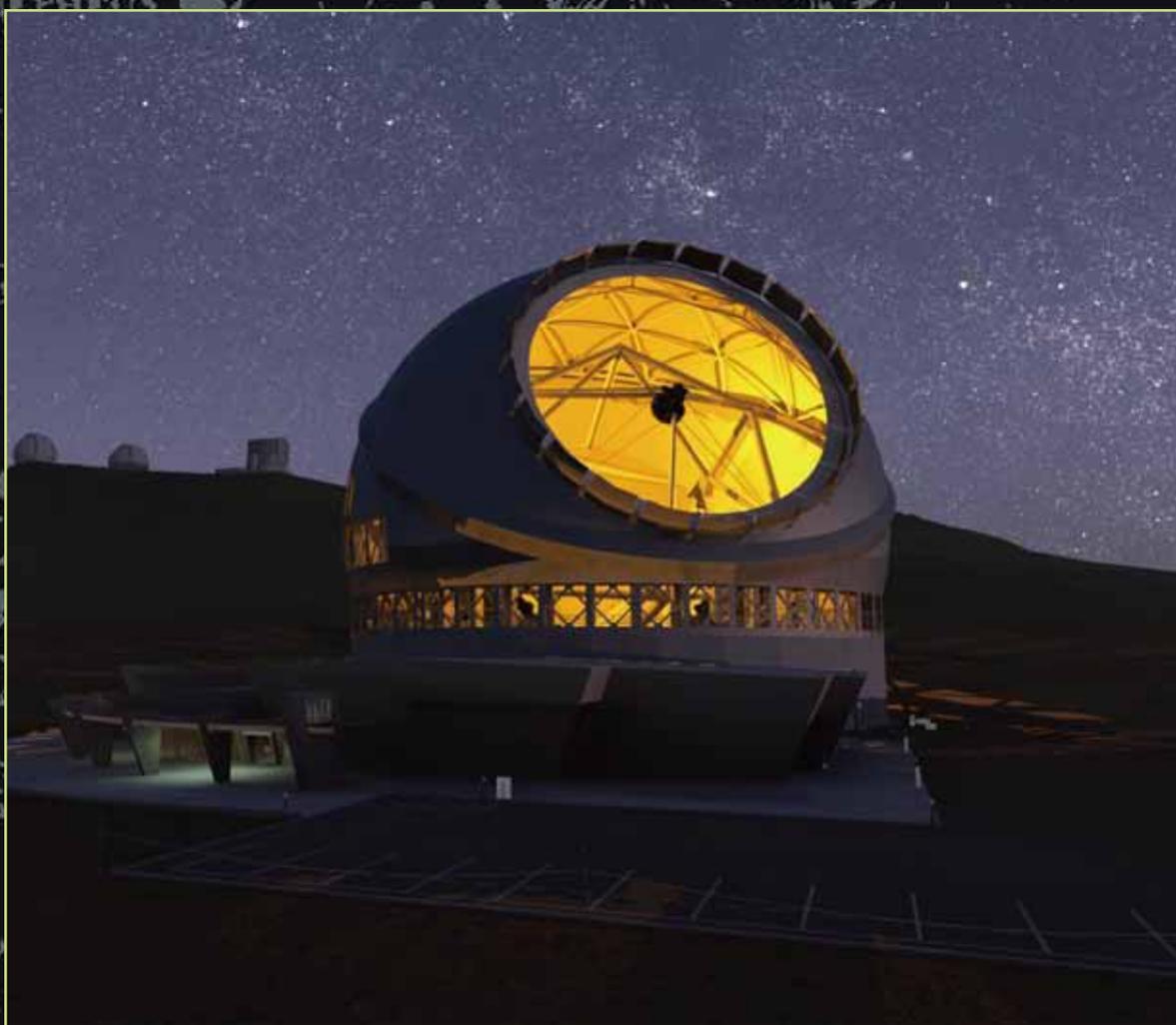


国立天文台ニュース

National Astronomical Observatory of Japan

2013年6月1日 No.239

特集・超大型望遠鏡 TMT 建設に 日本が本格的に始動！



- はじめに (家 正則・TMT推進室長)

- TMTの全体像

- ・ TMTが切り拓く新たな宇宙像 宇宙における生命をさぐる／宇宙で最初の星と銀河に迫る
- ・ TMTを生み出す驚異のテクノロジー 驚異の492枚複合鏡!／軽量・コンパクトな架台とドーム
- ・ TMTの能力を極限まで引き出す補償光学
- ・ TMTは巨大な国際科学協力プロジェクト
- ・ TMTと「すばる」の連携観測
- ・ 宇宙・天文光学EXPO前日準備取材記

6

2013

- 表紙
- 国立天文台カレンダー

03 特集 超大型望遠鏡TMT建設に 日本が本格的に始動！

～口径30メートル次世代光赤外望遠鏡が拓く新たな宇宙～

- 04 はじめに —— 家 正則 (TMT推進室長)
- 05 TMTの全体像 —— 青木和光 (TMT推進室)
 - ★TMTが切り拓く新たな宇宙像
 - ①宇宙における生命をさぐる
 - ②宇宙で最初の星と銀河に迫る
 - ③ダークエネルギーの性質の解明に挑む
- 07 ★TMTを生み出す驚異のテクノロジー
 - 驚異の492枚複合鏡！
 - 軽量・コンパクトな架台とドーム
- 11 ★TMTの能力を極限まで引き出す補償光学
- 12 ★TMTは巨大な国際科学協力プロジェクト
- 13 ★TMTと「すばる」の連携観測
- 14 おしらせ
 - 宇宙・天文光学EXPO前日準備取材記

- 15 ニュースタッフ
人事異動
 - 編集後記
 - 次号予告

16 シリーズ 国立天文台アーカイブ・カタログ15

『靈憲候簿』 —— 堀 真弓 (天文情報センター)

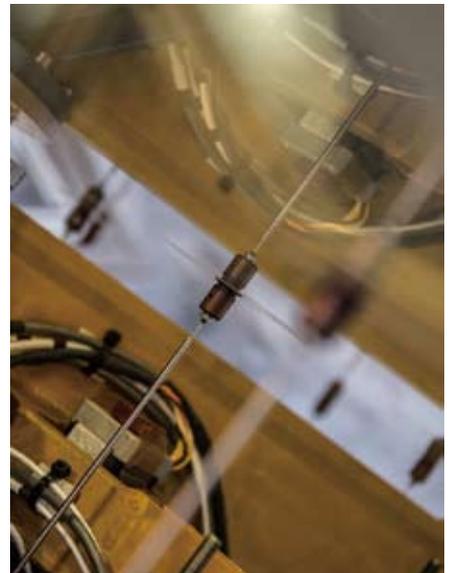


表紙画像

マウナケア山頂に建つTMTの完成予想図。

背景星図 (千葉市立郷土博物館)

渦巻銀河 M81 画像 (すばる望遠鏡)



TMT主鏡分割鏡の試作品の保持機構(アクチュエーター)部の拡大画像。くわしくは14ページおよび特集記事を参照 (撮影/長山省吾:天文情報センター)。

国立天文台カレンダー

2013年5月

- 7日(火) 幹事会議
- 8日(水) 天文情報専門委員会
- 10日(金) 4D2Uシアター公開/観望会
- 15日(水) ALMA国内完成記念式典
- 16日(木) 電波専門委員会
- 17日(金) 運営会議
- 23日(木) 安全衛生委員会
- 25日(土) 4D2Uシアター公開/観望会
- 31日(金) 幹事会議

