

超低高度衛星の利用に向けたワークショップ(第4回)
@ソラシティ 御茶ノ水カンファレンスセンター2018年9月18日

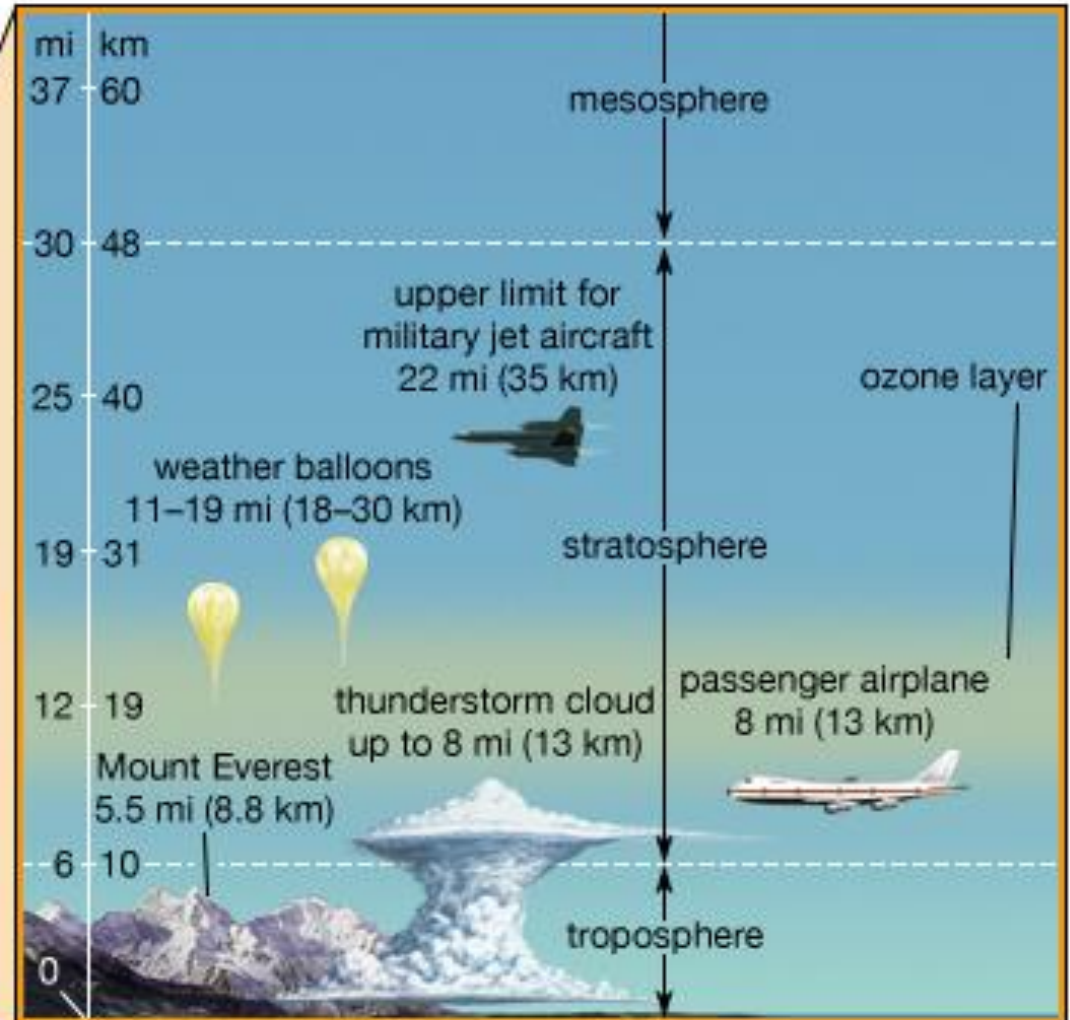
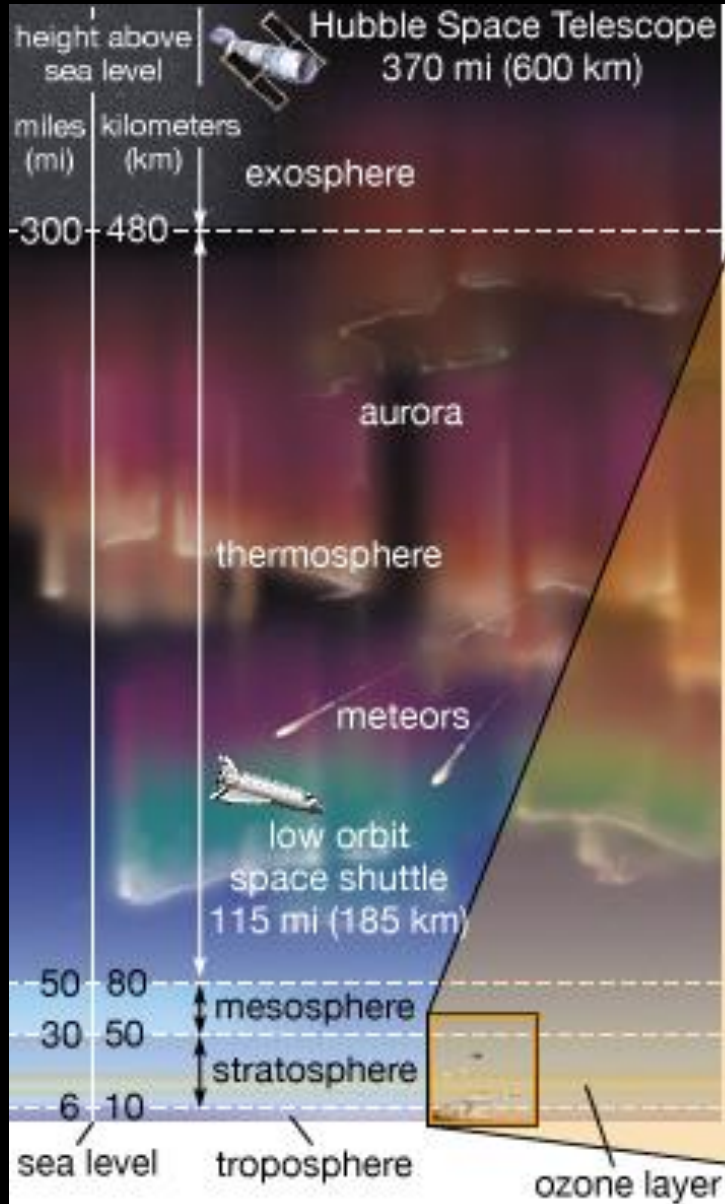
人工衛星データを用いた超高層大気 の質量密度推定の研究

