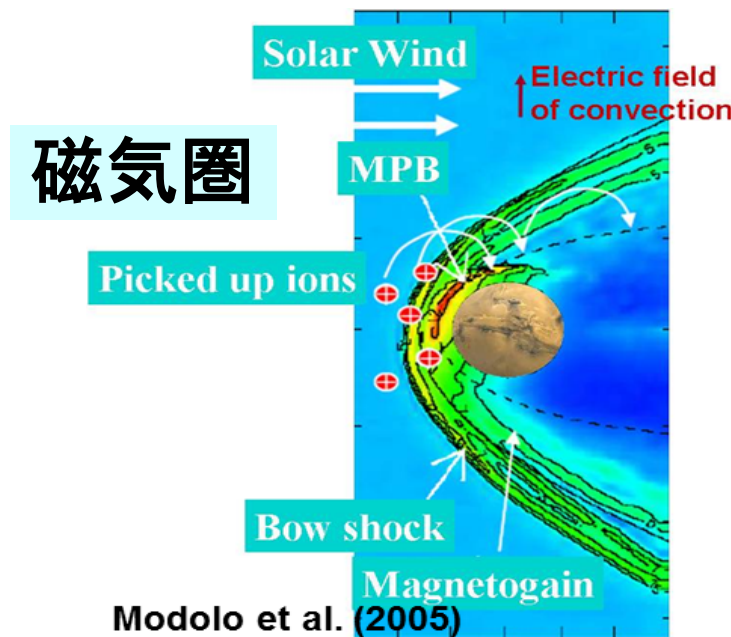


火星勉強会 (2013/05/28)

Mars exospheric thermal and non-thermal components: Seasonal and local variations, Yagi et al., 2012, Icarus

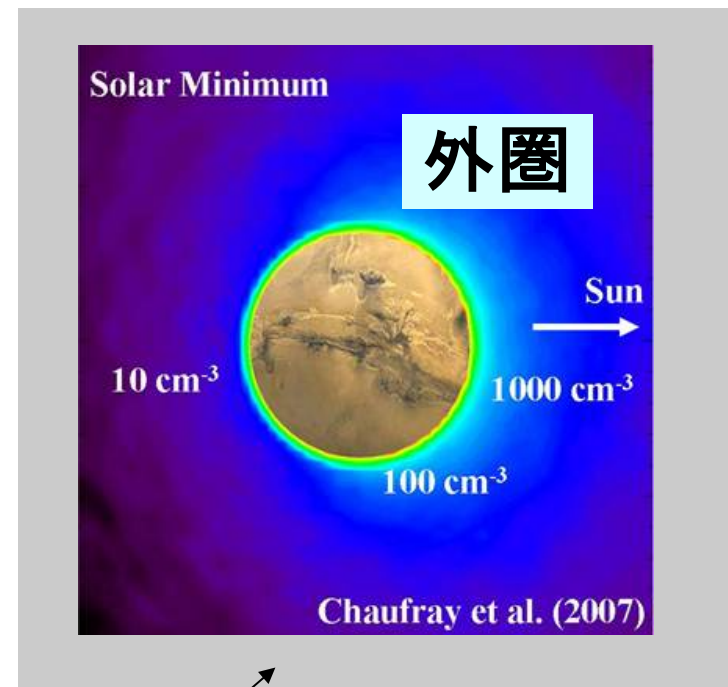
担当：八木(東北大)

Introduction



- ・スパッタリング
- ・電子衝突
- ・電化交換反応

質量負荷

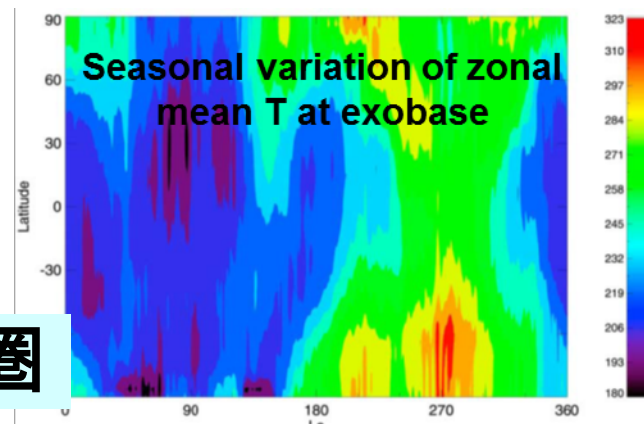


境界条件
(E, B, etc)

境界条件
(σ , J, etc)

- ・ ρ , T (熱的大気の供給)
- ・ O_2^+ (非熱的大気の供給)

熱圏・電離圏



Gonzalez-Galindo et al. (2009)

Introduction

火星外圏大気は生成過程によって熱的な成分と非熱的な成分に分けて考えられる。本論文では熱的・非熱的それぞれのモデルを構築し、議論している。

・熱的な成分

下から熱的に上がってきた成分は無衝突になるにつれ、静水圧平衡からChamberlain的な分布に遷移する。

・非熱的成分

スパッタリングや光化学反応によって生まれた大気は熱的なものに比べ、高いエネルギーを持つ。近年の研究[Chaufray et al., 2007]においては、解離性再結合などの光科学反応の寄与が特に大きいと考えられている。

熱的な成分: Chamberlain モデル

Exobaseより上空の衝突を無視できると仮定すると、外圏における粒子の軌道はLiouvilleの定理に従う。

→外圏大気の密度・温度は全てexobaseにおける密度・温度分布から以下の式で計算可能。

$$N(y, \alpha, \delta) = \int f_c d^3 v_i$$
$$f_c = N_c \left(\frac{m}{2\pi k T_c} \right)^{3/2} \times \exp \left[-\frac{m M G}{r_c k T_c} (V_c^2 + \boxed{\frac{\omega^2 r_c^2}{v_{esc}^2} \cos^2 \delta_c - 2 \frac{\omega r_c}{v_{esc}} \cos \delta_c V_c \sin \theta_c \sin \phi_c}) \right]$$

Planetary rotation term

N : density

y : rc/r , where r is a radial distance and rc is a height of exobase from the center of the planet

