

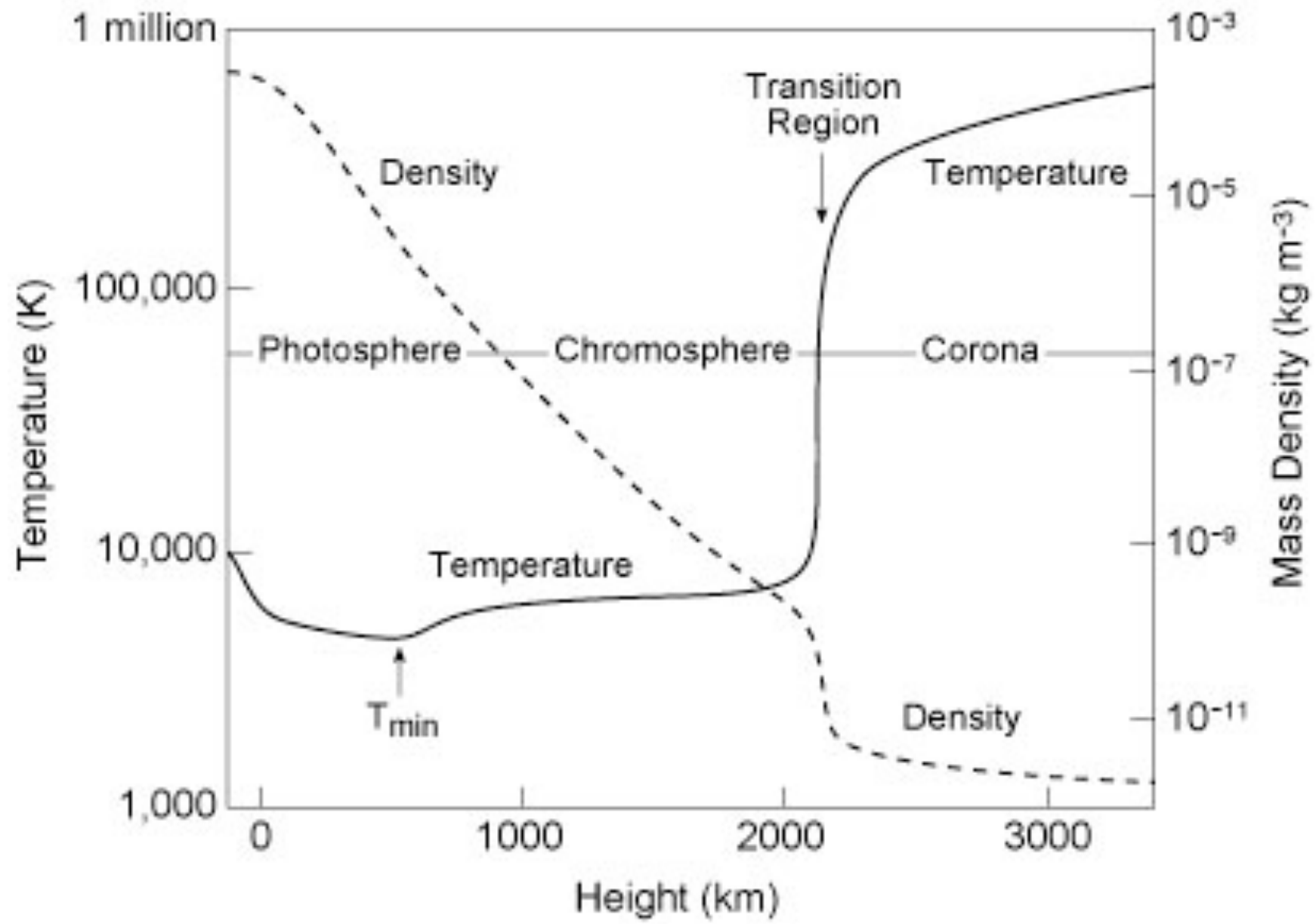
# 火星における対流励起重力波

今村 剛(宇宙研) 渡辺歩佳(東大) 前島康光(理研)

今日の話

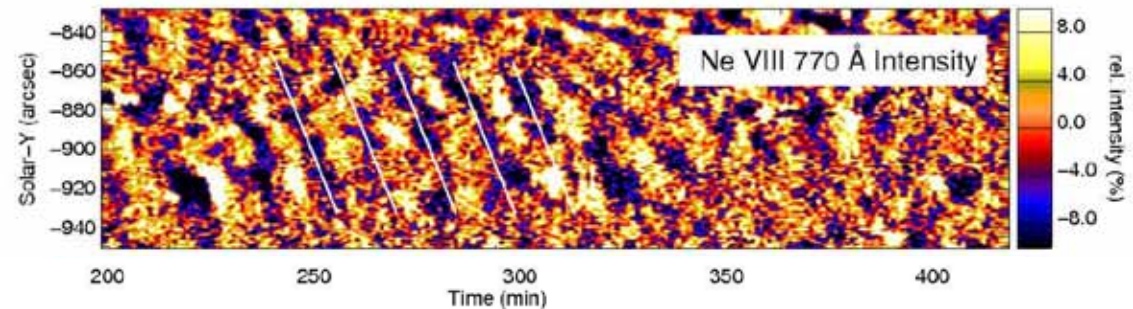
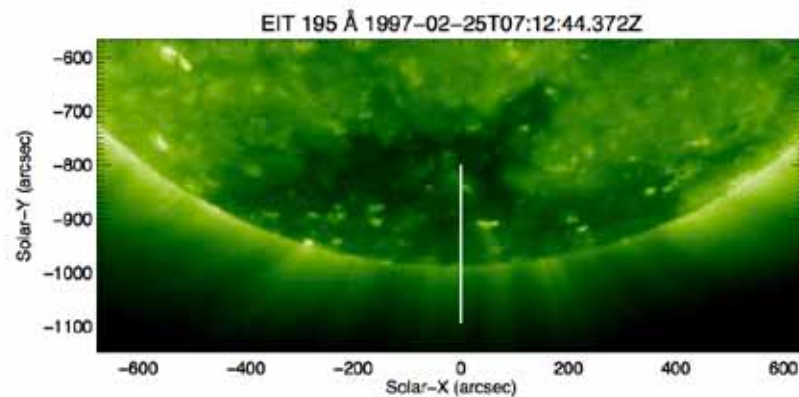
1. 対流励起重力波・音波の比較論(なぜ火星か)
2. 火星の対流励起重力波

# 太陽大気の対流と波動



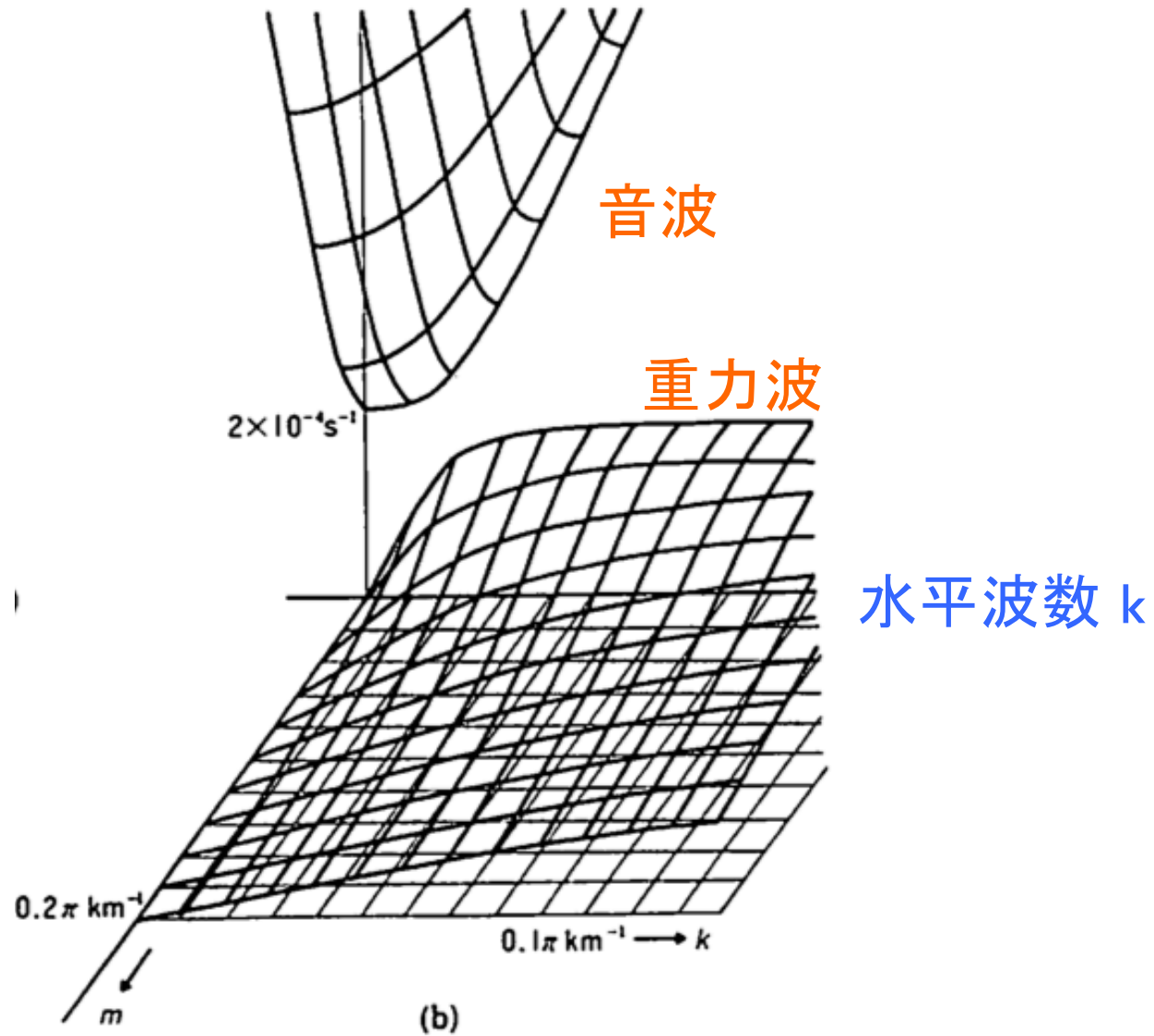
# 太陽大気の対流と波動

- 対流が運ぶエネルギーは地球の100000倍
- 対流圏界面(光球)の密度は地球対流圏の1/10000
- 流速 ~ 1 km/s
  
- 対流が励起する波動が上層大気に伝搬してコロナ加熱
- Alfvén波に加えて音波も重要 (重力波は考えない)



Gupta et al (2012)

周波数  $\sigma$



鉛直波数  $m$

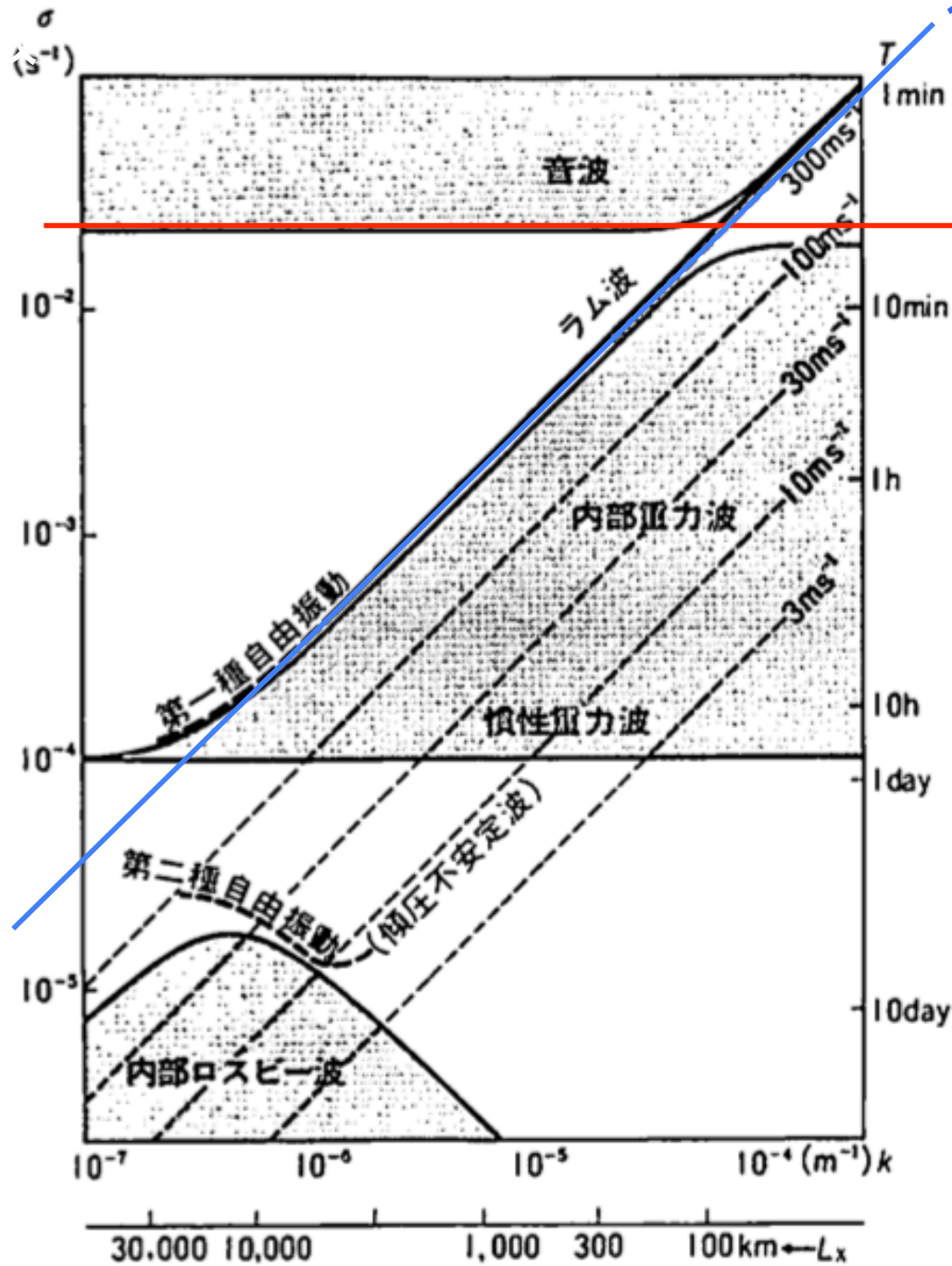
松野(1981)

