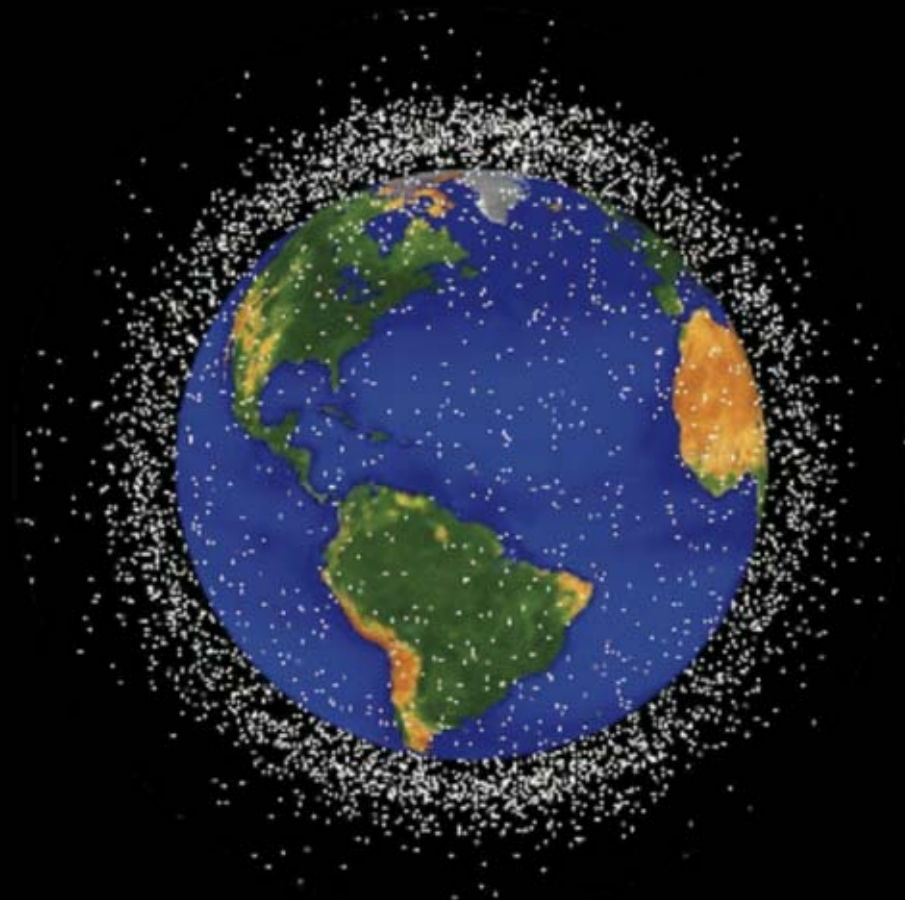


Selected Paper

本文は AIAA Aerospace America 誌の許可に基づく次の記事の翻訳である。(This article was reprinted with the permission of Aerospace America.) Leonard David: "Space Debris --A growing challenge", Aerospace America, pp.30-36, October 2009.

宇宙 デブリ



増大する挑戦

レオナルド・デビッド (寄稿ジャーナリスト)

軌道上での衝突や爆発した衛星、使用済み衛星などの残滓は、今や現在運用中の宇宙資産の数より非常に多くなっている。不気味な物体は、ISS（国際宇宙ステーション）を含む軌道上の飛行体が回避軌道制御を行う原因となっている。専門家は、その危険性と将来の宇宙計画への影響を評価している。ある人は、問題を解決する処置が直ぐにとられないと、一部の地球近傍の軌道は近い将来使用不可となると言っている。

晴れた夜空をよく観察して下さい。その不思議さに圧倒されることは疑いないと思います。しかしまた、あなたは寿命を全うしたか故障した衛星、使いきったロケット・ステージ、レンズ・キャップ、ペンキの破片や、宇宙で紛失した道具袋さえあるかも知れませんが、地球の最大のゴミ捨て場を見ているということに注意して下さい。