2013年6月

- 7日(金) 4D2Uシアター公開/観望会
- 21日(金) 幹事会議
- 22日(土) 4D2Uシアター公開/観望会
- 27日(木) 安全衛生委員会

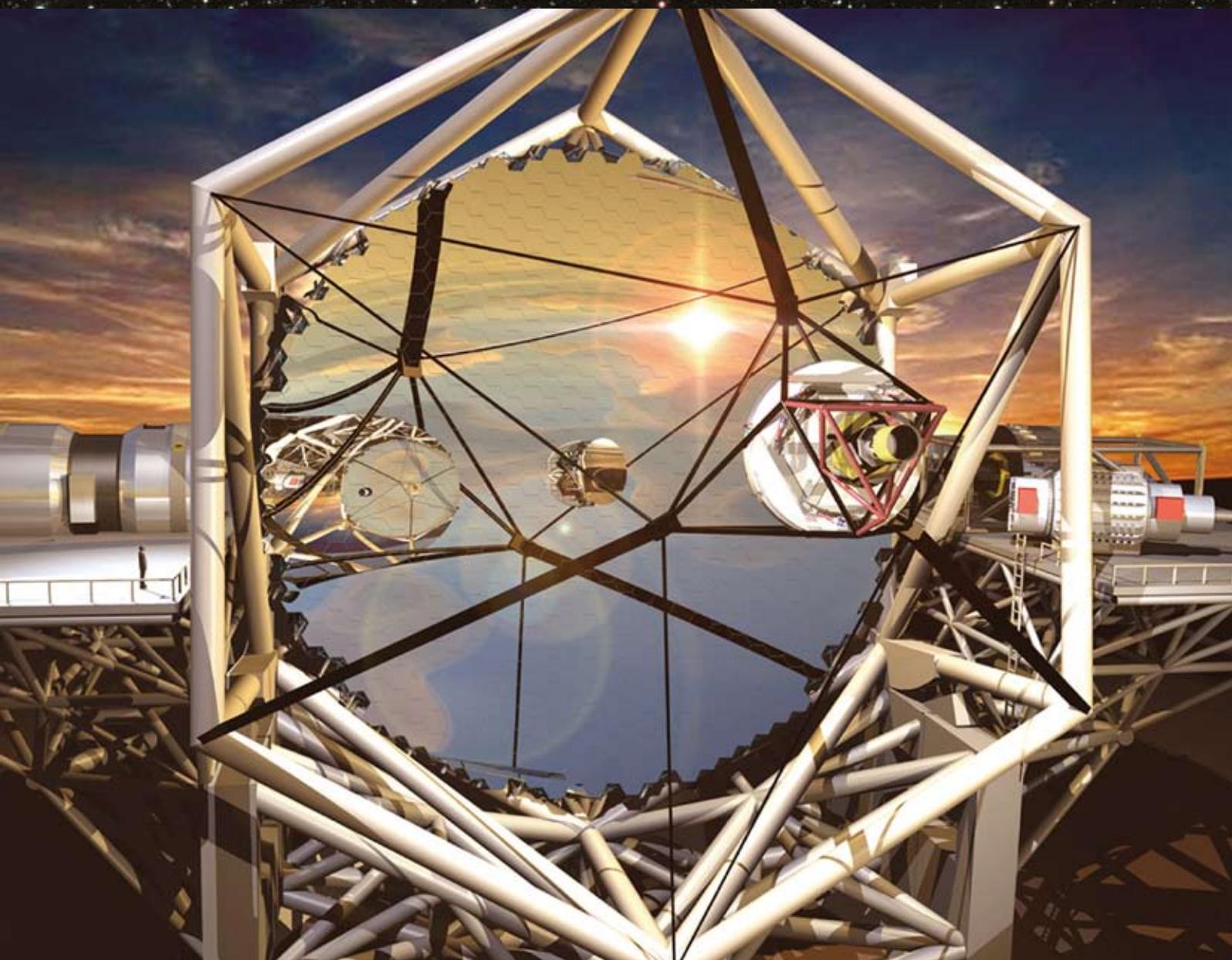
2013年7月

- 8日(月) 運営会議
- 12日(金) 幹事会議/4D2Uシアター公開/観望会
- 17日(水) 太陽天体プラズマ専門委員会
- 24日(水) 幹事会議/天文データ専門委員会
- 25日(木) 安全衛生委員会
- 27日(土) 4D2Uシアター公開/観望会
- 30日(火) 研究交流委員会

超大型望遠鏡TMT建設に 日本が本格的に始動！

～口径30メートル次世代光赤外望遠鏡が拓く新たな宇宙～

TMTは、日本を含む5か国の協力により、ハワイに口径30メートルの超大型光赤外線望遠鏡を建設する計画です。今年度予算でTMT建設に向けた準備費と建設経費の一部が措置され、この計画において日本が本格的に始動します。TMTとはどのような望遠鏡計画なのか、現在どのような開発や製作に取り組んでいるのか、この特集でご紹介します。



文

家 正則 (TMT 推進室長) 4 ページ

青木和光 (TMT 推進室) 5 ～ 13 ページ

はじめに

TMTとはどのような望遠鏡なのでしょうか。「すばる」など、つねに日本の大型光赤外望遠鏡プロジェクトの第一線で活躍してきた家 正則さん（TMT推進室長）に、その建設の歴史的経緯と意義を紹介してもらいます。

すばるからTMTへ

～2020年代に日本からノーベル賞級の観測成果を続々と～

家 正則（TMT推進室長）

いよいよ超大型望遠鏡TMTの建設が現実となる時がきた。この機会にこれまでの道のりを振り返り、10年後を展望してみよう。

話は30年前に遡る。すばる望遠鏡の本格的検討は1984年に発足させた大型光学赤外線望遠鏡技術検討会で始まった。1991年度から約400億円の予算を得て建設が始まるまでに延べ36回開催したこの技術検討会で望遠鏡計画の概要を固めていった。ファーストライトは1999年1月、2000年12月から共同利用を開始したが、検討開始から実に17年の歳月を要したことになる。8つの第一期観測装置も整い、すばる望遠鏡の運用が安定軌道に乗った2003年1月、次世代ミッションを検討するため、光赤外天文学将来計画検討会が発足し、有志とともに次の望遠鏡の検討を始めた。

当時、欧州では口径100メートルのOWL（Overwhelmingly Large）望遠鏡構想が威勢良く喧伝されていた。さすがに、「それはちょっと……」と考えた我々は、2004年までに主鏡直径30メートル、口径比1、同心円状のゼロ膨張セラミクス製セグメント鏡、非球面3枚の無収差望遠鏡 Japan Extremely Large Telescope（JELT）構想を練り、国立天文台内にELTプロジェクト室を2005年度から発足させた。核融合科学研究所との連携でゼロ膨張セラミクス焼成炉を開発し、試作したセラミクス鏡は広島大学1.5メートル望遠鏡の副鏡として実用化するなどの開発も進めた。主鏡の軽量化、コンパクトな望遠鏡とドーム構造で建設費の大幅削減を図ったが、それでも1000億円以下の予算での建設プランを作成することは不可能であった。そこで日本単独での建設でなく、国際協力での早期実現を目指すことを、2007年1月にコミュニティに諮り決断した。

幸いすばる望遠鏡は次々と国際的な科学成果を挙げてきたが、その最大の要因は他の8～10メートル級望遠鏡に無い広視野主焦点カメラを使った観測ができたからであった。この大きな利点を活かさない手はない。ハワイに次世代超大型望遠鏡を建設できれば、日本の研究者がすばる望遠鏡のサーベイ機能で見つけた重要な天体を次世代望遠鏡で観測して、研究面で世界をリードすることができる。国際協力の相手としては、カリフォルニア大学連合とカナダが検討を始めていたTMT（Thirty Meter Telescope）計画、欧州南天天文台が構想してきたE-ELT計画、カーネギー天文台などが構想を進めてきたGMT計画があったが、E-ELTもGMTもチリでの

建設を想定していた。そこで、唯一ハワイでの建設の

可能性を持っているTMTに白羽の矢を立て、2008年11月から年4回開催されるTMT評議会に参加し、ハワイでの建設を条件に連携交渉を進めた。

カリフォルニア大学連合とカナダは日本の参加を歓迎し、2009年には建設候補地をハワイとすることに決定し、建設許可申請の手続きを始めた。日本に続いて、2010年には中国が、2011年にはインドがTMT計画への参加意向表明を行い、国際協力プランの形が見えてきた。各パートナーの役割分担については、紆余曲折もあったが、すばる望遠鏡建設の実績などを踏まえて、日本は望遠鏡本体の設計・製作、主鏡鏡材の製作、主鏡研磨と観測装置製作の一部を分担することになった。

国立天文台はミリ波サブミリ波望遠鏡66台からなる国際協力事業ALMAを遂行した実績を持っている。TMTは一つの巨大望遠鏡を各パートナーが分担して製作する計画である。どのパートナーの製作に問題が生じても全体に大きな影響が及ぶという点では、TMTはALMAよりも複雑・困難なプロジェクトとなる。パートナーの責任と権利関係の調整や、TMT国際天文台の運営体制の構築についても忌憚のない議論が続いている。なかなかシンドイ議論だが、厳しい議論を率直に戦わせてこそ、相互信頼が醸し出されていくのだろうと考えている。

TMTの建設過程では、予算状況、為替変動・インフレ変動など予測が難しい側面もあり、マルチパートナーの進捗管理や乗り越えるべき技術的課題も出てくるだろう。前途は決して平坦な道では無いことを覚悟する必要がある。

だが、TMTが完成すれば、太陽系外惑星や原始惑星系の観測、生命存在の兆候の探査、遠方銀河の観測から初期宇宙史をひもとく研究、宇宙膨張変化の直接測定からダークエネルギーの性質に迫る研究など、学術的にも意義が高く、ワクワクする新しい研究分野が拓けるはずだ。

すばる望遠鏡により世界のトップレベルに踊り出て、ALMAでも重要な貢献を成し遂げた日本の天文学コミュニティには大きな活力と人材がある。TMTに全力投球できれば、すばるのユニークな観測機能との連携で、2020年代に日本からノーベル賞級の観測成果が続出するという夢も正夢となるのではないかとおおいに期待している。



TMTが切り拓く新たな宇宙像

TMTがめざすサイエンスとは何でしょうか？ 3つの大きなテーマ、「①宇宙における生命をさぐる」「②宇宙で最初の星と銀河に迫る」「③ダークエネルギーの性質の解明に挑む」から、とくに①と②について紹介します。

●宇宙観を変革し続ける大型望遠鏡

ガリレオが初めて望遠鏡を夜空に向けて以来、望遠鏡の進歩とともに人類の宇宙に対する認識は何度も塗り替えられてきました。私たちの太陽系が、のちに天の川銀河とよばれるようになった星の大集団に属していることがわかったのが18世紀。天の川銀河の外に同じような星の大集団である銀河が無数に存在することがわかったのは20世紀前半のことです。20世紀の天文学の進歩は、これらの銀河が群れをなして大規模構造とよばれる分布を示すことを明らかにし、ビッグバン以降の宇宙膨張の様子も解き明かしつつあります。

一方、私たちの地球のような惑星が他の星のまわりにも存在しているのか、という大きな問いにも20世紀末に答えが出されました。今では惑星の存在が示されている星は2000以上に達し、その姿が画像として得られるまでになってきています。

このような人類の宇宙観、自然観を大きく塗りかえる発見は、新たな謎をいくつも提起しています。これに挑むのが次世代超大型望遠鏡の課題です。

●口径30メートルの光赤外線望遠鏡

現在、可視光と赤外線を観測する望遠鏡として、すばる望遠鏡をはじめとする口径8～10メートルの望遠鏡が活躍しています。口径30メートルのTMTは、これらの望遠鏡にくらべ約10倍も多くの光を集めることができます。また、補償光学を用いることができる赤外線の観測では、ハッブル宇宙望遠鏡を10倍以上も上回る解像度を得られます。

今日の天文学は、電波やエックス線など、さまざまな波長の電磁波で天体や諸現象を調べることにより、宇宙を多面的に理解することを可能にしています。そのなかで、可視光や赤外線は太陽のような普通の星が最も多くのエネルギーを放つ波長帯です。また、遠方の銀河で誕生している星が放つ紫外線が、宇宙膨張による赤方偏移（光の波長が伸びて観測される現象）によって可視光や赤外線として観測されます。光赤外線望遠鏡の役割はますます大きくなっています。

