

スペースデブリの発生とその対策

JAXA 安全・信頼性推進部

加藤 明

1. まえがき

宇宙活動において、「宇宙のごみ」（以下「デブリ」）の発生を防止する取り組みは、国連や国際標準化機構が推奨するガイドラインや規格類、並びに宇宙先進国政府あるいは公的機関が発行する標準書等にて進められており、各国の関係者それぞれが可及的速やかに実行に移す必要がある。特に、ここ数年間の増加傾向が今後も継続すれば、宇宙活動を持続することがいずれはかなり困難となるほどである。このような悪化した軌道環境では、デブリの被害に対して積極的に信頼性と安全性を確保する必要がある。衛星・ロケットの品質を運用終了まで維持する信頼性、運用終了時点での廃棄処置を行うことの信頼性は、デブリ衝突による故障発生確率を含めて保証されるべきである。

2. 環境の状況

1957年に人類が宇宙へのアクセスを開始して以降、毎年衛星やロケットが軌道に投入され、その中の多くの物体が数十年間軌道に滞在し続ける。それに加えて衛星やロケットの破砕事象により多量の破片が発生している。発生したこれらデブリの数量は自然に落下する数量を凌ぐのでこれらデブリは増加しつつ付ける。図-1は米国が地上から観測し、軌道を公表している物体の毎年の増減を示すものであるが、2012年時点でこのように地上から観測できるものだけでも16,000個（軌道が公表されていない物体も含めれば22,000個）が蓄積されている。

3. 衝突被害

これらのデブリが軌道上の衛星等に衝突する頻度は軌道特性（高度、傾斜角度）や衛星等の形状特性に依存する。図-2はNASAの解析ツール（Debris Assessment Software-2）にて求めたもので、単位面積当たりの毎年の衝突数を軌道高度に沿って示したものである。

衝突の被害モードは、10cm以上のデブリでは衛星は粉砕し、1cm以上では致命的な不具合を起し、1mm未満でも脆弱な機器に衝突すれば貫通し、時には内部発力による破裂を引き起こすことになる。

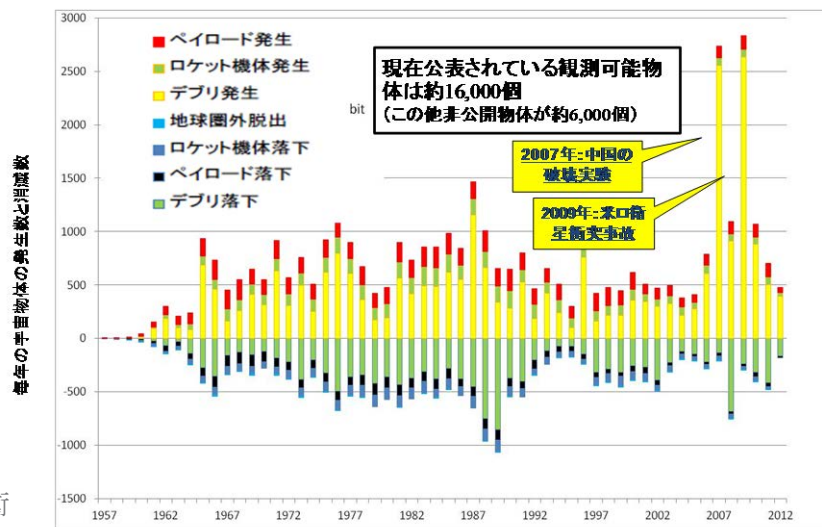


図-1 地球周回物体の毎年の発生と消滅状況
(データ出典: 米国防務司令部・統合宇宙運用センター
Satellite Situation Report/Space-Track/USSTRATCOM, @June 25, 2012) (処理責任: 加藤)

4. デブリの発生原因

軌道上物体の構成割合を図-3に示す。これはESAが2011年2月の国連 COPUOS/STSC 会合に報告した数値をベースに作成したものである。

デブリ対策はこれら発生原因毎に必要な。例えば破砕破片については意図的な破壊行為の禁止や爆発事故の防止、放出部品については放出しない設計を推奨すること、衛星やロケットの残骸については運用終了後に所定の期間内に有用な軌道から排除されるように管理することが望まれる。このような考えが世界のデブリ規制のベースになっていると考えてよいであろう。

