

# 金星大気スーパーロー テーションの理論

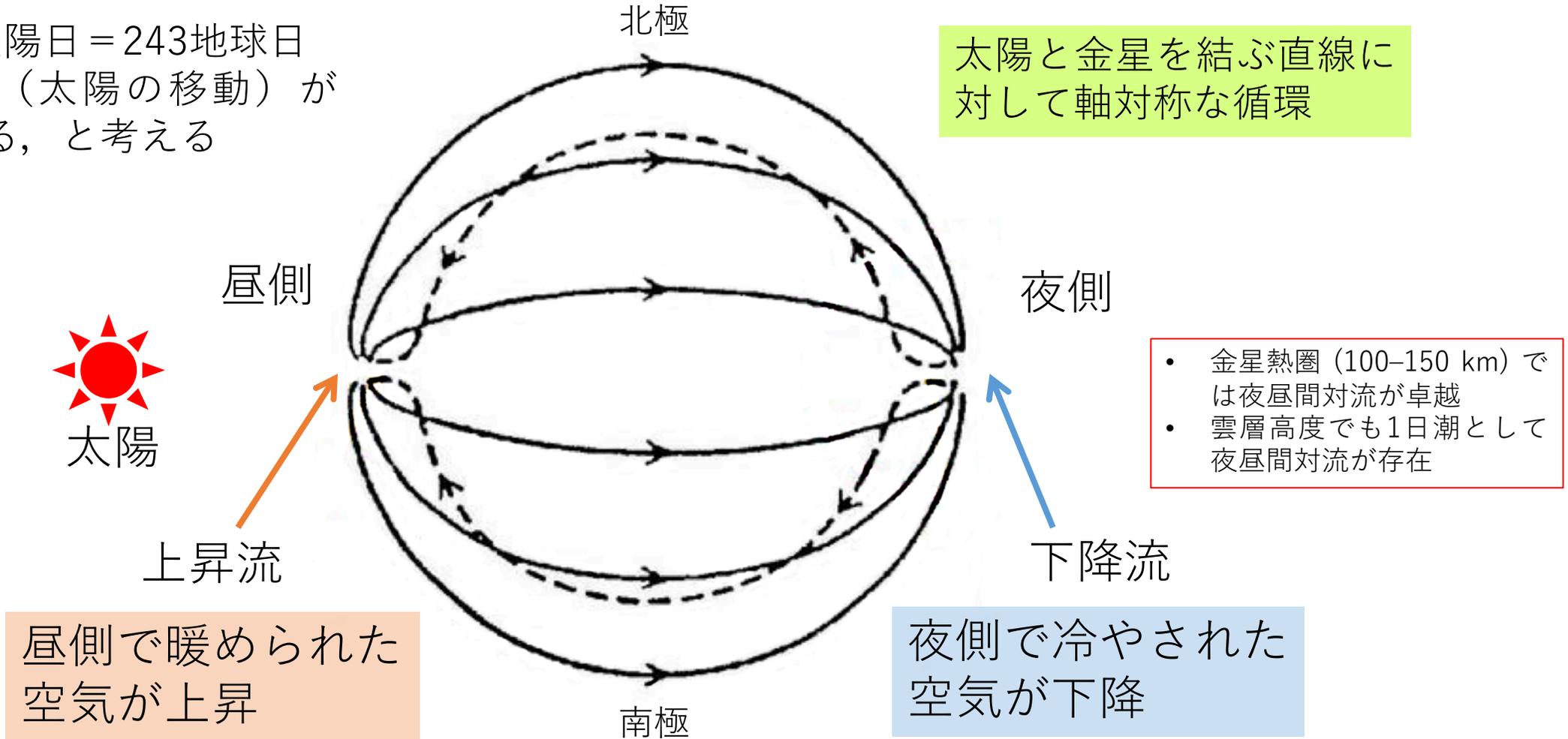
高木征弘 (京都産業大学・理学部)

# スーパーローテーションの理論

- 子午面循環に着目した理論
  - Gierasch (1975), Matsuda (1980, 1982)
- 夜昼間対流に着目した理論
  - Schubert and Whitehead (1969), Thompson (1970)
- 熱潮汐波に着目した理論
  - Fels and Lindzen (1974), Plumb (1975)
- 重力波に着目した理論
  - Hou and Farrell (1987)

# 予想された大気大循環：夜昼間対流

金星の1太陽日 = 243地球日  
自転効果（太陽の移動）が  
無視できる，と考える



# Moving flame メカニズム

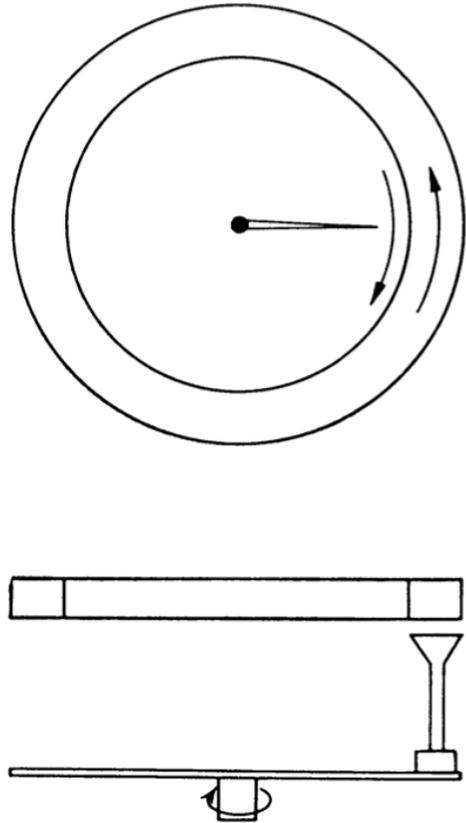


Fig. 1. Schematic diagram of the apparatus for the moving flame experiment.

- Moving flame = 動く炎
- 流体（水銀）の入った円環形容器の底面を，ガスバーナーを回転させながら加熱する（左図）。
- 容器の中の水銀はバーナーの回転とは逆方向に，バーナーの回転速度の数倍の速度まで加速される。
- この平均流を金星大気スーパーローテーションの生成と解釈する。

# Moving flame メカニズム (cont.)

傾いた対流による平均流生成

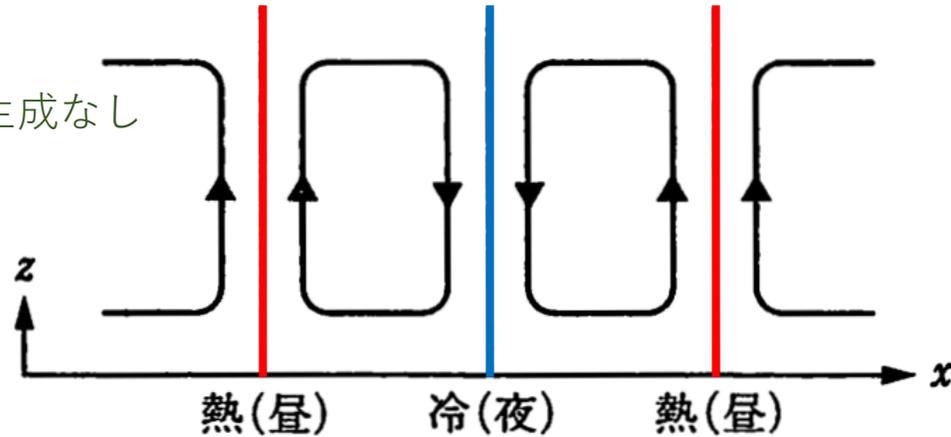
運動量輸送による平均流生成

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = -\frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2}$$

熱源が静止している場合

$$u'w' = 0 \quad u'w' = 0 \quad u'w' = 0$$

平均流生成なし

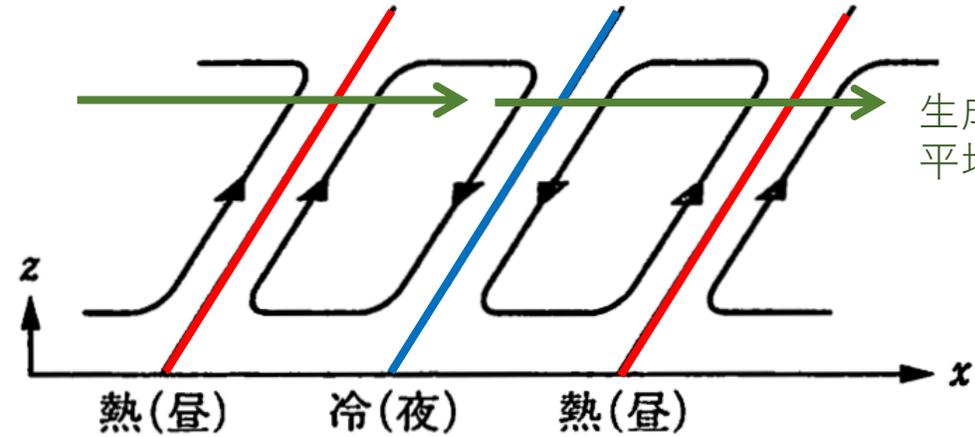


(a)

熱源がゆっくり移動する場合

$$u'w' > 0 \quad u'w' > 0 \quad u'w' > 0$$

生成される平均流



(b)

