

令和4年度産業標準化推進事業委託費（戦略的国際
標準化加速事業ルール形成戦略に係る調査研究
（宇宙環境保全のルール形成戦略に係る調査研究））

調査報告書

令和5年3月

日本大学

令和4年度産業標準化推進事業委託費（戦略的国際標準化加速事業ルール形成戦略
に係る調査研究（宇宙環境保全のルール形成戦略に係る調査研究））
成果報告書

目次

略 語	1
1. 本調査の背景および目的	3
2. SSR 及び他の宇宙環境保全に関するルール等の国内外動向調査	4
2.1. 宇宙環境保全に関する各種勧告・規制や技術要求、ガイドラインや規格の制定・改訂に関する、国連、主要な国際機関、各国の動向の調査・整理	4
2.1.1. 世界経済フォーラム（WEF：World Economic Forum：WEF）の動向	4
2.1.2. 米国連邦通信委員会（FCC：Federal Communications Commission）の動向	4
2.1.3. 衛星産業協会（SIA：Satellite Industry Association）の動向	5
2.1.4. SWF（Secure World Foundation）の動向	6
2.1.5. ESPI（European Space Policy Institute）の動向	7
2.1.6. IAA（International Academy of Astronautics）の動向	8
2.1.7. IADC、UNCOPUOS、ISO の最近の動向	8
2.1.8. SSR の概要	8
2.1.9. アジア・太平洋地域における SSR の状況	13
2.1.10. STM と SSR	13
2.1.11. 宇宙環境保全に関する各種勧告・規制や技術要求、ガイドラインや規格の制定・改訂に関する国際動向のまとめ	14
2.2. 我が国が SSR のルール制定や改訂に貢献できる領域や技術の調査・整理	15
2.2.1. 我が国が SSR のルール制定や改訂に貢献できる領域	15
2.2.2. 我が国が SSR のルール制定や改訂に貢献できる技術	15
2.3. SSR における技術情報の提示方法や改善すべき課題、着目すべき評価方法や必要なデータの調査・整理	17
2.4. 我が国主導のルール制定・改訂に備え協力見込みのある企業・関係者等の調査・整理	19
2.5. SSR の分析と SSR 改訂案の検討	19
2.5.1. SSR の分析	20
2.5.2. SSR の直近の改訂案	22
3. 高度な環境保全性と信頼性を有し持続的宇宙利用を可能にする衛星コア技術に関する国内外動向及び我が国企業の優位性調査	24
3.1. 高度な環境保全性と信頼性を有し持続的宇宙利用を可能にする衛星コア技術開発の国内外の動向調査・整理	24
3.2. 我が国が強みを発揮できる可能性のある技術に効果的な格付け方法に関する調査・整理	26
3.3. 国際市場規模の定量的調査・整理	26
3.3.1. 市場性が期待される格付け認証関連ビジネス	26
3.3.2. 認証取得支援サービスの市場創成規模推計	27
3.3.3. 第三者認証ビジネスの市場創成規模推計	33
3.3.4. SSA ビジネスの市場拡大規模推計	33
3.3.5. デブリ低減ビジネスの市場拡大規模推計	34
3.3.6. 宇宙環境保全ルールが形成された場合の新たな市場の規模推計結果	34
3.3.7. レーティングと保険との関係性	34

4. SSR のルール形成において我が国が影響力を確保する手法に関する調査.....	37
4.1. SSR 運営組織への関与・参画やその継続の方法についての調査・検討.....	37
4.2. SSR をアジア・太平洋地域に展開する仕組みについての調査・検討.....	37
4.3. SSR のルール形成において影響力を確保・維持するために必要な情報の調査・整理.....	39
4.4. まとめ.....	39
5. 我が国が宇宙環境保全のルール形成に貢献するための戦略の策定と今後の課題.....	40
5.1. 我が国が宇宙環境保全のルール形成に貢献し国際競争力を確保するための戦略策定.....	40
5.1.1. 格付け認証制度を伴う宇宙環境保全ルールの「あるべき姿」.....	40
5.1.2. ルール形成に貢献し国際競争力を確保するための戦略案.....	41
5.2. 戦略実施に向けた今後の課題.....	44
参考文献.....	46
別添資料.....	52
付録（調査資料等）.....	53
A.1 本調査研究の体制.....	53
A.2 JAQG 殿提供資料.....	54
A.3 格付けに係る技術情報の認証機関への提供について.....	56

図目次

図 2.1.1 Space Environment Capacity の概念 ^[7]	7
図 2.1.2 SSR の運営体制（2022 年 11 月時点）.....	9
図 2.1.3 設立中の SSR 協会の構成.....	10
図 2.1.4 SSR の評価モジュール.....	10
図 2.1.5 SSR の格付けプロセス.....	12
図 2.2.1 M-Pack（文献[61]のプレゼン資料より）.....	16
図 2.5.1 アクセルスペース社による Green Spacecraft の概念 ^[64]	20
図 2.5.2 文献[62]による主要ロケットの軌道上生存率の評価.....	22
図 3.1.1 電気推進器の推力 ^[76]	25
図 3.3.1 日本の人工衛星打上げ機数 ^[105] および 2030 年の推計機数.....	29
図 3.3.2 2016 年～2030 年の世界の人工衛星製造数（2030 年は推計値）.....	31
図 3.3.3 コンステレーション以外の衛星の製造機数（2020・2021・2030 年は推計値）.....	31
図 3.3.4 世界の衛星の製造機数推計値.....	31
図 3.3.5 2012 年～2021 年の世界の CubeSat 機数 ^[106]	32
図 3.3.6 CubeSat 機数の増加トレンド（2030 年は推計値）.....	32
図 3.3.7 SSA 市場規模予想.....	34
図 3.3.8 各種宇宙保険の適用範囲 ^[117]	35
図 4.2.1 9100 国際認証制度の体制（付録 A.2 JAQG 殿提供資料より）.....	38
図 4.2.2 国際認証体制の例.....	38

表目次

表 2.1.1 SSR の CONSULTATIVE BODY.....	9
表 2.1.2 SSR の B テストを受けた企業・大学.....	10
表 2.1.3 SSR の評価モジュールの概要.....	11

表 2.1.4	SSR における技術情報の提示方法と評価係数	11
表 2.1.5	SSR の格付けにおける各モジュールの重みづけ	11
表 2.1.6	SSR の特徴	12
表 2.1.7	格付けを受ける衛星運用事業者の立場からみた SSR の課題	13
表 2.1.8	宇宙環境保全に係る国際動向	14
表 2.2.1	認証ビジネスの観点で必要な宇宙環境保全技術と其中で我が国が貢献できる技術	15
表 2.2.2	我が国の企業による軌道離脱技術の例	16
表 2.3.1	SSR の格付けに必要なデータ	17
表 2.3.2	SSR における着目すべき評価方法	18
表 2.3.3	SSR における技術情報の提示方法と改善すべき課題と今後の可能性	19
表 2.4.1	協力見込みのある国内の企業・関係者等	19
表 2.5.1	SSR の位置づけ・価値の分析	20
表 2.5.2	SSR の運営面の分析	20
表 2.5.3	SSR の技術面の分析	21
表 2.5.4	SSR の直近の改訂案	22
表 3.1.1	衛星からのデブリ発生原因	24
表 3.1.2	高度な環境保全性を有し持続的宇宙利用を可能にする衛星コア技術	24
表 3.3.1	事業者における CN 推進および SBT 認定取得を支援するサービス	27
表 3.3.2	CN 関連支援サービスの提供状況 ^[103, 104]	28
表 3.3.3	市場性が期待できる国内 SSR 認証取得支援ビジネス	28
表 3.3.4	市場性が期待できる格付け取得支援ビジネスの詳細	29
表 3.3.5	SSR 認証取得支援ビジネスの国内市場推計結果サマリ	30
表 3.3.6	市場性が期待できる商用衛星用 SSR 認証取得支援ビジネス	30
表 3.3.7	海外において市場性が期待できる格付け取得支援ビジネスの詳細（コンステレーション以 外）	31
表 3.3.8	コンステレーション衛星向けに市場性が期待できる格付け取得支援ビジネスの詳細	32
表 3.3.9	格付け取得支援ビジネスの国際市場推計結果サマリ（CubeSat を除く）	32
表 3.3.10	市場性が期待できる格付け取得支援ビジネスの詳細（CubeSat）	33
表 3.3.11	CubeSat の格付け取得支援ビジネスの国際市場推計結果サマリ	33
表 3.3.12	格付け取得支援ビジネスの国際市場推計結果サマリ	33
表 3.3.13	宇宙環境保全ルールが形成された場合の新たな国際市場規模推算結果	34
表 3.3.14	宇宙環境保全ルールが形成された場合の新たな国内市場規模推算結果	34
表 3.3.15	宇宙保険の例 ^[117]	35
表 5.1.1	レーティングの改善戦略案（その 1：評価方法の改善戦略・戦術）	41
表 5.1.2	レーティングスキームの改善戦略案（その 2：国内および海外普及戦略・戦術）	42
表 5.1.3	SSR を足掛かりとした我が国の宇宙環境保全のルール形成貢献戦略（その 1：国際認証制 度構築戦略・戦術）	43
表 5.1.4	改善されたレーティングを足掛かりとした我が国の宇宙環境保全のルール形成貢献戦略 （その 2：他の宇宙環境保全活動との連携戦略・戦術）	43
表 5.1.5	改善されたレーティングを足掛かりとした我が国の宇宙環境保全のルール形成貢献戦略の 実施（SSR を例にとったスケジュール案）	44
表 5.2.1	戦略実施に向けた直近の課題（SSR の例）	45

略 語

ADOS	Application of Design and Operation Standards
ADR	Active Debris Removal (能動的デブリ除去)
APRSAF	Asia-Pacific Regional Space Agency Forum (アジア太平洋地域宇宙機関会議)
APRTA	Asia-Pacific Rating Association (アジア・太平洋地域レーティング協会、仮称)
AQMS	Aerospace Quality Management System (航空宇宙品質マネジメントシステム)
ASA	Australian Space Agency (オーストラリア宇宙庁)
ASCEND	Accelerating Space Commerce, Exploration, and New Discovery (AIAA 主催の国際会議)
ASI	Australian Science Innovations (オーストラリア国立大学内の組織)
CCSDS	Consultative Committee for Space Data Systems (宇宙データシステム諮問委員会)
CDM	Conjunction Data Message (デブリ接近情報)
CN	Carbon Neutral (カーボンニュートラル、気候中立)
COLA	Collision Avoidance Capabilities
CONFERS	Consortium for Execution of Rendezvous and Servicing Operations (ランデブ・サービス運用実施のためのコンソーシアム)
CSpOC	Combined Space Operations Center (米国連合宇宙運用センター)
DAO	Decentralized autonomous organization (分散型自律組織)
DIT	Detectability, Identification and Trackability
EC	(Space) Environment Capacity ((宇宙) 環境容量)
ECOB	Environmental Consequences of Orbital Breakups
EDT	ElectroDynamic Tether (導電性テザー)
EOL	End of Life
EPFL	Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (スイス連邦工科大学ローザンヌ校)
ESG	Environment, Society, Governance (環境、社会、企業統治を考慮した投資活動)
ESOC	European Space Operations Centre (欧州宇宙運用センター)
eSpace	EPFL Space Center (EPFL スペースセンター)
ESPI	European Space Policy Institute (欧州宇宙政策研究所)
EU SST	EU Space Surveillance and Tracking (EU 宇宙監視追跡)
FCC	Federal Communications Commission (米国連邦通信委員会)
FSOA	French Space Operations Act (フランス宇宙活動法)
IAA	The International Academy of Astronautics (国際宇宙航行アカデミー)
IADC	Inter-Agency Space Debris Coeducation Committee (国際機関間スペースデブリ調整委員会)
IAQG	International Aerospace Quality Group (国際航空宇宙品質グループ)
IDA	The Institute for Defense Analyses (国防分析研究所)
ISO	International Organization for Standardization (国際標準化機構)
ITU	International Telecommunications Union (国際電気通信連合)
JAQG	Japan Aerospace Quality Group (航空宇宙品質センター)
JRTA	Japan Rating Association (日本レーティング協会、仮称)
JSSRA	Japan Space Sustainability Rating Association (仮称「日本 SSR 協会」)
LEED	Leadership in Energy & Environmental Design (グリーンビルディング認証)
ISO	International Standardization Organization (国際標準化機構)
LTS	Long Term Sustainability (宇宙活動の長期的持続可能性)
METI	Ministry of Economy, Trade and Industry (経済産業省)
MI	Mission Index
NDA	Non-Disclosure Agreement (秘密保持契約)
NGSL	New Space Global Strategy Lab (一般社団法人 ニュースペース国際戦略研究所)
NORAD	North American Aerospace Defense Command (北アメリカ航空宇宙防衛司令部)
OADR	Open Architecture Data Repository
OCC	Orbital Carrying Capacity (軌道収容能力)
OOS	On-Orbit Servicing (軌道上サービス)

OPMT	Other Party Management Team
PMD	Post Mission Disposal（ミッション終了後の廃棄）
RMC	Registration Management Committee（審査登録管理委員会）
RPO	Rendezvous and Proximity Operations（ランデブー・近接運用）
RTA	Rating Association（レーティング協会、仮称）
SBT	Science Based Targets（温室効果ガス排出削減目標）
SEC	Space Environment Capacity（宇宙環境容量）
SJAC	The Societies of Japanese Aerospace Companies（一般社団法人日本航空宇宙工業会）
SIA	Satellite Industry Association（衛星産業協会）
SPD-3	Space Policy Directive-3（米国の宇宙政策大統領令第3号）：“National Space Traffic Management Policy”
SSA	Space Situational Awareness（宇宙状況把握）
SSC	Space Safety Coalition
SSR	Space Sustainability Rating（宇宙持続可能性格付け）
SST	Space Surveillance and Tracking（宇宙監視・追跡）
STCM	Space Traffic Coordination and Management
STM	Space Traffic Management（宇宙交通管理）
STSC	（国連宇宙空間平和利用委員会 UNCOPUOS の） Science and Technology Subcommittee（科学技術小委員会）
SWF	Secure World Foundation
TRL	Technical Readiness Level（技術成熟度）
UKSA	UK Space Agency（英国宇宙庁）
UNCOPUOS	United Nations Committee on the Peaceful Uses of Outer Space（国連宇宙空間平和利用委員会）
UNOOSA	United Nations Office for Outer Space Affairs（国連宇宙局）
VC	Venture Capital（ベンチャーキャピタル）
WEF	World Economic Forum（世界経済フォーラム）

1. 本調査の背景および目的

近年、人工衛星の増加とそれに伴うスペースデブリの発生により、軌道上が人工物体で急速に過密状態になってきている。そのため、人類が今後も軌道を継続的に利用できるよう、様々な国際機関が宇宙環境保全に向けた警鐘を鳴らし、ガイドライン・基準等を制定している。その結果、人工衛星を使って持続的に宇宙ビジネスを行っていくためには、人工衛星が高度な環境保全性（環境に優しい人工衛星技術）を有することが必須となっている。

実際、産業界が能動的に宇宙環境の持続的利用に資する取り組みを行うインセンティブにつなげることを目指し、経済産業省も加わる中で、世界経済フォーラムを中心に、国際フォーラム標準として、人工衛星の宇宙環境の保全性を評価し事業者の格付け認証を行うルールである「Space Sustainability Rating」（以下、「SSR」と称する）を検討してきた。当該格付けの認証実施機関として選定されたスイス連邦工科大学ローザンヌ校の EPFL 宇宙センター(以下、「eSpace」と称する)により、2022 年 6 月から認証が開始されたところである。

SSR により、スペースデブリ除去等の軌道上サービスや軌道環境の持続的な利用に資する更なる技術開発やその実装等に対するインセンティブが付与され、これらに強みのある我が国企業の追い風となることが期待される。

一方で、実質的に欧米が主導して認証ルールを形成していることから、我が国企業の取組みが正当に評価されない算定ルールが含まれている場合に我が国企業の将来受注に悪影響となりかねない点、我が国から算定方法の改善提案等が通りにくくなる点、認証機関への英文文書提出が我が国企業にとってコスト増や情報流出につながりかねない点等、我が国企業の国際競争力への影響も懸念される。

そこで本調査では、我が国が宇宙環境保全のルール形成に積極的に貢献する方法を探ることを目的に、（１）SSR 及び他の宇宙環境保全に関するルール等の国内外動向調査、（２）高度な環境保全性と信頼性を有し持続的宇宙利用を可能にする衛星コア技術に関する国内外動向及び我が国企業の優位性調査、及び（３）SSR のルール形成において我が国が影響力を確保する手法に関する調査を行い、（４）我が国が宇宙環境保全のルール形成に積極的に貢献するための戦略を提言としてまとめた。

本調査では SSR を例にとってはいるものの、調査内容の多くが宇宙環境保全のルール形成戦略全体を考える上にも有用なものとなっている。

なお、調査研究は、（１）文献調査、（２）関係者へのヒアリング、（３）eSpace との議論、そして、（４）本事業用に構成した有識者委員会からの意見・指導に基づいている（調査研究体制は付録 A.1（53 ページ）の通り）。

2. SSR 及び他の宇宙環境保全に関するルール等の国内外動向調査

本報告書では、我が国が宇宙環境保全のルール形成に積極的に貢献するための戦略を提案することになるが、本章では、その提案の前提となる、宇宙環境保全に関するルール等の国内外の動向を調査した結果を示す。

2.1. 宇宙環境保全に関する各種勧告・規制や技術要求、ガイドラインや規格の制定・改訂に関する、国連、主要な国際機関、各国の動向の調査・整理

宇宙環境保全に関しては、従来、デブリ（宇宙ごみ）に対する

- (1) 状況把握・分析：観測（Space Situational Awareness : SSA)システム、観測可能な大きさのデブリ分布把握（GEO 1m 以上、LEO 10cm 以上）
- (2) 分布予測：微小デブリの分布予測（環境モデル）、将来予測（推移モデル）
- (3) 設計・運用：軌道解析・衝突解析、回避運用、破碎防止、分離物の制限、防御、適切な運用終了措置（いわゆる「25 年ルール」）
- (4) 地上の安全対策、制御再突入、溶解解析、リスク評価、ロケット・衛星の非デブリ化

といったガイドラインや規制に関する国際標準・ルール化の検討が国際宇宙機関間スペースデブリ調整委員会（IADC : Inter-Agency Space Debris Coeducation Committee）、国連宇宙空間平和利用委員会（UNCOPUOS : United Nations Committee on the Peaceful Uses of Outer Space）、国際標準化機構（ISO : International Standardization Organization）で取り組まれてきたが、最近では、世界経済フォーラム（WEF : World Economic Forum : WEF）、米国連邦通信委員会（FCC : Federal Communications Commission）、衛星産業協会（SIA : Satellite Industry Association）、Secure World Foundation（SWF）、ESPI（European Space Policy Institute）、国際宇宙航行アカデミー（The International Academy of Astronautics: IAA）などがそれぞれ特徴的な活動を行っている。そこで本節では、宇宙環境保全に関する WEF、FCC、SIA、SWF、ESPI、IAA の動向を示すとともに、IADC、UNCOPUOS、ISO の最新動向を確認する。また、併せて、アジア・太平洋地域の状況についても触れる。

2.1.1. 世界経済フォーラム（WEF : World Economic Forum : WEF）の動向

WEF では、産業界が自主的に宇宙ごみ低減に取り組むための対策として、国際的なレーティングスキームの導入に向けた議論を進めてきた。そして、2019 年 5 月 6 日に米国ワシントンで開催された人工衛星分野の国際フォーラム「Satellite 2019」の中で、人工衛星の運用者（事業者）が行う個々のミッションが宇宙環境に与える影響を点数化し、その点数に応じてインセンティブを与える宇宙持続可能性格付け（Space Sustainability Rating : SSR）を WEF のプロジェクト「Shaping the Future of Mobility Platform（未来を形作るモビリティプラットフォーム）」の枠組みで開発することを発表した。開発チームには、マサチューセッツ工科大学 MIT メディアラボの「Space Enabled Research Group」が主導し、欧州宇宙機関（ESA）も参画。人工衛星ビジネス大手 Bryce Space and Technology、テキサス大学オースティン校の協力でコンソーシアムが形成された。2年以上にわたり、WEF は、このコンソーシアムと協力して、SSR の技術的要素と運用の定義に貢献してきた。その間、日本の経済産業省も WEF のアドバイザー・ボードのメンバーとして議論に参画してきた。

そして、格付けの運営機関（認証機関）として、2021 年 6 月 17 日よりスイス連邦工科大学ローザンヌ校（EPFL）の宇宙センター（eSpace）が選定され、1 年間の試行期間を経て、2022 年 6 月に SSR が民間認証制度として正式にスタートした。この際、フランスの衛星通信業者ステラ社と、日本からは、日本大学が創設メンバーとなった。また、設立から数週間で、ALTER グループ、EnduroSat、Privateer、Secure World Foundation、Slingshot Aerospace がメンバーとして参加し、評価システムを強化すると共に、その関連性と正確性を確保するための重要な専門知識を SSR に提供している。また、試行期間中には SpaceX、Planet、EPFL Spacecraft Team、OneWeb、アクセルスペース、Airbus を含む衛星関連事業者によって β テストが行われ、ツールの精度と実用性の検証が行われている^[1]。

なお、SSR については 2.1.8 節（8 ページ）にてその概要を示し、2.5 節（19 ページ）にて分析する。

2.1.2. 米国連邦通信委員会（FCC : Federal Communications Commission）の動向

FCC の規則および規制は、連邦規則集(Code of Federal Regulations : CFR)のタイトル 47 電気通信

にて規定される。同規定のパート 5 実験的ラジオサービス (EXPERIMENTAL RADIO SERVICE) の 5.64 項に衛星システムに関する特別規定 (Special provisions for satellite systems) があり、5.64 項(b) (7) (iv) (A)項にて所謂 25 年ルール (高度 2,000 キロメートル以下の軌道で寿命を終える宇宙船は、実行可能な限り早く、ミッション終了後 25 年以内に軌道から離脱する) が規定されていたが、**2022 年 9 月に 25 年を 5 年に短縮する規定が採択された**。この規定は、規定が採択されてから 2 年後に打ち上げられる衛星から適用され、米国で認可された衛星と、他の管轄区域によって認可されているが米国市場へのアクセスを求めている衛星の両方が対象となる。

25 年ルールを 5 年に短縮する規定について、2020 年 4 月に発行された規則制定提案告示 (Notice of Proposed Rule Making : NPRM) に対し、多くのコメント提出者が「ほとんどの場合、5 年程度のミッション後の軌道寿命が適切である可能性がある」とミッション後の軌道寿命を短縮することを支持していた。なお、5 年とする技術的根拠は示されていない。

一方で、大規模なコンステレーションに対しては、5 年はまだ長すぎる可能性がある」と多くのコメント者が表明しており、これらのシステムがもたらす軌道環境へのリスクを考慮して、FCC では大規模なコンステレーションには、1 年などのより短いミッション後の廃棄要件が適切かどうかを引き続き評価しているとしている。

いずれにしても、この「5 年ルール」は宇宙環境保全に対してはもちろん、その担い手である宇宙アクターにとっても大きなインパクトを与える可能性があるため、今後もその波及状況をモニタしていく必要があるだろう。

2.1.3. 衛星産業協会 (SIA : Satellite Industry Association) の動向

SIA は 1995 年の設立以来、米国の商用衛星産業の代表として、衛星ビジネスに影響を与える政策、規制、立法の問題について提唱してきた。SIA は、2020 年 9 月に発行したホワイトペーパー “The Future of Space and Space Traffic Coordination and Management”^[2] において、長期的な宇宙の持続可能性を促進できる STCM 体制を構築するための見解として、SSA や OADR (Open Architecture Data Repository) と絡めた視点で、以下の課題と推奨事項を提唱している。その内容は、我が国が SSR を含む今後の宇宙環境保全活動の戦略を考える上で示唆に富んだものになっている。

《課題》

(1) 適時性

近年、宇宙機の打ち上げと運用は劇的に増加している中で、衛星運用者は SSA サービスと CSpOC 等からのアラートに依存する方法で衝突回避運用を行っている。しかし、SSA サービスは有用ではあるものの、実用性としては宇宙の安全性と宇宙環境の持続可能性を確立するために必要なレベルには達していない。実用的かつ効果的な STCM システムを可能な限り早く整備することにより、現在の宇宙安全の体制を改善することが急務である。

(2) 軌道決定精度

現在の SSA サービスは、特定の軌道では衝突回避運用に十分な精度を備えているが、宇宙活動が増加するにつれて、多くの軌道では精度が不十分になる恐れがある。精度が適切かどうかは、衛星運用者が選択した特定の衝突回避の基準と閾値、オブジェクトの種類、オブジェクトのサイズまたは反射率、追跡と優先順位、オブジェクトが占有する軌道、オブジェクトのマヌーバ可能性に大きく依存する。これらの軌道の不正確性に対応するため、衛星運用者は多くの場合、非常に保守的な仮定の上で衝突回避の決定を行っており、大量のアラートが発生している。従って、これらのデータ精度の向上に焦点を当てるべきである。

(3) 現在の宇宙の持続可能性と安全性サービスを強化する商用ツールの開発

商用の SSA サービス、STCM サービスはいくつかの種類が存在しており、多様な STCM システムにおける政府・商用の両サービスの継続的な開発と採用により、衛星運用者が意思決定を行う精度が向上する。

(4) 追跡と高度な SSA 分析

堅牢で正確な SSA システムを構築するためには、様々な SSA 追跡ネットワークと様々な種類のセンサによる観測が必要である。これらの観測データは、最新のデータフュージョンエンジンと分析によって、衛星運用者がタイムリーな意思決定を行うための正確な SSA コンテンツと衝突アラートを生成する必要がある。

(5) Open Architecture Data Repository (OADR)

昨今、衛星運用者の多くが、宇宙機の位置の履歴や予測、マヌーバ計画、打ち上げ情報、初期軌道と再突入データ、及び運用の安全性に関連するデータなど、宇宙機に関するデータを提供する意思を示している。そこで、OADR の機能開発・実装をさらに進め、堅牢な STCM 業者のもとで、

各衛星運用者から運用データを収集し、衛星運用者間のデータ交換を世界規模に拡張する必要がある。なお、OADR については UNCOPUOS などでも議論は進められている。

(6) 情報の可用性

SSA と STCM のデータは、ミッション、高度、国籍に関わらず、また、商用か公用かに関わらず、全ての衛星運用者がすぐに利用できるようにすることが不可欠である。宇宙安全上の役割を考えると、これらのデータやデータ分析は可用性が高く、サービスの機能停止が最小限となるようにする必要があるため、衛星運用者は改善されたデータを提供する必要がある。

《推奨事項》

- (1) 今すぐに行動と資金が必要である：米国政府は、商用衛星分野のイノベーションを支援するため、より先鋭的な STCM 環境を導入すべきである。特に、米国の最先端の宇宙持続性モデルの実現に向けて、商用と政府の両方の能力を活用すべきであり、SPD-3 (Space Policy Directive-3, 宇宙政策大統領令第 3 号。Space Traffic Management (STM) 政策を定義している)^[4]の元で活動するだけの十分な資金が必要である。
- (2) フレームワークを構築すべきであるが、要件を満たす特定の技術に限定するべきではない：特定のものに固定せず、最新の宇宙安全フレームワークの要件を満たすための革新的な方法を認めることが、開発を促進し、最も費用対効果の高い効果的な技術を利用することにつながる。
- (3) 政府はベストプラクティスを奨励すべき：商業宇宙産業界は今後もビジネスを進めるために宇宙の安全な環境を求めており、宇宙への参入と支援を強化して宇宙の安全対策を広く普及させることが重要。
- (4) 全世界を網羅し、グローバルなニーズに応えるような解決策でなければならない：米国が国際的なものかを問わず、上記の全ての宇宙活動を含めることで、近代的で持続可能な STM のシステムができる。宇宙の持続可能性という重要な目標を達成するためには、米国政府、民間の利害関係者、志を同じくする宇宙関係者との関係性やリーダーシップが必要となる。

2.1.4. SWF (Secure World Foundation) の動向

SWF は、特に、(1) 宇宙の持続可能性、(2) 宇宙法と政策、(3) 人間と環境の安全保障、(4) グローバル対宇宙能力レポートの 4 つに焦点を当てて活動を行っているが、宇宙環境保全の観点では、以下の通り、大規模コンステレーションのライセンス供与に関する活動を行っている^[6]。

2022 年 6 月 21 日に SWF は、UKSA (英国宇宙機関) と協力して、大規模なコンステレーションのライセンス供与へのアプローチに関する規制当局間の対話を開催し、以下に示すトピックを識別した。

- ・ 大規模コンステレーションを監視するための政府全体のアプローチを実現するには、政治的リーダーシップが必要な責任を確立し、国の規制枠組み内で専門知識を共有するメカニズムが必要になる。
- ・ 宇宙持続可能性問題の認知度を高める段階から、持続可能性が意味するものを実際に定義する段階に移行する必要がある。大規模コンステレーションを最も効果的に管理するためには、宇宙で何が起きているのか、その活動が宇宙環境に与える影響を追跡および測定できることが必要である。そのため、宇宙環境管理の研究に向けた資金源を確保する必要がある。
- ・ インセンティブまたは規制のいずれかを通じて行動を測定、評価、および奨励するために、その行動とその影響について一貫して定義された測定基準が必要である。この点で、SSR が新たなツールの可能性として注目された。

また、この対話では、軌道収容能力 (Orbital Carrying Capacity, OCC) に焦点を当て、特定の軌道領域が維持できる活動量の定量化が可能となる軌道収容能力の概念が軌道をリソースとして管理するための有用なツールとなり得るかの議論が行われた。そこでは、大規模コンステレーションの拡大は軌道収容能力のモデリングの成熟よりも速く進んでおり、軌道収容能力が時間の経過とともに変化する可能性があり、長期的な意思決定を行うためのツールとしての有用性は限定されること、したがって、**軌道収容能力の短期的な影響に焦点を当ててモデリングする必要性**が指摘された。そして、大規模コンステレーションに関連する以下の 3 つの重要なテーマが今後の議論の焦点となる可能性があるとして、議論を継続することとなった。

- (1) 宇宙の持続可能性の政治的可視性を高め続けるとともに、運用に関連する解決策に移行することが必要である。
- (2) 大規模コンステレーションの規制は各国の行政機関全体で一貫性を確保する必要があり、国際的な関与とベストプラクティスの議論から始めるべきである。
- (3) 軌道容量の管理においては、新興宇宙国と将来の世代の両方にとっての軌道へのアクセスの公平性を議論する必要がある。

なお、この軌道収容能力の概念は、次項で述べる、ESPI による Space Environment Capacity (SEC) の概念に通じるものである。

2.1.5. ESPI (European Space Policy Institute) の動向

ESPI は「Space Economy and Commerce」、「Space Security and Defense」、「International and Legal」の 3 つの分野について、主要な宇宙政策問題に関する調査と分析、世界の宇宙動向と政策動向の監視、テーマ別会議とワークショップの開催を通じ、ESPI レポートを発行して、推奨事項、政策オプションやビジョンを提供しているが、その中で、宇宙環境保全に関しては、Space Environment Capacity (SEC、宇宙環境容量) の概念を提唱している^[7]。その概要は以下の通りである。

まず、Space Environment Capacity の概念を図にしたものを図 2.1.1 に示す。この図において、Available capacity、すなわち、宇宙環境内における現状の合計容量は Filled capacity と Unfilled capacity に分類でき、Filled capacity は全ての既存のミッションと軌道上のオブジェクトが環境へ及ぼす影響 (Capacity Index) をそれぞれ計算して合算することで求められるとされている。ここでいう Capacity Index とは、具体的には ECOB(Environmental Consequences of Orbital Breakups) Index を指しており、以下の要素掛け算により各ミッションが環境へ及ぼす影響を計算する^[8]。

- ・ 衝突確率と衝突の影響(被害の度合い)
- ・ 爆発の発生確率とその影響

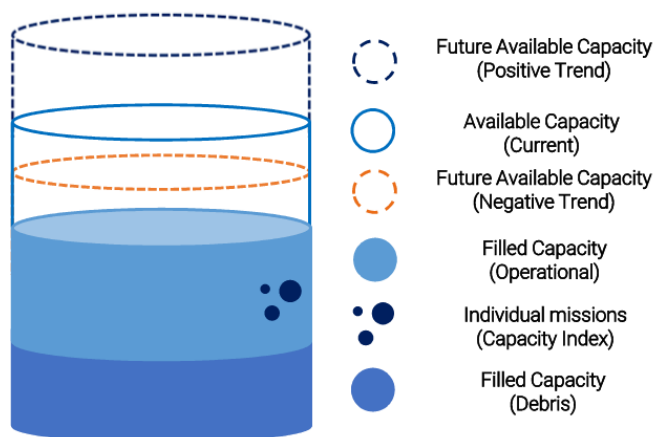


図 2.1.1 Space Environment Capacity の概念^[7]

Space Environment Capacity の概念は引き続き ESA が開発中であり、正規化の手順・管理手法は公開されていない。現在、Capacity の取引可能性を含めて検討されている最中である。

一方、STM に関しては、2020 年 1 月のレポートにおいて、次の通り報告している^[9]。すなわち、米国は民間の宇宙状況把握/宇宙交通管理能力を増強し、宇宙状況把握/宇宙交通管理市場における米国の商業的リーダーシップを確保するためのツール OADR (Open Architecture Data Repository) の開発を推進しており、欧州としても OADR への多くのデータ提供が可能である。一方で、米国の能力への依存度が高まり、戦略的自律性が低下するリスクがあるため、欧州はその依存度を管理し、それを許容範囲内に維持する能力を保証しなければならないとしている。すなわち、米国主導による規格の一方的な開発は、ヨーロッパにとって、競争上の不利な立場をもたらすリスクがあるため、宇宙交通管理標準とベストプラクティスの開発においてヨーロッパも積極的な役割を果たさなければならないとしている。

これを受け、欧州委員会において、2022 年 4 月に「宇宙交通管理に対する EU のアプローチ」に関するコミッションが採用された。同コミッションでは、STM に関して、欧州委員会と上級代表が行う、以下のアプローチを提案した。

- ・ 2022 年半ばまでに、関連するすべての EU 利害関係者との協議メカニズムを設定する。
- ・ EU SST (EU Space Surveillance and Tracking : EU 宇宙監視追跡) パートナリシップの支援を受けて、既存サービスのパフォーマンスを、2023 年半ばまでに 10cm を超えるすべての物体を検出できるまで向上させる。
- ・ EU SST パートナリシップと連携して、2023 年までにデータ共有プラットフォームの一部、2025 年までに将来の EU SST カタログの一部に産業界がアクセスできるようにする。
- ・ EU 加盟国と緊密に協力して、以下を行う：
 - 2023 年末までに、国際レベルで策定された基準とガイドラインに関する効果的な情報共有と調整が可能となるフォーラムを設立

- 同フォーラムにて、新しい欧州および国際規格の開発、EU レベルで選択された基準とガイドラインの推進、および、加盟国の衛星運用者によるライセンス申請を支援するためのツールボックス作成を実施
- ・ 2023 年末までに、STM 基準とガイドラインの実施に向けたインセンティブ措置と認証メカニズムを特定し、2024 年末までに、認証メカニズムを確立してインセンティブ措置を開始する。
- ・ 2023 年末までに、最初の限定的な一連の義務を提案し、2024 年半ばまでに EU STM 立法の可能性のある分野を特定し、2024 年末までに EU STM 立法の提案を行う。
- ・ 具体的な STM ソリューションを世界レベルで実施することを視野に入れて、STM のための機関を特定または作成するために国連と連携する。
- ・ 2022 年半ばまでに、EU の利益を保護しながら、EU が国連救済協定、責任条約、および登録条約に参加できる方法を検討する。

STM の議論は国の規制レベルから民間レベルまで、これまで多くの研究・議論が重ねられてきた歴史があり、この STM 認証の動きが実現すれば、SSR に代わる宇宙環境保全認証システムとして機能する可能性は高い。一方で、歴史が長い分、STM 認証システムが早期に実現するかは不透明である

2.1.6. IAA (International Academy of Astronautics) の動向

IAA では、SSR の推進者である MIT の Daniel Wood 氏が中心となって、スタディグループ SG 5.19 “Opportunities for National Governments to Foster Space Traffic Management using the Space Sustainability Rating” の提案がなされ、2022 年 12 月にキックオフされた^[11, 12]。グループ名からわかる通り、この SG では SSR を宇宙打上げ・運用の国内規制や認可の一部として、各国政府がどのように利用できるかを検討するとしており、① 各国政府が打ち上げの承認を申請する事業者に対して、SSR の一定以上の格付けを要求した場合、どのような影響があるか、② 政府が最低限の持続可能な行動を要求するのと、宇宙船事業者が可能な限り持続可能な革新的な方法を見出すインセンティブを与えるのでは、どちらが効果的か、といったことを検討するとしている。

なお、提案書^[12]には、メンバーとして、研究者・技術者の他に、EPFL、経済産業省、ISO、Chinese Academy of Astronautics の関係者が招待される、と書かれている。この SG は既に動き始めており、日本大学も SG に参加し、その動きをモニタしている。2023 年 2 月の段階では、各国の規制について、それぞれ SSR をなんらかの形で組み込む可能性があるか否かを議論している最中である。

2.1.1 項 (4 ページ) でも述べた通り、元々、WEF では宇宙環境保全活動にインセンティブを与える目的で SSR を立ち上げたと考えられるが、SSR が規制と結びつくと、衛星業者を始め宇宙アクターにとって、SSR は全く異なる性質のものになってくる。したがって、この IAA の動きは今後もモニタする必要があるだろう。

2.1.7. IADC、UNCOPUOS、ISO の最近の動向

周知の通り、IADC は 2002 年に先進国宇宙機関間で初めてのガイドラインとして「IADC スペースデブリ低減ガイドライン」を制定し、いわゆる 25 年ルールなど運用終了後の宇宙機の軌道離脱に関するガイドラインを示してきているが、昨今の大規模コンステレーションの発展の中でいかに軌道上環境を保全するか議論されており、2021 年 9 に「地球低軌道における大規模コンステレーションに関する声明」を表明した^[13]。その中では、コンステレーションの設計のみならず、宇宙機の設計、そして、運用について提言がなされている。

UNCOPUOS では上述の IADC ガイドラインをベースに 2007 年 6 月に「スペースデブリ低減ガイドライン」を採択し、宇宙活動の長期持続可能性について検討を続け^[14]、2019 年に宇宙活動の長期的持続可能性ガイドライン (21 の Long Term Sustainability: LTS ガイドライン) を制定しているが^[15]、2022 年に新しい長期的持続性検討 (LTS 2.0) WG が設置された。

ISO では航空機及び宇宙航行体技術委員会 (Technical Committee: TC20) の下部に「スペースシステム・運用分科会 (Sub Committee: SC14: Space Systems and Operations)」を設置し、2011 年に IADC ガイドラインの工業的な実施方法を定めた国際標準 ISO-24113 「デブリ低減要求 (Space Debris Mitigation Requirements)」を制定しているが、ISO-24113 の 2019 年の改訂では、運用開始からの信頼度低下も考慮の上、運用中の衛星については適切に寿命管理等を行うことが求められるようになった^[17]。ISO にはその他にも 2022 年に制定された ISO-23312 「宇宙船の詳細なスペースデブリ緩和要件 (Detailed space debris mitigation requirements for spacecraft)」^[18]など、複数のデブリ対策規格を制定している。なお、宇宙環境保全に関するリスクとしては、現在、①「スペースデブリ」だけでなく、②「宇宙天気」、③「宇宙近傍天体」の計 3 つが識別されており、②、③についても国際的、あるいは各国・各地域にて環境保全活動が進められている^[19]。

2.1.8. SSR の概要

SSR が 2019 年に WEF にて発表され、MIT、Bryce Space and Technology 社（コンサルティング会社）、ESA、テキサス大学オースティン校の研究者・技術者からなる SSR Consortium が中心となって活動を進め、2021 年 6 月に EPFL が認証機関として選定され、1 年の試行後、2022 年 6 月に正式に運営を開始したことは 2.1.1 節（4 ページ）にて述べた。そこで、本項では、2022 年度時点における SSR の概要を示す^[1, 20]。

SSR の運営体制は図 2.1.2 の通りであり、格付け内容等を決定する SSR Consortium と運営窓口である eSpace からなる「EXECUTIVE BODY」と、「MEMBERS」（ファウンディングメンバーおよびアソシエーションメンバー）、これら運営組織のアドバイザーである「CONSULTATIVE BODY」。そして、実際に格付けを受ける「RATING SUBSCRIBERS」から成る。日本からは経済産業省（METI）が CONSULTATIVE BODY として、日本大学がファウンディングメンバーとして運営に参加している。

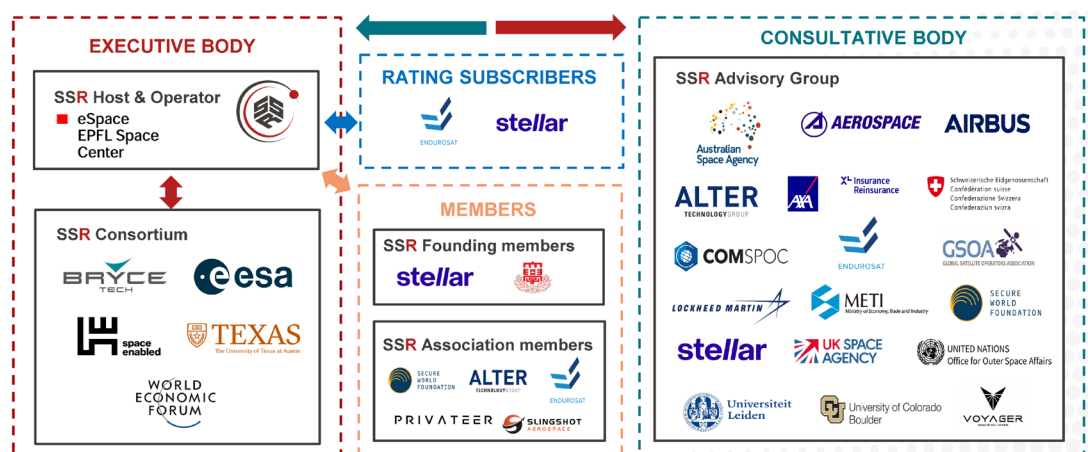


図 2.1.2 SSR の運営体制 (2022 年 11 月時点)

図 2.1.2 をより詳細にみると、CONSULTATIVE BODY には日・英・豪の省庁や国連宇宙部の他、スイスは国として参加している形となっている。また、シンクタンク・研究機関、いわゆる established space や new space、運用関連、SSA 関連、保険会社、大学と、一通りの分野の関係者が参加している。

なお、当初は elsco 社（保険会社）や Boeing 社も入っていたが、現在では抜けている。

表 2.1.1 SSR の CONSULTATIVE BODY

1	省庁	経済産業省、英国宇宙庁、オーストラリア宇宙庁、スイス連邦、国連宇宙部
	シンクタンク	Secure World Foundation (米)
2	研究機関	Aerospace Corporation (米)
3	大手宇宙機製造企業	Airbus (欧州)、Lockheed Martin (米)、
	宇宙機器関連企業	ALTER TECHNOLOGY (スペイン)
4	スタートアップ企業	EnduroSat (ブルガリア)、Stellar Telecommunications (仏)、VOYAGER Space Holdings (米)
6	衛星運用関連協会	GSOA (衛星運用事業者の協会)
5	SSA 関連企業	COMSPOC (米)
6	保険会社	AXA (仏)
7	大学	ライデン大学 (蘭)、コロラド大学ボルダー校 (米)、

なお、2021 年 6 月から 2022 年 5 月までの試行期間では、表 2.1.2 に示した企業・大学が格付けの試行（βテスト）を受審している（eSpace は格付け結果を公表していない）。これをみると、（大規模）コンステレーションの格付けの試行が多い。このことは、大規模コンステレーションは持続的な宇宙環境保全にとって脅威であるとの意見がある中で、自身のコンステレーション事業が宇宙環境保全を考慮したものであることを、SSR の格付けを利用してアピールできる可能性があることを示唆している。ただし、大規模コンステレーションが宇宙環境保全に与える影響の技術的評価は STM の分野でもまだ確立されておらず、SSR での格付けの妥当性について議論の余地がある。

表 2.1.2 SSR のβテストを受けた企業・大学

ミッション	事業者
—	アクセルスペース
Starlink	SpaceX
地球観測プラットフォーム	Airbus
地球観測コンステレーション	Planet
通信コンステレーション	OneWeb
地球観測コンステレーション	EPFL
6U ミッション	メルボルン大、ASA、ASI

そして、2023 年 2 月現在、SSR を運営する SSR Association（SSR 協会）を設立中であり、その中で格付け技術に関する WG（WG1: Technical WG）と、宇宙持続性に対する SSR の影響力を拡大することを検討する WG（WG2: Policy WG）を立ち上げて、その 2 つの WG を両輪として活動していこうとしているところである（図 2.1.3）。

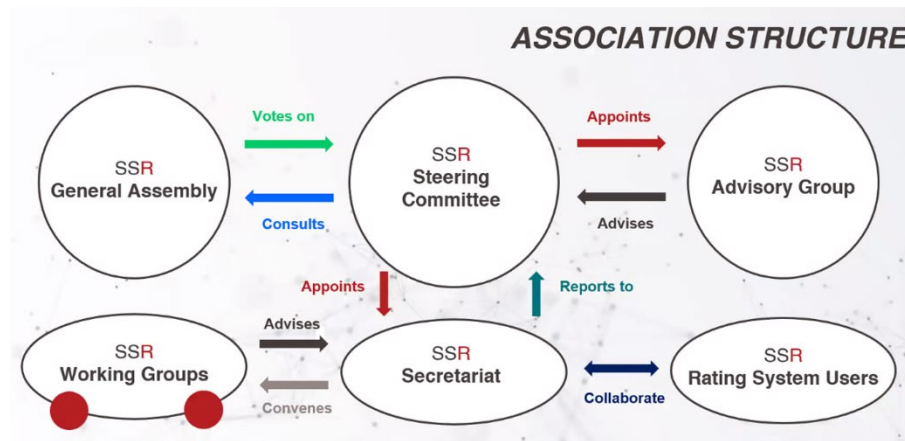


図 2.1.3 設立中の SSR 協会の構成

SSR では、図 2.1.4 に示す通り、格付け認証のための 6 つの評価モジュールを設定している。

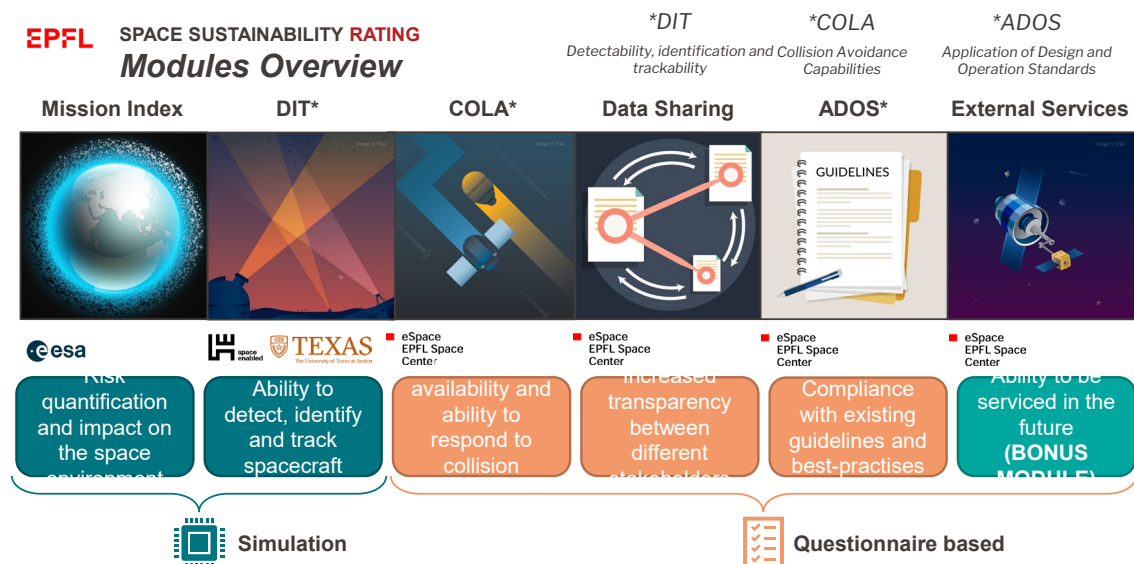


図 2.1.4 SSR の評価モジュール

これら 6 つのモジュールの概要は表 2.1.3 の通りであり、Mission Index モジュールおよび DIT モジュールは定量的な評価項目、残りの 4 つは質問に答える形の定性的な評価項目となっている。

また、表 2.1.3 からわかる通り、格付け希望者は衛星に関する技術情報を eSpace に提供する必要がある。その際、提示方法によって評価点が異なり、評価係数は表 2.1.4 の通りとなっている。さらに、6 つのモジュールの相対的な重みづけは表 2.1.5 の通りとなっており、総合得点が 81%以上であれば「Platinum」、71%以上で「Gold」、56%以上で「Silver」、40%以上で「Bronze」の格付けが与えられる。こういった格付け方法および格付けプロセスの詳細について、eSpace は格付け希望者に対してマ

ニュアルを配布している。その原文と邦訳はそれぞれ別添資料 1、2、および、3、4 に添付した。

表 2.1.3 SSR の評価モジュールの概要

No.	評価モジュール	評価項目の概要
1	Mission Index	ECOB (Environmental Consequences of Orbital Breakups) ^[8] に基づくミッションがスペースデブリ環境に与える影響(リスク指標)
2	DIT (Detectability, Identification and Trackability)	- 検出性：光学的検出とレーダー検出による検出性解析 - 識別性：（スコアリングに陽には含まれていない） - 追跡性：基準光学観測システム／追跡レーダースステムの使用を前提とした将来の軌道変化推定 - 衛星の特性評価 - 追跡オペレータのパフォーマンス評価
3	COLA (Collision Avoidance Capabilities)	- 軌道の状態把握 - 衝突回避：他の運用者との調整可否・調整能力、マヌーバ能力 - 通常運用終了後の軌道情報の維持
4	Data Sharing (データ共有)	- 衝突回避調整情報の共有・更新（連絡先情報等） - 衛星測位情報の共有・更新（天体歴やその誤差共分散等） - 衛星特性情報の共有・更新（質量、形状、マヌーバ能力等） - 自律マヌーバ特性の共有・更新（マヌーバ発動基準や SSA との共有、緊急停止手順等） - その他、周波数や衛星の異常等の広報の共有・更新
5	ADOS (Application of Design and Operation Standards, 設計・運用標準の適用)	- スペースデブリの低減と運用に関するガイドライン文書の適用、および、それらの文書に対するテーラリング有無 - 自主的に適用したガイドライン文書の有無 - 宇宙機/打上ロケットのデブリ放出有無 - 爆発確率の最小化 - 運用終了後の不活性化 - 宇宙機/ロケット上段の運用終了後の廃棄軌道投入有無 - UNCOPUOS の宇宙登録簿への関連オブジェクト登録有無
6	Extra Services (外部サービス)	- 軌道上サービス機能の実装設計 - 標準化インターフェースの組み込み - 寿命延長サービスの利用/実証へのコミットメント - 外部 ADR の利用/実証へのコミットメント

表 2.1.4 SSR における技術情報の提示方法と評価係数

技術情報の提示方法	係数	提示方法
① 申請書による主張	0.5	申請者による説明
② 技術資料の開示	0.6	ミッション設計の裏付けとなる技術資料を開示
③ 技術資料の一般公開	0.8	技術資料を政府/非営利団体に提出し、一般に公開
④ 第三者技術審査	1.0	第三者の技術専門家による適合性確認を実施

表 2.1.5 SSR の格付けにおける各モジュールの重みづけ

No.	評価モジュール	重みづけ
1	Mission Index	50%
2	DIT	12%
3	COLA	16.5%
4	Data Sharing	16.5%
5	ADOS	5%
6	External Services	ボーナス点（最大で 2%）

SSR における格付けプロセスは図 2.1.5 の通りであり、「Satellite Operators」が個々のミッションについて格付けを申請することとなっている。衛星に関連した主な事業者には、① 衛星のオーナー、② 衛星を利用して事業を進めるもの（衛星利用事業者）、③ 衛星の設計・製造をする事業者（衛星設計製造事業者）、④ 衛星の運用を請け負う事業者（衛星運用事業者）があり、1 つの事業者が①～④のうちの複数を兼ねる場合もある。これに対し、SSR の格付け申請者は衛星運用者（または衛星オーナー）であることを前提にしている。したがって、格付けの栄誉を享受するのは衛星運用者（または衛星オーナー）ということになる。つまり、衛星設計製造事業者は直接的には格付けの栄誉の対象になっていない。実際、格付け証（certificate）には Satellite Operator、すなわち、衛星運用者（または衛星オーナー）のロゴが入るようになっていて、衛星設計製造事業者のロゴは入らない。

