

S&MA研修 「軌道利用の安全」

FY2025
安全・信頼性推進部

1. 軌道利用の安全とは？
2. スペースデブリを増やさないための対策
3. 小さなデブリや隕石の衝突から宇宙機を守る
4. 軌道上の衝突事故を防止するためのリスク管理
5. 大気圏に落下する宇宙機／ロケットの残骸から地上を守る
6. 増えすぎたスペースデブリを積極的に減らす
7. 軌道利用の安全確保に係る安全・信頼性推進部の役割
8. 活動領域の拡大に伴い必要となる宇宙環境や地球環境への配慮(惑星保護など)

1. 軌道利用の安全とは？

1. 軌道利用の安全とは？

目次

- 1.1 軌道上物体との衝突のイメージ
- 1.2 スペースデブリとは？
- 1.3 保護領域とは？
- 1.4 軌道上はどれくらい混んでいるか？
- 1.5 宇宙機打上げ機数の変遷
- 1.6 観測可能な軌道上物体数の変遷
- 1.7 軌道高度別の物体数
- 1.8 物体数を激増させた事象
- 1.9 運用中人工衛星と他の軌道上物体との衝突をどう防ぐ？
- 1.10 地上から見えないサイズのデブリへの対応
- 1.11 地球へ再突入させる際、地上の人へ被害をもたらすリスク？
- 1.12 デブリ発生を防止するための対策

1. 軌道利用の安全とは？

安全：**リスク**が許容できるレベルまで低い状態

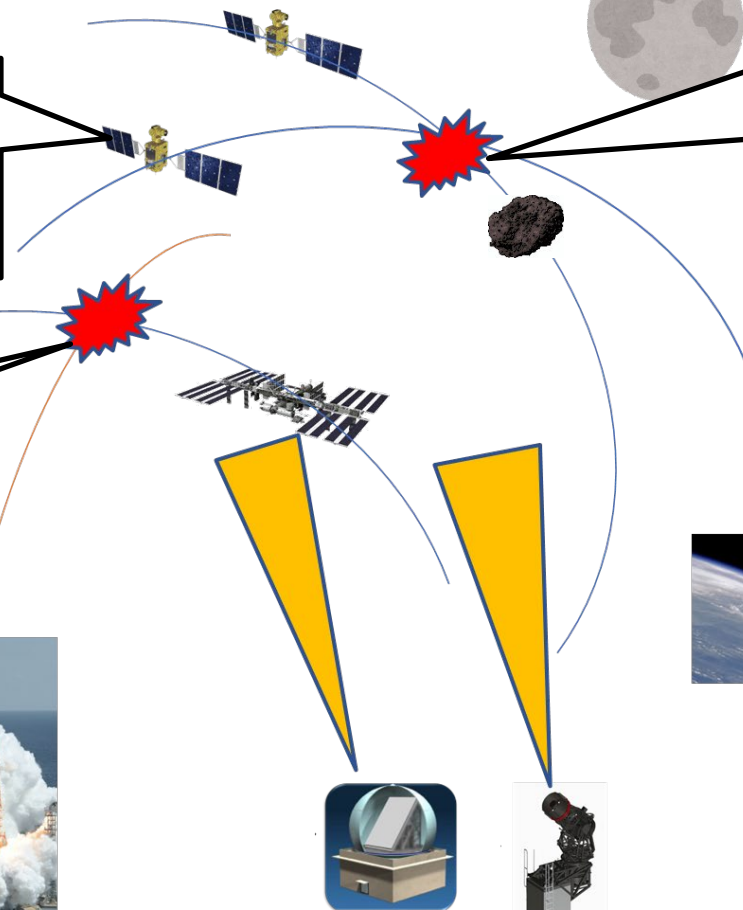


リスクには人命のみならず、インフラ・資産の喪失も含まれる。

ここでのリスクとは…？

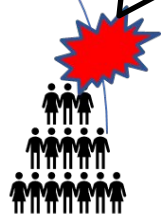
・運用中／運用終了後の人工衛星やロケット上段の**自己破砕**リスク

・ロケット打上げ時の**ISSとの衝突**リスク



・運用終了後の人工衛星やロケット上段と他の**軌道上物体との衝突**リスク
 ・運用中の人工衛星と他の**軌道上物体との衝突**リスク

・地球低軌道で運用を終了した人工衛星やロケットを**地上へ再突入**させる際、**地上の人に被害**をもたらすリスク



1. 軌道利用の安全とは？

1.1 軌道上物体との衝突のイメージ



Gravity Official Main Trailerより (Youtube)

<https://www.youtube.com/watch?v=OiTiKOy59o4>

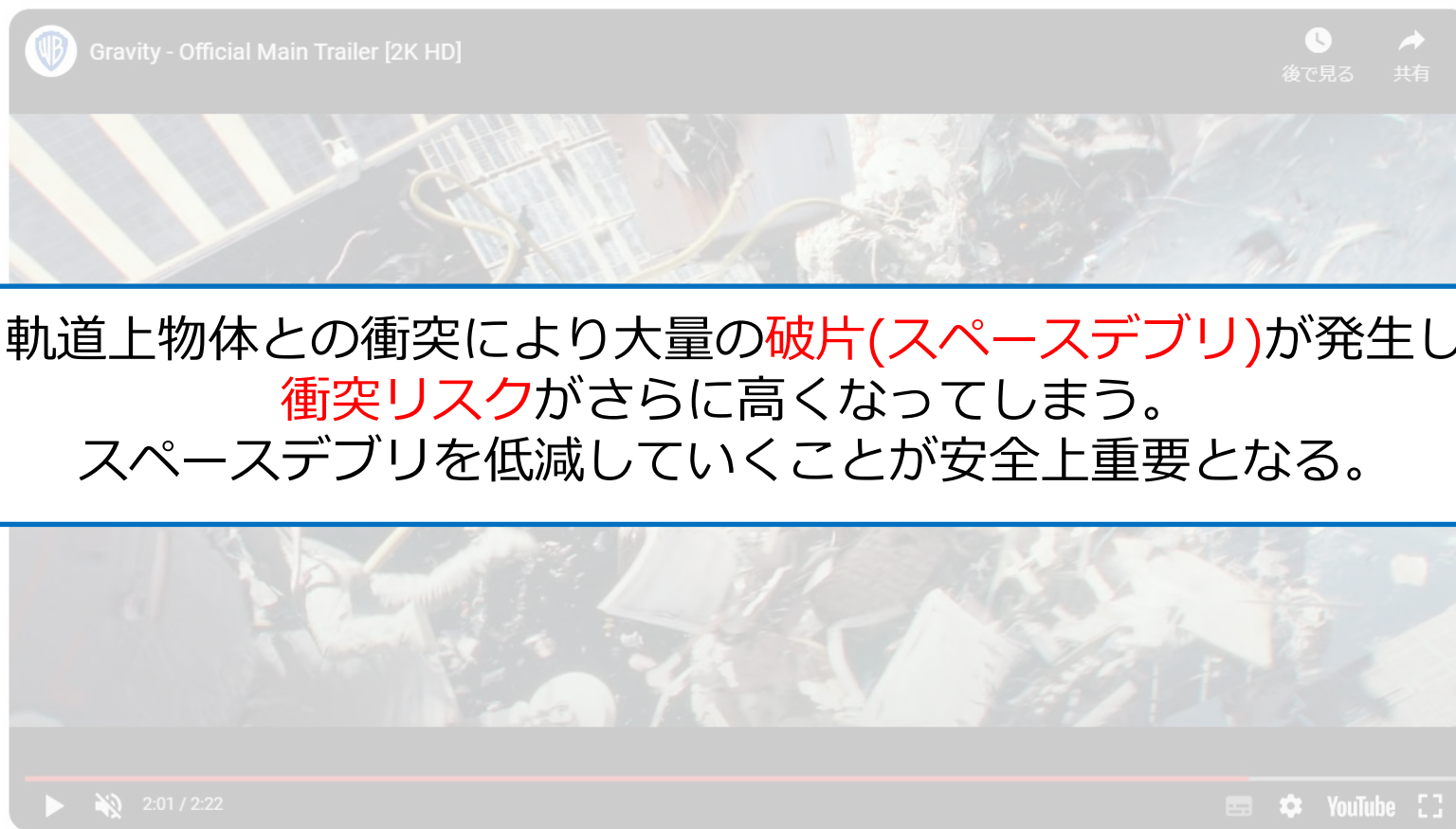
1. 軌道利用の安全とは？

1.1 軌道上物体との衝突のイメージ

Gravity - Official Main Trailer [2K HD]

YouTube

YouTube · Warner Bros. Pictures · 2013/09/04



Gravity Official Main Trailerより (Youtube)

<https://www.youtube.com/watch?v=OiTiKOy59o4>

1. 軌道利用の安全とは？

1.2 スペースデブリとは？

国連宇宙空間平和利用委員会(COPUOS)スペースデブリ低減ガイドライン、および

宇宙機関間スペースデブリ調整委員会 (IADC) スペースデブリ低減ガイドライン

- ✓ 地球を周回する軌道にある、または大気に再突入する、用をなさない人工物体とその破片や部品を指す。

国際標準化機構 (ISO) スペースデブリ低減要求

- ✓ 地球を周回する軌道にある、または大気に再突入する、もはや役に立たない人類起源の物体と、その破片や部品を指す。(再起動の可能性を有する保存モードやスタンバイモードにある宇宙機は、役に立つものと考えられる。)

注1：上記の定義では、地球を周回する軌道の外にある場合は、用をなさない人工物であっても（これらの要求管理対象とする）スペースデブリには該当しない。

注2：JAXA標準であるJMR-003：スペースデブリ発生防止標準の最新E版では、アルテミスアコードへの対応としてより広範に、地球を周回する軌道だけでなく、月周回軌道、火星周回軌道その他、安定な地球-月ラグランジュ点、安定な太陽-地球ラグランジュ点も含まれている。

1. 軌道利用の安全とは？

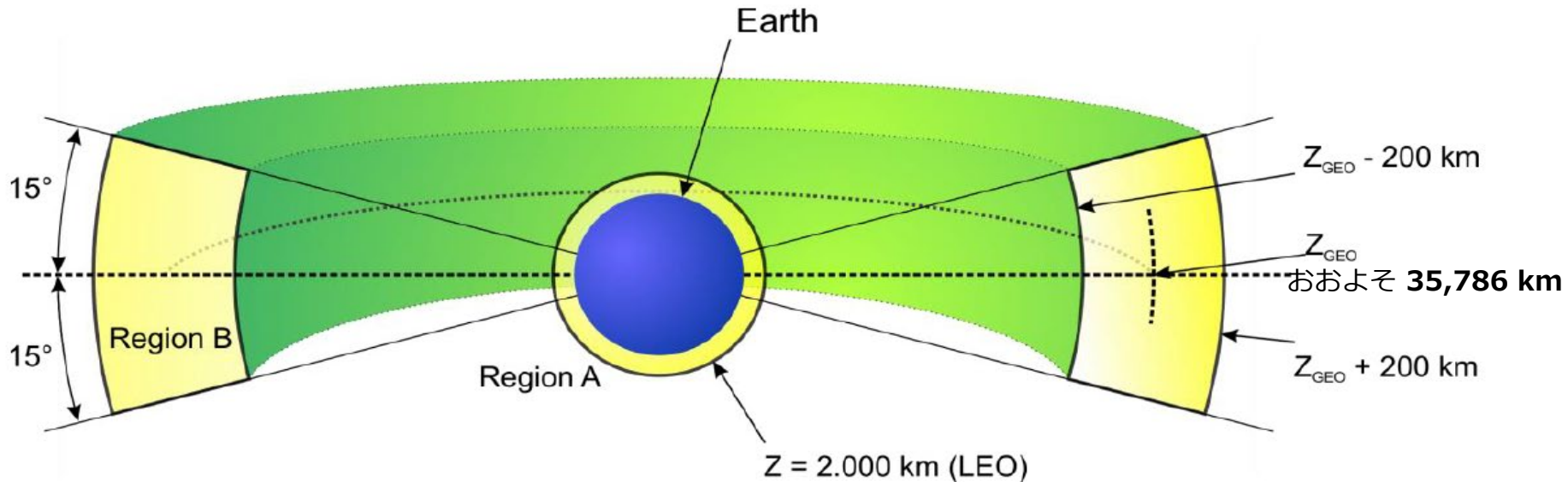
1.3 保護領域とは？

Inter-Agency Space Debris Coordination Committee



出典：IADC Space Debris Mitigation Guideline

IADC-02-01 Rev. 3



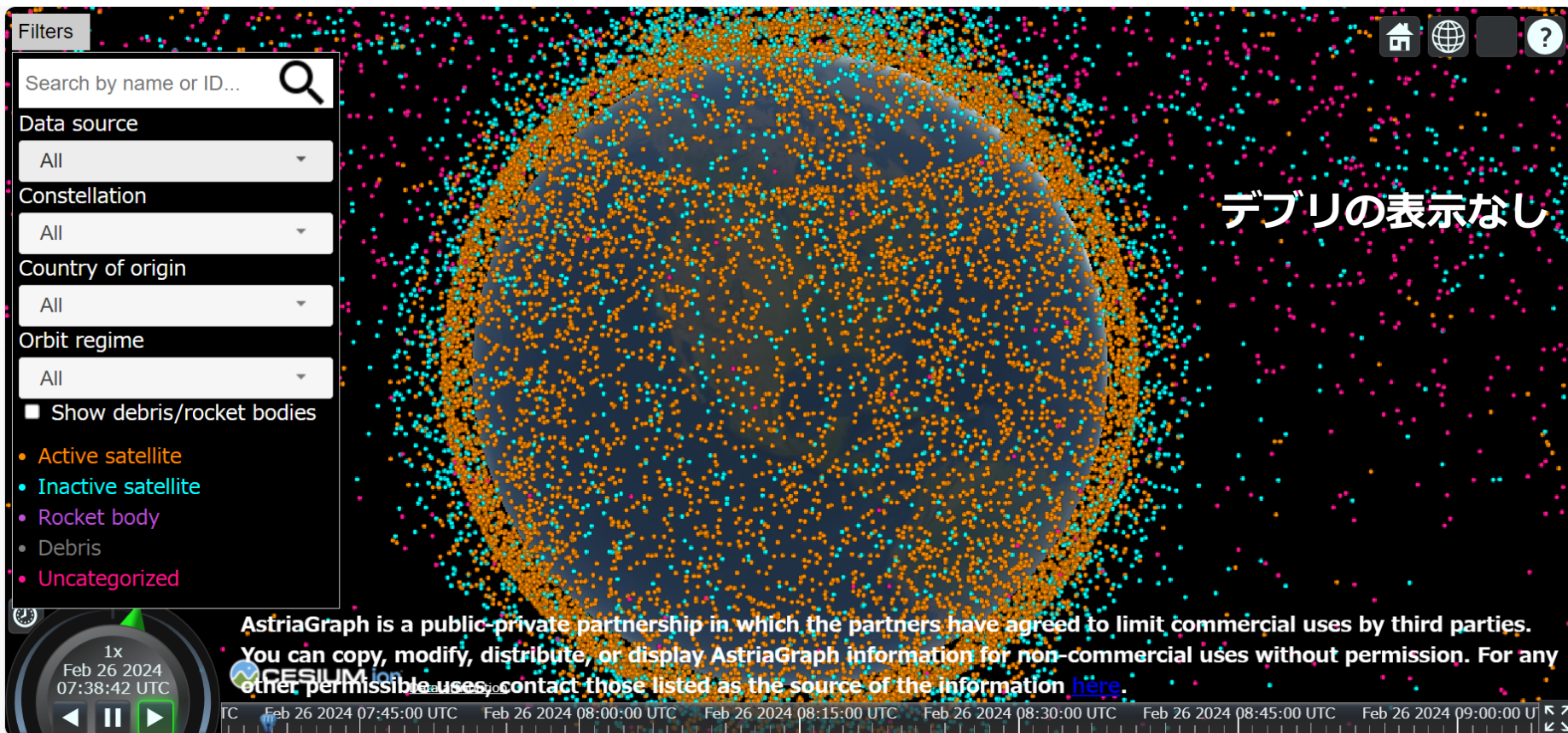
保護領域 (Protected regions)

IADCのスペースデブリ低減ガイドラインでは、上記の“Region A (低軌道)” および“Region B (静止軌道)”を保護領域と定め、運用終了後の物体が当該領域に長期間留まる、あるいは干渉することを制限するよう求めている。特に“Region A”に対しては具体的に、運用終了後25年以内の軌道離脱(再突入)が求められている。なお、“Region B”については運用終了後、直ちに離脱することが求められている。

1. 軌道利用の安全とは？

1.4 軌道上はどれくらい混んでいるか？

テキサス大学は異なるソースの軌道情報を同時にプロットでき、軌道上の物体数を視覚的に把握できるAstriaGraphを提供している。



<http://astria.tacc.utexas.edu/AstriaGraph/>

1. 軌道利用の安全とは？

1.4 軌道上はどれくらい混んでいるか？

テキサス大学は異なるソースの軌道情報を同時にプロットでき、軌道上の物体数を視覚的に把握できるAstriaGraphを提供している。

Filters

Search by name or ID...

Data source: All

Constellation: All

Country of origin: All

Orbit regime: All

Show debris/rocket bodies

- Active satellite
- Inactive satellite
- Rocket body
- Debris
- Uncategorized

デブリの表示あり

AstriaGraph is a public-private partnership in which the partners have agreed to limit commercial uses by third parties. You can copy, modify, distribute, or display AstriaGraph information for non-commercial uses without permission. For any other permissible uses, contact those listed as the source of the information [here](#).

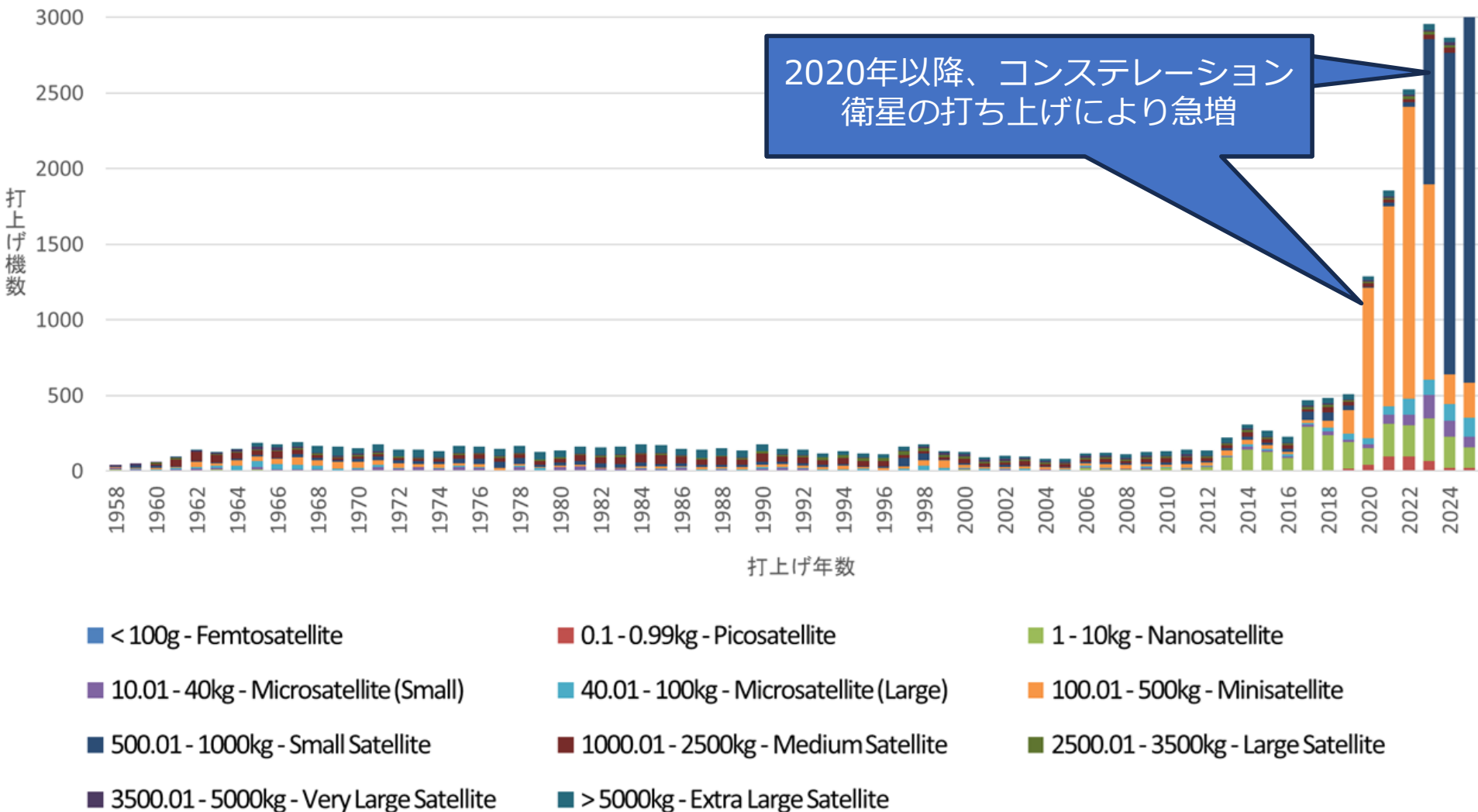
Feb 26 2024 08:02:33 UTC

Feb 26 2024 07:45:00 UTC Feb 26 2024 08:00:00 UTC Feb 26 2024 08:15:00 UTC Feb 26 2024 08:30:00 UTC Feb 26 2024 08:45:00 UTC Feb 26 2024 09:00:00 UTC

<http://astria.tacc.utexas.edu/AstriaGraph/>

1. 軌道利用の安全とは？

1.5 宇宙機打上げ機数の変遷

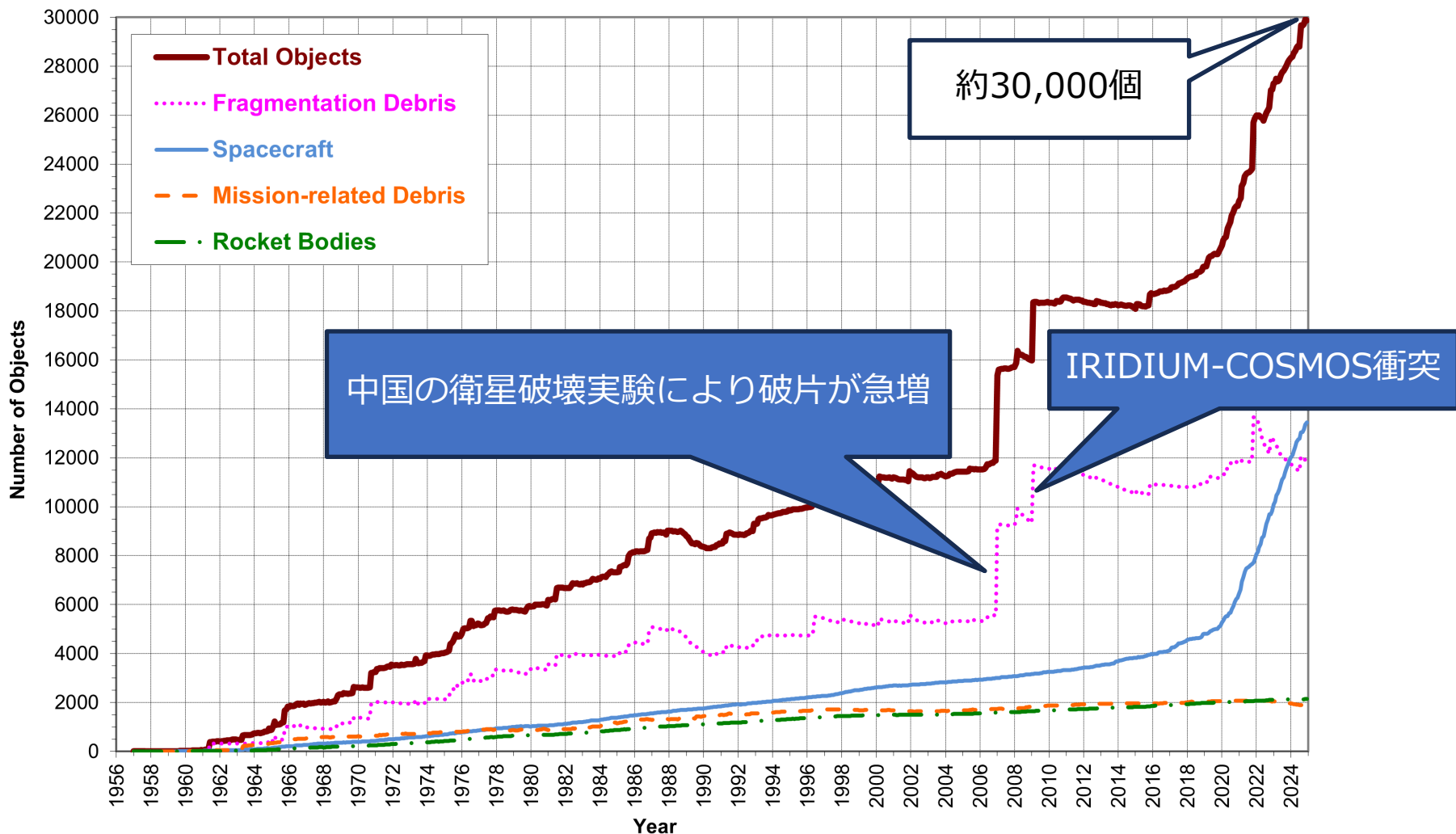


Seradata, 2025.11.11

1. 軌道利用の安全とは？

1.6 観測可能な軌道上物体数の変遷

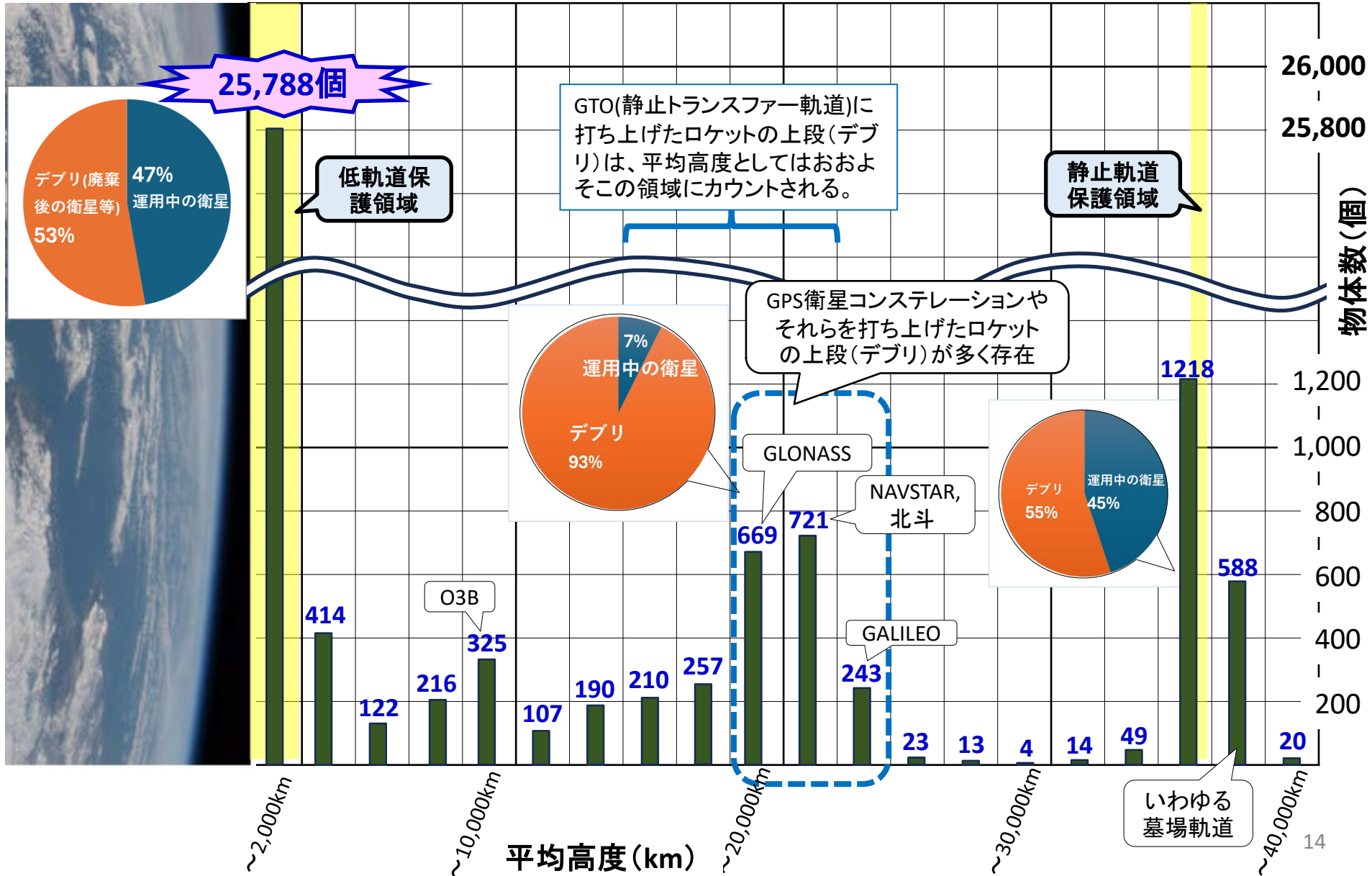
Monthly Number of Objects in Earth Orbit by Object Type



1. 軌道利用の安全とは？

1.7 軌道高度別の物体数

2025/11/11 時点のSpace-Track, Seradata公開情報を基に集計

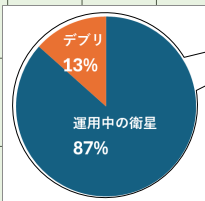


1. 軌道利用の安全とは？

1.7 軌道高度別の物体数(LEO)

2025/11/11 時点のSpace-Track, Seradata公開情報を基に集計

うち、**4,399**個がStarlink衛星



4698

5938

大気抵抗などにより、25年以内にLEOから除去される(地球に落下する)おおよそのボーダーライン

デブリが占める割合は約 94%

- 中国衛星破壊実験(2007年)破片: 551個
- IRIDIUM-COSMOS衝突(2009年)破片: 316個
- 長征6A自己破砕(2024年8月): 190個

デブリが占める割合は約 96%

- 中国衛星破壊実験(2007年)破片: 1,069個
- NOAA16衛星自己破砕(2015年)破片: 145個
- 長征6A自己破砕(2024年8月): 486個

デブリが占める割合は約 78%

- 中国衛星破壊実験(2007年)破片: 167個
- IRIDIUM-COSMOS衝突(2009年)破片: 209個
(時間と共に破片の高度が徐々に低下し、現在の高度帯に至ったものと理解される。)

2799

1660

1087

1861



OneWeb

902

900

737

321

960

500

208

89

46

44

LEO

~200km

~400km

~600km

~800km

~1,000km

~1,200km

~1,400km

~1,600km

~1,800km

~2,000km

平均高度 (km)

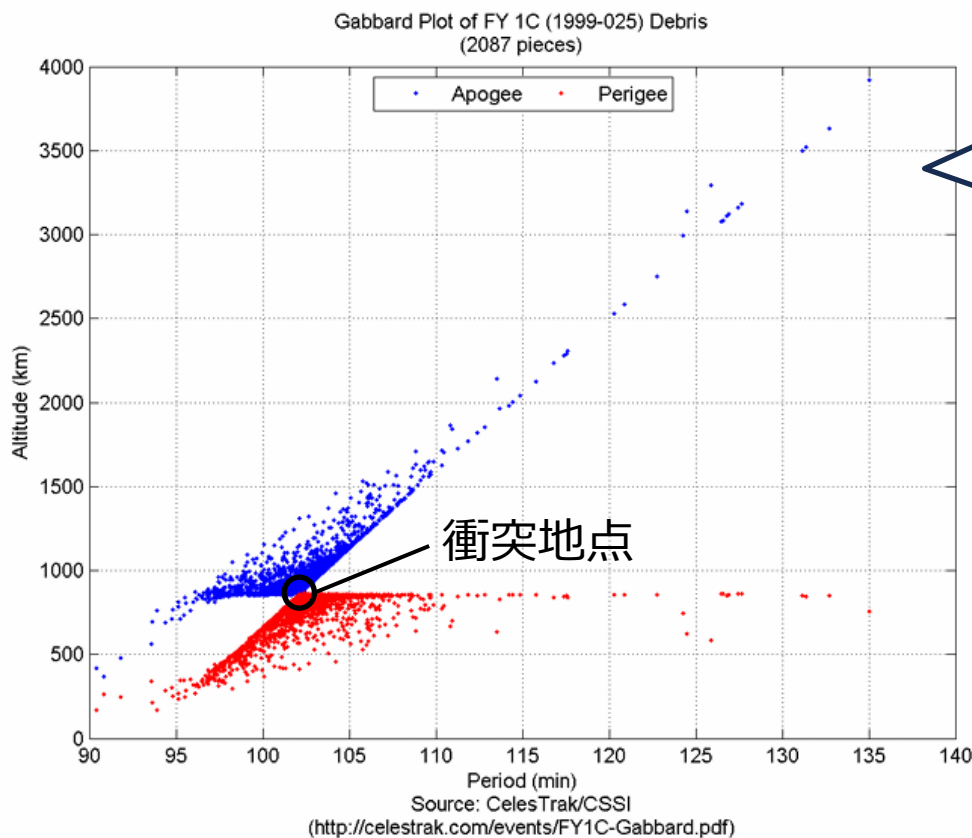
物体数(個)

1. 軌道利用の安全とは？

1.8 物体数を激増させた事象

中国衛星破壊実験（2007年）

太陽同期軌道（高度約800km）に投入された880kgの中国の気象衛星「Fengyun-1C」をターゲットとした**ミサイルによる衛星破壊実験**が2007年1月11日に実施された。



Gabbard plot
物体の軌道を近地点と遠地点の上下1セットで示したものの。

破片の軌道のうち、地球中心から最も遠い遠地点は4,000kmほどに達しており、破壊実験の影響の大きさを印象付けた。

米国のSSN(Space Surveillance Network)によると、5cm以上の物体が2200以上トラックされたとのこと。
(NASA ODQN v11i3)

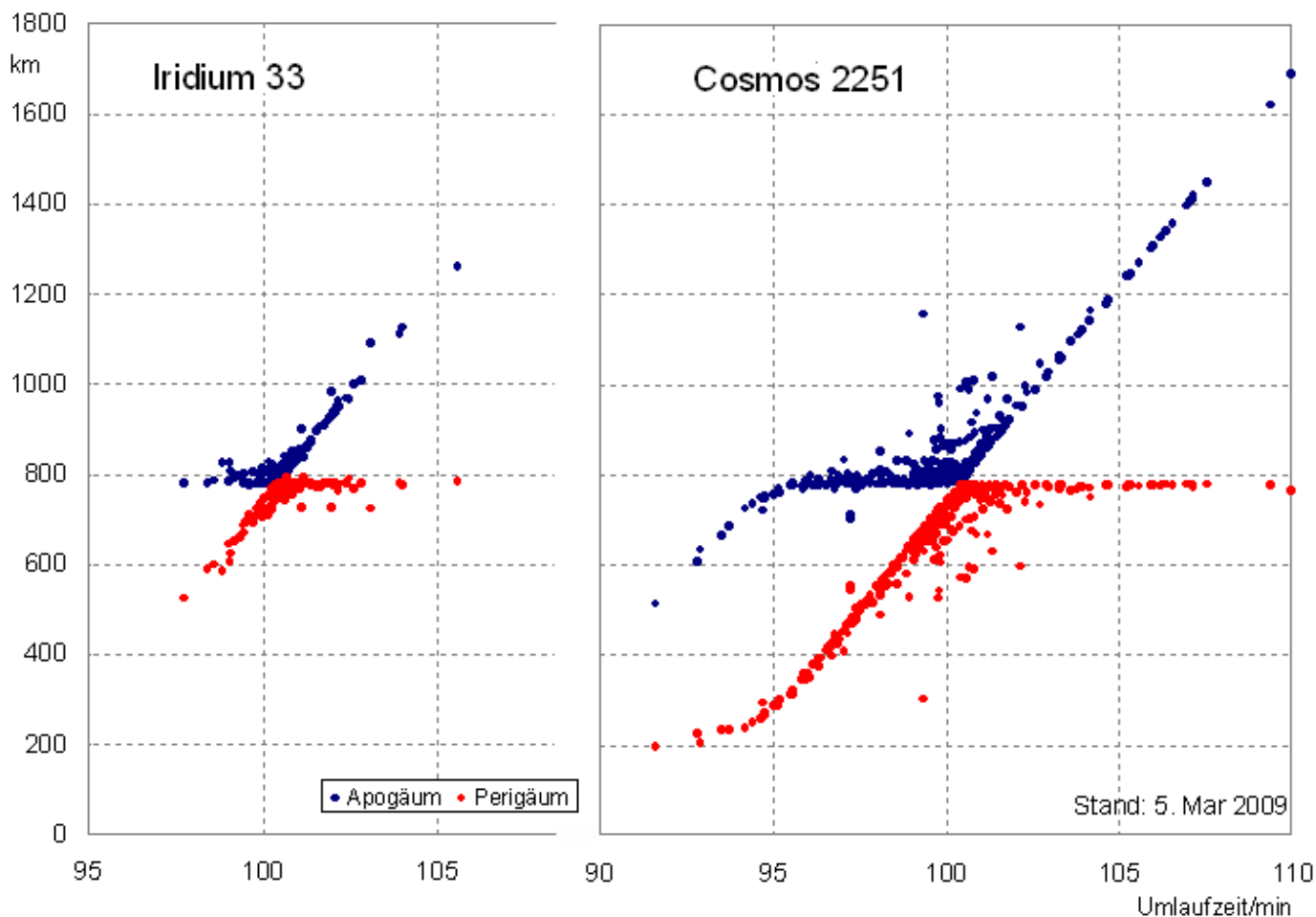
Analysis of the 2007 Chinese ASAT Test and the Impact of its Debris on the Space Environment, T.S. Kelso

