磨材で磨く）を行う方法。研磨し終えて、ガラス材のたわみをなくせば非球面の形状が実現する。もう1つは研削と研磨で非球面を一気に作る手法。TMTが手本とするケック望遠鏡（36～37ページの図）は1つめの手法で鏡を作ったので、今回の試作鏡でもこの手法を採用した（上段左はガラス材に加える力を計測している場面。上段右はたわませた状態で研磨しているところ。下段は試作鏡の検査風景）。しかし、この手法では鏡に加える力を緩めて磨き具合を調べ、再び力を加えて鏡をたわませて研磨して……、という工程を繰り返すので時間がかかる。そこで量産時には、一気に非球面を作る手法が採用される見通しだ。



面を実現するため、主鏡中心からの距離に応じて、異なる形状に磨く必要がある。しかも1枚の鏡の中でも主鏡の円周方向と、それと直交する方向では曲率が違う。鏡の縁の部分は磨くのが難しいが、一枚鏡の望遠鏡の場合は縁の部分を集光に用いなければ、それで済む。しかし、複合鏡の場合はそうはいかない。各鏡の縁の部分も含めてきれいな形に整えなければ、多数枚の鏡を組み合わせた時、全体として理想の曲面が実現しない。つまりTMTの鏡を磨くには非常に高度な技術が必要で、そうした技術を用いて、差し渡し1.5mという大きな鏡を、予備品を含めて600枚近く短期間に磨けるメーカーは世界でも限られる。

国立天文台はキヤノンと協力して主鏡の研磨を行なう計画を立てている。キヤノンは液晶露光装置や半導体露光装置のトップメーカーで、特に液晶露光装置は望遠鏡との結びつきが強いからだ。液晶画面はワイド化が進んでいるが、そうした液晶の大画面を作るには非常に大きくて薄いガラス表面に回路パターンを焼き込む必要がある。キヤノンが作っている液晶露光装置には直径1.5mの凹面鏡や直径約1mの非球面レンズなど大型の

光学系が組み込まれ、一度に大面積の回路焼き付けを行う方式だ（比較的小型の液晶露光装置を並べて大面積の焼き付けを行うメーカーもある）。その技術と設備を生かせば、新規設備投資をせずに、TMTの主鏡を短期間で磨き終えることができる。

このほどキヤノン宇都宮光学機器事業所（宇都宮市）で、TMT主鏡を構成する六角形の鏡の試作第1号が完成した。昨夏、オハラから送ってきたゼロ膨張ガラスの板材を約半年かけて加工した。この試作鏡で、日本製の鏡の性能の高さをTMT参加研究機関にアピールしたい考えだ。

オラ  
るかもしれない（36ページ下の図）。ただ、それはTMTのような集光力のある超大型望遠鏡によって初めてなし得ることだ。

このほかTMTの解像力と集光力によって数多くの新発見がもたらされるだろう（34ページ下の表）。その際、TMTのすぐとなりにあるすばる望遠鏡は、TMTの観測ターゲットを選んだり、TMTによる観測を成功させるための予備観測などを行う高性能望遠鏡としての役割を果たすことになる。

#### 未知の天文学の世界へ

ここまで紹介してきたのは、現時点でき考えられる観測テーマの一部にすぎない。

TMTが稼働するまでの今後10年の間には、2つの大型観測施設が動き始める。1つは来年、南米チリのアタカマ高地で本格稼働する巨大電波望遠鏡アルマ。66台の大型アンテナを分散配置し、実効的に山手線ほどの直径を持つ電波望遠鏡を実現する（中島林彦「『いざよい』をつくる」日経サイ

エンス2010年7月号、別冊日経サイエンス『宇宙大航海』に「世界最大の電波望遠鏡『アルマ』」と改題して収載）。もう1つは2014年に打ち上げるハッブル後継のジェームズ・ウェーブ宇宙望遠鏡だ（R. イリアン「ハッブルを超えて ジェームズ・ウェーブ宇宙望遠鏡」日経サイエンス2011年1月号）。

それらの観測によって現在の私たちには考えもつかない宇宙の新たな謎が見いだされるだろう。そしておそらく、その謎を解くのはTMTになる。

切る時、恒星がほんの少し暗くなる現象をとらえる手法による系外惑星の発見も増え、その中にはハビタブルゾーンに入るものも見つかってくるとみられている。その見方を裏づけるのが、今年2月、米航空宇宙局（NASA）が発表したケプラー宇宙望遠鏡による発見の大ニュースだった。

ケプラー望遠鏡は2009年に打ち上げられ、はくちょう座近くの領域にあり、約15万個以上の恒星について、系外惑星による減光を調べている。2月

の発表によると、系外惑星の候補を約1200個発見、うちハビタブルゾーンに入るものは54個で、うち5個は地球サイズ、49個はサイズがもっと大きいもの（巨大ガス惑星も含む）だという。これらはいずれも系外惑星“候補”的段階だが、ケプラーが観測している領域は夜空の約1/400であることを考えると、地球外生命が存在しそうな系外惑星は少なくはないかも知れない。

そこでTMTに期待がかかるのが、その時点までにリストアップされた、

生命が存在する可能性が高い系外惑星の詳しい観測だ。惑星に生命が存在していれば、大気に水や酸素、有機物など生命活動をうかがわせる成分が含まれている可能性が高い（N. Y. キアン「赤、青、黒… 異星の植物は何色か」日経サイエンス2008年7月号、別冊日経サイエンス『生命の起源 その核心に迫る』に収載）。

惑星が恒星の手前側を横切る時、恒星の光スペクトルには、そうした惑星大気の成分による光の吸収が観測でき