

超大型光学赤外線天体望遠鏡TMTの キーテクノロジー

江崎 豊* 仲尾次利崇*
加藤 篤* 猿田祐輔*
服部友哉*

Key Technologies for Ultra Large Optical Infrared Astronomical Telescope TMT

Yutaka Ezaki, Atsushi Kato, Tomoya Hattori, Toshitaka Nakaoji, Yusuke Saruta

要 旨

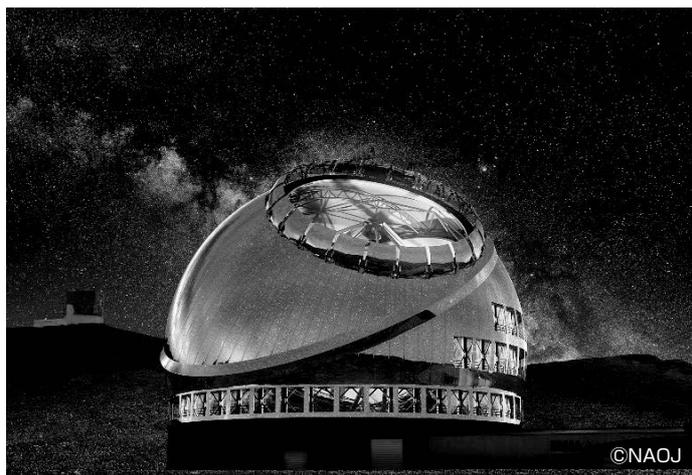
TMT(Thirty Meter Telescope)は、国際協力の下、2024年の稼働開始を目指して米国ハワイ州のマウナケア山頂に建設する計画が進められている、口径30mの光学赤外線・次世代超大型天体望遠鏡である。TMTは、世界最先端の天文学研究に用いられて活躍してきた口径8.2mのすばる望遠鏡をはるかにしのぐ13倍の集光力と4倍の解像度を実現し、“月の上の蛍の光が見える”と例えられている⁽¹⁾。TMTによって、宇宙に最初に生まれた星“ファースター”の発見や“地球外生命”の探索など、新しい天文学の研究分野を切り開くことが期待されている。

三菱電機では、幅、高さともに50mを超え、質量も2,000ト

ン以上となる巨大な望遠鏡の本体構造や、天体を追尾するために望遠鏡を駆動する架台駆動制御、分割鏡交換装置等の詳細設計を進めている。

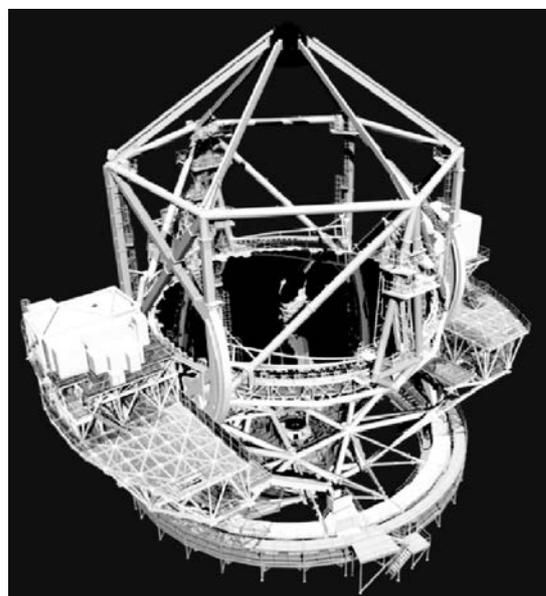
前例のないこれらの装置に対して、技術的難度が極めて高い要求性能や搭載機器とのインタフェース条件が規定されている。主要なものとしては、主鏡支持構造の姿勢変形の抑制、巨大地震に耐える免震構造、望遠鏡を精密に駆動して天体を捕らえ続ける高い追尾精度、1日10枚の分割鏡を交換する交換装置などの実現である。

当社は、これらの技術的要求を達成するため、詳細設計と技術開発を実施してきた。



TMT観測所の完成イメージ

提供：国立天文台



TMTの望遠鏡本体構造

次世代超大型天体望遠鏡TMT

左がTMT観測所全体の完成イメージ、右がTMT計画で当社が詳細設計を実施しているTMTの望遠鏡本体構造の概観である。縦、横、高さともに50mを超え、質量は2,000トンを超える史上最大級の望遠鏡の本体構造である。

