

# 金星大気力学

## —昔話と最近の話題

松田佳久(学芸大)・高木征弘(京産大)

- 金星のスーパーローテーションを中心として、議論する
- 昔(1970年代)の研究状況を述べる
- 最近の我々のGCMの計算結果を話題提供する

# 金星の放射対流平衡の計算

- 温室効果による金星地表面の高温(730K)の説明
- 地表面の到達する太陽光強度が不明だった
  - > Venera 8号の観測(1972): 金星軌道の1.5%の太陽光が地表面に到達
  - > この情報に基づき、当時の分光学のデータに基づき計算、Matsuda and Matsuno(1978)

# CO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>Oの吸収係数

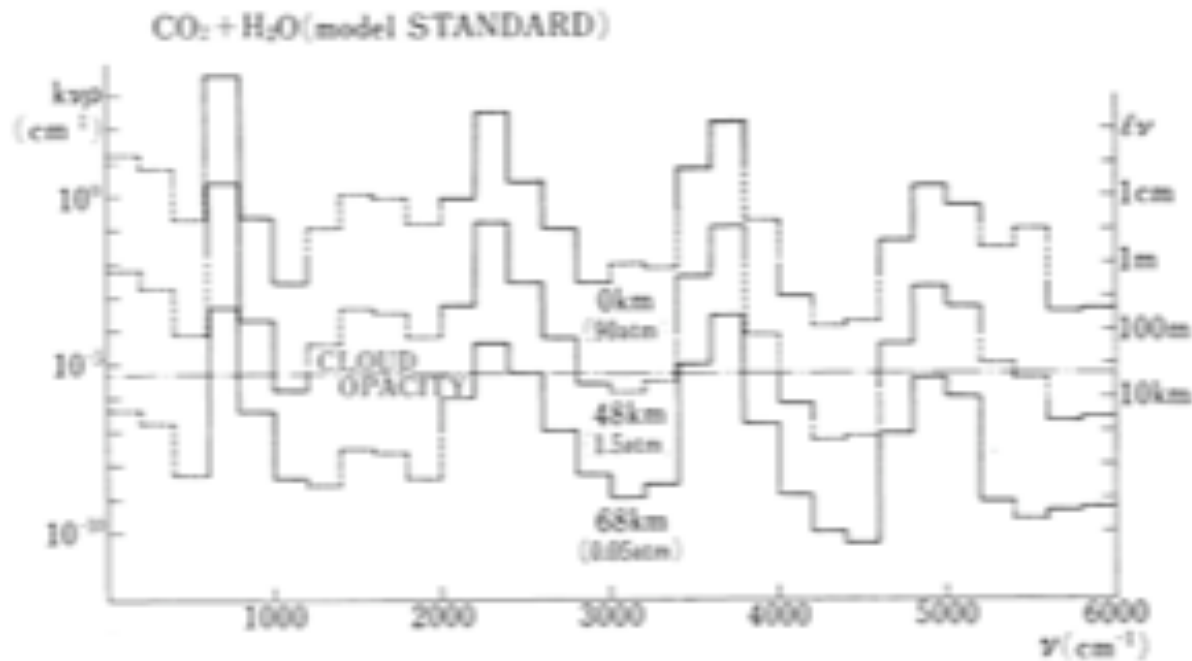


Fig. 4 Infra-red opacity ( $k_{\nu\rho}$ ) at selected levels (left scale) and corresponding photon mean free path ( $l_{\nu}$ , right scale). Solid line part is the spectral range where CO<sub>2</sub> is a major absorber and dashed line part is that of H<sub>2</sub>O. The cloud opacity (assumed grey) is also drawn.

# 放射平衡温度分布 (Matsuda and Matsuno(1978))

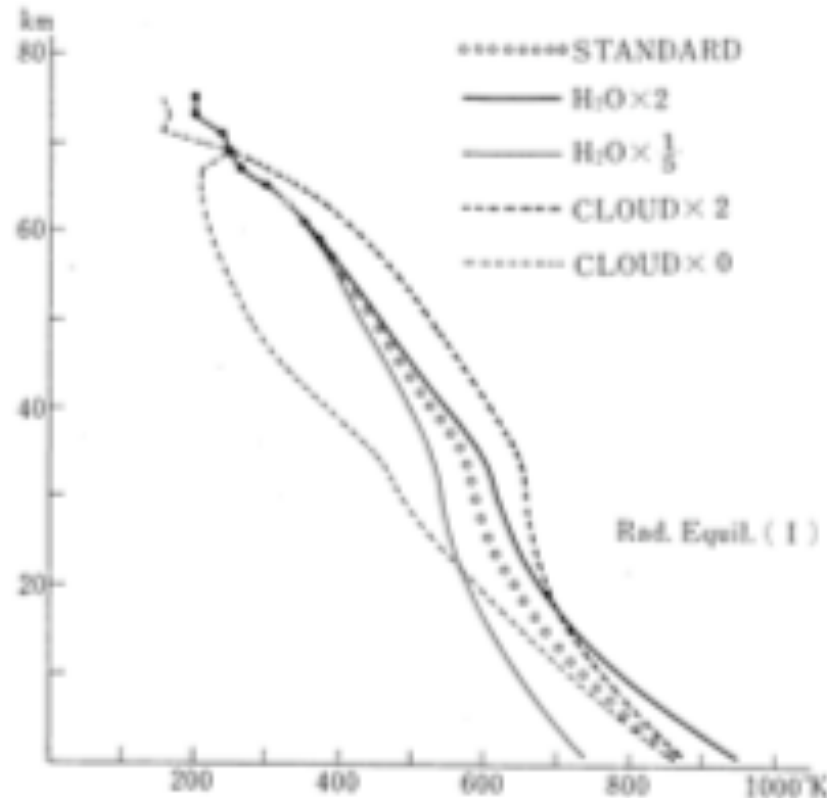


Fig. 7 Temperature distributions in radiative equilibrium (I). For abbreviation, "Standard", "H<sub>2</sub>O × 2" etc. see table 1.

# 放射对流平衡温度分布 (Matsuda and Matsuno(1978))

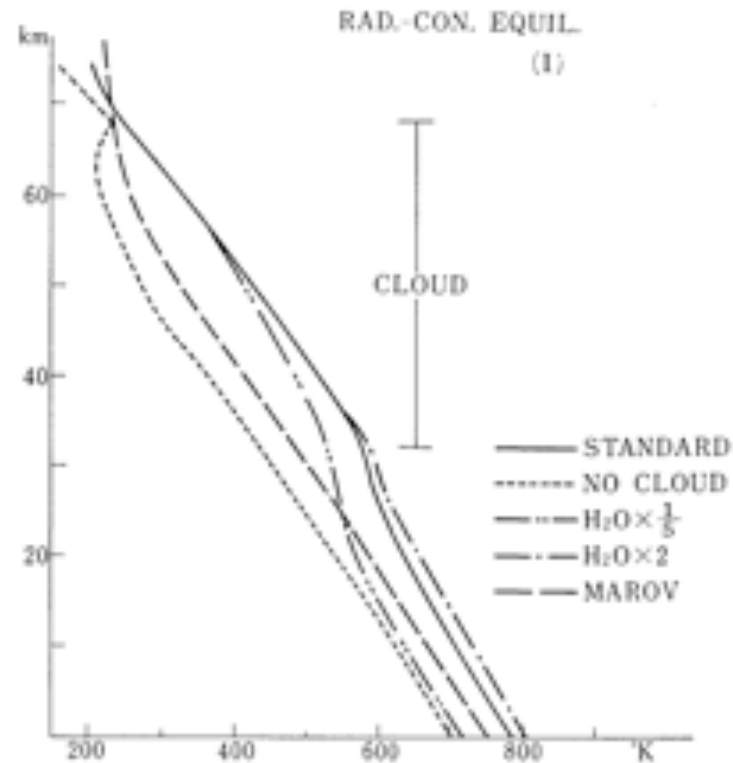


Fig. 9 Temperature distributions in radiative-convective equilibrium (I). Distribution of the case "cloud×2" is not depicted because there is no difference enough from the standard case to distinguish in this figure.

# 鉛直対流の計算

- 対流調節ではなく、渦拡散係数を使用

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\frac{R}{c_p}} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho K \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)$$

$$K = \begin{cases} l^2 \sqrt{\frac{g}{\theta} \left| \frac{\partial \theta}{\partial z} \right|} & \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} \leq 0 \right) \\ 0 & \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} > 0 \right) \end{cases}$$

# 温度の日変化(水平移流なし)

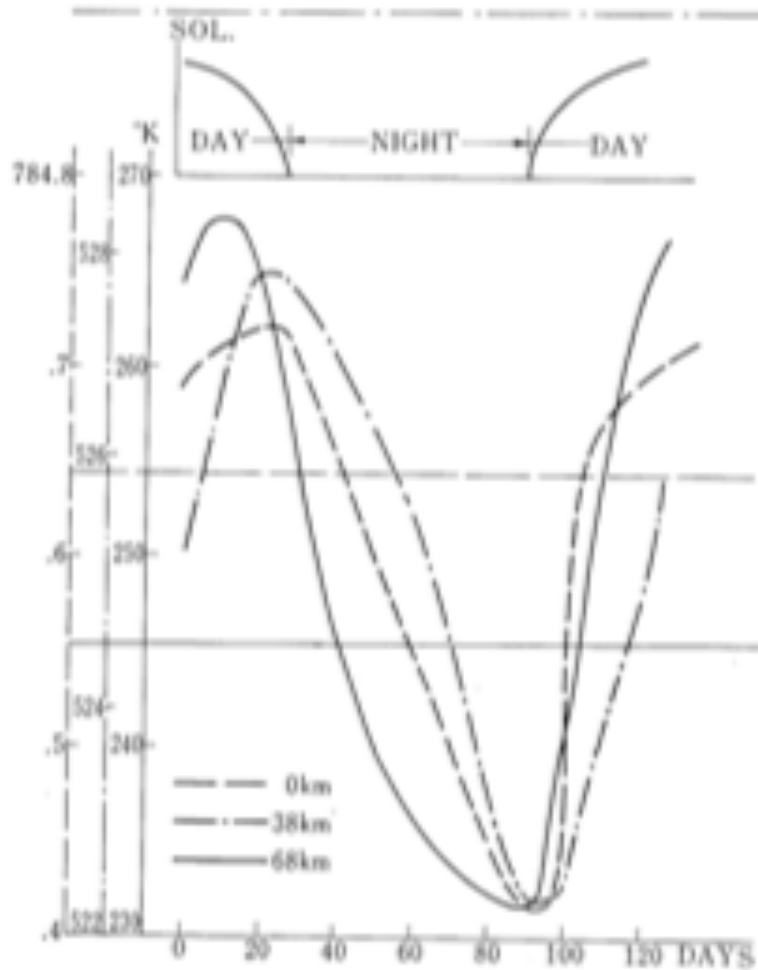


Fig. 13 Diurnal temperature variation at selected levels. A dashed line, a chain line and a solid line show diurnal temperature variation at 0 km (surface), 38 km (a level above the cloud base) and 68 km (cloud top), respectively. Three horizontal straight lines represents the temperature in the radiative-convective equilibrium at each level. The diurnal variation of solar radiation is also shown.

