

# 太陽周期活動と人工衛星の軌道低下の相関

スペースXがスターリンク衛星40機を喪失 地磁気嵐の影響で運用高度へ移動できず大気圏再突入へ

秋山文野 | フリーランスライター/翻訳者 (宇宙開発)  
2/9(水) 17:52

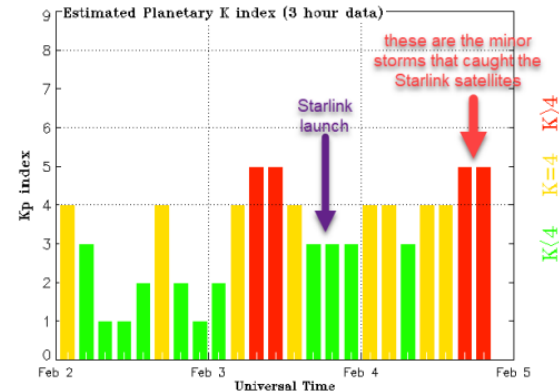


Credit : SpaceX

2022年2月8日、米スペースXは2月3日に打ち上げた通信衛星スターリンクの49機中、40機が地磁気嵐の影響で運用高度へ到達できず、大気圏に再突入すると発表した。スペースXは再突入は軌道の安全を守るための措置で、「衛星のスペースデブリ化を防ぐため」としている。

**GEOMAGNETIC STORM BRINGS DOWN STARLINK SATELLITES:** As many as 40 Starlink satellites are currently falling out of the sky—the surprising result of a minor geomagnetic storm. SpaceX made [the announcement](#) yesterday:

"On Thursday, Feb. 3rd at 1:13 p.m. EST, Falcon 9 [launched](#) 49 Starlink satellites to low Earth orbit from Launch Complex 39A (LC-39A) at Kennedy Space Center in Florida. ... Unfortunately, the satellites deployed on Thursday were significantly impacted by a geomagnetic storm on Friday, [Feb. 4th]."



Two days before launch a CME hit Earth's magnetic field. It was not a major space weather event. In fact, the weak impact did not at first spark any remarkable geomagnetic activity. However, as Earth passed through the CME's wake, some sputtering [G1-class](#) geomagnetic storms developed. It was one of these minor storms that caught the Starlink satellites on Feb. 4th.

茨城大学理学部 野澤恵、玉置晋

satoshi.nozawa.i@vc.ibaraki.ac.jp



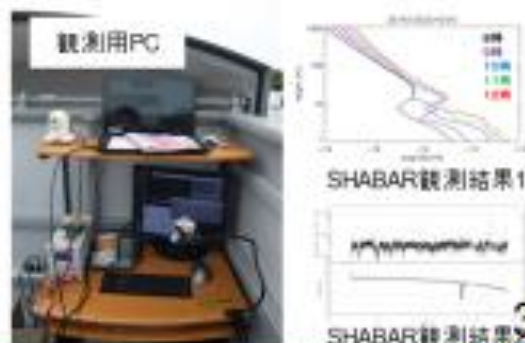
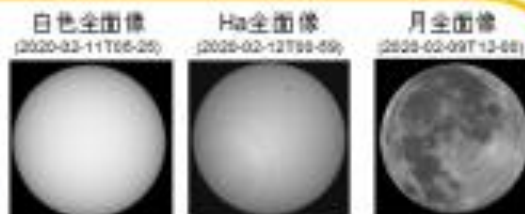


野澤恵(のざわさとし) [satoshi.nozawa.i@vc.ibaraki.ac.jp](mailto:satoshi.nozawa.i@vc.ibaraki.ac.jp)  
 研究対象: 宇宙天気、太陽物理、人工衛星障害など



- 太陽を起点の研究
- ・太陽が人工衛星に与える影響や障害
  - ・様々な太陽観測
  - ・宇宙磁気現象の解明

## 観測機器の一例



# 宇宙科学情報解析論文誌

## 宇宙科学情報解析論文誌 第11号論文募集

- 宇宙科学情報解析論文誌の趣旨
- 募集締切
- 投稿方法
- 集録の出版形態
- 査読ガイドライン

### 宇宙科学情報解析論文誌の趣旨

近年、宇宙科学においては、衛星・探査機や搭載観測装置の高機能得できるようになりました。こうした科学観測データや衛星・探査機をする為には、ユーザによる高度なデータ処理・解析を容易にする、また、オープンサイエンス化の流れに対応する必要性、科学観測データにおいてもデータにまつわる課題はますます増えています。

このような状況を鑑み、宇宙科学情報解析論文誌 (Journal of Space Weather and Space Climate) について、そのデータ処理・解析・利用の手法や、様々なデータ衛星・探査機運用への応用、等、宇宙科学と情報科学・情報工学等に

本論文誌では、学術的な新規性や独創性がある研究論文に留まらず、報告内容に独創性がある論文や、データ・サービスの開発記録として広

### 募集締切

2021年8月15日 (日) 17:30 JST (必着)

11月に受理され  
内容の紹介と  
査読の指摘を進める

1989年3月の宇宙天気現象と人工衛星の軌道低下の関係

野澤恵\*1, 玉置晋\*2, 井上卓悠\*3

### Relationship between Space Weather Phenomenon in March 1989 and Satellite Orbit

Satoshi Nozawa\*1, Susumu Tamaoki\*2, Takayuki Inoue\*3

#### ABSTRACT

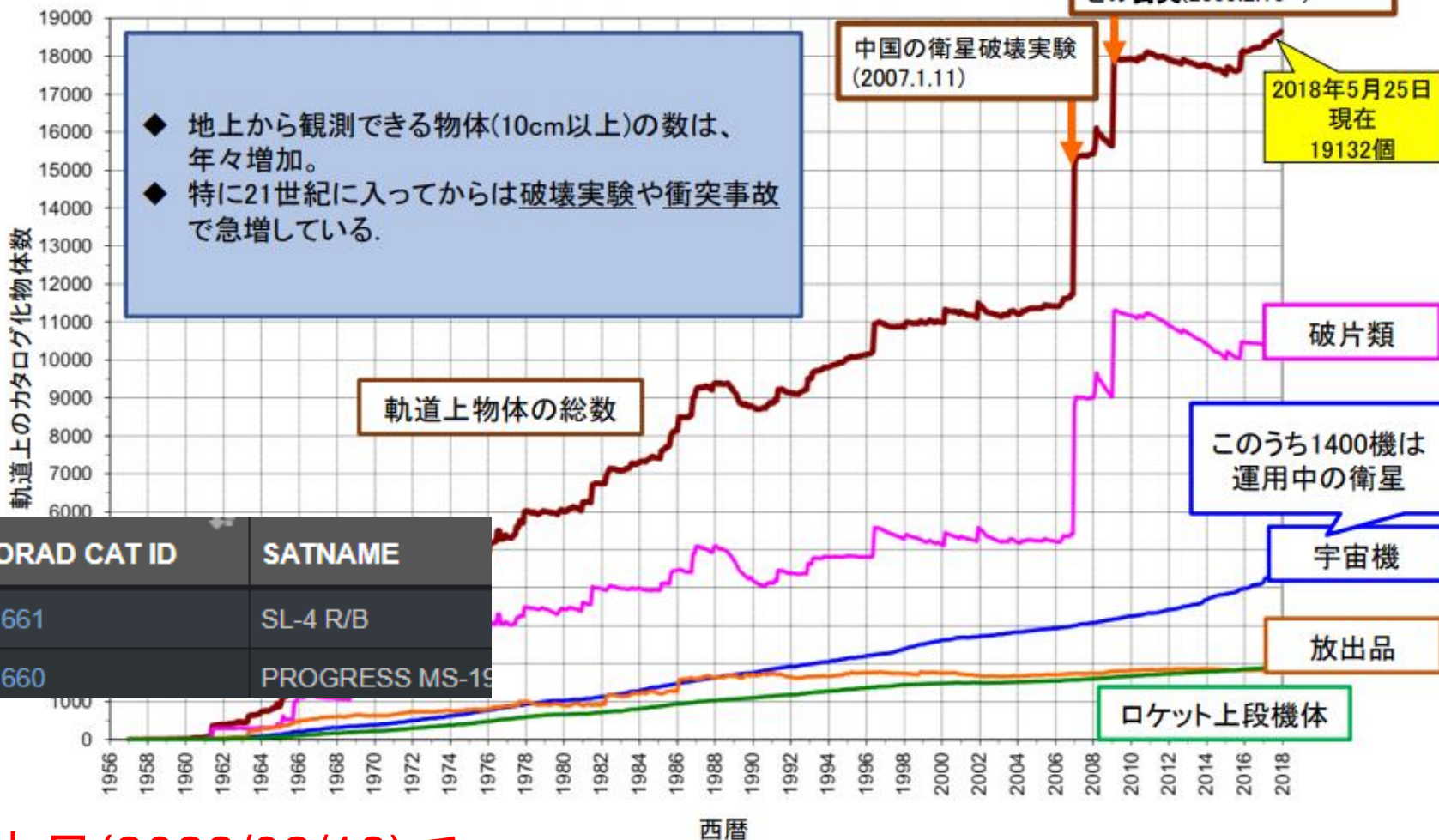
The TLE (Two Line Element) is used to analyze space objects in low orbits below 1100 km altitude and in near circular orbits. There is a correlation between the orbital declines and index of the relative sunspot number which is an indicator of solar activity. The declines were less than 1 km per year during the three years before and after the solar minimum, but were 10 times greater during the five years after the solar maximum. Next, we statistically examined the orbital declines calculated by TLEs from the space weather phenomena of the solar flare and associated magnetic storm in the Earth's magnetosphere that occurred in March 1989. The orbital degradation before and after the event was proportional to the atmospheric density, but the amount of decline after the event was larger than before the event, especially at altitudes of 700 to 1100 km, and the variation was large. This orbital decline causes an increase in velocity, and in some cases, a shift of one tenth of the Sun's visual diameter in a day, which causes a deviation from the orbit-holding range, which is a serious problem for satellite operations. In addition, orbit prediction using TLE is possible, suggesting that it is possible to estimate the density of the upper atmosphere from predictions and actual measurements.

