



衛星軌道上不具合分析・検討の状況について

平成20年7月30日

宇宙航空研究開発機構

執行役 富岡 健治

1. はじめに

衛星の初期フェーズ及び1年半程度経過時に、システム全損には至らないが機能・性能に制約を生じる不具合が散発している。

各衛星の不具合は、担当プロジェクトを主体に原因究明・個別処置・反映が実施されている。JAXA内横断的に編成された「衛星軌道上不具合分析・検討チーム」は、これらの技術及びプログラム管理等の共通的な反映事項の抽出を行った。結果の概要を報告する。

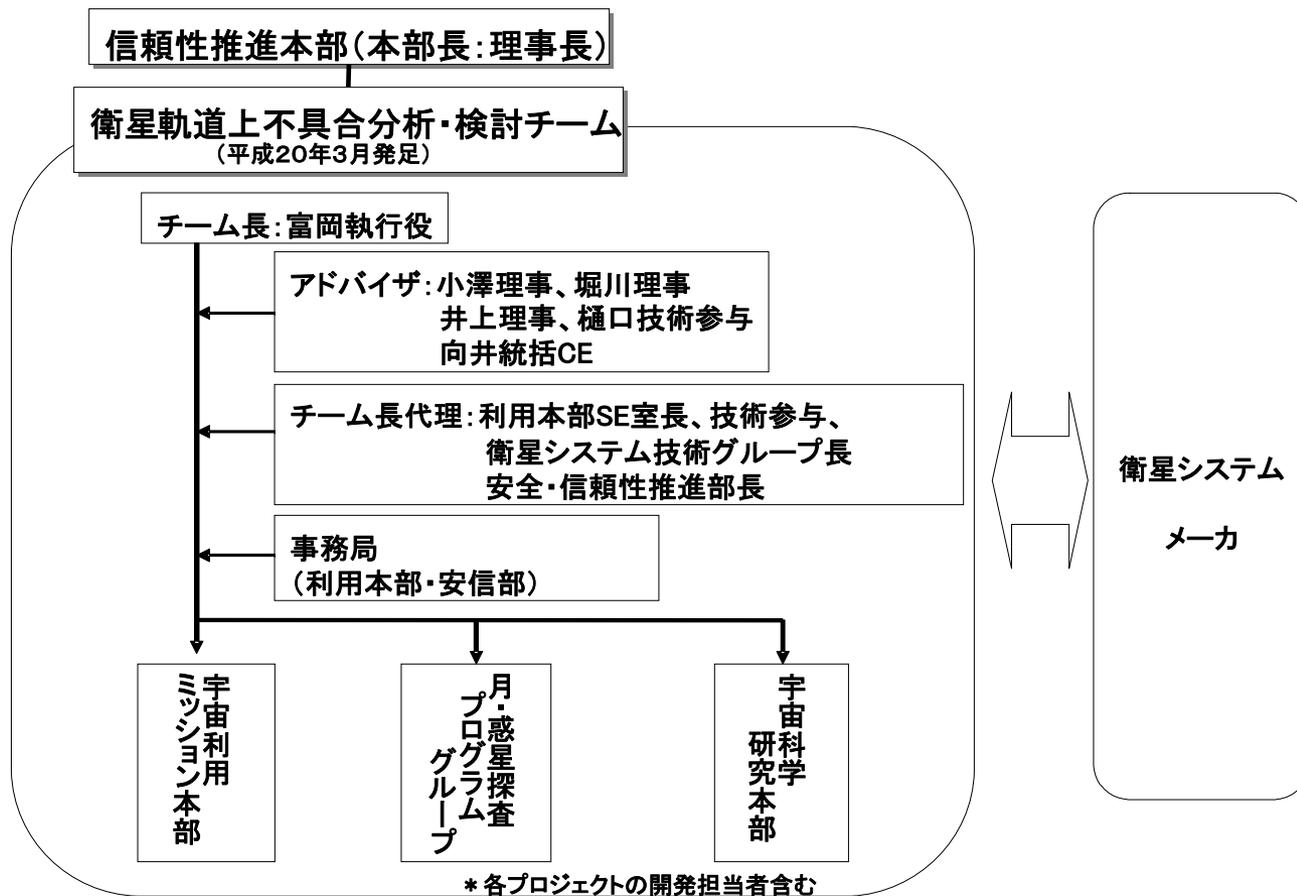


図1 衛星軌道上不具合分析・検討チーム体制

2. 作業の流れ(図中の数字は項番を示す)