米国の宇宙監視ネットワークは、直径10cm（4インチ）以上の19,000の地球周回の人工物体を追跡している。この数のおよそ95%は、何らかのデブリ（宇宙ゴミ）である。しかし、さらに、1cm未満の数100万とともに、直径1～10cmの約30万の物体が、地球を周回している。

高速で宇宙を飛んでいるので、1/2インチのデブリでさえ宇宙船に当たれば、破壊的な影響を及ぼすことになる。

このようなガラクタは見えないかもしれないが、忘れることはできない。例えば、制御不能のロシアのコスモス衛星と商用のイリジウム衛星の間での2月（2009年）の衝突がある。この事故は地球を回っているデブリの数を著しく増やした。たとえば、この事故により、ヨーロッパ宇宙機関（ESA）のERS-2衛星とEnvisat衛星が宇宙デブリから破滅的な衝突に会う確率が30%以上高くなったことを意味する。

2年前にはものすごく恐ろしい状況、即ち、中国が制御不能のFengyun-1C気象衛星を破壊したということがあった。2007年1月の中国による衛星攻撃訓練はデブリの雲をもたらした。50年間の宇宙運用の中で、最多の、厳しい破壊として記されるやっかいな後遺症をもたらした。研究によれば、それらのデブリは何世紀の間地球軌道に残りそうであり、軌道上衝突を避けるための衛星オペレータの能力に影響を及ぼす。実際、2007年6月に、NASAはFengyun-1Cの破片を避けるために、13億ドルのTerra衛星の軌道制御を行ったと報告した。

最近では、ISS乗員は、ステーションに衝突するかもしれない宇宙漂流物を避けるために、結合中のソユーズ宇宙船に逃避した。ISS自体

は、デブリを避けるために、何度か軌道制御されている。今回と他の過去の事例は、注意警報となっている。

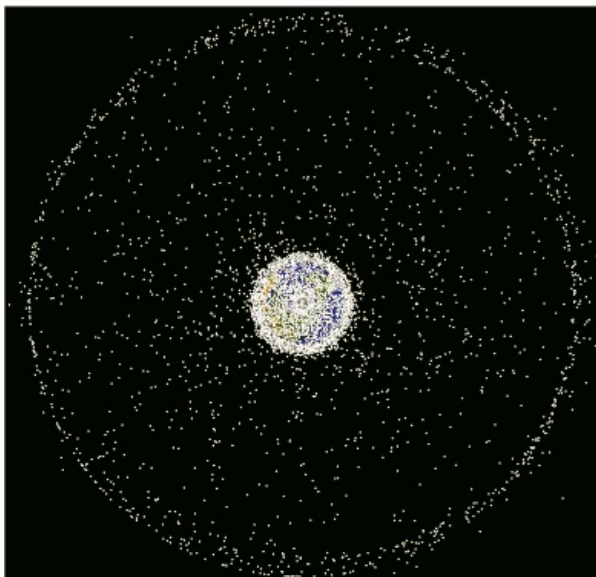
ドミノ効果

その警報に応えるのは、デブリによってもたらされる危険を測定して保険料の増加を検討する保険業者、軌道の衝突関連の多くの責任問題をチェックしている法律関係の学者、デブリに対処する新しい法令の必要性を調査し将来の宇宙計画への影響を評価する政策スペシャリストである。

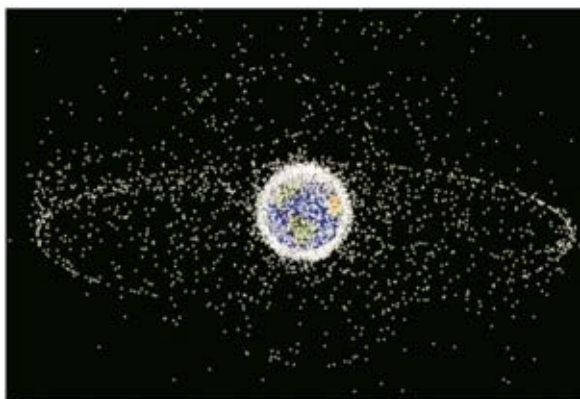
軌道上のデブリは「新しいまたは既存の宇宙システムに対する最大の脅威」である。これは、RAND研究所の2人の専門家、防衛戦略計画に取り組んでいる研究アシスタントのキャロライン・ライリーと上院外交委員会の前主任サイエンティスト及び前国務省科学顧問のピーター・ツィンマーマンによって共有された見方である。彼らはデブリの圧倒的な量とそれをきれいにするための仕組みの欠如、さらに、もし野放しのままにされるならば、より多くの軌道上のゴミにより宇宙が一時的または永久に使用できないようになるかもしれないと指摘する。

