

平成28年9月

**X線天文衛星「ひとみ」の失敗は、  
「発注者のエンジニアリング」の失敗**

**新国立競技場建設の白紙撤回に続く、我が  
国の大規模技術プロジェクトの歴史的破綻**

澤田雅之技術士事務所(電気電子部門)

所長 澤田 雅之

# X線天文衛星ASTRO-H「ひとみ」

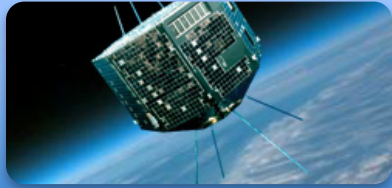


宇宙からのX線は、大気に吸収されるため衛星による観測が欠かせない。

2005年に打ち上げたX線天文衛星「すざく」の後継として、「すざく」の数十倍の性能の観測機器を搭載。重量約2.7t

米航空宇宙局、欧州宇宙機関などが参加する国際協力ミッション。国内28、国外23の大学や研究機関から約180名の研究者がプロジェクトに参加。我が国の負担額は、衛星打ち上げを含めて約310億円。

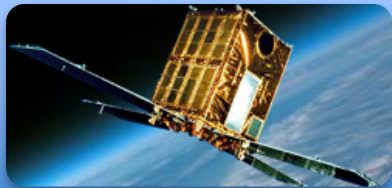
# X線天文衛星は日本のお家芸



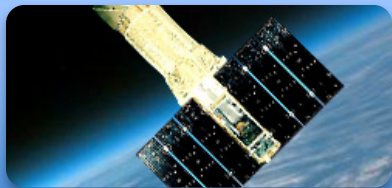
はくちょう 1979～1985 96Kg



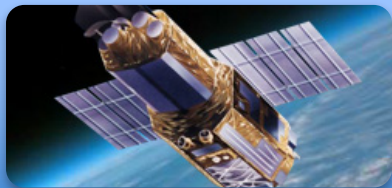
てんま 1983～1988 216Kg



ぎんが 1987～1991 420Kg



あすか 1993～2001 420Kg



すざく 2005～2015 1.7t

# 打ち上げ成功から分解までの経緯

平成28年2月17日 打ち上げに成功

平成28年2月29日 衛星本体の基本機能確認  
や、ソーラーパネルと光学ベンチの伸展を行  
う「クリティカルフェーズ」が完了

平成28年3月26日 全  
ての観測機器を立ち  
上げる「初期機能確  
認フェーズ」の期間  
中に、衛星異常回転  
が発生して分解



出典：X線天文衛星ASTRO-H「ひとみ」異常事象調査報告書



資料28-2-2  
科学技術・学術審議会  
研究計画・評価分科会  
宇宙開発利用部会  
(第28回H28.6.14)

# X線天文衛星ASTRO-H「ひとみ」 異常事象調査報告書

平成28(2016)年6月14日

国立研究開発法人

宇宙航空研究開発機構

本資料における時刻は注記のあるものを除いて全て日本時間(JST)で記述しております。

# X線天文衛星「ひとみ」が軌道上で分解



## ソフトウェアのバグとデータ入力ミスが原因！

### 1 姿勢測定系のバグによる回転の開始

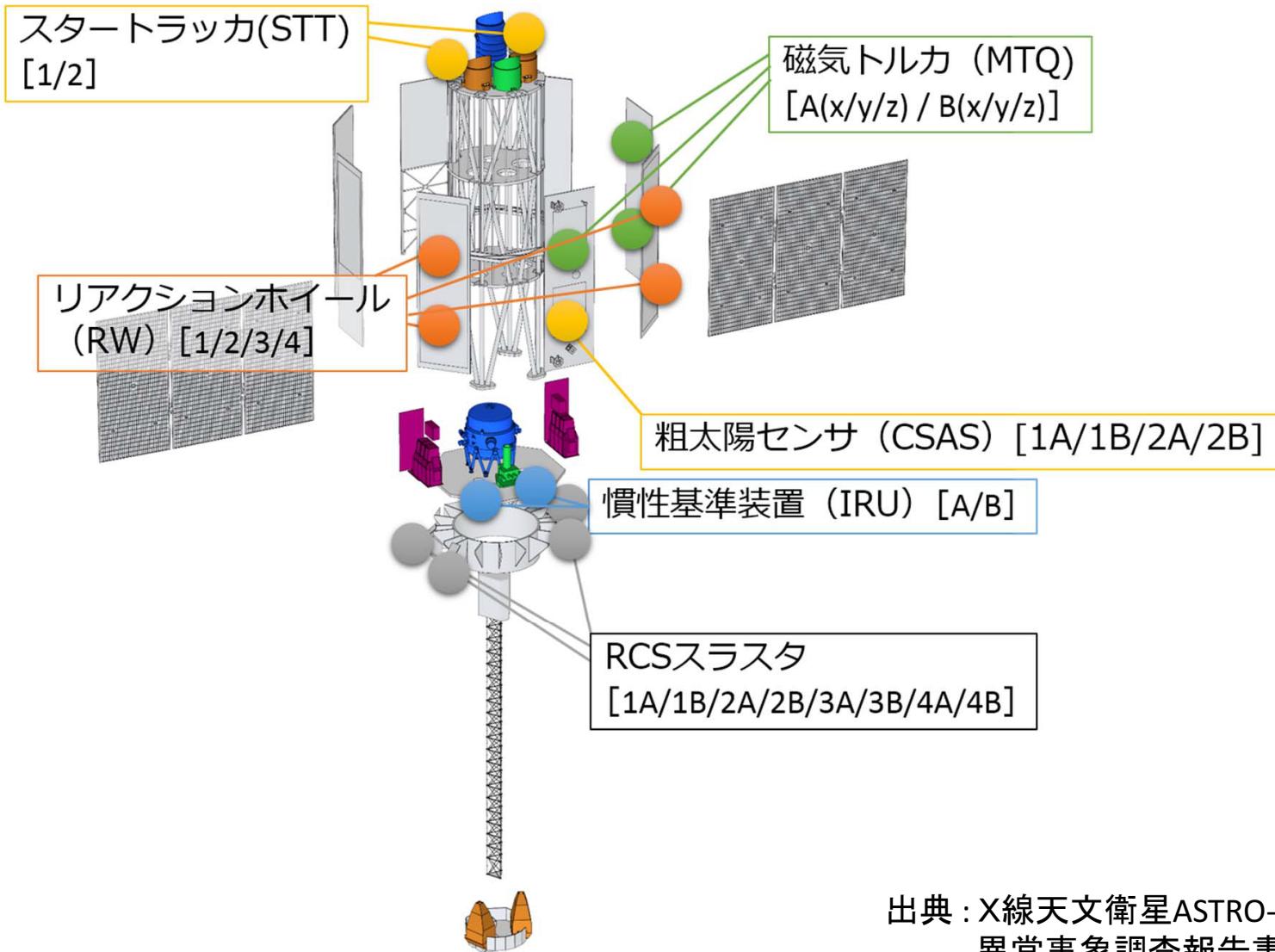
姿勢測定系のバグにより、実際には回転していない衛星がゆっくりと回転していると姿勢測定系が誤認 → 誤認した回転を止める方向に姿勢変更系を作動させた結果、**衛星はゆっくりと回転を開始**