*通信機製作所

1. ま え が き

TMTは、口径30mという史上最大級の大きさを誇る超大型光学赤外線天体望遠鏡であり、新しい天文学の研究分野を切り開くことが期待されている。当社は、その巨大な望遠鏡の本体構造や、天体を追尾するために望遠鏡を駆動する架台駆動制御、分割鏡交換装置等の詳細設計を進めている。

これらの装置に対して、技術的難度が極めて高い要求性能、搭載機器とのインタフェース条件が規定され、これらの技術的要求を達成するため、詳細設計と技術開発を実施してきた。

本稿では、技術的要求達成のため、詳細設計段階で適用を検討しているキーテクノロジーについて詳細を述べる。

2. TMTの望遠鏡本体構造

望遠鏡の架台は、方位軸／高度軸で駆動する経緯台式である(図1)。492枚の分割鏡から成る主鏡、副鏡、第3鏡で、ナスミス焦点に最大で視野直径20分角の観測光を結像させる。左右2つのナスミス台それぞれに複数の観測装置が望遠鏡の前後に展開され、大気ゆらぎ補償光学を備えた高解像度撮像、多天体同時分光などの観測が行われる予定である。

3. 望遠鏡構造の主要な要求性能と適用技術

望遠鏡構造の主要な要求性能は、主鏡支持構造部の姿勢変形量1.8mm RMS(Root Mean Square)以下への抑制、

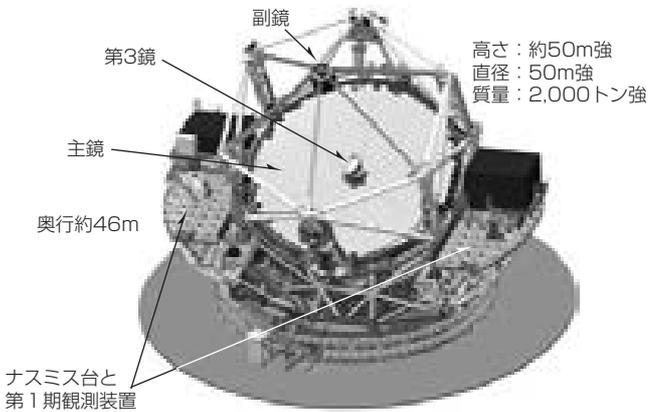
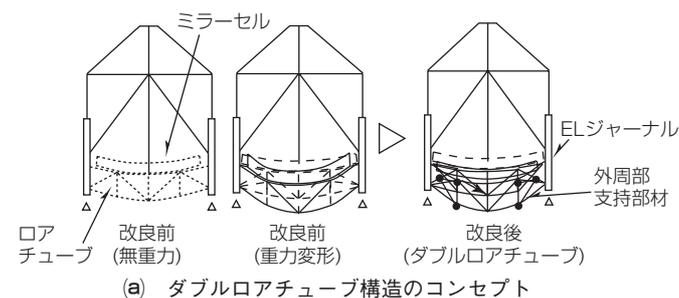


図1. TMTの本体構造



(a) ダブルロアチューブ構造のコンセプト

1000年に一度の地震に耐える免震構造、天体を0.015秒角RMS以下の精度で追尾し続ける高い追尾精度、1日10枚の分割鏡を交換する装置などの実現である。

3.1 主鏡支持構造部の姿勢変形抑制

口径30mのTMTでは、主鏡の自重変形(高度角変化による姿勢変化がたわみを発生させる)の抑制が大きな課題である。各分割鏡は主鏡支持構造部から支持され、主鏡面全体の自重変形は主鏡支持構造部の剛性に大きく依存している。

“すばる望遠鏡”では、高い剛性を確保するために、高度角回転の中核部や主鏡支持構造部を厚みのある箱構造にして自重変形を抑制した。これをTMTに適用した場合、望遠鏡の高さ寸法が大きくなり、部材数量も増大して目標口径・質量(すばる望遠鏡に比べて、口径が3.66倍、質量は4倍強)を大幅に超過する。また、望遠鏡の大型化は、収納するドームの大型化、基礎部の荷重負担の増加など、観測所全体のコスト、工期に大きく影響する。そこで、従来の設計思想を変更して鏡面精度を満足する望遠鏡構造の設計思想を確立する必要が生じた。

TMTは、主鏡支持構造部の両端の固定部であるEL(ELevation)ジャーナルという高度軸の半円上のレールが30m以上離れているため、自重変形時に主鏡支持構造の中央部分が大きく落ち込み、両端はほとんど変形しないために主鏡面が湾曲して鏡面精度が低下する問題が生じる。これに対して、各分割鏡を能動アクチュエータで補正するなどの対策が採られているが、ストロークの制約などがあり完全ではない。