ライリーとツィンマーマンは、デブリを除去しないと、より稠密な軌道のゴミの量が臨界点に達すると結論したNASAのデブリ専門家ドナルド・ケスラーとバートン・クーパラによって、数十年前になされた仕事を引用している。彼らが言うには、ある転換点を越すと、かなり大きな2つ物体の間の衝突が宇宙の「ドミノ効果」、今では関係者の中で「ケスラーシンドローム (Kessler syndrome)」として知られるが、つまり各々の細かい破片の雲がより多くの衛星に衝突し、宇宙の領域が実効的にすし詰め状態のゴミの雲となるまで、次々と衝突を起こし、一層のデブリを生じさせるということが起こると言う。

ツィンマーマンとライリーは、「静止軌道のベルトで衝突の急増が始まったなら、ベルト全体が永遠にビジネスに使用できなくなるかもしれない。」と言う。



NASAの静止軌道の極画像は北極上空の点から作られ、LEOと静止軌道領域に物体が集中していることを示している。



北半球上空のかなりの数の物体は、高傾斜角で高離心率のロシアの物体によっている。

NASAのチーフ・サイエンティストのニコラス・ジョンソンは、4月、「市民及び商用利用者のための宇宙環境の安全維持」と呼ぶ聴聞会で、下院の宇宙航空小委員会の前で証言した。将来の状況を踏まえて彼は言った。「『上がるものは降りなければならぬ』という格言は、宇宙時代にも通用するが、多くの衛星が地球に落ちるのに非常に長時間かかる。多くの場合、この降下は、何百年(数千年さえ)も続く。従って、スプートニク1号から世界中で4,600以上の宇宙ミッションが行われた後、大量の人工物体が地球軌道に確実に蓄積された。」

ジョンソンは、有人のISSだけでなく今世界を回っている多数の運用中の衛星は、もっと多くの古い宇宙船、荒廃した打ち上げロケットの軌道のステージ、故意に放棄されたゴミと200

以上の衛星爆発と衝突の漂流物を伴っていると指摘した。

「デブリの発生が抑えられない限り、宇宙システム運用の信頼に対する軌道デブリによってもたらされる脅威は増大し続ける。国際的な航空宇宙コミュニティは、新しい軌道デブリの発生を削減するために宇宙システムの設計と運用においてかなり進んだが、もっとやることはある。」とジョンソンは言う。

宇宙状況認識 (SSA)

今日、宇宙システム・オペレータは主として国防総省民間・外国プログラムから宇宙状況認識 (SSA: Space Situational Awareness) データを受け取っていると、ジョンソンは4月に証言した。「より多くのユーザにサービスするためと利用できるサービスを増やすために、このプロジェクトを強化することは、一番早く最も低価格で宇宙の安全を向上させることになる。長期的には、より高性能センサーにより高精度のデータを含む、宇宙監視の技術的な進歩が必要であろう。」

米国戦略指令部宇宙地球攻撃統合機能司令部指揮官ラリー・ジェームズ中將が同じ聴聞会で証言した。彼は、宇宙交通(宇宙往来物体の数)の成長というのは挑戦であるとともに懸念でもあると言った。

「1980年には、宇宙にある衛星を管理していたのは10か国だけであった。今日、9か国が宇宙港を運用し、50か国以上が衛星を所有するかその一部の所有権を有し、39か国の人々が宇宙を旅行した。1980年には、我々はおよそ4,700の宇宙対象物を追跡していた；それらの物体のうち280は動作中のペイロード/衛星であったが、2,600がデブリであった。今日、我々はおよそ19,000の物体、1,300の動作中のペイロードと7,500のデブリを追跡している。29年間に、宇宙交通(宇宙往来物体の数)は4倍になった。」と、ジェームズが注意喚起した。

