

欧米における宇宙状況認識の動向

1. はじめに

現在、欧米を中心に宇宙状況認識（SSA：Space Situation Awareness）というコンセプトが脚光を浴びている。我が国においても、平成21年1月に防衛省から出された「宇宙開発利用に関する基本方針」において、安全な宇宙開発利用を支援するための方策の一つとして取り上げられている。このSSAとはいったいどのようなコンセプト（システム）で、なぜ各国が争って開発を加速しているのであろうか。本稿では、「欧米における宇宙状況認識の動向」と題して、まず、米国と欧州の宇宙空間監視の現状と、宇宙空間において宇宙物体間の衝突を回避するための宇宙交通管理システム（STM：Space Traffic Management System）の動向について述べ、次に、我が国のSSA、STMへの対応策について提案する。

2. SSAシステムとは

(1) 概要

SSAシステムとは、自国の宇宙インフラの健全性を維持し、宇宙空間における他国からの脅威を認識するシステムで、次に示す異なる機能を有する複数のシステムの総称である。

①衝突予測システム

宇宙空間におけるデブリまたは衛星との衝突予測が可能なシステムで、下記の事例に対処が可能となる。

<事例>：イリジウムとロシア衛星の衝突

2009年2月11日、シベリア上空800kmでイリジウム（66個の極軌道衛星のコンステレーションで通信サービスを行っているシステム）とロシアの古い衛星（1993年に打上げられて軍事通信に使われていたが1995年以来、通信、制御の機能は喪失）が衝突した。衝突の結果

発生した破片は、2月27日現在で414個がカタログに記載されているが、これらの破片は、イリジウムの他の衛星を始めとして地球観測衛星等の多くの衛星に2次衝突の危険性をもたらしている。

なお、中型衛星が1cm以上のデブリに衝突する可能性は100年に1回とされているので、100機の衛星が飛行すれば、デブリが衝突する確率は1回／1年となる。

②脅威認識システム

宇宙空間に存在する攻撃、妨害、情報収集等の能力のある脅威の動静を地上及び宇宙空間から確認する能力、及び脅威の探知、追尾、認識機能を有するシステムで、下記の事例に対処が可能となる。

<事例>：中国による衛星破壊実験（ASAT）

2008年1月12日7時28分、中国は、四川省西昌付近の高度約865km（極軌道）を周回する中国の気象衛星「風雲1号C（FY-1C）」を、弾道ミサイル搭載の対衛星兵器を用いて破壊する実験を実施した（打上げ日：1999年5月10日）。破壊された衛星は多数のデブリを発生しており、10cm以上のデブリの数が少なくとも650個に達すると判明した。1mm以上の大きさは200万個以上との試算結果も一部で出されている。

③宇宙天気予報システム

太陽活動に伴う宇宙天気予報より得られたデータを分析することで、作戦・対抗策等の意思決定に使用するシステムで、下記事例に示す情報を提供する。

<事例>：宇宙天気予報の国際ネットワーク（ISES）

海外における宇宙天気情報（人類の健康や、人工衛星や地上の送電設備といった社会インフ

ラに影響を与えるような宇宙放射線や地磁気嵐などの宇宙環境変動の情報)については、国際宇宙環境情報サービス (ISES: The International Space Environment Service) によるものが国際的には主流であると考えられ、現在、世界12カ

国に地域予報センターが設けられている。我が国における宇宙天気予報情報については、独立行政法人情報通信研究機構 (NICT) の宇宙天気情報センター (SWC、Japan Space Weather Information Center) が運用されている。

