

# AFES-Venus でのスーパー ローテーションや擾乱など

高木征弘 (京都産業大学・理学部)

# AFES-Venus の紹介

- AFES (AGCM For Earth Simulator) for the Earth atmosphere (Ohfuchi et al., 2004; Enomoto et al., 2008) に基づく金星大気GCM
- 太陽加熱: Tomasko et al. (1980) and Crisp (1989)
  - 高度 80 (90) km 以上は無視
- 赤外線による放射輸送:
  - ニュートン冷却で代用
  - 参照温度場  $T_{ref}(z)$  は水平一様で VIRA 準拠.
- 大気安定度  $\Gamma(z)$ :
  - 低安定度層あり
- 地形なし
- 鉛直渦粘性: 0.015 m<sup>2</sup>/s (定数)
- 水平渦粘性: 4次の超粘性, 緩和時間は最大波数成分に対して0.05地球日 (T63の場合)
- 解像度: T63L120 ( $\Delta x \doteq 200$  km,  $\Delta z \doteq 1$  km, 鉛直領域: 0–120 km)
- 初期値: 理想化したスーパーローテーション状態 (温度場は風速とバランス)



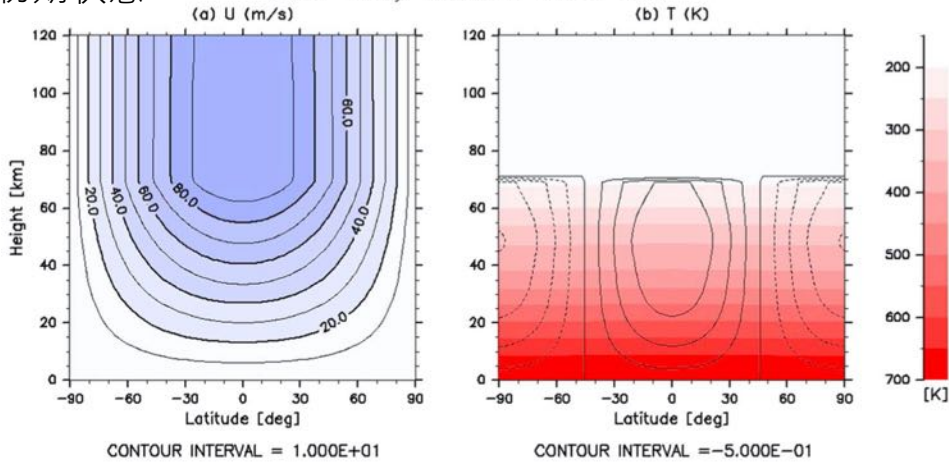
地球シミュレータ (JAMSTEC)

# 傾圧不安定波

- 初期の  $U(y,z)$ , 大気安定度  $\Gamma(z)$  に対する依存性を調べる。
- 初期の  $U(y,z)$  とバランスする  $T(y,z)$  にニュートン冷却で緩和させる。(太陽加熱なし)

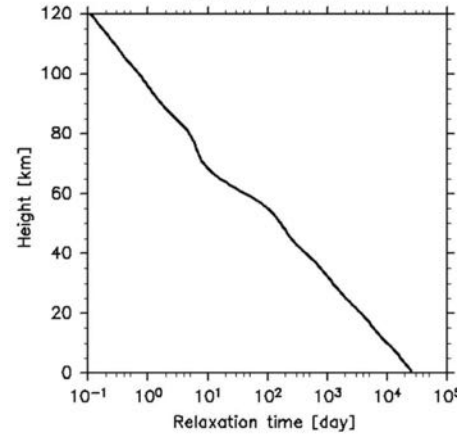
初期状態

Solid-body rotation (Case S0)



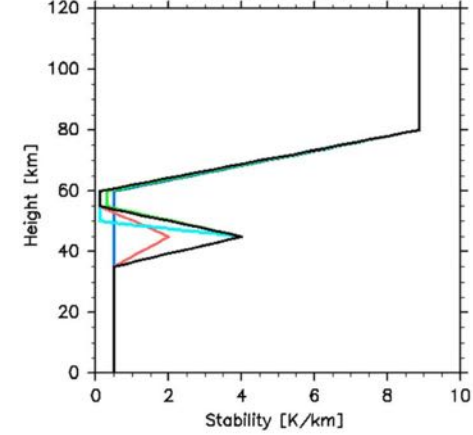
緩和時間

(a) Relaxation time



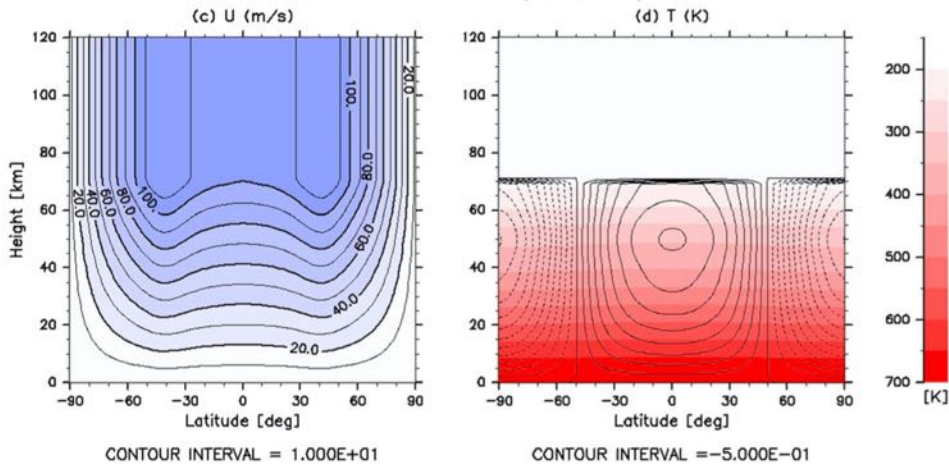
大気安定度

(b) Static stability

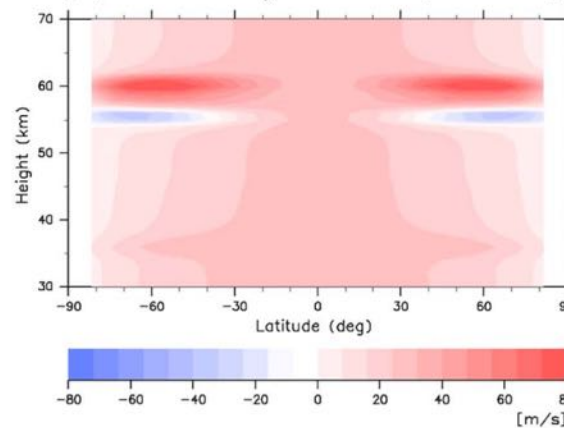


$dq/dy$  の分布 (符号が変わるところで不安定)

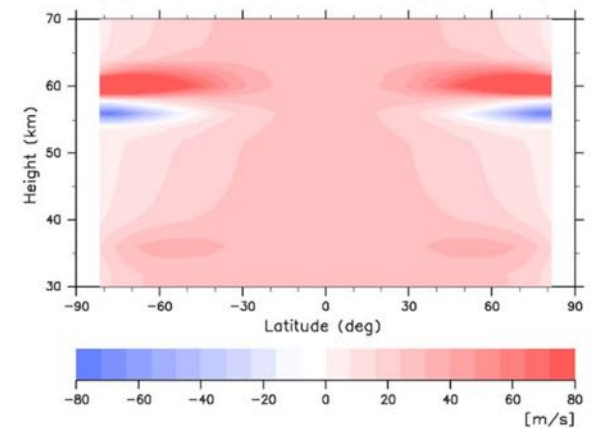
Mid-latitude Jets (Case J0)



(a) Solid-body rotation (Case S0)



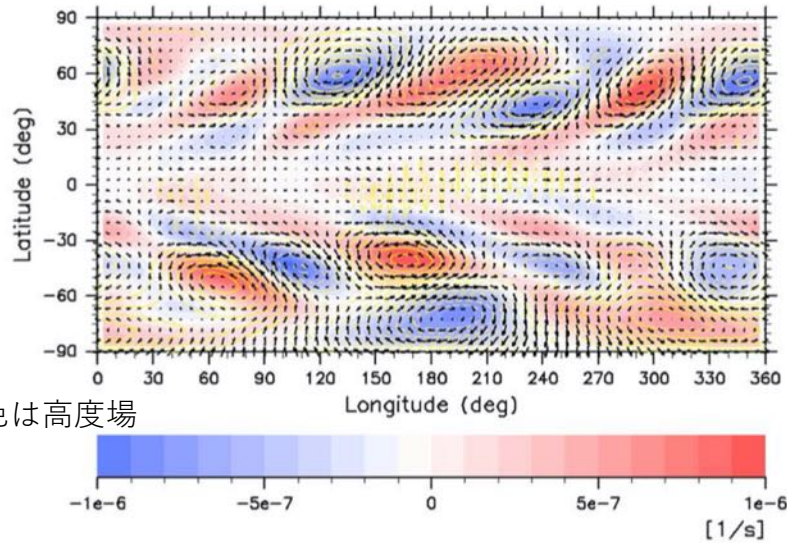
(b) Mid-latitude Jets (Case J0)



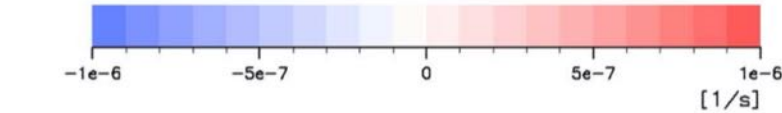
# 不安定モード (Case S0)

45°N での x-z 構造

(b) Vorticity, day 360

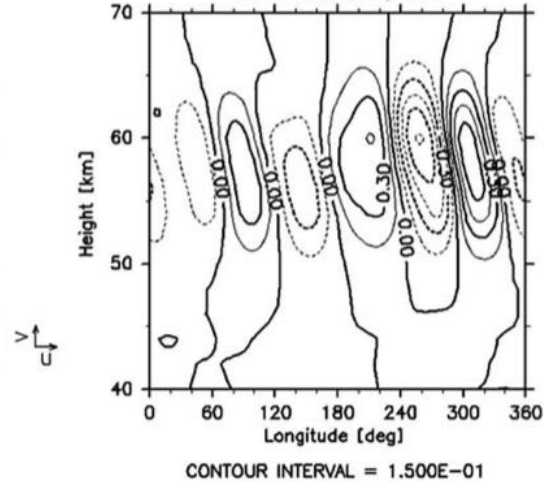


黄色は高度場



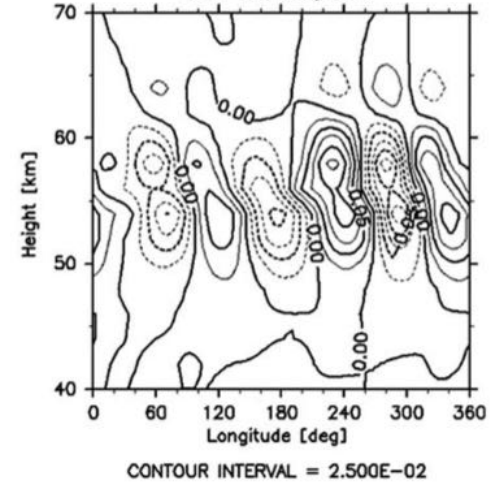
- 東西波数4程度の不安定モードが現れた。
- だいたい傾圧不安定波の構造。
- 中緯度に極向き運動量輸送・熱輸送がみられる。
- Young et al. (1984) の線形論と整合的。

(d)  $V'$  [m/s], day 360



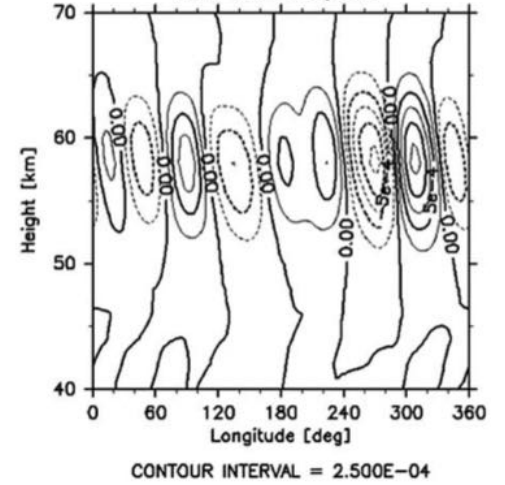
CONTOUR INTERVAL = 1.500E-01

(e)  $T'$  [K], day 360



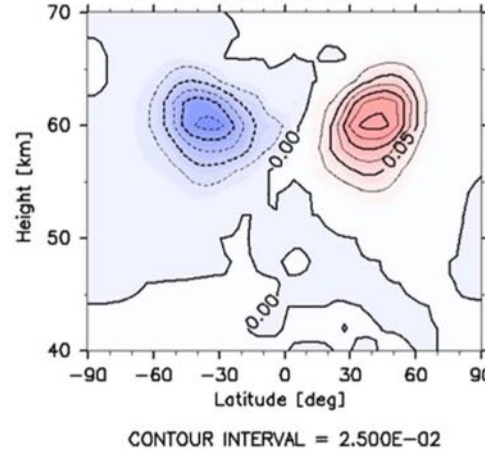
CONTOUR INTERVAL = 2.500E-02

(f)  $W'$  [m/s], day 360



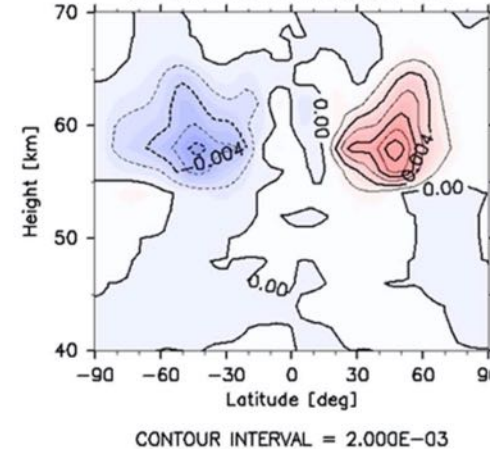
CONTOUR INTERVAL = 2.500E-04

(c) Zonal mean  $u'v'$ , day 361-390



CONTOUR INTERVAL = 2.500E-02

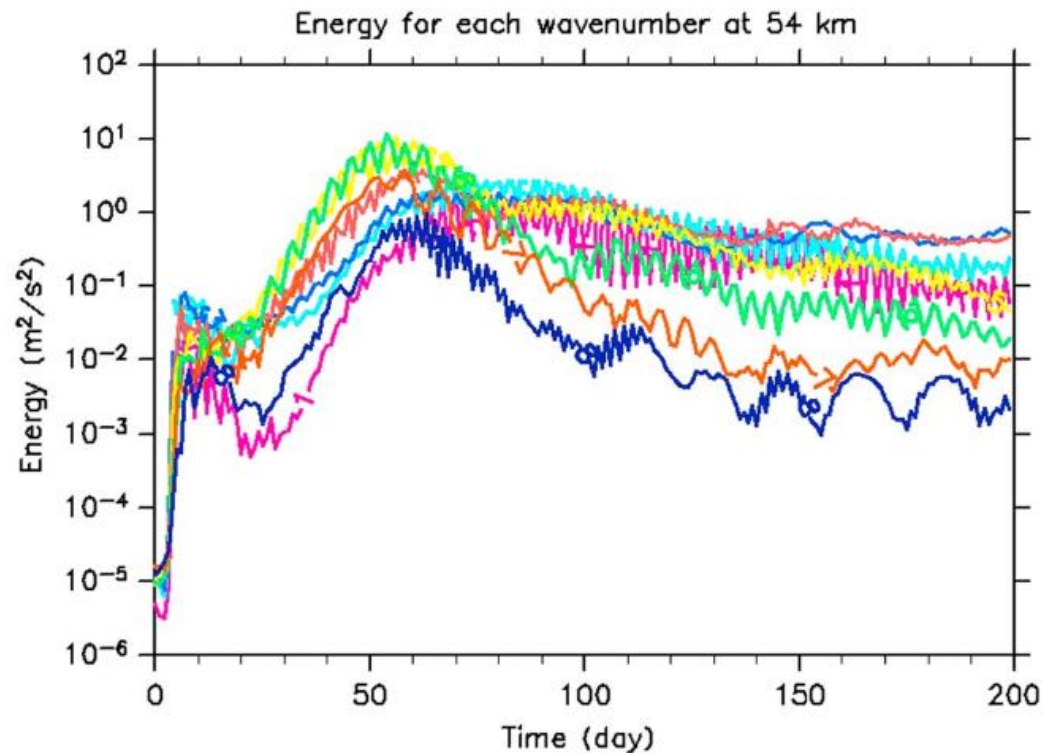
(d) Zonal mean  $v'T'$ , day 361-390



CONTOUR INTERVAL = 2.000E-03

Sugimoto et al. (2014a)

# 東西波数ごとのエネルギーの時間変化



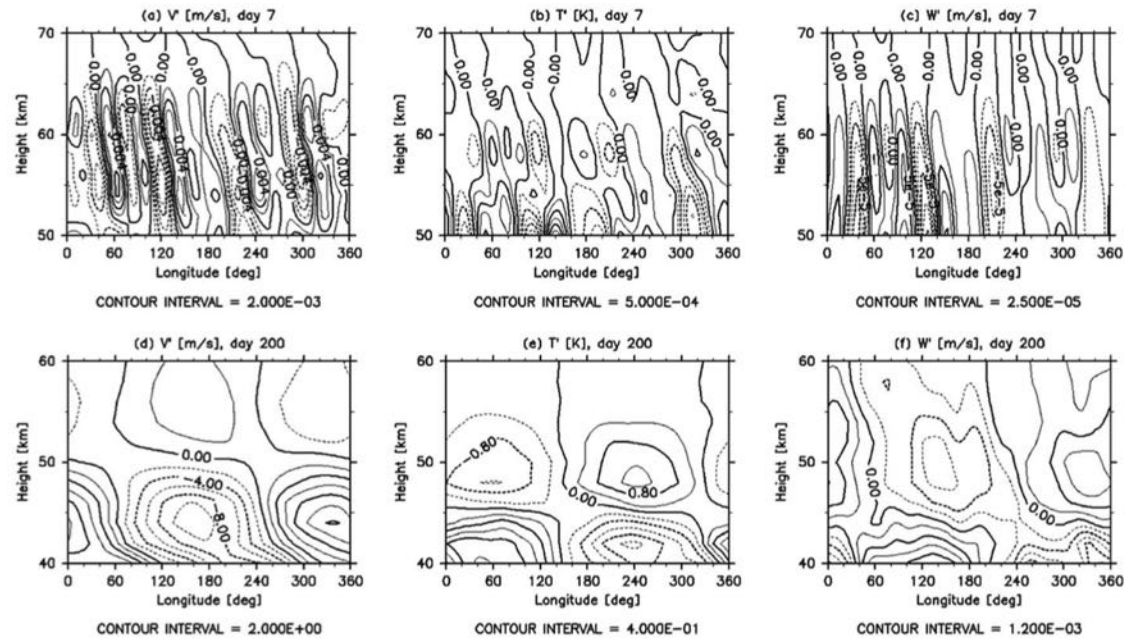
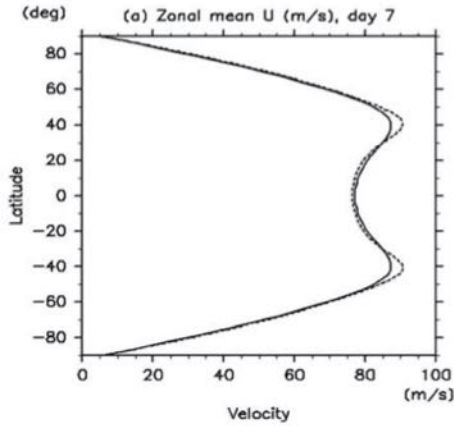
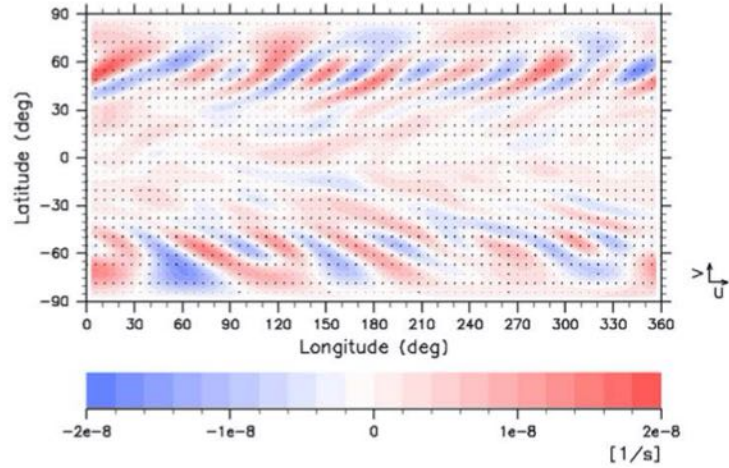
**Figure 7.** Time evolution of kinetic energy of the disturbances from days 0 to 200. Each colored line denotes energy of wave number 1 (pink), 2 (light blue), 3 (blue), 4 (red), 5 (yellow), 6 (green), 7 (orange), and 8 (dark blue).

- 25–50日にかけて、東西波数 5-6 が指数関数的に成長。
- 成長時間は約2週間で、過去の線型モデルによる研究結果とも整合的。
- 150日以降は東西波数 3-4 が支配的。

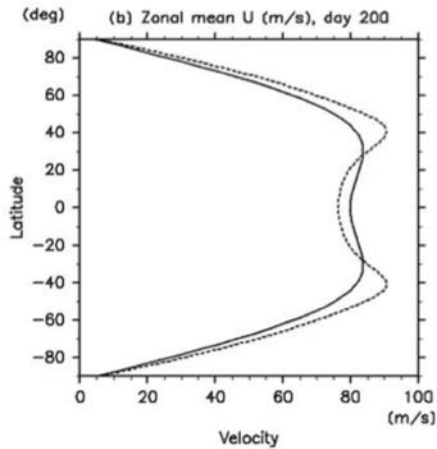
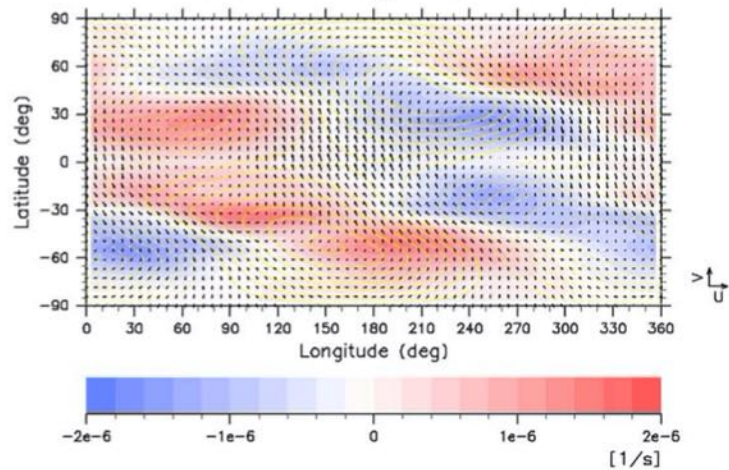
# 不安定モード (Case J0)

上：7日目 (50°N), 下：200日目 (20°N)

黄色は高度場 (a) Vorticity, day 7 54 km



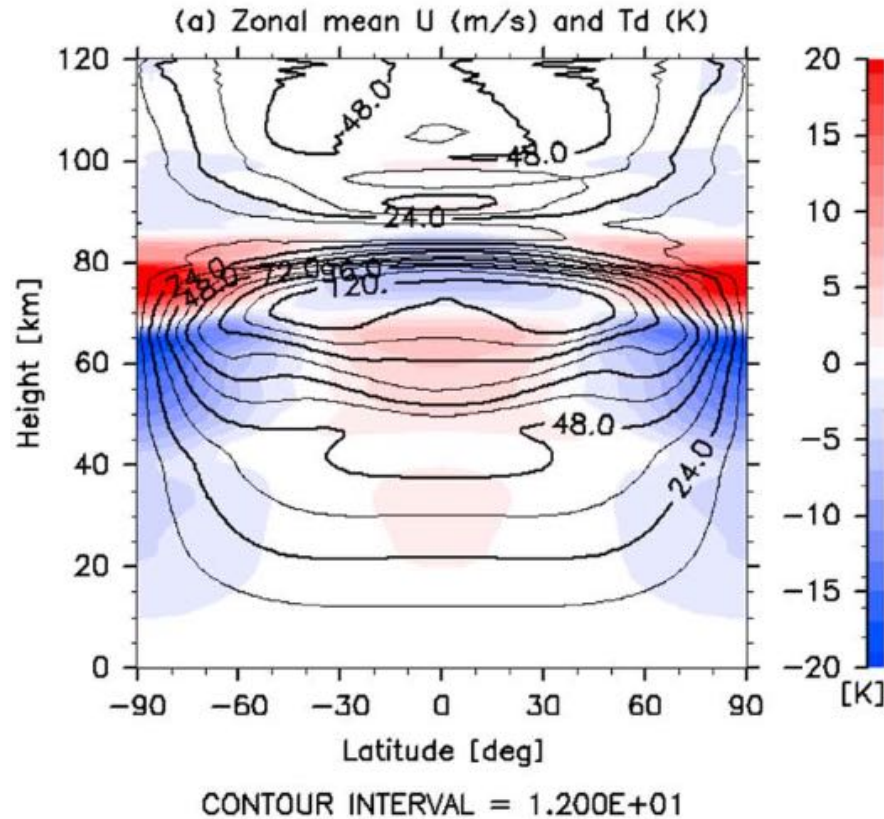
(b) Vorticity, day 200 54 km



- 初期には東西波数 7-8 の波が卓越。
  - 成長時間は S0 の場合より短く、速く成長。
  - ただし、あとの段階で卓越しない。
- 200日目では東西波数1の渦が卓越。
  - 位相速度からロスビー波と考えられた。
  - 位相は西に傾いている。

