

Bougher et al., Early MAVEN Deep
Dip campaign reveals thermosphere
and ionosphere variability, Science,
350, aad0459, 2015 の紹介

寺田直樹(東北大)
火星勉強会拡大版
2015年12月23日

要約

- 2回目のDeep Dip campaign
 - 太陽直下領域で高度~130kmの低高度域まで計測
 - 均質圏界面(130km付近)の直上。大気が拡散分離し、太陽極端紫外加熱のピークが位置する、大気散逸の貯蔵(reservoir)領域
 - 火星熱圏と電離圏の組成・構造・変動を包括的に計測
- 本計測によって明らかになったこと:
 - 中性大気と電離大気の予想を超えた変動(軌道間の変動、及び各軌道内の変動)

導入

- Reservoir領域の理解の重要性
 - 現在の大气散逸率は、MAVEN計測により制約可能
 - 過去への演繹の信頼性を上げるためには、reservoir領域における物理・化学過程とその変動(日変化、季節変化、太陽周期変化など)の理解が必須
- MAVEN's Deep Dip campaigns:
 - 各キャンペーン(1週間程度)で、通常は~150-170kmの近火点高度を~120-135 kmに下ろす
 - 軌道上で中性大气、熱的イオンと電子、磁場、超熱的イオンと電子を計測
 - 近火点位置は移動するので、ミッションを通して幅広い緯度・地方時をカバーする計画

軌道

- 2回目のDeep Dip campaign (DD2)
 - 2015年4月17-22日
 - 地方時は12-13時、赤道近傍(図1)、 $L_s \sim 327-330$ (北半球が冬~春)
- DD2の内、特に2軌道(O1085とO1086, 2015年4月22日)を紹介
 - O1085(奇数軌道)は、熱的イオン(NGIMS)とプラズマ場(MAG, SWEA, SWIA, LPW)の計測に焦点
 - O1086(偶数軌道)は、中性大気と温度(NGIMS)の計測に焦点
 - 近火点近傍に中程度の地殻起源磁場
 - 太陽風コンディションは通常

