



軌道利用の安全に係るレポート

2023年10月 Volume 1

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機数の変遷	5
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	7
2.2.2 地球低軌道	10
2.2.3 地球 12 時間周期軌道	10
2.2.4 地球静止軌道	11
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	12
2.4 破片発生の原因	14
3. 国内外のスペースデブリ対策に関する動向	18
3.1 国際的な動向	18
3.1.1 UN COPUOS	18
3.1.2 IADC	18
3.1.3 ISO	18
3.2 米国	19
3.3 欧州	19
3.4 日本	20
4. 参考文書およびデータベース	21
付録 I 用語集 (JMR-003E スペースデブリ発生防止標準等より)	22

図・表目次

図 2.1- 1 宇宙機打上げ機数の変遷 (出典：4 項(2)@2023.08.23).....	5
図 2.1- 2 軌道上物体数の変遷 (出典：4 項(1)@2023.08.23).....	6
図 2.1- 3 再突入物体数の変遷 (出典：4 項(1)@2023.08.23).....	6
図 2.2.1- 1 平均軌道高度別の軌道上物体数(出典：4 項(1)@2023.08.23).....	7
図 2.2.1- 2 平均軌道高度別の軌道上物体数(2,000 km 以下) (出典：4 項(1)@2023.08.23).....	8
図 2.2.1- 3 軌道パラメータの概念図 (出典：4 項(7)).....	8
図 2.2.1- 4 軌道傾斜角別の軌道上物体数 (出典：4 項(1)@2023.08.23).....	9
図 2.2.1- 5 軌道上物体数の国別割合 (出典：4 項(1)@2023.08.23).....	9
図 2.2.2- 1 低軌道の種類別物体数の割合 (出典：4 項(1)@2023.08.23).....	10
図 2.2.4- 1 静止軌道保護域の種類別物体数の割合 (出典：4 項(1)@2023.08.23).....	11
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：4 項(2)@2023.08.23).....	11
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.....	12
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.....	13
図 2.3- 3 2023 年時点の物質毎の推定空間密度 (出典 4 項(6)MASTER-8.0.3).....	13
図 2.4- 1 発生原因別破砕件数の割合 (出典：4 項(3)(4)).....	14
図 2.4- 2 発生原因別破片発生数の割合 (出典：4 項(3)(4)).....	15
図 2.4- 3 システム別破砕件数の割合 (出典：4 項(3)(4)).....	15
図 2.4- 4 打上げから破砕までに経過した期間 (出典：4 項(3)(4)).....	16
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：4 項(3)(4)).....	16
表 2.4- 1 生じた破片数の多い破砕事象トップ 10 (出典：4 項(3)).....	17

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20,000個を超える物体がある。特に破砕実験、破砕事故、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2023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、破砕事象の発生状況、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項ではスペースデブリ対策に関する動向を示す。4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機数の変遷

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 に示す。2020 年は、SpaceX 社の Starlink が 833 機、OneWeb が 104 機（これらの合計 1228 機）の衛星が打ち上げられて急増したが、2021 年には更に Starlink が 989 機（累積 1942 機）、OneWeb が 284 機（累積 394 機）、Spacebee が 76 機（累積 121 機）打ち上げられて、これらのコンステレーションだけで 1349 機の増加となった。その他の衛星を含めれば宇宙機全体で 2620 機の増加で累積 8167 機である。（そのうち 3785 機は既に落下している。）2022 年、2023 年にも打上げ機数の増加は続いており、上記コンステレーション衛星の影響が大きい。

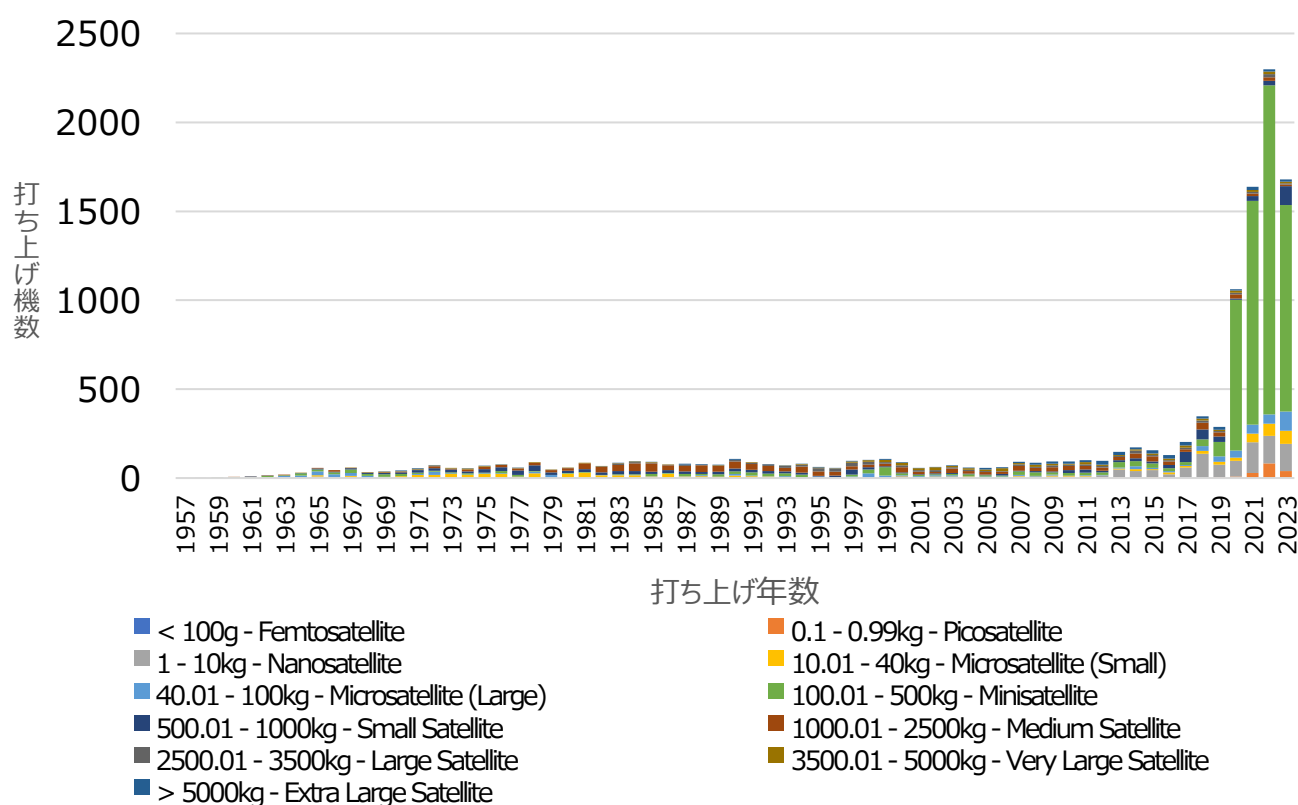


図 2.1- 1 宇宙機打上げ機数の変遷 (出典：4 項(2)@2023.08.23)