分析対象衛星の選定から対策反映事項のまとめまでの作業の流れを図1に示す。

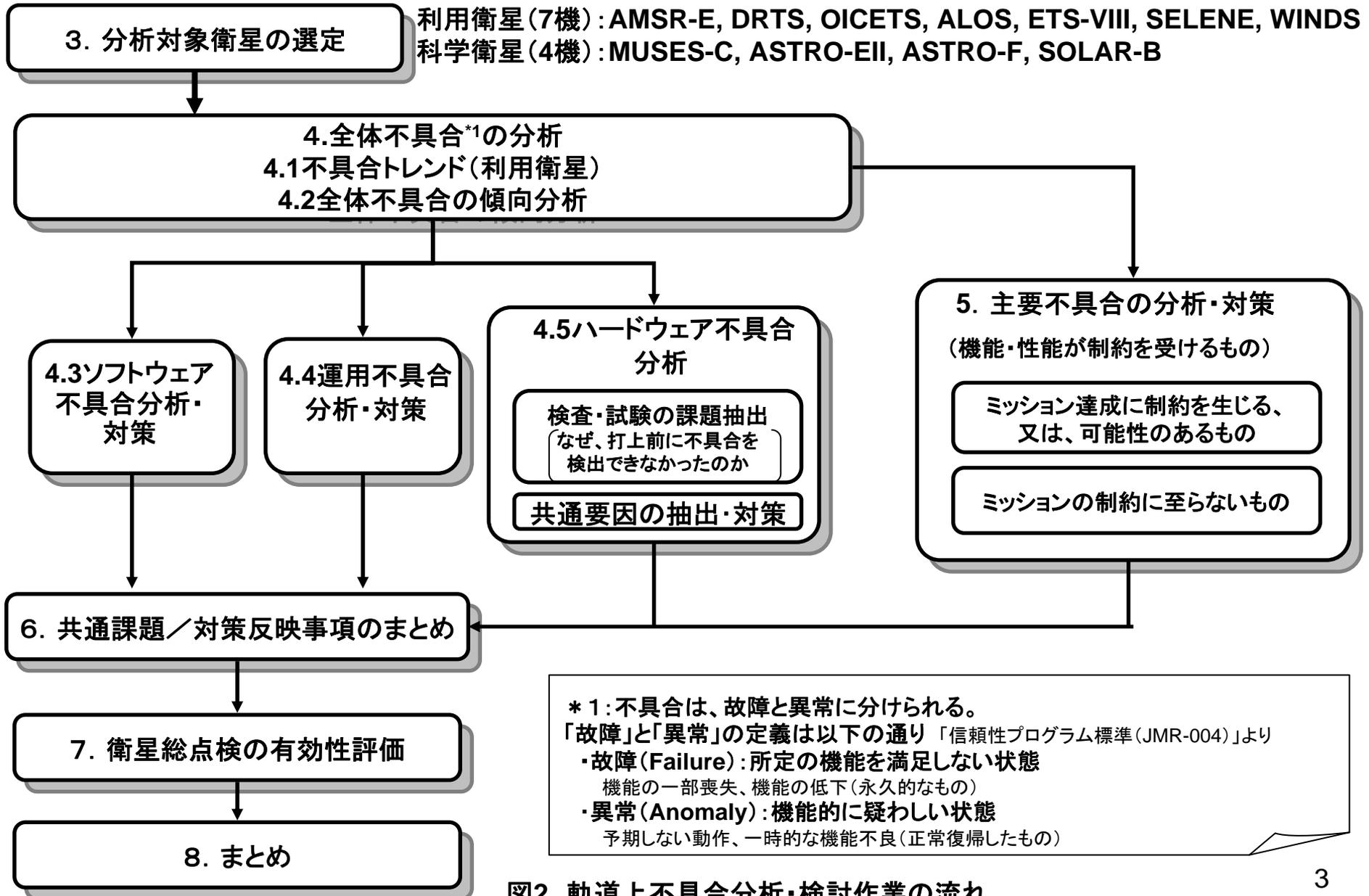


図2 軌道上不具合分析・検討作業の流れ

3. 分析対象衛星の選定(運用状況含む)

分析対象は、現在運用中の衛星のうち、開発時の情報収集が可能で軌道上不具合情報が比較的充実している以下の11衛星(利用衛星:7機、科学衛星:4機)とした。源泉データは、利用衛星については不具合情報システム、科学衛星はデータベース化されていないため運用記録等から抽出した。

