



軌道利用の安全に係るレポート

(JAXA Space Operations Safety Report)

2025 年 10 月 Volume 3

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	7
2.2 観測可能な軌道上物体の分布	8
2.2.1 地球周回軌道全体	9
2.2.2 地球低軌道保護域	13
2.2.3 地球 12 時間周期軌道域	15
2.2.4 地球静止軌道保護域	16
2.3 破片発生の原因	18
3. 軌道利用の安全に係るトピックス	25
3.1 将来の軌道上環境評価に関する研究	25
4. 国内外のスペースデブリ対策に関する動向	26
4.1 國際的な動向	26
4.1.1 UN COPUOS	26
4.1.2 IADC	26
4.1.3 ISO	27
4.2 米国	28
4.3 欧州	28
4.4 日本	29
5. 学会・ワークショップ情報	30
5.1 【開催結果報告】第 11 回 JAXA スペースデブリワークショップ	30
6. 参考文書およびデータベース	31
付録 I 用語集 (JMR-003E スペースデブリ発生防止標準等より)	32

図・表目次

図 2.1.1- 1 宇宙機打上げ機数の変遷	5
図 2.1.1- 2 宇宙機打上げ機数の変遷（2019 年まで）	6
表 2.1.1-1 大規模コンステレーションの打上げ実績・計画（西暦 2019～2025 年）	6
図 2.1.2- 1 再突入物体数の変遷	7
表 2.1.2- 1 西暦 2024 年～2025 年に再突入した衛星、ロケット、破片類	8
図 2.2- 1 CSpOC に登録され軌道物体数の変遷	8
図 2.2.1-1 軌道上物体の平均軌道高度に沿った分散状況	9
図 2.2.1-2 軌道上物体の軌道傾斜角に沿った分散状況	10
図 2.2.1-3 軌道上物体数の国別割合	11
表 2.2.1-1 各国の打上げ物体数及び破片類発生数	12
図 2.2.2-1 地球低軌道保護域に干渉する物体の種類別数量割合	13
図 2.2.2-2 平均軌道高度別の軌道上物体数(2,000 km 以下)	14
図 2.2.3-1 12 時間周期軌道周辺の衛星の分布状況	15
図 2.2.4-1 静止軌道保護域と干渉する物体の種類別の数量割合	16
図 2.2.4-2 静止軌道保護域と干渉する衛星の稼働状況	17
図 2.3-1 発生国別破碎発生高度	19
図 2.3-2 国別破碎発生件数の割合	19
図 2.3-3 国別破碎破片発生数の割合	20
図 2.3-4 発生原因別破碎件数の割合	21
図 2.3-5 発生原因別破片発生数の割合	21
図 2.3-6 システム別破碎件数の割合	22
図 2.3-7 打上げから破碎までに経過した期間	23
図 2.3-8 打上げから 1 年以内に生じた破碎原因の割合	23
表 2.3-1 西暦 2024 年以降の破片発生の登録状況	24
図 3.1-1 PMD 順守率及び PMD 期間の違いによる軌道上物体数推移の比較	25
図 5.1-1 ワークショップ会場の様子	30

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る。ロケットおよび衛星による宇宙活動に参入する事業者、設計者、運用者、衛星サービスの利用者など全ての関係者は軌道環境の現状及び今後の変化を把握しておくことが重要である。

本レポートは、主として米国 CSpOC⁽¹⁾及び英国 Slingshot Aerospace 社 Seradata⁽²⁾の提供するデータベースから 2025 年 9 月 1 日時点の情報に基づき、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 項ではスペースデブリ対策に関する国内外の動向を示す。JAXA では「JAXA スペースデブリ発生防止標準⁽⁴⁾」(JMR-003E) にて基本的設計・運用対策を要求している。

巻末に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。このうち 2020 年を境に大規模コンステレーション及び超小型衛星の打上げが活発になって、極端に衛星数が増加してそれ以前の傾向が把握しにくいので、図 2.1.1-2 に 2019 年以前の状況を示す。

これらの図の対象としては、低軌道(LEO)、12 時間周期軌道(MEO)（準同期軌道とも呼ばれる）、静止軌道 (GEO) で代表される地球周回軌道に成功裏に打上げた衛星に加えて、惑星探査軌道、ラグランジエ軌道等の全ての宇宙活動を含めている。ただし、亜軌道(suborbital)に打上げられた衛星は除いている。

また、図 2.1.1-1 は 2025 年 8 月末までに打上げられた衛星等を対象としているが、参考に 9 月以降に打上げが予定されている衛星も別枠で示している。それらは、本書のデータ・ソースである Seradata⁽²⁾が製造・打上げ契約の締結、MOU (Memorandum of Understanding:覚書) あるいは LOI (Letter of Intent : 意向書)の取り交わし等の公表された情報を登録したものに基づいている。

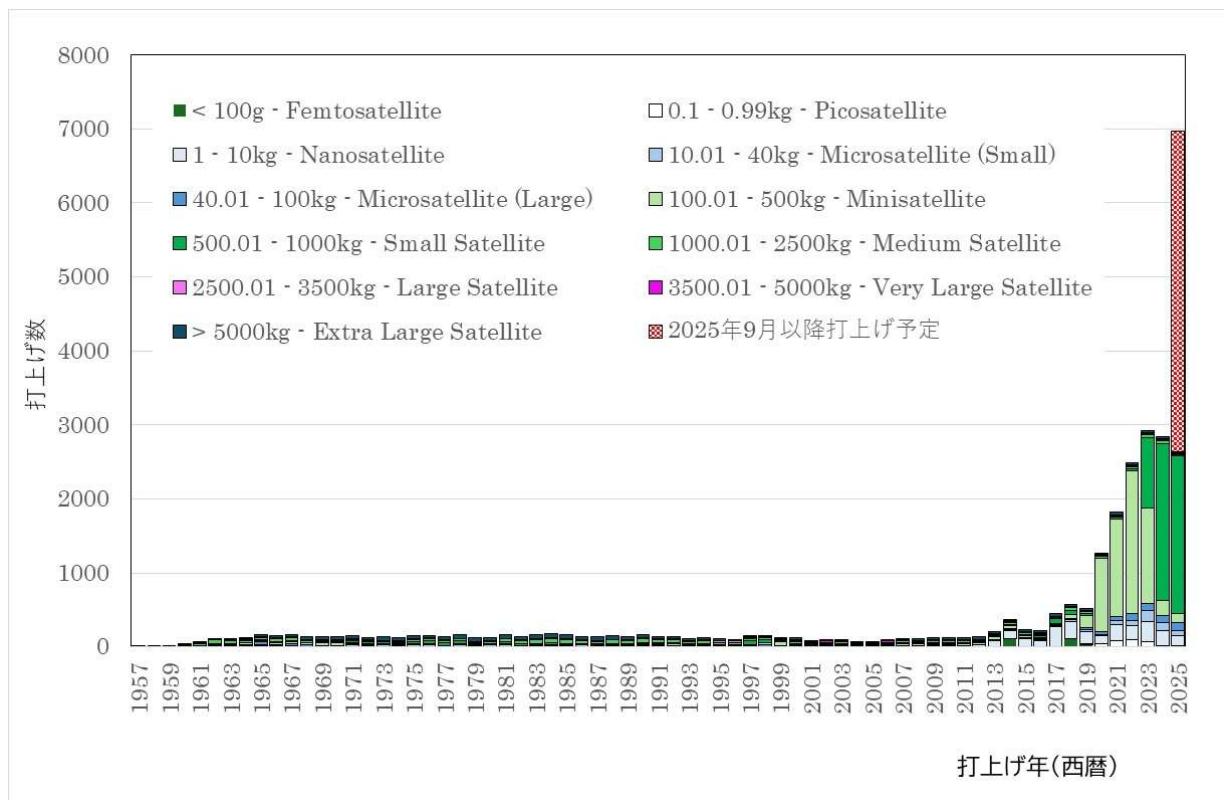


図 2.1.1-1 宇宙機打上げ機数の変遷 (出典 : Seradata@2025.09.01)

[注 : 衛星の打上げ機数は 2025/9/1 時点で登録されたデータとそれ以降 2025 年末までの打上げ予定を含めている。9 月以降のデータは Seradata⁽²⁾が MOU(Memorandum of Understanding), LOI (Letter of Intent)及びその他の公表情報を出典として提供するデータに基づいている。]

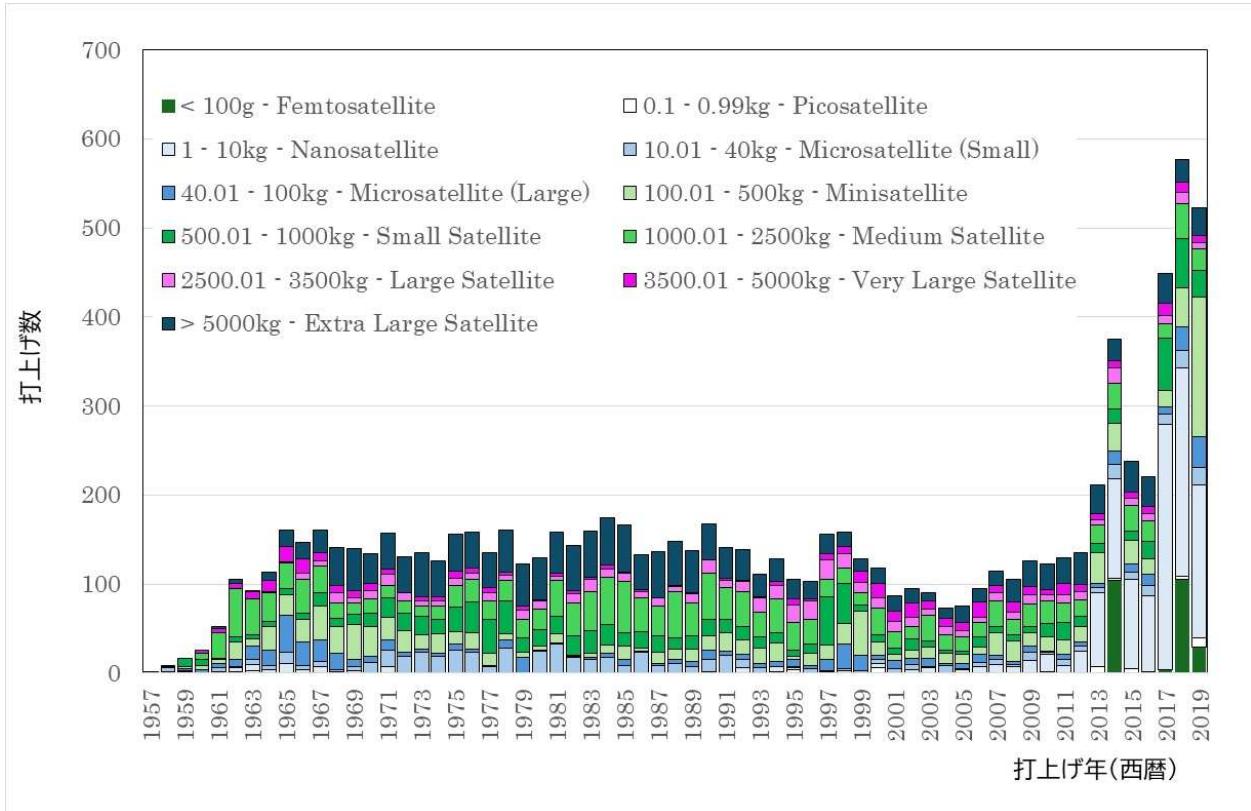


図 2.1.1-2 宇宙機打上げ機数の変遷（2019 年まで）（出典：Seradata@2025.09.01）

2019 年以降に 100 機以上の衛星を打上げた大規模コンステレーション・プログラムの打上げ動向を表 2.1.1-1 に示す。2025 年 9 月以降には Starlink、GuoWang、OneWeb、G60 Qianfan、Kuiper 等の大規模コンステレーション・プログラムが合計 4,048 機の衛星を打上げるため、その他の衛星を含めれば合計約 4,300 機の衛星が追加される予定である。

