

宇宙デブリの状況 その2 (破片の発生原因と飛散状況)

小澤 啓佑



米国 NORAD は、宇宙開発が始まって以来これまでに打上げられたロケットと衛星およびその破片（宇宙デブリ）の軌道情報を公表している。

以前の特別記事¹（宇宙デブリの状況（残留ロケット・残留衛星））では、NORAD の情報等^{2,3,4}に基づき、残留ロケット・残留衛星の分布状況について解説したが、本記事では、現在軌道に残留している破片について、その発生原因別に飛散状況を更に詳細に調査した。

右の図1は2015年までに打上げられたそれら宇宙デブリについて、現在も宇宙に残留しているものとすでに地球に落下したものの数を示している。なお NORAD は、低軌道ではおおむね直径 10 cm 以上、高軌道では直径 1 m 以上のものをカタログ化している。図1から下記のことが言える。

- ✓ 軌道に到達したロケットのうち約 33% (2,000 個) は現在も残留している。その軌道を次ページの図3に示す。
- ✓ 衛星については、約 57% (4,000 個) は残留している。その軌道を図4に示す。

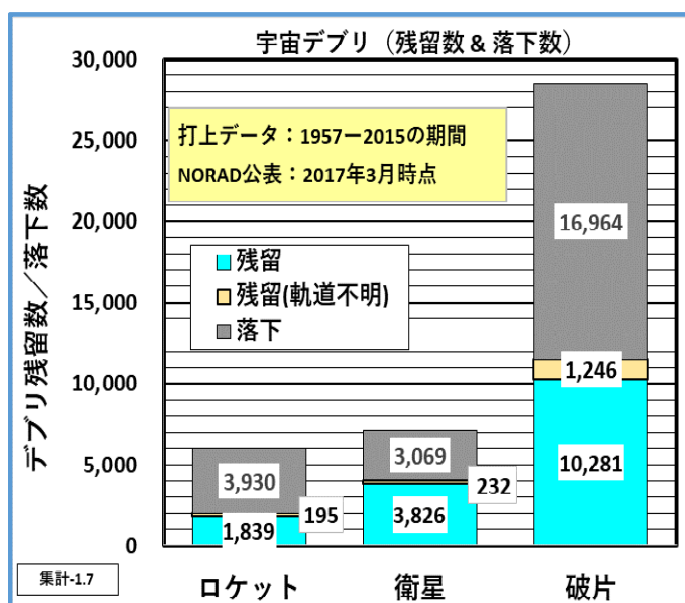


図1 デブリ残留数と落下数

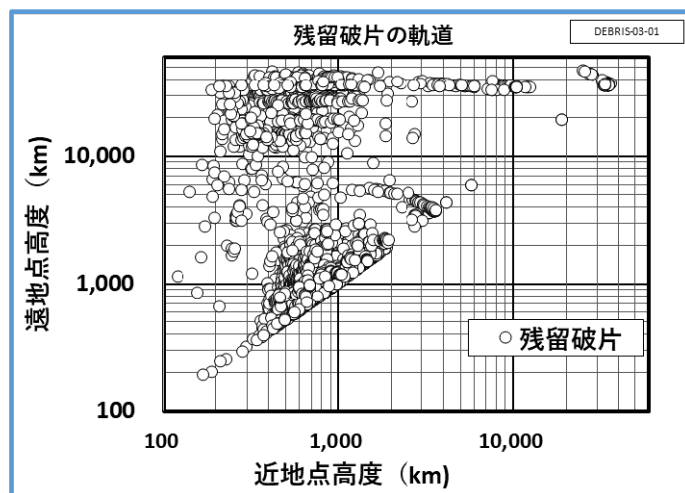


図2 残留破片の軌道

