

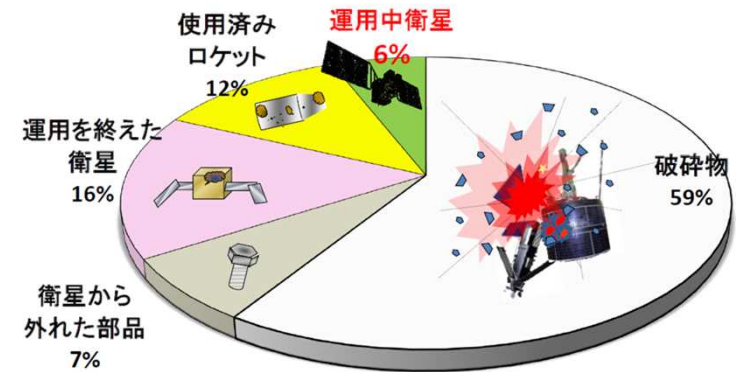
スペースデブリに関する最近の状況

令和2年 6月12日
宇宙航空研究開発機構

1. スペースデブリ問題の概要
2. 宇宙状況把握 (SSA)
3. 国際的な議論・ルール
4. スペースデブリ対策に係る研究開発

スペースデブリ：軌道上にある不要な人工物体の総称

- ▶ 使用済みあるいは故障した人工衛星・ロケット上段
- ▶ ミッション遂行中に放出した部品：分離機構部品など
- ▶ 運用後、残推薬による爆発・衝突により発生した破片
- ▶ その他、固体ロケットモータのスラグ（燃えカス）、塗料片、...



宇宙空間は宇宙ゴミ(スペースデブリ)だらけ=宇宙空間での飛行物体の94%がデブリ。

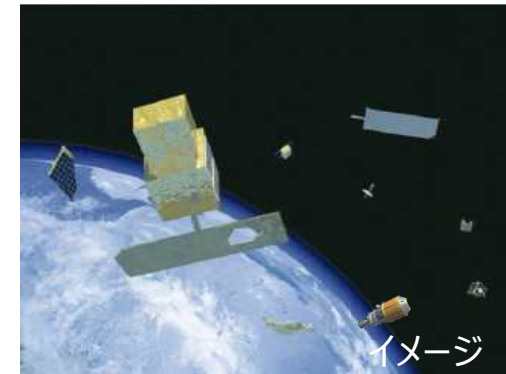
UN COPUOS/STSC Report from ESA

※(CSpOC, 2018年5月25日現在)

出典：数量割合はESAの2011年2月の国連COPUOS/STSCへの報告より

スペースデブリの数

- ▶ 軌道上物体の数：約23000個※
 - ✓ 米国が地上観測網で低軌道約100mm以上、静止軌道約1m以上の物体を追跡し軌道情報を公開
 - ✓ 運用衛星は約6%程度、残りはデブリ
 - ✓ カタログ化された軌道上物体:19132個(軍事衛星は軌道非公開), 残りは起源不明など
- ▶ 衝突速度は約10~15km/s (ライフルは1km/s)
 - ✓ 100mm以上：2.3万個→壊滅的破壊+大量破片発生
 - ✓ 10mm以上：50~70万個→ミッション終了につながる破壊
 - ✓ 1mm以上：1億個以上→故障