α : longitude

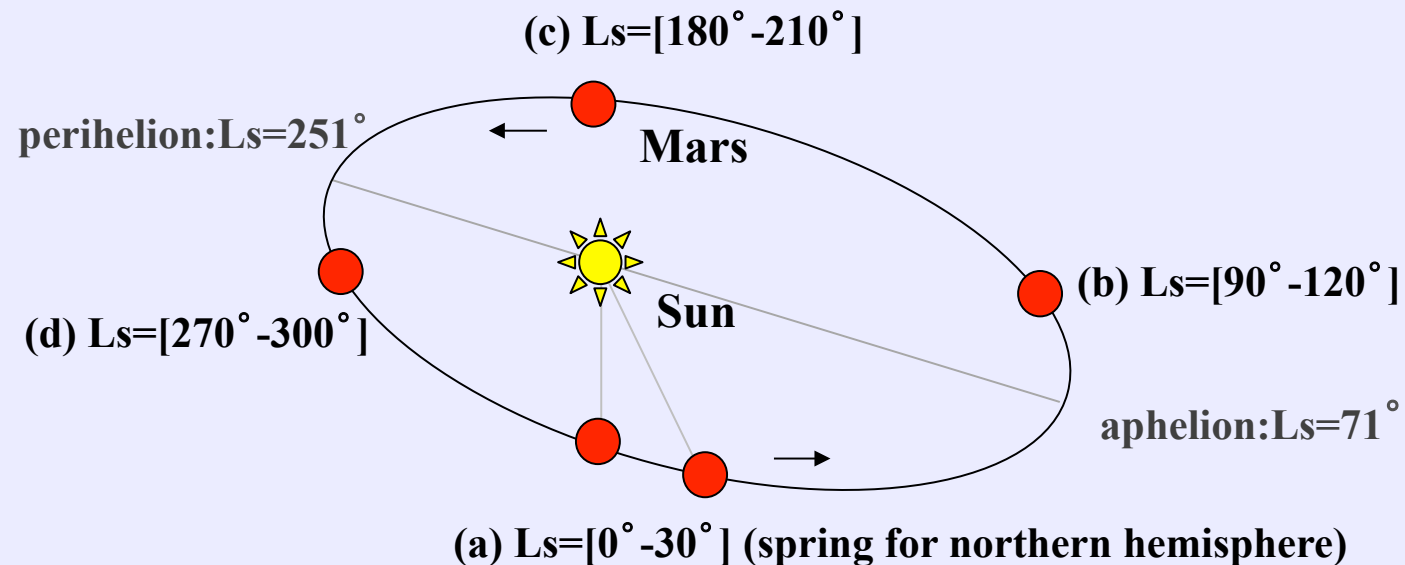
δ : latitude

f_c : phase space density at exobase

ω : angular frequency of the planetary rotation

熱的な成分: Chamberlain モデル

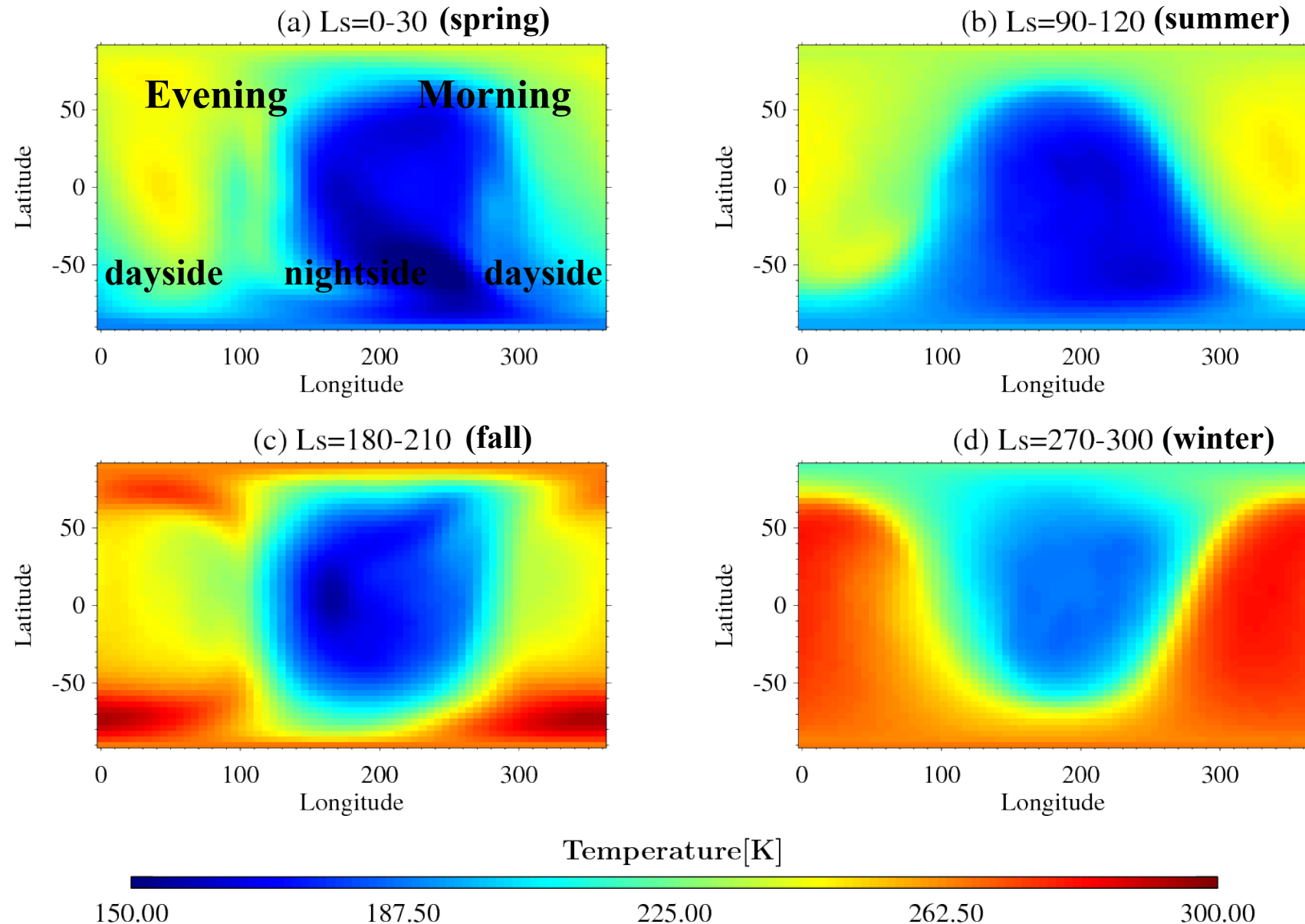
- ・衝突／無衝突境界 (exobase) の高度は200kmと仮定
- ・高度200kmにおける O , CO_2 , CO , O_2 の密度・温度分布は熱圏上空まで拡張されたLMDのMartian GCM [Gonzalez-Galindo et al., 2009]を利用する。



,それぞれ4つの季節に関して各粒子種のモデル計算を行う

Temperature at exobase (200km)