格付けを希望する衛星運用者は eSpace から提供される Input file に必要事項を記入し、技術情報等の

裏付けとなるデータと併せて eSpace に提供する。それら入力データの一部は定量的計算に用いられ、一部は SSR Consortium にて評価される。そして、その結果をもとに、eSpace が衛星運用者に格付けアップのためのコンサルティングを行い、衛星運用者が入力データを修正し、再度、評価を実施する、というフィードバックループを形成していることが、SSR の特徴の一つである。

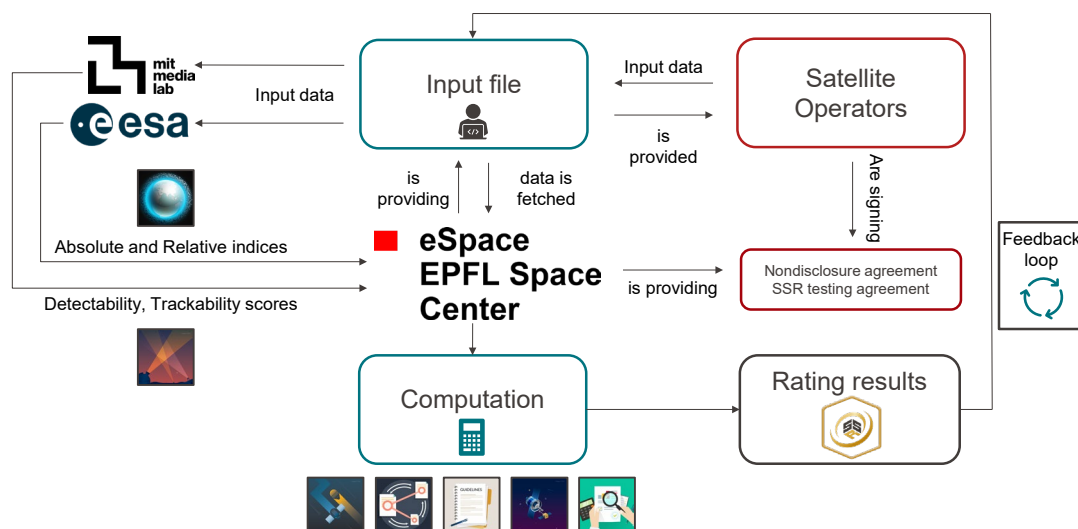


図 2.1.5 SSR の格付けプロセス

SSR の格付け認証システムは、米国グリーンビルディング協会（USGBC）が開発・運営する、環境に配慮した建物に与えられる認証制度 LEED（Leadership in Energy & Environmental Design）を参考にしている。LEED では、建築全体の企画・設計から建築施工、運営、メンテナンスにおける省エネルギーや環境負荷を評価することにより、建物の環境性能を客観的に評価する。評価は、七つのカテゴリーで行われ、それぞれ「必須要求項目」と「加点項目」が採点される。そして、加点項目で取得したポイントの合計に応じて、Platinum、Gold、Silver、Certified（標準認証）の四段階の認証ランクで格付けを行っている^[22]。これらはまさに SSR が採用している方式である。

なお、格付けの受審費用は、SSR のウェブサイト^[21]によれば、年間サブスクリプションで CHF 10,000（2022 年度のレート換算で、日本円にして約 140 万～150 万円程度）とされている。

以上が SSR の現状であり、SSR の主な特徴は表 2.1.6 の 7 つにまとめられる。

表 2.1.6 SSR の特徴

- 1) SSR はフォーラム標準であり、その運用窓口は eSpace であるが、格付け方法を決定するのは SSR Consortium である。
- 2) SSR のルール改訂の手続きや時期については規定されていない。
- 3) 2023 年 2 月時点において、スイスにて SSR を運営する法人（SSR 協会）を設立中であり、今後はそこを中心として組織体制が固められる予定である。
- 4) SSR は、衛星ミッションに対して格付けを希望する衛星運用者が eSpace に格付けを申請し、申請内容を SSR 側が評価し、格付け結果を衛星運用者に提供するものである。つまり、格付けされるのは個々の衛星ミッションであり、事業者（衛星運用事業者や衛星設計製造事業者、衛星利用事業者）ではない。
- 5) SSR は、規制ではなく、格付けというインセンティブを衛星運用者に提供することで、宇宙アクターの持続可能な活動を促進し、かつ、宇宙環境保全に貢献しようとするものである。
- 6) SSR の特徴は、インセンティブを提供する活動を認証ビジネスにしているところであり、eSpace 自身が格付け希望者に対してより高い格付けを得る方法をコンサルティングする点にある。
- 7) 宇宙環境保全に係るインセンティブを提供する活動を認証ビジネスやコンサルティングビジネスに結びつけているのは、2023 年 2 月時点では SSR だけである。
- 8) SSR にはアドバイザーとして、各国省庁の他、大手宇宙企業、スタートアップ企業、運用関連団体、民間 SSA 企業、保険会社と、一通りの関係者が参加している。
- 9) SpaceX や Planet、OneWeb 等の大規模コンステレーションミッションが格付けの β テストを受審している。
- 10) SSR は産業面からみると、「フォーラム標準」を用いた「第三者認証ビジネス」のルール（メイキング）戦略と捉えることができる。

また、SSR は開始されたばかりであることもあり、その格付け方法には少なからず課題があると言わざるを得ない。格付けを受ける衛星運用事業者の立場からみた課題としては、主に、表 2.1.7 に示す 3 つの課題に分類できる。そこで、表 2.1.7 に示した SSR の中身に関する課題の詳細については 2.3 節および 2.5 節にて分析し、今後の戦略案については 5.1.2 項に示すこととする。

表 2.1.7 格付けを受ける衛星運用事業者の立場からみた SSR の課題

課題	項目	内容
1. 位置づけ・価値	格付けの性質・価値	純粋にインセンティブを与えるものなのか、国によるなんらかのライセンスと結び付けようとする性質のものなのかが不明。それも含め、インセンティブの価値（費用対効果）が不明瞭。
2. 運営上の課題	評価対象	・衛星利用事業者や衛星設計製造事業者、衛星運用事業者を対象とするものではなく、個々の衛星ミッションが評価の対象となっている。評価対象の妥当性や各付けの効果が不明確
	技術情報の提供	・技術情報の中身によっては、輸出管理上、問題となる懸念がある ・第三者技術審査を受けると最も高得点になるが、ここでいう「第三者」が定義されていない
	運営体制	・認証機関が eSpace だけであり、全体の組織体系や認証機関のチェック体制等が不明瞭。その意味で、信頼度はそれほど高いとはいえない。 ・SSR の評価内容の改訂プロセス、認証機関の要件（認定プロセス）が定められておらず、運営方法が明確になっていない。 ・宇宙アクターからの認知度は高いとはいえない。 ・欧米主導でアジア・太平洋地域の影響力が小さい
3. 技術的課題	評価方法	例えば、以下の点が不十分 ・定量評価の科学的妥当性（例えば、ミッションインデックスの正規化方法） ・ADOS モジュールの評価方法（ガイドラインや設計標準への適合性評価方法） ・各モジュールの重みづけ ・技術成熟度の評価

なお、現在、SSR 運営組織内では新しいモジュールとして、Astronomy Module（別名 Dark Sky Module、衛星が発する光（太陽光の反射光等）が天文観測に悪影響を与える点を評価するモジュール）と、打ち上げ機が宇宙環境保全に与える影響を評価するモジュール（Launch Vehicle Sustainability Module）を追加することを検討中である（39 ページ 4.3 項参照）。後者は特に、我が国にとって不利になる可能性もあるため、2.5 節（19 ページ）にて分析する。

SSR については、SSR Consortium の Daniel Wood 氏をはじめとするメンバーが学会・シンポジウム等で精力的に発表を行うとともに、eSpace が UNCOPUOS でスイス代表として発表を行う、ESA が自機関の技術成果として SSR を紹介するなど、認知度を高めるために精力的に活動している。その甲斐もあってか、2022 年 9 月、世界の代表的宇宙コンサルティング企業 Euroconsult が主催する国際会議にて、EPFL 宇宙センターの SSR 認証への取組みが「持続的ビジネス賞」を受賞し、SSR への注目は高まっている。

2.1.9. アジア・太平洋地域における SSR の状況

一方、日本国内においては、当初、企業の研究者・技術者有志が SSR の動きをウォッチする必要性を認識し、SSR への対応について検討をしていた。そして、MIT 等、現・SSR Consortium メンバーによる SSR の具体的な検討開始当初、経産省の声掛けに一部民間事業者が応じて WEF での検討に参加するなどした。しかし、日本の産業界全体としての SSR に関する認知度は低く、2021 年の日本航空宇宙工業会（SJAC）の機関誌での記事^[23]や 2022 年 11 月の第 10 回 JAXA スペースデブリワークショップでの MIT による発表^[24]、宇宙法に関するシンポジウム^[25]、企業主体の研究会での発表^[26,27]等を通じて、ようやく認知され始めた段階である。また、アジア・太平洋地域の APRSAF 参加国においては、韓国など一部の国・地域では認知されているものの、まだ認知度は低いと言わざるを得ない^[28]。

2.1.10. STM と SSR

宇宙環境保全の観点では、STM についてこれまで国レベルでの検討に加え、民間主導でのガイドライ

ンの作成が進められてきている^[29-31]。実際、Space Safety Coalition^[32]や CONFERS^[33-35]、ASCEND^[36]がそれぞれ宇宙機の設計から運用、軌道上サービス（OOS）や近接運用（RPO）、低軌道での軌道上安全に関するベストプラクティスを示しており、こういった民間フォーラムで検討したものが国の規制や国際標準に反映されつつある。

これら民間 STM での検討内容を SSR に適用することは可能であろう。また、STM には宇宙空間の状態把握が不可欠であるため、SSA との関連が深い。SSA は SSR における DIT モジュールや Data Sharing モジュールでの評価項目にも含まれており、この点でも、STM・SSA の内容をそのまま SSR に適用する方が、SSR で独自のベストプラクティスや評価項目等を定義することで複数の基準ができてしまうよりもシンプルで、宇宙環境保全に資する活動をしようとする宇宙アクターにとっては、コストを抑えることができ都合がよいと考えられる。ただし、逆に言えば、仮に SSR が広く認知されるようになると、コストをかけてでも格付けを希望する衛星系運用事業者が多くなることも期待され、その場合、SSR 独自のコンサルティングビジネス等が創出・拡大する可能性はある。それと同時に、SSR が普及することで、民間 SSA ビジネスが発展する可能性もある。

一方、2.1.6 項（8 ページ）でも述べた通り、SSR の格付け結果を国レベルの STM（規制等）に利用することを検討する動きもあるので、SSR と STM および民間 SSA の関係をモニタしていく必要がある。

なお、国内でも、STM に関して、大規模コンステレーション（メガコンステ）への対応を中心に特許も含めた対応が進められている。その中で SSR に関して、次の 4 つの論点に整理している：(1) 軌道上物体数管理（運用衛星数の許認可のみならず、軌道降下中を含む軌道上物体数の管理をルール化すべきで、「設計寿命＞デオービット期間」をルール化すれば物体数単調増加は回避可能、という考え方）、(2) 推薬管理方法（「設計寿命＞デオービット期間」となるよう、推薬管理をする事業者を評価するルールは有効、という考え方）、(3) 自システム衝突防止（パッシブセーフティの仕組みを評価するルールは有効、とする考え方。実際、2025 年頃に想定される太陽活動活性期に太陽風やフレアの影響で衛星異常動作が発生した場合に、メガコンステ自システム内で衝突リスクがあることは問題となる）、(4) 軌道情報共有化（メガコンステ事業者のリアルタイム高精度軌道情報の共有化には工夫が必要であるものの、①メガコンステ高度帯への物体侵入を警報するルール、②危険解析と回避行動をメガコンステ事業者が実施する役割分担、③代表衛星の高精度情報と相対軌道情報の組み合わせは有効である、とする考え方）。SSR では(1)は Space Environment Capacity の導入で、(3)は Collision Avoidance モジュールでの評価で、(4)は Data Sharing モジュールでの評価でそれぞれ考慮はされているものの、上記のように想定する（今後つくろうとしている）宇宙環境保全に関するルールと連携した形にはなっていない。また、(2)については直接的には考慮されていない。その意味で、これらの論点は今後、SSR のルール改訂の際に参考になる。

2.1.11. 宇宙環境保全に関する各種勧告・規制や技術要求、ガイドラインや規格の制定・改訂に関する国際動向のまとめ

前項までの各機関の動向を整理すると、表 2.1.8 のようになる。ただし、2023 年 2 月時点では STM（STCM）、OADR に関しては、米国および米国企業を中心とする民間企業がリードしていることを前提に、これに対して各機関がどう対応しているか、という観点で整理した。

表 2.1.8 宇宙環境保全に係る国際動向

○：具体的な活動 △：利用 ◆：提唱 ■：議論

項目	WEF	FCC	SIA	SWF	ESPI	IAA	IADC	UN	ISO	SSR
SSR	○			◆		△				○
規制への SSR 組込				■		■				■
5 年ルール		○								△
STM、STCM			◆		○					△
SSA データ公開			◆	◆						△
OADR			◆		○			■		
大規模コンステレーション対応				◆			◆			
LTS (LTS2.0)							○	○		△
デブリ低減関連ガイドライン・標準							○	○	○	△
宇宙環境保全に関するベストプラクティスの提示				■						◆
OOC、SEC				■	○					△
ECOB					○					△

2.2. 我が国が SSR のルール制定や改訂に貢献できる領域や技術の調査・整理

SSR は既にルールが制定されて運営が開始されており、ルール制定の決定権は SSR Consortium（図 2.1.2、9 ページ）にあるため、今後、現状のルールの改訂や新たなルールの制定に我が国が影響力をもつことは容易ではなく、なんらかの戦略が必要となる。これについては 4.1 節（37 ページ）や 4.3 節（39 ページ）、5.1 節（40 ページ）にて詳細に検討するが、本節では、文献調査や宇宙環境保全に関連した技術を有する企業へのヒアリング結果に加えて、eSpace との議論の中で得られた情報をもとに、ルール制定や改訂に積極的に貢献できると考えられる領域、および、我が国が強みを発揮できると考えられる技術を示す。

2.2.1. 我が国が SSR のルール制定や改訂に貢献できる領域

Mission Index の概念は、2010 年代前半に我が国の研究者が提唱した「デブリインデックス」そのものであり、その具体的な計算方法や、その背景となる、軌道上デブリの推移モデル等も学術論文として公開されている^[37-40]。また、SSR のような格付けの考え方も当時に提唱されていた概念である。そして、現在でも Mission Index やそのベースとなる破碎モデル開発や軌道寿命予測、低軌道大規模コンステレーションのリスク評価等を含む宇宙環境保全に関連した学術研究をリードしてきている^[41-43]。一方で、SSR では Space Environment Capacity を用いて Mission Index を正規化しているが、その手法は学術的にコンセンサスが得られているわけではない。同様に、各モジュールの重みづけについても、その妥当性は示されていない。また、ガイドラインや国際標準についても日本は十分な経験・理解を有している。

また、SSR の特徴である認証ビジネスに関しては、「航空宇宙産業向け品質マネジメントシステム」認証制度、いわゆる 9100 国際認証制度が参考になると考えられる。実際、我が国はこれに関して JAQG は米国（AS9100）・欧州（EU9100）・日本（JIS Q 9100）の相互認証体制の構築を行ってきており、IAQG（国際航空宇宙品質グループ）の中で影響力をもって活動している^[44]。

以上より、次の 5 点について改訂をする際、改訂に積極的に貢献できる可能性がある。これらのうち、1)～4)は表 2.1.7 の「技術的課題」に対応しており、5)は「運営上の課題」および「位置づけ」に対応している。

- 1) Mission Index の定量化方法
- 2) それらの正規化手法
- 3) 各モジュールの重みづけ
- 4) ADOS モジュールにおける設計標準・運用標準・ガイドライン等の適切な適用方法
- 5) 認証ビジネスの国際展開

これらで実際に貢献していくためには、まず、SSR 協会の動きをモニタし、アクセスできるチームを国内で構成する必要があると考えられる。その上で、これら 5 つも含めた、我が国がルール形成に貢献していくための戦略については 5.1.2 項（41 ページ）にて議論する。

2.2.2. 我が国が SSR のルール制定や改訂に貢献できる技術

2.2.1 節に示した領域とは別に、SSR のルール制定や改訂に積極的に貢献する方法としては、宇宙環境保全に有効な技術を格付け認証項目に追加していくことが考えられる。その際、個別の技術を追加するというよりは、技術分野を追加していくことが適切であると考えられるが、そういった追加戦略については 5.1.2 項（41 ページ）にて議論することとし、本項では宇宙環境保全に有効な国内技術について整理する。

宇宙環境保全技術は多方面にわたるが、SSR の特徴である認証ビジネスの観点では、主には表 2.2.1 に示す技術分野が挙げられる。なお、最近では、運用終了後の衛星を墓場軌道へ移動させたり軌道降下させて燃え尽きさせたりするサービスは、デブリとなってしまっているものを除去するものと区別するため、End_of_Life（EOL）サポートサービスと呼ばれるようになってきているが、ここでは EOL サポートサービスも含めて能動的デブリ除去（ADR）と呼ぶこととする。

表 2.2.1 認証ビジネスの観点で必要な宇宙環境保全技術と其中で我が国が貢献できる技術

技術分野	技術目的	我が国が中心的に貢献できる可能性があると考えられる技術
SSA 関連技術	検出	
	同定	
	追跡	
破碎防止技術	推進タンク破碎防止	
	バッテリー破碎防止	
軌道離脱技術	自律的デオービット	・ドラッグセイル（展開膜）技術 ・EDT 技術
	能動的デブリ除去	・レーザー利用除去技術 ・軌道上ロードサービス技術

表 2.2.1 には我が国が特に積極的に貢献できると考えられる技術も記載した。その中で、まず、SSA 関連技術については最近でも様々な研究がなされており、また、美星スペースガードセンター（BSGC）の 1m および 50cm の光学望遠鏡による静止軌道付近物体の観測や上齋原スペースガードセンター（KSGC）のレーダーを使った低軌道物体の観測が行われている[44, 46]。しかし、海外では COMSPOC[47]、L3 Harris Technologies[48]、ExoAnalytic Solutions[49]、LeoLabs[50]、Privateer Space[51]、SCOUT[52]といった企業が既に SSA 関連サービスのビジネスを行っているのに対し、国内では、複数の企業が高い技術を有しているが、本格的なビジネス化はこれからという段階である[53]。それゆえ、表 2.2.1 では空欄になっている。逆に言えば、SSR が発展することで、国内でも民間 SSA ビジネスが拡大する可能性はある。同様のことは破砕防止技術についてもいえる。

一方、軌道離脱技術については既に国内企業がビジネス展開を始めており、その主なものとしては表 2.2.2 に示したものが挙げられる（アストロスケール社はグローバル企業であるが、国内にも拠点を有することから記載した）。これらのうち、中島田鉄工所とアストロスケール社は宇宙実証を既に行っている。

表 2.2.2 我が国の企業による軌道離脱技術の例

自律的デオービット技術	中島田鉄工所	膜展開式軌道離脱装置 DOM ^[54]
	アクセルスペース	膜展開式軌道離脱装置 D-SAIL ^[55]
	ALE	EDT 式軌道離脱装置装置 ^[56]
デブリ除去技術	アストロスケール	捕獲式デブリ除去他軌道上サービス ^[57]
	スカパーJSAT	レーザー照射式デブリ除去サービス ^[58]
	川崎重工業	ロケット上段除去衛星 ^[59]

また、これらの他にも、例えば、JAXA が進める商業デブリ除去実証プログラム CRD2（Commercial Removal of Debris Demonstration）^[60]では、アストロスケール社がフェーズ I の民間実施パートナーとして選定されており、非協力ターゲットデブリへの接近・近傍制御やデブリの運動や損傷・劣化の様子を把握するための画像・映像取得等をミッションとする ADRAS-J（Active Debris Removal by Astroscale-Japan）を打ち上げ予定であるなど、国内では民間企業と JAXA との共創でデブリ除去技術の実証・実用化に向けた活動が進んでいる。

この他に注目すべき技術として、現在、三菱重工業が開発中のロケット上段モニタ装置 M-Pack^[61]が挙げられる。図 2.2.1 は文献[61]のプレゼン資料から M-Pack に関する説明部分を抜粋したものである。M-Pack は衛星分離後のロケット上段の状態をモニタするための装置で、慣性センサ・GPS 受信機・帯電センサ・カメラ等を搭載し、データ処理系、地上との通信系、太陽電池やバッテリーを含む電源系を有するパッケージであり、2年以上の運用を目指している。M-Pack が実現されれば、M-Pack で得られるデータがデブリ関連の研究・開発に利用できるだけでなく、M-Pack を搭載したロケット上段のデブリ除去装置による捕獲・廃棄実験等への利用も可能となる。また、PMD デバイスを搭載しでロケット上段を廃棄する場合にも、PMD デバイスの効果をモニタすることができるなど、宇宙環境保全に関する研究・開発に大きく貢献することが期待される。今後、こういった活動を格付け評価に反映させることで、格付け評価の実質化（机上解析だけでなく、軌道上データに基づく評価）につながると考えられる。

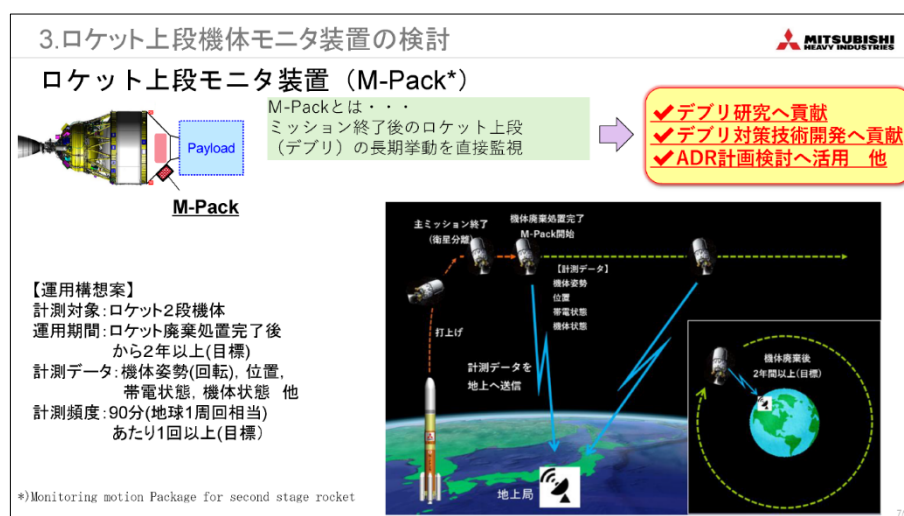


図 2.2.1 M-Pack（文献[61]のプレゼン資料より）

このように、日本は軌道離脱技術やそのモニタ技術に強みを有するが、現行の SSR では、これらの技

術は Extra Service モジュールに分類され、衛星ミッションにおいてこれらの技術を用いたとしても、ボーナスポイントを獲得できるに過ぎない。宇宙環境保全の観点ではこれらの技術は重要であることから、今後、SSR の格付け評価方法を改訂する際には、これらの技術に対して高いポイントを与えるよう提案することが考えられる。これについては 3.2 節で詳しく議論する。

なお、以上の技術の最新動向については、国外の技術動向と併せて 3.1 節（24 ページ）にてまとめる。

2.3. SSR における技術情報の提示方法や改善すべき課題、着目すべき評価方法や必要なデータの調査・整理

SSR の各モジュールの評価に必要なデータは表 2.3.1 の通りであり、我が国にとって影響度が比較的大きいという観点で着目すべき評価方法を整理したのが表 2.3.2 である。

表 2.3.1 SSR の格付けに必要なデータ

No.	評価モジュール	必要なデータ
0	事前質問	以下の質問に YES/NO/Partially で答える。Partially の場合は説明を付記する。 0.1 PMD に関する IADC デブリ低減ガイドライン 5.3 節（静止衛星の墓場軌道への投入や低軌道衛星の 25 年以内廃棄等）を遵守するか？ 0.2 IADC デブリ低減ガイドライン 5.2.1 項（破砕確率の最小化）に定義されている運用後の宇宙機の不活性化に取り組むか？ 0.3 IADC デブリ低減ガイドライン 4 章で定義されているデブリ低減プランをもっているか？ 0.4 格付け対象ミッションは宇宙物体の意図的破壊を避けるものであるか？ 0.5 格付けに必要な付属書類を提出できるか？
1	Mission Index (定量的評価) (50 点)	1.1.1 衛星数 1.1.2 衛星質量、衛星断面積 1.1.3 運用寿命（予定値） 1.1.4 複数衛星の場合、放出間隔（単機の場合、1 年と設定） 1.1.5 平均高度／軌道傾斜角 1.1.6 寿命時の近地点および遠地点高度 1.2.1 期待される PMD 成功率 1.2.2 衝突確率レベル（衝突回避マヌーバができない場合） 1.2.3 マヌーバに必要な日数（デフォルトは 1 日）
2	DIT (定量的評価) (12 点)	2.1.1 形状（円筒／直方体／球／他） 2.1.2 CAD データ（オプション）／外形寸法 2.1.3 近地点および遠地点高度／軌道傾斜角／昇交点赤経／緯度指数 2.2.1 運用者は軌道情報を入手するか否か（Space-Trak か、SSA 事業者からかから入手するか、自社で追跡するか、否か）／打上げ後 14 日以内に識別・追跡ができるか否か／打上げ後 1 日以内に識別・追跡ができるか否か 2.2.2 放射特性データ（ボーナス）／光学特性データ（ボーナス） 2.2.3 ノミナルの姿勢・指向精度要求 2.3.1 打上げ機からの放出プロセス 2.3.2 運用軌道に至るまでの初期運用の詳細な記述 2.3.3 ロケットからの衛星放出高度／その高度での放出衛星数 2.3.4 （目的軌道まで軌道変更する前に）放出軌道に留まっている時間 2.3.5 運用高度に至る前にそういった一時的な高度が存在するか否か 2.3.6 高度や軌道傾斜角はミッション運用中に変化するか？
3	COLA (定性的評価) (16.5 点)	3.1 運用者の軌道決定能力（Space-Trak や SSA プロバイダからの提供／自身で決定／自身での決定精度が 10km 以内／1km 以内） 3.1 運用者の調整頻度（調整不可能／緊急時のみ対応／1 日のうちの決められた時間帯／24 時間体制） 3.2 運用者の衝突回避調整能力（なし／接近情報等の受領窓口を有し、SSA プロバイダからの情報や公開カタログから軌道や予定しているマヌーバが問題ないかチェックできる／CDM 等のデータを解釈してリスクを判断し、デブリ低減のためのマヌーバを計画でき、接近情報を自動的に評価するシステムを有する／衝突評価・低減のための手順を文書化していて、SSA 情報共有カタログをみて運用中の宇宙機や予定しているマヌーバのチェックができる） 3.3 衝突回避のためのマヌーバ能力（なし／何かしらのマヌーバ能力／軌道 6 周回以内に少なくとも Δv が 1cm/s 程度のマヌーバ可能／軌道周回以内に少なくとも Δv が 1cm/s 程度のマヌーバ可能） 3.4 運用終了後の軌道情報（なし／墓場軌道投入か大気圏突入まで軌道情報を維持／軌道情報を 10km 精度で維持／1km 精度で維持）

4	Data Sharing (定性的評価) (16.5 点)	以下、データ共有先（なし／SSA プロバイダ／調整要求に応じて他者にも／運用者の自主的ネットワーク／公開）によって配点が異なる。 4.1 衝突回避調整情報：連絡先の情報、NORAD 情報等、対応時間、COLA 応答時間 4.2 衛星測位情報：衛星天体歴情報（過去およびマヌーバを含む予定情報）、天体歴の共分散、共分散の特性、打ち上げ時間 4.3 衛星特性情報：質量、サイズ（外形寸法／簡易 CAD モデル／その他）、マヌーバ可否、マヌーバ能力、運用状態 4.4 自律マヌーバ特性：マヌーバ発動基準、計画マヌーバが SSA 共有情報のどこにどの程度の頻度で反映されるか、誤作動時に自律手順を中断するための緊急停止手順 4.5 その他（ボーナス点）：周波数情報、衛星の異常情報、学術・政府研究支援のためのデータセット、自動でデータ共有を可能とするための API
5	ADOS (定性的評価) (5 点)	ガイドライン等への準拠の有無。備考欄に、どの程度準拠しているかを記載 5.1.1 デブリ低減ガイドライン（UNCOPUOS および IADC） 5.1.2 LTS ガイドライン 5.1.3 スペースデブリ低減標準（ISO24113、FSOA、NASA 等） 5.1.4 標準的な運用規格（CCSDS 508.0-B-1 または 502.0-B-2） 5.1.5 ITU の基準 5.1.6 接近運用をする場合には、例えば CONFERS の安全標準や有人用安全標準その他に、以下の質問に回答する。 5.2.1 上記の基準等のテーラリングを行っているか？（テーラリングの度合いによって、格付け側が 0～1 の係数をかけて採点） 5.2.2 宇宙機およびその打上げ機は運用中にデブリを放出するか？（YES／放出するが 1mm 未満） 5.2.3 軌道寿命期間内で爆発確率 x をどこまで最小化するか？（何もしない場合は $x = 1$。スコアは $1-100x$。ただし、0 を下回る場合は 0） 5.2.4 運用寿命期間後の宇宙機および打上げ機をそれぞれ不活性化するか？（制御再突入／デオービット／軌道変更。それぞれの場合の成功確率も記載） 5.2.5 運用終了後の宇宙機および打上げ機はそれぞれ廃棄軌道（保護領域と他オペレータの運用軌道を尊重した廃棄軌道）に投入されるか？（制御再突入／デオービット／軌道変更。それぞれの場合の成功確率も記載） 5.2.6 打ち上げ国は、国連宇宙空間平和利用委員会の宇宙登録簿に、打上げペイロード及び関連オブジェクトを登録することを約束しているか、もしくは登録したか？（YES／NO）
6	Extra Services (ボーナス)	6.1 軌道上サービス機能（OOS）の有無（0.5 点） 6.2 OOS のための標準インターフェースの有無（0.5 点） 6.3 寿命延長サービスの利用の有無（0.5 点） 6.4 外部の ADR サービスの利用の有無（0.5 点）

表 2.3.2 SSR における着目すべき評価方法

No.	評価モジュール	着目すべき評価方法	着目理由
1	Mission Index	Mission Index の計算式	学術的妥当性の懸念
		PMD 成功率の提示	計算根拠の妥当性の懸念
2	DIT	衛星の CAD の提供（必須ではないが、提供すると高得点）、放射特性や光学特性データの提供（ボーナス）	技術流出の懸念
		放射特性や光学特性データの提供（ボーナス）軌道情報を民間 SSA 事業者から入手することを推奨	民間 SSA のビジネスチャンスがある
3	COLA	マヌーバ能力の提示	技術流出の懸念
4	Data Sharing	周波数情報の共有	ハッキング等の懸念
		衛星の異常情報の共有	技術流出の懸念
5	ADOS	打上げ機に関する記述	日本のロケットを使用するとスコアが下がるような評価基準になる懸念
6	Extra Services	OOS 用の具体的な標準インターフェースは定義されていない	我が国が提案する余地がある
		関連技術の技術成熟度（TRL）が問われていない	TRL をスコアに反映させることで、我が国の技術力のある民間 ADR 企業の取組の価値が適正に評価される可能性がある

2.1.8 節の表 2.1.4 (11 ページ) に示した通り、各評価項目については①申請書による主張、②技術資料の開示、③技術資料の一般公開、④第三者技術審査の 4 つのうちのいずれかの形で技術情報を提示することとなる。このことと、表 2.3.2 に示した着目すべき評価方法について、企業の取組の価値が適正に評価されるという観点でみた場合の改善すべき課題、および、日本企業にとって有利になるという観点でみた今後の可能性をまとめたのが表 2.3.3 である。現状では技術情報を eSpace に提供するため、海外への技術流出が懸念されるが、第三者技術審査が最も評価係数が高いことを考えると、我が国の機関、例えば、宇宙活動法に基づく審査を第三者技術審査として SSR 運営組織に認めさせることができれば、日本企業の取組の価値が適正に評価される可能性がある。また、第三者技術審査を我が国の企業／機関が請け負うことができるようになれば、第三者機関やそれを認定する機関の市場が新たにできることになる。なお、表 2.3.2 や表 2.3.3 の内容に関しては、2.5 節でさらに分析する。

表 2.3.3 SSR における技術情報の提示方法と改善すべき課題と今後の可能性

技術情報の提示方法	改善すべき課題	今後の可能性
共通事項	英語での申請によるコスト増（例えば日本語の技術資料しかない場合の追加コストの発生など）	
② 技術資料の開示 ③ 技術資料の一般公開	日本の技術情報が海外へ流失するリスク	
④ 第三者技術審査	適合性を確認する第三者機関自体の信頼性の確保	・ 格付けを希望する側が「第三者」を申請できる可能性

2.4. 我が国主導のルール制定・改訂に備え協力見込みのある企業・関係者等の調査・整理

宇宙環境保全に関するルール制定・改訂に我が国が貢献することを想定した場合、国内においては、表 2.4.1 の左列のような企業・関係者に協力を求めることになると考えられる。そこで、それぞれ、右列に示す企業・関係者等にコンタクトをとり、ヒアリング等を行って、協力していただける旨を確認した。この他にも、例えば No.7 の SSA ビジネス関係者としてはいくつかの関係企業の協力が期待される。

表 2.4.1 協力見込みのある国内の企業・関係者等

No	協力を求めるべき対象者	協力見込みのある国内企業・関係者等
1	認証組織・認証ビジネスに知見を有する機関	・ 航空宇宙関連事業者による団体、航空宇宙の認証関係団体
2	宇宙関連の国際標準・規格の関係者	・ デブリ発生防止に関する技術及び各種ガイドライン等の専門家。 ・ JAXA 関係部署
3	他の宇宙環境保全活動、特に、STM の関係者	・ 人工衛星設計製造事業者（ISO 関係者、STM 関係者）
4	宇宙法等の研究者	・ 国際法・宇宙法の専門家（大学教授）
5	Mission Index の研究者	・ 軌道力学、デブリ破砕や軌道伝播解析研究、デブリ観測研究の専門家（大学教授）
6	DIT、特に、SSA 関連の研究者	・ JAXA 関係者
7	DIT、特に、SSA ビジネス関係者	・ 人工衛星設計製造事業者
8	デブリ低減技術の関係者	・ 人工衛星設計製造・利用事業者 ・ デブリ低減事業者 ・ 人工衛星運用事業者
9	宇宙環境保全サービス事業者	・ 軌道上サービス事業者
10	宇宙利用サービス事業者	・ 人工衛星設計製造・利用事業者
11	衛星設計製造事業者	・ 人工衛星設計製造事業者
12	衛星運用事業者・運用受託業者	・ 人工衛星運用事業者
13	打上げ機設計製造事業者・研究者	・ 打上げ機設計製造事業者 ・ 打上げ機の専門家（大学教授）
14	格付けの経験を有する事業者	・ 格付け認証の試行を受けた人工衛星事業者

2.5. SSR の分析と SSR 改訂案の検討

2.1.8 項 (8 ページ) において、SSR の概要を述べ、その特徴を表 2.1.6 (12 ページ) に、格付けをされる側からみた課題を表 2.1.7 (13 ページ) に示すとともに、格付け評価の中身について、着目すべき評価方法を表 2.3.2 (18 ページ) に、課題や今後の可能性を表 2.3.3 (19 ページ) に示した。そこで、以下、

2.5.1 項ではこれらをさらに分析し、それを踏まえて、0 項では直近の現実的な SSR 改訂案を示す。

2.5.1. SSR の分析

表 2.1.7 (13 ページ) に示した通り、現状の SSR の課題は位置づけ・価値、運営面、技術面（評価方法・内容）の 3 点に分類できる。逆に、評価できる部分もある。そこで、以下では、ヒアリング結果等に基づき、この 3 点のそれぞれについて、「現状」と、「評価される点」、「改善すべきと考えられる点」を整理する。そして、それぞれの「評価される点」を活かしつつ「改善すべきと考えられる点」を改善していく流れ、すなわち、SSR 改訂の方向性を最後に示す。

2.5.1.1. 位置づけ

SSR の位置づけ・価値を表 2.5.1 のように分析した。

表 2.5.1 SSR の位置づけ・価値の分析

1	現状	1.1 法的拘束力や公的な位置づけがない、フォーラム標準である 1.2 衛星事業者の宇宙環境保全への自主的な取り組みを評価し、格付けを行うものであり、高い格付けを得ることが衛星事業者にとってのインセンティブとなる 1.3 コンサルティングを含む「格付け」を認証ビジネスとしている 1.4 規制ではなく、格付けというインセンティブを衛星事業者に提供することで、宇宙アクターの持続可能な活動を促進し、かつ、宇宙環境保全に貢献しようとするものである 1.5 ただし、宇宙活動に関する各国、特に、宇宙環境保全の評価体制が十分に整っていない国の規制やライセンスと結びつけることの可能性について、IAA というアカデミックな場で検討している
2	評価される点	2.1 宇宙環境保全活動を認証ビジネスに結び付けた点（2023 年 2 月時点では、認証ビジネスに結び付けたのは SSR のみ） 2.2 規制ではなくインセンティブにより宇宙環境保全活動を推進している点
3	改善すべきと考えられる点	3.1 格付けの利用価値が不明瞭であり、費用対効果が見えない（見積もれない） 3.2 規制やライセンスと結びつけるよう各国に働きかけるか否かを明確にすること（衛星事業者にとって、規制やライセンスと結びつかないかは死活問題であるため）

この表の 3.1 の利用価値については、むしろ、「費用を抑えつつ、SSR をうまく利用して自社の事業の価値を高める」というスタンスに立って考えることもあり得る。実際、アクセルスペース社は、自社の持続可能な宇宙活動への貢献の一環として、「Green Spacecraft®」の概念を打ち出しており^[64]、各国政府や国際機関が提示する一般的なガイドラインで要求されるよりも広い範囲で一段高い「Green Spacecraft 基準」を設定し、自社の開発する衛星に適用するとともに、宇宙における環境問題の解決に向けて、世界中の宇宙アクターにこの基準の適用を働きかけるとしている。こういった、個々の民間事業者の宇宙環境保全に向けた活動の妥当性の客観的根拠の一つとして、格付け認証が利用できる可能性もあると考えられる。



図 2.5.1 アクセルスペース社による Green Spacecraft の概念^[64]

2.5.1.2. 運営面

運営面に関しては、評価対象、技術情報の提供、運営体制の 3 つの観点で表 2.5.2 の通りに整理した。

表 2.5.2 SSR の運営面の分析

1	現状	1.1.1 評価対象は事業者ではなく、個々のミッションである。 1.2.1 格付けに際し、衛星の設計・運用・廃棄に関する情報や打上げ機に関する情報を認証機関に提供する
---	----	--

		1.2.2 認証機関に提供する情報の裏付けについては、根拠文書の提出だけでなく、専門家による第三者技術審査も選択肢に含まれる。ただし、2023 年 2 月時点では「第三者」は定義されていない 1.3.1 SSR consortium と eSpace という一部の関係者が運営する組織であり、認証機関は eSpace のみである。アジア・太平洋地域での認知度は高くない。 1.3.2 一般的な認証システムに必要な、認証機関を認定するための機関（認定機関）とその要件や、認証機関に対する要件、運営のチェック体制、認証内容の改訂の手順化等は整備されていない
2	評価される点	2.1.1 宇宙環境保全に与える影響度（MI や DIT）はミッションの内容や軌道等によって異なるため、各ミッションの影響度を定量的に評価することのみを目的にするのであれば、個々のミッションを評価対象とすることは妥当である。
3	改善すべきと考えられる点	3.1.1 格付けの目的が衛星事業者の宇宙環境保全への自主的な取り組みを評価してインセンティブを与えることであるとしたら、事業者を評価対象にする方が適切であるとも考えられる。特に、実質的には格付け申請者である衛星運用事業者（または衛星オーナー）が評価対象になると考えられ、衛星設計製造事業者は対象になっていない。宇宙環境保全に対する衛星設計製造事業者の役割は大きいにも関わらず、直接的な評価対象にならない点には疑問が残る。 3.2.1 技術情報の中身によっては、輸出管理上、問題となる懸念がある。 3.2.2 第三者技術審査を受ける際、認証機関が第三者を指定するのか、格付けを受ける側が指定できるのかがあいまいであり、早急に「第三者」を定義すべき。特に、認証機関側が指定する場合、3.2.1 項と同様、技術情報流出の懸念がある。 3.3.1 他の国際認証制度を参考にするなどして、認証体制を整える必要がある。 3.3.2 体制整備に加えて、国際的な認知度を高める活動を進める必要がある。

この表の 3.2.1 の技術情報の問題は、我が国においては安全保障貿易管理の問題に相当する。これについては、付録 A.3（56 ページ）に付した通り、eSpace や SSR 協会が所在するスイスがいわゆるグループ A 国であるため、リスト規制のみを考慮すればよい。ただし、人工衛星そのものや人工衛星関連技術の多くがリスト規制の対象になっているため、公知の事実等を除いて、技術情報提供には**経済産業大臣の許可を取得する手続が必要**となる。また、情報提供の対象が eSpace や SSR 協会だけであれば、NDA を結ぶことで情報流出の懸念は低減するが、第三者技術審査を受ける場合、その「第三者」がグループ A 国以外の者であると、キャッチオール規制を受けることになる。

2.5.1.3. 技術面（評価方法・内容）

SSR の格付け評価方法や内容を技術的・学術的にみると、現状には数多くの課題がある。そこで、ここでは、当面の主な課題と考えられるものを取り上げることとし、表 2.5.3 のように整理した。

表 2.5.3 SSR の技術面の分析

1	現状	1.1 定量評価を行う 2 つのモジュール（Mission Index および DIT）と、定性的評価を行う 3 つのモジュール（COLA、Data Sharing、ADOS）とボーナスモジュールである、Extra Services の計 6 つのモジュールでそれぞれミッションを評価する。 1.2 それぞれのモジュールの評価点を重みづけして総和をとったものを評価スコアとして、そのスコアに応じて格付けを行う。 3.1 2023 年中の Launch Vehicle Sustainability（LVS）モジュール追加を検討中である。
2	評価される点	2.1 6 つのモジュールにより、大枠としては、宇宙環境保全に資する活動（運用）の評価に必要なものは網羅されている。
3	改善すべきと考えられる点	当面の改善すべき点としては、例えば以下のものが挙げられる。 3.2 宇宙環境保全の実質化 6 つのモジュールの中身、すなわち、この評価指標をみると、ADOS 以外は衝突被害・衝突回避に関するものであり、これだけで 0.95 の重みづけがされている。実際には、宇宙環境悪化の主要要因の一つに衛星自身の軌道上破砕（具体的には推進タンクの破砕など）がある。宇宙環境悪化の主要要因に即した評価指標および重みづけをすべきである。 - 衝突被害・衝突回避に重点を置くのであれば、大規模コンステレーションの評価（計算式等）を適切に行う必要がある。 3.3 ガイドラインの適用方法 - 単に「ガイドラインに適合しているか」を問うのではなく、適合させるべきと考えるガイドラインの個々の項目を指定し、それぞれへの適合／不適合を問うとともに、それらの重みづけもすべき。

	- 多くの国では IADC や ISO 等のガイドラインや標準を踏まえ、場合によってはそれらよりも詳細なガイドラインを設けている場合もある。例えば、日本であれば JMR-003 などが挙げられる。それらに適合しているものにはボーナス点を加算するなど、宇宙環境保全に対する努力の度合いに応じたスコアになるようにすべき。 3.4 定量化手法 - SEC を用いて Mission Index を正規化しているが、そもそも SEC の定量化については学術的議論の最中であり、正規化の学術的妥当性を示すことができない。 - Mission Index の重みが 50% と極めて大きい、その定量化方法はまだ研究段階にあることや、上記 3.2 の通り、軌道上破砕が考慮されていないなど、十分とはいえない部分もあるため、重みづけを大きくすることには疑問がある。むしろ、既に十分に検討されたガイドラインへの適合性を上記 3.3 の通りに詳細化し、重みづけを大きくすることもあり得る。 3.5 技術成熟度 (TRL) の評価 - DIT、COLA、Extra Services に関しては、これらに用いるハードウェアやソフトウェアの技術成熟度が重要になる（実際、運用時に想定している性能を発揮できなければ意味がないため）。しかし、SSR では技術成熟度は問われていない。 3.6 LVS モジュールの内容 - LVS モジュールについては、2023 年 2 月時点では検討が始まっていないが、SSR Consortium メンバーである Francesca Letizia の論文^[62]では図 2.5.2 にある通り、我が国の H-II の軌道上生存率が打ち上げ後、短期間に低くなるとしている。これは、打ち上げ時に断熱材が機体から剥離することを“破砕”とカウントしているからであるが、低高度でのこの剥離が宇宙環境に与える影響はほとんどない。しかし、この論文ではこの剥離を一般的な推薬タンクの破砕等と同等に評価しており、LVS モジュールがこの論文をベースに打ち上げ機の宇宙環境への影響を評価することになると、学術的にみて誤った評価になると言わざるを得ない。このようなことがないよう、LVS モジュールの評価方法は適切なものにする必要がある。	図 2.5.2 文献[62]による主要ロケットの軌道上生存率の評価
--	--	--

2.5.2. SSR の直近の改訂案

SSR を実質的に持続的な宇宙環境保全に資する格付け認証システムにしていくためには、SSR の「あるべき姿」を定義し、中・長期的な展望を持って改訂作業を進めていくべきである。そこでは、具体的な評価方法や技術論以前に、目指すべき方向・フィロソフィーに係る、根本的な部分も含まれると思われる。

しかし、既にルール形成がなされて格付け認証が始まっていることを考慮すると、まずは、現在の格付け方法をベースに、「① 格付け希望者に学術的に説明しにくい部分をなくす」という観点で改訂案を検討することが肝要である。また、宇宙環境保全活動を認証ビジネス化するという SSR の特徴を活かすためには、「② 認証ビジネスとして成立させる」という観点で改訂案を検討することも重要である。そこで、この 2 点を念頭に、改訂案を検討した結果を以下に示す。なお、①については、ヒアリング、および、関係者からの意見収集の結果も踏まえて整理した。

表 2.5.4 SSR の直近の改訂案

No	項目	現状	改訂案
1	格付け対象	個々の衛星ミッションであり、格付け申請者は衛星運用事業者（またはオーナー）	格付け証に衛星運用事業者のロゴだけでなく、希望によって衛星設計製造事業者のロゴも記載できるようにする（衛星運用事業者と衛星設計製造事業者が連名で申請できるようにする）
2	第三者技術審査	第三者が定義されていない	格付け申請者が第三者を指定し、それを SSR 協会が承認すれば、それによる審査を第三者技術審査として扱う
3	Mission Index	宇宙環境悪化（デブリ増加）の主要要因に即していない。特に、主要要因の 1 つである破砕防止対策が考慮されていない	少なくとも、破砕防止を評価する項目を追加し、計算式に反映させる。

4	Mission Index	SEC による正規化の詳細が不明	少なくとも、SEC の定義式や正規化の詳細を格付け申請者に提示（必要であれば NDA を結んだ上で提示）
5	TRL (技術成熟度)	DIT や COLA の一部、ならびに、Extra Services のほぼ全てに関しては、実効性という意味で、TRL が重要となる。しかし、TRL は評価していない	評価項目の中で TRL が重要となるものを識別し、それらの項目のスコアについては TRL で重みづけをする。
6	ADOS	「ガイドラインを適用しているか」だけを問うている	ガイドラインの項目を列挙・整理し、一つ一つの項目に対して適合性を問うようにする
7	ADOS	対象とするガイドラインが指定されている	指定ガイドライン内の項目にないものについても、格付け申請者が指定した各国のガイドラインの項目に記載され、宇宙環境保全に資すると SSR 協会が認めたものについては加点
8	重みづけ	Mission Index が 50%、ADOS が 5%、Extra Services（軌道上サービス関連）は最大で 2%	ガイドラインへの適合は宇宙環境保全活動の基本であると考えらるならば、ADOS の割合を高くする。また、衛星機数の増大により、今後、軌道上サービスが増えることを考慮すると、Extra Services の割合も高くすべき。
9	大規模コンステレーション	単機ミッションと同様の基準で評価（多数機であることは考慮されているか、詳細は不明）	大規模コンステレーションの評価については国際的に議論の最中であるので（表 2.1.8、14 ページ）、当面はより厳しめの格付けがなされるようにする
10	大規模コンステレーション	COLA や Data Sharing の重みづけが単機ミッションと大規模コンステレーションが同等で、どちらも 16.5%	大規模コンステレーションでは、軌道情報の共有や衝突回避行動は極めて重要になると考えられるため、重みづけを重くする。
11	改訂プロセス	決められていない	改訂スケジュールも含めて、改訂プロセスを明文化する

3. 高度な環境保全性と信頼性を有し持続的宇宙利用を可能にする衛星コア技術に関する国内外動向及び我が国企業の優位性調査

本章では持続的宇宙利用を可能とする衛星コア技術、ならびに、その中で我が国企業が優位性をもつ技術をまとめる。また、SSR を例にとりて、格付け認証を伴う宇宙環境保全ルールが形成された場合の新たな市場の規模を推計する。

3.1. 高度な環境保全性と信頼性を有し持続的宇宙利用を可能にする衛星コア技術開発の国内外の動向調査・整理

宇宙環境を保全し、持続的宇宙利用を可能にするためには、① 運用中の衛星を適切に交通管理すること、② デブリを発生させないことが必要である、また、この他に、コンステレーション衛星の増加に伴い、③ 地上からの天文観測に悪影響を与えないための対策も必要とされている。③については衛星表面に反射率の低い素材を用いる等の対策が考えられていること、①については STM 等で管理されるであろうことを考慮し、本節では②、すなわち、デブリ発生防止に関し、高度な環境保全性を有し持続的宇宙利用を可能にする衛星コア技術（以下、衛星コア技術と呼ぶ）という観点で動向調査をした結果をまとめる。なお、そういった衛星コア技術の信頼性については、軌道上実証がなされているか否かで評価することとする。

表 3.1.1 は衛星からのデブリ発生原因をまとめたものである^[65]。最右列の「特定技術」は、従来の衛星技術に加えて、宇宙環境保全の観点でなんらかの技術を別途必要とするか否かという観点で評価した。この「特定技術」に対応した衛星技術が、まさに上記の衛星コア技術となる。

表 3.1.1 衛星からのデブリ発生原因

項目	分類	内容	特定技術
運用時の放出物	意図的放出	締結物・カバー等の離脱	
	その他	経年劣化による素材の剥離等	
軌道上での破砕	意図的破壊	破砕実験等	
		再突入時の意図的・非意図的破壊	
	事故	推棄タンクやバッテリー等の破砕	
	衝突	他の宇宙機や大型デブリとの衝突	○
		微小デブリの衝突	
運用終了後のデブリ化	運用時の故障	システムトラブル、電源系や通信系のトラブル等	
		デオービット・デバイスの不具合	○
	軌道離脱の失敗	墓場軌道への軌道遷移失敗	○
		能動的デブリ除去の失敗	○
	デオービット後の残留物	大気圏突入時に燃え尽きずに残留	

以上より、衛星コア技術としては、表 3.1.2 の技術が挙げられる。これらは表 2.2.1（15 ページ）に示した、認証ビジネスの観点で必要な宇宙環境保全技術とほぼ同様である。ただし、表 3.1.2 は衛星技術に絞っているので、地上からの SSA 技術は含まれていない。

表 3.1.2 高度な環境保全性を有し持続的宇宙利用を可能にする衛星コア技術

目的	対象技術	具体的な技術・機器
衝突回避	検出・同定・追跡	・ 衛星からの SSA
	衝突回避用軌道変更	・ 化学推進器、高推力グリーンズラスト
軌道離脱技術	自律的デオービット	・ 化学推進、電気推進、ドラッグセイル、EDT
	能動的デブリ除去 (ADR)	・ 接近・ランデブー技術 ・ 捕獲技術（投網、鉤、ロボットアーム、軌道上サービス用インターフェース等） ・ 廃棄技術（軌道変更等）

以下では、これらの技術・機器についてまとめる。

(1) 衛星からの SSA

軌道上で宇宙物体を検出し、物体の形状や姿勢運動、機能、軌道情報等を同定し、追跡する技術は、地

上からの SSA を補完する意味で重要な技術となるが、高度な技術であることから、民間ビジネスにはあまり至っていないが、2016年に創業したオーストラリアの HEO Robotics 社は地球観測衛星を使って、低軌道上の宇宙物体の検出・同定ソフトウェア HEO Inspect を提供しており、アクセルスペースは 2022 年 11 月に同社と提携し、HEO Inspect が自社の衛星 GRUS のセンサデータ（衛星画像）にアクセスできるようにしたことを発表している^[67]。この時点で、HEO Robotics 社は 35 個のスペースセンサにアクセスできるようになったとされている。アクセルスペースはカナダ・NorthStar Earth & Space 社とも提携し、同社の SSA のために GRUS の画像を提供することを 2023 年 1 月に発表している^[68]。なお、NorthStar Earth & Space 社は SSA 衛星を 2023 年中に 3 機、最終的には 24 機、地球周回低軌道に配備すると発表している^[69]。