ジェームズは、ここ10年間の衛星打ち上げ活動を基に、控え目な予想として能動衛星の数が今後10年間に1,300から1,500まで急増すると見積もっている。将来のセンサの性能によるが、追跡物体の全体数は19,000から100,000まで増加するであろうと、彼は証言した。

安全な運用の確保

ジェームズは、今年のイリジウム/コスモスの衝突は、米軍が商用ユーザと共に安全な宇宙

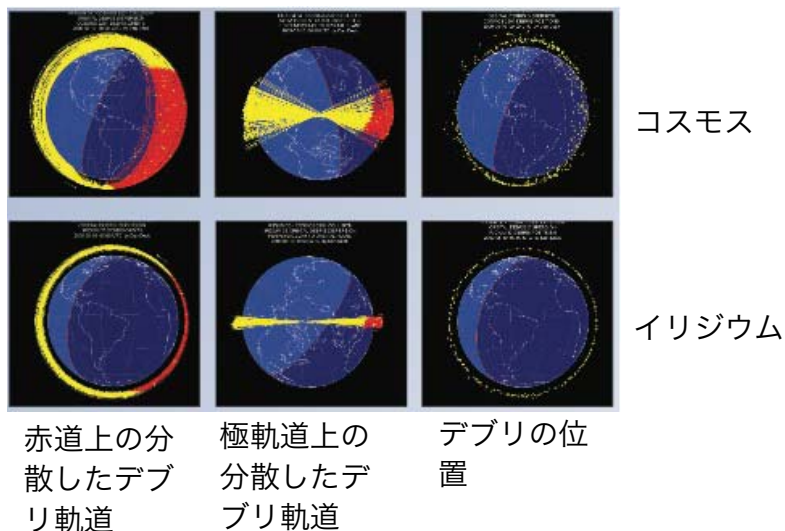
活動を確保するためにしなければならぬ「優れた例」と言う。共同宇宙運用センターが衝突の4時間50分後にイリジウムの衝突で増加した破片の判別評価を始めたという彼のコメントは意外な言葉のように思われた。同センターは現在、国防総省（DOD）の任務を支えるためにDODと商業的宇宙ユーザの安全な宇宙飛行活動を確保するために毎日330以上の物体を判別していると、彼は付け加えた。

「米国の宇宙監視機構は現在何千もの物体を検出し、追跡している。しかし、完全に追跡し、全ての軌道上物体を特徴づけ、解析し、衝突を予想する能力には大きな隔たりが残っている。」と、ジェームズは言った。この隔たりの解決のための鍵となる計画は、南半球から重要な領域をカバーすることができるハードウェアである米宇宙監視ネットワークで最も精密な専用レーダと見なされる「スペース・フェンス」であると彼は続けた。

スペース・フェンスは毎日75万の監視を実行することができ、10万以上の物体を追跡する。これによってカバーできないところを減らし、低中高度軌道（LEOとMEO）での宇宙状況認識を非常に改善することができる。さらに、ジェームズは、宇宙に基盤を置く宇宙監視衛星の将来の出番を強調した。そこでは、24時間毎に全静止軌道を常時走査が可能で、その高度の資産の現状認識を非常に改善するものである。

また、この聴聞会では、50以上の衛星を運用し、今日最大の商用静止衛星を運用するインテルサット・ゼネラルの法及び官公庁担当副社長のリチャード・ダルベロが証言した。彼は、米政府が宇宙交通（宇宙往来物体の数）管理の問題に関して主導的役割を演じなければならないと強調した。

現時点では、衛星オペレータは、静止軌道に漂っていて、運用中の衛星と衝突する可能性のある非動作衛星とか他の物体といったハードウェアを監視することを米政府に期待する。ダルベロは、「米政府と同型のレーダまたは光学観察能力を持つ他国が関与しさえすれば、制御のきかない宇宙物体を監視し、運用中の衛星に衝突する危険があるという警告を商用オペレータに実時間で出すことにより、宇宙商業

