

TMT 望遠鏡の構造と建設計画

白田 知史

〈国立天文台TMT推進室 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉

e-mail: usuda@naoj.org



TMT望遠鏡は方位角構造と高度角構造からなる経緯台方式です。日本はすばる望遠鏡やアルマ望遠鏡を製作し建設した実績を国際的に高く評価され、望遠鏡本体構造、架台制御システム、主鏡セグメント鏡交換装置などを担当することになりました。2012年度から開始した基本検討／基本設計に合格し、2014年度から2年間の詳細設計を開始し、2015年度から始まる望遠鏡の製造に向けた準備を進めています。すばる望遠鏡より重量で約4倍、高さで約3倍の超大型望遠鏡をハワイ島のマウナケア山頂に、たった2年間で組み立てるための準備計画も進められています。TMT望遠鏡の本体の特徴および山頂での建設計画について、紹介します。

1. TMT 望遠鏡システム

1.1 望遠鏡本体構造の役割分担推移

すばる望遠鏡の優れた性能が世界的に示された結果、超大型望遠鏡本体を製作し建設するための日本の実績は非常に高く評価されています。2006年から2009年にかけて、日本がTMT計画への合流を検討し、決定した時点では、カナダが望遠鏡本体構造を担当する予定でした。しかし、2011年に行われた役割分担の見直しの結果、カナダはドームと波面補償光学装置（NFIRAOS）を担当することになり、日本が望遠鏡本体構造および架台制御システムを担当することになり、すばる望遠鏡の製造・据付請負企業と協議を開始しました。

2011年度からまずは概念設計の検討を開始しました。この検討は、2010年までにカナダによってなされた既存の概念設計からスタートするのではなく、要求仕様を満たすために、すばる望遠鏡設計の実績を元に構成し直すというスタンスで始めました。図1はカナダの概念設計（左）と日本の最初の概念設計（右）です。日本の検討結果がすばる望遠鏡によく似ていることがわかんると思

ます。しかし、望遠鏡の筒頂部の重量が大きくなる点やトラス構造が弱いなどの問題点がすぐに判明し、1年間の検討の結果、カナダの概念設計をベースとして改良していく方針で固まりました。

カナダの概念設計には、地震に対する望遠鏡本体の強度不足や望遠鏡の性能に致命的な欠陥があることが指摘されていました。そこで、2012年からの基本検討として、問題点の解決と、より優れた設計にするための作業を開始しました。この検討ではコストや工程などを考慮した具体的な最適化の段階に入るとともに、望遠鏡本体とインターフェイスをもつ、ドーム、山頂施設、観測装置、

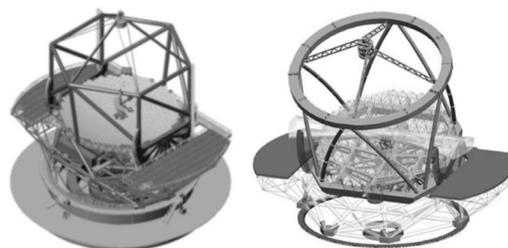


図1 望遠鏡本体の概念設計。(左)カナダの2008年の概念設計、(右)日本の2011年の初期の概念設計。

運用に向けた設計項目などについて、明確にする作業が必要でした。望遠鏡本体構造は有限要素解析を行って、通常の運用時だけでなく、大規模な地震時の場合も含めて最適化されています。日本は地震国ですので世界最先端の免震技術をもっていると言っても過言ではありません。最先端の免震技術を導入することによって、1,000年に一度の規模の地震（震度7以上）でも壊れない望遠鏡の構造を設計することができました。2013年11月12-14日と2014年4月15-16日に行われた望遠鏡本体構造および制御系の国際基本設計審査会では、世界各国の有識者として、ESO/E-ELT, NRAO/ALMA, CFHT, 国立天文台のチリ観測所／ハワイ観測所およびTMTプロジェクト本部に所属するメンバーを招聘し構成された審査委員会に対して、3,000ページを超える英語資料の作成と説明を行うことにより、無事に設計審査に合格することができました。現在は、2年間の詳細設計の段階に入っています。