### 2 姿勢変更系のデータ入力ミスによる回転の加速

衛星は自動的に緊急対応モードとなり、事前に入力したデータに基づき、ソーラーパネルを太陽に向けるため、小型ロケットを噴射 → データ入力ミスにより、小型ロケットの噴射が衛星の回転を加速させた結果、**遠心力により衛星は分解**



# 「ひとみ」の姿勢測定系と姿勢変更系



出典：X線天文衛星ASTRO-H「ひとみ」  
異常事象調査報告書

# 「ひとみ」の姿勢測定系

スタートラッカ：星々の配置を見て、**姿勢を実測する機器**。精度は高いが、撮像部が地球に向いている場合には姿勢を実測できない。

慣性基準装置：加速度の大きさと方向を調べて、**姿勢を推測する機器**。時間の経過とともに推測値の誤差が累積していくので、スタートラッカや粗太陽センサの実測値により補正する必要がある。

粗太陽センサ：太陽の方角を調べて、**姿勢を実測する機器**

# 「ひとみ」の姿勢変更系

**リアクションホイール：** ホイールの回転を加速又は減速させることにより、その反動で衛星を回転移動させる機器

**磁気トルカ：** 電磁石と地磁気の相互作用により、姿勢を変更する機器

**RCSスラスタ：** 小型のロケットエンジンを噴射して、姿勢を変更する機器。