●TMTで挑む宇宙の謎

TMTは、3つの大きな課題に挑戦しようとしています。

①宇宙における生命をさぐる

太陽以外の星のまわりにも見つかる惑星の大気を調べ、そこに生命の兆候をさぐります（6ページ参照）。

②宇宙で最初の星と銀河に迫る

ビッグバンから数億年で誕生したと考えられている宇宙で最初の星の集団を見つけ、最初の銀河の形成に迫ります（6ページ参照）。

③ダークエネルギーの性質の解明に挑む

現在の宇宙は膨張が加速していることが明らかになってきており、これを駆動している未知のエネルギーにはダークエネルギーという名前がつけられていますが、その正体は全く分かっていません。遠方の天体を期間をおいて観測し、その赤方偏移の変化量を測定すると、宇宙膨張の時間変化を割り出すことができます。これはダークエネルギーの性質の理解に重要なデータとなります。TMTによるこのテーマへの挑戦が検討されています。

TMTはさまざまな観測を行うことができる汎用望遠鏡です。この3つのテーマ以外にも太陽系内から100億光年以上彼方まで、様々な天体の観測が期待されます。日本でも約100人の研究者が参加してTMTによる観測の検討が行われています。

では、先に述べた①、②の課題について詳しくみてみましょう。

天の川 宇宙 銀河 宇宙 激動する宇宙



18世紀後半



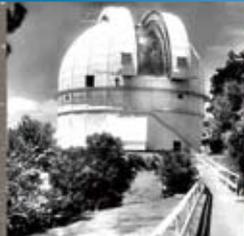
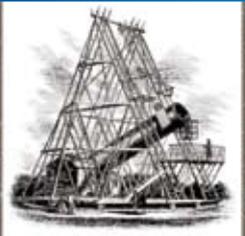
20世紀前半



20世紀後半～

第二の地球
ダークエネルギー
宇宙の一番星…

21世紀



人類の宇宙観の変革は、大型望遠鏡の開発と観測によって成し遂げられてきた。

1. 太陽系外惑星に生命を探る

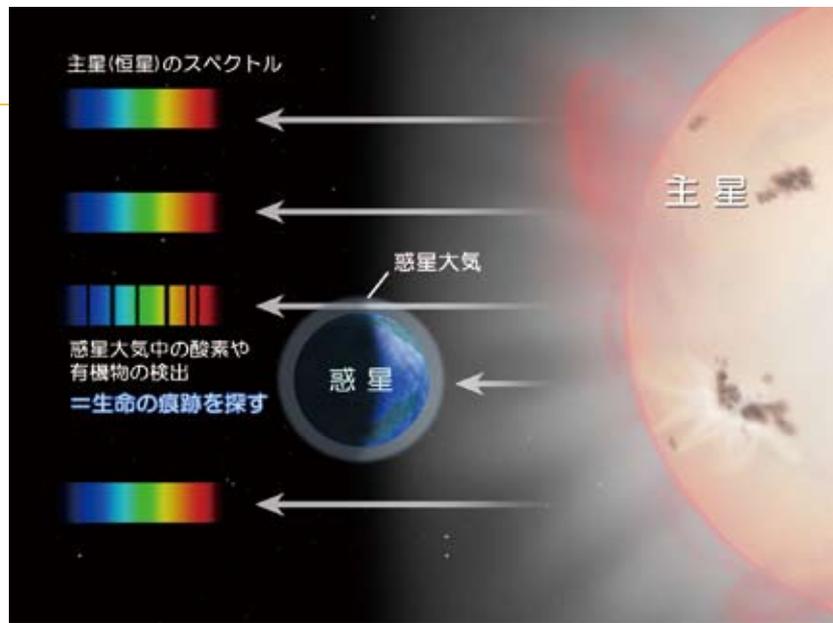
太陽以外の星のまわりの惑星系が次々と発見され、さまざまな大きさや軌道をもつ惑星が存在することがわかってきました。最近では、地球サイズの惑星も見つかるようになり、太陽系に似た惑星系も存在することがわかってきています。赤外線観測では、実際に惑星の姿がとらえられるようになってきています。

はたして「太陽系外惑星のなかに、生命が存在しているものはあるのか?」。これは人類共通の大きな疑問です。TMTは2つの観測方法で惑星に生命の兆候を探す観測に挑みます。

●惑星の反射光を調べる

惑星の姿を直接とらえる観測が難しいのは、明るい主星に対して惑星が暗いからです。太陽系を外からみて、地球の姿をとらえるのはとても難しいことです。これに対して、軽い星は太陽よりもずっと暗いため、惑星を検出するチャンスがひろがります。TMTは、太陽の数分の1の重さの星のまわりの地球型惑星の光を直接とらえる観測に挑みます。惑星の光の分析により、大気の組成を調べ、生命存在の可能性を探ります。

この観測のためには、超高解像度を可能にする補償光学(11ページ参照)を用いることに加え、主星の光を隠して周囲の惑星の姿を浮かび上がらせる特殊な観測装置が必要です。現在、日本の研究グループがその装置の検討を進めています。



惑星大気を透過してくる光を分光分析し、大気に生命に関連する物質を探ります。惑星が主星の前を通過する間に精度のよいデータをとるため、大望遠鏡が必須です。

●惑星大気の透過光を調べる

私たちからみて、惑星がちょうど主星の前を横切るような軌道をもっている場合には、星の光の一部が惑星のもつ大気を透過してくるようになります(上図)。この透過光の分析により、大気の組成を調べ、酸素や有機物のような生命に関連した物質の存在を探ることができます。この場合、惑星大気を透過してくる光だけを取り出すことはできないので、星の光全体を非常に高い精度で測定する必要があります。

2. 宇宙で最初の星と銀河に迫る

現在の宇宙では、銀河が群れをなし、「宇宙の大規模構造」とよばれる分布を示すことがわかっています。銀河やそれがありなす大規模構造は、宇宙誕生時にあった物質密度の濃淡がその種となって形づくられたと考えられるようになってきました。今、天文学者はその間の歴史の全貌を描き出し、観測で検証しようとしています。

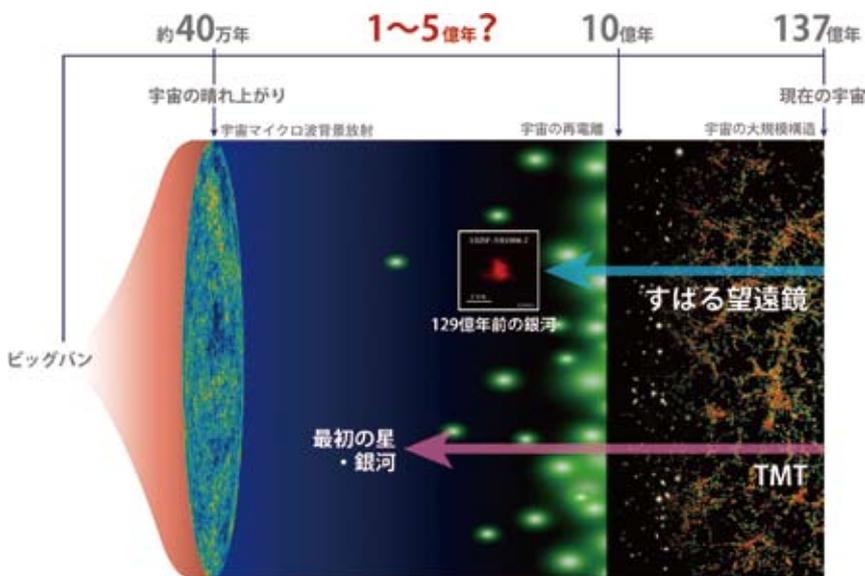
その鍵となるのが、「宇宙で最初の星と銀河がいつ、どの

ように誕生したのか」を解き明かすことです。すばる望遠鏡は、129億光年かなたの銀河の発見に成功しました(14ページ参照)。これは、宇宙誕生から約8億年の時点の銀河からの光をとらえたことになります。この時期は、まさに銀河が誕生し、成長を始めた時期にあたると考えられています。これより早い段階の銀河はより小さく、星の数も少なく、そしてより暗いと考えられます。TMTはこれらの天体を検出し、分光観測によってその正体を解明します。

それをとらえるには赤外線での高感度観測が必須です。誕生期の大量星は強い紫外線を放ちますが、130億光年以上の天体の場合、この紫外線が赤方偏移により、可視光をとびこえて赤外線で見られるようになるからです。

TMTの大きな鏡は、多くの光を集めることにより暗い天体の観測を可能にします。それに加え、赤外線では、宇宙空間の塵や地球大気の放射が背景光として目的天体の観測を邪魔します。補償光学(11ページ参照)を用いると、TMTでは超高解像度の赤外線観測が可能になり、背景光の影響を大幅に減らすことができます。これにより、高感度の赤外線観測が可能になります。

TMTでは、さらに初期の銀河をとらえ、そのなかでどのような星が形成されているのか解き明かすことをめざします。



すばる望遠鏡などがみつけた最遠の銀河よりもさらに遠い天体を調べ、ビッグバン後に最初に生まれた星や銀河に迫ります。

TMTを生み出す驚異のテクノロジー

TMTには口径30メートルを実現するためのさまざまな工夫が凝らされています。まずは492枚の鏡で構成される主鏡。そして、軽量・堅牢・コンパクトな架台やドームなど、TMTならではの新技術を紹介します。

● TMTの特色

TMTの最大の特色は、口径30メートルという、これまでの望遠鏡を大きく上回る巨大な主鏡にあります。

すばる望遠鏡（口径8.2メートル）の主鏡は一枚の鏡ですが、TMTは多数の鏡を組み合わせる分割鏡方式をとっています。それぞれの分割鏡は対角1.44メートルの六角形状で、これを492枚組み合わせます。

