

宇宙からの災害リスクを 低減する宇宙状況認識

辻野 照久
客員研究官

1 はじめに

近年、宇宙環境に起因する災害リスクへの関心が高まっている。

各分野の専門家がそれぞれ宇宙環境を監視するだけでなく、広く一般にも宇宙環境がもたらす災害リスクの発生確率や防護対策などを周知していく活動が世界的に重視されるようになってきた。このような活動を「宇宙状況認識」(SSA=Space Situational Awareness)という。SSAは「宇宙環境監視」と訳されることがあるが、「宇宙状況認識」には監視した結

果を一般向けに周知する活動という意味があり、本稿では「宇宙状況認識」を用いる。

地上に災害をもたらす危険性がある宇宙からの災害リスク(以下「宇宙環境リスク」という。)は3種類に大別できる。①「宇宙デブリ」(地球を高速で周回する人工衛星やその残骸の衝突・落下による実用衛星や地上への悪影響)、②「宇宙天気」(太陽活動に起因する磁気嵐や太陽風などが軌道上の衛星や地上インフラに対して及

ぼす悪影響)、③「地球近傍天体」(地球軌道と交差する楕円形の太陽公転軌道を周回する小惑星や彗星などが地球と衝突する危険性)の3つである。

本稿では「宇宙状況認識」活動の主な対象となる「宇宙デブリ」、「宇宙天気」および「地球近傍天体」について、想定されるリスクと対応方策の研究動向について述べる。

2 宇宙環境リスクとは

宇宙環境および変動監視については、本誌2004年10月号において、太陽活動に伴う地球近傍の宇宙天気の悪化による衛星への悪影響や宇宙デブリの危険性および観測・防御・低減などの対策、さらに地球近傍小惑星の衝突の可能性などの概要を示した¹⁾。以下は主にその後の状況変化を踏まえ、地上に災害をもたらす危険性がある宇宙環境リスクのそれぞれの状況と危険性について述べる。

2-1

宇宙デブリのリスク

(1) 宇宙デブリの状況

2012年1月9日付の「Satellite Situation Report」²⁾によれば、2011年末現在の軌道上物体の登録数は38,044個で、そのうち21,723個は既に消失している。特に数の多いロシア・米国・欧州宇宙機関・フランス・日本・中国・イン

ドの物体数を図表1に示す。このようにカタログ化されている宇宙飛行物体は概ね10cm以上の大きさである。それ以下の大きさの微小な宇宙デブリの数は数十万個にも及ぶと見られ、秒速8km近い高速で地球を周回しているため1cm程度の物体であっても衝突すれば大きな衝撃を与える危険性がある。

NASAが2010年に行った調査によれば、宇宙開発が開始されてから実施された4700件以上の

宇宙ミッションのうち、10 件のミッションで発生した宇宙デブリが、カタログ化された全デブリ数の 1/3 を占めているという。デブリを最も多く発生させたミッションは、中国の気象衛星「風雲 1C (FY-1C)」(国際標識番号 1999-025A) で、2007 年 1 月 11 日の衛星破壊実験により 2011 年 6 月までに 3,217 個のデブリが発生し、2012 年 1 月時点でそのうち 3,078 個が軌道上に留まっている。これは、軌道上にあるペイロード以外の飛行物体のうち約 24% を占める。過去に打ち上げた衛星数が非常に多いロシアと米国の方が中国よりデブリ数が多いことは当然であるが、中国はたった 1 機の衛星を破壊することでこれほどのデブリ増加をもたらしたことは異例の事態であると言える。

軌道上のロケット機体の数を R、衛星由来のデブリ (運用終了したペイロードも宇宙デブリと呼ばれる場合があるがここでは除く。) の数を D、軌道上物体の合計を S としたとき、 $(R+D)/S$ が軌道上物体に占めるペイロード以外の物体の割合を示す。中国は衛星破壊実験で生じたデブリが非常に多いためにこの割合が約 97% であり、極めて高い。これに対し、欧州宇宙機関 (ESA) や日本のデブリの割合は世界平均より相当低い。米国・ロシア・フランス・インドなどは世界平均程度である。なお、ロケット機体は衛星打上げに伴って必ず発生するものであり、ペイロードの増加に伴って増加することは現時点ではやむをえない。ロケット機体の処置も含め、宇宙デブリの発生を抑制し、安全に消滅させることは宇宙活動を行う各国に共通する今後の課題である。

(2) 危険性の高い宇宙デブリの事例

a) 衛星破壊実験による大量の宇宙デブリ発生

2007 年 1 月 11 日に中国はミサイルにより気象衛星「風雲 1C」(運用終了) の破壊実験を行った。ミサイル発射を行った人民解放軍 (PLA) は、衛星が跡形もなく消滅すると考えて爆破を試みたと思われる。しかし、実際には軌道上の飛行物体数を激増させただけで、消滅した破片はほとんどなかった。高度 800 km 近辺の極軌道には各国の地球観測衛星が多数周回しており、この衛星から生じた宇宙デブリと衝突する危険性が高まったことから、他国の宇宙機関から非難されている。

b) 原子炉衛星の落下と残存状況

1978 年 1 月 24 日、旧ソ連の海洋監視用レーダ衛星「コスモス 954」がカナダ北西部の雪原に落下した。人的被害はなかったが、搭載されていた電源用原子炉の放射性物質が付着した部品が多数飛散し、カナダ政府は回収および除染に当時で約 5 億円の費用を要した。そのような被害に対し旧ソ連はカナダに約 1 億円を賠償した。同型の原子炉搭載衛星はソ連崩壊

