

宇宙物体の軌道低下と宇宙天気現象の関係及び 宇宙天気現象を考慮した軌道予測の可能性

野澤 恵^{*1}, 久保庭 敦男^{*2}, アルベリウス 幸子^{*3}, 玉置 晋^{*4}

The Relationship between Satellite Orbit and Space Weather Phenomenon, and and the Possibility of Orbit Prediction considering Space Weather

NOZAWA Satoshi^{*1}, KUBONIWA Atsuo^{*2}, ARVELIUS Sachiko^{*3}, TAMAOKI Susumu^{*4}

ABSTRACT

The TLE(Two Line Element) is used to analyze the relationship between the altitude decreasing rate of orbit of a space object and the solar radio wave F10.7 over a period of about 50 years, and we found a very high correlation between them. The correlation can be approximated by a power distribution ($y = b \cdot x^a$) or an exponential distribution ($y = b \cdot \exp(ax)$). Using this approximation, we estimated the rate of altitude descent, compared it with the actual altitude change, and confirmed that the two altitude decreasing rates of orbit show similar trends. We observed the space object and compared the predicted trajectory with the actual trajectory. The possibility of orbit prediction considering space weather phenomena was discussed through statistical analysis.

Keywords: solar flare, space weather, SGP4, satellite, orbit, TLE

概要

TLE を用いて宇宙物体の約 50 年に渡る軌道高度の低下率と太陽電波強度 F10.7 の関係を解析し、非常に高い相関となった。その相関はべき乗分布($y = b \cdot x^a$)または指数分布($y = b \cdot \exp(ax)$)で近似することができた。この近似式を用いて高度の低下率の推測を行ない、実際の高度変化と比較し、二つの高度の低下率が似た傾向を示すことを確認した。実際に宇宙物体を観測し、予測した軌道と比較を行なった。そして統計的に解析することで宇宙天気現象を考慮した軌道予測の可能性について議論を行なった。

1. はじめに

地球を周回する人工衛星などの宇宙物体は地球・月・太陽の重力だけでなく、太陽光による放射圧などを受け、絶えず衛星軌道は変化している。超高層大気は太陽紫外線や磁気圏のオーロラ粒子などの影響を受け、大気温度や密度が変化することは知られている(King-Hele 1959, Wertz 2011)。特に高度 1000km 以下の低軌道では、希薄な地球大気にも関わらず大気抵抗が働き、宇宙物体の軌道高度は低下を続ける。太陽フレアやそれに伴う太陽紫外線強度の増大などの太陽活動現象や、地球磁気活動は宇宙天気現象と呼ばれる。2022 年 2 月に、多数のスターリンク衛星が地球磁気圏の小規模な磁気嵐により大気圏に落下し消失した(Kataoka et.al.2022)。これは宇宙天気の研究者に大きな驚きを与え、たとえ小規模な宇宙天気現象であっても、宇宙物体の軌道に与える影響を無視することができないことがわかった。

^{*} 2023 年 11 月 30 日受付 (Received November 30, 2023)

^{*1} 茨城大学理工学研究科理学野 (College of Science, Ibaraki University)

^{*2} アマチュア天文家 (Amateur Astronomer)

^{*3} ABLab(Aerospace Business Laboratory)

^{*4} ABLab/ 茨城大学理工学研究科博士後期課程在籍

(Aerospace Business Laboratory/Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University)

宇宙物体の軌道については JAXA の衛星では独自に軌道計算を行い軌道予測しているが、大学発の超小型衛星などでは、アメリカ合衆国宇宙軍(USSF)の提供する TLE(Two Line Element)を使用している。また運用停止となった人工衛星やスペースデブリなども、TLE を用いた軌道計算により、衝突などの回避が行なわれている。

TLE は Brouwer(1959)をもとに、SGP4(Simplified General Perturbations Satellite Orbit Model 4, Hoots and Roehrich(1980))の軌道計算用アルゴリズムを用いて、宇宙物体の軌道要素として提供されている。現在は Space-Track.org や、そのミラーサイトである CelesTrack など入手可能である。低軌道では誤差 1 km を内包し、また衛星など比較的大型の飛翔体は更新頻度が高く、毎日更新される場合が多い。宇宙物体として地上から観測できる 10cm 以上の物体について 5 万個強が TLE として、現在登録されている。

野澤ら(2021)では、太陽活動の指標である相対黒点数と宇宙物体の軌道低下の相関を示した。ここでは太陽活動極小期に比べ、太陽活動極大期では最大 10 倍となる一日に 30 m 程度の軌道低下があることがわかった。そして、軌道予測と実測の差から超高層の大気抵抗となる密度の変動を推定できることを示唆した。太陽活動以外に地球磁気圏の磁気嵐も加えた研究として、玉置ら(2022)は宇宙物体の高度低下の観点で地球低軌道物体の特徴について議論し、定性的に 4 層構造に超高層大気を分類することを提案した。

本研究は TLE を用いて宇宙物体の軌道低下と宇宙天気現象の関係を解析し、特定の宇宙物体の軌道低下率を推定した。そして予測した軌道と観測データとの比較を行い、宇宙天気現象を考慮した軌道予測の可能性について言及する。

