

第10章 試験計画

この章のまとめ

SPICA は従来の科学衛星にはない大きなシステムである。さらに、SPICA には、新たに技術開発を要する重要な事項がいくつかある。したがって、SPICA の設計にあたっては、試験計画まで含めた総合的な検討が必須である。

衛星としての通常の試験についても、大きなシステムとなることから、効率的でかつ信頼性の高い試験方法を考える必要がある。

さらに、試験方法について、特に検討が必要なサブシステムとしては、以下が挙げられる。各々の項目について、試験方法(案)と課題について述べる。

- 極低温冷却系
放射冷却と冷凍機によるハイブリッド冷却システムをどのように実証するかが大きな課題である。筑波宇宙センターの大型チェンバーを改造して用いる案を提案する。
- 焦点面観測装置
衛星システム全体としては、地上において焦点面観測装置を冷却する能力をもたない。そのため、焦点面観測装置試験は、いくつかの段階を経て行なう必要がある。
- 望遠鏡システム
3.5m という大きな望遠鏡の、しかも極低温における性能を、どのように実証するかが大きな課題である。筑波宇宙センターの6m チェンバーを一部改造して試験を行なう案を提案する(6章参照)。
- 姿勢制御系
バス機器とミッション機器の両方で制御を行なうハイブリッド制御方式の検証が早急に必要である。さらに、姿勢擾乱の管理、検証方法の検討、確立が急務である。

フェーズ A においては、これらの試験方法をより詳細に検討し、具体化することが重要である。さらに、一部は、試験設備の整備が必要である。他衛星の需要動向にも配慮しつつ、試験インフラストラクチャの整備を戦略的に行なうことが必要である。

10.1 基本方針

10.1.1 試験計画の重要性

SPICA は従来の科学衛星にはない大きなシステムである。さらに、SPICA には、新たに技術開発を要する重要な事項がいくつかある。したがって、SPICA の設計にあたっては、試験計画まで含めた総合的な検討が必須である。すなわち、試験計画の立案なしに、衛星そのものの設計を進めることはできない。

10.1.2 衛星システム

衛星システムとして SPICA を見ると、姿勢制御系など一部に新規開発の必要な部分もあるが、全体としては既存の技術で充分に対応できるものである。したがって、SPICA ミッションでは、バス機器ではできる限りこれまでに実績のある設計を踏襲する方針である。

しかしながら、従来の科学衛星にはない大きなシステムであり、衛星としての通常の試験についても、効率的でかつ信頼性の高い試験方法を考える必要がある。

SPICA は、H-IIA ロケットで打上げる大型衛星であり、これまでの科学衛星の枠には収まらない。開発研究段階の要素試験や機器単体の試験を除き、筑波宇宙センターでの組立て / 試験が必須である。

ミッション系では、個別の要素の試験は、相模原その他で行なうことを考えるが、フルサイズの望遠鏡、あるいはフルサイズの冷却系を用いる試験は、筑波で行うことを想定している。また衛星全体の熱・構造モデル試験、あるいは、衛星の組立て / 試験は、すべて筑波での作業を想定している。

10.1.3 特別な試験項目

SPICA 計画では、上記のように、バス機器はできる限りこれまでに実績のある設計を踏襲する方針であるが、ミッション機器には新たに技術開発を要する事項が多々あり、研究フェーズから設計の成立性確認のための各種試験が必要となる。研究開発フェーズの段階から各種試験が必要となるサブシステムとしては、以下が挙げられる。

- 極低温冷却系
- 望遠鏡システム
- 焦点面観測装置
- 姿勢制御系

以下では、これらのサブシステムに関する試験計画について述べる。

このうち望遠鏡システムは、軽量大口径の冷却望遠鏡を新規開発するものであり、大規模な試験が必要となるが、これについては、試験計画まで含めて 6 章に記述されているので、そちらを参照されたい。

また個々の赤外線観測装置については、例えばコロナグラフ装置のように、開発要素を多く含むものがあるが、ここでは衛星システム全体に影響する項目のみを取り上げることとする。

