

経済産業省 委託業務

令和元年度内外一体の
経済成長戦略構築にかかる国際経済調査事業
(宇宙状況把握データプラットフォーム形成
に向けた各国動向調査)

調査報告書

2020年2月

株式会社アストロスケール

はじめに.....	6
調査方法.....	7
1. SSA の基本事項とサービスの種類.....	9
1.1 SSA が必要とされる理由.....	9
1.1.1 衝突回避と宇宙航行の安全性.....	9
1.1.2 宇宙天気の影響の予測.....	16
1.1.3 惑星保護.....	16
1.2 宇宙状況把握と宇宙交通管理の定義.....	18
1.3 SSA プロセス.....	20
1.3.1 インプット.....	21
1.3.2 キュレーション.....	28
1.3.3 分析.....	29
1.3.4 プロダクト.....	34
1.3.5 サービス.....	35
1.3.6 データ及びプロセス管理.....	36
参考文献・脚注 セクション 1.....	38
2. 主要なプレーヤー.....	43
2.1 日本の SSA 能力.....	44
2.1.1 概要.....	44
2.1.2 日本の SSA に関する宇宙政策.....	44
2.1.3 JAXA の能力.....	46
2.1.4 防衛省の能力.....	48
2.1.5 民間企業の能力.....	51
2.2 米国の SSA 能力.....	53
2.2.1 米国宇宙政策.....	53
2.2.2 米国政府の能力.....	54
2.2.3 非政府主体の保有する能力.....	65
2.3 欧州の SSA 能力.....	71
2.3.1 概要.....	71
2.3.2 ESA.....	72

2.3.3	EUSST	74
2.3.4	欧州のセンサー	79
2.3.5	欧州の注目すべき国	81
2.4	その他の国の能力	91
2.4.1	ロシア	91
2.4.2	カナダ	92
2.4.3	中国	93
2.4.4	オーストラリア	94
2.4.5	ニュージーランド	97
2.4.6	インド	97
3.	民間SSA のビジネスモデル	106
3.1	宇宙経済の価値	106
3.1.1	GNSS	107
3.1.2	リモートセンシング	107
3.1.3	電気通信及びインターネット	108
3.2	SSA 市場：価値と顧客	109
3.3	SSA システムのコスト	110
3.4	主なビジネスモデル	112
3.4.1	概要	112
3.4.2	顧客が現在及び将来重視するデータ及びサービスの種類	112
3.4.3	SSA ビジネスモデル：現在と将来の展望	114
3.5	民間 SSA 企業のプロフィール	118
3.5.1	L3Harris Technologies, Inc.	118
3.5.2	Analytical Graphics, Inc.	120
3.5.3	Numerica Corporation	121
3.5.4	Exoanalytic Solutions, Inc.	123
3.5.5	Elecnor Deimos	124
3.5.5	LeoLabs Inc.	125
3.6	SSA に関連する米国政府の契約	126
3.7	将来の見通し	128
	参考文献・脚注 セクション 3	130
4.	国内SSA データプラットフォーム	132

4.1	SSA についての国際的なガイドラインとその効果	132
4.1.1	IADC（国際機関間スペースデブリ調整委員会）	132
4.1.2	国連宇宙空間平和利用委員会（UNCOPUOS）長期持続可能性（LTS）ガイドライン	134
4.1.3	CONFERS	137
4.1.4	Space Safety Coalition（SSC）	139
4.1.5	全体的な教訓	139
4.2	ビッグデータの利活用	140
4.2.1	地球観測におけるビッグデータ利用からの教訓	141
4.2.2	新しい SSA 技術のビッグデータへの取り込み	142
4.3	効果的な SSA システムの要件	145
4.3.1	意思決定に係る情報の提供	146
4.3.2	パートナーとの関係性の強化	148
4.3.3	経済成長に貢献	149
4.4	SSA データに対するニーズ	150
4.4.1	一般的な衛星における SSA ニーズ	150
4.4.2	軌道上サービス運用者における SSA ニーズ	151
4.4.3	打上げ事業者における SSA ニーズ	151
4.5	SSA 能力上のギャップと課題	151
4.6	基礎となる国内 SSA データプラットフォーム	158
4.6.1	日本の SSA システムの現状及び計画	158
4.6.2	短期的に構築すべき、基礎的となる国内 SSA データプラットフォーム	159
4.7	日本にとっての SSA アーキテクチャーの選択肢	161
4.7.1	日本にとっての選択肢の検討方法	161
4.7.2	日本にとっての SSA アーキテクチャーの選択肢	165
4.7.3	提示された選択肢の概要比較	172
	参考文献・脚注 セクション 4	173
5.	結論	176
6.	別紙	179
6.1	インタビューリスト	179
6.2	インタビュー調査質問事項	183

6.3	用語一覧.....	186
-----	-----------	-----

はじめに

宇宙状況把握（SSA：Space Situational Awareness）は、宇宙を利用する上での基盤であり、宇宙環境を理解し、宇宙天気、小惑星、宇宙物体の衝突などの宇宙におけるイベントを予測するために利用されている。宇宙空間環境及び宇宙における活動において、国家や政府、民間事業者及び運用者が意思決定を可能とする情報やサービスの提供は、宇宙機の運用に係る幅広い目的に資する。

当初、SSAは軍事目的のために開発されたが、今では正確かつ包括的なSSAデータにより、軍事、民間及び商業宇宙システムの運用における活動を正確に解釈し、特徴を把握することが可能となっている。また、異常の検知又は物体の挙動等を認識する能力を高めることにより、宇宙における航行安全を改善し、宇宙物体同士の衝突リスクを低減することができる。その後、宇宙におけるアセットの保護、保険金の請求、従来に比較してより安全な航行管理等軌道を周回する宇宙物体に対してこれまでに無いSSAの使用事例が見られている。

経済的な観点では、軌道上で近接した位置にある宇宙機の活動を追跡することで、衛星運用者の安全航行の管理能力を支援し、衝突回避、軌道維持能力をも向上させる。2000年以来、軌道上の宇宙機の数が増え続けているため、混雑した宇宙環境の正確な状況認識は、位置、航法及びタイミング（PNT：Position, Navigation, and Timing）システム、気象衛星、リモートセンシング、自国の検証技術手段

（NTM：National Technical Means of Verification）等世界経済に不可欠な宇宙アセットの保護に貢献している。

運用の観点からは、正確で包括的なSSAデータは、破砕、技術的な問題、衝突などの異常に関する科学的解明を可能にする。軍事、商業及び民生目的等あらゆる種類の運用者が、その活動領域における予測可能で、正確かつリアルタイムな特性情報を有することになれば、地球軌道上の安全性や持続可能性を損なうことなく、より多くの活動に対応できる。

経済産業省に提出されるこの報告書では、SSAシステムの要素、主要な官民双方のSSAプレーヤーの現在の能力、SSA提供者のビジネスモデルと戦略を調査・説明し、現代のSSA市場の特徴を明らかにする。次に、この報告書では、グローバルなSSAシステムにおける能力、研究、サービスのそれぞれについて現在どのようなギャップが存在するのかについてその概要も示す。最後に、日本のSSAシステム現状と今後の想定、現状のシステムにおいて向上の余地がある点を明らかにした上で、将来的の国内SSAプラットフォームの中長期的な在り方や形成のアプローチとして、4つの選択肢を検討していく。

調査方法

文献調査

本件報告書においては、優れた SSA インフラ及び官民双方の SSA システムという場合に中核となる要素に沿って、関連文書の徹底的な文献調査を実施し、調査結果はデータ及び SSA 関連企業のプロファイルを提示した。世界の SSA に関する能力、SSA のインフラ及びグローバルな規模で展開される SSA に関連する活動についても、文献調査を行い、定量的及び定性的研究についての一般評価を実施。この対象には、日本、米国、ヨーロッパ（特に英国、フランス、ドイツ、イタリア、スペイン）、ロシア、中国、カナダ、オーストラリア、ニュージーランド及びインドに焦点を当てた関連雑誌記事、書籍、ニュース記事、条約、SSA 組織間の覚書、政府の記録文書その他の電子上のソースを含む。

関係者へのインタビュー

次に、SSA システムの現況及び業界の現況並びに官民の技術的な能力の今後の開発に関する質問を用意し、文献調査の結果判明した組織内の各主要 SSA 提供者（プロバイダー）の代表者へインタビューを行なった。インタビューに際しては、インタビューのプラクティスや指針に基づいて、政府に関するもの、民間（商業主体）に関するものそれぞれについて事前に共通の質問事項を作成した（インタビューリスト及び調査質問事項は、それぞれ別紙 5.1 及び 5.2 を参照）。インタビューは録音され、インタビュー対象者の了承を得た上で記録を作成し、調査質問事項との関連での結果を分析。必要に応じて、フォローアップの質問も行った。

インタビューは、文献調査を補完し、調査結果について質的な確認を行い、正確さや整合性を検証するためにも使用した。文献調査とインタビューの双方から得られた情報から、SSA に関する世界の主要なプレーヤーを特定し、それぞれについて分析をした。

分析

最初の 2 つのセクションの調査に基づき、SSA 市場の世界的な技術動向について詳細な分析を行ない、SSA 業界の主要なプレーヤーについては、提供サービス、ビジネスモデル、顧客、重点領域、プロダクト・サービス等の概要をまとめた。また、SSA における日米間の協力や多国間での協力についても調査範囲としている。

更に、日本の SSA システム現状と今後の想定、そして向上の余地がある点を明らかにした上で、将来的な国内 SSA プラットフォームの中長期的な在り方やどうプラットフォームを形成するためのアプローチとして 4 つの選択肢を検討した。ここでは、顧客ニーズ、民営化レベル、専門知識、透明性及び予算や政策上の優先事項などの戦略的変数（この報告書ではこれを「レバー」と呼んでいる。）並びに様々な種類の主要なプレーヤーとの経済産業省の将来の関与のあり方についての提案を行なっている他、将来更に実証が必要な事項についても記載した。これら調査の結果は、経済産業省に対して、事実に基づいた報告書として提出される。また、この調

査は、他国政府や民間の SSA 関連企業の取組に関連して、経済産業省が実行可能かつ実地的な結論を提示している。

1. SSA の基本事項とサービスの種類

1.1 SSA が必要とされる理由

- SSA は、主に宇宙環境を理解し、宇宙天気、小惑星、宇宙物体の衝突などの宇宙におけるイベントを予測するために利用されている。
- 宇宙空間内のデブリの数は、衝突イベントによって増加しつつある。
- 1mm 程度の小さな物体でも、周回している相対速度が速いために、運用中の衛星に損傷を与える可能性がある。
- 宇宙で活動中の衛星数は増えており、宇宙空間は混雑化した環境となっている。

宇宙状況把握 (SSA; : Space Situational Awareness) は、宇宙を活用する上での基盤である。1957 年 10 月 4 日に衛星スプートニクが打上げられる前でさえ、SSA は無線伝送を研究している人々にとって興味の対象となっていた。通信に対する太陽活動と地球の磁場の影響を把握するためには、上層大気を理解する必要があり、これは電離層に対する宇宙天気の影響を測定する実験を意味していた¹。

また、宇宙時代の黎明期では SSA (当時は space surveillance (宇宙監視) と呼ばれていた) は、太陽系の形成における小さな残りの粒子である微小流星とミサイル攻撃という 2 つの脅威にも焦点を当てていた。今日、SSA は人間の多くの活動に関わる形で進化してきた。最も一般的な SSA の民生及び商業利用には以下のようなものがある。

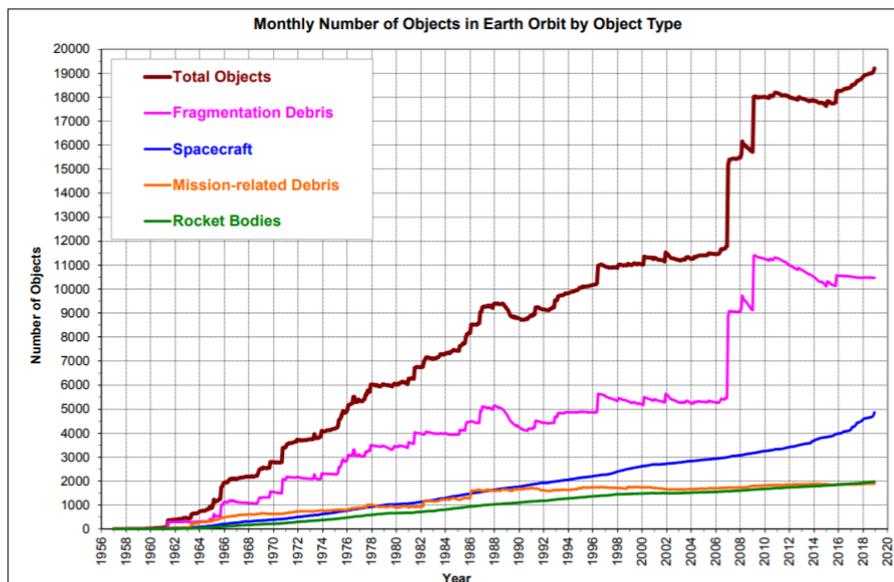
1.1.1 衝突回避と宇宙航行の安全性

現状

民生及び民間 (商業) 事業者から成る宇宙コミュニティにおいては、SSA は運用中及び運用終了又は操作不能な宇宙物体との衝突を回避するために必要なマヌーバを計画するためのツールと見なされている。60 年にわたる人類の宇宙活動の結果、5,500 回の打上げで 9,000 個もの通信、リモートセンシング、科学又は有人宇宙飛行といったミッション・ペイロードが最適な軌道に投入されてきた。現在、そのうち約 2,200 個が運用中の衛星であり、3,000 個以上が機能しない状態で軌道上に存在しており、それ以外の物体は軌道低下して地球の大気圏に突入して燃え尽きている。現在 SSA システムによって追跡可能な 10cm 以上の 34,000 個の物体の内訳は、使用済みの上段ロケット本体、ミッション中に放出されたデブリ及び破砕デブリである。また、致命的だが追跡不可能 (LNT : lethal but non-trackable) な 1~10 cm の物体が 90 万個以上あり、1cm 未満の破片に至っては 1 億 3000 万個存在する²。

宇宙空間の物体数

> 10 cm	: 34,000 個
> 1cm	: 900,000 個
> 1mm	: 130,000,000 個



Monthly Number of Cataloged Objects in Earth Orbit by Object Type. This chart displays a summary of all objects in Earth orbit officially cataloged by the U.S. Space Surveillance Network. "Fragmentation debris" includes satellite breakup debris and anomalous event debris, while "mission-related debris" includes all objects dispensed, separated, or released as part of the planned mission.

図表 1-1 : NASA Orbital Debris Report, 2019 年 5 月

The growing population of objects in space (宇宙における物体数の増加)

2007 年と 2009 年に起きた 2 回の壊滅的な衝突は、デブリの飛躍的な増加をもたらした。1 つ目は、2007 年に中国が高度 865km にある自国の気象衛星に対して衛星破壊実験を行い、結果として約 3,300 個の追跡可能なサイズのデブリが発生したものである。この結果生じたデブリのうち 100 年以内に自然に消滅するのはわずか 20% と推定されている³。2 つ目は、2009 年に高度約 800km で Iridium-33 と Cosmos-2251 という 2 つの大型衛星が偶発的に衝突したものである⁴。Iridium と Cosmos の衝突は、発生確率は低いものの、影響が大きいイベントであった。2 つの物体は 100,000 分の 3 の確率で衝突するとされていたが、その衝突の同じ週には同等レベルの確率で発生する接近予測が 37 つも出ていた⁵。結果的には、マヌーバするか否かの運用上の判断を下すためには、衝突予測の精度と予見可能性は不十分だったということになる。Iridium と Cosmos の衝突によって約 2,000 個の追跡可能なサイズのデブリが生じ、そのデブリは自然に落下するまでに数十年から数世紀を要する。

デブリが運用中の衛星に非常に有害である理由は、軌道上での速度で衝突したときに生成されるエネルギーにある。低軌道の物体は秒速約 7~8km で移動している。その速度や相対速度によって更に速い速度で衝突すると、塗料の薄片の大きさの粒子でさえ宇宙機に損傷を与える可能性がある。実際、このサイズの物体はスペースシャトルや国際宇宙ステーションのキューポラ（観測用モジュール）の窓、そして重要な地球監視衛星であるセンチネル-1A に亀裂を生じさせた⁶。

Debris Size	Similar in size to	Mass (g) aluminum sphere	Kinetic Energy (J)	Equiv. TNT (kg)	Energy similar to	Quantity	Trackable
1 mm	medium-grit sand or poppy seeds	0.0014	71	0.0003	Pitched baseball	Tens of millions	Can't be tracked
3 mm	smaller than BBs	0.038	1910	0.008	Bullets	Millions	Can't be tracked
1 cm	blueberries	1.41	70700	0.3	Falling anvil	Hundreds of thousands	Can't be tracked
5 cm	plum	176.7	8840000	37	Hit by bus	Tens of thousands	Most can't be tracked
10 cm	softball	1413.7	70700000	300	Large bomb	Tens of thousands	Most can be tracked
>10 cm	basketball to football field	1400 to 500,000,000	Up to 1×10^{13}	Up to 3,000,000	Very large bomb	Thousands	Tracked and cataloged by the space surveillance network

A summary of collision energies of various sized particles. Notice that tiny space debris can be deadly and are typically not trackable.

図表 1-2：デブリのサイズに関連して放出される等価エネルギー（出典：The Aerospace Corporation⁷⁾）



図表 1-3：1mm を超える全てのデブリの欧州宇宙機関 ESA (European Space Agency) による描写（縮尺通りではない）⁸⁾

2,000 個近くある使用済みのロケット上段もデブリとして懸念されている。これらの物体からなるいくつかの群の 1 つは高度 850km の位置に存在しており、2 つのロケット上段が約 5km の範囲で毎日接近している。これらの物体のうちの 2 つが衝突すると、追跡可能なカタログが一瞬にして倍増し、200,000 個もの LNT なデブリが生成される⁹⁾。その結果として生じた破片は低軌道で運用中の衛星と有人宇宙飛行に脅威をもたらし続けることとなる。

Tab. 1. Cluster characteristics highlight the debris-generating risk these collections of massive derelicts pose.

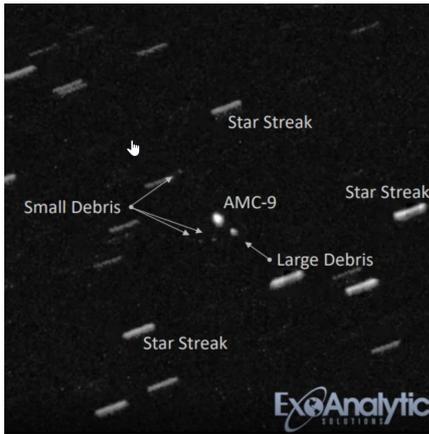
Center of Cluster (Span)	# of Objects and Mass (kg)	PC/yr and Probability of First Collision by 2019	Mass Involved in Typical Collision	Debris Generated from Collision Trackable (LNT)	Comments
775 km (60)	101 ~100,000	~1/400 4%	~1,600 – 2,800 kg	~4,500 (~60,000)	Most operational satellites affected
850 km (45)	75 ~208,000	~1/800 1%	~6,000 – 18,000 kg	~16,000 (~200,000)	Most consequential events
975 km (115)	314 ~335,000	~1/90 11%	~1,600 – 2,800 kg	~4,500 (~60,000)	Most likely events

図表 1-4 : 遺棄された大規模なロケット上段からなる群¹⁰

静止軌道 (GEO : Geosynchronous Orbit) は、カバレッジによる便益と衛星自体の価値から考えて、最も重要な軌道だと考えられている。この軌道は政府と民間企業の両方で使用されてきた歴史があり、現在は 562 個の衛星が運用されている¹¹。特に通信業界は、静止軌道帯に数十億ドルの投資を行なっている。もしこの軌道にデブリが生じた場合、それらのデブリは数千年の間軌道上に残り、重力井戸をゆっくりと前後に通過していく。静止軌道で生成されたデブリは、低軌道周回衛星ほど高速な相対運動はしないが、損傷を引き起こすような速度で静止軌道帯を横断する軌道がある。また、小さな物体は、太陽光を反射する大きな物体よりもはるかにわずかにしか見え、追跡される可能性が低くなる。したがって、静止軌道とその周辺は、限られた天然資源と見なされており、衛星の運用期間の末期には衛星軌道を GEO から約 300km 上にある「墓場軌道」と呼ばれる軌道に上げるために特別な注意が払われている¹²。

この軌道において衛星の異常や破砕を把握することは難しい。過去 3 年間で、いくつかの GEO 衛星が壊滅的な障害に直面し、多くのデブリが発生している¹³。

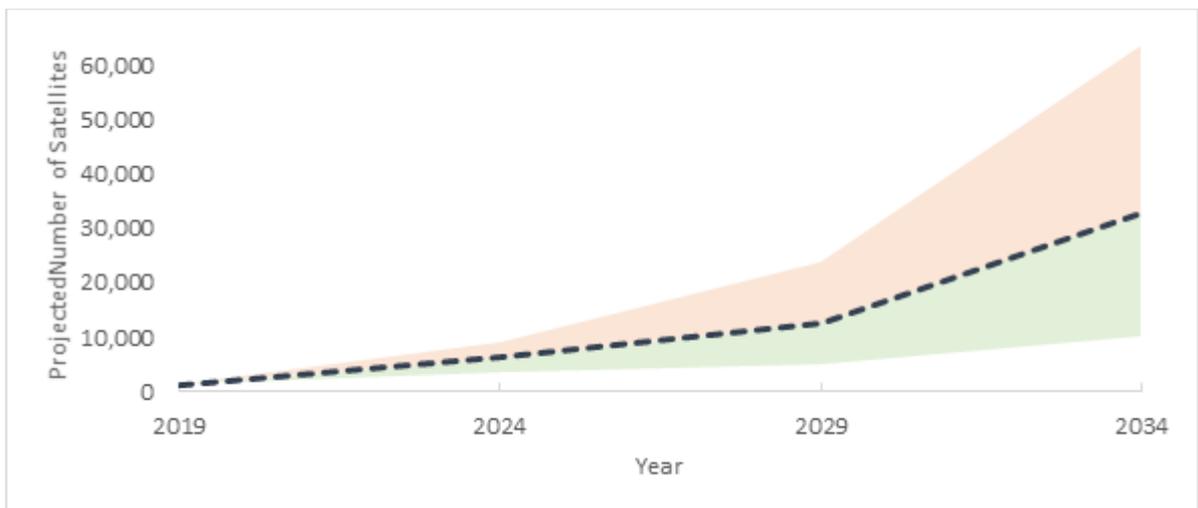
例えば 2017 年には AMC-9 と Telkom-1 でデブリが発生した¹⁴。ExoAnalytic 社のビデオは、Telkom-1 が分裂したように見える瞬間を捉えている¹⁵。2019 年には、Intelsat 29e が推進システムの損傷に遭遇し、静止軌道帯に沿って漂流しており、その結果いくつかのデブリが報告されている¹⁶。Intelsat 社は、ハーネスの問題と、微小流星塵又は低電圧イベントのいずれかが組み合わさって、この事故が引き起こされたとコメントしている¹⁷。また、2005 年に打上げられた Spaceway-1 では、2019 年 12 月に異常が発生し、次の使用時に搭載バッテリーが爆発する可能性が生じた¹⁸。このため、静止軌道帯の 300km 上にある「ジャンクヤード」と呼ばれる廃棄軌道への緊急軌道変更を計画している。



図表 1-5 : ExoAnalytic による AMC-9 分裂画像¹⁹

将来の展望

宇宙はこれまで以上にアクセスしやすくなっている。打上げの選択肢の増加、衛星コンポーネントの低コスト化、大規模な投資により、活気に満ちたグローバルな宇宙エコシステムが実現している。大学のキューブサット・プログラムは世界中で拡大しており、キューブサットの打上げは定期的に行われ、若い学生が宇宙コミュニティで将来のキャリアに備えるのに役立っている。また、主にリモートセンシング、インターネット接続、ナローバンドの IoT 通信に重点を置く新しい衛星運用者は、数千の衛星を宇宙に打ち上げる初期的な段階にある。例えば、最近世界最大のコンステレーション衛星運用者となった SpaceX 社は、低軌道（LEO : Low-Earth Orbit）に 42,000 個以上の衛星を打ち上げる計画をしている。2020 年の終わりまでには、SpaceX と OneWeb だけで、合計 1,916 個の低軌道衛星を打上げ、運用中の衛星が実質的に 2 倍に増えると予想されている。



図表 1-6 : 今後 15 年間の LEO 衛星数の予測

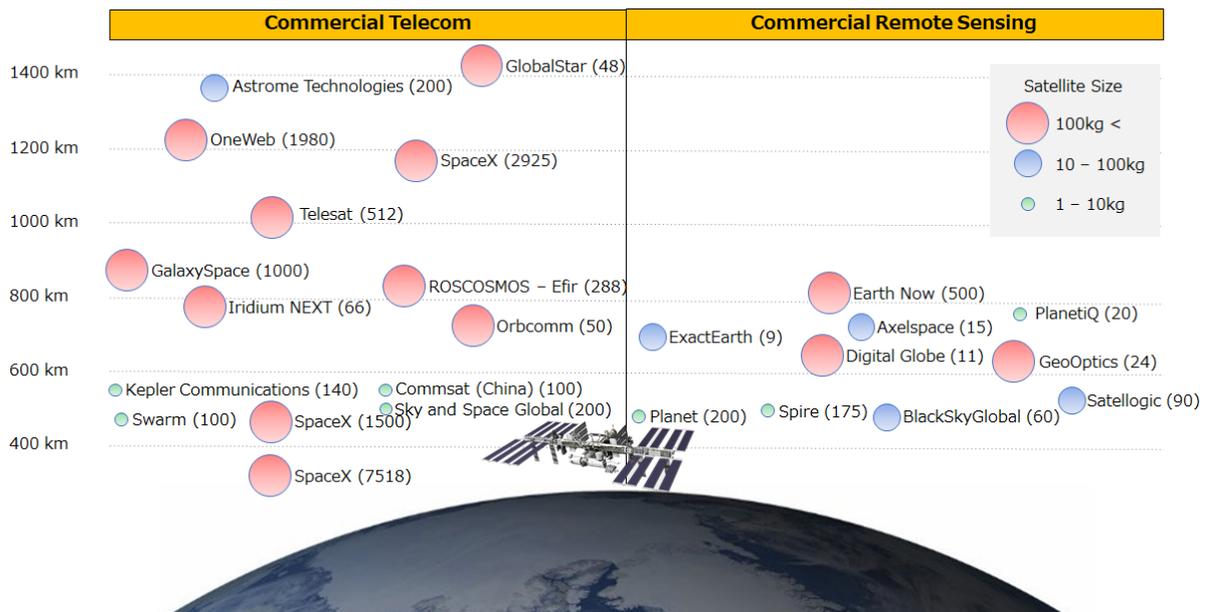


大規模コンステレーション、別名「メガコンステレーション」

低遅延通信を解決するため、これら企業はインターネットトラフィックを配信するために低軌道に焦点を合わせ始めた。地球から GEO への信号は約 600 ミリ秒かかるが、1,000km に到達するだけなら信号は約 30~50 ミリ秒で済む。SpaceX 社の約 300km の超低軌道 (VLEO : Very Low-Earth Orbit) コンステレーションでは、遅延 (レイテンシ) は 15~20 ミリ秒の範囲となる。これは、高性能で高帯域幅の衛星を使用した、よりスムーズなインターネット体験を意味している。世界中の大規模な人口にサービスを提供するために必要となるカバレッジを実現するには、多数の衛星が必要となる。OneWeb 社、SpaceX 社及び Telesat 社は軌道の上に 1 つ以上の衛星を持っており、Amazon 社もコンステレーション衛星を打ち上げる予定である。



図表 1-7 : AGI が描写した計画中のコンステレーション²⁰



図表 1-8：計画中又は既存のコンステレーション²¹

軌道上の衛星数の増加は、商業打上げ産業によって支えられている。これは、安全性の観点から軌道上と打上げ活動の両方において、SSA がこれまで以上に重要になることを意味している。

	2009-2013 Average	2014	2015	2016	2017	2018	2019
USA	19.0	24	20	22	29	31	21
Russia	30.2	32	26	17	19	17	22
China	14.8	16	19	22	18	39	34
Europe		11	12	11	11	11	9
<i>Japan</i>		4	4	4	7	6	2
<i>India</i>		4	5	7	5	7	6
<i>Israel</i>		1	0	1	0	0	0
<i>N Korea</i>		0	0	1	0	0	0
<i>S Korea</i>		0	0	0	0	0	0
<i>Iran</i>		0	1	0	1	0	2
<i>New Zealand</i>		0	0	0	1	3	6
Other		9	10	13	14	16	16
Total	79.0	92	87	85	91	114	102

図表 1-9：軌道への打上げの増加²²

将来の軌道上での活動には、軌道上でのサービスや月面ミッションのような新しい宇宙活動も含まれる。従来の SSA は、環境抵抗モデルと安定した軌道パラメーターに依存しているため、一定の又は頻繁なマヌーバを行っているオペレーションを追跡及び予測することは困難である。ランデブー及び近接オペレーションは GEO 及び LEO の両方の領域で行われており、電気イオン推進システムはゆっくりとした軌道上昇のための選択肢となりつつある。この種の活動は、現在の SSA 能力に負荷を掛け続けることになる。

長期的な活動のように見えるかもしれないが、複数の民間による月面ミッションが計画、資金提供されており、2019 年には最初の試みが行われている（イスラエル

の Beresheet)。月軌道での接近は、軌道特性が異なるため、地球軌道とは異なる方法で処理する必要があり、2021 年までに、月軌道か月表面へのアクセスをする複数の民間宇宙機が投入される可能性がある。

1.1.2 宇宙天気の影響の予測

宇宙天気とは、「宇宙搭載及び地上ベースのシステム並びにサービスの機能及び信頼性に影響を与えたり、財産や人間の健康を危険にさらしたりする、地球の磁気圏、電離圏、太陽及び太陽風による熱圏の環境条件」を指す²³。宇宙機に特有の影響としては、電子機器の損傷、無線周波数干渉、及び低軌道での大気抵抗の増加が上げられる。宇宙天気を測定、特性評価、予測することによって、宇宙機運用者に警告を提供し、宇宙機運用者は宇宙機を宇宙天気による影響への備えるようにすることができる。

宇宙天気は、地球上のインフラ、宇宙での人間の健康、太陽活動により放射線が強められた地域を飛行する航空機の健康にも影響を及ぼす可能性がある。送電線、パイプラインや鉄道は、地磁気嵐の際に電流が流れ、その結果電源がダウンすることがありえ、経済とセキュリティに影響する重要なインフラの損傷が起きうる。地磁気活動の増加時には、磁気異常の上や北極上空を飛行する航空機に、無線通信の停止又は電子機器の損傷が生じる可能性もある。



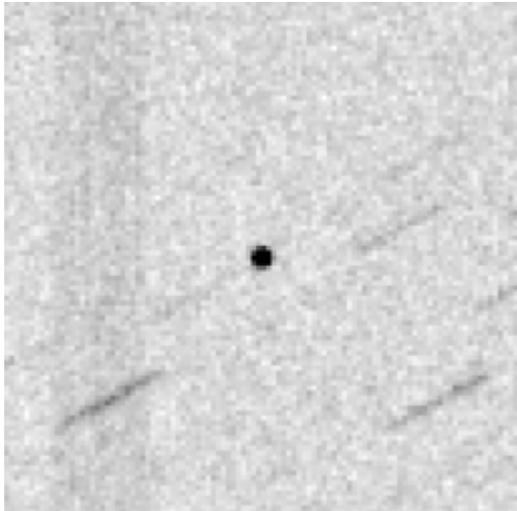
図表 1-10：宇宙天気（出典：米国海洋大気庁²⁴）

宇宙天気予報は、電離層のモデリング、抗力係数の生成、長距離通信の吸収予測、磁気擾動の理解などに使用されてる。米国海洋大気庁（NOAA：National Oceanic and Atmospheric Administration）は、日々の太陽活動をより公衆に分かりやすくするために、地磁気活動（Kp インデックス）、太陽束レベル及び太陽の X 線ピーク輝度を変換して、地磁気インデックス（G1-5）、太陽放射指数（S1-5）及びラジオ放送停止インデックス（R1-5）といった指標を開発した²⁵。

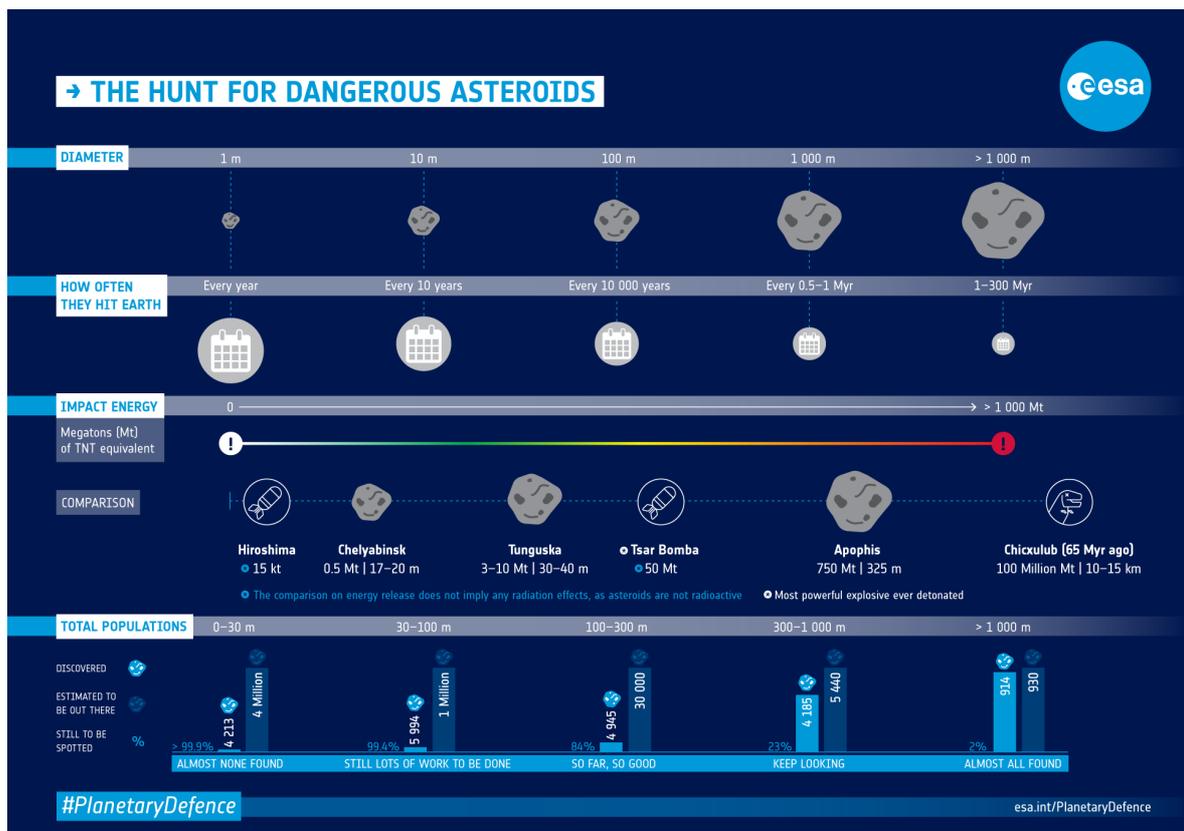
1.1.3 惑星保護

デブリは宇宙機の運用にとって差し迫った関心事であるが、地球上の生命の安全のための小惑星の検出も同様に重要である。40 億年の歴史の中で、地球は大小両方の小惑星と衝突してきたが、今後さらに多くの小惑星に襲われると見られている。

このような低確率だが発生した際に影響の大きいイベントに対処するためには、地球に脅威を与える太陽系の物体の軌道を検出、追跡、予測する SSA が必要となる。2019 年には、「2019OK」と呼ばれる 100m サイズの小惑星が、地球から月までの距離の 5 分の 1 にまで接近した。この際には、望遠鏡を使用して軌道を評価し、200 年後の次の接近を予測した。



図表 1-11 : 2019OK ESA²⁶



図表 1-12 : ESA 惑星防衛²⁷

1.2 宇宙状況把握と宇宙交通管理の定義

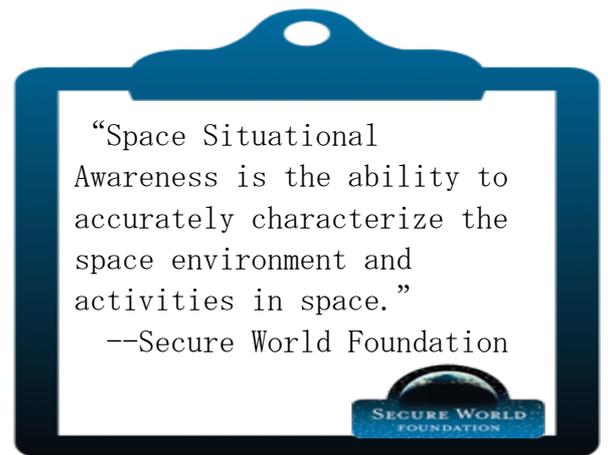
- 広く採用された宇宙状況把握 (SSA : Space Situational Awareness) の定義は存在しない。
- 宇宙交通管理 (STM : Space Traffic Management) は SSA と密接に関連しているが、その解釈には違いがある。
- 宇宙環境管理 (SEM : Space Environment Management) と STM によって、宇宙運用保証 (SOA : Space Operations Assurance) がされる。そして、これらは全てタイムリーで正確な SSA データに基づいている。

広く採用されているような SSA の定義は存在しないが、Secure World Foundation (SWF) による「宇宙状況把握とは、宇宙環境と宇宙での活動について、正確に特徴を把握する能力である」との説明は、SSA のコンセプトの核心を捉えている²⁸。これには、宇宙において発生する自然現象 (宇宙天気、微小流星塵の衝突又は地球近傍の小惑星など) と、宇宙環境の影響を受け、またその環境内で運用される人工物の位置や挙動が含まれる²⁹。

国際宇宙航行アカデミー (IAA : International Academy of Astronautics) も同様に、SSA を「デブリやアクティブな衛星又は機能していない衛星などの宇宙物体の検出、追跡、識別及びカタログ化を行う技術的能力並びに宇宙天気を観測してマヌーバやその他のイベントのために宇宙機とペイロードをモニターする技術的能力」と定義している³⁰。また、米国の宇宙政策大統領令第3号 (SPD-3 : Space Policy Directive 3) では SSA を「安全で、安定的、持続可能な宇宙活動をサポートするための宇宙物体とその運用環境のナレッジと特性把握」と定義している³¹。

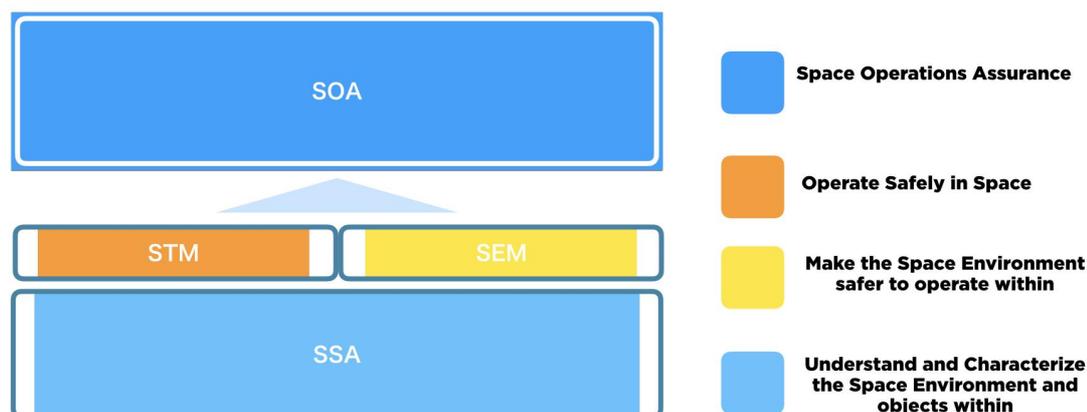
安全で、安定し、持続可能な宇宙活動を支援することは、積極的かつ成功した宇宙環境を達成するための鍵となる³²。SSA を使用することで、軌道、活動や宇宙環境の物体に対する影響を理解し予測することができる。また、STM も議論に含めることがますます重要になってきている。宇宙活動に関する「管理 (Management)」は、航空路交通管制の国内管理が確立されている航空交通管理とは、必ずしも同じ意味を持たない。宇宙で安全に運用するための必要なルール、調整及びそのためのツールが STM である。2018 年の IAA Space Traffic Management の研究では、STM を「宇宙空間への安全なアクセス、宇宙空間での運用、物理的又は無線周波数の干渉のない宇宙から地球への帰還、を促進するための一連の技術的及び規制上の規定」と説明している³³。

米国政府は SPD-3 において、STM を「宇宙環境での運用の安全性、安定性、及び持続可能性を高めるための活動の計画、調整、軌道上における同期的行動」のツールとして定義している³⁴。



宇宙交通管理とは、宇宙内で安全に運用するために必要なルール、調整、及びそのためのツールである

さらに、Maclay と McKnight は 2019 年の IAC の論文における最近のコンセプトにおいて、SSA を STM と宇宙環境管理（SEM）の両方の基礎要素として扱っている³⁵。STM は（協調活動を通じてか、規制によって義務付けられているかに関わらず）宇宙で安全に活動を行う方法を含んでいる。それに対して、SEM は宇宙環境に適応する方法又は宇宙環境を変更したり管理したりする方法を示しており、軌道上のデブリの軽減と改善も含まれている。SEM には軌道デブリの軽減と改善が含まれる。



図表 1-13 : Maclay 及び McKnight の 2019 年 IAC 発表論文から作成³⁶

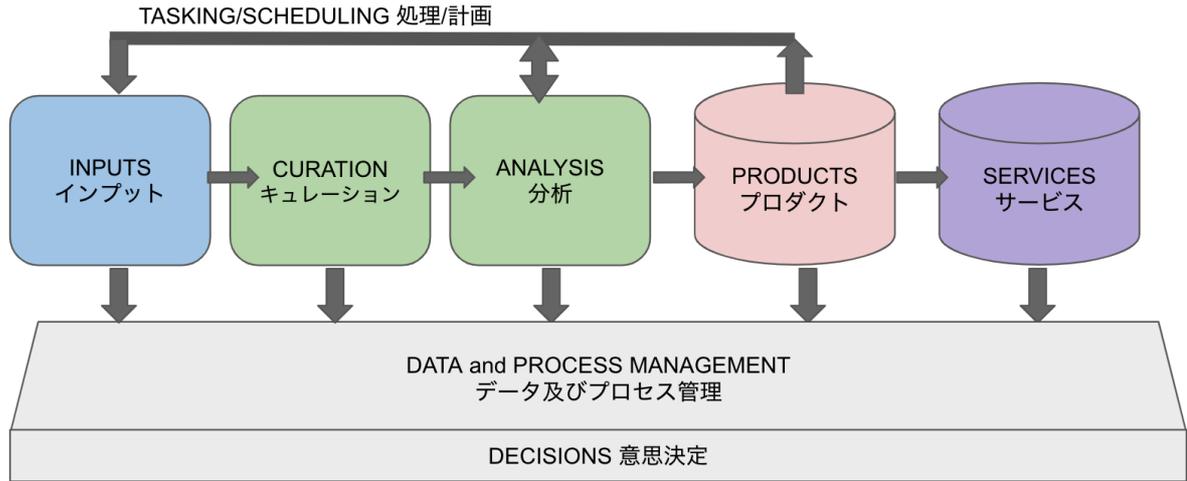
宇宙物体の位置情報や、宇宙環境がそれらの物体に与える影響を単に知るだけでは十分ではない。宇宙環境の中で安全に運用するための意思決定をサポートし、将来の可能性のある危険を低減し、又は改善するために、宇宙での活動と物体の特性を明らかにすることが益々重要になってきている。この全体的なアプローチは、McKnight が SOA と呼んでいるものであり、全ての民間又は政府の運用者に適応することができる³⁷。

1.3 SSA プロセス

- SSA のプロセスは、インプット、キュレーション、分析、プロダクト、サービス、データ管理及びプロセスの管理に分かれている。
- インプット：主に光学望遠鏡とレーダーシステムで構成されている。しかし、この他にも、効果的な SSA システムに貢献するような観測的、環境的又は非観測的な性質を持つインプットが多く存在している。
- キュレーション：キュレーションには、分析するための観測データの準備が含まれる。センサーデータの妥当性確認、フォーマット及びキャリブレーションも全てキュレーションに含まれる。
- 分析：分析ではいくつかのタスクが実行される。第一に、観測値を既知物体と一致させ、軌道を決定し、物体の将来の位置を予測するために使用される ELSETs 又は状態ベクトルを作成する。分析プロセスは、2 つの物体が接近するか否かについてとその確率を割り出す。分析は、挙動を判断し、回転運動、マヌーバ実行、破裂、物体が大気中に再突入する時期/場所などといった物体の特性を把握する。
- プロダクト：共有可能なアイテムで構成される。観測のセット、ELSETs、状態ベクトル、分析に使用するカタログ、接近データメッセージ、分析を含むレポートなどがプロダクトに当たる。
- サービス：顧客の意思決定プロセスをサポートする活動である。顧客の衛星についての接近解析サービスを提供することにより、顧客は意思決定を支援する情報を入手できるようになる。SSA サービスの種類としては、情報、システムとデータ、ソフトウェア及び人材がある。
- データ管理：ストレージ、保護や許可のためのプロトコル及び SSA の各プロセスにおいて外部のステークホルダーと接続するためのインターフェースで構成されている。SSA プロセスは、中央管理型、分散型、非中央管理型のいずれかの性質を持ち、各枠組みには長所と短所がある。プロセス管理は、SSA ミッションを達成するために必要な全ての SSA プロセスをどのように計画、運用し、人的又は機械的なりソースがどの程度必要とされるかを管理するものである。

セクション 1.1 で述べたように、SSA は宇宙環境と宇宙での活動を正確に把握する能力である。このプロセスには、宇宙における物体の挙動の定量化、予測及び評価が必要になる³⁸。ここで、6 つのプロセスからなる典型的な SSA プロセスを説明する。セクション 4 では、効果的な SSA システム（セクション 4.3）、SSA データのニーズ（セクション 4.4）、現在の SSA プロセス毎のギャップ（セクション 4.5）及び将来の SSA への国際的なベストプラクティスの影響（セクション 4.1）について説明する。

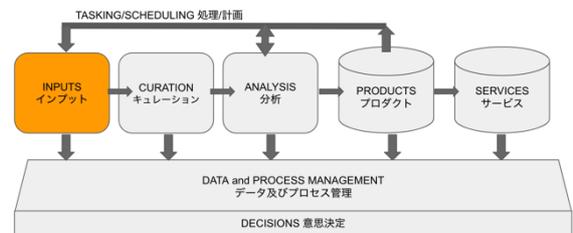
最も単純な形式の典型的な SSA システムは、インプット、キュレーション、分析、プロダクト、サービス及びデータ管理とプロセスの管理から構成されている。



図表 1-14 : SSA システムの要素

1.3.1 インプット

インプットは、SSA プロセスをサポートするための有用なデータであり、それらは、位置的、非位置的（すなわち特性評価）又は環境的な性質を持ったデータである。位置及び環境情報は、軌道決定及び衛星カタログの作成のサポートとなる。一方、非位置情報は、状態、挙動又は宇宙物体への外部から影響を明らかにするのに役立つ。



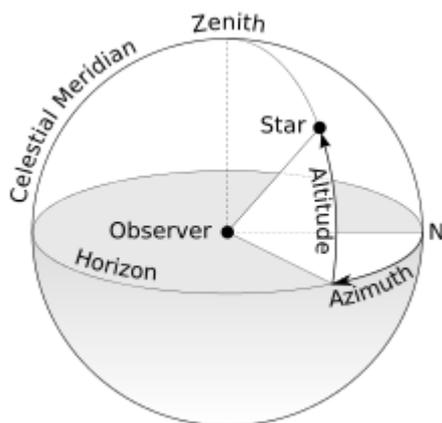
位置情報には、センサーシステムによる定量的な観測値又は軌道暦による所有者/操作者 (O/O : Owner/Operator) からのデータが含まれる³⁹。最も一般的なインプットとしては、光学観測により方位角（アジマス）、仰角（エレベーション）及び明るさ、レーダー観測によるレンジ、レンジレート、レーダー断面積がある。このセクションでは、これらを収集するシステムについて説明する。外部の ELSETs と状態ベクトル（他の SSA システムから）もインプットと見なされる。

環境情報は、SSA プロセスに不可欠なインプットである。宇宙天気の影響を理解することで、SSA データの処理におけるモデルとアルゴリズムをサポートすることができ、サービスのための外部のデータポイントに異常検知などのサービスを提供できる。摂動モデルは、重力場密度、大気密度、放射圧などの軌道決定のプロセスで使用される⁴⁰。

宇宙空間にある物体の情報も、非位置的なインプット又は環境的なインプットとなる。これには、ライトカーブ、無線周波数干渉 (RFI) データなどが含まれる。この増幅情報は、位置の更新に取り入れるのではなく、宇宙物体の挙動の特性を把握するのによく使用される。追加のインプットの例としては、軌道変更の計画、軌道上の物体数、宇宙機の技術マニュアルだけでなく、火の玉が空を横切るといったオープンソースのソーシャルメディアアカウントからの情報等広範囲に及ぶ。



図表 1-15 : オープンソースからのインプットの例 : Iridium 衛星のフレア (Secure World Foundation) ⁴¹



図表 1-16 : 方位角 (アジマス) 、 <https://en.wikipedia.org/wiki/Azimuth>

位置的情報	環境的情報	非位置的情報
測距情報	重力モデル	宇宙物体の健全性とテレメトリー
0/0 軌道暦	大気密度モデル	マヌーバ計画
要素セット (ELSET)	熱密度モデル	測光
状態ベクトル	地磁気条件	物体の形状/デザイン
無線周波数 (RF : Radio Frequency) の位置確認	弾道係数	破砕モデル
GPS 測定		

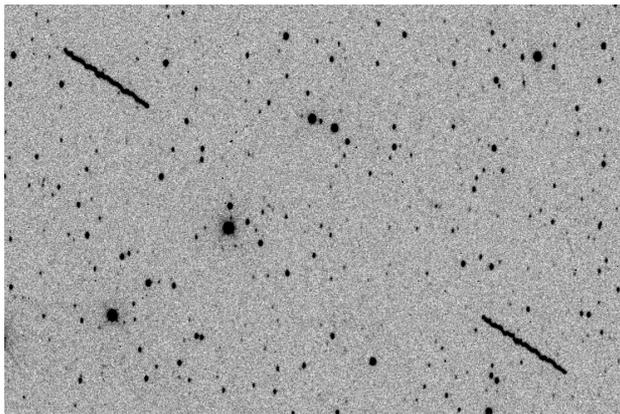
図表 1-17 : SSA システムへの位置、環境、及び非位置的なインプット情報例

1.3.1.1 光学的な観測

地上ベース (地上設置型)

地上の光学望遠鏡は、安価な CCD 望遠鏡を使用する宇宙愛好家から、米国宇宙監視ネットワーク (SSN : Space Surveillance Network) 及びその他の国で使用される最も洗練された光学機器まで、SSA で運用される最も一般的なセンサーである。これらのセンサーは通常、レーダーシステムと比較してコストが低い。安価な 40cm 光学望遠鏡では、特定の静止弧内のほとんどの物体を検出及び追跡することはできるが、画像から物体を識別したり特性情報まで得たりはできない。このようなセンサーの費用は約 40,000 米ドルである⁴²。ほとんどの光学望遠鏡には昼間には観測出来ないという制約があるが、赤外線センサーを採用して昼間にも光学画像を撮像できるセンサーもある⁴³。光学センサーのもう 1 つの制約は、雲を通して物体を追跡できないため、天候の影響を受けることである⁴⁴。

光学センサーが撮像した宇宙空間を移動する物体は、暗い宇宙空間の中に「筋」の画像として浮かび上がる。これらの「筋」をへらすことによって、特定の時間の物体の方位角 (アジマス)、仰角 (エレベーション) 及び明るさ把握することができる。このようにして光学センサーは多くの場合、物体のサイズではなく、明るさを検出している。また、物体までの距離や高度を特定することはできない。非常に優れた光学センサーであれば、宇宙物体特性把握 (SOC : Space Object Characterization)、つまり物体の特性又は挙動 (形状、回転など) を把握することができる。SOC の例として、2019 年 4 月の Intelsat Epic 29 の異常発生 ExoAnalytics ビデオがある ([図表 1-19](#))。



図表 1-18 : オーストラリアの観測所で観測された探査機 ExoMars とそこから投棄された燃料タンク⁴⁵



図表 1-19 : 2019 年 4 月に観測された Intelsat 29e の異常⁴⁶

宇宙ベース (宇宙設置型)

政府の宇宙ベースの SSA は米国全体に存在している。政府が保有する宇宙ベースの SSA には、米国の宇宙ベースの監視衛星 (SBSS : Space-based surveillance satellite)⁴⁷、Geosynchronous SSA Program (GSSAP)⁴⁸並びにカナダの Sapphire 衛星及び NEOSSat 衛星 (セクション 2.4.2 を参照) がある。一方で、商業的な宇宙ベースの SSA への関心も高まってきている。宇宙ベースの SSA には、地上ベースの SSA と比較していくつかの利点がある。(太陽と地球に近い角度を除いて) 雲や日光の影響を受けない。大気の収差がなければ必要な処理が少なくて済み、暗い物体でもより簡単に検出することができる。明らかに不利な点は、特に専用の SSA 衛星コンステレーションを展開する場合のコストである。また、観測される物体は、日蝕状態ではなく太陽に照らされている必要がある。

専用の宇宙設置型センサーに代わるものとして、ホステッド・ペイロードや、スタートラッカーによる偶発的な SSA データの収集がある。偶発的に得られるデータは、専用のセンサーで得られるものほど正確でも機能的でもないことが多い。物体の観測結果を保持しているスタートラッカーを搭載した衛星は多数あるが、それらのデータは破棄されているのが現状である。大きな衛星のホステッドセンサー・ペイロードは、特に GEO 地域においてコストを削減し、宇宙ベースの SSA 能力を開発するための選択肢になる。



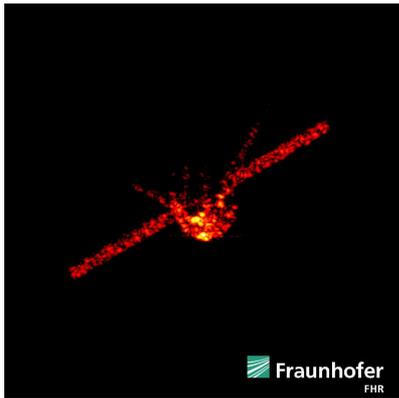
図表 1-20 : NEOSat 衛星 (カナダの宇宙設置型センサー) による人工衛星の近接画像⁴⁹

1.3.1.2 レーダーによる観測

地上ベースのレーダーからは、レンジ、レンジレート、アジマス角、速度、断面積の情報（見かけのサイズ）のデータを得ることができる。データの取得は天候や日光に左右されることはない。主に LEO の物体の検出と追跡に使用されるが、システムのパワーレベルによっては MEO (MEO : Medium Earth Orbit) 及び GEO の観測に焦点を合わせることもできる。これらのシステムは、取得とメンテナンスの両面において、光学センサーよりも高価で複雑になる傾向がある。このような技術はミサイル発射の検知にも使用されるため、米国とロシアのミサイル警戒システムが SSA センサーを兼ねている理由となっている。フェーズドアレイ・レーダーシステムは、電子的に操作をし、空を広範囲にわたってカバーすることができ、上空を通過すると多くの物体を同時に追跡することができる。他のレーダーシステムは機械的に操作され、カバレッジエリアが小さくなる。

「狭帯域及び広帯域レーダ：ナローバンドレーダースグネチャは、衛星のレーダー断面積 (RCS : Radar Cross-Section) 履歴又は距離時間強度 (RTI : Range-Time-Intensity) 履歴のいずれかで構成される。単純な衛星の狭帯域シグネチャは、既知の RCS 散乱式を使用して分析され、サイズと形状が決定される。より複雑な衛星の狭帯域の反射は、既知の衛星のシグネチャのデータベースと自動的に比較されて、適切に分類される。広帯域レーダーの反射は、レンジドップラー画像で構成される。衛星が質量中心の動きが分かっている場合は、レンジドップラー画像を適切にスケールリングすることによって、衛星の正確な形状とサイズの推定値を取得することができる。広帯域画像を使用することにより、アナリストはペイロードとロケット本体を明確に区別できる。」

Narrowband and Wideband Radar Signatures in Support of the Space Catalog Dr. Craig V. Solodyna and Mr. Gerald P. Banner, MIT Lincoln Laboratory⁵⁰



図表 1-21：独フラウンホーファー研究機構が捉えた中国の天空1号の再突入の広帯域レーダー画像⁵⁰

1.3.1.3 レーザー測距

レーザー測距は、元々はセンサーのキャリブレーションに使用されていたが、今では有益な SSA センサーとなってきている。レーザー測距によって、全ての軌道の物体について非常に正確な速度と距離を把握することができる。また、感度が高く、多くの場合数ミリメートルまで、非常に低い軌道の場合 1cm 未満のサイズの物体を検出することができる。そのため、小さなデブリの検出と追跡のため、レーザー測距は、特にレーザーのネットワークが選択肢として浮上してきている。このようなシステムのパフォーマンスは、物体の軌道パラメーター、複数のレーザーの分布や気象条件に依存する⁵¹。十分な出力があれば、地上ベースのレーザーによって小さなデブリの軌道を変えることもできるため、将来的には衝突回避の潜在的な選択肢ともなりうる。⁵²

レーザー画像検出と測距 (LIDAR)

LIDAR (Laser Imaging, Detection and Ranging) はレーダーに似ており、物体の方位角と仰角を算出するが、光学波長を使用する点が異なっている。これらのセンサーは、使用される波長のためにレーダーシステムのように雲を通して見ることはできず、SSA においては宇宙空間での使用が最も適している。この技術はレーダーほど成熟しておらず、宇宙ベースの SSA システム用としては開発途上のものである