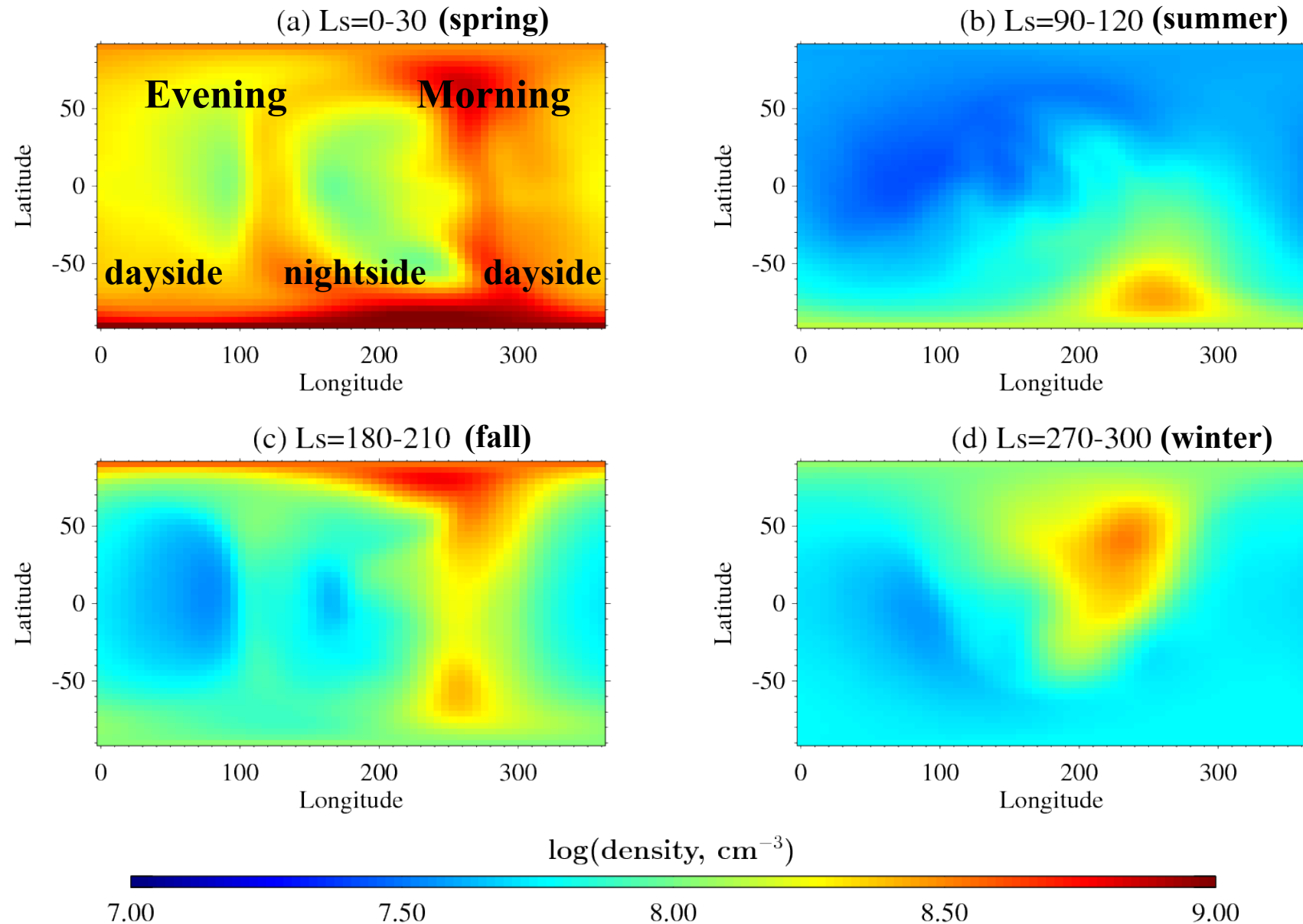
Boundary condition from
LMD-MGCM



高度200kmにおける温度分布(LMD-MGCMより)。自転軸の傾きと太陽間距離による季節変動がはっきりと見える

O density at exobase (200km)

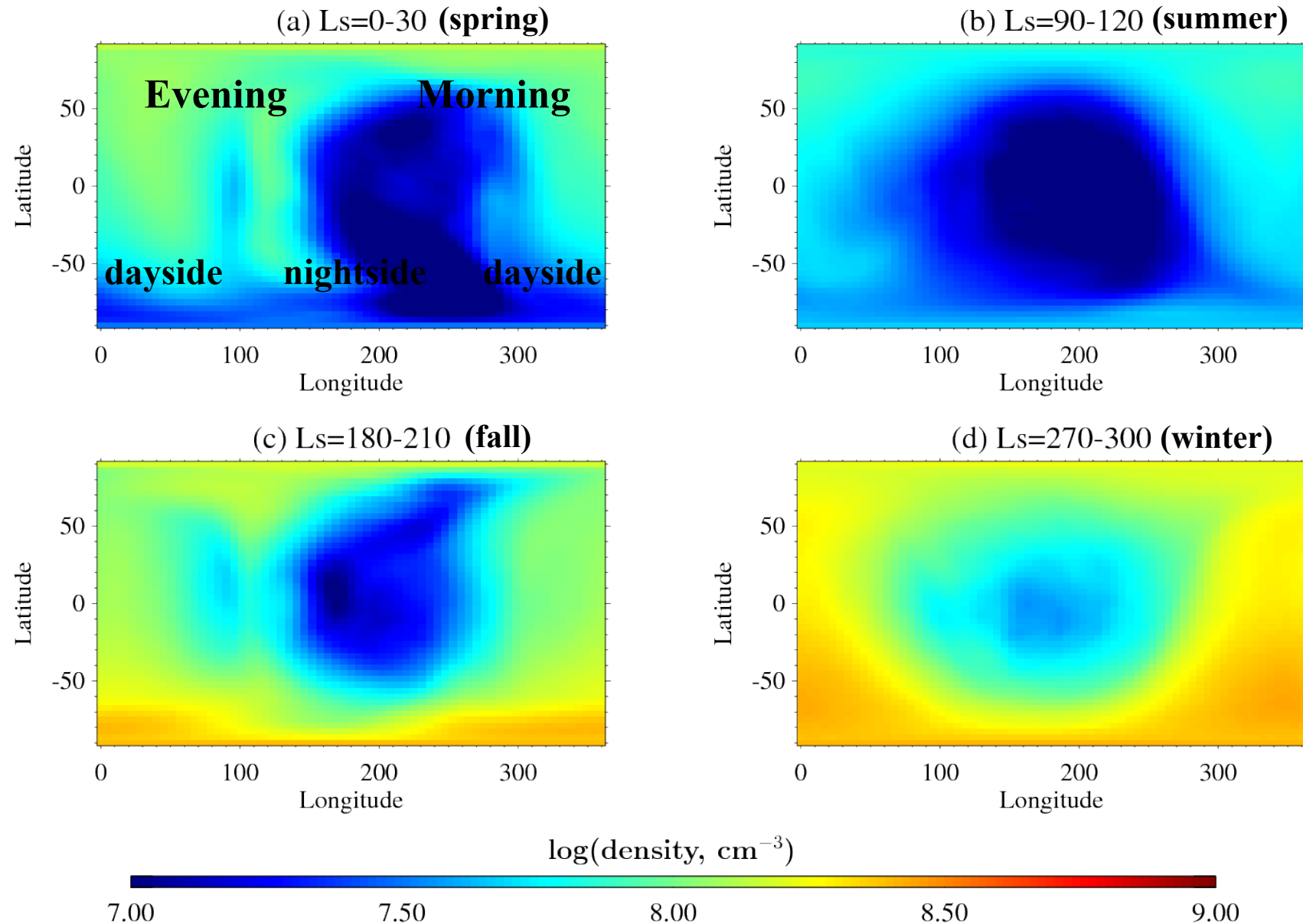
Boundary condition from
LMD-MGCM



高度200kmにおける酸素原子(O)の分布(LMD-MGCMより)。温度分布と比べると細かい構造が多い他、大きな構造としても温度分布と反相関する部分が存在する。

CO₂ density at exobase (200km)

