

SSA・STMに関する調査検討－概要

(スペースポリシー委員会)

(一社)日本航空宇宙工業会(以下、SJAC)では、平成14年度(2002年度)より「スペースポリシー委員会」を設置し、我が国の宇宙政策のあり方、諸問題の解決策について調査検討を行ってきた。

近年、宇宙空間のデブリが増加している。また地球低軌道に大規模衛星群を配置して通信などに利用する計画(メガコンステレーション計画)が発表されており、宇宙空間の物体数が飛躍的に増える恐れがある。宇宙空間を安定的に利用するためにはSSA・STM(Space Situational Awareness・Space Traffic Management:宇宙状況把握・宇宙交通管理)の状況を理解しておく必要があると考えられることから、令和元年度(2019年度)のSJACスペースポリシー委員会では、「SSA・STMに関する調査検討」を行うこととした。以下、活動結果の概要を報告する。

1. 宇宙空間物体数の増加

NASAの資料(図1)によれば高度200kmから50,000kmの宇宙空間に存在する10cm以上の物体数は年々増加している。

宇宙空間の物体数が増加している原因として、①人工衛星打上げ数の増加、②人工衛星等の破裂(Break-up)、③人工衛星攻撃兵器(ASAT:Anti-Satellite Weapon)による破壊実験、④人工衛星同士の衝突が挙げられる。

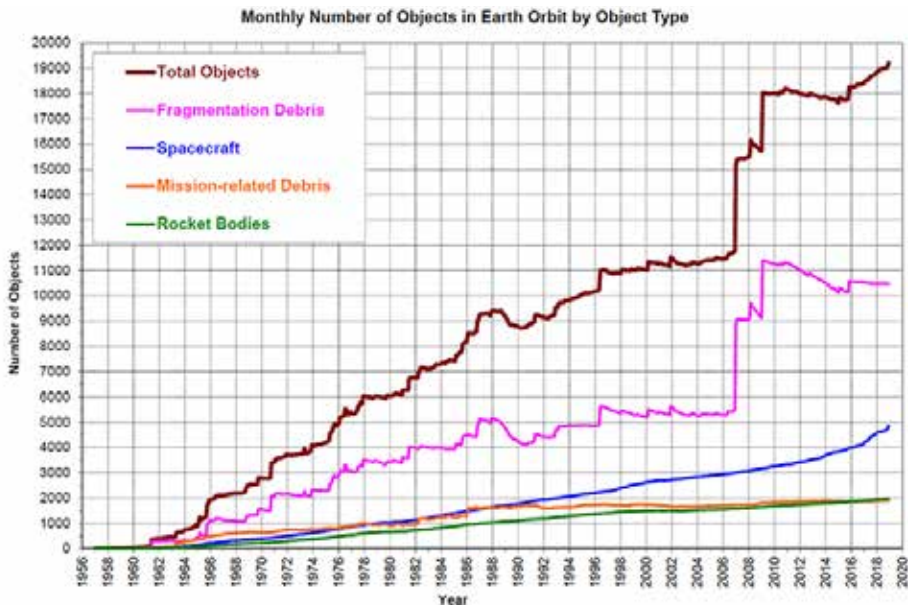


図1：宇宙空間の物体数(10cm以上)の推移(1957年～2019年)(出典*1)

図1の2007年の物体数急上昇は中国のASAT実験によるデブリ発生が原因で、2009年の物体数急上昇はイリジウム衛星とCOSMOS衛星の衛星同士の衝突によるデブリ発生が原因である。

