

# 金星雲層内における 対流の数値計算

宇宙理学専攻惑星宇宙グループ  
地球流体力学研究室 修士 2年  
川畑拓也

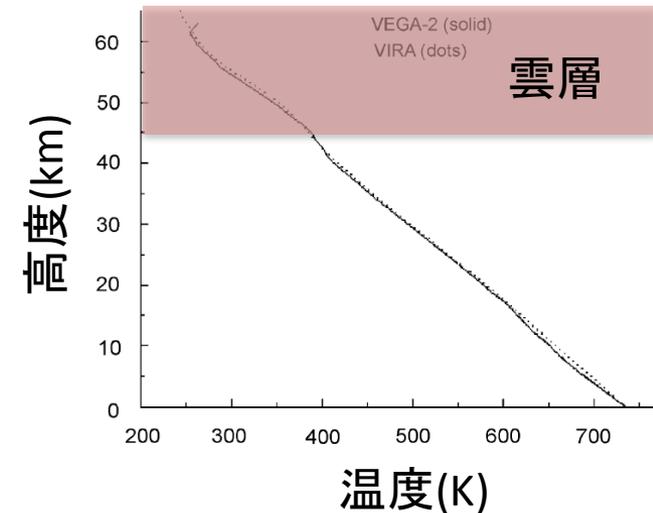
2013/02/06

# 金星の雲層

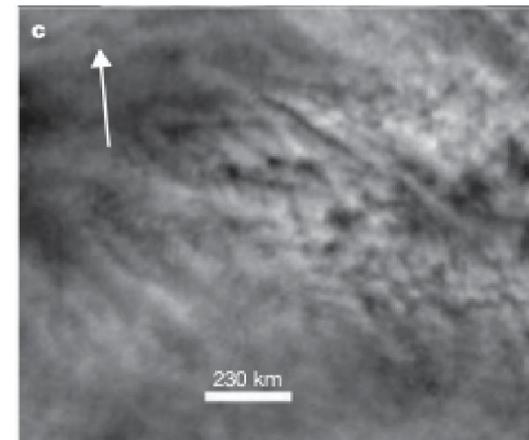
- 雲層

- 濃硫酸の雲
- 高度45 -70 km, 水平一様に分布
- 高度 48-55 km に中立層(Seiff et al., 1980)
- 中立層上端付近に1-3 m/s の鉛直速度(Linkin et al., 1986)

- 雲層内に対流が存在する可能性
- Venus Express による雲層上端のセル状の模様は対流によるもの？



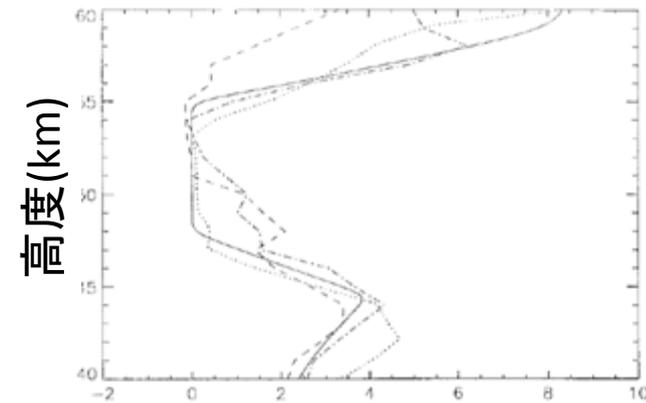
金星大気の鉛直温度プロファイル  
(Zasova et al., 2007, 一部加筆)



Venus Express による金星雲層の紫外線撮像(Markiewicz et al., 2007)

