

## 5.8. 筑波宇宙センターにおける ASTRO-H のシステム試験について

宇宙航空研究開発機構

ASTRO-H プロジェクトチーム

夏莉 権 氏



## 概要

- ✕ イン트로ダクション
  - + ASTRO-H衛星の概要
  - + 観測機器配置
  - + 技術的に困難な点
  - + 開発フロー概略
- ✕ 熱変形試験
  - + 試験の概略、試験の様子
  - + 試験実施上の特徴
- ✕ TTM試験
  - + 試験の概略、供試体の説明
  - + 試験実施上の特徴
- ✕ 今後実施予定の試験
  - + 微小擾乱試験
  - + MTM試験
- ✕ まとめ

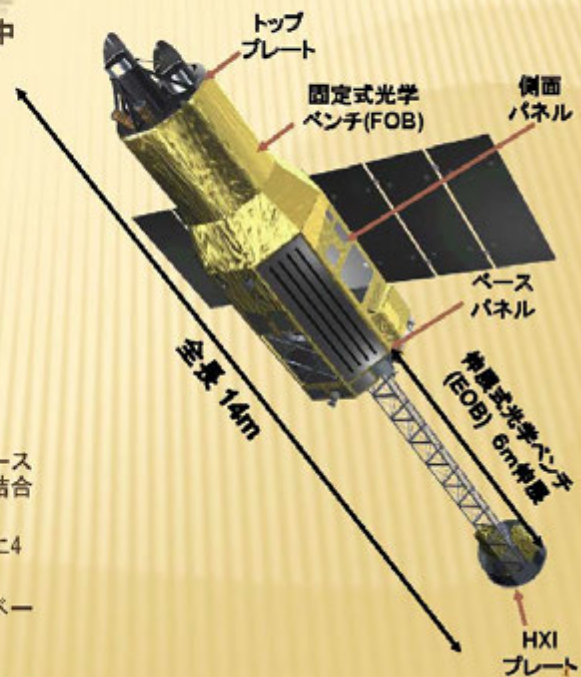
筑波宇宙センターにおけるASTRO-H のシステム試験について

## イントロダクション

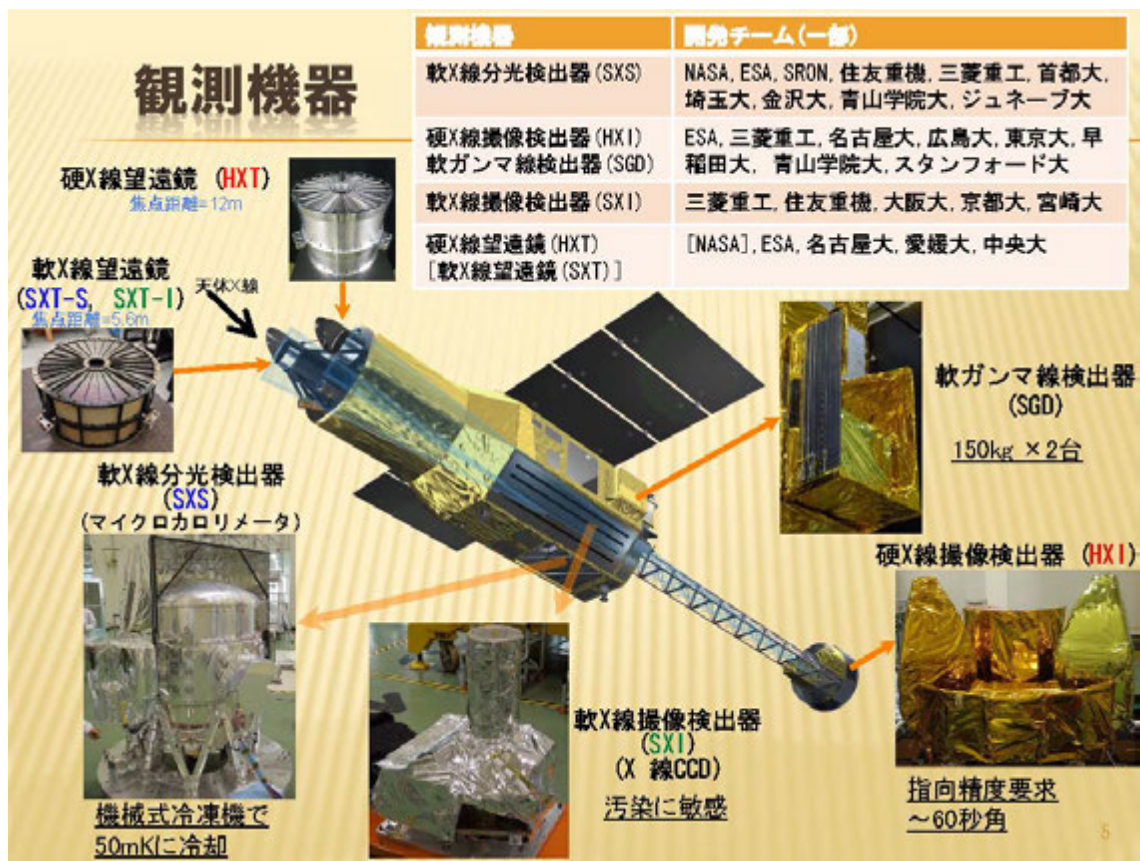
3

### ASTRO-H衛星の概要

- ✧ 宇宙科学研究所が中心となって開発中の日本で6番目のX線天文衛星
- ✧ 現状のステータス
  - + 2010年5月にシステムPDR実施
  - + 2012年2月にシステムCDR1実施
  - + TKSCにてシステム試験実施中
- ✧ 諸元
  - + 全長 14m (伸展時)
  - + 質量 2.7t
  - + 軌道高度 550km
  - + 2014年度打ち上げ(目標)
- ✧ 構造
  - + 主構体はCFRP製の下部構造(8角形のベースパネル、スラストチューブ、ロケット結合リング)と側面パネル
  - + CFRP製トラス構造の固定式光学ベンチに4台の望遠鏡を搭載する。
  - + 観測機器は伸展式光学ベンチの先端、ベースパネル、側面パネルに配置する。