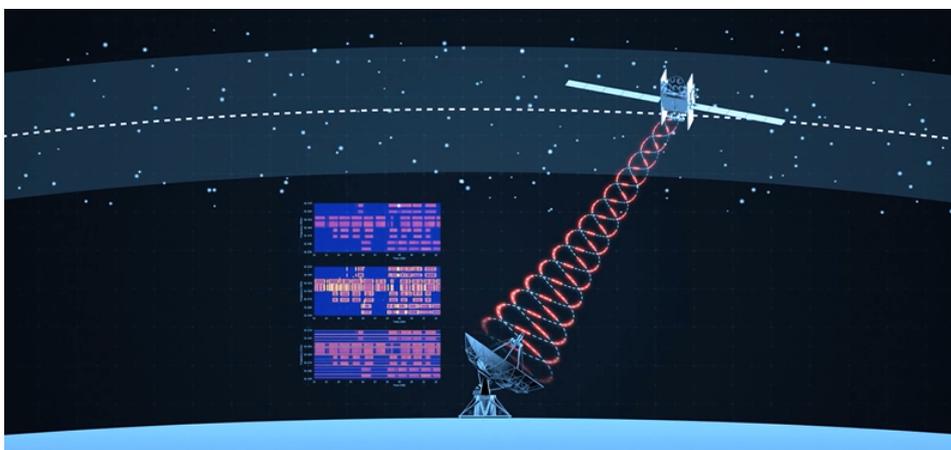
⁵³、⁵⁴。



図表 1-22 : オーストラリアの衛星レーザー測距施設 EOS Mount Stromio⁵⁵

1.3.1.4 無線周波数センサー

無線周波数（radio frequency sensor : RF）センサーは、無線周波数を発して、宇宙空間で活動している衛星の位置の特定、追跡や特性評価をすることができる。また、無線周波数干渉（RF 干渉 : Radio Frequency Interference）源の位置特定や異常なマヌーバの検出にも役立つ。このようなシステムの有効性は、物体の追跡量、つまり継続的な監視ができていのかどうかによって依存する。24 時間 365 日、常時完全な静止軌道の RF データを収集できるため、従来のセンサーによる検出や特性評価を凌ぐ独自の洞察を提供する。衛星の性能をサポートし、RF シグネチャから検出できる脆弱性を特定し、RF 干渉を軽減するための民間システムが登場している⁵⁶。



図表 1-23 : Kratos が提供する RF による SSA サービス⁵⁷

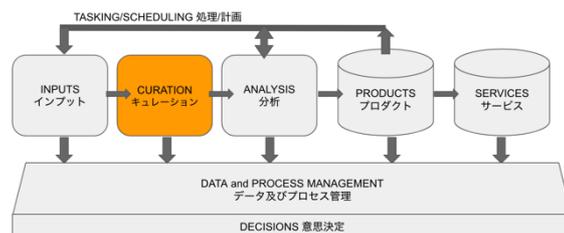
1.3.1.5 衛星所有者/運用者のデータ

衛星所有者/運用者（Owner/Operator : O/O）のデータは、衛星の計画された将来の位置、GPS 又はその他の手段から収集された位置データへの洞察を提供するものであり、SSA プロセスにおいて非常に重要なものである。これは、衛星の位置のより正確な情報であり、SSA システムに取り込み可能な軌道暦（ephemeris）によって表現される。

1.3.2 キュレーション

キュレーションとは、データの整理、記述、クリーニング、エンハンス、保存の方法など、データを「ケア」するプロセスである⁵⁸。SSA データの場合、生の観測結果を、有効性を確認済の観測結果と呼ばれる軌道決定のための基礎的なプロダクトに変換するための準備を指す。この報告書で使用しているキュレーションとデータ管理という用語は混同されやすい。この報告書においては、データ管理は外部の利害関係者とのインターフェースを表すものとして用い、SSA システム全体でプロトコルを共有するのに対し、キュレーションは入ってくる生の観測結果として用いている。

まず、センサーは、形状、アルベド及びその他の属性が既知となっている軌道上の較正用の基準物体（キャリブレーション物体）等の基準に対して、較正（キャリブレーション）を行う。既知のデータやシステムのバイアスは、削減又は排除する必要がある。光学画像の場合、画像から星のデータや背景ノイズが除去され、光学センサーから発せられる明確に分解された画像が提供される。

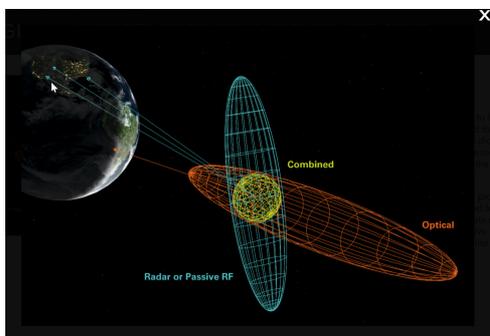


図表 1-24 : Lincoln Calibration Sphere は、今日でもレーダーセンサーのキャリブレーションに使用されている。直径 1.12m で、1965 年に打上げられた (Gunter の宇宙ページ : https://space.skyrocket.de/doc_sdat/lcs-1.htm)

データの有効性確認は、生の観測結果を評価する SSA プロセスの重要なステップである。観測結果には、センサーを基準とした特定の時点での物体の位置が含まれており、既知となっているセンサーの位置を踏まえて、地球中心の座標に変換される⁵⁹。観測結果の出所が有効であること又はデータが転送中に破損していないことを確認する必要もある。

最後に、より豊富なデータセットと精度の高いデータセットを作成するために、SSA の様々な情報を融合することが一般的になりつつある。たとえば、光学データとレーダーデータを組み合わせることで、距離とサイズを決定するのみならず、回

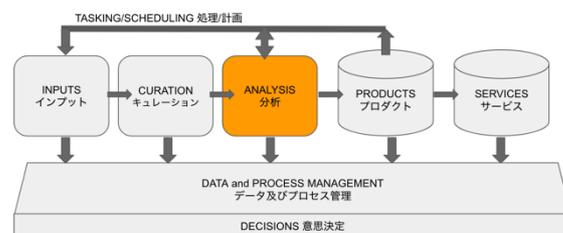
転率など、物体の更なる特性を明らかにすることができる。さらに、外部の非位置的情報を活用することにより、物体の挙動の背景となる理由や理論的根拠がより明確になる場合もある。このように、データ融合はキュレーションプロセスの要素の一つとなっている。



図表 1-25：様々なタイプのインプットの組み合わせにより、SSA の理解が深まる。レーダーと光学データの組み合わせによる描写 AGI による画像⁶⁰

1.3.3 分析

分析は SSA における中心的な機能である。分析のためには、キュレートされた SSA データを処理して、情報を明らかにする必要がある。そのため、分析結果はこのプロセスで適用されるバイアスに大きく依存する。宇宙活動に利用するために、追加的に必要となる分析の例としては以下のようなものがある。



観測の関連付け

適切なキュレーションの後、既存の物体カタログに対して現在の物体に観測を関連付ける必要がある。また、新規又は未知の物体が検出された場合、未知物体 (uncorrelated track : UCT) として処理、保存される。

軌道決定とカタログ作成

物体の軌道を決定することは、SSA プロセスの基本的なステップである。軌道を決定することにより、物体の将来の位置を予測することができる。新たな観測結果から軌道を算出するのに十分な情報が得られている場合、初期軌道決定 (IOD : Initial Orbit Determination) がなされる。一般的に軌道は、米国国防総省の 2 行軌道要素セット (TLE : Two-line element) ⁶¹ で表現されるケプラー要素と状態量ベクトルの 2 つによって表現される。状態ベクトルは、x、y、z の直交座標系で表され、各座標に速度が含まれる。ほとんどの状態ベクトルは、参照システムとして地球中心慣性座標系 (ECI : Earth Centered Inertial) を使用している。状態ベクト

ルには、TLE にはない貴重な（不確実性の指標である）共分散情報が含まれている点が重要である。カタログは、ELSETs 又は状態ベクトルのセットで構成される。

図表 1-26 : TLE と状態ベクトルの比較

	特徴
TLE	<ul style="list-style-type: none"> TLE は、 space-track.org を通じて米軍から配布されており、 celestrak.org などにも再配布されている最も一般的な形式である。 TLE には不確実性についての情報は含まれない 軌道計算用アルゴリズムとして、SGP4 を使用する。これは最新の天体力学ソフトウェアほど正確ではないが、計算時間は高速である
状態ベクトル	<ul style="list-style-type: none"> 位置、速度及びその情報の不確実性が提供される TLE よりも多く演算能力を必要とする ISO 規格のメッセージ形式は、全て状態ベクトルに基づいており、米軍以外では共通言語となっている

GCOM-W1 (SHIZUKU)										
(a)										
1	38337U	12025A	12194.00000000	.00000000	00000-0	17700-3	0	00659		
(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	(k)	(l)
(m)	(n)	(o)								
2	38337	98.1978	133.0858	0001777	101.6799	154.6424	14.57141916	8061		
(p)	(q)	(r)	(s)	(t)	(u)	(v)	(w)	(x)	(y)	

- (a)人工衛星の名称
- (b)行番号 (c)人工衛星番号 (d)分類(Uは分類なし) (e)国際識別番号(打上げ年の下2桁)
- (f)国際識別番号(打上げ年における打上げ数) (g)国際識別番号(piece of launch)
- (h)エポック年(西暦の下2桁) (i)エポック(年通算日+その日における00時からの経過時間)
- (j)平均運動の1次の時間微分 (k)平均運動の2次の時間微分 (l)大気抵抗係数項(小数点以下を表示)
- (m)エフェメスタイプ (n)エレメント番号 (o)チェックサム
- (p)行番号 (q)人工衛星番号 (r)軌道傾斜角(度) (s)昇交点赤経(度)
- (t)離心率(小数点以下を表示) (u)近地点引数(度) (v)平均近点離角(度) (w)平均運動(周回数/日)
- (x)エポック時の周回数(回) (y)チェックサム

図表 1-27 : Example of TLE (G-Portal 地球観測衛星データ提供システム) ⁶²

打上げ検出と追跡

打上げの検出は、独立（外部ソースのみから）及び共同（打上げ運用者が知らされる情報から）の2つの方法で行われる。独立した打上げ検出の場合、宇宙ベースの赤外線システムと地上レーダーが、このアクティビティに必要なセンサーになる。独立した打上げ検出はミサイル発射検出に関連付けられているため、商業的活動ではない。

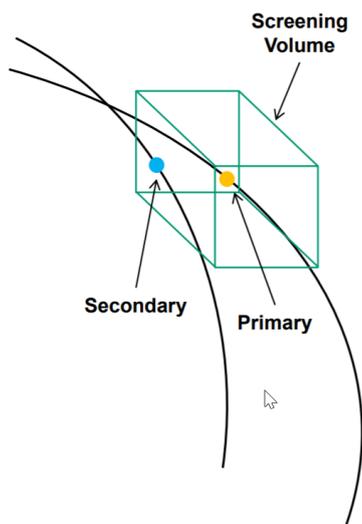
共同した打上げ検出と追跡には、打上げ機からのテレメトリや打上げの詳細の公開など、打上げ運用者からのデータの取り込みが含まれる。また、低帯域幅テレメトリによるリアルタイムな追跡を可能にするロケットに設置された ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast) のようなセンサーデータの有効性についても議論されている⁶³。これら打上げによるデータを使用すると、地上の SSA センサーを使ってロケットの追跡が出来る⁶⁴。このプロセスでは、ロケットの燃焼速度が一定であるため、発射と初期軌道の弧に沿った持続的な追跡が必要になる。

管理と同定

似たようなサイズの物体が大量に宇宙空間に配置される中、同じ形状と機能の物体をユニークなマーカー無しで、物体の打上げから再突入までを同定し、管理し続けることは、科学というよりも芸術とでも言うべき難しいタスクである。物体を継続的に観測し続けるには、センサーの地理的なカバー範囲が単純に不十分な場合もある。打上げ事業者からの打上げ前の情報や、衛星運用者からの予定軌道、打上げ物体のサイズやその他の特性情報を入手することにより、各物体を特定するためのプロセスを支援することができる。このプロセスは完了するまでに数日又は数週間かかる場合がある。

接近評価と打上げ前スクリーニング

各 ELSETs 又は状態ベクトルを数日先まで伝播して、他の軌道に対しての評価を行い、2つの物体が進行方向と放射状の「進入禁止領域内」で一定の距離内で交差するかどうかを判断する。2つの物体が接近すると予測される、つまり同じ「立入禁止区域」を占有する場合、これは接近と見なされる。状態ベクトルの不確実性を示す指標である共分散などの追加情報は、2つの物体が特定の時間に特定の区域内にある確率を明らかにするのに役立つ。接近データメッセージ (CDM) は標準的なメッセージであり、接近評価分析を通じて配布される。それらは、2つの物体間の最接近時 (TCA : Time of Closest Approach) の状態推定値と共分散、相対衝突情報及び軌道決定情報で構成されている⁶⁵。



図表 1-28 : Hejduk/Johnson による衝突確率評価 (P_c : Probability of Collision) の不確実性のイメージ。NASA 2016⁶⁶

打上げ前のスクリーニングにおける分析は、接近評価と似ている。予測された投入軌道について、打上げ後 24~48 時間の間で、より大きな軌道物体に対してスクリーニングを行い、接近が発生するかどうかを判断する。接近が予測された場合は、別の打上げウィンドウが設定される。ロケットの軌道、パフォーマンス及びペイロード分離の不確実性を踏まえると、デブリのような小さな物体に対しては効果的ではない。

マヌーバ評価

新しい観測結果を既存の軌道と比較して分析することにより、物体がマヌーバされたかどうかを示すことができる。この情報を手がかりとして、他のリソースを用いて追跡したり、マヌーバの意図を評価することができる。ただし、この分析は、使用されているモデル、軌道決定又はセンサー自体のエラーのために識別が難しいことに注意する必要がある。ここでのタスクは、それが真に物体のマヌーバによるものかどうか、それとも ELSETs が不正確であり更新が必要なのかどうかを理解することである。GEO では、観測は近接して位置する 2 つの物体間で逆にタグ付けを行ってしまった結果なこともありうる。

衝突確率の解析

衝突確率 (Probability of collision: P_c) は、物体が他の物体と衝突するリスクのレベルを評価するための指標である。この分析には、関係する 2 つの物体の位置、共分散及び外接球半径の推定値が必要になる⁶⁷。 P_c は、差し迫った接近に対してマヌーバが必要かどうかを評価するためによく使用されており、接近データメッセージ (CDM) を使って計算される。

破碎の評価

物体の予想位置と観測値を比較することにより、物体がその予測飛行経路から外れており、同様の軌道上に他の新しい未知の物体（UCT）があることが明らかになる場合がある。測光や電波信号の証拠などの関連情報も踏まえて、物体の破碎があったかどうかは明らかになる。

可視性と食

可視性解析は、地球の影に入り太陽によって照らされなくなった場合に、物体の軌道に基づいてシンプルに計算される。このタイプの分析はSSAにおいては、光学センサによる追跡に依存する物体の追跡可能性を判別するために行われる。

過去履歴の分析

観測結果、ELSETs やカタログの過去の履歴を分析することによって、長期にわたるトレンドを確認して公表したり、モデルやレギュレーションを更新したり、コンプライアンスを評価したりすることができる。未知の物体又は既知の物体と関連付けがされていない物体の場合、過去履歴の記録は物体の出所を特定、同定し、所有者を判別するのに役立つ。

ライトカーブ分析

軌道上の物体の明るさの推移を分析することにより、いくつかの情報を収集することができる。明るさの変動から、物体の安定性、回転率及び面積質量比、見かけのサイズ、また場合によっては材料の組成などのその他の関連情報を特定することができる。

再突入分析

地球の大気圏に再突入する物体の、正確な再突入位置と時間を予測することは、初期軌道が円軌道である場合には容易ではない。楕円軌道の場合、再突入は近地点で発生するため、再突入の予測は比較的容易である。いずれの場合も、地球に対しての飛行方向に誤差と不確実性が生じる。解析ツールによって、摂動モデルを使用して、大気圏内への突入の時間と場所を特定できる。

無線周波数 (RF) 評価

RF 評価には、放射検出、ペイロード性能及び干渉の位置が含まれる。RF データは、マヌーバの検知と評価にも役立つ。

End-of-life 評価

ミッション終了時の廃棄に関するライセンス要件を遵守するために、軌道離脱までの時間、ミッション後廃棄の信頼性や衛星の健全性の分析を行う。

ランデブー及び近接オペレーション (RPO : Rendez-vous and proximity operations) の特定

典型的な SSA 分析は、軌道上の 2 つの物体の距離を離す目的で行われる。ただし、ランデブー・近接オペレーション (RPO) のミッションでは、ドッキングや調査といった目的のために、2 つの物体を意図的に接近させる必要がある。2 つの物体が 1 キロメートル以内に接近すると、ほとんどの地上設置型センサーはそれらを区別できないため、2 つの物体を管理と追跡し続けることが SSA の重要な課題とある。

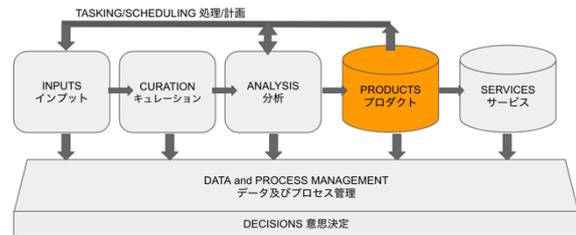
1.3.4 プロダクト

SSA プロダクトは、ハードウェア、ソフトウェア又は情報であり、共有したり購入したり、インプットと分析のプロセスへフィードバックしたりできるものである。観測とエフェメリスから始まる SSA ネットワークから生成される、いく

つかの重要な情報プロダクトがある。ELSETs は、TLE と状態ベクトルのいずれの形式であっても、共分散と合わせて提供される。カタログ全体もプロダクトと見なすことができる。接近データメッセージ (CDM) などのいくつかの標準的なデータメッセージは、外れ距離、衝突の可能性、最接近時及び最接近時の相対位置と速度に関する情報を提供している⁶⁸。物体の特性、イベントの傾向、無線周波数干渉などに関するレポートは、顧客向けにカスタマイズしたりパッケージ化することができる。

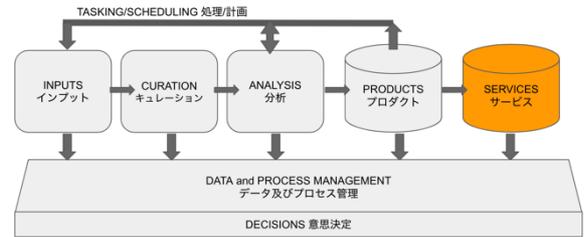
ソフトウェアプロダクトは、SSA の販売市場における重要な要素である。ソフトウェアとモデリングは社内で開発できるものの、分析は多くの場合、AGI 社の STK⁶⁹ や a.i Solution' s Freeflyer⁷⁰ などの民間ソフトウェアを使用して行われる。

最後に、ハードウェアはプロダクトとして見落とされるべきではない。センサー及び部品のサプライヤーは、SSA 情報収集のために必要となる様々な技術を提供している。以下に、プロダクトを種類別に示した。



1.3.5 サービス

サービスは「有形商品を生産しない役に立つ役務」と定義することができる⁷¹。SSA に関してサービスを定義する場合、宇宙機運用者のコミュニティにとって価値があると考えられるいくつかの形態がある。



SSA 情報サービス

民間事業者には、ビジネスをサポートし、ライセンス要件の遵守を支援する SSA サービスが必要となる。例えば、衝突の警告、マヌーバ計画、RF 干渉の回避、衛星のパフォーマンスと状態の把握が含まれる。SSA サービスは、民間事業者が直面するリスクの軽減に役立つ。ここで言うリスクは、宇宙機のライフサイクルによって異なる。SSA データの政府ユーザーは、全てのリスクと活動を理解し、宇宙環境をより良く理解するために科学と研究を実施するという、民間事業者と比べてより広範なミッションを持っている。

SSA 情報サービスには以下のようなものが含まれる。

- 運用コンセプトの開発（コンステレーション計画など）
- 打上げ前スクリーニング
- カタログのメンテナンスと観測結果の処理
- 接近評価と警告
- 衝突リスク管理と回避計画立案
- 無線周波数干渉の解決
- ランデブー・近接オペレーションの計画と検証
- 関心の高いイベント（HIE: High Interest Event）の通知：破碎、マヌーバ、打上げ、他の運用者による影響
- 重要なイベントの支援：打上げと早期軌道、マヌーバ、運用終了及びミッション終了
- 特性評価：サイズ、質量、状態、性能、能力
- SSA 情報の視覚化
- 再突入予測
- 過去履歴データのアーカイブと傾向把握
- カスタマイズされた SSA プロダクトの開発

SSA システムとデータサービス

SSA システムとデータの管理とアクセスを、サービスとして提供することができる。これには、システムの自動化の確立や、システムとデータを管理するための人的資源の活用が含まれる。

SSA システムとデータサービスには次のものが含まれる。

- システムの統合とシステム間のインターフェースの作成
- センサーのタスク処理とオペレーション

- データ保存：データの保存場所、保存及びネットワークの方法
- SSA システムの管理とシミュレーション：SSA プロセスの繋がり全体の管理
- アクセス制御：機密データ又は機密データを保護する許可プロトコルの作成

SSA ソフトウェアサービス

SSA プロセスには複数のソフトウェア開発ニーズがある。社内でアルゴリズムを開発するよりもサービスが好まれる場合がある。

SSA ソフトウェアサービスには次のものが含まれる。

- アルゴリズム開発
- プロダクト開発
- モデリングとシミュレーション
- API 又はユーザーインターフェースの開発

SSA 専門家によるサービス

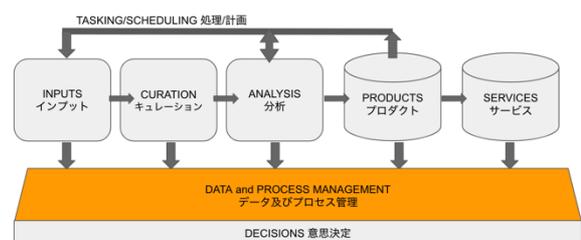
天体力学の専門家は世界中で数が限られているため、SSA サービス (SSA as a service) における専門知識・技能について考慮しておく必要がある。外部の SSA 専門家を活用することは、組織内の専門知識の増強やトレーニングとなる。

SSA 専門家によるサービスには次のものが含まれる。

- 軌道上安全性分析の専用サポート
- 宇宙力学の研究
- コンサルティング

1.3.6 データ及びプロセス管理

一般的な SSA システムの最後の 1 つのプロセスであるデータ及びプロセスの管理は、センサーシステム、データ、アルゴリズム、プロセス、アウトプットを全て一貫した一つのシステムとして統合することであり、プロセス全体を通して行われる。これは簡単な作業ではなく、アクセス及びデータ保護のプロトコル、外部の利害関係者とのインターフェース、データ保存などが含まれる。



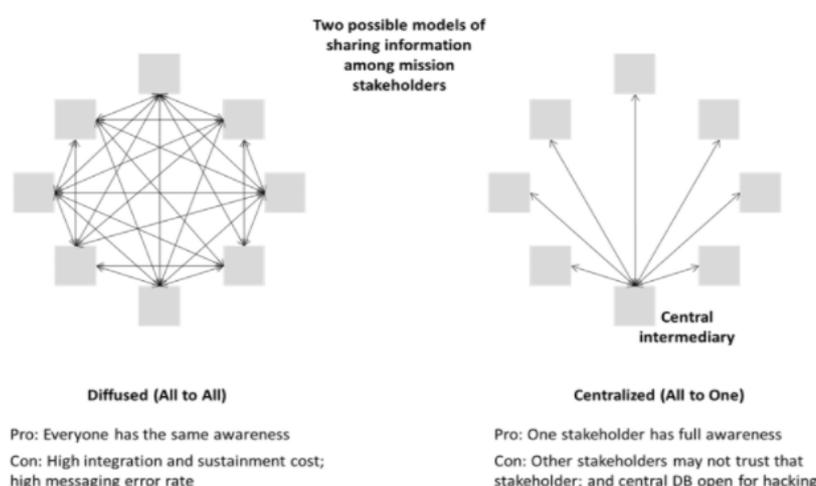
ネットワーク・アーキテクチャーの役割：中央管理型、分散型、非中央管理型

現在、SSA データは世界中の多くの利害関係者によって収集、保存、処理されている。このデータの集合体としての利益を最大化するためには、適切なアーキテクチャーの設計がますます重要になってくる。中央管理 (central repository) 型は、情報の交換 (例えば US Space Command で使用されるものなど) 及び物体の単一カタログの設計を簡素化することができる。一部の利害関係者はこの中央管理型ア

アーキテクチャーを好むが、データ、プロセス及び最終的には意思決定権限の自律性を放棄したくない利害関係者もいる。

分散型アーキテクチャーは、各利害関係者のデータとプロセスを制御しながら、共通の枠組み（欧州宇宙監視・追跡（EUSST : European Space Surveillance and Tracking）等）を共有できる他のネットワーク・アーキテクチャーが検討されつつある。これは、SSA の運用の処理時間がかかり費用もかさむ方法となる可能性があり、利害関係者間の高度な交渉が必要となる。

3 番目の SSA アーキテクチャーの選択肢は非中央管理型である。データをブロックチェーン技術で保存することによって、データの自律性と信頼性が達成される⁷²。このようなアーキテクチャーは、現時点ではまだ実行されている訳ではなく、まだコンセプトの段階にある。



図表 1-29 : SSA アーキテクチャーに適用される共有モデル (MITRE)⁷³ :

クラウドコンピューティングの役割

クラウド・コンピューティングは、SSA において強力な役割を果たすことができる。SSA がデータリポジトリといった一元化の方向に移行するに従い、クラウド上でデータ、プロセス又はその両方をホストすることが有益になる場合がある。つまり、地球観測などのデータが重く、量の多い市場に合わせて、分散データストレージとコンピューティング処理能力を活用している。

データ保護と許可の役割

宇宙飛行の安全性に使用される SSA データの性質と、データが破損又は使用できなくなった場合の結果を考えると、SSA システムはデータ保護とセキュリティを考慮して設計する必要がある。更に、専有データ又は機密データを収集する場合は、アクセスのための明確な許可を与え、保護する必要がある。これは、そのようなデータを使用する SSA プロセスを信頼するための基本的な要素である。

参考文献・脚注 セクション 1

- ¹ 防衛作戦、能力の再構成、抗たん性等脅威に対処するための一連の方法として米国 DoD が使用する「Space Mission Assurance」とは別の用語であることに留意する必要がある。[JP 3-14]。
- ² European Space Agency, “Space Debris by the Numbers,” European Space Agency, last modified January 2019, https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris/Space_debris_by_the_numbers.
- ³ Thomas S Kelso, “Chinese ASAT Test,” Celestrak, last modified June 22, 2012, <https://celestrak.com/webmaster.php>.
- ⁴ Brian Weeden, “2009 Iridium-Cosmos CollisionFact Sheet,” Secure World Foundation, last modified November 10, 2010, https://swfound.org/media/6575/swf_iridium_cosmos_collision_fact_sheet_updated_2012.pdf.
- ⁵ Glenn Peterson, Marlon Sorge, and William Ailor, “Space Traffic Management in the Age of New Space,” The Aerospace Corporation:Center for Space Policy and Strategy, (April 2018):1-12, https://aerospace.org/sites/default/files/2018-05/SpaceTrafficMgmt_0.pdf.
- ⁶ European Space Agency, “Copernicus Sentinel-1A satellite hit by space particle,” European Space Agency, last modified August 31, 2016, https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Copernicus_Sentinel-1A_satellite_hit_by_space_particle.
- ⁷ Aerospace, “Space Debris 101,” Aerospace, <https://aerospace.org/article/space-debris-101>.
- ⁸ European Space Agency, “Space Debris Safety and Security,” European Space Agency, https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris.
- ⁹ Timothy Maclay and Darren McKnight, “Space Environment Management:Framing the Objective and Setting Priorities for Controlling Orbital Debris Risk,” presented at 70th International Astronautical Congress (IAC), Washington, D.C., October 2019.
- ¹⁰ Timothy Maclay and Darren McKnight, “Space Environment Management:A Common Sense Framework for Controlling Orbital Debris Risk,” presented at Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS), Maui, HI, September 2019.
- ¹¹ Union of Concerned Scientists, “UCS Satellite Database,” Union of Concerned Scientists, last modified December 16, 2019, <https://www.ucsusa.org/resources/satellite-database>.
- ¹² European Space Agency, “ESA’ s Annual Space Environment Report.,” European Space Operations Centre, last modified July 17, 2019, https://www.sdo.esoc.esa.int/environment_report/Space_Environment_Report_latest.pdf.
- ¹³ Eric Berger, “A Satellite may be falling apart in Geostationary Orbit,” Ars Technica, last modified July 2, 2017, <https://arstechnica.com/science/2017/07/a-large-satellite-appears-to-be-falling-apart-in-geostationary-orbit/>.
- ¹⁴ Eric Berger, “It looks like yet another satellite is breaking apart at GEO,” Ars Technica, last modified August 30, 2017, <https://arstechnica.com/science/2017/08/it-looks-like-yet-another-satellite-is-breaking-apart-at-geo/>.
- ¹⁵ ExoAnalytic, “Telekom-1 Satellite Debris Incident,” ExoAnalytic, last modified August 2017, <https://exoanalytic.com/2017/08/30/exoanalytic-video-telkom-1/>.
- ¹⁶ Caleb Henry, “Intelsat-29e satellite suffers fuel leak, spotted drifting along GEO arc,” Space News, last modified April 10, 2019, <https://spacenews.com/intelsat-29e-satellite-suffers-fuel-leak-spotted-drifting-along-geo-arc/>.
- ¹⁷ Caleb Henry, “Intelsat pins Intelsat-29e failure on external event, readies replacement order,” Space News, last modified July 31, 2019, <https://spacenews.com/intelsat-pins-intelsat-29e-failure-on-external-event-readies-replacement-order/>.

-
- ¹⁸ Caleb Henry, “DirecTV fears explosion risk from satellite with damaged battery,” Space News, last modified January 22, 2020, <https://spacenews.com/directv-fears-explosion-risk-from-satellite-with-damaged-battery/>.
- ¹⁹ Eric Berger, “A Satellite may be falling apart in Geostationary Orbit,” Ars Technica, last modified July 2, 2017, <https://arstechnica.com/science/2017/07/a-large-satellite-appears-to-be-falling-apart-in-geostationary-orbit/>.
- ²⁰ SpaceCast, 28, “10 Years of Planned Satellites,” Discussion by Thomas Kelso and Colangelo Anthony, aired December 18, 2019, on Youtube. https://www.youtube.com/watch?list=PLvdhJ_UbhZ46RYWuiT0ncJAJ6bzIapWh&time_continue=322&v=8sYtPe9ycWQ&feature=emb_logo.
- ²¹ Caleb Henry, “LEO and MEO broadband constellations mega source of consternation,” Space News, last modified March 13, 2018, <https://spacenews.com/divining-what-the-stars-hold-in-store-for-broadband-megaconstellations/>.
- ²² Jonathan McDowell, “Space Activities in 2019,” Planet4589.org, last modified January 12 2020, <https://planet4589.org/space/papers/space19.pdf>.
- ²³ European Space Agency, “About Space Weather,” European Space Agency, <http://swe.ssa.esa.int/what-is-space-weather>.
- ²⁴ National Weather Service, “Space Weather and Safety,” National Weather Service, <https://www.weather.gov/safety/space>.
- ²⁵ National Weather Service, “NOAA Space Weather Scales,” National Weather Service, last modified April 7, 2011, https://www.swpc.noaa.gov/sites/default/files/images/NOAA_scales.pdf.
- ²⁶ European Space Agency, “Asteroid’s surprise close approach illustrates need for more eyes on the sky,” European Space Agency, last modified February 8, 2019, https://www.esa.int/Safety_Security/Asteroid_s_surprise_close_approach_illustrates_need_for_more_eyes_on_the_sky.
- ²⁷ 同上。
- ²⁸ Brian Weeden, “Space Situational Awareness Fact Sheet,” Secure World Foundation, Accessed January 11, 2020. https://swfound.org/media/205874/swf_ssa_fact_sheet.pdf.
- ²⁹ この報告書では、増大する人為的なスペースデブリの問題に着目し、宇宙にある物体の位置と挙動を理解することを目的として、1cm より大きい地球軌道内の物体の検出と特性評価を行う SSA について述べていく。
- ³⁰ Kai-Uwe Schrogl 他、「宇宙交通管理：実装のロードマップに向けて」、国際宇宙アカデミー、(2018年6月)：12.
- ³¹ The White House, “Space Policy Directive-3, National Space Traffic Management Policy”, June 18, 2018, <https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/space-policy-directive-3-national-space-traffic-management-policy/>, 最終アクセス日 2020年1月11日.
- ³² アメリカでは 米国国防総省では Space Domain Awareness (宇宙領域認識) という用語が使用されており、これは「宇宙の運用に影響を及ぼし、それによって我が国のセキュリティ、安全性、経済又は環境に影響を与える可能性のある宇宙領域に関連する、受動的又は能動的なあらゆる要因を識別し、特性把握し、及び理解すること」として使われている。Sandra Erwin, “Air Force: SSA Is No More; It’s ‘Space Domain Awareness’,” SpaceNews.com, November 14, 2019. <https://spacenews.com/air-force-ssa-is-no-more-its-space-domain-awareness/>, 最終アクセス日 2020年1月5日.
- ³³ Kai-Uwe Schrogl, et al., “Space Traffic Management: Towards a Roadmap for Implementation,” The International Academy of Astronautics, (June 2018): 22.
- ³⁴ The White House, “Space Policy Directive-3, National Space Traffic Management Policy”, June 18, 2018, <https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/space-policy-directive-3-national-space-traffic-management-policy/>, 最終アクセス日 2020年1月11日.
- ³⁵ Timothy Maclay and Darren McKnight, “Space Environment Management:Framing the Objective and Setting Priorities for Controlling Orbital Debris Risk,” presented at 70th International Astronautical Congress (IAC), Washington, D.C., October 2019.
- ³⁶ 同上。

-
- ³⁷ 防衛作戦、能力の再構成、抗たん性等脅威に対処するための一連の方法として米国 DoD が使用する「Space Mission Assurance」とは別の用語であることに留意する必要がある。[JP 3-14]。
- ³⁸ Mark Skinner, et al., “Results of the International Association for the Advancement of Space Safety Space Traffic Management Working Group,” *Journal of Space Safety and Engineering* 6, no. 2 (June 2019):88-91.
- ³⁹ 軌道暦は、宇宙を通る衛星の軌道を表す点のセット。
- ⁴⁰ Brian Weeden, “Space Surveillance and Situational Awareness PowerPoint,” Secure World Foundation, <http://swfound.org/media/205429/space-surveillance.pdf>.
- ⁴¹ 同上。
- ⁴² Mark Skinner, “Development of Distributed Space Object Tracking and Data Sharing as a Means of Achieving the UN 2030 Sustainable Development Goals,” presented at 5th Manfred Lachs International Conference on Global Space Governance, Montreal, QC, May 2017.
- ⁴³ Megan Clifford, Dave Baiocchi and William Wesler IV, “A Sixty-Year Timeline of the Air Force Maui Optical and Supercomputing Site,” RAND Corporation, 2013. https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR343.html.
- ⁴⁴ オーストラリアの宇宙監視望遠鏡 (SST : Space Surveillance Telescope) 等現在最も高度な光学望遠鏡の価格は約 1 億 5000 万米ドルである。Jeff Foust, “DARPA hands over space tracking telescope to the Air Force,” *Space News*, last modified on October 19, 2016, <https://spacenews.com/darpa-hands-over-space-tracking-telescope-to-the-air-force/>.
- ⁴⁵ European Space Agency, “ExoMars in Disguise,” European Space Agency, last modified on March 21, 2016, http://neo.ssa.esa.int/web/guest/news-archive?p_p_id=62_INSTANCE_qyX7&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-2&p_p_col_count=1&_62_INSTANCE_qyX7_struts_action=%2Fjournal_articles%2Fview&_62_INSTANCE_qyX7_groupId=10157&_62_INSTANCE_qyX7_articleId=18904&_62_INSTANCE_qyX7_version=3.9.
- ⁴⁶ 「Intelsat 29e 衛星の新しいビデオは劇的な「異常」を明らかにしている」
Video by ExoAnalytic Solutions Videos, aired April 12, 2019 on Youtube, <https://www.youtube.com/watch?reload=9&v=aqPrVn71lqY>.
- ⁴⁷ 米国空軍宇宙司令部、「宇宙ベースの宇宙監視」、米国 Air Force Space Command, last modified July 2019, <https://www.afspc.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Article/249016/ground-based-electro-optical-deep-space-surveillance/>.
- ⁴⁸ 米国 U.S. Air Force Space Command, “Geosynchronous Space Situational Awareness Program, U. S. 空軍宇宙司令部、最終変更日：2019 年 9 月、<https://www.afspc.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Article/730802/geosynchronous-space-situational-awareness-program-gssap/>
- ⁴⁹ Rober Scott, Stefan Thorsteinson and Viqar Abbasi, “On-Orbit Observations of Conjunction Space Objects Prior to the Time of Closest Approach,” Paper presented at Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS), Maui, HI, September 2019. <https://amostech.com/TechnicalPapers/2019/AstroDynamics/Scott.pdf>.
- ⁵⁰ Sarah Lewin, “How Was China’s Tiangong-1 Space Station Crash Tracked So Accurately?” *Space.com*, last modified April 2, 2018, <https://www.space.com/40168-china-space-station-tiangong-1-crash-tracking.html>.
- ⁵¹ Stefan Scharring, Jens Rodmann and Wolfgang Riede, “Network performance analysis of laser-optical tracking for space situational awareness in the Lower Earth Orbit,” presented at Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS), Maui, HI, September 2019.
- ⁵² Electro Optic Systems Ltd., “Space Debris Management,” EOS, <https://www.eos-us.com/space/space-debris-management/>.
- ⁵³ David Gast, “Lidar Design for Space Situational Awareness,” Naval PostGraduate School, September 2018. <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a488685.pdf>.
- ⁵⁴ Shunling Liang, “Lidar Remote Sensing” in *Comprehensive Remote Sensing*, 412-434, Netherlands:Elsevier, 2017, http://www2.geog.ucl.ac.uk/~mdisney/teaching/GE0GG141/papers/lidar_from_spave.pdf.

-
- ⁵⁵ Electro Optic Systems Ltd., “Space Debris Management,” EOS, <https://www.eos-us.com/space/space-debris-management/>.
- ⁵⁶ Kratos, “RF Space Situational Awareness Services,” Kratos, <https://www.kratosdefense.com/-/media/datasheets/ds-312-rf-space-situational-awareness-services.pdf>.
- ⁵⁷ Kratos, “Space Domain Awareness,” Kratos, <https://www.kratosdefense.com/products/space/signals/rf-management/rf-monitoring-services>.
- ⁵⁸ ICPSR, “Data Management and Curation,” University of Michigan:ICPSR, <https://www.icpsr.umich.edu/icpsrweb/content/datamanagement/index.html>.
- ⁵⁹ Analytical Graphics Inc., “CompSpOc,” Analytical Graphics Inc., <https://agi.com/comspoc>.
- ⁶⁰ Brian Weeden, “Space Surveillance and Situational Awareness PowerPoint,” Secure World Foundation, <http://swfound.org/media/205429/space-surveillance.pdf>.
- ⁶¹ Thomas S. Kelso, “Frequently Asked Questions:Two-Line Element Set Format,” Celestrak, last modified December 28, 2019, <https://www.celestrak.com/columns/v04n03/>
- ⁶² G-Portal 地球観測衛星データ提供システム, https://gportal.jaxa.jp/gpr/assets/mng_upload/GCOM-W/TLE.pdf.
- ⁶³ Dirk-Roger Schmitt, et al., “Satellite Based ADS-B for Commercial Space Flight Operations,” presented at 35th Space Symposium, Technical Track, Colorado Springs, Colorado, April 2019, <https://elib.dlr.de/131092/1/35SS%20TT%20SCHMITT%20ADS-B.pdf>.
- ⁶⁴ Brian Weeden, “The Numbers Game: What’s in Orbit and how do we know?” The Space Review, last modified July 13, 2009, <https://www.thespacereview.com/article/1417/1>.
- ⁶⁵ M. D. Hejduk and L. C. Johnson, “Evaluating Probability of Collision (Pc) Uncertainty,” NASA, April 2016, <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20160005313.pdf>.
- ⁶⁶ 同上
- ⁶⁷ Ryan C. Frigm, Matthew D. Hejduk, Lauren C. Johnson and Dragan Plakalovic, “Total Probability of Collision as a Metric for Finite Conjunction Assessment and Collision
- ⁶⁸ International Organization for Standardization, “Space data and information transfer systems – Conjunction data message,” ISO, last modified July 1, 2014. <https://www.iso.org/standard/64784.html>.
- ⁶⁹ Analytical Graphics Inc., “Products,” Analytical Graphics Inc., <https://www.agi.com/products>.
- ⁷⁰ AI Solutions, “FreeFlyer,” AI Solutions, <https://ai-solutions.com/freeflyer/>.
- ⁷¹ Merriam-Webster, “Service,” Merriam-Webster, <https://www.merriam-webster.com/dictionary/service>.
- ⁷² Harvey Reed, Nate Dailey, Bob Carden and Dave Bryson, “Blockchain Enabled Space Traffic Awareness (BESTA),” Presented at Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS), Maui, HI, September 2019.
- ⁷³ 同上

2. 主要なプレイヤー

宇宙状況把握 (SSA : Space Situational Awareness) は、宇宙機を運用する国々にとって、幅広い目的を提供する。当初、SSA は軍事目的のために開発されたが、今では正確かつ包括的な SSA データにより、軍事用、民間用及び商業用の宇宙システムの運用における活動を正確に解釈し、特徴を把握することが可能となっている。また、異常の検知又は物体の挙動等を認識する能力を高めることにより、宇宙における航行安全を改善し、宇宙物体同士の衝突リスクを低減することができる。その後、宇宙におけるアセットの保護、保険金の請求、従来に比較してより安全な航行管理等軌道を周回する宇宙物体に対してこれまでに無い SSA の使用事例が見られている。

経済的な観点では、軌道上で近接した位置にある宇宙機の活動を追跡することで、衛星運用者の安全航行の管理能力を支援し、衝突回避、軌道維持能力をも向上させる。2000 年以來、軌道上の宇宙機の数が増え続けているため、混雑した宇宙環境の正確な状況認識は、位置、航法及びタイミング (PNT : Position, Navigation, and Timing) システム、気象衛星、リモートセンシング、自国の検証技術手段 (NTM : National Technical Means of Verification) 等世界経済に不可欠な宇宙アセットの保護に貢献している。

運用の観点からは、正確で包括的な SSA データは、破砕、技術的な問題、衝突などの異常に関する科学的解明を可能にする。軍事、商業及び民生目的等あらゆる種類の事業者が、その活動領域における予測可能で、正確かつリアルタイムな特性情報を有することになれば、地球軌道上の安全性や持続可能性を損なうことなく、より多くの活動に対応できる。

2.1 日本の SSA 能力

2.1.1 概要

日本の政府機関としては、JAXA が SSA 能力を持っており、また防衛省も 2022 年度以降に SSA 能力獲得を目指して人員及び運用システムやデータ収集手段を含めた SSA システムの構築を進めている。しかし、現状民間事業者が利用可能な SSA プロダクトやサービスは、JAXA が保有する能力のうち一部のみに留まる。

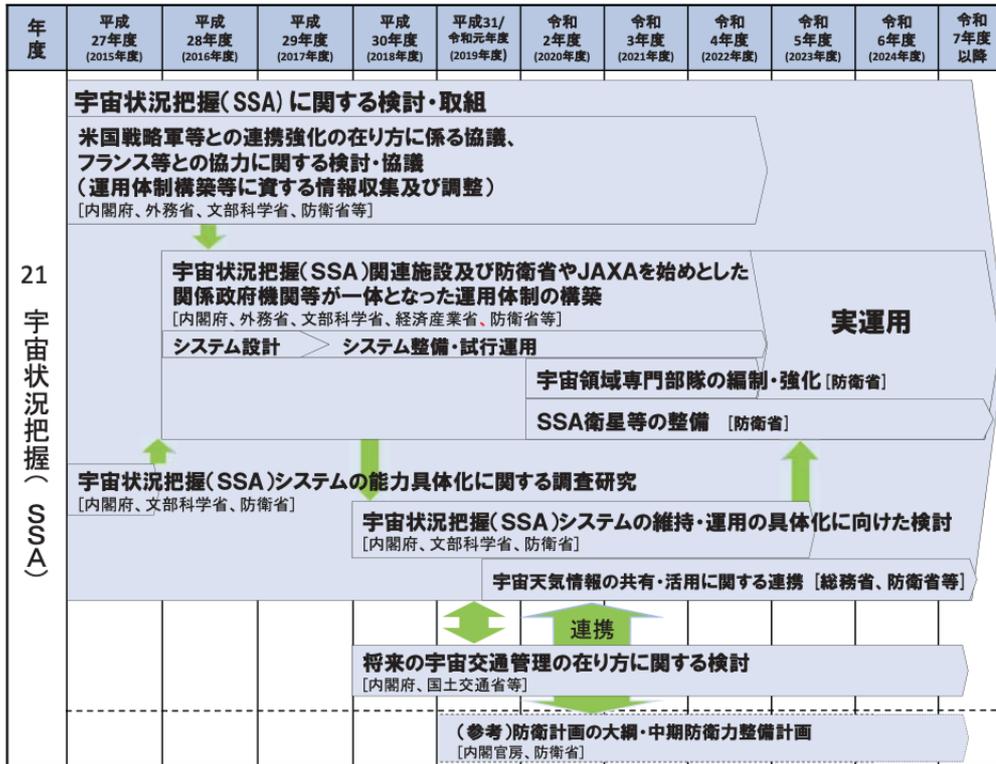
日本国内の SSA 能力を持つ民間事業者としては、JAXA による SSA を支える事業者が挙げられる。具体的には、JAXA の軌道決定システムを担当する富士通株式会社（富士通）、JAXA 保有のスペースガードセンターの運用を請け負う一般財団法人日本宇宙フォーラム（日本宇宙フォーラム）と、その下請けである特定非営利活動法人日本スペースガード協会（日本スペースガード協会）である。また、日本電気株式会社（NEC）は SSA の試験的な運用、IHI もデブリ観測設備を保有している。

2.1.2 日本の SSA に関する宇宙政策

宇宙基本計画は、「宇宙基本法（平成 20 年法律第 43 号）第 24 条に基づいて、我が国の宇宙開発利用に関する施策の総合的かつ計画的な推進を図るために策定されるものであり、我が国の宇宙開発利用の最も基礎となる計画として位置づけられる」文書である。2016 年の改訂版が 2020 年 2 月時点で最新のものとなるが、この中で宇宙空間の安定的利用の確保、宇宙協力を通じた日米同盟等の強化の観点から、具体的な取り組みとして SSA が上げられている。

宇宙基本計画工程表は、宇宙基本計画を踏まえて政策項目ごとの取り組み計画やその進捗を示した文書であり、2015 年 1 月の初版策定以降、毎年度改訂されている。SSA は初版から項目として挙げられており、「我が国の宇宙状況把握（SSA）体制の確立と能力の向上を図るとともに、米国との連携強化の在り方について協議を進め、宇宙空間安定的利用の確保及び日米同盟の強化に寄与する」ことを成果目標としている。2019 年 12 月の改訂版には、2020 年度以降の取り組みとして、防衛省による各種取り組み内容のほか、SSA 多国間机上演習への参加、SSA プラットフォーム形成に向けたフェージビリティ・スタディなどが上げられている。

4. (2)①v)宇宙状況把握



21 宇宙状況把握(SSA)

<p>成果目標</p> <p>【安保】我が国の宇宙状況把握(SSA)体制の確立と能力の向上を図るとともに、米国との連携強化の在り方について協議を進め、宇宙空間の安定的利用の確保及び日米同盟の強化に寄与する。</p> <p>【基盤】我が国の宇宙状況把握(SSA)体制の確立と能力の向上を図るとともに、米国との連携強化の在り方について協議を進め、宇宙空間の安定的利用の確保に寄与する。</p>
<p>2019年度末までの達成状況・実績</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 防衛省とJAXAの間で技術連絡会や人事交流等を継続的に行い、我が国のSSAシステムの体制構築及び両システム間の連携に関する調整を行った。 ■ 2023年度以降のシステム運用開始を見据え、2019年度、JAXAはSSAレーダの整備及び光学望遠鏡の更新を実施し、防衛省は、米国及び国内関係機関との連携に基づくSSAシステムの整備に必要な各種アセットの詳細設計等を実施するとともに、ディープスペースレーダ(DSR)の施設整備工事に着手した。 ■ SSA多国間机上演習「グローバルセンチネル2019」に参加した。 ■ 2023年度以降のシステム運用開始を見据え、関係3府省(内閣府、文部科学省、防衛省)により、システムの維持・運用の具体化に向けた検討を進めた。 ■ 防衛省は、宇宙天気情報の活用についてNICTと情報の共有・活用のための連携に向けた取り組みを行った。 ■ 国際シンポジウムの開催等により、SSA及び宇宙交通管理(STM)に関する諸外国の取組等を情報収集した。 ■ 将来のSSA情報収集能力向上等を検討するための国内外における民間も含めたSSA衛星等の技術動向、民間事業者が活用可能なSSAプラットフォームに関する各国動向等を調査する。
<p>2020年度以降の取組</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 防衛省は、2020年度に宇宙領域専門部隊を新編し、SSAシステムの実運用に向けた各種取組を推進するとともに、SSA衛星及びSSAレーザ測距装置の導入に係る取組を進める。また、Xバンド防衛通信衛星等の周辺を飛しょうするデブリや不明物体の特性を把握するためのSSA衛星の整備については、2026年頃の打上げを目標に取組を進める。 ■ SSA多国間机上演習への参加を継続するとともに、米戦略軍等への自衛官等の派遣等によりSSA体制整備を効果的に推進する。 ■ 2019年度の調査結果を踏まえ、民間事業者が活用可能なSSAプラットフォーム形成に向けたフィージビリティスタディを実施する。 ■ 関係府省及び関係機関が一体となったSSA体制の在り方について、米国との連携強化も踏まえて継続的に検討を行う。 ■ 2023年度から運用するSSAシステムの担い手をはじめとする、宇宙分野の人的基盤を人材育成等により構築していく。 ■ SSA情報の能力構築や将来的な能力強化のためSSAシステムの運用要領等の具体化、JAXAとの連携、米国や仏等との二国間・多国間協力等の具体的な取組を推進する。また、防衛省は、宇宙空間の電磁的環境情報等に関しJAXAに加えて、総務省との連携のあり方を検討するとともに、宇宙天気情報の活用についてNICTとの連携を進める。 ■ 2023年度以降のシステム運用開始を見据え、関係3府省(内閣府、文部科学省、防衛省)の間で、システムの設計・整備状況、SSA情報の果たす役割を踏まえつつシステムの維持・運用・経費等の具体化に向けた検討を進める。 ■ 内閣府、国土交通省等の連携により、STM等の国際的な動向等について調査し、将来のSSA情報の利活用について検討する。

図表 2-1：宇宙基本計画工程表（令和元年度改訂）における SSA の項目

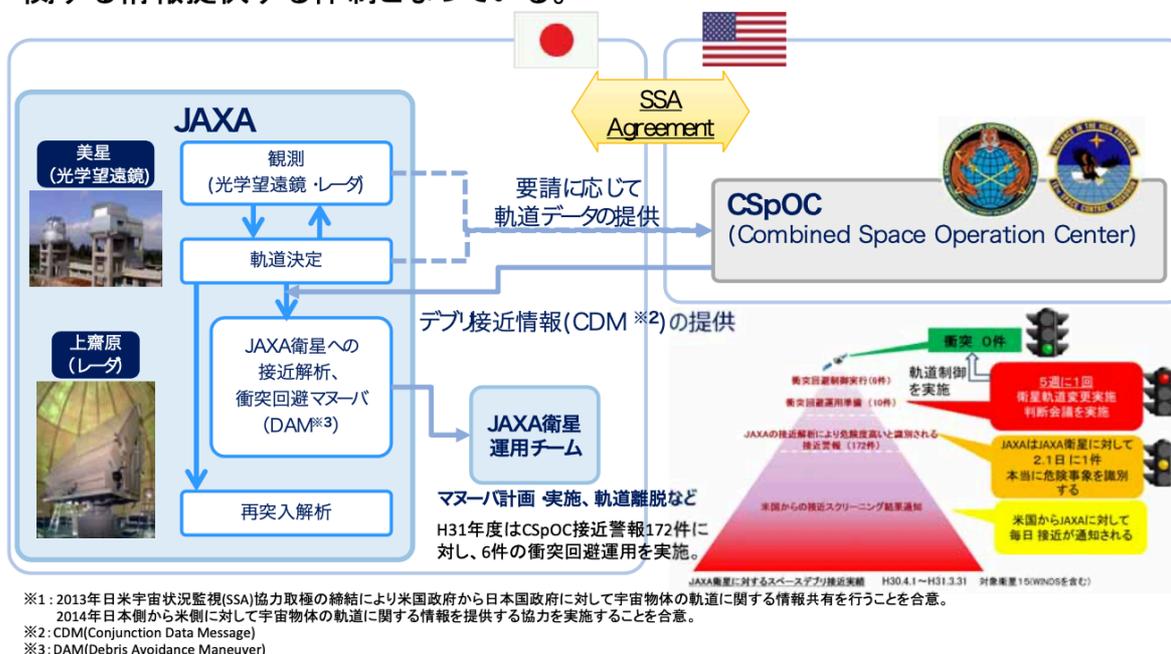
出典：「宇宙基本計画工程表（令和元年度改訂）」宇宙開発戦略本部決定、令和元年12月13日

2.1.3 JAXA の能力

JAXA による SSA は、JAXA の運用する衛星の衝突回避マヌーバの意思決定を目的としたものである。JAXA の運用する衛星のうちマヌーバ能力を持つ衛星について、CSpOC から CDM を受け取り、スペースガードセンターからの観測結果や CSpOC の公開データ等を踏まえて衝突確率の評価を行い、衝突回避マヌーバの実施要否を判断している。現状民間事業者が利用可能な SSA プロダクトやサービスは、JAXA が保有する能力のうち一部のみに留まる。

2019.5.31 第2回スペースデブリに関する関係府省等タスクフォース 現在のSSA活動概要

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。



図表 2-2：JAXA の現在の SSA 活動概要

出典：第2回スペースデブリに関する関係府省等タスクフォース（2019年5月31日）のJAXA発表資料、<https://www8.cao.go.jp/space/taskforce/debris/dai2/siryou3-1.pdf>、最終アクセス日2020年2月23日

2.1.3.1. インプット/キュレーション

上齋原スペースガードセンター

上齋原スペースガードセンター (KSGC : Kamisaibara Space Guard Center) は、岡山県鏡野町上齋原に設置されている JAXA 所有のレーダー観測設備である。高度 650km において 10cm 級の物体を観測する能力を持ち、同時に最大 30 個観測できる新規レーダーを 2021 年度に整備予定である。観測対象は LEO である。

観測計画は JAXA 筑波宇宙センターの解析システムから出されており、無人運用で観測が行われる。

レーダー Radar	観測能力 Observation capacity	10cm級(高度650km) 10 cm class (at an altitude of 650 km)
	同時観測物体数 Number of observable objects at once	最大30 Up to 30
光学望遠鏡 Optical telescope	検出限界等級 Detection limit grade	1m望遠鏡：約18等級 1 m telescope: about 18 grade
		50cm望遠鏡：約16.5等級 50 cm telescope: about 16.5 grade
解析システム Analysis system	管理対象物体数 Number of targets	最大100,000物体 Maximum 100,000 objects
	観測データ数(レーダー) Amount of observation data (Radar)	10,000パス/日 10,000 paths/day
	観測計画立案など Compiling an observation plan etc.	自動処理 Automatic processing

図表 2-3 : JAXA の SSA システムの主要諸元

出典 : JAXA パンフレット「宇宙状況認識 (SSA) システム」

<http://www.jaxa.jp/projects/pr/brochure/pdf/05/engineering06.pdf>, 最終アクセス日 2020 年 2 月 22 日

美星スペースガードセンター

美星スペースガードセンター (BSGC : Bisei Space Guard Center) は、岡山県井原市に設置されている JAXA 所有の光学観測設備である。1m 望遠鏡と 50cm 望遠鏡を有し、それぞれの検出限界等級は約 18 等級と約 16.5 等級である。観測対象は主に GEO である。1m 望遠鏡は、老朽化に対応して 2020 年度中に主鏡交換、駆動系更新等が行われる予定である。

KSGC と同様に観測計画は JAXA 筑波宇宙センターの解析システムから出されている。運用は、JAXA から委託を受けた日本宇宙フォーラムが行っている。

衛星の位置情報

一般的に、運用中の各衛星のオペレーターは、衛星から送られてくるデータ (テレメトリデータ) から衛星の位置情報を把握することができる。この位置情報

は、地上から当該物体を観測して得られる情報よりも精度が高い。JAXA 衛星が CDM を受け取った場合の接近解析においても、テレメトリデータから得られる位置情報を活用している。

また、JAXA は、JAXA が運用するマヌーバ能力を持つ衛星が軌道を変更（軌道遷移）する場合には事前に新しい位置情報を軌道暦として CSpOC に提供している。それによって CSpOC から受け取る CDM の精度を上げることができる。

2.1.3.2 データ管理/キュレーション及び分析

インプットとして得られた情報は、JAXA 筑波宇宙センター内の追跡ネットワーク技術センターが持つデータ解析システムで処理、分析されてる。管理対象物体は最大 10 万個である。観測優先度を上げる条件、下げる条件等のルールを事前に決めることにより、観測計画立案の自動処理化を進めている。

2.1.3.3 プロダクト/サービス

JAXA では外部向けに SSA 製品やサービスの提供は行っていない。ここでは、JAXA 内での利用のためのプロダクト及びサービスについて記述する。

JAXA では、CSpOC が Space-Track.org 等を通して公表しているカタログに、KSGC や BSGC からの観測結果、各衛星の位置情報等を加えたカタログを保有している。これを内部向けの SSA プロダクトと捉えることができる。

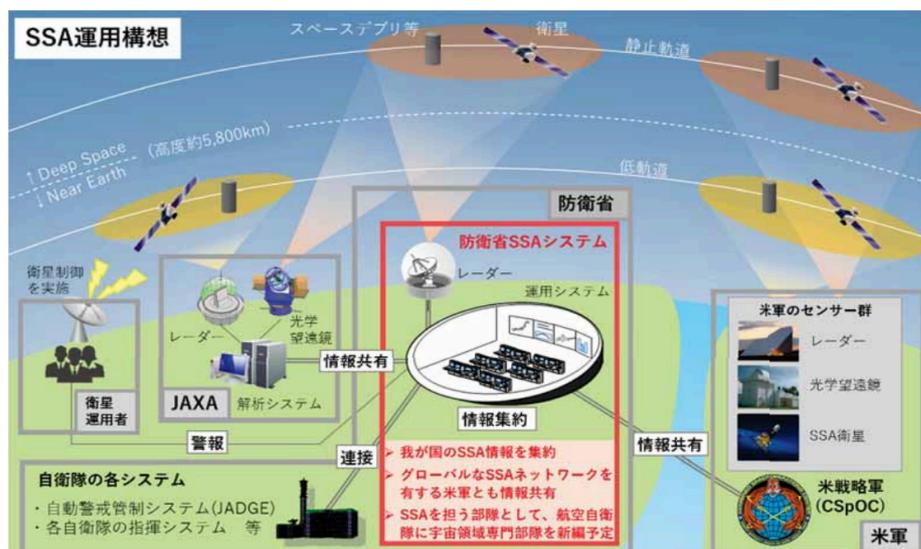
JAXA では、JAXA の全衛星について、CSpOC から CDM を受け取っている。そして、CDM を受け取った衛星及び接近可能性のある物体について、実機の質量等の正確な数値を用いて衝突確率の評価を行い、衝突回避マヌーバの実施要否を判断している。これは内部向けの SSA サービスと考えることができる。JAXA では、衝突回避マヌーバ後の軌道が、他のスペースデブリと接近しないかどうかの評価については、Classified な物体の軌道情報も含めたカタログを保有している CSpOC に対し、再度軌道情報を提示して実施してもらっている。

