

高度300kmに投入された超小型衛星群の軌道履歴をもとにした 大気構造の解析

吉武晴信, 木村敏則, 後澤康徳, 西尾正則

鹿児島大学大学院理工学研究科物理・宇宙専攻

概要

2010年5月21日に打ち上げた超小型人工衛星「KSAT」, 「WASEDA-SAT2」, 「Negai ☆」の軌道履歴をもとに高度300kmから180km近辺までの大気密度の推定を行った。宇宙環境パラメータを用いて大気密度を導出できる既存の大気モデルJ71と我々が推定した大気密度の比較を行った。高度300km近辺では推定した大気密度に大きなばらつきが見られ, その原因が宇宙環境によるものか解析手法によるものかを判別することができなかった。しかし, 既存の大気モデルでも大気密度が宇宙環境により大きく変動しており, 超低軌道衛星の軌道予測においては日々の宇宙環境を考慮した大気密度を組み込む必要があると思われる。

1 序論

鹿児島大学と地元企業が共同で開発した超小型人工衛星「KSAT」が2010年5月21日に, 金星探査機「あかつき」の相乗り衛星のひとつとして打ち上げられた。KSATは早稲田大学の「WASEDA-SAT2」と創価大学の「Negai ☆」とほぼ等しい初期軌道に投入された。3つの超小型人工衛星はアメリカ宇宙科学データセンター(NSSDC)によって国際衛星識別符号を取り付けられ, 大気圏に再突入するまで北アメリカ航空宇宙防衛司令部(NORADA)が観測を行っていた。観測された軌道データは2行軌道要素(Two-Line-Element; TLE)として提供されている。KSATのTLEは打ち上げ直後の2010年5月21日14時(UTC)から大気圏へ落下したと考えられる2010年7月11日8時(UTC)までのデータが存在する。TLEの更新間隔は衛星により様々であるが, KSATの場合も数時間おきから数日おきと, その更新間隔にはばらつきがある。

地球近傍の衛星の位置予測はTLEから, SGP4と呼ばれる軌道計算用アルゴリズムを用いることで計算できる。しかし, KSATの初期軌道である高度300kmの超低軌道においては, SGP4アルゴリズムでは高精度の予測が困難であることがわかった。これは, 衛星に働く大気抵抗による摂動が上手く反映されていないため, もしくはTLE自身に含まれる大気抵抗に関する値の精度に問題があるのではないかと考えられる。

そのため, 我々の研究は大気抵抗を考慮し, 超低軌道における衛星の高精度予測を可能とするシミュレーションプログラム作成を目的としている。本論文では, シミュレーションプログラム作成の際に必要な高度300km以下の大気構造をKSAT, WASEDA-SAT2, Negai ☆の3つの衛星のTLEを用いて解析する。

2 大気構造の解析

大気構造を解析するために, まず, 地球の形状, 月と太陽の重力, 大気抵抗の摂動を考慮した衛星の軌道モデルを作成した。大気抵抗を未知数として, 軌道モデルが各衛星のTLEに対してよい近似となるように最小二乗法を用いた。しかし, TLEのみでは数が少なく収束しないため, 各

TLE から 1 時間後まで 1 分間隔で擬似軌道履歴を作成した。擬似軌道履歴の作成には Jens T.Satre 氏の軌道予測スクリプト [5] を使用した。最小二乗法より各 TLE 間ごとの大気抵抗の平均を求めることができ、この大気抵抗の値より大気密度の算出を行った。

2.1 軌道モデル

軌道モデルの運動方程式は次式で表される。

$$\ddot{\vec{r}} = \nabla U + \vec{a}_{3-body} + \vec{a}_{drag} \quad (1)$$

$$U(r) = \frac{GM_{\oplus}}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \frac{R_{\oplus}^n}{r^n} P_{nm}(\sin \phi) (C_{nm} \cos(m\lambda) + S_{nm} \sin(m\lambda)) \quad (2)$$

\vec{a}_{3-body} は月と太陽による摂動を考慮した加速度、 \vec{a}_{drag} は大気抵抗により生じる加速度である。U(r) は地球の重力場を球面調和関数で表した式であり、 GM_{\oplus} は地心重力定数、 R_{\oplus} は地球半径である。また、 r は地球中心からの距離、 λ は経度、 ϕ は地心緯度である。 P_{nm} はルジャンドル陪関数、 C_{nm} 、 S_{nm} は球面調和展開係数であり、本モデルでは次数 n 、位数 m ともに 10 次まで考慮している。この方程式を 13 段 7 次のルンゲ・クッタ法を用いて計算することでこの軌道モデル上での任意の時間における衛星の位置、速度を取得する。