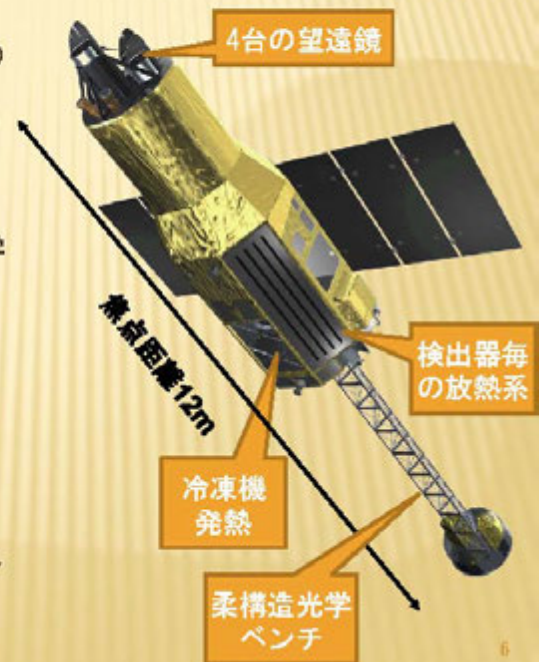
## 技術的に困難な点

### ✧ 構造、指向性

- + 4台の望遠鏡の光軸、4種類の検出器の中心軸を合わせる。
  - ✧ アライメント要求は典型的に60秒角(12m先で3mm)
  - 低熱歪み設計とし、MTM、熱変形試験で検証する。
- + 長焦点距離(12m)、柔構造の伸展式光学ベンチ(EOB)とRW、IRU、冷凍機などの擾乱源を有する。
  - 微小擾乱試験で検証する。

### ✧ 熱設計

- + 低軌道(550km)のため、熱環境は約90分周期で変動する。
- + 主要検出器SXSを50mKまで冷却する。冷凍機の発熱が大きい(~500W)。
- + 検出器毎に独自のラジエータ、ヒートパイプなどの熱制御系を有する。
  - TTMIにて検証する。



## 開発フロー概略



筑波宇宙センターにおけるASTRO-H のシステム試験について

## 熱変形試験



## 熱変形試験(1) 概略

### × 目的

- + 熱変形数学モデルの妥当性検証
- + 指向精度の設計/製造結果の検証
- 熱変形の配分は典型的に10秒(12m先で0.5mm)

### × 方法

- + 常温、常圧下で供試体の各部にヒーターを貼り、個別に昇温する。
- + 昇温によって生じる各部の変形を測定する。

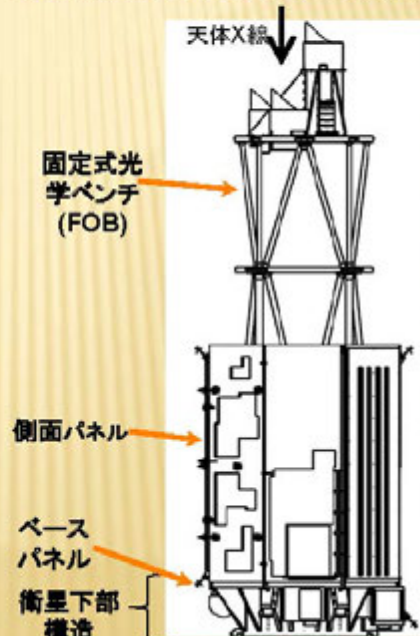
### × 3つの段階に分けて実施

- + Step1: 衛星下部構造
- + Step2: 下部構造+固定式光学ベンチ(FOB)、ベースパネルに設置されるミッション装置
- + Step3: 側面パネル+側面パネルに設置されるミッション装置

### × 試験実施期間

- + 5/8 ~ 6/12 (Step2まで)

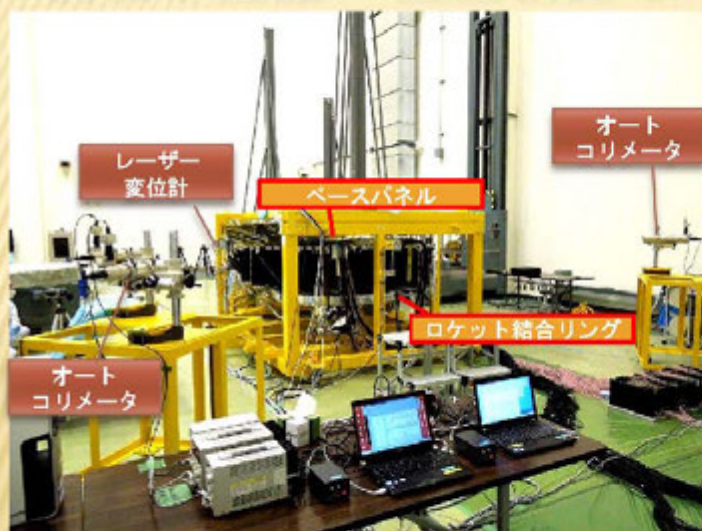
衛星側面図(伸展式光学ベンチ除く)