観測可能な軌道上物体数の変遷を図 2.1-2 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。2023 年 8 月現在、観測できる物体数だけで 25,000 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。現時点における軌道上物体の分布の詳細は 2.2 項に示す。

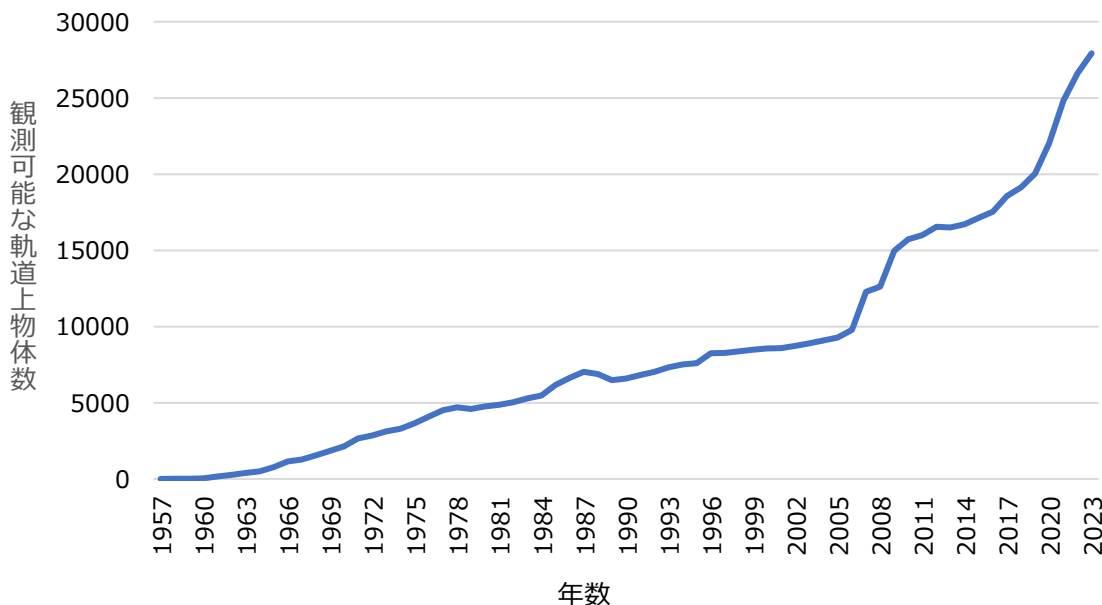


図 2.1- 2 軌道上物体数の変遷 (出典：4 項(1)@2023.08.23)

再突入物体数の変遷を図 2.1-3 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。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 3 項を参照。

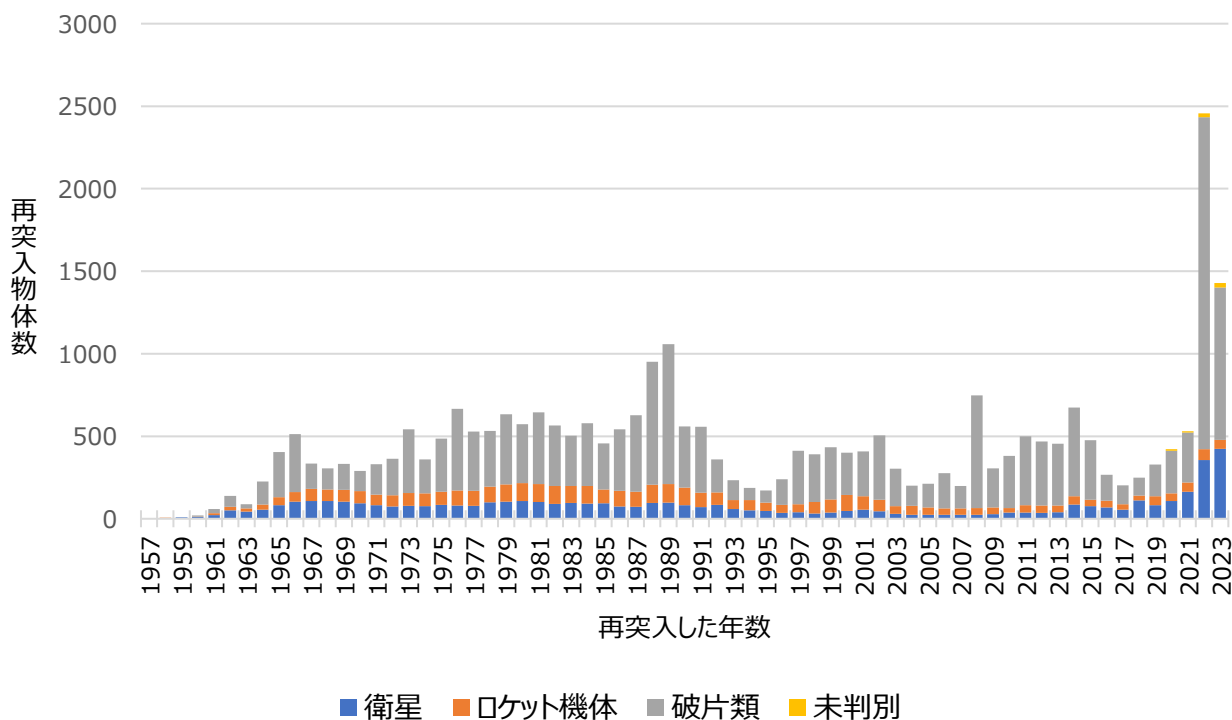


図 2.1- 3 再突入物体数の変遷 (出典：4 項(1)@2023.08.23)

2.2 観測可能な軌道上物体の分布

本項では、観測可能な軌道上物体¹のうち、地球周回軌道として利用されている高度 40,000km 以下の軌道域の宇宙物体の分布状況を示す。

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。また、図 2.2.1-2 に低軌道域(高度 2,000 km 以下)にフォーカスした平均軌道高度別の物体数を示す。軌道上物体のうち、ほとんどの物体は低軌道に存在しており、2023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。