2.2 大気抵抗と大気密度

一般的に、高層大気にて衛星に働く大気抵抗 \vec{a}_{drag} は次のように表される。

$$\vec{a}_{drag} = -\frac{1}{2} \rho \frac{C_D A}{m} v_{rel}^2 \frac{\vec{v}_{rel}}{|\vec{v}_{rel}|} \quad (3)$$

ρ は大気密度、 C_D は抗力係数、 A, m は衛星の断面積、質量である。また、 v_{rel} は地球とともに回転する大気に対する衛星の相対速度である。大気抵抗は衛星の運動方向と逆方向に働く。

抗力係数 C_D は無次元量であり、衛星の形状や表面物質、表面温度等に依存するので、実際の値を求めることは困難である。高度 300km の高層大気では酸素原子が他の大気組成物質より高い割合で存在する。このような場合、衛星の抗力係数は約 2.2 の値をとるとされているため [3]、本研究では抗力係数 $C_D = 2.2$ を用いる。また、断面積 A を衛星の姿勢変化を考慮した平均断面積とし、この値と各衛星の質量を用いて弾道係数 $m/(C_D A)$ を求め、式 (3) から大気密度の算出を行った。各衛星の寸法、質量、弾道係数を表 1 に示す。

衛星名	本体寸法	質量 (kg)	弾道係数 (kg/m ²)
WASEDA-SAT2(2010-020A)	10cm 立方	1.15	31.2
KSAT(2010-020B)	10cm 立方	1.40	38.0
Negai ☆”(2010-020C)	10cm 立方	0.80	21.7

表 1: 各衛星の弾道係数

3 推定大気密度と大気モデル J71

この章では、推定した高度ごとの大気密度と既存の大気モデルを比較する。大気モデルとしては、Jacchia 氏が 1971 年に公表したモデル J71(Jacchia 1971) を用いた。この大気モデルは過去の衛星の加速度測定、質量分析に基づいて構成されており、大気密度を算出する際には外気圏温度 T_{∞} が必要となる。外気圏温度 T_{∞} は太陽活動指数 F10.7 (単位は SolarFluxUnit: 1SFU = $10^{22} \text{Wm}^{-2} \text{Hz}^{-1}$) 及び地磁気指数 K_p から計算される。

図 1 は KSAT の TLE が存在する期間、2010 年 5 月 21 日から 2010 年 7 月 11 日までの F10.7 とその 81 日間の平均を示したものである [6]。また、図 2 は同期間における地磁気指数 A_p を示したものである [7]。 A_p は対数的に表現される指数 K_p を線形的な指数に変換し、その値の 1 日間の平均値である。F10.7 は 5 月から 6 月末にかけて 73SFU 付近を推移し、7 月に入って 10SFU 程度上昇している。一方、 A_p は 5 月 29 日に最大となり、6 月 16 日、6 月 30 日にも大きな値を示している。数値は最小 0 から最大 28 の間で変化している。

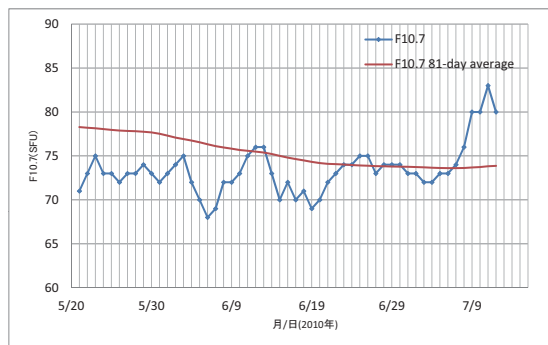


図 1: F10.7 と F10.7 81-day average

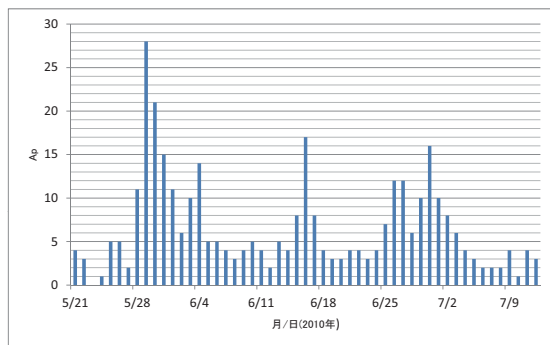


図 2: 地磁気指数 A_p

期間中の F10.7 と地磁気指数 K_p を用いて最大外気圏温度と最低外気圏温度を求め、大気モデル J71 に従う大気密度を算出した。大気密度の計算結果を表 2, 3, 4, に示す。また、大気モデル J71 の大気密度と我々が推定した大気密度を図 3, 4, 5 に示す。図 3 は WASEDA-SAT2, 図 4 は KSAT, 図 5 は Negai ☆” の場合である。WASEDA-SAT2, Negai ☆” の両衛星は KSAT に比べ、存在する TLE が少なく、推定可能な大気密度も限られていた。図中の日付は平均大気抵抗を求めた TLE 間の元期 (UTC) を表している。