9

## 熱変形試験(2)試験の様子

STEP1: 下部構造の試験



黄色の枠は治具。枠内の黒い構造物が供試体。  
供試体は下側から3本の柱で支える。  
ベースパネル上の2箇所にキューブミラーを設置する。

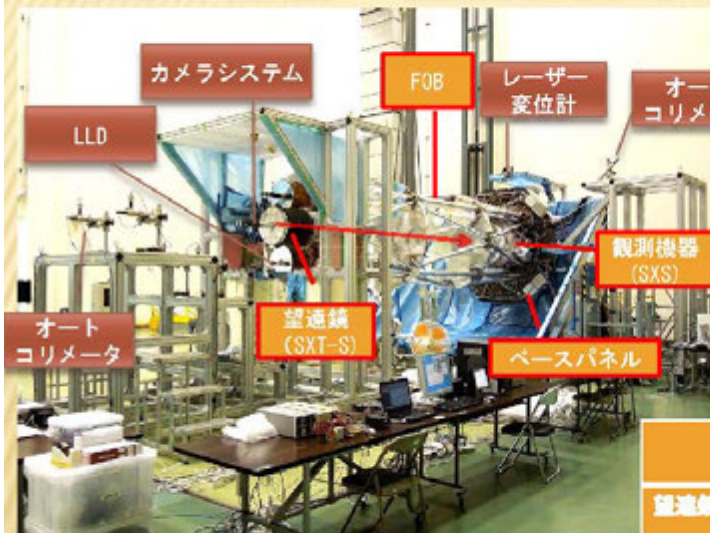
- × 4台のオートコリメータでベースパネルの反りを計測。
- × 12台のレーザー変位計でベースパネルの面内/面外変形を計測。
- × 供試体 225点、治具35点の温度を計測

10



## 熱変形試験(3)試験の様子

STEP2: 下部構造+  
固定式光学ベンチ (FOB)  
ミッション機器の試験



- ✦ オートコリメータ6台、レーザー変位計12台でプレートの反り、EOB取付点の傾きを計測。
- ✦ 望遠鏡光軸のずれを2種類の計測システムで計測。(下表)  
供試体419点、治具174点の温度を計測。

光軸測定用に開発した測定システム。  
望遠鏡と観測機器に下記の計測器を取り付け、変位を測る

	LLD	カメラシステム
望遠鏡側	レーザー光源	CCDカメラ
観測機器側	位置検出型PD	マーカー

供試体を横倒しにする。  
治具(アルミフレーム)と供試体をエアキャップ等で断熱する。

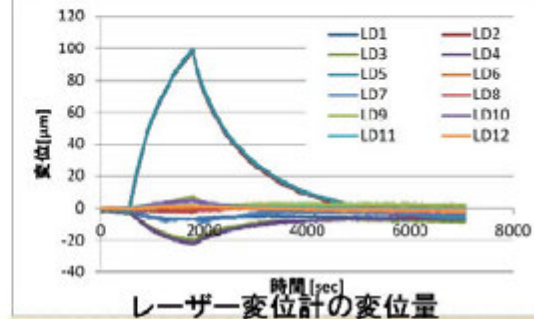
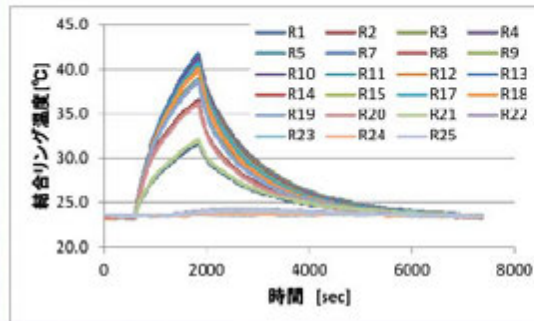
11

## 熱変形試験(4) 実施上の特徴

- ✦ 温度、熱変形量をリアルタイムモニタし、過渡応答を評価
  - + 温度、熱変形量ともに連続的な時系列データを取得し、試験中にデータを見ながら判断を行った。
  - + 必要に応じて試験パターンの組み替えを行った。
- ✦ 室温変動、治具の熱変形の影響を排除
  - + 室温をモニタし、安定する時間帯に昇温を行った。
  - + 30分程度の昇温で20℃程度の温度差を付け、対象外の箇所に熱が伝わらないようにした。
  - + 治具には断熱材を巻き、治具への熱伝達を最小限にすると共に治具自体の各点の温度を測定した。
  - + 治具単体での熱変形試験を実施した。(試験センター)
- ✦ 高精度の光軸測定装置を新規開発
  - + 秒角の傾きに相当する変位を測れる装置2式(LLD, カメラシステム)を新規開発した。いずれの装置も正常に動作した。

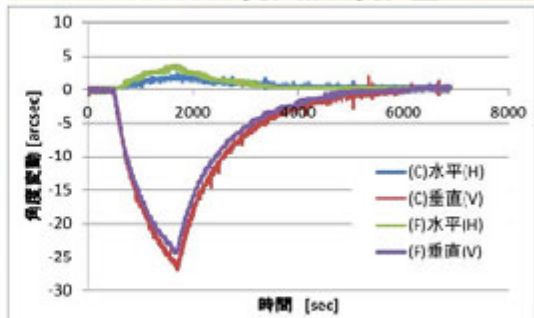
12

## 熱変形試験(5) 結果の例(結合リング昇温)



### 昇温箇所の温度計測データ

- ✕ 温度、レーザー変位計、オートコリメータとも1800sec付近(昇温終了時)にピークを持つ。
- ✕ 時系列データを見ることで、試験実施中の良否判断、昇温停止の判断がスムーズにできた。



オートコリメータ (AC) の計測データ  
(下部構造中央の指向基準キューブ)

## 熱変形試験(6) まとめ

- ✕ 時系列データをモニタし、短時間で安心して試験を進められた。
- ✕ 高精度の計測系を実現できた。
  - + LLD, カメラシステム、治具の温度測定など
  - + 試験センター殿には事前測定からご協力頂いた。
- ✕ 現状
  - + 熱変形数学モデルのコリレーションを実施中
  - + 熱変形のバジェットは概ね満たせる見込み
  - + STEP3 (側面パネルを含めた試験) の計画中



