

第21回宇宙科学シンポジウム

g04-04:

JASMINE (赤外線位置天文衛星) 望遠鏡の熱制御

国立天文台

JASMINE Project

間瀬一郎

小型JASMINEプリプロジェクト候補チーム

Abstract

JASMINE望遠鏡の熱制御要求は、熱歪抑制のため、**温度変動幅を $0.1^{\circ}\text{C}/50\text{分}$ (=連続観測時間)以下に抑制**することである。

熱制御手法として、光学系をパネルで囲み定温にヒータ制御し、距離を空けて光学系全体へ輻射することで、加熱のムラや短期変動を緩和する方式を採用した。

昨年度まで**望遠鏡BBMの熱平衡試験により温度制御感度特性を実測し熱制御要求を達成**する結果を得た。
今回の報告は、その設計・検証結果のまとめである。

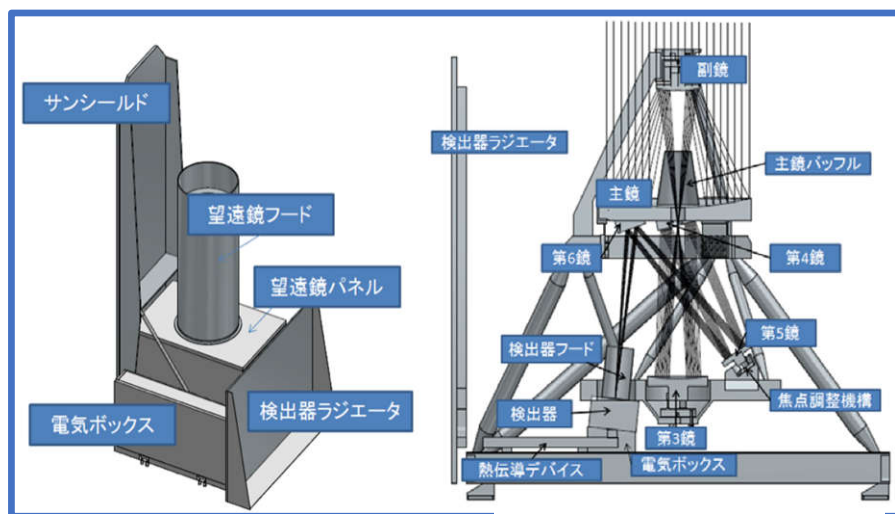
また、**赤外検出器は**検出器BOXで囲い、周囲と断熱して**170Kに冷却**する。その冷却性能は、部分熱モデルの熱平衡試験により2016年までに原理実証した。

目次

1. JASMINE望遠鏡概要と衛星熱環境(軌道・姿勢)
2. 熱制御の特徴
3. 熱制御方針
4. 望遠鏡熱制御方式
5. 望遠鏡熱制御感度の試験検証
(望遠鏡構造BBMと望遠鏡パネル熱モデル)
6. 検出器の冷却方式と試作検証
(検出器ボックスBBM熱モデル)

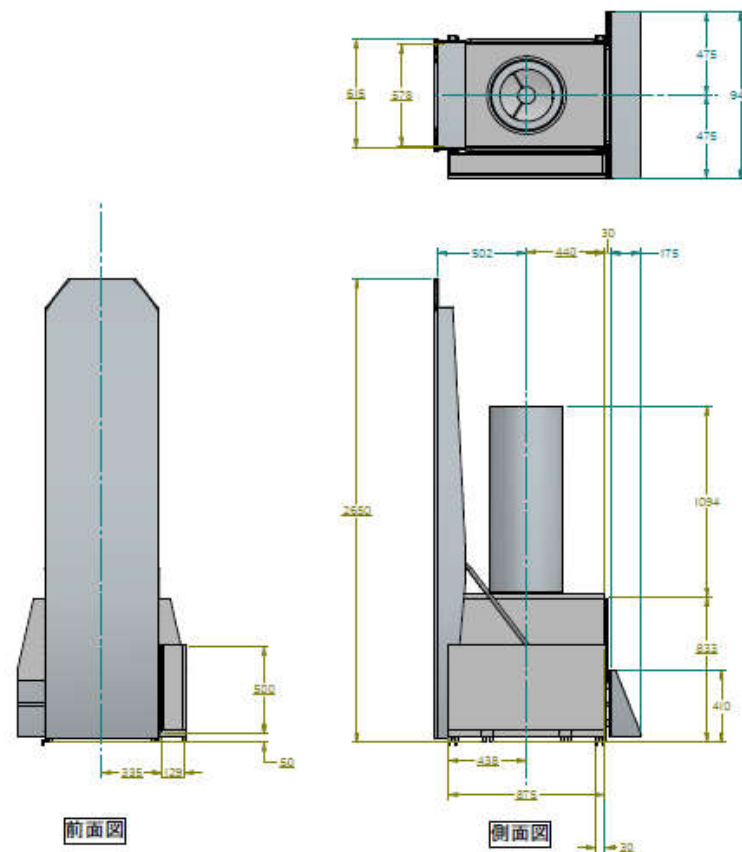
1. JASMINE望遠鏡概要と衛星熱環境(軌道・姿勢)

JASMINE 望遠鏡概要



左記の望遠鏡パネル
内の望遠鏡

JASMINE ミッション部外観・寸法



衛星熱環境(軌道・姿勢)

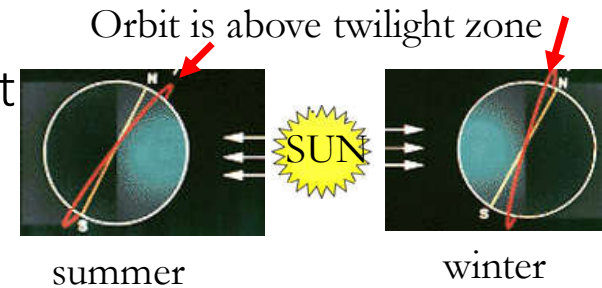
軌道

Dawn-Dusk orbit

Sun-synchronous circular orbit
 Altitude = 550km (TBS),
 inclination = 97.6deg. (TBS)

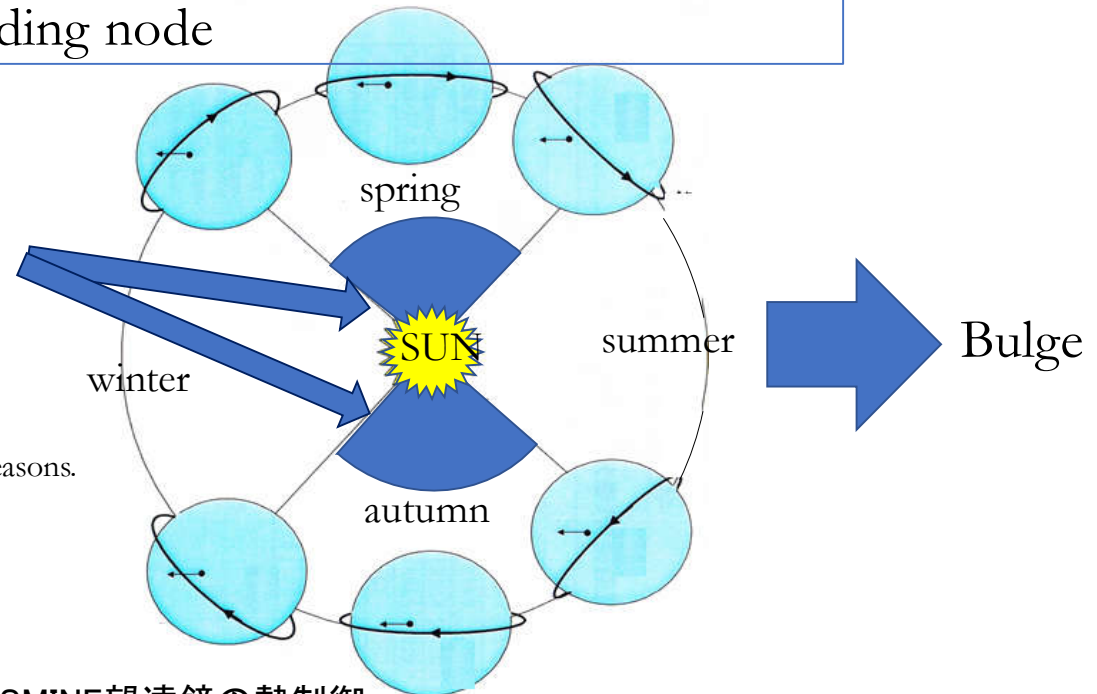
* LTAN= 6:00/18:00

* Local time of ascending node



Main target (Galactic bulge)
 observation is planned during
 spring and autumn seasons

Winter season: The sun is within 45deg from bulge direction.
 Summer season: Radiator sees Earth during observation,
 and detector temperature will be higher than the requirement.
 => Main-target observations will be done in autumn and spring seasons.