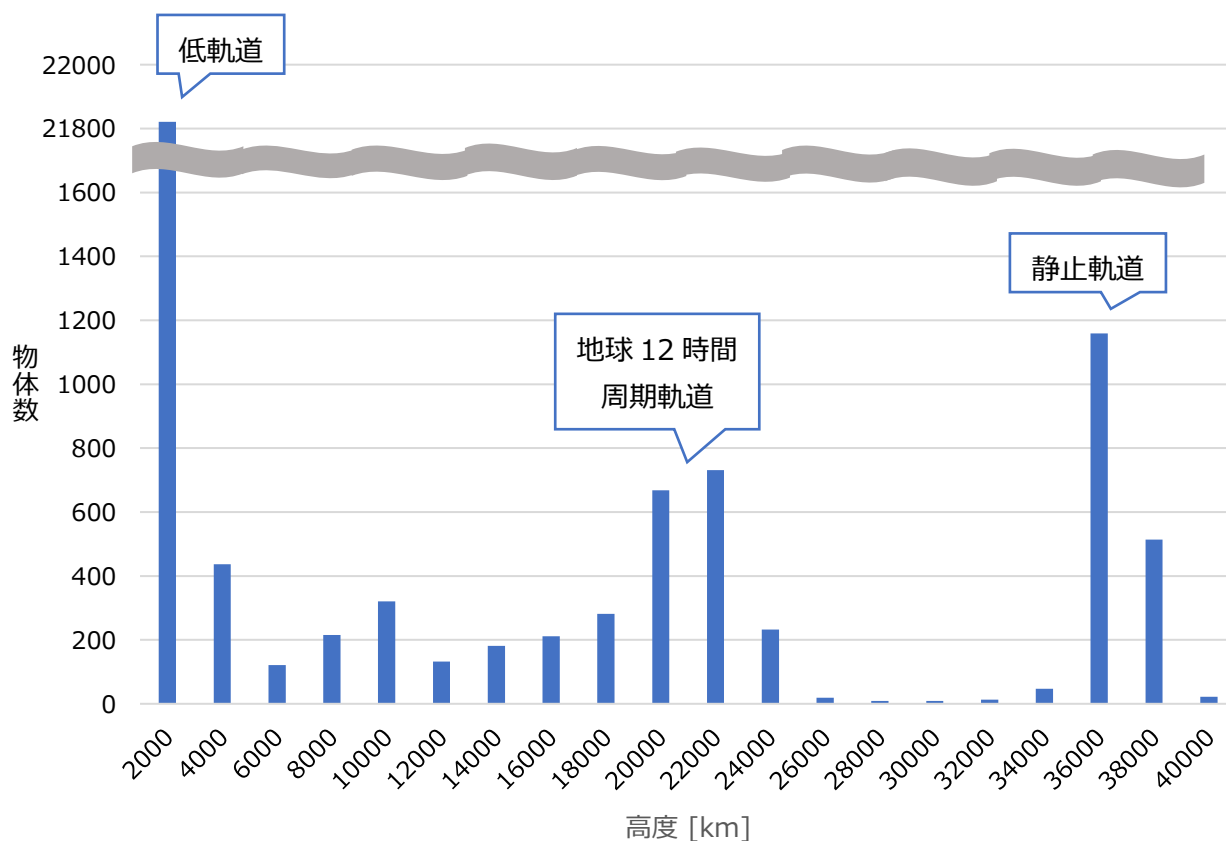


図 2.2.1- 1 平均軌道高度別の軌道上物体数(出典：4 項(1)@2023.08.23)

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。

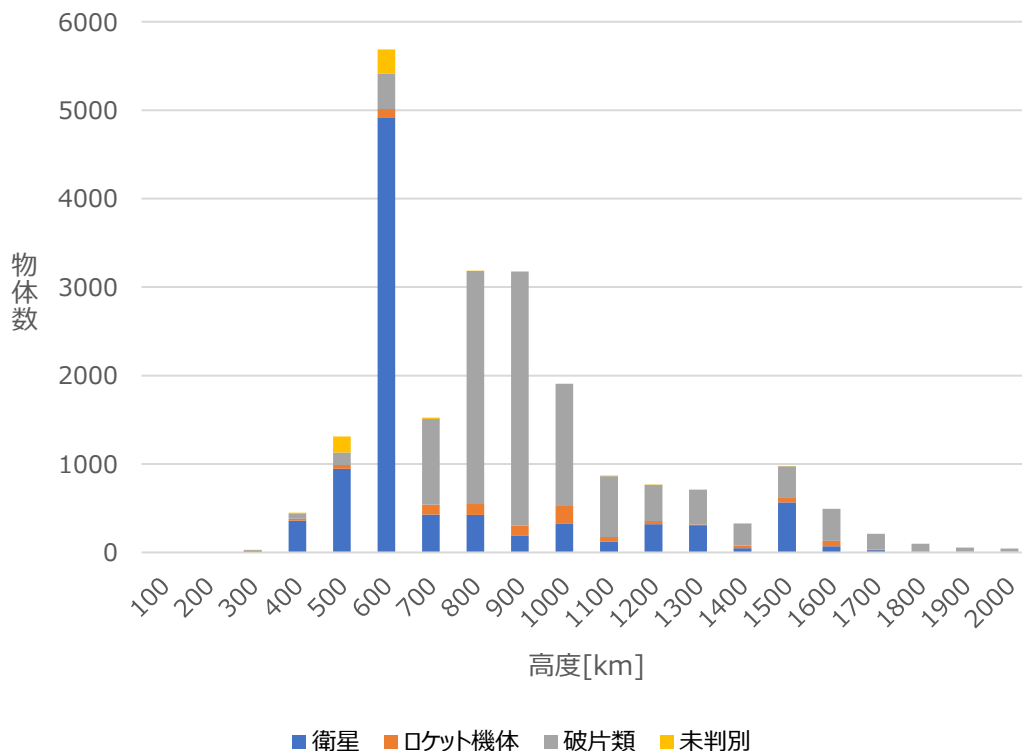


図 2.2.1- 2 平均軌道高度別の軌道上物体数(2,000 km 以下) (出典：4 項(1)@2023.08.23)

軌道上環境の物体集中を表す高度以外のパラメータ²として、軌道傾斜角がある。軌道傾斜角は図 2.2.1-3 に示すように地球の赤道面に対する軌道面の傾きを示している。図 2.2.1-4 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。

