



軌道利用の安全に係るレポート

(JAXA Space Operations Safety Report)

2024 年 10 月 Volume 2

目次

1. 目的	4
2. 軌道上物体の分布	5
2.1 宇宙機打上げ機数および再突入物体数の変遷	5
2.1.1 宇宙機打上げ機数	5
2.1.2 再突入物体数	6
2.2 観測可能な軌道上物体の分布	7
2.2.1 地球周回軌道全体	8
2.2.2 地球低軌道保護域	11
2.2.3 地球 12 時間周期軌道域	12
2.2.4 地球静止軌道保護域	13
2.3 微小物体含むスペースデブリおよびメテオロイドの分布	14
2.4 破片発生の原因	17
3. 軌道利用の安全に係るトピックス	21
3.1 ISS からの投機物がフロリダ州の民家に落下	21
3.2 ADRAS-J がスペースデブリ（H-IIA ロケット上段）の観測に成功	22
4. 国内外のスペースデブリ対策に関する動向	24
4.1 国際的な動向	24
4.1.1 UN COPUOS	24
4.1.2 IADC	24
4.1.3 ISO	24
4.2 米国	25
4.3 欧州	25
4.4 日本	26
5. 学会・ワークショップ情報	27
5.1 第 11 回 JAXA スペースデブリワークショップ	27
6. 参考文書およびデータベース	28
付録 I 用語集（JMR-003E スペースデブリ発生防止標準等より）	29

図・表目次

図 2.1.1- 1 宇宙機打上げ機数の変遷 (出典：6 項(2)@2024.08.27).....	5
図 2.1.2- 1 再突入物体数の変遷 (出典：6 項(1)@2024.08.19).....	6
表 2.1.2- 1 2022 年から 2024 年 8 月までに再突入した破片類の主な内訳とその個数.....	6
図 2.2- 1 カタログ化された物体数の変遷 (出典：6 項(1)@2024.08.21)	7
図 2.2.1- 1 平均軌道高度別の軌道上物体数(出典：6 項(1)@2024.08.19)	8
図 2.2.1- 2 軌道傾斜角別の軌道上物体数 (出典：6 項(1)@2024.08.19)	9
図 2.2.1- 3 軌道上物体数の国別割合 (出典：6 項(1)@2024.08.19).....	10
図 2.2.2- 1 地球低軌道保護域の種類別物体数の割合 (出典：6 項(1)@2024.08.19).....	11
図 2.2.2- 2 平均軌道高度別の軌道上物体数(2,000 km 以下) (出典：6 項(1)@2024.08.19)...	12
図 2.2.4- 1 静止軌道保護域の種類別物体数の割合 (出典：6 項(1)@2024.08.19).....	13
図 2.2.4- 2 静止軌道保護域の物体のうち運用中の衛星の割合 (出典：6 項(2)@2024.08.27)	13
図 2.3- 1 高度 420 km、軌道傾斜角 51.6° (ISS 軌道)におけるデブリ種毎のフラックス	14
図 2.3- 2 高度 600 km、軌道傾斜角 100° (太陽同期軌道)におけるデブリ種毎のフラックス.....	15
図 2.3- 3 2024 年 ESA 予測データに基づく高度別推定空間密度 (出典 6 項(6)MASTER-8.0.3) ...	16
図 2.4- 1 発生原因別破砕件数の割合 (出典：6 項(3)(4))	17
図 2.4- 2 発生原因別破片発生数の割合 (出典：6 項(3)(4)).....	18
図 2.4- 3 システム別破砕件数の割合 (出典：6 項(3)(4))	19
図 2.4- 4 打上げから破砕までに経過した期間 (出典：6 項(3)(4)).....	20
図 2.4- 5 打上げから 1 日目に生じた破砕原因の割合 (出典：6 項(3)(4))	20
図 3.1-1 発見されたニッケル水素電池搭載用構造物の支柱 (右) およびオリジナル形状 (左)	21
図 3.2-1「定点観測」による CRD2 のターゲットスペースデブリの連続画像のうちの 1 枚 (出典：6 項(7)).	22
図 3.2-2「周回観測」による CRD2 のターゲットスペースデブリの連続画像	23

1. 目的

近年の宇宙開発の活発化により、軌道上物体数は増加の一途をたどっており、観測可能な物体数だけでも 30,000 個を超える物体がある。特に破壊実験、破碎事故、大規模コンステレーション衛星や小型衛星の増加により、軌道上環境の悪化は深刻になっており、衝突確率の増大等の影響により衛星運用に与える影響は無視できない状況である。また、利用価値の高い軌道(主に地球低軌道、静止軌道)は国際的に保護領域として設定されており、運用終了後のロケット上段や衛星、それらから生じた破片などの、いわゆるスペースデブリを低減するための対策が重要視されている。

持続可能な宇宙開発のため、軌道上環境の維持は不可欠であり、ロケットおよび衛星の設計者、運用者を始めとする全てのステイクホルダーは軌道上環境の状況を把握しておくことが重要である。

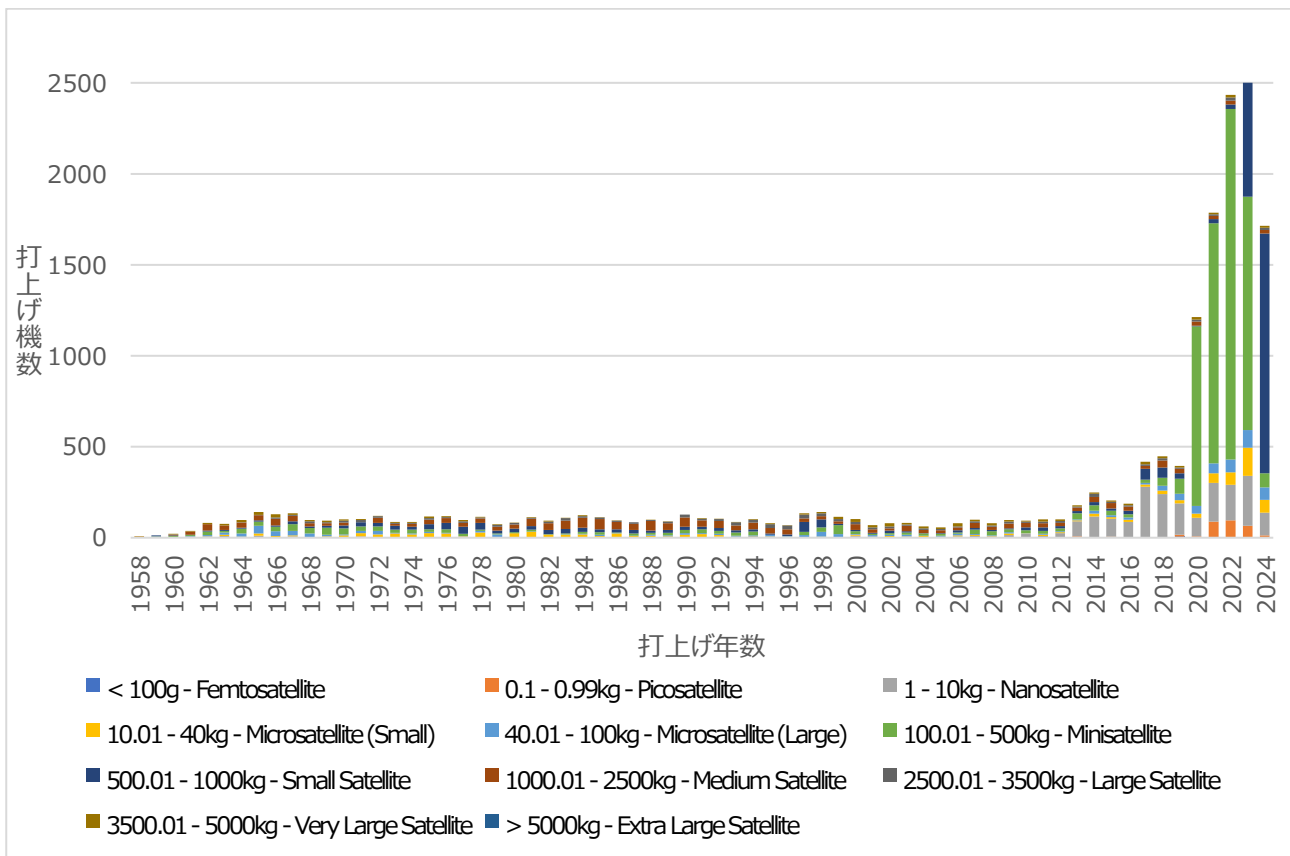
本レポートは 2024 年 8 月時点で入手できる情報に基づき、軌道上物体の分布、破碎事象の発生状況、国内外のデブリ対策の動向等の情報を提供するものである。2 項では軌道上物体の分布に係る情報を示す。3 項では軌道利用の安全に係るトピックスを紹介する。4 項ではスペースデブリ対策に関する動向を示す。5 項では予定されている学会およびワークショップの情報を掲載する。6 項では本書を作成するにあたり参考にした文書やデータベースを示す。

2. 軌道上物体の分布

2.1 宇宙機打上げ機数および再突入物体数の変遷

2.1.1 宇宙機打上げ機数

これまでに打ち上げられてきた宇宙機の数量の変遷を質量区分で仕分けて図 2.1.1-1 に示す。近年の宇宙物体数増加の主要因となっているコンステレーション衛星システムでは、2023 年から 2024 年 8 月現在までに SpaceX 社の Starlink が 3215 機（累積 6915 機）、OneWeb が 131 機（累積 635 機）、Spacebee が 24 機（累積 201 機）打ち上げられている。このように近年の打上げ機数の増加は、上記コンステレーション衛星の影響が大きい。その他の衛星も含めると、2023 年から 2024 年 8 月現在までに 4,699 機が打ち上げられている。また、1957 年からの累計では、20,016 機にのぼり、そのうち 5,210 機は既に再突入している。なお、2023 年以降に 500 kg 級の宇宙機が急増している理由は、Starlink が v2 へ移行したためである。