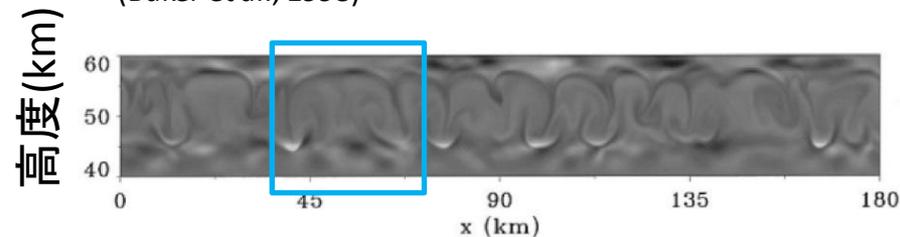
# 先行研究 Baker et al., 1998

- Baker et al., 1998による金星雲層対流の数値計算
  - 2次元完全圧縮方程式系
  - 計算領域 (格子点数)
    - 鉛直 20km (168点), 水平 180km(1000点)
    - 金星高度 40-60 km を想定
  - 太陽放射による水平一様加熱を仮定
  - 上下境界で熱フラックス固定
  - 領域全体に一定の拡散係数
- 示された対流の特徴
  - 水平スケール15-30km 程度
  - Venus Express による観測と整合的
  - 典型的な鉛直速度 5-7 m/s
    - 最大速度 14.2m/s



静的安定度(K/km)

Baker et al., 1998 の計算で用いられた初期の安定度 (Baker et al., 1998)



温位偏差(K)

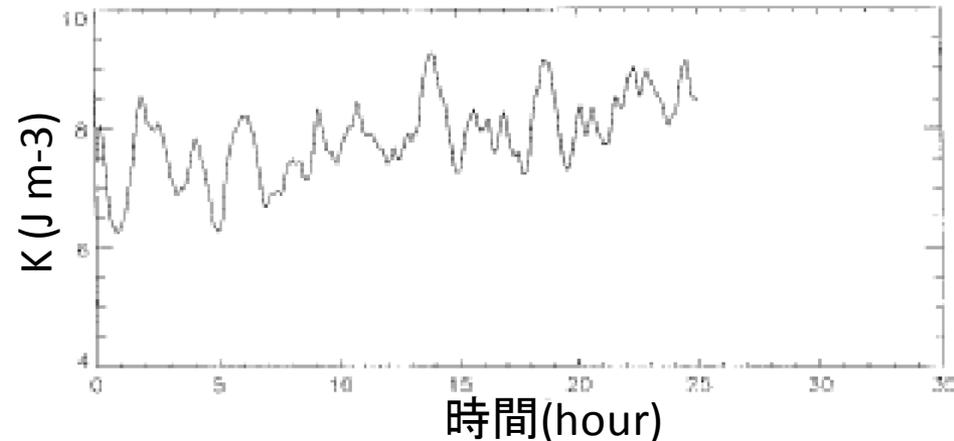
$t = 21.6346$  (hrs)

-1 0 1 4

Baker et al., 1998 で示された金星雲層での対流運動の様子 (Baker et al., 1998)

# 本研究の目的

- Baker et al., 1998 はエネルギー的に定常状態であるとは言い難い
  - より長い時間経過すると流れ場が変わるかもしれない
- 初期の対流の様子については詳細には述べられていない



Baker et al., 1998 での運動エネルギー密度の時間変化. 一部表記を改変 (Baker et al., 1998)

- Baker et al., 1998 よりも長時間計算し,
  - エネルギーが定常状態になった系での運動の構造を調べる
  - 定常状態でのエネルギー収支を解析する
- 初期の対流の発達の様子について調べる

# 数値モデル(deepconv/arare5)の概要

<http://www.gfd-dennou.org/library/deepconv/>

## • 支配方程式系(2次元準圧縮方程式系)

### 運動方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} = - \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) - c_p \theta \frac{\partial \Pi}{\partial x} + \text{Turb} \cdot u,$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = - \left( u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) - c_p \theta \frac{\partial \Pi}{\partial x} + \text{Turb} \cdot w + g \frac{\theta}{\theta_0},$$

$$\text{Turb} \cdot u_i = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ - \rho K_m \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\},$$

$$\text{Turb} \cdot \theta = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( - \rho K_h \frac{\partial \theta}{\partial x_j} \right)$$

