

論文紹介：

Neutral wind effects on ion outflow at Mars

Andersson et al., EPS, vol. 64, pp.105-112, 2012

担当者 寺田直樹(東北大)

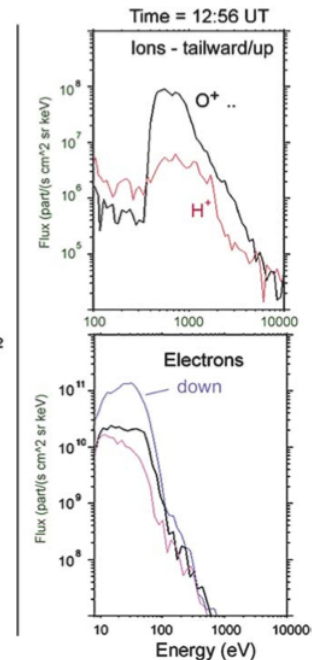
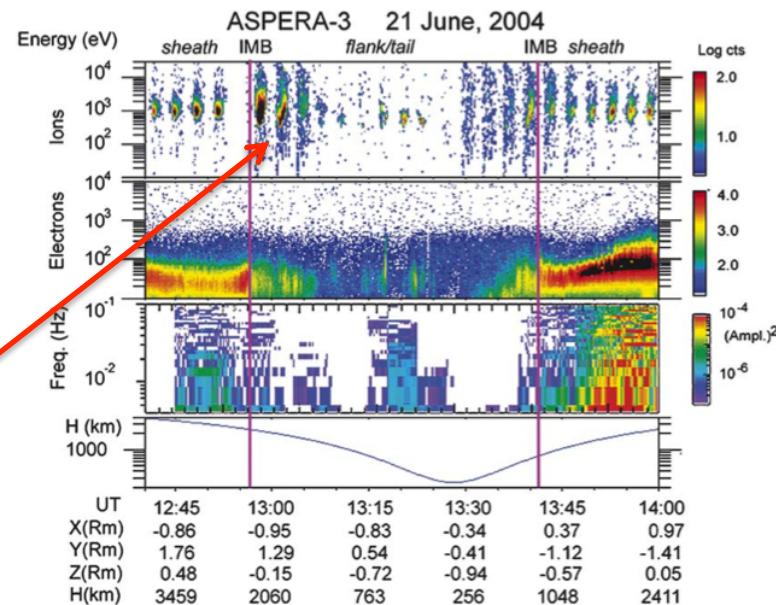
概要

- CAPIT (Combined Atmospheric Photochemistry and Ion Tracking) codeを用いて、熱圏風がイオンの密度と速度分布に及ぼす影響を評価
- CAPIT codeは、電離圏の光化学とプラズマ波動による加熱を考慮しているのが特徴
- イオン流出量は、熱圏風の影響を余り受けない
- しかし、イオン密度分布は大きく変化するるので、低高度の「その場」観測データを解析する際には注意が必要
- 地殻磁場の影響も調査：流出率は短期的には O_2^+ が最も大きく変化。しかし O_2^+ の補給はゆっくりなので長期的な流出量はあまり変化しない

Introduction/Background

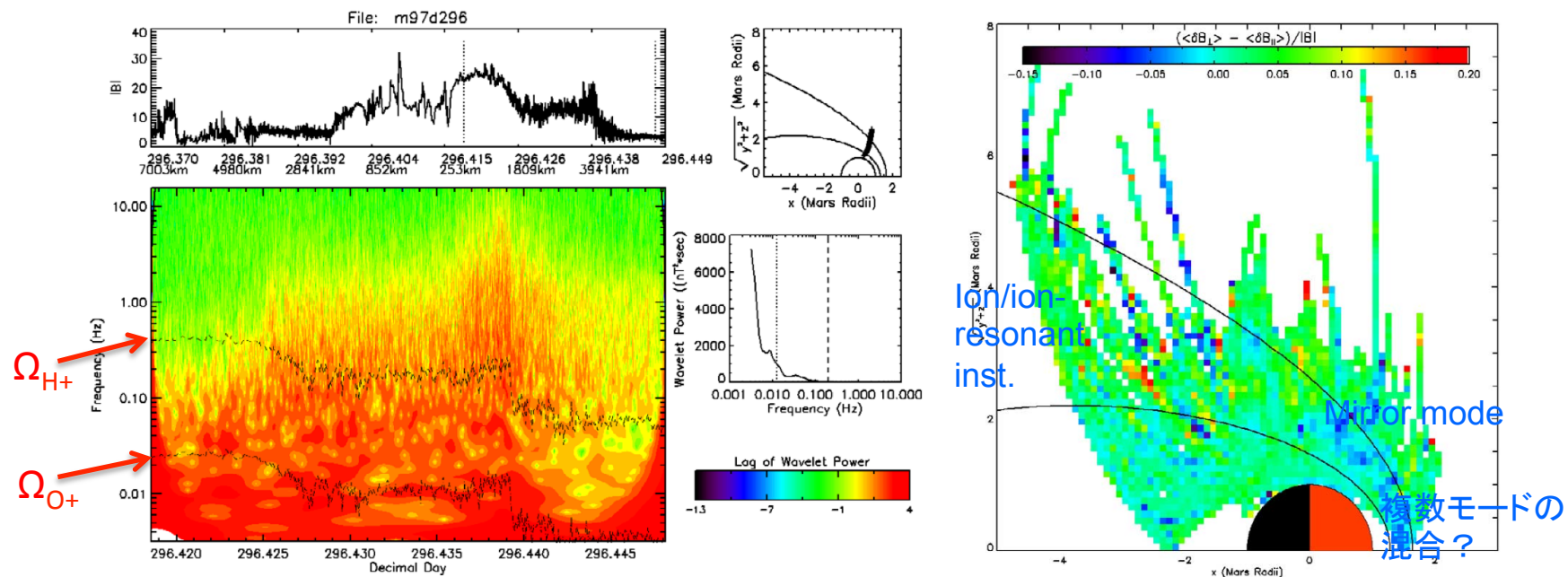
- イオン流出は様々な要因により変動しうる：
 - 太陽風動圧、太陽風誘導電場方向 (Nilsson et al., 2010)
 - $\sim 300\text{km}$ の低い高度域まで達するイオンサイクロトロン周波数帯の波動 ($0.01\text{-}0.02\text{Hz}$) (Winningham et al., 2006)
 - より長い時間スケールでの変動? (Duru et al., 2008)
- 高度 $\sim 300\text{km}$ では、energetic ion conics? が観測される (Lundin et al., 2006)

