

今後の環境省におけるスペースデブリ問題に関する取組について 中間とりまとめ

スペースデブリ問題に関する環境省内検討チーム

1. 環境省が本件に取り組むこととなった趣旨、背景

(1) 趣旨

2009年から行っているGOSATシリーズによる温室効果ガスの観測は、パリ協定の目標達成に向けた進捗管理に必要ないわば国際公共財であり、国際的にも高く評価され、観測継続が期待されている。

また、2020年6月に閣議決定された宇宙基本計画においても、宇宙システムは社会を支えるインフラとしてその重要性を増していること、そしてその広域的な機能を、エネルギー、気候変動、環境、食糧、公衆衛生、大規模自然災害等の地球規模課題の解決や国連の持続可能な開発目標（SDGs）の達成に活用することの重要性が示されたところ。

しかしながら、近年のスペースデブリの増加は、宇宙空間を継続的に安定利用する上で大きな懸念事項になっており、宇宙基本計画に、スペースデブリ対策として政府衛星の運用終了後の廃棄措置等必要な措置を講ずる旨も記載されている。

環境省は、GOSATシリーズによる温室効果ガス観測の事業主体として、適切な運用と適正な処分の責任を持ち、自ら適正な処分を実施することが望ましいと考えている。

まずはその第一歩として、打ち上げから11年を経過したGOSAT1号機のスペースデブリ化の防止と宇宙空間の持続的かつ安定的な利用の確保に向けた知見集積・情報発信に向け、2020年3月に省内に検討チームを立ち上げ、宇宙航空研究開発機構（JAXA）をはじめ関係機関の協力を得つつ対応策を検討することとした。

(2) スペースデブリ問題の現状、脅威

スペースデブリとは、軌道上にある不要な人工物体の総称とされ、具体的には、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される部品、爆発・衝突により発生した破片、固体ロケットモータのスラグ（燃えカス）などが挙げられる。

軌道上物体の数は年々増加しており、特に21世紀に入り破壊実験や衝突により急増。現在、地上から観測できる（およそ10cm以上の）軌道上物体の数は約23000個あり、うち運用中の衛星はわずか6%、残りはデブリと考えられる。

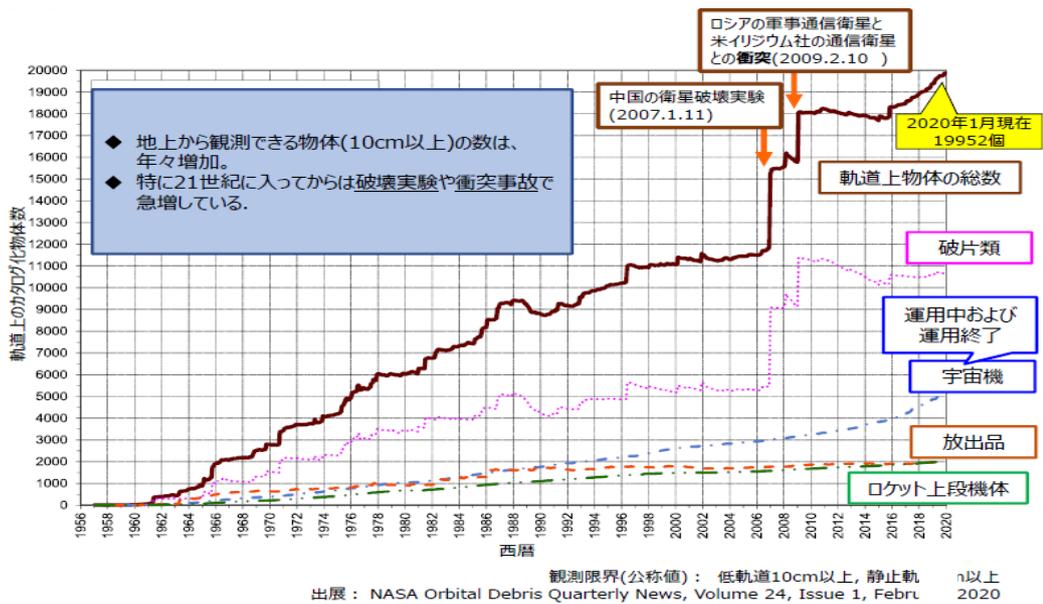


図1 米国が地上監視データから公表している軌道上物体の数

さらに、小型・超小型衛星などを用いた大規模コンステレーション等を含む民間企業による打上げも活発になっていることから、運用終了後の衛星等に対し適切な廃棄措置を執らなければ、低軌道域は更に混雑し、デブリの数も増加し続けることが予測されている。