姿勢

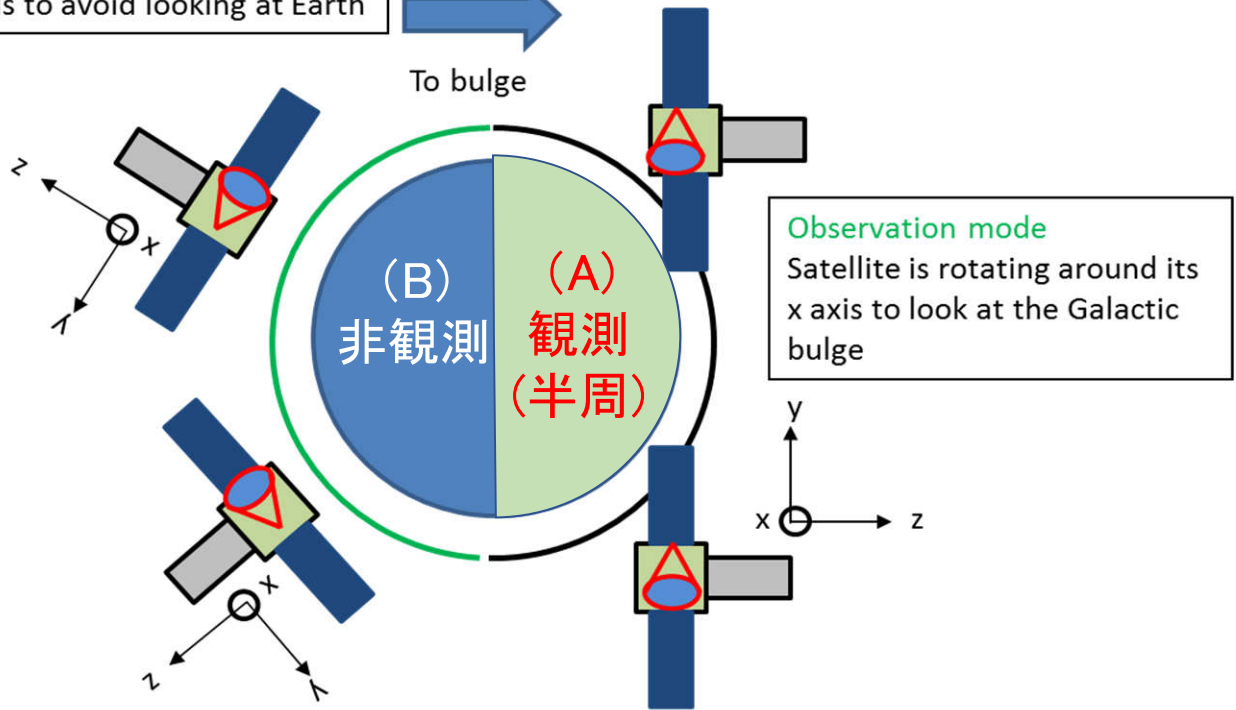
Non observation mode

Satellite is rotating around its x axis to avoid looking at Earth

To bulge

(A)軌道半周は、バルジを指向し観測。
(観測の開始・終了時にはフード内に地球入射:次ページ参照)

(B)残り半周は、望遠鏡視野の地球回避のため、地球に背を向け軌道面内において1回転する。
(準「あかり」姿勢)



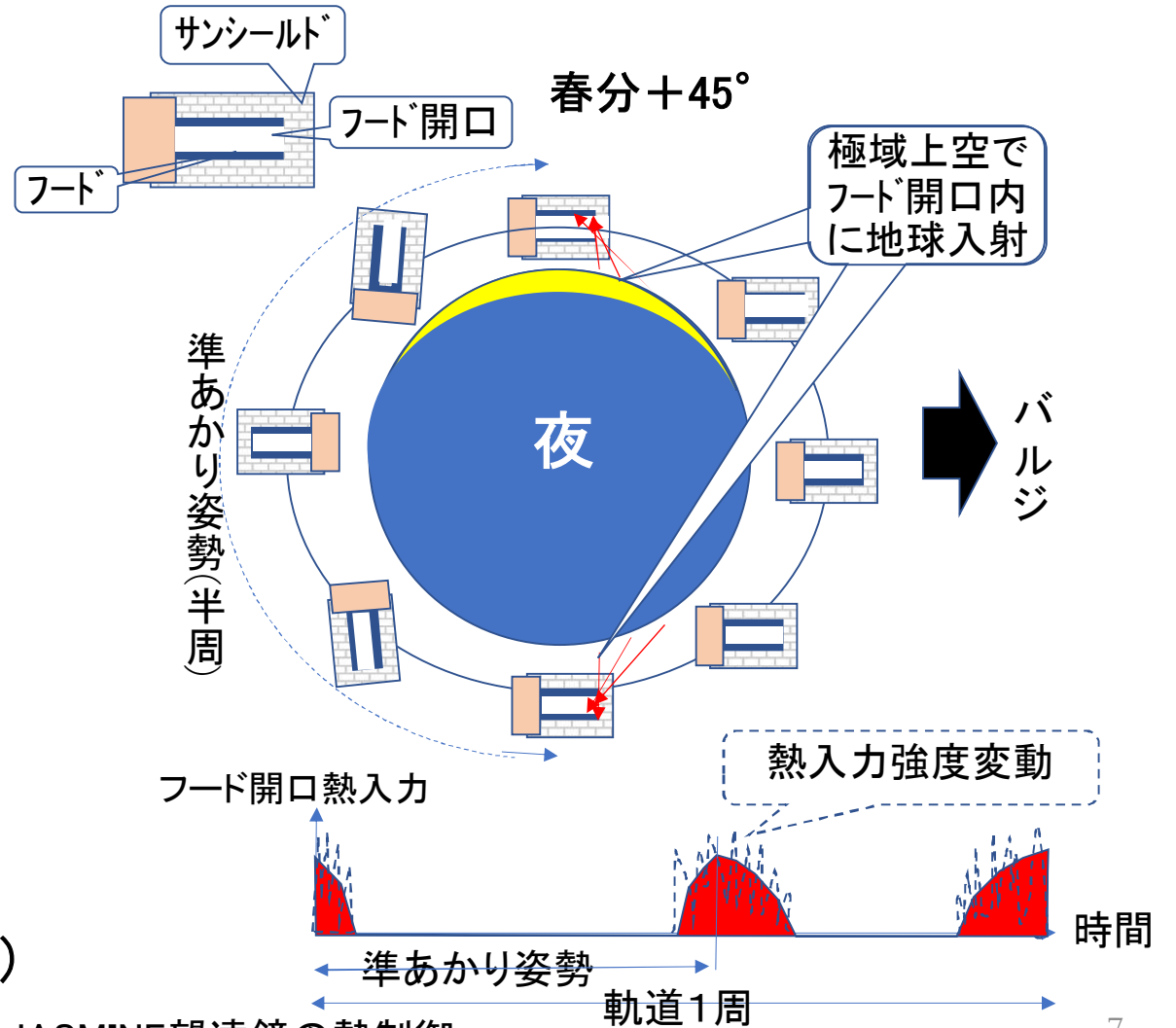
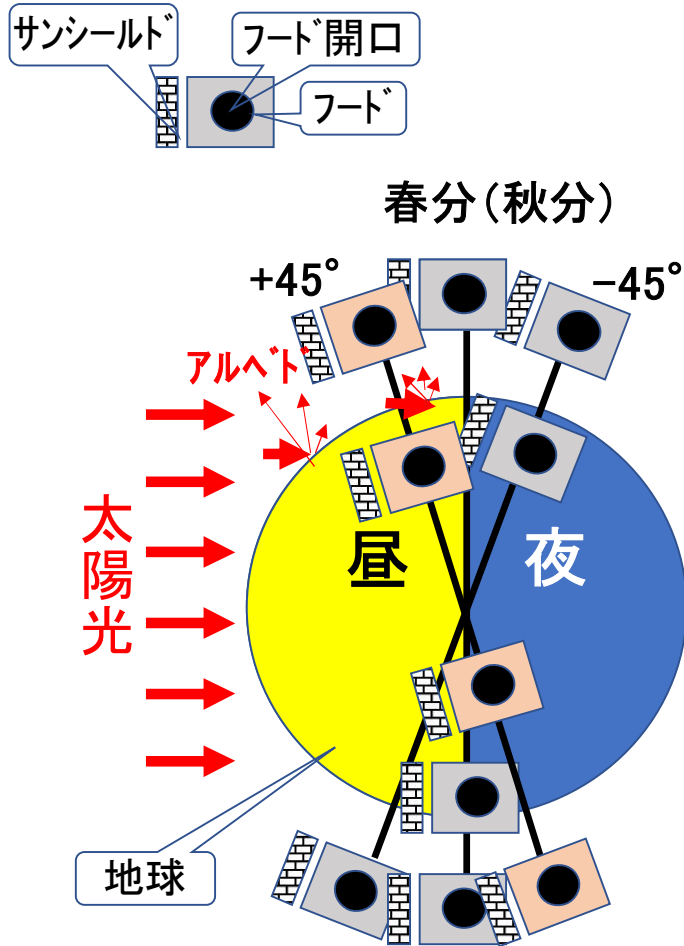
Observation mode