Broad-energy hot ion beam
(Lundin et al., 2006)



Introduction/Background

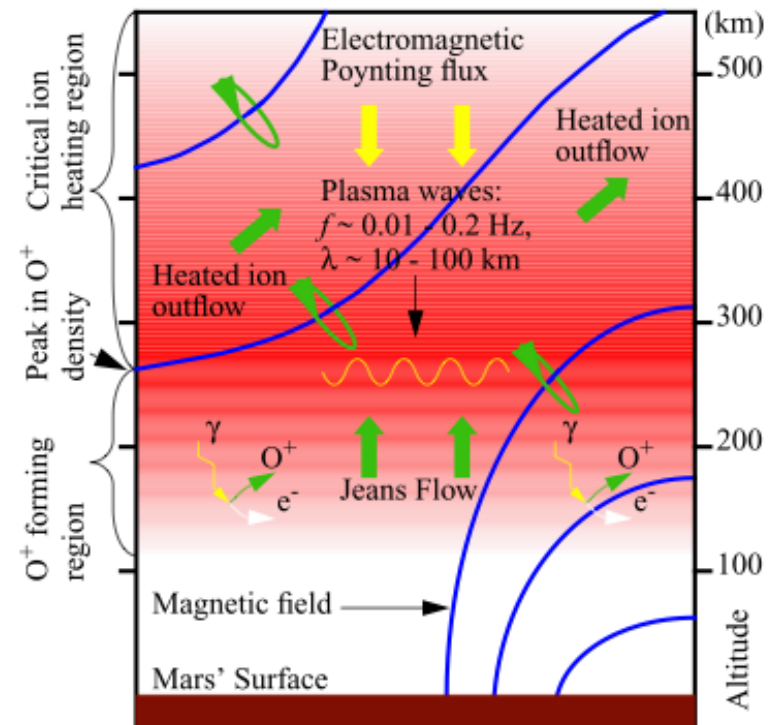
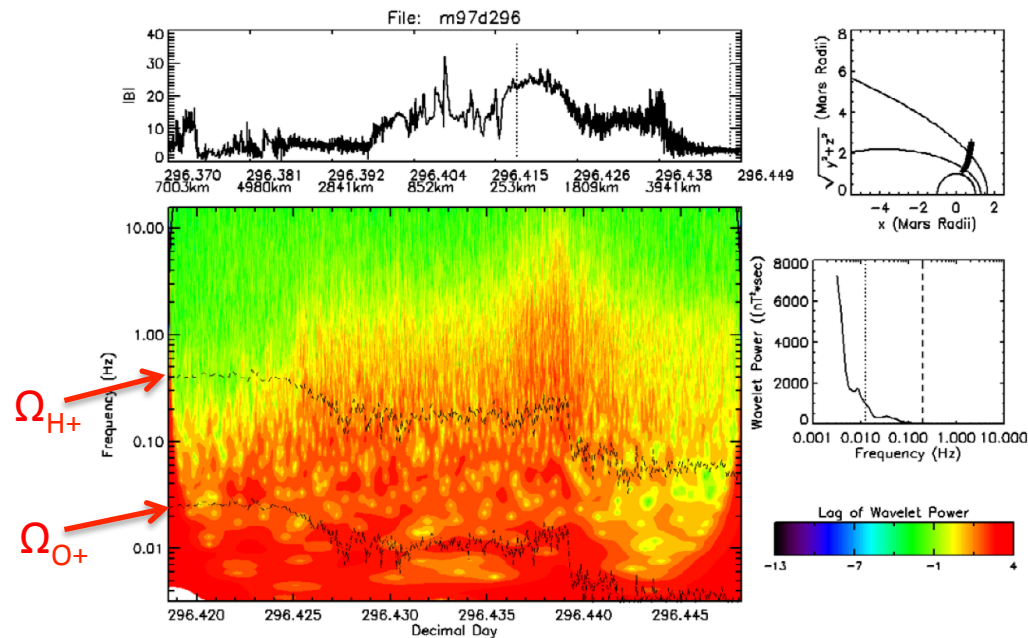
- 高度～300kmでは、 O^+ サイクロトロン周波数帯の磁場擾乱が観測される (Espley et al., 2004)
- しかし同高度域・同周波数帯の電場観測は無い



MGS MAG/ER観測 [Espley et al., 2004]

Introduction/Background

- 高度～300kmでは、 O^+ サイクロトロン周波数帯の磁場擾乱が観測される(Espley
- しかし同高度域・同周波数帯

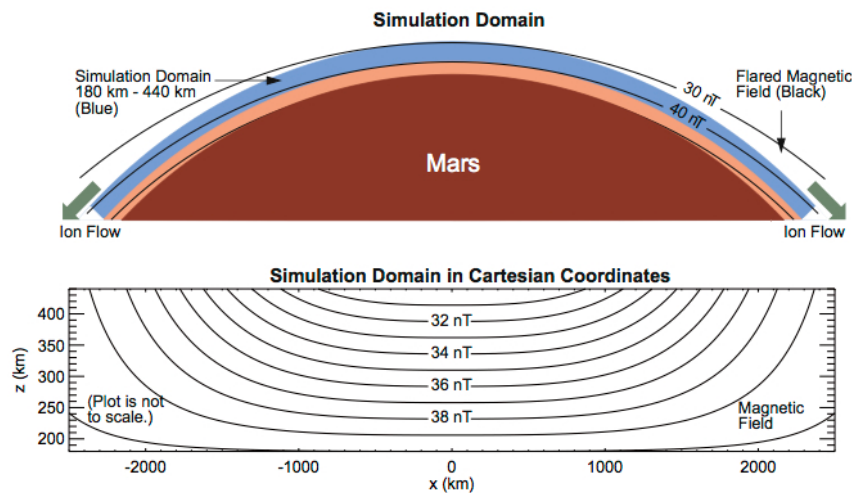


MGsのMAG/ER低周波波動観測から、沿磁力線電流に伴う波動 $\Rightarrow$ 電離圏 O^+ サイクロトロン加熱 $\Rightarrow$ 大量のイオン流出、を示唆 [Ergun et al., 2006]

