

Thermal effects of internal gravity waves in the Martian upper atmosphere

Medvedev, A. S., and E. Yiğit, 2012, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L05201, doi:10.1029/2012GL050852.

担当者 寺田香織

Abstract

- スペクトルで与えた重力波の力学的・熱的效果をパラメタ化するモデルとGCMモデルを結合した数値シミュレーションによって、中間圏・下部熱圏への重力波の熱的效果を調べた論文である。
- その計算結果は、高度 100 ~ 150 km において、重力波の熱的效果による加熱・冷却が、CO₂近赤外放射加熱・CO₂赤外放射冷却に匹敵する程大きいものであることを示している。
- スペクトル状の重力波の熱的效果を加えることにより、中間圏・熱圏の温度は従来のGCMの結果よりも低くなる。特に冬半球の中緯度から高緯度にかけて45 K も温度が下がる。
 - この冷たい中間圏・熱圏は、SPICAMの掩蔽観測、Mars Odyssey の観測とよく合う。

Introduction | 火星の重力波

- 起伏の激しい地形を流れる地表風、気象の不安定性、雲の対流等によって重力波は励起され、鉛直方向に伝搬し、中間圏・熱圏にまで達する。
- 重力波は上方に伝搬するにつれ、大気密度の減少に伴い振幅が成長する。振幅が大きくなりすぎると重力波は不安定になって崩れ（砕波）、ある高度から上空では振幅が成長しなくなり（飽和）、重力波はエネルギーを失う。
- 電波掩蔽 [Creasey et al., 2006]や加速度計 [Magalhães et al., 1999; Creasey et al., 2006a, 2006b; Fritts et al., 2006] による観測で見積もられた火星の重力波の振幅、運動量輸送量は地球の数倍であり、その飽和と砕波による加速度は数千 $\text{m s}^{-1} \text{ sol}^{-1}$ と推定される[Fritts et al., 2006; Heavens et al., 2010]。

Introduction | 火星GCMにおける重力波の扱い

simplified Lindzen-type breaking criterion

$$|u_i'| \geq |c_i - \bar{u}|$$

u_i' : 水平風速変動, c_i : 水平位相速度, $\bar{u}$: 水平風速

この条件を満たすような高度では、 $d(\theta + \theta') / dz < 0$ (θ : 温位) となり対流不安定が生じ、重力波が砕波される。

この “breaching level” の直上で飽和に達すると仮定し、この高度でその重力波を取り除く。

[cf. Yiğit et al., 2008]

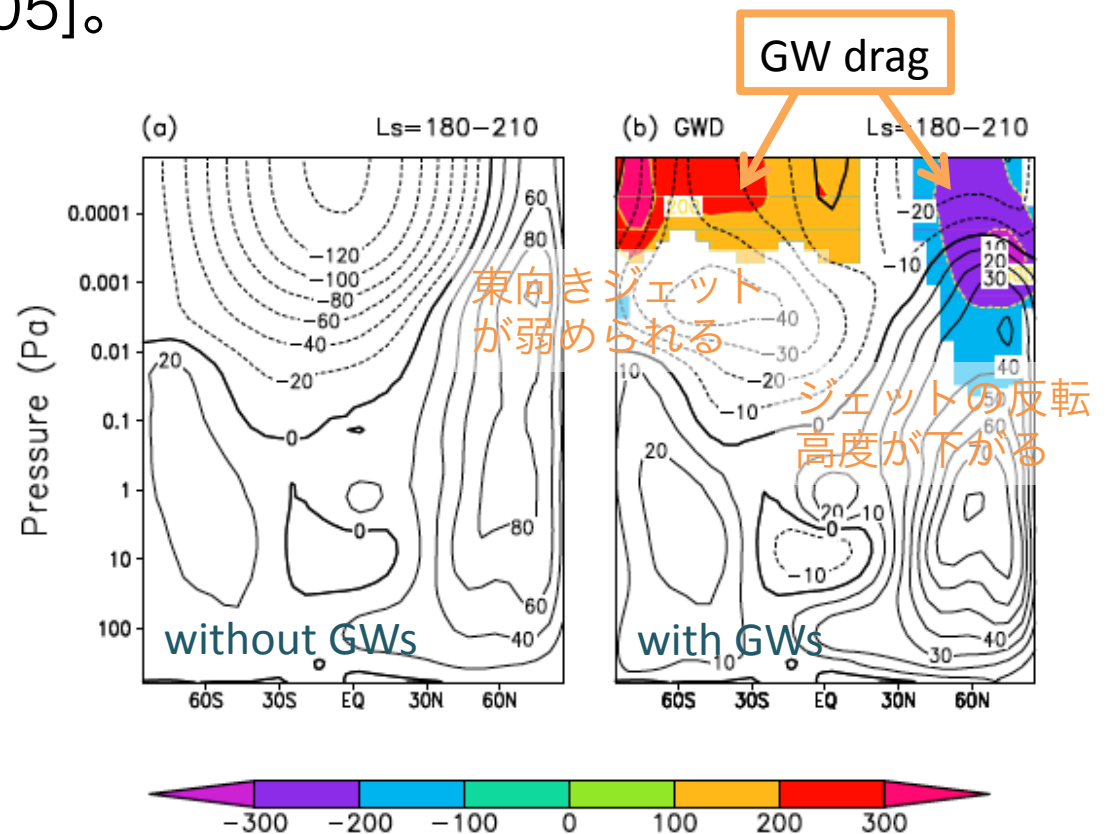
orographic gravity wave (GW) scheme

水平位相速度ゼロの仮定の下、地形によって生じる重力波の高調波を考える。

Introduction | 重力波の力学的効果

Orographic GW scheme の下での数値シミュレーションでは、重力波の中間圏・熱圏への力学的影響は乱流のたかだか 10 % であり、小さいと考えられていた [Hartogh et al., 2005; Angelats i Coll et al., 2005]。

しかし、近年行われた水平位相速度をもつ波も含めたスペクトル状の重力波の下での数値シミュレーションでは、重力波は中間圏・熱圏の子午面循環の形を変える程大きな力学的影響をもっていることが示された [Medvedev et al., 2011]。



Mean zonal wind (contours, in m s^{-1}) and zonal drag (shaded, in $\text{m s}^{-1} \text{ sol}^{-1}$) [Medvedev et al., 2011, figure 3] .

