

# 世界の人工衛星の不具合における自然環境の影響度

## Report on in-orbit spacecraft failures and the effects of natural environment on them

加藤 明

宇宙航空研究開発機構（〒 305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1）

Akira KATO

Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki, 305-8505, Japan

**Key Words:** failure spacecraft, malfunction, natural environment, radiation, solar flare, electro-static discharging (ESD), south Atlantic anomaly (SAA)

### 1. 概要

宇宙専門誌に公表された世界の人工衛星の不具合の情報のデータベースを源泉として、そこから発生時期、不具合原因、現象、発生部位に関する統計分析を行った結果の概要を紹介し、特に放射線等宇宙自然環境に起因する不具合について整理し、宇宙自然環境の研究に携わる方々を支援することを目的とする。

宇宙天気起因する不具合は、全発生数 455 件のうち 40 件（約 10 % 程度）を占める。不具合発生部位は軌道姿勢制御系のセンサ、コンピュータ、ホイール、イオンエンジン等プロセッサを有する多種の機器に及ぶが、その影響は一時的な機能停止が多く、全損に至ったケースは少ない。

海外の分析で帯電・放電の不具合の割合が多いと報告されているが、今回の分析ではそれほど多くは検出できていない。

本稿では先ず、2 項にて不具合全体について報告し、次に 3 項にて自然環境に起因する事象について説明する。

### 2. 公表された不具合の概要

ここで報告する不具合は、JAXA 安全・信頼性推進部ホームページに登録中のデータを源泉としている。これは JAXA 調査国際部が JAXA 内部に提供している不具合情報に当該推進部がサブシステム区分、原因区分、不具合の深刻度などの付加情報を与えたものである。本稿が用いた源泉データは 2015 年末までのものである。

図-1 に、公表された不具合を国別に示す。公表に関して最も透明性のある国は米国である。欧州あるいは共産圏とは大きな差がある。この意味で、この分析には国毎に源泉データに偏りがあることを覚悟しなくてはならない。

なお、軌道上不具合の原因を究明することは容易ではなく、65% 程度の原因は不明である。それでも不具合を発生したサブシステム、機器のレベルではある程度の整理ができる。十分なデータは揃っていないが、参考情報として報告する。

図-1 の背景には年間打上数を折れ線で示したが、不具合の発生数と打上げ数に大きな相関は見られない。全体としては技術の進展や習熟により、打上げ数の増加に比べれば不具合の発生は大きな増加は無い。逆に新たな

技術の適用が脆弱性を増すことも有ろう。通信量の増大等ミッションの高度化、衛星大型化に伴う電力量の増大、構造の柔軟性や熱設計の高度化、集積回路の高密度化などに伴う脆弱性の上昇等のマイナスの側面も考えられる。太陽活動の変化に応じた影響もあるであろう。この図の幾つかの特異点にはそれぞれの事情がある

- ① 1997 年のピークは幾つかの標準バスの設計に問題があったことが影響している。この時代には、高電力化、通信のハイスピード化等の新たな挑戦が始まり、設計に脆弱性が現れた時期でもある。[参考：図-2 の説明文]
- ② 2003 年のピークは自然環境の影響で打上げ後短期間で不具合を発生したものが影響している。
- ③ 2001 年以降の数年間には打上げ数は半減したが、不具合数は減少していない。集積回路の高密度化による放射線への脆弱性など技術の進展に伴うリスクが推測される。

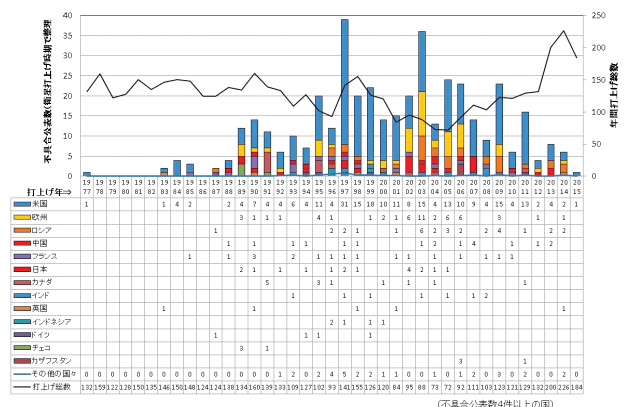


図-1 公表不具合件数の国別推移

図-2 では、不具合発生数を衛星の打上げ年度を基準にサブシステム毎に整理した。すると技術の進展と不具合の関係が分かる。1997 年のピークは故障率の高い Hughes 系、SS/L 系、Lockheed Martin 系、SpaceBus 系が集中的に打上げられた年である。例えば、Hughes 製 601HP 型は、NiH2 バッテリーや錫ディスクによるプロセッサの不具合を数回発生している。その他のバスにもそれぞれに特徴的な脆弱点がある。

