

5.1.4 不適切なパラメータ設定(1/4)

(1)事実関係

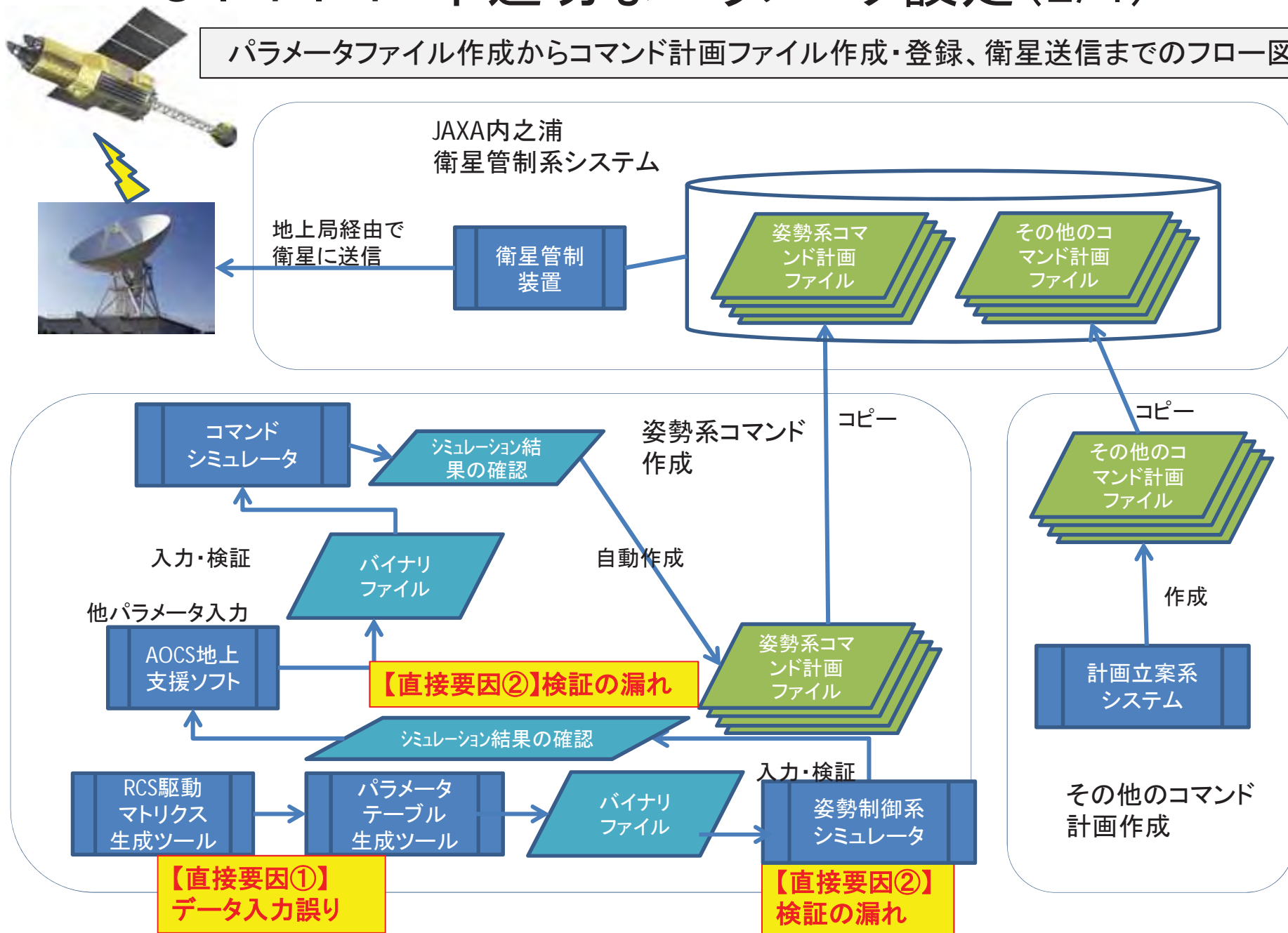
ASTRO-Hの運用は、運用支援業者と支援契約を結んだ上でJAXAが実施している。

ASTRO-HはEOB伸展前後で大きく質量特性が変わる特殊な衛星であり、EOB伸展後に、質量特性に影響を受けるパラメータ(重心位置と慣性モーメント)を書き換える必要がある。

- ① 2/25 EOB伸展後の質量特性変化に関するパラメータ変更運用の一環として、JAXAは運用支援業者を含めた協議の上で、実際のスラスト特性(実績値)を反映したスラスト制御パラメータも変更することを決定し、運用支援業者はその変更作業を開始した。ただし、このパラメータ変更運用については、打上げ前に制定する運用計画を規定する文書に明確に記述されておらず、また、どのパラメータをどの値に変更するか等、運用内容の詳細がJAXAと運用支援業者の双方で共有されていなかった。
- ②このスラスト制御パラメータ作成時に運用支援業者の作業においてデータ入力誤りがあり、その結果不適切なスラスト制御パラメータが作成された。
- ③また、運用計画を規定する文書に記述の無い作業を追加したこともあり同日の業務は輻輳し、検証過程において運用支援業者の担当者間での作業指示が曖昧となり、必要な検証作業の一部が実施されなかった。
- ④運用主体であるJAXAは、スラスト制御パラメータ変更の運用準備状況を確認せず、検証の漏れに気づかないまま、その運用の実施を指示した。
- ⑤2/28 EOB伸展後、オペレータはJAXAの指示に従い②で準備されたパラメータを衛星に送信した。

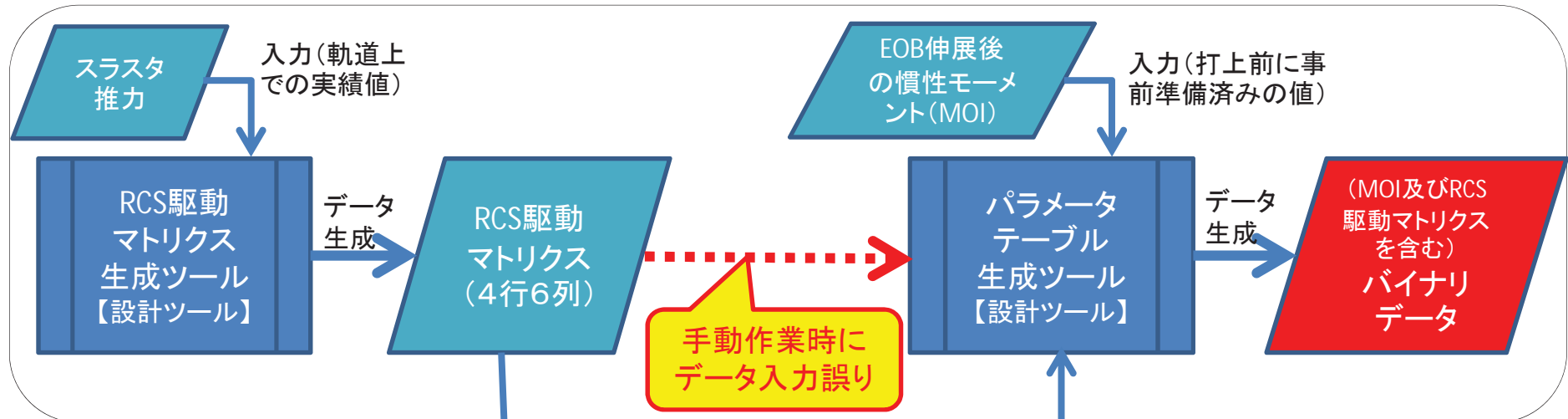
5.1.4 不適切なパラメータ設定(2/4)

パラメータファイル作成からコマンド計画ファイル作成・登録、衛星送信までのフロー図



5.1.4 不適切なパラメータ設定 (3/4)

■ 2/25のコマンド作成作業流れ(前ページフロー図左下部の一部拡大)