表 2.1.1-1 大規模コンステレーションの打上げ実績・計画（西暦 2019～2025 年）

コンステレーション名称	2019	2022	2021	2022	2023	2024	2025 (8 月以前)	2025 (9 月以降)
Starlink	120	833	989	1,722	1,984	1,983	1,890	793
GuoWang					5	12	79	2,093
OneWeb	6	104	284	110	132	20	0	0
G60 Qianfan						54	36	558
Kuiper					2		102	476
Planet Constellations	32	46	48	44	73	1	39	0
SpaceBee		36	76	56	24			
Starshield						104	81	0
SDA Transport Layer					19		0	126
Jilin 1	5	12	7	41	49	26		1
Lemur	16	18	16	9	17		7	1
合計	179	1,049	1,420	1,982	2,305	2,200	2,234	4,048

(出典：Seradata@2025.09.01)

2.1.2 再突入物体数

米国 CSPOC (Combined Space Operations Center : 統合宇宙運用センター) が観測し、登録した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。

同図で、2022 年以降再投入物体の数量が急増しているが、これは太陽活動に伴うコロナ質量放出が連続して発生し、磁気嵐の影響でジュール熱によって加熱されて膨張した大気が極域から低緯度に広がり、大気密度が広域に 50% 増加したことが原因であると国立極地研究所などの研究グループが発表している。この影響で 2022 年 2 月 3 日、米スペース X 社が Starlink を 49 機打上げたが、約 40 機が目標高度に達せず落下した。これらの衛星がロケットから分離したのは高度 200km 付近で、同社は衛星の飛行データを基に、衛星が通常より 50% 大きい大気の抵抗を受けたとしており、国立極地研究所の解析結果と一致している。

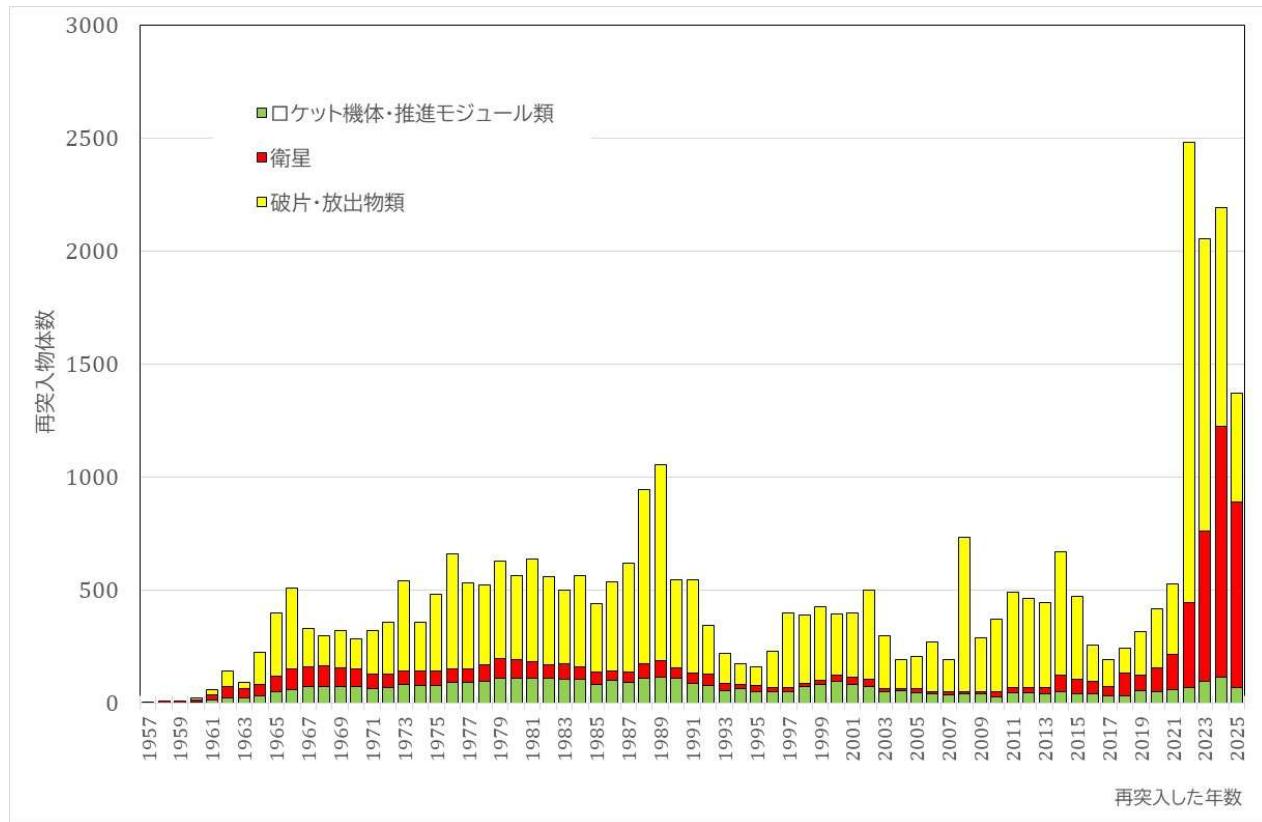


図 2.1.2- 1 再突入物体数の変遷 (出典 : CSPOC@2025.09.01)

2024 年から 2025 年 8 月末までに落下した宇宙物体を表 2.1.2-1 に示す。これらのうち大規模コンステレーション衛星は約 1,200 機 (STARLINK: 894 機、FLOCK: 159 機、SPACEBEE: 78 機、LEMUR: 71 機等) を占めており、ほとんどが平均高度 250 km 以下であった。低軌道衛星を企画する場合はこのような自然環境の影響への考慮も必要になる。

表 2.1.2- 1 西暦 2024 年～2025 年に再突入した衛星、ロケット、破片類

	2024 年	2025 年	総計
ロケット機体・推進モジュール類	115	68	183
衛星	1108	820	1928
破片・放出物類	968	482	1450

出典 : Seradata @2025.09.01

2.2 観測可能な軌道上物体の分布

本項では、CSPOC が登録した軌道上物体の数量の変遷及び分布状況を示す。

図 2.2-1 に軌道上物体の数量の変遷を示す。これは各年に打上げられたロケット・衛星とそれから放出された物体及び破碎現象で発生した破片類等の増加分と往還機の帰還や再突入による減少分を考慮している。

2025 年 8 月末時点では約 30,000 個が軌道を周回しているが、9 月以降年末までに約 4,300 個が追加される予定である。ただし、その間のロケット機体の増加や破片類の落下による減少が発生するので、それらを総合すると図に示す値より若干の増加が予想される。

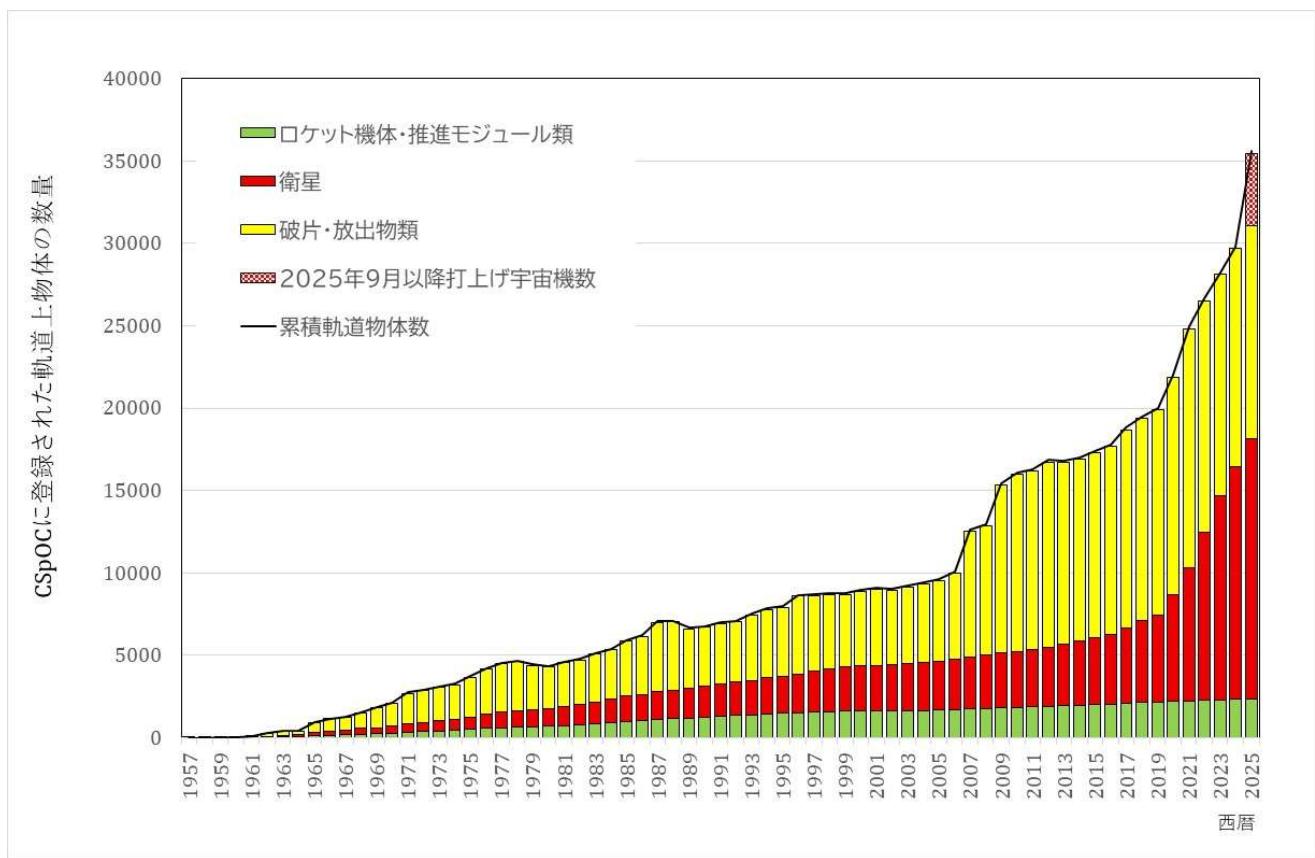


図 2.2- 1 CSPOC に登録された軌道物体数の変遷 (出典 : CSPOC@2025.09.01)

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、2025 年 8 月末時点で 25,000 個を超える物体が存在している。次いで、静止軌道保護域 ($35,786 \text{ km} \pm 200 \text{ km}$) に 1,000 個を超える物体が存在している。また、地球 12 時間周期軌道域については、JAXA 標準「JAXA スペースデブリ発生防止標準⁽⁴⁾」(JMR-003E) では高度 19,100 km~23,500 km) と指定しているが、その高度帯には約 290 機が存在している。

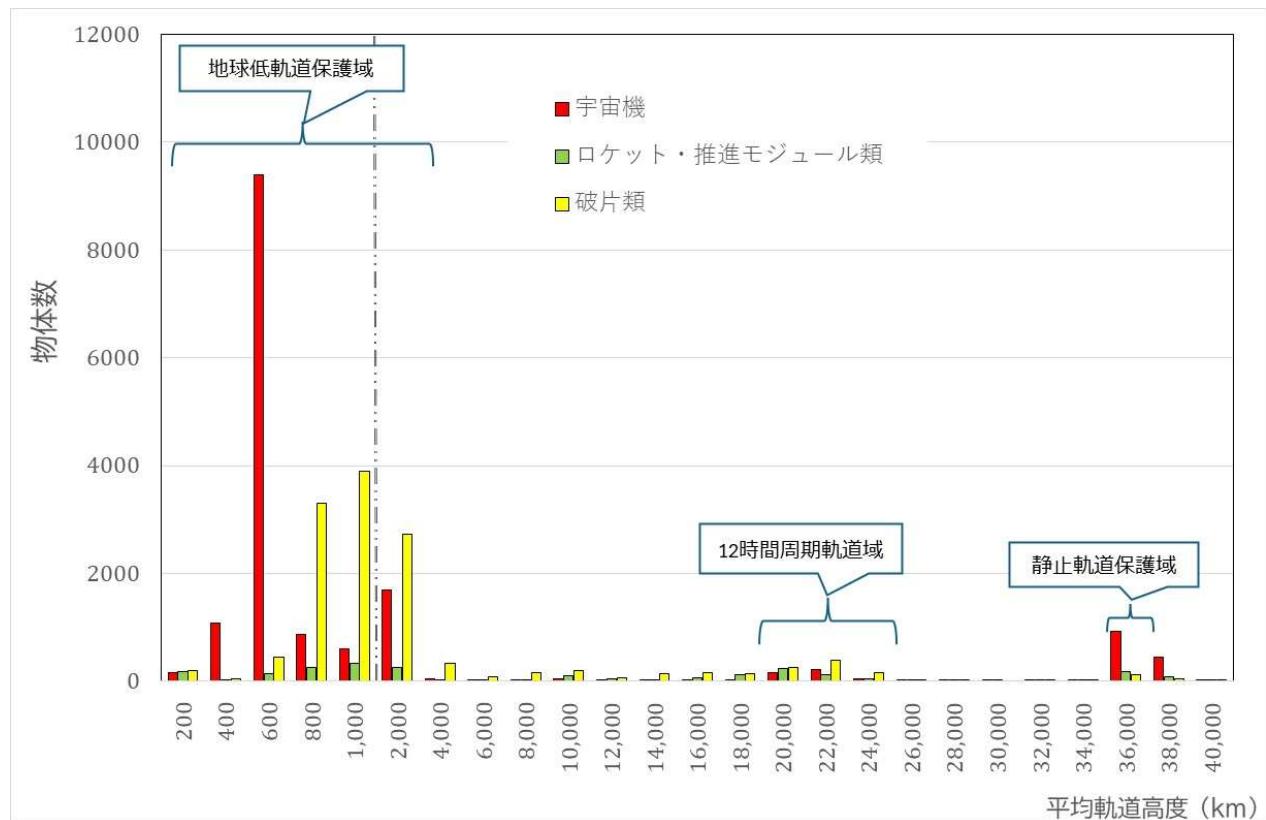


図 2.2.1- 1 軌道上物体の平均軌道高度に沿った分散状況(出典 : CSPOC@2025.09.01)

