



小型JASMINE実現のためのクリティカルな検討課題の技術実証

第13回宇宙科学シンポジウム 2013 1/8 - 1/9 宇宙科学研究所 相模原キャンパス P2-055

○丹羽佳人、矢野太平、鹿島伸博、宇都宮真、上田暁俊、郷田直輝、小林行泰(国立天文台)、山田良造(京大理)、安田達(JAXA)、他JASMINEワーキンググループ

Abstract

JASMINE計画は、次期位置天文観測衛星プロジェクトのひとつで、星の位置を10マイクロ秒角の精度で観測することを目標としている。現在、小型科学衛星シリーズの3号機への提案を目指して検討されている小型JASMINE計画では、ミッションシステムを成立させるための検討課題を洗い出し、それらの技術実証試験を行うことにより所定の精度要求を満たす事ができるかの確認を行っている。主な検討課題を以下に挙げる。

- ① 観測装置の熱変動実証: 観測で得た星の位置情報を用いて望遠鏡の熱変形の変動量を推定し、星の位置決定の誤差を補正することで、温度安定度に対する要求を1K程度まで緩和させることを考えており、そのストラテジーを実証する必要がある。
- ② 低反射率表面処理の性能評価: 許容される迷光量(1ピクセルあたり13 photon/sec)まで抑えるためにはフードやバツフル、さらに低反射率素材を用いた望遠鏡の内面処理が必要となる。ノミナルの設計では、フードの内面やバツフルの表面を低反射率の特性(半球反射率3%)にすることでフードは伸展せずにフェアリングにおさまる設計になっているが、反射率がさらに低く、軌道上での使用にも適した素材が見つければ、よりコンパクトサイズのフードにすることが可能となり、コストや重量なども助かるため、できるだけ低反射率な素材の検討をしている。
- ③ 星像中心位置決定精度の実証: 系統誤差の補正手法を確立し、およそ60万枚の撮像データから、実際に10マイクロ秒角の精度で星の位置決めが可能であることを実証する必要がある。
*以前から検討課題であった「高精度な衛星指向安定性のための制御システム開発」に関しては擾乱レベルの明確化及び要求を370ミリ秒角まで緩和することで対処した。

現在、それぞれの検討課題についてブレッドボードモデルを用いた実証試験や性能評価試験が進められており、本ポスターではその進捗状況について報告する。

① 観測装置の熱変動実証

熱安定度達成のストラテジー

熱による撮像画像サイズの変動(Fig. 1-1参照)が問題となるので以下のストラテジーで対処する。

- ① 望遠鏡周辺の温度変動を $\sim 1K/45$ 分程度に抑える。
- ② 撮像画像サイズの変動として、拡大縮小(1次の変動)や勾配をもった変動(2次の変動)は、0.1nm(目標精度)以上の変動が生じるとしても、3次以上の変動は、0.1nmより小さくなる。
- ③ 1次と2次変動は0.1nm以下の精度で星像の撮像データの解析により求められる。

以上のストラテジーはシミュレーションでその妥当性が示されており、実測による確認作業を現在進めている。

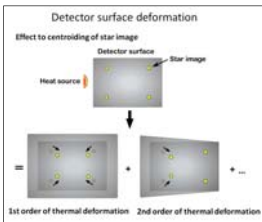


Fig. 1-1 熱入力による検出器面形状の熱変動とその影響

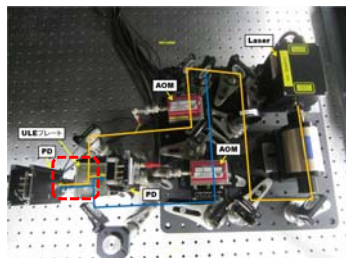


Fig. 1-2 ヘテロダインレーザー干渉計型熱変動センサーの外観: 赤で囲んだ部分に設置した素材上で光を干渉させ、その熱変動を感知している。(Niwa et al. Applied Optics, Vol. 48, Issue 32, pp. 6105-6110)