直前の 1988 年までに合計 37 機打ち上げられており、消失した衛星は 5 機しかなく、32 機が依然として周回を続けている。米国もプルトニウムを燃料とする原子力電池を搭載した衛星を多数打ち上げており、一部は惑星探査機で地球と遠く離れているが、現在も地球を周回しているものが多数ある。いずれも当分落下することはないと言われているが、監視し続ける必要はある。

c) 運用終了した大型衛星の落下

原子炉を搭載していない場合でも制御不能な大型衛星の落下は大きな災害につながる危険性がある。図表 2 に示すように 2011 年 9 月以降、使命を終えた大型衛星の落下が相次ぎ、宇宙から大きな部品が高速で地上に落ちてくるという危険な状況が相次いだ³⁾。特に宇宙デブリ対策が十分でなかった 1990 年代以前に打ち上げられた大型衛星は落下時のリスクが高く、今後は米国の X 線天文衛星「RXTE」の落下が 2014 年以降と予想されている。図表 2 に最近の大型衛星の落下例と今後の予想を示す。

このような宇宙からの落下物による災害リスクは、宇宙活動活発

図表 1 2011 年末の軌道上物体登録数

国・組織	軌道上物体					消滅物体				合計
	ペイロード	ロケット機体 R	衛星由来デブリ D	小計 S	$(R+D)/S^*$	ペイロード	ロケット機体	衛星由来デブリ	小計	
米国	1112	653	3111	4876	77.2%	794	612	4052	5458	10334
ロシア	1457	985	3674	6116	76.2%	2468	2729	8958	14155	20271
ESA 注	48	6	38	92	47.8%	9	7	15	31	123
フランス注	55	129	308	492	88.8%	8	62	607	677	1169
日本	128	43	35	206	37.9%	28	57	140	225	431
中国	120	66	3430	3616	96.7%	57	90	556	703	4319
インド	50	15	114	179	72.0%	9	10	267	286	465
その他	630	31	83	744	16.0%	61	11	116	188	932
計	3600	1928	10793	16321	78.0%	3434	3578	14711	21723	38044

出典：参考資料²⁾ を元に科学技術動向研究センターにて作成

* $(R+D)/S$ は軌道上物体に占めるペイロード以外の物体の割合を表す。

注 欧州のロケットは ESA が開発してフランス企業が打ち上げているため、ESA の衛星に限り ESA のロケットとみなし、ESA が関係しない衛星はフランスのロケットとみなしている。

化の負の側面であり、宇宙活動を行う国の責任として、安全性に対する取組みを真摯に行うことが国際的に求められている。特に、衛星の落下により他国に災害を及ぼした国は、宇宙条約により賠償責任を負うことを忘れてはならない。

d) 宇宙空間での衛星衝突

衛星や宇宙デブリの数が増えていくと、宇宙飛行物体同士の衝突の可能性も高まる。なかでも運用中の衛星が衝突により破壊されれば、地上での活動にも重大な支障を及ぼす。運用中の衛星同士の衝突事故はこれまでに発生していないが、一方が運用中の衛星であったケースとして、2009年2月10日に米イリジウム・サテライト社の通信衛星「イリジウム33」とロシアの運用終了した軍事衛星「コスモス2251」がシベリア上空で側面衝突した事故がある。

衛星同士の衝突を事前に予測することは困難で、完全に防護しようとするとは衝突予測計算に膨大な時間と費用がかかる。イリジウム社の場合は、代替衛星を打ち上げた方が費用的に安くなると割り切って、衝突予測を行っていない。また、同社の通信衛星は66機以上で運用されているため、1機を喪失しても予備機の利用などにより通信サービスへの影響は少なかったとみられる。

(3) 宇宙デブリが増え続けた場合のリスク

近年の宇宙デブリの増加傾向を図表3に示す。このグラフはSatellite Situation Report 2006年～2012年の毎年1月の米国・ロシア・中国・その他の国のそれぞれの宇宙デブリ数を積み上げたものである。2007年の衛星破壊実験による中国の宇宙デブリ数の急増、2009年の衛星衝突による米ロの宇宙デブリ数の急増がはっきりとわかる。これまでのような

ペースで宇宙デブリが増え続ければ、いずれ宇宙デブリ同士の衝突によってさらに宇宙デブリが増加するという時期を迎える。

全米科学アカデミー（NAS）の全米研究会議（NRC）は、NASAに対し、宇宙デブリに対する戦略計画を立てデブリ除去や危険性軽減のための対策を講じるべきであると提言した報告書を、2011年9月に発表した。NRCは、NASAが取るべき具体的な対策案として、宇宙機の不具合情報の記録・分析・報告・共有を提案するとともに、宇宙デブリに関する一般公開議論も行い、長期的な社会問題とみなして取り組むべきであるとしている。

宇宙天気のリスク

(1) 宇宙天気と宇宙天気予報

地球の周囲は静穏な環境ではなく、粒子や放射線が飛び交い、電磁気が作用し、激しく変化する空間である。地上では大気に守られてこのような危険が大幅に緩和されているものの、人類の生活に全く影響がないとは言えない。このようにさまざまに変化する地球周辺の状況を「宇宙天気」と呼んでいる。