Satellite is rotating around its x axis to look at the Galactic bulge

Satellite attitude near the autumnal equinox

satellite z-axis pointing in the direction of telescope line of sight
satellite x-axis pointing towards Sun (which is perpendicular above the paper)

望遠鏡フード内への地球入射



紙面手前方向が観測方向(バルジ)

2.JASMINE望遠鏡 熱制御の特徴

望遠鏡の構造・熱設計への主課題と対策

高度な寸法安定性と、それを実現するための熱安定性が技術的なカギとなる。最大の不安定性要因である**熱歪抑制**が、望遠鏡構造・熱設計への主要課題。
熱歪 = ① CTE(熱膨張率) × ② ΔT (温度変動)。この①②を抑制。

② ΔT (温度変動)の抑制

ヒータで**定温制御するパネルBOX**で覆って外部熱環境変動を遮断する「**遠火でジンワリ**」制御を採用。

要求: 望遠鏡短期温度変動: $\Delta T < 0.1K$ / 観測50分間

① CTE(熱膨張率)の抑制対策 > CTEゼロ材料を使用

- ・主構造: **スーパースーパーインバー**開発 (CTE=0±5E-8/K)
- ・鏡面材: CREARCERAM® -Z EX (CTE=0±1E-8/K)

赤外検出器は170Kに冷却: 望遠鏡と断熱
(望遠鏡は組立・試験容易性のため5±°C)

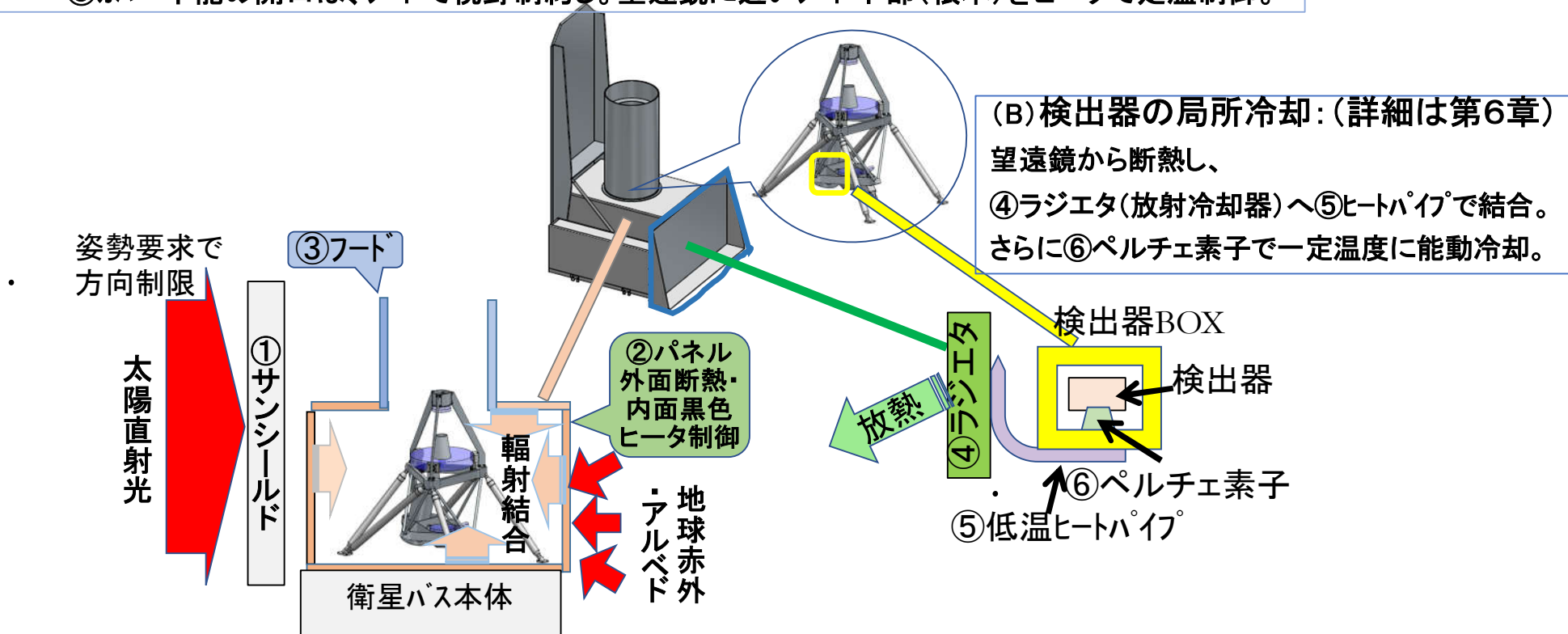
検出器BOX

3. JASMINE望遠鏡 熱制御方針

(A)望遠鏡の温度安定化: (詳細は第4章)

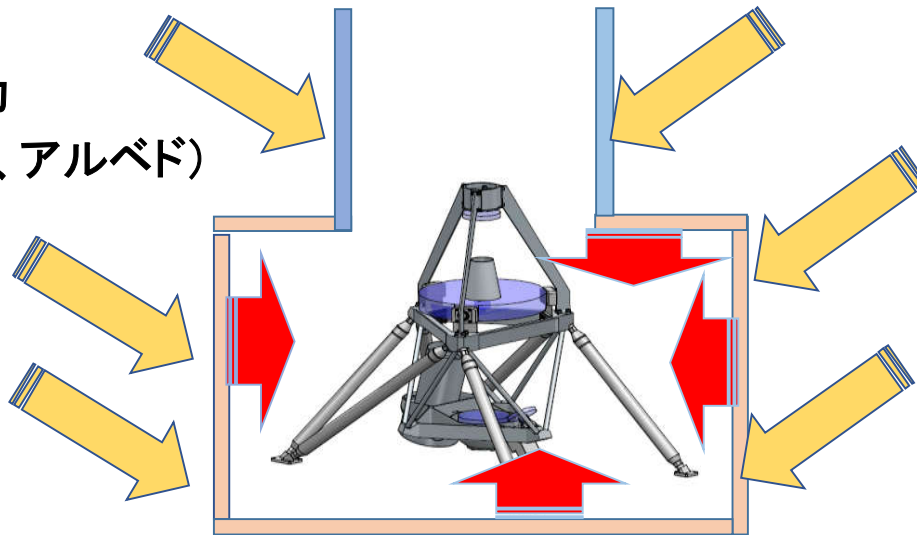
変動要因=外部熱入力から遮蔽し「遠火でじんわり保温」

- ①太陽直射は入射方向を制約(衛星姿勢要求)し、サンシールドで遮蔽
- ②他の方向変動する熱入力は全方向をパネルで覆い、外面を断熱。ヒータで温度変動を吸収。
- ③カバー不能の開口は、フードで視野制約し。望遠鏡に近いフード下部(根本)をヒータで定温制御。



4.JASMINE望遠鏡 熱制御方式

軌道熱入力
(地球赤外、アルベド)



望遠鏡の温度安定要求が
相対変化 $0.1^{\circ}\text{C}/50$ 分と高精度。

①望遠鏡に直接ヒータを装着すると、 0.1°C 以下の高精度の測温と制御必要で高価となる。また制御のリップルが直接の温度安定外乱となる。

②遠くから輻射で間接保温することで望遠鏡の大きな熱容量を利用し、 1°C 程度の低精度な制御で望遠鏡温度安定度 0.1°C を狙う。(原理実証:第5章)

