

レビュー:

High-altitude gravity waves in the Martian thermosphere observed by MAVEN/NGIMS and modeled by a gravity wave scheme

Erdal Yiğit, Scott L. England,
Guiping Liu, et al.
(including A.S. Medvedev and
T. Kuroda)

GRL 42, 8993-9000
doi:10.1002/2015GL065307

黒田剛史(東北大学)



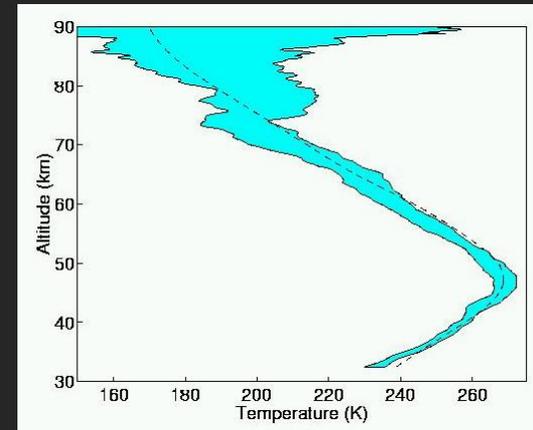
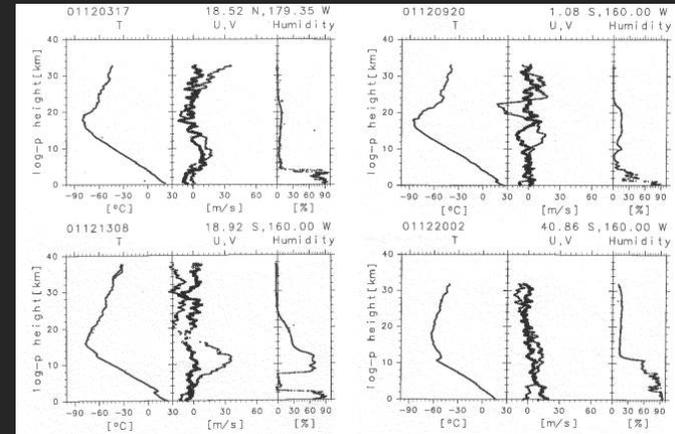
概要

- NGIMSが重力波によるCO₂の密度擾乱を初めて検出した
- Yiğit et al. (2008)の重力波抵抗パラメタリゼーションとMars Climate Database (LMDモデル)を用いた検証も併せて掲載
- 密度擾乱は高度180~220kmで20~40%、かなりのローカルタイム・緯度・高度変化がある
- 観測結果のモデル検証によると、重力波は下層大気から直接熱圏へ伝播し、力学過程にかなりの影響を及ぼしてから熱圏で観測と同等の密度擾乱を及ぼす
- モデル結果は観測より小さめだが(これについての議論も行っている)、定性的には観測と一致

重力波

小規模、周期1日以下

- 浮力を復元力とする。
- 火星大気は地球同様対流安定で、重力波が存在する。
- 周期は1日以下。
- 地形、対流、流れの力学的不安定などによって生成される。これらはすべて火星にも存在する。
- 波の振幅は上空に伝播するにつれ大きくなり(エネルギー保存)、振幅が大きくなりすぎたところで砕波する。



Lidar temperature measurements.
From K.Sato, R. Sica

$$\frac{1}{2}\rho_0 u'^2$$

火星の重力波

- その影響を直接観測することはできないが、GCMによる検証では、下層大気で励起され、上層へと伝播、熱圏の大気構造に力学的・熱的に大きな影響を及ぼす (Medvedev+2011, Medvedev&Yigit2012)
- aerobraking観測によると、重力波による密度擾乱は5~50% (Fritts+2006)

NGIMSデータの利用

- 中性CO₂の密度を測る(高度250km以下では全大気の密度とみなしてよい)
- 2014年12月1~23日、78回分の近火点通過時(地表から150~200km)のデータを解析に使用(Level 2データ)
- 観測のLT、緯度の情報は右上図のC,Dの通り