**Keywords:** solar flare, space weather, substorm, magnetic storm, satellite, orbit, TLE

#### 概要

NORAD/NASA が提供する TLE を用いて、高度 1100km 以下の低軌道、及び真円に近い軌道の宇宙物体について解析を行った。太陽活動の指標となる相対黒点数と軌道低下には相関があり、極小となる前後三年間では年 1km 以下の低下であったが、極大となる 5 年間では、その 10 倍となる 10km ほどの低下を示した。次に 1989 年 3 月に発生した太陽フレア及びそれに伴う地球磁気圏の磁気嵐の宇宙天気現象と TLE から求めた軌道低下を統計的に調べた。現象前後の軌道低下は大気密度に比例した低下量であるが、現象前に比べ現象後では低下量が大きく、特に高度 700 から 1100km ではばらつきが大きい。この軌道低下は速度上昇を発生させ、ある例では一日に太陽の視直径の 10 分の一のずれを起こし、数

# AXA 米国が地上監視データから公表している軌道上物体の数



NORAD CAT ID	SATNAME
51661	SL-4 R/B
51660	PROGRESS MS-19

本日(2022/02/18)で  
51661が登録

観測限界(公称値): 低軌道10cm以上, 静止軌道1m以上  
出展: NASA Orbital Debris Quarterly News, Volume 20, Issues 1&2, April 2016

# 軌道降下の時間変化

## 宇宙物体の高度低下と太陽活動

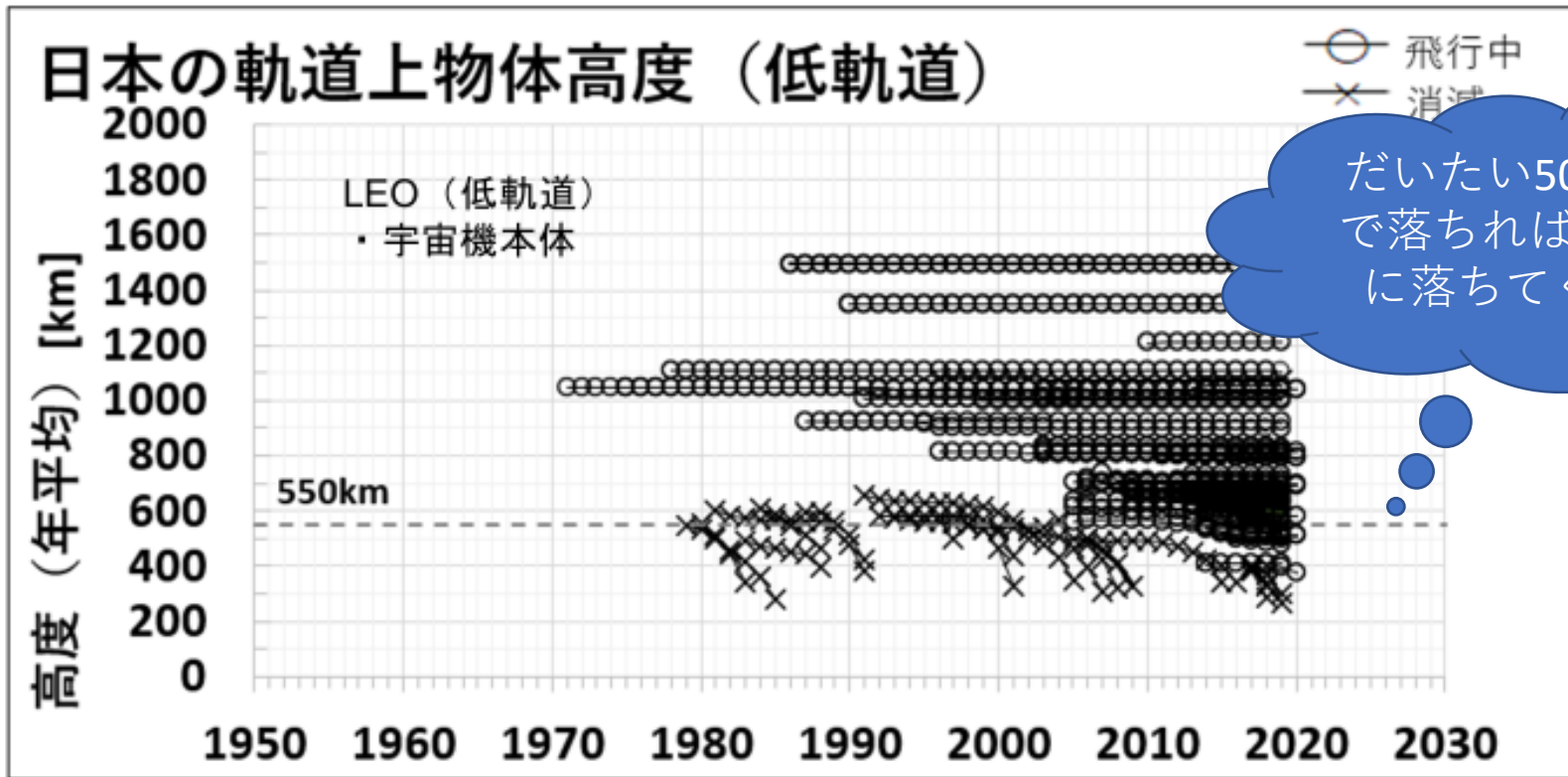


図1 日本の宇宙物体の軌道高度 (1年平均)

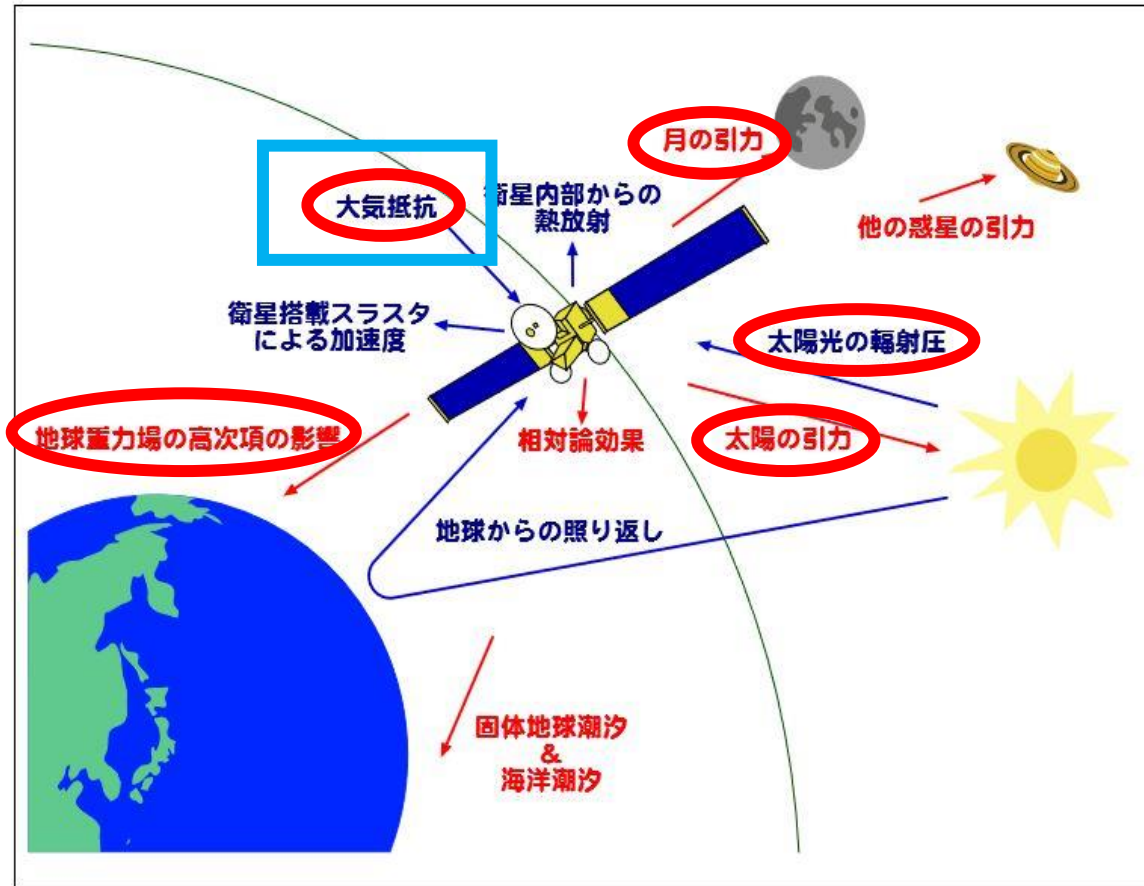
- ・ 高度1000km以下で大気抵抗による高度低下が見え始める。
- ・ 高度550km以下だと影響が顕著になる。

# 人工衛星が受ける力

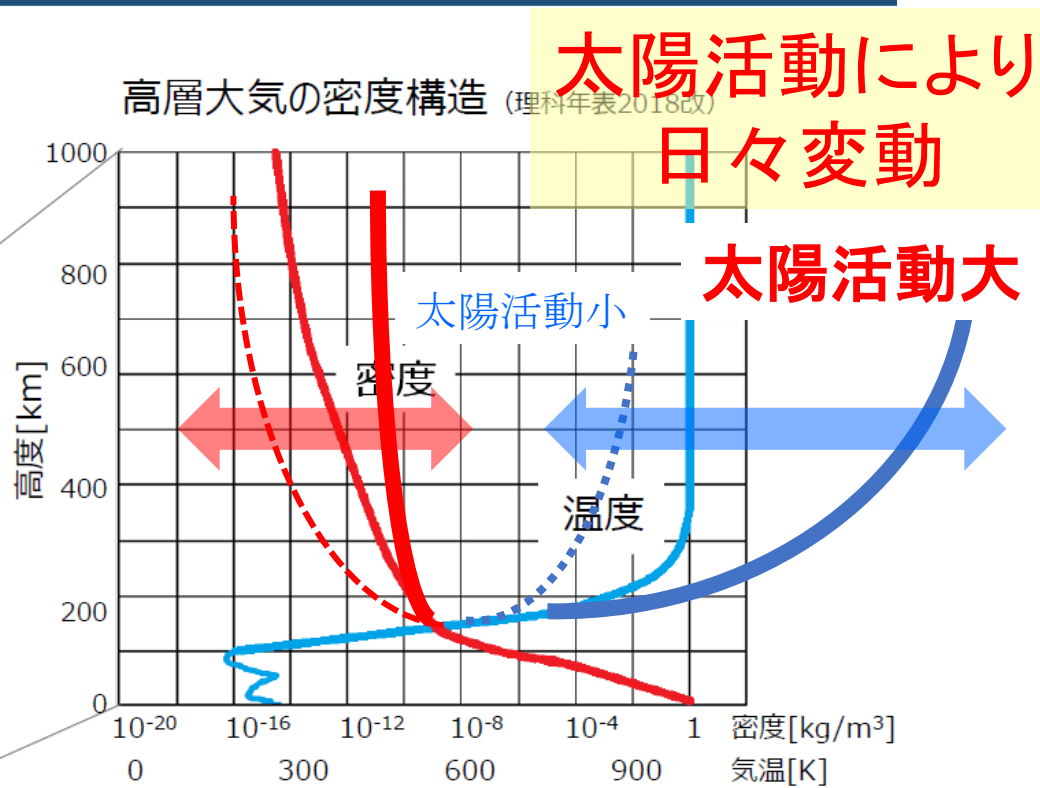
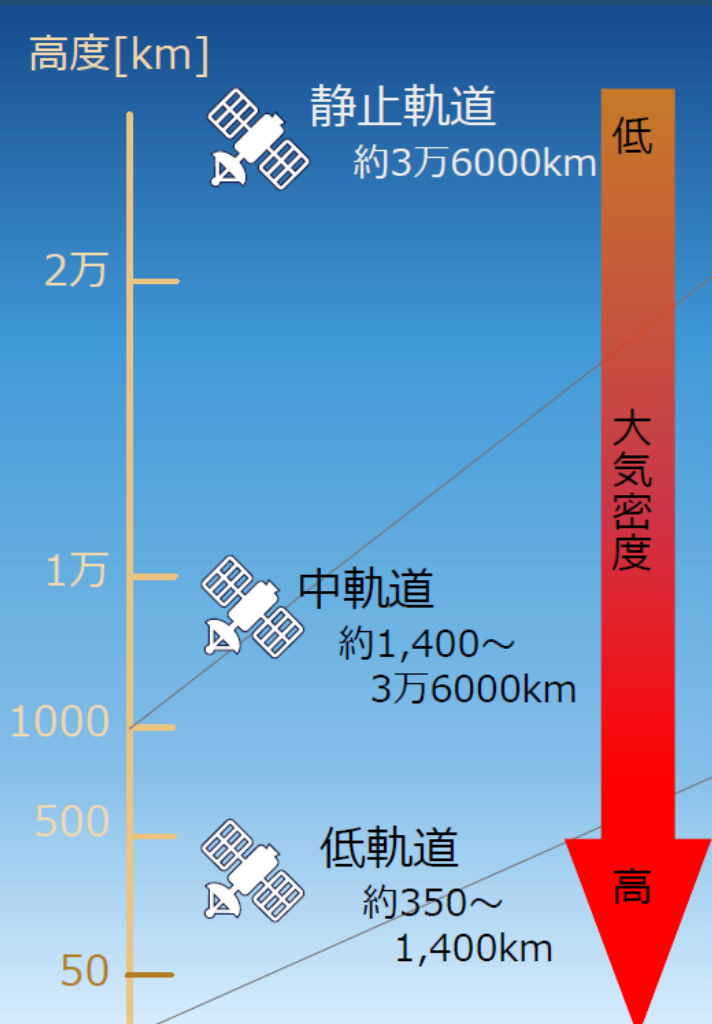
人工衛星の軌道は、主に