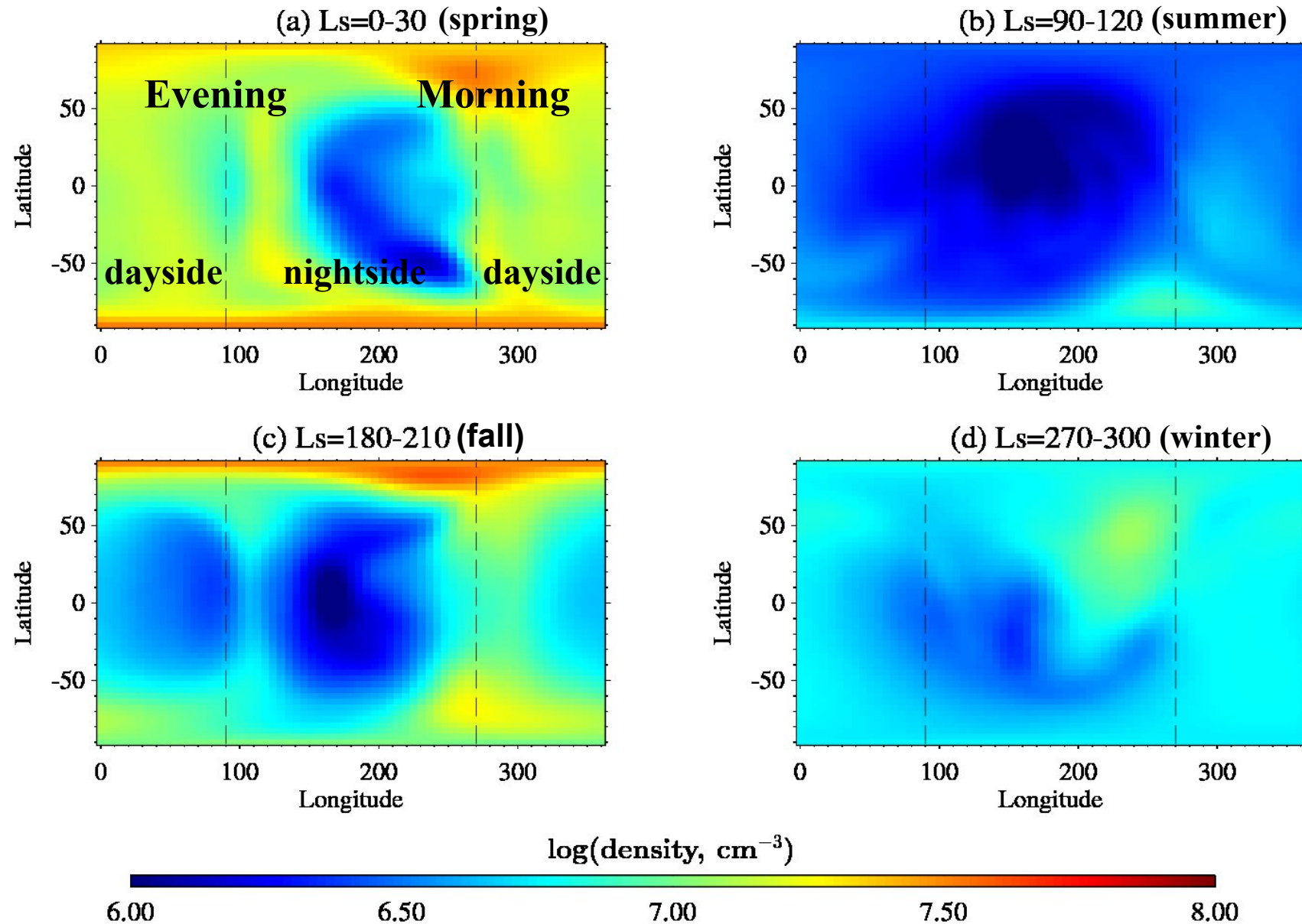
Boundary condition from
LMD-MGCM



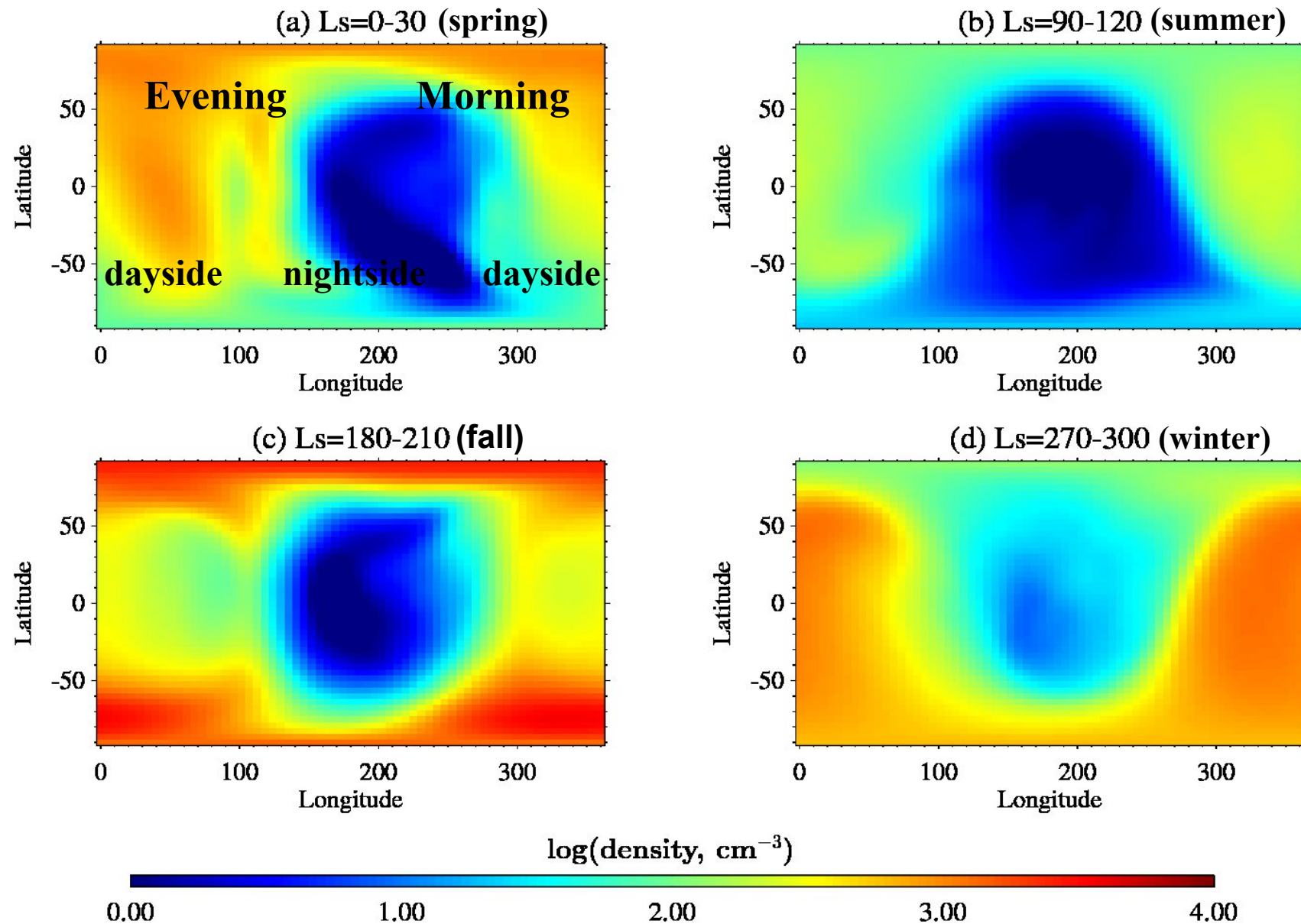
高度200kmにおけるCO₂の分布 (LMD-MGCMより)。大きな構造は温度分布と相関する。