### 熱力学の式

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \left( u \frac{\partial \theta}{\partial x} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - w \frac{\partial \theta}{\partial z} + \text{Turb} \cdot \theta + Q,$$

### 圧力方程式

$$\frac{\partial \Pi}{\partial t} = - \frac{c_s^2}{c_p \rho \theta} \nabla \cdot (\rho \theta u) \quad \theta = T \left( \frac{P_0}{P} \right)^{\frac{R}{c_p}}$$

u: 水平速度

w: 鉛直速度

$\theta$ : 温位擾乱

$\theta_0$ : 基本場の温位

$\Pi$ : エクスター関数

g: 重力加速度

$c_p$ : 定圧比熱

Cs: 音速

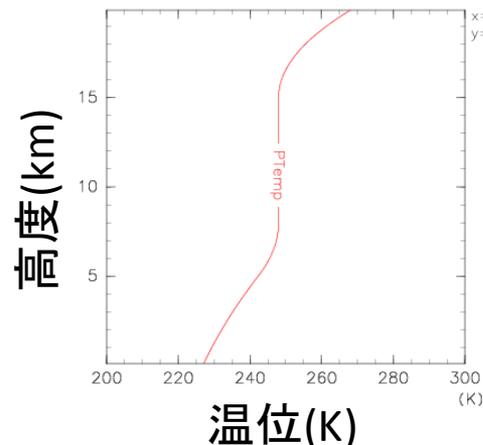
$\rho$ : 基本場の密度

$K_m$ : 運動量に対する  
乱流拡散係数

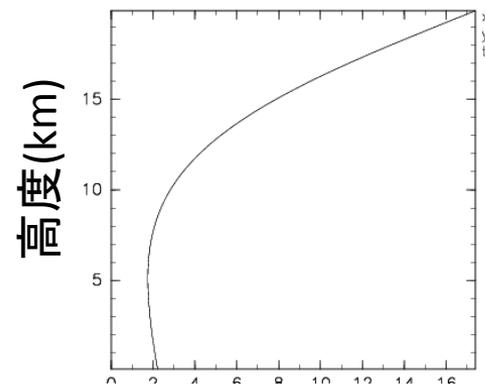
$K_h$ : 温位に対する  
乱流拡散係数

# 計算設定

- 計算領域(分解能)・計算時間
  - 水平 180 km, 鉛直 20 km ( $\Delta x=150\text{m}$ ,  $\Delta z=200\text{m}$ )
    - 下端は金星の高度 40 km を想定
  - 計算時間 161 時間 (580,000sec)
- 境界条件
  - 水平: 周期境界
  - 鉛直:  $w=0$ , 熱フラックス固定
- 初期条件
  - 鉛直 10 km にランダムな温位擾乱 (最大1K)
  - 初期の温位場は右上図
- 放射強制
  - 太陽放射を模した一様加熱(右下図)



Baker et al., 1998 で示されていた静的安定度から計算した基本場の温位の鉛直分布



太陽放射加熱率(W/m<sup>3</sup>)