(2) 衝突回避用化学推進器・高推力電気推進器

軌道変更のためのスラスタとしては、従来からヒドラジン等を用いた化学推進器があるので、これを用いればよい。ただし、最近では低毒性推進剤（グリーンプロペラント）を用いた推進系の開発が国内外で進んでおり、併せて、比較的高推力の電気推進器の研究・開発が進んでいる^[71-76]。国内では三菱重工業が JAXA 革新的衛星技術実証 1 号機 RAPIS-1 にグリーンプロペラントの 1 つである HAN（Hydroxyl Ammonium Nitrate）を用いたスラスタ GPRCS（Green Propellant Reaction Control System）を搭載し、2019 年に軌道上実証に成功している（推力は 1.1N を達成）。これらはもともと、衝突回避のような短時間で軌道変更を想定したものではなく、推力はおよそ 1N 級と、従来の化学推進器と比較すると高くないが（図 3.1.1）、比較的時間に余裕のある状況での衝突回避に利用することが考えられる。

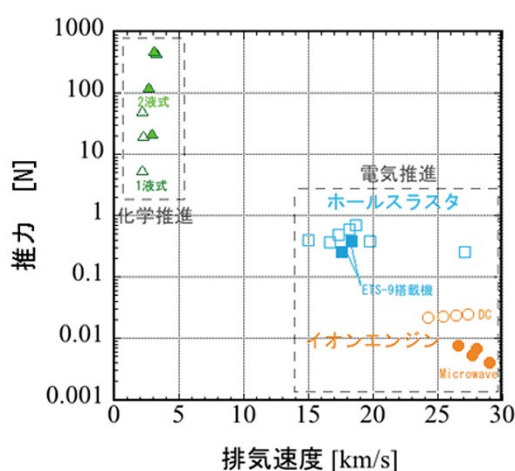


図 3.1.1 電気推進器の推力^[76]

(3) 自律的デオービット技術

低軌道衛星のデオービット用のデバイスとしては、現状では① 化学推進器、② 電気推進器、③ ドラッグセイル（展開膜）、④ EDT の 4 つがあり^[77]、特に③と④はデオービット用に特化して開発されてきた技術である。ドラッグセイルについては既に多くの宇宙実績があり、我が国も表 2.2.2（16 ページ）に示した通り、中島田鉄工所やアクセルスペースがビジネス展開を進めている。実際、最近でも、2019 年の ALE-1 に搭載された、中島田鉄工所の DOM^[54]や、2019 年に ESA の CubeSat “TechDemoSat-1”に搭載されたクランフィールド大の Icarus-1^[78, 79]、2022 年に ESA ミッションに搭載されたドイツの HPS 社の ADEO-N がそれぞれドラッグセイルの展開や軌道降下に成功している^[80, 81]。DOM や ADEO-N は既に市販されている。このように、ドラッグセイル技術は成熟した技術になってきており、CubeSat から 100 以下級の小型衛星まで、衛星重量に応じた小型・軽量・低コスト化の競争が起きている状況にある。

また、EDT 技術については、Tethers Unlimited 社は、2019 年に打ち上げられた CubeSat “Prox-1”に搭載された自社の EDT を 70m 伸展させ、軌道寿命を 24 倍短くできたことを 2020 年 1 月に発表した^[82]。

ドラッグセイルも EDT も、展開／伸展により軌道降下中に他の宇宙物体との衝突確率が高くなるため、その宇宙環境保全性への効果の定量評価について研究がなされてきているところではあるが、技術としては実用化され、ビジネス展開されつつある状況にある。

(4) 能動的デブリ除去（ADR）技術

いわゆる軌道上サービス、すなわち、① 軌道修正、② 寿命延長、③ 新規軌道への移動、④ EOL サポートサービス、⑤ 軌道環境保全（デブリ除去）のうち、ここでは本調査では④と⑤をまとめて能動的デブリ除去（ADR）と称しているが（2.2.2 項、15 ページ）、この（広義の）ADR については、表 2.2.2（16

ページ) に示した通り、アストロスケールやスカパーJSAT、川崎重工業が参入しているが、海外でも、Airbus (O. CUBED Services ミッション^[83])、Northrop Grumman (MEV ミッション^[84])、Thales Alenia (EROS IOD ミッション^[85])、Tethers Unlimited (LEO Knight ミッション^[86])、Surrey Space Centre (RemoveDebris ミッション^[87-89])、CleanSpace (CleanSpace-1 ミッション^[90]) など、多くの海外企業が参入している^[91]。

特に、RemoveDebris ミッションでは、投げ網の実験^[88]や鉤によるデブリ捕獲実験^[89]を成功させ、軌道上での動画を公開している。また、Northrop Grumman は 2022 年 2 月に静止軌道上で商用衛星のドッキングに成功し、軌道上での動画も公開している^[84]。こちらはもともと既存衛星の寿命延長を目的とした技術実証ミッションではあるが、ADR にも適用可能となっている。

また、ADR に必要な機器については、海外では例えば Altius Space Machines 社が軌道上サービスのインターフェースとなる、捕獲時の画像航法用のタグ等^[92]を販売するなど、要素技術に特化したビジネスも出てきている。また、捕獲にロボットアームを用いることは古くから研究されてきており、海外では Effective Space 社が 2018 年頃に Space Drone のコンセプトを打ち出してミッション提案をしていたが、2020 年にアストロスケール社に買収された^[94]。上述の Tethers Unlimited も AMERGINT Technology が買収しており^[95]、衛星製造分野と同様に、軌道上サービスや ADR の分野でも再編が起きつつある。

3.2. 我が国が強みを発揮できる可能性のある技術に効果的な格付け方法に関する調査・整理

前節 3.1 節に示した内容、および、2.2.2 項 (15 ページ) の内容 (ロケット上段モニタ装置 M-Pack 等) をまとめると、我が国が強みを発揮できる可能性のある技術としては以下のものが挙げられる。

- 衛星からの SSA 技術
- 軌道離脱技術 (自律的デオービット技術および能動的デブリ除去技術)
- 軌道上離脱技術の軌道上実証用テストベッド技術

しかし、例えば SSR の場合であれば、DIT 技術は地上からの SSA 技術が念頭にあると思われる評価方法になっており、その他の軌道上技術やテストベッド技術も含めて、上記の 3 つは Extra Services としてしか評価されず、スコアも 100 点満点中、最大でも 2 点のボーナス点しか与えられない。SSR も含め、今後、宇宙環境保全に関する格付け評価を行う場合には、上記のような、積極的にデブリ低減をしようとする努力に対して高いスコアをつけるような格付け評価をすることが望ましいと考えられる。また、衛星からの SSA 技術については既にビジネスとして開始されていることや、デブリ低減技術を軌道上で実証あるいはモニタできるテストベッド技術の研究がなされていることを考慮すると、TRL の高いもの、特に、軌道上実績のあるものに対して高いスコアを付けるような格付け評価をすることが望ましいと考えられる。

3.3. 国際市場規模の定量的調査・整理

本節以降では SSR に限らず、宇宙環境保全に関わる格付けの仕組みを「レーティング」と表現することにする。

まず、本節では、宇宙環境保全ルールが形成された場合の新たな市場の規模について、人工衛星運用事業者や人工衛星設計・製造事業者にヒアリングにて意見を得つつ、文献等を調査することで推計した結果を、次の 3 つに分けて示す。

1. 市場性が期待されるレーティング関連ビジネス
2. それぞれのレーティング関連ビジネスの市場規模の推計方法および推計結果
3. レーティングと保険との関係性

なお、上記 3 については、格付け認証を得ることにメリットが現状では不明瞭であるため、保険市場に対して格付け認証がどのような影響を与えるか、という定性的な調査・整理を行った。

3.3.1. 市場性が期待される格付け認証関連ビジネス

表 2.1.6 (12 ページ) にも示した通り、① SSR は第三者認証ビジネスであり、これそのものに市場性が期待されるが、これに併せて、② 認証取得支援サービス (コンサルティング) が新たな市場として期待される。また、2.1.10 項 (13 ページ) や 2.2.2 項 (15 ページ) 等で述べてきた通り、③ SSA ビジネスや④ デブリ低減ビジネス (軌道上サービス) の市場拡大が期待される。そこで、次項以降ではこれら①～④の規模を推計し、3.3.6 項 (34 ページ) にて、その総計を示す。

3.3.2. 認証取得支援サービスの市場創成規模推計

SSR のような格付け認証ビジネスが始まった際には、認証取得を支援するサービスも新たに創成されると考えられる。そこで、ここでは他の認証ビジネスを参考に、どのような支援サービスが想定されるかを検討し、その市場規模を推計する。

3.3.2.1. 認証ビジネスの周辺ビジネス

ここでは SSR のような格付け認証ビジネスが始まった際、どのような周辺ビジネスが新たに創成される可能性があるかを整理する。

(1) 調査方法とその背景

SSR をはじめ、ここでいうレーティングは持続的な宇宙環境保全に向けた取り組みであり、次の 2 点において、地球におけるカーボンニュートラル（CN）の取組みとの類似性が高い。

- ・ CN は地球環境を保全しながら持続的に経済活動を維持・発展するためのものである。一方で SSR は宇宙環境を保全しながら持続的に宇宙開発および宇宙環境利用を行うためのものであり、両者の志向は似通っている。
- ・ CN と SSR のいずれも認定・認証制度であり、制度設計に共通点を見出すことができる。

そこで、市場性が期待できるレーティング関連ビジネスの検討にあたり、CN の取組みを支援する既存サービスやメニューを参考にした。

CN とは温室効果ガスの排出を全体としてゼロにすることで、二酸化炭素をはじめとする温室効果ガスの「排出量」から、植林および森林管理などによる「吸収量」を差し引いて、合計を実質的にゼロにすることを意味する^[96]。近年の地球温暖化の進行を踏まえ、2015 年の第 21 回気候変動枠組条約締約国会議（COP21）にてパリ協定が採択され、「地球の平均気温上昇を 2℃より十分低く抑え、できれば 1.5℃に抑える努力をする」という 2℃未満目標が合意された。パリ協定締結以降、人為的な CO2 排出を抑制し、温暖化を食い止めるという動きが世界中で広がっている^[97]。CN に向けた取り組みは、事業者にとって日々の本業とは異なるものであり、事業者のみで CN を達成することは困難なものとなっている。そのため、CN 専業または一般のコンサルティング会社等が様々な CN サポートサービスを提供し、事業者の CN 達成を支援している^[98-102]。実際、CN を目指す国際的な取組みの中で代表的なものである SBT（Science-Based Target）認証の取得に向けて、様々な支援サービスが存在する。

同様のことは SSR 認証についても当てはまる。そこで、ここでは SBT 認定取得に向けた支援サービスを参考に、市場性が期待できる SSR 認証関連ビジネスを考えることとする。

SBT とは、パリ協定が求める水準と整合した 5 年～15 年先を目標年として企業が設定する、温室効果ガス排出量削減目標のことで、国連グローバルコンパクト(UNCG)、CDP (Carbon Disclosure Project)、WRI (世界資源研究所)、WWF (世界自然保護基金)の 4 者によって運営される共同イニシアティブ(SBT イニシアティブ、SBTi)体制が取られている。SBTi が GHG 排出量削減目標を検証し、その目標が SBT の要求する基準を満たしていれば SBT 目標として認定される^[99]。

(2) CN 推進および SBT 認証取得支援サービス

事業者が CN 推進および SBT 認定取得を支援するサービスには、表 3.3.1 のようなものがある^[98, 99]。

表 3.3.1 事業者における CN 推進および SBT 認定取得を支援するサービス

支援サービス	概要
ざっくばらんな相談会	CN 関連の様々な相談に応じる機会を設ける。
セミナー・勉強会の開催	CN の勉強会・セミナーを実施する。
GHG/CO2 排出削減目標策定支援	SBT に準拠した GHG/CO2 排出量削減目標設定に向けた、対応事項の整理や取組計画作成等を支援する。
GHG/CO2 排出量・削減量簡易算定	GHG/CO2 排出量を算定し、CN 達成のために必要な排出量削減を概算する。
GHG/CO2 詳細算定支援	SBT に準拠した国際的算定基準（GHG プロトコル）に基づいて、GHG/CO2 排出量算定を支援する。
GHG/CO2 排出量・削減量算定ツールの提供	GHG/CO2 の排出量や削減量を事業者自身が算定できるツールを提供する
SBT 認証取得支援	SBT 認証取得に向けて、申請書作成代行、申請書提出、SBTi との対応などを行う。
アドバイザー契約	CN に向けた取組みを長期的・継続的に支援する。将来のビジネス上のリスクおよび機会の特定や、戦略の方向性の検討を行う。

表 3.3.1 に示すような CN 支援・サポートメニューは、国内で複数社が所定の費用で提供している。各サービスの費用感、提供社数、および 1 社あたりの件数を表 3.3.2 に示す^[103, 104]。

表 3.3.2 CN 関連支援サービスの提供状況^[103, 104]

支援サービス	費用	提供社数	1 社あたりの件数
ざっくばらんな相談会	十数万円～数十万円	数十社	10 件程度/月
セミナー・勉強会の開催	十数万円～数十万円	数十社	10 件程度/月
GHG/CO2 排出削減目標策定支援	数十万円～百万円	十数社	10 件程度/月
GHG/CO2 排出量・削減量簡易算定	数十万円～百万円	十数社	10 件程度/月
GHG/CO2 詳細算定支援	数十万円～百万円	十数社	10 件程度/月
GHG/CO2 排出量・削減量算定ツールの提供	・ 数十万円～百万円 ・ サブスクリプション契約 数万円/月	数社程度	10 件程度/月
SBT 認証取得支援	百数十万円～	数社程度	10 件程度/年
アドバイザー契約	数百万円	数社程度	数件程度/年

(3) 対象とするレーティング支援ビジネスの整理

以上より、格付け認証を取得するにあたり、その支援・サポートのために既存の CN 支援サービスと似通った各種のビジネスが成立すると想定し、SSR 支援ビジネスとして市場性が期待できる内容を整理したのが表 3.3.3 である。ただし、ここでは、2030 年時点を想定して国内の市場規模を推計した。ここでいうレーティング関連ビジネスとは、衛星運用者（事業者）の格付け取得検討、または格付け取得を支援する各種のビジネス（コンサルティングなど）を指している。

表 3.3.3 市場性が期待できる国内 SSR 認証取得支援ビジネス

項目	内容
格付け取得に向けた相談会	レーティング関連の様々な相談に応じる内容。最も初歩的な支援サービス。
レーティング解説セミナー・勉強会支援	レーティングの勉強会・セミナーを実施。
スコア算定シミュレーション	現状の技術レベル、または任意の具体的技術レベルにおいて取得が想定される格付けスコアの算定。
スコア算定ツールの提供	自社においてスコアを算定するためのツールを提供。
格付け取得支援	格付けを取得するために必要な業務の支援。高スコアを取得するための技術導入などについても支援する。
レーティング申請者インプット情報の確認サポート	レーティング申請者インプット情報の公開性または第三者性を確保するための業務を行う。情報公開または第三者審査による係数を高めるための支援。
アドバイザー契約	人工衛星を高頻度に関与する企業や、大型人工衛星を開発する企業向けに、通期・複数期で総合的にレーティング関連支援を行う。

3.3.2.2. 国内市場規模の推計方法

以下に、国内の市場規模の推計方法を示す。

(1) 推計の前提

ここでの推定は、レーティング関連ビジネスの国内市場規模が 2030 年頃にどの程度創出されるかという観点で行った。

(2) 推定方法

推計は、2030 年に国内企業によって製造・打上げが見込まれる人工衛星機数をベースとし、市場性が期待できる格付け認証取得支援ビジネスそれぞれの費用、提供社数、および 1 社あたりの件数を乗じて推計した。

まず、2030 年に国内企業によって製造・打上げが見込まれる人工衛星機数は 45 機と設定した。これは、日本の人工衛星打ち上げ数を年別に見たデータのうち^[105]、2016 年から 2021 年（感染症拡大の影響を受けた 2020 年を除く）の通増から線形的に推計したものである。そして、

- 2030 年に製造・打上げが見込まれる 45 機のうちの約 20%となる 10 機が格付け支援サービス（ただし、長期アドバイザー契約を除く）を利用すると想定する
- その 10 機のうちの 20%にあたる 2 機が、長期アドバイザー契約も締結すると見込んだ（全体 45 機の 4%強）

以上の想定に基づき、既存の CN 支援サービス提供状況を踏まえて設定した、格付け取得支援サービス

それぞれの費用を表 3.3.4 に示す。

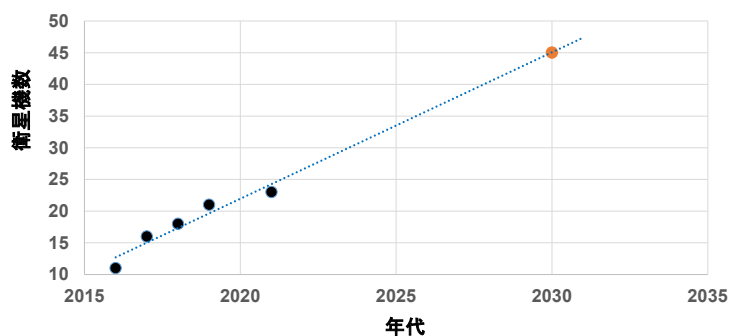


図 3.3.1 日本の人工衛星打上げ機数^[105]および 2030 年の推計機数

表 3.3.4 市場性が期待できる格付け取得支援ビジネスの詳細

項目	費用	サービス利用機数
格付け取得に向けた相談会	10 万円	10 機
レーティング解説セミナー・勉強会支援	20 万円	
スコア算定シミュレーション	100 万円	
スコア算定ツールの提供	50 万円	
格付け取得支援	400 万円	
格付け申請者インプット情報の確認サポート	200 万円	
アドバイザー契約	1,000 万円	2 機

3.3.2.3. 国内市場規模の推計結果

(1) 格付け取得に向けた相談会およびレーティング解説セミナー・勉強会支援

当該サービスは、レーティング関連の様々な相談に応じる機会を設定し、レーティングの勉強会・セミナーを実施するもので、最も初歩的な支援サービスである。費用として、相談会では 10 万円、セミナー・勉強会では 20 万円をそれぞれ想定し、2030 年に製造・打上げが見込まれる 45 機のうち 10 機が各サービスを利用するものと想定する。

これらの想定のもと、相談会では 2030 年に 100 万円、セミナー・勉強会では 200 万円と総計される。

(2) スコア算定シミュレーション、およびスコア算定ツールの提供

当該サービスは、格付け認証で定められたスコアを算定するもので、スコア算定シミュレーションでは現状の技術レベル、または任意の具体的技術レベルにおいて取得が想定されるスコアの算定を行う。スコア算定ツール提供は、自社においてスコアを算定するためのツールを提供するものである。費用として、スコア算定シミュレーションは 100 万円、スコア算定ツール提供は 50 万円をそれぞれ想定し、2030 年に製造・打上げが見込まれる 45 機のうち 10 機が各サービスを利用するものと想定する。

これらの想定のもと、スコア算定シミュレーションでは 2030 年に 1,000 万円、スコア算定ツールの提供では 500 万円と総計される。

(3) 格付け取得支援、および格付け申請者インプット情報の確認サポート

当該サービスは、格付け取得に向けた支援を行うもので、格付け取得支援では格付けを取得するために必要な業務一切の支援を行う。高スコアを取得するための技術導入などについての支援も行う。格付け申請者インプット情報の確認サポートでは、格付け申請者インプット情報の公開性または第三者性を確保するための業務を行う。情報公開または第三者審査による係数を高めるための支援となる。費用として、格付け取得支援は 400 万円、格付け申請者インプット情報の確認サポートは 200 万円をそれぞれ想定し、2030 年に製造・打上げが見込まれる 45 機のうち 10 機が各サービスを利用するものと想定する。

これらの想定のもと、格付け取得支援では 2030 年に 4,000 万円、格付け申請者インプット情報の確認サポートでは 2,000 万円と総計される。

(4) アドバイザリー契約

当該サービスは、人工衛星を高頻度開発する企業や、予算規模の大きな人工衛星を開発する企業向けに、通期・複数期で総合的に格付け関連支援を行うものである。費用として 1,000 万円を想定し、2030 年に製造・打上げが見込まれる 45 機のうち 5 機がアドバイザー契約を締結するものと想定する。

これらの想定のもと、本アドバイザー契約では 2030 年に 2,000 万円と総計される。

(5) SSR 認証取得支援ビジネスの市場推計結果サマリ

以上より、SSR 認証取得支援ビジネスの国内市場推計は表 3.3.5 のようにまとめられる。

表 3.3.5 SSR 認証取得支援ビジネスの国内市場推計結果サマリ

項目	総計
格付け取得に向けた相談会	100 万円
レーティング解説セミナー・勉強会支援	200 万円
スコア算定シミュレーション	1,000 万円
スコア算定ツールの提供	500 万円
格付け取得支援	4,000 万円
格付け申請者インプット情報の確認サポート	2,000 万円
アドバイザー契約	2,000 万円
総計	9,700 万円

3.3.2.4. 国際市場規模の推計

海外で打ち上げられている衛星については、Micro-Satellite クラス以上（10kg 超で CubeSat を除く）の商用衛星と CubeSat で状況が異なるため、これら 2 つの市場規模を別々に推計することとする。

(1) Micro-Satellite クラス以上商用衛星

1) 対象とする格付け取得支援ビジネスの整理

SSR 認証取得支援ビジネスの国際市場規模を推測するにあたり、2030 年時点を想定して国際市場規模を推計した。2030 年時点の世界の格付け取得支援ビジネスとして市場性が期待できる内容は基本的に表 3.3.3（28 ページ）と同様であるが、SSR についての取組みは欧米をはじめとする国際的取組みが先行していることを考慮し、ここでは格付けに関する相談会やセミナーは必要とされないと想定し、対象とする格付け取得支援ビジネスを表 3.3.6 の通りとした。

表 3.3.6 市場性が期待できる商用衛星用 SSR 認証取得支援ビジネス

項目	内容
スコア算定シミュレーション	現状または任意の具体的技術レベルで取得が想定されるスコアの算定。
スコア算定ツールの提供	自社においてスコアを算定するためのツールを提供。
格付け取得支援	格付けを取得するために必要な業務の支援。高スコアを取得するための技術導入などについても支援する。
格付け申請者インプット情報の確認サポート	格付け申請者インプット情報の公開性または第三者性を確保するための業務を行う。情報公開または第三者審査による係数を高めるための支援。
アドバイザー契約	人工衛星を高頻度に開発する企業や、大型人工衛星を開発する企業向けに、通期・複数期で総合的にレーティング関連支援を行う。

2) 市場規模の推計方法

国内市場の推計と同様に、2030 年に世界で製造・打上げが見込まれる商業衛星機数をベースとし、市場性が期待できる SSR 認証取得支援ビジネスそれぞれの費用を乗じて推計することで、SSR 認証取得支援ビジネスの国際市場規模が 2030 年頃にどの程度創出されるかという観点で行った。

まず、2030 年に世界で製造・打上げが見込まれる人工衛星のうち、コンステレーション以外の人工衛星機数を 935 機、コンステレーション衛星機数を 3735 機と設定した。これは、世界の人工衛星打ち上げ数を年別に見たデータ^[106]から、以下の手順によって推計したものである。

- 1) 2020 年からはコンステレーション衛星の機数が加味され、機数の増加トレンドが変化している（図 3.3.2）。そのため、2016 年～2019 年の人工衛星機数増加トレンドを、コンステレーション衛星以外の衛星の増加トレンドと考える。
- 2) 2016 年～2019 年のコンステレーション以外の衛星の機数トレンドを線形近似し、2020・2021 年、および 2030 年のコンステレーション以外の衛星機数を 337 機、396 機、および 935 機とそれぞれ推算する（図 3.3.3）。
- 3) 2020 年および 2021 年の実績機数からコンステレーション以外の衛星の機数（前項推計値）を減じて、2020 年および 2021 年のコンステレーション機数を 753 機および 1051 機とそれぞれ推算する。
- 4) 2020 年および 2021 年の実績機数トレンドを線形近似し、2030 年の総衛星機数を 4670 機と推算する（図 3.3.4）。
- 5) 2030 年の総衛星機数推計値 4670 機から、2030 年のコンステレーション以外の衛星推計値 935 機を減じて、2030 年のコンステレーション衛星機数を 3735 機と推算する。

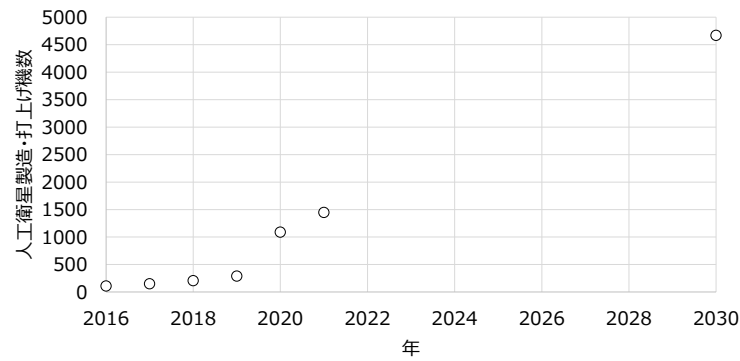


図 3.3.2 2016 年～2030 年の世界の人工衛星製造数（2030 年は推計値）

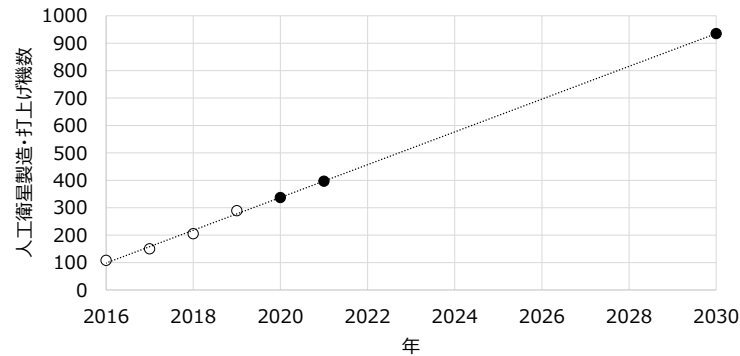


図 3.3.3 コンステレーション以外の衛星の製造機数（2020・2021・2030 年は推計値）

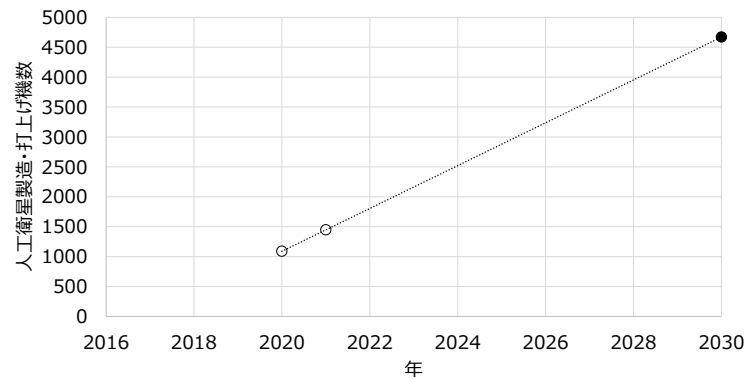


図 3.3.4 世界の衛星の製造機数推計値

以上の衛星機数推定に基づき、以下の通り、認証取得支援サービスを受ける機数を推定した。

- 2030 年に製造・打上げが見込まれるコンステレーション以外の衛星 935 機のうち 10%にあたる 93 機が、SSR 支援サービス（長期アドバイザリー契約を除く）を利用するものと想定する
- それら 93 機のうち、10%にあたる 9 機がアドバイザリー契約を締結すると見込む。

なお、国内ではレーティングの意義・価値の理解が進むことを前提として、推定では全体の 20%としたが、海外ではそれを前提とせず、低めの数字として 10%と想定した。以上より推定した費用および機数のまとめを表 3.3.7 に示す。なお、個々の項目の費用については国内と同等の金額を米ドルで換算した。

表 3.3.7 海外において市場性が期待できる格付け取得支援ビジネスの詳細（コンステレーション以外）

項目	費用 (USD)	サービス利用機数
スコア算定シミュレーション	8,000	93 機
スコア算定ツールの提供	4,000	
格付け取得支援	32,000	
格付け申請者インプット情報の確認サポート	16,000	
アドバイザリー契約	80,000	9 機

また、コンステレーション衛星については、同一仕様で同一軌道上にある人工衛星各機がサービス利用することは考えにくく、包括的なアドバイザリー契約のみを活用すると想定する。そこで、

- c. 2030 年に格付け取得支援サービスを利用する企業を 2 社と想定する
- d. 2 社で合計 20 軌道のコンステレーション衛星が運用されると想定する

そして、1 軌道あたりのアドバイザー契約費用を 1,000 万円と想定すると、費用・機数は表 3.3.8 のようになる。

表 3.3.8 コンステレーション衛星向けに市場性が期待できる格付け取得支援ビジネスの詳細

項目	費用 (USD)	サービス利用数
アドバイザー契約	80,000	20 軌道 (2 社)

3) 市場推定結果のサマリ

以上より求めた CubeSat を除く認証取得支援ビジネスの国際市場推計結果を表 3.3.9 に示す。

表 3.3.9 格付け取得支援ビジネスの国際市場推計結果サマリ (CubeSat を除く)

項目	総計 (千ドル)
スコア算定シミュレーション	744
スコア算定ツールの提供	372
格付け取得支援	2,976
格付け申請者インプット情報の確認サポート	1,488
アドバイザー契約	720
総計	6,300

(2) CubeSat

1) 市場規模の推定方法

世界の人工衛星打ち上げ数を年別に見たデータ^[106] (図 3.3.5) から、2030 年に世界で製造・打上げが見込まれる CubeSat 機数を 665 機と設定した (図 3.3.6)。

CubeSat の機数は増減を示しながらも、総体としては増加傾向にある。増加トレンドを把握するために、2012・2013・2014・2017・2021 年の機数を抽出し、その線形近似から 2030 年の CubeSat 機数を 665 機と推計した。そして、以下の想定で費用および機数を推算すると、表 3.3.10 のようになる。

- a. 2030 年に製造・打上げが見込まれる CubeSat665 機のうち 10%にあたる 66 機が、SSR 支援サービス (長期アドバイザー契約を除く) を利用するものと想定する
- b. CubeSat は予算規模が小さいこともあり、アドバイザー契約はなされないものと想定する

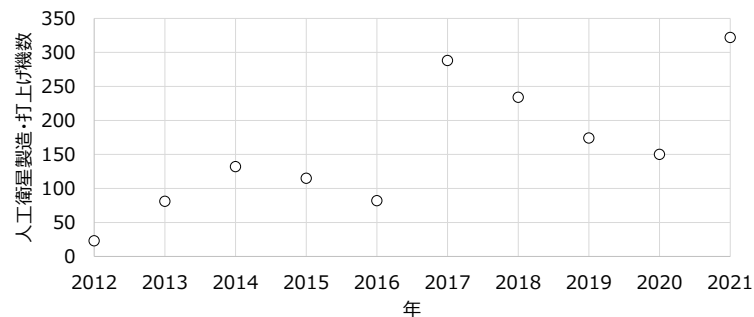


図 3.3.5 2012 年～2021 年の世界の CubeSat 機数^[106]

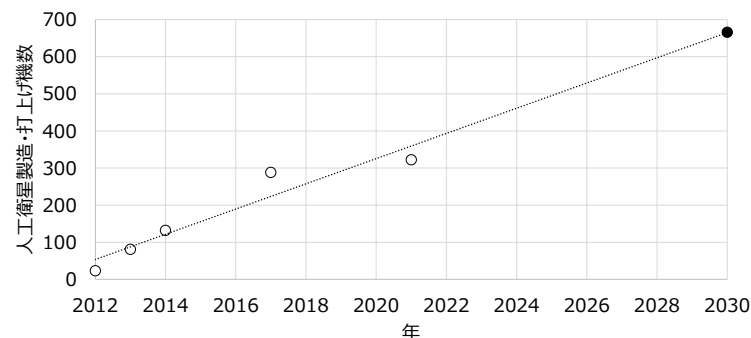


図 3.3.6 CubeSat 機数の増加トレンド (2030 年は推計値)

表 3.3.10 市場性が期待できる格付け取得支援ビジネスの詳細 (CubeSat)

項目	費用 (USD)	サービス利用機数
格付け取得に向けた相談会	800	66 機
レーティング解説セミナー・勉強会支援	1,600	
スコア算定シミュレーション	8,000	
スコア算定ツールの提供	4,000	
格付け取得支援	32,000	
格付け申請者インプット情報の確認サポート	16,000	

4) 市場推定結果のサマリ

表 3.3.10 より求めた、CubeSat の格付け取得支援ビジネスの国際市場推計結果を以下に示す。

表 3.3.11 CubeSat の格付け取得支援ビジネスの国際市場推計結果サマリ

項目	総計 (千ドル)
格付け取得に向けた相談会	52.8
レーティング解説セミナー・勉強会支援	105.6
スコア算定シミュレーション	528
スコア算定ツールの提供	264
格付け取得支援	2,112
格付け申請者インプット情報の確認サポート	1,056
総計	4,118

(3) 国際市場調査結果サマリ

以上をまとめると表 3.3.12 のようになり、国際市場は総額で約 1,040 万ドルと推計される。

表 3.3.12 格付け取得支援ビジネスの国際市場推計結果サマリ

項目	商業衛星 (千ドル)	CubeSat (千ドル)	総計 (千ドル)
格付け取得に向けた相談会	—	52.8	52.8
レーティング解説セミナー・勉強会支援	—	105.6	105.6
スコア算定シミュレーション	744	528	1,272
スコア算定ツールの提供	372	264	636
格付け取得支援	2,976	2,112	5,088
格付け申請者インプット情報の確認サポート	1,488	1,056	2,544
アドバイザリー契約	720	—	720
総計	6,300	4,118	10,418.4

3.3.3. 第三者認証ビジネスの市場創成規模推計

格付け認証費用は 2.1.8 項でも述べた通り、2023 年 2 月時点において、年間サブスクリプションで CHF 10,000 (日本円にして約 140 万～150 万円程度、米ドルで約 1.1 万ドル) である。2030 年には物価上昇等に伴ってサブスクリプション費用も値上がりしていると想定されるため、ここではサブスクリプション 1 本につき 160 万円 (13,000 USD) と設定する。

まず、国内市場については、表 3.3.4 (29 ページ) に示した通り、10 機が認証を申請すると仮定する。また、国際的には、コンステレーション以外の衛星は、表 3.3.7 (31 ページ) にある通り、93 機が認証を申請すると仮定する。そして、コンステレーションについては表 3.3.8 (32 ページ) にある通り、2 機が認証を申請すると仮定する。したがって、国際的には 95 機が申請すると仮定する。

以上より、市場規模は国内が 1,600 万円、国際的には 123 万ドルと推計する。

3.3.4. SSA ビジネスの市場拡大規模推計

今後、2030 年までの SSA の市場規模については複数の文献で予想がされており、文献[107]～[112]をそれぞれ文献 A～F として、それらの文献による予想値をプロットしたのが図 3.3.7 である。このグラフにより、2030 年の市場規模を 18 億ドルと予想することとする。そして、格付け認証ビジネスの創成により SSA 市場規模が 1%拡大すると仮定し、市場拡大規模を 1,800 万ドルと推算する。

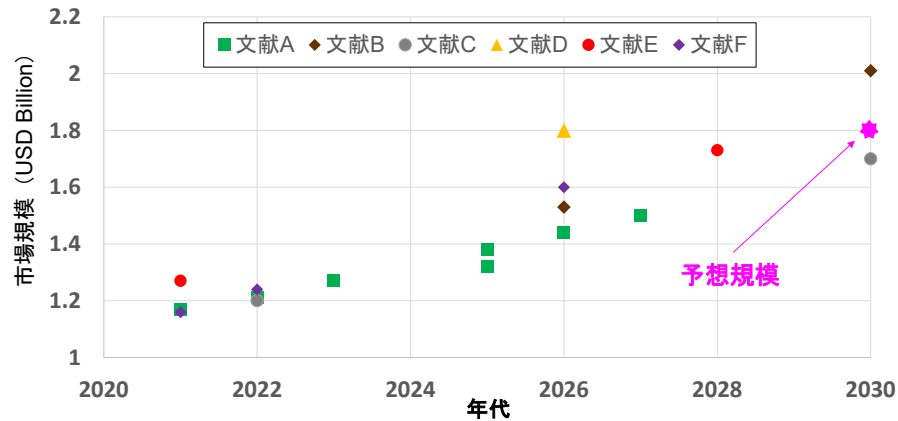


図 3.3.7 SSA 市場規模予想

3.3.5. デブリ低減ビジネスの市場拡大規模推計

デブリ低減技術には、衛星自身が軌道離脱する自律的デオービット技術と、外部からデブリを捕獲・除去する ADR 技術の 2 つがあり、それぞれがビジネスになっていることは、2.2.2 項（15 ページ）で述べた通りである。最近では特に後者の市場が拡大しつつあり、文献[113]では、2030 年に 2.7 億ドルに、文献[114]では 4.6 億ドルに、文献[115]では軌道上サービスの市場が 2028 年には 30 億ドル超で、そのうちの 11%、すなわち、3.3 億ドルが軌道離脱分野、すなわち、デブリ低減分野の市場になると予想している。これらの情報から、2030 年には 3 億ドル程度になるであろうと予想される。格付け認証ビジネスの創成により ADR の市場規模が 1%拡大すると仮定すると、市場規模は 300 万ドル程度となる。

これに対し、前者の自律的デオービットの市場については、衛星製造市場（2021 年で 137 億ドル^[116]）のせいぜい 1%程度と考えられ、格付け認証ビジネスの創成により拡大するのはそのうちの 1%程度であるとする、137 万ドル程度と考えられる。以上を合計すると、**437 万ドル程度**と推算される。

3.3.6. 宇宙環境保全ルールが形成された場合の新たな市場の規模推計結果

以上より、格付け認証を利用した宇宙環境保全ルールが形成された場合の新たな国際市場規模は表 3.3.13 の通り、**3,400 万ドル程度**であると予想される。

表 3.3.13 宇宙環境保全ルールが形成された場合の新たな国際市場規模推算結果

No	項目	規模
1	格付け認証ビジネスの創成	1,040 万ドル
2	格付け取得支援ビジネスの創成	123 万ドル
3	民間 SSA ビジネスの拡大	1,800 万ドル
4	デブリ低減ビジネスの拡大	437 万ドル
総計		3,400 万ドル

また、認証ビジネスおよび認証取得支援ビジネスについては、国内で閉じる部分もありその市場は以下の通り、1 億 1 千万円程度と推算される。

表 3.3.14 宇宙環境保全ルールが形成された場合の新たな国内市場規模推算結果

No	項目	規模
1	格付け認証ビジネスの創成	1,600 万円
2	格付け取得支援ビジネスの創成	9,700 万円
総計		1 億 1,300 万円

3.3.7. レーティングと保険との関係性

本項では、宇宙保険に関する現状を整理した上で、宇宙保険におけるレーティングで高スコアを取得することのメリットを示す。

3.3.7.1. 宇宙保険に関する現状整理

SSR と保険の関係性を検討するにあたり、三井住友海上火災保険株式会社が手掛ける宇宙事業に関する保険（以下、宇宙保険）を例に、現状の宇宙保険と宇宙保険の保険料の検討手法を整理した。

1) 現状の宇宙保険

宇宙保険としては例えば表 3.3.15 のようなものがあり、その内容はそれぞれこの表に示した通りである。また、それぞれの保険の適用範囲を時系列に示したのが表 3.3.15 である。レーティングは、スペースデブリ削減等の宇宙環境保全を対象とした制度のため、下記 4 種類のうち、寿命保険が特に対象となり得る。

なお、現在、スペースデブリの衝突事故に関する保険は、寿命保険の一部として扱われており、人工衛星の故障原因がスペースデブリによる場合には、保険料が支払われる仕組みとなっている。

表 3.3.15 宇宙保険の例^[117]

種類	概要
打上げ前保険	打上げ前までの地上におけるロケットや人工衛星の損害を補償。
打上げ保険	打上げから宇宙空間に到達するまでの人工衛星の損害を補償。打上げ保険では、人工衛星が宇宙空間に到達してから一定期間までの損害を含めて補償することも可能。
寿命保険	宇宙空間に到達してからの人工衛星の損害を補償。
宇宙賠償責任保険	ロケットの打上げや人工衛星の運用等により生じた第三者への損害賠償責任をカバー。

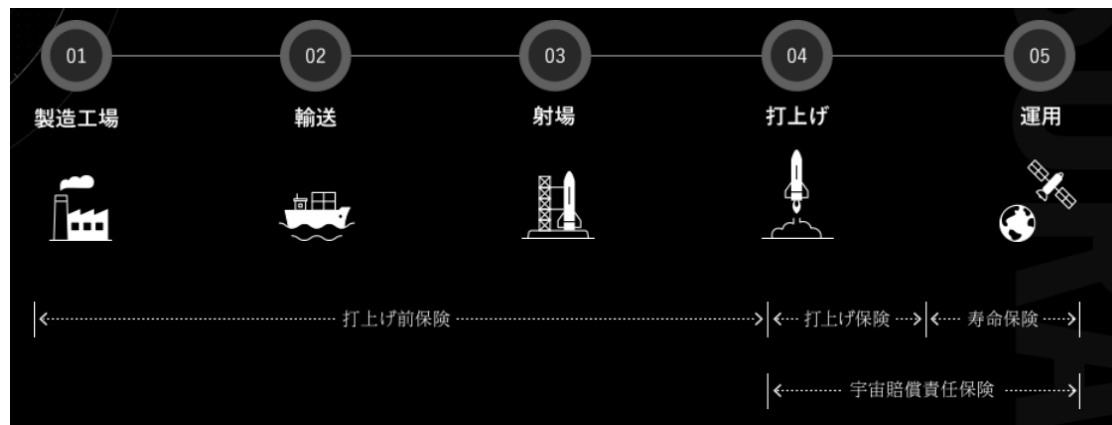


図 3.3.8 各種宇宙保険の適用範囲^[117]

2) 保険料の検討方法

近年、世界的にスペースデブリ削減に対する関心が高まっており、スペースデブリ削減に関する対策や検討が各機関で盛んに行われている。保険業界でもスペースデブリ削減に対する関心は高まっているが、現状、スペースデブリによる人工衛星の事故の発生件数が少ないため、スペースデブリの発生抑制に寄与する技術等を搭載していることで保険料が低くなるといった割引制度はない。

また、保険会社は、寿命保険の引き受けや保険料の検討にあたって、技術面を確認するための各社独自のチェックリストを活用している。新しい技術や時代の流れを踏まえ、各社それぞれチェックリストの項目を定期的に更新している。チェックリストの項目例を下記に示す。本チェックリストは、検討における絶対的な指針という訳ではなく、扱いは各社様々であるため、チェックリストにスペースデブリに関する項目があったとしても、必ず保険料の引き下げにつながるというわけではない。

＜チェックリストの項目例＞

- ・ 既存事業、事業計画に関する説明
- ・ 衛星バスの概要
- ・ 通信・画像観測機器等の概要
- ・ 予算
- ・ 製品保証
- ・ デブリリスクの軽減と衝突回避戦略（すべての LEO 衛星に適用）
- ・ 輸送機の概要
- ・ 保険適用要件 等

3.3.7.2. 宇宙保険における SSR で高レーティングを取得することのメリット

以上の通り、現状ではスペースデブリの宇宙保険への影響度は低く、保険料の引き下げ等、保険の観点における SSR を取得することへのメリットは少ない。しかし、将来、スペースデブリが増えたことによって、スペースデブリによる事故が多発し、宇宙保険の保険料が高くなる未来が訪れると仮定した場合、SSR での高レーティング取得により企業にとって下記のようなメリットが生じると考えられる。

1) 保険料の引き下げ

レーティングが普及すれば、「スペースデブリが減少したことにより、スペースデブリが原因の事故が少なくなる。これより、保険業界全体の宇宙保険の保険料の低下に繋がる。」という、技術の進展に伴う

事故の低減が、保険料の引き下げに寄与する可能性があると考えられる。

同様の事例として、自動車保険業界の ASV 割引（ASV：Advanced Safety Vehicle、先進安全自動車）がある。衝突被害軽減ブレーキ等の自動車の安全技術の普及に伴う事故発生率の減少により、2018 年 1 月から衝突被害軽減ブレーキの装着等、一定条件を満たす自動車に対して、約 9%の保険料の割引が適用されている。背景として、国土交通省は、平成 3 年度から「ASV 推進計画」を進めており、ASV に関する技術の開発・実用化・普及を促進するプロジェクトに取り組んでいる。また、平成 27 年 1 月には、「自動車関連情報の利活用に関する将来ビジョン検討会」の報告書にて、ASV 技術によるリスク軽減効果の自動車保険への反映についても言及し、「国と自動車メーカー、保険会社等の連携の下、リスク軽減効果の程度を確認するための方策を講じるほか、自動車保険の販売等の際に保険会社・代理店が対象車両の ASV 装置の装着状況を正確に把握できる仕組みの構築等の環境整備を速やかに推進すべき」と提言した。国やメーカー、保険会社等、様々な機関が連携して、技術の進展や普及を推し進めたことによって、保険料の引き下げにつながった事例の 1 つである。

2) 企業が保険会社を検討する際の選択肢の増加

現在、宇宙保険は、保険会社の入札を受け、企業が保険会社を取捨選択する形式となっている。入札際には、まず、企業が人工衛星に関する基礎情報を保険会社に提出し、保険会社は提出された基礎情報をもとに、各社が設定している前述のチェックリストを活用して引き受け可否や提示する保険料を検討する。

今後、チェックリストに「レーティングにて高スコアを取得」や「デブリ削減技術の搭載」等の項目が追加された場合、企業が当該項目を満たしていれば、下記のような恩恵を受けることができると想定される。なお、この仮定が成立するには、保険会社がチェックリストに基づいて、保険料を引き下げることが可能な状況となっていることが必要である。

- ・レーティングにて高スコアを取得していない状況よりも低い保険料で保険を受けることが可能となる
(例) 保険会社は、当初、保険料率 10%での入札を検討していたが、企業がレーティングで高スコアを取得していることを考慮し、保険料率を 9%で入札する 等
- ・安全性の向上に伴い、入札する保険会社が増え、企業側の選択肢が増える

3.3.7.3. まとめ

本項ではレーティングと保険の関係性を検討するにあたり、現状の宇宙保険と、宇宙保険の保険料の検討手法を整理した。3.3.7.1 項では、現状、スペースデブリが原因の人工衛星の事故が少ないこと等から、スペースデブリの宇宙保険への影響度が低く、保険料の引き下げ等、保険の観点における格付けを取得することへのメリットは少ないことが明らかになった。これを踏まえ、3.3.7.2 では、将来、スペースデブリが増えたことによって、スペースデブリによる事故が多発し、宇宙保険の保険料が高くなる未来が訪れると仮定し、保険の観点での SSR を取得することへのメリットを整理した。これより、将来、レーティングの普及により、保険料の引き下げや企業が保険会社を検討する際の選択肢の増加等のメリットが生じる可能性があることが示唆された。

4. SSR のルール形成において我が国が影響力を確保する手法に関する調査

本章では SSR のルール形成において我が国が影響力を発揮するための方策について調査した結果を示す。具体的には、SSR 運営組織への継続的な参画方法、アジア・太平洋地域への展開方法を示した上で、それらを基盤として SSR のルール形成に影響力を確保する流れを示す。

4.1. SSR 運営組織への関与・参画やその継続の方法についての調査・検討

2.1.8 項（8 ページ）で述べた通り、SSR 運営組織は下の図 2.1.2 のようであったが、現在、下の図 2.1.3 のような SSR 協会（SSR Association）を設立中である。この中で、SSR のルール形成を実質的に担うのは SSR Steering Committee（SSR 運営委員会）であり、SSR 協会発足当初の運営委員は、現在の SSR Consortium のメンバー5 人になるに考えられる。しかし、その後は、SSR General Assembly（SSR 総会）での投票で決まるとされている。一方、SSR 運営委員会にアドバイスを与えるのが SSR Advisory Group（SSR アドバイザリーグループ）であり、これは現在の同グループと同じグループである。そして、既述の通り、この他に 2 つのワーキンググループ（WG1: Technical WG と WG2 : Policy WG）が立ち上げられる。

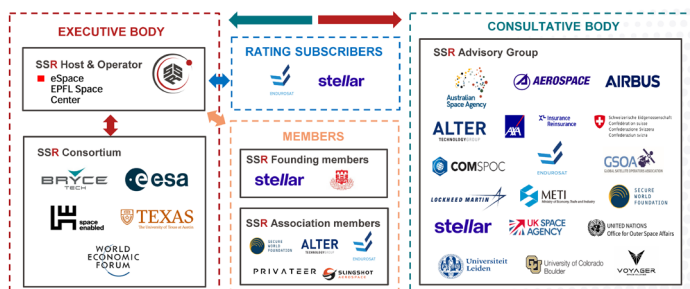


図 2.1.2 SSR の運営体制（2022 年 11 月時点）[再掲]



図 2.1.3 設立中の SSR 協会の構成 [再掲]

この SSR 協会に参画する方法は以下の 2 つである。

- 1) ファウンディングメンバー（創立会員）になること
- 2) 一般会員になること

これらの会員の年会費は対象によって異なる予定で、創立会員は CHF20,000～60,000、一般会員は CHF500～8,000 とされている（大学や公共的な法人であれば、創立会員は CHF20,000、一般会員は CHF500 である）。創立会員になると、SSR 総会に出席して運営委員選出の投票に参加できるだけでなく、SSR アドバイザリーグループのメンバーとなって、運営委員会意見を述べることができ、かつ、WG のメンバーとなって、SSR の運営に実質的に参加できるようになる。実際、Technical WG に参加すると、格付けプロセスの改善や新しいモジュールの立ち上げに関わることができ、Policy WG に参加すると、SSR の位置づけ（各国の法や国際的なガイドライン等への貢献等）や SSR のインセンティブの明確化の議論等に加わることができる。

4.2. SSR をアジア・太平洋地域に展開する仕組みについての調査・検討

SSR をアジア・太平洋地域に展開する仕組みの検討に当たり、既に航空宇宙分野で認証評価を行っている 9100 国際認証制度について、ヒアリングを行った。SSR 格付け認証制度はまだ開始されたばかりで、9100 国際認証制度に比べると、極めて小規模な認証制度であるが、体制としては参考にすべき点が多い。実際、ヒアリングや JAQG のサイト^[44]によれば、9100 認証制度では、図 4.2.1 の通り、

- ① 国際審査登録基準を定め、
- ② 南北アメリカ、アジア・太平洋、欧州の 3 地域にそれぞれ認証制度管理チームをつくり、
- ③ それぞれの地域にグループをつくり、
- ④ その下に認定機関、認証機関、審査員資格証明機関、研修提供者承認機関をつくり、
- ⑤ 審査員も確保し、

- ⑥ 相互監視をしながら、
- ⑦ 認証を希望する企業を審査することで、それぞれの地域での認証が全世界に通用することを保証し、
- ⑧ 審査結果をデータベースに登録し、データベースを公開することで、どの企業が認証を受けたか誰もが検索できるようにしている

が、これは SSR に限らず、そのまま格付け認証に当てはめることが可能であり、例えば、図 4.2.2 のような体制が考えられる。SSR の場合であれば、図 4.2.2 の“レーティング”を“SSR”に、“RTA”を“SSRA”に置き換えればよい。

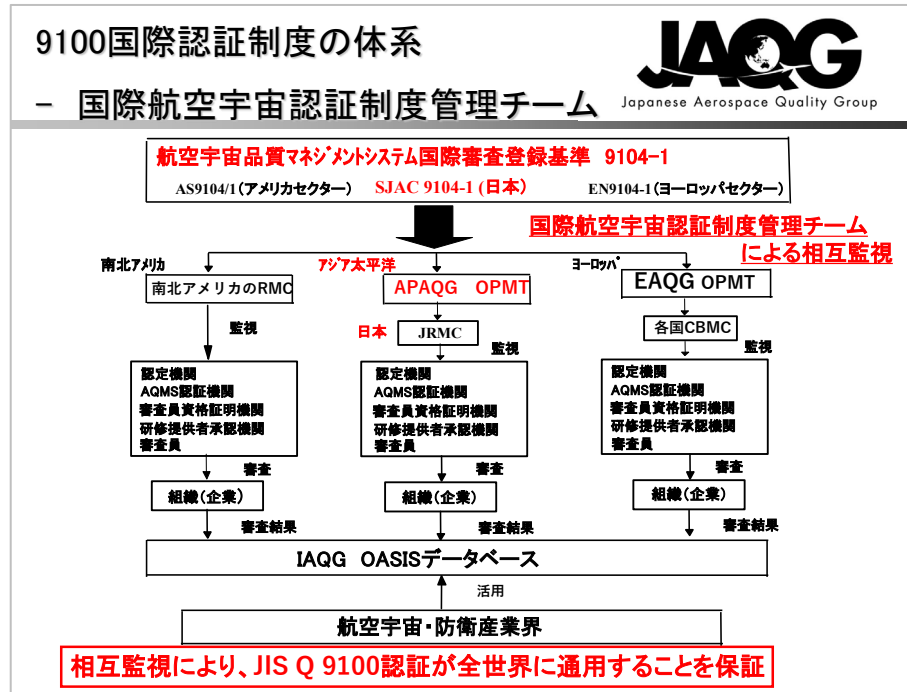


図 4.2.1 9100 国際認証制度の体制 (付録 A.2 JAQG 殿提供資料より)