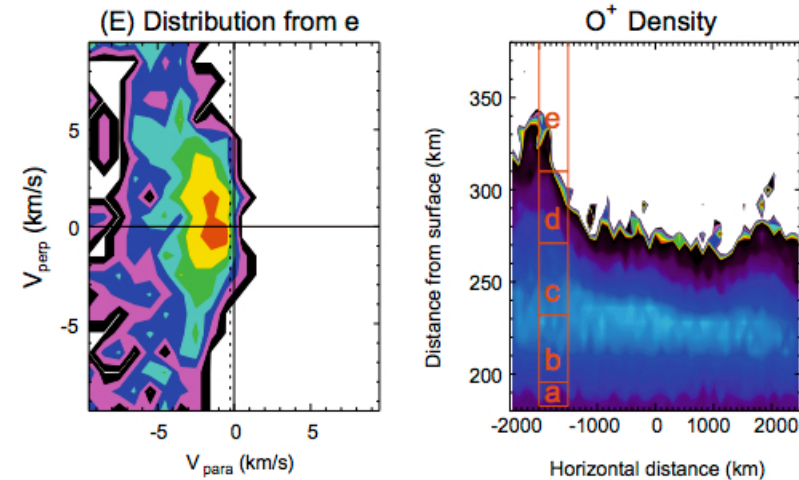
Introduction/Background

- Andersson et al. (2010)
 - 2次元の火星電離圏におけるイオン軌道追跡
 - ドレープ磁場を仮定(左下図)
 - プラズマ波動(O^+ サイクロトロン波を仮定)によるイオンの散乱・加熱
 - 電場は波動のみ考慮。両極性電場、太陽風誘導電場は含まない

$dE/dt = en_L S(f_{O^+}) / m_O$
ここで $S(f_{O^+})$ は O^+ サイクロトロン波の
電場パワー密度、 $\eta_L=0.5$ は左旋
偏波の割合、
(Cheng et al., 1986)



シミュレーション領域の模式図

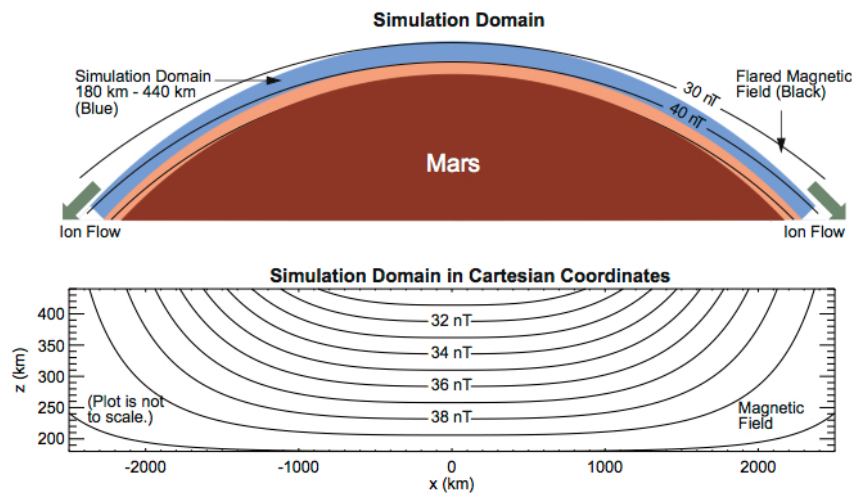


(右) O^+ 密度分布と(左)領域eにおける速度分布
(Andersson et al., 2010)

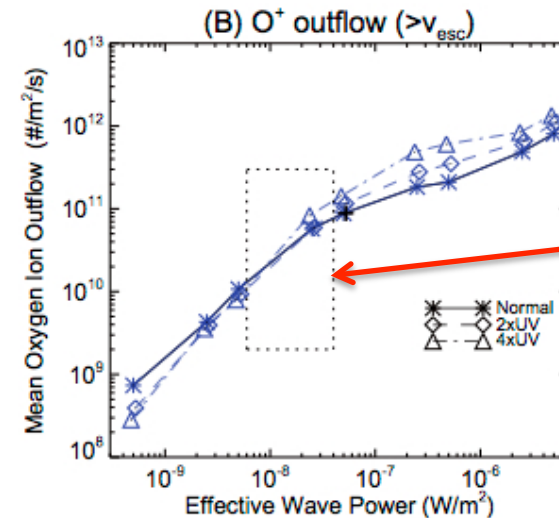
Introduction/Background

- Andersson et al. (2010)
 - 2次元の火星電離圏におけるイオン軌道追跡
 - ドレープ磁場を仮定(左下図)
 - プラズマ波動(O^+ サイクロトロン波を仮定)によるイオンの散乱・加熱
 - 電場は波動のみ考慮。両極性電場、太陽風誘導電場は含まない

$dE/dt = en_L S(f_{O^+}) / m_O$
 ここで $S(f_{O^+})$ は O^+ サイクロトロン波の
 電場パワー密度、 $\eta_L = 0.5$ は左旋
 偏波の割合、
 (Cheng et al., 1986)



シミュレーション領域の模式図



O^+ 流出率 vs 入力ポインティングフラックス
(Andersson et al., 2010)