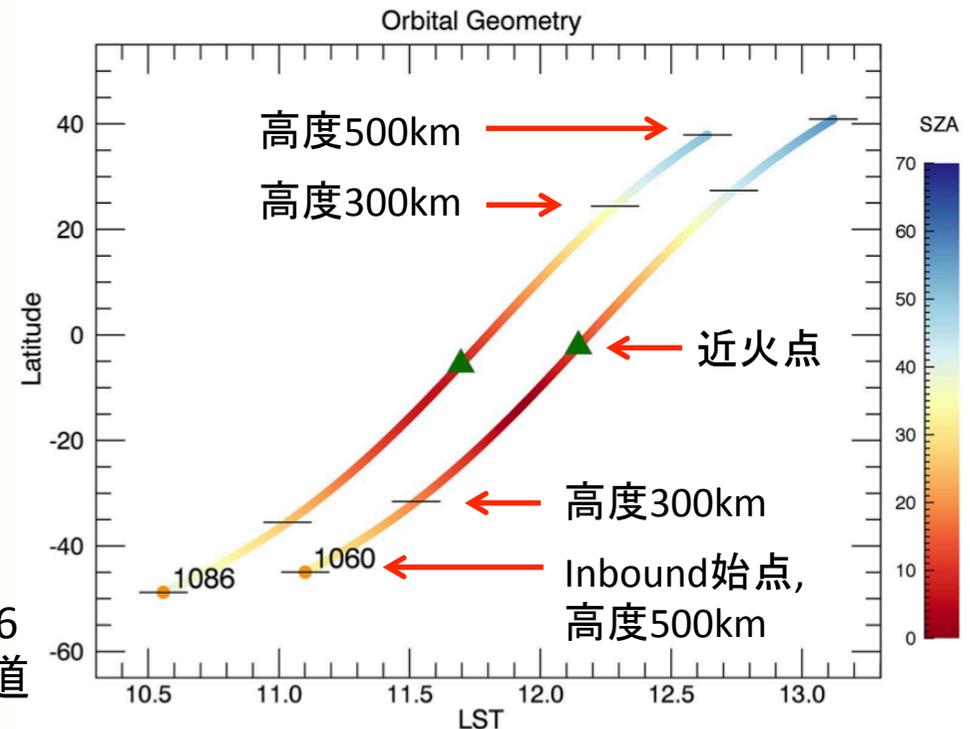


図1. DD2(O1060開始, O1086終了)におけるMAVENの軌道

中性大気の組成と温度の計測

- 過去の火星熱圏組成の直接計測は、1970年代のViking Landers 1, 2によるもののみ
- MAVEN / NGIMS [cf. Mahaffy et al., 2014]
 - 主要成分 (He, N, O, CO, N₂, O₂, NO, Ar, CO₂等) を~5km鉛直分解能、<25%精度で計測
 - 温度はスケールハイトから導出
 - 垂直変化と水平変化は数値モデルを用いないと切り分けられない
- 鍵となる成分 (CO₂, Ar, N₂, O) のinbound時の高度分布 (図2)
 - 火星電離圏-熱圏モデル (M-GITM) との比較
 - CO₂は高度160-220 kmで良く一致。130 kmでモデルは2倍ほど過小評価
 - Oは MEX / SPICAM の光学観測 [Chaufray et al., 2009] と高度200 kmで5倍ほどの差 (季節、太陽活動度の差?)

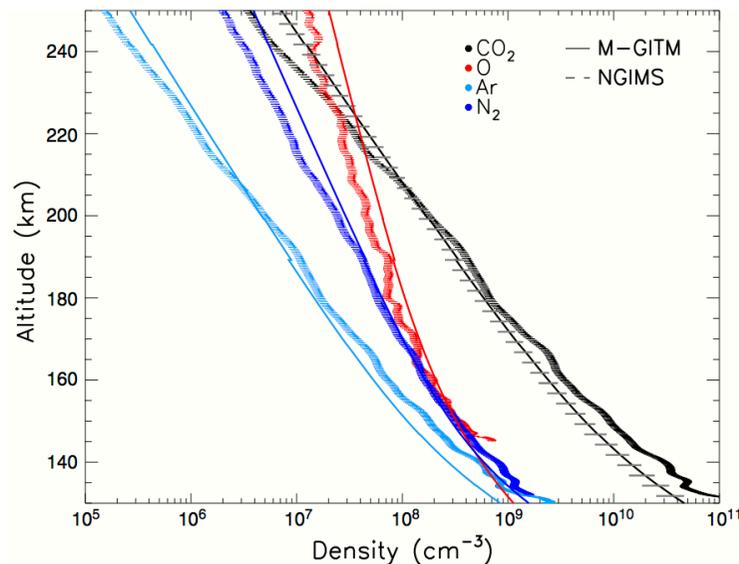


図2. NGIMS (O1086計測値の多項式を用いた20秒時間平均)とM-GITMの比較。M-GITMのCO₂の横線は、日変化の標準偏差を示す。

中性大気の組成と温度の計測

- $O/CO_2=1$ となるのは高度~225 km
 - O/CO_2 比は、 CO_2 の光解離、熱圏循環・ O の輸送を反映
 - O/CO_2 比は、 O_2^+/CO_2^+ 比、hot O 散逸等を計算する際に重要
 - 観測とモデルは良く一致
- N_2/CO_2 比より、“ N_2 均質圏界面高度”は~130 km
- M-GITMの N_2/CO_2 比による“ N_2 均質圏界面高度”は~120 km
 - 渦拡散係数の改良の必要性を示唆
 - 注: 分子種ごとに分子拡散係数・均質圏界面高度は異なる