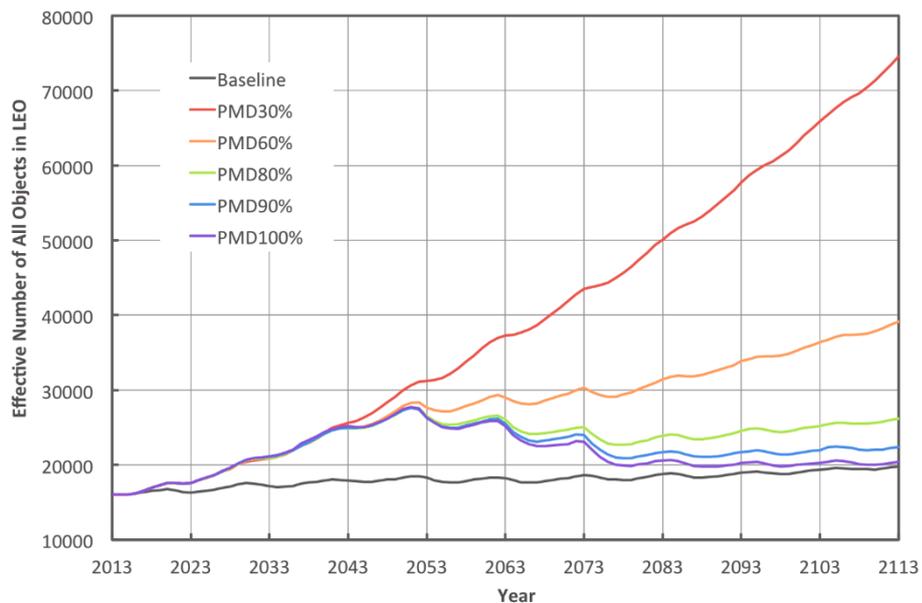


図2 低軌道域における運用終了後の廃棄成功確率毎のデブリ数予測

(資料) JAXA

増加し続けることが予測されているスペースデブリにより、GOSAT1号機は11年半

の運用期間中、衝突回避行動を1回実施した。また2018年10月に打ち上げたGOSAT2号機は約2年で衝突回避行動を2回行っている。

(3) 国内外の取組の現状と課題

(国際的な取組)

スペースデブリ対策については、スペースデブリに係る研究者の情報交換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である**国際宇宙機関間スペースデブリ調整委員会**(IADC: Inter-Agency Debris Coordination Committee)で検討されてきており、2002年に**IADCスペースデブリ低減ガイドライン**が制定された。これを踏まえ、宇宙活動の研究援助・情報交換、法及び原則の確立等の検討を目的とした**国連COPUOS**(Committee on the Peaceful Uses of Outer Space)で議論が進められ、2007年に**国連COPUOSスペースデブリ低減ガイドライン**が策定されている。その中に、スペースデブリの低減に向けたIADCガイドライン最新版を参照することが規定された。

COPUOSスペースデブリ低減ガイドラインでは、

- ・運用段階で放出されるデブリの制限、破砕の可能性の最小化、偶発的軌道上衝突確率の制限、意図的破壊活動とその他の危険な活動の回避、
 - ・ミッション終了後での破壊の可能性の最小化、低軌道域に長期的に留まることの制限、ミッション終了後に地球同期軌道域に長期的に留まることの制限
- が求められている。

これらのガイドラインは、新規に打ち上げを行う衛星を対象としていること、法的拘束力はなく対応は各国の自主的な取組に依拠しているため、新規参入事業者も含めた理解の促進や国際的な協調を推進していくことが重要である。