# 雲層での鉛直対流(昼間と夜間)

昼間

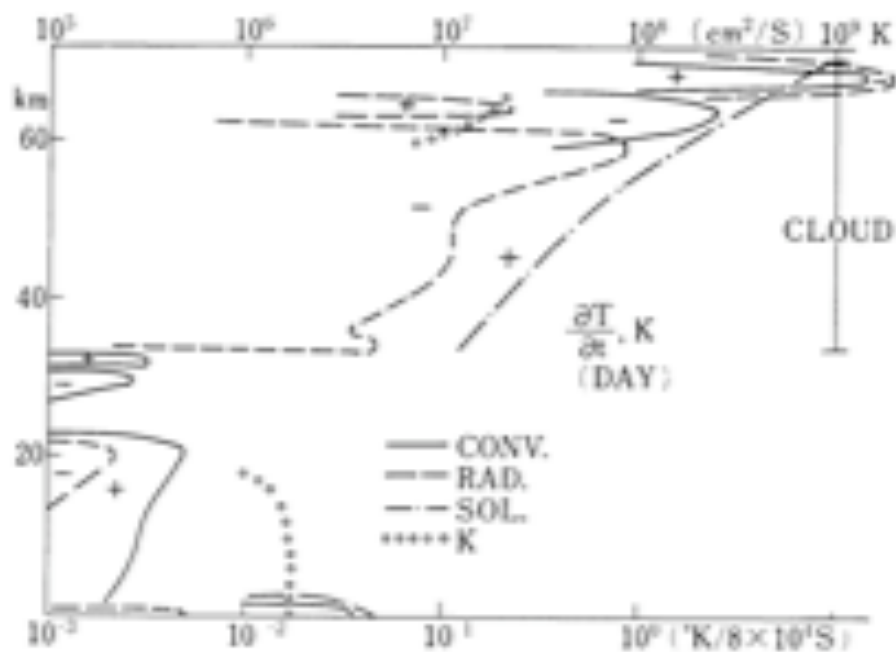


Fig. 14 Heat balance in the daytime. The rates of temperature change due to the convection, the radiation and the solar heating are illustrated. The eddy diffusion coefficient, designated as  $K$ , is also shown.

夜間

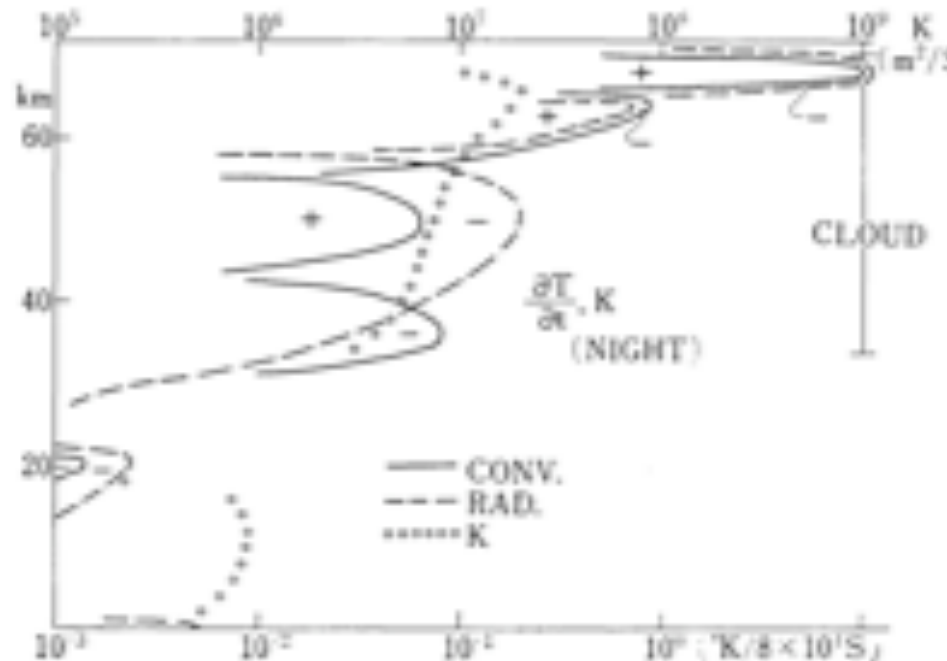


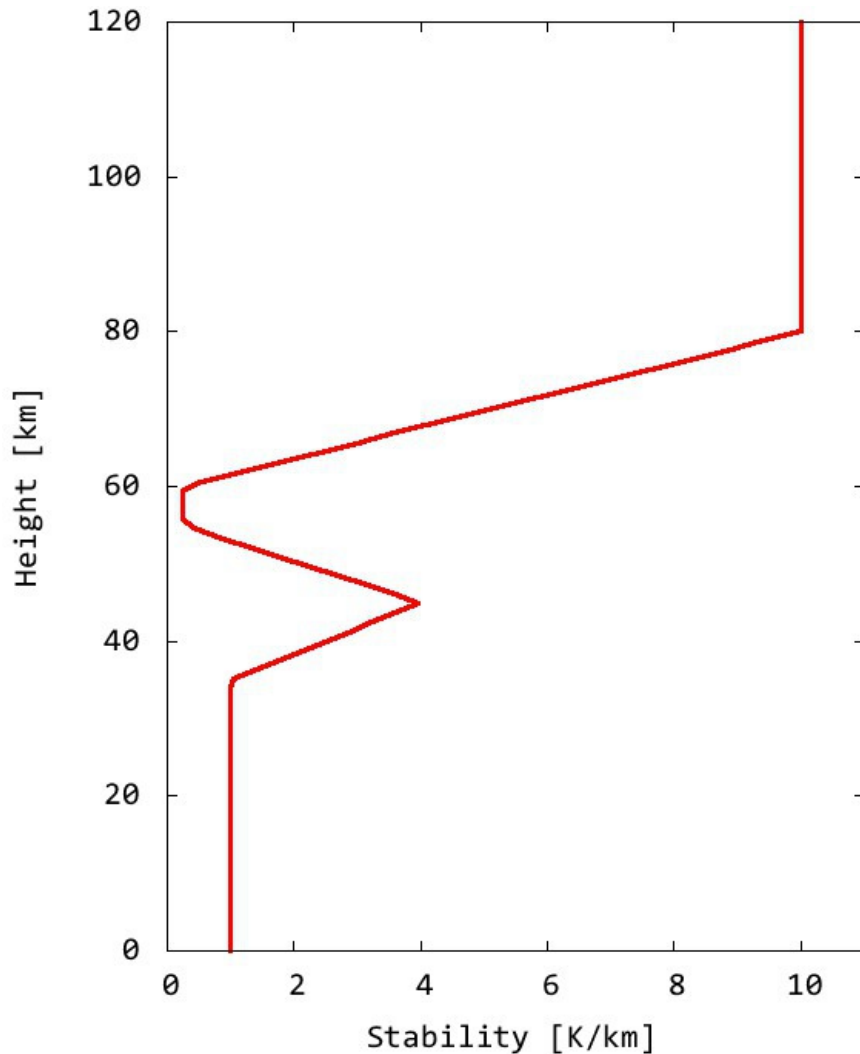
Fig. 15 Heat balance in the night time. The rates of temperature change due to the convection and the radiation are illustrated. The eddy diffusion coefficient, designated as  $K$ , is also shown.



# 雲層での鉛直対流(昼間と夜間)

- Matsuda and Matsuno(1978)の示唆すること  
    —> 誤り
- 雲層上部では、赤外放射による冷却と対流による加熱がほぼバランス(昼間は太陽加熱もある)
- 夜に対流が活発化(上から冷却されるので)
- 昼は対流が一部の高度に限られる
- 誤りの原因: 雲層の上のもや層の吸収?