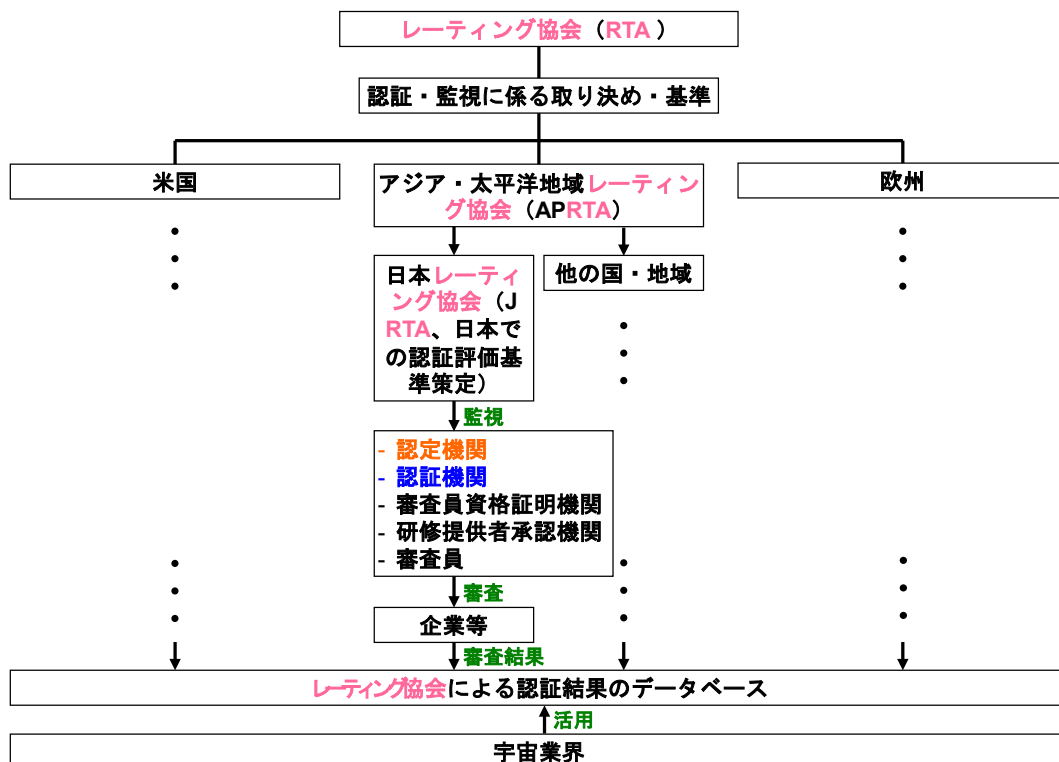


図 4.2.2 国際認証体制の例

ただし、こういった体制を実現するためには以下の課題を解決する必要がある。

- 1) 組織化の価値：アジア・太平洋地域の宇宙アクター、あるいは認証事業関係者に、SSR の運営側に参加することの意義・価値を理解してもらう活動を行っていく必要がある。そのためには、2.5 節（19 ページ）に示したような SSR の改善が前提となる。
- 2) 運営コスト：市場規模（3.3 節、26 ページ）と照らし合わせて、図 4.2.2 のような体制を構築・維持するコストを持続的にねん出できるか、検討を深める必要がある。
- 3) ユーザーの確保：2)と関連するが、格付け認証を受けることに十分な費用対効果があることを衛星事業者に示すこと。そのためには、具体的なメリットを示す必要がある。
- 4) 格付け結果の公開：現状の SSR では格付け結果の公開は考えられていない。SSR は単なる認証ではなく、格付けを伴うものであるため、認証を得ただけを公開するのか、格付け結果まで公開するのかを含めて、SSR 協会内でコンセンサスを得る必要がある。また、今後、SSR とは別の認証ルールを新しくつくることになった場合には、認証結果の公開を前提としてルール形成をすることが考えられる。

4.3. SSR のルール形成において影響力を確保・維持するために必要な情報の調査・整理

日本大学は 2022 年 6 月に SSR の創立メンバーとなり、4.1 節（37 ページ）に述べた、SSR 協会に関する情報を得るとともに、2022 年 12 月 8 日の SSR Working Group 説明会及び同 13 日の SSR Advisory Group Meeting において SSR 協会が以下の 7 項目に焦点を当てて活動していく予定であることが確認された。

- 1) 保険会社と協働で SSR の付加価値を高めていく
- 2) 引き続き、格付けシステムを強化していく
- 3) 政策に SSR を落とし込んでいく
- 4) 中立性と透明性を確保していく
- 5) SSR のリージョナルハブおよび各国ハブを設立していく
- 6) 健全かつ持続的な経営状態を担保していく
- 7) 2 つの Module（Astronomy Module（別名 Dark Sky Module）及び Launch Vehicle Sustainability Module）の追加検討（詳細は 2.1.8 項に示す）

また、これらの活動は、図 2.1.3 にも示した通り、2 つのワーキンググループ、すなわち、Technical WG（格付け技術に関する WG）および Policy WG（宇宙持続性に対する SSR の影響力を拡大することを検討する WG）にて進めることとなった。我が国としては、上記の 2)の中で SSR の改善・改訂を働きかけていき、4)の中で図 4.2.2 に示した認証体制を提案していき、5)の中でアジア・太平洋リージョナルハブの設立を進めることで、SSR のルール形成に影響力を確保・維持できると考えられる。



図 2.1.3 設立中の SSR 協会の構成（再掲）

4.4. まとめ

本章では SSR を例にとって、ルール形成において我が国が影響力を確保する手法について調査した。この調査結果は、SSR に限らず、今後、別の認証ルールが形成されることになった場合や、我が国が中心となって認証ルールを形成することになった場合にも適用が可能である。

5. 我が国が宇宙環境保全のルール形成に貢献するための戦略の策定と今後の課題

前章までの調査結果を踏まえ、本章では我が国が宇宙環境保全のルール形成に積極的に貢献するための戦略の一案を示し、その戦略案を実施する場合の課題をまとめる。

5.1. 我が国が宇宙環境保全のルール形成に貢献し国際競争力を確保するための戦略策定

前章までは、現状の SSR をベースとして調査結果をまとめてきたが、本来は、SSR に限らず、格付け認証制度を伴う宇宙環境保全ルールについて、その「あるべき姿」を想定し、これを長期目標として、それに向けて、短期的および中期的な戦略を策定すべきであろう。そこで、本調査研究では、有識者委員会にて「あるべき姿」を議論した。以下の 5.1.1 項ではその流れを示し、5.1.2 項（41 ページ）では、前章までの調査結果とその議論を念頭に、我が国が宇宙環境保全のルール形成に積極的に貢献し国際競争力を確保するための戦略の一案を提示する。

なお、以下では SSR を題材にするのであれば、以下の項の「レーティング」と書かれているところを「SSR」に、「RTA」（Rating Association）と書かれているところを「SSRA」と置き換えればよい。また、以下では、レーティングのルール形成が既になされ、認証ビジネスが始まっているが、国内および国際的な認知度は高くないことを前提に、そのレーティングスキームを利用して我が国がルール形成に積極的に貢献し、国際競争力を確保するための戦略を考える。

5.1.1. 格付け認証制度を伴う宇宙環境保全ルールの「あるべき姿」

以下、有識者委員会にて議論した流れを示す。

まず、宇宙環境保全に高い注目が集まっているのは、宇宙開発・利用が従来の国主導から民間へとシフトし、多様な宇宙利用がなされつつあること、その中でも特に、大規模コンステレーションが現実になってきたことによることを考慮すると、宇宙環境保全の具体的な目標を次のように掲げることが考えられる。

- a) 軌道環境の保全
- b) 宇宙活動の秩序の維持
- c) 様々な脅威への耐性を有する衛星の採用
- d) 安全な運用と適正な廃棄操作の保証
- e) 再突入時の地上の安全の保証
- f) 他天体と地球の相互の保護（対生物汚染）

これらはそのまま STM の目標とすることができ、それぞれの目標に対する脅威を想定し、それらの脅威に対する予防措置、検知策、被害への対応処置を、事業主体（衛星オーナー）、設計製造主体（衛星設計製造事業者）、運用実施主体（衛星運用事業者）のそれぞれが採るべき設備対策、技術対策、運用対策に分類し、それぞれの主体のベストプラクティスをまとめることで、STM の包括的なガイドラインを策定することができる。そして、その STM ガイドラインに沿って格付け認証評価を行えばよい。STM ガイドラインと連動させることにより、格付け認証の意義・価値が高まれば、STM に必須となる SSA、特に、我が国ではビジネス化がまだ進んでいない民間 SSA の発展、さらには、軌道上サービス等のデブリ低減技術・ビジネスの発展も見込まれる。以上が、長期的にみた格付け認証制度を伴う宇宙環境保全ルールの「あるべき姿」であると考えられる。

しかし、現実には STM の概念・目標すら国際的にコンセンサスの得られた定義はないため、この「あるべき姿」を実現するには時間がかかると考えられる。

そこで、例えば、開発～打上げ～運用の一連の流れを 3 つのフェーズ、すなわち、ミッション解析からミッション定義までの第 1 フェーズ、設計・製造・試験までの第 2 フェーズ、打ち上げからミッション遂行・PMD までの第 3 フェーズに分け、それぞれのフェーズにおける、宇宙環境保全に照らした評価項目・内容を設定する。そして、第 1 フェーズの格付け評価対象者は衛星オーナー、第 2 フェーズは衛星設計製造事業者、第 3 フェーズは衛星運用事業者として、格付けを行うことが考えられる。

そして、上述の STM ガイドラインが整理されれば、ここでの各フェーズの評価項目・内容はガイドラインに沿って整理することができると考えられる。

ただし、このフェーズ毎の格付け評価は、例えば現状の SSR には適合せず、また、そもそも、2.5.1 項（20 ページ）に示した直近の課題すら解決していない状況を考えると、このような、衛星オーナー、衛星設計製造事業者、衛星運用事業者をフェーズに分けて格付け評価することを中期目標として、例えば、0

項（22 ページ）に示した改訂から始めることが現実的であると考えられる。

5.1.2. ルール形成に貢献し国際競争力を確保するための戦略案

前項に示した通り、中期のおよび長期的目標を順次達成していくことが重要であるが、SSR のように既にルール形成がなされている場合には、まずは0 項（22 ページ）に示したような、すぐに改訂が必要な部分について改訂を提案するところから始めるのがよい。また、格付け認証の体制についても、我が国がルール形成に貢献するためには、4.3 節（39 ページ）に示した認証体制の構築が必要と考えられる。

しかしながら、例えば、SSR に関しては、改善すべき点が指摘されている中で、既に格付け認証が始まっていることや、国内、および、アジア・太平洋地域で SSR の認知度が高くない。このようなレーティングに関して、我が国が宇宙環境保全に関するルール形成に貢献し国際競争力を確保するためには、その準備として、レーティングの改善戦略と、改善されたレーティングスキームを前提に、そのレーティングを足掛かりとした我が国の宇宙環境保全のルール形成への貢献戦略の 2 つを並行して実施していく必要があると考えられる。そこで、5.1.2.1 目および 0 目ではこれら 2 つの具体的な中身を示し、5.1.2.3 目（44 ページ）にて、その実施スケジュール案を示す。

a. レーティングの改善戦略

b. 改善されたレーティングを足掛かりとした我が国の宇宙環境保全のルール形成への貢献戦略

5.1.2.1. レーティングの改善戦略案

レーティングの改善戦略は、(1) 格付け評価方法を改善しつつ、そのレーティングを(2) 国内およびアジア・太平洋地域を中心とした海外に普及させるという、2 つの柱で構成するのがよい。また、我が国がルール形成に積極的に貢献し国際競争力を確保するという目標を達成するためには、これら 2 つのそれぞれが、「客観的に妥当であること」と、「我が国の取組が正当に評価されること」を満足する必要がある。それを踏まえ、以下に上記(1)～(3)の戦略案を示す。

(1) 格付け評価方法の改善戦略

SSR を例にとった格付け評価方法に関する前章までの調査結果をまとめると、以下のようになる。

- a) 我が国は格付け評価を学術的・技術的に妥当なものにしていくだけの研究者・技術者を有し、特に、デブリ低減技術に強みがある状況にある（0 節、15 ページ）。
- b) それを踏まえた効果的な格付け方法もある（3.2 節、26 ページ）。
- c) 一方で、現状のレーティングには様々な課題がある（2.3 節、17 ページ）。
- d) ユーザーからもいくつかの懸念や改善案が示されている。
- e) さらに、SSR の場合であれば、2023 年中に、打ち上げ機が宇宙環境保全に与える影響を評価する Launch Vehicle Sustainability (LVS) モジュールを追加することを検討中で、これについても表 2.5.3（21 ページ）に示した通り、懸念がある。このように、既存のレーティングに新たなルールを追加することはしばしば起こることである。
- f) また、2.1.10 項（13 ページ）に示した通り、レーティングは STM や SSA との関連が深いので、STM や SSA の状況に即して SSR を改善していくという視点も必要である。
- g) 加えて、民間 SSA は、2.2.2 項の表 2.2.1（15 ページ）にも示した通り、我が国ではこれから発展が期待される分野である。
- h) そこで、5.1.1 項（40 ページ）に示した通り、STM の定義やガイドラインを制定し、それにそって格付け評価を行うこと、ならびに、それにより民間 SSA やデブリ低減ビジネスを発展させることを長期目標（最終目標）とする。
- i) この長期目標の達成に向けて、衛星オーナー、衛星設計製造事業者、衛星運用事業者をフェーズに分けて格付け評価することを中期目標としつつ、
- j) 直近では（表 2.5.4、22 ページ）に示した改善案を eSpace に提示すべきである。

そこで、表 5.1.1 のような格付け評価方法の改善戦略・戦術案が考えられる。

表 5.1.1 レーティングの改善戦略案（その 1：評価方法の改善戦略・戦術）

- | |
|--|
| <ol style="list-style-type: none">1) レーティングを運営する協会に対し、ユーザーからの意見、および、それを踏まえた表 2.5.4 の改善案を提示し、学術的・技術的な議論を協会の窓口機関と続けることで、短期的に改善をしつつ、窓口機関からの信頼を得るとともに、協会内での影響力を高めていく。2) 同時に、国内に格付け評価項目・方法を学術的および技術的に検討するチーム（技術検討チーム）を立ち上げ、STM や SEC などの宇宙環境保全に関する議論や研究の動向を見ながら、最新の改善案を協会に常に出せる状況をつくる。 |
|--|

- 3) また、ケーススタディとして、現在、協会が追加を検討中のルール⁶⁴の作成に技術検討チームが参加し、学術的・技術的に適切なルールとすることに貢献する。これにより、格付け評価方法に関する影響力を高める。
- 4) その上で、格付け評価項目を適切に分類することで、評価の枠組みを変更することなく、衛星オーナー、衛星設計製造事業者、衛星運用事業者をフェーズに分けて格付け評価できるようにする。その際、技術検討チームの検討結果に沿って、評価項目の修正・追加等を提案する。以上により、中期目標を達成する。
- 5) STM 等の議論の醸成に合わせて、今後コンセンサスが得られるであろう STM のガイドライン等に沿って、格付け評価項目を分類・整理し、STM 等と連動した格付け評価方法に仕立て上げる。これにより、長期目標を達成する。

(2) 国内およびアジア・太平洋地域を中心とした海外普及戦略

2.1.9 項（13 ページ）にも示した通り、国内およびアジア・太平洋地域における SSR の認知度は低い。このように、レーティングの認知度が低い場合に、認知度を高め、普及させるためには、格付け評価方法の改善のみならず、2.5.1.1 目（20 ページ）で分析した通り、格付けの利用価値、費用対効果が高いことを示す必要がある。また、4.2 節（37 ページ）で議論した通り、アジア・太平洋地域に向けた普及戦略の最終目標は、国際的に認められる相互認証制度を構築することであるので、それに向けた準備を進める必要がある。そこで、表 5.1.2 のような普及戦略・戦術が考えられる。

なお、2.1.11 項（14 ページ）で整理した通り、SWF や IAA では SSR を規制と連携させることも考えているが、少なくとも我が国においては時期尚早と考え、以下では検討のみにとどめることとした。また、ここではレーティングに関する日本国内の協会（JRТА）の設立とアジア・太平洋地域への周知までを示したが、その後の活動、すなわち、認証制度の構築戦略は、次の 0 目（42 ページ）にて示す。

表 5.1.2 レーティングスキームの改善戦略案（その 2：国内および海外普及戦略・戦術）

- 1) レーティングの運営方法の検討を行う運営検討チームを立ち上げる。
- 2) 運営検討チームは、格付け結果の利用方法を検討し、レーティング協会に対して利用のベスト・プラクティスを提示する（2.5.1.1 目（20 ページ）に示した、アクセルスペース社の Green Spacecraft⁶⁴はベストプラクティスの 1 つの候補となるであろう）。
- 3) 運営検討チームは、技術検討チームによる、宇宙環境保全ルールの中・長期目標を示しながら宇宙環境保全に格付け認証を導入する意義・価値・費用対効果を国内に周知する。手段としては、学会・シンポジウムや企業向け研究会での講演が考えられる。また、そういった講演の機会や個別のヒアリング等を通じて宇宙関連事業者の意見を収集し、SSR が宇宙活動の実態および宇宙関連事業者の利益から遊離したものにならないようにする。
- 4) レーティングに対する認知度・理解を深めた段階で、図 4.2.2（38 ページ）に示した体制を目指し、まずは、国内のレーティング協会（日本レーティング協会、JRТА）を立ち上げる。技術検討チームと運営検討チームのメンバーは JRТА に所属することになる。
- 5) レーティング協会と調整し、JRТА がアジア・太平洋地域のリージョナルハブとして活動することをオーソライズする。
- 6) JRТА の活動を紹介し、同様の協会（***RTA）をアジア・太平洋地域に立ち上げることを提案する。提案場所としては、APRSF や IAC のような国際会議、UNCOPUOS の科学技術小委員会（STSC）などが考えられる。
- 7) 以上の活動と並行して、SSR 運営検討チームは、2.1.6 項（8 ページ）に示した IAA のスタディグループ SG 5.19 に参加して SSR を各国の規制に組み込む検討の動向をモニタし続け、我が国の企業の取組が適正に評価されるよう、働きかけていく。これについては、アジア・太平洋地域のみならず、他の地域も含める。
- 8) JRТА は、レーティングが国際的にみて適切な方向に進むよう、IADC や ISO 等、宇宙環境保全に関するガイドライン・標準をまとめている機関の関係者（特に、国内関係者）から継続的に必要な情報を入手したり議論したりするなどして、そういった関係者へのレーティングの理解度を高めるとともに、レーティング協会に情報等を展開する。これにより、JRТА のレーティング協会内での影響度を高めていく。

5.1.2.2. 改善されたレーティングを足掛かりとした我が国の宇宙環境保全のルール形成貢献戦略案

以上のようにして、レーティングの改善のベースが整えば、それを足掛かりに、我が国の宇宙環境保全のルール形成に貢献することが可能となる。実際にルール形成に積極的に貢献するには、レーティングの体制を整えるとともに、他の宇宙環境保全活動との連携を深めて SSR の地位を確保する必要がある。そ

こで、以下では次の 2 つの戦略案を示す。

- 1, 国際認証制度構築戦略
- 2, 他の宇宙環境保全活動との連携戦略

(1) 国際認証制度構築戦略

図 4.2.2 (38 ページ) に示した SSR の相互認証体制を構築する。その戦略は表 5.1.3 の通りである。

表 5.1.3 SSR を足掛かりとした我が国の宇宙環境保全のルール形成貢献戦略
(その 1: 国際認証制度構築戦略・戦術)

- | |
|---|
| <ol style="list-style-type: none">1) 運営検討チームが、レーティング協会に図 4.2.2 のような国際認証制度の構築を目指すことを提案し、これをベースに議論を重ね、レーティングが目指すべき国際認証制度の体系を決定する。2) 特に、認証結果のデータベースの構築を提案し、レーティング協会の承認を受けた上で、レーティング協会の活動の一環として、データベースの構築を進める。3) それに基づき、国内の体制を整備する。具体的には、図 4.2.2 の場合であれば、まずは、関係機関（認定機関、認証機関、審査員資格証明機関、研修提供者承認機関）を設立し、審査員を確保する（当初は、JRTA の中にこれら機関、審査員を確保する、小規模な形でスタートすることも考えられる）。4) JRTA は 3.3 節 (26 ページ) に示した市場の活性化に向けたレーティングの広報活動を進めるとともに、研修提供者承認機関は、企業等による認証関連ビジネスの実施を適切に審査・承認していき、市場の拡大に寄与する。5) JRTA はレーティング協会内で日本の認証体制をベスト・プラクティスと認知させ、図 4.2.2 の認証体制を構築・推進する。6) JRTA はアジア・太平洋地域の協会（***RTA）にも我が国と同様の認証体制をつくるよう、働きかけ、複数の協会ができた段階で、アジア・太平洋地域レーティング協会 (APRTA) を立ち上げる。7) 以上の通り、レーティングの発展をリードすることで、JRTA はレーティング協会の運営委員会のようなもののメンバーとなって、協会内でルール形成を進めることができる立場となる。 |
|---|

(2) 他の宇宙環境保全活動との連携戦略

以上の戦略を実施することで、SSR の場合であれば、SSR のルール形成に積極的に貢献することは可能となると考えられる。しかしながら、今後、SSR が普及せず、他の宇宙環境保全ルールが普及する可能性があること、ならびに、既に STM に関するルール形成の議論が続けられていることを考えると、SSR 内に留まっていることは得策とはいえず、むしろ、

- a) SSR でのルール形成戦略をケーススタディとして宇宙環境保全に関わるルール形成の経験を積み、他の新しいルールが形成される際、それに参加して、我が国が影響力を確保できるようにする
- b) 我が国が自ら新しい宇宙環境保全ルールを形成する
- c) 現在検討中の他の有力な宇宙環境保全のルールの中に SSR を重要な位置づけとして組み込むことで、我が国がルール形成に積極的に貢献できるようにする

という、3 つのシナリオが考えられる。まず、a)については、そういった新しいルール形成の動きがあるかをモニタし続け、動きが出てきた時点で活動を開始すればよい。次に、b)については、例えば、我が国が得意とするデブリ低減技術をベースとした宇宙環境保全ビジネスも 1 つの候補として挙げられるであろうが、まだ議論を醸成している段階であり、今後の状況をみて活動を開始すればよいと考えられる。そこで、ここでは c)についてのみ、戦略案を表 5.1.5 に示すこととする。

表 5.1.4 改善されたレーティングを足掛かりとした我が国の宇宙環境保全のルール形成貢献戦略
(その 2: 他の宇宙環境保全活動との連携戦略・戦術)

- | |
|---|
| <ol style="list-style-type: none">1) 5.1.1 項 (40 ページ) に示した長期目標、ならびに、2.1.11 項 (14 ページ) に示した国際動向を念頭に、米国の STM の動きを注視しつつ、SIA の動きも含めて欧州の STM への対応もモニタしながら、世界のより多くの宇宙アクターに STM を遵守するための評価ツールの 1 つとしてレーティングを利用してもらうための活動を推進する。STM に関しては JAXA^[29]が議論に参加しているので、レーティングの利用拡大については JAXA に相談しながら決めていくことができるが、JRTA としても、運営検討チームが IAA のスタディグ |
|---|

ループ SG 5.19 に参加することも含めて STM の動きをモニタし、レーティング利用拡大に向けた適切な交渉相手を特定し、交渉をしていく。

- 2) 宇宙アクターへのレーティングの利用促進活動を通じて、我が国の認証ビジネスや我が国の企業のデブリ低減ビジネスや軌道上サービスの拡大をはかり、併せて、民間 SSA をはじめとする、現時点では我が国ではあまり盛んでないビジネスも発展させていく。これにより、我が国が宇宙環境保全に関するルール形成に積極的に貢献するという目標を達成する。

5.1.2.3. 戦略の実施スケジュール案

以上の戦略案を SSR に適用して 2029 年度末までに実施する場合のスケジュール案を表 5.1.5 に示す。

表 5.1.5 改善されたレーティングを足掛かりとした我が国の宇宙環境保全のルール形成貢献戦略の実施（SSR を例にとったスケジュール案）

項目	FY2023	FY2024	FY2025	FY2026	FY2027	FY2028	FY2029
a. レーティングの改善							
(1) 格付け評価方法の改善							
1) 短期的改善提示	★						
2) 技術検討チーム立ち上げ	★						
3) 技術検討チームの LVS モジュール作成参加	←→						
4) 中期目標（フェーズ毎の評価）	←			→			
5) 長期目標（STM と連動した格付け評価）	←						→
(2) 国内およびアジア・太平洋地域を中心とした海外普及							
1) 運営検討チーム立ち上げ	★						
2) 利用のベスト・プラクティス提示	★						
3) 意義・価値・費用対効果を国内に周知	←						→
4) 日本レーティング協会（JRТА）立ち上げ	★						
5) JRТА をアジア・太平洋地域のリージョナルハブとして認定	→★						
6) アジア・太平洋地域での協会立ち上げ		←→					
7) 規制への組み込みの動きのモニタ	←						→
8) 宇宙環境保全関連のガイドライン関係者との議論・情報交換		←					→
b. 改善されたレーティングを足掛かりとした我が国の宇宙環境保全のルール形成貢献戦略							
(1) 国際認証制度構築							
1) 国際認証制度設計・決定	→★						
2) データベース構築・更新・公開		←					→
3) 認証機関等の設立・審査員確保			★				→
4) 広報・認証関連ビジネス実施の審査			←				→
5) 相互認証体制の構築・推進			←				→
6) APRТА の立ち上げ			★				→
7) JRТА がレーティング協会運営委員会メンバーに就任			←				→
(2) 他の宇宙環境保全活動との連携							
1) レーティングの利用拡大活動				←→			→
2) レーティングを利用した宇宙環境保全ルール形成への積極的貢献（目標達成）							★

5.2. 戦略実施に向けた今後の課題

前節に示した戦略案の実施に向けて、SSR を例に、「現状で足りないもの」という観点で整理した直近の課題を表 5.2.1 に示す。このうち、No.1～5 は、表 5.1.5 の緑色で示したものであり、No.6～7 は表 5.1.5 の青色で示したものである。

SSR に限らず、我が国が宇宙環境保全に関するルール形成に積極的に貢献するためには、図 4.2.2（38 ページ）のような国際認証制度の構築は有効であると考えられる。実際、レーティングの中身（格付け認証手法）を議論することでルール形成に貢献するという直接的な戦略とは別に、レーティングに関する技術検討チームと運営検討チーム（および、渉外・事務局機能）からなる国内のレーティング協会（JRТА）

を設置し、国際認証の制度設計を行い、これを推進することでルール形成に貢献するという戦略は有効であると考えられる。

表 5.2.1 戦略実施に向けた直近の課題（SSR の例）

No	課題	詳細
1	短期的改善	表 2.5.4（22 ページ）に示した 9 つの改訂案を eSpace に送付し、SSR 協会 WG1（Technology WG）で審議し、格付け方法の改善をはかる
2	LVS モジュールへの対応	技術検討チームを組織し、eSpace と交渉して LVS モジュール作成に参加
3	アジア・太平洋地域リージョナルハブ設立準備	運用検討チームを組織し、協会と調整しながらリージョナルハブの設立準備を開始
4	JSSRA（仮称）設立準備	SSR 技術検討チームおよび SSR 運用検討チームと渉外・事務局機能をもった、JSSRA 設立準備委員会（仮称。以下、「準備委員会」と呼ぶ）を立ち上げ、JSSRA 設立の準備を開始
5	国際認証制度設計	準備委員会が SSR 協会 WG2（Policy WG）と議論しながら SSR により適した認証制度を設計（図 4.2.2（38 ページ）に示した認証制度は例であり、必ずしも最適な制度とは限らない。客観性を担保しつつ、よりコンパクトな制度にする必要がある）
6	JSSRA（仮称）設立	国内にて法人格を取得
7	国際認証制度体系の決定	国際認証制度の体系を決定する（それに合わせて、認証機関等、必要な機関の設置を開始する）

参考文献

以下、ウェブサイトの最終閲覧日は 2023 年 2 月 28 日である。

- [1] Adrien Saada, et.al., The Space Sustainability Rating: An operational process incentivizing operators to implement sustainable design and operation practices, IAC-22,A6,8-E9.1, International Astronautical Congress (IAC), September 2022.
- [2] Satellite Industry Association (SIA) White Paper, The Future of Space and Space Traffic Coordination and Management, September 2022.
URL:<https://sia.org/wp-content/uploads/2020/09/REVISED-White-Paper20-STCM-Sept-23rd-V1.0.pdf>
- [3] Diane Howard, Open Architecture Data Repository, UN Committee on the Peaceful Uses of Outer Space, Scientific and Technical Subcommittee, 58th Session, April 2021.
URL: <https://www.unoosa.org/documents/pdf/copuos/stsc/2021/tech-55E.pdf>
- [4] Space Policy Directive-3, National Space Traffic Management Policy, 2018.
URL:<https://trumpwhitehouse.archives.gov/presidential-actions/space-policy-directive-3-national-space-traffic-management-policy/>
- [5] Secure World Foundation website, Space Sustainability.
URL: <https://swfound.org/our-focus/space-sustainability/>
- [6] Brian Weeden and Victoria Samson (ed.), Global Counterspace Capabilities Report, Secure World Foundation, 2022.
URL: https://swfound.org/media/207350/swf_global_counterspace_capabilities_2022_rev2.pdf
- [7] ESPI, Space Environment Capacity, EPSI Report 82, April 2022.
URL:<https://www.espi.or.at/wp-content/uploads/2022/06/ESPI-Report-82-Space-Environment-Capacity-Full-Report.pdf>
- [8] Francesca Letizia, Camilla Colombo, Hugh G. Lewis, Holger Krag, Assessment of breakup severity on operational satellites, Advances in Space Research, Vol. 58, pp.1255-1274, 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2016.05.036>
- [9] ESPI, Towards a European Approach to Space Traffic Management, ESPI Report 71, January 2020.
URL:<https://www.espi.or.at/wp-content/uploads/2022/06/ESPI-Public-Report-71-Towards-a-European-Approach-to-Space-Traffic-Management-Full-Report.pdf>
- [10] European Commission website, An EU Approach for Space Traffic Management.
URL: https://defence-industry-space.ec.europa.eu/eu-space-policy/eu-space-programme/eu-approach-space-traffic-management_en
- [11] IAA website, Study Groups Commission 5 - Space Policies, Law & Economics.
URL: <https://iaaspace.org/studies/current-studies/#Study-Current-C5>
- [12] Daniel Wood, Proposal for Forming an IAA Study Group / SG 5.19.
URL:<https://iaaspace.org/wp-content/uploads/iaa/Scientific%20Activity/Study%20Groups/SG%20Commission%205/sg519/sg519.pdf>
- [13] IADC, IADC Statement on Large Constellations of Satellites in Low Earth Orbit, September 2021.
URL: https://www.iadc-home.org/documents_public/file_down/id/4195
- [14] UNOOSA website, Long-term Sustainability of Outer Space Activities.
URL:<https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/topics/long-term-sustainability-of-outer-space-activities.html>
- [15] UNCOPUOS, Guidelines for the Long-term Sustainability of Outer Space Activities, February 2021.
URL:https://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/documents/2021/stspace/stspace79_0_html/st_space79E.pdf

- [16] Peter Martinez, The UN COPUOS Guidelines for the Long-term Sustainability of Outer Space Activities, Journal of Space Safety Engineering, Vol. 8, pp.98-107. 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsse.2021.02.003>
- [17] ISO 24113:2019, Space systems — Space debris mitigation requirements, 2019.
URL: <https://www.iso.org/standard/72383.html>
- [18] ISO 23312:2022, Space systems — Detailed space debris mitigation requirements for spacecraft.
URL: <https://www.iso.org/standard/75221.html>
- [19] 松本晴久, 宇宙環境保全に関する現状と今後の動向, JSASS-2014-4019, 第 58 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2014 年 11 月.
URL:
https://jaxa.repo.nii.ac.jp/index.php?active_action=repository_view_main_item_detail&page_id=13&block_id=21&item_id=38664&item_no=1
- [20] Space Sustainability Rating website, <https://spacesustainabilityrating.org/>
- [21] Space Sustainability Rating website, GET A RATING,
<https://spacesustainabilityrating.org/join-us-get-a-rating/>
- [22] 日立株式会社ウェブサイト, LEED 認証
URL: <https://www.hitachi-hri.com/keyword/k092.html>
- [23] 宮崎康行, 小塚壮一郎, SSR(Space Sustainability Rating) に対する日本の課題と今後の取り組み, 航空と宇宙, 第 816 号, 2021 年 12 月.
URL: <https://www.sjac.or.jp/pdf/publication/backnumber/202112/20211202.pdf>
- [24] Minoo Rathnasabapathy, Space Sustainability Rating: Incentivising Long-term Sustainability in Orbit, 第 10 回 JAXA スペースデブリワークショップ, 2022 年 11 月 28-29 日.
URL: https://www.kenkai.jaxa.jp/event/2022/debrisws2022_03.html
- [25] Yukihiro Kitazawa Yasuyuki Miyazaki, “(Third-party) Rating Certification” encourage to ensure sustainable space activities? -Challenge of the Space Sustainability Rating (SSR)-, 第 14 回宇宙法シンポジウム, 「持続可能な宇宙活動に求められるリスク管理と法政策」,
URL: <https://space-law.keio.ac.jp/symposium.html>
- [26] 一般社団法人 ニュースペース国際戦略研究所第 37 回ニュースペース研究会, 2022 年 12 月 23 日.
URL: <https://ngsl.or.jp/news/meeting-37/>
- [27] 北澤幸人, 宮崎康行, Space Sustainability Rating は産業界に有用か? — 「フォーラム標準」によるルールメイキング —, 第 37 回ニュースペース研究会, 2022 年 12 月 23 日.
- [28] Yasuyuki Miyazaki, Space Sustainability Rating for Long-Term Sustainability of the Space Environment, 28th APRSAF, Space Policy and Law Working Group (SPLWG), November 2022.
- [29] 岩城陽大, 宇宙交通管理の国際的規範形成と民間事業者の役割, JSASS-2022-4538, 第 66 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2022 年 11 月.
- [30] 岩城陽大, 宇宙交通管理 (STM) をめぐる米欧関係と日本への示唆, 第 37 回ニュースペース研究会, 2022 年 12 月 23 日.
- [31] Bhavya Lal, et.al., Global Trends in Space Situational Awareness (SSA) and Space Traffic Management (STM), The Institute for Defense Analyses (IDA) Science and Technology Policy Institute, p.71, April 2018.
URL: <https://www.ida.org/-/media/feature/publications/g/gl/global-trends-in-space-situational-awareness-ssa-and-space-traffic-management-stm/d-9074.ashx>
- [32] Space Safety Coalition, Best Practices for the Sustainability of Space Operations, September 2019.
URL:
https://spacesafety.org/wp-content/uploads/2022/09/Endorsement-of-Best-Practices-for-Sustainability_v47.pdf
- [33] CONFERS, Guiding Principles for Commercial Rendezvous and Proximity Operations (RPO) and On - Orbit Servicing (OOS), November 2018. URL: https://www.satelliteconfers.org/wp-content/uploads/2018/11/CONFERS-Guiding-Principles_7Nov18.pdf

- [34] CONFERS, CONFERS Recommended Design and Operational Practices, October 2021 (revised). URL:
https://www.satelliteconfers.org/wp-content/uploads/2021/11/CONFERS_Operating_Practices_Revised-Oct-21.pdf
- [35] CONFERS, CONFERS On-Orbit Servicing (OOS) Mission Phases, October 2019. URL:
https://www.satelliteconfers.org/wp-content/uploads/2019/10/OOS_Mission_Phases.pdf
- [36] ASCEND, Satellite Orbital Safety Best Practices, October 2021. URL:
<https://www.ascend.events/outcomes/satellite-orbital-safety-best-practices-by-iridium-oneweb-spacex-aiaa/>
- [37] Tetsuo Yasaka, Can we have an end to the debris issue?, 6 2nd IAC, IAC-11.A6.5.1. 2011.
- [38] Yukihito Kitazawa, Organizational and Operational Requirements for Space Debris Remediation, International Interdisciplinary Congress on Space Debris Remediation, 2021. URL:
https://www.mcgill.ca/iasl/files/iasl/sdc2011_4_kitazawa.pdf.
- [39] Tetsuo Yasaka, and Nobuaki Ishii, Breakup in Geostationary Orbit: A Possible Creation of A Debris Ring, Acta Astronautica, Vol. 26, No. 7, pp. 523-530, 1992.
- [40] 花田俊也, 八坂哲雄, 静止軌道スペース・デブリ環境に関する推移モデル, 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 48, pp.19-25, 2000.
- [41] 棚橋茉拓, 陳泓儒, 吉村康広, 花田俊也, 微小デブリ観測衛星を用いた破砕起源の推定, JSASS-2022-4524, 第 66 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2022 年 11 月
- [42] 清水貴裕, 吉村康広, 河本聡美, 花田俊也, 気候変動を考慮した宇宙開発の持続可能性評価, JSASS-2022-4526, 第 66 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2022 年 11 月
- [43] Yuri Matsushita, Yasuhiro Yoshimura, Toshiya Hanada, Yuki Iwata, and Tadanori Fukushima, Risk Assessment of a Large Constellation of Satellites in Low-Earth Orbit, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, Vol. 20, pp.10-15, 2022, DOI: 10.2322/tastj.20.10
- [44] JAQG web サイト, JIS Q 9100 認証制度, URL: https://jaqg.sjac.or.jp/about/jisq9100_02.html
- [45] SJAC スペースポリシー委員会, SSA・STM に関する調査検討-概要, 宙と空, Vol. 799, pp. 1-15, 2020 年 7 月.
URL: <https://www.sjac.or.jp/pdf/publication/backnumber/202007/20200703.pdf>
- [46] 渡邊優人, 真坂元貴, 小金井和幸, 飯田美幸, 足立学, 松田郁未, 低軌道帯スペースデブリ観測のための SSA レーダー, JSASS-2022-4522, 第 66 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2022 年 11 月
- [47] COMSPOC website, SSASuite - Space situational awareness in an off-the-shelf, enterprise package -, URL: <https://comspoc.com/Products/SSASUITE/Default>
- [48] L3 Harris Technologies website, Space Domain Awareness, URL: <https://www.l3harris.com/all-capabilities/space-superiority#p2>
- [49] ExoAnalytic Solutions website, Space Domain Awareness, URL: <https://exoanalytic.com/space-domain-awareness/>
- [50] LeoLabs website, URL: <https://leolabs.space/>
- [51] Privateer Space website, URL: <https://mission.privateer.com/>
- [52] SCOUT Space, URL: <https://www.scout.space/>
- [53] 三菱総合研究所, 経済産業省委託事業「令和 2 年度政府衛星データのオープン&フリー化及びデータ利活用環境整備・データ利用促進事業（民間事業者への宇宙状況把握サービス提供のためのプラットフォームの構築に向けたフィージビリティスタディ事業）」, 2021 年 3 月.
URL: https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2020FY/000057.pdf
- [54] 中島田鉄工所 ウェブサイト, 宇宙関連事業,
URL: http://www.nakashimada.co.jp/aerospace_dom2.html
- [55] アクセルスペース社 ウェブサイト, D-SAIL, URL: <https://www.axelspace.com/ja/sustainability/>
- [56] ALE 社 web サイト, DEBRIS MITIGATION,
URL: <https://star-ale.com/project/debrismitigation.html>
- [57] アストロスケール社ウェブサイト, URL: <https://astroscale.com/ja/>

- [58] スカパーJSAT 社ニュースリリース, 世界初、宇宙ごみをレーザーで除去する衛星を設計・開発～宇宙のSDGs～ 持続可能な宇宙環境の維持をめざして, 2020 年 6 月.
URL: <https://www.skyperfectjsat.space/news/detail/sdgs.html>
- [59] 川崎重工, デブリ除去事業化へ向けての取り組み, 第 1 回スペースデブリに関する関係府省等タスクフォース資料, 2019.
URL: <https://www8.cao.go.jp/space/taskforce/debris/dai1/siryou3.pdf>
- [60] JAXA, 商業デブリ除去実証プログラム CRD2.
URL: <https://www.kenkai.jaxa.jp/crd2/>
- [61] 高木友士, 小早川豊範, 竹中健一郎, 木村友久, ロケット上段モニタ装置と飛行中ロケットの衝突回避, 第 10 回 JAXA スペースデブリワークショップ, 2022 年 11 月.
URL: https://jaxa.repo.nii.ac.jp/?action=repository_uri&item_id=49221&file_id=31&file_no=1
- [62] Francesca Letizia, Stijn Lemmens, Holger Krag, Environment capacity as an early mission design driver, *Acta Astronautica*, Vol. 173, pp.320-332, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.04.041>
- [63] 経済産業省, Web3.0 事業環境整備の考え方-今後のトークン経済の成熟から、Society5.0 への貢献可能性まで-, 2022 年 12 月.
URL: https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/shin_kijiku/pdf/010_03_01.pdf
- [64] アクセルスペース社ウェブサイト, Green Spacecraft.
URL: <https://www.axelspace.com/ja/sustainability/>
- [65] 加藤明, スペースデブリ発生防止技術と宇宙機の設計標準, 計測と制御, Vol.41, No.8, pp.569-574, 2002 年 8 月.
URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/sicej11962/41/8/41_8_569/_pdf
- [66] HEO Robotics 社ウェブサイト, URL: <https://www.heo-robotics.com/>
- [67] アクセルスペース, アクセルスペース、オーストラリアの HEO Robotics と提携 AxelGlobe の人工衛星 GRUS に搭載した 5 つの宇宙用センサーを HEO Inspect Software Platform に統合, 2022 年 11 月.
URL: <https://www.axelspace.com/ja/news/agpartnershipwithheorobotics/>
- [68] アクセルスペース, アクセルスペース、カナダ・NorthStar Earth & Space 社とパートナーシップを締結～地球観測衛星プラットフォーム”AxelGlobe”の衛星 GRUS による宇宙空間撮影で宇宙状況認識 (SSA) サービス提供へ～, 2023 年 1 月.
URL: <https://www.axelspace.com/ja/news/agpartnershipwithnorthstar/>
- [69] NorthStar Earth & Space website, NorthStar Earth & Space Inc. closes US\$35M Series C funding round lead by Cartesian Capital Group, LLC, January 2023.
URL: <https://northstar-data.com/northstar-earth-space-inc-closes-us35m-series-c-funding-round-lead-by-cartesian-capital-group-llc/>
- [70] Space News, NorthStar raises \$35 million for debris-tracking satellites, January 2023.
URL: <https://spacenews.com/northstar-raises-35-million-for-debris-tracking-satellites/>
- [71] Igor Levchenko, Dan M. Goebel, and Kateryna Bazaka, Electric Propulsion of Spacecraft, *Physics Today*, Vol. 75, No.9, pp.38-44, September 2022. DOI: 10.1063/PT.3.5081
- [72] Hikaru Uramachi, et.al., Green Propulsion Systems for Satellites - Development of Thrusters and Propulsion Systems using Low-toxicity Propellants -, *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review* Vol. 56 No. 1, pp. 1-7, March 2019.
URL: <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e561/e561050.pdf>
- [73] 岡 範全, 他, グリーンプロペラント推進系(GPRCS)の軌道上実証成果, 第 64 回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2020-4409, 2020 年 11 月.
URL: <https://www.jsass.jp/conference/sstc64.php>
- [74] J. A. Gonzalez del Amo, Electric Propulsion at the European Space Agency (ESA), *Space Propulsion Conference*, March 2021. URL: <https://www.epic-src.eu/wp-content/uploads/Electric-Propulsion-at-ESA-2021Virtualtiket.pdf>
- [75] 杵淵紀世志, 全電化衛星の世界動向, *日本航空宇宙学会誌*, Vo. 65, No. 9, pp. 16-21, 2017 年 9 月.

- URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/kjsass/65/9/65_274/_pdf/-char/en
- [76] 船木一幸, 宇宙科学の最前線: ホールスラスタが切り拓く宇宙探査の新時代, ISAS ニュース, No. 475, 2020 年 10 月.
URL: https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews475.pdf
<https://www.isas.jaxa.jp/feature/forefront/201027.html>
- [77] G. Sánchez-Arriaga, J.R. Sanmartín, E.C. Lorenzini, Comparison of technologies for deorbiting spacecraft from low-earth-orbit at end of mission, *Acta Astronautica*, Vol. 138, pp.536-542, 2017.
URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.12.004>
- [78] Cranfield University ウェブサイト, Camera captures innovative drag sail deployment in space, May 2019. URL: <https://www.cranfield.ac.uk/press/news-2019/camera-captures-innovative-drag-sail-deployment-in-space>
- [79] Zaria Serfontein, Jennifer Kingston, Stephen Hobbs, Ian Holbrough, Drag Augmentation Systems for Space Debris Mitigation, Small Satellite Conference 2020, SSC20-WKIV-03, August 2020.
URL: <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4624&context=smallsat>
- [80] ESA website, Show Me Your Wings: Successful In-flight Demonstration of the ADEO Braking Sail, January 2023.
URL:
https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Shaping_the_Future/Show_Me_Your_Wings_Successful_In-flight_Demonstration_of_the_ADEO_Braking_Sail
- [81] HPS GmbH website, ADEO,
URL: <https://www.hps-gmbh.com/en/portfolio/new-space-nanosatellite-equipment-en/adeo-en/>
- [82] Tethers Unlimited Inc., Taking Out the Space Trash: Tethers Unlimited Announces Successful Operation of Space-Debris Removal Device, January 2020.
URL: <https://www.tethers.com/taking-out-the-space-trash-tethers-unlimited-announces-successful-operation-of-space-debris-removal-device/>
- [83] Airbus, O. CUBED Services, URL: https://youtu.be/_6x0ly1vsRI
- [84] Northrop Grumman, MEV-2's Historic Rendezvous with IS-10-02 in Geostationary Orbit, April 2021. URL: <https://youtu.be/JUnA88PQY3k>
- [85] Thales Alenia Space, Thales Alenia Space to Lead EROSS IOD, On-Orbit Servicing Project, September 2022. URL: <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/space/press-release/thales-alenia-space-lead-eross-iod-orbit-servicing-project>
- [86] Tethers Unlimited, Tethers Unlimited developing satellite servicer for LEO missions, May 2019.
URL: <https://www.tethers.com/tethers-unlimited-developing-satellite-servicer-for-leo-missions/>
- [87] G.S. Aglietti, B. Taylor, and S. Fellowes, RemoveDEBRIS: An in-orbit demonstration of technologies for the removal of space debris, *The Aeronautical Journal*, Vol. 124, No. 1271, pp.1-23, January 2020, doi:10.1017/aer.2019.136
- [88] Surrey Nanosats SSC Mission Delivery Team, RemDeb Net Experiment Raw Footage,
URL: <https://youtu.be/RvgctXXzIYA>
- [89] SSTLTV, RemoveDEBRIS Harpoon Fire Video Feb 2019 1080P,
URL: https://youtu.be/_uPw9KP4Ii0
- [90] CleanSpace, Why We Do What We Do, URL: <https://youtu.be/h-8k25yhTr0>
- [91] 宙畑ウェブサイト, 実現間近!? 激化する軌道上サービスの開発競争、その分類と参入企業まとめ, 2020 年 2 月. URL: <https://sorabatake.jp/10481/>
- [92] Altius Space Machines website, URL: <https://altius-space.com/technologies/>
- [93] Effective Space, Space Drone™ Adaptive Servicing Spacecraft, ESA Clean Space Industrial Days 2018. URL:
https://indico.esa.int/event/234/contributions/3749/attachments/3072/3776/2018_CSID_LinnBarnett_Spacedrone.pdf
- [94] アストロスケール社ウェブサイト, 米国アストロスケールが静止軌道(GEO)衛星寿命延長の軌道上サービス市場に進出, URL: <https://astroscale.com/ja/astro-scale-u-s-enters-the-geo-satellite-life-extension-market/>

- [95] Tethers Unlimited Inc., Forging a Strong Satellite-Ground Connection: AMERGINT Technology Holdings Acquires Tethers Unlimited, Inc., May 2020. URL: <https://www.tethers.com/forging-a-strong-satellite-ground-connection-amergint-technology-holdings-acquires-tethers-unlimited-inc/>
- [96] 環境省脱炭素ポータルサイト,「カーボンニュートラルとは」.
URL: https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/about/
- [97] 環境省平成 28 年版環境・循環型社会・生物多様性白書, パート 1.
URL: <https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h28/index.html>
- [98] MS&AD インターリスク総研株式会社ウェブサイト,カーボンニュートラルサポート (CNS) の提供開始について.
URL: <https://www.irric.co.jp/topics/press/2021/0906.php>
- [99] 東京海上ディーアール株式会社ウェブサイト, SBT 目標設定支援コンサルティング.
URL: https://www.tokio-dr.jp/service/sustainability/science_based_target/
- [100] 株式会社エネルギーソリューションジャパンウェブサイト, 脱炭素ポータル.
URL: https://www.es-jpn.com/column_top/
- [101] 株式会社ウェイストボックスウェブサイト, 事業内容. URL: <https://wastebbox.net/service/scope/>
- [102] 株式会社ゼロボードウェブサイト, サービス紹介. URL: <https://zeroboard.jp/service>
- [103] MS&AD インターリスク総研, 宇宙環境保全に関するルール形成によって創造・拡大できる市場規模予測 調査報告書, 2023 年 2 月.
- [104] 株式会社リブ・コンサルティング, 脱炭素ソリューションカオスマップ 2022 サービス詳細レポート, 2022 年 10 月.
- [105] 経済産業省, 宇宙開発を巡る産業の動向について.
URL: https://www.meti.go.jp/statistics/toppage/report/minikaisetsu/hitokoto_kako/20220722hitokoto.html
- [106] 一般社団法人日本航空宇宙工業会, 世界の宇宙産業動向 (2021 年版) .
URL: <https://www.sjac.or.jp/pdf/publication/backnumber/202209/20220905.pdf>
- [107] 野村総研, 経済産業省委託事業「令和 2 年度政府衛星データのオープン&フリー化及びデータ利活用環境整備・データ利用促進事業 (民間事業者への宇宙状況把握サービス提供のためのプラットフォームの構築に向けたフィージビリティスタディ事業)」, 2021 年 3 月.
URL: https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2020FY/000057.pdf
- [108] Market Research Future, Space Situational Awareness (SSA) Market Report, March 2023.
URL: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/space-situational-awareness-market-9534>
- [109] Research and Market, Space Situational Awareness (SSA): Global Strategic Business Report, January 2023.
URL: <https://www.researchandmarkets.com/reports/4806102/space-situational-awareness-ssa-global>
- [110] ResearchStation, Space Situational Awareness Market by Solution (Services, Payload Systems, and Software), Orbital Range (Near-Earth and Deep Space), End Use (Commercial, and Government & Military), Object, Capability, and Region - Forecast to 2026, November 2021.
URL:
https://researchstation.jp/report/MAM/27/Space_Situational_Awareness_2026_MAM2741.html
- [111] Fortune Business Insights, Space Situational Awareness (SSA) Market Size, Share & COVID-19 Impact Analysis, By Offering (Service and Software), By Object (Mission-Related Debris, Rocket Bodies, Fragmentation Debris, Non-Functional Spacecraft, Functional Spacecraft), By End-User (Commercial, Military, and Government), and Regional Forecast, 2021-2028, June 2021.
URL: <https://www.fortunebusinessinsights.com/space-situational-awareness-ssa-market-105446>
- [112] Global Information Inc., Space Situational Awareness Global Market Report 2022: Ukraine-Russia War Impact, 2022.
URL: <https://www.gii.co.jp/report/tbrc1170043-space-situational-awareness-global-market-report.html>
- [113] Global Information, Space Debris Monitoring and Removal Market Forecasts to 2028 - Global Analysis By Debris Size, By Orbit Type, By Application By End User and Geography,

URL: <https://www.gii.co.jp/report/smrc1182347-space-debris-monitoring-removal-market-forecasts.html>

[114] Report Ocean, Active Space Debris Removal Market 2022: Industry Size, Regions, Emerging Trends, Growth Insights, Opportunities, and Forecast by 2030, 2022.

URL: <https://newscast.jp/news/0216355>

[115] 宙畑ウェブサイト, 軌道上サービスは宇宙市場の起爆剤か〜企業、市場規模、需要と課題~, 2018 年 7 月. URL: <https://sorabatake.jp/712/>

[116] Bryce Tech, SIA State of the Satellite Industry Report 2022, July 2022.