水平位相速度 = 音速

$$\frac{\sigma}{k} = \gamma \frac{p}{\rho}$$

カットオフ周波数

$$\sigma_{\text{cutoff}} = \frac{\gamma g}{2c_s}$$



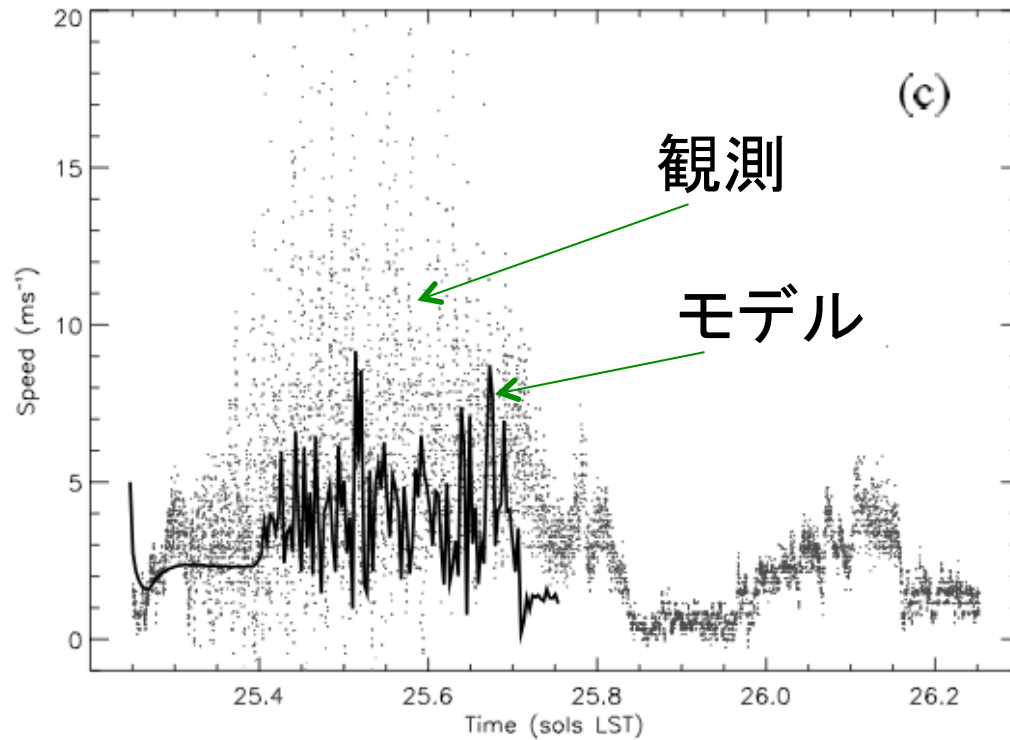
# 対流励起波動の違い

- 地球では重力波
- 太陽では音波

考えられる要因：流速の違いによる圧縮性の違い

以下2ケースも追加してパラメタ比較

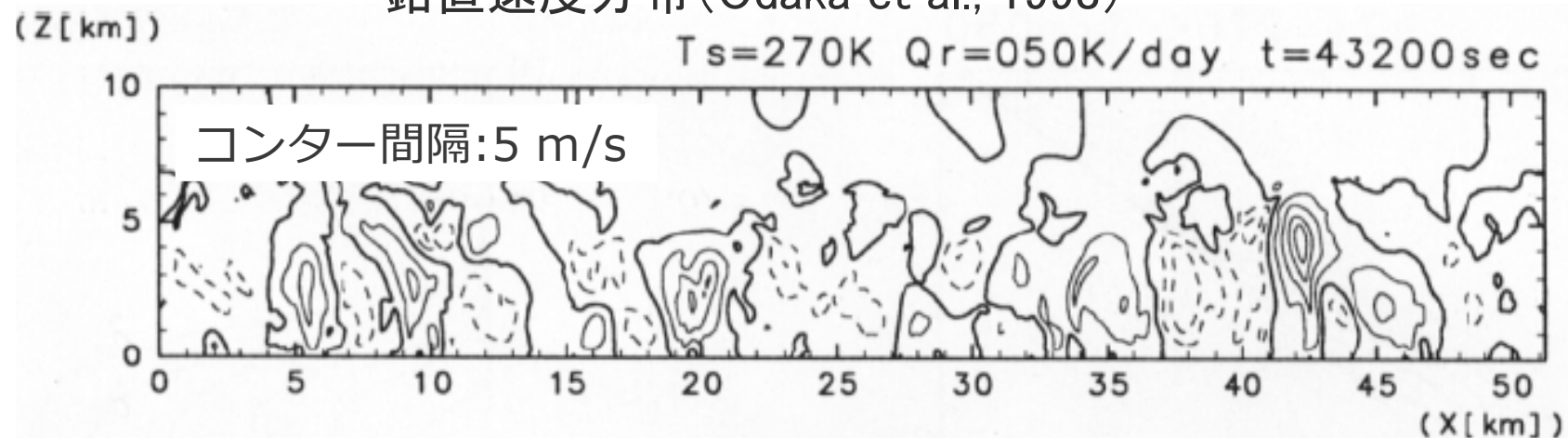
- 火星・・・対流速度大
- 暴走温室大気・・・？



## Mars Pathfinderによる 風速測定

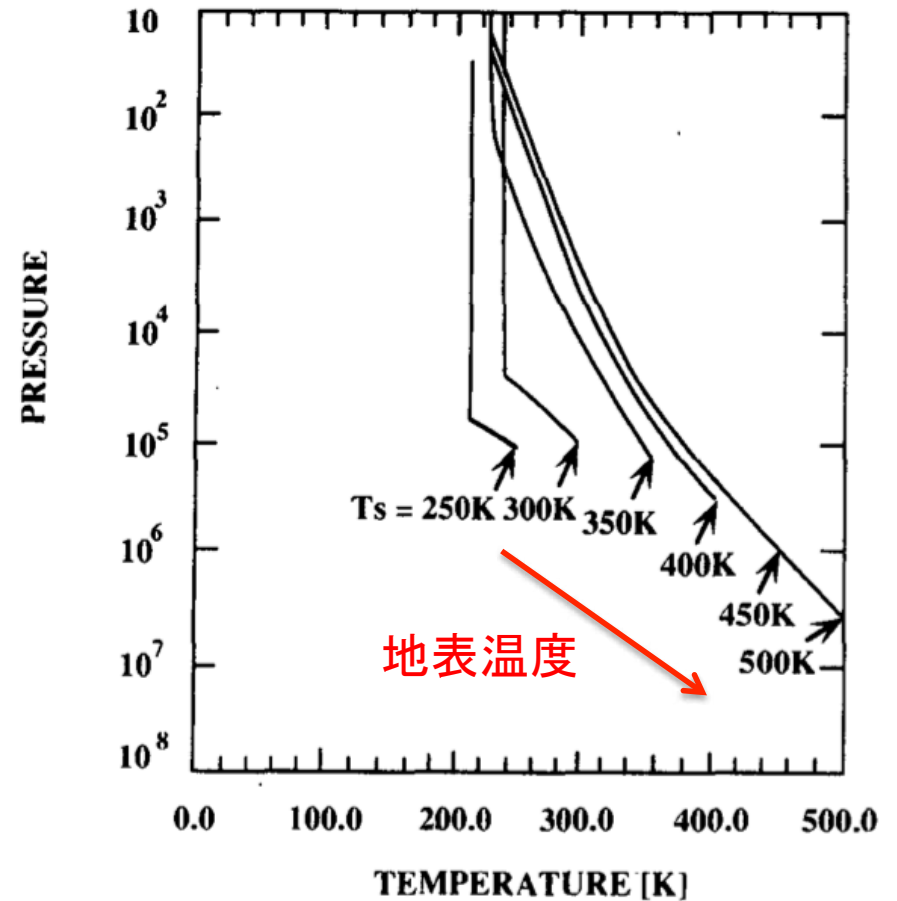
Michaels & Rafkin (2004)

## 火星の境界層対流の2次元実験による 鉛直速度分布 (Odaka et al., 1998)



# 暴走温室大気

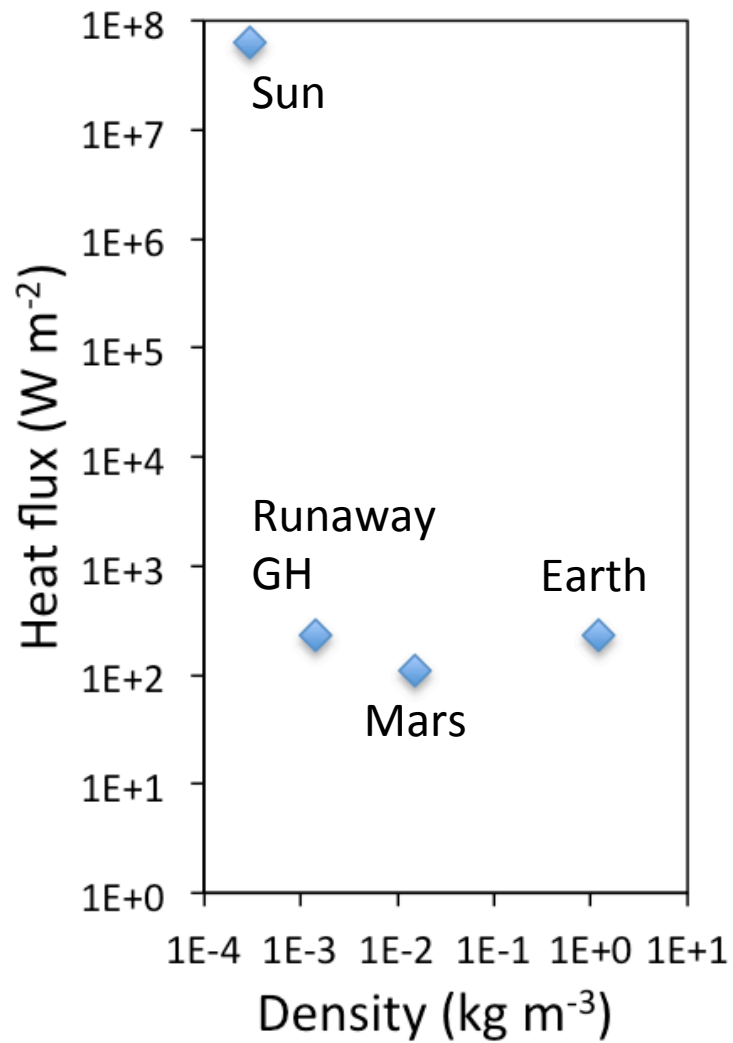
- 高度~100kmに位置する対流圏界面付近では大気密度が現在の対流圏の1/1000以下
- 対流が運ぶエネルギーは今と大差ないだろう
- (実際は違うが)乾燥対流だとして流速を  $F = \rho v^3$  から見積もる



