

### 1-3 Mars Upper atmospheric observation by using MAVEN/IUVS and ground-based telescopes (MAVEN/IUVS と地上観測連携による火星中層大気観測)

<sup>1</sup> 中川広務, <sup>2</sup>A.S. Medvedev, <sup>1,3</sup> 黒田剛史, <sup>2</sup>E. Yigit, <sup>1</sup> 寺田直樹, <sup>1</sup> 寺田香織, <sup>4</sup> 藤原均, <sup>2</sup>C. Mockel, <sup>2</sup>P. Hartogh, <sup>5</sup> 関華奈子, <sup>6</sup>H. Gröller, <sup>6</sup>R.V. Yelle, <sup>7</sup>F. Montmessin, <sup>8</sup>N.M. Schneider, <sup>8</sup>J.I. Deighan, <sup>8</sup>S. Jain, <sup>8</sup>B. Jakosky, <sup>9</sup> 青木翔平, <sup>10</sup> 佐川英夫, <sup>1</sup> 笠羽康正

[1]東北大学, [2]Max Planck Institute, Germany, [3]情報通信研究機構, [4]成蹊大学, [5]東京大学, [6]University of Arizona, USA, [7]LATMOS, France, [8]University of Colorado, USA, [9]IASB, Belgium, [10]京都産業大学

#### 1. 序論

近年, Mars Express(MEX)探査機によって予想をはるかに上回る大量の重イオン( $\text{CO}_2^+$ ,  $\text{O}_2^+$ )が高度 300km(外圏底)で観測されたのは大気散逸の観点において重要な発見である[Carlsson *et al.*, 2006]. 特に重イオンの源となる  $\text{CO}_2$  を高高度に輸送する過程が未解明であり, 現況数値シミュレーションでは再現できない. 輸送過程に重要な役割を担う候補は, 下層大気で励起された小規模重力波である. 地球大気同様火星大気中においても重力波が超高層大気において重要な役割を担うことは, 理論面から先行研究によって示唆されている[Yigit and Medvedev, 2015]. また, 観測面においても電波掩蔽観測および飛翔体エアロブレーキング等により下層大気および超高層大気中で小規模波状構造が確認されている[Creay *et al.*, 2006a, 2006b]. しかし, 下層と上層の波状構造の対応関係や重力波の上方伝搬過程は不透明で, 特に上層で観測されている波状構造が下層の地形等と対応していないなど未解明な点が多い. これらをつなぐ中層大気は MEX 搭載 SPICAM によって近年, 平均的な温度・密度構造が明らかになってきた[Montmessin *et al.*, 2006]が, 小規模擾乱に着目した研究はなされてこなかった. 本研究では, 2014 年 10 月から観測を開始した最新の MAVEN 探査機搭載 IUVS データを用いて, 中層大気中の小規模波状構造の特徴を明らかにするとともに, 連携して展開している地上観測による中層大気観測について紹介する. これらを通して, 重力波が超高層大気および大気散逸に及ぼす影響の解明に貢献する.

#### 2. MAVEN/IUVS 星掩蔽観測

MAVEN 搭載 IUVS は, FUV(110-190nm)・MUV(170-350nm)の 2 つのチャンネルからなる紫外分光器で, 星掩蔽観測によって高度 30km から 150km までの物

理量を導出することができる。本研究では、IUVS によって得られた星掩蔽観測データのうち、2015 年 8 月 1-2 日の 2 日間に実施されたキャンペーン観測 3 で得られた CO<sub>2</sub> 密度・温度プロファイルを解析した。特に、観測された 30 プロファイルのうち、高度 100-130km において高度分解能 5km 以下を達成し、密度擾乱と温度擾乱に反相関関係がみられる 17 プロファイルを採用した。本研究で用いた MAVEN/IUVS データ(Level-2, version-6, revision-1)は、Planetary Data System (PDS)から取得することができる。得られた CO<sub>2</sub> 密度・温度プロファイルの例を図 1 に示した。擾乱成分を取り出すために高度 100-130km に対して 4 次の多項式フィットを行い、平均場との切り分けを行った。密度・温度擾乱成分には、鉛直波長約 10-20km に相当する波状構造がみられ、その振幅はそれぞれ約 20%, 10%(~13K)に及ぶ。これは *Creasey et al. (2006)* で得られた下部熱圏における重力波密度擾乱 3-30%と整合的であり、一方で、地球中層大気で観測されている重力波密度擾乱 10%に比べて大きい。