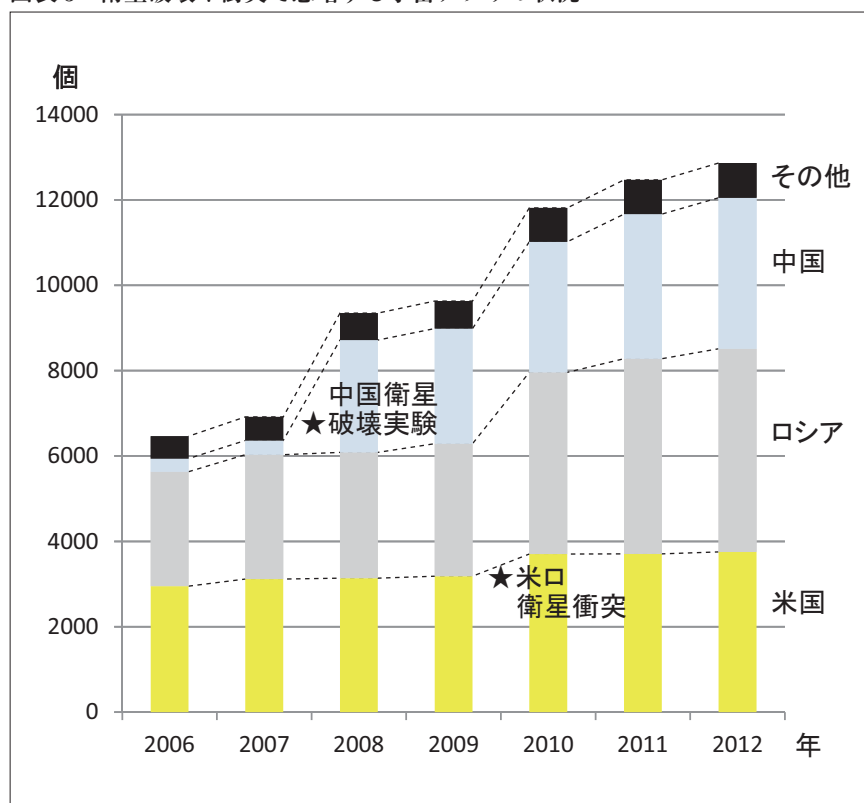
宇宙天気の指標となるものは、主に太陽風の速度やプラズマの量

図表2 最近の大型衛星の落下と今後の落下可能性

衛星保有国	衛星名	打上げ年	落下日	落下場所
米国	UARS	1991年	2011年9月24日	南太平洋
ドイツ	ROSAT	1990年	2011年10月23日	ベンガル湾
ロシア	Fobos-Grunt	2011年	2012年1月15日	太平洋チリ沖
米国	RXTE	1995年	2014～2023年	—

出典：各種資料を元に科学技術動向研究センターにて作成

図表3 衛星破壊や衝突で急増する宇宙デブリの状況



出典：Satellite Situation Report 2006年～2012年の毎年1月のデータから科学技術動向研究センターにて作成

である。太陽風に含まれるプラズマ電荷が地球磁気圏と反応して極域にオーロラが発生したり、電位差が生じたりする。以前は地上でモニタリング可能な地磁気や電離層の状況の観測を行うことが中心であった¹⁾が、近年、宇宙科学衛星による太陽観測が可能になり、数時間後から数日後まで先の太陽活動を予測できるようになってきた。

宇宙天気予報とは、このような太陽の活動や宇宙環境の変動を観測して、宇宙天気を予測し、研究機関から一般に向けて通報する活動を言う。

(2) 宇宙天気の変動による地上への悪影響

宇宙天気を大きく左右する太陽の活動は2013年に極大期を迎えると予測されてきたが、既に2012年早々から大規模な太陽フレアの警報が出されるなど注意が必要な時期に入っている。宇宙天気が最も悪い時には、宇宙空間で運用中の人工衛星の太陽電池パネルを損傷させたり、衛星内部の電子回路に障害を及ぼす恐れが高くなる。また、送電線など地上の施設への電磁的な影響が出ることもある。

太陽フレア（太陽表面の爆発現象）による衛星への影響としては、2006年に欧州宇宙機関の多

数の衛星において観測機器が電源オフになったという事例がある。通信放送衛星・地球観測衛星・航行測位衛星などの実用衛星の場合は、衛星の機能停止が地上の社会インフラへの影響に直結する。

2012年3月6日に最近5年間で最大規模の太陽フレアが発生し、米海洋大気庁（NOAA）は衛星や電波通信などに影響を与える可能性があるとの予報を出した。

2-3

地球近傍天体のリスク

(1) 地球近傍天体の状況

地球近傍天体（NEO=Near Earth Objects）とは、主に地球の公転軌道と交差するような楕円軌道を飛行する地球近傍小惑星（NEA=Near Earth Asteroid）、彗星（Comet）、他の惑星から飛来する隕石（Meteoroid）などの総称である。火星と木星の間に多数存在する小惑星の中で、地球軌道に接近することがあるNEAは数万個あるとされている。地球との衝突には至らないが、月程度の距離で地球付近を通過する可能性がある小惑星の把握に関しては各国でそれぞれ行っている。

2011年11月に月までの距離の

5分の4に相当する地球上空を直径400mのNEAが通過した。この規模の小惑星接近は30年前にもあり、次に予想される同規模のNEA通過はNASAによれば2028年頃であると予測されている。

地球の大気圏に突入して燃え尽きるような、より小型のNEAは非常に多く存在する。最近では小惑星「2012 BX34」が2012年1月27日に地球から約59,000kmの距離を通過したことが観測されている。これは地球へのニアミスの一例である。

さらに小型の隕石はしばしば地球に落下している。2012年1月にはモロッコに火星の一部と見られる隕石が落下し、アリゾナ大学などが高額で買い取ったという。

(2) NEO 衝突の危険性

比較的大型のNEOが万一地球と衝突すれば、地球環境に大きな変化をもたらす。恐竜の絶滅は大型のNEAが地球に衝突したためという説が有力である。このような衝突の発生頻度は非常に低いが、地球の生物への被害は甚大である。衝突のリスクをいち早く知るためには、NEOを観測し軌道データを蓄積していく必要がある。NEO衝突の恐れがある場合はその天体の軌道を変える対策も検討されている。

3 宇宙状況認識に関する各国の政策

宇宙環境リスクを低減するため、主要な宇宙開発国は宇宙状況認識（SSA）に関して政策を打ち出しはじめている。欧米の宇宙関係者の間でSSAに対する関心が高まったきっかけは、2007年に中国が行ったミサイルによる衛星破壊実験である。

人工的な宇宙環境リスクの低減については、欧州が提唱する「行

動規範」（CoC=Code of Conduct）が国際協力枠組みとなるものであり、その枠組みの下で宇宙状況認識の活動を米国・欧州・ロシア・日本・中国・インドなどの宇宙先進国が協調して推進することによって現状からの改善が図られる。宇宙天気や地球近傍天体など自然由来の宇宙環境リスクに関しては国際的に共同観測や情報共有