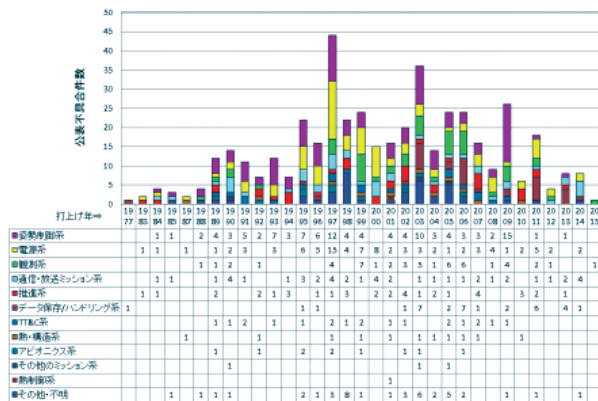


図-2 打上年基準 不具合サブシステム分布

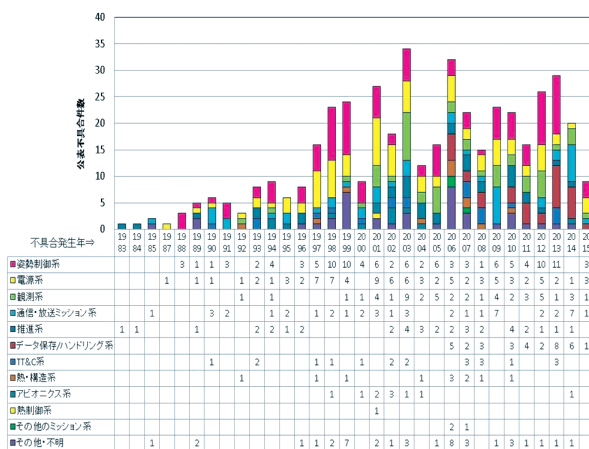


図-3 不具合発生年基準 不具合サブシステム分布

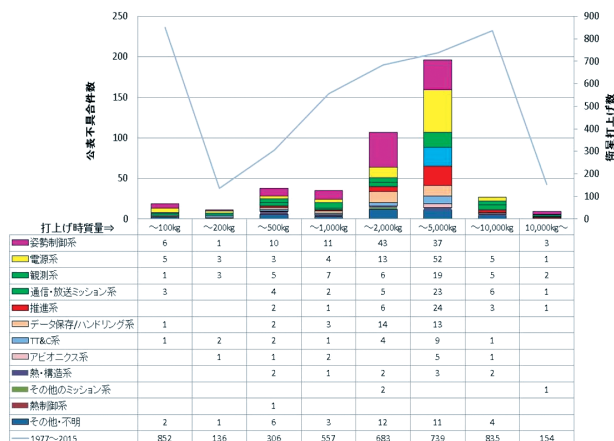


図-4 衛星の規模と不具合発生数の関係

図・3 は不具合発生数を発生時期を基準に整理したものである。こうすると自然環境との関係がやや強調されて表現されるであろう。この図で 2003 年のピークは直近で起きた太陽活動の影響によるところが大きい。

図・4は不具合発生数を衛星質量ごとに整理したものである。質量2～5tに最も多く、次いで1～2tに多く発生している。1t以下ではあまり発生していない。

大型衛星に不具合が多く発生する理由は、例えば、以下が考えられる。

①大型化によって衛星の柔軟性が増し、姿勢制御系は高精度姿勢制御、擾乱やスロッシングへの対応など高度

化され、またアポジ推進系や軌道姿勢制御用スラスタの高性能化が求められ、それらの脆弱性が増す。

②大型化を要求するシステム仕様（大容量通信、大電力容量、高電圧化）で通信、電源系に負担がかり、脆弱性が増す。

図-5 は不具合の原因区分を示すものである。本稿の主目的は不具合の発生原因の調査であるが、図-5 に示すように軌道上で発生した不具合の多くは原因不明である。この分析では、原因は不明でも、その発生個所が特定の機器に遡れるものは「機器不具合」とした。これでサブシステム毎の脆弱性が推測できる。図-6 に示すように、これが最大の要因と整理となっているが、根本的な原因は不明である。自然環境に起因する不具合はその次に多い。

