

デブリの本質の理解に向けて

(有)QPS研究所

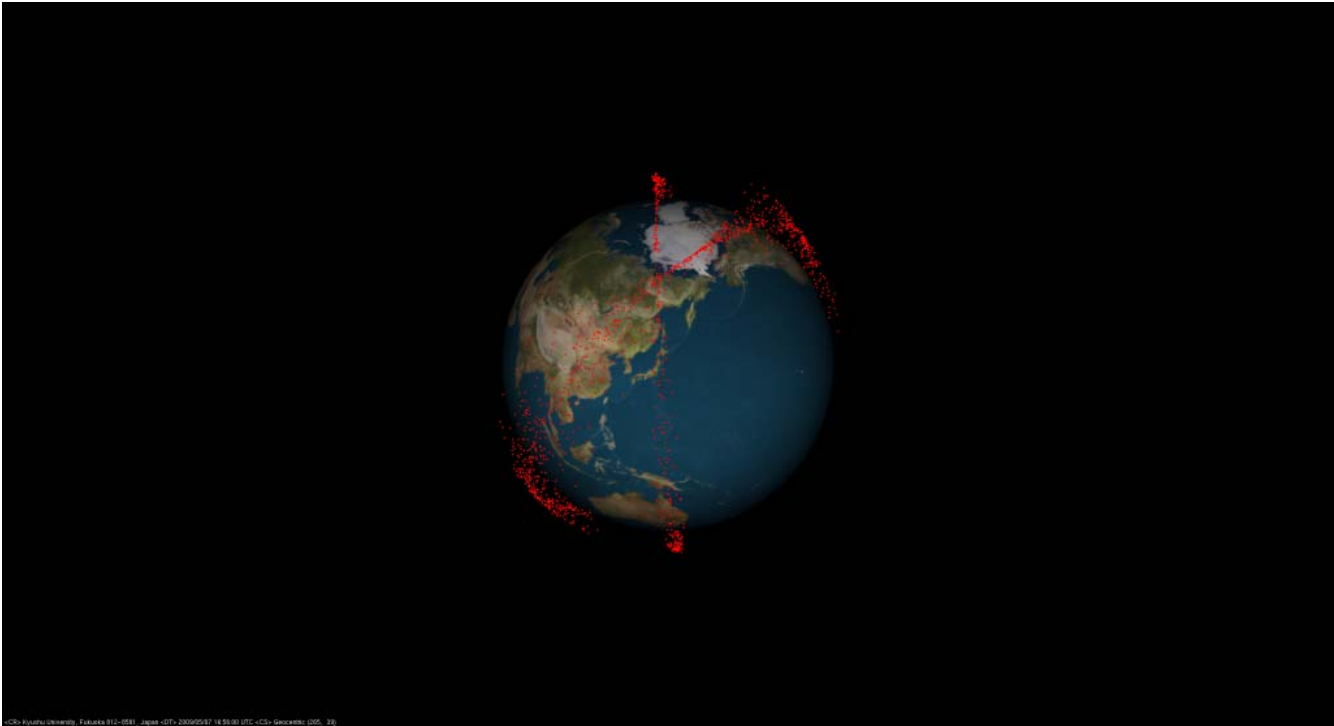
八坂哲雄

つ い最近、東京の品川で「人類の持続的宇宙開発利用のための国際シンポジウム」が開かれ、日米欧の研究者、政策担当者の参加にふくめ、日本政府要人の出席もあったそうである。1990年代初めに「デブリ研究会」を立ち上げた時から考えると文字通り隔世の感がある。当時は、「あんまりそんな話を広めると、宇宙開発の足を引っ張ることになる」との忠告めいた脅迫がひそかにささやかれる等、世の中は決して一色ではなかった。今は、デブリと言えやお茶の間の格好の話題であるだけでなく、宇宙開発の現場でも「なく子も黙る」最優先課題となっている。学生が作る小型衛星でさえも、デブリ低減のガイドラインに合致するよう涙ぐましい努力をしている。