を行っていくことで対処能力が高まる。

米国と日本は前記の3種類のリスクについて、異なる組織に分かれて観測や検討がなされているが、現在のところ政策的にはSSAの対象は宇宙デブリだけである。欧州は宇宙デブリと宇宙天気を合わせてSSAプログラムを予算化しており、地球近傍天体に

についてはまだSSA政策に統合化されていない。中国は2011年宇宙白書⁴⁾で初めて3種類の宇宙環境リスクに取り組むことについて言及した。いずれの主要国も今後は3種類のリスクへの対処方を総合的に構築し、国際的な協調を行っていくべきであろう。以下に各国・地域のSSA取組み状況をそれぞれ示す。

3-1

欧州におけるSSA政策

(1) 欧州宇宙機関のSSAプログラム

欧州では、欧州19カ国(2012年にルーマニアが19番目に加盟)と準加盟国カナダが参加する欧州宇宙機関(ESA)が、ロケット・衛星の開発や有人宇宙飛行といった主要な宇宙活動に横並びするプログラムとして、「宇宙状況認識(SSA)」を2009年から予算項目に掲げて宇宙デブリ対策と宇宙天気予報を推進している。予算規模としては、準備期間に当たる3年間で2009年の900万ユーロからスタートし、2010年は約1,000万ユーロ、2011年は約1,600万ユーロと着実に増加させてきた。しかし2012年予算⁵⁾では1,540万ユーロに減少し、準備プログラム後の本格的な活動開始の初年度としては控え目な額となっている。

現在までに、静止軌道の宇宙デブリ観測用の望遠鏡をスペインに設置し、また宇宙天気観測の欧州ネットワークを立ち上げており、将来のSSA活動に活用されるものとみられる。

ESAでは地球近傍天体に関しては今のところSSAとは別のものとして扱っているが、地上ベースの施設やデータ配信などをSSAと連携させていくことが提案されている⁶⁾。

(2) EUの取組み

欧州連合(EU)とESAは定期的に宇宙理事会(合同閣僚級理事会)を開催しており、2010年11月の第7回宇宙理事会では、欧州の宇宙資産保護のため、SSAに関する対応能力を確立する必要性があるとの認識が示された。

2011年3月、欧州委員会(EC)はEUの宇宙プログラム全体に対する欧州域内の認知度を調べるアンケートを行い、この中でSSAについては18項目の質問を設定した。27カ国608人から回答があった。まず、太陽フレアや宇宙デブリによる衛星障害について認識がある人は約97%にものぼった。そのような現象が影響を受ける分野について5段階評価(最も影響が大きいという評価を5点とする)で4点以上とする回答者の割合が多かったのは、航空機・自動車用航行測位システム(73%)や天気予報や地球観測衛星(69%)などであった。また57%の回答者が、EU自身でSSAの対策機能を保有すべきであると回答した。

一方EUは、世界各国の宇宙活動の秩序を保つため、多国間の協力枠組みである「宇宙活動の国際行動規範」(CoC=Code of Conduct)を提唱し、宇宙の安全に係わる諸問題について米国・ロシア・日本など欧州外の主要宇宙開発国の支持を取り付け、この行動規範を世界の共通認識としようとしている。米国とオーストラリアは既にこのような取組への参加を表明しており、日本も2012年1月25日に玄葉光一郎外相がEU主導の行動規範の策定作業に参加する方針を表明した。宇宙開発利用の国際ルールを策定し各国が協調して実施することは、人工物由来の宇宙環境リスクの低減に寄与するものと考えられる。

(3) 欧州各国の取組み

欧州の宇宙活動の特徴は、1つ

の国ではできないような大型プロジェクトを複数の加盟国の資金拠出によってESAが実施する一方で、加盟各国は自国の宇宙機関が独自の国内宇宙プログラムを実施するという重層構造になっていることである。加盟各国は従来からSSAに関連する取組みを独自に行ってきたが、各国間の協力を行うことはなかった。

各国独自の取組みの例としては、宇宙飛行物体を追跡するため、フランスの宇宙機関であるフランス国立宇宙研究センター(CNES)が運営するROSACE(静止軌道観測用光学望遠鏡)およびTAROT(高速追尾型望遠鏡)、ドイツのTIRA(FGANレーダ)、ノルウェーのGlobus(宇宙監視レーダ)、スウェーデンのEISCAT(宇宙監視レーダ)などの設備が設置され、宇宙デブリの観測が行われている。またフランス国立航空宇宙研究所(ONERA)が開発したレーダネットワークを仏空軍が宇宙デブリ観測用として運用している。

今後各国は自国の設備の維持とESAへの拠出を二重に負担するのではなく、ESAに拠出した資金によって全体的にバランスのとれた欧州全体のSSA関連施設を整えるという方向に進むであろう。各国の設備については、主センターとしての運用継続、ネットワーク化による役割分担、廃止による経費節減などの仕分けが行われることになる予想される。

3-2

米国の新宇宙政策の中でのSSA政策

米国では宇宙デブリの観測を国防総省(DoD)が実施し、宇宙天気の観測を商務省(DOC)管轄の海洋大気庁(NOAA)が実施し、地球近傍天体の観測を米国航空宇

宙局（NASA）や大学などがそれぞれ実施している。

2010年に発表されたオバマ大統領の新宇宙政策⁷⁾の中では、世界中の国々による宇宙の平和利用を可能にするため、米国が宇宙におけるリーダーシップを発揮し、多くの人が宇宙から恩恵を受けられるよう、宇宙の安定した環境を維持することを宇宙活動の方向性とする述べた。また、宇宙での無責任な行動が世界の人々に影響を与えることを警告し、すべての国々に対し、次世代の宇宙利用・探査の機会を引き継ぐために責任ある行動をとることを求めている。米国も自ら宇宙での責任ある行動をとることを約束している。SSAに関しては、人為的な活動の結果である宇宙デブリに焦点を当て、米国の能力を強化し、他国および産業界と協力して共通認識として高めていく。