参考：SWCが発信する情報の種類

	コンテンツ名	内 容
1	宇宙天気情報	概況・予報、太陽活動、地磁気活動、プロトン現象、高エネルギー電子、電離層、活動度指数等 (これらは、登録者へ情報メール配信されている。)
2	最新宇宙天気データ	<ul style="list-style-type: none"> 無線通信ケア情報：宇宙天気が無線通信に及ぼす影響度を配信 衛星運用ケア情報：宇宙天気が衛星運用に及ぼす影響度を配信 電力・磁気探査ケア情報：宇宙天気が電力・磁気探査に及ぼす影響度を配信 GPSケア情報：宇宙天気がGPS測量などに及ぼす影響度を配信 航空機関係ケア情報：宇宙天気が航空機に及ぼす影響度を配信
3	同 上	黒点数と波長が10.7cmのマイクロ波の太陽からの電波のフラックスの毎日の値、月平均値、予測値を掲載
4	同 上	太陽の自転周期27日に合わせたデータプロットを掲載。コロナホールからの高速の太陽風のように太陽の同じ領域からの影響はこのプロットを使い予測することが可能。
5	同 上	<ul style="list-style-type: none"> 国内での電離層観測、データ提供業務 南極昭和基地における電離層観測 東南アジア域における電離層じょう乱監視システムの構築 世界各国の電離層データの管理・提供 電離層擾乱発生予測を目的とした研究開発
6	宇宙天気予報	フレア予報、地磁気予報、プロトン現象の予報
7	宇宙天気ニュース	NICTの宇宙環境計測グループによる太陽フレア・磁気嵐・オーロラ活動など、宇宙天気の最新情報提供

出所：宇宙天気情報センターWEBサイト (<http://swc.nict.go.jp/>)

(2) SSA運用イメージ

SSAというコンセプトは、米国における軍事要求により誕生した。ミッション要求としては、地上システムと宇宙システムからデータ情報を収集し、Monitor (監視する)、Correlate (相関をとる)、Exploit (利用、促進する)、Fuse (融合し一体化する) というサイクルを回して知識

情報化し、ユーザ (部隊等) に予報、脅威分析、警告・警報等の情報を与えることである。

米国では、米軍統合宇宙作戦センター (JSPOC) が中心となり、地球軌道にある物体の検知、識別、追跡等を実施している。世界規模でスペースデブリを監視するシステム「宇宙監

視ネットワーク（SSN：Space Surveillance Network）」は、北半球に点在し（レーダ／光学方式システムからなる）、米国宇宙司令部のミッションの一つとして、以下の業務を行っている。

ア) 宇宙機の大気圏再突入時刻、場所の予測、イ) 再突入物体とミサイル攻撃との識別、誤った警戒発令の防止、ウ) 宇宙機の現在位

置の把握、エ) 新しい人工物体の検出、オ) 宇宙機のカatalogの維持、カ) 再突入物体の所有国の識別、キ) スペースシャトルや国際宇宙ステーションとの接近情報のNASAへの提供