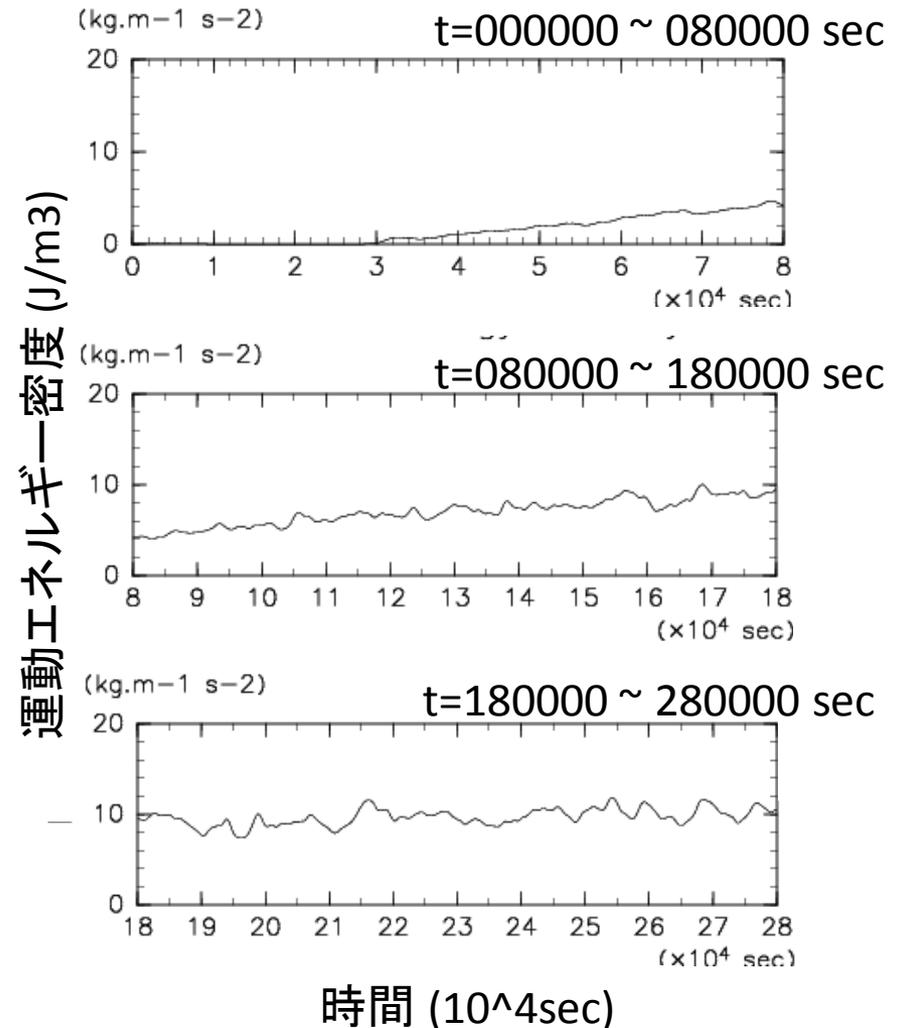
Baker et al., 1998 で示されていた高度40-60kmでの太陽放射加熱率