2.1.4 防衛省の能力

防衛省による SSA は、スペースデブリ等から我が国にとって重要な人工衛星を守ることが目的としており、レーダーと運用システムからなる SSA のシステムを構築中である。2019 年 12 月改訂の宇宙基本計画工程表によると、2020 年度に宇宙領域専門部隊を新編する予定である。「X バンド防衛通信衛星等の周辺を飛しょうするデブリや不明物体の特性を把握するための」宇宙設置型光学望遠鏡は 2026 年度頃の打上げを目標としており、他にも SSA レーザー測距装置の保有も検討している。JAXA 及び米国と情報共有も行う予定である。

宇宙状況監視（SSA）体制構築に向けた取組

- ▶ スペースデブリ等から我が国にとって重要な人工衛星を守るため、宇宙空間を常時継続的に監視
- ▶ 文科省/JAXAと連携し、**防衛省の宇宙状況監視システムを令和4年度までに構築**（宇宙基本計画）
- ▶ 防衛省は、主に静止軌道を監視可能なレーダーと、情報の集約・処理・共有を行う運用システムを整備



上記の取組に加え、中期防衛力整備計画において、宇宙設置型光学望遠鏡及びSSAレーザ測距装置を新たに導入し、宇宙空間の状況を地上および宇宙空間から常時継続的に監視する体制を構築することとしている。

宇宙設置型光学望遠鏡(イメージ図) ▶



図表 2-4：防衛省 SSA 体制構築に向けた取組

出典：第2回スペースデブリに関する関係府省等タスクフォース（2019年5月31日）のJAXA発表資料、<https://www8.cao.go.jp/space/taskforce/debris/dai2/siryous3-1.pdf>、最終アクセス日2020年2月23日

2.1.4.1 インプット/キューレーション

ディープスペースレーダー

ディープスペースレーダー（DSレーダー）は、山口県山陽小野田市に防衛省が設置予定のレーダー観測設備である。複数目標を同時追尾でき、探知距離は約40,000kmとGEOの観測が可能な能力を持ち、「複数のアンテナを用いて、高精度・遠距離探知を実現」する。

防衛省は「防衛省の任務遂行重要用な衛星（Xバンド通信衛星、気象衛星等）」と「上記以外の我が国の民生用衛星」を防護対象としており、民間事業者の衛星も含まれる。DSレーダーの観測対象は、防護対象及び防護対象に影響を与える宇宙物体が観測対象となる。

DSレーダーの観測結果は、防衛省内で利用する他に、CSpOCにも提供される予定である。

その他

平成 31 年度から平成 35 年度までを対象とする中期防衛力整備計画において、「宇宙設置型光学望遠鏡及び SSA レーザー測距装置を新たに導入する」とされている。宇宙設置型光学望遠鏡については「2026 年頃の打上げを目標に、2020 年度から整備を開始」する。

2.1.4.2 データ管理/キュレーション及び分析

インプットとして得られた情報は、東京都府中市の航空自衛隊府中基地に整備する運用システムに集約し、処理、共有を行う。運用システムが持つ機能の例は以下の通りである。

<SSA運用システムの機能の一例>



図表 2-5 : 防衛省 SSA 運用システムの機能の一例

出典：防衛省の「SSAに係る取組について」、第2回宇宙安全保障部会（2018年5月14日）の防衛省説明資料、<https://www8.cao.go.jp/space/committee/27-ampo/ampo-dai27/siryoku2-2.pdf>、最終アクセス日 2020 年 2 月 18 日

2.1.4.3 プロダクト/サービス

防衛省では接近警告等を除いた外部向けの SSA プロダクトやサービスの提供は現状では想定していない。ここでは、防衛省内での利用のためのプロダクト及びサービスについて記述する。

防衛省では、CSpOC との情報共有により、各種インプットからの情報を加えたカタログを保有する。これを内部向けの SSA プロダクトと捉えることができる。そして、接近解析、再突入分析等の結果は、防衛省内だけではなく衛星運用者に対しても公表されることから、官民全般を対象とした SSA サービスと考えることができる。

2.1.5 民間企業の能力

2.1.5.1 富士通

富士通は、JAXA のデブリ観測に関わるデータ処理と軌道解析において、長年システム開発と運用を行ってきた。具体的には、スペースデブリ観測のための観測計画立案、デブリの軌道決定、衛星へのデブリの接近予測解析、デブリの再突入予測解析等を行うシステムの開発や、このシステムを運用する人材を保有している。つまり、SSA のサービスのうち、SSA ソフトウェアサービスや SSA 専門家によるサービスを提供していると言える。これらの SSA 能力の民間事業者への提供は現状では行っていない。

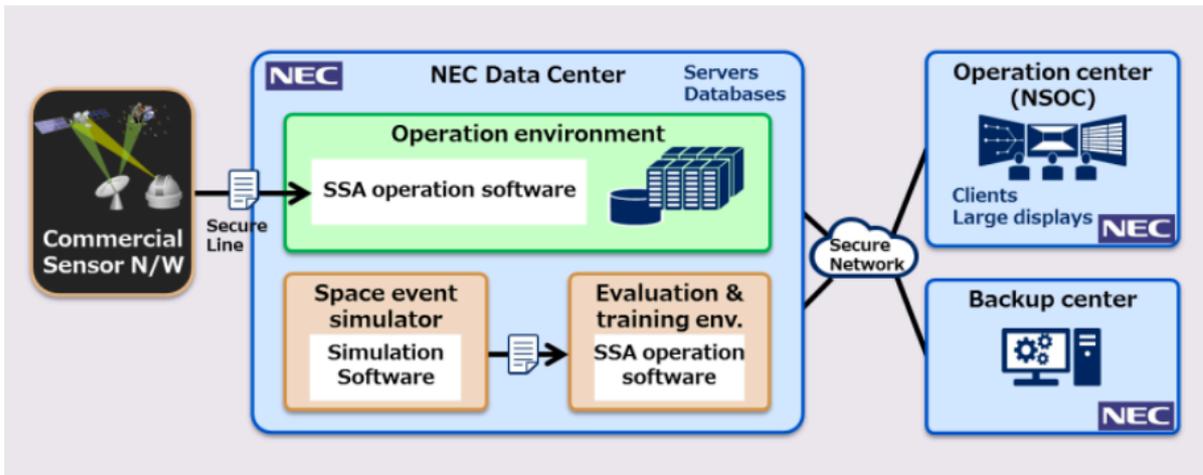
2.1.5.2 日本宇宙フォーラム、日本スペースガード協会

日本宇宙フォーラムは、JAXA の保有する美星スペースガードセンターの運用を受託している。また、内閣府宇宙開発戦略推進事務局が 2016 年 3 月以降毎年年度末に東京で開催している宇宙空間の安定的利用の確保に関する国際シンポジウムの事務局を努めている。SSA サービスのうち、SSA 専門家によるサービスを提供していると考えられるが、民間事業者への SSA 能力の提供は現状では行っていない。

日本スペースガード協会は、日本宇宙フォーラムから委託を受けて美星スペースガードセンターの運用を行っている。日本宇宙フォーラム同様、SSA サービスのうち SSA 専門家によるサービスを提供していると考えられるが、民間事業者への SSA 能力の提供は現状では行っていない。

2.1.5.3 NEC

従来 NEC は衛星の開発・製造までを手掛けていたが、近年業務範囲を衛星運用にも広げている。2018 年 4 月に東京に NEC 衛星オペレーションセンターを新設しており、この中で NEC ComSpOC と呼ぶ SSA システムのプロトタイプを開発している。インプットとしては AGI 社の商用プロダクトを活用している。分析としては、軌道決定や故障解析、CDM の発出や衝突回避制御のための評価支援を、自社保有の衛星について行っている。社内向けの SSA サービスの提供と捉えることもできるが、民間事業者への SSA 能力の提供は現状では行っていない。



図表 2-6 : NEC ComSpOC のプロトタイプシステムのシステム構成

出典 : Daiki Mori, Masatoshi Ebara, Takahiro Okada, Hideki Kimura, "Commercial SSA capability in Japan", Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS) 2019

2.2 米国の SSA 能力

- 米国政府は現在、最大の全国センサーネットワークである SSN を運用している。このネットワークは、カタログ内の全ての物体の運用者に衝突警告を提供するために第 18 宇宙管制飛行隊 (18SPCS : 18th Space Control Squadron) によって利用されている。
- 商業 SSA サービスの米国の提供者のいくつかは、グローバル SSA 市場で台頭してきており、多くがグローバル SSA データ共有コンソーシアムに貢献又は管理している。

2.2.1 米国宇宙政策

2010 年の米国の国家宇宙政策には、SSA 能力への継続的な投資を優先する 2 つの声明が含まれている。第 1 に、米国は、商業、民生及び国家安全保障といった様々なソースからの SSA 情報を開発し、保守し、及び使用を約束し、「宇宙環境の長期的な持続可能性と責任ある使用に合致しないような宇宙空間における行動を検知し、特定し、及び属性付け（アトリビューションを行う）」¹ため、更なる SSA 能力の精度と適時性の向上を「国家安全保障、民生宇宙機関及び商業及び外国宇宙事業の支援」の国家的優先事項として設定し、米国が SSA サービスのグローバルリーダーとして果たす役割を強調している。

2018 年 6 月、SPD-3²は、米国の国家 STM 計画を設けた。この大統領令には、米国航空宇宙局 (NASA : National Aeronautics and Space Administration) が米国を更新するための指示など、SSA に関連するいくつかの重要な要素と宇宙領域の管理と管理の強化に向けたステップが含まれていた。軌道デブリ軽減標準プラクティスを実施し、デブリの作成を回避するために、衛星の設計と運用の両方について新しいガイドラインを確立した。また、SPD-3 は、連邦通信委員会 (FCC : Federal Communications Commission) が新しい (ODMSP : Orbital Debris Mitigation Standard Practices) を商業ライセンスのプロセスに組み込むように指示し、米国企業が衛星を宇宙に打上げるための要件を引き上げることになる。

これらのイニシアチブを通じて、SPD-3 は、商業活動の成長領域としての宇宙の米国の考え方を更に強調した。この見通しに基づけば、この大統領令の最大の特徴は、米国の公的 SSA 能力に対する権限と責任を米国国防総省から米国商務省の宇宙商務局に移行することを開始することにあつた³。

米国家安全保障宇宙戦略 (NSSS : National Security Space Strategy) は、宇宙態勢見直し (Space Posture Review) 後 10 年ごとに作成される米国の宇宙政策文書であり、現在及び将来の戦略的宇宙環境について宇宙及び安全保障政策の優先順位を評価している。NSSS は、米国大統領の国家安全保障及び国家宇宙政策並びに米国国防総省の 4 年ごとの国防計画見直し (QDR:Quadrennial Defense Review) 及びのインテリジェンス・コミュニティの国家情報会議 (NIC: National Intelligence Council) と協議して形成される⁴。2018 年に、NSSS の改訂版が公表され、2011 年バージョンが更新された。これらの政策においては、SSA に関連する次の戦略目標が強調された。

- 米国は、抗たん性、防衛及び損害を受けた能力を再構成する能力を強化するために、宇宙のアーキテクチャーの変革を加速する。

- 米国は、基本的な宇宙能力を改善し、状況認識、インテリジェンス、取得プロセスの改善を通じて効果的な宇宙運用を確保する。
- 米国は、規制の枠組み、政策及びプロセスを合理化して、米国の民間企業を一層活用し、またサポートする。有人探査を可能にし、負担分担を促進し、脅威に共同して対応することを促進するために、二国間及び多国間での関与を追求する。

もう一つの定期的に更新される有名な宇宙政策文書は、宇宙作戦に関する共同刊行物 3-14 (JP 3-14: Joint Publication 3-14 on Space Operations) であり、米軍の参謀本部長の指揮の下に作成された報告書である。JP 3-14 は、戦闘教義を定め、共同軍事作戦の活動と実績を管理し、政府及び非政府機関、多国籍軍及び他の組織間のパートナーとの軍事的相互作用及び協力を考慮している。2018 年の JP 3-14⁵では、SSA を「宇宙での運用が依存している、宇宙物体と運用環境における必須の基礎的、最新及び予測的な情報と特性評価情報」と定義している。更に、宇宙監視と環境監視、米国の状況、

協力的な衛星システム、米国及び多国籍宇宙の準備状況の理解並びに宇宙領域の全体的な分析も含む。2018 年の JP 3-14 では、理想的には、将来の SSA アーキテクチャーには、宇宙における能力及び米国に潜在的な脅威をもたらすような意図の双方の理解が組み込まれることにも注目している。

2.2.2 米国政府の能力

2.2.2.1 インプット

米国は、SSA の世界で最も強固なインフラの拠点である。多くの国と同様に、米国は初期のミサイル警戒システムに由来する軍事的な能力として SSA センサーのネットワークを構築してきた。今日、SSN を構成するセンサーは、米国国防総省 (米国 DoD: Department of Defense) の宇宙統合軍 (USSPACECOM) の管理下にある。今般新規に創設された米国宇宙軍 (USSF: U.S. Space Force) は、かつての空軍宇宙軍団 (AFSPC: Air Force Space Command) がその前身に当たるが、DoD の SSA 能力の運用に関与する主要な司令部である。コロラド州のピーターソン空軍基地に本部を置き、宇宙領域においても米国及び同盟国の利益を保護するため、統合部隊に対して宇宙能力を付与すべく、宇宙軍を「編成、訓練、装備」することをそのミッションとする。この広範な権限の範囲内で、USSF は、軍事、民生及び商業の宇宙領域認識 (space domain awareness。注: SSA についての国防総省の軍事用語)、宇宙軍や衛星運用の指揮統制、核兵器の指揮・統制・通信 (3C)、核爆発の検知、ミサイル防衛を宇宙からサポートするためのミサイル警戒システム等いくつかのミッションごとの軍隊を編成し、訓練し及び装備するための特定の責任を負っている⁶。USSF は、シュリーバー、バックリー、パトリック、ロサンゼルス及びヴァンデンバーグ等の空軍基地等も管理している。また、ノースダコタ、アラスカ、ハワイ、海外の小規模な施設やユニットも管理している。特に重要なのは、旧第 14 空軍が USSF の宇宙作戦司令部 (SPOC: Space Operations Command) に改名されたヴァンデンバーグ空軍基地である。

SSNは、3つのセンサー（専門センサー、付随センサー及び貢献センサー）から構成され、「凝視する」フェーズド・アレイ・レーダーから、空の特定の部分、特に分解、再突入又は特定の宇宙機等を監視可能な光学望遠鏡にまで至る。SSNに統合されるデータに貢献するセンサーとしては、他国が所有又は運用するデータや、例えばマサチューセッツ工科大学（MIT）リンカーンスペース監視複合施設に設置されている学術機関が保有するデータがある。複合施設の3つのレーダー

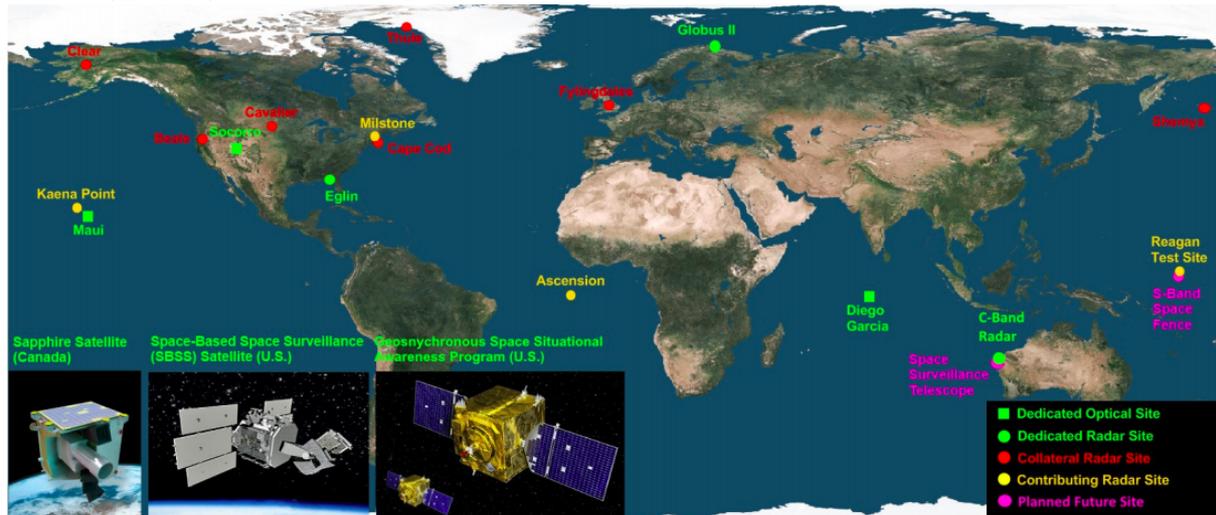
（Millstone Hill Radar、Haystack Ultra-wide Band Satellite Imaging Radar、Haystack Auxiliary Radar）からのデータは、データ管理とセンサー改善のための次世代研究の開発においてMIT研究者を支援している。

SSNにデータを供給する多くの追跡望遠鏡は宇宙ベースである。米国SSNにデータを供給する追跡望遠鏡は宇宙空間に配備されるものが多く、米国の宇宙設置型宇宙監視（SBSS：Space-Based Space Surveillance）衛星、静止空間状況認識プログラム（GSSAP：Geosynchronous Space Situational Awareness Program）衛星、先端技術リスク低減（ATRR：Advanced Technology Risk Reduction）衛星及びカナダのSapphire衛星がセンサーとして貢献している。これらの宇宙ベースの衛星は、地上ベースの望遠鏡を使用してGEOの物体を詳細にイメージングすることが難しいため、主に組み込まれている⁷。宇宙ベースの場合、時刻と天気がセンサーがいつ観測できるかに影響する制限とならないことであり、利用可能性に一貫性があることが、地上ベースの電気光学望遠鏡に対する利点である⁸。

現在、SSN向けに2つの主要なセンサーシステムが開発中である。1つ目は、「スペースフェンス（Space Fence）」と呼ばれる米国所有の次世代Sバンドレーダー（2～4GHz）であり、マーシャル諸島のケゼリン環礁で建設中。スペースフェンスは、2019年の一連のテストの後に運用開始が近づいており、2013年に廃止された従来の空軍宇宙監視システム（AFSSS：Air Force Space Surveillance System）を置き換える。スペースフェンスは、2019年の一連のテストの後に運用開始が近づいており、2013年に廃止された従来の空軍宇宙監視システム（AFSSS：Air Force Space Surveillance System）を置き換える。米国国防総省現在追跡できるLEOにおける10cmを超える物体数は16,000個であるが、スペースフェンスは、主にLEOにおいて合計200,000個を超える物体の検出及び追跡する能力が期待されている。このキャパシティには、直径約2センチメートルまでの物体が含まれ、現在のSSNの直径約10センチメートルレベルに比べて感度が大幅に向上することが期待されている。

開発中のもう一つのシステムは宇宙監視望遠鏡（SST：Space Surveillance Telescope）である。これは、ニューメキシコ州のホワイトサンズに配置された電気光学望遠鏡で、西オーストラリアの海軍通信局ハロルドE.ホルトに移転されている⁹。もともと米国国防高等研究計画局（DARPA：Defense Advanced Research Project Agency）の支援を受けて開発されたSSTは、11.5フィートの開口部を備えた3つの反射鏡の光学設計を備えている。湾曲した光学焦点面を備えたミラー設計により、この望遠鏡は従来の望遠鏡よりもはるかに広い視野（FOV：field of view）を操作可能であり、深宇宙でのかすかな物体を検出できるほど高感度でありながら、高速

かつ広範囲の検索を実行できる¹⁰。



The U.S. Space Surveillance Network

図表 2-7 : 米国 US SSN

緑のハイライト= SSA の専用サポート

赤いハイライト= SSA の付随的サポート

黄色のハイライト= SSA の貢献的サポート

(SST は 2021 年まで SSN ヘデータを供給する予定)

図表 2-8：米国 US SSN センサー（出典：米国政府説明責任局¹¹）

US SSN センサー	場所	センサーの種類	能力	その他の属性
マウイ	ハワイ州マウイ	電気光学望遠鏡、地上ベースの電気光学深宇宙システム（GEODSS：Ground-based Electro-Optical Deep Space System）12の一部	深宇宙メトリック追跡用のプライマリセンサー。光学空間物体識別（SOI）データも提供	
ソコロ	ニューメキシコ州ソコロ	電気光学望遠鏡、地上ベースの電気光学深宇宙システム（GEODSS）の一部	深宇宙メトリック追跡用のプライマリセンサー。光学空間物体識別（SOI）データも提供	
ディエゴ・ガルシア	英国領インド洋地域	電気光学望遠鏡、地上ベースの電気光学深宇宙システム（GEODSS）の一部	深宇宙メトリック追跡用のプライマリセンサー。光学空間物体識別（SOI）データも提供	
グローブス II	ヴァルド、ノルウェー	機械レーダー	近地球メトリック追跡と深宇宙の広帯域画像を提供	
エグリン	エグリン空軍基地、フロリダ州	フェーズドアレイレーダー	近距離メトリック追跡用のプライマリセンサー。また、レーダー断面積（RCS）測定及び制限された深宇宙メトリック追跡を提供	
アセンション	アセンション島、南大西洋	機械式レーダー	地球に近いメトリック追跡と RCS 測定を提供	
宇宙ベースの監視衛星（SBSS）	宇宙	光センシング衛星	メトリック観察とフォトメトリックの SOI データの両方を提供	
静止同期 SSA プログラム（GSSAP：Geosynchronous SSA Program）	宇宙	機密	プログラムの正確な仕様と詳細は機密 ¹³	
スペースフェンス（新）	マーシャル諸島、クェゼリン環礁	機械式レーダー（S-バンド）	軌道にある物体の手がかりのない検出、追跡、正確な測定を実行するように設計された地上レーダー	未稼働 2020 年に稼働状態になると予想されている
宇宙監視望遠鏡（SST：Space Surveillance Telescope）14	西オーストラリア州ノースウェストケープの海軍通信	電気光学望遠鏡	深宇宙メトリック追跡用のプライマリセンサー。光学空間物体識別（SOI）データも提供	未稼働ニューメキシコからの移転、2021 年に運用される予定

US SSN センサー	場所	センサーの種類	能力	その他の属性
	局ハロルド・E・ホルト			
クリア	クリア・アラ スカ州空軍基 地	アレイレーダー、弾道ミ サイル早期警戒システム (BMEWS) の一部	主にミサイル警告用。地 球に近いメトリック追跡 と RCS 測定を提供	
チューレ	グリーンラン ド チューレ 空軍基地	アレイレーダー、弾道ミ サイル早期警戒システム (BMEWS) の一部	主にミサイル警告用。地 球に近いメトリック追跡 と RCS 測定を提供	
王室空軍基地 (フ ィリングデール ズ)	フライングデ ールズ、英国	アレイレーダー、弾道ミ サイル早期警戒システム (BMEWS) の一部	主にミサイル警告用。地 球に近いメトリック追跡 と RCS 測定を提供	
キャバリア	ノースダコタ 州キャバリア 空軍基地	フェーズドアレイレーダ ー	主に、海上発射型及び大 陸間弾道ミサイルの戦術 的観点からの警告及び攻 撃のための評価用。地球 に近いメトリック追跡と RCS 測定を提供	
コブラデー15	アラスカ空軍 基地	フェーズドアレイレーダ ー	主にミサイル防衛用。地 球に近いメトリックトラ ッキングと RCS 測定を提 供	
ケープコッド	マサチューセ ッツ州ケープ コッド空軍基 地	フェーズドアレイレーダ ー、PAVE フェーズドア レイ警告システム (PAVE PAWS) の一部	ミサイル警戒及び宇宙監 視データを提供。近地球 メトリック追跡と RCS 測 定を提供	
ビール	カリフォルニ ア州ビール空 軍基地	フェーズドアレイレーダ ー、PAVE フェーズドア レイ警告システム (PAVE PAWS) の一部	ミサイル警戒及び宇宙監 視データを提供。近地球 メトリック追跡と RCS 測 定を提供	
ヘイスタック補助 レーダー	マサチュー セッツ州ウェ ストフォード	リンカーン宇宙監視シス テム (LSSC : Lincoln Space Surveillance System) の一部である機 械レーダー (Ku バン ド)	近地球及び深宇宙の広帯 域画像と RCS 測定を生成	
ミルストーンヒル 天文台	マサチュー セッツ州ウェ ストフォード	操縦可能な UHF アンテナ と操縦可能な L バンドア ンテナ	近地球及び深宇宙の広帯 域画像と RCS 測定を生成	
マウイ宇宙監視シ ステム (MSSS : Maui Space Surveillance)	ハワイ州マウ イ	電気光学望遠鏡 (5)	深宇宙のメトリックトラ ッキングとフォトメトリ ック SOI、及び近地球光学 画像を生成	

US SSN センサー	場所	センサーの種類	能力	その他の属性
System) ;高度な電気光学システム (AEOS : Advanced Electro Optical System) ;光学スーパーコンピューティングサイト (AMOS : Optical Supercomputing Site) ;RAVEN				
ARPA リンカーンCバンド観測可能レーダー (ALCOR)	マーシャル諸島、クェゼリン環礁	機械式レーダー;ロナルドレーガン弾道ミサイル防衛テストサイト (RTS) の一部	近地球広帯域画像と RCS 測定を生成	
ARPA 長期追跡及び計装レーダー (ALTAIR)	マーシャル諸島、クェゼリン環礁	機械式レーダー;ロナルドレーガン弾道ミサイル防衛テストサイト (RTS) の一部	地球及び深宇宙のメトリック追跡と RCS 測定を生成	
ミリ波 (MMW)	マーシャル諸島、クェゼリン環礁	機械式レーダー、ロナルドレーガン弾道ミサイル防衛テストサイト (RTS) の一部	近地球広帯域画像と RCS 測定を生成	
ターゲット解像度及び識別実験 (TRADEX)	マーシャル諸島、クェゼリン環礁	機械式レーダー、ロナルドレーガン弾道ミサイル防衛テストサイト (RTS) の一部	近地球及び深宇宙のメトリック追跡と RCS 測定を生成	
Sapphire (カナダ)	宇宙	宇宙ベースの光学望遠鏡	6,000~40,000km の軌道を監視	

2.2.2.2 データ管理/キュレーション及び分析¹⁶

SSN センサーからのデータは、ヴァンデンベルク空軍基地にある 18SPCS の連合宇宙運用センター (CSpOC : Combined Space Operations Center) に送られる。18SPCS の全体的なミッションは、「宇宙での行動のグローバルな自由を確保するための基本的な宇宙状況認識を提供すること」である¹⁷。18SPCS は、現在米国空軍ライフサイクル管理センターと Raytheon 社によって近代化が進められているレガシーの宇宙防衛作戦センター



CSpOC Logo

(SPADOC : Space Defense Operations Center) も運営している。最も重い計算を実行する Astrodynamic Support Workstation (ASW) と組み合わせて、SPADOC は SSN センサーから直接観測データを受信している。米国国防総省、米国関係省庁間、民間衛星運用者及び外国政府から

共有されているデータプロダクトに加えて、SSN 専用、付随、及び貢献的センサーからのデータを SPADOC に取り込むことで、18SPCS は物体の包括的な SpaceTrack 公開カタログを構築し、継続的に維持している。SPADOC システムは、CSPOC ミッションに不可欠な一般的な空間追跡機能を提供するが、計画された耐用年数の終わりに達し、その技術は古くなっている。進行中の改善の中には、コンピューター・ハードウェアの改善と、SPADOC Emulation Analysis Risk Reduction (SPEARR) と呼ばれる新しいエミュレートされたデータ環境の開発があり、Raytheon 社のプレスリリース¹⁸によれば、消費電力を削減し、メンテナンスの必要性が少なくなる。

CAVEnet (Command, Analysis, and Verification of Ephemerides Network) のコマンド、分析及び検証は、ASW ソフトウェアを実行するための低コストで商業的に開発されたワークステーションで構成されるミッション・サポート・システムである¹⁹。1990 年代初頭、SPADOC はますます時代遅れになり、その設計は新しいモデルを組み込めるほど柔軟ではなかったため、Silicon Graphics Incorporated がワークステーションとサーバーを開発するために選択され、要素セットの履歴と観察の詳細な分析のための分析ツールのスイートを提供した²⁰。

現在、CAVEnet の ASW ソフトウェアスイートは、SP 状態ベクトルと共分散情報のみに基づいて個別のカタログを保持し、既存の SPADOC 機能を強化する詳細な分析に利用されるオフラインシステムとして機能している²¹。

2.2.2.3 プロダクトとサービス

現在公開されているカタログのデータ・リポジトリからの中核となるサービスは、接近データメッセージ (CDM : Conjunction Data Messages) の発出である。CDM は、衛星と他の物体とが注意を要するほど接近している場合に電子メールを介して衛星運用者に通信される警告メッセージであり、通常、1 万分の 1 の確率内に収まる。CDM は、3 日前から 6 日前までに関係者に無料で発行されるが、運営者が衝突を回避するためのアクションにおける推奨事項は含まれていない。

CONSTITUTION	MESSAGE ID	CREATED	SAT 1 ID	SAT 1 NAME	SAT 2
CDM Account	27431_conj_30739_2014167161545_16512380434	2014-06-14 12:09:25	2002-024B	FENGYUN 1D	1999-025AS
CDM Account	27431_conj_30739_2014167161545_16613043442	2014-06-15 12:22:35	2002-024B	FENGYUN 1D	1999-025AS
CDM Account	27431_conj_30739_2014167161545_16712161227	2014-06-16 10:06:49	2002-024B	FENGYUN 1D	1999-025AS
CDM Account	27431_conj_12457_2014242225920_240121557621NE	2014-08-28 10:27:09	2002-024B	FENGYUN 1D	1981-0
CDM Account	27431_conj_12457_2014242225920_241112654629HE	2014-08-29 10:02:51	2002-024B	FENGYUN 1D	1981-0
CDM Account	27431_conj_12457_2014242225920_242095352682NE	2014-08-30 07:41:15	2002-024B	FENGYUN 1D	1981-0
CDM Account	27431_conj_82525_2014253110836_251094345656NE	2014-09-08 07:43:35	2002-024B	FENGYUN 1D	URK02
CDM Account	27431_conj_82525_2014253110836_252093944656NE	2014-09-09 08:08:40	2002-024B	FENGYUN 1D	URK02

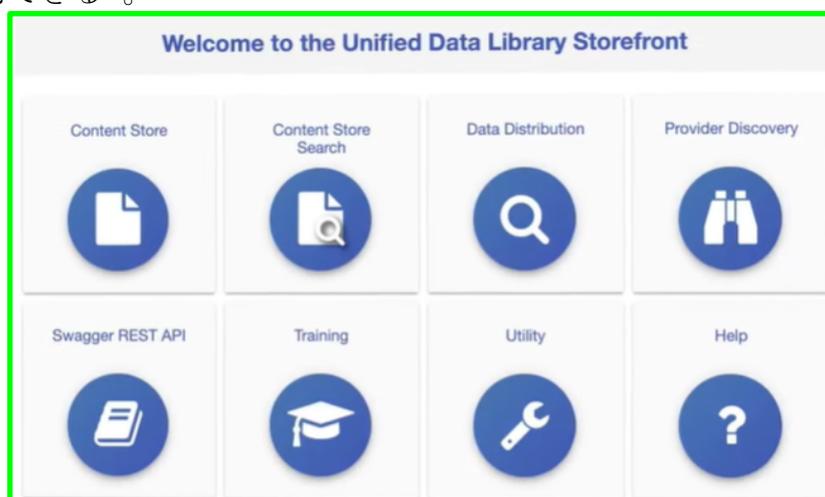
図表 2-9 : CDM の例 https://swfound.org/media/206180/bw_us_perspectives_ssa.pdf

また、18SPCS は、センサー最適化分析、有人宇宙飛行支援、再突入及び破裂評価、ステーションキーピング、打ち上げ分析など、米国及び関連宇宙システムの保護に役立つ他の SSA プロダクトを生成するために内部分析を実施する²²。

SpaceTrack カタログは、引き続き宇宙物体の最も包括的な公開カタログであるが、一部の商業 SSA 提供者は、より信頼性の高いデータを備えたカタログを保守し、顧客に提供している。2018 年、米国は、米国宇宙司令部の構造の中で、オーストラリア、カナダ、ドイツ、フランス、ニュージーランド、英国等の米国の同盟国をより恒久的で深いレベルに組み込み、脅威と知識の共有を強化した。この決定により、米国宇宙軍の連合軍宇宙部隊司令部の宇宙軍の指揮統制機能が「統合」から「連合」宇宙運用センターに移行した。米国との二国間 SSA データ共有協定を締結している他のいくつかの同盟国は、バンデンバーグの合同宇宙部隊司令部 (JFSCC : Joint Force Space Component Command) (現在の USSF) の機密 SSA データとリエゾン・オフィサーについて、二国間の協定の対象としている。

2.2.2.4 統合データ・ライブラリー (Unified Data Library)

2018 年、USSF は、ソフトウェア開発者である空軍宇宙ミサイルシステムセンター (SMC : Space and Missile Systems Center)、空軍研究所、データプログラム管理オフィス、産業界と連携して構築されたデータ・リポジトリである、クラウドベースのプロトタイプとなる統合データライブラリー (UDL : Unified Data Library) の設計と実施を委託した。SSA データは「ストアフロント」ユーザーインターフェース (UI) でフォーマットされており、UDL のエンドユーザーはデータの提供者によってタグ付けされた SSA データを検索し、アクセスできるようになる。アクセスの範囲は、オープンソースから極秘事項等の範囲で設定され、エンドユーザーごとに設計されたセキュリティレベル以下のデータにアクセスできる。UDL は、米国の商業団体が利用できる。UDL は、米国の商業団体、米国政府、承認された他国政府が利用できる²³。



図表 2-10: UDL ストアフロント (YouTube 経由) ²⁴

これまでのところ、UDL に対しては、同盟国による限定的なアクセスと貢献があり、政府機関ではないユーザーアクティビティの大部分は民間衛星運用者と商業 SSA プレーヤーに広がっている。

「ハイブリッドデータ・ストア」として、エンドユーザーはデータにアクセスし、民間提供者からカスタマイズされたデータを購入し、衛星運用者の場合は、独自の軌道暦を UDL に提供できる。現在、UDL は多様な提供者からのデータを多様な

形式で受け入れることができる。CSpOC から提供されるデータは、民間 SSA サービス提供者によってダウンロードされ、独自のモデルとデータと融合したり、民間企業の UDL プロファイルに再度アップロードすることが可能であるが、民間企業は政府が提供するデータセット自体を直接編集することはできない。ベータ版では、UDL は、SPD-3 に従って、米国商務省がオープン・アーキテクチャー・データリポジトリ (OADR : Open- Architecture Data Repository) の開発で最終的に契約する可能性のあるモデルの実験のためのプロトタイプシステムとして機能している。

2.2.2.5 SSA データマーケットプレイス

2019 年 8 月、民間ソフトウェア及びテクノロジー企業である Bluestaq 社は、AFWERX の支援の下で SSA データマーケットプレイスを構築するために、SMC : Space and Missile Systems Center の特別プログラム総局から中小企業技術革新研究プログラム (SBIR : Small Business Innovation Research) Phase II を獲得した。AFWERX とは、空軍のプログラム開発における空軍のイノベーション文化の育成を目的に、Techstars と呼ばれる米国のシード資金アクセラレータ企業と提携した空軍内のプログラムをいう²⁵。データマーケットプレイスは、DoD の顧客が SSA プロダクト及びサービスのデータ要件を提出できるストアフロント (店先) であり、商業 SSA 企業はそのサービスをリアルタイムに提供するため入札が可能。データマーケットプレイスは、UDL プログラムほど直接的な共同作業ではなく、代わりに SSA データプロダクトの誘致と取得を「合理化」する意図で委託されている。SSA データマーケットプレイスは、DoD の迅速な取得ツールとして、利用可能な商業 SSA プロダクトフォーマットを標準化し、供給と種類を増やし、データ提供者を顧客に直接マッチングさせるのに有用²⁶。

2.2.2.6 NSDC

以前は、統合・機関間・連合宇宙作戦センター (JISPOC : Joint Interagency Combined Space Operations Center) として知られていた国家宇宙防衛センター (NSDC : National Space Defense Center) には、戦略司令部、宇宙軍、国家司令局、及びインテリジェンス・コミュニティによる取り組みを統合する機関間ミッションがある。NSDC は、米国の宇宙システムの防衛に関連する脅威の検出、警告、特性評価、属性データの提供を主管している。NSDC チームは、2018 年初頭から 24 時間 365 日稼働しており、インテリジェンス・コミュニティからの警告と指示を軍事的な宇宙アセット・データと組み合わせて、宇宙領域に関する最新のコンテキスト化された情報を国家司令局に対して提供する²⁷。

2.2.2.7 米国商務省 OADR (オープン・アーキテクチャー・データリポジトリ)

現在、米国商務省宇宙商業局は米国海洋大気協会 (NOAA : National Oceanic and Atmospheric Association) の米国環境衛星データ情報局 (NESDIS : National Environmental Satellite, Data, and Information Service) に設置されている。

2018年6月、SPD-3は、国防総省から商務省が民生及び商業SSAサービスに対する責任を負うように業務の移管開始を指示した。責任の最終的な移管のための最初のステップの一環として、宇宙商業局は、クラウドベースのOpen-Architecture Data Repository (OADR)のプロトタイプの研究、設計、開発を担当した。このOADR内では、政府のデータ、商業的に提供されるデータ及び十分に確認された他のソースからのSSAプロダクトにアクセスして、顧客が調査及び購入ができる。OADRは開発中であるも、その開発者は軍宇宙司令部（現在は米国宇宙軍と呼ばれる）によって委託されたUDLデータリポジトリイニシアチブの設計から得られた教訓と成功を取り入れることが可能となっており、これは、既に業界で試行されている。OADRプロトタイプ初期運用機能（IOC：Initial Operating Capability）は、2024年までにSSA市場への展開することが義務付けられているが、宇宙商業局はできるだけ早く公開実証実験を実施するため、IOCのベータ版を期限の1年前に公表する予定である旨表明している。

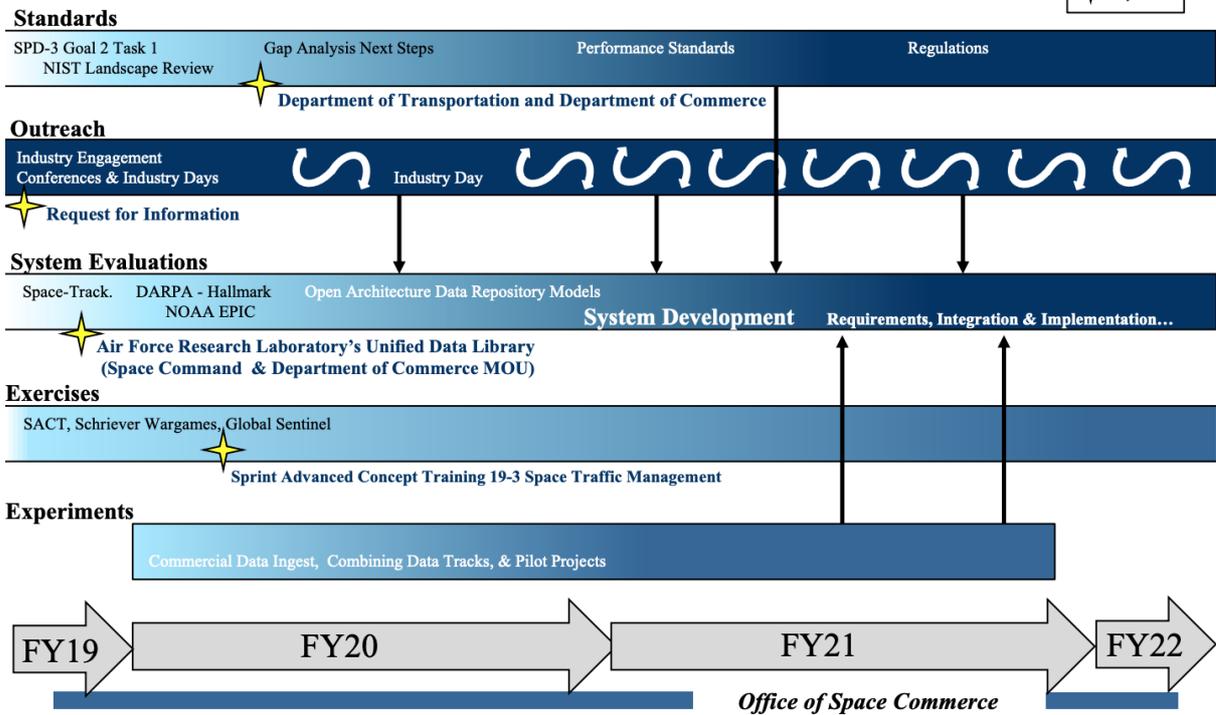
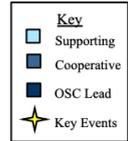
宇宙商業局は、米国DoDの保有するカタログ、同盟国からのデータ及び商業的なデータを融合し、SPD-3によって義務付けられたCDMを提供することがOADRの主たる機能であると認識している一方で、有望なSSA提供者（特に新規又はギャップを埋めるようなサービスを貢献するプロバイダー）が政府のCDMサービスの標準を超える価値を提供する能力を示せるマーケットプレイスとしてもOADRが機能する旨公の場で述べている²⁸。更に、OADRの重要な側面は、最終的に米国と同盟国との間でのデータ共有及び情報交換を行うのに十分な柔軟性を確保することである。ここには、欧州連合宇宙監視・追跡（EU SST：European Union Space Surveillance & Tracking）の組織など、既存の地域コンソーシアムとのデータ共有が含まれる。

OADRモデルが直面する主な課題は、特に新しい形式であったり、特定のプロダクト又はサービス用にカスタマイズされている場合になるが、リポジトリに送られるデータの品質を包括的に検査し、及び検証する手段である。オープンソース・モデルは急速に進化する検査方法に大きく依存しているため、宇宙商業局は、民間組織間の関係を強化した上で、データを共有し、データ処理及び管理方法についても協力していると強調している。宇宙商業局は、業界と協力して、打ち上げ前のリスク評価と軌道上での衝突リスク評価の双方の規範とベストプラクティスを開発していく。



Roadmap

Creating an STM Marketplace



図表 2-11 : STM ロードマップ

2.2.2.8 NASA

NASA は、デブリと SSA を扱う 2 つの主要なオフィスである、ゴダード宇宙飛行センターの接近評価リスク分析 (CARA : Conjunction Assessment Risk Analysis) センター及びヒューストンの軌道上デブリプログラムオフィス (ODPO : Orbital Debris Program Office) がある。

CARA は、NASA の無人ミッション (合計約 70 個の衛星) に対して運用中の物体とデブリ物体をスクリーニングする²⁹。また、NOAA、アメリカ地質調査所 (USGS : United States Geological Survey) 及びいくつかの国際的に連携しているミッションに対してもこのサービスを実施している。CARA チームは CSpOC に組み込まれており、SSN センサーネットワークと O/O データが使用可能な場合はそれを使用する。CARA プロセスのワークフローは、LEO で 1 日に 2 回、HEO/GEO で 1 日に 1 回、定期的なスクリーニングから始まる。潜在的な接近から 7~10 日 (LEO の場合は 7 日、HEO/GEO の場合は 10 日)、CARA チームは接近評価分析と回避リスク評価を実施する。O/O は衝突回避マヌーバの実行に責任を負い、CARA はマヌーバ接近スクリーニングのサポートを継続する。このプロセスには、手動と自動の両方の要素がある。CARA は、宇宙の混雑化とマヌーバの検出という今日の課題をサポートするために、このプロセスのためにより良いアルゴリズムの開発を続けている³⁰。

現在、CARA のサポートには次のものが含まれる（ただし、これらに限定されない）。

- カスタマイズされたミッションに固有な運用コンセプトの開発
- CspOC との単一インターフェース
- 軌道上安全性分析の専用サポート
- イベントのトレンド分析と状況認識のためのミッションへの自動レポート
- 高関心イベント通知
- PC 計算
- PC 感度分析
- 接近幾何学解析
- 共分散及び軌道決定ソリューションの評価
- 衝突回避マヌーバの計画と評価
- コロケーション/繰返し幾何学戦略支援
- 重要なイベントのサポート：打上げと早期軌道、マヌーバ、運用終了及びミッション終了
- 履歴データの活用と統計分析

ジョンソン宇宙センターの宇宙材料研究・探査科学部門の軌道デブリ・プログラム・オフィス（ODPO：Orbital Debris Program Office）は、軌道環境の測定、デブリの影響の研究を行い、NASA 及び商業宇宙コミュニティで使用されるソフトウェアのモデリングを担当し、軌道デブリに関するレポートを発出し、宇宙機運用者を保護するための対策を採用するための技術的なコンセンサスを開発している³¹。ODPO は、直径 10cm から 3mm までの微小デブリも追跡している。NASA は、マサチューセッツ州のヘイスタック超広帯域衛星画像レーダー（HUSIR：Haystack Ultra-wideband Satellite Imaging Radar）とカリフォルニア州の Goldstone Solar System Radar を使用して、この研究を進めています³²。結果は、距離、距離率、SNR、偏光情報を考慮したデブリを検出できる。

2.2.3 非政府主体の保有する能力

2.2.3.1 研究機関

いくつかの連邦予算による連邦研究開発センター（FFRDC：Federally Funded Research and Development Centers）は、SSA の研究に焦点を当てている。これらの 1 つに科学技術政策研究所（STPI：Science and Technology Policy Institute、非営利の防衛分析研究所によって運営）がある。STPI は、SSA を含む重要性が過小評価されている様々な研究分野の分析を提供している³³。Aerospace Corporation は FFRDC を運営するもう 1 つの非営利企業であり、米国政府機関に宇宙領域全体の SSA データプロダクト、分析及びサービスを提供している。Aerospace Corporation は、米国を含む米国 DoD の SSA 関連プログラムオフィスの多くの役職をサポートし、配置している。宇宙部隊、連合部隊の宇宙部隊コマンド、合同タスクフォース宇宙防衛及び宇宙安全保障防衛プログラム（SSDP）。

Aerospace Corporation は、SSA コミュニティの多くの著名な専門家の拠点である。Aerospace の航空宇宙再突入デブリ研究センター（CORDS：Center for Orbital

and Reentry Debris Studies) は、1990 年代後半のスペースデブリ、再突入及び衝突回避解析に関する研究開発の成果から生まれた³⁴。全体的に、異常な宇宙イベントを監視、検出、表示し、及び自動レポートを提供する。CORDS が実施するプロダクト及びサービスには、打上げ中及び軌道上で発生する可能性のある衝突予測、宇宙での衝突の後の宇宙機への危険予測、再突入する際のデブリのシミュレーション、大気圏へ再突入する衛星コンポーネントの残存推定並びに生命と財産に対するリスクの決定が含まれる。Aerospace Corporation は、再突入後も残存したマテリアルについて情報収集及び分析を行う。

2.2.3.2. 学術機関/ 非政府組織の能力

レーダーや望遠鏡を含む学術機関の保有する SSA センサーは、米国に所在する大学の多くに設置されているが、SSA システムの学術研究とイノベーションにおいて強力なリーダーシップを発揮している機関はわずかである。フロリダのエンブリーリドル航空大学 (Embry Riddle Aeronautical University) は、宇宙飛行プログラムを通じ SSA 及び宇宙交通管理の研究の最前線に立っている。前述のように、マサチューセッツ工科大学 (MIT) はリンカーン研究所を有し、リンカーン研究所はリンカーン宇宙監視複合施設を運営している。

空軍はコロラドスプリングスの SSA 研究センターを有し、米国の軍事的能力がアクセス可能。アリゾナ大学の月惑星研究所は、イメージング、特性評価、センサータスク及びサイバー・インフラに重点を置いている。米国における、SSA 研究の主要機関の 1 つがテキサス大学オースティン校 (UT Austin) である。同校の教授と学生は、物体の検出、追跡、識別、特性評価 (DTIC: Identification, and Characterization)、物体カタログの予測とメンテナンス、効率的なセンサータスクの方法、分割イベントの追跡及び初期軌道決定等いくつかのニッチな SSA 分野の研究を行っている。

同校には、SSA データ・リポジトリ、融合及び統合のための枠組みを実験している SSA 研究者もいる。そのようなプロジェクトの一つの「Astriagraph」という名称のプロジェクトは、「オープンで、透明で、クラウドソースの宇宙交通及び環境の監視・把握システム」構築のための取組を目指している³⁵。

Astriagraph に取り組んでいる研究者は、データを取り込むプロセスにおいて SSA データ提供者がベースとしている視点や想定を強調し、その結果、(それぞれの提供者によって提供されるデータの) 現象学と形式の差異を並べて表示することができる。Astriagraph のプラットフォームは現在開発段階にあるものの、複数の SSA データソースの堅牢な中間「レイヤー」があり、その上にアプリケーションのための実験的なアーキテクチャーの適用及び実証実験が可能となっている。2019 年の時点で、このプラットフォームへのアクセスは、テキサス大学オースティン校の研究者から承認された者のみに限られているものの、研究チームは SSA データプロダクトと主要な SSA プレーヤーのプロセスの透明性の向上を強く主張している。

学術機関を超えて、多くの非政府組織とシンクタンクも、SSA の技術、データ融合及び政策を取り巻く世界的な理解に貢献している。Secure World Foundation などの非営利組織や、戦略国際問題研究センター (CSIS: Center for Strategic and International Studies) の航空宇宙セキュリティ・プロジェクト等のシンクタンク

は、環境の現状、軌道の理解の向上、長期的な持続可能性のための実用的なアイデアに関する商業主体及び政府関係者向けのフォーラムの開催等を行っている。

2.2.3.3 米国主要な民間企業³⁶

主に過去 20 年の間、米国の商業的な SSA 企業は、独自のセンサーネットワーク、データリポジトリ、分析、プロダクト範囲及びデータ処理機能を急速に開発してきた。現在、このような商業 SSA 業界の一部のメンバーの能力は、コンピューティング能力、並びに意思決定ソフトウェア及びアルゴリズムの更新の容易さにおいて、すでに米国政府の能力を上回っている。また、多くのプレーヤーが、今後 3~5 年以内に宇宙物体のカタログを定期的に更新及び保守するという点でも、政府をしのぐ態勢にある。

商業的な SSA サービスとして、政府が提供する既存のカタログというベースラインに対して大きな価値を追加するようなニッチなプロダクト及び実際にそれを利用する例が既に存在している。例えば、CSPoC などの現在の政府のプログラムでは、異常解決情報、連続して推進する電気推進系のような物体に関する詳細な追跡情報、又は転送軌道にある物体に関する情報はサービスとして提供されてはいない。商業 SSA データ提供者は、衛星運用者に対して、政府が提供するサービスとのギャップを埋めるような安全飛行のためのサービスを提供することに重点を置いている。以下は、いくつかの民間事業者の能力について説明しているが、完全なリストではない。会社の詳細な説明はセクション 3 で詳述している。

Analytical Graphics Inc.

Analytical Graphics Inc. (AGI 社) は、デスクトップ、ウェブクライアント及びサーバーベースの開発キットを開発したソフトウェア会社である。AGI 社が提供するこれら一式のサービスは、陸、海、空及び宇宙の複雑な環境をモデリングし、及びシミュレートし、並びにリアルタイム又はシミュレートされた時間での活動分析及び評価を行う³⁷。この意味で、AGI 社は多くの商業 SSA サービス提供者よりも幅広い範囲をカバーしている。例えば、無人航空機 (UAV : Unmanned Aerial Vehicle) の交通管理のためのリファレンス (参照する情報) ・アーキテクチャーの開発に携わっている。SSA システムの場合、AGI 社のシステム・ツールキット

(STK : Systems Tool Kit) は、独自の天体力学計算に基づいて、基本的なモデリング環境について、大量の分析及びデータを処理可能な環境にまでスケールアップしている。AGI 社は、2014 年に商業宇宙オペレーションセンター (COMSpOC : Commercial Space Operations Center) を設立した。これは、世界有数の商業 SSA コンソーシアムの 1 つに発展している。AGI 社の COMSpOC は、民間による観測と相互運用可能な顧客データを独自の SSA ソフトウェアに組み込み、シミュレーション、モデリング、分析を行う。LEO ベースの衛星とデブリに焦点を合わせた 2 つのレーダーからの観測と、主に GEO の物体に焦点を合わせた世界中に 70 程度の望遠鏡からの観測を集めている。AGI 社が COMSpOC データにアクセスする SSA の顧客に提供するプロダクトには、宇宙飛行の安全性と正確な衝突回避、軌道の正確な位置特定のための高解像度軌道暦、デブリモデリング及びマヌーバ検出がある。

Exoanalytic Solutions, Inc.

Exoanalytic Solutions, Inc. (Exoanalytic 社) は、現在、最大の商業センサーネットワークの1つである ExoAnalytic Global Telescope Network (EGTN) を運用している。ExoAnalytic 社は、GEO で 10 センチメートルを超える全ての物体を追跡することが出来、宇宙における活動の非常に高い割合の拡散測定値を形成するため（つまり、空間物体のポピュレーションレベルの特性評価）、特定のイベント、エリア又は物体に関する要求された情報についてデータリポジトリを「クエリ」する段階の前に、可能な限り大量の生観測データを収集する戦略を取っている。ExoAnalytic 社は、未加工の観測データの販売から軌道、接近警告、アラートなどのより複雑なプロダクトに至るまで、主要な軌道上のイベントに直面している衛星運用者のアクションの意思決定支援等のための幅広いプロダクトを顧客に提供している。

L3Harris Technologies, Inc.

L3Harris Technologies, Inc. (L3Harris 社) は、世界の7つのサイトにまたがる固定スターリングセンサー及びタスク処理が可能なトラッキングセンサーとの組み合わせで構成されるグローバル・オプティカル・ネットワーク (GON : Global Optical Network) を所有している。L3Harris 社は、米国政府の SSA センサー及び処理システムの主要な契約業者だが、他の民間企業や学界とのデータ共有やコラボレーションも行っている。また、L3Harris 社は、スピノフ企業である Peraton 社を介して、米国 DoD 及びインテリジェンス・コミュニティの関係者に接近評価、衝突回避分析、分析及び警告を含む SSA サービスを提供している。2019 年 7 月、Peraton 社は、SSA のソフトウェア開発及びシステム統合並びに衛星地上システムと運用を提供するテクノロジー企業である Solers 社 (Solers, Inc) を買収した³⁸。

商業的には、L3Harris 社は GON から Space Sentry の処理及び配布システムにデータを送っている。衛星通信に提供するプロダクトには、ライトカーブ（対象の光度変化ベースの宇宙物体の不安定性警告、マヌーバ検出及び特性評価、初期軌道決定、接近評価並びに衝突回避サポートがある。

LeoLabs Inc.

LeoLabs Inc. (LeoLabs 社) は、ベンチャーキャピタルから支援を受けた SSA の新興企業であり、低軌道の物体の高解像度データを捉えるように設計された、低コストの地上ベースのフェーズド・アレイレーダーのグローバルネットワークを開発する。2019 年末の時点で、計画された6つのレーダーネットワークのうち3つが建設された。最初の2つは UHF レーダーで、2つ目は S バンドレーダーである。LeoLab 社は、LEO 環境の標準インターフェイス及び「地図」として機能するクラウドベースの API を構築する目的で設立された。これは、他のユーザーが、データの分析用のサービス及びアプリケーションの構築のために利用できる。LeoLabs 社は、レーダーネットワークが、通常は測定できない LEO 内の 250,000 個の物体を測

定し、及び追跡し、LEO 内の既知物体の約 95%と推定される範囲をカバーできることを期待している。

Bluestaq, LLC

Bluestaq, LLC (Bluestaq 社) は、米国 DoD 及びインテリジェンス・コミュニティの顧客向けに複数の SSA データリポジトリとマーケットプレイス・プロトタイプを開発したソフトウェア会社である。他の商業 SSA プレーヤーとは異なり、宇宙領域のみに焦点を当てているのではなく、多くの部門の軍事プロジェクト及びシステムにまたがるソフトウェアプロダクトとその構築を提供している。特に SSA ミッションでは、Bluestaq は米国政府との間に契約を締結している。特に SSA ミッションにおいては、Bluestaq 社は SSA ベンダー、プロダクト、サービスとのインターフェースをとるために、SSA データ提供者、学术界、民間企業、衛星運用者、DoD 顧客向けの初期の UDL 及び SSA データマーケットプレイスシステムを開発する契約を締結している。

SpaceNav

SpaceNav 社は、2009 年に Iridium-Cosmos 衛星の衝突後に設立された企業。「データに依存しない」収集アプローチを取り、運用上の衝突リスク管理システムの構築、展開及び人員訓練に SSA データ・プロダクトに集中している。同社の統合的なアプローチは、米国の商業ビジネス、民生部門、インテリジェンス、軍・政府のユーザーを含むあらゆる種類の衛星通信運用者及びグローバル運用者を対象にしているが、事業の大部分は民生機関に大きく依存している。SpaceNav 社は無数のソースからのデータの融合と統合を専門としており、主にメトリック及び光学観測並びに多数の政府及び民間企業からの到着時差 (TDOA: Time Difference of Arrival) データを収集している。軌道決定プロダクト、適合後の残差、統合された衝突警告リスク及びその他の予測情報を取得するために、顧客がログオン可能なウェブベースのプラットフォームを運用している。

Kratos Defence and Security Solutions, Inc.