また、国際標準化機構では、2010年に衛星に対するISO-24113スペースデブリ低減要求を策定するとともに、2019年には運用中の要求を新たに盛り込むなどの改定が行われた。

(国内の取組)

我が国では、人工衛星等の打ち上げ及び人工衛星の管理に関する法律（通称：宇宙活動法、平成 28 年法律第 76 号）に、今後打ち上げを行う人工衛星に対するデブリ防止対策を規定しており、国際ルールを遵守する国内規範を既に保持している。

具体的には、人工衛星等の打ち上げの許可条件及び打ち上げロケットの形式認定の要件に軌道上デブリ発生抑制、ロケット軌道投入段の保護領域からの除去が含まれている。また人工衛星の管理許可条件に、人工衛星の構造、管理計画、終了措置それぞれにデブリ発生抑制措置が含まれている。

以上のようなデブリ対策が国内外で講じられている一方、既存運用中衛星に対するデブリ防止のための運用及び運用継続の可否の判断等について具体化された規制はなく、個々の運用主体の判断に委ねられている。

2. GOSAT 1 号機に対する取組の方向性

GOSAT 1 号機は、主な温室効果ガスである二酸化炭素とメタンの全球分布の把握や、二酸化炭素の発生源と吸収源を亜大陸規模で推定することをミッションとした、世界初の温室効果ガス観測専用衛星として 2009 年に打ち上げられた。設計寿命を 2014 年に迎えた後も、温室効果ガスの増加による地球温暖化のリスクを算出・予測する上で、地球全体の温室効果ガスの平均濃度の算出等が重要であることから観測運用を継続してきた。現在では温室効果ガス観測において世界で最も長く観測を行っている衛星となった。また、2018 年には、後継機として GOSAT2 号機を打ち上げ、2019 年 2 月より定常運用を行っている。

GOSAT 1 号機と同レベルで、信頼性（検証）が確保され、かつ、オープンで長期間の観測データを提供している温室効果ガス観測衛星は、二酸化炭素に限っては米国の OCO-2 衛星、メタンの観測に限っては欧州の Sentinel-5P 衛星搭載 TROPOMI センサに限定されている。このため、世界のサイエンスコミュニティにおいて、GOSAT1 号機の GHG 観測データの価値・希少性は極めて高いといえる。さらに、近年の気候危機といわれる異常気象の頻発などから、サイエンスだけではなく、政治・行政・市民の分野を含めて、こうした GHG 観測データの存在価値が高まっていると考えられる。

このようなことから、GOSAT 1 号機のスペースデブリ化防止の検討においては、GOSAT シリーズとして長期間に亘って観測を継続していくことを踏まえながら、1 号機に対するスペースデブリ化防止対策に加え、1 号機と同等以上の機能を GOSAT2 号機において速やかに確保して 1 号機から 2 号機へ移行できるようにすることが重要となる。

なお GOSAT 1 号機については、宇宙活動法施行前の打ち上げ物体であり適用外であるが、最新の国内外の法規制・ガイドラインを準用して率先的な対応を検討する。

以上を踏まえ、GOSAT 1 号機に対するスペースデブリ化防止対策を以下の視点で整理する。

(1) スペースデブリ化防止のために対処すべき事項

- ・ スペースデブリの増加を抑制するためには、
 - ① 正常運用時の物体放出
 - ② 軌道上での自己破砕
 - 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砕

といった事象の発生を防止する必要がある。GOSAT1 号機には意図的に放出する物体がないことから、スペースデブリ低減には、IADC スペースデブリガイドライン及び ISO-24113 の要求事項を参照すれば、②から④に係る対応が今後必要と考えられる。これらの対応を温室効果ガスの観測運用を継続している期間（観測運用期間）及び観測運用を終了し衛星処分するまでの期間（廃棄運用期間）に分けて整理する。

