

A12 小型 JASMINE 構造系の検討

○宇都宮真 (JAXA), 安田進 (JAXA), 矢野太平 (天文台), 丹羽佳人 (天文台), 郷田直輝 (天文台), 小林行泰 (天文台), 鹿島伸悟 (天文台), 山田良透 (京大)
Shin UTSUNOMIYA(JAXA), Susumu YASUDA(JAXA), Taihei YANO(NAOJ),
Yoshito NIWA(NAOJ), Naoteru GODA(NAOJ), Yukiyasu KOBAYASHI(NAOJ),
Shingo KASHIMA(NAOJ), Yoshiyuki YAMADA (Kyoto Univ.)

1. 緒言

小型 JASMINE (Japan Astrometry Satellite Mission for INfrared Exploration) は、国立天文台を中心としたワーキンググループで開発している位置天文観測衛星¹⁾である。銀河中心近くのバルジの星をターゲットとし、10 マイクロ秒角 (μas) の世界最高精度の位置天文情報 (天球上の位置、年周視差、固有運動) を世界で初めて得ることを目的としている。ダストに覆われたバルジを観測するため、近赤外線を用いてサーベイすることがユニークである。ミッションの要求から、望遠鏡構造には低温保持と極度の寸法安定性が要求される。小型 JASMINE は、小型科学衛星標準バスに搭載することを前提に開発を進めてきており、環境条件は、イプシロンの打ち上げ環境および小型科学衛星標準バスのインターフェース条件より与えられている。小型科学衛星シリーズは、イプシロン搭載宇宙科学ミッションに枠組みを見直され、提案募集が行われている²⁾ が、構造系への要求に変わりはない。

小型 JASMINE は、これまでにない超高精度の望遠鏡を要求しているが、位置計測という単一ミッションに絞り、銀河系中心付近など科学的に重要で関心が高い領域にのみ絞って観測を行うことで、主鏡直径 300 mm の小型望遠鏡で実現が可能という概念検討結果を得ている。低コスト、短期間での開発の目途も立っている。本稿では、小型 JASMINE 構造系の概念検討結果を報告する。

2. 小型 JASMINE 観測系の概要

小型 JASMINE のミッション要求は、位置、年周視差、固有運動を 10~70 μas で観測することである。Hw バンド (波長 1.1~1.7 μm) を用い、11.5 等級より明るい星を対象として銀河中心方向の 3 度 x 3 度の狭領域をサーベイする。太陽との位置関係でバルジ方向の観測が困難な期間 (夏期および冬期) は、X 線連星や系外惑星探査などの特定天体を観測する計画である。

目標精度の達成は一回の観測では困難であり、同一の天体を多数回観測して統計処理し、誤差を除去することで高精度を得る方法を取る³⁾。ランダム誤差は、観測回数を多くする (大フレーム~約 10,000 枚) ことで観測回数の平方根に比例して低減する。系統誤差は、データ解析ステージにおいて短時間では星が動かないことを利用し、多数の星の位置情報から装置などの変形を推定しモデル化して除去する。長時間に渡る系統誤差は、位置情報が明らかな較正天体を用いて補正する。

図 1 に光学系の概要を示す。3 枚鏡コルシエ系であり、望遠鏡主鏡の口径は 300 mm、焦点距

離は 3.9 m、視野面積は $0.6^\circ \times 0.6^\circ$ である。3 枚の平面鏡を追加して搭載可能な長さに光路を折り畳んでいる。検出器は HgCdTe を用い、ペルチェ素子を使って冷却する。観測時間確保のため、太陽と地球からの迷光防止のため長尺のバツフルフードを望遠鏡前方に設置する。