2.1.2 再突入物体数

再突入物体数の変遷を図 2.1.2-1 に示す。近年の軌道上物体数の増加に伴い、今後の再突入物体数の増加が予想される。2020 年代では衛星の再突入数が増加傾向にあり、再突入による地上への影響に対する関心も高まっている。2022 年から破片類の再突入が急増しているが、その主な内訳と個数を表 2.1.2-1 に示す。

スペースデブリ低減に関する軌道上からの廃棄について、国内外の対策は本書 4 項を参照。

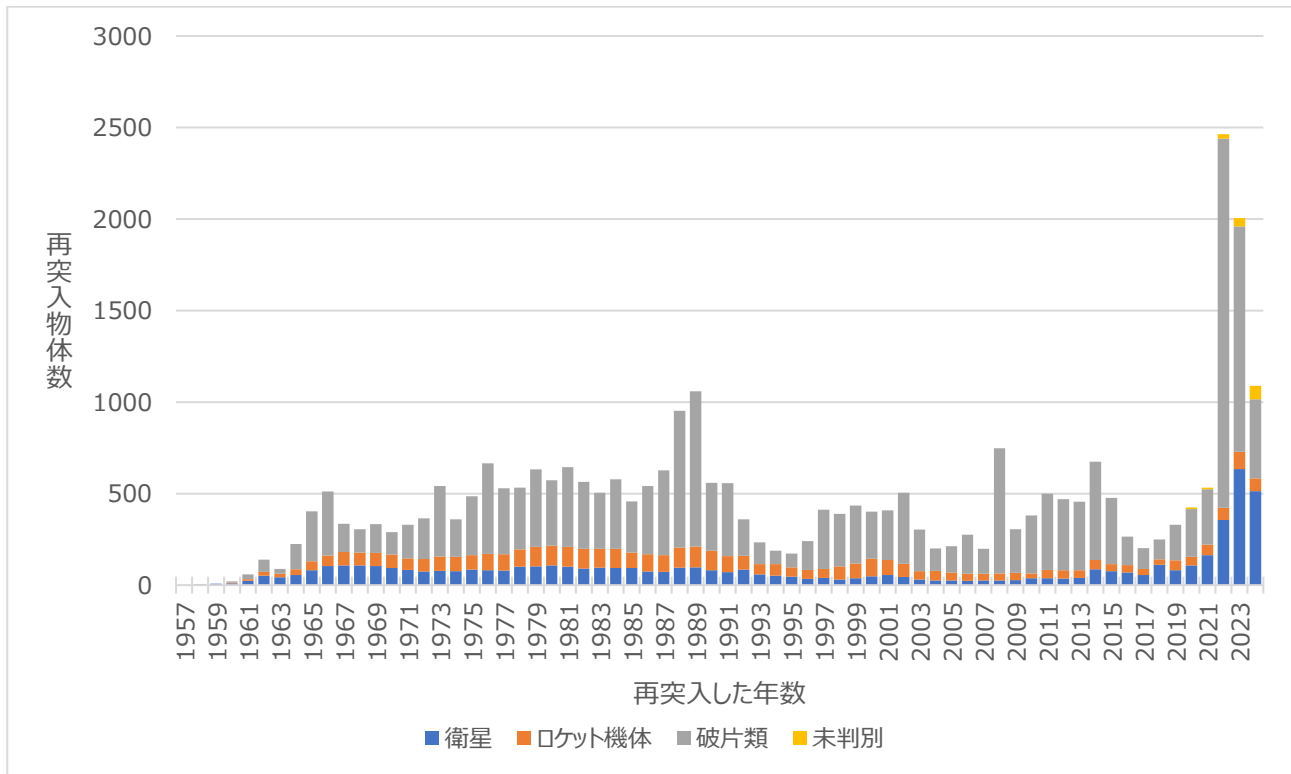


図 2.1.2- 1 再突入物体数の変遷 (出典：6 項(1)@2024.08.19)

表 2.1.2- 1 2022 年から 2024 年 8 月までに再突入した破片類の主な内訳とその個数

	COSMOS 1408	FENGYUN 1C	FALCON 9	COSMOS 2251	全体
個数	1717	231	228	212	3684
備考	2021/11/15 ロシアの A-SAT 実験 により破壊	2007/1/11 中国の A-SAT 実験 により破壊	1 度の打上げで 数個の放出物が ある	2009/2/10 イリジウム衛星と 衝突破壊	-

2.2 観測可能な軌道上物体の分布

本項では、カタログ化された軌道上物体のうち、地球周回軌道として利用されている高度 40,000km 以下の軌道域の軌道上物体の分布状況を示す。

カタログ化された軌道上物体数¹の変遷を図 2.2-1 に示す。打上げ機数の増加に伴い、軌道上物体数も増加傾向にある。2024 年 8 月現在、観測できる物体数だけで 30,000 個を超えており、軌道上環境の悪化による衝突リスクの増大が懸念されている。

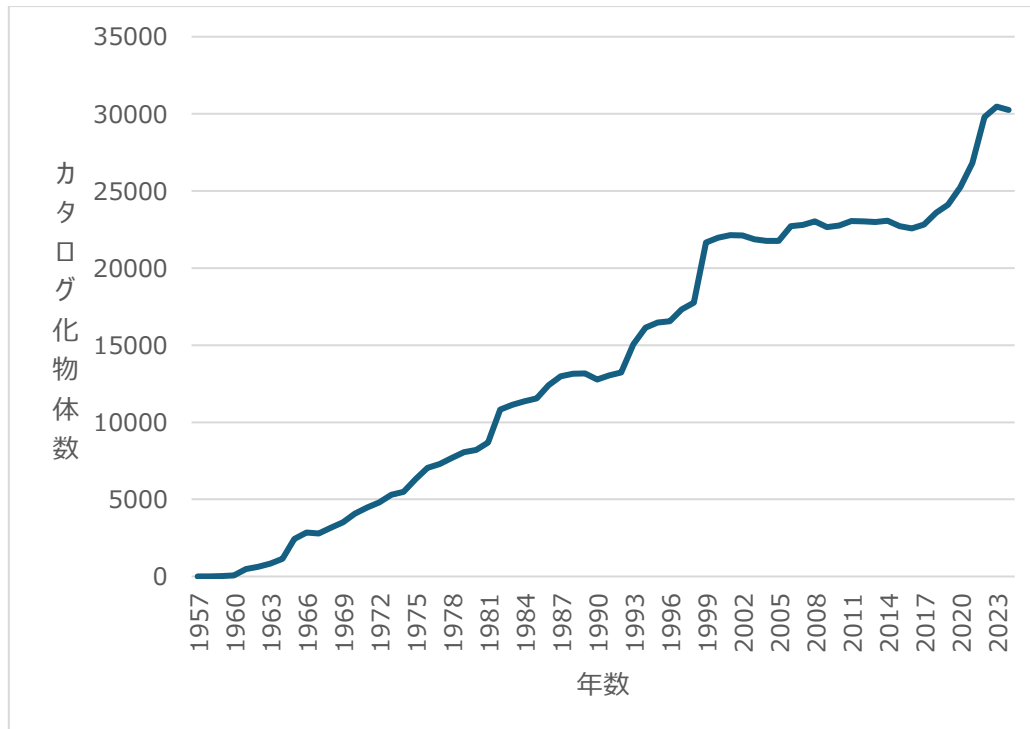


図 2.2- 1 カタログ化された物体数の変遷² (出典：6 項(1)@2024.08.21)

¹ 米国の CSpOC (Combined Space Operations Center)によりカタログ化された物体を対象としている。

² 使用したデータについて、破砕等により破片としてカタログ化された軌道上物体については、その物体が「打ち上げられた年」の物体数として計上されている。

2.2.1 地球周回軌道全体

図 2.2.1-1 に平均軌道高度別の物体数を示す。軌道上物体のうち、ほとんどの物体は地球低軌道保護域に存在しており、2024 年 8 月現在で 20,000 個を超える物体が存在している。次いで、静止軌道保護域(静止高度である 35,786 km 付近)に 1,000 個を超える物体が存在している。また、地球 12 時間周期軌道域と呼ばれる高度 20,000 km 付近の物体数も比較的多くなっている。

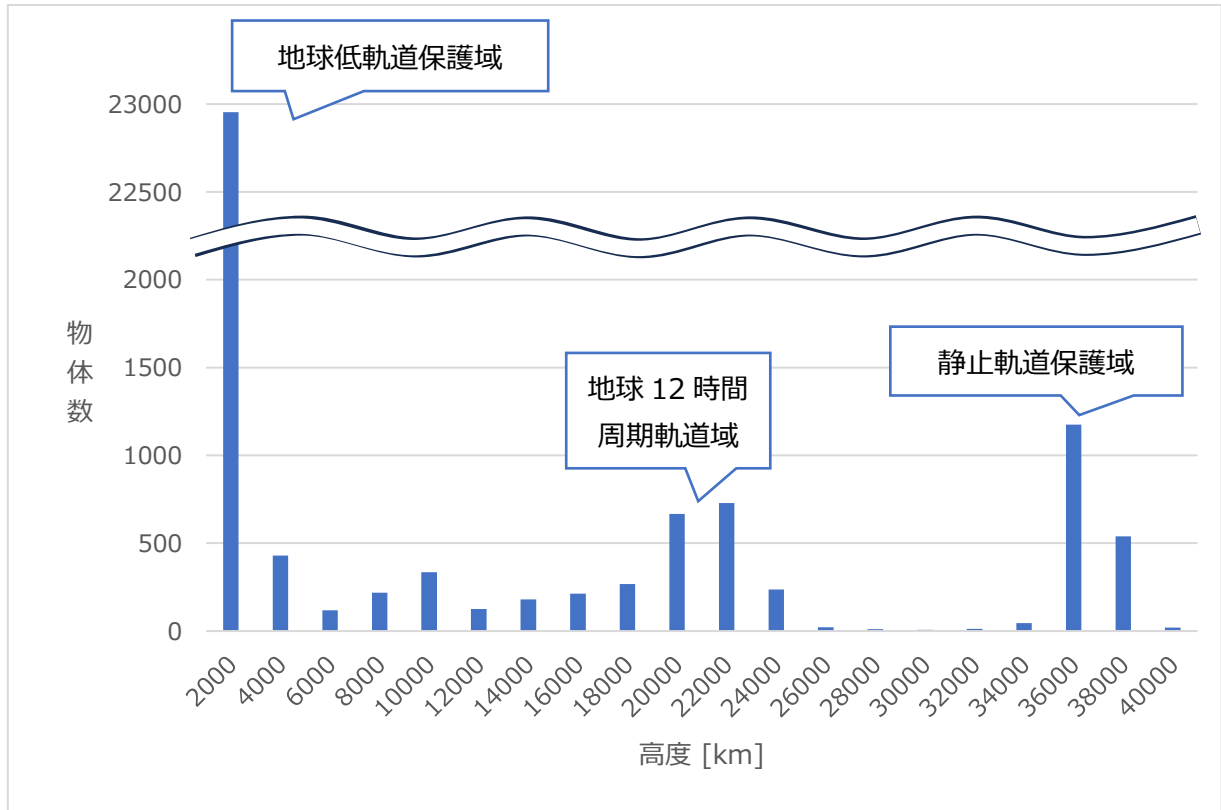


図 2.2.1- 1 平均軌道高度別の軌道上物体数(出典：6 項(1)@2024.08.19)