URL: https://brycetek.com/reports/report-documents/SIA_SSIR_2022.pdf

[117] 三井住友海上火災保険株式会社, 宇宙保険特設コンテンツ.

URL: <https://www.ms-ins.com/special/space/>

別添資料

本調査研究において作成した資料のうち、分量の都合で別添資料としたものは以下の通りである。

別添資料 1	EPFL, Space Sustainability Rating - Definition, Modules, and Scoring Methodology -, September 2022.
別添資料 2	別添資料 1 の邦訳版
別添資料 3	EPFL, Space Sustainability Rating – Process Definition -, September 2022.
別添資料 4	別添資料 3 の邦訳版

付録（調査資料等）

A.1 本調査研究の体制

本調査研究は図 A.1.1 の通りである。本調査研究では有識者委員会を構成し、宇宙環境保全のルール形成戦略について、2 回の委員会を通じてご指導いただいた。また、ステアリング委員会は、SSR の検討が海外で始まった頃からその動きに注目し、本調査研究を日本大学が実施するきっかけをつくった NGSL WG#1 のメンバーと日本大学とで構成した。なお、NGSL 事務局は、宇宙法および宇宙ビジネスの専門家である小塚壮一郎・学習院大学教授が務めており、小塚教授には本調査研究の実施支援の形でご助言等をいただいた。

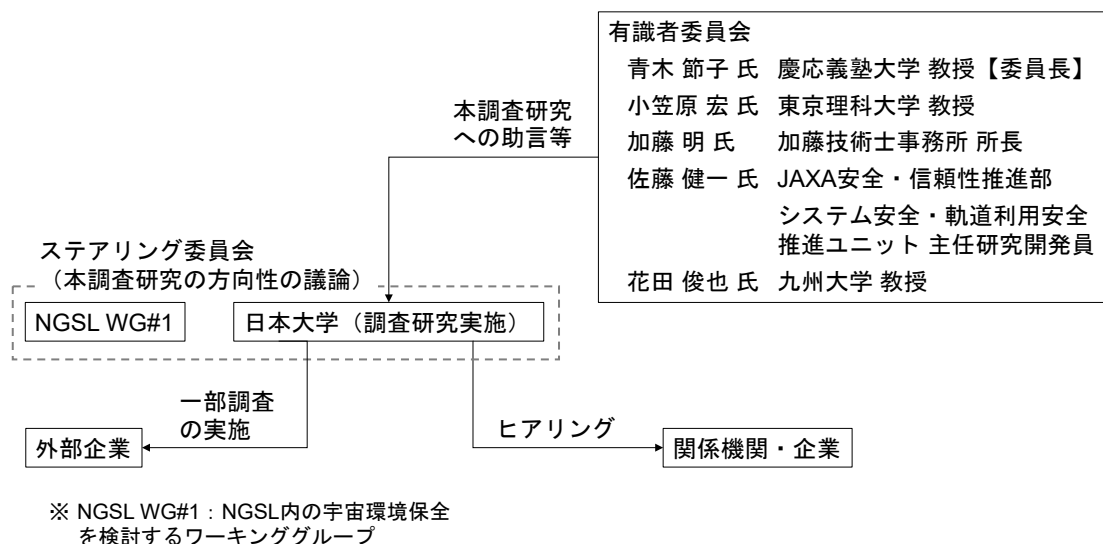


図 A.1.1 本調査研究の体制

A.2 JAQG 殿提供資料

9100国際認証制度

Japanese Aerospace Quality Group

9100導入前

各社・各組織の品質要求事項
(防衛装備庁蔵、ボーイング/GE等顧客による個別追加要求)
顧客による独自の能力調査、審査

現在

AS/EN/JIS Q 9100 + 各社固有要求事項
認証機関による認証/継続審査
官、顧客による監査の軽減/省略

IAQGは、ISO9001第3者監査とプライム監査の2本立てによる無駄を排除するため、業界共通の要求事項を標準化した9100規格と、それをもとに監査を共有する仕組みを開発

Industry Controlled Other Party (業界による監視制度)の導入

Japanese Aerospace Quality Group

✓ JIS Q 9100を基準とする第3者認証制度を活用(QMS監査の一本化)
✓ JAQG(IAQG)は、**認証の信頼性を維持・向上するため通常ISO9001等の認証制度にはない「業界による監視する制度」(ICOPスキーム)**を取り入れている

一般の認証スキーム

航空宇宙の認証スキーム

顧客の個別監査/個別品質要求対応コストを削減できる

JIS Q 9100 審査登録制度

Japanese Aerospace Quality Group

JIS Q 9100 審査登録制度

・JIS Q 9100に基づく認証は、従来プライム企業などの顧客が実施してきた品質システム審査に代わるものとしてIAQGメンバー会社間で認知されており、その審査データを従来の顧客審査の代わりに活用している。審査結果を記述する審査報告書はIAQGにより標準化されており(国内ではSJAC9101)、報告書はデータベース(OASIS)に登録される。

9100国際認証制度の体系

Japanese Aerospace Quality Group

国際航空宇宙認証制度管理チーム

航空宇宙品質マネジメントシステム国際審査登録基準 9104-1
AS9104/1 (アメリカセクター) SJAC 9104-1 (日本) EN9104-1 (ヨーロッパセクター)

相互監視により、JIS Q 9100認証が全世界に通用することを保証

JIS Q 9100認証取得のメリット

Japanese Aerospace Quality Group

JIS Q 9100 認証取得によって...

- 組織の品質マネジメントシステムの信頼性向上
- 顧客、Nadcapなどの品質マネジメントシステム監査の省略、又は簡素化
- 世界の航空宇宙プライム会社より航空宇宙・防衛関連サプライヤーとして認知される。ベンダーリスト(*)に登録
⇒ ビジネスチャンスの拡大
- 世界標準の9100認証が、JIS Q 9100として日本語で取得可能

(*) OASISデータベース：IAQGが開発した航空宇宙QMS審査データを登録するシステム。全世界で22,000件以上の認証取得組織のデータが登録されている。

Online Aerospace Supplier Information System

主要顧客の認証取得要求状況

Japanese Aerospace Quality Group

顧客が要求または推奨しているため、**9100認証取得は、航空宇宙分野参入の必須条件となりつつある。**

- ボーイング/エアバス：直接取引のある全サプライヤーに9100規格への適合/第三者認証取得を要求
- ロールスロイス/UTC：全サプライヤーに9100規格への適合/第三者認証取得を要求
- GE：9100規格への適合は要求しているが、認証要求までは規定はない
- 防衛装備庁：調達品の品質保証要求(DSP Z 9008)の一つとしてJIS Q 9100を採用
- NASA：調達品の品質保証要求(JMR-013)に採用
- JAXA：調達品の品質保証要求の一つとしてJIS Q 9100の採用
- 国内主要企業(MHI/KHI/IHI/SUBARUなど)：取引先へのQMS要求事項にJIS Q 9100を反映し、9100規格認証取得を要求または推奨している(三菱航空機は、第三者認証取得を要求)

JIS Q 9100認証状況

Japanese Aerospace Quality Group

- ◆ 認定機関
 - 日本適合性認定協会 (JAB)
- ◆ 認証機関 (JAB認定取得)
 - 日本品質保証機構 (JQA)
 - 防衛基盤整備協会 (BSK)
 - 日本検査キューエイ(株) (JCQA)
 - ビューローベリタスジャパン(株)
 - DNV GL
- ◆ 審査員資格証明機関、研修提供者承認機関
 - マネジメントシステム審査員
 - 評価登録センター(JRCA)
- ◆ 研修提供者 (JRCA承認)
 - (株)テクノファ
- ◆ 審査員(登録数)
 - 航空宇宙審査員(AA)：19名
 - 航空宇宙産業経験審査員(AEA)：65名
 - 合計：84名
- ◆ 認証取得組織(登録数)：732 組織

JIS Q 9100 認証組織(累計)

2021年5月31日現在

OASISデータベース - 認証情報閲覧

Japanese Aerospace Quality Group

組織の認証基本情報 閲覧可能
例：認証範囲、認証機関名、認証書コピー等

認証範囲、有効期限等

住所/連絡先

認証サイト(対象工場)一覧

例えば Printed Certificate [View] をクリックすれば、認証書コピーが見れる

IAQG (国際航空宇宙品質グループ) の組織



International Aerospace Quality Group (IAQG)



IAQG : International Aerospace Quality Group
 APAQG : Asia Pacific Aerospace Quality Group
 JAQG : Japanese Aerospace Quality Group
 AAQG : Americas Aerospace Quality Group
 EAQG : European Aerospace Quality Group

9

IAQG メンバー会社 (米州)



Americas

19 Members



IAQG 投票メンバー(10)
 セクターリーダー; UTC

10

IAQG メンバー会社 (欧州)



Europe

24 Members



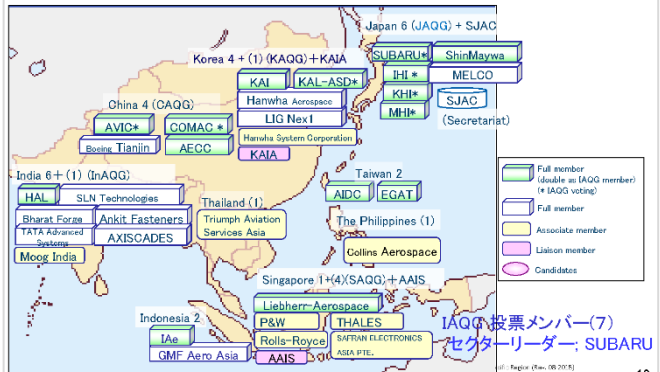
IAQG 投票メンバー(10)
 セクターリーダー; BAE Systems

11

IAQGメンバー (アジア・太平洋地区)



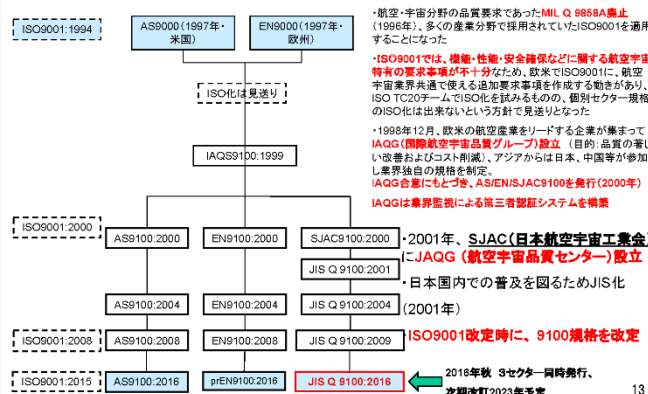
36 APAQG メンバー (15 IAQG メンバー) + 事務局 (SJAC)



IAQG 投票メンバー(7)
 セクターリーダー; SUBARU

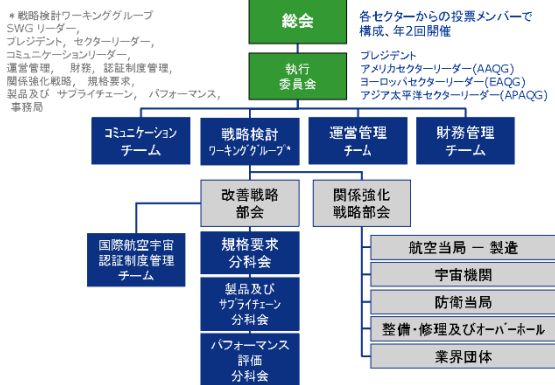
12

航空宇宙品質マネジメントシステム規格制定の経緯



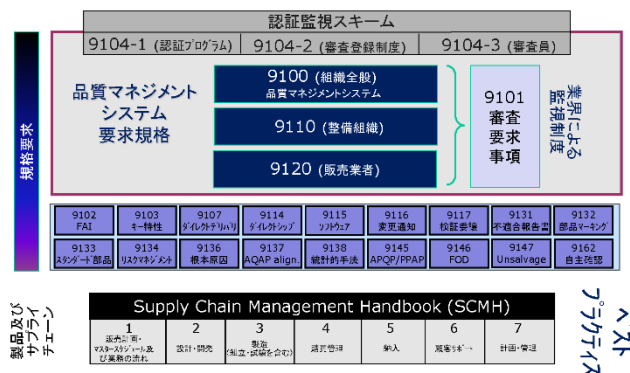
13

IAQGの組織(機能別)



14

IAQGの発行文章 - 規格要求分科会



15

A.3 格付けに係る技術情報の認証機関への提供について

宇宙開発に係る技術には、いわゆる機微技術として安全保障貿易管理の規制が適用されるものが少なくない。SSR の格付け審査において、格付けを受ける事業者は審査主体である SSR 協会に対して必要情報を提供することになるが、SSR 協会は外国法人であるため、この情報提供には安全保障貿易管理の規制が適用される。

安全保貿易管理には、リスト規制とキャッチオール規制が存在する。リスト規制は、ワッセナー協定等の国際輸出管理レジームにおいて合意された貨物・技術に適用されるものであり、輸出先地域を問わず経済産業大臣の許可が必要とされる¹。キャッチオール規制は、リスト規制の対象となっていない貨物・技術について、大量破壊兵器又は一般兵器の開発等に用いられるおそれのある場合に、経済産業大臣の許可が必要となる²。このうちキャッチオール規制は、いわゆるグループA国には適用されない³。SSR 協会が所在するスイスはグループA国であるため⁴、SSR の格付け取得プロセスに関しては、リスト規制のみを考慮すればよい。

リスト規制の対象技術は、リスト規制の対象貨物の設計、製造又は使用に係る技術として規制されている⁵。リスト規制の対象貨物を概略的に記述すれば、以下のとおりである⁶。

表 A.5.1 リスト規制の対象技術

輸出貿易管理令別表の項	貨物の種類	具体的な品目
一	武器	鉄砲・鉄砲弾等、爆発物・発射装置等など
二	原子力	核燃料物質・核原料物質、原子炉・原子炉用発電装置等など
三	化学兵器	軍用化学製剤の原料、軍用化学製剤と同等の毒性の物質・原料など
三の二	生物兵器	軍用細菌製剤の原料、細菌製剤用製造装置等
四	ミサイル	ロケット・製造装置等、無人航空機（UAV）・製造装置等など
五	先端材料	ふっ素化合物製品、芳香族ポリイミド製品など
六	材料加工	軸受等、数値制御工作機械など
七	エレクトロニクス	集積回路、マイクロ波用機器・ミリ波用機器など
八	電子計算機	電子計算機等
九	通信	伝送通信装置等、電子交換装置など
十	センサー等	水中探査装置等、光検出器・冷却器等など
十一	航法装置	加速度計等、ジャイロスコープ等など
十二	海洋関連	潜水艇、船舶の部分品・附属装置など
十三	推進装置	ガスタービンエンジン等、人工衛星・宇宙開発用飛しょう体等など
十四	その他	粉末状の金属燃料、火薬・爆薬成分、添加剤・前駆物質など
十五	機微品目	無機繊維他を用いた成形品、電波・赤外線吸収材・導電性高分子など

SSR の格付けプロセスにおいては、人工衛星（十三項）に関する技術を提出しなければならないことに加え、推進装置（三項）、セラミック複合材料（五項）、各種のエレクトロニクス装置（七項）、電子計算機（八項）、通信装置（九項）、センサー（十項）、火薬・爆薬成分（十四項）など多くの事項について、リスト規制の対象となる。従って、我が国の衛星事業者が SSR 格付けを取得する場合には、これらの情報の提供につき経済産業大臣の許可を取得する手続はかなりの負担となることが見込まれる。

¹ 外国為替及び外国貿易法 25 条 1 項・3 項。

² 外国為替令 17 条 5 項、貿易関係貿易外取引に関する省令 9 条 2 項 7 号。

³ 外国為替令別表の十六下欄括弧書き。

⁴ 輸出貿易管理令別表第三。

⁵ 外国為替令別表の一ないし十五。

⁶ 輸出貿易管理令別表第一の一ないし十五。貨物の種類等の名称は、経済産業省『安全保障貿易管理ガイドダンス [入門編]』（第 2. 1 版）〔令和 4 年 12 月〕<<https://www.meti.go.jp/policy/anpo/guidance/guidance.pdf>> 7 ページによる。



Space Sustainability Rating

Definition, Modules, and Scoring Methodology

Version date: September 2022



Type: **Technical Document**
Date of issue: **August 2021**
Latest Revision: **15/09/2022**



1 Table of Contents

2	SCOPE AND INTRODUCTION.....	3
2.1	ACRONYMS	3
2.2	REFERENCE DEFINITIONS	4
2.3	SPACE SUSTAINABILITY RATING DEFINITIONS	4
3	SSR FORMULATION AND ARCHITECTURE.....	5
3.1	MISSION RATING CONSTRUCTION	5
3.2	VERIFICATION OF THE APPLICANT INPUTS.....	7
3.3	DEFINITION OF SSR BASELINE TIER DESIGNATIONS	9
4	MODULES OF THE SSR.....	11
5	MISSION INDEX TO CALCULATE THE SPACE TRAFFIC FOOTPRINT.....	15
6	COLLISION AVOIDANCE CAPABILITIES.....	18
7	DATA SHARING	22
8	DETECTABILITY, IDENTIFICATION, AND TRACKABILITY	29
8.1	OVERVIEW	29
8.2	DETECTABILITY.....	32
8.3	IDENTIFICATION	33
8.4	TRACKABILITY	33
8.5	QUESTIONNAIRE PORTIONS FOR DIT.....	34
9	APPLICATION OF DESIGN & OPERATION STANDARDS.....	35
10	EXTERNAL SERVICES.....	37
11	SUMMARY OF REQUIRED INPUTS FOR SSR EVALUATION	39
11.1	PREREQUISITE QUESTIONS.....	39
11.2	MISSION INDEX.....	41
11.3	COLLISION AVOIDANCE CAPABILITIES	42
11.4	DATA SHARING	44
11.5	DETECTABILITY, IDENTIFICATION, AND TRACKABILITY	49
11.6	APPLICATION OF DESIGN & OPERATION STANDARDS.....	50
11.7	EXTERNAL SERVICES.....	51
11.8	VERIFICATION	52
12	REFERENCES	53



2 Scope and Introduction

The goal of this document is to have a single reference source of the description of the Space Sustainability Rating (SSR), both in terms of the overall score and the constituting modules.

2.1 Acronyms

Acronym	Description
AGI	Analytic Graphics Inc.
ARES	Assessment of Risk Event Statistics
ASO	Anthropogenic Space Object
CAD	Computer Aided Design
CCSDS	Consultative Committee for Space Data Systems
CDM	Conjunction Data Messages
CONFERS	Consortium For Execution of Rendezvous and Servicing Operations
CONOPS	CONcept of OPerationS
DIT	Detectability, Identification, and Trackability
DRAMA	Debris Risk Assessment and Mitigation Analysis
ECOB	Environmental Consequences of Orbital Breakups
EOIR	Electro-Optical/Infrared
ES	External Services
ESA	European Space Agency
FSOA	French Space Operations Act
GEO	Geostationary Orbit
IADC	Inter-Agency Space Debris Coordination Committee
ISO	International Organization for Standardization
ITU	International Telecommunications Union
LEO	Low Earth Orbit
MEO	Medium Earth Orbit
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NORAD	North American Aerospace Defense Command
OOS	On Orbit Servicing
RSO	Resident Space Object
SDM	Space Debris Mitigation
SSA	Space Situational Awareness
SSPD	Satellite Servicing Projects Division (of NASA)
SSR	Space Sustainability Rating
SST	Space Surveillance and Tracking
STF	Space Traffic Footprint
STK	Systems Tool Kit
UNCOPUOS	United Nations Committee on the Peaceful Use of Outer Space

2.2 Reference Definitions

Definition related to the space environment and space debris used in this document are consistent with [7].

2.3 Space Sustainability Rating Definitions

Anthropogenic: Objects created and put into space by humans, which could include any spacecraft or parts of rockets and spacecraft that results from missions

Detectability: The likelihood that a spacecraft in a given orbit can be detected separately by ground-based optical telescopes and radars used for surveillance.

Identification: The ability to confirm the detected object is unique and to label it as an individual known object at an instant in time.

Mission: Functional unit of spacecraft, launch vehicle, and mission related objects aimed at providing a specific service, by means of design and operations, for which they need to access and use part of the space environment. Note: A mission can consist of a single satellite, a satellite and launch vehicle, or larger combinations of these elements.

Mission Index to calculate Space Traffic Footprint: An aggregated numerical value that captures the impact of the design and operations of the objects involved in a mission on the space environment, largely based on the mitigation of space debris and its consequences. Values and methods that are used to compute this value should be physically measurable and/or transparently estimable. The notions of index and footprint are used synonymously to create a link with existing literature on this topic.

Space Sustainability Rating: The combination of the mission index or footprint with other factors that are not directly physically measurable to capture the notion of sustainable spaceflight. It can be associated with a single spacecraft or a mission as defined above.

Space Sustainability Rating Issuer: Entity responsible for the initial assignment and evolution of a Space Sustainability Rating associated with a mission.

SSR Applicant: Entity seeking or requesting a mission undergo the SSR process. The SSR Applicant may hold an executive or managerial position as a part of the mission, or an operator. Further details of the how the SSR will be managed and executed will be provided in time.

Trackability: The ability to monitor and predict the evolution of the orbit of the spacecraft over time.

3 SSR Formulation and Architecture

The SSR is formulated as a combined score based on the evaluation of individual modules, detailed in the following, where different aspects of space sustainability are covered.

3.1 Mission Rating Construction



Figure 1: Example of SSR Tiers



Figure 2: Example of Step indicators

A rated entity will receive a **“Tier Score”** which can be evaluated during any phase of a mission (**Error! Reference source not found.**). This is then periodically updated based on actual operator performance during the following phases of the mission. An issued rating is valid during one phase of a mission (pre-launch, on-orbit, disposal). When a mission enters a new mission phase, a reassessment is needed in order to ensure that the previously computed rating is still to date, taking into account potential evolution in the mission design, or operation.

During each evaluation, it is possible to earn additional credit towards a **bonus “Step”** indicator, which highlights certain steps a mission can take to ‘go over and above’ the baseline rating towards space sustainability. Various questions, as well as certain entire modules, count towards this bonus. Bonuses are reported separately and do not contribute to the baseline rating of a requesting entity. Due to the novelty of some of the bonus categories, bonus items are often less defined and rely more heavily on operator self-assessment versus verification of a particular well-defined behaviour.

The SSR is designed to be deliberately forward-looking to help encourage the adoption of sustainability across the space sector, including some that go beyond today's best practices. Not all forms of data sharing credited under the SSR are presently used operationally by most users. Similarly, some practices incentivized under the SSR are not currently performed by most operators. The intention of such items is to accelerate the adoption of additional operational practices that would further improve spaceflight safety and sustainability and catalyse the availability of a critical mass of data to support such practices.

Pre-launch phase: Prior to the launch of a space mission, all modules of SSR produce a score that is based on the data submitted by the SSR Applicant requesting the SSR. The score thus entails the sustainability evaluation from the mission as it has been planned, including the completeness and validation of the data provided. This part of the sustainability evaluation is based on inputs that are, or at least should be, available to all operators such as physical properties and mission planning and procedures. Specific criteria are associated with the scoring on each SSR module in order to reach certain tiers.

On-orbit: The pre-launch score evaluates the planned mission, but sustainability is largely about turning those plans into action. At regular points during the operational lifetime of the mission, the planned mission needs to be compared to the orbital reality. The on-orbit phase of the SSR shall apply each module to the mission again. The second SSR process determines the sustainability of implemented orbital behaviour and whether or not the actions align with the previously rated Baseline plans. Serious deviation could be justified. It is not foreseen that the mission index or space traffic footprint is regularly recomputed, as this could deteriorate based on the environment rather than actions of the operator, except for mission extensions. The latter is to incentivise realistic planning and avoid endless extensions.

The SSR is constructed in such a way that the information required to obtain the rating is available to operators or owners of space missions without the need to disclose proprietary or confidential information to the rating issuer. E.g. a spacecraft will have to identify the probability of successfully implementing post mission disposal procedures, and inform the SSR issuer on the method used to compute this probability, but not disclose technical implementation details such as sub-system design.

The SSR Applicant signing up for an SSR evaluation is invited to participate for the entire duration of the planned mission, starting during the design phase and including periodically monitoring as long as the object remains on-orbit. The verification of the statements submitted during the design phase are reviewed at first, and based on independent space surveillance means as well as operator input once the mission is on-orbit. Absence of communications between the operator and SSR issuer during the on-orbit implementation, combined with transparent reporting on space surveillance data, could thus lead to a dilution of the rating under the on-orbit entry. If an SSR Applicant chooses not to participate during the entire mission, the SSR score will expire.



The SSR itself is envisaged as a regularly revised scoring system, to adapt to the evolutions in the space environment as well as best practices and standards. Modules where changes are likely between SSR versions are to be identified. This is different from the *on-orbit* evaluation in the sense that the SSR issued and monitored would by default remain the version available at the moment of first registration with an SSR issuer. Adverse changes in the space environment, which occur after deploying a mission on orbit but that are beyond the control of an entity to act upon (e.g. nearby fragmentation events that increase the collision risk faced by the mission), are thus not affecting a rating. An operator could however voluntarily decide to get evaluated against a new version, but this would not be automatic. A reason for this could be to highlight additional changes made to achieve sustainable space operations.

3.2 Verification of the Applicant Inputs

It is assumed that the SSR application does not involve an in-depth review of the mission design on behalf of the SSR issuer. Instead, emphasis is placed on the level of verifiability of the data provided and the verification by technical authorities. These inputs are captured as part of the questionnaire, and hence the quality of the input to the SSR issuer has an influence on the rating.

Scoring within each of the SSR's modules relies on access to various pieces of factual information and/or analysis, most-often furnished by the satellite operator requesting a rating. A verification weighting is attached to inputs provided by the operator to both reflect the SSR issuer's confidence that its assessment of the system owner/operator or system's conformance with various SSR requirements is accurate and to incentivize entities to provide better verified data as part of their submission. For each of the questions contained in the questionnaire, a weighting is to be attached to the verification of the applicant's statements, which will be traced through the SSR issuer's use of that information.

The following applies:

- **Assertion by Applicant: Affirmative statement by the applicant is provided**
Factor: 0.5

This first category represents a simple statement made by an applicant without supporting documentation. Such statements will generally be assumed to be truthful, but the SSR issuer may seek to clarify or rely upon a different (default) value if it has reason to believe that the submission by the applicant is incorrect or infeasible.

- **Assertion with Technical Documentation: Supporting technical documentation on the mission design is disclosed to the SSR issuer**
Factor: 0.6

In this category, the applicant has provided appropriate technical documentation justifying the submitted value. For instance, the collision avoidance module of the questionnaire asks applicants to characterize the



covariance of their orbit determination. A technical analysis tracing various sources of errors and how they would impact the ultimate accuracy of the operator's orbit determination solution might provide this level of verification for an evaluation during the baseline rating. During the on-orbit phase, an operator might provide actual data regarding the accuracy of their operational orbit determination. In some cases, verification at this level will involve documents provided to the applicant by component manufacturers, launch providers, or other suppliers. As above, the SSR issuer will not necessarily review or confirm the technical validity of the submitted documentation, but reserves the right to do so, seek clarification as necessary, or rely upon different values if it believes the submission is incorrect or technically unfounded.

- **Public Release of Technical Documentation: Supporting technical documentation is submitted to a government or non-profit available for public review**

Factor: 0.8

For this level of verification, the supporting documentation must be submitted to a government or non-profit organization that would then make it available for review by the public. Such documentation must be available without requiring a specific "need to know" on the part of inspectors, and must be free of charge. The organization may require inspectors to create a user account or go through other reasonable registration procedures. An example might include spectrum license information submitted to a national spectrum regulator. At this level of verification, there is no expectation that the receiving party acts as a certifying technical authority for the information. Rather, the submission serves as a formal attestation of the accuracy of the information by the applicant and provides transparency for the data and supporting documentation to be evaluated by others.

- **Authority - Independent Technical Review: Confirmation of the compliance by a third-party technical expert is provided**

Factor: 1.0

This level of verification involves confirmation of the information submitted by the applicant by some third party with appropriate expertise to assess and confirm the technical credibility of the analysis or information provided by the applicant (or who performs such analysis itself on behalf of the applicant). Such technical experts might include (depending on the information to be provided), but are not limited to, government regulators and third-party consultants. Review may be conducted by an independent team of qualified individuals within the applicant's organization if the reviewing team is not involved in mission implementation and conducts oversight through a formal technical review process. No formal certification of technical authorities by the SSR issuer is proposed at this time, but such certification is under consideration for future updates to the SSR.

The contribution of these verification factors is relatively modest for the time being but may increase in future revisions of the SSR as the ecosystem develops further. There may be cases where the SSR issuer determines that appropriate technical documentation or confirmation of compliance by a technical authority is not possible or unnecessary given the nature or particular phase of a mission's development. In such cases, the SSR issuer will increase the weight of the provided information accordingly to avoid penalizing the operator.

3.3 Definition of SSR Baseline Tier Designations

As noted previously in section 3.1, a rated entity will receive a baseline rating "Tier Score" during the design phase of a mission (**Error! Reference source not found.**). This is then periodically updated based on actual operator performance during the on-orbit part of the mission and at regular points during the operational lifetime of the mission, the planned mission will be compared to the orbital reality, serving as an indication of how close the implementation is to the plan. This captures the notion that only once a mission is truly over, is its impact on the space environment known. An entity signing up for an SSR evaluation is committing for the entire duration of the planned mission, starting during the design phase and including periodically monitoring as long as the object remains on-orbit.

For each SSR module, a mission will receive a score between 0 (low) – 1 (high), by normalising the mission's module score with the maximum achievable point total for that respective module. The total SSR baseline is calculated by combining each module's score with the respective module weighting. It is important to mention that the SSR is still in its testing phase and the specific values of the module weights currently adopted; namely:

- Mission index (High, 50%)
- Collision Avoidance Capabilities, Data sharing (Medium, 16.5%), DIT (Medium, 12%),
- Design and Operation Standards (Low, 5%)

After considerable alpha and beta testing of the SSR among consortium members and external actors from industry, the first iteration of the SSR tier designations are defined as Platinum, Gold, Silver and Certified. Each of the SSR tiers are achieved after earning a certain combined score between 0 (low) – 1 (high) scale, based on the combined evaluation of individual modules.



Figure 3 SSR Tier Designations based on combined total weighted scores

Modules of the SSR



Figure 4: Overview of the Modules that build up the Space Sustainability Rating

The following main modules contribute to the SSR (in order of anticipated relative weight in the final score):

0. **Prerequisite Questions:** These questions address the bare minimum standards that an operator must perform to achieve a particular SSR. They include compliance with key Inter-Agency Space Debris Coordination Committee (IADC) guidelines for post-mission disposal, passivation, intentional debris generation, and creation of a space debris mitigation plan. They also ask the operator to confirm a willingness to share baseline spacecraft information with the SSR issuer over the lifetime of the mission. Operators who cannot achieve compliance with these questions, or who are unwilling to provide the necessary information to the SSR issuer may be limited to a lower tier of rating or denied a rating even if they would perform strongly in other categories.
1. **Mission Index to calculate the Space Traffic Footprint:** Any mission and object associated therewith leaves a trace in orbit. In the best of case, it is just using a portion of the space environment sustainably. In the worst case, it will cause harmful interference with other objects in the environment. This module quantifies the level of harmful physical interference caused by the planned design and mission operations.
2. **Collision Avoidance:** In absence of a perfect space surveillance capability and depending on the operators' capabilities, there are various ways a mission can choose to operate in a congested environment. This module aims to emphasise the steps which can be taken by operators to reduce the risk of accidental collision with debris and among active operators.
3. **Data Sharing:** Sharing of space situational awareness and other information by operators is critical to space safety. At the same time, some operators have



sensitivities about sharing certain kinds of information. In other cases, operators simply do not share certain information, but have no particular objection to potentially doing so. This module quantifies the amount of relevant information an operator shares with various communities and the contribution of this information to spaceflight safety.

4. *Detectability, Identification, and Trackability:* Small objects which might be operational but cannot be reliably included in space surveillance and tracking products form a risk to other objects in the space environment. Moreover, identification is required for registration and liability purposes. This module aims to cover these aspects. As space surveillance and tracking capabilities improve and become more accurate in tracking satellites, this module is expected to undergo updates with each SSR version.
5. *Application of Design & Operations Standards:* Successfully addressing the problem of space sustainability when it comes to avoiding the creation of space debris and operating in congested environment can only be achieved by means of common understanding and objectives. As such, as part of the SSR emphasis is placed on the adoption of standardisation concept in design and operations where possible. Standardization is a continuous process based on the availability of technologies and understanding of the environment. As such, changes in the standards need to be included when releasing a new SSR version and the implementation is considered relevant for *bonus* ratings where they are not mandatory.
6. *External Services:* Innovations taking place in the area of close proximity operations have the potential to improve space sustainability and as such are of interest. However, their application can be widely different for individual mission concepts. As such, they are considered relevant for *bonus* ratings. As external services develop and are successfully proven and utilized, the External Services module of the SSR will be updated to accordingly.

The following aspects have been excluded:

Re-Entry: From a space debris mitigation point of view, the end of life disposal of spacecraft through atmospheric re-entry is generally the preferred form of post-mission disposal as it does not leave debris on-orbit. On one hand, non-destructive re-entries by means of capsule or other thermally protected vehicles are generally prohibitively expensive. On the other hand, there is a potential risk to those on the ground, in the air, and at sea from collision with any objects that survive re-entry. Similarly, re-entering objects can deplete stratospheric ozone, increasing UV radiation exposure for humans on the ground, and contaminate land and water if hydrazine or other toxic materials survive re-entry. Proper de-orbit procedures, spacecraft design for demise, and modelling can help quantify and minimize these risks. The exclusion of re-entry in the SSR first iteration is primarily to simplify development of the SSR through a focus on the physical space environment. Re-entry risk is generally managed by national regulators and risk from spacecraft re-entry (especially nominal re-entry) is relatively low overall.

That being said, there are issues on the horizon in this area, particularly with respect to managing aggregate risk from planned large constellations and a significant increase in the number of on-orbit and re-entering spacecraft. This is a category that may be added in future SSR revisions.

Spectrum: The electromagnetic spectrum is a finite, shared resource. Satellite operators use spectrum for spacecraft telemetry, command and control, and to deliver payload data or perform communication services. Radiofrequency interference degrades mission performance and may cause safety hazards by preventing communication with a spacecraft or through denying a user access to critical safety-related spacecraft services. A potential SSR category could encourage spectrum information sharing and designs that make efficient use of spectrum, minimize interference for others, and facilitate interference geolocation, identification and mitigation (e.g. Carrier ID). This item is excluded from the initial SSR formulation for several reasons. First, interference tends to be a short-run, reversible event, (unless it is sufficiently bad to cause accidents or permanent losses). Second, regulation and norms in this area are fairly complex and well-developed already without SSR incentivization. Third, properly addressing spectrum would be a highly complex task, potentially involving deep access into company proprietary information, and significantly delay the initial SSR concept. This category may be added in future SSR revisions, but the current first iteration retains a focus on the physical interference with the space environment.

Economic Aspects: the field of economics devotes significant consideration to the allocation of scarce resources. While Earth's orbit is a finite and scarce resource, allocation to date has been done largely on a first-come basis, with states pursuing missions as they see fit (or authorizing such missions by commercial entities) unless conflicting with the ITU regulations on spectrum use. Resulting debris has generally been treated as a mission consequence rather than a long-term or indefinite allocation of that scarce resource. It is conceivable that a future SSR module could reward operators for allocations that optimize use of finite orbital resources, perhaps using the same four criteria of "rational, equitable, efficient and economical use" identified by the ITU to guide its mission. Consideration of operational financial resources and insurability could also play a role in assessment of the ability of an operator to conduct appropriate remediation in the event of an accident or other major off-nominal behaviour. This field and many of these issues are both nascent and potentially highly controversial. This potential module is excluded due to insufficient consideration and international consensus to guide the development of a potential economic module. Accordingly, it is considered out of scope for the time being.

Impact on Astronomical Observations: Certain satellites may reflect significant light in a manner that interferes with and/or saturates astronomical instruments on the ground. This concern is most significant for low altitude constellations with large areas of highly reflective surfaces oriented to reflect light towards the Earth. Potential mitigation techniques include adjustments to satellite surface coatings and coordination and sharing of predictive ephemerides with astronomical observers to facilitate sensor masking. This concern is not addressed in the Detectability, Identification, and Trackability module, as greater detectability is important for all satellites from an overall



space safety point of view, while only a limited number of satellites and mission concepts raise these issues. These concerns can and should be addressed by operator/astronomer coordination on an as necessary basis.

Broader Forms of Sustainability: The term sustainability is used in a variety of terrestrial contexts to refer to a broad set of considerations including supply chain sourcing and renewability, environmental emissions, and labour practices that can apply to the resource utilization and manufacture of space objects. One significant distillation of this concept is the set of 17 specific goals and associated targets identified in the United Nations Sustainable Development Goals. The current SSR first iteration description does not address these broader topics, including the launch vehicle's methods of propulsion to obtain orbit, and is focused specifically on the physical space environment.

4 Mission index to calculate the Space Traffic Footprint

The impact of a mission on the space debris environment is measured using the Environmental Consequences of Orbital Breakups (ECOB) formulation [1]. ECOB is a risk indicator, built from the general expression

Risk = Probability x Severity,

where the Probability term (p) captures the likelihood that an object is involved in a fragmentation event and the Severity term (e) quantifies the consequences of such an event. More in detail, p represents the probability of collision with objects large enough to trigger a catastrophic collision, i.e. a collision where enough energy is released that the parent object is destroyed, using the standard criterion of 40J/g. The availability of collision avoidance capabilities is captured by removing from the computation of the collision probability those objects that are large enough to be tracked with current surveillance systems and can be avoided with collision avoidance manoeuvres.

The term e quantifies the severity of the potential fragmentations in terms of the increase in the collision probability for operational satellites. This is done by defining a set of representative objects of the population of operational satellites and computing the collision probability for these objects due to the simulated fragmentations. More details on the approach used to model the probability and the severity terms can be found in [1]. The risk metric so-defined (I) is not computed only at a single epoch, but rather evaluated along the mission profile of an object to the implementation of disposal strategies at the end of mission [2]. In particular, this is done by considering the possible paths of evolution of the trajectory depending on the success rate of the disposal strategy (α), so that the index computation becomes:

$$ECOB = \int_{t_0}^{t_{EOL}} I dt + \alpha \int_{t_{EOL}}^{t_{fD}} I dt + (1 - \alpha) \int_{t_{EOL}}^{t_{fND}} I dt$$

where t_{EOL} represents the epoch of end of operations, t_{fD} , t_{fND} , the minimum between 100 years and the epoch of re-entry in the case, respectively, where the object is disposed and in the case where it is not disposed (i.e. abandoned in its operational orbit).

It has been shown how the proposed metric, while relying on few high-level parameters, allows capturing the differences among alternative mission architectures, for example considering the adoption of different operational concepts, the deployment of a constellation, and different implementation of disposal strategies [3]. With respect to the formulation applied in previous works [1] - [3], the computation of the collision probability takes into account the reduction of collision probability from trackable objects achieved due to the availability of collision avoidance strategies. In other words, with respect to previous work, the adoption of collision avoidance strategies is no longer treated as binary option (yes/no), but rather with a score (γ) that measures its efficacy. This score depends, among others, on parameters such as the threshold for reaction and lead time required to implement a collision avoidance manoeuvre. Free tools such

as ARES, from the ESA DRAMA suite¹ [4], are available for this purpose, so that γ is considered an input to ECOB.

The approach defined above provides an absolute evaluation of the impact of a mission on the environment; this means that some mission configurations will always score a higher footprint (e.g. because they introduce in the environment a large total mass) even when they adhere to space debris mitigation guidelines or go beyond them (e.g. by opting for a direct re-entry instead of a re-entry within 25 years).

However, one of the aspects that the SSR wants to highlight is when operators that implement better than required behaviours for what concerns mitigation efforts. In order to capture this aspect, besides the evaluation of the absolute debris risk, the computed footprint is compared to the one that the same mission would score in a reference scenario. The reference scenario corresponds to a minimum required level of mitigation actions, defined in the following ways for the different orbit classes (based on commonly applied and internationally recognised space debris mitigation standards):

- LEO: 25-year with 90% PMD,
- GEO: graveyard with 90% PMD,
- Other: no action.

The Mission Index in itself can be used to compare different missions, but a normalisation approach is needed to include its contribution in a composite indicator such the SSR and make it compatible with the other modules. In past work, an attempt was made to normalise the index value by using a reference value (i.e. the index of a specific satellite), under the assumption that this would represent a worst-case scenario. However, this approach has the downside of not being future-proof, whereas one of the main motivations behind the adoption of environmental impact assessment is to be able to capture the dynamic evolution of the debris environment. For this reason, the normalisation approach adopted for the SSR is based on the concept of environmental capacity [5], i.e. the number and type of missions that are compatible with the long-term stability of the environment. As detailed in [2], long-term simulations of the environment can be used to build a reference scenario with a good level of compliance to space debris mitigation guidelines. This scenario is then compared with the actual use of orbital resources, intended as the sum of the index for all objects in orbit, considering their expected mitigation strategies. Currently post-mission disposal (PMD) plans and their expected success rate are not systematically shared by operators, but thanks to space surveillance data, the activity of a spacecraft can be derived and the evolution of its orbit can be predicted, so the status of the environment can be assessed [6]. In terms of environmental capacity, a share of it is consumed by inactive satellites and rocket bodies, whereas the remaining part can be used for active and new missions. It is this value (the available capacity) that can be used to normalise the Mission Index

¹ Available for download at <https://sdup.esoc.esa.int/drama/>



within the SSR to reflect that the criticality of the index of a mission is also related to the global evolution of the environment.

5 Collision Avoidance Capabilities

This section addresses capabilities that satellite operators could have, which improve their ability to identify, respond to, and mitigate collisions. Three categories are proposed, with several items of increasing value in each category.

- **Orbital State Knowledge**

Rationale: Cooperative tracking often results in smaller covariances, as do more frequent tracking and improved information about planned satellite manoeuvres (e.g. by characterising the manoeuvre uncertainties). The SSR gives additional credit for better orbit determination, more frequently updated orbit determinations, and better characterized/validated covariance estimation. This could help spur better orbit determination capabilities, especially for small satellites that might otherwise lack it. In the absence of an industry-wide standard for covariance estimation, knowing you have well-characterized the realism of your covariance information helps other operators determine whether to trust provided covariance estimates.

There accuracy which can be achieved on the orbital state knowledge, in any spatial direction, is orbit regime dependent and can be influence by the chosen technologies. A top-level distinction between coarse and accurate is to be made, which can be assessed by the SSR issuer.

- **Collision Avoidance: Availability to Coordinate**

Rationale: Operators should be credited for maintaining service availability to coordinate with other operators for collision avoidance and being able to be contacted for collision avoidance purposes with high availability.

- **Collision Avoidance: Capability to Coordinate**

Rationale: Operators should be credited for maintaining staff with expertise to meaningfully resolve the potential event, namely:

- 1) ability to accept and interpret common data formats including conjunction data messages (CDMs) and other Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS) standards,
- 2) ability to review various sources of SSA² information and determine the level of risk posed by a conjunction and whether a manoeuvre is indicated, not-indicated, or if further information is needed,
- 3) ability to develop manoeuvre plans to mitigate a conjunction, screen manoeuvre plans from other operators for safety,

² SSA, as used in this section, refers to SST as well as space weather information and data products that inform atmospheric density estimation.



- 4) ability to task new non-routine manoeuvres for your satellites and confirm execution. Documented procedures help prevent human and technical errors during critical safety of flight operations.

Table 1: Scoring Rubric for Collision Avoidance Capability

Operator Action	Capability (including all lower levels)			
	No Score	Low Score (2 points)	Medium Score (3 points)	High Score (4 points)
Orbital State Knowledge (during normal operations)	Rely on a third party public SSA provider for state information (e.g. space-track.org TLE)	Operator maintained orbital position ³ state knowledge of object	Maintain orbital state knowledge of object to < 10 km in any direction. Update orbit determination for the operated satellite when a manoeuvre or other event induces a change to its orbit that would cause the operator's state estimation to be worse than the required orbital state knowledge. & Characterize/validate covariance of your orbit determination	Maintain orbital state knowledge of object to within < 1 km in any direction. Update orbit determination for the operated satellite when a manoeuvre or other event induces a change to its orbit that would cause the operator's state estimation to be worse than the required orbital state knowledge. & Characterize/validate covariance of your orbit determination
Collision Avoidance: Availability to Coordinate	Not able to coordinate	Able to coordinate in response to emergencies (but not necessarily on a routine basis).	Able to coordinate during set hours per day.	Has a system for routine conjunction assessment and capability to respond to concerns 24

³ Orbital position state knowledge refers to time-indexed position and velocity information, but does not include covariance.



				hours per day via human or computer system capable of supporting near-immediate coordination and reaction for urgent issues.
Collision Avoidance: Capability to Coordinate	Operator has no dedicated process for conjunction screening, assessment, or mitigation. The operator may be unable to or chose not to ever manoeuvre in response to conjunctions	Has the capability to be contacted in case of close approach or another high-risk event Operator regularly screens orbits and planned manoeuvres against public catalogues and/or information from SSA sharing organizations and/or third-party SSA providers	Operator is capable of interpreting conjunction data messages and other common formats, to determine risk and generate/screen mitigating manoeuvres Operator has a system for automated routine conjunction assessment	Has documented procedures for collision screening, assessment, and mitigation Regularly screens operational spacecraft and planned manoeuvres against SSA sharing organization catalogue
Collision avoidance: maneuver capability (BONUS)	No maneuver capabilities	Any maneuver capabilities (including differential drag)	Reaction (at least $\Delta v=1$ cm/s) within 6 orbital revolutions	Reaction (at least $\Delta v=1$ cm/s) within 1 orbital revolution
Maintaining orbital state knowledge after the end of normal operations		Maintain orbital state knowledge until spacecraft is placed into a graveyard orbit or is disposed of through atmospheric re-entry.	Maintain orbital state knowledge to 10 km until spacecraft is placed into a graveyard orbit or is disposed of through atmospheric re-entry.	Maintain orbital state knowledge to 1 km until spacecraft is placed into a graveyard orbit or is disposed of through atmospheric re-entry.



Scoring Guidance: Entities can receive credit for any box where they satisfy all criteria contained in the box. If an operator is able to fulfil multiple boxes in a single row, those point values are added. During the scoring process, the total number of points earned by the entity are divided by the total possible points. The normalized point total is an input to the full SSR calculation.

6 Data Sharing

This section addresses the information satellite and launch vehicle operators could share with other operators and stakeholders, and the contribution of such sharing to spaceflight safety. Potential forms of data sharing are divided into three categories:

- Collision Avoidance Coordination Information
- Satellite Metric Information
- Characterization Information

There are four potential sharing audiences, described in the list below. Operators may gain points by sharing a given type of information (listed in Table 2) with a particular audience. Sharing in this category includes both publication and update commitments, i.e. operators must commit and follow through on keeping the relevant form of data up-to-date in addition to sharing it to receive credit. The specific update cadence depends on form of data, but unless specifically specified, should be reasonable to support common operational uses of that information.

To achieve credit for sharing a specific type of data with a certain audience category, the SSR applicant should generally make the specific form of data available to entities in that particular category on a reasonable and non-discriminatory basis, but does not need to proactively demonstrate that every potential possible entity in a category has the capability to receive their data (e.g. making data available in a commonly used data format is enough, even if a subset of potentially users have systems that do not support that format).

- **SSA Provider(s)**

Many entities operate SSA databases for use by third parties or provide SSA data products or services to others. Some of these entities are governmental, others are operated as non-profits or in academia, and some are for profit entities. Sharing with such entities earns the SSR issuer this form of credit.

- **Other operators upon request for coordination**

Another operator may make a request for coordination to an SSR applicant in response to a high interest event or other specific planned or emergent event. Operators may be willing to share information with other entities with a credible need to know in response to such an event. Such sharing earns an SSR applicant credit for sharing in this category.

- **Voluntary network of operators/stakeholders**

Various organizations, including the Space Data Association, exist as venues to share safety of flight information, with some providing additional data verification and validation and/or legal and technical restrictions on the use of shared information. Informal networks also exist for various spacecraft operators with overlapping orbits, where data sharing happens on ad-hoc bases and to serve specific needs of operators. Such information networks are put in place when a mission has strict requirements, e.g. in terms of ground track

patterns, or potential interferences as part of orbital manoeuvre campaigns, e.g. tandem flights or crossing specific orbital regions, are identified. Sharing with such organizations would earn credit under this item.

- **Public**

In order to earn credit for sharing with the public, the operator must maintain and provide the relevant source of information. Having provided the information to a third party who hosts and shares such information (e.g. listing a satellite's mass on Wikipedia), would not be sufficient to earn credit under this category. While operators are encouraged to share information freely and easily with the public, requiring users to register and create an account and/or agree to terms of use would not prevent an applicant from receiving credit under this audience unless such terms of use provide for significant restrictions on use, as determined by the SSR issuer.

Weighting were determined by analysis based on contribution to spaceflight safety, as well as current operator practices, and operator concerns about different forms of data sharing. Forms of data sharing with a more significant impact on space sustainability receive more points. In answering these questions, an SSR applicant should respond with their best estimate for their intended capabilities and actions at the time of their submission (either for initial evaluation or re-certification). Credit for each form of sharing is subject to modification by the verification multipliers described in the Verification of Operator Inputs section.

Detailed information about the specific categories of activities within the Data Sharing Module:

- **Collision Avoidance Coordination Information**

Information to be shared/credited: contact information for flight dynamics team or other appropriate technical/operational contact for collision risk mitigation (likely name(s), title(s), phone number(s), email address(s), list of controlled objects by NORAD CAT ID or International Designator, languages spoken), information about the time zone in which that individual or team operates, and response time guarantees as appropriate. An operator would also be asked to commit to publishing this information somewhere accessible and ensure it remains up to date to receive credit.

Relevance: Currently, many, if not most, high-risk conjunctions involving active satellites controlled by different operators are resolved via manual communication between the involved operators. There is an operational need to be able to reliably reach the contact associated with a given object to ensure the operator is aware of the conjunction and so any necessary collision avoidance manoeuvres can be planned and coordinated.

Importance: Basic contact information is considered highly important. Hours of operation and response time guarantees are important, but secondary to timely and accurate contact information.



- **Satellite and Mission Information**

Information to be shared/credited: Information relevant for operators attempting to identify, assess and avoid high- risk conjunctions. This includes launch vehicle timing and trajectories, both planned and actual, if satellites have manoeuvre capabilities, operational vs. non-operational status, satellite ephemeris information (historical, and planned future ephemeris incorporating manoeuvres. This is evaluated based on planned behaviours in the baseline SSR and updated based on actual practice during the on-orbit phase), ephemeris covariance information and information about how that covariance information was generated.

Relevance: Launch information helps operators and SSA providers improve overall situational awareness, particularly as the number of launches and complexity of spacecraft deployment information continues to increase. Operational status information helps operators determine whether coordination is possible or necessary. Ephemeris information improves SSA, as operator orbit determination is often better than non-cooperative estimates. Covariance information helps determine if satellite position information is decision-quality or if more information is required.

Importance: Launch information is helpful, but less of a concern for most operators than on-orbit operations. Sharing information about operational status is important. Sharing current/predicted ephemeris and covariance information is highly important.

- **Satellite Characterization Information**

Information to be shared/credited: Satellite mass and size (either dimensions of a bounding volume, simplified CAD models, or other approach). These data are unlikely to change significantly during the operational life of most satellites. An operator would also be asked to commit to publishing this information somewhere accessible and assure it remains up to date.

Relevance: Satellite mass and size will be provided to the SSR issuer and used as part of the footprint calculations, but will not necessarily be released publicly. Knowing accurate mass and size information for operational satellites can help increase the fidelity of orbit propagation and conjunction assessments by third parties.

Importance: This information is considered important for the above reasons.

- **Autonomous systems (Subset of Satellite Characterization Information)**

Information to be shared/credited: As more satellites use autonomous collision avoidance algorithms, having public information about their concepts of operation will be important for these systems to be designed to avoid feedback loops between systems that lead to unsafe behaviour. Information could be shared about how these systems function at a high level, the decision timelines used, and how other operators should coordinate with the operator of spacecraft with autonomous manoeuvre systems mechanisms to avoid



uncoordinated collision avoidance manoeuvres. Specific items to be shared would include the criteria for when a manoeuvre is triggered, where and with what frequency planned autonomous manoeuvres are reflected in shared SSA information, and emergency stop procedures to interrupt autonomous procedures in case of malfunction.

Relevance: This is highly important in certain orbital regimes and will grow more important as such systems become more widespread.

Importance: This is listed as somewhat important, as it helps other operators in overlapping orbits coordinate to avoid hazardous conjunctions and unintended anomalies when operators' satellites react to one another's autonomous manoeuvres.

This category is only scored for operators who intend to operate or operate autonomous satellite manoeuvre systems (defined as systems that execute satellite manoeuvres without explicit manoeuvre approval by a human prior to execution).