Introduction/Background

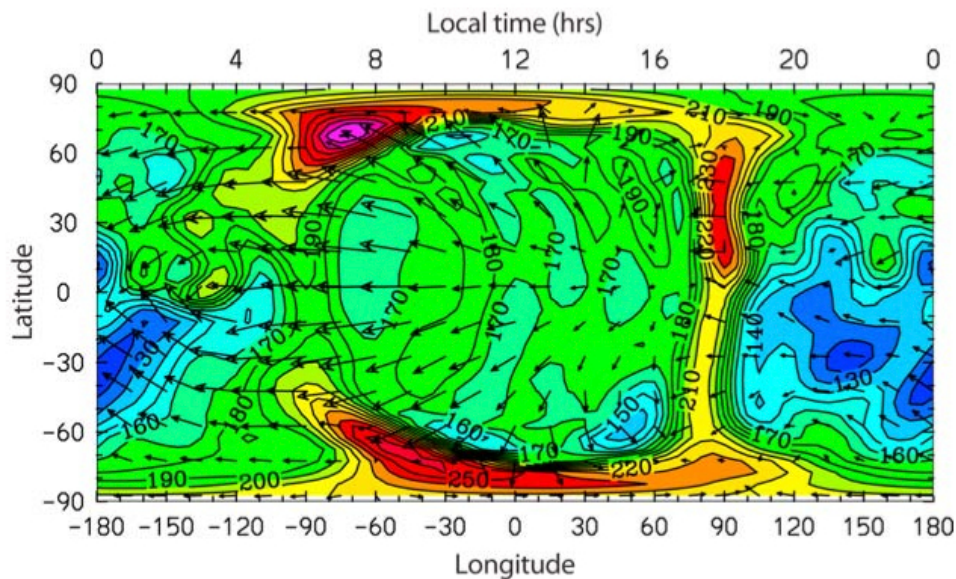
- Andersson et al. (2010)では、イオン流出率は上側境界から与えたポインティングフラックスに比例していた(低高度での中性大気との衝突・反応によるエネルギー損失が効き出すまでは比例)。
- 現火星での流出では重要かもしれない。
- しかし、非線形的な増加は見られなかったので、過去の大量の流出を説明するのは難しそう(現時点で考えられているパラメータ範囲では)。

Introduction/Background

- 本論文は、Andersson et al. (2010)に

- 熱圏中性大気の風(熱圏風)
- 局所的な地殻磁場

を加えて、火星電離圏のイオン密度と速度分布への影響を評価



熱圏風は、Valeille et al. (2009)の火星熱圏GCM(MTGCM)のピーク速さ(最大 $\sim 490\text{m/s}$)と方向に基づいて導入

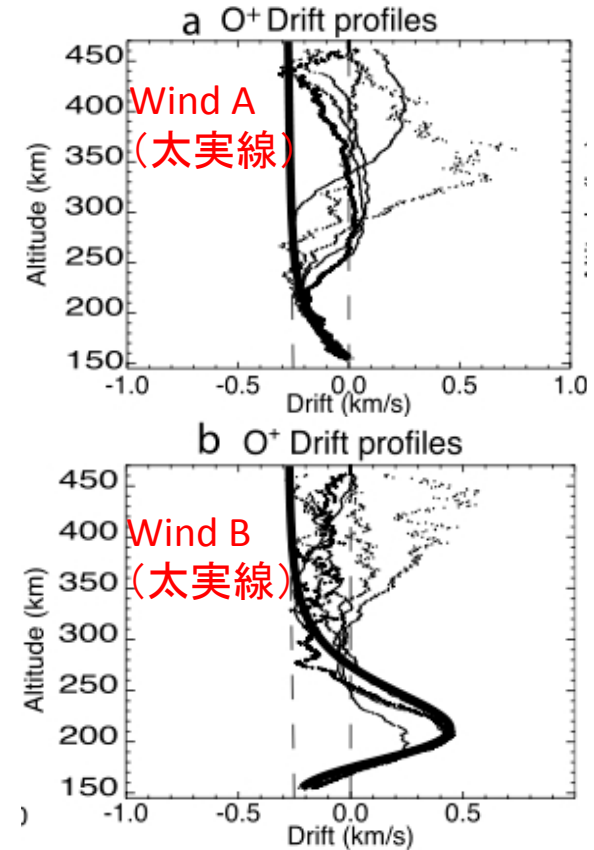
Valeille, A., V. Tennishev, S. W. Bougher, M. R. Combi, and A. F. Nagy (2009)

Simulation setup

- CAPIT codeを使用
 - 2次元電離圏(高度160-460km、 $\text{SZA} < \pm 45^\circ$)
 - 電磁場と重力の下で O^+ , O_2^+ , CO_2^+ , N_2^+ の粒子軌道を追跡
 - 19種類の光化学反応
- 波動エネルギーフラックスは、上側境界から与える
 - 具体的な値は記述無し。
 - 波動はイオンを加熱。イオンは中性大気との衝突や反応でエネルギーを失う。