筑波宇宙センターにおけるASTRO-H のシステム試験について

## TTM試験

15

### TTM試験(1) 概略

#### × 目的

- + 熱数学モデルの妥当性検証
- + 衛星の熱制御系(TCS)の設計/製造結果の検証
- + 搭載機器との熱I/F確認
- + FMの熱真空試験のための手順確立



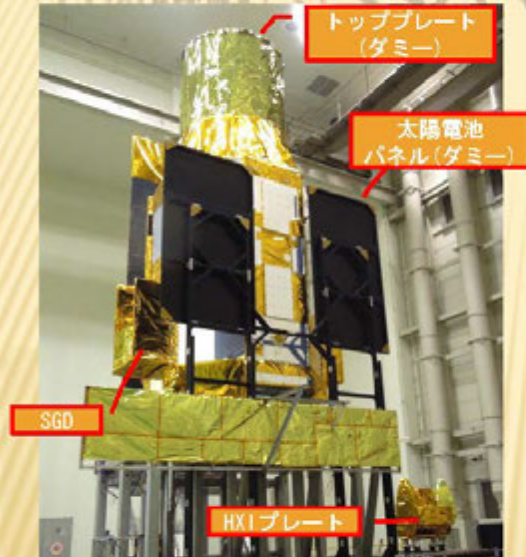
#### × 方法

- + 13mφチャンバーにてソーラー光照射を行う。
- + 2つの段階に分けて実施(1.6mφのソーラー光に衛星が入らない)
- + システムTTM試験(IR台車) 8/10～8/22
  - × 供試体：衛星主構体と主構体搭載機器、HXIプレート
  - × 試験モード：高温最悪、低温最悪、UVC、冷凍機故障モード
- + トッププレートTTM試験(TFX台車) 9/10～9/21
  - × 供試体：トッププレートと搭載機器、伸展式光学ベンチ(E08)
  - × 試験モード：低温最悪、高温最悪、姿勢角最悪(高温)、スピン角最悪(高温)

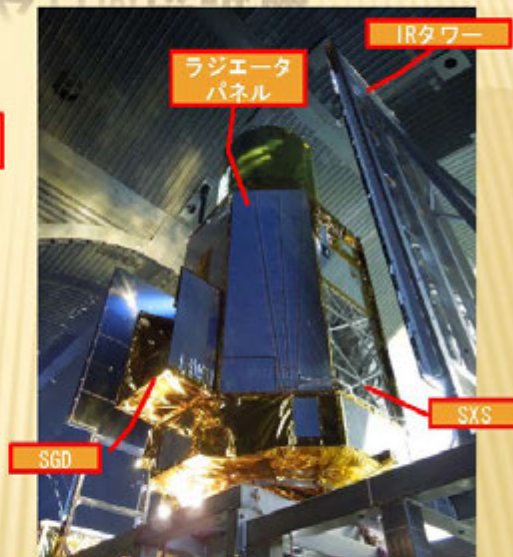


16

## TTM試験(2) システムTTM供試体

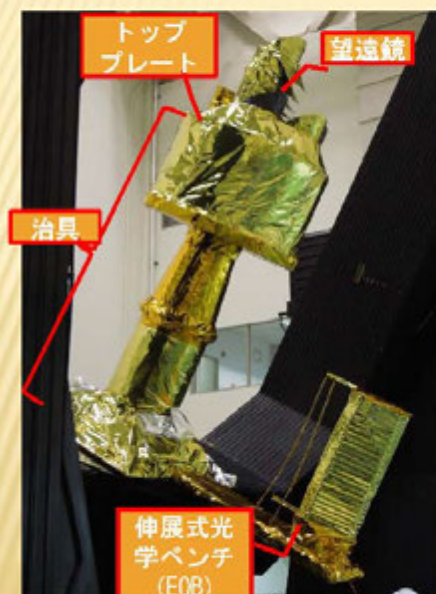


ソーラー光入射側。IR台車上の写真  
衛星隣のHXIプレートはIR試験を行う。  
温度モニタ点は750ch



反ソーラー光側。イルミネーションチェッ  
ク中の写真。  
IRタワーで地球赤外とアルベドを模擬する。

## TTM試験(3) トッププレートTTM供試体

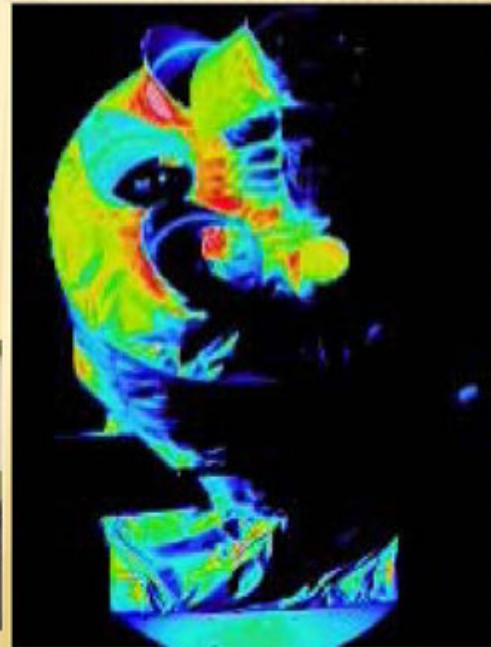
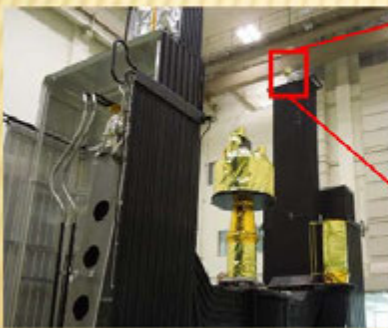


