

X線天文衛星「ひとみ」の異常事象に関する小委員会
報告書

平成28年6月14日
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

目次

1. 検証審議の経緯.....	1
1.1. 設置経緯と活動実績.....	1
2. 検証審議の概要.....	1
2.1. 報告事項のまとめ.....	1
2.1.1. 異常発生メカニズム	2
2.1.2. 異常発生の直接要因と課題、背後要因の分析、水平展開と今後の対策	3
2.2. 今後の対策に当たって小委員会の審議を通し出された委員からの留意事項	6
3. まとめ.....	7

1. 検証審議の経緯

1.1. 設置経緯と活動実績

X線天文衛星 ASTRO-H「ひとみ」（以下「ASTRO-H」という。）は、ASTRO-EII「すざく」に続く X線天文衛星として、平成 20 年 7 月に宇宙開発委員会による事前評価を経て開発に着手した。ASTRO-H は、平成 28 年 2 月 17 日（日本時間、以下同じ）に打ち上げられ、2 月 29 日にクリティカル運用期間を終了し、順調に運用を続けていたが、3 月 26 日に ASTRO-H との通信異常が発生した。

これを受け、宇宙開発利用部会は、ASTRO-H の状況について、平成 28 年 4 月 19 日、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（以下「JAXA」という。）より、ASTRO-H の姿勢異常事象、ASTRO-H からの物体発生事象、ASTRO-H との間の通信異常事象の要因分析の結果について報告を聴取した。

宇宙開発利用部会は、本件に係る検討を円滑に進める上で、専門技術的観点から第三者により、JAXA が実施した異常事象の原因分析結果及び再発防止のための対策の妥当性について検証する必要があると認めたため、宇宙開発利用部会運営規則第 2 条第 1 項に基づき、宇宙開発利用部会の下に「X線天文衛星「ひとみ」の異常事象に関する小委員会」（以下「小委員会」という。）を設置した（参考 1 参照）。

小委員会の構成員の委員名簿は参考 2 のとおりである。

平成 28 年 5 月 10 日に開催した宇宙開発利用部会では、JAXA より複数の海外機関から ASTRO-H の太陽電池パドルの両翼分離を示唆する情報を得たこと等を踏まえ、今後衛星が機能回復することは期待できない状態にあるとの判断に至り、復旧に向けた活動は取りやめ原因究明に専念することについて報告を聴取した。

小委員会の開催状況は以下のとおりである。（参考 3 参照）

(1) 5 月 24 日 第 1 回小委員会

発生事象及び地上観測結果、故障の本解析 (FTA) からの発生メカニズムの推定、発生メカニズム毎の要因分析結果について審議した。

(2) 5 月 31 日 第 2 回小委員会

発生メカニズム毎の要因分析の追加分析結果及び再発防止のための対策について審議した。

(3) 6 月 8 日 第 3 回小委員会

異常事象の要因分析結果及び再発防止のための対策のまとめについて審議した。

2. 検証審議の概要

2.1. 報告事項のまとめ

JAXA では、設計情報及び運用履歴、スペースデブリの観測状況等の情報を基に、FTA

を実施し、以下に挙げる異常発生メカニズムを推定し、その原因及び再発防止策を検討した。

小委員会の検証審議を通し整理された JAXA の異常事象の原因分析結果及び再発防止のための対策報告事項の要約は、以下のとおりである。

(事実関係の詳細は、別添 X 線天文衛星 ASTRO-H「ひとみ」異常事象調査報告書による)

2.1.1. 異常発生メカニズム

(1) IRU 誤差推定値の高止まりによる姿勢異常（衛星の異常回転）が発生【異常発生メカニズムⅠ】

ASTRO-H は、ジャイロにより衛星の3軸の角速度を計測する慣性基準装置（IRU：Inertial Reference Unit）とカメラで星を撮像し星の写っている方向から衛星の姿勢を知る恒星センサ（STT：Star Tracker）の2つの情報を用いて衛星の姿勢を決定する仕組みであった。