Introduction | 重力波の熱的效果（先行研究と目的）

熱的效果

- ① 重力波から熱へのエネルギー変換
- ② 下向き顕熱フラックスの鉛直勾配

火星の重力波の熱的效果を扱った研究は少ない。

1次元線形モデル [Parish et al., 2009] による計算では、冬至点の高度 135-175 km において、 $70\text{-}300\text{ K sol}^{-1}$ の熱的效果があるという結果が得られた。

地球における重力波の熱的效果は、Yiğit and Medvedev [2009] がスペクトル状の重力波を用いた GCM モデルによる計算を行っており、F 領域において「エネルギー変換による加熱は、ジュール加熱と同程度」、「顕熱フラックスの鉛直勾配による冷却は、分子熱伝導と同程度」であることを示した。

本論文は、Yiğit and Medvedev [2009] の GCM モデルを火星に適用し、**火星における重力波の熱的效果**を調べている。

Model | 重力波の効果のパラメタ化

[cf. Medvedev et al., 2011]

鉛直に伝搬する水平方向の運動量フラックス（単位質量当り）

$$\overline{u'w'_i}(z) = \overline{u'w'_i}(z_0)\rho(z_0)\rho^{-1}(z)\exp\left[-\int_{z_0}^z \sum_d \beta_d^i(z')dz'\right]$$

β : 散逸関数, 添字 i : 波, 添字 d : 散逸過程

GW drag による加速度

$$a_i(z) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho \overline{u'w'_i}(z)}{\partial z} = \sum_d \beta_d^i \overline{u'w'_i}(z)$$

エネルギー変換（波→熱）による熱流束

$$Q_{irr}^i = c_p^{-1} a_i (c_i - \bar{u})$$

顕熱フラックスの鉛直勾配による熱流束

$$Q_{diff}^i = \frac{H}{2\rho R} \frac{\partial}{\partial z} [\rho a_i (c_i - \bar{u})]$$

c_p : 定圧比熱, c_i : 位相速度, R : 気体定数, H : スケールハ⁷イト

Model | 重力波の散逸過程とその散逸関数

① Simplified Lindzen-type breaking criterion (critical level filtering)

対流不安定による碎波と飽和。

$$|u_i'| = \sqrt{\frac{|\overline{u'w'}(z)|N(z)}{k_h|c_i - \bar{u}(z)|}}, \quad k_h: \text{水平波数}, N: \text{ブラント・バイサラ周波数}$$

② Nonlinear saturation

重力波同士の相互作用から励起される不安定による碎波と飽和。

$$\beta_{non}^i = \frac{\sqrt{2\pi}N}{\sigma_i} \exp\left(-\frac{|c_i - \bar{u}|^2}{2\sigma_i^2}\right)$$
$$\sigma_i = \sqrt{\sum_{m_i > m_j} u_j'^2}, \quad m: \text{鉛直水平波数}$$

③ Molecular viscosity and thermal conduction

$$\beta_{mol}^i = \frac{2\nu_{mol}N^3}{k_h|c_i - \bar{u}|^4}$$

$$\nu_{mol} = 3.563 \times 10^{-7} T^{0.69} / \rho : \text{kinetic molecular viscosity} \quad 8$$

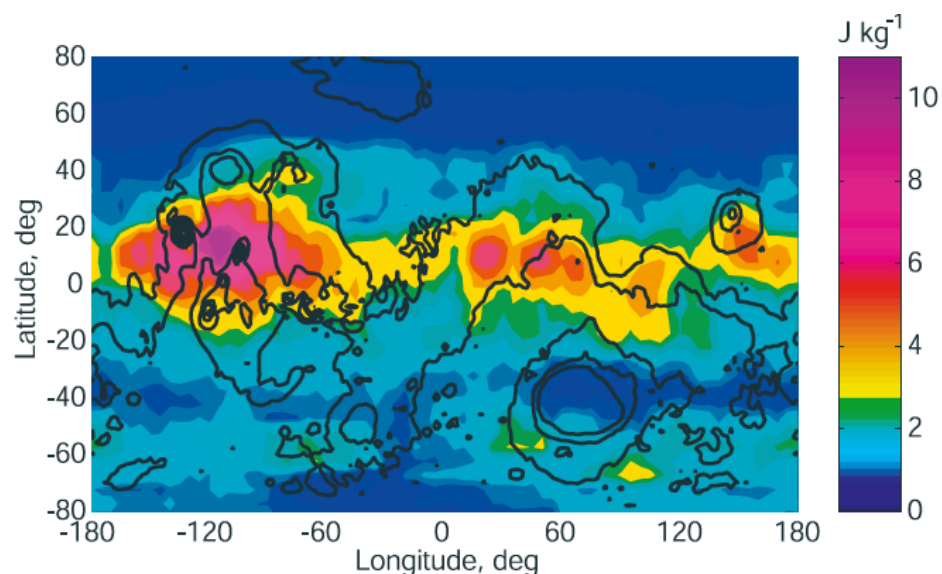
Model | 基準点における重力波の運動量フラックス

基準点 z_0 ($p = 260$ Pa (≈ 8 km)) における運動量フラックスは

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

の形で与える。位相速度 $-60 \sim 60$ m/s の範囲で 28 の波をおく。

火星の重力波のスペクトル分布が分からないため、地球の対流圏上部で観測されたスペクトル分布の解析形を用いている。ただし、単位質量当りの波動ポテンシャルエネルギーが、MGS の電波掩蔽観測から推定される背景値 0.5 J kg^{-1} [Creasey et al., 2006] になるよう水平風速の変動を設定する。

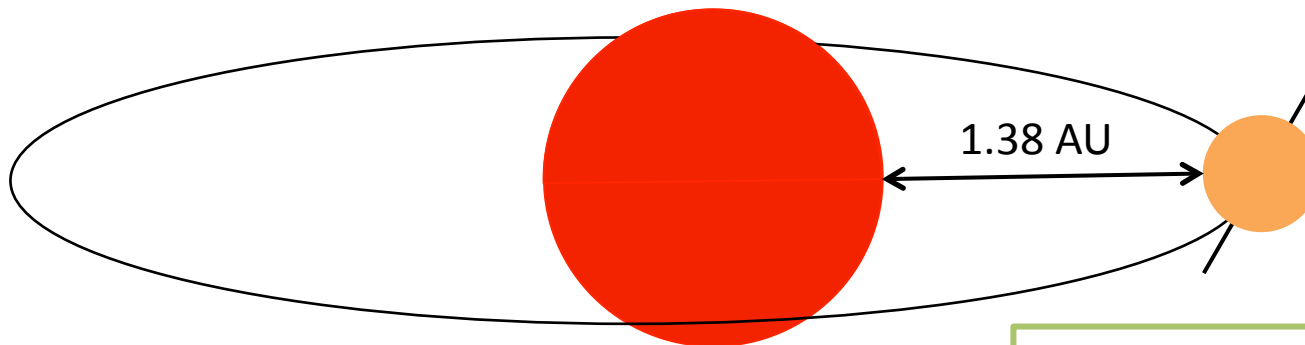


Global distribution of E_p , gravity wave potential energy per unit mass, at 10–30 km height for vertical wavelengths shorter than 10 km. [Creasey et al., 2006, figure 5]