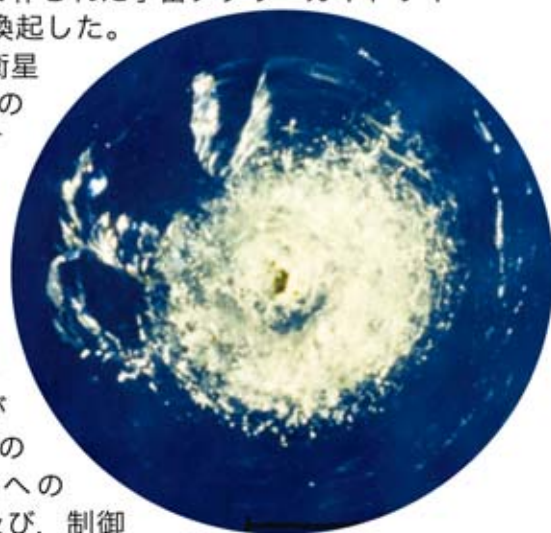


2009年2月のイリジウム 33/Cosmos 2251 の衝突によりデブリ数が非常に増加した（ダン・デアークによる作成画像）。

活動の安全性は確保される。」と言う。彼はさらに、絶えず変化する宇宙環境を監視し理解することができるSSAに対して十分な予算を付けることが重要であると付け加えた。

「衛星オペレータと政府が組織化し、協力して彼らの収集したデータを共有する方法を見つけることができるならば非常に貴重である。そのような共有プロセスは、宇宙情報のための『世界データ保管庫』の創造になる」と、ダルベロは見る。彼はまた、政府間宇宙デブリ調整委員会、つまり、宇宙デブリの研究及びその緩和策に関する情報を交換し合うための政府間機構によって作られた宇宙デブリ・ガイドラインに注意を喚起した。

その他、衛星の軌道位置の移動に関する既存の規則の正式化；衛星の一つが他の宇宙物体に損害を与える恐れがあるとき、他のオペレータへの通知方法；及び、制御を喪失した衛星の管理方法；のような拘束力のないガイドライ



スペースシャトルの窓は、多くのミッションで軌道デブリによってガンガン鳴らされた（NASA 提供）。

ンが開発できるであろうと、彼は言った。

「次の10年以内に、さらに多くの国が、商業的、科学的、国の目的のために宇宙を利用する能力を得るであろう。世界中の国が、明日の宇宙活動を保護するために今日の宇宙管理の主導権を取ることは重要である。」と彼は結論付けた。

同様の見解をとるのは、ワシントン、DCのジョージ・ワシントン大学エリオット大学院の国際情勢関係の宇宙政策研究所スコット・ペイス所長である。彼はまた、宇宙交通（宇宙往來物体の数）管理のために自発的な「道路規則」に賛成の証言をした。

「宇宙状況認識の改善と人工の軌道上のデブリによる危険の減少は、両方とも全ての国のために宇宙の長期的持続可能な使用に不可欠である。」と、ペイスは述べた。「宇宙関係国は、国連宇宙平和利用委員会の科学・技術小委員会によって認められる標準的な軌道デブリ緩和策に同意するべきである。宇宙状況認識を改善することは、また、国際協力の有望な分野と考えなければいけない。」

ゴミを取り除くこと

宇宙のガラクタの脅威は本当だということに疑念はない。しかし、その多くの危険は対処可能であると、NASAの軌道デブリ・プログラムのジョンソンが説明する。

本研究30年のベテランであるジョンソンは、Aerospace America誌に対して、ここ数年において、軌道デブリ環境の認識における最も重要な進歩は静止軌道付近の地域を含んだことだということである。「NASA、ESAとロシアのセンサは米宇宙監視ネットワークによって未だ追跡されない多数のデブリを検出した。」

この0.2~1.0mの小さなデブリ群は高い質量密度の特性を示していると、ジョンソンが言っている。静止軌道付近では、太陽の輻射圧は、そのようなデブリに軌道上の強い摂動力を生じさせる。そして、これは、これらの破片の1つが無傷の衛星またはロケット本体と衝突する確率だけでなく、そのような衝突を連続して起こすことにも影響を及ぼす。