1. 軌道利用の安全とは？

1.8 物体数を激増させた事象

IRIDIUM-COSMOS衝突（2009年）

2009年2月10日、運用中のIridium 33衛星と運用を終えていたCosmos 2251衛星が、高度790kmの地点にて相対速度11.6km/secで衝突した。衝突は破局的で、その後2衛星合計で2000個以上の破片がカタログ化された。



1. 軌道利用の安全とは？

1.8 物体数を激増させた事象

下表はNASA ODQNにて2023年に発表されている、歴史的な破砕イベントのワースト10。これまでに紹介した衛星破壊実験(ASATテスト)や衝突、自己破砕では大量の破片が発生することが分かる。

The Top-10 Worst Historical Breakup Events Based on Catalog Data as of 31 January 2023

Rank	International Designator	Common Name	Year of Breakup	Apogee Altitude (km)	Perigee Altitude (km)	Debris Cataloged	Debris in Orbit	Assessed Cause of Breakup
1	1999-025A	Fengyun-1C	2007	865	845	3532	2793	Anti-satellite (ASAT) test
2	1982-092A	Cosmos 1408	2021	490	465	1785	364	ASAT test
3	1993-036A	Cosmos 2251	2009	800	775	1715	1021	Accidental collision (with Iridium 33)
4	1994-029B	STEP II upper stage	1996	820	585	754	76	Accidental explosion
5	1997-051C	Iridium 33	2009	780	775	657	300	Accidental collision (with Cosmos 2251)
6	2022-151B	CZ-6A upper stage	2022	847	813	533	529	Accidental explosion
7	2006-026A	Cosmos 2421	2008	420	400	509	0	Unknown
8	1986-019C	SPOT 1 upper stage	1986	835	805	498	30	Accidental explosion
9	1981-053A	Cosmos 1275	1981	1015	960	479	418	Accidental explosion
10	1965-082DM	Titan 3C-4 transtage	1965	790	710	473	32	Accidental explosion

中国衛星
破壊実験

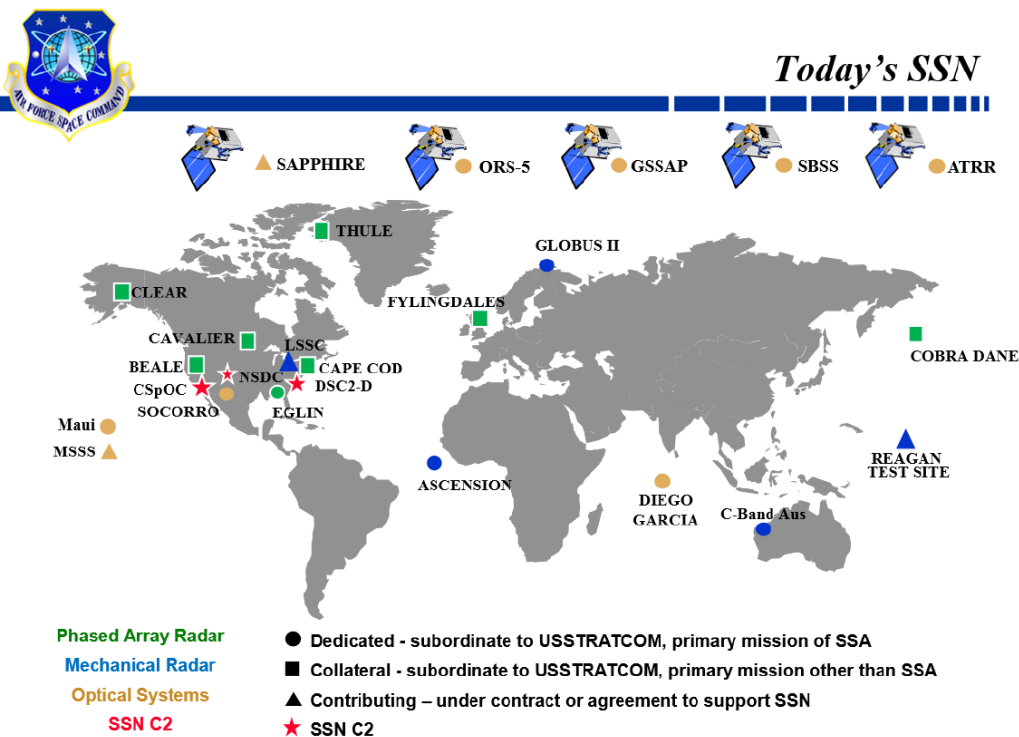
IRIDIUM-
COSMOS
衝突

1. 軌道利用の安全とは？

1.9 運用中人工衛星と他の軌道上物体との衝突をどう防ぐ？

宇宙状況把握(SSA : Space Situational Awareness) (1/2)

人工衛星を運用する地球周回軌道を安定的に利用するためには、運用中の他の人工衛星やスペースデブリ等の軌道上物体の軌道を把握して管理することが重要となる。



米国では軌道環境の把握は防衛省のSSN(Space Surveillance Network)によって行われている。SSNによって監視された物体の情報は、CSpOC(Combined Space Operations Center)によってカタログ化され、その一部はSpace-track.orgを通じて、日本からでも無料で確認することができる。

SSNセンサーは地球低軌道において10cm程度以上の物体をカタログ化している。

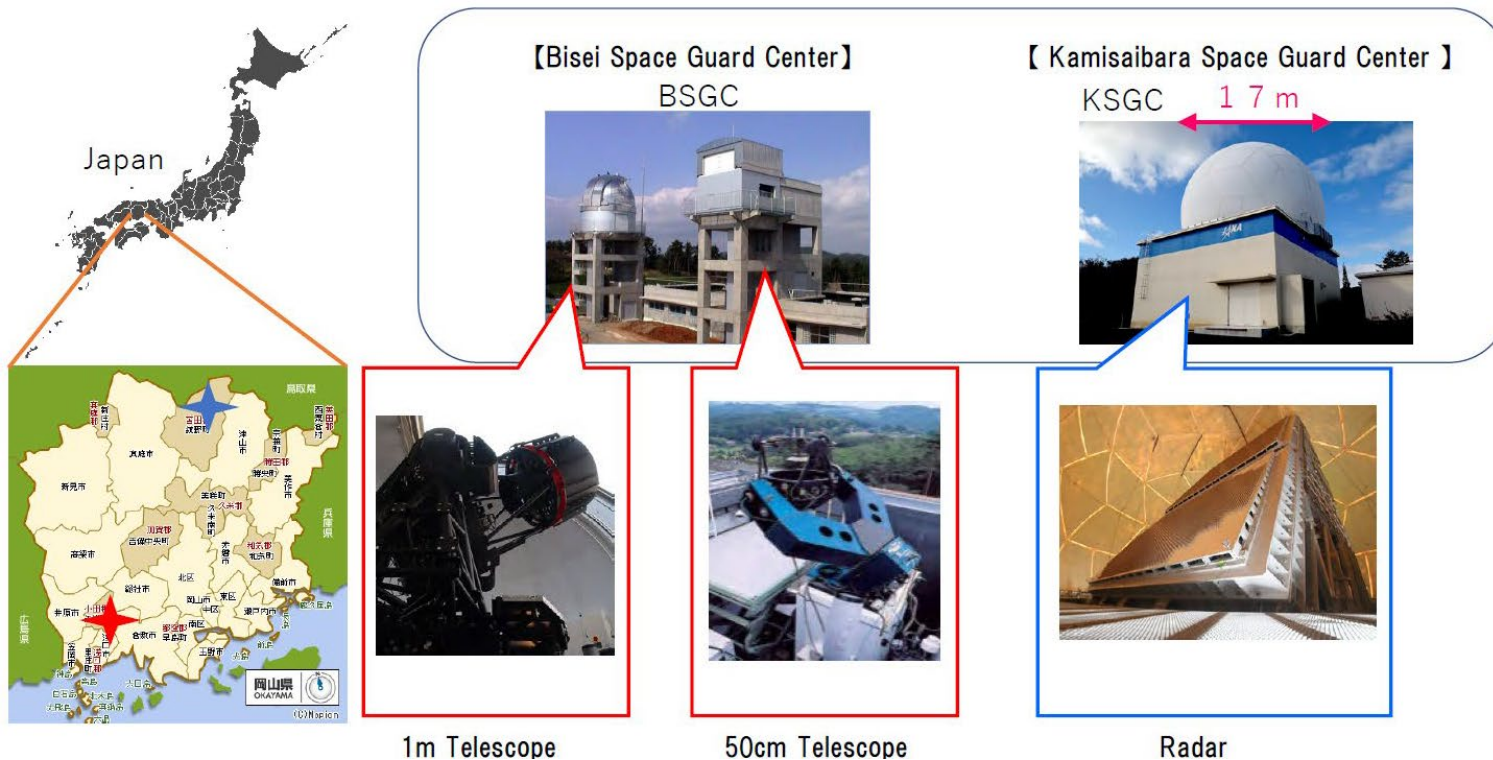
左の図は2019年時点でのSSNの監視網を示している。

1. 軌道利用の安全とは？

1.9 運用中人工衛星と他の軌道上物体との衝突をどう防ぐ？

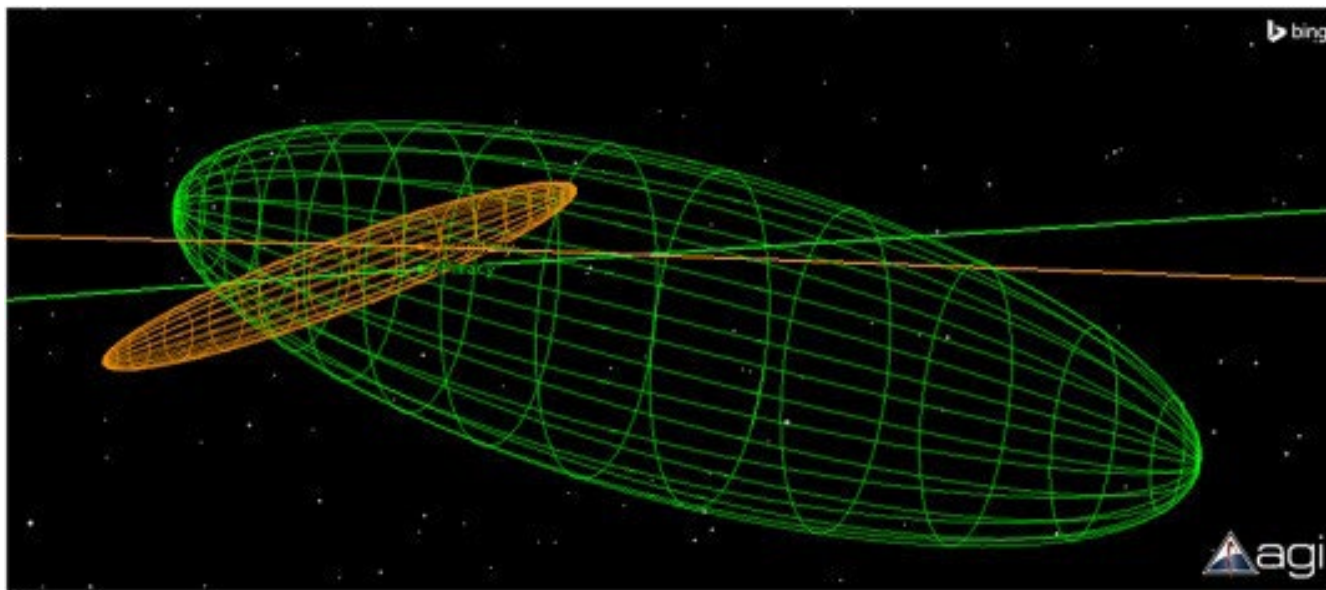
宇宙状況把握(SSA : Space Situational Awareness) (2/2)

JAXAのSSAシステムは、岡山県美星スペースガードセンター(光学)と、岡山県上齋原スペースガードセンター(レーダ)がある。光学望遠鏡は静止軌道の1m程度以上の物体を観測可能で、レーダは高度650kmにおいて10cm程度以上の物体を観測可能である。



衝突回避

低軌道の場合、自分（プライマリ物体）と接近する物体（セカンダリ物体）のそれぞれの位置の不確かさを楕円体で与え、この楕円体同士の衝突を確率的に評価している。

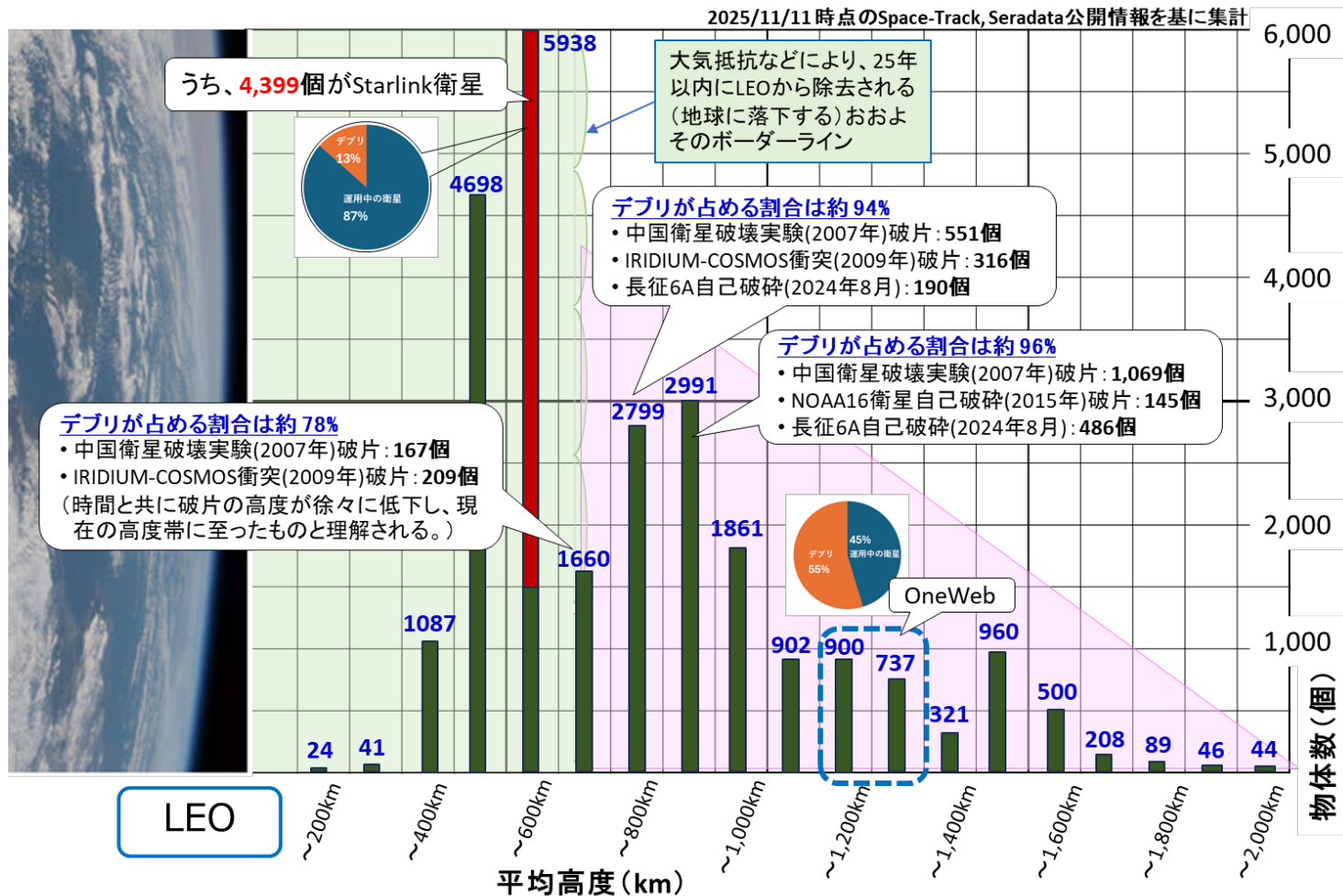


Probability of Collision:
Valuation, variability,
visualization, and validity,
Salvatore Alfano, et. al,

JAXAの場合、衝突確率と最接近時刻(TCA : Time to Closest Approach)までの時間の両方を加味して、**リスクの高い状態**になった場合には**衝突回避を衛星運用者に推奨または要求**している。

1. 軌道利用の安全とは？

1.10 地上から見えないサイズのデブリへの対応

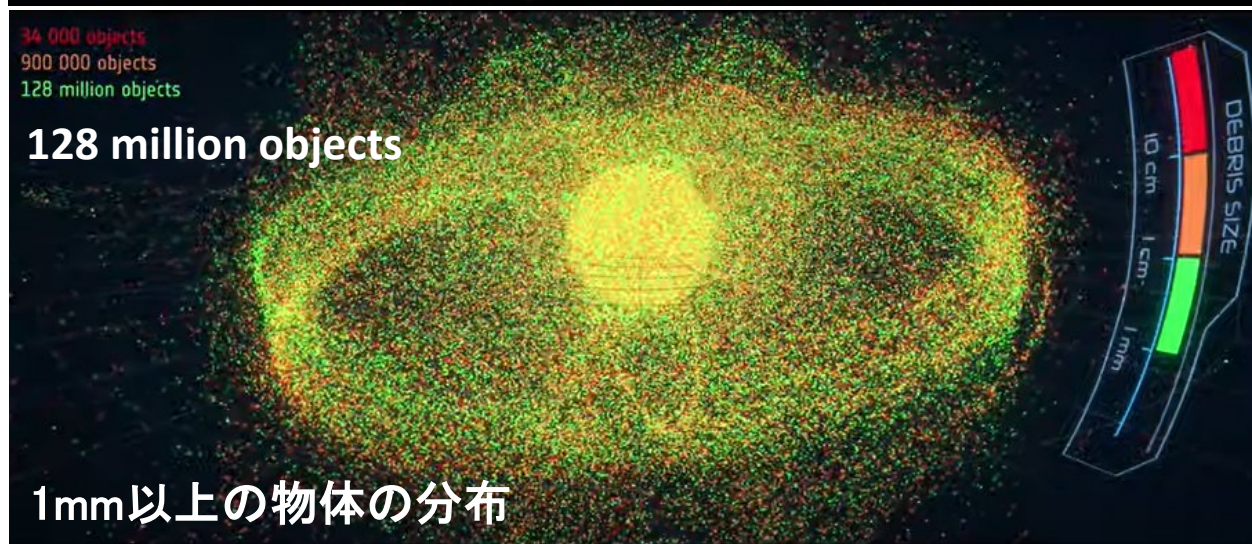


ここでの物体とは、地上からの観測が可能な**直径10cm程度(LEO)**以上のカタログ化された物体を指す

1. 軌道利用の安全とは？

1.10 地上から見えないサイズのデブリへの対応

地上から見えないサイズのデブリの分布



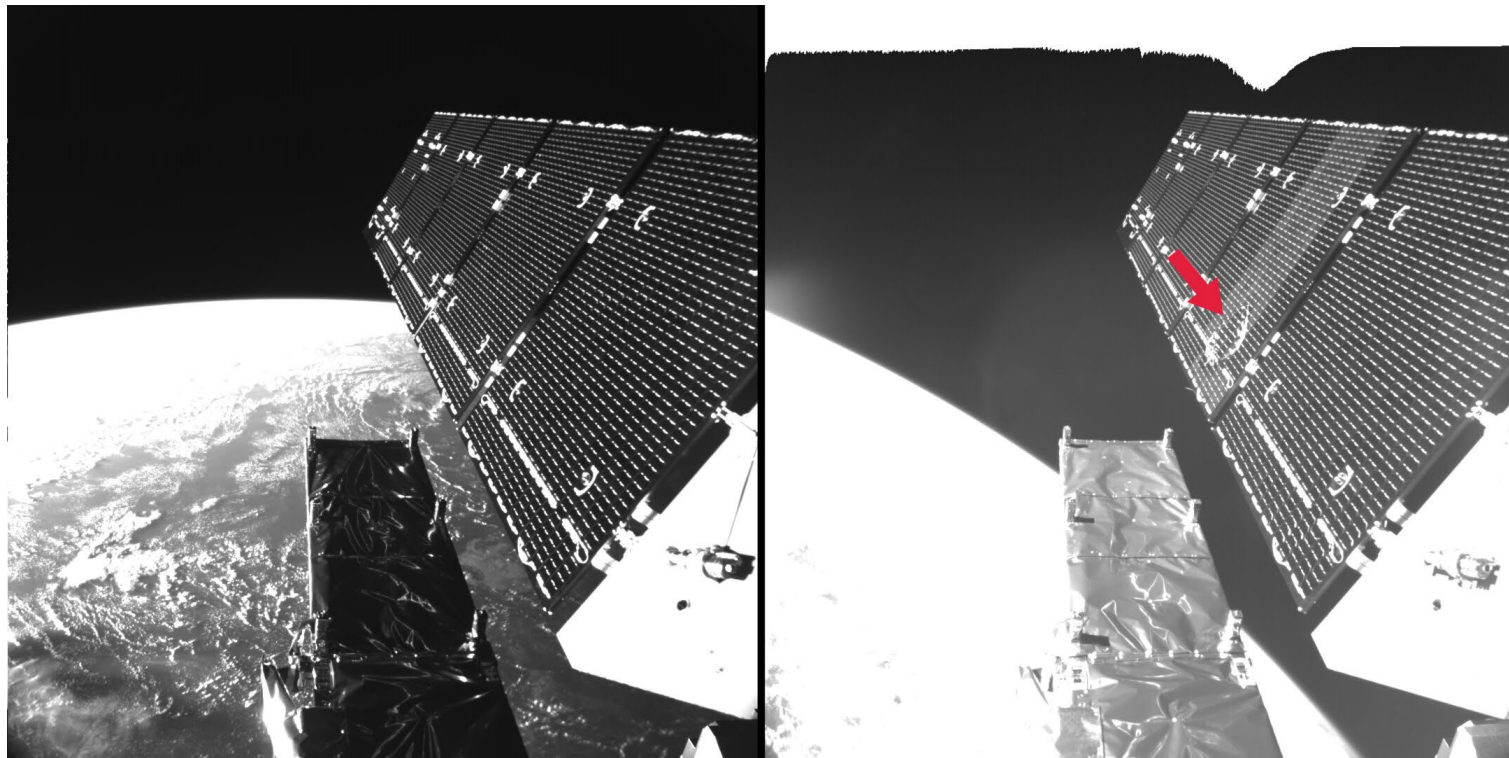
1. 軌道利用の安全とは？

1.10 地上から見えないサイズのデブリへの対応

地上から見えないサイズのデブリでも人工衛星の機能を喪失させる可能性がある。

2016年にESA Sentinel-1A衛星へのデブリ衝突が観測され話題となった。

直径数ミリのデブリが太陽電池に衝突した結果、40cm程度の範囲に影響が及び、太陽電池の発生電力が5%ほど低下したことが報告されている。



ESA Sentinel-1A衛星へのデブリの衝突

1. 軌道利用の安全とは？

1.10 地上から見えないサイズのデブリへの対応

地上から見えないサイズのデブリでも人工衛星の機能を喪失させる可能性がある。

2016年にESA Sentinel-1A衛星へのデブリ衝突が観測され話題となった。

直径数ミリのデブリが太陽電池に衝突した結果、40cm程度の範囲に影響が及び、太陽電池の発生電力が5%ほど低下したことが報告されている。

細かいデブリは、より大型のデブリ同士の衝突で主に生成されると考えられる。

「見える」デブリを減らすことは「見えない」デブリのリスクを低減する上でも重要！



ESA Sentinel-1A衛星へのデブリの衝突

1. 軌道利用の安全とは？

1.11 地球へ再突入させる際、地上の人へ被害をもたらすリスク？

はやぶさの再突入 (動画の10:54~)

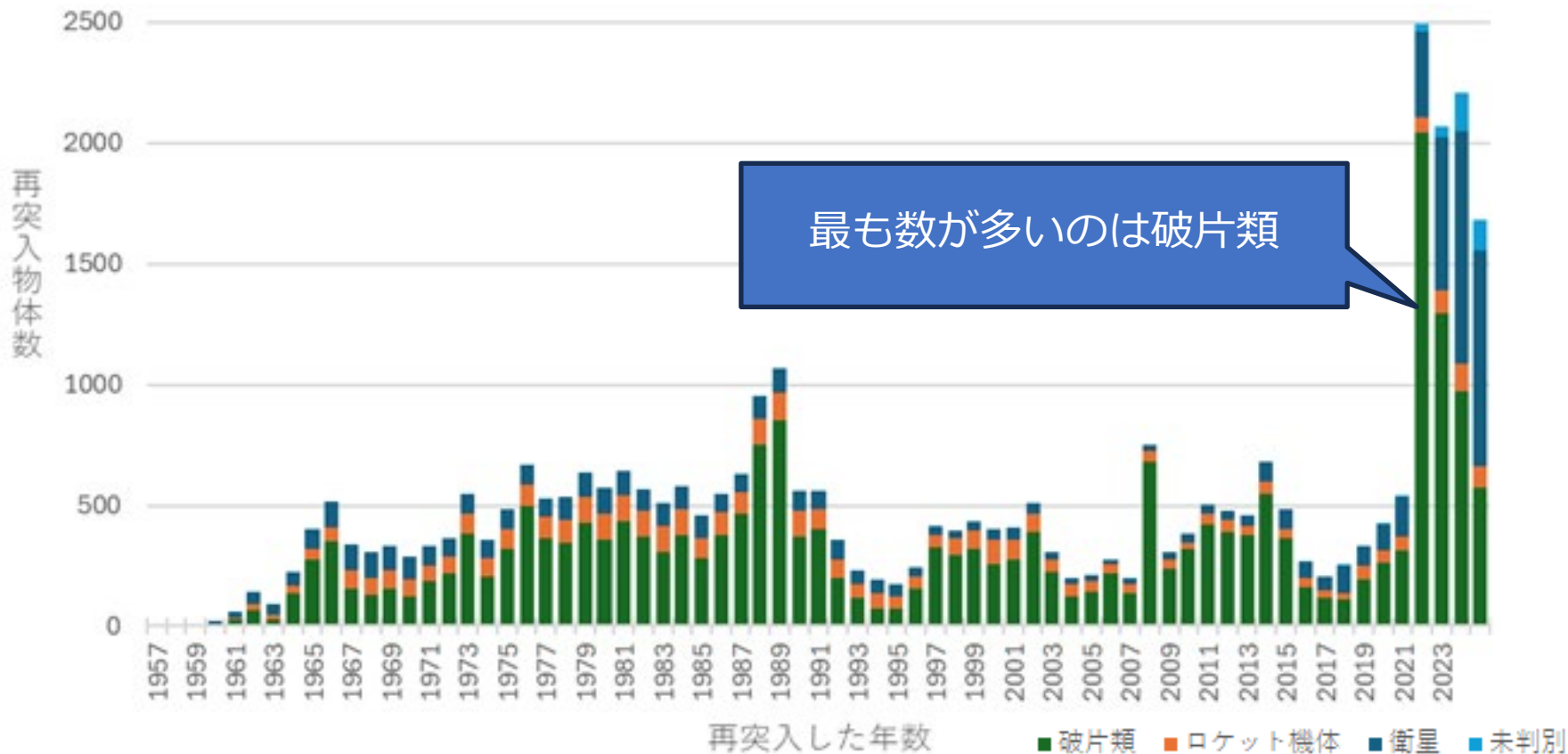


<https://www.youtube.com/watch?v=O0mUyfjYQng>

1. 軌道利用の安全とは？

1.11 地球へ再突入させる際、地上の人へ被害をもたらすリスク？

地球へ再突入してくる物体数の変遷



最も数が多いのは破片類

Space-Track (<https://www.space-track.org>), 2025.11.11

直近は、衛星破壊実験で発生した破片の大量の再突入が見られたが、今後は退役したコンステレーション衛星の再突入等で頻度は増加する予測が立てられている。²⁷

1. 軌道利用の安全とは？

1.11 地球へ再突入させる際、地上の人へ被害をもたらすリスク？

地上まで到達してしまう再突入物体

ロケットや衛星が地球へ再突入する際、大気による空力加熱によって大部分のパーツは燃え尽きる。しかしながら、チタン等の高融点の金属は再突入を経ても残存し、地上で度々見つかっている。地上に落下すれば、全く無関係な人に被害が及ぶ可能性がある。

1997年 デルタIIロケット燃料タンクの破片



<https://aerospace.org/article/satellite-reentry-manipulating-plunge>

2021年3月 米国ワシントン近傍で見つかった Falcon 9上段の推薬タンク



<https://www.kuow.org/stories/rocket-fireball-over-northwest-in-late-march-provides-lasting-value-to-space-junk-sleuths>

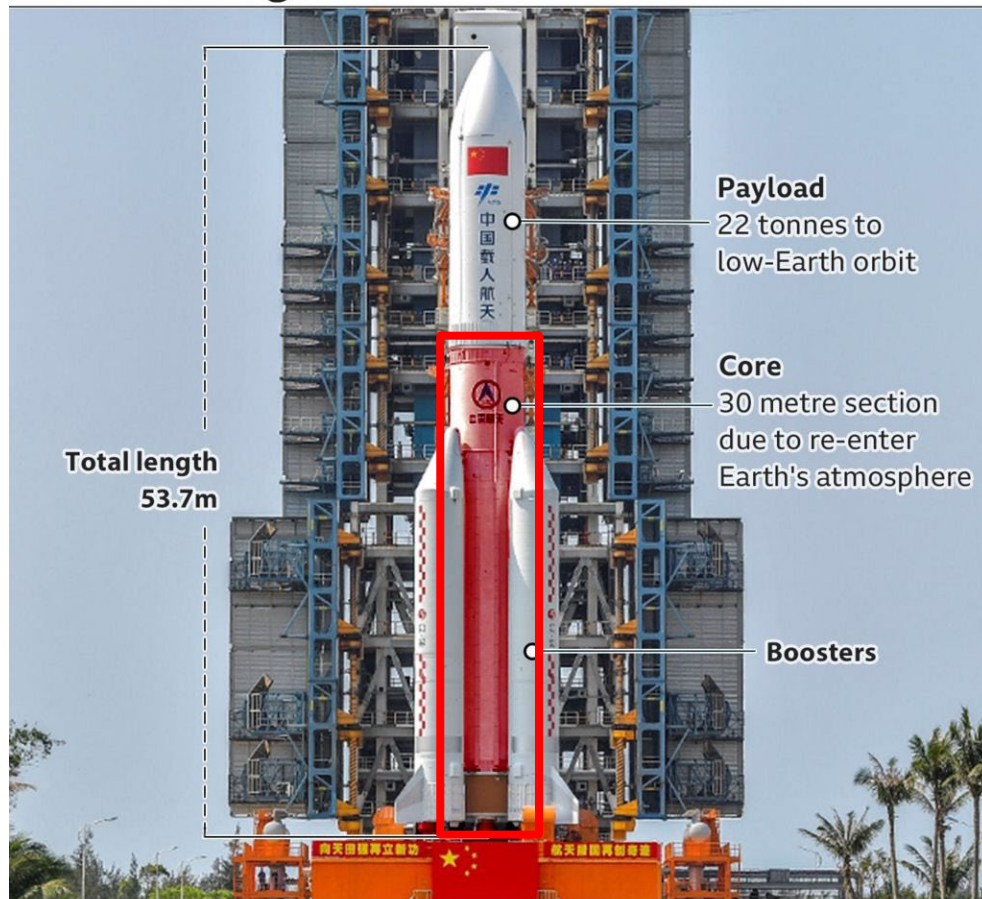
1. 軌道利用の安全とは？

1.11 地球へ再突入させる際、地上の人へ被害をもたらすリスク？

長征5Bロケットの非制御落下

2021年5月に中国の長征5Bロケットが非制御落下するというニュースが世界中で報じられた。

China's Long March 5b rocket



通常、ロケットの第1段とブースターは軌道に到達するように設計されておらず、これらは安全なエリア、通常は無人海域に落ちるように計画されているが、**長征5Bの場合、ロケットの第1段コア(赤枠)が軌道に到達した**。第1段コアは軌道から離脱する機能を有しておらず、**地球上のどこに落下してもおかしくない状況であった**。一般的な経験則では、再突入物体の質量の20~40%が地面に到達するが、正確な数は物体の設計(使用される材質)によって異なる。**長征5Bの場合、約5~10トンの地面への到達が予想**されていた。

結果的に長征5Bは北緯2.65度、東経72.47度のインド洋に落下した。

1. 軌道利用の安全とは？

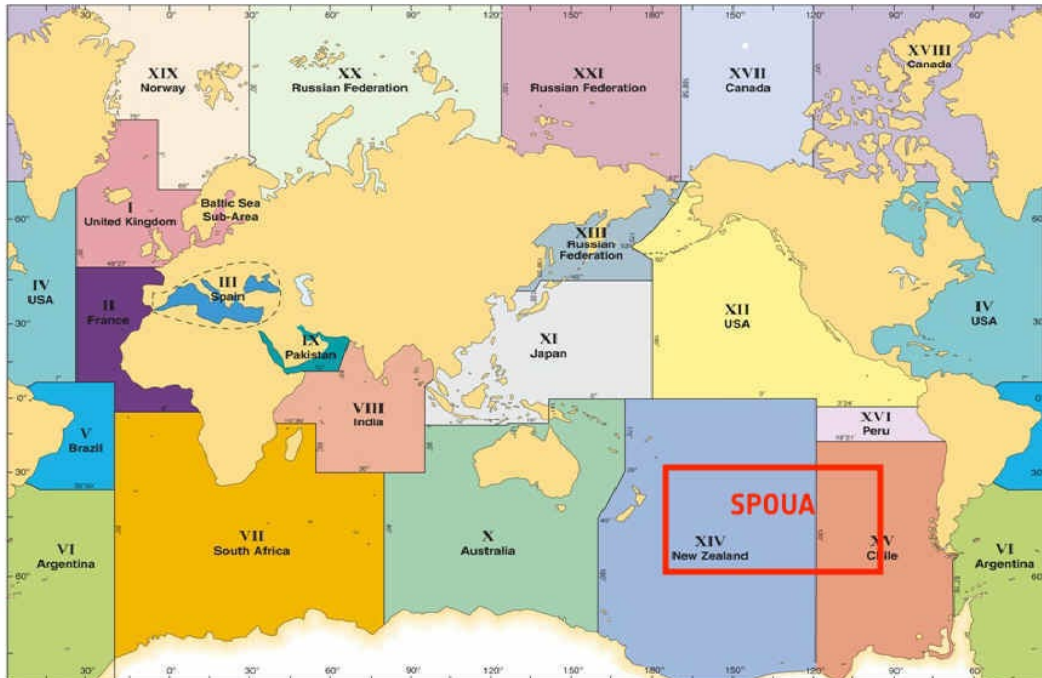
1.11 地球へ再突入させる際、地上の人へ被害をもたらすリスク？

制御再突入について

軌道離脱操作では、衛星またはロケットステージのエンジンを使用して軌道の近地点を下げ、**地球に再突入する場所を選択**する。これを**制御再突入**と呼ぶ。これにより、大きな物体は、その破片が誰も傷つけることのない無人海域をターゲットにすることができる。

軌道離脱操作を実行できるかどうかは、衛星またはロケットの設計とミッションによって異なる。大型のロケットステージは地上の人々に大きなリスクをもたらす傾向があるため、現在は制御再突入が推奨されている。

WORLD-WIDE NAVIGATIONAL WARNING SERVICE - NAVAREAS*



なお、**小型の人工衛星**については、地上到達時に燃え残る部品が少ないため、そのリスクは受け入れ可能として、**非制御での再突入を世界的に許容**している。

<https://blogs.esa.int/cleanpace/2018/11/16/basics-about-controlled-and-semi-controlled-reentry/>

1. 軌道利用の安全とは？

1.12 デブリ発生を防止するための対策

JAXAでは「JMR-003：スペースデブリ発生防止標準」にて、主眼とする対策として以下の4つを設定している。

- (1)宇宙システムの正常な運用で放出する物体を最小限とすること。
→本研修資料の2章にて詳述
- (2)運用中および運用終了後の宇宙システムが破砕して大量のデブリを発生させることを未然に防ぐこと。
→本研修資料の2,3,4章にて詳述
- (3)運用終了後の宇宙システムが利用価値の高い地球低軌道保護域、地球静止軌道保護域と接触する期間を短縮すること。
→本研修資料の2章にて詳述
- (4)地球低軌道保護域から除去した宇宙システムの地球への落下により人的被害および地球への環境汚染を発生させないこと。
→本研修資料の5章にて詳述

**軌道環境のさらなる悪化を防ぐため、
スペースデブリの発生を最小限に抑えていくことが重要な課題！**

1. 軌道利用の安全とは？

質疑応答

2. スペースデブリを増やさないための対策

目次

- 2.1 正常な運用で地球周回軌道に放出する物体を最小限に抑えたい
- 2.2 自己破砕による大量のデブリ発生を未然に防ぎたい
- 2.3 運用終了後の宇宙システムが保護領域に残る期間を短くしたい

2. スペースデブリを増やさないための対策

JMR-003：スペースデブリ発生防止標準にて主眼とする対策（一部抜粋）

- (1)宇宙システムの**正常な運用で放出する物体**を最小限とすること。
- (2)運用中および運用終了後の宇宙システムが**破砕して大量のデブリ**を発生させることを未然に防ぐこと。
→本章では**自己破砕**の防止について説明する。
- (3)運用終了後の宇宙システムが利用価値の高い地球低軌道保護域、地球静止軌道保護域と接触する期間を短縮すること。