1.2 望遠鏡本体システム

次に望遠鏡本体システムについて説明します。図2で、マウナケア山頂に建設されるTMT望遠鏡の山頂施設の主な構成物を示します。順番に簡単に紹介します。

ドーム

ドームは斬新な帽子型の設計（図3参照）になっています。この形状によって風による望遠鏡の揺

れを最小限に抑えるだけでなく、コンパクトな構造のためコスト削減にも貢献しています。ドーム全体は直径66 m、高さ56 mの大きさがあり、地面に固定された基礎（固定基礎構造）の上に三つの可動する機構：(1) 方位角方向に回転する機構（基礎部構造）、(2) 望遠鏡の高度角と同期して動く機構（帽子型構造）、(3) コンタクトレンズのような形状をしているシャッター構造で構成されています。地面から約8 mの高さの位置でドームが回転します。これに対し、帽子型構造は地面に対して32.5度傾いて回転します。方位角の回転と傾いた帽子型の回転の組み合わせによって、ドーム開口部をどの方向にも向けることができます。ドーム開口部は、帽子型構造とほぼ同じ回転面上でシャッター構造が独立して回転することによって開閉されます（図4）。ドームは、シャッターと通気口を閉めることで雨、雪、氷、塵や強い風などから内部の望遠鏡や観測装置などを守ることができます。

ドームの床には、交換用の主鏡セグメント鏡を保管する収納庫や、運搬台車用の足場、副鏡や第三鏡の蒸着設備、日中のドーム内温度調整のための空調設備など、日常的な運用保守に必要な設備が配備されています。

望遠鏡本体構造

望遠鏡は方位角構造と高度角構造からなる経緯台方式です（図5参照）。

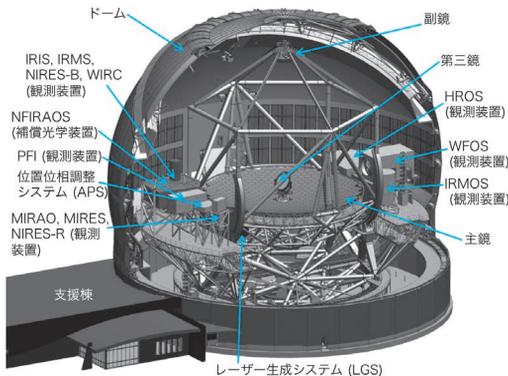


図2 TMT望遠鏡山頂施設概観図。

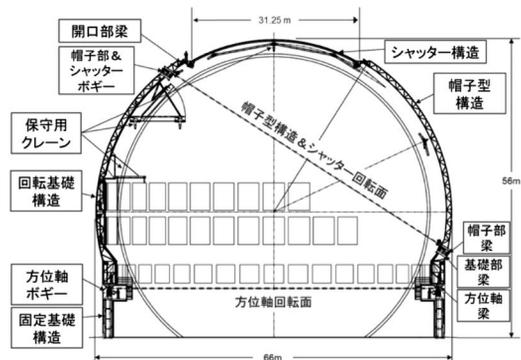


図3 ドームの概略図。

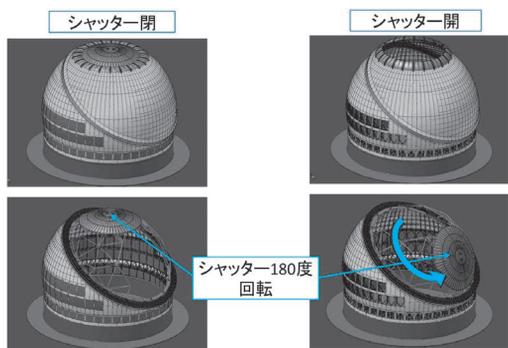


図4 帽子型ドーム構造の概略図。下図では見やすくするために帽子型構造を省略しています。帽子型構造とシャッター構造が独立して180度回転することによってドームの開閉が行われます。