軌道上環境の物体集中を表す高度以外のパラメータ³として、軌道傾斜角がある。図 2.2.1-2 に軌道傾斜角別の軌道上物体数を示す。衛星ミッションに依存した特定の傾斜角（例えば地球観測衛星であれば太陽同期軌道の 100 度弱）に集中していることが分かる。

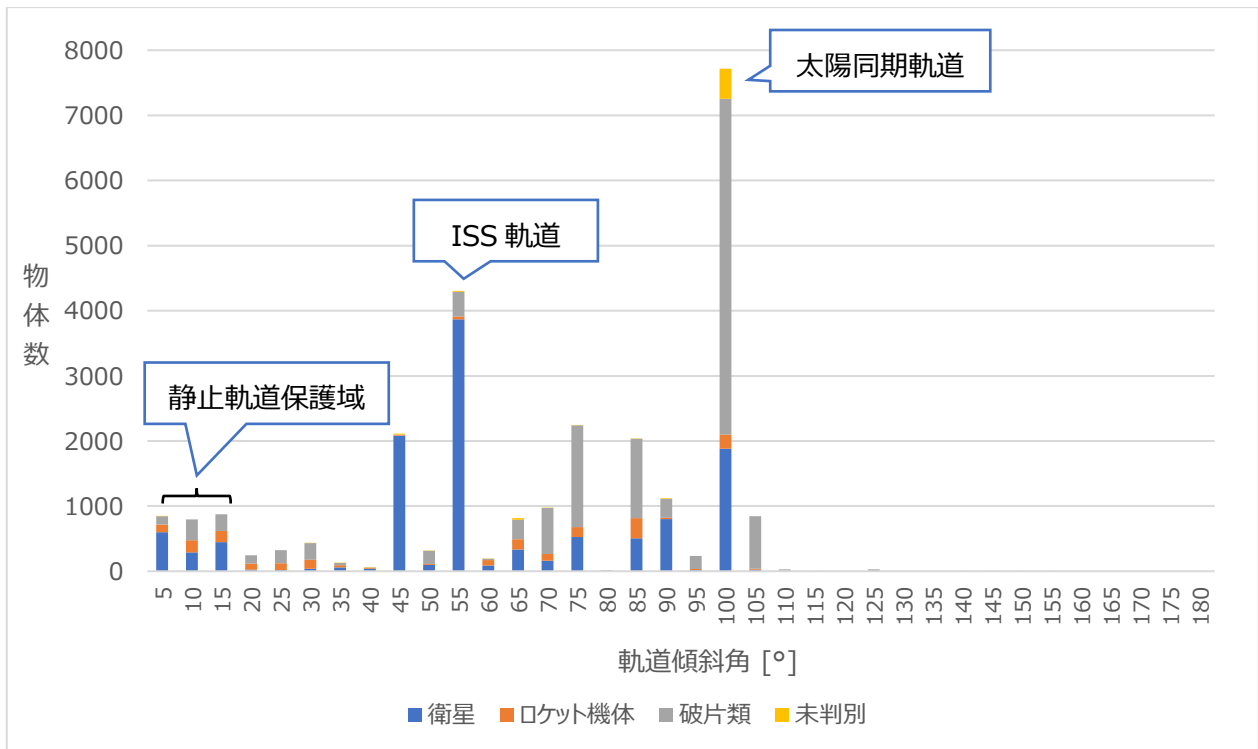


図 2.2.1- 2 軌道傾斜角別の軌道上物体数 (出典：6 項(1)@2024.08.19)

³ 平均高度、軌道傾斜角以外にも軌道を決定するパラメータとして、離心率(近地点高度、遠地点高度)や昇交点赤経などがあるが、密集度を特徴づけるパラメータの代表として本資料では平均高度と軌道傾斜角に対するデータを掲載している。

図 2.2.1-3 に軌道上物体数の国別割合を示す。2024 年 8 月現在、軌道上物体数は米国が最も多く、次いで CIS (Commonwealth of Independent States: 独立国家共同体)、中国が多くの割合を占めている。

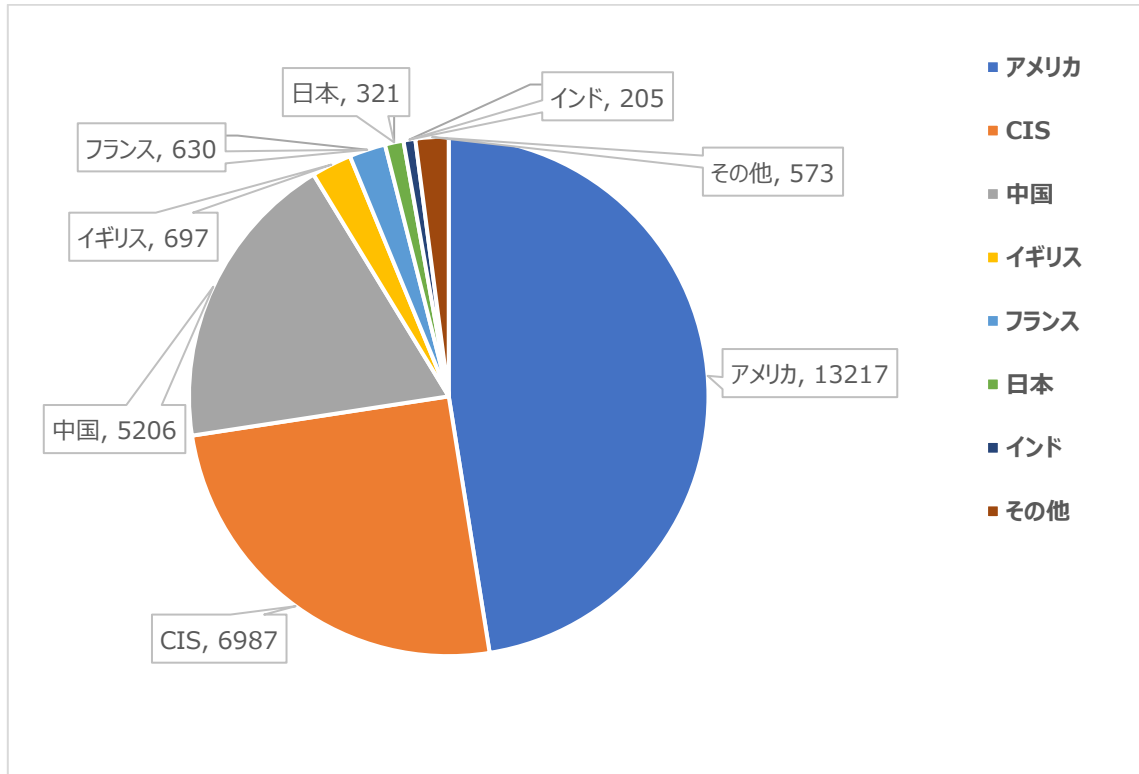


図 2.2.1- 3 軌道上物体数の国別割合 (出典 : 6 項(1)@2024.08.19)

2.2.2 地球低軌道保護域

図 2.2.2-1 に高度 2,000 km 以下の種類別物体数の割合を示す。衛星が 10,583 個で最も多く、次いで破片類が 10,060 個であり、ほとんどが破片と衛星で占められている。2023 年 8 月時点では破片類が 11,255 個、衛星が 9,089 個であったが、破片類は再突入し、衛星は主にコンステレーション衛星が増加したことにより、数が逆転した。破片の原因については 2.4 項を参照のこと。

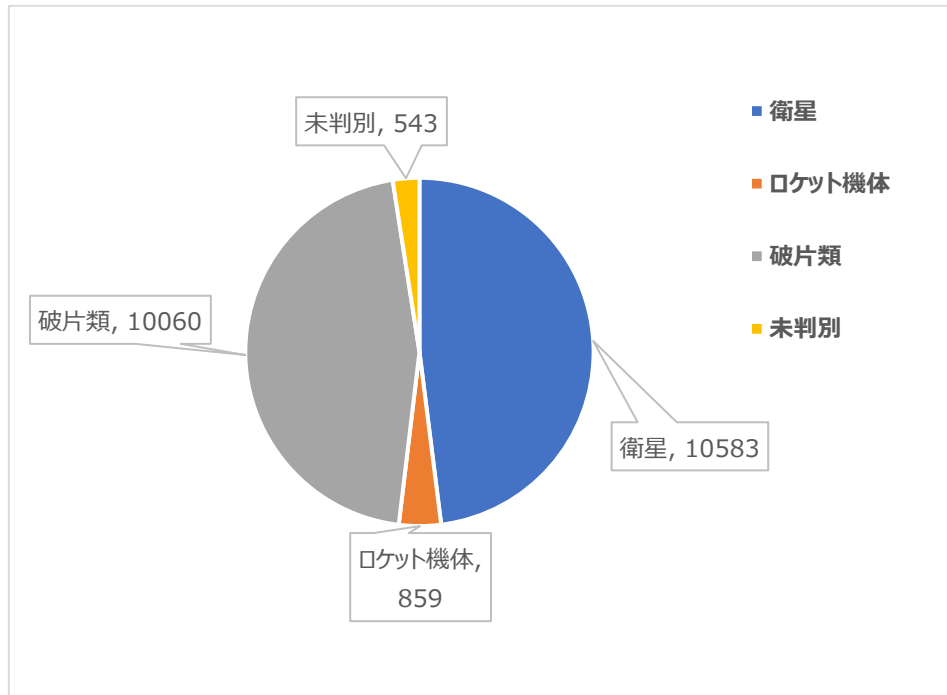


図 2.2.2- 1 地球低軌道保護域の種類別物体数の割合 (出典：6 項(1)@2024.08.19)

