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/

NATIONAL GEOGRAPHIC Inspiring People to Care About the Planet Inspiring People to Care About the Planet サイト内検索 サイト内検索 マーコース 写真 動画 サイト内検索 マーカース マー			
トップ	お > 人工衛星の落下、太陽活動で早まるナショナルジオグラフィックニューストップ 動物 古代の世界	ニュース 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
写真 NEW 動画 宇宙 動物 環境と自然 国と人 NEW	人工衛星の落下、プロップ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・		2011年9月22日 米国の人工衛星UARS 落下の記事
太古の世界 地球 クイズ・投票 キッズ		その命運はすでに尽きているかもしれない。しかし近日中に地上への落下が予想される NASAの「上層大気観測衛星(UARS)」は、ひっ そりと消え去るつもりはないようだ。	
人気コンテンツ おすすめトビックス NEW 今日の写真 パズル 壁紙	写真を拡大 国 印刷用ページ ☑ 友人に数える	重量6トンのUARSは、科学者の予想に反して 落下の速度を増しており、現時点の予測では米 国東部夏時間9月23日に大気圏に再突入する ものと見られる。 わずか2週間前、アメリカ政 府の科学者たちは衛・・・	ADVERTISEMENT ADVERTISEMENT おすすめトピック 最新テーマ:動物界の不思議なま

トップ

ニュース

写真 NEW 動画

宇宙

動物

環境と自然

国と人

太古の世界

地球

クイズ・投票

キッズ

人気コンテンツ

おすすめトピックス

今日の写真

パズル

壁紙



アクセスランキング 壁紙

- 1 どこまでも続く水… 2 ハイイログマの子…
- 3 夕焼けのキリン、…
- 4 初めて目にする地… 5 2匹のエイ

ナショナルジオグラフィック ニュース

ニューストップ | 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

ドイツの人工衛星、今週末に落下

for National Geographic News









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 前回より高いとされている。



写真を拡大

Traci Watson

October 20, 2011

■ 印刷用ページ ☑ 友人に数える

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 「2000分の1」。NASAの上層大気観測衛星 (UARS)の場合は「3200分の1」だった。

欧州宇宙機関(ESA)でスペースデブリ(宇宙 ゴミ)部門を率いるハイナー・クリンクラッド (Heiner Klinkrad)氏は、「現時点で、ROSATIは グリニッジ標準時の23日早朝(日本時間23日夕 方)、制御不能の状態で大気圏再突入すると予 測されている」と話す。

「ただし、実際の時刻は前後最大24時間ずれる

可能性がある」。誤差が生じるのは、太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。 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。

◆宇宙ゴミに触らないこと

残念なことに、クリンクラッド氏をはじめ、誰もROSATの落下地点を明言することは できない。

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 地域となる」と述べた。

2011年10月 ドイツの人工衛星 ROSAT落下の記事

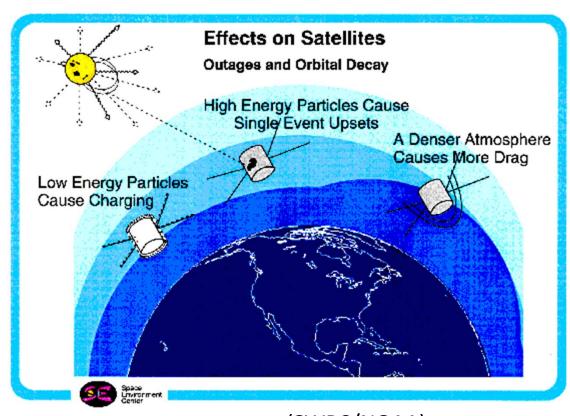
ADVERTISEMENT







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。

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D (V_s - U)^2 A_r$$

 F_D は人工衛星に働くドラッグ(drag force)。 ϱ 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_r 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、

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

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、

$$\frac{dE}{dt} = -F_D(V_s - U) = -\frac{1}{2}\rho C_D(V_s - U)^3 A_r$$

簡単のため、V=V。一Uとすると、

$$\frac{dE}{dt} = \frac{GMm}{2r^2} \frac{dr}{dt} = -\frac{1}{2} \rho C_D V^3 A_r$$