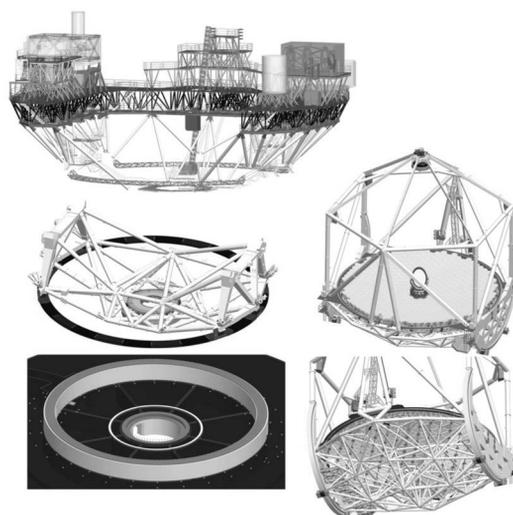


図6 望遠鏡構造の構成図：望遠鏡ピア（左下）、方位軸部（左中央）、ナスミス台構造（左上）、上から見た高度軸部（右上）と下から見た高度軸部（右下）。

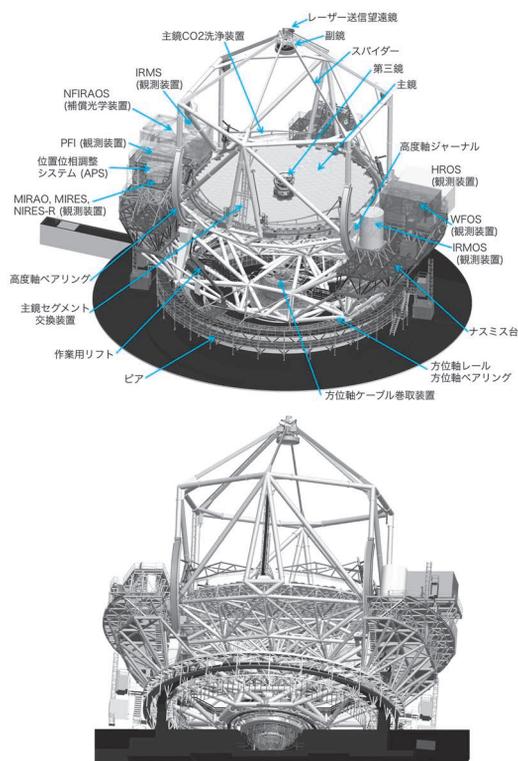


図5 望遠鏡の各部名称と後部から見た全体図。

望遠鏡構造は次の三つの部位から構成されます：

- (1) 望遠鏡ピアと山頂支援棟に接続されている鉄筋コンクリート製の基礎部、
- (2) 観測装置を設置

する二つのナスミス台を含む水平方向に回転する方位軸部、(3) 主鏡などの望遠鏡光学系を動作させる高度軸部（図6）。

望遠鏡の高度軸は天頂角0から90度まで、方位角構造は -250 から $+250$ 度の範囲で回転可能です。ただし、観測で使える高度軸の駆動範囲は25から89度です。望遠鏡の指向精度は1秒角で、1分角指向位置を微調整する際の精度は0.05秒角です。

方位軸レールは鉄筋コンクリート製の望遠鏡ピアの上に設置され、そのレールの上に静圧軸受ベアリングで支えられる望遠鏡の方位軸が載っています。ピアの中央には地震による揺れを軽減するための免震機構、ピントルベアリングとケーブル巻取装置があります。

風による望遠鏡の振動を軽減するために、ドームの開口部付近の筒頂部の構造はできるだけコンパクトになるように設計しています。高度軸部は主鏡、第三鏡、副鏡やレーザー送信望遠鏡を支える6本のスパイダー構造などの筒頂部の支持構造、高度軸ジャーナルなどで構成されます。望遠鏡を