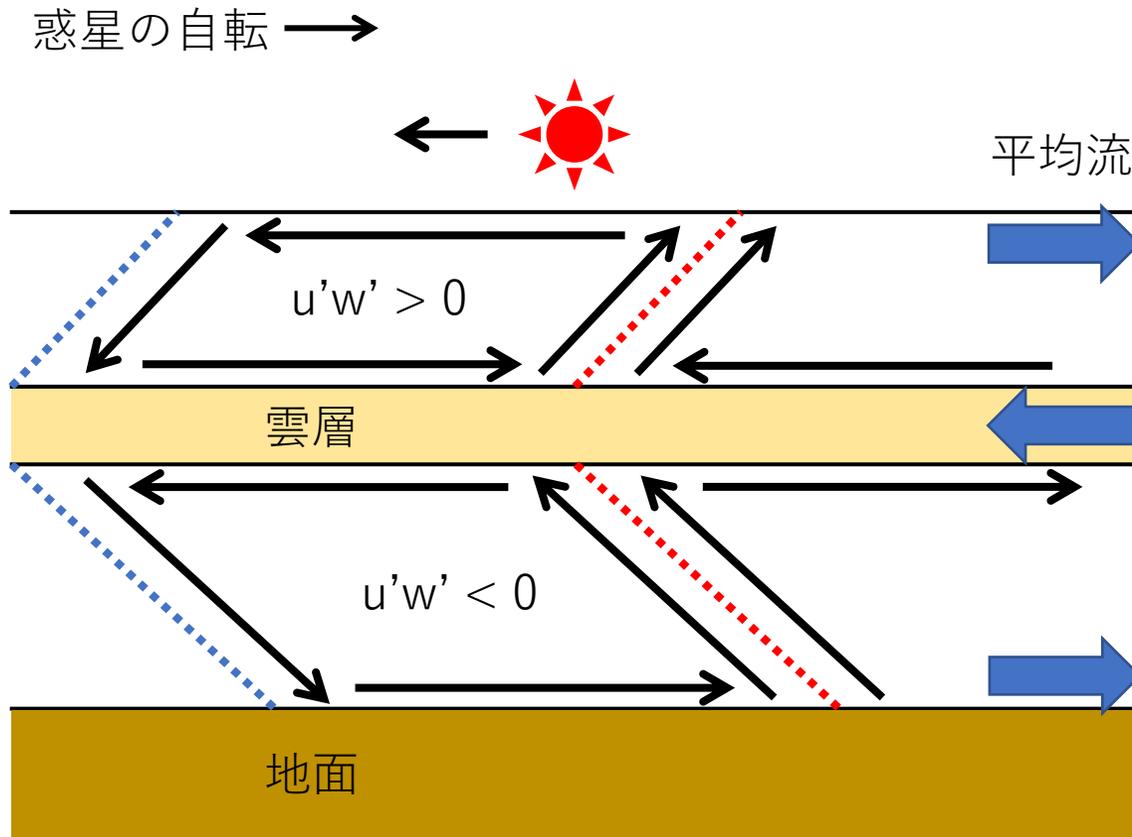
熱源の移動方向

図 3.8 moving flame のメカニズムを示す模式図

直立した対流(a)と傾斜した対流(b)。赤道上の鉛直断面図で、右方向を正とする。傾斜した軸をもつ対流によって正の運動量が上方へ輸送される。

松田 (2000)

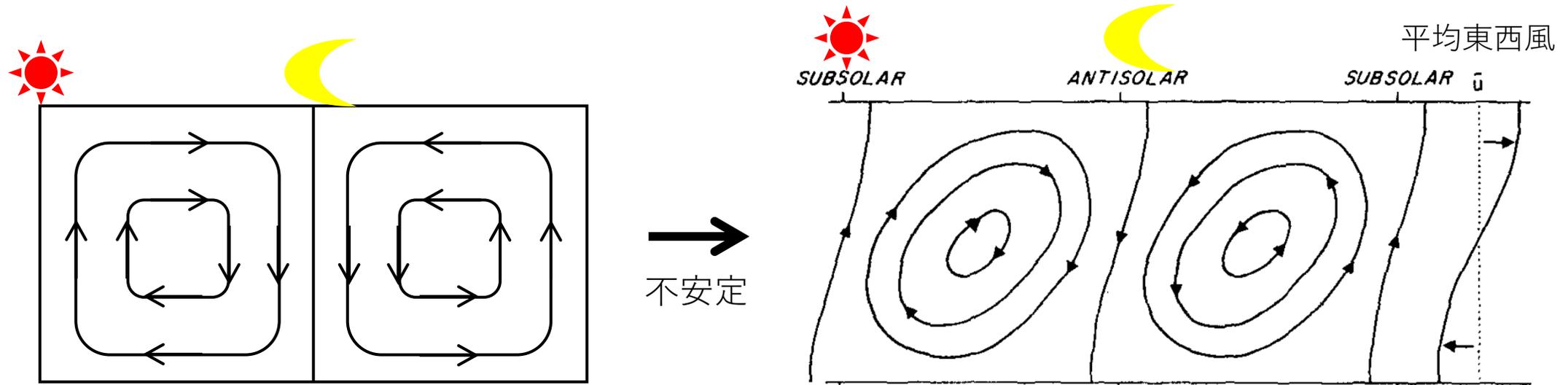
# Moving flame メカニズム (cont.)



- 太陽光エネルギーの大部分は雲層高度で吸収されることを考慮する。
- 雲層の上下の温度は熱伝導的に傾くものとする。
- 雲層より上では上向き，下では下向きの運動量輸送が生じ，雲層では太陽と同方向（自転と反対方向）の平均流が作られる。

# Thompson メカニズム

対流セルの傾きと鉛直シアを持つ平均流との相互作用による不安定



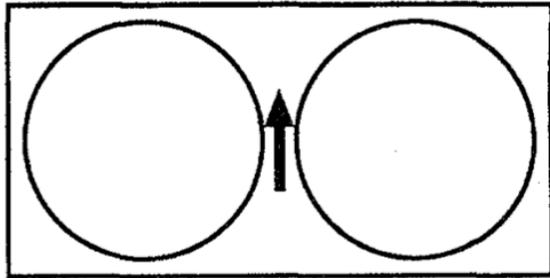
- 太陽の移動を無視する
- 直立した夜昼間対流が生じる
- これを基本場とする

- 鉛直シアをもつ平均流を擾乱として与える。
- 平均流の移流効果により対流軸がシアの方向に少し傾く。
- 運動量輸送  $[uw] > 0$  が生じ、上層では右向き、下層では左向きに平均流が加速される。
- 対流軸がさらに傾き、 $[uw]$  がますます大きくなる。
- 実際には、対流は温度場を介して傾く
- 平均流の生成に自転は必要ない。

Thompson (1970), 松田 (2000)

# 平均流と傾いた対流の相互作用

流線関数

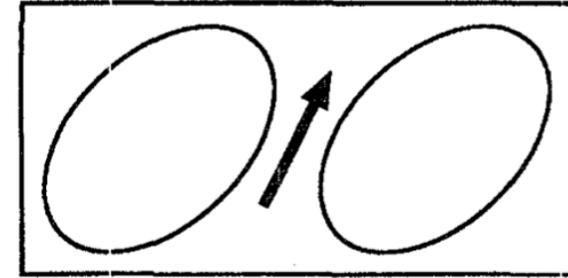


Streamfunction

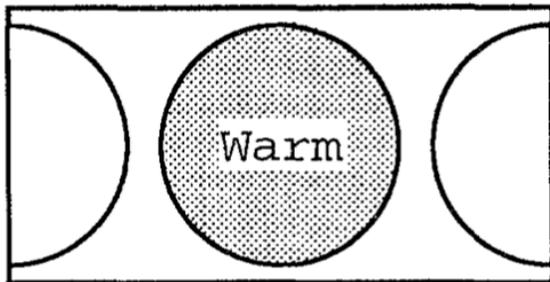
平均流



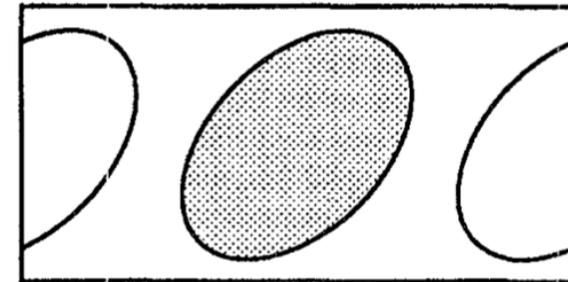
Mean shear flow



温度場



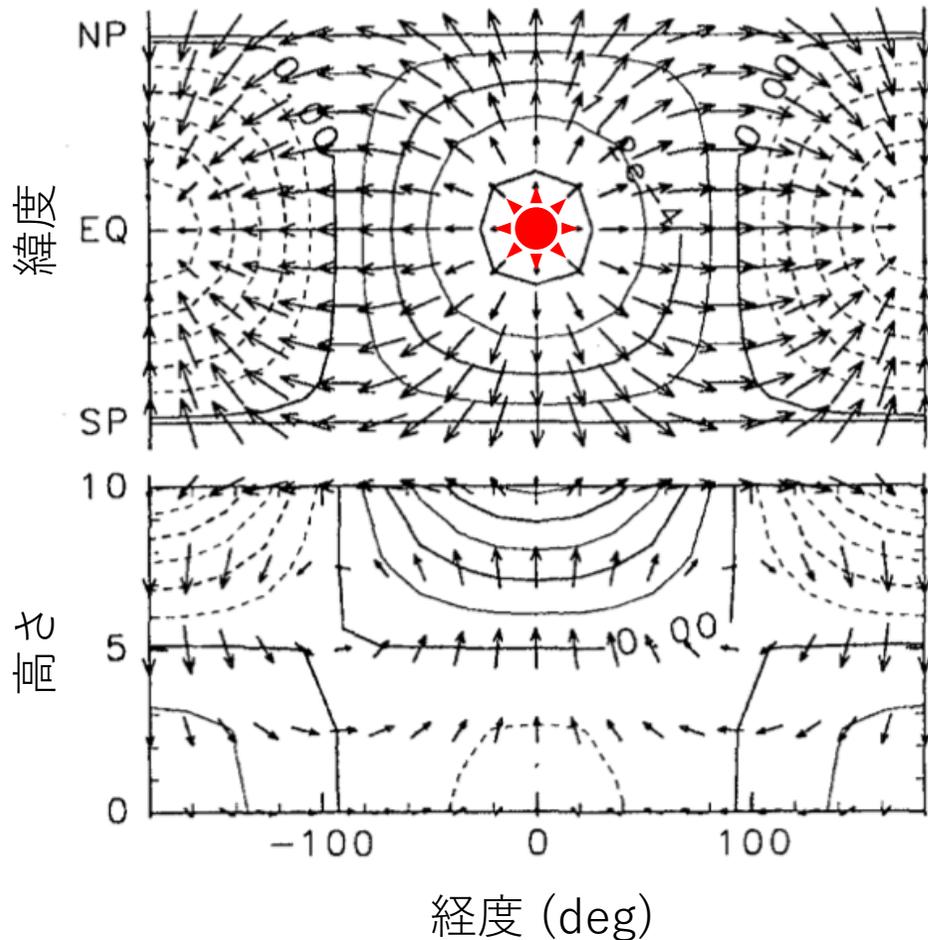
Temperature



Takagi and Matsuda (1999)