O density at 300km

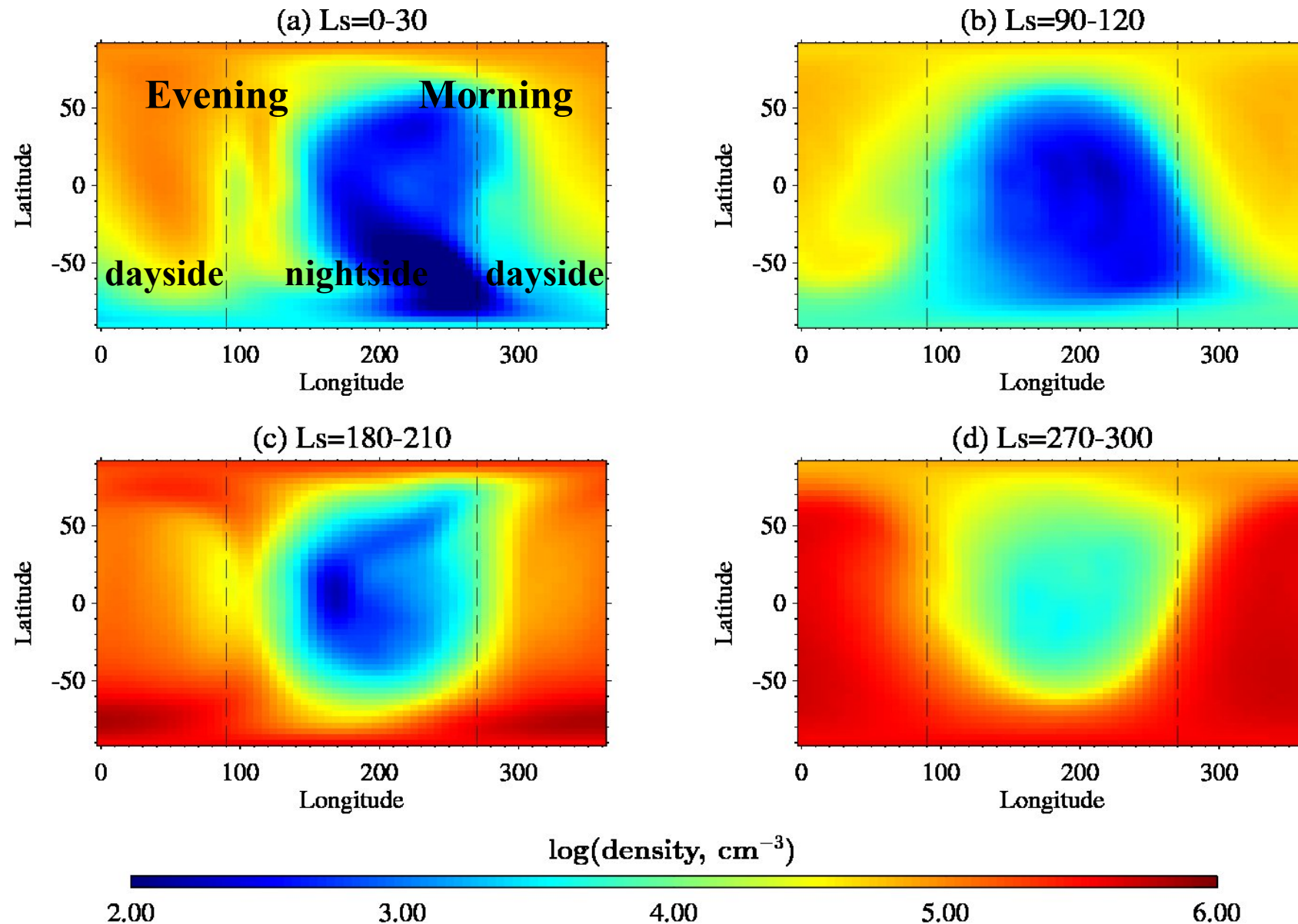
Results of simulation



高度300kmにおける酸素原子(O)の分布。構造は高度200kmにおける密度分布の影響を強く受けている。



高度740kmにおける酸素原子(O)の密度分布。構造は高度200kmにおける温度分布の影響を強く受けており、密度分布の影響は小さい。



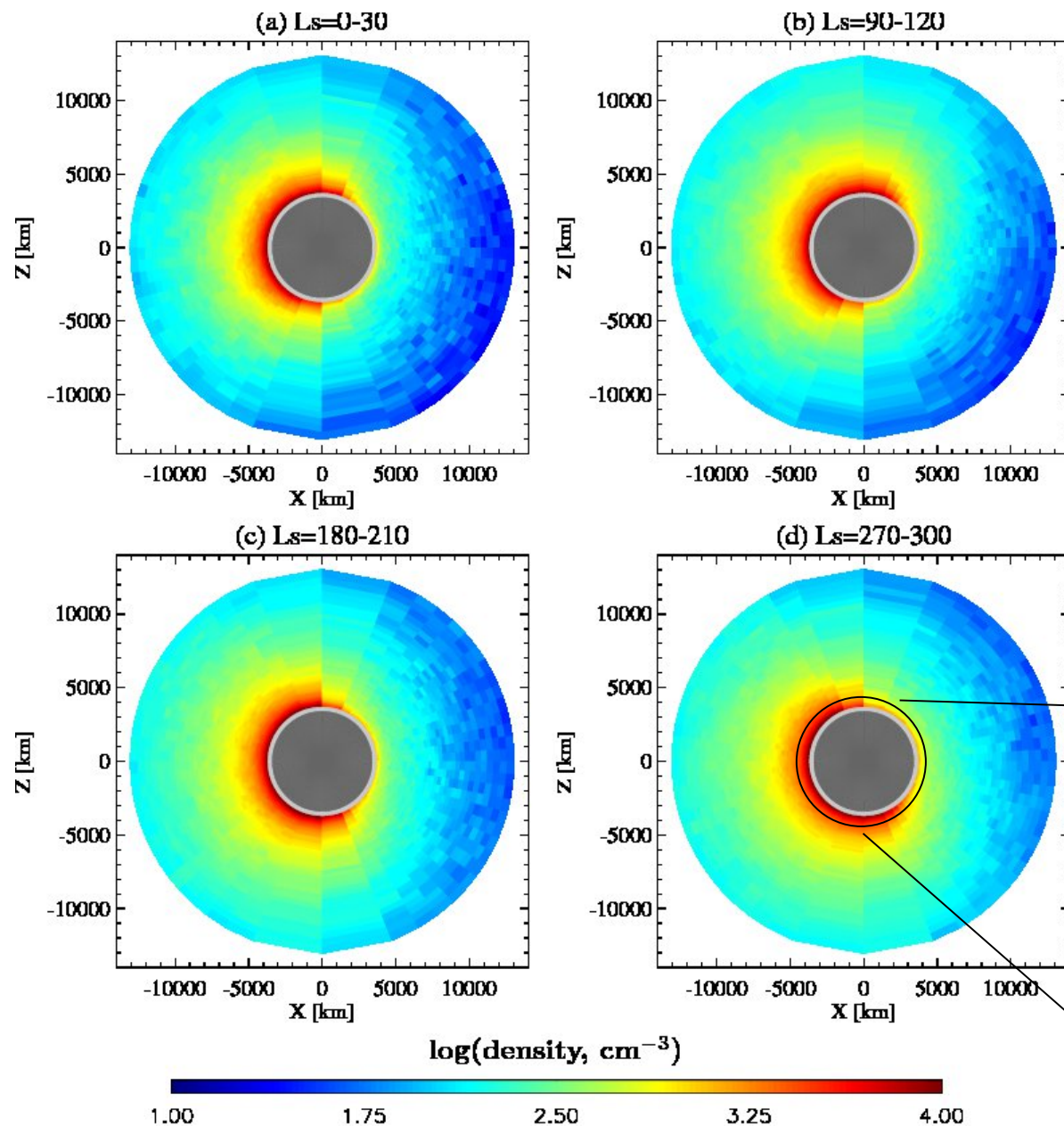
高度300kmにおけるCO₂ の密度分布。高度200kmにおける温度分布同様の季節変動を示す。

非熱的な成分: Monte-Carloモデル

- ・ 主要な非熱的粒子のソースは O_2^+ の解離性再結合
$$\text{O}_2^+ + e^- \Rightarrow \text{O}^* + \text{O}^* \quad [\text{Chaufray et al., 2007}].$$
- ・ O_2^+ は熱圏において以下の反応によって生成される