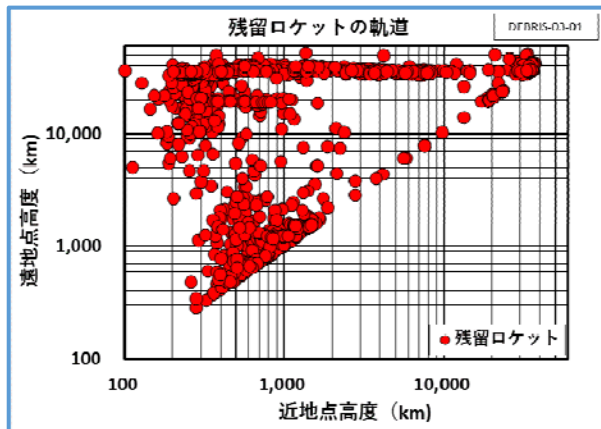


図3 残留ロケットの軌道

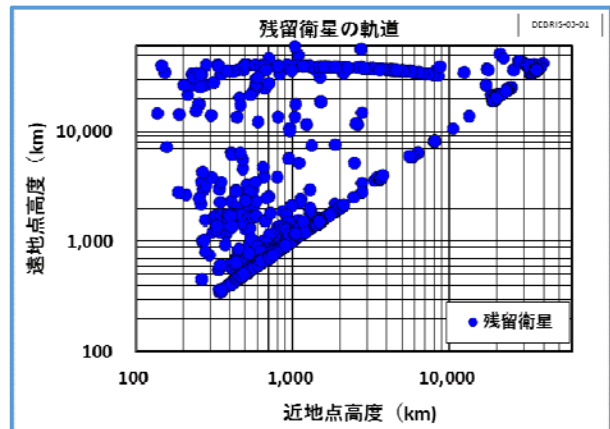


図4 残留衛星の軌道

- ✓ 現在、軌道に残留している破片の個数は約11,500個で、残留ロケットと残留衛星の合計の2倍に近い。その軌道を前ページの図2に示す。

1. 残留破片の飛散状況

破片は、主として長楕円軌道と低軌道に残留している。

(1) 長楕円軌道の残留破片 (図5)

- ✓ 長楕円軌道に残留している破片の密度は現在あまり高くはないが、近地点高度がおおむね400kmを超えると（断面形状にもよるが）軌道残留期間が50年～数十万年と長いため、今後も残留破片の数は増加するものと思われる。
- ✓ 長楕円軌道にはロケットが多く残留している（図3参照）。使用済みロケットの廃棄操作、推進薬の放出運用を強化するなど対策が必要である。

(2) 低軌道の残留破片 (図6)

- ✓ 現在軌道に残留している破片の数は約11,500個であるが、その約76%は高度300～1,800kmの範囲に残留している。また、低軌道の中でも高度800～900km近辺の破片の密度は最も高い（図6の赤枠部分）。
- ✓ 高度800～900kmに残留する破片は（断面形状にもよるが）地球へ落下するのに50年から数百年掛かるため、今後さらなる破片の増加が懸念される。