# 安定度分布: $\Gamma(z)=dT/dz+g/C_p$



- 雲層上部は安定
- 中立(対流層)は55~60km

# スーパーローテーション研究の状況 (1970年代)

- 高速東西流を作る可能メカニズムの提示

## (1) moving flameメカニズム

—夜昼間対流から東西一様流を作る

## (2) 重力波(熱潮汐波)メカニズム

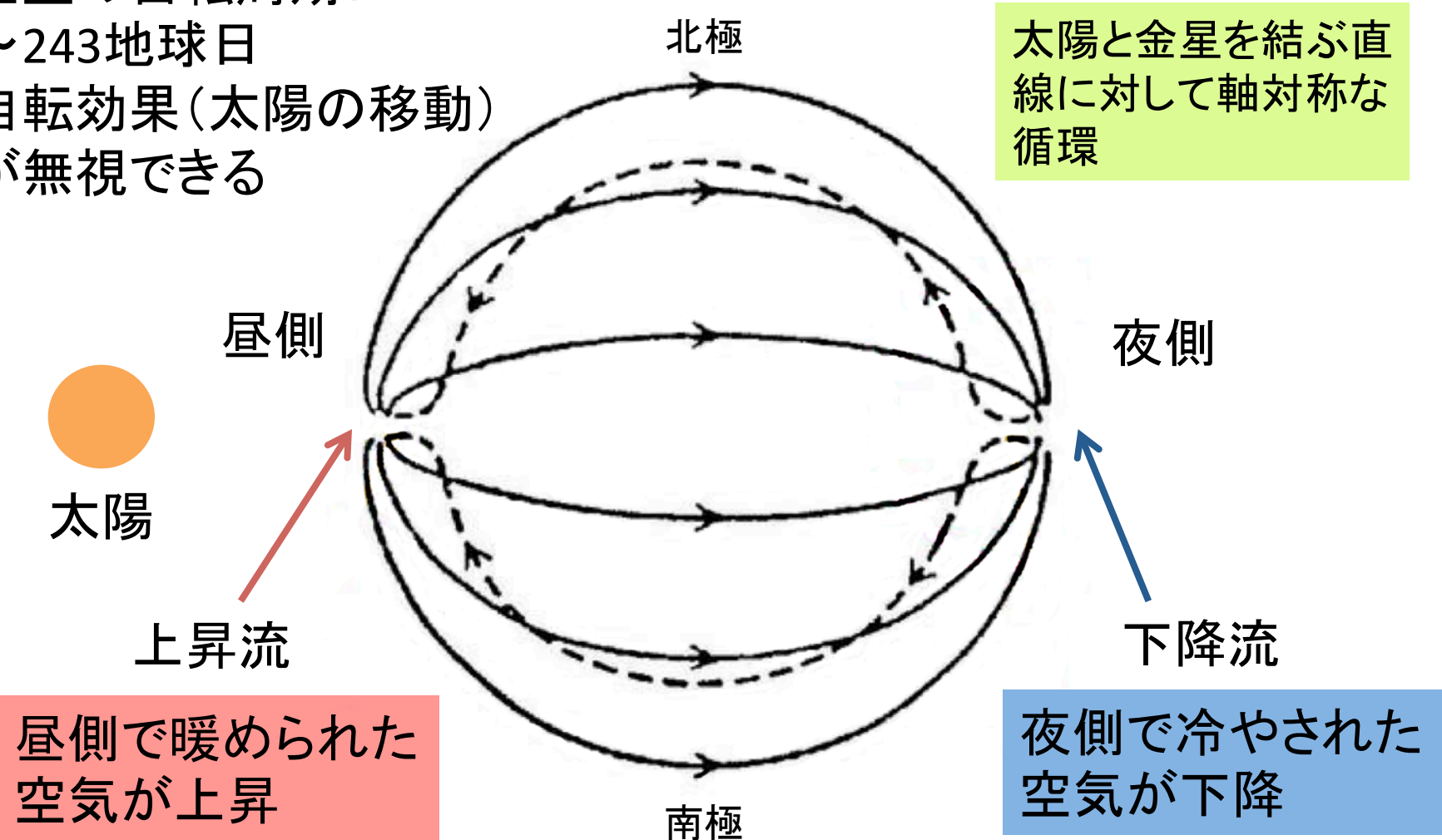
—重力波により余分な運動量を下方に運び、地面に捨てる。Fels and Lindzen(1974)が提案したが、否定的

## (3) 子午面循環メカニズム

—子午面循環によって固体部分の角運動量を汲み上げ、上層に蓄積

# 夜昼間対流

金星の自転周期：  
～243地球日  
自転効果(太陽の移動)  
が無視できる



# Young and Pollack(1977)の衝撃

- Young and PollackがGCMを用いて、初めてスーパーローテーションの再現に「成功」
- この結果の特徴
  - (a)惑星の自転がなくても、スーパーローテーションはできる
  - (b)初期条件により異なった状態( $U = \text{大}$ と $U = \text{小}$ )へ移行
- 彼らの解釈: 子午面循環メカニズムとThompsonメカニズムを併用(混乱している)

# Matsuda(1980)の研究

- 流体力学的非線型問題への関心
- 球面上の流れ場をトロイダル場とポロイダル場で表現し、それぞれを球面調和関数で展開(モード展開)。モード間のカップリング(非線型項)を陽に表現
- これ(highly truncated system)を積分し、高速東西流が出れば、それをつくる非線型項を見れば、メカニズムが分かると思った。何も物理的メカニズムを考えていない
- 積分してもうまく高速東西流が出ない。無理矢理、加熱率を大きくすると、カオス的な解が出て来た
- 松野先生の指導:「モードを増やしてやってみろ」
  - 対応:モードを減らしてやってみた(東西一様のモードのみで調べた)

# Matsuda(1980)の結果の特徴

- 子午面循環によるメカニズム
- 非線型方程式系での平衡解が解析的に求められている
- あるパラメータ領域では複数の平衡解が存在(2つの安定解、1つの不安定解)
- 安定解のうち1つは高速東風(子午面循環は弱い)に対応、1つは夜昼間対流に対応すると解釈されている
- 初期状態により異なった平衡状態に落ち着くことを意味する
- 力学的バランスにより、大循環のタイプを分類(直接循環タイプ、温度風(地衡風)バランスタイプ、遠心力バランスタイプ)

# 当時の金星観測の状況

- Pioneer Venusの報告(Science,1979)

Rossowの雲の解析一>

- (a) Mariner 10で見られた中緯度ジェットは存在しない(東風の緯度分布は剛体回転に近い)
- (b) 両半球で南北流は極向き  
( $\overline{u'v'}$  の解析は少し後)



# その後の惑星気象研究

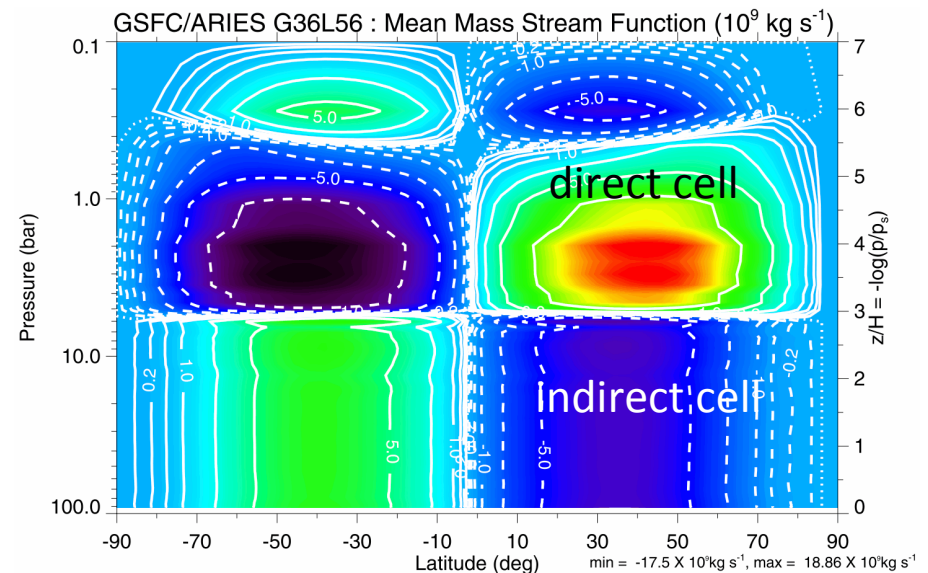
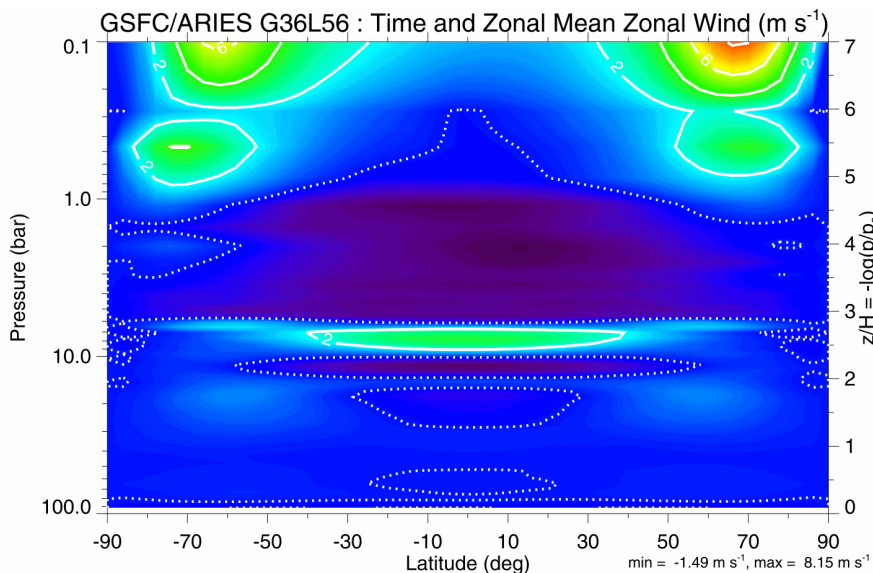
- 米国で非常に盛んであった惑星気象研究が急激に衰退、皆無に成った
- 原因は環境問題への関心(金?)の集中
- その後、緩やかに回復? 欧州が参入

# 数値実験(計算)的研究

- Moving flame (動く炎), Thompson メカニズム:  
Schubert and Whitehead (1969), Thompson (1970)
  - Takagi and Matsuda (1999, 2000)
- 熱潮汐波メカニズム: Fels and Lindzen (1974), Plumb (1975)
  - Newman and Leovy (1992)
  - Takagi and Matsuda (2005, 2006, 2007)
- Gierasch メカニズム: Gierasch (1975), Matsuda (1980, 1982)
  - Yamamoto and Takahashi (2003), Lee et al. (2007), Hollingsworth et al. (2007)
  - Kido and Wakata (2008), Yamamoto et al. (2009), Yamamoto and Yoden(2013),