表-1は世界の主なデブリ規制文書の要求事項の一覧である。

IADC ガイドラインは先進国宇宙機関が合意したものとしては初めてのガイドラインである。これが国連ガイドラインのベースとなっている。

国際標準化機構 (ISO) も ISO-24113 を制定している。JAXA は 2011 年にそれまでの JMR-003A 「スペースデブリ発生防止標準」を B 改訂してこの ISO 規格を包含した要求としている。ISO ではこの ISO-24113 規格の他に図-4に示す多くのデブリ関連規格を制定中である。しかし、これらの規格の中には単に上位規格の内容を繰り返すだけのものもある。筆者はこれらすべての規格を包含した解説書を提案して各国と調整中である。この解説書によればシステム設計者、各サブシステムの設計者がそれぞれ何をすれば良いか把握できる。

軌道上物体の衝突頻度

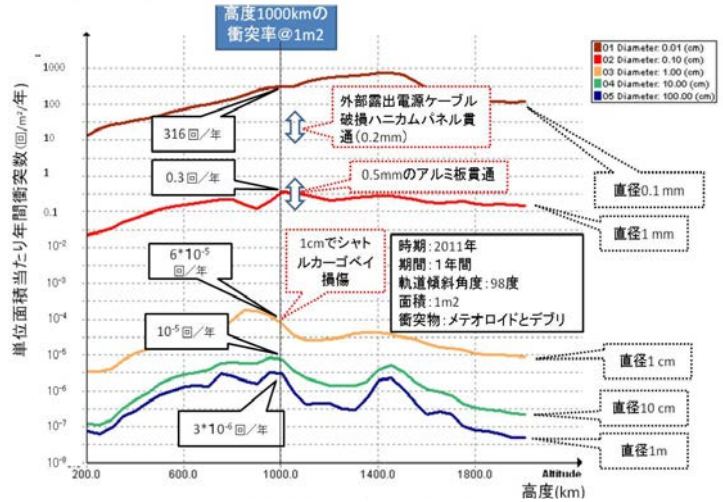
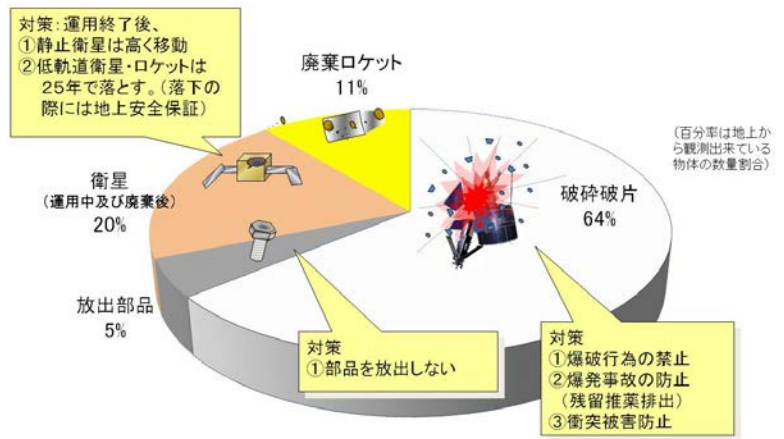


