

X線天文衛星ASTRO-H「ひとみ」 の今後の運用に係る補足説明資料

平成28(2016)年4月28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。

本資料の位置付け

本資料は、プレスリリースに示す以下の2項目について、技術的な検討結果を補足するものです。

(1)太陽電池パドルの分離について

(2)ASTRO-Hからの電波と推定していた受信について

(1)太陽電池パドルの分離について

- 今回の事象について、衛星の回転速度が増加した結果、回転状態で発生する力に対して弱い部位（太陽電池パドルの一部、伸展式光学ベンチ(EOB)等）が破断して分離したと推定してきた。
- 衛星の異常回転に至るまでのメカニズムについて、シミュレーション等により確認し、ほぼ確定することが出来た(参考参照)。
- メカニズムの調査と並行して、回転状態で発生する力に対して弱い部位の分離状態を推定するための調査・検討を行い、太陽電池パドルについては、太陽電池パドル取付部周辺で破損して、両翼ともパドルの一部ではなく、取付け部から分離した可能性が高いと判断した。
 - 太陽電池パドル部の詳細な解析(有限要素法による構造解析)の結果、回転状態で発生する力に対して太陽電池パドル取付部周辺が最も弱いこと
 - 太陽電池パドル取付部周辺が破断に至る回転速度は、協力を依頼している観測所等の観測により推定しているASTRO-Hの回転速度と同じオーダー(桁)であること

(2)ASTRO-Hからの電波と推定していた受信について

- これまで、通信異常が発生した後もASTRO-Hからと推定される電波を3回受信したことを報告してきた。

①3/26 23:49～23:52(約3分)@USC、23:48～23:51(約3分)@KTU

②3/27 01:23～01:27(約4分)@USC、01:21～01:27(約6分)@KTU

③3/28 22:06(約10秒)@USC

- これら3回の受信については、調査の中で以下の事象を確認しており、詳細な調査を進めてきた。

- ASTRO-Hのキャリア周波数(約2.3[GHz])から200[kHz]程度ずれた電波を受信している。
- 周波数スペクトルが通信異常が発生する前の正常なデータと異なっている。

- ただし、次の点からASTRO-Hからの電波の可能性があると考えていた。

- 計画通りの時間と方向から電波を受信できた。
- 周波数がずれているとはいえ、衛星が想定外の状態にあり、周波数が大きくずれる可能性もあると考えられた。
- 国際電気通信連合(ITU)で公開されている周波数情報からは、混信する可能性がある衛星が見つからなかった。

- 搭載通信機の設計並びに地上試験データを基に検討したところ、次の結論に至った。
 - 今回のような異常な姿勢、温度環境においては、キャリア周波数が200[kHz]程度の周波数変動は発生しない。
- 受信した電波と同様の特徴を有する電波を発する衛星の存在を確認した。
 - ASTRO-Hの復旧のための運用中の4月13日に、3月26日に観測された周波数スペクトルと同様の微弱な電波を、ASTRO-Hの可視開始予測時刻より2分程度前から受信した。
 - ASTRO-Hではない、ITUに公開されていない別の衛星の電波であると考え、当該衛星の軌道を検討し、ドップラー周波数を分析すると、3月26日及び27日に受信した電波の周波数と一致した。
- 搭載通信機の検討結果、及びASTRO-Hのキャリア周波数から200[kHz]程度ずれた電波を出す衛星の存在を確認したことから、3回受信した電波はASTRO-Hからのものではないと判断した。