鏡面精度を実現するための主鏡支持構造として“ダブルロアチューブ構造”の新規構築を行った。ダブルロアチューブ構造のコンセプトは次のとおりである。

- (1) ミラーセルはELジャーナルとは接続せず、中央部だけをロアチューブで支持する。
- (2) ミラーセル外周部は変形が中央部と同程度になる適切な剛性の部材で柔らかく、自然に支持する。

図2(a)にダブルロアチューブ構造のコンセプト、図2(b)に構造を示す。

この主鏡支持構造によって、ロアチューブの中央部と端部の変形差がそのままミラーセルを歪(ゆが)ませることを回避している。ミラーセル中央部だけをロアチューブで支

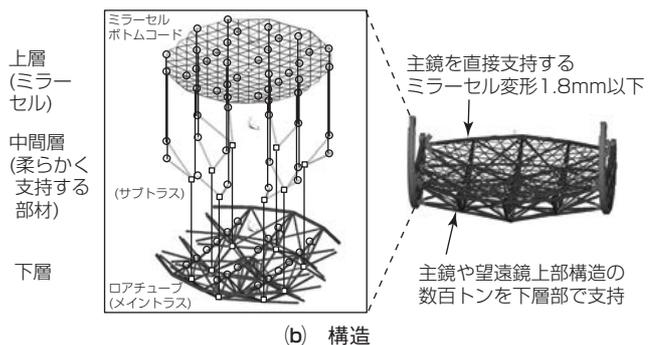


図2. 主鏡支持構造部

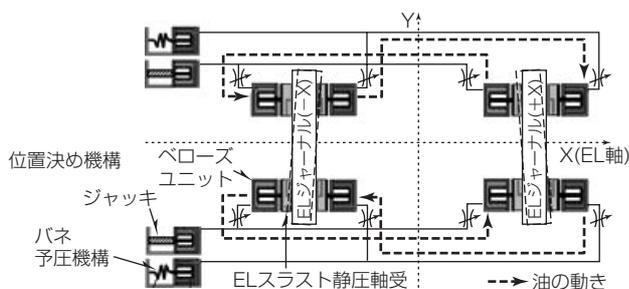


図3. ウィッフルツリー方式の概念

持させて外周部は適切な剛性の部材で支持させることで剛体変位が主となっている結果、鏡面変形を最小限に抑えることができた。

鏡面精度以外にも、仰角変化時の第3鏡とナスミス台上の観測装置群との光路長の変化を最小限に抑えるために、今回新たに鏡の支持方式として用いられるウィッフルツリー支持方式をEL回転構造のスラスト方向の支持に採用した。図3にウィッフルツリー支持方式の概念を示す。

4系統のウィッフルツリー支持によって、高度角回転構造の姿勢変化で生じる反力をAZ(AZimuth)構造・ナスミス構造に極力伝えないようにすることで、観測装置の変位を最小限に抑えている。予圧を与える油圧系統(駆動時、加減速時の反力から予圧を決定)と望遠鏡の中心位置を調整する油圧系統からなる。ELジャーナルの動きに応じて各系統内に封入された油が移動することで、AZ構造・ナスミス構造に入る反力を最小限に抑えている。

3.2 免震システム

TMTは“1000年に1度の確率で発生する地震荷重”に耐えるという要求に対して、望遠鏡で初めての水平方向免震構造を採用している。その特徴は①滑り要素による地震動の絶縁、②ダンパによる地震動の減衰、③与圧機構による運用時の駆動安定化と地震時の絶縁化の切り換え、④大規模地震解析時のスーパーコンピュータの利用である。

一般的に、望遠鏡の主軸は観測精度などへの追求から高剛性である必要があるが、免震構造を採用する場合、主軸を基礎と切り離す必要があり、この相反する性質を両立させることが課題であった。そこで、主軸部にロック機能を持たせることでこの課題を達成している。

望遠鏡の断面図を図4に示す。望遠鏡構造は回転中心の主軸部に設けられた滑り軸受(図中A)と回転レール上の静圧軸受(図中B)で質量が支えられ、一方で水平方向へ自由に移動できるようになっている。この主軸部に与圧したばねを応用したロック機構が設けられており、図5のように構造と基礎部をつないでいる。観測時、風や駆動ブレーキなどの外乱に対して望遠鏡構造はしっかり基礎部へ固定され、高い剛性を保つ。一方、地震時は一定の外力を超えればばねのリミットが外れて構造と基礎部の固定が開放され、水平方向への移動が自由になり免震される。同時に、ダン