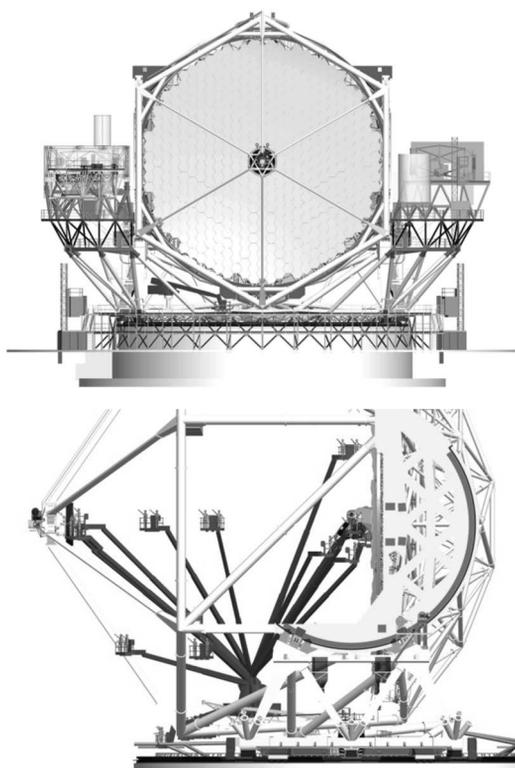


図7 望遠鏡は日中高度0度の状態で保持されます。保守作業用リフトは、左側の副鏡や右側の第三鏡などにアクセスして保守作業を行います。

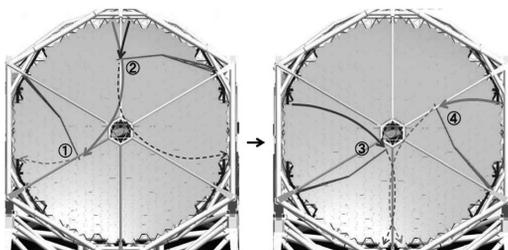


図8 CO₂洗浄用の4本のアームが①から④まで順番に駆動して、主鏡に降り積もった塵を落とします。

高度0度の状態まで傾けるために、高度軸ジャーナルは前方の片側に延長されています(図7参照)。観測装置が設置されるナスミス台は二重の支持構造にして、高度軸の高さまで上げています(図6)。望遠鏡構造のほとんどはパイプの組み合わせになっています。これにより自然換気機能に優れ、

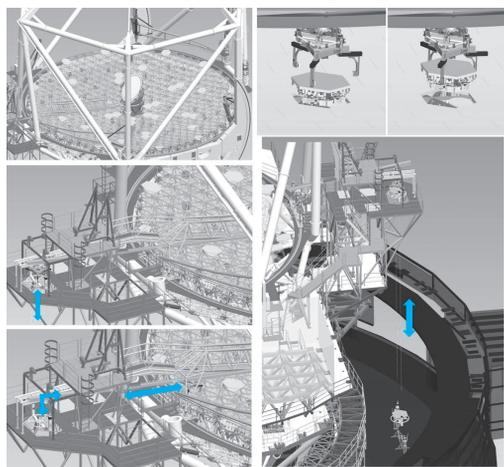


図9 セグメント鏡交換装置SHS。主鏡上を時計の針のように回転するブリッジ(左上)の下側にセグメントを保持する機構が付いています(右上)。交換された鏡は観測床まで運ばれます(右下)。

空気の擾乱を抑えることができるため、TMT望遠鏡の誇る高い結像性能を維持することができます。

TMT望遠鏡には主鏡カバーがありません。塵の付着を最小限に抑えるために日中は望遠鏡を水平方向に向けて待機させます(図7)。降り積もった塵はドライアイス(CO₂)を使って払い落とします。すばる望遠鏡と同様に、望遠鏡を水平方向に向けて、4本のCO₂洗浄用のアームを上から順番に駆動させます(図8)。また、副鏡や第三鏡の保守作業用に作業用リフトが取り付けられています(図7)。

