

地上大型光学・電波望遠鏡の キーテクノロジー

江崎 豊*
Yutaka Ezaki
川口 昇*
Noboru Kawaguchi

Key Technologies for Large Optical and Radio Ground Telescopes

1. ま え が き

三菱電機は1960年代に衛星通信用の地上大型アンテナ局に参入以降、人工衛星や惑星探査機などの管制・通信用の地上アンテナ局の開発製造を行ってきた。アンテナ開発で培った大型構造や姿勢制御の技術に応用し、1970年代から天文研究用の大型光学・電波望遠鏡にも参入した。天文研究用の大型光学・電波望遠鏡は、管制・通信用と比較して極めて高い精度が要求され、精密鏡支持・制御、大規模熱構造設計などの技術を開発してきた。当社の地上大型望遠鏡のキーテクノロジーをすばる・アルマ・TMT望遠鏡の適用事例で述べる。

2. すばる望遠鏡

すばる望遠鏡は、ハワイ島の標高4,200mのマウナケア山頂に建設された、一枚鏡では世界最大級の口径8.2mの光学赤外線望遠鏡である。観測所全体の外観を図1に、望遠鏡本体を図2に示す。当社が主契約者として約10年の歳月をかけて完成し、1999年に運用を開始した。2012年には、8m級望遠鏡では、すばるだけが持つ主焦点の広視野性能を更に拡大する、HSC(超広視野主焦点カメラ)の機構制御系の付加を担当する等、現在も機能更新・性能向上を続けている。

すばるの主要な技術課題に8.2m大口径の超薄型軽量主鏡の実現がある。従来の鏡支持方式(直径の1/6の厚い鏡+てこ支持)の場合、鏡質量は100トン以上、鏡鑄込に10年以上、望遠鏡全体質量も大幅増になるので適さない。そ

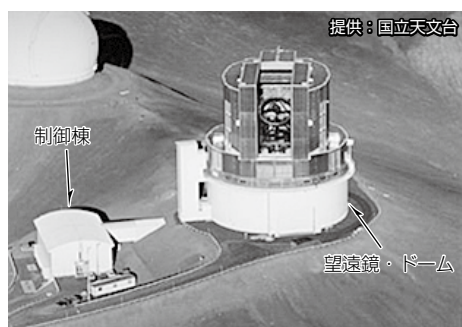


図1. すばる観測所全体

こで薄い鏡の製造、その低い剛性を補う多点鏡支持、モータ駆動と力センサで鏡厚み方向の支持力を制御するアクチュエータによって、鏡面形状を維持する能動光学を採用することで解決した(図3)。

厚さ0.2m(直径の1/40、20トン)の主鏡は、力センサの検出値をフィードバック制御して支持力精度0.01kgf以下、支持力90kgfを実現したアクチュエータ261本で支持する。アクチュエータは鏡の径方向の質量も支持し、主鏡部全体を支持するミラーセルの熱変形を鏡に伝えない構造である。

望遠鏡の姿勢変化で薄い鏡は変形するため、各アクチュエータの支持力は高度角(傾き)に応じて算出する。外乱の影響で生じる微小な熱変形など、鏡面の形状誤差を光学的に測定し、変形パターンの成分に分解し、主鏡で補正すべ