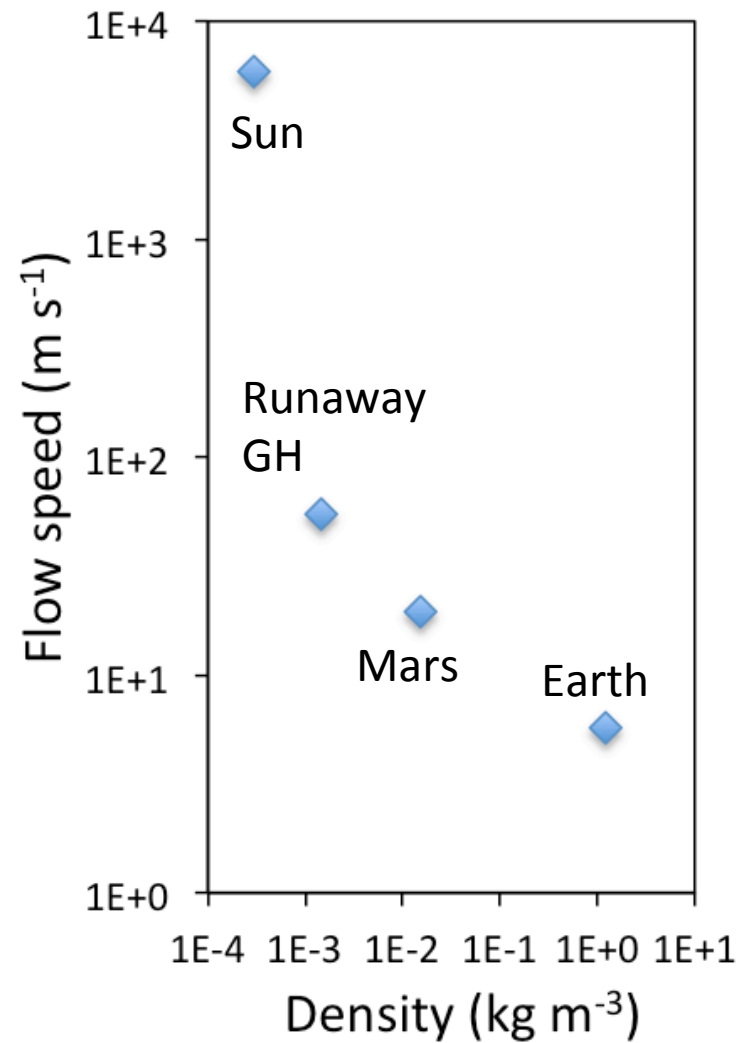
(Nakajima et al. 1992)

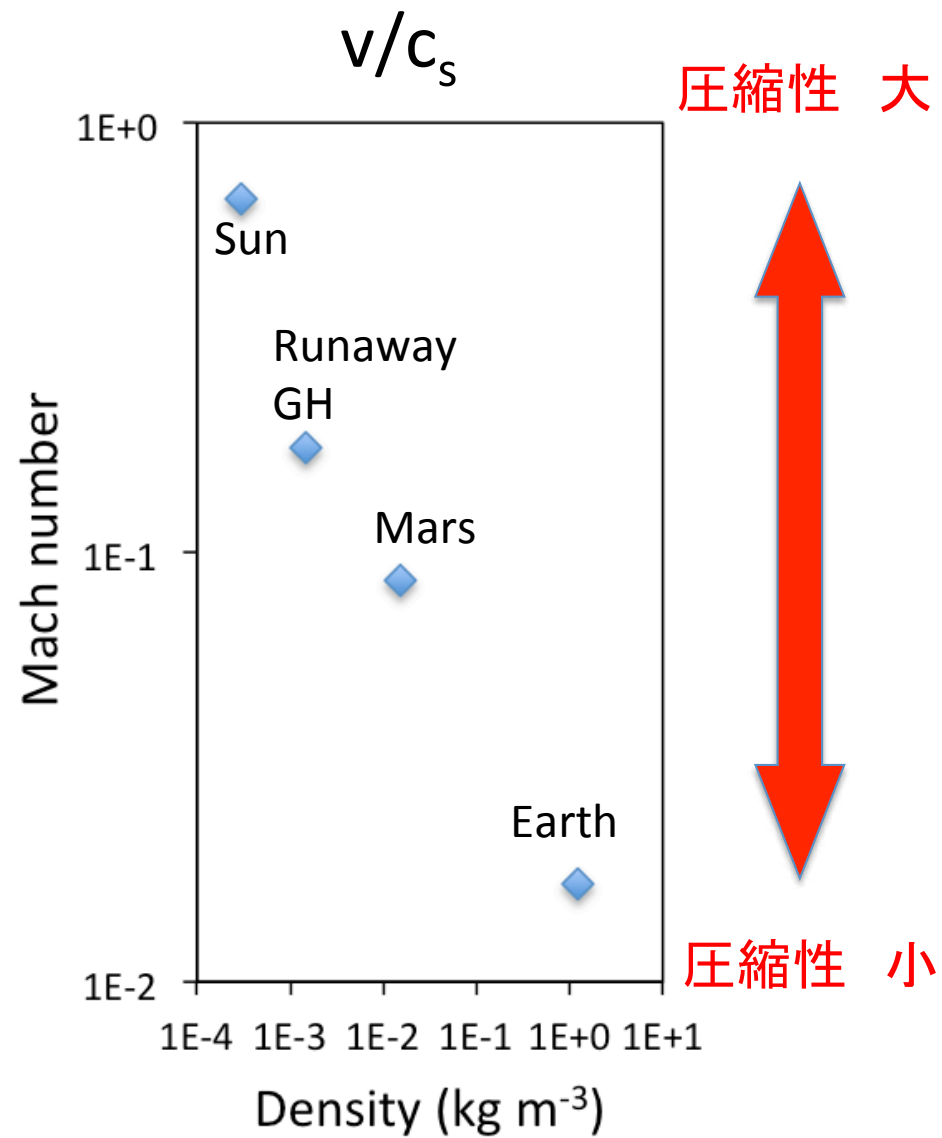
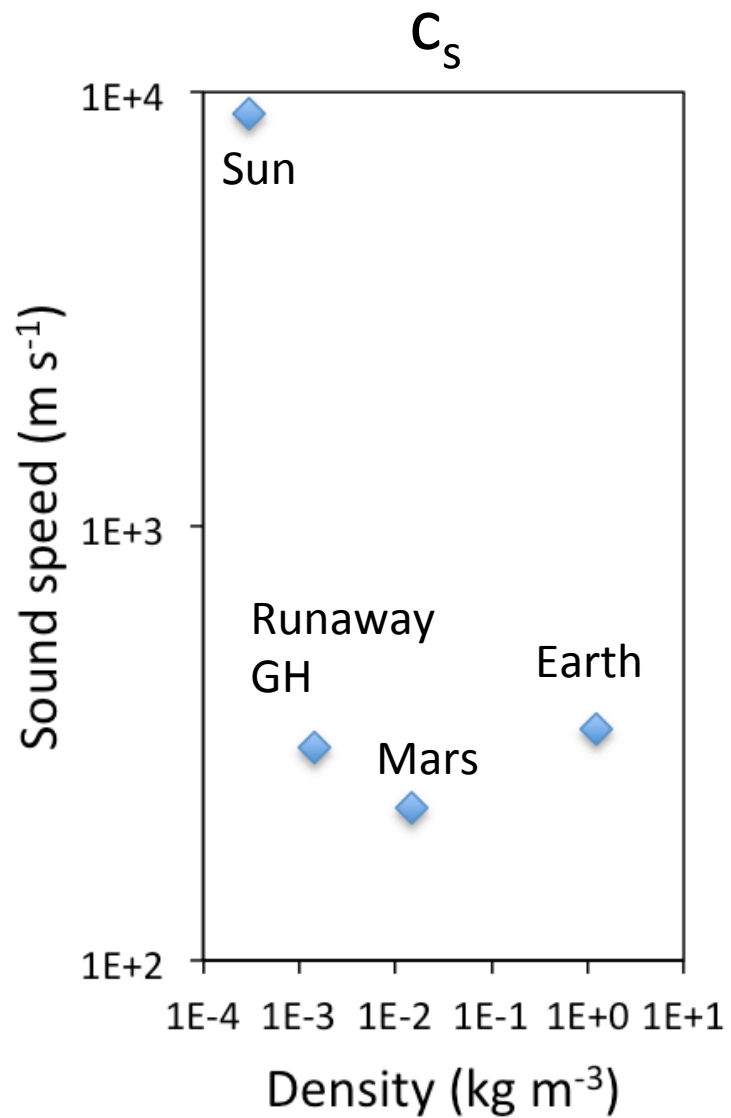


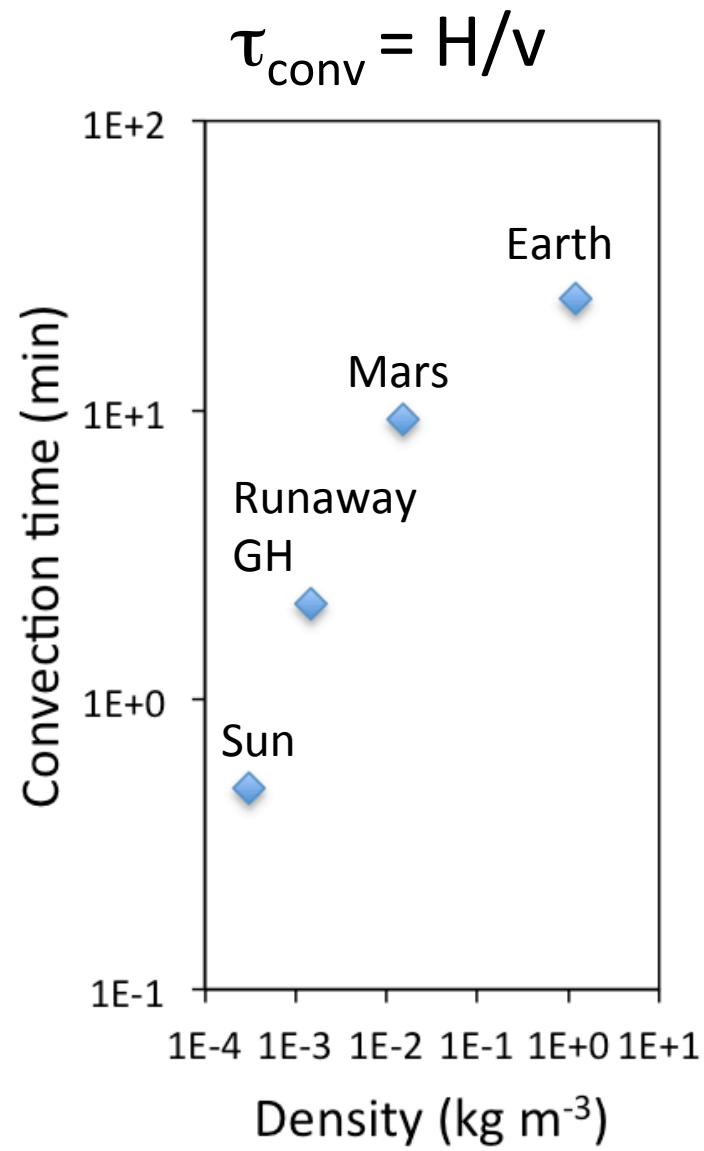
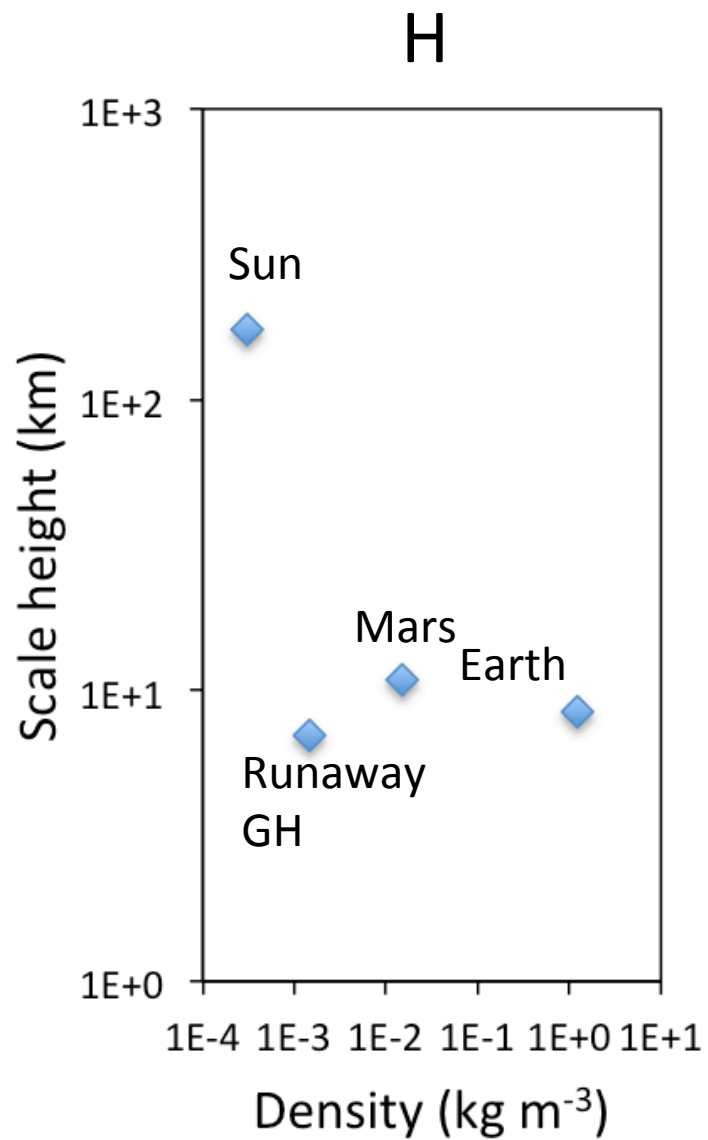
F