日付	平均高度(km)	大気抵抗(10^{-6}m/s^2)	大気密度(g/km^3)
5/22-5/23	297.09	-2.0029	2.0455
5/27-5/28	292.8	-4.6286	5.0968
5/28-5/30	291.21	-12.876	15.011
6/2-6/4	283.3	-9.2749	10.797
6/7-6/9	276.15	-8.564	9.9572
6/9-6/11	273.45	-10.938	12.711
6/13-6/14	268.1	-23.286	27.023
6/17-6/19	257.02	-21.603	25.033
6/19-6/21	251.04	-15.625	18.088

表 2: 大気抵抗と大気密度 (WASEDA-SAT2)

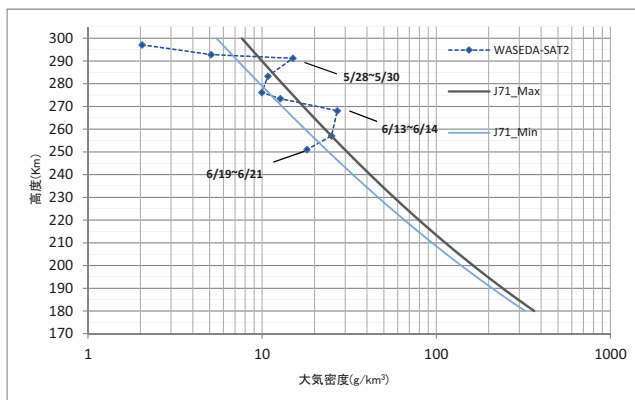


図 3: 大気密度 WASEDA-SAT2

日付	平均高度(km)	大気抵抗(10^{-6}m/s^2)	大気密度(g/km^3)
5/21-5/23	297.58	-4.2439	6.0298
5/28-5/30	292.71	-11.904	16.898
6/1-6/3	288.15	-6.8049	9.6525
6/3-6/5	286.14	-7.7179	10.944
6/5-6/6	284.93	-11.229	15.919
6/7-6/8	282.85	-9.5709	13.563
6/8-6/10	281.66	-18.808	26.648
6/10-6/13	279.56	-4.1957	5.9424
6/18-6/20	270.02	-6.181	8.7396
6/21-6/23	266.57	-15.536	21.954
6/27-6/29	255.42	-18.714	26.391
7/1-7/3	244.04	-24.547	34.55
7/4-7/5	235.44	-26.931	37.847
7/5-7/6	231.73	-25.121	35.28
7/6-7/7	227.57	-29.569	41.497
7/7-7/8	222.85	-35.623	49.951
7/8-7/9	217.78	-44.718	62.647
7/9-7/10	208.33	-74.458	104.14
7/10-7/11	189.51	-136.83	190.73
7/11-7/11	185.29	-157.38	219.22

表 3: 大気抵抗と大気密度 (KSAT)

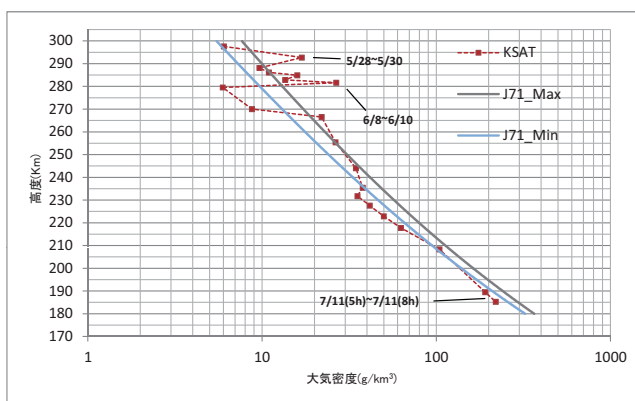


図 4: 大気密度 (KSAT)

日付	平均高度(km)	大気抵抗(10^{-6}m/s^2)	大気密度(g/km^3)
5/22-5/23	296	-5.8175	4.722
5/25-5/26	292.65	-15.1	12.249
5/28-5/31	286.57	-25.394	20.591
5/31-6/1	281.68	-25.553	20.688
6/1-6/2	278.86	-19.839	16.053
6/2-6/5	274.71	-15.876	12.838
6/10-6/13	253.52	-11.832	9.5324
6/13-6/15	241.4	-37.067	29.798