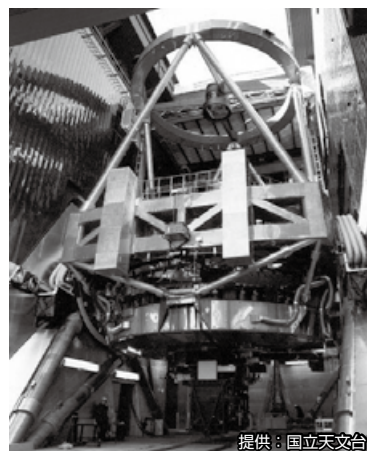


図2. 望遠鏡本体

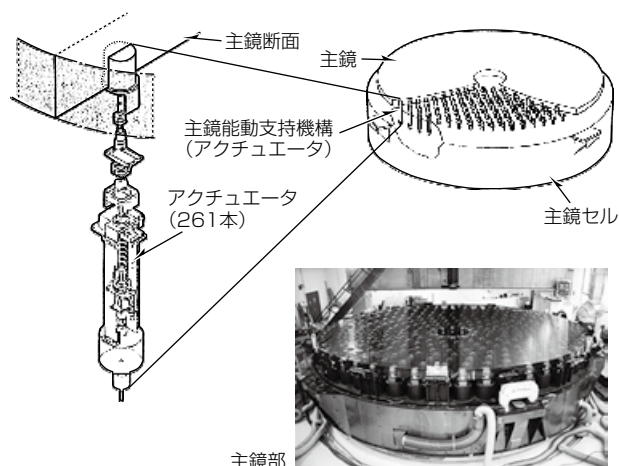


図3. すばるの主鏡と高精度支持アクチュエータ

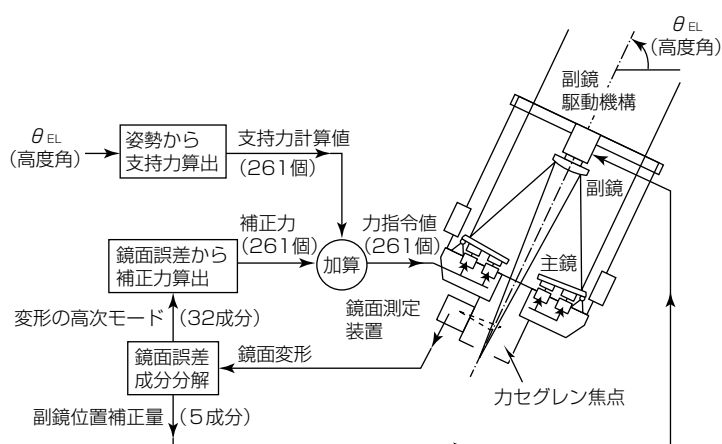


図4. すばる主鏡の能動支持制御系ブロック図

き有害な変形成分、必要な補正力を算出し、アクチュエータの力指令値を調整するフィードバック制御を行う。この能動光学によって、観測に利用される広い高度角範囲に対して、鏡面形状誤差の20ナノメートル以下の保持を実現し、望遠鏡の解像度は現在でも世界最高性能レベルの約0.2秒角を達成している(図4)。

3. アルマ望遠鏡

アルマ望遠鏡は、チリの標高5,000mのアタカマ砂漠に建設された、干渉計式の電波望遠鏡群である(図5)。日米欧の国際天文プロジェクトとして、口径12mのアンテナ50台と、日本(当社)が担当した“Atacama Compact Array (ACA, 別名森田アレイ)”と呼ばれるアンテナ16台(うち口径7mは12台)を組み合わせ、一つの巨大な電波望遠鏡を実現する(図6)。

ACAの主要な技術課題に温度変化と強風への対応がある。建設地は夜間と日中の温度差が激しく、アンテナ表面の温度変化は40度以上、風も平均風速10m/sと強い。この環境条件下で鏡面の歪(ひず)みを抑制することが要求される。

他国のアンテナは熱膨張係数が小さいCFRP(炭素繊維強化

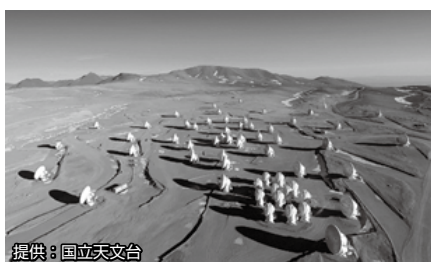


図5. アルマ望遠鏡全体



図6. ACA 7mアンテナ

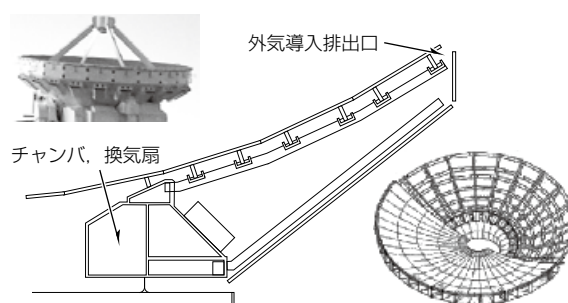


図7. 7mアンテナ主鏡裏面の熱構造設計(均温化)

