

# 惑星大気(火星, 金星, ...) での対流表現問題

神戸大学 大学院理学研究科  
惑星科学研究センター (CPS)  
林 祥介

[shosuke@gfd-dennou.org](mailto:shosuke@gfd-dennou.org)

2025 年 1月21日

WTK/CPS 大気境界層乱流ミニ研究会@神戸CPS



地球流体電脳倶楽部 <http://www.gfd-dennou.org/>  
惑星科学研究センター <http://www.cps-jp.org/>

# はじめに

大気運動を表現する数値モデルの高解像度化にともなう大気境界層乱流の Terra Incognita 問題を Wyngaard が提起して 20 年がたちましたが、系外惑星も含め惑星大気を念頭に置いた数値計算も高解像度が進展しつつあり、そこでの乱流の取扱方、特に、惑星表面での乱流の扱いについても、この問題を念頭に置き、惑星パラメタ空間での適用可能性など考えるべき時に至っているのではないかと考えられます。

そこで、まずは、モデル化の原点である地球大気での境界層の扱い方について、その理論から高解像度計算を念頭に置いたモデル化と実装の取り組みまで、その現状と問題点を紹介頂き、議論を行うことを予定しています。

# はじめに

要は

- 乱流問題、あるいは、その数値的表現問題（モデル化問題）
- GFD（地球流体力学）の伝統問題であるが、理解や技術の進展に伴い折に触れてみなおすのが良い（楽しい）
- （地球以外の）惑星気象の探求は、地球気象で培われた理解と技術が基

# はじめに

## 地球流体での乱流

- 流れの不安定（含む波の励起・伝搬・減衰/碎波）
- 対流

境界層においては上記両者が登場人物ではあるが、

以下、惑星気象のどっちかと言うと**対流**の、特に、大循環モデル等においてどう扱ったらよいのか（業界はさておき私が）わかってない、について少々

# はじめに

## 地球流体での乱流

- 流れの不安定（含む波の励起・伝搬・減衰/碎波）
- 対流

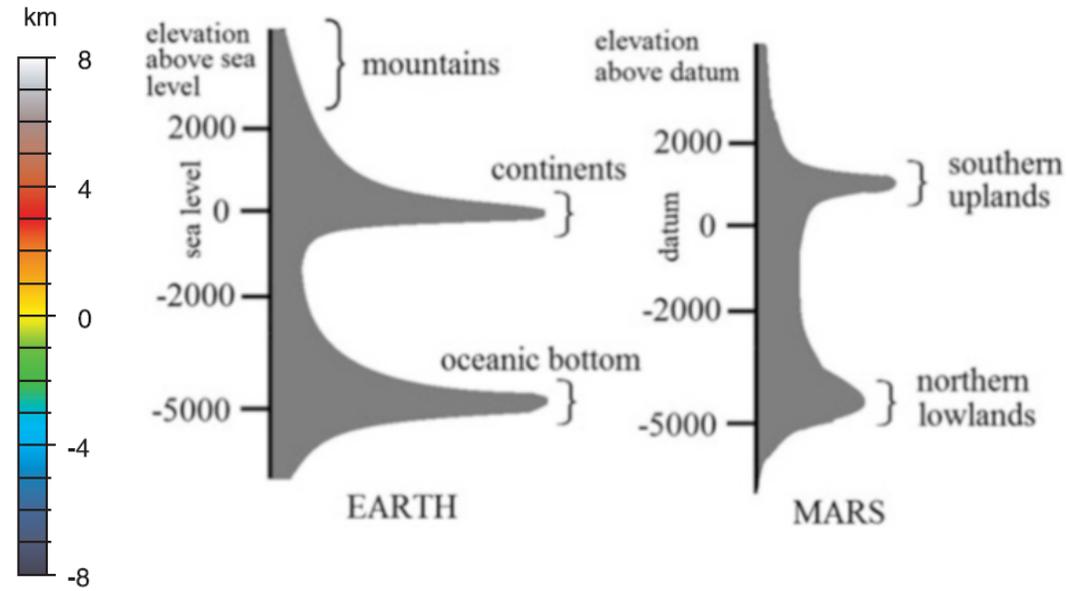
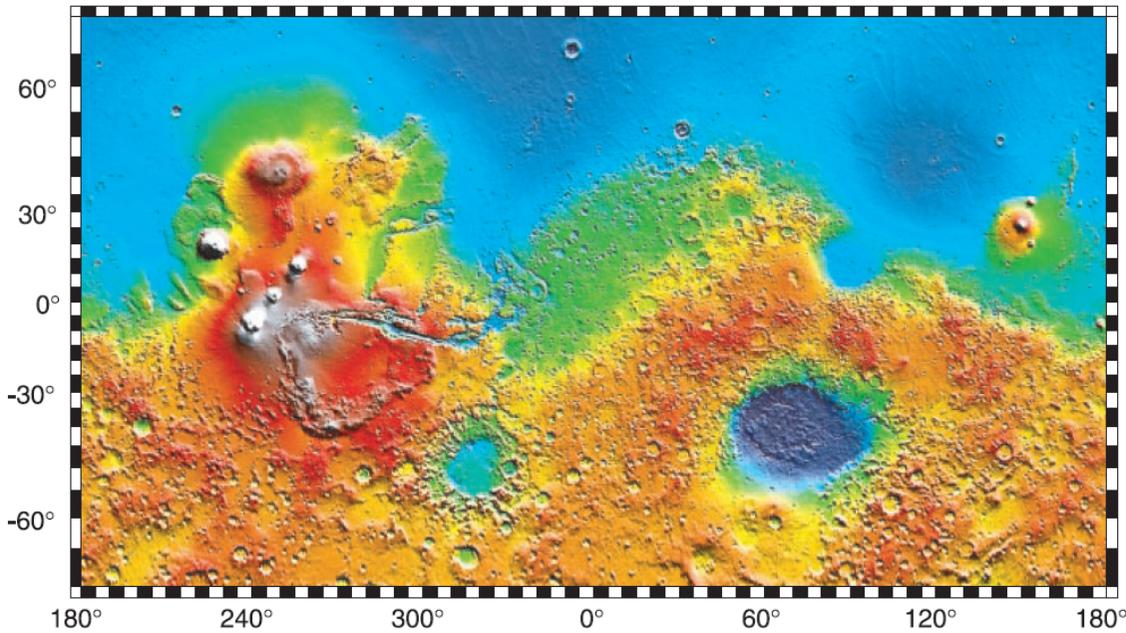
境界層においては上記両者が登場人物ではあるが、

以下、惑星気象のどっちかと言うと**対流**の、特に、大循環モデル等においてどう扱ったらよいのか（業界はさておき私が）わかってない、について少々

- 火星
- 金星
- …

# 火星地形

理想的な大気境界層を考えてもよさげな平らな場所があるかと言うと微妙だが、まあ…



Smith et al 1999: Mars Orbiter Laser Altimeter  
<https://doi.org/10.1126/science.284.5419.1495>

Sleep et al 1994: Martian plate tectonics  
<https://doi.org/10.1029/94JE00216>

# 火星大気大循環 (イメージ)

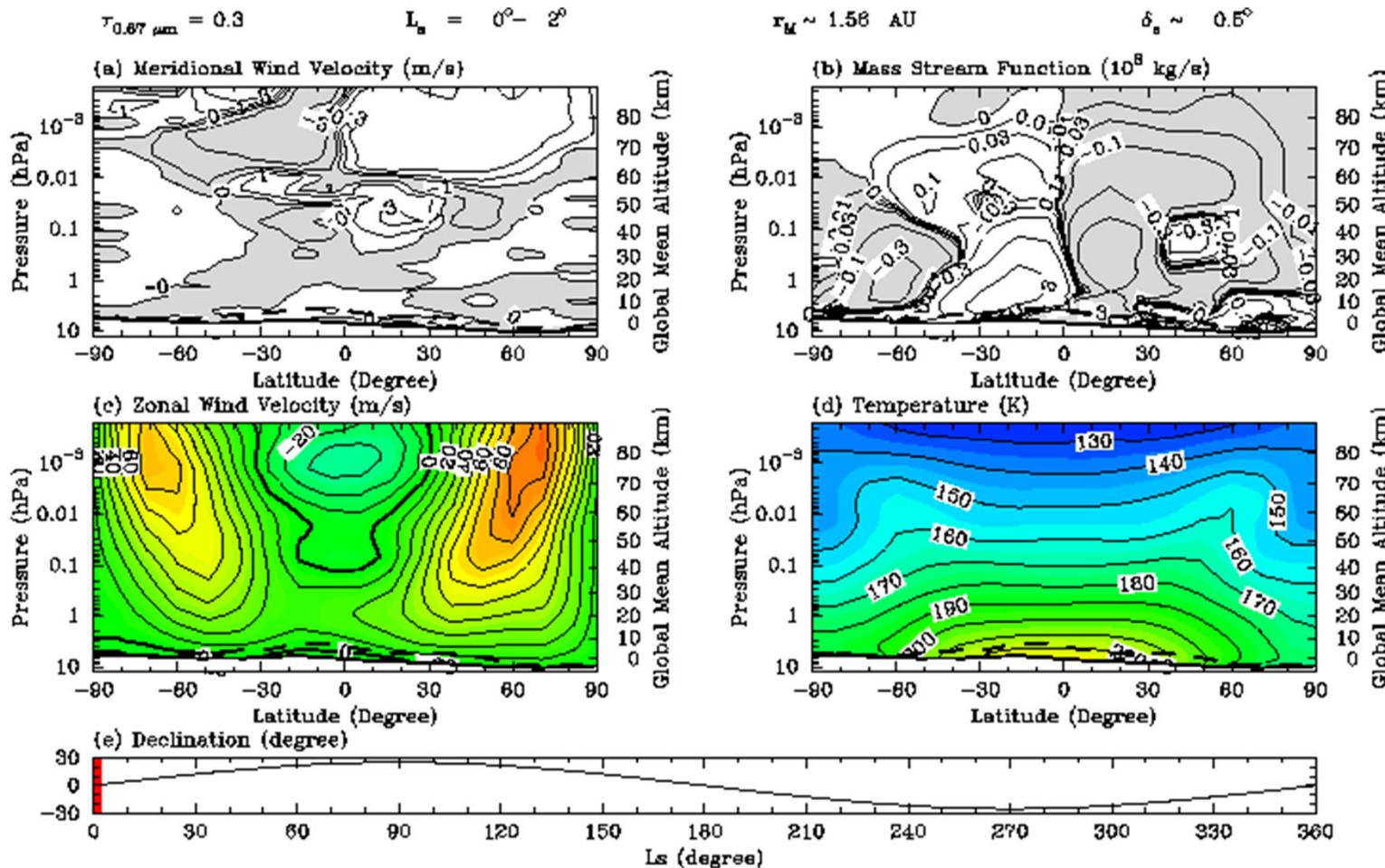
based on (DCPAM前夜)

Takashi et al 2003

<https://doi.org/10.1029/2001JE001638>

Martian GCM

but with spectral transformation T10?



Takahashi & Odaka  
2007 (unpublished)

Fixed dust opacity  
 $\tau = 0.3$

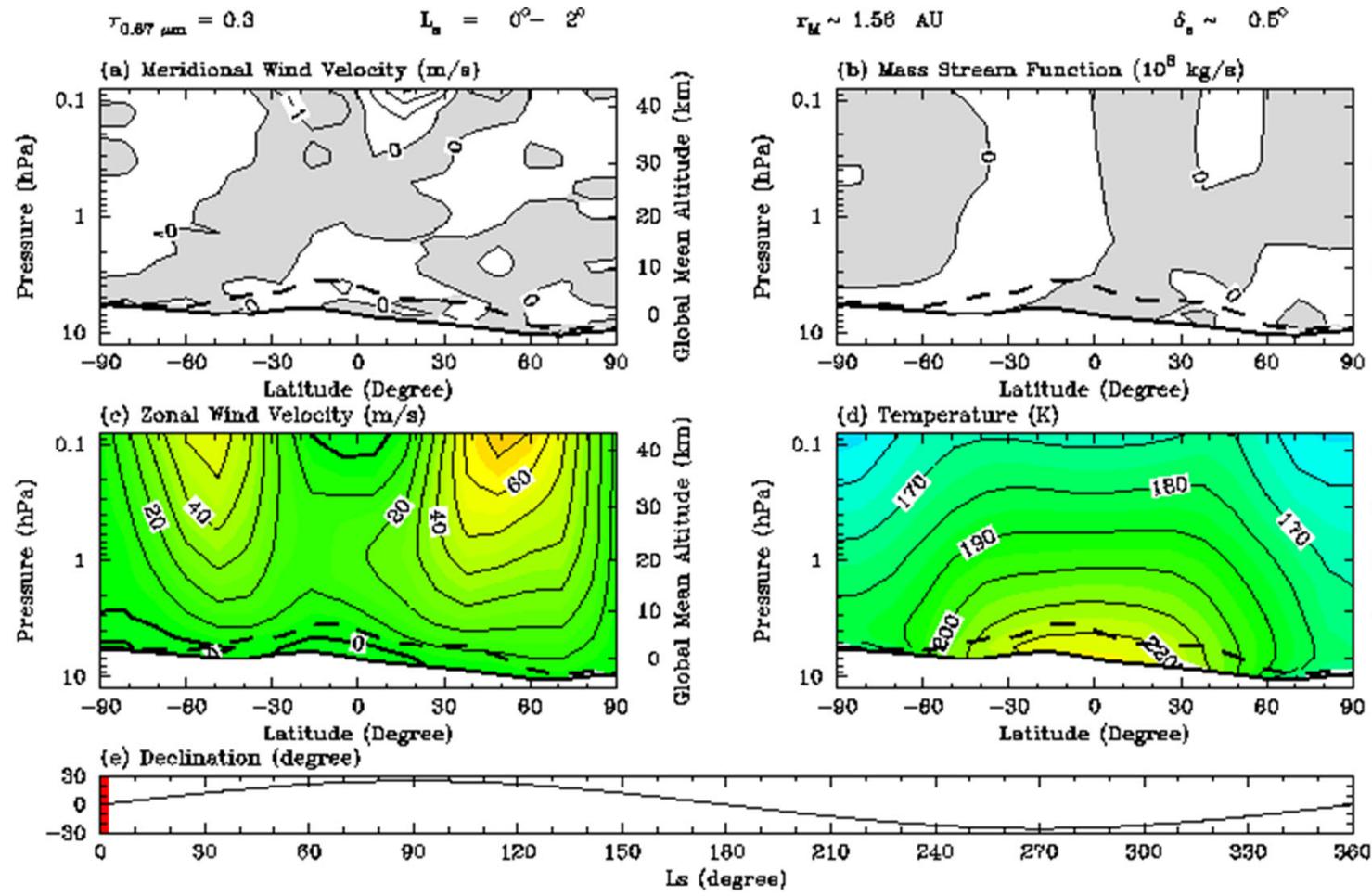
火星では  
「対流圏」は用いない  
「下層大気」という

「大気境界層」  
PBL (ABL)  
「対流境界層」  
CBL  
は用いる

PBLの上いきなり  
「成層圏」みたいな

# 火星大気大循環 (イメージ)

based on (DCPAM前夜)  
 Takashi et al 2003  
<https://doi.org/10.1029/2001JE001638>  
 Martian GCM  
 but with spectral transformation T10?



Takahashi & Odaka  
 2007 (unpublished)

Fixed dust opacity  
 $\tau = 0.3$

火星では  
 「対流圏」は用いない  
 「下層大気」という

「大気境界層」  
 PBL (ABL)  
 「対流境界層」  
 CBL  
 は用いる

PBLの上いきなり  
 「成層圏」みたいな

# 火星（金星も？）の対流＝乾燥対流

## 乾燥対流vs湿潤対流

佐藤正樹1992: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1992\)049%3C1202:SCMIOD%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1992)049%3C1202:SCMIOD%3E2.0.CO;2)

Simple Cumulus Models in One-Dimensional Radiative Convective Equilibrium Problems

には書いてないけど、熱機関としての大気対流考察した

Pauluis and Held 2002: [https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/59/2/1520-0469\\_2002\\_059\\_0125\\_eboaai\\_2.0.co\\_2.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/59/2/1520-0469_2002_059_0125_eboaai_2.0.co_2.xml)

Entropy Budget of an Atmosphere in Radiative-Convective Equilibrium. Part I: Maximum Work and Frictional Dissipation

- 乾燥対流：熱機関としての仕事＝運動エネルギー生成
- 湿潤対流：熱機関としては仕事はあまりしないで、大気を湿らせるだけ

乾燥対流は、同じエネルギー輸送を担うなら、大きな運動エネルギー源となる

重力波をいっぱい射出する？

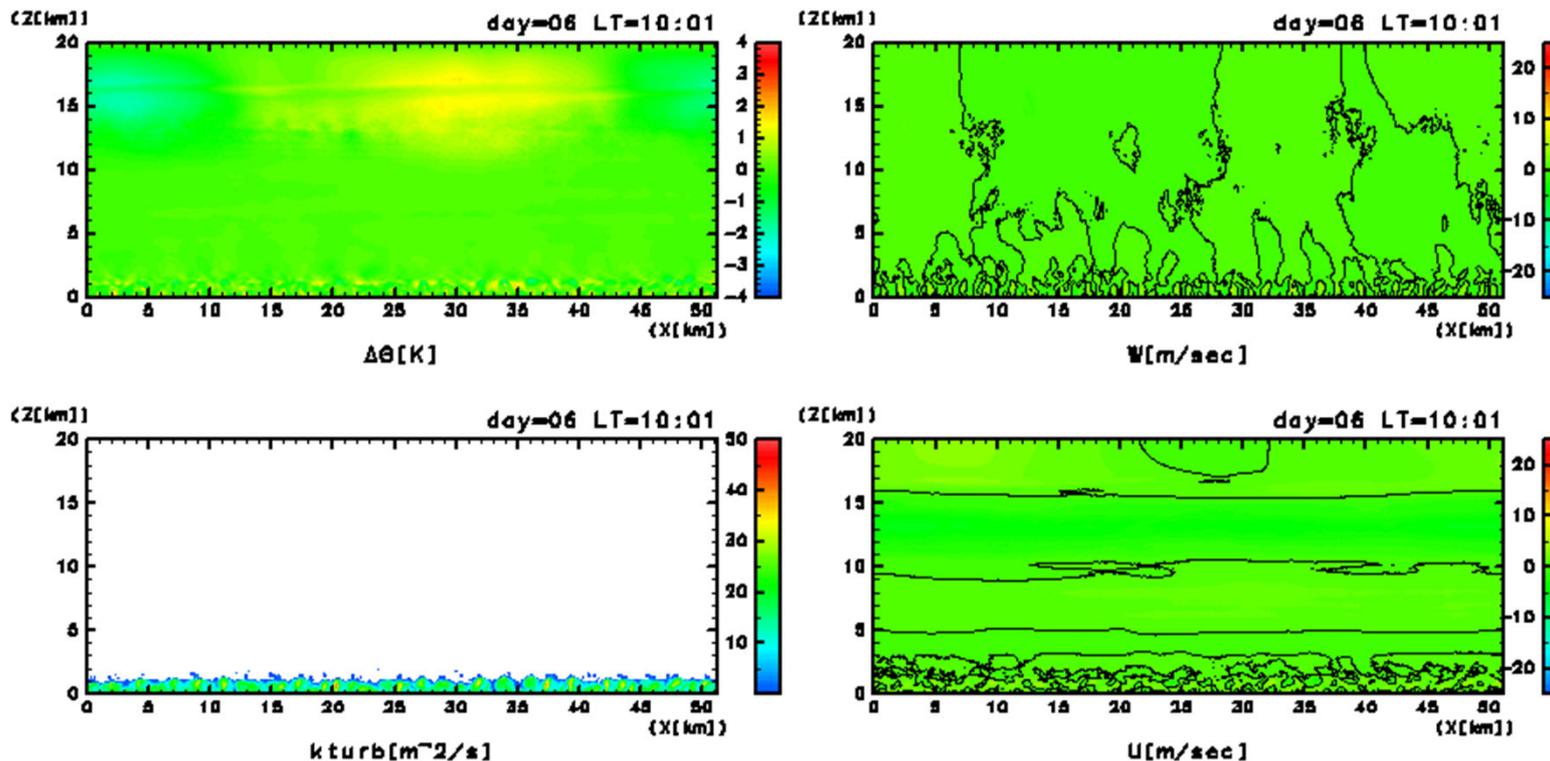
干渉してたいしたことない？

ちゃんとMYNN化すればよい？

# 火星表層 (PBL) の対流

- Odaka et al 1998 <https://doi.org/10.1186/BF03352130>
- Odaka 2001 <https://doi.org/10.1029/2000GL012090>
- Odaka et al 2001 <https://www2.nagare.or.jp/mm/2001/odaka/>