- 地球重力
- 地球の大気抗力
- 月，太陽による引力
- 太陽光の輻射圧

の影響を受け変動する。



# 人工衛星の置かれている宇宙環境



大気は地上数千kmまでに及んでおり、  
高度が低いほど密度が高い

# 宇宙物体に対する大気抵抗の物理量

- 物体に作用する大気抵抗の成分は、一般的に

$$F_i = \text{抵抗}, N \quad F_i = \frac{1}{2} \frac{\rho A C_i v^2}{m}$$

環境（高度や宇宙天気）に依存する物理量

$\rho$  = 大気質量密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$

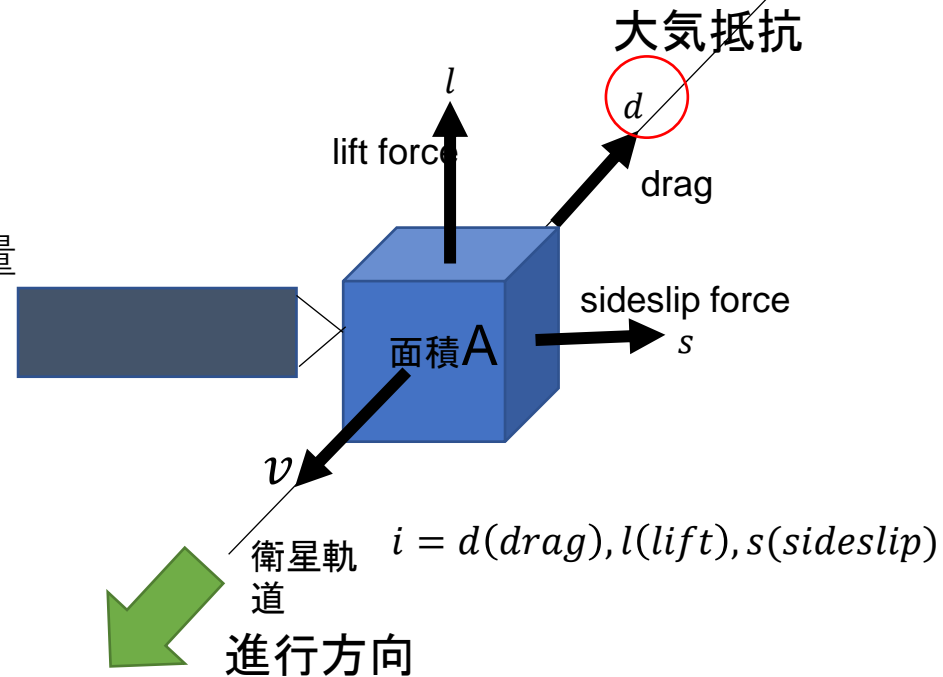
$v$  = 物体の大気相対速度,  $\text{m}/\text{s}$

宇宙物体の特性に依存する物理量

$A$  = 大気に相対する面積  $\text{m}^2$

$C_i$  = 抵抗係数, 無次元: 形状に依存

$m$  = 物体質量,  $\text{kg}$

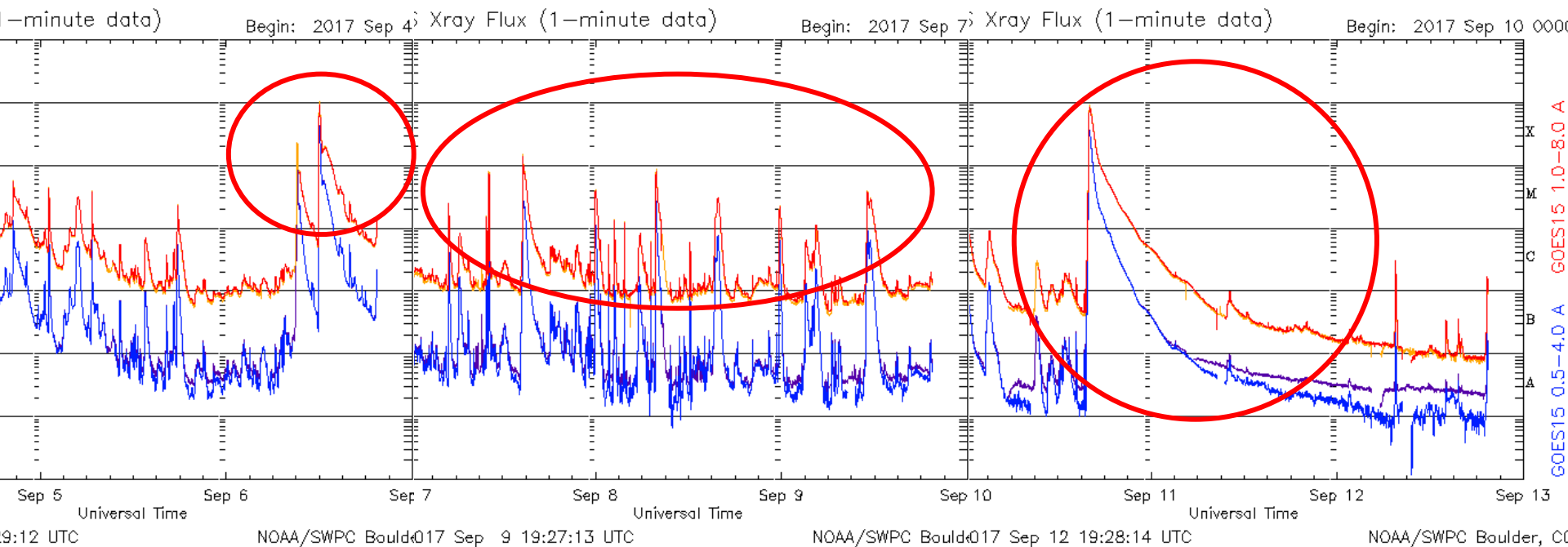


宇宙天気現象(太陽活動)の影響を明らかにしたい



# GOES衛星のX線フラックス [2017/09/04 – 09/12]

太陽からのX線はフレアの規模を示す



大フレアが何回も発生

# 11年ぶり、最強クラスの太陽フレアが発生

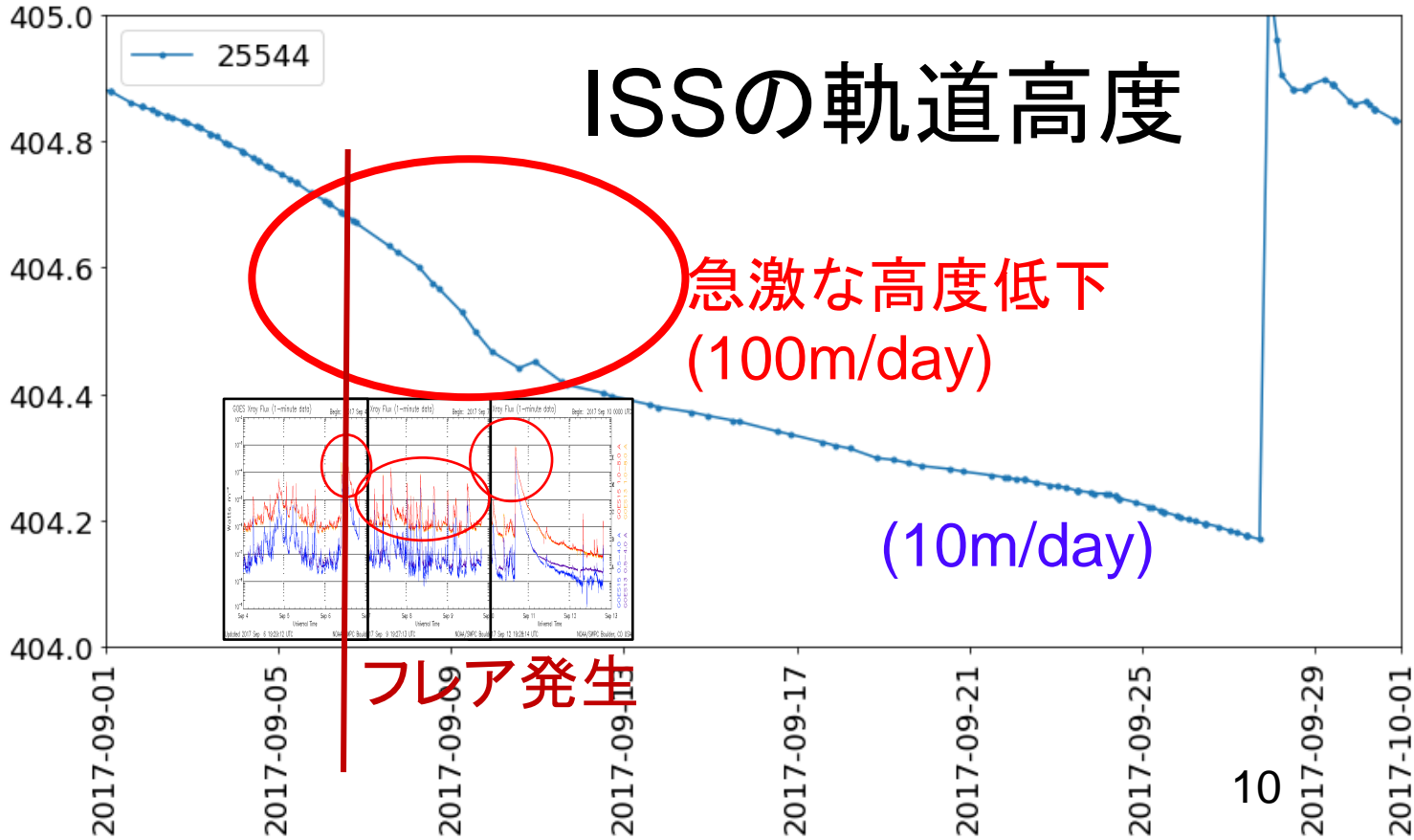
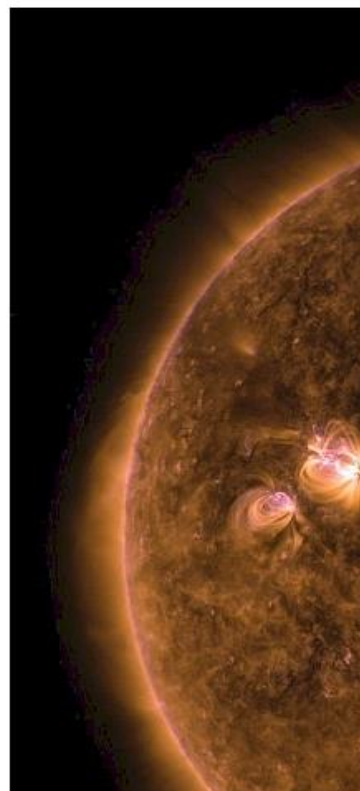
BI 63 ツイート いいね! 5,008 G+ Pocket 48