Kratos Defense&Security Solutions 社 (Kratos Defense&Security Solutions, Inc.) は、無人システム、衛星通信、ミサイル防衛等軍事分野と安全保障のためのアプリケーションを含む幅広いプロダクトラインを有する防衛分野における政府との契約企業。主に米国政府及びその同盟国政府との間に顧客契約を行っており、C バンド及び Ku バンド並びに X バンド及び S バンドに 80 の固定かつ操縦可能なセンサーを備え、世界の 21 の RF 監視サイトから成るグローバルネットワークからデータを取り込んでいる。また、他の光学センサー、レーダーセンサー、地上センサー、宇宙センサーからの RF データを SSA プロダクト及びサービスのために処理するマシン・ラーニング及び分析ツールも備えている³⁹。

米国 SSA 共有データプラットフォームについて、下図にまとめた。

図表 2-12：米国 SSA 共有データプラットフォーム

	SSN/SpaceTrack	UDL	Marketplace	COMSpOC コミュニティ
長所	所有者/運用者の公開カタログへのアクセスと CDM の無償提供	各 SSA データ提供者の能力の範囲を簡単に確認できる 政府及び商業ソースからの層別データ 学術的視点と政府組織以外の視点のより大きな統合	民間提供者は、最低価格で最高の信頼度の高い能力を提供するために入札できる。従来と比較して取得タイムラインを短縮	商業サイドからのインプットを増やし、公式の米国政府の能力、様々なデータ形式の融合を強化できる。 SpaceTrack カタログよりも優れたカバレッジ
短所	詳細度の低さ、非機密の政府データのみ	新しい情報、「ビッグデータ」問題を公正かつ正確に検査するという課題（データ全体を融合に手間/苦労がかかる）	民間提供者が協力してデータをオープンに共有するのを妨げる	参加するための有料メンバーシップ、情報は非公開で審査される

2.3 欧州の SSA 能力

- 欧州における SSA の活動は、3 つのレベルで実施されている。すなわち、国別プログラム、欧州宇宙機関（ESA : European Space Agency）による SSA プログラム及び EU SST サポートフレームワークの 3 つのレベル。
- 商業的には、Elecnor Deimos 社と GMV 社は地域の著名な商業 SSA プレーヤーであり、それぞれデータ処理と管理に特化している。

2.3.1 概要

一般に、欧州での宇宙活動は、国家によるプログラム、ESA 及び欧州連合（EU : European Union）の 3 つのレベルで行われている。



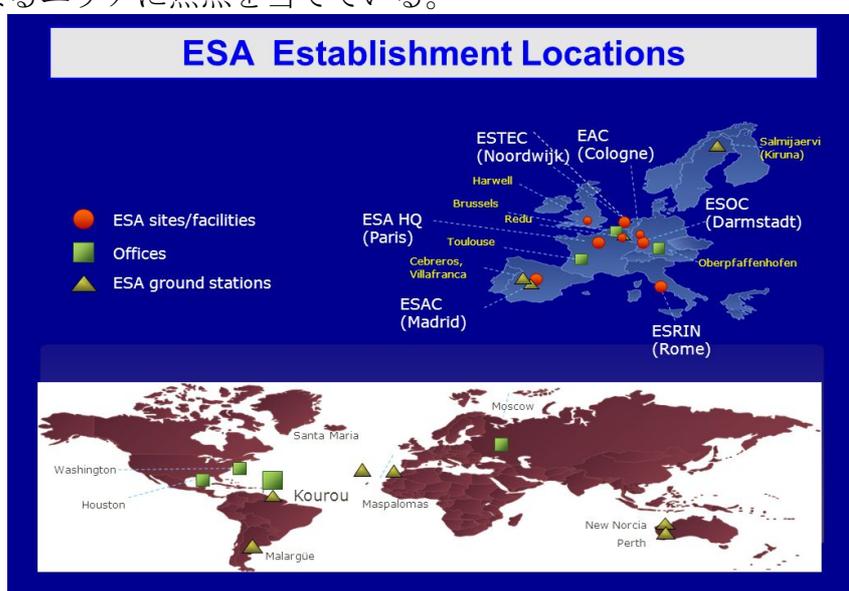
図表 2-13 : 欧州の SSA の枠組み

これは宇宙監視・把握（SSA）にも該当する。ESA において、SSA は宇宙安全プログラムの中に位置付けられ、2019 年 11 月の最新の ESA 閣僚会議で合計 432 百万ユーロの予算が付与されている。欧州の SSA は、主に初期段階の研究とプロセス開発に焦点を当てている。ESA は、EU 加盟国及び一部の非 EU 加盟欧州諸国（ノルウェー等）並びにカナダ等その他非欧州諸国で構成されている。EU には、EU 独自の宇宙監視・追跡（SST : Space Surveillance and Tracking）プログラムである EUSST サポートフレームワークも有している。このフレームワークには、EU 加盟国 8 か国（ドイツ、フランス、スペイン、イタリア、英国、ルーマニア、ポルトガル及びポーランド）が含まれるが、EUSST における英国の将来の役割は不確実になっている。EUSST サポートフレームワークには、センサーネットワーク、データ処理機能及びサービスの提供が含まれる。2015-2020 年には、様々な EU 助成金を通じて合計 167.5 百万ユーロ、サービスの提供と調整に最大 70.5 百万ユーロ、センサーのアップグレードに最大 97 百万ユーロが割り当てられた⁴⁰。

ESA と EU が主導するこれらの SSA プログラムは、欧州における包括的な枠組みを提供するが、それぞれの国レベルでの実施は国毎に異なり、それぞれの国の SSA イニシアチブに組み込まれている。政府が主導する一方、ドイツの SSA の取り組みは主に制度研究に焦点を当てているが、スペインは国内のより確立された商業サービス/提供者を活用している。SSA で最も有名な 2 つの民間企業は、どちらもスペインに本社を置いている。Elecnor Deimos 及び GMV。これらの企業は、商業 SSA サービス及びその基礎となるソフトウェアを提供し、ESA の SSA 及び SST プログラムに積極的に参加している。

2.3.2 ESA

ESA には、欧州の様々な場所に拠点を置く 9 つのセンターがあり、それぞれが異なるエリアに焦点を当てている。



図表 2-14 : ESA 拠点場所

ドイツのダルムシュタットにある欧州宇宙運用センター (ESOC : European Space Operations Centre) は、欧州の宇宙機を追跡し、及び制御し、地上システムを開発並びに管理している⁴¹。ESOC は、スペースデブリの研究とサービス、地上システムエンジニアリング、追跡ステーションの設計及び開発並びに衛星航法の「欧州センターオブエクセレンス」として機能しており、ESA の SSA プログラムの拠点になっている。ESA の宇宙状況認識 (SSA) プログラムの拠点である⁴²。SSA プログラムの目的は「宇宙環境、特に軌道上及び地上のインフラストラクチャーに対する危険に関するタイムリーで正確な情報、データ、サービスの提供を通じて、欧州の独立した利用と宇宙へのアクセスをサポートすること」となっている⁴³。

Space Situational Awareness (SSA) プログラムは、2009 年に開始され、多数の加盟国が拠出する任意の ESA プログラムである。この ESA プログラムは主に 3 つの分野に焦点を当てている。

1. 宇宙天気（SWE：Space Weather）：衛星搭載型及び地上ベースのインフラストラクチャーに影響を与える可能性のある太陽、惑星（地球を含む）環境の監視と予測
2. 近地球物体（NEO：Near-Earth Objects）：地球に影響を与える可能性がある小惑星等の自然の物体の検出
3. 宇宙監視及び追跡（SST：Space Surveillance and Tracking）：運用中及び運用終了後の衛星、廃棄された打上げロケット、及び地球を周回する断片化残骸の監視

ESA は、国家 SST イニシアチブと緊密に協力して、自律的な欧州の SST 能力に必要な研究と技術開発を提供することを目指している⁴⁴。SSA は任意のプログラムであり、以下の ESA 加盟国が現在の期間である 2017-2020 年に SSA に参加している。オーストリア、フランス、スウェーデン、ポルトガル、ベルギー、ドイツ、オランダ、ルーマニア、チェコ共和国、ギリシャ、ノルウェー、英国、デンマーク、イタリア、ポーランド、スイス、フィンランド、ルクセンブルク及びスペイン。ESA は、SST 活動を通じて、SST をサポートするハードウェア、ソフトウェア及びネットワークに関連する技術の研究と開発を行っており、特に技術標準化に重点を置いている。ESA の SST チームは、SST ソフトウェアの統合とテストに重点を置いている。このコアとなるソフトウェアには、バックエンド処理とフロントエンドサービスの両方が含まれている。ESA コアソフトウェアは、カタログの上で、次の 2 つの段階で機能する。

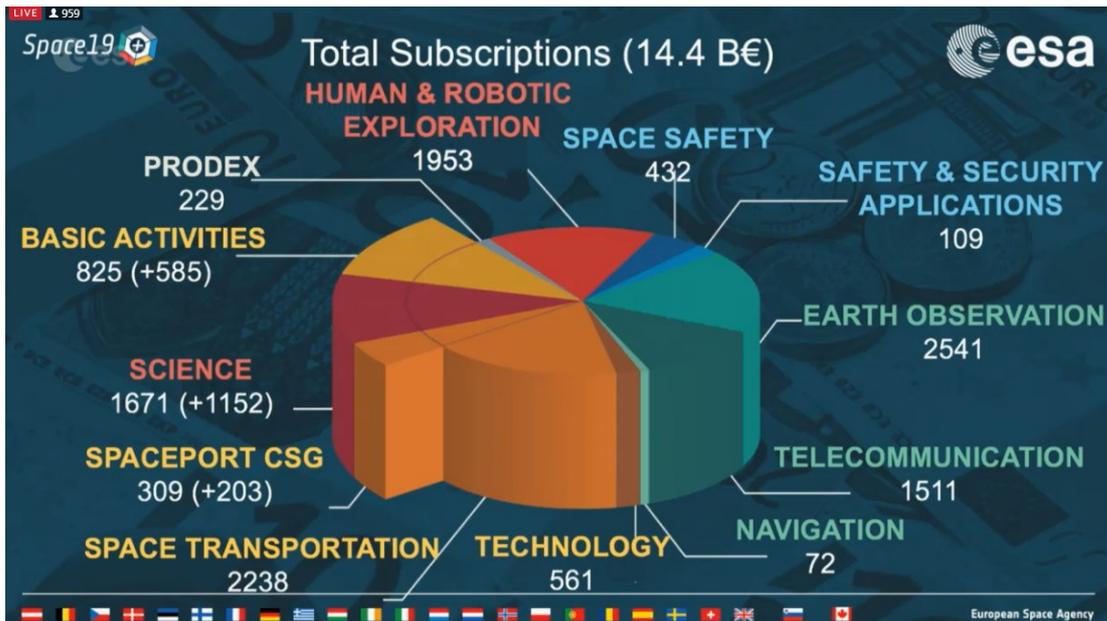
- カタログの保守：観測計画、データ処理、カタログ更新
- サービスレイヤー：カタログを照会して、接近予測や再突入予測などのフロントエンドサービスを実行するサービス

ESA には、130 以上の衛星で使用されているものを含め、最大 110 ものコア SSA ソフトウェアのユーザーがいる。スペインの会社である Deimos 社は現在、SST のサービスを計画及び処理するコアソフトウェアライブラリの開発をリードしている。

ESA SSA プログラムは現在、宇宙安全プログラムの対象となっている。2019 年 ESA の閣僚理事会「Space19 +」は、ESA 加盟国を束ね、ESA の今後数年間の作業のための新しい提案と資金を決定した。宇宙安全プログラムは、以下の主要な資金提供者を計画している。

- 宇宙及び地上ベースのセンサーの技術開発。宇宙交通管理の技術的側面に対応
- SST コアソフトウェアに対するコミュニティアプローチ
 - － 開発とメンテナンスの共同作業
 - － 複数の欧州システム間の相互運用性の確保
- リスクモデルとコンセプト開発

ESA 閣僚会議で、宇宙安全プログラムには、将来においても拠出が確約された資金として 432 百万ユーロを受け取った⁴⁵。これには、2023 年までの自動衝突回避と 2019 年の機械学習コンペティションを実証するために 2 百万ユーロからなる予算を確保した衝突リスク推定・自動緩和（CREAM：Collision Risk Estimation and Automated Mitigation）プログラムが含まれる。

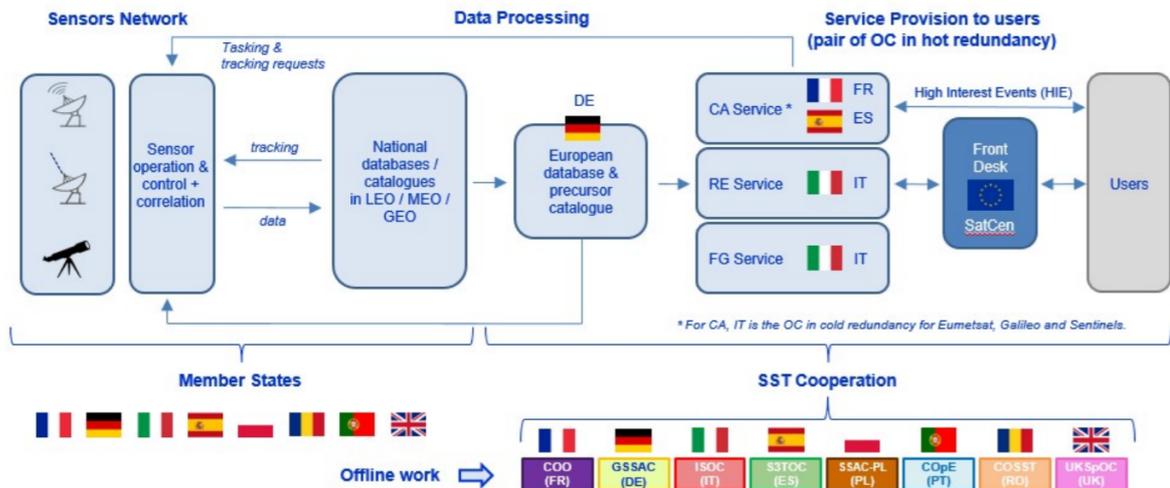


図表 2-15 : 2019 ESA 閣僚予算配分

2.3.3 EUSST

EUSST サポートフレームワークは、2014年に設立されたEU加盟国のコンソーシアムであり、欧州・国内の宇宙インフラ及び施設並びにサービスについて欧州の経済、社会、市民の安全とセキュリティのために不可欠な長期的な可用性を確保する⁴⁶。EUSSTの目的は、宇宙物体の監視と調査から成るサービスのセットアップと運用をサポートするために、SSA サポートフレームワークを確立することである。EUSST プロジェクトは欧州委員会によって承認され、各加盟国が様々な側面で貢献している。歴史的にそれぞれの加盟国の運用センターは、データの取得からサービスの分析及び導出までの完全なプロセスチェーンを提供していたが、現在では、コンソーシアム内の各運用センターがそれぞれ特定の構成要素を担当するようになった。EUSST サポートフレームワークには以下の内容が含まれる。

- センサーネットワーク : 宇宙物体を調査及び追跡するための、加盟国の地上及び/又は宇宙ベースのセンサーを含むセンサーネットワーク
- データ処理 : 国家レベルで SST データを処理し、及び分析し、EUSST で共有できる SST 情報及びサービスを生成するデータ処理
- サービス提供 : 衝突回避、再突入、破裂を含む SST サービスを提供する機能
- SST 協力 : CCO (フランス)、GSSAC (ドイツ)、ISOC (イタリア)、S3TOC (スペイン)、UKSpOC (英国) などの国家 SST サービスと SST 間の協力



図表 2-16 : EU SST サービス提供⁴⁷

EUSST プログラムには、元々5つの EU 加盟国が含まれていた（ドイツ、フランス、スペイン、イタリア及び英国）。2018年にルーマニア、ポーランド、ポルトガルの3 EU 加盟国が EUSST に参加しました。オーストリアは、EUSST へのアクセスに関してドイツとデータ共有協定を締結している。欧州連合からの英国の最近の離脱を考えると、EUSST における英国の将来の役割は不確実になっている。

センサーネットワーク :

現在の 2019-2021 年の期間では、EUSST サポートフレームワークのセンサーネットワークは、以下のような全ての軌道（LEO、MEO、HEO、及び GEO）のカバレッジを提供している。

- 5 個の監視レーダー
- 7 個の追跡レーダー
- 4 個のレーザーステーション
- 35 個の光学望遠鏡

センサー機能は、加盟国の権限の範囲に完全に留まることになっている。全リストは、以下の表に記載されている。

図表 2-17 : EUSST センサー機能リスト⁴⁸

Systematic operational campaigns providing European measurements for each service (CA, RE, FG)

Mode	Name	MS	Mode	Name	MS	Mode	Name	MS
12 Radars	Surveillance	BIRALES	Surveillance	Anlin-San ²	Tracking	Tracking	Bootes (2)	35 Telescopes
		Fylingdales ¹		Beata ²			CAS	
		GRAVES		CENTU			Cassini	
		GESTRA ^{1,2}		MoonBase ¹			GEOF	
		S3TSR		NEEMO-35			IAC-80	
		BIRALET		OASA			NEEMO-50 ²	
	Tracking	CASTR		PANOPTES (3) ^{1,2}			PANOPTES	
		MFDR		Polonia ¹			PdM-MiTe	
		SATAM (3)		Rantiga ¹			PST-2	
		TIRA		Solaris ¹			Solaris (2)	
				SPADE			TJO	
				TAROT (3) ¹			Tracker	
4 Lasers	Tracking	SLR Graz	TFRM	T030-AROAC ²				
		ROA SLR	T04-Berthelot ^{1,2}	T030-BIINET ²				
		MLRO	Starbrook					
		Borowiec SLR						

¹ Sensors perform both surveillance and tracking
² Sensors will enter into operations later than 1st April 2019, as declared in the 1SST2018-20 Grant

データ処理 :

EUSST サービスは、主に CSPoC が提供する米国のデータと、EU の SST コンソーシアム内で現在稼働している国の保有するセンサーに基づいている。オペレーションセンター (OC) には以下が含まれる。GSSAC (ドイツ)、ISOC (イタリア)、S3TOC (スペイン)、COO (フランス)、及び UKSpOC (イギリス)。SST サービス提供ポータルは、ユーザーがアクセスできる「フロントデスク」である。2001年に設立されたEUの機関である欧州連合衛星センター (SATCEN: European Union Satellite Centre) が提供し、その役割はEUSSTプログラムを通じてSSTサービスを含むように拡大された⁴⁹。

EUSST センサーネットワーク内のセンサーからのデータは、それぞれのオペレーションセンター (OC) によって共有される。EUSST サポートフレームワークの一部として専用の欧州データベースが開発されており、コンソーシアムのメンバー間でデータを共有するための共通プラットフォームとして機能している。

サービス提供 :

EUSST は、既存の機能に基づいた 3 つの主要なサービスを提供している⁵⁰。

- 衝突回避 (CA: Collision Avoidance) サービス: 宇宙機やスペースデブリ間の衝突のリスクを評価して、衝突回避の警告を生成
- 再突入解析 (RE: Re-entry Analysis) サービス: 制御されていない物体やデブリが地球大気圏に再突入するリスクを評価する分析と情報
- フラグメンテーション分析 (FG: Fragmentation Analysis) サービス: 軌道上での断片化、破砕又は衝突の検出、特性評価、アラート

これらのサービスは、CSPoC が提供する米国のデータと、EUSST コンソーシアム内の運用中の全国センサーに基づいている。これらの各サービスは、様々な運用センターから欧州のユーザーに無料で提供されている。

図表 2-18 : EUSST サービス及び提供者

サービス	提供者
衝突回避	フランスとスペイン
再突入分析	イタリア
フラグメンテーション分析	イタリア

2019年現在、EUSST サービスは以下を含む合計 60 の組織（18 の EU 加盟国、衛星運用者、宇宙機関、産業、研究施設）で使用されている。各サービスのユーザーの詳細を以下に要約する⁵¹。

図表 2-19 : EUSST サービス使用の内訳

サービス	ユーザー	ユーザーの組織	登録された宇宙機
衝突回避	45	22	131 (LEO で 41、MEO で 30、GEO で 60)
再突入分析	70	46	N/A
フラグメンテーション分析	60	39	N/A

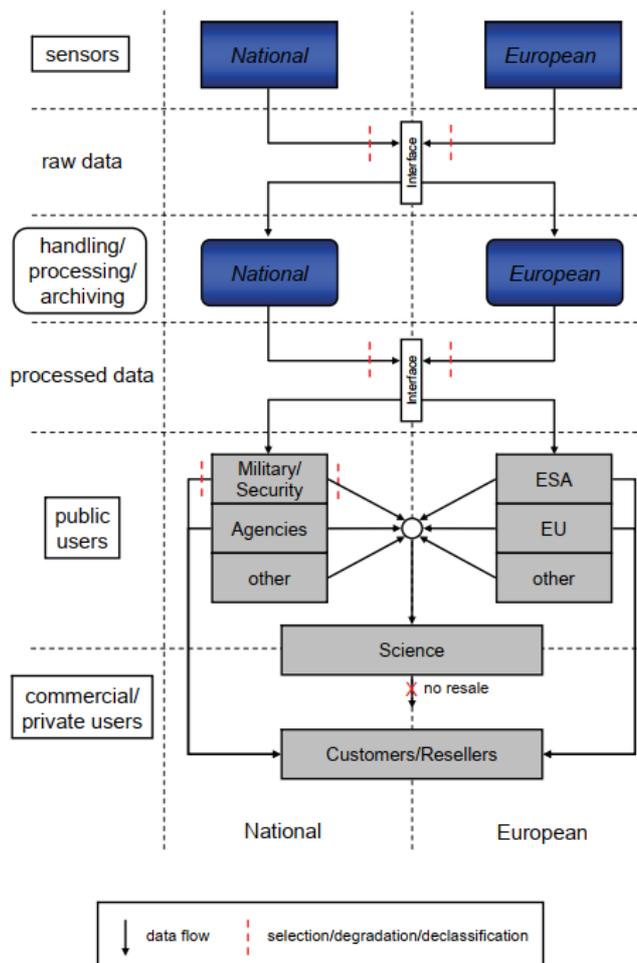
欧州宇宙政策研究所（ESPI : European Space Policy Institute）は、欧州の宇宙活動に関連する中長期的な問題において情報に基づいた見解を意思決定者に提供する独立したシンクタンクである⁵²。ESPI は、SSA に関連する多くの出版物、特に 2008 年の「Europe’ s Way to Space Situational Awareness（宇宙状況把握への欧州の道）」、そして最近では 2020 年 1 月に出版された「Towards a European Approach to Space Traffic Management（宇宙交通管理への欧州のアプローチに向けて）」を発行した。

ESPI の 2008 年の独立報告書である「Europe’ s Way to Space Situational Awareness（宇宙状況把握への欧州の道）」は、SSA のための欧州のシステムをセットアップする場合の影響を評価した⁵³。2008 年のこのレポートの発行以来、EUSST サポートフレームワークが確立された。ESPA はこのレポートで、欧州 SSA システムを成功させるための実行、適切な機能及び効率的な運用に関連するいくつかの側面を特定した。

1. データポリシー : 誰がどのデータに、いつ、いかなる条件でアクセスするか。このことにより、十分な情報の流れの必要性和、セキュリティとプライバシーの必要性を尊重する必要性とのバランスを実現する。この報告は、地球観測コミュニティを対象に、データ共有の様々なフレームワークを特定した。欧州では、各国が、データと資金の両面でシステムに貢献する必要がある。

そのため、各国がデータを共有するためのインセンティブを確保するために、さらに複雑なレイヤーがある。ESPI によって特定された潜在的な欧州 SSA システムデータフローを [図表 2-20](#) に示す。

2. ビジネスモデル：様々なシステムレベルの民間企業にとって魅力的な収益機会を示し、商業的な利益と国家又は超国家的な管理とのバランスをとる上で、民間又は官民との間のトレードオフを確立する。利益志向が望まれる場合、商業利害関係者にとって十分なビジネス機会を確保する必要がある。
3. オペレーション：欧州の SSA システムの構造的及び手続的な設定並びに制度的フレームワーク。中央集権型アプローチ及び分散構成並びに軍事的要件のある民生利用とのバランスを取る。機能的な SSA システムの存在は、将来の宇宙交通管理 (STM) の前提条件になる。



図表 2-20：欧州 SSA システムのデータフロー案

2.3.4 欧州のセンサー

宇宙監視が可能な現在利用可能な欧州にあるセンサー設備のリストを下表にまとめた。

図表 2-21：欧州宇宙監視施設

	センサー名	場所	運用者	備考
レー ダー	GRAVES ⁵⁴	ブロワ・ド・ペスメスとレベスト・デュ・ビオン、フランス	フランス国防省が所有する ONERA	自律型カタログを作成できるバイスタティック
	フィリングデールズ ⁵⁵	英国フィリングデールズ空軍基地	英国国防省（米国と共に）	SSN の一部、他の欧州諸国とのデータ共有なし
	ビラレス ⁵⁶	イタリア サルデーニャ		EUSST の一部
	グローブス II ⁵⁷	ノルウェー バルドル	ノルウェーのインテリジェンス（米国と共に）	SSN の一部、他の欧州諸国とのデータ共有なし
	TIRA ⁵⁸	Wachtberg, Germany ⁵⁹	FGAN	電波望遠鏡 Effelsberg でタンデムモードが可能
	Armor	フランス（ホームポート） ブレスト	フランス国防省（DGA/DCE）	「Monge」追跡船に搭載
	EISCAT	スカンジナビアの様々な場所	多国間の科学的なネットワーク	範囲及びドップラーデータのみを提供
	Monostatic Test Radar ⁶⁰	スペイン マドリード Santorcaz Naval Radio Station	宇宙監視・追跡システム（SSTS：Space Surveillance and Tracking System）	Indra がスペイン向けに建設
	Northern Cross/BIRALIS ⁶¹	イタリア ボローニャ Medicina Radio Observatory	国立天体物理研究所の電波天文学研究所（イタリア政府）	イタリア サルデーニャ BIRALES EUSST の一部
	GESTRA ⁶²	ドイツ	DLR	
チルボルトン ⁶³	英国 ハンプシャー	英国科学技術施設評議会	CAMRa 25メートルの操縦可能なパラボラディッシュ S バンドレーダー	

	センサー名	場所	運用者	備考
光学	SPOC ⁶⁴	フランス ツーロン 及びオデイロ	フランス国防省	一部の物体に初期軌道を提供
	ROSACE	フランス オートプロヴァンス	CNES	GEO 付近の正確な軌道決定
	TAROT ⁶⁵	フランス、チリ カレン・パルトー	CNES	ロザスと共同使用
	PIMS	英国 ハーストモンズー、キプロス ジブラルタル	英国国防省	IADC が使用
	ZIMLAT Telescope ⁶⁶	ツィンマーヴァルト天文台	ベルン大学天文学研究所 (AIUB)	主に衛星レーザー測距に使用 望遠鏡は GEO リングの 100° のセクターをカバー 夜間観測の最大 40%は、ESA 望遠鏡によって発見された GEO 物体の追跡に使用
	ESA Flyeye Telescope	イタリア シチリア		満天の NEO 用に設計 ⁶⁷
	OGS Telescope	テイデ天文台		
	Matera Laser Ranging Observatory	イタリア		
	Graz	ラストビュール天文台		衛星レーザー測距局グラーツ
Deimos Sky Survey	スペイン	デイモスペース	35 個の光学望遠鏡	

2.3.5 欧州の注目すべき国

2.3.5.1 英国

英国は最初の人工衛星であるスプートニク-1の追跡にジョンドレル銀行の電波望遠鏡が使用された1957年から、SSA活動に長年に渡り積極的に参加している⁶⁸。それ以来、英国は国際（主に米国SSN及びEUSSTサポートフレームワーク）SSA活動を支援し続けている。

英国政府と産業界は、国家安全保障にとってのSSAの重要性をますます認識し始めている。これは、宇宙がますます混雑し、競争が激しくなっているためである。2015年の英国国防省（MOD）の戦略的防衛・セキュリティレビュー（SDSR：Strategic Defence and Security Review）では、SSAが英国防衛科学技術研究所（DSTL：Defence Science and Technology Laboratory）の最優先事項であるとした⁶⁹。

RAF High Wycombeに本拠を置く英国宇宙運用センター（SpOC：Space Operations Centre）は、「宇宙領域を理解し、及び活用し、英国の重要な宇宙能力へのアクセスを保護し、英国の利益を守るため、そして宇宙制御を英国の軍事作戦に統合するために、宇宙制御及び宇宙力強化サポート能力を最大化する」責任を有している⁷⁰。2018年5月、RAFは、国防総省全体の宇宙関連のポストを増加させることに加え（500人から今後数年間で600人へ増員）、High WycombeのSpOCの規模を2倍（20人から40人に増員）することを表明した⁷¹。SpOCは、既存の米国防空作戦センターと統合されて、英国空軍作戦センター（National Air & Space Operations Centre）を設立し、英国の機関、業界及び国際パートナーとのより深い協力を目指している。英国は、英国宇宙機関（UKSA：UK Space Agency）によってEUSSTサポートフレームワークに参加している。UKSA SSTチームは、EUSSTサポートフレームワークへの英国の貢献に応じて近年成長したが、EUSSTにおける英国の将来の役割は不確実である。英国のSSAエコシステム（RAFとMoD、英国の宇宙機関、DSTL、STFCなど）に多数の様々な機関と組織が関与していることを考えると、英国が直面する課題の1つは、これらのいずれが英国のSSA戦略を所有するかを特定することと、包括的なプログラムをサポートするための監視と資金を提供することである。

英国は、RAF Fylingdalesのレーダーセンサー、Cilbolton Radar及びStarbrook広視野光学望遠鏡の3つのSSAセンサーを所有及び運用している⁷²。

1. RAF Fylingdales のレーダーセンサーは、欧州で最も強力な宇宙監視センサーである。主に米国を支援するために、英国軍によって運営される宇宙監視ネットワーク（SSN）、早期警戒及び宇宙監視ミッション。これは、UHF 帯域で動作する高性能 3 面フェーズドアレイレーダーで構成されている。



図表 2-22 : Chilbolton レーダー⁷³

2. Chilbolton レーダーは英国のウィンチェスターにあり、科学技術施設評議会（STFC : Science and Technologies Facilities Council）の一部である Rutherford Appleton Laboratory (RAL) によって運用されている⁷⁴。主に学術研究に使用されるが、STFC Space Monitoring Facility を通じて SSA にも使用される⁷⁵。現在計画中のアップグレードについては、新しいレーダーである Chilbolton Advanced Satellite Tracking Rada (CASTR) の所有が含まれている。現在、LEO で最大 1m のターゲットを検出できるが、計画されているアップグレードにより感度が 100 倍に向上し、より小型な衛星やスペースデブリを検出できるようになる。
3. Starbrook 広視野望遠鏡は 2006 年から実験的な調査センサーとして運営されている⁷⁶。キプロスにあり、1.5 m を超える GEO の物体を検出できる。

Northern Space and Security (NORSS) 社は、2018 年に設立された英国ベースのコンサルタント会社であり、宇宙運用コミュニティをサポートし、独自の運用能力を開発している⁷⁷。将来的には、NORSS 社は商業、政府及び軍事目的のために宇宙監視及び追跡サポートを提供することを目指している。NORSS 社のチームは、UKSA に軌道解析サポートを提供している。また、同社は SpaceTrack からのデータを 2 行軌道要素セット (TLE) の形式で使用し、それを「NORSS-track」というシステムに転送する。NORSS は通常、市販のソフトウェアを使用し、ニーズに合わせて調整される。NORSS が使用する主なソフトウェアは、AGI 社のシステムツールキット (STK : System Toolkit)、CNES が実行する JAC 及び CAESAR システム並びに ExoAnalytics 社のソフトウェアである。

SDA

Space Data Association (SDA) は、「制御された、信頼できる、効率的な宇宙環境を確保するために取り組んでいる」グローバルな衛星運用者の協会である。英国のマン島に位置する SDA は、運用データの共有と業界全体でのベストプラクティスの推進による飛行の安全性の向上を目的として 2009 年に設立された。また、衝突警告通知の精度と適時性を改善するとともに、全ての関連組織と提携して、次世代の STM システムと機能の定義を支援している。現在の SDA メンバーシップには、Inmarsat、Intelsat、Eutelsat、SES 及びその他の主要な GEO 衛星運用者等の衛星通信会社が含まれる。最近では、Planet や Spire などの一部の LEO 衛星運用者が

SDAに参加して、コミュニティとデータを共有している。全メンバーリストはSDAのウェブサイトで閲覧できる。

SDAは、AGI社が運営するプラットフォームであるSpace Data Center (SDC)をサポートしている。これにより、メンバーは運用データを共有し、評価と警告サービスを同時に提供できる。SDCは、メンバーが提供する軌道暦を利用し、統合されたマヌーバ情報及び米国SSNの公開カタログからのTLE及びSP (Special Perturbation: 特殊摂動) データと融合する。宇宙監視ネットワークによって生成された公開カタログ。

英国の学術機関

DSTLは、英国国防省の執行機関であり、防衛及び安全保障分野の科学技術に特化している⁷⁸。DSTLには、SSA研究 (TRL 6まで) の専門チームがあり、英国国防総省の航空軍団をサポートしている。また、DSTLは、特に防衛アプリケーションに重点を置いてSSAをサポートするために英国の研究に資金を提供している。防衛・セキュリティアクセラレータ (DASA: Defence and Security Accelerator) の支援を受けたDSTLの「[革新する宇宙](#)」コンペティションは200万ポンド以上の価値があり、英国の衛星の監視能力を高め、宇宙で敵対する可能性のあるアクターを特定するために設計された技術に焦点を当てている。DSTLは、Coalition Space Operations (CSpO) 内の運用SSAアーキテクチャーの開発をサポートするためにSSAセンサーと処理機能の統合をテストし、ファイブアイズの国 (英国、米国、カナダ、オーストラリア及びニュージーランド) の代表者との研究を調整している⁷⁹。

更にDSTLは、防衛アプリケーションに特に焦点を当て、SSAに貢献する可能性のある学術研究と卓越したセンターを特定するために2013年に設立された英国のイニシアチブである天体力学のコミュニティ利益社会 (ACI: Astrodynamics Community of Interest) をコーディネートしている⁸⁰。ACIは共同研究プロジェクトを促進し、SSAデータのニーズと可能な研究貢献を特定するワークショップを開催する。これらのワークショップは、学界が運用要件をよりよく理解し、そのような運用コンテキストに研究を適用できるようにすると同時に、英国の研究評議会によってサポートされるより野心的なSSA研究プログラムへの道を提供することにおいて、双方にとって有益である。ACIは現在、商業衛星運用者や英国軍事運用者を含む30の英国組織を取り入れ拡大している。

宇宙の持続可能性のためのグローバルネットワーク (GNOSIS: Global Network for Sustainability in Space) は、STFCが資金を提供するネットワークであり、粒子、核及び天体物理学分野の研究者が他の研究評議会及び近接地球宇宙環境を研究している業界の研究者と協力して近接した研究を行うことを目指している⁸¹。ネットワークの目的は、より安全な環境を実現するために、デブリの数と宇宙交通管理への影響を理解することである。GNOSISは、ワークショップの実施、スコーピング研究の実施及びプロジェクトと大学院生の資金提供による共同アイデアの開発をサポートするために、4年間の資金提供を受けている。

英国の多くの学術機関は、他の研究分野での専門知識をSSAに適用している。たとえば、天空観測データ管理をリードするエジンバラ大学は、そのようなデータプロセスを衛星の検出と特性評価に適用している。エジンバラの研究チームは、低軌道の人工物体を追跡するために設計されたカメラを再利用するロッキードマーティン用のプロトタイプFireOpal検出器を運用している。ウォーリック大学は太陽系外

惑星の分野の研究者が SSA の研究を行うための能力を持っていることに気付き、大規模な調査やそのデータ処理を行っている。彼らは、LEO での光学デブリ追跡のために、太陽系外惑星の研究のために伝統的に開発された地上ベースの望遠鏡の使用を検討しています。ワーウィック太陽系外惑星研究グループは最近、DSTL からそのような能力を開発するための資金を受けました⁸²。そうは言っても、天文学から SSA への移行はより困難であると示唆する人もいます。特定の SSA の知識が必要であり、望遠鏡とハードウェアをアップグレードして再利用する必要があります。

2.3.5.2 フランス

フランスにおける宇宙監視は国防がその責任を担っている。フランスにおける宇宙監視は、司令部間陸軍司令部 (CIE : **Commandement Interarmées de l'Espace**)、共同宇宙司令部及び空軍といった国防組織がその責任を担っている⁸³。運用レベルでは、責任はフランス空軍とフランスの宇宙機関であるフランス国立宇宙研究センター (CNES : **Centers d'Études Spatiales**) の間で共有されている。空軍は、監視システム (GRAVES) と追跡レーダーの全体的な調整と運用を担当している。CNES は、衝突リスクの監視、再突入解析、空軍の飛行力学サポート及びフランス宇宙法の実施を担当している⁸⁴。

SSA は、2019 年フランス国防宇宙戦略の 3 つの中核分野の 1 つとして定められ、SSA の能力を拡張して全ての軌道の活動を監視するよう求められた。それは以下のように報告されている。「この戦略における優先事項として、SSA は、脅威をより適切に評価し、観測された活動の特徴を把握するために、宇宙だけでなく地上でも強化する必要がある (宇宙関連のインテリジェンスに取り組む)。」フランス空軍の一部であるリヨンに本拠を置く軍事監視宇宙物体運用センター (COSMOS : **Centre Opérationnel de Surveillance Militaire des Objets Spatiaux**) は、防衛と国家安全保障の文脈で SSA に対処する責任を持つ。さらに、フランスはドイツとの二国間 SSA データ共有協定を締結している。この協定では未分類なものと分類されたものの両方の SSA データの交換について定められている。

CNES はフランス政府の宇宙機関である。本拠地はパリにあり、フランス国防省の監督下に置かれている。フランスは CNES によって EUSST サポートフレームワークに参加している。

宇宙デブリは、CNES の最優先事項であり、協力、監視、技術及び緩和が含まれる。CNES は、ベストプラクティス、ガイドライン及び標準の確立を担当する国際的な会合 (ECSS、ISO、UN COPUOS、IADC 等) を積極的にサポートしている。SSA の観点から、CNES は GRAVES のデータを使用して、LEOb の宇宙物体のカタログを保持している。CNES は、この分野での数十年の経験に基づいて、接近分析において主導的な役割を果たしている。これは、運用中のフランスの衛星である Cerise がスペースデブリとの衝突によって損傷した 1996 年の Cerise 事件によるものである。CNES は、このイベントに続いて連動分析を確立し、EUSST を介したこのようなサービスの主要な貢献者となった。CNES の主要な衝突回避サービスは CAESAR (Conjunction Analysis and Evaluation Service : 接近解析とアラートと回避有無の推奨といった評価サービス) と呼ばれている。アラートと推奨事項)。世界中の 106 の衛星が EU-SST サービスを通じて CAESAR を使用している。CAESAR は、フランス及び外国の

宇宙物体の衛星再突入を追跡する。CAESAR は米国から情報を取得し、JSpOC はフランスの SSA センサーからのデータで補足される。CAESAR は、衛星の軌道内衝突リスクの管理を担当するチームのニーズに対応する基盤ソフトウェアである Java for Conjunctions (JAC) によってサポートされている。これは CNES によって配布されるモジュラー・ソフトウェアであり、情報のみを提供する基本モジュールは無料で利用できるが、年会費を支払うことで意思決定及びその検証をサポートするエキスパートモジュールを利用できる。CNES には、これらのサービスをサポートする約 16 人の開発者からなるチームがあり、CNES 宇宙運用データ (SpOD : Space Operations Data) サーバーを通じて提供される。

フランスのセンサー

フランスの GRAVES レーダーシステム (GrandRéseauAdaptéà la Veille Spatiale) は、フランス国防省が所有、フランス空軍が運営し、LEO (高度 400-1000km) の宇宙物体の監視を提供する。GRAVES は 2005 年に運用を開始し、サイズが 1m を超える 2000~3000 の宇宙物体を追跡及びカタログ化することができる。GRAVES のデータは EUSST サポートフレームワークで使用され、CNES が提供する SSA サービスをサポートしている。フランス国防省のシステム評価及び試験局は、フランス全土で複数のレーダー及び光学センサーを運用している。これらの中で最も強力な Armor は、追跡船のモンゲにある。CNES は、主に天体物理学研究用に設計された TAROT 望遠鏡 (Télescopeà Action Rapide pour les Objets Transitoires) の観測時間を使用して、GEO 帯を調査している。2 つ目としては、補完的な望遠鏡 TAROT-S がチリに配備されている。



図表 2-23 : GRAVES レーダーシステム⁸⁵

2.3.5.3 ドイツ

2010 年のドイツ連邦政府の宇宙戦略には、国家的 SSA 能力の開発を含む、宇宙システムの完全な機能・能力と宇宙の利用へのアクセスを確保するという目的が含まれている。これにより、最終的にはドイツ空軍と DLR 宇宙局が運営する共同施設であるドイツ宇宙状況認識センター (GSSAC : German Space Situational Awareness Centre) が設立された。GSSAC は、ドイツ連邦政府の宇宙状況認識のための主たるコンタクト・ポイントとして機能し、宇宙物体のドイツのカタログを管理している。GSSAC のミッションは、国家政策の支援、宇宙インフラの保護及びドイツ軍の支援のためのプロダクトを提供する際に、宇宙監視、偵察及び天気で構成されている SSA を組み込むことである。

ドイツ航空宇宙センター (DLR : Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt eV) は、航空宇宙、エネルギー、輸送の研究のためのドイツの国立センターである。DLR

は、研究機関であることに加えて、ドイツの宇宙機関（DLR Space Administration）としても活動している。ドイツ連邦政府に代わってドイツの宇宙プログラムを計画し、実施する責任を有する。DLRは、EUSST サポートフレームワークでもドイツを代表して参加している。

データは米国からドイツ宇宙作戦センター（GSOC：German Space Operation Center）に提供される。米国 CSPoC が、このデータを小口径ロボット望遠鏡ネットワーク（SMARTnet：Small Aperture Robotic Telescope Network）で補完する。SMARTnet は、GSOC とベルン大学天文学研究所（AIUB）が共同で運営する世界規模の専用光学望遠鏡ネットワークであり、関係する全てのパートナー間で収集された全ての情報を自由に交換できる。結果の測定値は主にトラックレットであり、GSOC のサーバーを利用し、SMARTnet を介して交換される。SMARTnet は主に、静止軌道での GEO 調査及びカタログ物体に使用される。このネットワークには、スイス、その他の欧州のいずれかの場所、南アフリカの望遠鏡が含まれており、他にもオーストラリアと南アメリカに望遠鏡を配備する計画がある。さらに、ドイツはフランスとの二国間 SSA データ共有契約を締結しており、これは秘匿性のない情報と機密な物の双方の SSA データの交換を対象としている。

フラウンホーファー高周波物理及びレーダー技術研究所（FHR：Fraunhofer Institute for High Frequency Physics and Radar Techniques）は、様々な用途向けのレーダー及び高周波技術を開発する実験的研究センターである。ドイツ実験宇宙監視・追跡レーダー（GESTRA：German Experimental Space Surveillance and Tracking Radar）、追跡・画像レーダー（TIRA：Tracking and Imaging Radar）など、SSA に使用される多数のレーダーを設計した。

GESTRA システムは、地球軌道上の物体を連続的に追跡する機能を備えた 256 個の位相制御アンテナを採用している。このレーダーは、DLR Space Administration に代わって、フラウンホーファー高周波物理及び FHR によって開発及び構築された。2019 年 11 月に最初のデータを受信した。GESTRA が取得した全てのデータは、GSSAC によってカタログ化される。GESTRA は、LEO の物体のドイツの軌道データカタログを作成するために使用され、ドイツの研究機関が利用できるほか、EUSST プロジェクトをサポートしている。

TIRA は、FHR によって構築及び運用される 34m アンテナを備えた追跡及び画像レーダーである。その目的は、高精度の軌道決定と宇宙物体の詳細な分析である。TIRA はフランスの Graves レーダーと連携して使用され、グレースによって識別された物体の詳細なフォローアップを提供することがある。TIRA は様々な目的に使用されるが、その高い機能（1000km の高度でサイズが 2cm までの物体を識別できる）により、SUS に使用され、データは EUSST コンソーシアムと共有されている。



図表 2-24：GESTRA システム⁸⁶

2.3.5.4 スペイン

スペイン宇宙監視・追跡（S3T : Spanish Space Surveillance and Tracking）システムは、2つの主な目的を持つ宇宙監視・追跡（SST : Space Surveillance and Tracking）サービスを提供する。

1. 不可欠な宇宙インフラの長期的な可用性の確保
2. 政府及び民生サービスに対して、制御されていない大気圏再突入又はスペースデブリに関する出来る限りの情報の提供を提供している。

S3T システムには、国立 SST オペレーションセンター（S3TOC : SST Operations Centre）と、光学望遠鏡とレーダーセンサーを含む地上センサー（S3TSN）で構成されている。EUSST サービス提供ポータルを介して、衝突警告、断片化の検出と特性評価及び制御されていない大気圏再突入の監視といったサービスを提供している。

S3TOC は、外部データソース（US CSpOC など）で補完された S3T センサーネットワークからの観測に基づいて独自のカタログを保守し、EUSST プログラムに貢献している。JSpOC）及び EUSST プログラムに貢献しています。S3TOC は、次の機能で構成されている。

- データ処理とカタログ化
- サービス処理
- センサーの観測計画とタスク処理
- サービス提供

S3TOC ソフトウェアは、スペインの民間企業によって全て開発されている。2017年現在、S3T センサーネットワークには5つの光学望遠鏡と1つのレーダーセンサーが含まれており、さらに4つの望遠鏡、もう1つのレーダー、レーザー測距ステーションが計画されている。これらには、研究機関及び商業運用者が所有し、及び運営するセンサーが含まれる。

スペインは、EUSST サポートフレームワークで、スペイン政府・産業技術開発センター（CDTI : Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial）を担っている。ESA は、GMV 社（S3TOC の開発を担当）、Indra 社（宇宙監視及び追跡システム用の監視レーダーデモンストレーターの構築）並びに Deimos 社（望遠鏡とレーダーセンサー用のソフトウェアを提供）を含むスペインの産業界からのサポートと共に、S3T システムの開発において CDTI をサポートしている。

スペインには、欧州のユーザー・コミュニティに限定的な衝突回避及び再突入予測サービスを提供しながら、将来のサービスのためのテストベッドを提供している、欧州宇宙天文学センター（ESAC : European Space Astronomy Centre）にある ESA 宇宙監視試験・検証センター（SSTC : Space Surveillance Test and validation Centre）の本拠地もある。

スペインの民間企業

Elecnor Deimos（Deimos）社は、2001年に設立された宇宙サービスに特化したスペインの企業である。ポルトガル、スペイン、英国、ルーマニア、イタリアに複数のオフィスを有し、20名から400人の従業員を有する企業にまで成長した。Deimos 社は、ミッション分析、地上セグメントシステム、オンボードソフトウェア

システム、運用ソフトウェア開発、システム統合、検証、展開、試運転と運用のサポートなど、衛星システムのバリューチェーン全体に幅広いサービスを提供している。特に SSA に対して、Deimos 社は、地球に接近する宇宙物体の検出と追跡を目的としたプロジェクトである Deimos Sky Survey (DeSS) を運営している。Deimos 社は、スペインのオフィスから遠隔操作される 3 つの光学望遠鏡を所有しており、検出、追跡、特性評価、識別、カタログ化、衝突リスク評価などの SSA サービスを提供している。Deimos 社はこれらのサービスを顧客に提供し、研究プロジェクトをサポートし、EUSST へのスペインが貢献するためのデータを提供している。特に SSA の目的で提供しているその他のプロダクトとしては、ライセンス SSA ソフトウェア、特注ソフトウェアの構築及びダイレクトサービスの提供が含まれている。たとえば、Deimos 社は ESA Space Debris Office 用のソフトウェアを開発し、英国宇宙運用センター (UK SpOC : UK Space Operations Center) にライセンスを付与し、Eutelsat に直接 SSA 衝突警告サービスを提供している。サービスを全面的に提供することで、Deimos 社は運用を通じて日常的にソフトウェアをテストでき、開発チームに直接フィードバックすることが可能となっている。

GMV 社は、ミッションサポート、衛星ナビゲーション、地上セグメント、データ処理を含む幅広い分野の宇宙市場の顧客にプロダクト、サービス、ソリューションを提供する欧州の企業である。GMV 社は、欧州宇宙機関の SSA 及び SST プログラムに積極的に参加している。

欧州宇宙機関の SSA プログラムをサポートすることに加えて、GMV 社は商業衛星運用者に SSA サービスも提供している。GMV 社の focusoc という商業衝突回避サービスでは、CSpOC SP カタログに基づき、接近検出、衝突リスクの評価と回避及び SST データ処理と軌道決定の機能を提供している。USSTRATCOM と GMV 社間の SSA データ共有協定に基づいて、focusoc は接続評価 (CA) 及び衝突回避 (COLA) サービスを提供している。

Indra はスペインのコンサルティング、テクノロジー、イノベーション企業であり、多くの分野で活動している。宇宙セグメント事業は、EUSST を通じて技術インフラストラクチャを提供するスペインをサポートしている。2010 年、Indra はマドリッドのサントルカズ海軍無線局にある宇宙監視追跡システム (SSTS : Space Surveillance and Tracking System) の監視レーダーの検証・開発する契約を獲得した。それは既に稼働しており、衛星と宇宙物体の最初の観測を成功裏に実行した。

2.3.5.5 イタリア

イタリアの国家 SST 能力には、イタリア国防省、イタリア空軍 (ItAF : Italian Air Force)、イタリア宇宙機関 (ASI : Agenzia Spaziale Italiana) 及びイタリア国立天体物理学研究所 (INAF : National Institute for Astrophysics) の間のコラボレーションが含まれ、EUSST サポートフレームワークに直接貢献している。イタリアは、Agenzia Spaziale Italiana (ASI) が EUSST サポートフレームワークに参加している。

地上のレーダーセンサー、光学望遠鏡、レーザー施設を含む多くの国家センサーは、イタリア宇宙監視・追跡運用センター (ISOC : Italian Space Surveillance

and Tracking Operational Center) にデータを提供している。ISOC は、国家 SSA センサー、タスクセンサー、及びデータ処理の中心的なハブであり、EUSST サポートフレームワークに供給するサービスを提供する責務を負っている。

イタリアは主に、その学術的及び軍事的能力の使用に焦点を当てている。一例として、2015 年、イタリアの会社 Finmeccanica/Selex ES は、イタリア空軍と共同で、Selex ES がイタリア空軍向けに製造した RAT-31/DL FADR (**Fixed Air Defence Radar** : 固定防空レーダー) レーダーシステムを使用してテストを実施した⁸⁷。ドイツ航空宇宙工学グループ (GIAS : German Aerospace Engineering Group) は、ItAF フライトテストウィング内で動作し、EUSST プログラム内で ISOC として機能する。

GMSPAZIO 社は、ローマに拠点を置く欧州の中小企業であり、航空宇宙、防衛、セキュリティの分野で事業を展開している⁸⁸。GMSPAZIO 社は、AGI 社などのような多くのグローバルプロバイダーのシステムインテグレーター及びディストリビューターであり、独自のサービスである GMSPAZIO Satellite Tracking Toolkit (GSTT) を提供している。GSTT 社は、AGI 社の STK を基盤として、複数のソースからのデータを統合及び処理することにより、LEO、MEO、及び GEO 軌道の衛星運用者に SSA / SST 機能を提供する⁸⁹。

2.3.5.6 ポーランド

ポーランドは 2018 年に EUSST プログラムに参加し、2019 年から 2021 年の国家宇宙プログラムの一環として、国家宇宙状況認識センター (SSAC-PL : Space Situational Awareness Centre) を設立した⁹⁰。ポーランドは、ポーランド宇宙局の EUSST サポートフレームワークに参加している⁹¹。ポーランドの EUSST プログラムへの貢献には、世界中のポーランド、アルゼンチン、オーストラリア、チリ、RSA、米国にある 19 の望遠鏡が含まれ、複数の研究機関と民間企業が所有し、SSA データの処理と分析の専門知識を備えたプログラミングツールを備えている。

ポーランドの SSA コミュニティの中核には、公的研究機関と民間企業が含まれ、その多くは上記の望遠鏡を提供して EUSST プログラムをサポートしている。これらには、ポーランド科学アカデミーのニコラウスコペルニクス天文センター、ポズナンのアダムミツキェヴィチ大学物理学部の天文台、グディニアのバルト工科大学及び民間企業が含まれる。Sybilla Technologies 及び 6ROADS。

2.3.5.7 ルーマニア

ルーマニアは 2018 年に EUSST サポートフレームワークに参加し、ルーマニア宇宙機関 (ROSA : Romanian Space Agency) が代表を務めている。2019 年 3 月、ソリンドゥカル・ルーマニア大使が欧州連合衛星センター (EU SATCEN : European Union Satellite Centre) のディレクターに選出されている⁹²。

ルーマニアは 2011 年から欧州宇宙機関のメンバーであり、2014 年からルーマニアの研究機関や企業が ESA SSA プログラムの設計に参加している。ルーマニアは、レーダーシステムと光学望遠鏡ネットワークを含むセンサー機能の更新を検討している。また、ケイア (Cheia) 地上局では、ROSA は SSA 活動のために 32m アンテナ

を再利用することを検討している。このアンテナの予備評価は、Telespazio と Radiocom が共同所有しているルーマニアの商業会社 Rartel が主導している⁹³。ルーマニアでは、ROSA、宇宙科学研究所、ルーマニアアカデミー天文研究所との協力により、宇宙物体観測用の光学望遠鏡のネットワークも検討している。これらのセンサーからのデータは、ROSA の Space Tracking Center で集中管理される。

2.3.5.8 ルクセンブルク

ESA SSA プログラムをサポートすることに加えて、ルクセンブルク政府は 2019 年にカナダの商業 SSA 企業 NorthStar Earth&Space (NorthStar 社) との間で、クリーンスペースセンターオブエクセレンス (Centre of Excellence for Clean Space) を設立するための同意書に署名⁹⁴。同センターはルクセンブルクの NorthStar 社によって運営され、ルクセンブルクの宇宙コミュニティ全体でのコラボレーションを促進しながら、STM と SSA 情報サービスを提供することを目指している。

2.4 その他の国の能力

2.4.1 ロシア

- ロシアの SSA 能力は、現状では米国に次いで世界で 2 番目に大きい。ロシア軍は、4 つの電気光学望遠鏡を含む重要な宇宙監視能力を備えており、新しい地上ベースの宇宙監視システムを開発している。
- 国際科学光学観測ネットワーク (ISON: International Scientific Optical Observation Network) は GEO でのデブリ検出に焦点を当てたものであり、ロシアが運用している。

2.4.1.1 概要

ロシアは、米国に次いで世界で 2 番目に大きい強固な SSA センサーのネットワークを管理している。3 つのバイスタティック・フェーズド・アレイレーダーと 1 つの 4 面フェーズドアレイレーダーを含むロシア領土内外にある地上 SSA レーダー及び電気光学センサーのネットワーク。これは、モスクワを防御するため対弾道ミサイル (ABM) システムの一部でもあるロシア宇宙監視システム (RSSS: Russian Space Surveillance System) を運用している。米国と同様、RSSS はロシア防衛省の下で行われるロシアの軍事作戦と、ロシア宇宙機関 (Roscosmos) の民生オペレーションをサポートしている。ロシアには、外務省やロシア科学アカデミー (RAS: Russian Academy of Sciences) など、ロシア連邦全体の科学研究機関のネットワークの一部である他の機関の専門知識も組み込まれている。これらの機関は、SSA 関連の宇宙政策、国際協力、データ共有の発展に貢献している。

RSSS データは、米国の衛星カタログと同様の衛星カタログを作成及び維持するために使用されるが、GEO 帯でのカバレッジは不完全である⁹⁵。ロシアでは、国際科学光学観測ネットワーク (ISON: International Scientific Optical observation Network) も運営している。これは主に GEO 帯でのデブリ検出に焦点を当てており、RSSS とは別の機能である。ISON は、RAS 内のケルディシュ応用数学研究所 (KIAM: Keldysh Institute of Applied Mathematics) によって調整され、様々な国で約 90 の望遠鏡を持つ 38 の施設で構成されている。

ロシア軍は、タジキスタンにある 4 つの光電子望遠鏡で構成される Okno-M システムなど、重要な宇宙監視能力を備えている。2016 年初頭、ロシアは、Roscosmos との契約下で連邦宇宙計画の下で開発された、地球近傍の宇宙における「危険な状況」に対する自動警告システムを開発した。ロシアは、UNCOPUOS でシステムの概要を提示し、地球近傍の宇宙を監視するための世界初の民間システムであると説明した。プレゼンテーションでは、システムの目標を「ロシアの宇宙機によって行われる宇宙運用の安全性を確保するスペースデブリに関する国際的な義務において、ユーザーに地球近傍の危険な状況の警告を発出し、ロシア連邦のコンプライアンスを確保するために行われた活動を支援する。」と説明した。このシステムには、センサーデータの取り込み、処理、分析のための電気光学センサーとセンターが含まれている。

さらに、ロシア当局関係者は、全ての高度における継続的な監視を実行するための新しい地上ベースの宇宙監視システムの継続的な開発に言及している。このシス

テムは、2017年には約15,000個の物体を特定したと伝えられており、システムの構築は継続される予定である。

2.4.1.2 ロシアの民間企業

ロシアの2つの最大の衛星通信運用者であるロシア衛星通信会社 (Russian Satellite Communications Company) とガスプロム・スペースシステムズ (Gazprom Space Systems) は、軌道暦を世界の商業宇宙 SSA コンソーシアムと共有していることは公に知られていない。

2.4.2 カナダ

- カナダは、米国に貢献する2つのセンサーを管理及び運用している。SSN 及び SSA データ共有の国際的な基準形成においても役割を果たしている。
- 商業的に、カナダには NorthStar 社があり、宇宙ベースの SSA コンステレーション機能を開発している。

2.4.2.1 概要

カナダの主要な能力であるカナダ宇宙監視システム (CSSS : Canadian Space Surveillance System) は、米国に直接供給されている⁹⁶。CSSS は、Sapphire 衛星、宇宙ベース電気光学センサー及び Sapphire の観測処理と、Sapphire 衛星及び米国政府の CSpOC 間のデータ共有インターフェイスとして機能する Sensor System Operations Center (SSOC) で構成される2面 SSA アーキテクチャーである。サファイア衛星は、LEO の円形の太陽同期軌道で自律的な電気光学センサーを操作する。高度 6,000~40,000km のオブジェクトをイメージングできます。カナダにおいては、Sapphire の地上局は、宇宙機を制御及び監視する宇宙機管制センター (SCC : Spacecraft Control Center) と、CSpOC への送信のために SOC へ転送する前に Sapphire のデータの送信、受信及び処理を行う衛星処理並びにスケジューリング施設 (SPSF : Satellite Processing and Scheduling Facility) で構成される。カナダも同様に、LEO に拠点を置く NEOSSat マイクロサテライトを通じて、宇宙ベースの SSA データを米国 SSN に提供している。