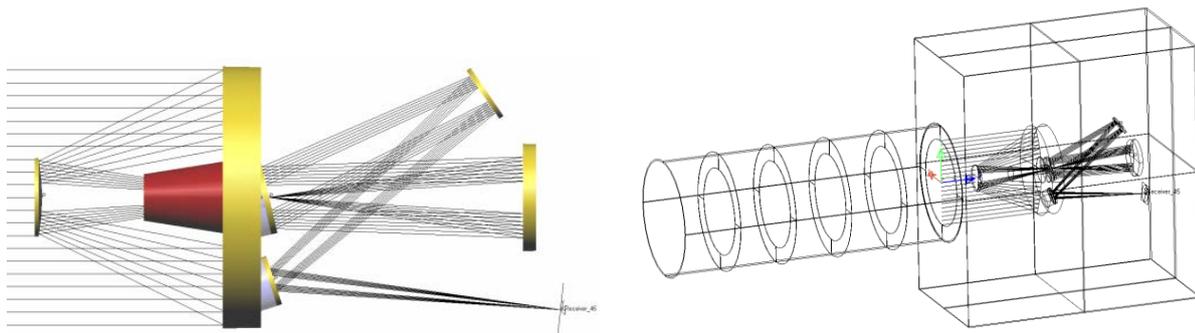


図1 小型 JASMINE 光学系

3. 構造系への要求事項

望遠鏡構造への安定度要求は、焦点面でのひずみに換算して、撮像時間（1 フレーム 7 秒、大フレーム形成時間 約 50 分）中に 0.1 nm 以下と非常に厳しい。ただし、このひずみは星像の相対位置に対してであり、全体の均一な変位や一様なひずみは補正で除去することを前提としている。動的な安定度の要求は、1 フレーム撮像時間 7s に対して、姿勢制御、熱ひずみなどバイアス変形も含め 370 mas 以下である。

機械環境条件は、イプシロンの打ち上げ環境と科学衛星標準バスからの要求により与えられる。強度、音響、衝撃については概念設計段階で検討することとし、イプシロンフェアリング包絡域、質量特性、剛性、標準バスとの機械的インターフェースについて、適合性を検証した。質量については、小型科学衛星の要求は 200 kg 以下であるが、イプシロンの 550 km 太陽同期軌道への投入能力 400 kg を考慮し、小型標準バス 250kg（マージン 5% を含む）を差し引き、150kg を上限として設定した。剛性要求は、機軸 70 Hz 以上、機軸直交 30 Hz 以上である。

4. 構造系の検討結果

4. 1 構造系の概要

構造系は熱的寸法安定性を優先した設計とした。望遠鏡本体部は静定トラス構造で、衛星バスの標準インターフェース点からトラスで主鏡支持パネルを支える。6 枚の望遠鏡パネルで形成した直方体の望遠鏡ボックス内に望遠鏡を設置し、ボックスと望遠鏡は MLI を用いて熱絶縁する。望遠鏡部と電気ボックス部とを分離し、熱を発生する電気ボックスは望遠鏡ボックス外側の側部に配置し熱影響を抑制する。また熱制御のため、サンシールド板を設置し、太陽光と地球アルベドの直射を防止し、極力低温に保つ設計とする。望遠鏡本体は開口部から放射冷却するほか、サンシールド板と反対面を深宇宙に向け、望遠鏡ラジエータとする。検出器は 160~180K に冷却する必要があり、ペルチェ素子を用いて冷却する。ペルチェ素子高温部はヒートパイプを介して外面のラジエータに熱接続する。望遠鏡と検出器のラジエータは、熱擾乱

を避けるために分離し、対向面は MLI で熱遮断する。

望遠鏡本体支持トラスと望遠鏡ボックスのベースパネルは、キネマテックマウントを介して衛星バス構体に結合し、バス構体の熱ひずみの影響を低減する。ブラケットには熱伝導が低いチタンを採用し、バスからの熱流入を抑える。構造系の諸元は、底面 949 x 875 mm、高さ 2650 mm である (図 2b)。