藤原 均

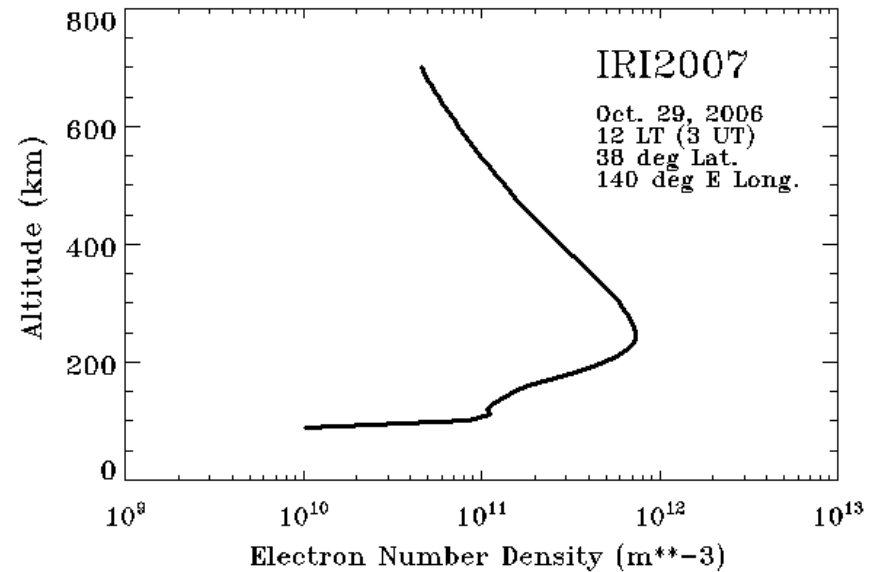
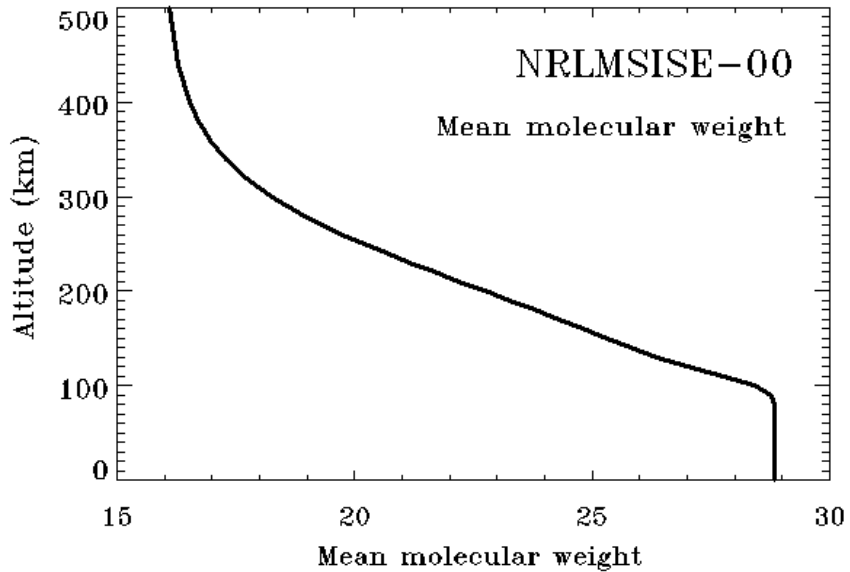
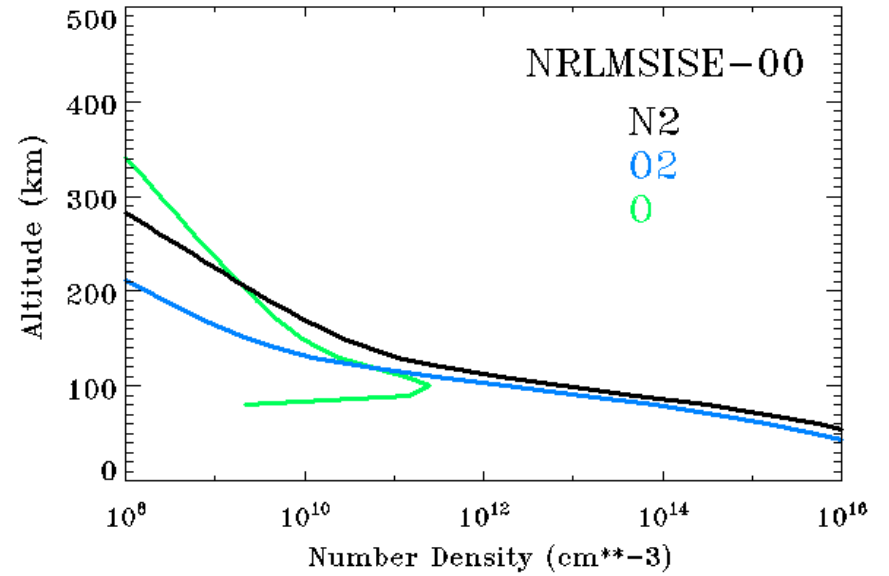
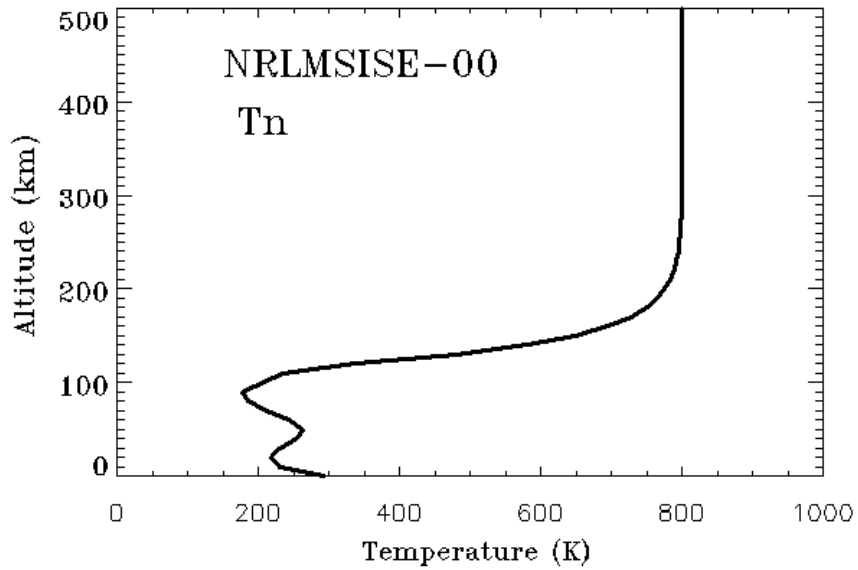
成蹊大学 理工学部

共同研究者: 三好勉信(九大)、東尾奈々(JAXA)、
Huixin Liu(九大)、歌島昌由(成蹊大)

Earth's Atmosphere



熱圏の大気



概要

- 超高層大気の研究課題のいくつか
特に、高度100-300 kmでの科学的(社会的)研究意義
- これまでの低高度衛星(< 300 km)による観測例
- 将来の衛星観測へ期待すること
- まとめ

高度**100~200** km付近では、温度、組成(平均分子量)、電子密度が高度とともに急激に変化する。

この高度範囲での、温度、質量密度、組成、風速・・・の高度分布の**観測例は極めて少ない**。

- * 衛星への大気摩擦→衛星の落下予測
- * 温度分布→エネルギー収支とコンシステントか？
寒冷化との関係は？
- * 組成(特に赤外放射に関わる微量成分と酸素原子)は？
- * 風速分布
→波の伝搬との関係は？
この領域での風の加速機構は十分にわかっているか？

衛星軌道半径の変化と熱圏大気質量密度

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{\rho V C_D A_r r}{m} \iff \rho = -\frac{m}{V C_D A_r r} \frac{dr}{dt}$$

※大気摩擦により、周回周期も変化する

$$\dot{T} = \frac{dT}{dt} = -\frac{3\pi C_D A_r r}{m} \rho$$

$$\left(T = \frac{2\pi r}{V} \right)$$

King-Hele [1959]

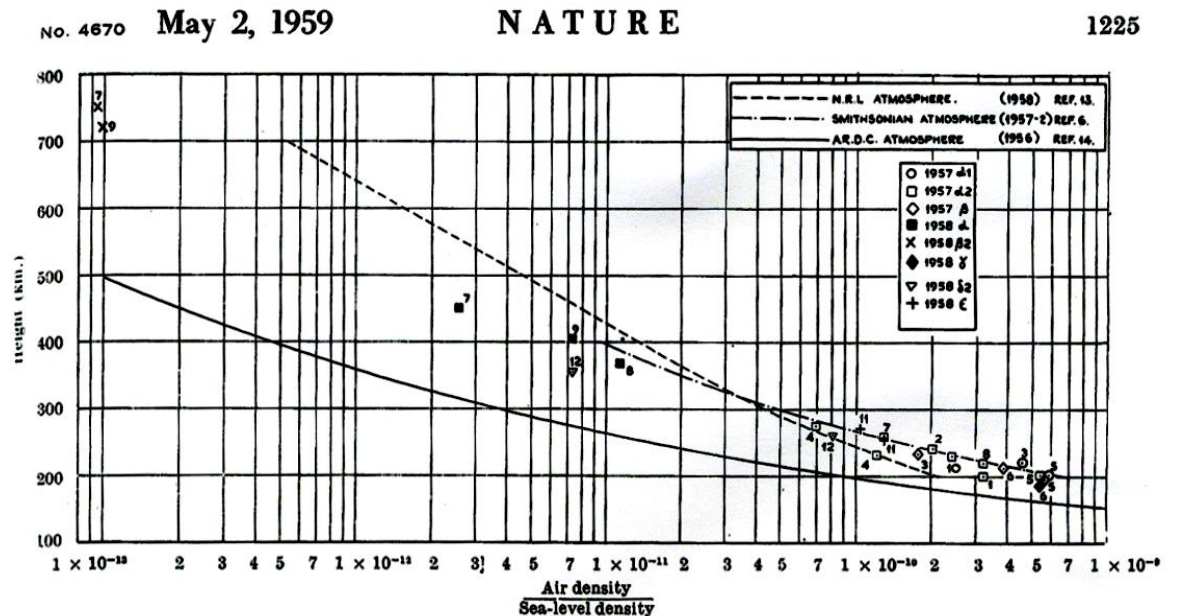


Fig. 1. Values of air density obtained by means of satellites (refs. 1-12), with proposed 'standard atmospheres' (refs. 6, 13, 14). Reference numbers are shown beside the plotted points