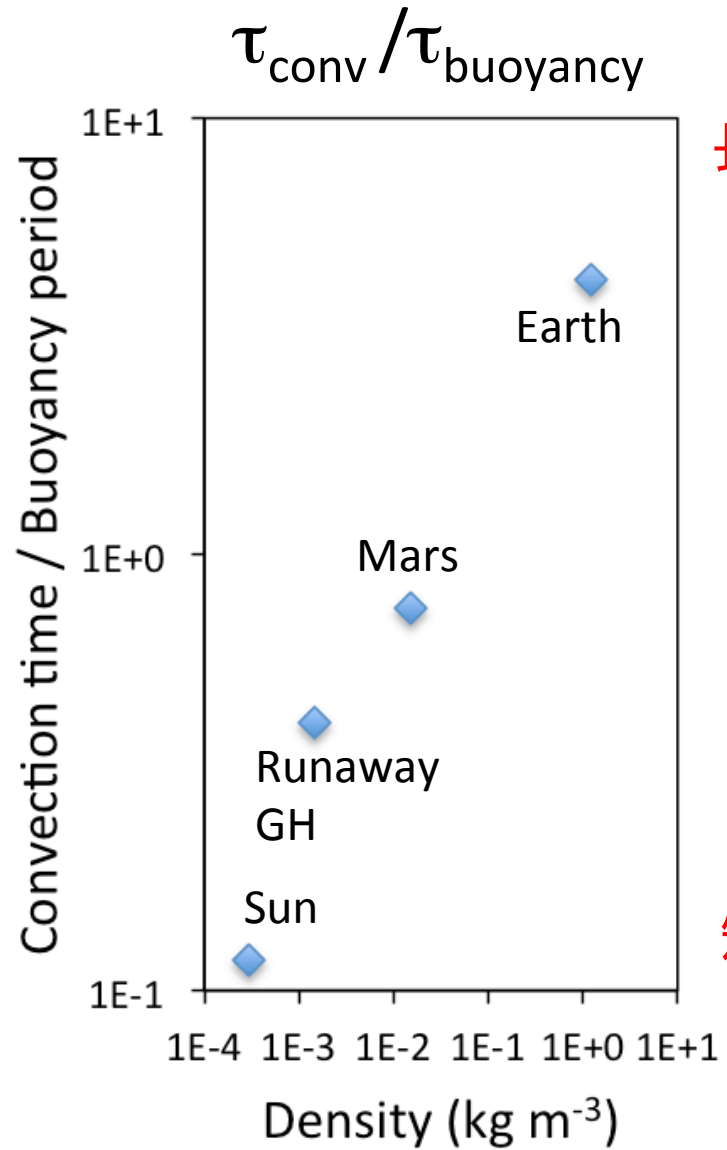
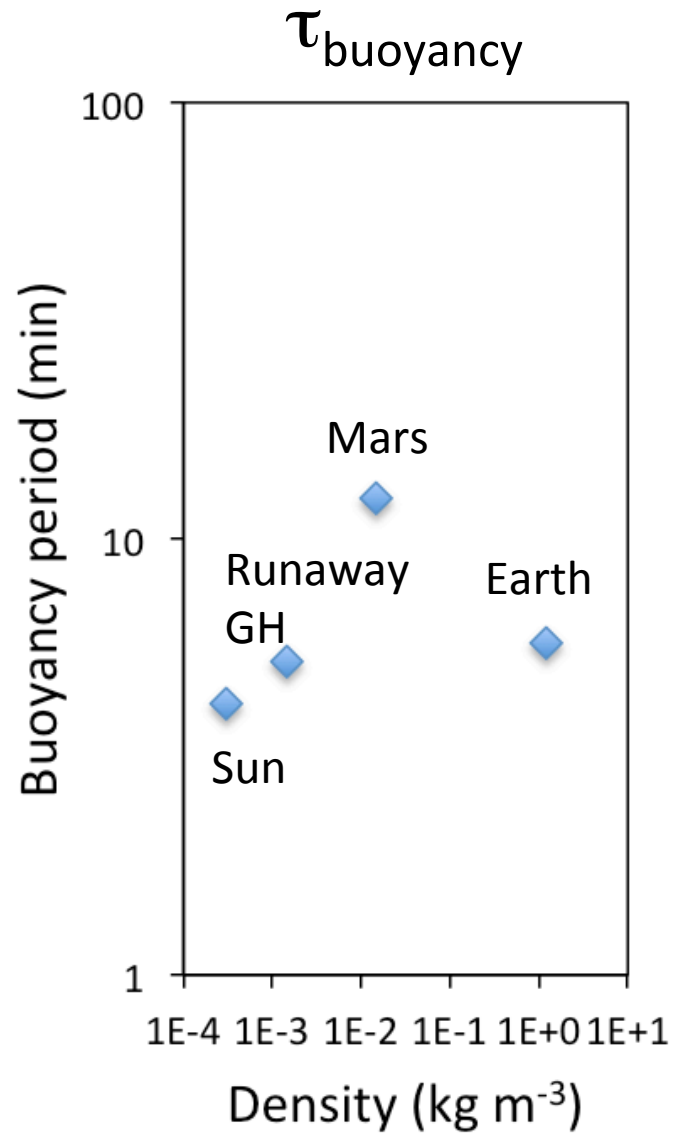


$$v = (F/\rho)^{1/3}$$









長周期重力波？



短周期重力波？

# 火星の対流励起重力波 (渡辺M論)

- そこそこ大事だと思われるがほとんど調べられていない
- 密度は1/100以下、熱フラックスは地球とコンパラだと、乾燥対流の流速は地球の数倍になりうる →短周期の重力波？

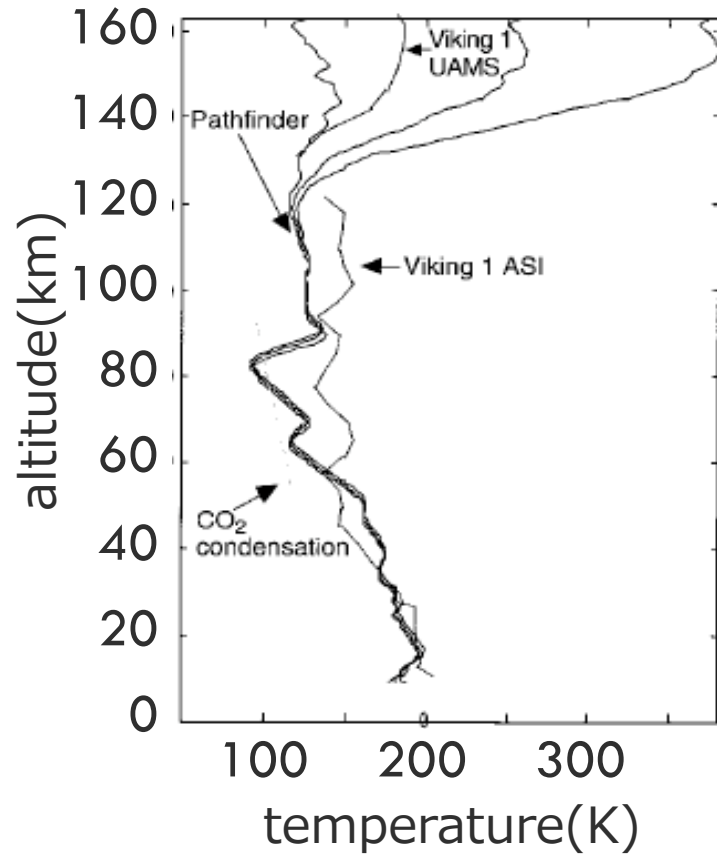
## 研究の目的

- 火星における対流励起重力波の特性と上層大気への影響を数値実験をもとに推定する。
- 火星大気が希薄であることの影響を考察する。

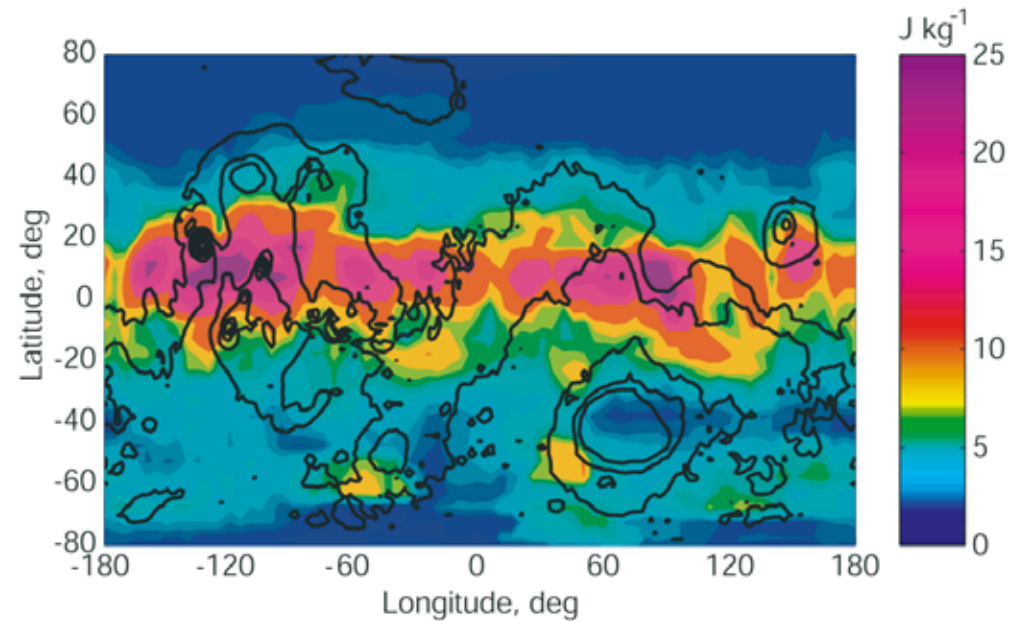
## 方法

- 対流による重力波の励起を非線形の数値流体モデルで再現し、典型的な重力波パラメータを推定する。
- 熱圏高度までの重力波伝搬と散逸過程を線型モデルをもとに考察する。

# 火星の重力波

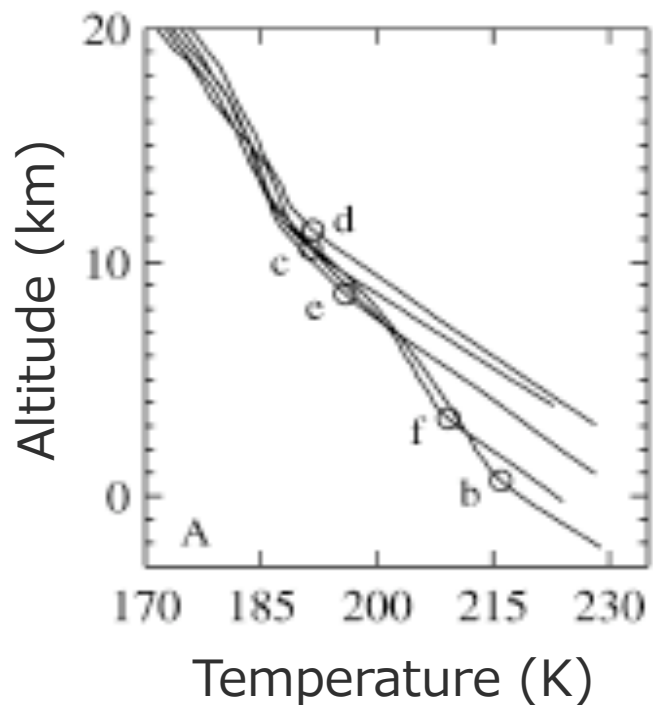


ランダーによる温度計測  
(Schofield et al., 1997)