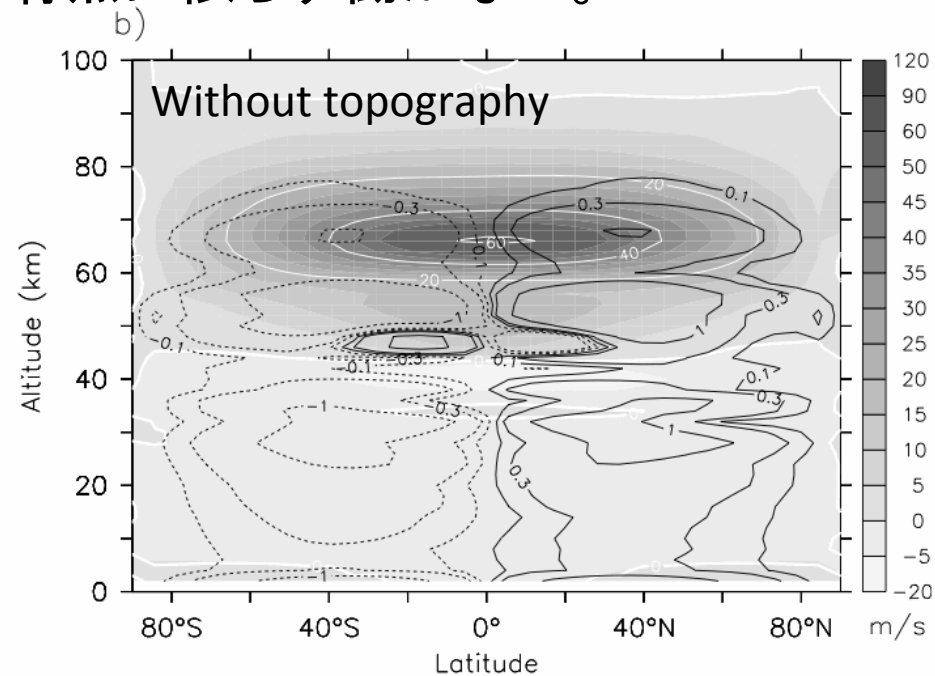
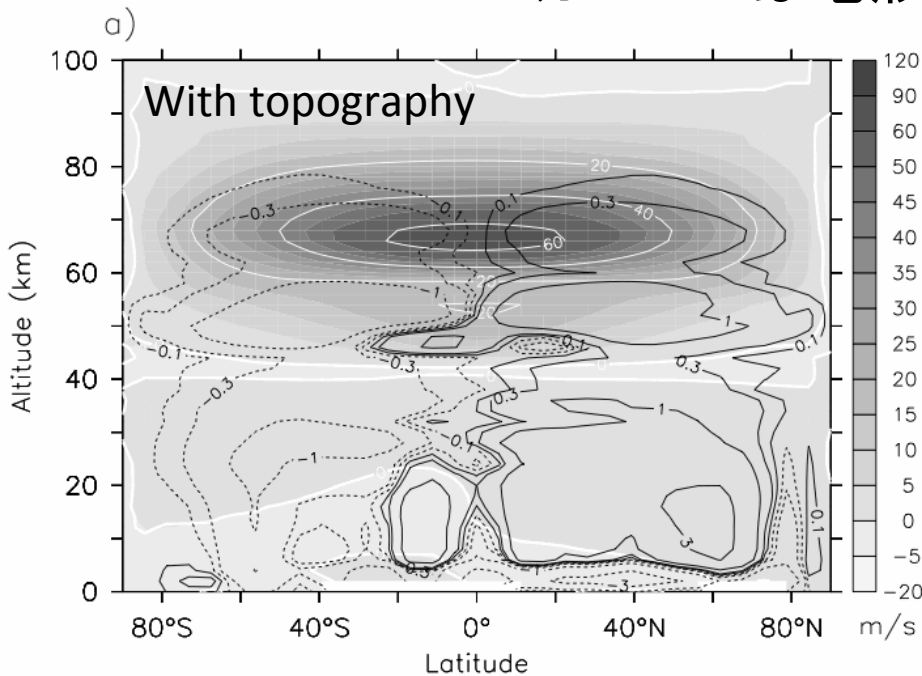
# 太陽加熱と平均子午面循環

- Hollingsworth et al. (2007)
  - 現実的な太陽加熱分布では、平均子午面循環が高度方向に3つのセルに分離し、高速東西流が生成されなくなった。
  - Gierasch メカニズムが現実的な太陽加熱では働かない可能性を示唆している。



# Gierasch メカニズムと熱潮汐波

- Lebonnois et al. (2010)
  - 放射伝達モデルと地形を組み込んだ GCM
  - 高度 60 km 以上では熱潮汐波メカニズムにより高速のスーパーローテーションが生成された。しかしながら、45 km 以下の平均東西流は 10 m/s 以下で非常に弱いまま。
  - 45 km 以下の平均子午面循環には地形が強く影響している。
  - Gierasch メカニズムは地形の有無に依らず働かない。



# 金星大気の多重平衡状態

- Matsuda (1980), Kido and Wakata (2008, 2009), Yamamoto (Kashimura) and Yoden (2013), Kashimura and Yoden (2015)
  - 金星大気には2つの安定平衡状態が存在
  - (1) 強い東西流 + 弱い子午面循環
  - (2) 弱い東西流 + 強い子午面循環
- Hollingsworth et al. (2007) と Lebonnois et al. (2010) の初期条件は静止状態であった。
  - 彼らの研究で得られた下層大気の流れは、(2) の平衡状態 (弱い東西流 + 強い子午面循環) に対応しているのではないかと考えられる。
- スーパーローテーション状態を初期条件にすれば、現実的な太陽加熱によっても Gierasch メカニズムが働くのではないか？

# 多重平衡解の存在を示唆

$U_{ini}: 0 \text{ m/s}$

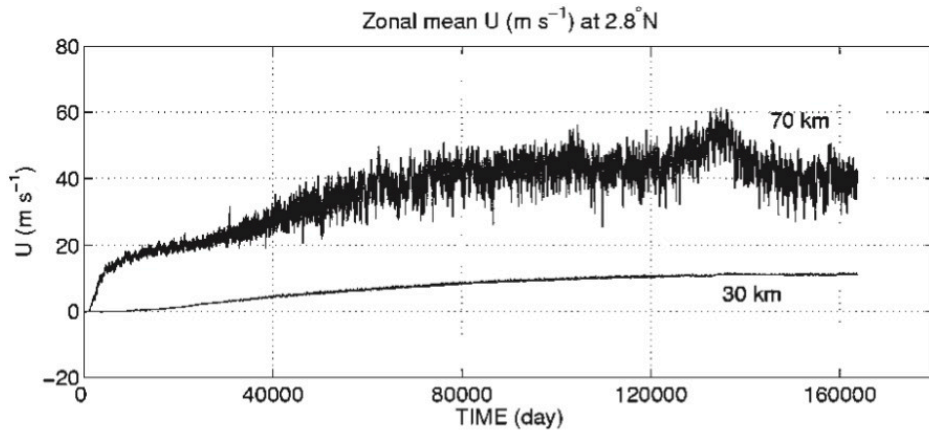


Fig. 4. Time evolution of zonal-mean zonal winds ( $\text{m s}^{-1}$ ) at 70 km and 30 km altitudes and at  $2.8^\circ\text{N}$  latitude.

- 弱い平均東西流
- 強い子午面循環

$U_{ini}: 50 \text{ m/s}$

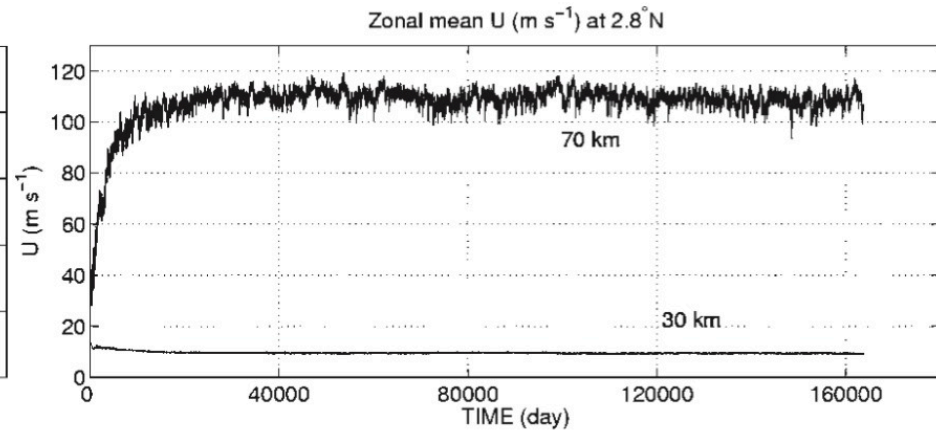


Fig. 6. Time evolution of zonal-mean zonal winds ( $\text{m s}^{-1}$ ) at 70 km and 30 km altitudes at  $2.8^\circ\text{N}$  latitude.