Examples

Space objects are tracked by North American Aerospace Defense Command (NORAD)

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

Table 1. Characteristics of the Three Starshine Spacecraft and Their Orbits

Starshine Spacecraft (NORAD Number)	Launch Date	Reentry Date	Launch Height, km	Eccentricity	Inclination, deg	Mass, kg	Diameter, cm	C_D	Inverse Ballistic Coefficient, $\text{cm}^2 \text{gm}^{-1}$
1 (25769)	1999 05-27	2000 02-18	380	<0.0015	51.6	39.4	47.5	2.2	0.099
2 (26996)	2001 12-05	2002 05-01	360	<0.0022	51.65	38.6	47.5	2.2	0.101
3 (26929)	2001 09-29	2003 01-21	470	<0.0013	67.05	89.5	93.5	2.1	0.161

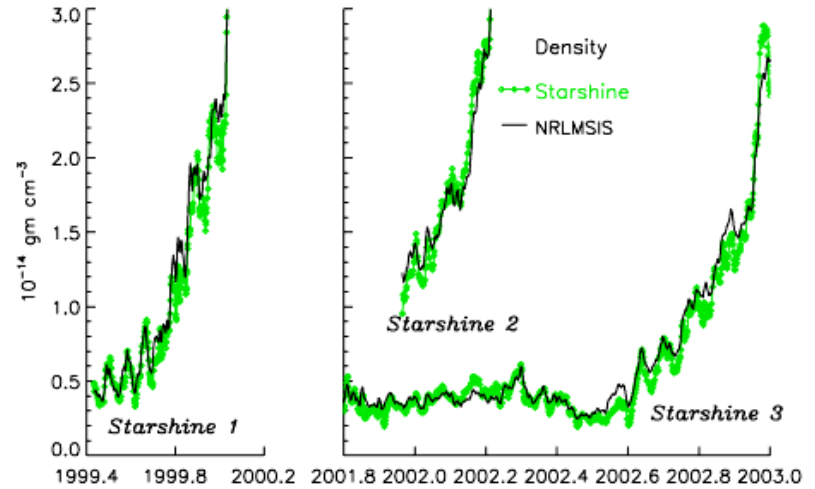
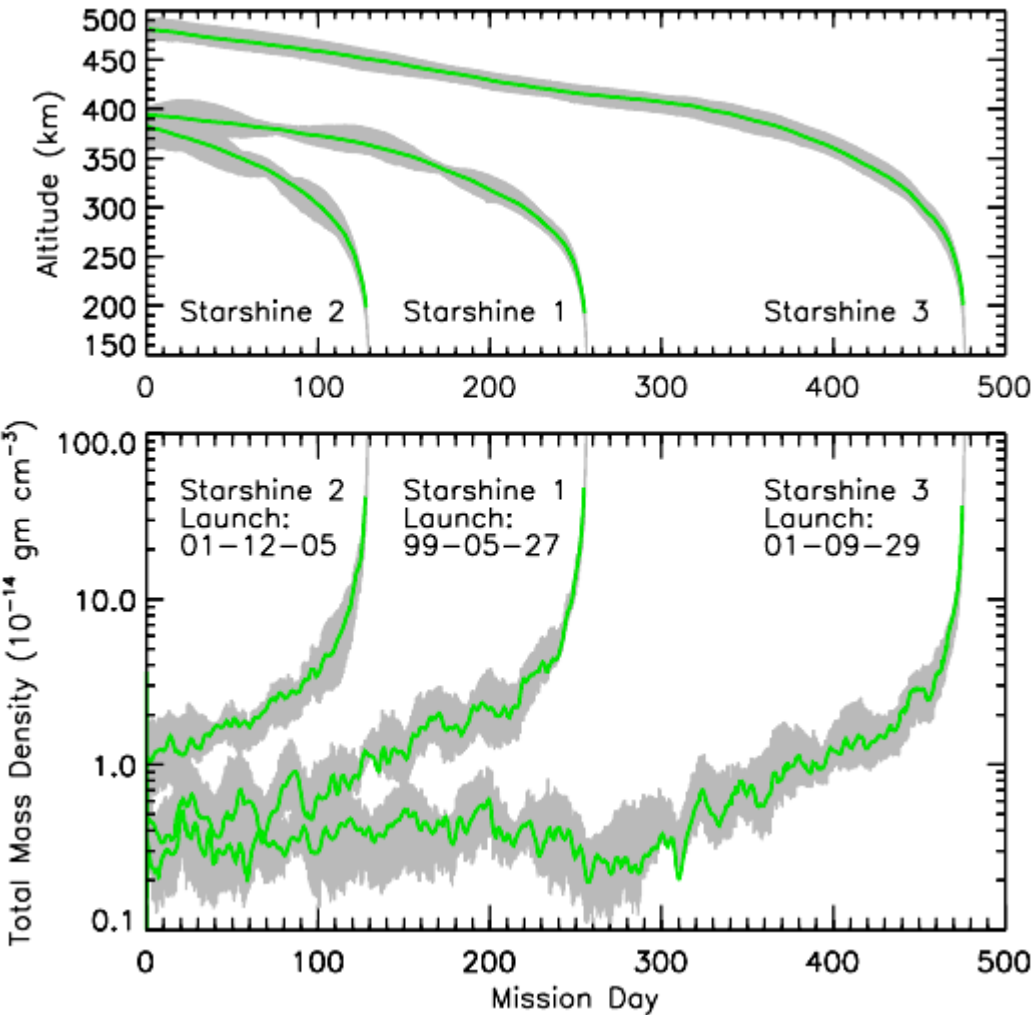
(Lean et al., JGR2006)



Starshine satellite:
Student **T**racked **A**tmospheric
Research **S**atellite **H**euristic
International **N**etworking
Experiment

<http://www.azinet.com/starshine/>

Determination of the satellite height and atmospheric density



Lean et al. [JGR, 2006]



PAGE 8 The Nashville Tennesse MONDAY, APRIL 5, 1979

Sunspot 'Drag' Miscalculated

By GARRETTTEFF
The Washington Post Service

The key to understanding Skylab's tumbling orbit is the sun.
The wobble of the upper atmosphere produces "drag" on a satellite traveling in its orbit. The drag brings the orbit lower until it finally falls out of orbit. During the first four years of an 11-year sunspot cycle, the increased solar activity causes the atmosphere to expand, so it presses toward the sun. Then, during the seven-year decline, it slowly contracts.
The greatest orbital lifetime of a satellite, NASA says, thus depends on the "sunspot-escape number" — will be far longer and more varied.
Unfortunately, no one understands why one 11-year cycle is more intense than another. "It's the whole," says NASA head Robert Frosch with a resigned sigh. "I would rather look at the effects of chickens than try to predict solar activity."

BUT SOMEbody HAS TO, and in 1974, when the last team of astronauts left Skylab, it was the space sciences laboratory at Marshall Space Flight Center. "We don't create any great certainty," Charles Lundquist, head of the laboratory, said recently. "It's a bit like the court astrologer looking at the positions of planets and trying to guess what the next eclipse will be.
Solar physicists must look at what has gone before — the 100-year cycle for which we have complete records. Cullen was the first Western astronomer to record the positions of the spots, but shortly after he

NEWS AND COMMENT

The Skylab Is Falling and
Sunspots Are Behind It All

BY GUY WATSON FOR THE WASHINGTON POST



Image contributed by:
L. J. Lanzerotti, Bell Laboratories,
Lucent Technologies, Inc.

Image Credit: Skylab image courtesy of NASA. Newspaper image courtesy of L. J. Lanzerotti, Bell Laboratories, Lucent Technologies, Inc.