- **Other forms of data sharing (BONUS)**

Information: radio-frequency information, spacecraft anomaly information, and datasets to support academic and governmental research

Relevance: other forms of data sharing also support space sustainability, but in ways more removed from operational physical collision avoidance. This category provides an opportunity for operators to get additional bonus credit for their contributions to sharing this data. It is expected that data shared will vary based on the operator and operational needs. Accordingly, this category is deliberately less defined. It is anticipated that for much of this data sharing, operators will share different information with different audiences. Nevertheless, such data sharing should be substantive and in sufficient detail to provide a clear and articulable benefit to at least one external stakeholder in the relevant category.

Information: Documented and available application programming interfaces or other machine to machine interfaces

Relevance: Well documented and available machine to machine interfaces provide ways for other providers to automate and make use of provided data in operational processes and provide additional reliability and greater ease of use as compared to scraping techniques. Operators could receive additional points if they make all data in a category (Collision Avoidance Coordination Information, Satellite Metric Information, Characterization Information) available in a documented API or other technical interface suitable for automated use.

Table 2: Scoring Rubric for Data Sharing

Data shared (categorized by contribution to safety)	None	SSA Provider(s)	Other operators upon request for coordination	Voluntary network of operators/ stakeholders	Public
Collision Avoidance Coordination Information					
Publish + update collision avoidance contact Information - name(s) - title(s), - phone number(s), - email address(s), - list of controlled objects by NORAD ID or International Designator - languages spoken)	0	10	10	12	12
Publish + update collision avoidance contact time zone/hours of operation	0	3	3	3	4
Publish + update COLA contact/coordination response time commitments	0	1	2	2	1
Satellite and Mission Information					
Publish + update satellite ephemeris (including manoeuvres, for LEO: 7 days, MEO/GEO: 14 days into the future). Sharing archived data is encouraged, but not required.	0	12	8	15	15
Publish + update covariance information	0	6	5	6	6
Publish + update covariance characterization/validation	0	1	2	3	3
Publish + update launch vehicle timing/trajectories (planned and	0	3	1	1	2

actual)					
Satellite Characterization Information					
Publish + update satellite mass	0	4	3	4	4
Publish + update satellite manoeuvrability (manoeuvrable/non-manoeuverable)	0	5	5	6	6
Publish + update satellite manoeuvrability capability ⁴	0	3	2	3	3
Publish + update satellite operational status (operational/non-operational) ⁵	0	5	5	6	6
If the satellite uses autonomous systems (systems without a human in the loop) for satellite manoeuvring, publish + update:					
The criteria for when a manoeuvre is triggered	0	5	3	5	5
Where and with what frequency planned autonomous manoeuvres are reflected in shared SSA information	0	5	3	5	5
If emergency stop procedures exist to interrupt autonomous procedures in case of	0	2	2	3	3

⁴ The intention of such sharing is to help other operators understand the capability of a particular spacecraft to maneuver in case of a high risk conjunction or other necessary event, especially for systems that use low-thrust propulsion or differential drag techniques. Potential forms of data sharing that meet this objective would include maximum achievable displacement from a reference orbit in 24 hours (or another reasonable time period), ΔV capability per revolution, or similar). Order of magnitude rather than precise values are acceptable.

⁵ This refers to the real-time operational status of the satellite post-launch until disposal.

malfunction and how another operator should request an emergency stop					
Other forms of data sharing (BONUS)					
Radio-frequency Information to support interference avoidance/mitigation/geolocation	0	1	4	3	3
Spacecraft anomaly information	0	1	2	3	4
Other datasets to support government/academic research ⁶	0	3	3	3	4
APIs or other means for automatic machine to machine access to above information. ⁷	0	1	1	2	2

Scoring Guidance: Operators can receive credit for any of the activities they do in any category of data sharing. The activities are listed with scores showing the points they receive for sharing a particular form of information with a particular audience. The operator can earn points for all the actions they take, including sharing a single kind of information with multiple audiences. During the scoring process, the total number of points earned by the operator are divided by the total potential points. The normalised point total is an input to the full SSR calculation.

⁶ Examples might include (but are not limited to) non-lethal impact data, inferred atmospheric drag, and/or manoeuvre information.

⁷ Points are per totally compliant data category (Collision Avoidance Coordination Information, Satellite Metric Information, Satellite Characterisation Information), so total score for automatic access is three times these values.

7 Detectability, Identification, and Trackability

7.1 Overview

The physical attributes of a satellite and the concept of operations affect the ability of sensors located on Earth to detect, identify, and track it. The goals of this aspect of the SSR are to encourage satellite operators to consider how the physical attributes of their satellite design and their operational approach during launch, operations and disposal affect the level of difficulty for observers to detect, identify, and track the satellite. By providing a consistent method to analyze a given satellite design and operational concept, this portion of the SSR will provide a standard metric for the comparison of satellite missions in the dimensions of detection, identification and tracking. Also, there is potential for this part of the SSR to encourage development of new ways for satellites to balance the considerations of how to limit their contributions to astronomic light pollution while maintaining their ability to be detected, identified, and tracked when necessary. In all, similar to the rest of the SSR, the Detectability, Identification, and Trackability (DIT) analyses aim to start conversations about how operators can utilize space more sustainably and responsibly.

Key definitions that drive the analysis include:

- **Detection:** This definition considers the scenario in which a space surveillance system using optical and radar sensors to observe Anthropogenic Space Objects is monitoring for spacecraft without having a specific list of objects and without *a priori* knowledge of the size, altitude or orbital characteristics of spacecraft. For this uninformed case, the Detection analysis asks the likelihood that a spacecraft in a given orbit can be detected separately by optical telescopes and surveillance radars. The Detectability of a set of mission spacecraft is therefore defined as the likelihood that the optical telescope and surveillance radar system will observe an Anthropogenic Space Object, subject to sources of error from the sensors, from signal loss as it propagates through the atmosphere and from illumination constraints due to the geometry of the sun, spacecraft and sensor.
- **Identification:** For this analysis, Identification refers to the process in which an observer who does not have *a priori* information about the name, ownership, range and size of spacecraft, uses information gained through physical observations to gradually specify how difficult it is for an uninformed observer to uniquely distinguish a given spacecraft from others using only measurable or inferred characteristics independent of coordination with a spacecraft operator to complete the identification process. In practice, it is very difficult to distinguish a spacecraft from others, particularly considering increasing concerns in the future about the challenge of distinguishing satellites via ground-based data, especially with an increase in small satellites and constellations. Thus the analysis shows the difficulty by calculating the angular momentum for a spacecraft and identifying a group of satellites that are found to be in a

mathematical cluster based on angular momentum. The smaller the cluster, the easier it will be to identify the spacecraft.

- **Tracking:** For this analysis, Tracking refers to the process in which an observer has already detected and identified a spacecraft and next seeks to monitor and predict the evolution of the orbit of the spacecraft over time. The Tracking analysis asks how difficult it is for an observer who is not the satellite operator to perform the tracking function. In this case, the assumption is that the satellite tracker has information about the name, owner and instantaneous location of a satellite at a specific time, however, the observer does not have full knowledge of the orbital parameters. In this situation, the uncertainty of the tracking information increases when the access times are shorter for a ground station to observe a spacecraft. Thus, the trackability analysis computes access times as a figure of merit to estimate the level of uncertainty in the tracking process. More frequent overpasses of a ground-based network of telescopes and radars improve the prediction for when the spacecraft will pass within the field of regard again.

This section presents the theoretical definitions that will drive the Detectability, Identification and Trackability Analysis for the SSR and discusses the methods to implement the first version of the software code using the tools Systems Tool Kit (from AGI) and MATLAB (from MathWorks). The authors acknowledge that the SSR Consortium prefers to use software that is either open source or accessible via low cost, whereas both STK and MATLAB require licenses. The SSR Consortium team aims to create a follow up version of the DIT analysis software using open-source software tools such as OreKit in place of STK, but the initial logic of the analysis will be demonstrated first in STK and MATLAB.

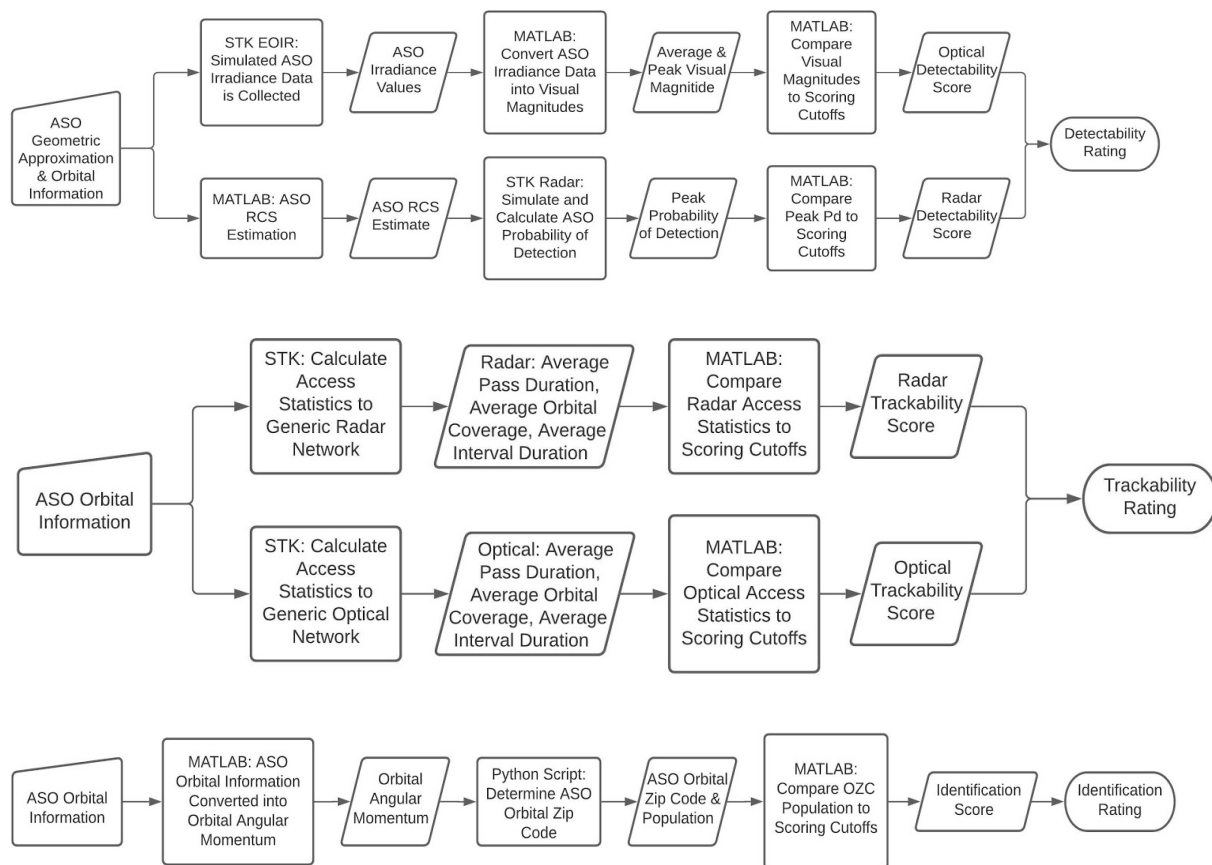


Figure 5: Overview of Analysis Procedure to Calculate Detectability, Identification and Tracking

The analysis introduced above seeks to quantify the DIT of a given RSO independently of the capabilities of its operator to track the satellite and to reduce the error in estimating the satellite's location. Thus, the analysis considers the perspective of an independent observer that is only working with information available through sensor observations of Anthropogenic Space Objects. Considerations of the level of error for the operator's estimates of satellite location will be taken into account in the Collision Avoidance section of the SSR. Using primarily simulation, the DIT analyses will start with a set of physical assumptions and initial data requested from the operator. The data requested from the satellite operator partly overlap with the data requested for the Mission Index module which is used in the calculation of the Space Traffic Footprint. The list includes the following:

- Geometric Approximation and Dimensions (rectangular prism, cylinder, or sphere)
- (Requested) Simplified CAD Model – Basic size and geometry
- (Requested) Detailed CAD Model - Complex faceted model (a single diffused facet can be used to average surface irregularities in order to provide an appropriate representation of material surfaces e.g. MLI wrinkling)

- Operational Orbit Parameters (apogee altitude, perigee altitude, inclination, RAAN, argument of perigee, mean anomaly)
- Nominal requirements for satellite Attitude/Pointing during primary mission
- The number of satellites in the mission and the deployment process from the launch vehicle
- A qualitative description of the early operational stages to reach the operational orbit (at what altitude are satellites deployed? How many satellites are deployed at a given altitude? How long do they stay at this altitude? Are there intermediate altitudes before reaching the operational altitude? Will the altitude and inclination change during the mission operations?)

A key component of the DIT analysis described here is the Ground Sensor Network (GSN) Capabilities assumed for the model. The ideal GSN for the SSR is one that represents capabilities attainable through commercially procured sensors that are available to countries around the world. The reason for this is that the SSR is intended to use transparent metrics to the extent possible. To accomplish this the GSN modeled for the SSR is not representative of any specific existing GSN. In particular, the GSN used for these analyses is made up of sensors with capabilities on par with commercially available telescopes and radar systems. The ground sensors are distributed geographically within the simulation in order to give similar coverage to a variety of orbits.

7.2 Detectability

The detectability analysis created for the first iteration of the SSR has two components: optical detection and radar detection. These represent the two most predominant methods for gathering data on satellites and other anthropogenic space objects (ASOs). These two portions of the analysis are represented in the top two rows of the analysis flowchart above. The goal of each of these analyses is to estimate how difficult it will be to detect a proposed ASO using each method individually and then translate that difficulty into a scorable metric for the SSR. The overall Detectability score is a combination of the Optical contribution and the Radar contribution. Thus, Detectability is evaluated as the Optical Score*(.05) + the Radar score*(.05).

For this first iteration of the SSR, the optical detectability testing employs a binary scoring method with one threshold between detectability. This threshold is set at a visual magnitude of 15, which represents the limiting magnitude of an optically idealized 0.25m telescope. In this context, optically idealized means that the telescope itself does not introduce any error into the optical detection process. In practice, imperfections in the lenses, mirrors, and electronics of optical sensors lower the limiting magnitude of the overall optical system. This means that the scoring cutoff of 15th visual magnitude between “Detectable” and “Not Detectable” corresponds to an idealized 0.25m telescope as well as a non-idealized 0.3m-0.5m telescope. Telescopes of this class were selected for the lowest cutoff based in-part on the work done at the Air Force Research Lab on “Raven automated small telescope systems”. This study explored and validated the concept of using commercially available telescopes of size less than < 0.5m for satellite observation and tracking. If an ASO meets the 15th magnitude cutoff, it

receives a score of 1, and if it does not meet the cutoff it receives a score of 0.5 for the Optical portion of the Detectability Score.

In radar analysis, a detection event occurs when the returning radar signal from the detected object is strong enough to be distinguished from the background noise with a certain level of confidence. For the DIT Radar Detection analysis, there are three cutoffs set to delineate between ASOs that are minimally detectable, ones that should be easier to detect, and ones that should be nearly guaranteed to be detected. According to AGI, the company that owns and develops the STK software used for the analysis, a detection event with a probability of detection over 50% can generally be considered a successful detection⁸.

In order to differentiate ASOs that barely make the minimal detectability cutoff from those that handily exceed it, the Radar Detectability employs one additional cutoff at 75%. If an ASO meets the 50% threshold it receives a Radar score of 0.5, if it meets the 75% threshold it receives a Radar score of 1, otherwise it receives a Radar score of 0.

7.3 Identification

Identification refers to the process in which a naïve observer who does not have a priori information about the name, ownership, range and size of spacecraft, uses information gained through physical observations from earth to gradually specify that a specific object observed from ground-based sensors is observed repeatedly and that it can be identified as an object with a specific name, orbit and owner. This analysis asks how difficult it is for an uninformed observer to uniquely distinguish a given spacecraft from others using only observable characteristics independent of coordination with a spacecraft operator to complete the identification process. **This analysis is not included in the DIT scoring at this time.**

7.4 Trackability

In the final portion of the analysis, the SSR assesses the trackability of a satellite by analyzing the level of certainty with which an independent observer can estimate the future evolution of the orbit of a spacecraft. This stage assumes that an observer uses the reference optical observation system and a tracking radar system that is tuned to the appropriate parameters to observe an object of the given size and range (as identified in the Detectability analysis). The analysis calculates the future predicted periods in which the Detected space object will overfly the telescopes and radars in the ground sensor network. The analysis calculates the level of uncertainty for the estimates of future overpasses. The higher the uncertainty in the future orbital trajectory estimates, the lower the trackability score.

In order to provide an empirical basis for selecting scoring cutoffs, TLEs for ~3200 active satellites were pulled from Celestrak. These satellites were then run through the trackability analysis to produce distributions to help identify trends in the pass duration,

⁸ (<https://help.agi.com/stk/11.0.1/Content/training/StartRadar.htm>).

orbital coverage, and interval duration metrics. The cutoffs described below were defined through a combination of information from literature on the topic and from observations of the empirical data produced for ~3200 active missions.

Scoring for the Trackability analysis is broken down into three components with two subscores for each. The first component is based on the ASO's average pass duration, with scoring cutoffs at 120s (.25), 180s (.5 pts), and 400s (1 pts). The second component is based on the ASO's average orbital coverage, with scoring cutoffs at 10% (.25 pt), 25% (.5 pts), and 60% (1 pts). The third component is based on the ASO's average interval duration, with scoring cutoffs at 12hrs (.5 pt) and 6hrs (1 pts). The total score for trackability is calculated as follows: $\text{Trackability} = [\text{PassDuration} * (\frac{1}{3}) + \text{AverageOrbitalCoverage} * (\frac{1}{3}) + \text{IntervalDuration} * (\frac{1}{3})]$.

7.5 Questionnaire Portions for DIT

The final component of the DIT analysis is an additional qualitative score derived from an operator's responses to the questionnaire. Certain aspects of the DIT processes cannot be quantitatively assessed at this time, so the questionnaire includes a few questions that evaluate the performance of the operator in the areas of satellite characterization and tracking.

The questions are the following ones:

Do you track the resident space objects you operate? Select all that apply.

- Operator depends on Space-track or other third party public SSA providers. (1 points)
- Operator or contracted SSA Service Provider identifies and maintains custody of operated satellites within 14 days of deployment and thereafter (2 point)
- Operator or contracted SSA Service Provider identifies and maintains custody of operated satellite within (1) day of deployment and thereafter. (3 points)

Provide verifiable photometric/radiometric characterisation data on the satellite to the SSR evaluator.

- Radiometric Data (average/max/min RCS) (2 point)
- Photometric Data (average/max/min Visual Magnitude) (2 point)

The final DIT Score is calculated as follows: $\text{DITScore} = \text{DetectabilityScore} * (\frac{1}{3}) + \text{TrackabilityScore} * (\frac{1}{3}) + \text{QualitativeScore} * (\frac{1}{3})$

8 Application of Design & Operation Standards

The adoption of internationally endorsed standards in the space domain has been identified as a clear path towards ensuring compatibility in understanding between operators among themselves, and between an operator and the space environment which is being used. It is however recognised that design and operation standard can have regional differences while trying to achieve the goal of extended space sustainability. For the SSR module, the following scoring approach is proposed to gauge the level of commitment, by means of a set of questionnaire entries that go hand in hand with the general validation strategy. It is intended that this section receives updates as part of updating the SSR versions.

As part of the **SSR**, some of the entries in the design and operational standards are evaluated explicitly to score the target levels for a specific mission. This is complementary to the physical evaluation, as in this part of the SSR the targets themselves are evaluated and in Question 1 it is evaluated how effective those targets are in the environment when implemented. The questions and proposed score are given below (Question 3 to 6). The scoring is proposed to be cumulative. As such a maximum of 11 and a minimum of 0 can be reached. No update is foreseen as part of the **on-orbit** evaluation.

As part of bonus SSR evaluation, the adoption of standards as part of the launching states is to be assessed. The questions and proposed score are given below (Question 1 and 2). As this would introduce a dependency on the origin of the SSR applicant, this needs to be balanced in order not to disproportionately discourage launching from emerging space launching countries that might not have strict requirements. On the other hand, deliberately choosing a regulatory regime because of the absence of regulations is to be discouraged. The scoring is proposed to be cumulative, with the individual SDM guidelines and standards as mutually exclusive. As such, a maximum of 7 and a minimum of 0 can be reached (times 2 in case of voluntary adoption). The score is suggested to be weighted with the outcome of the baseline evaluation, to have a measure of how far beyond the required the operator went.

Application of standards

Note: To calculate the score for this module, add the total points earned and divide by the total potential points. This normalised point total is an input to the full SSR calculation.

1. Which of the following documents concerning space debris mitigation and operations are applied to your mission. In case your mission applies space debris mitigation standards which are based on the space debris mitigation guidelines, tick both categories. Explicitly list the operational and environmental guidelines considered and state the need, and upon request, produce a memo on how they are addressed
 - None (0)
 - Space debris mitigation guidelines (e.g. UNCOPUOS, IADC; 1) and/or Long-Term Sustainability guidelines (e.g. UNCOPUOS; 1)

- Space debris mitigation standards or verifiable laws (e.g. ISO, FSOA, NASA; 1) and/or standardised operational products (e.g. CCSDS; 1)
 - In case of close proximity or rendezvous operations: safety standard (e.g. CONFERS work or human-graded standards; 1). If no such operations are conducted: 1.
 - ITU regulations on spectrum use (1)
2. Have any of the above standards been **tailored** to remove or loosen some of the requirements therein?
 - No (1)
 - Yes ($0 \leq x \leq 1$): The score needs to be reduced on a case by case evaluation by the SSR issuer to assess the impact of the tailoring and the extent to which it is captured by questions 3 - 7.
 3. Where any of these standards **voluntarily adopted**? (Bonus equal to their weight in question 1)
 4. Does your spacecraft or launcher release debris in orbit, **as part of the operations**:
 - If any, only smaller than 1 mm (1)
 - Yes (0)
 5. To which level do you minimise the **probability of explosion (x)** as part of the operational lifetime
 - Score: $1 - 10^{\min(0, \log_{10}(x) + 2)}$
 - Default by standard: 10^{-3} ,
 - No action or analysis counts as $x = 1$
 6. Are your spacecraft and launch vehicle **passivated** after its operation lifetime. Constellation provide an averaged answer for the fleet and launch vehicles
 - For each object (exclusive): No (0) Yes (1), controlled re-entry (2)
 - Does your spacecraft and launch vehicle upper stage use a disposal orbit after end of operations:
 - For each object (exclusive): No (0) Yes (1), controlled re-entry (2)
 - Quantification of the risk is part of the index
 - Disposal orbit respecting the protected region **and** operational orbits of other operators (but not drifting through)
 7. Does your launching state commit to registering/has registered your payload and associated objects with the United Nations Committee on the Peaceful Uses of Outer Space's Register of Objects Launched into Outer Space? For all objects associated with the mission (including launcher stages):
 - No (0)
 - Yes (1)

9 External Services

External features consider a wide range of activities and identifies classes of action that satellite operators can take to make their mission more amenable to receive External Services (ES) or to increase the probability of successful external services such as fixing, improving, and reviving satellites and refers to any work to refuel, repair, replace, or augment a satellite in space. It also considers design features that ensure or improve the detectability, trackability and identifiability of satellites in non-cooperative situations such as a low-power beacon or reflector. On-Orbit Servicing of satellites takes into consideration life-extension and upgradability as technology evolves, as well as the employment of external end-of-life disposal strategy.

The SSR does not assume that all operators will invest in external services, and in some cases such as low altitude orbits or small satellites, external services are not deemed necessary. As such, the external services module aims at providing bonus rating for missions where the investment in external services capabilities are appropriate. To calculate the score for this module, add the total points earned and divide by the total potential points. This normalised point total is an input to the Bonus portion of the SSR calculation.

Three categories of actions by operators are presented in **Error! Reference source not found.** below:

- **Actions during the design and pre-launch phase to make it easier for operators to have their mission serviced in the future**

ES technology is evolving in 'real-time' often after missions are launched. A significant number of contemporary ES cases are satellites that were not designed to be serviced (non-cooperative satellites). It is expected that this will likely continue for the next 1-2 years. Given the relatively low level of quality of knowledge on these different ES features, the first iteration of the SSR will weight all ES features equally. The credit given to ES will be low and entirely bonus in the first version of the SSR, with scope for re-evaluation in later versions as verification, validation and successful demonstration of ES capabilities are proven.

Third-party organisations/companies such as NASA's Satellite Servicing Projects Division (SSPD) and ESA's Clean Space Office have begun independent assessment, verification and validation of ES features through their own testing, particularly design choices, e.g. grapple fixtures. Taking advantage of these verification tools or providing evidence of self-validation and verification is necessary for SSR credit to be applied.

- **Commitment to use or demonstration of use of On Orbit Servicing (OOS)**

The utilisation of OOS, either through the operator's actions or payment of an external service will allow the operator to gain SSR credit, pending the mission complies with current regulatory standards.

As ES is a fairly new technology, the risks of failure are higher and non-trivial until consistent successful demonstration of these capabilities are proven. It is envisioned that future iterations of the SSR will account for technological demonstration of these services.

- **Utilising ES in line with current standards**

In addition to external service market maturity and technology adoption, legislative and policy drivers will also impact market adoption and should be monitored closely. The SSR will assess if the operating team are complying with standards developed and proposed by international groups e.g. Consortium for Execution of Rendezvous and Servicing Operations (CONFERS).

Table 3: Evaluating of the External Services approach for Bonus score

Scoring Category	Description	Example	Score (BONUS)
On-orbit (OOS) feature	Operators can take actions during the design and pre-launch phase to make it easier to have their mission serviced in the future. This does not imply that they will definitely use it.	Installing of OOS features in preparation to create a fail-safe option. Examples include visual fiducials, grapple fixtures, mechanical features, grasp features, and items to make it easier to track the object in case of radio failures such as beacons	0.5
Standardised interfaces	Utilising OOS in line with current standards	Employment of OOS capabilities that include standardised interfaces	0.5
Life extension services	Commitment to use or demonstration of use of On Orbit Servicing	External end-of-life removal service • Included in quantitative model, including risk of failure	0.5
Use of external ADR (beyond compliance)	Commitment to use or demonstration of use of On Orbit Servicing	Use of external ADR but still complies with 25 year deorbit rule	0.5

10 Summary of required inputs for SSR evaluation

10.1 Prerequisite questions

The purpose of the prerequisite questions is to check whether performance of the satellite operators meets a minimal level of effort toward sustainability. The idea here is that if one of the prerequisite questions is not answered with strong performance, the overall score of the operator should be limited to a lower level, even if the operator performs well in other aspects of the assessment.

The following questions are informed by the Space Debris Mitigation Guidelines of the Inter-Agency Space Debris Coordination Committee⁹

- 1.1. Will your mission comply with IADC guideline 5.3 for post mission disposal?
 - Yes
 - No
 - Partially (explain)
- 1.2. Do you commit to passivate your spacecraft at the end of operations, as defined in IADC guideline 5.2.1?
 - Yes
 - No
 - Partially (explain)
- 1.3. Do you have a space debris mitigation plan, as defined in the IADC guideline 4?
 - Yes
 - No
 - Partially (explain)
- 1.4. Does your mission avoid the intentional destruction of any space object?
 - Yes
 - No
 - Partially (explain)

The following questions are motivated to ensure that the SSR assessment will be informed by reasonable information regarding the mission parameters in order to perform the mission index and Detectability, Identification and Trackability Analysis.

- 1.5. An operator signing up for an SSR evaluation is committing to share with the SSR issuer (and keep updated throughout the entire duration of the spacecraft's mission) information and supporting documentation as required for the purpose of assessing and providing your mission with an SSR. Do you commit to providing information and supporting

⁹ https://www.unoosa.org/documents/pdf/space/space%20law/sd/IADC-2002-01-IADC-Space_Debris-Guidelines-Revision1.pdf

documentation as requested by the SSR Issuer for this purpose for the full duration of your spacecraft's mission?

- Yes
- No
- Partially (explain)

10.2 Mission index

- Object characteristics:
 - mass,
 - cross-sectional area (Cross-sectional area / Cross-Section Area in Randomly Tumbling Motion);
- Operational orbit parameters:
 - at minimum, semi-major axis, inclination, eccentricity, OR trajectory evolution (including manoeuvres),
 - expected operational lifetime;
- Mission architecture:
 - number of satellites,
 - launcher(s) and disposal trajectory (similar to Operational orbit parameters & Disposal strategy entries),
 - mission-related-object released with trajectories (similar to Operational orbit parameters);
- Disposal strategy:
 - target disposal orbit OR trajectory evolution (e.g. for non-conventional disposal strategies),
 - expected success rate;
- Collision avoidance:
 - mitigated collision risk (versus the trackable population of the SST solution):
The mitigated collision risk is assessing at what level an operator minimizes the risk of collision with detectable objects. A very large number of maneuvers can completely mitigate the collision risk (100% mitigated collision risk) and no action to mitigate the collision risk are resulting in a 0% mitigated collision risk. The mitigated collision risk can be computed by the issuer, and mainly depends on the collision avoidance strategy that an operator can provide. If not computed by the applicant, the accepted collision probability level, or the risk threshold triggering a maneuver for the satellite shall be provided in order for the issuer to compute the mitigated collision risk.

10.3 Collision Avoidance Capabilities

The scoring for the SSR considers all actions taken, thus SSR applicants are asked in the SSR form to indicate all actions they have taken in each category.

Table 4: Scoring Rubric for Collision Avoidance Capability

Operator Action	Capability (including all lower levels)			
	No Score	Low Score (2 points)	Medium Score (3 points)	High Score (4 points)
Orbital State Knowledge (during normal operations) The timeframe is dependent on forecast time and orbital revolution time; 7 days for revolution below 10 hours, 14 days when above	Rely on a third party public SSA provider for state information (e.g. space-track.org TLE)	Operator maintained orbital position ¹⁰ state knowledge of object	Maintain orbital state knowledge of object to < 10 km in any direction. Update orbit determination for the operated satellite when a manoeuvre or other event induces a change to its orbit that would cause the operator's state estimation to be worse than the required orbital state knowledge. & Characterise/validate covariance of your orbit determination	Maintain orbital state knowledge of object to < 1 km in any direction. Update orbit determination for the operated satellite when a manoeuvre or other event induces a change to its orbit that would cause the operator's state estimation to be worse than the required orbital state knowledge & Characterise/validate covariance of your orbit determination
Collision Avoidance: Availability to Coordinate	Not able to coordinate	Able to coordinate in response to emergencies (but not necessarily on a routine basis).	Able to coordinate during set hours per day	Has a system for routine conjunction assessment and capability to respond to concerns 24 hours per day via human or computer system capable of supporting near-immediate coordination and reaction for urgent issues.
Collision Avoidance: Capability to Coordinate	Operator has no dedicated process for conjunction	Has the capability to be contacted in case of close approach or	Operator is capable of interpreting conjunction data messages and other common formats, to	Has documented procedures for collision screening, assessment, and

¹⁰ Orbital position state knowledge refers to time-indexed position and velocity information, but does not include covariance.

	screening, assessment, or mitigation. The operator may be unable to or chose not to ever manoeuvre in response to conjunctions	another high-risk event Operator regularly screens orbits and planned manoeuvres against public catalogues and/or information from SSA sharing organisations and/or third-party SSA providers	determine risk and generate/screen mitigating manoeuvres Operator has a system for automated routine conjunction assessment	mitigation Regularly screens operational spacecraft and planned manoeuvres against SSA sharing organisation catalogue
Collision avoidance: maneuver capability	No maneuver capabilities	Any maneuver capabilities (including differential drag)	Reaction (at least $\Delta v=1$ cm/s) within 6 orbital revolutions	Reaction (at least $\Delta v=1$ cm/s) within 1 orbital revolution
(BONUS) Maintaining orbital state knowledge after the end of normal operations		Maintain orbital state knowledge until spacecraft is placed into a graveyard orbit or is disposed of through atmospheric re-entry.	Maintain orbital state knowledge to < 10 km until spacecraft is placed into a graveyard orbit or is disposed of through atmospheric re-entry.	Maintain orbital state knowledge to < 1 km until spacecraft is placed into a graveyard orbit or is disposed of through atmospheric re-entry.

Scoring Guidance: Entities can receive credit for any box where they satisfy all criteria contained in the box. If an operator is able to fulfil multiple boxes in a single row, those point values are added. During the scoring process, the total number of points earned by the entity are divided by the total possible points. The normalised point total is an input to the full SSR calculation.

10.4 Data sharing

What of the following information do you commit to keeping up to date and sharing with the following audiences?

Table 5: Scoring Rubric for Data Sharing

Data shared (categorised by contribution to safety)	None	SSA Provider(s)	Other operators upon request for coordination	Voluntary network of operators/ stakeholders	Public
Collision Avoidance Coordination Information					
Publish + update collision avoidance contact Information • name(s) • title(s), • phone number(s), • email address(s), • list of controlled objects by NORAD ID or International Designator • languages spoken)	0	10	10	12	12
Publish + update collision avoidance contact time zone/hours of operation	0	3	3	3	4
Publish + update COLA	0	1	2	2	1

contact/coordination response time commitments					
Satellite and Mission Information					
Publish + update satellite ephemeris (including manoeuvres, for LEO: 7 days, MEO/GEO: 14 days into the future). Sharing archived data is encouraged, but not required.	0	12	8	15	15
Publish + update covariance information	0	6	5	6	6
Publish + update covariance characterisation/validation	0	1	2	3	3
Publish + update launch vehicle timing/trajectories (planned and actual)	0	3	1	1	2
Satellite Characterisation Information					
Publish + update satellite mass	0	4	3	4	4
Publish + update satellite manoeuvrability (manoeuvrable/non-manoeuverable)	0	5	5	6	6

Publish + update satellite manoeuvrability capability ¹¹	0	3	2	3	3
Publish + update satellite operational status (operational/non-operational) ¹²	0	5	5	6	6
If the satellite uses autonomous systems (systems without a human in the loop) for satellite manoeuvring, publish + update:					
The criteria for when a manoeuvre is triggered	0	5	3	5	5
Where and with what frequency planned autonomous manoeuvres are reflected in shared SSA information	0	5	3	5	5
If emergency stop procedures	0	2	2	3	3

¹¹ The intention of such sharing is to help other operators understand the capability of a particular spacecraft to maneuver in case of a high risk conjunction or other necessary event, especially for systems that use low-thrust propulsion or differential drag techniques. Potential forms of data sharing that meet this objective would include maximum achievable displacement from a reference orbit in 24 hours (or another reasonable time period), ΔV capability per revolution, or similar). Order of magnitude rather than precise values are acceptable.

¹² This refers to the real-time operational status of the satellite post-launch until disposal.

exist to interrupt autonomous procedures in case of malfunction and how another operator should request an emergency stop					
Additional data (other forms of data sharing (BONUS))					
Radio-frequency Information to support interference avoidance/mitigation/geolocation	0	1	4	3	3
Spacecraft anomaly information	0	1	2	3	4
Other datasets to support government/academic research ¹³	0	3	3	3	4
APIs or other means for automatic machine to machine access to above information. ¹⁴	0	1	1	2	2

¹³ Examples might include (but are not limited to) non-lethal impact data, inferred atmospheric drag, and/or manoeuvre information.

¹⁴ Points are per totally compliant data category (Collision Avoidance Coordination Information, Satellite Metric Information, Satellite Characterisation Information), so total score for automatic access is three times these values.

Scoring Guidance: Operators can receive credit for any of the activities they do in any category of data sharing. The activities are listed with scores showing the points they receive for sharing a particular form of information with a particular audience. The operator can earn points for all the actions they take, including sharing a single kind of information with multiple audiences. During the scoring process, the total number of points earned by the operator are divided by the total potential points. The normalised point total is an input to the full SSR calculation.

10.5 Detectability, Identification, and Trackability

Please provide to the SSR evaluator the following characteristic information for your satellite:

- (Required) Geometric Approximation and Dimensions (rectangular prism, cylinder, or sphere)
- (Requested) Simplified CAD Model – Basic size and geometry
- (Requested) Detailed CAD Model – Complex faceted model (>1000 faces) with material details

Share with the SSR evaluator the following planned orbital information for your satellite

- Operational Orbit Parameters (apogee altitude, perigee altitude, inclination, RAAN, argument of perigee, mean anomaly)
- Nominal requirements for satellite Attitude/Pointing during primary mission
- The number of satellites in the mission and the deployment process from the launch vehicle
- A qualitative description of the early operational stages to reach the operational orbit (at what altitude are satellites deployed? How many satellites are deployed at a given altitude? How long do they stay at this altitude? Are there intermediate altitudes before reaching the operational altitude? Will the altitude and inclination change during the mission operations?)

The following questions qualitatively ask about the actions taken by the operator that can increase Detectability, Identifiability and Trackability.

Do you track the resident space objects you operate? Select all that apply.

- Operator depends on Space-track or other third party public SSA providers. (1 points)
- Operator or contracted SSA Service Provider identifies and maintains custody of operated satellites within 14 days of deployment and thereafter (2 point)
- Operator or contracted SSA Service Provider identifies and maintains custody of operated satellite within (1) day of deployment and thereafter. (3 points)

Provide verifiable photometric/radiometric characterisation data on the satellite to the SSR evaluator.

- Radiometric Data (average/max/min RCS) (2 point)
- Photometric Data (average/max/min Visual Magnitude) (2 point)

10.6 Application of Design & Operation Standards

Which of the following does your launching authority(ies) request you to follow or mission voluntarily adopts:

- None (0)
- Space debris mitigation guidelines (e.g. UNCOPUOS, IADC; 1) and/or Long Term Sustainability guidelines (e.g. UNCOPUOS; 1)
- Space debris mitigation standards or verifiable laws (e.g. ISO, FSOA, NASA; 1) and/or standardised operational products (e.g. CCSDS; 1)
- In case of close proximity or rendezvous operations: safety standard (e.g. CONFERS work or human-graded standards; 1). If no such operations are conducted: 1.

Have any of the above standards been **tailored** to remove or loosen some of the requirements therein? If yes, the score needs to be reduced on a case by case evaluation by the SSR evaluation.

- No (1)
- Yes ($0 \leq x \leq 1$): The score needs to be reduced on a case by case evaluation by the SSR issuer to assess the impact of the tailoring and the extent to which it is captured by questions 3 - 7.

Were any of these standards **voluntarily adopted**? (Bonus equal to their weight in 5.1)

Does your spacecraft or launcher release debris in orbit, **as part of the operations**:

- If any, only smaller than 1 mm (1)
- Yes (0)

To which level do you minimise the **probability of explosion (X)** as part of the operational lifetime:

- Score: $1 - 10^{\min(0, \log_{10}[x]+2)}$
- Default by standard: 10^{-3} ,
- No action or analysis counts as $X = 1$

Are your spacecraft and launch vehicle **passivated** after its operation lifetime:

- For each object (exclusive): No (0) Yes (1), near-controlled re-entry (2)
- Yes/controlled re-entry scores to be weighted with success ratio
- Constellations provide an averaged answer for the fleet and launch vehicles

Does your spacecraft and launch vehicle upper stage use a disposal orbit after end of operations:

- For each object (exclusive): No (0) Yes (1), near-controlled re-entry (2)
- Quantification of the risk is part of the index
- Disposal orbit respecting the protected region **and** operational orbits of other operators (but not drifting through)

Does your launching state commit to registering/has registered your payload and associated objects with the United Nations Committee on the Peaceful Uses of Outer Space's Register of Objects Launched into Outer Space? For all objects associated with the mission (including launcher stages):

- No (0)
- Yes (1)

10.7 External Services

Operators can take actions during the design and pre-launch phase to make it easier to have their mission serviced in the future. This does not imply that they will definitely use it.

6.6. Does your satellite design incorporate the installing of On-Orbit Servicing (OOS) features (e.g. visual fiducials, grapple fixtures, mechanical features, grasp features, and items to make it easier to track, capture, and service or de-orbit the satellite in case of system failures?

- Yes (0.5 point)
- No

6.7. Does your satellite design incorporate standardised interfaces?

- Yes (0.5 points)
- No

If yes, please provide specify which ones

Commitment to use or demonstration of use of On Orbit Servicing

6.8. Does your mission consider life extension services such as non-contact support, inspection, refuelling, upgradability, orbit modification and maintenance, orbit maintenance?

- Yes (0.5 points)
- No

If yes, please provide proof of verification and validation of testing

6.9. Does the mission employ external ADR services?

- Yes, mission complies with 25 year deorbit rule and includes features for external ADR (0.5 point)
- Yes, mission does not comply with 25 year deorbit rule without assistant, but relies solely on external ADR for deorbit (currently not compliant with standards) (0 points)
- No

If yes, please provide proof of contract

10.8 Verification

The SSR provides additional credit for statements by operators that can be supported by additional levels of verification. For each of the following items, please select which level of verification you chose to provide.

Please send any supporting documentation with your reply. If you believe a level of verification is not relevant for your mission in its current phase or concept, please include a brief remark explaining why.

- Assertion by Application: Affirmative statement by the applicant is provided. Factor: 0.5
- Assertion and Technical documentation: Supporting technical documentation on the mission design is disclosed. Factor: 0.6.
- Public Release of Technical Documentation: Supporting technical documentation is submitted to a government or non-profit available for public review. Factor: 0.8
- Authority - Independent Technical Review: Confirmation of the compliance by a third-party technical expert is provided. Factor: 1.0

For some items where a level of verification is not appropriate/necessary across all missions, select N/A.

11 References

- [1] Letizia F., Colombo C., Lewis H. G., Krag H., Extending the ECOB space debris index with fragmentation risk estimation. In 7th European Conference on Space Debris, 2017
- [2] Letizia F., Lemmens S., Bastida Virgili B., and Krag H., Application of a debris index for global evaluation of mitigation strategies, *Acta Astronautica*, Vol. 161, pp. 348–362, 2019. doi: 10.1016/j.actaastro.2019.05.003.
- [3] Letizia F., Lemmens S., and Krag H., Environment capacity as an early mission design driver, *Acta Astronautica*, 2020. Accepted for publication.
- [4] Braun V., Letizia F., Fuinke Q., Lemmens S., Sanvido S., DRAMA 3.0 - Upgrade of ESA's Debris Risk Assessment and Mitigation Analysis Tool Suite, 70th International Astronautical Congress, 21-25 October 2019, Washington.
- [5] Lemmens S., Letizia F., Space Traffic Management Through Environment Capacity. In: Schrogl K.U. (ed) *Handbook of Space Security*. Springer, Cham, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-227869_109-1
- [6] ESA Space Debris Office, ESA's Annual Space Environment Report, GEN-DB-LOG-00288-OPS-SD, 2020.
https://www.sdo.esoc.esa.int/environment_report/Space_Environment_Report_latest.pdf
- [7] Inter-Agency Space Debris Coordination Committee, IADC Space Debris Mitigation Guidelines, Issue 1 Revision 0, IADC-02-01, 2020.

Space Sustainability Rating

定義、モジュール及びスコアリング方法

Version date: 2022 年 9 月

1. 目次

2	スコープ及びイントロダクション	3
2.1	略語	3
2.2	参照定義	5
2.3	Space Sustainability Rating の定義	5
3	SSR 公式化及び構造	7
3.1	ミッションレーティング構築	7
3.2	申請者からのインプット確認	9
3.3	SSR ベースライン格付け指定の定義	11
4	SSR モジュール	13
5	宇宙交通フットプリント算出のためのミッション指標	17
6	衝突回避能力	20
7	データ共有	23
8	検出性、識別性、追跡性:DIT	30
8.1	概要	30
8.2	検出性:Detectability	33
8.3	識別性:Identification	34
8.4	追跡性:Trackability	34
8.5	DIT のアンケート部分	35
9	設計・運用標準の適用	36
10	外部サービス	39
11	SSR 評価に対するインプット要求の概要	42
11.1	前提条件の質問	42
11.2	ミッション指標	43
11.3	衝突回避能力	44
11.4	データ共有	46
11.5	検出性、識別性、追跡性	48
11.6	設計運用標準の適用	49
11.7	外部サービス	51
11.8	検証	52
12	参照	53

2 スコープ及びイントロダクション

本資料は SSR の総合スコア及び構成モジュールに係る説明の単一参照源となることを目的とする。

2.1 略語

Acronym	Description
AGI	Analytic Graphics Inc. (アナリティック・グラフィックス株式会社)
ARES	Assessment of Risk Event Statistics (リスクイベント統計の評価)
ASO	Anthropogenic Space Object (人工宇宙物体)
CAD	Computer Aided Design (コンピュータ支援設計)
CCSDS	Consultative Committee for Space Data Systems (宇宙データシステム諮問委員会)
CDM	Conjunction Data Messages (接近データメッセージ)
CONFERS	Consortium For Execution of Rendezvous and Servicing Operations (ランデブ・サービス運用実施のためのコンソーシアム)
CONOPS	CONcept of OPerationS (運用のコンセプト)
DIT	Detectability, Identification, and Trackability (検出性、識別性、追跡性)
DRAMA	Debris Risk Assessment and Mitigation Analysis (デブリリスク評価と緩和分析)
ECOB	Environmental Consequences of Orbital Breakups (軌道分裂の環境への影響)
EOIR	Electro-Optical/Infrared (電気光学/赤外線)
ES	External Services (外部サービス)
ESA	European Space Agency (欧州宇宙機関)



FSOA	French Space Operations Act (フランス宇宙活動法)
GEO	Geostationary Orbit (静止軌道)
IADC	Inter-Agency Space Debris Coordination Committee (国際機関間スペースデブリ調整委員会)
ISO	International Organization for Standardization (国際標準化機構)
ITU	International Telecommunications Union (国際電気通信連合)
LEO	Low Earth Orbit (地球低軌道)
MEO	Medium Earth Orbit (地球中軌道)
NASA	National Aeronautics and Space Administration (アメリカ航空宇宙局)
NORAD	North American Aerospace Defense Command (北アメリカ航空宇宙防衛司令部)
OOS	On Orbit Servicing (軌道上サービス)
RSO	Resident Space Object (地球を周回する宇宙飛しょう物体)
SDM	Space Debris Mitigation (スペースデブリの低減)
SSA	Space Situational Awareness (宇宙状況認識)
SSPD	Satellite Servicing Projects Division (of NASA) (衛星サービス事業部)
SSR	Space Sustainability Rating (宇宙持続性格付け)
SST	Space Surveillance and Tracking (宇宙監視・追跡)
STF	Space Traffic Footprint (宇宙交通フットプリント)
STK	Systems Tool Kit (システムツールキット)

UNCOPUOS	United Nations Committee on the Peaceful Use of Outer Space (国連宇宙空間平和利用委員会)
----------	--

2.2 参照定義

本文書で使用する宇宙環境およびスペースデブリに関する定義は、[7]と一致する。

2.3 Space Sustainability Rating の定義

Anthropogenic: 人類が作成し、宇宙に投入された物体。ミッションの結果として生じたロケット及び宇宙機の一部を含む。

Detectability (検出性): 軌道上にある宇宙機が、監視に使用される地上の光学望遠鏡とレーダによって個別に検出される可能性。

Identification (識別性): 検出された物体が一意のものであることを確認し、個々の既知のオブジェクトとして瞬時にラベル付けする能力。

Mission: 宇宙環境の一部にアクセスして使用する必要がある特定のサービスを設計および運用によって提供することを目的とした宇宙機、ロケット、およびミッション関連オブジェクトの機能単位。

注: ミッションは、単一の衛星、衛星とロケット、またはこれらの要素のより大きな組み合わせで構成することができる。

Mission Index to calculate Space Traffic Footprint (宇宙交通フットプリント算出のためのミッション指標): 主にスペースデブリの軽減とその結果に基づいて、ミッションに与えるオブジェクトの設計と運用が宇宙環境に与える影響に関して集計した数値。この値を計算するために使用される値と方法は、物理的に測定可能及び/または透過的に推定可能である必要がある。Index: 指標とFootprint: フットプリントの概念は、このトピックに関する既存の文献と関連付けるために同義的に使用される。

Space Sustainability Rating: 持続可能な宇宙飛行の概念を捉えるための、ミッション指標やフットプリントと、直接物理的に測定できない他の要素の組み合わせ。宇宙機単体もしくはは上記で定義されたミッションと関連付けることができる。

Space Sustainability Rating Issuer (SSR 発行者): ミッションに関連する宇宙持続性評価の最初の課題と発展に責任を持つ主体。

SSR Applicant (SSR 申請者): SSR プロセスを経て、ミッションを追求する、あるいは要求する主体。SSR 申請者は、ミッションの一部として役員や管理職、またはオペレータを兼任することが可能である。SSR の管理・実行方法の更なる詳細については、順次お知らせしていく予定である。

Trackability (追跡性): 宇宙機の軌道の時間変化を監視し、予測する能力。

3 SSR 公式化及び構造

SSR は、宇宙の持続可能性のさまざまな側面をカバーし、以下に詳細を記述する各モジュールの評価に基づく総合得点として策定される。

3.1 ミッションレーティング構築



Figure 1: SSR 格付けの例



Figure 2: ステップインジケータの例

被格付け主体はミッション中のいかなる段階でも評価可能な格付けスコア (Tier score) を受け取る。そして、ミッションの後続段階における実際のオペレータのパフォーマンスに基づいて、定期的に更新される。発行されたレーティングは一つのミッション段階 (打ち上げ前、軌道上、廃棄) の期間で有効である。ミッションが新たなミッション段階に移行した場合、ミッションの設計や運用に潜在する発展を考慮し、以前に算出された評価が最新のものであることを確認するために、再評価が必要である。

各評価において、ボーナスステップ (Step) インジケータに対する追加クレジットを獲得することが可能である。この指標は、ミッションが宇宙の持続可能性に向けてベースラインレーティングを「超える」ことができる特定のステップを強調するものである。様々な問題や特定のモジュール全体が、このボーナスの対象となる。ボーナスは個別に報告され、リクエ

ストした主体のベースラインレーティングに寄与しない。 ボーナスカテゴリの中には新規性の高いものもあるため、ボーナスカテゴリはあまり定義されておらず、特定の明確に定義された行動の検証ではなく、オペレータの自己評価に大きく依存している場合が多い。

SSR は、今日のベストプラクティスを超えるものも含め、宇宙分野でのサステナビリティの適用を促進するために、意図的に将来を見据えた設計としている。SSR の下でクレジットされたデータ共有の形式のすべてが、現在ほとんどのユーザーによって運用的に使用されているわけではない。同様に、SSR の下で奨励されるいくつかの方法は、現在、ほとんどのオペレータによって実行されていない。このような項目の意図は、宇宙飛行の安全性と持続可能性をさらに改善させるような追加の運用方法の採用を加速させ、そのような方法を支援するための重要で大量なデータの可用性を促進することである。

打ち上げ前段階(Pre-launch phase): 宇宙ミッションの打ち上げ前に、SSR のすべてのモジュールは、SSR 申請者が提出したデータに基づいてスコアを算出する。 このため、提供されたデータの完全性と妥当性を含め、計画されたミッションからのサステナビリティ評価がスコアに含まれる。 サステナビリティ評価は、物理的特性やミッションの計画や手順など、すべてのオペレータが利用できる、あるいは少なくとも利用できるはずのインプットに基づいている。 各 SSR モジュールのスコアは、一定の格付けに到達するために、具体的な基準が関連付けられている。

軌道上(On-orbit): 打ち上げ前のスコアは、計画したミッションを評価するものであるが、サステナビリティは、その計画を行動に移すことが主なポイントである。 ミッションの運用期間中の一定の時点で、計画されたミッションと軌道上の実際を比較する必要がある。 SSR の軌道上段階では、各モジュールを再度ミッションに適用する。2 つ目の SSR プロセスでは、実施された軌道上の行動のサステナビリティと、事前に評価されたベースライン計画に沿った行動かどうかを判断する。重大な逸脱は正当化される。ミッションの延長を除いて、ミッション指標または宇宙交通フットプリントはオペレータの行動ではなく環境に基づいて悪化する可能性があるため、定期的に再計算されることは想定していない。後者は、現実的な計画を奨励し、際限のない延長を避けるためのものである。

SSR は、宇宙ミッションのオペレータや所有者が、レーティングを得るために必要な情報を、レーティング発行者に所有権や機密情報を開示する必要なく利用できるように構築されている。例えば、宇宙機は、ミッション後の廃棄手順を成功させる確率を特定し、この確率を計算するために用いた方法を SSR 発行者に通知しなければならないが、サブシステム設計などの技術的な詳細は開示する必要がない。

SSR 評価に参加する SSR 申請者は、計画されたミッションの全期間に参加するように招待

される。これには、設計段階から始まり、オブジェクトが軌道上にある限り定期的な監視が含まれる。設計段階で提出された記述の検証は、まず独立した宇宙監視手段に基づき、またミッションの軌道投入後はオペレータのインプットに基づいてレビューされる。軌道上での実施中にオペレータと SSR 発行者の間でコミュニケーションが行われなかった場合、宇宙監視データの透明性を有する報告と相まって、軌道投入に基づくレーティングの希薄化につながる。SSR 申請者がミッション全体に参加しなかった場合 SSR スコアは失効する。