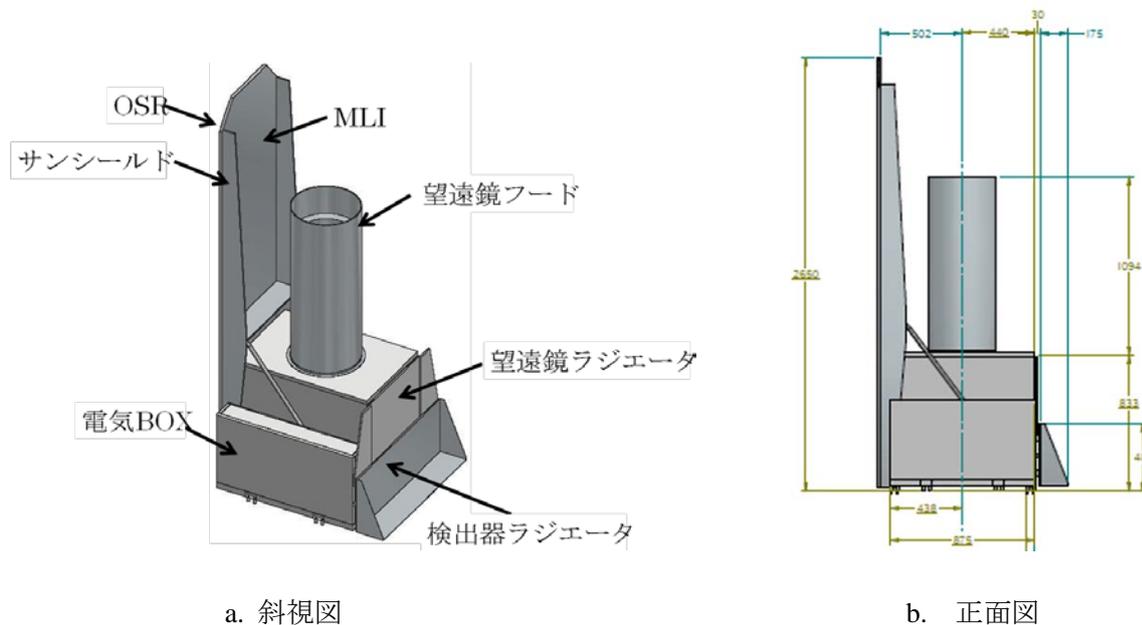


図 2 小型 JASMINE 構造系の概要

4. 2 望遠鏡の構造

望遠鏡の構造と材料を図 3 に示す。全ての光学系を一体の静定トラス構造に設置している。主鏡支持パネル、副鏡支持パネル、検出器支持パネルをトラスで結合支持する。第 4 鏡と第 6 平面鏡は主鏡と一体化し、機械加工精度で位置出し可能とした。第 5 鏡、第 3 鏡と検出器を同一パネルに搭載し、組み立て精度を向上させ、光軸調整の簡易化を意図した。検出器に焦点調整機構を設置する。トラス、鏡面支持パネル、ブラケットは、全てインバーで製作する。同一材料によるアサーマルな構造とし、トラスやブラケットの変形による不均一な熱ひずみの低減と設計上予測が不可能な変形要因を極力排除した。インバーは実績が豊富な金属材料であり、部品間のバラつきが少ないことも重視している。インバー採用によって、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の弱点であった湿潤変形を排除する効果がある。本設計では質量要求に大きなマージンがあるため、比剛性が劣るインバーの大量採用が可能となった。

4. 3 質量特性

ミッション部の質量総計は、96 kg であり、インバーを用いてもなお大きなマージンがある。内訳は、鏡面を含む望遠鏡本体 31 kg、構体パネル 21 kg、サンシールドおよびフード 11 kg、熱制御系 8 kg、検出器 4 kg、焦点調整機構 2 kg、電気系 19 kg である。質量中心高さはバス上面から 422 mm であり、標準バスの要求を満たしている。