宇宙システム自身が単独でスペースデブリを生み出さないための
設計・運用上のポイントは何か？

2. スペースデブリを増やさないための対策

2.1 正常な運用で地球周回軌道に放出する物体を最小限に抑えたい

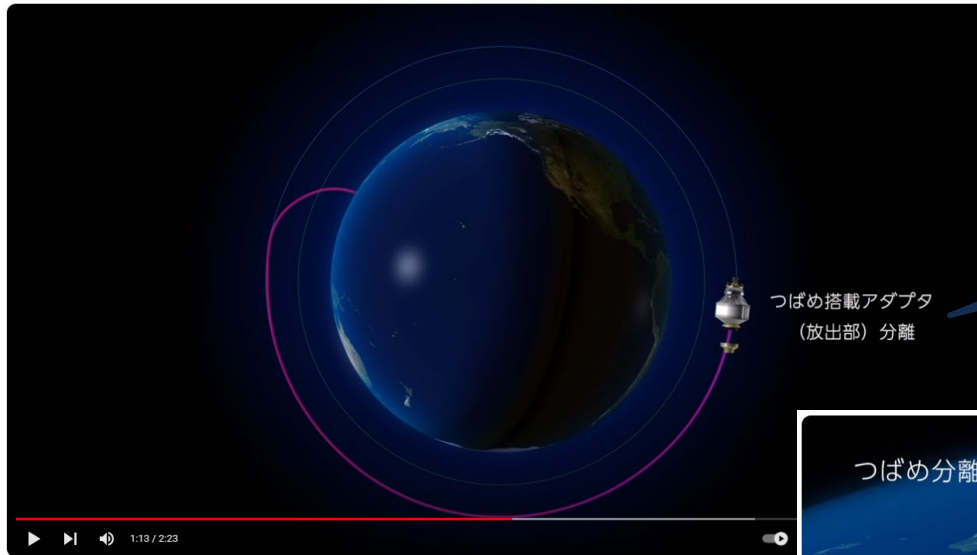
放出されている物体とはどのようなものか？



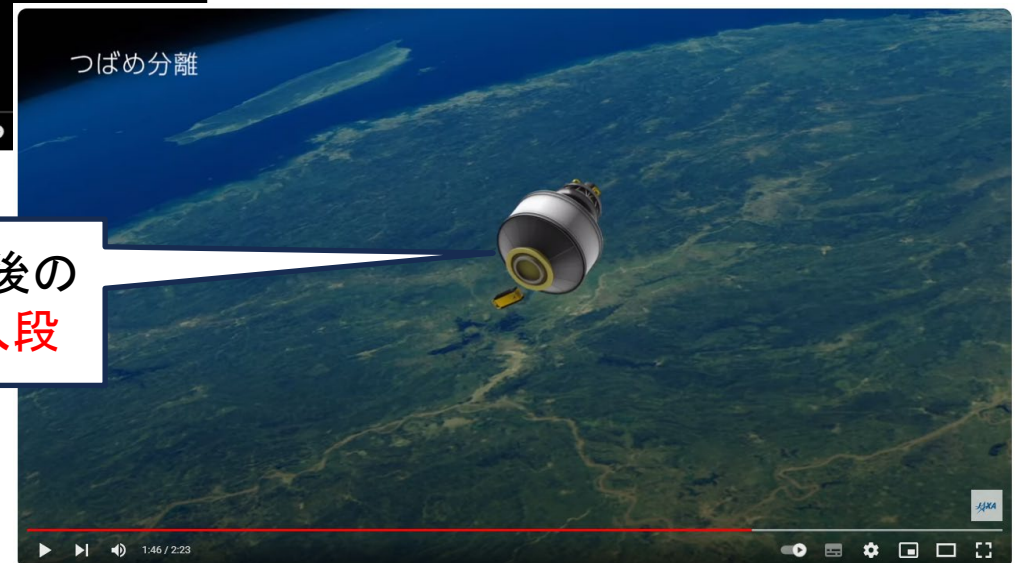
2. スペースデブリを増やさないための対策

2.1 正常な運用で地球周回軌道に放出する物体を最小限に抑えたい

放出されている物体とはどのようなものか？



1:11辺りで放出される
ペイロード支持構体



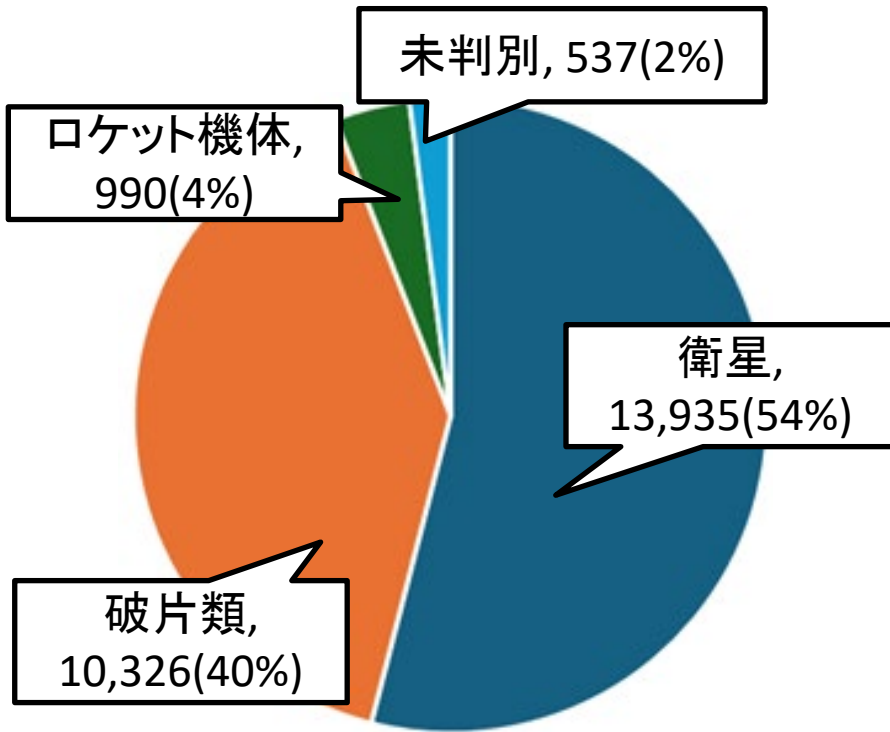
放出されている物体とはどのようなものか？

- 打上げ後に地球周回軌道に残るロケット関連の物体
 - ▶ロケット軌道投入段
 - ▶その他のペイロード支持構体等
- 分離後地球周回軌道に残る宇宙機関連の物体
 - ▶締結具
 - ▶静止衛星用キックエンジン等
- ミッションに従い計画的に分離・放出される物体
 - ▶デザー
 - ▶親宇宙機から分離される子宇宙機等
- 火工品により放出される燃焼生成物及び破片類
- 固体ロケットモータにより放出されるスラグ

2. スペースデブリを増やさないための対策

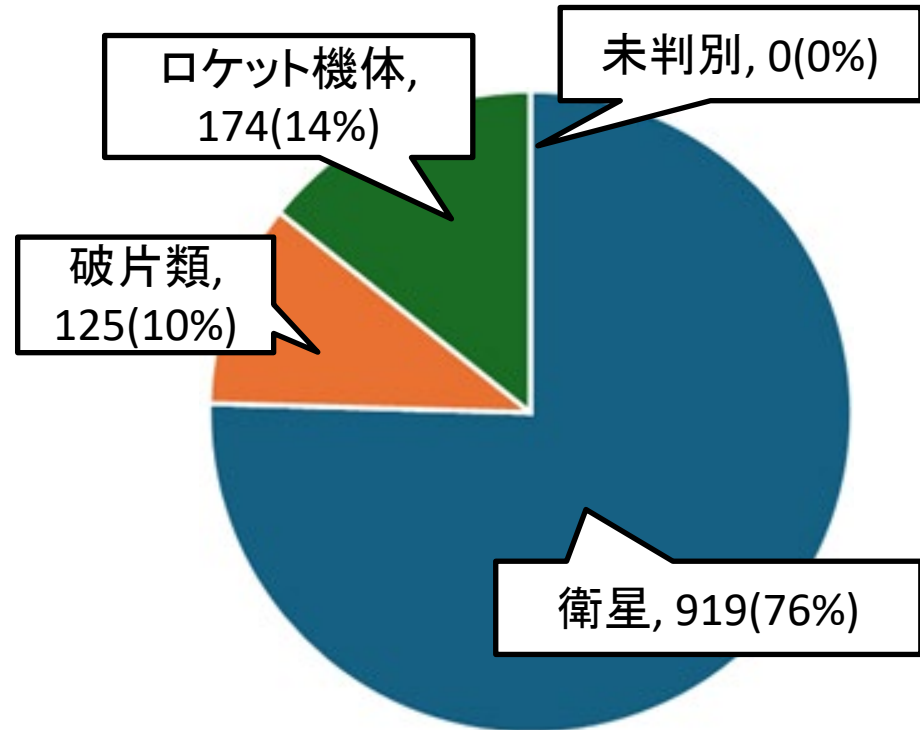
2.1 正常な運用で地球周回軌道に放出する物体を最小限に抑えたい

放出されている物体の数ほどの程度か？



低軌道の種類別物体数の割合

2025/11/11 時点のSpace-Track, Seradata公開情報を基に集計



静止軌道の種類別物体数の割合

2. スペースデブリを増やさないための対策

2.1 正常な運用で地球周回軌道に放出する物体を最小限に抑えたい

抑えるための設計・運用上のポイント (1/2)

JAXAではJMR-003にて以下を規定している(一部抜粋)。

- 打上げ後に地球周回軌道に残るロケット関連の物体
 - ▶ペイロードが1機の場合は1個まで。複数の場合は2個まで。
- 分離後地球周回軌道に残る宇宙機関連の物体
 - ▶技術的、経済的に重大な問題が無い限り放出しない設計とする。
※放出せざるを得ない場合の廃棄方法についてもJMR-003に記載
- ミッションに従い計画的に分離・放出される物体
 - ▶放出物体の面積／質量比、軌道寿命等の特性から有人宇宙システム等を含む他の宇宙機への衝突リスクを評価し、それらに対して重大な支障を及ぼさないための手段(を講ずることができること)を示す。
 - ▶テザーについては、マルチストランドテザーを採用する等デブリ／メテオロイドの衝突により容易に切断しない構造とすること、用済み後に収納し衝突リスクを低減させることを推奨。

抑えるための設計・運用上のポイント (2/2)

JAXAではJMR-003にて以下を規定している(一部抜粋)。

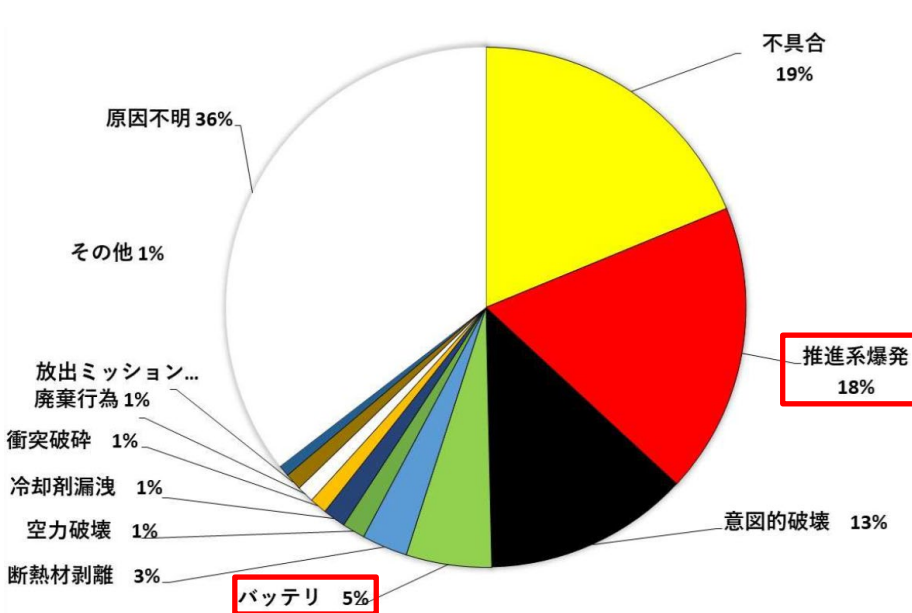
- 火工品に放出される燃焼生成物及び破片類
 - 最大長さで1mmを超える燃焼生成物及び破片類を地球周回軌道に放出しないように設計・使用しなければならない。
- 固体ロケットモータにより放出されるスラグ
 - 地球静止軌道保護域及び地球低軌道保護域に1mm以上のスラグを放出しないように設計・運用しなければならない。

2. スペースデブリを増やさないための対策

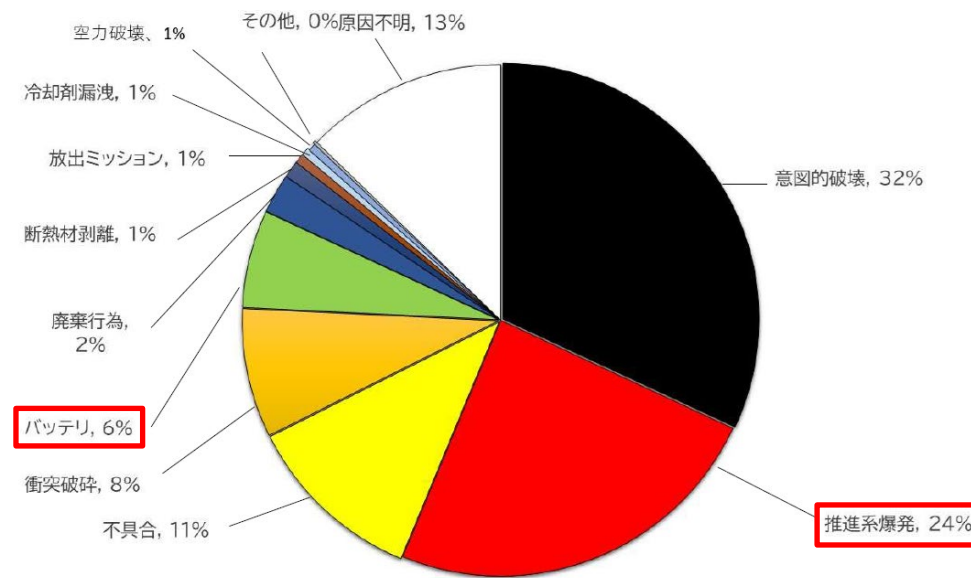
2.2 自己破砕による大量のデブリ発生を未然に防ぎたい

自己破砕とはどのようなものか？

推進薬やバッテリーなどの内部エネルギーに起因する破砕



発生原因別 破砕件数の割合



発生原因別 破片発生数の割合

軌道利用の安全に係るレポート 2025年10月 Volume 3より

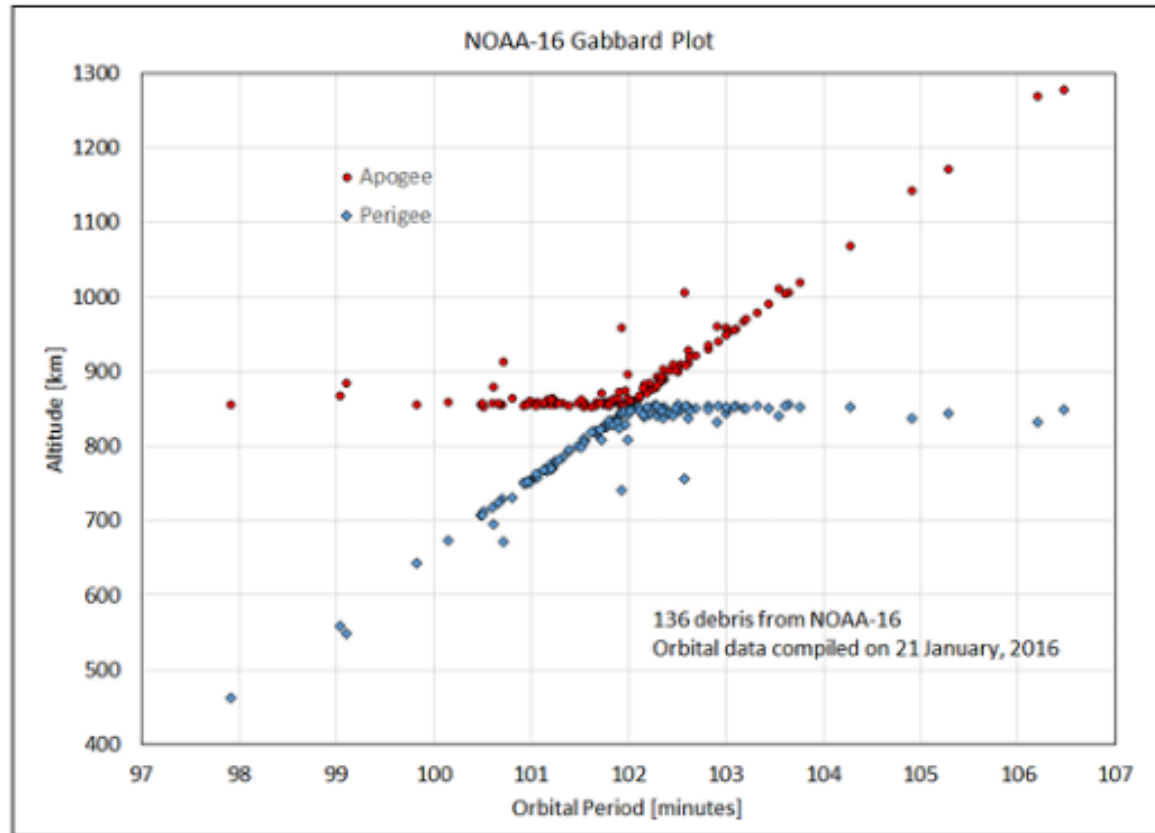
https://www.jaxa.jp/projects/debris/debris_report/files/debris_report-2025-v3.pdf

2. スペースデブリを増やさないための対策

2.2 自己破砕による大量のデブリ発生を未然に防ぎたい

NOAA-16衛星自己破砕（2015年）

2015年11月25日、米国の運用終了した気象衛星NOAA-16が自己破砕を起こした。高度850km付近の軌道傾斜角98.9°太陽同期軌道にて破砕が観測され、136個の破片がカタログ化された。この破砕の原因はバッテリーにあると推測されている。



Dispersion of debris from the NOAA-16 breakup of 136 tracked debris (including the parent body). The Gabbard plot shows the classic "X" pattern indicative of an explosive breakup from a circular orbit.

NASA ODQN v20i1より

2. スペースデブリを増やさないための対策

2.2 自己破砕による大量のデブリ発生を未然に防ぎたい

Briz-M 上段の自己破砕 (2012年)

ロシアのプロトンロケットの上段Briz-Mが2012年6月に打上げられたが、**適切に燃焼せず**、長楕円軌道(近地点265km、遠地点5015km)に5トンの推薬(2液系)を残したまま放置された。その後、同10月16日に近地点付近の290kmで**自己破砕**を起こし、最低700個の破片が観測された(より小さい観測不可能なものはさらに多数発生)。**破砕の原因は推進薬と酸化剤の混合**と推測されている。破片の軌道はISSの軌道と交差するものであった。

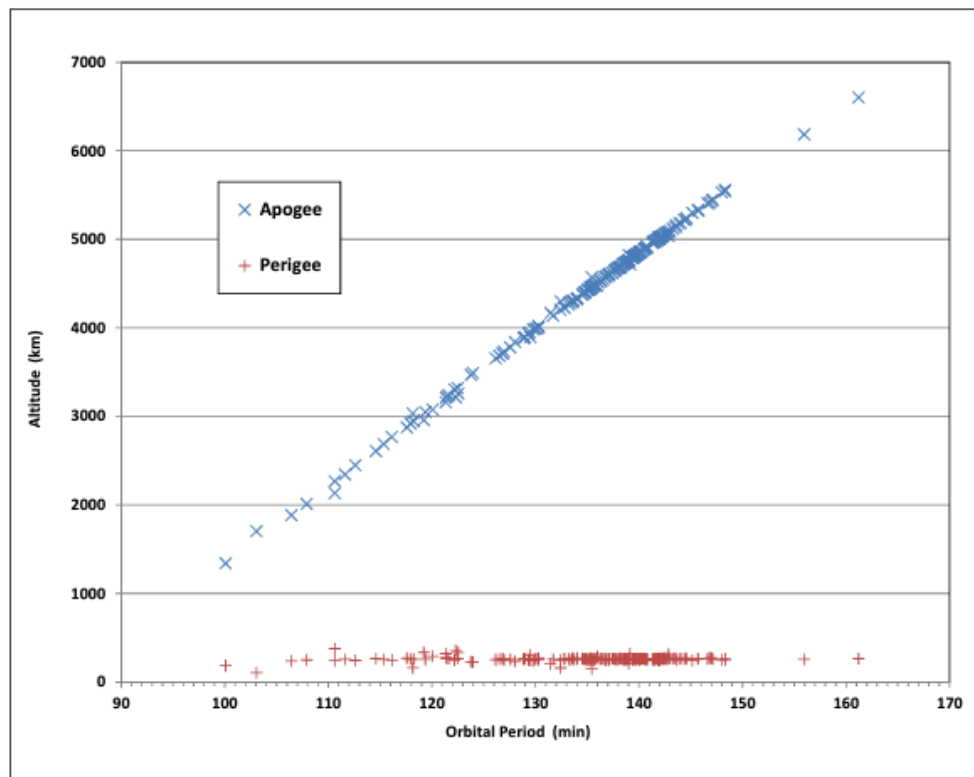


Figure 2. Distribution of more than 200 tracked Briz-M debris as of 25 October 2012.

Tutorial : An Overview
of the Orbital Debris
Environment, NASA
ODPO
NASA ODQN v17i1

2. スペースデブリを増やさないための対策

2.2 自己破砕による大量のデブリ発生を未然に防ぎたい

Briz-M 上段の自己破砕 (2012年)

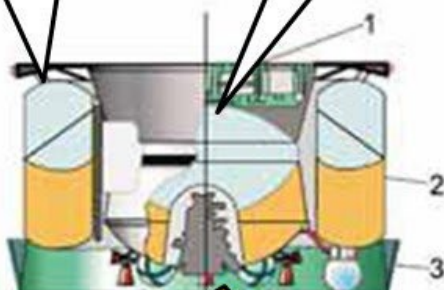
Briz-Mは度々破砕が観測されており、設計上の課題があるといえる。

軌道上で爆発事故を度々引き起こすロシアの推進モジュール



補助推進剤
タンク

主推進剤
タンク



タンク内隔壁が破損すると燃料と酸化剤が混合して爆発する(ヒドラジンと四酸化二窒素の場合瞬時に爆発)。このようなタンク構造は改善する必要がある。少なくとも運用終了時に残留推進剤は排出する必要がある。

運用中の内部エネルギーによる破砕

防止するための設計・運用上のポイント (1/2)

- 設計の確実性
 - 宇宙システムが運用中に破砕事故に至る不具合を起こさないよう適切な信頼性・品質管理がなされていることを設計審査等で確認すること。
 - 原則宇宙システムの運用中の偶発的破砕発生率が0.001以下であること。
- 宇宙機の運用中の監視
 - 宇宙機の運用管制においては、推進系、バッテリー系、姿勢制御系等の異常発生 of 監視を手順に含め、異常検知時には速やかに対策を取ること。

運用中の内部エネルギーによる破砕

防止するための設計・運用上のポイント (2/2)

- 不具合発生時のデブリ対策

- 運用中の宇宙機に不具合が発生し破砕を招く恐れがある場合、あるいは運用継続能力が失われると判断した場合は、回復の見込みがない限り、以下を検討し、可能な範囲で実施すること。

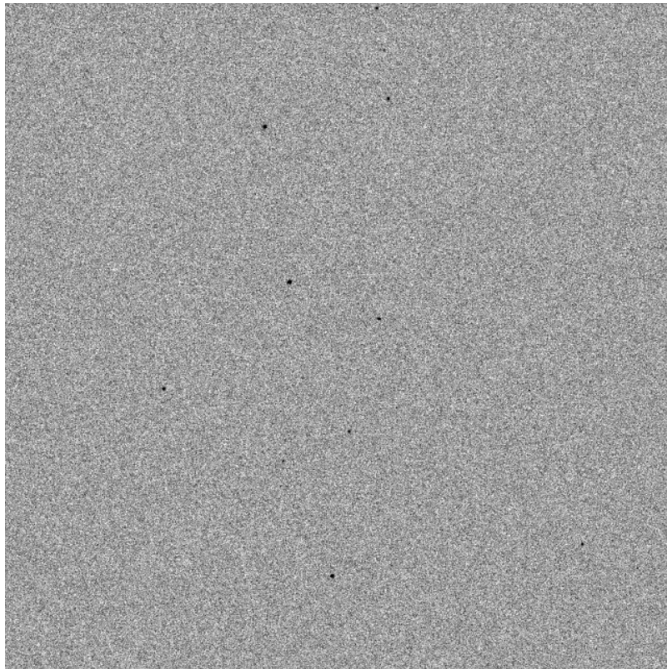
- ✓ 残留エネルギー源の除去

- ✓ 保護軌道域からの排除

運用終了後の内部エネルギーによる破砕 防止するための設計・運用上のポイント (1/3)

- 残留液体推進剤及び高圧流体に関する処置

➤用済み後の宇宙システムは、軌道変更マヌーバにおいて、液体推進剤及び高圧流体を破砕の原因とならないまでに使いきるか、排出すること。



運用終了後の内部エネルギーの排出 (パッシベーション) 例

UAEの火星探査機HOPEを打上げたH-2Aロケット42号機が、探査機を分離したのちに推進薬を排出した場面が、ESAの観測設備によって観測されている。

2020年7月23日ESA提供

運用終了後の内部エネルギーによる破砕 防止するための設計・運用上のポイント (2/3)

- バッテリーの破砕防止処置

- バッテリーは、異常な内圧の上昇と構造的破壊を引き起こさないよう電氣的・機械的に適切な設計・製造が行われたものを適用すること。
- 運用終了時点で充電回路を遮断すること。

- 指令破壊系

- 火工品は太陽光等による温度上昇を考慮し、自然不発火保証温度に対して十分な余裕を確保すること。
- 指令破壊受信器は指令破壊の実行の可能性が無くなった時点で速やかに誤爆を防止する処置を行うこと。

運用終了後の内部エネルギーによる破砕

防止するための設計・運用上のポイント (3/3)

- ヒートパイプ等
 - 減圧できない圧力機器は、軌道上寿命期間の入熱を考慮して、破裂の危険性のない十分な安全率を有すること。
- ホイール等の回転機器
 - ホイール等の回転機器は運用終了後に停止するものであること。

2. スペースデブリを増やさないための対策

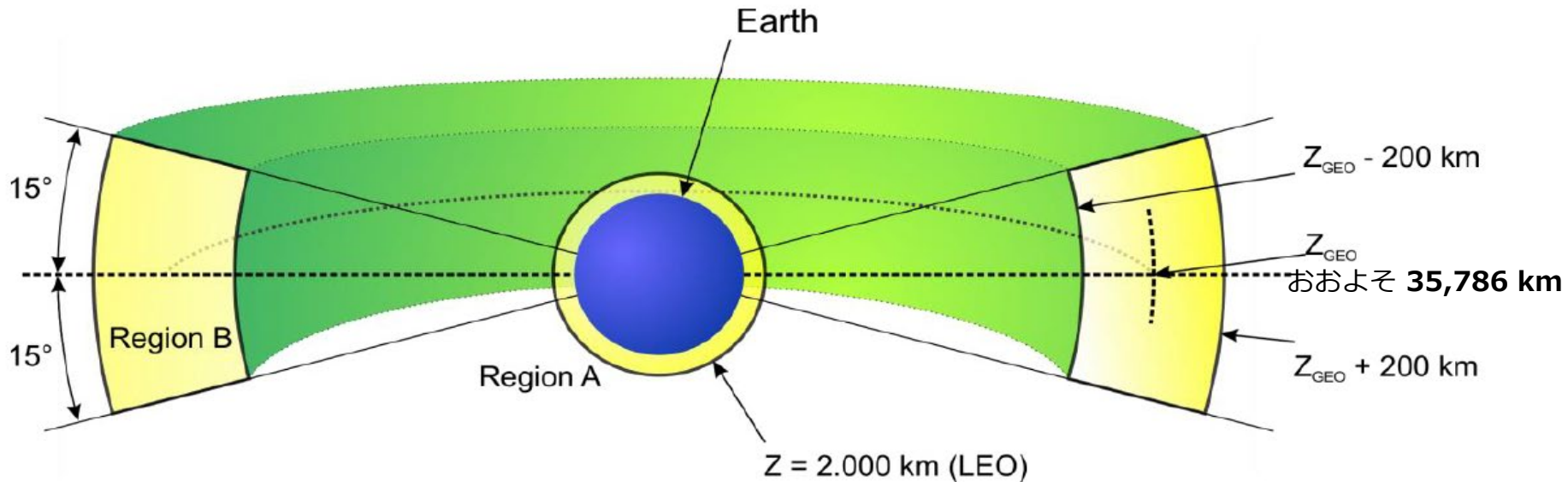
2.3 運用終了後の宇宙システムが保護領域に残る期間を短くしたい

Inter-Agency Space Debris Coordination Committee



出典 : IADC Space Debris Mitigation Guideline

IADC-02-01 Rev. 3



保護領域 (Protected regions)

IADCのスペースデブリ低減ガイドラインでは、上記の“Region A (低軌道)” および“Region B (静止軌道)”を保護領域と定め、運用終了後の物体が当該領域に長期間留まる、あるいは干渉することを制限するよう求めている。

地球低軌道域(Region A)に対する運用終了後の措置

以下のいずれか、あるいは複数の処置をとること。

- 回収
軌道上で捕獲して地上で回収すること。
捕獲作業では分離物の発生がないこと。
- 制御再突入
地上の安全を保証する形態で、制御して再突入させること。
- 自然落下
大気抵抗により25年以内に自然落下する場合はそのまま放置してもよい。
- 軌道寿命の短縮
25年以内に自然落下する軌道へ移動すること。
- 展開物、テザー等による軌道寿命短縮
大気抵抗等軌道減衰効果を増強する手段により25年を満足させること。

2. スペースデブリを増やさないための対策

2.3 運用終了後の宇宙システムが保護領域に残る期間を短くしたい

地球低軌道域(Region A)に対する運用終了後の措置

以下のいずれか、あるいは複数の処置をとること。

- 回収
軌道
捕獲
 - 制御
地上
 - 自然
大気
 - 軌道
25年
- 25年の算定開始時点

 - ①衝突回避能力を有する宇宙システム
→ミッション終了時点
 - ②衝突回避能力を有しない宇宙システム
→軌道投入時点
 - ③地球低軌道保護域上空で運用を停止し、その後降下して
当該保護域と干渉する宇宙システム
→当該保護域と干渉を開始すると予測される時点
- 展開物、テザー等による軌道寿命短縮
大気抵抗等軌道減衰効果を増強する手段により25年を満足させること。

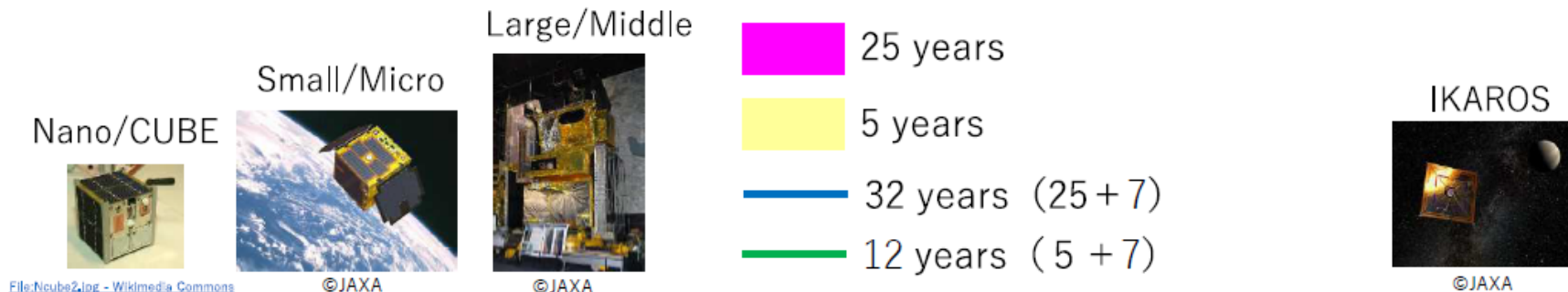
2. スペースデブリを増やさないための対策

2.3 運用終了後の宇宙システムが保護領域に残る期間を短くしたい

面積/質量(A/M)比と高度に対する軌道寿命

(2022年11月28日時点の太陽活動に基づく解析結果)

Ave. Satellite Life Span ≒ 7 years



Uneasy to decay

A/M [m²/kg]

Easy to decay

Altitude [km]	A/M [m ² /kg]															
	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	
750	180.00	149.00	128.00	115.00	103.00	92.70	48.00	30.70	23.40	19.50	18.20	16.30	11.50	10.10	9.53	
700	96.60	82.80	71.70	62.00	53.80	50.70	27.60	18.70	14.00	9.98	9.16	8.67	8.30	8.01	7.80	
650	51.50	42.10	38.90	31.60	29.80	28.30	15.24	9.28	8.38	7.84	7.43	7.10	6.82	6.53	6.28	
600	28.20	21.20	19.50	18.40	17.30	15.10	8.38	7.39	6.74	6.16	5.59	4.93	4.27	3.57	3.00	
550	13.34	10.39	9.49	8.95	8.58	8.25	6.49	5.13	3.61	2.46	1.81	1.44	1.19	1.03	0.90	
500	8.01	7.52	7.10	6.74	6.41	6.04	2.79	1.47	1.03	0.78	0.62	0.53	0.45	0.41	0.37	

第10回 JAXAスペースデブリワークショップ パネルディスカッション
「新しい世界潮流の見極め ～5年ルールに対する民間企業の視点～」

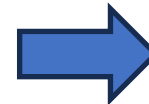
MUSCAT Space Engineering Co. Ltd

地球静止軌道域(Region B)に対する運用終了後の措置

以下のいずれかを満足するような軌道に直ちに移動させること。

- リオービット(*)後の初期の離心率は0.003未満とすること。
地球静止軌道高度上空の最低近地点高度 ΔH (km) は以下

$$\Delta H = 235 + 1,000 \times C_R \times A / m \text{ [km]}$$



計算すると300くらいの値

※ITUでは以前約300kmの
リオービットを勧告していた

C_R : 太陽輻射圧係数
 A : 宇宙機の有効断面積 [m^2] (全表面積の25%)
 m : 宇宙機の質量 [kg]

- 廃棄後の軌道のペリジ高度が静止高度より充分高く、長期的摂動力を考慮しても100年間地球静止軌道保護域と干渉しないこと。

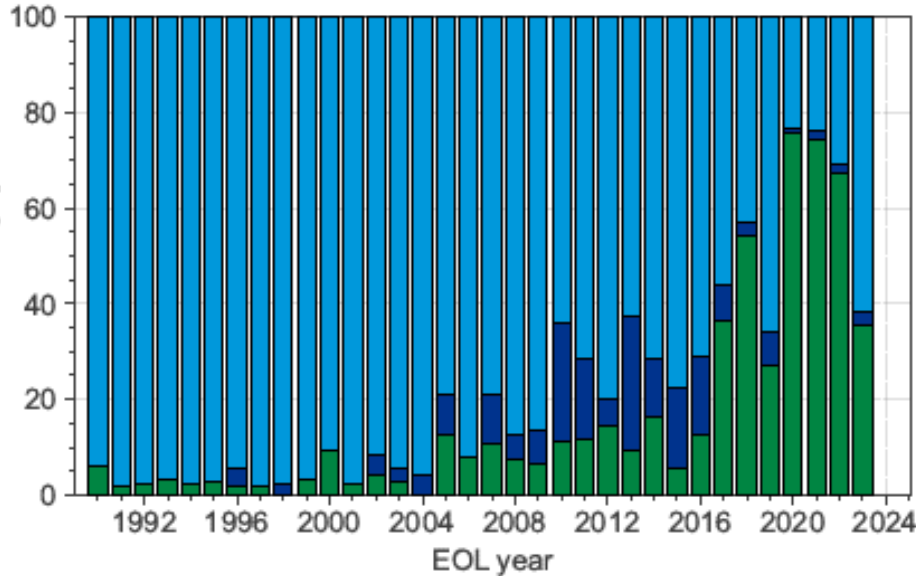
(*)運用終了後の宇宙機を、現在静止軌道域に存在する不要な物体との衝突率が無視できる程度に高度を上昇させること

2. スペースデブリを増やさないための対策

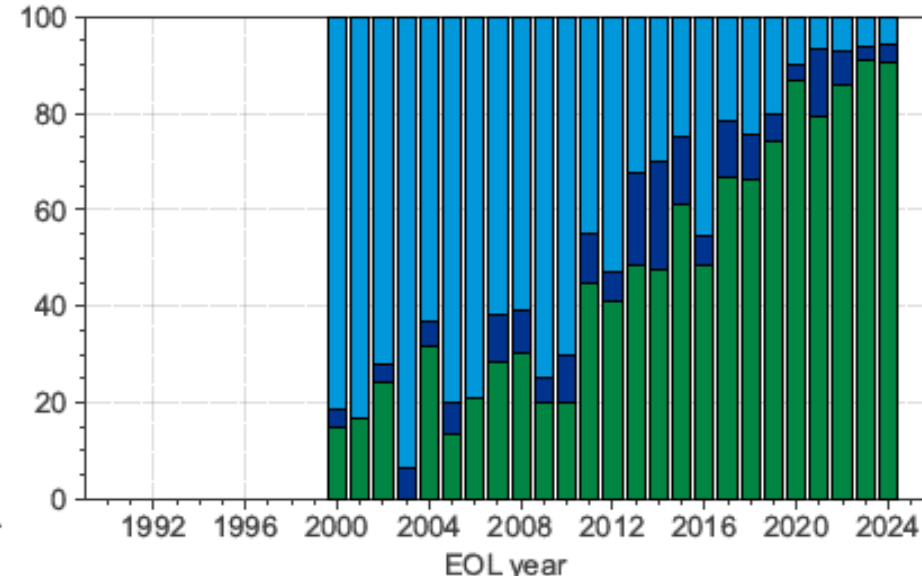
2.3 運用終了後の宇宙システムが保護領域に残る期間を短くしたい

地球低軌道域における人工衛星とロケット機体の廃棄成功率

人工衛星の廃棄成功率



ロケット機体の廃棄成功率



■ 廃棄成功

■ 廃棄の意図はあったが失敗

■ 廃棄の意図なし

ESA'S ANNUAL SPACE ENVIRONMENT REPORT

世界的な廃棄成功確率の目標値は90%とされており、ロケット機体は90%程度までできている。

人工衛星も改善傾向にはあるが、70%(2023年は35%)程度とまだ低い状況である。

2. スペースデブリを増やさないための対策

JMR-003 : スペースデブリ発生防止標準にて主眼とする対策 (一部抜粋)

