

Mars solar wind interaction: Formation of the Martian corona and atmospheric loss to space

Chaufray et al., 2007

の紹介 ISAS/JAXA 久保田康文

要旨

- ・Oの流出について4つのメカニズム(pickup, ENA, 解離再結合、スパッタリング)を比較した。
- ・太陽活動度が低い場合と高い場合で、Oコロナの3次元分布と流出量を計算した。
- ・ hybrid simulationから計算された電磁場を用いてO⁺の流出とスパッタリングを引き起こすO⁺を計算した。
- ・ Oの流出に関してスパッタリングの寄与は解離再結合より一桁小さい。O⁺の流出よりもOの流出が支配的だった。また流出量は太陽活動度に大きく依存する。

背景

Oの流出について重要な6つの非熱的な流出過程

1. 分子イオンの解離再結合(DR) $O_2^+ + e \rightarrow O + O$
Hodges [2000] など、Oコロナの主要なソース 他 C, N

2. 太陽風によるpickup

光電離、電子衝突(MPB)、電荷交換(X-ray halo, ENA by ASPERA 3)

3. pickupイオンの電荷交換によって生成するENA



4. pickupイオンやENAによる大気のスパッタリング

Luhmann et al. [1992]など、Oの流出について(1.)と比較してあまり寄与しない。
しかし、過去の太陽活動が高い場合ではOの流出について重要なソース。

5. 電離層からの流体的な流出

O_2^+ , CO_2^+ のような電離層起源のイオンの流出(by ASPERA)

6. 分子の光解離

N, Cの流出について重要。

研究目的とSimulationの概要

太陽活動度が大きい時と小さい時で4つの流出過程を比較する

Step 1

Chamberlainモデルから熱的Oを計算、 O_2^+ のDRから非熱的Oをモンテカルロ計算
→Oコロナの分布、**DRによるOの流出量**

Step 2

Oコロナを用いてハイブリッドシミュレーション
→電磁場と反応係数

Step 3

電磁場と反応係数を用いてテスト粒子モンテカルロ計算
→再衝突のフラックス、 **O^+ の流出量**、**ENAによるOの流出量**

Step 4

再衝突とENAによるスパッタリングをモンテカルロ計算
→**スパッタリングによるOの流出量**、分布

熱的OとO₂⁺の密度分布(step 1インプット)

・熱的Oについて

Chamberlain モデル

外圏温度: 200 K solar min

350 K solar max

Krasnopolsky [2002]

・O₂⁺について

SZA=60°: Krasnopolsky [2002]

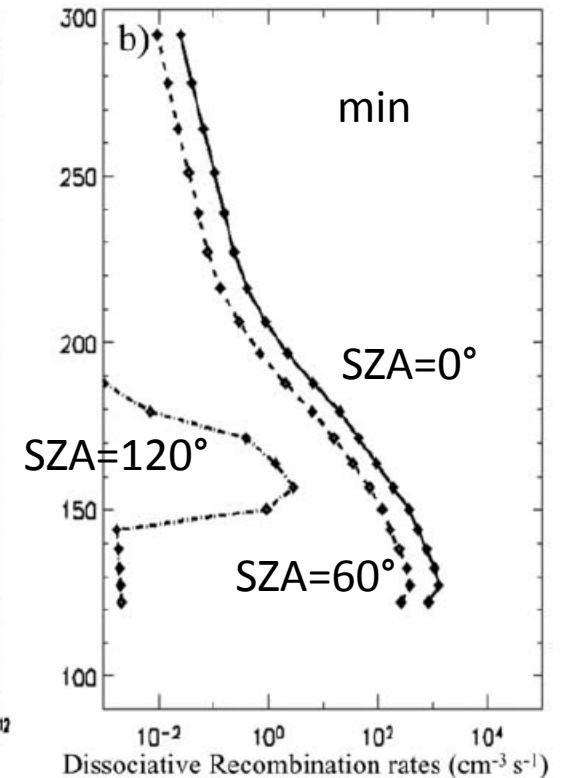
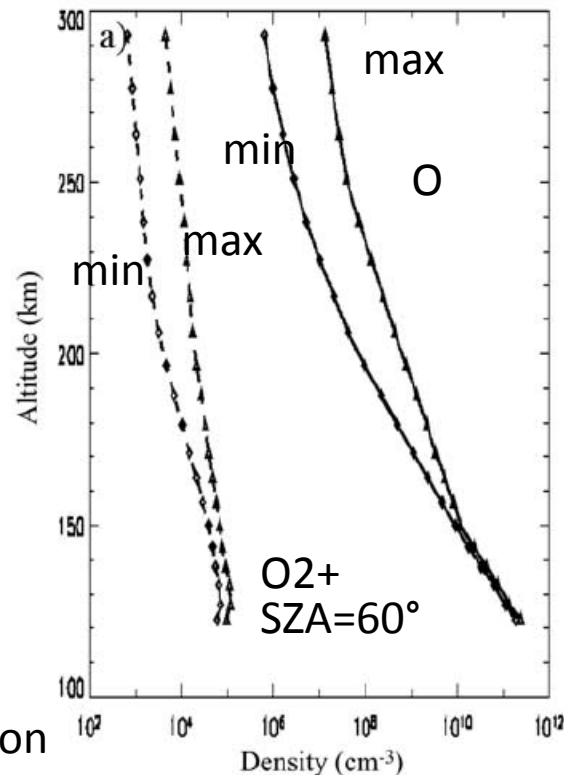
SZA=120°: Viking 1のradio occultation