2012年1月17日、米国政府は宇宙デブリ対策を中心に安全な宇宙開発・利用の多国間の枠組み作りのため、EUと連携し、「宇宙活動の国際行動規範」の策定作業を進めるとの声明を発表した。

3-3

日本の宇宙基本計画における宇宙デブリ政策

日本ではまだSSAの概念が宇宙基本計画⁸⁾の中で定着していない。宇宙デブリの観測や低減対策などを担っている組織は(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)、宇宙天気を観測し予報を行っている組織は(独)情報通信研究機構(NICT)、地球近傍天体を研究する組織は(大)自然科学研究機構国立天文台(NAO)やNPO法人などに分かれていて、総合的な取り組みは行われていない。今後の宇

宙基本計画見直しにおいて、SSAの対象を総合化して宇宙環境リスクに対処するようになることが望ましいと考えられる。

宇宙デブリに関してのみは、2009年に策定された宇宙基本計画において、「宇宙環境の保全」として今後の課題が以下のように3つ示されている。

(a) デブリの分布状況把握

デブリの分布状況は、現在JAXA等が保有している宇宙観測機能によりデブリの監視を実施しているが、例えば周回軌道上のデブリについてはメートル級の大きさのデブリを識別できる程度であり、衝突により人工衛星の破壊を招く恐れのあるサブメートル級のデブリを詳細かつ高精度に把握する能力を有していない。今後、諸外国の観測データとの連携も図り、周回軌道上でサブメートル級のデブリの詳細な軌道位置等を把握することを目指す。

(b) デブリ発生極小化

デブリ発生極小化のため、運用中の人工衛星からの部品類飛散の抑止や、運用終了後の人工衛星の爆発抑止などが有効である。日本は、JAXAが独自にデブリを低減するためのガイドラインを作成して遵守している。日本は、デブリ発生を低減するための国際的な枠組み作りに積極的に参加するなど国際的な連携を確保することにより、宇宙の環境の保全を推進する。さらに、人工衛星のデブリ防護策や、運用終了した後に大気圏で燃え尽き地上への被害を局限するような衛星等についても研究を推進する。

(c) デブリの除去措置

デブリの増加に伴うデブリ同士

の衝突機会の増大によりデブリが自然発生的に増加する可能性が国際機関間宇宙デブリ調整委員会(IADC)等で指摘されている。日本では、デブリの捕獲や軌道から除去する技術(捕獲用ロボット技術等)は未だ研究段階にある。今後、国際的な連携を図りつつ、デブリの捕獲や軌道から除去する技術を小型衛星等を用いて宇宙で実証することを目指した研究を推進する。

3-4

中国宇宙白書におけるSSA政策

中国は2011年に米国を上回る19回のロケット打上げを行い、ロシアに次ぐ世界第2位の打上げ国となった。米国や欧州は中国の宇宙開発活動の急速な活発化に対し、SSAの観点から警戒感を示している。中国は第12次5カ年計画(2011年~2015年)の開始に当たり2011年12月に2011年版宇宙白書「2011中国的航天」を発表し、この中で有人宇宙飛行や月探査などの主要プロジェクトと並んで、宇宙デブリ・宇宙天気・地球近傍天体に関する取組みについて言及している。特に宇宙デブリに関しては具体的な対策の計画を示している。欧米がSSAへの関心を高めたきっかけが中国のミサイルによる自国衛星破壊実験であったことを想起すると、中国が宇宙デブリに関して前向きな取組みを行おうとすることは欧米の反応への配慮とも受け取れる。これが、衛星破壊実験による大量の宇宙デブリ発生のような行為を再発しないという意味表明であるとするれば、国際協調への足がかりとして歓迎すべき姿勢であると言える。

4 宇宙環境リスクへの対策

今後、宇宙環境リスクの存在をより多くの国が認識し、的確な政策に基づいてリスクへの対処を実施することが望ましい。3種類のリスク対応に関して共通的に言えることは、まず対象の観測態勢を整備し、各リスクに対処する技術能力を開発していくことが必要であるということことである。

4-1

宇宙デブリの対策

宇宙デブリに対しては、現時点では多くの国々で観測や防御・低減の対策がある程度講じられていると言える。特に危険な大型デブリの除去についてはまだほとんど対策がない状態である。

(1) 宇宙デブリの観測

米国は一定以上の大きさ以上の宇宙デブリを常時観測している。米戦略司令軍 (US STRATCOM) は常時 800 機の運用中の衛星と、2 万個以上の宇宙デブリの追跡を行い、可能な限り世界各国にも追跡情報を公開している。それでも追跡対象外の宇宙デブリははるかに数が多く、衛星に影響を与えうる宇宙飛行物体の追跡を行うためには人員が大幅に不足している状況である。しかも米国以外で現在の米国以上の衛星追跡を実施できる国は皆無である。

日本でも比較的早い時期から独自の観測施設を設置し運用してきた。JAXA は(財)日本宇宙フォーラム (JSF) が保有する岡山県の宇宙デブリ観測施設を利用して、光学による静止軌道の宇宙デブリの日々の状況や、レーダによる低軌道周回衛星の軌道決定などを

行っている。しかし、JSF の施設は既に完成以来 6 年～8 年程度経過しており、性能面でも不十分である。観測施設の増設や性能向上を国際的な連携によってどのように補っていくかが今後の検討課題である。

ただし、欧州・ロシア・中国などでも宇宙飛行物体の光学観測やレーダ観測を行っており、地理的特性によってその国独自の観測データが取得できる。米国の観測能力の限界を補うためにも国際的な観測協力が活発に行われるようになることが望ましい。