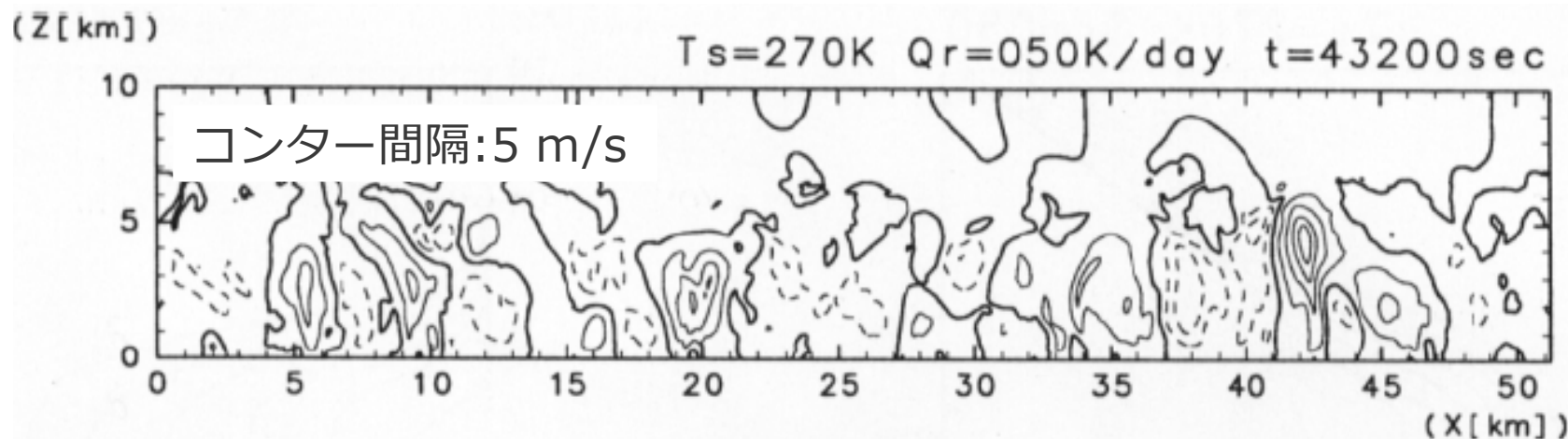
電波掩蔽による重力波エネルギー分布  
(Creasey et al. 2006)

# 火星における境界層対流



電波掩蔽による温度プロファイル  
→厚さ5km程度の対流層を示唆  
(Hinson et al., 2008)

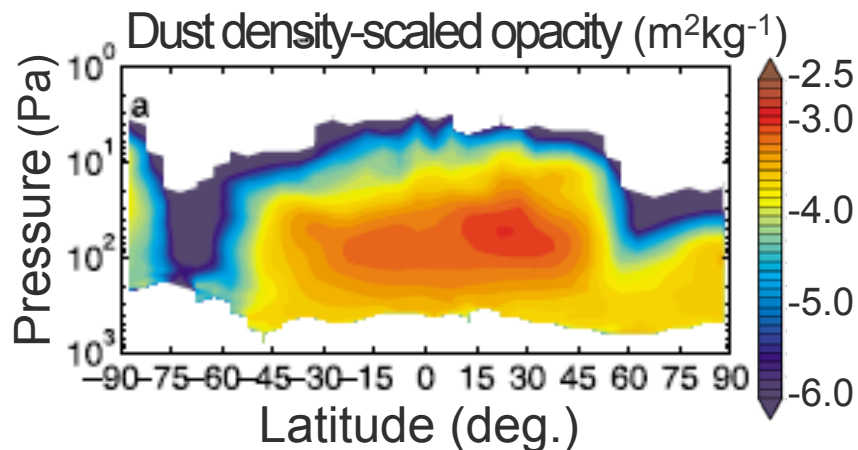
2次元対流実験による鉛直速度分布  
(Odaka et al., 1998)



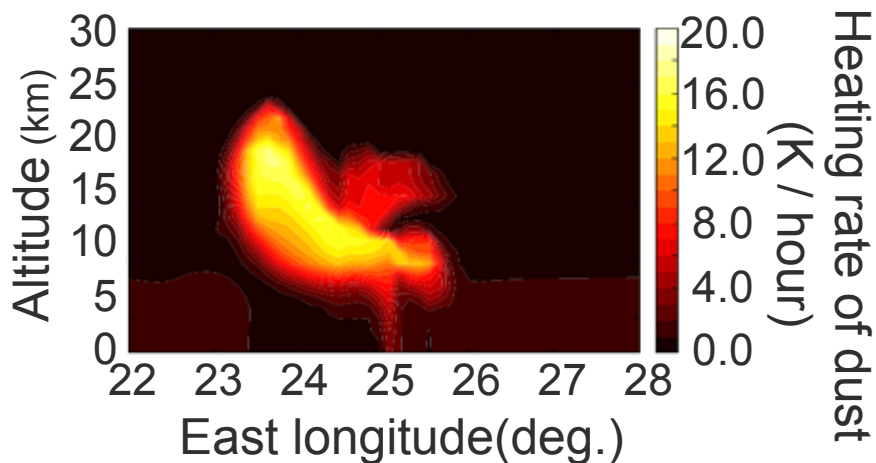
# 局地ダストストーム

## ◆"Rocket dust storm" (Spiga et al., 2013)

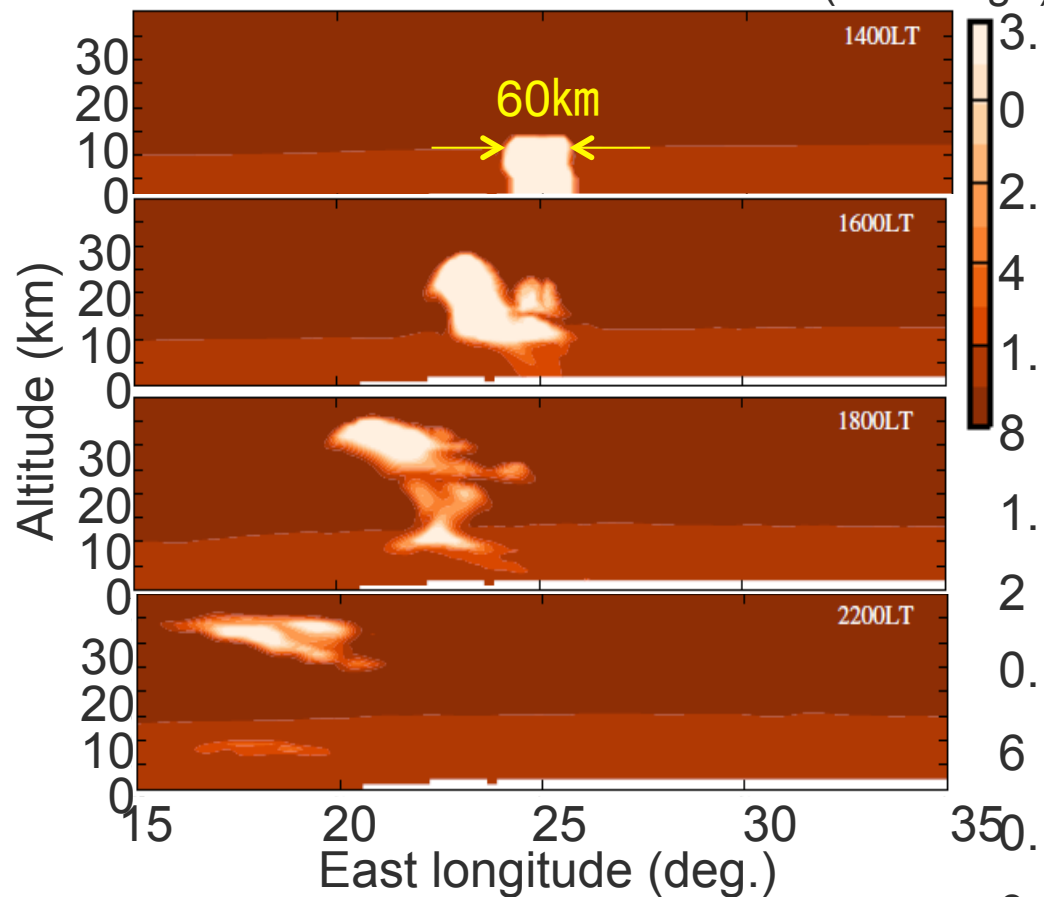
高高度のダスト層を説明するために提唱



Dust layer at high altitude observed by Mars Climate Sounder  
(Heavens et al., 2011)



Density-scaled dust optical depth ( $10^{-3}\text{m}^2\text{kg}^{-1}$ )





# 2次元対流モデル

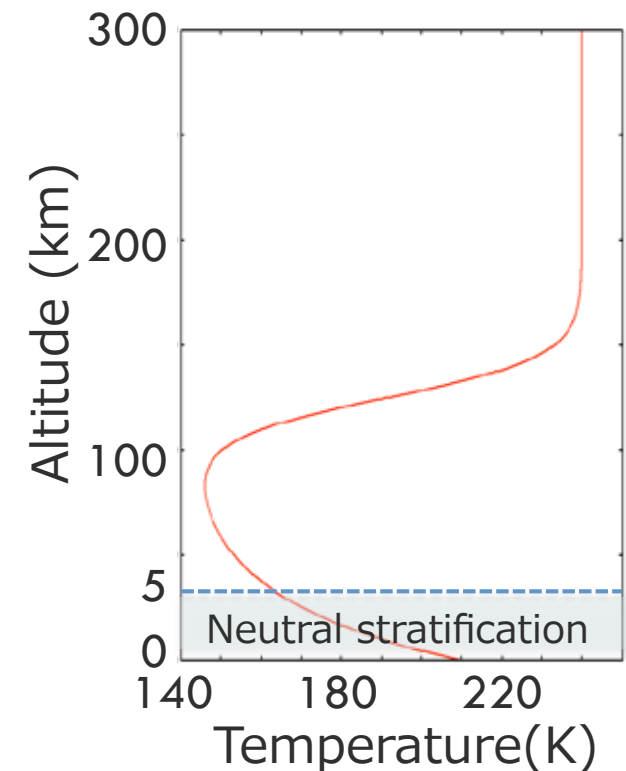
## 2種類の加熱強制

一様加熱： 地表面加熱を想定

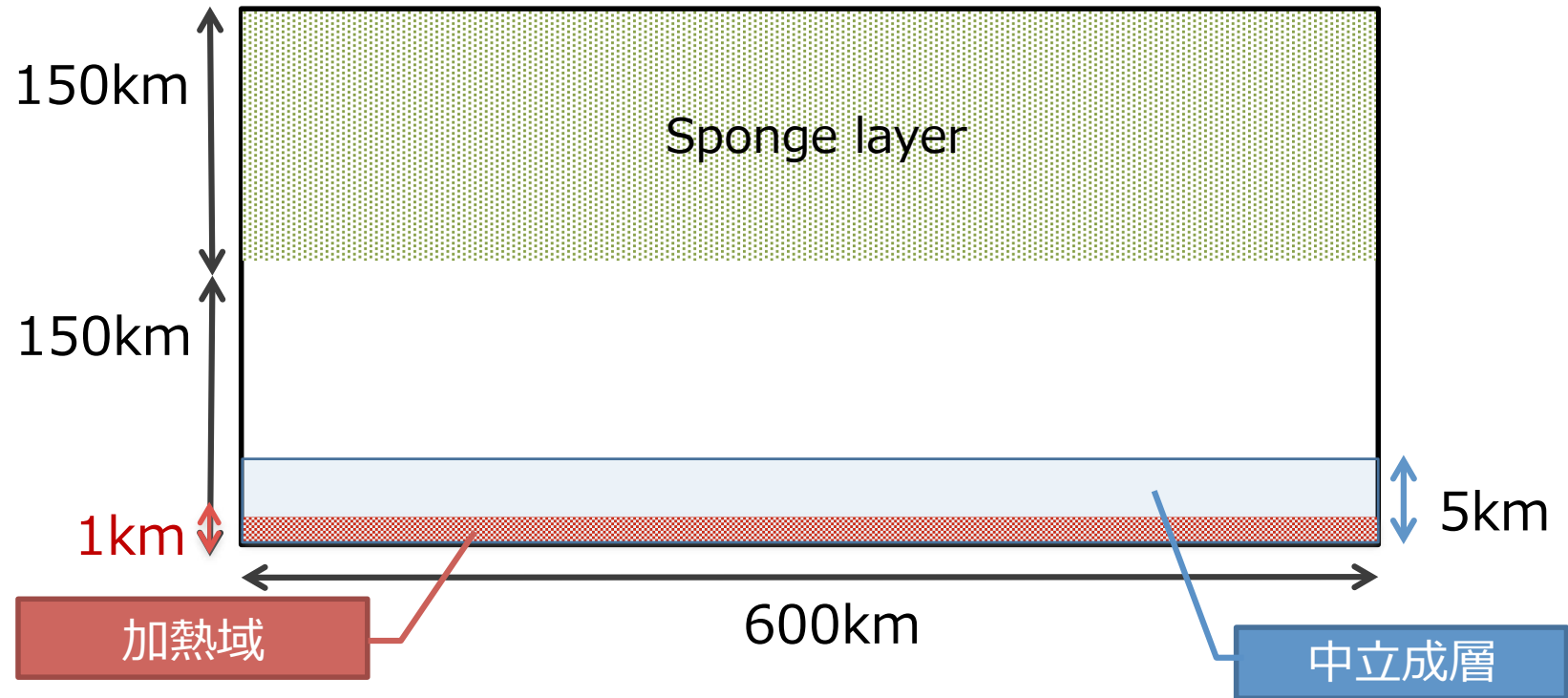
局所加熱： 局在化したダスト雲の加熱を想定

非静力学モデル CReSS (Cloud Resolving Storm Simulator) version 2.3 is used.