RCSとは、Reaction Control Subsystemのこと



# 宇宙航空研究開発機構の宇宙科学研究所

**1964年** 東京大学に宇宙航空研究所を設立。1970年には日本初の人工衛星である「おおすみ」を打ち上げ。以後、独自開発した固体燃料ロケットによる科学衛星打ち上げの中核となる。

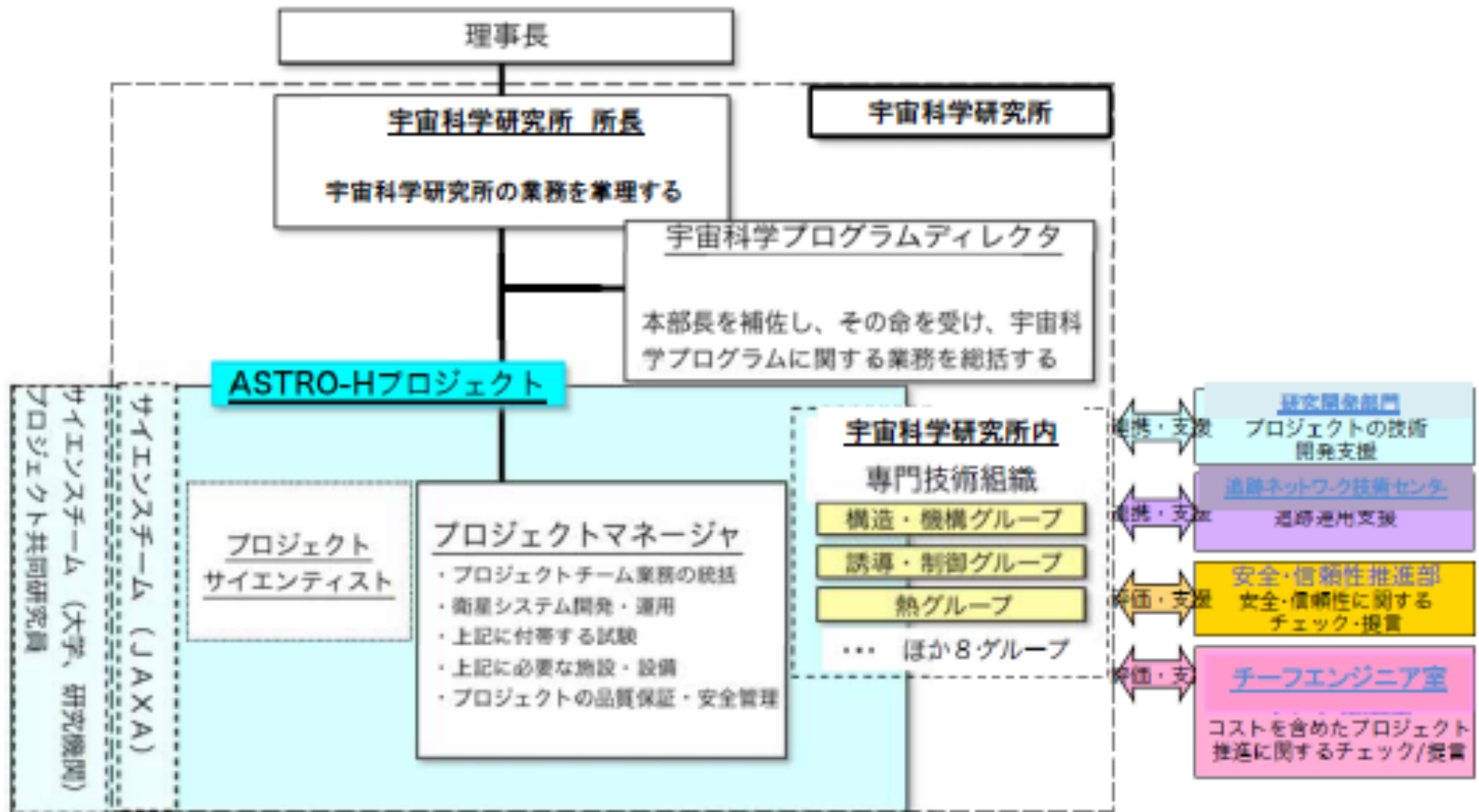
**1981年** 文部省宇宙科学研究所に改組。

**2001年** 文部省と科学技術庁が統合され、文部科学省宇宙科学研究所に改組。

**2003年** 旧科学技術庁系列の航空宇宙技術研究所及び宇宙開発事業団と統合され、宇宙航空研究開発機構(JAXA)が発足。その一機関として、宇宙科学研究本部に改組。

**2010年** 宇宙航空研究開発機構の宇宙科学研究所に改名。

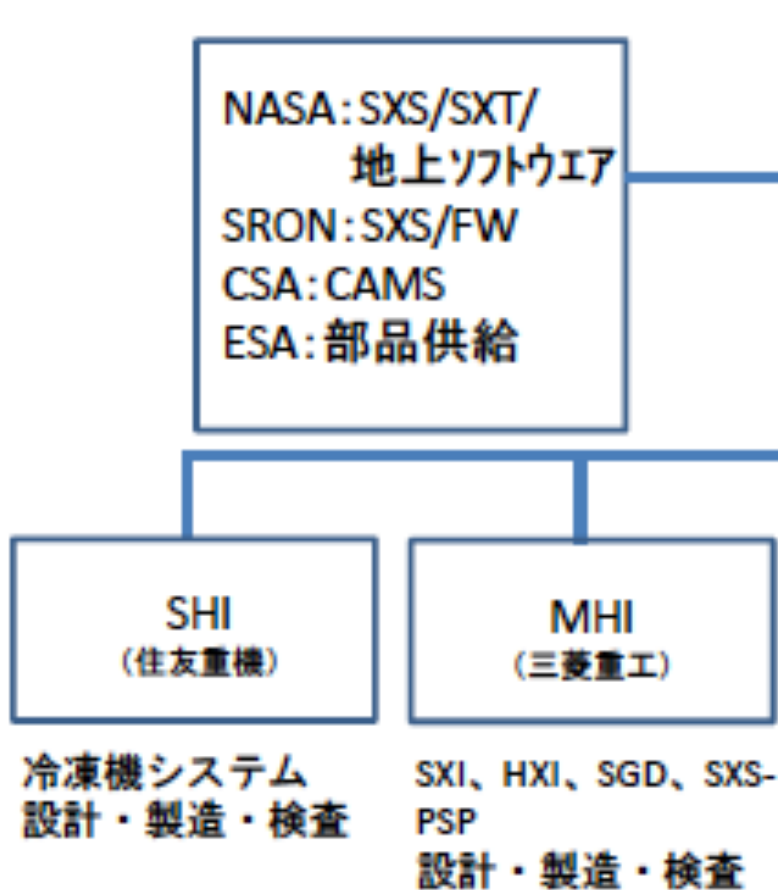
# ASTRO-H「ひとみ」の開発体制 (JAXA内)