- (1)宇宙システムの**正常な運用で放出する物体**を最小限とすること。
- (2)運用中および運用終了後の宇宙システムが**破砕して大量のデブリ**を発生させることを未然に防ぐこと。
→本章では**自己破砕**の防止について説明した。
- (3)運用終了後の宇宙システムが利用価値の高い地球低軌道保護域、地球静止軌道保護域と接触する期間を短縮すること。

なお、わが国では宇宙条約に準拠した国内法として「人工衛星等の打上げ及び人工衛星の管理に関する法律（通称：宇宙活動法）」が制定されており、内閣府が規制当局を務めている。同法では人工衛星を運用する際に国のライセンスを取得することが義務化されており、スペースデブリの抑制を求めている。上記に関連する要求として、宇宙活動法のガイドラインでは以下を定めている。

6.2. 人工衛星の構造

6.2.1 意図しない物体放出防止

6.2.3 異常時の破砕防止

6.3. 管理計画

6.3.2 異常時の破砕防止

6.3.4 人工衛星の管理を実行する運用体制の構築

6.4. 終了措置

6.4.2 静止軌道保護域以遠への排除

6.4.4 その他の終了措置

2. スペースデブリを増やさないための対策

JMR-003 : スペースデブリ発生防止標準にて主眼とする対策 (一部抜粋)

- (1)宇宙システムの**正常な運用で放出する物体**を最小限とすること。
- (2)運用中および運用終了後の宇宙システムが**破砕して大量のデブリ**を発生させることを未然に防ぐこと。
→本章では**自己破砕**の防止について説明した。
- (3)運用終了後の宇宙システムが利用価値の高い地球低軌道保護域、地球静止軌道保護域と接触する期間を短縮すること。

**宇宙システム自身が単独でスペースデブリを生み出さないために
設計・運用上のポイントをしっかり抑えていくことが重要！**

質疑応答

3. 小さなデブリや隕石の衝突から宇宙機を守る

目次

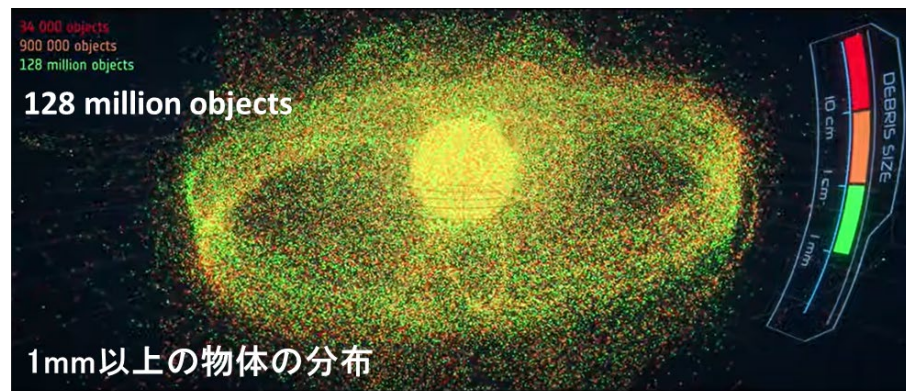
- 3.1 観測可能な軌道上物体数の変遷
- 3.2 小さなデブリのサイズごとの原因存在推定
- 3.3 デブリのサイズと影響度の評価
- 3.4 小さなデブリがどのような問題になるか？
- 3.5 JEM(日本実験棟)のシールド配置と貫通限界
- 3.6 運用中に衝突する可能性がある微小デブリのサイズ
- 3.7 スペースデブリ防護設計のリスク評価フロー
- 3.8 衝突リスク評価の具体例
- 3.9 TURANDOT (デブリ損傷評価ツール)
- 3.10 衝突試験に関する紹介
- 3.11 関連するJAXA共通技術文書の紹介

3. 小さなデブリや隕石の衝突から宇宙機を守る

JMR-003 : スペースデブリ発生防止標準にて主眼とする対策(一部抜粋)

- (2)運用中の宇宙システムが**破砕してデブリ**を発生させることを未然に防ぐこと。
 - 宇宙システムの廃棄に必要な機能の喪失を未然に防ぐこと。
 - 本章では**偶発的衝突による破砕**の防止について、防護の観点で説明する。

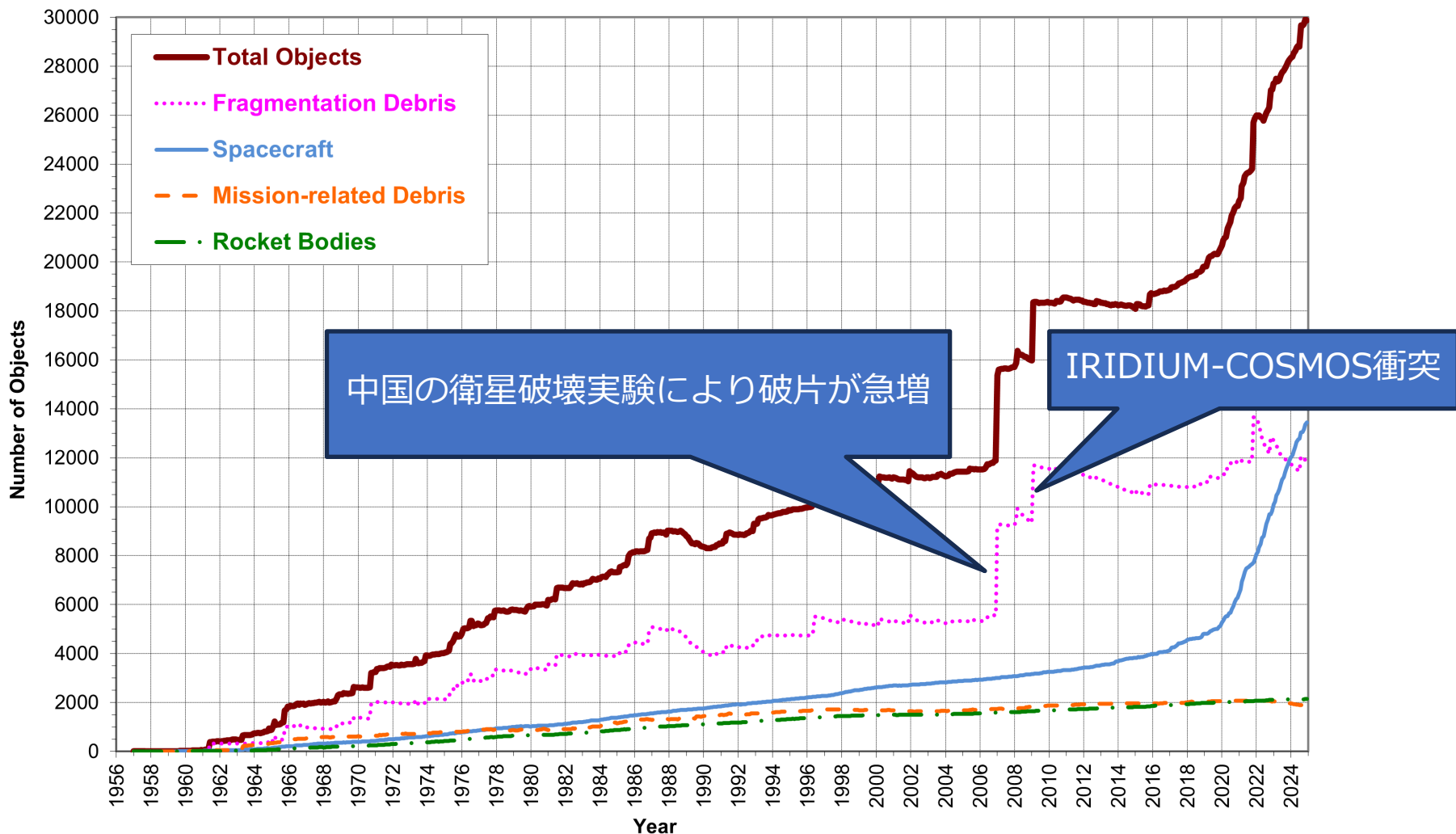
地上から見えないスペースデブリとの衝突は避けられない。
 どのように対応するか？



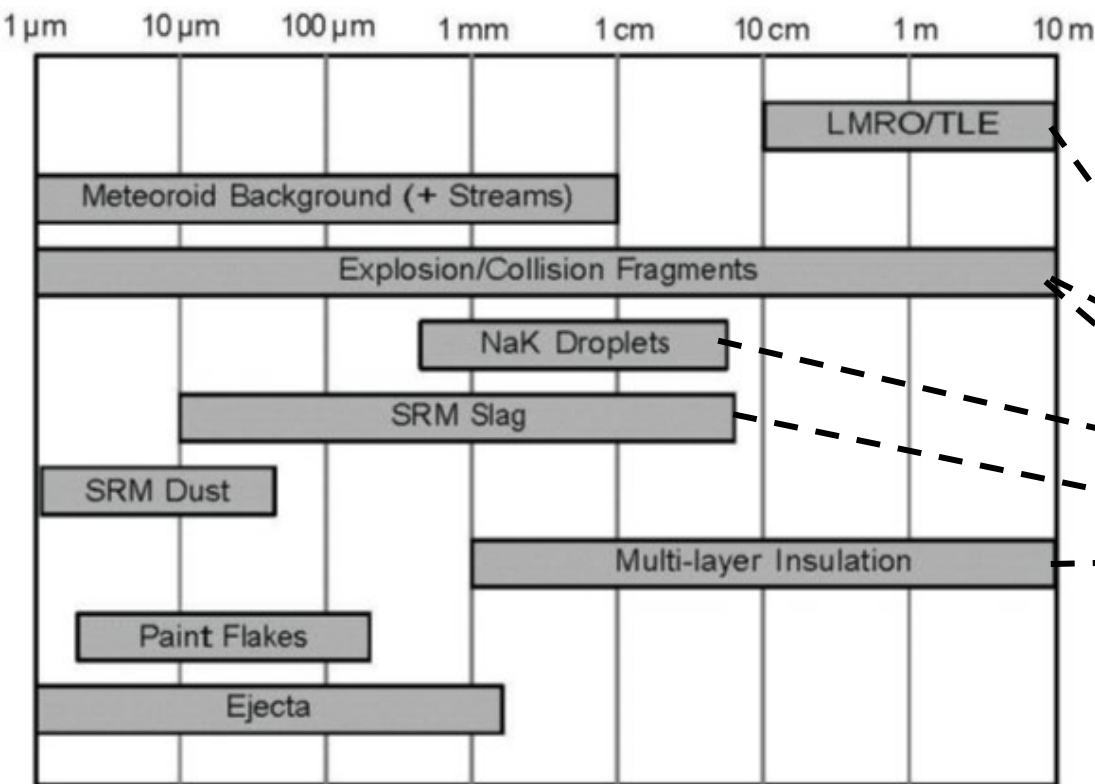
3. 小さなデブリや隕石の衝突から宇宙機を守る

3.1 観測可能な軌道上物体数の変遷

Monthly Number of Objects in Earth Orbit by Object Type



ESAによる低軌道におけるデブリのサイズごとの原因存在推定



1cmサイズデブリの推定物体別割合

Source	Share
Launch and Mission Related Objects (LMRO)	1.2%
Explosions fragments	62.4%
Collisions fragments	26.4%
Sodium Potassium (NaK) droplets	6.8%
Solid Rocket Motor (SRM) slag	2.5%
Multi-layer Insulation (MLI) fragments	0.7%

Horstmann et al., A Validation Method of ESA's MASTER 1 cm Population in Low Earth Orbit, AMOS Conference, 2017

3. 小さなデブリや隕石の衝突から宇宙機を守る

3.3 デブリのサイズと影響度の評価

デブリサイズ	対象物(衛星など)への影響
～ 0.1mm	<ul style="list-style-type: none"> ・衝突確率は極めて高いが、衝突時の対象物への影響度は小さい。 ・衝突時、ハーネス被覆が剥がれる程度の影響がある。
0.1 ～ 1mm	<ul style="list-style-type: none"> ・衝突確率はとても高い。 ・衝突時、部位によっては対象物に深刻な影響を与える。 ・対象物を防護するための手法が確立しつつある。
1mm ～ 1cm	<ul style="list-style-type: none"> ・衝突確率は比較的高い(軌道と運用期間による) ・衝突時、対象物に深刻な影響を与える可能性がある。 ・対象物を防護する手法はあるが、質量増等の悪影響が大きい。
1 ～ 10cm	<ul style="list-style-type: none"> ・衝突確率は低いですが、衝突時の対象物への影響度は大きい。 ・地上からの追跡・回避が可能になりつつある。
10cm ～	<ul style="list-style-type: none"> ・衝突時の影響は極めて大きい。 ・地上からの追跡・回避が可能。



観測不可
≡ 回避不可

観測可能
≡ 回避可能

3. 小さなデブリや隕石の衝突から宇宙機を守る

3.4 小さなデブリがどのような問題になるか？

軌道上での被害

1. デブリが衝突して宇宙機が壊れないか
2. デブリの影響でミッションに影響が及ばないか
3. デブリが衝突して宇宙飛行士に危険がないか

10cm以下の物体の衝突が疑われる事例

- 2006:ロシア通信衛星の故障。冷却液が噴出、姿勢制御不可に至る。
- 2007:欧州気象衛星の不具合。軌道変化及び東西制御スラスタ破損。
- 2013:ロシア小型衛星の故障。スピンレート及び高度が低下。
- 2013:エクアドル小型衛星の通信途絶。ロケット破片の衝突が原因と推測。
- 2015:日本GCOM-W1電力低下及び軌道変化。
- 2016:欧州Sentinel-1A電力低下及び軌道変化。カメラで衝突痕を確認。

3. 小さなデブリや隕石の衝突から宇宙機を守る

3.4 小さなデブリがどのような問題になるか？

軌道上でのデブリ衝突速度



プロ野球選手の球
時速 160 km



新幹線
時速 300 km



戦闘機
時速 2,700 km

デブリの平均衝突速度は…

- ・ 静止軌道 → 時速3,600km (1km/s)
- ・ 低軌道 → 時速36,000km (10km/s)

3. 小さなデブリや隕石の衝突から宇宙機を守る

3.4 小さなデブリがどのような問題になるか？

デブリの衝突エネルギー

ある大きさのアルミ球が秒速10kmで衝突した時の運動エネルギーと等価なのは…

直径1mm



スマートフォンが**時速300km**で衝突

直径1cm



自家用車が**時速120km**で衝突

直径10cm



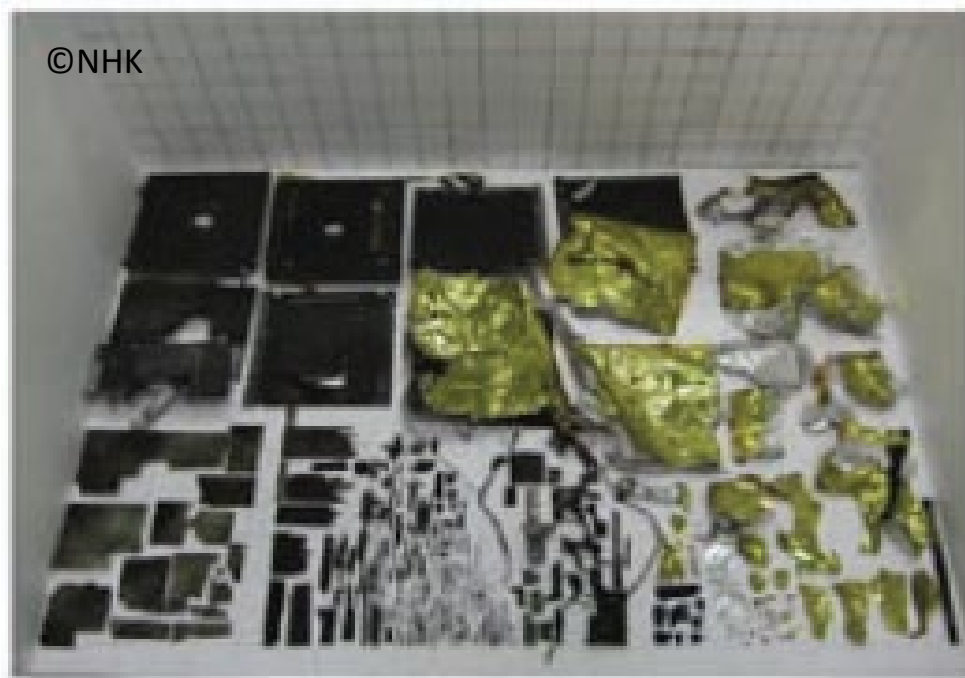
150人乗りの旅客機が**時速450km**で衝突

3. 小さなデブリや隕石の衝突から宇宙機を守る

3.4 小さなデブリがどのような問題になるか？

デブリの平均衝突速度は、低高度軌道で秒速10km (時速36,000km)

→小さなデブリでも、衝突すれば人工衛星に重大な損傷を与えることが可能



人工衛星に直径3cmの模擬デブリを秒速1.7kmで衝突させた実験

直径2mm以上の破片が約1,700個も生じた

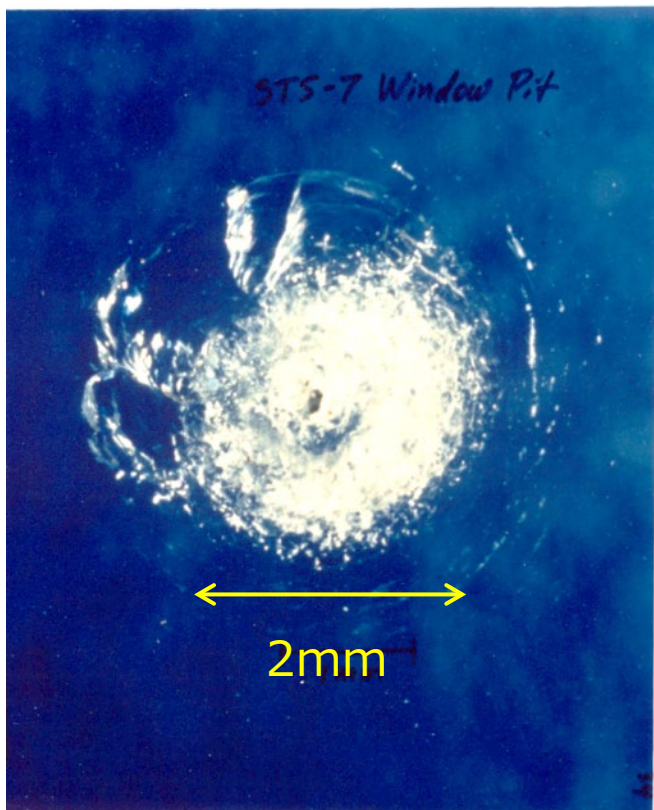
サイエンスZERO「『宇宙のゴミ問題』を解決せよ」, 2009

3. 小さなデブリや隕石の衝突から宇宙機を守る

3.4 小さなデブリがどのような問題になるか？

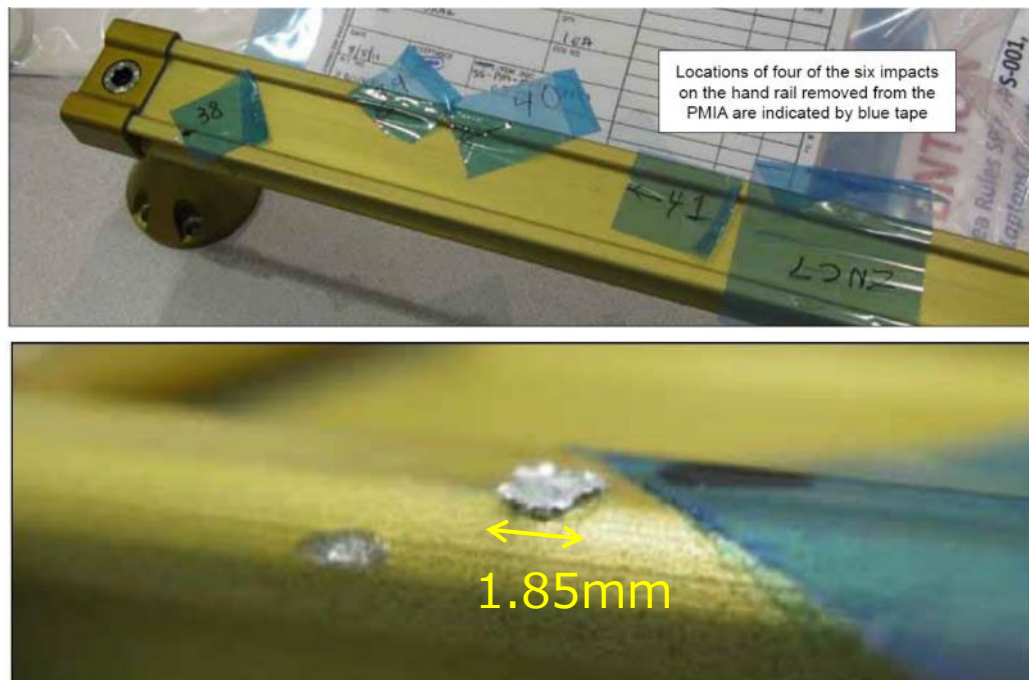
微小デブリの衝突例

スペースシャトルの窓に
直径2mmの衝突痕



Ref. NASA Orbital Debris Program Office HP

ISSのハンドレールに6個の微小な衝突痕

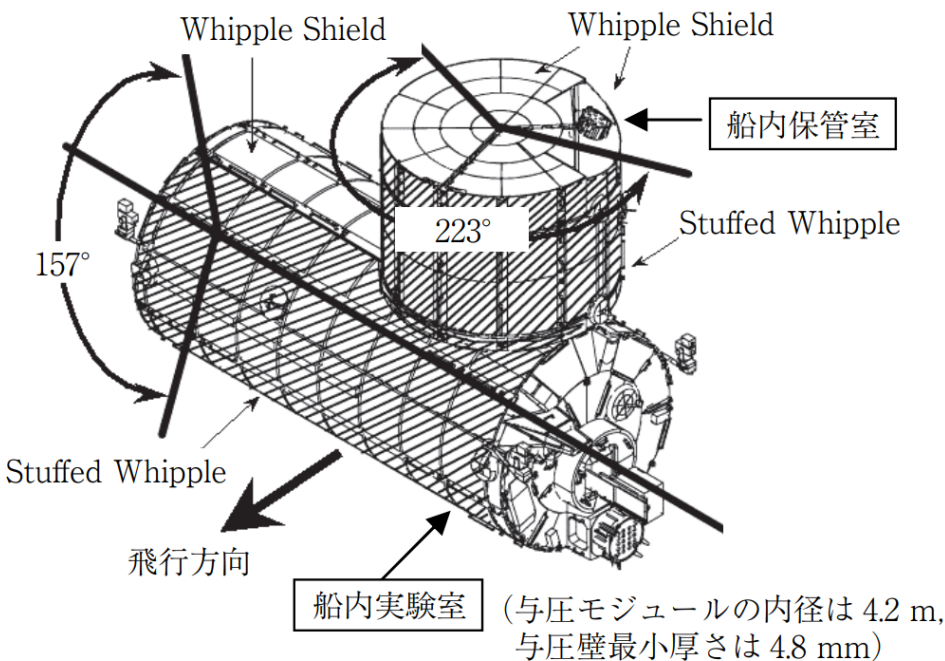


Ref. NASA Orbital Debris Quarterly News, **17**(2), 2013

3. 小さなデブリや隕石の衝突から宇宙機を守る

3.5 JEM(日本実験棟)のシールド配置と貫通限界

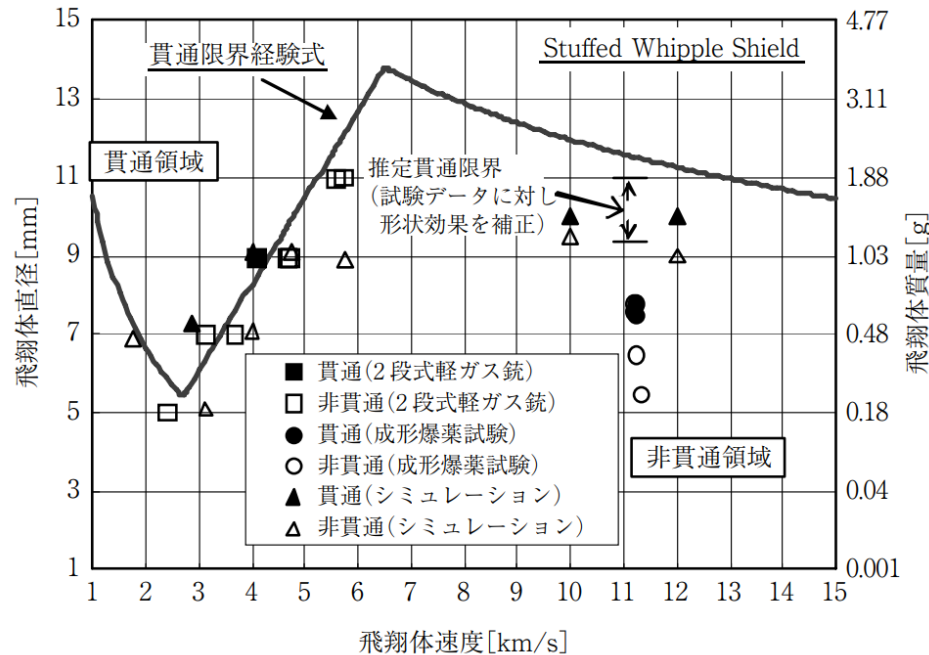
JEM 与圧モジュールのシールド配置



Whipple Shield :
 壁の外側にもう一層の薄いアルミ板を設けたもの

Stuffed Whipple :
 壁とWhipple Shieldの間に、スタッフィングと呼ばれる防弾チョッキのような何種類かの繊維を層にしたものを挟んでいる。

シールドの貫通限界式：
 試験およびシミュレーション結果の比較



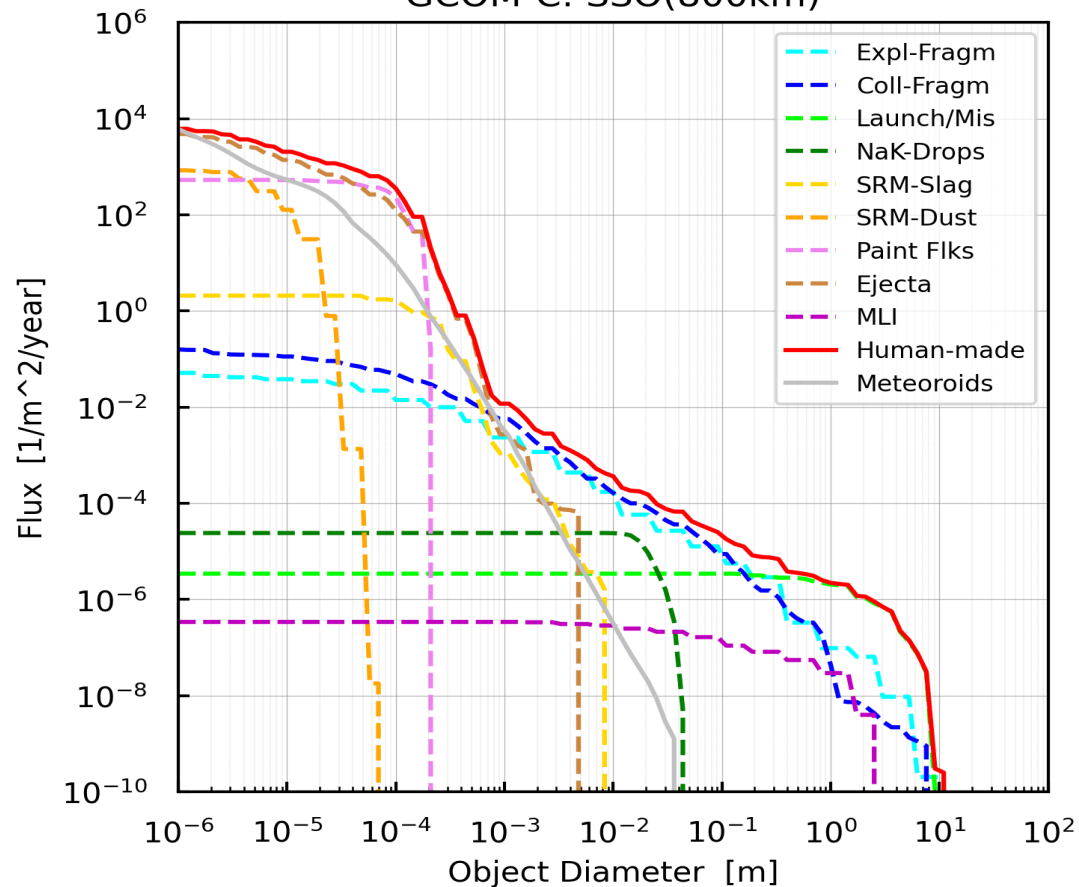
地球低軌道のスペースデブリの衝突速度7~10km/sであれば、10mm程度まで防ぐことができる。

3. 小さなデブリや隕石の衝突から宇宙機を守る

3.6 運用中に衝突する可能性がある微小デブリのサイズ

LEO衛星(800km)が1年間運用された場合に衝突するデブリの数の例
 ※デブリ環境モデル：MASTER-8.0.5 (Population Files Ver. 1911)

GCOM-C: SSO(800km)



- Expl-Fragm 爆発により発生した破片
Explosion Fragments
- Coll-Fragm 衝突により発生した破片
Collision Fragments
- Launch/Mis ミッション上発生したデブリ
Launch/Mission
- NaK-Drops 原子炉衛星から漏洩した冷却媒体液滴
NaK Droplets
- SRM-Slag 固体ロケットモータのスラグ
SRM Slag Particles
- SRM-Dust 固体ロケットモータダスト
SRM Dust Particles
- Paint Flks 表面劣化により発生するデブリ
Paint Flakes
- Ejecta デブリ衝突により発生するデブリ
Ejecta
- Meteoroids 季節変動しないメテオロイド
Meteoroid Background

MASTERでは粒子種(メテオロイドを含む)を選択できる

3. 小さなデブリや隕石の衝突から宇宙機を守る

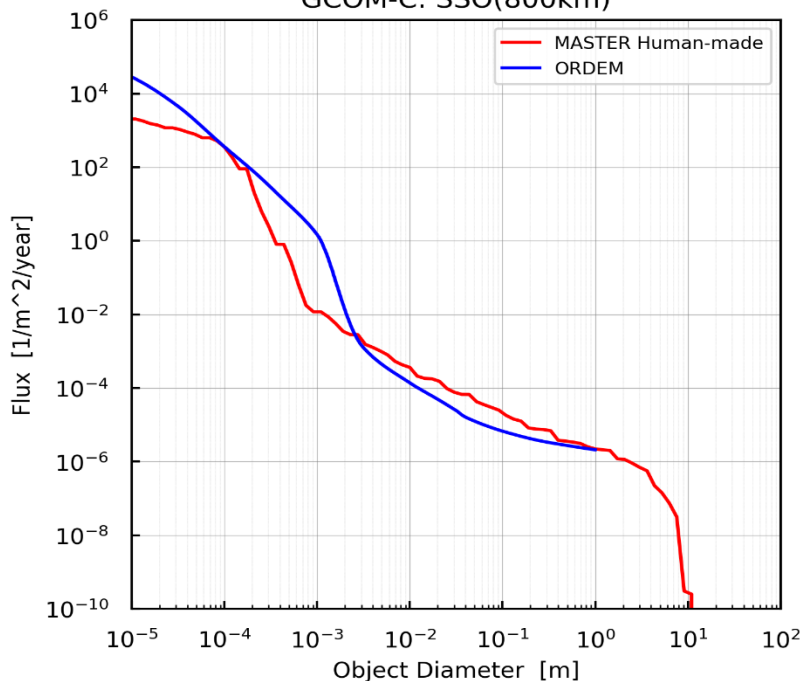
3.6 運用中に衝突する可能性がある微小デブリのサイズ

観測できない微小デブリは、**デブリ環境モデルによって存在確率を推定**する。
 NASAとESAの環境モデルが主に、宇宙機設計に実用化されている。

- NASA : ORDEM (<https://software.nasa.gov/software/MSC-25457-1>)
- ESA : MASTER (<https://sdup.esoc.esa.int/>)

ただし、微小デブリの存在確率は主に使われる上記2つの環境モデルですら桁オーダーで差がある。下図は800kmのLEO軌道でのデブリの衝突頻度を**ORDEM3.2**と**MASTER-8.0.5**で比較したもの

GCOM-C: SSO(800km)



期間	2024 01 01 00 – 2025 01 01 00
SMA [km]	7171.95
ECC	1.0e-04
INC [dig]	98.0
RAAN [deg]	0
AoP [deg]	0

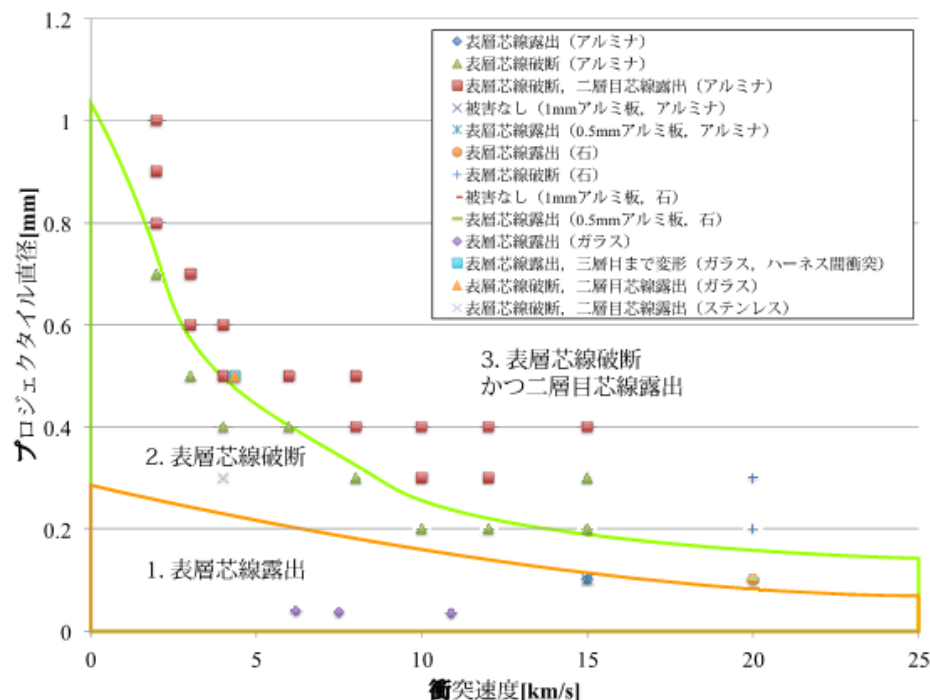
ORDEMにはデブリ種の区別はなく
 Human-madeデブリのみ

3. 小さなデブリや隕石の衝突から宇宙機を守る

3.6 運用中に衝突する可能性がある微小デブリのサイズ

- 直径1mm以下の微小デブリが、衛星に対して衝突頻度が高い。
- しかし、微小デブリの衝突試験・数値解析結果は世界的に見てほとんど公表されておらず、デブリ防護設計を実行するためのデータが不足している
- デブリ防護設計標準WGではスペースデブリ防護設計マニュアル (JERG-2-144-HB001) を発行し、衛星構造材料や防御材の衝突シミュレーションと衝突試験で取得した貫通限界曲線を載せ、JAXAプロジェクトへデブリ防護設計指針を提供している。

ハーネス貫通限界曲線の例

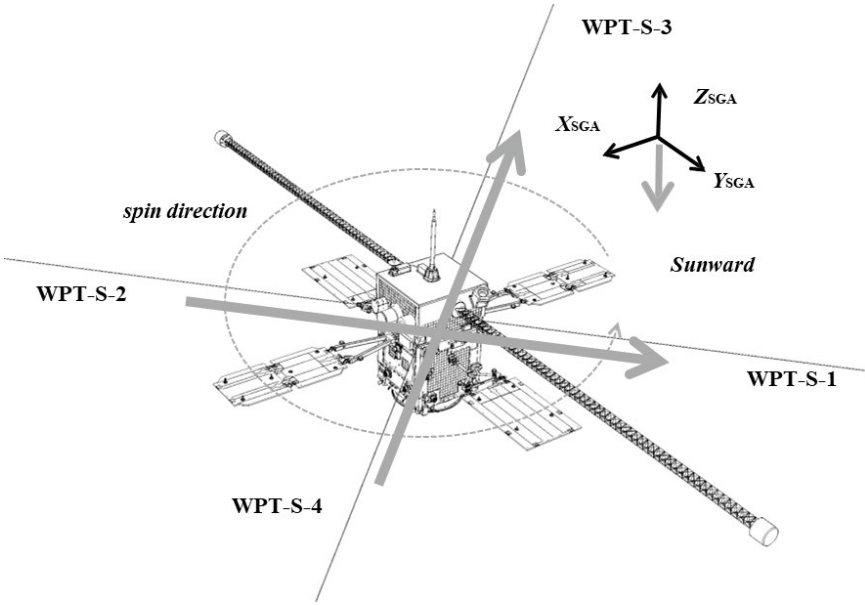


Ref. スペースデブリ防護設計マニュアル B改訂, 付録III.