表 4: 大気抵抗と大気密度 (Negai ☆)

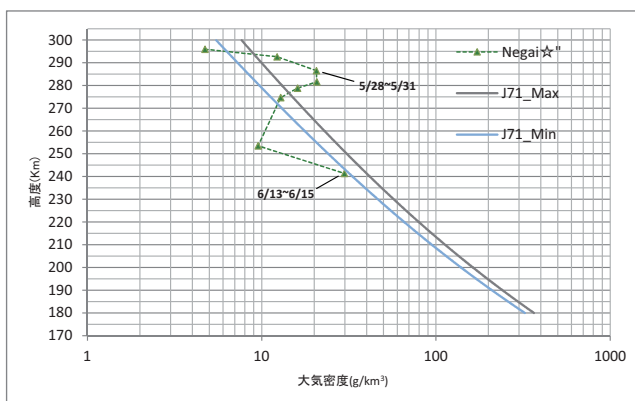


図 5: 大気密度 (Negai ☆)

KSAT は 6 月 29 日から高度 250km を下回っているが、高度約 250km から約 180km では推定した大気密度が大気モデル J71 の大気密度と近い値に推移している。これは地磁気指数が 7 月初頭

から静穏日に推移していることから、大気密度も大きく変動していないと考えられる。一方、F10.7の値は7月中旬より10SFU近く上昇しているが、大気密度に大きな影響を与えるほどの変動ではない。

高度約300kmから約250kmでは、3つの衛星の軌道履歴より推定した大気密度に大きなばらつきが見られ、大気モデルJ71と大きく異なる値を取っている。5月28日から5月31日には地磁気指数が大きく変化しており、その影響を受け大気密度も大きく変化しているのではないかと考えられたが、地磁気擾乱が見られない6月8日から14日にも大気密度が大きく変動している。

算出した大気抵抗はTLE期間ごとの平均値であり、衛星の日照時間、日々の宇宙環境による大気抵抗の変動を詳細に記すことはできない。このため、高度約300kmから高度約250km間の大気密度に大きなばらつきが見られるのではないかと考えられる。もう1つの原因として、TLE自身も観測値をもとに作られたものなので、軌道投入直後の数日間はTLE自身が不確実ということも考えられる。

4 まとめ

大気構造の解析の最終的な目標は推定した大気密度をモデル化し、数値シミュレーションに組み込むことで高精度軌道予測を行うことであった。大気密度が宇宙環境に大きく左右されなければ高度だけに依存した大気モデルを作成し高精度軌道予測に活用できると考えたが、高度300km付近では既存の大気モデルでも大気密度が宇宙環境により大きく変動することが分かった。このため、超低軌道衛星の軌道予測においては日々の宇宙環境を考慮した大気密度を組み込む必要があると思われる。

大気構造解析に用いた軌道モデル、抗力係数の設定に不備がある可能性も考えられる。TLEは本来、近似解析解で軌道伝播を行うSGP/SDPアルゴリズムで用いられる軌道データのフォーマットであり、数値解析に適用するにはTLE自身を補正する必要がある。また、抗力係数は一般的な値2.2を用いたが、大気分子が衛星表面で拡散反射することを考慮し、より厳密な値を用いて大気密度の算出を行うべきである。衛星断面積についても考察が必要だが、今回の3つの超小型衛星は精密な姿勢制御をできていないため、衛星の姿勢を仮定をして計算するほかに方法はないと考える。

上記を考慮した解析手法で大気密度を推定すると、有用な結果が得られるかもしれない。今後の研究進展としては、大気密度の推定方法の改良、種々ある既存の大気モデルを数値解析に組み込み、高精度軌道予測が行えるかを確認してゆく。

参考文献

- [1] Oliver Montenbruck and Eberhard Gill, "Satellite Orbits-Models.Methods.Applications", Springer, 2005.
- [2] David A.Vallado, "Fundamentals of Astrodynamics and Applications Third Edition", Microcosm Press, 2007.
- [3] King-Hele D.G, "Satellite orbits in an atmosphere: theory and applications.", Blackie and Son, 1987.
- [4] 木下 宙, "天体と軌道の力学", 東京大学出版会, 1998年6月30日.

- [5] http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/indices/old_indices.html, Oct.17, 2011.
- [6] http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/indices/old_indices.html, Oct.17, 2011.
- [7] <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index-j.html>, Oct.17, 2011.