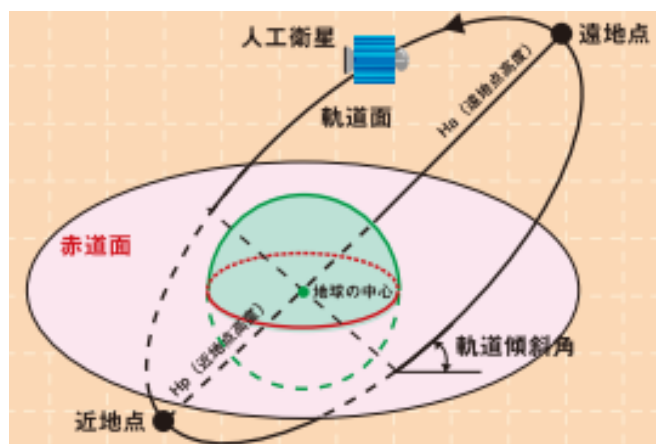


図 2.2.1- 3 軌道パラメータの概念図 (出典：4 項(7))

² 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。

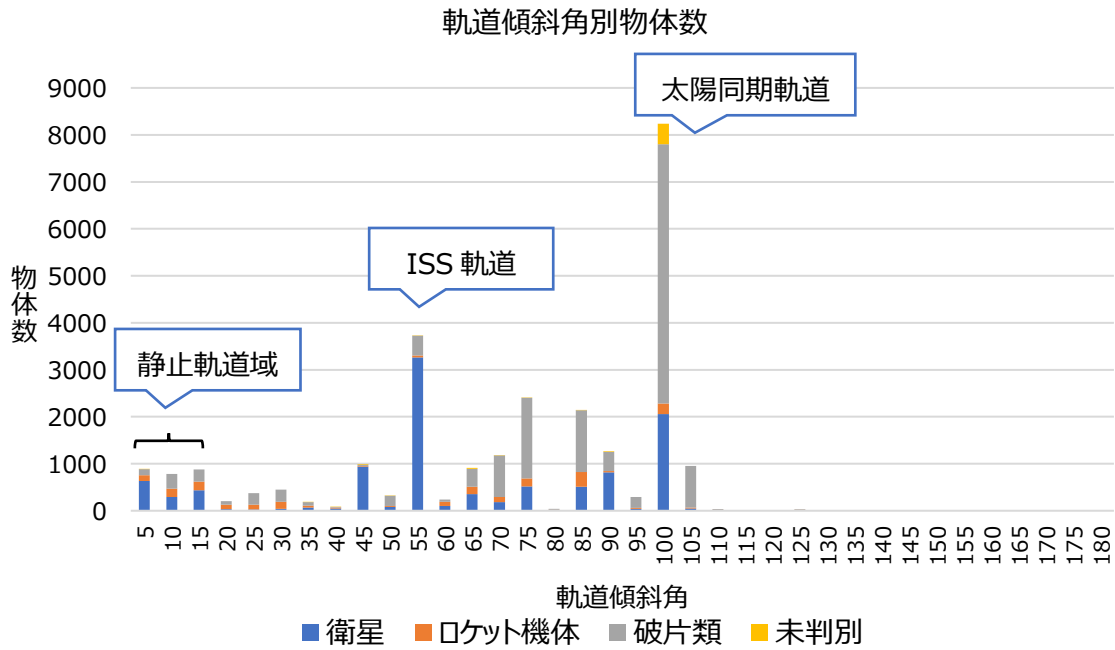


図 2.2.1- 4 軌道傾斜角別の軌道上物体数 (出典：4 項(1)@2023.08.23)

図 2.2.1-5 に軌道上物体数の国別割合を示す。2023 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。

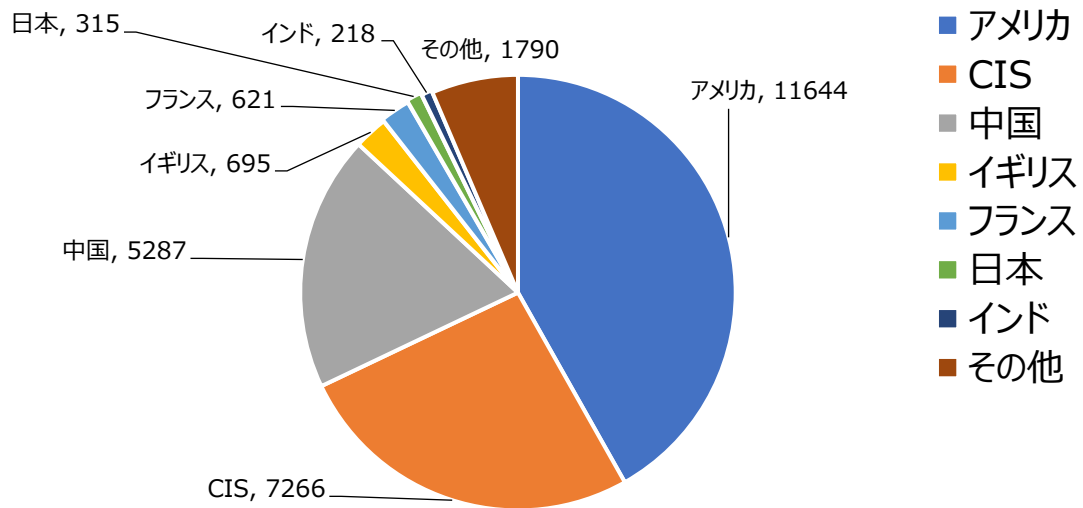


図 2.2.1- 5 軌道上物体数の国別割合 (出典：4 項(1)@2023.08.23)

2.2.2 地球低軌道

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。破片類が 11255 個で最も多く、次いで衛星が 9089 個であり、ほとんどが破片と衛星で占められている。破片の原因については 2.4 項を参照のこと。

図 2.2.1-2 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 1 に安全確保が必要な軌道域である。高度 600~1,000 km 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、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 2023 年現在にかけて大規模衛星コンステレーション衛星が打上げられたため、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。