3. 小さなデブリや隕石の衝突から宇宙機を守る

3.8 衝突リスク評価の具体例

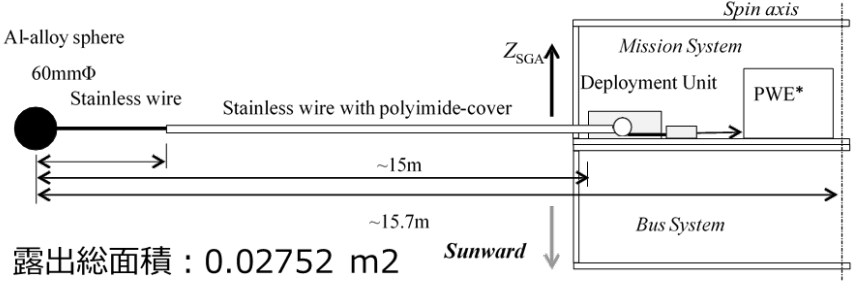
ERG(あらせ)のWPTへの衝突リスク検討



損傷リスクの確率を求めるために
 下記の3つのパラメータが必要となる。
 (1) 影響をおよぼす最小のMMODサイズ(直径)
 (2) 軌道上のMMOD環境
 (3) ミッション期間



ESAが提供するモデル MASTER 2009 を
 用いてERG軌道におけるMMOD環境を求めた。
 打上げ日時：2016年4月1日10:43:22(UTC)
 期間：2016年4月1日10時より1年間
 軌道：遠地点：26790 km
 近地点：300 km
 傾斜角：28.1 degree
 MMOD直径： $1 \times 10^{-6} \text{m}$ から1mまで

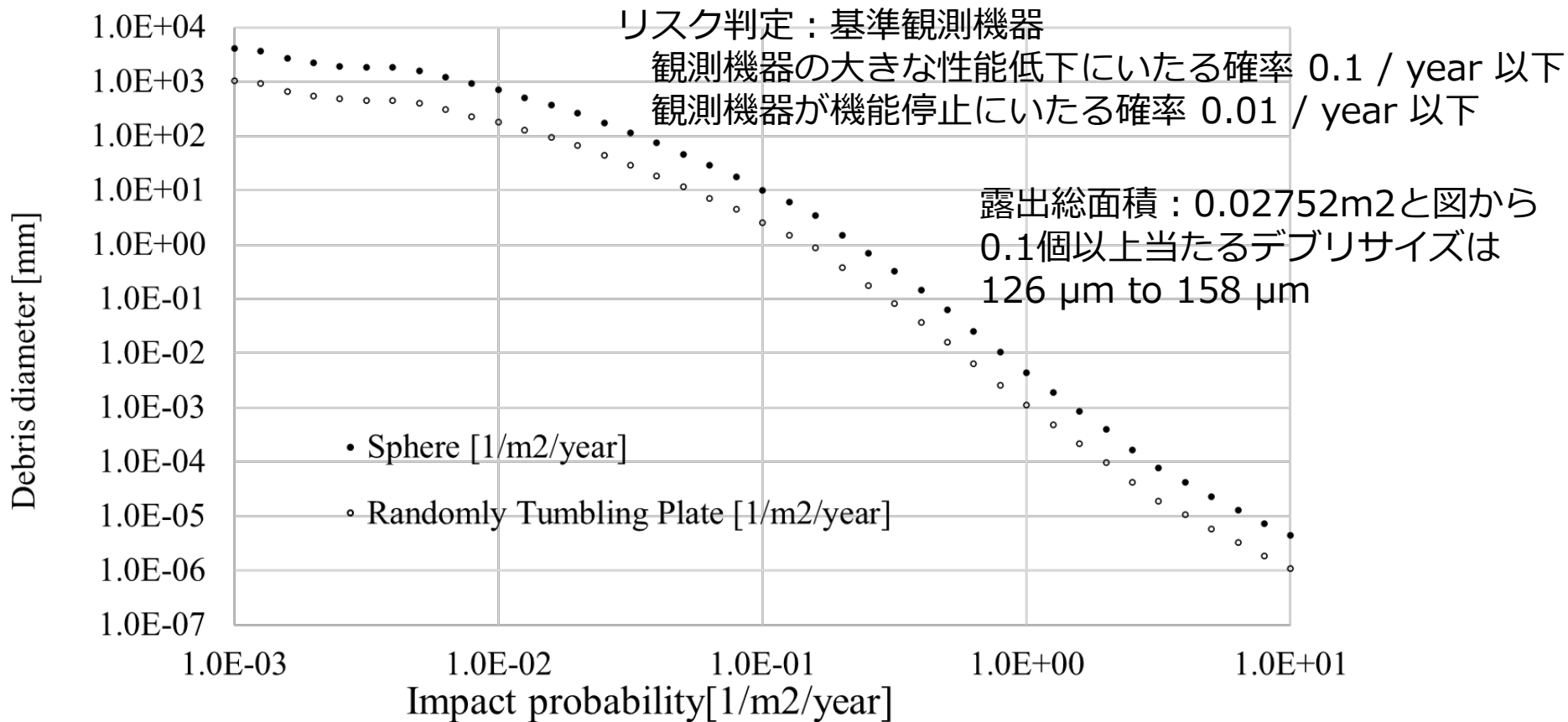


WPT：ワイヤプローブアンテナ
 MMOD：微小隕石及び軌道上デブリ

3. 小さなデブリや隕石の衝突から宇宙機を守る

3.8 衝突リスク評価の具体例

ERG(あらせ)のWPTへの衝突リスク検討：衝突確率



「Sphere」は宇宙機（衝突する対象）を断面積1 m²の球とみなしたものであり、すべての入射フラックスが90度の角度でターゲットに衝突する。「Randomly Tumbling Plate」は宇宙機をその中心周りにランダムに回転する1 m²の片面のプレートとみなしたものであり、Sphere の場合の1/4のフラックスになる。

3. 小さなデブリや隕石の衝突から宇宙機を守る

3.8 衝突リスク評価の具体例

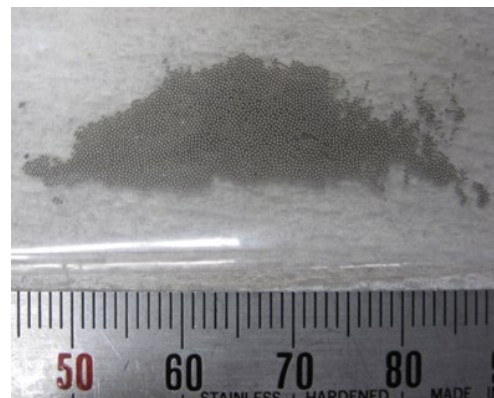
ERG(あらせ)のWPTへの衝突リスク検討：衝突試験結果

JAXAが保有する衝突試験装置：大学共同利用設備

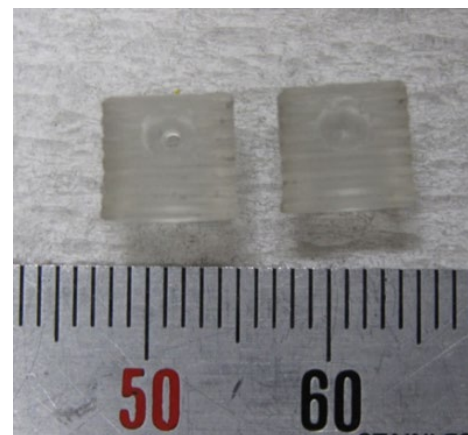
Two-stage light gas gun @ ISAS / JAXA



Projectiles (模擬デブリ)



Sabot (弾筒)



8km/s 弱の射出試験を定常的に実施可能

3. 小さなデブリや隕石の衝突から宇宙機を守る

3.8 衝突リスク評価の具体例

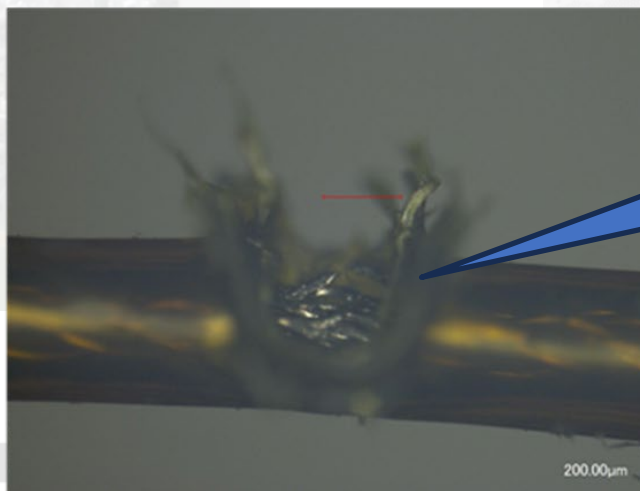
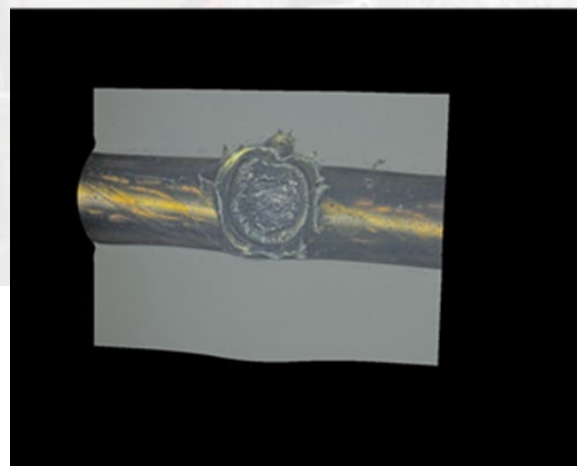
ERG(あらせ)のWPTへの衝突リスク検討：衝突試験結果

JAXAが保有する衝突試験装置：大学共同利用設備

Two-stage light gas gun @ ISAS / JAXA

Projectiles (模擬デブリ)

直径125 μm の模擬デブリを衝突速度5.9 km/sで衝突させた結果...



貫通せず
破れたのは被膜のみ

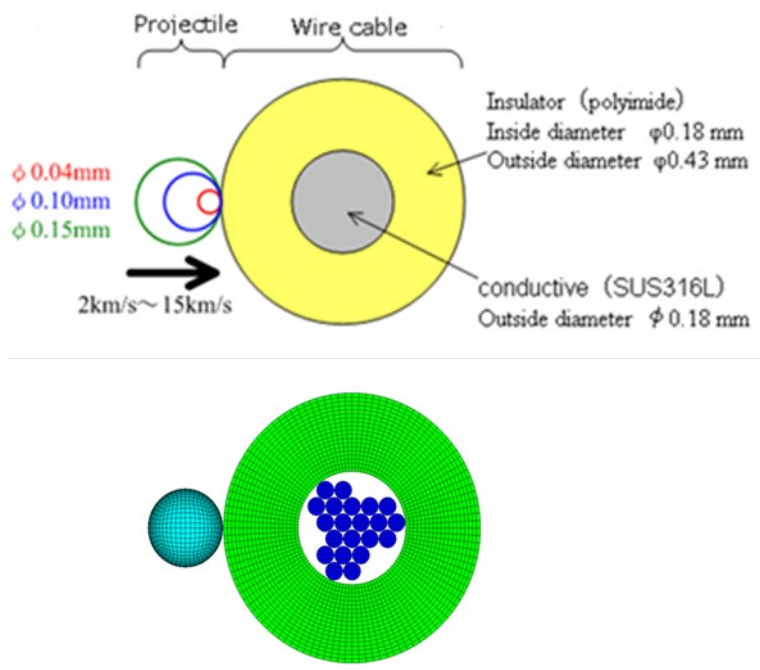
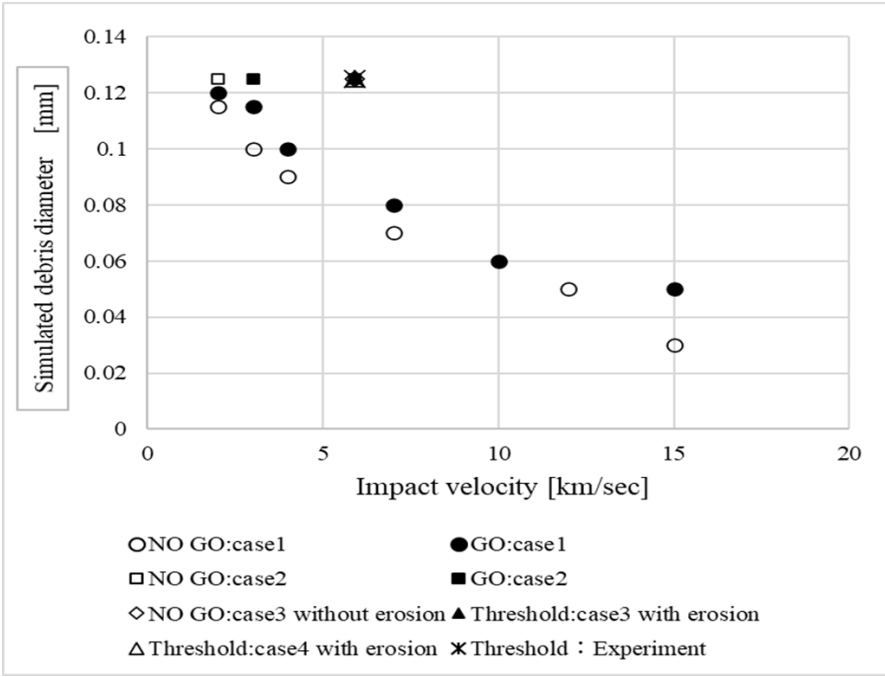
Sabot
Stopper

8km/s 弱の射出試験を定常的に実施可能

3. 小さなデブリや隕石の衝突から宇宙機を守る

3.8 衝突リスク評価の具体例

ERG(あらせ)のWPTへの衝突リスク検討：結論



得られた衝突試験結果と解析結果から、ぎりぎりクライテリアを満足すると判断し、設計変更は行わなかった。
 過酷な放射線環境下で打上げから約8年を経過して、9機器全てが稼働中

3. 小さなデブリや隕石の衝突から宇宙機を守る

3.9 TURANDOT (デブリ損傷評価ツール)

Tactical Utilities for Rapid Analysis of Debris on Orbit Terrestrial

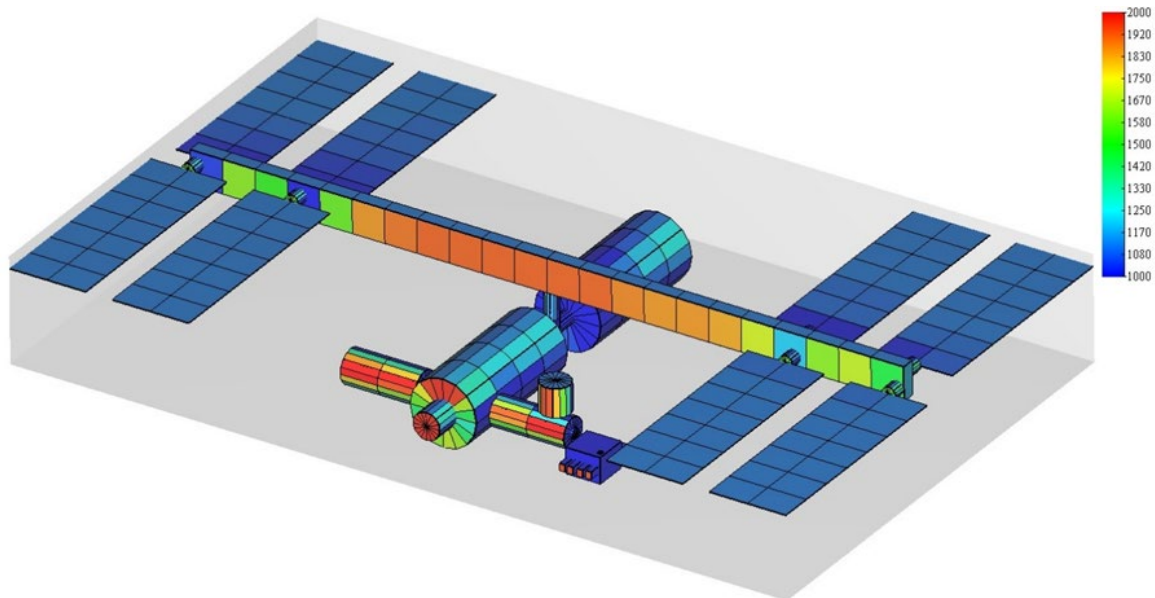
JAXAとMUSCAT Space Engineering社とで開発、維持改定中

ESAとNASAのデブリ環境モデルを用いて宇宙機へのデブリ衝突リスク評価を実施するツール

衛星の3Dモデルに対する衝突リスクを計算する。

各機関のツール

ツール名	所有者
BUMPER	NASA
ESABASE2 / DEBRIS	ESA
COLLO	TSNIImash
BUFFER	ROSCOSMOS
MDPANTO	RWTH Aachen Univ
SHIELD	QuintiQ
MODAOST	CNSA
TURANDOT	JAXA

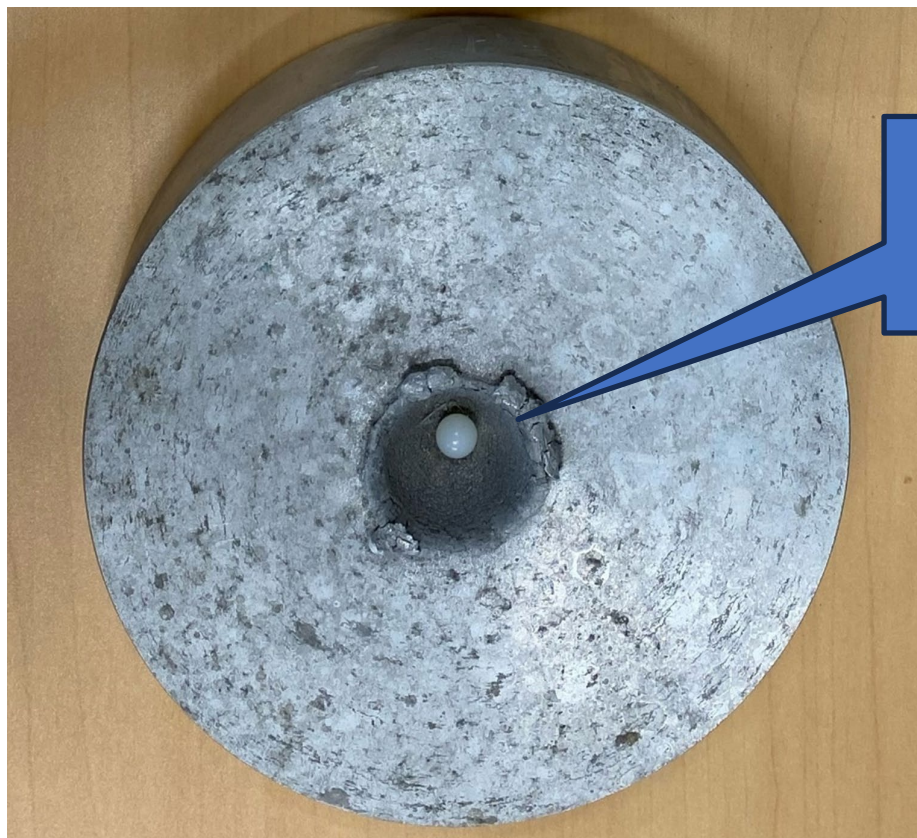


3. 小さなデブリや隕石の衝突から宇宙機を守る

3.10 衝突試験に関する紹介

衝突試験により損傷した供試体
※前述したISAS / JAXAの衝突試験装置を使用

模擬デブリ：直径7mmのポリカーボネート球
供試体(衝突対象)：アルミニウム円盤
衝突の速度：約7 km/s



供試体に空いた穴
直径4cm、深さ1cm

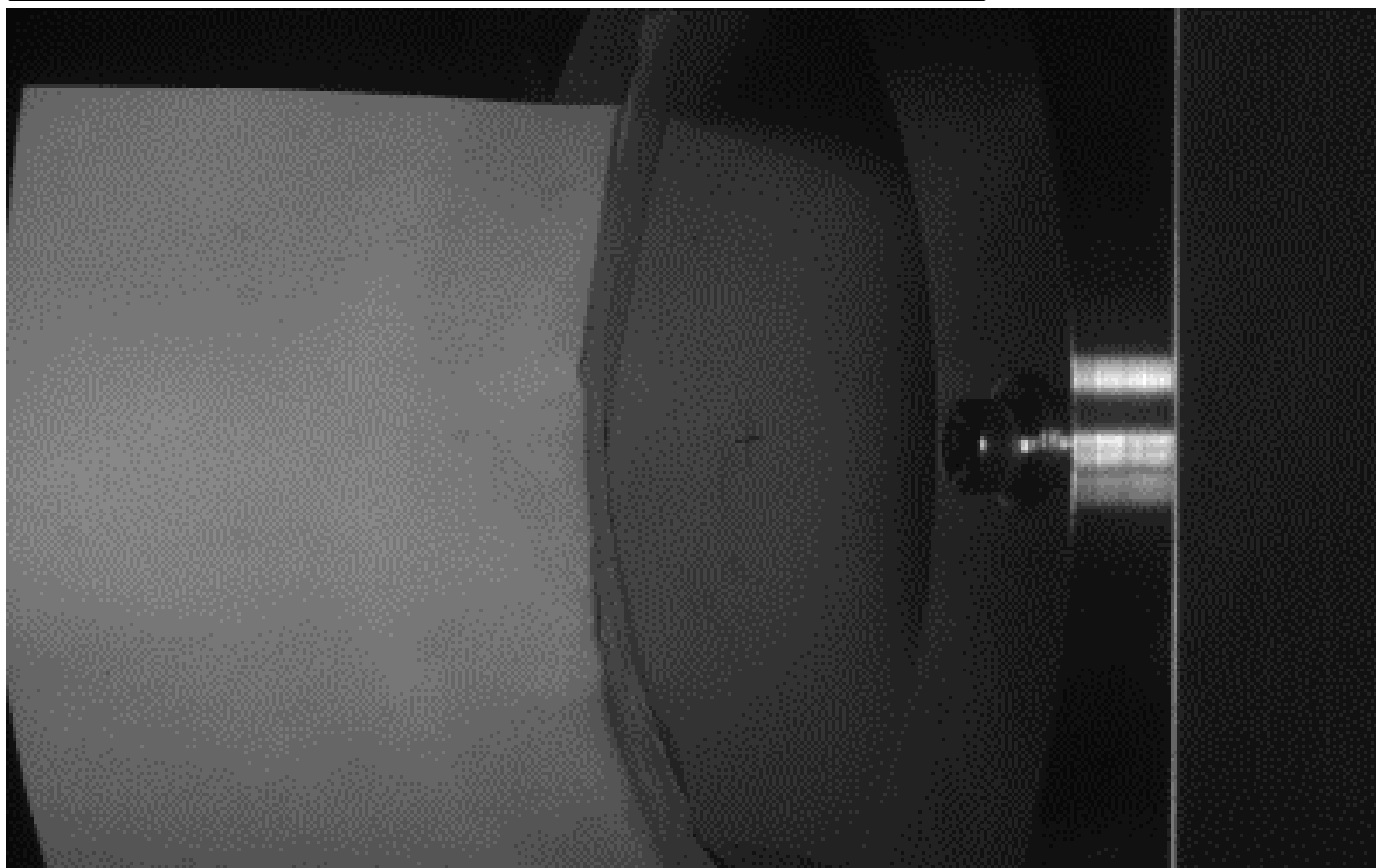
衝突試験の映像

※前述したISAS / JAXAの衝突試験装置を使用

模擬デブリ：直径1mmのアルミ球

供試体(衝突対象)：厚さ1.2mmのチタン板

衝突の速度：6.090 km/s



チタン板を貫通

衝突試験の映像

模擬デブリ：直径7mmのアルミ球
 供試体(衝突対象)：厚さ0.6mmのチタン板
 衝突の速度：2.39 km/s



JERG-2-144 微小デブリ衝突耐性評価標準

JERG-2-144-HB001 スペースデブリ防護設計マニュアル

https://www.in-jaxa/fw/dfw/ansn/anshin/TechDoc/design_index.php

3. 小さなデブリや隕石の衝突から宇宙機を守る

JMR-003 : スペースデブリ発生防止標準にて主眼とする対策(一部抜粋)

- (2)運用中の宇宙システムが**破砕してデブリ**を発生させることを未然に防ぐこと。
→宇宙システムの廃棄に必要な機能の喪失を未然に防ぐこと。
→本章では**偶発的衝突による破砕**の防止について、防護の観点で説明した。

**地上から見えないスペースデブリとの衝突は避けられない。
衝突試験や損傷評価ツールを活用した防護策の検討が重要！**

質疑応答

4. 軌道上の衝突事故を防止するためのリスク管理

目次

- 4.1 軌道上物体との衝突に関する懸念
- 4.2 デブリとの衝突を避けるため、何を行っている？
- 4.3 宇宙状況把握(SSA : Space Situational Awareness)
- 4.4 接近解析と衝突回避運用
- 4.5 ロケット打上げ時の軌道上物体との衝突回避

4. 軌道上の衝突事故を防止するためのリスク管理

JMR-003：スペースデブリ発生防止標準にて主眼とする対策(一部抜粋)

(2)運用中の宇宙システムが**破砕して大量のデブリ**を発生させることを未然に防ぐこと。

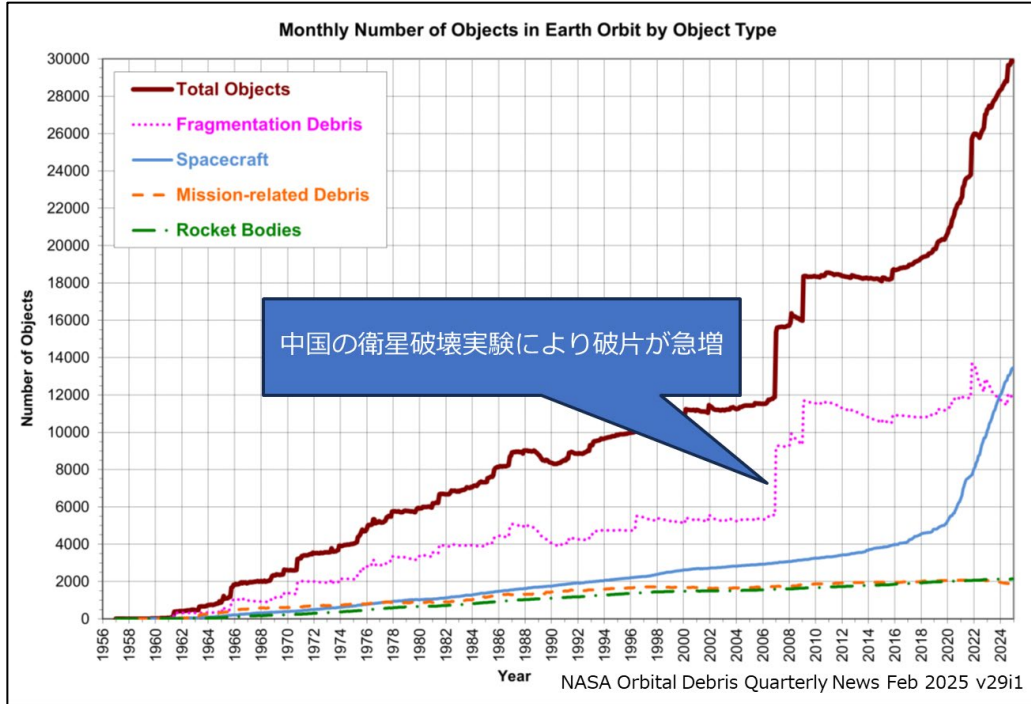
→本章では**偶発的衝突による破砕**の防止について、衝突回避の観点で説明する。

- スペースデブリの観測・軌道決定
→宇宙状況把握(SSA)
- 宇宙機への接近解析と衝突回避
→衝突回避運用(JMR-016：人工衛星の衝突リスク管理標準にて規定)
- ロケット打上げ時の軌道上物体との衝突回避
→L-COLA(JERG-1-011:人工衛星等打上げ用ロケットの飛行安全に関する基本要求にて規定)

4. 軌道上の衝突事故を防止するためのリスク管理

4.1 軌道上物体との衝突に関する懸念

米国が軌道を把握・更新し続けている軌道上物体数の推移



カタログ物体(*)との衝突事例(抜粋)

- 1991:ロシア使用済み衛星と衛星破片
- 1996:仏軍事観測衛星とロケット破片
- 2005:米国ロケットと中国ロケット破片

(*)カタログ物体

米国が観測・軌道決定し、維持管理する軌道上物体。直径10cm以上と言われているが、近々レーダ設備の高度化(Space Fence)により、より小さな物体の軌道把握が可能になると言われている。

4. 軌道上の衝突事故を防止するためのリスク管理

4.1 軌道上物体との衝突に関する懸念

2015年以降に浮上した新たな懸念

2015年以降、小型衛星利用が急拡大

1. 中小規模の企業による小型衛星サービス
2. 迅速監視・通信システムの実現(コンステレーション)
3. 大学など超小型衛星実験の一般化



ロケットから放出直前の
Starlink衛星群(60機同時放出)

コンステレーション名称	機数 (実績/計画)	軌道高度	衛星質量
Iridium Next, USA	75 / 75	780 km	860 kg
BlackSky, USA	12 / 16	450 km	44-56 kg
OneWeb, USA	656 / 716	1,200 km	147 kg
SpaceX Starlink	10,095 / 42,000	550 km	260, 800 kg
SES (O3b / mPOWER)	30 / 70	8,000 km	
Telesat (Lightspeed), CANADA	8 / 298	1,000-1,248 km	700-750 kg

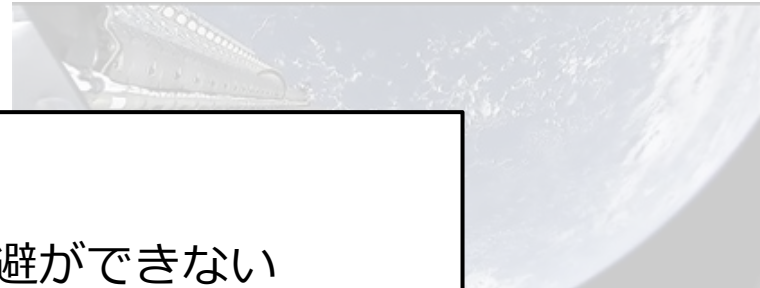
4. 軌道上の衝突事故を防止するためのリスク管理

4.1 軌道上物体との衝突に関する懸念

2015年以降に浮上した新たな懸念

2015年以降、小型衛星利用が急拡大

1. 中小規模の企業による小型衛星サービス
2. 迅速監視
3. 大学など



トから放出直前の様子(60機同時放出)

小型衛星業界の持つ課題

- A) 軌道制御機能が不十分で衝突回避ができない
- B) 運用終了後、保護軌道域からの脱出ができない
- C) 大型衛星との相乗りで安く打ち上げる⇒放出高度が高くなり、運用終了後の廃棄処置が困難
- D) 運用終了後の管理責任が曖昧になりがち

コンステレーション			
Iridium Next,			
BlackSky, U			
OneWeb, U			
SpaceX Starlink	10,095 / 42,000	550 km	260, 800 kg
SES (O3b / mPOWER)	30 / 70	8,000 km	
Telesat (Lightspeed), CANADA	8 / 298	1,000-1,248 km	700-750 kg

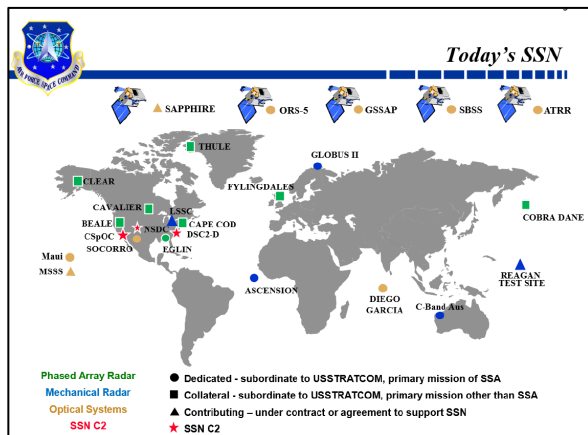
4. 軌道上の衝突事故を防止するためのリスク管理

4.2 デブリとの衝突を避けるため、何を行っている？



②スクリーニング

米国が保有するデブリカタログとの
接近解析を実施



③接近通知(CDM)を作成

解析の結果、接近が検知されれば
CDM形式でJAXAへ通知

①軌道暦を米国へ送付

JAXA衛星のうち、軌道制御可能な衛星は、
最新軌道予測（軌道暦）を送付

④接近リスクを独自評価

JAXA衛星の最新情報を取り入れ衝突確率を算出
最接近時刻までの時間と衝突確率をもとに、
CAMの要否を判断
軌道変更する場合は変更後の予測軌道を
米国へ送付

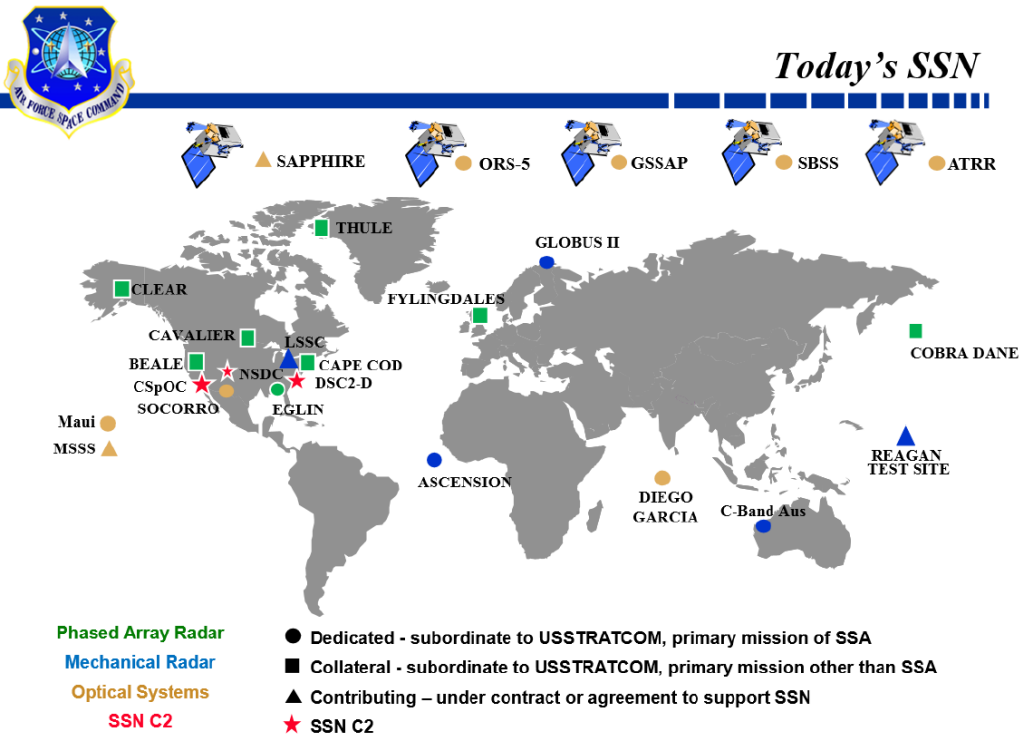
⑤接近回避運用(CAM)

衛星運用者との最終判断会議の後にGo判断が
出た場合、CAMを実施
デブリ接近後の可視パスで衛星の健全性を確認

4. 軌道上の衝突事故を防止するためのリスク管理

4.3 宇宙状況把握(SSA : Space Situational Awareness)

人工衛星を運用する地球周回軌道を安定的に利用するためには、運用中の他の人工衛星やスペースデブリ等の軌道上物体の軌道を把握して管理することが重要となる。



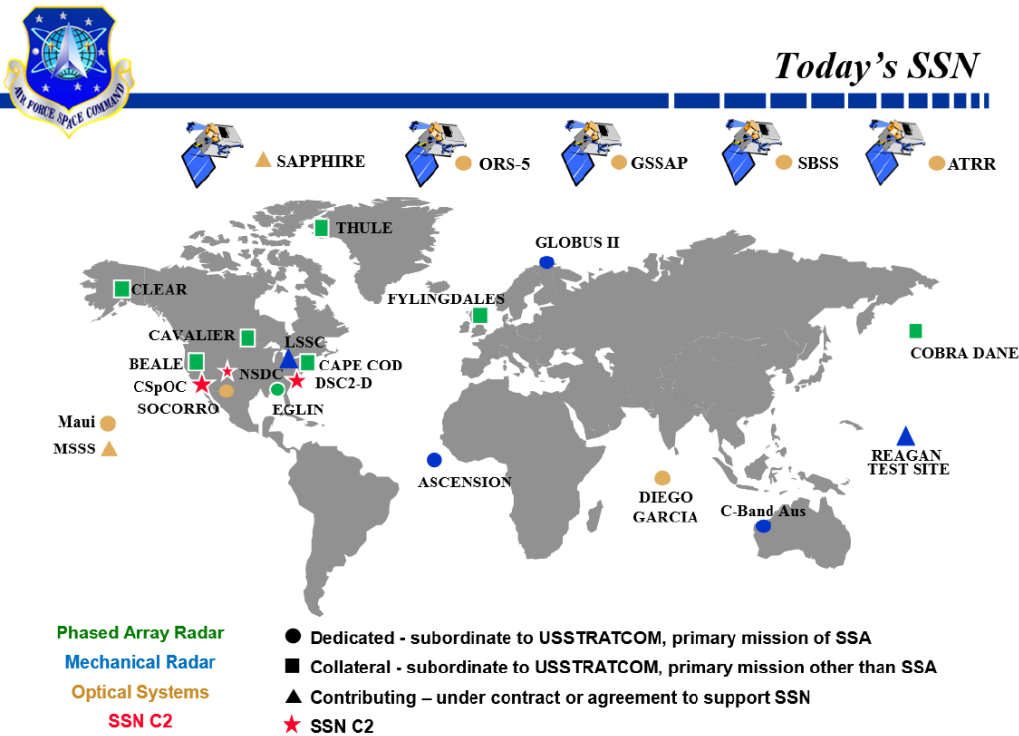
米国では軌道環境の把握は防衛省のSSN(Space Surveillance Network)によって行われている。