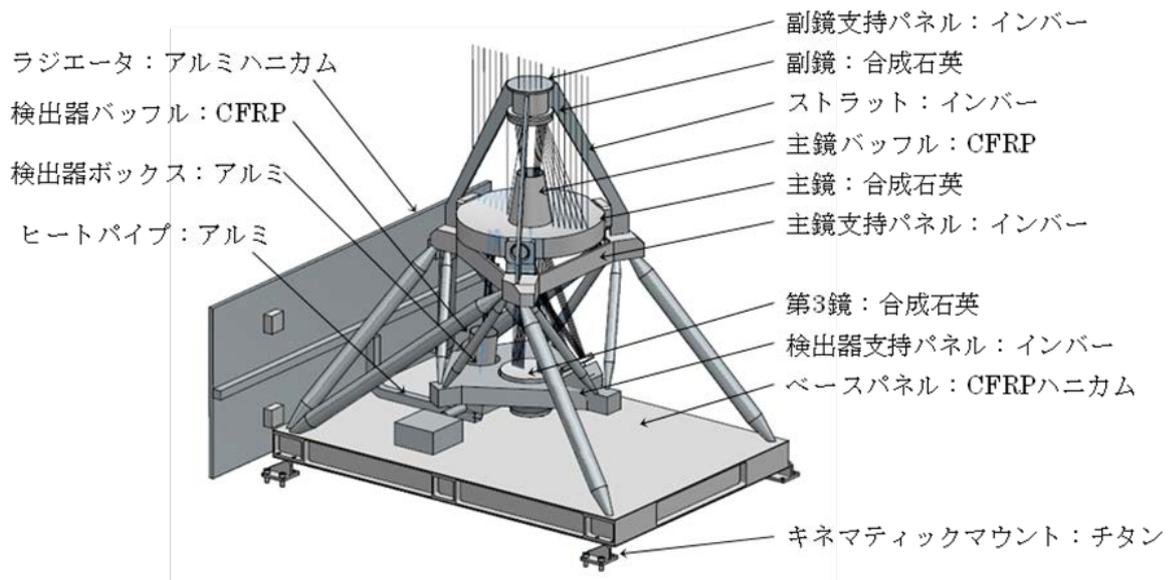


図3 望遠鏡構造と材料

4. 4 イプシロン包絡域との適合性

イプシロン包絡域との適合性を図4に示す。サンシールド上部の切り欠きはフェアリングとの間に十分なクリアランスを持たせるためである。

4. 5 固有振動値解析

ミッション部の固有値解析の結果は、

機軸方向一次	Z方向	~235 Hz
機軸直交方向一次	X方向	~123 Hz
	Y方向	~78 Hz

(図5)