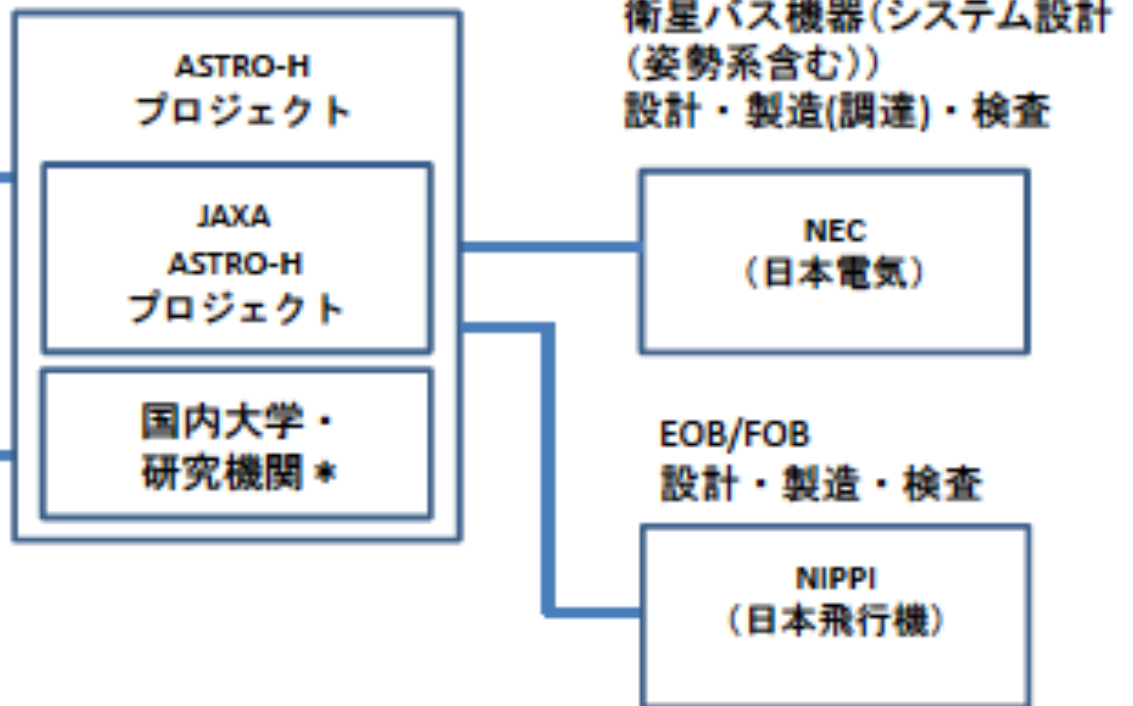
出典：X線天文衛星ASTRO-H「ひとみ」異常事象調査報告書

# ASTRO-H「ひとみ」の開発体制 JAXA-他機関/企業関係図

## <ミッション機器関連>

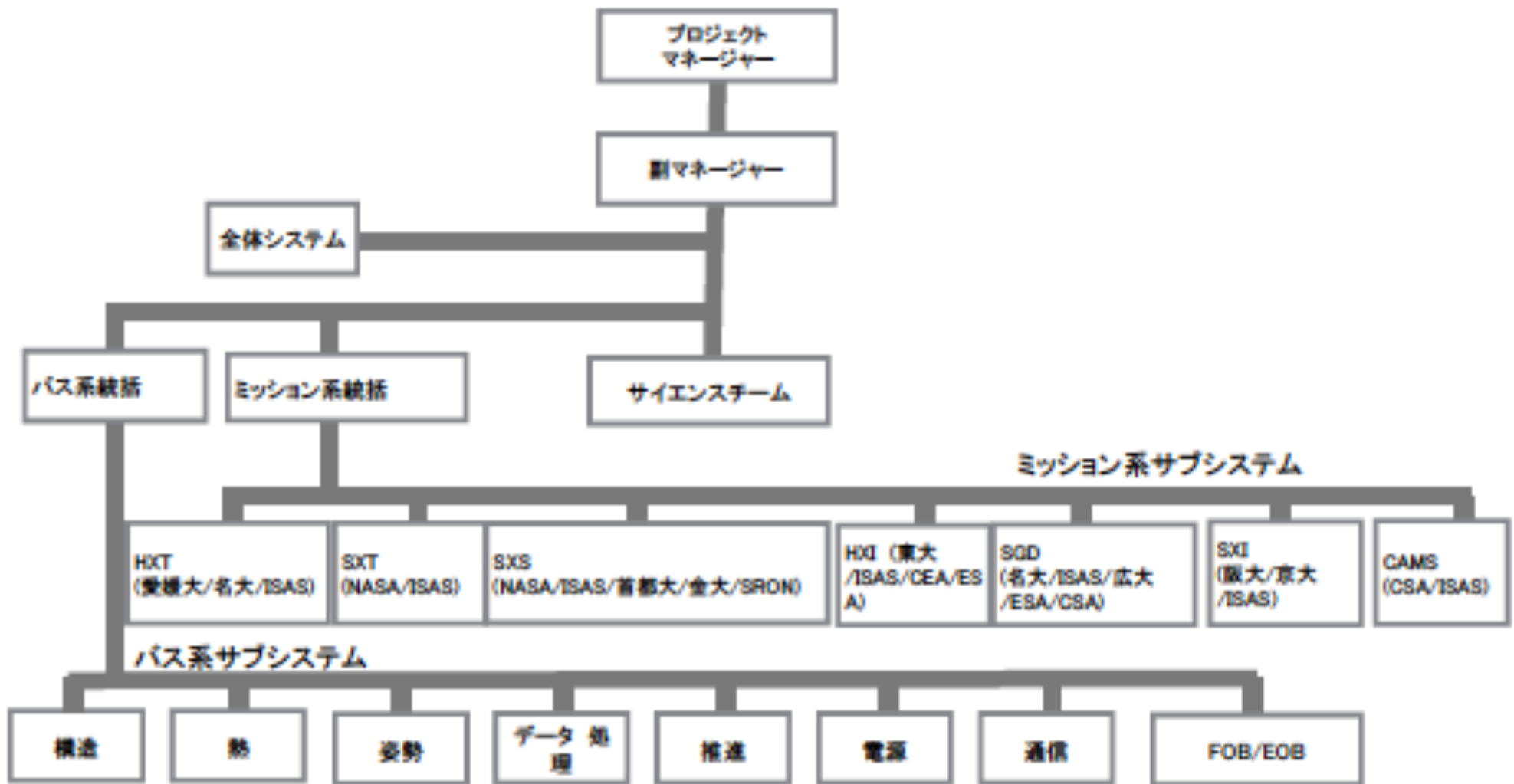


## <衛星バス機器関連>



\* 大学共同利用システム研究員として、  
JAXA/ISASの一部をなす

# ASTRO-H プロジェクト体制図



出典：X線天文衛星ASTRO-H「ひとみ」異常事象調査報告書

# ASTRO-Hのプロジェクトマネージャー

## 高橋忠幸教授

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所教授で、**高エネルギー宇宙物理学が専門**

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻の教授を併任し、宇宙科学研究所で東京大学大学院生を指導

## 高橋教授の研究テーマ

**高エネルギー宇宙物理学の研究。**人工衛星、大気球などの飛行体を用いた宇宙X線あるいはガンマ線の観測を通して、宇宙の高エネルギー現象及び宇宙の構造と進化の研究を行っている。特に、ブラックホールの近傍からのX線・ガンマ線放射、活動銀河核ジェットからの広範囲な波長域にわたる放射、超新星残骸や銀河団からの硬X線放射など、これまで、十分に理解が進んでいない、**宇宙における非熱的な現象が、主な研究対象**である。

X線天文衛星「すざく」において、硬X線検出器(HXD)を開発、ASTRO-Hのシステム開発および硬X線・軟ガンマ線検出器開発を行う一方で、次世代のガンマ線天文学を切り開くために、半導体技術、VLSI技術等を駆使した新しいガンマ線検出器の開発を行っている。

(宇宙科学研究所の教育職 職員一覧からの引用)



# 異常回転の2大原因

## 1 姿勢測定系の誤認による回転の開始

観測対象変更に伴う姿勢変更後、姿勢測定系の想定外な動作により、実際には回転していない衛星がゆっくりと回転していると姿勢測定系が誤認 → この誤認した回転を止める方向に姿勢変更系が作動した結果、**衛星はゆっくりと回転を開始**

## 2 姿勢変更系の誤入力による回転の加速

姿勢を把握できなくなった衛星は緊急対応モードとなり、ソーラーパネルを太陽に向けるため、事前に入力したデータに基づきスラスタ(小型のロケットエンジン)を噴射 → データの誤入力により、スラスタの噴射が衛星の回転を加速させた結果、**遠心力で衛星は分解**

# 姿勢変更系データの誤入力

2月25日に実施したRCSスラスト制御データ変更作業の流れ