Simulation setup

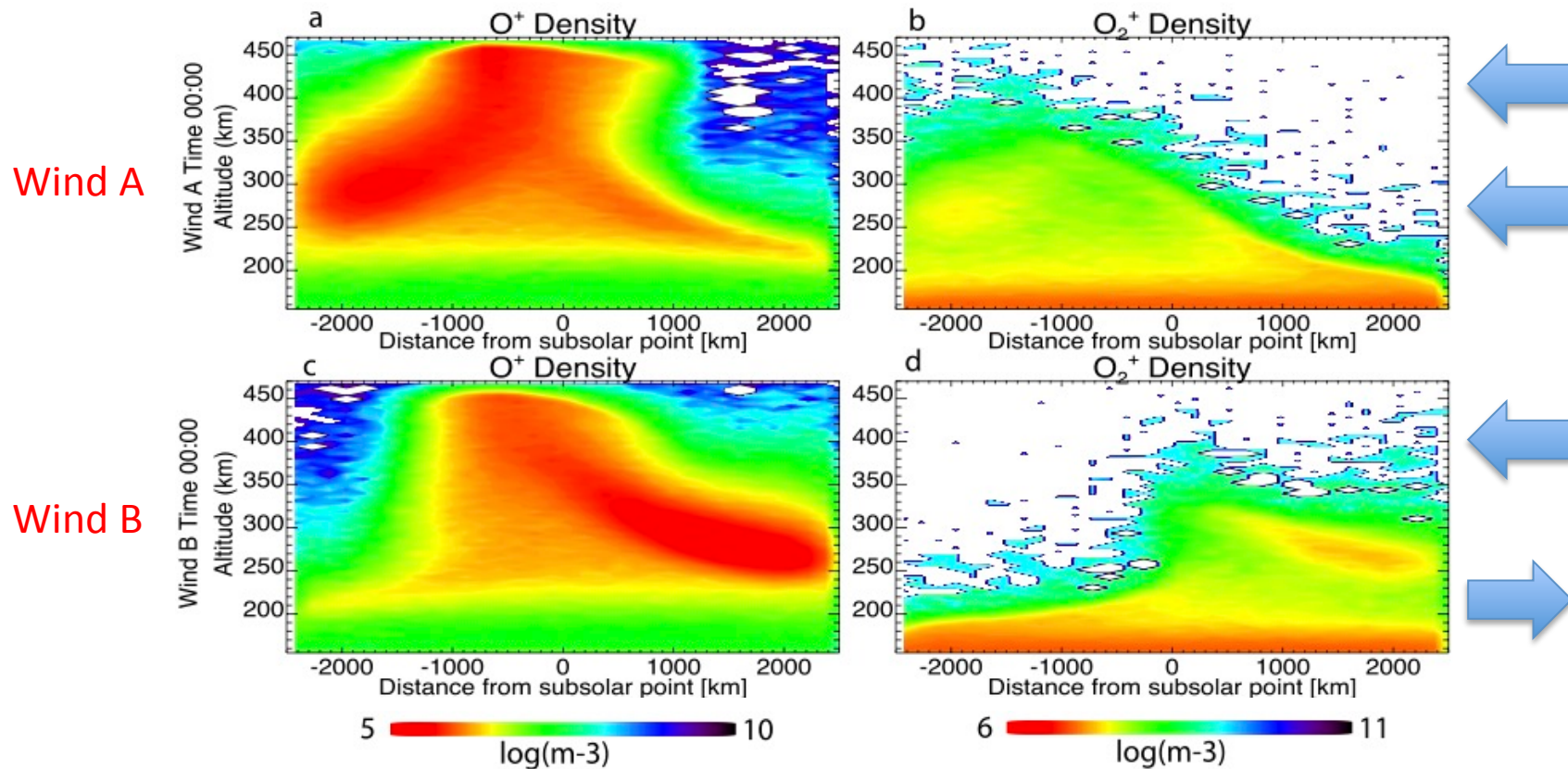
- 背景の中性大気
 - 密度は時間固定 (Vikingの高度分布 + SZA依存 ($\propto \cos(\text{SZA})$))
 - 速度はValeille et al.(2009)を参考に して2種類与える
- Wind A
 - 高度250km以上で地表と同速度 ($\sim -0.2\text{km/s}$)
- Wind B
 - 非現実的かもしれない
 - 幾つかシミュレーションを行ったところ、外圏底 (このシミュレーションでは高度 $\sim 250\text{km}$) 付近の中性大気の速度がイオン分布に強い影響を 及ぼすことがわかった



Simulation setup

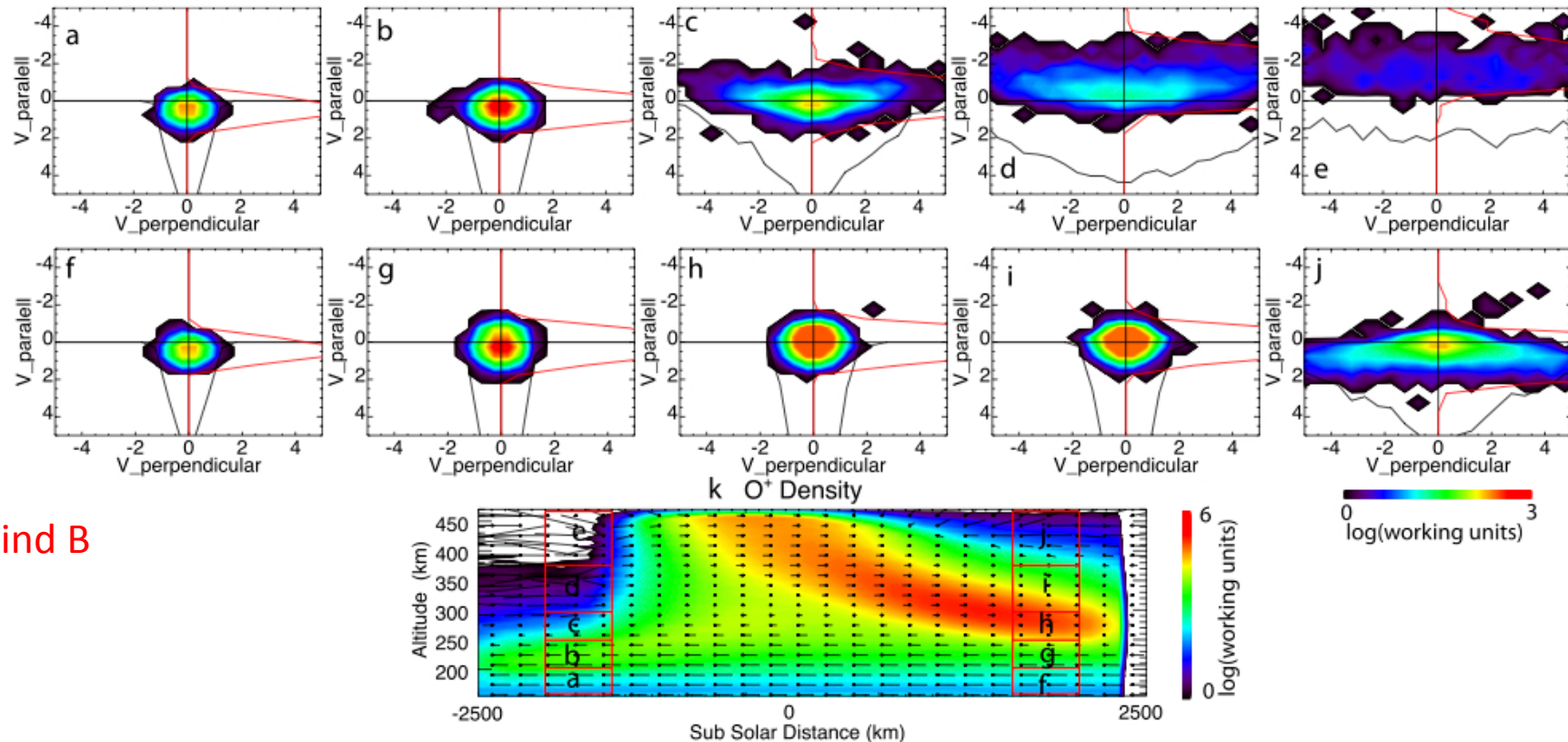
- イオンの「流出」の基準
 1. ある高度より上側に到達し、シミュレーション領域から（磁力線沿いに）抜け出したイオン
 2. 脱出速度に達したイオンの2つを用いた