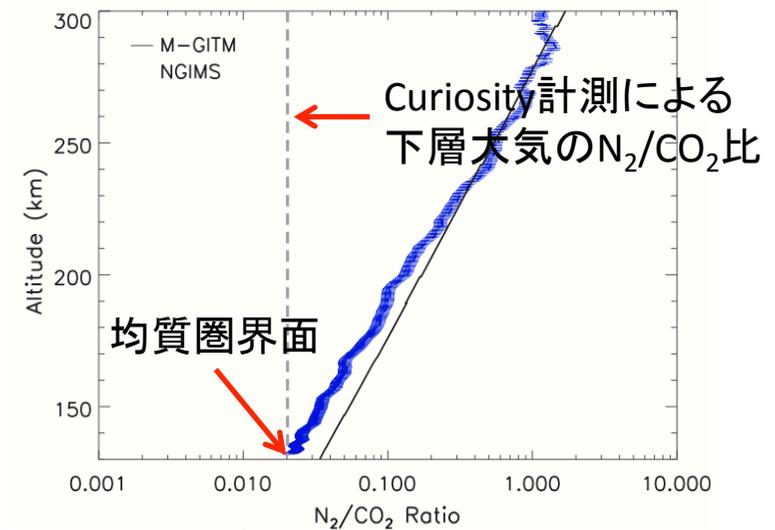
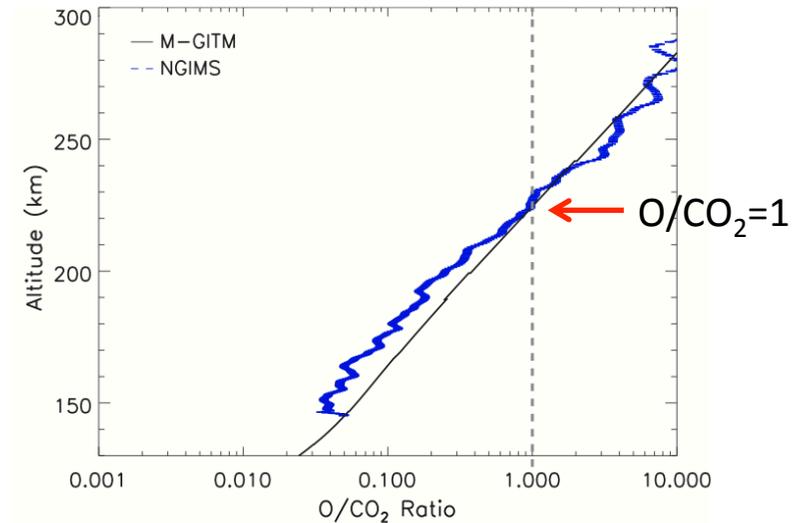
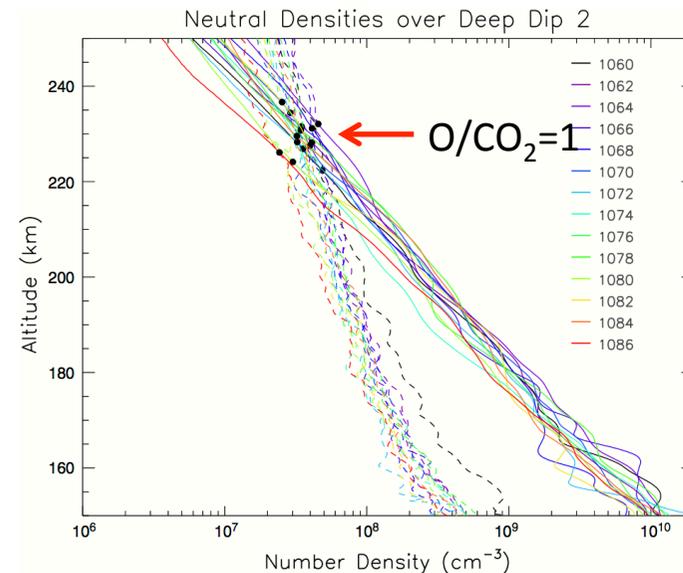
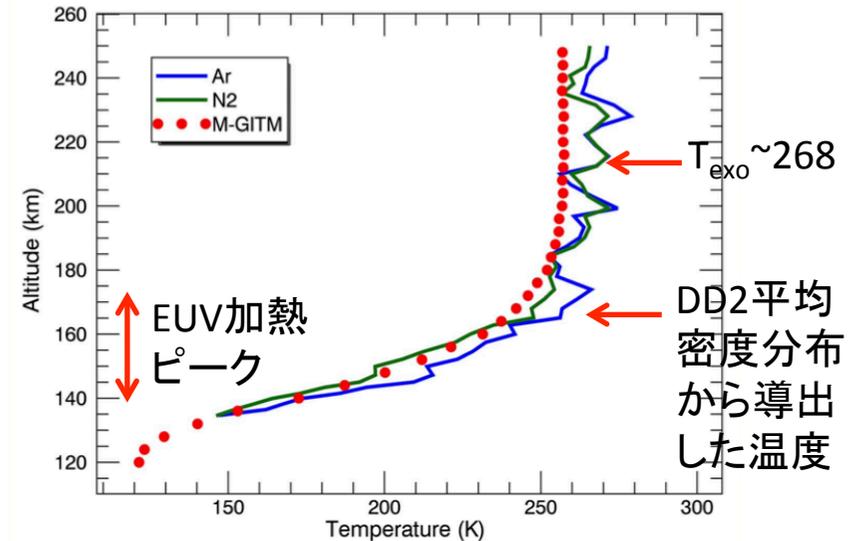


図3. NGIMS (O1086) とM-GITMによる中性大気密度比の高度分布

中性大気の組成と温度の計測

- 温度の高度分布も観測とモデルは良く一致(図4)
 - M-GITMは太陽EUVによる外圏温度を良く再現
 - ただし、M-GITMは軌道ごとの変動(1 σ は19 K: $T_{\text{exo}} \sim 268 \pm 19$ K)を捉えられない
- 軌道ごとの変動(図5)
 - 高度200 kmで、O密度は2倍程度、CO₂密度は2.7倍程度変動
- 軌道ごとの変動は、下層大気からの重力波の影響かもしれない [Medvedev et al., 2011, 2012]