- × トッププレートと伸展式光学ベンチ (EOB) をTFX台車に乗せて試験する。
  - + 搭載機器は4台の望遠鏡、各2台の恒星センサ (STT)、アライメントモニタ (AMS)。
  - + 伸展式光学ベンチ (EOB) は5段分の熱モデル (FMは23段)
- × 姿勢角 $30^{\circ}$ 、スピン角 $30^{\circ}$ まで傾ける。



## TTM試験(4)実施上の特徴(1)

- × IRカメラでの温度モニタ(試験センター)
  - + 熱電対だけではわからない詳細な温度分布がリアルタイムにモニタできた。
  - + 規則反射による局所的加熱が見られた。
- × チャンバのぞき窓からのIRカメラ、可視光カメラによる撮影
  - + ヒートパイプの動作状況など、供試体の状況を定期的チェックした。



19

## TTM試験(5)実施上の特徴(2)

### × 衛星内部、外部の圧力測定

- × 衛星内部における放電危険領域の突破、モード変更に伴う放電領域への再突入の有無の確認。
- ⇒ 総合試験における搭載機器の運用基準作成の際の目安とする。



20

## TTM試験(6)実施上の特徴(3)

- × 衛星内部、外部のTQCM測定
  - + アウトガスに敏感な機器のそばで測定を行った。  
⇒局所的なアウトガスの影響が分かる。  
⇒衛星外部の値と比較ができる。
- × 平衡を早めるためのヒーター操作
  - + 試験前解析の結果と、開始後数時間の温度変化率から平衡温度を予測し、ヒーターの発熱量を調節した。
- × 24時間体制シフト
  - + ISAS熱・流体Gr, ISAS X線Gr, 供試体メーカー担当者が常駐した。

21

## TTM試験(7) 今後に向けた設備側への依頼(抜粋)

- × 温度モニタ用のPCが少ない。
  - + 最低限でも6台くらいほしい。
  - + 警告表示専用端末があるとよい。
- × 温度データをユーザーが自由に取得できるようにしてほしい。
- × 温度表示ソフトのGUIを改善してほしい。
  - + 文字が小さい、凡例がわかりにくい、熱電対の温度一覧表が見たいなど
- × ヒーター制御の方法、手順を改善してほしい。
  - + ON/OFF制御、設定の一括反映ができると良い。
- × チャンバ内カメラを増強してほしい。
  - + 可視+赤外を複数セット。可動式であればなお良い。
  - + 赤外カメラは対応温度範囲を広げてほしい。

22



## TTM試験(8)まとめ

- × システムTTM(2012/8/10-8/22), トッププレートTTM試験(2012/9/10-9/21)を実施した。
- × IRカメラを用いることでソーラー光による局所的な加熱の様子がわかった。
- × 衛星内外の圧力、アウトガス測定を行い、総合試験に向けた基礎データを取得することができた。
- × ヒーター操作により平衡到達時間を短縮できた。
- × 総合試験に向け、設備の改善をお願いしたい。

23

筑波宇宙センターにおけるASTRO-H のシステム試験について

## 今後の試験予定

24

## 今後の試験予定(1) 微小擾乱試験

### ✧ 微小擾乱試験(2013年2月)

- + 軟X線分光検出器(SXS), 軟X線撮像検出器(SXI)の冷凍機、RW, IRUで発生する擾乱が観測機器に与える影響を測定する。
- + 冷凍機はEMを、RW, IRUは小型加振器を用いる。
- + 衛星を天井から吊って試験する。
- + 2012年3月頃から研開本部の構造Gr、熱Gr、誘導制御Grの皆様に調査、協力頂いています。

25

## 今後の試験予定(2) MTM試験

### ✧ MTM試験(2013年 3月～5月)

- + 音響試験
- + 振動試験
- + 分離衝撃試験
- + 600chの加速度ピックアップを使用予定。関係各所、各プロジェクトにも融通のお願いをしております。宜しくお願い致します。

26



## 筑波宇宙センターにおけるASTRO-H のシステム試験について

## まとめ

27

## まとめ

- ✕ ASTRO-H はつくばでシステム試験を行っており、日本中、世界中の宇宙機関、メーカー、大学から多くの人が参加する。
- ✕ 試験センターの全面的な協力の下、熱変形試験、2つのTTM試験を終えた。
  - + 熱変形試験：リアルタイムに変形量をモニタしながら、過渡状態での試験を行った。試験時間を短縮し、手戻りを少なくできる手法である。
  - + TTM試験：IRカメラで供試体の詳細な温度分布を測定した。衛星構体内部の圧力、アウトガス量を測定し、総合試験に向けた基礎データを取得できた。
- ✕ 擾乱、MTM、衛星総合試験に向け、今後とも試験センターの皆様にはご協力をお願い致します。

28

## 関連講演

✧ 第56回 宇科連 (11/20-22) にて本講演に関連する講演があります。

参照 番号	講演 番号	タイトル	発表者
[1]	2009	ASTRO-H 高精度大型構造物の熱変形試験	石村 康生
[2]	2010	ASTRO-H 熱変形試験における治具変形評価	和田 篤始
[3]	2011	高精度大型構造物に向けた遠距離変位計測システムの開発	河野 太郎
[4]	1N12	X線天文衛星ASTRO-Hの熱設計	岩田 直子