# 球面上のThompsonメカニズム

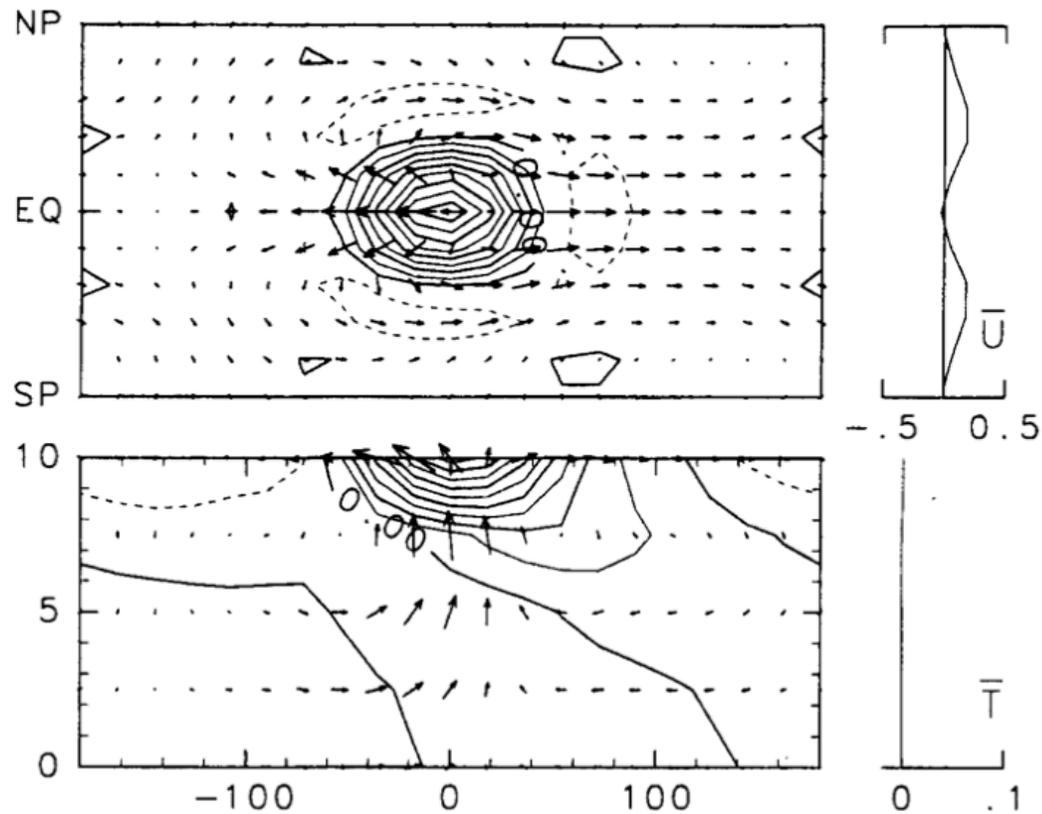
上層の夜昼間対流の風速



- 球面上の3次元的な夜昼間対流を数値的に求め、その線型安定性を調べた。
- 広いパラメータ範囲で夜昼間対流は安定。
- Thompsonメカニズムは働かない？

# 自転を考慮した場合の安定性

自転周期24.3日，低緯度の局在加熱の場合

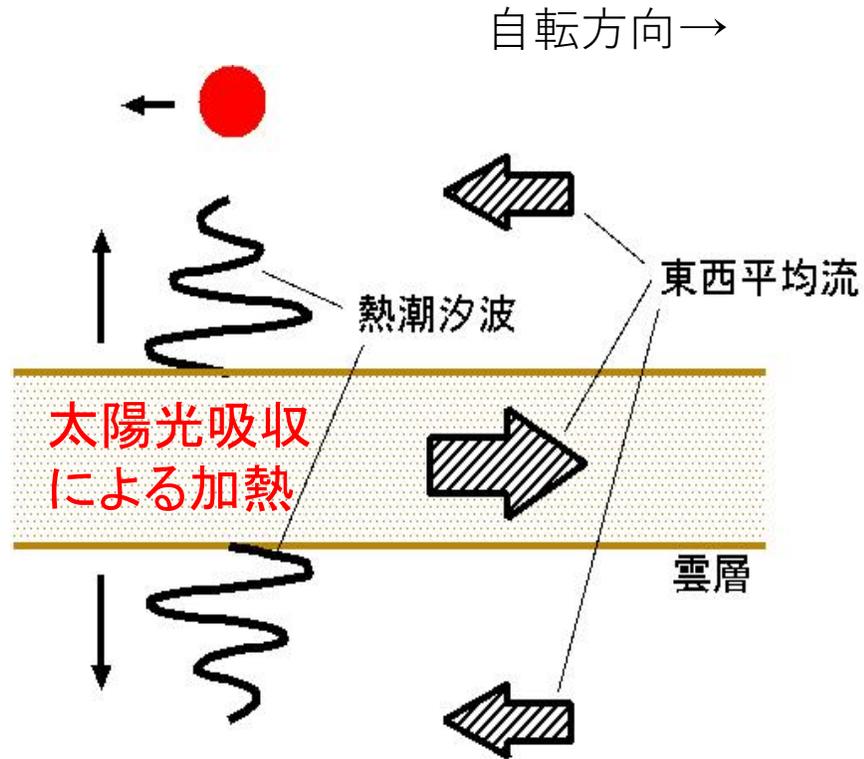


$$\Omega = 2\pi/24.3, \nu_V = 3.0, \Gamma = 1.3$$

Takagi and Matsuda (2000)

- 自転の効果によって夜昼間対流が低緯度に制限され，東西方向の循環が卓越する場合は，2次元的なThompson メカニズムが働く可能性がある。
- 自転周期243日，24.3日の場合について，基本場を求め，線型安定性を調べた。
- その結果，調べたパラメータの範囲内で，夜昼間対流は安定であることがわかった

# 熱潮汐波メカニズム

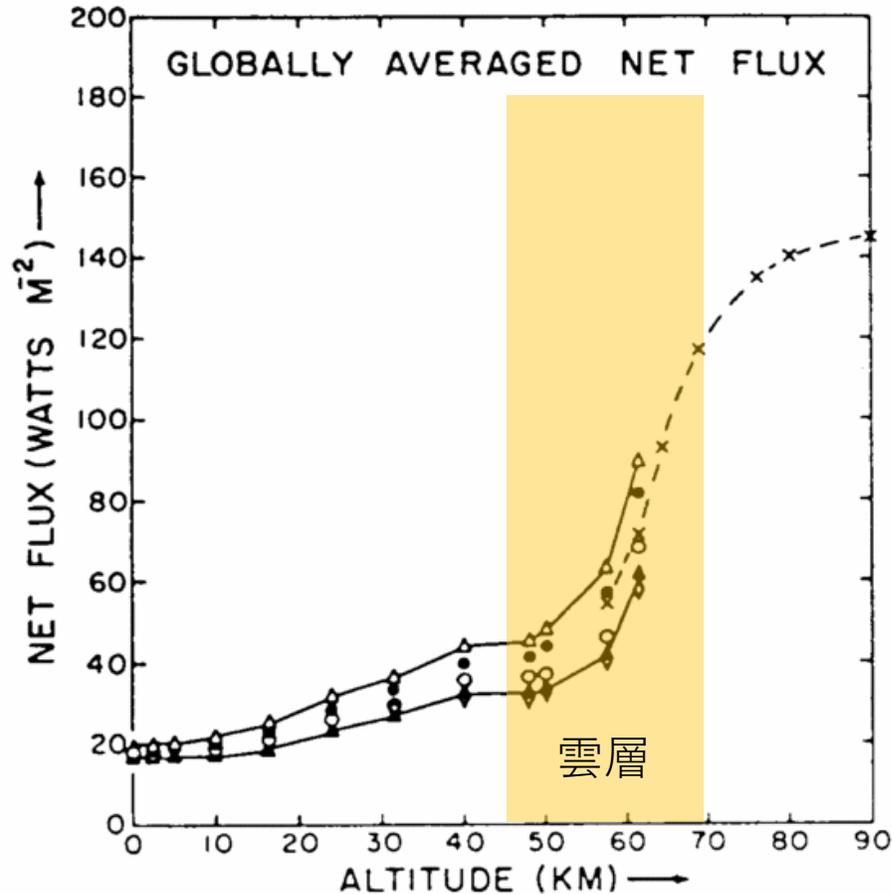


熱潮汐波は波の位相速度と同じ方向の運動量を伴う (Fels and Lindzen, 1974)

- 熱潮汐波とは…
  - 太陽光加熱によって励起される大気中の波 (金星では主に重力波)
  - 地上からみると、太陽と同じ位相速度で東西方向に伝播
  - 東西波数1の波 = 一日潮
  - 東西波数2の波 = 半日潮
- 雲層高度での太陽光吸収により、金星大気中では熱潮汐波が強く励起される
- 熱潮汐波は運動量を運ぶ (波に伴う運動量)
  - 波が励起される領域 (雲層) では波の位相速度と逆方向 (= 自転と同じ方向) の平均東西流が作られる

# 金星大気中の太陽光吸収

全球平均した正味の太陽光フラックス



Tomasko et al. (1980)

- 金星に吸収される太陽光エネルギーの過半（約60%）が雲層（45–70 km）で吸収される。
- もや層（70–80 km）での吸収もかなり多い。（大気密度が小さいので、加熱率  $K/s$  が大きくなる）
- 雲層より下の太陽光吸収は弱い。
- 地面に到達する太陽光は  $17 \text{ W/m}^2$ （12%）程度。（温室効果には不利）

# 波に伴う運動量

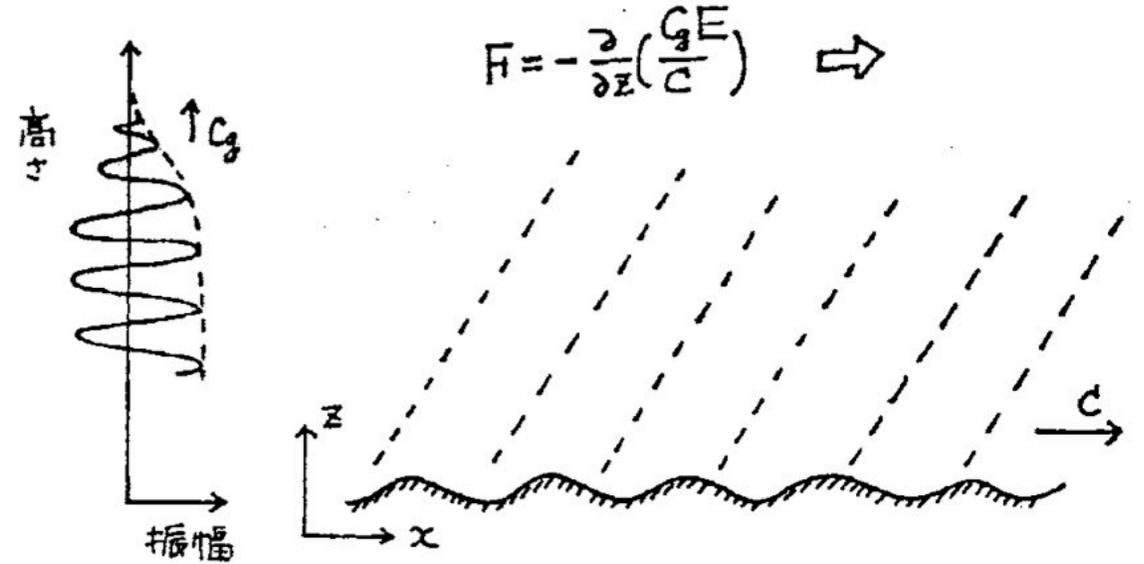
- 東西方向の運動方程式：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$$

