

超小型衛星 SEEDS・SPROUT を用いた軌道予測ツールおよび膜面展開による軌道への影響評価

Impact assessment of the track by track prediction tools and the film surface deployment using ultra-small satellite SEEDS・SPROUT

宮崎・山崎研究室
Miyazaki・Yamazaki Laboratory
木村 圭汰
Keita Kimura

Abstract: Currently, there are a number of satellites in space. While you are carrying the hopes and dreams of the human race, drifting as it is a long period of time space artificial satellites played a purpose, a problem that the debris of has occurred. In this study, using a high-precision orbital calculation software "Orbit Propagator", SEEDS, the orbit predicted as the target of two aircraft of SPROUT went. A result, it was possible to predict the period of up to atmospheric re-entry of the two aircraft. In particular, in the SPROUT done also verification of the film surface rate of expansion was carried out to predict the rate of expansion.

1. 背景と目的

今日、私たちの住む地球の遥か上空、宇宙では様々な目的、手段を持った無数の人工衛星が飛び交っている。この日本大学理工学部、宮崎研究室でも、2008年4月にSEEDS、2014年5月にSPROUTという小型人工衛星を打ち上げていた。しかし近年、衛星の多くが役目を終えたのち、そのまま宇宙空間に残り漂ってしまう、衛星のデブリ化等が問題となっている。

宇宙を飛び交う衛星やデブリは長い時間をかけてゆっくりと降下していき、やがて大気圏へ再突入し燃えてなくなるが、設計、開発の段階で衛星の軌道を高精度予測し問題となるような長い期間デブリとして残さないことが求められる。

そこで本研究では、宮崎研究室で打ち上げている超小型人工衛星SEEDS、SPROUTの二機を用いて、高精度軌道予測ソフト「Orbit Propagator」の有効性を評価し、両機の大気圏再突入までの予測をする。特に、SPROUTは2015年にメインミッションである軌道上での膜面構造物展開を行っている。膜面展開による軌道降下への影響も加味して検証していく。^[1]

2. SEEDS、SPROUT 諸元

まず初めに、本研究において対象とした二機の人工衛星、SEEDS、SPROUTの基本的な情報、軌道計算の際に用いたパラメータを記載しておく。また、上述した高精度軌道予測ソフト「Orbit Propagator」について簡単な説明をする。

Table 1. SEEDS 諸元

衛星名	SEEDS
打ち上げ	2008年4月28日
断面積/質量	0.015[m ² /kg]



Fig1. SEEDS の筐体

Table 2. SPROUT 諸元^[2]

衛星名	SPROUT
打ち上げ	2014年5月24日
断面積/質量	0.00716[m ² /kg](膜面収納時)

なおSPROUT膜面構造物を有しており、この膜面構造物の展開ミッションを2015年6月23日に行っている。

Orbit Propagatorの計算において断面積/質量の値が予測結果に大きく影響する。この膜面の展開率ごとの断面積/質量を下表にまとめる。

Table 3. 各膜面展開率ごとの断面積/質量

展開率[%]	断面積/質量[m ² /kg]
0%	0.00716
10%	0.0244
20%	0.0417
30%	0.0589
50%	0.0934
80%	0.145

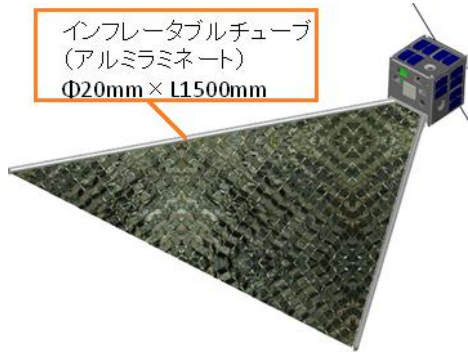
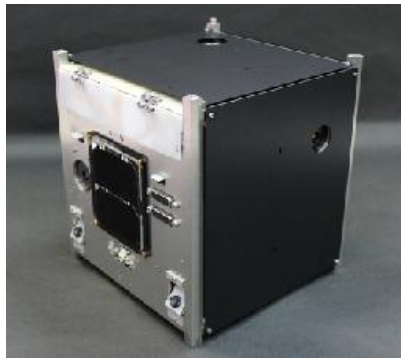


Fig2. SPROUT の筐体と膜面の略図^[2]