2. 使用するデータと解析方法

TLE には軌道要素の 6 つの量が含まれている。本研究は野澤ら(2021)の解析方法と同様に元期、平均運動を用いた。今回使用する宇宙物体は離心率が 0 に近く、軌道を真円と仮定し軌道半径(地心距離)を求め、高度を求める。ただしこの高度は、理解しやすいように軌道半径から地球の平均半径を差し引いたもので、平均海面からの標高の意味ではない。これは解析において最低 30 日以上期間で考えるため、平均化及び簡略化したモデルを用いたためである。

またデータ取得は <https://www.space-track.org/> にアカウントを作成し、python の spacetrack, tletool ライブラリを用い、python から直接 TLE をダウンロードし解析を行った。加えて天体の位置計算や SGP4 を用いた軌道計算に skyfield ライブラリを用いた。この skyfield ライブラリ(<https://rhodesmill.org/skyfield/>)は、天体暦や星座線(星座を構成する星と星を結ぶ線)、ヒッパルコスカタログ(ヒッパルコス衛星のデータから作られた星図)の使用も可能で、宇宙物体の衛星軌道を SGP4 予測ライブラリで計算し、地図や天球に表示が可能である。

太陽活動の指標として、野澤ら(2021)では太陽相対黒点数を用いたが、本研究では太陽から定常的に放射されている波長 10.7cm(周波数 2.8GHz)の電波の強度(単位は Solar Flux Unit (SFU) = $10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ 、以下 F10.7 とする)を用いる。これは太陽相対黒点数と強い相関があり(Chen et al. 2011)、太陽活動の極大期では 200 程度、極小期では 70 程度と、黒点数と異なり 0 にならない。また、地球高層大気の加熱の原因と考えられる太陽紫外線強度とも強い相関がある。そして 60 年以上に渡り、観測され続けてデータが OMNI2 で公開(<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>)されているため、今回の解析に使用した。

3. 結果その 1: 宇宙物体の軌道低下と太陽活動の関係

今回使用する宇宙物体は OPS 8180 (STP RADSAT) (TLE カタログ番号 6217、COSPAR:1972-076B、以下「宇宙物体 6217」とする)である。これは、質量が 208kg のアメリカ軍の衛星で、1972 年 10 月 2 日に打ち上げられた。当初は軌道傾斜角 98.4 度、遠地点高度 761 km、近地点高度 736 km の離心率 0.0015 であったが、現在の軌道傾斜角 98.546 度、離心率も 0.001 以下となっている。そのため軌道を簡単のため真円とした。

図 1 は、宇宙物体 6217 の 1974 年頭から 2021 年末までの円軌道と仮定した軌道高度を示したものである。エラー値が入っているが、解析では省いている。図 2 は太陽活動の指標である F10.7 を示す。太陽活動に応じて、軌道低下が大きくなるのが確認できる。ただし、2010 年からの軌道高度は顕著な低下になっていない。これは 2010 年からの太陽活動が穏やかなためと推測される。