Simulation results



- Wind A/Bのシミュレーション結果
- O^+ と O_2^+ の密度分布(カラーバーは恐らく左右逆)
- 特に高度180-240kmの熱圏風がイオン密度に大きな影響を及ぼす

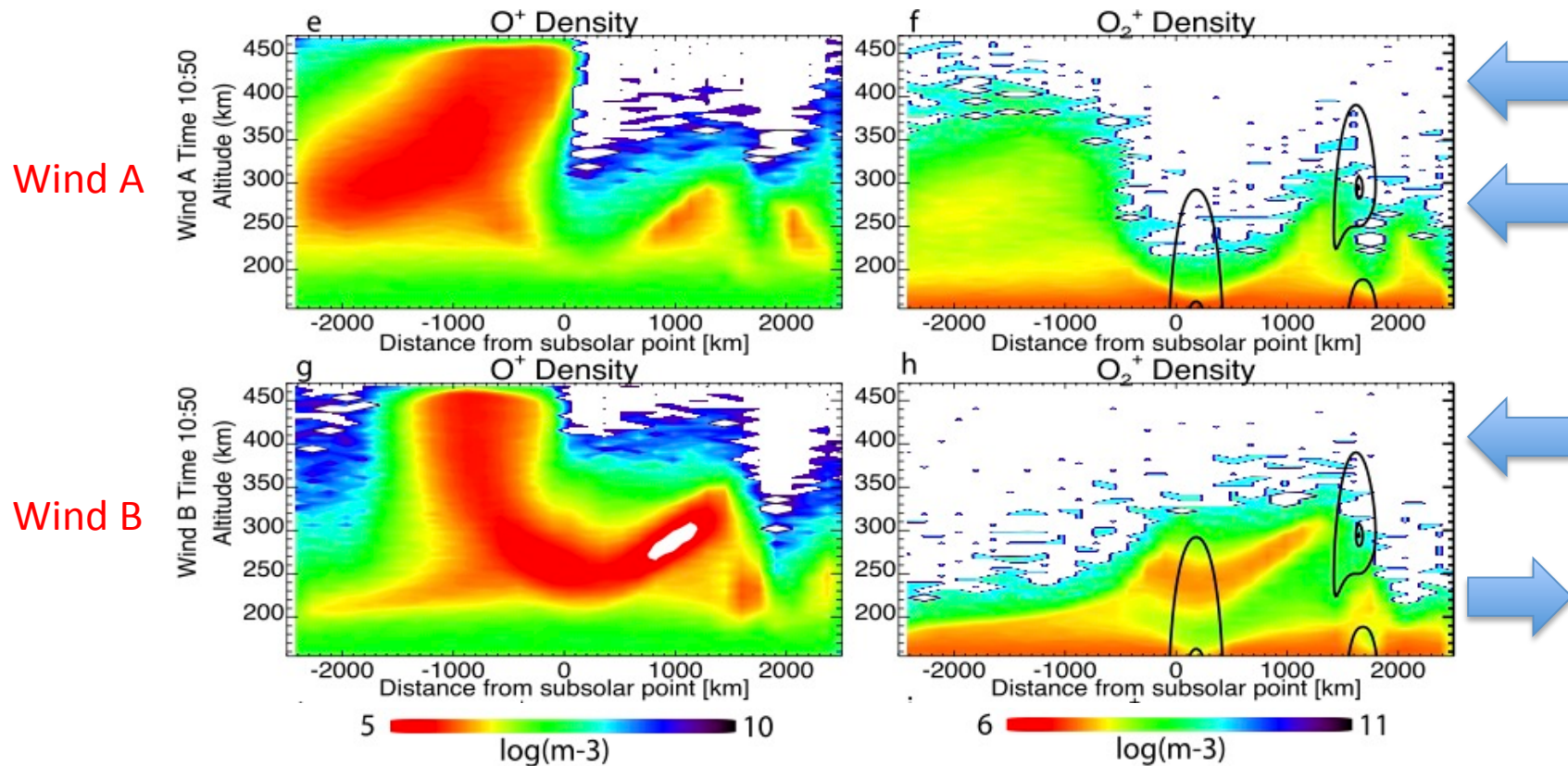
Simulation results



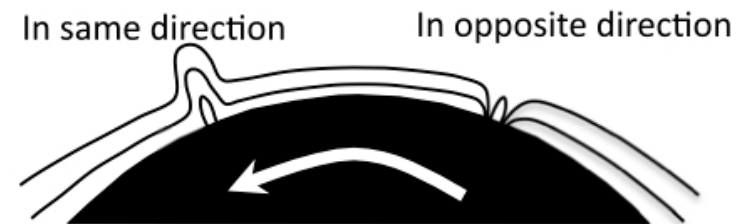
Wind B

- イオンの速度分布関数
- 密度が高い領域では、イオンはコールドなまま
- 高高度の低密度域で加熱されたイオン (ion conics) がみられる
 - メインの加熱域は、低密度域と高密度域の境界にできる
- 加熱されたイオンは、ミラーフォースによって磁力線沿いに加速・流出 (この高高度加速・流出は、熱圏風とは独立に生じている)