### 3. 結果

波のエネルギー  $E_p$  を上記温度の擾乱成分から以下の式で算出した。

$$E_p = \frac{1}{2} \left( \frac{g}{N} \right)^2 \left( \frac{T'}{\bar{T}} \right)^2$$

ここで重力加速度  $g$ , ブラントバイサラ振動数  $N$ , 温度平均成分  $\bar{T}$ , 温度擾乱  $T'$  とした。高度 100-130km において平均し、全球分布を調べた結果を図 2 に示した。2015 年 8 月 1-2 日に得られたキャンペーン#3 は、データ数は少ないものの全経度・緯度 60S~40N をカバーしている(地方時は 19 時から 5 時に分布)。これから、波の活動度が全球的に一樣ではないことがわかる。中緯度の方が低緯度よりも活動度が高いことが特筆すべき点である。地形や対流によって重力波が励起されその活動度の極大が赤道付近にみられる下層大気の様相とは異なる。

### 4. 議論

得られた結果を解釈するために、高分解能の火星大気大循環モデル(high-res. MGCM)による数値シミュレーションを実施し、下層で励起された重力波がどのように上層大気に伝搬するかを調べた。モデルの詳細は *Kuroda et al. (2015, 2016)* を参照していただきたいが、モデル中では水平方向に 1.1°×1.1°(60km グリッドサイズ), 鉛直方向には地表面から高度 80-100km までを 49 層に分解し、小規模重力波の励起・伝搬・減衰をパラメタリゼーション無しに解くことができる。図 3 は、高分解能モデルによって得られた重力波の  $E_p$  緯度経度分布である。

(水平波数 60~106, 水平波長 200~350km に相当する成分のみ抽出). 圧力が 260Pa と 0.1Pa の 2 つの高度(それぞれ約 10km, 約 80km に相当)について示した. 観測に対応するように季節  $L_s = 20$  による計算結果である. 高度 10km の下層大気においては,  $E_p$  は赤道帯の山岳地域で増大している. これは対流によって励起されていると示唆した *Creasey et al. (2006a)* の観測結果と合致する. 一方, 中層大気 80km において, エネルギーの極大は中緯度・高緯度に存在する. 赤道帯においてもはや極大がないことが特徴的である. これは地形起源の小規模重力波が上方伝搬中で減衰を起こすという地球大気における観測・数値計算実験と合致し, 背景風速場によるフィルタリング効果によって理解することができる. 一方で, 中高緯度で発生した東西ジェットは位相向きによってはフィルタリング効果を受けずに上層まで伝搬できることが計算結果から明らかになった. その結果, 中層大気 80km では波のエネルギーのピークが中高緯度に移動したと理解することができる.

上述した高分解能モデルは上限が 80km であるため MAVEN 観測と直接的に比較することができない. そのため本研究では地表面から高度 150-170km まで解くことができるマックスプランク研究所火星大気大循環モデル MPI-MGCM によって補完する. モデルの詳細は例えば *Medvedev et al. (2011)* に記述がある. 高度方向に 67 層, 水平方向に  $64 \times 32$  グリッドに分解し, サブグリッドスケールの重力波をパラメタリゼーションによって与えている (*Yigit et al., 2008*). 図 4 に計算で得られた重力波によって生じた温度擾乱の経度平均を示した. **a** が high-res. MGCM の計算結果であり, **b** が MPI-MGCM の計算結果である. まず, 高度 80km 以下において二つの計算結果がよい合致を示していることがわかる. 次に, 重力波の活動が下部熱圏にまで到達しており緯度方向の非一様性もみられていることがわかる. 得られた温度擾乱も観測されたものに近く, 高度 120km より上空では 17K におよぶ擾乱がみられる.