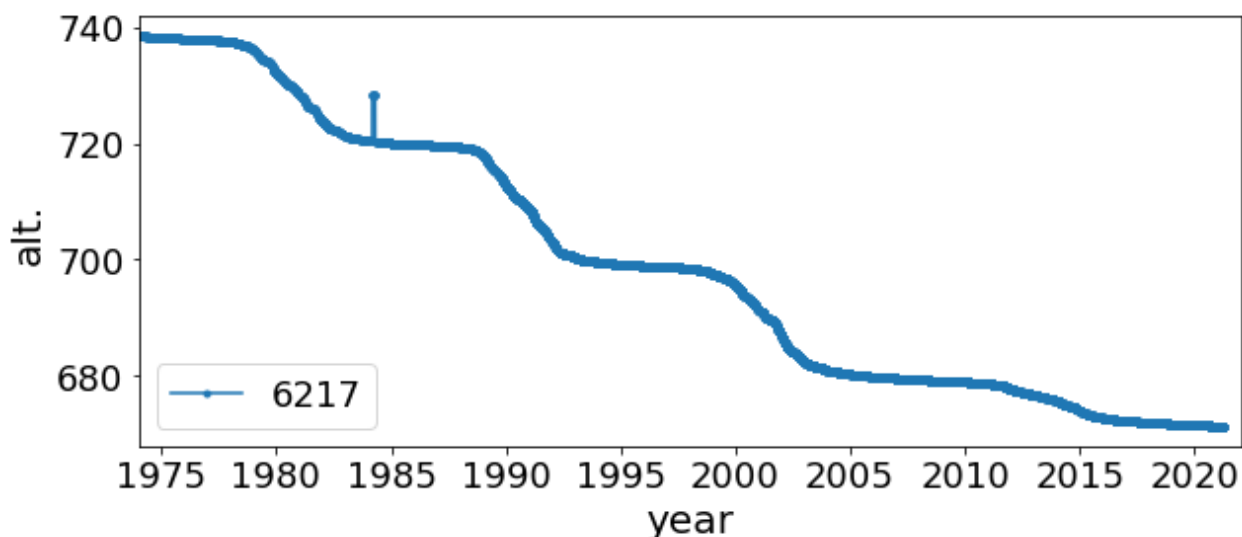


図 1 OPS 8180 (STP RADSAT)の高度(km)の時間変化図。TLE データから求めた高度を点で示した。

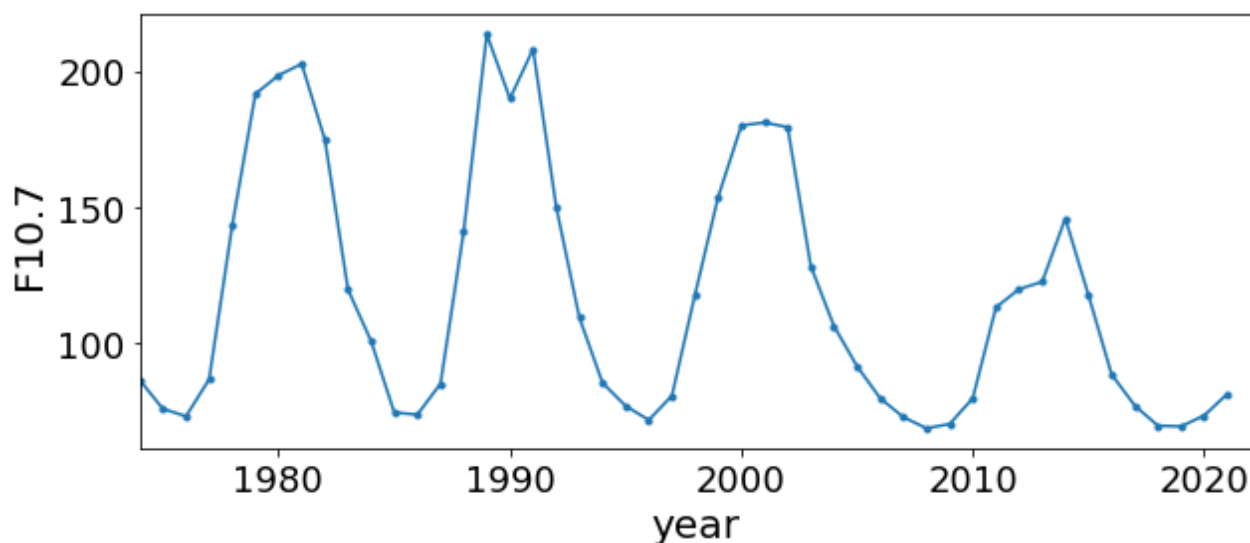


図 2 太陽電波強度 F10.7(単位は sfu(solar flux unit, 1 sfu = 10^4 Jy) の年平均の時間変化図。点はその年の平均値を示す。

野澤ら(2021)では衛星軌道高度から求めたある期間の平均の軌道高度の低下率(m/day、値自体は負のため相関係数は負となる)と相対黒点数との相関を報告した。本研究では、それぞれ同じ期間の30,60,120,180,360日間の高度の低下率とF10.7の相関を求めた。図3,4では360日間と30日間(太陽自転は27日程度)の相関を示す。30日間では値が散らばるが、360日間では相関が高く、ある関係式に沿っているように見える。そこで、図3はF10.7と軌道低下率の相関を両対数とした図で、相関係数は-0.95である、直線はべき乗分布($y = b \cdot x^a$)で、係数 $a = 3.1$, $b = 9.2 \cdot 10^{-7}$ 、 $y = 9.2 \cdot 10^{-7} \cdot [F10.7] \cdot x^{3.1}$ の線が示してある。ここで[F10.7]は、その期間の平均のF10.7の値を示す。図4は高度の低下率だけを片対数にした相関図で、相関係数は-0.95、直線は指数分布($y = b \cdot \exp(ax)$)を示す。 $a = -0.025$, $b = -0.098$ で $y = -0.098 \cdot \exp(0.025 \cdot [F10.7])$ となる。