Model | 計算条件

low solar activity

地球軌道で $F_{10.7} = 80 \times 10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$



北半球が冬
($L_s = 270^\circ$)

low dust activity
dust の光学的厚さ $\tau = 0.2$

Temperature Changes

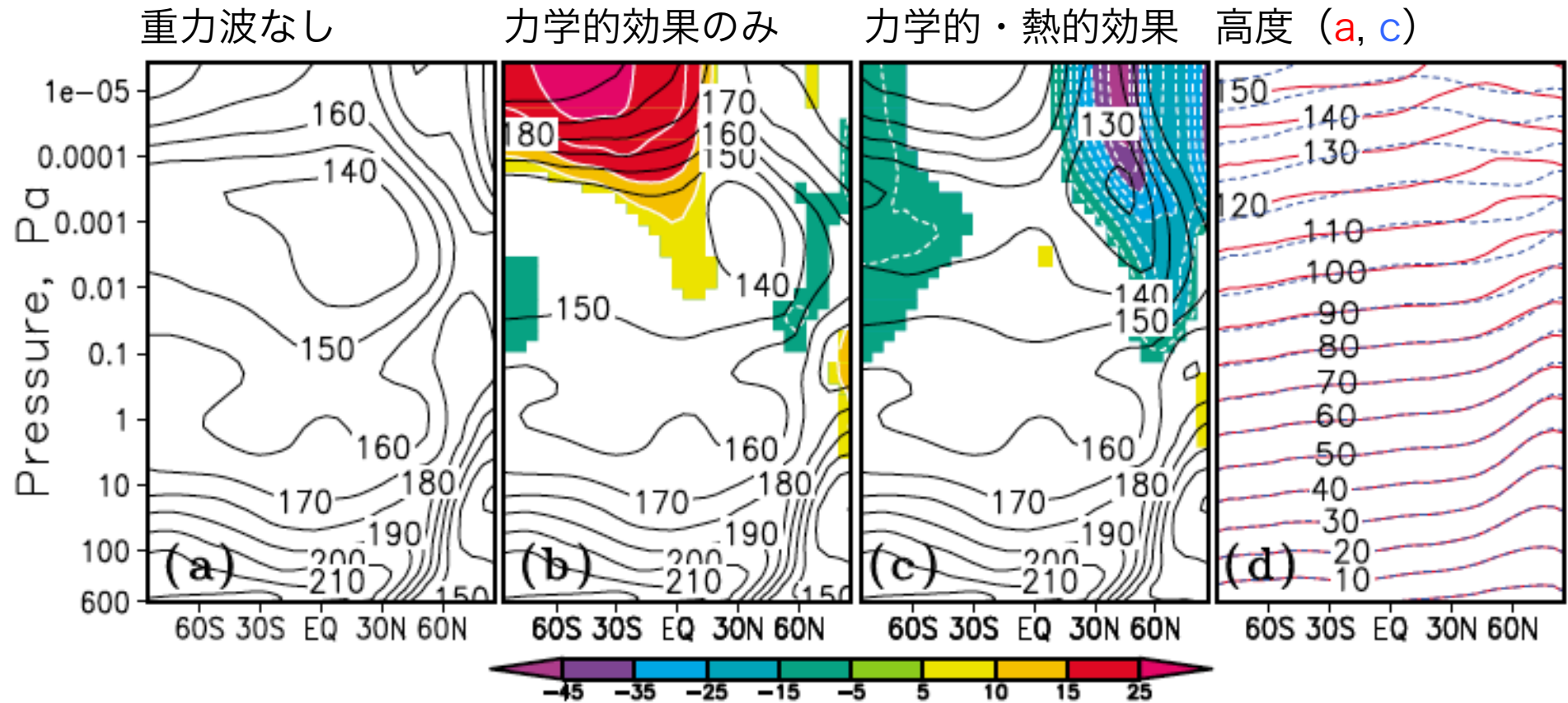


Figure 1. Zonal mean temperature (black contour lines) on $L_s = 270^\circ$ simulated (a) without accounting for unresolved GWs, (b) with the parameterized GW dynamical forcing only, and (c) with both dynamical and thermal effects included in the GW parameterization. Shaded are the temperature differences between the corresponding run and the simulation without GW parameterization shown in Figure 1a. Figure 1d shows zonally averaged geopotential heights for runs a and c in blue and red, correspondingly.