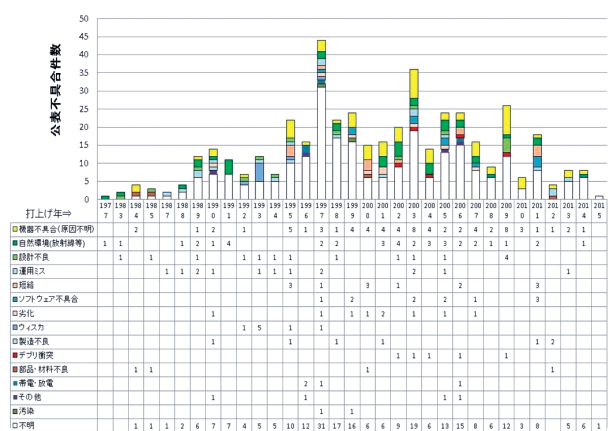


図-5 不具合原因・現象の分布

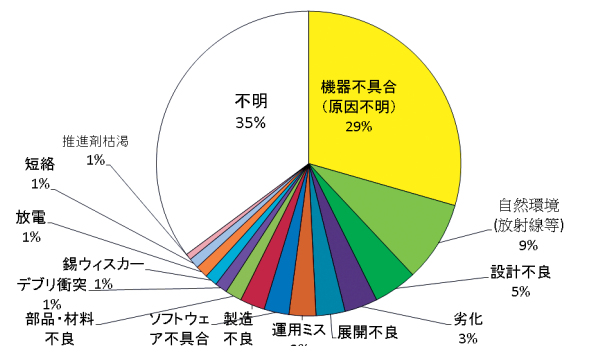


図-6 不具合原因大分類

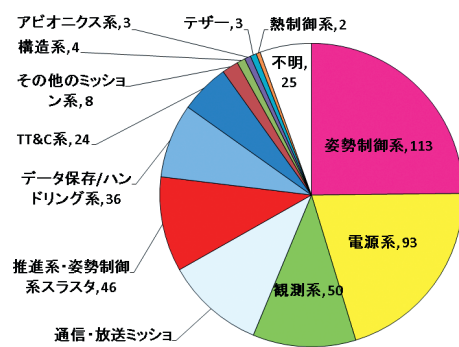


図-7 不具合のサブシステム分類

図-7にはサブシステムごとの分布を示しているが、姿勢制御系、電源系等に多く発生している。サブシステム内部の機器の内訳毎に不具合発生状況は、表-1に示す。

表-1 機器毎不具合発生数

	構成要素	不具合数
姿勢制御系	スタートラッカ	13
	リアクションホイール	13
	ジャイロ스코プ	12
	モーメンタムホイール	10
	オンボードコンピュータ	8
	姿勢制御用スラスタ	7
	ソフトウェア	6
	地球センサ	5
	衛星コントロール・プロセッサ (SCP)	3
	ケーブル	2
	太陽センサ	2
	トルクコイル	1
	姿勢安定ブーム破損	1
	電源回路	1
	その他姿勢制御系、機器、回路、不明	31
	小計	115
電源系	太陽電池パドル、パネル	44
	その他電力系機器・回路	19
	バッテリー	14
	DCDC コンバータ	3
	太陽電池パドル駆動機構	3
	ソフトウェア	1
	不明	7
	小計	89
推進系	軌道姿勢制御スラスタ	21
	液体アポジエンジン	7
	固体ロケット	4
	推進剤タンク	4
	不明	1
	小計	37
データ保存系	コンピュータ	20
	ソフトウェア	5
	記録装置	2
	探査ローバの制御系	2
	データ処理系	1
	光学データ処理系	1
	制御回路	1
	不明	2
	小計	34
TT&C系	通信系	6
	ソフトウェア	3
	テレメトリ	3
	TTC RF系	1
	アンテナ駆動モータ	1
	オンボードコンピュータ	1
	コマンド系	1
	テープレコーダ	1
	不明	3
	小計	20

