# 宇宙機に働く大気ドラッグの評価について ~高精度な宇宙機運用に向けて~

# 成蹊大学 理工学部 藤原 均

共同研究者 三好勉信 (九州大学 大学院理学研究院) 陣英克 (情報通信研究機構) 品川裕之 (情報通信研究機構) 東尾奈々 (宇宙航空研究開発機構)

熱圏・電離圏:	*低高度衛星・ISSの飛翔領域
	*宇宙機が外の世界へ出て行くとき、また帰還
	するときに必ず通過する領域
	*地上・宇宙間での通信の際に電波が伝わる領域

宇宙天気研究としての熱圏・電離圏の研究課題

現象の理解と予測

電離圏電子密度変動
 電離圏嵐、プラズマバブル等の現象予測
 GPS測位、地上・宇宙通信への影響

2. 熱圏大気密度変動 宇宙機への大気ドラッグ

3. 酸素原子密度 (原子状酸素) 宇宙機の表面素材への影響

#### http://www.nationalgeographic.co.jp/



トップ	ナショナルジオグラフィック	=1-7 ×	
ニュース	ニューストップ 動物 古代の世界		
写真 NEW			
動画	ドイツの人工衛星、	今週末に落下	
宇宙		Social News (1) 57:27 [[1] 1/1/2] 92	
動物	Traci Watson		
環境と自然	for National Geographic News		
国と人 NEW	October 20, 2011		
太古の世界	2011年9月、NASAの人工衛星が地球に落下して話題になったが、今週末にはドイ ツの人工衛星「ROSAT」も大気圏に再突入するという。破片が人にぶつかる確率は		
地球			
クイズ・投票	前回より高いとされている。		
キッズ		ROSATの開発と建造を率いたドイツ航空宇宙	
	· · · · ·	センターによると、破片が人を傷つける確率は	
人気コンテンツ	in the second second	「2000分の1」。NASAの上層大気観測衛星	
おすすめトピックス NEW		(UARS)の場合は13200万の1]/25/2。	
今日の写真		欧州宇宙機関(ESA)でスペースデブリ(宇宙	
パズル		ゴミ)部門を率いるハイナー・クリンクラッド	
壁紙	写真を拡大	(Heiner Klinkrad)氏は、「現時点で、RUSATIよ グリニッジ連進時の23日早朝(日本時間23日夕	
	目的刷用ページ	方)、制御不能の状態で大気圏再突入すると予	
神秘の国の多様な素顔	<ul> <li>▲ あんに数える</li> </ul>	測されている」と話す。	
エジプトの自然			
	可能性がある」 調差が生じるの!	1/こにし、美際の時刻は削後放大24時間すれる + 大陽の放射エネルギーの変化が100%の精度	
	で予測できないためだ。太陽放射	が増大すると、大気の温度が上昇し、膨張する。	
A shake the	人工衛星にかかる抗力も増し、予	測よりも早く落下することになる。	
CT -	◆宇宙ゴミに触らないこと		
写真集はこちら…>	建今なことに カリンクラッド氏を	けじめ 誰もPPRATの落下地占を明言することけ	
アクセスランキング	できない。		
壁紙			
2 ハイイログマの子…	ドイツ航空宇宙センターのローランド・グラブ(Roland Grave)氏は、「可能性として、落下地点は北緯53度から南緯53度の間、つまり地球の大陸のほとんどが対象		
3 夕焼けのキリン、… 4 初めて目にする地…			
52匹のエイ	地域となる」と述べた。		

動物 | 古代の世界 | 環境 | 文化 | 科学 & 宇宙 | 風変わりニュース | ニュース特集 | おすすめトビックス NEW

#### 人工衛星、今週末に落下

2011年10月 ドイツの人工衛星 **ROSAT**落下の記事

**ADVERTISEMENT** 





## X線天文衛星「あすか」の事故



2000年7月15日の大磁気 嵐のために衛星高度が 100 kmも降下。大気摩擦 の影響で姿勢が乱れ、太 陽電池パネルに十分な 太陽光があたらずに、バッ テリーの枯渇 → 制御不能 に陥ったと考えられている。

(SWPC/NOAA)

### 超高層大気の密度計測

人工衛星が惑星周辺を回っているとき、低高度では惑星大気から受けるド ラッグ/抗力(drag force)のため、わずかながら周回高度が低下する。この ような抗力を受け続けると、やがて人工衛星は大気圏に再突入(reentry)し、 落下することとなる。