図 2.2.2-2 に地球低軌道保護域(高度 2,000 km 以下)の平均軌道高度別の物体数を示す。図 2.2.2-2 に示されるように、高度 300～400 km は大気の影響で落下が促進されることもあって数量としては少ないが国際宇宙ステーション（高度：約 400 km）等の有人ミッションに使用される軌道であるので第一に安全確保が必要な軌道域である。高度 600 km 周辺は太陽同期軌道の地球観測衛星とナビゲーション用衛星を主体とするもので、高度 700～1,000 km は多くのスペースデブリで込み合っている。特に高度 500～600 km は 2020 年から 2024 年現在にかけて大規模コンステレーション衛星が打ち上げられたため、これまで数量的にピークの混雑量を示していた高度 800～1,000 km をはるかに凌いでいる。次のピークは高度 1,500 km でロシアの通信衛星を主体とするものである。

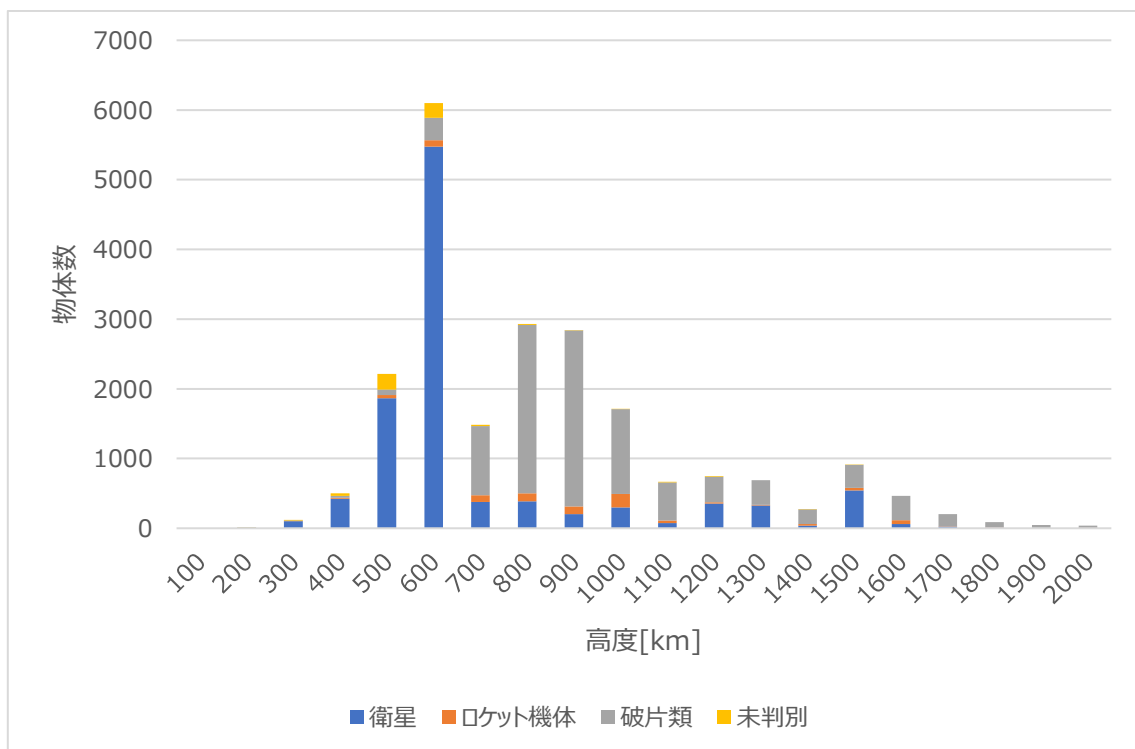


図 2.2.2- 2 平均軌道高度別の軌道上物体数(2,000 km 以下) (出典：6 項(1)@2024.08.19)

2.2.3 地球 12 時間周期軌道域

高度 20,000 km 付近の準同期軌道は GPS を代表とする 12 時間周期の軌道であり、貴重な用途を持つ軌道域であるため、JAXA 標準「JMR-003 スペースデブリ発生防止標準」では保護軌道域に分類しているが、国際的には明確な保護軌道域とは認識されていない。

2.2.4 地球静止軌道保護域

図 2.2.4-1 に静止軌道保護域(静止軌道高度 35,786 km \pm 200 km かつ軌道傾斜角： \pm 15 度以内)の種類別物体数の割合を示す。ほとんどが衛星であり、破片は比較的少ない。

また、図 2.2.4-2 に静止軌道保護域の物体のうち運用中の衛星の割合を示す。運用終了後のリオービット(静止軌道保護域外の墓場軌道への移動)は、近年は 90 %の静止衛星で実施されているが、多くの非稼働衛星が滞留している。

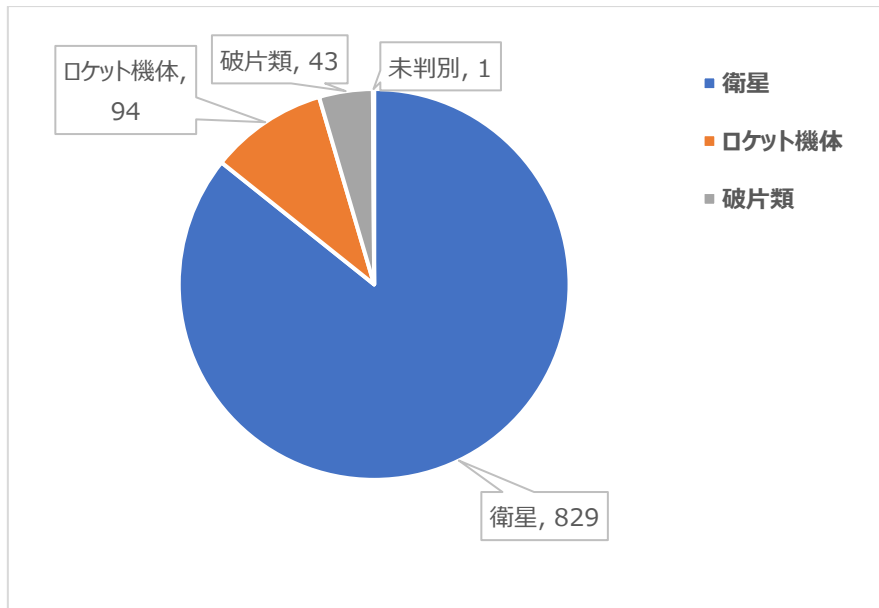


図 2.2.4- 1 静止軌道保護域の種類別物体数の割合 (出典：6 項(1)@2024.08.19)

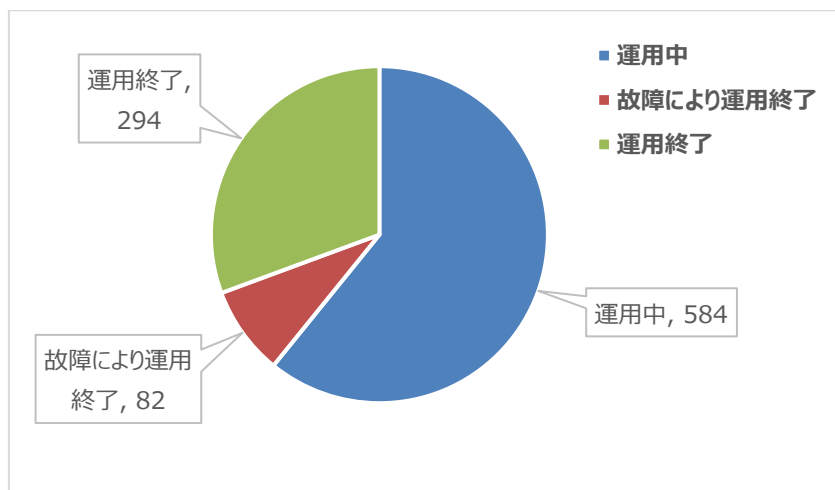


図 2.2.4- 2 静止軌道保護域の物体のうち運用中の衛星の割合 (出典：6 項(2)@2024.08.27)

2.3 微小物体含むスペースデブリおよびメテオロイドの分布

2.2 項では観測できる(カタログ化された)軌道上物体(直径 10 cm 程度以上とされている)の分布についてデータを示したが、本項は観測できない微小物体を含めた軌道上環境モデルのデータを示す。

地上から観測できない物体については、過去に行われた軌道上曝露実験機から回収したデータや高性能レーダの観測データに基づいて、NASA や ESA などがモデル化を行っている。代表例として、6 項(5)や(6)がある。

図 2.3-1 および図 2.3-2 は ESA の MASTER-8.0.3 による 2024 年の ESA 予測データに基づく高度 420 km、軌道傾斜角 51.6° (ISS 軌道を想定)および高度 600 km、軌道傾斜角 100.0°(太陽同期軌道を想定)におけるスペースデブリ(人工物体)及びメテオロイドのフラックスを示している。

