

静止軌道のスペースデブリの現況と将来予測

○有吉 雄哉*¹, 花田 俊也*²⁻⁴

* 1 九州大学大学院工学府航空宇宙工学専攻

* 2 九州大学大学院工学研究院航空宇宙工学部門

* 3 九州大学宇宙環境研究センター

* 4 独立行政法人宇宙航空研究開発機構

Abstract Geosynchronous Earth Orbit is one of the most important orbits for space activities. But space debris is increasing in the geosynchronous region. This paper explains about the present and future state of geosynchronous region. For predicting future environment, GEODEEM developed by Kyushu University is used. The model indicates that explosion is the main debris production mode in next 100 years.

Keywords: Space Debris, Geosynchronous Earth Orbit, Modeling

1. はじめに

スペースデブリとは不要な人工物体の総称である。一般には運用が終了した人工衛星やロケット上段機体といった大きな物体から爆発・衝突によって生じた破片や塗料片といった小さなものが含まれる。運用中の人工衛星と自然物質であるメテオロイドは除くのが一般的である。米国航空宇宙局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) によると, 1957年10月4日に打ち上げられた SPUTNIK 1 以来, 4500以上の宇宙ミッションが実行され, 2007年8月1日現在までに米国宇宙司令部 (US Space Command) のカタログに登録された人工物体の総数は, 31,998個に達するが, 12146個の人工物体は未だ地球周回軌道に残ったままである^[1]。静止軌道は宇宙活動を続けていく上で重要な軌道の1つである。この軌道は軌道周期と地球の自転周期がほぼ一致しているため, 地球上から静止軌道に存在する衛星をみるとある1点に止まっているように見える。この特徴を生かして通信衛星や気象衛星といった我々の生活に身近な衛星が多く存在している。一方, この範囲では空気密度が非常に小さいため, 低軌道のようにスペースデブリが自然に減少していくということがない。このため, スペースデブリを発生させないことが重要となる。本論文では, 静止軌道の現況と九州大学で開発を行っている静止軌道環境推移モデル GEODEEM による今後100年間の軌道環境の推移について論じる。

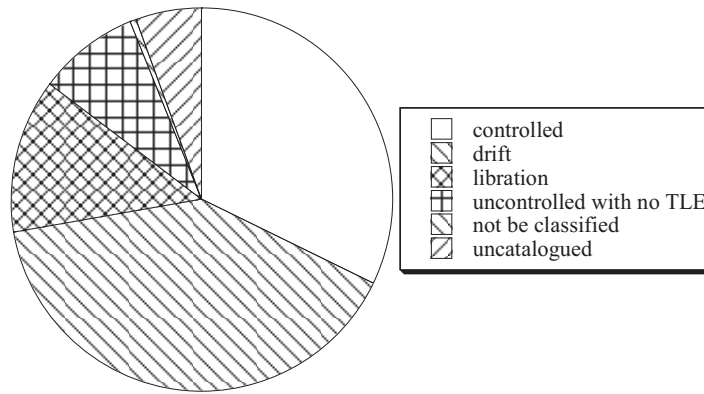
2. 静止軌道のスペースデブリの現況

静止軌道の範囲として以下のように定義されている^[2]。

- 離心率が0.1以下
- 平均運動が0.9から1.1以下 (長半径が39664 - 45314 km)
- 軌道傾斜角が30度以下

以下に, この定義に合致する物体についての現況を Choc^[2]を参考に説明する。

静止軌道は現在の観測機器では地球から観測が非常に難しい。2008年12月31日にこの範囲では1186個の物体が観測され米国宇宙司令部のカタログに記録されている。これらを軌道制御の状況によって分類したものが第1図である。このうち軌道制御を行っていない805個の物体がスペースデブリと考えられる。



第1図 静止軌道の軌道制御状況

打ち上げ数の推移

第2図に2000年1月1日から2008年12月31日までの打ち上げ数の推移を示す。毎年30個程度の人工物体が静止軌道に投入されている。このうち静止軌道に投入されている物体の大半は人工衛星となっている。ロケット上段機体は前述の静止軌道の定義には当てはまらない、離心率の大きな静止遷移軌道に存在しているものと思われる。