小型衛星といえば、一時、デブリを作り出す元凶のように言われた時がある。確かに小型衛星は寿命が短いうえに、軌道制御の能力を持ったものはまれであるから、打ち上げてから数年でデブリの仲間入りをしてしまう。しかも、何個もまとめて打ち上げられることが多いので確かに目立つ。デブリの問題は素人わかりがするうえ、スポットの当て方によってさまざまな問題を浮かび上がらせることができる。一体問題の本質は何なのか、じっくり考えてみないと本当の問題を見逃してしまう可能性がある。

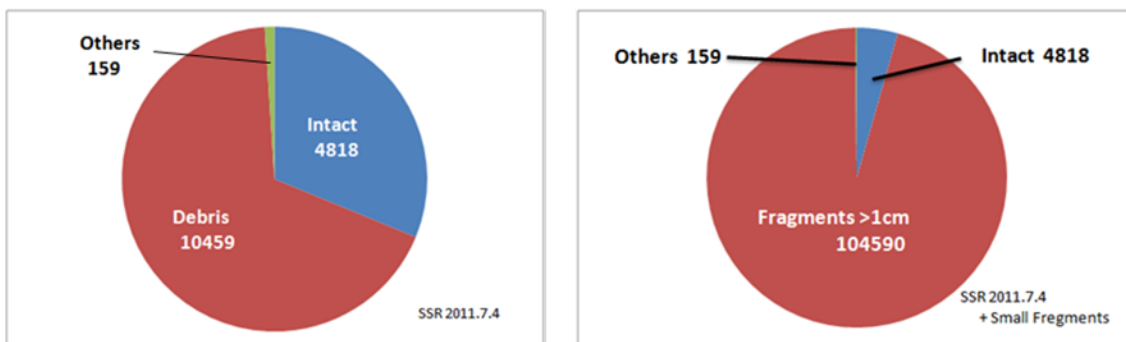
2012年2月の時点で、地球の周りには17000個の物体が存在する(米国Space Surveillance Network、SSNによる)。このうち通信衛星など稼働しているのは1000個以下しかないで、16000個強がデブリの範疇にはいる。17000個を別の見方で分類することもできる。このうち、人工衛星として打ち上げられたものは3800個、ロケット機体が2000個。しからば、残りの1万個以上の物体は何かといえば、ロケットや衛星が壊されたために生じた破片である。たとえば、2007年に中国がASAT実験を行った結果、3000個の破片が観測された。また、2009年のイリジウムとコスモスの衝突では双方が2000個の破片と化した。そもそも最初に宇宙で破壊現象が起きたのは、スプートニクが打ち上げられてから4年後の1961年である。アメリカがTrasit-4Aという衛星を無事打ち上げた2時間後、その打ち上げに使われたロケットの最上段が突然爆発した。その頃の米国では、ようやくNORADの宇宙監視網が完成し、宇宙物体のカタログが作られ始めたころである。この日、この件で一挙に物体数が3倍に増えてしまった。すなわち一つの破壊事象で、米ソの両国がそれまでに打ち上げた物体の総数の2倍に近い300個もの破片が発生したのである。それ以来現在まで、宇宙で作られた破片の数は、打ち上げた物体の数をはるかに凌駕し続けている。

以上のことから、一口にデブリといっても、その中で破片がかなりの部分を占めている事がわかる。もう一步踏み込んでみよう。今までの話はNORADから引き継がれた宇宙監視網で観測した結果で成り立っている。良く知られているように、ほぼ10cmより大きいものしか観測に引っかからない。爆発や衝突で生じる破片はいろいろのサイズがあり、小さいものほど指数関数的に数が増えることが分かっている。衝突で相手に重大な被害を与える大きさにして数センチ程度の破片であれば、10cmクラスの破片より確実に10倍多い



▲ イリジウムとコスモスの衝突によるデブリ分布(4ヶ月後)
(九州大学 花田俊也教授提供)