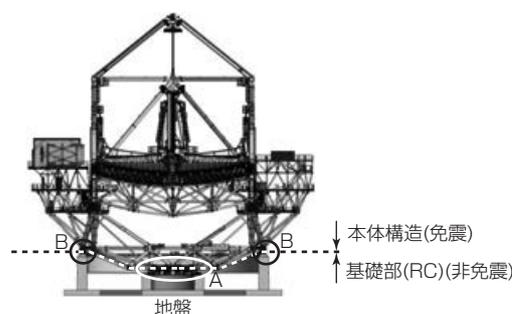


図4. 望遠鏡構造と基礎部の断面

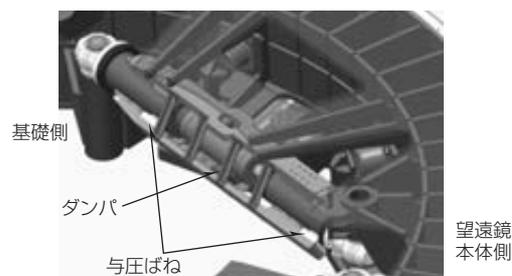


図5. 主軸部内の与圧ばねを使用したロック機構

パで揺れを減衰させる。このような機構で観測時の高い望遠鏡性能を満たすと同時に、地震時に光学機器及び観測機器に許容される加速度要求、及び各サブシステム装置の強度要求を満足させている。

また、地震解析でより現実的な評価を行うため、大規模構造モデルに実地震波を入力している。国立天文台にスーパーコンピュータ“アテルイ”を用いた解析を協力いただき、解析時間を半年以上縮め、解析効率と解析品質の向上を達成している。

3.3 追尾精度

3.3.1 大規模構造の高精度モデリングと解析時間の低減

この望遠鏡は、コスト等の理由で国内仮組時の架台駆動試験が不可能であるため、現地でのリスク低減と機械設計へのフィードバックの目的で、高精度な解析による性能評価が不可欠であった。具体的には、構造モデルを含む制御システムのモデルを構築し①周波数応答解析、②天体追尾や“Short Move駆動”の時刻歴応答のシミュレーション解析を組み合わせることで評価を実施した。このうち②では、実時間で数分程度の解析を多くの追尾パターンで実施する必要があるが、数十万ノード(=数十万×6自由度)のモデルで実施するのは時間がかかり現実的ではない。また、システムの基本的な応答の確認にも時間がかかり過ぎ、効率が悪い。このため、高精度(要求された精度の維持)と解析時間の低減(評価の効率化)の両立が解析の課題である。

この解決のため、構造のFEM(Finite Element Model)のモード解析結果から制御性能に影響する支配的かつ適切な数のモードを抽出して、自由度を縮小したモデルを生成してシミュレーションを行うことで、モデル精度を維持した上で効率化を図った。また、天空上の光軸の応答を評価

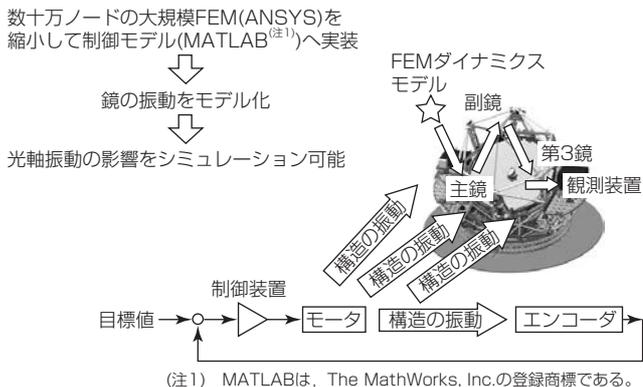


図6. 構造・光学・制御のモデル化

するために、関連する光学コンポーネント(主鏡～第3鏡、ナスミス台上の観測装置)の代表ノードの振動から、光軸の振動を算出するモデルを生成してシミュレーションに適用した。このように、機械・光学・制御を統合したモデルを構築して解析することで、より現実の光軸ぶれに近い応答の評価を実現した。図6にモデル化の概念を示す。