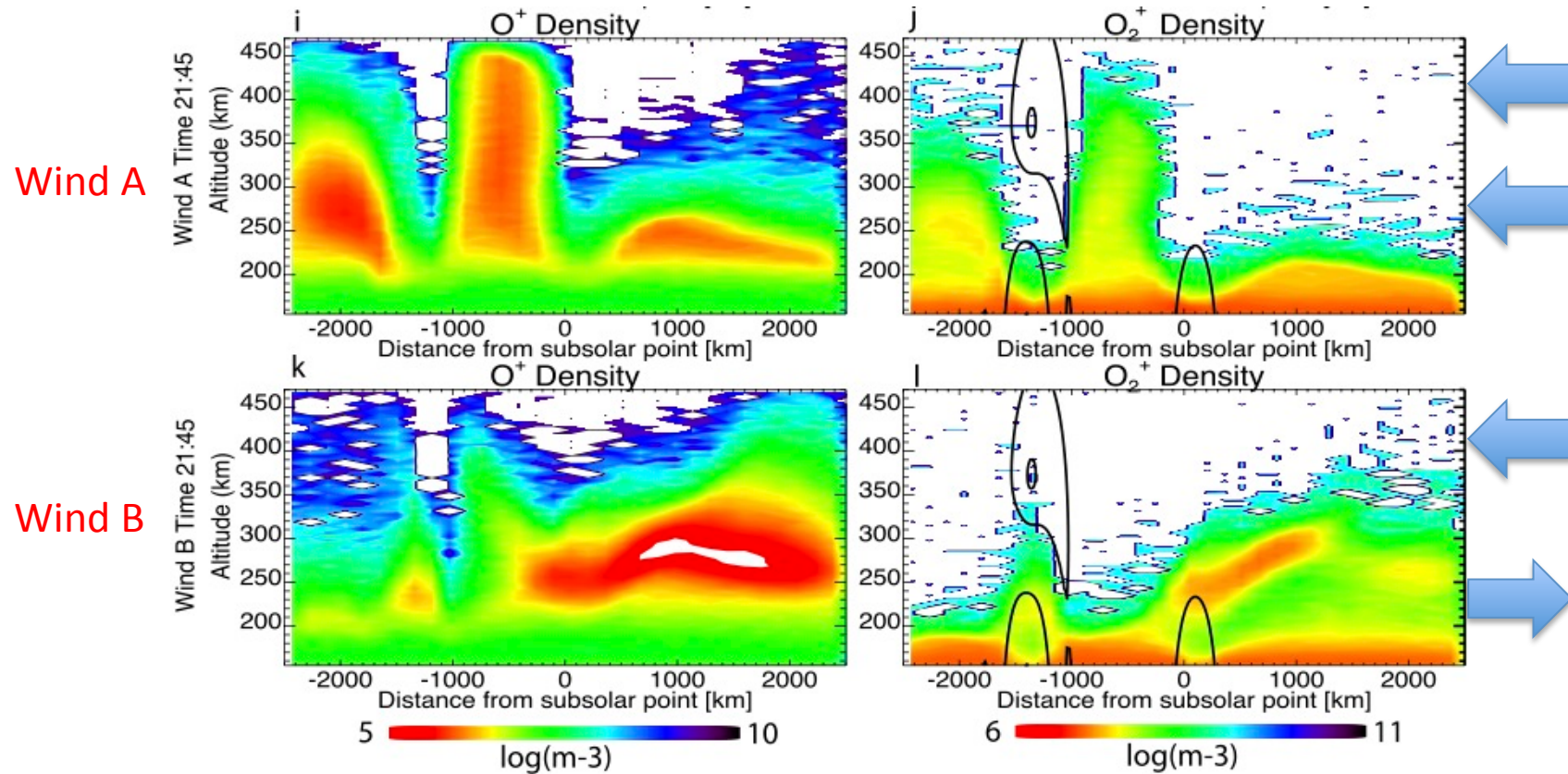
Simulation results



- 地殻磁場の影響
- 地殻磁場は地表と同じ速度で回転させた
- イオンを持ち上げ、加熱時間を長くする効果を期待

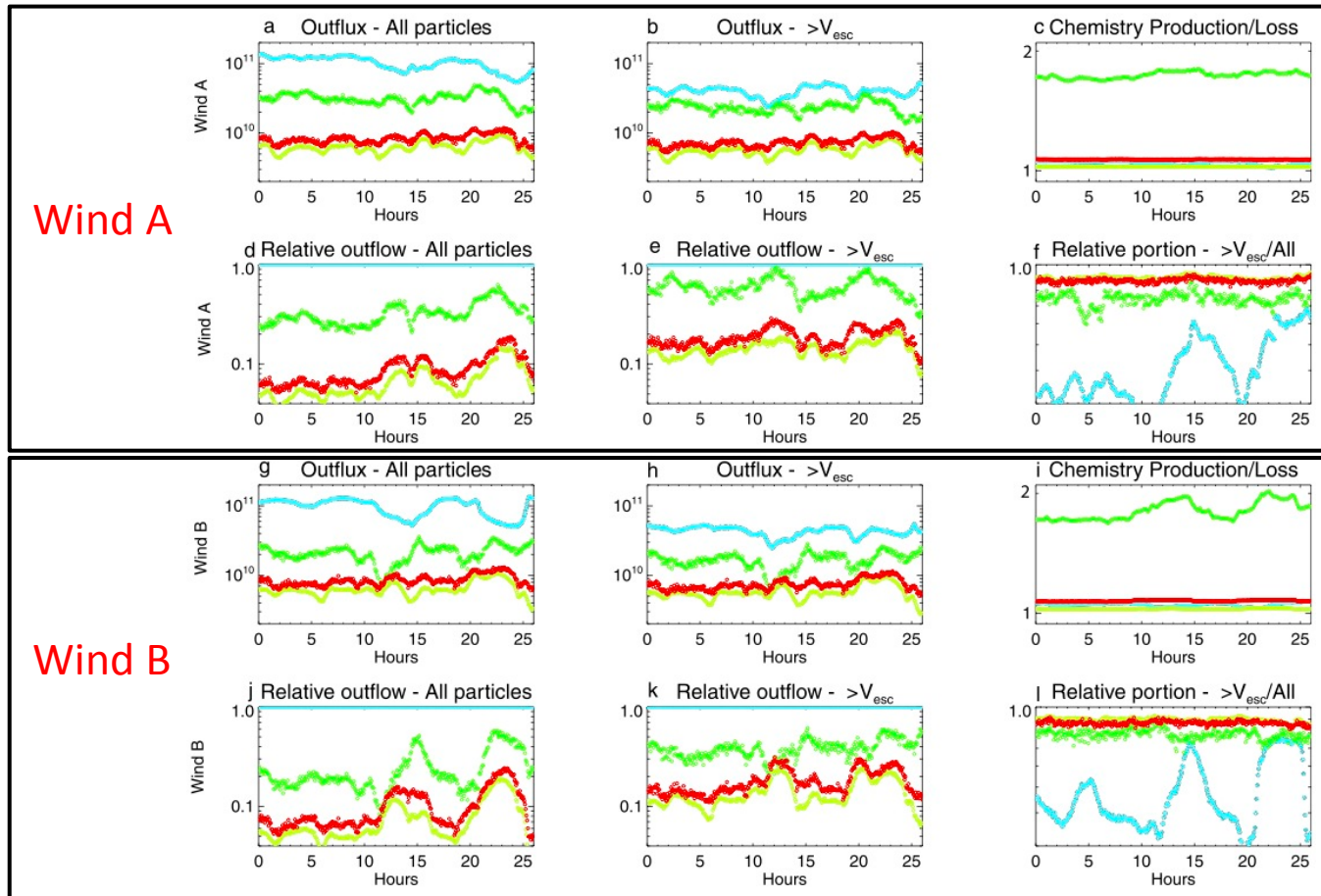


Simulation results



- 地殻磁場の影響(その2)
- 逆向きのtwo dipolesが通過

Simulation results



水色: O^+
 緑色: O_2^+
 赤色: CO_2^+
 黄色: N_2^+

a/g: 全流出量
 b/h: 脱出エネルギー以上のイオンの流出量
 c/i: 化学反応によるイオン生成と消失の比
 d/j: a/gを O^+ で規格化したもの
 e/k: b/hを O^+ で規格化したもの
 f/l: 脱出エネルギー以上をもつイオンの比率

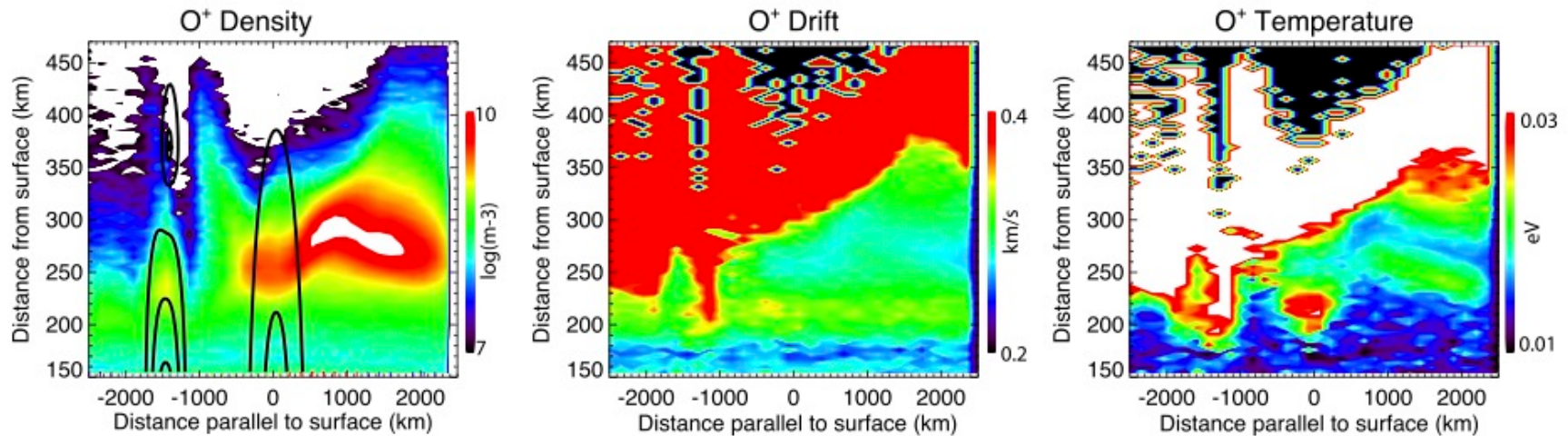
- 地殻磁場の影響:
 - 前ページの図をみると、密度変化は大きかった
 - 流出率等の時間変化(上の図)は、あまり影響を受けない(2-3倍程度の短期の時間変化のみ)
 - 火星自転周期より長い時間スケールでは、地殻磁場の影響は小さいと言える

Simulation results

- 地殻磁場の影響：
 - 流出率は短期的には O_2^+ が最も大きく変化