「RCS駆動マトリクス生成ツール」の出力

```

0.153748  0.000000  0.178475  0.000000  0.134816  0.000000
0.153748  0.000000  0.000000 -0.177997  0.000000 -0.134816
0.000000 -0.152615  0.000000 -0.177997  0.134816  0.000000
0.000000 -0.152615  0.178475  0.000000  0.000000 -0.134816
    
```

「パラメータテーブル生成ツール」への入力

RCS-A 駆動マトリクス		EOB伸展後の慣性モーメント(MOI)
	0.153748	
	0.000000	
	0.178475	
	0.000000	
	0.134816	
	0.000000	
	0.153748	
	0.000000	
	0.000000	
	-0.177997	
	0.000000	
	-0.134816	
	0.000000	
	-0.152615	
	0.000000	
	-0.177997	
	0.134816	
	0.000000	
	0.000000	
	-0.152615	
	0.178475	
	0.000000	
	0.000000	
	-0.134816	

★ 負値を絶対値へ変換した上で入力しなければならなかった。

パラメータテーブルには、マイナス値を絶対値に変換して入力しなければならなかった。

# リスクマネジメントとダメージコントロール

姿勢変更系データ誤入力の原因は、運用マニュアルの不備！ → **マニュアルの整備は、リスクマネジメントの基本**



リスクマネジメントが不十分では、ダメージコントロールは不可能！ → リスクマネジメントとダメージコントロールの大成功事例は、小惑星探査機「はやぶさ」

# 異常回転の発生から分解までの詳細

慣性基準装置の推測値(誤差が累積)に基づき、衛星の姿勢を変更

48分後 ↓

スタートラッカが姿勢を正確に実測した直後に、**不意にリセット** →

慣性基準装置の推測値(誤差が累積)とスタートラッカの実測値(正確)との差異から、**衛星がゆっくりと回転していると誤認** →

**誤認した回転を止めようとしてリアクションホイールを作動**させた結果、衛星はゆっくりと回転し始めた。**(衛星は回転していないと誤認)**

4分後 ↓

測定を再開したスタートラッカの**正確な実測値を異常と誤認**して、**測定系から除外**。**(予備のスタートラッカには自動的に切り替わらない設定)** → ①