主鏡が大きくなるのと同様に望遠鏡本体やドームも大型になりますが、これを最小限にとどめるために、主鏡のF値（焦点距離／口径）が非常に小さくなるよう設計されています。ドームの高さは56メートルありますが、これはすばる望遠鏡ドーム（高さ43メートル）より一回り大きいサイズにとどまっています。望遠鏡本体も、軽量でかつ丈夫な構造になるよう、工夫がこらされています。

● TMT光学系の仕組み

天体からの光は主鏡で集められ、副鏡と第3鏡で反射されて望遠鏡の両側の「ナスミス台」に配置される観測装置のひとつに導かれます。望遠鏡頭頂部に置かれる副鏡は直径3.1メートルの凸面鏡で、主鏡と合わせて望遠鏡の光学系を構成します。第3鏡は平面鏡で、3.5メートル×2.5メートルの楕円形状をしており、一枚の鏡としてはTMTのなかで最も大きなものです。

観測装置の置かれるナスミス焦点では、望遠鏡が天体を追尾している間も天体像が同じ位置に届くため、大型の装置を置くのに適しています。TMTの装置はどれも非常に大型になるため、観測ごとに置き替えることが困難です。そのため、装置の配置は固定とし、第3鏡の向きを細かく制御することにより、観測に用いる装置の切り替えを行います。

● TMTの製作計画

主鏡分割鏡は、交換用の予備とあわせて500枚以上必要になります。これを約5年間で製作するため、量産のスピードが鍵になります。現在、鏡材の製作と表面加工作業を複数の国で分担して行う計画で、量産を見込んだ技術開発と実証が進められています。日本は鏡材の製作と一部の表面加工を分担する予定であり、本格建設に先立って、今年度、実際の製作を開始します。

日本は、最も大きな貢献として望遠鏡本体構造の製作を分担する予定です。軽量で丈夫な望遠鏡構造の製作に向け、設計と技術開発が進められています。

この他、副鏡、第3鏡、観測装置、ドームなどの製作が国際分担で行われます。それぞれの分担をしっかりと確かめながら、スケジュールどおり各部を製作して組み合わせることが、建設の鍵となります。

TMTの初期観測装置

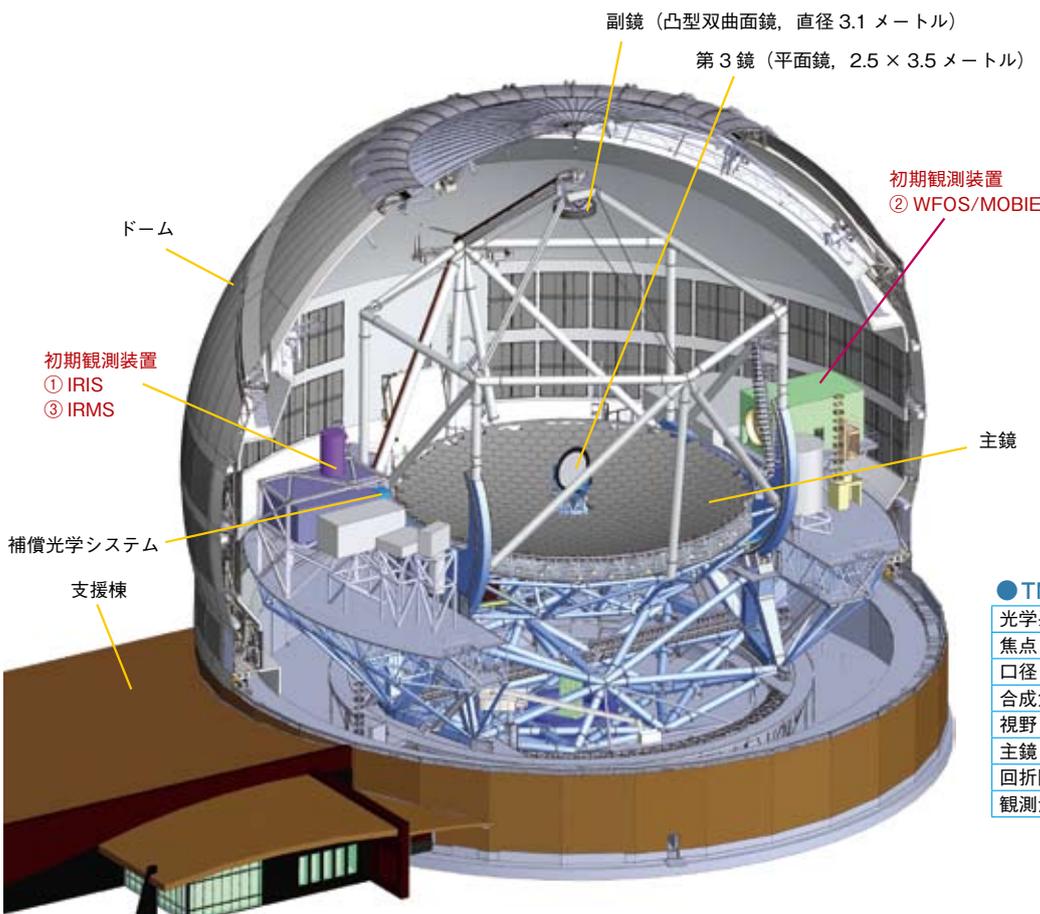
初期の観測装置として以下の3つが計画されています。

① **近赤外線撮像分光装置 (IRIS)**
波長0.8～2.4 μm の近赤外線の領域で補償光学（11ページ）により回折限界の解像度を実現し、撮像・面分光観測を行う装置。

② **広視野可視撮像分光装置 (WFOS/MOBIE)**
1 μm までの可視光の波長で、大望遠鏡としては広い視野（9.6分角×4.2分角）で多天体分光観測を行う装置。波長分解能は最大8000。

③ **近赤外多天体分光器 (IRMS)**
波長0.9～2.5 μm の近赤外線の領域で、約2分角の視野内で多天体分光観測を行う装置。波長分解能は最大約5000。

※初期観測装置に続いて、多彩な観測を実現するための装置が順次製作される予定です。



● TMTの諸元

光学系	リッチー・クレティエン式
焦点	変則ナスミス焦点
口径	30メートル (492枚の分割鏡)
合成焦点距離	450メートル
視野	15分角
主鏡F値	1
回折限界	8ミリ秒角 (波長1 μm)
観測波長	0.31～28 μm

驚異の492枚複合鏡！

●分割鏡による主鏡

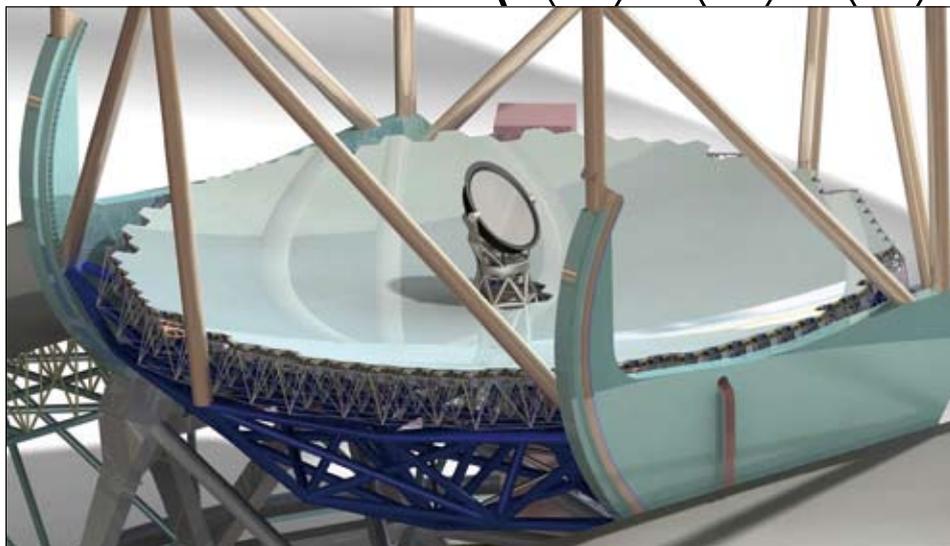
TMTは、多数の鏡を組み合わせて口径30メートルの主鏡を構成する分割鏡方式を採用しています。現在活躍している口径8～10メートルの望遠鏡に対して、飛躍的な大型化を図ることができるのは、分割鏡方式が大望遠鏡でも可能であることが実証されてきたからです。

TMTの分割鏡は、対角1.44メートルの六角形状をしており、これを492枚敷き詰めます。主鏡全体が放物面に近い双曲面になるように、それぞれの分割鏡の表面も非球面状に研磨加工されます。表面の研磨精度は可視光の波長の数十分の1程度（約10ナノメートル）にする必要があります。表面の形状が少しずつ違う82種類の分割鏡がそれぞれ6枚用いられます。これに交換用の1枚を加えて、それぞれの種類の鏡は7枚ずつ製作されます。

鏡の表面は薄い金属膜でコートされ、可視光から赤外線まで高い反射率をもつ鏡となります。望遠鏡運用時には、分割鏡の洗浄・再コートは交換用の鏡を利用して順次行われます。これにより、夜間観測を止めずに主鏡の保守を行うことができます。

分割鏡は裏側から中心1点とそれ以外の27点で支持されます。それぞれの分割鏡の形状はこの支持点にとりつけられたアクチュエータ（21個）で決定されます。また、分割鏡の位置は隣の分割鏡との間に設置される12個のセンサーと3つのアクチュエータを用いてリアルタイムで制御され、主鏡全体の形状が観測中つねに適切なものとなるように調整されます。

鏡の厚さは4.5センチメートルで、すばる望遠鏡の主鏡の厚さの4分の1以下です。このため、TMT主鏡の面積はす



望遠鏡に搭載された主鏡と第3鏡。492枚の六角形の分割鏡が敷き詰められています。分割鏡の位置と形状は、全体で主鏡として機能するように主鏡制御システムによって制御されます。第3鏡は観測に用いる装置に光が導かれるように、向きが調整されます。