数値計算が先行  
先駆的な仕事  
2次元非弾性計算



Odaka et al 2001

ダスト無し  
CO<sub>2</sub>吸収のみ  
2次元

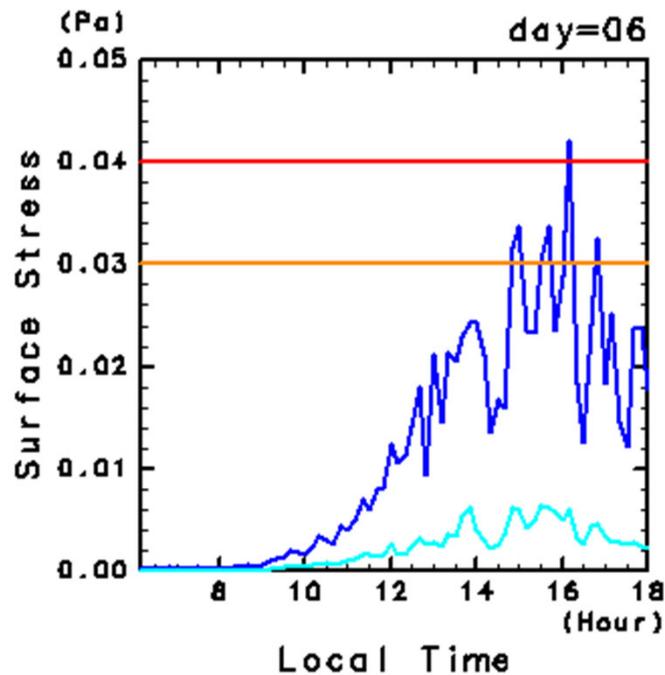
→

対流強度が強すぎ  
に注意だが  
PBLの高さは  
10kmぐらい  
上昇流は20m/sぐらい  
とした

# 火星表層 (PBL) の対流

- Odaka et al 1998 <https://doi.org/10.1186/BF03352130>
- Odaka 2001 <https://doi.org/10.1029/2000GL012090>
- Odaka et al 2001 <https://www2.nagare.or.jp/mm/2001/odaka/>

数値計算が先行  
先駆的な仕事  
2次元非弾性計算



Odaka et al 2001

図 5: 地表摩擦(絶対値)の日変化 (LT = 06:00 ~ 18:00). 青は最大値, 水色は水平平均値, 橙と赤はダスト巻き上げに必要な臨界摩擦の下限値と上限値 ([Greeley and Iversen, 1985](#)).

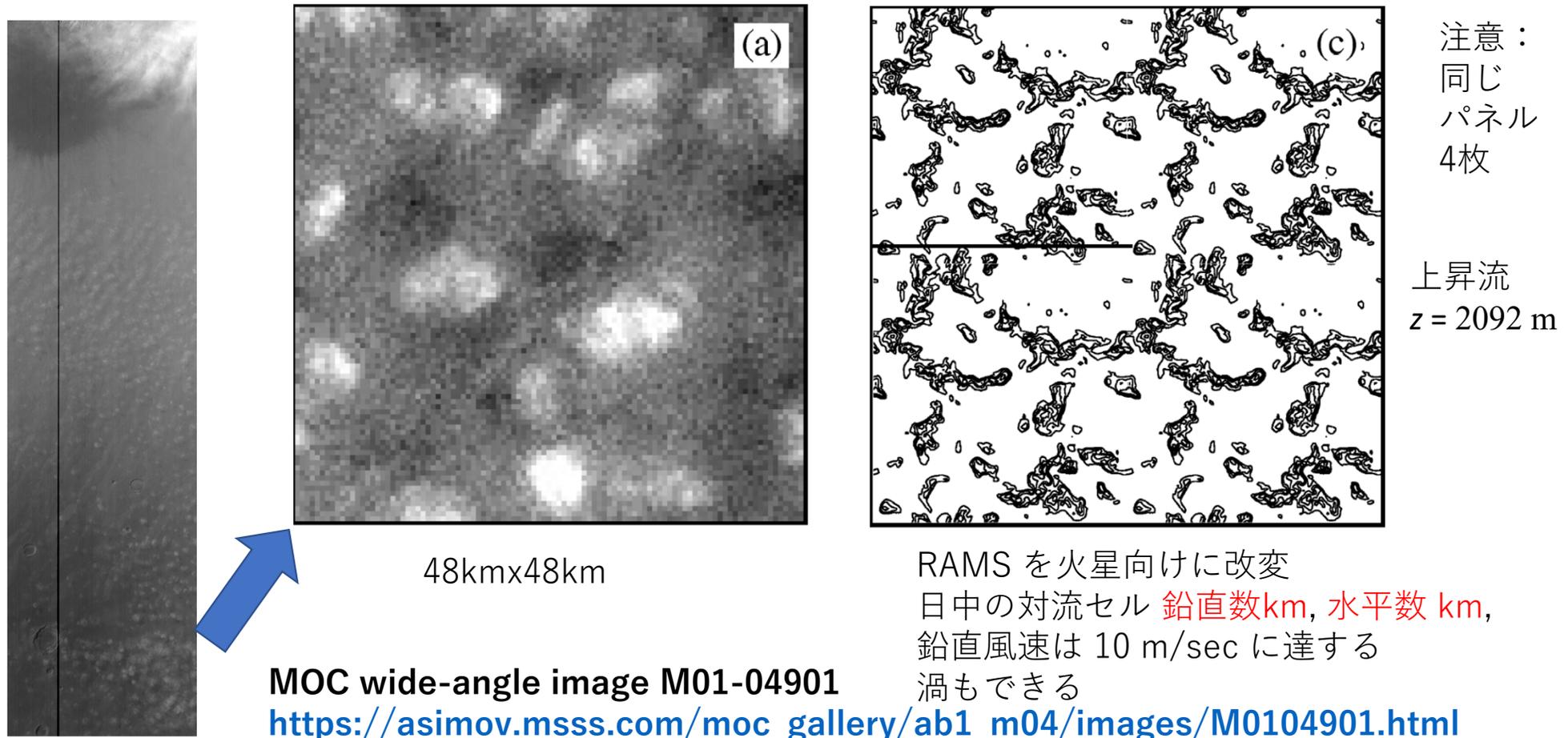
平均応力じゃあダストが巻き上がらない問題の解決？  
その後、人々は渦の存在に注目し、**ダストデビルパラメタリゼーション**という手に向かったが

# 火星表層 (PBL) の対流

先駆的な仕事  
3次元計算

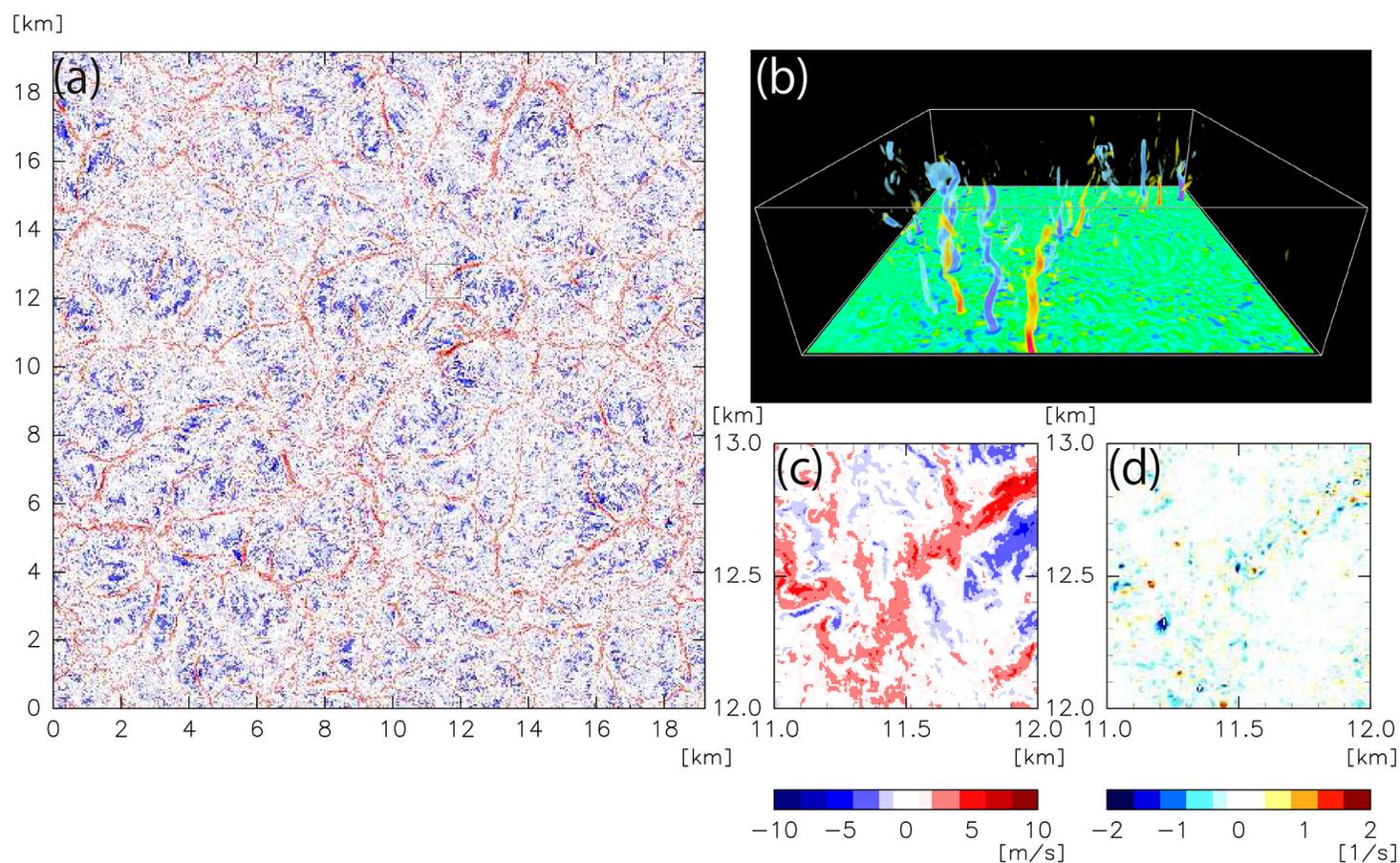
24kmx24kmxH9.6km  
150mx150mx(4-225)m  
(最下層グリッドは1.9m)  
160x160x61格子

- Michaels and Rafkin 2004 <https://doi.org/10.1256/qj.02.169>



# 火星表層 (PBL) の対流

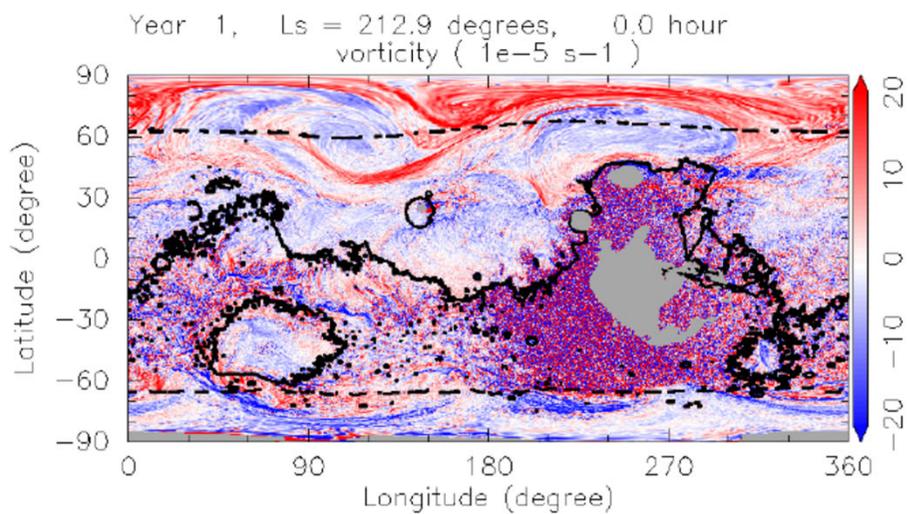
- Nishizawa et al 2016 LES 計算  
<https://doi.org/10.1002/2016GL068896>



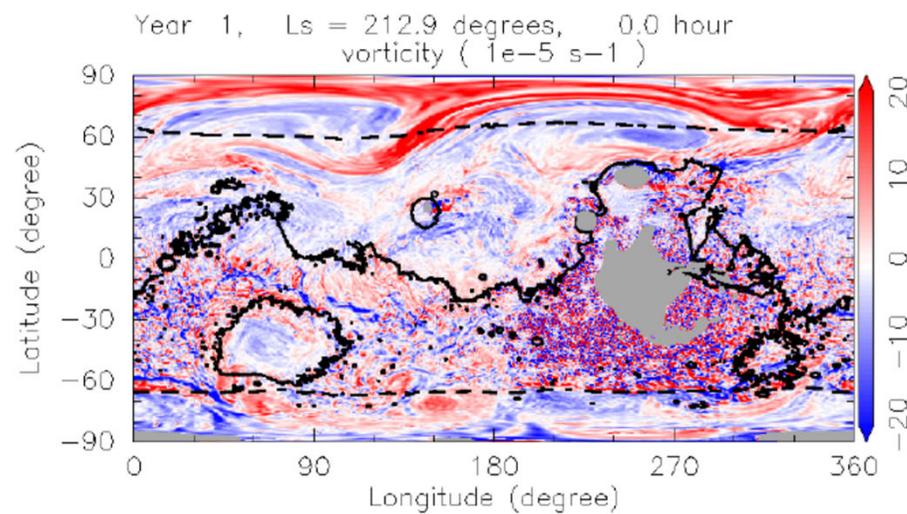
**Figure 1**  
z=62.5 m  
5 m resolution run at 14:30 LT

(a, c) vertical velocity  
(d) vertical vorticity  
(b) 3D vertical vorticity

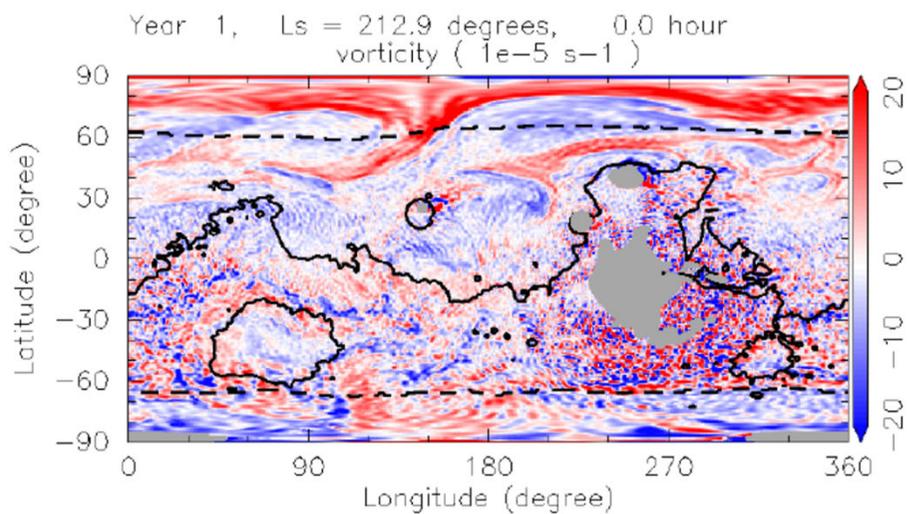
(a) entire domain  
(b-d) 1 km × 1 km  
the rectangle in (a)  
(b) top=300 m