以上

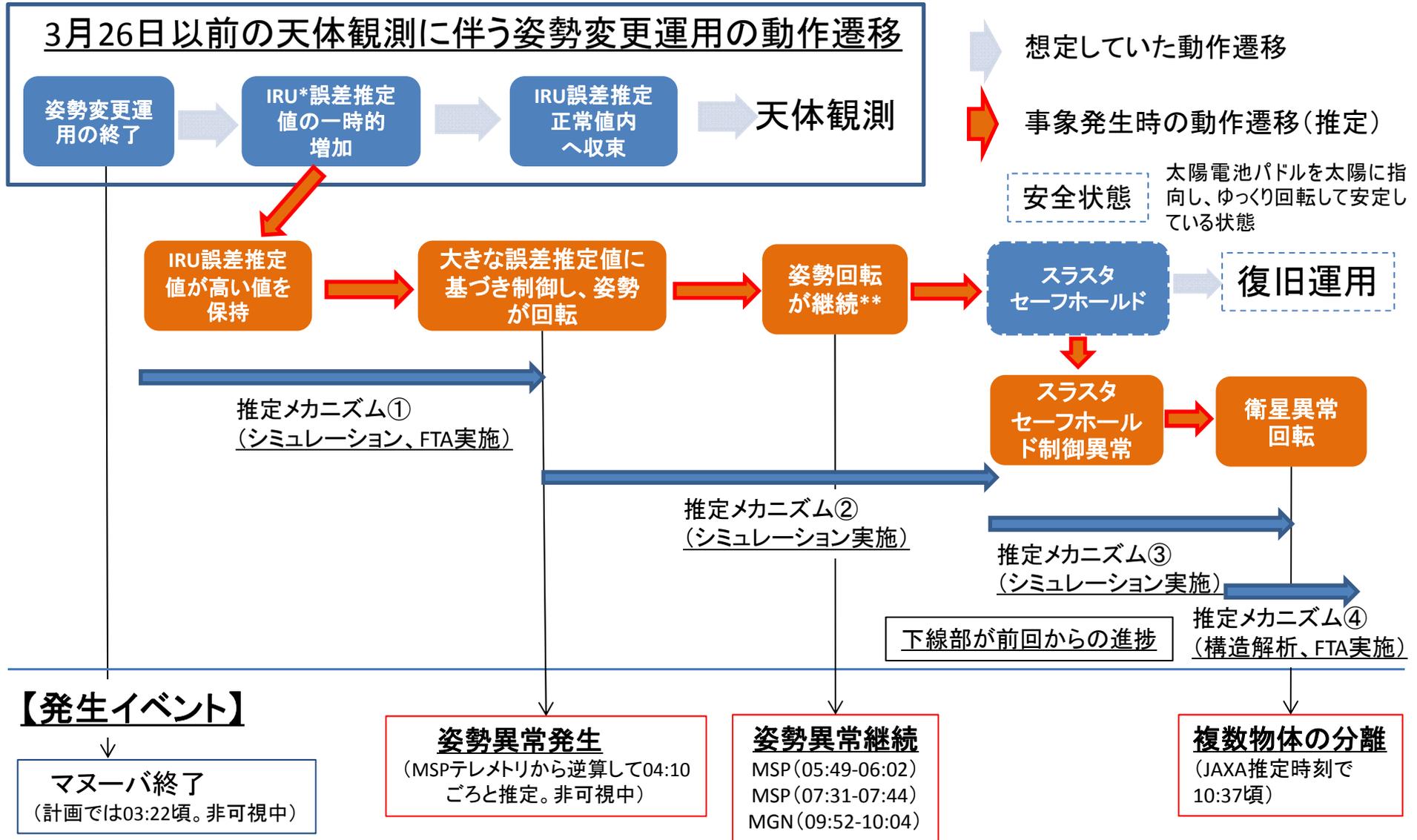
推定メカニズム(サマリ)

(「衛星正常状態」から「姿勢異常」が発生し、「物体の分離」に至るまで)

- (1) 3月26日に活動銀河核観測のための姿勢変更運用を計画通り実施した。
- (2) 姿勢変更運用終了後、姿勢制御系の想定と異なる動作により、実際には衛星が回転していないにもかかわらず、姿勢制御系は衛星が回転していると自己判断した。その結果、回転を止めようとする向きにリアクションホイール(RW)を作動させ、衛星を回転させるという姿勢異常が発生した。【推定メカニズム①】
- (3) 加えて、姿勢制御系が実施する磁気トルカによる角運動量のアンローディング※が姿勢異常のため正常に働かず、RWに角運動量が蓄積※し続けた。【推定メカニズム②】
- (4) 姿勢制御系はこの状況を危険と判断し、衛星を安全な状態とするためセーフホールド(SH)に移行し、スラスタを噴射したと推定される。この際、姿勢制御系は不適切なスラスタ制御パラメータにより、想定と異なる指示をスラスタに与えたと推定される。その結果、スラスタは想定と異なる噴射を行い、衛星の回転が加速する作用を与えたと推定される。【推定メカニズム③】
- (5) 衛星の想定以上の回転運動により、太陽電池パドル、あるいはEOBなど、回転状態で発生する力に対して構造的に弱い部位が分離したと推定される。特に太陽電池パドルについては、取付部周辺で破損し、両翼とも分離した可能性が高い。【推定メカニズム④】