「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 | 0.153748 | [s/(Nms)]. Σ bdy ⇒ Σ コンポ |
|---------------|-----------|--------------------------|
| | 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 | |

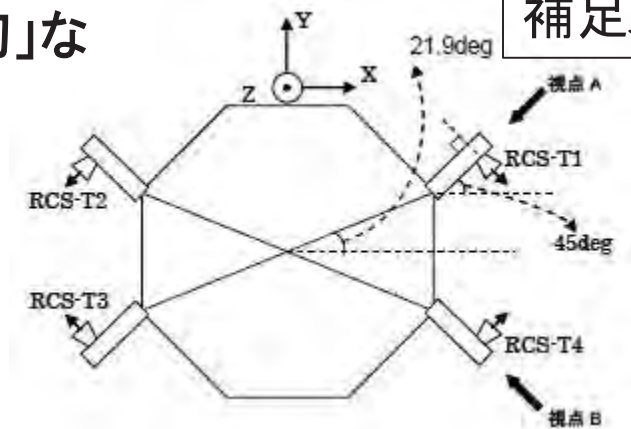
★ 負値を絶対値へ変換した上で入力しなければならなかった。

「RCS制御パラメータ設定値の一部が不適切」な場合の衛星挙動概略を次頁にしめす。【補足】

補足

【補足】「RCS制御パラメータ設定値の一部が不適切」な場合の衛星挙動概略について

RCS駆動マトリクスにおける、「負方向トルク積要求値に対するスラスタ噴射時間を求める係数」(下図中の赤枠部)について、本来は全て正值にすべき所、負値のまま設定した場合の衛星挙動概略を記す。

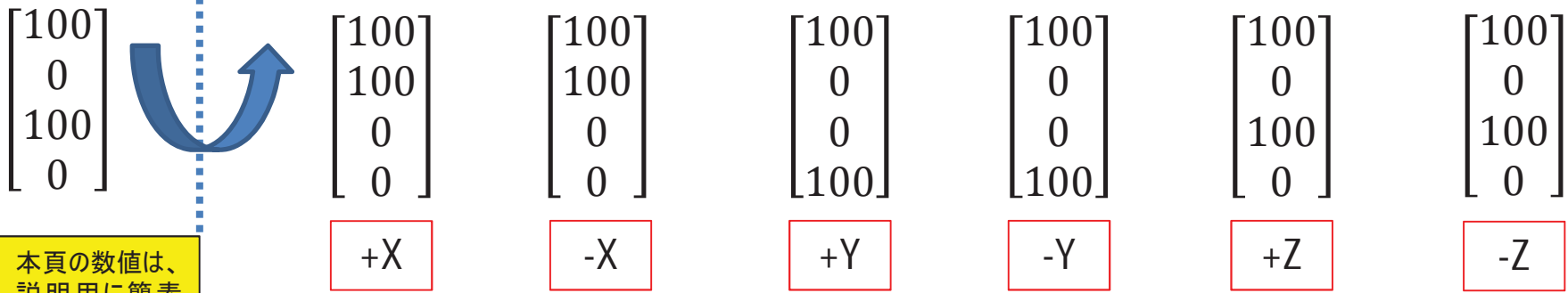


例) -Zトルク積要求値を100Nmsと設定した場合

$$\begin{matrix}
 \text{RCS-T1噴射秒時(s)} \\
 \text{RCS-T2噴射秒時(s)} \\
 \text{RCS-T3噴射秒時(s)} \\
 \text{RCS-T4噴射秒時(s)}
 \end{matrix}
 \begin{bmatrix}
 0 \\
 -100 \\
 0 \\
 -100
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\
 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 \\
 0 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 \\
 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & -1
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 100
 \end{bmatrix}
 \begin{matrix}
 +Xトルク積要求値 (Nms) \\
 -Xトルク積要求値 (Nms) \\
 +Yトルク積要求値 (Nms) \\
 -Yトルク積要求値 (Nms) \\
 +Zトルク積要求値 (Nms) \\
 -Zトルク積要求値 (Nms)
 \end{matrix}$$

省推薬処理: 各RCSの「最少」の噴射秒時を各秒時から引く

各トルク積要求値を100とした場合は以下の通りになる。



本頁の数值は、説明用に簡素化したものであり、実際にとりえる値とは異なる。

結果として、XYZ三軸共に、マイナス軸周りのトルク積要求値を設定してもプラス軸方向のスラスタ噴射となる為、一方向に増速し続ける。

5.1.4 不適切なパラメータ設定(4/4)

(2)直接要因:

①パラメータ作成時のデータ入力誤り

- 運用支援業者の作業者が「RCS駆動マトリクス生成ツール」出力を「パラメータテーブル生成ツール」入力する際に負値を正值に直さなければならぬところを実施しなかった。
- 当該作業者は、ツールの使用経験はあったが、本作業は初めてであり、符号を直すことを知らなかった。
- 当該2ツールは、JAXAによる「運用ツール化すべき対象」となっておらず、いずれも開発試験時に設計を熟知した開発者が使用する開発ツールをそのまま活用したため、事前にツールの手順書は準備されず、作業訓練も実施されていなかった。

②検証の漏れ

- 運用支援業者は生成したスラスト制御パラメータをシミュレーションで確認しなかった。
- 運用支援業者の担当者間で、口頭でシミュレーションを依頼したが、スラスト制御パラメータの変更による検証の必要性が相手に伝わらなかった。また結果確認を実施しなかった。
- JAXAがスラスト制御パラメータ変更の運用準備状況を最終的に確認していなかった。
- JAXA及び運用支援業者の双方で、検証結果を確認してから次作業に移行するプロセス、運用支援業者の検証結果(または検証行為)を確認するプロセスが明確化されていなかった。

5.2.1 設計フェーズでの課題検討 (1/8)

(1) 事実関係

1) ASTRO-H姿勢制御系の設計について

JAXA ASTRO-Hプロジェクトは「すざく技術を最大限継承した設計」を採用し、その後概念設計を進め、2008年のSDR時に、姿勢制御設計項目に関する要求をJAXA文書であるミッションシステム要求書に記載した。その後、システム設計担当業者は、基本設計以降の設計を行った。

<姿勢系に関する設計の基本的考え方>

ASTRO-Hは、高い観測性能かつ大きな機体サイズに対応する必要があったため、以下の考え方を採用した。

- ・ サイズアップに伴い熱歪・擾乱が増す中で、高指向決定精度・高指向安定度を実現する。
- ・ 機体サイズに起因する大きな重力傾斜トルクに対応するために、大角運動量を有するRWや、大きな外乱除去トルクを発生可能なMTQを搭載する。
- ・ すざくのようなバイアス角運動量を持つバイアスモーメンタム方式でなく、ゼロモーメンタム方式を採用する。

<FDIRに関する設計の基本的考え方>

セーフホールドモード移行による観測時間減少を避けるため、定常制御中の動作は、「自動で性能維持可能(Fail Tolerant)」もしくは「自動で機能維持可能(Fail Operational)」となるよう冗長系を確保し、不必要に「安全退避(Fail Safe)」モードに移行しない設計とする。

5.2.1 設計フェーズでの課題検討 (2/8)

2) 設計審査、設計会議の状況

前頁に記載の通りシステム設計担当業者は設計を進めた。設計結果については、JAXA ASTRO-Hプロジェクトが各業者の支援を受けてまとめ、ISASがJAXA内外の審査員も参加した以下の設計審査会を行った。

<ISAS主催の技術的な設計審査>

- 2008年 4月:システム定義審査(SDR)
- 2010年 5月:システム基本設計審査(PDR)
- 2011年11月:姿勢制御系詳細設計審査その1(CDR1)
- 2012年 2月:システム詳細設計審査その1(CDR1)※1
- 2012年 6月:姿勢制御系詳細設計審査その2(CDR2)
- 2014年11月:システム詳細設計審査その2(CDR2)※2