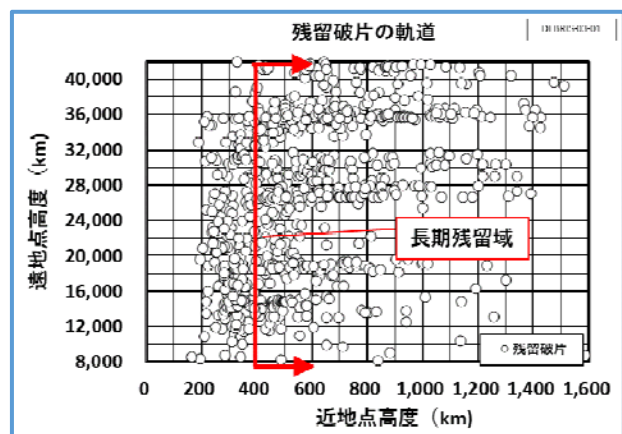


図5 長楕円軌道残留破片の軌道

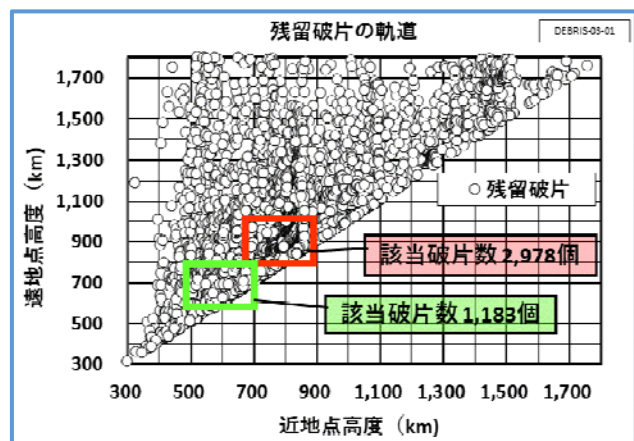


図6 低軌道残留破片の軌道

2. 発生原因別破片の残留数と飛散状況

破片の発生原因別残留個数を図7に示す。発生原因の概要は下記のとおり。

- (1) ロケットの爆発等（部品の放出を含む）
- (2) 衛星攻撃破壊（ASAT*実験）
- (3) 衛星爆発等（バッテリーの爆発を含む）
- (4) 衛星同士の衝突

(*) anti-satellite

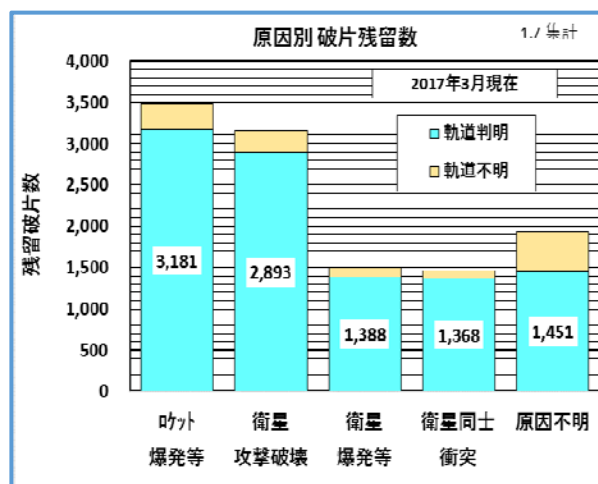


図7 残留破片の発生原因別個数

(1) ロケットの爆発等による破片の飛散状況

下図8にロケットの爆発等による破片の飛散状況（赤丸印）を示す。破片は長楕円軌道と低

軌道に多く飛散しており、軌道が不明のものを含めるとロケットの破片の残留数は合計約3,500個で、主として下記のロケットが爆発し、破片を飛散させたことにより生じた。

- ◇ 米国 Delta ロケット 12 機（1961 年～1978 年打上）
- ◇ 米国 Titan ロケット 3 機（1965 年～1968 年打上）
- ◇ 欧州 Ariane ロケット 12 機（1979 年～1992 年打上）
- ◇ ソ連 Tsiklon と Zenit-2 の 6 機（1978 年～1993 年打上）
- ◇ ソ連 Proton ロケット（Ullage Motor）16 機（1983 年～1997 年打上）
- ◇ 中国 CZ-4 ロケットの 2 機（1990 年、1999 年打上）
- ◇ インド PSLV ロケット 1 機（2001 年打上）
- ◇ 露 Proton ロケット（Breeze）3 機（2006 年～2012 年打上）

上記ロケットに搭載された自然性の残推進薬が打上げの数年から10数年後に爆発を起こした。現在では推進薬タンクの Passivation（防錆処理）や使用済みロケットの廃棄操作、残推進薬の放出運用など対策が進んでいる。このほかに中国の長征ロケット（CZ-2、-3、-4）では、2002 年ころから打上げられた約40機が原因は不明であるが、各機数個から数十個の破片を発生させている。