姿勢決定の過程においては、IRU 計測値に基づき姿勢制御系ソフトウェアが計算した姿勢値を、STT が計測した姿勢値により補正し、同時に IRU 誤差推定を行う。その際、観測機会の最大化を企図し、計算姿勢値を STT 計測値に速やかに収束させる（その代償として IRU 誤差推定値がごく短い間だけ過渡的に増大してしまうことを許容する）設計を採用していた。

今回は、IRU 誤差推定値が増大したタイミングで STT の姿勢値出力が中断してしまい、IRU 誤差推定値が高止まりする状態が発生した。

その後、STT は姿勢出力を再開したが、姿勢制御系ソフトウェアの姿勢値は再開までの間、高止まりした IRU 誤差推定値を用いて計算されてしまったため、再開時には STT 出力姿勢値との差が1度以上に達していた。このような場合には STT を異常と判断する設定とされていたため、以降は、IRU 誤差推定値が高止まりし姿勢角推定値と STT 出力姿勢値との差が1度以上となったまま、STT の計測値を棄却し続ける結果となった。

このように IRU の誤差推定値が高止まった結果、実際には、ASTRO-H は、静止しているにもかかわらず、自らが回転していると自己判断し、姿勢を制御する機構であるリアクションホイール（RW）を作動させ、ASTRO-H は、緩やかな異常回転を開始した。

(2) 姿勢異常（衛星の異常回転）の継続【異常発生メカニズムⅡ】及び不適切なスラスト制御パラメータにより衛星の異常回転が加速【異常発生メカニズムⅢ】

ASTRO-H は、STT の計測値を棄却した状態では、IRU に基づく姿勢決定値が誤っていた場合に他のセンサで姿勢異常を検知する仕組みがなく、RW を用いてセーフホールドモードに早期に移行して姿勢を安全に立て直すことができなかった。

また、ASTRO-H が認識している姿勢と実際の姿勢に差異が生じた結果、RW の角運動量が正常動作範囲を超えないよう、姿勢を保持しながら RW の回転数を減らす（アン

ローディング) 機構が正常に機能できなくなり、RW の回転は、速くなっていき許容値を超えるに至り、ASTRO-H は、この状態を危険と判断し、姿勢を安定な状態に制御するため、スラスタを用いるセーフホールドモードに移行した。

ところが、スラスタ制御パラメータを手作業により作成した際にデータ入力誤りが発生しており、当該パラメータの検証が指示の伝達の不徹底により実施されていなかったため、不適切なスラスタ制御パラメータが ASTRO-H にセットされた状態であった。

その結果、スラスタは、想定と異なる動作により ASTRO-H の回転を一層加速させた。

(3) 太陽電池パドル及び伸展式光学ベンチ等が分離【異常発生メカニズムⅣ】

ASTRO-H の想定以上の回転運動により、両翼の太陽電池パドル、伸展式光学ベンチなど回転状態で発生する力に構造的に弱い部位が取付け部周辺で破断して分離した。

2.1.2. 異常発生の直接要因と課題、背後要因の分析、水平展開と今後の対策

(1) 異常発生の直接要因と課題、背後要因の分析

①設計段階に係る主要な要因分析

i) [異常事象Ⅰの直接要因 A] STT 挙動による IRU 誤差推定値高止まり事象に係る想定漏れ

ASTRO-H に搭載された STT は、新規開発品であり、計測の中断頻度が高まり軌道上での調整作業が未了時に異常発生に至った。当該 STT は、計測の速度と精度に重点をおいて設計されたが、実際の使用条件を反映した安全性や地上での性能機能の確認のための試験計画は不十分であった。

ii) [異常事象Ⅰの直接要因 B] 姿勢角推定値と STT 計測値データに長時間差がある場合に STT 計測値を棄却する設計の採用

観測時間の確保に係る要望への対応に当たって、衛星の安全性を含めたシステムとしての総合的な検討が不足した。また、設計段階では地上からの運用で柔軟に対処することとしながら、運用において対応できなかった。

iii) [異常事象Ⅱの直接要因] 姿勢異常検知における独立センサの不使用

姿勢制御系ソフトウェアと独立したセンサを姿勢異常検知に使用しない設計とした際に、姿勢を誤る可能性を考慮したロジックを採用せず運用で対処する方針としたが、運用に申し送りがなされなかった。

iv) 背後要因

- ・システムの複雑化、大型化により、従来の宇宙科学研究所 (ISAS) の方法では、衛星プロジェクトの管理や衛星の安全性確保が十分ではないことを認識できなかった。
- ・プロジェクト管理者がサイエンス成果を創出する役割も兼ねており、安全・信頼性管理を含むプロジェクトを十分に管理できなかった。