この分野の進歩はあったが、特定の地域でより多くの研究が必要であると、ジョンソンが述べた。「明らかに、低高度と高高度の軌道中のデブリに関するより多くの観察データが、地球近傍の宇宙環境をより正確に特徴づけ、軌道デブリの数の増加と発生を監視するのに必要で

ある。これを達成するために、より強力なより多くのセンサ（レーダと光学観測装置）が必要である。」

一般の認識という点で、デブリの課題一衝突、宇宙を勢いよく飛び交うゴミの雲及び宇宙飛行士への緊急の警告—はメディアの高い注意を引く。そして、そのような報告において少し誇大なものがある。

「いくつかのメディアは、軌道デブリによってもたらされる直近及び将来の脅威を誇張する傾向はある。」とジョンソンが述べた。「実際の脅威がある一方で、今日、それらはほとんど対処可能である。そのうえ、現在まで科学界及びオペレータの努力に対して十分な功績は与えられていない。地球近傍の宇宙環境は、過去30年の間、航空宇宙コミュニティの少数の人の世に知られない努力がなければ今日もっとも悪くなったであろう。」

明らかに、「ゴミを取り除く」という宇宙の命題は将来の軌道上衝突を減少させるであろう。「問題はそれをするのに費用対効果がよい技術がないことである。」とスタンフォード大学ビジネス大学院経営科学教授のローレンス・ウェインが言う。自分自身のゴミを取り除くことを宇宙計画に要求する既存の規則を施行することにより、宇宙ゴミと高価な軌道上の衛星が衝突する脅威の増加を止めることができた、彼は信じている。

ウェインは、LEOで起こっていることが地球上の環境経済学に似ていると主張している。地球の資源のように、宇宙は人間の侵略により初期の攻撃を受けている。

ウェインとスタンフォード大学計算・数学工学研究所博士課程学生のアンドリュー・ブラッドリーは、物体が打ち上げ25年以内に軌道から取り除かれることを必要としている既存のNASA規則の遵守に賛成する。二人は、器材を軌道外に置くことに対する規則の完全遵守に関する将来の政策に焦点を当てること、及び、故意に軌道上の物体を爆発させることを禁止することを主張している。

ウェインとブラッドリーによるもう一つの提案は、打ち上げる度に料金を設定し、かつ、漂っているゴミを無視する者を罰することである。疑いもなく、このアプローチは大変な政治的および経済的な交渉を必要とするであろう。「しかし、我々が高い遵守を得ることができれば、この問題は管理下に置かれたままとすることができる。」と、ウェインは信じて

いる。料金は将来の衝突で破壊される使用可能な衛星を補償及び宇宙デブリ緩和技術の研究開発に用いられる。

増大する困難

ガーヴィー・シューベルト・ベアラ法律事務所の宇宙法スペシャリストのジェームズ・ダNSTANは、最近のコスモス/イリジウム事故を最初の重要な事例とみなしている。

イリジウムは衝突保険を掛けていた、しかし、第三者の損害だけのために、とダNSTANが述べた。イリジウムが衝突の可能性を知っていたかどうかさえ不明である。また、その特定のイリジウム衛星が寿命をずっと越えていたので、オペレータが衝突を避けるために軌道制御用燃料を使うことを躊躇したかどうかについての疑問がある。それから、ロシア側の議論では、慣例国際法では遺棄された衛星を取り除くことは要求されていないと言う。イリジウムは、衝突を避けるために積極的な処置をとる義務はないと主張していると、宇宙法アナリストが言う。

この3月、イリジウムは、商用及び外国の法人プログラムのような活動を通して、評価と警告を改善する努力を米国政府とともに行ったとする衝突後声明を出した。

「これらは役に立つ努力であったが、イリジウムはこの事件がより積極的行動の必要性さえ示したと思う。そして、同社は宇宙活動の安全性余裕を増やすために、行動を強化すること