日本時間9月6日、大規模な太陽フレアが2度にわたり発生した。とくに21時ごろのフレアは11年ぶりとなる最強クラスのフレアで、この現象に伴う太陽風の乱れが8日の夜ごろ地球に到来すると予測されている。

【2017年9月7日 NASA/宇宙天気ニュース/情報通信研究機構】

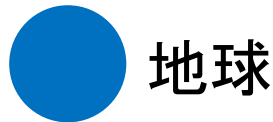
9月6日18時ごろ（日本時間、以下同）、太陽表面の南西の活動領域（黒点群）2673で大規模フレアが発生した。太陽フレアの強度はピーク時のX線強度によって弱い方からA、B、C、M、Xに分類されるが、このフレアの強度はX2.2で、2015年5月5日以来2年4か月ぶりのXクラスのフレアだった。

さらに同夜21時ごろ、同領域  
フレア強度が9以上に達したのは

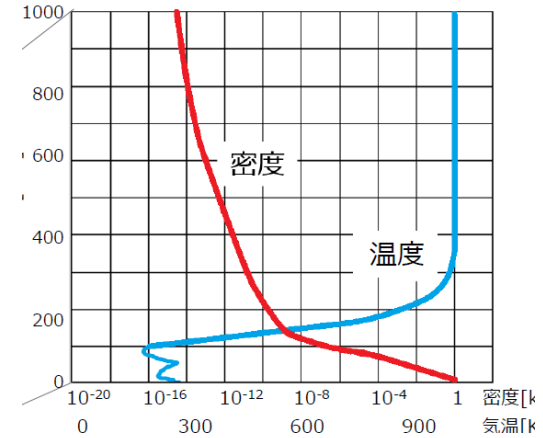


# 軌道降下(通常時)

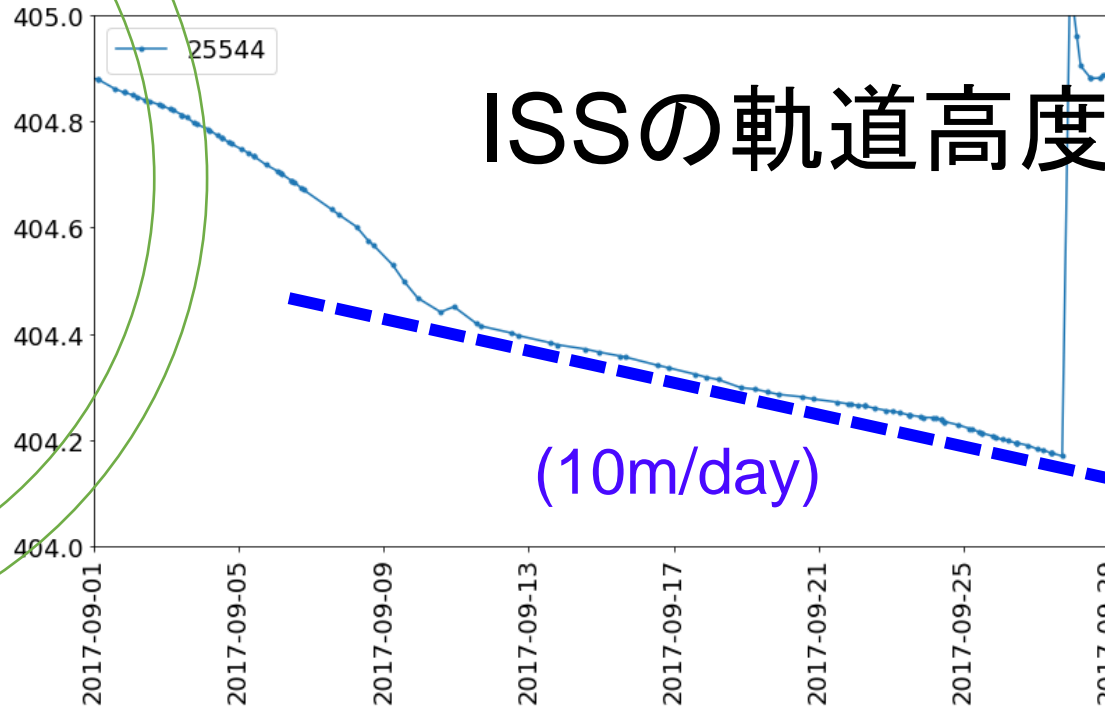
わずかな空気の大气抵抗による軌道降下が日常的に発生



高層大気の密度構造 (理科年表2018改)

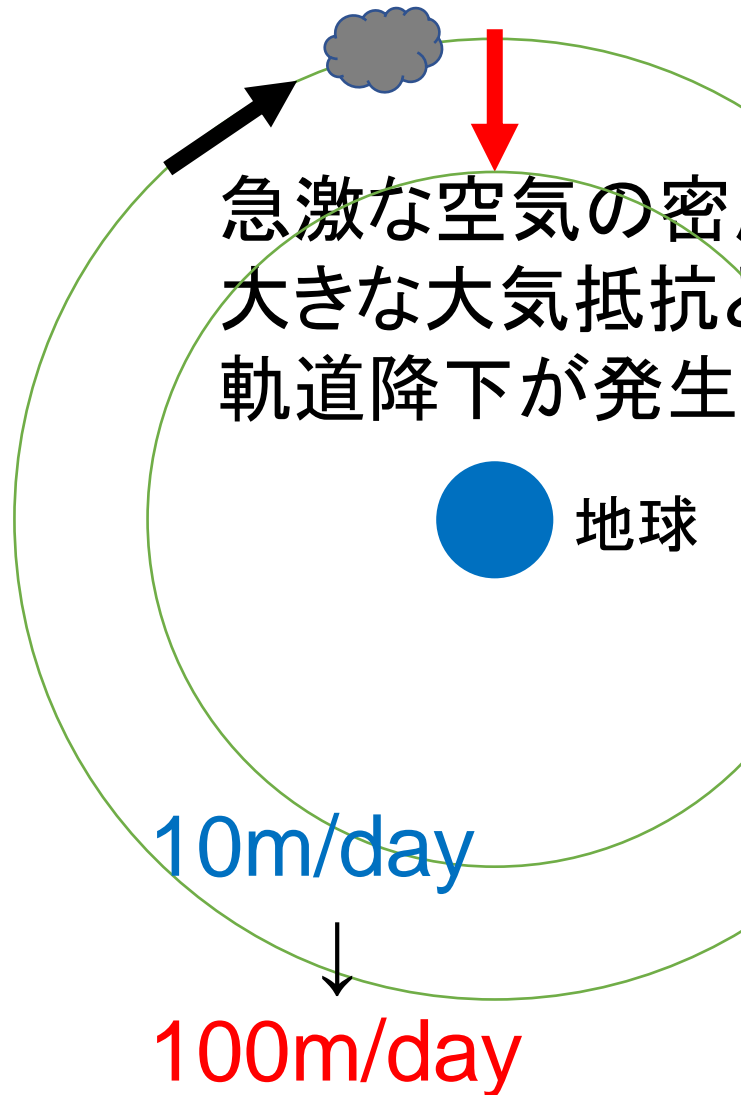


## ISSの軌道高度

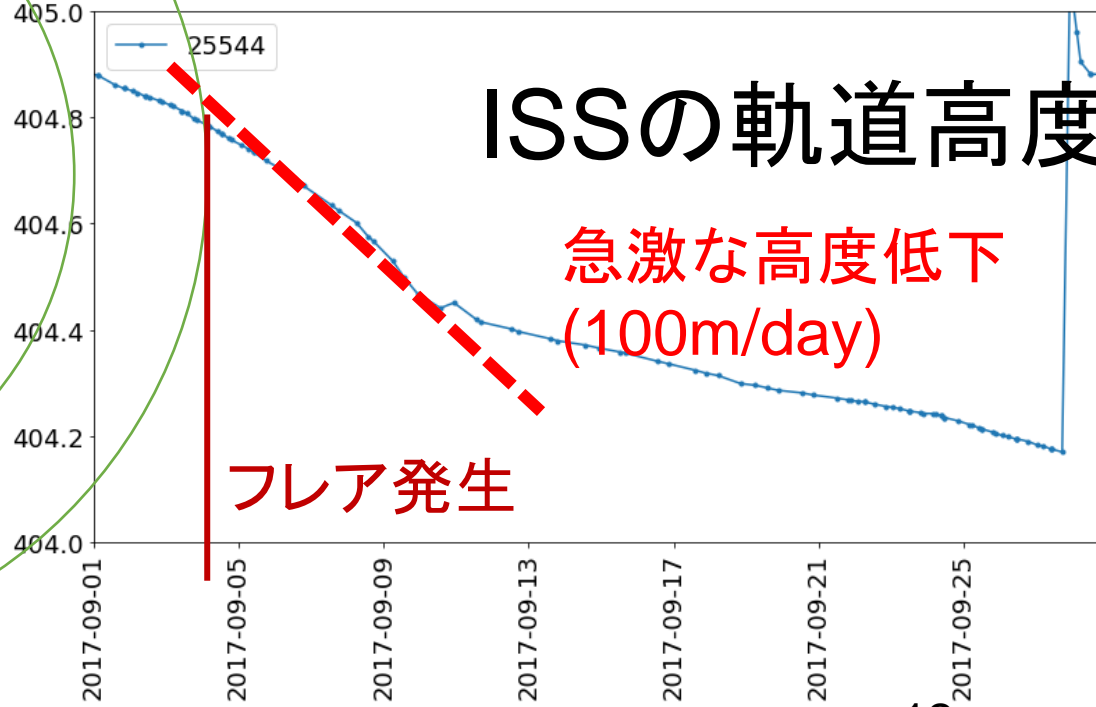
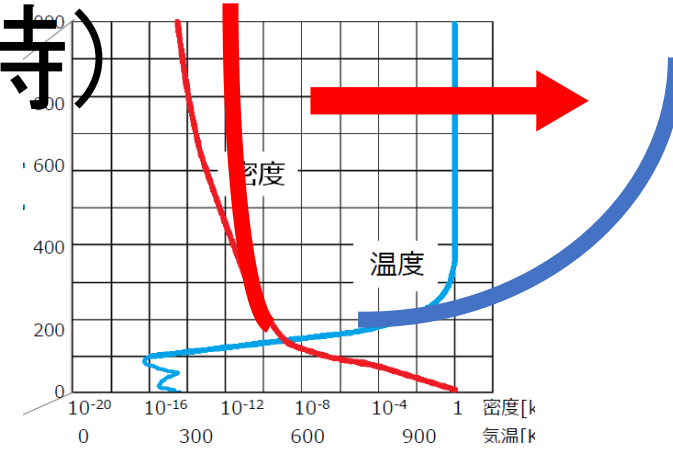