① 打上げ数の増加

図2に示す通り、2013年以降、毎年200機を超える人工衛星等が打上げられている。これは、CubeSatを含む小型衛星の同時打上げ（相

乗り打上）が増加しているためである。また、第2項に示すメガコンステレーションの計画が進めば、さらに打上げ機数が増加すると考えられる。

② Break-upの発生

図3に示す通り、1年に数回、人工衛星やロケット上段の破裂事象（Break-up）が発生している。

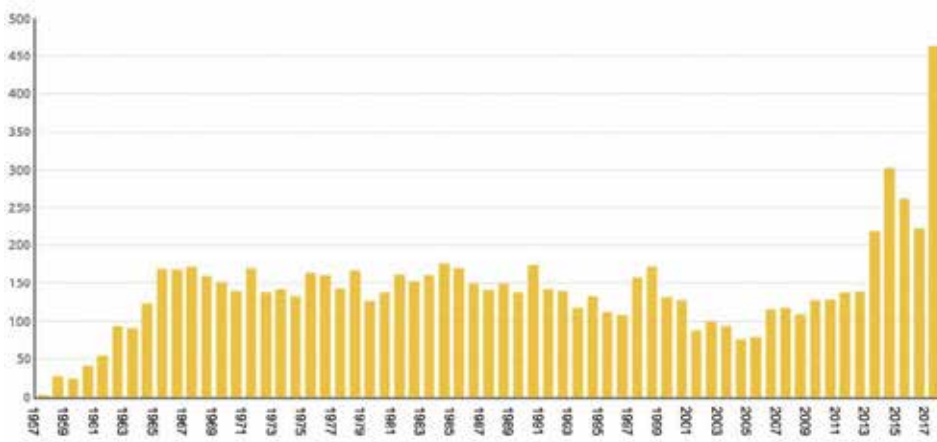


図2：人工衛星等の打上げ推移（1957年～2017年）（出典*2）

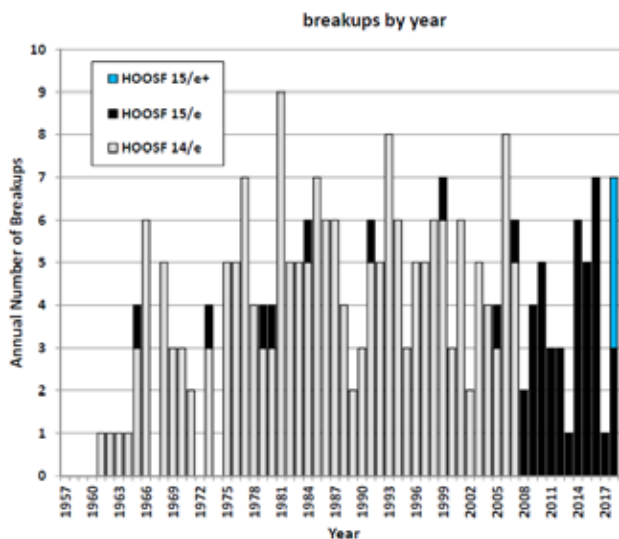


図3：人工衛星等の破裂事象（Break-up）（1961年～2018年）（出典*3）

我が国に関連する事象として、2016年5月にはASTRO-H（ひとみ）がBreak-upして、破片が13個発生している。また、2018年2月にはH2Aロケットの第2段がBreak-upして、破片が7個発生している。

③ASAT実験

2007年1月の中国によるASAT実験では、高度約800kmを周回する自国の気象衛星「風雲1号C（Fengyun-1C）」が破壊され、3,400個以上の破片（10cm以上）が発生したことが観測されている。破片が90%減少するのは2090年頃とされている。なお、1cm以上の破片は15万個以上発生したと推定されている。

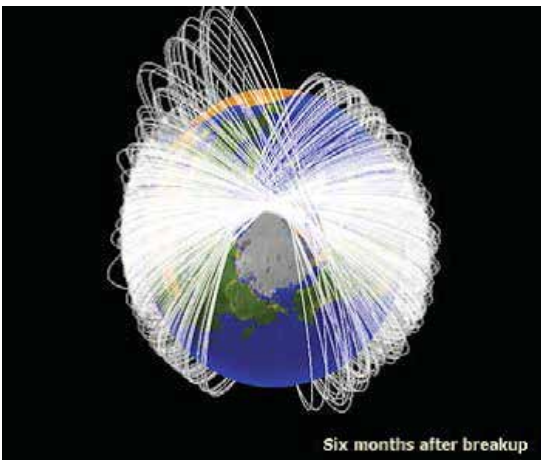
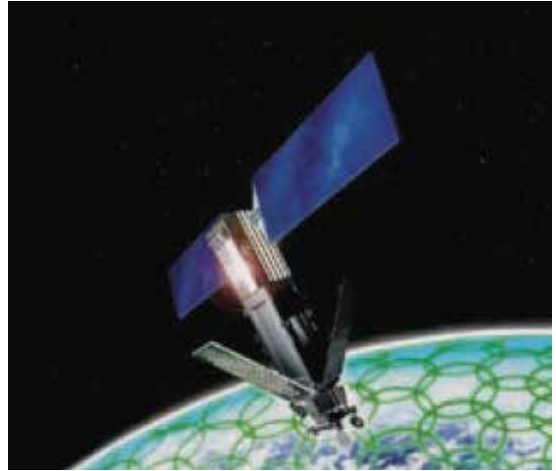