を支持する。」と声明を言っている。イリジウムが支持する将来の特定の活動は、宇宙環境がよりよく理解され、よりよく特徴づけられるように、SSAを改善するための長期の投資である。

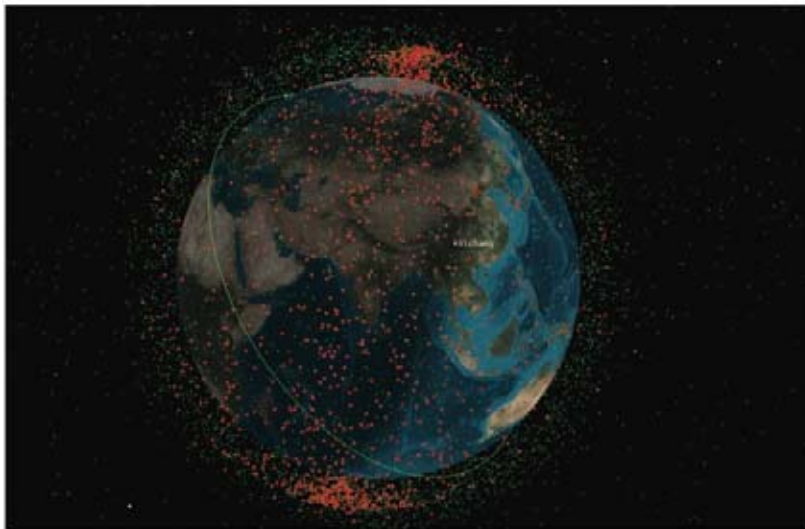
「イリジウムは、商用オペレータが衛星軌道のデータを供給すれば、商用衛星追跡のために必要な米空軍の資源を軽減し、一般に利用できる以上の正確さを提供することができる。」そして、改善されたSSAが世界的な宇宙コミュニティの幸福にとって必須であると付け加えた。

「この事例は確かにイリジウムによってサービスを受ける商用及び政府の顧客を含む商用宇宙産業が成功するために、SSAが重要であることを指摘している。イリジウムは、SSA能力を向上させ、宇宙環境の安全性を向上させるために、政府、産業界、国際コミュニティ間の協力に関与すると、イリジウム声明は結論付けた。

解決策を求めて

軌道デブリによって引き起こされる困難性は悪化するので、解決を求める動きが出ている。1つの清掃事業は、メリーランド州ローレルのジョーンズ・ホプキンス大学応用物理研究所の上級科学者のマーシャル・カプランが促進している。この初期の努力では、いかにデブリを実際に集めるかを地上及び/または宇宙上での実験を行う見通しを持って、状況が今後数年間にどう悪くなるか予測するためのシミュレーションに取り組んでいると、カプランが

Aerospace America誌に語った。「我々が現在までやってきたことは、大きくも小さくも多くも、問題をもっと悪くし、悪くし続けようとしている。」提案された手段は、デブリを掴むためにエアロジェルで一杯の巨大なふわふわした球を軌道上に配置したり、軌道降下用デザーを使ったり、デブリのかたまりに向けてエネルギーパルスを照射するために低出力地上レーザーを使うことさえ含むものである。そのようなエネルギー攻撃により、デブリの表面の層を蒸発させ、ガスを放出させる。このガスの放出により、デブリをより高い高度に上げることになるが、近地点を減少



2007年1月(衛星攻撃兵器テストの5分後)からの中国の衛星攻撃兵器シナリオをISS軌道(緑色の線)、LEO衛星(緑色の点)及びデブリの環(赤色)とともに表すAGIビューア・ファイルからのスクリーンショット(AGI/CelesTrak/CSSI提供)。

させる。目標とした宇宙デブリは、2、3日以内に再突入して空気中で燃え尽きることになる。

現時点では、デブリの増加を緩和しようとして、取られる方法は正しいものであるとカプランは言う。今のところ、LEOのデブリを清掃するためのコストは、経済的ではない。「それは高価で、長期間かかる。我々には、まだ良い解決策がない。しかし、宇宙デブリの減少が必須となるときが来る。」と彼は言う。