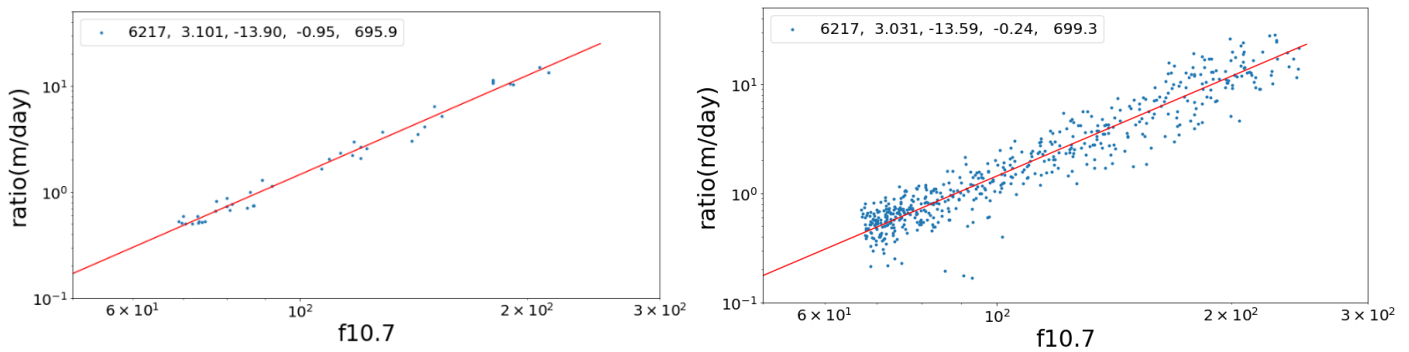


図3 F10.7と高度低下率の両対数を取った分布図。左が期間360日で平均したもの、右が30日で平均したもの。赤線はべき乗分布線である。

図の左上の数字は順にTLEカタログ番号、係数a,b、相関係数と軌道高度(km)である。

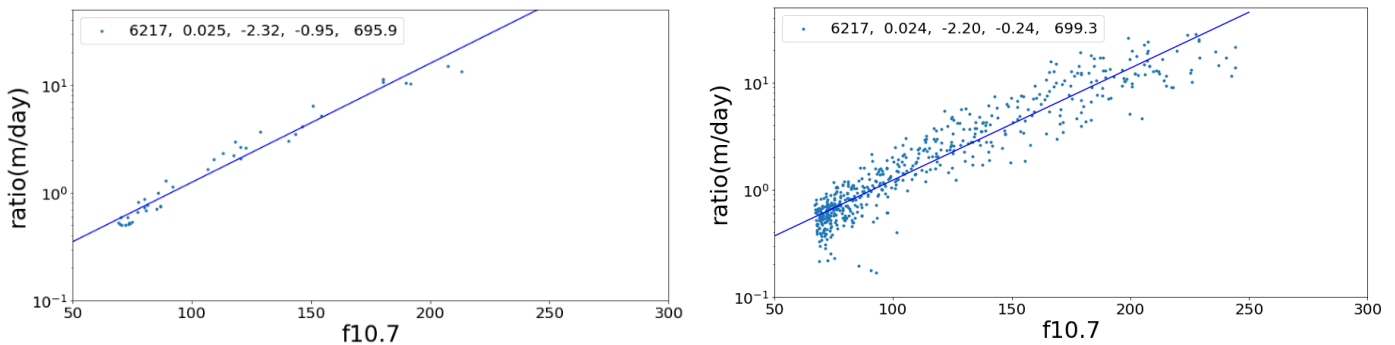


図4 F10.7と高度低下率の片対数を取った分布図。左が期間360日で平均したもの、右が30日で平均したもの。赤線は指数分布線である。

図の左上の数字は順にTLEカタログ番号、係数a,b、相関係数と軌道高度(km)である。

これらの関係式はF10.7の観測値を得たときの、高度の低下率を経験的に示すもので、例えば、F10.7がそれぞれ100, 200の場合は、1m/day, 10m/dayの低下率となる。これは、ある時間のF10.7の値が観測から提供されると、高度の低下率が計算されることを意味し、宇宙天気現象の影響による軌道の簡易的な予測、すなわち宇宙天気予報の一つと考えることもできる。

そこで、実際に過去の 6127 の高度の低下率の推測を行ない、実際の高度変化に対応しているかを検証する。そこで太陽活動が非常に激しかった 2000 年 7 月 14 日(天文観測衛星あすかが姿勢を乱したとき)の前後の三ヶ月間の軌道高度を図 5 の左に示した。右は 2008 年 9 月 1 日は太陽活動非常に低く、無黒点状態が長く続いた期間に含まれ、宇宙物体 6217 の軌道高度をそれぞれ示した。

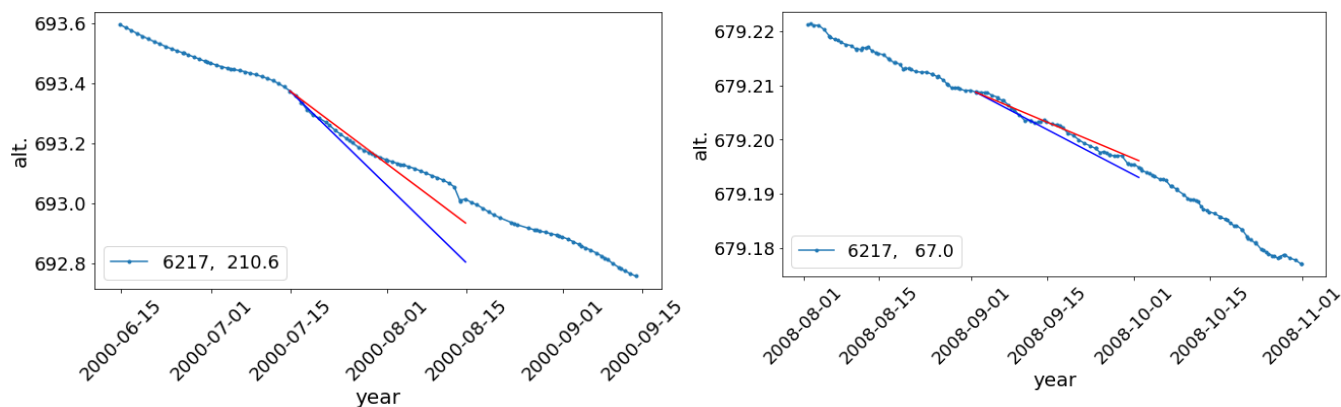


図 5 6217 の高度の時間変化図。左が太陽活動極大期である 2000 年 7 月 14 日を含む三ヶ月間、右が極小期である 2008 年 9 月 1 日を含む三ヶ月間である。赤と青の直線はべき乗分布と指数分布の関係式から予測された高度の低下率を示す。図の左下の数字は TLE カタログ番号とその日の F10.7 の観測値である。

縦軸のスケールは左右と異なり、左では三ヶ月程度で 0.8km 程度低下するが、右では 0.04km の低下である。また左図では約 15 日間で低下率の傾向が変わる。これは太陽自転が 27 日程度のため、活動領域が地球で観測し始めてから、15 日程度で半周し、地球から見えない裏側に移動するためと考えられる。