直径 30 m ! TMTの主鏡

TMTの主鏡の構成概念図。この図の誌面上の大きさ（直径）がおおよそ30 cmなので、TMTの実物の主鏡の直径の大きさは、おおよそこの100倍、面積はおおよそ10,000倍となります。1~82の扇形の82枚が、それぞれ表面形状の異なる分割鏡で構成される1セットで、これを6セット組み合わせて1枚の主鏡となります。

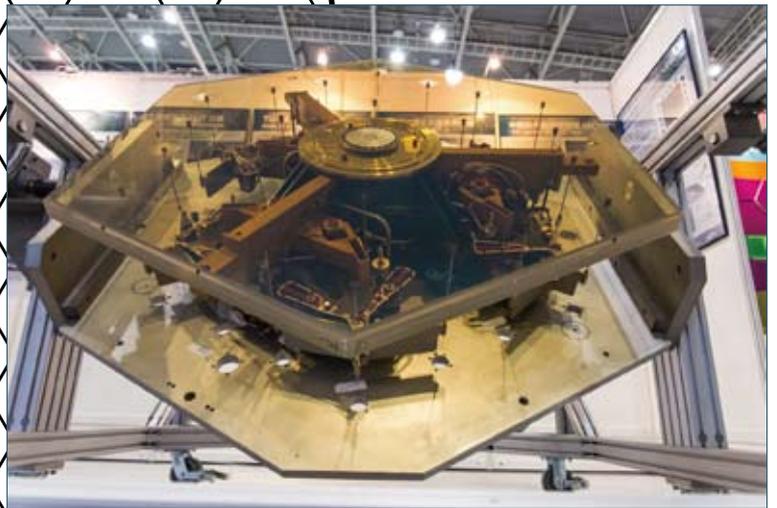
ばる望遠鏡の主鏡の約13倍になりますが、重さは4倍程度にとどまります。これは望遠鏡全体の軽量化にも大きく貢献しています。

●鏡の製作

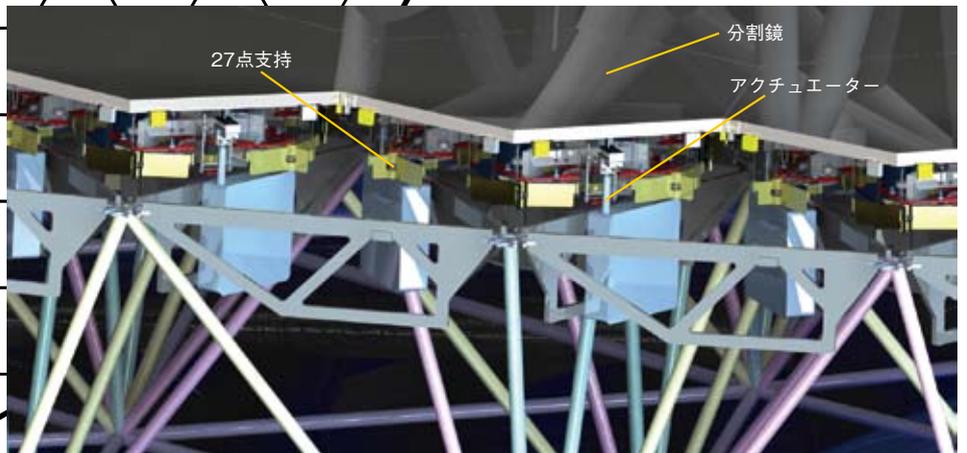
交換用のものを含めると、分割鏡は574枚必要となります。これを建設期間中に製作するには、年間約100枚という量産ペースが必要です。

観測中に気温が変化しても鏡の形状が影響を受けないように、鏡材としてはゼロ膨張ガラス材が用いられます。鏡材の製作は日本が分担する予定であり、今年度、実際に量産を開始します。表面加工（研削・研磨）工程の技術実証も進んでおり、日本では今年度から一部加工が行われます。

TMT計画全体としては、表面加工は各国の分担で行う予定であり、その製作工程の検討と技術実証が進んでいます。



昨年度日本で試作された主鏡分割鏡。実際に表面加工が行われたもので、測定のために鏡の支持機構（これは米国で製作された試作品）に搭載されています。この表面に金属膜のコートが施され、反射率の高い鏡となります（14ページも参照）／撮影：長山省吾。



主鏡分割鏡と支持機構。鏡の厚さは4.5 cm。分割鏡の位置は12個のセンサーと3つのアクチュエーターを用いてリアルタイムで制御されます。

●TMTの構造

天体からの光を集める主鏡とならんで、望遠鏡本体構造も観測性能を出す上で極めて重要です。TMT建設に向けた重要課題のひとつは、いかに軽量・コンパクトな望遠鏡にするか、という点です。

従来の望遠鏡構造を踏襲したのでは、主鏡が大型化するとつれて本体構造も大きくなってしまいます。TMT主鏡の直径はすばる望遠鏡の約3.6倍あります。望遠鏡構造もそれに比例して大型化すると、体積では約50倍にもなってしまいます。また、望遠鏡を覆うドーム構造もそれだけ大きくなってしまいます。

これを最小限にとどめるため、主鏡のF値（焦点距離／口径）が1となる光学系を用いています。これはすばる望遠鏡の場合の半分、それだけTMT主鏡は深い凹面となります。

サイズとともに重量を低く抑えることも重要です。TMT主鏡の面積はすばる望遠鏡の約13倍になりますが、重量は

約4倍におさまります（9ページ参照）。本体構造も軽量化が図られており、現在の設計では、水平方向に動く構造部分が2000トン余となります。これはすばる望遠鏡（550トン）の約4倍になります（なお、すばる望遠鏡は主焦点を用いるために、本体構造が強化されており、大型望遠鏡の中では比較的重くなっています。分割鏡方式で口径10メートルのケック（Keck）望遠鏡の重量は約300トンです）。

このほか、本体構造には、分割鏡の洗浄・再コートのための交換機構など、さまざまな仕組みが含まれます。

また、望遠鏡の耐震性も課題です。ハワイ諸島は大地震の少ない地域にありますが、大型精密機械である望遠鏡には地震は脅威となります。

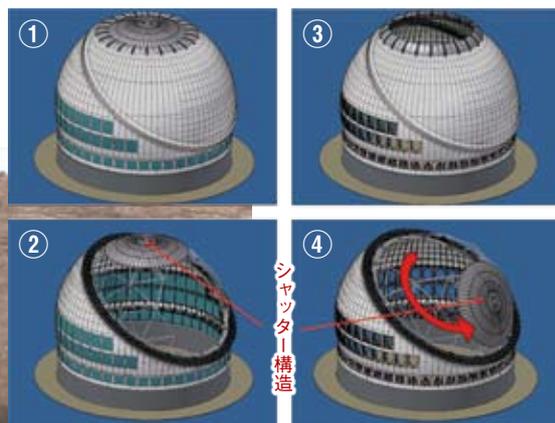
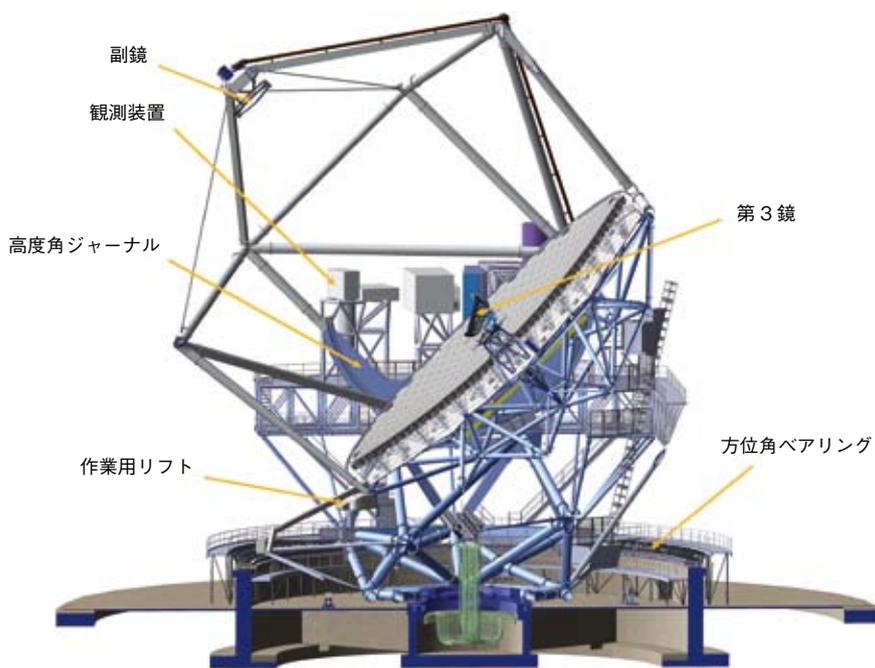
望遠鏡本体構造の設計・製作は日本の分担となる予定であり、今年度、基本設計や技術開発が行われます。

●斬新なドーム構造

望遠鏡を守り、観測環境を制御する望遠鏡ドームもできるだけコンパクトになるように工夫されています。

特に、望遠鏡に対する風の影響を最小限におさえることが重要であり、そのために直径30メートル余の円形のシャッターが開閉する構造になっています。ドーム全体の水平回転と、シャッターを含む帽子型構造の斜め方向への回転を組み合わせて、望遠鏡が向く方向だけが開く仕組みになります。

TMTの本体構造。TMTは水平方向と高度方向に駆動する経緯台式望遠鏡で、主鏡、副鏡、第3鏡でつくられる焦点で観測を行います。水平回転で動く部分は2000トン余となる見込み。スムーズな駆動により天体に望遠鏡を向け、追尾する性能が必要になります。