- 強い平均東西流
- 弱い子午面循環

# 本研究では...

- スーパーローテーションを初期条件とし、現実的な太陽加熱によってどのような大気循環が維持されるかを調査する。
- 平均子午面循環と熱潮汐波の効果を分離するため、太陽加熱をフーリエ成分に分解する：

$$Q_{\text{total}} = Q_0 + Q_1 + Q_2 + \dots$$

添字は東西波数を表す。

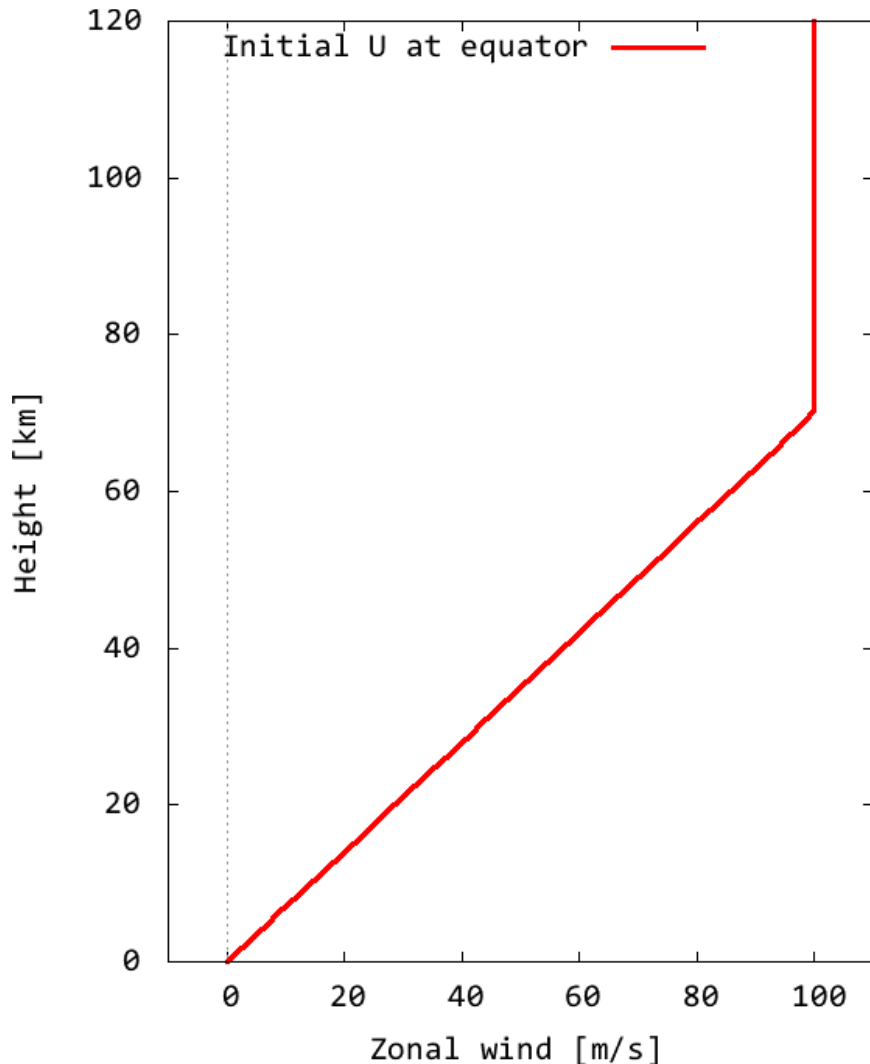
- 地面で吸収される太陽光 ( $17 \text{ W/m}^2$ ) は惑星境界層 (PBL) 内に一様に分配する。
  - PBL は最下層の鉛直渦粘性を  $500 \text{ m}^2/\text{s}$  に設定することによって表現した。
  - PBL の厚さは  $2 \text{ km}$  とした。

# 数値モデル

- GCM (Hoskins and Simmons, 1975)
  - 解像度: T21L80 (0–120 km,  $\Delta z$ : 0.2–2 km)
  - 地面摩擦はレーリー摩擦によって表現 (緩和時間は1地球日)
  - 鉛直渦粘性は定数 ( $3.0 \times 10^{-3}$  or  $3.0 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s)
- 太陽加熱
  - 鉛直分布は観測に準拠 (Tomasko et al., 1980).
  - フーリエ成分に分解して与える。
- 放射輸送 (長波)
  - Newtonian cooling で単純化:  $dT/dt = Q - \kappa (T - T_{\text{ref}}(z))$
  - $\kappa$ : Crisp (1986),  $T_{\text{ref}}(z)$ : 観測に基づく水平一様な分布
- 地形なし,  $C_p$  一定, ...
- 積分時間は100地球年
  - 鉛直渦粘性の緩和時間は数百～数千地球年

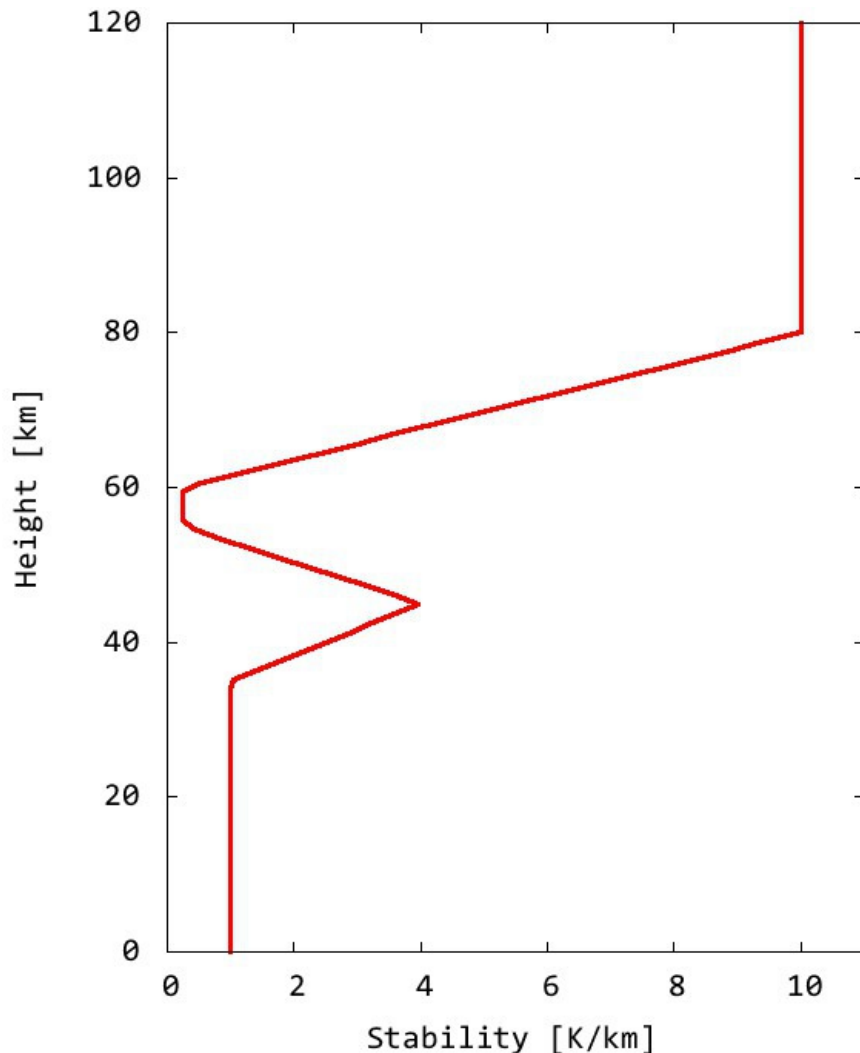


# 初期条件: $U(y,z)$ and $T(y,z)$



- スーパーローテーションを初期条件とした:
  - 地面から 70 km までは線形に風速増加.
  - 70 km 以上は風速一定 (赤道で 100 m/s).
  - 緯度分布は剛体回転仮定。
- 初期の温度場は平均東西流と傾度風バランスするように与える。

# 安定度分布: $\Gamma(z) = dT/dz + g/C_p$

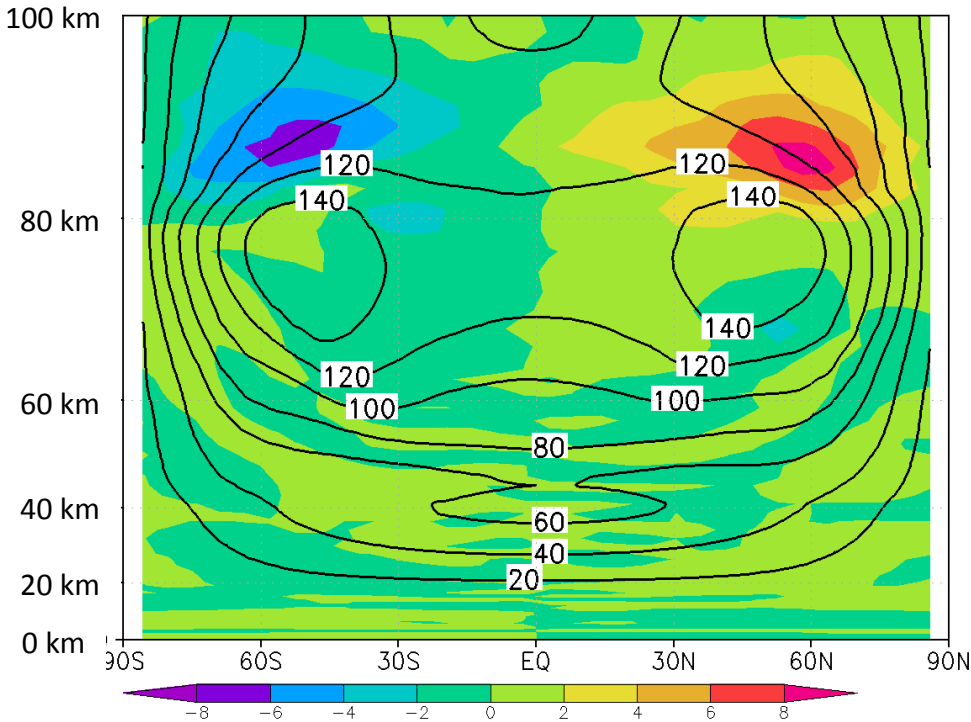


- 雲層中の中立成層領域が雲層付近で生じる傾圧不安定に重要 (Sugimoto et al. 2014)
- 本研究では観測に基づく安定度分布を与える。
- 初期の温度分布は、 $\Gamma(z)$  をもとに東西風速分布とバランスするように与える。