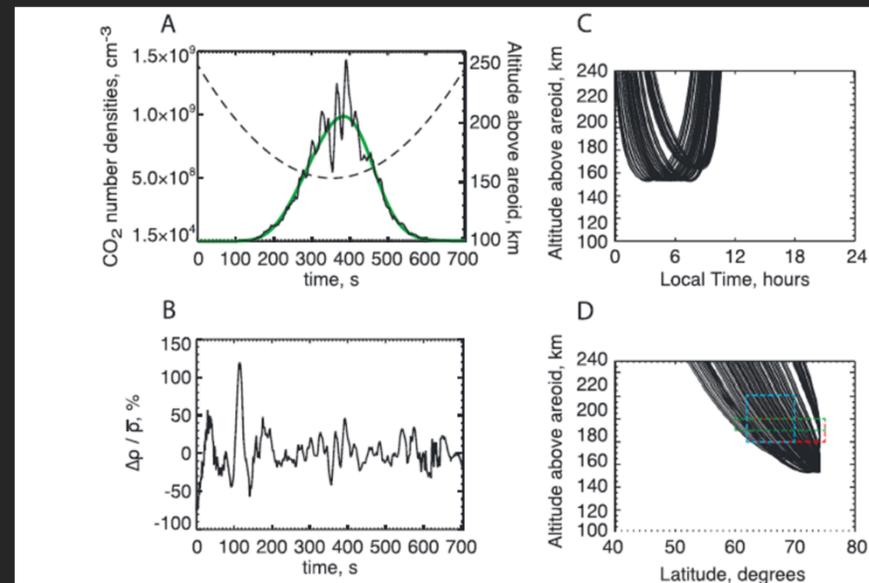


Figure 1. MAVEN orbital details: (a) The black dashed line shows the MAVEN spacecraft altitude as a function of time measured from the point at which the spacecraft passes 250 km altitude relative to the areoid on its inbound pass (18 December 2014, 18:41:04 UT). The solid black line shows the CO₂ number density measured by NGIMS during this periapsis pass. The solid green line shows the least squares fit to the CO₂ number density described in the text; (b) the relative density perturbations during the same periapsis pass shown in Figure 1a; (c and d) the sampling of the NGIMS data as functions of altitude, local time, and latitude, for all the data from December 2014 that are used in this study, where each dot represents a single CO₂ density measurement. The red, blue, and green boxes are described in the text.

NGIMSデータの密度擾乱

- localtime分布: 朝より未明のほうが擾乱が2倍大きい(180~200km高度、北緯62~75度)
- 緯度分布: 北緯60~65度ではそれより北よりも擾乱は小さめ(190~200km高度、北緯60~75度)
- 高度分布: 200km辺りが擾乱のピークでそれより上に行くと小さくなる(180~220km高度、北緯62~70度)
200km以下ではdissipationを振幅の増大が上回るが、それより上ではdissipationの効果を上回る
- 経度方向にははっきりした変化は見られなかった(図なし)

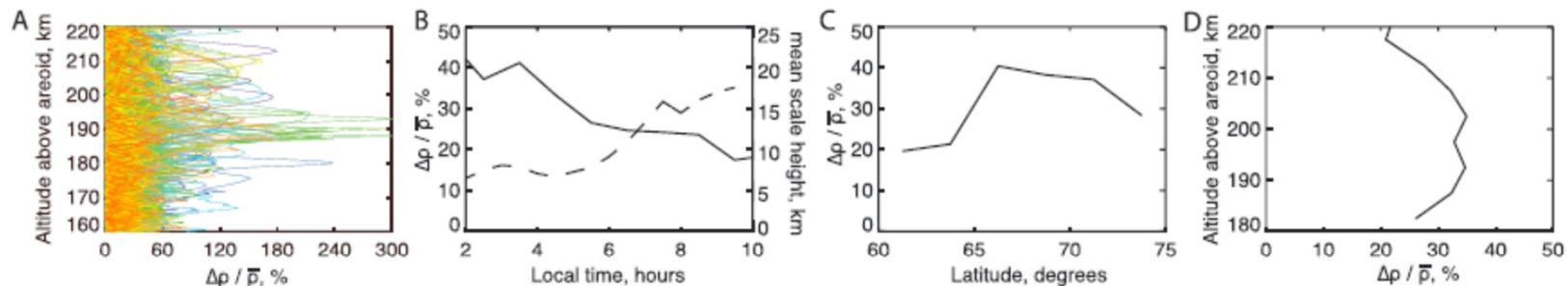
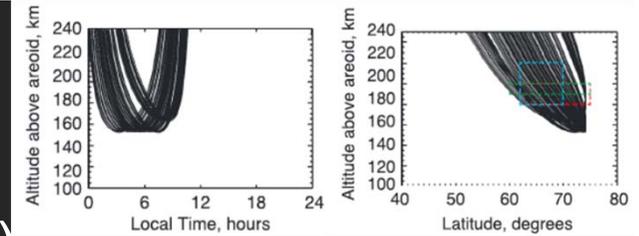