# 運動エネルギー密度

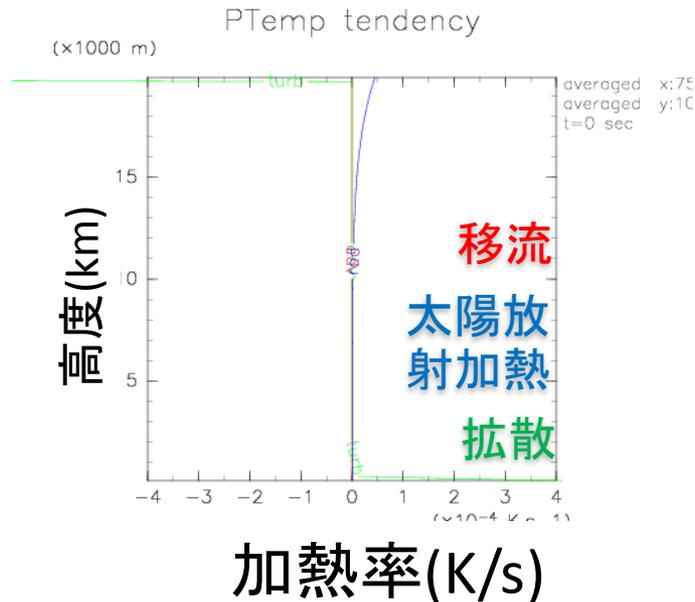
- 運動エネルギー密度は  $t=180000$  sec でほぼ一定値



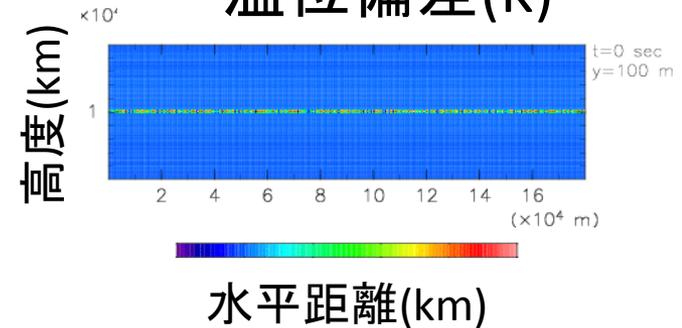
エネルギー的に定常状態



# 対流の発生の様子

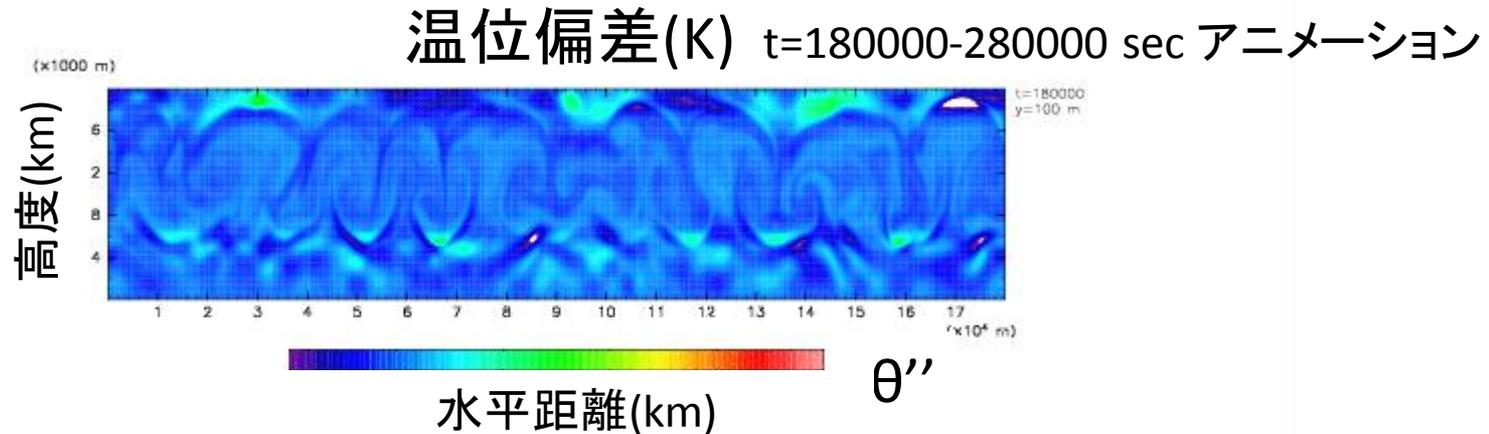


t=20000-398000 sec アニメーション  
温位偏差(K)