図4：風雲1号Cのデブリ雲の拡散状況（6か月後）（出典*4）

④人工衛星同士の衝突

2009年2月、米国イリジウム 33衛星（衛星電話サービス）とロシアのCOSMOS 2251衛星（運用停止済み）が高度790kmで衝突した。両衛星は、ほぼ直角に衝突し、イリジウムからは破片600個以上、COSMOSからは破片1,600個以上が発生した。破片が90%減少するのはそれぞれ2035年頃、2054年頃とされている。

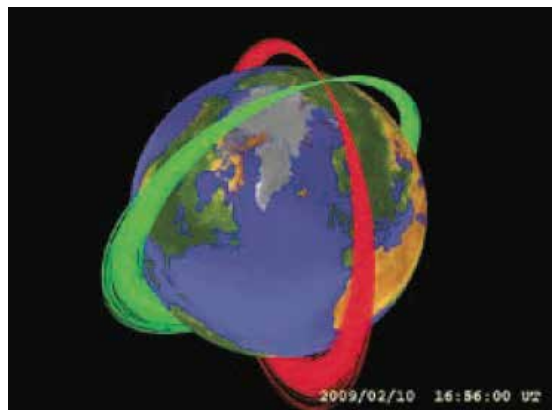


図5：（上）イリジウム衛星、（中）COSMOS 2251衛星、（下）衝突で発生したデブリの軌道（出典*5）

2. メガコンステレーション計画

低軌道に数多くの衛星を配置し、地球全域で高速通信網を構築するメガコンステレーション計画が公表されている。下表に代表的な計画を示す。実現すれば宇宙物体数が飛躍的に増大する可能性がある。表中の衛星機数は運用機数である。仮に衛星寿命が5年であれば、5年毎に続々と次世代衛星を打上げな

ければならない。運用終了から大気圏再突入まで（PMD：Post Mission Disposal）に25年を要するとすれば、運用終了した衛星は運用中の衛星の5倍の数が宇宙空間に留まることになる。これを避けるには、衛星寿命を長くする（例：5年⇒10年）、PMDの期間を短くする（例：25年⇒5年）などが必要となってくる。

表1：メガコンステレーション計画

名称	計画機数	備考（6/13時点、打上済機数）
OneWeb社	高度1,200km 約900機	2020年3月21日に34機打上げて、合計70機。 しかし、2020年3月27日、Chapter-11（破産）入り。
SpaceX社 StarLink	高度350km～1,200km 41,943機	2020年6月13日に58機打上げて、合計540機。
Amazon社 Project Kuiper	高度590km～630km 3,236機	現時点での打上げ0機。

3. 米国のSSA観測体制

米国ではSSA観測体制が整備されている。10cm以上の物体は地上のレーダにより観測されており、軌道が特定され、カタログ化され

ている。それより小さな1cm、1mm、0.1mm等の物体（デブリ）は一部のみが観測されている。高性能な地上のレーダにより、一部（1cm程度）の物体が観測されている。それより