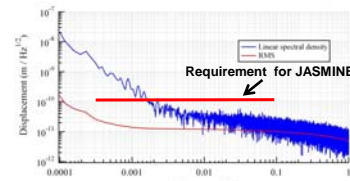


Fig. 1-3 熱変動センサーの雑音評価

望遠鏡素材の熱変動量測定

熱安定度達成のストラテジーを実証するため、望遠鏡・検出器素材の3次までの熱変形モードを実測する。

◆熱変動センサーとしてsub-nmの変動量が測定可能なレーザー干渉計を利用。

◆測距信号の取得方法としてヘテロダイン干渉法を採用。外乱の影響をフィードバック制御で抑えることで、測定対象のみ感度をもつ測距システムを構築。sub-nmの測定が可能で小型JASMINEの要求測定精度(45分以下のRMS値で0.1nm)を満たす(Fig. 1-2, 1-3)。

◆熱変動測定のための光学系をFig. 1-4に示す。PD出力信号S1の出力が0になるように、AOMでレーザー一周波数の位相制御をすることで、望遠鏡素材の各区間における膨張・収縮量(0h1, 0h2, 0h3)を外乱の影響(0L7 or 0L8)を受けずに直接検出することが可能。FEMによるシミュレーションにより熱変形が要求される精度で測定可能であることを確認(Fig. 1-5)。

◆検出器の熱変形特性を調べるため、その素材であるシリコンウエハ上に光学素子をボンディングする必要がある。シリコンウエハ上に形成された酸化皮膜により、シリケートボンディングが有効(E J Elliffe et al., Class Quantum Grav. 22, S257-S267 (2005))。

◆Fig. 1-6は熱変動量を実測するためのシリコンウエハ。ウエハ上には合成石英製のビームスプリッターがシリケートボンディングによって接着されている。

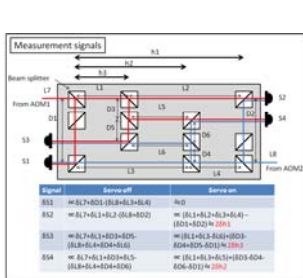


Fig. 1-4 熱変動測定のための光学系

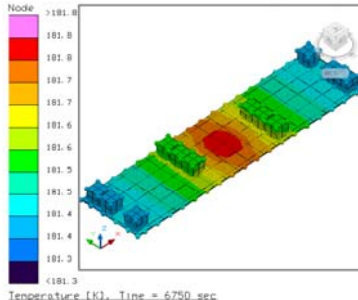


Fig. 1-5 FEMによる熱変形シミュレーション

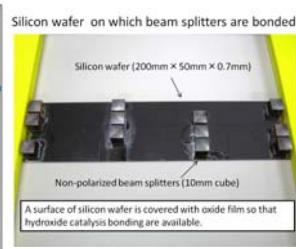


Fig. 1-6 熱変動測定のための光学系がボンディングされたシリコンウエハ

② 低反射率表面処理の性能評価

要求性能

低反射率表面処理として以下の要求を満たすものを調査している。

- ① 波長1.4um付近での半球反射率3%以下でランバート散乱する
- ② 安価で大面積に対して処理が可能
- ③ 宇宙軌道上での環境に耐えられる
- ④ アウトガスの量が少ない

半球反射率測定

◆分光光度計(SHIMADZU, SolidSpec-3700)を用いて各種表面処理(Table 3-1)の8°入射時の半球反射率を測定した。

◆測定の結果をFig. 3-1に示した。特にVEL-BLACKと導電性繊維植毛の半球反射率が小さく、波長1.4umに対してそれぞれ0.3%と0.4%だった。

◆VEL-BLACKはJWST搭載予定の素材であり宇宙仕様であることから小型JASMINEの表面処理のベースラインとした。また、導電性繊維植毛に関しても今後宇宙耐性試験を進めて使用可能であるかを確認しておく。

Table 3-1: 表面処理の概要

名称	販売/開発元	種類
NHVソフト	京都ハイパル繊維工業株式会社	ナイロン植毛
タフブラック	エビテラ化学工業株式会社	黒色メッキ
PNC	MA P社	宇宙仕様ブラックペイント
ファインシャットSP	光陽オリエンタージャパン株式会社	特殊ポリウレタン素材のマイクロセル発泡体
メタルベルベット	Acktar社	宇宙仕様の光吸収体
導電性繊維植毛	京都ハイパル繊維工業株式会社	導電性繊維(ペルトロン)の植毛
VEL-BLACK	ESLU社	宇宙仕様のカーボンファイバー植毛