観測運用期間では、軌道上での自己破砕防止のために人工衛星の状態を定常的に監視し、破砕の原因となる推進系の異常等が確認された場合には、地上からの制御で破砕の危険を回避することが求められており、GOSAT1 号機では対応している。また、軌道上における衝突による破砕を防ぐためには、地上で軌道を把握できる物体との接近を監視し、衝突の危険性が高いと判断される場合には衛星の軌道を能動的に変更すること（回避行動）により対応している状況である。

観測運用終了後については、残留エネルギーによる破砕を防止することが必要である。そのため、残推薬の排出やバッテリー充電回路の遮断を行う機能を備えている。また、低軌道保護域の物体数を抑制する観点から、観測運用終了後、25 年以内に大気圏に再突入する軌道まで衛星を移動すること、その成功確率を 90%以上に保持することが望ましい。これまでは廃棄運用期間の信頼度だけを評価していたが、2019 年の ISO-24113 の改定で、運用開始からの信頼度低下も考慮の上、運用中の衛星についても適切に寿命管理等を行うことが求められるようになった。特に運用終了時の対応が重要であることから（3）において詳細を整理する。

(2) GOSAT 1号機 運用終了判断の観点 (案)

GOSAT 1号機は 2009 年に打ち上げられ、2014 年にはミッション要求を達成した後、後継機へのミッション移行状況を見据えて観測運用を継続し現在に至っている。当面は衛星機器の健全性を評価しつつ、運用を継続する考えであった。

これまでの衛星においては、ミッション達成後に積極的に処分することは行っておらず、GOSAT と同様、衛星の健全性を評価し運用継続を判断してきたものの、軌道上で想定できない不具合が発生し、運用が停止され、スペースデブリとして滞留してしまっている衛星もある。

このような状況を踏まえ、GOSAT1 号機がスペースデブリとして滞留することが無いよう、以下の観点から運用継続の判断の考え方を新たに設けることを目指す。

A) GOSAT 観測ミッションの継続性

(GOSAT1 号機プロダクトから GOSAT 2号機プロダクトへの移行可否判断)

GOSAT 1号機が観測運用を継続する必要があるかどうかを判断することが必要である。GOSAT 1号機の 5 年の観測運用期間内に温室効果ガスの全球濃度分布の測定を高精度に行う等のミッションは、達成されている。一方温室効果ガスの濃度を継続的に監視していくことが国際的な温暖化対策推進の観点から非常に重要である。そこで、後継機として 2018 年に打ち上げた GOSAT2 号機に温室効果ガス濃度の観測のミッションを引き継ぐことでその役割を終えることができると考える。現在国立環境研究所 (NIES) では、当該ミッション継続性の確認作業を行っているところから、この状況を踏まえ判断することが必要と考える。

B) 衛星の健全性 (廃棄措置に必要な機能の確保)

衛星の健全性評価については、環境省・NIES・JAXA の三者協定である「温室効果ガス観測センサの開発・利用に関する協定」に基づき JAXA が担っているところであるが、GOSAT1 号機は従前の JAXA ルール (NASDA1996) に基づき設計時の信頼度は定められていたが、11 年以上運用している現状での廃棄措置に必要な機能に係る信頼度を評価するルールがなかった。

現在 JAXA では、最新の国際ルールである ISO24113 の 2019 版の改定に伴うスペースデブリ発生防止標準 (JMR-003) の見直しを行っており、それに基づき GOSAT1 号機の評価を試みることにする。

なお、後継機である GOSAT2 号機についても、設計寿命 5 年で設計されており、2023 年 11 月には寿命を迎えることから、同等の健全性評価が望ましいと考える。

(廃棄措置に必要な機能の残寿命評価及び健全性)

- ① 廃棄マヌーバ用資源の管理
廃棄マヌーバに必要な残推薬量が確保できていること
- ② 廃棄措置に用いる作動寿命品目の残寿命評価
寿命管理部品のうち、寿命を超える部品がないこと
- ③ 廃棄措置に必要な機器の健全性の評価と緊急時対応
廃棄措置に必要な機能について経年劣化要素によりリミット値を超えるものがないこと。年度初めを信頼度の起点とし廃棄措置に必要な機能の条件付き信頼度が0.9を切らないこと