上記①②のトレードオフを次頁に示す。

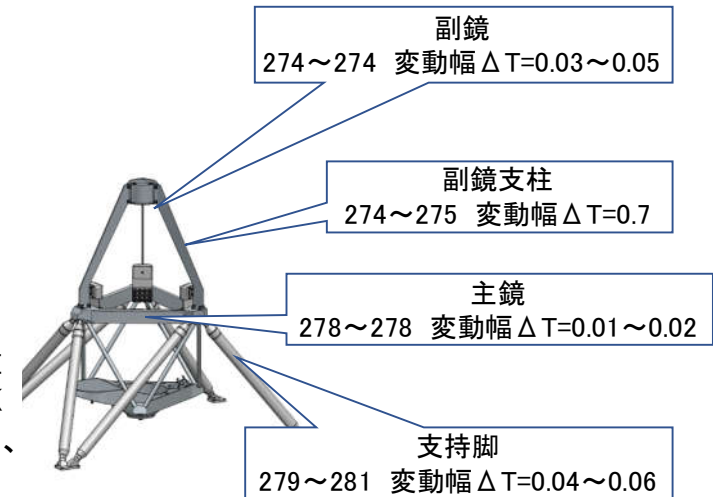
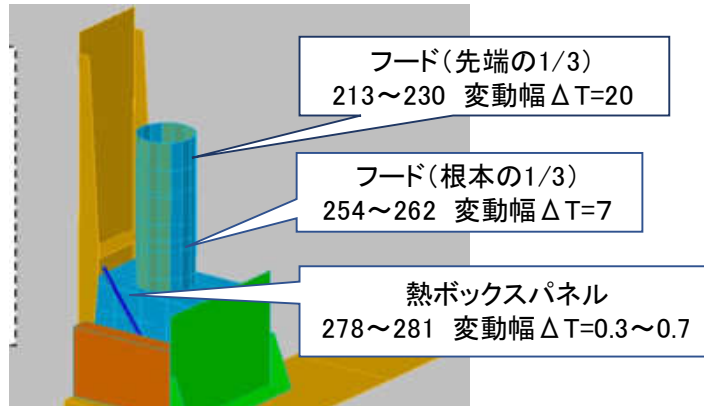
「遠火でジンワリ」制御方式

望遠鏡を囲む望遠鏡パネル全面を 5°C 付近:安定度 1°C で定温制御(単純ヒータ制御)し、そこから距離を空けて光学系全体へ輻射することでヒータ加熱の局所分布ムラや、短期温度変動への感度を緩和する方式。

望遠鏡熱制御方式のトレードオフ

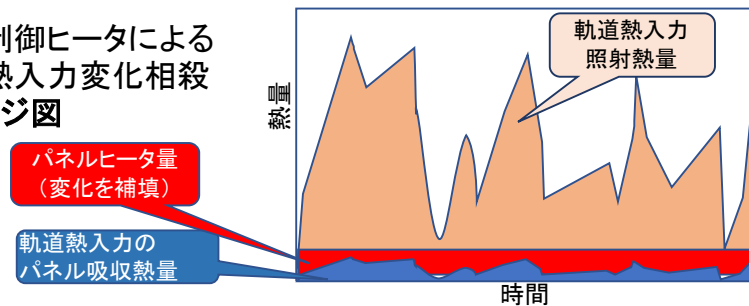
熱制御方式	<間接ヒータ制御> 周囲囲む熱ボックスをヒータで定温化して、 輻射で中の望遠鏡を定温化。	<直接ヒータ制御> 望遠鏡構造に直接ヒータを付けて定温化。 (直接貼れない一部ミラーはヒータ板を近接設置)
小型 JASMINEへ適用 の特色	ボックスで囲えず無制御となる開口は、 観測視野が星であり輻射熱量が小、 また観測視野が狭いので開口は小さく外乱が少ない	ヒータを貼る部分の材料はスーパースーパーインバーで、 温度拡散性が小さく、細かくヒータ制御ch分けが必要。
制御装置 規模	○ 周囲ボックスは元々設置(外部と断熱用)。 ボックスの温度不均一は間接制御で均されるため、 ボックス温度の時間・空間均一度要求は緩いので、 ヒータ分割ch数は少数、制御則も単純(温度ヒステリ シス許容幅が広い)	△ ヒータ加熱の時間・空間均一度が直接望遠鏡の温度変動・ 熱歪に直結するので、温度の時間・空間均一度要求幅は狭いた め、ヒータ分割ch数は多数、制御則も精密(温度ヒステリシス許 容幅が狭い)
制御精度	△ ボックスで囲えず無制御となる部分(開口)の外乱が、 もし無視できない場合は、制御精度が不十分	○ 直接制御なので、制御精度は良好
新規開発要素・ 技術リスク	◎ 特に無し。(既存技術)	△ 精密な制御(リニア制御等)と精密温度定は、 既存技術の改良や、新規開発が必要になるリスク。
コスト	◎ ヒータ制御回路が単純で制御ch数も小。	△ ヒータch数が多い。ヒータ制御則が高級。
結論	○採用 唯一の△である開口部の制御精度の実現性が、 解析により見通しが得られたので(次ページ参照)、 新規開発要素が少なくシンプル・低コストなため採用	×不採用 制御精度を得るには大規模となり、技術リスク大、コスト が大。

熱パネルで覆えないフード開口への軌道熱入力変化による、望遠鏡上端(副鏡)の温度安定性の確認解析結果。
(フード・パネルからの「遠火でジンワリ」制御が有効か)



熱パネルで覆えないフード開口への軌道熱入力(地球赤外輻射とアルベド)の軌道上位置による変動により、軌道1周中のフードの温度変動幅は先端部で約20K、フード根元側で約7K それに近い副鏡支柱の軌道1周変動幅は0.7K(要求<2K)、内部の主鏡は0.02K(要求<0.1K)、支柱は0.04~0.06K(要求<0.25K)に抑えられた。(フード下部をヒータ制御すれば副鏡変動幅は更に縮小)。周囲の熱ボックスは、解析ソフト内機能で5°C(278.3K)設定のバングバング制御をさせた結果、温度変動幅0.3~0.8K。

定温制御ヒータによる外部熱入力変化相殺イメージ図



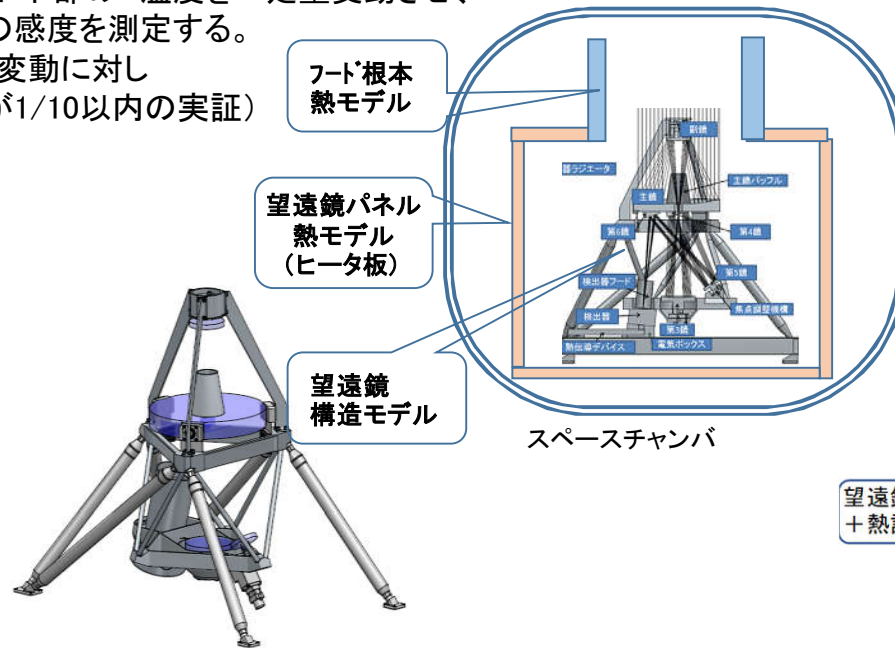
【春+45】<ヒータ電力解析結果：熱ボックス：各面別の合計>

パネル名	ヒータ動作時間	時間割合	発熱量	発熱軌道平均
+X	3766.851	65%	6.216	4.04
-X	2528.064	44%	6.016	2.62
+Y	2158.299	37%	6.064	2.26
-Y	5742.594	99%	6	5.94
+Z	3537.171	61%	9.6	5.85
-Z(System I/F)	2386.791	41%	3.16	1.30
合計(W)			22.0	