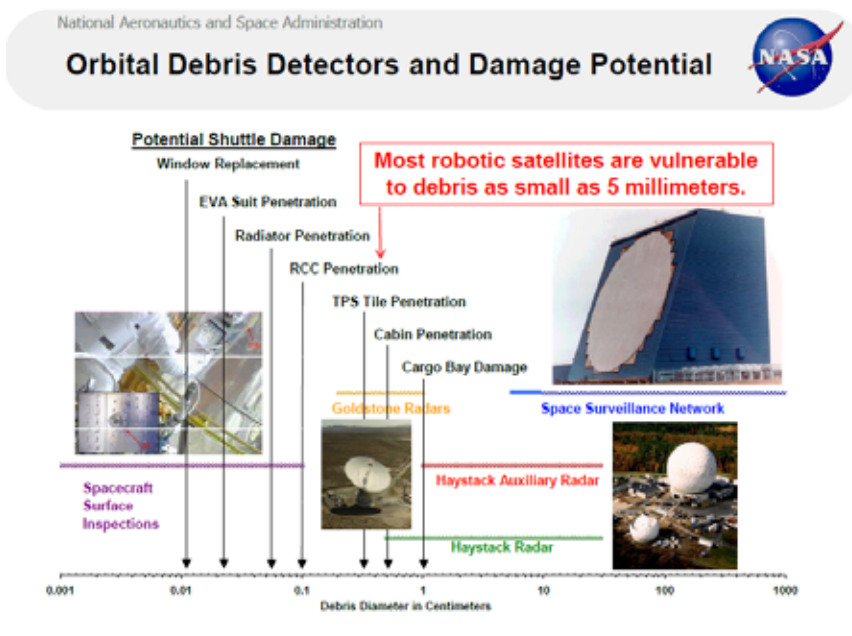


図6：SSAセンサー性能比較（出典*6）

小さな物体は、宇宙空間を飛行した後に地上に戻ったスペースシャトル（STS）や人工衛星（LDEF：Long Duration Exposure Facility 等）にデブリが衝突した痕跡から宇宙空間での存在数が推計されている。

大きさが10cm以上のデブリは2万3千個、1cm～10cmのデブリは約50万個、1mm～1cmのデブリは1億個を超えていると推定されている。

米国のSSAデブリセンサの能力とデブリの大きさによる損傷範囲を図6に示す。スペースシャトルでは、0.1mmのデブリで窓ガラス

交換、0.3mmのデブリで耐熱タイル貫通、などの被害が予想されており、実際にスペースシャトルの多くの耐熱タイルは損傷して交換が行われた。

米国のSSN観測網（図7）は、全世界に約30基のレーダ+望遠鏡、及び宇宙からの観測衛星6機（2019年現在）により観測活動を展開中である。更に、太平洋上のクワジャリン環礁に新たなSpace Fence（宇宙物体検知レーダ：宇宙空間に建てられたフェンスの様に通過する物体を検知する）（図8）が建設されて

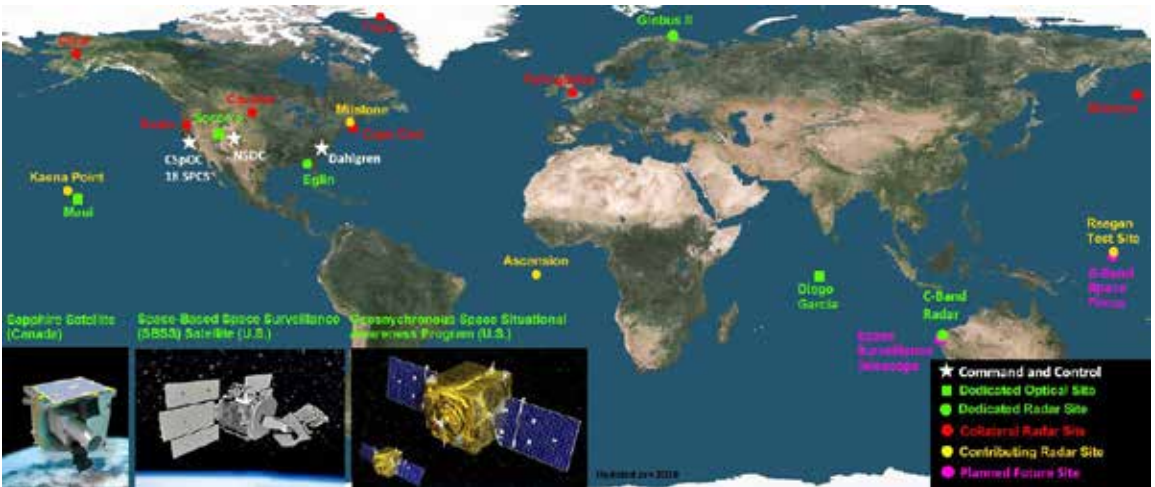


図7：米国宇宙監視ネットワーク（SSN）（出典*7）

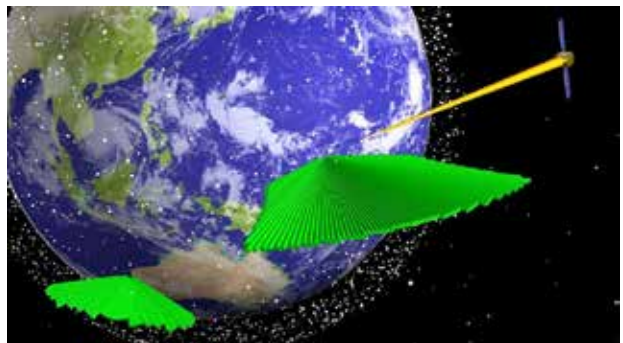


図8：クワジャリン環礁のSpace Fence（出典*8）



図9：オーストラリア西部に移設される光学望遠鏡（Space Surveillance Telescope）（出典*9）

2020年3月に稼働を開始した。Space FenceのSバンドレーダにより2～3cm以上の大きさのデブリ約20万個の物体を検知できるとされている。

また、オーストラリアの西部には米軍の光学望遠鏡（Space Surveillance Telescope：口径3.5m）（図9）の移設（ニューメキシコ州からの移設）が進められており、2022年に稼働開始の予定である。