彼は一つの気がかりなシナリオについて思索している；「もしデブリとISSで破滅的な衝突があれば、そして、生命が失われるならば、その結果、デブリの問題が解決されるまで、少なくとも低い地球軌道で、有人宇宙飛行の停止となると思う。政治的な方策は何なのか決して分

からないが、すぐに何かするように我々を刺激する。」

LEOという価値ある財産を綺麗にすることは国際的な参加を必要とし、主要な新宇宙計画の形をとると、カプランが提案する。宇宙デブリを縮小するという選択肢は今はまだ空想的であるが、これからの仕事は経費と見通しに関しては、環境保護局によってこれまでに行われたものよりはるかに大規模な大型予算のクリーンアップ・キャンペーンと同様である。

「この問題は、更に悪いことになる。」と彼は言う。「宇宙デブリは、確かに成長産業である。」

(翻訳：飯田尚志，JFSC編集顧問)

宇宙交通（宇宙往来物体の数）管理

破壊的な宇宙デブリから有人宇宙飛行と衛星に対する脅威を減らし、宇宙環境についての知識を増やすと言うことは容易であるが行うのは容易ではない。過去15年に亘って、世界の主要な宇宙機関は、新しい宇宙デブリの生成を阻止し、衛星と有人宇宙機に対する既存デブリの衝撃を軽減することを目的として一連の宇宙デブリ緩和のガイドラインを開発してきた。これらのガイドラインは、地球軌道を長期に持続させるという重要なことを含んでいる。

2月に起きた商用のイリジウム衛星と故障したロシアのコスモス衛星の衝突によって、持続性、つまり、宇宙状況認識としても知られる軌道と宇宙環境における物体の認識が重要であることが強調された。

「宇宙状況認識は、我々の時代で最も重要な宇宙の課題の一つである。」と、コロラド州スーペリアに本部がある安全世界協会理事のレイ・ウィリアムソンが言った。このグループは次のような重要な結果が期待される宇宙状況認識の強力な主唱者である：

- 地上及び宇宙を基盤とするセンサ、衛星所有オペレータ及び宇宙気象データのような複数の源からのデータの結合
- 関係する全ての民間利用のためのあるレベルのデータ及び現在米軍が完全には提供できない機能の提供
- 国際的参画とか契約という解決策と、世界各国にある既存のセンサからのデータを統合し、全体としての安全を強化することによってもたらされる経費の節減という解決策の両方の混合

ジョンズ・ホプキンス大学応用物理研究所上級科学者のマーシャル・カプランからの楽観的なメッセージによると、デブリの脅威を減らすための方法とかシステムは次の数年間に開発されるということである。

解決策はいくつかの努力、つまり、衛星への遮蔽板の追加、衛星への余分の軌道制御燃料の搭載、新しいデブリ生成を制限するためのもっと上空への自動的デオービット、強制的に寿命末期のリスク軽減軌道制御、大きな脅威地域からデブリの物理的な除去、などであるとカプランは言及した。

「成功にはすべての宇宙開発国が協力して、協働することが必要である。」と、カプランは注意喚起する。しかし、これらのアプローチがあったとして、次に何が来るのか？

デブリ衝突の危険性を許容できるレベルに保つために実施中の国際的な計画、つまり、宇宙交通（宇宙往来物体の数）管理という計画、がなければならぬとカプランは提案する。その努力とは、宇宙開発国が特定の軌道スロットまたは地域を独占することの制限に同意して、自発的に行うものである。

「各国は、さらに、新しいデブリの作成に関して責任があることを認識し、軌道利用に関する規制に同意しなければならない。宇宙交通管理は、衛星の運用を安全に保つため、長期に使用された軌道でのデブリ生成制御が継続的に行われる必要がある。」とカプランが言う。

「結局、宇宙交通（宇宙往来物体の数）管理プログラムは、すべての打ち上げ機会に新しい衛星の軌道投入と共にデブリ除去活動を行う方向で、主な宇宙計画と統合されるかもしれない。」と結論付けた。

[レナード・デビッド，安全世界協会准研究員]