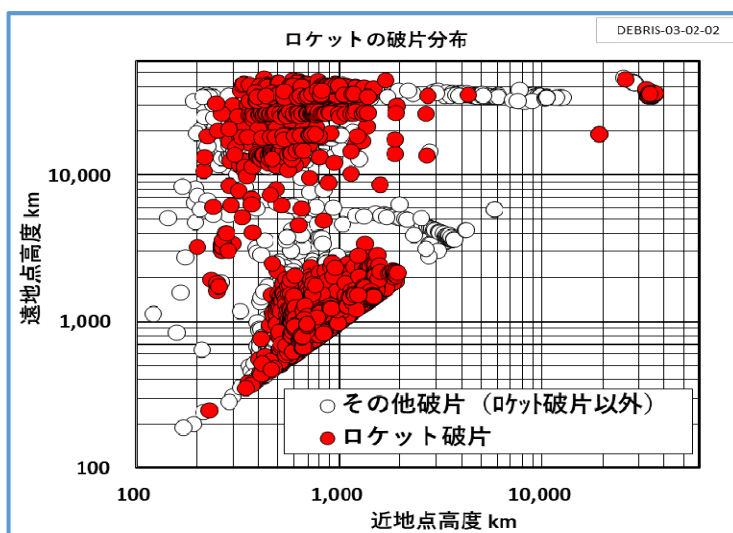


図8 ロケット爆発等による破片の軌道

(2) 衛星攻撃破壊による破片の飛散状況

下図 9 は 2007 年 1 月に中国が弾道ミサイルを使って同国の使用済みの気象衛星 Fengyun-1C (高度 850km) の破壊・実験を行ったことにより生じた破片の分布を示す (茶色の丸印)。この破壊により約 3,400 個の破片が発生し、現在もその 83%以上の約 2,900 個の破片が高度 500km~1,000km を中心に広範囲に残留している。

下図 10 は 1968 年~1982 年の間にソ連が実施した衛星攻撃 (ASAT) 実験により生じた破片の分布を示す (青色の丸印)。ASAT 実験は約 20 回実施され、うち 9 回については、破片の発生が確認されている。この ASAT 実験では Target となる衛星を先に打上げておき、その後攻撃機 (Interceptor) を打上げ、Target 衛星に近づき、その回りを 2 周回ほどし、Target の近傍で Interceptor が自爆することにより Target 衛星を破壊するというものであった。実験としてはあまり多数の破片を生じさせるものではなかったが、被攻撃衛星の高度が比較的高かったため、殆ど地球に落下することが無く、現在もほぼ 100%の約 270 個の破片が残留している。