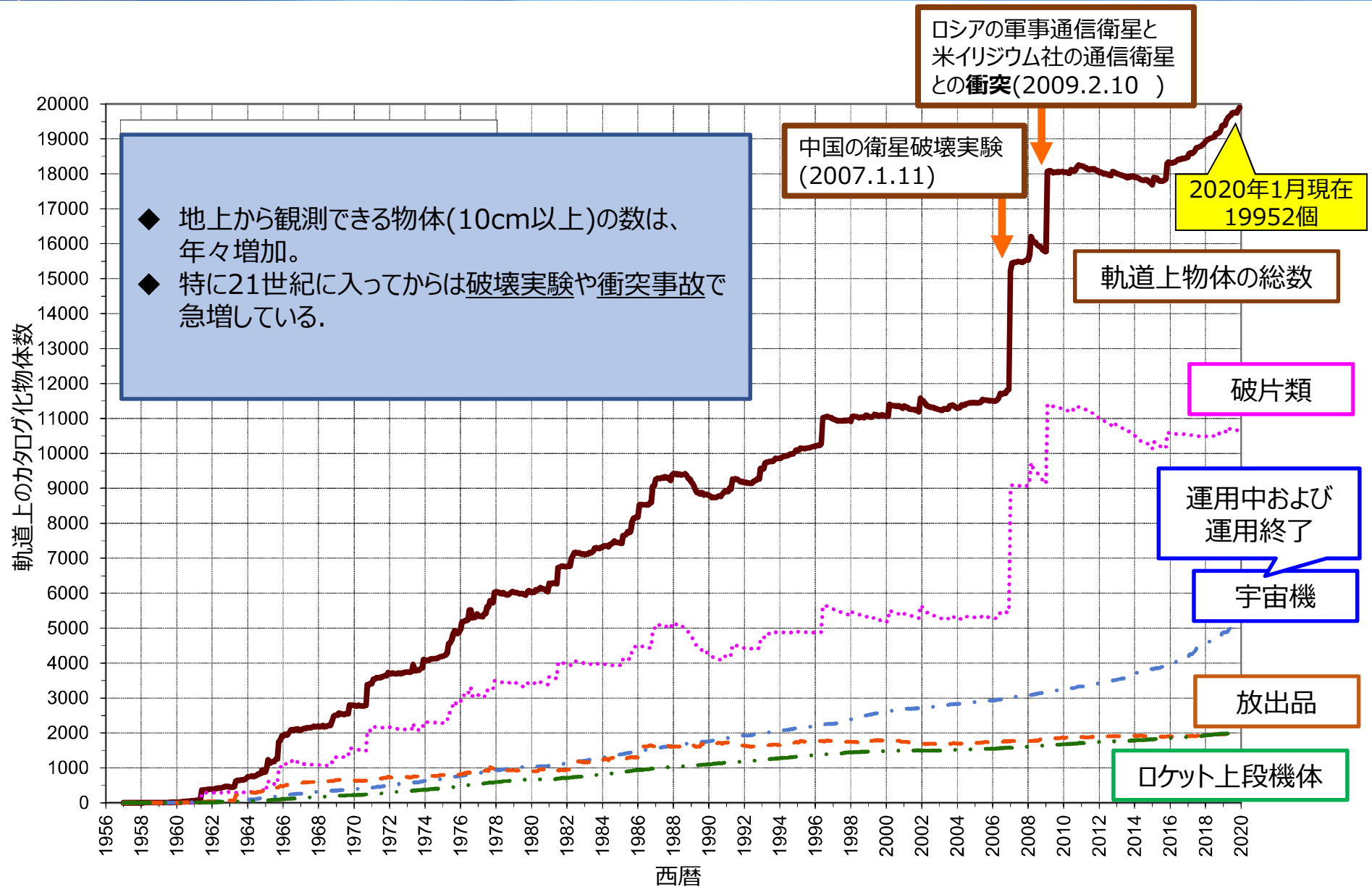


イメージ

小さな宇宙デブリは発見・追跡が困難、かつ宇宙機に壊滅的なダメージを与える

新たなデブリを生まないために、「宇宙デブリ同士を衝突させない」ための総合的な取り組みが必要

米国が地上監視データから公表している軌道上物体の数



観測限界(公称値)： 低軌道10cm以上, 静止軌道1m以上

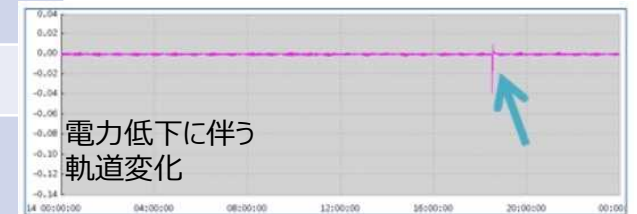
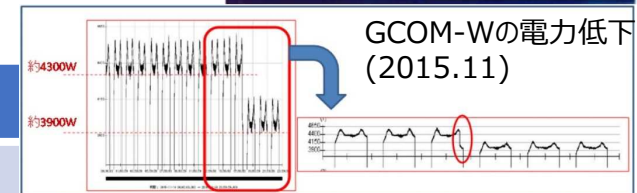
出展： NASA Orbital Debris Quarterly News, Volume 24, Issue 1, February 2020

➤実際に衝突が発生。回収宇宙機表面にも衝突痕。

カタログ化物体同士の衝突：4例	
2009.2	米イリジウム33と露使用済み衛星 衛星大破、大量の破片発生
2005.1	米ロケットと中国ロケット破片
1996.7	仏軍事観測衛星CERISEとロケット破片 ブーム損傷
1991.12	露使用済み衛星と衛星破片



非カタログ化物体との衝突が疑われる事例	
2016.8	欧Sentinel-1A 電力低下、軌道変化 カメラで約40cmの衝突痕
2015.11	日本GCOM-W 電力低下、軌道変化
2013.5	エクアドル小型衛星と露ロケット破片 高速回転し衛星通信途絶
2013.3	露小型衛星BLITS故障 スピンレート及び高度が変化
2007.5	欧気象衛星Meteosat-8の不具合 軌道が変化し東西制御スラスタ破損
2006.3	露通信衛星 EXPRESS-AM11の故障 冷却液が噴出、姿勢が失われ機能不全に 他多数



デブリ状況把握・分析

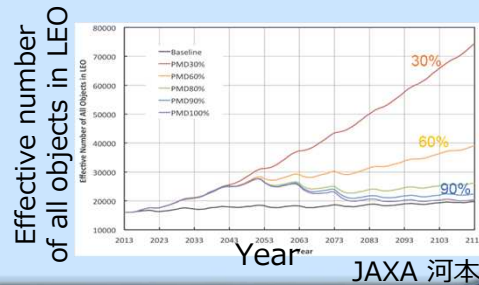
観測

SSAシステム
観測可能な大きさの
デブリ分布把握
GEO 1m以上
LEO 10cm以上



分布予測

微小デブリの分布予測
(環境モデル)



将来予測

将来分布予測
(推移モデル)

JAXA 河本

設計・運用

軌道解析・衝突解析

回避運用

破砕防止

分離物の制限

防御

適切な運用終了措置(25年ルール)



国際標準・ルール化の検討

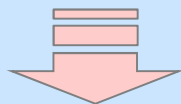
IADC

国連COPUOS

ISO

国際会議等でのデブリガイドライン整備

今後の議論として…



STM 宇宙交通管制
(Space Traffic Management)