を使って補間

$$n(O_2^+) = n_{60} \quad \text{for } 0^\circ < \text{SZA} < 60^\circ$$

$$n(O_2^+) = (n_{60} - n_{120}) \cos(\text{sza}) + \frac{(n_{60} + n_{120})}{2} \quad \text{for } 60^\circ < \text{SZA} < 120^\circ$$

$$n(O_2^+) = 2n_{120} \cos(\text{sza}) + 2n_{120} \quad \text{for } 120^\circ < \text{SZA} < 180^\circ$$



DRの反応係数 $n(e^-) = n(O_2^+)$

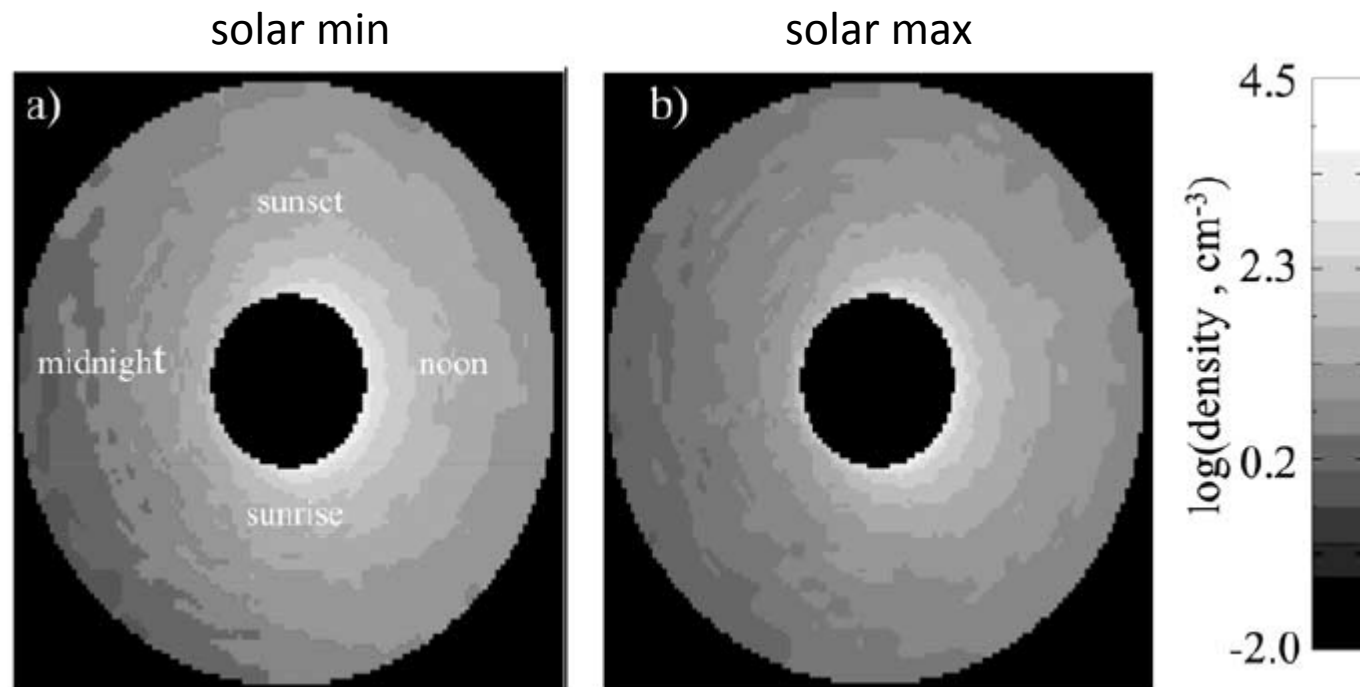
$$\alpha(z) = 2.4 \times 10^{-7} \left(\frac{300}{T_e} \right)^{0.70} n(e^-) n(O_2^+)$$

[Peverall et al., 2001]

DRによる非熱的Oの密度分布(step 1)