Model domain	Vertical: 300 km (sponge layer: 150-300 km) Horizontal: 600 km
Grid interval	Vertical: 0.5 km    Horizontal: 1.0 km
Boundary condition	Side: Radiation (Dust heating) or Periodic (Uniform heating) Top and bottom: rigid wall
Initial condition	600Pa at the surface Hydrostatic equilibrium Neutral stratification below 5 km altitude



# 一様加熱実験の設定



加熱率: 高度 0-1 km で **10 K/hour**

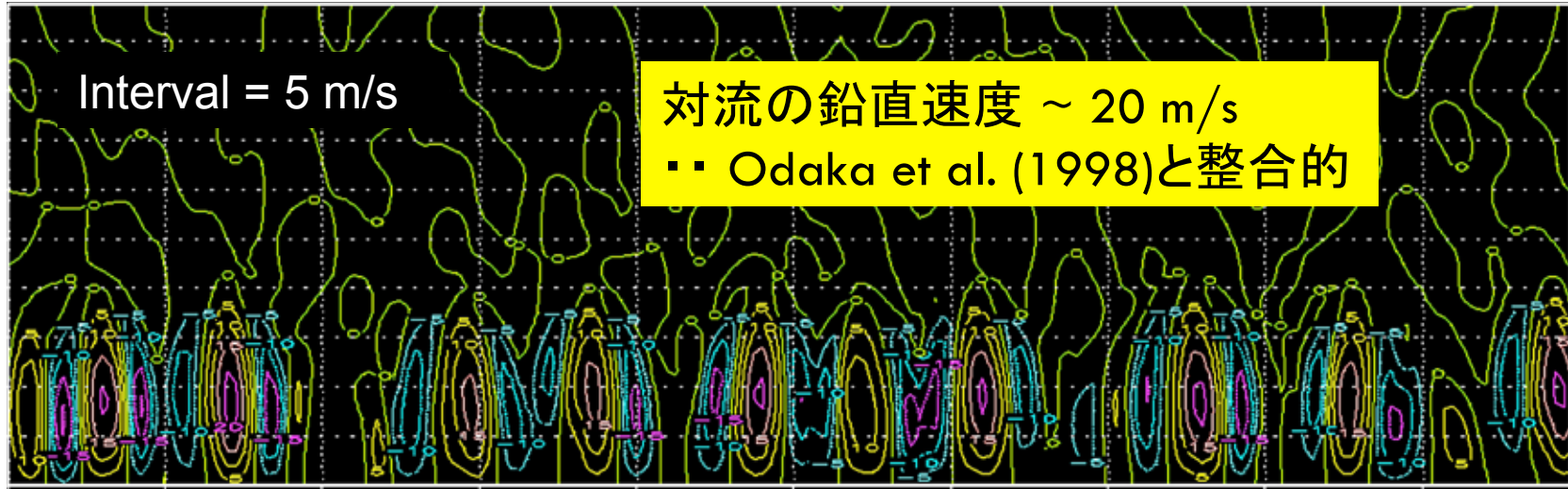
(観測とモデルから見積もられた境界層 0-5 km での夜間の放射冷却はおよそ 50 K/day (Heberle et al., 1993)。これを昼間の加熱で補うとするとおよそ 10 K/hour となる。)

# 結果 (150 min, 地表近く)

(km)  
20

## 鉛直速度

Interval = 5 m/s



対流の鉛直速度 ~ 20 m/s

▪ Odaka et al. (1998)と整合的

10

0

0 100 200 (km)

(km)  
20

## 温位擾乱

Interval = 0.2 K



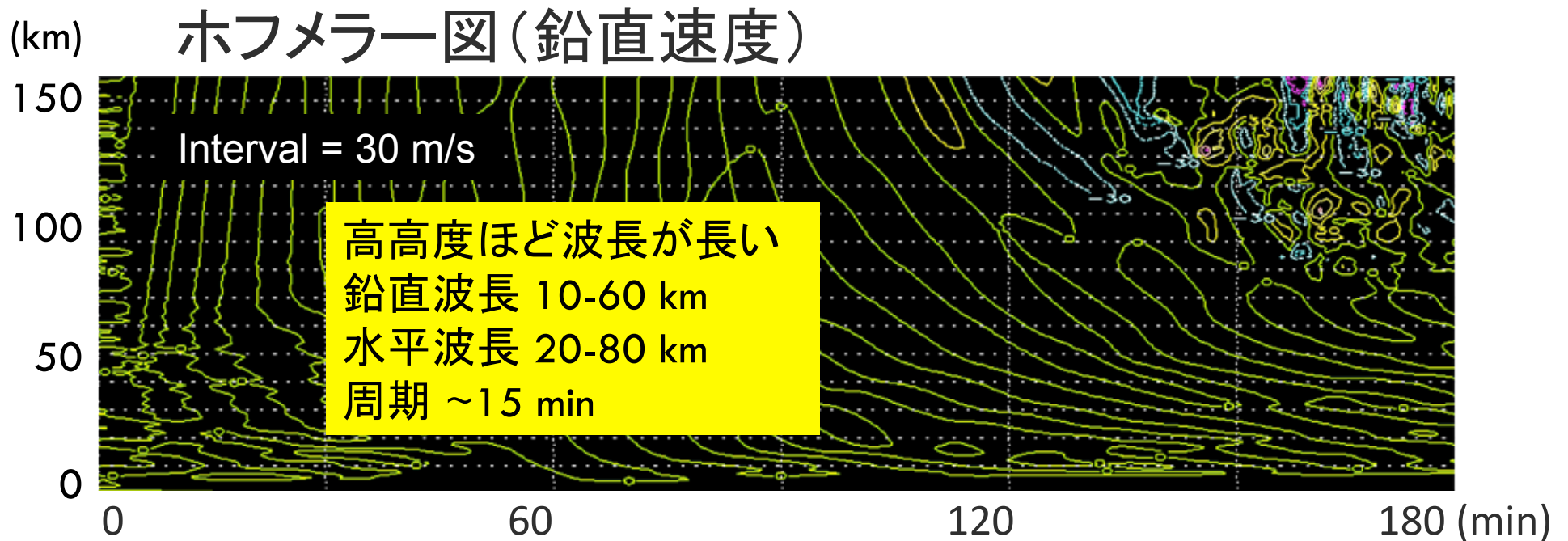
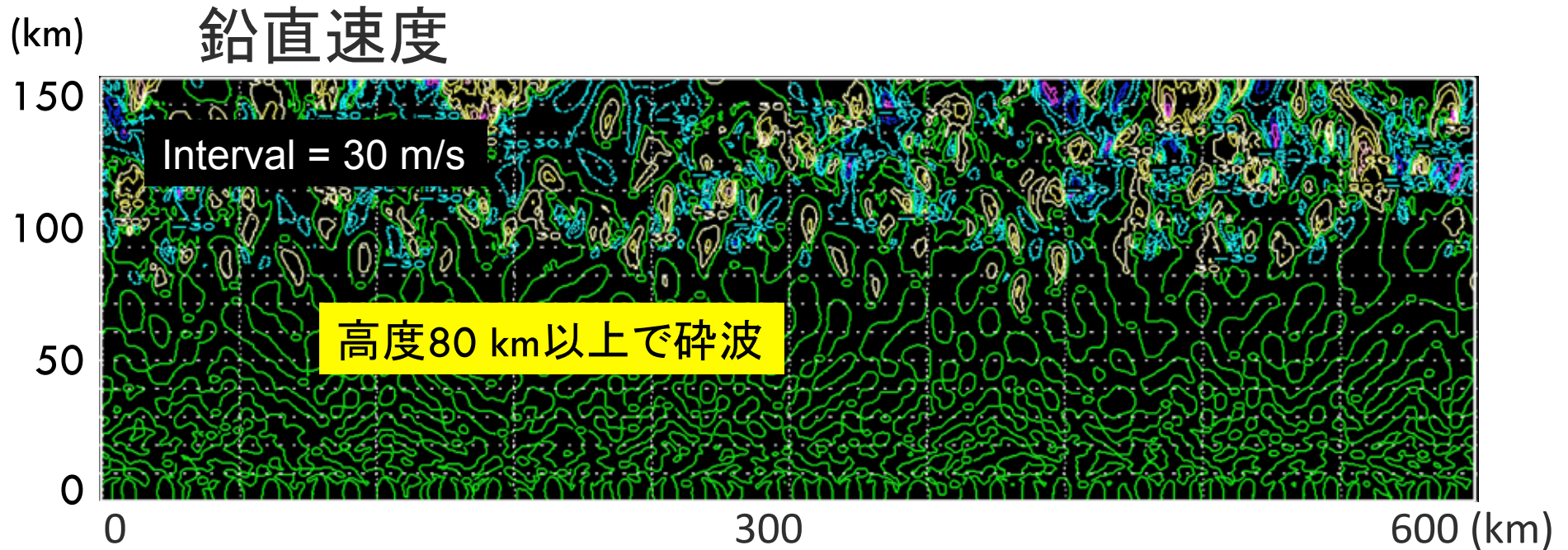
対流により重力波励起

10

0

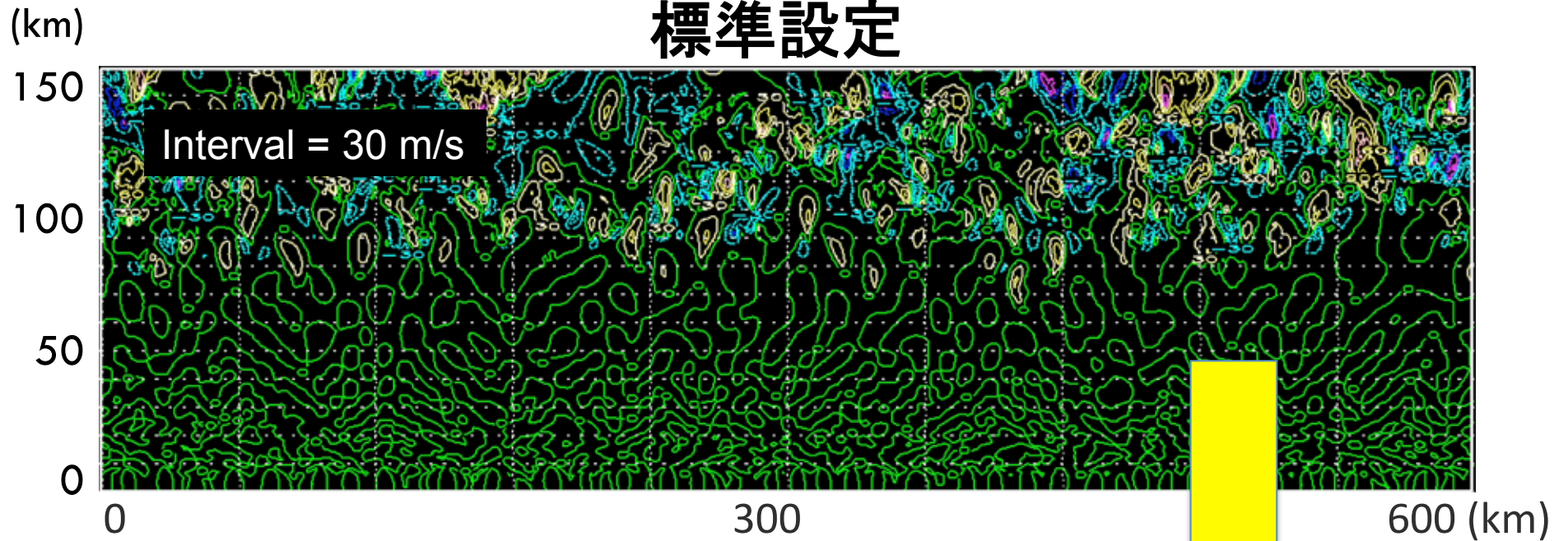
0 100 200 (km)