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、

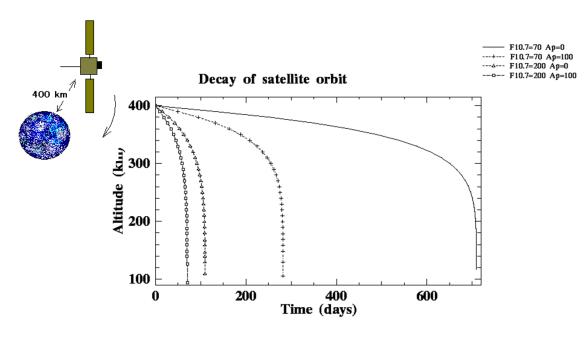
$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = -\frac{\rho V C_D A_r \mathbf{r}}{m}$$

$$\dot{\mathbf{T}} = \frac{\mathbf{dT}}{\mathbf{dt}} = -\frac{3\pi C_{\mathrm{D}} A_{\mathrm{r}} \mathbf{r}}{\mathbf{m}} \rho$$

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。

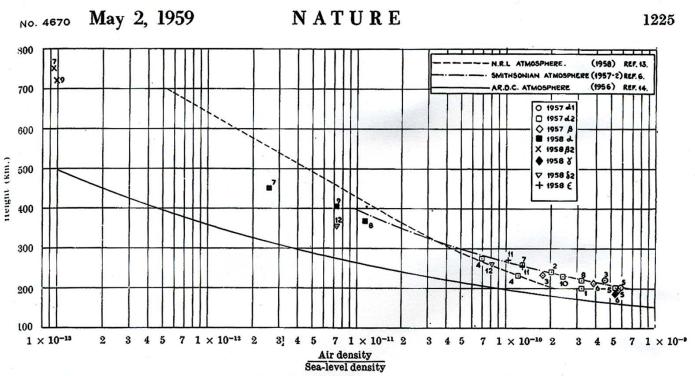


Fig. 1. Values of air density obtained by means of satellites (refs. 1-12), with proposed 'standard atmospheres' (refs. 6, 13, 14).

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)

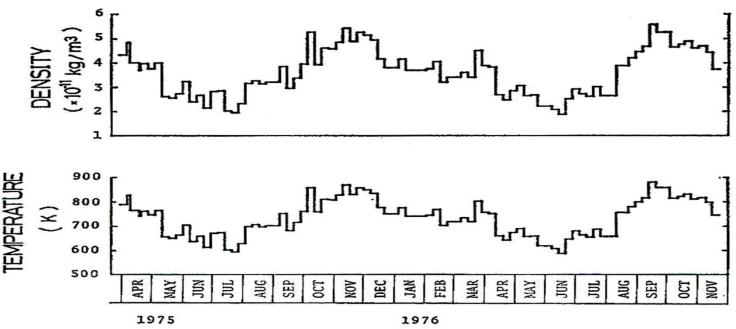


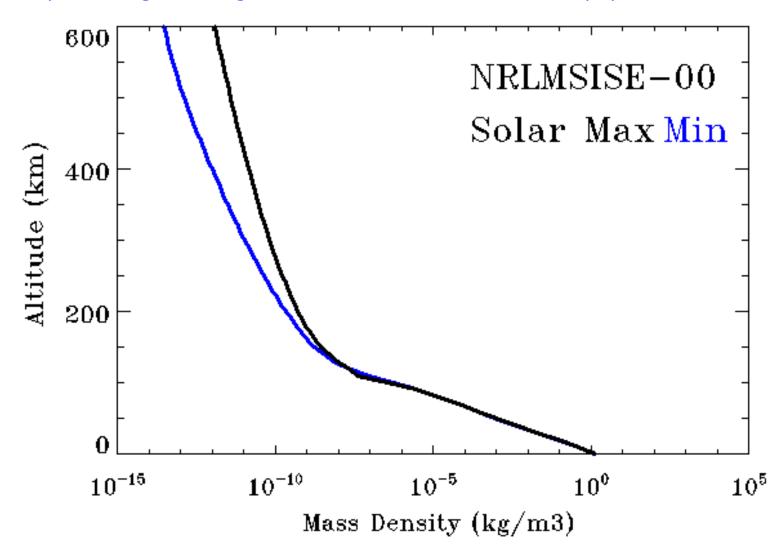
Fig. 3. Daily variation of exospheric temperature.