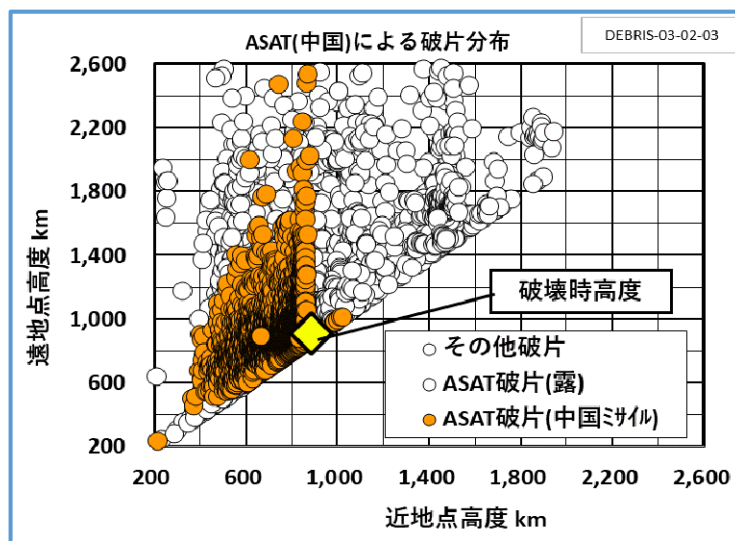


図 9 ASAT (中国) による破片の軌道

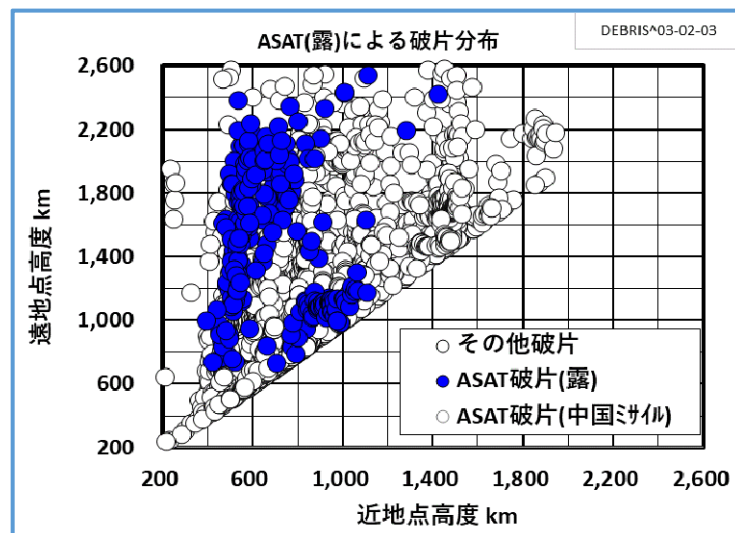


図 10 ASAT (露) による破片の軌道

(3) 衛星爆発等による破片の飛散状況

下図 11 は衛星の爆発等の事象により生じた破片の飛散状況を示している（緑の丸印）。衛星の爆発等の事象のうち最も破片の数が多いのはバッテリーの爆発で、これにより現在、約 1,000 個の破片が残留している。バッテリーの爆発は、打上げから数年～10 年を経たのちに事象が発生しており、多いものでは一つの衛星で数百個の破片を生じさせている。以下にバッテリーが爆発した衛星の例を示す。

- ◇ ソ連 ASAT Target 衛星 Cosmos 839 (1976 年打上) : 高度 970km×2,100km
- ◇ ソ連航法衛星 Cosmos 1275 (1981 年打上) : 高度 950km×1,000km
- ◇ ソ連 ASAT Target 衛星 Cosmos 1375 (1982 年打上) : 高度 1,000km
- ◇ ソ連測地衛星 Cosmos 1823 (1987 年打上) : 高度 1,500km
- ◇ 米国軍事気象衛星 DMSP 5D (1995 年打上) : 高度 840km
- ◇ 米国気象衛星 NOAA 16 (2000 年打上) : 高度 850km

バッテリーの爆発を除き衛星の爆発の原因は不明であるが、打上げから数十年を経たのちに破裂し数十個から数百個の破片を発生させており、(バッテリーの破片を除いた) 衛星の破片の数は約 500 個である。以下に爆発した衛星の例を示す。

- ◇ 米国気象衛星 Nimbus 2 (1966 年打上) : 高度 1,100km
- ◇ 米国軍事気象衛星 DMSP 5D (1991 年打上) : 高度 850km
- ◇ 米国早期警戒衛星 Midas 2 (1966 年打上) : 高度 3,700km
- ◇ 米国通信衛星 Satcom 3 (1979 年打上) : 高度 170km×36,000km
- ◇ ソ連気象衛星 Meteor-2 (1979、1982、1988 年打上) : 高度 850～950km