SSNによって監視された物体の情報は、CSpOC(Combined Space Operations Center)によってカタログ化されている。

SSNセンサーは地球低軌道において10cm程度以上の物体をカタログ化している。

2019年時点でのSSNの監視網
 NASA教育資料Tutorial :
 An Overview of the Orbital Debris Environment (2019)

人工衛星を運用する地球周回軌道を安定的に利用するためには、運用中の他の人工衛星やスペースデブリ等の軌道上物体の軌道を把握して管理することが重要となる。



CSpOCは衛星運用者のための接近解析サービスを提供している。

JAXAはSSA活動に関連してCSpOCと契約しており、JAXAが運用する衛星に関する軌道暦をCSpOCへ送付し、CSpOCはカタログ物体との接近を評価する。

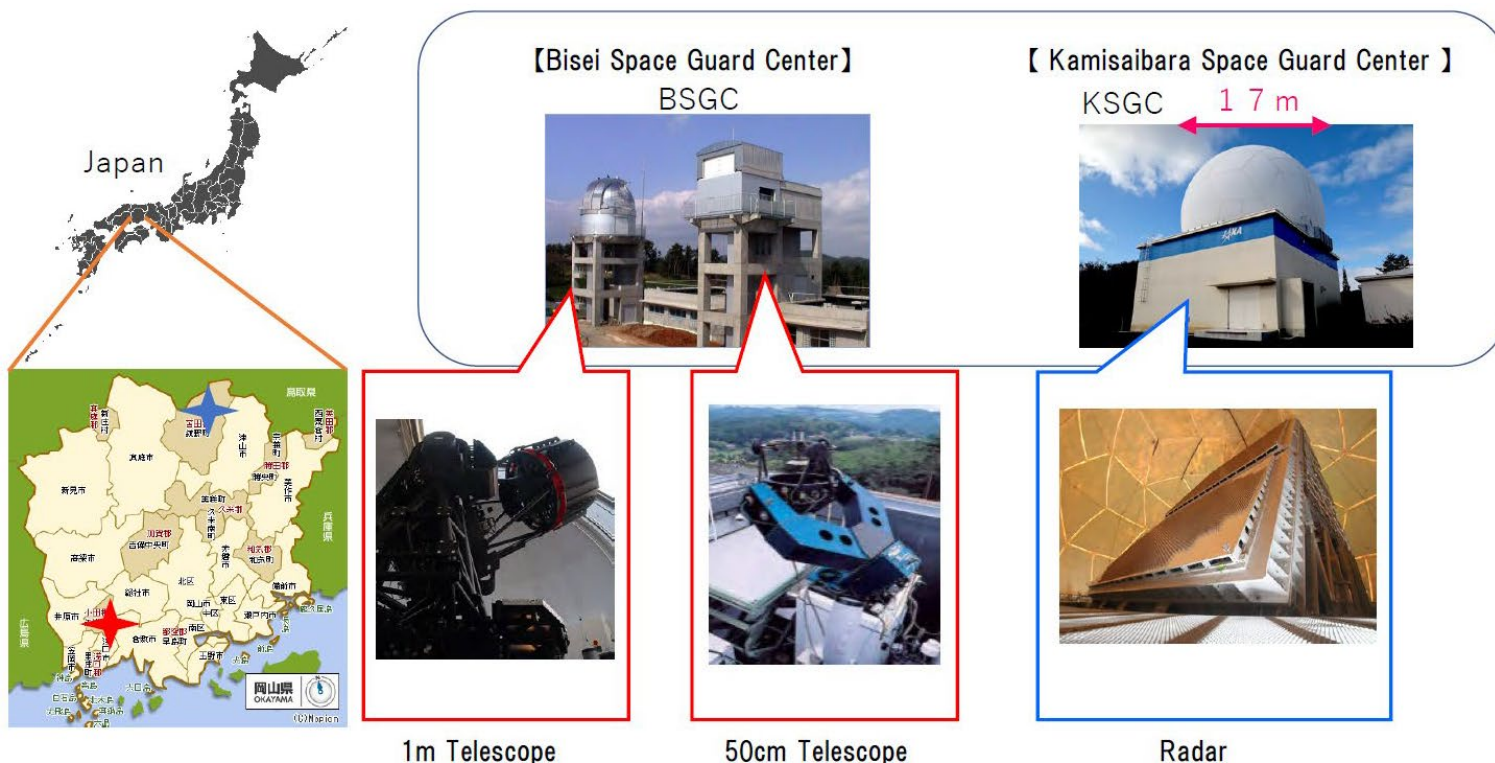
CSpOCが接近を検知したらCDMがJAXAに送られてくる。CDMをJAXA内で評価し、JAXA衛星がCAMを行うか否かの判断を下す。

2019年時点でのSSNの監視網
NASA教育資料Tutorial :
An Overview of the Orbital Debris Environment (2019)

4. 軌道上の衝突事故を防止するためのリスク管理

4.3 宇宙状況把握(SSA : Space Situational Awareness)

JAXAのSSAシステムは、岡山県美星スペースガードセンター(光学)と、岡山県上齋原スペースガードセンター(レーダ)がある。光学望遠鏡は静止軌道の1m程度以上の物体を観測可能で、レーダは高度650kmにおいて10cm程度以上の物体を観測可能である。



Japan

【Bisei Space Guard Center】
BSGC

【Kamisaibara Space Guard Center】
KSGC 17m

1m Telescope

50cm Telescope

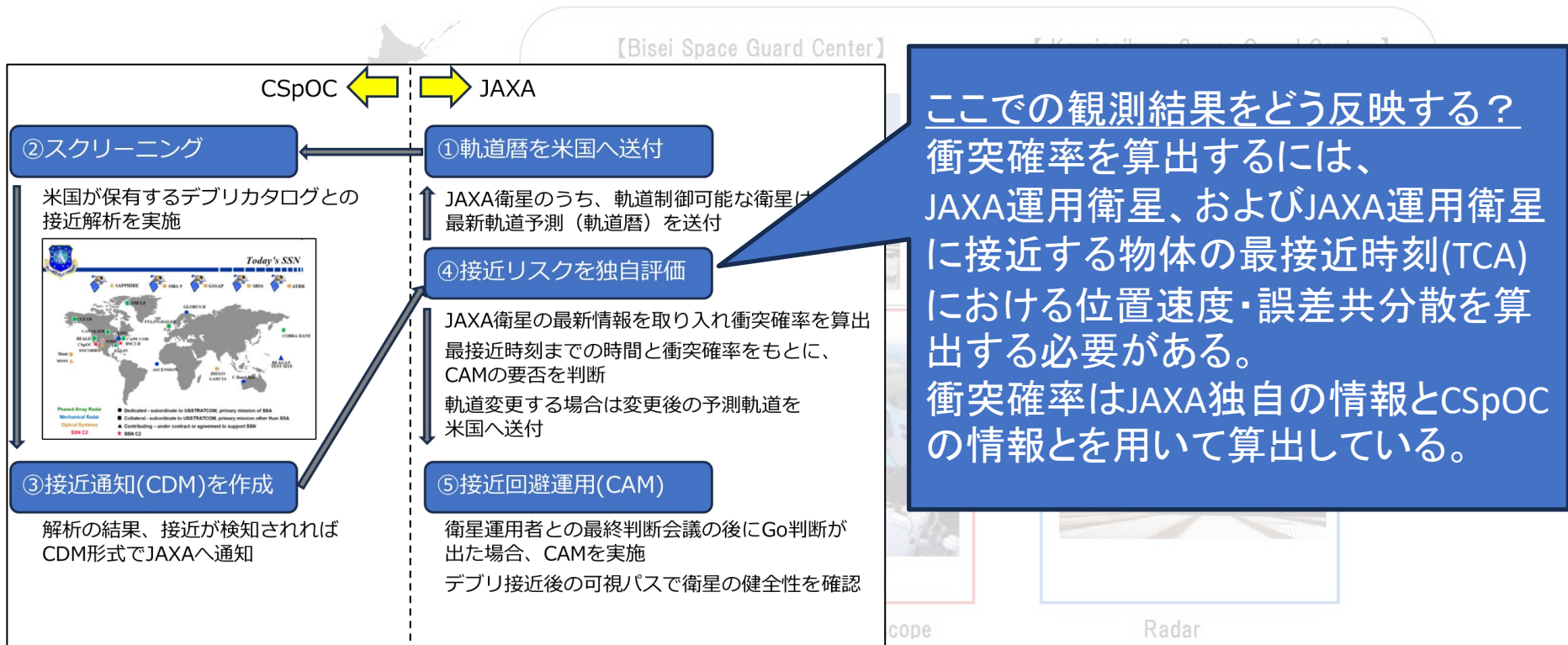
Radar

2023年 ISRO WS追跡ネットワーク技術センター発表資料 (JAXA's SSA Activities)

4. 軌道上の衝突事故を防止するためのリスク管理

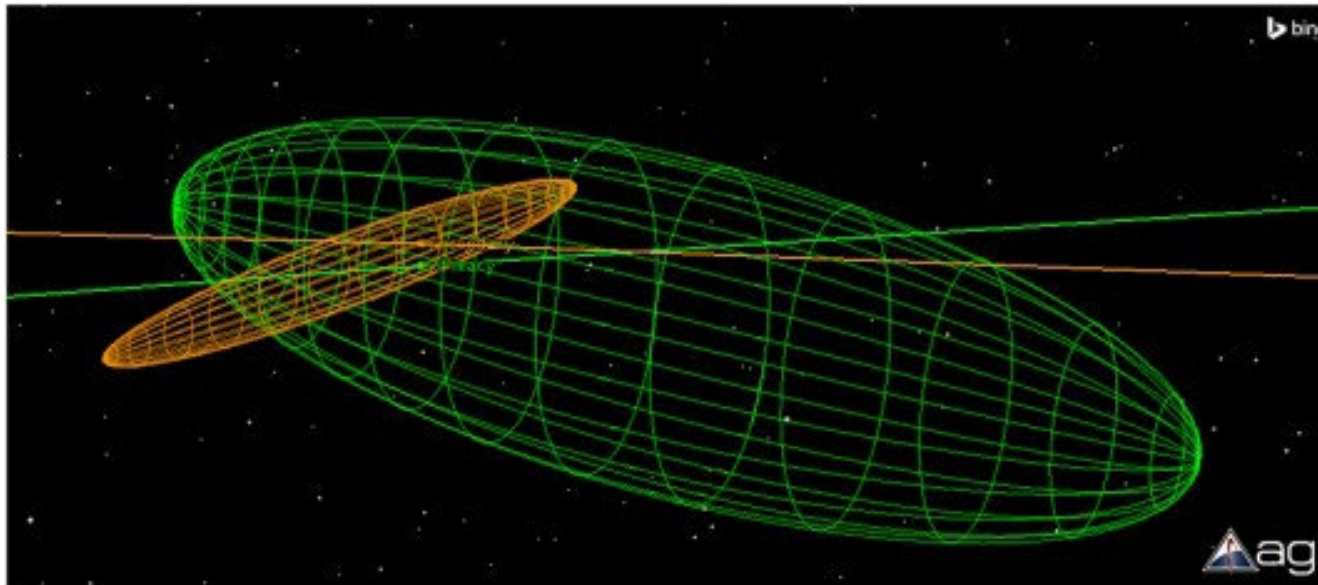
4.3 宇宙状況把握(SSA : Space Situational Awareness)

JAXAのSSAシステムは、岡山県美星スペースガードセンター(光学)と、岡山県上齋原スペースガードセンター(レーダ)がある。光学望遠鏡は静止軌道の1m程度以上の物体を観測可能で、レーダは高度650kmにおいて10cm程度以上の物体を観測可能である。



■ 衝突回避の概要

低軌道の場合、自分（プライマリ物体）と評価対象物（セカンダリ物体）のそれぞれの位置の不確かさを楕円体で与え、この楕円体同士の衝突を確率的に評価している。



Probability of Collision:
Valuation, variability,
visualization, and validity,
Salvatore Alfano, et. al,

JAXAの場合、衝突確率と最接近時刻(TCA : Time to Closest Approach)までの時間の両方を加味して、**リスクの高い状態**になった場合には**衝突回避を衛星運用者に推奨または要求**している。

4. 軌道上の衝突事故を防止するためのリスク管理

4.4 接近解析と衝突回避運用

- プライマリ物体がセカンダリ物体と衝突するリスクを低減するために衝突回避運用を実施する。
- リスクを評価するために「発生可能性」と「想定される影響度」の2項目を組み合わせてリスクの大きさを求めることが規定されている。ただし、軌道が把握されている物体同士（いずれも物体半径が数cm以上）の衝突事象に関して言えば、**一度衝突が発生した場合には**、プライマリ物体の機能を損失するだけでなく、**宇宙環境に深刻な影響を与える**ことから、発生した際の影響度はいずれの衝突の場合も許容レベルを超える。そのため、**実質的には「発生可能性（衝突確率）」のみの指標で、衝突リスクを評価**すればよい。
- ただし、静止衛星のように衝突確率によるリスク管理が必ずしもそぐわない場合は、接近解析・衝突回避運用支援部署と調整し、接近解析及び適切な相対距離を確保するなどによる衝突回避運用の方針を決める。

- 衝突リスクを規定する指標として、軌道位置の誤差や物体の大きさを考慮して算出される「衝突確率」を原則使用する。衝突断面で評価する衝突確率の計算条件には相対速度が大きいことなどがあるが、静止軌道ではこの計算条件が成り立たない場合が発生し得る。
- 最接近距離や高度方向の分離距離は、衝突リスクを評価するための付帯情報として扱うこととする。

■ 機構担当部署および各組織への要求

接近解析・衝突回避運用を実施する部署

- ・ 衝突回避運用を含む衛星運用に関する実施判断
- ・ 上記の実施判断に関する情報連絡
- ・ 衝突回避運用に関する衛星管制運用

接近解析・衝突回避運用支援を実施する部署

- ・ プライマリ物体に衝突する可能性のあるセカンダリ物体の識別と衝突リスクの算出
- ・ 衝突リスクの高い接近事象に関する情報連絡
- ・ 衝突回避制御の計画立案
- ・ 衝突回避運用に関する追跡ネットワーク設備の運用

危機管理室

- ・ リスク管理に係る情報の収集と状況の把握（衝突回避後の安全確認を含む）
- ・ 検知されたリスクについて、全機構的対応の判断
（対応要と判断された場合は、対応策の協議・設定）

4. 軌道上の衝突事故を防止するためのリスク管理

4.4 接近解析と衝突回避運用

機構担当部署は、セカンダリ物体との衝突リスクを最小化するために以下の各項を実施しなければならない。

(1) 接近解析及び衝突回避運用

(2) 情報連絡

なお、低軌道衛星に関しては別項(JMR-016 6.2項)に従う運用を要求するが、**低軌道衛星以外は別途個別に定めた最接近時刻における幾何学的距離等を用いたリスク評価手法に基づき運用**を行うこと

低軌道以外はどうするのか？

追跡NW管理要領を制定後、低軌道以外において衝突回避運用を実施した経験はない。経験のない運用方法をJAXA標準とするわけにはいかない。

低軌道衛星以外では機構での衝突回避運用実績を積み、衝突回避運用手順が成熟した後、JMR-016に加える予定である。

4. 軌道上の衝突事故を防止するためのリスク管理

4.4 接近解析と衝突回避運用

■ 衝突リスクレベル

プライマリ物体とセカンダリ物体の衝突リスクに備えるために**三段階の衝突リスクレベルを設定**する。

衝突リスクレベル		説明
レベル1	MONITOR	衝突リスクが高いことが検知されているが、TCAに至るまでに衝突回避制御を実施する時間が十分に確保されている状態。このリスク対応レベルでは、追跡ネットワーク技術センターから最新の接近状況を逐次報告し、関係者は衝突リスクの傾向に注視する。軌道制御機能を有していない主物体であっても、レベル1の条件を満たしている場合には本リスク対応レベルに該当する。
レベル2	URGENT	衝突リスクが高いため、衝突回避制御の準備を進め、要すれば衝突回避制御を実施すべき状態。このリスク対応レベルでは、追跡ネットワーク技術センターから最新の接近状況を逐次報告するとともに、衝突回避運用の準備と、要すれば衝突回避制御を実施することで、衝突リスクを低減させることを優先した危機管理体制、衛星運用体制を構築する。
レベル3	CRITICAL	衝突リスクが非常に高いが、衝突リスクを低減させるための衛星運用（衝突回避運用等）が実施できない状態。このリスク対応レベルでは、衝突リスクを低減させることができないため、真にリスクの高い状態であり、最大限の危機管理体制、衛星運用体制を構築する。

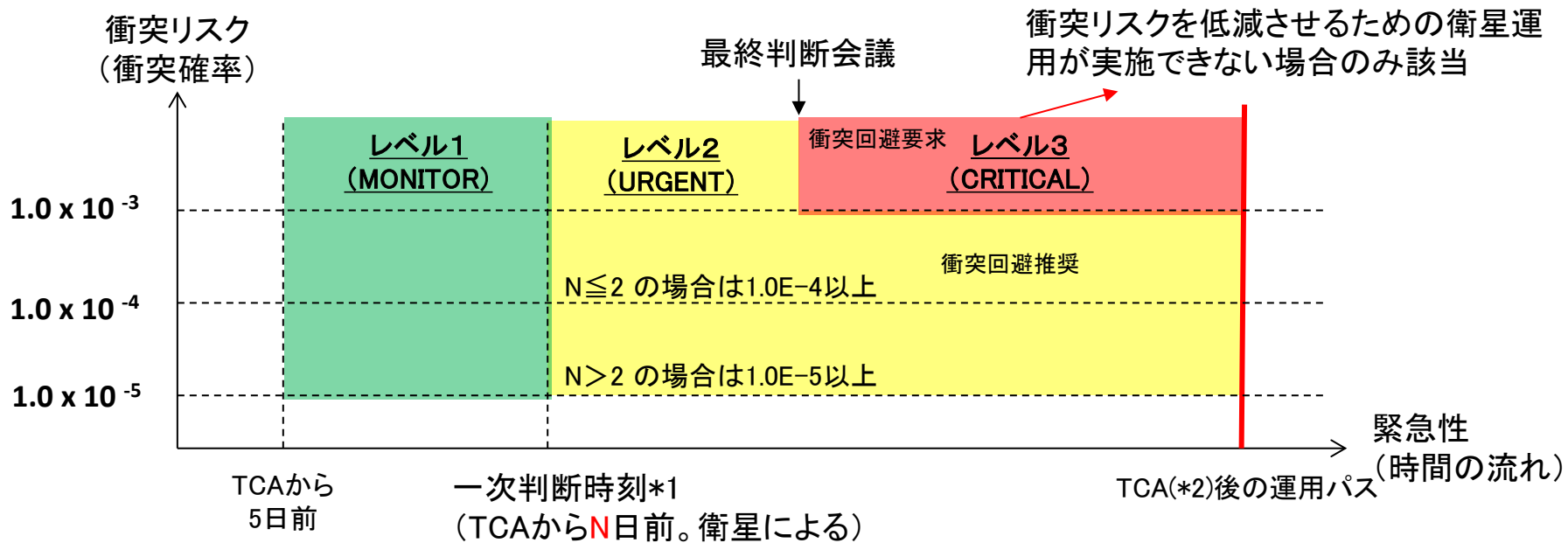
4. 軌道上の衝突事故を防止するためのリスク管理

4.4 接近解析と衝突回避運用

■ 衝突リスクレベルの遷移

原則として、衝突確率の大きさと緊急度、すなわち最接近時刻までの猶予時間に応じて定義される。

軌道制御機能を有するプライマリ物体の場合



* 1: 衝突回避制御の準備に必要な時間を考慮し、衝突回避運用を実施する部署毎に設定する

* 2: Time of Closest Approach (最接近時刻)

■ 最終判断会議における衝突回避制御の実施判断基準

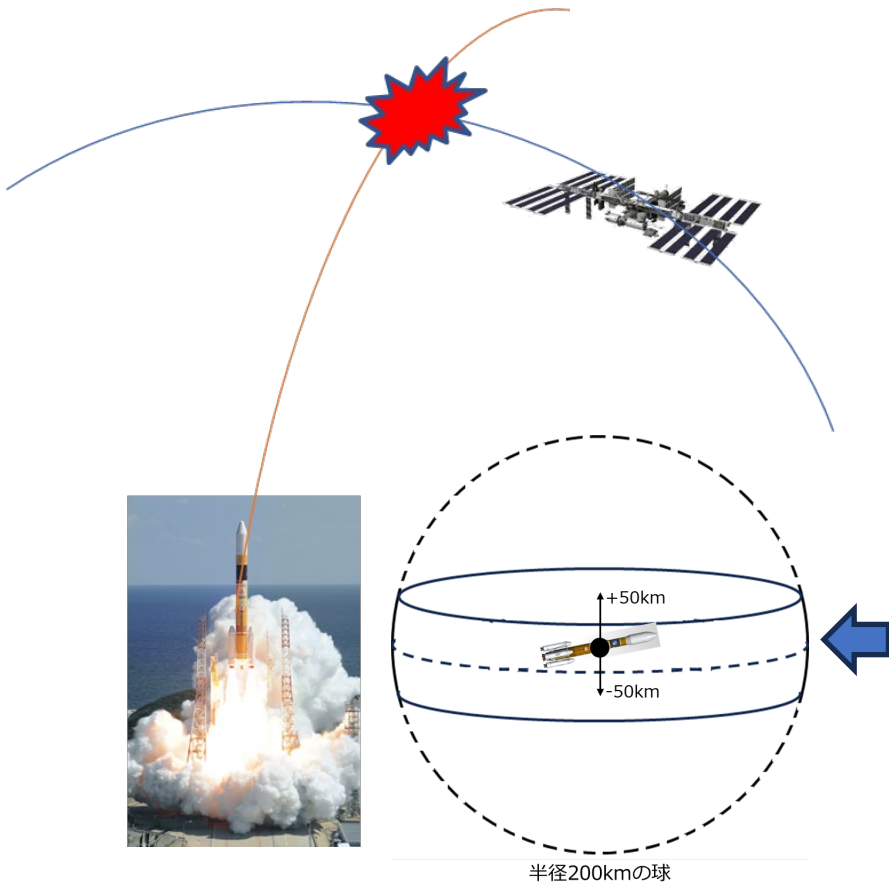
衝突回避制御の実施判断基準は下表の通りとする。なお、衝突回避制御の実施判断に際しては、下記の判断基準に加えて、当該時点の衛星システムの状態（衝突回避制御運用を実施することによるリスクが無いか）を考慮し、総合的に判断する必要がある。

カテゴリ	衝突確率	説明
回避要求範囲	1.0E-3以上	軌道制御機能を有するプライマリ物体は、ミッション運用の継続性よりも 回避制御の実施を優先 すること
回避推奨範囲	1.0E-4 以上 1.0E-3 未満	軌道制御機能を有するプライマリ物体は、ミッション運用の継続性を考慮したうえで 可能であれば回避制御を実施 すること

4. 軌道上の衝突事故を防止するためのリスク管理

4.5 ロケット打上げ時の軌道上物体との衝突回避

- ロケット打上げ時の軌道上物体との衝突回避
(L-COLA : Launch - COLLision Avoidance)



ロケットの打上げに際しては、有人宇宙物体が必要な安全化措置を取ることができるように、原則として打上げから60時間まで、**ロケット(ロケットからの分離物を含む)と軌道上の有人宇宙物体とが衝突しないように配慮**すること。具体的には、下記(1)の確認を行うこと。(1)を満足しない場合でも、(2)の確認ができればよい。

(1)ロケットを中心とした半径200kmの球内で、且つ高度方向に対して±50km以内の領域に有人宇宙物体が進入しないこと。

(2)ロケットと有人宇宙物体との1接近あたりの衝突確率が $1.0E-6$ 以下であること。

4. 軌道上の衝突事故を防止するためのリスク管理

JMR-003：スペースデブリ発生防止標準にて主眼とする対策(一部抜粋)

(2)運用中の宇宙システムが**破砕して大量のデブリ**を発生させることを未然に防ぐこと。

→本章では**偶発的衝突による破砕**の防止について、衝突回避の観点で説明した。

- ・スペースデブリの観測・軌道決定
→宇宙状況把握(SSA)
- ・宇宙機への接近解析と衝突回避
→衝突回避運用(JMR-016：人工衛星の衝突リスク管理標準にて規定)
- ・ロケット打上げ時の軌道上物体との衝突回避
→L-COLA(JERG-1-011:人工衛星等打上げ用ロケットの飛行安全に関する基本要
求にて規定)

**偶発的衝突による大量のデブリ発生を防ぐために、
これらを着実に実施していくことが必要不可欠となる！**

なお、上記に関連する要求として、宇宙活動法のガイドラインでは以下を定めている。

6.3. 管理計画

6.3.3 他の人工衛星等との衝突回避

質疑応答

5. 大気圏に落下する宇宙機／ロケットの残骸から 地上を守る

目次

- 5.1 地球へ再突入してくる物体数の変遷
- 5.2 地上に到達する再突入物体
- 5.3 溶融解析と傷害予測数
- 5.4 制御しない再突入は落下地点を正確に予測できるか？
- 5.5 制御再突入

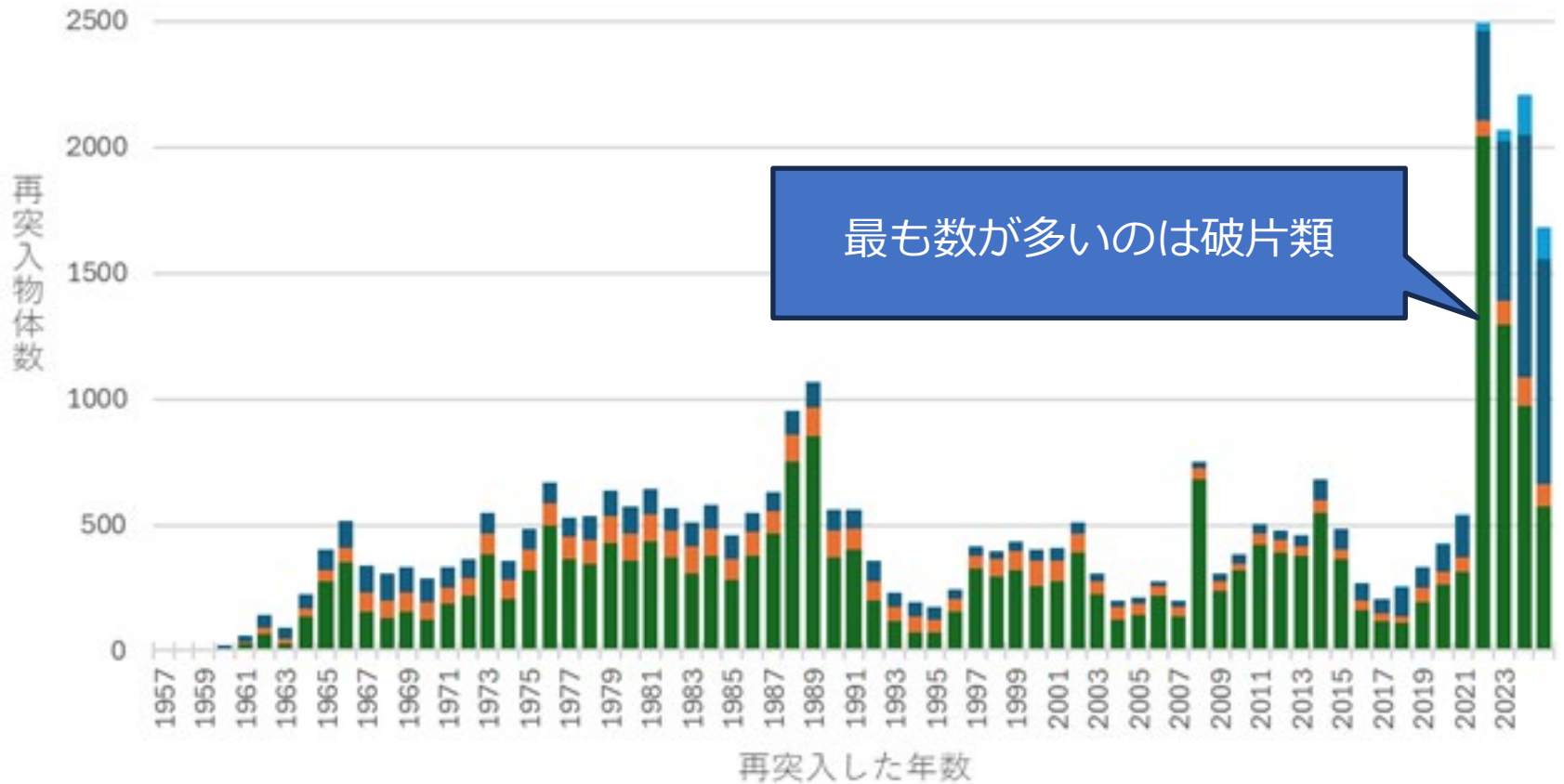
JMR-003 : スペースデブリ発生防止標準にて主眼とする対策(一部抜粋)

(4)地球低軌道保護域から除去した宇宙システムの地球への落下により人的被害および地球への環境汚染を発生させないこと。

地球低軌道保護域から離脱した宇宙システムの地上再突入を安全に実施するために考慮すべきポイントは何か？

5. 大気圏に落下する宇宙機／ロケットの残骸から地上を守る

5.1 地球へ再突入してくる物体数の変遷



Space-Track (<https://www.space-track.org>), 2025.11.11

直近は、衛星破壊実験で発生した破片の大量の再突入が見られたが、今後は退役したコンステレーション衛星の再突入等で頻度は増加する予測が立てられている。

5. 大気圏に落下する宇宙機／ロケットの残骸から地上を守る

5.1 地球へ再突入してくる物体数の変遷



Space-Track (<https://www.space-track.org>), 2025.11.11

直近は、衛星破壊実験で発生した破片の大量の再突入が見られたが、今後は退役したコンステレーション衛星の再突入等で頻度は増加する予測が立てられている。

5. 大気圏に落下する宇宙機／ロケットの残骸から地上を守る

5.2 地上に到達する再突入物体

ロケットや衛星が地球へ再突入する際、大気による空力加熱によって大部分のパーツは燃え尽きる。しかしながら、チタン等の高融点の金属は再突入を経ても残存し、地上で度々見つかっている。地上に落下すれば、全く無関係な人に被害が及ぶ可能性がある。

1997年 デルタIIロケット燃料タンクの破片



<https://aerospace.org/article/satellite-reentry-manipulating-plunge>

2021年3月 米国ワシントン近傍で見つかった Falcon 9上段の推薬タンク

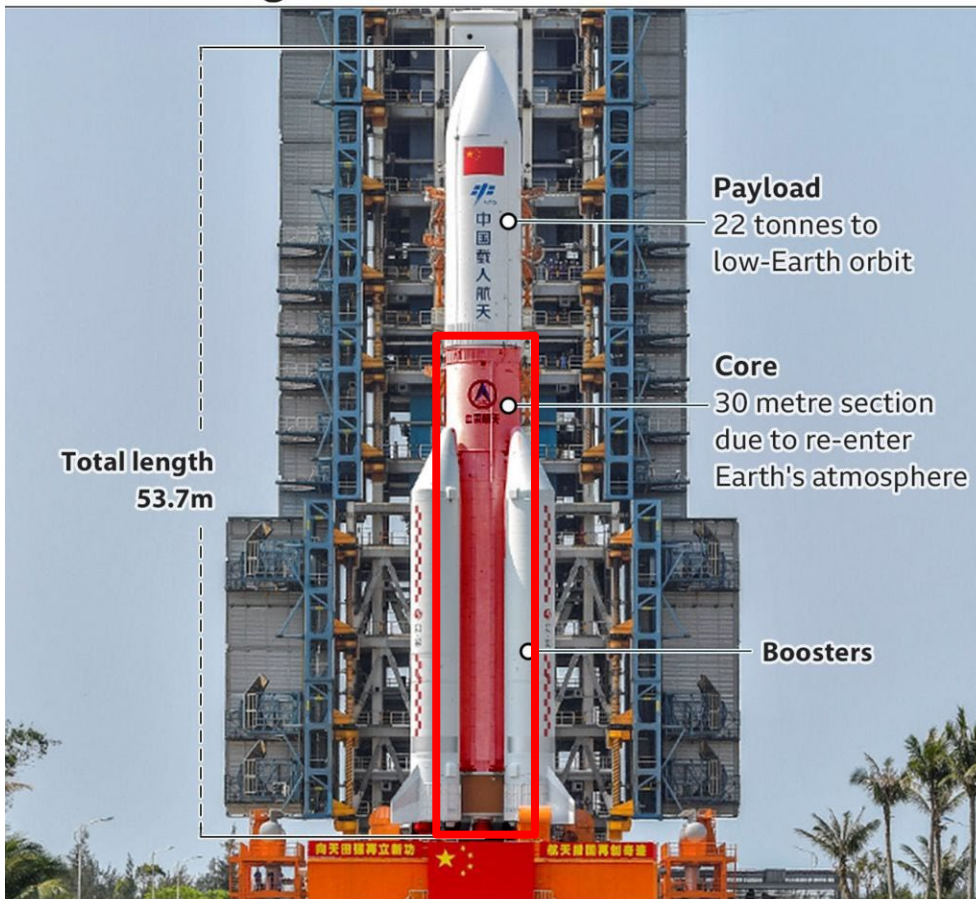


<https://www.kuow.org/stories/rocket-fireball-over-northwest-in-late-march-provides-lasting-value-to-space-junk-sleuths>

長征5Bロケットの非制御落下 (1/3)

2021年5月に中国の長征5Bロケットが非制御落下するというニュースが世界中で報じられた。

China's Long March 5b rocket

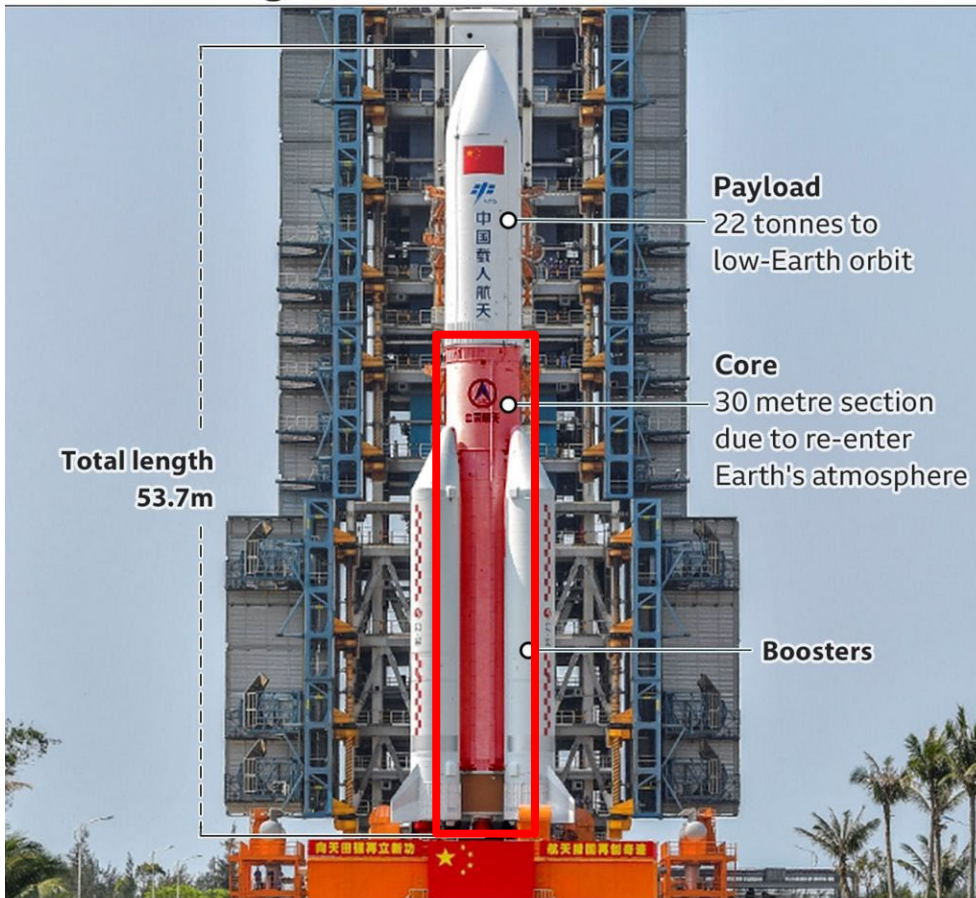


通常、ロケットの第1段とブースターは軌道に到達するように設計されておらず、これらは安全なエリア、通常は無人海域に落ちるように計画されているが、**長征5Bの場合、ロケットの第1段コア(赤枠)が軌道に到達した。**第1段コアは軌道から離脱する機能を有しておらず、**地球上のどこに落下してもおかしくない状況であった。**

長征5Bロケットの非制御落下 (2/3)

2021年5月に中国の長征5Bロケットが非制御落下するというニュースが世界中で報じられた。

China's Long March 5b rocket



長征5Bの軌道傾斜角は41.5度であり、これは再突入範囲が北はニューヨーク、ローマ、北京、南はニュージーランド、チリまで及ぶことを意味した。これにより、これらの場所のいずれも、長さ30m、幅5m、重さ21トンのこの巨大なスペースデブリの落下の可能性があった。

一般的な経験則では、再突入物体の質量の20～40%が地面に到達するが、正確な数は物体の設計(使用される材質)によって異なる。長征5Bの場合、約5～10トンの地面への到達が予想されていた。