カナダの SSA 能力のもう1つの主要なプレーヤーは、米国国防総省に属する DARPA と同様に機能する研究機関であるカナダ国防研究開発局 (DRDC : Defense Research and Development Canada) である。オタワに所在する DRDC は最近、SSA (カナダでは宇宙監視、又は「SofS : Surveillance of Space」と呼ばれることもある) の R&D ツールとして機能する小型光学センサーを開発した。センサーは DRDC オタワ宇宙監視観測所 (SSO : DRDC Ottawa Space Surveillance Observatory) と呼ばれている。このセンサーは、NEOSSat SofS 宇宙ベースのマイクロサテライトの操作もサポートしている⁹⁷。

カナダは、Norstar Space Data として知られる NorthStar 社の本拠地でもある。NorstarSpace Data は、SSA 機能用に設計されたリモートセンシング及び光学センサ

一用の宇宙ベースのハイパースペクトル並びに赤外線（IR：infrared）コンステレーションを開発している商業会社である。カナダ政府、ケベック州政府、Telesystem Space（カナダの技術開発会社）の両方からの投資により、NorthStar社は、宇宙に焦点を合わせたセンサーが完全に展開した時には300,000個以上の低軌道の物体を対象とし、世界の顧客へ軌道を追跡しサービス提供をしようとしている⁹⁸。

2.4.3 中国

- 中国はデータ共有活動に参加していないが、堅牢で、大部分が機密のSSAセンサーネットワークを運用している。
- 中国はまた、アジア太平洋宇宙協力機構（APSCO：Asia Pacific Space Cooperation Organization）を通じて、アジア太平洋地域でのSSAデータ共有の確立に取り組んできた。

2.4.3.1 能力及び宇宙政策

中国は、対衛星（ASAT：Anti-Satellite）兵器システムの開発とその実験成功を通じて、優れたSSA能力の所有を実証しているが、中国の軍事SSA能力の多くの詳細は公開されていない。中国科学アカデミー（CAS：Chinese Academy of Sciences）が運営するパープルマウンテン天文台（PMO：Purple Mountain Observatory、紫金山天文台）には、Ganyu、Honghe、Qingdai、Qinghai、Xuyiの5つの支所天文台にある望遠鏡がある。PMOは、中国からの打ち上げの分析など、いくつかのユニークなSSAサービスをサポートすることを目的とした海洋ベースの船を所有し、運用している。また、最近ではアルゼンチンのパタゴニア地域において、平和目的の宇宙観測及び探査を目的とした地パラボラアンテナが設置された⁹⁹。

最近の開発状況としては、国家防衛科学技術産業局（SAST：Science, Technology and Industry for National Defense）及びCASによる2015年の地球近傍物体

（NEO：Near-Earth Objects）とスペースデブリの両方を監視する政府運営センターの設立がある。中国国営メディアによると、同センターはCSpOCと同様の監視ネットワークを管理し、既存の中国の施設からの観測データと海外の監視データを取り込み、独自の監視ネットワークを構築している¹⁰⁰。公的には認めていないものの、中国のSSA活動の背後には国家安全保障と防衛の動機もあると見られている。

2016年の中国政府の宇宙政策白書は、非宇宙物体を含む可能性が高い「スペースデブリ・データベース」を強化する計画に言及した。この白書においては、データ共有モデルと宇宙環境監視システムの改善も求められている。また、NEOを監視する施設に関する一連の研究を実施し、そのような物体を監視及びカタログ化する中国の能力を高める計画を策定することも約束した。中国の宇宙物体のカタログはおそらく国際社会に公開されていないが、ある研究では、中国はTiangong-1宇宙ステーションの再突入についての非常に正確な予測を通じて、他の組織と比較して軌道の伝播と追跡能力を実証したことを指摘している¹⁰¹。

中国の宇宙ベースのSSA能力に関する公開情報は限られているが、中国の衛星のSJ-12、SJ-15、及びSJ-17中によって行われるランデブー及び近接操作（RPO）：

Rendezvous and Proximity Operation) に基づく一部のアナリストによる推測では、その用途は宇宙ベースの SSA 及び検査である可能性がある¹⁰²。

2.4.3.2 パートナーシップと地域活動

中国は、SSA を宇宙分野における戦略的な国際協力と中国のリーダーシップ促進の分野と見なしている。アジア太平洋宇宙協力機構 (APSCO : Asia Pacific Space Cooperation Organization) でのリーダーシップを通じて、SSA のデータと情報を取り込むことで貢献している。APSCO は、宇宙活動における協力と負担分担のために、アジア太平洋諸国間で ESA のような連合を構築することを目標に制定された地域団体である。中国は、APSCO のアジア太平洋地域地上ベース光学宇宙物体観測システム (APOSOS : Asia-Pacific Ground-based Optical Space Objects Observation System) ネットワークの開発をリードしている。2011 年から、APOSOS は、APSCO 加盟国間で既存の観測施設と新たに建設された観測施設を繋ぐこのネットワークの完成に向けて徐々に推進している¹⁰³。

このネットワークの主な焦点は、衝突回避及び早期警告サービスのために、加盟国が持つ LEO における物体に関するデータの拡大にある。2012 年にタイ、インドネシア、イランで最初の試験フェーズが成功し、その後、これら 3 つの望遠鏡が 2013 年に実装された。その後、2015 年にはパキスタンとペルーにある 2 つが続いた。APSCO の公式文書において、APSCO 加盟国の宇宙機の 90% を含む 206 個の物体が、物体カタログにおいて追跡されたことを報告している。APSCO は、バングラデシュ、モンゴル、トルコを含む他の各 APSCO 加盟国に最終的にセンサーを構築する目標を公に表明している。

2.4.4 オーストラリア

- オーストラリアは、米軍の能力の強力なパートナーであり、SSN に情報を提供し、国内の SSA 知識ベースに貢献するいくつかのセンサーをホストしている。
- オーストラリアには、SSA を研究しているいくつかの定評のある学術研究機関があり、最近、民間 SSA 提供者が出現している。

2.4.4.1 概要

オーストラリアの地理的位置は、宇宙時代 (Space Age) から宇宙通信の重要な役割を果たしてきたが、最近になってようやく民生宇宙機関を立ち上げている。こういった状況ではあるが、オーストラリアは宇宙活動において SSA の専門知識と米国との緊密な関係を長年培ってきており、独自目的の利用と、SSN に供給する地上及び宇宙ベースの SSA センサーをいくつか運用している。たとえば、オーストラリア空軍 (RAAF : Royal Australian Air Force) の第 1 リモートセンシングユニット (1RSU : No. 1 Remote Sensing Unit) は、1992 年に最初に設立され、Jindalee の高周波 Skywave Over-The-Horizon-Radar (OTHR) を運用している。また、オーストラリアは月間太陽観測所 (LSO : Learmonth Solar Observatory) と呼ばれる、太陽

活動を監視及び分析する宇宙気象望遠鏡を運用している。LSO は、気象局、防衛科学技術グループ及び米国空軍が共同で運営している。

また、1RSU は電気光学式宇宙監視望遠鏡 (SST) と地上設置型光学望遠鏡及び C バンド宇宙監視レーダーの 2 つの米国所有の SSA システムを遠隔操作しており、観測データを米国 SSN に供給している。SST は、三面鏡の光学設計と湾曲した光学焦点面により、従来の望遠鏡よりもはるかに大きな視野 (FOV : Field of View) を動作させながら、高速で広域の検索の性能を発揮し、SSN に重要なキャパシティを提供している。SST は 2017 年に、米国ニューメキシコ州のホワイトサンズから、西オーストラリア州エクスマスの海軍通信局ハロルド E. ホルトに移管を開始した。新しいサイトでのシステムの完全実装には天候的な影響があったものの、今後稼働し 2021 年までに米国 SSN にデータを送信する予定である。ハロルド E. ホルト海軍通信局にある C バンド宇宙監視レーダーシステムは、米国とオーストラリアの共同イニシアチブであり、米国 SSN へのデータ供給を開始した最初の南半球 LEO センサーであった。米国宇宙軍は、レーダーの運用開始から 1 年の間に、レーダーが 40,000 を超える宇宙物体追跡イベントを実施したと推定した¹⁰⁴。



図表 2-25 : ハロルド E. ホルト海軍通信局にある C バンド宇宙監視レーダーシステム米国空軍宇宙局による画像提供¹⁰⁵

2.4.4.2 非政府組織

オーストラリアには、宇宙環境研究センター (SERC : Space Environment Research Centre) もある。これは、政府機関、大学、オーストラリア、米国、及び日本の宇宙産業の専門家のコラボレーションである¹⁰⁶。SERC のメンバーには国立情報通信技術研究所、ロッキードマーティン・スペースシステムズ社の先端技術センター、EOS スペースシステム、王立メルボルン工科大学の宇宙研究センター、オーストラリア国立大学、オプタス衛星ネットワークなどがある。SERC は、宇宙デブリから生じる問題に対処するための国内の、国際的な、商業的な取り組みを融合させたいと考えている。彼らのウェブサイトでは「現在の独立した研究努力を統合し、

国際研究協力のための透明なフレームワーク、最先端の宇宙研究プログラムとインフラストラクチャへのアクセス（中略）、研究プログラムの相乗効果を強化し、新しい道を調査するための新しい資金（中略）研究の模範的な管理、一貫した焦点、戦略的リーダーシップを提供する」との記載がある。

2.4.4.3 オーストラリアの民間企業

Electro Optic Systems 社は、ソフトウェア、レーザー、エレクトロニクス、オプトロニクス、ジンバル、望遠鏡、ビームディレクターのコアテクノロジーに基づいた様々な電気光学アプリケーションのプロダクト範囲を提供するオーストラリアの技術関連の上場企業である。ESA Space Systems は、SSA の事業部門として、ハードウェア側に特化しており、物理センサーとシステムの設計、製造、配送及び運用を提供している。そのシステムは、指向性エネルギービームを使用して宇宙物体を調査し、そのシステムは物体追跡、特性評価、識別、通信、遠隔操縦、ミサイル防衛などのサービスを実行できる。EOS Space Systems は、レーザー、望遠鏡、ビームディレクターなどの SSA インフラストラクチャを、オーストラリア政府と世界中の同盟国とパートナーに提供している。EOS Space Systems は、マウントストロムロ天文台でデブリ追跡ステーションを運用し、最近、ロッキードマーティンとオーストラリア国防総省の支援を受けて、リアマンスに新しい運用サイトを開設した。

High Earth Orbit Robotics (HEO Robotics) は、シドニーに拠点を置く新興企業であり、宇宙ベースの宇宙物体に接近、検査、10km 前後の距離から高解像度の画像に捕捉できるナノ衛星の分散型「群れ」コンステレーションのアーキテクチャーを開発している。HEO Robotics は、この高解像度の画像を利用して、衛星通信運用者や保険会社が衛星の健全性を評価する方法や、軌道デブリの分布に関する研究に貢献したいと考えている。また、HEO Robotics は、最終的な軌道上サービスと軌道上での製造の経済的適応を可能にすると考え、検査画像を使用して衛星の寿命を最適化するバリューチェーンを表明して、衛星の寿命を最適化しようとしている¹⁰⁷。

2.4.4.4 学術機関

カーティン大学の国際電波天文学研究センターは、直径 1.5km を超える領域に分散された 2048 個のダイポールアンテナで構成される電波天文学機器、マーチソンワイドフィールドアレイ (MWA : Murchison Widefield Array) を管理している。MWA はパッシブ RF 信号を受信することが最近実証されており、カーティン大学と Defense Science and Technology Group の間でパッシブワイドエリア SSA センサーとして機能する可能性を判断するためのさらなる研究が行われている。現在、MWA の主要な機能は、天体物理学と宇宙天気研究に向けられている¹⁰⁷。

王立メルボルン工科大学 (RMIT : The Royal Melbourne Institute of Technology) の宇宙研究センターは、SERC 協力グループのメンバーであり、天体力学、GPS 追跡、大気、宇宙天気、電離層の特性評価における SSA 関連の研究を行っている。特に、RMIT は、宇宙物体の軌道決定アルゴリズムを改善するために SERC 内で活動してきた。別の大学であるオーストラリア国立大学 (ANU : Australian National University) は、主にエンドユーザーのサービスとアプリケーションに関する SSA の研究を行っており、SERC にも貢献している。

2.4.5 ニュージーランド

- ニュージーランドは最近、民間の SSA 企業の支援を受けて、SSA 能力に対する政策と予算投資を増やした。
- ニュージーランドは、宇宙システム、政策、及びプログラムの目標の構築に、商業的な視点と能力を含めることを特に優先している。

2.4.5.1 概要

ニュージーランドは新興宇宙国であり、2016年に国の民生宇宙機関が設立されて以来、様々な宇宙問題にまたがる新しい宇宙政策の取り組みを取り入れてきた。特に、ニュージーランドのビジネス・イノベーション・雇用省 (MBIE: Ministry of Business, Innovation, and Employment) は、宇宙規制の主要な政策機関として任命されており、ニュージーランドと米国との技術保障措置協定である宇宙及び高高度活動法案の他、UNCOPUOS の新加盟国として国連宇宙物体登録条約に署名し、批准するという決定を発表している。

MBIE は、他の宇宙プレーヤーとの協力関係を構築することを目的とした革新的なパートナーシッププログラムも主導している。その地理的位置は、航空交通や船舶からの干渉を比較的最小限に抑えながら、様々な軌道で SSA インフラとして理想的な場所にある。2018年、MBIE は、宇宙関連の R&D プロジェクトで協力するために、SSA の民間企業である LeoLabs 社と覚書 (MOU) に署名した。2019年、そのパートナーシップの最初のプロダクトである、Kiwi Space Radar (KWS) と呼ばれる新しい LeoLabs フェーズド・アレイ S バンドレーダーが発表され、ニュージーランド宇宙機関に SSA データが提供される。

LeoLabs 社は、ニュージーランド宇宙機関と提携して、同機関のための規制的かつ持続可能なプラットフォームを設けた。このプラットフォームは、例えば政府が付与したライセンスの遵守の確認等政策・規制策定のための分野の測定を行う。商業的な新興企業が規制政策に直接影響を与えることは珍しいことだが、これは商業活動を宇宙活動に取り入れることに対するニュージーランド政府の熱意を示している。

2.4.6 インド

- インドは、SSA プログラム及びシステムへの投資を増やし、国際 STM の枠組みの開発に貢献するとの意向を表明している。
- インドの現在の SSA 能力は、近年、根本的な進歩を遂げている。

インド政府は、科学プログラムや打ち上げ能力から、人間の宇宙飛行システムや衛星破壊システムに至るまで、2010年以降、宇宙システムへの投資を大幅に見直してきた。現在は、北米航空宇宙防衛司令部 (NORAD: North American Aerospace Defense Command) の TLE に依存しており、COLA、SOPA (Space Object Proximity Analysis)、デブリ・モデリングなどの衛星システムで SSA 分析を行っている。2018年、インドの国家宇宙機関であるインド宇宙研究機関 (ISRO: Indian Space Research Organisation) は、CNES との宇宙協力に関する共同ビジョンに署名した。ISRO のセンサーネットワークには、マルチオブジェクト追跡レーダー (MOTR:

Multi-Object Tracking Radar) 、現在改装中の LEO 内のオブジェクトを追跡するための L バンドフェーズドアレイレーダーが含まれている。MOTR は、800km の範囲内で 50cm までの物体を追跡でき、それは Polar Satellite Launch Vehicle (PSLV) の上段の追跡で実証されている。ISRO は、近い将来、追加のレーダーと光学望遠鏡への投資計画を公に発表した。これには、2021 年にオンラインになると予想される GEO の物体を観察するための電気光学システムが含まれる¹⁰⁸。データ分析とプロダクトの観点から、ISRO は打ち上げロケットの離陸許可のために衝突回避分析を行い、国際機関間スペースデブリ調整委員会 (IADC : Inter-Agency Space Debris Coordination Committee) の再突入予測キャンペーンに貢献している。また、インドはスペインの SST システムに監視レーダーを構築し、2019 年初頭に稼働し始めた。2019 年初頭に「宇宙状況認識のための国の能力の確立を通じて宇宙資産を保護するためのイニシアチブをとる」ことを発表し、約 80 名の人員を含む SSA の中核組織の設立も含んでいる¹⁰⁹。

参考文献・脚注 セクション 2

- ¹ 米国 U.S. Government, “National Space Policy of the United States of America,” President of the United States, last modified June 28, 2010, https://history.nasa.gov/national_space_policy_6-28-10.pdf.
- ² Todd Harrison and Kaitlyn Johnson, “How Does Space Policy Directive 3 Affect Space Traffic Management?” Center for Strategic and International Studies, last modified June 19, 2019, <https://www.csis.org/analysis/how-does-space-policy-directive-3-affect-space-traffic-management>.
- ³ Open-Architecture Data Repository (OADR) の詳細については、セクション 2.2.3.6 を参照。
- ⁴ Department of Defense, “Fact Sheet: National Security Space Strategy,” Department of Defense, https://archive.defense.gov/home/features/2011/0111_nsss/docs/2011_01_19_NSSS_Fact_Sheet_FINAL.pdf.
- ⁵ 同上。
- ⁶ Department of the Air Force, “Comprehensive Plan for the Organizational Structure for the U.S. Space Force,” Department of the Air Force, last modified in February 2020, <https://velosteam.com/wp-content/uploads/2020/02/Space-Force-Report.pdf>.
- Oriana Pawlyk, “New U.S. Space Force Hub Renamed ‘SPOC’,” Military.com, last modified December 31, 2019, <https://www.military.com/daily-news/2019/12/31/new-us-space-force-hub-renamed-spoc.html>.
- ⁸ Brian Weeden, Paul Cefola and Jaganath Sankaran, “Global Space Situational Awareness Sensors,” Secure World Foundation, September 2010, https://www.researchgate.net/publication/228787139_Global_Space_Situational_Awareness_Sensors
- ⁹ 詳細はセクション 2.4.2 を参照。
- ¹⁰ Mark R. Ackermann, et al., “Alternatives for Ground-Based, Large-Aperture Optical Space Surveillance Systems,” presented at Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS), Maui, HI, September 2013, https://amostech.com/TechnicalPapers/2013/Optical_Systems/ACKERMANN.pdf.
- ¹¹ Lincoln Laboratory, “Space Surveillance Telescope,” Massachusetts Institute of Technology, <https://www.ll.mit.edu/r-d/projects/space-surveillance-telescope>.
- ¹² U.S. Government Accountability Office, “Space Situational Awareness: Status of Efforts and Planned Budgets,” GAO, last modified October 8, 2015, <https://www.gao.gov/products/gao-16-6r>.
- ¹³ U.S. Air Force Space Command, “Ground-Based Electro-Optical Deep Space Surveillance,” U.S. Air Force Space Command, last modified July 2019, <https://www.afspc.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Article/249016/ground-based-electro-optical-deep-space-surveillance/>.
- ¹⁴ U.S. Air Force Space Command, “Geosynchronous Space Situational Awareness Program, U.S. Air Force Space Command, last modified in September 2019, <https://www.afspc.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Article/730802/geosynchronous-space-situational-awareness-program-gssap/>
- ¹⁵ Mark R. Ackermann, et al., “Alternatives for Ground-Based, Large-Aperture Optical Space Surveillance Systems,” presented at Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS), Maui, HI, September 2013, https://amostech.com/TechnicalPapers/2013/Optical_Systems/ACKERMANN.pdf.
- ¹⁶ George Lewis, “Space Surveillance Sensors: The Cobra Dane Radar,” Mostlymissiledefense.com, last modified April 12, 2012, <https://mostlymissiledefense.com/2012/04/12/cobra-dane-radar-april-12-2012/>.

-
- ¹⁷ Wikipedia, “Combined Space Operations Center Logo,” Wikipedia, last modified February 3, 2020, https://en.wikipedia.org/wiki/Combined_Space_Operations_Center.
- ¹⁸ Peterson Air Force Base, “18th Space Control Squadron,” Peterson Air Force Base, last modified on March 30, 2018, <https://www.peterson.af.mil/About/Fact-Sheets/Display/Article/1060346/18th-space-control-squadron/>.
- ¹⁹ Chris Johnson “U.S. Chris Johnson “U.S. Air Force and Raytheon collaborate to modernize space command and control system,” PRNewswire, last modified on April 3, 2019, <https://www.prnewswire.com/news-releases/us-air-force-and-raytheon-collaborate-to-modernize-space-command-and-control-system-300823294.html>.
- ²⁰ Mark A. Baird, “Maintaining Space Situational Awareness and Taking It to the Next Level,” Air & Space Power Journal, (September-October 2013):50-72.
- ²¹ Brian Weeden, “Computer Systems and Algorithms for Space Situational Awareness: History and Future Development,” presented at 15th International Space Conference of Pacific-basin Societies, Montreal, QC, July 2010, <http://swfound.org/media/205395/computer-systems-and-algorithms-for-space-situational-awareness-history-and-future-development.pdf>.
- ²² 同上
- ²³ European Space Agency, “Presentation on Space Safety for Space 19+,” ESA.
- ²⁴ Diane Howard and Mark Mulholland, Interview by the Astroscale Team, Personal Interview, Washington D.C., December 2, 2019.
- ²⁵ Bluestaq, “Unified Data Library – The Storefront Overview,” Youtube, July 5 2019, <https://www.youtube.com/watch?v=aB12pM9VcrE>.
- ²⁶ Sandra Erwin, “Military sees value in commercial data, but needs to figure out how to buy it,” SpaceNews, September 8, 2019
- ²⁷ Space and Missile Systems Center, “Boosting Space Situational Awareness: SMC Awards SBIR Phase 2 Contract,” Los Angeles Air Force Base, last modified August 21, 2019, <https://www.losangeles.af.mil/News/Article-Display/Article/1939353/boosting-space-situational-awareness-smc-awards-sbir-phase-2-contract/>
- ²⁸ John Keller, “IARPA asks industry for ability to image geosynchronous objects for space situational awareness,” Military and Aerospace Electronics, last modified April 6, 2017, <https://www.militaryaerospace.com/power/article/16726286/iarpa-asks-industry-for-ability-to-image-geosynchronous-objects-for-space-situational-awareness>.
- ²⁹ Jeff Foust, “Data sharing seen as critical to future of space situational awareness,” Space News, last modified September 20, 2019, <https://spacenews.com/data-sharing-seen-as-critical-to-future-of-space-situational-awareness/>.
- ³⁰ NASA, 「CARA : NASA, “CARA:Conjunction Assessment Risk Analysis,” NASA, <https://satellitesafety.gsfc.nasa.gov/CARA.html>.
- ³¹ Lauri K. Newman, et al., “NASA Conjunction Assessment Risk Analysis Updates Requirements Architecture,” NASA, last modified August 2019, <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20190029214.pdf>.
- ³² NASA, “Orbital Debris Issue,” NASA, <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/index.html>.
- ³³ 国際的な SSA 能力の詳細については、STPI レポートの Recommended Readings annex を参照。
- ³⁴ Center for Orbital Reentry and Debris Studies, “The Problem of Space Debris,” The Aerospace Corporation, <https://aerospace.org/sites/default/files/2018-06/Orbital-debris0318.pdf>.
- ³⁵ Moriba Jah, “Astriagraph: Monitoring Global Traffic in Space,” The Strange Loop, 2019, <https://www.thestrangeloop.com/2019/astriagraph-monitoring-global-traffic-in-space.html>
- ³⁶ このセクションは主要な商業 SSA プレーヤーの基本的な概要であり、より詳細なプロフィールはセクション 3 に記載している。
- ³⁷ Space Security Index, “Space Security Index 2019,” The Space Security Index 16, 1 (2019):33.

-
- ³⁸ Peraton, “Peraton to Acquire Solers Inc.,” PR Newswire, last modified June 17, 2019, <https://www.prnewswire.com/news-releases/peraton-to-acquire-solers-inc-300868075.html>.
- ³⁹ Kratos, “Towards More Complete Space Situational Awareness:How RF Data Can Fill the Gaps in Traditional SSA Techniques,” Kratos, <https://www.kratosdefense.com/products/space/signals/rf-management/rf-monitoring-services>.
- ⁴⁰ European Commission, “Report from the Commission to the European Parliament and the Council on the implementation of the Space Surveillance and Tracking (SST) support framework (2014-2017),” European Commission, last modified May 3, 2018, [http://www.europarl.europa.eu/RegData/docs_autres_institutions/commission_europeenne/com/2018/0256/COM_COM\(2018\)0256_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/docs_autres_institutions/commission_europeenne/com/2018/0256/COM_COM(2018)0256_EN.pdf).
- ⁴¹ European Space Agency, “About ESOC,” ESA, http://www.esa.int/About_Us/ESOC.
- ⁴² European Space Agency, “Where Missions Come Alive,” ESA, https://download.esa.int/esoc/esa_ESOC_BR_web_2015.pdf.
- ⁴³ 同上
- ⁴⁴ European Space Agency, “Space Surveillance and Tracking – SST Segment,” ESA, https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Surveillance_and_Tracking_-_SST_Segment.
- ⁴⁵ European Space Agency, “ESA Ministerial Budget Allocation Powerpoint,” ESA, https://esamultimedia.esa.int/docs/corporate/Space19plus_charts.pdf.
- ⁴⁶ European Parliament, “Decision No 541/2014/EU of the European Parliament and of the Council of 16 April 2014 establishing a Framework for Space Surveillance and Tracking Support,” Eur-Lex, May 27, 2014, [https://eur-lex.europa.eu/eli/dec/2014/541\(1\)/oj](https://eur-lex.europa.eu/eli/dec/2014/541(1)/oj).
- ⁴⁷ Pascal Faucher, Regina Peldszus and Amélie Gravier, “Operational Space Surveillance and Tracking in Europe,” presented at the 1st International Orbital Debris Conference, Sugar Land, TX, December 2019, <https://www.hou.usra.edu/meetings/orbitaldebris2019/orbital2019paper/pdf/6165.pdf>.
- ⁴⁸ 同上
- ⁴⁹ European Commission, “EU SST Report: 2-3SST2016-17 – D6.1 – Update of Service
- ⁵⁰ Pascal Faucher, Regina Peldszus and Amélie Gravier, “Operational Space Surveillance and Tracking in Europe,” presented at the 1st International Orbital Debris Conference, Sugar Land, TX, December 2019, <https://www.hou.usra.edu/meetings/orbitaldebris2019/orbital2019paper/pdf/6165.pdf>.
- ⁵¹ 同上
- ⁵² European Space Policy Institute, “Rethinking the Assessment of the Value of Spectrum,” ESPI Brief 37, 1 (January 2020):1-2, <https://espi.or.at/news/espi-brief-37-rethinking-the-assessment-of-the-value-of-spectrum>.
- ⁵³ Wolfgang Rathgeber, “Europe’s Way to Space Situational Awareness (SSA),” European Space Policy Institute, last modified January 10, 2008, <https://espi.or.at/publications/espi-public-reports/send/2-public-espi-reports/112-europe-s-way-to-space-situational-awareness-ssa>.
- ⁵⁴ Wikipedia, “Graves (system),” Wikipedia, last modified January 6, 2020, [https://en.wikipedia.org/wiki/Graves_\(system\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Graves_(system)).
- ⁵⁵ Forces Network, “RAF Fylingdales: What Does The Royal Air Force Station Do?” Forces Network, last modified November 15, 2019
- ⁵⁶ Giuseppe Pupillo, et al., “Operational Challenges of the Multibeam Radar Sensor BIRALES
- ⁵⁷ Thomas Nilsen, “US and Norway upgrade eye on border to northern Russia,” The Barents Observer, last modified November 16, 2018, <https://thebarentsobserver.com/en/security/2018/11/us-and-norway-upgrades-eye-northern-russia>.
- ⁵⁸ Wikipedia, “Tira (System),” Wikipedia, last modified September 30, 2019, [https://en.wikipedia.org/wiki/TIRA_\(System\)](https://en.wikipedia.org/wiki/TIRA_(System)).
- ⁵⁹ Youngkyu Kim, “Security in Space,” Fraunhofer, <https://www.fhr.fraunhofer.de/en/businessunits/space.html>.

-
- ⁶⁰ European Space Agency, “ESA deploys first orbital debris test radar in Spain,” ESA, https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris/ESA_deploys_first_orbital_debris_test_radar_in_Spain.
- ⁶¹ Wikipedia, “Medicina Radio Observatory,” Wikipedia, last modified February 10, 2020, https://en.wikipedia.org/wiki/Medicina_Radio_Observatory#Space_Debris_Tracking.
- ⁶² Giuseppe Pupillo, et al., “Operational Challenges of the Multibeam Radar Sensor BIRALES
- ⁶³ Science and Technology Facilities Council, “About Chilbolton Conservatory,” STFC.uk, <https://www.chilbolton.stfc.ac.uk/Pages/home.aspx>.
- ⁶⁴ Heiner Klinkard, et al., “Europe’s Eyes on the Skies: The Proposal for a Space Surveillance System,” ESA, last modified in February 2008, http://www.esa.int/esapub/bulletin/bulletin133/bul133f_klinkrad.pdf.
- ⁶⁵ Alain Kotz, et al., “Six Years of Science with the TAROT Telescope at La Silla,” The Messenger 151 (March 2013): 1–9, https://www.researchgate.net/publication/258806379_Six_Years_of_Science_with_the_TAROT_Telescope_at_La_Silla.
- ⁶⁶ European Space Agency, “Zimmerwald Small Aperture Robotic Telescope (ZimSMART),” ESA, last modified May 6, 2010, https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2010/05/Zimmerwald_Small_Aperture_Robotic_Telescope_ZimSMART.
- ⁶⁷ European Space Agency, “SSA Programme Overview,” ESA, https://www.esa.int/Safety_Security/SSA_Programme_overview.
- ⁶⁸ Andrea Console, “Command and Control of a Multinational Space Surveillance and Tracking Network,” Joint Air Power Competence Centre, last modified in June 2019, https://www.japcc.org/wp-content/uploads/JAPCC_C2SST_2019_screen.pdf.
- ⁶⁹ Her Majesty Government, “National Security Strategy and Strategic Defence and Security Review 2015,” HM Government, last modified November 2015, https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/555607/2015_Strategic_Defence_and_Security_Review.pdf.
- ⁷⁰ Ralph Dinsley, “The UK Contribution to Understanding the Space Domain,” The British Interplanetary Society, last modified September 15, 2016, <https://www.bis-space.com/2016/07/12/17568/the-uk-contribution-to-understanding-the-space-domain>.
- ⁷¹ Tim Robinson, “UK MoD goes more boldly into Space,” Royal Aeronautical Society, last modified May 15, 2018, <https://www.aerosociety.com/news/uk-mod-goes-more-boldly-into-space/>.
- ⁷² Science and Technology Facilities Council, “About Chilbolton Conservatory,” STFC.uk, <https://www.chilbolton.stfc.ac.uk/Pages/home.aspx>.
- ⁷³ Science & Technology Facilities Council, “Chilbolton Observatory - a rare glimpse inside!” RAL Space, last modified on October 20, 2017, <https://www.ralspace.stfc.ac.uk/Pages/Chilbolton-Observatory-%E2%80%93-a-rare-glimpse-inside!.aspx>.
- ⁷⁴ Science and Technology Facilities Council, “Home FAQ Page,” UKRI, <https://stfc.ukri.org/>.
- ⁷⁵ Judith Jeffrey, “Space Monitoring Facility,” Chilbolton Observatory, <https://www.chilbolton.stfc.ac.uk/Pages/Space-Monitoring-Facility.aspx>.
- ⁷⁶ Space Insight, “An introduction to Space Insight’s Starbrook systems for the surveillance of space,” Space Insight Starbrook, last modified in 2014, https://www.spaceinsight.co.uk/assets/uploads/SpaceInsight_Starbrook.pdf.
- ⁷⁷ 同上
- ⁷⁸ UK Government, “About us page,” UK Government, <https://www.gov.uk/government/organisations/defence-science-and-technology-laboratory/about#who-we-are>
- ⁷⁹ Defence Science and Technology Laboratory, “Dstl in Unique Five-Eyes Space Situational Awareness Experiment,” UK Government, last modified on February 4, 2020,

-
- <https://www.gov.uk/government/news/dstl-in-unique-five-eyes-space-situational-awareness-experiment>.
- ⁸⁰ Pat Donnelly and Andrew Ash, “The Critical Role of Experimentation to Further SSA Understanding,” presented at Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS), Maui, HI, September 2016, <https://amostech.com/TechnicalPapers/2016/Poster/Ash.pdf>.
- ⁸¹ GNOSIS Network, “The Global Network on Sustainability in Space,” GNOSIS Network, <https://gnosishnetwork.org/>.
- ⁸² Defense Science and Technology Laboratory, “Winners of ‘Space to Innovate’ competition,” UK Government, last modified September 24, 2019, <https://www.gov.uk/government/publications/winners-of-space-to-innovate-competition-announced/winners-of-space-to-innovate-competition>.
- ⁸³ Monique Moury, “CNES role in French Space Surveillance,” CNES, presented at JSF SSA Symposium, Tokyo, JSF, February 2015, <http://www.jsforum.or.jp/debrisympo/2015/pdf/18%20MouryM-2015-JSF-SSAsympo-CNES-V4.pdf>.
- ⁸⁴ CNES, “The French Space Operation Act,” CNES, <https://www.unoosa.org/pdf/pres/lsc2009/pres-04.pdf>.
- ⁸⁵ Degreane Horizon, “Graves System,” Degreane Horizon, <https://www.degreane-horizon.com/en/reference/graves-system/>.
- ⁸⁶ Innovations-Report, “Space observation with radar to secure Germany’s space infrastructure,” Innovations-Report, last modified March 23, 2018, <https://www.innovations-report.com/html/reports/physics-astronomy/space-observation-with-radar-to-secure-germany-s-space-infrastructure.html>.
- ⁸⁷ Leonardo Company, “Selex ES radars key players of the Space Surveillance and Tracking program,” Leonardo Company, last modified on March 3, 2015, <https://www.leonardocompany.com/en/news-and-stories-detail/-/detail/selex-es-am-space-junk>.
- ⁸⁸ GMSpazio, “GMSPAZIO - Homepage,” GMSpazio, <http://www.gmspazio.com/>.
- ⁸⁹ GMSpazio “GSTT - GMSPAZIO Satellite Tracking Toolkit,” GMSpazio, last modified January 2, 2017, <http://www.gmspazio.com/portfolio-view/gstt/>.
- ⁹⁰ Maciej Konacki, et al., “Optical, laser and processing capabilities of the new Polish Space Situational Awareness Centre,” presented at Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS), Maui, HI, September 2019, <https://amostech.com/TechnicalPapers/2019/Space-Situational-Awareness/Konacki.pdf>.
- ⁹¹ Polish Space Agency, “Poland has joined the Space Surveillance and Tracking (SST) Consortium established to track space debris,” Poland Space Agency, <https://polsa.gov.pl/en/events/events/15-latest/943-poland-has-joined-the-space-surveillance-and-tracking-sst-consortium-established-to-track-space-debris>.
- ⁹² Romanian Space Agency, “Prestigious Romanian Leadership at EU SATCEN,” ROSA, last modified on March 7, 2019, <http://www.rosa.ro/index.php/en/news-menu/stiri/3388-prestigious-romanian-leadership-position-at-eu-satcen>.
- ⁹³ Rartel, “Space applications for security: existing and future projects for the Cheia Earth Station,” Rartel, last modified April 22, 2016, https://eisc-europa.eu/images/stories/2016q1/2016EISC_Workshop_Presentations/10_Scagnoli.pdf.
- ⁹⁴ NorthStar Earth & Space Inc., “Luxembourg and NorthStar to create Centre of Excellence for Clean Space,” Newswire, last modified December 19, 2019, <https://www.newswire.ca/news-releases/luxembourg-and-northstar-to-create-centre-of-excellence-for-clean-space-874192253.html>.
- ⁹⁵ Global Security, “Russian Space Surveillance System (RSSS),” Global Security, <https://www.globalsecurity.org/space/world/russia/space-surveillance.htm>.
- ⁹⁶ Space Security Index, “Space Security Index 2019,” The Space Security Index 16, 1 (2019): 31.
- ⁹⁷ ポール・マスケルとローン・オラム、「サファイア : Paul Maskell and Lorne Oram, “Sapphire:

-
- Canada's Answer to Space-Based Surveillance of Orbital Objects," Surveillance of Space Project, last modified in January 2008, <https://pdfs.semanticscholar.org/34db/b9c3bef9db6769219673a1635e6904f6737a.pdf>.
- ⁹⁸ カナダ宇宙庁、「NEOSSat : Canadian Space Agency, "NEOSSat: Canada's Sentinel in the Sky," Canadian Space Agency, last modified on July 6, 2018, <https://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/neossat/default.asp>.
- ⁹⁹ <https://www.reuters.com/article/us-space-argentina-china-insight/chinas-military-run-space-station-in-argentina-is-a-black-box-idUSKCN1PP0I2>
- ¹⁰⁰ Xinhua, "China Launches Space Junk Monitoring Center," Xinhuanet, last modified on 8 June 2015, http://news.xinhuanet.com/english/2015-06/08/c_134308233.htm&sa=D&ust=1581989867676000&usg=AFQjCNHTQOEjRORa50yXU2XQhuoJYDT4Yw.
- ¹⁰¹ Bhavya Lal, et al., "Global Trends in Space Situational Awareness (SSA) and Space Traffic Management (STM)," Science and Technology Policy Institute, last modified in April 2018, <https://www.ida.org/-/media/feature/publications/g/gl/global-trends-in-space-situational-awareness-ssa-and-space-traffic-management-stm/d-9074.ashx>.
- ¹⁰² Brian Weeden and Victoria Samson, "Global Counter Space Capabilities: An Open Source Assessment," Secure World Foundation, April 2018, https://swfound.org/media/206118/swf_global_counterspace_april2018.pdf
- ¹⁰³ Asia-Pacific Space Cooperation Organization, "Ground-Based Space Object Observation Network," Asia-Pacific Space Cooperation Organization, <http://www.apsco.int/html/compl/content/GBSOON/2018-07-05/44-180-1.shtml>.
- ¹⁰⁴ Asia-Pacific Space Cooperation Organization, "Ground-Based Space Object Observation Network," Asia-Pacific Space Cooperation Organization, <http://www.apsco.int/html/compl/content/GBSOON/2018-07-05/44-180-1.shtml>.
- ¹⁰⁵ 米国空軍宇宙局、「Cバンド宇宙監視レーダーシステム」、米国 Air Force, <https://media.defense.gov/2018/Mar/02/2001885747/-1/-1/0/180303-F-03755-0002.JPG>
- ¹⁰⁶ James C. S. Bennett, "Space Situational Awareness in Australia: Overview & details of the Space Environment Research Centre," presented at the Space Situational Awareness Workshop: Perspectives on the Future Directions for Korea, Seoul, KR, January 2019, <https://swfound.org/media/206341/bennett-ssa-workshop-swf-kari-2019.pdf>
- ¹⁰⁷ William Crowe, "How HEO Robotics Are Using Nanosatellites To Monitor Space Debris And Asteroids," Space Bandits, <https://www.spacebandits.io/interviews/heo-robotics>.
- ¹⁰⁸ Brittany Morreale, et al., "Australian Space Situational Awareness Capability Demonstrations," presented at Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS), Maui, HI, September 2017, https://amostech.com/TechnicalPapers/2017/Poster/Bessell_2.pdf.
- ¹⁰⁹ Indian Space Research Organization, "Message from Chairman's Desk: 2018, A Year of many 'firsts' and 'beginnings'," Government of India, last modified on January 1, 2019, <https://www.isro.gov.in/update/01-jan-2019/message-chairmans-desk>.

3. 民間 SSA のビジネスモデル

3.1 宇宙経済の価値

- グローバルな宇宙産業の着実に増加している売上の予測値を評価することにより、SSA サービスがサポート技術及びサービスとしてもたらす潜在的な価値を理解することができる。
- 宇宙産業に直接携わる企業の価値を合計するだけでは、これらの宇宙システムの価値の全体像を正確に把握できない。宇宙がもたらす経済価値は全体で数兆米ドルの影響がある。
- したがって、宇宙ベースのアセットを保護する SSA システムは、衛星及び打上げロケット産業だけでなく、社会全体に影響を与える波及効果があり、重要な経済的機能を果たす。

宇宙時代の到来から 60 年の間に、宇宙システムは成長し、世界経済に重要なサービスを提供している。当初、宇宙産業は、打上げ機の政府請負業者と初期の衛星のメーカーから構成されていたが、その目的は主に軍事的目的であった。その後、1960 年代と及び 1970 年代になり、民間の支援を受けた通信衛星が軌道上の政府保有の宇宙機に搭載され始め、商業的な宇宙セクターが徐々に形成され始めた。1980 年代半ばまでに、多くの政府が商業的な打上げ事業者のライセンス取得のためのガイドラインを策定し始め、宇宙経済は一層開かれたものとなった。今日、毎年何百もの新しい衛星が打上げられ、世界中の市場の生産性と効率化の向上を促している。民間事業者が打ち上げる衛星の数は着実に増加しており、政府が打上げた衛星の数をはるかに上回っている。

政府は、依然として多くの宇宙ベースのサービス及び活動の中心的な顧客兼ユーザーであり、衛星アプリケーション市場に関する報告書が作成されることもあるものの、宇宙システムが現在の世界経済に及ぼす深刻な影響を正確に定量化することは依然として困難である。宇宙ベースのシステムからのデータとサービスは、国際通信とインターネット、輸送・出荷、天気予報、災害対応、採掘、測量、環境モニタリング、精密農業、正確なマッピングと人口予測、電気通信、さらにはグローバルな金融と銀行業、公益事業やその他の重要な経済インフラストラクチャと同様に、宇宙システムのデータとプロダクトの使用は、場合によっては気付かないほど現代社会と完全に統合されている¹。Space Foundation の報告によると、世界の宇宙経済活動の価値は 2018 年には 8% 超増加し、約 4,150 億米ドルに達した²。コンサルティング会社の Bryce Space and Technology 社は、米国だけで、衛星システムに依存している主要産業の総収入合計は、年間 5 兆米ドルを超えるとしている³。

3.1.1 GNSS

宇宙ベースのデータが世界経済にどれだけ密接に統合されているかを示す良い例は、全地球航法衛星システム（GNSS：Global Navigation Satellite Systems）からのデータの使用である。米国が所有及び運用している最も成功した GNSS コンステレーションは、全地球測位システム（GPS：Global Positioning System）と呼ばれ、約 20,000km の高度で中軌道にある衛星のコンステレーションである。他の GNSS コンステレーションは、ロシアが運営する GLONASS、ヨーロッパが運営するガリレオ、中国が運営する北斗（BeiDou）、日本が運営する準天頂衛星システム（QZSS：Quasi-Zenith Satellite System）等があり、地域及びグローバルにサービスを提供している多くの人は GNSS データを通勤のナビゲーションなどの便利な日常アプリケーションと関連付けることができる。しかし、GNSS コンステレーションが、正確な位置、ナビゲーション及びタイミング信号を提供し、世界中のエンドユーザーの日常生活に重要な影響を与えていることについては、ほとんどのエンドユーザーが知ることはない。多くの宇宙システムと同様に、GPS はもともと軍事用に構築されており、国家安全保障の目的のみに利用されていた。しかし、1980 年代に商業利用及び民生利用についても可能となって以来、民間市場においても使用されるまでに利用が拡大され、経済的に様々に応用するための広範なプロダクトとサービスの基盤を形成している。米国国立標準技術研究所（NIST：National Institute of Standards and Technology）による RTI レポートは、1983 年の商業化以来、調査対象となる 10 のセクターでの GPS データが経済全体に与える影響は、直接収益で 1.4 兆米ドルを超えていたと推定した⁴。しかし、効率性、労働力の生産性、コストの回避などの他のメリットは考慮されていない。

3.1.2 リモートセンシング

リモートセンシング産業は、宇宙アセットと宇宙関連のプロダクトによって可能となったもう 1 つの大きな経済セクターである。リモートセンシングは、現場での観測やセンシングとは対照的に、遠く離れた地球上の物体、場所又は現象に関する情報を収集する。通常は衛星によって観測されるが、場合によっては、高度の気象観測用気球又はドローンによっても観測される。特に地球観測（EO：Earth observation）リモートセンシング衛星は、光学及び赤外線（IR：infrared）エネルギー（太陽光の反射）といった宇宙由来の反射エネルギーを測定するために使用できる。リモートセンシング衛星は、高解像度で変化する地形を調査する合成開口レーダー（SAR：Synthetic Aperture Radar）衛星、地球からの二酸化炭素、メタン、その他の温室効果ガスの排出量を評価する分光衛星等その他の種類のデータも測定できる。しかし、予期しなかったリモートセンシングの最大の利用例は、天気予報と監視であり、世界経済と社会の生活の質に幅広い影響を有している。

実際、宇宙システムから送信されるデータによって、グローバルな天気予報能力に抜本的な変化が生じることが可能となった。準リアルタイム及びリアルタイムでの宇宙データの登場で、天気予報モデル及びアルゴリズムの精度と適時性が体系的に改善され、誤差が減少したことで、天気を予測することが可能な範囲が 1~3 日先から 7~10 日先までになった。EO データにより、気象予報は都市や農業地域の正確な降水量予報を行うことが可能となり、航空及び海上輸送の安全性を向上させた。また、ハリケーン、モンスーン、場合によっては地震などの厳しい気象事象の発生

についての測定誤差を減少させることで、自然災害に対するより正確な緊急事態対応に係る決定を通知することが可能になった。こういったデータにより、災害の発生におけるより早い段階での警告の発出が可能となり、災害前後の準備・対応が可能になり、結果人命を救うことにつながる。

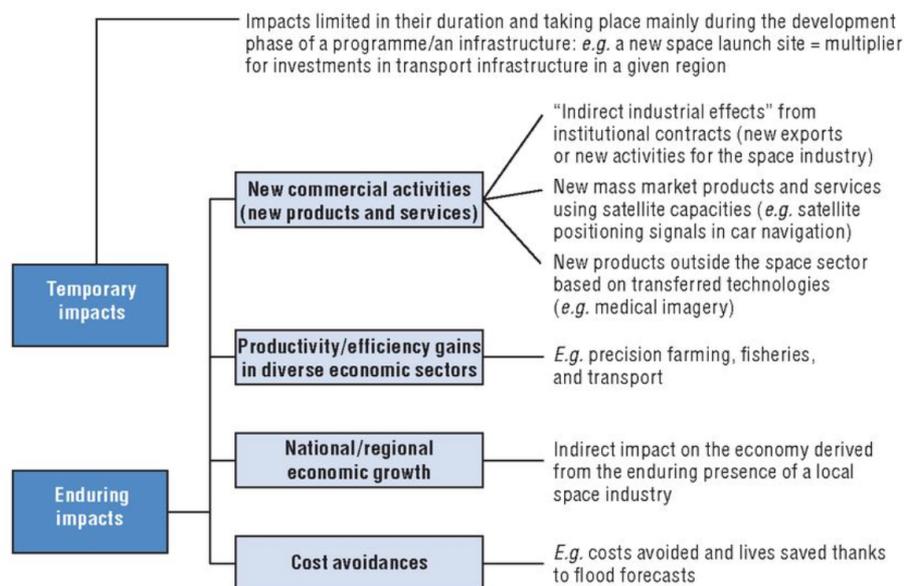
リモートセンシング・システムは、変化する地球の気候を理解するためにも不可欠である。このシステムは、海洋温度、海氷、森林破壊、野生生物の生息地に対する都市開発の影響等、より広範な環境に関する気象活動及びそのパターンを監視及び追跡できる。E0 データの新興市場は精密農業と呼ばれている。これは、衛星データを利用して、農家が土壌、肥料、散水及び植栽のスケジュール並びに輪作が全体的な生産効率に与える影響について、農業及び農業業界にカスタマイズした洞察を提供している⁵。

日々の再訪に向けた地球観測衛星コンステレーションの再訪率の向上によって、宇宙から得られたデータをクラウド・コンピューティング、機械学習、人工知能への適用の増加という別の現象を生じさせている。特にE0の場合、リモートセンシング・システムから有意義で実用的な理解を収集するには、大量のデータを処理する必要がある。Northern Sky Research (NSR) の2019年の報告書によれば、E0業界の新しいビジネスモデル（通常のサービスの年間・月間サブスクリプション等）により、E0データの顧客市場が拡大していることがわかった。2018年、NSRはE0市場が2027年までに24億米ドルに達すると予測されている⁶。

3.1.3 電気通信及びインターネット

宇宙システムによって可能となった世界経済の最大のセクター電気通信である。1980年代に商業通信衛星システムが開始されたことで、民間企業は世界中の情報を迅速に転送し、放送できるようになり、電話、テレビ、衛星ラジオ及びインターネットのビジネスモデルのパラダイムシフトを起こした。GNSSと同様に、電気通信業界は、主に民生分野及び国家安全保障分野での通信機能について、長年にわたり政府を主たる顧客として利益を得てきている。その需要は、娯楽市場と、サービスの行き届いていない遠隔地での通信やインターネット接続などの特殊な市場のから商業化されて以来急増した。衛星通信のバリューチェーンの一部は、非常に小さな口径の端末（VSAT）業界にもある。これは、クレジットカードに係るトランザクションなどの狭帯域データや、モバイル海上通信や機内無線インターネットなどの一部のニッチな伝送にも使用される⁷。衛星産業協会の報告によると、地上機器とテレビ、ラジオ、ブロードバンド及びモバイル通信の宇宙サービスを組み合わせた収益は、2018年だけで約2,500億米ドルに達した⁸。モノのインターネット（IoT）バリューチェーンなどの新しい機能の開発が進むにつれて、宇宙システムからのデータを使用してこれらの新しい機能を増殖させることも拡大しようとしている。

Figure 7.1. **Review of possible impacts derived from investments in space programme**



Source: OECD (2011), *The Space Economy at a Glance 2011*, OECD Publishing, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264111790-en>, p. 79.

9

図表 3-1 : 宇宙プログラム投資の影響

2011年の宇宙経済に関する報告書「The Space Economy at a Glance 2011」における経済協力開発機構（OECD）の表は、宇宙システムが国際、国内、更には地域的又はローカルな経済に影響を与えながらも、十分には議論されていない方法を記載している。経済効果と言ってもすぐに念頭に浮かぶものに留まらず、例えば、新しい射場が地域経済の輸送セクターに与える影響として、宇宙プログラムと宇宙ベースのデータから生じる生産性の向上、コスト回避、加えて全く新しいビジネスやプロダクト等の「永続的な」効果等が挙げられている。

3.2 SSA 市場：価値と顧客

人工衛星は、民生、インテリジェンス及び国家安全保障に関する政府のプログラムにとって不可欠であり、民間衛星事業者が軌道上の宇宙システムの過半数のシェアを持つようになったのは、この20年のことになる。SSAは、ミサイル防衛及び警戒体制にそのルーツがあることから、政府は現在でもSSAサービス及びデータの最大の顧客となっている。同様に、政府は歴史的にSSAデータと分析のプロバイダーでもあり、民間SSA提供者は比較的新しい。より高度な空間的及び時間的機能に対する世界的な需要が高まるにつれて、より多くの民間企業がSSAデータの取得と分析に焦点を当てたビジネスを追求し始めた。今後数十年、軌道上の商業用衛星の数と使用が増加し、低軌道とその周辺の小型衛星の大規模かつ拡散したコンステレーション・アーキテクチャーへの人気の高まりに助けられるところもあって、民間SSA提供者は、ますます困難となっている仕事量や進化し続ける顧客市場に対応するために、その能力を成長させている。

商業、民生又は軍事目的の如何を問わず、宇宙システムの世界経済への投資と影響は膨大であるが、軌道上の宇宙システムを監視及び保護するための SSA データ取得と分析への投資は未だ少ない。ただし、近年、軌道上の衛星の数が劇的に増加したことを受け、政府は、この拡大されたミッションに対応するため、SSA インフラ、データ管理、サービス及びプロダクトのサポートと維持を再評価し、増強している。投資の増加分は、いくつかのセンサーの移動、運用と人員の給与、新しいセンサーとデータ管理システムの開発、宇宙天気のプロダクトとサービスの強化、市販の SSA データの購入、プロダクト、取得構造の開発及び既存のセンサーネットワークのアップグレードなど、様々な分野にまたがっている。2018 年の IDA レポートでは、ロシアや中国などの一部の国は国内の SSA 能力への投資を増やすことに戦略的な関心を有しているが、SSA データを処理し、これらの国が自国のソフトウェアを使用して SSA プロダクトを開発する能力については不明であり、米国ほど成熟しているとは考えられない旨述べられている¹⁰。

米国政府は現在、SSA のプロダクト、サービス、運用及びインフラに対する世界的な支出をにおいて圧倒的な地位にある。2015 会計年度から 2020 会計年度までの予測支出の詳細を示す GAO レポートでは、米国政府の SSA の中核的な予算（国防総省（DoD）、NASA 及び海洋大気局（NOAA）による運用と開発の全体から計算したもの）が年間平均約 10 億米ドルであり、そのうち運営費及び人件費が毎年の中核予算の約 63% を占めることが判明した。対照的に、欧州宇宙機関（ESA : European Space Agency）は、2009 年度から 2020 年度の間に SSA プログラムに合計約 2 億ユーロを割り当てている¹¹。

3.3 SSA システムのコスト

米国やロシアなど、地理的に分散した大規模な SSA センサーネットワークを運用している国では、通常、新しいセンサーとシステムの契約、構築、実証実験及び展開が SSA 予算の大きな割合を占めている。ただし、SSA 予算の大部分は通常、人件費と運用費から成る。国によっては、より大きなセンサーネットワークに接続する単一又は少数のセンサーへの投資を選択する国もある。こうすることで、SSA プログラムに関わる組織の人的な訓練と雇用について、さほど莫大な投資は必要ではなくなる¹²。

GAO の報告書によると、米国の SSA への投資は他国の群を抜いている。GAO の報告書によると、米国宇宙軍（以前の空軍宇宙司令部）は、4 つの新しい SSA センサー及びシステムの開発、連合宇宙運用センター（CSPoC : Combined Space Operations Center）のミッション・システムの交換に対して、2015 年から 2020 年度までの間に合計約 18 億米ドルを投資している。米国空軍気象局は、2015 年度から 2020 年度にかけて、次世代のイオノゾンデと呼ばれる、宇宙天気分析のために電離層を構成する粒子のデータを提供する地上レーダーのシリーズで構成された新しい SSA センサーに対して 2,200 万米ドルを投資した。これに加えて、DARPA は、同じ期間（2015 年度から 2020 年度まで）に 99 百万米ドル近くを投資した。この投資には、宇宙監視望遠鏡、DARPA の極秘ミッションに固有な SSA プロジェクト及び DARPA に特有なプログラムにわたるが、よりリアルタイムの SSA 及び意思決定ツールをサポートする技術を研究している。

欧州では、2009年のSSAプログラムの設立以来、ESAのSSAセンサーへの資金提供は約2億ユーロとなっているが、「完全に機能する欧州SSAシステムの実装に向けた目標と進捗を達成する」ため、次の予算期間に「多数」の新規契約を予見することが、ESAのWebサイトで述べられている¹³。更に、EUの2015年から2020年までの予算には、EUSSTプログラムと呼ばれるEUのSSA能力について、センサー・ネットワークのアップグレードに97百万ユーロ、SSAサービスの提供及び調整に70.5百万ユーロ、5年間で合計167.5百万ユーロが組み込まれた。

SSAハードウェア

SSAセンサーを構築するためのコストは様々であり、必要なメンテナンスとアップグレードは運用寿命全体にわたって異なる。地上の光学望遠鏡の場合、初期建設費用だけでも、目的、精密さ及び全体的な能力に応じて、数万米ドルから数億米ドルの範囲になる。たとえば、2002年にDARPAから資金提供を受けた宇宙監視望遠鏡（SST：Space Surveillance Telescope）は、2011年まで完成せず、現在もテストと評価が行われている。しかし、SSTは最先端の光学機器であり、これまでに世界で最も先進的な広視野調査望遠鏡のように動作している¹⁴。このような規模のプロジェクトの場合と同様に、パフォーマンスの向上の大部分は、プログラムの複雑さコストの増加と結びついてきた。2002年から2011年（9年間）のSSTを生成するための総費用は150百万米ドルとなっている¹⁵。堅牢性には欠ける光学インフラストラクチャと比較すると、これは単一のセンサーに対して行うには大きな投資である。SSTとは異なる性能を備えたものがあるが、光学システムへの同等の投資として、欧州天文台（ESO：European Southern Observatory）が約6,400万米ドル（2019年時点の価値に換算）で委託開発し、1999年から2009年までの建設期間に渡った天体用可視及び赤外線測量望遠鏡（VISTA：Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy）がある。

全体として、レーダーSSAシステムは設計がより複雑であり、開発に費用がかかる。例えば、米国スペースフェンス・レーダーは、2019年に約1,720百万米ドルの予算が割り当てられ、14年間にわたって稼働するSバンドのレーダーシステムである。スペースフェンスは、2021年に運用開始予定であり、20万個近くの物体を追跡し、1日当たり150万件の観測を行う能力が期待されている。これは既存のSSNレーダーによる現在の観測数の約10倍に相当する。特定のレーダーへの軍の投資も様々であることは注目に値する。これは、多くの政府保有のミサイル警戒システムは、SSAミッションにも対応できるためである。

LeoLabs社などの一部の商業的なプレーヤーは、レーダーネットワーク用に様々なアーキテクチャを選択している。つまり、スペースフェンスのように単一の大容量レーダーに投資するのではなく、単一のソフトウェアにデータを統合する目的で、地理的に分散された低コストで低感度の6つのレーダーに投資している。これまでに、LeoLabs社は1,700万米ドルの投資を行なっている。LeoLabs社のアプローチは、従来のレーダーによるデータ取得とは異なるが、ベンチャーキャピタルから支援を受けた企業のビジネスモデルに沿ったものであり、企業は投資家にリターンを返すまでの期間が短くなっている。

SSA センサー又はセンサーのネットワークの場合、SSA データの処理と管理に係る補完的なシステムを獲得するため、総投資額の相当部分を割り当てる必要がある。これには、取り込んだ生の観測データをデータプロダクトに処理するためのソフトウェアの短期又は長期のライセンスが含まれる。すでにセクション 1.3.2 及び 1.3.3 で説明したように、キュレーションと分析は、政府又は民間提供者の両方からの最終的な SSA データプロダクト及びサービスの有効性、正確性、及び精度を決定する重要なステップである。

3.4 主なビジネスモデル

3.4.1 概要

一般に、ビジネスモデルとは、企業が顧客から対価として支払われる金額の仮定となるものである。これらの仮定は、ビジネス哲学者ピーター・ドラッカーがそれらを考えたように、潜在的な顧客基盤、競争、それとの区別、価値、技術、知的財産など、より大きな市場内のビジネスのコンテキストに依存する¹⁷。本質的に、ビジネスモデルとは、プロダクトやサービスを顧客に提供することでビジネスが利益を得ることができるかについての基本的なロジックである。