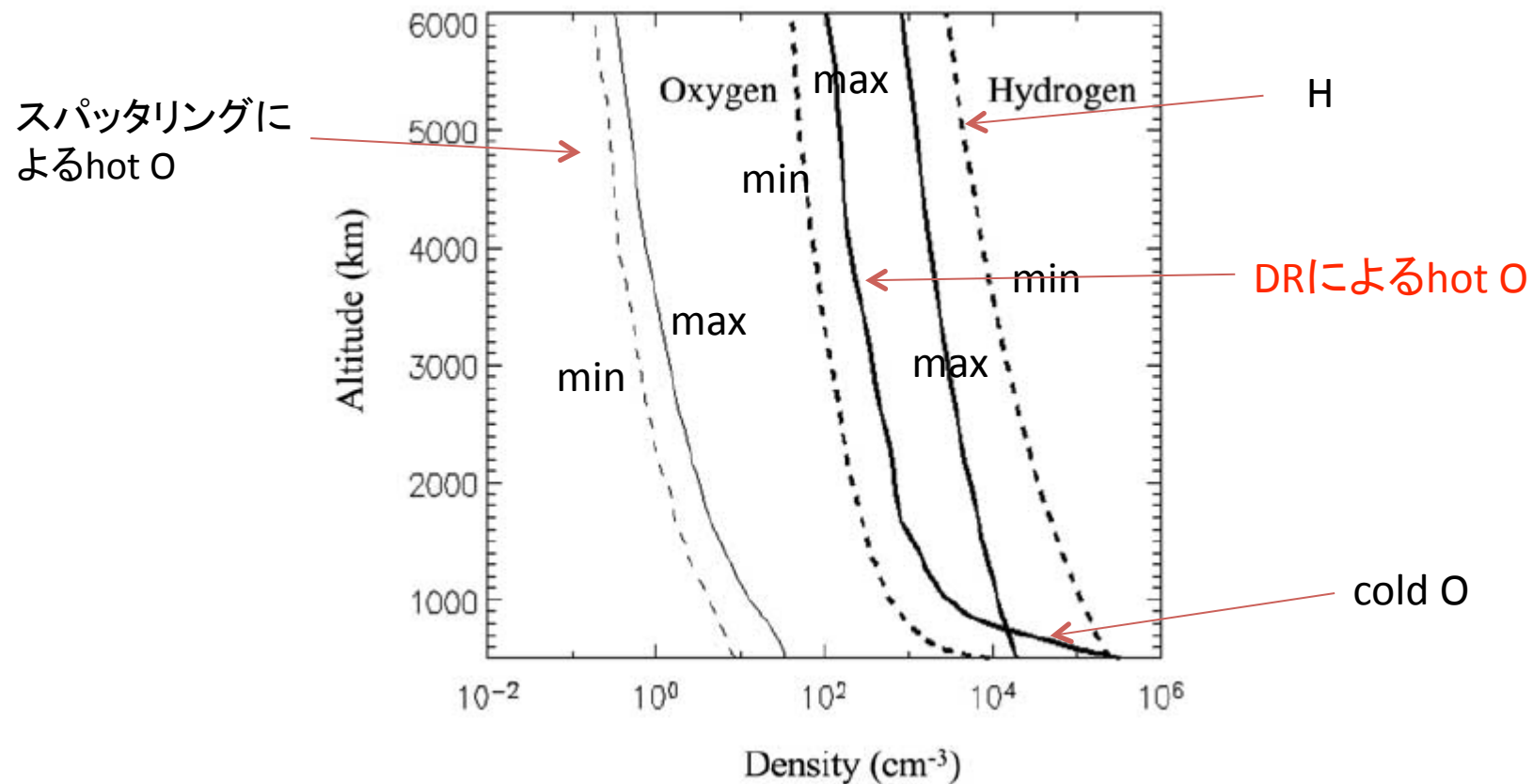
手法

Hot O とcoldの成分(figure 1a)の衝突を考えるためモンテカルロ計算(300 km以下)



- ・昼側に比べて夜側のhot Oが少ない。
- ・sunset sunriseで自転による非対称がある。

サブソーラのOとHの密度分布 (step 1)



- ・DRによるhot OについてHodges [2000]とほぼ同じ、Kim et al. [1998]より低い。
高度200 km以下の中性密度の違いによる。
- ・流出するOが生成する高度(exobase)
solar min 170 -190 km solar max 200 -230 km

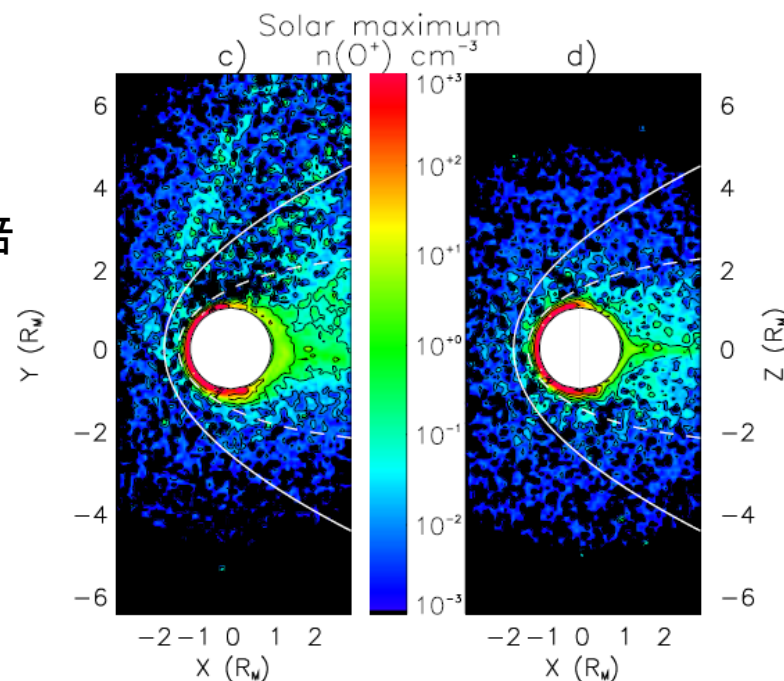
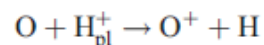
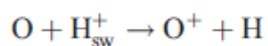
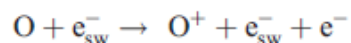
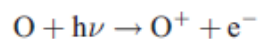
テスト粒子モンテカルロ計算 (step 2,step3)

・hybrid simulation by [Modolo et al., 2005]

有限ラーマ半径効果による惑星近傍の構造の非対称を扱える。

光電離率はSolar Min に対してsolar Max は0で3倍
Hで2倍

		Solar min.	Solar max
f_O	(s^{-1})	10.7×10^{-8}	31.25×10^{-8}
f_H	(s^{-1})	2.40×10^{-8}	4.28×10^{-8}