図 2.2.1-2 に軌道上物体の軌道傾斜角に沿った分散状況を示す。

傾斜角 43 度及び 52~53 度は、Starlink, Kuiper, Flock などの大規模コンステレーションが適用する傾斜角なので数量が多くなっている。

傾斜角 90 度は極軌道衛星、傾斜角 90 度以上 100 度付近は太陽同期衛星に適用される。

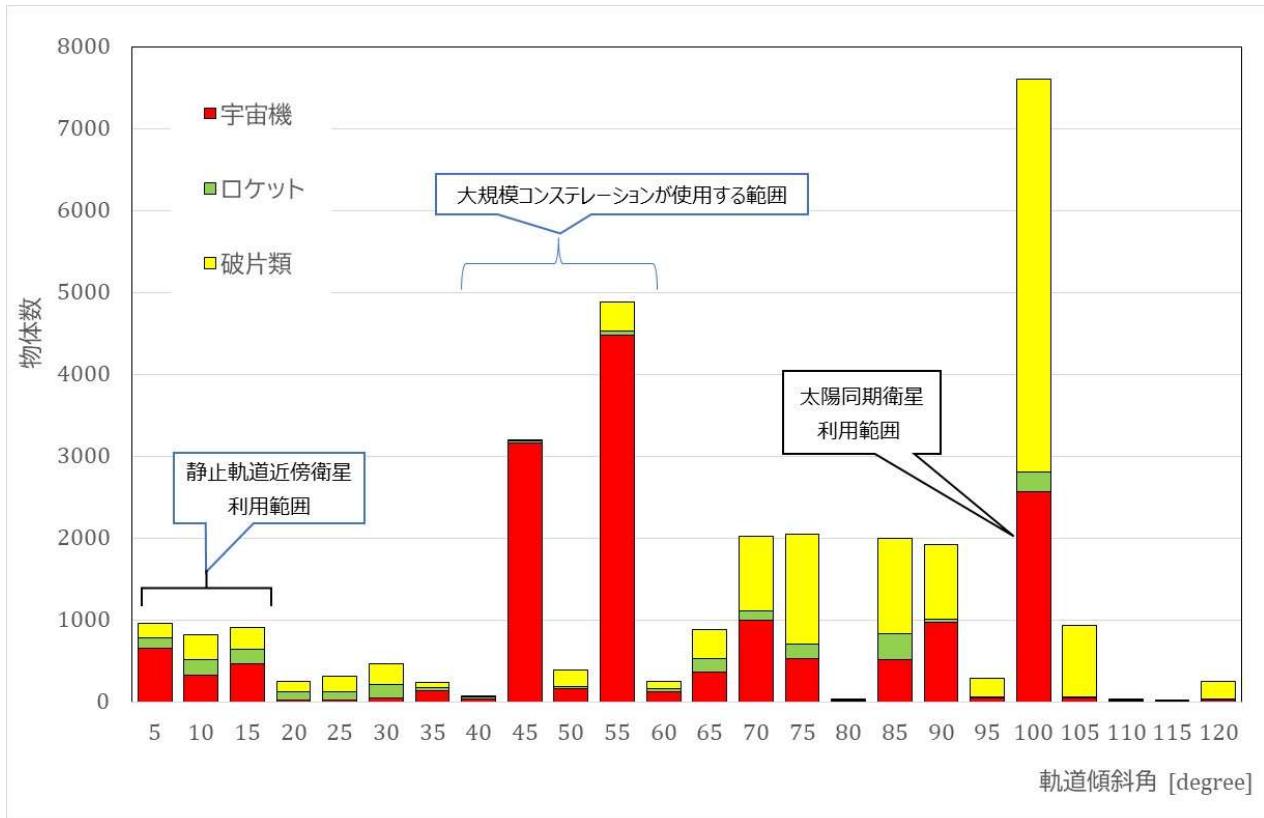


図 2.2.1- 2 軌道上物体の軌道傾斜角に沿った分散状況 (出典 : CSpOC@2025.09.01)

図 2.2.1-3 に軌道上物体数の主な国別の割合を示す。2025 年 8 月末現在、軌道上物体数は米国が最も多く、次いでロシア、中国が多くの割合を占めている。更に詳細を CSpOC の Box Score 情報を源泉として表 2.2.1-1 に示す。中国、ロシアは物体数としては多いが、破片類が多くを占めている。英国の衛星打上げ数は大規模コンステレーションの効果で世界第 4 位に上昇したが、ロケットの打上げがほとんどなく、衛星の破碎事故も少ないので総合第 7 位になっている。日本の衛星数は第 5 位であり、破片類の発生もそれほど多くはないので総合的な順位でも 5 位に位置している。

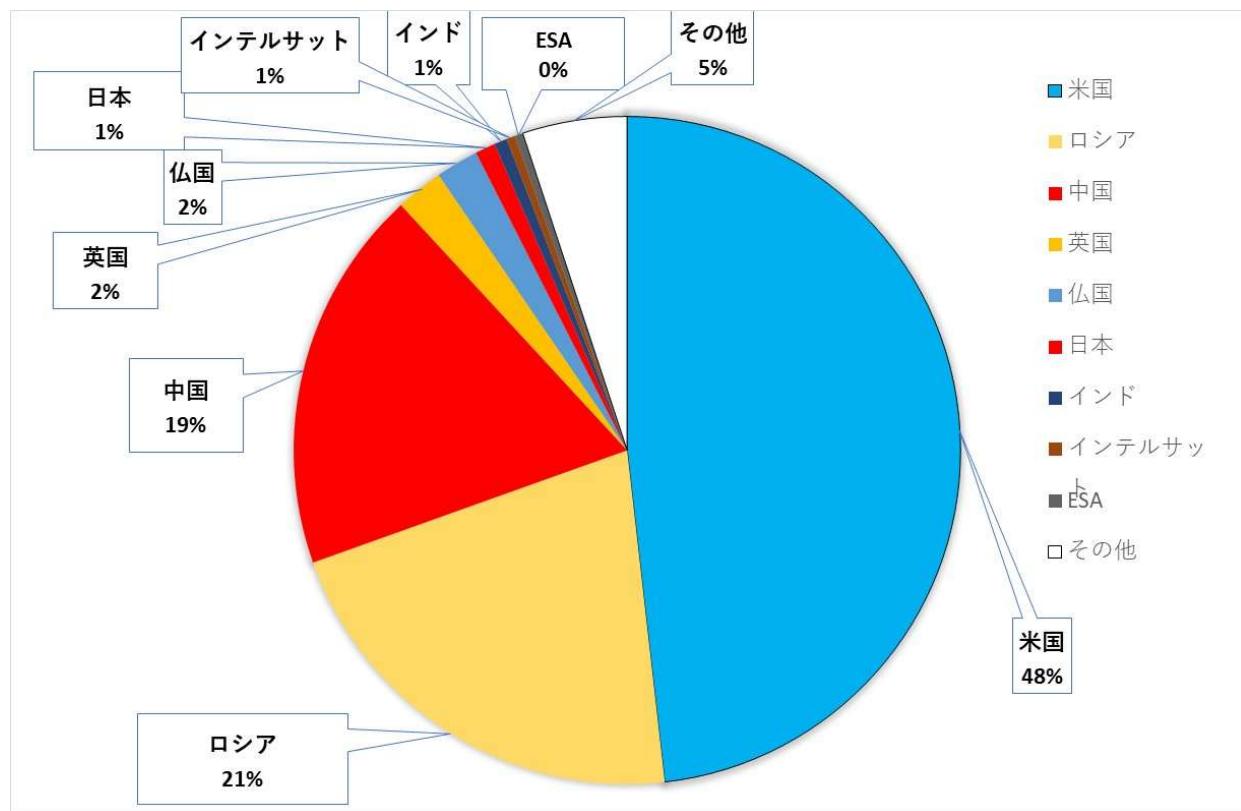


図 2.2.1-3 軌道上物体数の国別割合 (出典 : CSpOC@2025.09.01)

表 2.2.1-1 各国の打上げ物体数及び破片類発生数 (出典 : CSPOC Box Score @2025.09.01)

国名／機関名	軌道上物体数					消滅物体数 (再突入または回収)				合計
	衛星	ロケット	破片類	未判別	小計	衛星	ロケット	破片類	小計	
ロシア	1577	1046	4030	23	6676	2173	2947	13237	18357	25033
米国	10329	777	3965	3	15074	3403	830	5654	9887	24961
中国	931	245	4331	307	5814	332	349	2163	2844	8658
フランス	126	166	358	0	650	23	91	707	821	1471
日本	209	53	41	3	306	123	86	358	567	873
インド	113	42	40	1	196	38	34	488	560	756
英国	718	1	0	0	719	27	0	5	32	751
ESA	105	7	12	0	124	16	4	29	49	173
INTELSAT	92	0	38	0	130	1	0	0	1	131
ドイツ	87	0	1	0	88	39	0	1	40	128
イタリア	75	2	0	0	77	34	0	2	36	113
カナダ	69	0	5	0	74	30	0	2	32	106
国際宇宙ステーション	5	0	0	0	5	1	0	100	101	106
OTC 社	58	0	7	0	65	1	0	28	29	94
中国／ブラジル	4	0	7	0	11	0	0	80	80	91
グローバルスター社	84	0	1	0	85	0	0	1	1	86
スペイン	51	0	0	0	51	30	0	0	30	81
SES 社	78	0	0	0	78	1	0	0	1	79
アルゼンチン	37	0	0	0	37	31	0	1	32	69
オーストラリア	39	2	0	0	41	25	0	0	25	66
EUTELSAT	62	0	0	0	62	0	0	0	0	62
大韓民国	45	3	0	6	54	6	1	0	7	61
イスラエル	15	0	0	0	15	28	10	1	39	54
トルコ	34	0	0	0	34	7	0	0	7	41
フィンランド	28	0	0	0	28	10	0	0	10	38
シーロンチ社	1	30	3	0	34	0	3	0	3	37
ブラジル	28	0	0	0	28	8	0	0	8	36
イラン	4	2	0	4	10	11	7	2	20	30
台湾	21	0	0	0	21	7	0	2	9	30
ノルウェイ	24	0	0	0	24	2	0	0	2	26
ニュージーランド	1	0	0	1	2	24	0	0	24	26
シンガポール	18	0	0	0	18	8	0	0	8	26
アラブ首長国連邦	16	0	0	0	16	9	0	0	9	25
インドネシア	19	0	0	0	19	3	0	0	3	22
スイス	17	0	0	0	17	5	0	0	5	22
その他	320	4	8	260	592	305	1	5	311	903
合計	15440	2380	12847	608	31275	6761	4363	22866	33990	65265