 - 図c/iの化学反応によるイオン生成と消失の比は、 O^+ , CO_2^+ , N_2^+ では1に近い。一方で、 O_2^+ の比は ~ 2 。→ O_2^+ は宇宙空間へのロスが重要。
 - しかし O_2^+ の補給(光化学生成)はゆっくりなので、流出率が短期的に変化しても、長期的な流出量はあまり変化しない

Simulation results

Wind B



- O^+ の密度、ドリフト速度、温度（白色領域はカラーバーの上限以上）
- 高高度は粒子数が小さいので速度と温度はエラー大
- 低高度では、ドリフト速度は中性大気の色度を反映
- イオン温度は、高度とともに単調増加するとは限らない。密度ピークの下側に温度が高い領域ができることもある

Summary

- 近年、MTGCMを用いたシミュレーションにより、火星熱圏には $\sim 0.5\text{km/s}$ の風が存在することが示唆された
- CAPIT codeを用いて、この熱圏風がイオン分布に及ぼす影響を調べたところ、
 - イオン密度・速度分布には影響大
 - イオン流出率にはあまり影響しない
 - 磁場の形状の変化の方が、短期的なイオン流出率変化に影響大
 - トータルのイオン流出量(火星自転周期より長い時間スケールで平均したもの)にはあまり影響しない
- 低高度でのイオンの「その場」観測データの解析には注意が必要
- 外圏底以下でのイオン速度から、中性大気のを推測できる可能性を示唆