・得られた O^+ の反応係数と電磁場を使って数百万個のテスト粒子の軌道を追う。

(i)低高度の境界 300kmを通過した粒子を入射粒子としてカウント

(ii)上端の境界を通過した粒子を流出粒子としてカウント

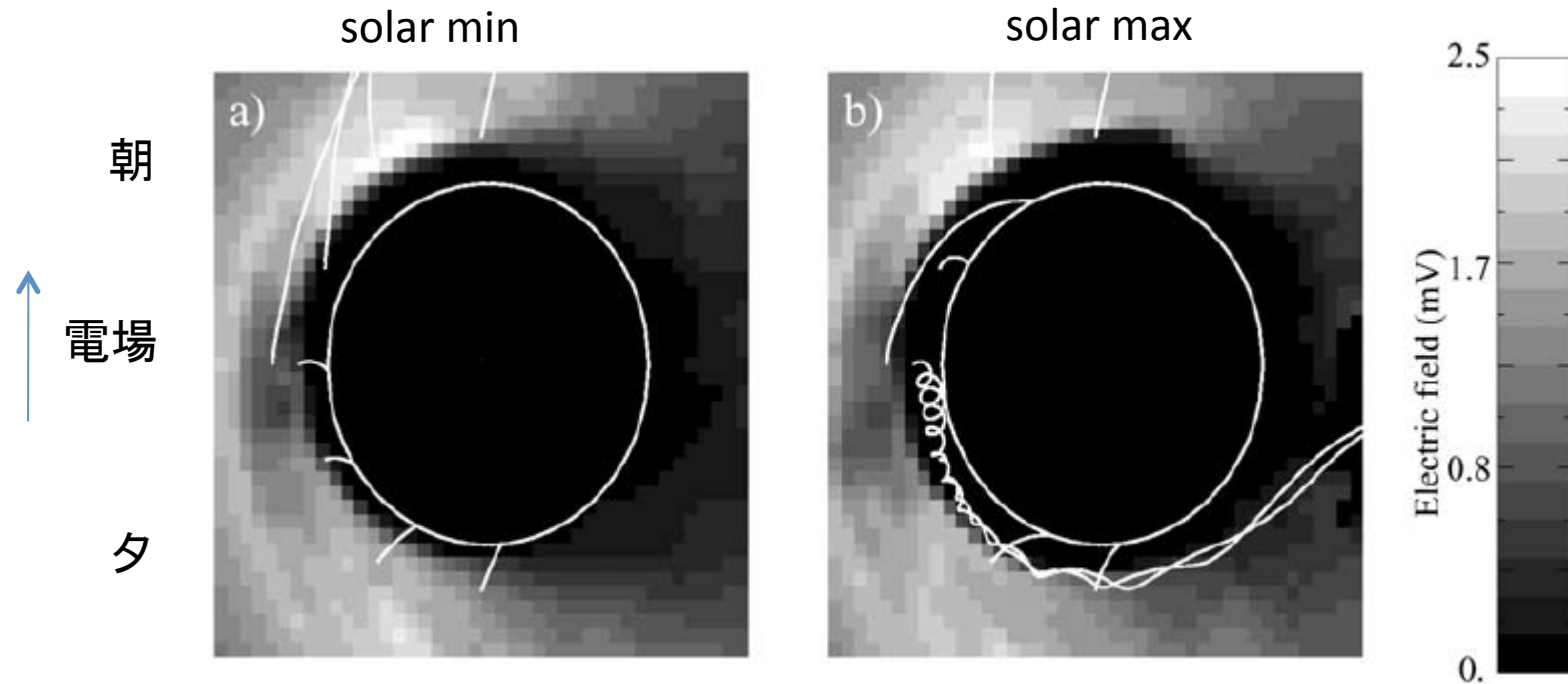
(iii)電荷交換(モンテカルロ)をしてENAが生成したら、(i),(ii)と同様に扱う。

Pickup O⁺とENA Oの流出量と入射量(step 3)

	O ⁺ の全生成量、	流出量、	入射量	O(ENA)の流出量、入射量	
	O ⁺ Total Production, s ⁻¹	O ⁺ Escaping Flux, s ⁻¹	O ⁺ Impacting Flux, s ⁻¹	O Escaping Flux, s ⁻¹	O Impacting Flux, s ⁻¹
<i>Low Solar Activity</i>					
Photoionization	1.6×10^{23}	3.2×10^{22}	1.2×10^{23}	2.0×10^{21}	1.1×10^{21}
Electronic impact	2.7×10^{22}	1.3×10^{22}	1.4×10^{22}	2.0×10^{20}	2.2×10^{20}
Charge exchange	1.7×10^{24}	1.6×10^{23}	1.5×10^{24}	6.8×10^{21}	1.0×10^{22}
<i>High Solar Activity</i>					
Photoionization	6.7×10^{24}	2.8×10^{24}	3.4×10^{24}	2.7×10^{23}	2.4×10^{23}
Electronic impact	1.7×10^{23}	4.7×10^{22}	1.2×10^{23}	1.9×10^{21}	6.7×10^{21}
Charge exchange	2.5×10^{24}	6.1×10^{23}	1.7×10^{24}	7.1×10^{22}	1.2×10^{23}

- ENAの生成量はO⁺の全生成量に比べて小さい、escape 1%、impact 8%
Barabash et al., [2002](50 %がENAに変換される)と比較すると低い。
→低高度境界の位置による。(Barabashは210 km 本計算は300 km)
- 太陽活動度によって、大気に衝突する粒子の割合が変化する。
全生成イオンに対してmin 84 % max 55 %
→maxの方が遠くでマスローディングがおきるため
- Zhang et al., [1993b]と比較して特に電子衝突による生成が小さい
MPB以下での電子衝突の反応係数が小さいため