当時の最高精度のモデルを使っても、Skylabの再突入時間の推定には大きなズレがあり(従って、再突入の場所も予測と外れた)、この時以来、超高層大気密度推定の重要性が広く認識されるようになった。



サイト内検索

- すべて ニュース 写真 動画



トップ > ニュース > 科学&宇宙 > 人工衛星の落下、太陽活動で早まる

トップ
ニュース
写真 <small>NEW</small>
動画
宇宙
動物
環境と自然
国と人 <small>NEW</small>
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 <small>NEW</small>
今日の写真
パズル
壁紙

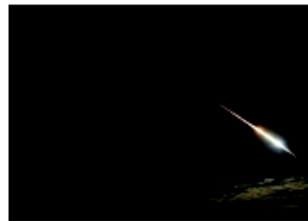
ナショナルジオグラフィック ニュース

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 | おすすめトピックス NEW

人工衛星の落下、太陽活動で早まる

[ツイートする](#) [B!](#) [i!](#) [Social News](#) [m](#) チェック [いいね!](#) 59

Traci Watson
for National Geographic News
September 22, 2011



写真を拡大

印刷用ページ

友人に教える

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。

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...

2011年9月22日 米国の人工衛星UARS 落下の記事

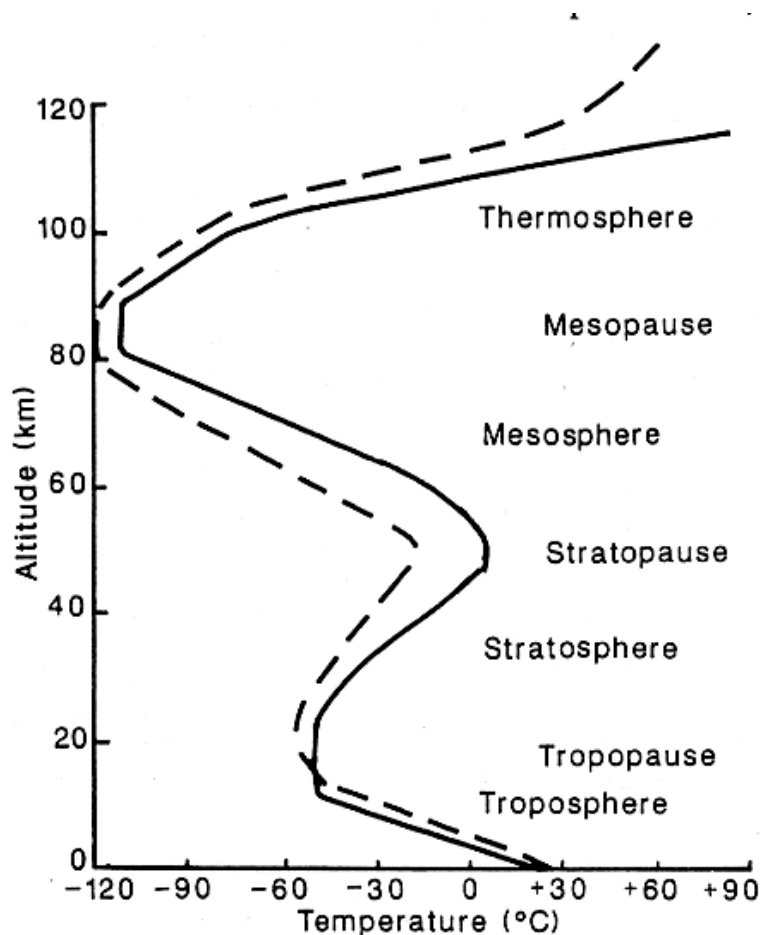
ADVERTISEMENT

おすすめトピックス

最新テーマ：動物界の不思議な交尾行動

超高層大気の寒冷化

厚い大気に覆われた対流圏では、CO₂は温室効果に働く。
一方、希薄な大気領域の熱圏では、CO₂は大気から熱を奪い、寒冷化に働く。



“Greenhouse Cooling”

Cicerone [1990]

July 14, 2009

Awesome noctilucent clouds in the Parisian sky

パリ祭の夜に現れた夜光雲

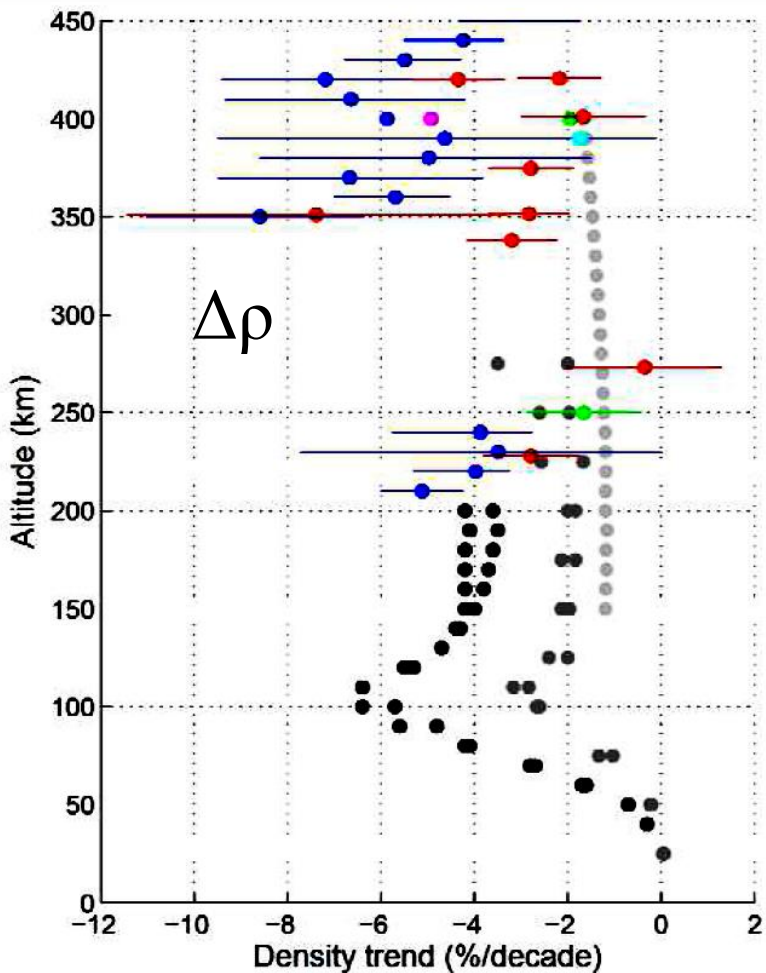


夜光雲の発生には氷の結晶の生成が必要であるが、そのためには大気は低温でなければならない。そのため、かつては夜光雲は夏の極域でのみ見られる現象であった(中間圏では夏のほうが冬よりも気温が低い)。

夜光雲が見られるようになったのは産業革命以降であること、近年、中緯度でも夜光雲が見られるようになったことから、中間圏の寒冷化が進んだのでは？と考えられている。

熱圏大気質量密度減少の長期トレンド

Mass density trend due to greenhouse cooling



- Akmaev et al. (2006)
- Cnossen (2009)
- Qian and Solomon (2011)
- Saunders et al. (2011)
- Emmert et al. (2004)
- Emmert and Picone (2011)
- Marcos et al. (2005)
- Keating et al. (2000)

(Ingrid Cnossen, 2012: Climate change in the upper atmosphere in “Greenhouse Gases - Emission, Measurement and Management”, www.intechopen.com)

Few observations and many uncertainties for mass density variations.

Observations seem to show larger cooling than theoretical ones.