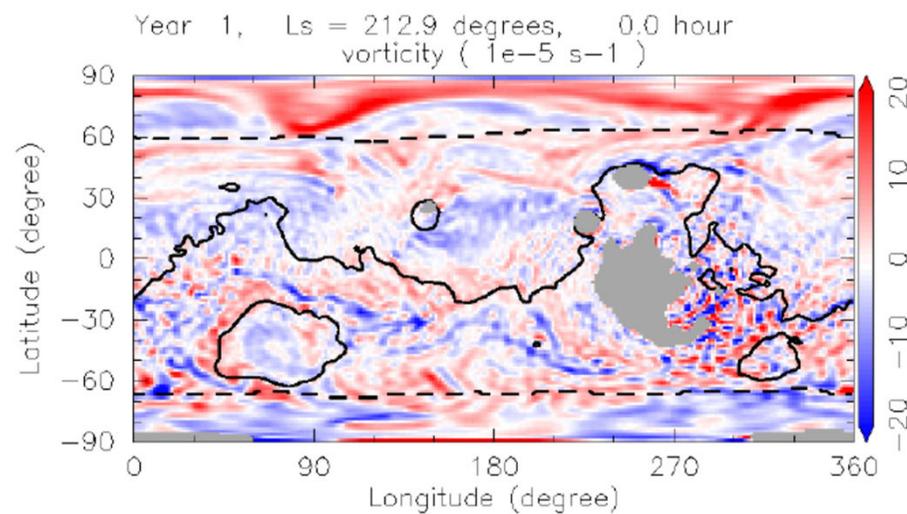
(a) T639L96



(b) T319L96



(c) T159L96



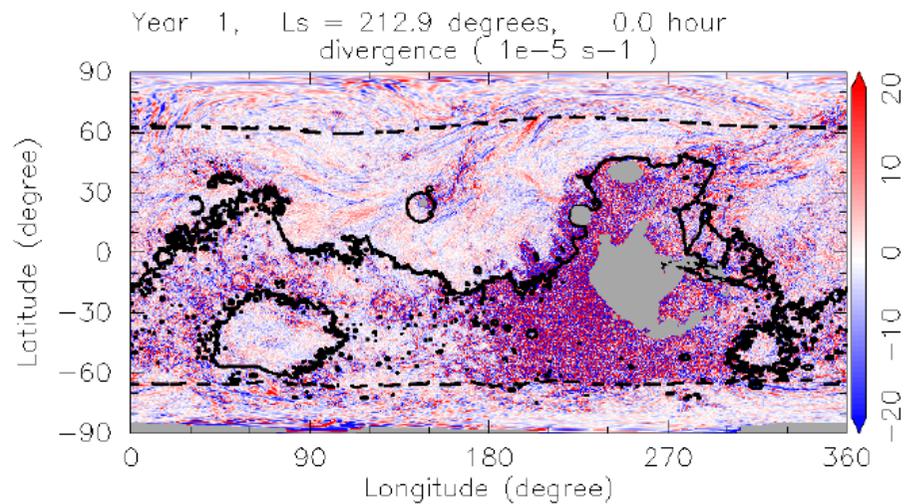
(d) T79L96

**AFES-Mars**  
静力全球モデル  
Takahashi  
et al  
(in preparation)

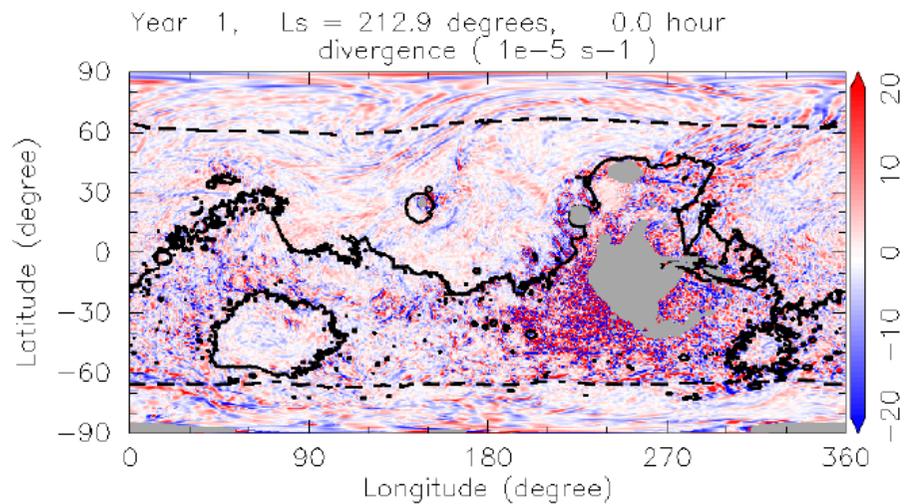
Ls = 212.9  
4 h Pa  
での渦度

GCMが  
表現しなかった  
対流

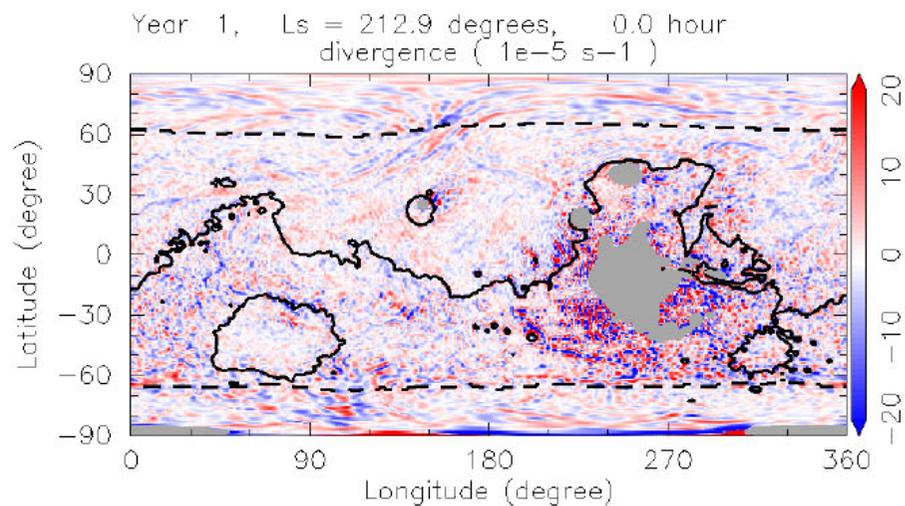
**対流調節なし**



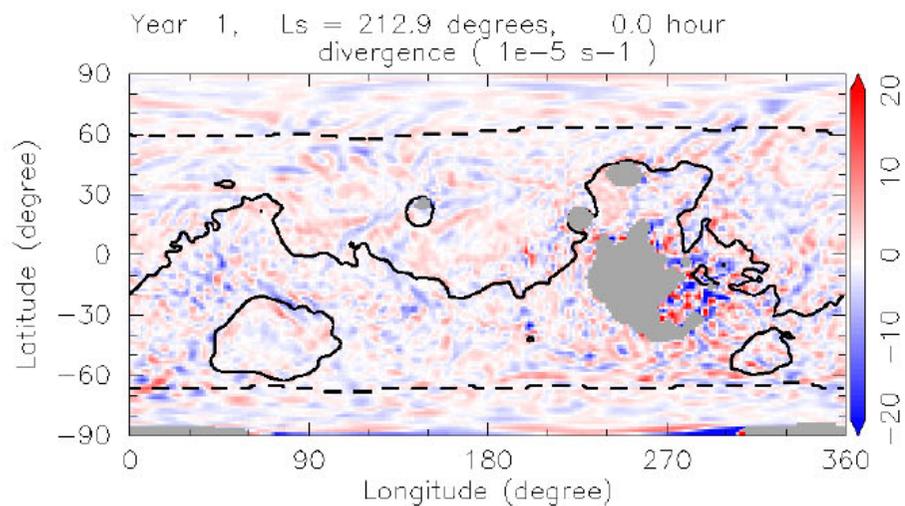
(a) T639L96



(b) T319L96



(c) T159L96



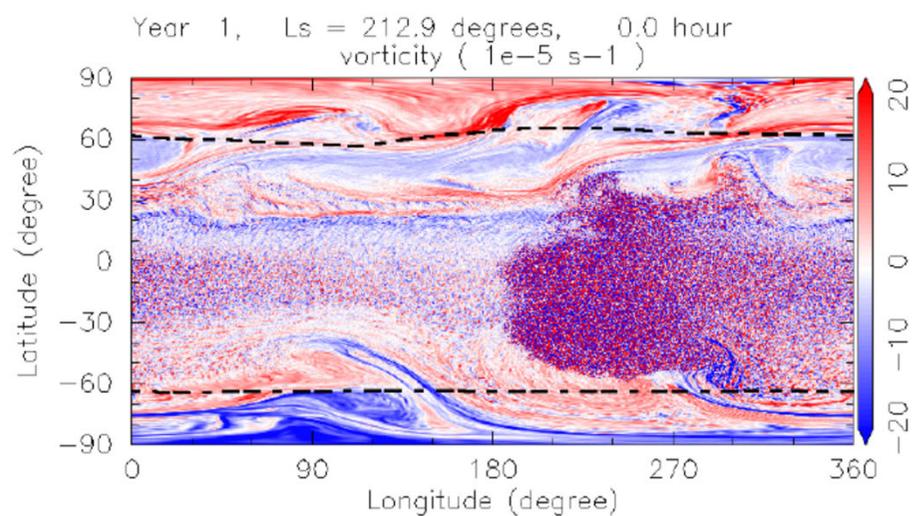
(d) T79L96

**AFES-Mars**  
**静力全球モデル**  
 Takahashi  
 et al  
 (in preparation)

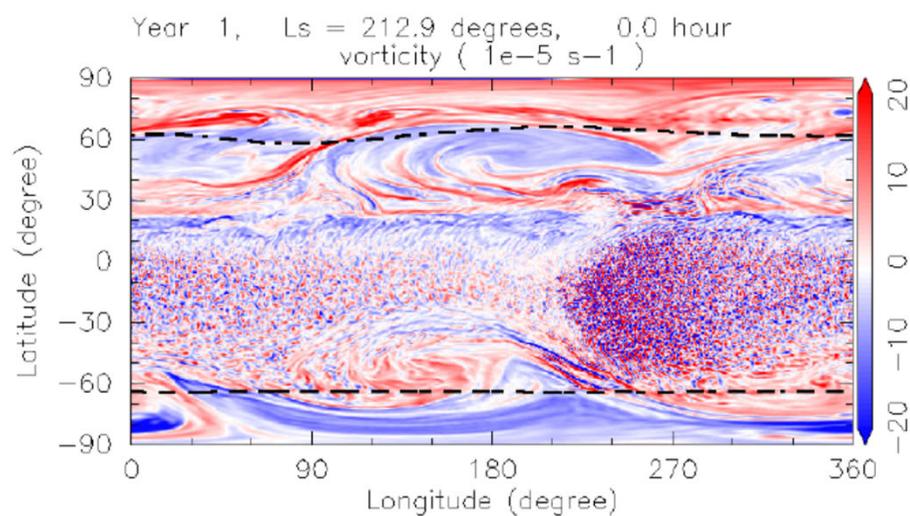
Ls = 212.9  
 4 h Pa  
 での発散

GCMが  
 表現しなかった  
 対流

**対流調節なし**



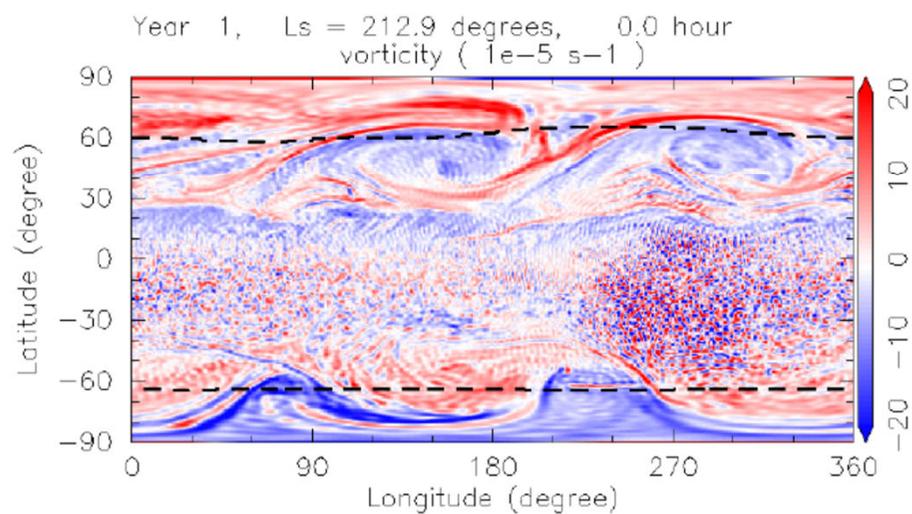
(a) T639L96



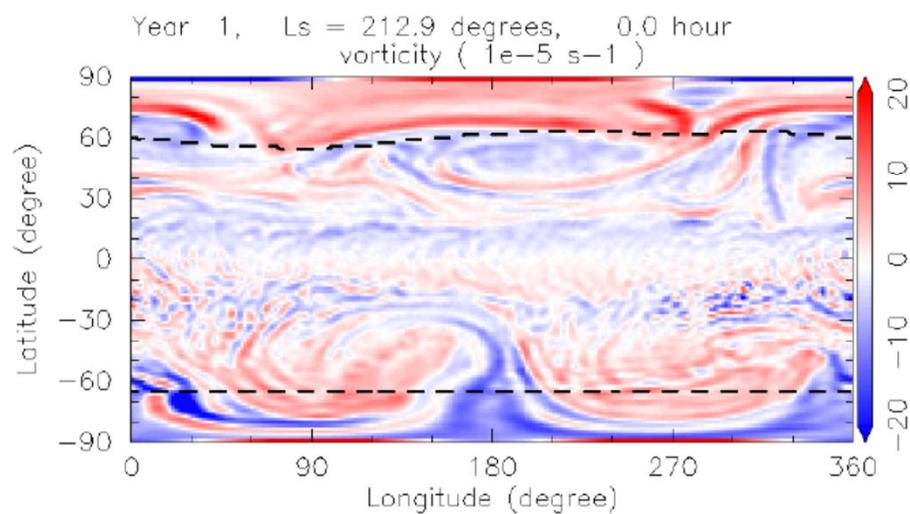
(b) T319L96

**AFES-Mars**  
**静力全球モデル**  
 Takahashi  
 et al  
 (in preparation)

Ls = 212.9  
 4 h Pa  
 での渦度

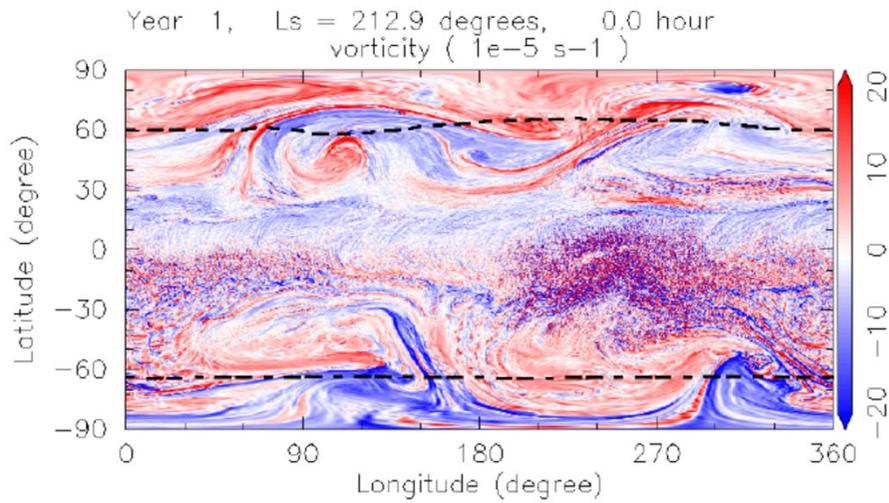


(c) T159L96

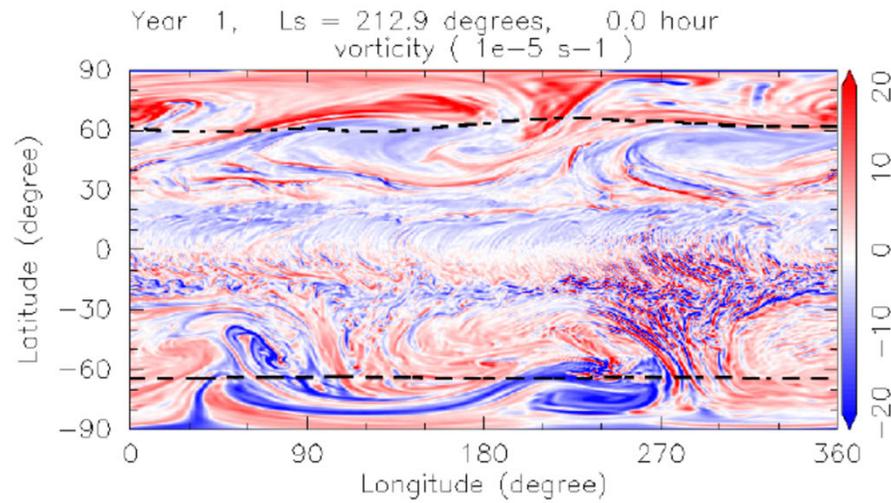


(d) T79L96

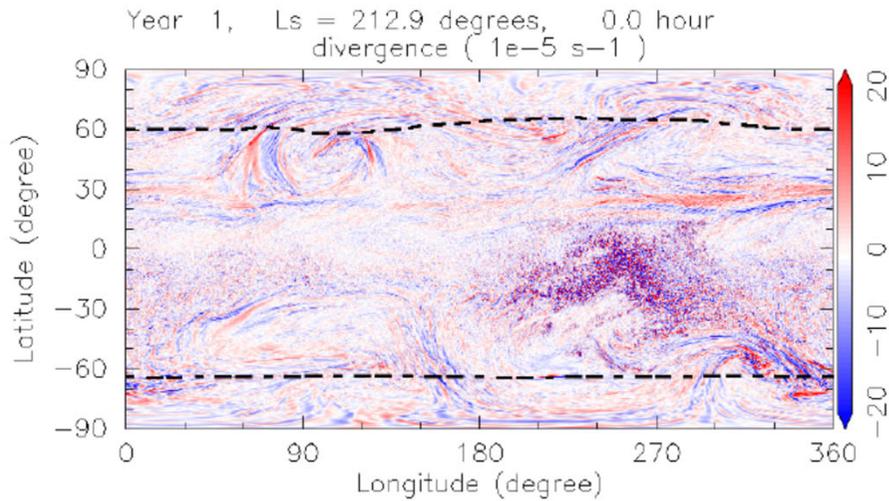
**地形無し**  
**対流調節なし**



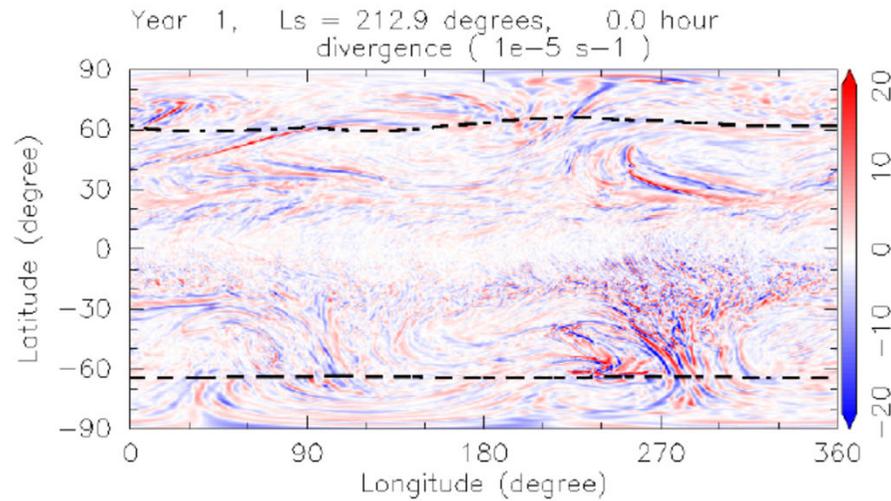
(a) Vorticity (T639L96)



(b) Vorticity (T319L96)



(c) Divergence (T639L96)