赤と青の直線はべき乗分布と指数分布の関係式から予測された高度の低下率である。左図では 7 月 14 日の F10.7 が 210.6 を使った予測の傾きは両者とも似た傾向を示すが、指数関数からの予測がより低下が激しく、最初の数日の傾きと一致している。右図は F10.7 も最低値に近い 67.0 となったときのもので、両者とも同じ傾きを示すが、やはり指数関数からの予測の方が、観測値に近くなっている。

4. 結果その 2:宇宙物体の予測した軌道と観測データとの比較

アマチュア天文家の観測例として、国際宇宙ステーション(ISS)が太陽面や月面を通過するときに撮影を行ない公開され、その鮮明な ISS の姿に息を飲むことがある。最近では地上から天球を見上げたときに、どんな衛星が通過しているかを可視化するスマホのアプリもあり、この延長で ISS が太陽や月、他の惑星と同方向に位置するときに、撮影に適した時刻や場所を知らせる機能を有するものがある。公開された宇宙物体と天体が写った画像を見ると、予測された軌道とは一致しないことが多く、角度にして 0.1 度程度離れることは良くある。また予測通りに太陽の真ん中を通過する場所で撮影したが、通常よりは離れたところである太陽の周辺を通過したケースもあった。その時期の太陽活動は比較的高かったため、大気加熱による大気抵抗が大きくなり、通常以上にずれた軌道となったと解釈できるが、憶測でしかない。そこで宇宙天気現象が軌道に与える影響を定量的に扱うために、精密な観測を行なった。

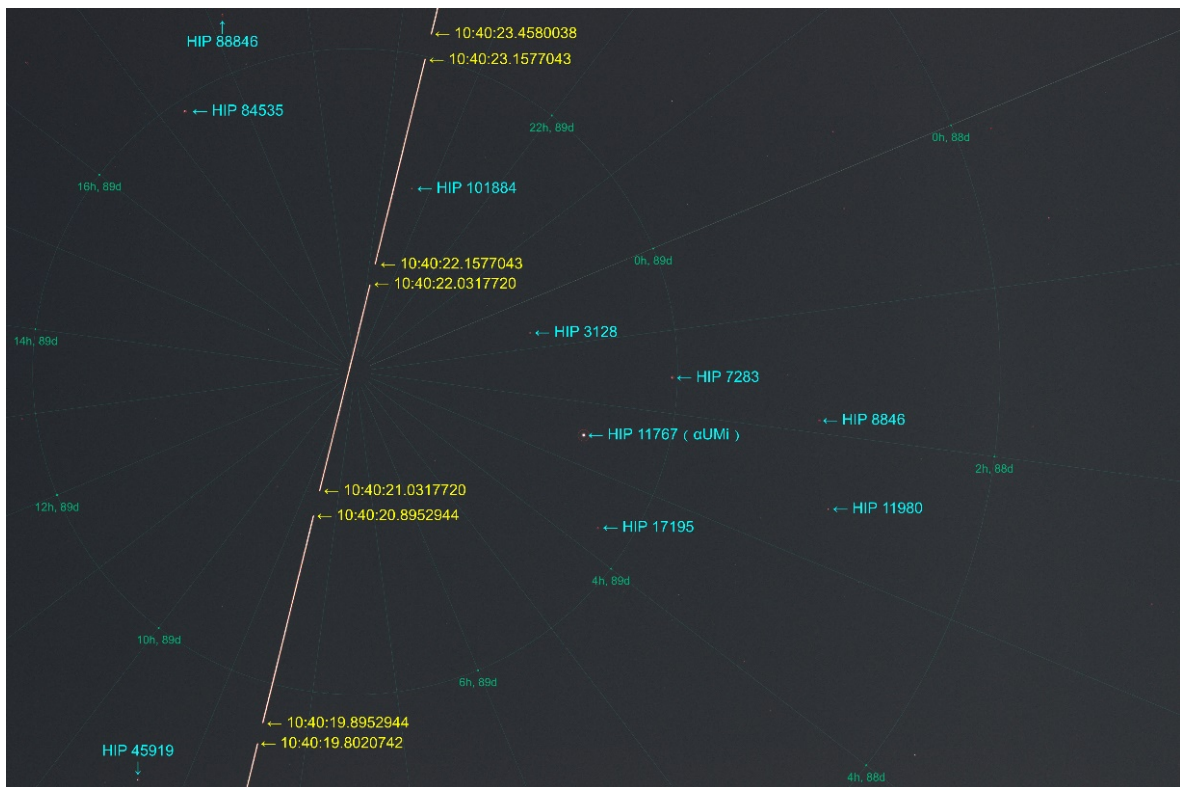


図 6 2023 年 6 月 20 日 19:40:22 JST に天の北極と北極星の間を通過する中国の宇宙ステーション(CSS)の観測画像。赤い破線は間欠の撮影された CSS の軌跡で、黄色の数字は UTC の時刻である。小青字は赤経赤緯、大青字はヒッパルコス星図カタログの天体で HIP と数字で示した。αUMi は北極星である。

そこで中国の宇宙ステーション(CSS、TLE カタログ番号 48274)を日本時間の 2023 年 6 月 20 日 19:40:20 ごろに観測した画像が図 6 である。天の北極と北極星の間を通過すると予測された CSS が見事に撮影されている。この画像は複数の画像を重ね合わせたもので、PC に同期した時刻が記録されているため、軌道時刻の同定が可能である。ただし時間精度としては、1/100 秒程度である。この画像には通過の日本時間の時刻が追記され、加えて北極星(HIP 11787(αUMI))などヒッパルコスカタログ番号)など、天体も記入されている。ただし観測機器などの由来の画像の歪みなどは排除していない。