※1:システムCDR1は、EM・FM方式をとる軟X線分光検出器(SXS)を除く全てのサブシステム、および衛星システムを対象とした。

※2:システムCDR2は、EMIによる検証を反映したSXS FM、及びCDR1以降に発生した設計の修正点とその衛星バスシステムへの反映を対象とした。

JAXA ASTRO-Hプロジェクトは、研究者等も参加する設計会議においてメーカーからの報告を受け、設計・開発内容及び進捗の確認を行った。

<JAXA・企業・大学など関係者が集まった設計会議>

計21回実施(2008-15年)

5.2.1 設計フェーズでの課題検討 (3/8)

(2) 個別課題

■ 異常発生メカニズム①関係 (STT、AOCS設計)

【STTの挙動】

- STT単体開発での設計・検証において、捕捉モード時姿勢レート計算のロジックと星使用条件パラメータ設定値が、捕捉の速さや精度に重点をおいて設計され、実際の使用条件を反映したロバスト性の検討や試験計画が十分でなかった。

【AOCS設計】

- 研究者の観測時間確保の要望に対する姿勢決定系設計において、JAXA ASTRO-Hプロジェクト及び設計業者の双方に、衛星の安全性を含めたシステムとしての総合的な検討不足があった。
- CDR2姿勢系、カルマンフィルター設計パラメータを再調整することが双方で議論されていた。分科会 (ISAS主催) でカルマンフィルターのバイアスレート推定値が大きくなることが認識されその後の検討で再調整不要とされたが、結果が審査員に共有されなかった。
- STT非更新フラグを用いた自動検知機能もFDIRの1つとして議論されたが、JAXA ASTRO-Hプロジェクト及び設計業者は地上からの支援で対処することとし、実装されなかった。

5.2.1 設計フェーズでの課題検討 (4/8)

■ 異常発生メカニズム②関係(FDIR挙動)

- 粗太陽センサ(CSAS)をセーフホールド移行判断に用いなかった件については、CSASの線形領域視野(20deg)が観測視野範囲(30deg)に比べ狭いため、太陽方向を視野に納めきれず、不必要にセーフホールドに移行する可能性があった。このため、ミッションの継続性を優先するASTRO-Hプロジェクトの要求を受け、CSASの代わりにACFSの算出値を用いることとした。
- その際、ACFSの算出値が誤る可能性を考慮し、STT非更新フラグを用いた自動検知機能やサンプルゼンス41degを外した際にFDIRに移行するというロジックは採用されず、連続非更新回数をテレメトリ出力して、運用で対処する方針となった。しかし、具体的な運用の対応は申し送られなかった。

5.2.1 設計フェーズでの課題検討 (5/8)

■ 異常発生メカニズム③関係(パラメータ設定)

- 設計段階において、ワーストケース解析の一環として、EOB伸展前および伸展後(寿命末期)の姿勢制御性能の確認が行われ、質量特性とスラスト制御パラメータの妥当性もシミュレーションにより検証されている。一方、EOB伸展直後のパラメータは、実際のタンク圧を計測してから設定するため、事前の準備がなされていなかった。初期運用で行うパラメータはあらかじめ準備して、セットしておくか、差分情報のみを行うなど、初期運用に負担がないように準備しておくべきであった点は課題といえる。

■ 異常発生メカニズム④関係(物体の破断・分離)

- 太陽電池パドルやEOBを含む衛星の構造設計は、製造、組立から打上げ、軌道上での運用終了までに想定される荷重条件から各部で最も厳しくなる荷重を評定としている。これは国内外の宇宙機設計において一般的な考えである。実際に、打上げから太陽電池パドル展開、EOB伸展を経て構体の固有振動数等に異常が見られず、正常に機能していたことから、構造の強度設計は問題ないと考えている。

5.2.1 設計フェーズでの課題検討 (6/8)

(3) 設計フェーズの課題まとめ

- ・ 姿勢制御系の設計においては、JAXA ASTRO-Hプロジェクトが提示したミッションシステム要求書の要求に関する記述が偏っており、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が少なく、その結果、JAXA ASTRO-Hプロジェクト及び設計業者共に、システムとしての安全性を欠く結果を招いた。
- ・ 姿勢制御系の設計において、打ち上げ後の初期運用フェーズに負担がないように、パラメータの設定をあらかじめ用意して切り替えるか、差分のみの変更を行うなど、設計段階で検討すべき事項が十分でなかった。
- ・ 設計審査会等での懸念事項を網羅的に管理できていなかった。JAXA ASTRO-Hプロジェクトにおける確認、及び第三者によるISAS主催の審査会等の確認が不十分であった。

5.2.1 設計フェーズでの課題検討(7/8)

(4) 背後要因

1) JAXA ASTRO-Hプロジェクトの体制において、プロジェクト管理とサイエンス成果創出の役割の違いと分担、及びそれぞれを担う人材の能力要件が不明確であった。

- プロジェクト管理者らがサイエンス成果創出の役割も兼ねており、安全・信頼性管理を含むプロジェクト管理や衛星の安全性に配慮するシステム設計が十分でなかった。
- プロジェクト管理者らが専任ではなく、人材の能力要件や担当業務に関する教育指導も十分でなかった。

プロジェクトのシステムが複雑かつ大きくなり、ISASが実施してきた従来の方法ではプロジェクト管理や衛星の安全性の確保が十分でないことを予見できなかった。

2) JAXA ASTRO-Hプロジェクトと、設計担当業者、及びそれぞれに所属する研究者と担当者の役割分担と責任関係が不明確なまま開発を進めた。

- 姿勢制御系要求条件において、研究者より厳しい「要求以上の要望」のある場合、ISASと企業の徹底した検討により対応すべきところ、位置づけを明確にした文書が制定されていなかったなど基本動作ができておらず、結果、関係者間の認識に違いが生じた。

5.2.1 設計フェーズでの課題検討 (8/8)

- カルマンフィルタ設計パラメータ再調整や、STT連続非更新時の運用対処等、設計審査会等で抽出された確認・懸念事項について、管理責任を誰が担うかが文書上不明確であったこともあり、網羅的な管理が十分にできなかった。また、上記事象の解決において、JAXA 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出来なかった。
- プロジェクトのシステム規模が複雑かつ大きくなり、それまでISASが実施してきた従来の方法では管理が行き届かなくなることを予見できなかった。

3) 設計段階で検討すべき事項や審査において、第三者によるシステムの安全・信頼性を確認する仕組みや手法が効果的に機能していなかった。

- システムを構成する特定の技術課題に議論が集中したこともあり、網羅的に審査ができず1)2)の問題を修正できなかった。また、運用準備が遅れたこともあり、運用の妥当性評価が不十分になり、打上げとの時期的な整合の確認が十分でなかった。
- 審査において網羅的な確認を実施すべき等の基本動作が不十分であり、独立評価チームやS&MA活動等に対する被評価側の対応が不十分であり、また組織として支援する体制も十分でなかった。

5.2.2 製造・試験フェーズでの課題検討 (1/2)

(1) 事実関係

CDRの結果を受け、姿勢系のフライト機器の製造・試験は、以下のスケジュールで実施された。

- ① 2013年8月～12月：AOCP噛み合わせ試験
- ② 2014年1月～6月：衛星一次噛み合わせ試験(AOCS参加)
- ③ 2014年12月～2015年2月：姿勢系総合試験
- ④ 2015年3月～2015年10月：衛星総合試験(AOCS参加)

5.2.2 製造・試験フェーズでの課題検討 (2/2)

(2) 個別課題

- ・ 異常発生メカニズム①～③関係(STT挙動、AOC設計、FDIR挙動、パラメータ設定)
開発期間中、各機器の不具合によりスケジュール遅延が発生したものの、対策を実施し、2015年2月に姿勢系総合試験を終了し、最終的な衛星総合試験を経て問題ないことが確認された。
- ・ 異常発生メカニズム④関係(物体の破断・分離)
回転状態で大きな荷重が加わり破断して分離したと推定される太陽電池パドル取付部周辺及びEOBに関して製造時の検査記録を基に検討評価した結果、問題となる事項はなく、今回の事象は、製造・試験に起因する問題ではない。