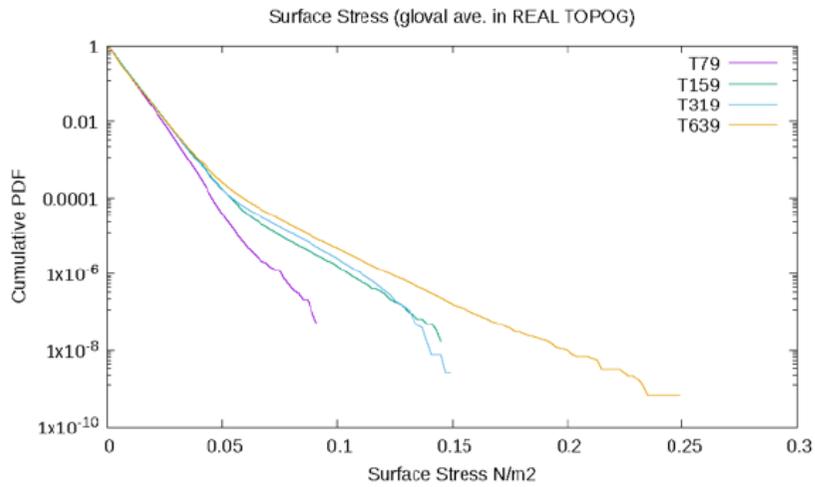


(d) Divergence (T319L96)

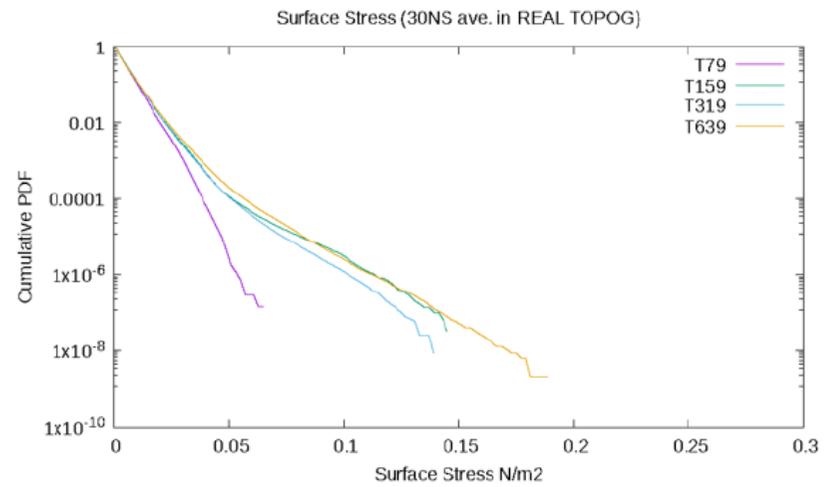
AFES-Mars  
静力全球モデル  
Takahashi  
et al  
(in preparation)

Ls = 212.9  
4 h Pa  
での  
渦度・発散

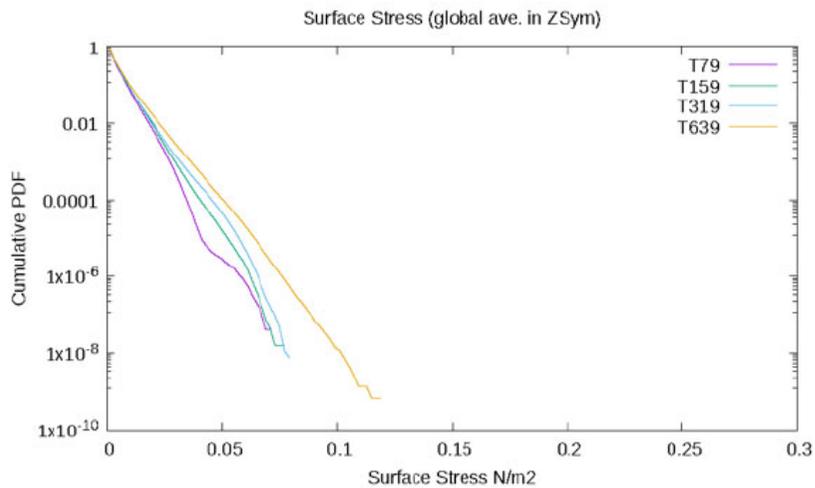
地形無し  
対流調節あり



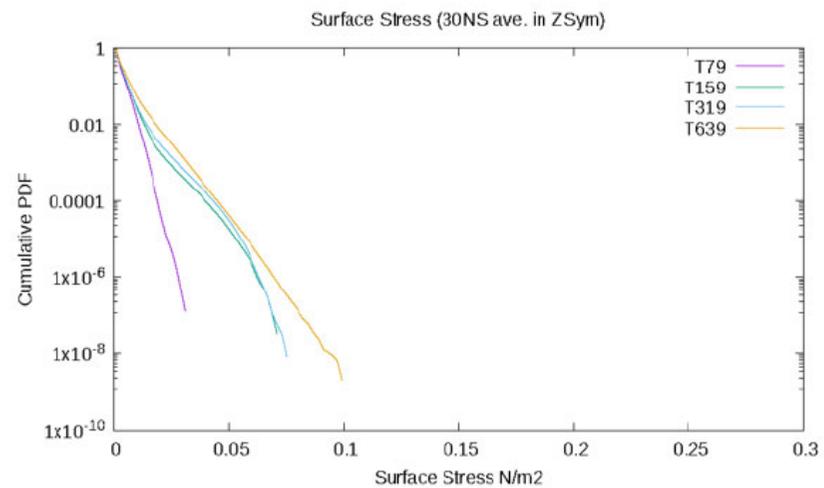
(a) Global Realistic



(b) 30°S–30°N Realistic



(c) Global Idealized



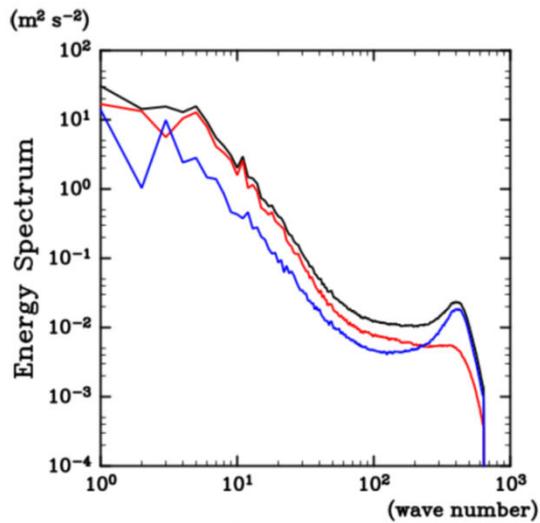
(d) 30°S–30°N Idealized

AFES-Mars  
静力全球モデル  
Takahashi  
et al  
(in preparation)

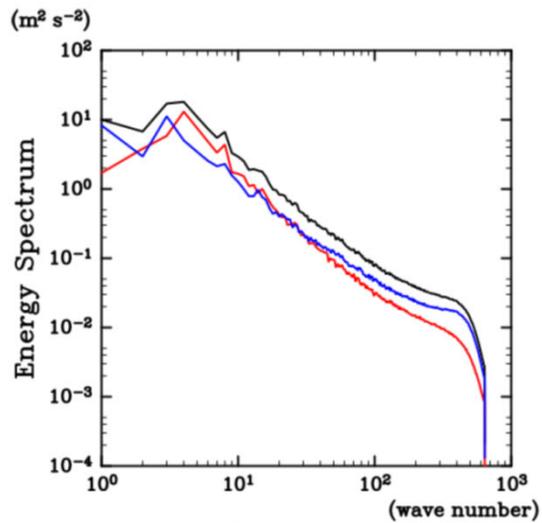
L<sub>s</sub> = 212.9  
地表面応力  
積算分布

対流調節なし

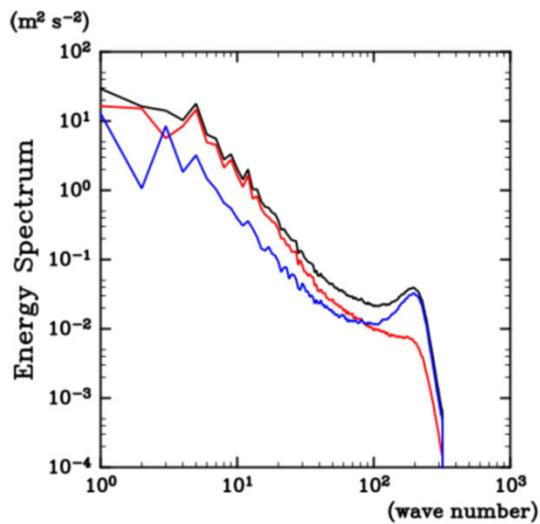
AFES-Mars  
静力全球モデル  
Takahashi  
et al  
(in preparation)



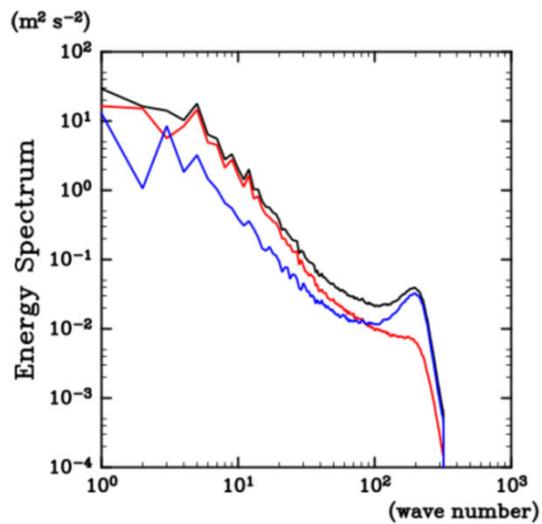
(a) T639L96 (Idealized)



(b) T639L96 (Realistic)



(c) T319L96 (Idealized)



(d) T319L96 (Realistic)

$L_s = 212.9$   
 $\sigma = 0.97$   
赤：回転成分  
青：発散成分  
黒：全KE

対流調節なし

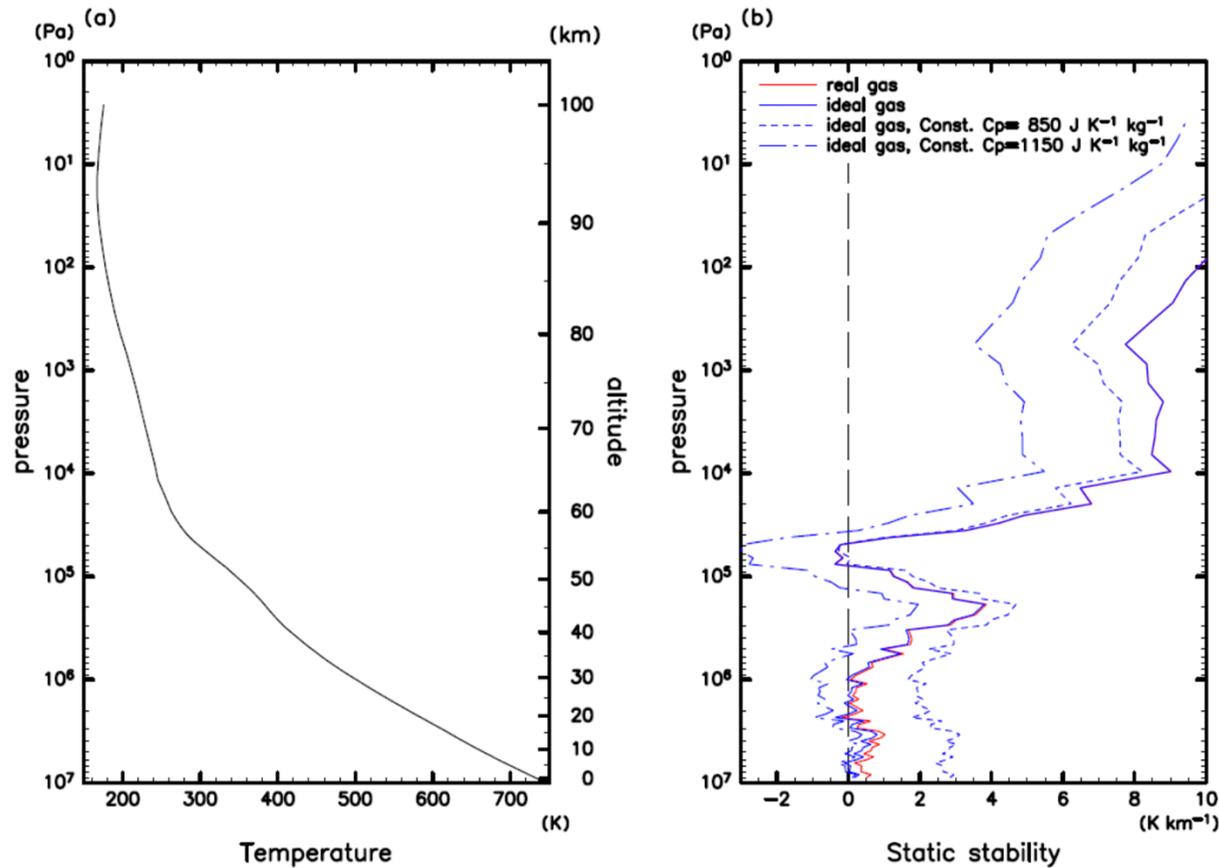
# 金星大気構造

Takahashi et al 2024

Dependence

of the Radiative-Convective Equilibrium Structure  
of the Lower Atmosphere of Venus  
on the Thermodynamic Model

<https://doi.org/10.2151/jmsj.2024-001>

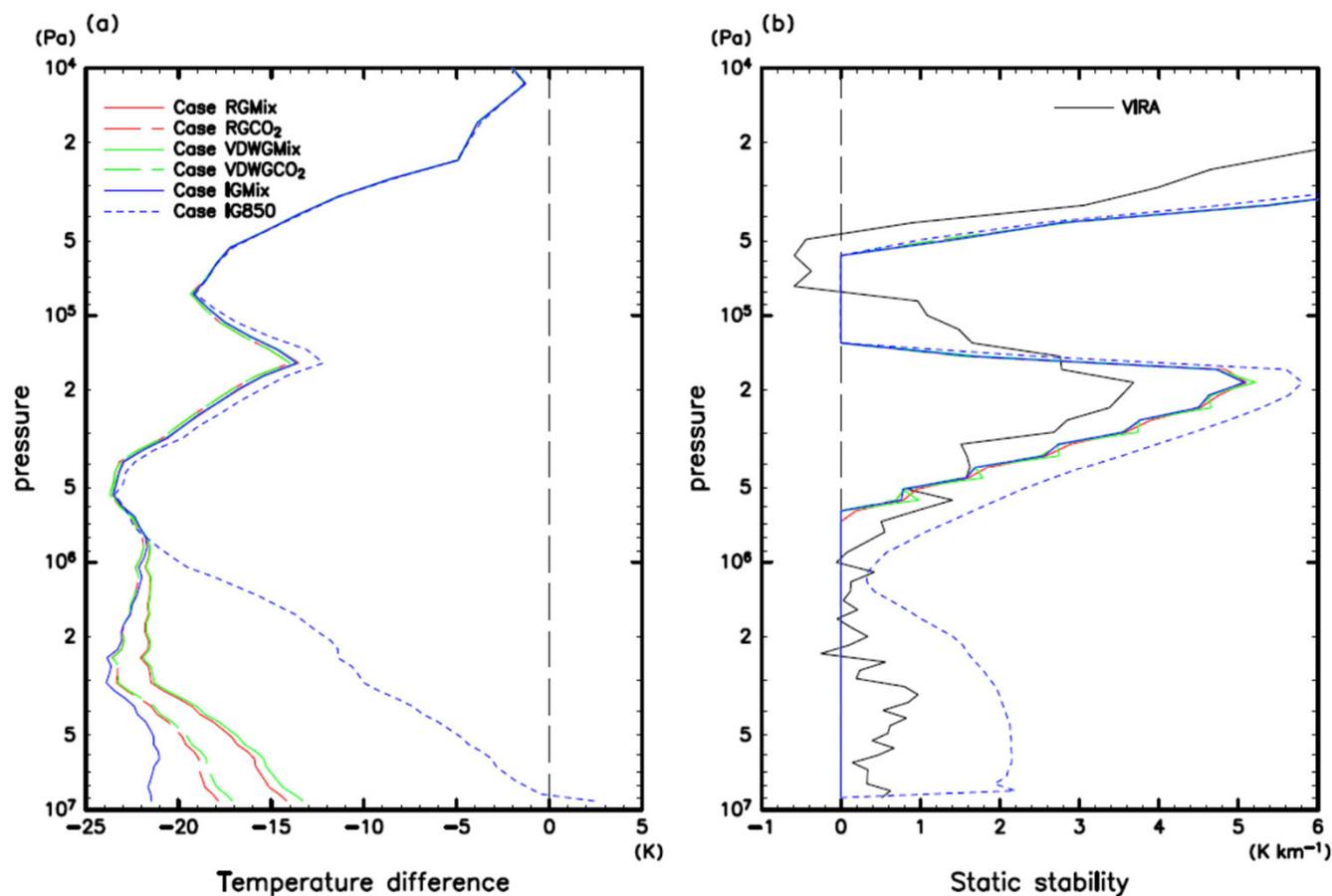


下層では  
比熱一定理想気体  
じゃダメだ

(a) temperature  
(b) static stability  
the VIRA model at low latitude  
red: real gas  
blue solid ideal gas  
blue short-dashed  $C_p=850 J/K kg$   
blue dot-dashed  $C_p=1150 J/K kg$

# 金星大気構造

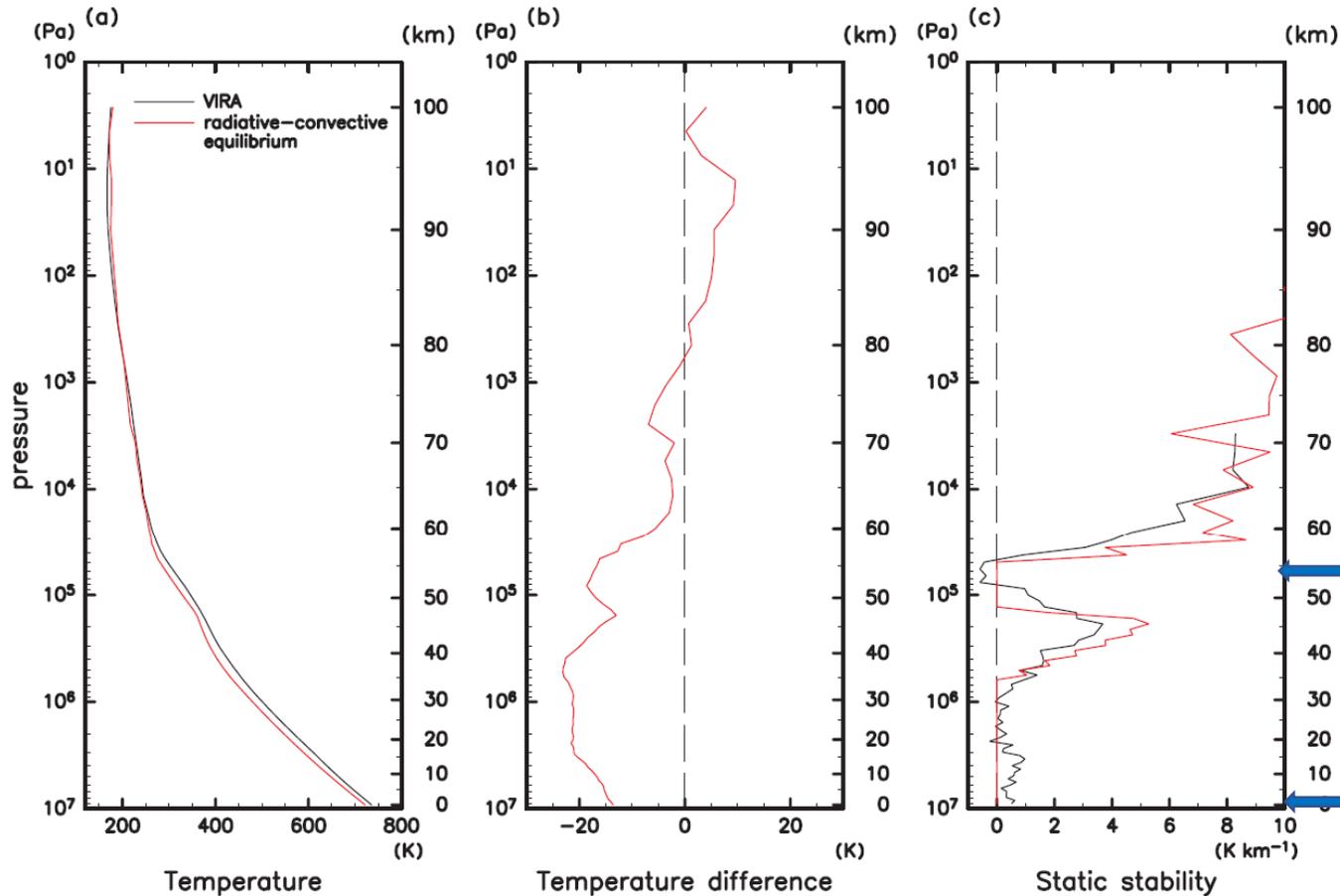
Takahashi et al 2024  
Dependence  
of the Radiative-Convective Equilibrium Structure  
of the Lower Atmosphere of Venus  
on the Thermodynamic Model  
<https://doi.org/10.2151/jmsj.2024-001>



状態方程式を  
段階的に選んだ  
放射対流平衡プロファイル

# 金星大気構造

Takahashi et al 2024  
 Radiative Effects on  
 the Formation of  
 the Stably Stratified Layer  
 in the Lower Atmosphere of Venus  
<https://doi.org/10.2151/jmsj.2024-025>



鉛直1次元放射対流平衡モデル  
 で下層の安定成層領域は  
 維持されるか？

雲層 (対流層?)