Temperature Changes

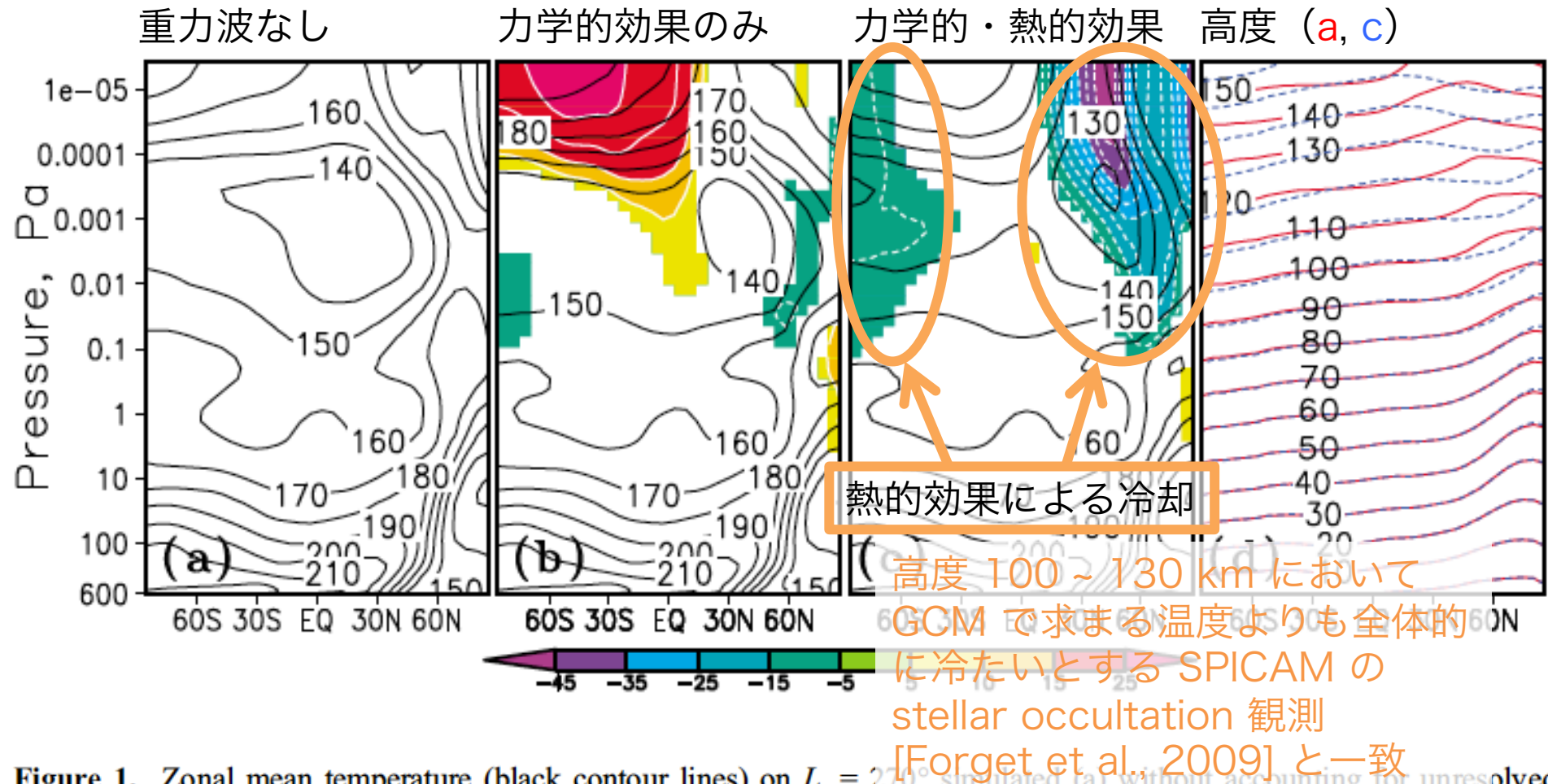


Figure 1. Zonal mean temperature (black contour lines) on $L_s = 270^\circ$ simulated (a) without accounting for unresolved GWs, (b) with the parameterized GW dynamical forcing only, and (c) with both dynamical and thermal effects included in the GW parameterization. Shaded are the temperature differences between the corresponding run and the simulation without GW parameterization shown in Figure 1a. Figure 1d shows zonally averaged geopotential heights for runs a and c in blue and red, correspondingly.

Temperature Changes

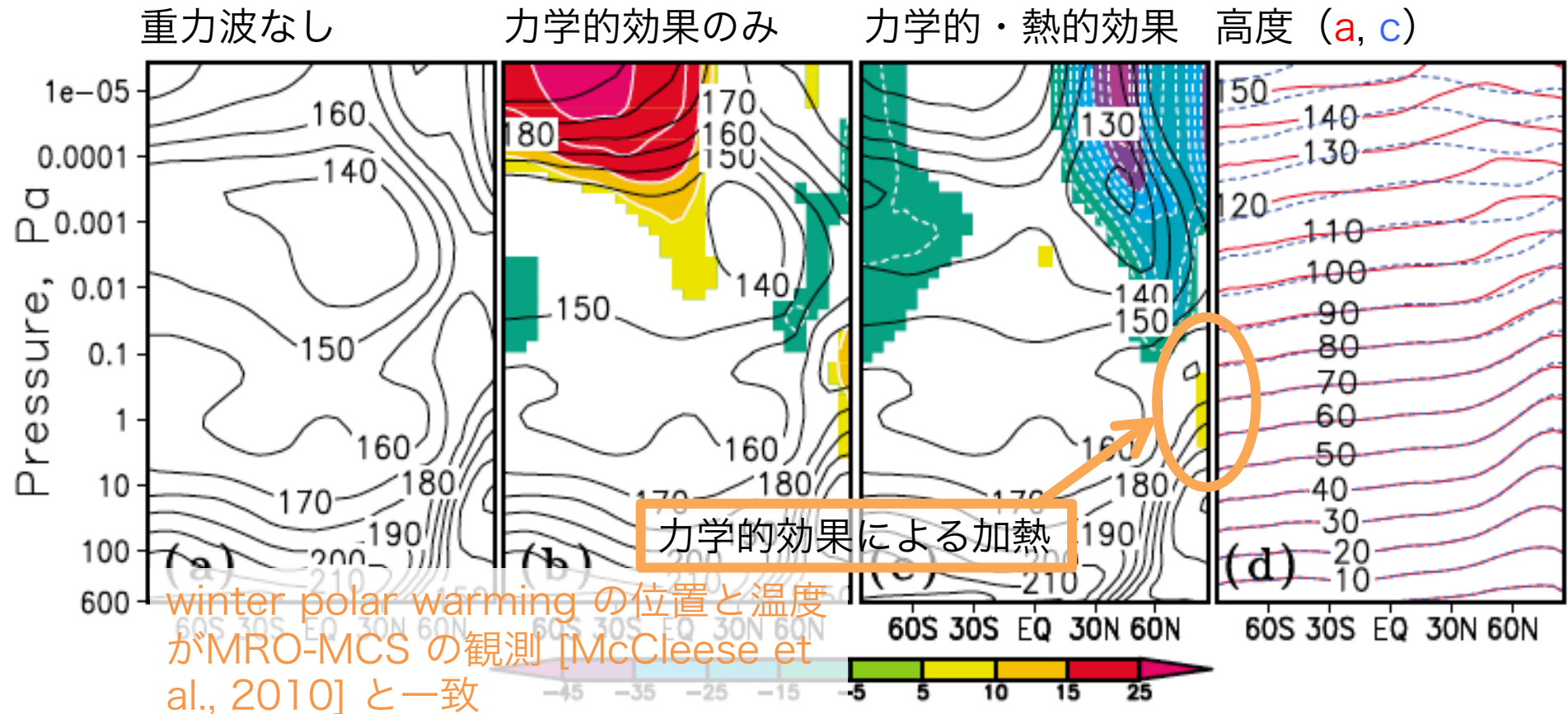


Figure 1. Zonal mean temperature (black contour lines) on $L_s = 270^\circ$ simulated (a) without accounting for unresolved GWs, (b) with the parameterized GW dynamical forcing only, and (c) with both dynamical and thermal effects included in the GW parameterization. Shaded are the temperature differences between the corresponding run and the simulation without GW parameterization shown in Figure 1a. Figure 1d shows zonally averaged geopotential heights for runs a and c in blue and red, correspondingly.