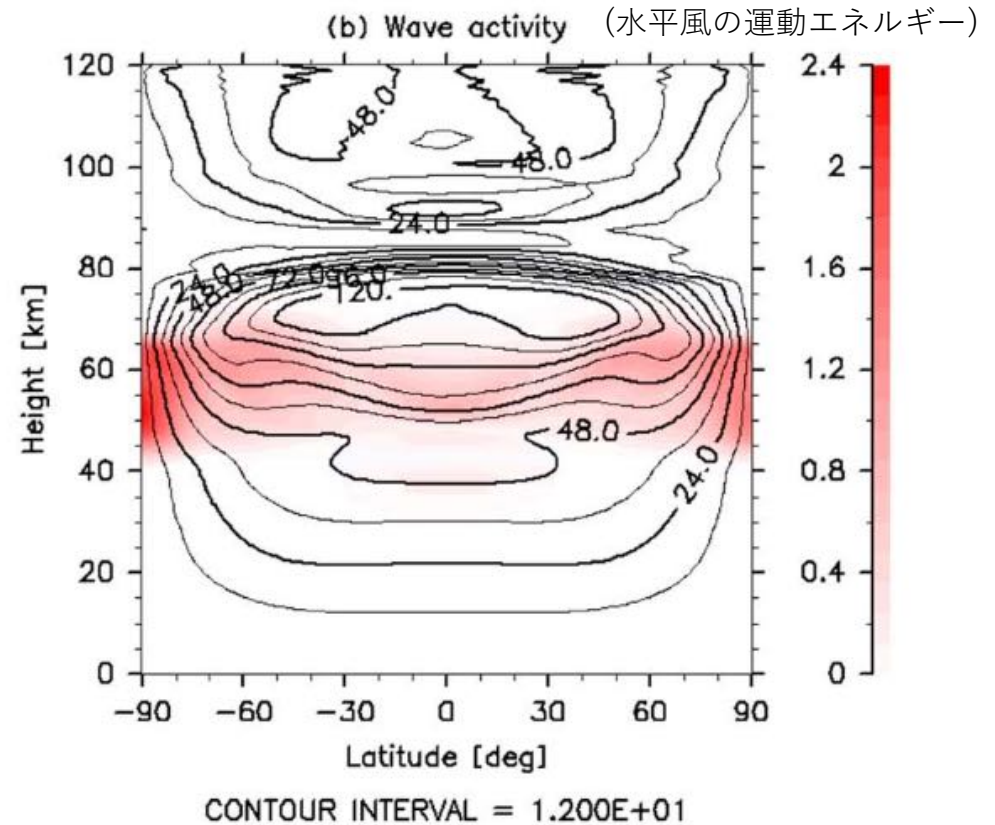
# 傾圧不安定波 (2)

平均東西風と温度分布



- 雲層高度では観測と整合的な東西風速分布が得られた。

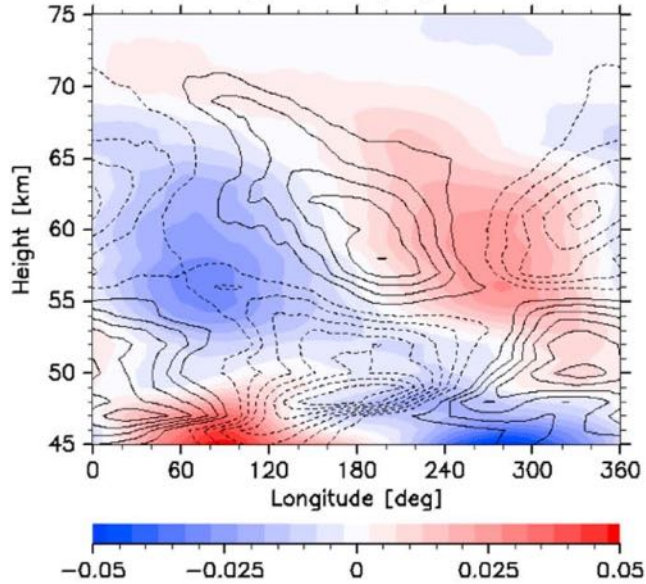
- 現実的な太陽加熱で大気運動を強制し、その中に現れる短周期擾乱を調べた。
- 解像度はT63L120



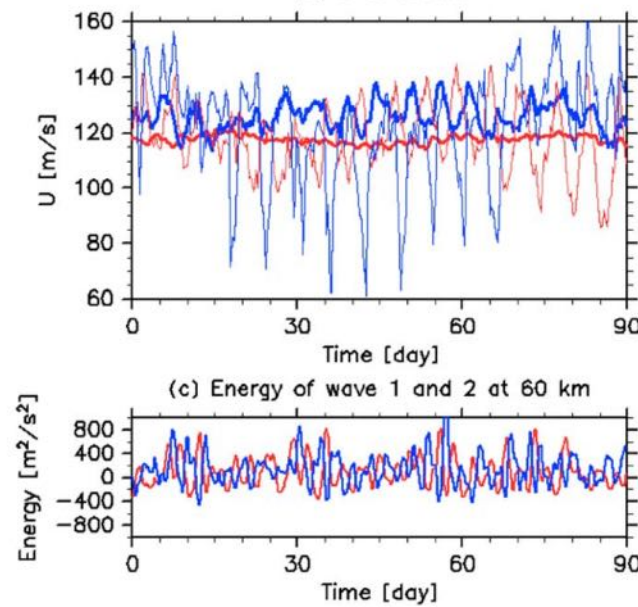
- 高度 40–70 km の幅広い緯度帯に活発な擾乱活動がみられる。

# 不安定波の鉛直構造

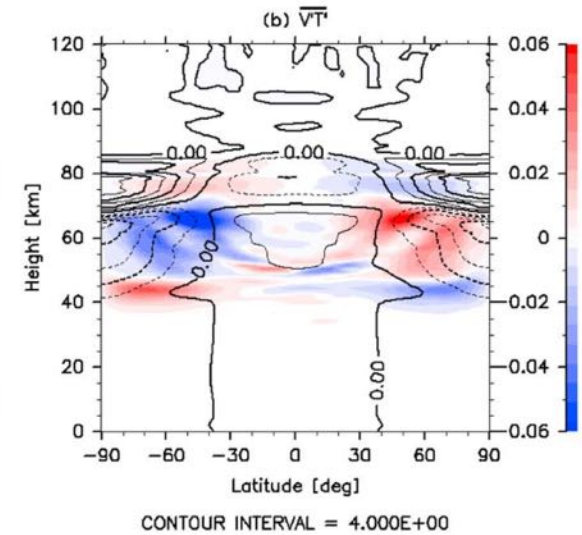
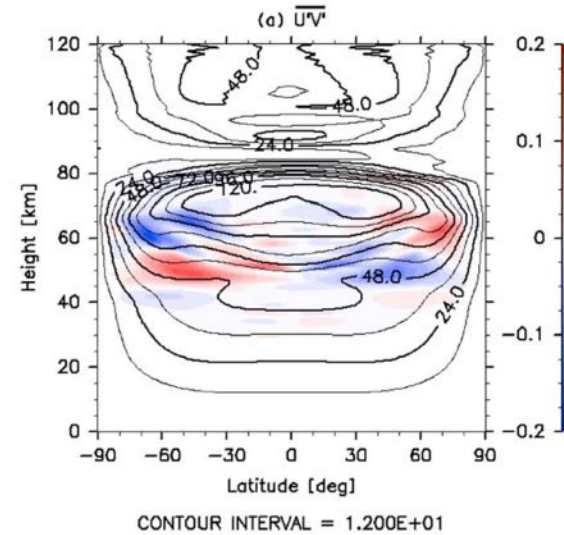
45°N での分布 (黒:  $V'$ , 色:  $T'$ )  
(a)  $V'$  and  $T'$ , day 20



赤: 赤道, 青: 45°N  
(b) U at 70 km



赤: 東西波数1, 青: 2 (30°-60°Nで平均)



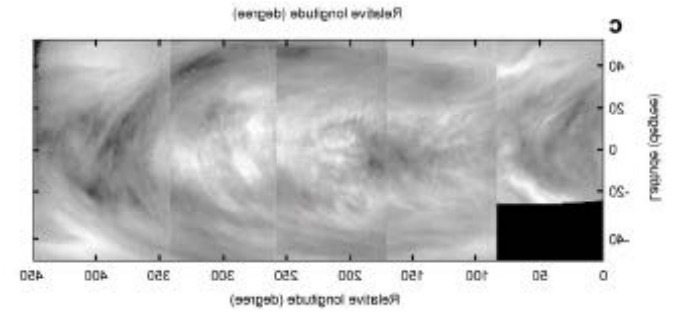
Sugimoto et al. (2014b)

- 東西波数 1 が卓越している。
- $V' \sim 30$  m/s,  $T' \sim 6$  K
- 高度 50 km 以上で位相が西に傾いている。
- 傾圧不安定波的な構造。
- ただし, Sugimoto et al. (2014a) とかなり異なる。

- 高度 45–70 km では極向き熱輸送
- 高度 40–45 km, 70–80 km では赤道向き熱輸送



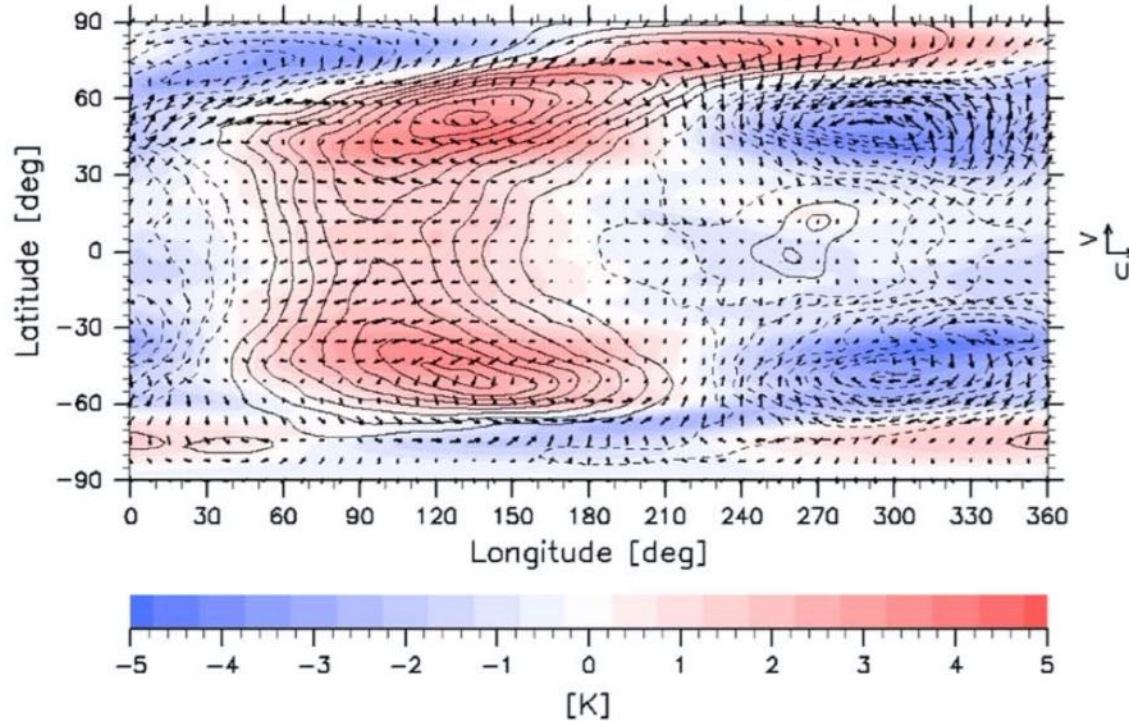
# 不安定波の水平構造 (60 km)



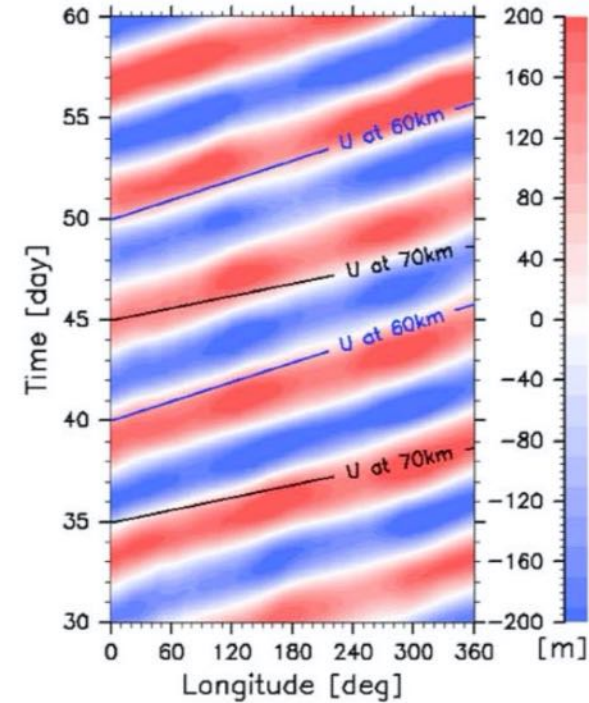
自転方向  
→

黒: Z' (70 km), 色: T' (60 km)

(a) U, V, Z at 70 km, T at 60 km, day 47



(b) Z at 70km, 45N



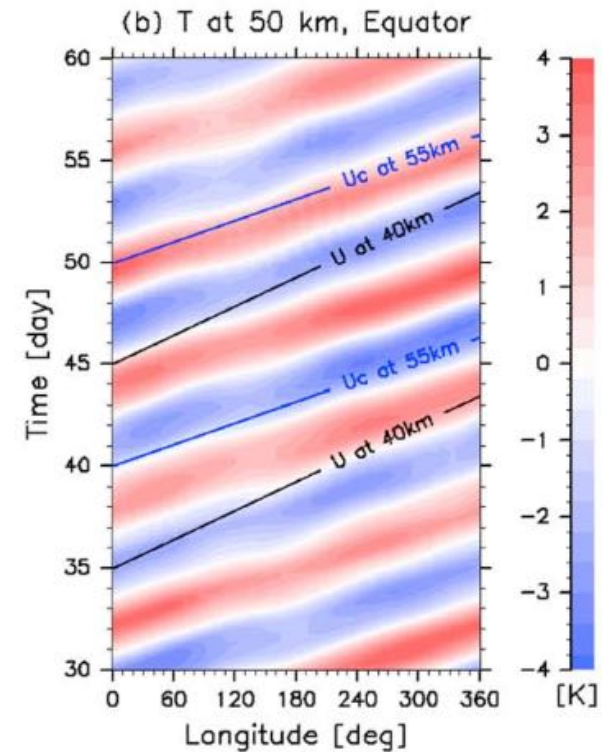
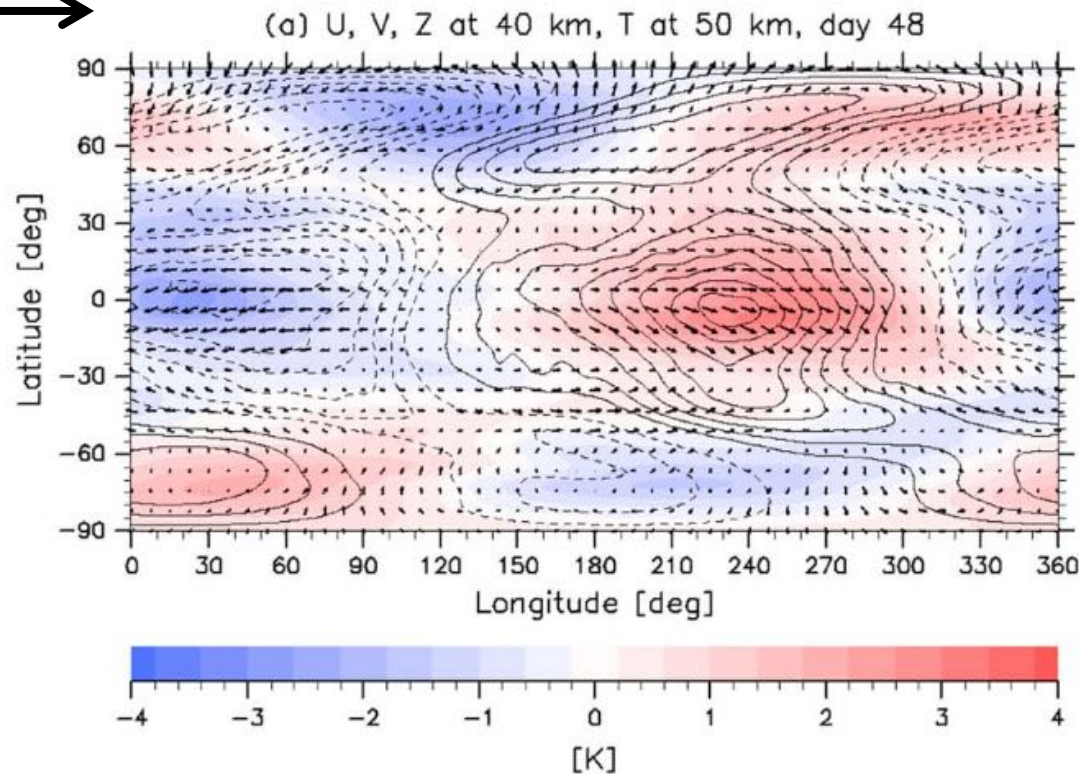
Kouyama et al. (2012)

- 雲頂高度では東西波数 1 が卓越。
- 渦に伴う風速は 20 m/s 程度。
- Y字模様 (右上) に似た構造が再現されている。

- 波の周期は5.8日。
- いわゆる中緯度ロスビー波 (5日波) は傾圧不安定波で説明される。

# 不安定波の水平構造 (50 km)

自転方向  
→

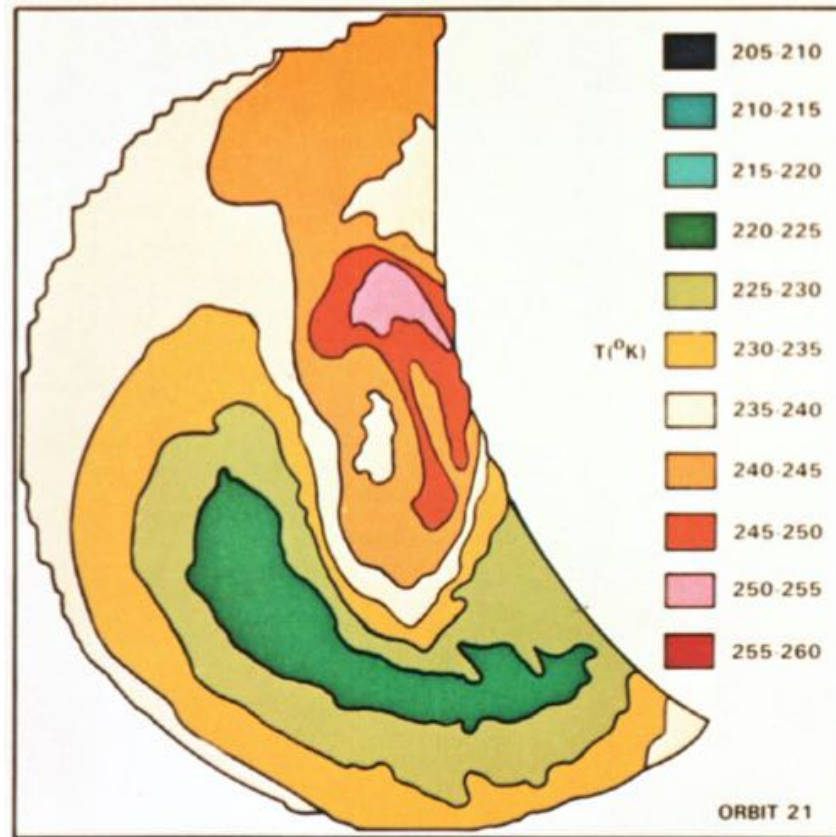


- 50 km 以下では赤道域に東西波数 1 の構造が卓越する (20–50 km に存在)。
- Rossby-Kelvin 結合不安定 (Iga and Matsuda, 2005) に似ている。
- 波の周期は6.2日程度で、赤外観測など (Crisp et al., 1991; Hosouchi et al., 2012) と整合的。
- 赤道域では50 km付近に臨界高度が存在する。

Ando et al. (2016)

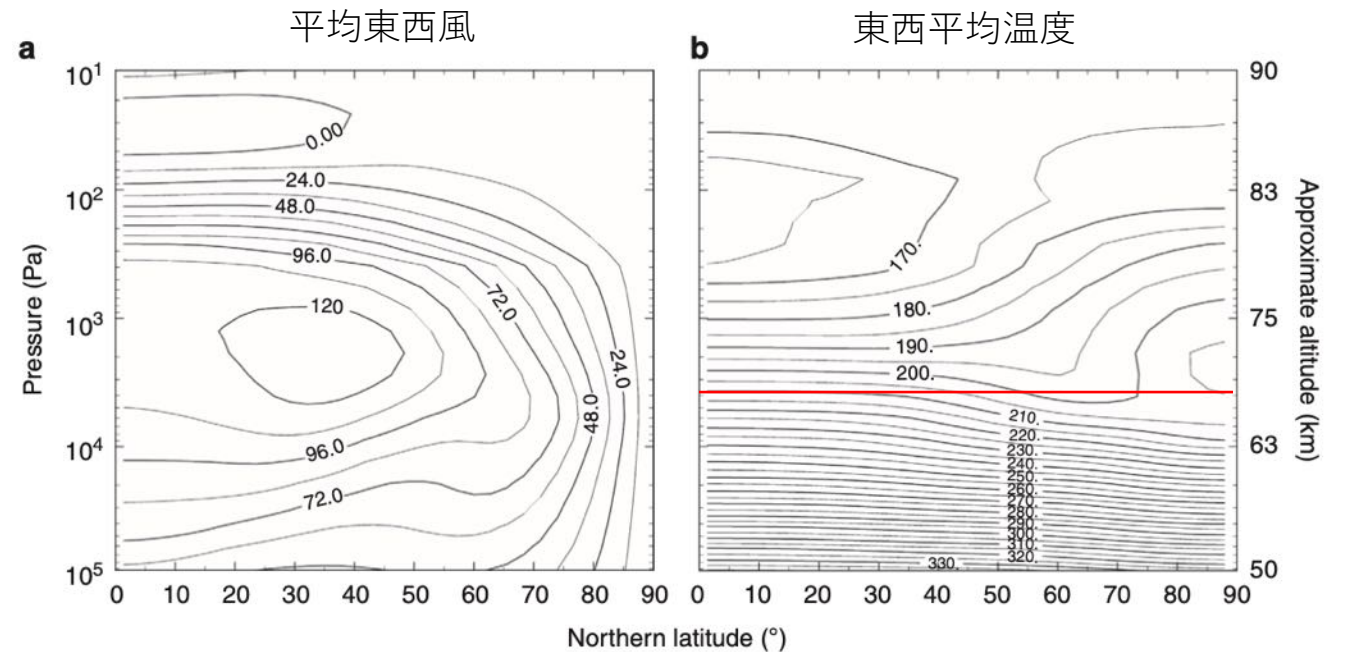
# 周極低温域

Pioneer Venus が観測した雲頂温度



雲頂付近の温度は、極域が暖かく、その周囲が冷たい。

Taylor et al. (1980)