地上の安全対策

制御再突入

溶融解析

リスク評価

ロケット・衛星の非デブリ化



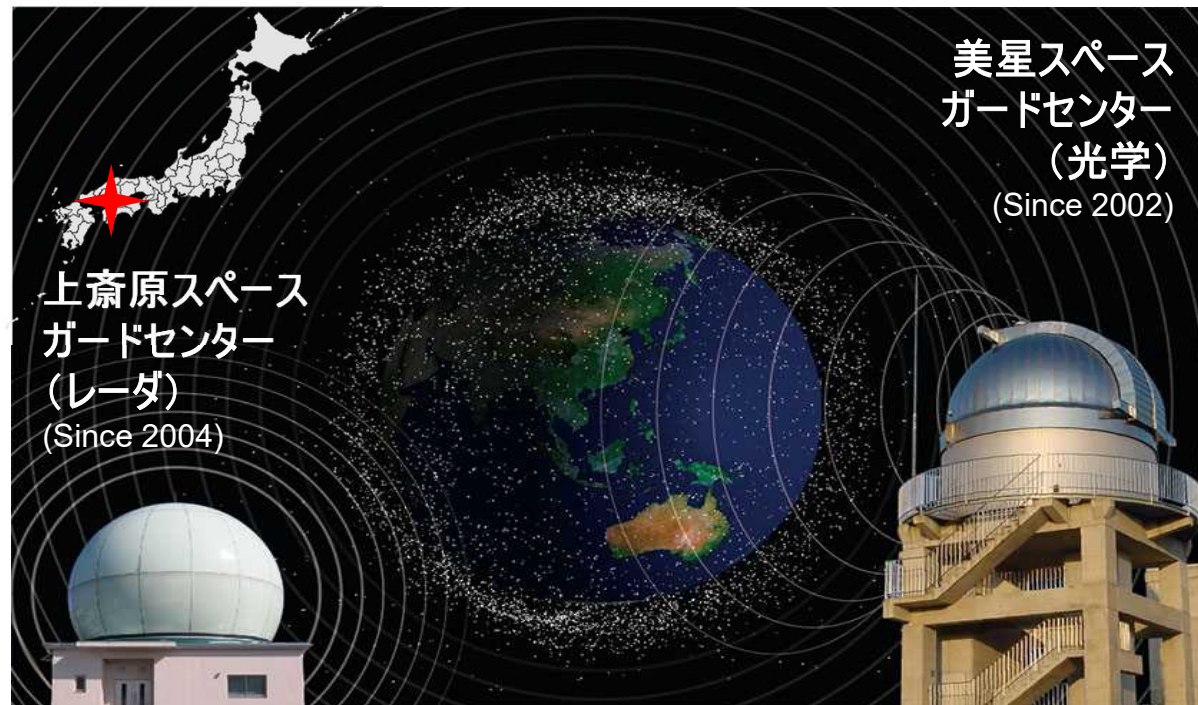
デブリ除去

- ✓ 世界に先駆けたデブリ除去システムの研究推進
- ✓ ロケット上段・大型デブリをターゲットとした実証
- ✓ 民間事業拡大に向けた枠組み作り

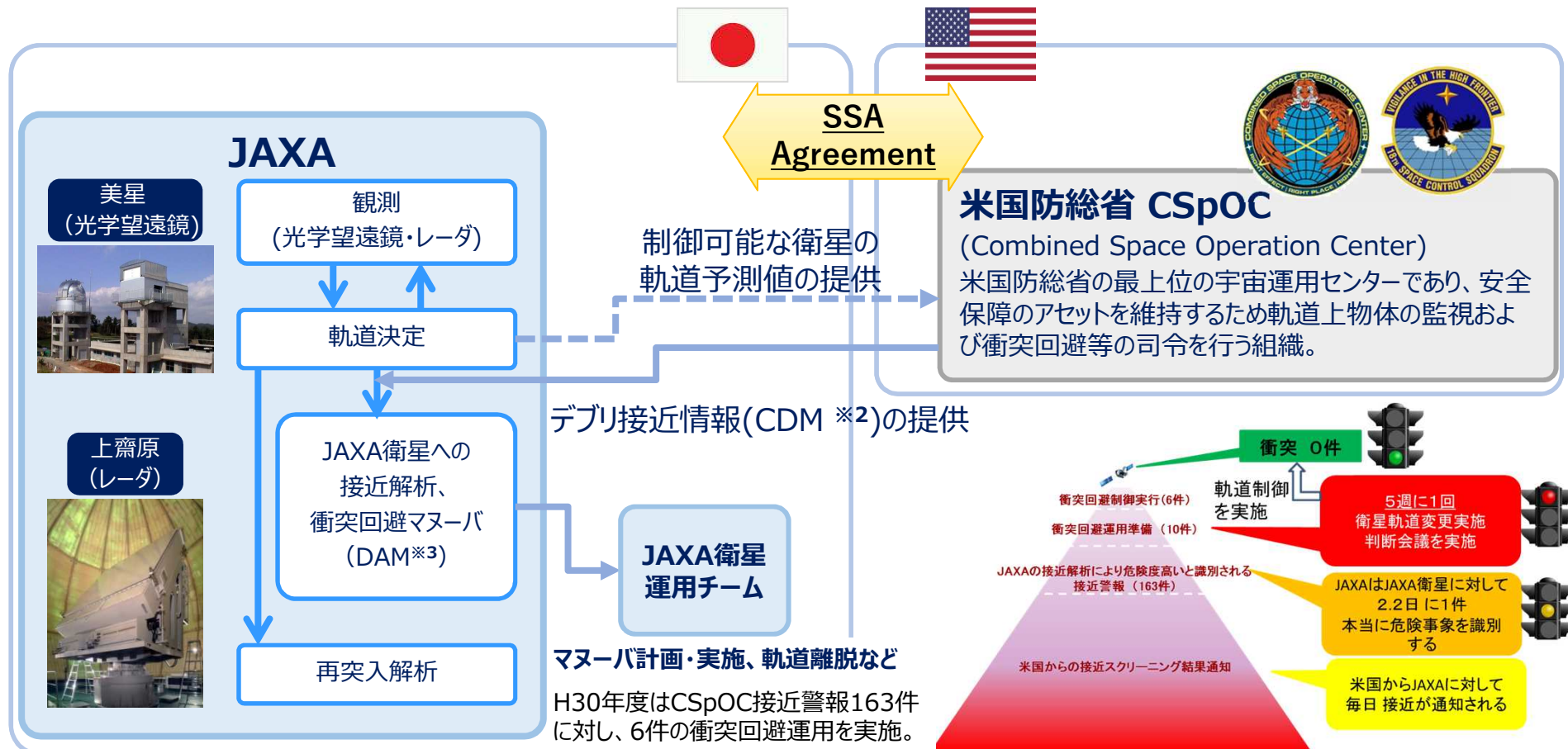
1. スペースデブリ問題の概要
2. 宇宙状況把握 (SSA)
3. 国際的な議論・ルール
4. スペースデブリ対策に係る研究開発

※宇宙状況把握：Space Situational Awareness

- JAXAは従来から、保有する人工衛星の安全な運用を目的として、SSA関連施設(光学望遠鏡、レーダー)による、スペースデブリの観測および観測データに基づく軌道決定、接近解析等を実施している。



JAXAは保有衛星の安全な運用のため、SSA関連施設による物体観測、衝突回避運用等を実施。米国・日本政府間の取極※¹に基づき、日米相互に宇宙物体の軌道に関する情報提供する体制となっている。



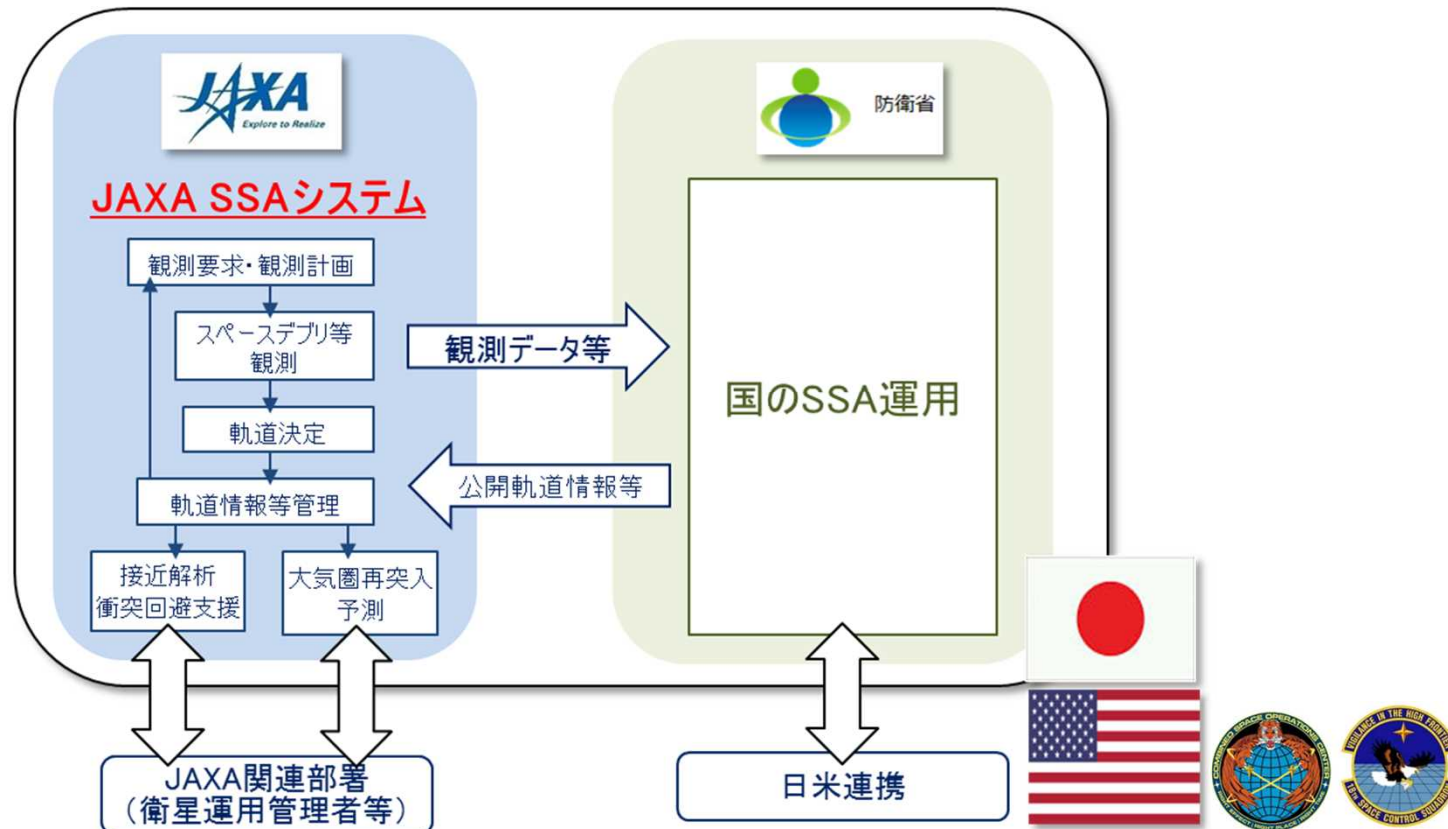
JAXA衛星に対するスペースデブリ接近実績 H30.4.1~H31.3.31 対象衛星15(WINDSを含む)