- + 連続の式を東西平均：

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} = 0$$

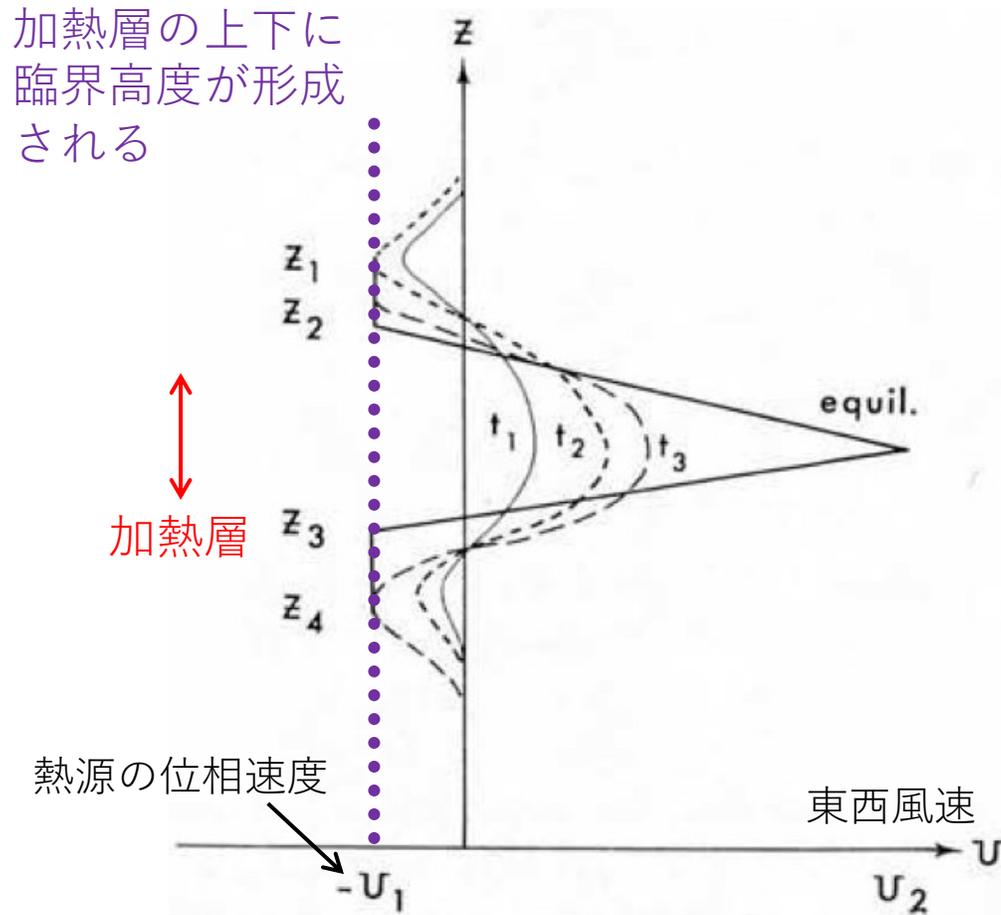
- 鉛直伝播する波では  $\overline{u'w'}$  が 0 にならず、波束の伝播に伴って平均東西流  $U$  が生成・消滅する。これを「波に伴う運動量」という。



第1図 凹凸のある底板によってつくられた波が上方へ伝わっているところ。

瓜生 (1976)

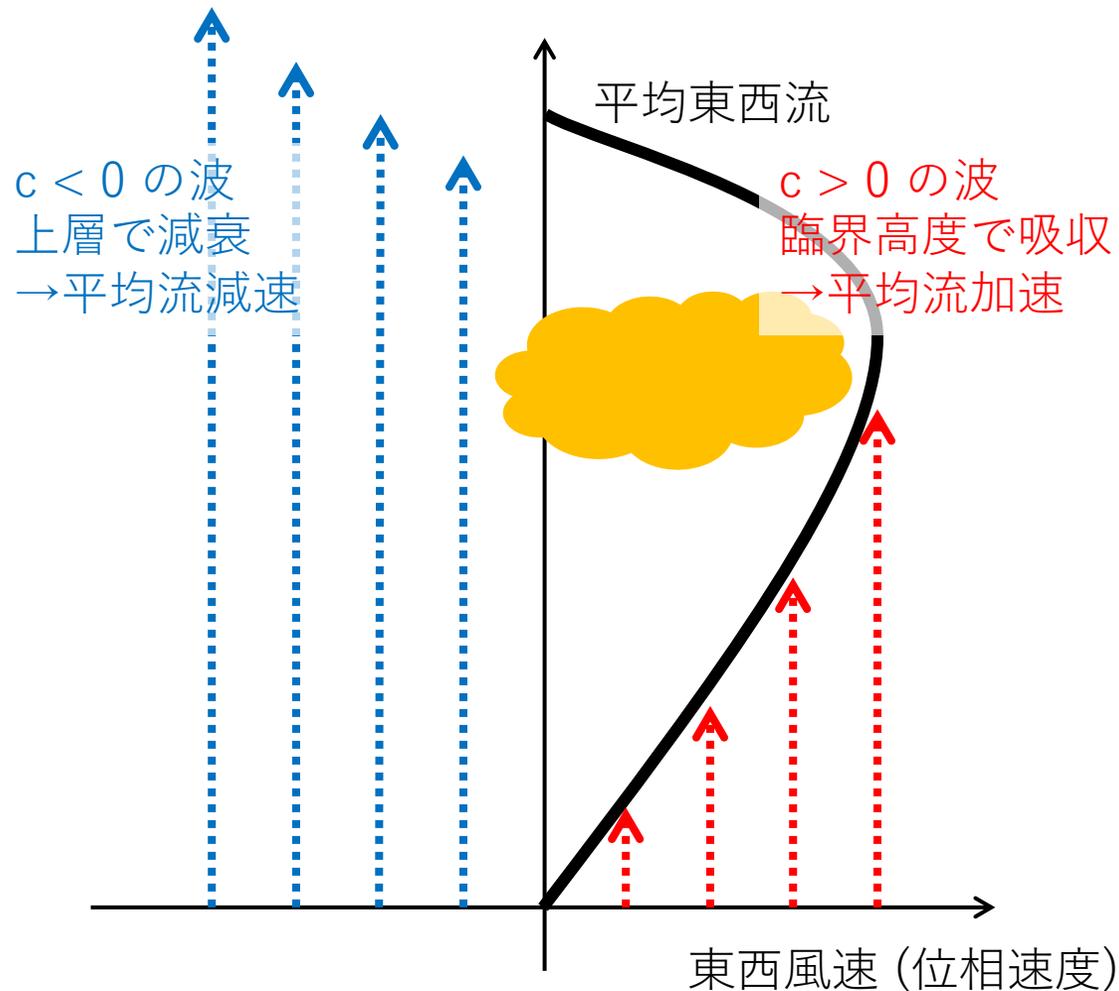
# 熱潮汐波メカニズムの問題点



Fels and Lindzen (1974)

- 臨界高度の形成
  - $U=c$  ( $c$ : 波の位相速度) となる高度 (臨界高度) を波は通過できない。
  - 金星大気中では雲層の上下で波が減衰し、臨界高度が形成されるため、熱潮汐波メカニズムによる平均流生成の効果は限定的 (Fels and Lindzen, 1974)。
  - 平均流の速さは波の位相速度の数倍 (10 m/s 程度) が限度。
- 数値実験による検証
  - 熱潮汐波による平均流強化は 10 m/s 程度 (Newman and Leovy, 1992)

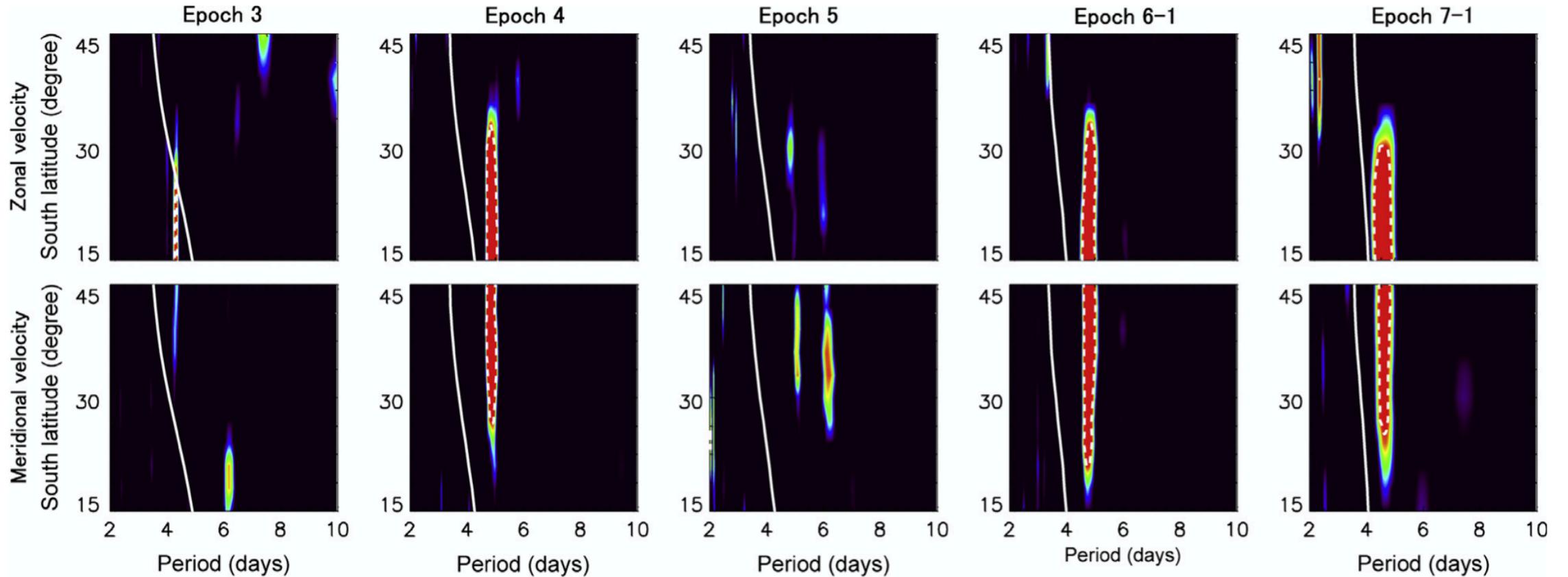
# 重力波メカニズム



- さまざまな位相速度をもつ重力波が地面付近で励起され、上方伝播する。
- 正の位相速度の波は臨界高度で吸収され、雲層以下の平均東西風を加速する。
- 負の位相速度の波は雲層より上まで伝播し、上層の平均東西風を減速する。

Hou and Farrell (1987)