高度

~ 250-350 km

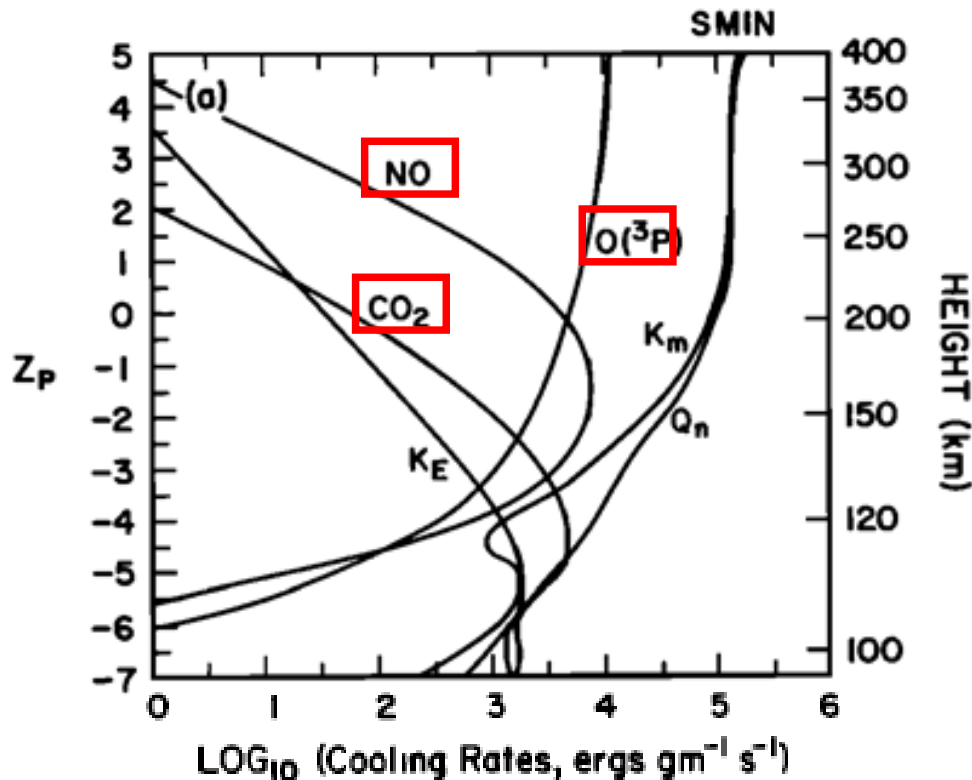
< 200 km

では、トレンドを議論できる
データがない！

熱圏での赤外放射冷却

- **CO₂ cooling** at 15 μm (peaks ~ **120 km**)
- **NO cooling** at 5.3 μm (peaks ~ **150 km**)
- **O(³P) fine structure cooling** at 63 μm (maximizes > 200 km)

(Burns et al. [2011, Chapman conference ppt]より)



Global mean
cooling rates in the
thermosphere by
NCAR 1D model

(Roble et al., JGR, 1987)

CO₂、NOからの全赤外放射量

Infrared radiation from the thermosphere to space

Mlynczak, M. G., L. A. Hunt, C. J. Mertens, B. Thomas Marshall, J. M. Russell III, T. Woods, R. Earl Thompson, and L. L. Gordley (2014), Influence of solar variability on the infrared radiative cooling of the thermosphere from 2002 to 2014, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 2508-2513, doi:10.1002/2014GL059556.

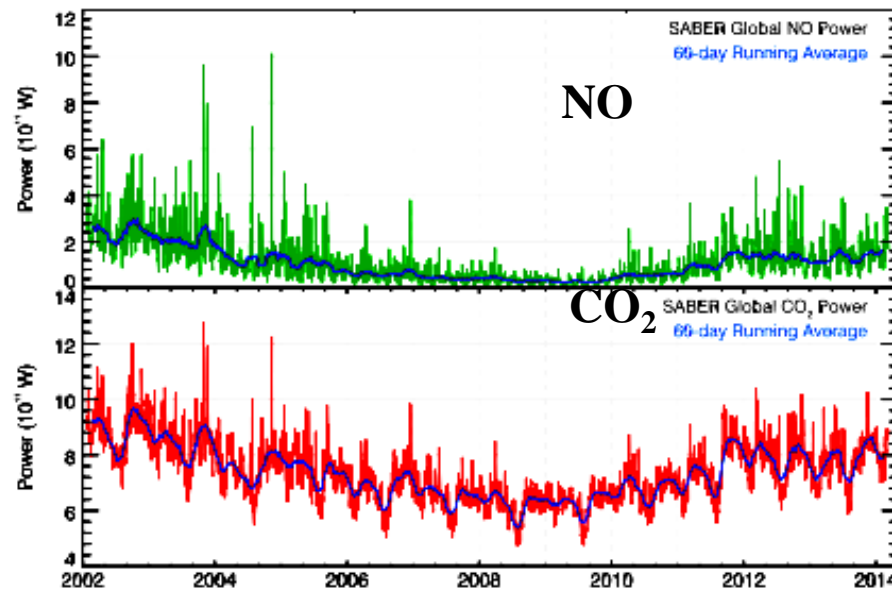
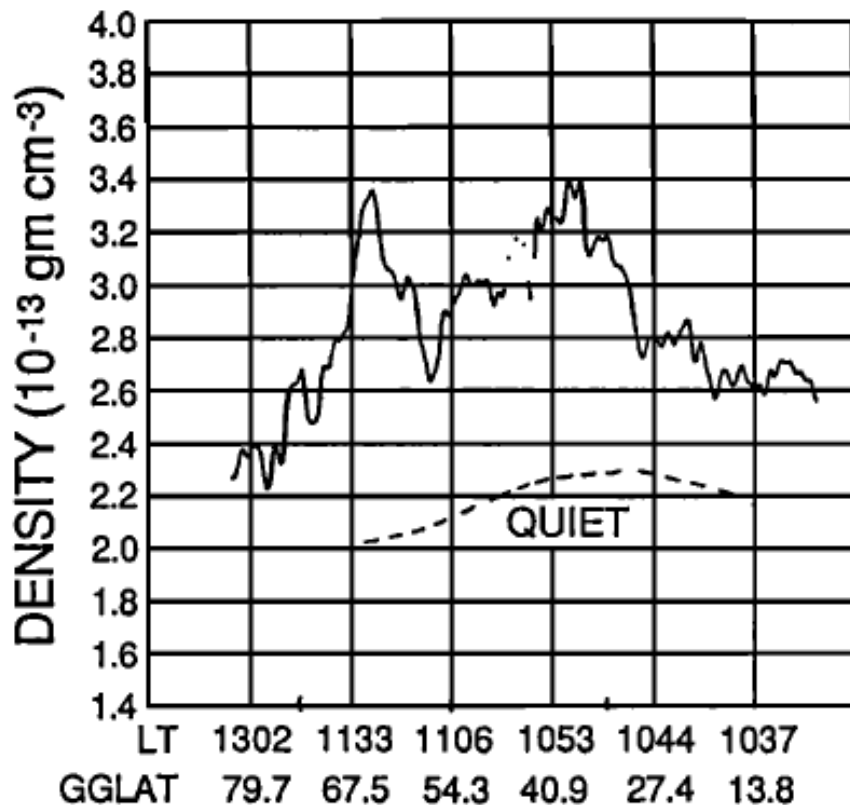


Figure 1. Time series of SABER daily global infrared power for (top) NO and (bottom) CO₂, from 22 January 2002 to 11 March 2014. The 60 day running mean is shown by the blue curve in both cases. Data from more than 4400 days of SABER observations are in each series.