4. 我が国のSSA観測体制

我が国の現在のSSA体制では宇宙物体（デブリ）の観測は非常に限定的である。このため、JAXAと防衛省では観測体制の強化を図っている。JAXAと防衛省はともに2022年度中に設備強化を終了し、2023年度からの運用を開始する計画である。（図10、11、12、表2）

観測体制強化後には米国へのデータ提供などの情報共有を進めるとされているが、その時点においても我が国のSSA性能は米国と比較して限定的であり、米国への依存が継続する。



図10：JAXAのSSA体制（光学望遠鏡とレーダの配置場所）（出典*10）

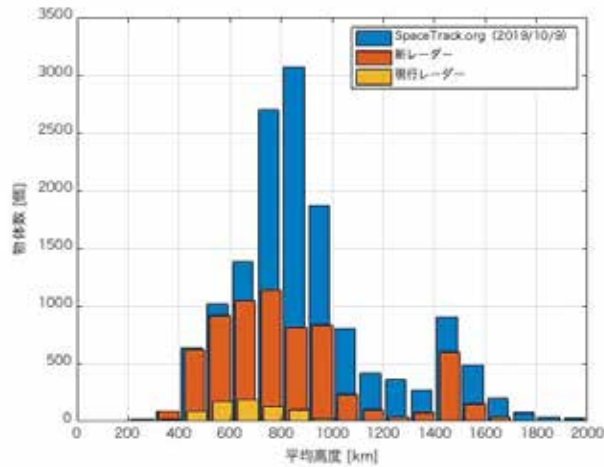


図11：SSAレーダによる低軌道物体の観測性能（高度別の検知物体数）の比較（青色：米国、茶色：JAXA新レーダ、橙色：JAXA現レーダ）（出典*11）

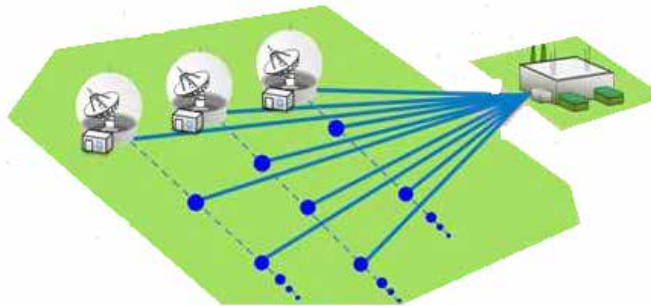


図12：新設される防衛省Deep Space Radar（山口県山陽小野田市）の概念図（出典*12）

表2：SSA観測設備の強化

観測設備	現状	体制強化
JAXA光学望遠鏡 (岡山県)	口径1m望遠鏡 口径50cm望遠鏡	リハービッシュ（修理）
JAXAフェイズド アレイレーダ (岡山県)	1.6m級（高度650km）の物体検知 観測200回/日	10cm級（高度650km）の物体検知 観測10,000回/日
防衛省Deep Space レーダ (山口県)	なし	直径15m～40mのパラボラアンテナ レーダ群による高度5,800km～静止 軌道（36,000km）の物体検知

5. デブリ回避の軌道変更

デブリ衝突の脅威は多くの場所で議論されている。ISS（International Space Station：国際宇宙ステーション）の居住区部分にはデブリダンパが設置されており1cm以下の微小なデ

ブリを防ぐことが出来る。しかし1cm以上の大きなデブリが衝突すると破裂が免れないことから、デブリ接近が予測される場合はISSの軌道を変更している。過去（1999年～2015年）に25回の軌道変更が行われた（図13）。