結果的に長征5Bは北緯2.65度、東経72.47度のインド洋に落下した。

Source: Xinhua / China Daily

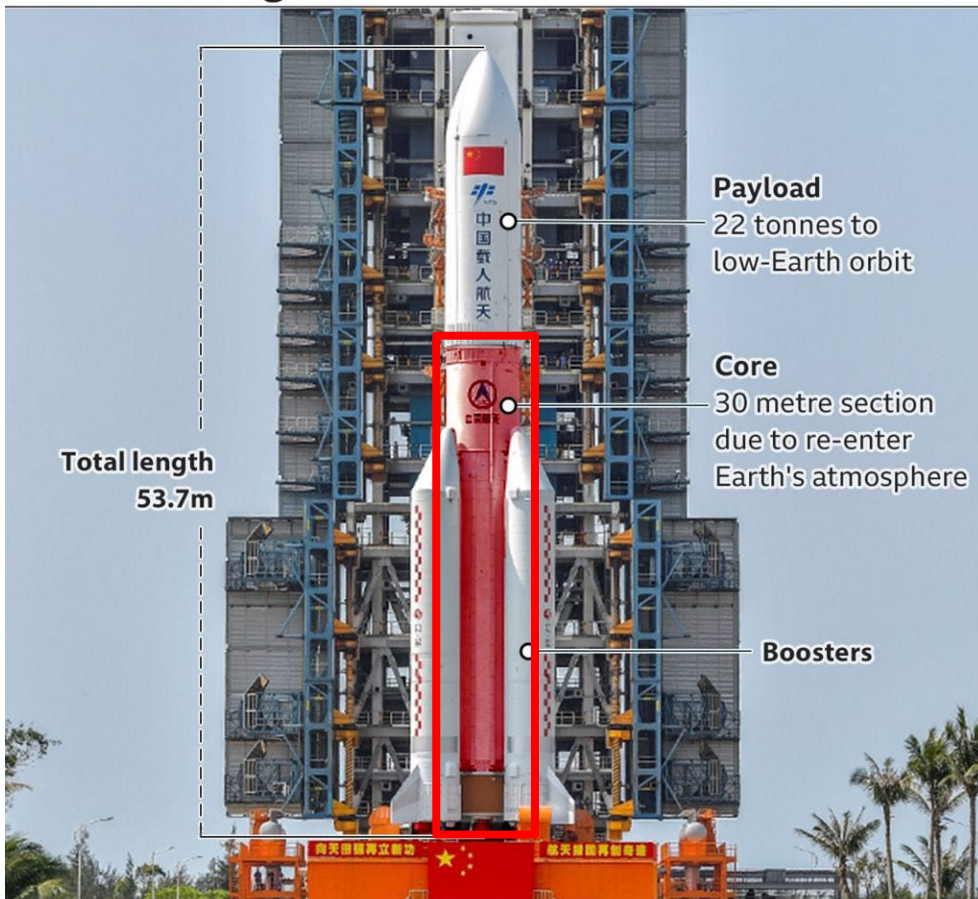
<https://www.bbc.com/news/science-environment-62333546>

BBC

長征5Bロケットの非制御落下 (3/3)

2021年5月に中国の長征5Bロケットが非制御落下するというニュースが世界中で報じられた。

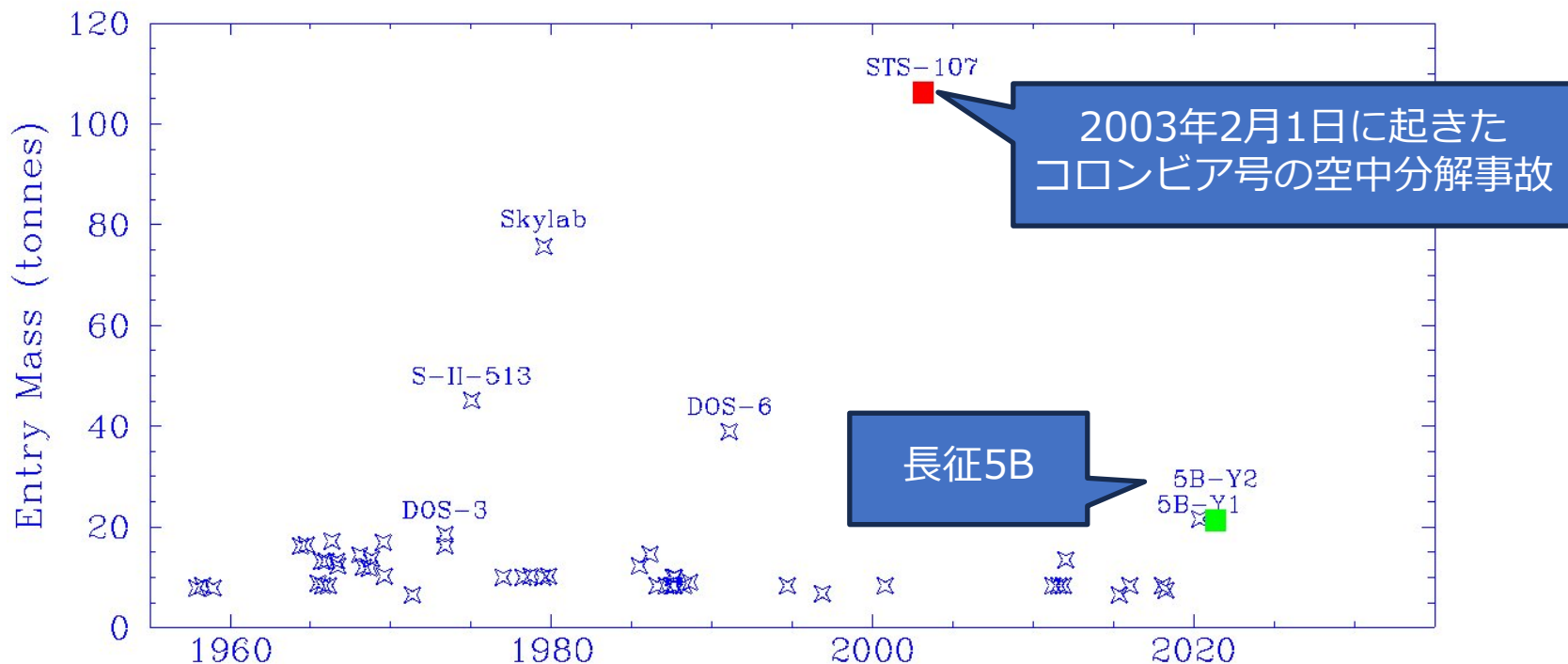
China's Long March 5b rocket



2022年の11月4日には、長征5Bコアステージが再突入過程でスペイン領空を通過したため、カタルーニャおよびその他の地域では飛行が全面的に制限される、という対応も取られており、約300便が遅延するなど、実際に影響を受けている。

巨大物体の非制御落下事例

Large Uncontrolled Reentries 1957-2021



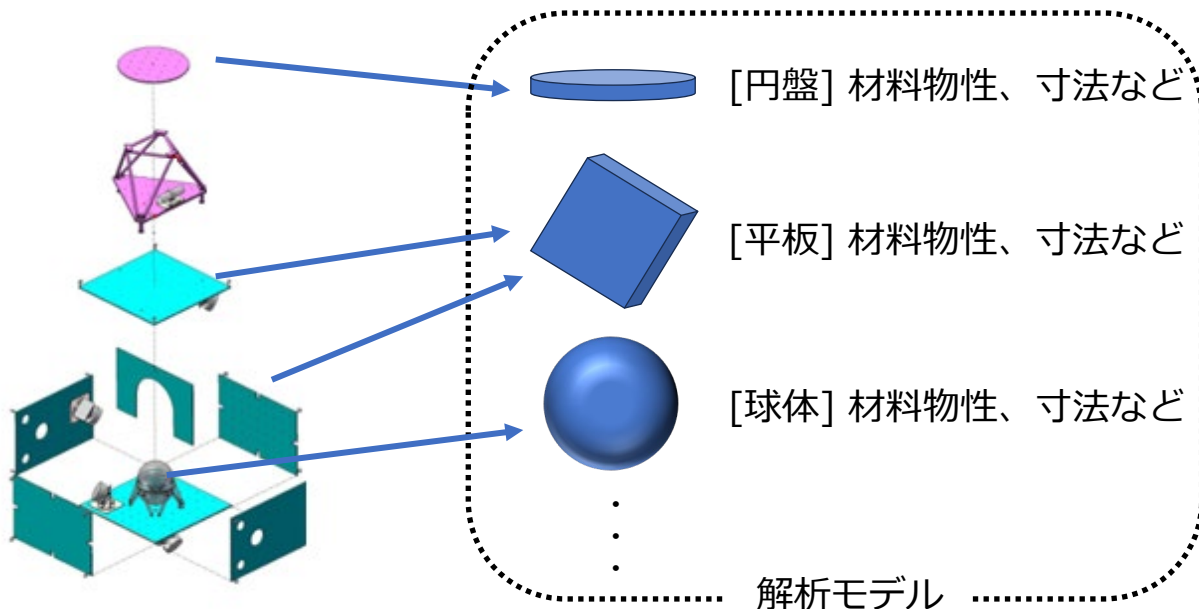
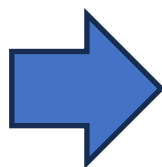
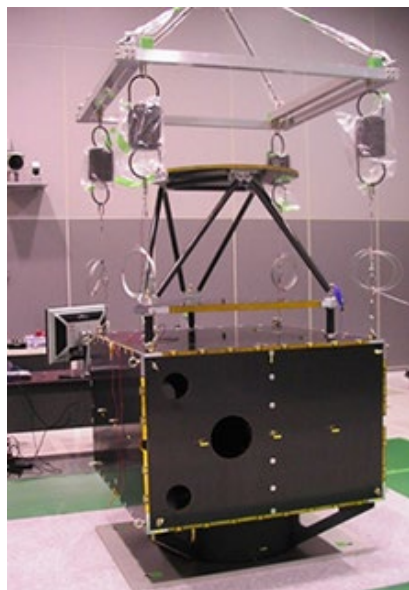
Jonathan McDowell氏のX投稿（2021年5月3日）より

大気圏突入後の部材の溶け残りは必ずしも親物体の質量に比例するものではないが、ロケットの設計としてはある程度共通性があるため、規模が大きいほど溶け残りが多くなるはず、というのは比較的一般的な考え方である。

宇宙に打ち上げた物体の再突入時の溶融性を分析し、**傷害予測数**という指標により地上の人々の**死傷リスク**を判断する方法は確立されている。

■ 傷害予測数の算出 (Step.1)

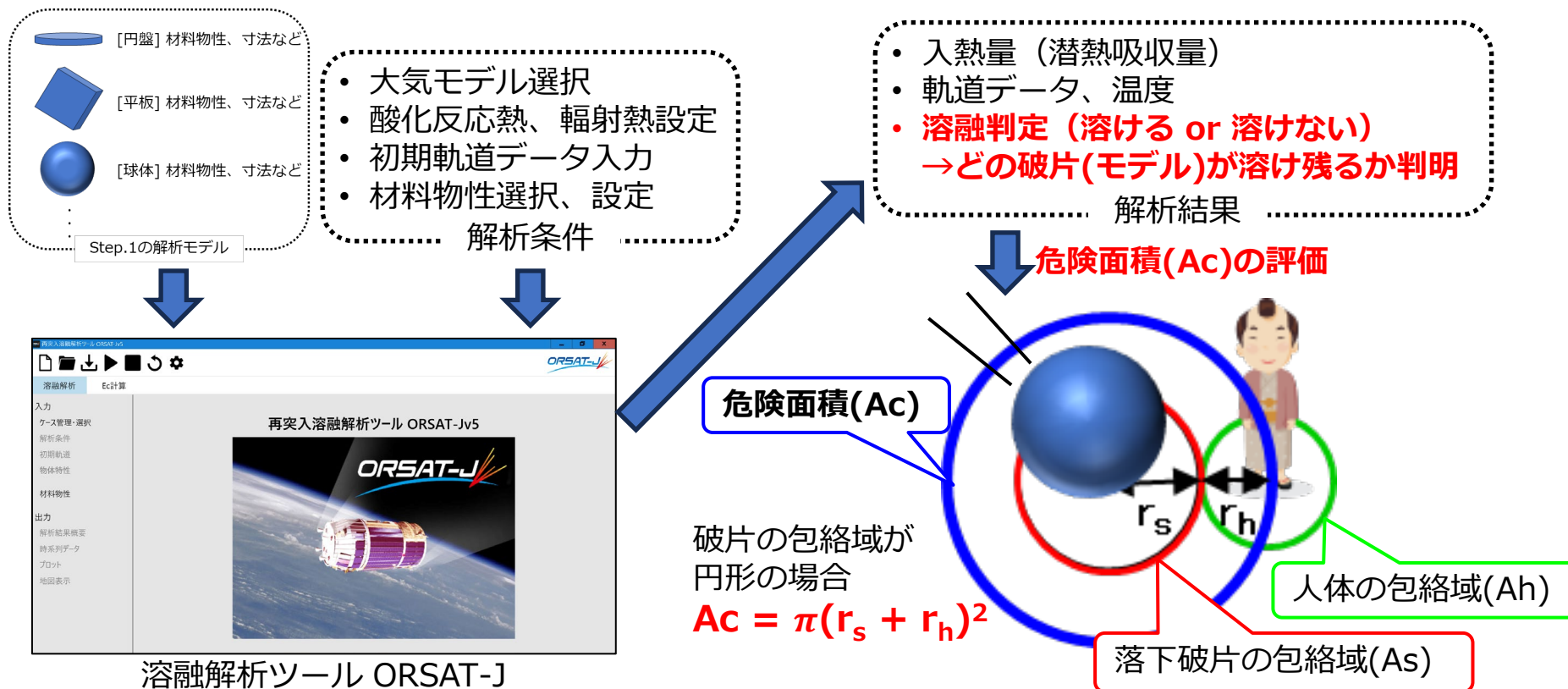
ロケットや人工衛星の設計を紐解き、溶融解析ツールで解析できるようにモデル化する。



宇宙に打ち上げた物体の再突入時の溶融性を分析し、**傷害予測数**という指標により地上の人々の**死傷リスク**を判断する方法は確立されている。

■ 傷害予測数の算出 (Step.2)

溶融解析を行う。



5. 大気圏に落下する宇宙機／ロケットの残骸から地上を守る

5.3 溶融解析と傷害予測数

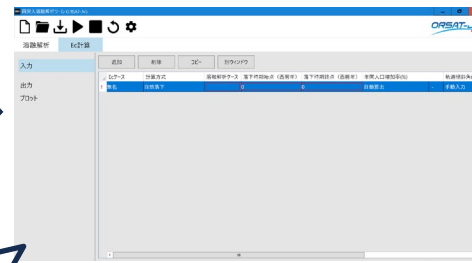
宇宙に打ち上げた物体の再突入時の溶融性を分析し、**傷害予測数**という指標により地上の人々の**死傷リスク**を判断する方法は確立されている。

■ 傷害予測数の算出 (Step.3)

傷害予測数を計算する。

- 危険面積（全ての残存破片の合算値）
- 軌道傾斜角（自然落下の場合）
- 世界人口モデル（現在はGPW4）
- 落下半年次
- 人口増加率（仮定）

入力条件設定



溶融解析ツール ORSAT-J



傷害予測数 (Ec)

$$E_c = A_c \sum_{i=\text{緯度帯}} \frac{P_i N_i}{A_i}$$

- E_c : 傷害予測数[人]
- A_c : 危険面積[m^2]
- P_i : i番目の緯度帯への落下確率[-]
- N_i : i番目の緯度帯の人口[人]
- A_i : i番目の緯度帯の面積[m^2]

宇宙に打ち上げた物体の再突入時の溶融性を分析し、**傷害予測数**という指標により地上の人々の**死傷リスク**を判断する方法は確立されている。

■ 傷害予測数の算出 (Step.3)

傷害予測数を計算する。

傷害予測数の計算結果を見る上で留意しなければならないポイント

- 解析モデルはフライト品の形状を（解析可能な形状で）近似したもの。**複数の部材で構成されている場合、最も溶けにくい材料で代表させるのが一般的。**
- 融点に到達していても、**溶融に必要な潜熱を100%吸収するまでは「溶けた」という判定にならない。**よって、実際は融点に到達し構造的な強度が低下している場合でも、（潜熱吸収が100%に達しなければ）一塊の物体が残存するという判定になっている。
- **解析上は世界人口全てが野晒しという仮定**（衝突エネルギーが15J以上の破片は全て対象）。しかし、現実には昼夜通して屋内に居る人口が圧倒的に多く、特に都市部では頑丈な鉄筋コンクリートに守られている人口が多い。

他国の宇宙機とのリスク相対化（比較）の観点では安易に評価条件を緩めるべきではないものの、現在のEc評価が実際のリスクを表現できていない可能性も否めない。

5. 大気圏に落下する宇宙機／ロケットの残骸から地上を守る

5.3 溶融解析と傷害予測数

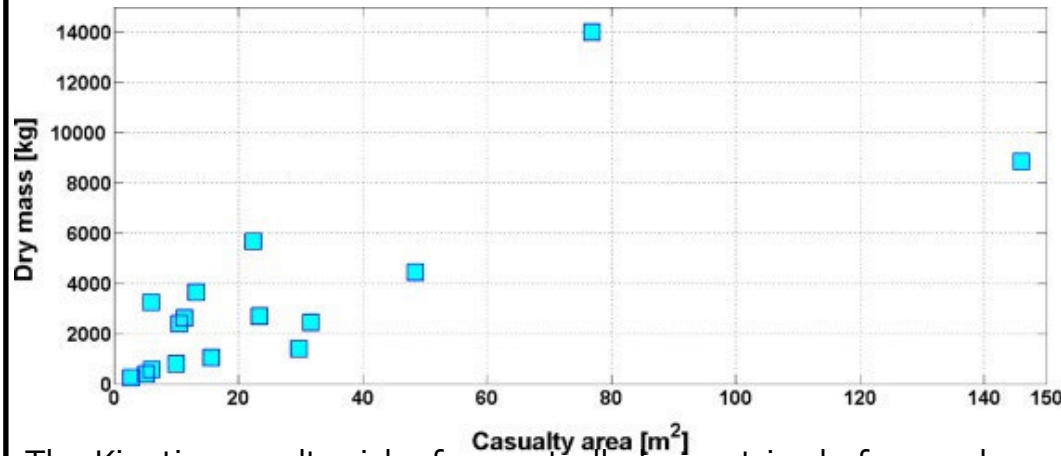
宇宙に打ち上げた物体の再突入時の溶融性を分析し、**傷害予測数**という指標により地上の人々の**死傷リスク**を判断する方法は確立されている。

■ 傷害予測数の算出 (Step.3)

傷害予測数を計算する。

傷害予測数が 10^{-4} を超える（≡同じミッションを10,000回繰り返した場合の被害が1名を上回る）場合は、**設計を変更する**（溶融しやすい材料を選定する）か**再突入を制御**することで、リスクを軽減する必要がある。

世界の主要な**大型ロケット上段**において **10^{-4} を超えないことはほぼ不可能**



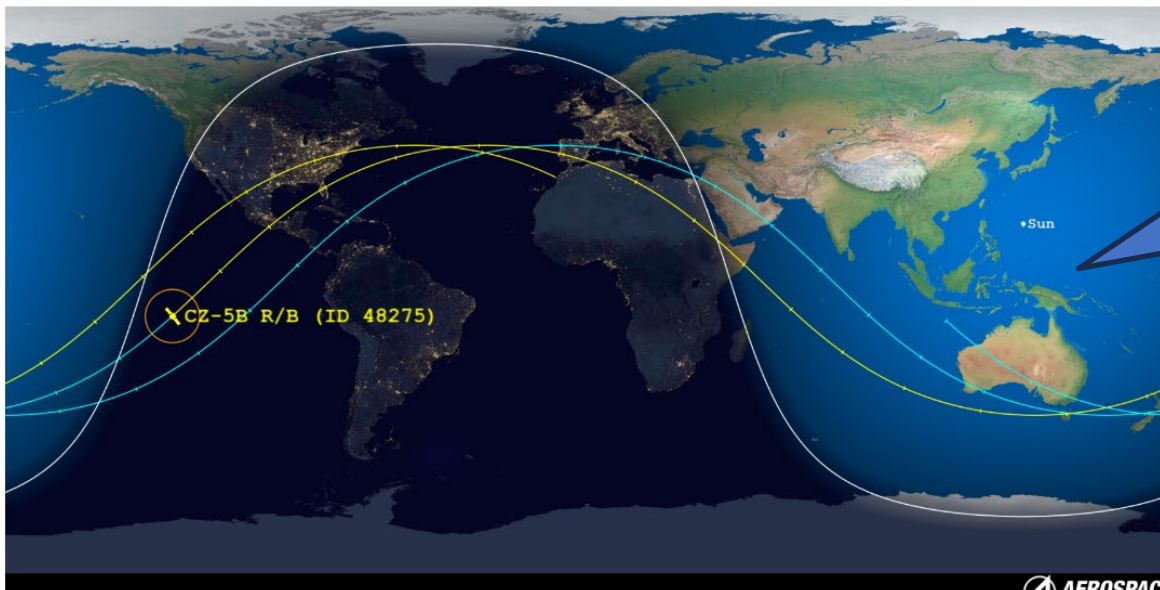
The Kinetic casualty risk of uncontrolled re-entries before and after the transition to small satellites and mega-constellations, Carmen Pardini, et. al,

左図は危険面積(Casualty area)と落下物の溶融前の推葉抜き質量(Dry mass)をプロットしたもの。落下物の軌道傾斜角にもよるが、**自然落下の場合、危険面積が $5\sim 10\text{m}^2$ 程度で傷害予測数が 10^{-4} を超える可能性がある**。

再突入予測の例

下図は長征5Bコアステージのエアロスペース社による2021年5月8日 20:34:12 UTC時点の再突入予測であり、この時の再突入予測は2021年5月9日 03:02 UTC ±2時間であった。

黄色の円のアイコンは予測される再突入ウィンドウの中心を示し、青色のトラックはそのウィンドウの前半、黄色のトラックは後半を示している(各目盛りは5分間隔)。この経路以外の場所での落下は予想されない。白線は予測再突入時刻の昼/夜の境界線を示している。

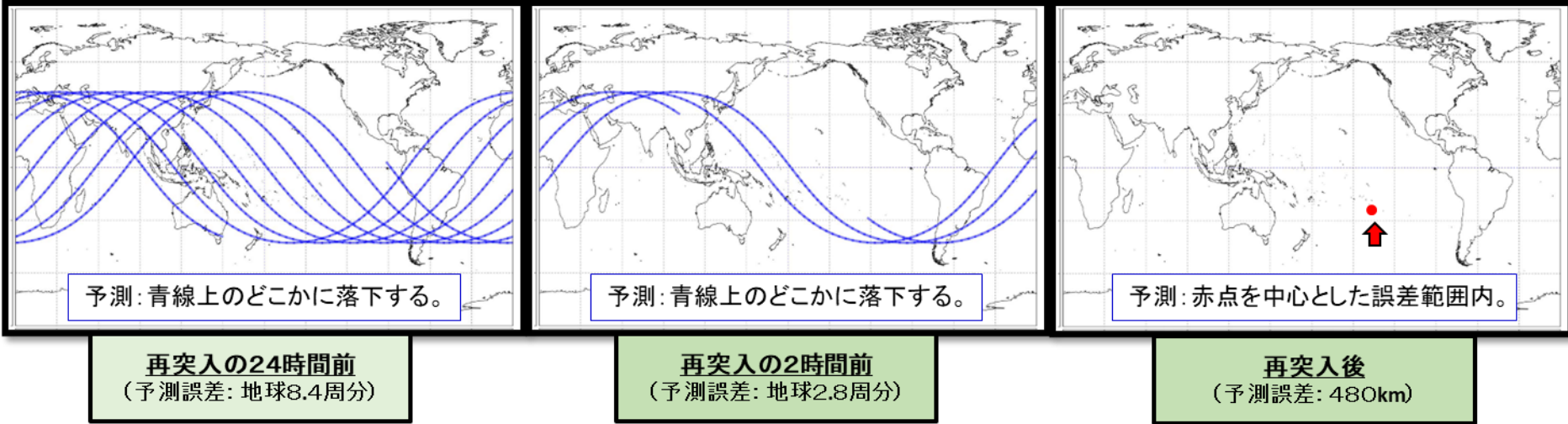


再突入予測は非常に
広い範囲にわたる…

5. 大気圏に落下する宇宙機／ロケットの残骸から地上を守る

5.4 制御しない再突入は落下地点を正確に予測できるか？

デブリがどこに着地するかを予測することは非常に難しいため、解析者は**デブリが大気圏に再突入する大まかなエリアを予測することしかできない**。

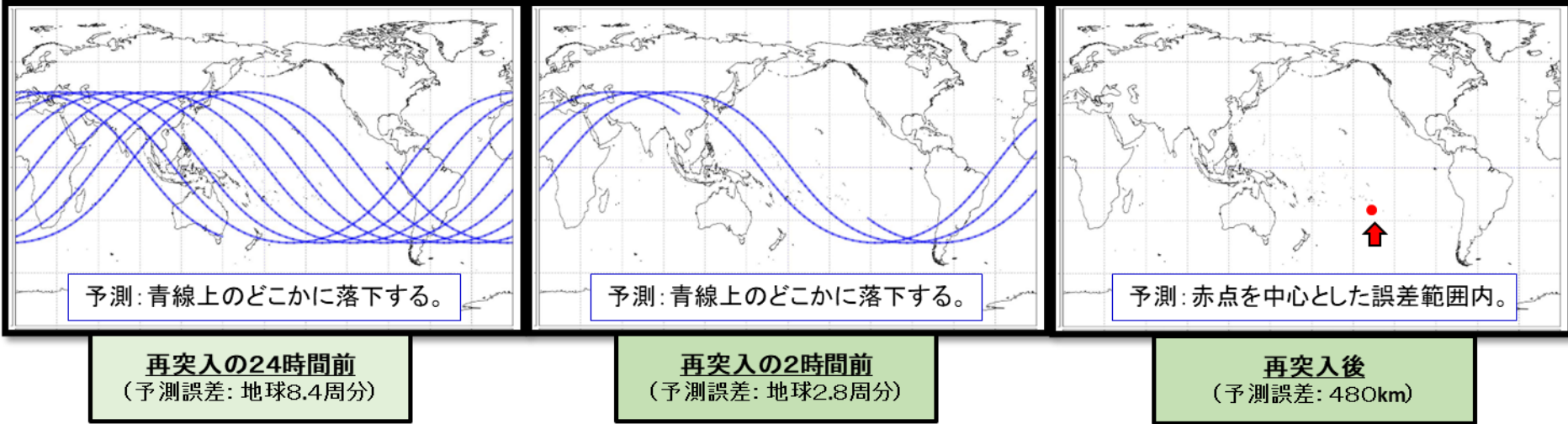


大気圏再突入時刻の予測に1分の誤差があると、デブリの位置は約480km近く変化する。残存する破片は長い範囲に広がるため、ほぼ同一の2つの破片が何キロも離れた場所に落下する可能性がある。たとえば、デルタロケットの4つのコンポーネントがテキサスと南アフリカに残骸を残した。デブリの落下位置を予測する際の主な困難は、**軌道上の物体の寿命を予測する際の不確実性に関連**している。

5. 大気圏に落下する宇宙機／ロケットの残骸から地上を守る

5.4 制御しない再突入は落下地点を正確に予測できるか？

デブリがどこに着地するかを予測することは非常に難しいため、解析者は**デブリが大気圏に再突入する大まかなエリアを予測することしかできない**。



最新の大気モデルや実機体の設計情報を用いた評価であっても、**誤差が非常に大きく予測と呼べる精度を有していない**（再突入後の評価であっても500km程度の誤差が残る）。

予測精度の向上については、各国の宇宙機関等が（IADC等でも）協力して取り組んでいる課題であるが、**自然落下する物体の落下地点予測の精度を向上するのは容易ではない状況**である。

5. 大気圏に落下する宇宙機／ロケットの残骸から地上を守る

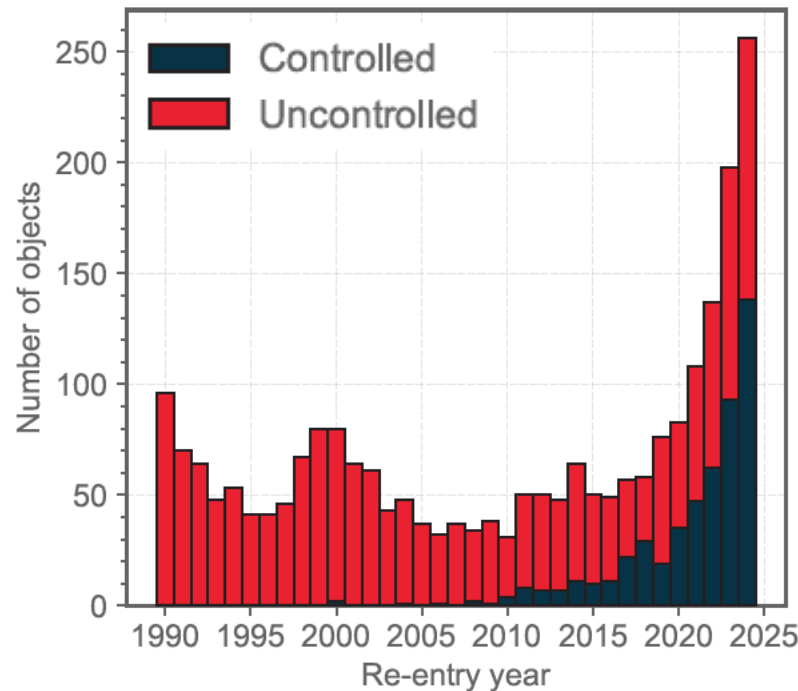
5.5 制御再突入

- 軌道離脱操作では、衛星またはロケットステージのエンジンを使用して軌道の近地点を下げ、**地球に再突入する場所を選択**する。これを**制御再突入**と呼ぶ。これにより、大きな物体は、その破片が誰も傷つけることのない無人海域をターゲットにすることができる。
- 実際の落下地点を観測しているわけではないが、機体からの情報に基づく計算によると、**計画していた落下地点との誤差は数十～100km程度**となっている。
- 軌道離脱操作を実行できるかどうかは、衛星またはロケットの設計とミッションによって異なる。大型のロケットステージは地上の人々に大きなリスクをもたらす傾向があるため、現在は制御再突入が推奨されている。

5. 大気圏に落下する宇宙機／ロケットの残骸から地上を守る

5.5 制御再突入

- IADCガイドライン等では、軌道からの再突入時に溶け残る部材が多い場合、地上落下時の危険性を緩和するために**制御再突入を推奨**している。
- 一方、制御再突入機能を有するロケットは比較的近年開発されたものに限定され、また**打上げ軌道が高いほど高度を下げるのに多くの推進剤を使うため、制御再突入しようとする**ことで著しい**打上げ能力の低下が見込まれる**ことから、すべてのミッションで対応できるわけではないが、義務化の流れがある。



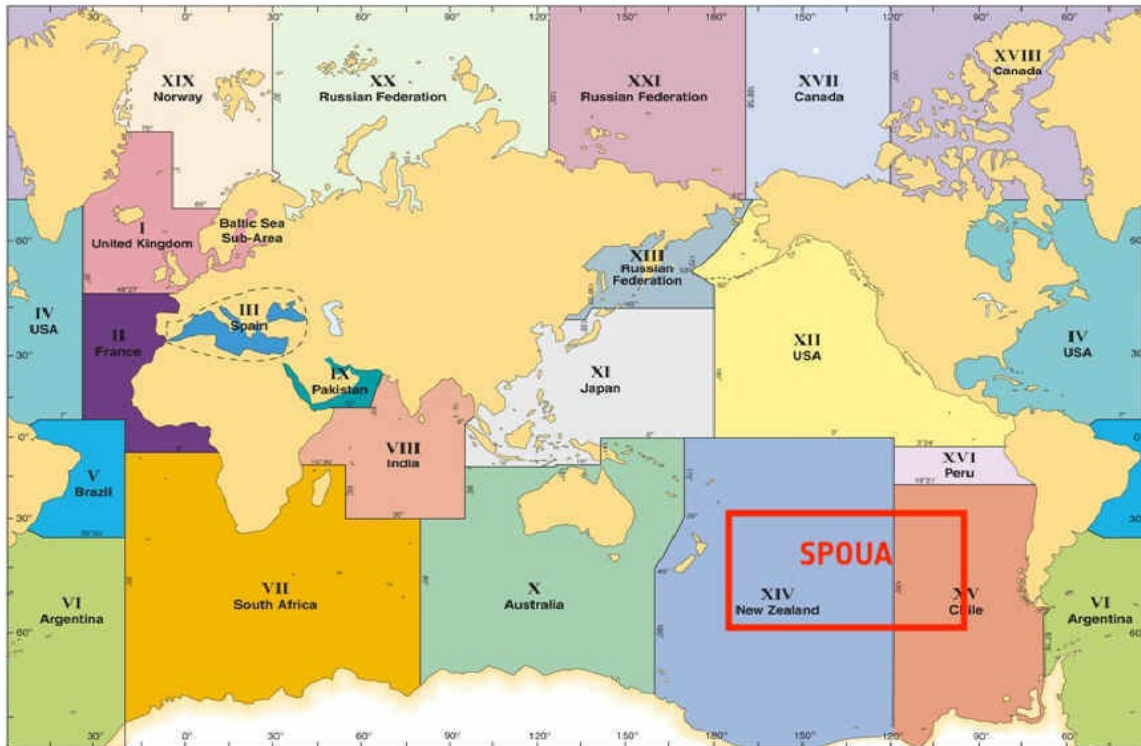
ロケット上段の再突入数と制御再突入の割合
 出典：ESA'S ANNUAL SPACE ENVIRONMENT REPORT

5. 大気圏に落下する宇宙機／ロケットの残骸から地上を守る

5.5 制御再突入

ロケットステージの場合は通常、最大の無人海域であるSPOUA(South Pacific Ocean Uninhabited Area)などの広く開けた領域への制御再突入を計画する。H-2Bロケット、H3ロケット上段やHTV、HTV-Xは制御再突入を採用している。なお、**小型の人工衛星**については、地上到達時に燃え残る部品が少ないため、そのリスクは受け入れ可能として、**非制御での再突入を世界的に許容**している。

WORLD-WIDE NAVIGATIONAL WARNING SERVICE - NAVAREAS*



<https://blogs.esa.int/cleanspace/2018/11/16/basics-about-controlled-and-semi-controlled-reentry/>

JMR-003：スペースデブリ発生防止標準にて主眼とする対策(一部抜粋)

(4)地球低軌道保護域から除去した宇宙システムの地球への落下により人的被害および地球への環境汚染を発生させないこと。

溶融解析により傷害予測数を評価し、要すれば制御再突入を採用することで、地上の被害を防いでいくことが重要となる！

なお、上記に関連する要求として、宇宙活動法のガイドラインでは以下を定めている。

6.2. 人工衛星の構造

6.2.4 再突入時の第三者損害の防止

6.4. 終了措置

6.4.1 地球への制御再突入

質疑応答

6. 増えすぎたスペースデブリを積極的に減らす

目次

6.1 JAXAの取り組み CRD2ミッション

6.2 ADRの課題

6. 増えすぎたスペースデブリを積極的に減らす

これまでのスペースデブリ対策は、基本的にロケット／衛星設計段階において予め対処しておかなければならず、事後で何とかできることは非常に限られている。

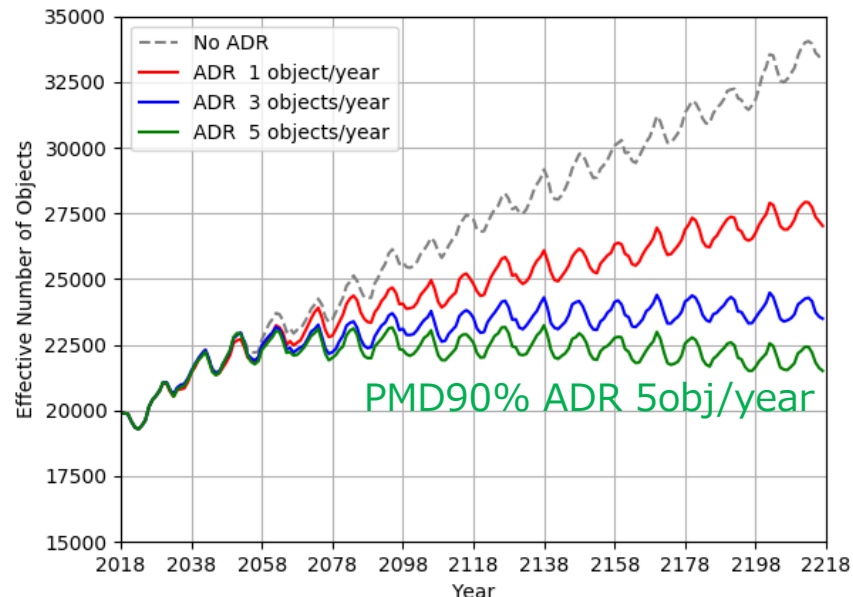
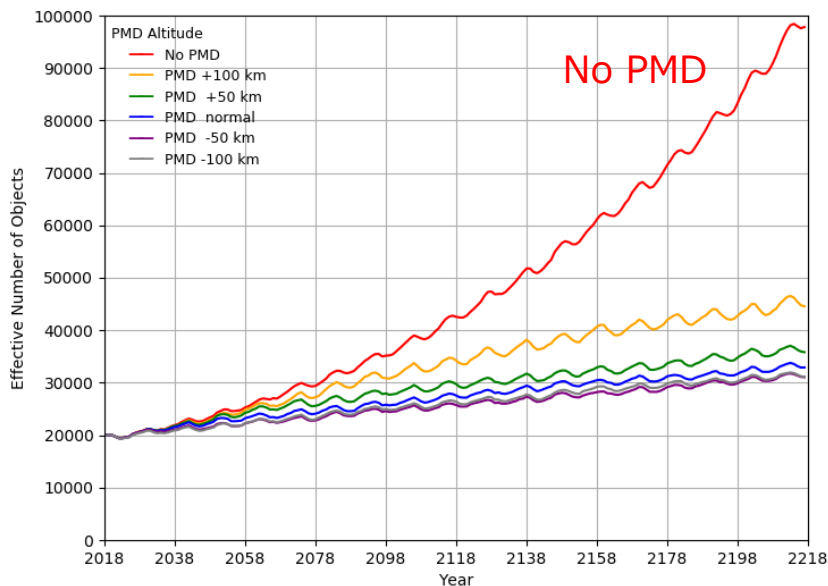
予めデブリ対策を行っておくことをデブリ低減（Mitigation）と呼んでいる。

新たに打ち上げるロケット／宇宙機に対してはデブリ低減策を取れば良いが、既に軌道上にあるデブリを取り除くには、自浄作用に任せざるを得ない。しかしながら、混雑軌道にある大型のデブリは、その環境に放置されると自浄作用が働く前に衝突による破砕を起こし、軌道環境が悪化するという懸念がある。

Identifying the 50 statistically-most-concerning derelict objects in LEO, McKnight, et. al.によると50のハイリスクな大型デブリが提案されており、そのうちトップ20までの物体は高度800-1000kmにあるSL-16（ゼニットロケット）の上段である。

6. 増えすぎたスペースデブリを積極的に減らす

デブリの増加を抑え軌道上のデブリ環境を安定化させるためには、デブリ排出低減や運用を終了した衛星の適切な軌道変更（Post Mission Disposal : PMD）に加え、デブリ除去衛星などによる能動的デブリ除去（Active Debris Removal : ADR）が有効



S. Kawamoto, et.al, "Impact on Collision Probability by Post Mission Disposal and Active Debris Removal", Journal of Space Safety Engineering, 7, 3, 178-191, 2020.09.