太陽活動度に対する O^+ の軌道の違い (step 3)



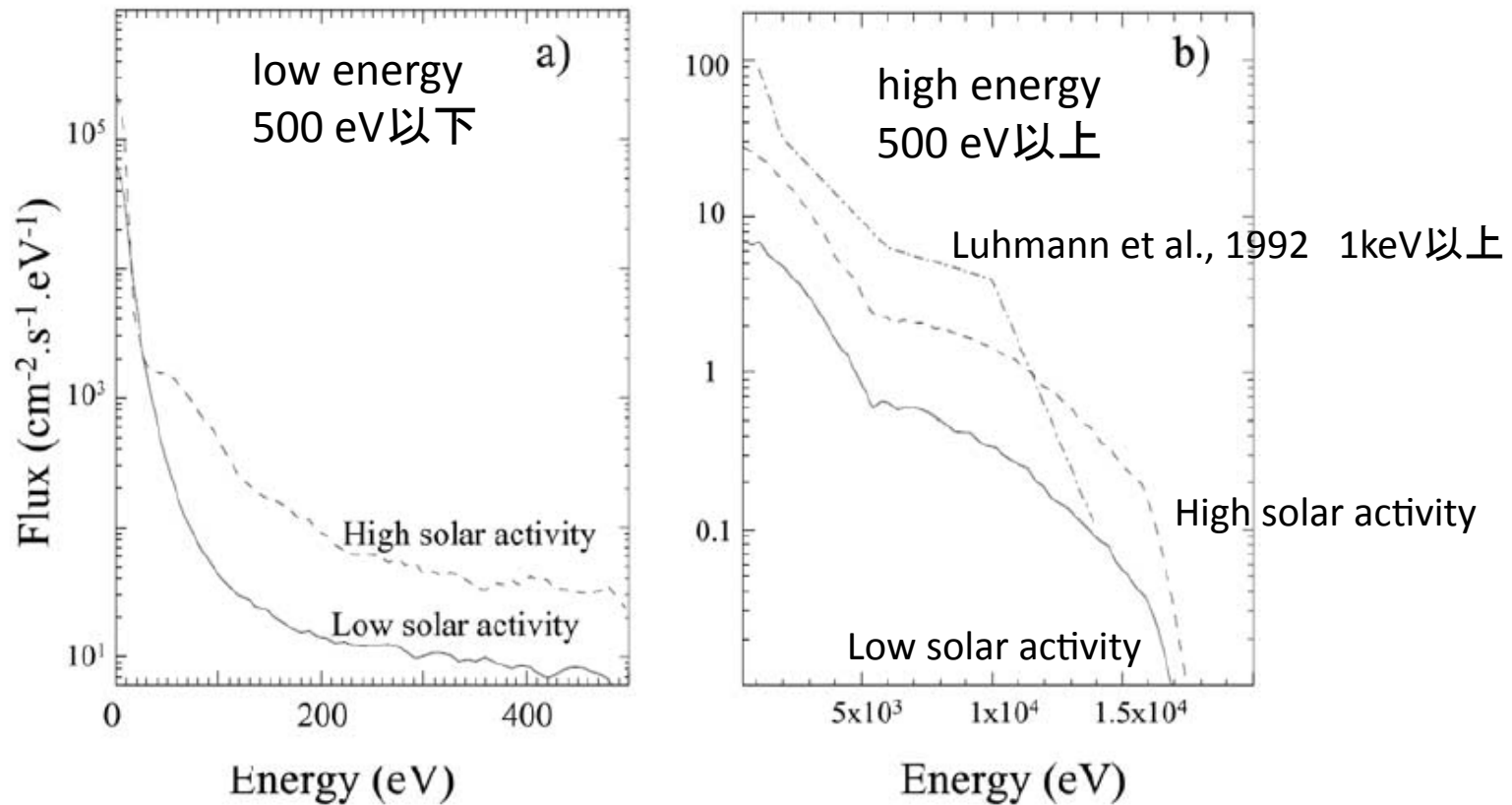
O^+ の軌道、電場の強度

- ・maxの方が低高度への電場の侵入を抑える。
- ・maxの方がジャイロ半径が小さい。その為、入射するイオンの割合が小さくなる。
- ・コロナが多いと O^+ の生成は増えるが、マスローディングのため惑星を守る

スパッタリング(step 3,step 4)