## 5. 結論

本研究は, MAVEN/IUVS が下部熱圏で観測した温度波状擾乱が, 下層で励起された小規模重力波が上方伝搬して生じたものである可能性を示唆した. 今後観測データが増えることで検証を進める必要があるが, 得られた全球分布は地球下部熱圏のものとおおよそ類似しており, 重力波の上方伝搬過程は地球においても火星においても同じように理解することができる. 火星において上部熱圏まで重力波が到達しうるのか・大気散逸に影響を及ぼしうるのかは重要な課題で

あるが、その場観測 NGIMS により上部熱圏における波状構造の特徴が明らかになりつつある[England et al., 2016]. 外圏底高度約 200km において、大振幅(20-35%)の波状擾乱が全球的に一様に観測されているのは非常に興味深い(背景温度場で規格化した場合) [Terada et al., submitted].

## 6. 地上連携観測

火星において小規模重力波の上方伝搬には背景風速場が重要な役割を担うことが示唆された. しかし、火星上層における中性大気風速場の観測事例は非常に稀で理解が進んでいない. 我々は、地上観測を連携実施して火星上層における中性大気風速場を明らかにすることで、モデルの更なる制約・現実的な重力波伝搬の理解に役立てることを目指している. 本研究では、アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 ALMA によって 2014 年 5 月( $L_s = 124$ )に得られた火星 CO スペクトルを示した(PI:Aoki). このとき火星視直径 14"に対して空間分解能 0.6"を達成しており火星ディスクを 23 分割、およそ 300km を達成できる. 高い分解能で高度中層大気の風速分布を導出できると期待でき、現在解析中である. また、自身で開発した波長分解能 100 万を超える中間赤外レーザヘテロダイン分光器を用いると、10 ミクロン帯において CO<sub>2</sub> non-LTE emission を観測することができ、単一の emission line のドップラーシフトから直接的に高度 75km の風速を 10m/s の精度で導出することができる[Nakagawa et al., 2016]. これらを飛翔体実験と連携することで、大気の上下結合の理解に努めたい.