- ・プロジェクトの管理に携わる者は専任ではなく、当該者の能力要件や担当業務に対する教育指導も不十分であった。
- ・ISASと企業との役割分担と責任関係が不明確なまま開発が進められた。
- ・設計に対する要求事項の位置づけが明確化されず、重要事項・品質記録に係る文書が作成されていなかったため、関係者間で認識が共有できなかった。
- ・管理責任を誰が担うか文書上不明確であったため、網羅的な管理が不十分となった。
- ・設計段階における第三者による確認の仕組みや手法が不十分であった。
- ・特定の技術的課題に議論が集中し、網羅的な審査ができず安全性の課題に対応できなかった。

②製造・試験段階に係る主要な要因分析

製造・試験に起因する問題は、特に認められなかった。

③運用段階に係る主要な要因分析

i) [異常事象Ⅲの直接要因 A] 運用上の管理が不十分

衛星の初期運用段階のリスクを過小評価し、全体システムの安全性を欠いていたため、スラスト制御パラメータの変更やSTTの調整中における地上局から非可視な状態での姿勢変更といった作業のリスクに対する認識が不十分であった。

ii) [異常事象Ⅲの直接要因 B] 運用への負荷集中

設計段階において処置すべき事項を運用において対処する方針として初期運用時の負荷を増大させた。併せて、運用準備に対する重要性を過小評価して、運用計画書、手順書、要員の訓練等の運用の準備が不十分な状態で運用に臨み、運用段階において業務が集中し作業上の余裕が不十分な状態になった。

iii) 背後要因

- ・安全に運用する意識及び安全かつ慎重に運用を行う体制（プロジェクト体制や第三者による評価等）が不十分であり、確実に運用を行う基本動作ができていなかった。
- ・運用準備の重要性に対する意識が十分でなく、安全な運用よりも観測機器の装置開発や観測を優先し、安全運用の準備が後送りされていた。

(2) 直接要因に対する水平展開

直接要因に対し、以下の三つの視点に基づき水平展開を行った。

- ・STT計測値と姿勢制御系ソフトウェア計算値に一定以上の齟齬が発生した場合には、STT計測値を棄却して姿勢角推定値のみを使用する状態を長期間維持しないことを確認した。
- ・姿勢決定系と独立したセンサを用いて姿勢異常判定を行う等、確実にセーフホー

ルドに移行する設計となっていることを確認した。

- ・パラメータの書換えを軌道上で行う場合は、打上げ前に確認されたパラメータで書き換えることを基本とし、また、打上げ前に確認されていないものに書き換える場合には、事前にシミュレータ等による検証を実施してから送信することを確認した。

その結果、以下の衛星等については、以下の事項に留意した上で今後確認を行っていくこととした。

- ・ジオスペース探査衛星（ERG）：運用体制を再検討中
 - ・水星探査計画（BepiColombo/MMO）：打上げ8年後の運用計画を再評価
 - ・超低高度衛星技術試験機（SLATS）：太陽電池の発生電力を用いた太陽捕捉等のアルゴリズムを追加作成
 - ・雲エアロゾル放射ミッション/雲プロファイリングレーダ（EarthCARE/CPR）：温度センサの故障検知の値が立ち上げ時と定常時で異なるため運用計画を再評価
- 上記以外の衛星等については、開発、運用への影響がないことを確認した。

（3）今後の具体的な対策

課題及び背後要因に対応するため以下の対策を講じる。

①ISAS プロジェクトマネジメント体制の見直し

- ・プロジェクト管理に責任を持つPM(Project Manager)とサイエンス成果の創出に責任をもつPI(Principal Investigator)を明確に区分し、それぞれ別の者が担当する。特にプロジェクトマネジメントやシステムに責任を負う者については、経験や能力等任命の要件を明確にするとともに、PM等の重要なプロジェクトマネジメントの要員は、専任の者を充てる。