表1 分析対象衛星の運用状況

(注)2008年5月29日時点

衛星名	ミッション期間	打上げ日	これまでの運用実績	主な成果と運用状況
Aqua/AMSR-E (改良型高性能マイクロ波放射計)	3年	2002/5/4	6年0ヶ月	<ul style="list-style-type: none"> ・1.6mの大口径アンテナにより、マイクロ波放射計として世界最高水準の空間分解能を達成。 ・世界初となる広域・定量的な土壌水分観測や全天候型の全球海面水温観測を実現。 ・3年のミッション期間を達成し、現在も観測を継続中(後期利用段階)。
DRTS こだま	7年	2002/9/10	5年8ヶ月	<ul style="list-style-type: none"> ・複数の地球観測衛星等(ADEOS-II、ALOS、OICETS、欧州宇宙機関のENVISAT)との衛星間通信実験を実施。 ・国内地上局では直接交信できない地域の上空で取得された観測データをリアルタイム伝送することに成功。 ・現在、順調に通信実験を実施中(定常段階)。 今後は、JEMの実験データ伝送・双方向通信などにも利用予定。
MUSES-C はやぶさ	3年	2003/5/9	5年0ヶ月	<ul style="list-style-type: none"> ・電気推進機の長期作動による小惑星イトカワへのランデブーと小惑星イトカワの科学観測に成功。 ・現在、エクストラサクセスを目指し地球へ帰還中(予定:2010年6月頃)。 ・リアクションホイール不具合については、代替手段としてイオンエンジン等を用いて姿勢制御を実施中。
ASTRO-EII すざく	1年	2005/7/10	2年10ヶ月	<ul style="list-style-type: none"> ・世界最高水準のX線観測システムにより銀河宇宙線の起源を解明するなど様々な観測成果を挙げた。 ・ミッション期間を終了し、現在も観測を継続中。 ・X線カロリメーターについては液体ヘリウムを早期に喪失したものの軌道上における世界最低温度を達成。
OICETS きらり	1年	2005/8/24	2年9ヶ月	<ul style="list-style-type: none"> ・欧州宇宙機関のデータ中継技術衛星ARTEMISとの間で世界初の双方向光衛星間通信に成功。 ・情報通信研究機構(NICT)光地上局との間で世界初の低軌道周回衛星と光地上局との間の双方向光通信実験に成功。 ・定常段階を終了し、現在、軌道上データ取得及び評価を実施中(後期利用段階)。
ALOS だいち	3年	2006/1/24	2年4ヶ月	<ul style="list-style-type: none"> ・3種類の地球観測センサを用いて世界最高速の衛星間データ通信により全陸域をカバーする画像を取得し、ユーザに観測データを提供。 ・国内の防災関連機関、国際災害チャータ、センチネル・アジア関連機関等の要請に対応し緊急観測を実施。 ・現在も安定した観測運用を実施中(定常段階)。
ASTRO-F あかり	1年	2006/2/22	2年3ヶ月	<ul style="list-style-type: none"> ・過去の衛星より高解像度、高感度の全天サーベイを達成し、赤外線天体カタログを作成中(一部公開を開始)。 ・星の誕生と死の過程、銀河の星形成活動等について既に大きな成果を挙げた。 ・ミッション期間を終了し、現在も観測を継続中。 ・2007年8月に液体ヘリウムを使い切り、現在、機械式冷凍機のみによる近赤外線の観測を継続中。
SOLAR-B ひので	3年	2006/9/23	1年8ヶ月	<ul style="list-style-type: none"> ・可視光・X線・極紫外線の3種類の望遠鏡により太陽大気中の磁場分布や電流分布、速度分布の精密な観測を実施中。 ・太陽黒点の3次元的な磁場・速度場構造を明らかにするなど太陽物理学研究にインパクトを与える観測成果を挙げた。 ・X帯通信系不具合については、代替手段としてS帯によるデータ伝送を開始しつつある。
ETS-VIII きく8号	3年	2006/12/18	1年5ヶ月	<ul style="list-style-type: none"> ・世界最大級の大型展開アンテナ(2基)の展開に成功。 ・現在、移動体通信や測位に関する基本実験ならびに利用実験を実施中(定常段階)。 ・大型展開アンテナ受信系不具合については、代替手段として測位実験用アンテナを用いて実験を継続。
SELENE かぐや	1年1ヶ月	2007/9/14	0年8ヶ月	<ul style="list-style-type: none"> ・14種類のミッション機器(HDTV含む)により月の元素分布、地形、内部構造、周辺環境等を観測中(定常段階)。 ・これまでに月の裏側の重力異常を明瞭に捉えるなど、新たな成果を挙げつつある。 ・粒子線計測器不具合については一部の検出器は使用できないもののミッションサクセスは達成できる見込み。
WINDS きずな	5年	2008/2/23	0年3ヶ月	<ul style="list-style-type: none"> ・マルチビームアンテナ及び広域電子走査アンテナにより地球局との世界最高速度のデータ通信に成功。 ・6月30日に初期機能確認を終了し、現在、基本実験を実施中(定常段階)。 ・10月以降に総務省公募による利用実験を開始予定。

