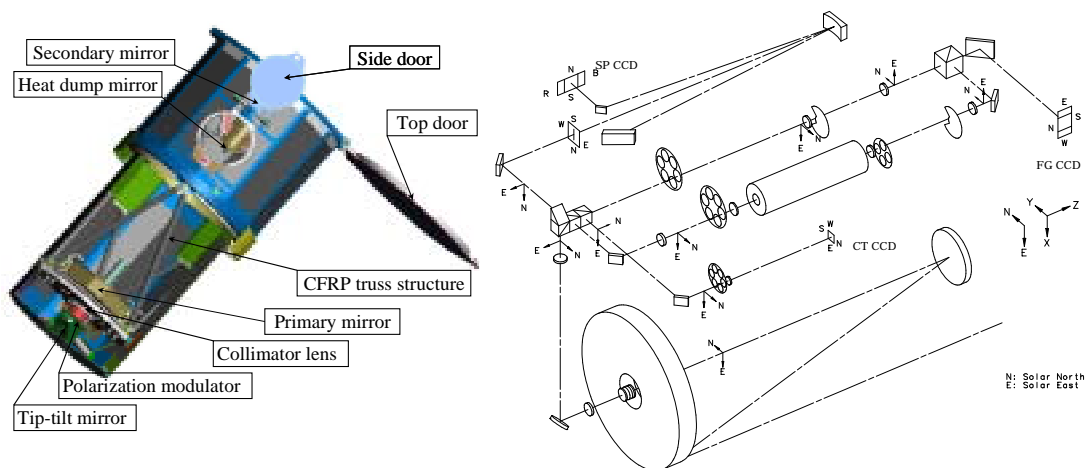


SOLAR-B 可視光望遠鏡の光学技術

常田佐久、末松芳法、一本潔、清水敏文、大坪政司（国立天文台）

Solar-B搭載の可視光望遠鏡（Solar Optical Telescope、以下SOTと略称）は、口径50cmのグレゴリアン望遠鏡（観測波長0.38-0.7 μ 、視野330x160秒角）で、空間分解能0.2秒角（波長0.5 μ ）で偏光の観測により、太陽表面の磁場の3成分マップを高い空間・時間分解能で得ることを主目的としている。SOTの開発は順調に進展しており、分光器による精密磁場観測・フィルターグラフによる高空間・時間分解能観測に加えて、魅力的な研究テーマとして、局所的日振学による対流層内部の3次元磁場配位・速度場の観測も浮上しつつある。SOTにより、通常の「上から」の磁場観測に加えて、同時に対流層の磁束管と流れの立体「撮像」を行うことが可能となる。

SOTの望遠鏡部分は国立天文台が中心となって開発を行い、焦点面パッケージ（フィルター光学系、分光器光学系、コレレーショントラッカー光学系よりなる）は、MASAで製作が



行われている。太陽観測のための大口径の軌道可視光望遠鏡は、1970年代からNASAにより精力的な検討が続けられてきたが、SOLAR-Bで日米の技術を結集して実現することになった。同種の望遠鏡の飛翔実績はなく、参考となる設計例はない。本稿では、SOLAR-Bで使われている光学技術について紹介したい。

望遠鏡の構造および可視光望遠鏡全体のレイアウトを上図に示す。望遠鏡および焦点面検出器は、衛星バス上部に搭載されている光学ベンチにマウントされている。望遠鏡は、主鏡・副鏡・排熱鏡（主鏡焦点位置で視野外の太陽光を望遠鏡外部に排出する金属鏡）、コレリメーターレンズユニット、偏光モジュレーター、可動鏡よりなる。コレリメーターレンズユニットは、観測波長0.38-0.7 μ でほぼ無収差・アクロマチック・温度による焦点位置変化が補償された6枚レンズ（赤外反射フィルターを含む）光学系である。望遠鏡に硬く固定されたコレリメーターレンズにより、焦点面パッケージにはコレリメートされた光が渡され（ア


フォーカルインターフェース)、相互の位置精度要求が実質上発生しない。これにより、日米分担製作されている望遠鏡と焦点面装置の結合が、機械組立精度でよい。望遠鏡の光学部品の位置精度、とくに主鏡と副鏡の位置精度は厳しく、望遠鏡構体(右図)にはゼロ膨張に近い(0.1ppm)グラフィートシアネート複合材料を接着して使用し、ネジ締結部がない。

望遠鏡の性能はバジェット表で管理されるが、設計段階での割り当て誤差は順次実験値に置き換えられ、一部は数値計算による保証値が使用される。バジェット表には、結像性能を現す波面バジェット、焦点位置バジェット、指向軸バジェットなどがある。焦点位置のずれは、焦点面装置内の再結像レンズの位置をコマンドにより調整することで補正される。焦点位置バジェットは、機械環境試験前後や熱真空環境での焦点位置変化を計測し、最悪でも補正レンジに入ることを確認する。波面バジェットに影響する要素の一つとして、主鏡、副鏡、コリメーター光学系の軌道上