略称注記

- (1) EUME : EUROPEAN ORGANIZATION FOR THE EXPLOITATION OF METEOROLOGICAL SATELLITES
- (2) SES 社 : SOCIÉTÉ EUROPÉENNE DES SATELLITES
- (3) EUTELSAT : EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS SATELLITE ORGANIZATION (EUTELSAT)
- (4) INTELSAT : INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS SATELLITE ORGANIZATION (INTELSAT)
- (5) OTC 社: オービタルテレコミュニケーション社
- (6) SES 社 : SOCIÉTÉ EUROPÉENNE DES SATELLITES

2.2.2 地球低軌道保護域

図 2.2.2-1 に遠地点／近地点の平均高度が低軌道保護領域の 2,000 km 以下の物体について種類別に存在割合を示す。衛星が 13,788 個で最も多く、次いで放出物・破片類が 11,922 個、ロケット機体類が 1,550 個である。大規模コンステレーションの出現前は放出物・破片類が大多数を占めていたが、近年は逆転している。破片の原因については 2.3 項を参照されたい。

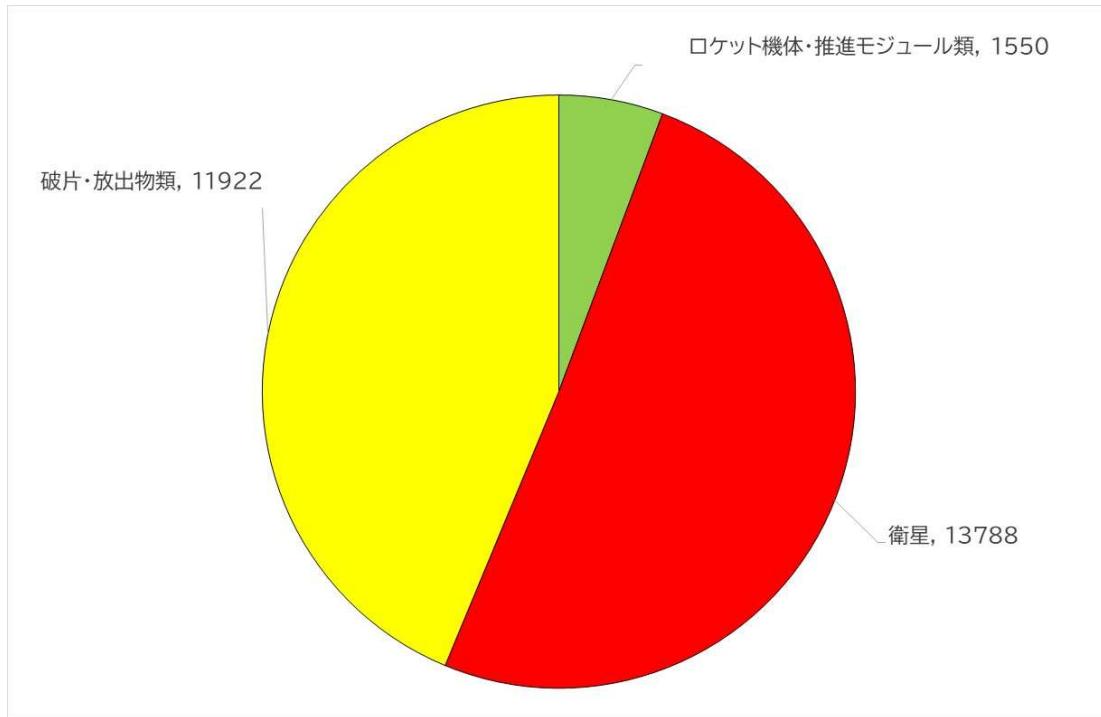


図 2.2.2- 1 地球低軌道保護域に干渉する物体の種類別数量割合 (出典 : CSpOC@2025.9.1)

図 2.2.2-2 に平均軌道高度が地球低軌道保護域(高度 2,000 km 以下)内にある物体の、高度別の存在数を示す。高度 300~400 km はミッションも少なく、大気の影響で落下が促進されることもある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 500~600 km 周辺は大型コンステレーションと太陽同期軌道の地球観測衛星を主体とするもので、2019 年以降大規模コンステレーション衛星が打上げられているため多くの衛星が存在している。過去には、高度 800~1,000 km がピークであったが、コンステレーション(Starlink)の大量打上げで、当該軌道帯がピークになっている。

高度 700~1,000 km は多くのスペースデブリで混み合っている。

高度 1,500 km はロシアの通信衛星を主体とするものである。

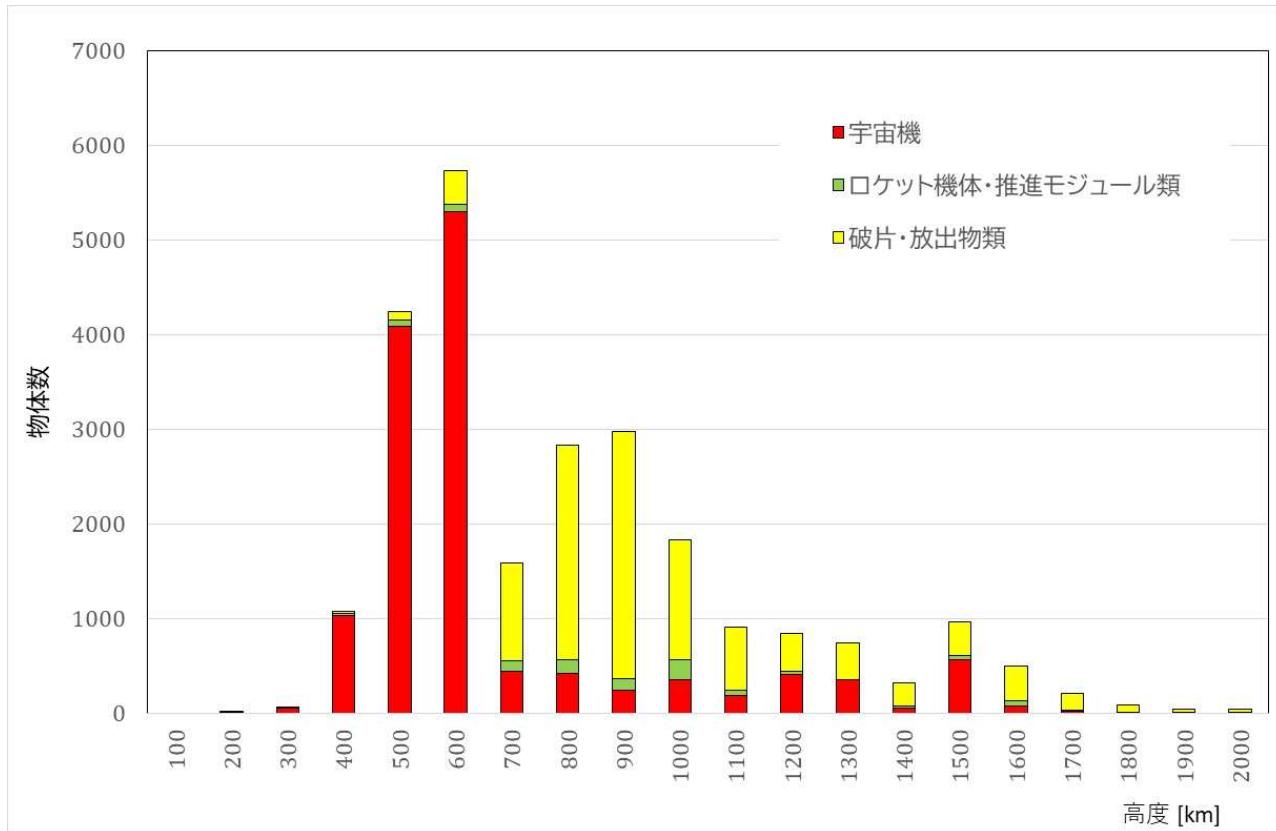


図 2.2.2-2 平均軌道高度別の軌道上物体数(2,000 km 以下) (出典：CSpOC@2025.9.1)

2.2.3 地球 12 時間周期軌道域

高度 20,000 km 付近の 12 時間周期軌道（準同期軌道とも呼ばれる）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-003E スペースデブリ発生防止標準⁽⁴⁾」では保護軌道域として高度 19,100 km～23,500 km を保護域と指定している。しかし、国際的には中高度帯の保護軌道域は識別されていない。

図 2.2.3-1 に 12 時間周期軌道周辺の衛星の分布を示す。数量的には 300 機程度で、さほど多くはない。同図では運用中（待機中も含む）か廃棄後かを識別して示す。

この軌道域は、かつては米国が主要なユーザであったが、近年は欧州の GALILEO や中国の BEIDOU が増加しつつある。NAVSTAR(GPS)の運用高度は 20,000 km 付近であるが、廃棄後は多くが 21,000 km 以上に移動している。中国は BEIDOU を 21,600 km 付近で運用しており、廃棄後もその高度に止めている。ロシアは Glonass を高度 19,000 km で運用しており、廃棄後もその高度から移動させていないので既に 100 機以上が滞留している。欧州は Galileo を 23,400 km で運用しており、運用終了後は 200～600 km 高い軌道に移動している。

ロケットに関しては当該図には含めていないが、ロシアは衛星とロケット機体の両方を高度約 19,000 km の同一軌道に残すのに対し、米国は基本的にはロケットの近地点を数百 km に止めたまま、衛星のみを高度 20,000～20,200 km の運用軌道に移動させているので、ロケット機体は軌道減衰が期待できる。

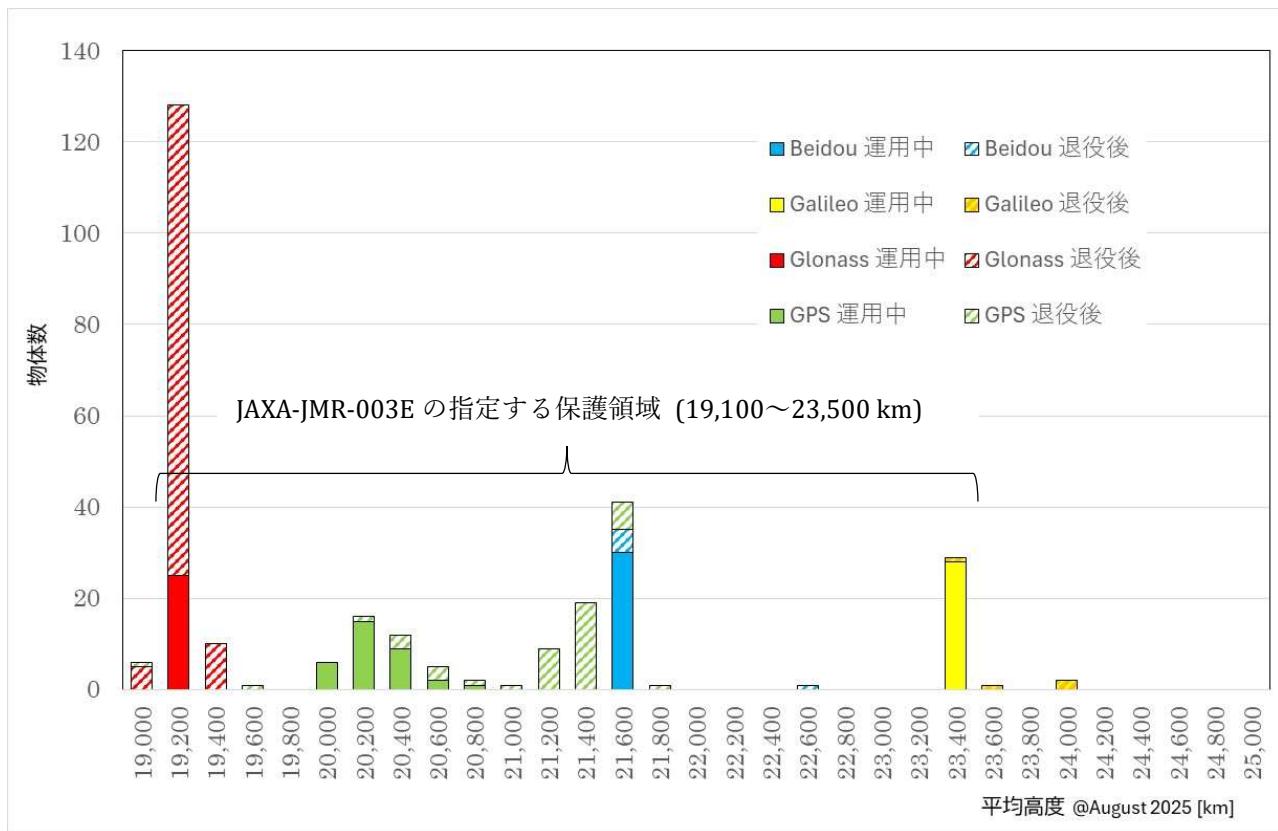


図 2.2.3-1 12 時間周期軌道周辺の衛星の分布状況

2.2.4 地球静止軌道保護域

図 2.2.4-1 に静止軌道保護域と干渉する物体の種類別の数（遠地点高度 > 35,586 km, 近地点高度 < 35,986 km の範囲に存在する物体、ただし、静止軌道と干渉しないモルニア軌道物体を除く）を示す。ほとんどが衛星である。ロケット・推進モジュールも存在する。地球から遠く離れている物体が多いために静止軌道観測可能サイズ（50～100 cm 以上）より小さな破片類は登録されていないものが多いと思われる。