SSR 自体は、宇宙環境の変化、ベストプラクティスや標準に適応するために、定期的に改訂される採点システムとして設計されている。SSR のバージョン間で変更の可能性があるモジュールを識別する必要がある。これは軌道上評価とは異なり、発行及びモニタされる SSR は、デフォルトでは SSR 発行者に最初に登録された時点のバージョンのままであることを意味する。軌道上にミッションを展開した後に発生する、事業者が対処できない宇宙環境の悪化（例えば、衝突リスクを高める近傍の破碎事象など）は、レーティングに影響しない。ただし、オペレータが自主的に新バージョンに対する評価を受けることは可能であるが、これは自動的には行われない。この理由は、持続可能な宇宙機運用を実現するために行われた追加変更を強調するためである。

3.2 申請者からのインプット確認

SSR の申請では、SSR 発行者を代表してミッション設計を詳細に確認することはない。その代わりに、提供されたデータの検証可能性のレベルや、技術当局による検証が重視される。これらのインプットは、アンケートの一部として取り込まれるため、SSR 発行者へのインプットの質がレーティングに影響を与える。

SSR の各モジュールの採点は、殆どの場合レーティングを要求するオペレータから提供される様々な情報や解析へのアクセスに依存している。

システム所有者/オペレータまたはシステムに対するさまざまな SSR 要件への適合性の評価は正確であるという SSR 発行者の信頼を反映し、提出の一部としてより良い検証済みデータを提供するよう責任主体に動機づけするために、運用者によって提供される入力に検証の重みづけが付加される。アンケートの各設問は、申請者の記述に対する検証のための重みづけがなされ、SSR 発行者がその情報を利用することでトレースされる。

下記が適用される：

- **申請者の主張：** 申請者により肯定的なステートメントが提供されていること

係数：0.5

この最初のカテゴリは、裏付けとなる文書がない、申請者による単純なステートメントである。このようなステートメントは一般に真実であると見なされるが、SSR 発行者は、

申請者による提出物が不正確または実行不可能であると信じる理由がある場合、異なる（デフォルト）値を明確化または準拠するよう求めることができる。

- **技術資料による主張： ミッション設計の裏付けとなる技術資料を SSR 発行者に開示すること**

係数： 0.6

このカテゴリでは、申請者は提出された値を正当化する適切な技術文書を提出する。例えば、アンケートの衝突回避モジュールは、申請者に軌道決定の共分散の特徴を問うものである。ベースラインレーティング中の評価に対するこのレベルの検証では、様々な誤差の要因と、それらがオペレータの軌道決定値の最終的な精度にどのように影響するかを追跡する技術的分析が必要である。軌道上段階において、オペレータは、運用軌道決定の精度に関する実際のデータを提供する可能性がある。場合によっては、この段階での検証には、部品製造業者、打上げ業者、またはその他の供給業者から申請者に提供される文書が含まれる。上記のとおり、SSR 発行者は、提出された文書の技術的妥当性を必ずしも審査・確認しないが、提出された文書が不正確または技術的に根拠がないと判断した場合には、審査を行い、必要に応じて説明を求め、または異なる値に準拠する権利を有している。

- **技術資料の公開： 技術的な裏付け資料を政府または非営利団体に提出し、一般に公開されていること**

係数： 0.8

このレベルの検証では、裏付けとなる資料を政府または非営利団体に提出し、その団体が一般に閲覧できるようにする必要がある。このような資料は、検査官側の特定の「知る必要性 (Need to know)」を必要とせず、無料で入手できなければならない。組織は、検査官にユーザーアカウントの作成またはその他の合理的な登録手続きを要求することができる。例えば、国の電波規制当局に提出される電波法免許情報などが挙げられる。この検証レベルでは、受信側が情報の証明技術当局として機能することは期待できない。むしろ、提出することで、申請者が情報の正確さを正式に証明し、データ及び裏付け資料を他の人が評価できるような透明性を提供する役割を果たす。

- **技術当局 - 独立した技術審査： 第三者の技術専門家による適合確認を実施すること**

係数： 1.0

このレベルの検証では、申請者が提出した解析または情報の技術的信頼性を評価・確認する適切な専門知識を有する第三者（または申請者に代わって当該分析自体を実施する第三者）が、申請者が提出した情報を確認することが含まれる。技術的専門家には、（提供される情報に応じて）政府の規制当局や第三者のコンサルタントが含まれる可

能性があるが、これらに限定されるものではない。審査チームがミッションの実施に関与せず、正式な技術審査プロセスを通じて監視を行う場合は、申請者の組織内の有資格者からなる独立したチームが審査を行うことができる。現時点では、SSR 発行者による技術当局の正式な認証は提案されていないが、将来の SSR の更新のために、そのような認証が検討されている。

これらの検証要素の貢献度は、当面は比較的小さいが、エコシステムのさらなる発展に伴い、将来の SSR の改訂で増加する可能性がある。SSR 発行者が、ミッション開発の性質や特定の段階を考慮し、適切な技術資料や技術当局による適合性の確認が不可能または不要であると判断する場合もある。このような場合、SSR 発行者は、オペレータにペナルティを与えないよう、提供される情報の重みづけをそれに応じて増やす。

3.3 SSR ベースライン格付け指定の定義

3.1 項で前述したとおり、被格付け主体は、ミッションの設計段階でベースライン格付け「Tier Score」を受けることになる。そして、ミッションの軌道上における実際のオペレータのパフォーマンスに基づいて定期的に更新され、ミッションの運用期間中の一定の時点で、計画されたミッションと軌道上の実際を比較し、実施内容が計画にどれだけ近づいているかを示す役割を果たす。これは、ミッションが本当に終了して初めて、そのミッションが宇宙環境に与える影響が分かるという考え方を表す。SSR 評価に参加する主体は、計画されたミッションの全期間（設計段階から始まり、対象物が軌道上にある限り定期的なモニタリングを含む）をコミットすることになる。

各 SSR モジュールについて、ミッションは 0（低い）～1（高い）のスコアを受け取る。これは、ミッションのモジュールスコアを、各モジュールの達成可能な最大ポイント合計で正規化することによって行われる。各モジュールのスコアと各モジュールの重みづけを合わせて、SSR ベースラインの合計を算出する。SSR はまだテスト段階であり、現在採用されているモジュールの重みづけの具体的な値について言及することが重要である。

すなわち、

- ミッション指標 (High, 50%)
- 衝突回避能力, データ共有 (Medium, 16.5%), DIT (Medium, 12%),
- 設計運用標準 (Low, 5%)

コンソーシアムメンバーおよび産業界からの外部関係者による SSR のアルファおよびベータテストの結果、SSR の最初の段階は、Platinum、Gold、Silver、Certified と定義された。

SSR のそれぞれの格付は、各モジュールの総合評価により、0（低い）～1（高い）の間で一定の総合スコアを獲得した場合に発行される。



Figure 3: 合計荷重スコアに基づく SSR 格付け

4 SSR モジュール



Figure 4: SSR を構成するモジュールの概要

SSR を構成する主なモジュールは以下の通りである。（最終スコアの重みづけが重くなると予想される順）：

0. 前提条件となる質問(Prerequisite Questions): これらの質問は、SSR を達成するためにオペレータが実行しなければならない最低限の基準について示している。これには、ミッション後の廃棄(PMD)、安全化処置、意図的なデブリの発生防止、デブリ削減計画の策定のための国際機関間スペースデブリ調整委員会 (IADC) のガイドライン遵守が含まれる。また、ミッションのライフタイムを通じて、ベースラインの宇宙機の情報を SSR 発行者と共有する意思がオペレータにあるかどうかの質問も含まれている。これらの質問に対して準拠出来ないオペレータ、または SSR 発行者に必要な情報を提供しようとししないオペレータは、他のカテゴリで高いパフォーマンスを発揮できるとしても、低いランクの格付けに制限される、もしくはレーティングを拒否される可能性がある。
1. 宇宙交通フットプリント算出のためのミッション指標(Mission Index to calculate the Space Traffic Footprint): いかなるミッションも、関連する物体も、軌道上に痕跡を残す。よく言えば、宇宙環境の一部を持続的に利用しているに過ぎない。最悪の場合、宇宙環境において他物体への有害な干渉を引き起こす恐れがある。このモジュールでは、計画された設計とミッション運用によって引き起こされる有害な物理的干渉のレベルが定量化される。

2. 衝突回避 (Collision Avoidance): 完璧な宇宙監視能力がない場合、オペレータの能力に応じて、混雑した宇宙環境下でのミッションを達成する運用方法がある。このモジュールは、デブリとの偶発的な衝突や運用中のオペレータ間の衝突リスクを低減するためにオペレータが取ることができる手順を明確にすることを目的としている。
3. データ共有 (Data Sharing): 宇宙状況認識 (SSA) などの情報をオペレータが共有することは、宇宙の安全にとって非常に重要である。同時に、特定の情報が機微を有しておりオペレータが共有を躊躇する場合がある。また、特定の機微な情報を共有しないだけで、共有することには異存がない場合もある。このモジュールでは、オペレータが様々なコミュニティと共有している関連情報の量と、その情報が宇宙飛行の安全性にどの程度寄与しているかを定量化する。
4. 検出性、識別性、追跡性 (Detectability, Identification, and Trackability): 運用可能であっても、宇宙監視追跡対象に確実に含めることができない小さな宇宙機は、宇宙環境における他の物体に対するリスクとなる。さらに、登録情報や責任の所在を明らかにするために、識別が必要である。このモジュールは、これらの側面をカバーすることを目的としている。宇宙監視追跡能力が向上し、宇宙機をより正確に追跡できるようになるに伴い、本モジュールは SSR のバージョンごとに更新されることが見込まれる。
5. 設計運用標準の適用 (Application of Design & Operations Standards): スペースデブリの発生を防ぎ、混雑した宇宙環境での運用を可能にするために、宇宙の持続可能性の問題に対処するには、共通の理解と目標が必要である。そのため、SSR の一環として、設計と運用において可能な限り標準化することに重点を置いている。標準化は、技術や宇宙環境に対する理解に基づいて継続的に行われる。そのため、SSR の新バージョンをリリースする際には、標準の変更を含める必要があり、その実装は、必須ではないボーナスレーティングに関連付けられる。
6. 外部サービス (External Services): 近傍運用の分野で起きている技術革新は、宇宙のサステナビリティを向上させる可能性があり、興味深い。しかし、その応用は個々のミッションのコンセプトによって大きく異なる可能性がある。そのため、それらはボーナス評価に含まれている。外部サービスの開発、実証、利用が成功した場合、SSR はそれに応じて更新される予定である。

下記の点は除外されている。：

再突入 (Re-Entry)： デブリ軽減の観点から、宇宙機の運用が終了した後の処分は、軌道上にデブリを残さない大気圏再突入 (PMD) が一般的に望ましい。一方、カプセルやその他の熱保護された宇宙機による非破壊的な再突入は、一般的に膨大なコストを要する。他方、再突入した物体が地上・空中・海上に衝突するリスクもある。同様に、再突入した物体は成層圏のオゾンを破壊し、地上の人間が浴びる紫外線量を増やす可能性がある。また、ヒドラジンやその他の有毒物質が再突入時に残存した場合、土壌汚染や水質汚染を生じる可能性がある。適切な軌道離脱手順、安全化処置を見据えた宇宙機設計およびモデリングは、これらのリスクを定量化し、最小化するのに役立ちます。SSR の初版で再突入を除外したのは、主に物理的な宇宙環境範囲に集中して SSR の開発を簡略化するためである。再突入のリスクは、一般に各国の規制当局によって管理されており、宇宙機の再突入（特にノミナル再突入）によるリスクは、全体として比較的低い。

しかしながら、この分野において、特に計画されている大規模なコンステレーションや、軌道上・再突入宇宙機の数的大幅な増加による総合的なリスクの管理に関して、課題が山積している。これは将来の SSR 改訂で追加される可能性のあるカテゴリである。

スペクトル (Spectrum)： 電磁波スペクトルは有限の共有資源である。オペレータは、宇宙機のテレメトリ、コマンドおよび制御、ならびにペイロードデータの配信または通信サービスのために電波を使用する。電波干渉は、宇宙機との通信を妨げる、あるいは安全関連の重要な宇宙機サービスへのアクセスを妨げることで、ミッションのパフォーマンスを低下させ、安全上のハザードを引き起こす可能性がある。潜在的な SSR カテゴリとしては、スペクトル情報の共有と効率的な使用により他者への干渉を最小化し、干渉の地理的位置特定、識別、低減（例：キャリア ID）する設計をことがある。この項目は、いくつかの理由により、最初の SSR 制定から除外されている。第一に、干渉は短期的で可逆的な事象である（事故や恒久的な損失を引き起こすほどのものでない限り）。第二に、この分野の規制と規範は、SSR 以外において複雑な状態で発展している。第三に、スペクトルに適切に対処することは、非常に複雑な作業であり、企業の専有情報に深くアクセスする可能性があり、初期の SSR コンセプトを大幅に遅らせることになる。このカテゴリは将来の SSR 改訂で追加されるかもしれないが、現在の最初の制定では、宇宙環境に対する物理的干渉に集中している。

経済的側面 (Economic Aspects)： 経済分野では、希少資源の配分を重要視している。地球軌道は有限かつ希少な資源であるが、これまでの割り当ては主に先着順で行われ、ITU の周波数利用規則に抵触しない限り、国家が適切と考えるミッションを遂行する（または民間事業者によるミッションを許可する）。その結果生じるデブリは、一般に、希少資源の長期的

または無期限の割り当てではなく、ミッションの結果として扱われてきた。将来の SSR モジュールでは、有限な軌道資源の利用を最適化するような配分に対して、オペレータに報いることが考えられる。おそらく、ITU がミッションの指針として識別した「合理的 (Rational)、公平 (Equitable)、効率的 (Efficient)、経済的利用 (Economical use)」の 4 つの基準と同じものを用いることとなる。また、運用資金と保険加入の可能性を考慮することは、事故やその他の重大な異常事態が発生した場合のオペレータの対処能力を評価する上で役割を果たす可能性がある。この分野と課題の多くは、始まったばかりであり、大きな議論を呼ぶ可能性がある。経済モジュールの開発のための検討と国際的なコンセンサスが不十分であるため、除外する。当面は対象外とする。

天体観測への影響 (Impact on Astronomical Observations): 衛星によっては、地上の天文機器に干渉する、あるいは飽和させる形で光を反射することがある。この懸念は、地球に向かって光を反射するような高反射面の面積が大きい低高度のコンステレーションで最も顕著となる。緩和策として、衛星表面のコーティングの調整、センサのマスキングを容易にするための天体観測者との予測天体歴の調整と共有などが考えられる。この懸念は、検出性 (Detectability)、識別性 (Index)、追跡性 (Trackability) モジュールでは扱われない。検出性を高めることは、全体的な安全性の観点からすべての衛星にとって重要であるが、限られた衛星とミッションの概念のみがこれらの問題を巻き起こしていることが理由である。必要に応じてオペレータと天文学者の調整によって対処することが可能であり、その必要がある。

より広義のサステナビリティ (Broader Forms of Sustainability): サステナビリティという用語は、サプライチェーンの調達や再生可能性、環境排出、労働慣習など、地上でのさまざまな文脈で使用されており、宇宙物体の資源利用や製造に適用することができる幅広い考慮事項を指している。このコンセプトは、国連の持続可能な開発目標 (SDGs) で識別された 17 の具体的な目標および関連するターゲットと関係する。現在の SSR 初版の記述では、軌道投入速度を得るためのロケットの推進方法など、幅広い話題には触れておらず、物理的な宇宙環境に特化したものとなっている。

5 宇宙交通フットプリント算出のためのミッション指標

ミッションがスペースデブリ環境に与える影響は、ECOB (Environmental Consequences of Orbital Breakups) [1]を用いて定式化されている。ECOB はリスク指標であり、以下の一般式により構成される。

$$\text{Risk} = \text{Probability} \times \text{Severity},$$

ここで、確率の項 (p) は、ある物体が破砕現象に巻き込まれる可能性を表し、シビリティの項 (e) は、そのような事象の結果を定量的に表す。より詳細には、 p は破局的衝突（親物体が破壊されるほどのエネルギーが放出される衝突）を引き起こすのに十分な大きさの物体と衝突する確率を表し、40J/g という標準的な基準で表している。衝突回避能力の可用性は、現在の監視システムで追跡可能な大きさで、かつ衝突回避操作で回避可能な物体を衝突確率の計算から除外することで把握することができる。

(e) は、運用中の衛星の衝突確率の増加という観点から、潜在的な破砕の重大性を定量化するものである。これは、運用中の衛星の母集団から代表的な物体を定義し、これらの物体に対するシミュレーション破砕による衝突確率を計算することによって行われる。衝突確率とシビリティの項のモデル化に用いた手法の詳細は[1]に示されている。このようなリスク指標 (I) は、単一のエポックだけで計算されるのではなく、宇宙機のミッションプロファイルに沿って、ミッション終了時の廃棄実施に至るまで評価される[2]。特に、廃棄の成功率 (α) に依存する軌道環境の発展の方針を考慮することによって行われ、指標計算が次のようになる。

$$\text{ECOB} = \int_{t_0}^{t_{EOL}} I \, dt + \alpha \int_{t_{EOL}}^{t_{fD}} I \, dt + (1 - \alpha) \int_{t_{EOL}}^{t_{fND}} I \, dt$$

ここで、 t_{EOL} は運用終了時のエポック、 t_{fD} 、 t_{fND} は、それぞれ廃棄される場合と廃棄されない場合（運用軌道上に放置される場合）の 100 年経過するもしくは再突入の時点のエポックの最小値である。

提案した指標が、少数のハイレベルなパラメータに依存しながら、代替ミッションアーキテクチャ間の差異（例えば、異なる運用コンセプトの採用、コンステレーションの展開、異なる廃棄戦略の実施などを考慮）を捉えることができることが示されている[3]。先行研究[1]～[3]で適用された定式化に関して、衝突確率の計算では、衝突回避計画の有効性により実現する追跡可能な物体からの衝突確率の減少を考慮する。言い換えれば、先行研究に関して、衝突回避計画の採用はもはや二者択一（yes/no）ではなく、その有効性を測定するスコア (γ) で扱われる。このスコアは、対応の閾値や衝突回避操作の実行に必要なリードタ

イムなどのパラメータに依存する。ESA DRAMA suite¹ [4]のARESのようなフリーツールがこの目的に利用可能で、 γ は ECOB へのインプットとみなされる。

上記で定義されたアプローチは、ミッションが環境に与える影響を絶対的に評価するものである。つまり、スペースデブリ軽減のためのガイドラインを遵守した場合でも、それを超えるようなミッション構成（例えば 25 年以内の再突入ではなく、直接再突入を選択するなど）の場合においても、（例えば宇宙環境中に大きな総質量を投入する等により）常に高いフットプリントとなる可能性がある。

しかし、SSR が強調したい側面は、緩和努力に関して要求以上の優れた行動をするオペレータがいる場合である。この側面を捉えるために、絶対的なデブリリスクの評価に加えて、計算されたフットプリントは、同じミッションが参照シナリオで獲得するスコアと比較される。低減アクションの最低要求レベルに相当する参照シナリオは、各軌道に対して以下のように定義された（一般的に適用され、国際的に認識されているスペースデブリ低減標準に基づいている）。

- LEO: 25 年 と 90% PMD
- GEO: 墓場軌道と 90% PMD
- Other: ノーアクション

ミッション指標自体は異なるミッションを比較するために使用することができるが、SSR のような複合指標にその寄与を含め、他のモジュールと互換性を持たせるためには、正規化のアプローチが必要である。先行研究では、ワーストケースを想定して、基準値（特定の衛星の指標）を用いて指標の数値を正規化する試みがなされた。しかし、このアプローチには将来性がないという欠点がある。一方、環境影響評価を行う主たる動機の 1 つは、デブリ環境の動的な発展を捉えることができるようになることである。そのため、SSR で採用した正規化アプローチは、環境容量 (Environmental capacity) [5]、すなわち、宇宙環境の長期的安定性に適合するミッションの数と種類の概念に基づくものである。[2]に詳述されているように、宇宙環境の長期シミュレーションは、スペースデブリ低減ガイドラインに十分なレベルで準拠した参照シナリオを構築するために使用することができる。次に、このシナリオは、予想される緩和戦略を考慮して、軌道上の全オブジェクトの指標の合計として意図されている軌道資源の実際の使用と比較されます。現在、ポストミッション廃棄 (PMD) 計画とその期待成功率は、より体系的に共有されていないが、宇宙監視データのおかげで、宇宙機の活動を導き出し、軌道の発展を予測することができ、宇宙環境の状態を評価することができる[6]。環境容量という点では、その一部は停止した衛星やロケット本体で消費され、残

¹ Available for download at <https://sdup.esoc.esa.int/drama/>

りの部分は活動中のミッションや新規ミッションに利用することができる。この値（利用可能な容量）を使って、SSR 内のミッション指標を正規化し、その指標の重要性が広範囲な環境の発展にも関係することを反映させることができる。

6 衝突回避能力

このセクションでは、オペレータの衝突検知、対処、軽減能力を向上させるための能力について述べる。3つのカテゴリが提案されており、各カテゴリで価値が高まるいくつかの項目がある。

- **軌道状態の知識 (Orbital State Knowledge) :**

理由: より頻繁な追跡や、計画された衛星のマヌーバに関する改善情報 (例: マヌーバの不確実性の特徴) と同様に、協調追跡はしばしば共分散をより小さくする。SSRは、より良い軌道決定、より頻繁に更新される軌道決定、より良い特性/検証された共分散推定に対して追加的なクレジットを与える。これにより、特に軌道決定能力が不足している小型衛星の軌道決定能力を向上させることができる。共分散推定に関する業界共通の標準がない場合、オペレータが共分散情報の現実性を十分に理解していることは、オペレータから提供された共分散推定値を信頼するかどうか他のオペレータが判断することに役立つ。軌道状態の知識により達成される任意の空間方向の精度は、軌道体制 (Orbit regime) に依存し、選択した技術によって影響を受ける可能性がある。SSR発行者が評価できるように、トップレベルで粗いか正確かの区別をする必要がある。

- **衝突回避: 調整可否 (Collision Avoidance: Availability to Coordinate)**

理由: オペレータは、高い稼働率で衝突回避のための連絡をとり、他のオペレータと調整することができるサービスの稼働率を維持することを評価されるべきである。

- **衝突回避: 調整能力 (Collision Avoidance: Capability to Coordinate)**

理由: オペレータは、潜在的イベントを有意に解決することができる専門知識を持ったスタッフを維持することを評価されるべきである。すなわち:

- 1) デブリ接近情報 (CDM) および他の宇宙データシステム諮問委員会 (CCSDS) 標準を含む共通データ形式を受領し、理解する能力。
- 2) 様々な SSA²の情報源を検討し、接近がもたらすリスクのレベルを判断し、マヌーバの実行判断、あるいはさらなる情報の必要性を判断する能力。
- 3) 接近を緩和するためのマヌーバ計画を作成する能力、安全のために他のオペレータのマヌーバ計画をスクリーニングする能力。
衛星に新しい非定常マヌーバをタスク化し、その実行を確認する能力。
- 4) 文書化された手順は、軌道上運用の安全においてヒューマンエラーやテクニカルエラーの防止に役立つ。

² このセクションでの SSA とは SST のほか、大気密度推定に役立つ宇宙天気情報およびデータを意味する。

Table 1: 衝突回避能力に関する採点基準

オペレータ アクション	能力（すべての低レベルを含む）			
	スコアなし	低スコア (2 ポイント)	中スコア (3 ポイント)	高スコア (4 ポイント)
軌道の状態 把握（通常 運用時）	状態情報に ついて、第 三者である 公的な SSA プロバイダ に依存す る。（例： space- track.org TLE）	オペレータが オブジェクト の軌道位置状 態の知識 (Orbital position state knowledge) ³ を維持してい ること。	対象物の軌道状態 を、あらゆる方向に 対して 10km 未満ま で把握すること。 マヌーバやその他の 事象により、オペレ ータの状態推定が必 要な軌道状態の知識 より悪くなるような 軌道に変化を誘発し た場合、マヌーバ衛 星の軌道決定を更新 すること。 及び 軌道決定の共分散の 特徴付け／検証。	対象物の軌道状態 を、あらゆる方向に 対して 1km 未満まで 把握すること。 マヌーバやその他の 事象により、オペレ ータの状態推定が必 要な軌道状態の知識 より悪くなるような 軌道に変化を誘発し た場合、マヌーバ衛 星の軌道決定を更新 すること 及び 軌道決定の共分散の 特徴付け／検証
衝突回避： 調整可否	調整不可能	緊急事態に対 応するための 調整が可能で あること。 (ただし定常 的でない)	1 日のうち決められ た時間帯に調整可能 であること。	定期的な接近評価 と、緊急の問題に対 してほぼ即座に調 整・対処できるよ う、要員またはシス テムにより 24 時間 体制で懸念に対応で きる機能を有するこ と。
衝突回避： 調整能力	オペレータ は、接近の	接近またはそ の他の高リス	オペレータは、デブ リ接近情報（CDM）	衝突のスクリーニン グ、評価、低減のた

³ 軌道位置状態の知識 (Orbital position state knowledge) とは、時間軸を持った位置と速度の情報であり、共分散は含まれない。

	スクリーニング、評価、低減のための専用プロセスを持たない。オペレータは接近に対応したマヌーバをすることができない、もしくははしないことを選択する。	クの事象が発生した場合に連絡を受ける機能を有していること。 オペレータは、定期的に軌道と計画されたマヌーバを SSA プロバイダからの情報及び/もしくは公開カタログと照らし合わせてスクリーニングすること。	やその他の一般的なフォーマットを解釈し、リスクを判断し、低減マヌーバを生成/スクリーニングが可能であること。 オペレータは、自動化されたルーチンの接近評価のためのシステムを持っていること。	めの文書化された手順を有すること。 運用中の宇宙機及び計画されたマヌーバを SSA プロバイダのカタログに照らして定期的にスクリーニングすること。
衝突回避：マヌーバ能力	マヌーバ機能を有していない	何かしらマヌーバ機能を有すること。 (差動大気効力：Differential Drag を含む)	軌道 6 周回以内に対応すること(少なくとも $\Delta 1\text{cm/s}$)	軌道 1 周回以内に対応すること(少なくとも $\Delta 1\text{cm/s}$)
(ボーナス) 通常運用終了後の軌道状態の知識の維持		宇宙機が墓場軌道に投入する、もしくは大気圏再突入により廃棄するまで、軌道状態の知識を維持すること。	宇宙機が墓場軌道に投入する、もしくは大気圏再突入により廃棄するまで、軌道状態の知識を 10km ままでに維持すること。	宇宙機が墓場軌道に投入する、もしくは大気圏再突入により廃棄するまで、軌道状態の知識を 1km ままでに維持すること。

スコアリング案内: 被格付け主体は、ボックスに含まれるすべてのクライテリアを満たす

場合、どのボックスでもクレジットを受けることが出来る。被格付け主体が1つの行で複数のボックスを満たすことができた場合、それらのポイント値は加算される。採点プロセスでは、被格付け主体が獲得したポイントの合計を、潜在ポイントの合計で割る。正規化されたポイントの合計は、SSR 計算への入力となる。

7 データ共有

このセクションでは、衛星やロケットのオペレータが他のオペレータやステークホルダーと共有できる情報、およびそのような情報共有が宇宙飛行の安全性に寄与することについて述べる。データ共有のフォームは、3つのカテゴリに分けられる。:

- 衝突回避調整情報 (Collision Avoidance Coordination Information)
- 衛星測位情報 (Satellite Metric Information)
- 特性情報 (Characterization Information)

潜在的な共有の対象者は、以下に示す4つである。オペレータは、各対象者と特定のタイプの情報 (Table 2 に記載) を共有することにより、ポイントを獲得することができる。このカテゴリにおける「情報共有」は、公開と更新の両方が含まれます。つまり、オペレータは、ポイントを得るために、共有に加えて、関連する形式のデータを最新に保つことを約束・実行する必要がある。具体的な更新頻度はデータの形式によって異なるが、特に指定しない限り、その情報の運用をサポートするために適当な頻度を選択する必要がある。

対象者と各種データを共有することのクレジットを得るために、SSR 申請者は通常合理的かつ非差別的に各利用者がデータの特定の形式を利用できるようにすべきであるが、カテゴリ内のすべての潜在的利用者がそのデータを受け取る能力を有することを積極的に示す必要はない (例えば、潜在的利用者の一部がその形式に対応していないシステムを有していても、一般的に利用されるデータ形式でデータを利用できるようにしていれば十分である)。

● SSA プロバイダ (複数可)

多くの事業者が、第三者による利用のために SSA データベースを運用し、または SSA に関する製品もしくはサービスを他者に提供している。これらの団体の中には、政府機関、非営利団体または学術機関、および営利団体 がある。このような団体と共有することで、SSR 発行者はクレジットを獲得できる。

● 調整要求に基づく他オペレータ

他のオペレータは、関心の高いイベント、計画的もしくは緊急のイベントに対応して、SSR 申請者に調整の要求を行うことができる。オペレータは、そのような事象に対応して、知る必要のある他の事業者と情報を共有する。それにより、SSR 申請者がこのカテ

ゴリでのクレジットを獲得する。

- **オペレータやステークホルダの自主的なネットワーク**

宇宙データ協会を含む様々な組織が、飛行安全に関する情報を共有する場として存在しており、中にはデータの追加検証や確認、共有情報の使用に関する法的・技術的制限を提供する組織もある。また、軌道が重複するオペレータのための非公式ネットワークも存在し、そこでは、オペレータの特定のニーズに応えるために、目的限定でデータ共有が行われている。このような情報ネットワークは、地上追尾パターンなどミッションに厳しい要求がある場合、もしくはタンデム飛行や特定の軌道領域の横断など、軌道マヌーバキャンペーンの一環として潜在的な干渉が確認された場合に設置される。これらの組織との共有の場合にクレジットを得ることができる。

- **公衆**

公衆との共有でクレジットを獲得するためには、オペレータは関連する情報源を維持し提供する必要がある。そのような情報を全体展開する第三者に情報を提供した場合（例：ウィキペディアに衛星の質量を掲載する）、このカテゴリでクレジットを獲得するには不十分である。オペレータは情報を自由かつ容易に公衆と共有することが推奨されるが、利用者にアカウント登録と利用条件への同意を要求しても、SSR 発行者が決定したように、利用条件が大きな制限とならない限り、申請者はクレジットを得ることが出来る。

重みづけは、宇宙飛行の安全性への貢献度、現在のオペレータの慣行、様々な形態のデータ共有に対するオペレータの懸念に基づいて分析によって決定された。宇宙のサステナビリティに大きな影響を与えるデータ共有の形態は、より多くのポイントを獲得できる。これらの質問に答える際、SSR 申請者は、申請時（初回評価または再認証のいずれか）に意図した能力と行動に対する最善の推定値で回答する必要がある。各共有形態のクレジットは、「オペレータ入力の実証」セクションに記載されている検証倍率によって修正される。

データ共有モジュール内の特定のカテゴリに関する詳細情報:

- **衝突回避調整情報**

共有情報・クレジット: 衝突リスク低減に関する軌道力学チームまたはその他の適切な技術・業務連絡先の情報（名前、役職、電話番号、メールアドレス、NORAD CAT ID または国際呼称による管理対象物のリスト、使用言語）、その個人またはチームが活動する時間帯に関する情報、および必要に応じて応答可能時間帯。また、オペレータはこの情報をアクセス可能な場所に公開し、クレジットを受けるために最新の状態に保つことを約束するよう求められる。

関連性： 現在、異なるオペレータが管理する運用中衛星を含む高リスクの接近の多くは、関係するオペレータ間のマニュアルのコミュニケーションによって解決されている（ほぼ全てというわけではない）。そのため、オペレータが接近を認識し、必要な衝突回避行動を計画・調整できるように、特定のオブジェクトに関連する連絡先に確実に連絡できることが運用上必要とされる。

重要性： 基本的な連絡先情報の重要度は高いと思われる。営業時間や応答時間の保証は重要だが、タイムリーで正確な連絡先情報が優先される。

- **衛星・ミッション情報**

共有情報・クレジット： 高リスクの接近を特定、評価、回避しようとするオペレータへの情報。これには、ロケットのタイミングと軌道（計画と実績の両方）、衛星に軌道修正機能がある場合の運用可否状態、衛星天体歴情報（過去と、軌道修正を組み込んだ将来の計画天体歴。これは、ベースライン SSR の行動計画に基づいて評価され、軌道上フェーズでの実際に基づいて更新される）、天体歴共分散情報およびその共分散情報がどのように生成されたかという情報が含まれる。

関連性： 打上げ情報は、特に打上げ回数が増加し、宇宙機の放出情報が複雑化する中で、オペレータと SSA プロバイダが全体的な状況認識を向上させるために役立つ。運用状況情報は、オペレータが調整可能か必要かを判断するのに役立つ。天体歴情報は、オペレータによる軌道決定が非協力的な推定よりも優れていることが多いため、SSA を向上させる。共分散情報は、衛星の位置情報が意思決定の質であるか、より多くの情報が必要であるかを判断することに役立つ。

重要性： 打ち上げ情報は有用だが、軌道上運用に比べれば、多くのオペレータにとっての関心事として小さい。運用状況についての情報交換は重要である。現在／予測される天体歴と共分散情報の共有は非常に重要である。

- **衛星特性情報**

共有情報・クレジット： 衛星の質量と大きさ（外形体積の寸法、簡略化した CAD モデル、または他の方法のいずれか）。これらのデータは、ほとんどの衛星の運用期間中に大きく変化することはない。また、オペレータは、この情報をアクセス可能な場所に公開し、最新の状態を維持することを約束するよう求められる。

関連性: 衛星の質量とサイズは SSR 発行者に提供され、フットプリント計算の一部として使用されるが、必ずしも一般に公開される必要はない。運用中の衛星の正確な質量とサイズの情報を知ること、第三者による軌道伝搬と接近評価の正確性を高めることができる。

重要性: 上記の理由によりこの情報は重要である。

- **自律システム（衛星特性情報のサブセット）**

共有情報・クレジット: より多くの衛星が自律的な衝突回避アルゴリズムを使用するようになると、非安全行動につながるシステム間のフィードバックループを避けるようなシステムを設計するために、その動作概念について公開情報を持つことが重要になる。これらのシステムがどのように高いレベルで機能するか、使用される決定タイムライン、そして非調整状態の衝突回避マヌーバを避けるために他のオペレータが自律マヌーバシステム機構を持つ宇宙機のオペレータとどのように協調すべきかの情報が共有される。具体的に共有すべき項目としては、どのような場合にマヌーバが発動されるかの基準、計画された自律マヌーバが共有される SSA 情報のどこに、どの程度の頻度で反映されるか、誤作動時に自律手順を中断するための緊急停止手順などが挙げられる。

関連性: ある特定の軌道体制において非常に重要であり、そのようなシステムがより広く普及するにつれて、より重要性を増していく。

重要性: これは、オペレータの衛星が互いの自律的な操作に反応したときに、軌道が重なる他のオペレータが危険な接近やや意図しない異常を回避するための調整をすることに役立つため、ある程度重要である。

このカテゴリは、自律型衛星マヌーバシステム（実行前に運用要員による明示的なマヌーバ承認なしに衛星マヌーバが実行されるシステムと定義される）の運用を行うオペレータに対してのみ採点される。

- **その他のデータ共有の形態（ボーナス）**

情報: 電波周波数情報、宇宙機異常情報、学術・政府研究支援のためのデータセット



関連性: 他のデータ共有の形態も宇宙のサステナビリティをサポートするが、運用上の物理的な衝突回避とは関係性が低い。このカテゴリでは、このようなデータの共有に貢献した事業者に、さらなるボーナスクレジットを与える機会を提供する。共有されるデータは、オペレータと運用上のニーズによって異なることが予想されます。従って、このカテゴリは意図的にあまり定義されていない。このデータ共有の多くで、オペレータは異なる対象者と異なる情報を共有することが予想される。しかしながら、このようなデータ共有は、関連するカテゴリの少なくとも 1 つの外部ステークホルダに明確な利益を提供するために、実質的かつ詳細であるべきである。

情報: 文書化され、利用可能なアプリケーションプログラミングインタフェースまたはその他のマシンツーマシンインタフェース

関連性: よく文書化され利用可能なマシンツーマシンインタフェースは、他のプロバイダが提供データを運用プロセスで自動化し利用する方法を提供し、スクレイピングと比較して信頼性と使い勝手が良い。オペレータは、カテゴリ内のすべてのデータ（衝突回避調整情報、衛星測位情報、特性情報）を、文書化された API または自動使用に適した他の技術的インタフェースで利用できるようにすれば、追加ポイントを得ることができる。

Table 2: データ共有に関する採点基準

共有データ(安全への貢献度によりカテゴリ)	無し	SSA プロバイダ	調整要求に基づく他オペレータ	オペレータやステークホルダの自主的なネットワーク	公衆
衝突回避調整情報					
衝突回避の連絡先情報の公開及び更新 ・ 氏名 (複数可) ・ 肩書き (複数可) ・ 電話番号 (複数可) ・ 電子メールアドレス (複数可) ・ NORAD ID または国際標識による管理対象物のリスト ・ 使用言語	0	10	10	12	12
衝突回避連絡可能時間帯の公開及び更新	0	3	3	3	4
COLA 連絡／調整対応時間のコミットメントを公表及び更新	0	1	2	2	1
衛星・ミッション情報					
衛星天体歴の公開と更新 (LEO は 7 日間分、MEO/GEO は 14 日間分のマヌーバを含む)。アーカイブデータの共有は推奨であるが、必須でない。	0	12	8	15	15
共分散情報の公開及び更新	0	6	5	6	6
共分散特性／妥当性確認の公開及び更新	0	1	2	3	3
打上げのタイミング・軌道 (計画・実績) の公開及び更新	0	3	1	1	2



衛星特性情報					
衛星質量の公開と更新	0	4	3	4	4
マヌーバ性の公開と更新 (マヌーバ可否)	0	5	5	6	6
マヌーバ能力の公開と更新 ⁴	0	3	2	3	3
衛星の運用状況を公開及び更新 (運用中/非運用状態) ⁵	0	5	5	6	6
衛星マヌーバに自律システム (人間が介入しないシステム)を使用する場合、下記の 公開及び更新:					
● マヌーバが発動する際の 基準	0	5	3	5	5
● 計画された自律マヌーバ が、どこで、どのような 頻度で、共有された SSA 情報に反映されるか。	0	5	3	5	5
● 誤動作時に自律マヌーバ を中断するための緊急停 止手順が存在するか、お よび他のオペレータはど のように緊急停止を要求 すべきか。	0	2	2	3	3
その他のデータ共有の形態 (ボーナス)					
干渉回避／低減／ジオローケー ションを支援する電波周波数 情報	0	1	4	3	3
宇宙機異常情報	0	1	2	3	4
学術・政府研究支援のための 他のデータセット ⁶	0	3	3	3	4

⁴ この共有の意図は、特に低推力推進または差動抗力技術を使用するシステムにおいて、高リスクの接近または他の必要な事象の場合に、特定の宇宙機のマヌーバ能力を他の運用者の理解を助けることである。この目的に合致するデータ共有の形態としては、24 時間（または他の合理的な期間）内に基準軌道から到達可能な最大変位、1 回転あたりの ΔV 能力、または同様のものがある。正確な値ではなく、大きさのオーダーで許容される。

⁵ 打ち上げから廃棄されるまでの衛星のリアルタイムな運用状況を指す。

⁶ 例として、非致死性的衝撃データ、推定大気抵抗、マヌーバ情報（ただし、これらに限定されない）が含まれる可能性がある。

上記の情報にマシンからマシンへ自動的にアクセスするための API またはその他の手段。 ⁷	0	1	1	2	2
--	---	---	---	---	---

スコアリング案内: オペレータは、データ共有の各カテゴリで行うアクティビティに対してクレジットを得ることができる。アクティビティは、特定のユーザーと特定の形式の情報を共有することで得られるポイントを示すスコアとともにリストアップされる。オペレータは、1つの種類の情報を複数の対象者と共有することも含め、行ったすべてのアクティビティに対してポイントを獲得することができる。採点プロセスでは、オペレータが獲得したポイントの合計を潜在ポイントの合計で割る。正規化されたポイントの合計は、SSR 計算への入力となる。

8 検出性、識別性、追跡性:DIT

8.1 概要

衛星の物理的特性や運用コンセプトは、地球上のセンサが衛星を検出、識別、追跡する能力に影響を与える。この SSR の目的は、衛星の設計の物理的特性や打上げ、運用、廃棄時の運用方法が、観測者が衛星を識別、追跡することの難度にどのように影響するかを検討するよう衛星オペレータに奨励することである。衛星の設計や運用コンセプトを分析するための一貫した方法を提供することにより、SSR の本項目は、検出、識別、追跡の次元で衛星ミッションの比較のための標準的な尺度となる。また、SSR の本項目は、衛星が天文観測の光害への影響をいかに制限するかという考慮と、必要なときに検出、識別、追跡する能力を維持することのバランスをとるための新しい手法を奨励する可能性がある。SSR の他の部分と同様に、検出性、識別性、追跡性 (DIT) 分析は、オペレータがより持続的かつ責任を持って宇宙空間を活用する方法についてのやり取りを始めることを目的としている。

分析に必要な主な定義は以下の通りである：

- **検出性**: この定義では、人工宇宙物体を観測するための光学センサやレーダセンサを用いた宇宙監視システムが、特定の宇宙物体リストを持たず、宇宙機のサイズや高度、軌道特性などの事前の知識なしに宇宙機の監視を行うシナリオを考えている。このように情報が無い場合、探知分析では、所定の軌道にある宇宙機が光学望遠鏡と監視レーダによって別々に探知される可能性がある。したがって、1セットのミッションの宇宙機の検出性は、光学望遠鏡と監視レーダシステムが、センサ

⁷ ポイントは完全に準拠するデータカテゴリー（衝突回避調整情報、衛星測位情報、衛星特性情報）ごとに設定されているため、自動アクセスの合計ポイントはこれらの値の3倍となる。

からのエラー源、大気中を伝播する際の信号損失、太陽・宇宙船・センサの形状による照明制約の影響を受けて、人工の宇宙物体を観測できる可能性として定義される。

- **識別性:** この解析において、識別性とは、宇宙機の名称、所有者、範囲、サイズに関する事前の情報を持たない観測者が、宇宙機オペレータとの連携とは無関係に測定・推定可能な特性のみを用いて、ある宇宙機を他から一意に識別することがいかに難しいかを徐々に特定し、物理的観測を通じて得た情報を用いて、識別を完了するプロセスを指す。特に、小型衛星やコンステレーションの増加に伴い、地上からのデータによる衛星の識別の難しさが今後懸念されることを考慮すると、実際には非常に困難である。このように、宇宙船の角運動量を計算し、角運動量から数学的なクラスタに属することがわかった衛星群を特定することで、その難度がわかるという分析である。クラスタが小さいほど、宇宙機の特定は容易になる。
- **追跡:** この解析では、観測者が既に宇宙機を検出・識別しており、次に宇宙機の軌道の時間的变化を監視・予測しようとするプロセスを追跡:Tracking と呼んでいる。追跡解析では、衛星オペレータではない観測者が追跡機能を実行することの難度を確認する。この場合、衛星追跡装置は、衛星の名前、所有者、特定の時刻の瞬間的な位置に関する情報を持っているが、観測者は軌道パラメータに関する完全な知識を持っていないことが前提である。このような状況において、地上局が宇宙機を観測するためのアクセス時間が短くなると、追跡情報の不確実性が増加する。このように、追跡性解析では、追跡プロセスの不確実性のレベルを推定するための数値として、アクセス時間を計算する。望遠鏡やレーダの地上ネットワークとの可視パスの頻度が高ければ高いほど、宇宙機が再び視野内を通過する時間の予測は向上する。

このセクションでは、SSR の検出性、識別性、追跡性解析を行う理論的定義を示し、Systems Tool Kit (from AGI) と MATLAB (from MathWorks) といったツールを用いて、ソフトウェアコードの最初のバージョンを実装する方法について議論する。SSR コンソーシアムではオープンソースや安価に入手できるソフトウェアを好んで使用しているが、STK と MATLAB はどちらもライセンスが必要であることを認識している。今後、SSR コンソーシアムチームは、STK の代わりに OreKit などのオープンソースソフトウェアツールを用いて、DIT 解析ソフトウェアのフォローアップ版を作成することを目指しているが、まず STK と MATLAB で解析の初期ロジックを実証する予定である。

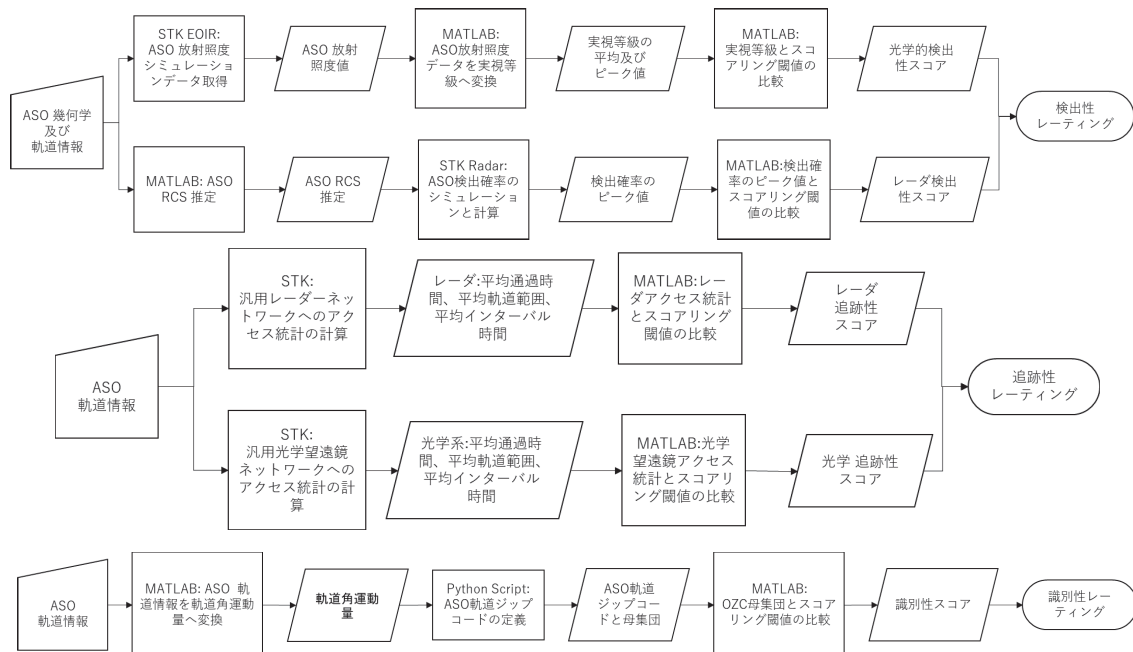


Figure 5: 検出性、識別性、追跡性を計算する解析手順の概要

上記で紹介した解析は、衛星を追跡するオペレータの能力とは無関係に、ある RS0 の DIT を定量化し、衛星の位置を推定する際の誤差を少なくすることを目的としている。このように、本解析では、人工の宇宙物体のセンサ観測によって得られる情報のみを扱う独立した観測者の視点を考慮している。衛星位置のオペレータによる推定値の誤差のレベルに関する考慮は、SSR の衝突回避のセクションで行われる。主にシミュレーションを使用して、DIT 解析は、オペレータに要求された物理的な仮定と初期データのセットから開始する。衛星オペレータに要求されるデータは、宇宙交通フットプリントの計算に使用されるミッション指標モジュールに要求されるデータと一部重複している。リストには以下を含む。

- 幾何学的近似: Geometric Approximation 及び寸法（直方体、円柱、球体）
- （要求）簡易 CAD モデル-基本サイズと幾何学的形状
- （要求）詳細 CAD モデル - 複雑なファセットモデル（MLI のしわなど、材料表面の適切な表現を提供するために、表面の不規則性を平均化することが出来る単一の拡散ファセット）
- 運用軌道パラメータ（遠地点高度、近地点高度、傾斜角、昇交点赤経、近地点引数、平均近点角）
- 主ミッションにおける衛星の姿勢・ポインティングに関するノミナル要求事項
- ミッションに含まれる衛星の数とロケットからの分離プロセス
- 運用軌道に到達するまでの初期運用段階の定性的説明（どの高度で衛星を分離す

るのか？ある高度に何機投入されるか？その高度にどれくらいの時間滞在しているのか？運用高度に到達するまでに中間的な高度があるか？運用中に高度や軌道傾斜角は変化しないか？)

ここで説明する DIT 解析の重要な要素は、モデルで想定する地上センサネットワーク (GSN) 能力である。SSR のための理想的な GSN は、世界中の国が利用できる商業用に準備されたセンサによって達成出来る能力のものである。その理由は、SSR は可能な限り透明性の高い指標を用いることを意図しているためである。そのため、SSR でモデル化した GSN は、特定の既存の GSN を代表するものでない。特に、これらの解析に使用した GSN は、市販の望遠鏡やレーダシステムと同等の能力を持つセンサで構成されている。地上センサは、様々な軌道を同様にカバーするために、シミュレーション内で地理的に分散されている。

8.2 検出性: Detectability

SSR の初版で作成された検出性解析は、光学的検出とレーダ検出の 2 つの要素を持っている。この 2 つの方法は、人工衛星やその他の人工宇宙物体 (Anthropogenic Space Objects : ASOs) のデータを収集するための最も一般的な方法である。この 2 つの部分については、上記の分析フローチャートの上 2 行で表現されています。これらの分析の目的は、提案された ASO を各手法での検出難度を推定し、その難しさを SSR の評価指標に変換することである。総合的な検出性スコアは、光学的寄与とレーダ的寄与を合わせたものである。したがって、検出性は光学スコア*(.05)+レーダスコア*(.05)で評価される。

この SSR の初版では、光学的検出性テストは、検出性の間に一つの閾値を持つ二値採点法を採用している。この閾値は、光学的に理想化された 0.25m 望遠鏡の限界等級である 15 等級に設定されている。ここでいう光学的に理想化されたとは、望遠鏡自体が光学的な検出プロセスに誤差を生じさせないという意味である。実際には、光学センサのレンズ、反射鏡、電子回路の不完全性によって、光学系全体の限界等級が低下する。つまり、「検出可能」と「検出不可能」の間の視等級 15 の採点基準は、理想的な 0.25m 望遠鏡にも、非理想的な 0.3m-0.5m 望遠鏡にも対応している。このクラスの望遠鏡は、空軍研究所で行われた「Raven automated small telescope systems」の研究成果に基づいて、最も低い閾値で選ばれた。この研究では、0.5m 未満の市販の望遠鏡を衛星の観測・追跡用に使用するコンセプトを調査・検証した。ASO が 15 等級の閾値を満たした場合、検出性スコアの光学部分に対してスコアは 1 となり、閾値を満たさない場合、スコアは 0.5 となる。

レーダ解析では、検出物体からの戻りレーダ信号が、ある信頼度で背景雑音と区別できるほど強い場合に、検出可能となる。DIT レーダ検出解析では、ASO を最低限検出できるもの、検出しやすいもの、ほぼ確実に検出できるものの 3 つの閾値が設定されている。解析に使用

した STK ソフトウェアを所有・開発する AGI 社によると、一般的に検出確率が 50%を超える検出事象は、検出成功とみなすことができるとのことである。⁸

レーダ探知能力では、最小限の探知能力しか持たない ASO と、それを大幅に超える ASO を区別するために、75%という追加の探知能力を採用している。ASO が 50%の閾値を満たした場合、レーダスコアは 0.5、75%の閾値を満たした場合は 1、それ以外の場合、レーダスコアは 0 となる。

8.3 識別性: Identification

識別性とは、宇宙機の名称、所有者、範囲、サイズなどの事前の情報を持たない単純な観測者が、地上からの物理観測で得た情報をもとに、地上のセンサから観測された特定の物体を繰り返し観測し、当該オブジェクトの名称、軌道、所有者を徐々に特定するプロセスをいう。この解析では、宇宙機のパイロットと連携して識別作業を行うことなく、観測可能な特性のみを用いて、情報を与えられていない観測者がある宇宙機を他と一意に区別することの難度を確認する。この解析は、現時点では DIT のスコアリングに含まれていない。

8.4 追跡性: Trackability

解析の最終段階では、独立した観測者が衛星の軌道の将来の変化を推定できる確実性のレベルを解析することにより、SSR は衛星の追跡性を評価する。この段階では、基準光学観測システムと、所定のサイズと範囲（検出性解析で特定された）の物体を観測するために適切なパラメータに調整された追跡レーダシステムを観測者が使用することを想定している。解析では、検出された宇宙物体が地上センサネットワーク内の望遠鏡やレーダの視野を通過する将来の予測期間を計算する。解析は、将来の通過の推定値の不確実性のレベルを計算する。将来の軌道推定値の不確実性が高いほど、追跡性スコアは低くなる。