$$\begin{aligned} \text{CO}_2^+ + \text{O} &\Rightarrow \text{CO} + \text{O}_2^+ \\ \text{CO}_2 + \text{O}^+ &\Rightarrow \text{CO} + \text{O}_2^+ \end{aligned}$$
- ・ 120kmから300kmまで、非熱的Oと背景大気の衝突を解き、300kmより上空は無衝突な領域とする(粒子は弾道軌道を取るか、宇宙空間に流出する)
- ・ 熱的成分と同様、 O_2^+ の分布はLMD-MGCMを用いる。

Hot O density

Results of simulation



・密度分布は単純に太陽天頂角と高度に依存する

⇒季節依存性や昼・夜の差が顕著

・高度10000kmにおいても 100 cm^{-3} 程度の非熱的なOが存在。

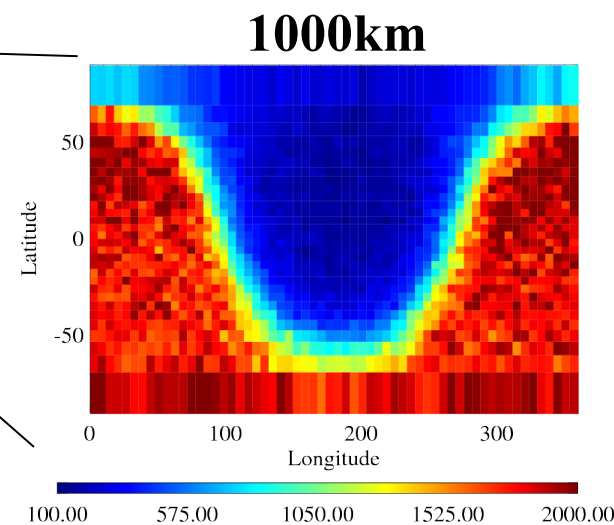
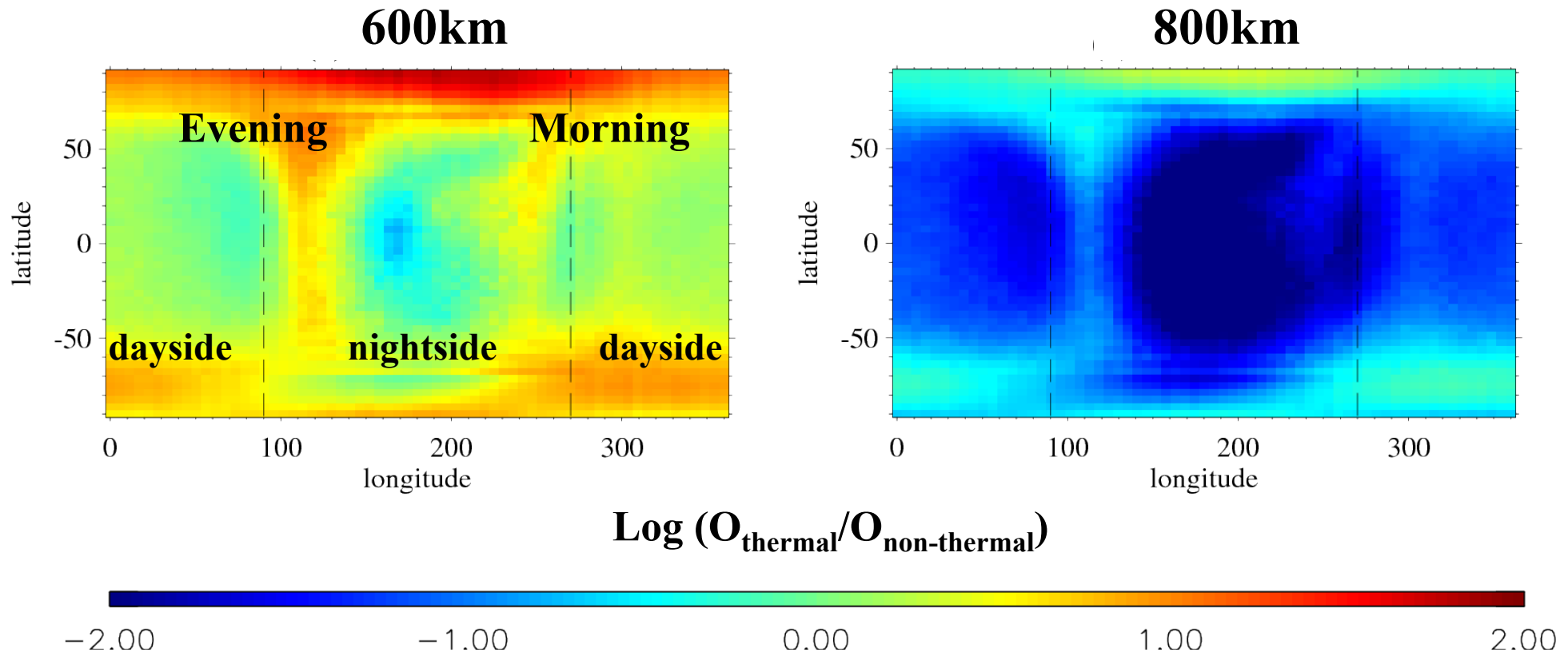