SSAシステムの運用イメージを、下記に示す。

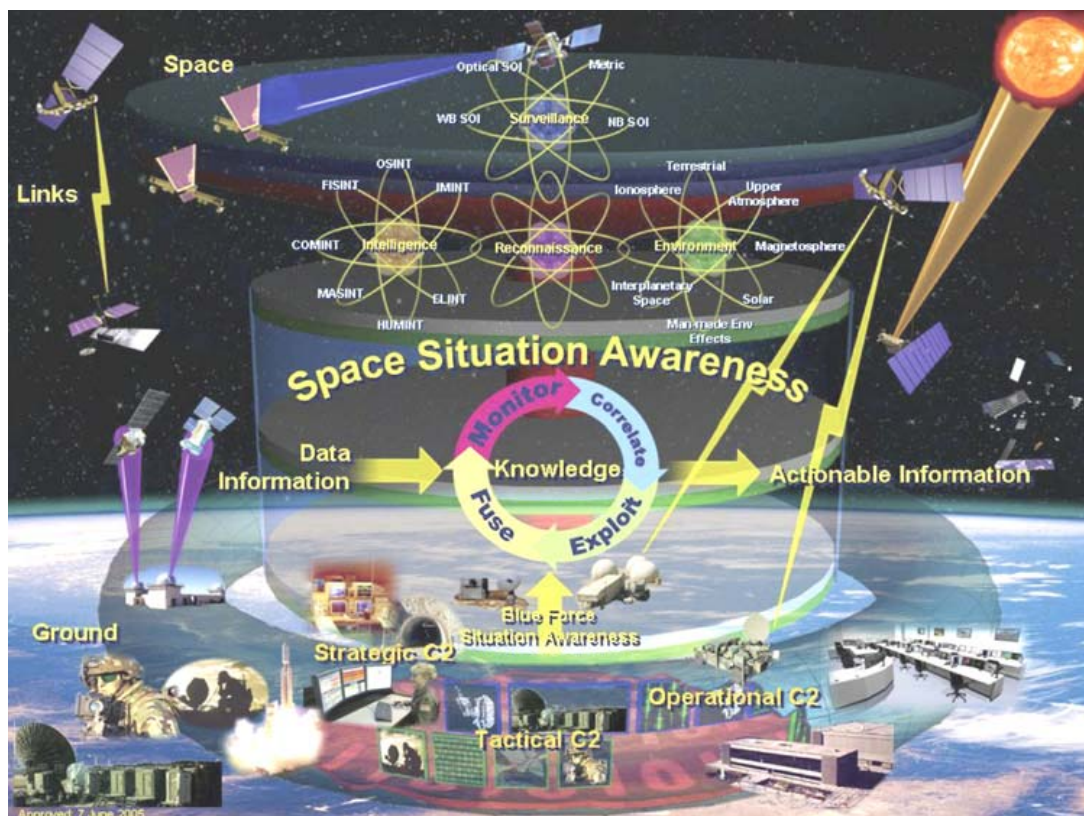


図1 SSAシステムの運用イメージ

(3) SSAシステムアーキテクチャ

SSAセンターの役割は、地上システム及び宇宙システムから得られる宇宙物体の各種情報を一旦集約し、ユーザ要求と国家安全保障要求とのバランスを踏まえ、どのユーザにどの程度の情報をどのような形で提供するかを判断することである。SSAシステムのシステムアーキテクチャを、次に示す。

3. 米国のSSA監視状況

米国では、SSAシステムとして地上システムと宇宙システムを開発・運用している。地上システムにおいては、米ヘイスタックレーダは、自動追尾が可能で、高度1,000kmにおいて1cm程度の物体の識別が可能である。光学システムは、マウイ島に3.6m級の光学望遠鏡を有する。宇宙システムにおいては、SBSS衛星を開発中である。

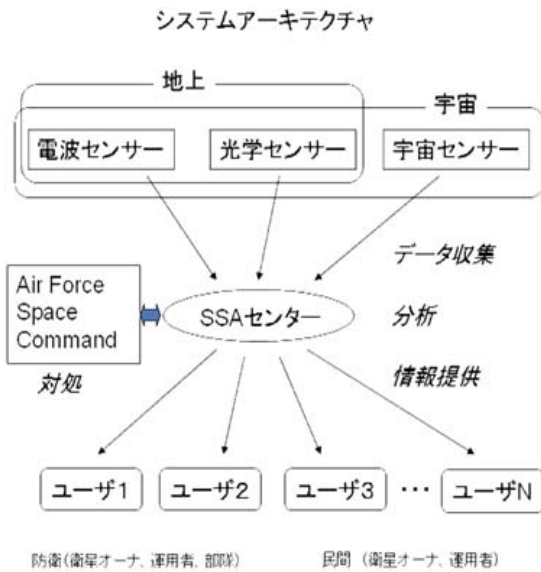


図2 SSAシステムアーキテクチャ

(1) 地上システム

地上システムは、レーダ方式と光学方式より構成される。

①レーダ方式SSAシステム

レーダ方式は、電磁波（レーダ波）を対象物に向けて照射し、その反射波を測定することにより、対象物までの距離や方向を明らかにする方式であり、SSNではBi-static方式、Parabola方式、Radar-Fence方式の3方式が利用されている。Bi-static方式とは、レーダ波の送信機と受信機を離して設置し、送受信の時間差により距離を測る方式である。Parabola方式とは、方物曲面をした反射器を持つ凹型アンテナを持ち送受信を1つのアンテナで行う方式である。Radar-Fence方式とは、地上に小型レーダを平面上横一列にフェンス状に並べて宇宙空間の対象物を監視する方式で、機械的な首振り動作を必要としない方式である。米国におけるSSA（レーダ方式）地上施設を、下表に示す。