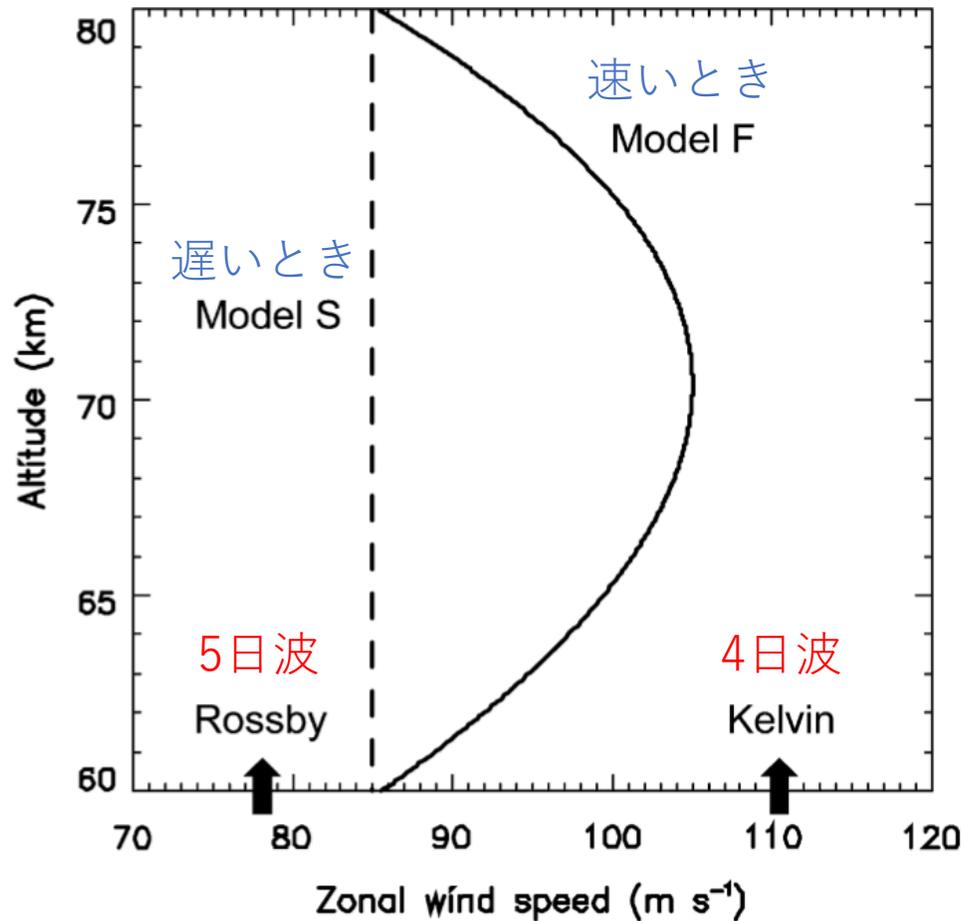
# 東西風の強度と4日波・5日波の活動



東西風が遅いときに4日波，速いときに5日波が活発？

Kouyama et al. (2015)

# 東西風の時間変動に関する仮説

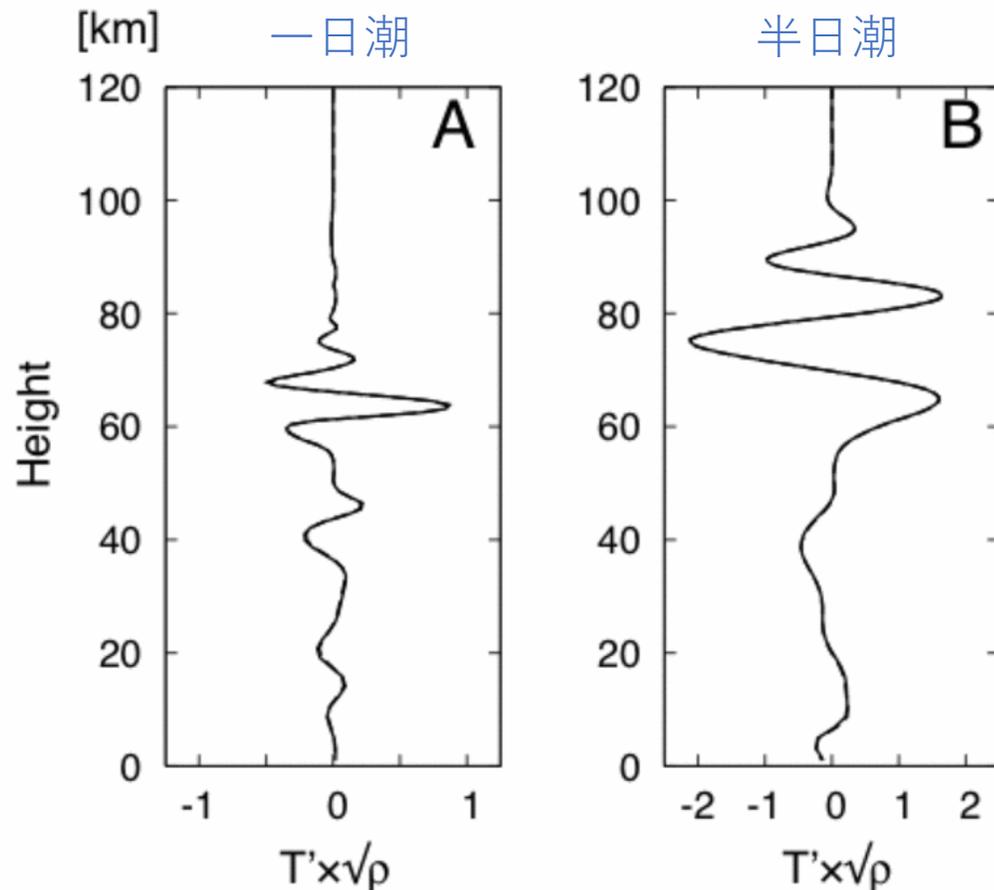


Kouyama et al. (2015)

- 東西風が速いとき
  - Kelvin波は途中で減衰する
  - 雲頂でRossby波が観測される
  - Rossby波は中緯度の東西風を減速
  - 低緯度を減速するメカニズムが必要
- 東西流が遅いとき
  - Rossby波は途中で減衰する
  - 雲頂でKelvin波が観測される
  - Kelvin波は低緯度の東西風を加速
  - 東西風の遅い状態 → 速い状態へ

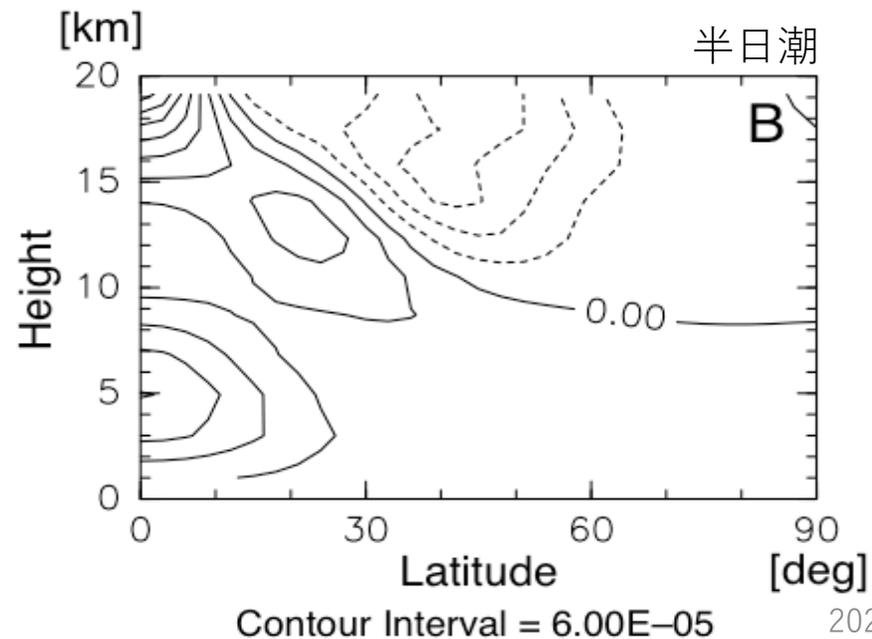
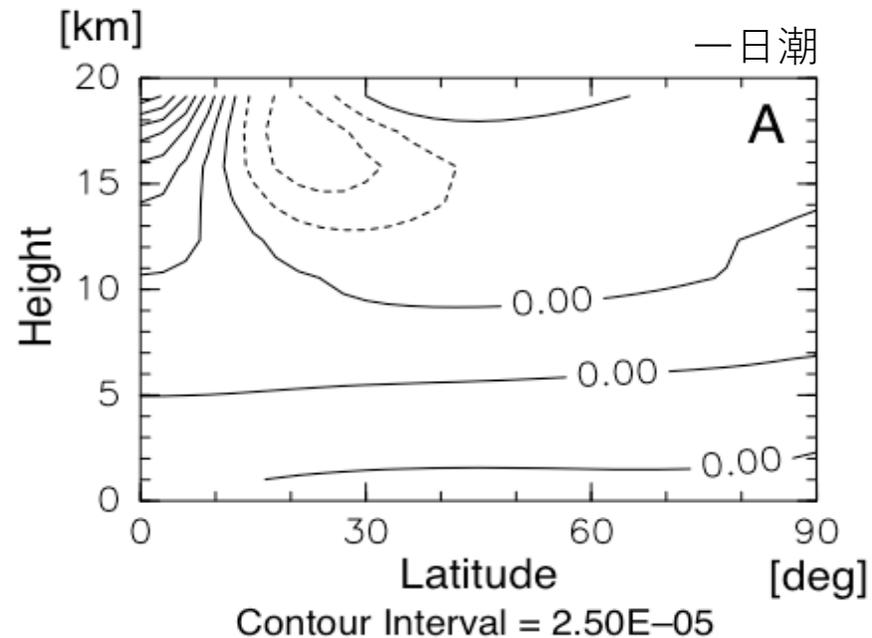
# 熱潮汐波の鉛直伝播の検証

球面上線型モデルで求めた熱潮汐波の鉛直構造



- 雲層で励起された一日潮・半日潮はともに地面付近まで下方伝播する。
  - 地面から 40 km 付近までの振幅は雲層での太陽加熱によって決まり、雲層以下での太陽光吸収の効果は小さい。
  - 地面加熱の影響も最下層を除きほとんど無視できる。
- 金星大気中の熱潮汐波の構造は雲層の加熱で決まる。
- 熱潮汐波の運動量輸送により、東西方向の運動量が雲層と地面付近の大気間で交換される。

## 熱潮汐波による平均流の減速率



## 下層大気の加速・減速

- 一日潮の効果
  - 最下層ではほとんど効果なし
- 半日潮の効果
  - 高度 0-10 km の低緯度域で平均東西流を減速（自転と逆向きに加速）
  - 減速率:  $2.4 \times 10^{-4}$  m/s/day
  - 自転と逆向きの平均東西流
- 上層大気（雲層）と下層大気との運動量交換 + 固体部分からの運動量供給を示唆