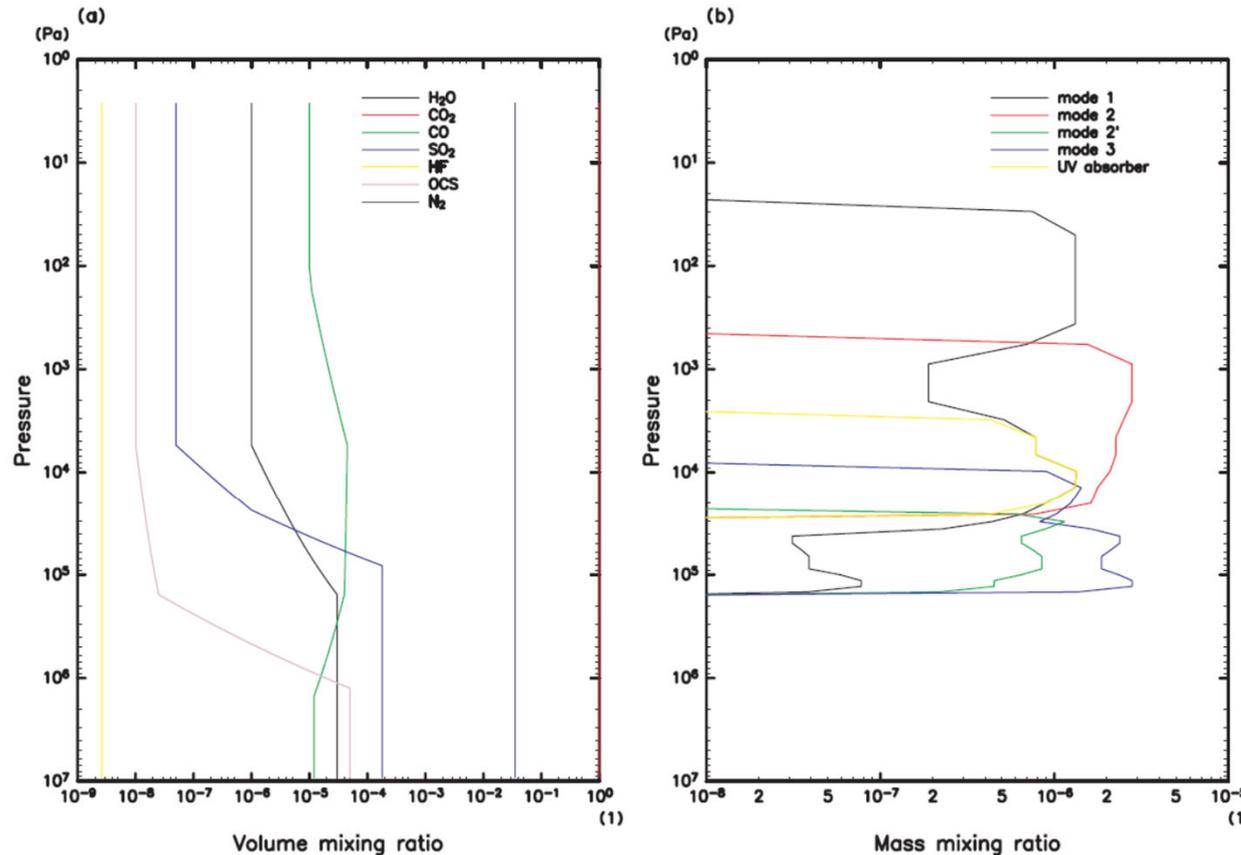
観測によると安定層

PBL (直達日射はなんぼかあるので  
 対流層があるはず?)

Fig. 2. Radiative-convective equilibrium profiles of (a) temperature, (b) temperature difference from the low latitude profile of the VIRA model, and (c) static stability for the control experiment (red). The black lines are those of the low latitude profiles of the VIRA model.

# 金星大気構造

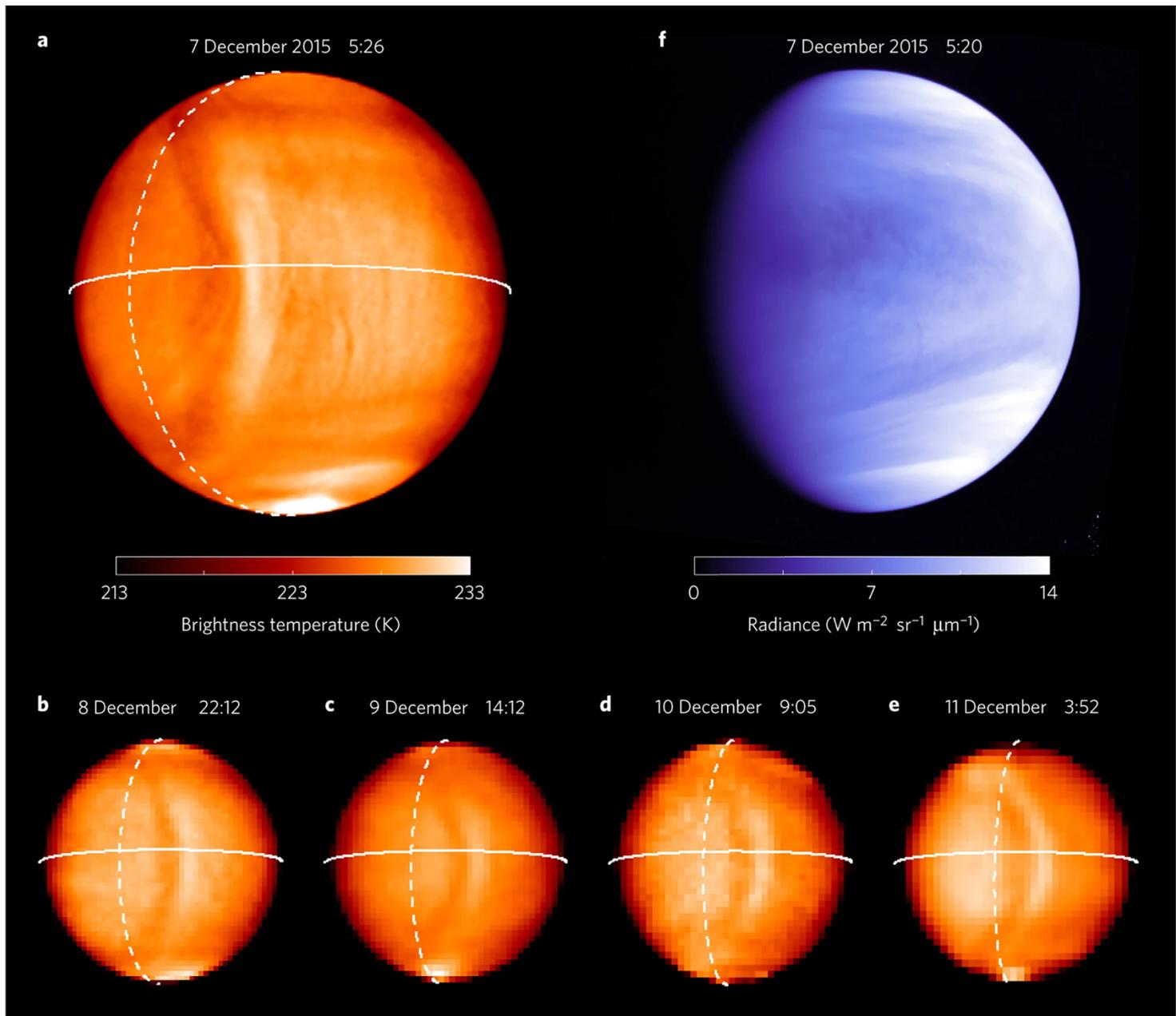
Takahashi et al 2024  
 Radiative Effects on  
 the Formation of  
 the Stably Stratified Layer  
 in the Lower Atmosphere of Venus  
<https://doi.org/10.2151/jmsj.2024-025>



ちなみに  
 吸収物質分布

1.  $H_2O$  と  $SO_2$  を観測されている最大濃度にする
2.  $CO$  を観測されている最小濃度にする  
 と下層に安定層が形成できるが、安定度は観測よりだいぶ小さい。
3.  $CO_2$  and/or  $H_2O$  の連続吸収を増やす  
 と安定度は観測されている程度の大きさにすることができる。

Fig. 1. Vertical profiles of volume mixing ratios of gases and mass mixing ratios of clouds and UV absorber used in the control experiment: profiles of (a) gases and (b) clouds and UV absorber.

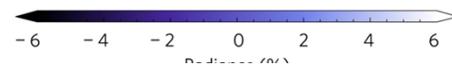
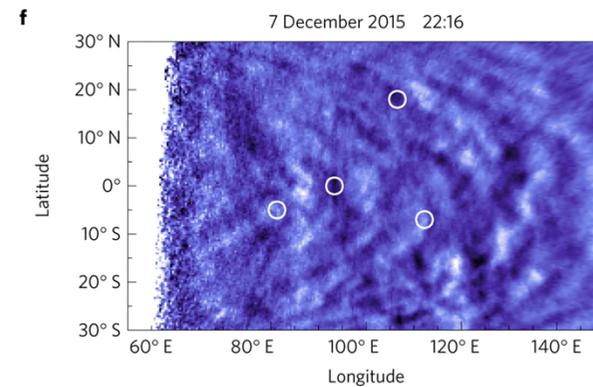
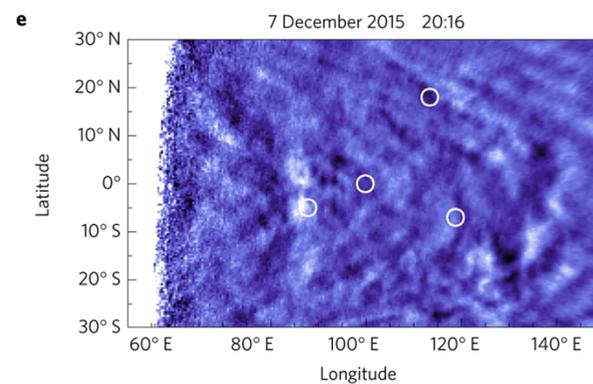
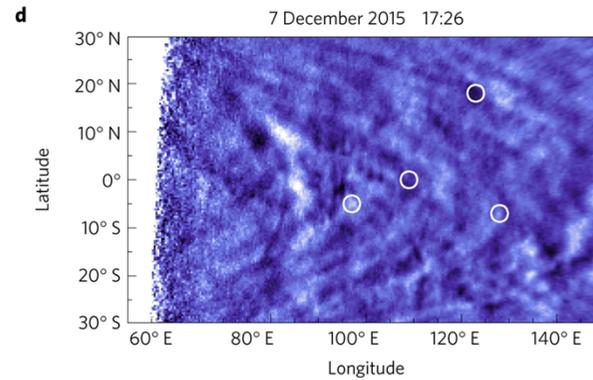
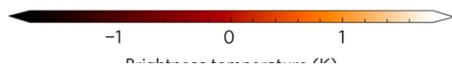
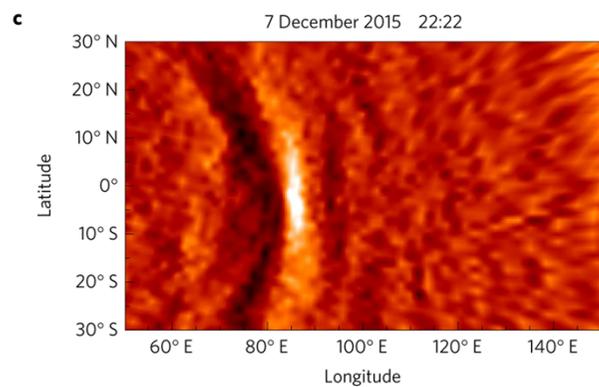
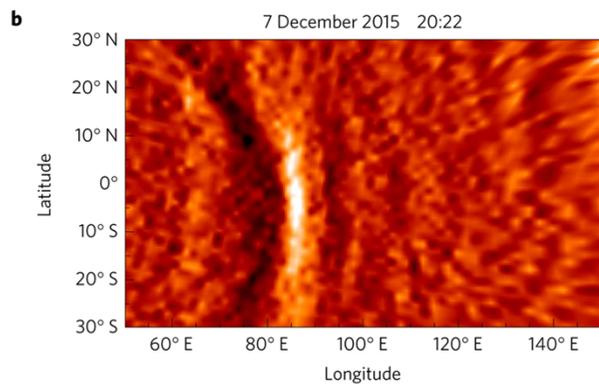
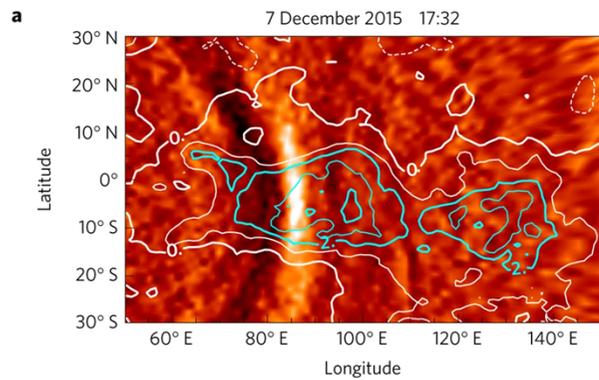


Fukuhara et al 2017  
<https://doi.org/10.1038/ngeo2873>

Large stationary gravity wave in the atmosphere of Venus

弓状構造  
 地表面地形に固定されている  
 →  
 山岳波

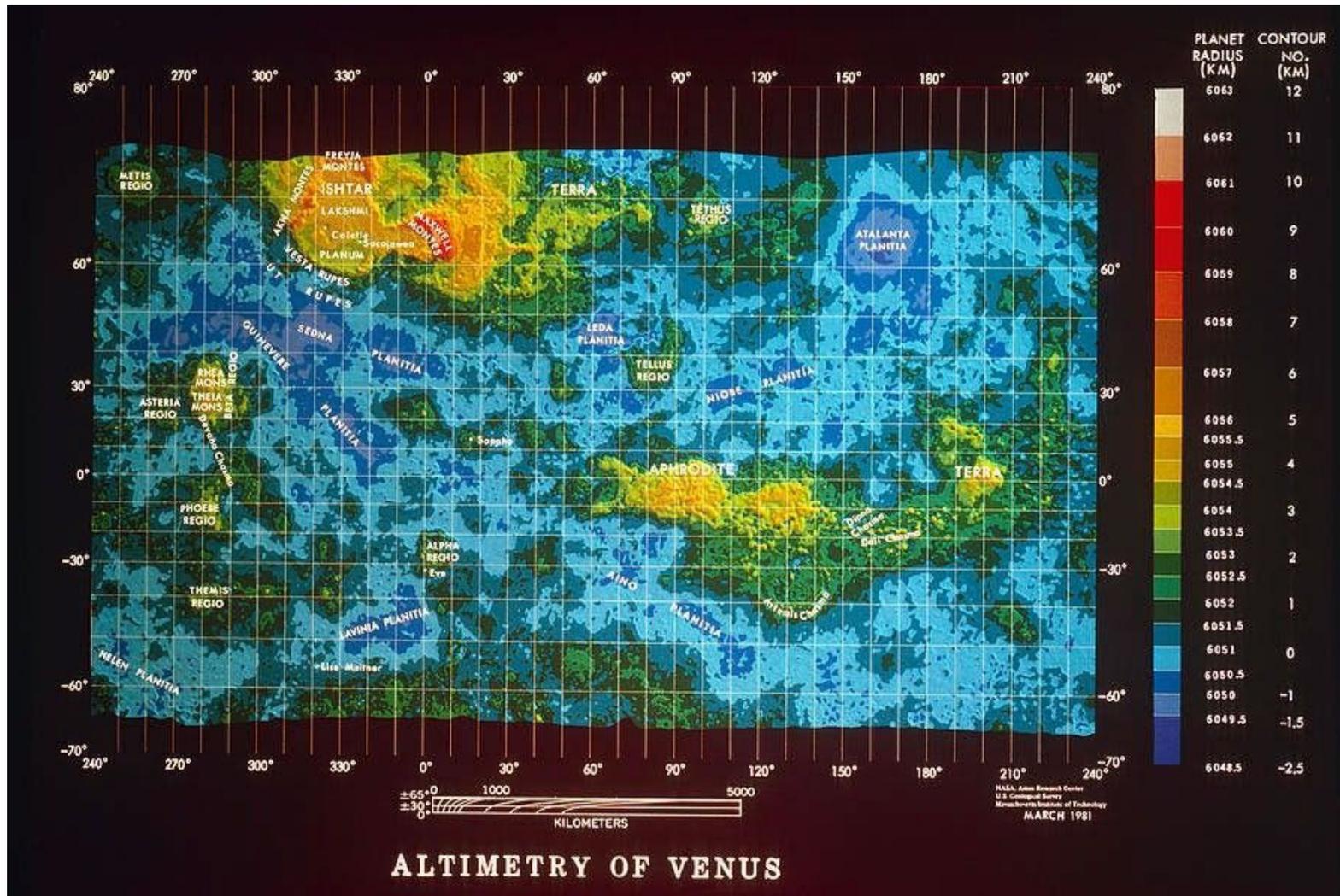
安定層の存在



Fukuhara et al 2017  
<https://doi.org/10.1038/ngeo2873>  
 Large stationary gravity wave in the atmosphere of Venus