廃棄の推移

第3図に2000年1月1日から2008年12月31日までの運用終了後の衛星の静止軌道外への廃棄の状況を示す。Inter-Agency Space Debris Coordination Committee (IADC)^[3]や国際連合^[4]では、衛星のミッション終了後には静止軌道より高高度に軌道変換させることを求めているが、全ての人工衛星がこの勧告に従うことができていない。これは人工衛星の寿命末期には、軌道変換用の推進薬の推定が難しいことや、機器の故障によって軌道変換が難しいためである。

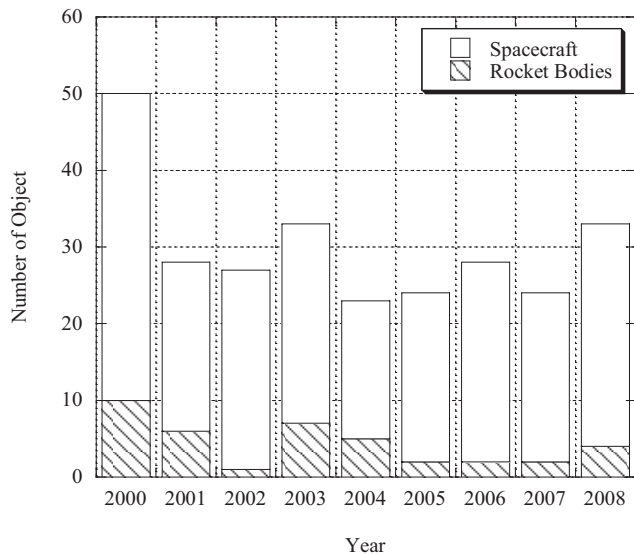
破碎の状況

静止軌道ではこれまでに衝突は確認されていない。一方爆発は2件確認されている。1つは、Ekran 2 (International Designator 1977-092A)で、1978年6月25日に爆発した。原因はバッテリーの爆発と考えられる。2つ目は、1992年2月21日に起こったTitan IIIC Transtage(1968-081E)である。残留推進薬が原因とみられる。しかし、NASAとESAによる静止軌道のスペースデブリの観測によると、これら2件の爆発ではない爆発によって生じたとみられる破片が観測されている。この観測結果等から、実際には静止軌道では10件の破碎現象があったものと考えられている^[5]。

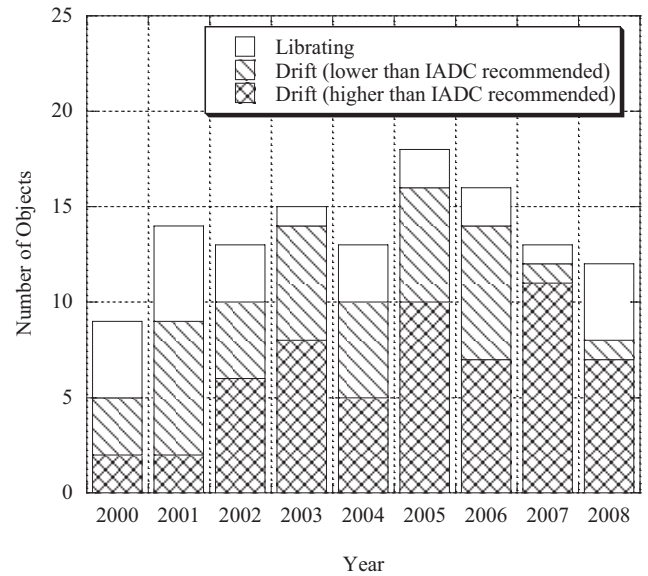
3. 今後100年間の推移

3.1. 環境推移モデル

今後100年間の軌道環境の推移の予測には、九州大学で開発を行っている静止軌道環境推移モデルGEODEEMを利用する。GEODEEMは2009年度にアップグレードを行い、現在のバージョンは4.0である。このモデルでは、これまでのGEODEEMでは、軌道上の物体を種類によって分類を行い、その物体数の変化から静止軌道の推移を予測していたが、バージョン4.0からは全ての物体を個別に取り扱うように変更した。詳細はAriyoshi^[6]を参考にされたい。以下では将来予測において重要なパラメータとなる爆発率と衝突率の算出方法について説明する。