衛星は姿勢を全く把握できなくなった。**(粗太陽センサは姿勢測定に用いず)** ②

③

衛星は、緊急対応モードに移行し、ソーラーパネルを太陽に向けるため、予め入力されたデータに基づき、スラスタ(小型のロケットエンジン)を噴射 →

**データに入力誤りがあったため、スラスタの噴射は衛星の回転を加速**する方向に働き、**高速回転による遠心力で衛星は分解**

# 姿勢測定系が脆弱化した理由

## ① 異常と判断したスタートラッカを測定系から排除する設定

- スタートラッカ出力の単発的なノイズ変動による姿勢決定精度の劣化を避け、安定姿勢での観測時間を長く取るため
- 慣性基準装置の推測値に依存する設計

## ② 予備のスタートラッカに自動的に切り替わらない設定

- スタートラッカ切替時に発生する姿勢微変動を避け、安定姿勢での観測時間を長く取るため
- 慣性基準装置の推測値に依存する設計

## ③ 粗太陽センサを姿勢測定に用いない設定

- 粗太陽センサの視野範囲の狭さから、不必要に緊急対応モードに移行した場合には観測が中断されるため
- 慣性基準装置の推測値に依存する設計



## 姿勢測定系の誤認による回転の開始(1/4)

衛星の姿勢測定系は、加速度を調べて姿勢の変化を推測する慣性基準装置と、星空を見て衛星の姿勢を正確に実測するスタートラッカを用いており、**慣性基準装置の推測値(時間とともに誤差が累積する。)**を、**スタートラッカの実測値で補正するように構成**していた。

スタートラッカは、現用・予備の2台を搭載していたが、切替時に発生する姿勢の微変動を避けるため、**自動的に切り替えない設計**としていた。また、慣性基準装置の推測値とスタートラッカの実測値に $1^{\circ}$ 以上の隔たりがある場合には、**スタートラッカの実測値を棄却する設計**としていた。



3月26日の3時22分、望遠鏡の向きを変えるため、衛星の姿勢を変更した。

## 姿勢測定系の誤認による回転の開始(2/4)

3月26日の3時22分、望遠鏡の向きを変えるため、衛星の姿勢を変更した。



4時10分、地球に遮られていたスタートラッカの視野が開け、衛星の姿勢をスタートラッカが正確に実測した。しかし、この直後にスタートラッカが不意にリセットし、実測値を出力しなくなった。



姿勢制御系ソフトウェアは、4時10分時点での慣性基準装置に基づく推測値(誤差が累積)とスタートラッカの実測値(正確)との差異に基づき、1時間に21.7度の速度で衛星はゆっくりと回転していると誤認(実際には回転していない。)した。

## 姿勢測定系の誤認による回転の開始(3/4)

姿勢制御系ソフトウェアは、1時間に21.7度の速度で衛星はゆっくりと回転していると誤認(実際には回転していない。)した。



姿勢制御系ソフトウェアは、誤認した回転を止めるため、リアクションホイールを作動させた結果、1時間に21.7度の一定速度で衛星はゆっくりと回転し始めた。一定速度の場合には、慣性基準装置では姿勢の変化を検知できないため、姿勢制御系ソフトウェアは回転を止めたと誤認(実際には回転している。)した。



4時14分、スタートラッカによる衛星の姿勢の正確な実測が再開した。

## 姿勢測定系の誤認による回転の開始(4/4)

4時14分、スタートラッカによる衛星の姿勢の正確な実測が再開した。



4時10分から4時14分の間に、衛星は $1^{\circ}$ 以上回転していた。このため、姿勢制御系ソフトウェアは、スタートラッカの異常と判断して、スタートラッカの出力を全て棄却した。



回転の継続により、地球の重力に対して衛星が直立した形にならないように姿勢を保つ機能に大きな負荷が掛かり、リアクションホイールの姿勢制御能力が限界に達した。

## 姿勢変更系の誤入力による回転の加速(1/2)

スタートラッカや粗太陽センサが出力する実測値を用いず、慣性基準装置による推測値のみに依存することとなった姿勢制御系ソフトウェアでは、大きな推測誤差の発生を検知して補正することができない。



姿勢制御系ソフトウェアは、衛星の実際の姿勢を把握できなくなった。



姿勢制御系ソフトウェアが推測した誤った姿勢に基づき、磁気トルカとリアクションホイールを動作させ続けたため、リアクションホイールの姿勢制御能力が限界に達した。



## 姿勢変更系の誤入力による回転の加速(2/2)

リアクションホイールの姿勢制御能力が限界に達した。



衛星は自動的にセーフホールドモードに移行し、粗太陽センサで捉えた太陽の方角に太陽電池パドルを向けるため、予め設定されたパラメータに基づき、スラスタ(小型のロケットエンジン)を噴射した。このパラメータは、光学ベンチの伸展に伴い、2月25日に設定値が変更されていた。



2月25日に設定変更されたパラメータに入力誤りがあったため、スラスタの噴射は衛星の回転を加速する方向に働き、高速回転による遠心力で、3月26日に衛星は分解した。

## 異常回転を引き起こした設計上の直接要因 (1/2)

- 1 姿勢変更に伴う観測時間のロスを減らすため、姿勢変更後の姿勢決定収束時間が短くなるよう、姿勢決定システムのリセット後のゲインを高く設定した。
- 2 スタートラッカ出力の単発的なノイズ変動による姿勢決定精度の劣化を避けるため、スタートラッカが出力する瞬時の姿勢情報と、慣性基準装置に基づき姿勢制御系ソフトウェアが継続的に計算している姿勢情報との間に $1^\circ$ 以上の差がある場合は、スタートラッカを棄却して姿勢制御ソフトウェアの計算値を優先する設計とした。