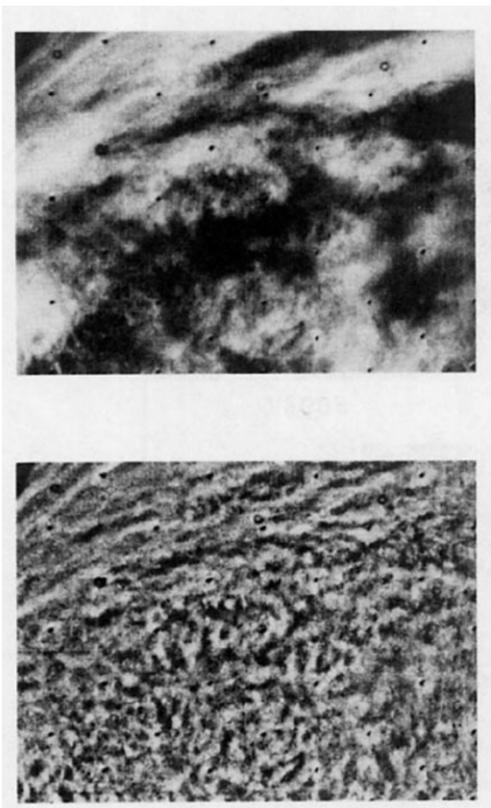
LIR 画像と UV 画像

# 金星地形



# 金星雲層の対流?

- 古くは、例えば、Mariner 10 UV 画像 (1974.02?)  
Belton et al., 1976: Cloud Patterns, Waves and Convection in the Venus  
Atmosphere. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1976\)033%3C1394:CPWACI%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1976)033%3C1394:CPWACI%3E2.0.CO;2)



太陽直下点  
～少々狩る于域に  
対流セルっぽい  
のが見える  
サイズ200km  
ぐらい

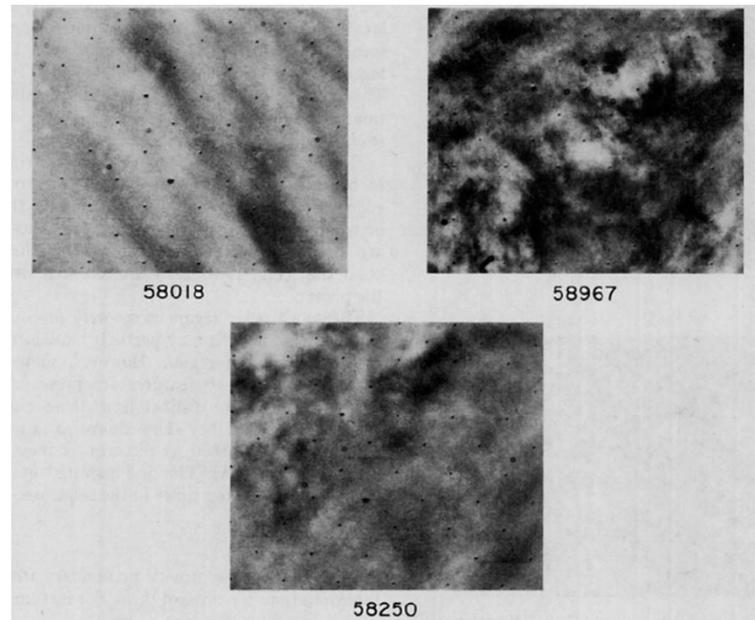


FIG. 11. The subsolar disturbance.  
FDS 58018: north-south alignments at -13N, 50 downwind of the subsolar point.  
FDS 58967: chaotic nature of fine structure at 8N, 2 downwind of the subsolar point.  
FDS 58250: latitude +1N, about 15 upwind of the subsolar point.

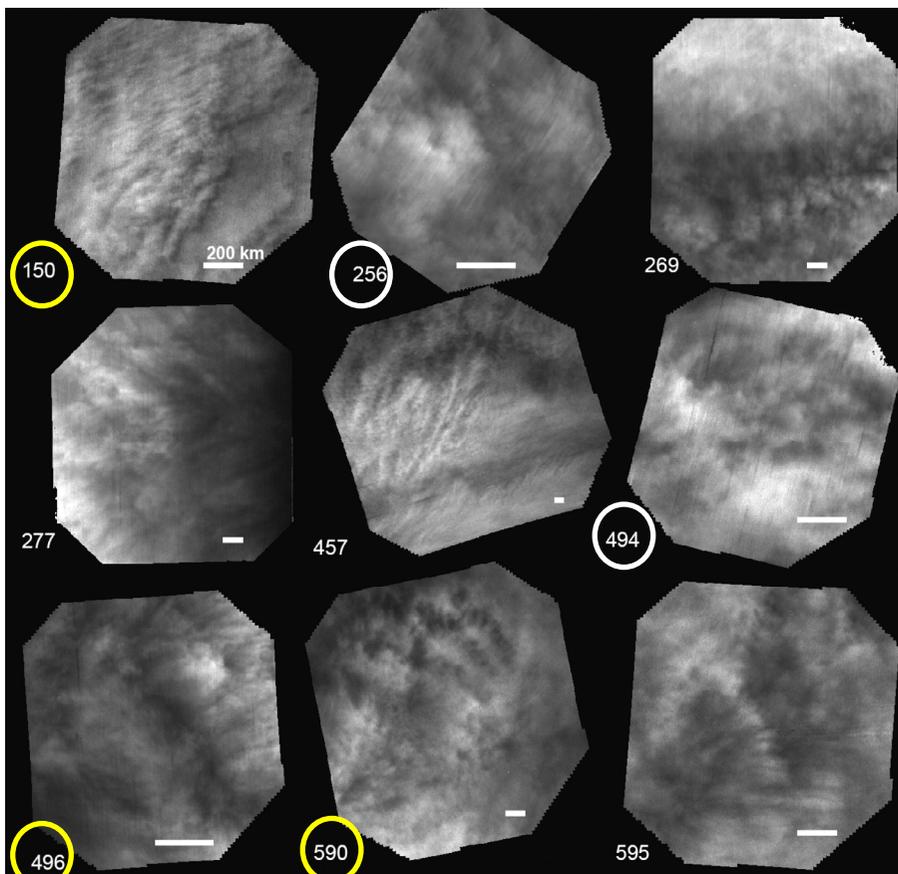
FIG. 12. A field of bright-rimmed cellular structures on the northern edge of the subsolar disturbance.

(top) a contrast-enhanced version

(bottom) spatially filtered to bring out the fine-scale structure

# 金星雲層の対流？

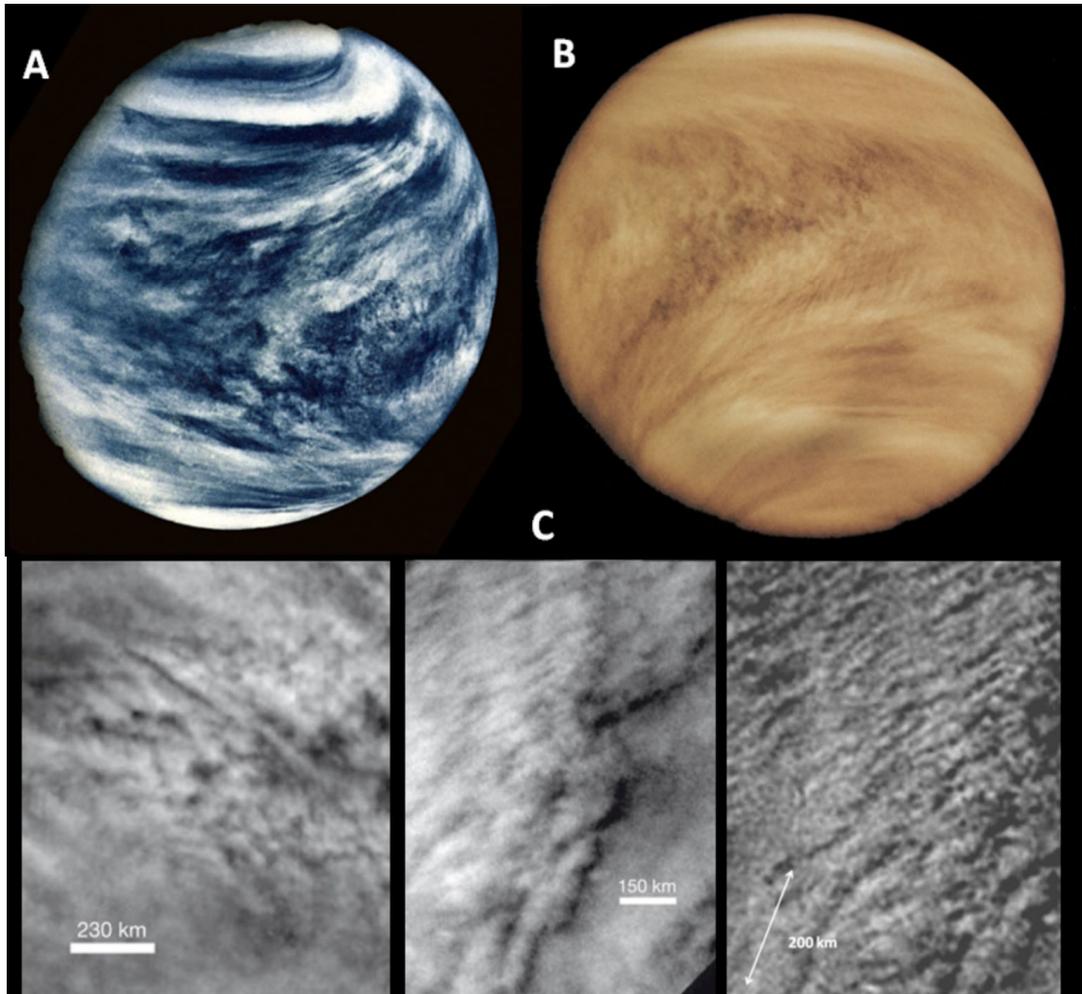
- VEX VMC (UV Venus Monitoring Camera) 画像 (2009)  
Titov et al., 2012: Morphology of the cloud tops as observed by the Venus Express Monitoring Camera. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2011.06.020>



軌道256、494には200kmスケールのまだら模様  
軌道150、496、590には数十km程度の対流セル？

Fig. 10. low latitudes  
低緯度のUV 画像  
分解能はa few km/pixel

# 金星雲層の対流？



- Sanchez-Lavega et al., 2017:  
The Atmospheric Dynamics of Venus  
<https://doi.org/10.1007/s11214-017-0389-x>
- **Fig. 23** UV images  
(A) Mariner 10; 5 February 1974 (NASA)  
(B) Pioneer-Venus, 5 February 1979 (NASA)  
(C) VMC on Venus Express, 22 July 2007 (ESA) The *lower right image* is a highly processed image to show features at a scale of 25 km

# 金星雲層の対流？

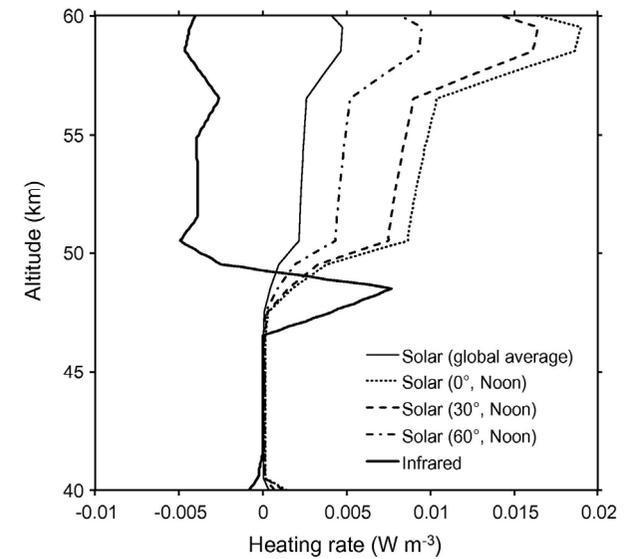
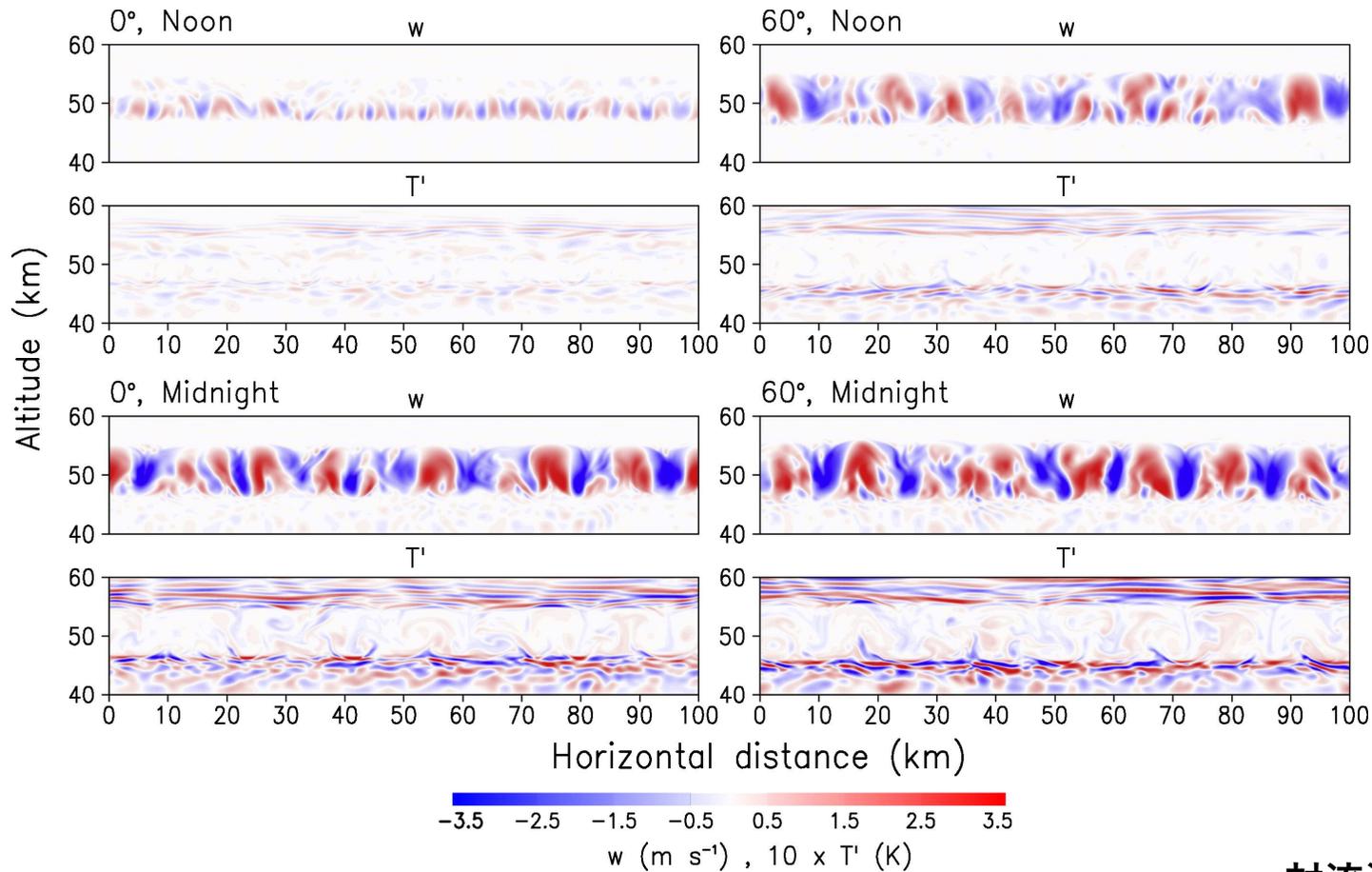
- 「あかつき」UV 画像 (2015–2025)  
Matsui and Imamura ? 現在解析中
- 「あかつき」IR2 画像 (2015–2016)  
もやっとしているが対流じゃないんじゃない？

# 金星雲層の対流計算 (2D)

Imamura et al 2014

Inverse insolation dependence of Venus' cloud-level convection

<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.10.012>



solar heating and infrared heating

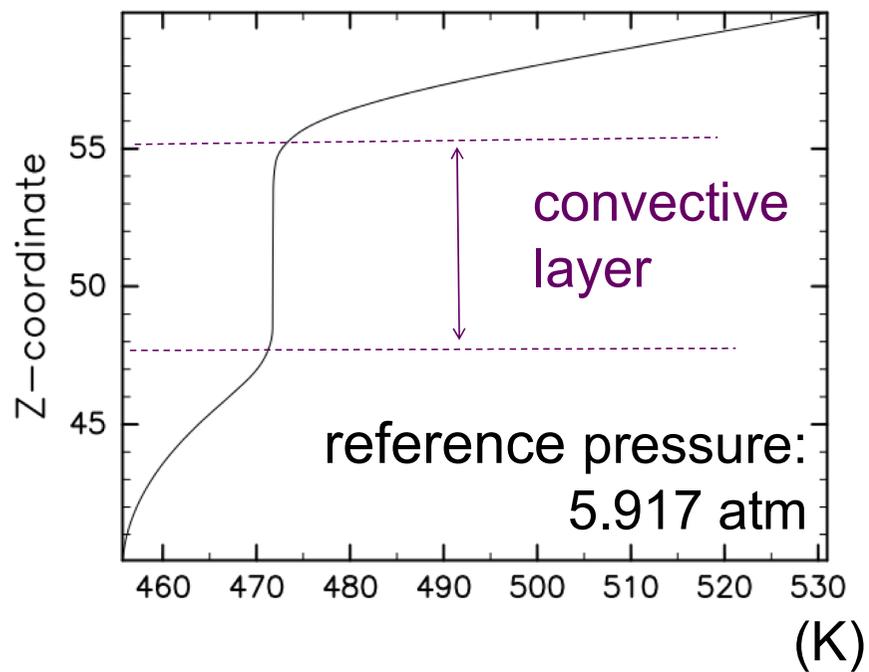
対流活動度は高緯度夜面で強い

# 金星雲層の対流計算 (3D)

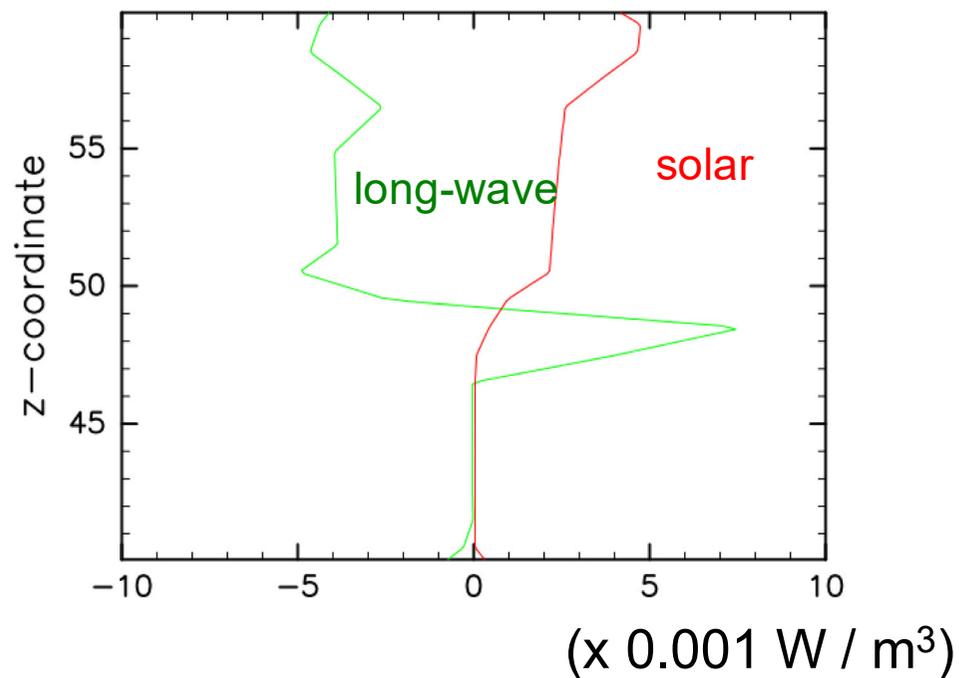
Sugiyama (in preparation)