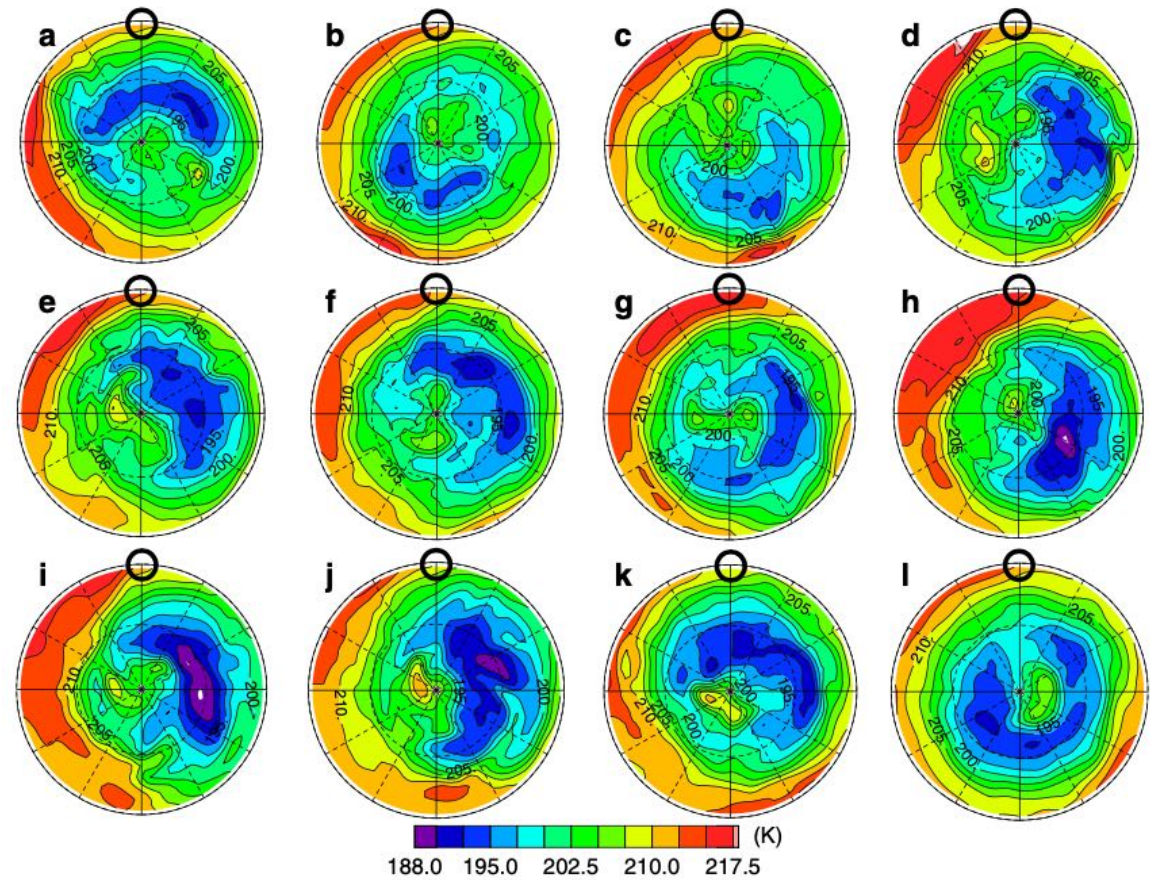
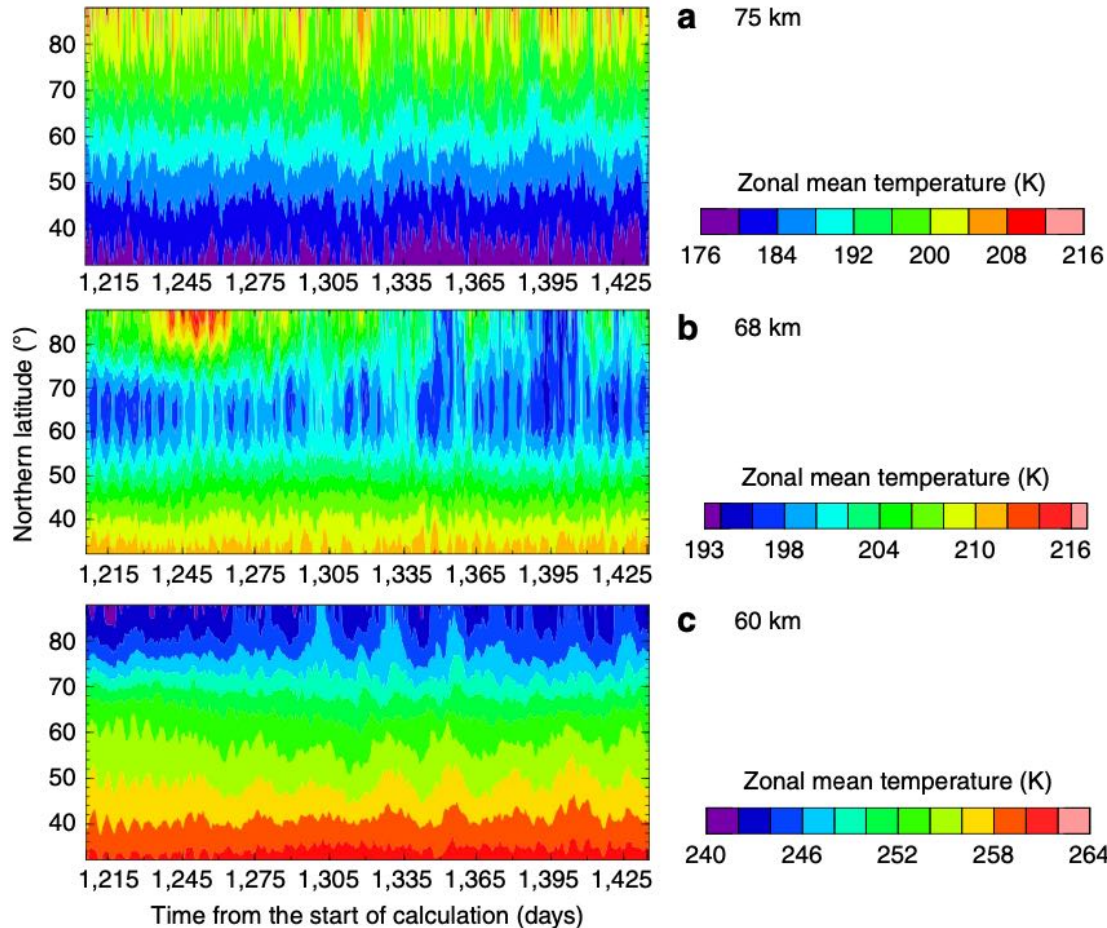


- 高度 70 km 付近で平均東西風の鉛直シアが変化するため、温度の南北温度傾度も変化する。
- 70 km より上では高緯度ほど暖かい。
- 高度 68 km の温度分布に周極低温構造が再現された。

# 温度場の時間変化

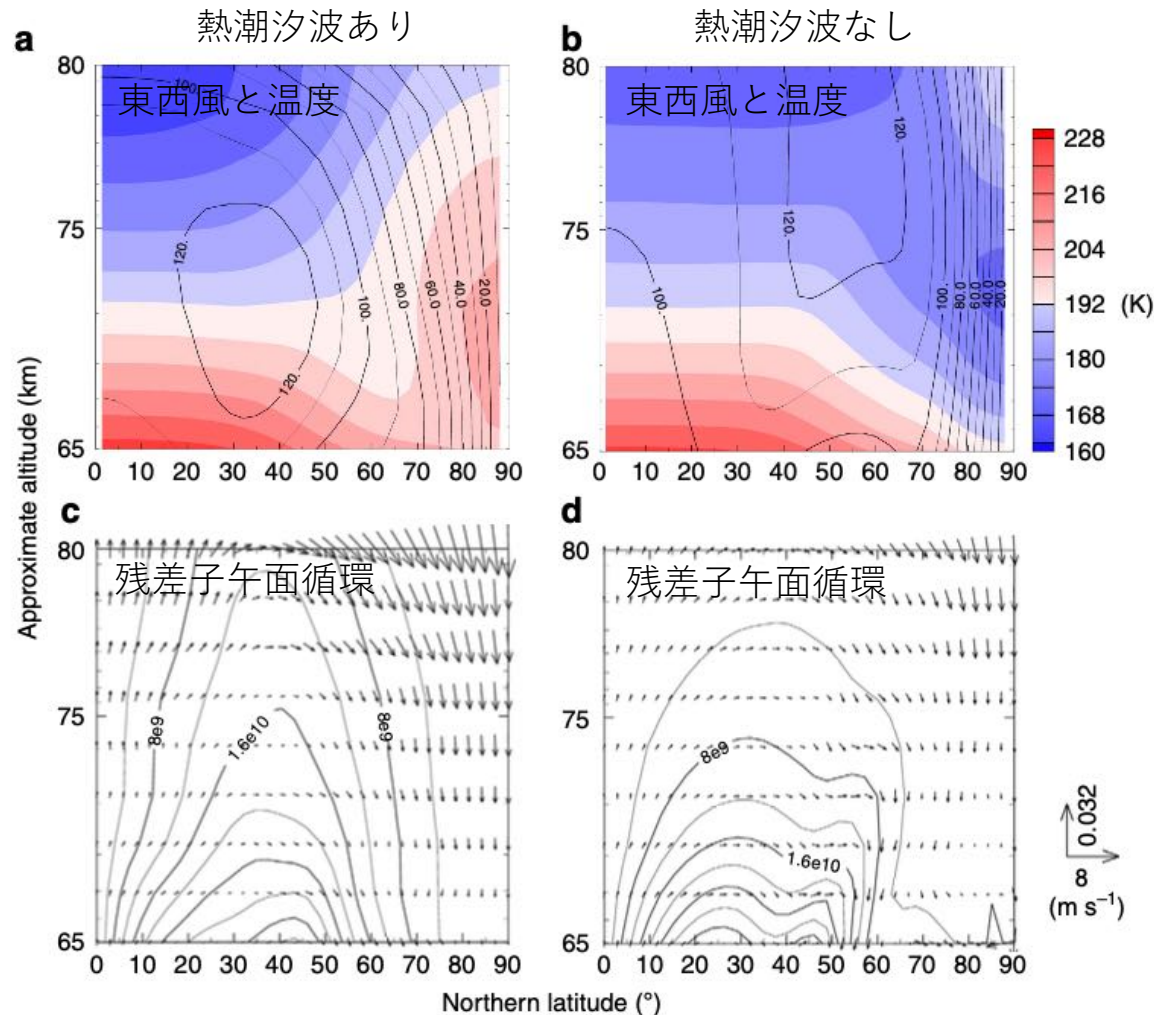
GCM で得られた1日ごとの温度分布

東西平均温度場



- 極のS字状の暖域が回転している。
- 周極低温域のある緯度帯では東西波数0と1,2が卓越
- 熱潮汐波と短周期擾乱(東西波数1,時々2)の影響

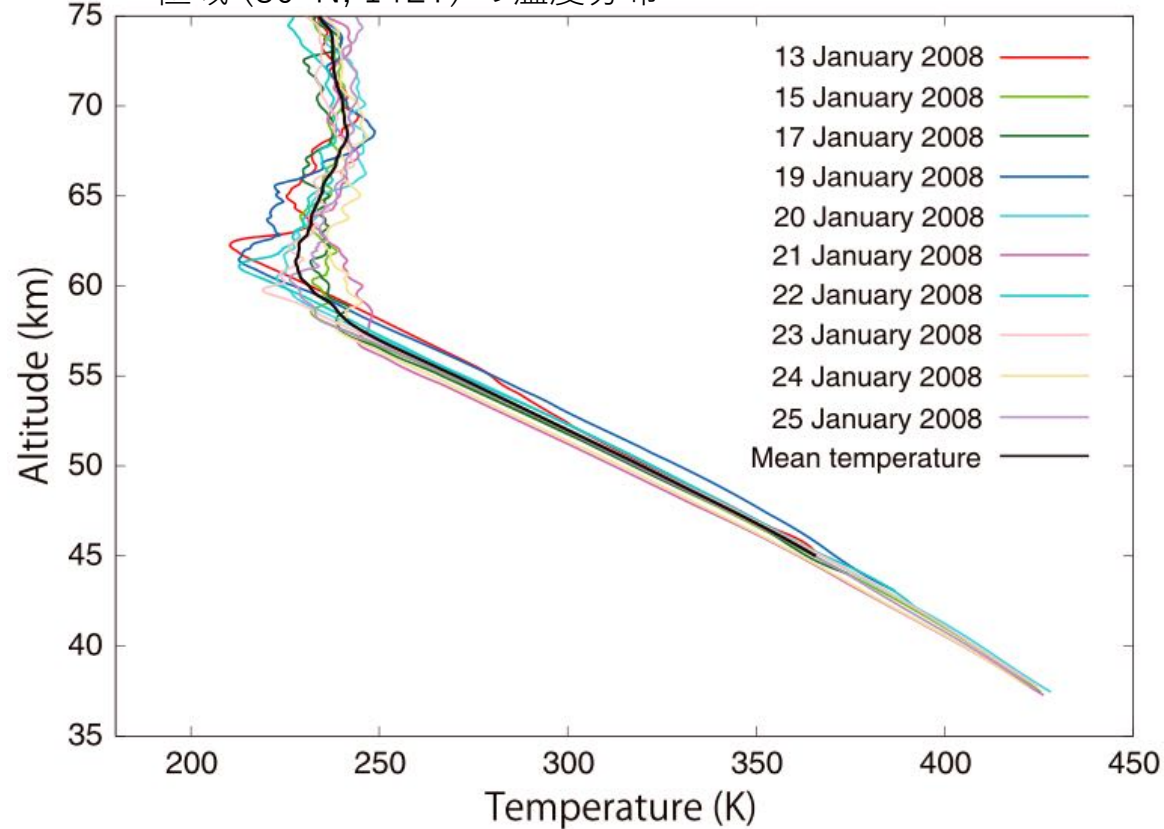
# 熱潮汐波の影響



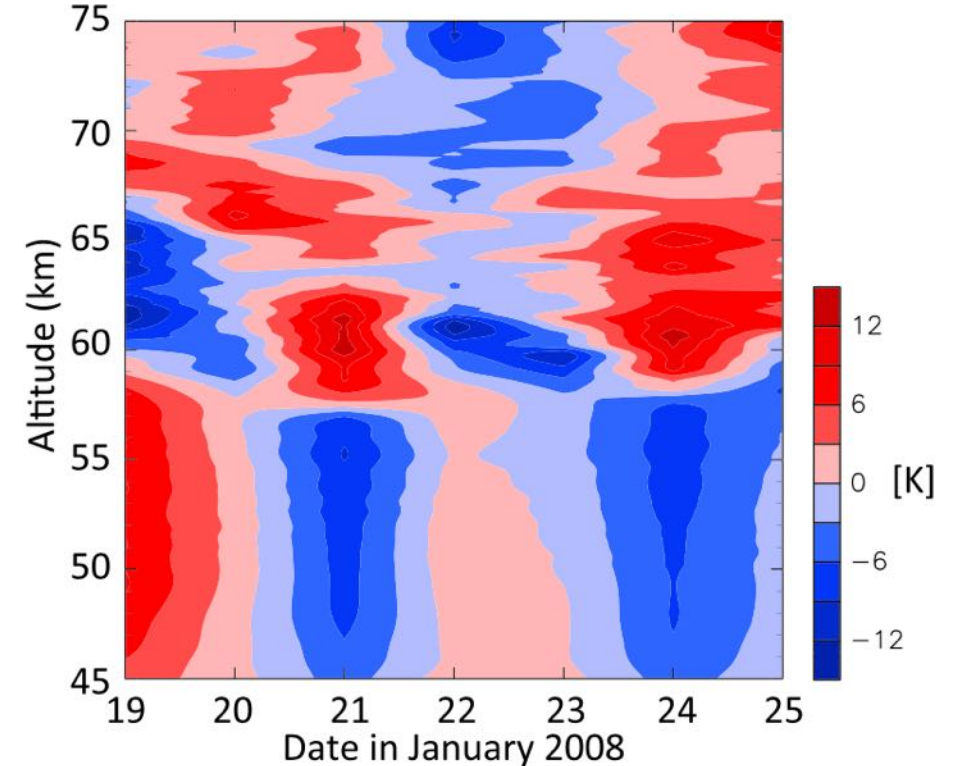
- 熱潮汐波を含まない計算では周極低温域が再現されなかった。
- 熱潮汐波ありの場合、残差子午面循環は極域に強い下降流を作る。
- 熱潮汐波なしの場合も極域の下降流はあるが、ありの場合の 1/2 から 1/3 程度しかない。
- 極の暖域の形成には熱潮汐波によって強化された残差子午面循環（の下降流）が寄与している可能性がある。
- その結果、周極低温域が形成される。

# 極域の温度擾乱

Venus Express の電波掩蔽観測によって連続観測された極域 (80°N, 14LT) の温度分布

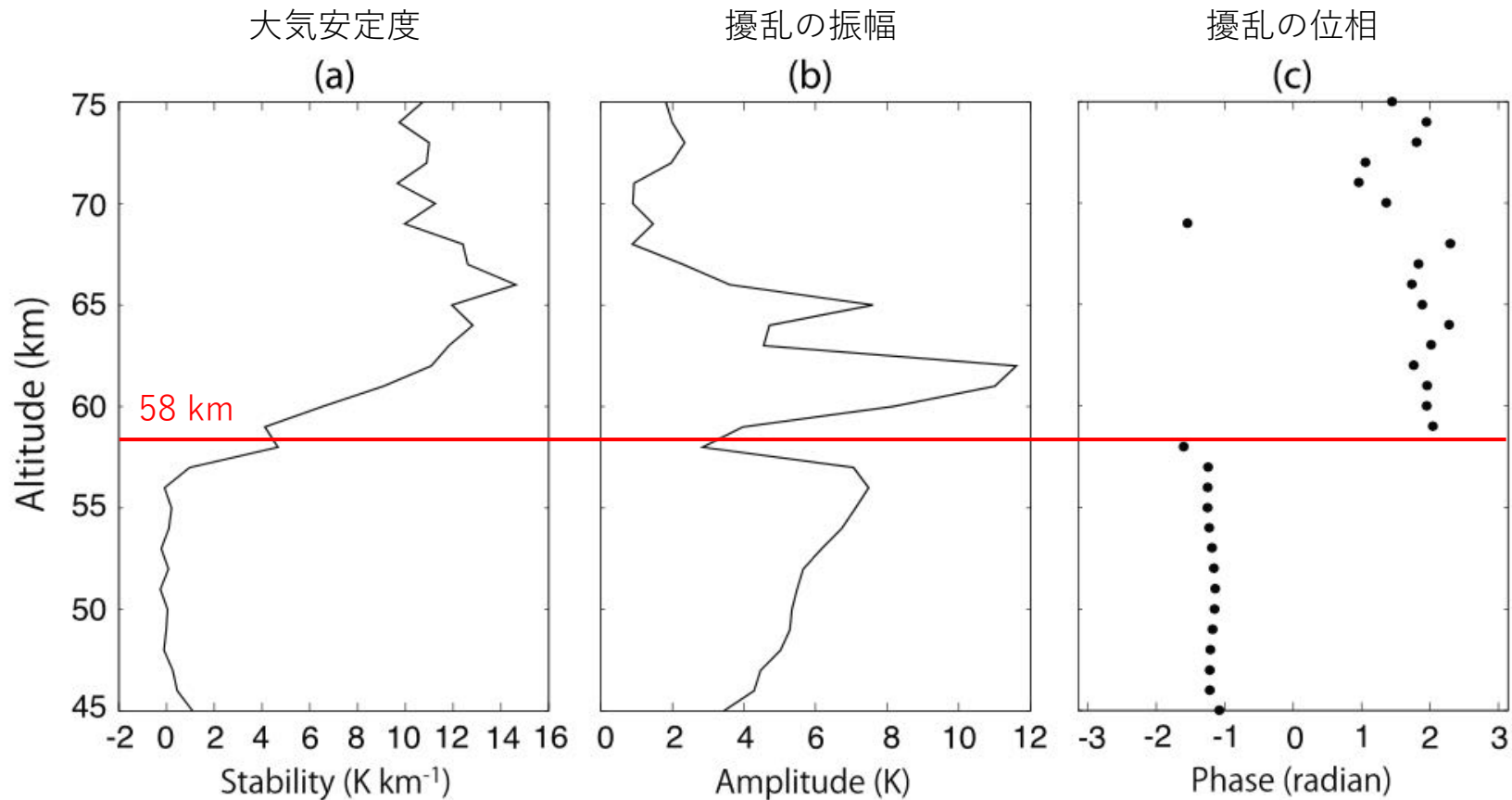


左図を時間方向に並べなおしたもの



- 周期3.1の周期的な変動がみられる。
- 高度 58 km 付近で符号が切り替わり, その上下で位相がほぼ直立している。

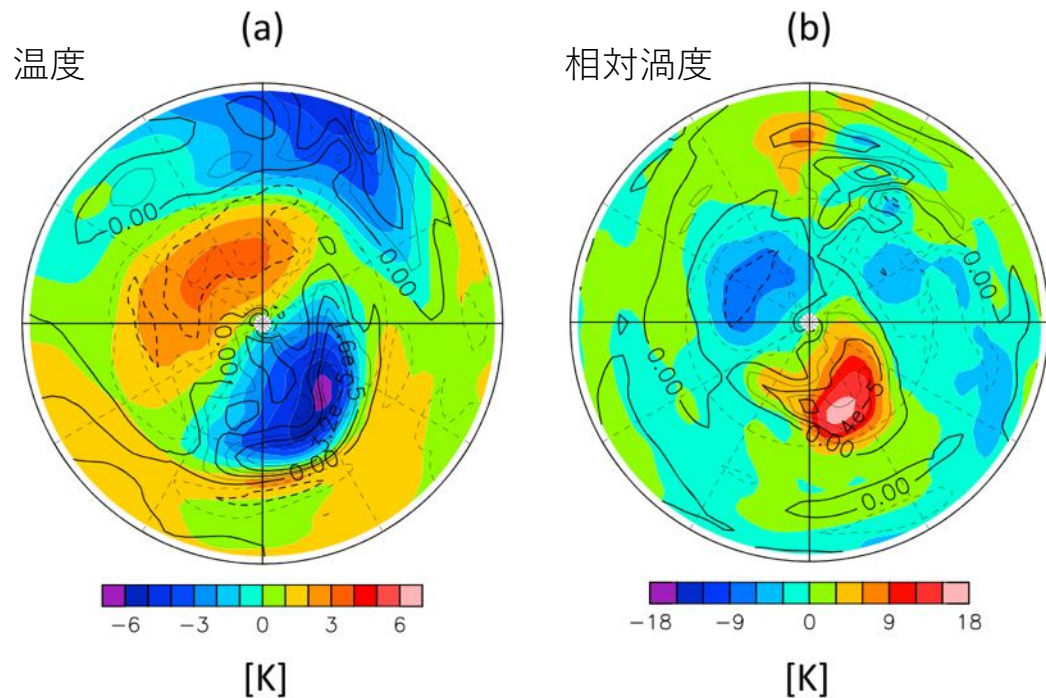
# 大気安定度と波の関係



- 大気安定度は 57 km 以下でほぼ 0 (中立成層)。57 km より上で急激に大きくなる。
- 擾乱の振幅は 45–56 km で高さとともに大きくなるが、58 km 付近に極小があり、62 km より上では急速に減少する。
- 擾乱の位相は 58 km 付近で  $180^\circ$  ジャンプする。その上下ではほぼ一定。
- この観測結果は Pioneer Venus の観測とも整合的 (Apt and Leung, 1982)。

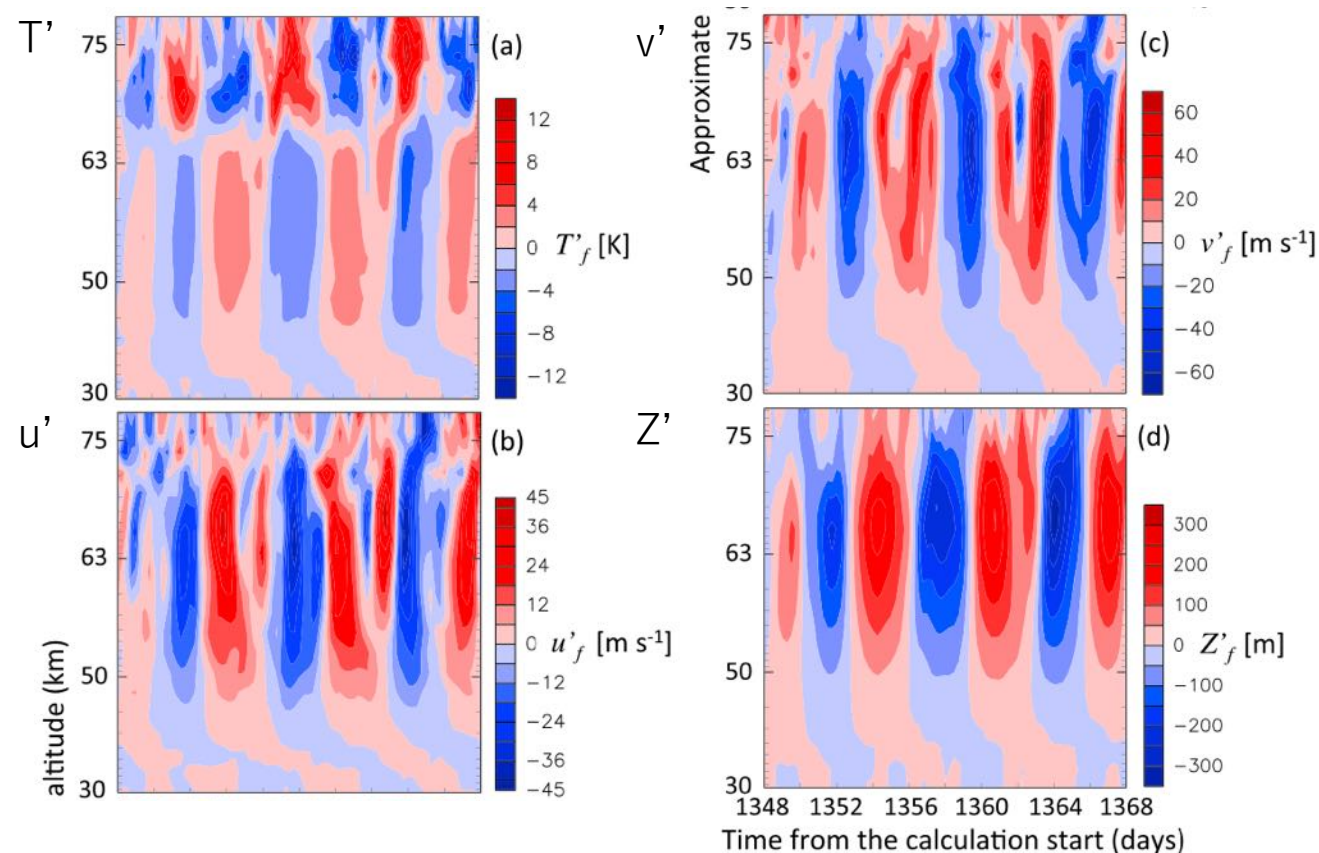
# GCMとの比較

高緯度にみられる擾乱 (30°–90° N, 57 km)