通信・放射線環境	通信システム	19
	アンテナ類	15
	信号増幅器	6
	搭載ソフトウェア	1
	不明	3
	小計	45

### 3. 自然環境に起因する不具合

不具合現象のなかで、特に放射線等宇宙自然環境に起因する不具合は 455 件中 40 件であり、全体の 10 % 程度である。

図-8は、故障を引き起こす自然環境とその発生割合について示すものである。ただし、本稿では宇宙環境の変化事象（太陽フレア、太陽風など）とそれに起因する放射線環境の変化等の二次的要因、更に他の原因でも引き起こされる静電放電などの直接の不具合原因などの要素が体系的に整理されていない。例えば、本稿では環境要因として、太陽フレア、太陽風、放射線、磁気嵐などと分類しているが、太陽活動は放射線による不具合や、静電放電による不具合を発生させる。また、放射線も磁気圏内に捕捉された放射線、銀河放射線、あるいは太陽から放出された放射線の直撃を受ける場合があるが、その区別はしていない。これらの点で本稿の原因区分は未熟である。これは公表された報告内容の詳細度にもよるが、環境の専門家による精査が行われていないということからくる限界もある。これらは今後改善すべき点である。

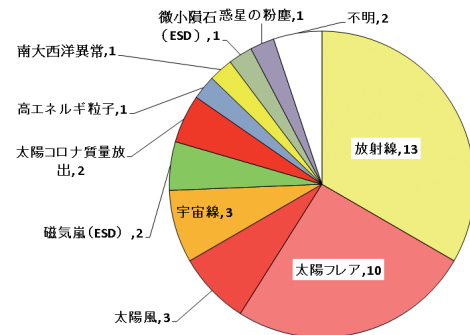


図-8 故障を引き起こす自然環境とその発生割合



図-9 軌道別の自然環境要因の影響

図-9は衛星の軌道区分（静止、低軌道、惑星軌道）毎の不具合の発生状況である。静止軌道では太陽の影響を直接受け、低軌道では捕捉された放射線源の影響を受けていると思われる。

図-10には、サブシステムごとの脆弱度を示した。姿勢制御系、電力系が多いのはシステム全体と同じであるが、データ保存／ハンドリング系、観測系などが被害を多く受けている。

その内訳は、図-11～13に示すように、姿勢制御系ではスター・トラッカ、イオンエンジン、姿勢制御系電子回路などであり、データ保存／ハンドリング系では、搭載プロセッサ、制御回路、コンピュータ、光学データ処理系が、電源系では太陽電池パネルが多く被害を受けている。