※¹ : 2013年日米宇宙状況監視(SSA)協力取極の締結により米国政府から日本国政府に対して宇宙物体の軌道に関する情報共有を行うことを合意。2014年日本側から米側に対して宇宙物体の軌道に関する情報を提供する協力を実施することを合意。
 ※² : CDM(Conjunction Data Message)
 ※³ : DAM(Debris Avoidance Maneuver)

宇宙基本計画

日米連携に基づく宇宙空間の状況把握のために必要となるSSA関連施設及び防衛省やJAXAを始めとした関係政府機関等が一体となった運用体制を、平成30年代前半までに構築する。これに並行して、我が国関係機関と米国戦略軍等との間で連携強化のあり方について協議を進め、運用体制構築等に資する情報収集及び調整を図る。（内閣府、外務省、文部科学省、防衛省等）

国のSSA体制



JAXAは2023年運用開始を目指して、レーダ及び解析システムの能力向上、光学望遠鏡の更新を実施。

岡山県



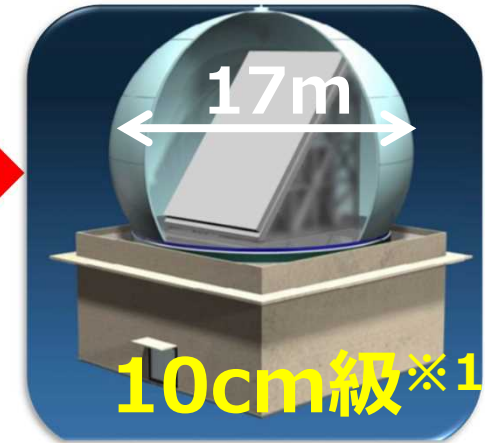
上齋原スペースガードセンター
(レーダ 2004年～)

美星スペースガードセンター
(光学望遠鏡 2002年～)



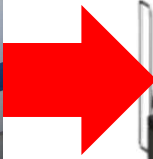
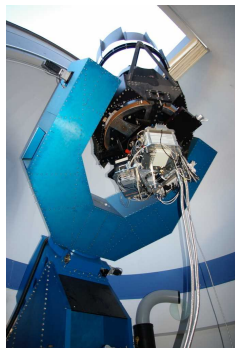
1.6m級

観測能力の向上
→10cm級レーダの新規整備



※1 : 高度650kmで10cm級の物体観測が可能

光学望遠鏡の老朽化更新



イメージ

茨城県

JAXA・筑波宇宙センター
(解析システム)

観測回数の増加、処理能力の強化

1. スペースデブリ問題の概要
2. 宇宙状況把握 (SSA)
3. 国際的な議論・ルール
4. スペースデブリ対策に係る研究開発

各国宇宙機関では、国際標準・ガイドラインに対応した標準を運用しており、国際ルールに準拠して活動している。

• 国際ガイドライン・標準

➤ IADCスペースデブリ低減ガイドライン(2002年)

- ✓ IADC (Inter-Agency Debris Coordination Committee)は、スペースデブリに係る研究者の情報交換・議論の場として設立された、先進国を中心とした宇宙機関で構成される委員会。
- ✓ 2002年に先進国宇宙機関間の初めての合意ガイドラインが制定された。

➤ 国連COPUOSスペースデブリ低減ガイドライン(2007年)

- ✓ COPUOS (Committee on the Peaceful Uses of Outer Space)は、宇宙活動の研究援助・情報交換、法および原則の確立等の検討を目的とした国連委員会。
- ✓ IADCガイドラインを踏まえて制定されたガイドライン。

➤ ISO-24113スペースデブリ低減要求(2010年)

- ✓ IADCガイドラインの工業的な実施方法を定めた国際標準。

• 各国宇宙機関が運用する標準

➤ NASA標準 (NASA-STD-8719.14)

- ✓ IADCガイドラインと整合。

➤ 欧州宇宙標準協会規格 (ECSS-U-AS-10C)

- ✓ ISO-24113と整合を取るように維持。

➤ JAXA標準 (JMR-003)

- ✓ ISO-24113と整合を取るように維持。

国際ルールに準拠

スペースデブリ低減に向けた基本的な考え方

スペースデブリは、①正常運用時の物体放出、②軌道上での自己破碎、③運用終了後の保護軌道域からの離脱失敗、④軌道上物体との衝突による破碎によって増加する。スペースデブリ低減には、これら4項目への対処が必要。

IADCスペースデブリ低減ガイドラインおよびISO-24113スペースデブリ低減要求の主な項目

① 正常運用時における物体放出の制限

*スラグ：固体燃料の燃焼、溶融の過程で発生する残渣物

- 意図的な物体放出や固体ロケットモータのスラグ*等の制限
(スラグは一律禁止ではなく、軌道寿命による環境への影響を考慮)