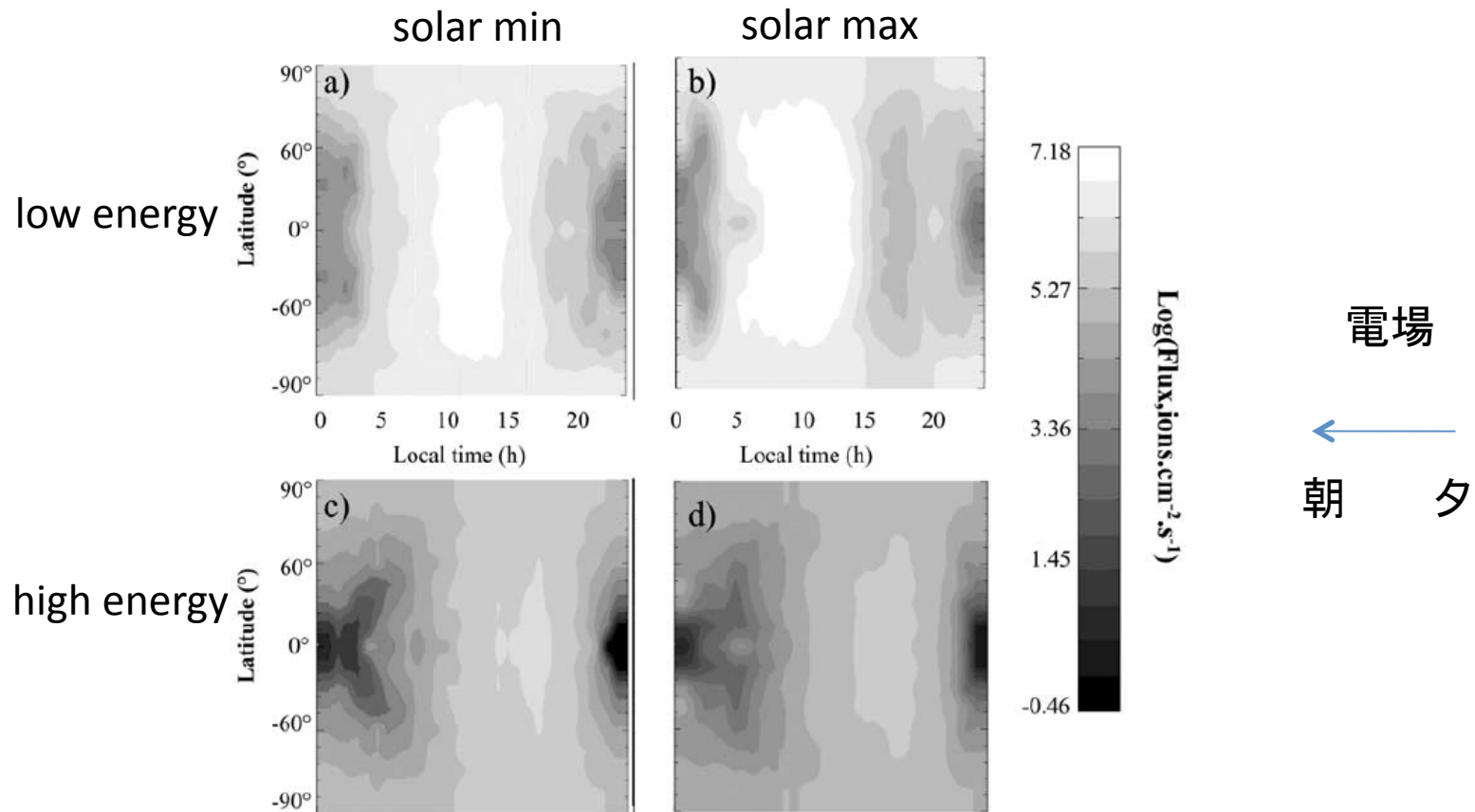
- ・Step 3で得られた入射粒子について
300 km以下で O^+ はENAに変化すると考える。
300 km以下に入射したENAとOの衝突を考える。
- ・Step 1の手法と同様のhot Oとcold Oの衝突を考えたモンテカルロ計算をして
スパッタリングによるOコロナの形成と流出を考える。
- ・入射エネルギーの違いによって流出量の変化を評価するため、
low energy 500 eV以下
High energy 500 eV以上
に分けて議論している。

入射粒子(O^+ , ENAO)のエネルギー分布 (step 3)



- high energyについて形は大体同じ
- high solar activity はとlow solar activityと比べて入射フラックスは4倍大きい。

入射粒子(O^+ , ENAO)の空間分布 (step 3)



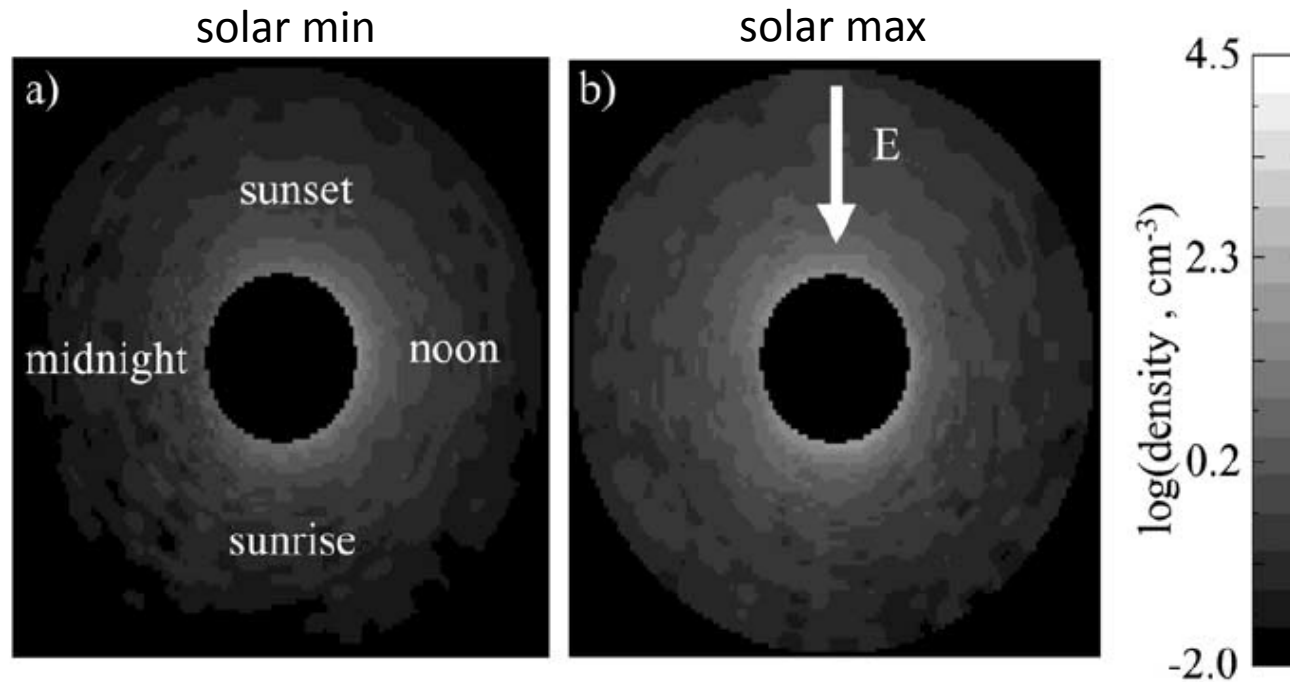
- high energyで夕方側でfluxが大きい。High energyの粒子は高高度で生成した粒子が振り込むので、朝側で生成した粒子は流出する。
- サブソーラに降り込む粒子は0 – 30 eVの粒子である。
- maxの時サブソーラで生成したイオンは朝方に降り込む。