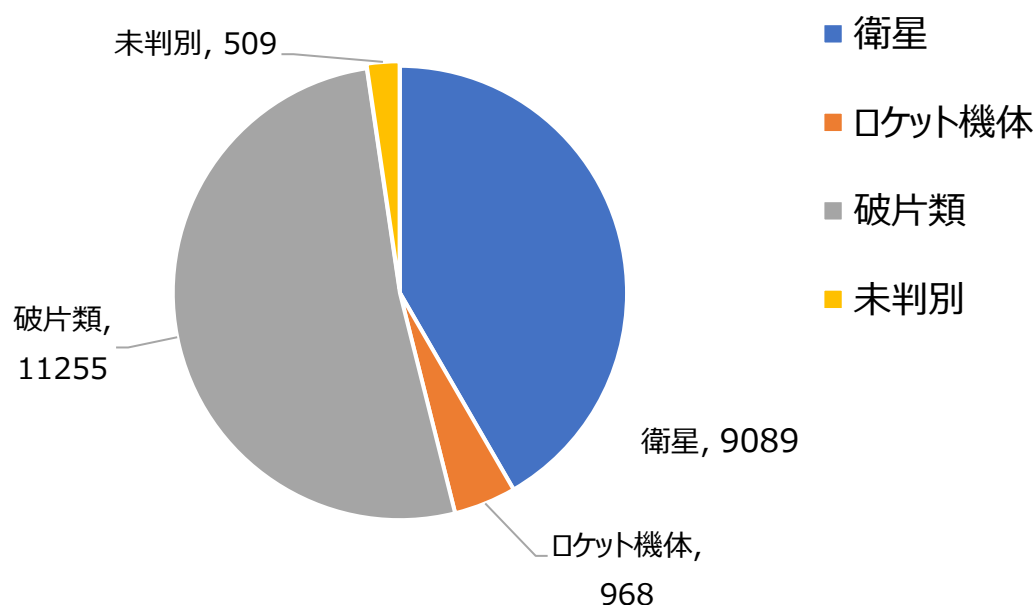


図 2.2.2- 1 低軌道の種類別物体数の割合 (出典：4 項(1)@2023.08.23)

2.2.3 地球 12 時間周期軌道

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が、図 2.2.1-1 が示すように数量的にはさほど多くはないため、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

図 2.2.4-1 に静止軌道保護域(静止軌道高度 35,786 km ± 200 km かつ軌道傾斜角 : ±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。

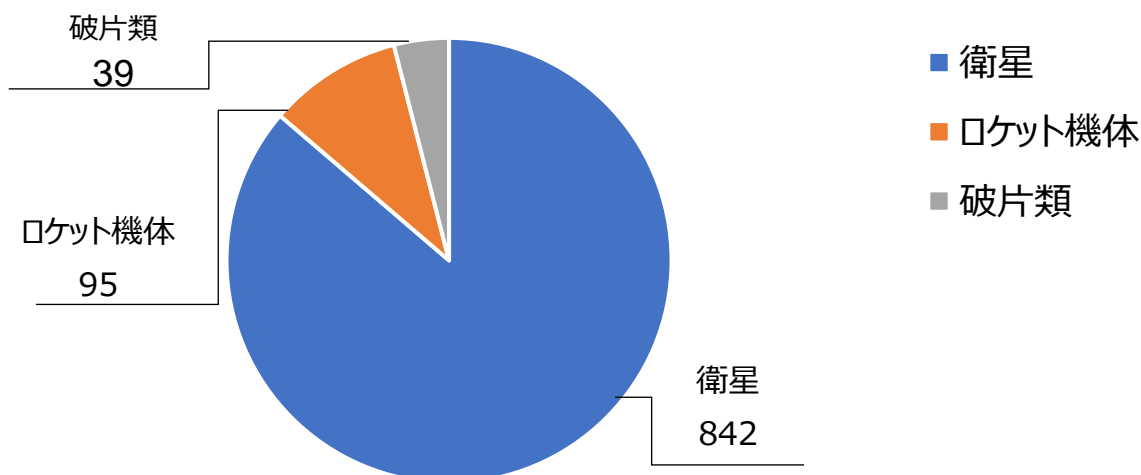


図 2.2.4- 1 静止軌道保護域の種類別物体数の割合 (出典 : 4 項(1)@2023.08.23)

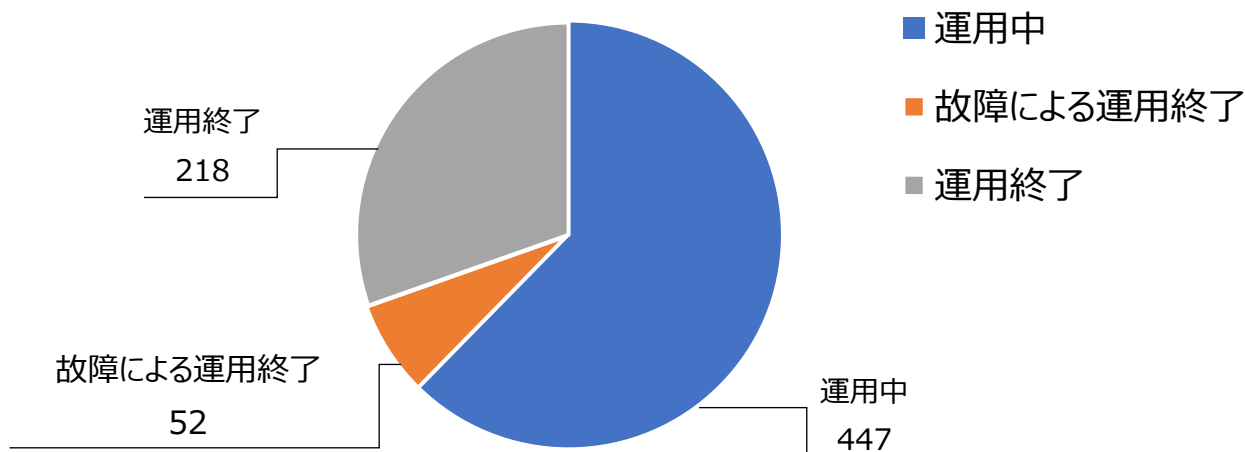


図 2.2.4- 2 静止軌道保護域の物体のうち運用中の衛星の割合 (出典 : 4 項(2)@2023.08.23)

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暴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、4 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 2023 年の高度 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。