3.4.2 顧客が現在及び将来重視するデータ及びサービスの種類

衛星運用者にとって、政府の SSA システムとデータは、軌道上のアセットを保護する上で大きな役割を果たす。しかし、より詳細で信頼性の高い SSA サービスを求めるとの観点から、これらの事業者は民間 SSA 提供者にますます注目している。米国などの主要な地域及びグローバル企業米空軍の第 18 宇宙管制中隊 (18SPCS) は、一般的な公共サービスレベルの SSA プロダクトを運用者に提供し、潜在的な危険について警告するための接近データメッセージを発行するが、通常、関係者に対してそれ以上の追加的な情報や行動についての勧告は行っていない。同様に、米国 SSN の SpaceTrack カタログ等宇宙物体のカタログの一部は米国政府によって管理され、公開されているが、商業 SSA データ提供者が現在顧客に提供できるレベルと比較すると詳細さにおいて劣る。

特に、商業用の SSA センサーと分析の技術的成熟度が向上するにつれて、米軍は、国家安全保障に係る宇宙物体の公開カタログ上の開示について透明性を欠如しているとの批判を受けている¹⁸。軍事及び商業宇宙産業の両方において、米軍は非軍事関連 SSA の機能と作戦 (非軍事 CDM や SpaceTrack 非分類カタログの管理など) を外部に移すべきだというコンセンサスが高まっている。軍、SPD-3 によって後押しされる形で、そのようなサービスを商務省に移すことになった。しかし、商業的な SSA ベンダーは、更に高度な分析を行うために、より専門的なデータ製品を消費者に提供するだけでなく、信頼性も高い安全航行性監視、高度なデータストレージと処理、さらには運用者の意思決定サポートなどの追加サービスも提供するようなシステムの運用が必要であると考えている。現在、こういった民間の SSA ベンダーが採用しているビジネスモデルは、主に政府のニーズに対応しているものである。

政府は何十年にもわたって「主たる」顧客であった。政府の SSA プログラム・インフラの構築と保守に関する契約に加え、政府は、SSA システムの各要素（インプット、キュレーション、分析、プロダクト、サービス、並びにデータ管理及びデータ処理）における能力の増強を商業と学術界から提供されるサービスに依存している。この商業的に取得された能力は、商業及び学術的な生データセット、高度なデータ分析とプロダクト、専門知識と人材、処理と管理サービス、物体とイベント特性評価サービスの購入又は政府のセンサーネットワークでは十分にモニタリングされていないような特定の分野についての分析の提供という形式を取っている。

SSA のデータ、プロダクト又はサービスを政府以外の事業に提供しようとする民間企業は困難な市場に直面している。何十年もの間、SSA データの提供は、主に政府の民生部門及び軍事目的に対するものであったため、市場として新しい可能性に適応している最中である。商業衛星数が増加するにつれて、衛星運用者の間で、18SPCS によって発出される CDM 以外の SSA データについての市場の需要と関心が最近になって生まれてきた。

言い換えれば、商業衛星運用者はまだ初期段階の新興顧客であり、SSA データを購入する市場というものが明確になってきている訳では無い。現時点では、これらの新しい運用者は営利機関であるため、より効果的で、便利で、また、手頃な価格で任務を遂行するのに役立つ民間 SSA プロダクト及びサービスのみを購入している¹⁹。SSA を介して得られた情報によって軌道上の顧客資産についてのリスクを低減することは、特に混雑する軌道において、商業衛星通信事業の重要な要素を形成している。GEO では、資本集約型のアセットのパフォーマンスが非常に重要であるため、リスク低減に加え、そのようなアセットの維持と継続的な管理が高く評価されている。

SSA プロダクト及びサービスの民間提供者は、顧客のニーズを評価し、それらを中心にビジネスモデルを開発する。GEO 衛星の長年の運用者など、従来のほとんどの顧客は、情報について比較的一貫したニーズを有している。しかし、LEO 上の小型衛星の大規模な「メガコンステレーション」等の新しいの構造の導入は、化学推進で比較的稀にしかマヌーバしない従来の標準的な 3 軸宇宙機設計から転換があることを示している。他の軌道にまたがる衛星の数が増加し続けるにつれて、運用者同士が干渉する方法の力学に変化が生じている。民間 SSA 提供者は、衛星運用者と連携して提供内容とデータ管理戦略を微修正し、日々進化する顧客の検討事項に適応していく必要がある。

- 顧客はアセットについてどのような質問をするか？
- 顧客の質問に答えるプロダクトを作るのに十分な量のデータがあるか？
- 顧客の宇宙物体の全体的な挙動を記述し、それらを他のアセットの挙動と比較するのに十分な量のデータがあるか？
- 顧客が尋ねる可能性のある将来の質問に答えるために十分なデータ量はありますか？
- 顧客の質問に答える過程で、会社は何を学んだか？

今日、保険会社のリスク評価プロセスは、商業衛星運用者が商業 SSA データを購入するよう促進する役割を果たしているものの、米国の衛星運用者のライセンス要件では、所有者/運用者が商業 SSA サービスの購入を必要とするようなアセットに関

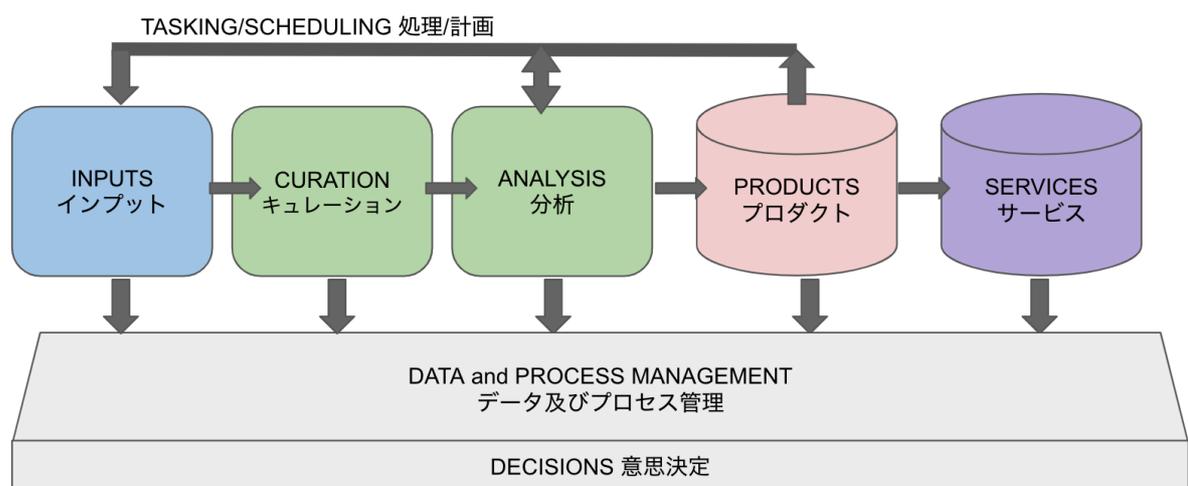
する SSA 情報を取得する必要はない。将来的には、商業衛星運用者が商業 SSA サービスを購入するモチベーションは、現在の単純なリスクを低減したいというニーズから、将来、運用者が持続的かつ責任を持ってミッション期間から廃棄までの間、アセットを管理するという政府ライセンス要件の履行を含めるといった内容に変わりつつある。

3.4.3 SSA ビジネスモデル：現在と将来の展望

商業 SSA ベンダーは、政府の及び商業的な顧客のニーズに見合った様々なビジネスモデルを採用している。近年、SSA ベンダーは商業的な宇宙活動という大きい波の間で頭角を現し、その能力を最大限に売り込み、独自の価値を提供する方法についての今までにないアイデアを出してきている。

この点を念頭に置いていたとしても、民間の SSA データプロダクト及びサービスがビジネスとして成立するには、以下のような様々な理由で難しい場合がある。世界中の多くの衛星運用者にとって、米国政府が世界中の運用者に無料で提供している接近警告は、a) 衛星運用者のシステムに対する多くのリスクを低減しており、b) 投資家のニーズに応え、c) 保険会社のデューデリジェンスを法的に証明できることから、それだけで「十分」であると考えているからである。宇宙交通について、より包括的な管理が求められるにつれて、民間 SSA 提供者は、データ共有及びサービス取得モデルの実験実験という政府と同様の方法をとるようになり、UDL、SSA データ・マーケットプレイス等のプロトタイプ等を作成するに至っている。CSpOC が公に提供するデータに関しては、運用者に対して発行される多数の「誤検知」に基づく衝突警告等の課題が残る。民間の SSA は、これらの課題解決のニーズを満たし、基本的な安全航行から将来の軌道上サービスなどの新しい活動支援をすることが期待されている。

全ての SSA システムには、次の 6 つの要素全てが何らかの形で組み込まれている。詳細の説明は「[1.3 SSA プロセス](#)」を参照。



図表 3-2：SSA システムの 6 つの要素

SSA システムのこれらの6つのコア要素から、民間 SSA 企業は、顧客に提案する分野に特化する戦略に加え、企業の労働、技術、金銭的及び知的投資の配分戦略を策定している。これらの戦略的決定には、特定の活動、ハードウェア又は機能をアウトソースすることが可能か、他のプレーヤーとの間で協力したり共有できる活動は何か、どういったニーズを満たすか、最先端のサービス、ハードウェア又は専門知識を開発できるかどうかを決めることが含まれる。こういった企業は営利団体であり、政府規模の SSA ネットワークは民間事業者が保有するには非常に高価なので、競争的な観点からどの SSA 能力に特化するかと、そのような能力を最高の価値を維持しつつ最低の価格で提供しようと努力している。SSA 市場へのアプローチを形成するために、商業 SSA 企業は SSA システムの各要素を慎重に検討する。

商業 SSA 事業が市場に参入する時は、顧客のニーズに応じて、6つの要素の組み合わせのマーケティングと販売に関するビジネスモデルを策定する。一部の顧客は、キュレーション又は処理されていない観測データのみを必要とする場合がある。その場合、データはプロダクト化され、独立して情報とインサイトを処理する能力を持つ顧客に直接販売される。他の顧客は、ELSETs、接近データメッセージ (CDM)、商業カタログへのアクセスなど、より洗練されたプロダクトを望んでいる場合がある。販売されるこれらのプロダクトは、顧客に直接実証された価値がなければならず、通常、顧客のニーズに合わせてケースバイケースで調整される。この段階では、これらのプロダクトは、分析又は企業からの他のインサイトとともにパッケージ化されていないためである。

一部のより独立した顧客は、オンデマンドのタスク処理や物体の特性評価、マヌーバ警告と意思決定のサポート、その他のサポートなどのみを商業 SSA サービスに求めている。彼らは、SSA サービス提供者がどのように結論に到達したかを見ることに興味がないため、「乱雑な」生の観測データや、解決された軌道などのプロダクトは必要としていない。このタイプの顧客に提供されるサービスは、顧客と共に働く労働力と専門知識を提供でき、政府プログラム又は企業部門で SSA チームを配置したり、ケースバイケースで個別に販売できる。同様に、一部の衛星通信運用者は、データ管理、保管、キュレーション又は他の SSA データの統合を民間の SSA 企業にアウトソースする場合がある。これは、会社自体の SSA データプロダクト又は他のソースから取り込まれたデータとともにパッケージ化できる。

以下は、著書 Mark Johnson が著書「Reinvent Your Business Model」²⁰ で説明している、一般的な現代のビジネスモデルの例である。これらのモデルは現在、一部の民間 SSA 提供者に使用されているが、この表では、民間の SSA 市場の発展に伴い将来の商業 SSA サービス提供者が使用できるモデルも検討している。

図表 3-3 : 民間 SSA サービス提供者

ビジネスモデル	説明	例
会員/アフィニティクラブ	会社は、プロダクト又はサービスへのアクセスを、メンバーシップの料金を支払う人のみに提供する。	AGI 社が運営する Space Data Association (SDA) は現在、衛星運用者向けにこのモデル採用している。SDA は営利組織ではあるが、衛星運用者は、データを SDA に蓄積し、分析と引き換えに AGI 社に運用コストを一括で支払う。
フリーミアム	企業は、基本サービスへのアクセスを無料で顧客に提供し、より包括的なサービスを追加費用で利用できる。	Bluestaq 社によって構築され、DoD によって資金提供された UDL の現在のモデル。OADR でも同様なモデルになる可能性がある。
仲介者	企業は仲介者として機能し、購入者と販売者を有料で結び付ける。	潜在的な将来のモデル。SSA データマーケットプレイスのような現在のオークションモデル組織の概念の民営化から発展する可能性がある。
リバースオークション	顧客は要件を設定し、企業はそれらの要件を満たすサービス提供を入札する。	Bluestaq 社が構築し、DoD が資金提供した SSA データマーケットプレイスのプロトタイプ現在のモデル。これは、防衛関連の SSA サービス取得の従来のモデルでもある。従来のプロセスを高速化するためにテストされている。
バンドリング	企業は、価格帯の異なるプロダクトやサービスのパッケージを複数提案する。	現在、ExoAnalytic 社、AGI 社、L3Harris 社などのいくつかの民間 SSA 企業で使用されている。
クラウドソーシング	データ提供者のグループが集約され、他の人のプロダクトと引き換えにプロダクトを提供する。	テキサス大学オースティン校の Astriagraph の研究プロジェクトは、現在このモデルを実験している。このモデルは、国連などの政府間機関の後援の下で、将来の国際的なデータ共有プログラムの基礎を形成し得る。
オートメーション (自動化)	低価格のサービスを提供するために、人間の労働によって実行される従来のプロセスを自動化する。	SSA システムの特定の要素では、Numerica 社が複雑なロジスティクスソフトウェアを使用してセンサー観察タスクを自動化するなどが実用化が進んでいる。将来の潜在的なモデル。特

ビジネスモデル	説明	例
		に、AI とマシンラーニングの進歩を活用して、コンステレーションの接近回避マヌーバを構築する場合など。
デジタル・プラットフォーム	「ギグエコノミー」モデル。企業はデータプラットフォームを管理、提供し、絶えず更新されるデータをデータプラットフォームに入力する。データを使用するためのアプリケーションは他の企業によって構築され、プラットフォーム管理者のサービス売上はその分削減される。	LeoLabs 社は、LEO 環境においてこのモデルを実現するため、SSA サービスの「Google マップ」として機能することを目指している。
細分化	会社は、プロダクト又はサービスの部分的な使用を販売する。	将来の潜在的なモデル。特に軌道寿命が短い衛星、特定の軌道スロットの SSA の「タイムシェア」。
都度払い	企業は、プロダクト又はサービスを使用した分のみ顧客に課金する。	潜在的な将来のモデル。STM フレームワークの下で民間の SSA サービスがより洗練されるにつれて、SSA サービスの単位を定量化する標準化された手段が開発される可能性がある。
プロダクトからサービス	プロダクトを販売するのではなく、プロダクトが提供するサービスを販売する。	顧客が生観測のみを購入するという珍しいケースを除き、このモデルは現在、他のビジネスモデルのデザインと一緒にほとんどの民間 SSA 企業で使用されている。
標準化	過去にパーソナライズ又はカスタマイズされたサービスを標準化して、コストを削減する。	潜在的な将来のモデル。大規模なコンステレーションを運営する顧客を対象とする企業が適用できる。
定期購読（サブスクリプション）	企業は、一定期間サービスにアクセスするために定期購読料を請求する。	現在、ほとんどの商業宇宙企業で使用されており、メンバーシップと組み合わせることもある。

3.5 民間 SSA 企業のプロフィール

このセクションでは、SSAに関連するプロダクトとサービスを提供する主要な民間企業に関する公開情報に基づいた詳細なプロフィールを示す（網羅的なリストではない）。ここでは、入力、キュレーション、分析、プロダクト、サービスにわたる SSA バリューチェーンの各要素において商品を提供する、卓越した競争力のあるビジネスであるかどうかを検証している²¹。ここで取り上げた企業は L3Harris を除き未上場企業である。地域域ごとに分類された民間 SSA プレーヤーの詳細については、セクション 2「主要プレーヤー」を参照のこと。

3.5.1 L3Harris Technologies, Inc.



米国フロリダ州メルボルンに本社を置く L3Harris 社は、SSA 事業部門のデータ取り込み及びデータ管理の要素に重点を置き、軍事分野にわたって幅広いプロダクトを提供する大規模な防衛請負業者である。L3Harris 社は、米国政府の SSA センサー及び処理システムの主要な契約業者だが、他の民間企業や学术界とのデータ共有やコラボレーションも行っている。たとえば、L3 Harris 社は地上ベースの電気光学深宇宙監視 (GEODSS : Ground-Based Electro-Optical Deep Space Surveillance) 望遠鏡を開発し、軌道上で約 10,000 個の物体に対して米国 SSN の追跡に貢献している。

L3Harris 社は、様々な現象学における異なる種類のデータを SSN に統合することにも取り組んでいる。同社は、世界の 7 つのサイトにまたがる電気光学センサーの 2 層ネットワークで構成される望遠鏡のグローバル・オプティカル・ネットワーク (GON : Global Optical Network) を所有及び運用している。第 1 層には、GEO ベルトの常時観測を提供する 24 時間稼働している非タスク星型ネットワークの固定「ベースライン」が含まれ、第 2 層には、より信頼度の高い望遠鏡を備えたタスク可能なネットワークで構成され、規則的に増強したデータの取込みに優れた光学系が装備されている。

商業的には、L3Harris 社は GON から Space Sentry の処理及び配布システムのためにデータを送っている。政府の事業が主な顧客となっているが、商業衛星運用者に提供するプロダクトには、ライトカーブベースの宇宙物体の不安定性アラート、マヌーバ検出と特性評価、初期軌道決定、接近評価及び衝突回避サポートがある²³。

L3Harris 社のデータプロダクトは、独自のセンサー以外の SSA データのソースを取り込まないため、他の商業 SSA サービス提供者とは異なる。L3Harris 社は、データ処理がどのような仮定の上に立っていたか、その起源を理解するために、多くのソースからのデータを融合する政府と顧客は、細心の注意を払う必要があると指摘している²⁴。

図表 3-4 : L3Harris 社の概要

顧客	主に米国政府機関
----	----------

提供するサービス	初期軌道決定、衝突確率、マヌーバ検出時間と推進、及び生命のパターン
ビジネスモデル	バンドリング、プロダクトからサービス
重点領域	ハードウェアセンサーネットワーク、データ管理及び処理
本社	米国フロリダ州メルボルン
従業員	>50,000 (L3Harris 社全体の従業員数であり、SSA 関連事業のみの数ではない)
企業形態	防衛請負業者、ハードウェア
社史	宇宙競争におけるいくつかの伝統的な航空宇宙請負業者のユニットから形成され、L3 Technologies 社と Harris Corporation 社は、2019 年に合併して L3Harris Technologies, Inc. 社となった。
よく知られている分野	米国政府の SSA センサーの構築と保守
カバレッジ/性能	GE0、高い ME0 軌道
グローバルへの販売	なし
主要なパートナー	米国空軍

3.5.2 Analytical Graphics, Inc.

米国ペンシルバニア州エクストンに本社を置く Analytical Graphics Inc. (AGI 社) 社は、Web ベースのソフトウェア会社であり、SSA 事業のキュレーション、分析及びサービスの



要素に多大な努力を注いでいる。AGI 社は、LEO ベースの物体に焦点を合わせた 2 つのレーダーと、GEO の物体に主に焦点を合わせた世界中の約 70 の望遠鏡で構成されるネットワークからの観測を広く取り込んでいる。また、同社は、他の商業及び学術機関と提携し、センサーデータサービス指向のアーキテクチャー (SOA : Service-oriented Architecture) データ及び分析サブスクリプションサービスである

「Spacebook」を通じて配信される SSA プロダクトを処理する商業宇宙運用センター (COMSpOC : Commercial Space Operation Center) を運営しているまた、COMSpOC を通じて、同社は政府の SSA プロダクトと相互運用可能な顧客データとの観察結果を、シミュレーション、モデリング及びサービスの生成のためのソフトウェアに連結している。AGI 社は、商業衛星運用者や政府機関といった幅広い顧客を有し、その大部分が COMSpOC にデータを供給している。さらに、AGI 社は、ソフトウェアを利用して、衛星運用者の独立した非営利の共同データ共有連合である Space Data Association (SDA) の Space Data Center (SDC) を管理している。SDC は、SDC メンバーが提供する軌道暦を利用して、スペース・トラックの公表されているカタログの TLE 及び SP データと融合している。

AGI は、他の多くの SSA ベンダーとは異なる。なぜなら、AGI は、様々なソースや観測データの形式を 1 つのシステムに比較及び融合することを非常に優先しているからである。たとえば、SDA の保守では、AGI は約 30 の衛星運用者からデータを取り込み、比較し、並べ替える。各運用者は独自のキュレーション、処理、及びデータ管理方法を使用する。他の洗練された SSA データ提供者と同様に、AGI は、物体の場所と他の情報ソースが指し示す運用者の判断との間の不一致の状況を確認し、関係者に警告するためにそれを使用している。AGI は、デブリ環境に関する業界の理解に広く貢献しているアナリストの本拠地であり、主にコロラドスプリングスに本拠を置く宇宙標準革新センター (Center for Space Standards and Innovation) の支援の下、技術論文、記事、論説、ホワイトペーパーを定期的に発行している。

図表 3-5 : AGI 社の概要

顧客	民間及び政府の衛星運用者
提供するサービス	全種類
ビジネスモデル	サブスクリプション、バンドルサブスクリプション
重点領域	キュレーション、分析、及びサービス
本社	米国ペンシルバニア州エクストン
従業員	~200
企業形態	ソフトウェア、分析
社史	1989年、地上、海、空及び宇宙のプラットフォームに適用される物理学に基づいたシステムツールキット（STK：Systems Tool Kit）ソフトウェアと共に設立された。プロダクト及びその他のソフトウェアベースのプラットフォームは、元のソフトウェアスイートから進化した。
よく知られている分野	COMSpOC 運用者、SDC マネージャー、STK ソフトウェア
カバレッジ/性能	LEO、MEO、HEO、GEO
グローバルへの販売	あり
主要なパートナー	SDA の SDC を管理し、UDL に貢献し、Space Safety Coalition Endorsee、CONFERS Observer メンバー

3.5.3 Numerica Corporation

米国コロラド州フォートコリンズに本社を置く Numerica 社は、コロラド州立大学のスピノフ企業として誕生。同社の SSA の事業ラインは、2008 年に航空及びミサイル防衛チームから発展した。Numerica 社は、SSA システムのキュレーション及びデータ処理及び管理要素に多額の投資を行い、センサーの世界的なネットワーク、宇宙監視及び追跡システム、データ処理データ活用パイプラインを運用している。Numerica 社は、約 140 のセンサー（望遠鏡と凝視アレイ）を世界中の 17 か所で運用しており、そのうち 12 か所は米国外にある。Numerica 社は、完全に統合されたデータ処理パイプラインも運用しており、SSA と Space Operations に係る両方のビジネスラインをサポートしている。



図表 3-6 : Numerica 社の概要

顧客	主に米国政府、一部の商業衛星運用者
提供するサービス	このソフトウェアは、UCT 解像度、破碎及び近接宇宙物体処理並びにカタログメンテナンスをサポートする宇宙監視用のリアルタイムマルチセンサー追跡ソリューションを提供する。
ビジネスモデル	オートメーション
重点領域	キュレーション、データ処理、管理
本社	米国コロラド州フォートコリンズ
従業員	~50
企業形態	ソフトウェア、データキュレーション
社史	もともとコロラド州立大学のスピンオフ企業として設立され、2008年にミサイル防衛チームから SSA サービスビジネスが生まれた。
よく知られている分野	自動化及びタスクアルゴリズム、データフュージョン、昼間の追跡機能
カバレッジ/性能	GEO、MEO、HEO 及びエキゾチック軌道
グローバルへの販売	はい、UDL を通じて米国の同盟国に
主要なパートナー	SDL Data Marketplace の参加者である UDL への貢献者

3.5.4 Exoanalytic Solutions, Inc.



米国カリフォルニア州フットヒルランチに本社を置く ExoAnalytic 社は、現在、ボリュームと地理的分布という意味で、最大の商業センサーネットワークの1つである ExoAnalytic Global Telescope Network (EGTN) を運営している。EGTN は、5つの大陸とハワイにある30の観測所にある300を超える望遠鏡で構成されている。2008年に設立された ExoAnalytic 社は、SSA システムのデータ取込み及びサービスの要素に多額の投資を行っている。ExoAnalytic 社は、GEO 内の10センチメートルを超える全ての物体を追跡可能であり、宇宙での活動について非常に高い割合の拡散測定値を形成するため、可能な限り大量の生の観測データを収集する戦略を採用している。つまり、ExoAnalytic 社は、GEO での物体数レベルのデータを集約できる。この大量のデータは、イベント、エリア又は物体に関する特定の情報をデータリポジトリに「照会」する段階の前に、全体として収集されて保存される。

ExoAnalytic 社は、大量のデータ取込みにより GEO 内の物体の「全て」の情報を維持できるため、ExoAnalytic 宇宙運用センター (ESpOC : ExoAnalytic Space Operations Center) を運営し、生の観測データの販売から、軌道、接近警告、アラート及び主要な軌道上のイベントに直面している衛星運用者の行動方針の決定支援まで、幅広い顧客向けのプロダクトを提供している。また、ライトカーブの専門的なフォレンジック分析のプロダクトラインで知られている。これは、物体活動の特性評価や、破砕などの軌道上で発生する特定の注目すべきイベントの検査に使用できる。

図表 3-7 : ExoAnalytic 社の概要

顧客	広範囲：政府及び商業衛星運用者
提供するサービス	広い範囲：生の観測データからプロダクト、接近警告やアラートなどのサービス、意思決定支援まで
ビジネスモデル	プロダクトからサービス、バンドリング
重点領域	データ取込み、サービス
本社	米国カリフォルニア州フットヒルランチ
従業員	~100
企業形態	ソフトウェア、分析
社史	米国のギャップを埋めるために2008年に設立されたSSN機能。ミサイル防衛の専門知識ベースのモデリング、シミュレーション、追跡に関する専門知識を適用することにより、IRADを通じて独立したオペレーションセンターを開発しました。

よく知られている分野	地理的に分散した大規模なセンサーネットワーク、ライトカーブを使用した軌道上イベントのフォレンジック分析
カバレッジ/性能	主に GEO だが、その他の領域も含む
グローバルへの販売	あり
主要なパートナー	Space Data Association の参加メンバー、UDL への貢献メンバー、SSA データマーケットプレイスの参加メンバー

3.5.5 Elecnor Deimos



Elecnor Deimos (Deimos) 社は、2001 年に設立された宇宙サービスに特化したスペインの企業である。ポルトガル、スペイン、英国、ルーマニア、イタリアの複数のオフィスを有し、20 名から 400 人の従業員を有する企業にまで成長した。Deimos 社は、ミッション分析、地上セグメントシステム、オンボードソフトウェアシステム、運用ソフトウェア開発、システム統合、検証、展開、試運転と運用のサポートなど、衛星システムのバリューチェーン全体に幅広いサービスを提供している。特に SSA については、Deimos 社は、地球に接近する宇宙物体の検出と追跡を目的としたプロジェクトである Deimos Sky Survey (DeSS) を運営し、スペインのオフィスから遠隔操作される 3 つの光学望遠鏡を所有する。英国のハーウェル、ルーマニアのブカレスト、イタリアのサンピエトロモゼッツォにオフィスがある。

図表 3-8 : Deimos 社の概要

顧客	ESA、スペイン、民間衛星運用者
提供するサービス	必要に応じたエンドツーエンドのサービス： ミッション分析、地上セグメントシステム及びオンボードソフトウェアシステム、運用ソフトウェア開発、システム統合、検証、展開、及び試運転と運用のサポート。
ビジネスモデル	プロダクトからサービス
重点領域	幅広いサービスの提供（ある分野だけに特化しているわけではない）。
本社	マドリッド、スペイン
従業員	400
企業形態	ソフトウェア、ミッション管理
社史	Elecnor Deimos 社は 2001 年に設立され、ハイテクシステムとエンジニアリングソリューションの開発と提供を目指している。エンジニアリング、インフラ開発、建設プロジ

	エレクトでスペインを代表する企業の1つである Elecnor 社の技術部門に当たる。宇宙は Elecnor Deimos 社の活動の1つのセグメントであり、同社の宇宙セグメントは現在、スペイン、英国、ルーマニア、イタリアの複数のオフィスにまたがっている。
評判	ヨーロッパの市場リーダー
カバレッジ/性能	主に GEO、ただしソフトウェアは他の軌道にも適用可能
グローバルでの販売	あり
主要なパートナー	主にヨーロッパで運営。EUSST にデータフィード

3.5.5 LeoLabs Inc.

米国カリフォルニア州メンロパークに本社を置く LeoLabs 社は、ベンチャーキャピタルから支援を受けた SSA の新興企業であり、主に低軌道

(LEO) にある物体の高解像度データをキャプチャ

するように設計された、低コストの地上ベースのフェーズドアレイレーダーのグローバルネットワークを開発している。導入に費用と時間がかかる従来のレーダーシステムとは異なり、LeoLabs 社は6か月でレーダーを構築し、15百万から20百万ドルのベンチャーキャピタル資金を調達した。2019年末の時点で、計画された6つのレーダーネットワークのうち3つが建設された。最初の2つはUHFレーダーで、2つ目はSバンドレーダーである。

LeoLabs 社の地上レーダーのネットワークは、従来のセンサーで測定するには小さすぎる低軌道上の2~20cmの250,000個物体を測定及び追跡できるように設計されている。これらの250,000個の物体は、LeoLabs 社がLEO内の物体に対する接近リスクの約95%を構成すると推定している。450~1200kmの軌道において将来運営が予定されるメガコンステレーションは、LeoLabs 社が注力している300~2000kmの範囲に収まると予想される。LeoLabs 社は、デジタルプラットフォームのビジネスモデルをLEOのSSA市場に適用することを目標に組み込んだ。宇宙環境の

「Google マップ」としてマーケティングを展開しており、同社はLEOデータプロダクト用のクラウドベースのAPIを構築し、レーダーネットワークを使用してそのAPIを絶えず更新している。次に、標準インターフェイスとして、他のユーザーと組織がそれを利用してデータ分析用のサービスとアプリケーションを構築し、LeoLabs 社がプラットフォームホストとして機能し、ユーザー及び組織が提供したサービスの売上の一部を得ようとしている。

最近では、LeoLabs 社は、新興宇宙国でビジネスを行うことを検討している商業宇宙企業に資するような宇宙政策と規制を形成するため積極的に取り組んでいる。ニュージーランド政府へのサービスとして、規制ガイダンスを提供し、2019年に最新のレーダーであるSバンドKiwi Space Radarのホストにもなっている。



他のニッチな民間 SSA 提供者と同様に、LeoLabs 社は自社のセンサーネットワークからのデータのみをプラットフォームに組み込んでいる。

図表 3-9 : LeoLabs 社の概要

顧客	LEO 衛星運用者
提供するサービス	デジタル LEO プラットフォーム、警告
ビジネスモデル	デジタルプラットフォーム、メンバーシップ
重点領域	キュレーション、分析、データ管理、処理
本社	米国カリフォルニア州メンロパーク
従業員	<50
企業形態	ソフトウェア、
社史	2015 年に米国カリフォルニア州メンロパークを発端とする最近設立されたベンチャーキャピタルから支援を受けた新興企業
よく知られている分野	低コストのレーダーネットワーク、LEO における 2~10 cm の物体追跡
カバレッジ/性能	主に LEO
グローバルへの販売	あり
主要なパートナー	ニュージーランド政府との間の MBIE との覚書締結、UDL への貢献メンバー、SSA データマーケットプレイス参加者、CONFERS オブザーバーメンバー

3.6 SSA に関連する米国政府の契約

オープンソースの情報によれば、SSA に関連する米国政府との契約は 2015 年から 2019 年の間に約 435, 589, 250 米ドルに及ぶことが判明した。この数値は、usaspending.gov、sbir.gov、defense.gov を含む（ただし、これらに限定されない。）政府が運営する公式の公開ウェブサイトから編集した。データベース検索には、「宇宙監視」、「宇宙交通管理」及び「宇宙状況認識」のキーワードが使用された。したがって、以下に示す数値は、SSA に関連する政府契約の網羅的リストではない。2015 年から 2019 年の期間中の多くの運用中のものに関する契約は、公表されていないか、SSA として明確に識別されていない場合がある。限定された情報ではあるものの、以下の数字は、2015 年から 2019 年の間に米国政府が業界と協力

して米国政府の SSA システムをサポートした契約関係の「最小」の公的に知りうる契約関係を表している。

米国 SSA というトピックに基づく現在の運用に関する政府と業界との契約関係は、入力（データ又はセンサーハードウェア）、センサーとシステムの維持、分析、SSA に関連するサービス、ソフトウェアライセンスのいくつかのカテゴリに分類される。データはまた、米国がデータはまた、米国政府は、センサーとデータ、キュレーションと分析、プロダクトとサービス、データ管理のカテゴリの研究に投資している。最後に、データは、SSA に関する政府と業界との契約の内、圧倒的な数の契約（93%）が米国国防総省（DoD）との間で締結されていることを示している。

図表 3-10：契約から収集されたデータ（米ドル）

インプット（データ又はハードウェア）	\$21,066,773
センサー及びシステムメンテナンスの契約	\$145,003,370
分析	\$15,402,000
サービス	\$75,210,648
ソフトウェアライセンス	\$19,094,285
小計	\$275,777,076

図表 3-11：SSAに関連する研究契約について収集されたデータ（米ドル）

（インプット）センサーとデータ	\$64,585,352
キュレーションと分析	\$35,647,462
プロダクトとサービス	\$7,599,722
データ管理	\$51,979,638
小計	\$159,812,174

3.7 将来の見通し

今後、主たる顧客としての政府のニーズによって市場は引き続き形成されると思われる。しかし、米国政府が、SSAに係る協力体制とデータ共有について、自国が主導する形での世界的に認知された相互運用可能なフレームワークの構築に優先順位と動機を変化させたことにより、民間のSSAサービス提供者が顧客のニーズに応える市場の状態にも影響が生じる。このセクションで紹介するSSA関連企業は著名な企業で、SSAにおけるビジネスを確立している。しかし、SSA関連のスタートアップ企業は引き続き新たに登場してきており、世界のSSA市場で地位を確立するようなユニークな提案を行なっている。

グローバルな民間のSSAの出現により、SSAデータがコモディティ化（公共財化）される。そのことで、SSA企業が行う価値提案は、品質と精度を特徴とし、プロセスに強みを持った独自のプロダクトとサービスに移行していく可能性がある。共同及び競争力のあるデータリポジトリ、ハブ、コンソーシアム並びにUDL、SSAデータマーケットプレイス、Astriagraph及びSDA等デジタルマーケットプレイスの現在のプロトタイプのコネプトは全て、SSA市場の将来について独自の仮定を提示し、成功と失敗から貴重な洞察を提供することができる。個々の企業は、政府が

グローバル STM に向けた政策の方向性を取り入れることに大きく貢献すると考えている。さらに、衛星運用者のリスク管理を取り締まるようなより堅牢な規制の導入によって、顧客ベースは拡大し続け、その顧客ベースに対応できるように商業 SSA ビジネスモデルが継続的に拡大する可能性がある。商業的な宇宙経済の他の分野で明らかのように、従来の想定を革新し、刷新するような新しい SSA ビジネスモデルは、今後数年で間違いなく発生する。そして、ビジネスの持続可能性は、顧客の将来のニーズの状態を把握し、新しい技術市場のトレンドへの適用如何によるだろう。

参考文献・脚注 セクション 3

1. OECD, The Space Economy at a Glance 2007, OECD Publishing, Paris, 2007, <https://doi.org/10.1787/9789264040847-en>.
2. Space Foundation, 「Space Economy Scorecard」, The Space Report, <https://www.thespacereport.org/scorecard/>
3. Bryce Space and Technology, “Satellites Key to \$5T+ Across U.S. Economy,” Bryce Space and Technology, last modified in September 2019, https://brycetech.com/downloads/Bryce_Satellites_Key_2019.pdf.
4. Alan C. O’ Connor, et al., “Economic Benefits of the Global Positioning System (GPS),” RTI International, last modified in June 2019, https://www.rti.org/sites/default/files/gps_finalreport.pdf.
5. OECD, The Space Economy at a Glance 2007, OECD Publishing, Paris, 2007, <https://doi.org/10.1787/9789264040847-en>.
6. Debra Werner, “Forecasts call for rapid growth in Earth observation market,” Space News, last modified December 10, 2018. <https://spacenews.com/forecasts-call-for-rapid-growth-in-earth-observation-market/>
7. OECD, “Intensity indicators: selected activities and outputs in the space economy,” in the OECD Handbook Measuring the Space Economy, OECD Publishing, 2012, https://read.oecd-ilibrary.org/economics/oecd-handbook-on-measuring-the-space-economy/intensity-indicators-selected-activities-and-outputs-in-the-space-economy_9789264169166-7-en#page1
8. Bryce Space and Technology, “State of the Industry Satellite Report 2019,” Bryce Space and Technology, last modified in May 2019, <https://brycetech.com/downloads/SSIR-2019-2-pager.pdf>
9. OECD, “Measuring socio-economic impacts from space activities,” in the OECD Handbook Measuring the Space Economy, OECD Publishing, 2012, https://read.oecd-ilibrary.org/economics/oecd-handbook-on-measuring-the-space-economy/measuring-socio-economic-impacts-from-space-activities_9789264169166-8-en#page1
10. Bhavya Lal, et al., “Global Trends in Space Situational Awareness (SSA) and Space Traffic Management (STM),” Science and Technology Policy Institute, last modified in April 2018, <https://www.ida.org/-/media/feature/publications/g/gl/global-trends-in-space-situational-awareness-ssa-and-space-traffic-management-stm/d-9074.ashx>.
11. European Space Agency, “SSA Programme Overview,” ESA, https://www.esa.int/Safety_Security/SSA_Programme_overview.
12. 例として、カナダ SSA センサーの詳細については、このレポートの主要なプレイヤーのセクションを参照。
13. European Space Agency, “SSA Programme Overview,” ESA, https://www.esa.int/Safety_Security/SSA_Programme_overview.
14. Mark R. Ackermann, et al., “Alternatives for Ground-Based, Large-Aperture Optical Space Surveillance Systems,” presented at Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS), Maui, HI, September 2013, https://amostech.com/TechnicalPapers/2013/Optical_Systems/ACKERMANN.pdf.
15. Turner Brinton, “DARPA Space Telescope Will Track Objects in Geostationary Orbit,” Space News, last modified April 29, 2011, <https://spacenews.com/darpa-space-telescope-will-track-objects-geostationary-orbit/>.
16. USASpending. Gov 「2019 年、政府は 4.45 兆ドルを費やしました」 USASpending. Gov、<https://www.usaspending.gov/#/>.
17. Andrea Ovans, “What is a business model,” Harvard Business Review, last modified January 23, 2015, <https://hbr.org/2015/01/what-is-a-business-model>.
18. Todd Harrison Kaitlyn, Interview by the Astroscale Team, Personal interview, Washington D.C, November 25, 2019.

19. Mark W. Johnson, “Reinvent your Business Model:How to Seize the White Space for Transformative Growth,” Harvard Business Review Press, July 10, 2018, <https://store.hbr.org/product/reinvent-your-business-model-how-to-seize-the-white-space-for-transformative-growth/10219>.
20. 同上
21. SSA ソフトウェア会社である VES LLC が提供する SSA サービスに関する公開情報が不十分なため、この調査には含まれていない。
22. U.S. Department of Defense, “Main Page,” Defense.Gov, <https://www.defense.gov/>.
23. L3Harris “Space Superiority,” L3Harris, last modified in July 2019, https://www.harris.com/sites/default/files/files/franchise_content/57946-l3harris-space-superiority-sell-sheet-sas.pdf
24. Abhay Masher and John MacDonald, Interview by the Astroscale Team, Personal interview, Washington D.C, December 19, 2019.
25. U.S. Department of Defense, “Main Page,” Defense.Gov, <https://www.defense.gov/>.
26. U.S. Department of Defense, “Main Page,” Defense.Gov, <https://www.defense.gov/>.
27. U.S. Department of Defense, “Main Page,” Defense.Gov, <https://www.defense.gov/>
28. Clinton Clark and Brien R. Flewelling, Interview by the Astroscale Team, Personal Interview, Washington D.C., November 21, 2019.
29. Space News, “Air Force selects Slingshot Aerospace to bring artificial intelligence into space surveillance,” Space News, last modified April 7, 2019, <https://spacenews.com/air-force-selects-slingshot-aerospace-to-bring-artificial-intelligence-into-space-surveillance/>.
30. U.S. Department of Defense, “Contracts For April 27, 2018,” Defense.Gov, last modified April 27, 2018, <https://www.defense.gov/Newsroom/Contracts/Contract/Article/1505834/>.
31. U.S. Department of Defense, “Contracts For November 21, 2019,” Defense.Gov, last modified November 21, 2019, <https://www.defense.gov/Newsroom/Contracts/Contract/Article/2023490/>.
32. Carolina D’ Agati, “Lockheed Awarded Contract for Joint Air-to-Surface Standoff Missile Production - DoD Daily Contracts,” Clearance Jobs News, last modified October 5, 2018, <https://news.clearancejobs.com/2018/10/05/lockheed-awarded-contract-for-joint-air-to-surface-standoff-missile-production-dod-daily-contracts/>.
33. SBIR, “Event Recognition for SSA via Multi-INT Fusion and Automated I&Ws,” SBIR, <https://www.sbir.gov/sbirsearch/detail/1597153>.
34. Nathan Strout, “Bluestaq will help the Air Force expand its library of space objects,” C4ISRNET, last modified October 30, 2019, <https://www.c4isrnet.com/intel-geoint/2019/10/30/bluestaq-will-help-the-air-force-expand-its-library-of-space-objects/>.

4. 国内 SSA データプラットフォーム

4.1 SSA についての国際的なガイドラインとその効果

- 国際機関間デブリ調整委員会（IADC）及び国連宇宙空間平和利用委員会（UN COPUOS : United Nations Committee on the Peaceful Uses of Outer Space）の 21 の宇宙活動の長期的持続可能性（LTS : Long-term Sustainable）ガイドラインは、その実施が義務付けられているものではないが、SSA のデータ、プロダクト及びサービスが宇宙の長期的な持続可能性を確保するために必要となる基本的な能力であることを示唆している。SSA システムは、LTS ガイドライン及びベストプラクティスの実施の多くを直接サポートする。
- CONFERS や SSC 等、既存の国際的なデブリ低減ガイドラインを超えた、産業界主導の取組が出現している。SSA はこれらの取組もサポートできる。
- 国際的なガイドラインが SSA のプロダクトとサービスに係る需要に直接的な影響を与えるかどうかを判断するのは時期尚早であるが、軌道上で何が起きているのかを知ることについての一般的な関心が高まっている。

4.1.1 IADC（国際機関間スペースデブリ調整委員会）

国際機関間スペースデブリ調整委員会（IADC : Inter-agency Space Debris Coordination Committee）は、国内の機関が人為的及び自然発生的に生じたデブリに関連する活動を調整する国際的なフォーラムとして、1993 年に設立された。IADC は、宇宙デブリについての研究を実施し、及び促進し、参加する（宇宙）機関の間で、関連する事項について情報を交換し、進行中の協力についての進捗状況をレビューし、また、デブリ低減策の選択肢を定めたりしている。2003 年、IADC はスペースデブリを制限又は低減するためのガイドラインを採択した。これらのガイドラインは世界中の多くの国で採用されているが、公式な（国家間の）合意や国の実施が要件となっている訳ではなく、あくまでも指針である。

IADC デブリ低減ガイドラインは、主に 4 つの分野に焦点を当てている。

- (1) 正常な運用で放出される物体の制限
- (2) 軌道上破碎事故の防止
- (3) 運用終了後の廃棄（保護軌道域からの除去）
- (4) 軌道上の衝突の防止

詳細については、それぞれガイドライン内で説明されている。軌道上のデブリの発生を最小限に抑えるため、ガイドラインでは、バッテリーや推進システム等のデブリの発生源についても取り上げられている。ガイドラインは、物体の意図的な破壊を避ける必要があることをメンバーに指示し、廃棄オプションを提供する。興味

深いことに、IADC ガイドラインは「25 年ルール」で最も有名である。しかしながら、実際には、低地球軌道にある物体のミッション終了から 25 年後の再突入についての言及はごくわずかである。この測定基準は、国内での協議や、多くの場合国内規制の形で広く公表されている。ただし、(IADC 上の) 正確な文言は次のとおりとなっている。「この IADC その他の研究並びに既存の国内の指針は、25 年という期間が妥当、かつ、適切な寿命上限であると判断した。」¹

重要なのは、IADC ガイドラインが軌道上の保護されるゾーン (保護領域) の定義を行っていることである。具体的には、GEO の上下 200 km (及び 15° 以内) と、LEO は 2000 km までと定義されている。SSA コミュニティは、上記のゾーン (加えて MEO と HEO も) に現在注目している。

IADC の一部でもある参加 (宇宙) 機関は、これらのガイドラインに実施にコミットしているものの、実施は任意のものとされ、また実施の態様も多岐にわたる。例えば、米国は IADC ガイドラインのいくつかの要素を国内の規制に取り込んでいる。連邦通信委員会 (FCC : Federal Communications Commission) は、自国のものか又は市場アクセスを求めているかを問わず、宇宙ステーションの用途ごとに軌道デブリを最小限に抑える計画を証明するよう求めている。同様に、NOAA は、軌道上のデブリの最小化を検証するために認可申請を必要としている。ただし、米国での商業打ち上げ活動を承認する機関である FAA は、IADC の 25 年提案の遵守を要求していない。

IADC ガイドラインの最終的な効果は広範囲にわたっている。まず、同ガイドラインは、2007 年 12 月の国連総会決議 (67/217) として採択されることで体系化された。次に、同ガイドラインは、保護ゾーン内の観測に焦点を絞った観測を行うための初期的な枠組みを提供している。宇宙空間における物体の軌道決定及び宇宙における物体の行動又は SSA の識別レベルと特性レベルのいずれの観測データも同ガイドラインに資するものである。軌道、方位、推定マヌーバ行動及び履歴等、IADC ガイドラインの実施を評価するためのいくつかのツールを利用することができる²。

IADC が SSA にもたらす鍵となる効果は次のとおりである。

- 保護された軌道領域と GEO 廃棄軌道の定義
- デブリの発生の制限に関する軌道上の指針となる行動を定義
- 廃棄するタイムライン目標を定義

4.1.2 国連宇宙空間平和利用委員会（UNCOPUOS）長期持続可能性 （LTS）ガイドライン

国連宇宙空間平和利用委員会（UNCOPUOS）は、2010年に、自主的な長期的持続可能性（LTS）ガイドラインについて加盟国が検討し、勧告するためにワーキンググループを設立した。当初は、同ワーキンググループの下には、4つの専門家会合があった。

- 専門家会合 A：地上の持続可能な開発を支援する持続可能な宇宙利用
- 専門家会合 B：宇宙デブリ、宇宙運用及び協調的な SSA をサポートするツール
- 専門家会合 C：宇宙天気
- 専門家会合 D：宇宙分野における新しいプレーヤーのための規制体制とガイダンス

これらの専門家会合は、IADC やジュネーブ軍縮会議（CD: Conference on Disarmament）等の機関からも意見を受領している。専門家会合は、2014年に COPUOS 加盟国に対して意見を提出し、LTS ワーキンググループがガイドラインの交渉を開始した。2018年、COPUOS の 87 の加盟国は、21 の LTS ガイドラインとその前文の採択に同意した。LTS ガイドラインは、宇宙活動における国内及び国際的な慣行を支援し、宇宙での活動の信頼及び透明性の向上を目的としている。

ガイドラインは 4 つのカテゴリに分類される。

- A：宇宙活動に関する方針及び規制体系
- B：宇宙運用の安全性
- C：国際協力、能力育成及び認知
- D：科学的・技術的な研究開発

以下では、同ガイドラインのうち SSA に関連する物が、SSA の必要性にどのように影響するかを評価している。ガイドラインの多くは、SSA システムの所有を必要としない情報の共有を奨励しているが、中には国内規制の整備と SSA 能力の国内開発を奨励しているものもある。

図表 4-1 : SSAに係るガイドラインと要件

ガイドライン	タイトル	SSA への影響
A. 1	宇宙活動に関する国内規制体系の必要に応じた採択、見直し及び修正	国内規制体系を導入したり、更新する場合、デブリ低減に係る評価も含まれ得るが、遵守を確保するためには SSA データとサービスが必要となる。
A. 2	宇宙活動に関する国内規制体系に関し、必要に応じた策定、見直し又は修正する際の複数の要素の考慮	このガイドラインでは、SPU データメッセージングに使用される COPUOS デブリ低減ガイドライン及び ISO・CCSDS 標準が具体的に言及されている。
A. 3	国内宇宙活動の監督	宇宙活動を監督し、国内規制の遵守を確保するために、国は SSA を利用する必要がある。
A. 4	無線周波数スペクトルの衡平、合理的かつ効率的な使用及び衛星によって利用される様々な軌道領域の確保	このガイドラインは、SSA 対応を通じて実行される無線周波数監視によってサポートされる。SSA サービスがサポートする軌道離脱についても奨励している。
B. 1	更新された連絡先の提供及び宇宙物体と軌道上事象に関する情報の共有	このガイドラインは、SSA 関連データの共有を奨励している。軌道上の物体の運用、接近解析、物体・イベントの監視である。
B. 2	宇宙物体の軌道データの精度向上並びに軌道情報の共有の実行及び実用性の強化	このガイドラインは、宇宙飛行の安全性のための軌道データの精度を向上させるべく SSA データ、サービス、システム及びプロセスのさらなる開発並びに国際標準での宇宙物体の軌道情報の共有を支援する。
B. 3	スペース・デブリ監視情報の収集、共有及び普及の促進	このガイドラインは、スペースデブリの軌道及び物理的特性を測定及び監視し、評価するための SSA システムの開発に直接関連している。
B. 4	制御飛行中の全軌道フェーズにおける接近解析の実行	このガイドラインを実施するためには、SSA データとシステムが必要である。このガイドラインは、十分な SSA 情報を持っていない主体が、接近評価機関から 24 時間のサポート得ることを奨励している。
B. 5	打ち上げ前接近解析に向けた実用的な取組みの確立	このガイドラインは、打ち上げ前の接近評価について特定の SSA サービスを必要とする。また、計画された挿入軌道の近くで運用する他の宇宙物体と、打ち上げられる宇宙物体の衝突のリスクの変化の傾向の分析評価の交換を奨励する。

ガイドライン	タイトル	SSA への影響
B. 6	有効な宇宙天気に関するデータ及び予報の共有	このガイドラインは、SSA の要素としての宇宙天気に直接関係する。
B. 7	宇宙天気モデル及びツールの開発並びに宇宙天気による影響の低減のための確立した実行の収集	モデルは SSA プロセスの重要な要素である
B. 8	物理的及び運用面の特徴に関わらない宇宙物体の設計及び運用運用上の特性	デブリ低減要件を国が監視するためには、SSA 情報が必要となる。
B. 9	宇宙物体の非制御再突入に伴うリスクを取り扱う対策	再突入予測情報が推奨される。このためには SSA データとサービスが必要である。
B. 10	宇宙空間を通過するレーザービーム源を使用する際の予防策の遵守	このガイドラインを実施するためには、SSA を利用し、宇宙物体が傍受た場所についての知識が必要である。
C. 2	宇宙活動の長期持続可能性に関する経験の共有及び情報交換のための適切な新たな手続の作成	効果的な LTS として共有されるいかなる経験も SSA データに基づく。
C. 3	能力構築の促進及び支援	このガイドラインは、飛行力学と軌道の能力構築、共同での軌道計算と接近評価の実行及び適切な正確な軌道データと宇宙物体の監視用の適切なツールへのアクセスの提供を奨励する。
C. 4	宇宙活動の認知向上	SSA 及び活動の透明性が宇宙活動の認知を支える。

21 の LTS ガイドラインの与える影響は、主要国の実施次第である。任意的なものであるが、自国内でのガイドラインの実施を披露することを考えている国もある。2020 年 1 月の (COPUOS) 科学技術小委員会では、LTS ガイドラインの実施に係る報告、いかなる国内措置が取られたか、COPUOS としてガイドラインの更なる実施を進めるために何ができるかについて提案がなされた。ガイドラインの実施に関する 5 年間の作業計画は、同ガイドラインを徐々に浸透させるための取組を継続する。また、更なるガイドラインの策定に使われる可能性もある。

英国は、ガイドライン B. 2 「宇宙物体の軌道データの精度向上並びに軌道情報の共有の実行及び実用性の強化」の実施のために、SST (宇宙監視と追跡) のギャップと改善点を特定していると報告した。このステートメントからは、英国が SSA データを分析するためのツールに焦点を合わせていると考えられる³。

4.1.3 CONFERS

Consortium for Execution of Rendezvous and Servicing Operations (CONFERS) は、米国防高等研究計画局 (DARPA) の初期シード資金をベースとした業界主導のイニシアチブであり、軌道上サービス (OOS : On-Orbit Servicing) 及びランデブー及び近接運用 (RPO : Rendezvous and Proximity Operations) について、拘束力を有さず、コンセンサスに基づく技術及び運用標準として、政府と業界のベストプラクティスを研究、開発及び公開することを目的としている⁴。CONFERS のメンバーは米国、欧州及び日本の民間主体である。政府機関はオブザーバーとして会議に参加できる。

CONFERS メンバーは3つの文書を公開している。

1. 商業的な RPO 及び OOS の基本原則

この基本原則は、メンバーにとっての指針となる定義を確立し、RPO 及び OOS の安全かつ透明性の高い形での実施に際しての、CONFERS としての主要な関心を特定する。その中で、合意に基づいた運用、法令の遵守、デブリ低減と衝突回避を含む責任のある運用並びに鍵となる透明性の原則を含む。

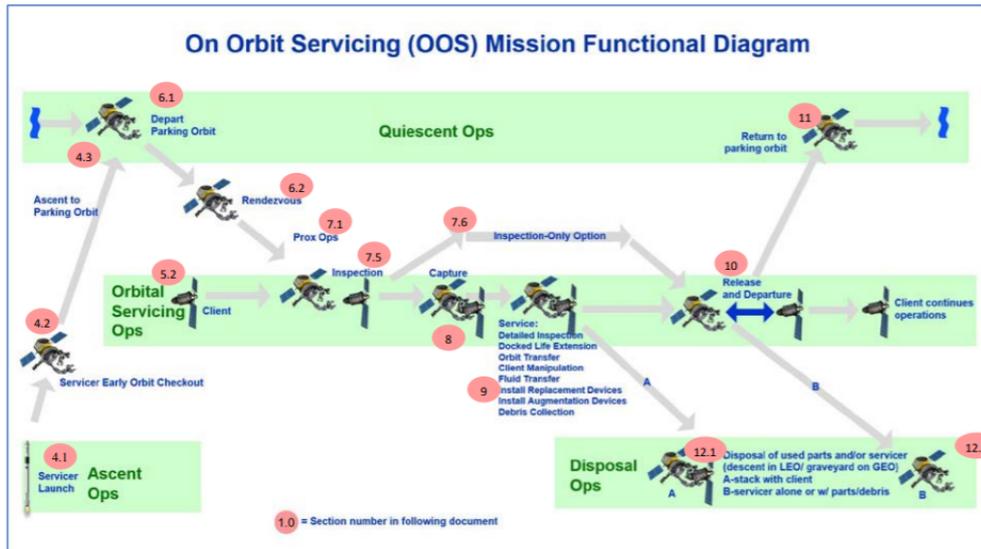
2. CONFERS が推奨する設計と運用上の慣行

この文書におけるミッションの運用に関する部分では、リスク及び事故の結果を最小限に抑えるためのプラクティスが確立されている。また、物体の識別、安全域外への接近、接近の通知及び安全情報の交換が奨励されている。こういった全ての事項には正確でタイムリーな SSA データとサービスが必要である。

- 識別：宇宙物体の特性評価が必要
- 安全域：軌道の決定と予測の精度及び不確実性に係る情報が必要
- 接近アプローチの通知：サービスを提供する者と軌道を横断又は共有する物体の追跡が必要
- 安全情報の交換：接近警告及び衝突回避サービスの理解が必要

3. CONFERS の OOS ミッション・フェーズの提供

ミッション・フェーズが特定されることは、安全で透明性の高い OOS 業務を実施するために、如何なるタイプの SSA 能力が必要なのかを判断するのに役立つ。



図表 4-2 : 軌道上サービス (OOS) 図

SSA データを使用する運用者にとっての CONFERS の効果とその実施は、この活動が民間事業者向けに始まったばかりであるため、まだ明らかではない。2020 年 2 月 10 日、カナダの宇宙ベースのセンサーが一連の画像を収集した。NorthrupGrumman Information Systems 社の MEV-1 衛星は、対象顧客である Intelsat 901 とランデブーをする模様である。



図表 4-3 : カナダ軍からの提供⁵

4.1.4 Space Safety Coalition (SSC)

Space Safety Coalition (SSC) とは、2019 年に宇宙活動の持続可能性に関するベストプラクティスを開発するとの共通の目的を持って集まった民間事業者及び組織から成る特別なグループである⁶。このグループは、デブリ低減のための既存の国際的なガイドラインやプラクティスを超えた安全のためのプラクティスの概略を明らかにしている。また、宇宙における責任のある行動をどう確保するかについても複数の勧告を出している。そこには、例えば、責任のある行動を審査したり、デブリ低減に係るプラクティスを実施することを求めるような打ち上げ契約を行う打ち上げ者（提供者）を選ぶことも含まれている。

プラクティスの主要な部分は次のとおりである。

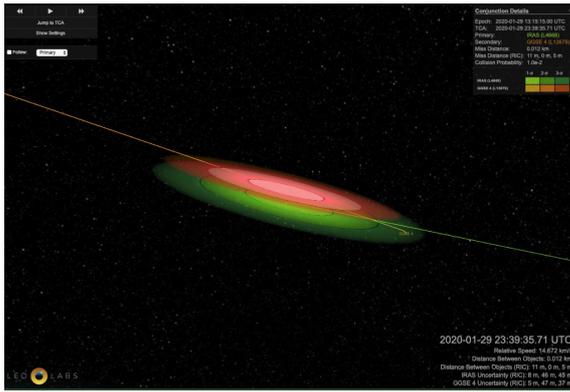
1. 宇宙機の所有者、運用者及び利害関係者は、飛行安全性と衝突回避に関連する情報を交換する必要がある。
2. 打ち上げに係るサービス提供者を選択する際、宇宙事業者は宇宙環境の持続可能性を考慮する必要がある。
3. ミッション及びコンステレーションの設計者並びに宇宙機の運用者は、宇宙機、コンステレーション及び／又は宇宙機団について構造及び活動の概要を設計する段階において宇宙の安全を優先するべきである。
4. 宇宙機の設計者と運用者は、成功裏に廃棄する確率を 95%とする等のベストプラクティスを満たすように宇宙機を設計すべきである。
5. 宇宙機の運用者は、宇宙環境の持続可能性を向上するような宇宙活動のコンセプトを採用する必要がある。

これらのベストプラクティスの遵守に係る検証は行われない。また、規制措置について、強制的な履行や勧告実施や勧告ではないことを明確にするため「すべき (should)」や「努力する (strive for)」等の文言が全般にわたって使用されている。

それにもかかわらず、本件文書は、特に軌道デブリを懸念している業界からの最も強力な言葉である。SSA は、この文書の参加者自身が作成したベストプラクティスを遵守することについて、参加者の間での「ピアプレッシャー」与える役割を有する可能性がある。

4.1.5 全体的な教訓

これらガイドライン、プラクティス又は基準は、いずれも現在は（法的拘束力を有さない）任意によるものであり、これらの実施について、より優れた SSA アーキテクチャーを直接的に必要とするものではない。しかし、宇宙における責任ある行動を監視することへの関心とその理解は高まっている。2020 年 1 月、LeoLabs 社は、2つの機能していない衛星が相当程度近接することを公表した⁷。この公表は、マスコミや世界からの関心を集め、透明性の高い宇宙環境の整備と宇宙活動の効果的な監視において、SSA の有する価値を証明した。



図表 4-4 : LeoLabs 社は、SSA レーダー入手した接近を一般に公表し、デブリ低減に係るプラクティスについてのグローバルな対話を開始した⁸。

4.2 ビッグデータの利活用

ボリューム、距離と速度、多様性がデータ管理の特徴である⁹。大量で膨大な量の情報を収集するという SSA の性質上、この3つの点は広く浸透している。現時点では、民間事業者、政府、学術機関等 SSA データのソースには様々なものがある。データは様々な方法で収集、処理、共有され、視覚化される。今日の SSA コミュニティにとって大きな課題は、これらのデータ・ソース間の接続に一貫性を欠いていることにある。SSA の課題が「単なる」ビッグデータ上の課題であれば、Google 等のソフトウェア及びコンピューター企業は、機械学習の技術を融合した上で適用し、そこから貴重な情報を収集することができる。今日、現実の SSA 市場は、まだその段階からは程遠く、各サービス・提供者（サービス提供者）内でそれぞれの理解を積み上げているものの、相互の比較は行われていない。

“Big data is a lot of data that's very different. That's what we need.”