JAXAでは、以下の図3のとおり、廃棄措置の対応手順を今般とりまとめたところであり、GOSAT 1号機への対応状況も整理されている。

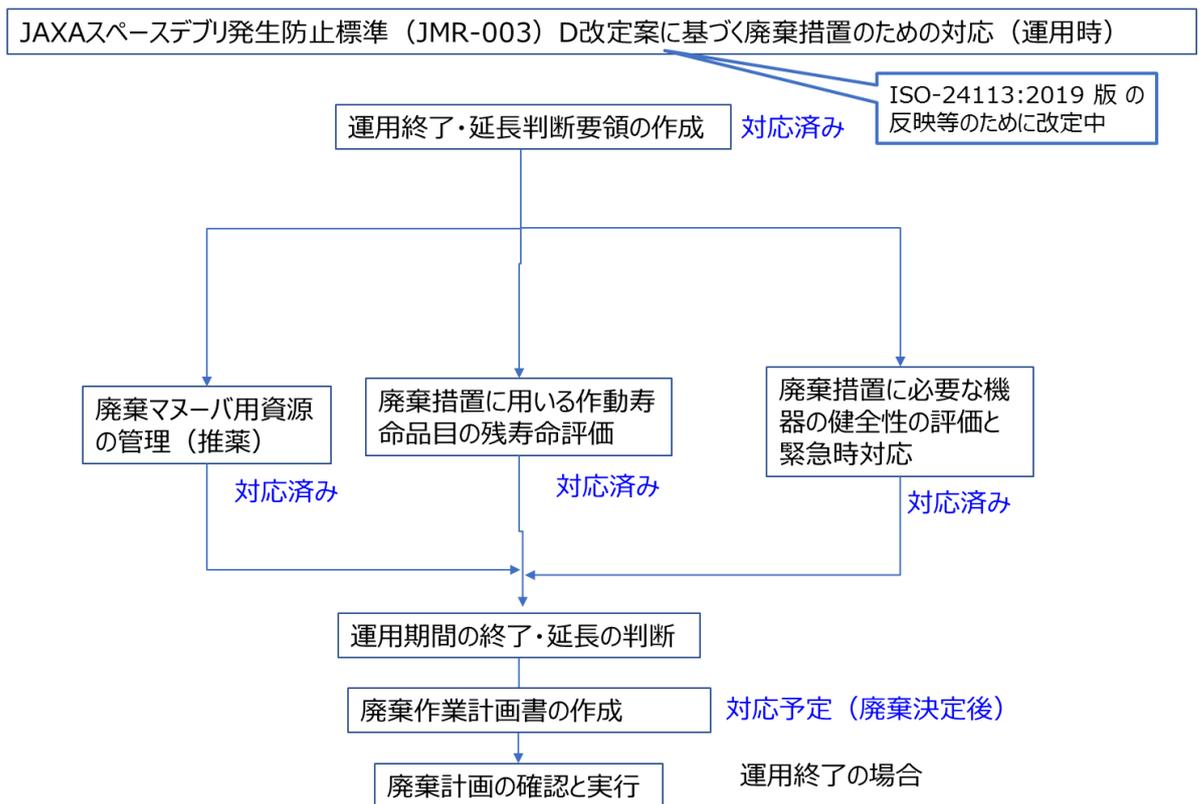


図3 GOSAT 運用継続判断指標

(資料) JAXA

(3) 処分方法

低軌道衛星の処分方法としては、ISO-24113 を参照し、現在の技術開発状況及び設計時に措置されていた GOSAT 1 号機の機能等を勘案し、以下の対応を行うことが望ましい。

- ① 衛星を制御して大気圏に突入させる
- ② 25 年以内に自然落下する軌道に降下して廃棄

②に関しては、GOSAT 初号機の設計時に想定された処分方法であり、今後の取組として現状の高度 666 km から 25 年以内に自然落下する高度 600km 程度以下の軌道に降下させることが考えられるが、適切に運用しなければ他の物体に衝突する可能性は否定できない。新たにデブリを生じさせないという観点からは、①の大気圏突入による処分が望ましいと考えられる一方、設計時に想定していない処分方法であるため GOSAT 初号機が技術的に対応可能か検討が求められるところである。なお、地球低軌道にいる国内の地球観測衛星においては、衛星を廃棄するために制御して大気圏に突入させた事例は現時点ではない。