# 結果 (150 min, 全領域)

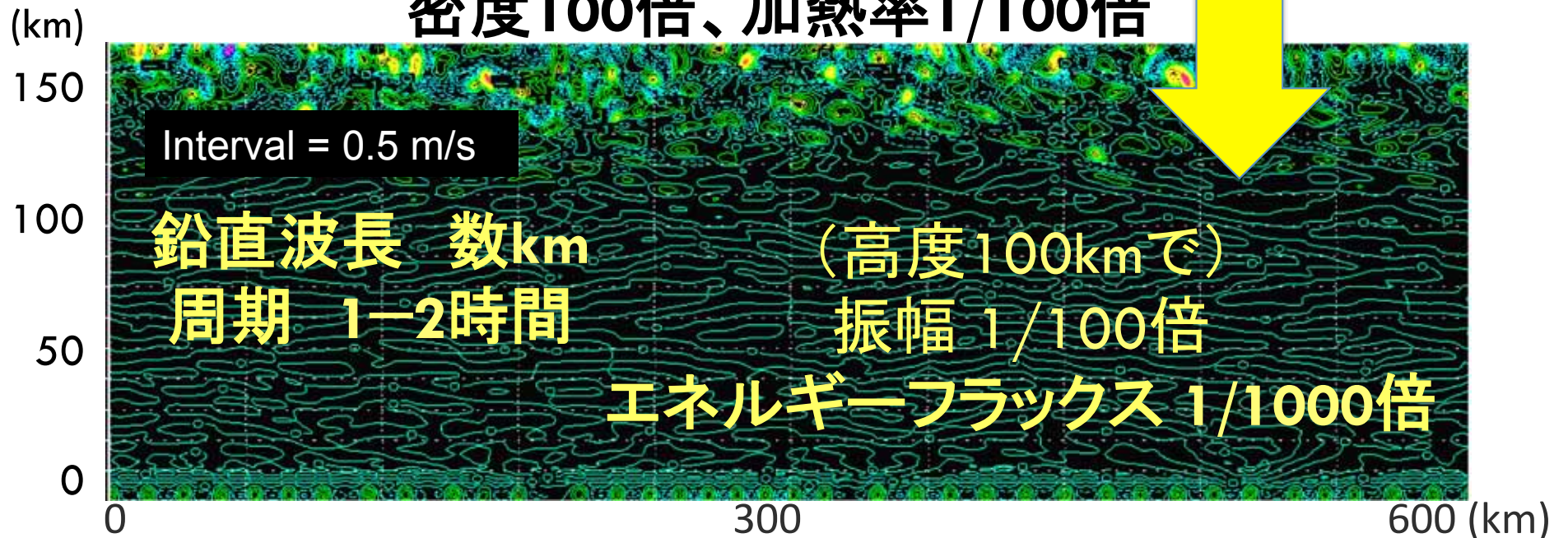


# 密度100倍実験

## 標準設定



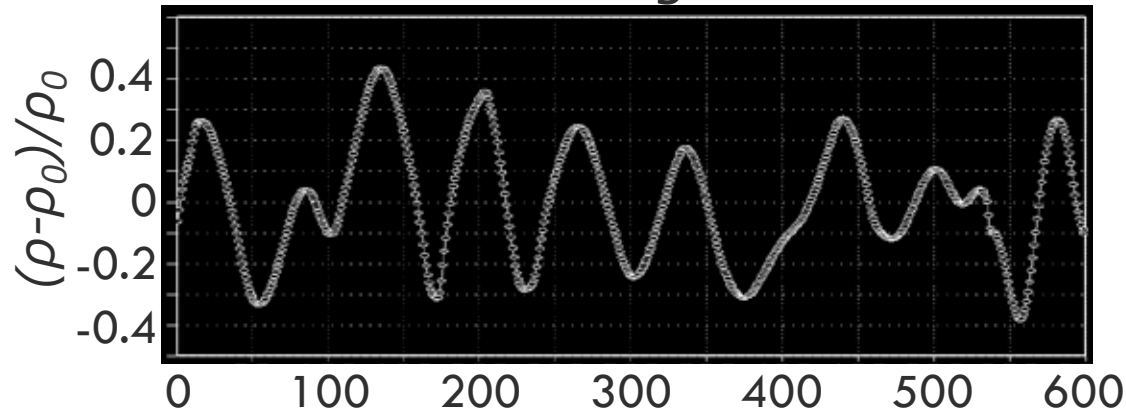
## 密度100倍、加熱率1/100倍



# 下部熱圏での密度変動

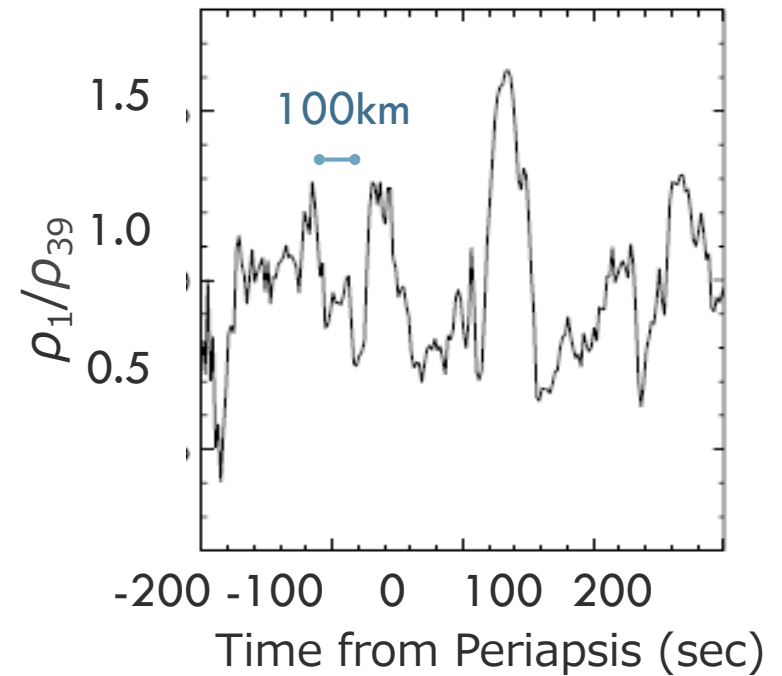
## モデル (高度130km)

Density amplitude : 5-50%  
Horizontal wavelength : 50-100km



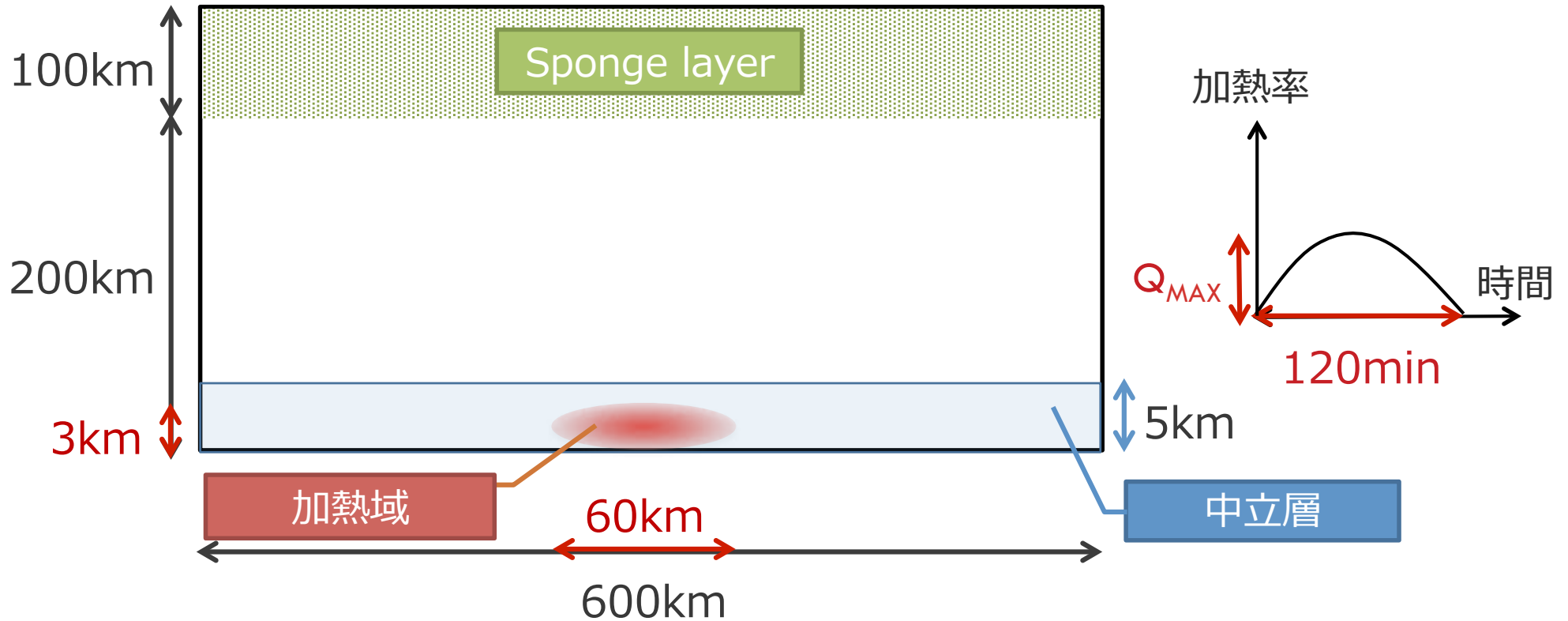
## 観測 (高度100-130 km)

Density amplitude : 5-50%  
Horizontal wavelength : 20-200km



(Fritts et al., 2006)