TMT望遠鏡の主鏡は492枚のセグメント鏡で構成されます。現在予定されている運用計画では汚れた鏡を1日で10枚交換することが要求されています。これは常に望遠鏡の光学系の反射率を最高の状態に維持し、天体からの微弱な光を捉えるために必要です。効率良くセグメント鏡を交換するために、正確な位置を自動的に認識し、その場所まで移動するロボットの機能をもつ装置(セグメント鏡交換装置SHS)が望遠鏡に組み込まれ

ています (図9)。

望遠鏡架台制御システム

望遠鏡架台制御システムは、天体を導入するためのポインティングやオフセット、観測中の追尾、背景ノイズの影響を除去するためのノッディングやディザリングと呼ばれる望遠鏡の動作機能などをもちます。方位角と高度角の駆動には、すばる望遠鏡やアルマ望遠鏡と同様にダイレクトドライブ方式を採用しています。方位角は望遠鏡ピア上に、高度角は高度軸ジャーナル上に磁石を円弧状に並べ、架台上にコイルを並べる同期式リニアモーター方式です。この方式により、旧式の望遠鏡で用いられているモーターと歯車減速機からなる駆動機構で問題になっていた摩擦に伴う細かな変動が制御系に与える外乱トルクの影響を抑えることができ、追尾性能を格段に上げることができ、また、方位角と高度角の軸受けについても摩擦による変動を抑えるために静圧軸受が用いられています。

2. TMT 建設計画

2.1 TMT 建設計画：サイト

TMT プロジェクトは、候補地選定のためにハワイ島マウナケア山頂、メキシコ、チリの5カ所において、5年以上にわたってシーイング、晴天率、水蒸気量などの調査を行いました。すばる望

遠鏡があるマウナケア山頂の特徴をまとめると主に以下の四つが挙げられます。

- (1) 晴天率が高い。
- (2) 標高が高いことにより水蒸気量が少なく、赤外線の透過率が良い。
- (3) 低温であり、熱雑音が少ない。
- (4) 大気揺らぎが少なく、シーイングが良い。

調査の結果、特に補償光学系の性能に大きく影響する上空の大気揺らぎの影響がマウナケア山頂で最も小さいことがわかりました (表1)。その他、地震、地盤、運用経費、既存の観測所との共同開発や共同研究、環境などを総合的に判断した結果、2009年7月にハワイ島マウナケア山頂付近の13 Northを建設地とすることが決まりました。TMTの建設場所は、すばる望遠鏡から約1 km北側に離れ、100 mほど下がった標高は4,012 mの平坦な場所にあります (図10)。

2.2 TMT 建設計画：組立て・建設手順

ハワイ山頂での建設は、2014年から開始されます。まずは、サイトへの道路建設から整地・掘削、コンクリート基礎、ドームの鋼鉄材の組み立てなどから始まります。

建設場所の整地が行われた後に始まる工事は大きく二つの時期に分けられます。前半の時期は、望遠鏡ピアとドームの建設が行われます (図11)。後半の時期には、ドームの建設と並行して望遠鏡

表1 TMT 建設候補地の比較。

パラメータ	Cero Tolar (チリ)	Cero Armazones (チリ)	Cero Tolonchar (チリ)	San Pedro Martir (メキシコ)	Maunakea 13N (ハワイ)
標高 (m)	2290	3064	4480	2830	4012
像質 (上空シーイング, 秒角)	0.41	0.4	0.41	0.46	0.4
像質 (同上, 最良10%, 秒角)	0.23	0.22	0.22	0.27	0.22
アイソプラナティック角 (秒角)	1.93	2.04	1.83	2.03	2.69
コヒーレント時間 (ミリ秒)	5.2	4.6	5.6	4.2	5.1
夜間気温 (°C)	14	7.5	-0.7	5.4	2.3
夜間風速 (m/s)	3.2	6.3	2.7	2.2	3.7
夜間湿度 (%)	19	21	36	38	30
温度変化 (10-90%)	5.6	7.5	9.5	16.2	6.8
晴れの割合 (%)	87	89	82	83	76
水蒸気量 (mm)	4	2.9	1.7	2.6	1.9