高度200 km付近での熱圏大気質量密度変動

レーダーによるプラズマ計測以外には、ロケット観測などがまれにあるだけでほとんど観測が行われていない。

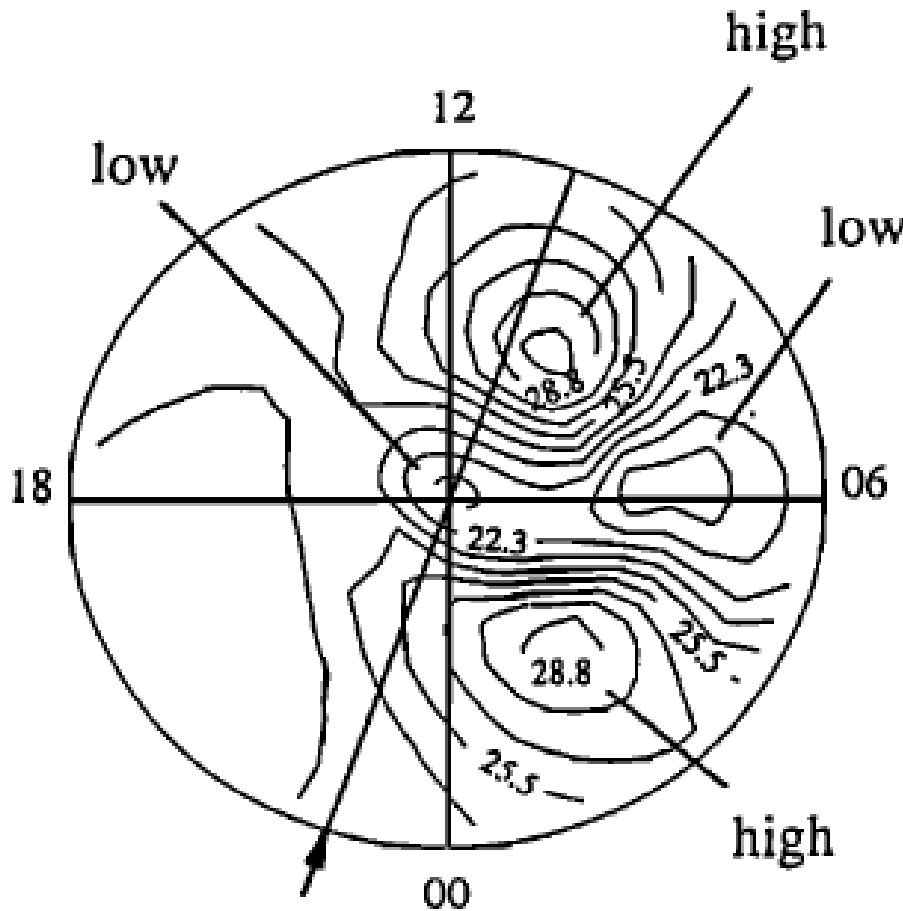


Crowley et al. [JGR, 1996]
高度200kmでの中性
大気密度変化。
地磁気静穏時と
擾乱時(Kp~5)の比較。

San Marco satellite

Figure 1. Comparison of measured density variations for active (solid curve) and quiet (dashed curve) conditions at 200 km as a function of geographic latitude for a polar orbiting satellite in the 1040-2240 LT plane.

Crowleyらは、観測された密度分布をcellular structure (又は density cell)と呼び、極域に現れる2~4の高(低)密度領域を衛星が通過したことによると考えた。



NCAR-TIGCMによる
シミュレーション。
高度200 km、
Cross polar cap potential
drop = 90 kV

これまでの主な超高層大気観測ミッションの例

AEROS, Alouette, Atmospheric Explorer (AE)

Dynamics Explorer (DE)

Upper Atmosphere Research Satellite (UARS)

Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics
(TIMED)

Cosmic/FORMOSAT, C/NOFS

Aeronomy of Ice in the Mesosphere (AIM)

Odin satellite, SCISAT-1(ACE-FTS)

NOAA satellites

Defense Meteorological Satellite Program (DMSP)

GPS → Total electron content

CHAMP, GRACE, SWARM, GOCE

ISS-IMAP

たいよう(SRATS)、ひのとり、おおぞら、あけぼの、れいめい、(Geotail) …

Year	Experiment	Data	Lifetime	Agency
1981	DE-2	Composition	18 Mos.	NASA
1982	SETA-2	Density	8 Mos.	AFRL
1983	SETA-3	Density	8 Mos.	AFRL
1985	S85-1	Density	3 Mos.	AFRL
1988	San Marco	Density	8 Mos.	NASA
1999	LORAAS	Composition	3 Yrs.	NRL
2000	CHAMP	Density	5+ Yrs.	GFZ Potsdam
2001	TIMED GUVI	Composition	4+ Yrs.	NASA/APL/Aerospace
2002	GRACE	Density	3+ Yrs.	CSR, Texas
2003	SSULI/SSUSI	Composition	3+ Yrs.	DMSP/APL/NRL
2003	ORBITAL DRAG	Density	30+ Yrs.	AFRL/AFSPC/NRL

Figure 2 Satellite density measurements before and after the year 2000

(Marcos, AIAA 2006)

Cross-track wind from the accelerometer onboard the **SETA satellite**

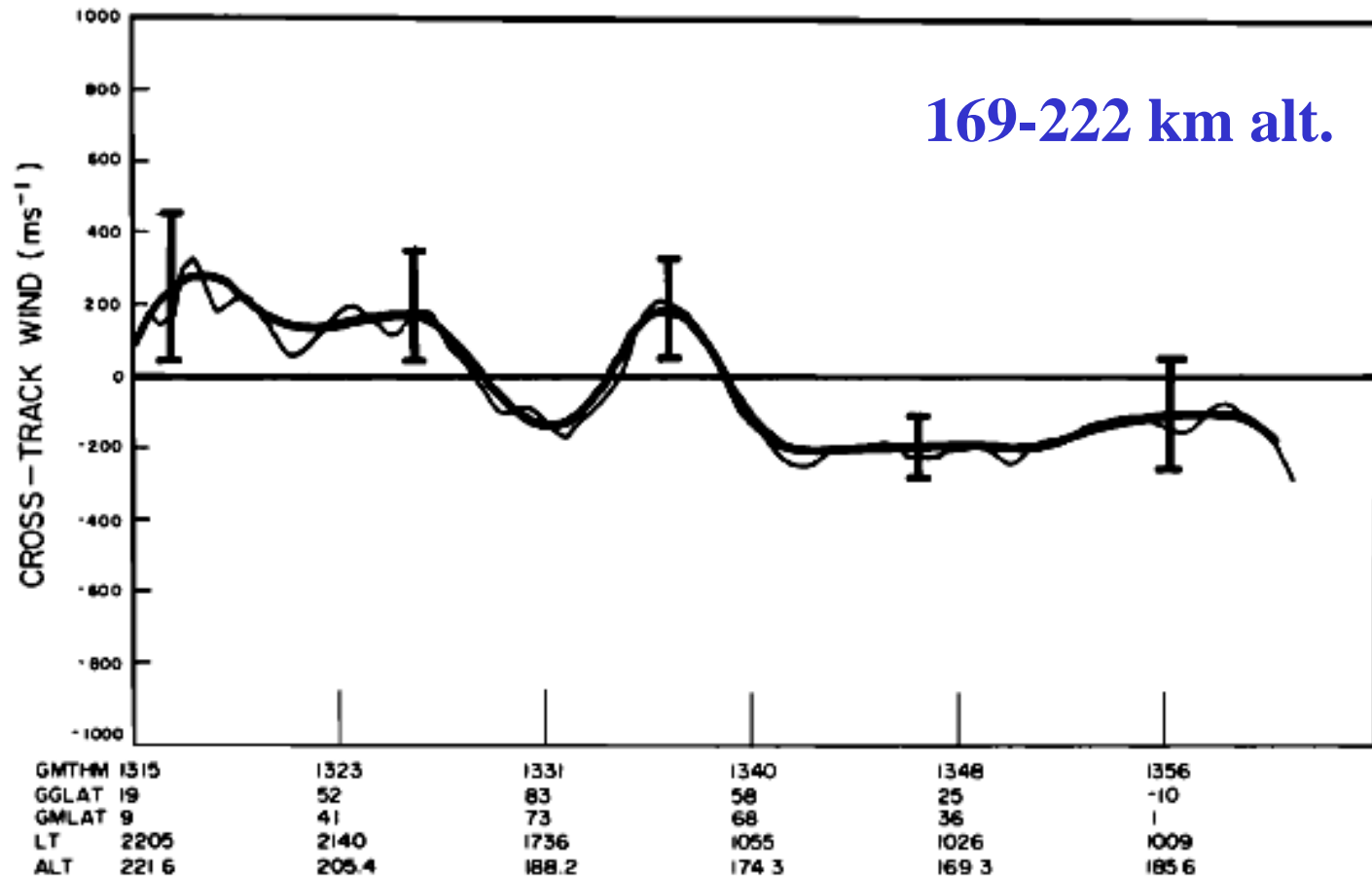


Fig. 5. Cross-axis winds corresponding to the data in Figure 4 plotted versus universal time, geographical latitude, geomagnetic latitude, local time, and altitude. Unsmoothed (light line) and smoothed (heavy line) data are shown. Error bars on the smoothed data primarily reflect uncertainties due to vehicle vibration noise (see section 2).