<http://www.jsass.or.jp/spnavcom/56ukaren/annai/annai.html>

29

筑波宇宙センターにおける  
ASTRO-H のシステム試験について

## おわり

30



筑波宇宙センターにおける  
ASTRO-H のシステム試験について

## バックアップスライド

31

## プロジェクトの目的

- × 「宇宙の大規模構造と、その進化の解明」のため
  1. 銀河団という宇宙最大の天体における熱、銀河団物質の運動エネルギー、非熱的エネルギーの全体像を明らかにし、ダイナミックな銀河団の成長を直接観測する。
  2. 厚い周辺物質に隠された遠方(過去)の巨大ブラックホールを「すざく」の約100倍の感度で観測し、その進化と銀河形成に果たす役割を解明する。
- × 「宇宙の極限状態の理解」のため
  3. ブラックホールの極近傍の物質の運動を測定することで重力のゆがみを把握し、相対論的時空の構造を明らかにする。
- × 「多様性にとんだ非熱的エネルギー宇宙の探求」のため
  4. 宇宙に存在する高エネルギー粒子(宇宙線)がエネルギーを獲得する現場の物理状態を測定し、重力や衝突・爆発のエネルギーが宇宙線を生み出す過程を解明する。
- × 「ダークマター・暗黒エネルギーの探求」のため
  5. 距離(年齢)の異なる銀河団内のダークマターの分布と総質量を測定し、銀河団の進化に果たすダークマターと暗黒エネルギーの役割を探求する。

32

## プロジェクトの目標設定

意義	目的	目標
宇宙の大規模構造とその進化の解明	銀河団の成長の直接観測	1) 10個程度の代表的な銀河団において、熱エネルギーを測定し、鉄輝線のエネルギー領域(6キロ電子ボルト)で300km/sの速度分解能の分光性能を実現し、銀河団物質の運動エネルギーを測定する。硬X線帯域で「すざく」の約100倍の感度(*)で分光観測することで非熱的エネルギーを測定する。
	巨大ブラックホールの進化と銀河形成に果たす役割	2) 遠方にある10個程度の隠された巨大ブラックホールの候補天体を、硬X線帯域で「すざく」の約100倍の感度(*)で分光観測し、母銀河との関係を明らかにする。
宇宙の極限状態の理解	ブラックホール極近傍での相対論的時空の構造の理解	3) 代表的な数個の活動銀河中心の巨大ブラックホールを、数10キロ電子ボルト程度までの範囲で連続スペクトルを取得し、同時に輝線や吸収線を7電子ボルト程度の分解能で分光測定する。
非熱的エネルギー宇宙の探求	重力や衝突・爆発のエネルギーが宇宙線を生み出す過程を解明	4) 数個の若い超新星残骸を、硬X線帯域で「すざく」の約100倍の感度(*)で分光観測して硬X線放射を測定し、電子のエネルギー分布を決定する。巨大ブラックホールにおいては、2から10キロ電子ボルトでのX線強度がかに星雲の1000分の1程度で、ベキ1.7を持つ巨大ブラックホールのスペクトルを、600キロ電子ボルトまでの帯域で観測可能な感度で、10個以上取得する。
ダークマター・暗黒エネルギーの探求	ダークマターと暗黒エネルギーが宇宙の構造形成に果たした役割の探求	5) 目標1)を達成した後、さらに10個程度の天体の観測を行って約80億光年までの宇宙(赤方偏移<1)で銀河団内のダークマターの総質量を測定し、総質量と銀河団数の関係を年代ごとに決定する。(エキストラな目標)

(\*) 点源と見なせる天体を観測した場合に達成される検出感度を表す

33

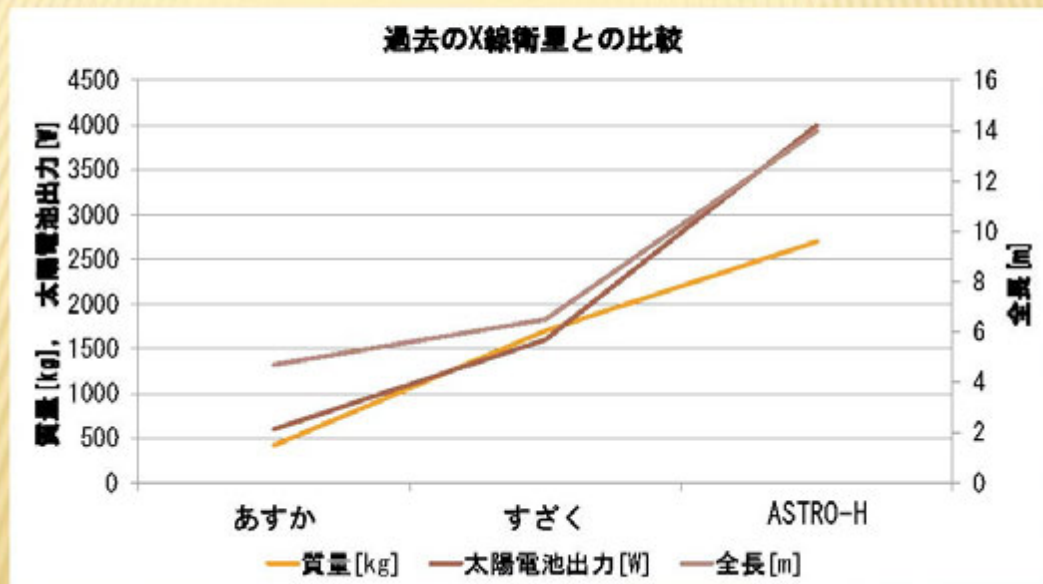
## これまでのX線天文衛星との比較

	あすか	すざく	ASTRO-H
打ち上げ年	1993年	2005年	2014年度
質量	420kg	1700kg	2700kg
全長	4.7m	6.5m	14m
太陽電池出力	600W	1600W	4000W
打ち上げロケット	M-3 SII 7号機	M-V 6号機	H-IIA
主要検出器	X線望遠鏡 X線CCDカメラ 撮像型蛍光比例計 数管	X線望遠鏡 高分解能X線分光器 X線CCDカメラ 硬X線検出器	硬X線反射望遠鏡 軟X線反射望遠鏡 軟X線分光検出器 軟X線撮像検出器 硬X線撮像検出器 軟ガンマ線検出器
試験場所	相模原キャンパス	相模原キャンパス	筑波宇宙センター