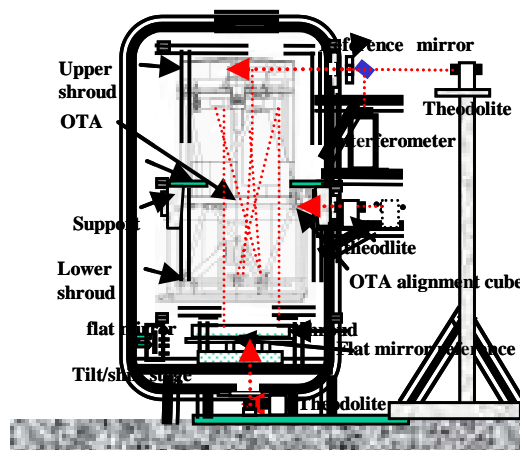


温度変化に対応する波面誤差があるが、数値計算の値は(右中図)熱光学試験により確認される。

熱光学試験(右下図)は、光学窓・シールド付きの真空チャンパーに、望遠鏡およびオートコリメーション用の基準平面鏡(口径55cm)を入れて行う。望遠鏡に軌道と同じ(ないしよ

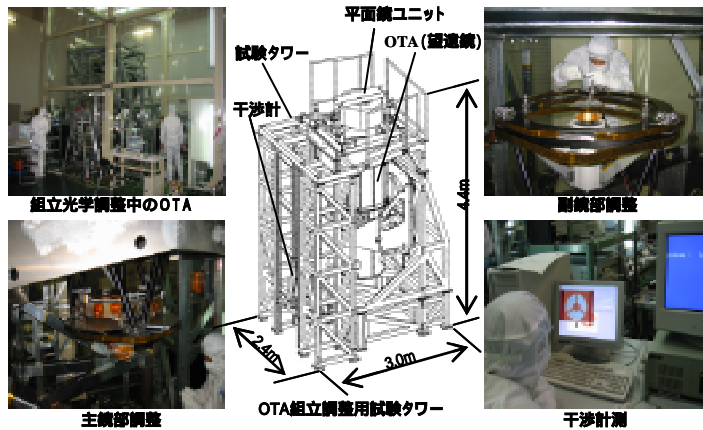
波面誤差	主鏡	副鏡	CLU
配分	19.0 nm rms WF	4.6 nm rms WF	10.2 nm rms WF
設計値	16.6 nm rms WF	4.2 nm rms WF	9.4 nm rms WF
熱解析モデル			
外観写真			
	主鏡 構造熱モデル	副鏡構造熱モデル	コリメータレンズユニット

り厳しい)温度分布を与え、干渉計およびセオドライトにより波面性能・焦点位置・指向軸の確認を行う。複合材料構体の除湿収縮による真空試験中の寸法変形量は、

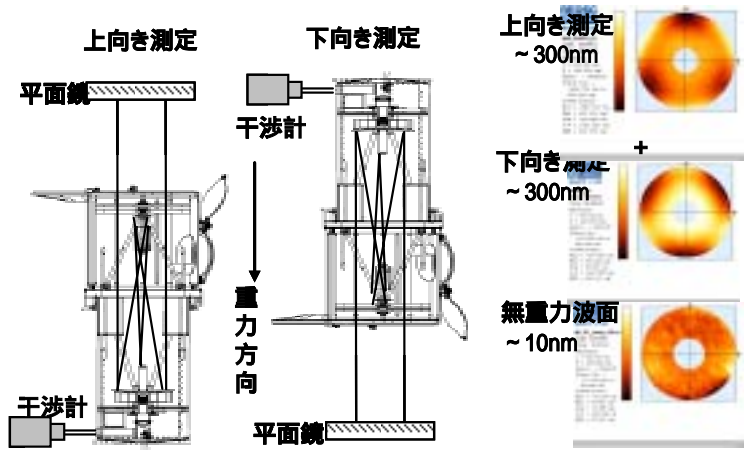


27 ppmに達し、焦点位置バジ
 ジェット表の更新が行われた。

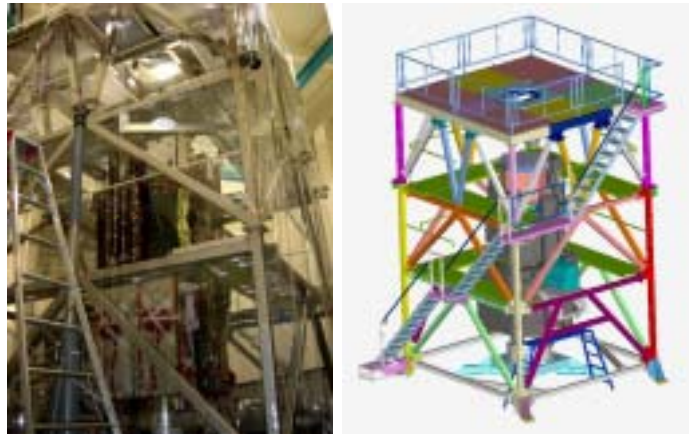
右図は定盤上の望遠鏡試験タ
 ワーで、望遠鏡を基準平面鏡による
 オートコリメーションにより波
 面計測する様子を示している。タ
 ワーは高さ約3 mの位置に口径
 55 cmの無収差平面鏡を、その下
 に望遠鏡を光学的に安定に保持
 するためのジグであり、構造計算