## 異常回転を引き起こした設計上の直接要因 (2/2)

- 3 スタートラッカ切替時に発生する姿勢微変動を避け、安定姿勢で観測する時間を長く取るため、2台搭載していたスタートラッカの片系が使用できない際には、両系共に使用せず、慣性基準装置の出力に基づく姿勢制御系ソフトウェアの計算値に依存する設計とした。
- 4 ミッションの継続性を優先するASTRO-Hプロジェクトからの要求に基づき、視野範囲の狭さから不必要にセーフホールドに移行する可能性があった粗太陽センサについては、セーフホールド移行判断に用いず、姿勢制御系ソフトウェアの計算値を用いる設計とした。

# 異常回転を引き起こした設計上の背後要因

- 1 プロジェクトマネージャーが科学的成果創出の役割も兼ねており、安全・信頼性についてのプロジェクト管理が十分でなかった。
- 2 姿勢制御系の設計では、ASTRO-Hプロジェクトからの要求書の記述が偏っており、より良い観測条件を確保する要求は詳細である一方、安全・信頼性に関する要求は少なかった。
- 3 姿勢制御系要求条件として、研究者側から厳しい「要求以上の要望」のある場合、受注企業と徹底した検討を行うなどの基本動作ができていなかった。
- 4 設計審査会等で示された確認・懸念事項について、そのフォローが十分にできていなかった。また、その解決に向けて、ASTRO-Hプロジェクトが、システムを総合的に見渡し、局所最適でなく全体最適な解を見いだすことができなかった。

# 部分最適化ではなく全体最適化

ASTRO-Hプロジェクトは、「観測時間の確保」の最大化を、至上命題として追求した。



「観測時間の確保」と「姿勢制御の信頼性の確保」は、トレードオフの関係にある。



「姿勢制御の信頼性の確保」の最小化に繋がった。

# 部分最適化ではなく全体最適化

## ★部分最適化はボトムアップ

システムの部分ごとにそれぞれ最適化すれば、最適化された各部分をまとめ上げた全体が最適化される？ → **各部分の間にトレードオフの関係があれば、全体最適化は不可能。**

## ★全体最適化はトップダウン


部分最適化を図るのではなく、プロジェクトの目的を見据えて、プロジェクトの全体最適化を図る。

 **ここが、技術プロジェクトを破綻させない鍵！**

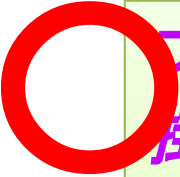


# プロジェクトの運営体制の抜本的な見直し

## 部分最適化 → ボトムアップ

 プロジェクトを構成する各グループごとに最善を尽くすことが求められる。 → グループを率いる各リーダーは、プロジェクトの責任を互いに分かち合う立場であり、各々の専門分野の技術力に加えて、グループとしての結果を出すための統率・指導力及び折衝・調整力が欠かせない。

## 全体最適化 → トップダウン

 プロジェクトの成否は、偏にプロジェクトマネージャの手腕に掛かってくる。 → プロジェクトマネージャは、プロジェクトの最終責任を一身に負う立場となるため、プロジェクトの全般に関する技術力に加えて、優れた企画力、折衝・調整力及び統率・指導力が求められる。

# トップダウンでプロジェクトを運営

欧米では通例

我が国では、戦前の軍用機開発プロジェクトが典型的なトップダウン。零戦では、三菱重工の堀越二郎技師が設計主務者として、零戦開発プロジェクトを統率。零戦の成功は、堀越二郎技師の卓越した技術力、企画力、折衝・調整力及び統率・指導力の賜物。



トップダウンでプロジェクトを運営するには、プロジェクトマネージャーが最終責任を全うできるよう、強力な権限の付与が必要。この点について、プロジェクト構成員の意識改革の徹底が欠かせない。