(Marcos and Forbes, JGR1985)

200 km alt.
July 20-23, 1983

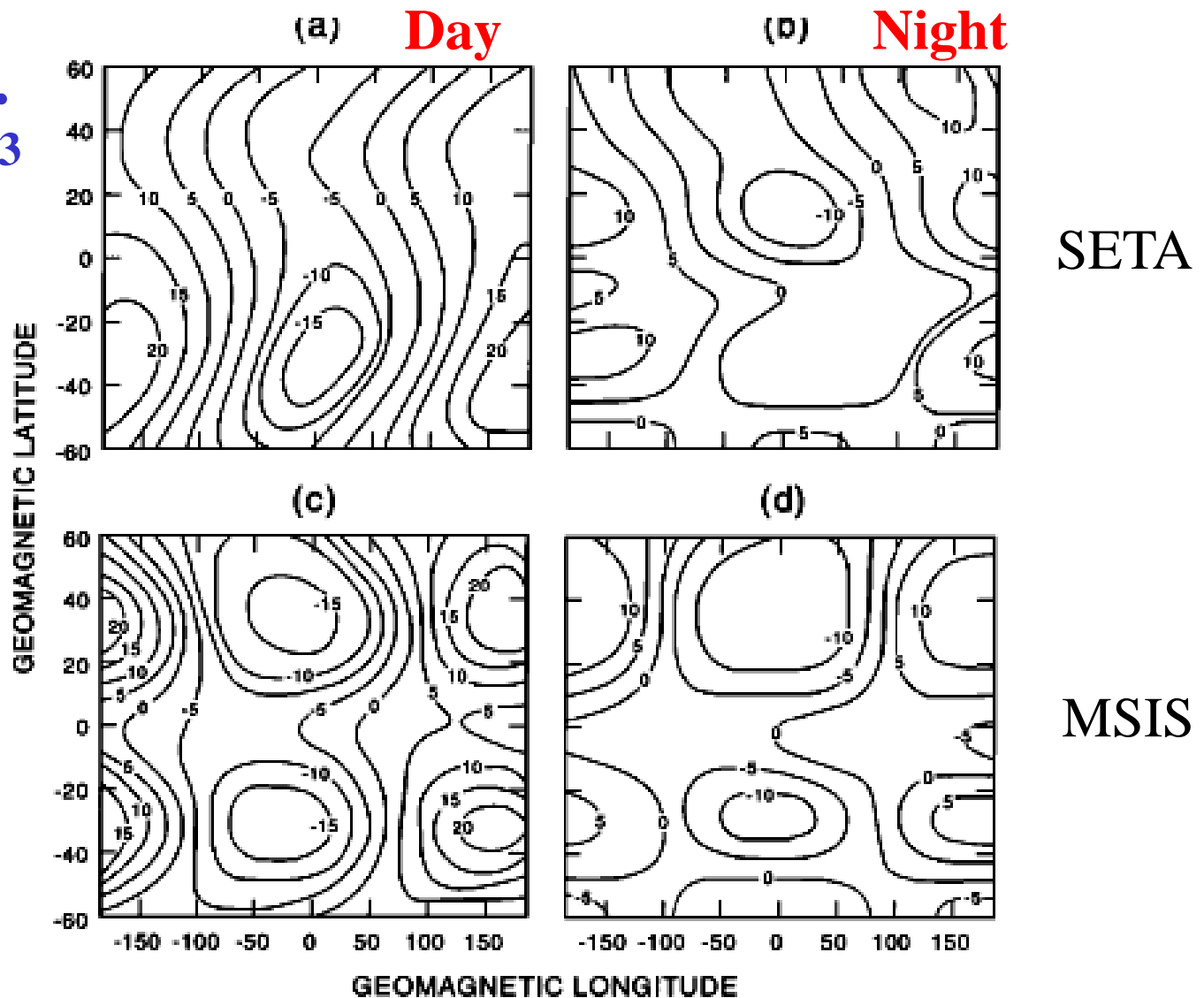
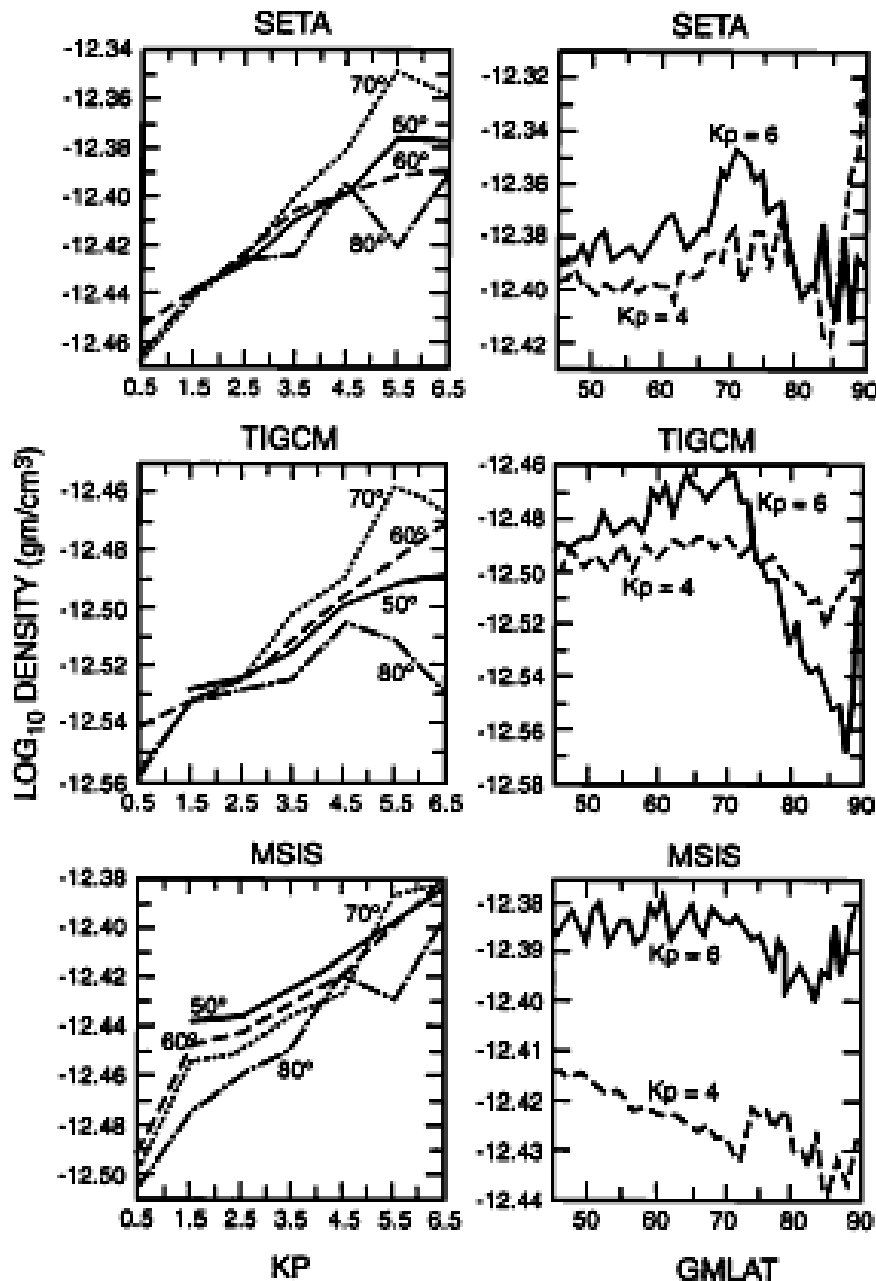


Figure 4. Longitude/UT effect as revealed in (a) and (b) Seta and (c) and (d) MSISE-90 total mass densities (percent variation about quiet-time densities, as in Figure 3) at 200 km during July 20–23, 1983. (left) Daytime is ~1030 LT. (right) Nighttime is ~2230 LT. The scales correspond to -15% to +20% (daytime) and -10% to +10% (nighttime).

(Forbes et al., JGR1999)



高度約200 kmでの
 ρ の緯度変化

(Forbes et al., JGR1993)

Fig. 6. Daytime densities at 300 km as a result of one-unit K_p binning and 10° latitude binning over the 20-day observational period. (Top) SETA densities (normalized to 300 km) (left) versus K_p , at various geomagnetic latitudes and (right) versus geomagnetic latitude for $K_p = 4.0$ and 6.0 . (Middle) Same as top figures, except for the TIGCM at 300 km. (Bottom) Same as above, except for the MSISE90 model at 300 km.