(10m/day)

# 軌道降下(太陽フレア時)



高層大気の密度構造 (理科年表2018改)



# 解析方法

今回は低軌道衛星を用いて解析

条件: 平均運動(mm)>14.0  
離心率(e)<0.001

## Two Line Element (TLE)の説明

- TLEとは、米国北アメリカ航空宇宙防衛司令部 (North American Aerospace Defense Command) が監視し公開している人工衛星を含む宇宙物体の軌道情報を2行形式で表したものである。  
(参考: <http://www.celestrak.com/NORAD/documentation/tle-fmt.asp>)
- TLEは以下の形式である。

GCOM-W1 (SHIZUKU)													
(a)													
1	38337U	12025A	12194.00000000	.00000000	00000-0	17700-3	0	00659					
(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	(k)	(l)	(m)	(n)	(o)
2	38337	98.1978	133.0858	0001777	101.6799	154.624	14.57141916	8061					
(p)	(q)	(r)	(s)	(t)	(u)	(v)	(w)	(x)	(y)				

(a)人工衛星の名称

(b)行番号

(c)人工衛星番号

(d)分類(Uは分類なし)

(e)国際識別番号(打上げ年の下2桁)

(f)国際識別番号(打上げ年における打上げ数)

(g)国際識別番号(piece of launch)

(h)エポック年(西暦の下2桁)

(i)エポック(年通算日+その日における00時からの経過時間)

(j)平均運動の1次の時間微分

(k)平均運動の2次の時間微分

(l)大気抵抗係数項(小数点以下を表示)

(m)エフェメリスタイプ

(n)エレメント番号

(o)チェックサム

(p)行番号

(q)人工衛星番号

(r)軌道傾斜角(度)

(s)昇交点赤経(度)

(t)離心率(小数点以下を表示)

(u)近地点引数(度)

(v)平均近点離角(度)

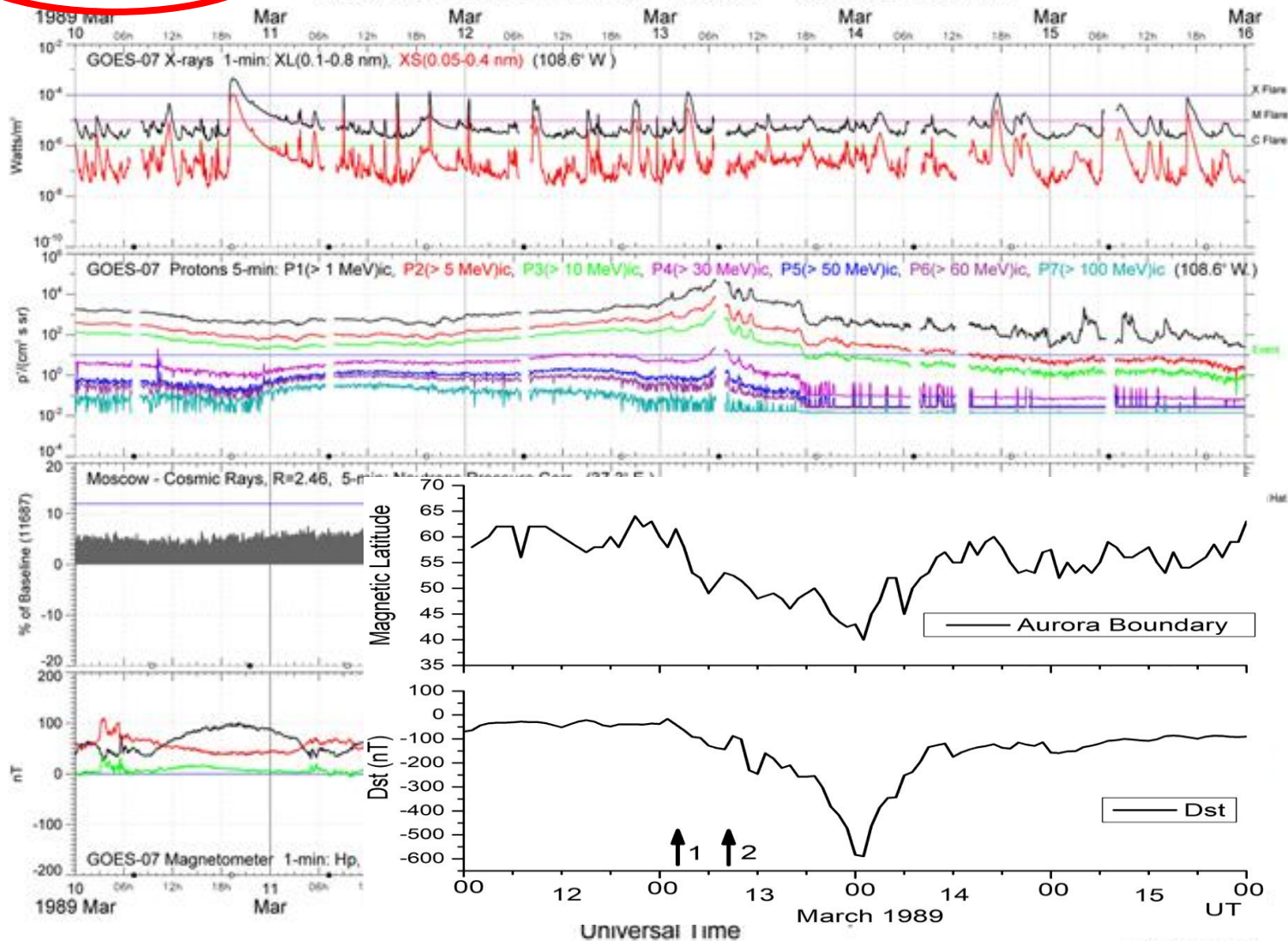
(w)平均運動(周回数/日)

(x)エポック時の周回数(回)

(y)チェックサム

### 3.2. 1989年3月の磁気嵐 (宇宙天気現象) と軌道低下の相関例

Extreme Event: 1989-03-10 00h - 1989-03-15 24h



1989年3月に発生した磁気嵐を示す図。上から磁気緯度、Dst(低緯度の地磁気変動量全磁場強度)を示す。Boteler(2019)のFigure 6から引用。14