(上) 図4. DD2平均温度とM-GITMによる温度
(下) 図5. DD2各軌道におけるO, CO₂密度

電離大気と磁場の計測

- O1085におけるイオン密度とプラズマ計測(図7)
 - NGIMS 熱的イオン密度
 - MAG 水平磁場
 - LPW 電子温度
 - SWEA 超熱的電子フラックス
 - SWIA 超熱的イオン密度
 - Multifluid MHDモデルは良く一致。ただし、 O^+ 密度と CO_2^+ 低高度ピークは不一致。
(* M-GITMはイオンは光化学平衡密度のみ計算している)
- 1軌道の中に大きく時空間変動
 - 高度200 kmより上側は輸送支配・下側は光化学支配
 - L1, L2で熱的イオン密度変動、局所電流(磁場不連続)、光電子増加(主に CO_2 の電離で生成)、電子温度減少
 - 幅~5-10 kmの薄い境界層
 - 誘導磁気圏磁場と地殻起源磁場の境界を示唆
 - CO_2^+ ピークは O_2^+ ピークより上側に形成
 - 電離圏内で~1 keVプロトンの下向きフラックス
 - 太陽EUVに加えて、超高層の熱源に
 - 太陽風フラックスの推定も可能となる
 - 外圏底下まで~10-20 keVイオン(恐らく O^+)の降込み

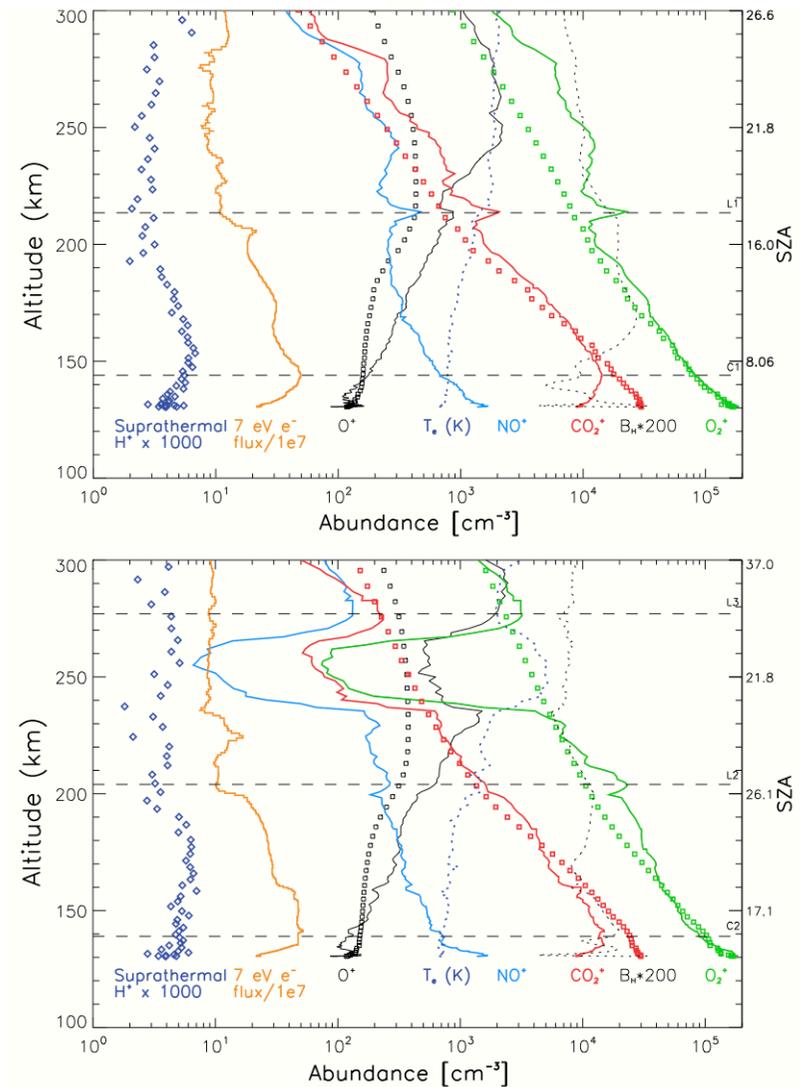


図7. O1085におけるNGIMSイオン密度とプラズマ計測。四角はmultifluid MHDモデル

まとめ

- 中性大気の密度と温度の計測
 - 熱圏密度と温度は軌道ごとに変動。潮汐や重力波などによって駆動される。
 - 太陽EUV放射に駆動される火星外圏の平均的な温度は、M-GITMで再現。しかし太陽EUV放射は、軌道ごとの変動を説明できない。
- 電離大気と磁場の計測
 - 電離大気も1軌道の内に大きく時空間変動。
 - 地殻起源磁場は電離圏構造に影響を及ぼし、電流を運ぶ薄いプラズマ境界層を形成する。