- t=30000 sec で冷たい下降流の発生により駆動
  - 上端での冷却が拡散によって中立層上端まで到達するのにかかる時間

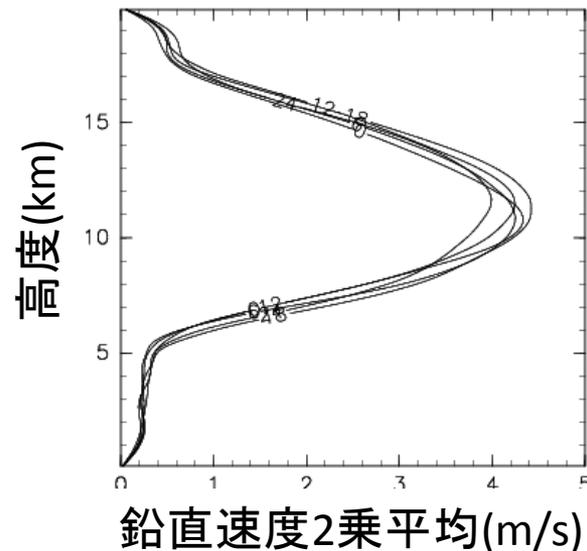
# 対流の様子



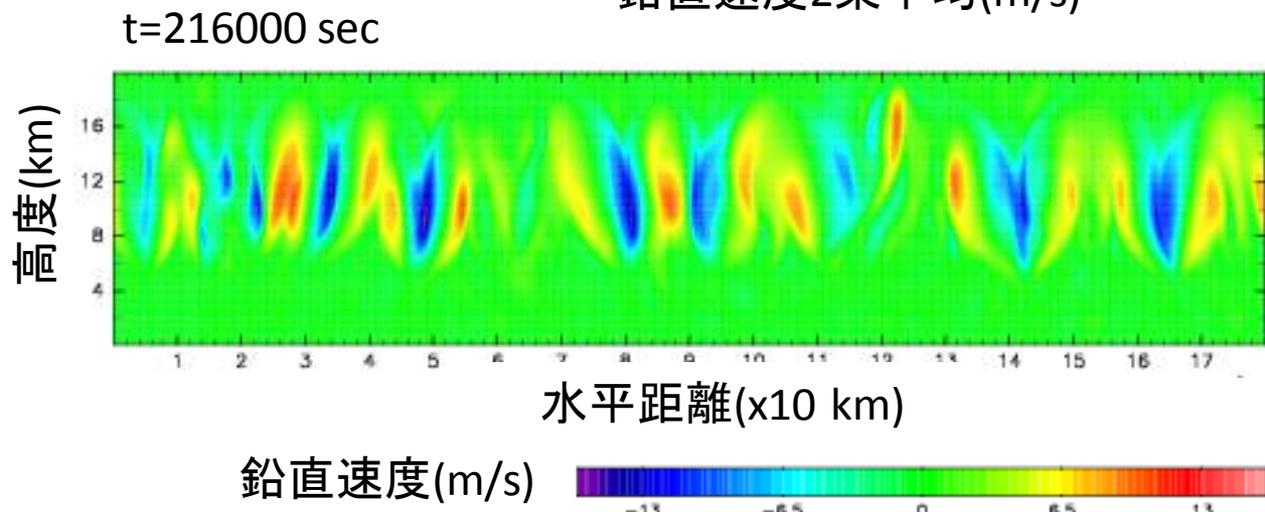
- $\theta''$  温位偏差(温位の水平平均からのずれ)
- セルの水平スケールは 15-30 km

# 定常状態での速度場

- 典型的な鉛直速度は対流層中層で4.5 m/s程度
  - 右図は $t=180000$  sec から  $20000$  sec 毎に描いた鉛直速度の2乗平均値