(3) 製造・試験フェーズの課題まとめ

- ・ 制御系機器は、開発中課題が発生し、スケジュール遅れ等が発生したものの全て適切に処置されたことを確認し、最終的に打ち上げられ、今回の事象は製造・試験に起因する問題ではない。
- ・ また、太陽電池パドル取付部周辺及びEOBに関する製造・試験に起因する問題ではない。

5.2.3 運用フェーズでの課題検討 (1/5)

(1) 事実関係

<ASTRO-Hの運用計画について>

- ・ 衛星運用はJAXA ASTRO-Hプロジェクトが主体となって実施する体制をとっていた。クリティカルフェーズの運用計画は、JAXA ASTRO-Hプロジェクト・製造担当者・運用支援業者等で協議の上、運用支援業者が作成し、JAXA ASTRO-Hプロジェクトが承認する体制をとっていた。
- ・ 打上前のH27/8からH28/2にかけて、上述のメンバーで構成される運用調整会を約20回(サブシステム毎の調整会含めると約60回超)打上前に実施した。これらを踏まえ、クリティカルフェーズにおける計画・手順を、運用計画を規定する文書(初期運用計画書)で制定した。
ただし、EOB伸展直後の質量特性変化に関するパラメータ変更運用については、運用調整会の場では議論されず、運用を規定する文書に記載されなかった。

5.2.3 運用フェーズでの課題検討 (2/5)

(2) 個別課題

■ 異常発生メカニズム①関係 (STT挙動、AOCS設計)

- 打上げ後、STTに係る不明事象(追尾モードから捕捉モード等に戻る事象や追尾モードに移行するのに時間がかかる事象)が複数発生したが、問題が解決されないまま、STTを地蝕時にスタンバイとする対応で、初期確認運用および試験観測が続けられた。(STTパラメータチューニングも未了であった)。
- 軌道上STT不明事象について JAXA ASTRO-H追跡管制隊衛星管制班から ISAS内S&MAメンバーへ実質的な報告がなされていなかった。

■ 異常発生メカニズム②関係 (FDIR挙動)

- 5.2.1項に示したとおり、「連続非更新回数をテレメトリ出力して、運用で対処する方針となったが、具体的な運用への申し送りが不十分であった」ことにより、今回の事象において、地上から特別の対応はなされなかった。
- 姿勢変更マヌーバを可視終了の間際で実施し、その後の海外局ではレンジング運用のみとしていたため、非可視時間帯における衛星状態を確認できなかった。
 - - 詳細は、(4)参考「USC可視群でのコマンド運用、海外局のレンジング運用、姿勢変更マヌーバの可視」に示す。
- 運用制約条件が打上前に整理しきれず、かつ軌道上課題が未解決なまま当該マヌーバが実施された。

5.2.3 運用フェーズでの課題検討 (3/5)

■ 異常発生メカニズム③関係(パラメータ設定)

- 直接的な要因は、「パラメータ作成時のデータ入力誤り」と作成後の「検証の漏れ」である。人的ミスは起こりうるものとして衛星の運用システム(運用手順等含む)は構築されるのが一般的であるにも拘らず、今回の事象については、「データ入力誤り」・「検証の漏れ」等人的ミスを見逃さない仕組み(作業フロー・体制)の不備が課題と考える。

また、以下の事実が確認されている。

- 訓練・リハーサルはクリティカルフェーズ初日作業、及び定常運用のみで実施され、パラメータ設定変更のリハーサルは実施されていない。
- 運用作業計画は日々更新され、運用支援業者の姿勢系担当者の作業が輻輳した。
- パラメータ設定のためのツールは、いずれも開発試験時に設計を熟知した開発者が使用するツールとの位置付けであったため、事前にツールの手順書は準備されず、作業訓練も実施されていなかった。パラメータ作成/シミュレーションプロセスの全体手順書もなかった。
- JAXA ASTRO-H追跡管制隊衛星管制班がスラスタ制御パラメータ変更の運用準備状況を最終的に確認していなかった。

■ 異常発生メカニズム④関係(物体の破断・分離)

- 今回の事象では、構造設計よりも厳しい荷重条件が発生・付与されたものであり、運用に関わる課題は特にない。

5.2.3 運用フェーズでの課題検討 (4/5)

(3) 運用フェーズの課題まとめ

- JAXA ASTRO-Hプロジェクトは、衛星の初期運用段階のリスクを過小評価し、システムとしての安全性を欠く結果を招いた。
 - 初期機能確認フェーズで運用が安定していなかった状況で、マヌーバ完了を確認せずに長時間の不可視に入れるという運用は、定常運用移行を見ずえた内之浦局中心の運用方針とはいえ、結果的には時期尚早であった。
 - 非可視でのマヌーバ実施について、事前の判断基準も不明確であった。
 - もともと作業が輻輳するクリティカルフェーズにおいて、追加のパラメータ設定及び検証を行うなど作業リスクに対する配慮が不足していた。

- 運用計画書、手順書・マニュアル、要員の訓練等の運用の準備に対する重要性を過小評価して、計画書や手順書の整備や運用訓練が不十分だった。
 - 手順書整備では、必ずしも全ての手順・ツール類・作業結果の確認方法について網羅的に整備するということになされていなかった。
 - 地上系打上準備の遅れについては、審査会アクションの解決と実際の運用開始の時期的な整合が十分ではなかった。
 - 運用訓練は打上当日、クリティカルフェーズ初日、定常運用のみに集中しており、幅広い目配りが不足していた。

5.2.3 運用フェーズでの課題検討 (5/5)

(4) 背後要因

1) JAXA ASTRO-Hプロジェクト及び運用支援業者とも衛星を安全に運用する意識が十分でなく、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)が引かれていなかった。

- ・ スラスタ制御パラメータ設定がクリティカルな運用であるという認識、初期確認フェーズは衛星及び運用がまだ安定していない状況であるという認識の共有が不足していた。
- ・ 運用において、リスク対応を含めた充実した体制が整備されていなかった。

2) JAXA ASTRO-Hプロジェクト及び運用支援業者とも、確実に運用するための基本動作が出来ていなかった。

- ・ 「人的ミス」「検証の漏れ」を防ぐために、運用手順書・ツールを整備し、運用訓練を行うことが十分に行われず、品質記録も整備されなかった。
- ・ 運用が複雑かつ高度化して規模が大きくなり、経験豊富な人材を中心にした少数精鋭の体制による運用では対応できなくなった。

3) プロジェクト内において運用準備に対する意識が十分でなく、衛星の安全な運用よりも観測機器の装置開発および観測が優先されたことにより、衛星の安全運用の準備が後回しにされた。

- ・ 打上げまでに準備が整わなかった結果、運用を規定する文書に未記載な事項を運用支援業者が作業することとなり、業務輻輳が起こり、不適切なパラメータ設定につながった。
- ・ 運用も複雑かつ高度化しており、運用準備は開発と平行して早期に開始し、十分な時間をかける必要があったが、それができていなかった。

5.3 直接原因の水平展開(1/2)

ASTRO-H運用異常の直接原因に対応し、以下の視点に基づき、JAXA内プロジェクトへの水平展開を行った。

(1) オンボード姿勢決定におけるSTTの使用方法

STT出力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。(センサ出力と計算機(値)とに齟齬が生じた場合の設計上の対処)

(2) FDIR姿勢異常判定における独立センサの使用

STTからのデータが使えない場合に、太陽センサ出力や発生電力等の実測値を用いた姿勢異常判定を行い確実にセーフホールド移行すること。
(あるセンサデータが使えない場合の相互補完などのロバスト性の確保)

(3) 姿勢制御用パラメータの軌道上書き換え

パラメータの書換を軌道上で行う場合には、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、確認されていない、または、確認できない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。
(運用についての作業・検証プロセスの妥当性)