プラスチック)を主鏡部骨組みに採用したが、7mアンテナは高価なCFRPを使わず鉄を採用した。鉄は熱膨張係数が大きく骨組みに温度むらが生じると鏡がいきなり変形する。主鏡部骨組み全体で温度変化を均一にし、いびつな変形を抑制する熱構造設計を採用して解決した(図7)。外気を取り入れて主鏡骨組み部に風を流すことで、主鏡骨組み部の温度を均一に保っている。

24個の強力な換気扇を主鏡中央寄りのチャンバ部に設置し、負圧によって主鏡の周縁側の開口から外気を取り入れる。従来の当社の熱構造設計では、主鏡裏面の部材間の空間に風を流していたが、7mアンテナでは、骨組みのパイプ部材の管内に直接風を流すことで、部材の径方向、軸方向にわたって温度むらを低減する。管内を通過してチャンバに入った外気は部材間の空間を通過させて、外気に放出することで、更なる均温化を図っている。

主鏡骨組み全体を部材レベルで均温化する熱構造設計によって、アンテナ鏡面の歪みの20μm以下への抑制を達成している。

4. TMT望遠鏡

TMT望遠鏡はハワイ島マウナケア山に建設される、口径30mの史上最大級の光学赤外線天体望遠鏡である。TMT観測所全体の外観を図8に、望遠鏡本体の構造を図9に示す。5か国の国際協力によって1台の望遠鏡を建設する。当社は高さ・幅50m、質量2,000トンを超える望遠鏡本体構造や、観測物体を捕捉・精追尾するための望遠鏡の精密駆動制御系、主鏡を構成する492枚の分割鏡の鏡交換ロボットシステム等を担当し、開発設計を進めてきた。

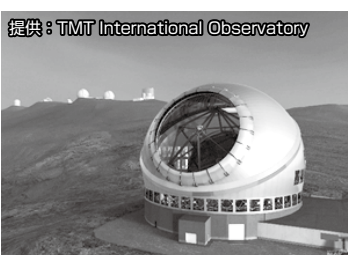


図8. TMT観測所全体

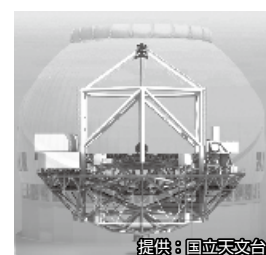


図9. 望遠鏡本体の構造

TMTの主要な技術課題に、1,000年に一度の巨大地震への対応、1日10枚の分割鏡交換と作業省人化、質量がすばるの5倍にもかかわらず方位軸駆動速度が5倍であることなどがある。

巨大地震に対して望遠鏡構造の耐震強度を上げる場合、望遠鏡が大幅に重くなり、望遠鏡の駆動速度・性能が低下する。そこで地面の揺れが望遠鏡に伝わらないよう、当社望遠鏡初の免震システムを採用することで解決する。その特徴は①滑り要素による地震動の絶縁、②ダンパによる望遠鏡の揺れの減衰、③観測時の望遠鏡と地面の剛結合、地震時の地震動の絶縁、地震後の原点自動復帰、の多元並立である(図10)。

望遠鏡は下部中央の主軸部(図10中A部)周りに回転するが、駆動摩擦低減のため、回転レール部(図10中B部)の静圧軸受によって2,600トンの望遠鏡を数十 μ m浮かしており、水平方向に滑らせることが可能である。主軸部に免振ダンパ、ビンガム流体を用いたロック・与圧機構を設けて望遠鏡と基礎部を接続する。通常の観測時は風などの外乱に対して望遠鏡は基礎部に固定され、高い剛性を保つ。地震時は一定の外力を超えるとビンガム流体が流動し、固定のロックが開放され、水平方向に滑ることで免震され、同時にダンパによって望遠鏡の揺れを吸収・減衰し、地震後は与圧機構で原点位置に自動復帰する(図11)。これらによって観測時の高い望遠鏡駆動性能と、地震時の望遠鏡