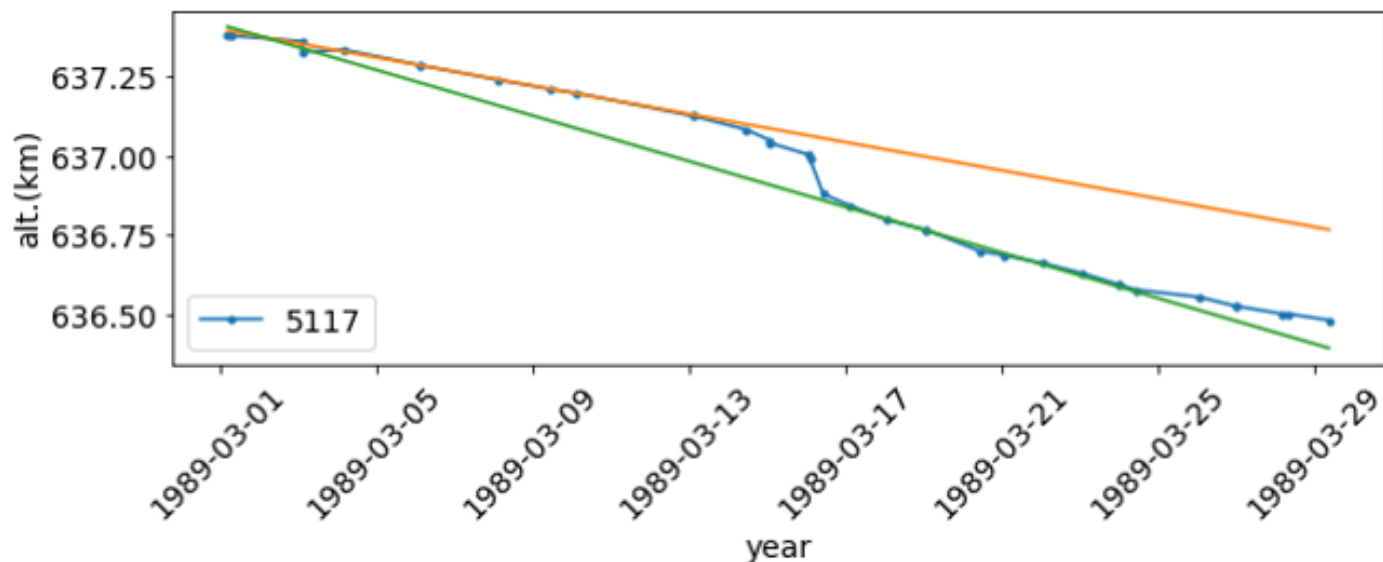


図 6 COSMOS 405 の高度(km)の 1989 年三月の時間変化図。←

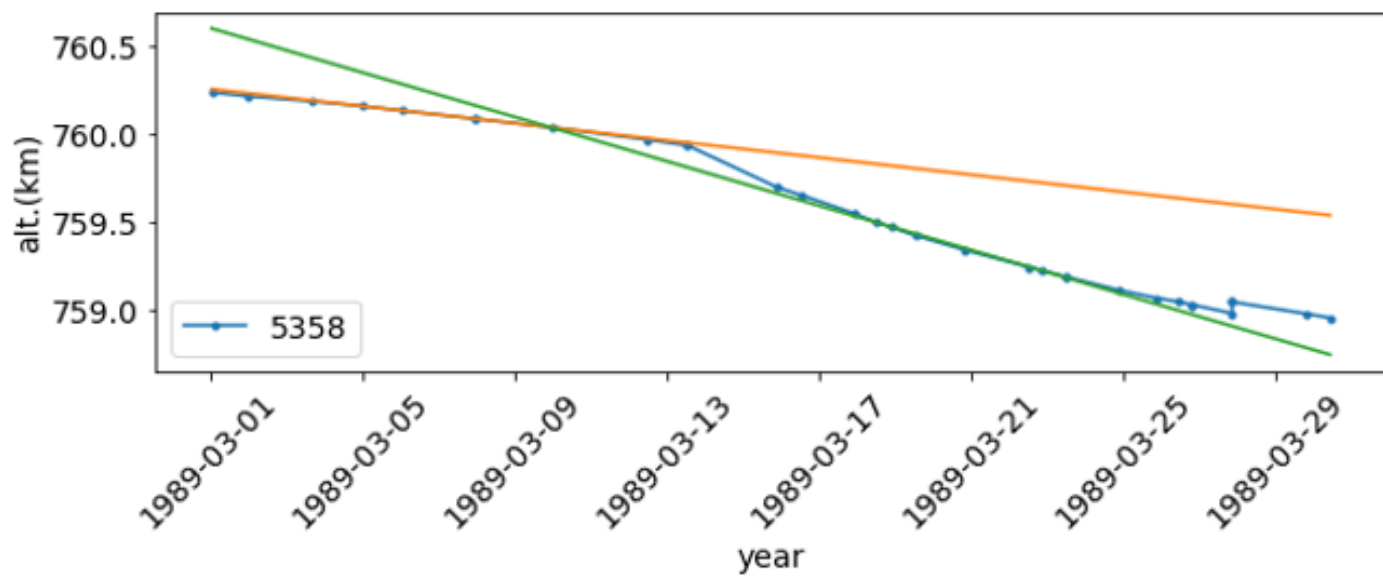
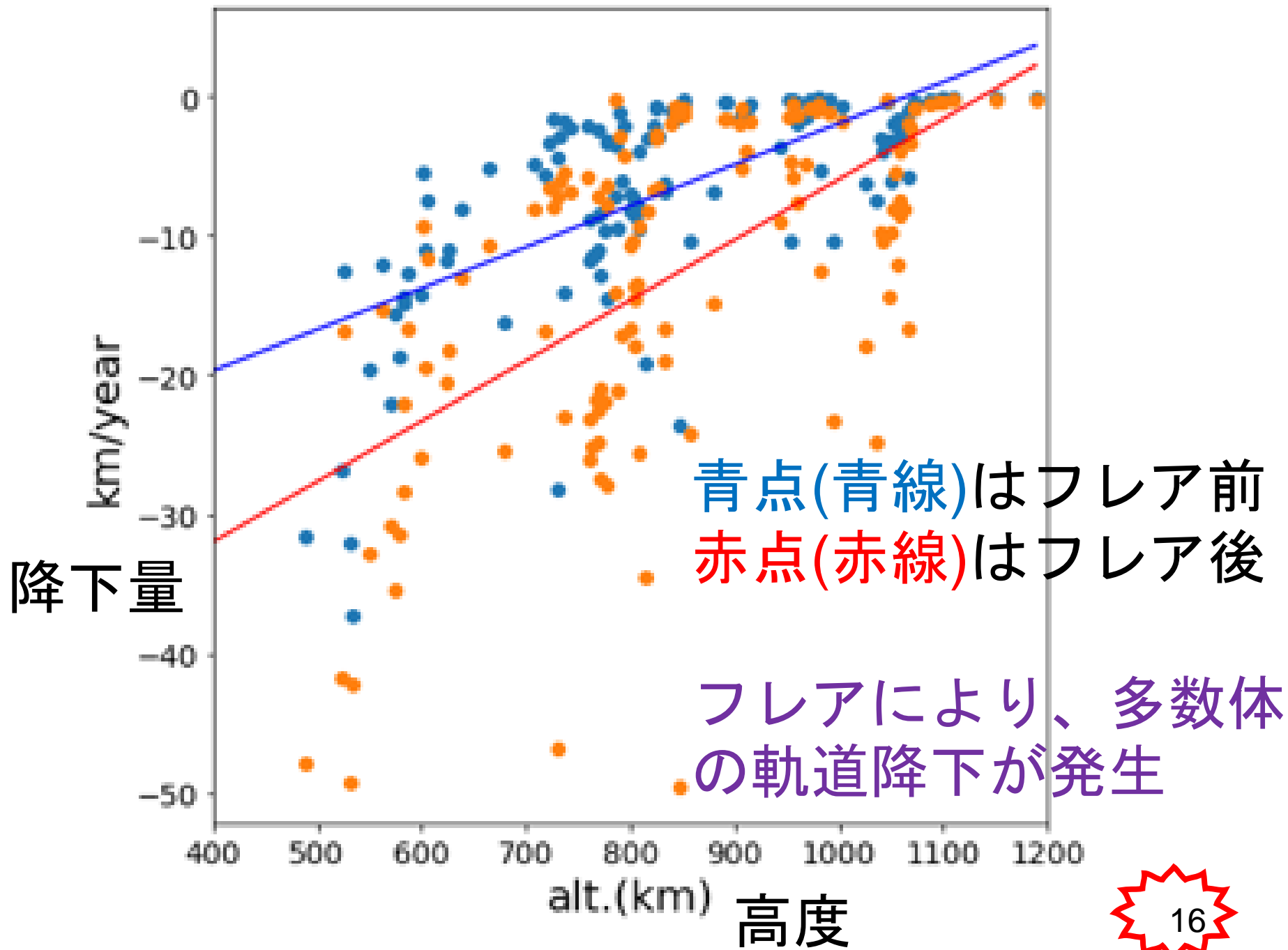
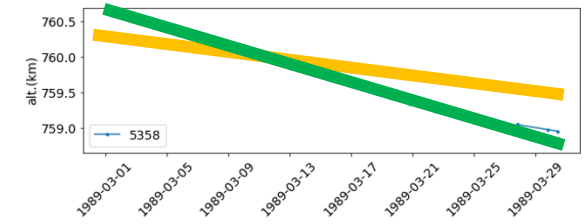
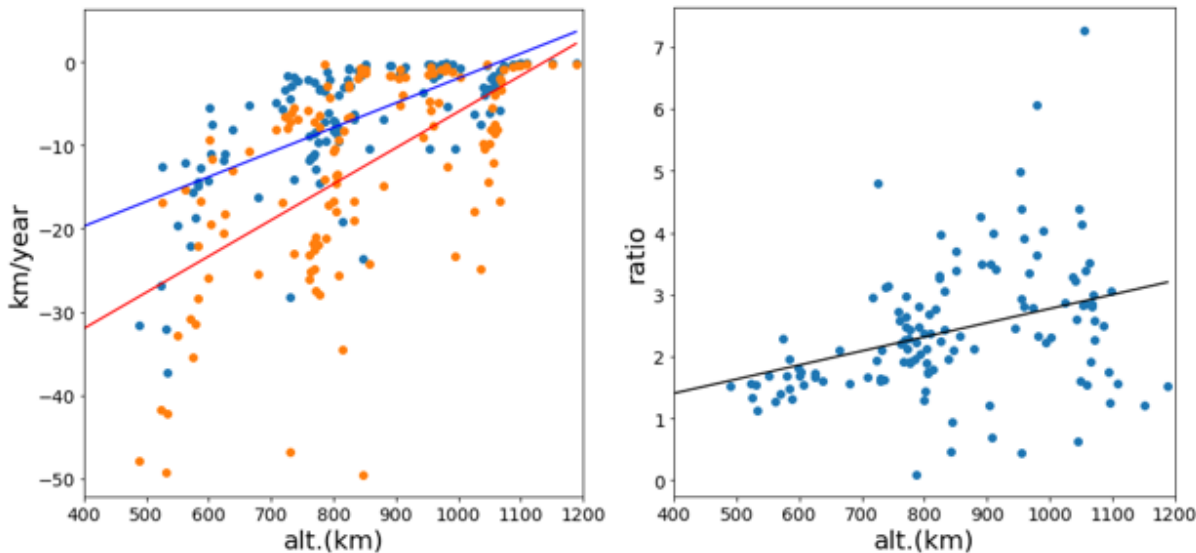


図 7 ロケット SL-8 のデブリの高度(km)の 1989 年三月の時間変化図。←

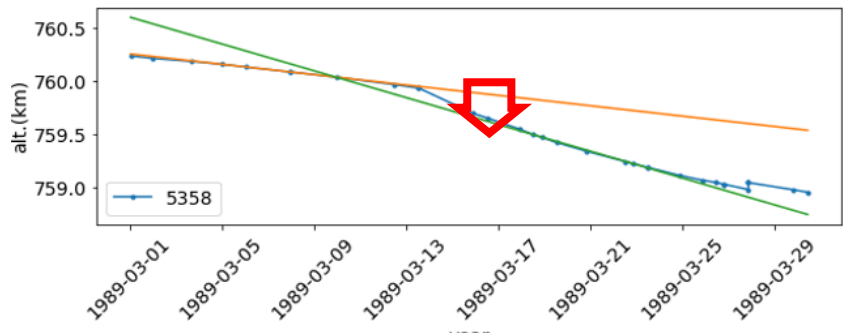
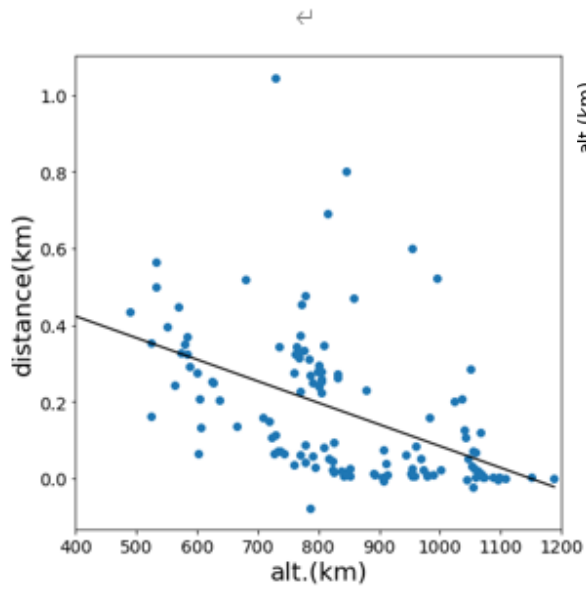






**フレア後/フレア前**  
**降下率の比**  
**高高度でばらつき大**  
 他のフレアでは異なる描像

図8 宇宙物体 126 個の軌道高度と低下量との相関図。左図で青点は現象前、赤点は現象後の高度低下量を示す。青直線が青点の最小二乗直線、赤直線が赤点のものである。右図は、個々の現象後の低下量を現象前の低下量で割った低下率である。黒直線が、最小二乗直線である。



**実際の軌道降下距離**  
**大気密度に依存?**

図9 宇宙物体 126 個の 3/17 の低下距離を示す。図 6,7 の二本の直線の 3/17 の距離の差と軌道高度との相関図。相関係数は-0.49 で、最小二乗直線は  $y = -0.00056 x + 0.65$  である。

これまでは短期的な  
太陽影響(太陽フレア)

これからは長期的な  
太陽の影響(太陽黒点)