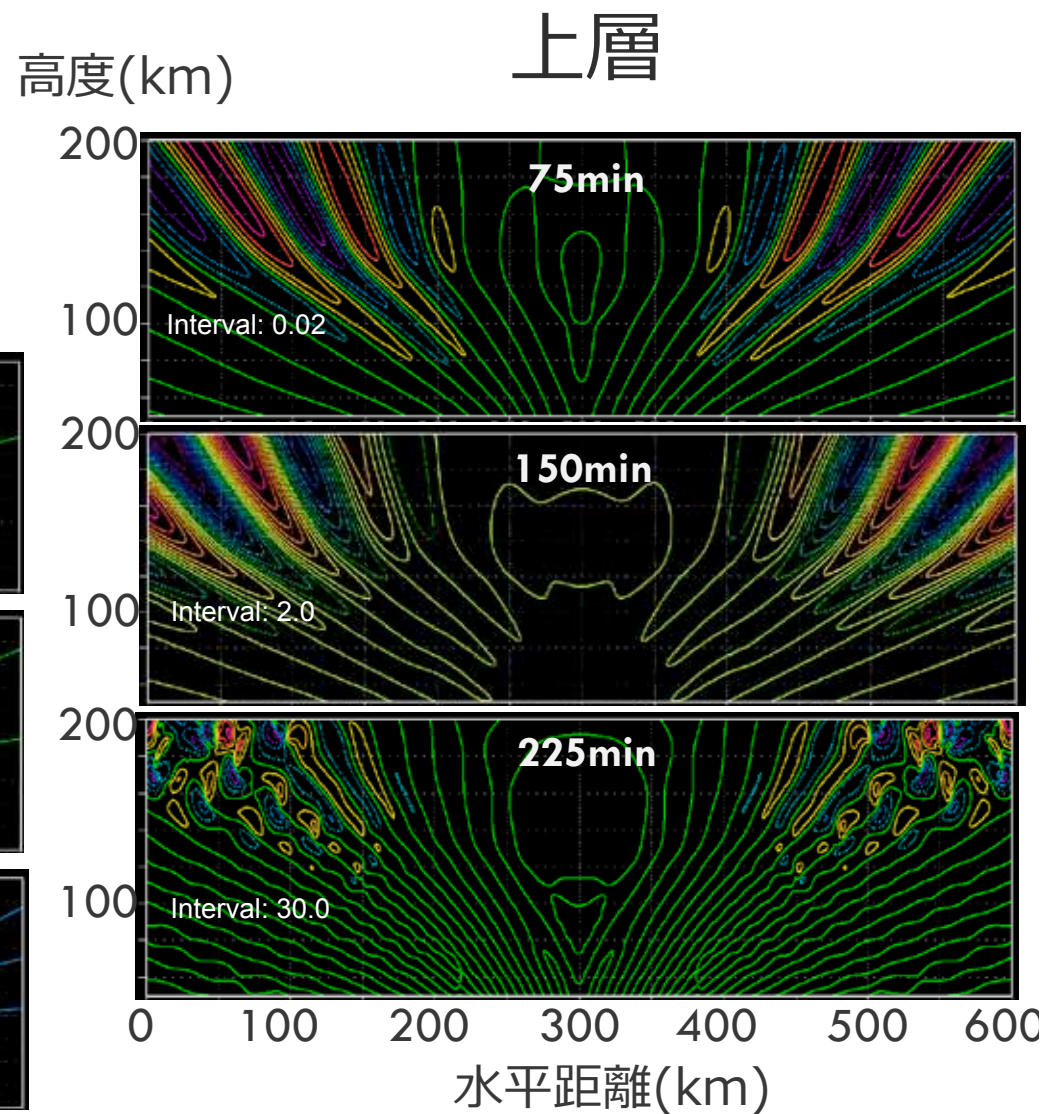
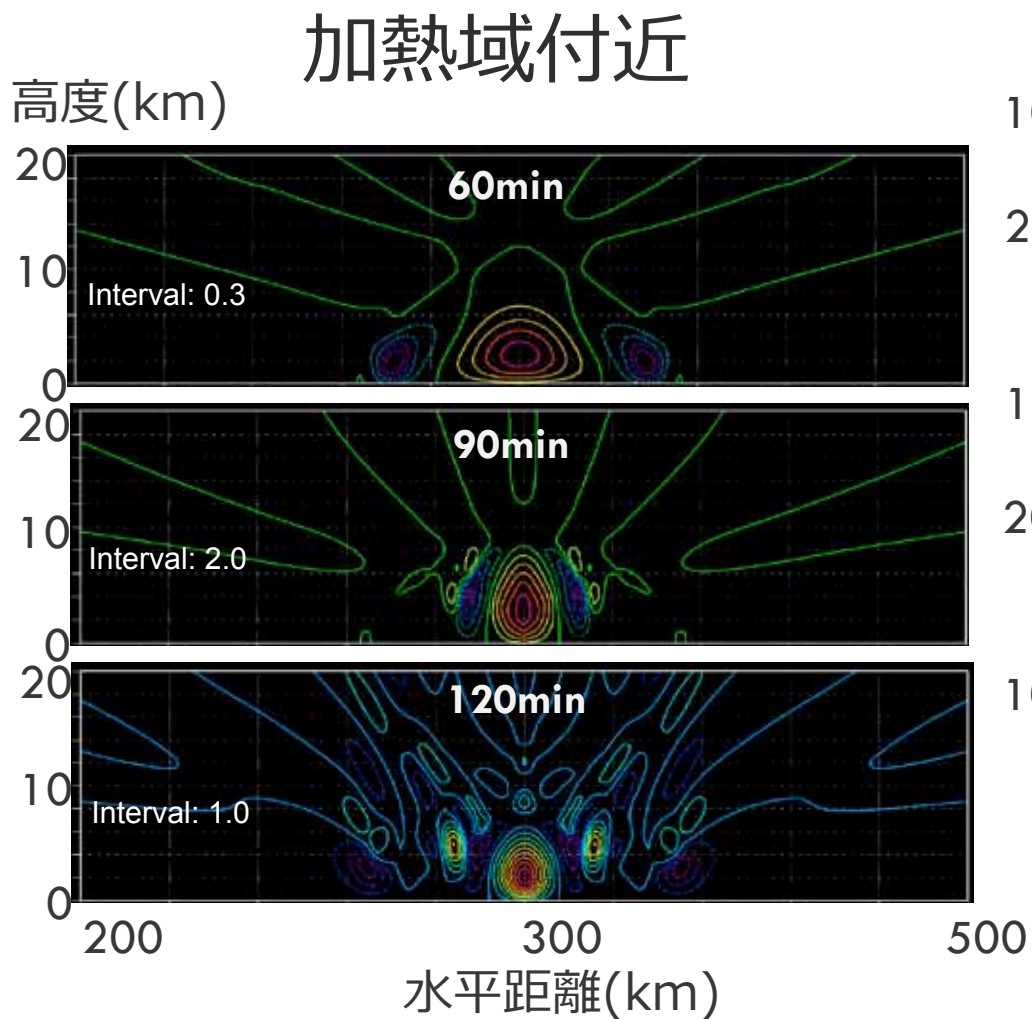
# 局所加熱実験の設定



加熱率極大 :  $Q_{MAX} = 10K/hour$

(加熱率、加熱の時間スケールは Spiga et al. (2013)を参考)

# 結果 (鉛直風)



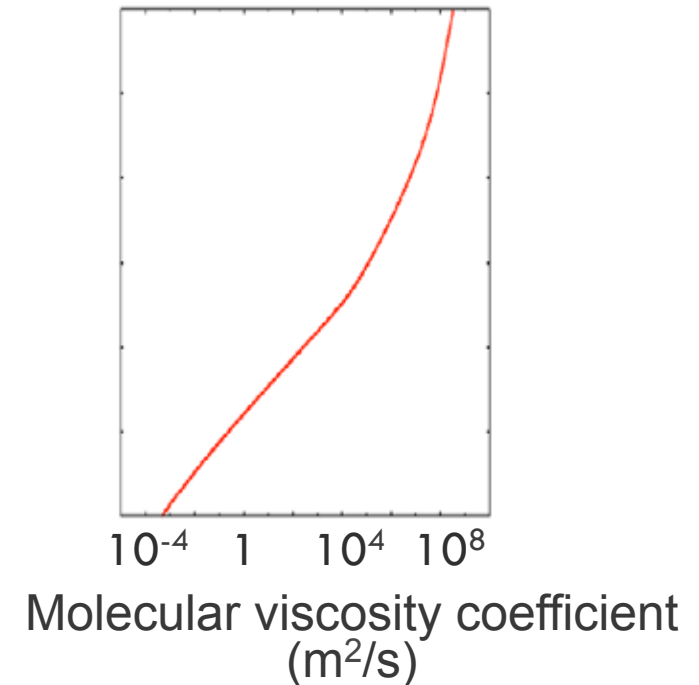


# 分子粘性による波の減衰

線型解を求め、4つの加熱項を考察

$$\bar{\rho} C_p Q = \underbrace{\langle \boldsymbol{\sigma}'_m : \nabla \boldsymbol{v}' \rangle}_{\text{粘性散逸}} - \underbrace{\frac{d}{dz} \{ C_p \bar{\rho} \langle w' T' \rangle \}}_{\text{顕熱フラックス収束}} + \underbrace{\langle \boldsymbol{v}' \cdot \nabla p' \rangle}_{\text{圧力勾配}} - \underbrace{\frac{d\bar{p}}{dz} \frac{\langle w' \rho' \rangle}{\bar{\rho}}}_{\text{鉛直ドリフト}}$$

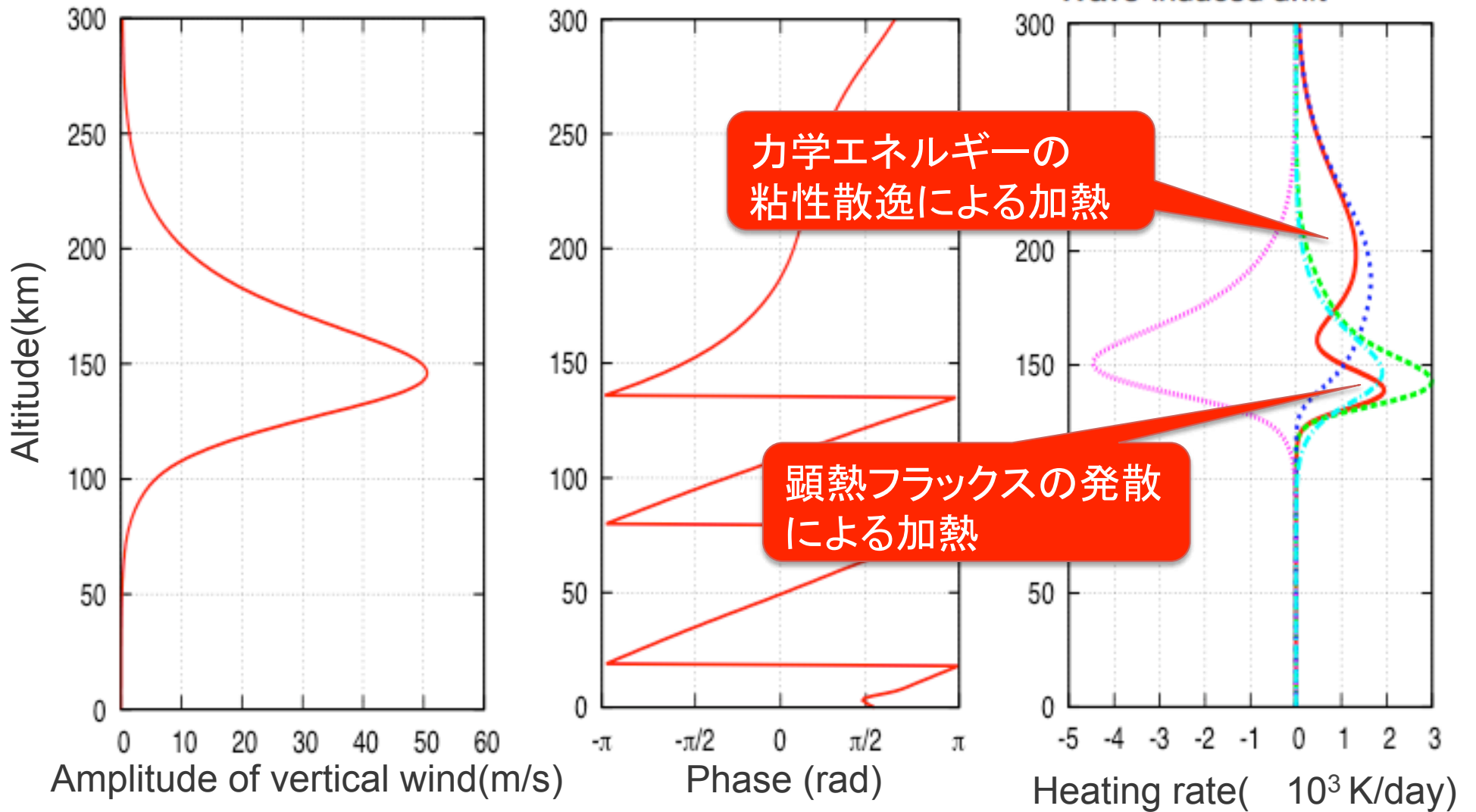
Model domain	Altitude: -200 – 500 km (600Pa at surface)
Sponge layer	Altitude: -200 – 0 km
Boundary condition	Upper: amplitude is zero. Lower: amplitude is zero.
Wave forcing	Periodical heating at altitude 3-7 km.



# 線形解

$\lambda_z = 60 \text{ km}$ ,  $\lambda_x = 95 \text{ km}$ ,  $T = 15 \text{ min}$

Total heating ———  
Sensible heat flux divergence - - -  
Viscous heating ·····  
Wave-induced pressure gradients ·····  
Wave-induced drift - · - ·



# まとめ

- ◆ 対流励起波動のパラメタ依存性(大気密度依存性など)を大きな問題意識として持ちつつ..
- ◆ 火星において対流が重力波を励起する過程の数値実験を行い、比較的短周期の重力波が励起されて上層大気にまで伝搬する可能性を示した。
- ◆ これらの重力波は数十kmの鉛直波長を持ち、鉛直伝搬が速いため、分子粘性が卓越する熱圏まで到達して大きな加熱率をもたらさう。
- ◆ 与える熱エネルギーを同じにしたまま密度を100倍にすると、鉛直波長が数kmとなり、熱圏下部でのエネルギーフラックスはおよそ1/1000倍になった。周期と水平スケールが対流の性質で決まり、そこから分散関係で鉛直波長が決まる？
- ◆ 音波は確認できず
- ◆ 3次元効果は大問題