4. 全体不具合の分析

4.1 不具合トレンド(利用衛星)

- 分析対象の衛星と過去の衛星とでは、不具合件数に有意差が見られない。
- 大型衛星は不具合件数が多いが、衛星の高機能・高密度化(質量比)を考慮すると近年は減少傾向にある。

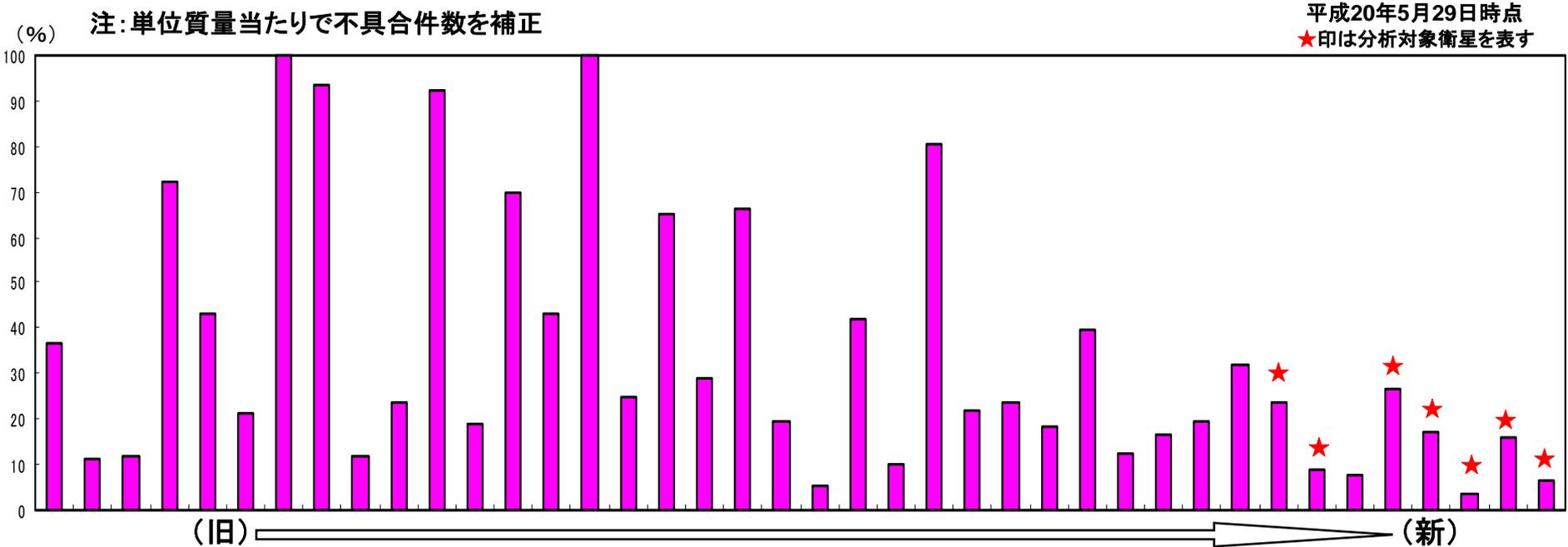


図3 不具合トレンド(利用衛星)

4.2 全体不具合の傾向分析(異常・故障含む全不具合184件／11機)