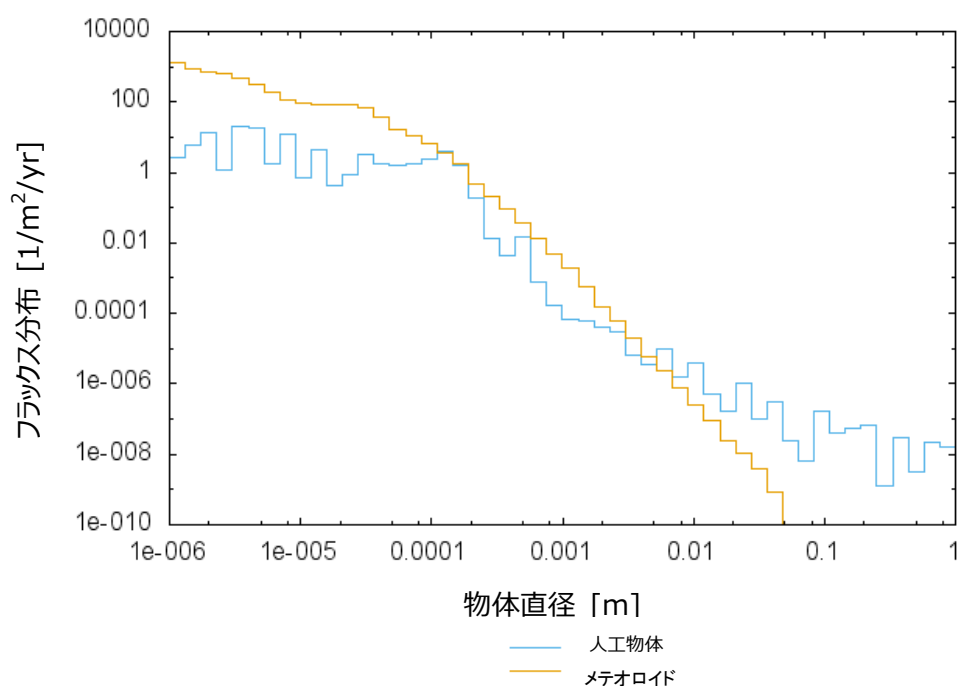


図 2.3- 1 高度 420 km、軌道傾斜角 51.6° (ISS 軌道)におけるデブリ種毎のフラックス
(出典：4 項(6)MASTER-8.0.3)

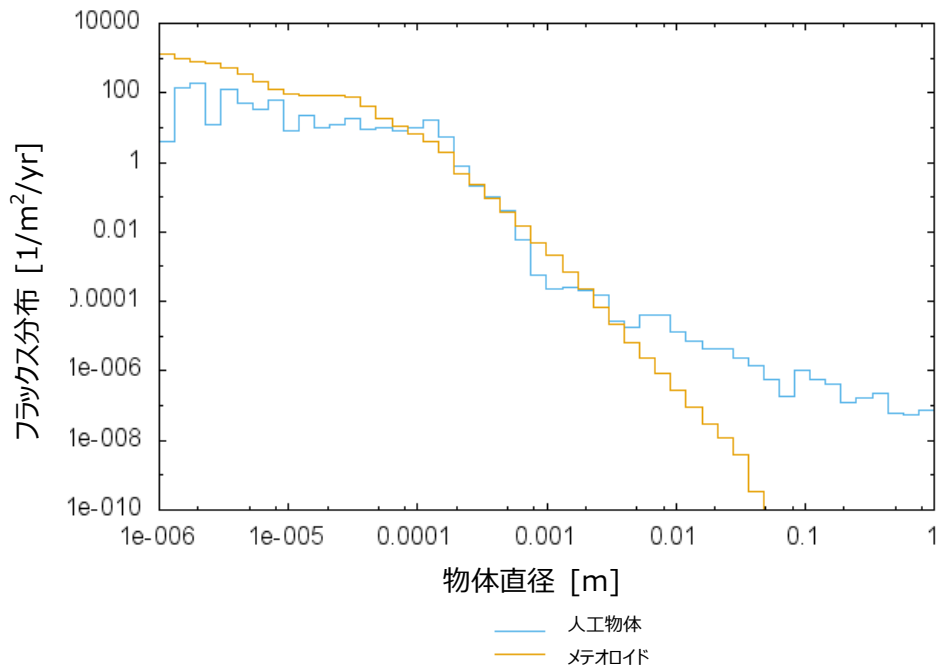


図 2.3- 2 高度 600 km、軌道傾斜角 100° (太陽同期軌道)におけるデブリ種毎のフラックス
(出典：4 項(6)MASTER-8.0.3)

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 36786 km、物体直径 10^{-6} m から 1 m までの物体の 2023 年時点の高度別空間密度の推定を示す。

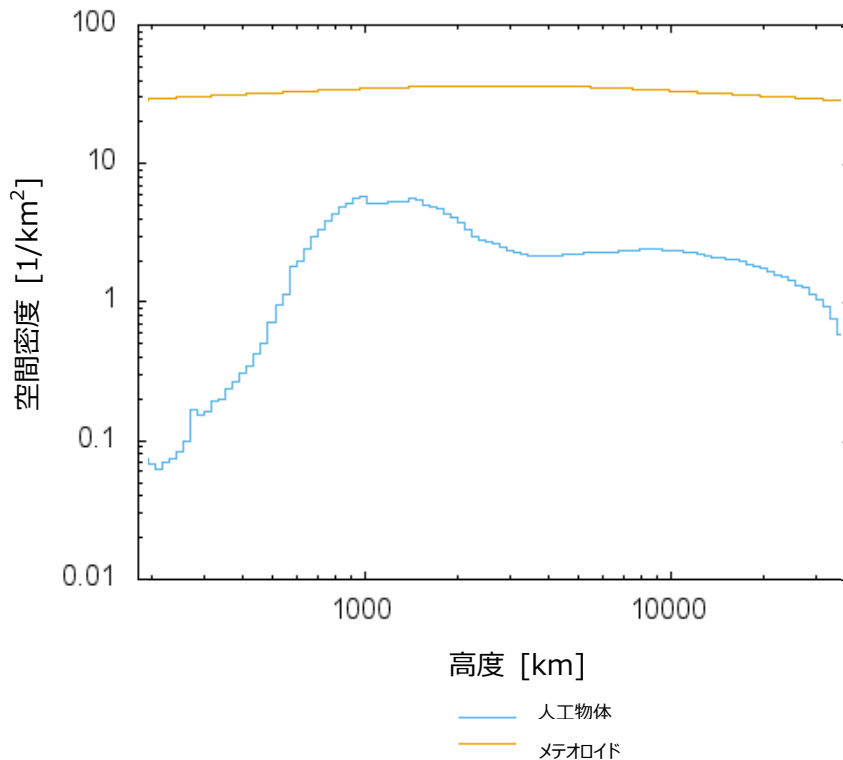


図 2.3- 3 2023 年時点の物質毎の推定空間密度 (出典 4 項(6)MASTER-8.0.3)