熱潮汐波による大気スーパーローテーション生成の可能性あり

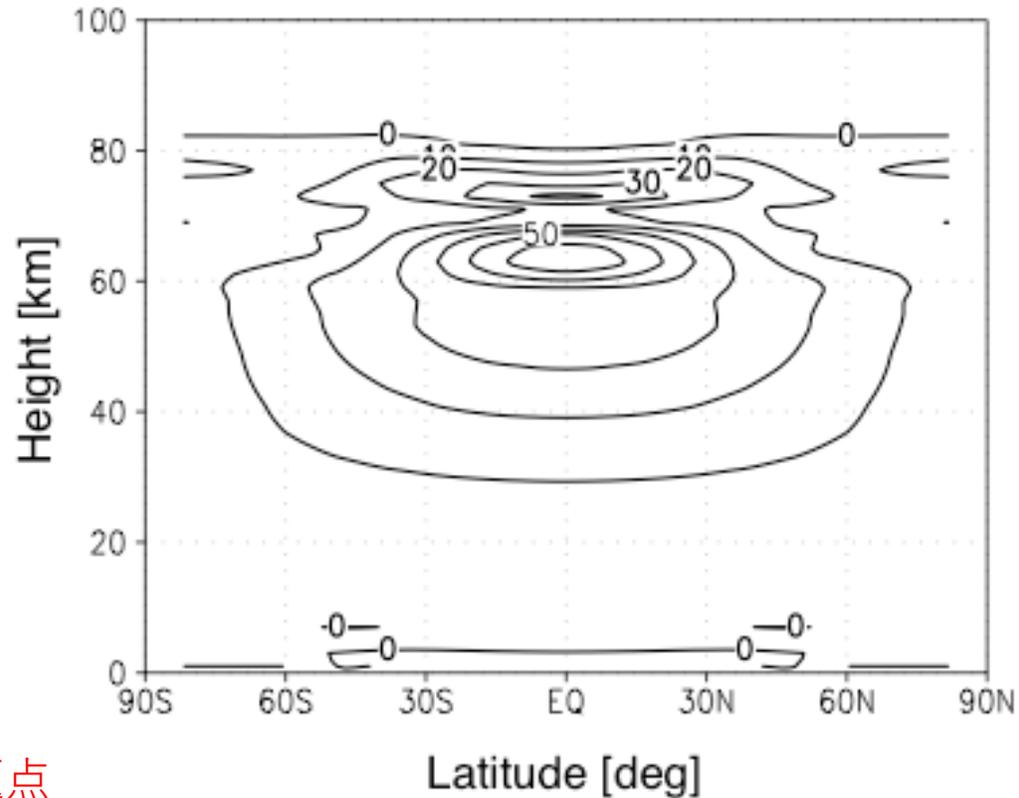
# GCMによる熱潮汐波メカニズムの検証

- 熱潮汐波と平均東西流（スーパーローテーション）の非線型相互作用を調べ、熱潮汐波メカニズムが動作するか検討。
- 大気大循環モデル (GCM)
  - 惑星全体の大気運動の時間発展を調べる数値モデル
  - Hoskins and Simmons (1975) に基づく
  - T21L60, 鉛直領域: 0-120 km
- 静止状態から500地球年積分
- 太陽加熱
  - 現実的な強度・分布 (Crisp 1986, 1989; Tomasko 1980)
  - ただし, 平均東西成分なし (= 平均子午面循環は含まれない)
  - 地表面での太陽光吸収は無視
- 放射過程・ダンピング
  - 放射過程はニュートン冷却で単純化 (水平一様な観測温度場 VIRA に緩和させる, Seiff et al. 1985)
  - 最下層にのみレーリー摩擦 (緩和時間1.0地球日)
  - 一様な鉛直渦粘性 (Ev)

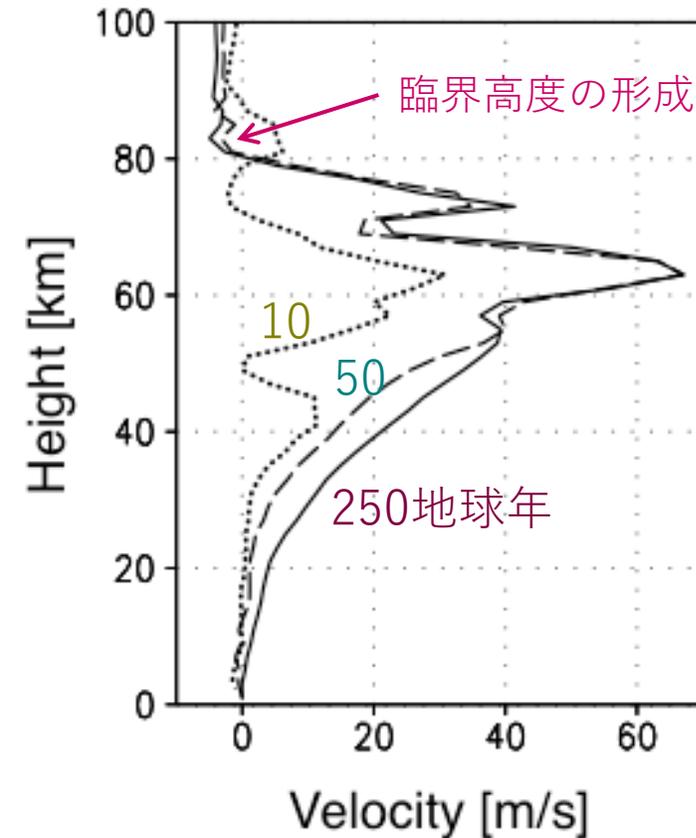
Takagi and Matsuda (2007)

# GCMによる熱潮汐波メカニズムの検証

平均東西流 (m/s) の緯度-高度分布 (250地球年目)



赤道での平均東西流の時間変化



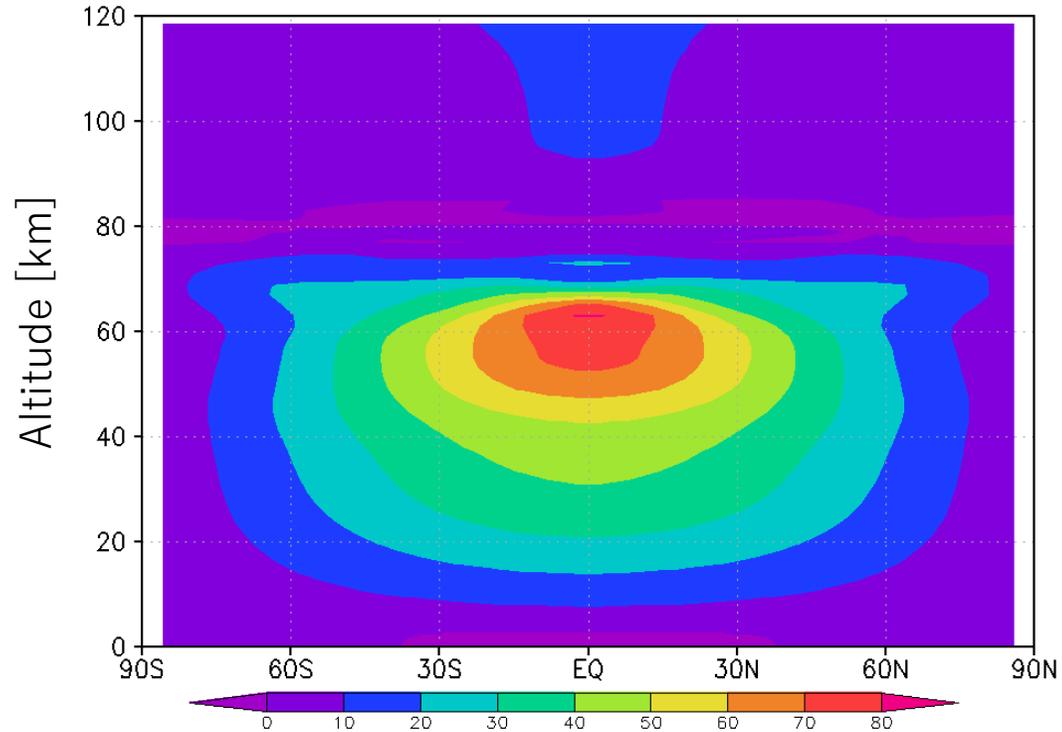
## 問題点

- 子午面循環の効果を無視している。
- 緯度分布が顕著な赤道ジェット型になっている点も非現実的。

Takagi and Matsuda (2007)