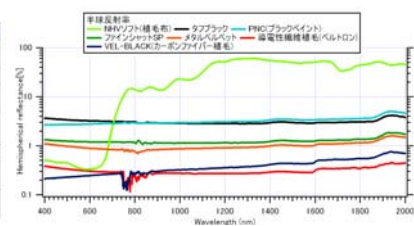


Fig. 3-1: 各表面処理の半球反射率の測定結果

③ 星像中心位置決定精度の実証

星像中心位置決定のアルゴリズム

10マイクロ秒角の精度で星像の中心位置を決定するために重心法を用いる。画像が熱変動等によって歪む影響(系統誤差)をパラメータ化して解くことで星像間の距離をサブピクセルレベルの精度で測定することが可能となっている。Table 1-1は想定される系統誤差の種類をまとめている。本試験では実際に疑似星像を撮像し、これらの系統誤差を解く、あるいはランダム化して取り除くことで目標の精度が達成できることを検証する。

実証試験概要

Yano, T., et al. 2006, PASP, 118, 1448
Yano, T., et al. 2004, PASP, 116, 667

アルゴリズム実証試験のセットアップ及び撮像画像はFig. 2-1を参照。測定システムに起因する系統誤差がなければ、星像中心位置決定精度はランダム誤差で決まっています。星の数の平方根に比例して上がる。10万分の1ピクセルの位置決定精度を達成するためには、およそ60万枚以上の長期連続撮像が必要であり、実験システムのオートメーション化、リモートコントロール化を進めた。これまでに10万枚の撮像データから系統誤差を適切に取り除き、ランダム誤差として、 $\sim N$ 分の1則に従い誤差分散が低減していくことの確認ができている。(Fig. 2-2)。

Table 1-1 セントロイドに係る系統誤差の整理

撮像画像	系統誤差(原因別)	系統誤差(性質分類)
小フレーム(0.6°四方)	中心推定誤差	ランダムに発生する誤差
検出器誤差	ピクセル毎形状誤差	ランダムに発生する誤差
	検出器歪み	ランダムに発生する誤差
	感度むらによるフット中心ずれ	ランダムに発生する誤差
	検出器大域歪	ランダムに発生する誤差
大フレーム(3°四方)	星像補正誤差*	色と座標の関数
	光学歪み	座標の関数
	40分スケール構造歪み	時間の関数
大フレーム多数枚	衛星位置見精度誤差*	全体平行移動
	衛星位置見精度誤差*	全体平行移動
	構造経年変化(膨張、重力変位)	時間の関数
	素子間振動	ランダム
	熱変動	ランダム
	校正天体誤差*	校正天体毎

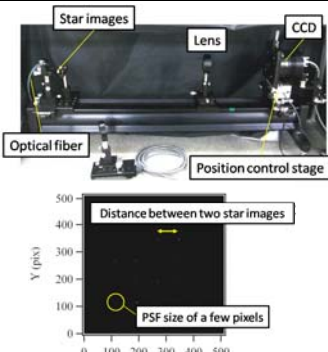


Fig. 2-1: アルゴリズム実証試験のセットアップと撮像画像

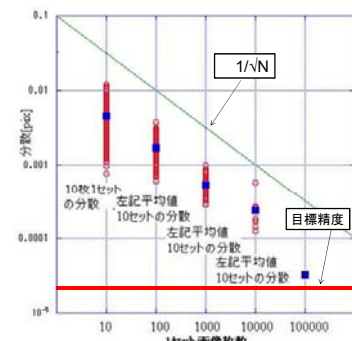


Fig. 2-2: 星像中心位置決定精度

今後の予定

小型JASMINEは小型科学衛星ミッションの公募(25年春予定)への応募を予定しており、24年度中に各検討課題においてBBMIによる検証を完了し、TRL4相当達成を目指す。