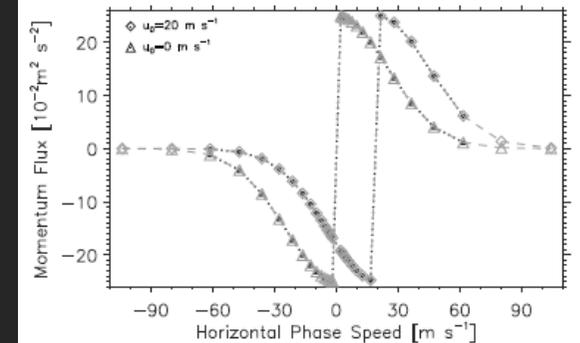
Figure 2. MAVEN observations of gravity wave-induced CO₂ density fluctuations in the upper thermosphere. (a) The relative density perturbations for all 78 profiles each displayed with different colors (both inbound and outbound); (b) the mean value of the absolute relative density perturbation (solid line) and the mean scale height (dashed line) as a function of local time, for within 180–200 km altitude above the areoid and 62°–75°N, from all periapsis passes during December 2014 described in the text. Values are shown in 1 h local time bins; (c) as in Figure 1b, but as a function of latitude, for all data within 190–200 km altitude above the areoid and 60°–75°N. Values are shown in 2.5° latitude bins; (d) as in Figure 1a, but as a function of altitude above the areoid, for all data within 62°–70°. Values are shown in 5 km altitude bins.

重力波抵抗スキーム(Yiğit+2008)を用いた検証

スキームの概要

[Medvedev et al., 2011]

- Mars Odysseyのaerobrakingで観測された温度の緯度分布について、初めてGCMでの再現に成功したスキーム(右下図参照)
- Mars Climate Databaseの大気場を用いて求めた重力波の効果: 重力波は200kmくらいまで伝播、dragのピークは100~160km → 風速への影響も同様
- 風速変動への影響最大350m/s、密度擾乱最大180%(~100km)



$$\overline{u'w'} = \text{sgn}(c_i - \bar{u}_0) \overline{u'w'}_{\max} \exp\left[-(c_i - \bar{u}_0)^2 / c_w^2\right]$$

$$Q_{\text{irr}}^i = c_p^{-1} a_i (c_i - \bar{u}), \quad Q_{\text{dif}}^i = \frac{H}{2\rho R} \frac{\partial}{\partial z} [\rho a_i (c_i - \bar{u})]$$

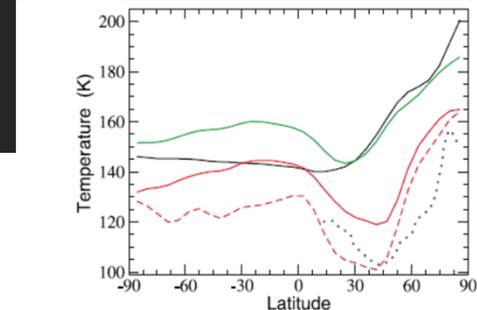


Figure 2. Zonally and diurnally averaged temperatures (solid lines) at $p = 0.0002$ Pa (≈ 120 km) from the runs without GWs (black), with only dynamical effects of GWs (“drag”) included (green), and with both dynamical and thermal effects accounted for (red). The blue dotted line presents the night-time temperature inferred from ODY aerobraking measurements [Bougher et al., 2006]. The red dashed line corresponds to the night-time (near 02:00 hours) temperature from the run including both dynamical and thermal GW effects.