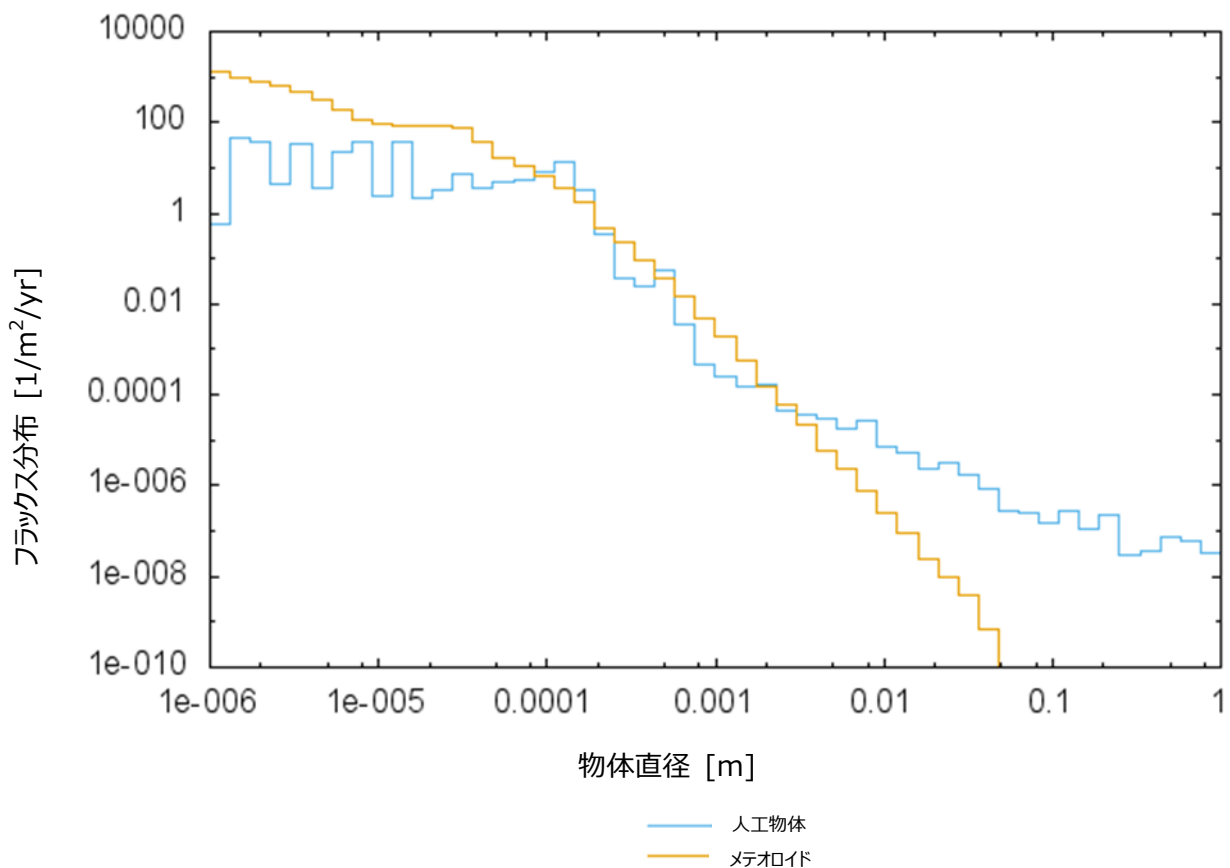


図 2.3- 1 高度 420 km、軌道傾斜角 51.6° (ISS 軌道)におけるデブリ種毎のフラックス
(出典：6 項(6)MASTER-8.0.3)

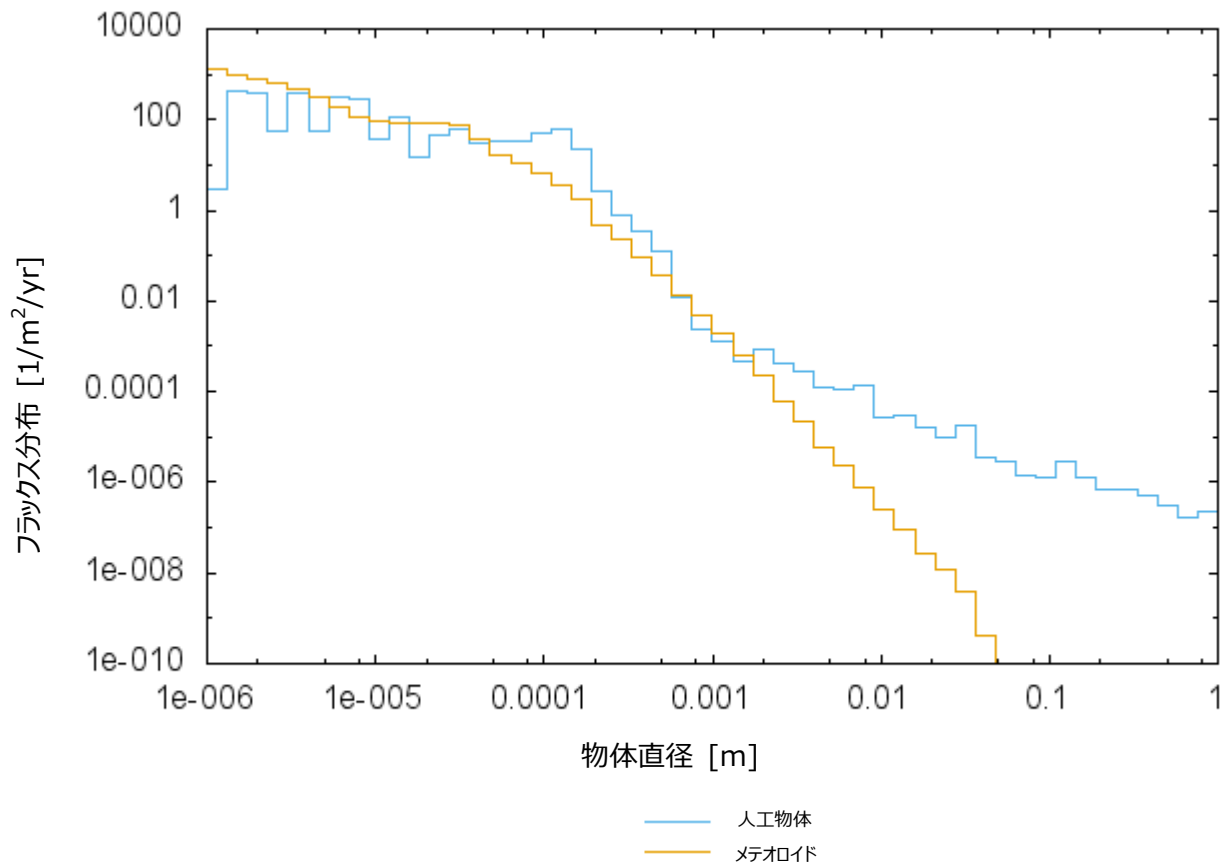


図 2.3- 2 高度 600 km、軌道傾斜角 100° (太陽同期軌道)におけるデブリ種毎のフラックス
(出典 : 6 項(6)MASTER-8.0.3)

図 2.3-3 に MASTER-8.0.3 のデータソースのある高度 186 km から 36,786 km、物体直径 10^{-4} m から 1 m までの物体の 2024 年 ESA 予測データに基づく高度別空間密度の推定を示す。

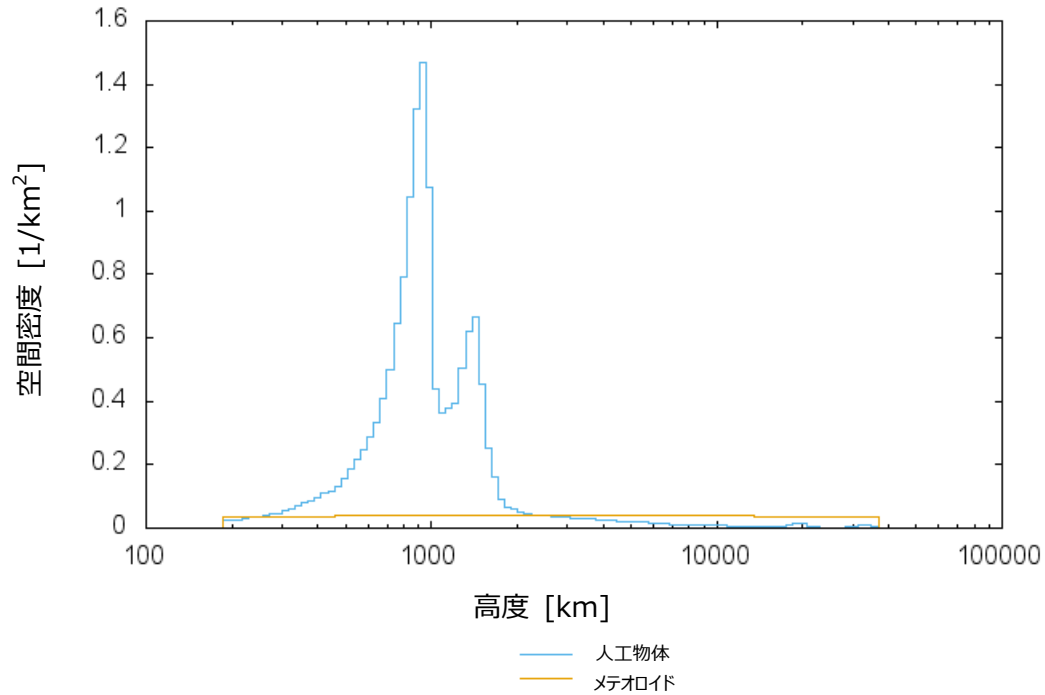


図 2.3- 3 2024 年 ESA 予測データに基づく高度別推定空間密度 (出典 6 項(6)MASTER-8.0.3)