10.2 冷却系

SPICA 冷却系は、これまで実用化されて来た液体ヘリウム等の冷媒による冷却から脱却し、常温での打上げ、軌道上での放射冷却と機械式冷凍機による冷却を目指している。放射冷却システムは、冷媒も電力も必要としない魅力的なシステムであるが、地上での試験に困難を伴う。SPICA 冷却系では、10K 程度の低温部からも、3K の宇宙に対して放射で排熱するが、通常の衛星熱真空試験チェンバーは、液体窒素温度のシュラウドしか有しない。試験計画においては、このような既存のスペースチェンバーを使ってどこまで冷却系の設計を検証できるかが鍵となる。また最後は熱数学モデルによって軌道上での冷却性能を推定せざるを得ず、熱数学モデルをいかに正確なものにできるかも焦点となる。

表 10.1: 測定すべき低温物性

測定対象	CFRP 部材 (低熱伝導率 CFRP、及び高熱伝導率 CFRP) 鏡材 (SiC、C/SiC 等)
測定項目	熱伝導率、線膨張係数、比熱、赤外放射率

10.2.1 研究開発フェーズ段階での試験項目

研究開発フェーズ段階においては、設計に必要な各要素の性能 / 特性を確認することが中心となる。

具体的な項目としては以下が挙げられる。

1. 冷凍機の冷却能力評価
冷凍温度 4.5K, 2.5K, 1.7K それぞれの冷凍機の冷凍能力を、試作機を用いて、経年変化 (予測) を含めて確立する必要がある。
2. 材料の低温物性の実測
熱・構造材料の極低温での物性は、既存のデータに頼らず、実測の必要がある。特に複合材料は、実際に使用予定の材料でデータを取得することが必須である。
3. 冷凍機排熱機器の性能評価
大きな電力を消費する冷凍機の排熱方式は、冷却系設計に大きく影響する要素である。LHP, MPL, ヒートパイプが候補となっているが、どれを使用するか決定と、その性能の評価が必要である。
4. 望遠鏡、赤外線観測装置冷却熱パスの伝熱コンダクタンス測定
望遠鏡および観測装置は、それぞれに発生熱量、要求冷却温度が異なり、それに応じた熱パスが設定される。要素試験により、冷却される熱パスの伝熱コンダクタンスを、接触抵抗を含めて、評価する。
5. ヒートスイッチ性能試験
故障時に熱侵入パスとなる冷凍機を切り離すためのヒートスイッチについて、ON 時、OFF 時の伝熱コンダクタンスを測定する。
6. 望遠鏡 / 赤外線観測装置インターフェイス部の熱歪み
これは冷却性能に関わるものではないが、冷却系から望遠鏡システムに加わる荷重を評価しておくことが、望遠鏡支持構造の設計に必要である。望遠鏡システムを支えるトラス構造の部分モデル、またはスケールモデルを製作し、冷却して熱歪みを測定する。また同時に、赤外線観測装置取り付け部の熱収縮についても、測定する。

10.2.2 PM 段階の試験項目

PM 段階においては、フルサイズの熱・構造試験モデルの製作が必要である。放熱板の冷却性能、熱シールド板の断熱性能を確認し熱設計の成立性を確認するとともに、熱数学モデルを検証する。できれば、FM と同じ材料で構成する望遠鏡システムの試作品も搭載する。

SPICA ミッション系の熱設計では、22K 程度の温度になると推定されるバツフルや、40~90K の温度となるシールド #1, 2, 3 から放射により排熱を行うが、宇宙と同じ 3K のシュラウドを備