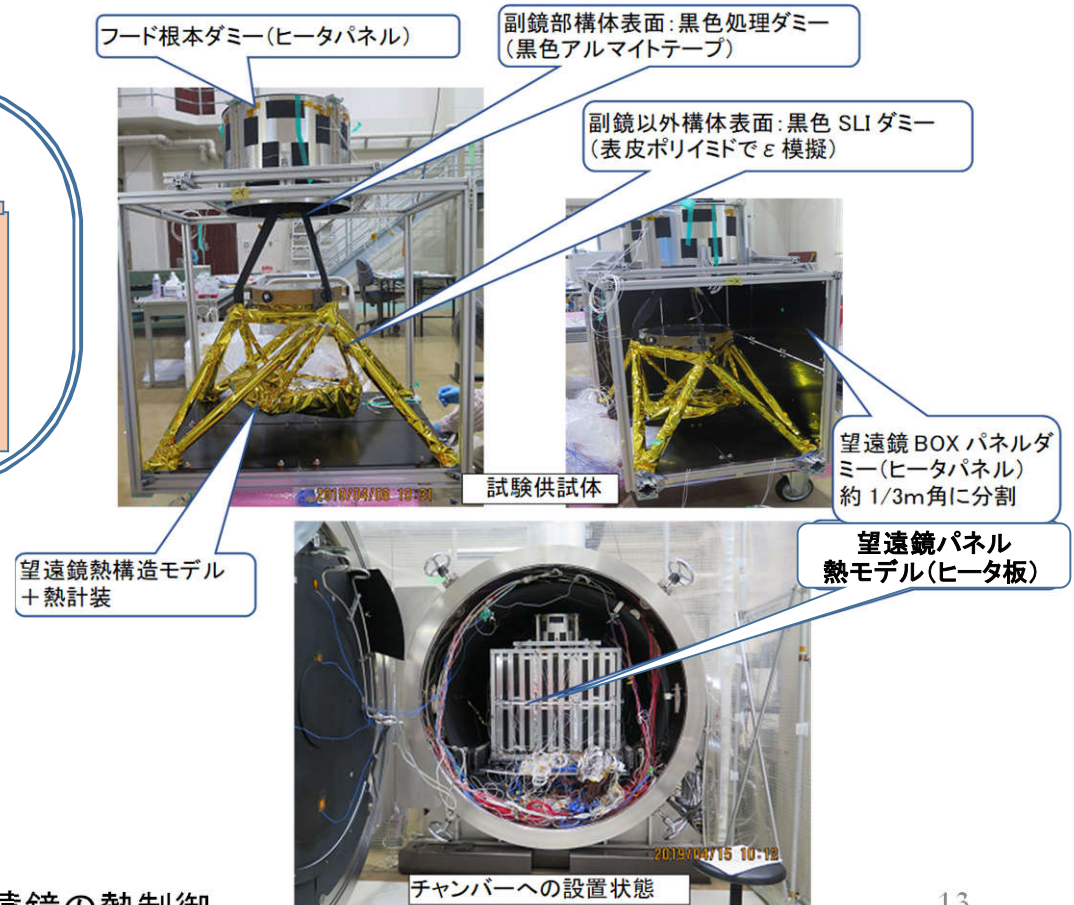
5. 望遠鏡熱制御感度の試験検証 (望遠鏡構造BBMと望遠鏡パネル熱モデル)

望遠鏡構造モデルを、望遠鏡パネルとフード根本の熱ダミー(ヒータ板)で囲む。

パネルとフード下部の 温度を一定量変動させ、望遠鏡温度の感度を測定する。
(パネル温度変動に対し望遠鏡感度が1/10以内の実証)



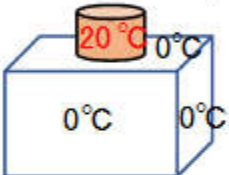
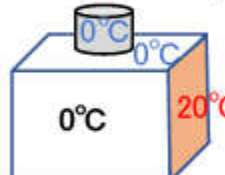
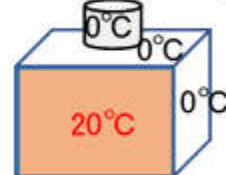
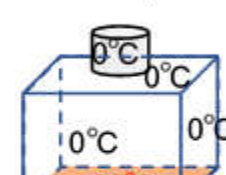
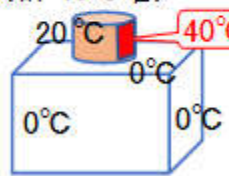
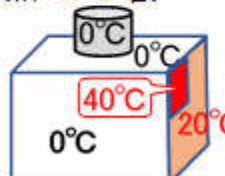
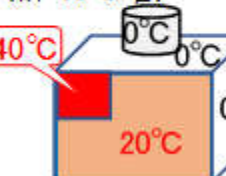
③試験コンフィギュレーション

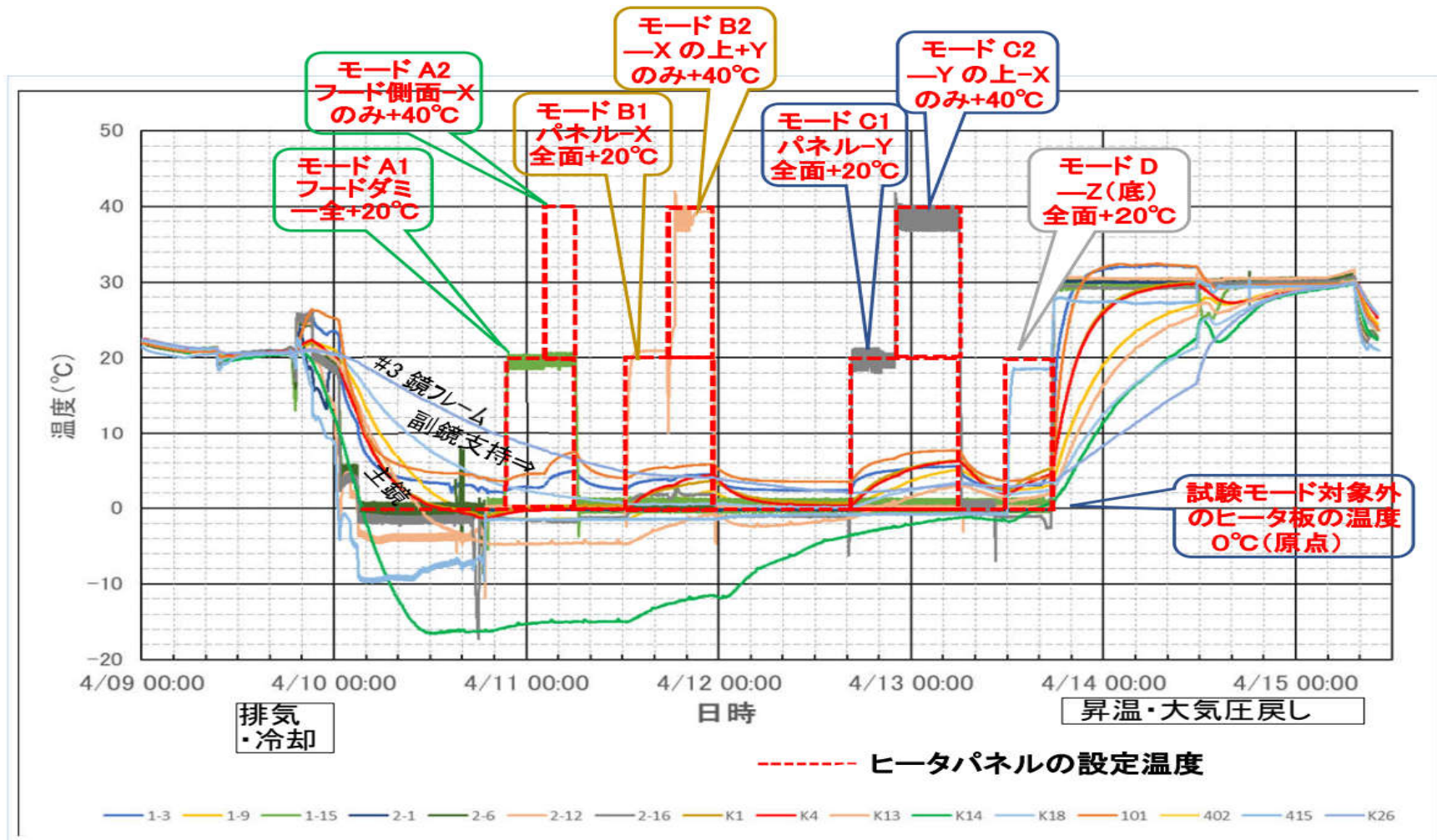


望遠鏡熱制御感度の試験検証結果 サマリー

パネルとフード下部の代表箇所温度を、別々に20°C(軌道上予定1°Cの20倍)変動させ、望遠鏡温度の感度を測定する。(パネル温度変動に対し望遠鏡感度が1/10以内の実証)
 結果は、周囲温度への感度最大であるモードAの副鏡部の、直近フード温度変化20°Cに対する最大感度が1.3°C/H以下=感度6.5% < 10% だった。→フード1°C変化への感度は10%=0.1°C以下