2.4 破片発生の原因

軌道環境の悪化の最大原因は破砕事故である。破砕で発生した破片はカタログ物体の半数近くを占めている。破砕現象は主に以下の原因で発生する。

- (1) 残留推進剤の爆発
- (2) 意図的破壊実験
- (3) 破砕要素を有する品目の不具合
- (4) スペースデブリやメテオロイドの衝突

破砕事象の件数について、破砕事故の原因別破砕件数を図 2.4-1 に、破片数を図 2.4-2 に示す。推進薬による破砕が 118 件と最も多く、次いで意図的破壊が 61 件、バッテリーによる破砕が 12 件である。原因不明も 84 件と多い。意図的破壊は内部エネルギーによる自爆と外部からの衝突による爆破(ASAT: Anti-Satellite Weapon 実験等)の大きく 2 つに分かれる。後者は発生件数は少ないが、破片発生数が多い。

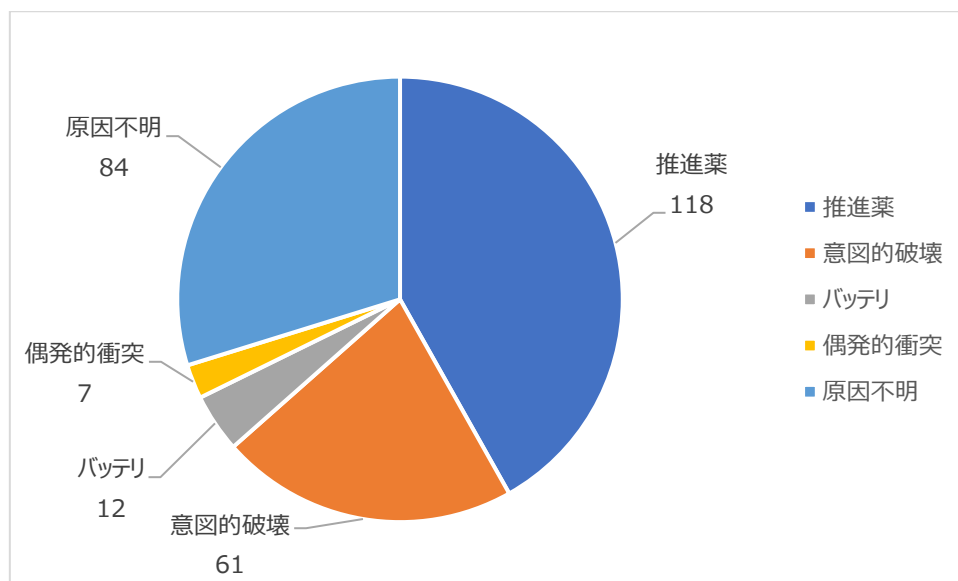


図 2.4- 1 発生原因別破砕件数の割合 (出典：6 項(3)(4))

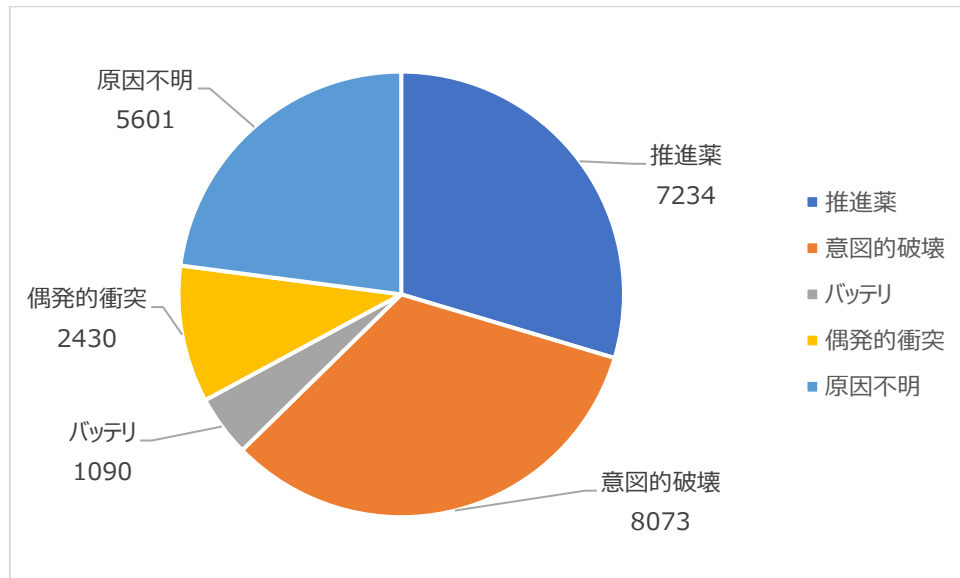


図 2.4- 2 発生原因別破片発生数の割合 (出典：6 項(3)(4))

本章のデータには含まれていないが、2013 年に太陽同期軌道に打ち上げられ 2021 年には運用終了していたロシアの衛星 Resurs P1 が 2024 年 6 月 26 日に軌道上で破砕した。Resurs P1 の破砕原因は分かっておらず、少なくとも 100 個以上⁴の破片を放出した。さらに、2024 年 8 月 6 日に高度 800 km の極軌道に打ち上げられた中国のロケット Long March 6A が 2024 年 8 月 7 日に軌道上で破砕した⁵。Long March 6A についても破砕原因は不明であり、300 個以上⁶の破片が観測されている。なお、Long March 6A は 2022 年 11 月にも軌道上で破砕しており、700 個⁷の破片がカタログ化されている。

⁴ U.S. Space Command プレスリリース：<https://www.spacecom.mil/Newsroom/News/Article-Display/Article/3819238/press-release-break-up-of-russian-owned-space-object/>

⁵ USSPACECOM の情報に基づき、多数のニュースサイトが取り上げている。

⁶ U.S. Space Command X アカウント：
https://x.com/US_SpaceCom/status/1821615199230816555

⁷ 2024 年 8 月 19 日時点の 6 項(1)に基づいて計上した値。

破砕物を宇宙機、ロケット機体およびミッション関連デブリ⁸に分けて破砕原因を示したのが図 2.4-3 である。推進系を有するロケット機体やミッション関係デブリでは残留推進剤の爆発の事例が多い。(推進薬が原因で破砕したミッション関係デブリは全てプロトンのロケットモータである。)

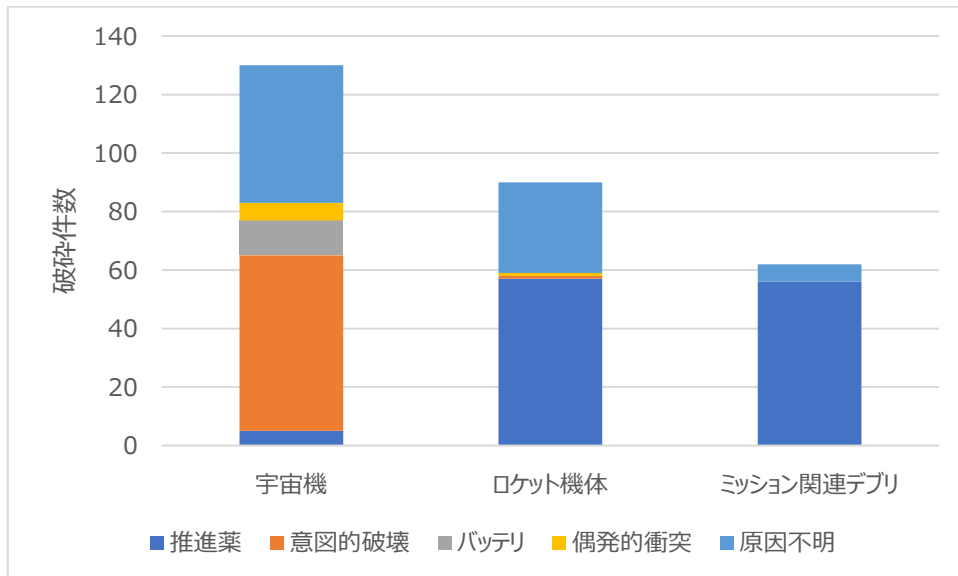


図 2.4- 3 システム別破砕件数の割合 (出典：6 項(3)(4))

⁸ ミッションを達成するために生じる分離物の総称。

図 2.4-4 に打上げから破砕までに経過した期間を示す。1 年以内に破砕した件数が最も多く 123 件である。さらに、打上げから 1 日目に破砕した件数は 50 件であり、ほとんどを占めている。打上げから 1 日目に生じた破砕原因の割合を図 2.4-5 に示す。年数が経過するにつれて減少傾向にあるが、10 年以上経過してから残留推進薬により爆発することもあることが分かる。