(Kato et al., 1979)

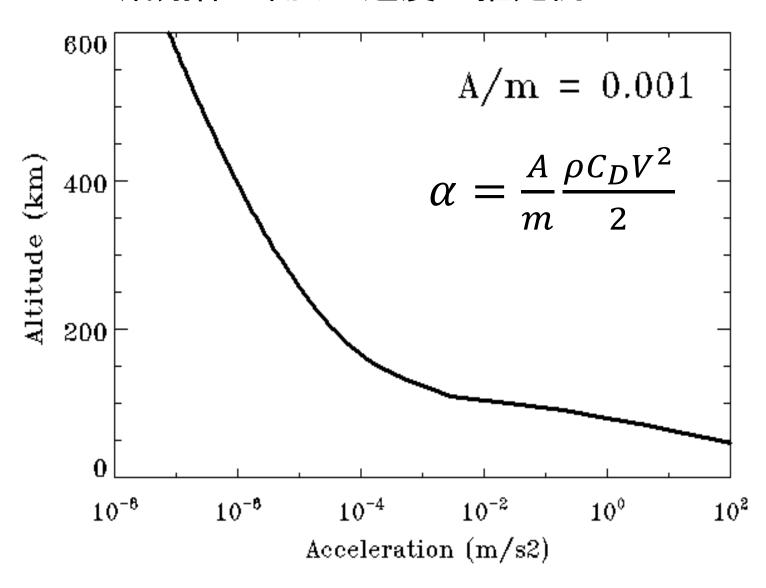
平均的な熱圏大気密度

NRLMSISE-00 Atmosphere Model

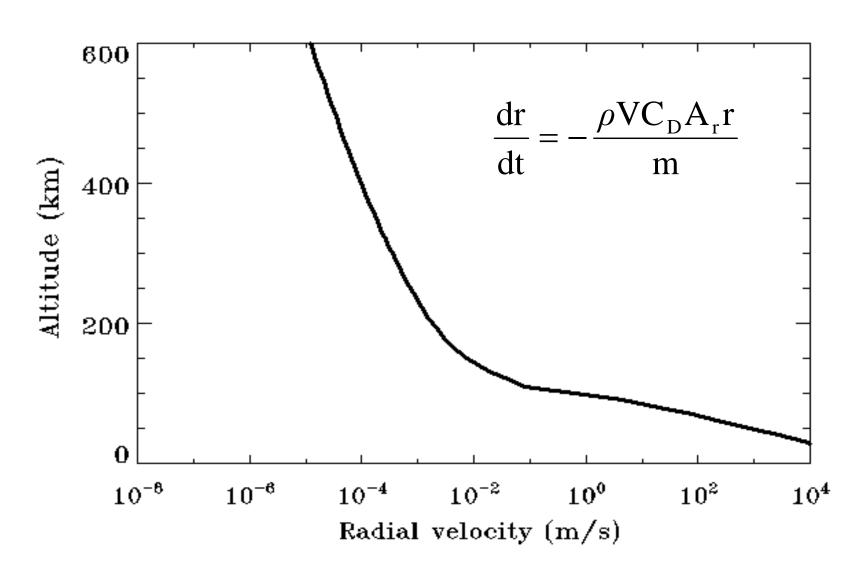
http://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/nrlmsise00.php