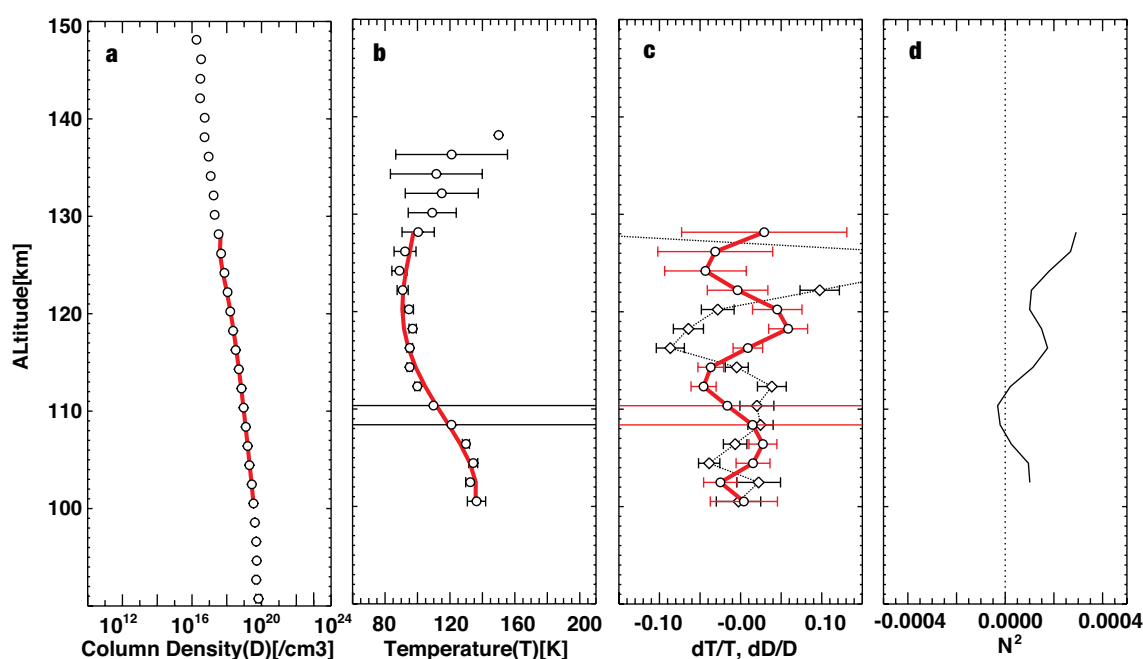


図 1. IUVS で観測された **a**  $\text{CO}_2$  密度分布, **b** 温度分布, **c** 擾乱成分, **d** ブラント・バ  
イサラ振動数の一例(2015 年 8 月 2 日 10:11UT,  $(-67.3^\circ, 23.8^\circ)$ , 太陽天頂角  $142^\circ$ 、  
地方時 1.1hr). **a b** における赤実線は多項式フィッティング.