Implications for thermospheric winter polar warming

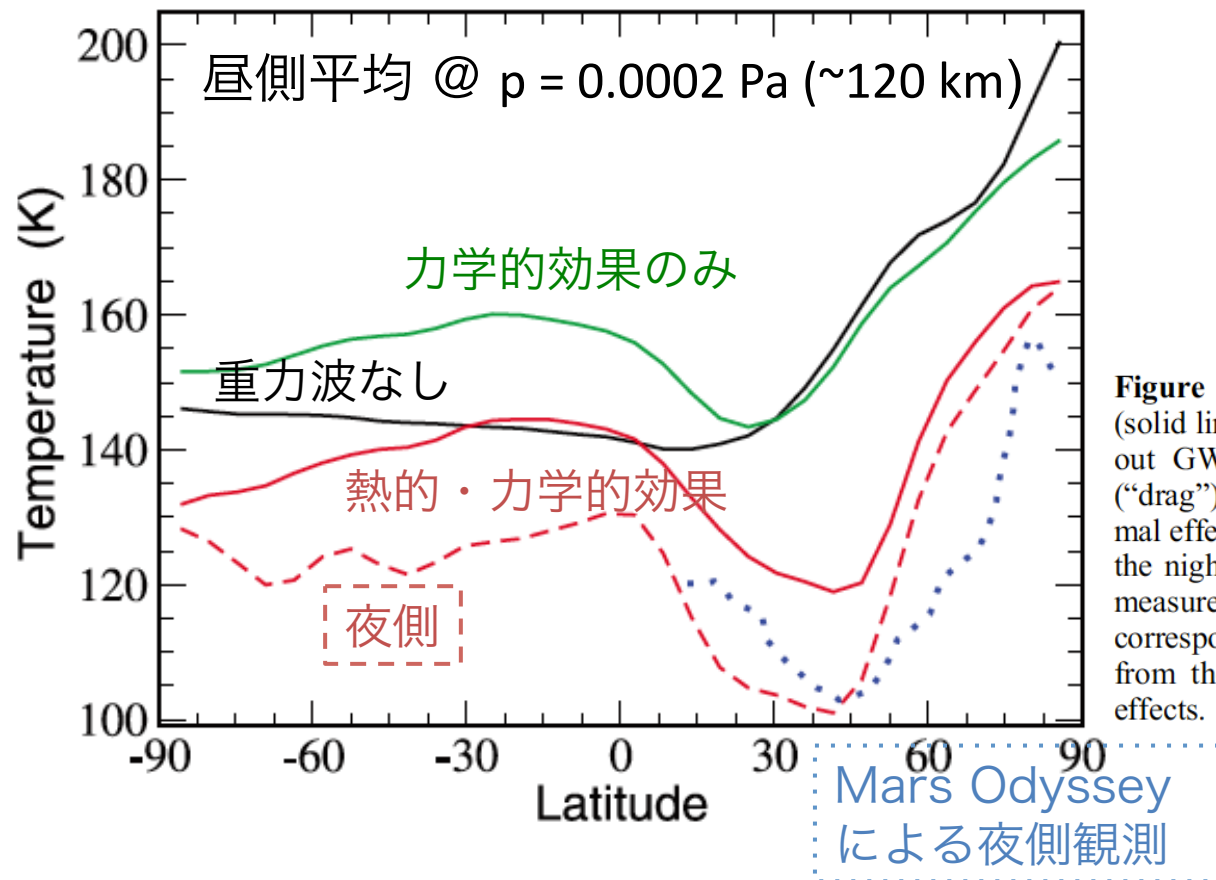
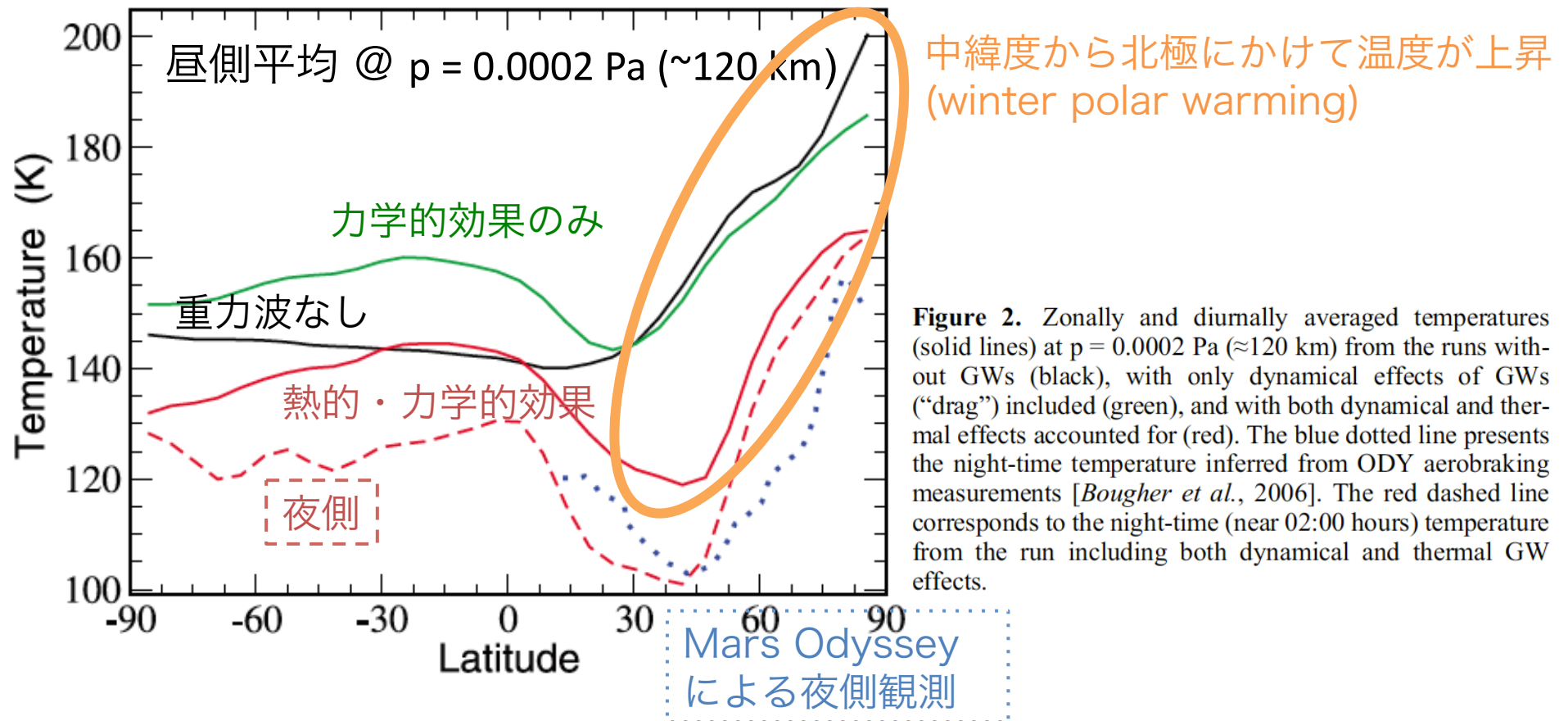