- 57 km は低安定度層の中にあり，そこでは  $T' > 0$  と  $\zeta' < 0$  が対応している。
- 高安定度層ではこの関係が逆転する。

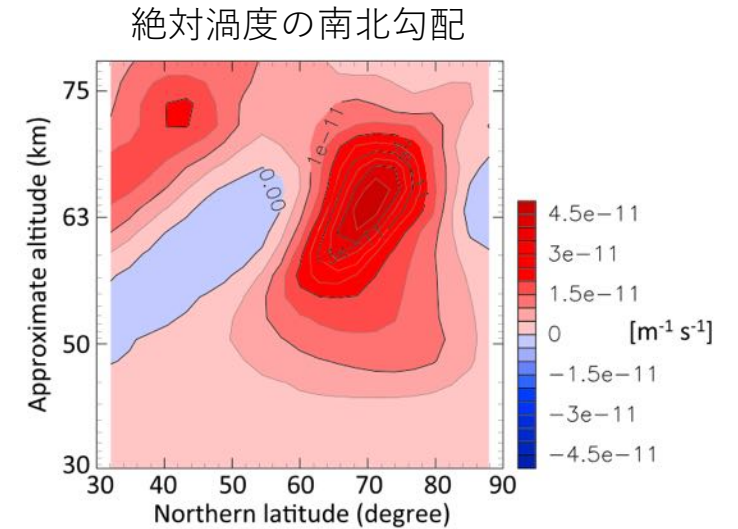
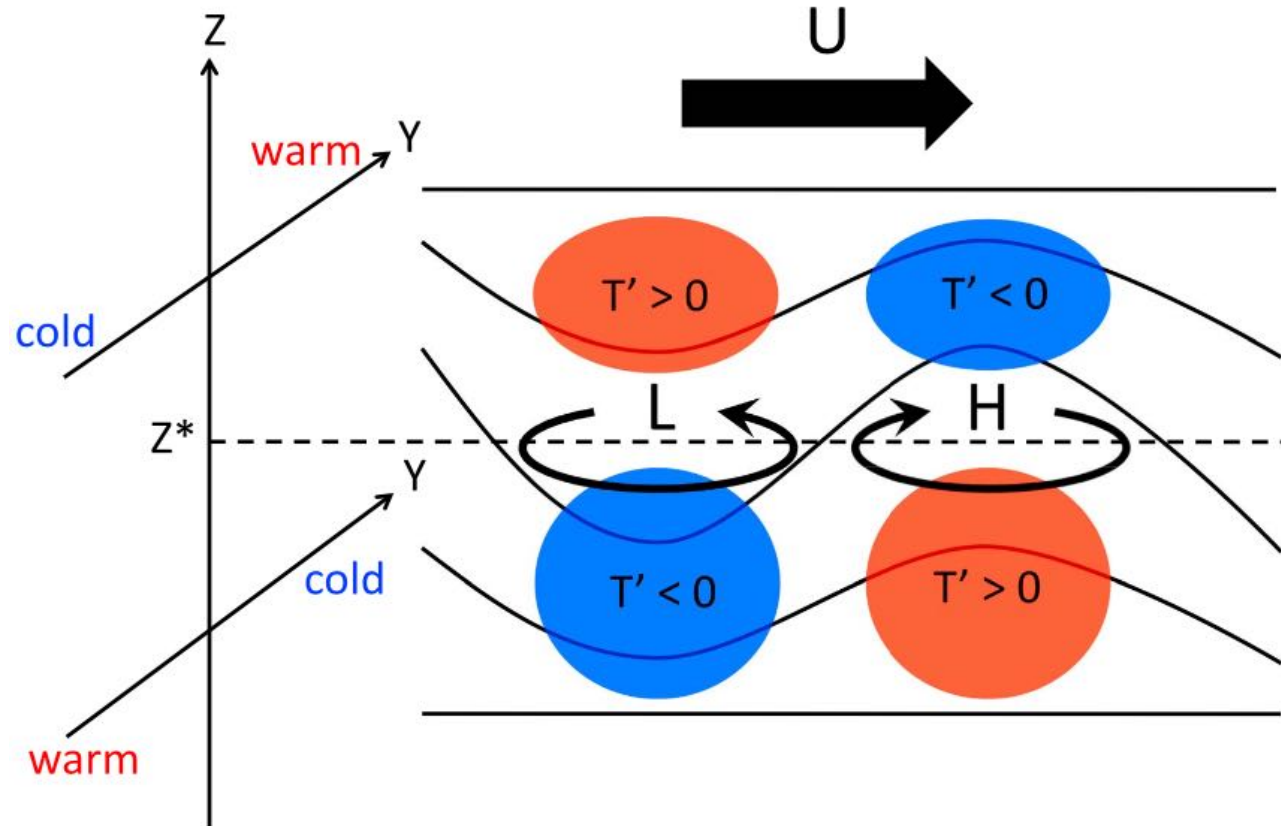
擾乱の時間・高度断面図 (80° N)



- $T'$  の振幅は 65 km で極小。GCM ではこの高度で安定度が急に高くなる。
- $Z'$  と  $u', v'$  はほぼ地衡風の関係を満たす。
- 擾乱の位相速度は平均東西風より遅い。
- 南北の運動量輸送および熱輸送はほとんどない。



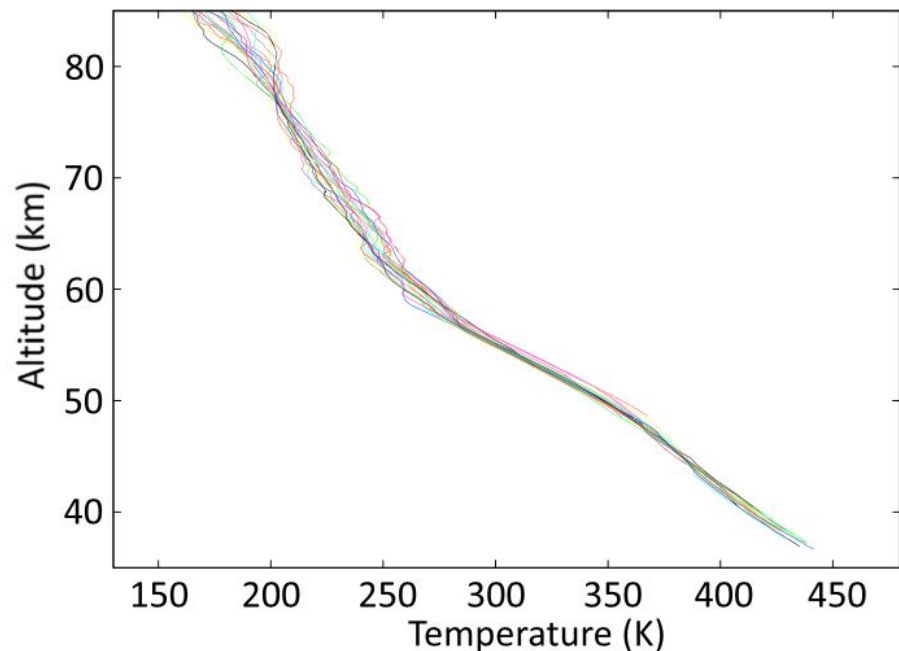
# 推定された温度擾乱の構造



- 擾乱は鉛直方向に順圧的な構造を持つ中立ロスビー波と考えられる。
- ロスビー波の分散関係から推定した擾乱の南北スケールはGCMの結果とよく一致する。
- 高緯度の 63 km 付近は順圧不安定の必要条件を満たすことから、擾乱は順圧不安定と関係しているかもしれない。

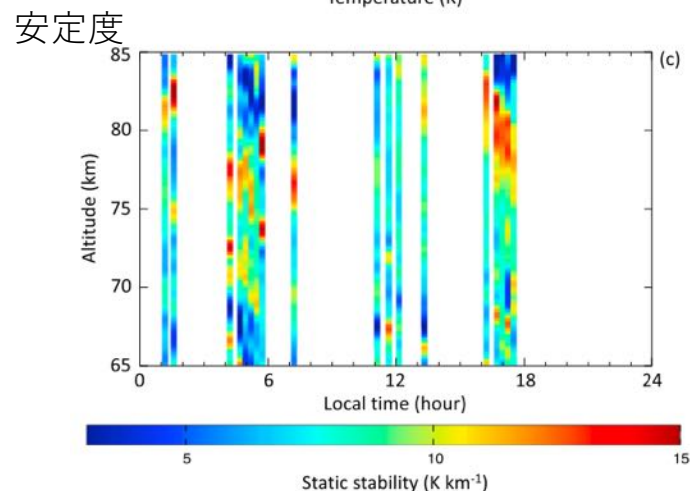
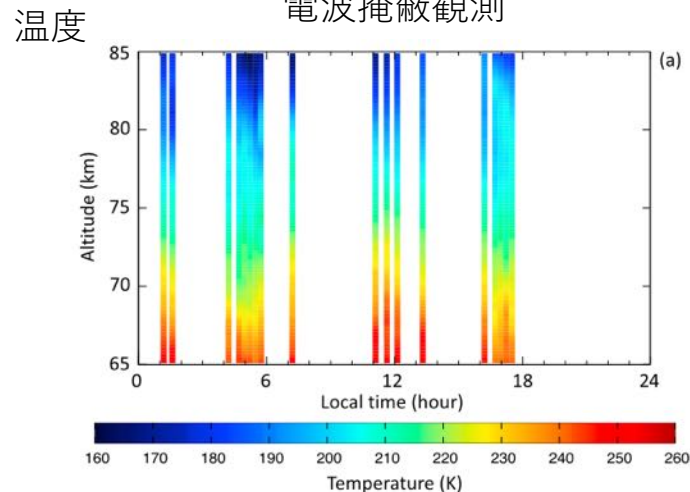
# 上層の温度構造：電波掩蔽観測との比較

あかつき電波掩蔽観測による温度分布

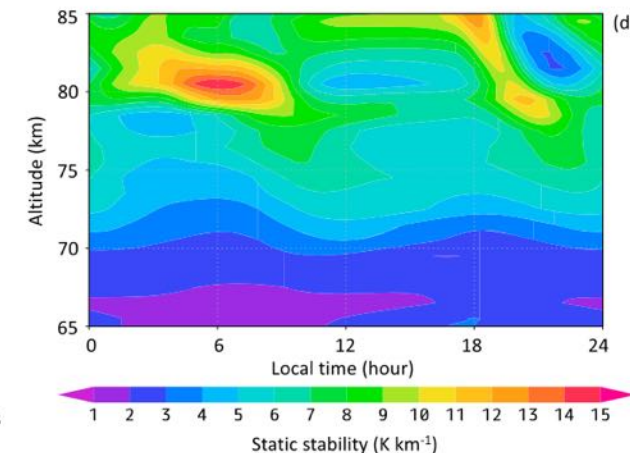
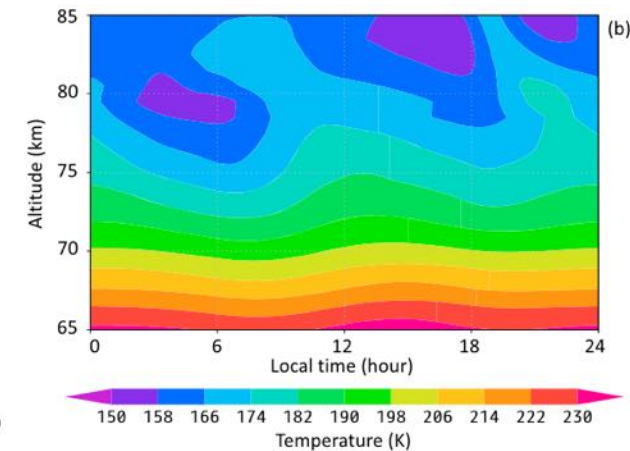


- 温度と大気安定度のローカルタイム・高度分布を GCM と比較したところ、かなりよい一致が見られた。

電波掩蔽観測

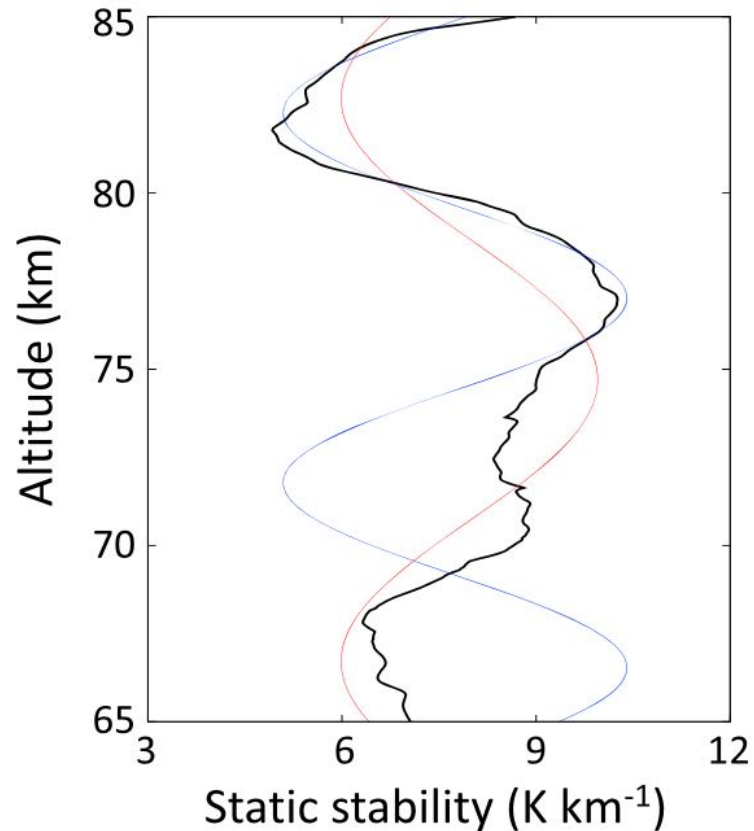


AFES-Venus



# 鉛直波長と東西風の推定

$$\text{熱潮汐波 (重力波) の分散関係} \quad \bar{u} - c = \frac{N}{m} \left( 1 + \frac{l^2}{k^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$



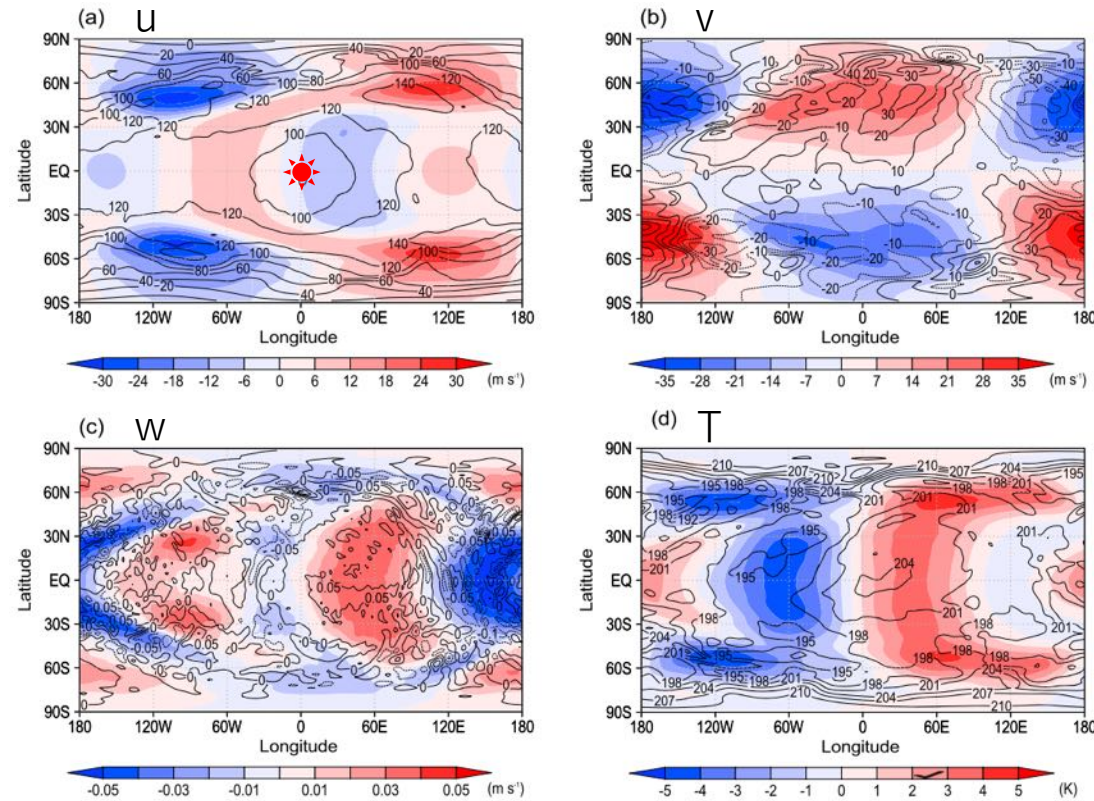
- 大気安定度の鉛直プロファイルから熱潮汐波 (半日潮) の鉛直波長を推定した。
  - 高度 80 km 以下では ~15 km
  - 高度 75 km 以上では 10-15 km (上層ほど短い)
- 鉛直波長の変化は東西風が減速していることによって引き起こされると考えられる。
- 分散関係から推定した東西風速は, 44-64 m/s (75-85 km) で, GCM の結果と整合的。
- 観測によれば, 雲頂の東西風速は 90-120 m/s 程度。
- したがって, 電波掩蔽観測の結果は, **東西平均風が雲頂より上で急に減速**していることを示唆している。

- 4:00-7:30 LT で平均した安定度の鉛直プロファイル (黒線)
- 70-85 km でフィッティングしたもの (赤線)
- 75-85 km でフィッティングしたもの (青線)

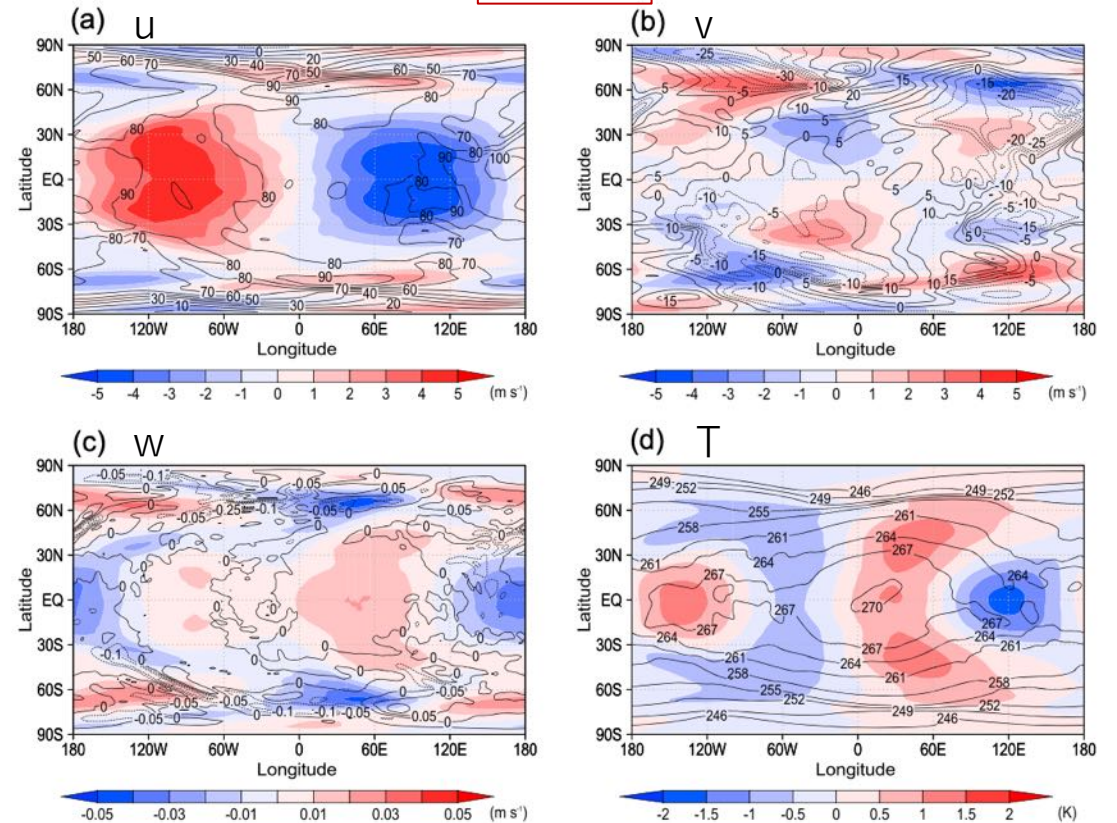
# 熱潮汐波の構造

午前 午後

70 km



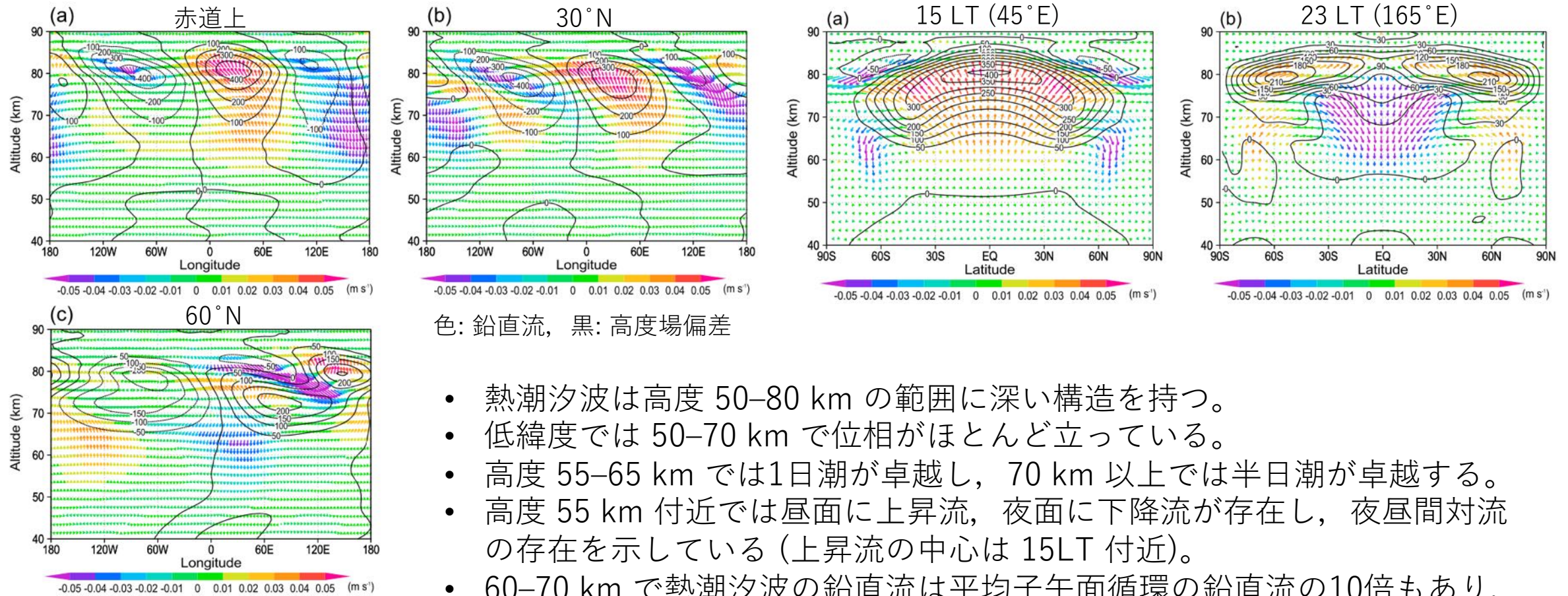
60 km



- 低緯度で東西波数 2 (半日潮), 高緯度で東西波数 1 (1日潮) が卓越。
- 低緯度の東西風は 12–16 LT で極小
- 南北風は昼面で極向き, 夜面で赤道向き。
- 低緯度に顕著な鉛直流あり。