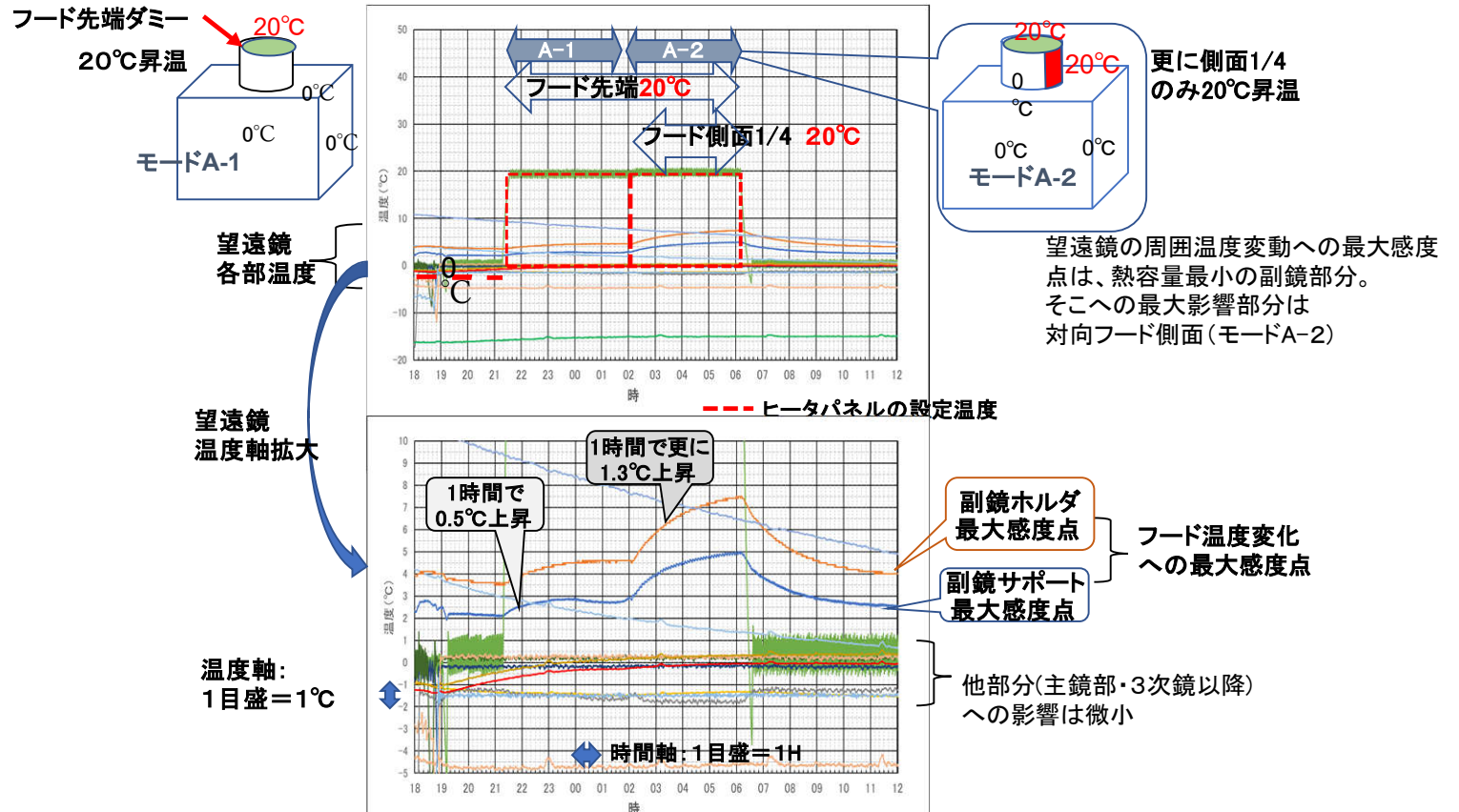
試験モード

モード名	A	B	C	D
温度外乱源	フード下部	パネル短側面 代表:-X	パネル長側面 代表:-Y	パネル底面= バス対向面(-Z)
温度設定	A-1:全体 20°C増	B-1:全体 20°C増	C-1:全体 20°C増	全体 20°C増
初期状態は A~Dモード 全面0°C				
	A-2: 側面の1/4 のみ更に 20°C増 (計 40°C増)	B-2: 面の1/4 のみ更に 20°C増 (計 40°C増)	C-2: 面の1/6 のみ更に 20°C増 (計 40°C増)	
				
主な影響 対象部分	副鏡部	主鏡サポート	主鏡サポート	望遠鏡の下部構造



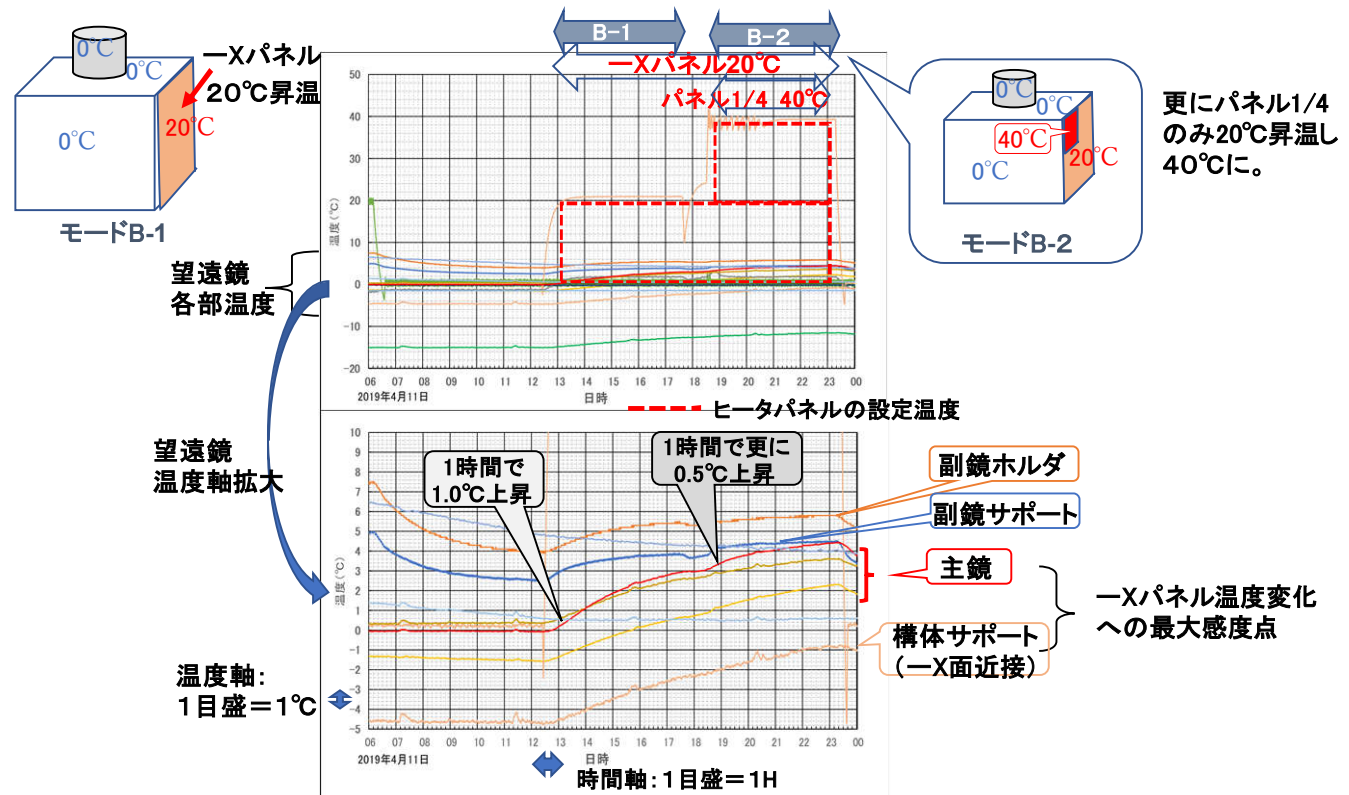
試験期間中の試験モードと代表点時間プロファイル

熱モデル試験結果 モードA 最悪最大ケース(フード根本温度変化への望遠鏡温度の感度)