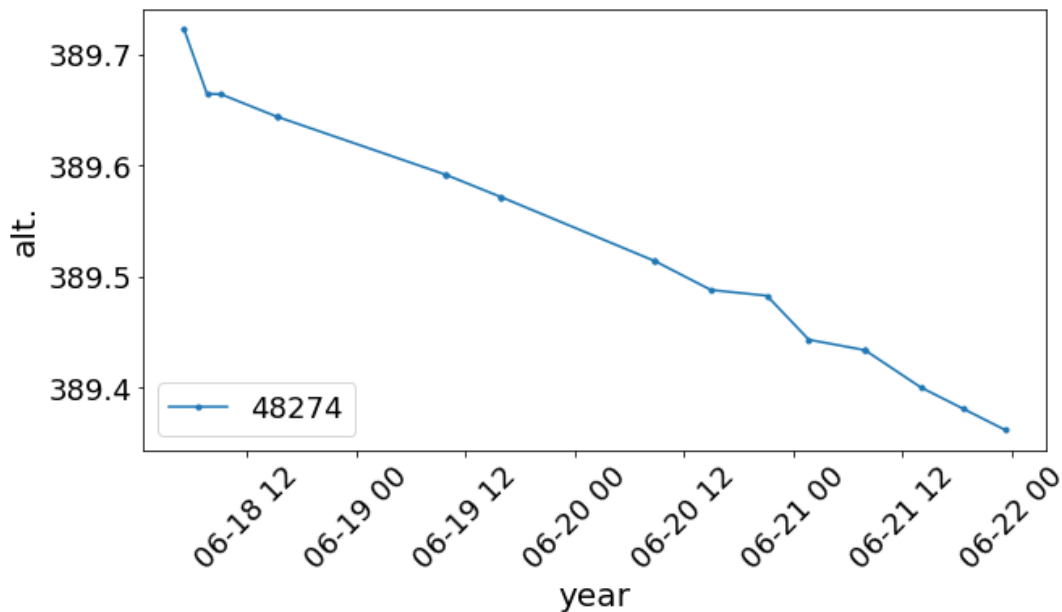


図 7 CSS(TLE カタログ番号 48274)の高度(km)の時間変化図

図 7 では CSS は離心率は 0.001 程度のため円軌道と仮定し、2023 年 6 月 18 日から 22 日までの軌道高度を示す。この期間は太陽面に 10 個以上の活動領域が存在し、中規模程度の M クラス太陽フレアが複数回発生しており、6 月 20 日の 16:42 には X1.1 の大規模フレアが発生した。画像撮影時はこの太陽フレア前 10:40UT であるため、軌道高度は通常の低下率である。撮影後の高度は上下をしており、太陽フレアの影響と予想される。

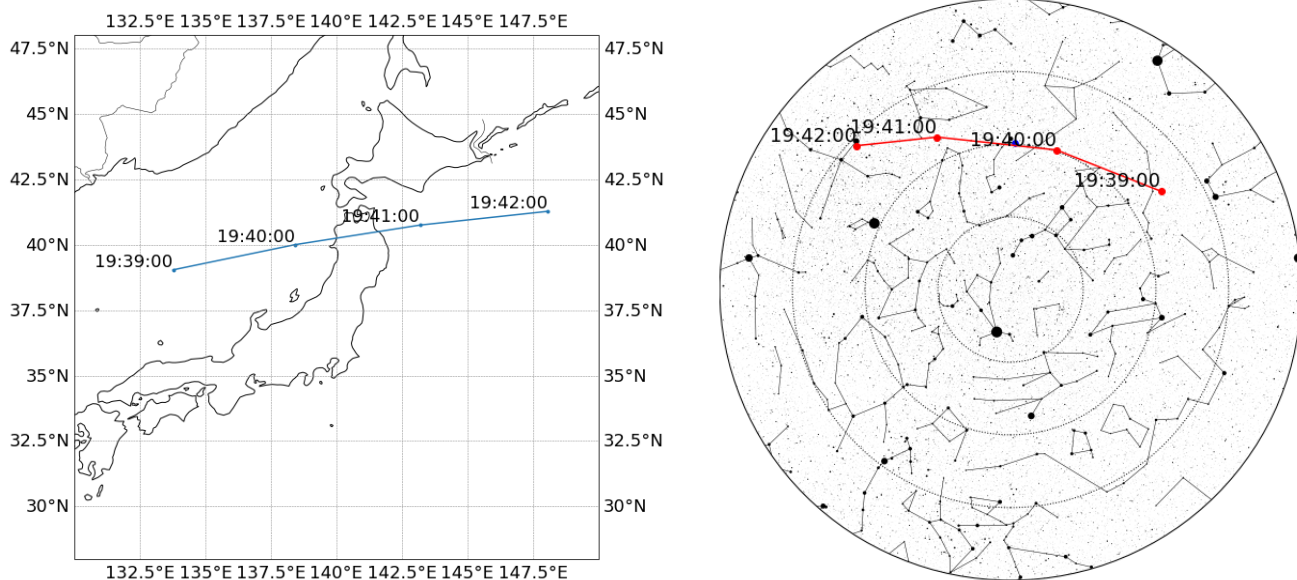


図 8 2023 年 6 月 20 日 19:40:20 JST 前後を通過する CSS の軌道を世界地図と天球に重ねたもの。左図の青線が軌跡で、青点と JST 時刻を表記した。右図も同様に天球に軌跡と時刻を表記した。