5.3 直接原因の水平展開(2/2)

<確認結果>

以下の衛星について、水平展開に直接該当する事項があることから、特に留意して開発を進め今後確認を行っていく。

- ジオスペース探査衛星(ERG):
クリティカル運用に万全を期すため、運用体制を再検討中。
- 水星探査計画(BepiColombo/MMO):
打上げ8年後に初めてクリティカル運用を開始する特徴を有しているため、運用計画を詳細評価する。
- 超低高度衛星技術試験機(SLATS):
ロバスト性向上策としてSAP発生電力を用いた太陽捕捉等のアルゴリズムを作成中。
- 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):
センサの温度に係るFDIR設定値が立上げ時と定常時で異なるため、注意深く運用計画を立てる。

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。

6. 今後のISASプロジェクト運営の改革

6.1 改革の主旨

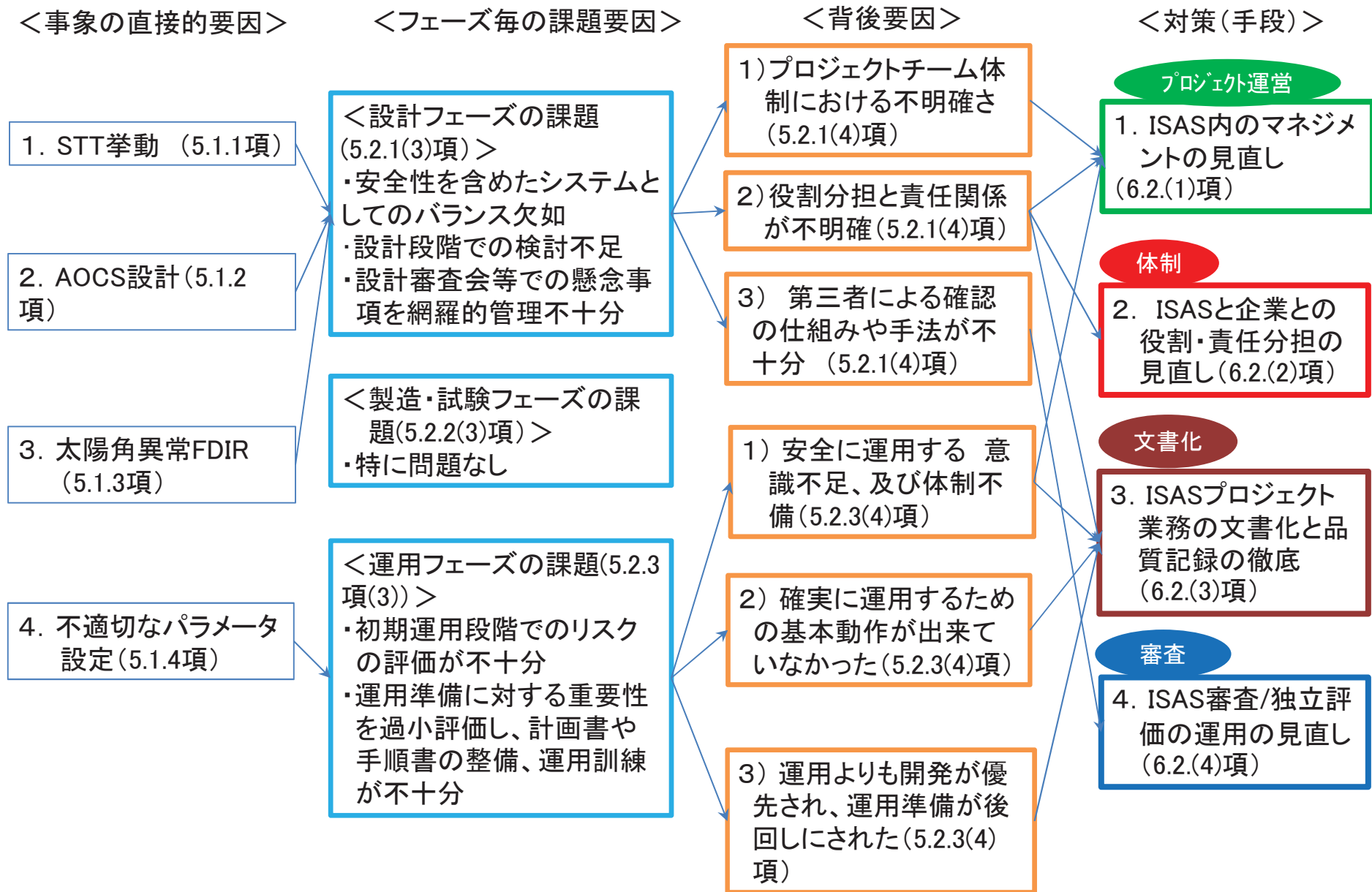
- ・ 5章までの直接要因、背後要因分析結果から、ASTRO-Hの運用断念に至った根本的な原因は、国・国民から付託された宇宙機システム全体の成立性に対する最終責任もISASのプロジェクトチーム自らが担っているとの基本意識の不足に加え、企業との役割・責任分担を契約上も実行上も曖昧な下でプロジェクトを進めてきたことにある。
- ・ 加えて、PM*とPI**の兼務、ISAS組織運営業務や大学院教育等の責務を果たす故のPM業務専任化の不徹底など、多額な国費投入を行うプロジェクトのミッション達成を左右する重要な要件に関しては、ISASの他プロジェクトについてもASTRO-Hプロジェクトと同様な状況が見られる。
- ・ 高度化する科学要求に対応し、大型化・複雑化が進んでいる科学衛星を含む宇宙機システムの開発・運用においては、ISASと企業との協働、及び当該宇宙機の目的に対応できる企業の主体的な役割・責任を担ったプロジェクト参加・貢献は不可欠である。
- ・ 従って、特に新たな知見の獲得を目的とする科学衛星についても、安全を重視したロバストなシステムの設計・製造を一元的に実施できる企業に委託し、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い、科学要求立案・先導的技術開発・最先端センサ研究開発等に注力する体制に変革する。
- ・ 以降に記述する対策は、ISASが主体となって推進するプロジェクトの運営改革へ適用する。

* PM(Project Manager): プロジェクト管理に責任を持つ者

** PI(Principal Investigator): サイエンス成果の創出に責任を持つ者

【補足K】 要因と今後のISASプロジェクト運営の改革との関係

補足K



6.2 今後の具体的な対策

(1) ISASプロジェクトマネジメント体制の見直し

- ISASプロジェクトに関わる実施要領、管理方法は、すべてJAXAで定めた全社プロジェクト関連規則、規程類に準拠することを徹底する。
- 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持つPI(Principal Investigator)を明確に区別し、それぞれ別人が担当する。
- PMおよびPIのそれぞれの役割、責任をJAXAの全社規程である「プロジェクトマネージメント規程」に明記する。
- 特にPMの職務に関しては、就任要件(プロジェクト経験、能力等)を明確にし、上記文書に明記する。PIの人は選は学术界の意見を重用して任命する。
- ISAS内プロジェクト体制およびその管理・運用に関して、プロジェクトマネージャだけでなく、サブマネージャ、システムマネージャ等のプロジェクト管理及びシステム責任を負うものについては、その経験や能力等の要件を明確にする。なおPMをはじめ枢要なプロジェクト要員は専任化を就任への前提とする。
- プロジェクトスタート前にプロジェクト要員にプロジェクト管理の基本を再教育する。

6.2 今後の具体的な対策

(2) ISASと企業との役割・責任分担の見直し

1) 設計・製造フェーズ

- 本来、システム設計により科学要求と衛星の安全の両立を図るべきであり、これにより先端的科学ミッションを確実に実現することが国民の付託を受けたISASの責務である。
- この考えに基づき、大型かつ複雑なシステムの開発を進めるに当たって、設計・製造の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、契約上も実行上も契約書の記述内容に基づき、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。その際、受け入れ検査におけるISASと企業の役割についても明確にし、充実化を図る。
- 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・最先端センサ研究開発等に注力する。
- また、宇宙機システム全体の設計・製造を一元的に実施し、その安全性に責任を持つ企業と契約し、先端的科学ミッションを確実に実現する。