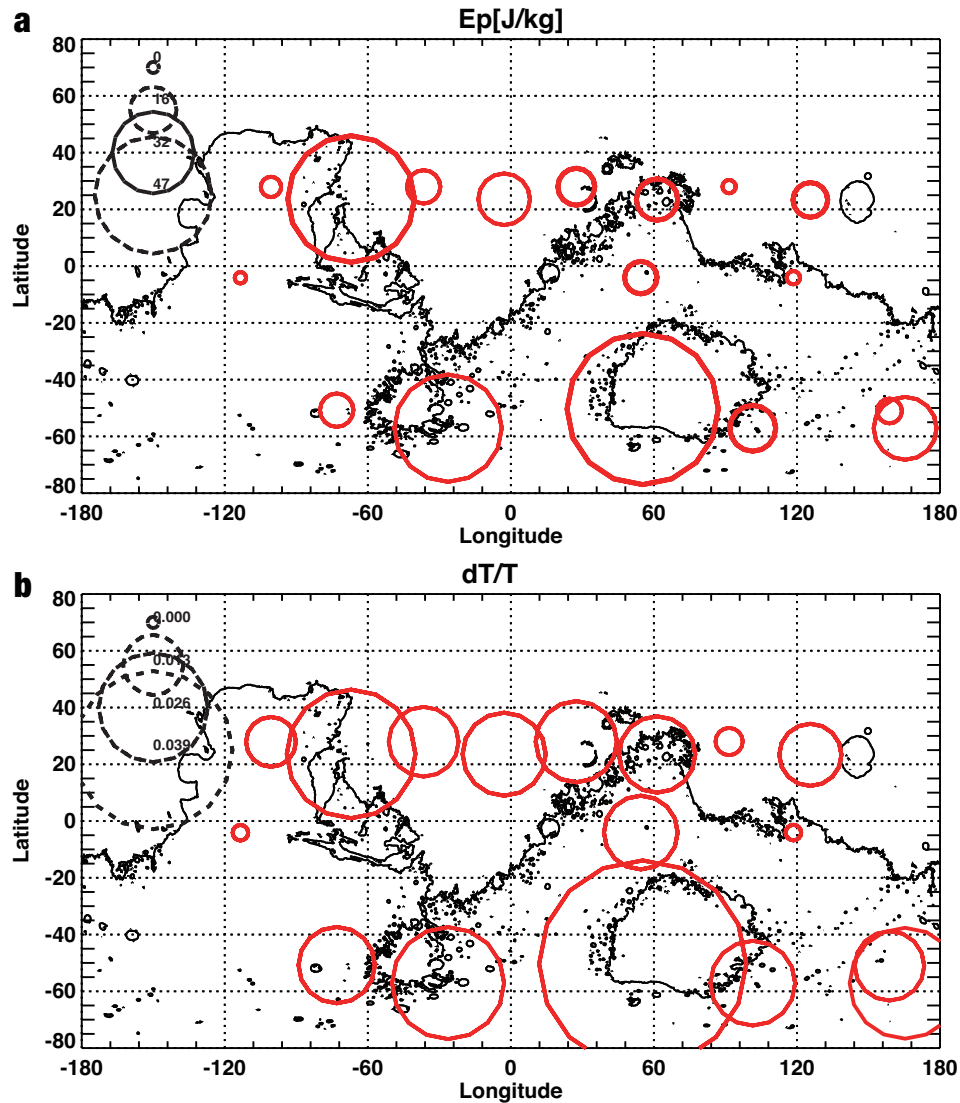


図 2. 規格化した温度擾乱成分の振幅(**b**)と, そこから得られた波のポテンシャルエネルギー $E_p$  (**a**). 2015 年 8 月 1-2 日に得られた 100-130km 高度の温度擾乱振幅平均値を赤丸の大きさで示した. 大きさの指標は左上に示してある.

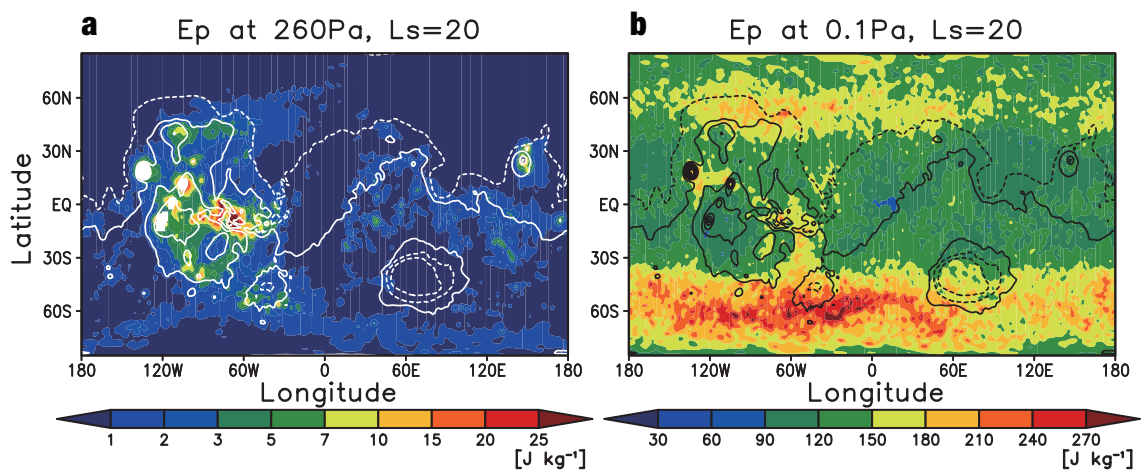


図 3. 高分解能 MGCM で計算された  $E_p$  緯度経度分布( $L_s=20$ ). 波数が 60~106 に相当する波成分のみを抽出. 高度約 10km(**a**), 80km(**b**)を示した. 5-sol を平均した計算結果.