# 東西平均場 (100 地球年)

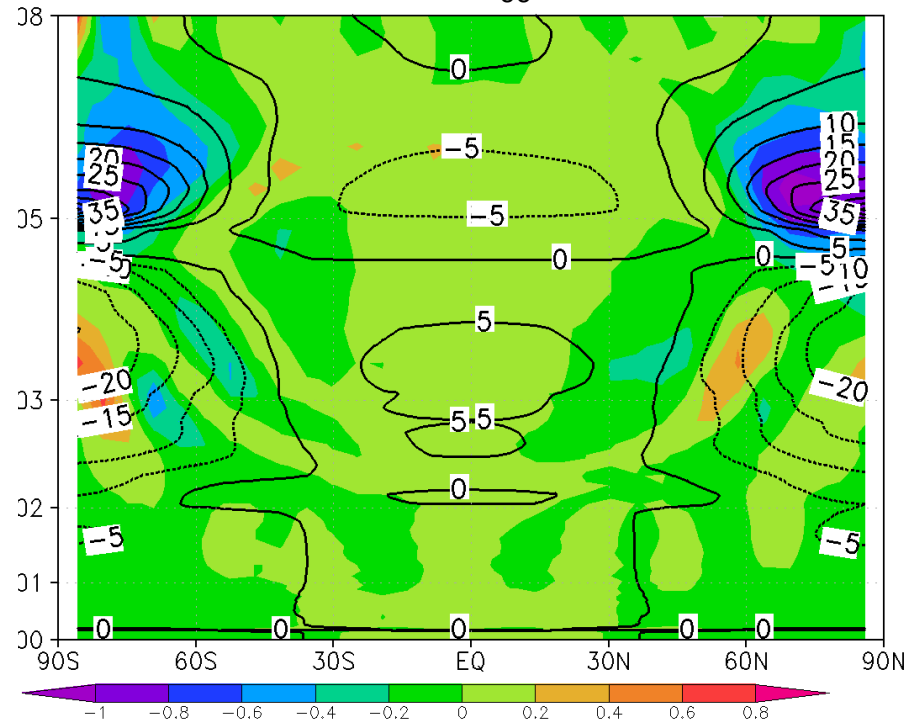
Case  $Q=Q_0$ ,  $H=2$  km,  $E=3.0E-2$

V (color) and U (contour)



速いスーパーローテーションが上層だけでなく、45 km 以下の下層でも維持されている。顕著な中緯度ジェットが存在 (~150 m/s at 45° latitudes).

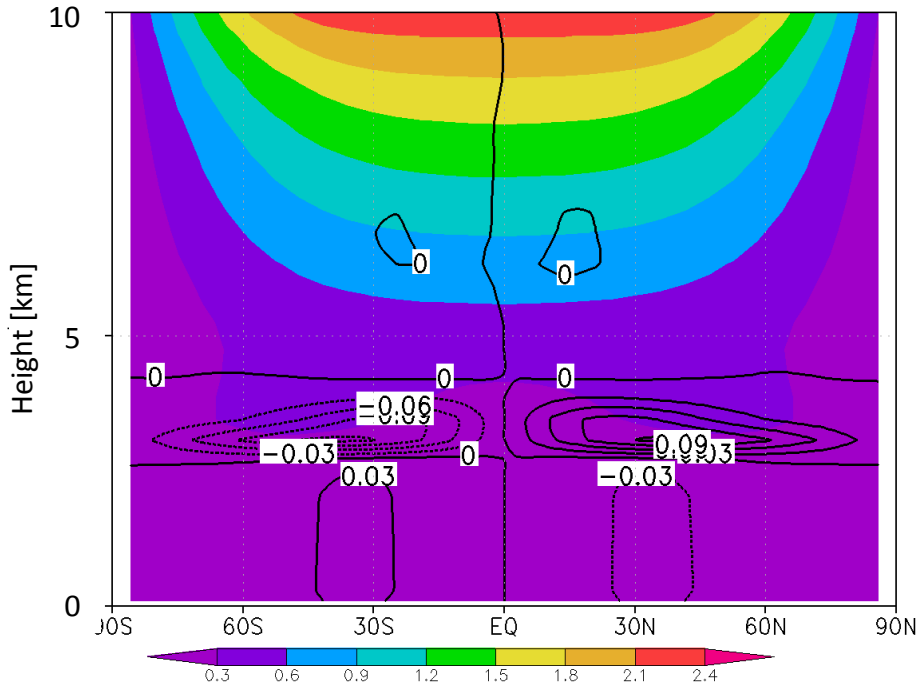
W (color) and  $T(y,z)-T_{00}(z)$  (contour)



低緯度では地面から高度 100 km まで上昇流が卓越。

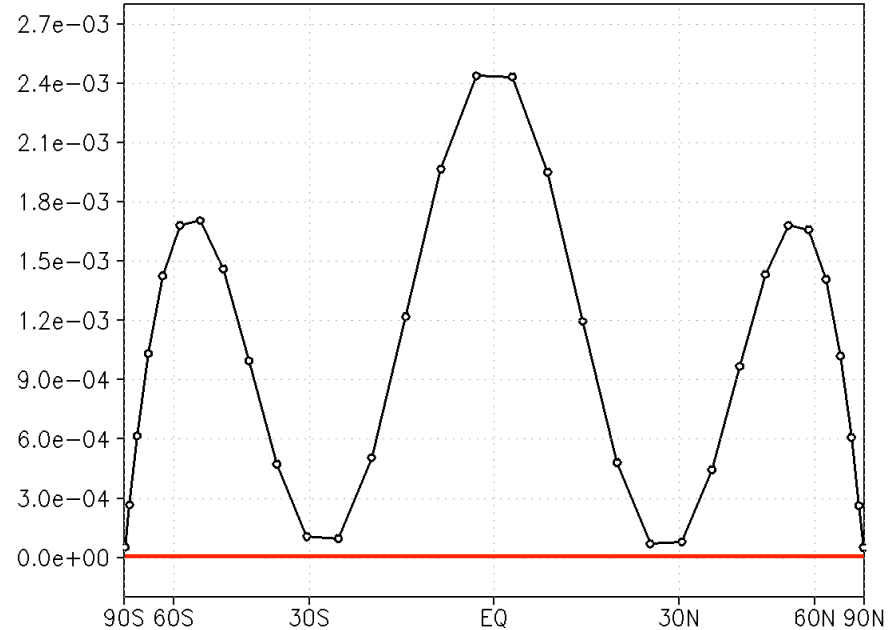
# 東西平均した循環 (< 10 km)

U (color) and V (contours)



顕著な平均子午面循環が惑星境界層内に存在。最下層の南北流(赤道向き)の風速は0.03 m/s程度。

$U_{\text{bottom}} \times \cos(\text{LAT})$



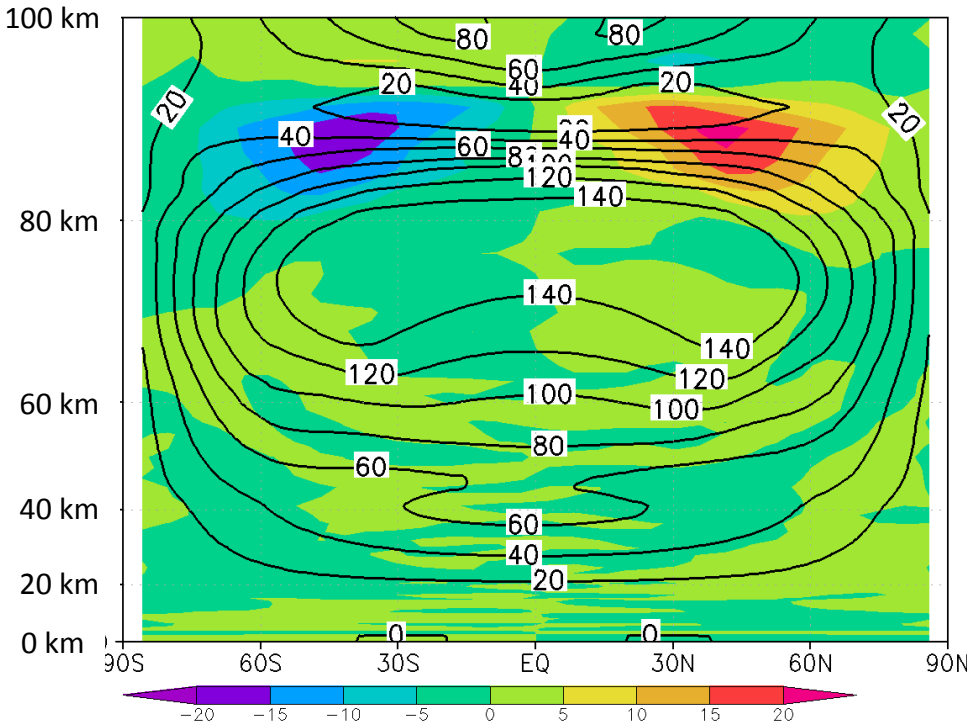
最下層の東西風は非常に遅く、風速は数 mm/s 程度。30°付近に極小が存在するが、負の U は存在しない。これは地面摩擦によって大気の角運動量が失われつつあることを示す。

# 東西平均場 (100 地球年)

Case  $Q=Q_0+Q_2$ ,  $H=2$  km,  $E=3.0E-2$

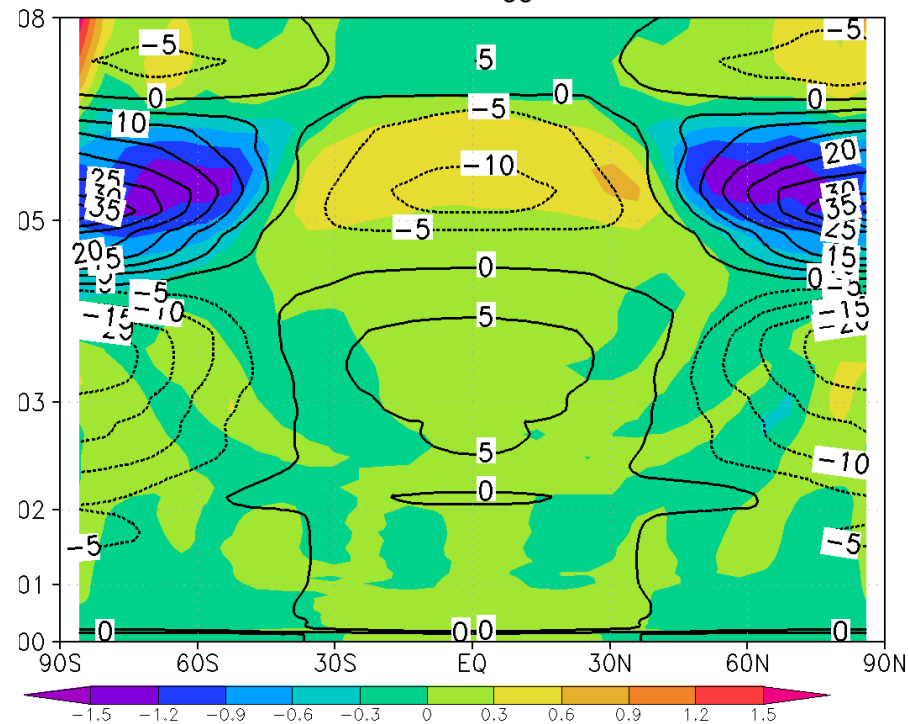
(The semidiurnal component added.)