② 軌道上破碎事故の防止

- 破碎事故、残留エネルギーによる爆発を防止すること
- 意図的な破壊行為、軌道環境に有害な行為の禁止

③ 運用終了後の廃棄措置

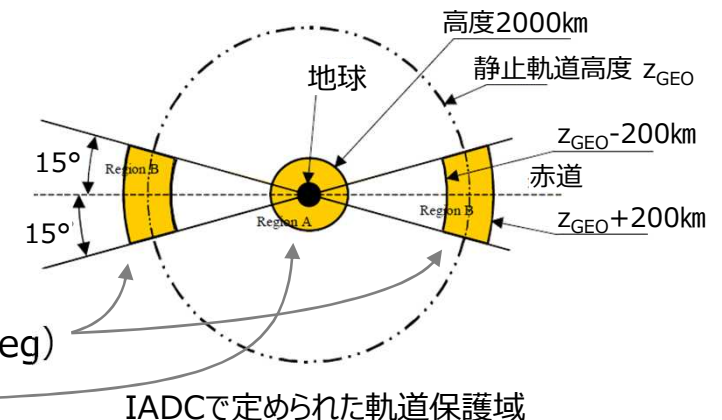
- 運用終了後に保護軌道域から離脱すること
 - 静止軌道保護域 (静止軌道高度 $\pm 200\text{km}$, 緯度 $\pm 15\text{deg}$)
 - 低軌道保護域 (高度 2000km 以下)

※25年以内に低軌道保護域から離脱

- 廃棄措置の成功確率が90%以上であること

④ 軌道上における衝突の防止

- 地上で監視できる物体との衝突の回避を行うこと



廃棄措置の成功確率の評価について、これまでは定常運用期間の信頼度低下を考慮しない条件付きだったが、ISO-24113:2019改定により条件無しとされた。

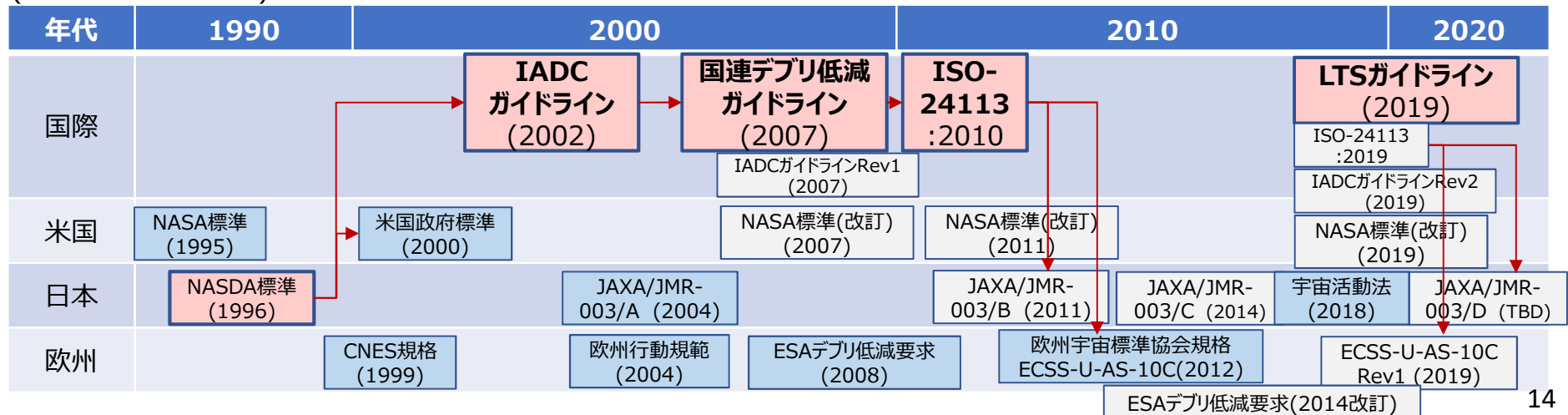
・スペースデブリ発生防止標準 (JMR-003)

- ISO-24113制定以前に制定したJAXA標準を、IADCガイドラインおよびISO-24113に整合するように維持し、国際ルールに準拠。
 - ✓ ISO-24113:2019改定への対応を検討中。
- ISOの要求内容と整合しているが、JAXAが行う開発管理等に即した構成とし、要求内容も一部ISOより具体化されている(例:管理手法等)。
- 今後のデブリ対策に向けて、JAXA独自要求として、SSA捕捉支援になるリフレクタ装着の推奨等の追加を検討中。

・軌道上サービスミッションに係る安全基準 (JERG-2-026)

- デブリ除去を含む軌道上サービスを促進すべく、JAXA安全基準を制定(2019年12月)。
- 接近、接触、結合を有する軌道上サービスが、他の人工衛星の管理に悪影響を及ぼす事象(衝突によるデブリの発生等)を引き起こすことを防止するための基本要素。

(国際標準制定の歴史)

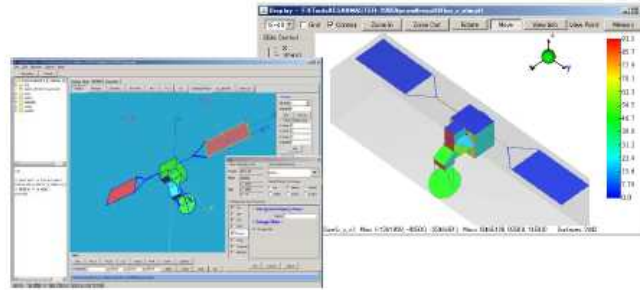


1. スペースデブリ問題の概要
2. 宇宙状況把握 (SSA)
3. 国際的な議論・ルール
4. スペースデブリ対策に係る研究開発

観測



モデル化



軌道上デブリのその場観測



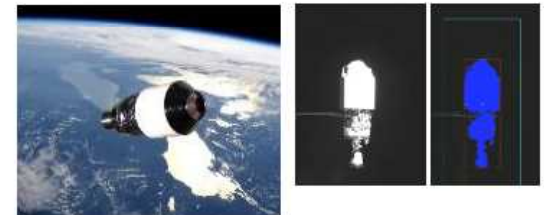
高効率推進系



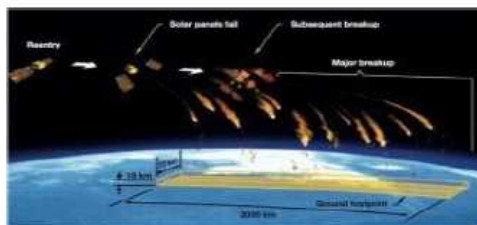
物体キャプチャ



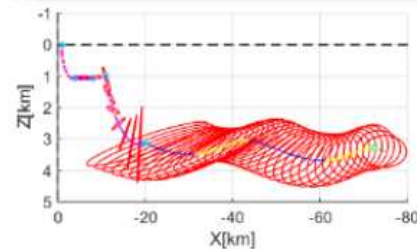
ランデブ



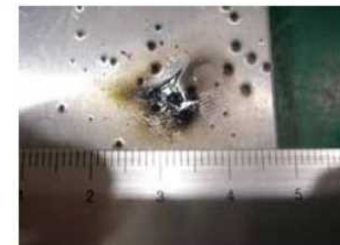
軌道離脱・再突入



数値解析



デブリ防護



スペースデブリ防護設計マニュアル

- 直径1mm以下の微小デブリは、地上から観測ができず衝突回避運用が難しく、かつ、衛星に対して衝突頻度が高いため、衛星の微小デブリからの防護が必要。
- 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た。
- デブリ防御設計標準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衛星プロジェクトへデブリ防護設計指針を提供している。