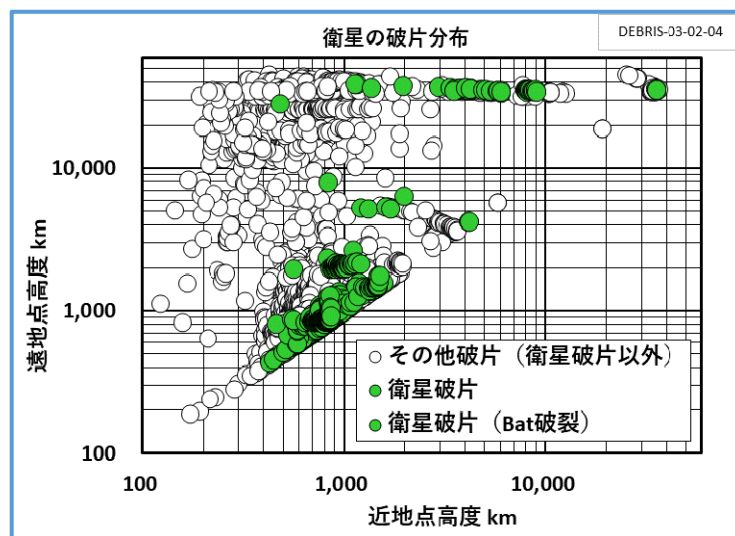
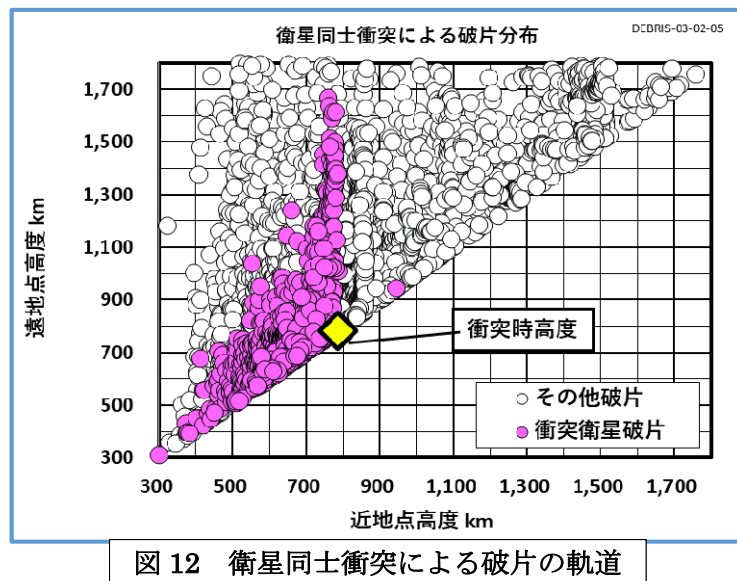


図 11 衛星爆発等による破片の軌道

(4) 衛星同士の衝突による破片の飛散状況

米国の商業通信衛星 Iridium 33 とロシアの軍事通信衛星 Strela 2M#51 (Cosmos 2251) は 2009 年 2 月、シベリア上空、高度約 780km で衝突した。人工衛星本体同士の衝突としては世界初であった。この衝突時点までに Iridium 衛星は 98 機、Strela 2、2M は 57 機が打上げられていたが、この衛星数程度では衝突の確率は極めて小さく試算結果では 50 万年から 100 万年に 1 回起こるような極めて希な事象である。なお Iridium 衛星は音声通信用衛星で重量 690kg、Strela 2M は蓄積転送型通信衛星で重量 875kg であったが、この衝突により Iridium 衛星は約 600 個の破片となり、現在その 55% の約 330 個が残留し、Strela 衛星は約 1,670 個の破片となり、現在その 66% の約 1,100 個が残留している (図 12 参照)。



【出典】

- 1: Space Japan Review, No.96, Spring 2017
特別記事 #2 宇宙デブリの状況 (残留ロケット・残留衛星)
- 2: NORAD サイト Real Time Satellite Tracking
- 3: NASA 資料 History of on-orbit satellite fragmentations
- 4: RAE (the British Royal Aircraft Establishment) サイト

著者紹介

小澤 啓佑

1969 年 科学技術庁宇宙開発推進本部 (同年 10 月宇宙開発事業団に改組) に就職、ロケット打上管制業務に従事、通信衛星 3 号 (CS-3) の開発、通信放送技術衛星 (COMETS) の開発、データ中継技術衛星 (DRTS) の開発、画像衛星の開発に従事している。