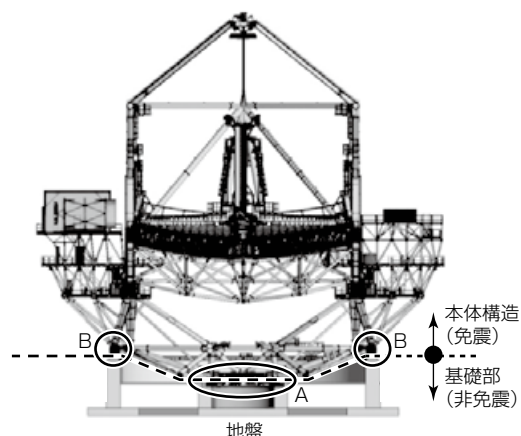


図10. 地震動の免振

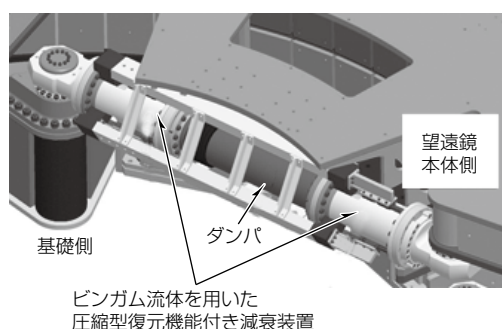


図11. 主軸部ダンパ、ロック

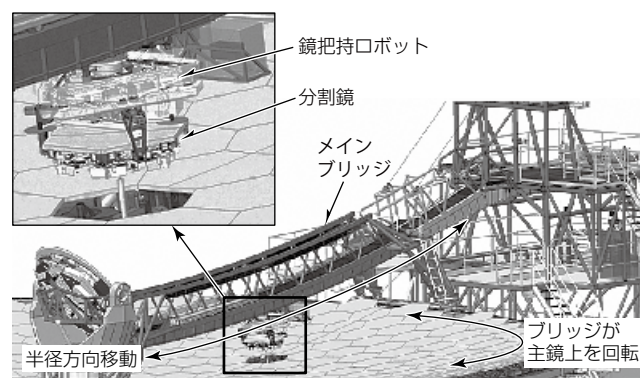


図12. 分割鏡自動交換装置

搭載の精密光学機器と望遠鏡本体構造にかかる加速度の低減の両立を達成する。

分割鏡交換システムは分割鏡を主鏡の所定位置へ搬送するため、主鏡上方に展開したブリッジを円周方向に回転させ、ブリッジ下部の鏡把持ロボットを半径方向に移動させる。分割鏡の着脱は6自由度で駆動する鏡把持ロボットが行う。

分割鏡は主鏡上の位置によって傾き、形状が異なり、鏡着脱操作時の駆動誤差や荷重乗り移りで鏡や支持構造に過大な外力が発生しやすい。直径30mの範囲に広がる分割鏡の交換を少人数のオペレータで遠隔精密操作するのは限界がある。そこで6軸力センサで反力を検出し、鏡に外力をかけないように制御の柔らかさを自動変化させるコンプライアンス制御(力覚制御)、カメラと画像処理で鏡と交換装置の相対的な位置・傾き・距離を検出するビジョンセンサを採用することで、分割鏡交換の省人化、短時間化を実現する。鏡把持ロボットを試作し、様々な鏡姿勢での自動着脱動作を評価し、1日10枚の自動交換が可能な見通しを得た。なお、望遠鏡の分割鏡自動交換は世界初の試みになる(図12)。

5. む す び

当社の地上大型天体望遠鏡のキーテクノロジーについて適用事例で述べた。ほかにもダイレクトドライブモータを採用した高精度な観測物体の捕捉・追尾技術などがあり、1/100秒角レベルの追尾精度を達成している(この報告の技術詳細、その他技術は三菱電機技報2009年3月号、2011年9月号、2014年1月号、2月号、2016年2月号などに掲載している)。これらによって当社は世界トップレベルの性能を実現し、天文学の発展に貢献してきた。当社の天体望遠鏡技術は、当社が提供する、宇宙状況把握光学望遠鏡システムの主鏡支持や駆動制御の開発に活用されており、新たな望遠鏡の利用分野及び当社の社会貢献としての今後の発展が期待される。