えた試験チェンバーが存在しないことが問題となる。現状では、以下の様なコンフィギュレーションでの試験を想定している。

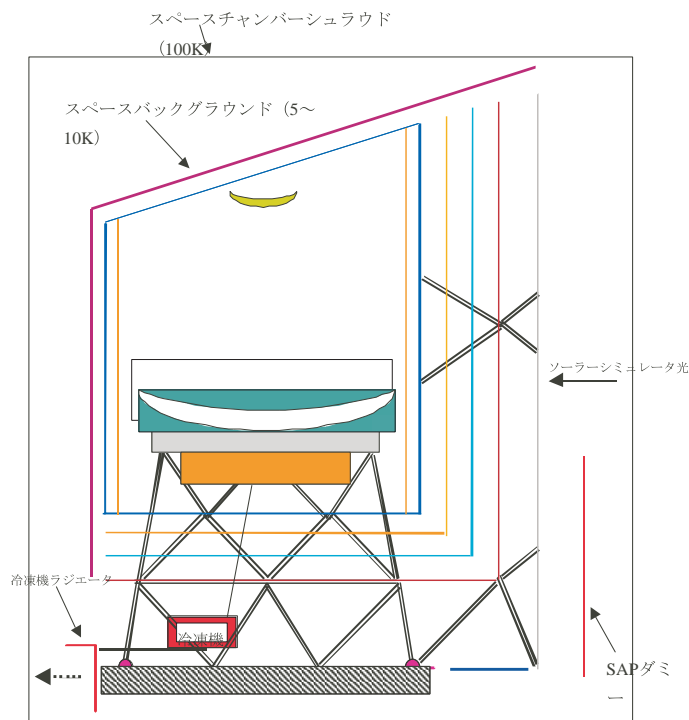


図 10.1: SPICA 冷却系試験の構成図

1. 使用チェンバー

つくば宇宙センターの 13 m ϕ チェンバーを想定している。

ただし、望遠鏡開口部、および側面の太陽方向以外の部分を覆う、スペースバックグラウンド (SB) をチェンバー内に設置する必要がある (図 10.1 参照)。この SB は、ガスヘリウム循環 + GM 冷凍機、あるいは液体ヘリウムにより、10K 以下の温度まで冷却する。必要な冷却能力は、20W 程度である。

2. 搭載冷凍機

全体の熱設計の検証のためには、4.5K 冷凍機のみ搭載すれば良い。また冷凍機の排熱は、通常の 80K のシュラウドに放熱することで足りる。

3. その他の要求

SPICA 冷却系は、放射冷却と搭載用冷凍機による冷却では、冷却に要する期間が数ヶ月となり、非現実的な試験期間が必要となる。このため、望遠鏡が取付けられる光学ベンチにはヘリウム配管を設置し、液体ヘリウムを流して強制冷却することにより、試験期間の短縮をはかる。

10.2.3 試験設備の整備

上記のように、筑波宇宙センターの 13 M ϕ チェンバーの改造が必要である。具体的には、望遠鏡開口部、および側面の太陽方向以外の部分を覆う、スペースバックグラウンド (SB) をチェンバー内に設置する必要がある (図 10.1 参照)。

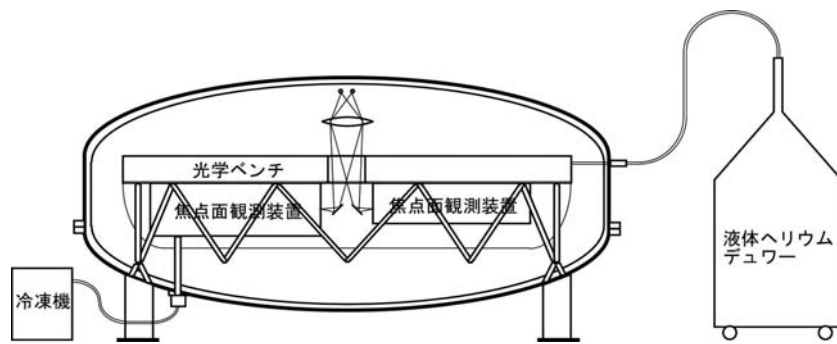


図 10.2: 焦点面観測装置全体の冷却試験構成図。小型の望遠鏡シミュレーターを含む。軌道上の動作と同様に、冷凍機による冷却シミュレーションも可能とする。

10.3 焦点面観測装置

10.3.1 段階的試験

従来の赤外線天文衛星では、観測装置の冷却に、真空槽と液体ヘリウムを用いて来た。これは、前述のように、大幅な重量増を招くという欠点を持っていた。SPICA 冷却系は、この欠点を克服すべく、冷媒を搭載しないシステムを採用している。これにより、軽量化を達成し、大口径冷却望遠鏡を軌道上に打上げることが可能としている。