2) 運用フェーズ

- 運用についても、ISASと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し、契約書にその具体的内容を明記する。

6.2 今後の具体的な対策

(3) ISASプロジェクト業務の文書化と品質記録の徹底

現行のプロジェクト管理に関するJAXA全体の規程(「プロジェクトマネジメント規程」「プロジェクトマネジメント実施要領」)をISASは遵守し、特にISAS主体のプロジェクトに関する特別の記載が必要なら追補する。

1) プロジェクト推進に関わる重要事項の文書化

- ISASから企業に提示する要求文書体系(例えば技術仕様書等)を抜本的に見直す。
- プロジェクト内容の重要事項の変更、重要事象の発生とその対処等を根拠を含めて、重要な出来事についての記録として文書に残す。

2) 品質記録の徹底

- 審査会、運用等の意思決定の共有を図るため、また不具合時の原因究明の根拠とするため、ISASおよび企業間で管理の役割分担を明確にした上で、両者にてそれぞれの品質記録を徹底する。これにより、システムの安全性に課題が発生した時に原因究明と対策の迅速な実行を可能とする。
- プロジェクトの実施責任を負うプロジェクト管理者らは、担当企業の宇宙機のシステム安全に関する品質記録をもとに、その内容を吟味し、品質水準を確認する。

3) 運用計画

- 設計フェーズから運用フェーズへの申し送り事項が確実に引き継がれるよう文書化の徹底を行う。また、認識の共有・作業ミスの防止を行うための運用文書・品質記録の作成を徹底する。

6.2 今後の具体的な対策

(4) ISAS審査／独立評価の運用の見直し

- 1) ISASやJAXAでの設計審査会等で常に確認すべき基本事項は、新たな知見の獲得を目的としつつも、安全を重視したロバストなシステムの設計である。ASTRO-Hを含むこれまでのISAS主体の宇宙機システムでは、この点で不十分な点が見受けられる。
- 2) 科学を目的とするISASの宇宙機において、システムの安全性を優先することとしていたが特徴ある観測機器等の課題解決にも重点がおかれ、結果として懸念事項の網羅的な審査や管理が十分にできなかった。
- 3) 設計段階で検討すべき事項や設計審査において、ISASの独立評価チームやS&MA等の第三者による審査内容の確認が不十分であったことを踏まえ、以下の対策を行う。
 - 審査会を充実(審査の進め方、意識向上)させ、確実にそのフォローをクロスチェックのもと行う。特に、打上げ前の運用準備を確認するISAS審査を第三者の視点を入れて徹底する。
 - 審査会と日々の活動の評価検証を充実させるため、独立評価の体制強化を行う。特にソフトウェアIV&V活動を義務化し、より確実なミッション達成のために、プロジェクトを技術的に支援する。同時にISAS独立評価およびS&MA機能の強化を図る。

6. 2 今後の具体的な対策

なお、6.2項に記載の対策の履行状況については、ISASレベル及びJAXA経営レベルで履行状況の確認・評価を既存の審査・報告の仕組みを活用して継続的に行い、対策の着実な実施および定着を図る。

7. まとめ

7. まとめ

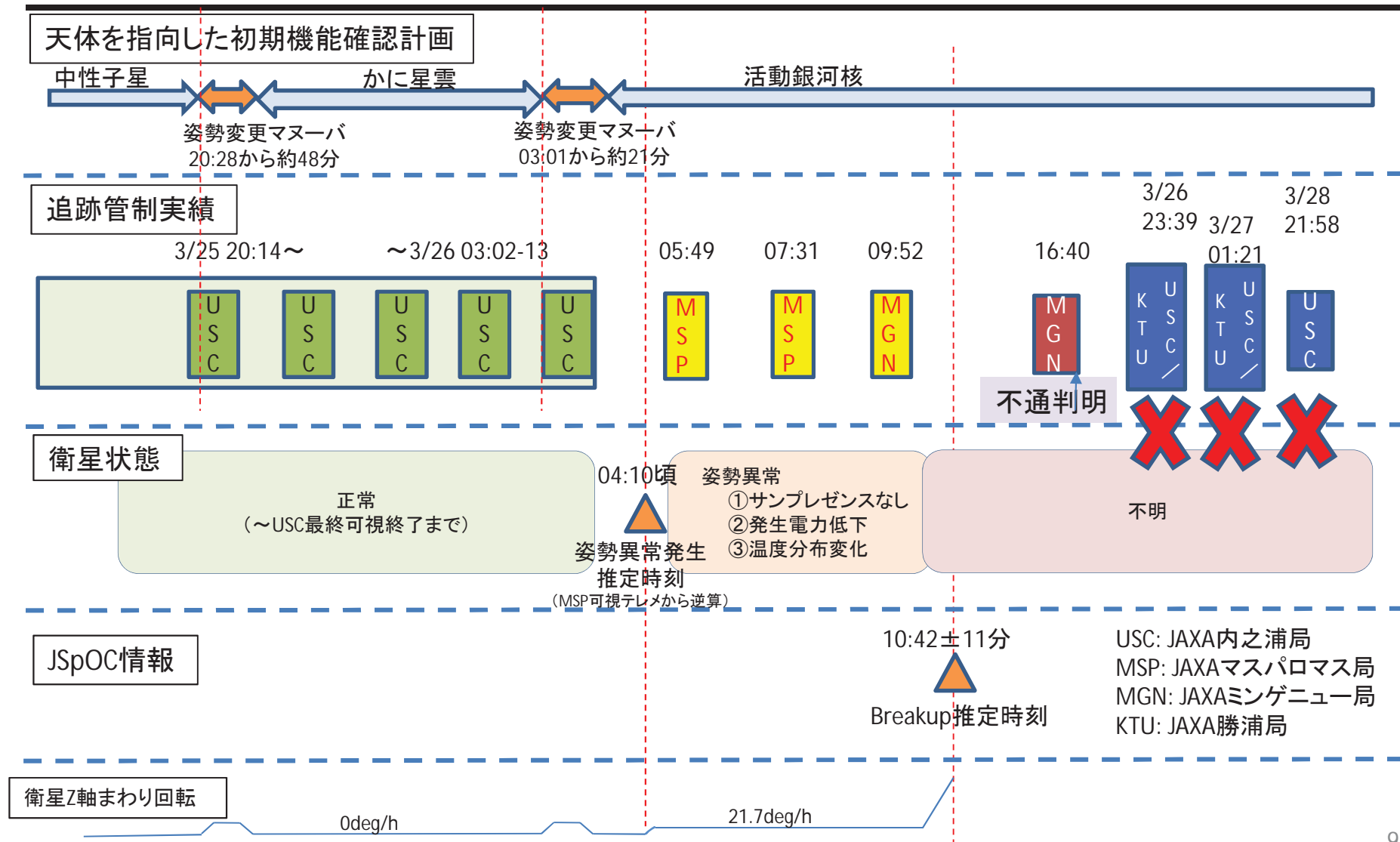
- JAXAは、X線天文衛星ASTRO-H「ひとみ」の運用断念について、この衛星の観測成果に期待をいただいた、国内外の協力関係機関や天文学の研究者、及び多くの国民の方々に対し、その期待に応えられなかった責任を重く受け止めている。
- 本来、システム設計により科学要求と衛星の安全の両立を図るべきであり、先端的科学ミッションを確実に実現することがISASの責務である。そのため、本報告書で取りまとめた対策をISASプロジェクトに対して速やかに講じる。
- プロジェクト共通の横断的事項である、IV&Vをはじめとする独立評価、S&MA、及び審査といった機能の強化を全社課題として位置付け徹底し、国・国民から付託されたより複雑化が進む宇宙機システム全体の成立性を向上させる。