高精度軌道ソフト「Orbit Propagator」の仕様を以下の表に示す。^[3]

Table4. Orbit Propagator の仕様

項目	詳細
開発環境	Microsoft Visual Studio 2010
使用言語	C++
数値積分法	8次 Dormand-Prince 法
地球重力モデル	GGM03C 96次
大気抵抗モデル	NRLMSISE-00
月・太陽モデル	JPL DE405
太陽フラックス f10.7	参考文献より引用 ^{[4] [5]}
地磁気摂乱	参考文献より引用 ^{[4] [5]}

太陽フラックス、地磁気摂乱のデータは以下の観測データより引用した。^{[4] [5]}

また、SEEDS、SPROUT 両機の TLE は以下の観測データを用いている。^[6]

以上のパラメータを用いて、検証を行っていく。

3. Orbit Propagator 整合性の確認

3.1 SEEDS による検証

本検証を行うにあたって、Orbit Propagator が SEEDS、SPROUT の両機に使用可能か確認する必要がある。よって打ち上げから約7年半経過し、軌道上のデータが豊富な SEEDS を用いて Orbit Propagator の整合性を検証した。

検証方法として、SEEDS の過去の TLE データより SGP4 をモデルとした計算方法により高度を算出し実際の軌道推移を求め、Orbit Propagator の予測結果と比較した。

精度比較の対象として、九州大学と JAXA が共同で開発した衛星の軌道降下が推定できる「デブリ発生防止標準支援ツール(DEMIST)」での予測結果も併せて下記グラフに示した。

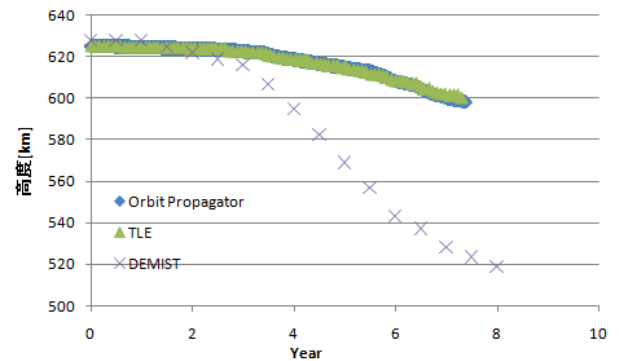


Fig3. SEEDS、軌道予測精度の検証結果

以上の結果より SEEDS 打ち上げから7年半分の TLE から算出した高度と Orbit Propagator の軌道予測結果がほとんど一致し、高い精度 (最大誤差±100[m]以内) があることが確認できた。

この結果を見て分かるように Orbit Propagator の精度は他の予測プログラムより遥かに高い精度があることが見て取れる。

3.2 SPROUT による検証

次に Orbit Propagator が SPROUT にも使えることを確認するため、SPROUT 打ち上げより約1年半分のデータと Orbit Propagator の結果を検証した。

なお、ここでは膜展開より前の1年間を対象とし膜展開後の検証は後に記載する。(膜の展開率によって予測結果が変わってくるため)

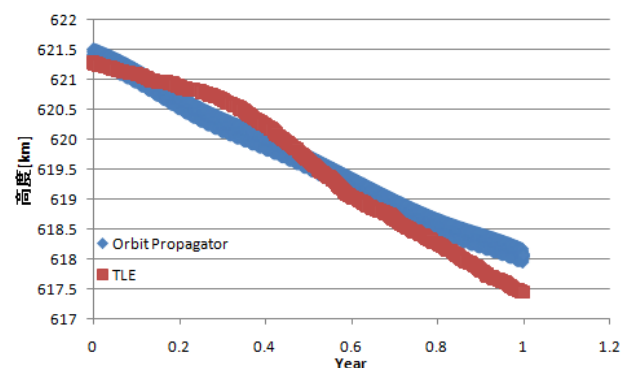


Fig4. SPROUT、軌道予測精度の検証結果

SPROUT でも実際の軌道と近い精度での予測ができることが確認できた。(最大誤差±350[m]以内)

以上。

.SPROUT 膜面展開率の予測

前述したとおり SPROUT は 2015 年 6 月 23 日に膜面構造物の展開を行っている。軌道の予測をするにあたって、膜面率が分からないと予測ができない。よって膜面展開から半年分の TLE データの軌道推移と、Orbit Propagator による各展開率ごとの予測結果から膜展開率を予測する。