第2図 人工物体の静止軌道への軌道投入数の推移
爆発率



第3図 静止軌道外への廃棄の状況

人工衛星とロケットの静止軌道累積滞在時間と地球近傍での Ekran 2 と Titan IIIC の爆発の回数から爆発率を設定する。まず全ての人工衛星の宇宙空間の累積滞在時間は約 58,000 時間である。このうち静止軌道累積滞在時間は約 9,500 時間である。宇宙空間において、Ekran 2 と原因が類似する爆発は 8 回あるので、静止軌道ではこれまでに 1.3 回の爆発が起っている可能性がある。同様にロケット上段機体の宇宙空間の累積滞在時間は約 33,000 時間である。このうち静止軌道累積滞在時間は約 3,100 時間である。宇宙空間において Titan IIIC に類似する爆発は 49 回あるので、静止軌道では、これまでに 4.7 回の爆発が起っている可能性がある。以上のことより、爆発率は第1表のようになる。

衝突率

衝突率を計算する前に、遠地点・近地点の比較と軌道間最短距離により衝突する可能性のある組み合わせを特定することで、計算量を減らすようにしている。フィルタを通過したもののみ、衝突の判別を行う。衝突の判別は、衝突球という概念から物体間の距離が一定値以下になった場合にその2物体の衝突確率を計算し、乱数との比較から衝突したどうかを判別する。

衝突率は上記の 1 つのフィルタを通過した軌道間最短距離の近い 2 物体間で計算を行う。計算には Chobotov や Reynolds による気体分子運動論を応用させた手法を衝突球に適用した方法を用いる。衝突球を第2図に示す。ここで衝突球とは軌道上物体を中心に直径が衝突限界距離dの球のことを表している。軌道決定の誤差や摂動などから、衝突球の内部で衝突が起こる可能性があると考えられる。衝突球の体積は次のようになる。

第1表 爆発率

| | 宇宙機 (人工衛星) | ロケット上段機体 |
|----------------|----------------------|----------------------|
| 軌道上滞在時間 (全領域) | 58,000 時間 | 33,000 時間 |
| 爆発数 (全領域) | 8 回 | 49 回 |
| 軌道上滞在時間 (静止軌道) | 9,500 時間 | 3,100 時間 |
| 爆発率 | 1.2×10^{-4} | 4.0×10^{-4} |

$$V = \frac{\pi}{6} d^3 \quad (1)$$

軌道速度を U とすると、物体がその球内に存在する時間は、

$$\Delta t = \frac{d}{U} \quad (2)$$

と表される。また、軌道周期を P とすると物体が球内に存在する時間 p は

$$p = \frac{\Delta t}{P} \quad (3)$$

となる。2つの物体は衝突球の重なり合った部分で衝突すると考えられるが、 ΔV を2つの球の重複体積とすると、

$$\Delta V = \frac{\pi}{3} h^2 (3d - 2h) \quad (4)$$

である。ここで $h = (d - \Delta r)/2$ であり、 Δr は2つの衝突球の中心が結ぶ線上において球が重なっている部分の線分の長さである。これらにより、物体2が重複体積内にいる確率は $p_2 \Delta V / V$ と表すことができる。ある1個の物体がその他の物体と衝突する確率は、断面積、数密度及び相対速度の積で与えられ、物体は球の重なり合った部分で衝突することになり、物体がその部分に存在する時間、断面積、相対速度を考慮することにより最終的に衝突する確率が式(5)で算出される。