-- Dr. Moriba Jah, UT Austin

“So we need to create a big data problem, and then we should be able to look at information giants like Google, Amazon--and see how do they group together massive amounts of different types of information and link these, and go from data to discovery” -

-- Dr. Moriba Jah, UT Austin

4.2.1 地球観測におけるビッグデータ利用からの教訓

- 米海洋大気局（NOAA）が大量の気象データを処理する方法上の教訓は、SSAアーキテクチャーにも適用できる。
- エンドユーザーはクラウドを介してデータにアクセス可能。
- ユーザーはデータを引き出してクラウド外で操作できるが、元のデータは変更できない。

宇宙データの問題の一部は、共通点のないデータの管理及び処理並びに課題をクラウドベースで実行可能な「ビッグデータ」の問題に移行することで、ある程度改善されてきてはいる。SSA コミュニティにとって参考となる重要な例は、地球観測データの蓄積、特に NOAA によって行われた気象モデリングである。今日のほとんどの天気予報は「アンサンブル学習」と呼ばれるアプローチで処理される。このアプローチでは、多くの異なるモデルが評価を行う中央ハブに融合され、それぞれのモデルに関連する現象論とバイアスが考慮されている。例えば、あるモデルは、嵐をその発生初期段階において観測し、追跡することを得意とするが、別のモデルは、ハリケーンのような嵐が外洋上に存在する時点を得意とし、また別のモデルは海岸に到達した時点での観測・追跡を得意とする。政府のクラウドは、これらのモデルの間の調整役となり、こういった業界が有するそれぞれの強みをフォーラムとして、とりまとめている。

この構造には、エンドユーザーも運用上の利点を見出している。NOAA では、クラウドベースのアンサンブル・モデルに移行する以前は、地域の天気予報士は、持続不可能で緩慢なモデルを使用していた。個々のユーザーは地域での天気予測を実行するために、政府が運営するスーパーコンピュータからデスクトップに連邦気象モデル全体をダウンロードする必要があった。NOAA が「公式」政府クラウドと民間のクラウドを運用するクラウドベースというアプローチをとることにより、エンドユーザーは、より機敏なアーキテクチャにアクセスできるようになった。厳格なインターフェイスのルールを適用することで、ユーザーの経験値は向上する。つまり、商業的なユーザーは、政府が保有するクラウドからデータを引出し、自身のクラウドに組み込むことができるが、商用ユーザーは、政府が提供するデータを政府のクラウドから引き出して自分のクラウドと融合できるが、政府のクラウドに対して（商業的なユーザーの）データが戻ることはない。その代わりに、融合され、検証された民間から提供されるデータは民間のクラウドから入手可能である。

このようなアンサンブル学習アプローチが成功するかどうかは、データを様々な角度から検討すること、取り込まれるデータの検証を行うといった文化を育むことができるかに大きく依存する。政府のデータを民間のデータと比較したり、事実確認を行うことで、全ての運用者とプログラム担当者は、データの齟齬がどこで生じたのか、また、それぞれの関係者がキュレーションと分析段階にどのような想定を置いているのか等についてより明確な理解を有することができる。この方法では、より幅広いアーキテクチャーの構築に向けて、新たな視点並びにデータ形式に対する応答性及び適応性を身に着けることが可能になる。現在のクラウドベースの気象モデルは、この方法で運用されている。政府モデルが特定の気象現象を検出しない場合、商業提供者はデータについての分析を行い、そのイベントが見逃された理由

を理解し、様々なデータの考慮が確保されるような新しいアルゴリズムを構築する。一度実証実験と検証をしまえば、新しいアルゴリズムをモデルに組み込むことで、エラーの再発を防ぐことができる。ピアレビューは、このように政府の能力を向上させると同時に、革新的な民間のプロダクトにも繋がっていく。

他の商業 SSA データ提供者や他国が、新しい形式や新しい型のセンサーによって SSA データを提供し始めると、（気象予報と）同様のアンサンブル学習アプローチを採用する SSA クラウド・アーキテクチャーが登場してくるだろうことは想像に難くない。これは、現時点での米国商務省の OADR 事業の枠組みが持つ最終的な目標である。

4.2.2 新しい SSA 技術のビッグデータへの取り込み

- SSA には精査を要する多くの技術的な傾向がある
- その傾向の多くは、分析ツールとデータ管理に関連しているが、SSA の全体にまたがっている。

運用中の衛星とデブリの数が増加し、同時に政府、学术界及び商業提供者の SSA のナレッジベースが拡大するに伴い、議論に値するような技術的な傾向も出てきている¹⁰。

日中に行われるイメージング

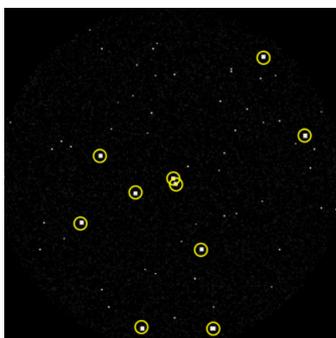
日中に行われるイメージングは、これまでの夜間のみ光学センサーよりも多くの物体追跡の機会を提供できるため、より容易に利用可能な SSA 技術として浮上している¹¹。レーダーシステムの構築は複雑で高額となる可能性があるが、日中のイメージング・システムは地上の光学カバレッジでは足りない部分を埋めることができ、これにより衛星の管理を維持できる。日中の衛星の画像化に使用される重要な技術は、短波赤外線センサーと高度な画像処理アルゴリズムである。Numerica 社は最近、SSA サービスに日中の衛星追跡能力を提供し始めている。最近では、これを更に発展させるために米国空軍の「スペースピッチデー (Space Pitch Day)」で 75 万ドルを獲得した¹²。

補償光学

地上の光学センサーは、大気の乱流に影響されるという性質があり、ぼやけた画像が生成されることがある。補償光学系は波面センサーを使用してこの摂動を検出し、クローズドループ制御がリアルタイムで誤差を補正する。補償光学の研究は長年行われてきたが、センサーへの応用はあまり普及しなかった。補償光学は複数の米国空軍の中小企業技術革新研究プログラム (SBIR) の対象となっている。補償光学研究は小さな物体デブリ修復とも統合されている¹³。

スタートラッカー

市販のスタートラッカーは、偶発的な SSA（星を追跡する際に二次的に収集される SSA 観測）のソースとして考えられている。これらのセンサーは、ほぼ全ての衛星に搭載されており、姿勢決定に使用され、地球から遠ざかっている¹⁴。このような概念を使用する場合、SSA システムに入力する SSA 画像の多大な量のデータを提供できる。



図表 4-5: A simulated image showing the location and brightness of objects in the field of view of a startracker¹⁵

GNSS 信号を使用したデブリ追跡

GNSS 信号はレーダー反射器として使用することが可能であり、低地球軌道上の小さなデブリを検出できる。信号は豊富であるが、宇宙空間を走査するために必要となる処理能力は法外な金額となり得る¹⁶。にもかかわらず、この方法は、宇宙空間における物体を検知し、SSA システムへの独自のインプットを行うための信号情報を活用する具体的な例であり、今後研究が進んでいく分野である¹⁷。

進化するモデリング

SSA 情報は、物体が空間でどのように挙動し、物体が周囲の力によってどのように摂動するか、実際にどの程度宇宙が混雑しているか等の複数のモデルに基づいている。これらのモデルは、SSA プロダクトをより正確にするために、より正確で新しい情報で常に更新されている。一部のモデルはプロダクト化に向け機が熟している。例えば、空間内の物体は様々な複雑な形状であるにもかかわらず、球体としてモデル化されている¹⁸。これによって、そのような物体について予測される挙動の評価に影響することから、研究対象ともなっている。

タスクの自動化

SSA プロセスにおける自動化の最も一般的な使用例の 1 つは、センサーのタスク処理である。本調査の実施のために行われたインタビューでは、センサーネットワークは、タスク化する機能が自動化されているという回答が複数あった。自動化による利点としては、天候や事象がタスクに影響を与える可能性も含む形で、センサーの時間割り当てについて最適化することが含まれることである。軌道上衝突回避のための自動化も開発されている。ESA の CREAM プログラムは、宇宙機運用者をサポートするため、衝突回避アクションの自動決定、計画及び実行を行うべく開発さ

れている。このテクノロジーは回避プロセスを加速し、衛星に事前に保存されたアルゴリズムを使用して、決定からイベントまでの時間を最小化する。実証開始は2025年を予定¹⁹。SSAチェーンの自律性は、計算、メモリー及び通信量が軽量であれば、柔軟性と速度を実現することが可能²⁰。

宇宙物体の特性評価

宇宙物体特性評価 (SOC : Space Object Characterization) は、以前は政府による評価であったが、商業利用をサポートする上でも役に立つ。姿勢検出、影、形状、アルベド、劣化及び宇宙物体の多くを決定するのに役立つ SSA に特化した測光、干渉測定、分光法、ライトカーブ分析等といった科学技術に関心が多く集まっている。

人工知能、ニューラルネットワーク及び認知融合

研究上及び新しい使用において最も一般的なトピックの1つは、ITの進歩と SSA が遭遇するハードデータの問題を組み合わせ、意思決定を行うための豊富な情報プロダクトを引き出すことである。観測の関連付け、マヌーバ検出、物体の特性評価は全て、これらの手法の恩恵を受ける²¹。

クラウドコンピューティング

セクション1で説明したように、クラウドを介してデータを保存し、データにアクセスすることは、多くのユーザーの間でデータを迅速に格納し、共有する一般的な方法になりつつある。SSAの専門家は重複性を理由としてデータをローカルにバックアップすることを必要としているが、商業主体及び政府機関のいずれもクラウド・コンピューティングを利用している。

Comparative SSA 他との比較

多くの SSA データセットで見られる問題の一つに、宇宙における物体の位置についての異なる解をどのように比較するかがある。学術機関と民間 SSA 提供者の双方が、データ同士を比較する手法を開発するための投資を行っている。そのような開発の1つに、テキサス大学オースティン校の Astriagraph という3つの層を持つナレッジ・グラフ・データベースがある。3の層とは、SSA 情報に関する様々なソースからのデータの層、データをモデル化するグラフィカル・データベースの層、そして情報を要求及び受信できるクエリー (注: データベースの検索で、指定された条件を満たす情報を取り出すために行われる処理の要求) の層である²²。

市民 (アマチュアによる) 科学とクラウドソーシング

アマチュアである市民のコミュニティは、SSAにおいて常に一定の役割を果たしてきた。そのような人の多くは、政府のシステムと同程度に軌道上のイベントを認識している。市民でも利用可能な精巧な望遠鏡装置と軌道上の物体を追跡する愛好

家のネットワークにより、市民による観測も情報として取り込んでいく機会が存在している。アマチュアによる科学的調査及び研究の実践は、何年か前から、宇宙ベースの地球観測の要素となっており、現在ではそれらの研究を SSA の「クラウドソース」に組み込む努力がなされている。そのうちの一つの取り組みとして、Consensys 社がイニシアチブをとる TruSat がある。「TruSat は、衛星の軌道位置に関するデータをクラウドソーシングし、検証するように設計されており、振興の持続可能性に関する基準に対する軌道行動の測定に使用できるローバルに信頼のある情報に自由にアクセスすることを可能とする。TruSat のオープンセンサーアーキテクチャーは、双眼鏡やスマートフォンアプリを備えた市民衛星観測者から大学の観測所まで、あらゆる個人又は組織からの衛星観測データを受け入れ、地球の複数の地点からの衛星観測を軌道予測に自律的に組み立てる」²³

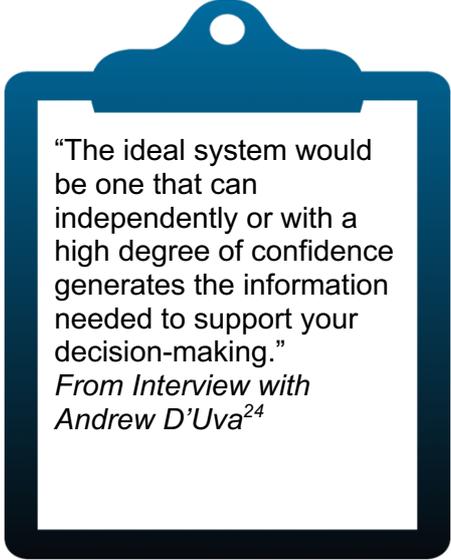
4.3 効果的な SSA システムの要件

- 効果的な SSA システムは、意思決定に係る情報を提供し、関係性を強化し、経済成長をサポートする。
- SSA システムは、正確かつタイムリーであって、十分なカバレッジを持つプロダクトやサービスを継続的に提供する。また、多様なインプットを有し、拡張性があり、また、強力な処理能力を有する。更に研究を通じて継続的にシステムを改善していく必要がある。
- SSA システムから生じるデータ、プロダクト、サービス及びプロセスは信頼性が高い必要がある。
- 効果的な SSA システムは、既存のシステムを作り替える必要はないが、利用できる商業的な能力を活用してその準備を加速し、エンドユーザーを念頭に置いて構築されており、SSA 人材の蓄積を促進する。

この調査では、インタビューと文献調査を通じて、最適な SSA システムの持つ特徴を特定した。最適なシステムとは、システムのエンドユーザーのニーズに依存することから、現在及び近い将来（10年後）のニーズとして特定された最も一般的な特徴を以下に示す。これらは意思決定に係る情報、関係性の強化及び経済成長の支援に焦点を当てている。

4.3.1 意思決定に係る情報の提供

最適な SSA システムが持つ最も重要な特徴の 1 つは、意思決定に使用できる重要な情報を提供することである。衛星を移動させる必要があるか？保険をかけた衛星に何が起きたか？その太陽イベントは運用にどの程度影響するか？このような問に対して、質の高い SSA 情報に基づいて意思決定を行うことが可能である。したがって、理想的なシステムとは、意思決定を支える必要な情報を提供するために、独立した、又は信頼性が高いものである必要がある。



“The ideal system would be one that can independently or with a high degree of confidence generate the information needed to support your decision-making.”
From Interview with Andrew D’Uva²⁴

意思決定を可能とするような SSA を提供するために、考慮すべき要素がいくつかある。

正確かつタイムリー

SSA データは、精度と共分散（不確実性の定量化）に重点を置いている。センサーから最終プロダクトまでのプロセスのバイアスを減らすことにより、より正確なデータを生成できる。十分な観測を行って頻繁に見直しを行うことにより、軌道決定プロセスの精度を確保することができる。共分散情報を含めると、衝突の可能性を特定し、接近の信頼度を高めるのに役立つ。最後に、最も正確な天体力学モデルを使用することは重要ではあるが、その場合データ処理の負荷が重くなる。

正確でタイムリーな SSA データの主な特徴：

- 多くの宇宙物体観測結果を収集している
- 一つの宇宙物体の観測結果を頻繁に収集している
- 軌道遷移するために特別な摂動天体力学ソフトウェアを使用する
- 正確なタイミングソースを使用する
- 共分散情報が生成されるようにする
- SSA プロセス全体のバイアスを減らす

軌道を適切にカバーする必要がある

地理的に多様なセンサーネットワークは、好ましい幾何学を持ち、物体の全軌道経路全体で収集できる観測値を生成する。一部の高度楕円軌道（モルニヤ軌道等）には、南半球の近地点と北半球に高い範囲がある。海上に再突入するデブリ低減技術により、衛星運用者がミッションの最後で大気圏再突入による燃え尽きさせるた

め、南近地点の楕円軌道を作成することがより一般的になる²⁵。顧客が1つの軌道域に固有である場合、軌道領域がセンサーネットワークから表示可能な適切なカバレッジであることに注意する。

適切なカバレッジの主な機能：

- LEO 及び HE0 物体の南半球カバレッジ
- 静止弧の完全な可視性
- 深宇宙 (> 225 分) 及び LEO カバレッジ
- 追跡の永続性 (1 日当たりの複数の通過/追跡機会)

インプットの多様性を有している

インプットの多様性は、貴重な情報を作成するための豊富なデータにつながる。たとえば、光学センサーからの角度データとレーダーデータからの距離測定値を融合することにより、より正確な解決策が決定され、回転率等の物体の他の特性が明らかになる²⁶。最新の SSA システムは、単なる観測データ以上のものを処理できるが、多くのソースからの融合と処理が可能である。

インプットの多様性の主な特徴

- 複数のタイプの SSA インプット (光学、レーダー、レーザー、SWIR、RF 等)
- 様々な形式の異種データを取り込むことができる

相互運用性、モジュラー、保護及び拡張性

優れた SSA システムは、他のシステムとインターフェースで接続することが可能であり、不正アクセスやデータの破損を防ぐために適切なセキュリティ対策を使用する。容易にアップグレードが可能。ソフトウェアのモジュールは更新を容易にするために交換可能であり、拡張性を可能とするためシステムにモジュール性が組み込まれている。システムは新しいフライトプロファイルを処理でき、データ削減と機械学習を活用する。

相互運用性、モジュール性、保護の主な機能：

- アップグレード可能で拡張性がある
- 他のシステム、セキュリティを考慮した設計
- 機械学習と自動化の進歩を活用

SSA システムは処理に重点を置いている (中間の層)

優れた SSA システムは、キュレーションとデータ管理を中核として構築されている。意思決定情報を推進するために、ソフトウェア分析に重点が置かれている。プロセスと分析能力には多くの考慮事項がある。

処理の主な機能：

- データの処理と管理に関する設計
- ソースに依存しない
- 独自の分析能力を備えている
- 各要素又はシステム全体が自動化されている

意思決定を可能とするような情報を与える解を出すために、データをどの程度うまく使用しているか、データを処理、関連付け、融合に長けているか。」 SSA を改善するための中核となる研究の継続

最終的により良い SSA プロダクトに反映されるような応用研究、モデリング、アルゴリズム等今後も引き続き開発が必要な分野がある。このような作業は、未だ競争性を有するような研究であるため、政府による資金提供が必要になる場合がある。

継続的な中核的な研究の主な特徴：

- 学術研究及び政府による研究は、宇宙環境とその物体への影響に関する理解を向上させることを目的としている。

4.3.2 パートナーとの関係性の強化

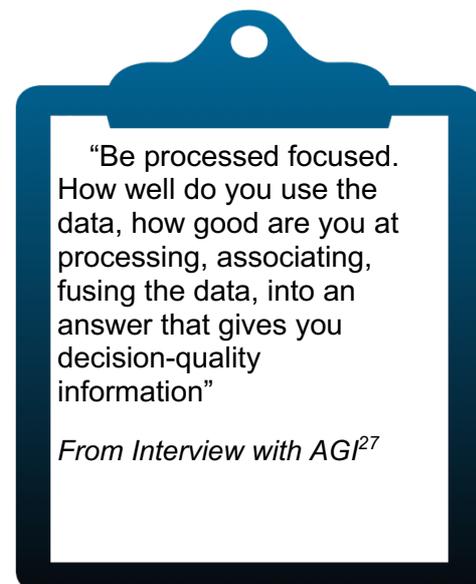
1つの SSA システムが全ての情報を持っているわけではないこと、宇宙における主体の数と種類が増え続けていることから、全ての関係者の利益に資するようにパートナー間の協力関係を構築していくこともまた、現代の SSA システムの特徴である。SSA における関係強化に際して考慮すべき事項として、

SSA のデータ、プロダクト、サービス及びプロセスについての信頼性がある。

SSA データ、プロダクト、サービス及びプロセスに対する信頼性は透明性の要件にも繋がっていく。信頼性がなければ、SSA データが取り込まれて別のシステムに受け入れられることはほとんどない。データ共有契約及びオープンかつ透明性の高い関係性は、独立性を維持しつつも協力的な宇宙活動という目標において、パートナーのデータについて信頼及び透明性を構築することを支援する。

信用と信頼に係る主な特徴：

- データ共有のための協定／契約



- 外交政策
- データ、プロダクト、サービス及びプロセスについて、パートナーへの透明性を確保する

学術的な連携が活用されている

理想的には、SSA は、SSA のデータ、プロダクト及びサービスについて、政府による安全性の確保及び民間向け市場の双方を可能とする。学界との関係は、利益を目的とせず、SSA のデータ、プロダクト及びサービス、商業的には必ずしも成り立たない研究、外交政策についてのピアレビュー及び政策を促す可能性がある。更に、学術的な連携は才能を育成する（この点は後述する）。

学術的な連携の主な特徴：

- SSA 研究のための資金
- SSA データ、プロダクト及びサービスのピアレビューのための連携

4.3.3 経済成長に貢献

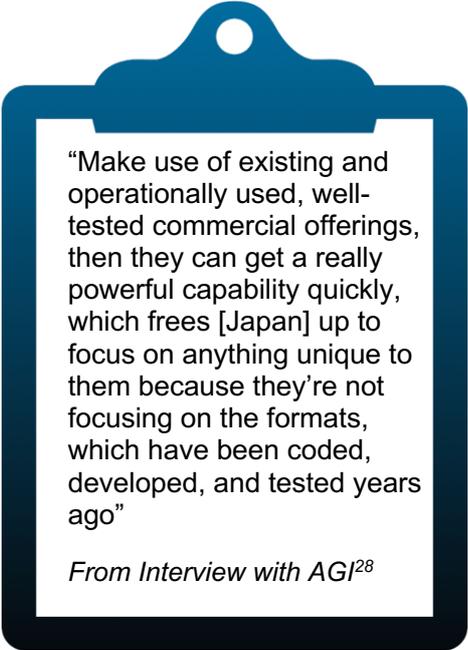
SSA データ、プロダクト及びサービスは、政府との契約関係に大きく依存する新興市場である。そのような市場の目標の多くは、無償で提供されている安全性のための SSA という基準を超えて、SSA プロダクトとサービスのための持続可能な市場を確保することにある。経済的価値を生み出すような SSA システムは、次のことを行う必要がある。

その時点で利用可能な最新技術を活用し、そこから更に成長する。

商業部門は、カタログ化並びに物体、パターン及び異常の検出な定期的なアップデートの点で、政府の保有する SSA 能力を超えている。商業的な SSA システムは、政府又は民間の顧客のニーズに応える独自の SSA 能力を開発し続けると予想されている。新しい SSA システムは、最先端の商業的な能力を活用し、利用可能な既存の能力を超えたイノベーションへの投資に集中することで時間を節約できる。

顧客のニーズに応える

改めて説明する必要までもないが、顧客のニーズを満たすデータ、プロダクト及びサービスの開発をサポートすることは不可欠である。新しい SSA システムを設計する際には、エンドユーザーが何を必要としているかを知ることが重要。例えば、



“Make use of existing and operationally used, well-tested commercial offerings, then they can get a really powerful capability quickly, which frees [Japan] up to focus on anything unique to them because they’re not focusing on the formats, which have been coded, developed, and tested years ago”

From Interview with AGI²⁸

SSA の商業エンドユーザーの大半は、自己が保有する衛星の軌道以外について何が起きているのかについて、心配してする必要は必ずしもない。

才能を開発し、育てる

最適な SSA システムは、多様な学問分野における人材を必要とするが、これらの多くが、技術的にも価値の高い仕事である。教育から雇用機会まで、理想的な SSA プログラムは必要な人材の蓄積をサポートする。

4.4 SSA データに対するニーズ

4.4.1 一般的な衛星における SSA ニーズ

1. 精度

CSpOC は民間事業者に対しては軌道情報を TLE でしか提供しておらず、一般的に TLE には数キロメートル単位で誤差があると言われている。また、不確実性を定量化した指標である共分散（コバリアンス）も提供されていない。つまり、公式には精度情報がないため、誤差にもばらつきがあることを意味している。

宇宙物体間の衝突回避のためには、SSA 情報に誤差があってもその誤差まで考慮して保守的に衝突確率を算出することはできるが、CDM は多くなる。例えば JAXA の運用するマヌーバ可能な 15 の衛星に対して、2018 年度は 16 万件もの CDM が通知された。

2. 更新頻度

TLE の中に最後に観測した日時の記事はあるが、更新頻度は保証されておらず、次にいつデータが更新されるかも知ることができない。そのため、軌道予測が難しい軌道上にある物体や、マヌーバしている物体との衝突回避に懸念がある。

3. 回避マヌーバのための情報

CSpOC から送信される CDM の中には、最接近時間、最接近距離、相対速度、衝突確率等が記載されている。衝突回避のためのマヌーバを行うにあたっては、回避マヌーバを行うべき時間（タイミング）やどの程度マヌーバすべきか（回避制御量）を決める必要があるが、これらの情報は CDM には記載されておらず、また CSpOC から別途提供もされていない。各運用者が分析することや、SSA サービスを購入することも可能だが、そのような能力や予算がない運用者の場合、細かい検討なしにマヌーバすることによって衛星に搭載している燃料を浪費していたり、逆に無事過ぎることを期待して何もせず静観していたりしうる。

4.4.2 軌道上サービス運用者における SSA ニーズ

1. 精度

軌道上サービスにおいては、最終的にはサービス提供側の衛星に搭載した光学カメラやレーダー測距計を使って、顧客側物体を探索して位置を特定する。SSA 情報は、その前段階としてどの軌道を探索するかを決めるために顧客側物体のおおよその位置を把握するために活用している。現在 CSp0C から民間事業者が無償で提供される情報では精度に不足がある。そのため、LeoLabs、AGI、ExoAnalytic Solutions 等民間向けに SSA 情報の提供をしているプレーヤーからの購入が必要となっている。具体的には、状態ベクトル（8 要素 - 位置・速度・太陽輻射圧係数・弾道係数）や共分散のデータや、状態ベクトルを時間軸で提供する軌道暦（例えば過去 1 日、将来 7 日分の予測を提供）などの情報にニーズがありうる。

2. 特性情報

また今後のニーズが出てくる情報としては、故障や経年劣化によって外観が変化していたり、資料の紛失等により外観情報が得られていない物体を捕獲する必要がある場合の形状情報や、制御不能になっている物体の回転速度や回転方向の情報が上げられる。これらの情報があれば、サービス提供側衛星設計時にこの情報があれば、より設計や運用計画立案が可能となるためである。

4.4.3 打上げ事業者における SSA ニーズ

現在国内の打上げにおいては、CSp0C のデータに基づいて、有人宇宙システムとの衝突解析を行っているが、デブリとの衝突回避のための解析は行っていない。今後、特に大規模なコンステレーションが複数の軌道高度で展開されてくると、ロケット打上げ時の飛行安全確保が難しくなってくる。複数の軌道高度にコンステレーション衛星が多数展開されることになると、その高度にある衛星の間をタイミングを見て通過することとなる。各打上げ事業者側で、複数のコンステレーションの最新の位置情報を把握して打上げタイミングを図ることは現実的ではなく、そのような情報を一元的にした SSA プロダクトや、COLA 解析を行う SSA サービスへのニーズがありうる。

4.5 SSA 能力上のギャップと課題

現在の SSA 能力及び効果的な SSA の要件の考え方に基づくと、現在のグローバルな SSA システムには、技術的な及びデータ処理上の観点、政策並び政治的な観点から、以下のギャップがあると言える。

カバレッジ

SSA データの多くは米国から提供される。SSN は、LEO、MEO、GEO 及び HEO の物体を追跡するセンサーのグローバルネットワークである。欧州の SSA アセットも、全

起動に対応している 51 個のセンサーを用い、防衛及び安全保障の面での運用に焦点を当てている。商業用及び学術用のセンサーは、世界中にあり、数百の望遠鏡と少数のレーダーシステムから成る。

カバレッジの範囲だけではなく、軌道全体を網羅し、継続的に維持されることが不可欠である。つまり、軌道の全般にわたって物体を継続して追跡するためには、データが、統合され、地球全体に分配されるようなセンサーを保有することが最終的に望ましい状態と言える。現在の状況はそうはなっておらず、南半球には限られた数のセンサーしかなく、レーダーと光学センサーが最近になってオーストラリアとニュージーランドに設置された。軌道全体にわたるカバレッジを拡大する方法は、南半球を優先してセンサーの数と分布を増やすか、1日に複数の観察機会がある宇宙ベースの SSA システムを採用することである。

感度

感度（追跡する物体のサイズ）について、下の図[X]は、米国の視点に基づいた粒子サイズ/高度についての入手可能なデータ・ソースを示す。LEO では 1mm~1cm、GEO では 10cm~1m の範囲において感度にギャップがある。環境の合理的なモデリングを提供するために、NASA が管理している民生用の機器は、LEO (1000km 以下) 上の粒子サイズについては、合理的な感度を有している。これは、1993 年から 2009 年までのハッブル宇宙望遠鏡に搭載されたレガシー広域惑星カメラ 2 (WFPC2: Wide Field and Planetary Camera-2) に近い²⁹。その他の多数のレーダー (HAX 社、HUSIR 社、ゴールドストーン社のレーダー) も 5 ミリ程度の物体まで観測が可能³⁰。たとえば、HUSIR 社には、約 2000 km 以下の LEO であれば 1cm 未満の物体、国際宇宙ステーション (ISS: International Space Station) の高度 (400km) においては約 5mm までの物体を観測する能力がある³¹。

米国の SNN は、MODEST 望遠鏡と組み合わせ、GEO 上の高度 36,000km において最大 10cm までのサイズの物体を検知できる³²。商業 SSA コミュニティは、LEO レーダーを活用し、数 mm のサイズ (レーザー測距)、1 秒以下及び 20 等級、2.5X10X10cm までの物体を追跡している³³。その他機微な機器も出てきているが、それらは全ての LNT を追跡せず、一部のセンサーは軌道上にある物体のボリュームを継続的に追跡できない場合がある。この例外はスペースフェンスである。スペースフェンスは、50 万個もの物体を新たに米国のカタログに追加することが見込まれる。

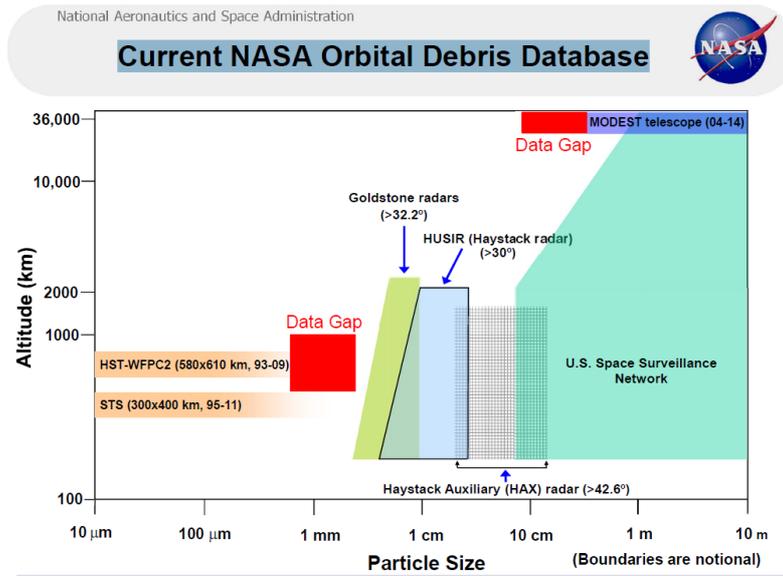


図 X : 現在の NASA の保有する軌道上デブリデータベース

センサーの多様性

小さいながらもセンサーの種類には多様性が増してきており、貴重な洞察を行うことができる。レーダー、レーザー及び RF センサーは存在するが、SSA システムに完全に統合されていない場合がある。これらのシステムをより多く使用し、それらを SSA プロセスに統合すると、より高い精度と様々な新しいプロダクト及びサービスが実現する。

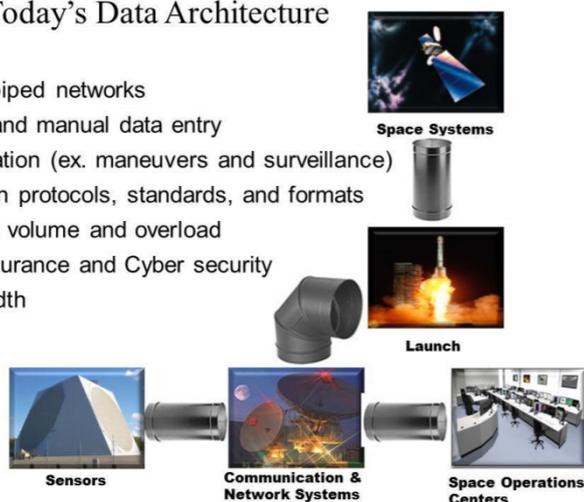
精度と共分散

CSpOC が公に提供するデータに関しては、運用者に対して発行される多数の「誤検知」に基づく衝突警告等の主要な課題がある。多くの課題は不十分な精度と誤差情報に起因するため、一般の人々が CSpOC データの潜在的なバイアスを理解することは難しく、そのためその限界を理解することは困難である。特に 10 年以内に打ち上げられる数千の新しい衛星の中で、又は OOS 等の新しい活動のために、より良いモデリングとアルゴリズムが必要である。米国及び一部の同盟国の場合、米国 DoD は、高精度のカタログにフィードする特別な摂動ソフトウェアを使用している。

高度な伝播技術を使用した商業 SSA は、非常に正確な軌道ソリューションを実現できる。GEO では、0.1 秒角の光センサー（GEO では約 30m に相当³⁴⁾）でこれが実証されており、LEO レーダーでは 50m の精度が実証されている。

Background - Today's Data Architecture

- ★ Multiple stove-piped networks
- ★ Low accuracy and manual data entry
- ★ Gaps in information (ex. maneuvers and surveillance)
- ★ Lack of common protocols, standards, and formats
- ★ Increasing data volume and overload
- ★ Information assurance and Cyber security
- ★ Limited bandwidth
- ★ Unaffordable
- ★ In-flexible
- ★ Untimely



Opportunity for improvement without new, dedicated, or costly sensors

Fig. 1 "As-Is" SSA Data Architecture

図表 4-6 : David Richmond, "Space Situational Awareness Architecture Vision", presented at Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS), Maui, HI, September 2013³⁵

研究とモデリング

位置情報は大きな物体については十分な情報ではあるが、宇宙環境の全体的な理解を深めるのに役立つ非位置情報が不足している。宇宙天気等の宇宙環境現象と軌道上の物体の反応との間の因果関係の特徴付ける共通の基準が存在しないため、物体の挙動の解釈が不明確になる可能性があり、戦略的な安全保障にリスクをもたらす³⁶。コミュニティが単純化された仮定（たとえば、全ての空間物体が完全な球体とする仮定等）に依存しているため、環境を実際に理解する能力が制限される。機械学習、たとえば摂動力に合わせた自動処理アルゴリズムは、この理解を改善するのに役立つ可能性があるが、まだ初期段階にある。

更に、研究者達は、軌道上での活動又は物体の種類の内いずれにも共通の経験的分類法や命名法は存在せず、あいまいな解釈のために正確な規制ガイドラインを台無しにしていることに留意している。³⁶ 昼光イメージングや高 Ghz レーダーなど、物体の行動と軌道体制を特定する能力の向上は、位置情報以外の必要な情報の提供に役立ち、共通の基準と用語の形成を支援する。

新しい軌道環境向けのプロダクト及びサービス

将来の SSA のニーズは、今日のニーズ（及び能力）とは大幅に異なる。LEO をめぐる環境は、LEO 上の通信コンステレーションが数千の新しい衛星を打ち上げ、LEO で運用可能な衛星の数を 1 桁増やそうとしているため、今後 10 年間で劇的に変化する。そのため、デブリの数は引き続き増加していくことに加えて、STM を求める声も増加すると考えている。宇宙環境がますます混雑化している中で、解析が手動で

なされるような衝突回避操作は実用的ではなく、新しい混雑のレベルに対象できる自動化プロセスが必要になる。GEO 環境も変化が予想される。小型衛星が打上げられているため、小型の物体についての SSA データの必要性はかつてないほど重要となってきた。従来の LEO 及び GEO の「軌道ハイウェイ」を超えて、他の軌道（高 LEO、MEO、地球月間軌道等）がより活発に利用されると、異なる SSA 要件と能力を要求される可能性もある。（現在の）標準化された衝突回避サポート、打上げ検出、打上げ前の COLA、再突入等のサービスには限界がある³⁷。その結果、軌道上の活動に係る監視と執行は、自ずと制限される。

RPO 及び OOS といった新しい起動上の活動の登場により、新しい（そして潜在的にはより特注品といった形の）SSA へのニーズが生まれる。通常の軌道を維持している衛星の監視は、軌道面を横切って、他の宇宙物体の近くで移動するようなサービス衛星の監視とは、おそらく相当異なるものになると考えられる。更に、これらの活動を実行する運用者にとっての SSA ニーズも異なる可能性がある。より正確な SSA データを必要となる場合がある。また、規制当局と保険会社を満足させるために、活動に関して独立した検証を行うための第三者による監視も必要になる可能性がある。こういった新しいサービスは、これまでとは異なる SSA 能力を必要とするだろう。

宇宙のプレーヤーの数と種類は、近年大幅に変化しており、今後もその変化が続くと見られている。商業的なプレーヤーは、宇宙機の打上げと運用並びに SSA サービス及びデータの提供において、より大きな役割を果たすことができる。これは、異なる基準や期待に縛られている政府のような伝統的な宇宙ユーザーにとって重要な意味を持つ可能性がある。新しい宇宙システムを打上げる政府の数も大幅に増加しており、これらの新しいプレーヤーはこれまでは存在しなかった SSA のニーズを持っている。関係性の構築、ギャップの充足、負担分担のための新たな機会をもたらす一方で、グローバル化から背を向けるようなナショナリスティックな外交政策の傾向といった地政学的な要因は、宇宙領域への波及効果をもたらすこともあるだろうし、グローバルな規模でのデータ共有と透明性のあるアーキテクチャクチャーに二の足を踏ませる可能性もある。

透明性及び信頼

SSA コミュニティが直面する重要な課題は、データ共有能力の限界に伴う信頼性の欠如である。SSA のための多数国間の協力の可能性についての議論はあるものの、二国間のデータ共有協定の外部では、実際の実験は行われていない。さらに、SSA は大抵の場合は機密情報に該当し、自由に各国と共有することを制限している。このことは、欧州としての SSA のカタログの共有を目指す EUSST 支援枠組み（the EUSST Support Framework）を実施する上での主要な課題の 1 つになっている。現在、各国は、自国のカタログを保持しているが、他の EU 加盟国との間で全てのデータを共有することに躊躇している。例えば、Phantom Echoes 計画を通じたファイブ・アイズ諸国間の SSA 能力の統合や、緊密な同盟関係にあるフランスやドイツ等とのデータ共有協定といった有望な例はあるものの、これらは極めて稀な事例である³⁸。

また、データ管理とキュレーションの実践に関する透明性が欠如している。データ処理・融合のベースとなる仮定や誤差に係る不確実性が理解されていなければ、最終的なプロダクト・サービスへの信頼を得ることは困難である。

共有と相互運用性

現在、政府の SSA システムは依然として国によってその大部分が一元化されており、又、そもそもデータを共有することを目的として設計されてはいなかった。特定のモジュールの更新、協力における地政学的な要因及び商業的な SSA 能力の拡大は改善がなされているものの、データの形式、プロダクトの種類及び現象学の共有について国際的な基準というものは作成されていない。セクション 4.4.1 で説明されている通り、SSA においてこれらの分野での進展は遅かった。ゆえに、「サイロ化された」データリポジトリが生まれ、結果として宇宙空間の測定とモデリングのためのリソースを全体として管理できなくなった。過去 20 年間に構築された商用 SSA システムは、既存の SSA システムよりも高い相互運用性を備えている。しかし、近年になってやっと、政府の政策により、二国間及び多国間でのデータ共有のための協定の実施が促されてきている。米国の例米戦略軍 (Strategic Command) は、2019 年に 100 番目となる二国間データ共有協定への署名を達成した。しかしながら、全般として、政府間のデータ共有が標準化され、堅牢なものとなり、自動化されるためには、まだほとんど何も行われていない³⁹。

衛星を打ち上げる際にロケットステージを軌道に配備する衛星運用者と打ち上げ提供者は、多くの場合、説明的な情報 (例えば、彼らが起動に放出した物体のモデル、寸法及び RF 特性) を、自己が所有するものとみなしておりため、SSA の提供者に公には共有しないことを選択する。安全性の観点からは、このようなことは、活動量の多い起動の「周辺」について、正確かつしっかりした特性を特定するというプロセスの構築を複雑にする。物体の寿命期間の各段階でのデータ共有の増加は、より本格的かつ詳細な活動についての共通認識を形成するのに資することとなり、最終的に宇宙ベースのミッションの各参加者にも資するものとなる。

専門知識

SSA のエコシステムには人材という大きな問題もある。情報の大規模なデジタルライブラリー、特に様々な形式を統合し、異なる文化やニーズを持つ組織で利用されるライブラリーのキュレーションについては、現在の主要な SSA プレーヤーの間ではほとんど存在していない学際的なアプローチが取られる必要がある。社会科学者、人類学者、生態学者、持続可能性の研究者等 SSA 以外の専門家、行動を分類するための一般的な分類法と指標の作成を支援し、多国間の協調の取組のための基礎を据える。

図表 4-7：主要な SSA ギャップ

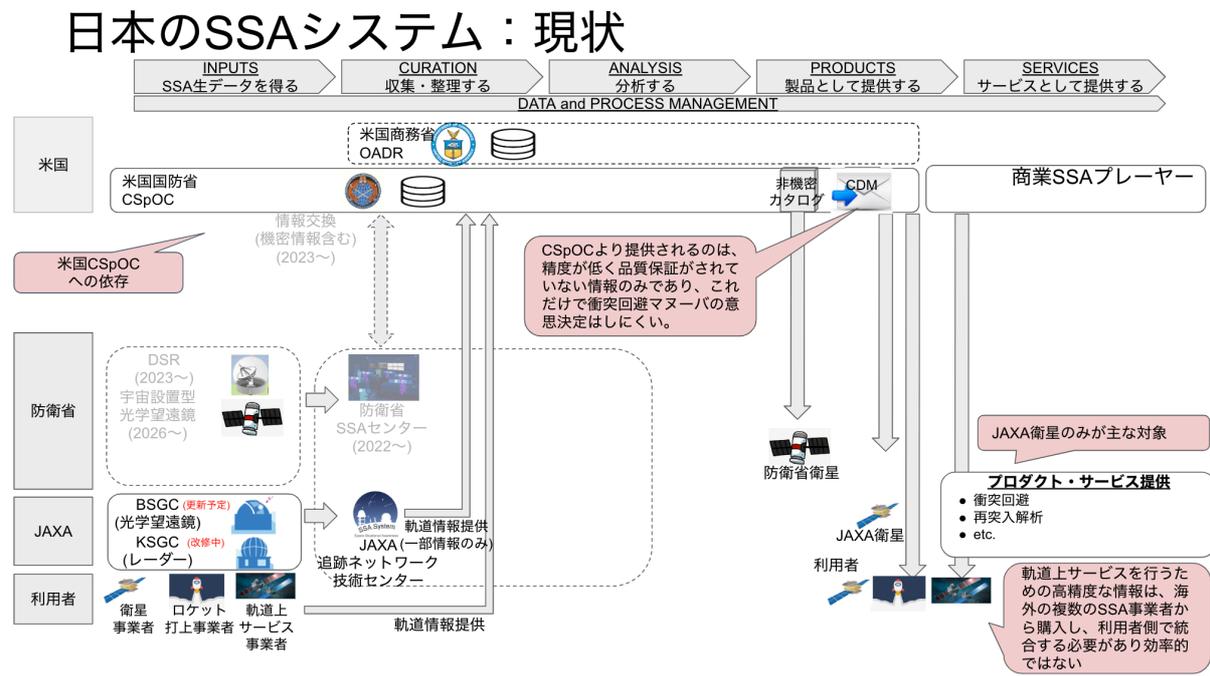
主要な SSA ギャップ	
1-カバレッジ	南半球のカバレッジは大幅に不足。 持続性：秒（昼光-光学）、1日10回（LEO専用）又は毎日・数日ごと（公開カタログ）
2-感度	6mm; LEOで2.5X10X10cm+; GEOで10cm-1m システムはより小さい物体の数を持続的に追跡できない場合がある
3-センサーの多様性	少数のレーダー、レーザー及びパッシブRFシステムをより大きなSSAデータセットに統合する。
4-精度	カバレッジの欠如、追跡の持続性、観測の数、モデリング及び使用されるアルゴリズムのタイプに基づく。RPO等の新しい軌道上活動に適した精度が必要である。 最先端の精度：0.1秒（光学）、VM+20及び<100m（レーダー）
5-研究とモデリング	宇宙環境の現象間の因果関係を特徴付ける共通の基準が存在しない。
6-起動上の新しい環境向けのプロダクト及びサービス	新しい衛星の展開、特に継続的でゆっくりとしたマヌーバを伴う展開を追跡し、それを理解する能力が低い。
7-透明性及び信頼	地政学的レベルでは、多数の政府は、SSAデータとプロダクトを共有するための透明性の構築のための政治的なサポートを欠いている。このことは、起動上の活動が増加し、宇宙領域が一層混雑化するに従い、戦略的安定性を不安定なものとする。
8-共有と相互運用性	技術レベルでは、データ共有に積極的に取り組もうとしている組織には、正確、広範かつタイムリーなコラボレーションを行うために必要な現象論、データ形式、行動規範及びデータアーキテクチャーの調整と標準化を欠いている。
9-専門知識	現在のSSAシステムには、意思決定を可能とするような情報をエンドユーザーに提供できる堅牢なデータリポジトリの設計とそのような実施を支える学際的な方法、研究及び専門知識が組み込まれていない。

4.6 基礎となる国内 SSA データプラットフォーム

4.6.1 日本の SSA システムの現状及び計画

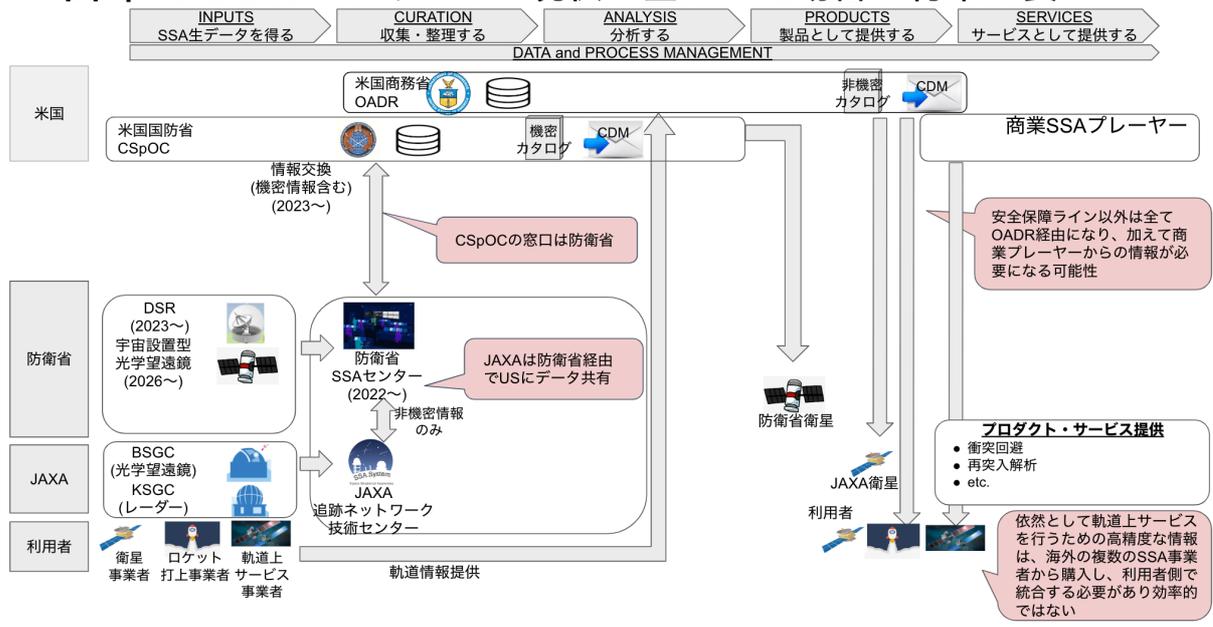
現状の日本の SSA システム

セクション 2.1 で日本の現状の SSA 能力を概説したが、下記は図式化したものである。JAXA が SSA システムを保有しており、JAXA 内に対して衝突回避や再突入のためのサービスを提供している。



2023 年度までには、JAXA の協力を得て防衛省の SSA システムが構築される予定である。それに伴い、日本政府としての CSpOC の窓口は防衛省に統一し、JAXA は防衛省経由で米国と情報共有をすることが想定されている。下記はこの 2023 年度時点で想定されている能力及び体制を示した図である。

日本のSSAシステム：現状に基づいた場合の将来の姿



図表 4-9: 日本の SSA システムの現状に基づいた場合の将来の姿

JAXA は JAXA 衛星の防護、防衛省は JAXA 衛星も含む日本の衛星の防護を目的としている。JAXA から防衛省への KSGC 及び BSGC の観測データ提供等はあるものの、SSA システム自体はそれぞれで構築、運用される計画である。

4.6.2 短期的に構築すべき、基礎的となる国内 SSA データプラットフォーム

日本の SSA システムの向上余地

現状計画されている SSA 能力及び体制でも、宇宙基本計画工程表において成果目標とされている SSA 体制の確立と能力の向上や、日米同盟の強化には一定の寄与がある。しかし、国内の宇宙産業の育成・推進、また SSA 及び STM ひいては宇宙環境保全分野における国際的な立ち位置の形成といったさらに幅広い視点からは、さらなる向上余地がある。

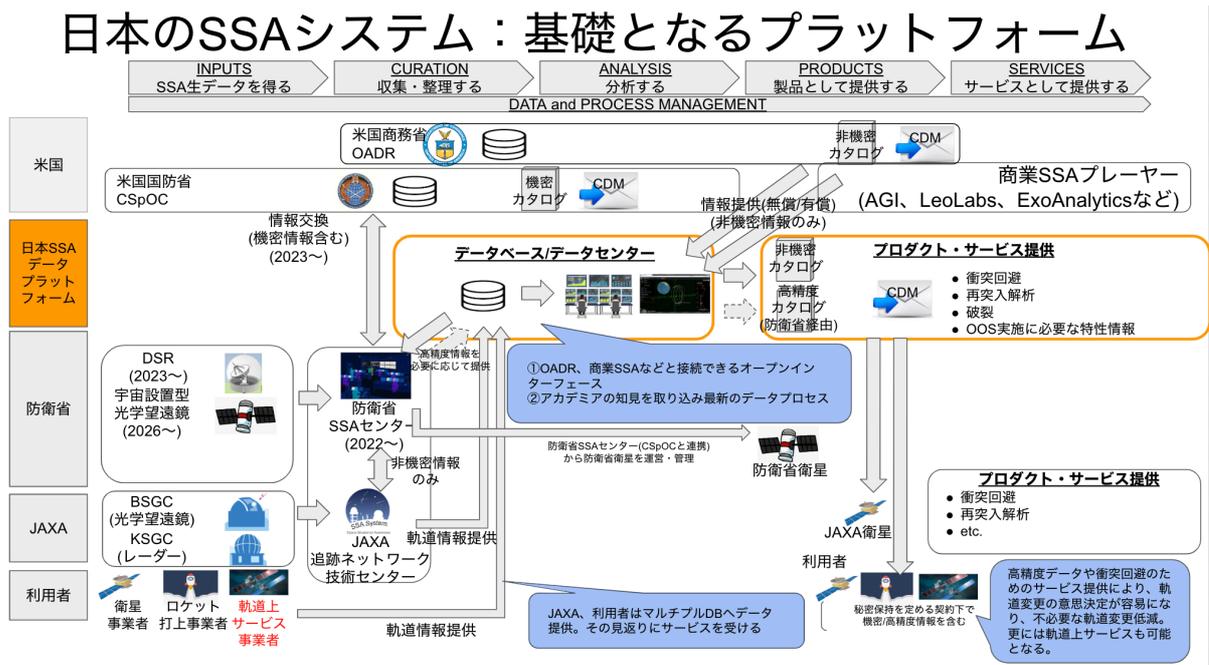
向上余地としては大きく以下の 4 点が挙げられる。

1. [インプット] 高精度情報、品質保証のある情報や現状不足している情報等多様な情報の入手
2. [分析] 解析手法、アルゴリズムの継続的な改良
3. [プロダクト/サービス] 民間事業者へのプロダクト/サービスの提供
4. [データ管理] 外部からのデータ入手を想定したインターフェースや相互運用性の確保

5. [SSA 能力全体] 自立性のさらなる向上

短期的に構築すべき基礎となる国内 SSA データプラットフォーム

これらの向上余地を踏まえて、短期的に構築すべき基礎となる国内 SSA データプラットフォームの案を下記に示した。



図表 4-10：基礎となる国内 SSA データプラットフォーム

現在の想定から大きく異なるのは、防衛省や JAXA とは別に、商業マルチプルデータベース/データセンターを設置している点である。このデータベース/データセンターが国内の民間事業者や商業 SSA 事業者からもデータを入手し、また民間事業者向けにプロダクトやサービスを提供する。

このようなプラットフォームを持つことにより、EUSST のように、データの分析、完全ではないものの自国版のカタログ、そしてそこから自国衛星等のためにサービスまでを一気通貫で行うことができるようになる。民間事業者に対してプロダクト/サービスを提供することにより、国内の宇宙産業を支援することができる。そして、自立的な SSA 能力を持つことによって、宇宙環境保全分野における日本の国際的な立場を強化することができる。

4.7 日本にとっての SSA アーキテクチャーの選択肢

4.7.1 日本にとっての選択肢の検討方法

国内 SSA プラットフォームの中長期的な在り方を検討するにあたっては、複雑かつ相互に作用する複数の変数を考慮する必要がある。プラットフォームの在り方の選択肢を上げるにあたっては、SSA システムの6つのプロセス（インプット、キュレーション、分析、プロダクト、サービス及びデータ管理）のそれぞれについて慎重な意思決定を要することから、選択肢の作成に先立って主に技術的な傾向を調査してきた。そして、短期的に構築すべき基礎的な国内 SSA データプラットフォームの提案を行った。ここからは、国内 SSA データプラットフォームが長期的に取りうる選択肢を、グローバルな技術的、商業的及び政策的な視点も含めて検討していく。

検討の流れ

1. 現状の SSA：グローバルで各国政府及び民間 SSA 提供者は、現在どのような能力を保有しているのか。また、日本の現状（ここでは基礎的なプラットフォームの構築は完了していると想定）はどのようになっているのか。

SSA のデータ・プロダクト・サービスを提供する政府及び民間事業者の現在の能力を把握するために、文献調査や主要なプレーヤー及び顧客に対するインタビューを実施した。

その結果、米国が主導する大規模な政府保有の SSA システムが軍事目的及び安全性確保のための SSA を維持しているのに対して、比較的規模の小さい国や民間事業者は特定の軌道や宇宙物体に焦点を当てたよりニッチかつ顧客のニーズに特化したデータをプロダクトとして提供する傾向があることが判明した。一般的に、軍事・インテリジェンス目的の政府の SSA データは機密情報である。一方で、現在は商業及び政府レベルで、システム構造の近代化、データ収集に関するロジスティクスの改善、更により強固なデータ共有を行うことによって、市場機会を広げるような投資が検討されつつある。

2. 将来の SSA：グローバルな技術動向や SSA に関する国際的なガイドラインを踏まえて将来の SSA はどのようになるか。

国内 SSA データプラットフォームに影響を与える要素を、文献調査やインタビュー及びそれらを踏まえた分析によって検討した。

その結果、大きな流れとして各国政府により SSA についてより広範な情報共有と協力のための初期的な政策目標が立てられ、実験やプロトタイプとなる枠組み構築が行われつつあることが見えてきた。しかし、各国の間での信頼構築において課題に直面していることも分かった。例えば米国では政府主導で UDL や OADR 等の実験的なデータ共有リポジトリが開発されているものの、それらは未だ設計段階に至っていないなかったり、広範囲での実施のために必要となる財政的な支援を得られていなか

ったりする。また技術面においては、データの融合や処理において AI や機械学習を活用する等、SSA システムの特定の要素を自動化するという検討もなされている。

3. ギャップ：グローバルな SSA についての現在のギャップとは？

現状の不足している具体的な要素を特定するために、ギャップ分析を行ない、9 つのギャップを洗い出した。

4. 日本の機会：日本の強みと日本への期待とは何か？

日本が、国内 SSA データプラットフォームを構築するために活かせる地政学的及び外交的な立ち位置についても考慮した。具体的には下記が挙げられる。

a. 米国との密接な関係：

日本は、物理的なハードウェア、データ管理、分析ソフトウェアの面で現在最も強固な基盤を有する主要な SSA プレーヤーである米国との間に緊密なパートナーシップを築いてきた。国内に SSA データプラットフォームを構築するにあたって、米国との関係を活用できる可能性がある。

b. 戦略的な地理的位置：

日本の地理的位置は、センサーのカバレッジを埋める観点から有利である。さらに、日本には、アジア太平洋地域への影響力を有しており、コンソーシアム型のアプローチによって、SSA プレーヤー間の優先順位付けや投資に影響を与えることができる。

c. 多国間の枠組みにおける高い評価

日本は長年、UNCOPUOS、IADC、国際標準化機構（ISO）、APRSF などの多国間の枠組みでのガイドライン・覚書の合意や、共通の研究目標、能力構築の形成に参加している。このような多国間協力への日本の積極的な取り組みは、好意的に評価されている。

d. 持続可能性/環境政策への貢献

日本は、さまざまな業界で持続可能性とグリーンな環境政策を普及するための法律と規制を優先すると主導的役割を果たしてきた。宇宙産業に適用した場合、この見通しは戦略的な優位性を形成する。

5. 日本にとっての選択肢：SSA/STM において、日本がリーダーシップを確立するにはどのようなプラットフォームである必要があるか？

中長期的な国内 SSA データプラットフォームが満たすべき要件を、以下のように定義した。最初の 2 項目は、前述の短期的に構築すべき基礎的なプラットフォームにおいても触れた内容であるが、中長期的にも維持し続けることが望ましいため、再度あげている。

中長期的な国内 SSA データプラットフォームが満たすべき要件

- a. 解析手法、アルゴリズムの継続的な改良
- b. 外部からのデータ入手を想定したインターフェースや相互運用性の確保
- c. アジア太平洋地域でのリーダーシップ発揮：宇宙飛行の安全性と戦略的安全

性に関する日本の優先事項と目標と歩調を合わせつつ、アジア太平洋地域における SSA をめぐる協力について、日本が地域的な影響力を行使してリーダーシップを取る。

- d. 国際的ガイドラインとの整合：国連の LTS ガイドラインの実施や業界全体における持続可能性の確保に整合し、さらにリードする。
- e. グローバルな SSA 能力への貢献：市場におけるギャップを埋め、日本を宇宙安全の革新的な最先端のポジションに置くことにより、グローバルな SSA 能力に貢献する。

これらの 5 つの要件を考慮しつつ、日本が取りうる戦略的な選択肢として後述する 4 つを見出した。いずれも、日本が目指す SSA の方向性に沿うものである。

考慮すべきレバー

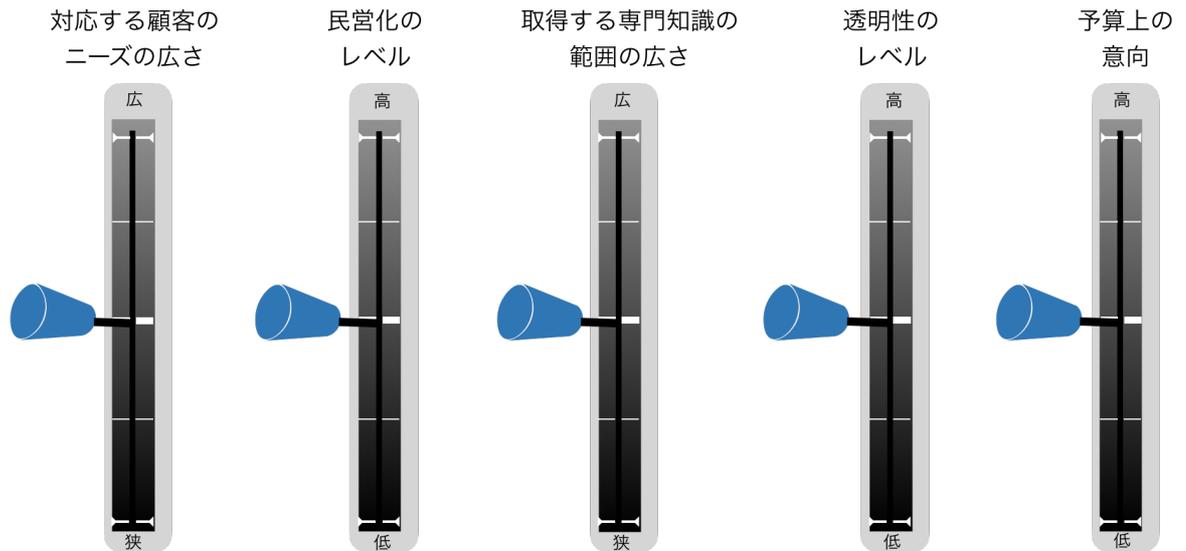
国内 SSA データプラットフォームの在り方を左右する、戦略的な変数である「レバー」として 5 つの項目を定義した。これらの「レバー」は、各選択肢の目指す方向性や焦点をどこに置いているかを反映しており、選択肢の比較や判断の助けとなる。

1. 対応する顧客のニーズの広さ：幅広い顧客ニーズに対応するのか（例えば全ての軌道を対象とする）、限られた顧客ニーズに対応するのか（例えば個々の衛星に照準を合わせる）を示す。このレバーは、日本として日本の SSA システムをグローバルな市場に資するものとするのをどの程度望んでいるのか、グローバルな SSA 市場への日本の関与をどのように考えているのか、ギャップを埋める技術にどのように焦点を当てることができるか、によって異なってくる。
2. 民営化のレベル：民間と政府の間、具体的には民間 SSA 提供者と政府の SSA 機関との間の役割分担を示す。このレバーは、SSA サービス・データを民営化することに政府としてどの程度コミットするか、に左右される。
3. 取得する専門知識の範囲の広さ：国内で保つ必要がある能力がハードウェアのみか、ソフトウェアのみか、又はハードウェア・ソフトウェアいずれもか、を示す。このレバーは、日本が SSA プロセスのうちどこに焦点を当てるか、他国とどのように協力するかによって異なってくる。
4. 透明性のレベル：データプラットフォームのデータを、オープンに共有するのか、データの保護を重視するのか、を示す。このレバーは、SSA を政府内

の機能とするのか、特に安全保障のためのものと捉えるか、民間と提供していくのか、どの程度データ共有するのかによって決まる。

5. 予算上のコミットメント：SSA システムへの短期的及び長期的な予算投入への意向を示す。このレバーは、国内の政策的な必要性やグローバルな SSA への貢献を踏まえつつ、日本政府からの全般的な投資のレベルを決定するものであるからであり、どの選択肢を選ぶかの判断に最も影響力がある。

●
6.