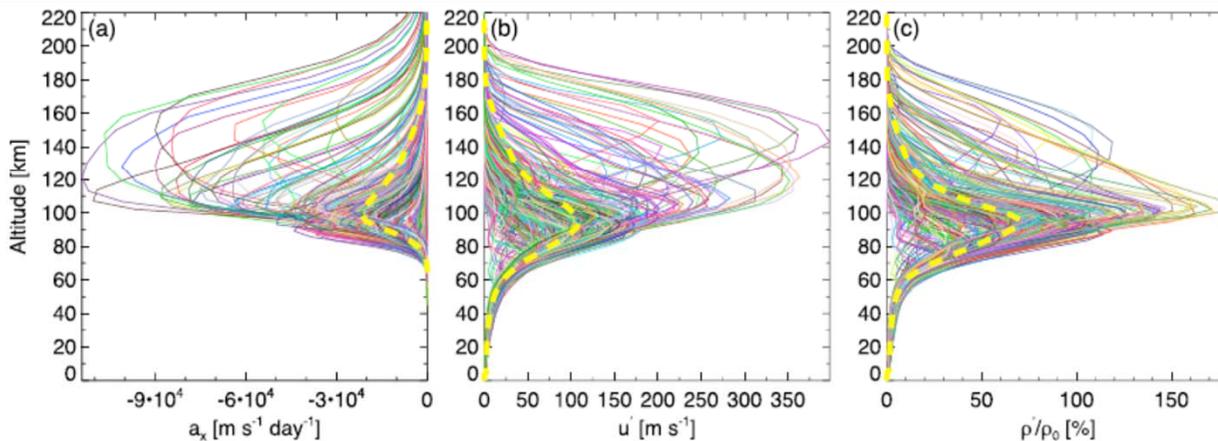


Figure 3. Altitude profiles of gravity wave effects calculated by the extended nonlinear gravity wave scheme of Yiğit et al. [2008] using the Mars Climate Database atmospheric fields as input for the observational conditions of MAVEN. Each profile is shown with a different color: (a) zonal GW drag a_x ($\text{m s}^{-1} \text{sol}^{-1}$) with negative indicating westward drag, (b) RMS wind fluctuations u' (m s^{-1}), and (c) relative density perturbations ρ'/ρ_0 (%). The mean values of each parameter are shown with thick dashed yellow lines.

[↑Medvedev and Yiğit, 2012]

観測とモデルの比較

- 重力波抵抗スキームから示された高度150~200kmの密度擾乱は、NGIMS観測で得られたものに比べてかなり小さい
localtime分布、緯度分布は定性的には部分的に合ってる
- 観測と異なる理由として考えられるもの：
 - 重力波のソースが分かってない
 - 重力波の伝播は背景風速に大きく依存、MCDの風速場は重力波の効果が反映さえていない
 - NGIMSの観測結果が反映しているのは下からの伝播だけではなく、より高い高度や水平的に離れた場所(重力波抵抗スキームでは考慮していない励起源)での励起をおそらく含む
 - infrasound wave (可聴下音波)の効果(重力波よりも上層に伝わりやすく影響を与えやすい)

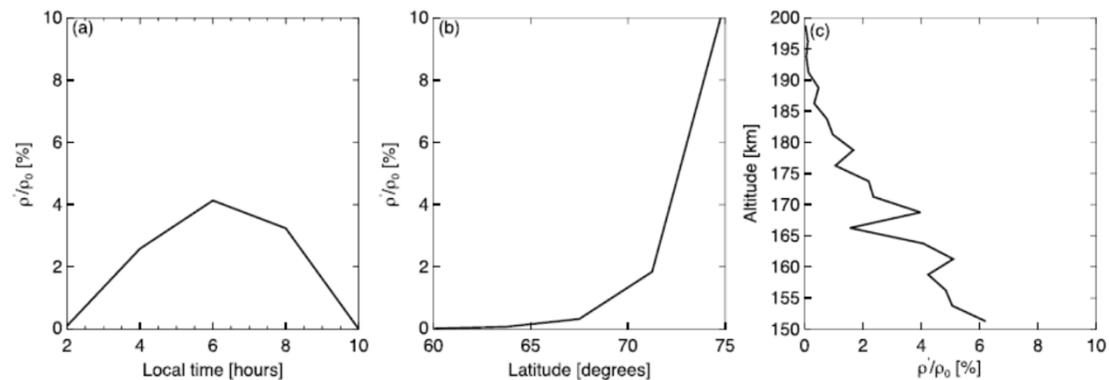


Figure 4. Modeled mean gravity wave-induced relative density perturbations ρ'/ρ_0 (%) that are presented in Figure 3 are binned for data between 150 and 200 km as a function of all (a) local times 2–10 h and (b) latitudes 60°–75°. (c) Altitude variation between 150 and 200 km for all local times and latitudes are shown.

まとめ

- 重力波による高度180~220kmのCO₂の密度擾乱をNGIMSが初めて観測(2014年12月)
- 密度擾乱の振幅は概ね20~30%に及ぶ
- 擾乱のlocaltime・緯度変化は過去の観測(Pioneer Venusなど)で見られた特徴と似ている
- Yiğit et al. (2008)の重力波抵抗パラメタリゼーションとMars Climate Databaseを使用した理論的検証によると、重力波の熱圏への伝播は空間変動が大きく、及ぼす密度擾乱は高度100kmで150%以上、高度150km以上で50~100%
- いずれにせよ、観測では密度擾乱が250km以下のあらゆる高度で見られ、これはこれまで観測で擾乱が確認された高度よりもはるかに高く、理論的検証で重力波がおよび高度よりもはるかに高い
- より詳しい観測が必要