しかし、これは地上において、衛星システムとしての冷却機能を放棄したことに相当する。このために、衛星の地上試験において軌道上の冷却状態を再現することが容易ではない。

この状況の影響を最も受けるのが、焦点面観測装置である。それは、天文観測用赤外線センサーは極低温でのみ動作し、常温では性能の確認のみならず、破損の恐れから通電さえできないものが多いことによる。従って、焦点面観測装置の設計・試験には、工夫が必要となる。基本的には、限られたセンサー部を除いて、できるだけ多くの部分の健全性が、常温、あるいは不完全な冷却でも確認できるよう、観測装置設計時に総合的に計画をたてておくことが必要である。

試験は、効率的に行なうために、いくつかの段階に分け、各々の試験での獲得目標を明確にする。全体として、verification matrix が十分に埋められるよう、総合的に試験計画を立案することになる。

まず、センサーまで含めた焦点面観測装置性能の詳細試験は、観測装置単体での試験段階で主に行なうこととする。その後の試験では、冷却系其他とのインターフェイスを明確にして管理し、熱、機械、電気的インターフェイス条件を保証することで、センサー性能が出ることを保証することとなる。その上で、必要最小限の冷却試験を行い、(詳細性能の確認は無理としても)end-to-endの健全性確認を行う。

10.3.2 試験設備の整備

上記の試験を行なうためには、以下の試験設備の整備が必要である。

1. 焦点面観測装置全体を冷却試験するチャンバー (図 10.2) の新規製作
2. システム全体での熱試験の際に、焦点面観測装置の動作を可能とするための、チャンバーへの改造 (詳しくは、前節にて議論)

10.4 姿勢制御系

SPICA の望遠鏡指向方向の制御は、特にコロナグラフモードにおいて、1 分間にわたって角度の 0.03 秒という高い安定度を要求する。これは望遠鏡焦点面に設置される星センサーと Tip-Tilt 鏡による指向制御系と、衛星全体の姿勢を制御する姿勢制御系の協調制御により実現される。研究開発フェーズにおいては、焦点面の指向制御系の仕様 (あるいはその現実的な目標値) を確定し、指向制御系と姿勢制御系の機能分担を明らかにして、設計の妥当性を確認することが必用となる。

10.4.1 研究開発フェーズにおける試験項目

FPI センサーの特性評価

焦点面に置かれる FPI センサーは、ガイド星の位置を検出することにより、姿勢制御系と指向制御系の基準座標のバイアス誤差、及び、FPI が受ける擾乱を検出する。FPI センサーは、Tip-Tilt ミラー駆動制御の目標値を与えるとともに、FPI が受ける擾乱の主成分 (冷凍機振動等) 毎に、その振幅と位相を同定して、Tip-Tilt ミラー駆動にフィードフォワード制御を行うことが想定されている (8.5 節を参照)。この目的のために、FPI センサー部を試作し、以下の評価を行う。

- 静特性の評価
- 単一擾乱周波数に対する入出力振幅 / 位相特性、およびその同定精度
- 複数擾乱周波数が存在する場合の単一擾乱同定精度

これらの試験結果に基づき、FPI センサーに実際に印加される擾乱環境下において、極力高い擾乱検出、精度を実現するための最適動作点 (読みだし周波数等) を決定する。

Tip-Tilt 制御系駆動特性評価

FPI センサーと Tip-Tilt 駆動系から構成される Tip-Tilt 制御系を試作し、その周波数応答特性、駆動精度等を評価する。これにより、要求される指向制御精度の到達可能性を確認するとともに、FPI センサーと Tip-Tilt 駆動系の精度 (誤差) の最適性能配分等を決定する。

ハイブリッド制御方式の妥当性評価

現在の想定では、指向制御系は角度補正情報を姿勢制御系に出力し、姿勢制御系はこれに基づいて、温度変動等によるアラインメント誤差の補正を行う。この方式の妥当性を確認するため、衛星全体のダイナミクスシミュレーションを実施する。このシミュレーションにより、アラインメント誤差補正アルゴリズムの確立と、必要な計算周期を得る。