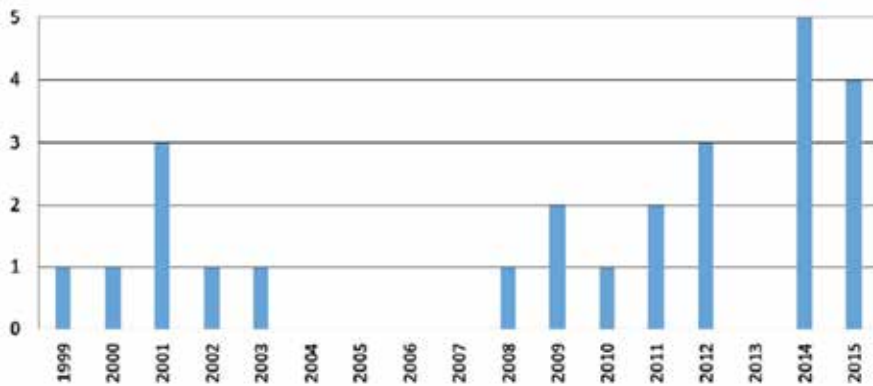


図13：ISSのデブリ回避軌道変更の回数（1999年～2015年）（出典*13）

また、人工衛星についてもデブリが接近する場合は接近予測解析が行われ、デブリ衝突回避の軌道変更が行われている。

6. デブリ低減

地球低軌道では希薄な大気が存在する為、自然に少しずつデブリの高度が低下し、年数が経過すると、最終的に大気圏に再突入してデブリの数が減少する。しかし、大気圏に再突入するまでの年数は、高度600km以下では数年程度、高度800kmでは数十年程度、高度1,000km以上では数百年かかるとされている。

従って、自然落下には時間がかかるため、デブリの数を増やさないために国連がデブリ低減ガイドラインを定め、運用終了後25年以内に衛星を落下させる処置をとることを推奨している。このような運用終了後に人工衛星の軌道を下げて早期に大気圏に再突入させるPMD（Post Mission Disposal）は、現時点では全衛星の10%程度しか実行されていない。NASAが2011年4月に行った解析によれば、今後2011年頃と同程度の打上げが行われた場合、90%のPMDだけでは不十分で、2020年からは大型のデブリ（運用終了後の人工衛星やロケット上段）を年間5個、能動的に再突入

させるADR（Active Debris Removal）が必要と示されている。

図14の①緑色の波線（2020年～2210年）がPMD90%+ADR年5個の場合を示している。その数値は12,000個から14,000個の範囲の変動となっており、2020年の物体数から大幅な増加は抑えられている。但し、この試算は2011年当時の打上げペースを元にしており、その後に活発になった小型衛星の同時複数打上げやメガコンステレーション打上げは試算に反映されていないので注意が必要である。また、①緑色・②青色・③赤色の波線の11年周期の小変動の波は、太陽活動周期による地球大気の膨張の影響を示している。（太陽活動大⇒大気膨張⇒デブリの落下が早まる。）

このADRに関して、各国の宇宙機関も技術開発の取り組みを始めており、民間では我が国のアストロスケール社が開発を行っている。しかし、デブリ除去を実際に行った場合の費用をだれが負担するかが明確では無く、かつ、低コストでデブリ除去を実施する必要があり課題が多い。

なお、静止軌道の衛星では軌道を下げて地

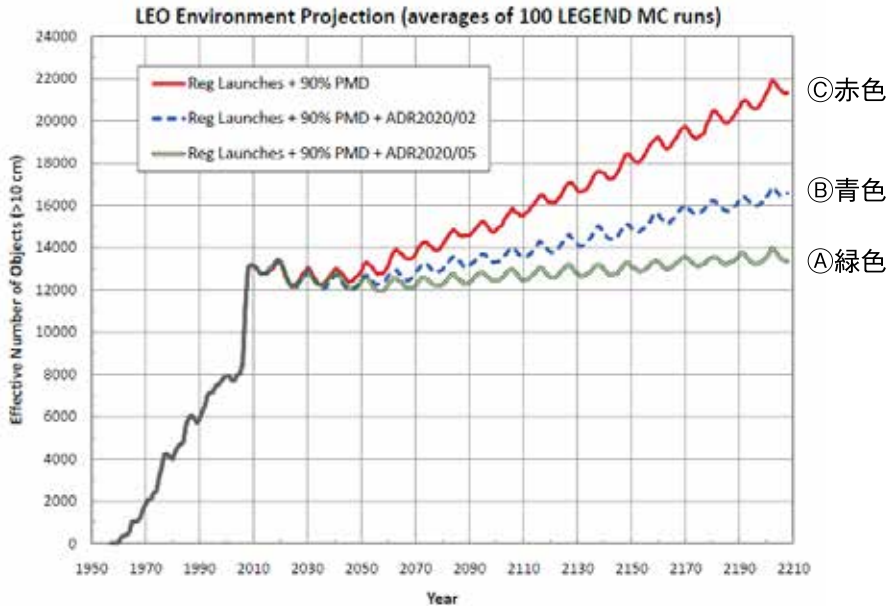


図14：デブリ増加予測（2011年時点）（出典*14）

球大気へ再突入させることは、非常に大きなエネルギーが必要であり困難なため、国連デブリ低減ガイドラインによると、運用終了後の人工衛星は静止軌道の上空（235km以上）に設定される墓場軌道へ高度を上げることを推奨している。