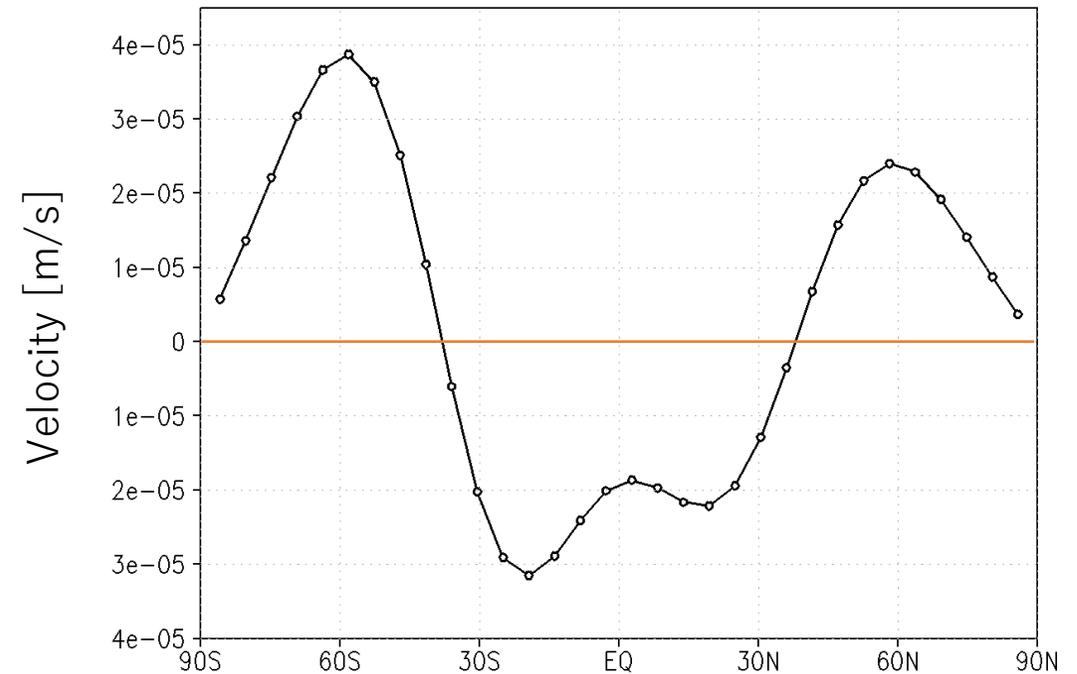
# 地面との相互作用

平均東西風の緯度・高度分布



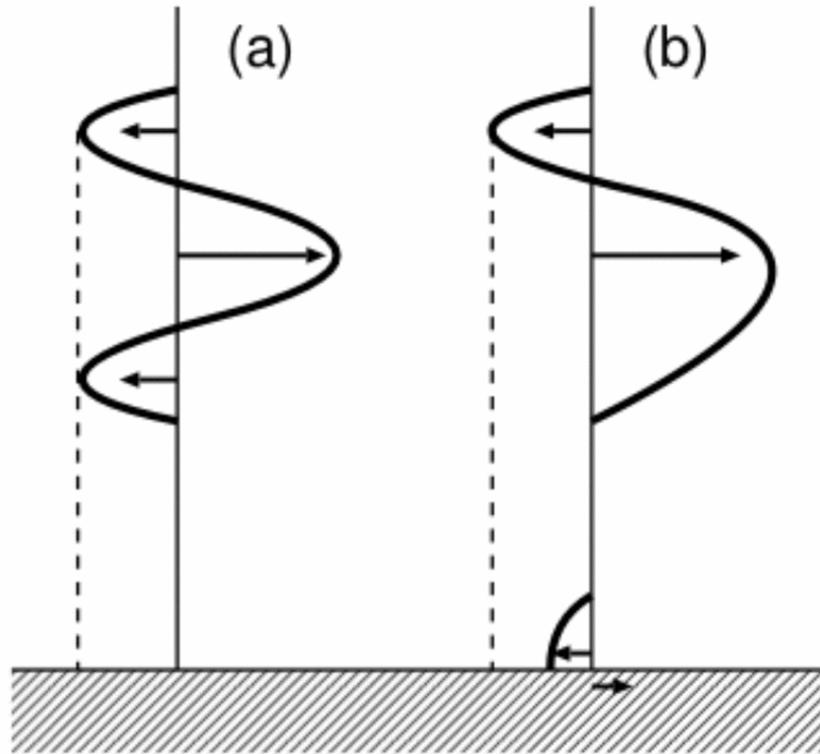
- 最下層の低緯度に自転と逆向きの平均東西風 ( $U < 0$ ) が作られている。

最下層の平均東西風



- 地面摩擦は最下層の  $U$  に比例すると仮定しているため、これにより大気角運動量が増加する。

# 熱潮汐波メカニズムのまとめ



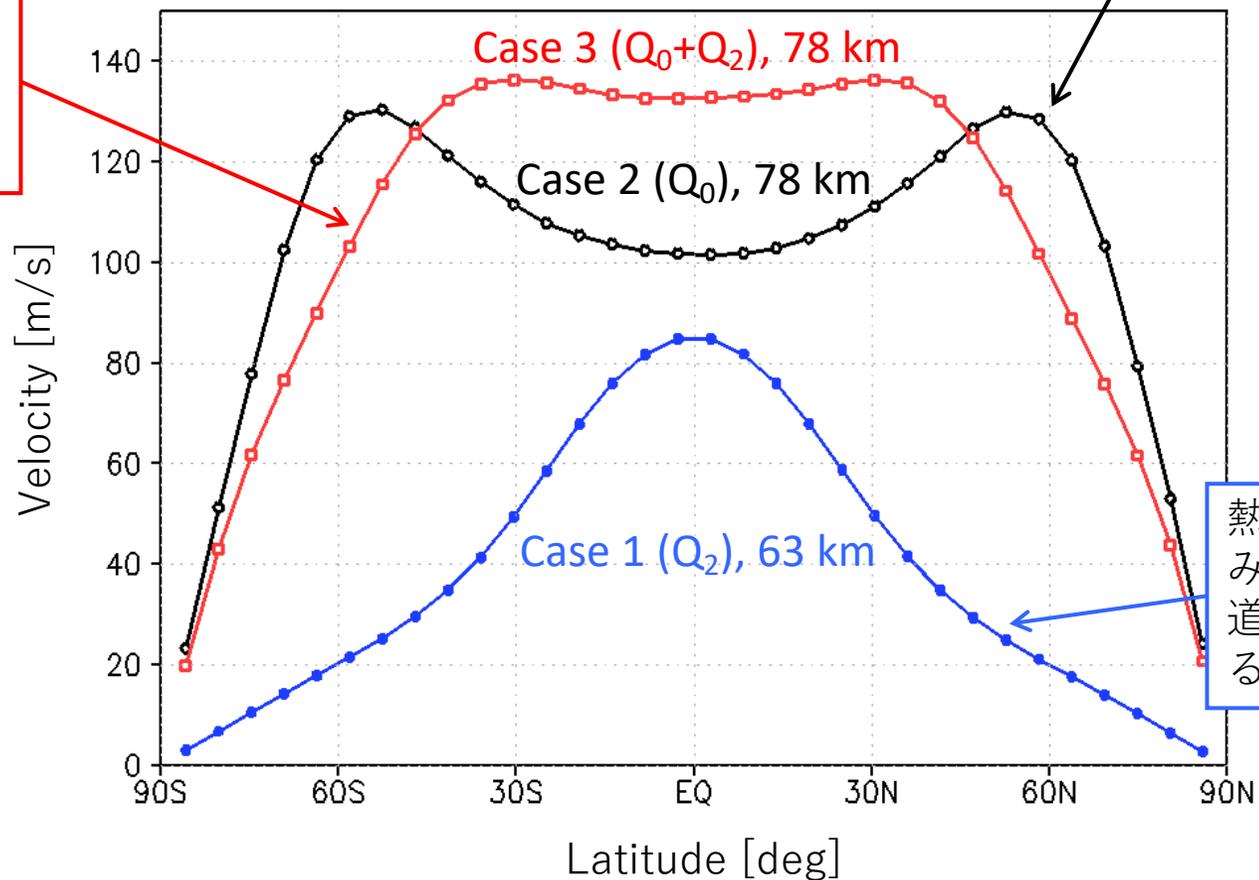
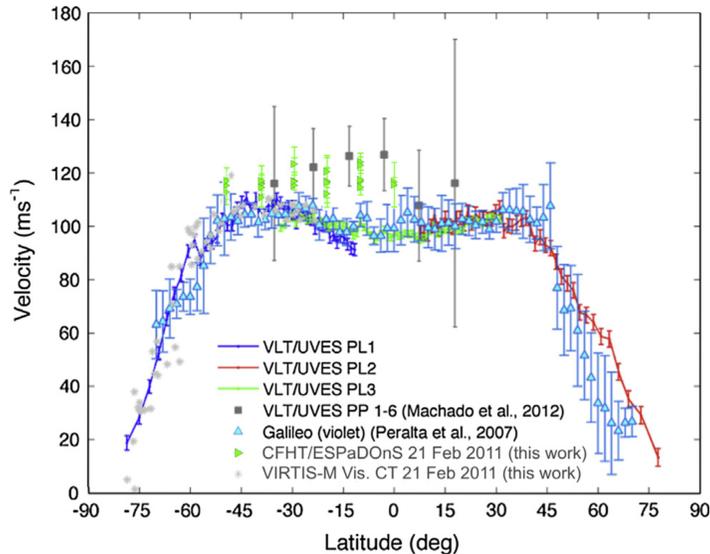
熱潮汐波によるスーパーローテーション生成の  
模式図: (a) Fels and Lindzen (1974), (b) Takagi  
and Matsuda (2007)

- (a) 従来の熱潮汐波メカニズム
  - 雲層の上下に臨界高度が形成され運動量交換が妨げられるため、速い東西流が生成されない。
  - 運動量の交換は雲層付近でしか起こらないため、大気は正味の運動量を得ることができない。
- (b) TM2007 のメカニズム
  - 半日潮が下層に伝播し、自転と逆向きの平均東西流が 0-10 km の高度に誘導される。
  - この反流に地面摩擦が作用し、固体惑星部分から大気に正味の角運動量が供給される。
  - 地面から雲層までの広い範囲に高速東西流が生成・維持される。

# 熱潮汐波と子午面循環の効果

子午面循環と熱潮汐波の両方を考慮した場合：低緯度の雲頂高度でほぼ等速分布をもつスーパーローテーションが維持される。

地上観測との比較  
Machado et al. (2014)



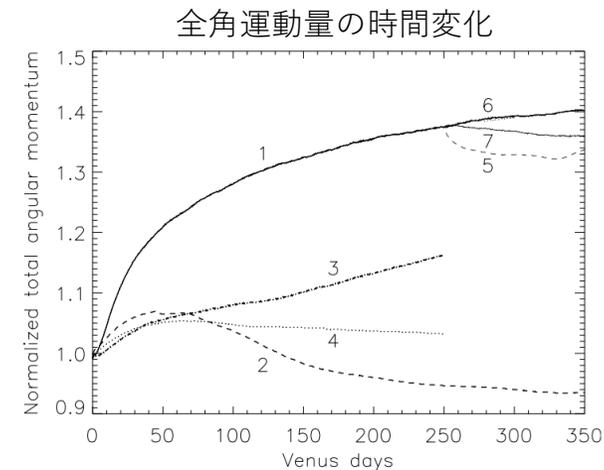
子午面循環のみを考慮した場合：極向き輸送により中高緯度ジェットが形成される。

熱潮汐波（半日潮）のみを考慮した場合：赤道ジェットが形成される。

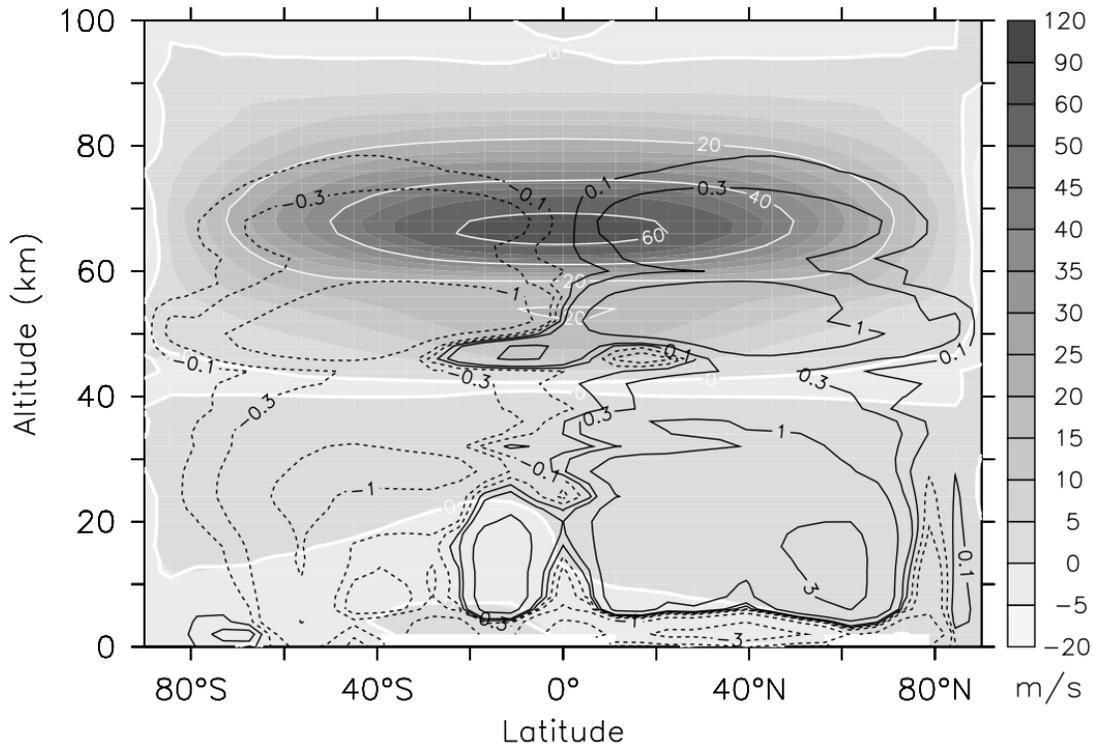
Takagi et al. (in prep)