表1 米国におけるSSA（レーダ方式）地上施設

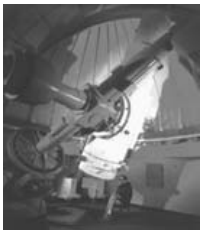


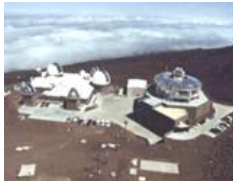
	AN/FPS-85@ Florida	ALTAIR@ Western Pacific	NAVSPASVR@ CA
SSN 設置例			
方式	Bi-static方式	Parabola方式	Radar-Fence方式
長所	多くのビームを用いることにより、同時刻に多くの物体を追跡可能	狭ビームかつ大電力。静止軌道にてバスケットボール大の物体を追跡可能	30,000kmまでの物体は追尾可能。また、大きさも精度良く取得可能
短所	レンジに制約がある。一般的に数千kmまで。	1回に1物体しか追尾できず、物体に合わせてパラボラを移動させる必要がある。	同時刻に複数の物体が横切るとエコーを生じ、位置精度の低下を招く可能性がある。

②光学方式SSAシステム

光学方式は、天文望遠鏡と同じ主鏡の光軸上前方に双曲面の凸面鏡（副鏡）を対向させ、主鏡の中央の開口部から鏡面裏側に光束を取り出して接眼レンズに導く「カセグレン方式」が主流である。対象物体の距離や大きさは、

同一時刻の2カ所以上の地上施設のデータ（地上施設間の距離と地上から物体までの距離と大きさ）をもとに三角測量方式で求めることが可能である。米国のSSA（光学方式）地上施設を、下表に示す。

表2 米国のSSA（光学方式）地上施設

	MODEST	Socorro	Diego Garcia	Maui
所 属	NASA (ミシガン大学)	SSN	SSN	SSN
口 径	0.91m	1.2m×2個 0.4m×1個	1.2m×3個 0.6m×1個	3.6m×1個 1.6m×1個 1.2m×3個
望遠鏡種類	Curtis Schmidt	Cassegrain	Cassegrain	Cassegrain
CCD	2048×2048	—	—	—
FOV	1.3 deg×1.3 deg	1.2m : 2 deg	1.2m : 2 deg 0.6m : 6 deg	3.6m : 0.2 deg 1.6m : 1.2 deg 1.2m : 2 deg
限界等級	18等級 (露出：5秒)	—	—	—
設置場所	チリ Cerro Tololo	Socorro	Diego Garcia 英国領（インド沖）	Maui島 ハワイ州
外 観				

(注) CCD：電荷結合素子(Charge Coupled Device)，FOV：視野(Field of View)

(2) 宇宙システム

①SBSS衛星

2006年1月に中国が行った衛星破壊行為が発端となり、軍事のみならず民事、経済など様々な分野において必要不可欠な存在となっている宇宙システムを保護するため、宇宙物体を監視する活動が今後重視されると予想されている。地上からの物体追跡能力に加え、

宇宙空間において軌道上物体を監視するシステムを開発するプロジェクトを総称してSBSS（Space-Based Space Surveillance System）という。初号機のSBSS-1は、2009年にMinotaur-IVで打上げ予定であり、二号機以降の計画は不明である。なお、SBSSを構築するサブシステムには、下記に示す、監視対象の事故衛星

やデブリなどの宇宙物体の事故調査を行う MiTEx 衛星や、衛星への燃料補給、修理などを行う技術の軌道上実験を行う Orbital Express 衛星などの実証衛星がある。

② MiTEx 衛星

MiTEx (Micro-Satellite Technology Experiment) は、米国政府の故障した早期警戒衛星 (2007年10月打上げ、2008年11月頃以降通信途断) に接近させ原因調査を実施した衛星である。MiTEx は、2006年に静止軌道に投入された重量255キロのマイクロ衛星であり、デルタロケットに MiTExA と MiTExB の2機が搭載されて2機同時に軌道投入された。