衛星正常状態から物体の分離に至る推定メカニズム

参考



MSP: JAXAマスパロマス局
 MGN: JAXAミンゲニュー局

表示時刻は
 全て日本時間3/26

* IRU: Inertial Reference Unit、慣性基準装置
 **ASTRO-Hの姿勢制御系は、姿勢異常判断に太陽センサを使用せず、姿勢制御系ソフトウェアによる推定値をもとに姿勢異常を判断している。

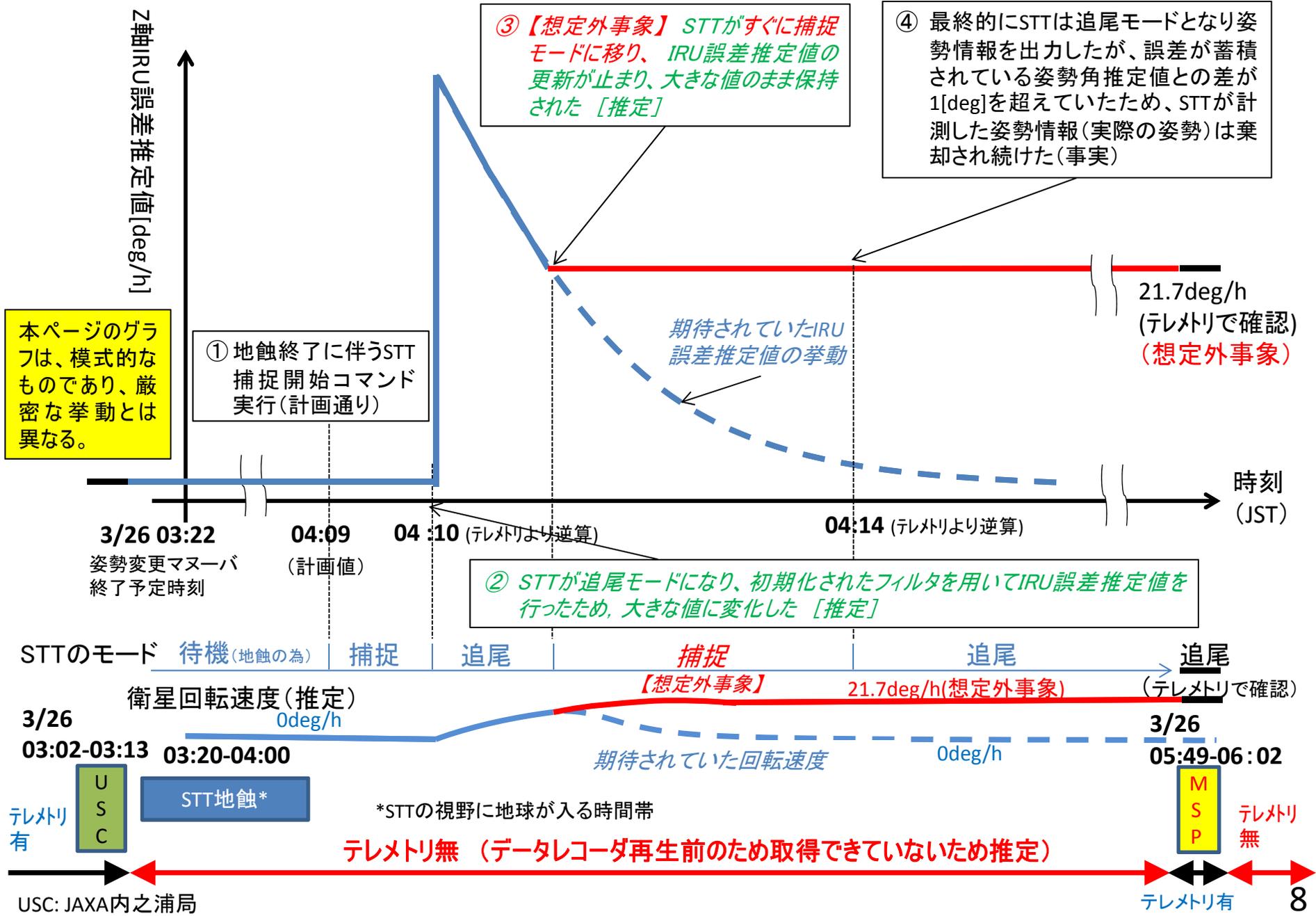
(1)衛星正常状態から姿勢異常発生まで【推定メカニズム①】

参考

- ASTRO-Hは通常時、慣性基準装置(IRU)とスタートラッカ(STT)の情報をもとに姿勢制御を行う。
- 3/26の姿勢変更運用は、姿勢変更中はSTTデータの取り込みを一時的に停止し、姿勢変更運用終了後にSTTデータの取り込みを再開する運用としていた。STTデータの取り込み再開の際、IRU誤差推定値が一時的に実際の誤差推定値よりも大きな値となり、その後、STTデータによる補正により正常値範囲内に収束する動作を行うことを想定していた。
- しかしながら、3/26の姿勢変更運用終了後、何らかの要因によりIRU誤差推定値が実際とは異なる高い値を保持し続け、その結果、MSP局のテレメトリとして21.7[deg/h]という高いIRU誤差推定値が確認されたと考えている。
- この場合、実際には衛星が回転していないにもかかわらず、姿勢制御系が衛星が回転していると自己判断し、その結果、回転を止めようとする向きにリアクションホイール(RW)を作動させたと判断している。
- IRU誤差推定値が高い値を保持する要因について、搭載ソフトウェアを用いてSTTのモード遷移をインプットしてシミュレーションしたところ、次ページに示すSTTの動作においてIRU誤差推定値が高い値のまま保持されることを確認した。
- なお、IRU誤差推定値が高い値に保持された件についてFTAを行い、IRUの異常や搭載コンピュータのハードウェア異常といったその他の要因により、高い値に保持される可能性は低いと判断している。

IRU誤差推定値の動き

参考



(2)姿勢異常発生から姿勢回転継続まで【推定メカニズム②】

参考

- (1)の事象発生後、衛星はゆっくりと傾き始め、太陽電池パドルが太陽方向からずれ始めたが、ASTRO-Hの姿勢制御系は、太陽センサを姿勢異常判断に使用していないため姿勢異常が検知できず、姿勢回転が継続した。
- この時、並行して実施している磁気トルカによるRW角運動量のアンローディング*処理が、姿勢異常のため正常に働かず、RWに角運動量が蓄積**された。