と考えられる。(NASAの破碎モデルでは、質量が一桁小さくなるごとに数が5.6倍となる)
まとめて図にまとめると以下のようなになる。



左の図はSSNのデータから地球を脱出したもの、軌道が分からないものを除き、打ち上げてそのままの衛星とロケット(Intact)、破片(Debris)ならびにその他(Others)に分けてそれらの数を示したものである。その他には分離したシュラウド、原子炉衛星から漏れ出た液体金属のしずく、分離の時に放出される部品が含まれる。右の図は、左の図に、さらに小さな1cm以上の大きさの破片を含めた場合の図である。これらの図から、デブリの問題とは破片の問題であることがわかる。1961年以来、爆発、衛星破壊実験、衝突によるブレークアップ現象が200回も観測されており、その結果として破片が集積したのが現在の宇宙環境である。衛星を幾つ打ち上げようと、衛星やそれを打ち上げたロケットがブレークアップ(破碎)しなければ、深刻な問題とはならない。

破片が生成する原因が爆発、衛星破壊実験、衝突であると前述した。爆発はロケット最終段にわずかに残された残留燃料が何らかの原因で引火するケースが多く、バッテリーの過熱が原因とされるケースもある。いずれにしる偶発的に起こる。これに対し、衛星破壊実験は意図的に破壊することであり、たちが悪い。偶発的爆発に対しては、原因の解明と技術的解決策が明らかにされてきた。国レベルや国際的な各種のガイ

ドラインはこの種の爆発の対策を詳細に規定している。衛星破壊実験は国際条約で規制することはできていないが、破片が長い間軌道にとどまるような高度での実行を自粛するよう国連のガイドラインなどで求めている。爆発と実験は過去には破片を作り出す主要因であったが、可能な対策が完備してきたので、これからは主役を衝突に交代することになる。

衝突を次の種類に分類すると対策を考える上で都合がよい。

- 1) 稼働中の衛星同士
- 2) 稼働中の衛星と非稼働衛星ないし物体(デブリ)
- 3) 非稼働衛星/物体同士

稼働中の衛星は軌道・位置の管理がなされ、軌道制御能力を持っているので、稼働中の衛星同士の衝突は注意をすれば本来避けられるもの。イリジウムのようなコンステレーションでは本来衝突の可能性は高いので、厳密な管理をすることが必須である。静止衛星でも同じく管理が常識である。ところが、自分のシステム内の衛星については管理することは当たり前でも、他の類似システムに属する衛星までモニターすることはまれである、というか、不可能である。SNNのデータから他の衛星の軌道情報は得られる。しかし、このデータを衝突解析に使うことは適切でない。衝突を取り扱うには軌道要素の中央値に加え、確率データ、いわゆるCovarianceが必要であるが、SNNは中央値しか公開していない。解決策としては単純である。アメリカがCovarianceまでを公開するか、あるいは、衛星保有機関が相互に軌道データを交換すること。後者が将来的にも有利であることは自明である。

稼働中の衛星に非稼働の物体、つまりデブリが接近する場合は事情が全く異なる。2009年のイリジウムとコスモスの衝突はこのケースである。非稼働物体はその軌道制御がもはやできず、トラポン機能も当然失われているので、通常の方法で軌道を同定することもできない。このような物体の軌道をモニターしているのは、やはりSNNである。ここでもSNNがCovarianceまで公開することが全面解決への道を開くことになるが、アメリカとしてはその方向へ動く気配はない。しかしながら、イリジウムとコスモスの衝突の結果を受けて、アメリカは次善の策として、異常接近が予測される場合にJoint Space Operation Center (JSOP) から衛星オペレーターに通知を出すようになった。この通知には双方の物体の軌道要素が詳細に記述され、オペレーターサイドではどれほどの危険性があるか自分で判断ができるようになっている。衝突回避の軌道制御をするかどうかはオペレーターサイドの判断による。