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 112 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 11 件である。原因不明も 83 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。具体例は表 2.4-1 を参照のこと。

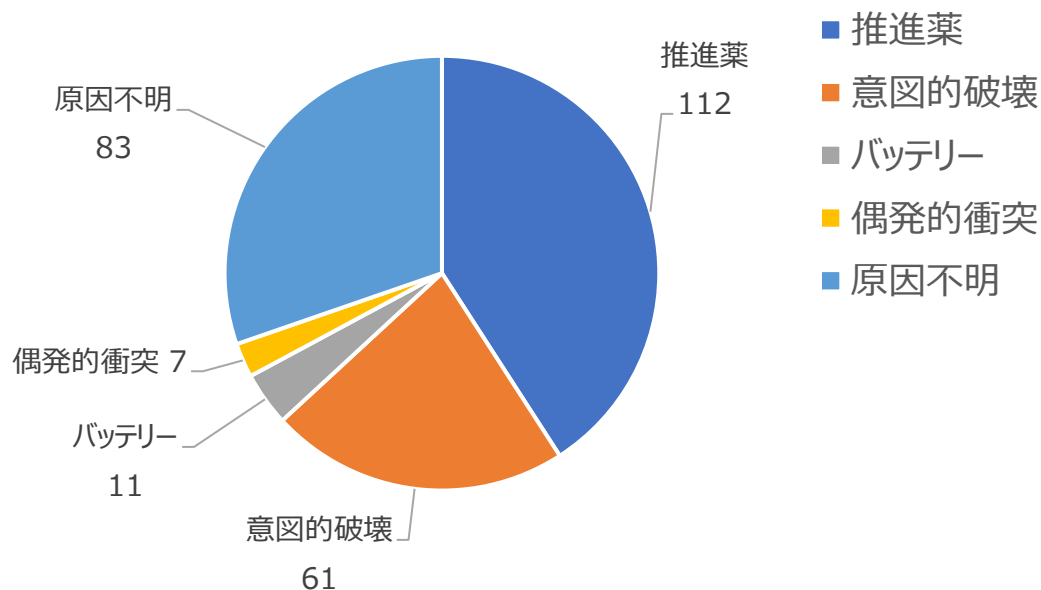


図 2.4- 1 発生原因別破砕件数の割合 (出典 : 4 項(3)(4))

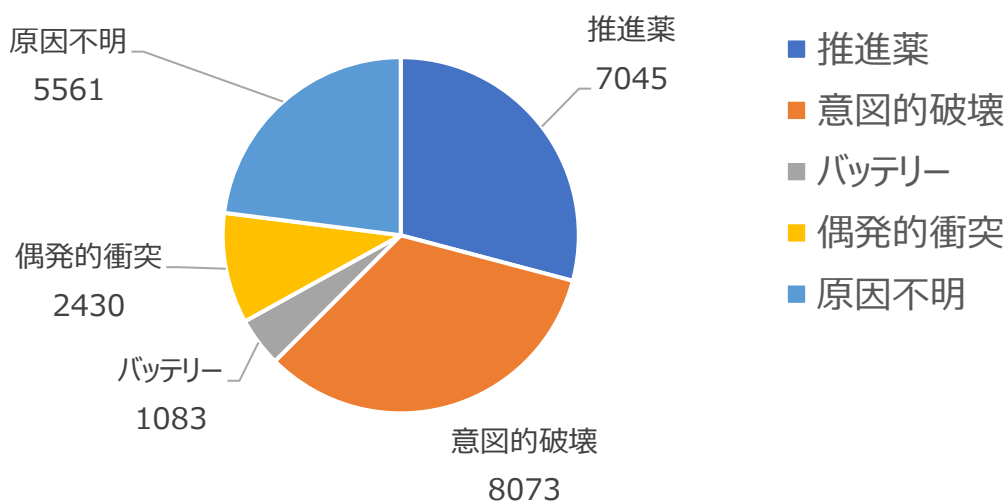


図 2.4- 2 発生原因別破片発生数の割合 (出典：4 項(3)(4))

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³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。)

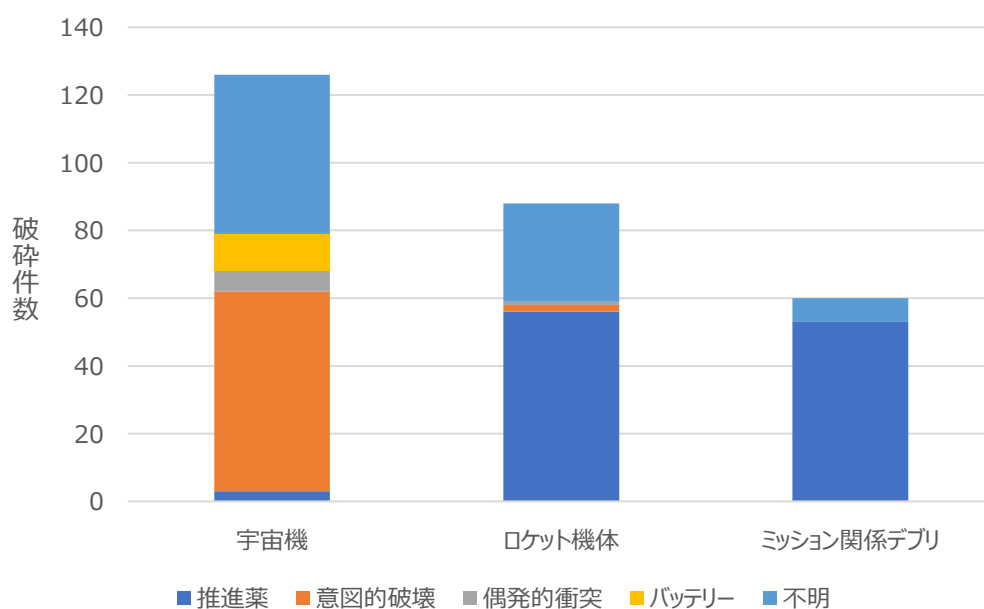


図 2.4- 3 システム別破砕件数の割合 (出典：4 項(3)(4))