飛翔体に働く加速度の推定例



飛翔体の落下速度の推定例



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。

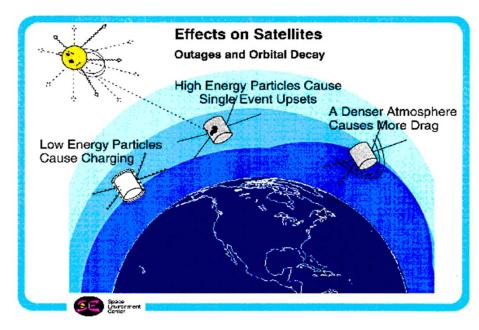
使用済み衛星の落下予測や、将来的な(無人)宇宙機の高度な運用のためには、高精度な大気摩擦力(宇宙機に働く加速度)の推定が重要。

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CD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

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = -\frac{\rho V C_D A_r r}{m} \qquad \qquad \rho = -\frac{m}{V C_D A_r r} \frac{d\mathbf{r}}{dt}$$

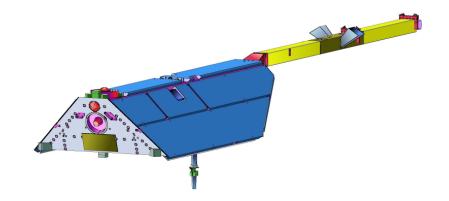


(from NOAA)

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

CHAMP

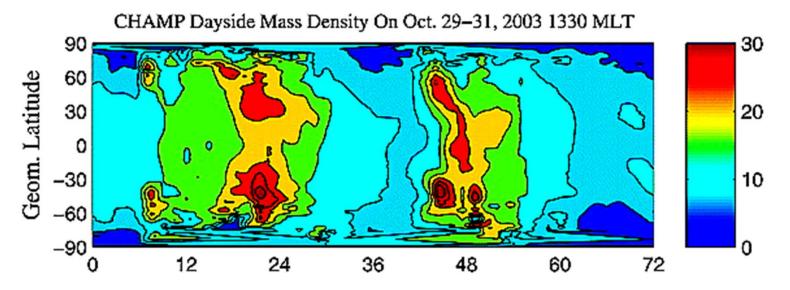


2000年7月15日打ち上げ 2010年9月19日ミッション終了

- *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

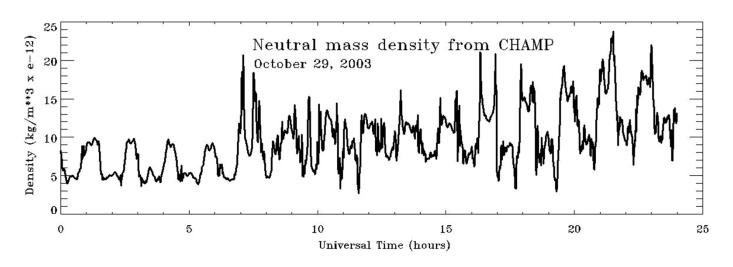
大気ドラッグ=大気密度 進行方向に垂直な風速

http://op.gfz-potsdam.de/champ/index_CHAMP.html

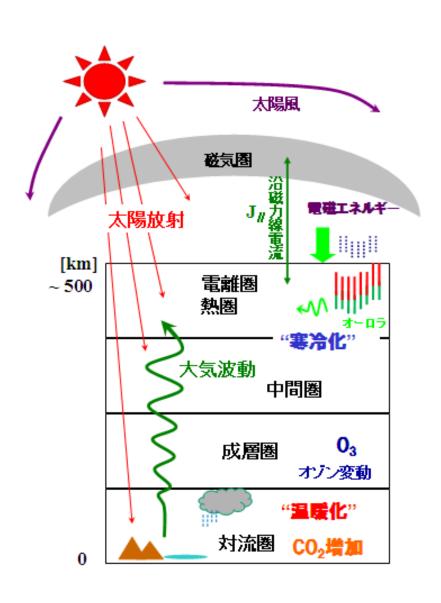


Storm-time density variations [Liu et al., 2005]