高度100～200 km付近での研究課題例のまとめ

- * CO₂、Oの分布
- * 質量密度の変動(density cell)
- * 熱圏高速風？
- * NLC、大気光の微細構造→大気重力波の微細構造

超低高度衛星から(間近から)のリモートセンシング

社会的な意義

中間圏・熱圏の寒冷化→対流圏の温暖化 のモニタリング
宇宙への玄関口の環境を知る→将来の高度な宇宙機の運用
のための基礎情報
超低高度からのリモートセンシング技術・データ利用の可能性

Summary

低高度 (< 200 km)での密度計測の例はそれなりにはある。経験モデル(MSIS)との比較もされている。密度の局所構造(赤道非対称性)などは十分に説明はされていない? 時系列での変動についての議論はない?(少ない?) 長期変動の議論が可能な(継続的な)観測データは存在しないと思われる。

高高度では、CHAMP、GRACE以降、様々な例が示された。特に、地磁気擾乱時の密度構造のClimatologyがそれら以前とは比べ物にならない。地磁気擾乱時の予測への準備が進みつつある?(Guo et al., 2010)。

超高層大気の寒冷化との関係で、高度100-200 kmに赤外放射のピークをもつCO₂と、CO₂との反応が重要である。この時空間変動の理解が不可欠(赤外放射量、温度・密度の減少トレンドのモデルと観測との不一致の原因究明のため)。

また、超低高度からのリモートセンシングにより、大気光や夜光雲の微細構造の可視化→重力波砕波の可視化が有効かもしれない。

高度100-200 kmは、衛星運用・利用の面だけでなく、大気科学のフロンティア領域でもある。「つばめ」の観測に加え、今後の継続的な低高度領域の観測が期待される。

予備スライド

夜光雲に見られる大気重力波、及びそれに伴う微細構造

??

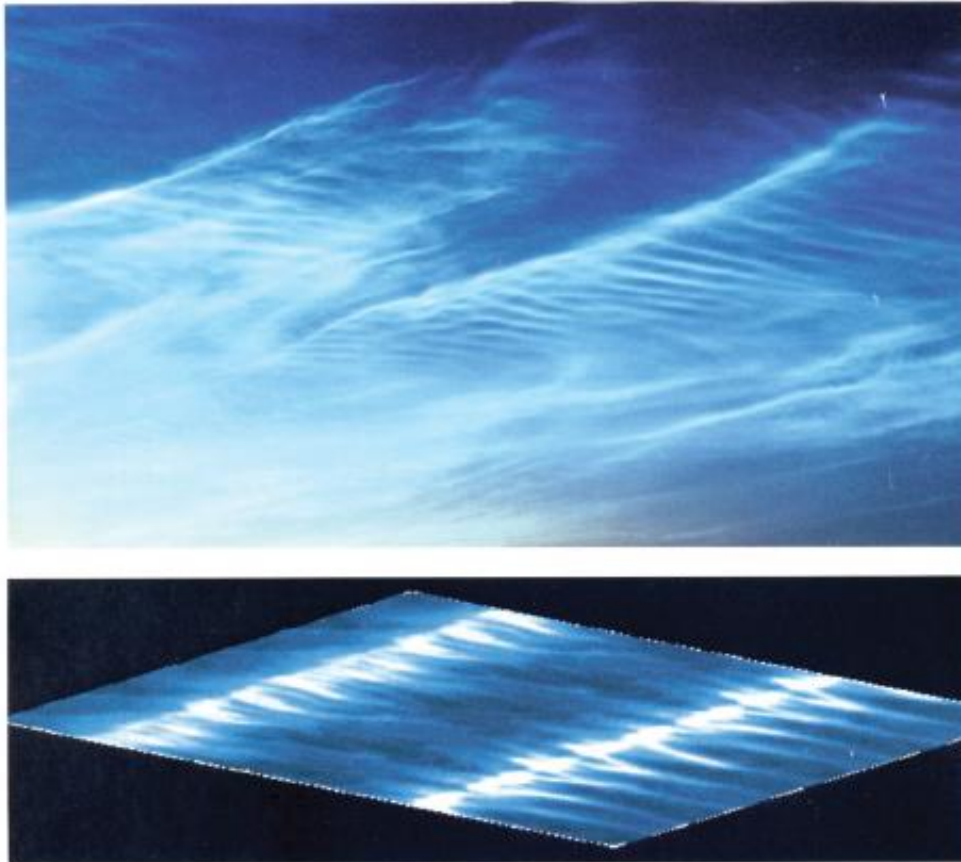
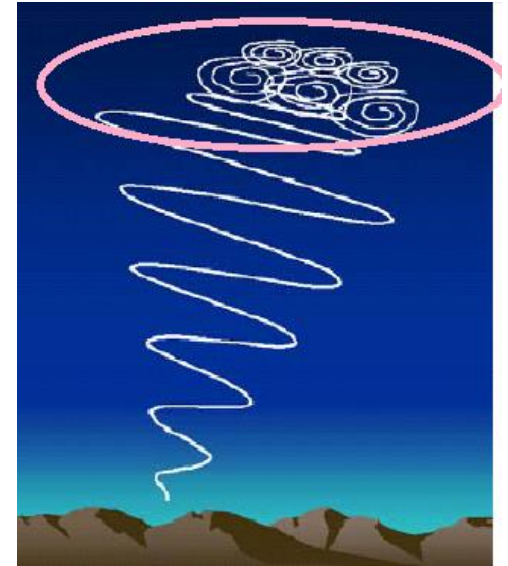


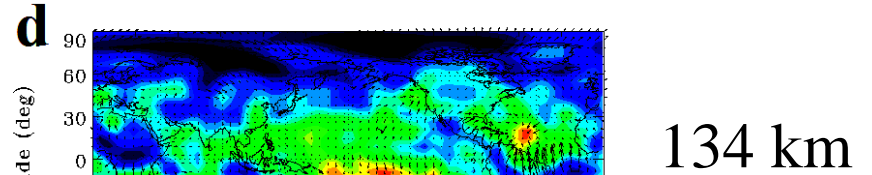
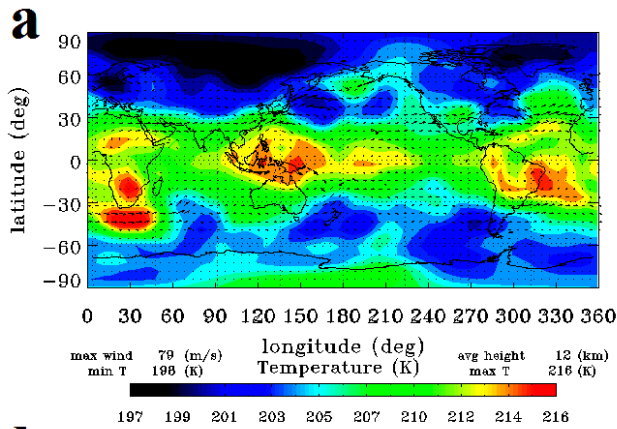
Figure 16. (top) Observed and (bottom) simulated gravity wave and instability structures in NLC. Photo was taken at Turku, Finland, on 21–22 July 1989, courtesy of Pekka Parviainen. Streamwise-aligned instability structures are believed to have accounted for the smaller-scale bright bands oriented approximately normal to the gravity wave phase fronts in the upper image. After *Fritts et al.* [1993b].



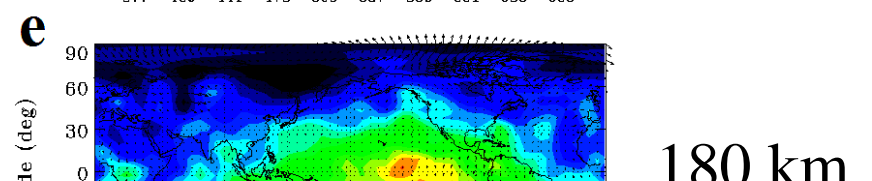
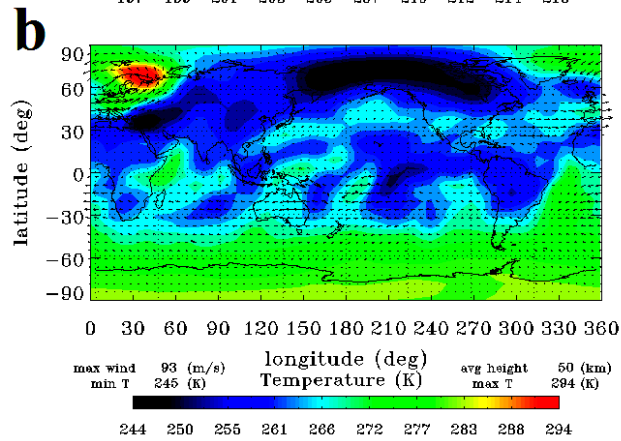
Fritts and Alexander
(*Rev. Geophys.*, 2003)

GCMの計算例 Examples of GCM simulation (Fujiwara et al., 2011)

20 km



50 km



89 km