34



## これまでのX線天文衛星との比較



35

## 体制上困難な点

- ✧ 世界トップレベルの力を合わせて開発している  
→ 参加機関数、参加者が多く、周知徹底、連絡が難しい。

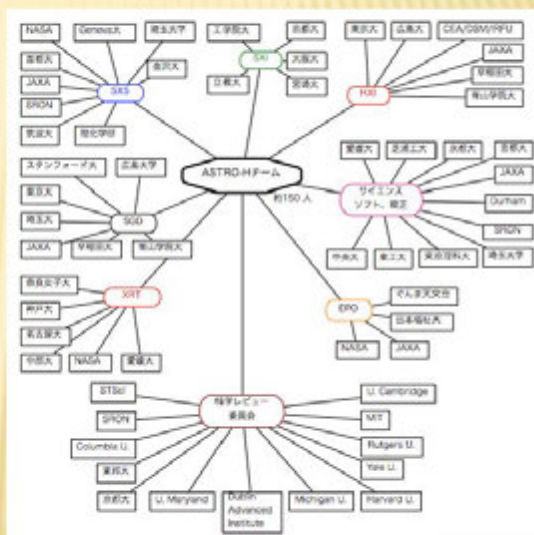
検出器	海外機関	主メーカー	主な大学
SXS	NASA, ESA, SRON	住友重機, 三菱重工	首都大, 埼玉大, 金沢大, Jeneva大
HXI/SGD (AMS)	ESA (CSA)	三菱重工 (Neptec)	名古屋大, 広島大, 東京大, 早稲田大, Stanford大
SXI		三菱重工, 住友重機	大阪大, 京都大, 宮崎大
HXT (SXT)	ESA (NASA)	[名古屋大] ([NASA])	名古屋大, 中央大, 愛媛大



36

## 大学を中心とした検出器チーム

- ✕ 主要検出器はJAXA/ISASと大学、メーカーからなるチームにより開発が進められている。
- ✕ 大学側が設計、機器製造、環境試験、性能試験、較正等大きな役割を果たしている。
- ✕ 国内 25大学、海外機関を加えると40を超える機関、180人にもおよぶ研究者が開発に参加している。



宇宙航空研究開発機構(JAXA)/NASA/青山学院大学/ESA/Yale U./Wisconsin U./STScI/SRON/愛媛大学/WIT/WPI-K/大阪市立大学/大阪大学/金沢大学/京都大学/Cambridge U./県立ぐんま天文台/工学院大学/神戸大学/Columbia U./埼玉大学/CEA-DSM-IRFU/CfA/Harvard/芝浦工業大学/首都大学東京/KIPAC-Stanford U./Saint Mary's U./Durham U./Dublin Institute for Advanced Studies/中央大学/中部大学/筑波大学/東京工業大学/東京大学/東京理科大学/東邦大学/名古屋大学/奈良女子大学/日本大学/日本福祉大学/広島大学/物質材料機構/Michigan U./宮崎大学/U. Geneva/U. Maryland

## 熱変形試験計測系

名称	台数	目的	型番等
レーザー変位計 (LD)	12台	ベースパネル/トッププレート の面内/面外変形の測定	キーエンス LK-H155 直線性: $\pm 0.02\%$ of 80mm 計測レンジ: $\pm 40$ mm
オートコリメータ (AC)	6台	ベースパネル/トッププレート の反り、伸展式光学ベンチ (EOB) 取り付け部の傾き測定	Nikonインストルメンツ6D 面の傾斜角(2軸)を秒角精 度で計測可能。
LLD (遠距離レー ザー変位計測 システム)	2台	望遠鏡光軸の傾きの測定	新規開発品 望遠鏡光軸にレーザー光源、 検出器上面に位置検出型フォ トダイオード(PSD)を取り付 け、変位を測定する。
カメラシステム (望遠レンズ搭 載のCCDカメラ、 マーカー)	2台	同上	新規開発品 望遠鏡光軸にCCDカメラ、検 出器上面にマーカーを取り付 け、画像解析で変位を測定す る。



## アライメント要求

観測対象方向に対する要求

	軟X線分光器 SXS	軟X線撮像器 SXI	硬X線撮像器 HXI	軟ガンマ線検出器 SGD
光軸	< 120	< 120	< 60	<200
中心軸	< 55	< 184	< 52	-
指向安定性	< 10 /0.25sec	< 10 /4sec	< 10 /0.25sec	-

(単位 秒角)

望遠鏡の焦点距離と各検出器のサイズ、結像中心位置許容範囲



	SXS	SXI	HXI
焦点距離	5.6m	5.6m	12m
検出器サイズ	□5mm	□62mm	□32mm
結像中心要求(※)	Φ3mm	Φ10mm	Φ6mm

(※ 検出器中心から結像中心までの距離)