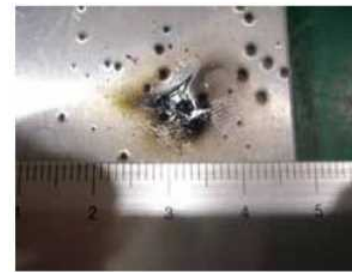
衛星設計者が、設計・運用の各段階で何を考慮すべきか把握し、設計の参考とする衝突試験結果、解析結果等のデータを蓄積している。



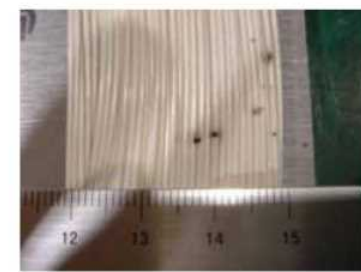
超高速衝突試験後の電力ハーネス表面



微小デブリ衝突試験設備
(2段式軽ガス銃)



(a) アルミシールド表面



(b) ハーネス表面



(c) アルミシールド表面



(d) ハーネス表面

アルミシールドによる防御性能評価試験結果

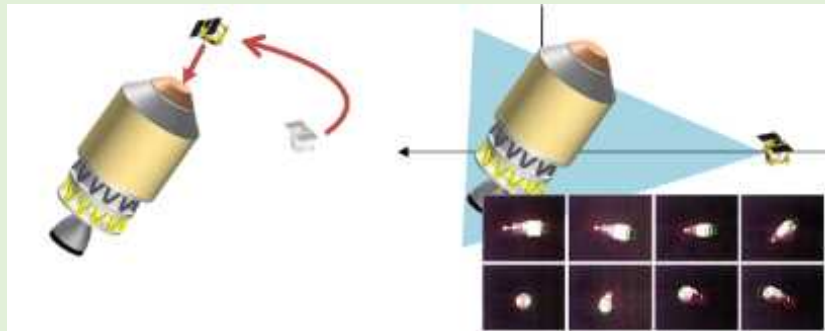
民間とのパートナーシップにより『世界初の大型デブリ除去』を目指す

- 除去効果が大きく、技術的に高度な我が国由来の**大型デブリ除去を2段階で実証**
- **事業者が事業戦略に基づき主体的に宇宙機開発・技術実証を行うためのJAXAによる総合的マネジメントおよび技術的支援**により、民間事業者の自立・国際競争力確保を目指す

今回のプロジェクトの範囲

フェーズⅠ：キー技術実証①

2022年度打上げ



- 衛星製造・打上・近傍制御を含む運用の実施
- 軌道上デブリの運動観測データの取得・納入



技術実証衛星イメージ

フェーズⅡ：キー技術実証②

ロケット上段除去実証

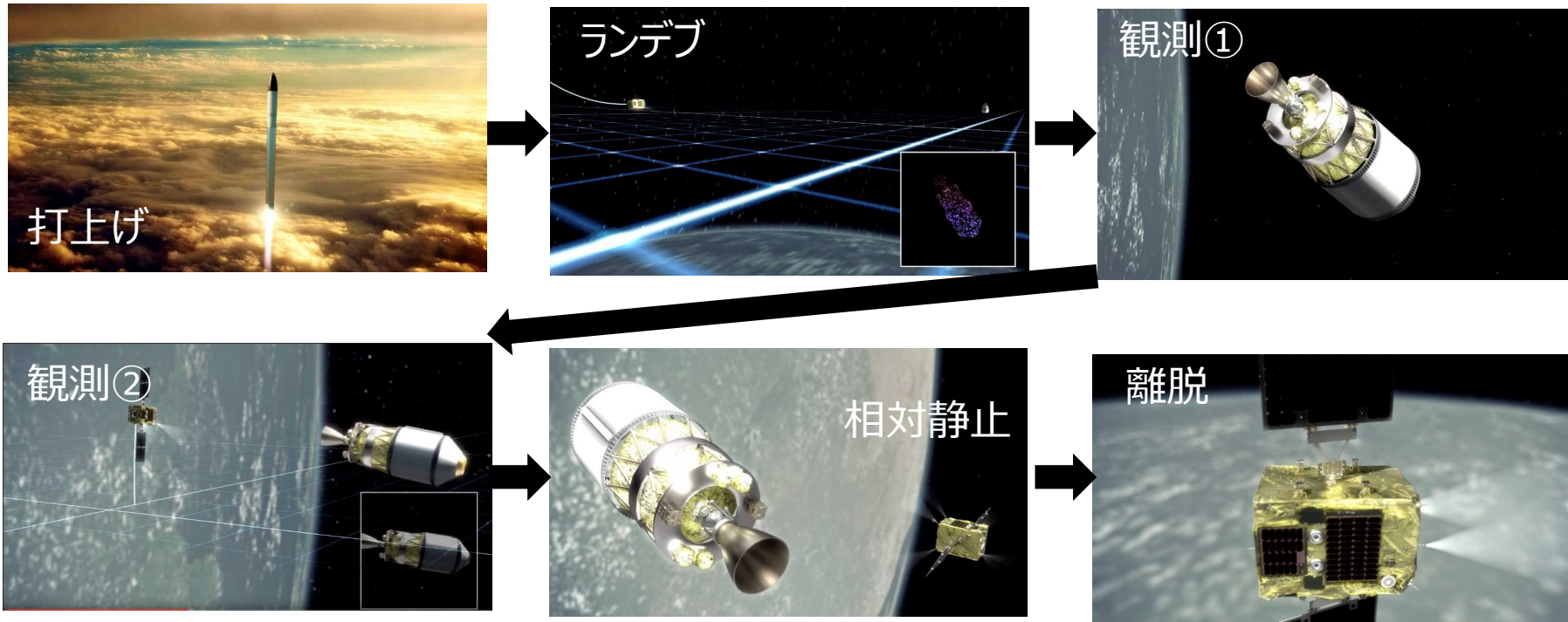
2025年以降打上げ



- 我が国由来のロケット上段をターゲット
- JAXAはコスト競争力のある技術を提供

世界初の大型デブリ除去へ

フェーズ I のパートナーとして株式会社アストロスケールを選定



成果概要

- 軌道上デブリ研究に資するデータ、デブリ除去の国際議論に資するデータ
- 非協力ランデブを実現する宇宙機技術
- 競争力のある信頼性・品質保証プロセス
- 事業化へ向けた事業開発成果
- 事業化へ向けたシステム・技術開発成果の獲得

} JAXAが得る成果

} パートナーが得る成果

参考資料



IADC (IADC: Inter-Agency Debris Coordination Committee)

国際宇宙機関間スペースデブリ調整委員会

NASA (米)、ROSKOSMOS (露)、CNES (仏)、JAXA (日)、ASI (伊)、CNSA (中)、UKSA (英)、DLR (独)、ESA (欧)、ISRO (印)、NSAU (烏)、CSA (加)、KARI (韓)