図-2 軌道高度毎のデブリ衝突頻度



出典: 数量割合はESAの2011年2月の国連COPUOS/STSCへの報告より

図-3 軌道物体の構成状況

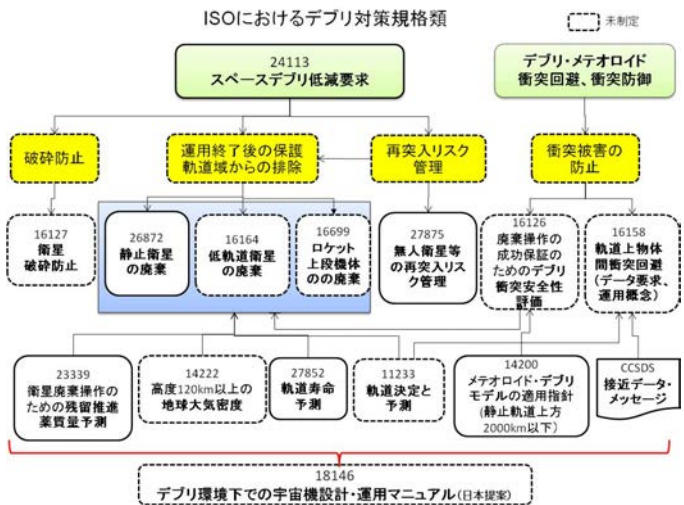


図-4 ISOにおけるデブリ関連規格

表-1 世界のデブリ発生防止規定

		低減策	IADC ガイドライン	UN ガイドライン	国連標準化機構 (ISO-24113)	NASA (NPR 8715.6A & 8719.14)	欧州行動規範	JAXA (JMR-003B)
部品の放出	部品類放出抑制		○	○ (Rec-1)	○	○>1mm	○	○
	固体モータ残渣物				○		スラグ<1mm	○
	火工品				燃焼生成物<1mm		破片<1mm	燃焼生成物<1mm
軌道上破砕	破壊行為禁止		○	○ (Rec-4)	○	100 object-years	○(SD-DE-04)	○
	運用中の事故		○	○ (Rec-2)	爆発確率<10 ⁻³	爆発確率<10 ⁻³	爆発確率<10 ⁻⁴	爆発確率<10 ⁻³
	残留推進薬放出等		○	○ (Rec-5)	○	一般的に要求	○	○
衝突	大型物体衝突回避		○	○ (Rec-3)		他文書で規制	○	○
	小型物体衝突対策		○			リスクの評価	他文書で対策推奨	○
運用終了後の処置	静止軌道	リオービット距離	ITU推奨式 離心率<0.003	○ (Rec-7)	ITU推奨式 離心率<0.003 成功確率>0.9	8715: +300km 8719:ITUの式 離心率<0.005	ITU推奨式 成功確率>0.9	ITU推奨式 離心率<0.003 成功確率>0.9
		GEO下側保護域	-200 km			GEO - 500 km	-200 km	-200 km以下
	低軌道・中高度軌道	軌道滞在期間短縮	推奨 (25年以内)	○ (Rec-6)	残存<25年 成功確率>0.9 100年不干涉	全期間<30、 EOL残存<25年 成功確率>0.9	残存<25年 成功確率>0.9	残存<25年 成功確率>0.9
		墓場軌道への移動			○	2,000 - 19,700 km 20,700-35,300 km	○	○
		軌道上回収		○		○		○
		再突入時地上被害		○	○ (Rec-6)	○	○(Ec<10 ⁻⁴)	○(Ec<10 ⁻⁴)

5. 破砕現象の内訳

図-3 では軌道上物体の 64%が破砕破片となっている。図-5 は破片の発生源について分類したものである。意図的破壊、運用終了後の推進系の爆発、不具合による破砕が三大原因である。

図-6 は破砕したロケット・衛星が打ち上げられた年と破砕を発生させた年の関係を示したものである。最も多い意図的破壊は 1964 年から 2008 年迄米ロを中心に行われてきたが、基本的には 1993 年でほとんど終了している。2007 年の中国とそれに引き続く 2008 年の米国の破壊は冷戦とは別の枠でとらえるべきである。

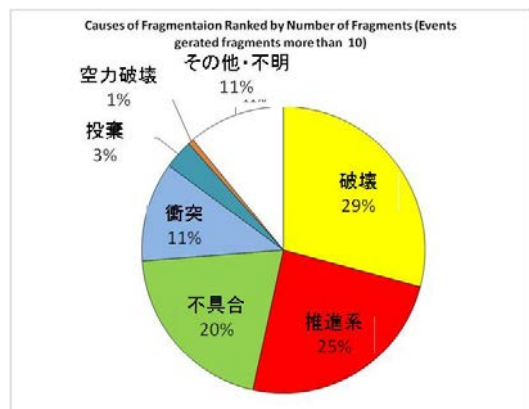


図-5 破片の発生数による発生原因の分布 (破片発生数が10個以上のイベント)

将来予測としては冷戦構造の終結を考えれば意図的な破壊は今後は起きそうもない。中東あるいはアジア地域で新たな宇宙軍拡が繰り返される懸念がないとは言えないが、国連勧告が次第に整備されてきている現在、かつての頻度での繰り返しはないものと期待したい。