Orbit Propagator の膜展開は打ち上げから 390 日後とした。

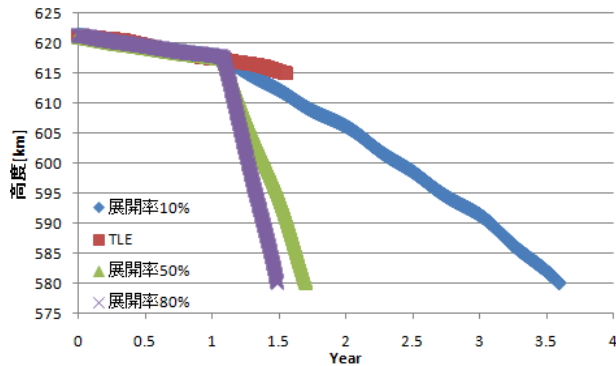


Fig5.SPROUT 膜面展開率の予測 1

この結果を見ると展開率は 10%に満たないことになる。ここから更に値を絞り込んだ

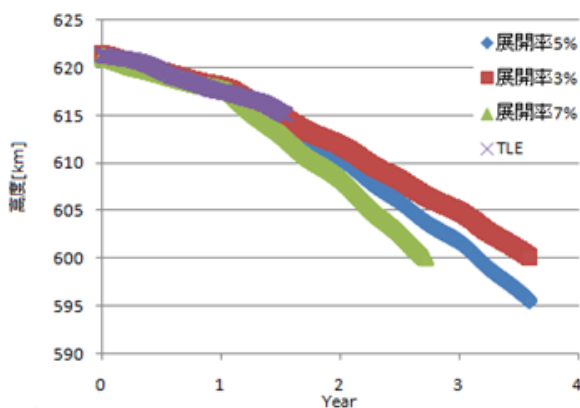


Fig6.SPROUT 膜面展開率の予測 2

このグラフから膜面展開率は Orbit Propagator の予測によると 3~5%という結果になる。

SPROUT に搭載されたカメラで、撮影したダウンリンクデータの写真をもとに、三次元復元したときの膜面展開率の予想値は 13%程度との報告があり、Orbit Propagator での予測結果と異なっている。Fig7 に実際のカメラデータを示す。

TLE の軌道推移をみてみると、膜面の展開前後で軌道の降下率に大きな変化が見られていない。TLE から算出した高度は実際の観測データと言えるので間違いはない。まだ展開から半年と、期間が短いため、今後 1 年、2 年とデータ量増えてくると、より精度の高い予測が可能になってくるだろう。

現状で Orbit Propagator の展開率予測がどの程度正しいかどうかは把握できないが、上述した写真データを見ると 3~5%という展開率は低いように伺える。

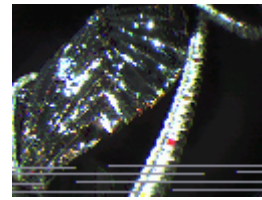


Fig7.軌道上で撮影した膜面の写真(1/5 圧縮 CAM2 ROM3)

5.大気圏突入までの軌道予測

5.1 大気圏突入までの軌道予測 (SEEDS)

SEEDS の大気圏突入までの予測結果は以下ようになった。

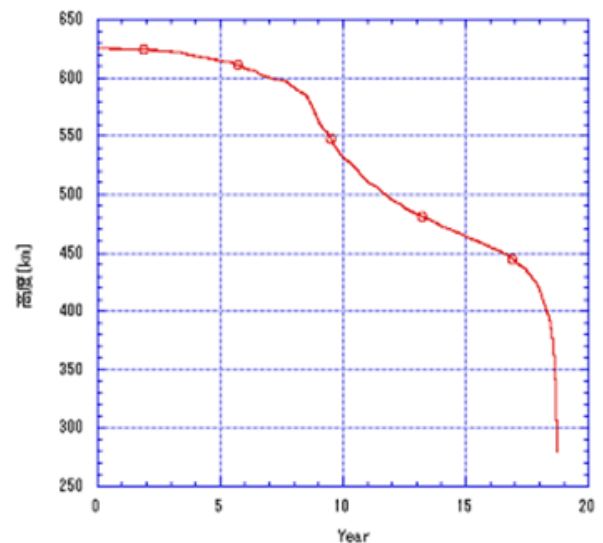


Fig8.SEEDS 大気圏再突入までの予測

再突入の高度は 280[km]とし予測。結果から大気圏突入までは約 18 年半となった。

ただし、Orbit Propagator で使用している太陽活動データは、打ち上げ後 7 年半は実際の観測データを使用しており、その後は今までの観測データ平均を 11 年周期で繰り返すと仮定して反映している