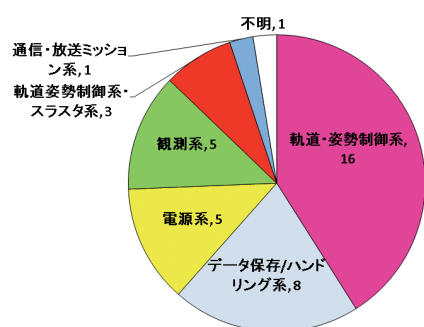


図-10 環境起因の不具合のサブシステム分類

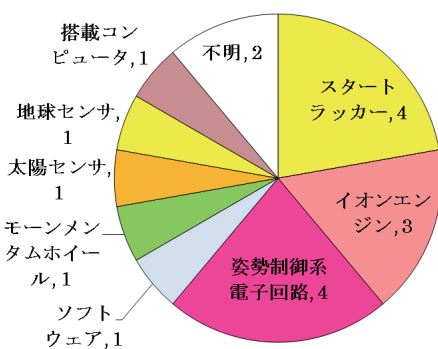


図-11 姿勢制御系不具合発生部位

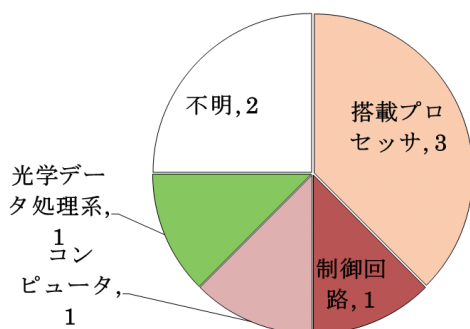


図-12 データ保存・ハンドリング系不具合発生部位

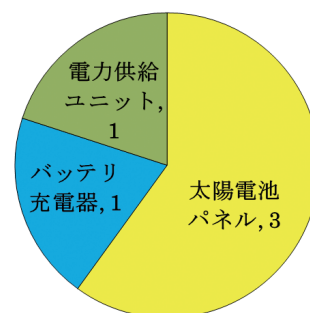


図-13 電力系不具合発生部位

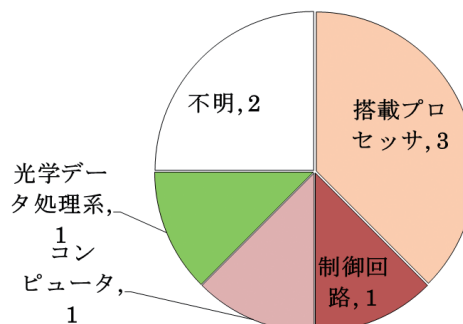


図-14 不具合の運用への影響度

図-14は不具合の影響度であるが、全機能停止に追い込まれた不具合は表-2の6件のみであり、半数以上は一時的な機能停止である。自然環境への対策は多くの場合、衛星設計に反映済みであるということであろうか。

表-2 全機能停止の不具合内容

衛星名称	サブシステム識別	不具合現象	不具合原因
Feng Yun (風雲) 1A	姿勢制御機器	姿勢制御不能	ESD又は放射線の影響によって、姿勢制御を喪失した。
Magion3	バッテリー充電器	打上げから8ヶ月後バッテリー充電器が突然故障した。	太陽活動の活発期にあたり、バッテリーの充電器がその放射線損傷を受けた結果、電力が突然失われた。
Galaxy-3R	コントロールプロセッサ	予備の衛星コントロールプロセッサ(SCP)に不具合。メインSCPも2001年に不具合を起こしており、衛星の運用停止	特定のバスに起因する短絡障害の可能性
Chandrayaan-1 (月周回衛星)	電力供給ユニット	コンピュータへの電力供給が断たれた	放射線の影響で、コンピュータシステムを制御する電力供給ユニットに不具合
Galaxy-15	不明	地上との交信が途絶・制御不能。一時的に地球指向を失い、数時間後に電力消耗によりC、L両バンドの通信機器が停止。	太陽のコロナ質量放出(CME)が原因とみられる
Corot	光学データ処理系	衛星バスは正常に動作しているものの、生きている処理系の一つのチャンネルと衛星本体のコンピュータとの通信が途絶。	南大西洋異常地域を同機が通過した際に生じた可能性

図-15は打上げ後の不具合発生までの期間を示すものであるが、ほとんどは3年以内に発生していることが分かる。不具合の発生時期は太陽活動に多く依存すると考えられがちであるが、補足放射線源によるトータル・ドーズの影響が強いのか、運用期間と大きく拘っているように観察される。

図-16には、この意味で、太陽活動と不具合発生時期を合わせて図示した。2003年の太陽フレアの頻発と過去最大規模のフレアの発生の影響は見られるものの、それ以外の太陽活動との因果関係は明確ではない。



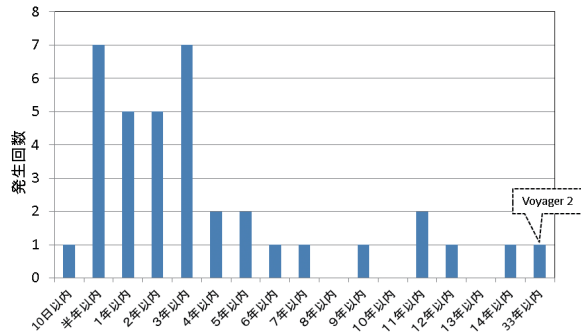


図-15 不具合発生時期（打上げ後年数）

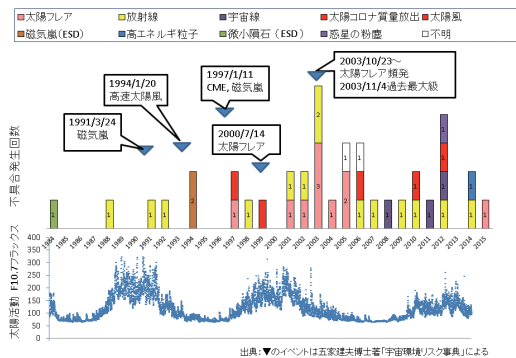


図-16 太陽活動と不具合の発生時期

#### 4. 海外データベースによる確認

3 項は JAXA 安全・信頼性推進部が保有する 2015 年までのデータであったが、これとは別に保険会社が保有する衛星不具合情報も契約により入手することができる。