また、図 2.2.4-2 に上記の条件で静止軌道保護域と干渉する物体の衛星の稼働状況の割合を示す。運用終了後のリオービット（静止軌道保護域外への移動）は、近年は 90 % の静止衛星で実施されているが、過去には多くの廃棄衛星が移動しなかったために現在も滞留しているものがある。

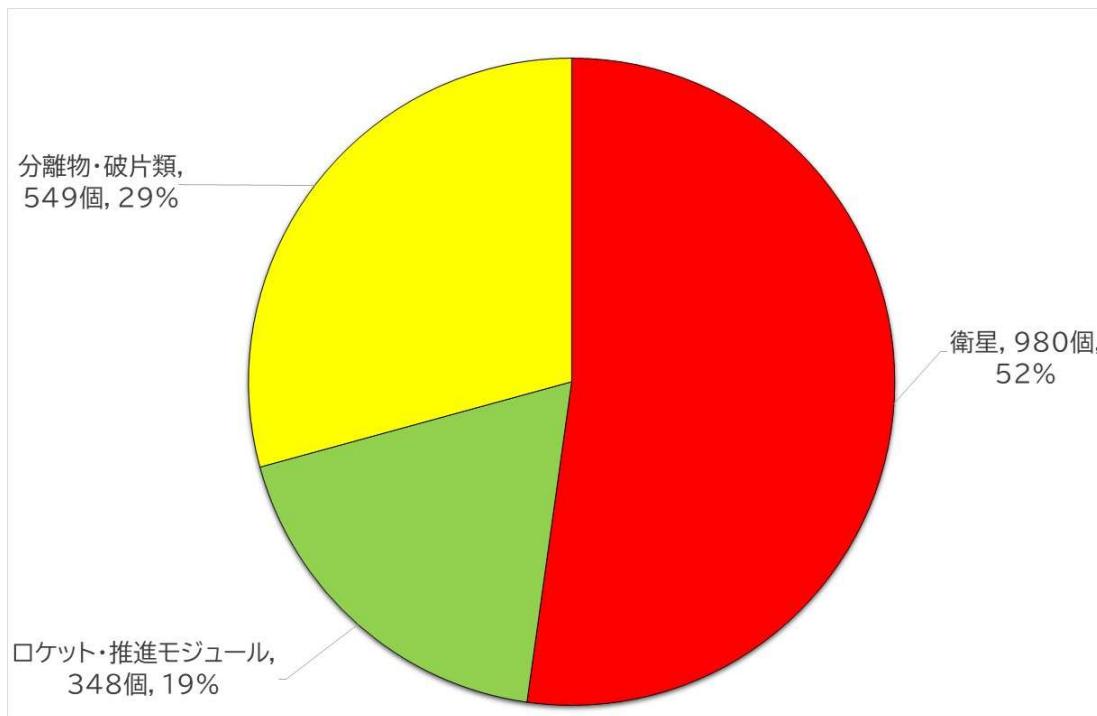


図 2.2.4-1 静止軌道保護域と干渉する物体の種類別の数量割合

[注：遠地点高度 > 35,586 km, 近地点高度 < 35,986 km の範囲に存在する物体、ただし、モルニア軌道物体を除く。] (出典：CSpOC@2025.09.01)

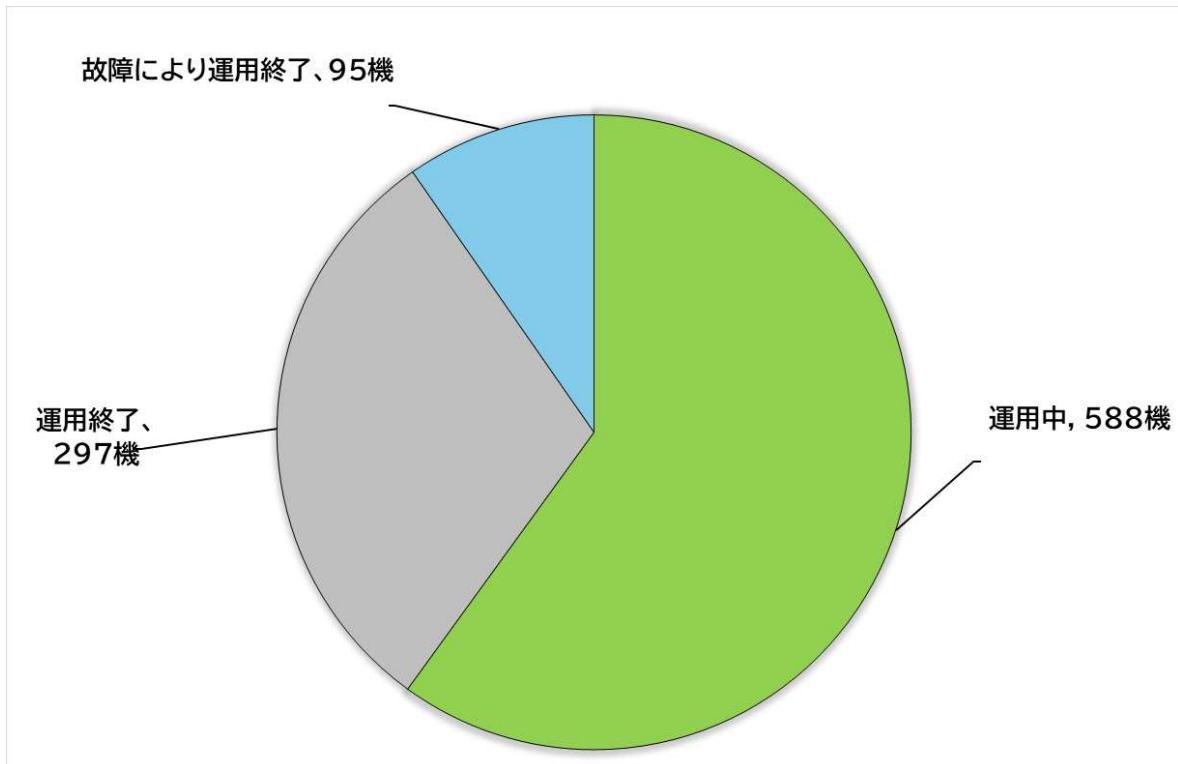


図 2.2.4-2 静止軌道保護域と干渉する衛星の稼働状況

[注: 遠地点高度 $> 35,586$ km, 近地点高度 $< 35,986$ km の範囲に存在する物体、ただし、モルニア軌道物体を除く。] (出典: Seradata@2025.09.01)

2.3 破片発生の原因

軌道環境の悪化の主たる原因是、破碎事象による破片類の分散である。本書で扱う破碎破片はカタログ物体の半数近くを占めている。広義の破碎現象は主に以下の原因で発生する。IADC ガイドラインなどによる一般的な理解としては、断熱材の剥離、高密度冷却材の漏洩、再突入時の空力破壊などは破碎の定義には入らないが、ロケットの極低温推進剤タンク周辺の断熱材の剥離などは破碎現象として海外から指摘されていることから、このレポートでは多量の物体の飛散も破碎事象に加えている。

- (1) 残留推進剤の爆発
- (2) 意図的破壊実験
- (3) バッテリの破裂
- (4) 軌道上物体との衝突
- (5) 破碎要素を有する品目の不具合
- (6) ロケット機体の断熱材の剥離
- (7) 核燃料電池の高密度冷却材の漏洩
- (8) 低高度到達時の空力破壊

本書では、破片を 10 個以上発生した破碎事象について調査した。破碎原因については、衛星の打上げ後 5 日以内の破碎とロケットの打上げ当日の破碎の原因是不具合と整理した。バッテリの不具合は NASA の報告をもとに仕分けている。

図 2.3-1 にこれまで発生した破碎現象の高度を発生国別に示した。利用途の多い、貴重な低軌道域で多くの破碎が発生している。この領域で最大の破碎は、中国が高度 800 km 付近で意図的破壊を行った事象であり、多くの衛星が衝突の危険にさらされている。ロシアは遠地点高度 40,000 km 付近で自爆による意図的破壊を行った。これは破碎破片で近傍の衛星を破壊する実験であった。この実験による破片は遠方であるために、十分把握できていない恐れがある。

図 2.3-2 は国別破碎発生件数の割合を、図 2.3-3 は国別破碎破片発生数の割合を示すものである。いずれもロシアと米国が 2 大発生国である。打上げた衛星の数と破片の数の割合について表 2.2.1-2 で確認すれば、ロシアは衛星の数の 2 倍半、中国は 4 倍以上の破片を発生させている。米国は大規模コンステレーションを除いて考えれば、衛星数とほぼ同等の数量の破片を発生していることになる。

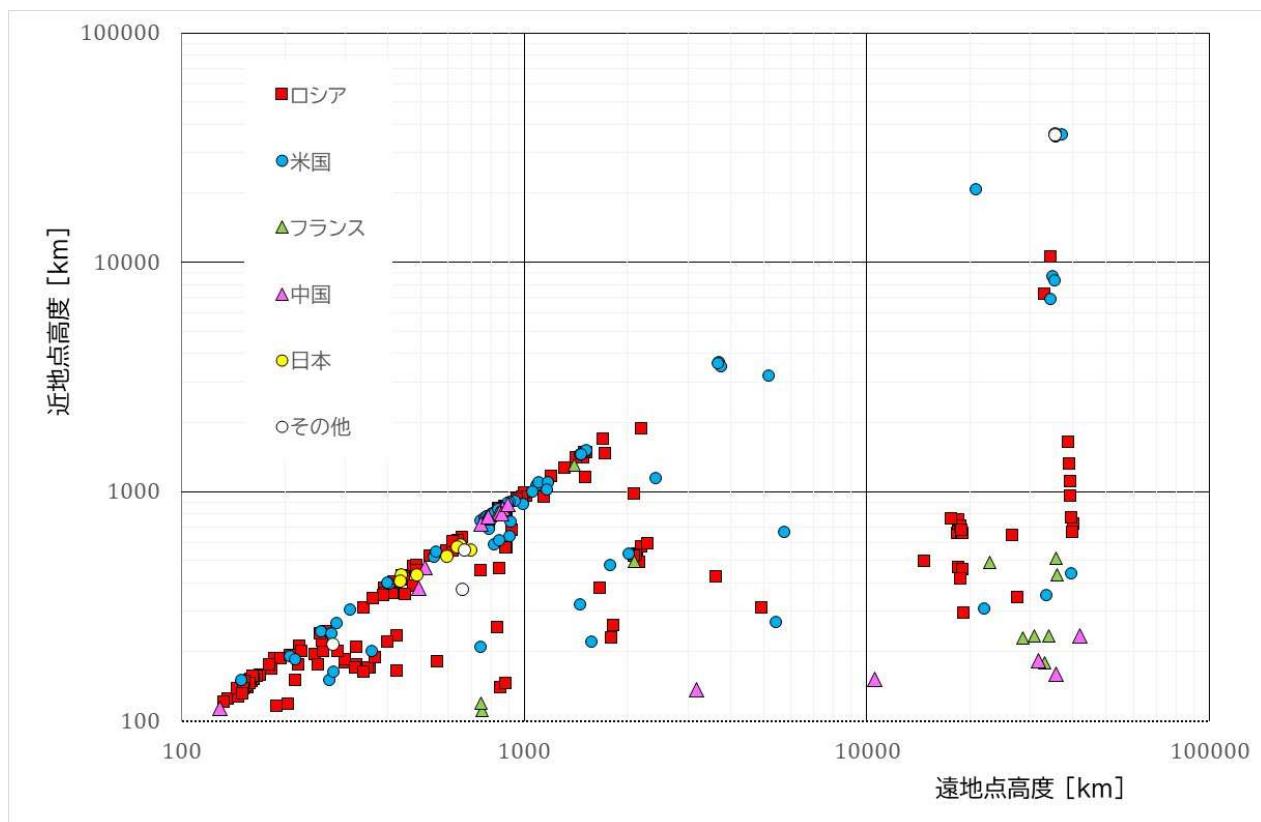


図 2.3-1 発生国別破碎発生高度 (出典 : CSpOC@2025.09.01)