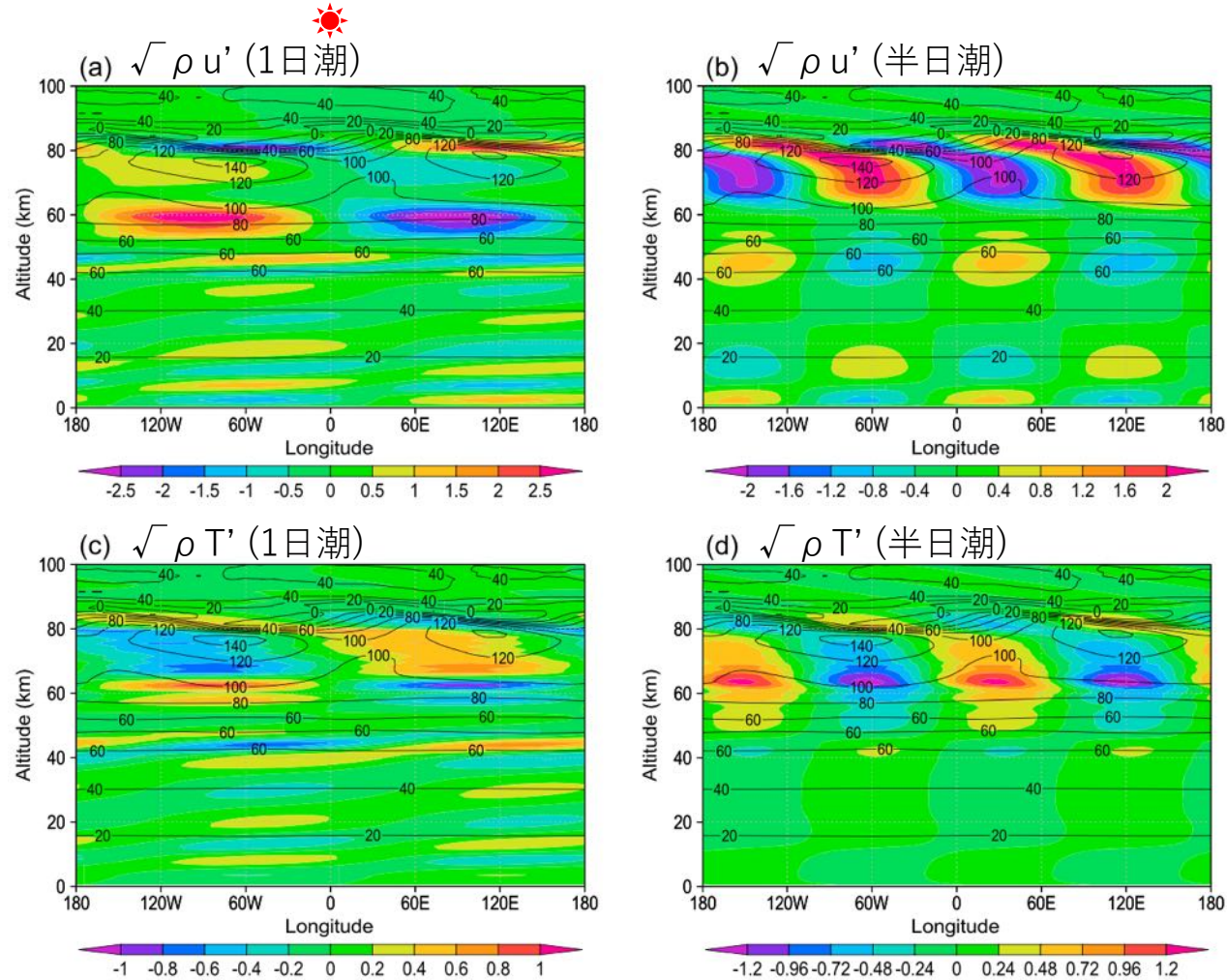
- 東西風では低緯度でも1日潮が卓越。
- かなり複雑な構造をしている。

# 夜昼間対流の存在



- 熱潮汐波は高度 50–80 km の範囲に深い構造を持つ。
- 低緯度では 50–70 km で位相がほとんど立っている。
- 高度 55–65 km では1日潮が卓越し, 70 km 以上では半日潮が卓越する。
- 高度 55 km 付近では昼面に上昇流, 夜面に下降流が存在し, 夜昼間対流の存在を示している (上昇流の中心は 15LT 付近)。
- 60–70 km で熱潮汐波の鉛直流は平均子午面循環の鉛直流の10倍もあり, 夜昼間対流が雲層中の物質循環に重要である可能性を示唆している。

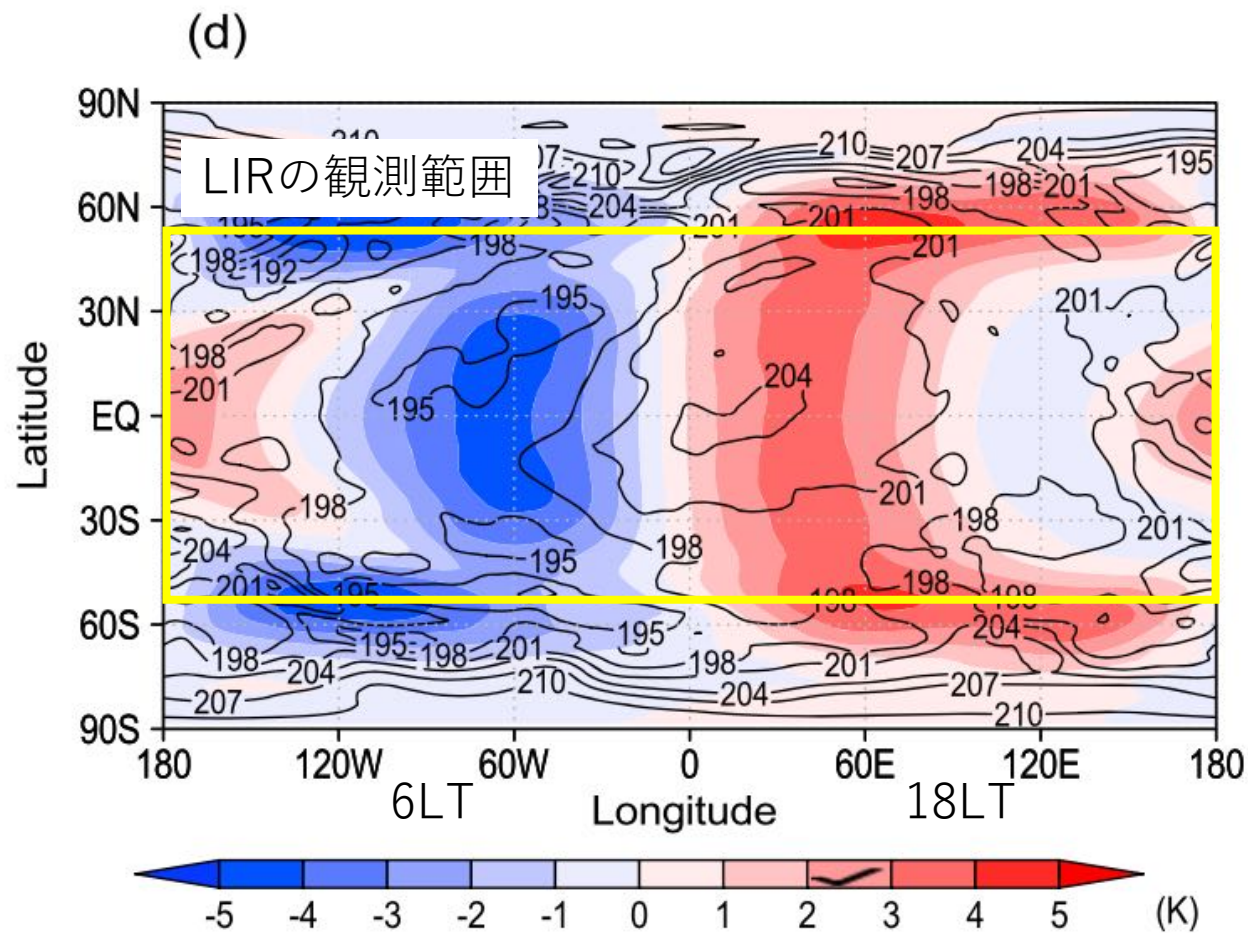
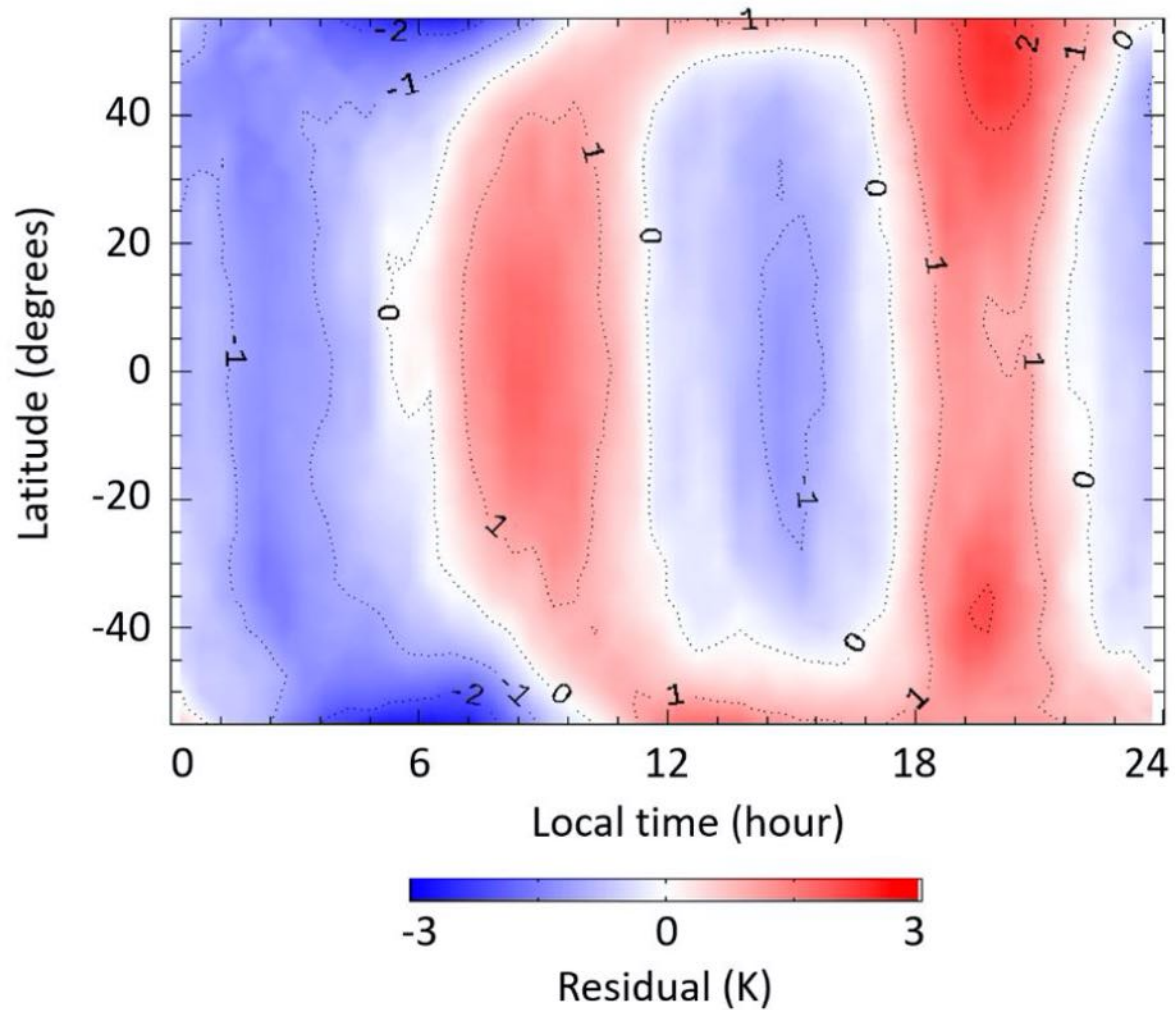
# 鉛直伝播 (赤道上)



- 一日潮・半日潮とも高度 60–70 km から上下に伝播し、下方伝播した波は地面にまで到達する。
- 下層での鉛直波長はそれぞれ 10–15 km, 20–40 km 程度。(東西風速や大気安定度によって大きく変化する)
- このような構造は線型モデルによる研究結果 (Pechmann and Ingersoll, 1984; Takagi and Matsuda, 2005, 2006) と整合的。
- 一日潮は 50–70 km で夜昼間対流的な構造を示す。ただし、線型モデルで得られるような鉛直波長の短い一日潮も励起されている可能性がある。(平均操作で見えなくなっている?)

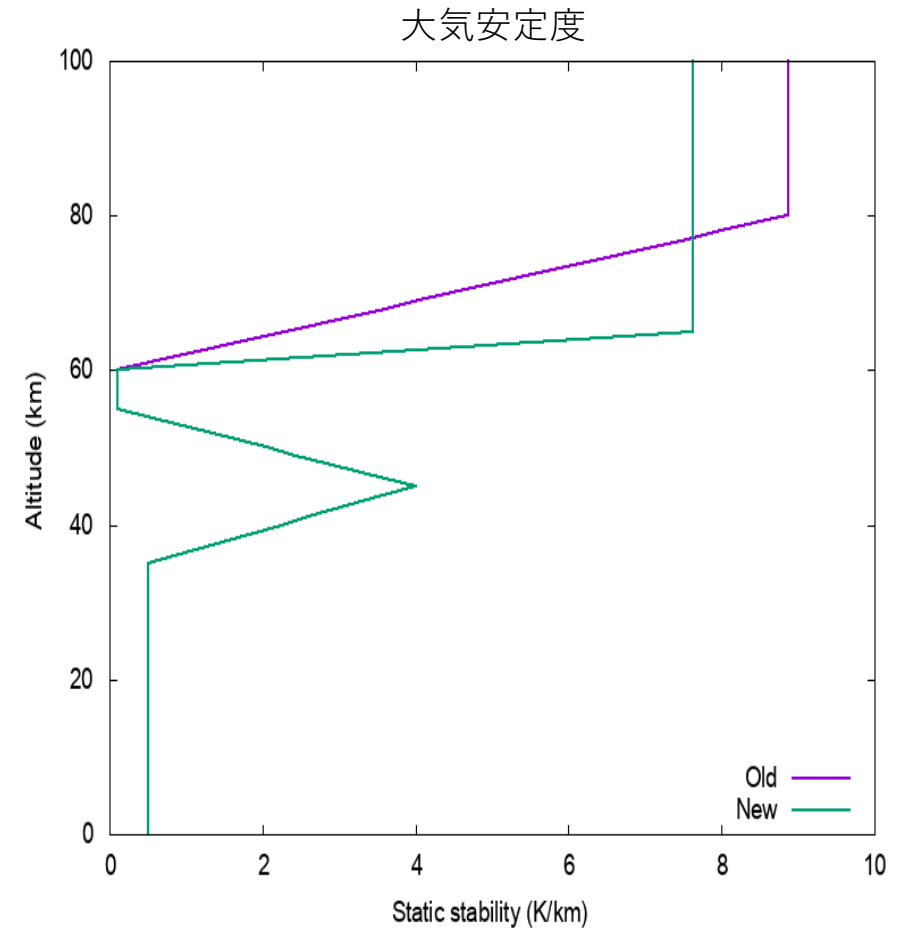
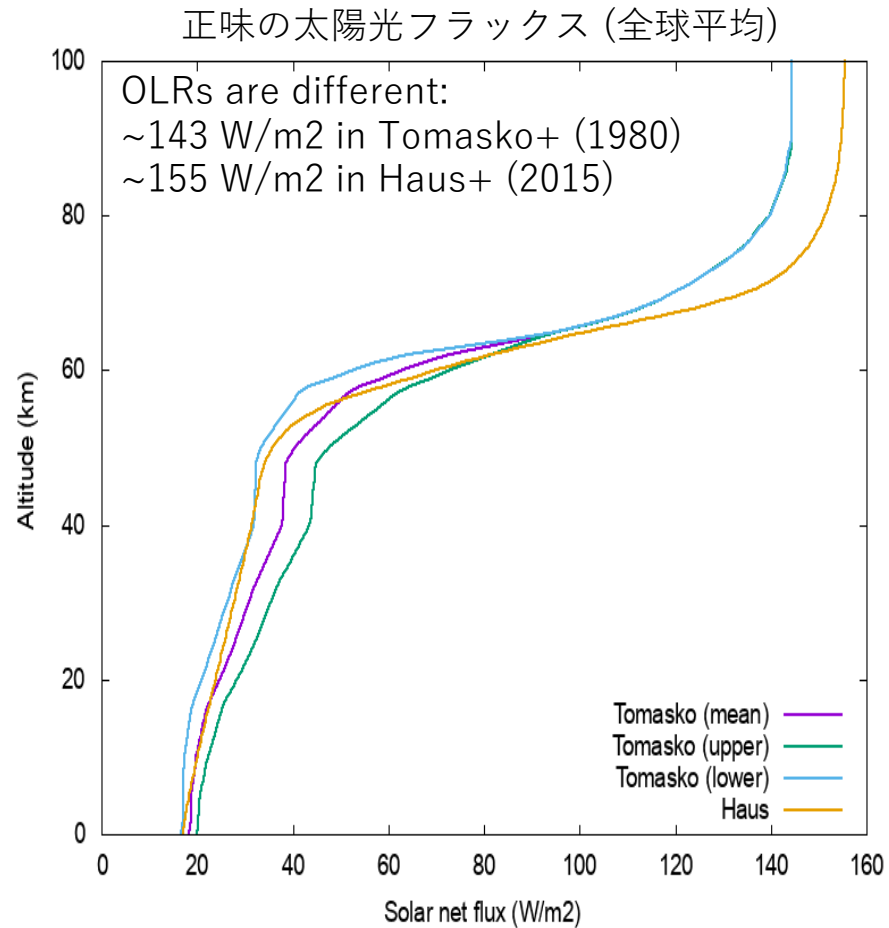
# LIRとの比較

Kouyama+ (2019)



- LIRに比べて下流側に90° (6LT) ほどずれている
- 形は似ているが位相があっていない

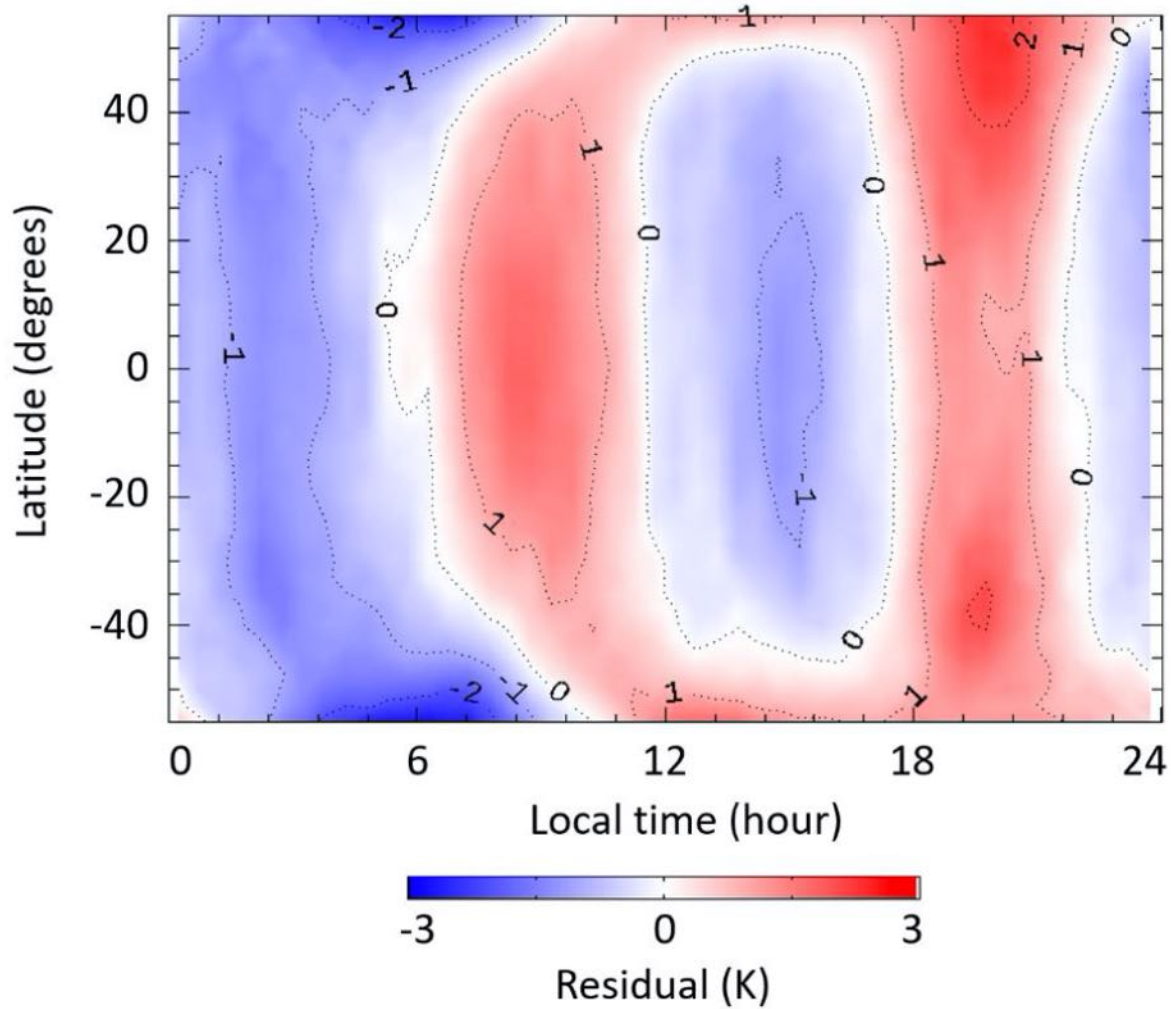
# 太陽加熱と大気安定度を変更



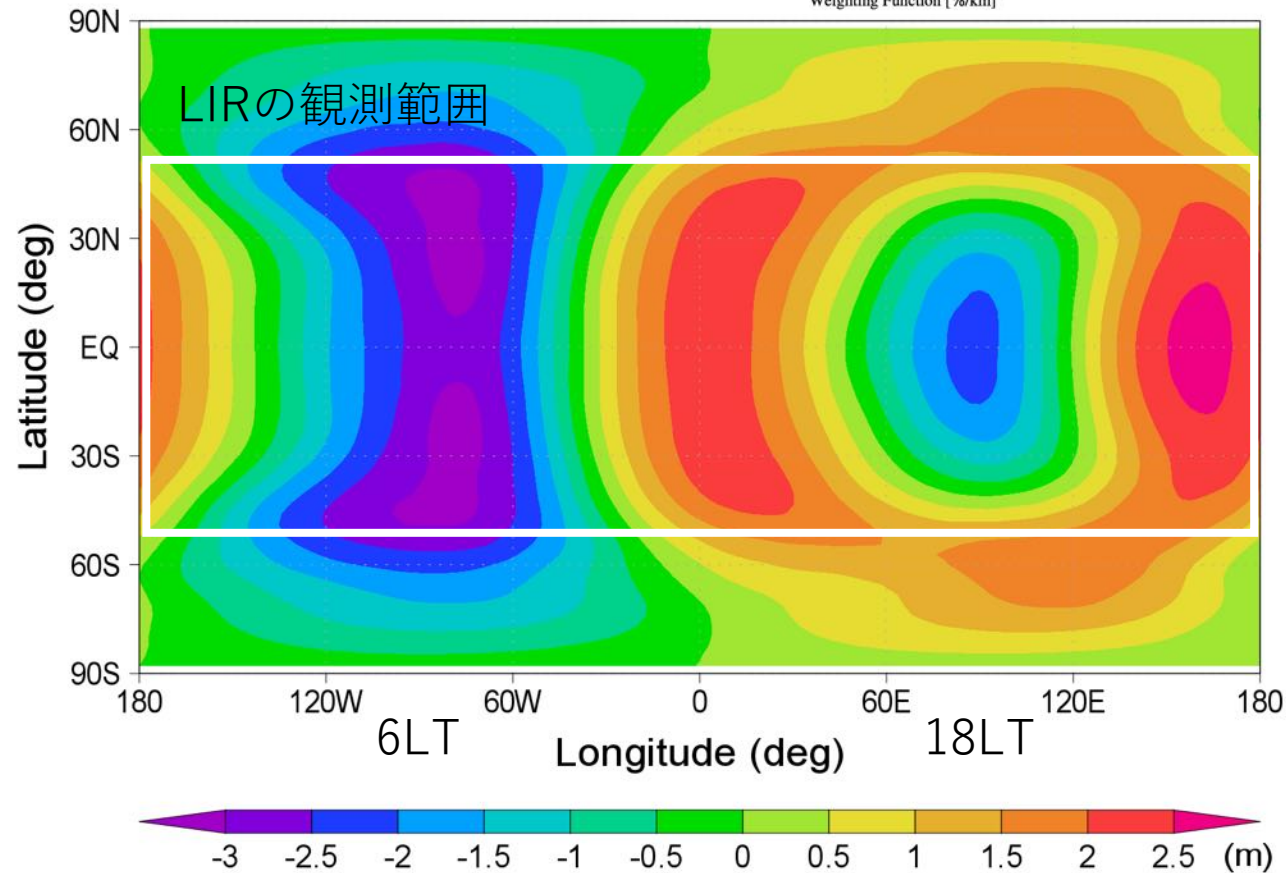
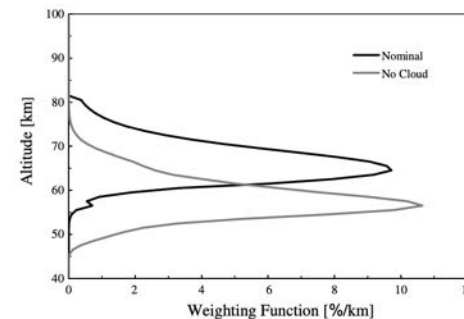