Figure8. Hot O density distribution in meridian plane and at 1000km.

熱的／非熱的なOの密度比



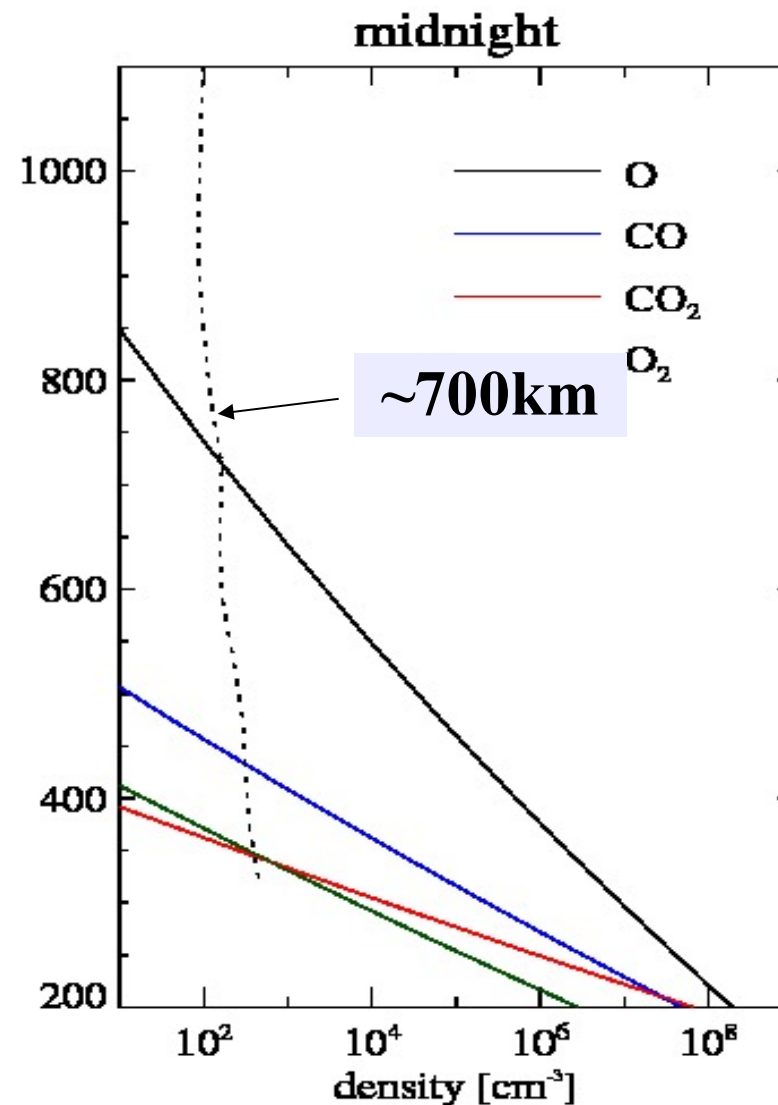
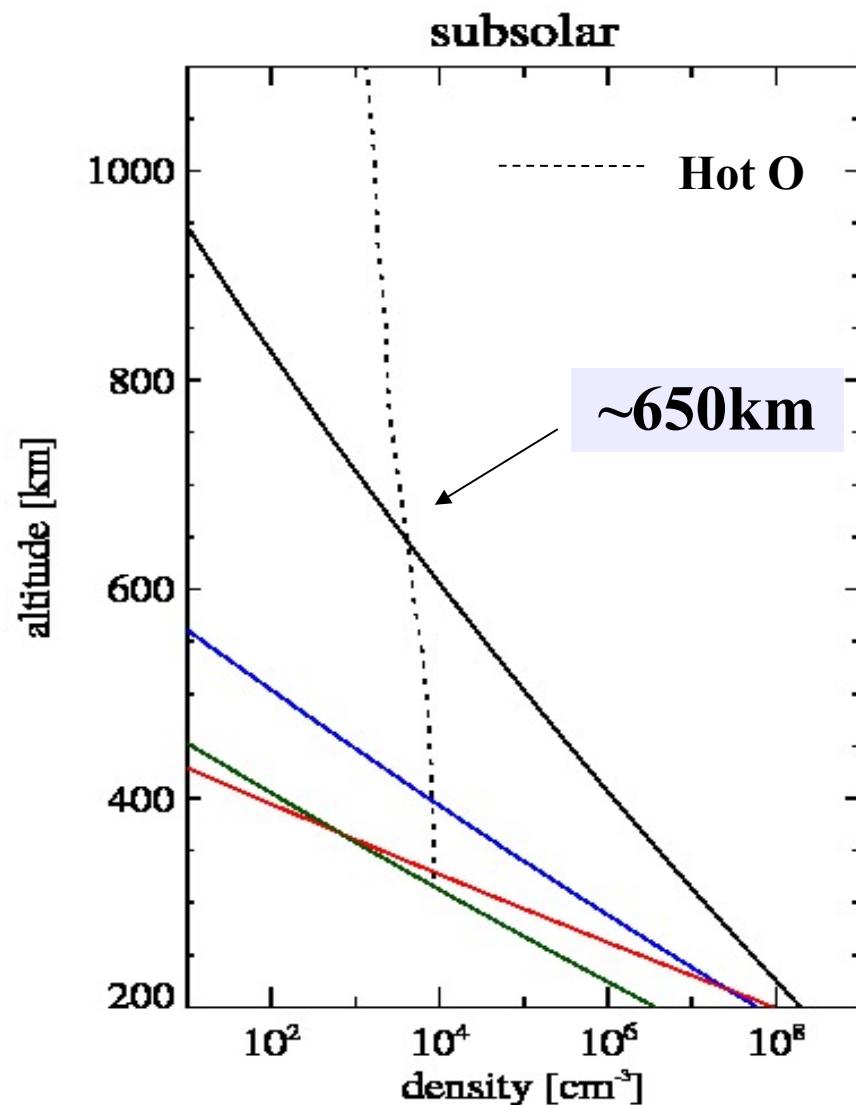
- ・高度600kmにおいては熱的な成分が主要な構成要素
- ・高度800kmにおいては逆転し、非熱的な成分が主になる