Figure 2. Zonally and diurnally averaged temperatures (solid lines) at $p = 0.0002$ Pa (≈ 120 km) from the runs without GWs (black), with only dynamical effects of GWs ("drag") included (green), and with both dynamical and thermal effects accounted for (red). The blue dotted line presents the night-time 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.

Implications for thermospheric winter polar warming



重力波の熱的效果は全体的に温度を下げるため、熱圏の winter polar warming に及ぼす影響は小さい。

Implications for thermospheric winter polar warming

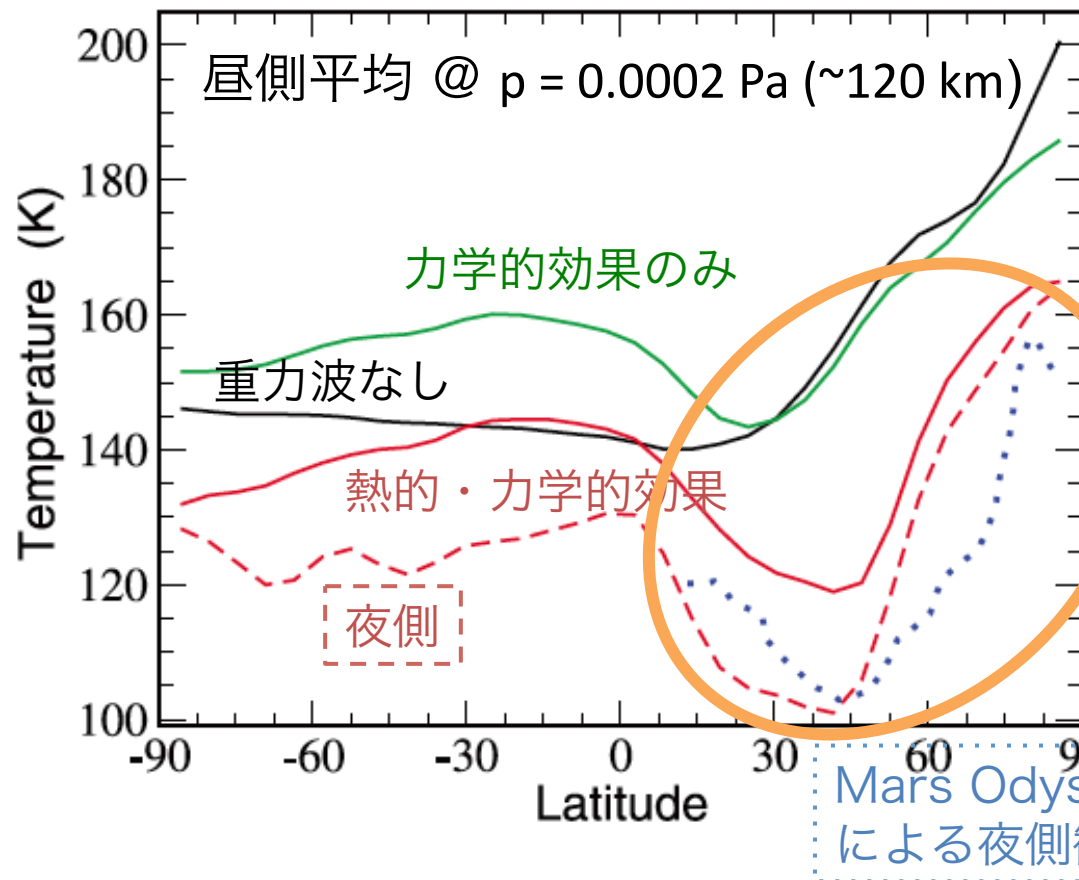


Figure 2. Zonally and diurnally averaged temperatures (solid lines) at $p = 0.0002$ Pa (≈ 120 km) from the runs without GWs (black), with only dynamical effects of GWs ("drag") included (green), and with both dynamical and thermal effects accounted for (red). The blue dotted line presents the night-time 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. The orange circle highlights the region where the model including both thermal and dynamical effects (red solid line) closely matches the observed night-time temperatures (blue dotted line) in the winter polar region.