# LIRとの比較

Kouyama+ (2019)



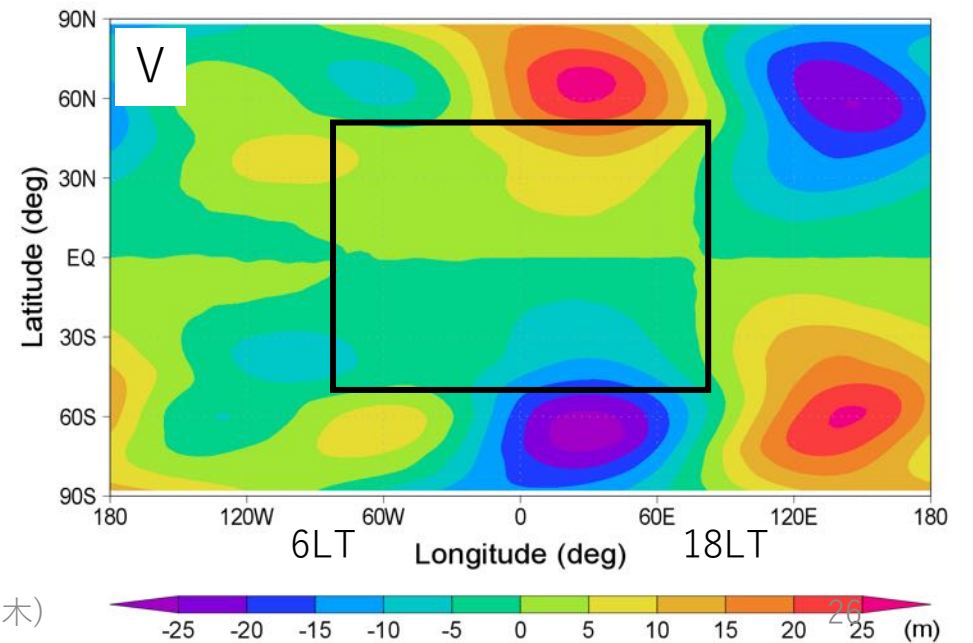
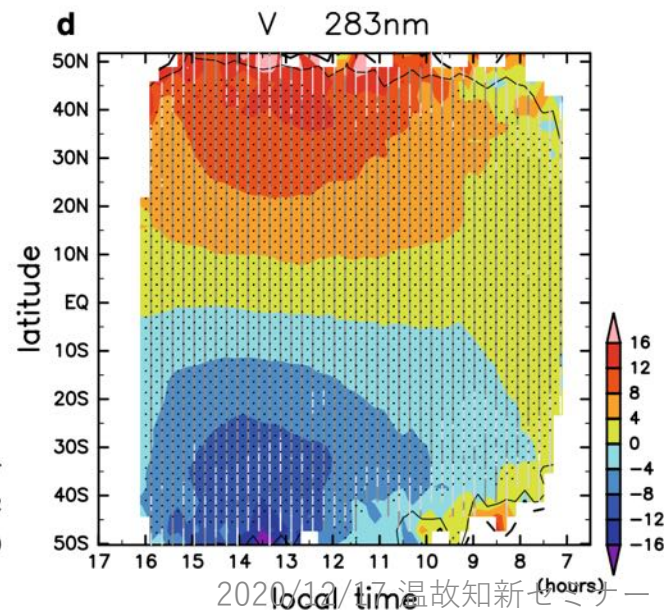
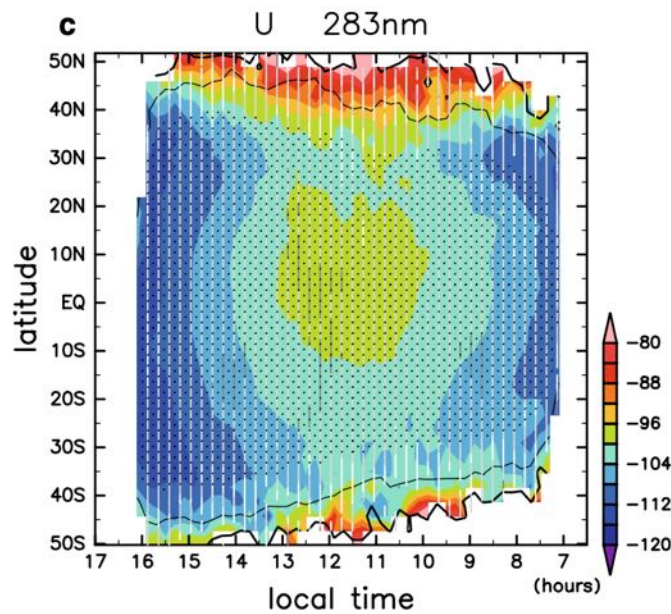
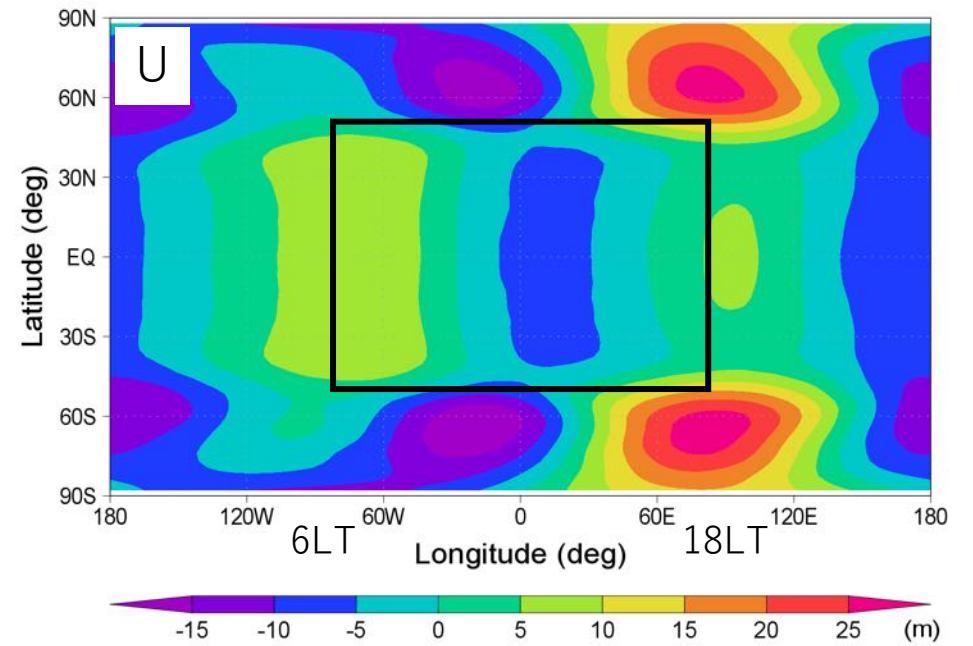
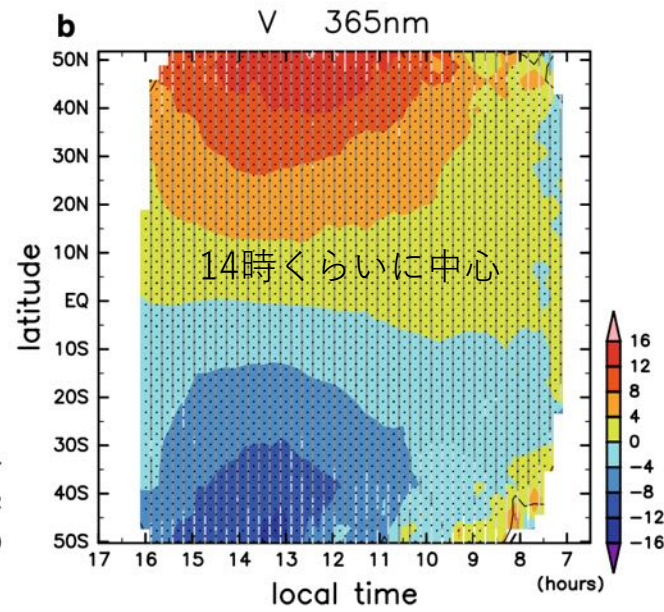
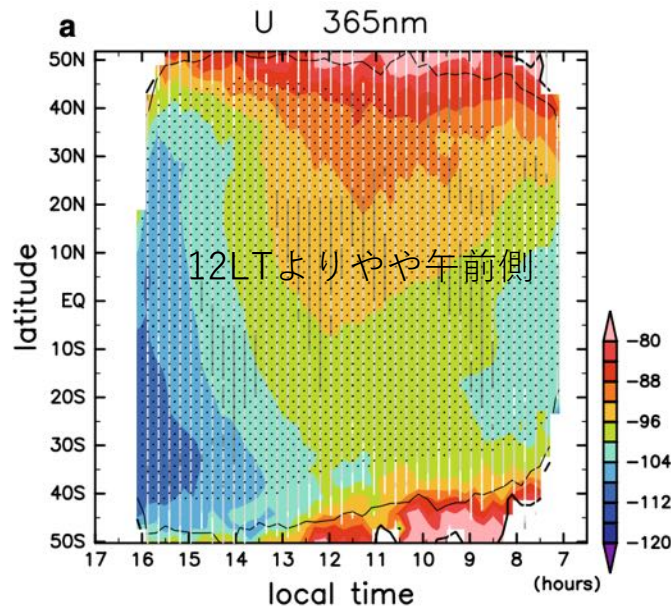
Taguchi+ (2007) の  
荷重関数を考慮



- LIRに比べて下流側に30° (2LT) ほどずれている
- 原因は・・・

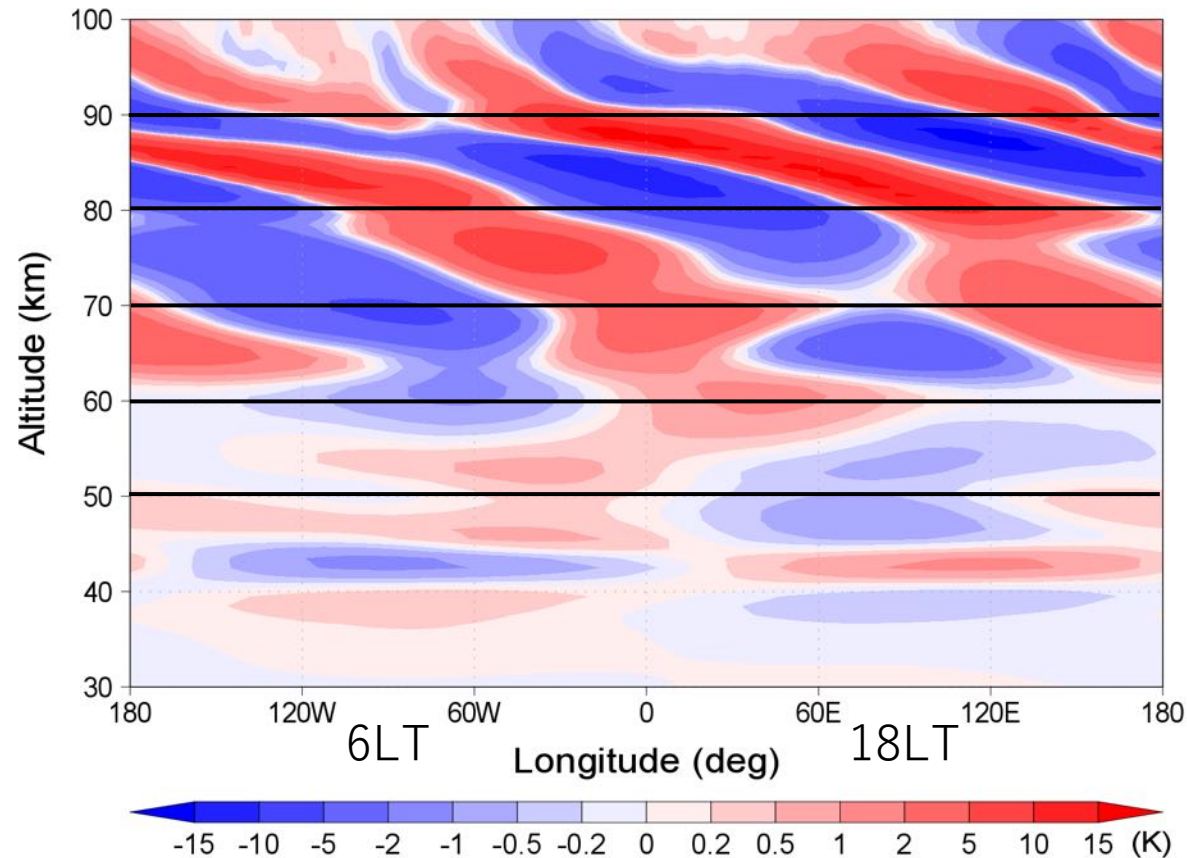
# あかつきUVIとの比較 (Horinouchi+, 2018)

東西反転に注意



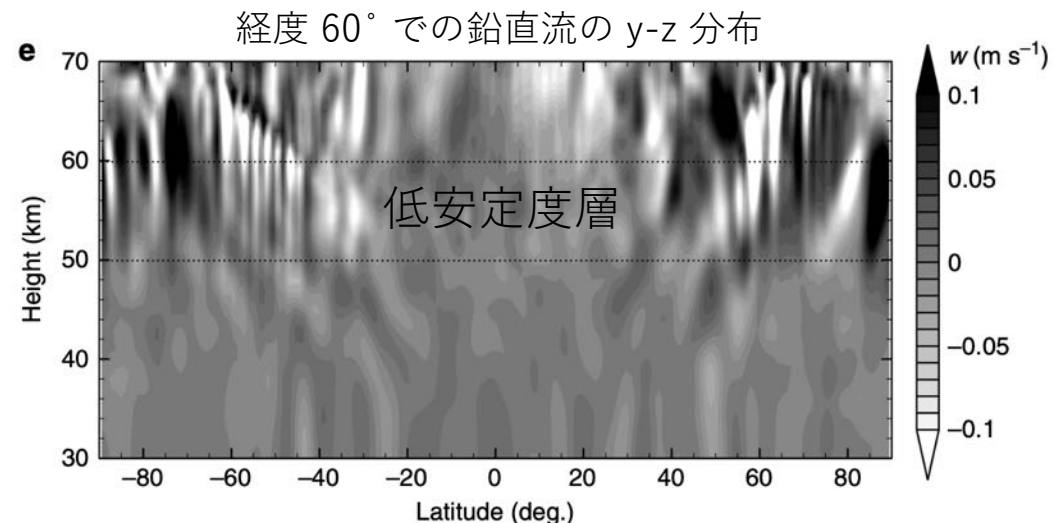
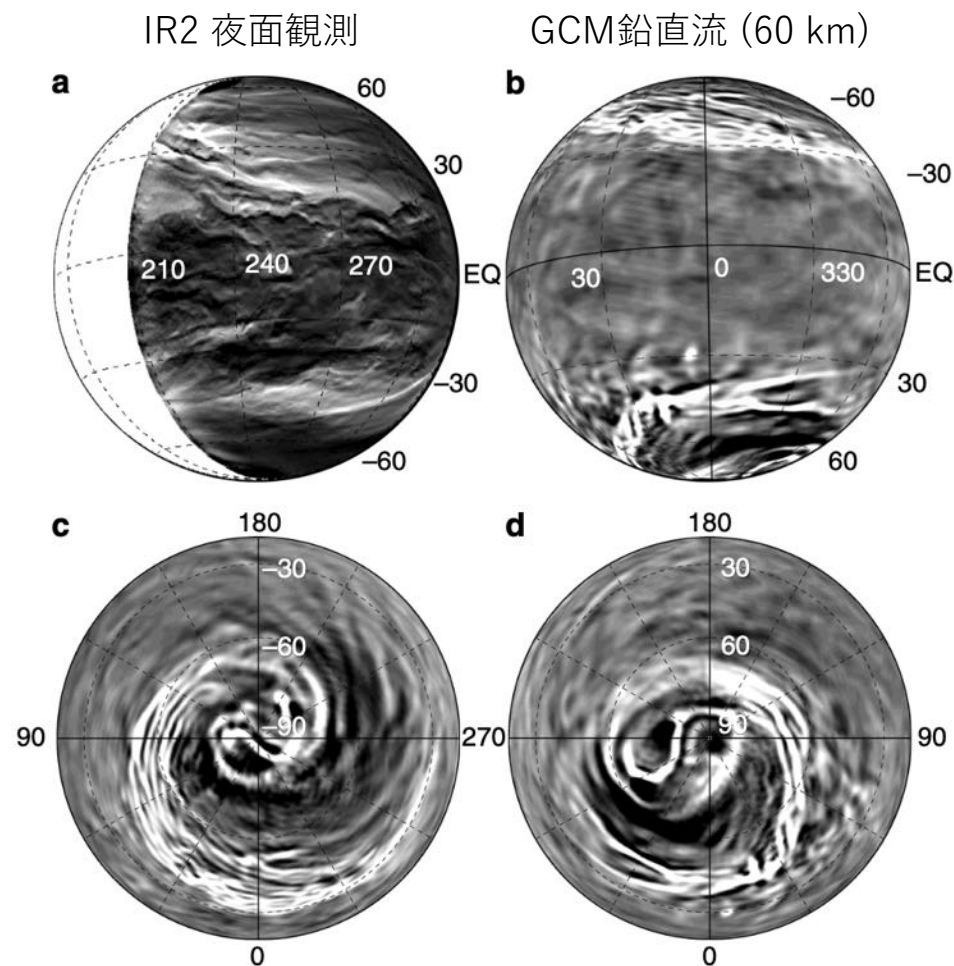
# あかつき電波掩蔽との比較

AFES-Venus 熱潮汐成分



- 70 km 以上は東西方向の位相を含め、よく似ている。
- 70 km 以下は 2-4 LT 程度の位相のズレがある。ズレの方向は LIR の場合と同傾向。
- 鉛直伝播の様子が電波掩蔽の結果とよくあっていることを考慮すると、位相のずれは熱潮汐波の上下伝播が切り替わる高度 (60-65 km) での位相のずれを反映している？
- 熱力学バランス:  $U \frac{dT'}{dx} + \Gamma w' = Q$
- 左辺の2項はどちらも20%程度の誤差を含みそう。
- 熱潮汐波の位相をあわせるにはかなりの fine tuning が必要。

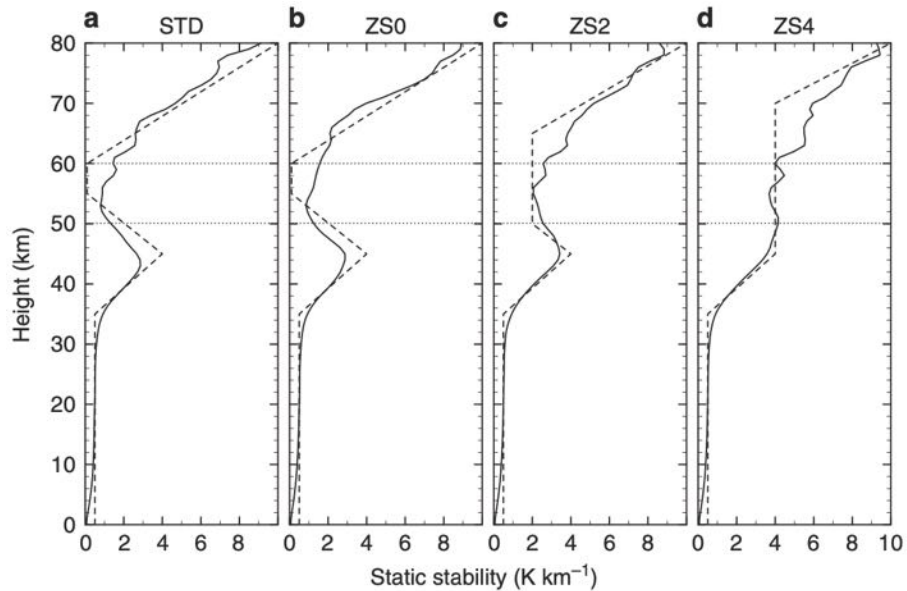
# 惑星規模ストリーク構造



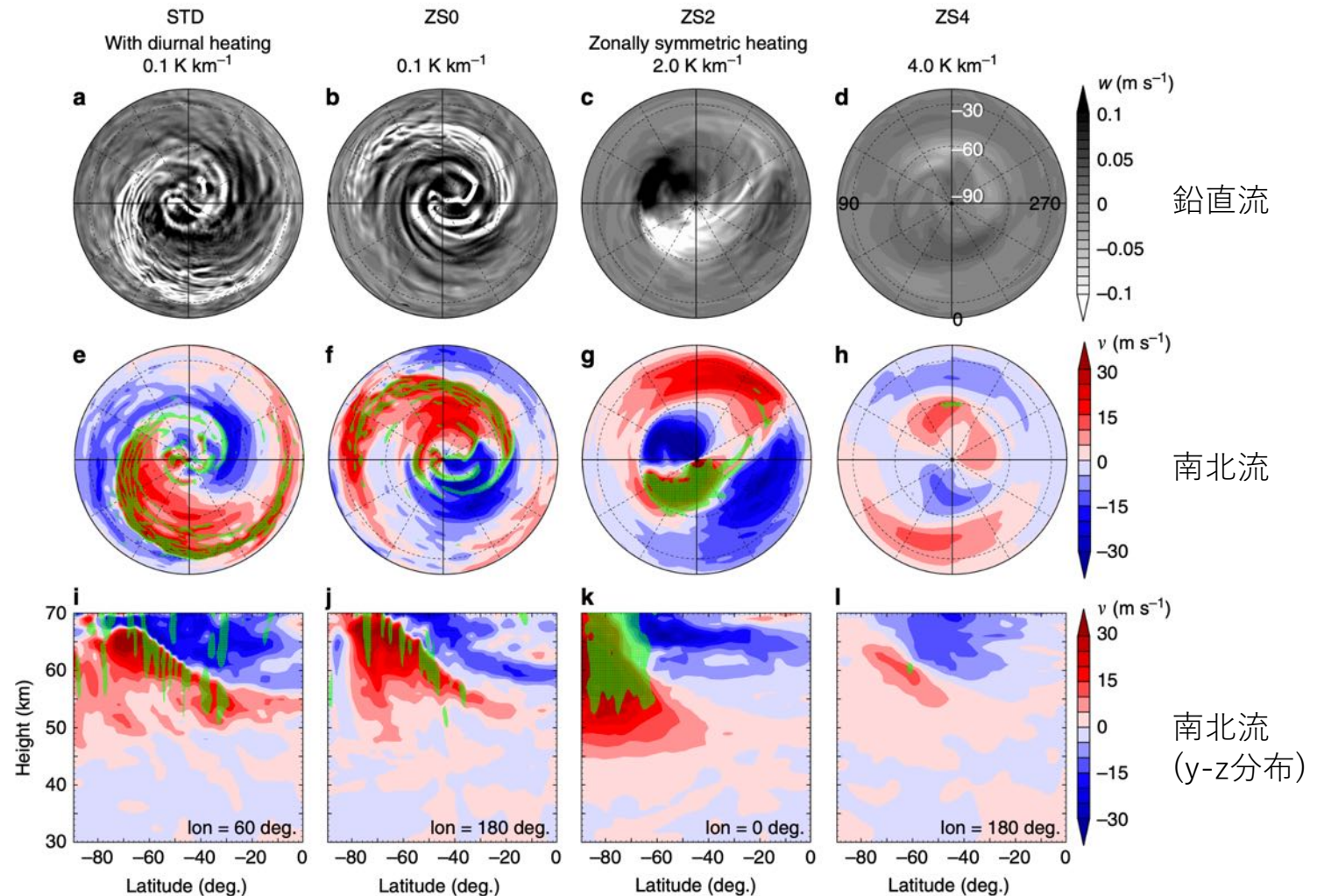
- あかつき IR2 カメラによる夜面観測により，雲底高度 (49–57 km) に惑星規模のストリーク構造が発見された。
- 下層大気からの熱放射を観測しており，明るい = 雲薄い，暗い = 雲厚い，を意味する。
- AFES-Venus の高度 60 km での鉛直流にも似たようなストリーク構造が再現されていた。