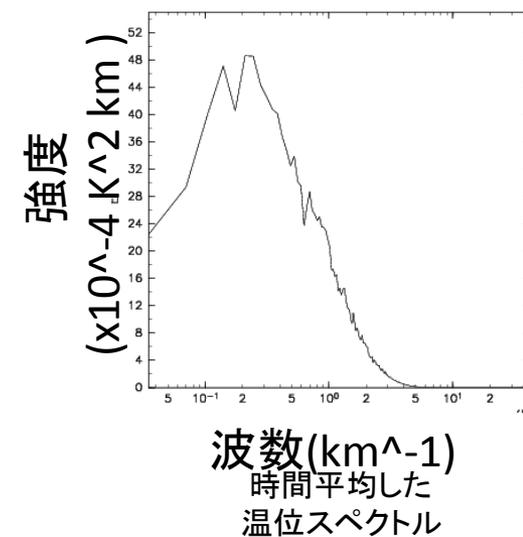
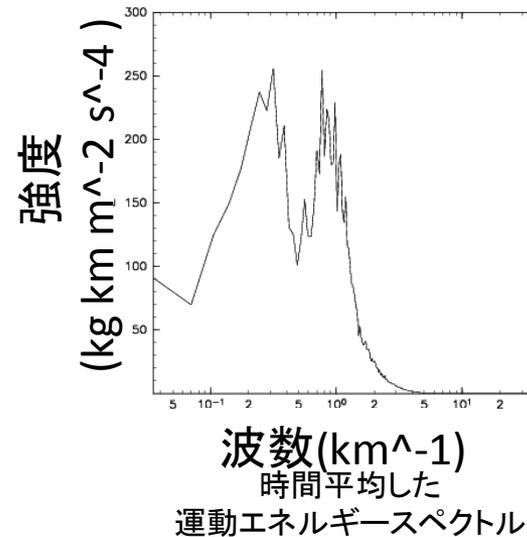
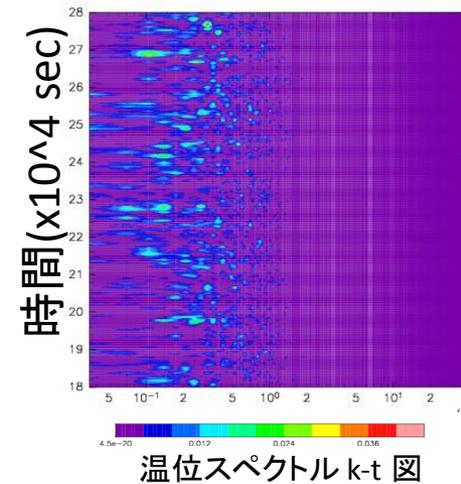
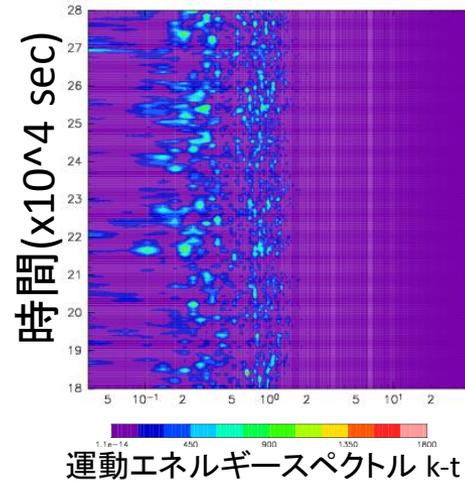


- 最大速度は15 m/s 程度



# スペクトル解析

- $z=10\text{km}$ におけるスペクトル解析
  - 温位, 運動エネルギーのピークは波長 25 km 付近
  - 運動エネルギーの第2のピークは微細構造によるもの
  - 対流セルの水平スケールと整合的



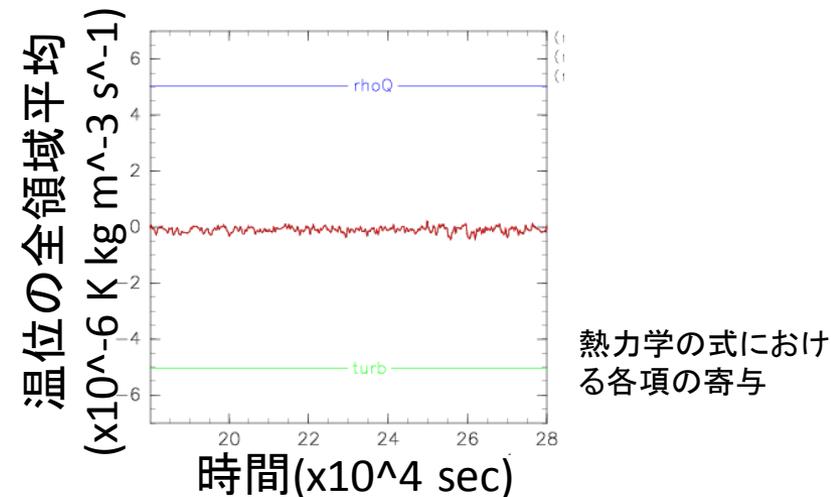
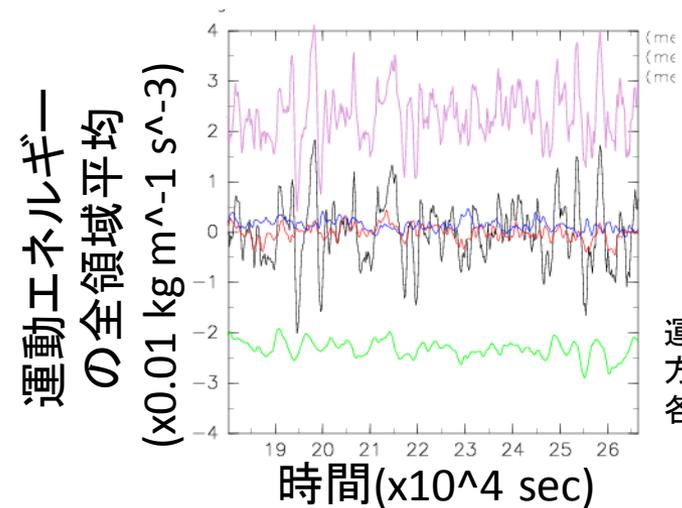
# 定常状態におけるバランス