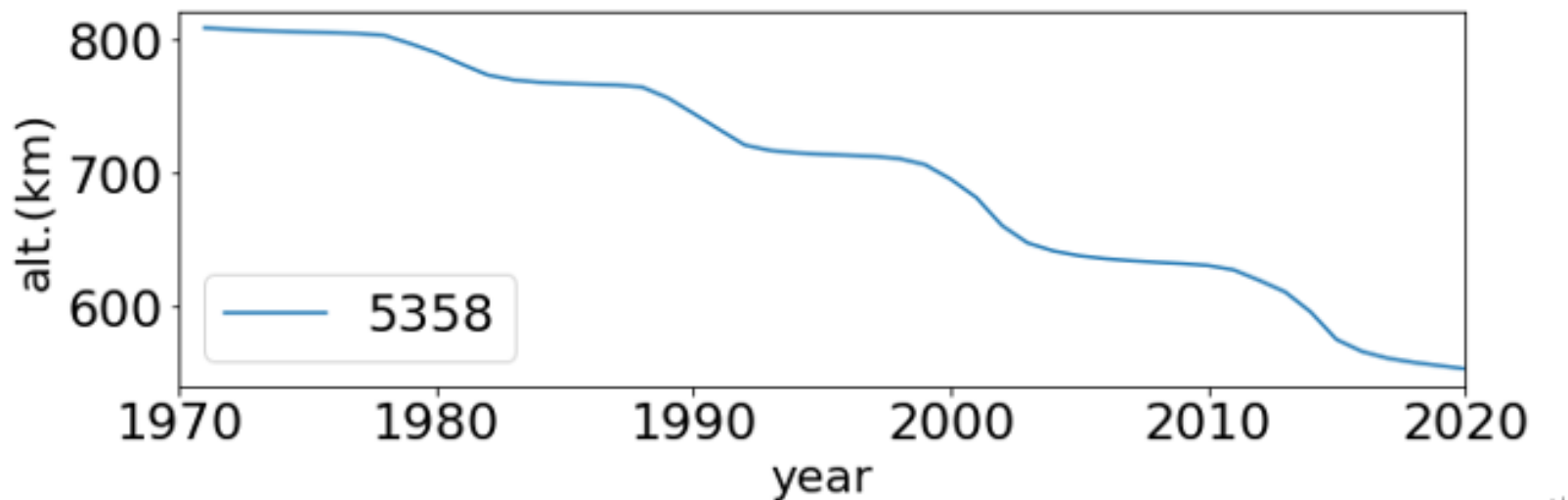


図 2 ロケット SL-8 のデブリの高度(km)の時間変化図。←

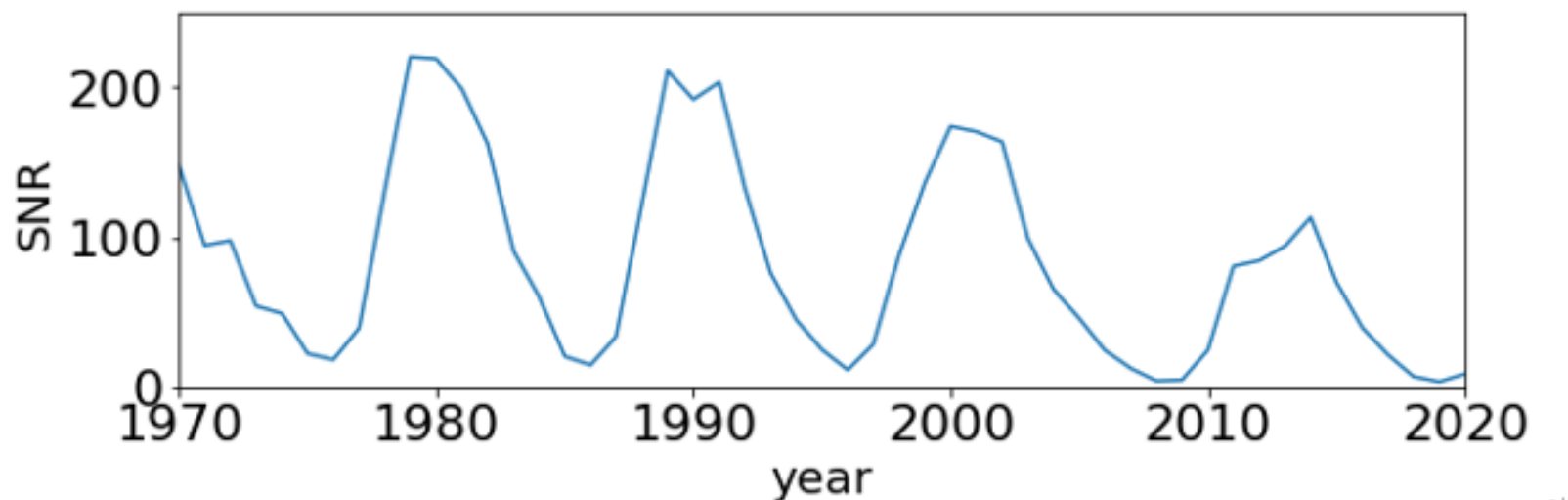
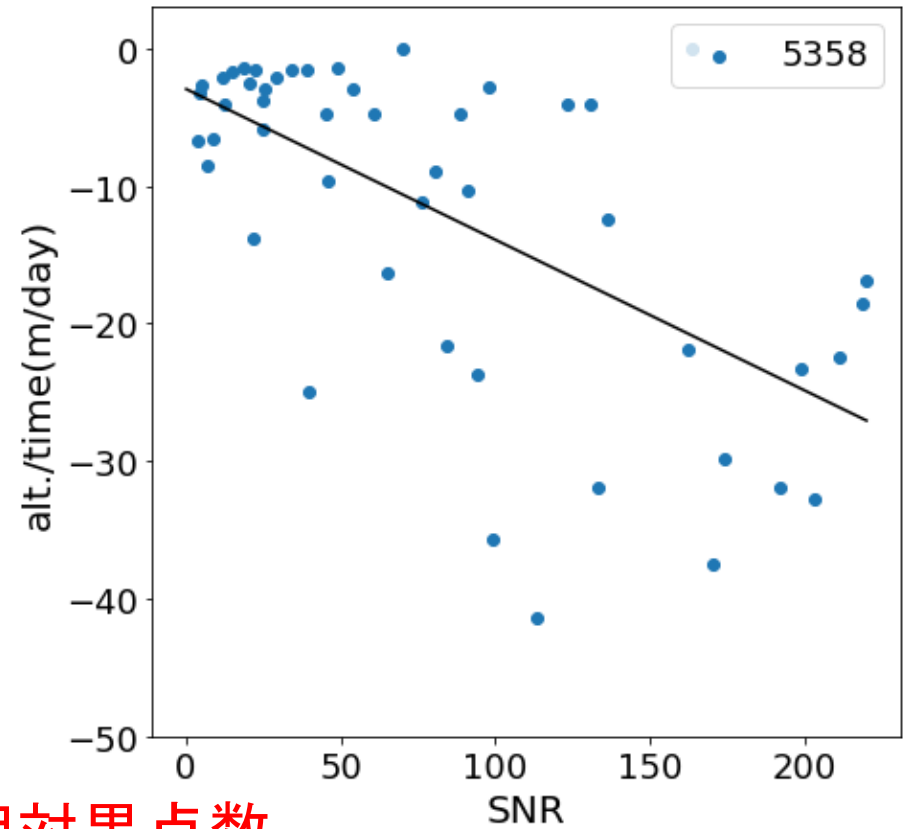
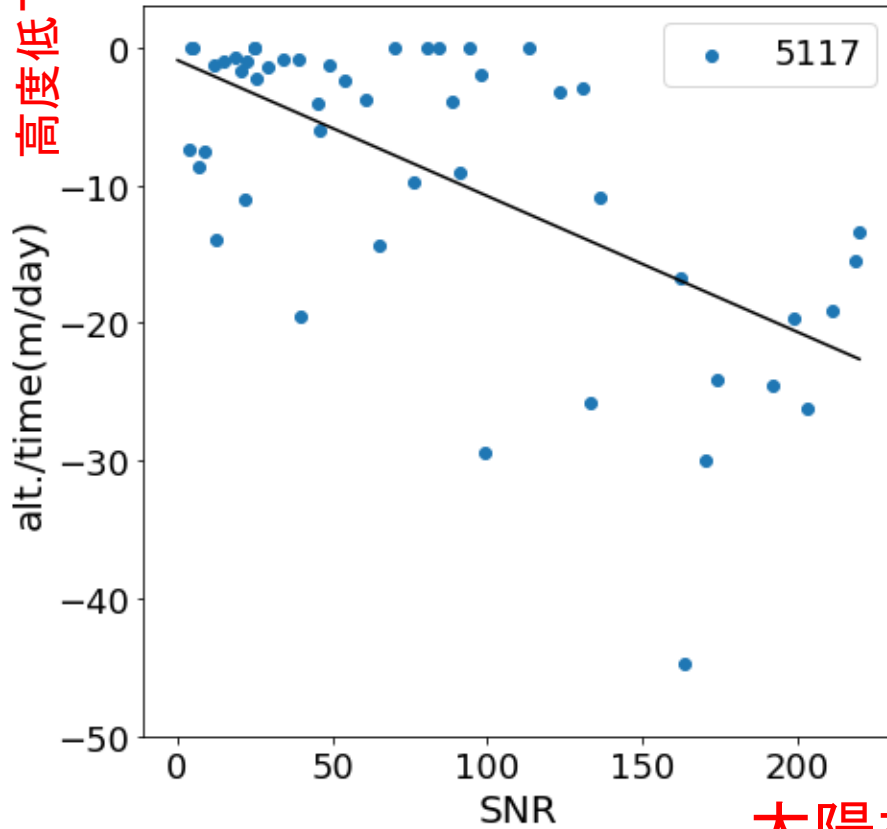


図 3 太陽相対黒点数の時間変化図。←

高度低下率



太陽相対黒点数

太陽相対黒点数と毎年毎の高度低下率と相関図。  
左がNORAD 5117 と右がNORAD 5358 である。  
相関係数はそれぞれ、 $-0.635$ ,  $-0.629$  である。