であった。最も低い周波数は、副鏡の機軸周りの回転方向で 36 Hz であり、剛性要求を満たしている。

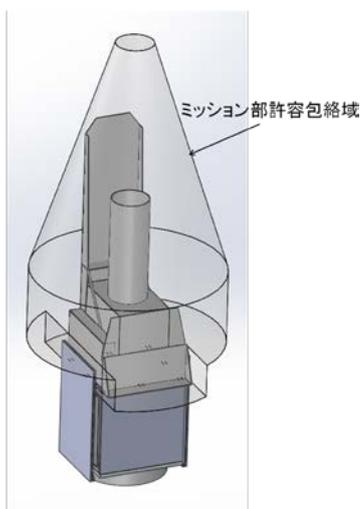


図4 イプシロン包絡域との適合性

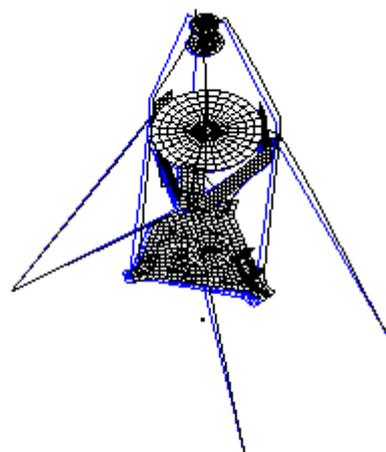


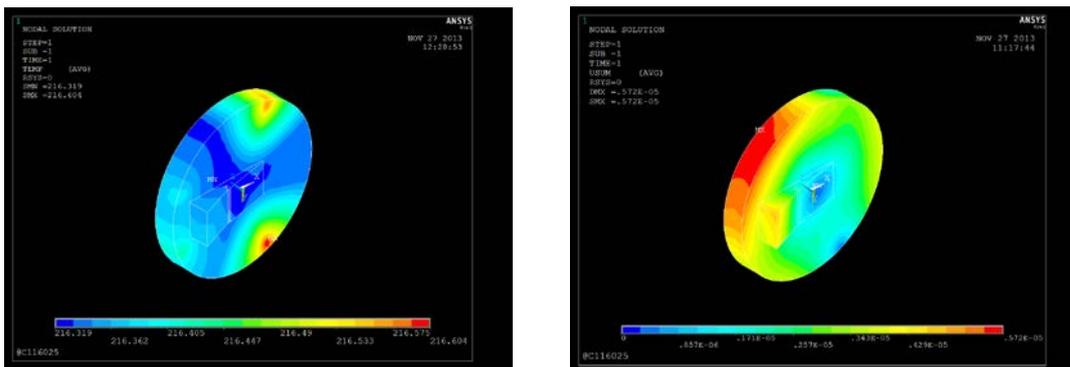
図5 振動モード：Y軸一次

4. 6 擾乱解析

擾乱源としてリアクションホイール (RWA) と慣性基準装置 (IRU) を検討した。RWA の共振領域は、20~70 Hz にある。IRU は、143~155 Hz の領域内の1周波数である。RWA の危険周波数領域には副鏡の機軸周りのモードが存在するが、これは非励振のローカルモードである。IRU の危険周波数領域には、主要モードもローカルモードも存在しない。数百倍の共振倍率を考慮して RWA の擾乱は 240 mas 程度との情報を衛星バス側から得ており、共振により擾乱が生じる危険は小さいと考えられる。

4. 7 望遠鏡構造の熱ひずみの検討

熱ひずみの検討は、熱解析によって得られた温度と温度分布を用いて行った。観測時間 50 分の範囲における熱変動量は、副鏡支柱 2 K、第 3 鏡支柱 0.25 K、主鏡部にある第 6 平面鏡部 0.1 K 程度である。温度分布を入れて望遠鏡の熱ひずみを計算し、得られた鏡面に対して光線追跡して焦点面における画像のひずみを求めた。第 6 平面鏡の変形が最も大きな影響を与えることが光線追跡より判った。第 6 鏡の熱ひずみ計算結果を図 6 に、この時の焦点面における画像のひずみを図 7 に示す。図 7 における横軸は時刻である。焦点面における像のひずみは、補正前では最大 2 nm であったが、一次補正を行うと精度が 2 桁向上し、残渣は 0.03 nm となり、要求値を満足した。



a. 主鏡の温度分布

b. 温度分布より計算した熱ひずみ

図 6 主鏡の熱ひずみの計算結果

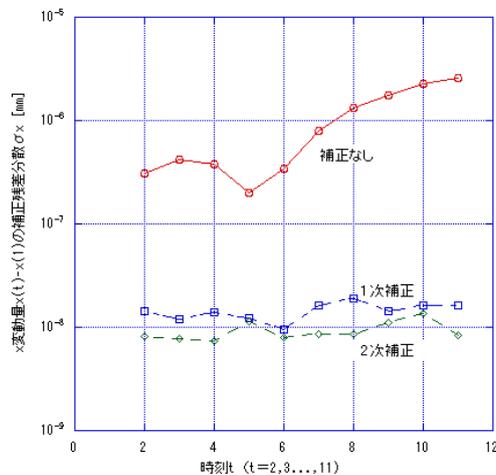


図 7 望遠鏡熱ひずみの影響

5. 結言

小型 JASMINE 構造系の検討を行い、科学ミッション要求から来るシステム要求、イプシロン環境条件、小型科学衛星バスからの要求を全て満足する概念検討結果が得られた。イプシロンや小型標準バス仕様に適合する範囲で設計を行ったので、ロケットや衛星バスに対する新規要求は無い。強度については未検討であるが、これまでの経験から部分的な強化で解決が可能な範囲と考えてよく、質量に余裕もある。構成材料や構造に新規性は全く無いので、構造系に関しては開発が比較的短期間に集約すると期待できる。しかし、本稿の結果はあくまで机上検討であり、これまでにない高い精度要求であることを考慮すると、早期に実物で計測して検証を行うことがリスク低減に繋がる。特に熱ひずみ解析については、熱解析で得た高い温度安定を基に計算しており、その実現性を早期に実証する必要があると考える。また本稿ではパッシブ温度制御を前提として検討してきたが、アクティブ制御を加えてよりロバストな設計とする提案もある。0℃～常温近傍に望遠鏡温度を制御できれば、光学調整と性能検証が飛躍的に容易となることは確実であり、今後も継続して検討しトレードオフを行う。

参考文献

1. www.jasmine-galaxy.org
2. 宇宙科学研究所ホームページ参照
3. 郷田他、”小型 JASMINE 計画の全体的概要 “、小型科学衛星シンポジウム、2013.3