採点基準を選択するための経験則を提供するために、Celestrak から約 3200 個の運用中の衛星の TLE を取り出した。これらの衛星を追跡性解析にかけ、通過時間 (Pass duration)、軌道範囲 (Orbital coverage)、インターバル時間指標 (Interval duration metrics) の傾向を特定することに役立つ分布を作成した。以下に説明する閾値は、このテーマに関する文献からの情報と、約 3200 個の運用中ミッションについて作成された実証データの観察から得られた情報の組み合わせによって定義された。

追跡性解析のスコアは、3つの要素に分けられ、それぞれ2つのサブスコアがあります。最初の要素は、ASO の平均通過時間 (Pass duration) に基づいており、120 秒 (0.25 ポイント)、

⁸ <https://help.agi.com/stk/11.0.1/Content/training/StartRadar.htm>

180 秒 (0.5 ポイント)、400 秒 (1 ポイント) が採点基準となっている。2 つ目の要素は ASO の平均軌道範囲 (Orbital coverage) に基づいており、10% (0.25 ポイント)、25% (0.5 ポイント)、60% (1 ポイント) が採点基準となっている。3 つ目の要素は、ASO の平均的なインターバル時間 (Interval duration) に基づいており、12 時間 (0.5 ポイント) および 6 時間 (1 ポイント) を採点基準となっている。追跡性の合計スコアは以下のように計算される。

$$\text{追跡性} = [\text{通過時間} \times (\frac{1}{3}) + \text{平均軌道範囲} \times (\frac{1}{3}) + \text{間隔時間} \times (\frac{1}{3})]$$

8.5 DIT のアンケート部分

DIT 解析の最後の要素は、アンケートに対するオペレータからの回答より得られる追加の定性的スコアである。DIT プロセスの一部の側面では、現時点では定量的に評価することができないため、アンケートには、衛星の特性評価と追跡の分野でオペレータのパフォーマンスを評価する質問が含まれている。

質問は以下の通りである：

運用している自らの宇宙物体を追跡しているか？該当するものを全て選択せよ。

- オペレータは、Space-Track または他の第三者の公的 SSA プロバイダに依存する。 (1 ポイント)
- オペレータもしくは契約している SSA サービスプロバイダは、投入後 14 日以内に、運用衛星を特定し、管理する。 (2 ポイント)
- オペレータもしくは契約している SSA サービスプロバイダは、投入後 1 日以内に、運用衛星を特定し、管理する。 (3 ポイント)

衛星に関する検証可能な光学測定／放射測定特性データを SSR 評価者に提供する。

- 放射測定データ (平均/最大/最小 レーダ反射断面積) (2 ポイント)
- 光学測定データ (平均/最大/最小 実視等級) (2 ポイント)

最終的な DIT スコアは以下のように算出される。：

$$\text{DIT スコア} = \text{検出性スコア} \times (\frac{1}{3}) + \text{追跡性スコア} \times (\frac{1}{3}) + \text{定性的スコア} \times (\frac{1}{3})$$

9 設計・運用標準の適用

宇宙分野では、国際的に承認された標準を適用することが、オペレータ間およびオペレータと利用する宇宙環境との間の理解の互換性を確保するための明確な道である。しかしながら、拡張した宇宙のサステナビリティの目標を達成しようとする、設計と運用の標準が地域によって異なる。SSR モジュールでは、コミットメントのレベルを測定するために、一般的な検証方法と連動したアンケート項目により、以下の採点手法を提案する。本章は、SSR のバージョンアップの一環として更新されることを想定している。

SSR の一環として、設計・運用標準の項目の一部を明示的に評価し、特定のミッションの目標レベルを採点する。これは物理的評価と補完関係にあり、SSR のこの部分ではターゲットそのものを評価し、質問 1 ではそのターゲットが実行されたときに環境にどのような効果をもたらすかを評価している。設問と採点案を以下に示す（設問 3～6）。採点は累積的に行う。そのため、最高 11 点、最低 0 点である。軌道上評価としての更新は行わない予定である。

ボーナス SSR の評価の一環として、打上げ国としての標準の適用が評価される予定である。質問と採点案を以下に示す（質問 1、質問 2）。この場合、SSR 申請者の出身国に依存することになるため、厳しい条件を設けていない可能性のある宇宙開発新興国からの打ち上げを不当に抑制しないよう、バランスを取る必要がある。一方で、規制がないからといって、意図的に規制体制を選択することは抑制する必要がある。採点は、個々の SDM ガイドラインや標準を相互に排他的とし、累積的に行う。そのため、最大で 7、最小で 0（任意適用の場合は 2 の倍数）となることがある。このスコアにベースライン評価の結果を加味することで、オペレータが要求された以上のことを行ったかどうかの指標とする。

標準の適用

Note: このモジュールのスコアの計算は、獲得したポイントの合計を加算し、潜在的なポイントの合計で割る。正規化されたポイントの合計は、SSR 計算への入力となる。

1. スペースデブリの低減と運用に関する以下の文書のうち、ミッションに適用するのはどれであるか。スペースデブリ低減ガイドラインに基づくスペースデブリ低減標準を適用するミッションの場合、両方のカテゴリにチェックを入れること。検討した運用・環境ガイドラインをリスト化のうえ必要性を明記し、要請があれば対応方法のメモを作成する。
 - 無し (0)
 - スペースデブリ低減ガイドライン（例：UNCOPUOS, IADC; 1）及び/もしくは 長

- 期サステナビリティガイドライン（例 UNCOPUOS; 1）
- スペースデブリ低減標準もしくは検証可能な法律（例 ISO, FSOA, NASA; 1） 及び/もしくは 標準化された運用プロダクト（例 CCSDS; 1）
 - 近接・ランデブー運用の場合：安全標準（例 CONFERS の取組もしくは対人仕様の標準; 1）。そのような運用が行われない場合：1.
 - 周波数申請に関する ITU 規定(1)
2. 上記の規格の中で、要求事項の一部を削除や緩めるように調整（テーラリング）が行われたものはあるか？
- 無し(1)
 - はい ($0 \leq x \leq 1$)：テーラリングの影響と質問 3~7 で捉えた範囲を評価するため、SSR 発行者がケースバイケースで減点する必要がある。
3. これらの規格のうち、自主的に適用したものはあるか？（ボーナスは、質問 1 での重みづけに等しい）
4. 宇宙機やロケットは、運用の一環として軌道上でデブリを放出するか？：
- もしあれば、1mm 以下のもののみ (1)
 - はい (0)
5. 運用寿命の一部として、爆発の確率 (x) をどのレベルまで最小化するか
- スコア： $1 - 10^{\min(0, \log_{10}(x) + 2)}$
 - 標準ではデフォルト： 10^{-3}
 - 何もしない、分析しないを $x=1$ とする。
6. 宇宙機やロケットは、その運用期間終了後に不活性化されるか。コンステレーションは、フリートおよびロケットについて平均的な回答を提供する。
- 各オブジェクトについて(排他的)：いいえ (0)、はい (1)、制御再突入(2)
7. 宇宙機及びロケットの上段は、運用終了後に廃棄軌道へ投入されるか：
- 各オブジェクトについて(排他的)：いいえ (0)、はい (1)、制御再突入(2)
 - リスクの定量化は指標の一部である
 - 保護領域と他オペレータの運用軌道を尊重した廃棄軌道（ただし、ドリフトスルーは不可）
8. 打ち上げ国は、国連宇宙空間平和利用委員会の宇宙登録簿に、打上げペイロード及び



関連オブジェクトを登録することを約束しているか、もしくは登録したか？ミッションに関連する全てのオブジェクト（打ち上げステージを含む）について：

- いいえ (0)
- はい (1)

10 外部サービス

外部機能は、幅広い活動を考慮し、衛星の修理、改良、復旧、燃料の補給、交換、補強、交換等の作業を行う外部サービス（External service:ES）を受けやすいミッションにするため、もしくは外部サービスが成功する確率を高めるために衛星オペレータが取ることができ行動のクラスを識別する。また、低出力ビーコンやリフレクタなど、非協力的な状況での衛星の検出性、追跡性、識別性を確保もしくは向上させる設計上の機能についても検討する。人工衛星の軌道上保守は、技術の進化に伴う寿命延長やアップグレード、また、外部での使用済み衛星の廃棄戦略も考慮される。

SSR は、全てのオペレータが外部サービスに投資することを想定しておらず、低軌道や小型衛星など、外部サービスが必要ないと判断される場合もある。このように、外部サービスモジュールは、外部サービス能力への投資が適切なミッションにボーナス評価を与えることを目的としている。スコアを計算するために、オペレータが獲得したポイントの合計を潜在ポイントの合計で割る。正規化されたポイントの合計は、SSR 計算のボーナス部分への入力となる。

オペレータによるアクションについて 3 つのカテゴリを下記にします。:

- **将来的にオペレータがサービスを受けやすくするための、設計および打上げ前の段階でのアクション**

ES 技術は、ミッションが打ち上げられた後、「リアルタイム」で進化する。現代の ES 事例の多くは、サービスを受けることを想定していない衛星（非協力的な衛星）である。これは今後 1~2 年は続くと思われる。これらの異なる ES の機能に関する知識の質が低いことを考慮し、SSR の初版では、全ての ES の機能に等しく重みづけを行う。SSR の最初のバージョンでは、ES に与えられるクレジットは低く、完全にボーナス区分として扱われ、ES の能力の検証、妥当性確認、デモンストレーションの成功が証明されれば、後のバージョンで再評価される可能性がある。

NASA の SSPD (Satellite Servicing Projects Division) や ESA の Clean Space Office などの第三者機関/企業は、独自の試験や、特にグラップルフィクスチャなどの設計選択を通して ES 機能の独立的な評価、検証、妥当性確認を始めている。これらの検証ツールを活用するか、自らの妥当性確認及び検証の証拠を提供することが、SSR クレジットの適用に必要である。

● 軌道上サービス (On Orbit Servicing: OOS) の利用または実証へのコミットメント

オペレータのアクションまたは外部サービスの支払いによる OOS の利用により、ミッションが現行の規制標準に準拠する限り、オペレータは SSR クレジットを獲得することが可能である。

ES は新しい技術であるため、機能の一貫した成功例が証明されるまでは、失敗のリスクは高く、確定的でない。 SSR の将来のバージョンでは、これらのサービスの技術実証を考慮することが想定されている。

● 現行標準に沿った ES の活用

外部サービス市場の成熟や技術導入に加え、法的あるいは政治的要因も市場導入に影響を与えるため、注意深く監視する必要がある。 SSR は、ランデブーとサービス・オペレーションの実施のためのコンソーシアム (Consortium for Execution of Rendezvous and Servicing Operations: CONFERS) 等の国際的な団体によって開発・提案された標準に、運用チームが準拠しているかどうかを評価する。

Table 3: ボーナス・スコアのための外部サービス・アプローチの評価

採点カテゴリ	説明	例	スコア (ボーナス)
軌道上 (OOS) 機能	オペレータは、設計や打ち上げ前段階で、将来的にミッションのサービスを受けやすくするためのアクションを取ることが出来る。これは、必ず使用することを意味するものではない。	フェイルセーフオプションの用意として、OOS 機能の実装。例えば、ビジュアルフィデューシャル、グラップルフィクスチャ、メカニカルフィーチャ、グラップフィーチャ、ビーコンのような無線障害時に対象物を追跡しやすくするアイテム等がある。	0.5
標準化インタフェー	現行標準に沿った	標準化インタフェー	0.5



ス	00S の利用	スを含む 00S 機能を採用する。	
寿命延長サービス	00S の利用または実証へのコミットメント	外部の運用終了後の改修サービス ・ 故障のリスクも含めて定量的なモデルに含まれる	0.5
外部 ADR の利用 (単なるコンプライアンスを超えて)	00S の利用または実証へのコミットメント	外部の ADR を使用するが、25 年軌道離脱ルールに準拠する。	0.5

11 SSR 評価に対するインプット要求の概要

11.1 前提条件の質問

前提条件の質問の目的は、衛星オペレータのパフォーマンスが、サステナビリティに対する最低限の努力のレベルを満たしているかどうかを確認することである。もし前提条件となる質問の1つが強いパフォーマンスで回答されない場合、そのオペレータの総合スコアは、たとえ他の評価項目で優れていたとしても、低いレベルに制限されるべきであるという考え方である。

以下の質問は、国際機関間スペースデブリ調整委員会 (IADC) の「スペースデブリ低減ガイドライン」に基づく。⁹

11.1. ミッション終了後の廃棄について、IADC ガイドライン 5.3 項を遵守しているか?

- はい
- いいえ
- 一部 (説明を追記)

11.2. IADC ガイドライン 5.2. 項 1 で定義されているとおり、運用終了時に宇宙機を不活性化することを確約するか?

- はい
- いいえ
- 一部 (説明を追記)

11.3. IADC ガイドライン 4 項で定義されているスペースデブリ低減計画を有しているか?

- はい
- いいえ
- 一部 (説明を追記)

11.4. 宇宙物体の意図的な破壊を避けているか?

- はい
- いいえ
- 一部 (説明を追記)

⁹ https://www.unoosa.org/documents/pdf/spacelaw/sd/IADC-2002-01-IADC-Space_Debris-Guidelines-Revision1.pdf

下記の質問は、ミッション指標及び検出性、識別性、追跡性解析を実行するために、SSR 評価がミッションパラメータに関する合理的な情報に基づいて行われることを保証するための動機付けとなるものである。

11.5. SSR 評価を申し込むオペレータは、ミッションへの SSR 評価の要求事項として、必要な情報および補足資料を SSR 発行者と共有する（及びミッションの全期間を通じて更新する）ことを約束する。宇宙機のミッション全期間において、SSR 発行者の要求に基づいて情報および補足書類を提供することを約束するか？

- はい
- いいえ
- 一部（説明を追記）

11.2 ミッション指標

- 宇宙物体の特性：
 - 質量,
 - 断面積（断面積 / ランダムなタンブリング運動における断面積）;
- 運用軌道パラメータ：
 - 最低限 軌道長半径、軌道傾斜角、離心率 もしくは軌道履歴（マヌーバを含む）,
 - 予想される軌道寿命;
- ミッション・アーキテクチャ：
 - 衛星の数,
 - 打上げロケットと廃棄軌道（運用軌道パラメータと廃棄計画の項目と同様）,
 - 投入されるミッションに関連する宇宙物体とその軌道（運用軌道パラメータと同様）;
- 廃棄計画：
 - 目標の廃棄軌道 もしくは軌道履歴（例：非従来型の処分計画の場合）,
 - 予想成功率;
- 衝突回避：
 - 衝突リスク低減（SST ソリューションの追跡可能な母集団に対して）：
衝突リスクの低減は、検知可能な物体との衝突リスクをオペレータがどのレ

ベルで最小化するかを評価するものである。非常に多くマヌーバで衝突リスクを完全に低減できる（衝突リスク 100%低減）、衝突リスク低減のためのアクションがない場合は、衝突リスク 0%低減となる。低減された衝突リスクは、発行者が計算することができ、主にオペレータが提供できる衝突回避策に依存する。申請者が計算しない場合、発行者が緩和された衝突リスクを計算するために、許容された衝突確率レベル、または衛星のマヌーバのトリガーとなるリスク閾値を提供する必要があります。

11.3 衝突回避能力

SSR のスコアリングでは、実施したすべてのアクションが考慮されるため、SSR 申請者は SSR フォームに各カテゴリで実施したすべてのアクションを記入するよう求められる。

Table 4: 衝突回避能力に関する採点基準

能力（すべての低レベルを含む）				
オペレーターアクション	スコアなし	オペレーターアクション	スコアなし	オペレーターアクション
軌道の状態把握(通常運用時) タイムフレームは予測時刻と軌道周期に依存し、軌道周期が 10 時間未満の場合は 7 日間、それ以上の場合は 14 日間。	状態情報について、第三者である公的な SSA プロバイダに依存する。(例: space-track.org TLE)	オペレータがオブジェクトの軌道位置状態の知識 (Orbital position state knowledge) ¹⁰ を維持していること。	対象物の軌道状態を、あらゆる方向に対して 10km 未満まで把握すること。 マヌーバやその他の事象により、オペレータの状態推定が必要な軌道状態の知識より悪くなるような軌道に変化を誘発した場合、マヌーバ衛星の軌道決定を更新	対象物の軌道状態を、あらゆる方向に対して 1km 未満まで把握すること。 マヌーバやその他の事象により、オペレータの状態推定が必要な軌道状態の知識より悪くなるような軌道に変化を誘発した場合、マヌーバ衛星の軌道決定を更新

¹⁰軌道位置状態の知識 (Orbital position state knowledge) とは、時間軸を持った位置と速度の情報であり、共分散は含まれない。

			すること。 及び 軌道決定の共分散 の特徴付け／検証。	すること 及び 軌道決定の共分散 の特徴付け／検証
衝突回避： 調整可否	調整不可能	緊急事態に対 応するための 調整が可能で あること。(た だし定常的で ない)	1 日のうち決められ た時間帯に調整可 能であること。	定期的な接近評価 と、緊急の問題に 対してほぼ即座に 調整・対処できる よう、要員または システムにより 24 時間体制で懸念に 対応できる機能を 有すること。
衝突回避： 調整能力	オペレータ は、接近のス クリーニング、 評価、低減の ための専用プ ロセスを持た ない。オペレー タは接近に対 応したマヌー バをすることが できない、もし くはしないこ とを選択する。	接近またはそ の他の高リス クの事象が発 生した場合に 連絡を受ける 機能を有して いること。 オペレータ は、定期的に 軌道と計画さ れたマヌーバ を SSA プロバ イダからの情 報及び/もしくは 公開カタログ と照らし合 わせてスクリ ーニングする こと。	オペレータは、デ ブリ接近情報 (CDM) やその他 の一般的なフォー マットを解釈し、 リスクを判断し、 低減マヌーバを 生成/スクリー ニングが可能 であること。 オペレータは、 自動化されたル ーチンの接近評 価のためのシス テムを持っている こと。	衝突のスクリー ニング、評価、 低減のための文 書化された手順 を有すること。 運用中の宇宙機 及び計画された マヌーバを SSA プロバイダのカ タログに照らし て定期的にスク リーニングする こと。
衝突回避： マヌーバ能	マヌーバ機能 を有していな	何かしらマヌ ーバ機能を有	軌道 6 周回以内 に対応すること (少なく	軌道 1 周回以内 に対応すること (少

力	い	すること。(差動大気効力: Differential Drag を含む)	とも $\Delta 1\text{cm/s}$)	なくとも $\Delta 1\text{cm/s}$)
(ボーナス) 通常運用終了後の軌道状態の知識の維持		宇宙機が墓場軌道に投入する、もしくは大気圏再突入により廃棄するまで、軌道状態の知識を維持すること。	宇宙機が墓場軌道に投入する、もしくは大気圏再突入により廃棄するまで、軌道状態の知識を 10km までに維持すること。	宇宙機が墓場軌道に投入する、もしくは大気圏再突入により廃棄するまで、軌道状態の知識を 1km までに維持すること。

スコアリング案内: 被格付け主体は、ボックスに含まれるすべてのクライテリアを満たす場合、どのボックスでもクレジットを受けることが出来る。被格付け主体が1つの行で複数のボックスを満たすことができた場合、それらのポイント値は加算される。採点プロセスでは、被格付け主体が獲得したポイントの合計を、潜在ポイントの合計で割る。正規化されたポイントの合計は、SSR 計算への入力となる。

11.4 データ共有

以下の情報のうち、どれを最新の状態に保ち、以下の対象者と共有することを約束出来るか？

Table 5: データ共有に関する採点基準

共有データ (安全への貢献度によりカテゴリ)	無し	SSA プロバイダ	調整要求に基づく他オペレータ	共有データ (安全への貢献度によりカテゴリ)	無し
衝突回避調整情報					
衝突回避の連絡先情報の公開及び更新 ● 氏名 (複数可) ● 肩書き (複数可) ● 電話番号 (複数可) ● 電子メールアドレス (複数可)	0	10	10	12	12

● NORAD ID または国際標識 による管理対象物のリスト					
● 使用言語					
衝突回避連絡可能時間帯の公開 及び更新	0	3	3	3	4
COLA 連絡／調整対応時間のコミ ットメントを公表及び更新	0	1	2	2	1
衛星・ミッション情報					
衛星天体歴の公開と更新(LEO は 7 日間分、MEO/GE0 は 14 日間分 のマヌーバを含む)。アーカイブ データの共有は推奨であるが、 必須でない。	0	12	8	15	15
共分散情報の公開及び更新	0	6	5	6	6
共分散特性／妥当性確認の公開 及び更新	0	1	2	3	3
打上げのタイミング・軌道（計 画・実績）の公開及び更新	0	3	1	1	2
衛星特性情報					
衛星質量の公開と更新	0	4	3	4	4
マヌーバ性の公開と更新 (マヌーバ可否)	0	5	5	6	6
マヌーバ能力の公開と更新 ¹¹	0	3	2	3	3
衛星の運用状況を公開及び更新 (運用中/非運用状態) ¹²	0	5	5	6	6
衛星マヌーバに自律システム (人間が介入しないシステム) を使用する場合、下記の公開及 び更新:					
● マヌーバが発動する際の基 準	0	5	3	5	5

¹¹ この共有の意図は、特に低推力推進または差動抗力技術を使用するシステムにおいて、高リスクの接近または他の必要な事象の場合に、特定の宇宙機のマヌーバ能力を他の運用者の理解を助けることである。この目的に合致するデータ共有の形態としては、24 時間（または他の合理的な期間）内に基準軌道から到達可能な最大変位、1 回転あたりの ΔV 能力、または同様のものがある。正確な値ではなく、大きさのオーダーで許容される。

¹² 打ち上げから廃棄されるまでの衛星のリアルタイムな運用状況を指す。

● 計画された自律マヌーバが、どこで、どのような頻度で、共有された SSA 情報に反映されるか。	0	5	3	5	5
● 誤動作時に自律マヌーバを中断するための緊急停止手順が存在するか、および他のオペレータはどのように緊急停止を要求すべきか。	0	2	2	3	3
その他のデータ共有の形態（ボーナス）					
干渉回避／軽減／ジオロケーションを支援する電波周波数情報	0	1	4	3	3
宇宙機異常情報	0	1	2	3	4
学術・政府研究支援のための他のデータセット ¹³	0	3	3	3	4
記の情報にマシンからマシンへ自動的にアクセスするための API またはその他の手段。 ¹⁴	0	1	1	2	2

スコアリング案内: オペレータは、データ共有の各カテゴリで行うアクティビティに対してクレジットを得ることができる。アクティビティは、特定のユーザーと特定の形式の情報を共有することで得られるポイントを示すスコアとともにリストアップされる。オペレータは、1つの種類の情報を複数の対象者と共有することも含め、行ったすべてのアクティビティに対してポイントを獲得することができる。採点プロセスでは、オペレータが獲得したポイントの合計を潜在ポイントの合計で割る。正規化されたポイントの合計は、SSR 計算への入力となる。

11.5 検出性、識別性、追跡性

SSR 評価者に、以下の衛星の特性情報を提供すること：

- (Required) 幾何学的近似: Geometric Approximation 及び寸法（直方体、円柱、球

¹³ 例として、非致命的衝撃データ、推定大気抵抗、マヌーバ情報（ただし、これらに限定されない）が含まれる可能性がある。

¹⁴ ポイントは完全に準拠するデータカテゴリー（衝突回避調整情報、衛星測位情報、衛星特性情報）ごとに設定されているため、自動アクセスの合計ポイントはこれらの値の3倍となる。

体)

- (要求) 簡易 CAD モデル - 基本サイズと幾何学的形状
- (要求) 詳細 CAD モデル - 詳細な物性情報と複雑なファセットモデル (>1000 faces)

SSR 評価者に以下の計画軌道情報を提供すること:

- 運用軌道パラメータ (遠地点高度、近地点高度、傾斜角、昇交点赤経、近地点引数、平均近点角)
- 主ミッションにおける衛星の姿勢・ポインティングに関するノミナル要求事項
- ミッションに含まれる衛星の数とロケットからの分離プロセス
- 運用軌道に到達するまでの初期運用段階の定性的説明 (どの高度で衛星を分離するのか? ある高度に何機投入されるか? その高度にどれくらいの時間滞在しているのか? 運用高度に到達するまでに中間的な高度があるか? 運用中に高度や軌道傾斜角は変化しないか?)

以下は、検出性、識別性、追跡性を向上させるためにオペレータが行うアクションについて定性的な質問である。

運用している自らの宇宙オブジェクトを追跡しているか? 該当するものを全て選択せよ。

- オペレータは、Space-Track または他の第三者の公的 SSA プロバイダに依存する。(1 ポイント)
- オペレータもしくは契約している SSA サービスプロバイダは、投入後 14 日以内に、運用衛星を特定し、管理する。(2 ポイント)
- オペレータもしくは契約している SSA サービスプロバイダは、投入後 1 日以内に、運用衛星を特定し、管理する。(3 ポイント)

衛星に関する検証可能な光学測定/放射測定特性データを SSR 評価者に提供する。

- 放射測定データ (平均/最大/最小 レーダ反射断面積) (2 ポイント)
- 光学測定データ (平均/最大/最小 実視等級) (2 ポイント)

11.6 設計運用標準の適用

以下のうち、打上げ事業者から準拠を要求されているもの、もしくは、ミッションが自主的に採用しているものは、どれであるか。:

- 無し (0)
- スペースデブリ低減ガイドライン (例: UNCOPUOS, IADC; 1) 及び/もしくは 長期サステナビリティガイドライン (例 UNCOPUOS; 1)

- スペースデブリ低減標準もしくは検証可能な法律（例 ISO, FSOA, NASA; 1） 及び/もしくは 標準化された運用プロダクト（例 CCSDS; 1）
- 近接・ランデブー運用の場合：安全標準（例 CONFERS の取組もしくは対人仕様の標準; 1）。そのような運用が行われない場合：1.

上記の規格の中で、要求事項の一部を削除や緩めるように調整（テーラリング）が行われたものはあるか？ 「はい」の場合、SSR 発行者がケースバイケースで減点する必要がある。

- 無し (1)
- はい ($0 \leq x \leq 1$)：テーラリングの影響と質問 3~7 で捉えた範囲を評価するため、SSR 発行者がケースバイケースで減点する必要がある。

これらの規格のうち、自主的に適用したものはあるか？（ボーナスは 5.1 項での重みづけに等しい）宇宙機やロケットは、運用の一環として軌道上でデブリを放出するか？

- もしあれば、1mm 以下のもののみ (1)
- はい (0)

運用寿命の一部として、爆発の確率 (x) をどのレベルまで最小化するか？

- スコア： $1 - 10^{\min(0, \log_{10}[x] + 2)}$
- 標準ではデフォルト： 10^{-3} ,
- 何もしない、分析しないを $x=1$ とする。

宇宙機やロケットは、その運用期間終了後に不活性化されるか？

- 各オブジェクトについて(排他的)：いいえ (0)、はい (1)、制御再突入に近い(2)
- はい/制御再突入のスコアは成功確率により重みづけされる。
- コンステレーションは、フリートおよびロケットについて平均的な回答を提供する

宇宙機及びロケットの上段は、運用終了後に廃棄軌道へ投入されるか？

- 各オブジェクトについて(排他的)：いいえ (0)、はい (1)、制御再突入に近い(2)
- リスクの定量化は指標の一部である
- 保護領域と他オペレータの運用軌道を尊重した廃棄軌道（ただし、ドリフトスルーは不可）

打ち上げ国は、国連宇宙空間平和利用委員会の宇宙登録簿に、打上げペイロード及び関連オブジェクトを登録することを約束しているか、もしくは登録したか？ ミッションに関連する全てのオブジェクト（打ち上げステージを含む）について：

- いいえ (0)
- はい (1)

11.7 外部サービス

オペレータは、設計や打ち上げ前段階で、将来的にミッションのサービスを受けやすくするためのアクションを取ることが出来る。これは、必ず使用することを意味するものではない。

- 11.6. 衛星の軌道上サービス (OOS) 機能 (ビジュアルフィデューシャル、グラップルフィクスチャ、メカニカルフィーチャ、グラップフィーチャ、システム故障時のサービスもしくは軌道離脱を容易にするアイテムなど) の実装を設計時に盛り込んでいるか？
- はい (0.5 ポイント)
 - いいえ

- 11.7. 衛星の設計に標準化インターフェースが組み込まれているか？
- はい (0.5 ポイント)
 - いいえ
- 「はい」の場合、いずれであるか具体的に記述すること。

OOS の利用または実証へのコミットメント

- 11.8. 非接触型サポート、点検、燃料再補給、アップグレード、軌道修正・保守などの延命サービスをミッションで考慮しているか？
- はい (0.5 ポイント)
 - いいえ
- 「はい」の場合、試験検証及び妥当性確認の証拠を提出すること。

- 11.9. ミッションは、外部の ADR サービスを利用するか？
- はい。ミッションは 25 年軌道離脱ルールに準拠し、外部の ADR のための機能を有している。(0.5 ポイント)
 - はい、ミッションはアシスタントなしでの 25 年軌道離脱ルールに準拠しておらず、軌道離脱は外部の ADR にのみ依存する (現在標準に準拠していない)。(0 ポイント)
 - いいえ

「はい」の場合、契約内容を証明する書類を提出すること。

11.8 検証

SSR は、追加的なレベルの検証により裏付けられるオペレータの説明に対して、追加クレジットを付与する。下記の各項目について、どのレベルの検証を選択したかを選択すること。

補足資料がある場合は、返信と共に送付すること。また、検証のレベルがミッションの現在のフェーズまたはコンセプトにとって適切でないと考える場合、その理由を説明する簡単な記述を含めること。

- 申請書による主張：申請者は肯定的な説明を提出する。ファクタ：0.5
- 主張及び技術文書：ミッション設計の裏付けとなる技術資料を公開する。ファクタ：0.6
- 技術資料の一般公開：技術資料を政府または非営利団体に提出し、一般に公開する。ファクタ：0.8
- オーソリティー 第三者技術審査：第三者の技術専門家による適合性確認を行う。ファクタ：1.0

全てのミッションにおいて検証のレベルが適切でない/必要でない項目については、N/A を選択すること。

12 参照

- [1] Letizia F., Colombo C., Lewis H. G., Krag H., Extending the ECOB space debris index with fragmentation risk estimation. In 7th European Conference on Space Debris, 2017
- [2] Letizia F., Lemmens S., Bastida Virgili B., and Krag H., Application of a debris index for global evaluation of mitigation strategies, *Acta Astronautica*, Vol. 161, pp. 348-362, 2019. doi: 10.1016/j.actaastro.2019.05.003.
- [3] Letizia F., Lemmens S., and Krag H., Environment capacity as an early mission design driver, *Acta Astronautica*, 2020. Accepted for publication.
- [4] Braun V., Letizia F., Fuinke Q., Lemmens S., Sanvido S., DRAMA 3.0 – Upgrade of ESA’ s Debris Risk Assessment and Mitigation Analysis Tool Suite, 70th International Astronautical Congress, 21-25 October 2019, Washington.
- [5] Lemmens S., Letizia F., Space Traffic Management Through Environment Capacity.
In: Schrogl K.U. (ed) *Handbook of Space Security*. Springer, Cham, 2020.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-227869_109-1
- [6] ESA Space Debris Office, ESA’ s Annual Space Environment Report, GEN-DB-LOG-00288-OPS-SD, 2020.
https://www.sdo.esoc.esa.int/environment_report/Space_Environment_Report_lat_est.pdf
- [7] Inter-Agency Space Debris Coordination Committee, IADC Space Debris Mitigation Guidelines, Issue 1 Revision 0, IADC-02-01, 2020.

Space Sustainability Rating **Process description**

Version date: September 2022



Type: **Technical Document**
Issued by: **Adrien Saada**
Date of issue: **28/09/2022**
Latest Revision: **07/09/2022**
Linked document: **[1] SSR NDA**
[2] SSR Agreement
[3] SSR Master Methodology

This documents intends to describe the Space Sustainability Rating process from the informal approval of the operator to perform a rating, to the feedback loop phase.

The rating process is divided in three main phases:

- (i) Contractual phase;
- (ii) Input gathering phase and computation; and
- (iii) Feedback and re-computation loops

I. Contractual phase

The contractual phase sets a legal framework for performing a rating. This part of the process is crucial, as the SSR is voluntary and requests satellite operators' data to perform an assessment. Whereas the Space Sustainability Rating promotes transparency between space stakeholders, it is not mandatory for participating operators to publicly share any mission related data. In that regard, a Non-Disclosure Agreement ([1] SSR NDA), between the parties is signed in order to protect any sensitive mission information provided by the applicant to the SSR issuer used in order to compute a rating.

A rating agreement document describing the role of each party is also signed between the satellite operator and the SSR team. This document provides the basics obligations regarding the communication of data to the SSR issuer, confidentiality and intellectual property.

This initial phase is designed to ensure that SSR contractually acts as a third-party evaluator of the applicant's sustainability level. The documents ensures that the rating



issuing is performed without disclosing sensitive mission data or proprietary information used for the computation of the rating, and defines the rights and duties of each party ([2] SSR agreement). This document ensures that the results of the evaluation are the applicant's property. It is consequently the operator's decision to publicly communicate the results of the rating, which is encouraged to increase transparency and convince more operators to evaluate and enhance their sustainability level.

II. Input gathering phase and computation

Prior to any evaluation and to proceed with the assessment, it is necessary that the applicant's mission meets a minimal level of effort toward sustainability. A small list of pre-requisite questions is then submitted to the applicant as a first step in the data gathering process. If the mission does not meet one of the minimum requirements, the overall score of the operator can be limited to a lower level, even if the operator performs well in other aspects of the assessment. Or it can make it impossible to receive the rating. Therefore, in these cases it is advisable to vary the mission parameters in order to be compliant with the Space Debris Mitigation Guidelines of the Inter-Agency Space Debris Coordination Committee (IADC).

After the verification of the compliance with the pre-requisites questions, the applicant is requested to provide different information to the SSR issuer, also defined as "inputs". A list of the requested information can be found on reference ([3] SSR Master Methodology). Assistance is provided by the SSR team for the applicant to familiarize with the different rating inputs and requirements. Once all of the latter are available to the SSR issuer, the computation of the score can be performed.

It shall be noted that at the date of publication of this document, the "mission index" module is computed by the European Space Agency, and the "Detectability, Identification, and Trackability" module is computed by the space enabled research group at MIT. The input relative to these modules are then shared to these organizations. The data shared with these organizations is also protected by Non-Disclosure Agreements and the exchange of information is performed using secured servers located in Switzerland.

III. Feedback and re-computation phase

After the first computation of the score, results are communicated to the applicant and based on the rating score, a badge is awarded to the applicant (*Figure 1*) as well as a rating certificate (*Figure 2*). These documents are acting as formal recognition of the applicant participation and outcome in a rating.



Figure 1: Space Sustainability Rating badges (Tier score)



Figure 2: Rating certificate for a simulated mission

Alongside the results, the SSR team also issues a score analysis and recommendation report, allowing the applicant to have a more detailed understanding of the score of each module, and to identify areas for improvement.

In the scope of this report, a separate analysis is performed by the SSR team including modifications of the applicant's input according to recommendations that could be implemented to the mission. A projected score is computed including this new set of recommendations and is compared to the initial score.

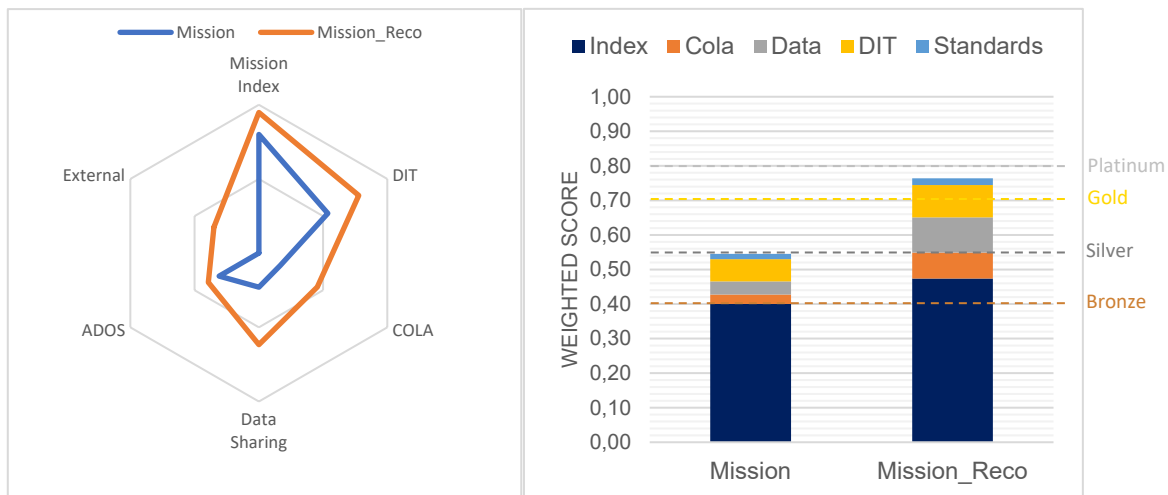


Figure 3: Module score comparison between a mission and the projected scenario including recommendations

Based on the recommendation report, the operator can decide to incorporate any recommendations into the mission. In that case, a score recompilation is performed by the SSR issuer to account for the operator's effort and the new score is issued. The SSR goal is to allow the operator to identify areas for improvement as well as incentivize to implement the currently advised best-practises. By performing recompilation of the score in case of inclusion of a recommendation, operators can reach higher scores, ultimately resulting in more sustainable behaviours.

IV. Process summary, tasks description

Figure 4 summarizes the process of performing a rating. Based on beta-testing and first ratings, it has been noted that a rating is usually computed within 4 weeks from the initiation of data collection (excluding the contractual phase). The most time-consuming step being the correct completion of the input file as the operators need to familiarize with the SSR methodology and understand what information is expected. After a first rating computation, the recompilation of a score is relatively straightforward, depending on the amount of input change, allowing fast feedback loop between the applicant and the SSR team.

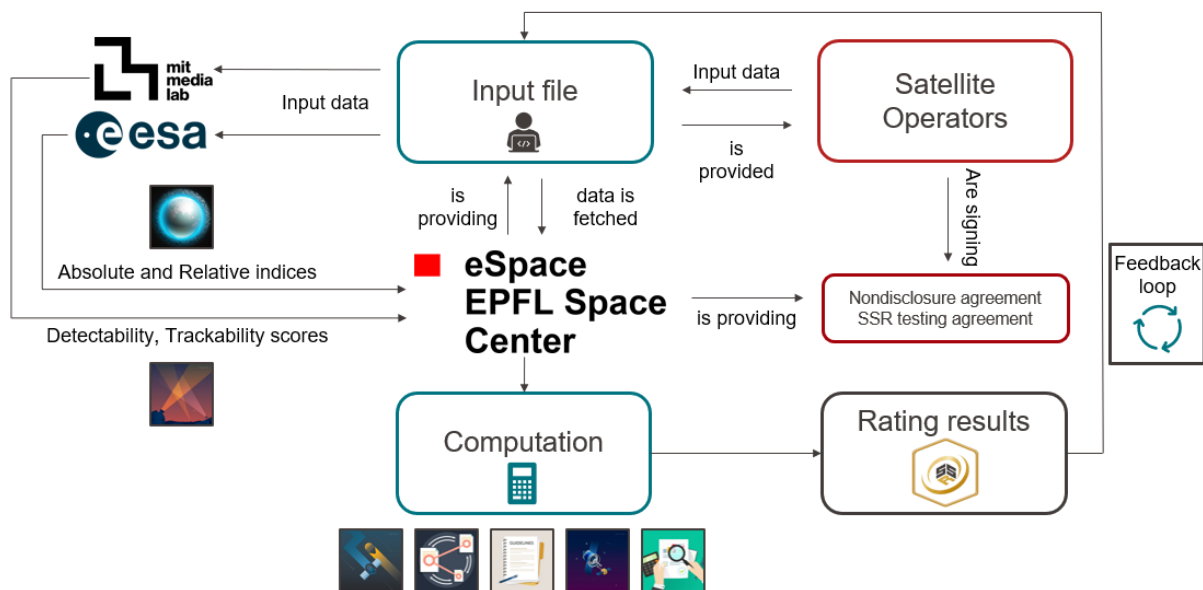


Figure 4: SSR process summary

Here below are summarized the steps, tasks and milestone to complete a rating

- **Phase 0:** Contractual Phase (Timeline depending on the operator responsiveness)
 - o Signature of the SSR Agreement
 - o Optional: Signature of a Non-Disclosure Agreement
- **Phase 1:** Data gathering and verification assessment (Timeline depending on the applicant responsiveness and amount of verification needed)
 - o Kick-off meeting: 1 hour technical presentation by the SSR team on the necessary data needed to perform a rating
 - o Verification to the compliance with the pre-requisites questions
 - o Completion of the data input form by the applicant
 - o Optional: Progress meeting(s) for the Space Sustainability Rating team to provide any clarification deemed necessary by the applicant
 - o Optional: The SSR team might request of additional documentation or information to support the applicant's input data
 - o Milestone: Validation by the SSR team of the correct completion of the rating input form, including the verification level
- **Phase 2:** Computation (indicative timeline: about 10 days, depending on the type of mission)
 - o SSR team communicates of the necessary information to MIT and ESA for computation of their respective modules (using a **secured** platform, servers located in Switzerland)
 - Mission Index data to ESA
 - DIT data to MIT
 - o Computation of the module scores and aggregation into a single score by the SSR team
 - o Optional: Preliminary results sharing from the SSR team to the applicant (no



preliminary scores shall be publicly shared by the applicant at this stage)

- **Phase 3:** Results communication and feedback loop
 - o Scoring results communication from the SSR team to the applicant
 - o Deliverable: SSR scores document, certificate, communication material (rating badge) and feedback report including:
 - Score of each modules with comments
 - Analysis of the possibility for improvement through recommendations
 - Analysis of a projected score including the recommendations
 - o Optional and recommended: implementation of some or all recommendations by the applicant and recompilation of the score by the SSR team. This optional step can be requested several times, the SSR team can support the applicant to publicly communicate around a potential score increase.

Space Sustainability Rating

プロセス説明

Version date: 2022 年 9 月

Type: Technical Document
Issued by: Adrien Saada
Date of issue: 2022 年 9 月 28 日
Latest Revision: 2022 年 9 月 7 日
Linked document: [1] SSR NDA
[2] SSR Agreement
[3] SSR Master Methodology

本資料は、オペレータがレーティングを受けることが内定してからフィードバックループフェーズまでの Space Sustainability Rating のプロセスを述べたものである。

レーティングプロセスは主に 3 つのフェーズに分けられる。

- (i) 契約フェーズ
- (ii) インプットデータ収集・スコア計算フェーズ
- (iii) フィードバック・スコア再計算フェーズ

I. 契約フェーズ

契約フェーズはレーティングを行う上での法的枠組みを整えるフェーズである。本フェーズは、SSR が任意であり、且つ、査定を行うために衛星オペレータのデータを要求することから重要である。SSR がステークホルダー間の透明性を促進する一方で、オペレータがミッション関連データを公表することは必須ではない。従って、レーティングを計算するために申請者から SSR 発行者に提供される機微なミッション情報を守るため、組織間で NDA が締結される (Linked document, [1] SSR NDA)。

衛星オペレータと SSR チームの間では、それぞれの組織の役割を記載したレーティング合意書も締結される。この合意書には、SSR 発行者とのデータのやり取りや守秘義務、知的財産に関する基本的な責務が記載されている。

この初期フェーズは、SSR が申請者のサステナビリティレベルの第三者評価機関として契約に基づいて対応することを保証するために設けられている。上述した文書では、レーティングの計算に使用される機微なミッションデータや機密情報の開示なしでレーティングの発行が行われることを保証し、各組織の権利と義務を定義している (Linked document, [2] SSR Agreement)。また、SSR 同意書は、評価結果が申請者の財産であることを保証している。従って、レーティング結果を公表するかはオペレータの判断となる。レーティング結果の公表によってオペレータの透明性が高まり、サステナビリティレベルの評価、向上を行うオペレータが増加することが期待される。

II. インプットデータ収集・スコア計算フェーズ

評価と査定に進む前に、申請者のミッションがサステナビリティに対する努力の最低レベルを満たしている必要がある。そのため、データ収集プロセスの第一段階として前提条件の質問が申請者に送付される。申請者のミッションが必要最低限の要件を1つでも満たしていない場合、他の評価項目が優れていても全体スコアが下がってしまう。また、最悪の場合、レーティング自体を受けることができなくなってしまう。この場合、「Space Debris Mitigation Guidelines of the Inter-Agency Space Debris Coordination Committee (IADC)」に準拠するようにミッションパラメータを変更することが勧告される。

前提条件の質問を満たしているかが検証された後、申請者は「インプット」と呼ばれる情報を SSR 発行者に提示するよう要求される。要求される情報のリストは参考文献 (Linked document, [3] SSR Master Methodology) で確認することができる。また、申請者が様々なレーティングインプットや要求に習熟するように SSR チームが支援してくれる。SSR 発行者が全ての資料を受領後、スコア計算が開始される。

本資料の出版時点では、ミッション指標 (Mission Index) モジュールは欧州宇宙機関 (ESA: European Space Agency) によって計算され、検出性・識別・追跡性 (Detectability, Identification, and Trackability) モジュールはマサチューセッツ工科大学 (MIT: Massachusetts Institute of Technology) の Space Enabled Research Group によって計算される。これらのモジュールに関連するインプットデータは上記の組織に共有される。また、これらの共有データも NDA で保護され、情報の交換にはスイスにある安全なサーバが使用される。

III. フィードバック・スコア再計算フェーズ

一次スコア計算後、結果が申請者に連絡され、レーティングスコアに基づいてレーティングバッジ (Figure 1) とレーティング証明書 (Figure 2) が申請者に授与される。これらは申請者のレーティングへの参加とその成果を公式に認定する書類となる。



Figure 1: Space Sustainability Rating badges (Tier score)



Figure 2: Rating certificate for a simulated mission

申請者が各モジュールのスコアについてより詳細に理解し、改善箇所を認識できるように、SSR チームはレーティング結果と共にスコア分析とリコメンデーションレポートを発行する。

このレポートの作成に当たり、SSR チームは申請者が推奨事項をミッションに反映した場合の評価を実施し、推奨事項を含めて計算された予想スコアが一次スコアと比較されて記載される。

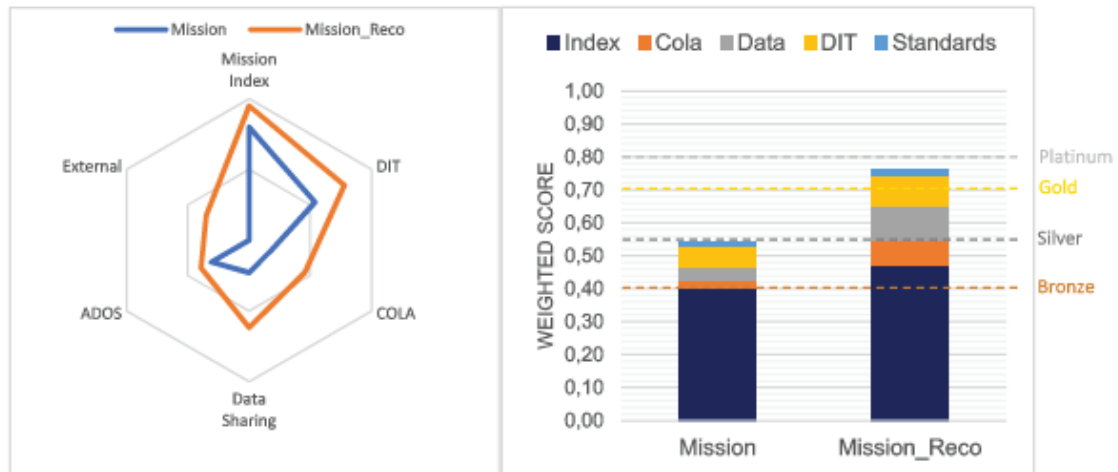


Figure 3: Module score comparison between a mission and the projected scenario including recommendations

オペレータは推奨事項をミッションに反映するかをリコメンデーションレポートに基づいて判断することができる。ミッションへの反映が行われる場合、SSR チームによって、オペレータの努力を踏まえたスコアの再計算が行われ、新しいスコアが発行される。SSR の目的は、オペレータにミッションの改善余地を認識してもらい、現在推奨される最善策をミッションに反映するインセンティブを与えることである。推奨事項を反映した場合のスコア再計算を行うことで、オペレータはより高いスコアを取得できるようになり、最終的に更にサステナブルな行動につながる。

IV. 各プロセスにおける作業内容のサマリ

Figure 4はレーティングプロセスを要約したものである。ベータテストと一次レーティングに基づき、レーティングは通常、データ収集開始から4週間以内（契約フェーズを除く）に計算される。オペレータは、まず SSR のレーティング方法やどのような情報を提示すればよいかを理解する必要があるため、インプットファイルを正しく完成させることが最も時間を要する作業となる。一次レーティング計算後のスコア再計算は比較的単純なプロセスであり、インプットデータの変更量によるが、申請者と SSR チームの間の迅速なフィードバックループを可能にする。

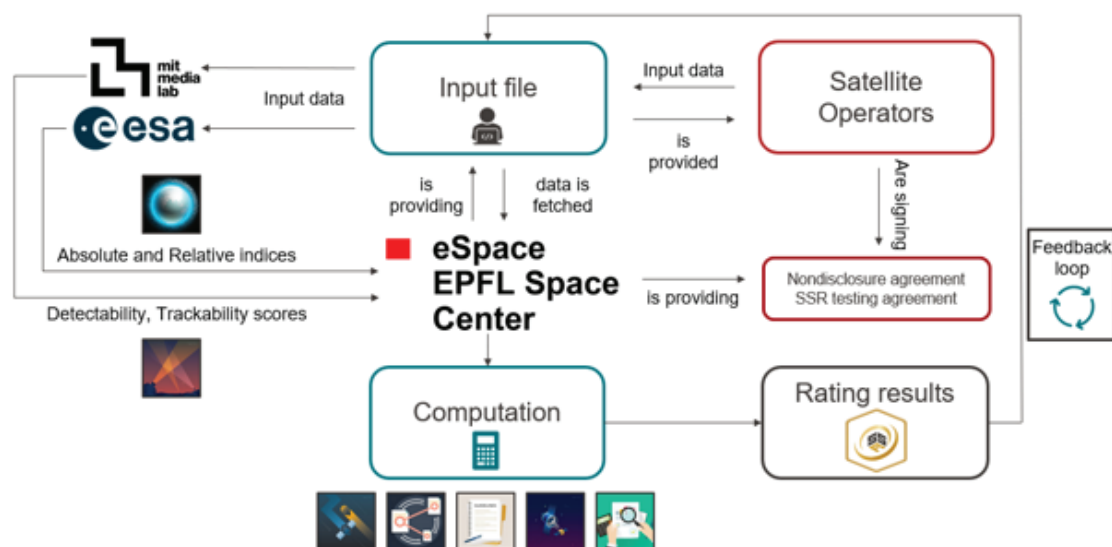


Figure 4: SSR process summary

以下にレーティング完了までのステップ、タスク、マイルストーンの要約を示す。

- **Phase 0:** 契約フェーズ（所要期間は申請者の対応の早さによる）
 - SSR 合意書への署名
 - オプション： NDA への署名
- **Phase 1:** データ収集と検証評価（所要期間は申請者の対応の早さと必要な検証の量による）
 - キックオフミーティング： SSR チームが、レーティングを行う上で必要なデータに関する技術的な説明を1時間程度行う。
 - 前提条件の質問を満たしているかの検証
 - 申請者によるデータインプットの完了

- オプション： 申請者からの説明が必要な事項がある場合、SSR チームに対して進捗ミーティングを行う。
- オプション： SSR チームが、申請者のインプットデータを補足する追加の資料や情報を要求する可能性がある。
- マイルストーン： SSR チームが、レーティングインプットフォームが検証レベルを含め正しく入力されているかの妥当性を確認する。
- **Phase 2**: スコア計算（ミッション内容によるが、所要期間は 10 日間程度を想定）
 - SSR チームは MIT と ESA にそれぞれのモジュールの計算に必要な情報を連絡する。（スイスにある安全なサーバを使用）
 - ◇ ESA： ミッション指標データ
 - ◇ MIT： 検出性・識別・追跡性データ
 - SSR チームによるモジュールスコアの計算と総合スコアへの合算
 - オプション： SSR チームから申請者への一次結果の共有（この段階では申請者による一次スコアの公開はしてはならない）
- **Phase 3**: スコア結果の連絡とフィードバックループ
 - SSR チームから申請者にスコア結果を連絡する。
 - 成果物： 以下の内容を含む SSR スコア、レーティング証明書、フィードバックレポート：
 - ◇ それぞれのモジュールのスコアとコメント
 - ◇ 推奨事項によるスコア改善の可能性
 - ◇ 推奨事項を反映した場合の予測スコア
 - オプションと推奨： 申請者による一部あるいは全ての推奨事項の反映と SSR チームによるスコアの再計算。申請者がスコアの向上可能性を公表するのを SSR チームがサポートするため、本ステップは複数回要求することができる。