(2) 宇宙ステーションや衛星の宇宙デブリ防御対策

NASA は宇宙ステーションや実用衛星を宇宙デブリから防御する対策を検討するプログラムを実施している。中心的な事務所はテキサス州にあるジョンソン宇宙センター (JSC) 内にある⁹⁾。宇宙デブリ防御に関して現在の NASA の最大の関心事は常時 3 名から 6 名の宇宙飛行士が滞在する国際宇宙ステーション (ISS) の安全な運行を脅かされないことである。ISS ではごく小さい宇宙デブリの衝突に対してはバンパーで構造的に防御しているが、中型・大型の宇宙デブリを回避するために軌道上昇・下降などの制御を日常的に行っている。ロシアや欧州の物資補給船が ISS ドッキング中に軌道高度変更の推進力として利用されている。

(3) 宇宙デブリの低減対策

宇宙デブリの数を減らす対策としては、2007 年 2 月の国際連合総会において、国際機関間宇宙デブリ調整委員会 (IADC) が勧告した「宇宙デブリ低減ガイドライ

ン」が決議された。衛星を打ち上げる各国は、このガイドラインに基づいて低減に必要な措置を実施している。日本ももちろん、このガイドラインを踏まえて衛星開発を行っており、宇宙デブリ対策を実行している。

米ロと並ぶ主要宇宙国になりつつある中国も IADC に参加しており、2011 年中国宇宙白書では衛星やロケットにより生じる宇宙デブリを減少させる対策を掲げている。中国が積極的に宇宙デブリ低減対策を実施しようとしていることを示す事例としては、2011 年 9 月に打ち上げた宇宙ステーション実験機「天宮 1 号」の運用計画があげられる。「天宮 1 号」は 2 年間のミッション期間中に 3 機の神舟宇宙船とドッキングし、ミッション終了後には機体を安全な場所に落下させる計画である。

(4) 衛星落下リスクを避けるための宇宙デブリ除去技術の開発

衛星落下のリスクに関しては、危険な衛星を自然落下以前に除去することが最も安全な対策である。除去の方法については吸引による捕獲やレーザ利用による軌道変更などさまざまなアイデアが考えられている。強制的に落下させる方法として、地上から制御可能なチェイサー衛星(捕捉する側)をターゲット衛星(捕捉される側)と同じ軌道に打ち上げてドッキングさせ、地上から制御可能なチェイサー衛星の推進力でターゲット衛星と一緒に再突入軌道に軌道変更することにより、安全な場所に計画的に落下させることが可能になる。

2012 年 2 月にスイスの大学が、打上げ済みの 1 kg 級の超小型衛星を捕獲し大気圏で燃え尽きさせ

る実験を行うための、同サイズの捕獲衛星を開発する構想を発表した。規模は非常に小さいものの、具体的な宇宙デブリ除去対策の一例を示したものとしてメディアの注目を集めた。日本ではJAXAの研究開発本部未踏技術研究センターが、宇宙デブリを捕獲し軌道上から除去するシステム技術の研究開発を行っている。このようなアイデアは、日本で毎年行われている「衛星設計コンテスト」において、タコの足の機構を真似た吸着型の腕でターゲット衛星を捕捉するチェイサー衛星の概念が1990年代に提案されて以来、連続と続いている。日本が得意とするランデブー技術やロボット技術を活用して宇宙デブリ除去をより安全に行うことができるようになれば、世界の宇宙開発に対する大きな貢献となるだろう。

4-2

宇宙天気変動の観測と対策

地上の地磁気観測や電離層の状況などから宇宙天気を間接的に知る活動は、古くから行われてきた。以前は無線通信の雑音対策などが中心であったが、最近では人工衛星・航空機・送電線・パイプラインなど地上の活動に必須のインフラへの影響が顕著になったため、宇宙環境リスクとして衛星搭載の太陽電池パネルや電子機器の障害発生を防ぐ対策が必要になってき

ている。

(1) 太陽観測衛星による観測

太陽活動の変化を早期に察知する上で、衛星による太陽観測の機能が充実してきた。近年、ラグランジュ点に配置した太陽観測衛星などにより直接太陽活動を観測し、宇宙天気変動の予測に利用することが主流になってきている。

図表4に米国・欧州・日本の太陽観測衛星の観測対象を示す。太陽活動の観測において、特に重力的に安定したラグランジュ点(L1、L4およびL5)に配置された米国や欧州の衛星の観測データが有効に利用されている。「STEREO」衛星は太陽の左右の側面を観測できるため、太陽の自転に伴って活発な活動を行っている場所が地球方向に向かう時期を予測できる。日本の太陽観測衛星「ひので」による観測データも世界各国の宇宙天気観測に貢献している。

(2) 各国の宇宙天気予報サイト

現在、主要宇宙開発国13カ国から、一般向けに最新の宇宙天気予報を提供するサイトが開設されている。これらはすべてユネスコの下部組織である国際宇宙環境情報サービス (ISES = International Space Environment Service) に参加し、連携して活動している。

a) 米国

米国では、NOAAの宇宙天気予報センター (SWPC = Space Weather Prediction Center) が静止気象衛星 GOES のデータなどを用い

て宇宙天気予報の情報を作成し、ホームページで日々の観測状況および今後の予測を公開している¹⁰⁾。

トップページには太陽の最新画像とともに、主要な予報として磁気嵐、太陽風、通信障害の程度を示している。磁気嵐は地磁気擾乱の振幅に応じて、静穏な場合は「None」、振幅が大きくなるに従って「Minor」(小)、「Moderate」(中)、「Strong」(大)、「Severe」(より大)、「Extreme」(極大) という6段階の予測指標が表示される。同様に太陽風であれば10 MeV以上の粒子・イオンの密度、通信障害であれば太陽X線の最大輝度に応じてそれぞれ6段階の予測指標で表示される。

b) 欧州

ESAは「ESA SPACE WEATHER WEB SERVER」でESA/NASA共同開発の太陽観測衛星「SOHO」の太陽観測画像を中心に公開している¹¹⁾。ただし、他の国の宇宙天気予報サイトに比べ、専門家向けの構成となっている。NOAAのようなわかりやすい指標は示されていない。

c) 日本

(独)情報通信研究機構 (NICT) が宇宙天気予報のホームページ「宇宙天気情報センター」(SWC)で米国衛星や日本の太陽観測衛星「ひので」などによる観測状況を毎日公開している¹²⁾。トップページには観測情報がグラフィカルな様式で要約されている。