參考資料

【参考】 事象発生前後の衛星状態

参考

- 天体を指向した初期機能確認計画（指向天体と姿勢変更マヌーバ）と追跡管制の実績、その時の衛星状態とJSpOC情報の時刻関係を下図に示す。



STT軌道上不明事象の条件整理 (STT事象A~D)

参考

| STT事象 | 番号 | 追尾→捕捉移行日時 (JST) | 発生回数 | STT振舞い | 衛星日照/日陰 | 固体地球から視野中心への角度 (deg) | 視野方向地表昼夜 | 地蝕 | SAA | 要因 |
|-------|----|-------------------------|------|--------|---------|----------------------|----------|----|--------|-----|
| B | 1 | 2/28 14:37:56 | 1 | 星数少1 | 日照 | 47.5 | 昼 | | | 星数少 |
| | 2 | 2/28 19:22:26 | 1 | 星数少2 | 日照 | 32.0 | 昼 | | | |
| | 3 | 2/29 11:18:39~ 11:18:47 | 3 | 地蝕明け動作 | 日照 | 19.2 | 昼 | 地蝕 | | 地蝕 |
| | 4 | 3/3 09:44:41 | 1 | 地蝕明け動作 | 日照 | 19.8 | 昼 | 地蝕 | | |
| | 5 | 3/8 05:06:57~ 05:07:05 | 2 | 地蝕入り動作 | 日照 | 5.9 | 昼 | 地蝕 | | |
| | 6 | 3/8 05:31:52 | 1 | 地蝕明け動作 | 日照 | 6.2 | 夜 | 地蝕 | SAA | |
| | 7 | 3/8 09:40:05 | 1 | 地蝕明け動作 | 日照 | -16.0 | 昼 | 地蝕 | | |
| | 8 | 3/16 08:26:01~ 08:26:05 | 2 | 地蝕入り動作 | 日照 | 16.6 | 昼 | 地蝕 | | |
| | 9 | 3/16 08:33:56~ 08:34:05 | 3 | 地蝕明け動作 | 日照 | 16.6 | 昼 | 地蝕 | | |
| | 10 | 3/16 23:49:03~ 23:49:09 | 2 | 地蝕入り動作 | 日陰 | 2.4 | 夜 | 地蝕 | | |
| | 11 | 3/17 00:13:35 | 1 | 地蝕明け動作 | 日照 | 17.8 | 昼 | 地蝕 | | |
| | 12 | 3/17 02:01:00 | 1 | 地蝕入り動作 | 日照 | 16.0 | 昼 | 地蝕 | SAA | |
| | 13 | 3/17 02:40:50 ~02:41:40 | 8 | 地蝕明け動作 | 日陰 | 1.2~4.8 | 夜 | 地蝕 | | |
| | 14 | 3/17 03:37:07~ 03:37:12 | 2 | 地蝕入り動作 | 日照 | 16.2 | 昼 | 地蝕 | | |
| | 15 | 3/17 04:16:33~ 04:16:39 | 2 | 地蝕明け動作 | 日陰 | 1.0 | 夜 | 地蝕 | | |
| A | 16 | 3/26 04:10:00 | ? | 星数少 | 日照 | 33.1 | 夜 | | SAA通過後 | 星数少 |
| C | 17 | 2/28 00:07:34 | 1 | 星数少 | 日照 | 32.6 | 昼 | | | 星数少 |
| | 18 | 3/16 05:15:06~05:15:11 | 2 | 地蝕入り動作 | 日照 | 16.5 | 昼 | 地蝕 | | 地蝕 |
| | 19 | 3/20 06:35:27 | 1 | 星数少 | 日照 | 96.3 | 昼 | | | 星数少 |
| D | 20 | 2/19 20:16 | 1 | 全面地蝕 | 日照 | 0 | 昼 | 地蝕 | | 地蝕 |

【参考】姿勢変更マヌーバを可視終了の間際とした考え方1

参考

1. 前提

- ASTRO-Hは宇宙の様々な天体にX線望遠鏡を向けて観測する。観測の要求から、1日に複数回の姿勢変更が必要となる場合があるのに対して、1日に5回しかコンタクトのない内之浦局をコマンド運用の主局とするので、定常運用では「直後にリアルタイムテレメトリによる確認が不可能な内之浦非可視マヌーバ」を実行することは必須であり、どこかのタイミングでこれを実施する必要があった。

2. 姿勢系チェックアウト計画と実施状況

- 姿勢系のチェックアウト計画は、JAXAが打上前に初期運用計画書の一部として規定していた。クリティカルフェーズ終了後はこの部分を切り出して、JAXAが運用支援業者の支援の下で、機能確認の計画・実績を一体的に管理していたが、運用主体であるJAXAの正式な規定文書とはしていなかった。
- 姿勢系のチェックアウト計画の項目には、クリティカルフェーズまで、定常運用開始前までの完了期日のつけられた項目と、完了期日の指定のない項目があった。
- 進捗状況は、クリティカルフェーズ中に完了すべき項目は全てクリティカルフェーズで完了した。本事象発生時は、定常運用開始までに完了させる項目の中に未完の項目が残っている状況であった。特に、STTチェックアウトは軌道上事象の検討を進めている段階であったため未完了（実施時期も未定）であった。
- 「直後にリアルタイムテレメトリによる確認が不可能な内之浦非可視マヌーバ」を開始してよい条件は、姿勢系チェックアウト計画では定められていなかった。このため、実際の運用を行う中で、その様子を見ながら判断することになった。

【参考】姿勢変更マヌーバを可視終了の間際とした考え方2

参考

3. 運用の実際

■ ①USC可視群でのコマンド運用、海外局のレンジング運用

- クリティカルフェーズ終了(~2/28)までは、可能な限り多くのパスを割り当てて、24時間体制で衛星コマンド運用・状態監視モニタを実施した。
- その後2/29~3/16は、内之浦USC可視群でのコマンド運用を原則とし、MSP/MGN可視群は状態監視・レンジング運用のみとした。
- 3/16に軌道上でのGPSR航法解の性能評価を完了したため、3/17以降は、軌道決定をレンジングからGPSRデータに切り替え、GPSRの継続的な評価の観点から、テレメ監視立ち会いなしでレンジング運用のみを行う方針とした。

■ ②姿勢変更マヌーバのタイミング決定

- 姿勢制御系の立上げ状況に応じて、最初は「可視時間内に収まる」ように始め、「可視中で開始し次可視で終了確認」「タイムラインコマンドで可視上空に実施」「タイムラインコマンドで非可視中に実施」「メーカー姿勢系担当を連絡待機で実施」というように段階を踏んで進めた。
- 上記の段階が問題なく終了したことから、STTチェックアウトが未完了だったもののIRUチェックアウト完了を確認したことから、初めて、USC最終可視に開始し、直後の可視でテレメ状態監視しない状態で長時間の不可視運用に入れるというマヌーバを行った。