- スペースデブリに係る研究者の情報交換・議論の場として設立された、先進国を中心とした宇宙機関で構成される委員会。
- スペースデブリに係る宇宙環境予測、関連研究および宇宙空間の持続的な利用のために必要な対策等を技術的に議論。

SG(Steering Group)

各WGへのAI割り当ておよび
公開文書作成

WG1: Measurements スペースデブリ の観測(状況把握)

宇宙物体のレーダおよび光学観測
に関する情報交換

WG2: Environment and Database スペースデブリの 将来予測評価

軌道上物体の分布予測(環境モデル)
と将来分布予測(推移モデル)
に関する情報交換

WG3: Protection デブリ衝突 防御

微小デブリの防御手法に
関する情報交換

WG4: Mitigation デブリ低減

規制を含む削減対策に関
する情報交換

最近のトピック

宇宙物体のライトカーブ観測を
CNSA、ESA、JAXA、NASA、
ROSCOSMOSが協調して実施

ラージコンステレーションの将
来影響予測

宇宙機へのスペースデブリ
衝突時の破碎評価、
防御マニュアルの整備

ラージコンステレーションに対す
る声明を作成
IADCデブリ低減ガイドラインを
改定(2020年3月)

ラージコンステレーション計画に対応するためデブリ低減ガイドラインの改定がホットトピック
(衛星群が大量投入される時代にいか軌道環境を保全するか=Mitigation)

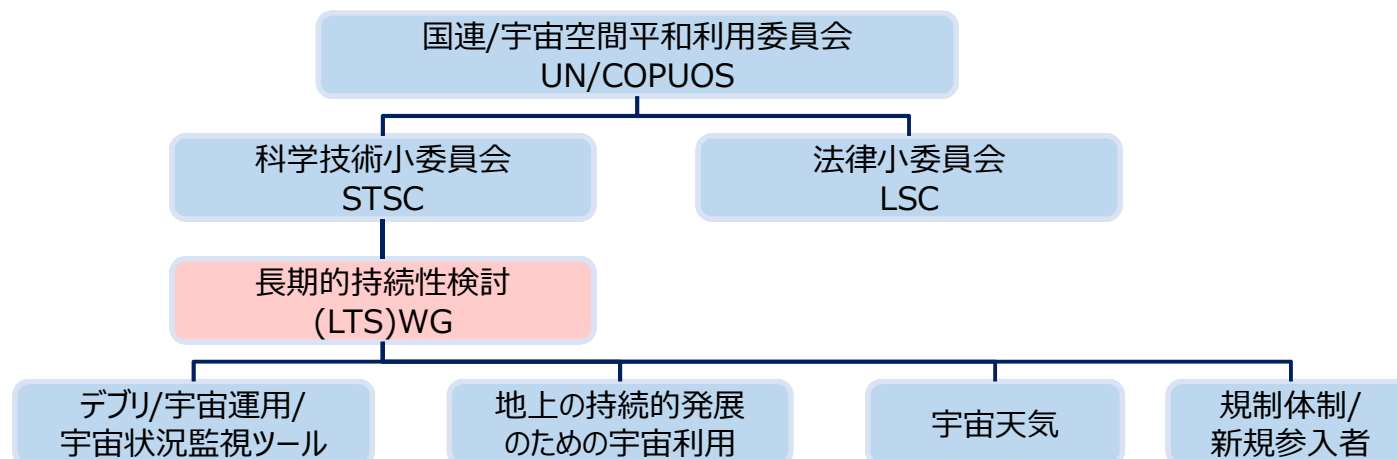
UN/COPUOS (COPUOS : Committee on the Peaceful Uses of Outer Space、宇宙空間平和利用委員会 (国連常設委員会))

➤ 概要

- ✓ 宇宙活動の研究援助・情報交換、法および原則の確立等の検討を目的とした国連委員会。
- ✓ 2つの小委員会(科学技術小委員会/法律小委員会)で構成され、**決定は絶対的コンセンサス**で行われる。
- ✓ 日本からは外務省が代表機関として参加。近年は、LTSガイドライン制定に向けた議論がメインピック。

➤ 長期的持続性ガイドライン (LTS)

- ✓ 宇宙活動の長期的持続可能性についてのガイドラインを作成することを目指し2010年に交渉を開始。
(第40回宇宙産業・科学技術基盤部会 外務省資料より)
- ✓ **21個のガイドラインについては合意が得られたが、7個のガイドラインについては合意が得られず**、2018年6月にWGのマンデート満了に伴い交渉が終了した。
- ✓ **COPUOS本委員会として21個のLTSガイドラインを正式に採択することが決定**された。
- ✓ 採択された21個のガイドラインは、**宇宙ごみ低減や宇宙物体の安全を含む宇宙活動の長期持続可能な利用を目的とした、加盟国が自主的に実施すべきグッドプラクティス**として一致したもの。



ISO 24113:2019 Space systems - Space debris mitigation requirementsにおける新たな規制項目

(既存の規制項目は省略) Evolution of ISO's Space Debris Mitigation Standards (IOC 2019発表論文)より引用

1. 地球周回軌道での破砕の防止

- GEOの宇宙機は衝突回避マヌーバ機能を持つこと
- 衝突回避マヌーバ機能を持つ宇宙機は運用終了まで衝突リスクを管理すること。そのリスクが一定値を上回った場合、衝突回避マヌーバを実施すること
- 運用終了までに宇宙機がデブリ・メテオロイドの衝突により破砕するリスクを評価すること

2. 運用終了後の宇宙機とロケット軌道投入段の保護軌道域からの除去

- 廃棄成功確率 > 0.9 (条件無し確率)
- 廃棄に必要な機能がデブリ・メテオロイドの衝突により破砕するリスクを評価すること
- 宇宙機とロケット軌道投入段のLEOにおける軌道寿命 < 25 年であること。カウントの開始は
 - a) 衝突回避マヌーバ能力が無い場合、軌道投入時
 - b) 衝突回避マヌーバ能力が有る場合、ミッション終了時
 - c) LEOの外で運用する場合、LEO干涉開始点
- LEOからの除去は、回収、制御再突入、自然落下、自発的な軌道寿命の短縮により行うこと