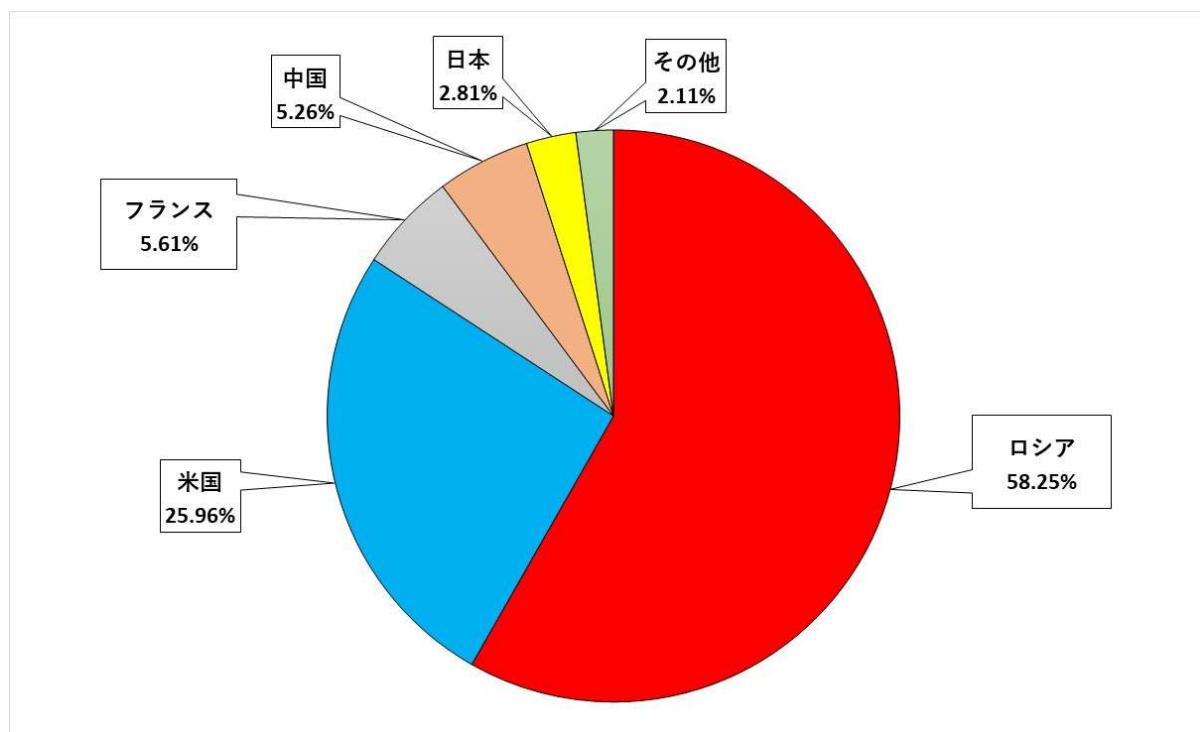


図 2.3-2 国別破碎発生件数の割合 (出典 : CSpOC@2025.09.01)

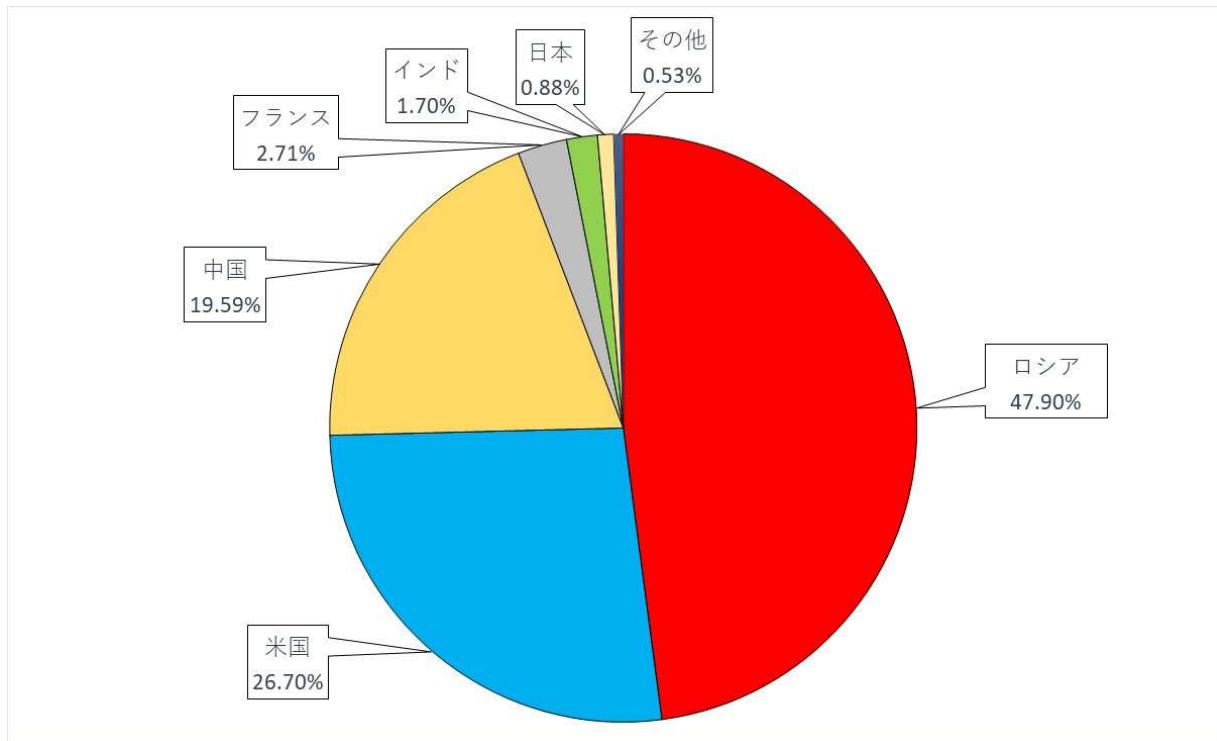


図 2.3-3 国別破碎破片発生数の割合 (出典 : CSpOC@2025.09.01)

破碎事象の件数について、破碎事故の原因別破碎件数を図 2.3-4 に、破片数を図 2.3-5 に示す。原因不明が多いが、推定できる範囲では意図的破壊行為、残留推進剤の爆発、不具合による破碎、バッテリの破碎が多い。残留推進剤の爆発は燃料・酸化剤タンクが合体して共通隔壁で仕切られた一体型のタンク構造を有するロケット機体が、共通隔壁の損傷で爆発して事例が多い。かつては米国デルタ・ロケットで複数回発生したが現在は改良されているので発生していないが、ロシアは現在も当該タンク構造で運用しており、多くの破碎事例を引き起こしている。

意図的破壊は一時冷戦の終結で収束していたが、2007 年以降、中国、ロシア、インドなどが再度実施を始めている。ロシアは前述のように自爆型の破壊実験であるが、米国は地上発射型のミサイルによる破壊実験を低高度で実施してきた。この地上発射型の破壊実験については、2022 年 12 月 7 日の国連総会での自肅することが決議[第一回会合報告 (A/77/383, para. 16)]されており、2023 年の広島 G7 でも先進国間で合意されている。

バッテリによる破碎は、かつてはロシアの申告で認識されていたが、近年は米国の DMSP 5D-2 や NOAA で発生している可能性が報告されている。

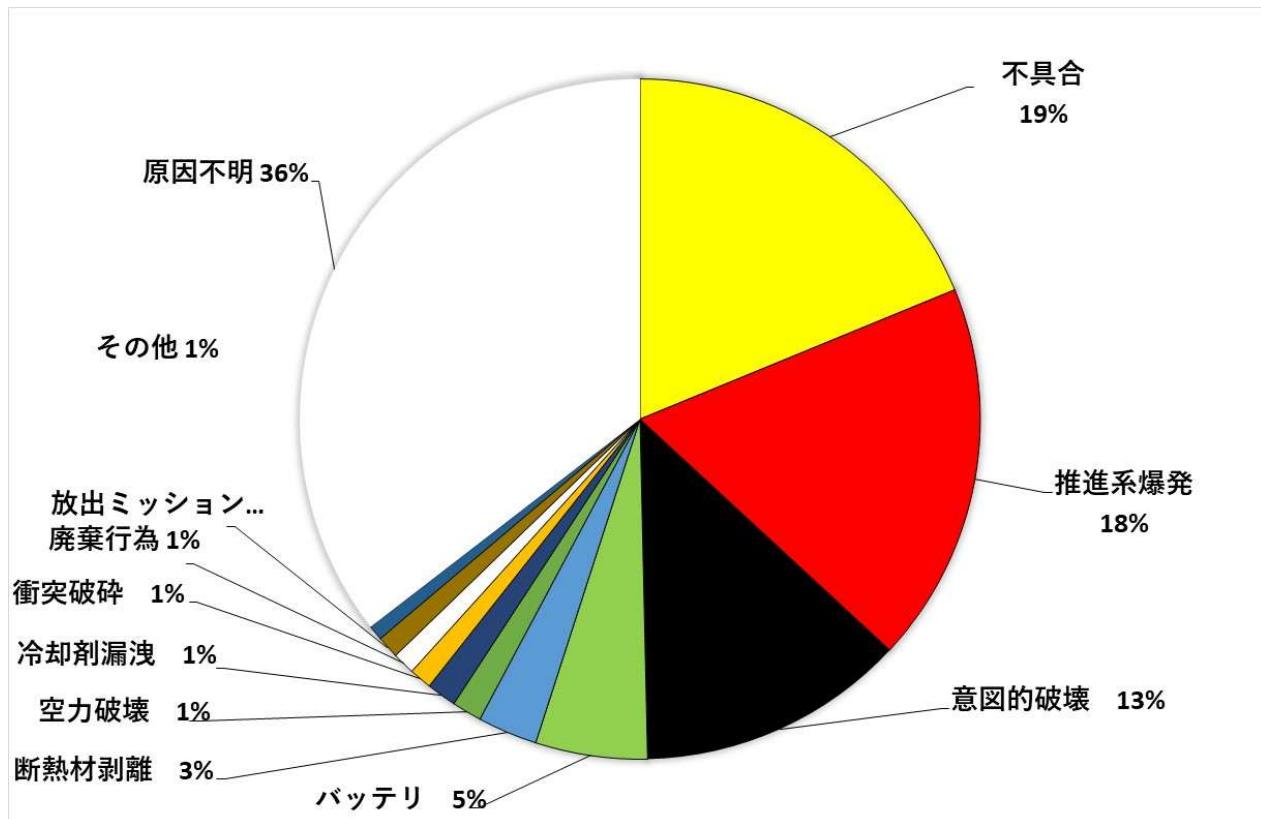


図 2.3- 4 発生原因別破砕件数の割合 (出典 : CSPOC@2025.09.01)