³ 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120件である。さらに、打上げから1日目に破砕した件数は49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。

また、表 2.4-1 に軌道上破砕のうち生じた破片数が多い事象トップ10を示す。

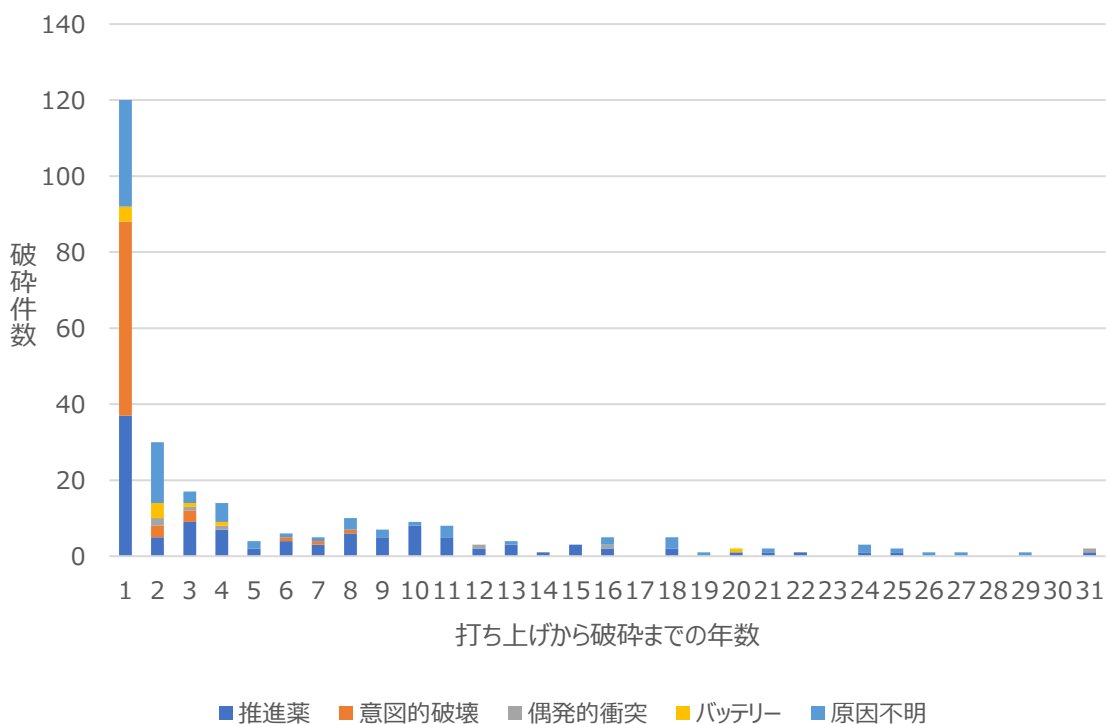


図 2.4- 4 打ち上げから破砕までに経過した期間 (出典：4 項(3)(4))

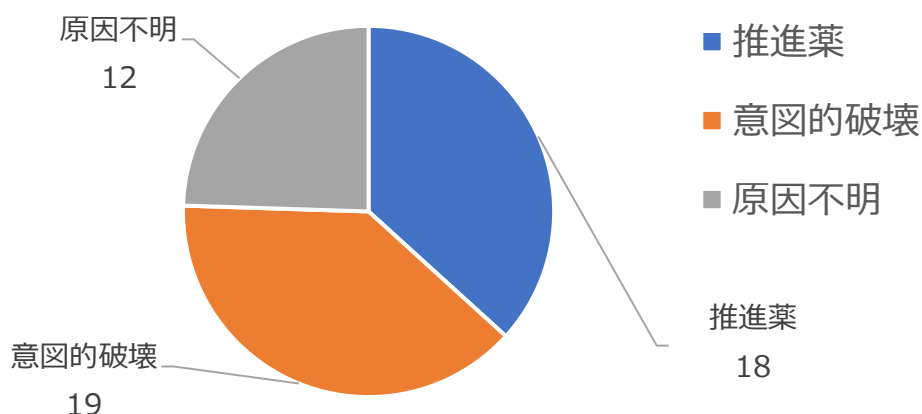


図 2.4- 5 打ち上げから1日目に生じた破砕原因の割合 (出典：4 項(3)(4))

表 2.4- 1 生じた破片数の多い破碎事象トップ 10 (出典：4 項(3))

順位	破碎物体	国際識別 番号	破碎年	破片数		高度(km)		推定破碎原因
				発生	残存	近	遠	
1	Fengyun-1C	1999-025A	2007	3532	2793	845	865	ASAT 実験
2	Cosmos 1408	1982-092A	2021	1785	364	465	490	ASAT 実験
3	Cosmos 2251	1993-036A	2009	1715	1021	775	800	Iridium 33 との 衝突事故
4	STEP II 上段	1994-029B	1996	754	76	585	820	爆発事故
5	Iridium 33	1997-051C	2009	657	300	775	780	Cosmos 2251 との 衝突事故
6	CZ-6A 上段	2022-151B	2022	533	529	813	847	爆発事故
7	Cosmos 2421	2006-026A	2008	509	0	400	420	不明
8	SPOT 1 上段	1986-019C	1986	498	30	805	835	爆発事故
9	Cosmos 1275	1981-053A	1981	479	418	960	1015	爆発事故
10	Titan 3C-4 上段	1965-082DM	1965	473	32	710	790	爆発事故

3. 国内外のスペースデブリ対策に関する動向

3.1 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有す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。

3.1.1 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。(4項(8)参照)

3.1.2 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。2023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。(4項(9)参照)

3.1.3 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。(4項(10)参照)

3.2 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、2019年に改定されている。

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 (4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、2018年に出された大統領令SPD-3 (Space Policy Directives)により、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た。FCCは連邦規則集の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。

ロケット打上げに関しては、FAA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。

3.3 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2012年に制定されたECSS-U-AS-10Cなどの国際的なガイドラインに準拠している。(4項(11)参照)

また、定期的にESA’s 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。

仏国には宇宙活動法⁴およびその下位の技術規則があり、スペースデブリに関する規制も含まれている。

英国ではCAA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 原題：LOI n 2008 518 du 3 juin 2008 relative aux operations spatiales

3.4 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。(4 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。(4 項(13)参照)

4. 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)
(<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 : 人工衛星のすべてがわかる！人工衛星ガイドブック (3/2015,P.4/16)
- (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)

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。
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±200km 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。