96kmx96kmx91km  
200mx200mx62.5m  
準圧縮系

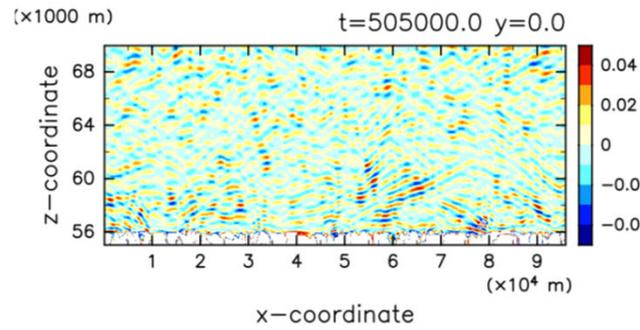
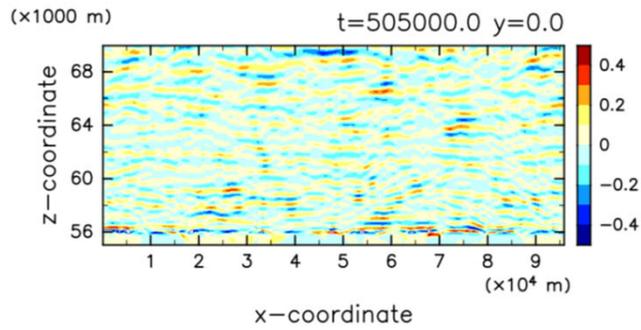
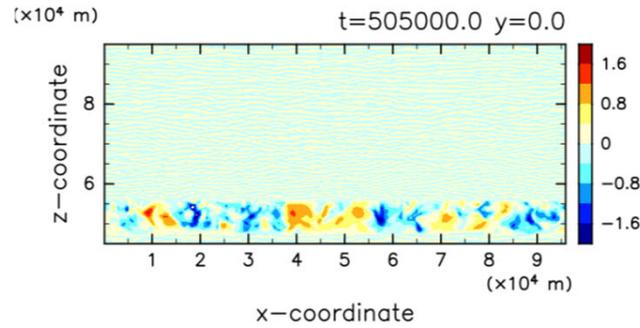
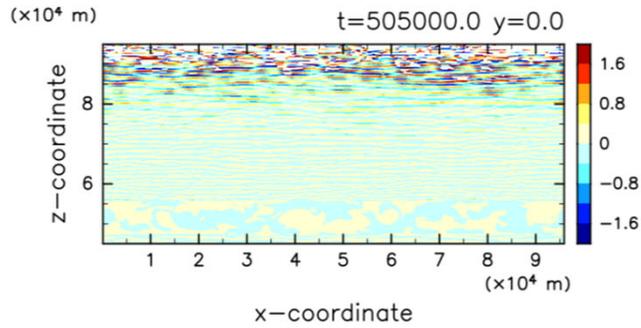
(x1000 m)



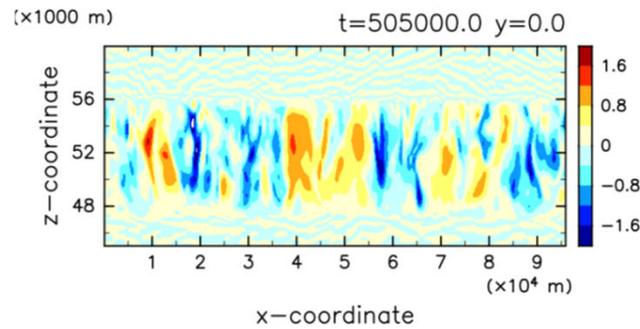
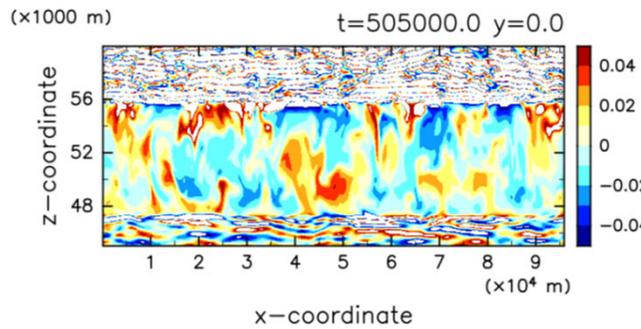
(x1000 m)



Sugiyama (in preparation)



重力波生成域拡大



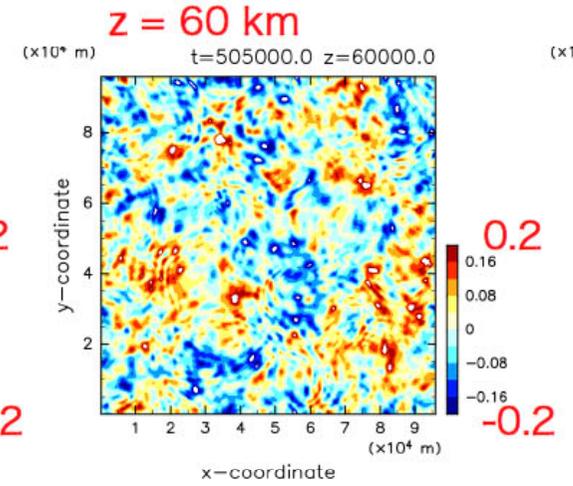
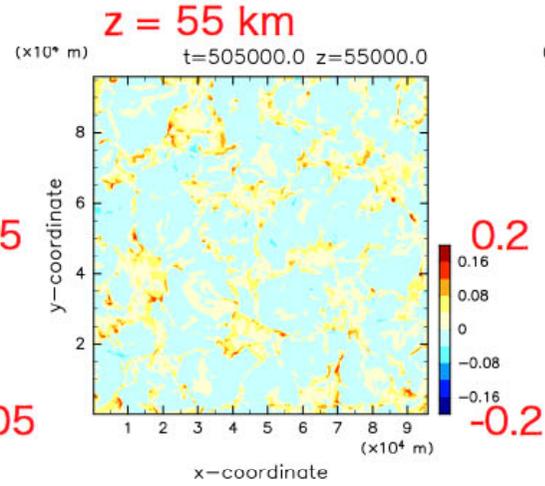
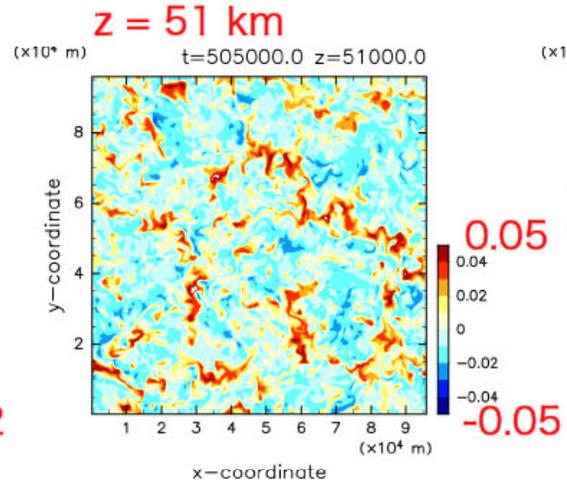
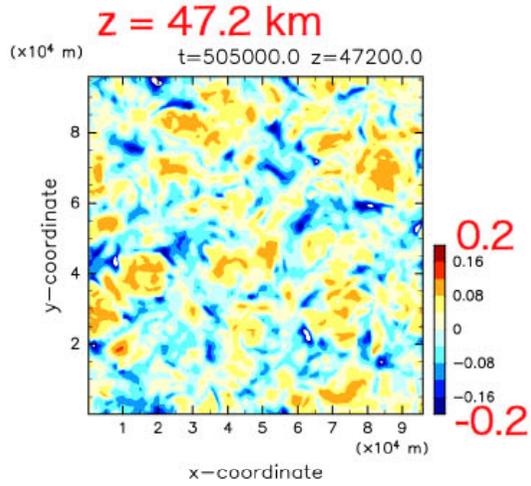
对流域拡大

温位偏差

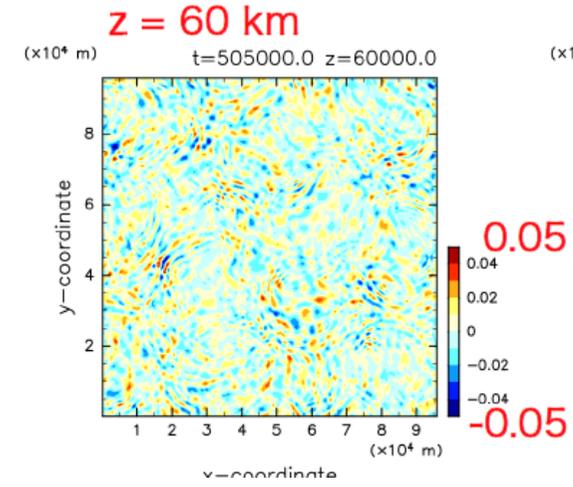
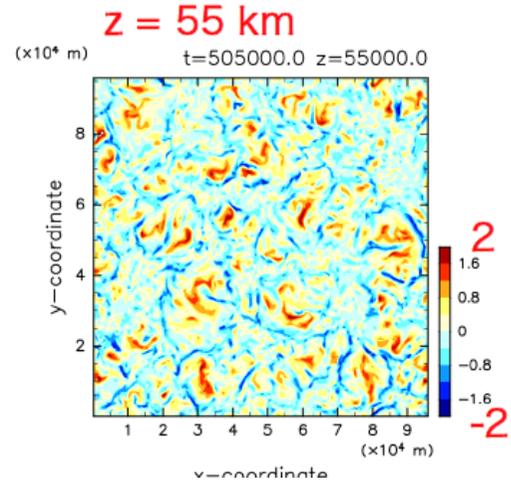
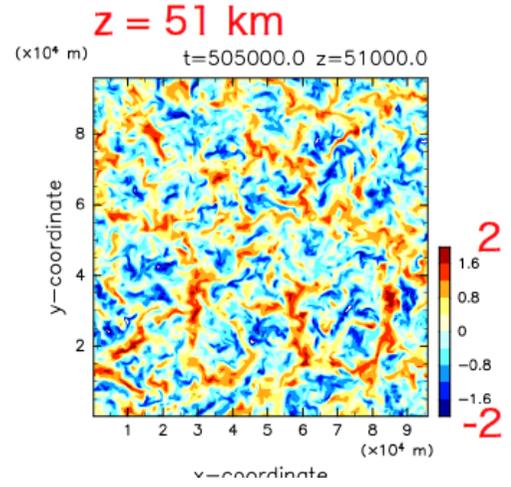
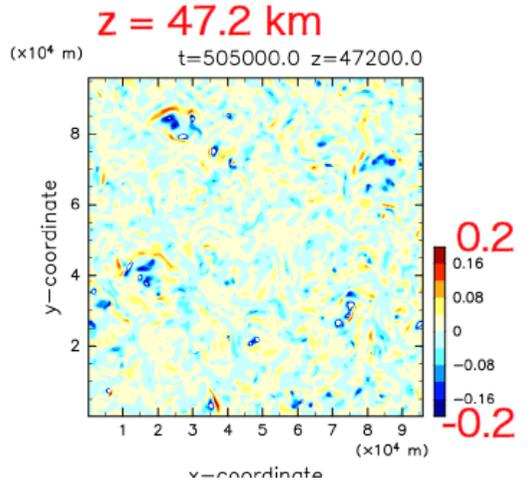
鉛直流速

Sugiyama (in preparation)

### Potential Temperature Deviation [K]



### Vertical Velocity [m/s]



# 金星PBLの（対流）計算（3D）

- GCM

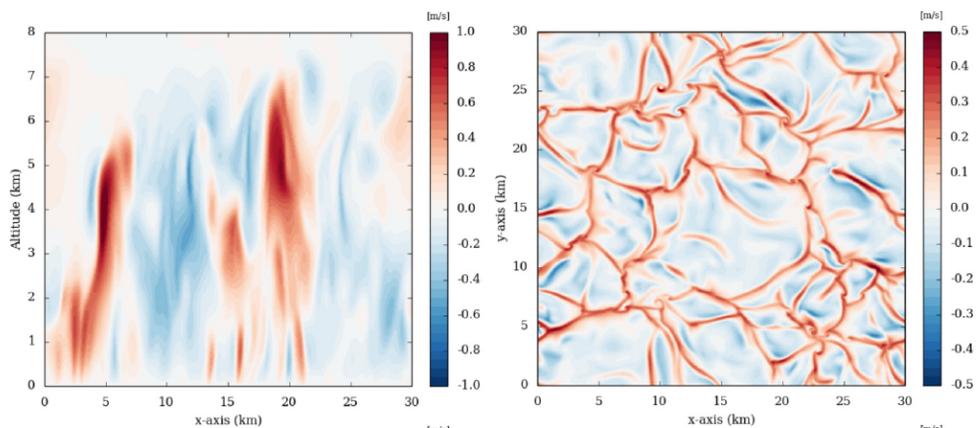
Lebonnois et al 2018: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2018.06.006>  
Planetary boundary layer and slope winds on Venus

- RANS～LES

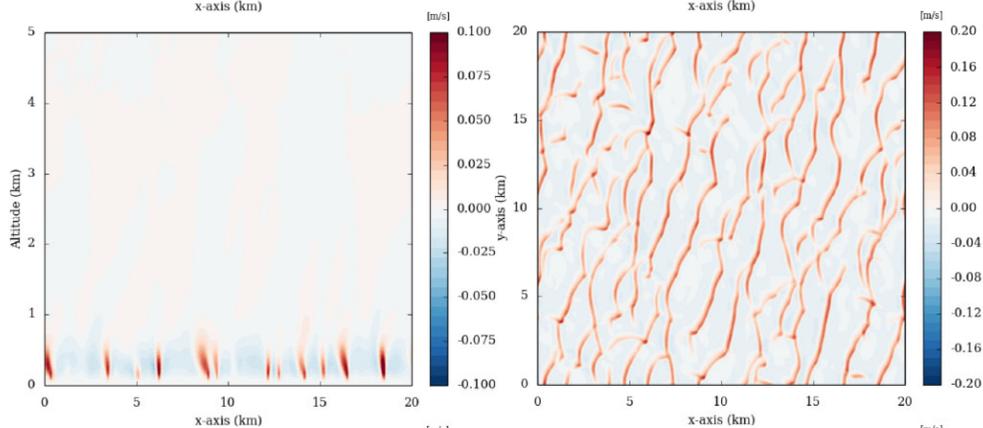
Yamamoto 2011: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2010.11.019>  
Microscale simulations of Venus' convective adjustment and mixing near the surface: Thermal and material transport processes

Lefevre 2022: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2022.115167>  
Venus boundary layer dynamics: Eolian transport and convective vortex

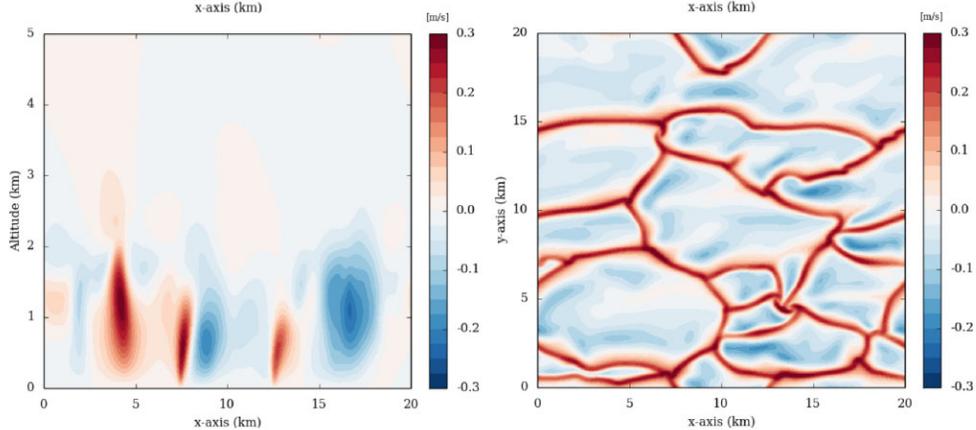
高地昼



高地夜



低地昼



Lefevre 2022:

<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2022.115167>

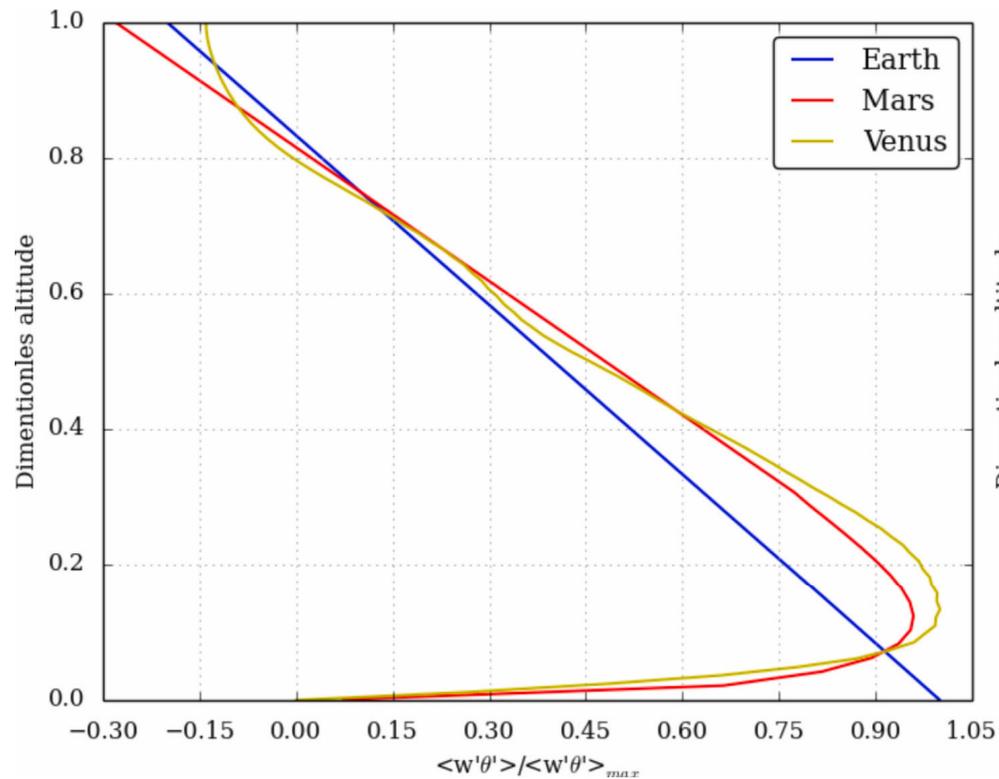
上昇流  
それぞれの地表から100m

# 境界層フラックス比較

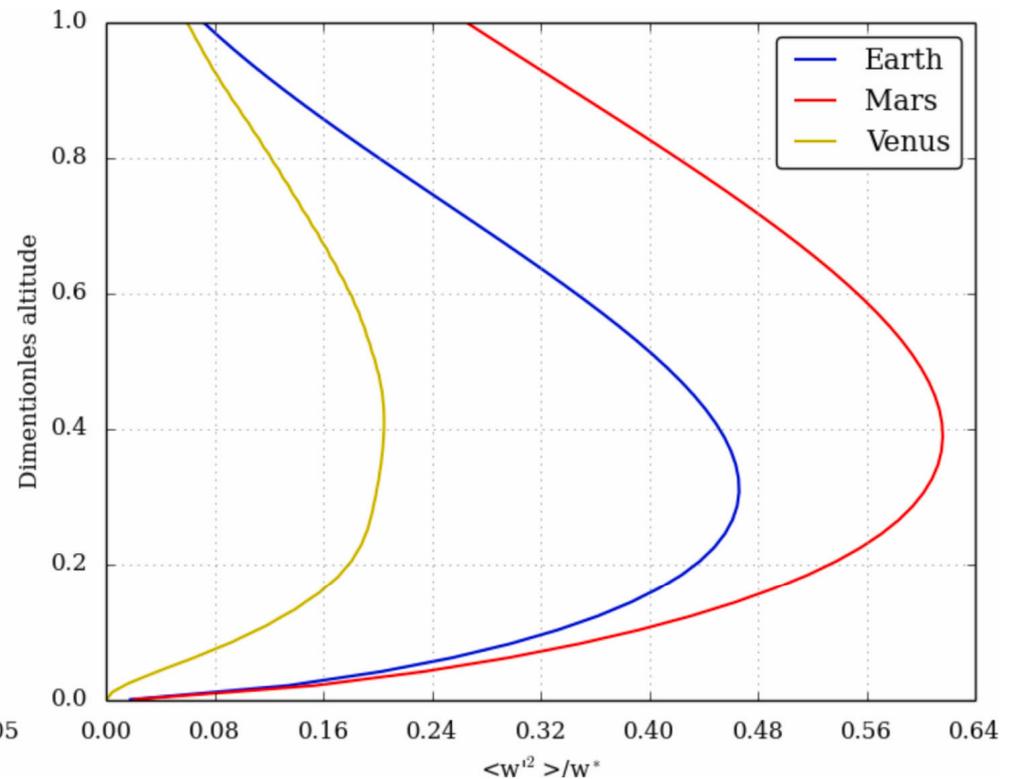
Lefevre 2022:

<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2022.115167>

対流層厚で規格化



鉛直熱輸送（最大値で規格化）



鉛直風速偏差（対流速度スケール  $W = (gh \langle w' \theta' \rangle / \langle \theta \rangle)^{1/3}$  で規格化）

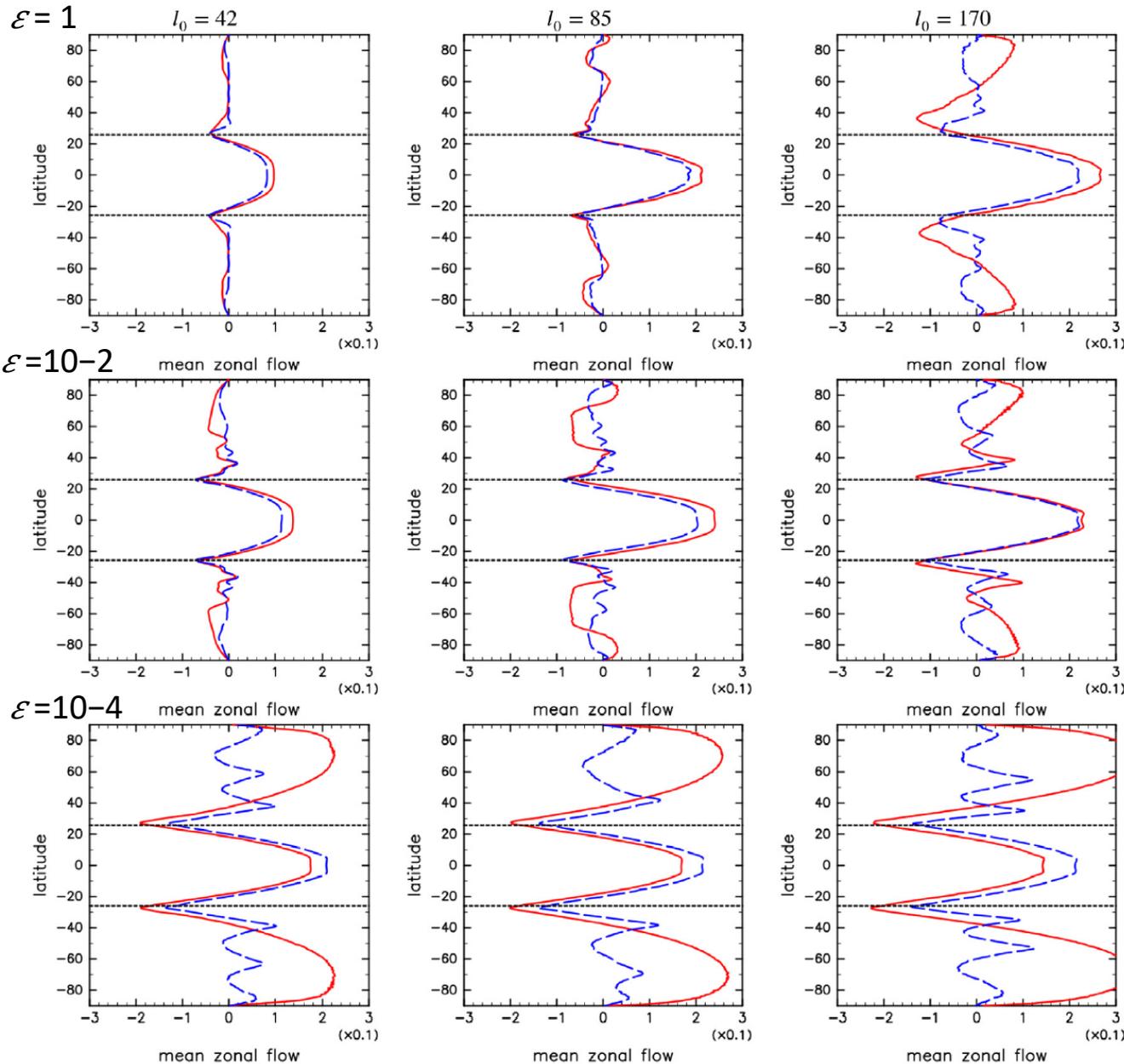
# 球殻対流 (ガス惑星たち?)

Takehiro et al 2024 : Asymptotic profiles of mean zonal flows generated by thermal convection of Boussinesq fluid in a rapidly rotating thin spherical shell

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103524002148>

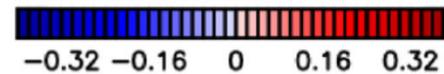
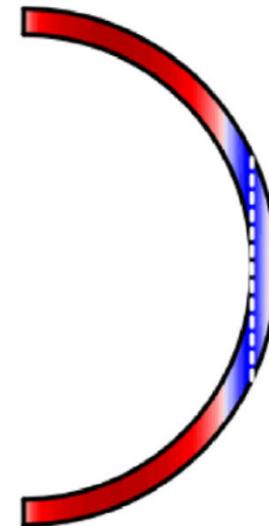
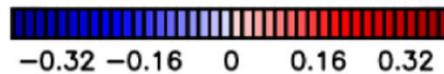
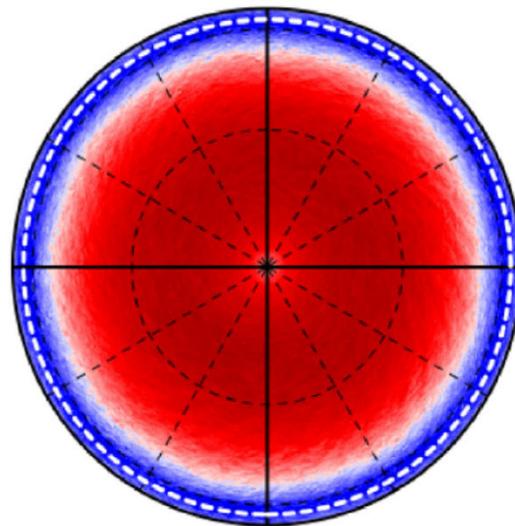
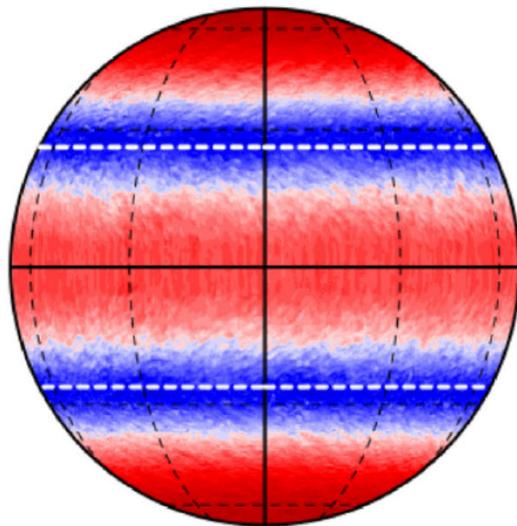
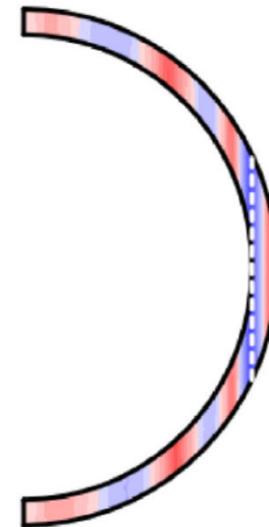
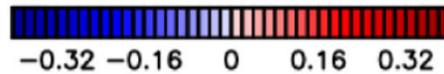
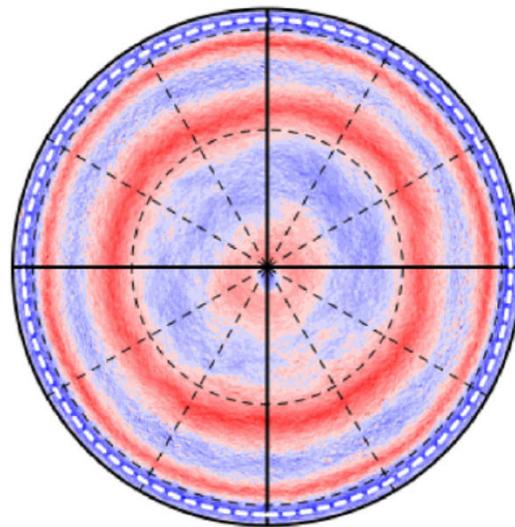
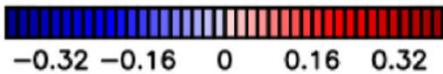
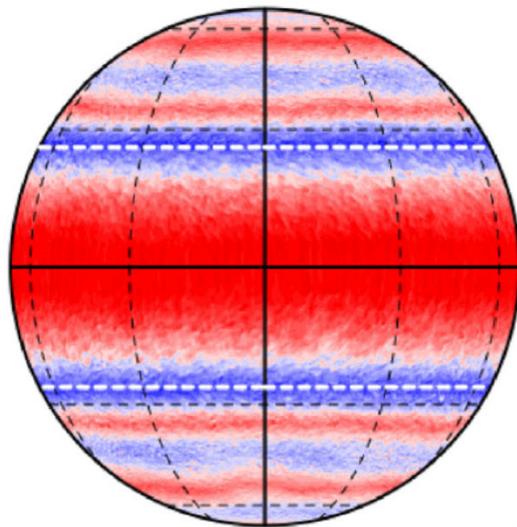
回転球殻熱対流による  
縞々計算  
1536 × 768 × 64

青  $t=10^4$ 、赤  $t=10^5$



# 球殻対流 (ガス惑星たち?)

Takehiro et al 2024 :  
<https://www.science-direct.com/science/article/pii/S0019103524002148>

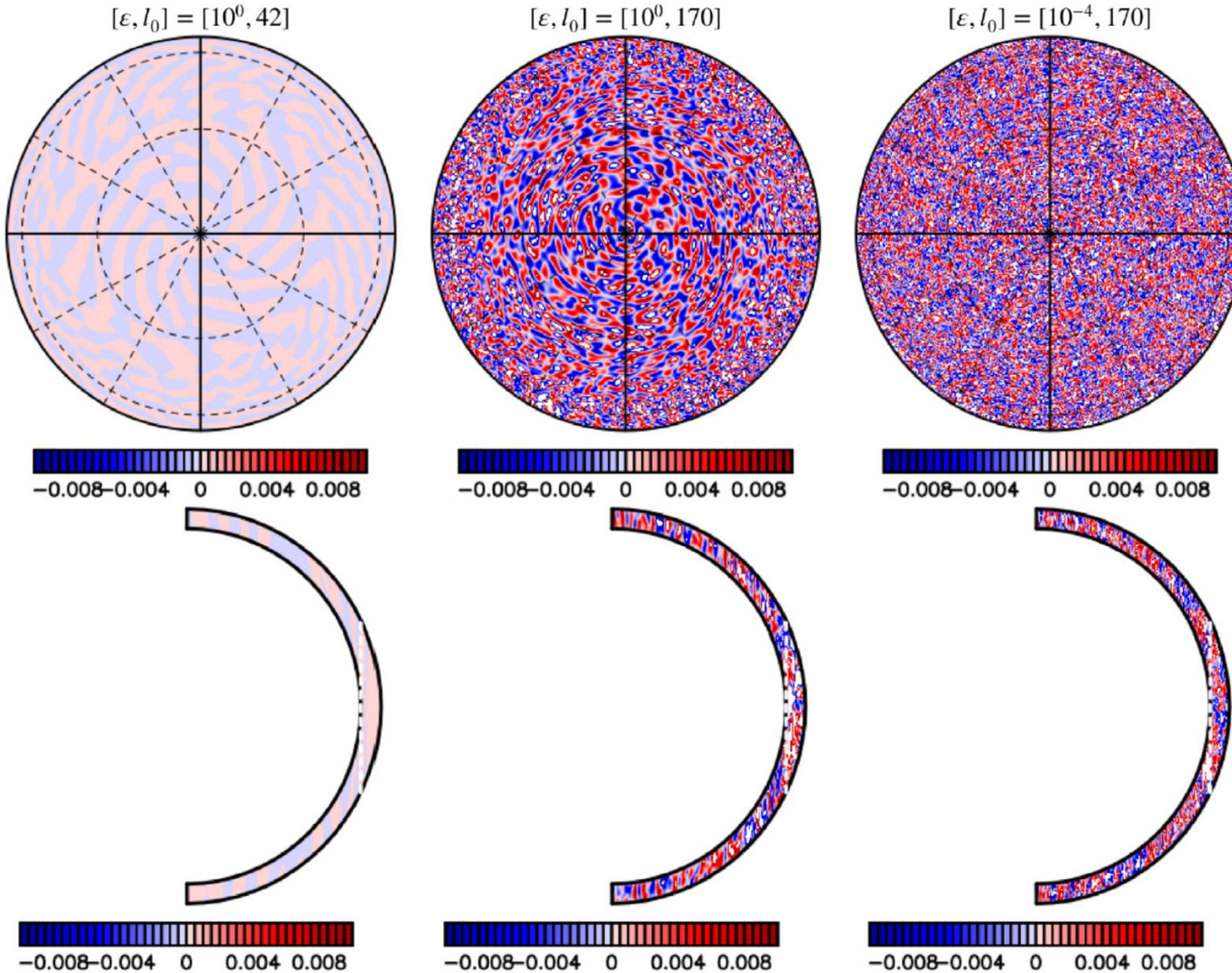


回転球殻熱対流による  
縞々計算  
 $1536 \times 768 \times 64$

$[\varepsilon, \lambda] = [10^{-4}, 170]$   
上  $t = 10^4$   
下  $t = 10^5$

# 球殻対流 (ガス惑星たち?)

Takehiro et al 2024 :  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103524002148>



回転球殻熱対流による  
縞々計算  
1536 × 768 × 64

ようやく鉛直対流が表現  
されるようになってきた  
乱流混合もよく考えない  
といけない

速度の動径方向成分  
上：球殻中層  
下：断面  
 $t = 10^5$ .

# まとめ

- 惑星大気大循環モデルによる数値計算における鉛直対流のモデル化
    - 地球大気で培われてきた乱流混合モデルをそのまま使っていいのかな
    - 鉛直対流を許容するような高分解能計算での対流混合の扱いはどうしたらいいのかな
    - $f/N > 1$ みたいな場合はどうしたよいか？
  - 火星の例
    - 乾燥大気のPBL：強い対流→重力波射出？
    - 地形性擾乱と対流
    - 応力変動のテールがダスト巻き上げに効く問題（ダストデビルに押し付けていいのか？）
  - 金星の例
    - 雲層の鉛直対流・乱流・重力波射出
    - PBLってどうなってるの
  - 外惑星の例
    - $f/N$ があまり大きく場合の混合
- などなど考えてくれるといいなあ