# 50年間の宇宙物体(100個弱)の高度変化と太陽活動の相関

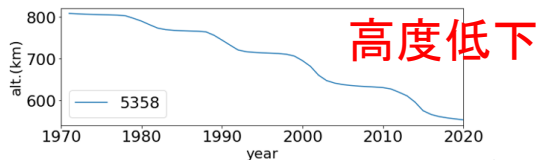


図2 ロケット SL-8 のデブリの高度(km)の時間変化図。

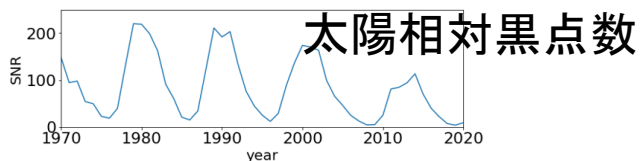
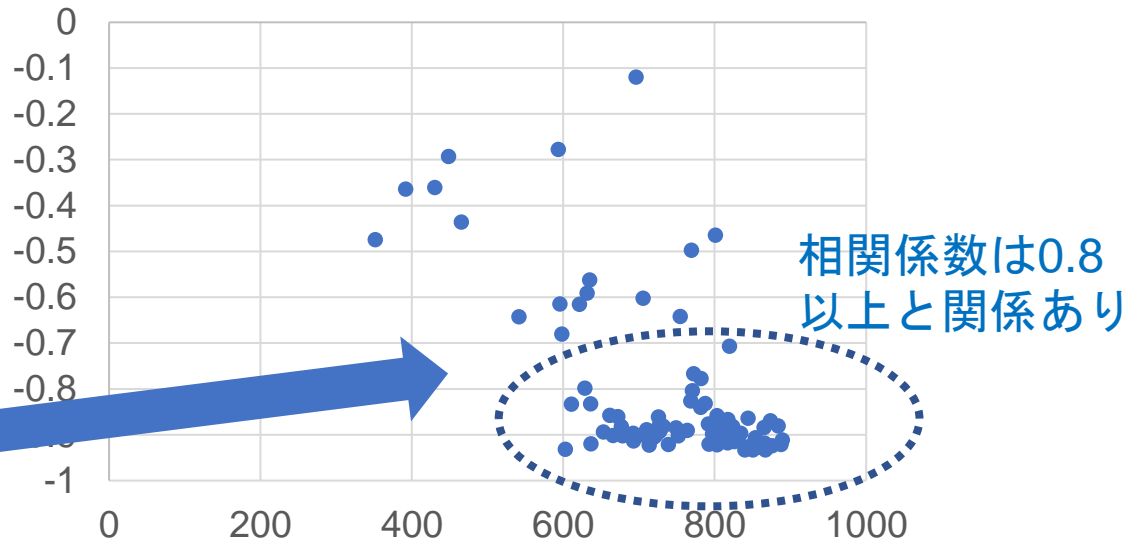
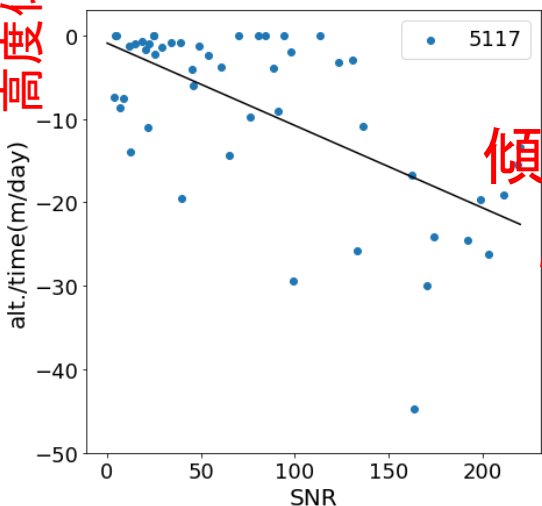


図3 太陽相対黒点数の時間変化図。



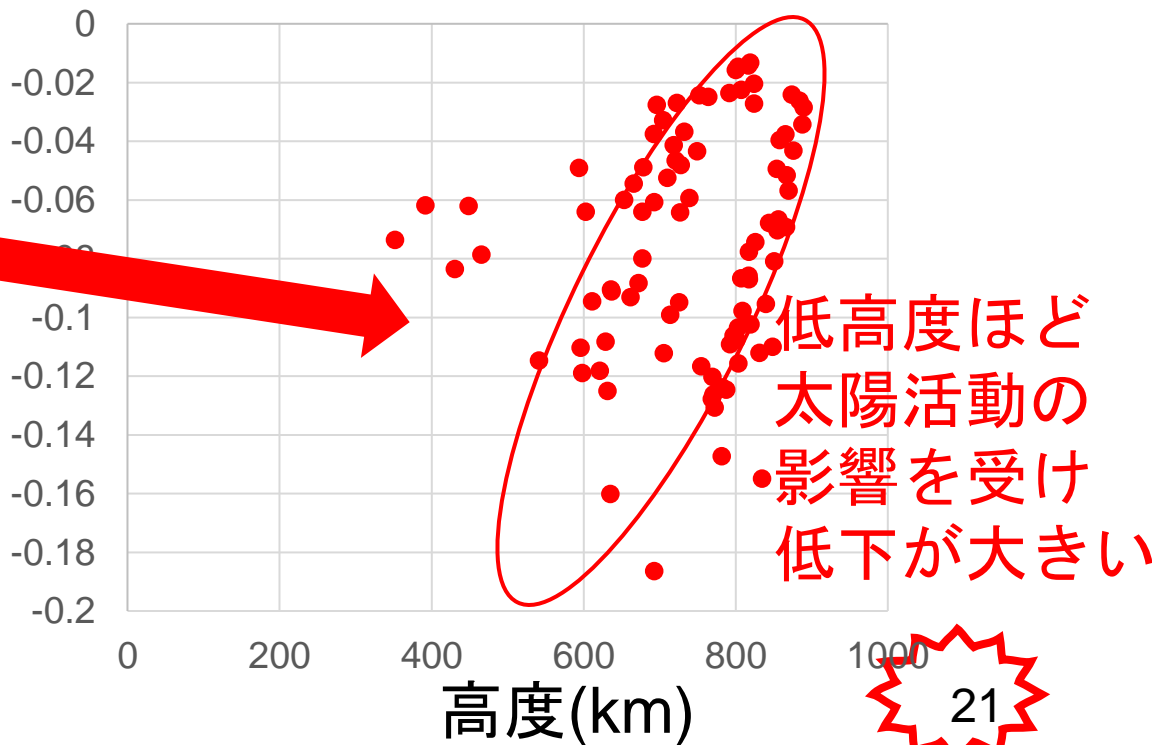
高度低下率

相関係数: -0.635



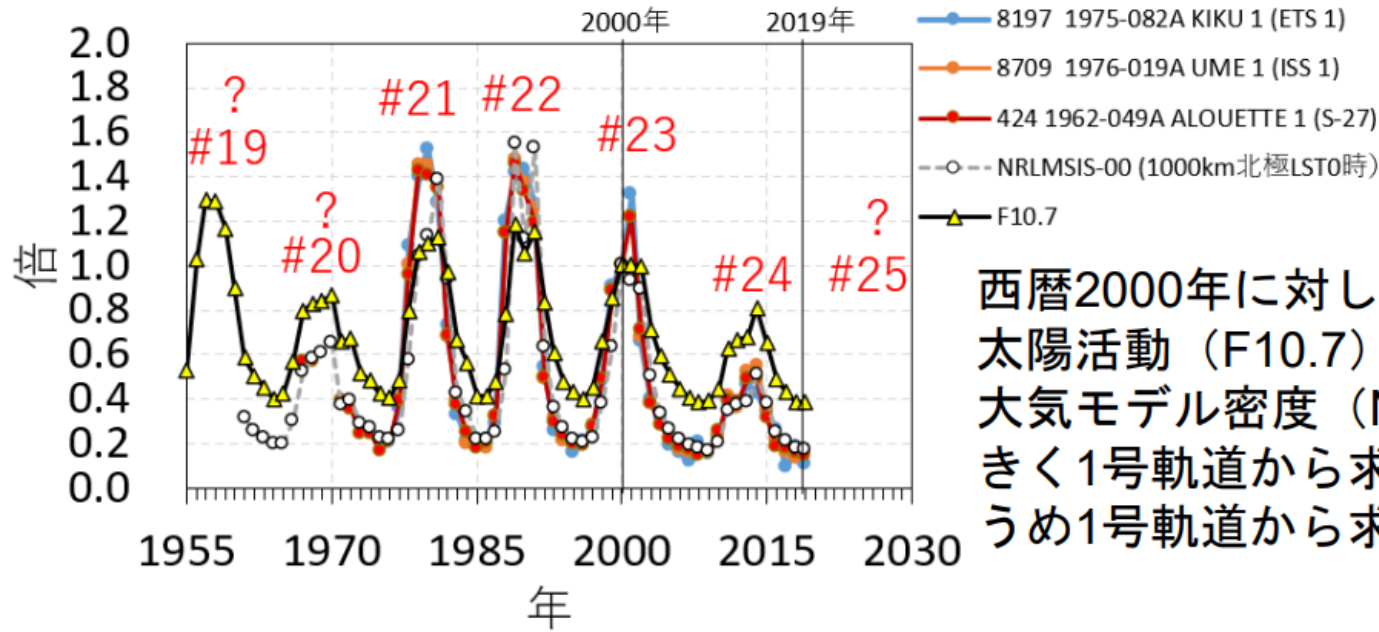
傾き

太陽相対黒点数



# Q:最近の宇宙環境は暑かった？寒かった？

## 2000年の大気密度との比較（高度1000km）



西暦2000年に対して西暦2019年は、  
太陽活動（F10.7）比：0.39  
大気モデル密度（NRLMSIS00）比：0.17  
きく1号軌道から求めた密度比：0.10  
うめ1号軌道から求めた密度比：0.16

A: 2019年の高度1000kmの大気密度は2000年の1～2割→寒かった

各太陽サイクルを個別に検証する必要あり  
定性的から定量的に

# まとめ

公開されているTLEデータを用いて、宇宙天気現象(太陽活動)と衛星軌道降下について、長期的及び短期的に影響を明らかにした

先の論文では未解析であった太陽相対黒点数と軌道降下の50年間の関係を明らかに、低高度ほど低下が大きい

## 4. まとめ

### 4.1. 速度変化と追尾

TLEの統計的解析より、1989年3月の宇宙天気現象による軌道低下を明らかにした。本研究で対象にした宇宙物体は低軌道で円軌道であるため、現象が発生時の大気変化を常時被る。そのためどの時点で軌道低下が発生した位置などは明らかにできない。そこで、別の観点から軌道低下による速度変化を見積もり、位置ずれを議論する。この位置ずれは衛星運用として軌道保持範囲に関係するものである。

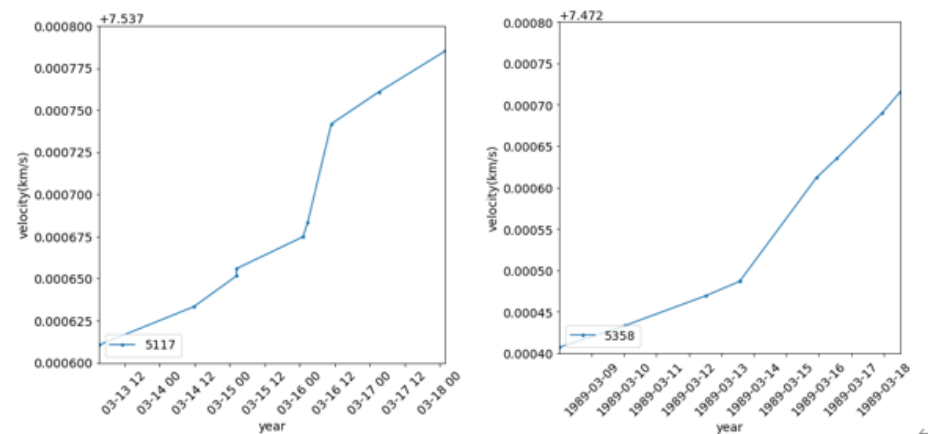


図 10 NORAD 5117,5358 の 1989 年 3 月の TLE から求めた速度の時間変化図

実用的な地球観測衛星では軌道保持範囲として、赤道上の経度方向では2.5km程度が求められる(玉置ら(2020))。軌道円周上の進行方向に直すと高度637 kmでは、その範囲は40.6 kmとなる。NORAD 5117 の0.53 kmの速度差では、一日の周回数(14.78)では5.18日で、軌道保持範囲を逸脱してしまう。