②ISAS と企業との役割・責任分担の見直し

- ・設計・製造段階において、先端的科学ミッションの確実な実現のため、一元的な管理に基づくシステムの安全性を確保するため、契約書の記載内容に基づき、企業との役割分担及び責任関係を明確にした体制に見直す。ISASは、科学要求とのせめぎ合いの中でプロジェクトを確実に実施する責任を負うとともに、科学要求立案・先導的技術開発・先端的センサ研究開発等に注力する。
- ・運用段階においても、企業との役割分担及び責任関係を明確にした体制を構築する。

③プロジェクト業務の文書化と品質記録の徹底

- ・プロジェクト推進に関わる重要事項を文書化して関係者により共有する。また、審査会、運用等の意思決定の共有、不具合時の原因究明と対策の迅速な実行を図るため、企業との間で役割分担を明確化した上で、両者それぞれにおいて品質記録の作成を徹底する。

④審査／独立評価の運用の見直し

- ・システムの安全性を重視した審査や管理を行えるよう審査会を充実させ、懸念事項の網羅的なフォローを確実に実施する。第三者による独立した評価や検証を徹底する。

2.2. 今後の対策に当たって小委員会の審議を通し出された委員からの留意事項

(1) 開発全体について

- ・設計段階だけでなく製造・試験・運用段階までを含めたトータルシステムとして統一的なリスク対応が必要。
- ・システムの大規模化・複雑化に対しては、設計をシンプル化し、検証事項を少なくし確実性を上げることが重要。
- ・運用の安全の確保に徹したバランスの良いトレードオフ（ミッション要求の最大化と安全要求とのバランス）が開発においては必要なため、個々の衛星の特徴に合わせたノウハウを共有が重要。
- ・宇宙研究開発の高度化のために、事故原因特定のための分析に加え、メカニズムと組織運営のリスクを総合的に分析する手法を開発することを望む。
- ・教育職にもマネジメントへの寄与評価を適切に行い、科学衛星を成功させる国内唯一の研究所であることを重視する文化を育むことが重要。

(2) 要因分析手法について

- ・高度な科学技術システムにおいては、不適合が致命的事象に至らない重層的なシステムの予防設計が必要。そのためのシステム構築に向けた中長期的な取組が重要。
- ・ヒューマンファクターの影響（ヒューマンエラーの防止・検出等）等衛星運用における安全性の向上についての研究が重要。

(3) 開発体制について

- ・やるべきことの明示化・ルール化においては、ISAS の良さ※を失うことのないよう、開発規模の大小に応じて、一定の範囲でテーラリングをできる自由度を持つ等の工夫が必要。（※構想から設計・製造・運用まで一貫して理工学が協力した開発を進め、限られたリソースの中で世界一級の科学ミッションの成果を出してきたこと）
- ・企業との役割・責任分担の見直しについては、開発段階と運用段階では役割と責任分担の在り方が異なるため、一律的な規定とならないよう留意。
- ・先端技術の開発においては、常に新たな検討事項が発生する機会が多いため、過去の経験を活かした検討にとどまらず、開発する先端技術に応じた留意点を事前に検討して望むことが重要。

(4) 人材育成

- ・今回の異常事象は、ミッションと安全性のバランス、FDIR 設計のバランス、設計だけでなく製造・試験・運用まで含めた全体感の欠如（トータルシステムとし

てリスクを考慮できなかった)が原因の一因であり、全体感(俯瞰力)を持って技術を束ねるシステムマネジャーとその人材育成が必要。

(5) 情報発信について

- ・ASTRO-Hのような国際協働プロジェクトにおいて、事故の詳細などを伝える記者会見等は、海外の共同研究者の信頼を失わないよう経緯も含めて英語による同時発信が重要。

3. まとめ

審議を通じ、JAXAが実施したASTRO-Hの異常事象に係る異常発生メカニズム及びその直接的な要因の分析について、JAXAより詳細な解析データや背景まで踏み込んだ調査結果の提出を受け、委員との間の十分な質疑応答を経て、JAXAの報告の内容は、合理的な説明がなされており妥当であると認めた。