3.3.2 構造の振動や軸間干渉を考慮した制御則の改良

望遠鏡構造は、その質量制限によって、大きさの割に軽量化された“大型柔軟構造物”であるが、短時間に天体間を切り換えてすぐさま天体観測に移るという“Short Move駆動”の要求があり、準静的に駆動させる日周運動の追尾だけに留(とど)まらず“Short Move駆動”による加振力が望遠鏡構造に入り、これが構造物を振動させる原因となる。この結果、①制振性(柔軟構造の光軸の揺れを最小限にする)と②高応答性(短時間で目的の天体の位置まで移動する)という相反する要求の両立が追尾制御の課題となる。

高精度な駆動を達成するため、低トルクリプルのDD(Direct Drive)モータや高精度テープ式エンコーダなどの高性能化を進めているが、それだけでは達成が難しい。そこで、次に挙げる制御則の改良を実施して制振性と高応答性の両立を図っている。

- (1) 構造フィルタによる不要帯域ゲインの低減
- (2) 軸内、軸間相互干渉力の影響の抑制
- (3) 振動を抑制する指令値の生成

(1)の構造フィルタは、望遠鏡の制御に不要な高周波域の共振による振動を抑制するために、ノッチフィルタなどを制御ループ内に挿入して振動の励起を抑える。また、軸内に発生する共振を(2)の相互干渉力の抑制制御で低減する。回転軸上に複数配置した検出器とモータを利用して、回転軸全体の運動を純粋な回転の“同相”成分と反対方向の“逆相”成分に分解し、双方に制御ループを適用することで制振を実現している。これらに加えて、構造共振を避けるように指令整形と指令フィルタリングを実施してサーボループに与えることで、更に振動を抑制している。図7に制御システムのブロック図を示す。

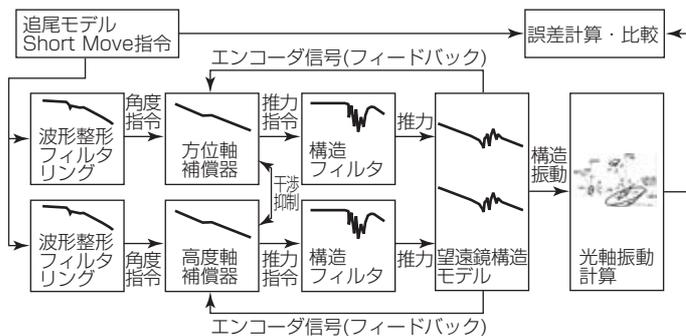


図7. 制振・高応答性を実現する制御システムのブロック図

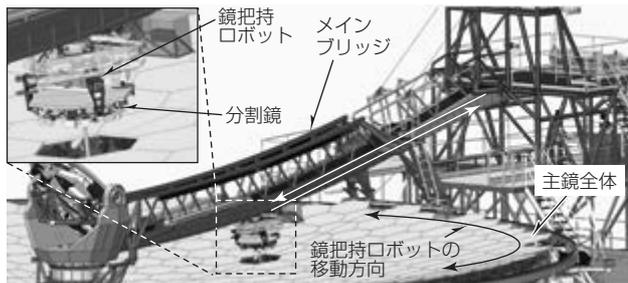


図8. 分割鏡自動交換装置の構成

3.4 分割鏡自動交換装置

分割鏡交換装置の構成を図8に示す。分割鏡を主鏡の所定の位置へ搬送するために、主鏡上部を円周方向に回転するブリッジを主鏡上部に展開し、ブリッジ下部を鏡把持ロボットが半径方向に動く。分割鏡の着脱は、6自由度で駆動するパラレルリンク機構の鏡把持ロボットが行う。

主鏡上の位置によって様々な配置(角度、傾き)をとる分割鏡に対して、その着脱時に鏡や望遠鏡側の支持部に過剰な力が掛からないようにする必要がある。そのため、6軸力センサで反力を検出して鏡に負荷をかけないように柔らかさを可変にするコンプライアンス制御(力覚制御)、カメラ画像によって鏡と交換装置の相対位置、傾き、距離を検出するビジョンセンサを実装し、分割鏡交換での高効率化、省人化を実現する。現在鏡把持ロボットの試作機を製作し、開発評価中である。なお、望遠鏡の分割鏡自動交換装置は世界初^(注2)の試みである。

(注2) 2015年12月現在、当社調べ

4. むすび

国際協力で進められるTMTプロジェクトへの参画に当たり、国立天文台の指導の下、計画を主導する米国や海外の様々な機関との調整が必要となる。このプロジェクトの実現に向けて、今後も各国と協力し技術開発と貢献を図っていく。

参考文献

- (1) 国立天文台ホームページ：国立天文台TMT推進室 <http://tmt.nao.ac.jp/>