また、一般向けによりわかりやすく解説するため、「宇宙天気ニュース」のページでは地上の天気予報とよく似た表現で、毎日の宇宙天気予報を伝えている¹³⁾。

d) 中国

国家気象局衛星気象センターに属する国家空間天気監視予警センターが、今後3日間の宇宙天気予

図表4 主な太陽活動観測衛星

衛星名	保有国/運用機関	軌道	ミッション	打上げ年	観測対象
GOES	米国/NOAA	静止軌道	気象観測	1994年以降	太陽X線画像、X線、陽子(水素イオン)、電子
SOHO	ESA/NASA	L1	太陽観測	1995年	コロナ質量放出(CME)
STEREO	米国/NOAA	L4およびL5	太陽観測	2006年	太陽の側面の活動
ひので	日本/JAXA	極軌道	太陽観測	2006年	太陽表面のコロナホール

出典：各種資料を元に科学技術動向研究センターで作成

報などの情報をホームページで公開している¹⁴⁾。

e) ロシア

ロシアではロシア科学アカデミー (RAN) に属する宇宙研究所 (IKI) が宇宙天気予報のサービスを行っている。IKI は 1965 年に設立され、火星探査機や金星探査機のプロジェクトに参加していたが、現在は地球観測や生態系などに影響しうる地球近傍の宇宙科学研究を行い、その一環として宇宙天気予報の研究と情報発信を行っている。内容としては磁気嵐のデータなどをホームページで公開している¹⁵⁾。

(3) 宇宙天気予報を利用した衛星運用者等の対策

通信放送衛星・気象衛星・航行測位衛星などの日常重要な情報を提供する衛星を運用する機関や企業は、各国の宇宙天気予報のデータを参考にして、磁気嵐などから衛星を防護するための管制を行っている。

それらを基に、太陽電池パネル表面が磁気嵐の方向に向かないように衛星の姿勢を変えることや、衛星全体を省電力のセーフモードにして最小限の機能で衛星を維持することなどの対策を行っている。

国際宇宙ステーションに滞在している宇宙飛行士に対しても、健康上の影響を受けるおそれがある場合はより安全な場所へ避難するなどの対策を行っている。

宇宙天気の影響は、宇宙空間だけでなく地上にも及ぶ。例えば電力会社では、磁気嵐のもたらす電磁誘導により、送電線に異常な電流が流れる危険を回避するよう注意している。

この他、天文観測やアマチュア無線などでも、宇宙天気の変化には注意が払われている。

4-3

地球近傍天体 (NEO) の観測と安全対策

(1) 各国の NEO 観測状況

NEO の観測も各国の天文台や衛星により活発に行われている。NEODyS (Near Earth Objects-Dynamic Site)¹⁶⁾ というホームページには、小惑星や彗星の観測を過去に行ったことがあるか現在も行っている世界各国の天文台や望遠鏡がリスト化されており、前日観測された地球近傍小惑星 (NEA) のデータを閲覧することができる。しかし、NEA を効率よく発見できる望遠鏡はあまり多くない。米国および日本の主要な施設での NEA の観測状況を図表 5 に示す。

NEODyS リストに掲載されている日本の天文台や個人の望遠鏡は 109 にも及び、全国 30 都道府県に分布している。最も活発に観測を行っているのは、岡山県の実星スペースガードセンターである。静止軌道付近の宇宙デブリの観測を行うために口径 1 m の望遠鏡に設置された CCD カメラのデータを用いて、NEA の検出を行うことができる。ただし、日本の NEO の観測は現在のところ NPO 法人や個人の自発的な活動が中心であり、本格的に実施するには公的な観測体制を整備することが必要であろう。

(2) 地球に衝突する恐れのある NEO への対策

仮にすべての NEA や彗星の軌道が観測でき、地球に衝突する恐れのある NEO の存在や衝突時期がすべて判明したとしても、現時点では具体的な対策はほとんど実施できない。しかし、衝突回避に向けた検討を既に行っている例もある。

2009 年 12 月、ロシア宇宙庁 (FSA) は 2036 年にも地球に衝突する可能性がある小惑星「Apophis」の衝突回避対策を検討する委員会を設置する計画を公表した。Apophis は直径 350 m の小惑星で、もし地球に衝突すると 50 万平方 km 程度の砂漠が生じる懸念がある¹⁷⁾。衝突回避のためには何らかの方法で軌道を変えることが必要で、その目的に特化した装置の開発も必要となるため、これは国際プロジェクトとなる可能性もあると示唆されている。

NASA は、以前のデータでは Apophis が「2036 年 4 月 13 日に地球に衝突する確率が 4 万 5000 分の 1」と発表していたが、最新のデータを使って Apophis の軌道を再計算したところ、「衝突の確率は 25 万分の 1 にまで低下した」と改めている。

前述の宇宙デブリを捕獲し安全に落下させる技術は、将来的にこのような危険な小惑星対策として必要とされる軌道変換技術に発展する可能性もある。

図表 5 主な NEA 観測施設

施設名	運用機関	国名	主鏡口径	小惑星観測数
NEAT	NASA	米国	1m	11,000 以上
Spacewatch	アリゾナ大学	米国	1.8m	20,000 以上
実星スペースガードセンター	日本宇宙フォーラム	日本	1m	約 5500