③ Orbital Express 衛星

Orbital Express は、ASTRO と NEXTSat/CSC と呼ばれる二つの衛星から構成され、衛星への燃料補給、修理、機能付加に必要な技術の軌道上実験衛星 (Orbital Express Advanced Technology Demonstration) であり、2007年3月に、ASTO が NEXTSat/CSC と無人でランデブー及びドッキングし、燃料補給、バッテリー交換などの実験に成功した。

4. 欧州の SSA 監視状況

(1) 欧州の SSA の目的

欧州の SSA の目的は、欧州宇宙システムの保護、宇宙における経済活動の進展、国際協力の進展、独自のモニタリングによる国際宇宙条約 (平和利用) の履行、そして宇宙交通管理システム (STM : Space Traffic Management) の形成等である。欧州の SSA システムは、既存の観測システムを用いてスペースデブリ観測、気象観測等の目的に特化して使用しているが、軌道上の状況を監視できる能力を有しているため、既存システムの連携による SSA システムの実現について検討している段階である。例えば、欧州における世界最高性能を有するレーダ観測装置 FGAN (独) は、civil

agency である応用自然科学研究協会が所有しているが、予算の96%は独防衛省 (MoD) から拠出されており、これまでは科学的でデータの取得を行ってきたが、今後、MoD が SSA 監視用として“運用”するかどうか現在検討中である。

(2) ハーグ欧州閣僚級理事会 (2008年11月) までの経過と決定事項

当初はフルプログラムとして5年、1億ユーロ (最大3億ユーロまで可能) が提案されたが、欧州の昨今の経済環境、宇宙天気のスコープの変更により、提案は55百万ユーロとなった。内容は主に研究 (ペーパーワーク) であり、一部のハードウェア (レーダシステム) の調達を含む。主眼はデータポリシー、データセキュリティのありかたの研究である。最終的に、この55百万ユーロの提案は参加国のオプションプログラムとして11カ国が49.5百万ユーロを供出することになった (スペインが最大の拠出国)。欧州における代表的なレーダ/光学観測装置を、下記に示す。

5. 宇宙交通管理システム (STM) の動向

(1) STM の概要

宇宙交通管理システム (STM : Space Traffic Management System) とは、宇宙空間において宇宙物体間の衝突を避けるためのシステムであり、SSA で取得した各種データを使用する。生命科学、社会科学を含む宇宙科学全般の研究に携わる世界各国の学者・研究者等から選ばれた人々によって構成される国際宇宙航行アカデミー (IAA : International Academy of Astronautics) の報告書では、STM は次のように4つの要素で定義されている。

ア) 情報収集、イ) 通報システム、ウ) 実施的交通規制 (有人飛行含む打上げ安全規則、軌道の選択などの安全区域についての規則、

表3 欧州におけるレーダ観測装置




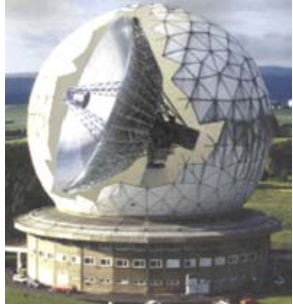



	Globus II	GRAVES	FGAN (TIRA)
所 属	ノルウェー： Norwegian Intelligence Service	仏軍（運用はONERA）	独：応用自然科学研究協会
探知能力	40,000km	1,000km $\phi=1m$	1,000km $\phi=2cm$
周波数帯	X帯（9.5～10.5 GHz）	VHF帯	L帯（Tracking） Ku帯（SAR imaging）
空 中 線 開 口	パラボラアンテナ $\phi=27m$	フェーズドアレイ 送信：15 m × 6 m 受信： $\phi=60m$	パラボラアンテナ $\phi=34m$
送信出力	200 kW	不明	L帯：1MW Ku帯：13kW
送受信モジュール	N/A	不明	N/A
設置場所	Vardø	Transmitter：Dijon Receiver：Apt	ドイツ・ボン郊外
外 観		 Transmitter  Receiver	