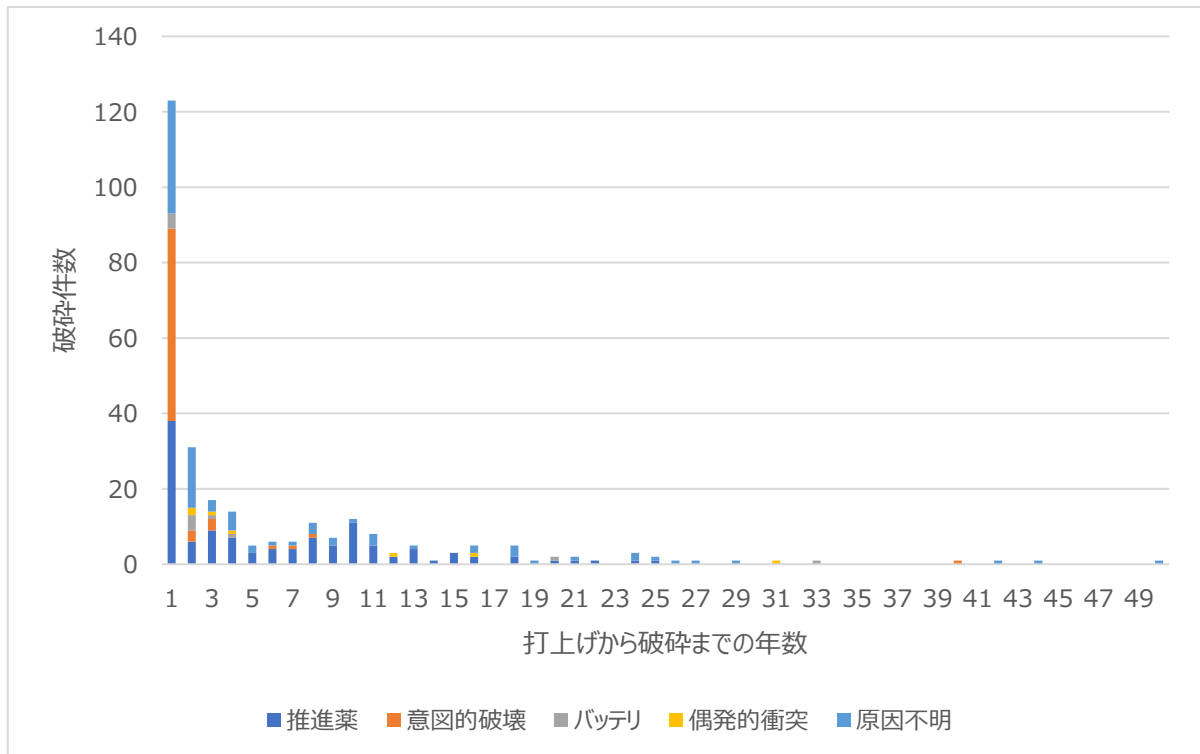


図 2.4- 4 打上げから破砕までに経過した期間（出典：6 項(3)(4)）

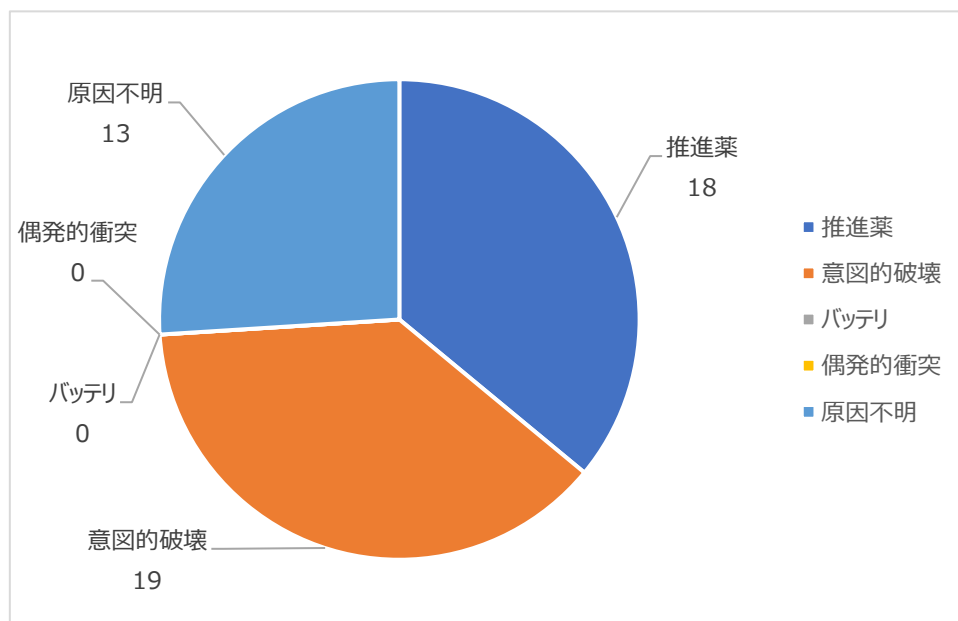


図 2.4- 5 打上げから 1 日目に生じた破砕原因の割合（出典：6 項(3)(4)）

3. 軌道利用の安全に係るトピックス

3.1 ISS からの投機物がフロリダ州の民家に落下

2020 年 5 月、国際宇宙ステーション（ISS）に物資を運ぶために種子島宇宙センターから打ち上げられた「こうのとり 9 号機」は、ISS の電力システム更新のために NASA が開発したリチウムイオン電池を曝露パレットに搭載していた。当該パレットは、輸送したリチウムイオン電池と入れ替えで廃棄が必要なニッケル水素電池を搭載し ISS のロボットアームにより 2021 年 3 月に投棄された。（こうのとり 7 号機の曝露パレットが、ソユーズ 56S の緊急帰還の影響で ISS に残置され 8 号機で回収、8 号機の曝露パレットが 9 号機で回収され、9 号機の曝露パレットは予め投棄により廃棄する計画で打ち上げられた）

ニッケル水素電池を搭載した曝露パレットは、地球の大気圏に突入する際に完全に燃え尽きると評価されていたが、当該パレットの再突入が確認された 2024 年 3 月 8 日、落下予想地点の経路上にあるフロリダ州ネイブルズで、民家の屋根を突き破って落下した金属片が発見、回収された。NASA が落下物を回収し、NASA ケネディー宇宙センターで分析した結果、落下物は NASA が開発したニッケル水素電池搭載用構造物の支柱（インコネル製）の 1 つであることが確認された。

今回の落下物はもともと燃え尽きると評価されていたところ、回収されたハードウェアは設計の特徴が確認できるなど、想定外に少ない加熱量であったことが確認されたため、今回の現象の解明や溶融解析評価の改善に向けた取り組みが期待される。



図 3.1-1 発見されたニッケル水素電池搭載用構造物の支柱（右）およびオリジナル形状（左）⁹

⁹ <https://blogs.nasa.gov/spacestation/2024/04/15/nasa-completes-analysis-of-recovered-space-object/>

3.2 ADRAS-J がスペースデブリ（H-IIA ロケット上段）の観測に成功

JAXA は、持続的な宇宙活動の実現のためにスペースデブリ除去を新規宇宙事業として拓くことを目的として「商業デブリ除去実証 (CRD2) フェーズ I」を進めている。CRD2 フェーズ I の実証衛星 ADRAS-J (Active Debris Removal by Astroscale-Japan) は株式会社アストロスケールが開発・所有・運用を担っている。ADRAS-J はスペースデブリとなった H-IIA ロケット上段に後方約数百 m の距離まで近接し撮影することに成功した。(2024 年 4 月 26 日発表)

また、対象デブリとの距離約 50 m で実施された「定点観測」画像が同年 6 月 14 日に発表された。この観測により、ターゲットのスペースデブリの運動が、地心方向に沿った直立姿勢であるだけでなく、その機体の機軸周りの回転もほとんどない状態であることが確認された。さらに、このスペースデブリに大きな損傷がないこと、ロケットの表面に使われている断熱材について、打上げ直後はオレンジ色であったものが、10 年以上の期間を経て軌道上の強い紫外線により濃い茶色に変色していることも確認された。なお、機体の左右に観察されるひも状のものは、打上げ時の画像にも見られた機体の表面保護用のテープと、現状画像状況より推定された。

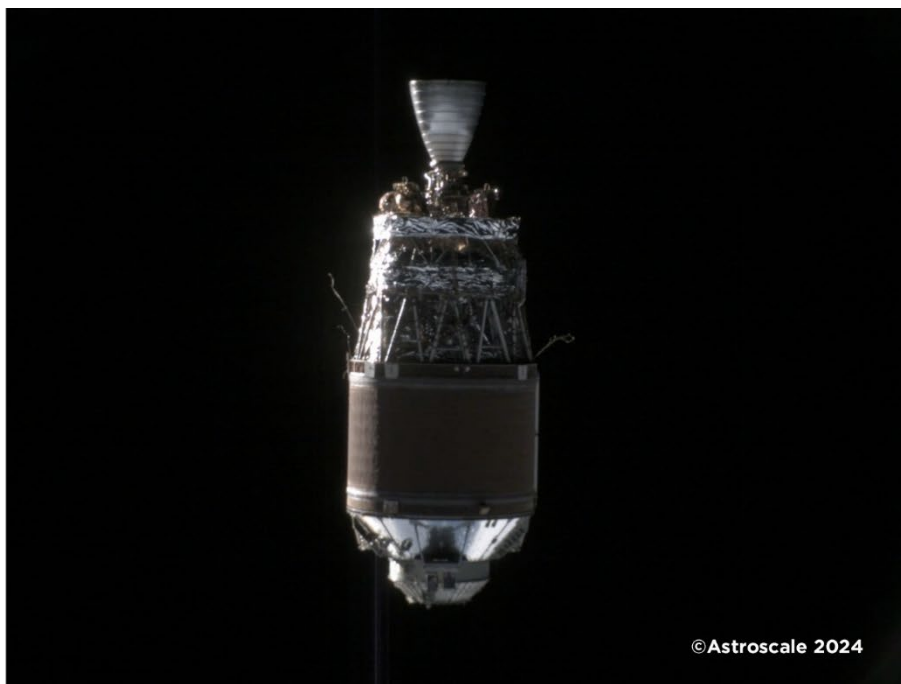


図 3.2-1 「定点観測」による CRD2 のターゲットスペースデブリ¹⁰の連続画像のうちの 1 枚 (出典：6 項(7))

¹⁰ 2009 年に温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(GOSAT) を打ち上げた H-IIA ロケット上段。国際識別番号：2009-002J、カタログ番号：33550

同年 7 月 30 日には、対象デブリとの距離約 50m で実施された「周回観測」画像が発表された。「定点観測」で見えていた片側の側面だけでなく、対象デブリ全体の表面の様相について確認された。また、CRD2 フェーズ II において捕獲を行う対象部位である PAF とその周辺部位について、衛星分離後の各部品やハーネス等の状況や、軌道上で 15 年を経た現況が確認された。これらは、今後の CRD2 フェーズ II で捕獲を行うにあたり重要な知見となる。



図 3.2-2 「周回観測」による CRD2 のターゲットスペースデブリの連続画像
(2024 年 7 月 16 日撮影、時系列は左上→右上→左下→右下) (出典：6 項(7))

4. 国内外のスペースデブリ対策に関する動向

4.1 国際的な動向

スペースデブリ対策は一国が実施しても効果は薄く、国際的な協力が不可欠である。スペースデブリ低減に関する標準やガイドラインを策定している代表的な国際機関として、UN COPUOS (United Nations Committee on the Peaceful Uses of Outer Space)、IADC (Inter-Agency Space Debris Coordination Committee)、ISO (Organization for International Standards)などがある。