ドームは固定台構造（下の茶色の部分）と、水平方向に回転する基部構造、斜めに回転する帽子型構造、円形のシャッター構造から成ります。①は非観測時の状態（②は帽子型構造を透視したようす）。観測時には円形のシャッターが回転して開き（③）、基部構造と帽子型構造の回転により開口部が望遠鏡の向きに合うように制御されます（④）。

TMTの能力を極限まで引き出す補償光学

巨大な主鏡を活かして高解像度の観測を行うためには、大気ゆらぎを補正する補償光学技術が不可欠です。すばる望遠鏡でも実用化されている補償光学技術が、TMTで、さらにどのように進化するのか紹介します。

●補償光学による驚異の解像度

望遠鏡の解像度は、口径が大きいほど高くなります。しかし、地上望遠鏡による観測では、大気ゆらぎにより星像が乱されてしまい、大望遠鏡の場合はそのままでは最大限の性能（回折限界）での観測ができません。

巨大な主鏡を活かした高解像度観測のためには、大気ゆらぎの影響を補正する補償光学技術が不可欠です。補償光学はすでにすばる望遠鏡でも実用化されていますが、口径の大きなTMTで実現するには、従来にない高い技術が必要とされます。

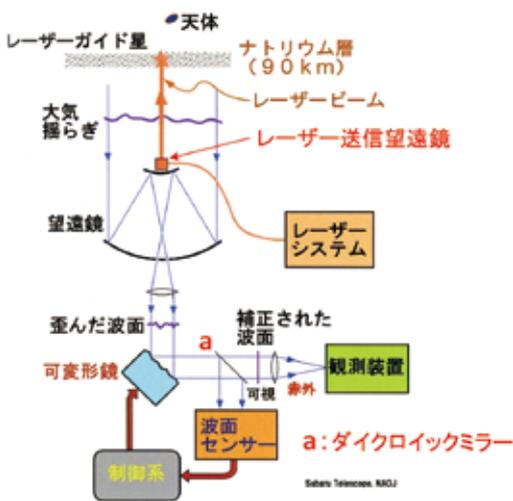
TMTで補償光学を用いると、近赤外線観測の解像度は約

0.01秒角（1度角の36万分の1）となります。これはハッブル宇宙望遠鏡の10倍以上、すばる望遠鏡の4倍以上になります。解像度が高まると、天体観測を妨げる背景光（地球大気からの赤外線放射など）の影響を抑えることができるので、より暗い天体の検出も可能になります。

TMTには、レーザーで大気中のナトリウム層を照射して人工のガイド星（参照星）を生成する装置が搭載されます。これにより、近赤外線観測では補償光学を多くの場合に使用することが可能になります。また、複数のガイド星を用いて、比較的広い視野にわたって高精度の補正を行う補償光学装置の製作が進められています。

補償光学の仕組み

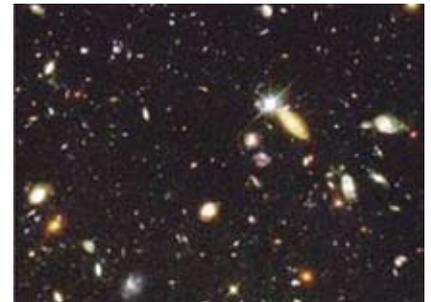
地球の大気には温度むらがあり、それがもとになって屈折率も一様ではなくなります。天体からの光は、大気の外までは平面波としてやってきますが、これが大気中で乱され、星像の乱れ（ぼやけ）を生みます。望遠鏡で集められた光を、表面形状を変化させることのできる鏡（可変形鏡）で反射されることにより、波面の乱れをリアルタイムで補正します。波面の乱れのような、目的天体の近くにあるガイド星（参照星）を用いて測定します。大気ゆらぎは時々刻々変化するため、波面の測定と可変形鏡による補正は毎秒1000回という速さで行われます。



光を集める主鏡が大きくなるほど、そこに入ってくる天体からの光が大気の広い範囲を通過することになります。そのため、可変形鏡による補正も細かく行わなければなりません。

また、目的天体のすぐ近くにガイド星があるとは限りません。どの天域でも高精度の波面補正を可能にするために、望遠鏡からレーザーを照射して上空約90キロメートルにある大気中のナトリウム層を光らせ、人工のガイド星を作り出します。

補償光学の概念図。天体からの光の波面は大気中で乱されるが、可変形鏡でそれが補正されたうえで観測装置に入る。レーザーガイド星の光を波面センサーで測定することにより波面の乱れが測られ、可変形鏡に補正のための情報が送られる。



ハッブル宇宙望遠鏡



TMT



（左）TMTからのレーザー照射のイメージ。レーザーによって上空約90キロメートルのナトリウム層が照らされ、人工のガイド星が作られる。

（上）ハッブル宇宙望遠鏡（HST）の解像度と、補償光学を用いた場合のTMTの解像度を比較するシミュレーション画像。望遠鏡の最大性能（回折限界）が口径に比例するため、TMTのほうがずっと高い解像度の観測が可能になる（上段のHSTが撮像した銀河団画像から、銀河のひとつを拡大したイメージ画像が中段のもの。それをTMTで観測すると格段にシャープに見えることがわかる）。



TMTは巨大な国際科学協力プロジェクト

TMTは、日本、米国、カナダ、中国、インドの5か国による国際協力で進められています。本格的な観測を開始したアルマ望遠鏡に続いて、今後、国立天文台が総力を挙げて取り組む国際科学協力プロジェクトです。

●国際協力でハワイに建設

TMT計画は、日本、米国、カナダ、中国、インドの5か国による国際協力で進められています。米国では、カリフォルニア大学とカリフォルニア工科大学がカナダとともにTMT観測所公社を設立して建設準備を推進してきましたが、今年新たにイェール大学が参加の意向を表明しました。全米科学財団（NSF）も建設後期と運用段階での参加が期待されており、今年からTMTに連携計画資金の助成を行うことになりました。今後はこれにもとづいてNSFとTMTの国際パートナーが協議を行っていきます。

建設地は、すばる望遠鏡も設置されているハワイ島・マウナケア山です。マウナケア山頂域は、天候が安定し、星像がシャープで、赤外線観測条件もよいことで知られており、すばる望遠鏡のほかにもケック（Keck）望遠鏡やジェミニ（GEMINI）望遠鏡などの大型望遠鏡が建ち並んでいます。TMTはすばる望遠鏡から1キロメートルほどはなれた場所（標高4050メートル）での建設が予定されています。TMTは、ハワイ大学を通じて、望遠鏡建設用地としてハワイ州に保護地区利用許可の申請を行っていましたが、2013年4月にハワイ州土地天然資源評議会から建設許可が出されました。これは州としての最終的な建設許可に相当するもので、今後いよいよ詳細な地盤調査などに入ります。

TMTの運用主体となる「TMT国際天文台」の本部はハワイ島ヒロ市におかれます。本部の場所はすばる望遠鏡の山麓

施設のすぐ近くが予定されています。

2014年度の建設開始に向け、現在、国際パートナー間の合意契約書の準備が進んでいます。予定では来年、合意契約書が締結され、本格的な建設が始まります。観測開始予定は2022年度です。建設経費は約1500億円の見込みです。

●日本の役割分担

日本は国際パートナーの一員として、建設経費の約4分の1を担うことを目標に国立天文台が計画を進めています。

望遠鏡建設において、日本は望遠鏡本体構造と主鏡分割鏡の製作という重要な部分を担う予定です。主鏡の製作については、昨年度までに進めてきた鏡材や表面加工についての技術開発と工程の検討をふまえて、今年度、一部製作を始めます。鏡材は全体の約1割にあたる60枚を製作する予定です。また、表面加工の最初の段階としての研削加工を10枚余について行います。また、望遠鏡本体構造にむけ、軽量で丈夫な望遠鏡システムの検討や要素技術の開発・実証を進めます。

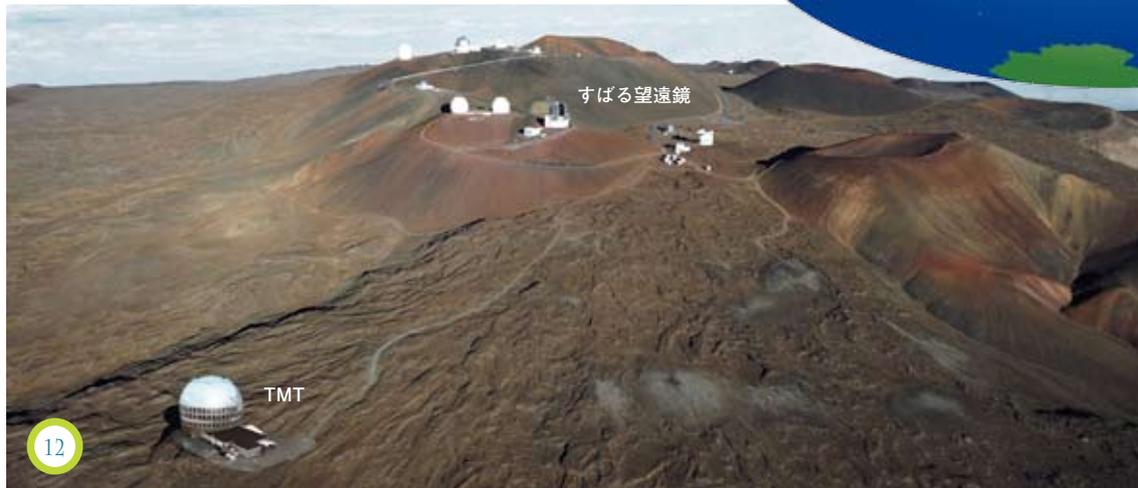
また、実際にデータを取得する観測装置の製作も担当します。初期観測装置（第1期観測装置）として予定されているもののうち、近赤外線撮像分光装置（IRIS）の撮像部については日本が担当することが決まっており、設計・技術開発が進んでいます。そのほか、広視野可視撮像分光装置（WFOS）の一部を分担することも検討しています。また、第2期以降の観測装置のいくつかは日本が主導して製作することをめざし、要素技術の検討などが進んでいます。