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

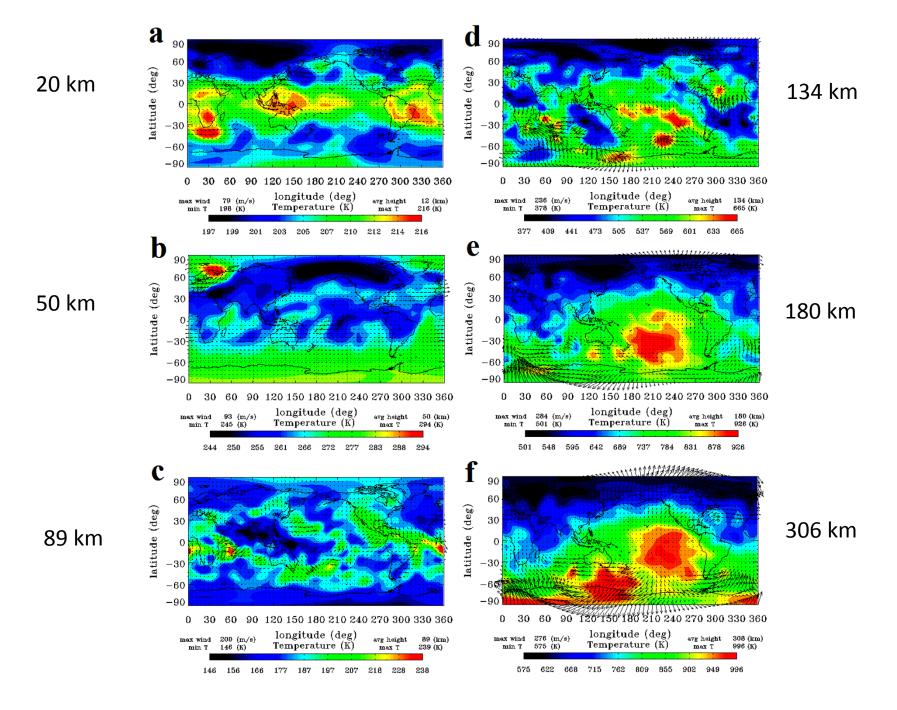


領域間結合モデルの開発が 必要

大気圏・電離圏統合モデル

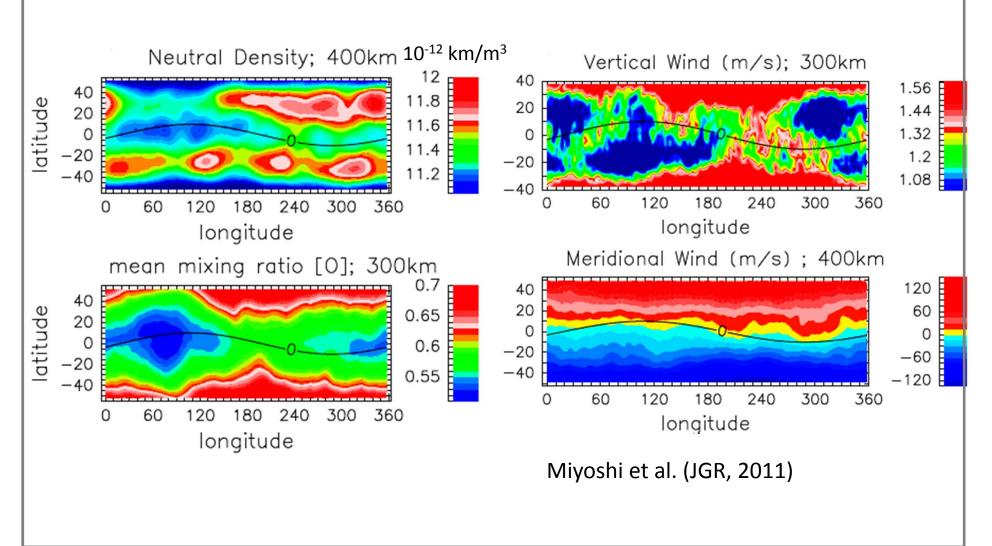
Ground-to-topside model of Atmosphere and Ionosphere for Aeronomy (GAIA)

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



An example of the GAIA simulations

Miyoshi et al. investigated the equatorial mass density anomaly (EMA) by using GAIA.



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。