V (color) and U (contour)



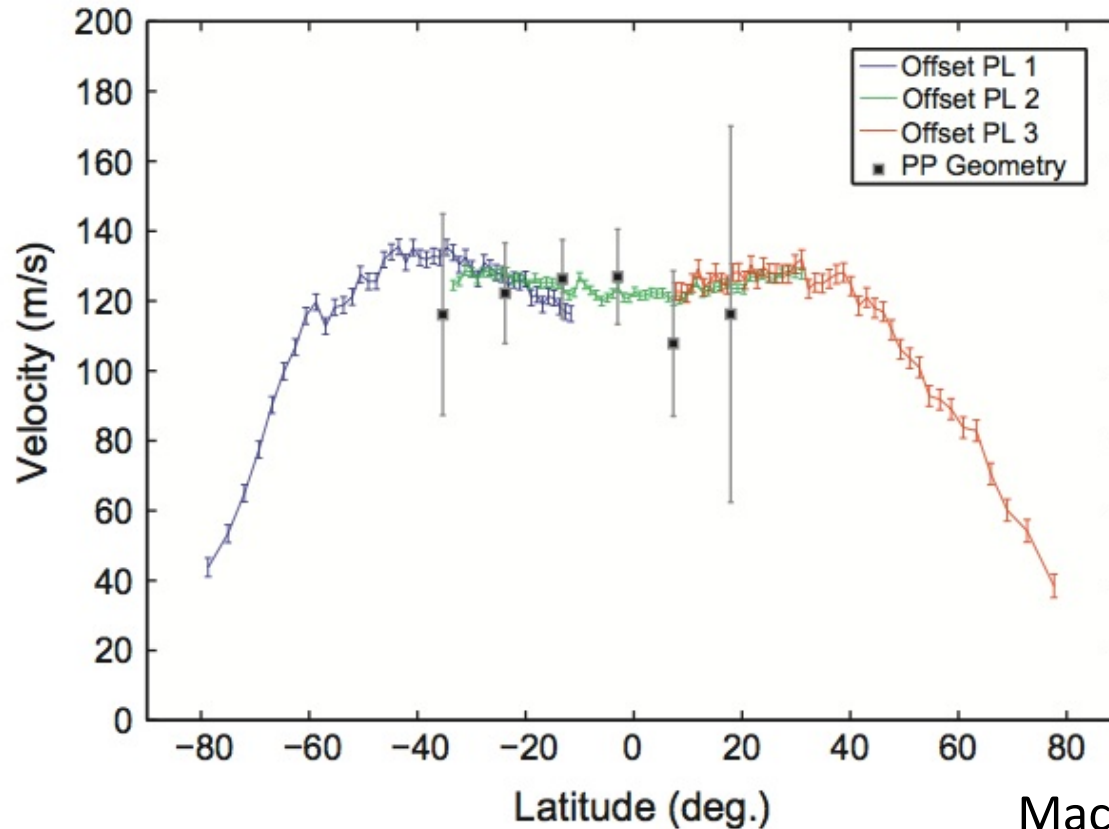
太陽加熱に半日潮成分を加えると、平均東西風の分布がかなり変化する。雲頂高度の赤道から40°付近まではほぼ等速分布となる。これは最近の観測結果と非常によく一致する。(e.g., Machado et al. 2012)

W (color) and  $T(y,z)-T_{00}(z)$  (contour)



Vertical motions and temperature distributions are qualitatively unchanged. However, the direct circulation has been much enhanced above 80 km where  $dU/dz$  is negative.

# 吸収線のドップラーシフト観測による 東西風速の緯度分布



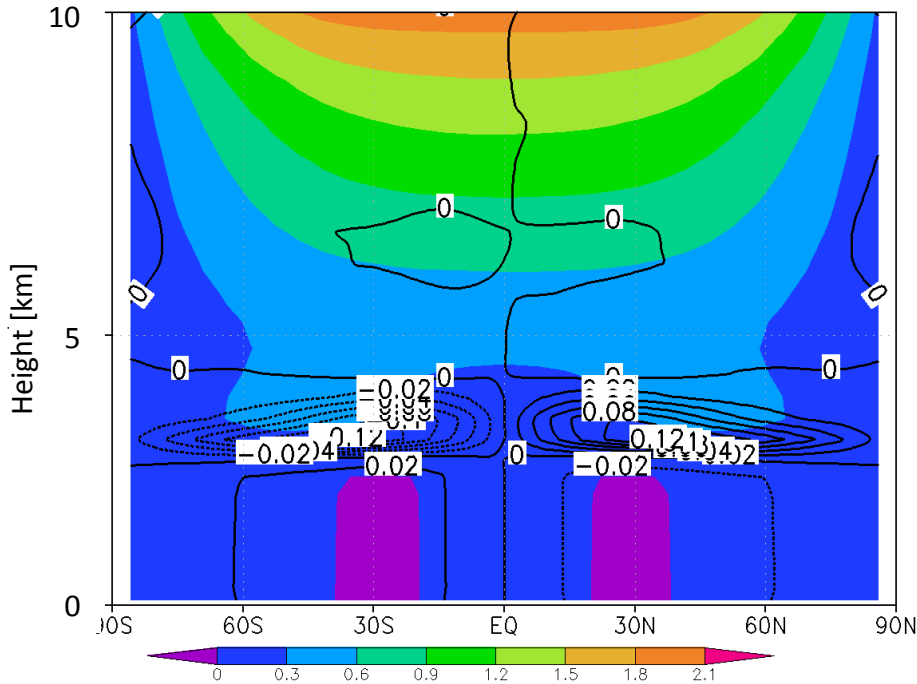
UV

Machado et al. (2012)

**Fig. 11.** Summary of the measurements made with the slit perpendicular to the rotation axis (zonal wind velocity, squares) and parallel (relative zonal wind measurements, lines). Curve PL3 (green) has been offset vertically in order to best-fit the absolute zonal wind measurements closest to the equator. Curves PL1 (blue) and PL2 (red) were offset in order to align them with curve PL3 in their regions of overlap.

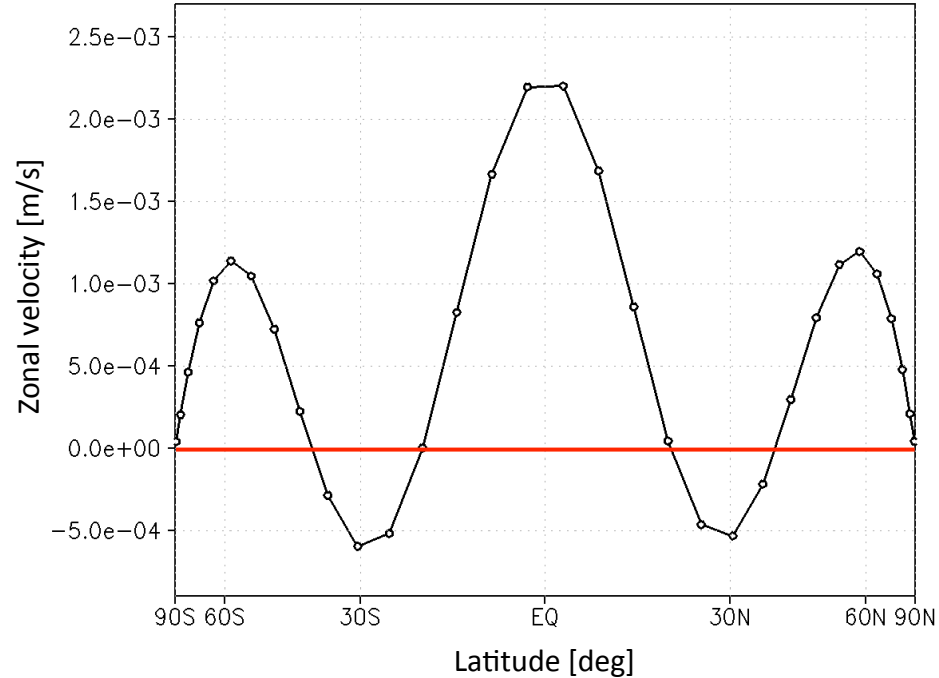
# 東西平均した循環 (< 10 km)

U (color) and V (contours)