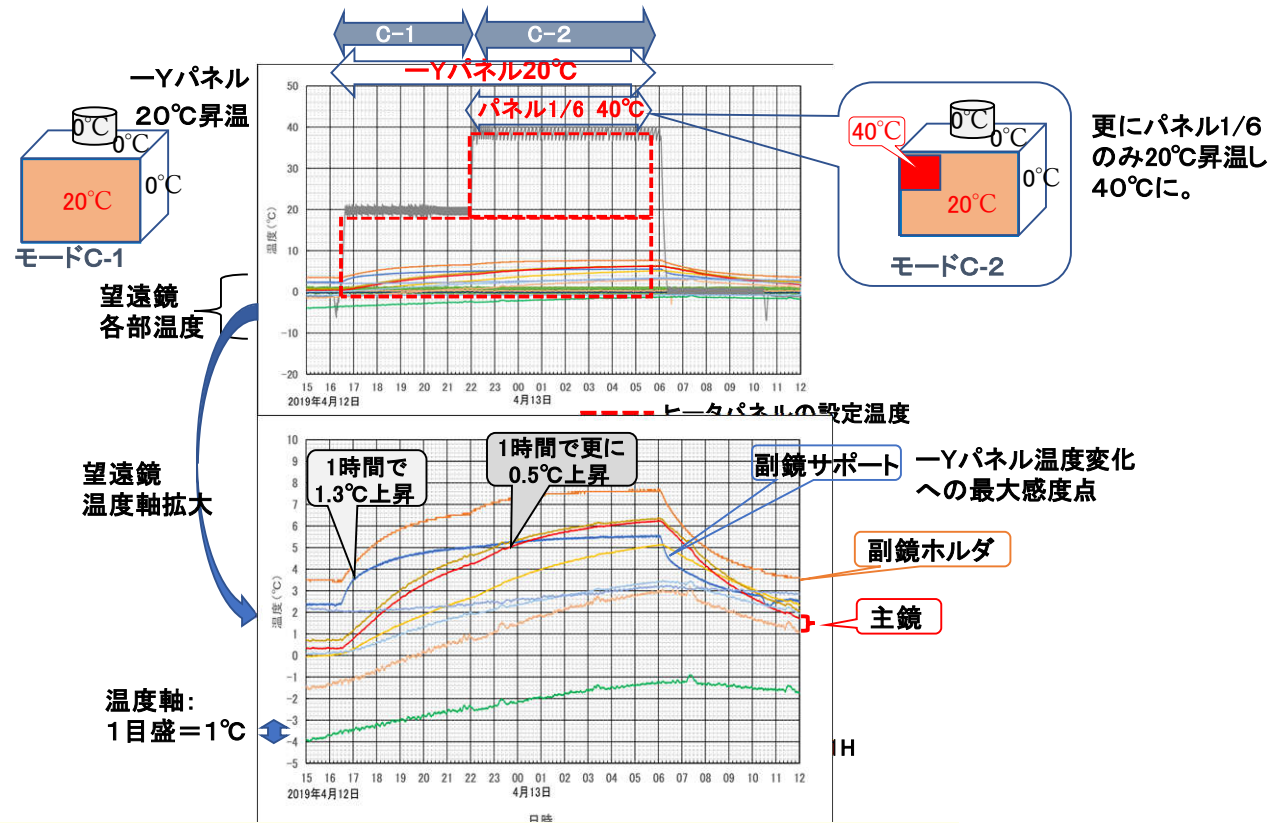
周囲温度への感度最大である副鏡部の、直近フード温度変化20°Cに対する最大感度は1.3°C/H以下=感度6.5% < 10% だった。
→フード1°C変化への感度は10%=0.1°C以下

熱モデル試験結果 モードB パネル短側面-X温度への望遠鏡温度感度



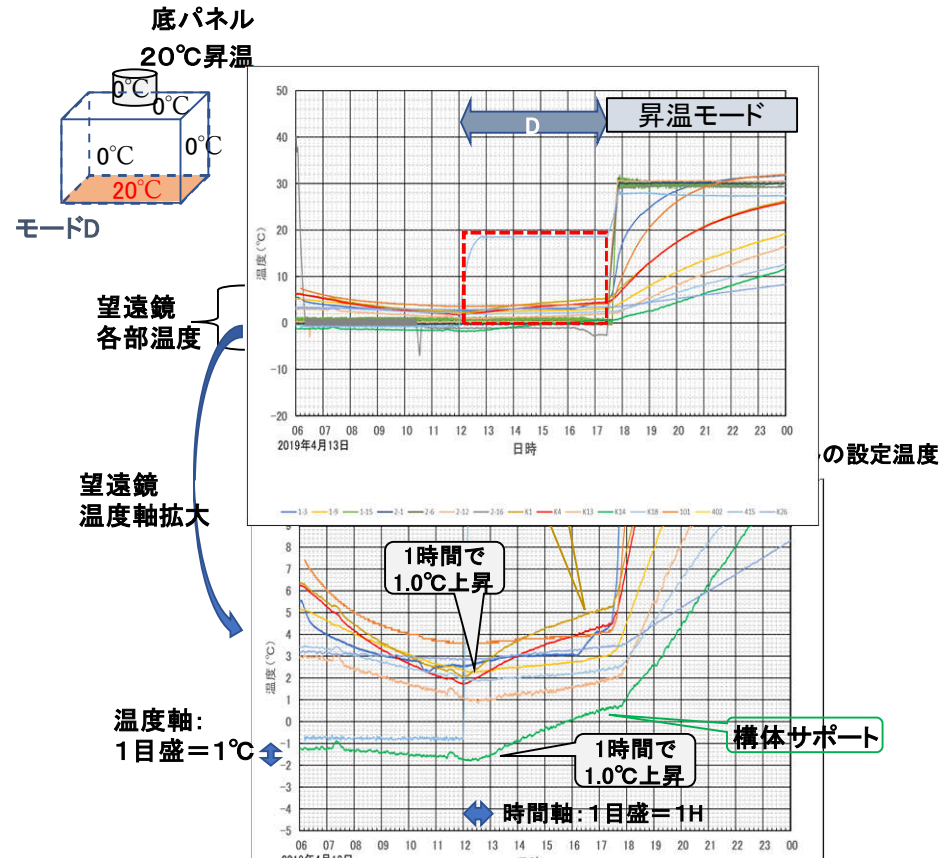
-Xパネルへの感度最大である主鏡と、-X面近傍の構体サポートの、
-Xパネル温度変化20°Cに対する最大感度は1.0°C/H以下=感度5% < 10% だった。
→パネル1°C変化への感度は10% = 0.1°C以下

熱モデル試験結果 モードC パネル長側面-Y温度への望遠鏡温度感度



-Yパネルへの感度最大である副鏡サポートの、-Yパネル温度変化20°Cに対する最大感度は1.3°C/H以下=感度6.5% < 10% だった。
 →パネル1°C変化への感度は10% = 0.1°C以下

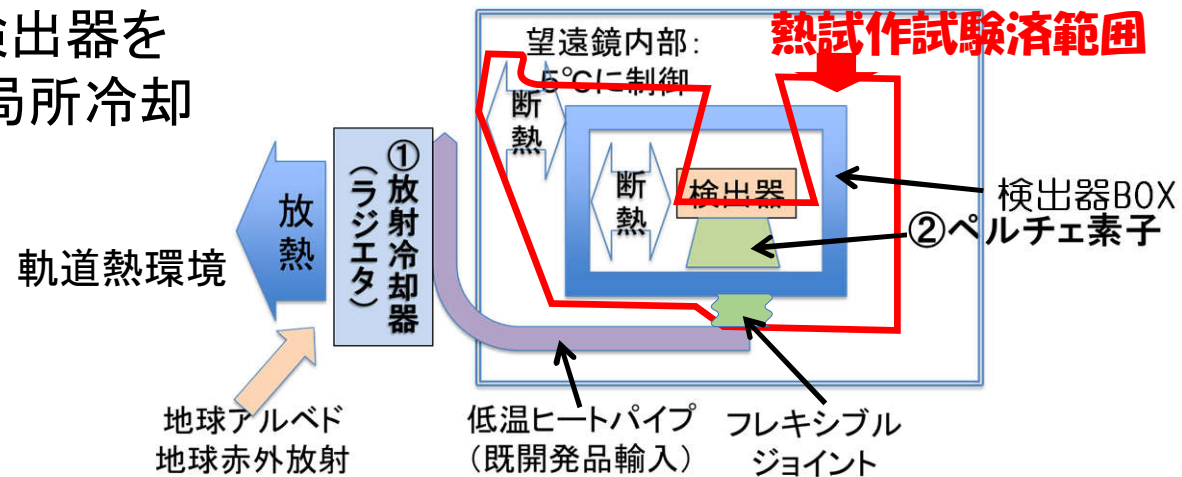
熱モデル試験結果 モードD (パネル底面)温度変化への望遠鏡感度)