Gravity wave heating/cooling rates

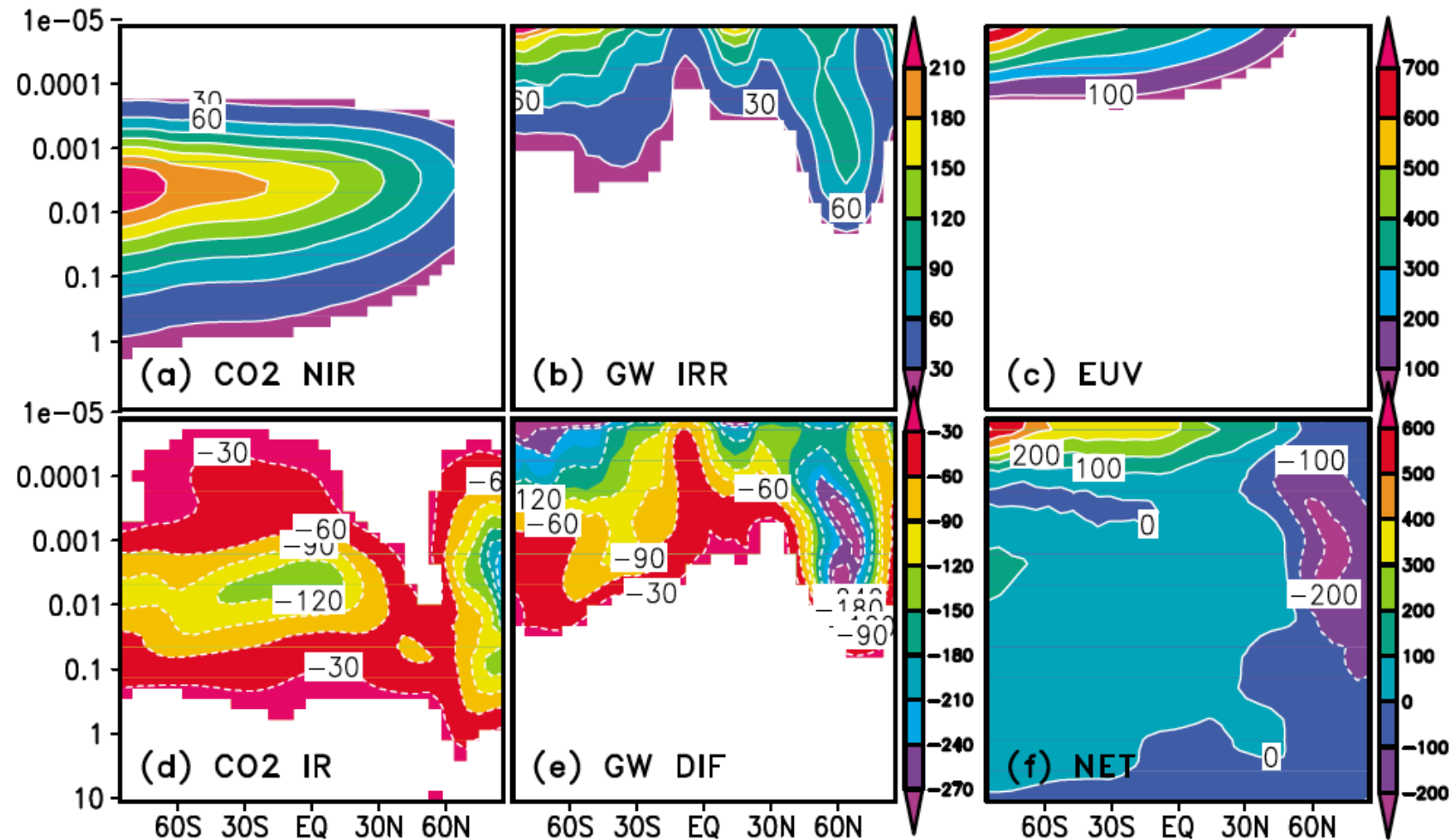
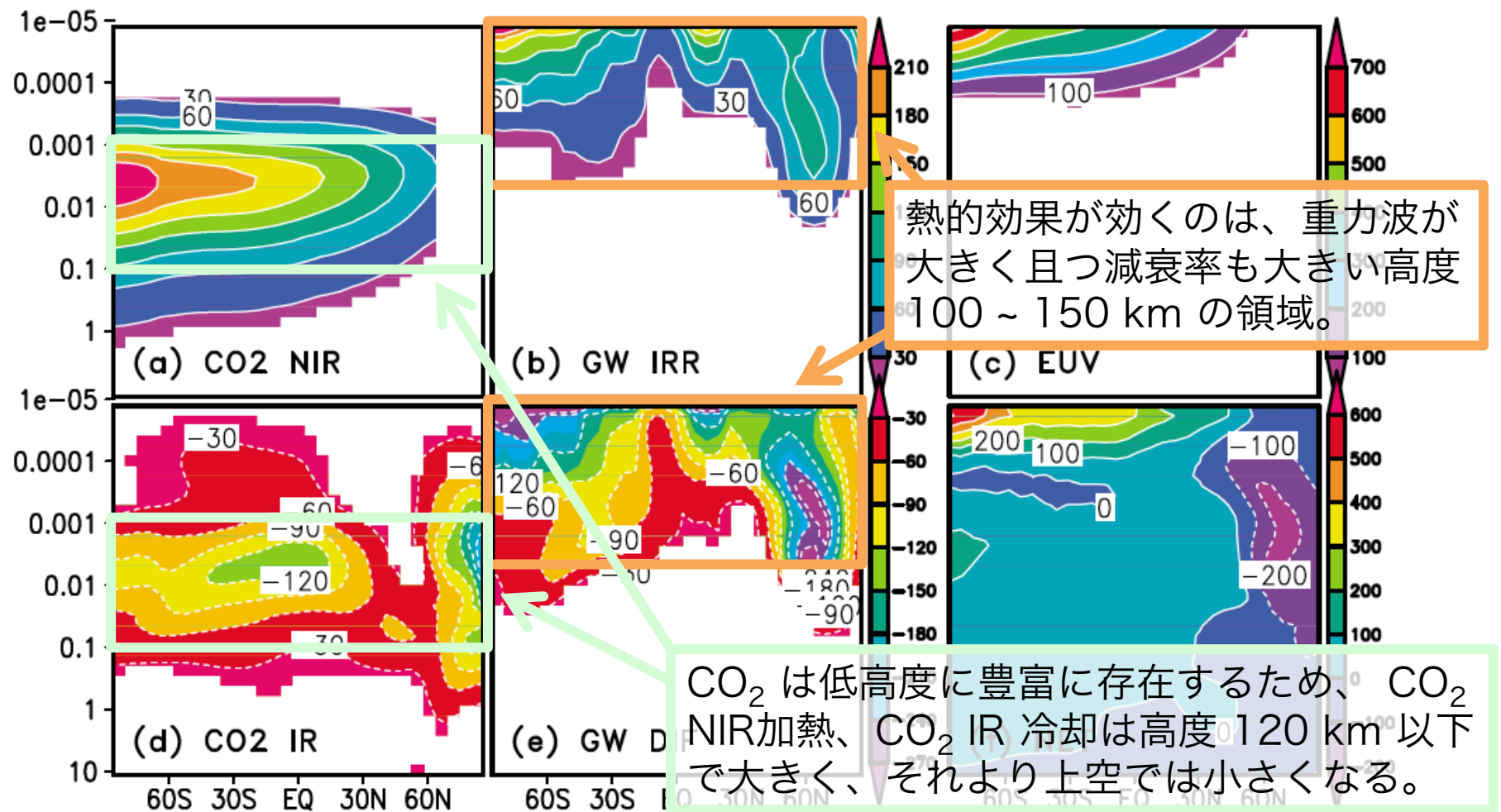