人工衛星に働く大気ドラッグは以下のように表される。

$$F_{\rm D} = \frac{1}{2} \rho C_{\rm D} (V_{\rm s} - U)^2 A_{\rm r}$$

 $F_D$ は人工衛星に働くドラッグ(drag force)。 $\varrho$ は大気密度。Vs、Uはそれぞれ 衛星速度と大気の風速。 $C_D$ はdrag coefficient、A<sub>r</sub>は大気との衝突における 衛星の有効面積。Killeen et al.[1993]の指摘するところによれば、drag coefficientがキーパラメータであり、かつ、最も理解が遅れている(人工衛 星表面での大気分子・原子と衛星との運動量輸送の微視的な物理過程 がわかっていない)。一般的には、 $C_D$ ~2.2程度の値が使われている。 (例えば、Herrero [1987]によれば、1.6~2.7) 半径rの円軌道で運動する人工衛星のエネルギーは、

$$E = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{r}$$

m、vは人工衛星の質量、速度。Gは万有引力定数。Mは地球の質量。 大気ドラッグが小さいとすると、円軌道が維持され、中心力場の中で円 運動する衛星の全エネルギーは、

$$\mathbf{E} = -\frac{\mathbf{GMm}}{2\mathbf{r}}$$

となる。一方、大気ドラッグによる衛星のエネルギー変化は、

$$\frac{dE}{dt} = -F_{\rm D}(V_{\rm s} - U) = -\frac{1}{2}\rho C_{\rm D}(V_{\rm s} - U)^3 A_{\rm r}$$

簡単のため、V=V<sub>s</sub>-Uとすると、

$$\frac{\mathrm{dE}}{\mathrm{dt}} = \frac{\mathrm{GMm}}{2\mathrm{r}^2} \frac{\mathrm{dr}}{\mathrm{dt}} = -\frac{1}{2}\rho \mathrm{C}_\mathrm{D} \mathrm{V}^3 \mathrm{A}_\mathrm{r}$$

となり、簡単のためV=Vsとすると、

$$V = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

軌道半径の変化率は、



と書くことが出来る。

上記は大気密度が既知として人工衛星の寿命を見積もっているが、歴史的に は逆のことが行なわれてきた。すなわち、人工衛星の軌道変化から大気密度 を推定した。例えば、King-Hele [1959], King-Hele [1992]。

高度 400 km を円軌道で運動していた人工衛星が再突入(地表面に落下)するまでに 要する時間。モデル大気を使った簡単な計算例を以下に示す。



4つの線は超高層大気のコンディ ションが違う場合のもの。太陽活 動極大期、地磁気擾乱時には衛 星寿命は約72日と計算された。 一方、太陽活動極小期、地磁気 静穏時の状態では約700日。 (注:ここでは、極端な場合をあえ て比較している。大気の状態は 時々刻々変わるので、実際の計 算は難しい) 以下に示すのは、スプートニクなど、初期の衛星の軌道データを使って得られた熱圏での大気密度である。King-Heleが1959年にNature誌に発表したものである。



Fig. 1. Values of air density obtained by means of satellites (refs. 1-12). with proposed 'standard atmospheres' (refs. 6, 13, 14). Reference numbers are shown beside the plotted points

グラフの下方に示されている実線は、当時の理論的な予測にもとづく大 気密度の高度プロファイルであるが、ここでの結果によれば、実測値は それよりも1桁ほど大きな値を示している。

#### TAIYO衛星の例 (一週間平均の密度・外気圏温度)



<sup>(</sup>Kato et al., 1979)

## 平均的な熱圏大気密度

NRLMSISE-00 Atmosphere Model <u>http://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/nrlmsise00.php</u>







原理的には宇宙機の落下速度、落下時間、落下場所 を推定することはできる。

しかし、現状では推定精度は極めて悪い。 →UARSやROSATでは直前になるまで地表に落下する時間が不明だった。

使用済み衛星の落下予測や、将来的な(無人)宇宙機の高度な運用のためには、高精度な大気摩擦力(宇宙機に働く加速度)の推定が重要。

なぜ、推定精度が悪いのか?

\*超高層大気質量密度の空間分布や変動が

十分には把握できていない?

\*摩擦係数C<sub>D</sub>の不確定さ?

\*衛星の周回周期・高度変化→大気ドラッグ→大気密度\*大気密度→大気ドラッグ→衛星の周回周期・高度変化



(from NOAA)

### 加速度計搭載の測地衛星 CHAMP

熱圏大気質量密度計測において画期的成果



- \*衛星に搭載したGPS受信機 で精密軌道決定
- \*高感度の加速度計が搭載され, 非重力場加速度成分の補正

大気ドラッグ=大気密度 進行方向に垂直な風速

http://op.gfz-potsdam.de/champ/index\_CHAMP.html



Storm-time density variations [Liu et al., 2005]

2003年10月29日の質量密度変動をCHAMPの軌道に沿ってプロットしたもの(400 km 高度)



### 現象の理解と予測に向けた試み



領域間結合モデルの開発が 必要

大気圏・電離圏統合モデル

**G**round-to-topside model of <u>A</u>tmosphere and <u>l</u>onosphere for <u>A</u>eronomy (GAIA)

#### GCM simulation by Fujiwara et al. (IAGA-book, 2011)





まとめ

高度な宇宙機の運用のために、超高層大気変動、とくに質量密度の時空間分布の理解は不可欠である。

宇宙・大気科学研究のために開発された数値 モデルの計算結果を用いて、高精度な質量密 度の時空間分布の推定を行うことが可能と考え られる。今後、宇宙機落下の予測や、宇宙機の 軌道変化等の推定への応用を視野に入れた研 究を実施していく。