スパッタリングによるOの流出量 (step 4)

	Low-Energy Particles	High-Energy Particles
<i>Low Solar Conditions</i>		
Incident flux	1.6×10^{24}	3.6×10^{22}
Escape flux	9.8×10^{22}	1.1×10^{23}
<i>High Solar Conditions</i>		
Incident flux	5.3×10^{24}	1.4×10^{23}
Escape flux	2.9×10^{23}	4.2×10^{23}

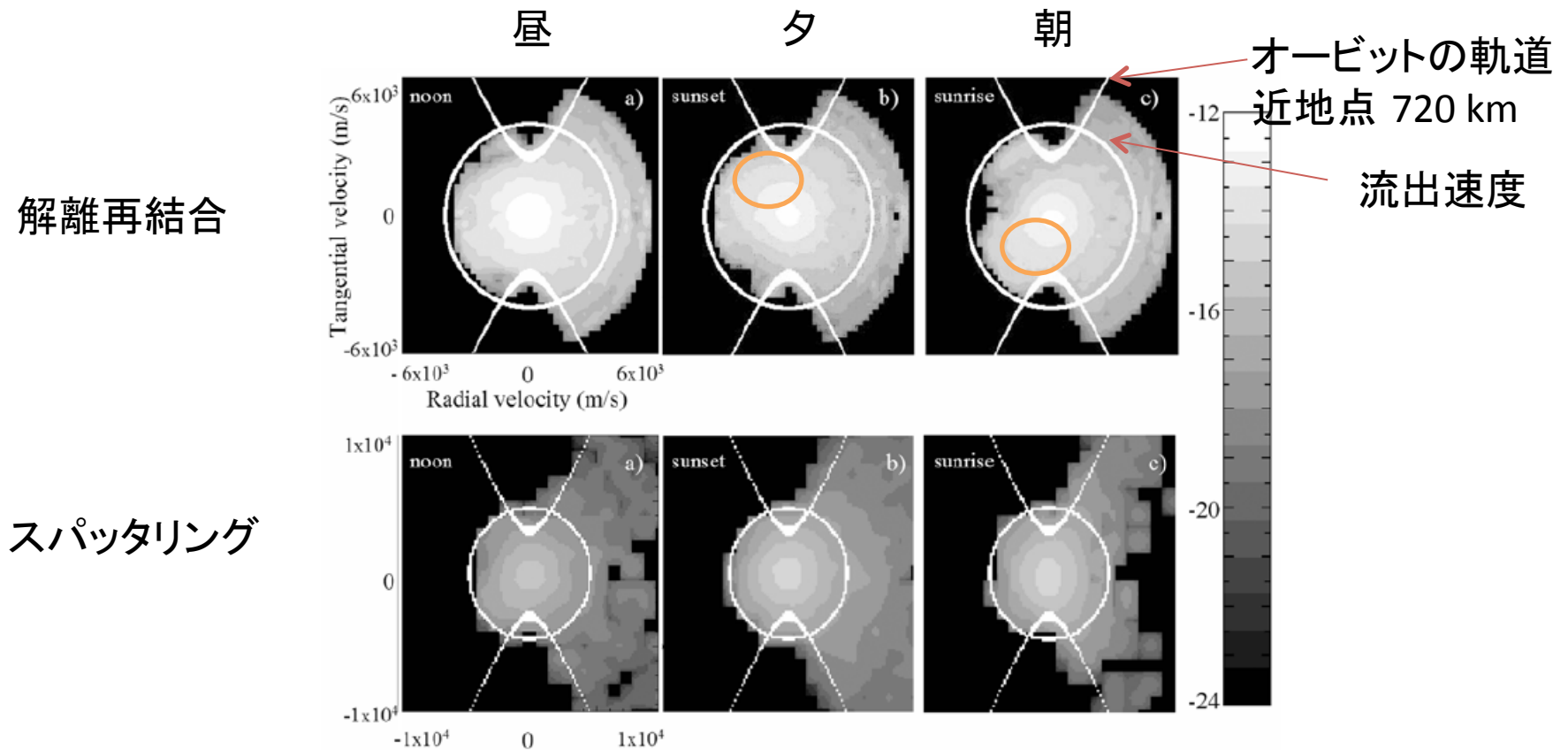
- ・スパッタリングの効率 流出量/入射量
low energy 0.06 , high energy 3
- ・生成高度 (解離再結合のピークの高度よりも低い)
min 170 km max 200 km