図 8 には python と skyfield ライブラリを用いて、軌道予測を行なったものを示す。Skyfield ライブラリには SGP4 が組み込まれており、それを使ったデモプログラムが公開され ISS 等の宇宙物体の軌道予測が頻繁に行なわれている。図 8 の左図では日本の東北地域を西から東に通過する軌道を確認できる。

図 8 の右は地上から見上げた天球図で、西から東に 5 分程度で天球を通過し、日本時間 19:40 すぎに北極星近傍を通る軌道となった。この予測した軌道は、別の宇宙物体の通過を予測するサイトなどと比較し、一致することを確認した。

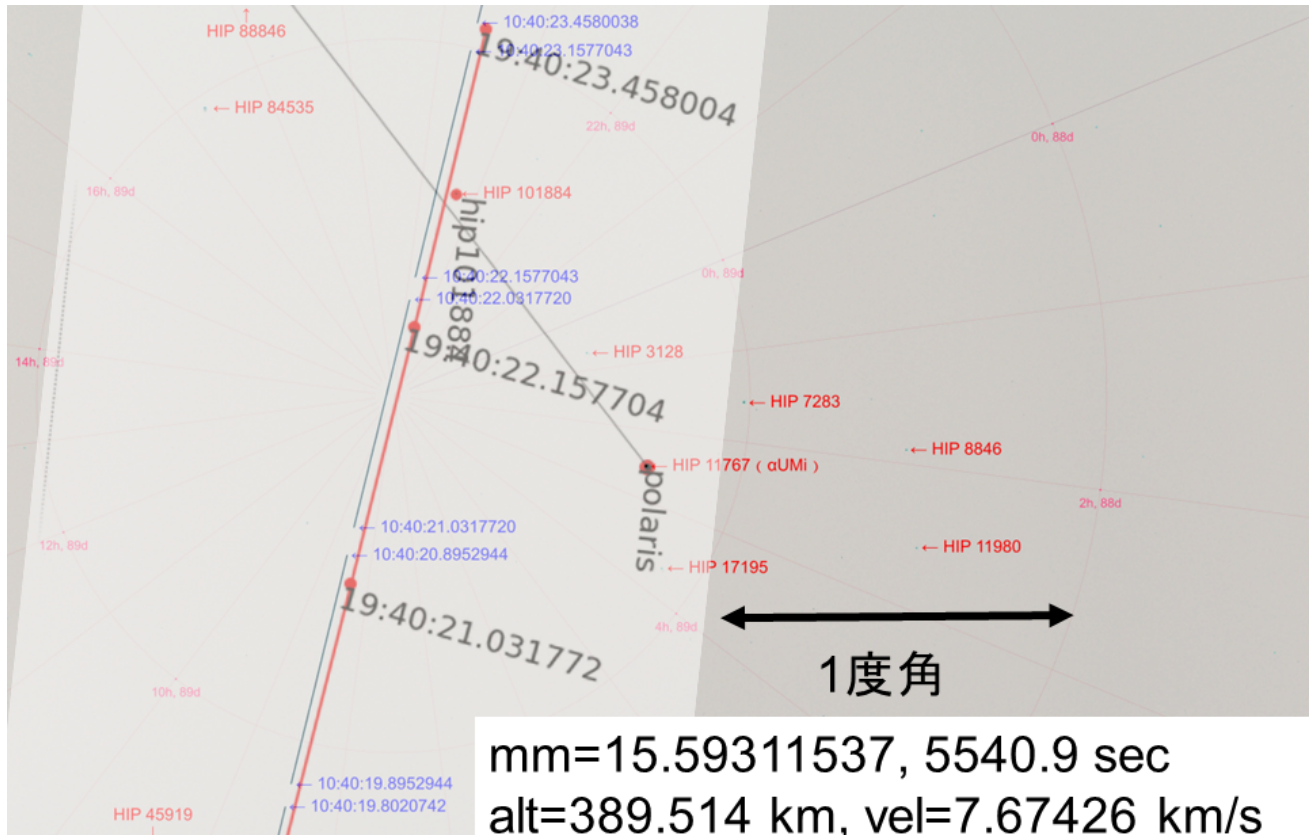


図 9 CSS の観測画像に色反転を施し、衛星予測ライブラリを用いて予測軌道(赤線)を重ねたもの。数字などは図 6 の表記に準ずる。赤線上の赤点の数字が予測された JST 時刻である。北極星(α UMi)を位置同定に使い、小熊座の星座線と北極星(polaris)を重ねた。また 1 度角の長さを矢印で示した。右下には予測軌道における周回率(mm、単位は周回/日)の値、一周期の時間、高度(alt)、周回速度(vel)を記した。

図 9 では、図 8 の右を拡大し、衛星軌道の予測の線を観測画像に重ねたものである。観測の軌道と予測の線は、横方向のずれが発生しているが、そのずれは 1 度角はよりずっと小さい。また通過時刻の日本時間で 19:40:23.348004 では一致するが、それ以外では観測値と予測が異なっている。この観測と予測の時刻差は SGP4 の内包する 1km 誤差程度であり、運用上は問題ないと考えられる。