$$C_{12} = \frac{p_2 \Delta V}{V} \frac{p_1}{V} A_{12} U_{12} \quad (5)$$

破砕モデル

破砕モデルには NASA 標準破砕モデル^{[7],[8]}を使用している。爆発率・衝突率によって爆発・衝突が発生した場合にこのモデルを使用して破片を生成する。

3.2. 予測結果

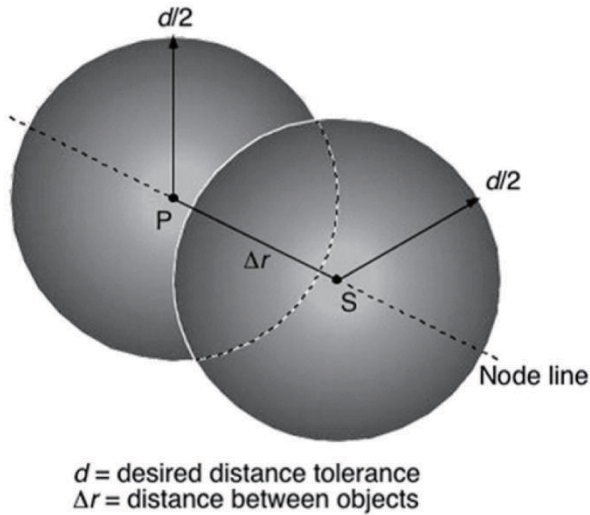
シミュレーションシナリオ

シミュレーションシナリオとして **Business as Usual** シナリオを定義する。このシナリオでは結果・初期軌道環境・軌道投入履歴を以下のように定めている。

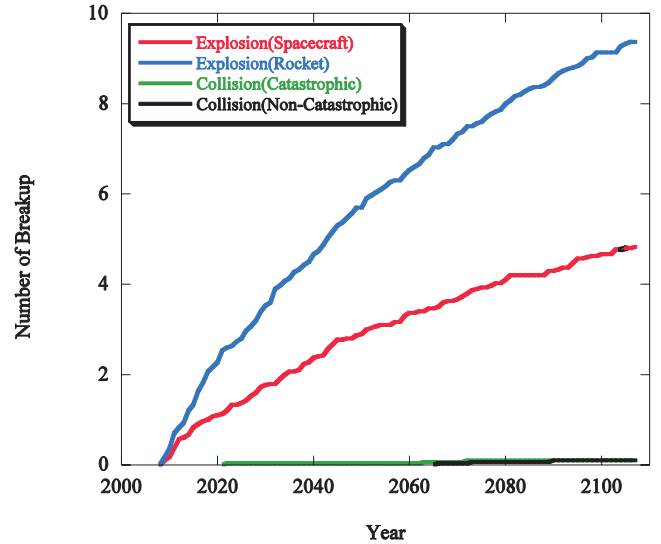
- 30回の試行の平均を結果とする
- 軌道計算は5日ごとに行う
- 軌道投入、爆発、衝突の判定は1年ごとに行う
- 初期条件は2008年1月1日現在の軌道環境に TitanIIIC と Ekran 2 とする
- 軌道投入には過去8年間（2000年1月1日から2007年12月31日まで）の軌道投入履歴を繰り返し使用する
- 軌道外廃棄は過去8年（2000年1月1日から2007年12月31日まで）の成否の割合と廃棄高度分布に従い行う

破砕数の推移

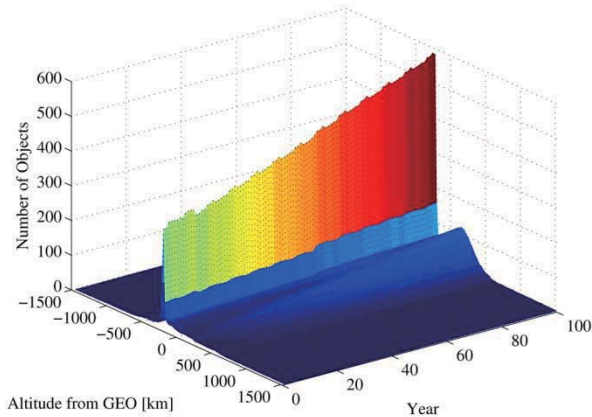
今後100年間の破砕現象の回数の推移を第5図に示す。この結果から、今後100年間においても、破砕現象の原因としては、爆発、特にロケット上段機体の爆発が支配的であることがわかる。