太陽活動の影響は、軌道の降下に大きく影響する大気抵抗に大きな影響を及ぼすため Orbit Propagator の結果にも大きな影響を及ぼすことが分かっている。

5.2 大気圏突入までの軌道予測 (SPROUT)

SPROUT の大気圏再突入までの予測は以下になった。なお、膜面の展開日は 390 日後、展開率は 3%として計算した予測値である。

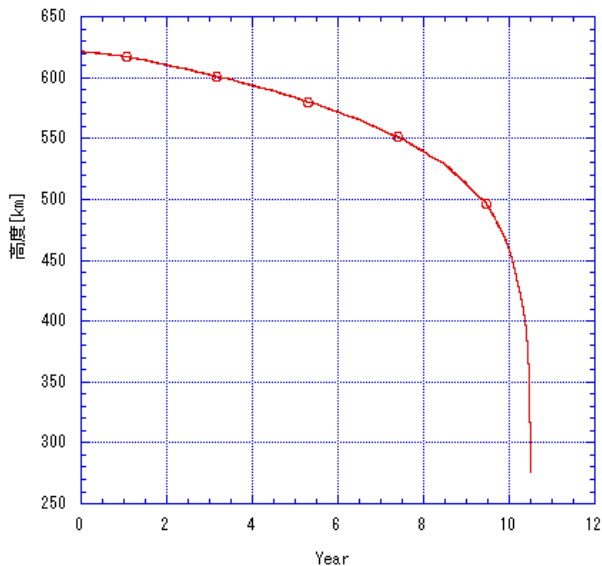


Fig.9.SPROUT 大気圏再突入までの予測

大気圏突入高度は SEEDS と同様に 280[km]とした。このグラフより、現時点で Orbit Propagator による SPROUT 大気圏再突入まで時間は、約 10 年半という結果がでた。

SEEDS と同様高度 400[km]を下回ってからの降下が急激になっている。軌道降下に大きく影響を及ぼす地球大気抵抗は、高度が低くなり、地球に近づいていくほど大きくなるのが起因していると考えられる。また、太陽活動データも平均データを 11 年周期で繰り返すと仮定して入力して。よって精度がどの程度かどうかはわからない。

6 結論

- SEEDS、SPROUT の両機の軌道を Orbit Propagator を用いて他の軌道計算ソフトと比較しても、高い精度で予測することが可能である。
- Orbit Propagator の予測によると SEEDS の大気圏再突入までの期間は約 18 年半である。
- Orbit Propagator による予測は太陽活動パラメータによって大きな影響を受けるため、高い精度を出すには正確なデータを入力する必要がある。よって、過去の平均データを 11 年周期で繰り返すと仮定して計算している仕様上、未来の軌道予測値は実際の軌道とずれてしまうことがある。
- SPROUT の膜面展開率は、Orbit Propagator による軌道予測と TLE から算出した軌道との比較から、3~5%という結果になった。
- Orbit Propagator による予測によると、膜展開 390 日後、展開率 3%のとき、大気圏再突入までに要する期間は約 10 年半である。

参考文献

- [1]盛本真史「人工衛星の高精度軌道計算」2013 年 3 月
- [2]宮崎康行「SPROUT 説明」パワーポイント資料
- [3]盛本真史「Orbit Propagator マニュアル」2013 年 3 月
- [4] 太陽活動データ
<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/kp/index.html>

Kp 指数京都大学大学院理学研究科附属地磁気世界資料解析センター

[5]太陽活動データ <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>

[6]SEEDS、SPROUT TLE データ

<https://www.space-track.org/#/tle>

スペーストラック

[7]Kaleida Graph マニュアル

<http://www.arch.eng.osaka-u.ac.jp/~kuwa/kuwa-site/memo/makekaleida/MakeKaleidaGraph.pdf>