7. STM（Space Traffic Management）

近年、人工衛星の打上げや有人のサブオービタル弾道観光旅行などの宇宙活動が活発化してきており、宇宙空間の物体数が増加してきていることは上述の通りである。そのため航空機に対する航空交通管理に類似する宇宙交通管理の必要性が検討されている。ただし、現時点ではSTMの統一的な定義はない

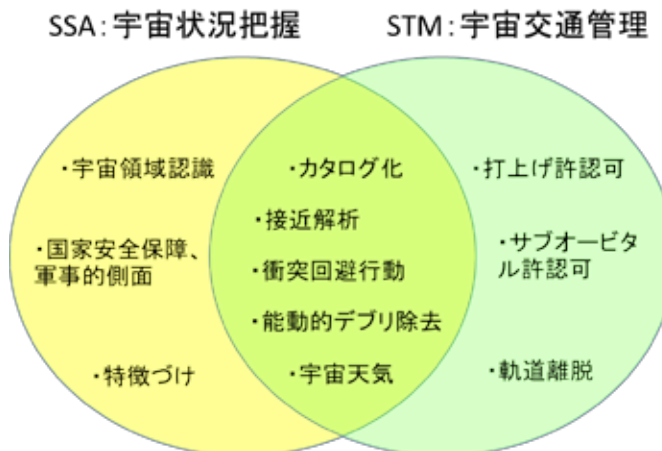


図15：SSAとSTMの関係

表3：陸上、海上、空域及び宇宙の交通管理比較（出典*15）

	陸上	海上	空域	宇宙
物体に対する国家管轄権	国籍国	旗国	国籍国	登録国
領域に対する国家管轄権	領土=排他的主権	領海=排他的主権	領空=排他的主権	なし【※1】
機体の登録	車両登録	船舶登録	機体登録	宇宙物体登録
無登録物体の扱い	無登録車は通行不可	無国籍船は拿捕の対象／入港禁止	無登録機は航空管制の対象外／着陸・通航拒否	法的制裁なし【※2】

が、SSAが軌道上の状態把握に重点をおいていることに対して、STMは打上の許認可から、最終的な落下処置等までの管理を目指したものである。一般的な包含関係を図15に示す。

表3に陸上、海上、空域の空間における国家管轄権の設定のされ方と、それらにおける交通に対する取扱いを整理する。

表3に示される通り、既存の空間に対して宇宙空間には決定的に異なる点が二点存在する。

①第一は、宇宙空間には領域に対する国家主権が及んでいない点である。（表3中の【※1】）他の空間の国際領域は、国家が主権を有する領域と隣接しているため、国際領域から各国の主権領域への連続性に基づいて、各国に国際領域にまで一定のコントロールを及ぼすインセンティブが働く。海上における世界航行警報業務（NAVAREA）や航空における飛行情報区（FIR）の運用がそれにあたる。

これらの業務は、公海あるいはその上空という国際領域でありながら、各国が自らコストを負担して交通管理を行っている。これは自国の領域と隣接する国際領域へ一定のコントロールを及ぼすことで、迫りくる危機を早

期に把握するというインセンティブがあるために受け入れられた実行と言える。

しかし宇宙空間は国家による領有権を一般的に禁止されたため（宇宙条約の第2条）、他の空間と同様の効果が期待できず、主権国家から空間として統制するインセンティブをも奪った形になっているといえることができる。

②第二に、国際的な認知を与えない物体に対する扱いに特徴がある。（表3中の【※2】）船舶や航空機は特定の国家への登録が義務付けられており、登録国の表示によって当該国による保護を前提とし、その反射として登録国にその機体の国際基準適合性を保証させることで、安全で円滑な空間秩序を維持するというシステムが構築されている。

したがって国籍不明の機体は、領海や領空では通航や管制の拒否や、強制措置等の対象となる。公海上においては軍艦による臨検や拿捕の理由にもなりうる。このように船舶や航空機においては、国籍の付与がその庇護下での運航の前提となっており、登録しなければ運用者が被る不利益が大きいため運用者に登録のインセンティブが存在する制度設計となっている。宇宙物体にも物体登録の義務は存在しているが、事実上は不履行に対する制裁措置が存在していない。