Figure 3. Zonal mean heating and cooling rates (in K sol^{-1}) due to various physical mechanisms: (a) radiative heating by near-IR CO₂ bands; (b) irreversible GW heating; (c) EUV heating by CO₂ molecules; (d) cooling by 15- μm bands; (e) differential heating and cooling by GWs; (f) net heating and cooling rates.

Gravity wave heating/cooling rates



120 km よりも上空では、CO₂ による加熱・冷却よりも重力波による加熱・冷却の方が卓越する。

Gravity wave heating/cooling rates

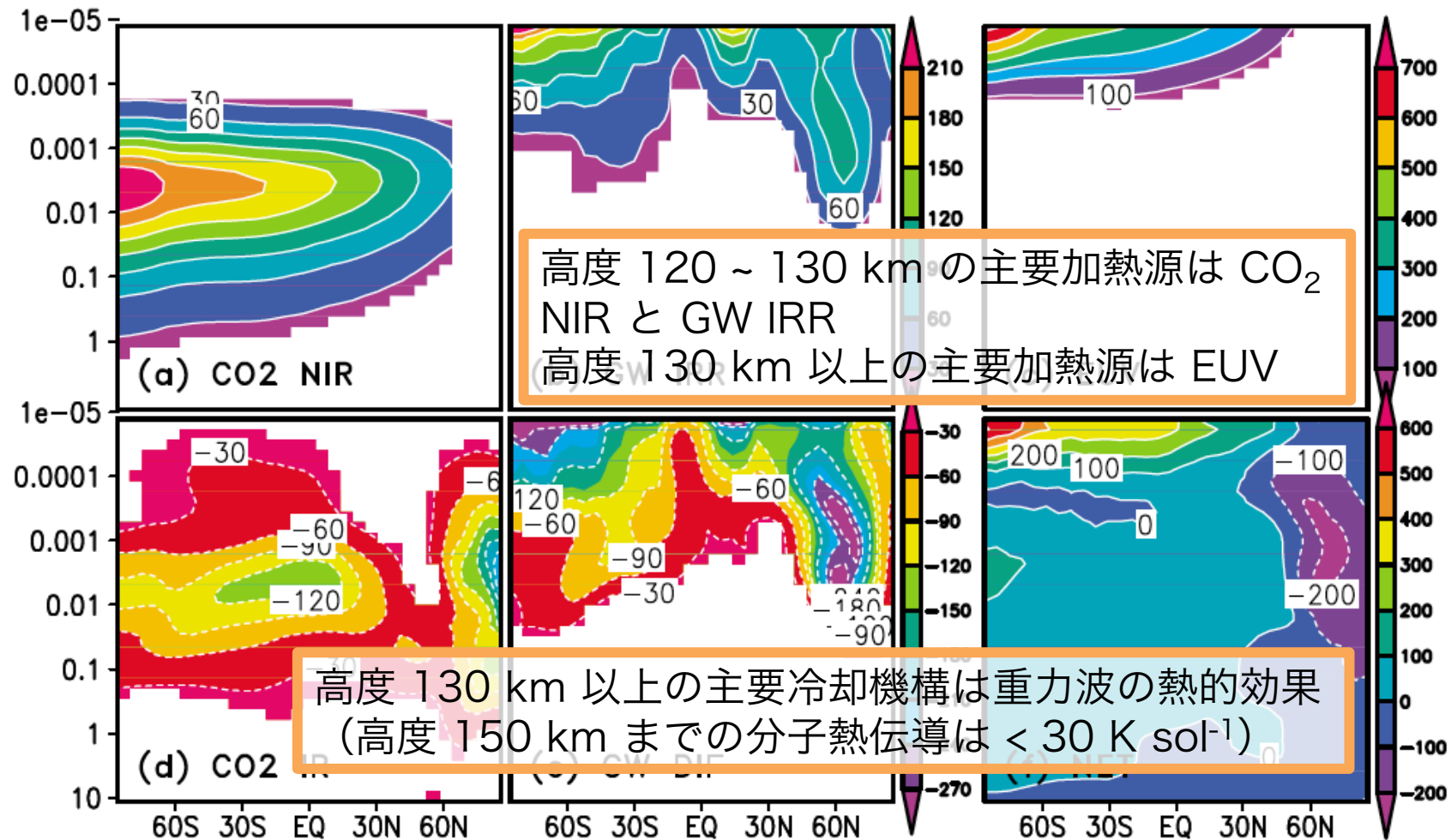


Figure 3. Zonal mean heating and cooling rates (in K sol^{-1}) due to various physical mechanisms: (a) radiative heating by near-IR CO₂ bands; (b) irreversible GW heating; (c) EUV heating by CO₂ molecules; (d) cooling by 15-m bands; (e) differential heating and cooling by GWs; (f) net heating and cooling rates.

Summary and Conclusions

- 重力波の熱的効果は、中間圏・下部熱圏における熱収支を考える上で無視できない程大きい。
 - 重力波の力学的エネルギーから熱エネルギーへの不可逆変換による加熱は、CO₂ の近赤外放射加熱と同程度の熱量がある。
 - 下向き熱フラックスの鉛直勾配による冷却は、CO₂ の赤外放射冷却と同程度の熱量がある。
 - 先行研究の Parish et al. [2009] の結果とほぼ一致。
- 重力波の熱的効果を入れることにより、中間圏・熱圏の温度が全体的に数十 K 下がる。これは、従来の GCM モデル [Forget et al., 2009; McDunn et al., 2010] よりも、SPICAM の掩蔽観測 [Forget et al., 2009] や ODY による温度のリトリバル [Bougher et al., 2006] の結果に合う。