一方、非稼働物体同士に関しては、如何に精密に衝突解析が行われ、予測がされようとも、衝突を回避する手段はない。将来的にはこのケースが最も憂慮される。現在これに対処する手段としてガイドラインに含まれているのが、いわゆる25年ルールである。衛星やロケット上段は、ミッションを終えた時点から25年以内に大気圏に突入させる等の方策で軌道上から除去することが求められている。これから打ち上げられる衛星やロケットはこれに準拠したものとなるであろうが、問題はすでに軌道上にある物体の取り扱いである。何百年もの軌道寿命を持つ何トンもの大型物体がすでに数百個は存在する。何らかの回収技術を開発してより危険なものから除去してゆくことしか対処手段はない。日本をはじめとして各国ではそのような技術開発を行っており、IAC等の国際会議でもこの方面の報告と論議の場が提供されている。

このようにみると、今後避けるべき破片の生成に対しては、各種のガイドライン等で技術的な対処策が明らかになっている。また、少なくとも稼働中の衛星に対してはJSOPの自発的な通知発行によって衝突の危険性は察知され、必要な場合の対処もできるようになった。最後に残るのが非稼働物体＝デブリ同士の衝突である。JAXAにおいて導電性テザーによる物体落下などの研究が進んでいるのは確かである。しかし、これを実現するプロセス、つまり実験、実証段階から毎年数個であれ処理してゆくシステムの構築とそのための費用についてはいまだ明らかにされたことはない。技術者はそのような技術開発には熱意を持っている。問題はその技術を適用して現実的なシステム化をすること、特に、一回のオペレーションがどれくらいのコ

ストになり、それを何年間継続する必要があるかを考えることで、その技術そのものの評価をすることが極めて重大であろう。筆者の大まかな予測では、オペレーションを50年オーダーで継続することが必要である。その間、システムを維持・運用してゆくための費用はどれほど必要であろうか。間違いなく現在の宇宙機関、ないし、その連合体だけで行うのは困難であり、新たな国際機関が必要であろうと考える。見方によっては、民間セクターにあっても極めて魅力的な投資対象ともなろう。確実なことは、政府が強くコミットすることが必要であり、そのためには広く一般的支持が前提となること。

筆者は、Debris Indexなるものを提案してきている。これは一般の人でも宇宙物体の危険性を認識できる指標である。専門家は高度な知識とデータを用いて危険性を計算することができる。しかし、専門家がこのような評価を独占している限りは、デブリの本質の理解とこれから求められるアクションに対する国民的広がりは無理である。

注) Debris Index: ある物体が軌道上寿命の間に幾つの破片を生成するかを示す指標。

$$I_{DEB} = \alpha M \cdot A \cdot F(h) \cdot T_{Orb}$$

衝突回避運動をする場合は、

$$I_{DEB} = \alpha M \cdot A \cdot F(h) \cdot \varepsilon_{AVOI} \cdot T_{Orb}$$

ただし、 M は物体質量、 A は断面積、 T_{Orb} は軌道にとどまる年数(軌道寿命)。専門家が国際合意により提供するべきは、 $F(h)$ =高度 h におけるデブリフラックス、 α =単位質量の物体が生成しうる破片数、 ε_{AVOI} =衝突回避マヌーバー(Collision Avoidance: CA)の効果。初期的な前提で求めた代表的物体の値は次の通り。

Satellite Type	α 1/kg	Altitude km	Flux 1/year/m ²	Orbital Life year	Mass kg	Area m ²	Debris Index	
							w/o CA	CA
Typical SSO Sat	30	800	10 ⁻⁴	25	800	4	269	27
Typical GEO Sat	3	36000	10 ⁻⁶	10	2000	10	0.6	0.1
Object in SSO	30	800	10 ⁻⁴	100	2000	10	6000	N/A
Small Sat	30	800	10 ⁻⁴	25	50	0.25	0.9	N/A
Cube Sat	30	800	10 ⁻⁴	25	1	0.01	0.001	N/A

Fragments / Flux considered > 1 cm

Tentative Assumptions

$$\alpha = 30 \text{ (LEO) and } 3 \text{ (GEO), } \varepsilon_{AVOI} = 0.1$$

$$F(800) = 10^{-4} \text{ (1/year/m}^2\text{), } F(36,000) = 10^{-6} \text{ (1/year/m}^2\text{)}$$