5. まとめと議論

宇宙物体 6217 の約 50 年に渡る軌道高度の低下率と太陽電波強度 F10.7 との 360 日間平均の相関は -0.95 と非常に高い結果を得た。また、図 3, 4 ではべき乗分布($y = b \cdot x^a$)または指数分布($y = b \cdot \exp(ax)$)で近似することができた。ただし、どちらが一致しているかの判別の読み取りは難しい。物理的な意味では、べき乗則は地震の大きさと発生頻度の関係で知られており、太陽フレアの発生頻度とエネルギーも同じくべき乗則である。太陽電波強度 F10.7 の発生頻度と高度の低下率の大きさと発生頻度が一致するのは不思議ではない。

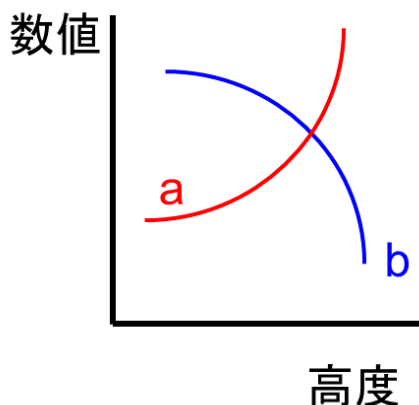


図 10 高度と係数の関係例

指数分布($y = b \cdot \exp(ax)$)の場合は、太陽電波強度 F10.7 と強い相関のある太陽紫外線による大気加熱が働くと考えると、高度の低下率は大気密度及び大気抵抗に比例すると考えられ、このための物理的な説明が必要である。また今回の一例だけで判断するのは難しいため、各高度毎に統計的に調べる必要がある。

この高度毎に調べることにより、べき乗分布($y = b \cdot x^a$)または指数分布($y = b \cdot \exp(ax)$)の係数 a, b の高度による関係式の例(図 10)が見い出せれば、特定の宇宙物体だけでなく、適切に係数 a, b をスケーリングすることで、異なる高度でも軌道低下率を近似的に予測できる可能性がある(秋山ら 2017)。これは宇宙天気現象の予報と一つとなる可能性がある。

宇宙物体 48274 である中国の宇宙ステーションを観測し、軌道予測と SGP4 の誤差程度で時刻の一致をみた。このときは太陽フレアの前で急激な大気抵抗の増大がないため、予測と大幅にずれなかったが、アマチュア天文家の公開している画像では、太陽活動の増大のため通常の軌道のずれより大きなものがあった。将来的に SGP4 に宇宙天気現象の効果を取り入れた新しいモデルの構築が望まれる。ただし、宇宙物体の軌道変化には、重力異常など地球重力場の影響、地球が真円でない効果、衛星からの熱放射などがあり、大気抵抗の影響を定量的に議論するには統計的な解析が必要である。

以上本研究では例が少なく、統計的な解析は不十分すぎるため、一般化にはより多くの宇宙物体を対象に統計的な解析が必要である。特に後者の観測は全天サーバイ観測を行なう光学望遠鏡の画像解析や、人工衛星追尾に特化した小型望遠鏡装置の開発が考えられる。また観測の解析のフィードバックを衛星予測にどのように反映する方法の構築も必要である。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 23K02807 及び、名古屋大学宇宙地球環境研究所の共同研究の助成を受けたものである。また茨城大学研究推進経費の研究拠点の支援を受けたものである。図 6 の観測画像は共同著者の久保庭敦男氏の撮影となります。最後に阿部旬也氏、井上卓悠氏の協力により完成しました。ここに深く感謝します。

参考文献

秋山恭平, 中村信一, 大気抵抗加速度のスケーリング則を用いた低軌道物体の軌道誤差共分散の適正化手法に関する検討, 第 61 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2K07, JSASS-2017-4450, 2017

Brouwer, D., Solution of the problem of artificial satellite theory without drag, The Astronomical Journal, 64, 378, 1959

Chen, Y., Liu, L., and Wan, W., Does the F10.7 index correctly describe solar EUV flux during the deep solar minimum of 2007–2009? J. Geophys. Res., 116, A04304, 2011

Kataoka, R., Shiota, D., Fujiwara, H., Jin, H., Tao, C., Shinagawa, H., Miyoshi, Y., Unexpected space weather causing the reentry of 38 Starlink satellites in February 2022, J. Space Weather Space Clim., 12, 41, 2022

玉置晋, アルヴェリウス幸子, 野澤恵, 宇宙天気と地球低軌道の 4 層構造, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告: 宇宙科学情報解析論文誌: 第 12 号, 51-61, 2023

野澤恵, 玉置晋, 井上卓悠. 1989 年 3 月の宇宙天気現象と人工衛星の軌道低下の関係, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告: 宇宙科学情報解析論文誌: 第 11 号, 45-55. 2023

Hoots, F. R. and Roehrich, R. L. Spacetrack Report No. 3: Models for propagation of NORAD element sets. , Aerospace Defense Center, Peterson Air Force Base (1980).

Wertz, James R., Atmospheric Drag and Satellite Decay, Sec. 9.4.4 in Space Mission Engineering: The New SMAD, ed. by J. Wertz, D. Everett, and J. Puschell, Hawthorne, CA: Microcosm Press, 2011.