宇宙空間における国家管轄権の根拠となる宇宙物体登録だが、運用者がこれを怠ったとしても特段の実体的不利益は生じないのである。よって積極的に登録する運用者のインセンティブが低いままになっている。

以上の二点において、逆説的ではあるが、現代国際宇宙法体系の原則が、混雑した宇宙空間に対して秩序をもたらすべき動機を、規制者、被規制者の両面から妨げており、「宇宙空間は本質的に領域としてコントロールし

にくい空間である」といえる。(出典*15)

8. Airspace Traffic Integration (FAA)

FAA (Federal Aviation Administration : 米国連邦航空局) の資料 (図16、17) によれば、フロリダ州ケネディ宇宙センターからロケットが打上げられる場合 (一例 : SpaceX社のFalcon-9ロケット) は、マイアミ発着の航空便は経路変更が求められている。このような経路変更は従来から行われている。しかし



図16：通常時のフロリダ上空の空路
(マイアミへ直行するフロリダ半島東側ルート)

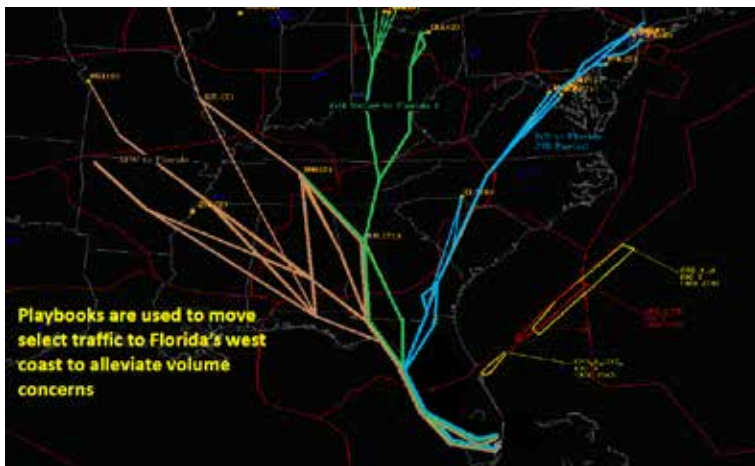


図17：ロケット打上げ時のフロリダ上空の空路
(ロケットの危険域を回避するフロリダ半島西側ルートが求められる) (出典*16)

今後さらに宇宙活動が活発化し、複数の Space Port・射場から打上げが行われる場合は航空と宇宙の交通統合 (Traffic Integration) が必要になるとしている。

以上のように、宇宙空間を今後も長期にわたり持続可能な形で安定的に利用してゆくためには、ますますSSA・STMが重要となってきた。

出典資料

- *1 : <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/modeling/legend.html>
- *2 : <https://www.seradata.com/final-score-for-2017-463-a-new-record-for-the-number-of-satellites-attempted-to-be-launched-in-a-single-year/>
- *3 : History of On-orbit Satellite Fragmentations (HOOSF) , 15th edition
- *4 : <https://www.orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv11i3.pdf>
- *5 : <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv13i2.pdf>
- *6 : <https://www.nasa.gov/sites/default/files/files/OrbitalDebrisProgramOffice.pdf>
- *7 : <https://swfound.org/media/206348/weeden-us-policy-and-capabilities-for-ssa.pdf>
- *8 : Lockheed Martin社
- *9 : <https://www.darpa.mil/program/space-surveillance-telescope>
- *10 : <https://www.jaxa.jp/projects/ssa/>
- *11 : http://track.sfo.jaxa.jp/business_overview/busi_over08.html
- *12 : 令和2年2月、防衛省の宇宙分野における取組
- *13 : <https://www.spacepolicyonline.com/pages/images/stories/Orbital%20Traffic%20Mgmt%20report%20from%20SAIC.pdf>
- *14 : <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv15i2.pdf>
- *15 : 竹内悠「国際宇宙交通管理 (STM) レジームによる国際宇宙ガバナンス確立の必要性」『法学政治学論究』120巻、2019年
- *16 : https://www.unoosa.org/documents/pdf/spacelaw/workshops/2017/ICAOUNOOSA2017/0407_Garceau_FAA.pdf

〔(一社) 日本航空宇宙工業会 技術部部長 宇治 勝〕