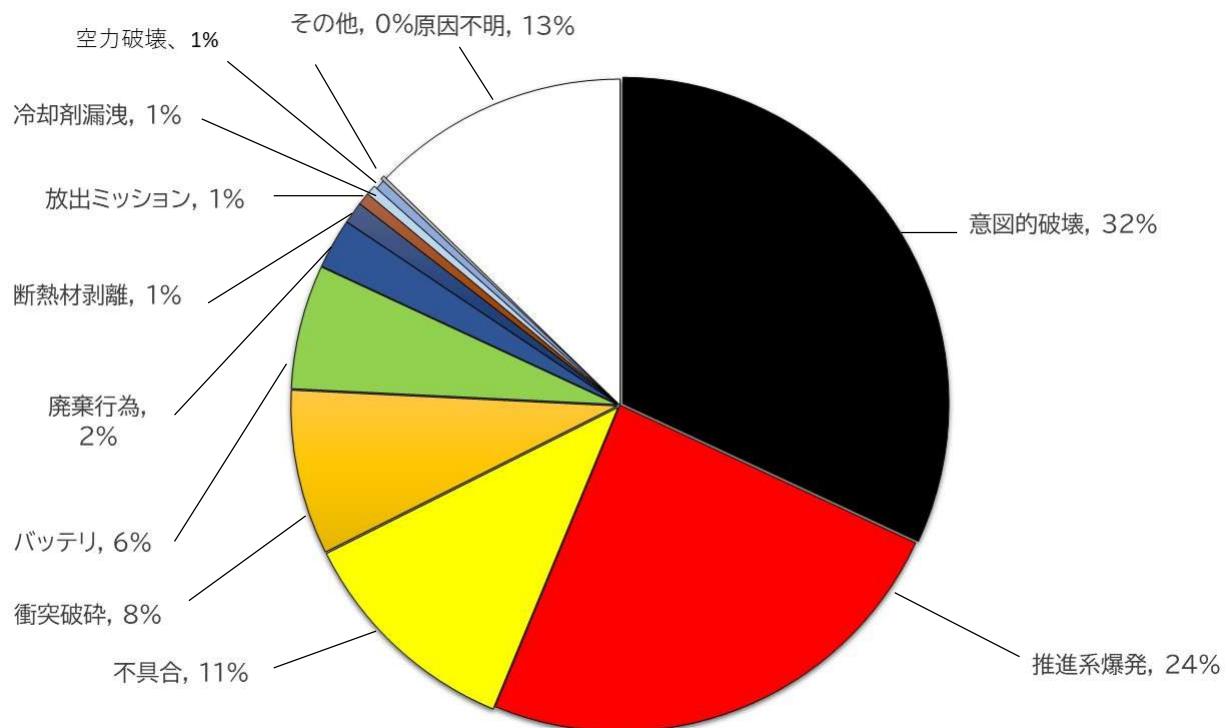


図 2.3-5 発生原因別破片発生数の割合 (出典 : CSPOC@2025.9.1)

破碎物を宇宙機とロケット機体（推進モジュールを含む）に分けて破碎原因を示したのが図 2.3-6 である。衛星では意図的破壊が多く、ロケットでは推進剤の爆発の事例が多い。

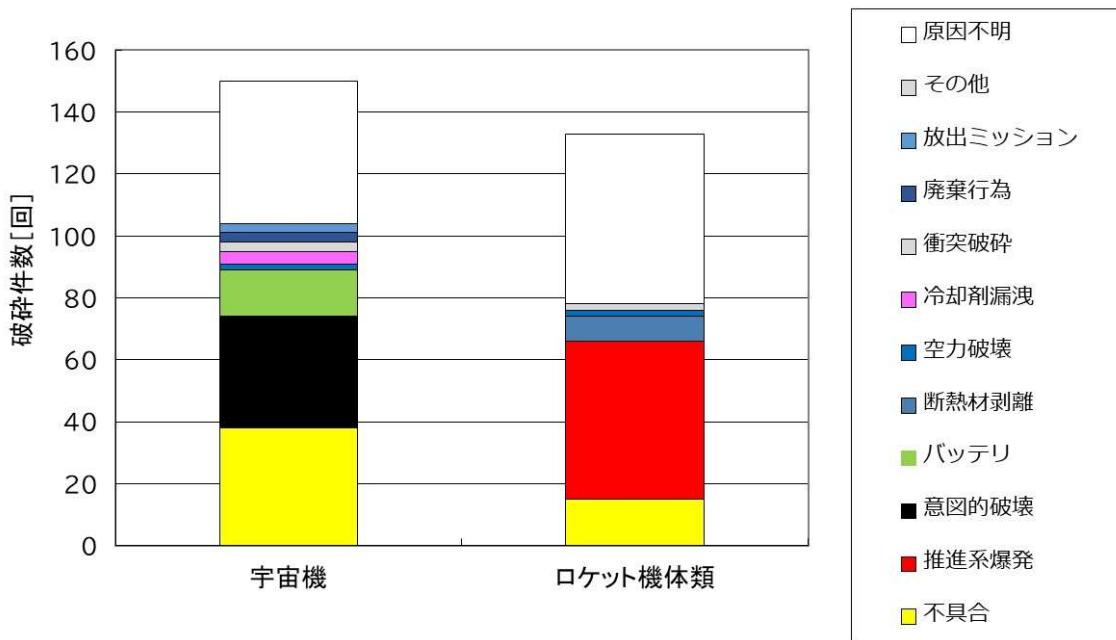


図 2.3-6 システム別破碎件数の割合 (出典 : CSpOC@2025.09.01)

図 2.3-7 に打上げから破碎までに経過した期間を示す。1 年以内に破碎した件数が最も多く 137 件である。打上げから 1 年以内に生じた破碎原因の割合を図 2.3-8 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ある。これは主として先に説明した一体型の推進剤タンクに関連することが多い。即ち、運用終了時に残留推進剤を排出しないこと、その推進剤が自己着火性の酸素と燃料の組み合わせ（例えば、四酸化二窒素の酸化剤とヒドラジン系の燃料）であること、共通隔壁が疲労あるいはデブリの衝突で破損すること、この三つの要因が揃えば破碎の確率は最大になる。

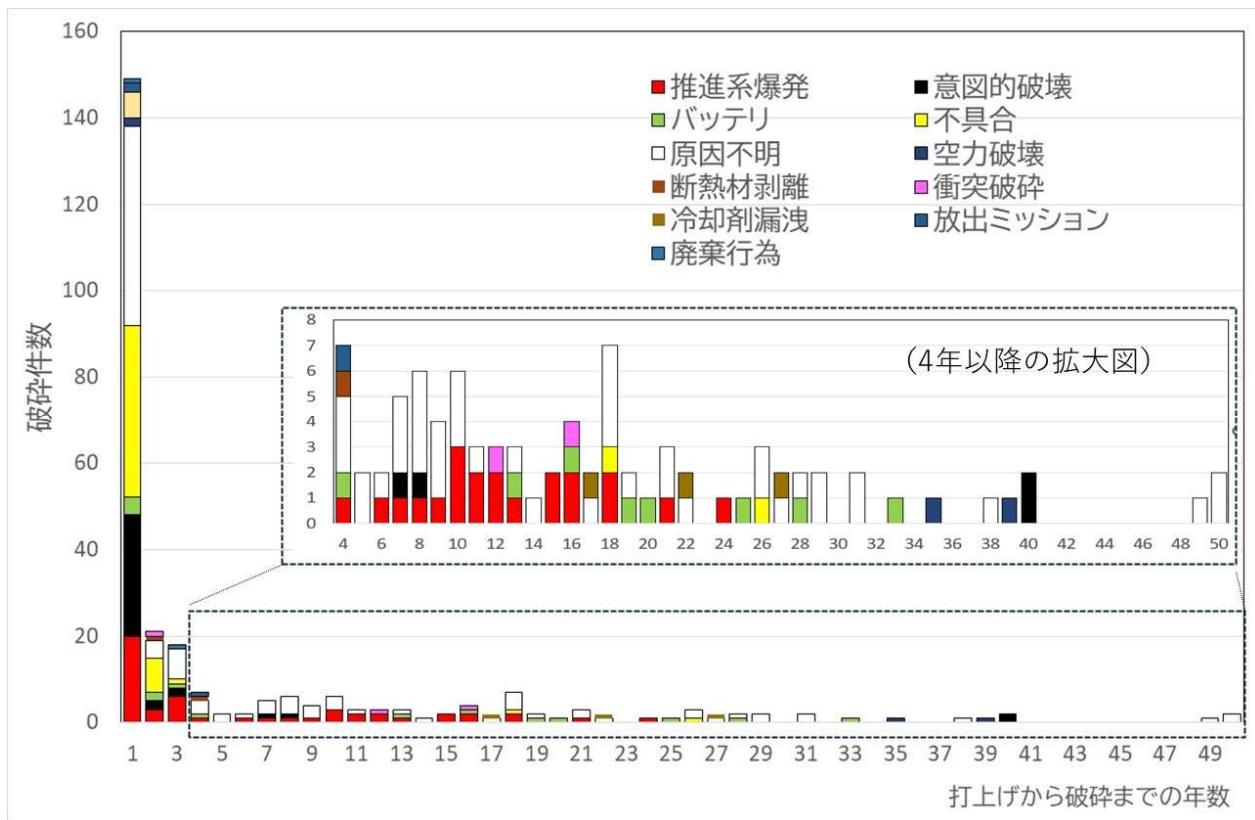


図 2.3-7 打上げから破碎までに経過した期間 (出典 : CSpOC@2025.09.01)

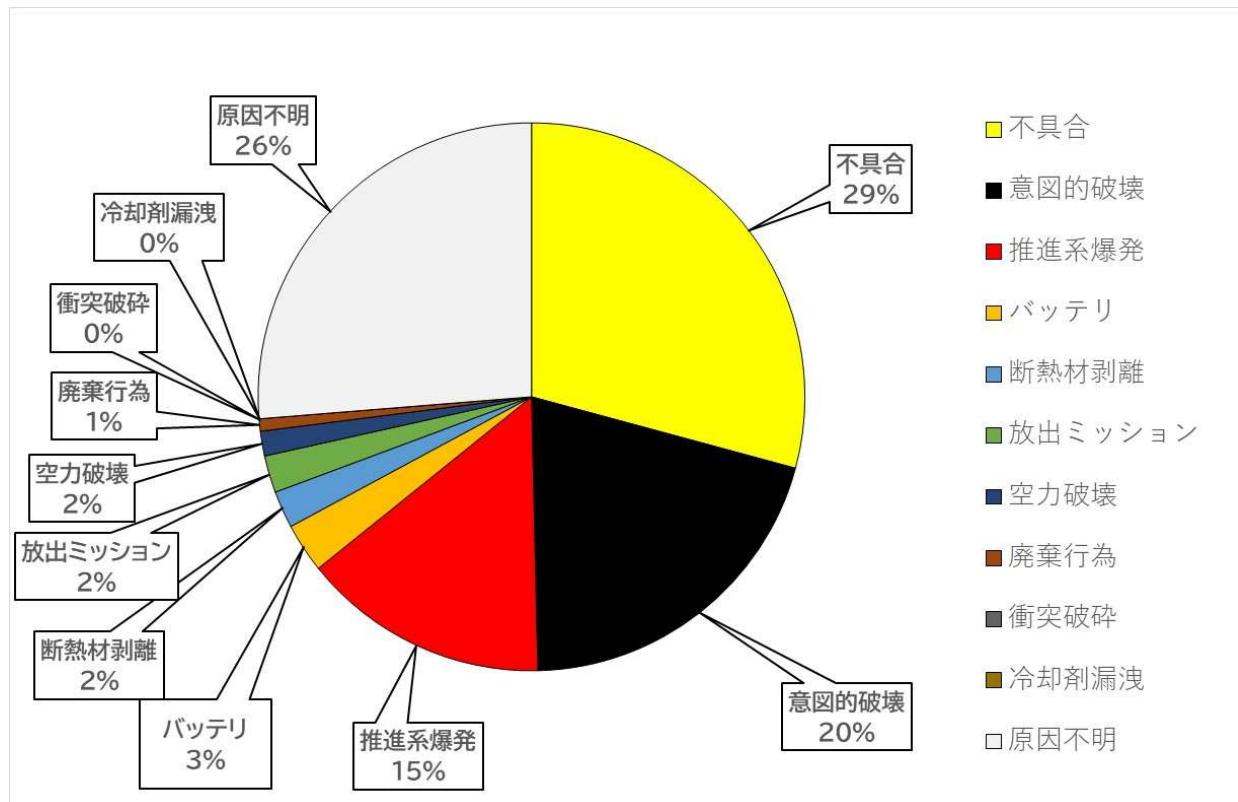


図 2.3-8 打上げから 1 年以内に生じた破碎原因の割合 (出典 : CSpOC@2025.09.01)