推進系の爆発事故は酸化剤と燃料が共通隔壁で仕切られ他構造のロケットで多発したものである。近年ではタンクの分離化が進められているか、残留推進薬の排出が勧告されており、この種のロケットの新たな打上げは先進国に関しては多くは無いと考えられる。新規参入者にこの経験が継承されなければ再発の恐れはある。

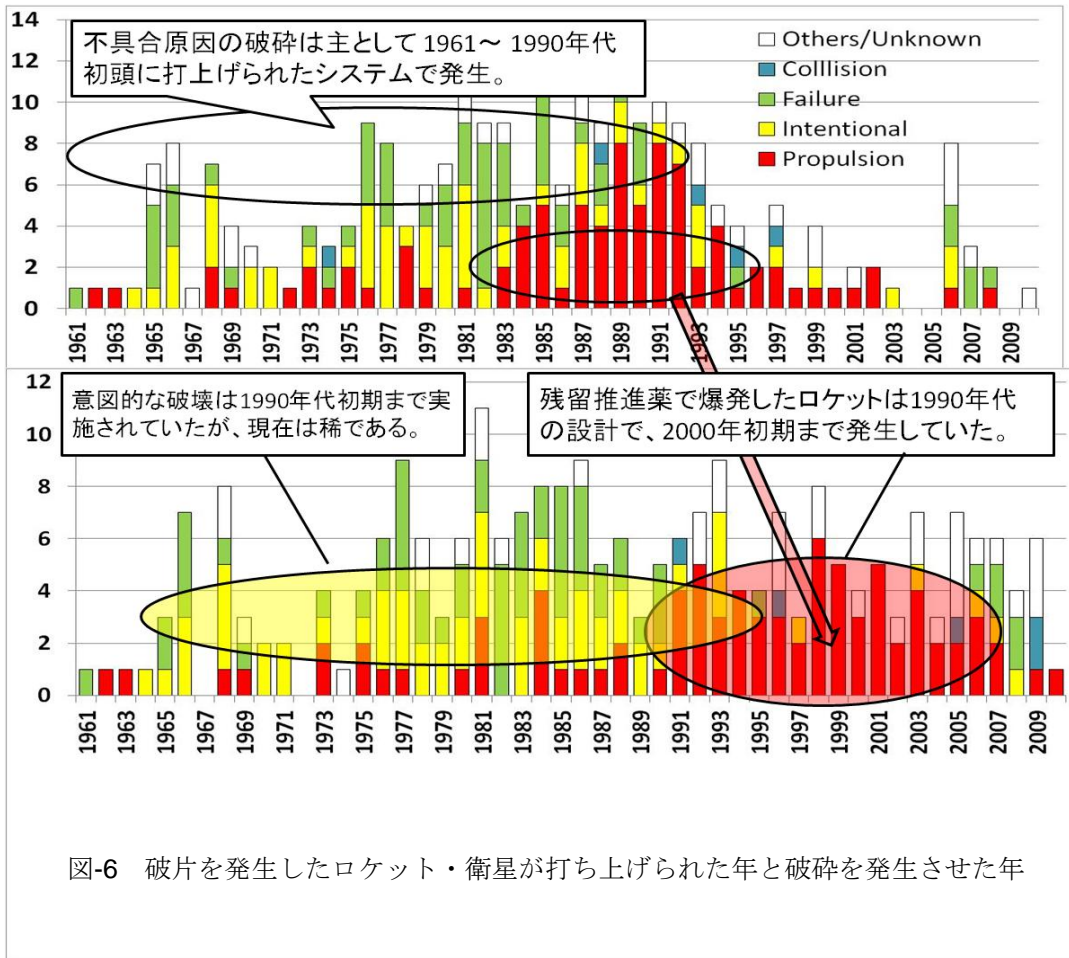


図-6 破片を発生したロケット・衛星が打ち上げられた年と破砕を発生させた年

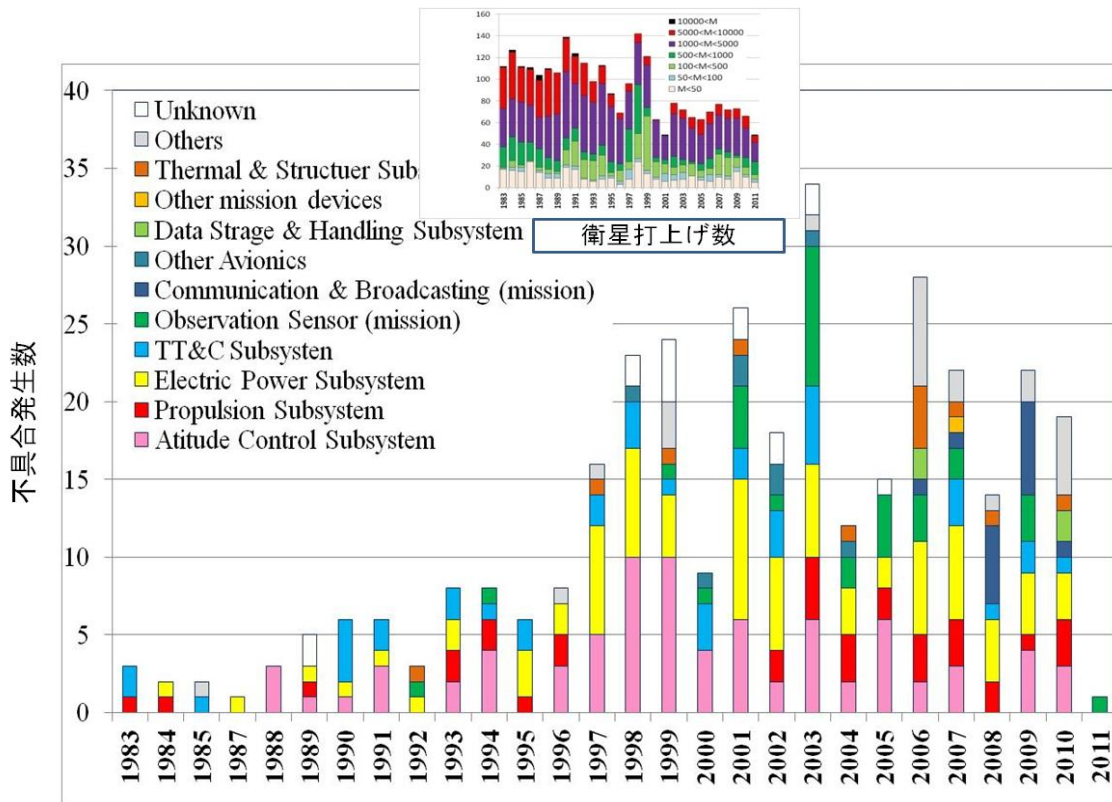


図-7 毎年の不具合発生数とサブシステム分類

三大原因の最後の不具合については、図-7に示すように21世紀になって世界の衛星打上げ総数が半減したにも関わらず不具合発生数は減少していない。不具合数がそのまま破砕数ではないがバッテリー、推進系の不具合は破砕に結びつきやすい。これも新規参入者が不十分な技術・品質管理で繰り返さないことが重要である。

6. まとめ

デブリの発生防止については過去の反省の下に、国連、IADC、ISO等国際機関でガイドラインや規格が制定され、今後の衛星国際調達や打上げサービスに適用されることで徹底されることが期待できる。とくにアリアンロケット、ソユーズ及びベガの打上げサービスを行うフランスが自国の領土から打上げる衛星に国内法を適用すると宣言したこともあり、衛星調達市場ではデブリ対策が徹底されているか否かで差別化が進み、この流れに乗れない衛星メーカーは脱落の方向に迫いやられることになる。

このような楽観的な観測の一方、現在のデブリ低減規格が品詞・信頼性のベースとなる管理手法については当然のこととしてほとんど言及していないことが懸念される。この意味で今後宇宙開発に参入してくる国あるいは企業、大学などが不具合による破砕を発生させてくる可能性は否定できない。新規参入者が、先進諸国が蓄積してきた経験・技術を如何に継承できるかが今後の動向を左右すると考えられる。この意味で、国際規格を発行するISO等の貢献が期待される。