- 09:52-10:04 MGN局のテレメトリから、RWに蓄積された角運動量が制限値に近い値まで上昇していたことを確認している(テレメトリ:112[Nms]、制限値:120[Nms])。
- 姿勢異常状態における角運動量蓄積についてシミュレーションにて確認し、実際の値とほぼ同じ角運動量がRWに蓄積されることを確認した。

*アンローディング:磁気トルカ作動または姿勢制御用スラスタの微量噴射により、リアクションホイールの回転数を正常動作範囲内に調整する運用

**角運動量の蓄積:角運動量の蓄積は、リアクションホイールの回転数の増加に相当

(3)姿勢回転継続から異常回転まで【推定メカニズム③】

- RWに蓄積する角運動量が最終的に制限値(120[Nms])を超えると姿勢制御系はRWによる制御に何らかの異常が発生したと判断し、スラスタにより姿勢制御を行うモード(スラスタセーフホールドモード:RCS SH)に移行する。
- RCS SHでは、スラスタにより太陽を捕捉するように姿勢を立て直す動作を行う。
- RCS SHに移行した場合、不適切なスラスタ制御パラメータにより、スラスタは想定と異なり、衛星の回転速度が増加する方向に噴射を行う。
- シミュレーションにより不適切なスラスタ制御パラメータによる噴射動作を模擬したところ、回転速度が加速する方向に作用し、太陽電池パドルの分離に至る回転速度まで到達するケースがありうることを確認した。

(4)異常回転から物体の分離まで【推定メカニズム④】

- 衛星の回転速度が増加した結果、回転状態で発生する力に対して弱い部位(太陽電池パドル、EOB等)が破断して分離したと推定される。
- 回転による破断について解析を行った結果、太陽電池パドルが破断に至る回転速度は、協力を依頼している観測所等の観測により推定しているASTRO-Hの回転速度と同じオーダー(桁)であり、太陽電池パドル取付部周辺で破損して、両翼とも分離した可能性が高い。

一部物体の大気圏再突入について

○再突入予測・結果情報

国防総省戦略軍統合宇宙運用センター(JSpOC)はASTRO-Hについて、本体と識別されている物体を含めた11物体の軌道情報をホームページ上に公開している。当該ホームページに2物体(ID:41438、41443)の大気圏再突入予測が更新されている。これらは、他の9物体と比べ、比較的早く高度を下げていることが観測されていた物体である。

– 再突入結果

- 41443: 2016年4月20日

– 再突入予測

- 41438: 2016年4月28日

○再突入物体について

JAXAでは、これらの物体は大気圏中で燃え尽きると推定している。