また、本件の直接原因に対応するための水平展開に関しては、JAXAより本件に関する事項のある4つのプロジェクトを特定し、開発・運用に対する留意事項を明確化するとともに、その他の人工衛星等については、開発・運用への影響がないことを確認したとの報告を受け、小委員会としても、直接原因に対するJAXAの水平展開は、妥当であると認めた。

次に、再発防止対策としては、「ISASのプロジェクトマネジメント体制の見直し」、「ISASと企業との役割・責任分担の見直し」、「プロジェクト業務の文書化と品質記録の徹底」、「審査/独立評価の運用の見直し」の4つの対策をJAXAから提示を受け、質疑応答を経て、ASTRO-Hの異常事象を受けた再発防止策として合理的なものであり妥当であるとの心証に至った。

これをもって、小委員会としては、JAXAの報告内容の妥当性についての検証を終了することとした。

なお、JAXAに対しては、小委員会の審議において、高度化する科学要求を受けたシステムの大型化、複雑化への対応に当たって、開発から運用までの全体を通じた検証の結果、事業の運営の問題が明らかになり、それがASTRO-Hの運用断念という極めて残念な結果につながったことについて、この責任を直視し、今後、このような事態を起こすことのないよう、得られた知見と報告書に掲げた対策を組織全体の資産として、これを確実に実施すると共に、引き続き今回の事故を契機としたプロジェクトの運用体制の改善を継続的に進め、宇宙開発の業務全般にわたって更なる信頼性と技術力の向上に努めることを強く望みたい。特に再発防止を確実にものとするためには、4つの対策を取り込んだ革新的なプロジェクトの運用体制が構築されなければならない。科学衛星のように先端科学研究を進める大型プロジェクトはミッション要求の最大化と安全要求とのバランスを取る必要があり、ISASはJAXAの他部門と一体となって全社的に革新的な運用体制の構築に取り組むことを強く望みたい。

最後に、本検証作業を通し JAXA 及び関係する企業が非常に真摯に協力していただいたことに対し感謝の意を表したい。

以上

宇宙開発利用部会 X線天文衛星「ひとみ」の異常事象に関する小委員会の設置について

平成 28 年 4 月 19 日
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

1. 設置の趣旨

宇宙開発利用部会は、X線天文衛星「ひとみ」の状況について、平成 28 年 4 月 19 日、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（以下「JAXA」という。）より、同衛星の姿勢異常事象、同衛星からの物体発生事象、同衛星との間の通信異常事象の要因分析の結果について報告を聴取した。

本部会は、本件に係る検討を円滑に進める上で、専門技術的観点から第三者により、JAXA が実施した上記要因分析の結果について、その内容の技術的妥当性を検証する必要があると認めたため、宇宙開発利用部会運営規則第 2 条第 1 項に基づき、宇宙開発利用部会の下にX線天文衛星「ひとみ」の異常事象に関する小委員会（以下「小委員会」という。）を設置する

2. 検証事項

X線天文衛星「ひとみ」の状況に関して、JAXA が実施した同衛星における異常事象の要因分析結果の妥当性等について検証を行う。

3. 設置期間

小委員会の設置が決定した日から平成 29 年 2 月 14 日までとする。

4. その他

小委員会の運営に関し必要な事項は、科学技術・学術審議会令、科学技術・学術審議会運営規則、研究計画・評価分科会運営規則及び宇宙開発利用部会運営規則によるものとする。

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
X 線天文衛星「ひとみ」の異常事象に関する小委員会 委員名簿

平成 28 年 5 月 10 日
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

(五十音順)

(委員)

◎佐藤 勝彦 日本学術振興会学術システム研究センター所長

(臨時・専門委員)

○木村 真一 東京理科大学工学部電気電子情報工学科教授
白坂 成功 慶應義塾大学システムデザイン・マネジメント研究科准教授
野口 和彦 横浜国立大学大学院環境情報研究院教授
横山 広美 東京大学大学院理学系研究科准教授

◎:主査、○:主査代理

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
X線天文衛星「ひとみ」の異常事象に関する小委員会開催状況

平成 28 年 5 月 24 日（火曜日） 第 1 回小委員会

平成 28 年 5 月 31 日（火曜日） 第 2 回小委員会

平成 28 年 6 月 8 日（水曜日） 第 3 回小委員会