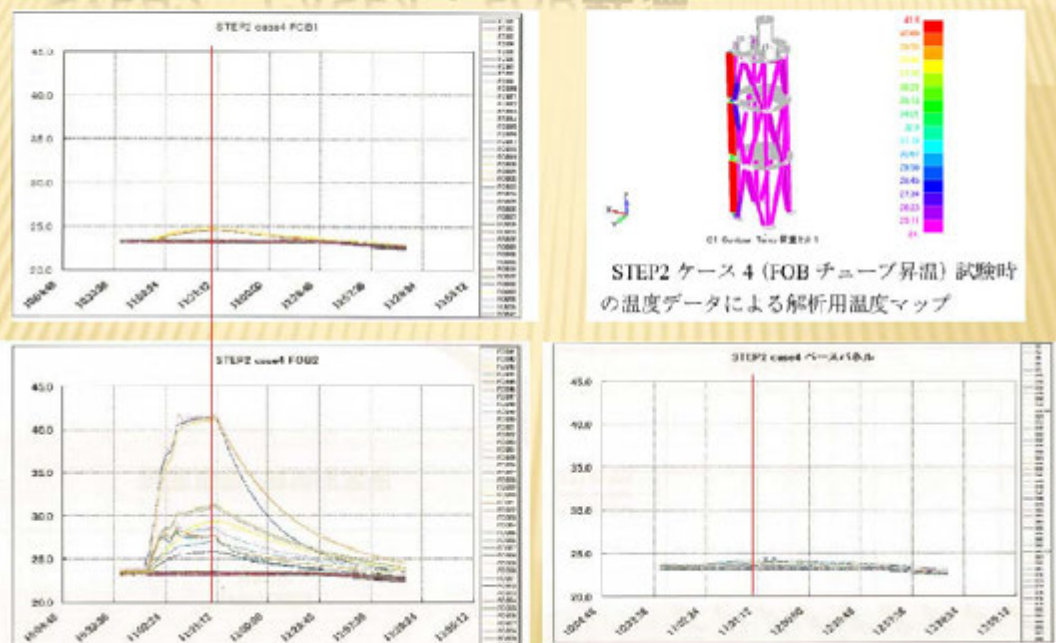
39

## 熱変形試験結果 STEP2 試験結果概要

	昇温箇所	ΔT (実績)	代表点変形
Case1-01	ベースパネル+Y, スラストチューブ+Y, アウトリガー+Y	約20℃	TP -Y 84 μm
Case1-02	ベースパネル+Y	約10℃	TP -Y 14 μm
Case3	SXS-DWR	約30℃	DWR H 19秒角
Case4	FOBチューブ(+X+Yの縦部材)の昇温	約20℃	TP -Y -15 μm +X 18 μm
Case5	EOB保持構造昇温	約15℃	EOB H -3秒角 V -13秒角
Case6-01	FOBトッププレート+Y昇温	約15℃	<5 μm <2秒角
Case6-02	SXT-I ダミー昇温	約4℃	SXT-I 簡易AMS < 2秒角
Case8	STT ダミー昇温	約8℃	STT H, V 9秒角
Case9-01	SXT-S ダミー昇温	約9℃	SXT-S カメラ ≪ 2秒角
Case9-02	HXT (-X) 昇温	約10℃	HXT (-X) 簡易AMS < 2秒角

ΔTの決め方：軌道上の温度変動，ダミーの昇温限界，計測精度に対して十分な変形量

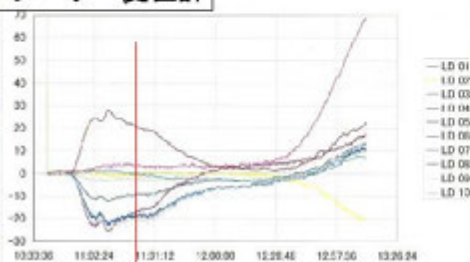
## STEP2 CASE4 : FOB昇温



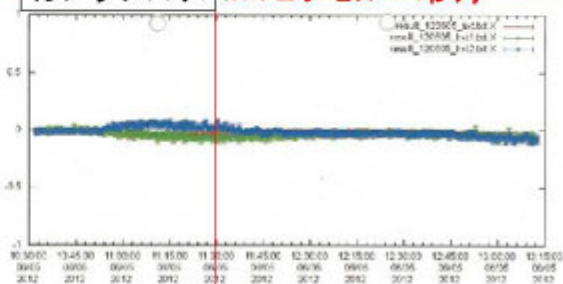
41

## STEP2 CASE4 : FOB昇温

レーザ変位計



カメラシステム0.1ピクセル=1秒角



LLD

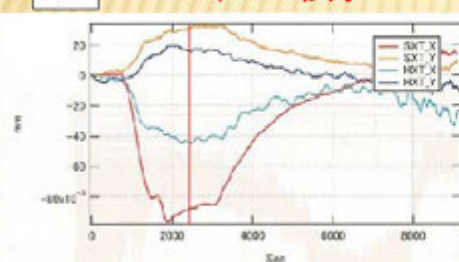
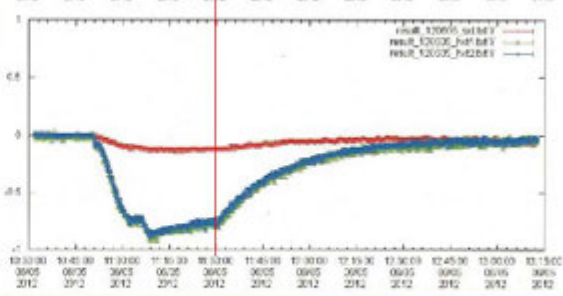
27  $\mu\text{m}$  = 1秒角

図 4.9 HXTSCT の XY を同時にプロットしたもの。



42



## 質疑応答

質問者①（九州工業大学 趙氏）

IR カメラについて教えてください。チャンバの外から撮っているのか？もしくは中から撮っているのでしょうか？

発表者

両方です。本発表で示した画像は、チャンバの中から取ったもので、TFX 台車の上に取り付けたカメラから撮った画像です。

質問者②（九州工業大学 趙氏）

チャンバの中から取るのは理解できますが、外から取る際は、IR 透過窓をつけているのでしょうか？またその視野にはシュラウドがかぶっていないのでしょうか？

発表者

IR 透過窓は付けていて、視野にはシュラウドがかぶることはありません。

質問者③（JAXA 環境試験技術センター 施氏）

これから音響試験、衝撃試験、振動試験含めて 600ch 使うとありましたが、それは同時に取得するチャンネル数なのでしょうか？

発表者

いえ、同時に取得するものではありません。同時に使用するのは 300ch までに抑えようとしています。設備のチャンネル数をオーバーするようであれば、間引く方向で考えたいと思います。

質問者④（JAXA 環境試験技術センター 施氏）

設備の方は最大 400ch しか使用できないので、試験時には調整させてください。