3. 地球に再突入する物体の人的被害のリスクの制御

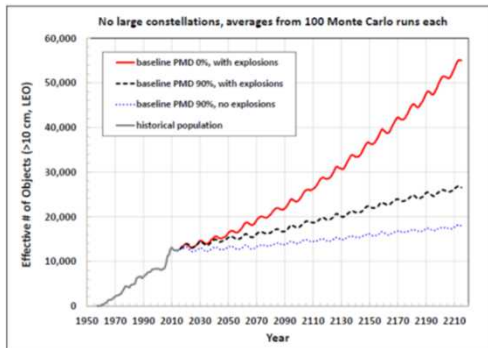
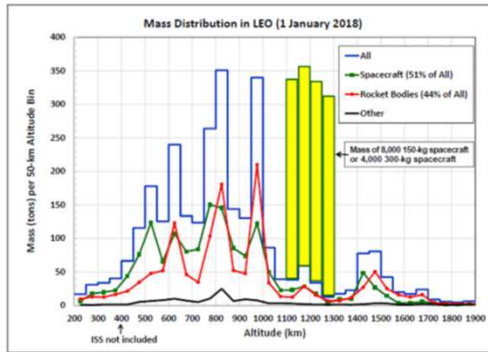
- 再突入リスクは各国承認機関の定める閾値よりも低くすること。(注記: 一般的に 10^{-4} の閾値が使われる)

4. 正常運用時の地球周回軌道へのスペースデブリの意図的放出の制限

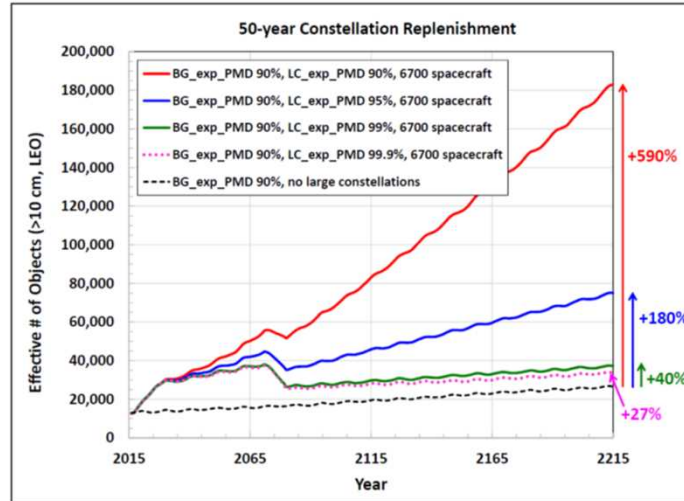
- 単一宇宙機打上げのロケットに対する放出は1つまで、複数宇宙機打上げの場合は2つまで
- LEO、GEO保護軌道域に1mm以上の固体ロケットモータスラグの排出を制限

□ NASAは“Orbital Debris Quarterly News”^{※1}でデブリ推移予測の解析結果を公表

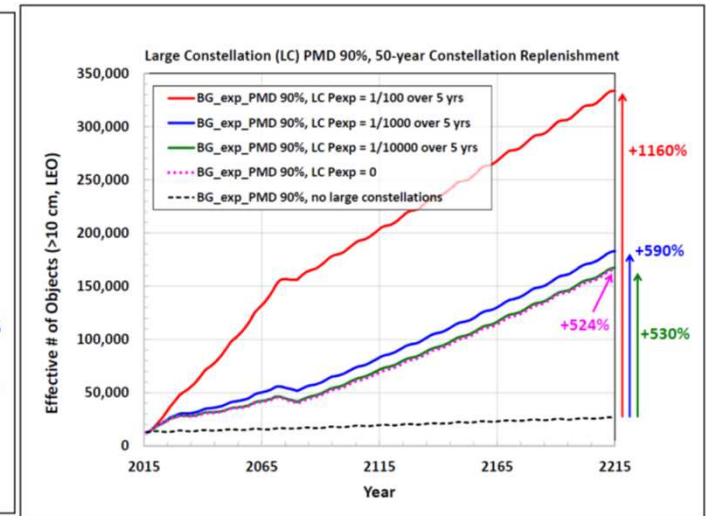
- ラージコンステレーション(LC)の影響を予測：高度1100～1300kmに150kgの衛星で構成されるコンステレーションと300kgの衛星で構成されるコンステレーションで合計8,300機の衛星が投入された場合のインパクトを予測(左上図)
- 衛星は500kmで展開され、所定の軌道に上昇、運用期間5年とした後、5年（25年ではない）で自然落下する軌道まで降下し、新たな衛星に置き換える運用シナリオ。爆発等の自己破砕率は5年間で1/1000とし、40J/g^{※2}の衝突が起こった場合に、衛星は完全破壊されるものと仮定。



コンステレーションがない場合の推移予測
PMD90%（黒破線）を基準



コンステレーションが50年運用された場合
(PMD99%以上（緑）で基準と同程度)
PMD90%では衝突回数は平均年3回起こる予測



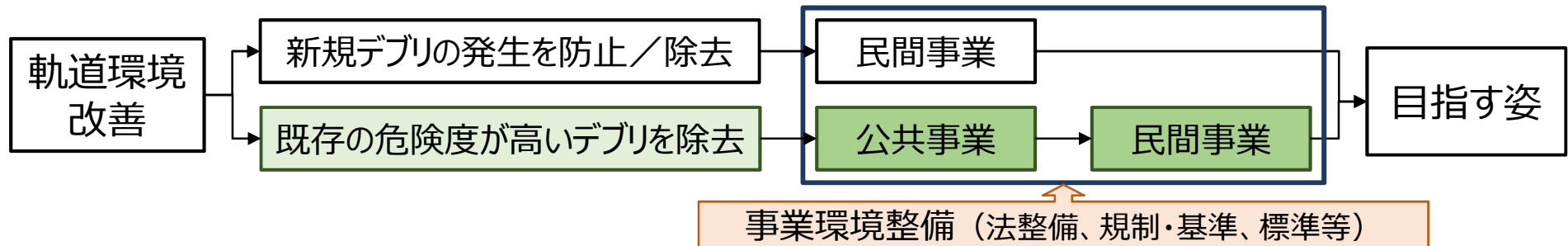
破砕率を変えた場合の結果
(破砕率1/1000以下が求められる)

- デブリは衝突もしくは自己破砕で増加する。
- 衝突を防ぐにはPMD成功率を上げる必要があり、LCに対しては90%では低い。
- 自己破砕率が高いと運用期間中にデブリが急増する（母数が多いため）

※1 J.-C. LIOU et.al, “NASA ODPO’s Large Constellation Study”, Orbital Debris Quarterly News, Vol.22, Issue 3, September 2018

※2 300kgの衛星相手に10km/sで衝突するなら、240gのデブリ、5km/sなら1kgのデブリ相当。（直径10cmのデブリは純粋アルミの球なら2kg）

目指す姿：「デブリ除去を新規宇宙事業として拓き、民間事業者が新たな市場を獲得する」



	第4期中長期計画 (～2024)	次期中長期計画以降
民間事業	民間事業者が独自に進める事業	
事業環境整備 (法整備、規制・規準、標準等)	IADC、COPUOS、ISO、WEF等	
アンカーテナンシー	フェーズI	フェーズII 民間事業 既存デブリ除去事業等
世界初の デブリ除去技術実証	キー技術実証	世界初のデブリ除去
JAXAの研究開発	常に一步先の研究開発を進め、事業者の要望に応じて技術移転を行う	