(1) 対象衛星の不具合発生時期【図4】

打上げから不具合*発生までの日数別に集計した結果は次の通り。 *不具合は、故障と異常に分けられる

(2) 対象衛星全体不具合事象の分類【図5】

ハードウェアの不具合が過半数を占める。

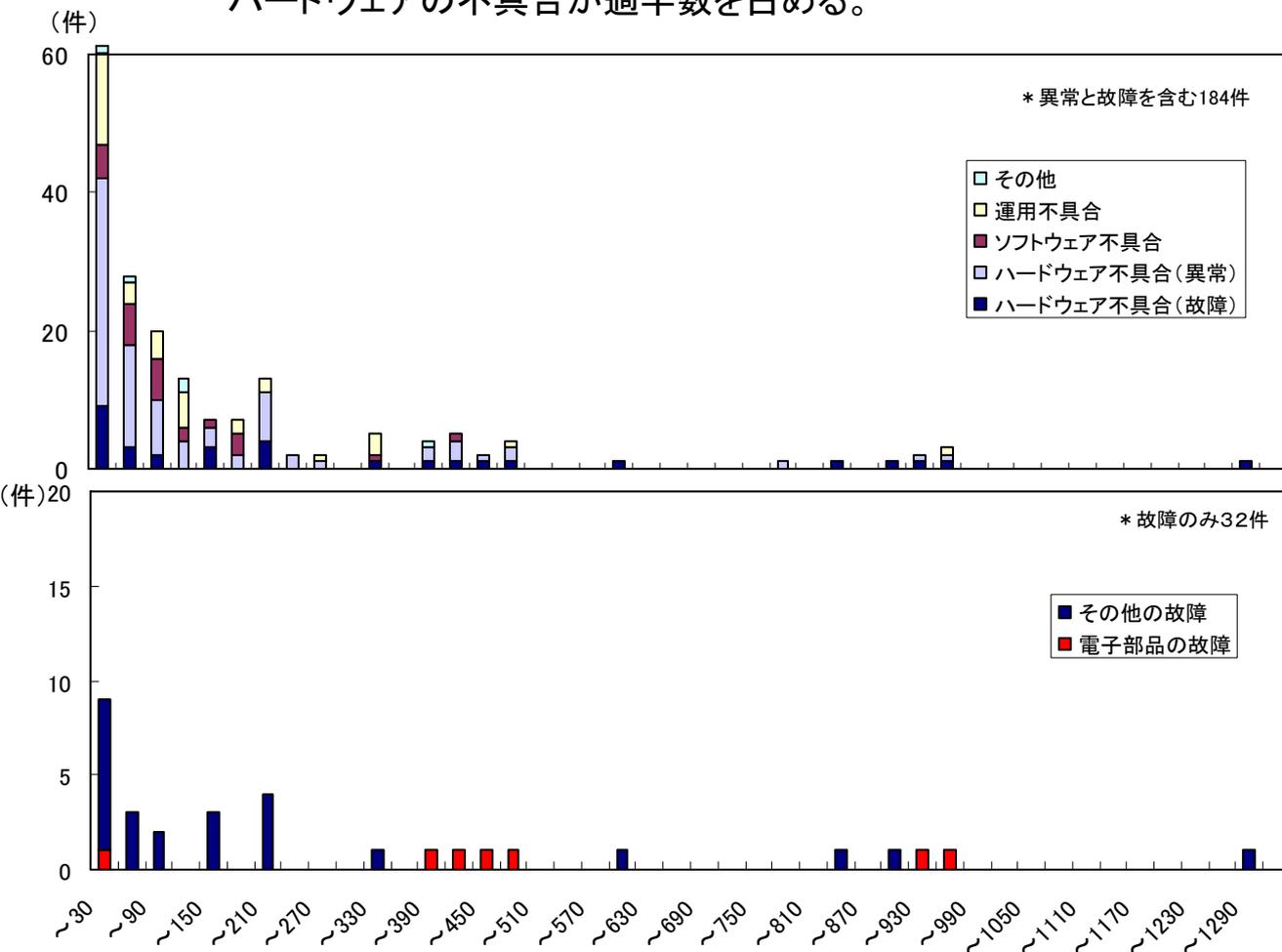


図4 打ち上げから不具合発生までの時期

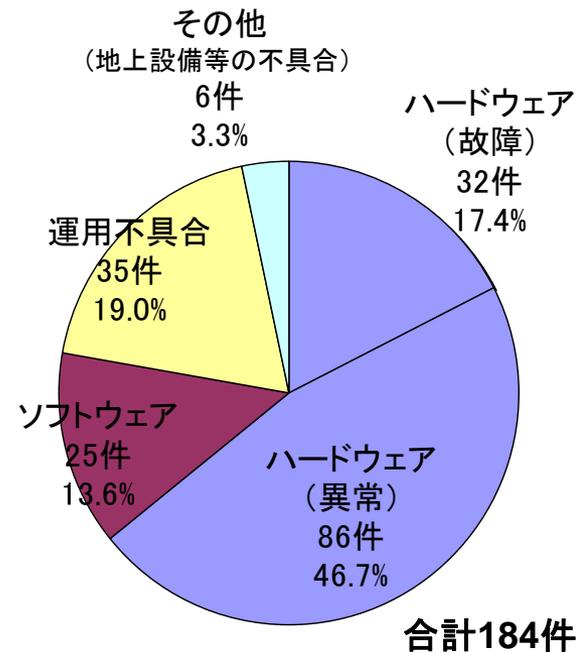
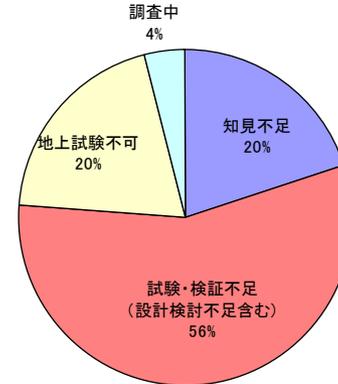