スパッタリングによるOの密度分布 (step 4)



- ・降り込み粒子が多いところで密度が高くなる。(夕方側)
- ・解離再結合で生成したOよりもスパッタリングによるOの密度は低い。

Hot Oの速度分布関数 (step 4)



- RDについて昼は半径方向の速度軸に対して対称 (560 – 890 km)

朝夕で粒子が多い領域があるが、これは昼でRDがおきるため。

- スパッタリングについてCipriani et al., [2007]と同様に羽のような形をしている
夕がたで高エネルギー粒子が多い。

流出量のまとめ

	Low Solar Activity	High Solar Activity
Dissociative recombination	1×10^{25}	4×10^{25}
Ion escape	2×10^{23}	3×10^{24}
ENA escape	4×10^{22}	4×10^{23}
Sputtering	2×10^{23}	7×10^{23}

DR	Low solar activity	High solar activity
Hodges[2002]	4.4×10^{25}	1.8×10^{26}
Kim et al. [1998]	3.4×10^{25}	8.5×10^{25}
krestyanikova [2005] 1D	6.5×10^{24}	1.1×10^{26}

- min Hodges[2002], Kim et al [1998] のモデルと比較して3~4倍低い。
krestyanikova [2005] ら1Dで見積もったのより少し大きい
- max Hodges[2002], Kim et al [1998], krestyanikova [2005] のモデルと比較して低い。

しかし、min /maxの割合は0.25でHodges [2002]と一致している。

流出量のまとめ

	Low Solar Activity	High Solar Activity
Dissociative recombination	1×10^{25}	4×10^{25}
Ion escape	2×10^{23}	3×10^{24}
ENA escape	4×10^{22}	4×10^{23}
Sputtering	2×10^{23}	7×10^{23}

ENAも太陽活動度に大きく依存する。

Min Ma et al. [2004] Modolo et al. [2005]と比較して小さい

O密度が低いため、また電離層からのバルクの流出を除いているため

Max Modolo et al. [2005]と比較して大きい。特にmin/maxの比が5 本研究は17

この大きな違いは熱的 Oの扱いの違いによる。

Modolo et al. [2005]はmin,maxとほぼ同じ。本研究maxの方が濃い。

Ion escape (observation)	Low solar activity	High solar activity
Verigin et al., [1991] TAUS		5×10^{24}
Lundin et al. [1989] ASPERA		2.5×10^{25}
Barabash et al., [2007] ASPERA3	1.6×10^{23}	

・スパッタリングの寄与は小さい。

しかし過去の太陽風速度が速く、EUVフラックスが大きいような場合、入射イオンのエネルギーが大きく、fluxが多くなるので寄与が大きくなる。

まとめ

- ・Oの流出について4つのメカニズムを比較した(DR、pickup、ENA、スパッタリング)
- ・太陽活動度が低、高とも解離再結合によるOの流出が支配的だ。
- ・熱的な中性大気の密度分布の違いが重要である。他の論文と比較した中で流出量の違いは中性大気の密度分布の違いによるところが大きい。
熱的な中性大気の密度分布はexobaseの温度によるので、正確に決める必要がある。

References

- Barabash et al. (2002), Energetic neutral atoms at Mars: 4. Imaging of planetary oxygen, J. Geophys. Res., 107(A10), 1280, doi:10.1029/2001JA000326.
- Hodges, R. R. (2000), Distributions of hot oxygen for Venus and Mars, J. Geophys. Res, 105, 6971– 6981.
- Kim et al. (1998), Solar cycle variability of hot oxygen atoms at Mars, J. Geophys. Res, 103, 29,339–29,342.
- Krasnopolsky, V. A. (2002), Mars' upper atmosphere and ionosphere at low, medium, and high solar activities: Implications for evolution of water, J. Geophys. Res., 107(E12), 5128, doi:10.1029/2001JE001809.
- Krestyanikova et al. (2005), Stochastic models of hot planetary and satellite coronas: A photochemical source of hot oxygen in the upper atmosphere of Mars, Sol. Syst. Res., 39, 22–32.
- Leblanc, F., and R. E. Johnson (2001), Sputtering of the Martian atmosphere by solar wind pick-up ions, Planet. Space Sci., 49, 645– 656.
- Luhmann et al. (1992), Evolutionary impact of sputtering of the Martian atmosphere by O⁺ pick-up ions, Geophys. Res. Lett., 19, 2151– 2154.
- Ma et al. (2004), Threedimensional, multispecies, high spatial resolution MHD studies of the solar wind interaction with Mars, J. Geophys. Res., 109, A07211, doi:10.1029/2003JA010367.
- Modolo et al. (2005), Influence of the solar activity on the Martian plasma environment, Ann. Geophys, 23, 433– 444.
- Peverall et al. (2001), Dissociative recombination and excitation of O₂⁺: Cross sections, products yields, and implications for studies of ionospheric airglows, J. Chem. Phys., 114, 6679–6689.
- Zhang et al. (1993b), Oxygen ionization rates at Mars and Venus: Relative contributions of impact ionization and charge exchange, J. Geophys. Res, 98, 3311 –3318.