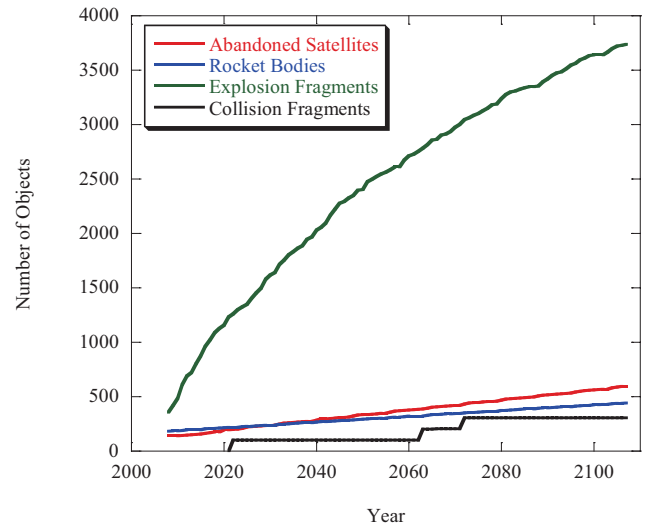
第4図 衝突球



第5図 今後100年間の破砕数の推移



第6図 今後100年間の高度別の物体数の推移
 物体数の推移



第7図 今後100年間の種類別の物体数の推移

Business as Usual シナリオを適用した場合の今後100年間の人工物体の分布の推移を第6図に示す。この図は時間軸には1年ごと、高度軸は36,000 kmを基準(0 km)とし、20 kmごとに結果をプロットしている。この結果からこれまでの状況が今後100年間続くと仮定した場合、静止軌道近傍の物体は増加し続けることがわかる。また、分類別の静止軌道近傍の物体数の推移を第7図に示す。静止軌道に直接影響を与えるものはこの中の静止軌道に放置された衛星と爆発・衝突によって生じた破片である。これら2つの要因はこのシミュレーションにおいて増加傾向を示している。静止軌道に放置された衛星の増加については、これまでの状況が今後も続くと仮定しているため軌道廃棄が完全には行われていないためである。一方、破砕現象によって生じた破片の増加については、爆発によって生じた破片が静止軌道に放置された衛星以上に増加している。これは前節で述べたように、今後100年間で宇宙機とロケット上段機体合わせて約14回の爆発があるためである。

4. まとめ

本論文では、現在の静止軌道の状況と将来の軌道環境の推移について述べた。現在の状況が続くと仮定した場合、静止軌道においては人工物体同士の衝突が起こる可能性は非常に小さく、爆発によってスペースデブリの増加が起こると考えられる。静止軌道では低軌道とは異なり、大気抵抗が働かないため自然浄化は期待できず、将来に渡り静止軌道を汚染し続ける。静止軌道を利用し続けるには、爆発を抑制し、スペースデブリの発生を防止することが重要となる。

参考文献

- [1] N. L. Johnson: HISTORY OF ON-ORBIT SATELLITE FRAGMENTATION 14th Edition, NASA Orbital Debris Program Office, NASA/TM-2008-214779, 2008.
- [2] R. Choc, R. Jehn: Classification of Geosynchronous Object Issue 11, European Space Agency/ European Space Operations Centre, 2009.
- [3] Inter-Agency Space Debris Coordination Committee: IADC Space Debris Mitigation Guidelines, 2007.
- [4] UN Space Debris Mitigation Guidelines, 2007.
- [5] Minute of the 27th Inter-Agency Space Debris Coordination Committee Meeting, 2009.
- [6] Y. Ariyoshi, T. Hanada: GEODEEM 4.0: Updated Model for Better Understanding GEO Debris Environment, The 27th International Symposium on Space Technology and Science, r-2-02, Tukuba, Japan, 2009.
- [7] N. L. Johnson, P.H. Krisko, J. -C. Liou, P. D. Anz-Meador: NASA's New Breakup Model of EVOLVE 4.0, Advances in Space Research, Vol.28, No.9, pp.1377-1384, 2001.
- [8] P.D. Anz-Meador, M.J. Matney: An assesment of the NASA explosion fragmentation model to 1 mm characteristic sizes, Advances in Space Research, Vol 34, No. 5, pp.987-992, 2004.