表4 欧州における光学望遠鏡

	ESA Space Debris Telescope	SPOC	ROSACE
所 属	ESA	French DGA	CNES
口 径	1m	不明	0.5m
望遠鏡種類	Ritchey-Chrétien	不明	Newton
CCD	4×4 array, 2048×2048	576×384	1024×1556
FOV	0.7deg×0.7deg	50deg×50deg	0.3deg×0.4deg
限界等級	20等級（露出：2秒）	6～7等級	19等級
設置場所	Tenerife	Toulon and Odeillo	不明
外 観			

(注) CCD：電荷結合素子 (Charge Coupled Device), FOV：視野 (Field of View)

軌道上運用における具体的な通行規則、軌道変更の優先権規則、静止軌道、低軌道衛星の運用)、エ) 実際の宇宙交通管理メカニズム

(2) 欧米の動向

STMに関する欧米の動向を、下記に示す。

① フランス国立宇宙研究センター (CNES) の動向

大量のデブリを発生させたイリジウム衛星とロシアのCosmos-2251の衝突により、世界各国の宇宙開発国が協力し、今回のような衝突の再発を防止するSpace Traffic Management Agencyを設立すべきだとの声が欧州を中心に上がってきている。その背景には、米空軍の軌道上衝突に関する情報配布に問題があるのではないかと疑念があるためと言われている。CNESでは、米空軍がリリースするデータは極めて不正確であり、米空軍が生データだけでも提供してくれていれば、衝突の危険性をより詳細に解析でき、イリジウム或いはCosmosが自国衛星であれば、衝突を回避できていたかもしれないと述べている。(CNESでは、米空軍提供のデータだけでなく、独自の地上レーダによるデータを併用し、衝突の可能性を監視している)。

② 国際宇宙航行アカデミー (IAA) の提言

2006年、国際宇宙航行アカデミー (IAA : International Academy of Astronautics) は、欧米の専門家による、宇宙交通管理システムの提言を行った。この中で、現状認識と2020年までの展望について述べ、宇宙交通管理システムの重要性を強調した。主な内容を、下記に示す。

<現状認識>

① 大多数の運用衛星には軌道を変える能力がなく、その能力を有する少数の衛星でも軌道変更には即時性や回数において限界がある。

② 1980年以降、打上げ数は若干の低下が見られるが、残存物体 (デブリとなったロケットの上段部や破裂した衛星など) には増加傾向が見られる。

③ 宇宙デブリは、継続的に大量に増加 (現在1cm以上の物体は100,000個以上) しており、殆どのものがカタログ化 (SSNに登録され軌道・大きさがデータとして管理) されていない。アメリカのSSN (Space Surveillance Network) は、デブリだけではなく、世界のすべての打上げ機 (ロケット、衛星) をモニタリングしている。このうち、軍事衛星は公開の義務がないため公表されていない。