平均子午面循環の様子はほとんど変わらない。しかしながら、緯度30°付近に負の東西平均流 ( $U < 0$ ) が現れている。

$U_{\text{bottom}} \times \cos(\text{LAT})$

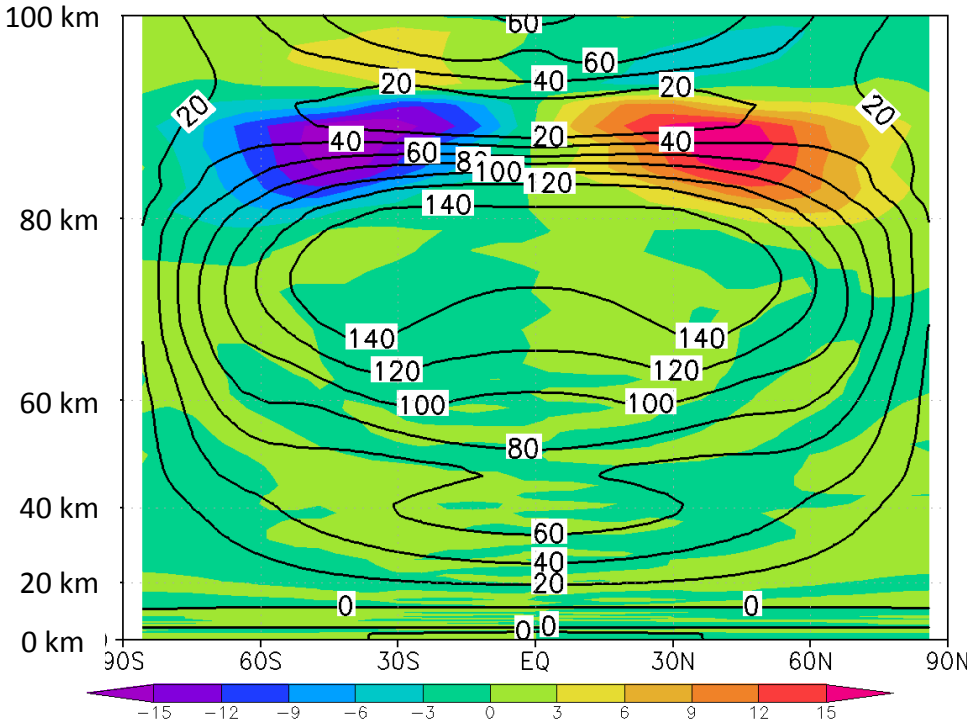


$U > 0$  の面積が  $U < 0$  の面積より広く、ネットでは地面摩擦によって角運動量は減少。

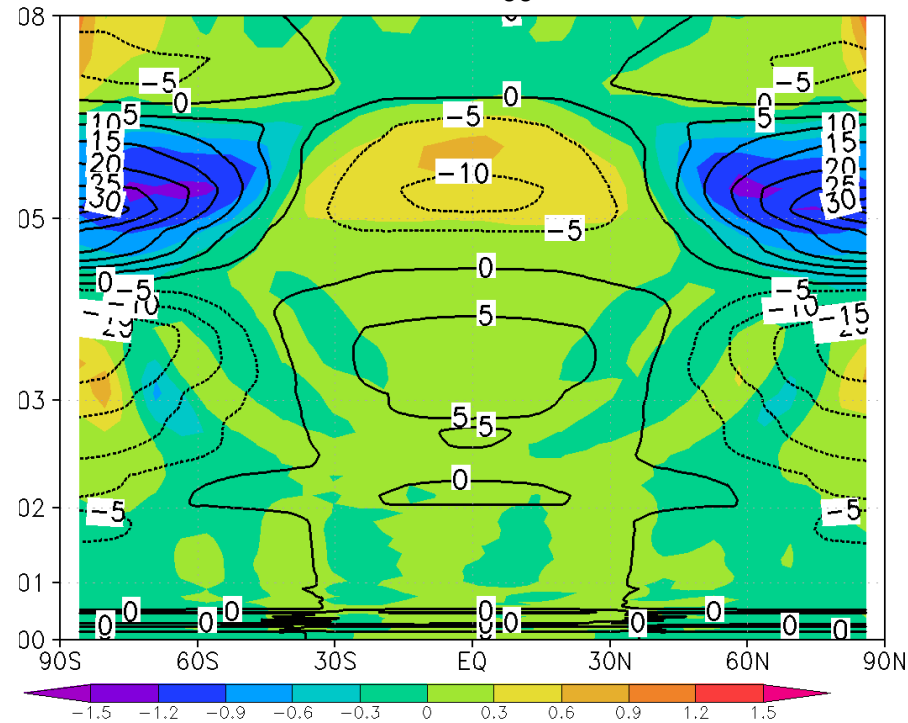
# 東西平均場 (100 地球年)

Case  $Q=Q_0+Q_2$ ,  $H=2$  km,  $E=3.0E-3$

V (color) and U (contour)



W (color) and  $T(y,z)-T_{00}(z)$  (contour)

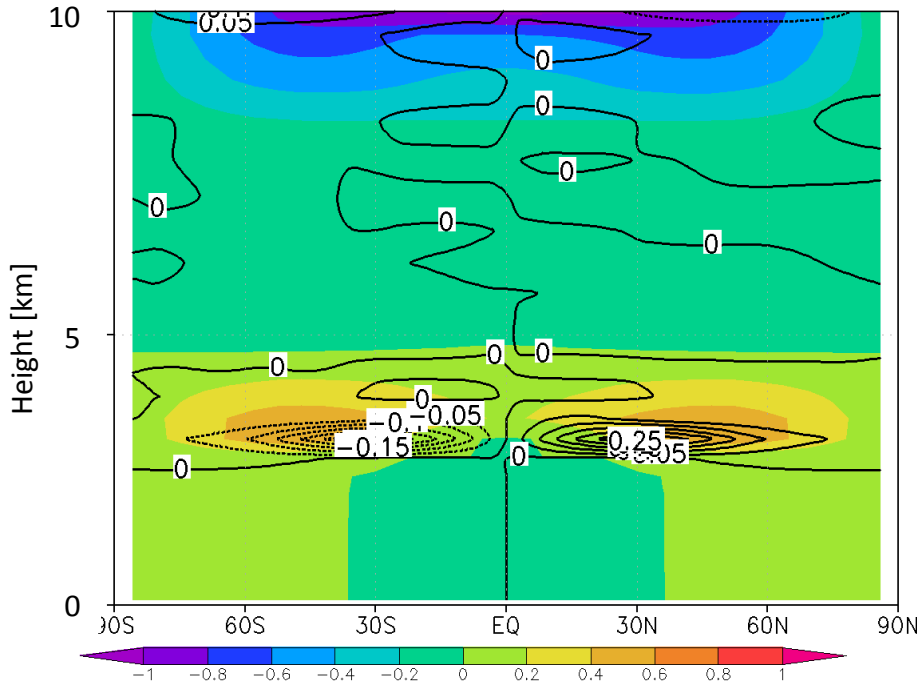


太陽加熱に半日潮成分を加え, さらに鉛直渦粘性を小さくしたところ, 負の東西平均流  $U < 0$  が低緯度に現れた。



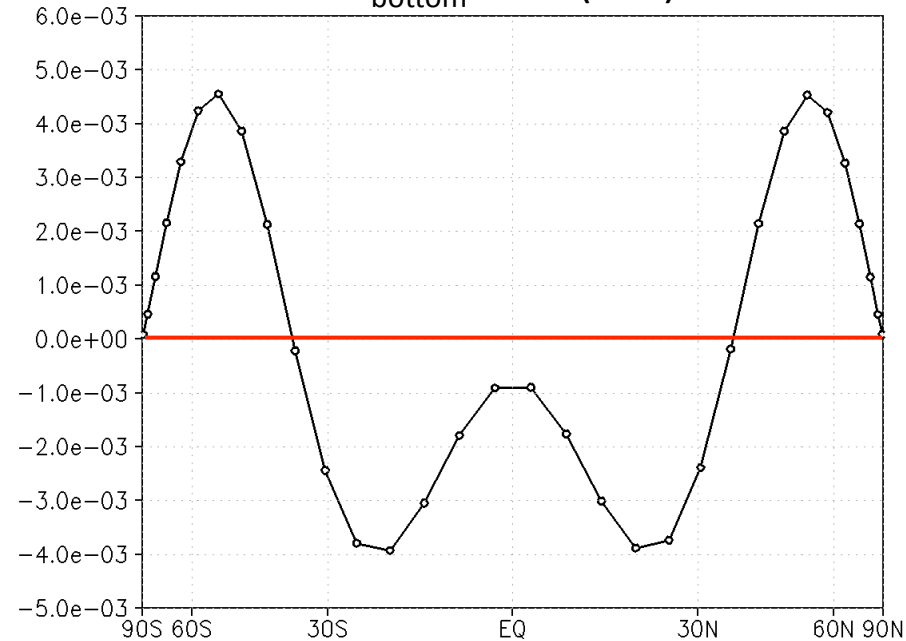
# 東西平均した循環 (< 10 km)

U (color) and V (contours)



平均子午面循環の様子はほとんど変わらない。一方、平均東西流の分布は高度 12 km 以下で大きく変化。赤道域に負の平均東西風  $U < 0$  が現れている。

$U_{\text{bottom}} \times \cos(\text{LAT})$



$U > 0$  の面積より  $U < 0$  の面積がやや大きい。地面摩擦によって大気角運動量は増加する傾向。大気スーパーローテーションが長時間維持される可能性を示す。

# 後半のまとめ

- 最下層の平均子午面循環は(仮定した)惑星境界層内に存在する。
- 太陽加熱の東西平均成分 ( $Q_0$ ) のみを与えた場合, 最下層に負の平均東西流 ( $U < 0$ ) は現れず, Gierasch メカニズムは働かなかった。
- 太陽加熱に半日潮成分 ( $Q_2$ ) を加えた場合は, 地面付近に負の平均東西流 ( $U < 0$ ) が現れた。さらに, 鉛直渦粘性が小さい場合は, 地面摩擦によって大気の角運動量がほとんど変化しない状態が実現した。
- 負の平均東西流 ( $U < 0$ ) が惑星境界層内に形成されるメカニズムはよくわからない。半日潮の影響？

DAY = 1080.00