# 大気安定度に対する依存性

大気安定度 (破線は初期値)



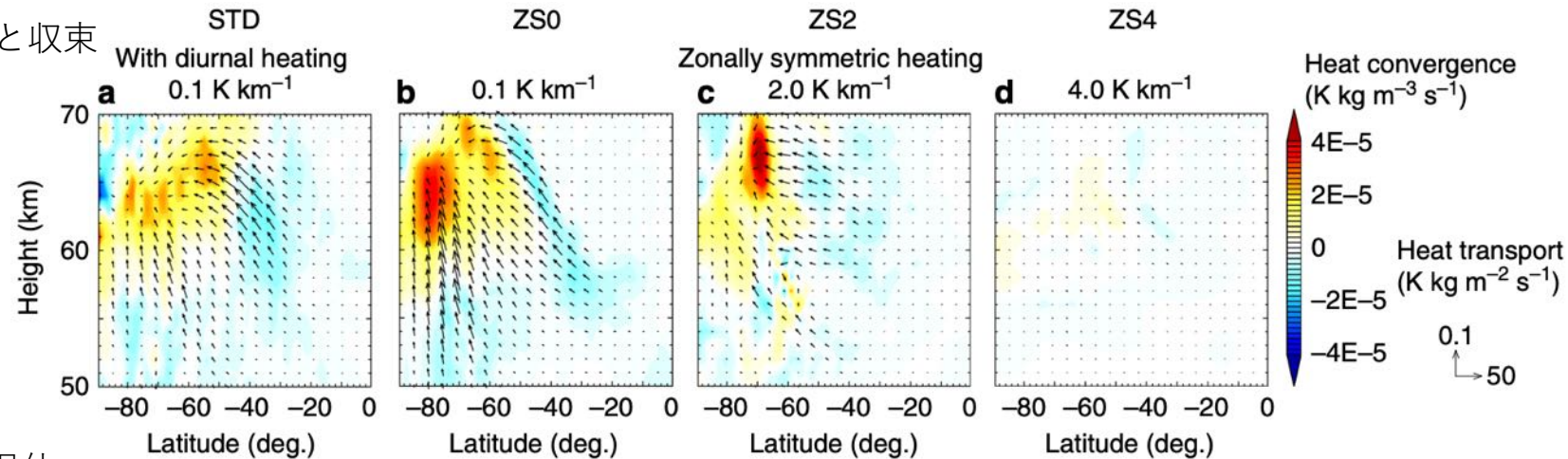
- 初期およびニュートン冷却で緩和させる温度場の大気安定度を変化させて比較実験を行った。
- 大気安定度が高い場合、ストリーク構造がほぼ消失。



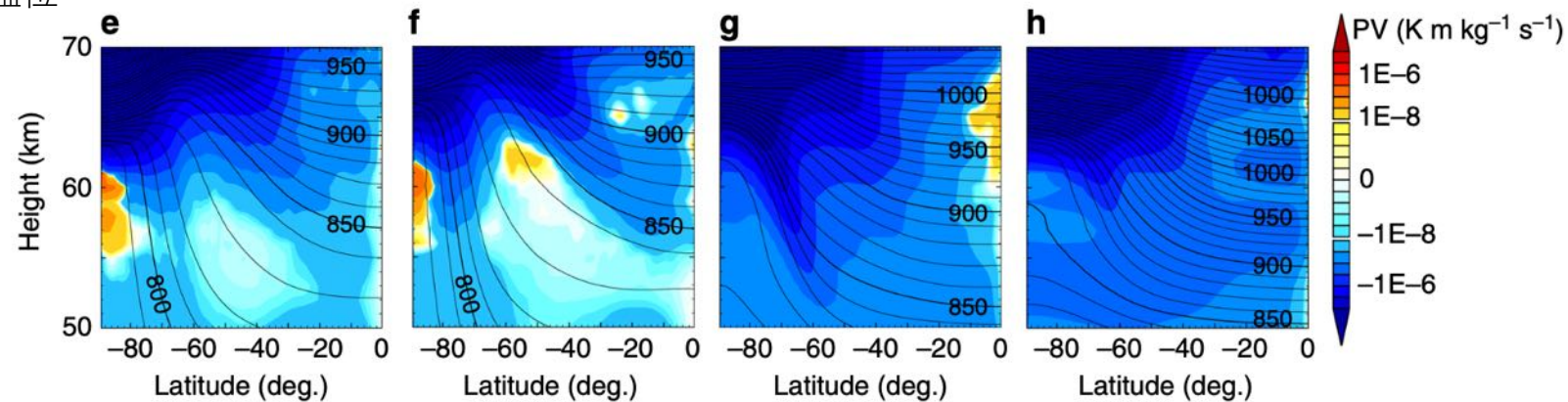
緑のハッチは強い下降流の領域を示す

# 大気安定度の影響：熱輸送とPV

熱輸送と収束



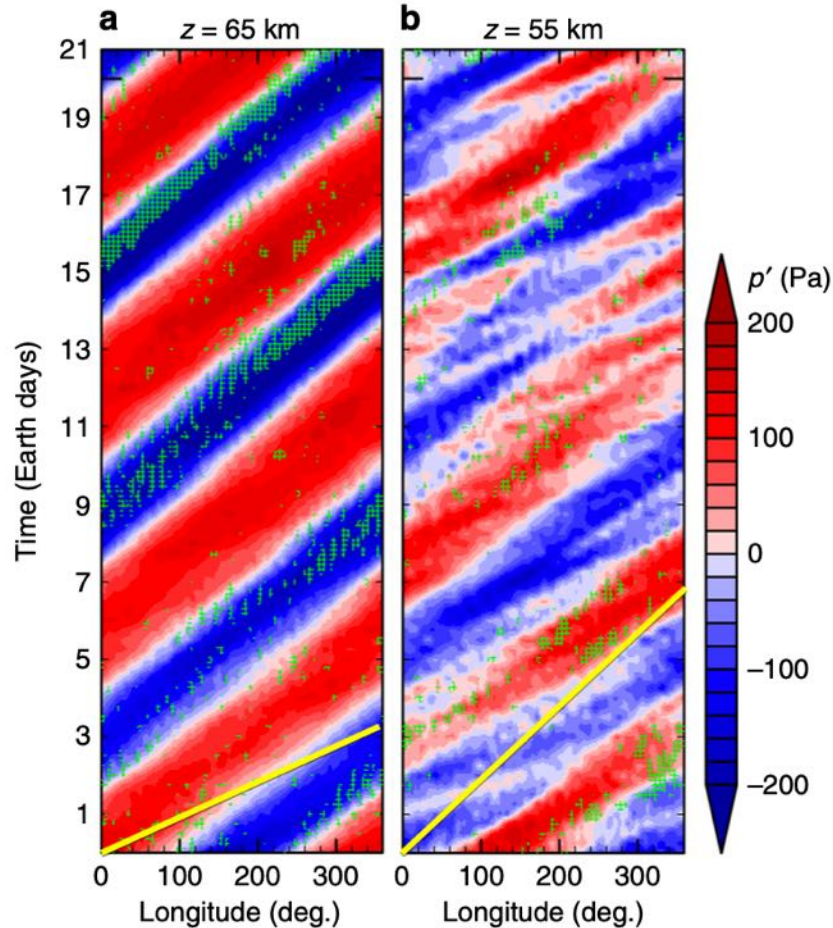
PVと温位



- 大きな極向き熱輸送が存在は、傾圧不安定の存在を示唆している。
- 大気安定度が大きい場合は、熱輸送の鉛直成分が弱くなる (ZS2)。ZS4 の場合には水平成分もほぼ完全に消失する。
- 中緯度の 50–60 km, 極域の 55–60 km に  $PV > 0$  が存在。大気安定度が低いことだけでなく、渦の水平成分も寄与している。
- 大気安定度の低いケースでは、中緯度および極域で傾圧不安定が起こる可能性がある。

# 擾乱の位相速度と平均流

ZS0 で得られた圧力偏差 (35°S)



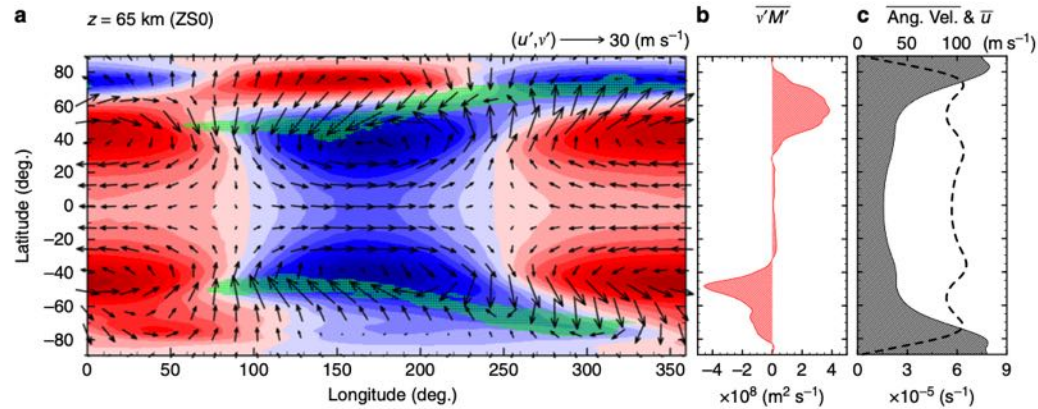
- 高度 65 km
  - 東西波数1の構造が卓越している。
  - 周期は5.8日 (62.1 m/s)
  - 平均東西流の周期は3.3日 (109.3 m/s)
  - 擾乱は平均流に対して西進
  - 強い鉛直流の領域 (緑色のハッチ) は擾乱とともに移動。
- 高度 55 km
  - 同じ周期のシグナルが認められる。
  - 平均東西流の周期は6.8日 (53.1 m/s)
  - 擾乱は平均流に対して東進

# 水平構造の南北対称性

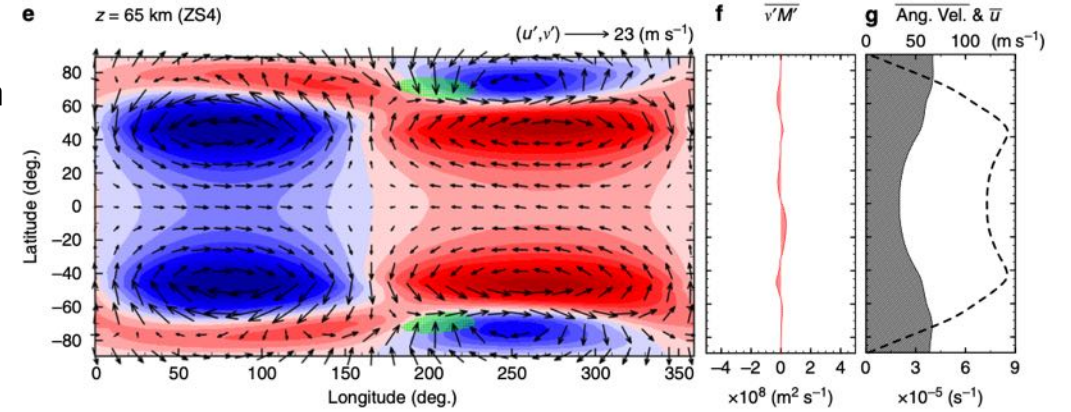
65 km, 35°S の  $p'$  のシグナルを使ってコンポジット平均

色:  $p'$ , ベクトル:  $(u', v')$ , 緑: 下降流

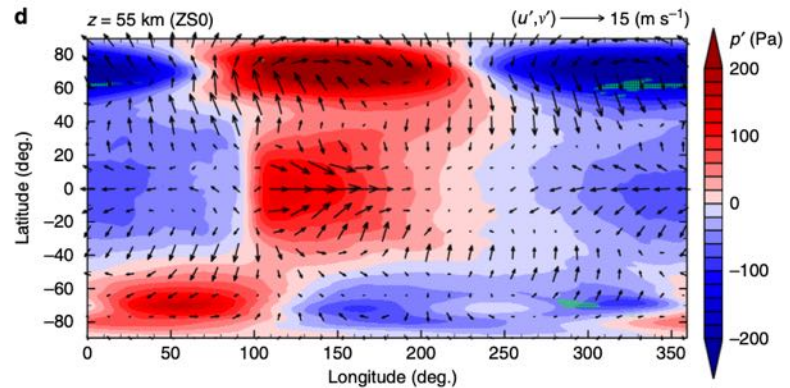
ZS0  
65 km



ZS4  
65 km



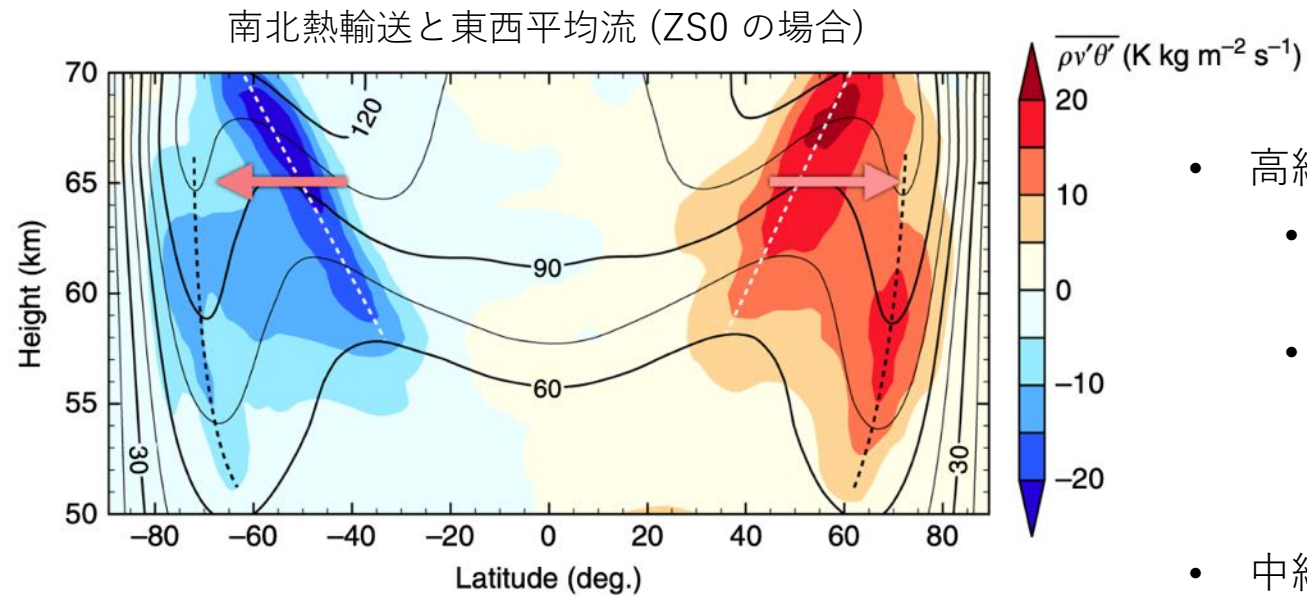
ZS0  
55 km



- ZS0 の場合
  - 65 km: 東西波数1のロスビー波に似ている。
  - 55 km: 低緯度の構造はケルビン波に似ている。
  - 両者による不安定の可能性がある。
  - その結果として南北対称性が生じている。
- ストリーク構造の成因
  - ロスビー波が南北に傾き、その極側で、水平風の収束によって強い下降流 (ストリーク構造) が作られる。
  - ZS4 の場合, ロスビー波は現れるが, 気圧偏差が南北方向に傾かず, 弱い下降流しか作られない。



# 傾圧不安定について



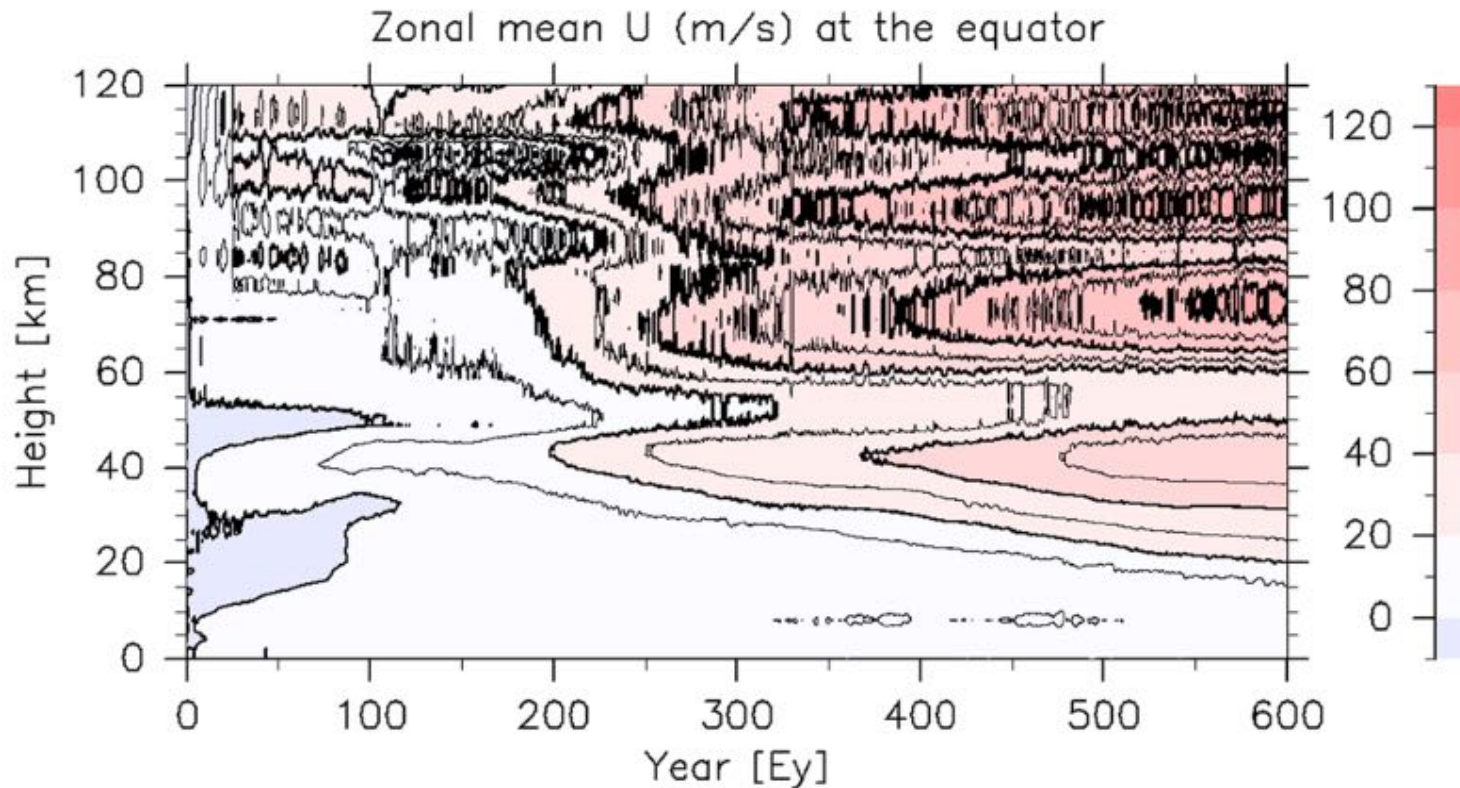
- 極向き熱輸送が卓越
- 中緯度 (白点線) と高緯度 (黒点線) に2つの軸が存在し、どちらも傾圧不安定を示唆

- 高緯度の傾圧不安定
  - 高緯度側の熱輸送は高緯度ジェットに沿っている。
  - 地球対流圏の中緯度ジェットと同様、傾圧不安定に伴う擾乱が高緯度ジェットの形成に寄与している可能性がある。さらに、高緯度ジェットはロスビー波の位相を傾かせる可能性がある。
- 中緯度の傾圧不安定
  - 中緯度の傾圧擾乱の役割は明らかではない。
  - 中緯度の 65 km 付近には顕著な極向き運動量輸送が存在している (図中の矢印)。

# 子午面循環メカニズムによるSR生成

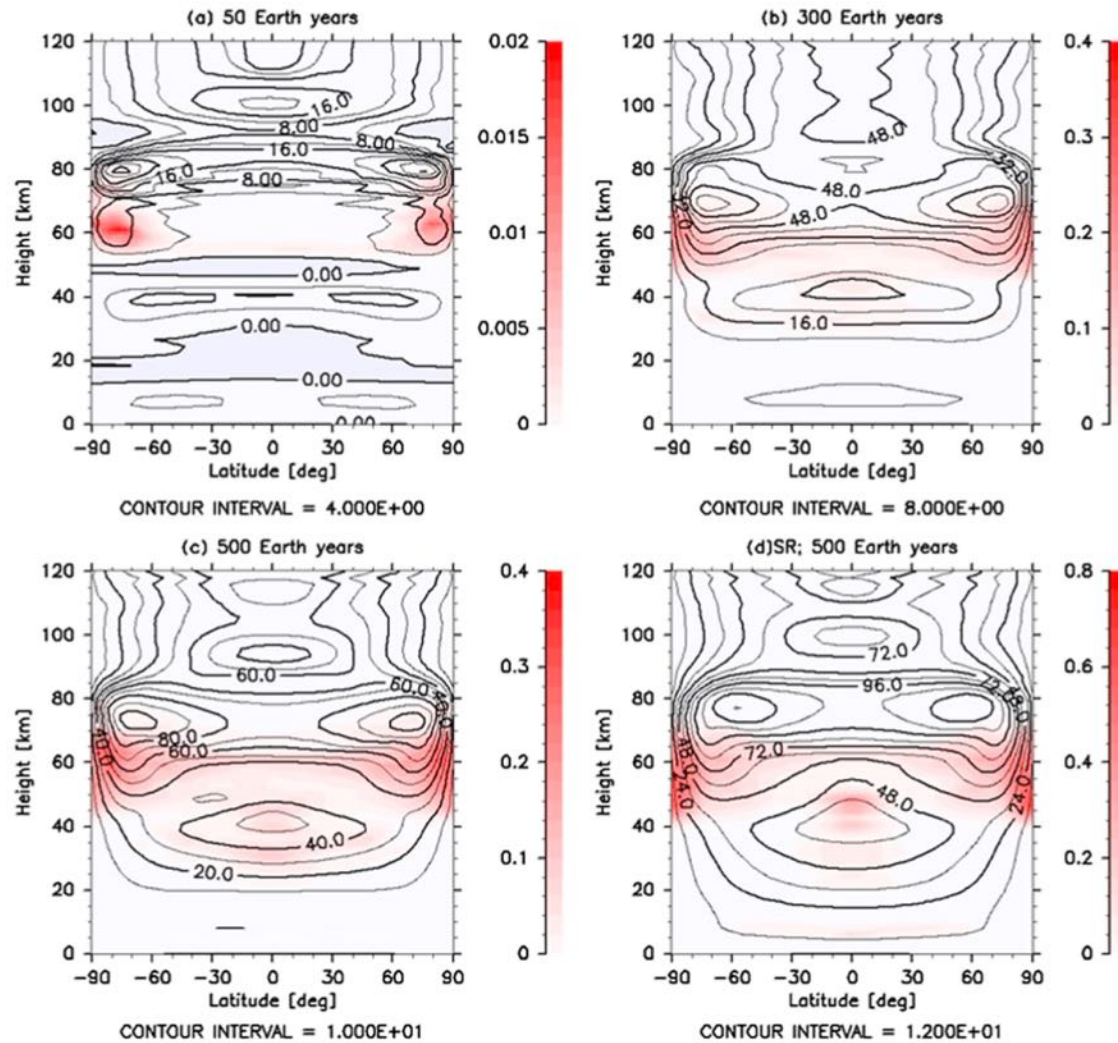
- 太陽加熱の東西平均成分のみを考慮する。(強度は現実的)
- 静止状態を初期値にして長時間 (500地球年以上) 積分した結果, 子午面循環メカニズムによって 100 m/s を超えるスーパーローテーションが形成された。
- ただし, 鉛直渦粘性は  $0.02 \text{ m}^2/\text{s}$  以下である必要がある。
- 低安定度層も順圧/傾圧不安定の運動量輸送によって高緯度ジェットを伴うスーパーローテーションに強く影響する。

# 東西平均風の時間変化 (赤道)



- 計算の条件
  - 解像度: T42L60
  - 鉛直渦粘性:  $0.0015 \text{ m}^2/\text{s}$
  - 水平超粘性: 0.1 地球日
  - 初期値: 静止状態
- 100地球年目までは 10–30 km と 50 km 付近に負の平均流が存在するが、やがて消失する。
- 負の平均流がなくなると、次第に SR が形成される。
- 500地球年以降になると 100 m/s を超える SR が維持される。