図表 4-11：考慮すべきレバーの概念

次項より、4つの選択肢を提案する。

4.7.2 日本にとっての SSA アーキテクチャーの選択肢

選択肢 A アジア太平洋地域におけるリーダーシップの確立

これは、日本が中心となって、SSA についてアジア太平洋地域の連携形成を目指す選択肢である。グローバル SSA 市場が拡大し続けることが予想される中でこの選択肢を取ることによって、EUSST プログラムを例とした他の地域的なモデルのように、日本が外交的にも経済的にもアジア太平洋地域内の能力構築を進める役割を担うこととなる。

図表 4-12：選択肢 A の概要

<p>どのような既存技術や協力関係に 依拠するか</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 域内のパートナー国との間で、データ共有に係る協定・契約を要する ● 米国のデータ・リポジトリとの相互運用性が必要 ● 他の地域のコンソーシアム及び政府保有の SSA 組織と民間 SSA 事業者との間の対話が必要
<p>どのような先端 SSA 技術が使用 されているか</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 複数の SSA 組織・事業者と連携するため、データ管理と相互運用性に関する先端技術を活用しうる <ul style="list-style-type: none"> ○ 進化するモデリング（域内プレーヤー向けの「アンサンブル学習アプローチ」） ○ （サービス提供の）自動化 ○ AI、機械学習（タスク処理の改善、データ融合） ○ クラウドコンピューティング（最新のリポジトリ・アーキテクチャー、データ共有、処理） ○ SSA データの比較手法（様々な結果の検証とクロスチェック）
<p>国際的なベストプラクティスの実 施をどのように支えるか。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● LTS ガイドラインをサポートしている <ul style="list-style-type: none"> ○ B1: 連絡先の提供宇宙物体と軌道上に関する情報の共有 ○ B2: 宇宙物体の軌道の精度向上軌道情報の共有 ○ B3: スペース・デブリ監視情報の収集、共有及び普及の促進 ○ B4: 制御飛行中の全軌道フェーズにおける接近解析の実行 ○ C2: 宇宙活動の長期持続可能性に関する経験の共有及び情報交換のための適切な新たな手続の作成 ○ C3: 能力構築の促進及び支援 ○ C4: 宇宙活動の認知向上 ● 日本が主導する SSA コンソーシアムへの信頼を構築するためには、いくつかの国に対しては（二国間及び多国間枠組みを通じた）外交的努力を必要とする
<p>効果的な SSA システムと見なされ る理由とは</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 域内の SSA データ・プロダクトを一元化されたハブに取り込むことで、共通の運用状況についての認識

	<p>が可能となり、より質の良い分析が容易になる。結果として、得られるサービスの信頼性が高まり、意思決定を可能とするような質の情報がエンドユーザーに提供される</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 日本は域内における主要な顧客となり、国内及び域内の商業 SSA の成長とイノベーションを促進
日本の強みをどう活かすか	<ul style="list-style-type: none"> ● 戦略的な地理的位置：アジア太平洋地域のパートナーが保有する物体の観測と追跡に注力することにより、地域内の宇宙安全保障のための努力と整合性をとる ● 米国との密接な関係：米国及びその他の SSA 事業者集団との連携と関与を強化する
日本のリーダーシップ発揮にどう繋がるか	<ul style="list-style-type: none"> ● 日本の SSA の専門家が能力構築に関与することで、域内のプレーヤーとの協力関係を強化することになり、SSA 研究とイノベーションにおける日本の役割を更に強固にする
弱点は何か	<ul style="list-style-type: none"> ● 大規模な予算的なコミットメントが必要 ● 域内の SSA プレーヤーとの間で政治的な交渉及び能力構築のための取り組みが必要
どのようなギャップを埋めるか	<ul style="list-style-type: none"> ● 透明性及び信頼 ● 共有と相互運用性 ● 専門知識

選択肢 B 宇宙物体特性評価 (SOC : Space Object Characterization) のエキスパート

これは日本が最先端の革新的な SSA 技術に投資し、独自のセンサーでグローバルな SSA 能力のギャップを充足するという選択肢である。日本は、ニッチながらも専門性の高い SSA サービス、宇宙における事象や物体の特性といった専門知識の面で高い評価を得ることができる。豊富な位置的な情報を利用することにより、宇宙機が運用される場所のみならず、なぜ、何を、誰が宇宙機を運用しているのかを把握することができる。このような情報は、現在グローバルに見ても不足している。SOC 能力を開発することは、基本的な飛行安全性確保に留まらず、同盟国と関係者に価値をもたらすニッチで魅力的なサービスになり得る。このセンサーからのデータプロダクトとサービスは、既存のデータリポジトリと公開 SpaceTrack カタログ等のカタログに直接提供したり、将来的に構築が見込まれる OADR 等のオープン・アーキテクチャに通知したりすることができる。

図表 4-13：選択肢 B の概要

<p>どのような既存技術や協力関係に依拠するか</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 技術面では、特性評価という既存のギャップを埋める新たな分野を開拓することになる ● OADR 等の米国システムとの相互運用性 ● パートナーと共有が可能（データ共有協定は必要）
<p>どのような先端 SSA 技術が使用されているか</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 宇宙物体の特性評価 ● 日中の撮像 ● 補償光学 ● 進化し続けるモデリング ● タスクの自動化 ● AI、機械学習 ● クラウドコンピューティング
<p>国際的なベストプラクティスの実施をどのように支えるか</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● LTS ガイドラインのサポート <ul style="list-style-type: none"> ○ B1: 更新された連絡先の提供及び宇宙物体と軌道上事象に関する情報の共有 ○ B2: 宇宙物体の軌道データの精度向上並びに軌道情報の共有の実行及び実用性の強化 ○ B3: スペース・デブリ監視情報の収集、共有及び普及の促進 ○ C2: 宇宙活動の長期持続可能性に関する経験の共有及び情報交換のための適切な新たな手続の作成 ○ C4: 宇宙活動の認知向上 ● CONFERS の原則とプラクティスをサポート
<p>効果的な SSA とみなされる理由とは何か</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 独自のセンサーの統合は、物体の行動についての特性評価に関するギャップを埋めるためのものであり、エンドユーザーに対してより精度の高い意思決定を行うための情報を提供する既存の SSA 分析を補完することができる ● このデータのギャップを埋めることにより、日本が新しいパートナーシップやデータ共有協定に関与して米国の SSN にデータを送付することとなり、米国との関係を強化できる
<p>日本の強みをどう活かすか</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 多国間の枠組みにおける高い評価：新しい特性評価の仕組みに向けて取り組むことで、日本が地域のリーダーとなる
<p>日本のリーダーシップ発揮にどう繋がるか</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● センサーが保有するギャップを埋めるような特性評価のデータにより、日本は、軌道上サービス、ADR、宇宙空間での製造等に寄与する新しい SSA の提供を主導することができる
<p>弱点</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● CDM などの日々の基本的な SSA サービスについては、既存の SSA パートナーシップに引き続き依存することになる

どのようなギャップを埋めるか	<ul style="list-style-type: none"> ● カバレッジ ● センサーの多様性 ● 新しい軌道環境に対応するプロダクト及びサービス ● 専門知識
----------------	--

選択肢 C 民間型の中核的研究拠点 (CoE)

これは日本が支援する形で SSA の中核的研究拠点 (Center of Excellence : CoE) を設立する選択肢である。CoE の中心機能は、世界から専門家が集まり、革新的な研究に取り組み、共通のストラクチャーの下で協力し、ベストプラクティスを構想するための場として機能である。専門家はそこで得た洞察を自国に持ち帰り、世界中の政府の SSA 事業の政策決定者に情報を共有する。日本が主導して、多数国間の、かつ、排他的でない CoE を、短期的にも長期的にも、学術研究者と民間 SSA 事業者が最先端の研究を行う場を提供する。これによって、研究者が能力のギャップを埋めるための提案をし、データ分析と処理方法を検討し、センサー技術を改善していくオープンな環境を作る。

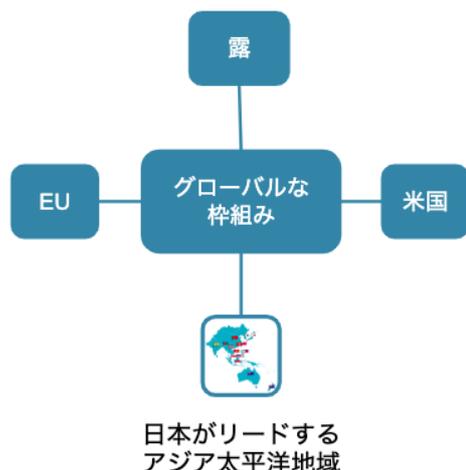
図表 4-14 選択肢 C の概要

どのような既存技術や協力関係に依拠するか	<ul style="list-style-type: none"> ● Astriagraph や OADR などの新しいデータリポジトリアーキテクチャーの実験モデルから得られた情報と教訓 ● 研究及び商業的イノベーターへの依存
どのような最先端の SSA 技術が使用されているか	<ul style="list-style-type: none"> ● SSA データの比較手法 ● クラウドコンピューティング ● 人工知能、ニューラルネットワーク及び認知融合 ● 市民の科学とのクラウドソーシングの可能性 (実験的)
国際的なベストプラクティスの実施をどうサポートするか	<ul style="list-style-type: none"> ● LTS ガイドラインのサポート <ul style="list-style-type: none"> ○ B1: 更新された連絡先の提供及び宇宙物体と軌道上事象に関する情報の共有 ○ B2: 宇宙物体の軌道データの精度向上並びに軌道情報の共有の実行及び実用性の強化 ○ B3: スペース・デブリ監視情報の収集、共有及び普及の促進 ○ B5: 打ち上げ前の接近評価に向けた実用的な取組みの確立 ○ B9: 宇宙物体の非制御再突入に伴うリスクを取り扱う対策 ○ C2: 宇宙活動の長期持続可能性に関する経験の共有及び情報交換のための適切な新たな手続の作成 ○ C3: 能力構築の促進及び支援

	○ C4: 宇宙活動の認知向上
効果的な SSA とみなされる理由とは何か	<ul style="list-style-type: none"> ● 学术界及び研究との連携を活用して、インプットの多様性を重視し、信頼を構築する ● 日本が革新的な事業を実施する。それによって、民間事業者を活性化し、意思決定を行えるようなプロダクト・サービスを提供するための優れた設計に結びつく。
日本の強みをどう活かすか	<ul style="list-style-type: none"> ● 多国間の枠組みにおける高い評価：日本は、多国間組織が抱える問題を解決するためベストプラクティスを集約する上で経験及び高い評判を有している
日本のリーダーシップ発揮にどう繋がるか	<ul style="list-style-type: none"> ● 日本が、SSA センサー、データ管理と処理方法、政策及び規範の作成のための学術的及び一般的な研究開発やイノベーションのための世界的なセンターとなる
弱点	<ul style="list-style-type: none"> ● 基本的な飛行安全のための SSA サービスの米国への依存が継続する ● 複数の国の CoE への参加が必要
どのギャップを埋めるのか	<ul style="list-style-type: none"> ● 精度と共分散 ● 研究とモデリング ● 透明性及び信頼 ● 共有と相互運用性 ● 専門知識

選択肢 D グローバル SSA リポジトリ（2040 年に向けて）

これは、グローバルな SSA 能力、協力、透明性の向上を促進する上で、アジア太平洋地域をとりまとめて主導的な役割を果たすという選択肢である。将来的に、現在の Space Data Association (SDA。静止衛星運用者からが提供する軌道情報を集めて共有している) のようなグローバル SSA リポジトリにおいて、アジア太平洋地域のまとめ役となることを狙う。選択肢 A「アジア太平洋地域におけるリーダーシップの確立」で提案した物理的なインフラの構築の多くに関与し、その能力を活用して、アジア太平洋地域が EUSST、米国、ロシア及び新興の SSA プレーヤー等とデータを共有する際に地域を主導する役割を果たす。



図表 4-15 : グローバルな SSA リポジトリの枠組みのイメージ

この選択肢は、SDA 等のオープン・アーキテクチャにおけるデータ共有の形式を参考にする。また、Astriagraph 等の学術研究のプロトタイプが持つデータ融合のイノベーションも参考となる。

この選択肢の実現には、多大な外交的努力を必要とし、完全に実施されるまで 10～20 年程度の長い期間を要する。しかし、現在の SSA 能力のギャップを埋めるためには理想的な型の一つではある。地政学的な課題はあるものの、全ての主要な SSA プレーヤーに対し最大限の恩恵をもたらし、宇宙空間の安定的な利用にも大きく貢献する。UNCOPUOS の下で作成したされた LTS ガイドラインのように、多国間枠組みにおける長期間に及ぶ取り組みは、この選択肢に参加する者に対して最大の利益をもたらす。最終的には強固で、正確でタイムリーな SSA/STM の促進のための非常に重要な基盤となる。

図表 4-16 : 選択肢 D の概要

<p>どのような既存技術や協力関係に依拠するか</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● データ共有に係る協定、域内のパートナー及びグローバルなコンソーシアムの枠組みとの間の相互運用性 ● 標準化された方法で全てのデータを結合するために、透明性及び信頼の程度並びにデータの統合の方法の開発に大きく依存する。
<p>どのような先端 SSA 技術が使用されているか</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 理想的な最終状態であるため、データ共有と情報の標準化に多額の投資が必要となる ● 進化するモデリング（域内プレーヤー向けの「アンサンブル学習アプローチ」） ● 自動化（サービス） ● AI、機械学習（タスク処理の改善、データ融合） ● クラウドコンピューティング（最新のリポジトリ・アーキテクチャー、データ共有、処理）

	<ul style="list-style-type: none"> ● SSA 同士の比較（異なる結果の検証とクロスチェック）
国際的なベストプラクティスの実施をどう支えるか	<ul style="list-style-type: none"> ● LTS ガイドラインもサポート <ul style="list-style-type: none"> ○ B1: 更新された連絡先の提供及び宇宙物体と軌道上事象に関する情報の共有 ○ B2: 宇宙物体の軌道データの精度向上並びに軌道情報の共有の実行及び実用性の強化 ○ B3: スペース・デブリ監視情報の収集、共有及び普及の促進 ○ B4: 制御飛行中の全軌道フェーズにおける接近解析の実行 ○ B5: 打ち上げ前の接近評価に向けた実用的な取組みの確立 ○ B6: 有効な宇宙天気に関するデータ及び予報の共有 ○ B7: 宇宙天気モデル及びツールの開発並びに宇宙天気による影響の低減のための確立した実行の収集 ○ B9: 宇宙物体の非制御再突入に伴うリスクを取り扱う対策 ○ C2: 宇宙活動の長期持続可能性に関する経験の共有及び情報交換のための適切な新たな手続の作成 ○ C3: 能力構築の促進及び支援 ○ C4: 宇宙活動の認知向上 ● IADC、UNCOPUOS 等を通じた外交的努力がグローバルに必要となる
効果的な SSA とみなされる理由とは何か	<ul style="list-style-type: none"> ● グローバルなデータ・プロダクトが蓄積され、一般的な分析や集約されたサービスが広がることにより、SSA の信頼、システムへの信頼が増す。また、インプットの多様性の確保及び協力のための意思疎通の大幅な増加に貢献する ● 完全な実施に至った場合、宇宙空間における運用の安全性と安心に大きく貢献し、空や海上等の他の領域での活動と同様に宇宙での経済活動を増加させることにつながる
日本の強みをどう活かすか	<ul style="list-style-type: none"> ● 地理的位置：日本はアジア太平洋地域において主導的な役割を果たすことが可能 ● 持続可能性/環境政策への貢献：宇宙領域においても、責任ある持続可能な活動を行うために主導的な役割を果たすことが可能
日本のリーダーシップ発揮にどう繋がるか	<ul style="list-style-type: none"> ● 日本がアジア太平洋地域のコンソーシアムを主導することで、能力構築、自国の専門知識の開発、SSA の研究とイノベーションの推進など、日本の指導力を育てるための選択肢 A と同様のメリットも得ることができる

弱点	<ul style="list-style-type: none"> ● 多大な政治交渉が必要となる ● 実施のために最も長い時間を要する
どのギャップを埋めるのか	<ul style="list-style-type: none"> ● センサーの多様性とカバレッジ ● 新しい軌道環境に対応するの製品及びサービス ● 透明性及び信頼 ● 共有と相互運用性 ● 専門知識

表 X：選択肢 D の内訳

4.7.3 提示された選択肢の概要比較

図表 4-17：選択肢の概要比較

#	選択肢	説明	対応する顧客のニーズの広さ	民営化レベル	取得する専門知識の範囲	透明性のレベル	予算上のコミットメント
A	アジア太平洋地域におけるリーダーシップの確立	日本が中心となつて、SSA におけるアジア太平洋地域の連携形成を目指す	中	柔軟	広	中	高
B	宇宙物体特性評価のエキスパート	最先端の革新的な SSA 技術に投資し、独自のセンサーでグローバルな SSA 能力のギャップを充足する	狭	中	中	低～中	中
C	民間型の中核的研究拠点 (CoE)	SSA の中核的研究拠点を設立する	狭	低～中	広	高	低～中
D	グローバルな SSA のファシリテーター	グローバルな SSA 能力、協力、透明性の向上を促進する上で、アジア太平洋地域をとりまとめて主導的な役割を果たす	中	柔軟	中	高	高

参考文献・脚注 セクション 4

1. Inter-Agency Space Debris Coordination Committee, “IADC Space Debris Mitigation Guidelines,” Inter-Agency Space Debris Coordination Committee, last modified in September 2007, https://www.unoosa.org/documents/pdf/spacelaw/sd/IADC-2002-01-IADC-Space_Debris-Guidelines-Revision1.pdf.
2. Ramona L. Walls, et al., “Assessing the IADC Space Debris Mitigation Guidelines: A case for ontology-based data management,” presented at Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS), Maui, HI, September 2016, <https://amostech.com/TechnicalPapers/2016/SSA/Walls.pdf>.
3. UN Committee on the Peaceful Uses of Outer Space, “Voluntary Implementation of the Guidelines for the Long-term Sustainability of Outer Space Activities and Proposed Reporting Approach by the United Kingdom,” UN Office for Outer Space Affairs, last modified February 7, 2020, https://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/documents/2020/aac_105c_12020crp/aac_105c_12020crp_15_0_html/AC105_C1_2020_CRP15E.pdf.
4. The Consortium for Execution of Rendezvous and Servicing Operations, “About Us,” CONFERS, <https://www.satelliteconfers.org/about-us/>.
5. Canadian Forces, “Check out these captures using Canada’s NEOSat and Sapphire satellites, as we assist in tracking the in-orbit docking experiment of the Northrop Grumman MEV-1 with Intelsat 901 in support of our Five-Eyes partner nations and the Phantom Echoes team,” Twitter, February 10, 2020, <https://twitter.com/CanadianForces/status/1226986044068900864?s=20>.
6. Space Safety Coalition, “Best Practices for the Sustainability of Space Operations,” SSC, <https://spacesafety.org/>.
7. LeoLabs Inc., “Our latest update this morning for IRAS / GGSE 4 shows a 12m miss distance, with a Probability of Collision (Pc) back to 1 in 100. Here is a plot of our last five days worth of miss distance updates on this event,” Twitter, January 29, 2020, https://twitter.com/LeoLabs_Space/status/1222547865567887361?s=20.
8. LeoLabs Inc., “The 12m total miss distance has components of: 11m radially; 0m in-track; 5m cross-track. We can visualize this conjunction geometry from the top-down and side-on views of the event at TCA,” Twitter, January 29, 2020, https://twitter.com/LeoLabs_Space/status/1222547873583312896?s=20.
9. David Richmond, “Space Situational Awareness Architecture Vision,” presented at Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS), Maui, HI, September 2013, <https://amostech.com/TechnicalPapers/2013/POSTER/RICHMOND.pdf>.
10. A survey of AMOS Conference technical papers from 2017, 2018, and 2019 was performed along with a survey of technical papers from the 1st International Orbital Debris Conference (IOC). Interview discussions also revealed technology trends.
11. Nathan Estell, Dylan Ma and Patrick Seitzer, “Daylight imaging of LEO satellites using COTS hardware,” presented at Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS), Maui, HI, September 2019, <https://amostech.com/TechnicalPapers/2019/Optical-Systems-&-Instrumentation/Estell.pdf>.
12. Miriam Kramer, “This company wants to track satellites during the daytime,” Axios, last modified November 12, 2019, <https://www.axios.com/numerica-track-satellites-daytime-9f155555-e203-4917-ad87-4fab82bb3fe0.html>.
13. David Grosse, et al., “Adaptive Optics for Satellite Imaging and Earth Based Space Debris Manoeuvres,” presented at 7th European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany, April 2017, <https://www.first-light-imaging.com/wp-content/uploads/2019/10/SDC7-paper536.pdf>.
14. Samuel Clemens, et al., “Feasibility of Using Commercial Star Trackers for On-Orbit Resident Space Object Detection,” presented at Advanced Maui Optical and Space

- Surveillance Technologies Conference (AMOS), Maui, HI, September 2018, https://amostech.com/TechnicalPapers/2018/Space-Based_Assets/Clemens.pdf.
15. 同上
 16. Sohrab Mahmud, Sana Ullah Qaisar and Craig Benson, “Tracking Low Earth Orbit Small Debris with GPS Satellites as Bistatic Radar,” presented at Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS), Maui, HI, September 2016, <https://www.amostech.com/TechnicalPapers/2016/Orbital-Debris/Benson.pdf>.
 17. David Richmond and Tatum Poole, “Satellite Tracking and Characterization Using Signal Data,” presented at Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS), Maui, HI, September 2019, <https://amostech.com/TechnicalPapers/2019/Space-Situational-Awareness/Richmond.pdf>.
 18. Moriba Jah on “Space Missions of Global Importance: Planetary Defense, Space Weather Protection, and Space Situational Awareness,” Aired on U.S. Senate Committee on Commerce, Science and Transportation, February 12, 2020, <https://www.commerce.senate.gov/2020/2/space-missions-of-global-importance-planetary-defense-space-weather-protection-and-space-situational-awareness>.
 19. Tim Flohrer, et al., “CREAM – ESA’s Proposal for Collision Risk Estimation and Automated Mitigation,” presented at Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS), Maui, HI, September 2019, <https://amostech.com/TechnicalPapers/2019/Space-Situational-Awareness/Flohrer.pdf>.
 20. Hussein L. Weis, “Orbit Design of an Autonomous Space-based SSA Swarm: Distributed Machine Learning at the Edge,” presented at 2019 Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS), Maui, HI, September 2019, <https://www.semanticscholar.org/paper/Orbit-Design-of-an-Autonomous-Space-based-SSA-at-Weis-Hussein/d328692dbf7d961e35b31167b4596c7ce9d277b4>.
 21. Hao Peng and Xiaoli Bai, “Limits of Machine Learning Approach on Improving Orbit Prediction Accuracy using Support Vector Machine,” presented at 2019 Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS), Maui, HI, September 2017, <https://amostech.com/TechnicalPapers/2017/Astrodynamics/Bai.pdf>.
 22. Cockrell School of Engineering, “ASTRIAGraph,” UT Austin, <https://sites.utexas.edu/moriba/astrigraph/>.
 23. ConsenSys “ConsenSys Space Launches TruSat System,” ConsenSys, last modified October 21, 2019, https://consensys.net/blog/press-release/consensys-space-trusat_-10-22-2019/.
 24. Andrew D’ Uva, Interview by the Astroscale Team, Personal Interview, Washington D.C., December 9, 2019.
 25. For example, OneWeb intends to lower the perigee to lower than 200 km and keep apogee at 1,100 km at end of mission.
 26. Alexander F. Herz, et al., “SSA Sensor Tasking Approach for Improved Orbit Determination Accuracies and More Efficient Use of Ground Assets,” presented at Presented at Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS), Maui, HI, September 2013, <https://amostech.com/TechnicalPapers/2013/POSTER/HERZ.pdf>.
 27. AGI, Interview by the Astroscale Team, Personal Interview, Washington D.C., December 13, 2019.
 28. Ibid.
 29. Space Telescope Science Institute, “WFPC2,” STScI, <http://www.stsci.edu/hst/wfpc2>.
 30. Mark Matney, “Measuring small debris - what you can’t see can hurt you,” Orbital Debris Program Office NASA, last modified September 12, 2016, <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20160011226.pdf>.
 31. Ibid.
 32. Advanced Technology International ATI, “CONFERS GSSF 2018,” Youtube, 6:06:34, aired on November 8, 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=MEYzBY1D9KM>.

33. LeoLabs, "LeoTrack FAQ," LeoLabs, https://www.leolabs.space/leotrack_faq.
34. Advanced Technology International ATI, "CONFERS GSSF 2018," Youtube, 6:06:34, aired on November 8, 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=MEYzbY1D9KM>.
35. David Richmond, "Space Situational Awareness Architecture Vision," presented at Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS), Maui, HI, September 2013, <https://amostech.com/TechnicalPapers/2013/POSTER/RICHMOND.pdf>.
36. Moriba Jah, Interview by the Astroscale Team, Personal Interview, Washington D.C., November 20, 2019.
37. Simon George and Andrew Ash, "Future On-Orbit Spacecraft Technologies and Associated Challenges for Space Situational Awareness," presented at Presented at Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS), Maui, HI, September 2019, <https://amostech.com/TechnicalPapers/2019/Space-Based-Assets/George.pdf>.
38. Defence Science and Technology Laboratory, "Dstl in Unique Five-Eyes Space Situational Awareness Experiment," DSTL, last modified February 4, 2020, <https://www.gov.uk/government/news/dstl-in-unique-five-eyes-space-situational-awareness-experiment>.
39. Karen Singer, "100th space sharing agreement signed, Romania Space Agency joins," U.S. Strategic Command, last modified April 16, 2019, <https://www.stratcom.mil/Media/News/News-Article-View/Article/1825882/100th-space-sharing-agreement-signed-romania-space-agency-joins/>.

5. 結論

宇宙活動は現代生活に不可欠である。特にこの過去 20 年以内に、世界の宇宙産業は広く多様化し、宇宙経済を前進させる多くの先進的な商業宇宙業界のプレイヤーが台頭してきた。宇宙空間領域の利用が拡大するにつれて、次世代のプレイヤーと新たに台頭するミッションをサポートするために、最先端の SSA 能力、分析、及び協力についても進化しなければならない。打上げの選択肢の増加、衛星コンポーネントの低コスト化及びより大きな投資活動により、活気に満ちたグローバルな宇宙エコシステムが実現してきている一方、通信、混雑した軌道及びデブリ除去の明確な手段の欠如によってもたらされる宇宙機へのリスクは今後数年間で増してくる。民間及び政府機関の運用者にとって、宇宙領域の包括的、正確、タイムリーな認識は、設計から宇宙機の使用停止までの安全で責任ある持続可能な運用を可能にするために、これまで以上に重要になってきている。

現代の宇宙経済に効果的な SSA システムは、意思決定品質の情報を提供するために、エンドユーザーを念頭に置いてゼロから設計する必要がある。そのためには、適切なカバレッジと継続性を提供し、多様なインプットを組み込み、相互運用性、拡張性があり、強力な処理コンポーネントを持ち、継続的に改善及び進化させるための関係を作り上げる必要がある。

米国政府は現在、SSA のプロダクト、サービス、運用、及びインフラの世界最大の消費者であり、商業 SSA サービス及びデータ提供者の「主たる」顧客としての役割を果たしている。商業 SSA サービスの商業顧客ベースと市場はまだ初期段階だが、今後数十年で劇的に成長する態勢を整えており、革新的なソリューションの開発を促す技術的、意思決定的、手順的要件に動的な変化をもたらし得る。

今日、現在の SSA 市場の製品と顧客のニーズにはまだギャップが存在する。これらには、信頼性の欠如に加えて、限られたデータ共有機能、カバレッジ、精度と分散、インプットの多様性、センサーの感度といった技術的なギャップも含まれる。新しいミッションの種類が今後数年間で増加するにつれて、この新しい軌道環境に対応する SSA サービスとプロダクトを提供するために行われるべき基本的な事項がまだまだ存在する。

日本政府は、これらの主要な課題とグローバルな SSA 能力のギャップを埋めるために強力なリーダーシップを担うことができる。多国間の枠組みでの日本の高い評価、アジア太平洋地域における日本の戦略的な地理的位置、持続可能性への日本の貢献など、宇宙産業にもたらす強みを考えると、日本には国内、地域及びグローバルな SSA イニシアチブでパラダイムシフトを促進するために必要なすべてのツールがあると考えられる。

この報告書では、SSA のプロセス、主要な政府プレイヤーの SSA 能力やプログラム、商業 SSA 市場の戦略的アプローチとビジネスモデル、市場ギャップの調査を行

った。この分析から、戦略的な5つのレバーを定義した。これは、国内データプラットフォームの在り方やそのアプローチについて、各選択肢の目指す方向性や焦点を評価できる戦略的な変数である。これにより、意思決定者は、レバーと組み合わせ、適切と思われる各選択肢を判断することができる。特定した戦略的選択肢は以下の次の4つである。

選択肢A：アジア太平洋地域におけるリーダーシップの確立

これは、日本が中心となって、SSAにおけるアジア太平洋地域の連携形成を目指す選択肢である。グローバルSSA市場が拡大し続けることが予想される中でこの選択肢を取ることによって、EUSSTプログラムを例とした他の地域的なモデルのように、日本が外交的にも経済的にも地域の能力構築を進める役割を担うこととなる。

選択肢B：宇宙物体特性のエキスパート

日本が最先端の革新的なSSA技術に投資し、独自のセンサーでグローバルなSSA能力のギャップを充足するという選択肢である。日本は、ニッチながらも専門性の高いSSAサービス、宇宙における事象や物体の特性といった専門知識の面で高い評価を得ることができる。豊富な位置的な情報を利用することにより、宇宙機が運用される場所のみならず、なぜ、何を、誰が宇宙機を運用しているのかを把握することができる。このような情報は、現在グローバルに見ても不足している。

選択肢C：民間型の中核的研究拠点（CoE）

日本が支援する形でSSAの中核的研究拠点（Center of Excellence：CoE）を設立する選択肢である。CoEの中心的な機能は、世界から専門家が集まり、革新的な研究に取り組み、共通のストラクチャーの下で協力し、ベストプラクティスを構想するための場として機能である。専門家はそこで得た洞察を自国に持ち帰り、世界中の政府のSSA事業の政策決定者に情報を共有する。日本が主導して、多数国間の、かつ、排他的でないCoEを、短期的にも長期的にも、学術研究者と民間SSA事業者が最先端の研究を行う場を提供する。これによって、研究者が能力のギャップを埋めるための提案をし、データ分析と処理方法を検討し、センサー技術を改善していくオープンな環境を作る。

選択肢D：グローバルSSAリポジトリ

グローバルなSSA能力、協力、透明性の向上を促進する上で、アジア太平洋地域をとりまとめて主導的な役割を果たすという選択肢である。将来的に、現在のSpace Data AssociationのようなグローバルSSAリポジトリにおいて、アジア太平洋地域のまとめ役となることを狙う。選択肢A「アジア太平洋地域におけるリーダーシップの確立」で提案した物理的なインフラの構築の多くに関与し、その能力を活用して、アジア太平洋地域がEUSST、米国、ロシア及び新興のSSAプレーヤー等とデータを共有する際に地域を主導する役割を果たす。

これらの各選択肢は、SSA データプラットフォームの在り方を左右する、戦略的な変数である「レバー」を用いて比較したり優先順位を判断したりすることができる。さらに技術面や連携先の意向等について調査をしていき、一つの選択肢又は選択肢の組み合わせを検討していくことが望まれる。SSA のグローバルな能力と顧客のニーズの進化に伴い、この調査で提示された情報は、SSA 技術、政策、協力や能力構築において日本がリーダーシップをより発揮するための助けとなる。

6. 別紙

6.1 インタビューリスト

Interviewee	Organization	Title/Position	Date	Interviewer
Abhay Masher and John MacDonald	L3Harris Technologies, Inc.	International Strategy & Business Development Manager	December 19, 2019	Luc Riesbeck and Charity Weeden
Moriba Jah	The University of Texas at Austin	Associate Professor	November 20, 2019	Charity Weeden
Clinton Clark and Brien R. Flewelling	ExoAnalytic Solutions	Vice President of Sales and Business Development; Chief of SSA Architect	November 21, 2019	Luc Riesbeck and Charity Weeden
Lauchie Scott	Defence R&D Canada (DRDC)	Defence Scientist at Defence R&D Canada Ottawa	November 22, 2019	Luc Riesbeck and Charity Weeden
Mark Skinner	The Aerospace Corporation Center for Orbital and Reentry Debris Studies (CORDS)	Senior Project Leader for Space Traffic Management	November 22, 2019	Charity Weeden
Todd Harrison and Kaitlyn Johnson	Center for Strategic and International Studies (CSIS) Aerospace Security	Director of the Aerospace Security Project and Senior Fellow of the International Security Program; Associate Fellow and Associate Director of the Aerospace Security Project	November 25, 2019	Luc Riesbeck and Charity Weeden

Interviewee	Organization	Title/Position	Date	Interviewer
Bhavya Lal	Institute for Defense Analysis, Science and Technology Policy Institute (IDA STPI)	Research Staff Member	November 26, 2019	Luc Riesbeck and Charity Weeden
Brian Weeden	Secure World Foundation	Director of Program Planning	December 2, 2019	Charity Weeden
Diane Howard and Mark Mulholland	Office of Space Commerce, U.S. Department of Commerce	Chief Counsel; SSA Support	December 2, 2019	Luc Riesbeck and Charity Weeden
Don Pollaco	University of Warwick	Professor, Department of Physics	December 3, 2019	Harriet Brettle
Seth Harvey	Bluestaq LLC	CEO and Co-founder	December 5, 2019	Luc Riesbeck
Andrew D' Uva	Providence Access Company; Space Data Association Ltd.	President; Advisor	December 9, 2019	Luc Riesbeck and Charity Weeden
Alan DeClerck	LeoLabs, Inc.	Vice President, Business Development & Strategy	December 10, 2019	Luc Riesbeck and Charity Weeden
Matthew Duncan	SpaceNav LLC.	President/Owner	December 13, 2019	Luc Riesbeck and Charity Weeden
Daniel L. Oltrogge	Analytical Graphics, Inc. (AGI)	Director, Center for Space Standards and Innovation	December 13, 2019	Luc Riesbeck and Charity Weeden
Ralph Dinsley	Northern Space and Security, Ltd. (NORSS)	Executive Director	December 23, 2019	Harriet Brettle

Interviewee	Organization	Title/Position	Date	Interviewer
Adam White	Northern Space and Security, Ltd. (NORSS)	Technical Director	January 24, 2020	Harriet Brettle
Jeff Aristoff	Numerica	VP of Space Systems	January 3, 2020	Luc Riesbeck and Charity Weeden
Bob Mann	University of Edinburgh	Professor, School of Physics and Astronomy	January 7, 2020	Harriet Brettle
Manuel Metz	DLR	Space Debris Research Group	January 8, 2020	Harriet Brettle
Reuben Wright	Deimos UK	Head of Ground Segment and SSA	January 14, 2020	Harriet Brettle
Shinichi Nakamura (中村 新一) and Mayumi Nakamura (松浦 真弓)	Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)	Senior Researcher, Space Tracking and Communications Center (追跡ネットワーク技術センター 主幹研究開発員); Project Manager, SSA System Project Team, Space Tracking and Communications Center (追跡ネットワーク技術センター SSA システムプロジェクトチーム プロジェクトマネージャー)	January 30, 2019	Eriko Yamamoto Nobuyasu Tajime
Masaya Kameyama (亀山 雅也) Yuji Kobayashi (小林 雄二) Hiroto Nakajima (中島 廣人)	Fujitsu Ltd./富士通株式会社	Director, Space Business Development Office, Technical Computing Solutions Unit (テクニカルコンピューティングソリューション事業本部 特定ビジネス開発室 シニアマネージャー); Senior Director, CO-Creation Technical	February 13, 2020	Nobu Okada Eriko Yamamoto Nobuyasu Tajime

Interviewee	Organization	Title/Position	Date	Interviewer
		Computing Solutions Unit/Sales Divisions (同 TC 統括営業部 シニアディレクター 兼 第二営業部長); 2nd Marketing & Sales Dept., TC Marketing & Sales Div. Technical Computing Solutions Unit (同 TC 統括営業部 第二営業部)		
Ryo Kitaoka (北岡 亮) Asaki Maeno (前野 旭弘) Tetsu Kobayashi (小林 鉄) Kazuhiro Takeuchi (竹内 一博) Masaya Hirayama (平山 雅也) Sumihiko Tazoe (田添 純彦)	JMoD	Director, Space and Ocean Policy Office, Strategic Planning Division, Bureau of Defense Policy (戦略企画課宇宙・海洋政策室長); 同室防衛部員 Defense Official (同防衛事務官) Same (戦略企画課部員) Maj. Space Team, Project Promotion Group, Emerging Domains and Programs, Air Staff Office (航空幕僚監部防衛部新領域等推進 PG 宇宙チーム 三等空佐) Same (同防衛技官)	February 20, 2020	Nobuyasu Tajime Aya Iwamoto

6.2 インタビュー調査質問事項

調査質問事項

(注：商業・学術主体に対してのみの質問事項には「*」を付与)

セクション1：SSA システムの基本

1. SSA システムについて説明するとどのようなものになるか。
2. どのような種類の SSA データを収集しているか？*
3. データはどのように統合または融合されているか？*
4. データを使用してどのような分析が行われているか？*
5. データ統合と分析を実行可能なものにするために必要とするものは何か？
*
6. どのような種類の SSA 情報を公開/運用者に提供しているか？
7. 商業的な主体による SSA データの利用率の増加があるか？
8. どのタイプのソフトウェアシステムを使用しているか？*
 - SSA の収集と分析*
 - ユーザー向け*
9. どのモデリング・ツールを使用しているか？*
 - 宇宙の環境向け*
 - 大気情報について*
10. データ/プロダクト/サービスのユーザーは誰で、どのように使用しているか？*
11. 組織の拠点はどこか。センサーはどの程度の範囲にあるのか？*
12. SSA の上位 5 つのアプリケーション又はプロダクトは何か？
 - 政府の利用のため
 - 商業利用のため
 - 科学的な目的のため

セクション2：主要なプレイヤー

1. 自己の組織とグローバルな SSA エコシステム（官民いずれも含む）との関係を説明してください
2. 自己の組織は、SSA データの収集/分析/統合に関して他のパートナーと協力しているか？どのような能力について協力しているのか？
3. SSA システムに統合する商用データ、プロダクト、サービスを購入しているか？（主要なプログラム名を開示できる場合はその名称）
 - これは過去 5 年間でどのように変化したか？また、今後 5 年間でどのように変化していくか？
 - 機密データを処理しているか？その場合、どのように統合/処理しているか？*
4. SSA データ収集/統合/分析に関係する技術はどれくらい早く進歩するか？
5. 具体的に進歩とは何か？
6. 今後 10 年間で SSA 運用者/労働力の需要が増加すると予測するか？*
7. SSA インフラストラクチャと分析の産業基盤とサプライチェーンは、今後 5 年間でどのように進化するか？*

セクション3：主要な商業 SSA プレーヤーのビジネスモデル

1. 組織の主な収益源/主なプロダクト・ラインは何か。*
2. 他の商用 SSA データ/プロダクト/サービスと比較した場合の価値提案は何か？*
3. 顧客は主に政府か商業主体か？なぜその市場をターゲットにしたのか？*
4. データ/サービスの料金を公開しているか？*
5. 業務に関連する最大の課題は何か？*
 - テクニカル*
 - ビジネス*
 - 政策
 - 規制*
 - これらのうち、民間 SSA 提供者の成功に対する最大の障壁は何か？*
6. 過去 5 年間で、SSA 市場（政府と商業事業者によるデータとサービスの両方の購入）はどのように進化したか？将来の動向は？
7. 商業 SSA（プロバイダー、インテグレーター、アナリスト/プロセッサー、製品開発者）の「ハブ」になる国又は地域について予想していることはあるか？その場合、その国は民間事業者にとって魅力的か？
8. 利用可能な新しいタイプのデータ、プロダクト、サービスは何か？
9. 次の技術トレンドの SSA 市場への適用についてどのように考えているか？
 - 人工知能 (AI) *
 - 非光学センシング*
 - 機械学習
 - 宇宙ベースのセンシング*
 - オートメーション
 - シミュレーション/ AR *
 - ニューラルネットワーク*
 - ブロックチェーン*
 - フォレンジック*
 - 分析されていない物体特性化*
 - 挙動分析*

セクション 4：4 ビッグデータの利活用検討事項及び選択肢

1. SSA サービス/データを使用するように事業者にもっと影響を与える可能性のある説得力のあるガイドライン、プラクティス、または標準はどれか？*
 - LTS*
 - IADC*
 - ISO*
 - その他*
2. SSA システムの設計方法の長所と短所は何か？
3. 自己の見解では、現在の SSA における最大のギャップは何か？
 - インフラストラクチャ/ハードウェア
 - ソフトウェア/処理
 - 政策
 - 基準/規範など
4. 追加したいこと、その他回答が必要な重要な事項はあるか？

6.3 用語一覧

略語	日本語	名称
ACI	天体力学のコミュニティ利益社会	Astrodynamics Community of Interest
AEOS	高度な電気光学システム	Advanced Electro Optical System
AFSPC	米国空軍宇宙軍団	U.S. Air Force Space Command
AFSSS	空軍宇宙監視システム	Air Force Space Surveillance System
AIUB	ベルン大学天文学研究所	Astronomical Institute of the University of Bern
AMOS	光学スーパーコンピューティングサイト	Air Force Maui Optical Supercomputing Site
ANU	オーストラリア国立大学	Australian National University
APOSOS	アジア太平洋地域地上ベース光学宇宙物体観測システム	Asia-Pacific Optical Space Objects Observation System
APRSAF	アジア太平洋地域宇宙機関フォーラム	Asia-Pacific Regional Space Agency Forum
APSCO	アジア太平洋宇宙協力機構	Asia Pacific Space Cooperation Organization
ASAT	対衛星	Anti-Satellite
ATTR	先端技術リスク低減	Advanced Technology Risk Reduction
BMEWS	弾道ミサイル早期警戒システム	Ballistic Missile Early Warning System
CA	接近評価	Conjunction Assessment
CAS	中国科学アカデミー	Chinese Academy of Sciences
CAESAR	接近解析とアラートと回避有無の推奨といった評価サービス	Conjunction Analysis & Evaluation Service Alerts & Recommendations
CARA	接近評価リスク分析	Conjunction Assessment Risk Analysis
CDM	接近データメッセージ	Conjunction Data Messages

略語	日本語	名称
CDTI	スペイン政府・産業技術開発センター	Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial
CIE	フランス司令部間陸軍司令部	Commandement Interarmées de l' Espace
CNES	フランス国立宇宙研究センター	Centre National d' Études Spatiales
COLA	衝突回避	Collision Avoidance
COMSpOC	商業宇宙運用センター	Commercial Space Operations Center
CORDS	(Aerospace の) 航空宇宙再突入デブリ研究センター	Center for Orbital and Reentry Debris Studies
COSMOS	軍事監視宇宙物体運用センター	Centre Opérationnel de Surveillance Militaire des Objets Spatiaux
CREAM	衝突リスク推定・自動緩和	Collision Risk Estimation and Automated Mitigation
CSpOC	連合宇宙運用センター	Combined Space Operations Center
CSSS	カナダ宇宙監視システム	Canadian Space Surveillance System
DARPA	米国防総省高等研究計画局	Defense Advanced Research Project Agency
DASA	防衛・セキュリティアクセラレータ	Defence and Security Accelerator
DOD	米国防総省	Department of Defense
DRDC	カナダ国防研究開発局	Defense Research and Development Canada
DSTL	英国防衛科学技術研究所	Defence Science and Technology Laboratory
DTIC	物体の検出、追跡、識別、特性評価	Detection, Tracking, Identification, and Characterization
ECI	地球中心慣性座標系	Earth Centered Inertial
ELSET	要素セット	Element Set
ESA	欧州宇宙機関	European Space Agency
ESAC	欧州宇宙天文学センター	European Space Astronomy Centre
EU SATCEN	欧州連合衛星センター	European Union Satellite Centre

略語	日本語	名称
ESOC	欧州宇宙運用センター	European Space Operations Centre
ESPI	欧州宇宙政策研究所	European Space Policy Institute
EUSST	欧州宇宙監視・追跡	European Union Space Surveillance & Tracking
FADR	固定防空レーダー	Fixed Air Defence Radar
FCC	連邦通信委員会	Federal Communications Commission
FFRDC	連邦研究開発センター	Federally Funded Research and Development Centers
FG	フラグメンテーション分析	Fragmentation Analysis
FHR	フラウンホーファー高周波物理及びレーダー技術研究所	Fraunhofer Institute for High Frequency Physics & Radar Techniques
GEO	静止軌道	Geosynchronous Orbit
GEODSS	電気光学深宇宙監視	Ground-Based Electro-Optical Deep Space System
GESTRA	ドイツ実験宇宙監視及び追跡レーダー	German Experimental Space Surveillance and Tracking Radar
GIAS	ドイツ航空宇宙工学グループ	German Aerospace Engineering Group
GNOSIS	宇宙の持続可能性のためのグローバルネットワーク	Global Network for Sustainability in Space
GON	グローバル・オプティカル・ネットワーク	Global Optical Network
GRAVES	監視システム	Grand Réseau Adapté à la Veille Spatiale
GSOC	ドイツ宇宙作戦センター	German Space Operations Center
GSSAC	ドイツ宇宙状況認識センター	German Space Situational Awareness Centre
GSSAP		Geosynchronous SSA Program
HEO ROBOTICS		High Earth Orbit Robotics
HUSIR	ヘイスタック超広帯域衛星画像レーダー	Haystack Ultra-wideband Satellite Imaging Radar

略語	日本語	名称
IAA	国際宇宙航行アカデミー	International Academy of Astronautics
IARPA	米国インテリジェンス高等研究 計画活動	Intelligence Advanced Research Projects Activity
INAF	イタリア国立天体物理学研究所	National Institute for Astrophysics
IOC	初期運用機能	Initial Operating Capability
IOD	初期軌道決定	Initial Orbit Determination
IR	赤外線	Infrared
ISOC	イタリア宇宙監視・追跡運用セ ンター	Italian Space Surveillance and Tracking Operational Center
ISON	国際科学光学観測ネットワーク	International Scientific Optical Observation Network
ItAF	イタリア空軍	Italian Air Force
JFSCC	合同宇宙部隊司令部	Joint Force Space Component Command
JICSPOC	統合・機関間・連合宇宙作戦セ ンター	Joint Interagency Combined Space Operations Center
JP 3-14	宇宙作戦に関する共同刊行物 3-14	Joint Publication 3-14 on Space Operations
KIAM	ケルディシュ応用数学研究所	Keldysh Institute of Applied Mathematics
LEO	低軌道	Low Earth Orbit
LIDAR	レーザー画像検出と測距	Laser Imaging, Detection and Ranging
LNT	致命的だが追跡不可能	Lethal But Non-Trackable
LSO	月間太陽観測所	Learmonth Solar Observatory
LSSC	リンカーン宇宙監視システム	Lincoln Space Surveillance System
MBIE	ニュージーランドビジネス・ イノベーション・雇用省	New Zealand' s Ministry of Business, Innovation, and Employment
MEO	中軌道	Medium-Earth Orbit
MIT	マサチューセッツ工科大学	Massachusetts Institute of Technology
MMW	ミリ波	Millimeter Wave

略語	日本語	名称
MOD	国防省	Ministry of Defence
MSSS	マウイ宇宙監視システム	Maui Space Surveillance System
MWA	マーチソンワイドフィールドアレイ	Murchison Widefield Array
NASA	米国航空宇宙局	National Aeronautics and Space Administration
NEO	近地球物体	Near-Earth Objects
NESDIS	米国環境衛星データ情報局	National Environmental Satellite, Data, and Information Service
NOAA	米国海洋大気協会	National Oceanic and Atmospheric Administration
NORAD	北米航空宇宙防衛司令部	North American Aerospace Defense Command
NSDC	国家宇宙防衛センター	National Space Defense Center
NSSS	米国家安全保障宇宙戦略	National Security Space Strategy
NTM	自国の検証技術手段	National Technical Means of Verification
OADR	オープン・アーキテクチャー・データリポジトリ	Open- Architecture Data Repository
OC	運用センター	Operational Center
ODMSP	軌道上デブリ低減標準プラクティス	Orbital Debris Mitigation Standard Practices
ODPO	軌道上デブリプログラムオフィス	Orbital Debris Program Office
O/O	所有者/運用者	Owner/Operator
PC	衝突確率評価	Probability of Collision
PMO	パープルマウンテン天文台	Purple Mountain Observatory
PNT	位置、ナビゲーション、タイミング	Position, Navigation, and Timing systems
RAAF	オーストラリア空軍	Royal Australian Air Force

略語	日本語	名称
RAS	ロシア科学アカデミー	Russian Academy of Sciences
RCS	レーダー断面積	Radar Cross-Section
RE	再突入分析	Re-entry Analysis
RF	無線周波数	Radio Frequency
RFI	無線周波数干渉	Radio Frequency Interference
RMIT	王立メルボルン工科大学	The Royal Melbourne Institute of Technology
ROSA	ルーマニア宇宙機関	Romanian Space Agency
RPO	ランデブー及び近接操作	Rendez-Vous and Proximity Operations
RSSS	ロシア宇宙監視システム	Russian Space Surveillance System
RTI	距離時間強度	Range-Time-Intensity
RTS	ロナルドレーガン弾道ミサイル 防衛テストサイト	Ronald Reagan Ballistic Missile Defense Test Site
SAST	国家防衛科学技術産業局	State Administration of Science, Technology & Industry
SBIRS	宇宙ベースの赤外線システム	Space-Based InfraRed System
SBSS	宇宙ベースの監視衛星	Space-Based Surveillance Satellite
SERC	宇宙環境研究センター	Space Environment Research Centre
SBIR	中小企業技術革新研究プログラム	Small Business Innovation Research
SDSR	戦略的防衛・セキュリティレビュー	Strategic Defence and Security Review
SMARTnet	小口径ロボット望遠鏡ネットワーク	Small Aperture Robotic Telescope Network
SMC	空軍宇宙軍・ミサイルシステム センター	Space and Missile Systems Center
SOA	宇宙運用保証	Space Operations Assurance
SOC	宇宙物体特性評価	Space Object Characterization
SCC	宇宙機管制センター	Spacecraft Control Center

略語	日本語	名称
SOI	空間物体識別	Space Object Identification
SP	特別摂動	Special Perturbation
SPADOC	宇宙防衛作戦センター	Space Defense Operations Center
SPD-3	宇宙政策大統領令第3号	U.S. Space Policy Directive 3
SSA	宇宙状況把握	Space Situational Awareness
SSN	米国宇宙監視ネットワーク	Space Surveillance Network
SST	宇宙監視・追跡	Space Surveillance and Tracking
STFC	科学技術施設評議会	Space Technologies and Facilities Council
STK	システム・ツールキット	Systems Tool Kit
STM	宇宙交通管理	Space Traffic Management
STPI	科学技術政策研究所	Science and Technology Policy Institute
SWE	宇宙天気	Space Weather
S3T	スペイン宇宙監視・追跡	Spanish Space Surveillance and Tracking
S3TOC	スペイン国立 SST オペレーションセンター	Spanish Space SST Operations Centre
TCA	2つの物体間の最接近時	Time of Closest Approach
TIRA	追跡・画像レーダー	Tracking and Imaging Radar
TLE	2行軌道要素セット	Two Line Element
TRADEX	ターゲット解像度及び識別実験	Target Resolution and Discrimination Experiment
UAV	無人航空機	Unmanned Aerial Vehicle
UCT	未知物体	Uncorrelated Track
UDL	統合データライブラリ	Unified Data Library
UI	ユーザーインターフェース	User interface
UKSA	英国宇宙機関	UK Space Agency

略語	日本語	名称
UK SpOC	英国宇宙運用センター	UK Space Operations Centre
USSF	米国宇宙軍	U.S. Space Force
USSPACECOM	米国宇宙統合軍	U.S. Space Command
UT Austin	テキサス大学オースティン校	University of Texas at Austin
VLEO	超低軌道	Very Low-Earth Orbit
1RSU	第1リモートセンシングユニット	RAAF No. 1 Remote Sensing Unit