図5 不具合事象分類

4.3 ソフトウェア不具合の分析【図6】

【共通要因】

- ・ソフトウェアの詳細仕様決定が遅れ、試験・検証不足になっている
- ・機能・性能に制約を与える不具合は発生していない
(すべてプログラムの書き換えや運用で対処できている)



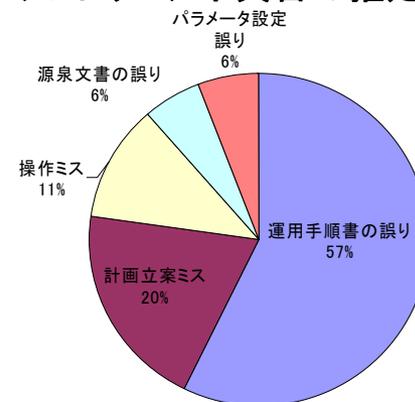
合計25件

図6 ソフトウェア不具合の推定原因分類

4.4 運用不具合の分析【図7】

【共通要因】

- ・衛星設計と運用設計がタイムリーに連携して進められていないため、運用手順書誤り等が多い
(維持設計において実質的に作成:全衛星共通)
- ・機能・性能に制約を与える不具合は発生していない



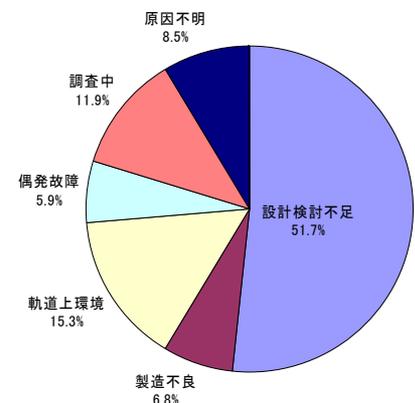
合計35件

図7 運用不具合の推定原因分類

4.5 ハードウェア不具合の分析【図8】

【共通要因(なぜ打上げ前に不具合を検出できなかったのか)】

- ・地上試験では軌道上環境を完全に模擬困難
- ・過去の実績から不要と判断したため試験が不充分
- ・製造不良のうち、特殊工程等の検査で検出不可能



合計118件

図8 ハードウェア不具合の推定原因分類

5. 主要不具合の分析

全不具合の中から機能・性能に制約を受けるものを「主要不具合」として抽出した(24件)。

その中で、ミッション達成に制約を生じる、又は、可能性のあるもの(3件: 部)、

ミッションの制約に至らないもの(21件)。

背後要因分析を行い、共通課題の識別及び対策反映事項を抽出した。

表2 主要不具合一覧

No.	件名	打上げからの経過日数	推定原因	背後要因	対策反映事項
1	リアクションホイール(X軸)不具合【MUSES-C】	2年3ヶ月	ホイール設計変更部の異常	設計変更に対する信頼性解析評価(地上試験)が不十分 輸出規制等による海外部品・コンポーネントの情報不足	【共通課題Ⅰ】 海外部品・コンポーネントの品質確保
2	リアクションホイール(Y軸)不具合【MUSES-C】	2年5ヶ月	同上	同上	
3	DCアークジェット不具合【DRTS】	1ヶ月	コンタミ侵入	海外部品・コンポーネントの情報不足	
4	大型展開アンテナ給電部電源不具合【ETS-VIII】 *電源部	1.5ヶ月	ダイオード出力端の短絡(絶縁対策不足)	外部機関において、信頼性品質管理に関して製造メーカーのシステムを信頼し、自らが信頼性品質管理要求を行ってきていなかった。ダイオード出力端に関して十分な審査チェックを行っていなかった。	【共通課題Ⅱ】 外部機関との共同開発品・支給品に関する信頼性・品質の確保
5	X線微量熱量計冷却系不具合【ASTRO-E II】	1ヶ月	真空下での液体ヘリウム排気パス不良	真空下の極低温ヘリウムに関する専門家がいない (外部機関の専門家が途中転出)	
6	狭帯域フィルタ撮像系不具合【SOLAR-B】	1ヶ月	フィルタのシリコンオイル中に気泡残留	外部機関支給品に関する品質要求・確認が行われていない	
7	直接伝送系不具合【ALOS】	打上げ直後	太陽電池パドルによるマルチバス干渉	検討不足/試験で検証不可/解析ツールなし	【共通課題Ⅲ】 設計・解析/試験の充実
8	INスラスタ不具合【DRTS】	3年6ヶ月	細長い触媒粒が金網をすり抜けノズルスロートに堆積	知見・認識が不足していた	