TMT以外の超大型望遠鏡計画

TMT以外にも、2020年代の完成をめざして2つの超大型望遠鏡が計画されています。

一つはヨーロッパ諸国が構成するヨーロッパ南天文台（ESO）が進めているE-ELT（European Extremely Large Telescope）計画で、TMTと同じく六角形状の分割鏡方式を採用しています。完成すれば口径39メートルという、TMTをしのぐ大きさとなる野心的な計画で、南米・チリに建設予定です。もう一つは、米国の複数大学とオーストラリア、韓国の協力で進められているGMT（Giant Magellan Telescope）計画で、直径8.4メートルの鏡を7枚用いる望遠鏡です。建設地は南米・チリです。

TMTは北半球に設置されるため、これら2つの望遠鏡と観測する天域を補い合う関係になります。



（上）TMT計画を進めている5か国と建設地・ハワイ。
（左）ハワイ島マウナケア山頂のTMT（完成予想図）と各国の大望遠鏡。



TMT
THIRTY METER TELESCOPE

TMTと「すばる」の連携観測

TMTが建設されるマウナケア山頂は、「すばる」をはじめ多くの天文台が立ち並ぶ天文学のメッカ。同じ地で「すばる」の強みである広視野観測と組み合わせれば、双方の能力をフルに引き出す連携観測が実現します。

2020年代にTMTが登場すると、マウナケア山の観測所も大きく変わると予想されます。これまで8～10メートル級望遠鏡が担ってきた最も暗い天体の観測や、最も高い解像度での観測はTMTに引き継がれ、発展します。そのなかで、8～10メートル望遠鏡はそれぞれ特色を活かした観測に力を集中していくことになります。また、望遠鏡運用もより緊密な国際協力を進める方向に向かっていきます。

● TMTとすばる望遠鏡

すばる望遠鏡はこれまで、大型望遠鏡のなかでは抜群に広い視野をもつ望遠鏡として活躍してきました。これを可能にしたのが主焦点に搭載された観測装置です。すばる望遠鏡は現在、さらに視野の広い新主焦点カメラ（Hyper Suprime-Cam：HSC）の搭載を進めており、これにより広い天域を探索する能力が飛躍的に高まります。

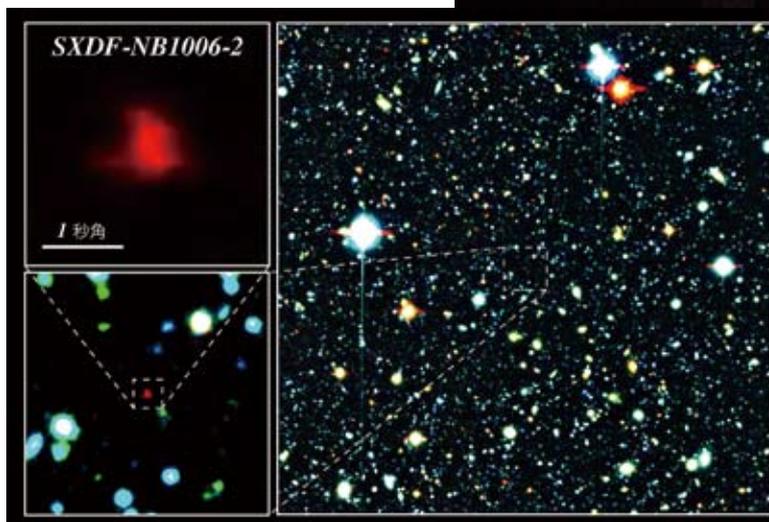
すばる望遠鏡の広視野観測能力は、TMTによる研究を進めるうえで重要な武器になります。例えば、すばる望遠鏡に

よる探査で最遠方銀河の候補天体のような興味深い天体を見つけ出し、TMTによる観測でその性質を詳しく調べるといったような研究が可能になります。

● TMTとそれ以外の望遠鏡の運用

TMTでは、建設経費の支出に応じて各国が運用費を負担し、それにもとづいて観測時間が配分される予定です。日本はすばる望遠鏡と連携してTMTによる観測研究を推進し、世界の天文学をリードすることをめざします。これに向け、日本では約100人の研究者が参加してTMTでの観測計画の検討が行われています。また、TMT科学諮問委員会をはじめ科学研究に関する国際的な協議にも積極的に参加し、議論をリードしています。

望遠鏡運用を担うTMT国際天文台は、すばる望遠鏡山麓施設のあるハワイ島ヒロ市におかれます。この地の利を活かし、日本は望遠鏡運用でも大きな貢献を行うことをめざします。



(上) すばる望遠鏡の主焦点カメラによる深宇宙画像。129億光年彼方の銀河をとらえています。このような暗い銀河の詳細な分光観測がTMTによる重要な研究テーマのひとつです。

(右) 新主焦点カメラ（HSC）を搭載したすばる望遠鏡。望遠鏡頭頂部にカメラが搭載されています。その上に見えるのはプレアデス星団。

宇宙・天文光学 EXPO 前日準備取材記

長山省吾 (天文情報センター) [取材協力: 宮下隆明 (TMT 推進室)]

光学機器メーカー各社が出展するビジネス向けの展示イベント「OPIE'13」が、2013年4月24日(水)から26日(金)の日程で開催されました。複数分野の展示会で構成されているOPIEに、今年から新たに追加された「宇宙・天文光学 EXPO」に国立天文台も加わり、TMT推進室とひので科学プロジェクトが出展しました。

TMTの主鏡分割鏡の試作品が出展されると聞きつけ、イベント前日の準備中に広報用素材の撮影と取材を行ってきました。準備で忙しいなか、暖かく迎えてくれたTMT推進室の方々には、感謝の気持ちでいっぱいでした。また天文情報センターの情報収集能力の高さも発揮することができました。

国立天文台ブースの広さはおよそ36m²ほどあり、他の企業ブースと比較しても広い方でした。主な展示内容は、TMT主鏡分割鏡の試作品、TMT計画の解説パネル、TMTの観測装置IRISほかの解説パネル、太陽観測衛星「ひので」の主鏡のバックアップ鏡、「ひので」の解説パネル・映像等と多彩なラインナップでした。ビデオ一つを設置しただけのちょっと寂しげな某航空宇宙機関ブースと比べて、チカラの入った展示だったと思います。

●主催者オプトロニクス社による取材

準備が終わりそうな頃、主催者のオプトロニクス社の記者が国立天文台ブース



TMTと「ひので」の展示。



へ取材に来ていました。事前にアポイントメントはありませんでした。準備中の各ブースを見て周り、良さそうな取材対象を探していた様子でした。他のブースにはない異色の出展が記者の興味を惹いたようです。宮下主任研究技師がTMT計画と試作鏡について説明している動画がYouTubeで公開されていますので、ご覧ください(★01)。

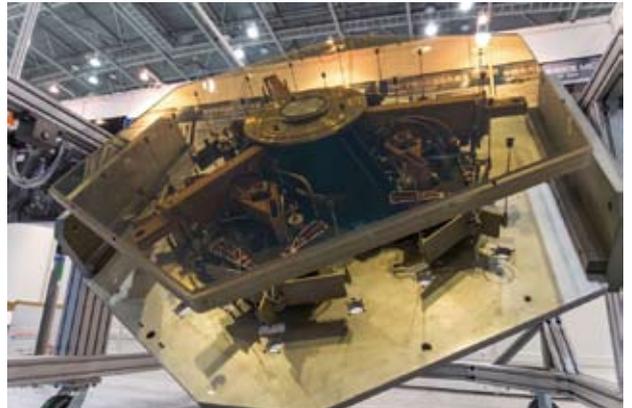
●解説動画を制作!

オプトロニクス社の取材と同様に、われわれも宮下主任研究技師による解説をお願いして撮影を行いました。同氏によるリアリティのある即興解説をYouTubeの国立天文台チャンネルで公開していますので、ぜひご覧ください(★02)。

●大盛況で終わった出展

私が取材したのはイベントの本番前日のみなので、当日の様子はわかりませんが、それではこの原稿が締まらないので、後日、宮下主任研究技師から聞いた話を紹介してこの報告を終わりたいと思います。イベント当日、多くの来場者が国立天文台ブースを訪れ、その盛況ぶりは昼食をとる暇がないほどで、嬉しい悲鳴だったとのこと。特に展示の分割鏡が多く人の目につき、足を止めてくれたそうです。やはり実物展示のインパクトは大きいようです。ビジネス向けイベントだったため比較的専門的な質問が多く、一般向け公開とは一味違った楽しさがあったそうです。

また、「宇宙・天文」という名前に惹かれて来られた一般の方も多く、たくさんの応援のお言葉も頂いたようです。3日間の展示会全体で、昨年までは1万人程度だった来場者が今年は1万2000人を超え、「宇宙・天文」の効果が大き



主鏡分割鏡の試作品。保持機構(アクチュエーター)付きのセグメントミラーで、このような分割鏡を492枚並べて、直径30mの1枚の鏡として機能させる。日本は鏡製作の一部を担当する(9ページ参照)。