4.1.1 UN COPUOS

毎年、各国および各機関でスペースデブリに関する情報交換を実施している。2007 年に Space Debris Mitigation Guideline が制定され、法的拘束力はないものの、参加国に向けて基本的なスペースデブリ低減対策が記載されている。(6 項(8)参照。)

4.1.2 IADC

スペースデブリ問題に関する活動の国際的な調整を行う機関であり、加盟宇宙機関間の情報交換、研究協力機会の促進、共同活動の進捗確認、スペースデブリ低減策の識別などを目的としている。2024 年 9 月現在、JAXA 含む 13 の加盟宇宙機関で構成されている。

運営グループおよび 4 つのワーキンググループ(measurements (WG1), environment and database (WG2), protection (WG3), mitigation (WG4))で構成されている。

2002 年に初版が発行された「IADC スペースデブリ低減ガイドライン」の第 3 版が 2021 年に制定、公開されている。また、大規模コンステレーション衛星や能動的デブリ除去に対する提言を公開している。(6 項(9)参照。)

4.1.3 ISO

各国専門家有志の合意に基づく標準を発行している独立した非政府機関である。

2023 年に第 4 版となる「ISO 24113:2023 Space systems — Space debris mitigation requirements」が制定されており、購入することができる。その他、スペースデブリ低減に関連する標準も複数存在している。(6 項(10)参照。)

4.2 米国

米国政府は NASA が主導となり作成した ODMSP (Orbital Debris Mitigation Standard Practices) に従ってスペースデブリ低減を実施している。ODMSP は 2001 年に初版が制定され、大統領令 SPD(Space Policy Directives)-3 を反映し 2019 年に改定されている。破碎確率や衝突確率などの定量的制限の追加、各保護軌道域における廃棄手法の詳細化、大規模コンステレーションや軌道上サービスに関する規範の追加など、大幅な内容の更新があった。

NASA は独自にスペースデブリ低減に関する標準として NPR 8715.6(2024 年に E 版が発行された) と NASA-STD-8719.14 (2021 年に C 版が制定されている)を定めて、スペースデブリ低減に係る評価を実施することを要求している。また、四半期に一度、Orbital Debris Quarterly News (6 項(3)参照)を刊行しており、スペースデブリに関する情報を公開している。

民間の宇宙活動に関しては、FCC(Federal Communications Commission)が人工衛星のスペースデブリ低減を含む管理に対する許認可に対して責任を持つ規制当局として任命されており、連邦規則集の 47 CFR Part 5(実験用衛星), 25(商用衛星), 97(アマチュア衛星)にてスペースデブリ低減に関する要求を制定している。2004 年に規則が制定され、SPD-3 を受けて 2018 年から改訂議論が進み、2020 年に一部規則の改正が公示された。さらにその後、2022 年に地球低軌道保護域の運用終了後の廃棄寿命に関する定量的要求を国際標準である 25 年から 5 年に引き下げることが報告された。なお、廃棄寿命に関しては ODMSP では 25 年以下とされており、NASA、NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)、DOD(Department of Defense)といった他の米国機関はそれに準じている。廃棄寿命 5 年以下に加えて、コンステレーション衛星に対する廃棄成功確率 0.99 以上といった内容を含む規則改訂は 2024 年 9 月に施行される。(6 項(14)参照。)

ロケット打上げに関しては、FAA(Federal Aviation Administration)が許認可を担う規制当局であり、連邦規則集の 14 CFR Part 450 §450.171 にてスペースデブリ低減に関する要求を制定している。また、2023 年 9 月にスペースデブリに関する新規則提案(Part 453)が出された。(6 項(15)参照。)

4.3 欧州

ESA は ESA/ADMIN/IPOL(2014)2 “Space Debris Mitigation Policy for Agency Projects”に基づいて ESA プロジェクトを実施しており、技術要求としては ISO 24113 を取り込んでいる。自プロジェクトに対しては、2023 年まで適用していた ECSS-U-AS-10C の適用を取り止めて、独自のデブリ低減要求である ESA Space Debris Mitigation Requirements, ESSB-ST-U-007, Issue 1 Revision 0, 2023 を採用することにした。このような要求の採用を含め、2030 年までにスペースデブリの増加数を“0”にすることを掲げて Zero Debris approach を示している。また、Zero Debris approach に加えて宇宙コミュニティ全体に向けた指針として Zero Debris Charter を示している。(6 項(11)参照。)

また、定期的に ESA's Annual Space Environment Report を発行しており、世界的な宇宙活動の状況や、宇宙活動の長期的な持続可能性の改善に向けたスペースデブリ低減策の有効性を示している。(6 項(16)参照。)

仏国には宇宙活動法¹¹およびその下位の技術規則(通称 Technical Regulations)があり、スペースデブリに関する規制も含まれている。Technical Regulations は 2024 年に改訂されている。

英国では CAA(Civil Aviation Authority)が民間宇宙活動に対する規制当局であり、宇宙活動に関する法律として、Outer Space Act 1986 (OSA)、Space Industry Act 2018 (SIA)がある。

4.4 日本

JAXA はスペースデブリ発生防止標準である JMR-003 を制定、公開しており、2023 年に制定された E 版では、地球周回軌道以外の月軌道等に対する要求の識別などを新たに記載している。また、2022 年に JMR-016「人工衛星の衝突リスク管理標準」を制定、公開している。(6 項(12)参照。)

国内法としては、「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 2016 年に施行され、関連するガイドラインが公開されている。その中にスペースデブリ低減に関する事項も含まれており、日本で打上げや人工衛星の管理を実施する場合には許可申請を出す必要がある。(6 項(13)参照。)

¹¹ 原題 : LOI n 2008 518 du 3 juin 2008 relative aux operations spatiales

5. 学会・ワークショップ情報

5.1 第 11 回 JAXA スペースデブリワークショップ

JAXA 研究開発部門は、スペースデブリ問題に関する国内最大規模の国内外の関係者の議論の場として、「第 11 回スペースデブリワークショップ」を開催する。本ワークショップでは、国内外の技術動向等の情報を提供するとともに、各研究者間の積極的な協力関係の醸成を目指している。ワークショップは国際および一般セッションからなり、観測、SSA/STM、モデル、防護、低減、法政策、除去等の分野で発表が行われる予定。

開催日：2024 年 10 月 28 日（月）～ 30 日（水）

主催：JAXA 研究開発部門

開催場所：JAXA 調布航空宇宙センター 事務棟 1 号館 2 階講堂（東京都調布市深大寺東町 7-44-1）
及びオンライン

参加費：無料（懇親会費は別途必要）

参加申し込み期間：会場参加：8 月下旬～10 月上旬、オンライン聴講：10 月上旬～10 月 25 日

<https://www.kenkai.jaxa.jp/event/2024/debrisws2024.html>

6. 参考文書およびデータベース

- (1) CSpOC : Space Track (<https://www.space-track.org>)
- (2) Seradata (<https://www.seradata.com/>)
- (3) NASA : Orbital Debris Quarterly News
(Volume26, Issue3 / Volume27, Issue1 / Volume27, Issue2 / Volume27, Issue4)
(<https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/>)
- (4) NASA : History of On-orbit Satellite Fragmentation 16th Edition
- (5) NASA : Orbital Debris Engineering Model (ORDEM)
- (6) ESA : MASTER (Meteoroid And Space debris Terrestrial Environment Reference)
- (7) JAXA : Web サイト (https://www.jaxa.jp/press/2024/06/20240614-2_j.html)
(https://www.jaxa.jp/press/2024/07/20240730-1_j.html)
- (8) UNOOSA : Web サイト
(<https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/topics/space-debris/index.html>)
- (9) IADC : Web サイト (<https://iadc-home.org>)
- (10) ISO : Web サイト (<https://www.iso.org/home.html>)
- (11) ESA : Web サイト (<https://technology.esa.int/page/space-debris-mitigation>)
- (12) JAXA : Web サイト (<https://sma.jaxa.jp/techdoc.html>)
- (13) 内閣府 : Web サイト
(https://www8.cao.go.jp/space/application/space_activity/application.html)
- (14) 米国 FCC : Federal Register Vol. 89, No. 154
- (15) 米国 FCC : Federal Register Vol. 88, No. 185
- (16) ESA : ESA_Space_Environment_Report_2024
(https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris)

付録 I 用語集 (JMR-003E スペースデブリ発生防止標準等より)

用語	意味
宇宙機	宇宙で一連のタスク、機能を能動的・受動的に果たすために設計されたシステム。別途定義するロケットは除く。
衛星コンステレーション	特定の方式に基づく多数個の人工衛星の一群
スペースデブリ	地球周回軌道、月周回軌道、火星周回軌道、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にある無用な人類起源の物体。宇宙システムから分離する付属品、破砕により発生する破片、運用終了後の宇宙システムなどが含まれる。
破砕	宇宙機等が軌道周回中に、内部エネルギーによる化学的爆発又は機械的破裂あるいは他の物体との衝突による機械的破砕等によりデブリを発生する現象をいう。 経年劣化等によるシステムの一部の離脱、剥離、落下中の空力破壊は含まない。
フラックス	単位時間、単位面積あたりに物体が通過する数。
保護軌道域	現状で特に利用頻度が高く、保全すべきと識別される軌道域である。具体的には以下に示す地球低軌道保護域、地球 12 時間周期軌道域および地球静止軌道保護域である。 a. 地球低軌道保護域：高度 2,000 km 以下 b. 地球 12 時間周期軌道域：高度 19,100 km 以上、23,500 km 以下の軌道域 c. 地球静止軌道保護域：静止軌道高度 ± 200 km かつ緯度： ± 15 度以内
メテオロイド	宇宙に存在する自然起源の粒子。主として小惑星か彗星を起源とする。
ロケット	宇宙機打上げ用ロケットを指す。なお、打上げ後に、目標軌道に乗る上段機体を軌道投入段と表現する。