9	恒星センサ電子冷却器不具合【ASTRO-F】 *電源部	2ヶ月	特有な実装設計に対する熱解析の不備	詳細熱解析を実施していなかった	【共通課題Ⅳ】 電源部周りの対策 (偶発故障:電子部品の故障含む)
10	太陽センサ不具合【WINDS】	6日	(偶発故障:電子部品の故障)	なし	
11	データ中継衛星通信部不具合【ALOS】 *電源部	1年3ヶ月	(偶発故障:電子部品の故障)	なし	
12	イオンエンジン電源装置不具合【ETS-VIII】 *電源部	1年1ヶ月	(偶発故障:電子部品の故障)	なし	
13	受信機出力不具合【AMSR-E】	2年6ヶ月	(偶発故障:電子部品の故障)	なし	
14	X線CCDカメラデータ処理系不具合【ASTRO-E II】	2年7ヶ月	(偶発故障:電子部品の故障)	なし	
15	アポジエンジン不具合【DRTS】	3日	オフィスの誤装着	ヒューマンエラーの回避策が不十分	【その他の課題】 ヒューマンエラーの防止
16	サンシールド不具合【ASTRO-F】	打上げ直後	急速減圧に伴うサンシールドの熱制御材の剥がれ	急速減圧下での熱制御材はがれ現象に関する認識不足 衛星総点検の点検内容が下請けメーカーへ展開不足	
17	X帯変調器不具合【SOLAR-B】	1年3ヶ月	(原因調査中)		
18	粒子線計測器荷電粒子センサー不具合【SELENE】	2ヶ月	(原因調査中)		
19	蛍光X線分光計不具合【SELENE】	2ヶ月	(原因調査中)		
20	ガンマ線分光計不具合【SELENE】	6.5ヶ月	(原因調査中)		
21	姿勢制御電子回路不具合【WINDS】	8日	(原因調査中)		
22	マルチポートアンプ不具合【WINDS】 *電源部	2ヶ月	(原因調査中)		
23	スターリング冷凍機不具合【ASTRO-F】	1年7ヶ月	(原因調査中)		
24	サンシールド不具合【ASTRO-F】	2年2ヶ月	(原因調査中)		

6. 共通課題／対策反映事項のまとめ

<共通課題Ⅰ：海外部品・コンポーネントの品質確保：19年度より実施中>

【対策反映事項】

海外部品・コンポーネント品質向上のための下記ガイドラインの適用

- ・実績のある標準品を原則使用
 - ・海外コンポーネントの構成部品に対する、部品プログラム基準の適用
 - ・海外コンポーネント、部品メーカーの情報収集(第三者機関の活用含む)
- なお、キー・コンポーネントに関しては、国産化・継続的採用

<共通課題Ⅱ：外部機関との共同開発品・支給品に関する信頼性・品質の確保：

19年度より実施中>

【対策反映事項】

- (1) 外部機関における信頼性品質管理体制構築
 - ・信頼性・品質管理プログラム要求、整備支援(JAXA制定プログラム文書の準用を含む)、相互審査
- (2) JAXA専門技術者グループをはじめ、有識者の参画、ピアレビューの充実
- (3) 他機関からの支給品の品質情報の確認、審査

<共通課題Ⅲ：設計・解析／試験の充実>

【対策反映事項】

・設計・解析

- (1) システム・サブシステム・コンポーネント／解析・試験要素の適合性確認におけるピアレビューの強化・可視化
(解析・試験の境界、制約条件を加味した可視化による妥当性の詳細確認)
- (2) 安易に類似性・フライト実績を評価しない(更なる技術成熟度(TRL)の評価と設計・検証の徹底)
- (3) 適切な冗長化による単一故障点の回避、
重要ポイントではFTA*1とFMEA*2のクロスチェック等技術リスク評価の充実
- (4) 最新設計標準の適用の徹底