- 運動エネルギーの全領域平均の変化率のバランス

粘性散逸 ~ 浮力

- 温位の全領域平均の変化率のバランス

太陽放射加熱 ~ 拡散



# まとめ

- 結論

- エネルギー的に定常状態に達した系での対流の水平スケールは 15-30 km, 典型的な鉛直速度は4.5 m/s, 最大速度15m/s 程度となった
  - 概ね Baker et al., 1998 で示されたものと同様の結果
- 対流は上端で冷却された熱が拡散によって中立層上端まで輸送されることで生じることがわかった
- 運動エネルギーの全領域平均値の変化率は粘性散逸と浮力による仕事率の和で説明できることがわかった。温位の全領域平均は太陽放射による一様加熱と拡散による熱輸送が概ね釣り合っていることがわかった

- 課題

- 熱力学の式の移流計算の精度に問題がある可能性
  - 詳細な調査が必要

# 参考文献

- Baker et al., 1998: Cloud-Level penetrative compressible convection in the Venus atmosphere. J. Atmos. Sci., 55, 3--18
- Eymet et al., 2008: Met exchange parameterization of therman infrared radiative transfer in Venus' atmosphere. J. Geophys. Res., 114, 1--21
- Hou. A. Y., Goody, R. M., 1989: Further Studies of the Circulation of the Venus atmosphere. J. Atmos. Sci., 46, 991--1001
- Klemp, J. B., Wilhelmson, R. B., 1978: The simulation of three-dimensional convective storm dynamics. J. Atmos. Sci., 35, 1070--1096
- Tomasco et al., 1985: The absorption of solar energy and the heating rate in the atmosphere of Venus. Adv. Space. Res., 5, 71--79
- Titov et al., 2012: Morphology of the cloud tops as observed by Venus Express monitoring camera. Icarus, 217, 682--701
- 杉山耕一郎, 小高正嗣, 山下達也, 中島健介, 林祥介, deepconv 開発グループ, 2011: 非静力学モデル deepconv, <http://www.gfd-dennou.org/library/deepconv/>, 地球流体電脳倶楽部
- 地球流体電脳倶楽部, 2012: 非静力学モデル deepconv の定式化, 44pp  
[http://www.gfd-dennou.org/library/deepconv/arare5/arare5\\_current/doc/dai1bu/pub/teishiki.pdf](http://www.gfd-dennou.org/library/deepconv/arare5/arare5_current/doc/dai1bu/pub/teishiki.pdf)
- 地球流体電脳倶楽部, 2012: 非静力学モデル deepconv の離散化, 43pp  
[http://www.gfd-dennou.org/library/deepconv/arare5/arare5\\_current/doc/dai2bu/pub/main.pdf](http://www.gfd-dennou.org/library/deepconv/arare5/arare5_current/doc/dai2bu/pub/main.pdf)
- 松田 佳久, 2000: 惑星気象学, 東京大学出版会