# 設計と製造を一括して発注

受注者側に実現を求める機能要件及び性能要件を、受注者側が設計と製造を行う上で必要十分となるように、発注仕様書にリストアップ

→ 全体最適化の追求



実現を求める機能要件及び性能要件の達成責任は、全て受注者側に在る。

# 理想的な発注者のエンジニアリング

## 設計審査会の審査内容の抜本的な見直し

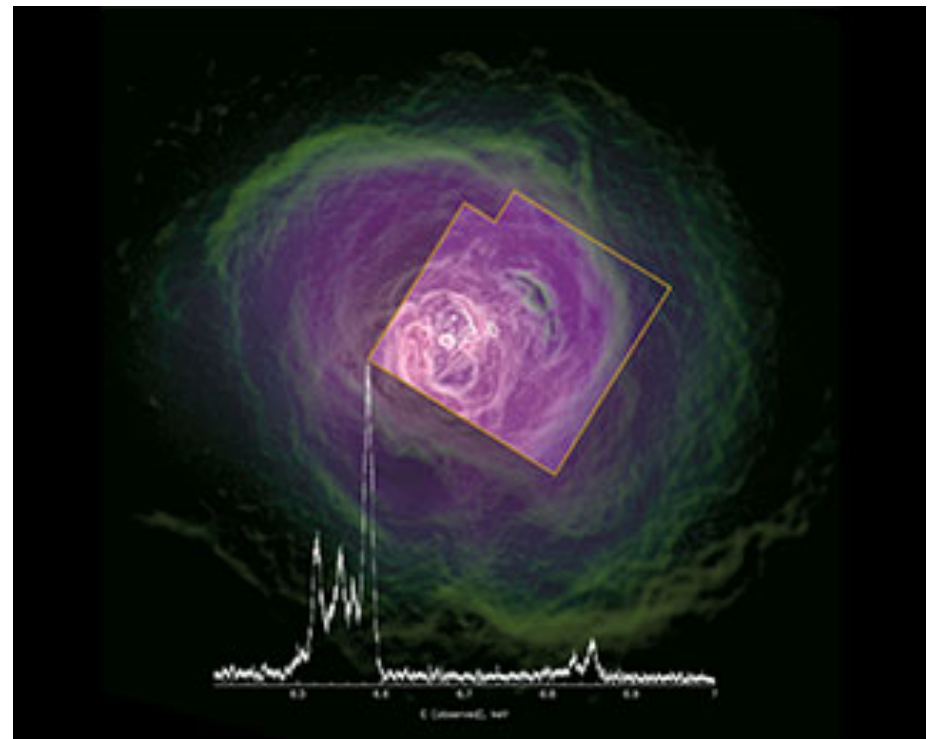
**概要設計書の審査：** 概要設計書は、①解決すべき課題、②解決方策の概要、③課題解決により期待される効果、の三点について、一読すれば理解が得られるように、簡潔明瞭な文章で作成する。

**発注仕様書の審査：** 発注仕様書は、受注企業が詳細設計を行う上で欠かせない機能要件及び性能要件について、誤解を招かないように簡潔明瞭に作成する。また、性能要件間にトレードオフの関係が生じる場合においても、実現が不可能ではない性能要件とする。

# 「ひとみ」搭載観測機器でペルセウス座銀河団を観測

国際研究チームはX線天文衛星ASTRO-H「ひとみ」**打ち上げの約一週間後から開始した観測装置立ち上げ段階で**、搭載された軟X線分光検出器(SXS: Soft X-ray Spectrometer)によって**ペルセウス座銀河団を合計23万秒間観測**しました。取得されたデータから、SXSは打ち上げ前に見積もっていた以上の分解能を達成し、**これまでの20倍以上の精度で高温ガスの運動を測定できることを軌道上で実証**しました。また、今回のSXSによる観測で、銀河団中心部のガスの運動をはじめて測定することに成功しました。

観測の結果、銀河団中心部で、巨大ブラックホールから吹き出すジェットは高温ガスとぶつかり、高温ガスを押しつけているものの、その結果作り出されるはずのガスの乱れた運動は意外に小さい、すなわち高速ジェットが影響を及ぼしているにも関わらず銀河団中心部の高温ガスは意外に静かであるということがわかりました。本研究成果は、**7月7日付英国科学誌「Nature」に掲載**されました。



資料29-7

科学技術・学術審議会  
研究計画・評価分科会  
宇宙開発利用部会  
(第29回H28.7.14)

# X線天文衛星ASTRO-H「ひとみ」の 後継機の検討について

2016年7月14日

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構  
宇宙科学研究所長 理事 常田佐久



## 前回宇宙開発利用部会後の取り組み

- 前回宇宙開発利用部会の『X線天文衛星「ひとみ」異常事象に関する報告書』で報告した以下の対策について、具体的な取り組みを実施している。
  - ① プロジェクトマネジメント体制の見直し
  - ② 宇宙科学研究所と請負業者の役割・責任分担の見直し
  - ③ プロジェクト業務の文書化と品質記録の徹底
  - ④ 審査や独立評価の運用の見直し
    - 宇宙研のプロマネ経験者等による6回の検討会を実施し、さらに、宇宙研全員との意見交換会を開催(7月8日)。
    - 上記対策を着実に実行するため、全社横断で取り組んでいる。
- 高エネルギー宇宙物理連絡会(X線天文学研究者の団体)が宇宙理工学合同委員会にてASTRO-H喪失に対するコミュニティとしての総括について言及。(7月11日)

# ASTRO-H事故を踏まえた設計見直し

## 『システム設計』

最先端の科学観測を実施しつつも、安全を重視したロバストなシステム設計を行う。

## 『ASTRO-H総点検』

ASTRO-Hの開発・運用を振り返り、その反映事項を抽出して適切に取り組む。

## 『姿勢制御系ソフトウェア』

ASTRO-Hの直接原因に対して複合的な対策を施し、慣性基準装置(IRU)バイアス誤差の推定値が高止まりが起こらない設計とする。



## 『太陽角異常検出条件』

十分広い視野の粗太陽センサを採用する等、セーフホールド姿勢移行の太陽方向異常検知に、姿勢決定系推定姿勢以外の情報を用いる設計とする。

## 『運用』

運用準備を確実にするための共通的な支援部門や「運用準備作業のガイドライン」を定義する。運用準備状況を打上1年前から確認し、最終的には第三者の視点も含めて審査する仕組みを構築する。

平成28年9月

X線天文衛星「ひとみ」の失敗は、  
「発注者のエンジニアリング」の失敗

終

新国立競技場建設の白紙撤回に続く、我が  
国の大規模技術プロジェクトの歴史的破綻

澤田雅之技術士事務所(電気電子部門)

所長 澤田 雅之