2024~2025 年の間に発生した破碎現象については、CSpOC に登録された軌道物体情報によれば、10 個以上の破片を発生した機体は以下の 6 機である。このうちの 5 機は過去にも破片の発生が登録されている。

CZ-6A は中国のロケットの機体であり、現在までの登録破片で歴代第 7 位の破片を発生したことになる。ロケット機体の破碎源は残留推進剤と考えるのが自然であるが、これが 2 年間の内に 9 回の破碎を繰り返したように登録されている。残留エネルギーによる破碎が繰り返されるとは考え難い。破片の登録が遅れたか、飛散した後の破片にデブリが衝突して破碎した可能性があるが詳細は未調査である。

その他は衛星であるが、代表的な破碎源としては軌道・姿勢制御用の推進剤とバッテリがある。INTELSAT-33E は 2024/10/19 に不具合により運用を停止しているので破片の発生はその時期と思われるが、CSpOC がその破片を登録したのは 2024/11/15 の STARLINK の打上げの後になっている。実際には破碎の後、破片の軌道の逆伝播で破碎時期を推定するのに数か月の時間がかかると考えるのが自然であろう。また、当該衛星は 2025 年にも破片が登録されているが、これも破片の登録の遅れか、飛散した後の破片にデブリが衝突して破碎したものかは詳細な解析を行わなければ不明である。このように、本書のように破片の登録時期と実際の物理現象を直接結び付けることは、本来はより慎重でなければならない。

表 2.3-1 西暦 2024 年以降の破片発生の登録状況

	破碎発生機体	国際識別番号	破片発生数 (2024 年と 2025 年)	発生破片 総数	過去の破片発生登録時期
1	CZ-6A	2024-140	664+41	705	2024/8/6, 2024/8/23, 2024/9/4, 2024/9/15, 2024/9/15, 2024/9/25, 2024/10/8, 2024/11/6, 2025/6/27
2	INTELSAT 33E	2016-053	18+18	36	2024/11/16, 2025/6/15
3	RESURS P1	2013-030	19	19	2024/6/26
4	COSMOS 2499	2014-028	14	73	2021/12/9, 2023/2/28, 2024/8/23
5	COSMOS 970	1977-121	51	120	1977/12/21, 2025/7/30
6	DMSP 5D-2 F14	1997-012	15	19	1997/4/10, 2025/2/9

3. 軌道利用の安全に係るトピックス

3.1 将来の軌道上環境評価に関する研究

JAXA 研究開発部門では、九州大学と共同開発した軌道上デブリ推移モデル (Near-Earth Orbital Debris Environment Evolutionary Model : NEODEEM) を用いて、軌道上環境の将来予測を実施している。その一例を図 3.1-1 に示す。低軌道における物体数の増加を抑えるためには、PMD 順守率¹を高めること（最低でも 90%以上必要）が効果的であると予測している。

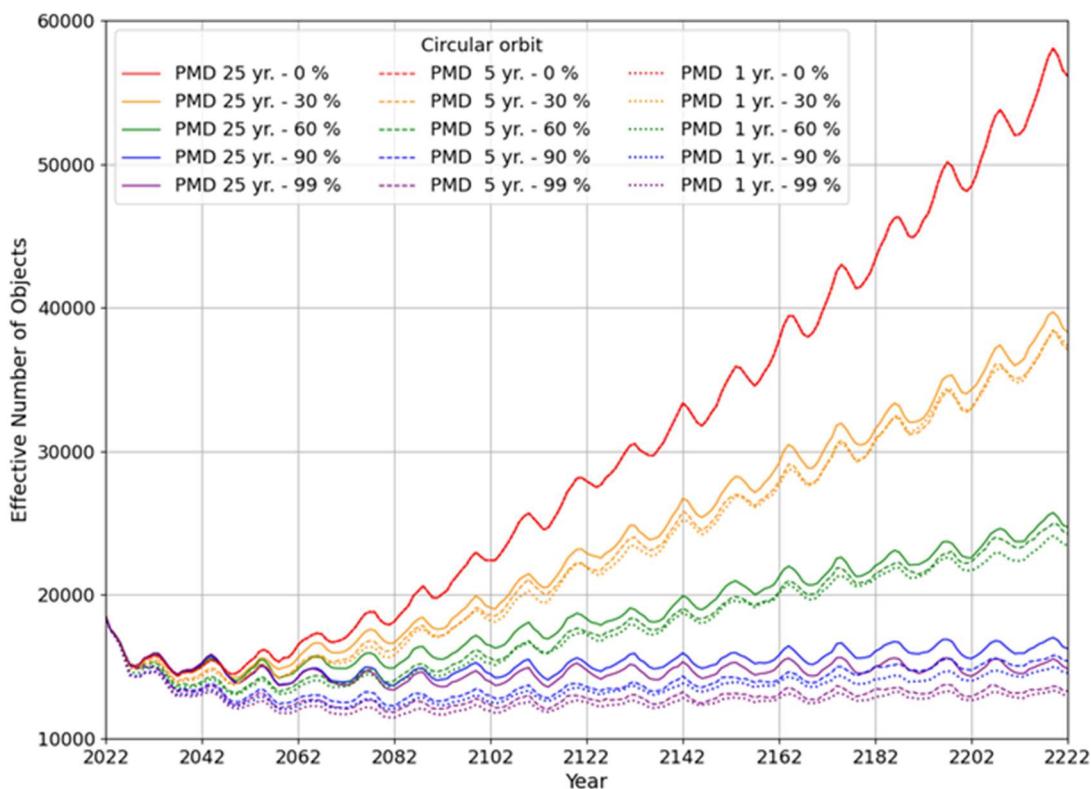


図 3.1-1 PMD 順守率及び PMD 期間の違いによる軌道上物体数推移（高度 2,000km 以下）の比較²

¹ 人工衛星の運用終了後に軌道を離脱させる処置 (Post-Mission Disposal : PMD) について、国際的なガイドライン（主に IADC ガイドライン）に基づくルール（例：25 年ルール）に従って実施が成功する割合。

² S. Kawamoto, R. Harada, Y. Kitagawa, T. Hanada, Evaluation of the effectiveness of the 5-year rule — impact on the orbital environment at each altitude by reducing the post-mission disposal lifetime, *Acta Astronautica*, 219 (2024) 653–661.

4. 国内外のスペースデブリ対策に関する動向

4.1 國際的な動向

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^[5]が制定され、法的拘束力はないものの、加盟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。

これは次項にて説明する IADC ガイドラインの制定を受けて、世界的な合意の機運が醸成されたとの判断のもとに作成されたもので、巻末には詳細は IADC ガイドラインを参照するように記されている。

4.1.2 IADC

先進国の政府系宇宙機関がスペースデブリに関する情報交換や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ことを目的に、欧米主導で設置されたフォーラムである。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活動している。2025 年 9 月現在、以下の 13 の加盟宇宙機関で構成されている。

- イタリア : ASI (Agenzia Spaziale Italiana)
- フランス : CNES (Centre National d'Etudes Spatiales)
- 中国 : CNSA (China National Space Administration)
- カナダ : CSA (Canadian Space Agency)
- ドイツ : DLR (German Aerospace Center)
- 欧州 : ESA (European Space Agency)
- インド : ISRO (Indian Space Research Organisation)
- 日本 : JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency)
- 韓国 : KARI (Korea Aerospace Research Institute)
- 米国 : NASA (National Aeronautics and Space Administration)
- ロシア : ROSCOSMOS (State Space Corporation)
- ウクライナ : SSAU (State Space Agency of Ukraine)
- 英国 : UK Space Agency

組織構成は、運営グループ（幹部会）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」(IADC-02-01)の第 4 版が 2025 年 1 月に制定、公開されている。新たにラージコンステレーションへの推奨事項の追加、低軌道の PMD において可能な限り軌道寿命を短縮することの推奨、などが盛り込まれている。

発行文書としては、他に、「IADC ガイドラインの解説書」(IADC-04-06 :Support to IADC Guidelines)、「大規模コンステレーション衛星に関する提言」(IADC-15-03)、衝突防御設計を支援する「プロテクション・マニュアル」(IADC-04-03)などを公開している。

更に、IADC の環境レポート(IADC Report on the Status of the Space Debris Environment)(IADC-23-01)の 2025 年度版が今年 2 月に発行されており、最新の軌道上の統計、将来予測が報告されている。

以上の各文書は IADC の公開サイト^[6]で参照できる。

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、以下に示すスペースデブリ関連規格・技術仕様書・技術レポート類が発行されている。(これらの閲覧は購入により可能)

- (1) 24113 Space debris mitigation requirements
- (2) 18146 Space debris mitigation design and operation manual for spacecraft
- (3) 20590 Space debris mitigation design and operation manual for launch vehicle orbital stages
- (4) 6434 Design, testing and operation of a large constellation of spacecraft [Tec Spec]
- (5) 27852 Estimation of orbit lifetime
- (6) 16158 Avoiding collisions with orbiting objects [Tech Rep]
- (7) 16126 Assessment of survivability of unmanned spacecraft against space debris and meteoroid impacts to ensure successful post-mission disposal
- (8) 11227 Test procedures to evaluate spacecraft material ejecta upon hypervelocity impact

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。

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^[7]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。

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、自プロジェクトに対しては、2023 年まで ISO 24113 を取り込んだ ECSS-U-AS-10C を適用してきたが、現在は独自のデブリ低減要求である ESA Space Debris Mitigation Requirements^[8], 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^[9]を示している。

また、定期的に ESA's Annual Space Environment Report^[10]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³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⁽⁴⁾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。

2022 年に JMR-016 「人工衛星の衝突リスク管理標準^[11]」を制定、公開している。

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^[12]を出す必要がある。

³ 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 【開催結果報告】第 11 回 JAXA スペースデブリワークショップ[†]

「第 11 回 JAXA スペースデブリワークショップ」は、2024 年 10 月 28 日～30 日に、JAXA 調布航空宇宙センターにて開催し、終了した。国内外から 400 名以上のご参加をいただいた（オンラインを含む）。講演資料は、JAXA リポジトリ（下記 URL）にてご参照可能。

https://jaxa.repo.nii.ac.jp/search?page=1&size=20&sort=custom_sort&search_type=2&q=1736319533546



図 5.1-1 ワークショップ会場の様子

なお、次回開催予定は未定。

6. 参考文書およびデータベース

- [1] U.S. Space Forces, Combined Space Operations Center (CSpOC), Space Track (<https://www.space-track.org>) [閲覧するにはユーザ登録が必要である。]
- [2] Slingshot Aerospace, Seradata (<https://www.seradata.com/>) [閲覧するには契約が必要である。]
- [3] NASA : Orbital Debris Quarterly News (<https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/>)
(Volume 28, Issue 4 October 2024/ Volume29, Issue1 February 2025)
- [4] JAXA スペースでブリ発生防止標準 (JMR-003E)
- [5] Committee on the Peaceful Uses of Outer Space (COPUOS): Space Debris Mitigation Guidelines
(<https://www.unoosa.org/documents/pdf/spacelaw/sd/COPUOS-GuidelinesE.pdf>)
- [6] IADC : 公開 Web サイト
(https://www.iadc-home.org/documents_public/view/id/82#u)
- [7] FAA(Federal Aviation Administration)連邦規則集 14 CFR Part 450 §450.171 Safety at end of launch.
(<https://www.law.cornell.edu/cfr/text/14/450.171>)
- [8] ESA Space Debris Mitigation Requirements, ESSB-ST-U-007 Issue 1, 30/10/2023
(<https://technology.esa.int/upload/media/ESA-Space-Debris-Mitigation-Requirements-ESSB-ST-U-007-Issue1.pdf>)
- [9] ESA The Zero Debris Charter
(https://www.esa.int/Space_Safety/Clean_Space/The_Zero_Debris_Charter)
- [10] ESA_Space_Environment_Report_2024
(https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris)
- [11] JAXA 人工衛星の衝突リスク管理標準, JMR-016, 27/12/2022
(https://sma.jaxa.jp/TechDoc/Docs/JAXA-JMR-016_N1.pdf)
- [12] 内閣府 宇宙活動法に関する情報及び申請受付について
(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、破碎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。
破碎	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碎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±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。（注：本レポートではロケット上段とは呼ばれない「打上げ支援モジュール」も含めている。）