- 上記①②の通り、JAXAとしては、衛星の初期機能確認の状況を見極めつつ、定常状態への移行も見すえた段階的な運用を行う考え方を採っていた。

【参考】異常発生メカニズム①に関する部品やソフトウェア、アルゴリズム等のヘリテージの詳細(表)

| 姿勢系機器 | 略号 | ベースライン機器の搭載実績 | TRL | 補足 |
|-----------------|------|--------------------------------------|-----|---|
| リアクションホイール | RW | Type-L HSRW | 9 | JAXA戦略コンポーネントとして開発されたホイールである(Type-Lホイール)。軌道上実績がある同機種(Type-Mホイール)の回転子を大きくし、最大蓄積角運動量を 30Nmsから80Nmsに増やしたモデルである。JAXA認定モデルによるQT試験が実施されている。 |
| 磁気トルカ | MTQ | ZARM社MTQ新規開発品 | 6 | ASTRO-Hで搭載する新規設計品であるため、EM品にて検証を行った。(EM1台/FM3台) |
| 恒星センサ | STT | JAXA戦略コンポーネント(次世代STT) | 6 | JAXA戦略コンポーネントとして開発された機器である。認定モデルとしてQMが製作され、QT試験が実施されている。 |
| 慣性基準装置 | IRU | GCOM-W、GCOM-C、ALOS-2などに搭載されている | 9 | ASTRO-H搭載IRU(Type-3AS)は、TDGコマが3個搭載されているIRU(Type-3A)のTDGコマを一つダミーに交換したものである。Type-3AはGCOM-W1、ALOS-2など多くの軌道上実績があり、Type-3ASはASNARO、SPRINT-Aなどに搭載が決まっていた。 |
| 粗太陽センサ | CSAS | ADCOLE社実績多数、海外調達品 | 9 | SPRINT-A、ASNARO、あかつき等、多数の軌道上実績がある太陽センサである。 |
| 磁気センサ | GAS | ZARM社PROBA-2(民生部品) SPRINT-A(宇宙部品) | 9 | 海外プロジェクト品(民生部品使用)を宇宙用部品に置き換えた磁場センサである。宇宙用部品としては新規設計品のため、EM品にて検証を行った(EM1台/FM2台)。 |
| 3Nスラスタ | RCS | はるか、すざく、あかり、あかつき等、軌道上実績が多いスラスタである。 | 9 | 触媒を変更したため、寿命試験モデルにより寿命試験を実施した。 |
| 姿勢制御系フライトソフトウェア | ACFS | - | - | すざく等の過去の科学衛星の考え方(ロジック等)を踏襲した。また、SpWを採用し、標準ミドルウェア、シミュレータ、単体試験ツールなどを共通化したことで、コスト/時間の削減を図った。 |

略語集

| 略称 | 英語 | 日本語 |
|-----------------|---|--|
| ACFS | Attitude Control Flight Software | 姿勢制御ソフトウェア |
| <u>ALOS-2</u> | Advanced Land Observing Satellite-2 “DAICHI-2” | 陸域観測技術衛星2号「だいち2号」 |
| AOCP | Attitude and Orbit Control Processor | 姿勢軌道制御計算機 |
| AOCS | Attitude and Orbit Control Subsystem | 姿勢及び軌道制御サブシステム |
| ASTRO-H | X-ray satellite “Hitomi” | X線天文衛星「ひとみ」 |
| CAMS | Canadian ASTRO-H Metrology System | アラインメント計測システム |
| CDR | Critical Design Review | 詳細設計審査 |
| CdTe | Cadmium telluride | テルル化カドミウム |
| <u>CPR</u> | Cloud Profiling Radar | 雲プロファイリングレーダ |
| CSA | Canadian Space Agency | カナダ宇宙庁 |
| CSAS | Coarse Sun Aspect Sensor | 粗太陽センサ |
| EarthCARE | Earth Cloud, Aerosol and Radiation Explorer | 雲エアロゾル放射ミッション |
| EM | Engineering Model | 開発モデル |
| EOB | Extensible Optical Bench | 伸展式光学ベンチ |
| EOL | end of life | 寿命末期 |
| <u>ERG</u> | Exploration of energization and Radiation in Geospace “ERG” | ジオスペース探査衛星 |
| ESA | European Space Agency | 欧州宇宙機関 |
| FOB | Fixed optical bench | 固定式光学ベンチ |
| FDIR | Fault Detection Isolation and Reconfiguration | 故障検出, 分離及び再構成 |
| FM | Flight Model | フライトモデル |
| FTA | Fault Tree Analysis | 故障の木解析 |
| <u>GCOM-C</u> | Global Change Observation Mission – Climate | 気候変動観測衛星 |
| <u>GCOM-W</u> | Global Change Observation Mission – Water “SHIZUKU” | 水循環変動観測衛星「しずく」 |
| GPSR | GPS receiver | GPS (Global Positioning System Receiver) 受信機 |
| HXI | Hard X-ray Imager | 硬X線撮像検出器 |
| HXT | Hard X-ray Telescope | 硬X線望遠鏡 |
| IRU | Inertial Reference Unit | 慣性基準装置 |
| ISAS | Institute of Space and Astronautical Science | JAXA宇宙科学研究所 |
| <u>IV&V</u> | Independent Verification and Validation | 独立検証及び妥当性確認 |
| JAXA | Japan Aerospace Exploration Agency | 宇宙航空研究開発機構 |

| 略称 | 英語 | 日本語 |
|-------|---|-------------------------|
| JSpOC | Joint Space Operations Center | 米国国防総省戦略軍統合宇宙運用センター |
| JST | Japan Standard Time | 日本標準時 |
| KTU | Katsuura Tracking and Communications Station | 勝浦宇宙通信所 |
| MELCO | Mitsubishi Electric Corporation | 三菱電機株式会社 |
| MGN | Mingenew ground station | JAXA GNミンゲニュー局(オーストラリア) |
| MHI | Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. | 三菱重工業株式会社 |
| MMO | Mercury Magnetospheric Orbiter | 水星磁気圏探査機 |
| MOI | moment of inertia | 慣性モーメント |
| MSP | Maspalomas ground station | JAXA GNマスパロマス局(スペイン) |
| MTQ | Magnetic Torque | 磁気トルカ |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration | 米国航空宇宙局 |
| NEC | NEC Corporation | 日本電気株式会社 |
| NIPPI | NIPPI Corporation | 日本飛行機株式会社 |
| PDR | Preliminary Design Review | 基本設計審査 |
| PI | Principal Investigator | 主任調査員, 代表研究者 |
| PM | Project Manager | プロジェクト管理責任者 |
| QM | Qualification Model | 認定モデル(認定試験用モデル) |
| QT | Qualification Test | 認定試験 |
| RCS | Reaction Control Subsystem | 推進系 |
| RFP | Request for Proposal | 提案依頼書 |
| RW | Reaction Wheel | リアクションホイール |
| SAA | South Atlantic Anomaly | 南大西洋異常地域 |
| SAC | Space Activities Commission | 宇宙開発委員会 |
| SANT | S-band Antenna | S帯アンテナ |
| SAP | Solar Array Paddle | 太陽電池パドル |
| SDR | System Definition Review | システム定義審査 |
| SED | Space Engineering Development Co., Ltd. | 宇宙技術開発株式会社 |
| SGD | Soft Gamma-Ray Detector | 軟ガンマ線検出器 |
| SH | Safe Hold | セーフホールド |
| SHI | Sumitomo Heavy Industries, Ltd. | 住友重機械工業株式会社 |

| 略称 | 英語 | 日本語 |
|----------|--|---------------|
| SHNT | Shunt Dissipater | シャント装置 |
| SLATS | Super Low Altitude Test Satellite | 超低高度衛星技術試験機 |
| SPRINT-A | Spectroscopic Planet Observatory for Recognition of Interaction of Atmosphere "HISAKI" | 惑星分光観測衛星「ひさき」 |
| SpW | SpaceWire | スペースワイヤ |
| SRON | Netherlands Institute for Space Research | オランダ宇宙研究機関 |
| STT | Star Tracker | スタートラッカ |
| SXI | Soft X-ray Imager | 軟X線撮像検出器 |
| SXS | Soft X-ray Spectrometer | 軟X線分光検出器 |
| SXS-ADR | SXS Adiabatic Demagnetization Refrigerator | SXS断熱消磁冷凍機 |
| SXS-PSP | SXS Pulse Shape Processor | SXSデジタル波形処理装置 |
| SXT-I | Soft X-ray Telescope for Imager | SXI用軟X線望遠鏡 |
| SXT-S | Soft X-ray Telescope for Spectrometer | SXS用軟X線望遠鏡 |
| S&MA | Safety and Mission Assurance | 安全・開発保証 |
| TDG | Tuned Dry Gyro | チューンドドライジャイロ |
| USC | Uchinoura Space Center | 内之浦宇宙空間観測所 |
| UT | Universal Time | 世界時 |
| UTC | Coordinated Universal Time | 協定世界時 |