10.4.2 PM 段階以降の試験項目

開発段階、及び製造段階における姿勢制御系に関連する試験計画を、表 10.2 と 10.3 に示す。開発段階 (PM) では、指向制御系と姿勢制御系とのインターフェイス確認や、擾乱発生要素の PM 品を用いた擾乱の測定や、擾乱レベルの管理が重要な試験要素となる。擾乱の管理は、製造段階においても非常に大きな試験項目となる。

表 10.2: SPICA 姿勢軌道制御系に関連する試験計画 (開発段階における試験)

試験名	試験目的	備考
姿勢系評価試験	AOCU および搭載ソフトウェアの基本機能性能を確認する。またシミュレータを用いて閉ループ試験系を構成して姿勢軌道制御系の機能性能を確認する。	
擾乱試験	擾乱発生要素 (フライト品と同等品) に対してその擾乱特性を計測する。対象品目は、RW および IRU 擾乱伝達要素 (構造モデル等) に対してその特性を評価する。	コンポーネント/サブシステム /システムレベル
アイソレータ特性評価試験 (暫定)	上記擾乱試験の結果、アイソレータが必要となる場合には、アイソレータの特性を評価する試験を実施する。	コンポーネントレベル
指向制御系噛合わせ試験	指向制御系との I/F を確認する。機能を模擬した部分的閉ループ試験系を構成して、指向制御系を含む指向制御機能性能を確認する。	試験方法について指向制御系との調整が必要 低擾乱試験環境が必要

表 10.3: SPICA 姿勢軌道制御系に関連する試験計画 (製造段階における試験)

試験名	試験目的	備考
姿勢系評価試験	閉ループ試験系を構成して、姿勢軌道制御系の機能性能を確認する。	サブシステムレベル
擾乱試験	擾乱発生要素 (フライト品) に対してその擾乱特性を計測する。 擾乱伝達要素 (フライト品) に対してその特性を評価する。	コンポーネント/サブシステム /システムレベル
指向制御系噛合わせ試験	指向制御系との I/F を確認する。 閉ループ試験系を構成して、指向制御系を含む指向制御機能性能を確認する。	サブシステムレベル 低擾乱試験環境が必要

10.4.3 試験設備の整備

姿勢系の試験だけのために、大きな試験設備を新設する必要はない。

ただし、特に FPI センサー等の一部の試験においては、極端に低い擾乱レベルの試験環境が必要となる。これは JAXA 内の設備では実現できない可能性があり、試験設備の調査が早急に必要である。

10.5 試験設備の戦略的整備

上記に提案している試験設備を、SPICA のためだけに整備することは、あまりにも効率が悪い。

宇宙ミッションの特徴は、その試験に大きなインフラストラクチャーを必要とすることである。したがって、そのインフラストラクチャーを、複数のミッションにおいて、いかに効率的に共有していくかということは、効率的な宇宙開発のためには、大きな課題である。

上記に提案している試験設備のうち、光学試験設備や姿勢制御試験のシステムは、他の衛星との共同により開発・整備すべきものである。日本としての戦略的な試験設備整備のなかに、SPICA のための試験設備を位置付ける必要がある。

試験設備の整備には長い時間が必要である。したがって、試験設備計画を具体化することは、SPICA のフェーズ A にとって重要な課題の一つである。

10.6 技術成熟度

衛星システム試験に関する技術の成熟度を表 10.4 に、ミッション部試験に関する技術の成熟度を表 10.5 に示す。

表 10.4: 衛星システム試験に関する技術の成熟度

項目	現時点での状況	フェーズ A 完了時の見通し	備考
姿勢系以外	7	7	
姿勢系	4	6	

表 10.5: ミッション部試験に関する技術の成熟度

項目	現時点での状況	フェーズ 完了時の見通し	備考
望遠鏡	3	5	
冷却系	3	5	チェンバーの整備が必要
焦点面観測装置	3	5	チェンバーの整備が必要