④ カタログ化される宇宙物体の数は、着実に増えている (現在10cm以上の物体は9,000個以上がカタログ化されている)。

⑤ 運用衛星の数は、カタログ化された物体の6~7%を占めている。

⑥ 宇宙監視能力は米国が支配しているが、ロシアや欧州も続いている。米国は、任意的ではあるがデータや処理された情報などを提供している。

⑦ 現在の宇宙監視システムの能力や正確度は、小物体を対象にすることは難しく、すべての宇宙活動に障害を回避する為のサービスを提供できていない。

⑧ 宇宙の天気に関する情報はまだ限られているが、宇宙物体の運用と、デブリ環境の予測には重要である。

⑨ 一定の監視や宇宙天気に関する情報は、宇宙交通管理システムを実行する為にとっても役立つ。

<2020年までの展望>

① 大気密度の変化により起こる、宇宙物体の運動予測の誤差や、予測された軌道上位置の誤差などは、経過時間の2乗で増加する。この為、すべての宇宙物体の位置を、高い

精度で組織的に監視する必要がある。

- ②完全／部分的な再使用型打上げシステム（RLV：Reusable Launch Vehicle）の運用の見通しはあるものの、2020年まではRLVの1,000km以下での打上げミッションは限られている。
- ③有人宇宙飛行は、過去20年間においては全打上げの13%を占める。これは、今後の技術開発と共に増加するであろう。しかし、劇的に増加するのは2020年以降である。
- ④安全性が確保されれば宇宙観光客を含む弾道有人飛行の数が増加する。
- ⑤宇宙物体を回収するための導電性のひも（テザー）、高度20km程度に滞空して監視・通信支援業務を行う成層圏飛行船、将来導入されるかもしれない宇宙エレベータなどの技術は、打上げや再突入時のルールが確立された時に、特に考慮すべき分野である。

6. おわりに（まとめ）

以上述べたように、SSA、STMについては、日本ではなじみの薄い新しいコンセプトではあるが、わが国としても、宇宙開発先進国としての立場を維持するためには、国連を中心とし各国と連携をしてSSA、STMを推進することが避けられない状況にある。以下に、我が国におけるSSA（STMを含む）の推進方策について私見を述べる。

(1) 現状

①現在、世界のレーダ観測を比較すると、独FGANと米ヘイスタックレーダが探知能力として、高度1,000kmにおいて1～2cmの物体が識別できる世界最高レベルにある。我が国は、比較的大きなデブリとの衝突予測である場合は、KSGC（上斉原宇宙ガードセンタ）レーダを利用した独自の観測により衝突の有無を見極めることが出来るが、微小デブリとの衝突が予測された場合は、TIRAレーダ

（FGAN）などの海外観測システムに頼らざるを得ない状況にある。

②我が国のデブリ観測（BSGC：美星宇宙ガードセンタ）における光学観測の等級は、約18等級である。ESAやロシアについては約20等級程度まで観測でき（等級が5等級下がるごとに明るさは百倍暗くなる）、この2等級の違いは非常に大きい。一方、天文観測分野においては、光径2mの世界最大の公開望遠鏡を持つ西はりま天文台のようなデブリ観測に使用可能な大型天文台施設を日本各地に保有している。

③H-2A#15号機で打上げられ、通信が途絶えたソラン社の衛星「かがやき」の軌道の確定・追跡ができない。

④東アジアからの飛翔体が日本上空を飛んでいても、必ずしも正確な飛翔情報（形状など）データを取得できるとは言い難い。

⑤STMについては、日本からの情報の発信やSTMに関する組織への参画はない。

(2) 推進方策

①現状で述べた③④項を考慮すると、まず、少なくとも日本が打上げる衛星については大学衛星（10センチ角クラス）についても追跡・監視能力を持ち、次にSTMを推進できる程度の世界レベルの追跡・監視能力を構築することが必要である。

②地上から宇宙の状態を観測するレーダ系、光学系のシステム構築を優先し、宇宙での衛星による監視システムは、要素技術の開発と実証を進める。なお、光学系システム構築に当たっては、費用対効果の観点から日本各地の天文台との連携を考慮すべきである。

③デュアルユース（軍民両用）で官民共同の日本独自のSSAセンターを構築し、国際協力のあり方、データポリシー、データセキュリティ、データの発表の仕方などを検討する。

なお、観測対象は、次のように段階的に対応することが望ましい。

[第1段階]

- ・ 10cm級（軌道高度1,000km）：
現状技術の改修レベル・延長上で対処可能な技術範囲

[第2段階]

- ・ 2cm級（軌道高度1,000km）：
現状技術に開発要素を付加した技術範囲

④STMについては、世界的に見てもまだコンセプト構築の段階にあり、日本としても遅れをとらないよう、現段階から議論に参画することが重要である。

参考文献

- ・ 平成18年度 スペースデブリに関する調査報告書／SJAC
- ・ 平成19年度 スペースデブリに関する調査報告書／SJAC
- ・ 平成21年 防衛宇宙データブック／SJAC

〔(社)日本航空宇宙工業会 技術部部長 坂本 規博〕