本体構造の組み立てと山頂施設の建設が行われます（図12, 13）。

図11はドーム構造の組み立て手順を示しています。左上から土地の掘削と望遠鏡ピアの設置、ドーム基礎の建設、ドームの水平回転部の建設に向けた仮枠組の設置と回転部の組立て、ドーム帽子型構造部（ドームキャップ部）、シャッターと

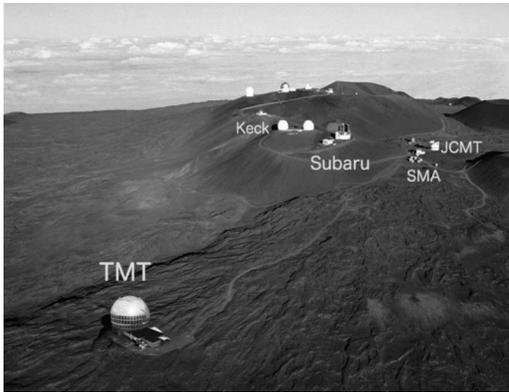


図10 マウナケア山頂のTMT望遠鏡建設場所。

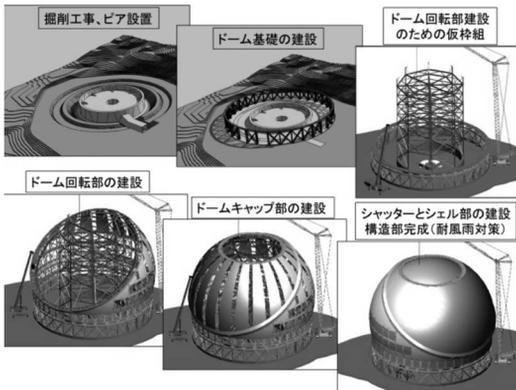


図11 マウナケア山頂のドーム建設作業。

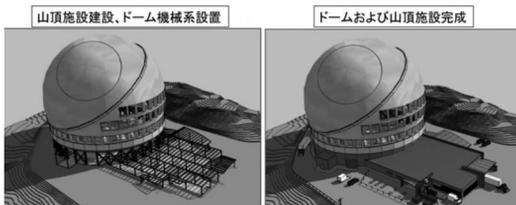


図12 マウナケア山頂の山頂施設の建設作業。

帽子型構造（シェル部）の建設の様子が示されています。この作業が終わると、風雨の影響を受けないため、ドーム内部の組み立て作業を開始する

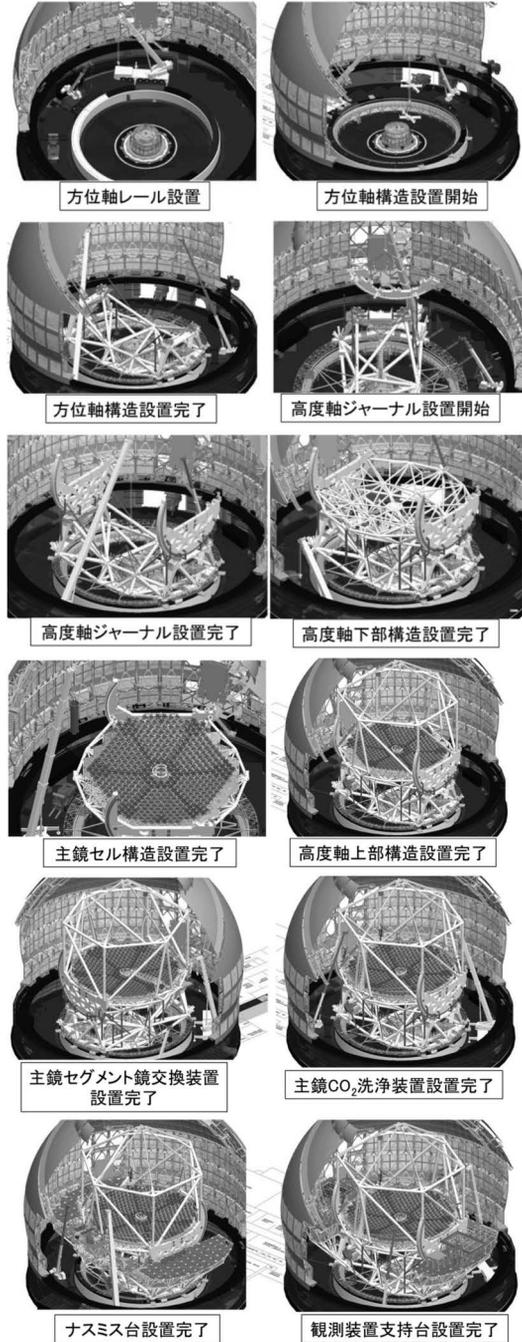


図13 マウナケア山頂の望遠鏡本体構造の組み立て作業。

ことができます。

図12は山頂施設（制御棟）の建設作業の様子を示しています。

図13は望遠鏡構造の組み立て工程を示しています。左上の方位軸レールの設置から始まり、方位軸構造、高度軸下部構造、主鏡部、高度軸上部構造、主鏡セグメント鏡交換装置（SHS）、主鏡CO₂洗浄装置、ナスミス台の順に約24カ月に望遠鏡本体構造の組み立てを完了することが求められています。主鏡セグメント鏡や第三鏡についてはダミーウェイトが設置され、望遠鏡の筒頂部分の組み立て作業が終了した後に、SHSやCO₂洗浄装置の設置や調整などの作業が開始されます。

2.3 TMT建設計画：光学系組立調整期

望遠鏡本体の方位軸と高度軸の駆動試験や、主鏡セグメント鏡交換装置の駆動試験が完了した後、ダミーウェイトから主鏡セグメント鏡に交換する作業が開始されます。まずは中央の40枚のセグメント鏡が設置された段階で、主焦点部に設置された試験用のカメラを用いて、星の光を用いた試験・調整観測が始まります。これがTMT望遠鏡にとってのエンジニアリングファーストライトになります。つづいて、副鏡、第三鏡、補償光学装置、レーザーガイド星システム、観測装置などの設置および調整・試験作業が行われます。これらの光学系や観測装置などの試験が完了すると、観測装置を用いた試験観測が開始され、いよいよ初期科学運用に向けた準備が始まります。

参考文献

- 1) 国立天文台TMT推進室, 2012, 「次世代超大型光学赤外線望遠鏡—Thirty Meter Telescope (TMT)—計画説明書」
- 2) <http://tmt.nao.ac.jp/>

TMT Telescope Structure and On-Site Construction Plan

Tomonori USUDA

TMTJ Project Office, National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: The TMT telescope structure is an altitude-azimuth design with a single azimuth track and two large elevation journals. In 2011, the TMT consortium agreed to assign NAOJ the work share for designing and building the Telescope Structure System including the mount control system, the segment handling system, and so on. A comprehensive preliminary design study was performed in 2012 and 2013, and the design was successfully passed its Preliminary Design Review in November 2013 and April 2014. The works are now moving to the final design phase from April 2014 for two years. It is very challenging to build the extremely large telescope which is four times heavier and three times higher than Subaru Telescope on the top of Mauna Kea, Hawai'i for only two years. The telescope and its construction plan are introduced.