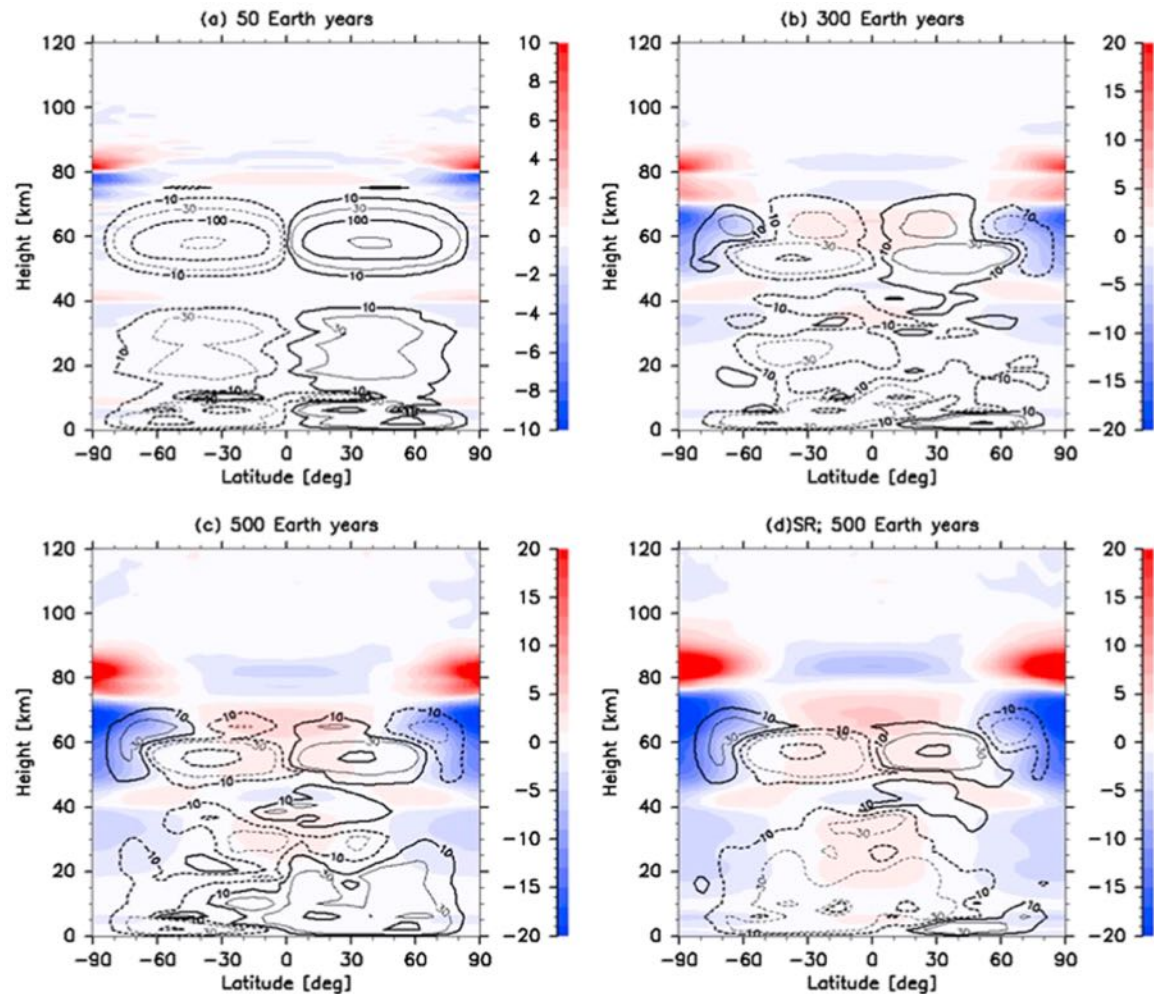
# 東西平均流と擾乱活動の変化



- 100地球年目まで上層に高緯度ジェットを伴う弱いSRが存在し、雲層以下には低緯度から高緯度まで負の平均流が存在している。
- 負の平均流は100年程度で消失し、それ以降SRが成長する。
- 500年程度で100 m/sを超えるSRが維持されるようになる。
- 得られた準定常状態は、理想化されたスーパーローテーションを初期状態とした場合とほぼ一致しており、このパラメータでは多重平衡状態は存在しないようである。

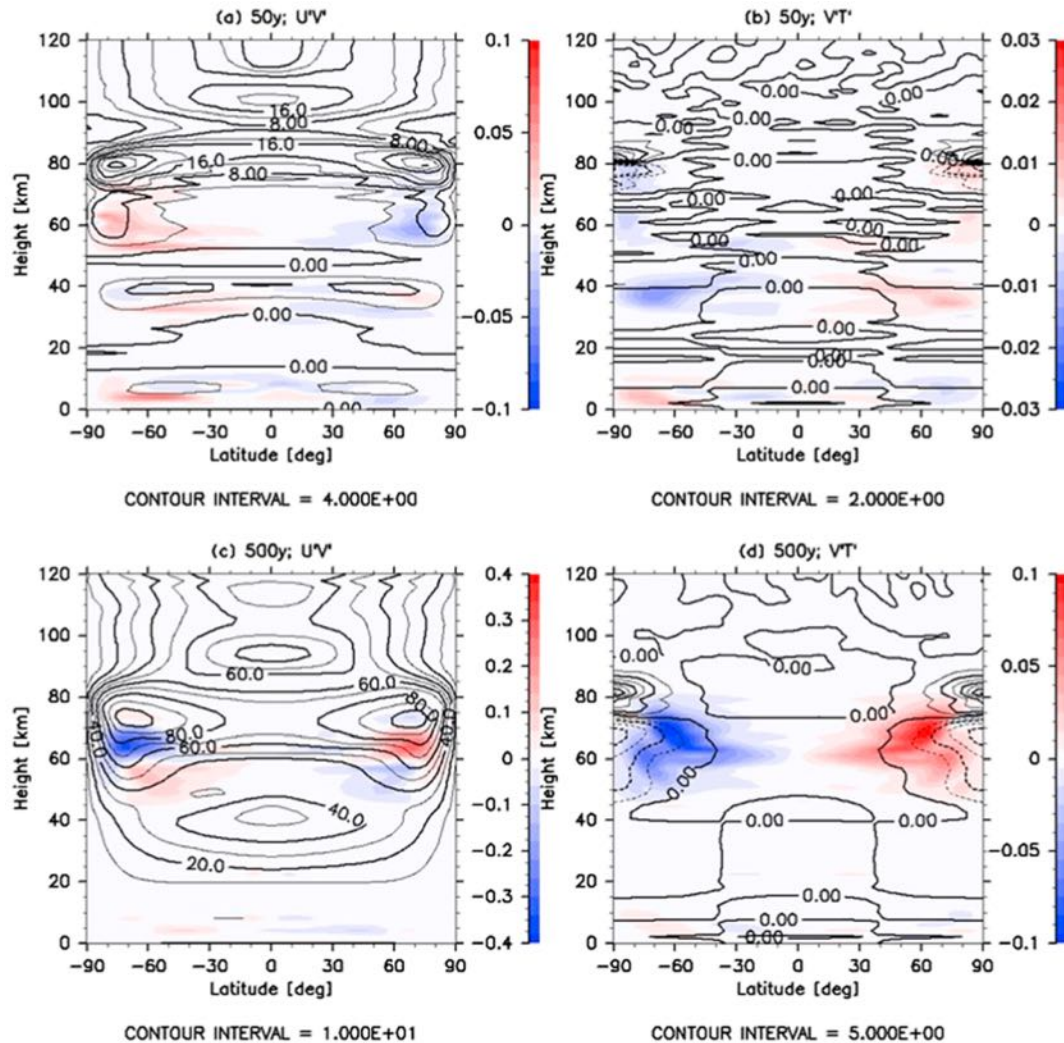
# 平均子午面循環の変化

質量流線関数と温度偏差



- 最初、子午面循環は上下2セルに分かれている。上側の子午面循環によって上層(50–70 km)に高緯度ジェットを伴う弱いSRが作られる。
- 地面付近にも子午面循環が作られ、負の平均流に地面摩擦が作用することにより、角運動量が下層大気に蓄積する。
- ある程度下層大気に角運動量が蓄積すると、子午面循環が合体し、0–50 kmに広がる。
- その後、上側の子午面循環を中心にSRが発達する。
- 速いSRの発達に伴って、高緯度側にフェレル循環が現れる。

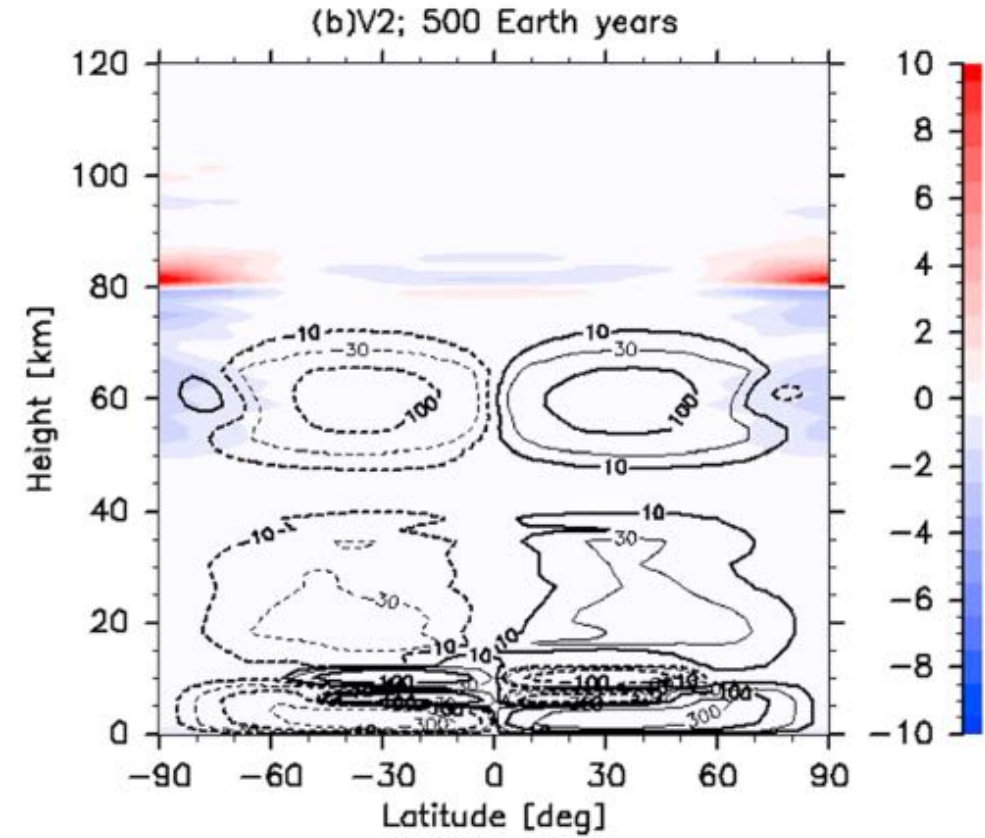
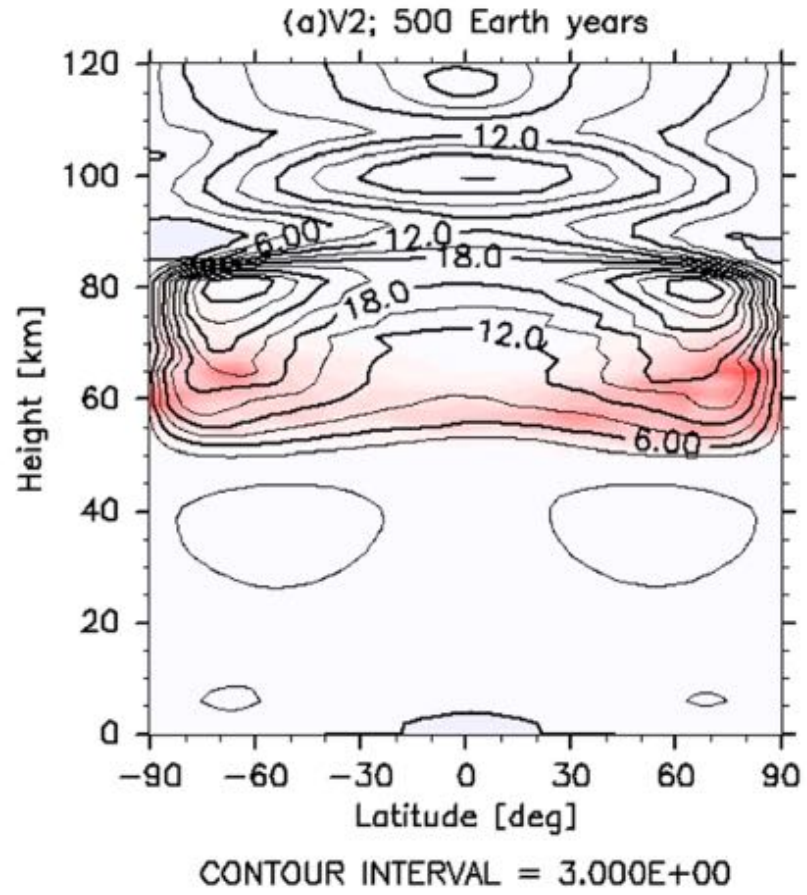
# 擾乱による運動量と熱の輸送



- 50年目の運動量輸送は赤道向きで、上側の子午面循環では、子午面循環メカニズムが作動すると考えられる。熱輸送はほぼ極向きである。
- 準定常状態（500年目）になると 45–55 km に運動量の赤道向き輸送がみられるものの、運動量・熱ともに極向き輸送である。これは傾圧不安定波によるものと考えられる。
- 高緯度ジェットは運動量フラックスの収束によって維持される。この構造は従来の結果とも整合的である。(Lebonnois et al., 2016; Sugimoto et al., 2014b)

# 鉛直渦粘性 $0.15 \text{ m}^2/\text{s}$ の場合

標準ケースの初期段階に似ているが、この状態が3000年以上維持され、速いSRが形成されない。

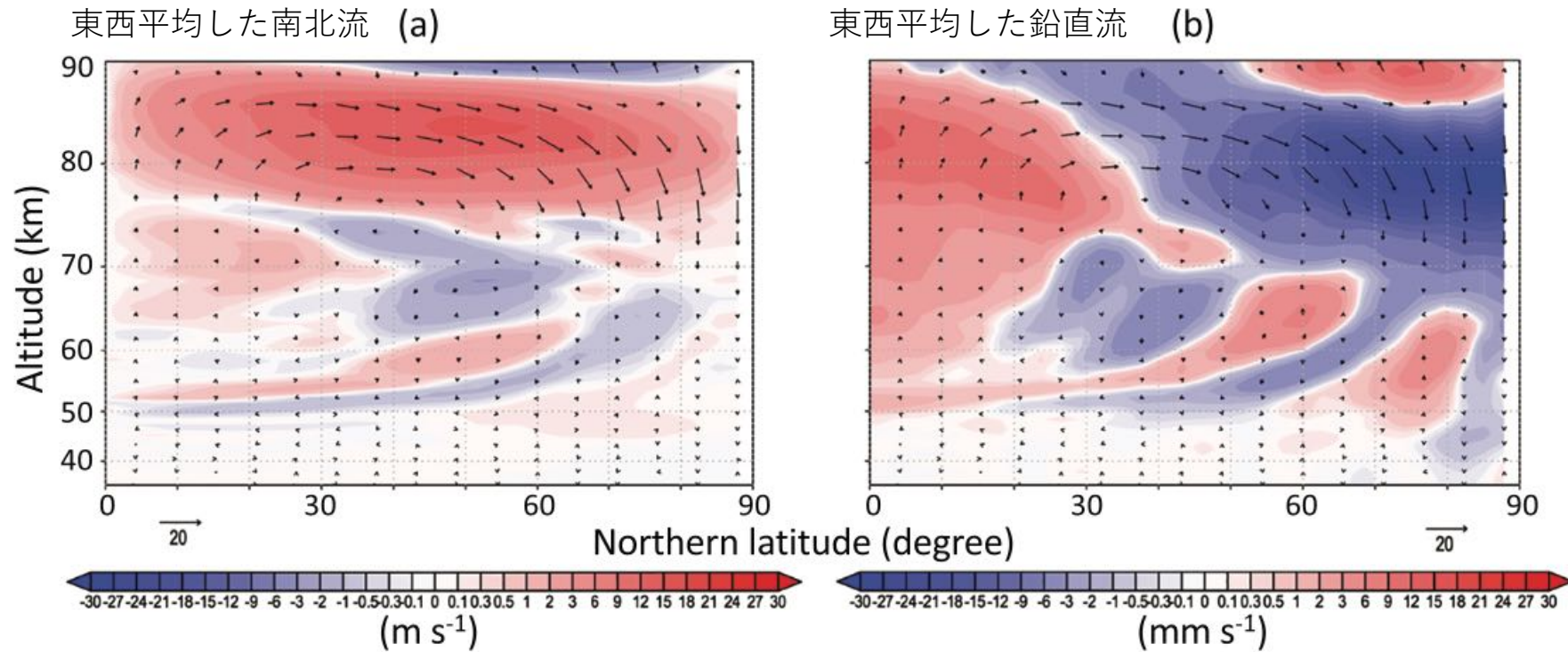


# 雲分布の再現

- 雲モデルの概要
  - 硫酸蒸気は昼面の 60–64 km で作られ, 35 km 以下で熱分解される。
  - 水蒸気は下層 (30 km 以下は 30 ppmv で固定) から運ばれる。
  - 硫酸液滴の濃度は 96% で固定。
  - 硫酸蒸気と水蒸気がともに飽和した場合にのみ雲が作られる。
  - モード1・2粒子を想定して落下速度を評価。
- GCMの設定
  - 解像度: T42L120
  - 初期条件: 雲なし, 硫酸蒸気なし, 水蒸気は飽和蒸気圧で与える。
  - 理想化したスーパーローテーション状態から40地球年積分。

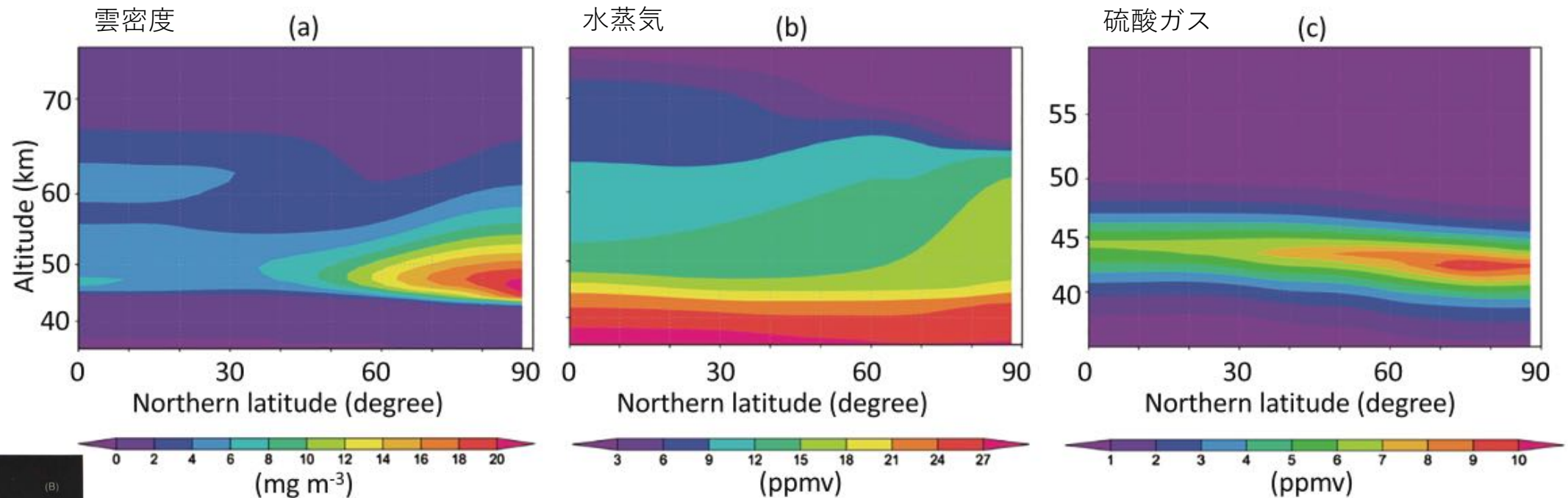


# 平均子午面循環の構造



- 高度 70 km より上では赤道から極に延びるハドレー循環が卓越。
- 50–70 km では複雑な構造。中緯度にフェレル循環？
- これまでの雲モデルはこのような循環は考慮されていなかった。

# 東西平均した雲分布



- 極域の 43–53 km に厚い雲
- 赤道域の 47 km 付近にも弱い極大
- 中緯度で雲の厚さは最小
- 赤外觀測と矛盾しない分布

- 水蒸気が極域で増大
- 観測結果とも整合的 (Cottini et al., 2015)
- 大気安定度分布と極域の活発な擾乱活動の影響が示唆される

- 硫酸ガスは極域の 43 km 付近で最大
- 厚い雲からの落下によって形成される
- Venus Express の観測 (Oschlisniok et al., 2017) では雲底下の高緯度と低緯度に極大があり、低緯度側が再現できていない。

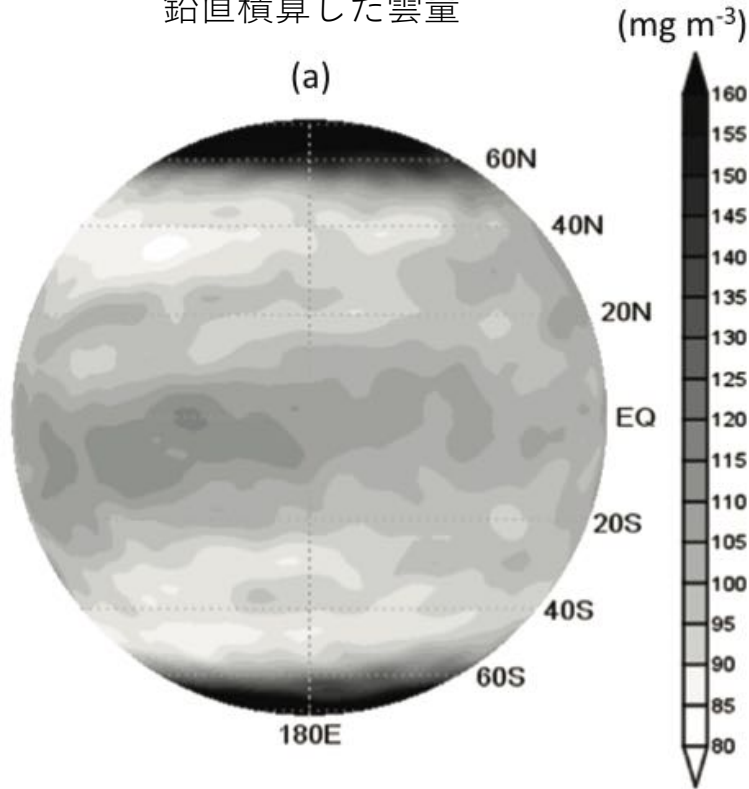


Carlson et al. (1993)

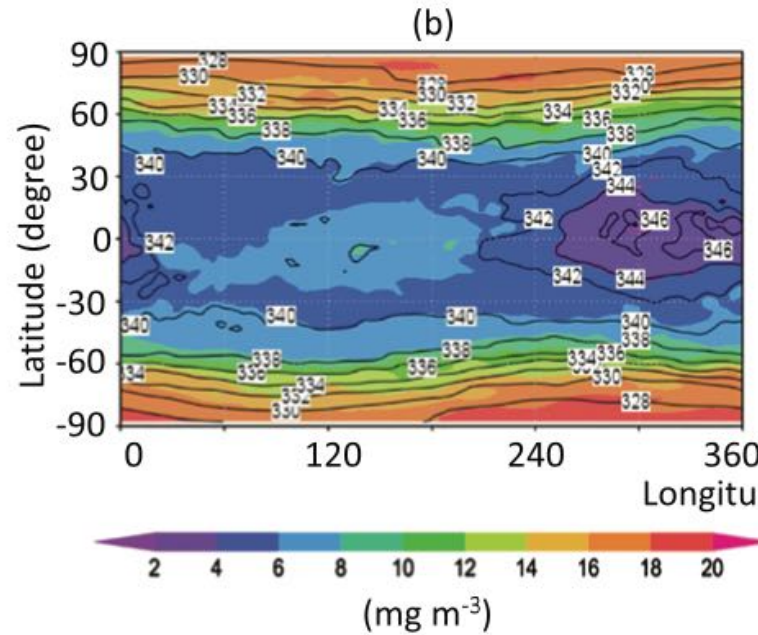
# 雲の水平構造

- 緯度 60° より低緯度側では雲量の時空間変動が大きい。
- 低緯度では波に伴うと思われる東西波数 1・2 の構造がみられる。
- このような特徴は過去の観測とも整合的 (Crisp et al., 1991)
- 雲底付近 (50 km) では東西波数 1 が卓越
  - 雲の濃淡は鉛直流ではなく温度偏差によって作られる。
  - ケルビン波に関連？
- 60 km では東西波数 1・2 が卓越。熱潮汐波も寄与？

鉛直積算した雲量



高度 50 km での雲密度



高度 60 km での雲密度