この項では、Seradata 社が保険契約がカバーする範囲で入手したデータを SpaceTrack3 と呼ばれるデータベースで有償で提供しているの、そこに登録されている衛星の不具合 2474 件（1957～2015 年）から、自然現象に起因する 260 件（全体の約 10 %）を抽出・分析した結果を示す。ここで、自然現象起因とは、放射線、静電放電、太陽フレア、太陽嵐、コロナ質量放出、アルベド、プロトンをキーワードとして抽出したものである。抽出の優先順位としては、まず放射線、静電放電を含むものを最優先でカウントして、それらを含まない不具合について太陽フレア、太陽嵐、コロナ質量放出、アルベド、プロトンで抽出した。

図-17 に原因分布を示すが、放射線、静電放電が大部分を占めている。

図-18 は、図-16 に対応させて描いたものであるが、2006 年 6 月 30 日に 40 機の GLOBALSTAR（バスは SSL-400）に放射線傷害が発生した一連の不具合（この不具合は公表不具合には含まれていない）が大きく影響して、その他の傾向を覆い隠している状態であるが、2003 年のピークは無く、2000 年にピークが見えることは観察できる。この相違については別途分析する。

#### 5. まとめ

公表された不具合 455 件のうち、宇宙天気起因する不具合は 40 件（約 10 % 程度）を占める。衛星の損

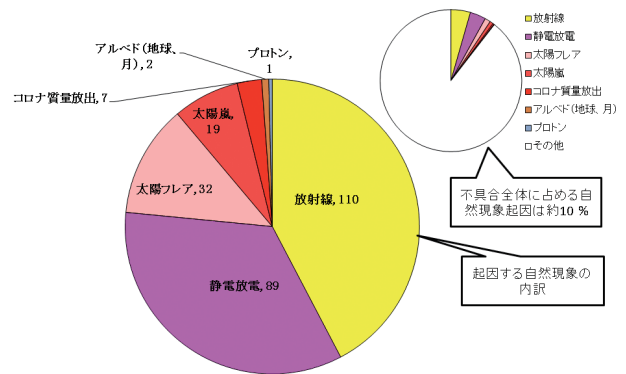


図-17 Seradata 社 SpaceTrack3 データの要因分析

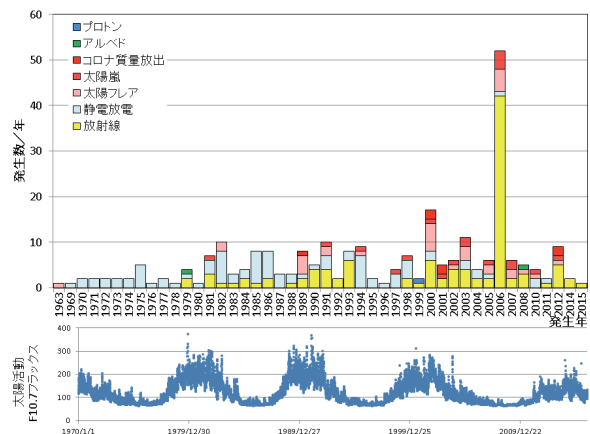


図-18 Sradata 社 SpaceTrack3 による発生時期

データベースに登録されている不具合 2474 件についても調査したが、そのうち自然現象（放射線、太陽フレア、太陽嵐、コロナ質量放出、静電放電など）に起因する不具合は 260 件で、この結果も約 10 % である。今回の分析では太陽活動などの自然現象とそれに励起される地球周辺の環境の変化（磁器圏のゆがみ、磁気圏内に補足される放射線の増大、西太平洋異常のパターンの変化など）、また、それに誘引される不具合原因（放射線被害、静電放電）等が体系的に整理されていないために十分な分析にはなっていない。このため保険会社のデータでは静電放電の割合が多いが、公表された不具合情報ではそのような傾向は得られなかったが、これは太陽活動、磁気嵐等に起因する静電放電を、どのように区分するかの問題である。

今後宇宙環境問題の専門家を交えて精査を行いたい。

自然現象による不具合は無視はできないが、260 件中 90 % には機能のロスが発生していない。全損は 4 % の 6 機のみである。これは基本的な放射線対策、静電放電対策などがとられている結果であろう。ちなみに自然環境に限らない不具合全体では機能喪失の無い不具合は 79 % で、全損は 4 % である。

#### 6. 参考文献

- 1) 五家建夫、「宇宙環境リスク辞典」、平成 18 年 11 月 1 日、丸善出版サービスセンター