Scale height O:40km-50km, CO:~20km, CO₂:~12km, Hot O: >400km

Density profile of each component

Results of simulation

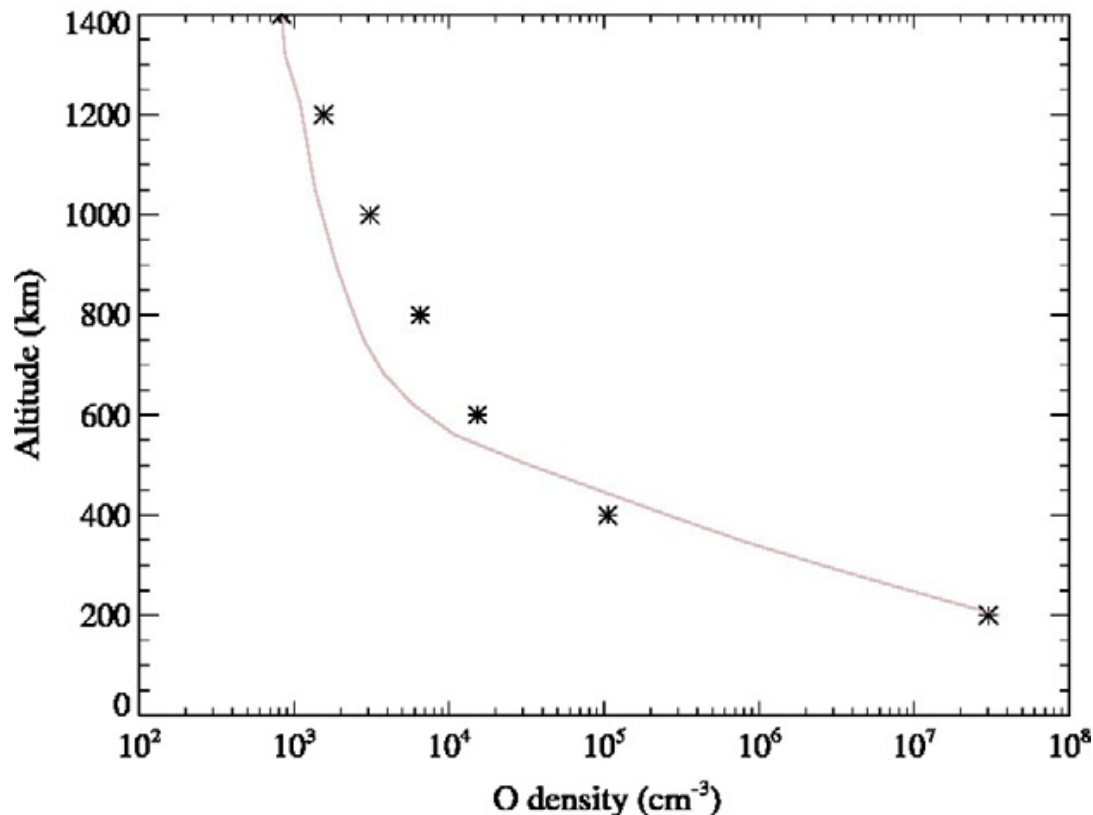
Ls=180-210° (fall)



- ・高度650km-700kmにおいて熱的／非熱的Oの比重が逆転する。

衛星観測との比較

- ・Rosetta/Aliceが火星フライバイ時に行った大気観測との比較
- ・実際に観測で求まるのは視線方向積分された値のみであり、モデルにfitした値 [Feldman et al., 2011] との比較



Oの高度分布

* マークがFeldmanによる見積もり、線が本論文による熱的・非熱的モデルの合計値。

観測はスリット幅が荒く、高度方向に換算すると320km程度に相当することから、ズレは観測誤差の範囲である。

大気流出量の見積もり

熱的な要素

- ・高度300km以降でイオン化した粒子は流出すると仮定すると (Zhang et al., 1993)、高度300km以上におけるOのイオン化レートは 10^{25} s^{-1} 程度。Aspera-3 による報告では O^+ のFluxは $2.1 \times 10^{24} \text{ s}^{-1}$ [Lundin et al., 2008]と見積もられており、一桁多い。
 - ・一方、 CO_2 の高度300km以上のイオン化レートは 10^{22} - 10^{23} s^{-1} であり、Aspera-3の観測($\sim 3.5 \times 10^{23} \text{ s}^{-1}$)と比べる、一桁少ない。
- ➔多くのイオンは、電離圏から流出している可能性がある。一方で300km以降でイオン化した粒子もすべてが流出するわけではない。

大気流出量の見積もり

非熱的な要素

- ・粒子計算の上端である $4R_M$ を超えた粒子は流出として扱う。
- ・非熱的なOの流出率は季節により $2.9 - 5.3 \times 10^{25} \text{ s}^{-1}$ の間で変動
- ・Chaufray et al. [2007] の見積もりでは $1.0 \times 10^{25} \text{ s}^{-1}$
→ 熱圏モデルの違い
- ・Valeille et al. [2009] によれば、Solar minで $4.6-7.4 \times 10^{25} \text{ s}^{-1}$
Solar maxで $1.9-2.6 \times 10^{26} \text{ s}^{-1}$ と見積もられている
→ 衝突項の扱いによる誤差？

問題点など

- ・イオン化した粒子の流出量の見積もりに関して
→電離圏から流出させるメカニズムは？
- ・電子温度によって解離性再結合の定数が大きく変動する。使用された数値はVikingの観測によるもので、3次元的な分布は考慮されていない。
- ・モンテカルロ計算の衝突項に関して、universal potential が用いられているが妥当性は？
- ・水素原子の計算が困難(MGCM側の問題)