(4) ステークホルダーとの意見交換

GOSAT 1 号機は 1 (1) で述べた通り、パリ協定の目標達成に向けた進捗管理に必要ないわば国際公共財であり、国際的にも高く評価され、観測継続が期待されている。アメリカ航空宇宙局(NASA)、欧州宇宙機関(ESA)、フランス国立宇宙研究センター(CNES)、ドイツ航空宇宙センター(DLR)など多くの機関と相互協定を締結して共同研究も進められており、運用継続判断指標の検討に際しては、こうしたステークホルダーとも十分に議論を重ね、地球観測の継続性と宇宙の持続可能な利用方法の確立の必要性について理解を醸成していくことが重要である。

ステークホルダーとの意見交換に当たり、留意すべき論点は以下のとおり。

1) 接続可能な地球観測

- ・ 各国協調によるスペースデブリ問題への対応必要性

2) 運用継続判断根拠

- ① GOSAT1 号機プロダクトから GOSAT 2 号機プロダクトへの移行可否判断
- ② GOSAT1 号機の健全性と継続運用リスク判断
- ③ GOSAT2 号機の健全性 (設計寿命 5 年)

3. 今後の取組の方向性

(1) GOSAT 1号機への対応

2(2)の判断の観点に沿ってGOSAT 1号機の状態監視を続ける。現在のところ、今後1, 2年の間は2(1)に示す処分方法を用いた廃棄措置が必要な状況ではなく運用継続して問題がないことがJAXAにより確認できている。しかしながら、廃棄措置に必要な機能の条件付き信頼度が90%を超えていても想定外の不具合発生に伴う通信途絶による突然のデブリ化のリスクは否定できない。

GOSAT 1号機プロダクトからGOSAT2号機プロダクトへの移行ができることを判断した上で、ステークホルダーの理解を得つつ、適切なタイミングで廃棄処分に移る。

GOSAT 1号機の運用終了に際しては、2(3)で整理した処分方法に加え、デブリ監視・除去技術開発への活用の可能性についても検討する。例えば、燃料(推進薬)の残量が十分かつ健全性を確保されていることを条件に、宇宙状況把握の供試体として例えば、軌道上のデブリ観測や低軌道データの取得等に利活用することも有効であると考えられる。

今回の取りまとめでは、新規に打ち上げを行う衛星を対象としている最新の国際標準規格ISO-24113(2019)に準じてGOSAT1号機を評価し検討したこと、スペースデブリを新たに発生させないためにミッション終了後の衛星の積極的な処分を検討したことが新しい取り組みといえる。今後、国内外のステークホルダーとの意見交換を進め、合意形成を図っていくとともに、方針決定にあたってはGOSATプロジェクトの共同実施者であるNIES、JAXAと協議を行っていく。

また、今回整理した内容及びGOSAT 1号機における経験を国内外にも広く情報発信し、民間を含めた各事業主体における自主的取組の参考となるよう、また国内外のスペースデブリ化防止に向けた取組や施策検討の機運の向上に貢献する。

(2) 近い将来を見据えた対応

GOSAT 2号機運用についても1号機同様の管理を進めていく。また、2号機のデブリ防止化対策設計を踏襲し開発を行っている3号機(GOSAT-GW)に関しては運用継続判断を含む設計の妥当性を確認するとともに、1号機での本議論を踏まえ、具体的にどういった配慮が採りえるかを今後検討していく。

また、今後期待される動きとして、デブリ除去及び軌道上での修理・燃料補給などの軌道上サービスが実現すれば、衛星寿命延伸や廃棄衛星再利用といった形でスペースデブリ

の発生抑制、再利用・再生利用、適正処理に大きく道が拓けることとなる。我が国企業でこれに取り組む動きもみられるところ、関係機関とともに今後の動向を注視し、官民連携の上国際的な情報発信、イノベーションの促進に取り組むことが望まれる。