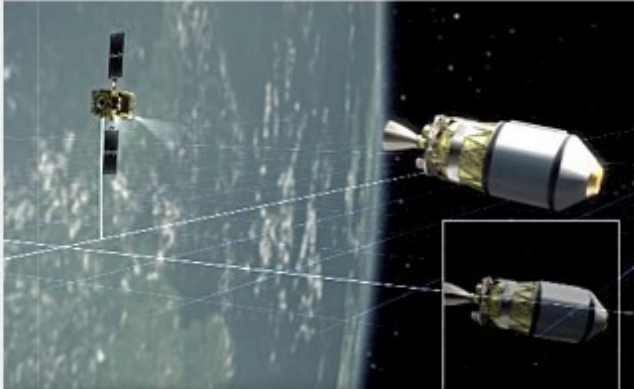
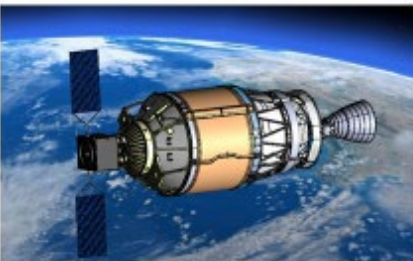
**大型のデブリを早期に除去することは
細かいデブリのリスクを低減する上でも重要！**

6. 増えすぎたスペースデブリを積極的に減らす

6.1 JAXAの取り組み CRD2ミッション

幾つかの宇宙機関は大型デブリを除去するミッション(ADR)を行おうとしており、ADRのように能動的に軌道環境を改善することをRemediationと呼んでいる。

JAXAが行う(*)商業デブリ除去実証 (CRD2 : Commercial Removal of Debris Demonstration) ミッションでは、**H-IIAロケット上段 (15号機 GOSATミッション 2009年)** に対する能動的なデブリ除去を計画している。(*)Astroscale社と共同

<p>2023年度打ち上げ予定</p> <h3>Phase I</h3> <p>キー技術実証</p>  <ul style="list-style-type: none"> 非協力的ターゲットへのランデブ、近傍制御、映像の取得 <p>©Astroscale Japan Inc.</p>	<p>2026年度以降打ち上げ</p> <h3>Phase II</h3> <p>デブリ除去実証</p>  <ul style="list-style-type: none"> 非協力的ターゲットへのランデブ、近傍制御、映像の取得 大型デブリ (ロケット上段) の除去 <p>©JAXA</p>
--	---

6. 増えすぎたスペースデブリを積極的に減らす

6.1 JAXAの取り組み CRD2ミッション

幾つかの宇宙機関は大型デブリを除去するミッション(ADR)を行おうとしており、ADRのように能動的に軌道環境を改善することをRemediationと呼んでいる。

JAXAが行う(*)商業デブリ除去実証 (CRD2 : Commercial Removal of Debris Demonstration) ミッションでは、H-IIAロケット上段 (15号機 GOSATミッション 2009年) に対する能動的なデブリ除去を計画している。(*)Astroscale社と共同

2023年度打ち上げ予定

Phase I

キー技術実証



・ 非協力的ターゲットへのランデブ、近傍制御、映像の取得

©Astroscale Japan Inc.

ターゲットデブリの周回観測 (2024年7月)



©Astroscale 2024

・ 大型デブリ (ロケット上段) の除去

©JAXA

6. 増えすぎたスペースデブリを積極的に減らす

6.2 ADRの課題



また、ESAのclearspace-1ミッションではPROBA-1衛星の能動的なデブリ除去を計画している。

https://www.esa.int/Space_Safety/ClearSpace-1より

このような活動はより活発になると想定されるが、能動的デブリ除去には多額の費用がかかることから、このような活動を実施するための予算はどこから捻出するか、スポンサーは誰なのか、という**技術以外の課題も今後解決しなければならない。**

なお、本章に関連する要求として、宇宙活動法のガイドラインでは以下を定めている。

6.2. 人工衛星の構造

6.2.2 分離又は結合時の他の人工衛星の管理への干渉防止

6.3. 管理計画

6.3.1 分離又は結合時の他の人工衛星の管理への干渉防止

6. 増えすぎたスペースデブリを積極的に減らす

6.2 ADRの課題



また、ESAのclearspace-1ミッションではPROBA-1衛星の能動的なデブリ除去を計画している。

https://www.esa.int/Space_Safety/ClearSpace-1より

このような活動はより活発になってくると想定されるが、能動的デブリ除去には多額の費用がかかることから、このような活動を実施するための予算はどこから捻出するか、スポンサーは誰なのか、という**技術以外の課題も今後解決しなければならない。**

新しいミッション計画段階でしっかり“デブリ低減”策を講じることは費用対効果の面からも重要

質疑応答

7. 軌道利用の安全確保に係る安全・信頼性推進部の役割

目次

7.1 基準類の国際調整、JAXA設計標準の制定・改定

7.2 JAXA設計標準の適合性評価、宇宙活動法許可申請書類の社内評価支援

7.3 解析ツールの開発・管理

JAXA 安全・信頼性推進部(安信部)では、軌道利用の安全に係る様々な業務を遂行している。

- (1)基準類の国際調整、JAXA設計標準の制定・改定
- (2)JAXA設計標準の適合性評価、宇宙活動法許可申請書類の社内評価支援
- (3)軌道利用の安全に係る解析ツールの開発・管理

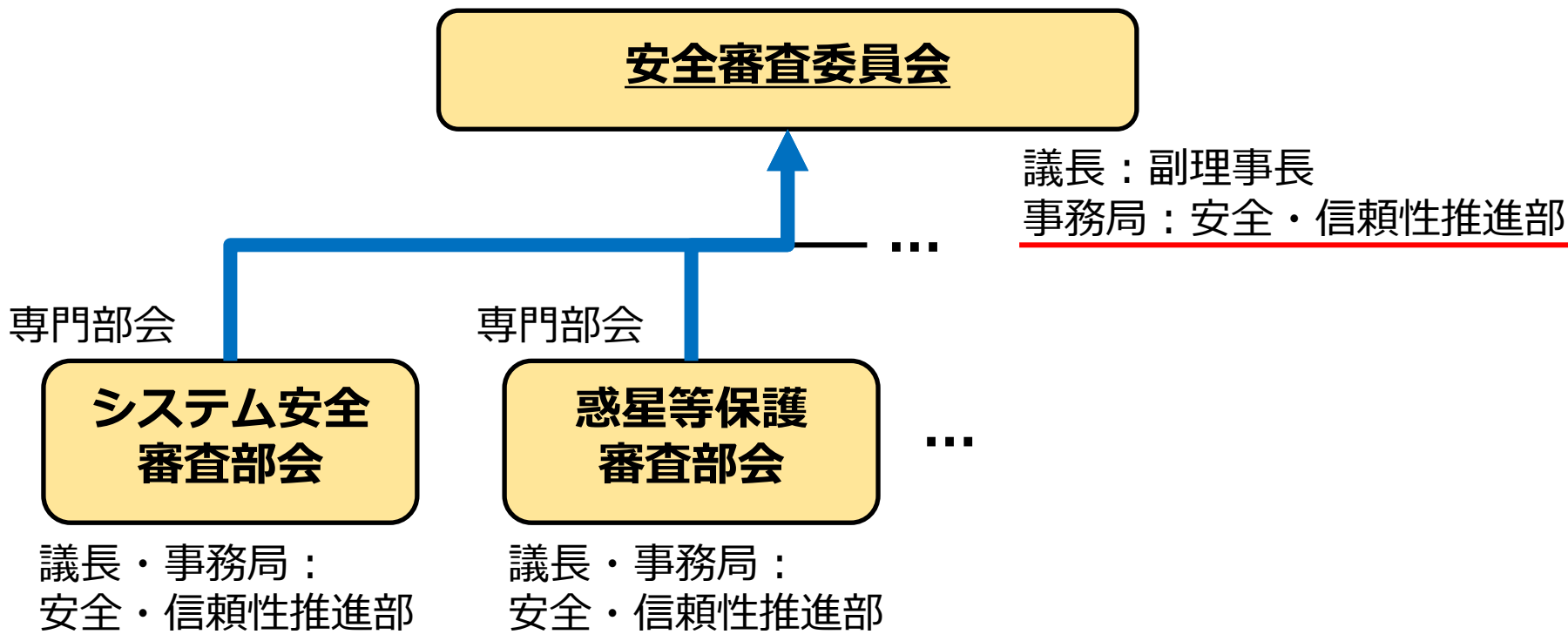
宇宙機関間スペースデブリ調整委員会（IADC）や、国際標準化機構（ISO）等において、デブリ低減や再突入安全に関する技術要求の骨子が議論されている。

これらの国際会合に参加し、技術的な知見をベースに、次世代の技術要求の在り方について議論するとともに、得られた知見をJAXAの設計標準に反映している。また、設計標準の根拠となるデータを取得するための実験も執り行う。



第43回IADC年次総会@ダルムシュタット,2025
<https://indico.esa.int/event/556/overview>

軌道利用の安全に係るJAXA設計標準や宇宙活動法の許可申請書類は、プロジェクト毎にその適合性が、JAXA安全審査委員会およびその専門部会のシステム安全審査部会にて審査される。安全・信頼性推進部はこれらの審査会の事務局を担っており、社内評価の支援を行っている。

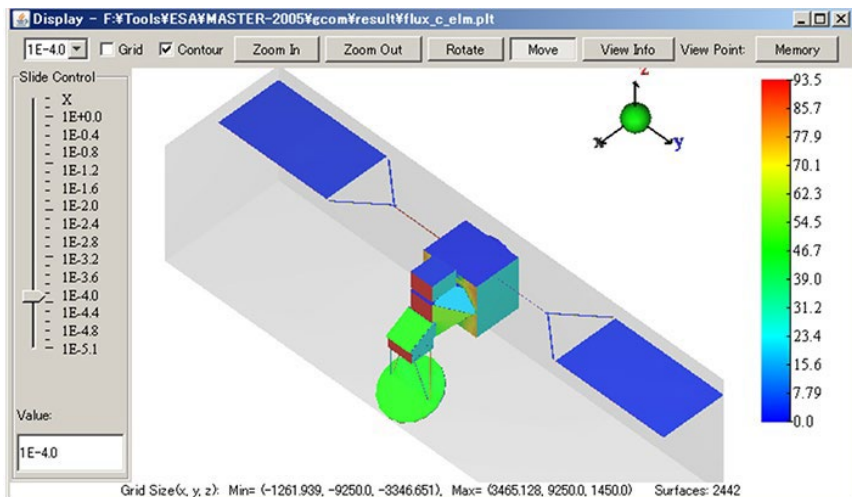


7. 軌道利用の安全確保に係る安全・信頼性推進部の役割

7.3 解析ツールの開発・管理

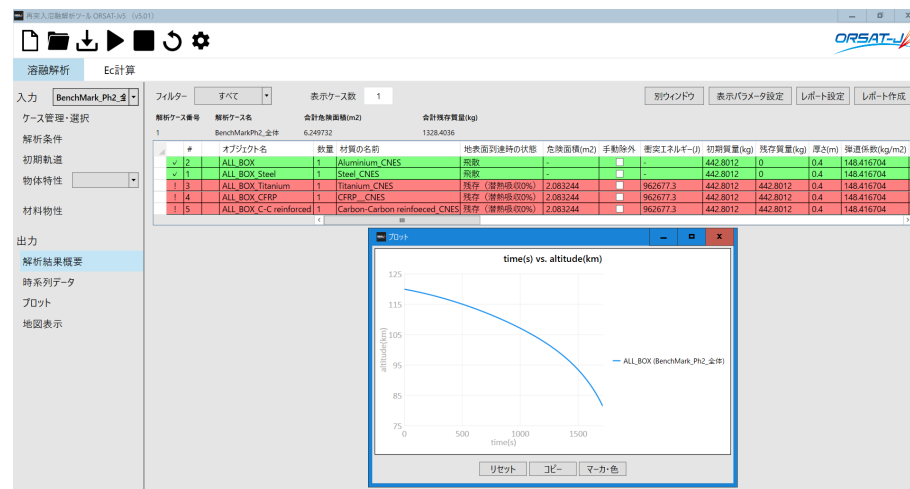
デブリ衝突損傷解析ツール「TURANDOT」や、再突入溶融解析ツール「ORSAT-J」の開発や管理を行っている。これらについては、研究開発部門と協調しながら最新の知見を随時取り入れるとともに、NASA、ESA、CNES等の他宇宙機関とのベンチマーク活動を行うことで、ツールの信頼性を担保している。また、ツールのユーザを増やすために、適宜ツールの講習会も開催している。

TURANDOT



<https://sma.jaxa.jp/Software/TURANDOT/index.html>

ORSAT-J



<https://sma.jaxa.jp/Software/ORSAT-J/index.html>

質疑応答

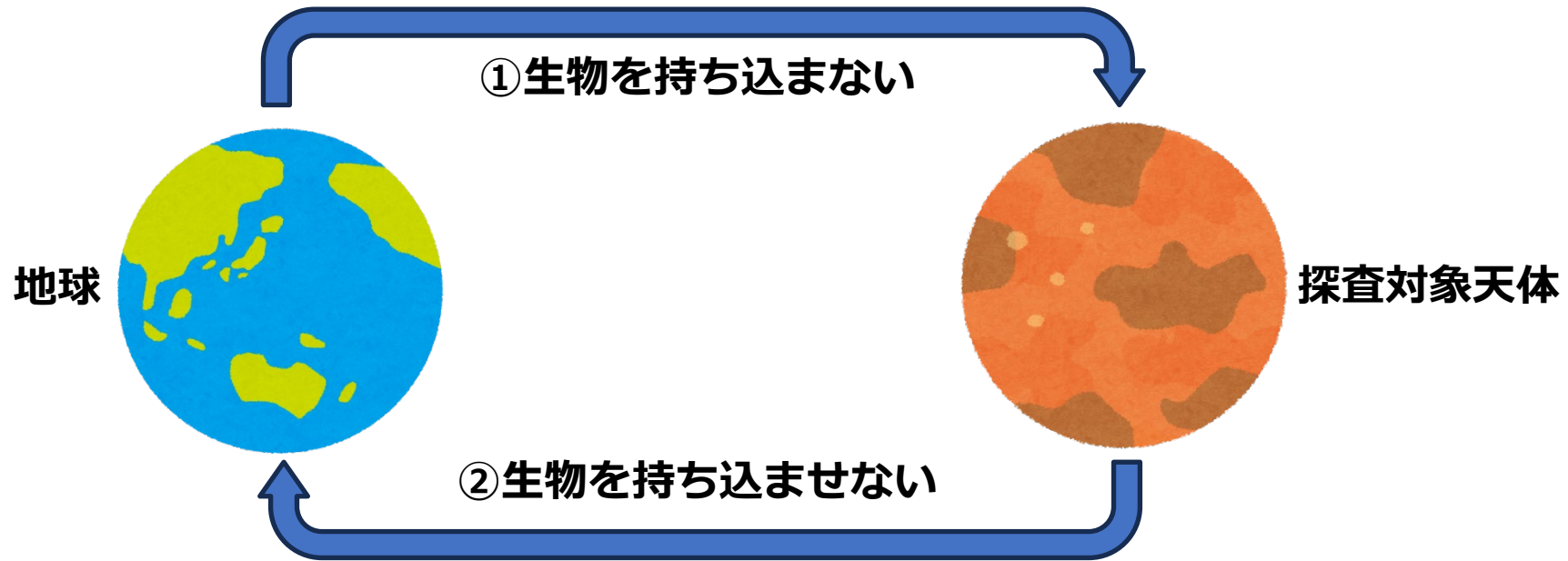
8. 活動領域の拡大に伴い必要となる宇宙環境や地球環境への配慮(惑星保護など)

目次

- 8.1 惑星保護カテゴリと惑星保護要求
- 8.2 日本国政府の対応
- 8.3 JAXAの取り組み
- 8.4 今後の取り組み

8. 活動領域の拡大に伴い必要となる宇宙環境や地球環境への配慮 (惑星保護など)

惑星保護とは「生物を持ち込まない、持ち込ませない」



国際宇宙空間研究委員会 (Committee on Space Research: COSPAR) が規定する**惑星保護方針 (Planetary Protection Policy: PPP)** に準拠した宇宙機の開発および運用に係るアクティビティであり、主として「**探査対象天体の保全**」と、探査対象の天体から帰還あるいはサンプルを回収する際の「**地球-月系の環境保護**」から構成される。

8. 活動領域の拡大に伴い必要となる宇宙環境や地球環境への配慮 (惑星保護など)

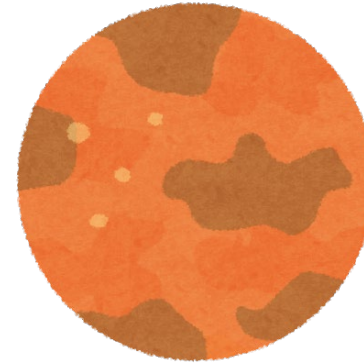
惑星保護とは「生物を持ち込まない、持ち込ませない」

①生物を持ち込まない

地球



探査対象天体



①主として「探査対象天体(*)の保全」

(*)特に、火星、オーシャンワールド [エウロパ(木星の衛星)、エンケラドス(土星の衛星)等]

下記設計標準が定義されている。

1. 対象天体へ到達する軌道エネルギーを有するロケット、デブリ、およびフライバイあるいは周回する宇宙機の対象天体への衝突確率を規定値以下とすること。
2. 対象天体へ着陸する宇宙機の汚染度を規定値以下とすること。
3. 宇宙機の汚染を判定するために既定の方法によって検査を行うこと。



Viking lander 乾熱滅菌

https://en.wikipedia.org/wiki/Planetary_protection

8. 活動領域の拡大に伴い必要となる宇宙環境や地球環境への配慮 (惑星保護など)

惑星保護とは「生物を持ち込まない、持ち込ませない」



②対象天体から帰還あるいはサンプルを回収する際の「地球-月系の環境保護」

- 生命（の痕跡）の存在が否定できない天体から帰還あるいはサンプルを回収する場合、地球-月系へもたらされる生命および物質によって破局的な災害をもたらすことがないように、汚染確率を極小化することである。
- 惑星保護方針では、帰還機およびサンプルコンテナの強度や運用に係る設計標準が定義されている。

8. 活動領域の拡大に伴い必要となる宇宙環境や地球環境への配慮

8.1 惑星保護カテゴリと惑星保護要求

カテゴリ	対象ミッション	対象天体	惑星保護要求
I	化学進化の過程や生命の起源に関して、科学的観点からは重要でないと考えられる天体への、すべての形態のミッション	S 型小天体, イオ, 水星	なし
II	化学進化の過程や生命の起源に関して、科学的観点からは重要性が高いが、科学的意見によれば、宇宙機による汚染が将来の調査に悪影響を及ぼす恐れのない天体への、すべての形態のミッション	(II-1) 金星, 彗星, 小天体(P 型, D 型, C 型), 木星, 木星の衛星(イオ, エウロパ, ガニメデを除く), 土星, 土星の衛星(タイタン, エンケラドスを除く), 天王星, 天王星の衛星, 海王星, 海王星の衛星(トリトンを除く), 冥王星の 1/2 サイズ以下のカイパーベルト天体	惑星保護文書要求をテーラリングした簡易な文書作成.
		(II-2) 月	(II-1)を対象とする要求に加えて, 有機物目録
		(II-3)ガニメデ, タイタン, トリトン, 冥王星と衛星カロン, 冥王星の 1/2 サイズ以上のカイパーベルト天体	(II-1)を対象とする要求に加えて, 汚染確率解析
III	保護される太陽系天体へのフライバイおよび周回ミッション	火星, エウロパ, エンケラドス	惑星保護文書要求に準拠した文書作成, 有機物目録, 衝突確率解析, 汚染確率解析
IV	保護される太陽系天体への地表ミッション		惑星保護文書要求に準拠した文書作成, 有機物目録, 有機物サンプルの保管, 材料・部品・組立品・設備に対する滅菌とバイオバーデン管理
V	天体由来の生命体が存在しないと考えられる太陽系天体からの地球帰還(制約のない地球帰還; Unrestricted Earth Return)	金星, 月, 小天体(B 型, C 型, S 型), イオ, 水星, ただし小天体については 都度判断	往路行程のカテゴリに対応した惑星保護要求のみ
	上記以外の地球帰還(制約付き地球帰還; Restricted Earth Return)	火星, エウロパ, エンケラドス, 左記以外は都度判断	滅菌および検証. 検証ができない場合は完全な封じ込め

■ 宇宙条約と国内法の関係

わが国では宇宙条約に準拠した国内法として「人工衛星等の打上げ及び人工衛星の管理に関する法律（通称：宇宙活動法）」が制定されており、スペースデブリの抑制と同様に惑星等の保護を求めている。このため、内閣府が行う人工衛星の管理に係る許可の審査において、COSPARのPPPに準拠しない宇宙機の打上げや運用は認められていない。

■ 宇宙活動法ガイドラインにおける要求

宇宙活動法の「人工衛星の管理に係る許可に関するガイドライン(*)」では、「6.2. 人工衛星の構造」に係る要求として以下を定めている。

- 6.2.5 他の天体由来の物質による地球環境悪化の防止
- 6.2.6 他の天体の環境汚染の防止

また、「6.4. 終了措置」に係る要求として

- 6.4.3 地球以外の天体を回る軌道への投入等

を定めており、いずれもCOSPARのPPPへの準拠を求めるものである。

(*)なお、現在は打上げ機に対する惑星保護の要求が明文化されていないが、今後のガイドライン改定において明文化される見込み。

8.3 JAXAの取り組み

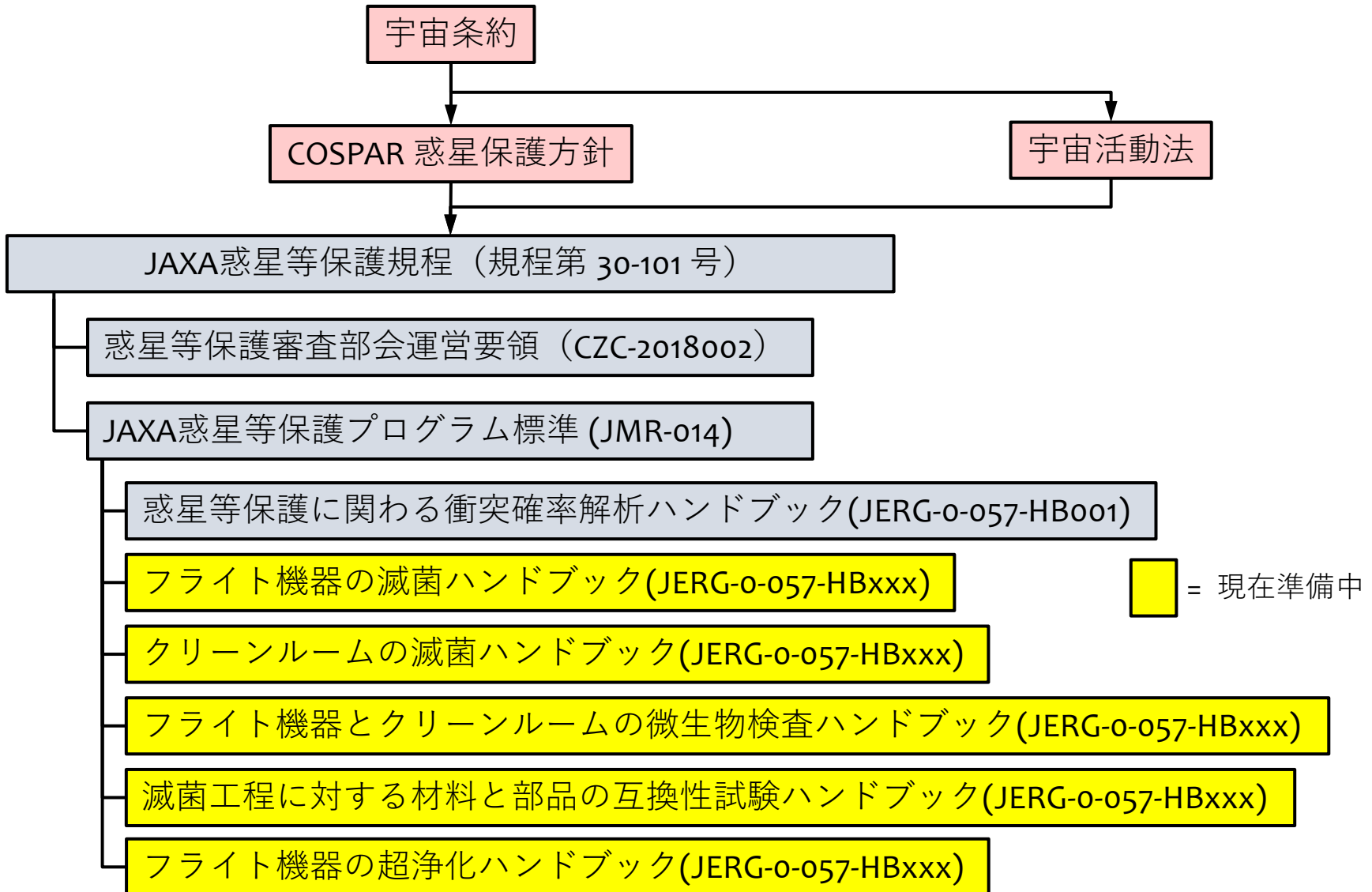
■ JAXAの惑星等保護規程および惑星等保護プログラム標準

2018年に「惑星等保護規程（規程第30-101号）」並びに「惑星等保護プログラム標準（JMR-014）」を制定し、安全・信頼性推進部が事務局として惑星等保護審査部会を運営することを決定。安全審査委員会では、JMR-014への適合性によって惑星保護の妥当性を審査することとなった。

なお、JMR-014がCOSPARのPPPに準拠していること、およびJAXAの惑星保護審査部会が十分な審査能力を有していることは、COSPARや関係宇宙機関（ESA、NASA）にも認められている。

8. 活動領域の拡大に伴い必要となる宇宙環境や地球環境への配慮

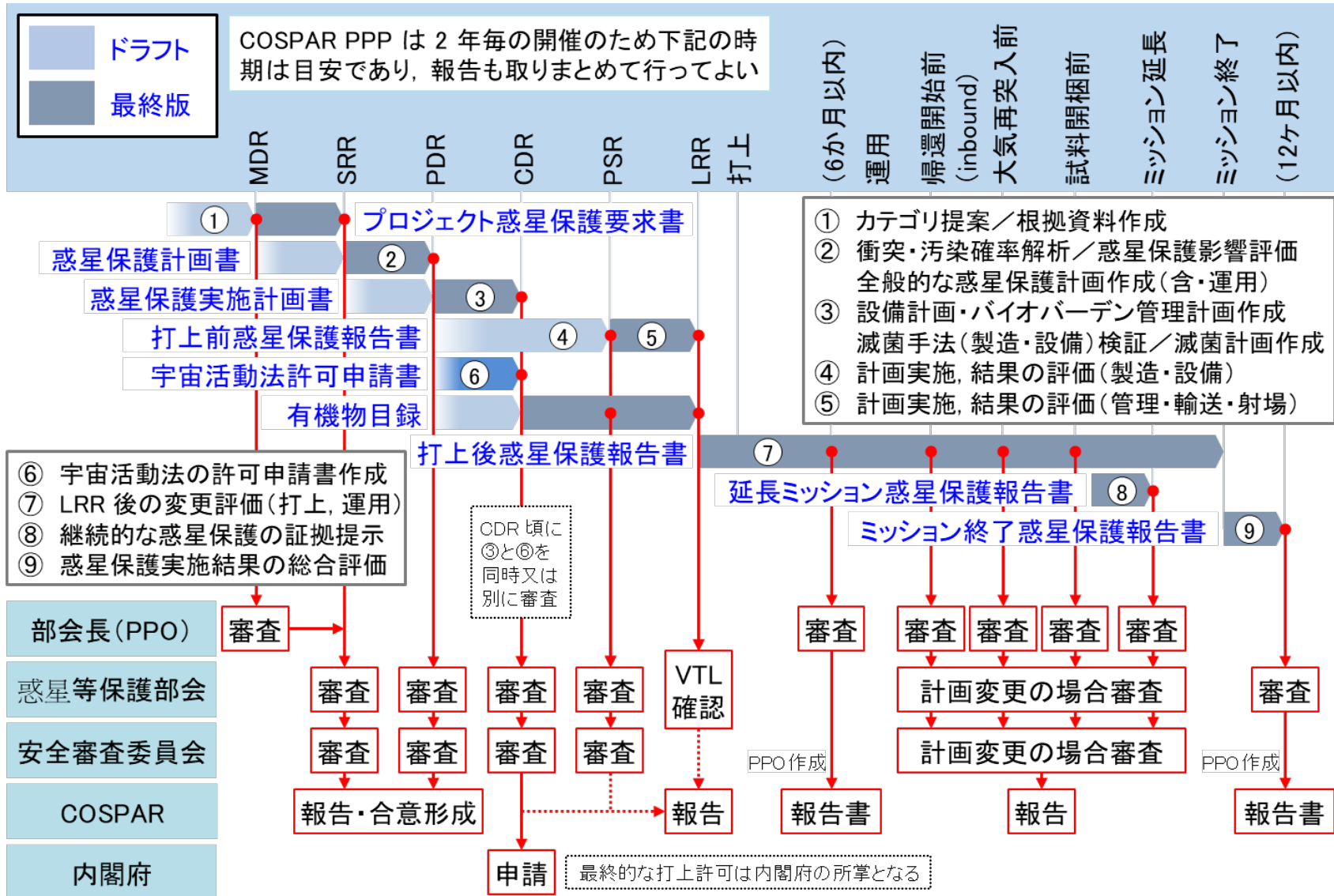
8.3 JAXAの取り組み



8. 活動領域の拡大に伴い必要となる宇宙環境や地球環境への配慮

8.3 JAXAの取り組み

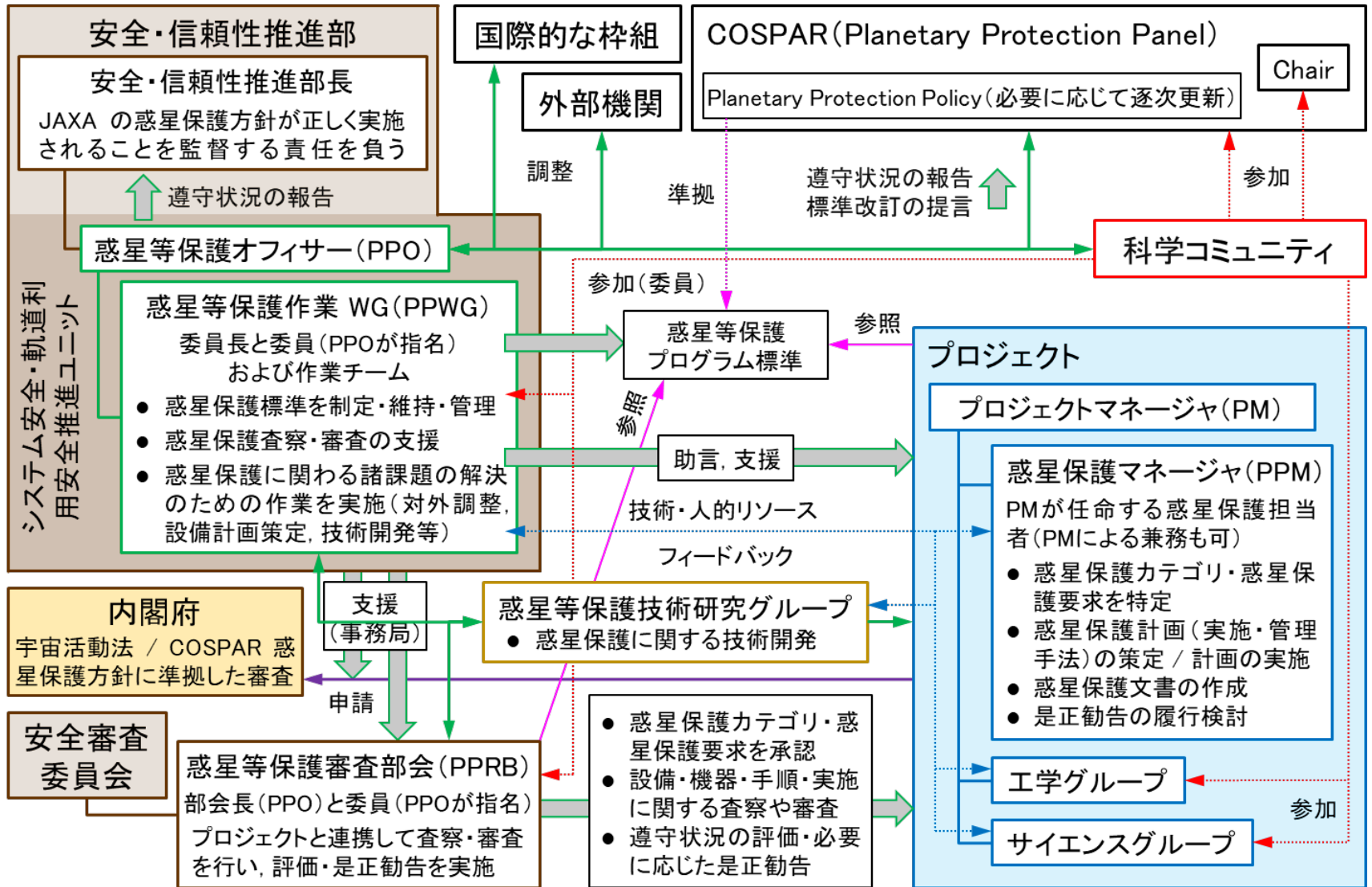
JAXAにおける惑星保護の実施手順



8. 活動領域の拡大に伴い必要となる宇宙環境や地球環境への配慮

8.3 JAXAの取り組み

JAXAにおける惑星保護の実施体制



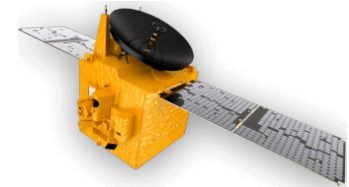
惑星保護技術の主なアクティビティ

分野	項目	アクティビティ
規定遵守・ 管理技術	PP規定・手順書の策定	規定・体制の文書化
	施設管理規定の策定・監査	手順書作成・監査員の養成
	作業規定の策定・監査	手順書作成・監査員の養成
	作業訓練	技術者の養成
環境維持技術	製造工程	製造メーカーの指導・監督
	輸送工程	無菌輸送技術の開発
	組立工程	BB管理クリーンルームの導入
	射場	BB管理クリーンブースの導入
滅菌技術	組立時/汚染された場合の滅菌	滅菌処理装置の導入
	施設・試験装置の滅菌	クリーンルームの滅菌
検査技術	バイオバーデン検査	分析器の導入・技術者の養成
	環境モニタ検査	分析器の導入・技術者の養成
	データベース構築・標本保存	保存庫の導入
規定・基準の 検証	放射線滅菌効率の検証	放射線滅菌実験・解析
	インパクト衝突による生存率の検証	軽ガス銃による実験・解析
	乾熱滅菌による生存率の検証	フラッシュランプによる実験・解析

■ 規制当局および民間事業の支援

日本国政府の対応として説明した通り、宇宙活動法のガイドラインでは探査機がCOSPARのPPPに準拠することを求めており、現状では民間事業者が探査機を打上げ／運用するためには、COSPARが認めた宇宙機関等の技術要求を適用した上で、審査能力を有する宇宙機関の審査を受けなければならない。

- ✓ 2020年にH-IIAロケットがUAEの火星探査機（HOPE）を打ち上げた際、探査機については（製造を請け負ったのが米国メーカーであったこともあり）NASAが適合性の確認を行った。一方、H-IIAロケット上段の火星衝突確率等については日本国の責任と切り分けられ、国際的に日本が責任を持ってPPPへの適合性を審査すべきという議論になった。このため、JAXAは打上げ事業者（MHI）と調整し、有償でH-IIA上段の火星衝突確率評価や惑星等保護審査部会における審査を実施、最終的にLOC (Letter of Certification)を発行した。



- ✓ 2023年4月に民間初の月面着陸に挑んだispace社のHAKUTO-R ミッション1月着陸船についても、同様にJAXAにて審査を実施した。



8.4 今後の取り組み

- COSPARのPPPは新たな科学的知見等に伴い改定されることから、引き続きPPPに準拠するようJMR-014を維持する。また、惑星等保護審査部会を安定的に運営し、JAXAプロジェクトのみならず民間事業者が行う探査もPPPに確実に準拠する形で行われるよう担保する。
- カテゴリ4（保護される天体地表ミッション）やカテゴリ5-RER（生命体の存在が否定できない天体からの帰還ミッション）をサポートする技術の獲得
- 火星からのサンプルリターンや火星有人ミッションに向けた惑星保護要求検討への貢献

質疑応答