底(-Z)パネルへの感度最大である構体サポートの、底パネル温度変化20°Cに対する最大感度は1.0°C/H以下=感度5% < 10% だった。 → 1°C変化への感度は10% = 0.1°C以下

6. 検出器の冷却方式と試作検証 (検出器ボックスBBM熱モデル)

- ① 検出器BOXを放射冷却
- ② BOX内で検出器を
ペルチェで局所冷却



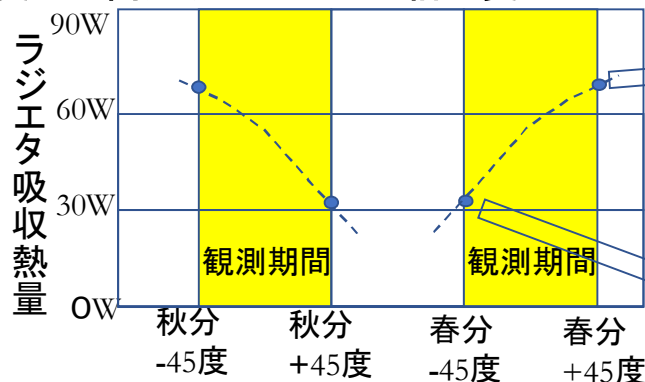
検出器冷却システムブロック図

軌道熱環境の季節変動とラジエタ温度

ラジエタ温度は軌道熱入力で変わる。ラジエタへの軌道熱入力は、

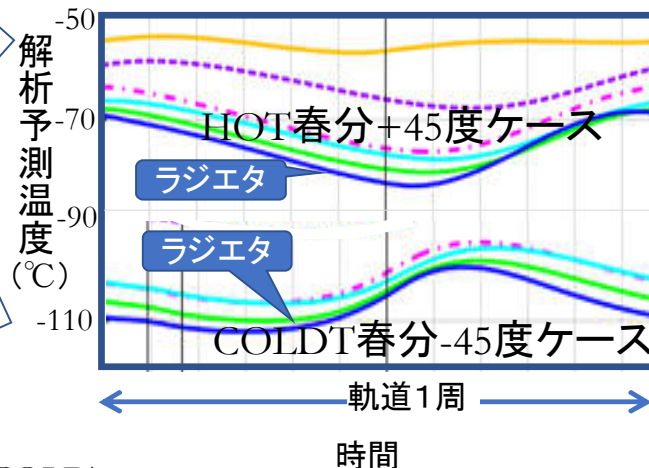
- ①季節変化: ラジエタから見た太陽・地球方向変化に依存。
夏至非観測域前後の春分+45度と秋分-45度がラジエタへの熱入力最大。
 - ②熱源強度変化: アルベド・地球赤外はJAXA熱設計基準JERG-2-310の
地球赤外最大・アルベド最小 を設定 (衛星ラジエタの通常の高温最悪)
- 上記①②の最悪条件のリニアサムを設定した。

①季節変化@高温ケース: ほぼ2倍の変化



両方の最悪

高温⇔低温 最悪ケースで
ラジエタ温度は、約30°C差



②熱源強度の高温(HOT)・低温(COLD)最悪条件設定:

- ・太陽強度: 極端最悪: 不確定も含む年間の最大(HOT)・最小(COLD)
- ・地球赤外(IR)・アルベド(ALB): 通常のラジエタの最悪設定
0.3H以内変化幅の; IR最大+ALB最少(HOT), IR最小+ALB最大(COLD)

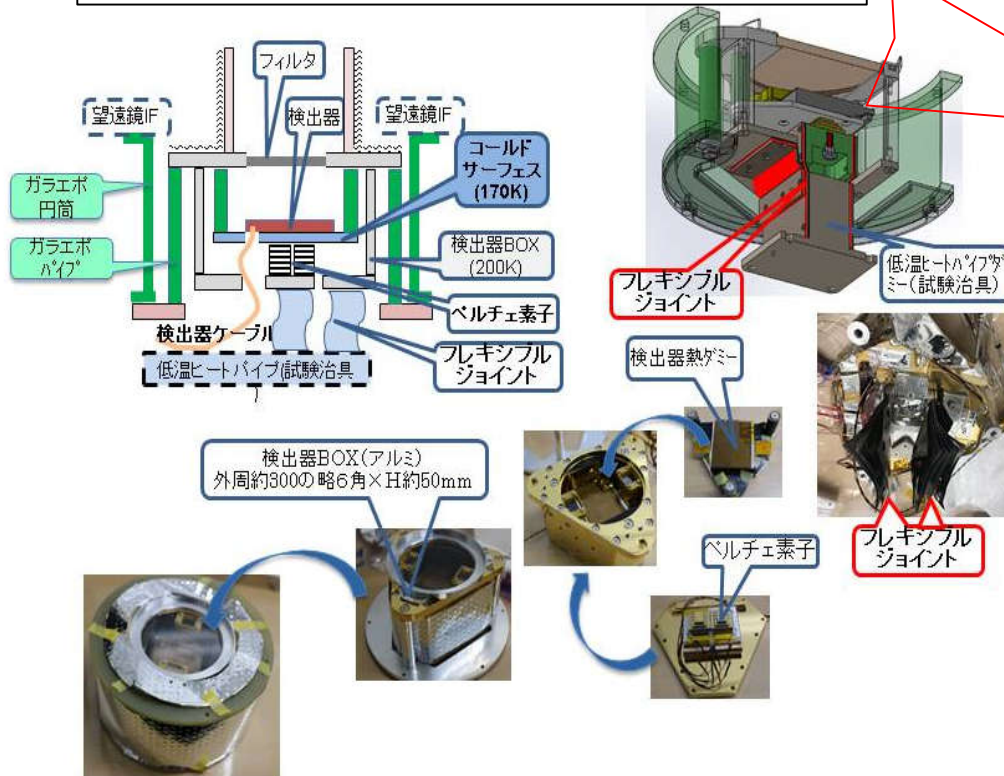
検出器BOX+フレキシジョイント(熱モデル)試作試験結果

検出器BOX冷却:ペルチェ素子冷却

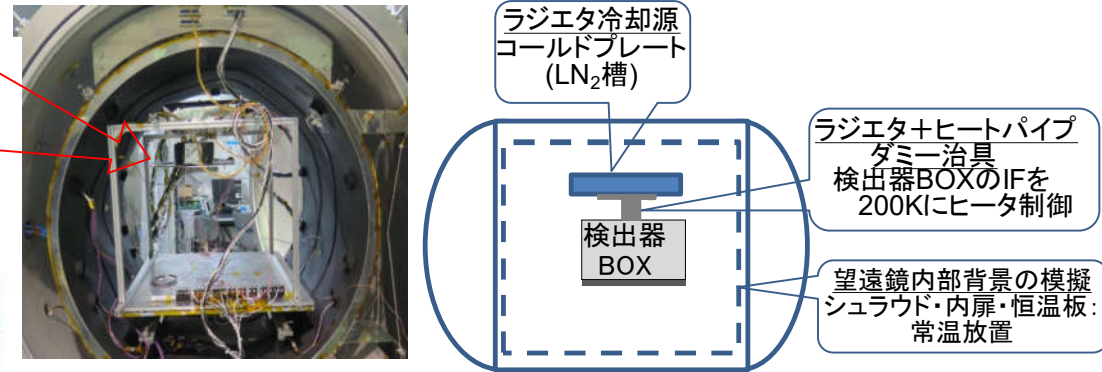
検出器を170K(200Kからの $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$)に冷却可能なことを実証した。

- ・衛星のラジエタの温度は、軌道上において平均195K、検出器BOXは平均200Kとなる
- ・ペルチェ素子を用いて検出器を170K(-103 $^{\circ}\text{C}$)以下に冷却する。つまり平均 $\Delta T=30\text{K}$ を実現させる必要がある。
- ・ペルチェ素子は、KELK社のK4MA010を2個並列使用

検出器BOX+フレキシジョイント(熱モデル)



熱平衡試験コンフィギュレーション



試験結果

検出器を約170Kに冷却