小惑星観測数は 2012 年 2 月現在

5 我が国が今後実施すべき活動

今後日本でも「宇宙状況認識」という活動を通じて宇宙環境リスクを低減する努力を払っていく必要がある。観測態勢が整ってきた現在においては、これらのリスクはもはや想定外とはいえ、人類の生存や社会インフラに重大な脅威となりうることを認識しなければならない。

しかし、欧州・米国・中国などで「宇宙状況認識」を意識した政策が打ち出されているのに対し、日本では「宇宙状況認識」の概念自体がまだ定着していない。3種類の宇宙環境リスクに対してそれぞれ異なる組織や研究グループが対応しているが、3つのリスクは互いに排他的なものではなく、たとえば宇宙デブリも太陽活動も地球近傍天体も観測できるような宇宙環境監視衛星を開発し、複数のグループが観測データを共同利用するといった連携がなされれば、相乗効果が期待できるだろう。そのためには、宇宙環境リスクを総合的に把握し、その対策を実施する政策を宇宙基本計画の見直しなどの中で確立することが望まれる。特に宇宙デブリに関しては、宇宙活動の国際枠組みとなる「行動規範」について、米国・欧州・ロシア・中国などと協調して構築を推進すべきであろう。

3種類の宇宙環境リスクに対しては、それぞれ以下のような具体的

な活動を継続していく必要がある。

- (1) 増大し続ける宇宙デブリの追跡に関しては、現在主導的地位にある米国の対応能力にも限界があり、各国がそれぞれの地理的特性や技術力を活用した対策を担うことが望ましい。日本も宇宙デブリ低減ガイドラインを遵守した衛星開発を行うことはもちろんであるが、観測施設の整備やデブリ低減技術の開発などで積極的に世界をリードしていくべきである。技術的には、特に光学観測・レーダ観測ともに現状より性能を向上させることが望まれる。
- (2) 制御不能な大型宇宙デブリを捕獲し、安全な場所で落下させる技術に対しては、世界的にも研究開発の機運が出始めている。日本が既に先行しているランデブー技術やロボット技術を活用して、宇宙物体捕獲システムの実用化へ向けての研究開発を行うべきである。
- (3) 宇宙天気予報は既に社会インフラに組み込まれている実用衛星の防護や地上施設への影響を予防するための必須の情報となっており、公的に行われている定常運用を継続する必要がある。

- (4) 地球近傍天体観測は光学望遠鏡やCCDカメラなど観測機器の性能向上によりこれまで以上に効率的に実施できるようになってきているが、観測に従事する人材の育成など観測体制を整備し定常的に運用を継続していく必要がある。また、将来的に発生のある恐れがある巨大な地球近傍天体への対策は今後国際協調で検討が行われると予想され、日本も高い技術力を身につけて国際連携に積極的に参加すべきである。

以上のような施策を実施する上で、まず宇宙状況認識の世界的動向や日本にとっての必要性を理解し、宇宙状況認識活動の方向性を政策文書において定義することが早急に必要である。それとともに、宇宙環境リスク低減の活動を実際に担う人材育成に努めることも必要であると考ええる。

謝辞

本稿を執筆するに当たり、宇宙デブリに関しては(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)、宇宙天気に関しては(独)情報通信研究機構、地球近傍天体に関しては(財)日本宇宙フォーラム(JSF)の関係者より資料提供・討議をいただいたことを感謝します。

参考文献

- 1) 「宇宙環境観測・変動監視の研究動向」, 科学技術動向, 2004年10月号レポート
- 2) Satellite Situation Report, NASA ゴダード宇宙飛行センター発行
- 3) 「使命を終えた大型人工衛星の部品落下」 科学技術動向 2011年11・12月号トピックス
- 4) 2011 中国的航天: <http://tech.sina.com.cn/d/2011-12-29/10366579924.shtml>
- 5) ESA Space for Europe—Funding 2012年1月10日: http://www.esa.int/esaMI/About_ESA/SEMNQ4FVL2F_0.html

- 6) Space Situational Awareness and Near Earth Object (NEO), Detlef Koschny (ESA), 2008年7月:
http://www.cdti.es/recursos/doc/Programas/Aeronautica_espacio_retornos_industriales/Agencia_Espacial_Europea/44046_3073072008122021.pdf
- 7) 米国新宇宙政策 Statement by the President on the New National Space Policy :
<http://www.whitehouse.gov/the-press-office/statement-president-new-national-space-policy>
- 8) 宇宙基本計画 2009年6月2日 宇宙開発戦略本部
- 9) NASA/JSC Orbital Debris Program Office のホームページ : <http://www.orbitaldebris.jsc.nasa.gov/index.html>
- 10) 米国海洋大気庁の宇宙天気予報サイト : <http://www.swpc.noaa.gov/>
- 11) 欧州宇宙機関の宇宙天気予報サイト「ESA SPACE WEATHER WEB SERVER」: <http://www.esa-spaceweather.net/>
- 12) 情報通信研究機構の宇宙天気予報サイト : <http://swc.nict.go.jp/contents/index.php>
- 13) 「宇宙天気ニュース」のページ : <http://swnews.jp/>
- 14) 中国気象局の宇宙天気予報サイト : <http://www.nsmc.cma.gov.cn/NewSite/NSMC/Channels/100009.html>
- 15) ロシアの科学アカデミー宇宙研究所の宇宙天気予報サイト :
<http://spaceweather.ru/content/extended-geomagnetic-storm-forecast>
- 16) NEODyS のページ : <http://newton.dm.unipi.it/neodyS/>
- 17) ロシア通信 (RIA Novosti) の記事による

執筆者プロフィール



辻野 照久

安全・システムユニット
科学技術動向研究センター 客員研究官
<http://www.nistep.go.jp/index-j.html>

専門は電気工学。旧国鉄で新幹線の運転管理、旧宇宙開発事業団で世界の宇宙開発動向調査などに従事。現在は宇宙航空研究開発機構国際部特任担当役、科学技術振興機構研究開発戦略センター特任フェローも兼ねる。中国語の科学技術文献読解を得意とする。