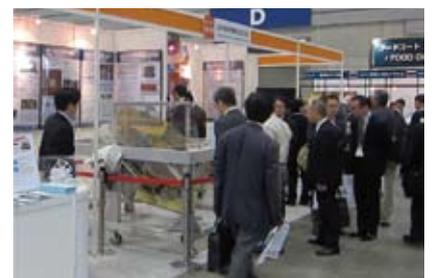


セグメントミラーの保持機構：複数枚並べた鏡面の位置をナノメートルオーダーで制御を行い、492枚が理想的な回駆双曲面になるようにする。

かったとも言われています。多くの方にTMT計画を広報する良い機会になったとのことでした。



分割鏡試作品の前で解説する宮下主任研究技師



当日の国立天文台ブースの賑わいのようす。

● 年俸制職員

発令年月日	氏名	異動用語	異動後の所属・職名等	異動前の所属・職名等
平成 25 年 3 月 31 日	武田隆顕	任期満了		理論研究部特任助教 (天文シミュレーションプロジェクト)
平成 25 年 4 月 1 日	石川遼子	採用	ひので科学プロジェクト特任助教 (国立天文台フェロー)	
平成 25 年 4 月 1 日	田中賢幸	採用	ハワイ観測所特任助教 (三鷹) (国立天文台フェロー)	
平成 25 年 4 月 1 日	新永浩子	採用	チリ観測所特任准教授 (三鷹)	
平成 25 年 4 月 1 日	永井 洋	採用	チリ観測所特任助教 (三鷹)	
平成 25 年 4 月 1 日	秋山永治	採用	チリ観測所特任助教 (三鷹)	
平成 25 年 4 月 1 日	永山 匠	採用	水沢 VLBI 観測所特任研究員 (三鷹)	
平成 25 年 4 月 1 日	竹腰達哉	採用	野辺山宇宙電波観測所特任研究員	
平成 25 年 4 月 1 日	三浦理絵	採用	チリ観測所特任研究員 (三鷹)	
平成 25 年 4 月 1 日	吉田鉄生	採用	天文データセンター特任研究員	
平成 25 年 4 月 1 日	山口正輝	採用	JASMINE 検討室特任研究員	
平成 25 年 4 月 1 日	西塚直人	採用	ひので科学プロジェクト特任研究員	
平成 25 年 4 月 1 日	黒野泰隆	採用	チリ観測所特任研究員	
平成 25 年 4 月 1 日	山口隆弘	兼務命	(兼) チリ観測所事務部会計係長	

NEW STAFF ニュースタッフ

● 研究教育職員



亀野誠二 (かめの せいじ)

所属：電波研究部 (チリ観測所)

出身地：神奈川県

3月1日付けでチリ観測所に着任しました亀野誠二です。7年ぶりに国立天文台に戻ってきました。前任の鹿児島大学では学生と共に学ぶ教育・研究に取り組んでいましたが、チリ観測所ではALMAのシステム検証という工学寄りの仕事を担当します。外国に住み、スペイン語圏で生活し、多様な文化的背景を持つ仲間と協力してALMAという巨大装置に魂を込めるといのは大きな挑戦で、やりがいを感じます。皆様の厚いご支援で何とか始動できました。このような機会を得られたことに感謝し、まずはALMAの生産性向上に努め、ゆくゆくはVLBI並の分解能で熱的宇宙が見られるよう頑張ります。



奥田武志 (おくだ たけし)

所属：電波研究部(チリ観測所・三鷹)

出身地：栃木県

3月1日付けでチリ観測所ASTE望遠鏡マネージャとして着任しました奥田武志です。主に活動銀河核の進化と星間ガスの関係に興味を持ち、早期型銀河や電波銀河のミリ波帯観測を中心に研究を行っています。国立天文台には大学院生から研究員の間にお世話になり、ASTE望遠鏡広帯域分光計及びACA相関器の開発に携わりました。前職の名古屋大学では、4年間ほど南米チリにあるNANTEN2望遠鏡の運用、観測装置及びソフトウェア開発を行ってきました。これまでの私の経験を生かしてASTE望遠鏡を世界的なサブミリ波天文学の重要拠点となるように様々な点において整備し、さらなる充実を図っていきたくと考えております。

編集後記

研究会で核融合研に行ってきました。最寄り駅からのバスの便がめっちゃ少ないです。行かれる方は事前にご調査をお勧めします。(O)

アルマのふたつの大きな式典が終わって、次へ。科学成果がどんどん出てきてこれはこれでうれしい悲鳴。(h)

火曜日は2限に大岡山、3限に本郷で講義です。昼食は移動の南北線にて。けっこうすごいかも!?(e)

ペランダできゅうりとトマトを育てています。日々成長する姿にとっても感心してしまいます。それに引き換え人間の成長の遅いこと。(K)

春過ぎてと、思う間もなく30℃。夏の暑さは日本列島の南北の長さに関係ないようだ、昨年は思いました。今年も既に感じています。(J)

出張時の羽田空港からスカイツリーをバックにした夜景写真を撮ろうとアングルを探していたのですが、東京タワーは見えるもののスカイツリーは見え。霞んでいるようで、かすかにあそこら辺にありそうな……というものが見えたものの写真には写らずでした。梅雨時期の湿気恐るべし。(κ)

「梅雨空に 赤く輝く 春の月」 それにしても蒸し暑い……。 (W)

国立天文台ニュース

NAOJ NEWS

No.239 2013.06

ISSN 0915-8863

© 2013 NAOJ

(本誌記事の無断転載・放送を禁じます)

国立天文台ニュース編集委員会

●編集委員：渡部潤一(委員長・副台長) / 小宮山 裕(ハワイ観測所) / 寺家孝明(水沢VLBI観測所) / 勝川行雄(ひので科学プロジェクト) / 平松正顕(チリ観測所) / 小久保英一郎(理論研究部) / 岡田則夫(先端技術センター) ●編集：天文情報センター出版室(高田裕行/福島英雄/岩城邦典) ●デザイン：久保麻紀(天文情報センター)

★国立天文台ニュースに関するお問い合わせは、上記の電話あるいはFAXでお願いいたします。
なお、国立天文台ニュースは、http://www.nao.ac.jp/naojnews/recent_issue.htmlでもご覧いただけます。

7月号の研究トピックスは「宇宙空間に漂うサッカーボール・C₆₀ フラーレン」をお届けします。祝! 日本代表、ワールドカップ本大会出場決定!

次号予告

れいけんこうぼ
『靈憲侯簿』

堀 真弓 (天文情報センター)

アーカイブ・メモ

品名：靈憲候簿
 巻数：99冊
 製作：天保九年（1838）～弘化三年（1847）
 （書写本） 渋川景佑編

所在地：国立天文台三鷹地区
 公開状況：非公開。図書室ホームページの貴重資料「和漢書目録」からデジタル画像が閲覧できます。
<http://library.nao.ac.jp/kichou/archive/0500/kmview.html>

幕府天文方の渋川景佑は天保九年（1838）10月8日に幕府から天文観測の命を受け、天保九年11月（1838）から安政元年12月（1855）の間、小石川三百坂下、九段坂などで観測を続けた。この観測記録が『靈憲候簿』である。清書された献上本201冊は内閣文庫が所蔵しており、国立天文台で所蔵しているものは、天文方の控本の前半部分、天保九年（1838）から弘化三年末（1847）までの99冊になる。

それまでも改暦の前後には暦法（暦の計算方法）が合っているかを確認するために観測が行われていたが、これはそれらのような一時的なものとは異なり、長期にわたる定常観測であった。

1ヵ月分の観測がそれぞれ1冊にまとめられており、用いた観測機器と、観測の担当者が記されている。

太陽、月、五星（水星、金星、火星、木星、土星）、恒星、日月食などが観測されている。

また、気象観測も併せて行われた。天体からの光が地球の大気で屈折を起こす現象である大気差（清濛気差）の値が温度や気圧によって変化するため、これを補正するためにデータを取ったものと思われる。

天気、風、温度、気圧を観測しており、1日3回、朝、正午、夕方に寒暖儀や晴雨儀などを用いて測驗された。日本人による温度、気圧の連続した観測記録としては現存するものでは大阪の間重新の観測記録に次いで古く、また江戸では最古であり、気象学においても重要な資料である。

17年にわたる勤勉な観測記録であるが、天文方がこの観測結果を暦法等に利用したかは不明である。「靈憲候簿」に記された最後の観測年の十余年後、明治維新を迎えて天文方は廃止された。

同時代の日本人による気象観測記録に、「未加精之測驗」、「加精密之測驗」、「愈加精密之測驗」（いずれも大阪歴史博物館所蔵）がある。文政十年（1827）、高橋景保が清濛気差の観測のための機器を間重新に貸出してくれるよう幕府に申し願ひ、同年に間重新に天気儀（気圧計）と気候儀（温度計）が貸出され、これによって文政十年（1827）から天保四年（1833）まで大阪で観測されたデータである。高橋景保は高橋至時の息子で渋川景佑の兄。間重新は間重富の息子。高橋至時と間重富は麻田学派の天文暦学者であり、共に寛政の改暦に携わった。



図1 靈憲とは宇宙の根本原理のこと。「昔在先王、將軍歩天路、用定靈軌、尋緒本元。先準之于渾体、是為正儀立度、而皇極有迫建也、樞運有迫稽也。乃建乃稽、斯經天常。聖人無心、因茲以生心、故靈憲作興。」（『靈憲』張衡著）。候は気候、氣象。



図2 天保十四年2月11日。記述されている彗星は1843年の「3月の大彗星（C/1843 D1）」と思われる。

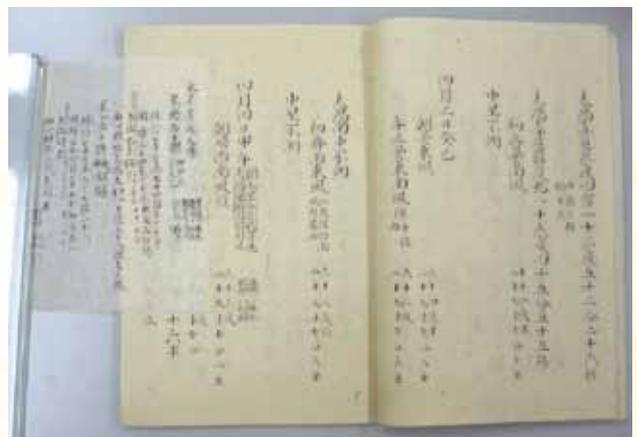


図3 弘化二年（1845）4月4日。水星日面經過の観測。



★国立天文台図書室ホームページ「貴重資料展示室」では、所蔵する貴重な古書を紹介しています。
<http://library.nao.ac.jp/kichou/open/index.html>