*1: FTA: 故障の木解析

*2: FMEA: 故障モード影響解析

・試験

- (1) 試験の境界条件の把握と結果の評価
- (2) 解析と試験の有効な組合せ(可能な限りのEnd to End試験の実施)
- (3) 寿命を考慮すべき要素の可視化と特定、試験モデルによる寿命試験(設計限界)の実施
- (4) 限界性能試験によるマージン評価

<共通課題Ⅳ：電源部周りの対策(偶発故障(電子部品の故障)含む)強化>

【対策反映事項】

・電源部周り

- (1)システム全体の電源ラインにおける保護機能と故障分離機能(リミッタ、スイッチ、ヒューズ等)のレビュー
- (2)新規開発機器・設計変更機器の保護機能、故障分離機能については、妥当性を試験により検証

・初期段階の電子部品故障

部品・コンポーネントレベルでの熱サイクル・エージング条件の見直し検討

・定常段階の電子部品故障

研究課題として取り組む事項

- (1)部品・回路が受ける軌道上運用パターン(熱サイクル、スイッチングによるインラッシュ電流等)の影響評価
- (2)デレーティングの強化による部品の負荷低減の検討
- (3)運用期間やミッションに応じた冗長設計の最適化

<その他の共通課題>

(1)ソフトウェア不具合【17年度より実施中】

【対策反映事項】

- ・ソフトウェアに対する要求、ハード／ソフトウェアの機能分担を早期に明確化
- ・設計仕様を適切に検証計画へ反映(早期仕様確定、仕様変更の確実な反映)
- ・第三者による検証・妥当性確認の強化(開発者の思い込みや考慮洩れを排除)
- ・ソフトウェア開発・検証技術の関係者への提供及び教育
- ・アプリケーションソフト以外(リアルタイムOS等)の評価・試験の充実【単体評価手法の試行と確立:新規】

(2)運用不具合【19年度より実施中】

【対策反映事項】

- ・運用コンセプト及び要求事項の初期フェーズでの明確化
- ・操作ミス(ヒューマンエラー)の継続的排除(教育訓練の充実)

(3)ヒューマンエラー【電子化・IT化等推進中】

【対策反映事項】

- ・図面確認の強化(ダブルチェックの実施、設計者と製造者との図面の電子化、手順書の視覚化)
- ・教育や訓練の強化(ヒューマンエラーの継続的な排除、作業者が間違いやすい作業環境等の改善)
- ・IT化(3次元図面等)による設計過誤防止の強化

7. 衛星総点検の有効性評価

平成16年度、ALOS、ETS-VIII、ASTRO-EIIを中心に実施した衛星総点検では、ADEOS-II及びPLANET-Bの事故の反映や電源タスクフォースの反映の他、設計・解析・試験の再評価を中心に点検・反映を実施した。それ以降の衛星(OICETSを含む)についても自主点検や設計審査の中で同様の確認を行ってきた。

- ・設計検証結果の再確認(新規技術の設計妥当性、単一故障点、冗長構成、サバイバル性)
- ・異常発生時の運用性評価、I/F設計の過誤・抜け、寿命評価、試験評価(End to End試験、試験条件の制約)
- ・点検において必要とされた追加解析・追加試験・改修の実施

現在運用中の衛星について、衛星総点検採否での明確な差異は確認できないが、ミッション期間内の衛星全損や致命的な不具合は発生していない。

総点検では次の成果が得られたと考える。

- ①ETS-VIII給電部不具合については、サバイバル性が確保されており、通信実験が可能となっている
- ②通信系のEnd to End試験の効果によりバス系通信システムの系統不具合は起きていない
- ③電源系サブシステム:1次電源側(ADEOS-IIの反映対策強化による)の不具合が少ない

なお、システムエンジニアリング活動の一環としてプロジェクトマネジメント関連規定に総点検の趣旨を反映し、定常活動化が図られている。

8. まとめ

JAXAが組織横断的にプロジェクト、信頼性部門、システムエンジニアリング部門が軌道上不具合を11機の衛星に対して分析した。

その結果、衛星の規模・機能の複雑さを考慮すると、過去の衛星と比べて不具合発生率は低下傾向にあり、衛星総点検を含め信頼性・品質向上に掛かる活動が一定の成果を挙げていると考える。

本分析より、識別した要対策反映事項7件を現行・新規プロジェクトに適時反映し、更なる対象不具合の再発防止、類似不具合の未然防止を図る。

また、不具合情報の充実、設計標準の整備、知見を有する人材の活用およびメーカーとの有機的連携等のマネジメント対策を充実させ、信頼性向上を推進する。