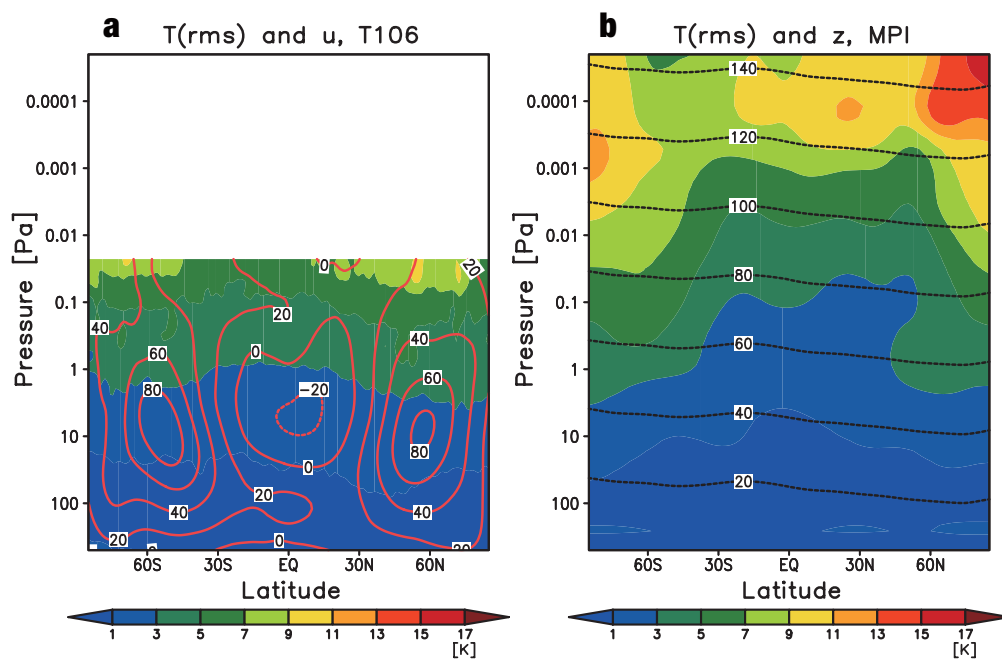


図 4. 高分解能 MGCM(**a**)と MPI-MGCM(**b**)で計算された温度擾乱緯度高度分布. 赤実線は東西平均した風速場. 黒線はおよその高度を示す.

## A. 参考文献

- Carlsson et al., Mass composition of the escaping plasma at Mars, *Icarus*, 182, 320, 2006.
- Creasey et al., Global and seasonal distribution of gravity wave activity in Mars' lower atmosphere derived from MGS radio occultation data, *GRL*, 33, L01803, doi:10.1029/2005GL024037, 2006a.
- Creasey et al., Density variability at scales typical of gravity waves observed in Mars' thermosphere by the MGS accelerometer, *GRL*, 33, L22814, doi:10.1029/GL027583, 2006b.
- England et al., MAVEN NGISM observations of atmospheric gravity waves in the Martian thermosphere, *JGR*, accepted.
- Kuroda et al., A global view of gravity waves in the Martian atmosphere inferred from a high-resolution general circulation model, *GRL*, 42, doi:10.1002/2015GL066332, 2015.
- Kuroda et al., Global distribution of gravity wave sources and fields in the Martian atmosphere during equinox and solstice inferred from a high-resolution general circulation model, *J. Atmos. Sci.*, 73, 4895, doi:10.1175/JAS-D-16-0142.1, 2016.
- Medvedev et al., Influence of gravity waves on the Martian atmosphere: general circulation modeling, *JGR*, 116, E10004, doi:10.1029/2011JE003848, 2011.
- Montmessin et al., Stellar occultations at UV wavelengths by the SPICAM instrument: Retrieval and analysis of Martian haze profiles, *JGR*, 111, E09S09, doi:10.1029/2005JE002662, 2006.
- Nakagawa et al., IR heterodyne spectrometer MILAHI for continuous monitoring observatory of Martian and Venusian atmospheres at Mt.Haleakala, Hawaii, *PSS*, 126, 34, 2016.
- Yigit et al., Parameterization of the effects of vertically propagating gravity waves for thermosphere general circulation models: Sensitivity study, *JGR*, 113, D19106, doi:10.1029/2008JD011132, 2008.
- Yigit and Medvedev, Internal wave coupling processes in Earth's atmosphere, *ASR*, 55, 983, doi:10.1016/j.asr.2014.11.020, 2015.