# 熱潮汐波の効果

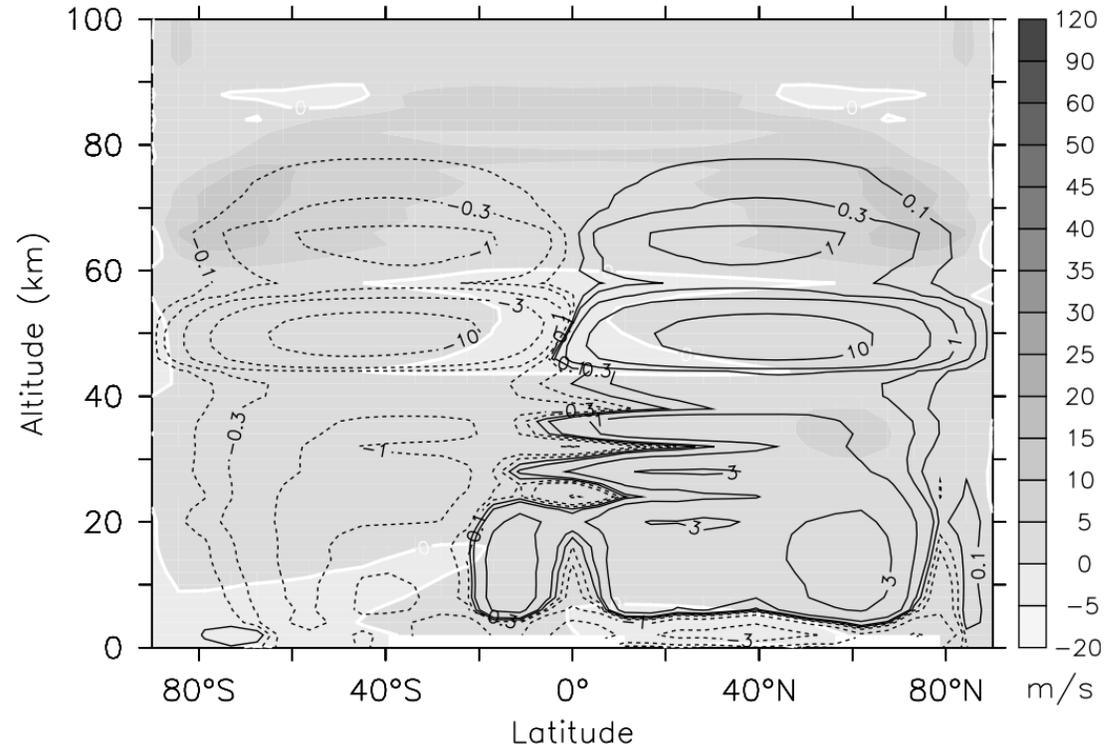
途中で太陽加熱の日変化をオフ (右図の5) にすると、雲層のスーパーローテーションがほぼ消失。熱潮汐波メカニズムは雲層 SR の維持に重要？



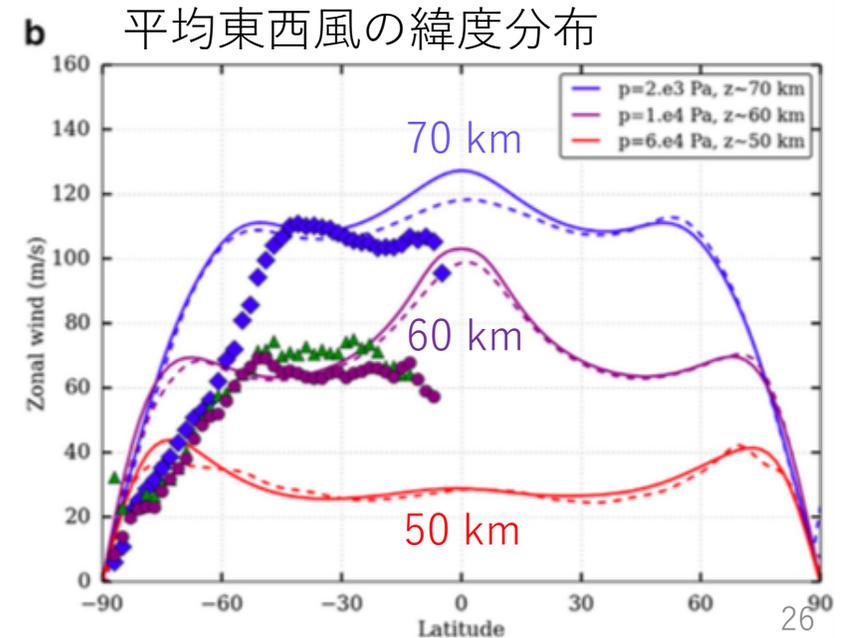
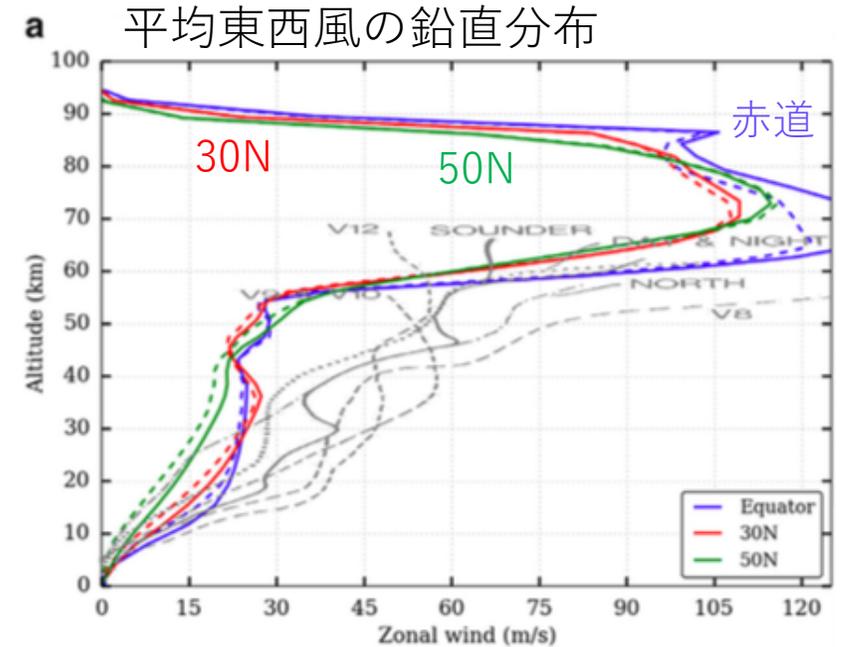
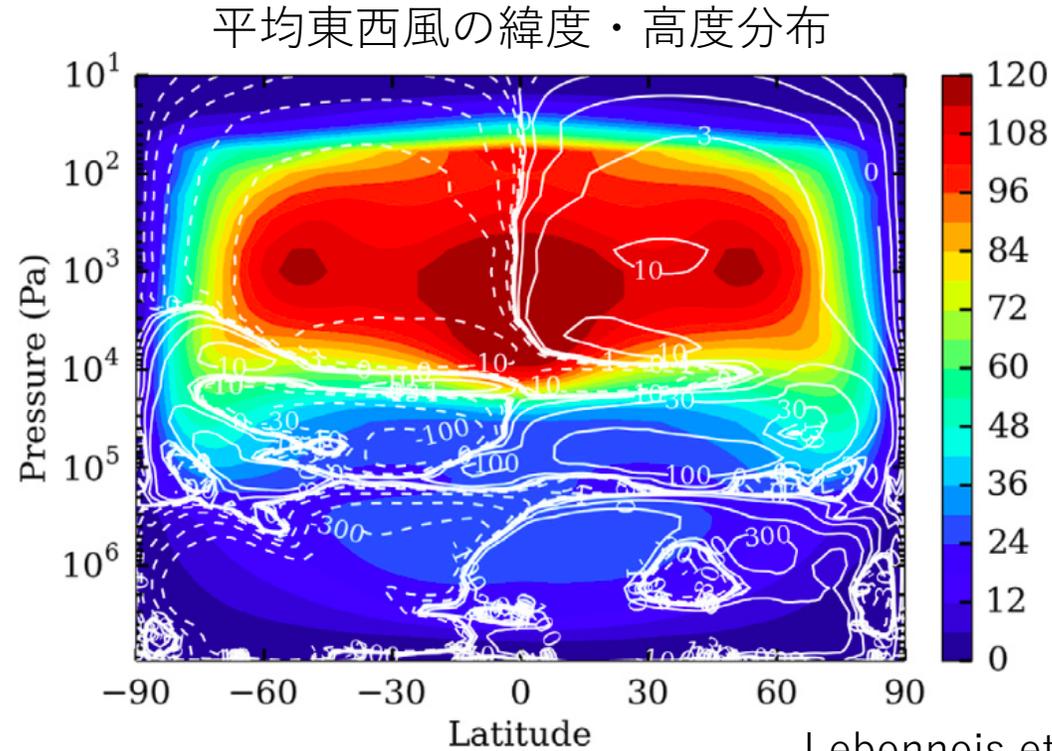
a) 太陽加熱の日変化あり (ケース1)



f) 太陽加熱の日変化オフ (ケース5)



# 放射伝達を含む金星GCM



- 硫酸雲の効果を含む放射輸送と地形を考慮した GCM によって、静止状態からの大気スーパーローテーションの生成に成功。
- 顕著な赤道ジェット。熱潮汐波メカニズム？

# まとめ

- 金星大気スーパーローテーションの理論がいくつか提案されているが、現在では子午面循環と熱潮汐波が有力視されている。
- 夜昼間対流は金星熱圏（100 km 以上）で卓越しており、それ自体としては非現実的な想定ではない。
- 平均子午面循環・熱潮汐波・短周期の波と擾乱による運動量輸送の解明が重要。