を行い剛性を徹底して高め
 てある。主鏡は側面3点で支
 持されており、地上で望遠鏡
 を上向きにした測定では重
 力による主鏡の変形により、
 数100 nm (RMS) の大き
 な3角アス収差がでる。タワ
 ーは、図に示したように望遠
 鏡を180度反転できる回転機
 構があり、上向き測定データと
 下向き測定データを加算する
 ことにより、軌道上での重力のな
 い場合に対応した波面を求め
 ることができる。



望遠鏡は衛星に組み込み後、1
 年近くにわたり振動試験など
 のハードな試験にさらされる。
 望遠鏡は、口径50 cm重量12
 Kgの軽量化ULE主鏡をは
 じめとして精緻な光学製品で



構成されており、すべての単体環境試験を通過していても、衛星レベルの試験に気を抜く
 ことはできない。このため、望遠鏡が衛星に搭載されたままで、光学干渉計により波面計
 測が可能な光学インジェクションポートを持つ。オートコリメーション平面鏡は、衛星全
 体を覆う高さ約5 mの衛星光学タワー上に設置される。このポートを用いて、望遠鏡の波
 面性能にのみならず、望遠鏡の指向軸方向の測定、焦点面装置の動作チェック光源の挿入
 が可能である。これにより環境試験ごとに光学性能の完全な把握が可能であり、打ち上げ

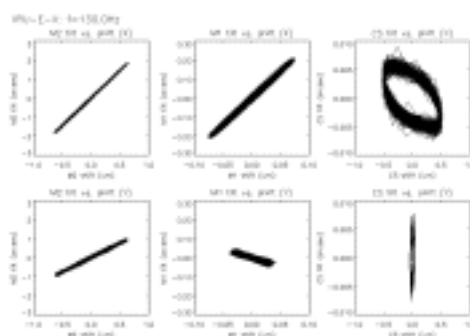
時の望遠鏡の健全性を保証できる。

SOTはCCD面上の画像安定度として、ストークス成分の全情報を十分なS/Nで取得する10秒の間に0.02秒角（3 μ m）以内を必要とする。これは、衛星の姿勢制御系で実現できる精度をはるかに上回るため、焦点面装置内のCorrelation Tracker（NASA担当）Tip-Tilt Mirror（可動鏡：天文台担当）・搭載コンピューターによるclosed-loop制御（天文台担当）により、画像ジッターの安定化をはかる。Correlation trackerは、太陽の粒状班をCCDカメラにより高速撮像(300 frames/sec)して基準画像との相関演算により、姿勢変動を求め、Tip-tilt mirrorは望遠鏡内にある。FEM品の実験室環境での安定度は、0.01秒角（3 μ m）以上であり十分な安定度が確認されている。帯域は15 Hz程度であり、CCDカメラの読み出し遅延で決まっているが、ミラーおよび制御系はこれよりかなり高速である。

衛星バスモジュール内のホイールやジャイロによる力およびトルク擾乱が望遠鏡に伝達し光学素子を振動させる。主鏡や副鏡の位置シフトやチルトが発生することにより、指向軸方向が振動する。振動の周波数は、擾乱源に対応した100 Hz以上であり、CCDの露出時間より早い振動である。このため、擾乱の影響は、空間分解能の劣化となって現れる。右図のように衛星をバネでつり実機ホイールなどを回転させ、望遠鏡内光学素子に取り付けた高感度加速度計データから主鏡や副鏡の変位（チルトとシフト）を検出し（右下図）、指向軸方向の高周波振動による画質劣化を定量的に求めている。画質劣化は等



価波面誤差に換算され、波面誤差バジェットから許容量が管理されている。MTMフェーズの擾乱測定により、ジャイロ搭載位置の変更、ホイール回転数域の最適化、構造の一部変更が行われた。またX線望遠鏡のフィルターホイールなどの影響も今後実測されるが、FEM計算の結果影響が無視できない懸念があり、衛星ミッションデータプロセッサ（MDP）の観測装置の中



央制御機能を用いてソフトウェアにより対策をほどこしている（X線望遠鏡のフィルターホイールが回転中は、可視光望遠鏡の撮像を中止する）。

これまで見てきたように、SOLAR-B可視光望遠鏡の開発においては、徹底して「地上試験により軌道上光学性能を実測し保証する」方針をとり、光学的試験法の開発と実施に大きな努力を払ってきた。これにより、軌道上での回折限界光学性能の実現に不安はないと考えている。