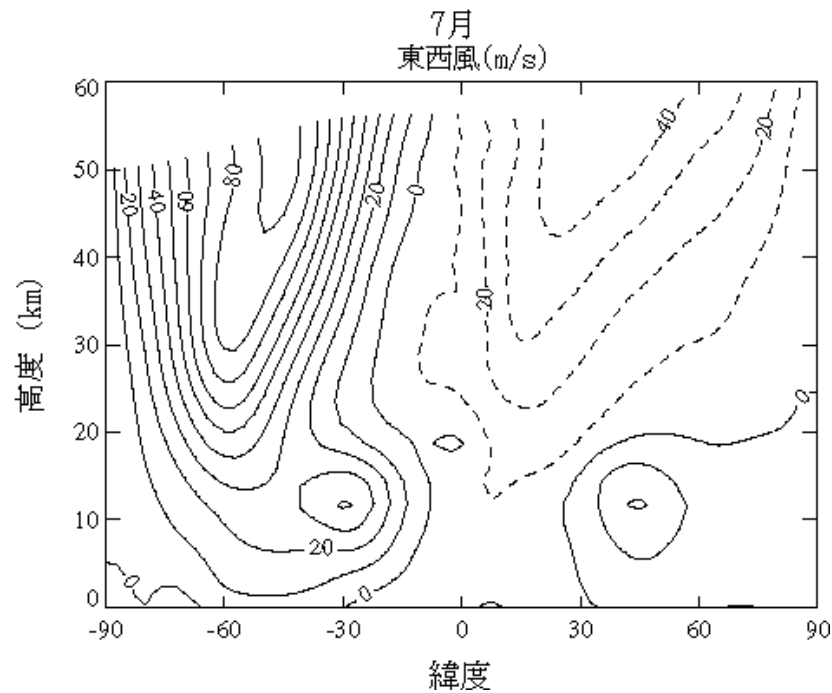
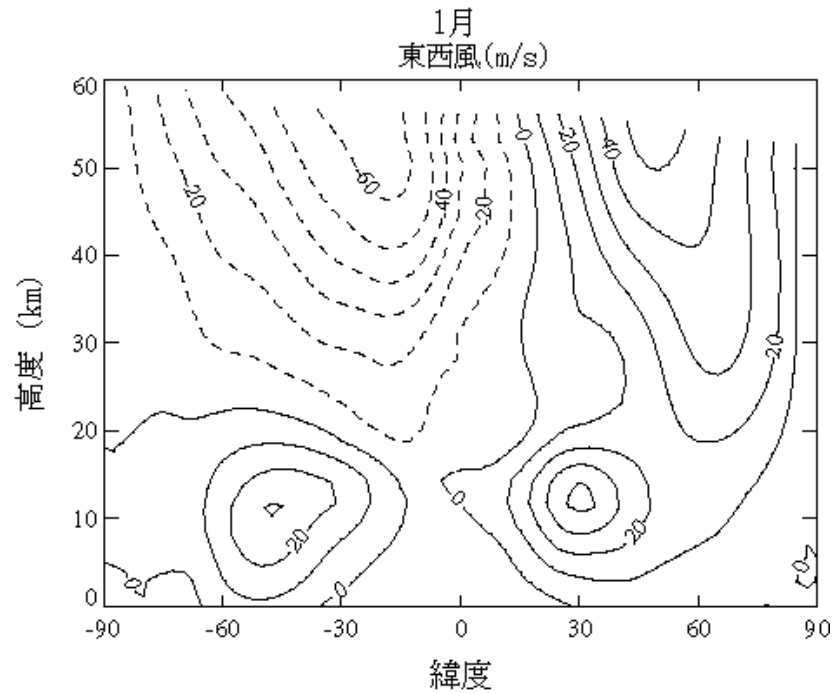


第3回

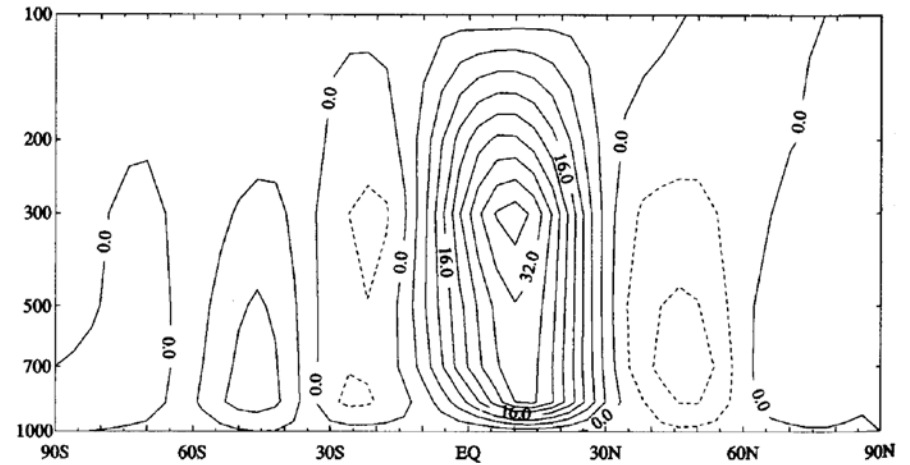
スーパーローテーション

1. 金星大気のスーパーローテーション
2. 金星とタイタン
3. 地球大気のスーパーローテーション
4. 木星大気のスーパーローテーション

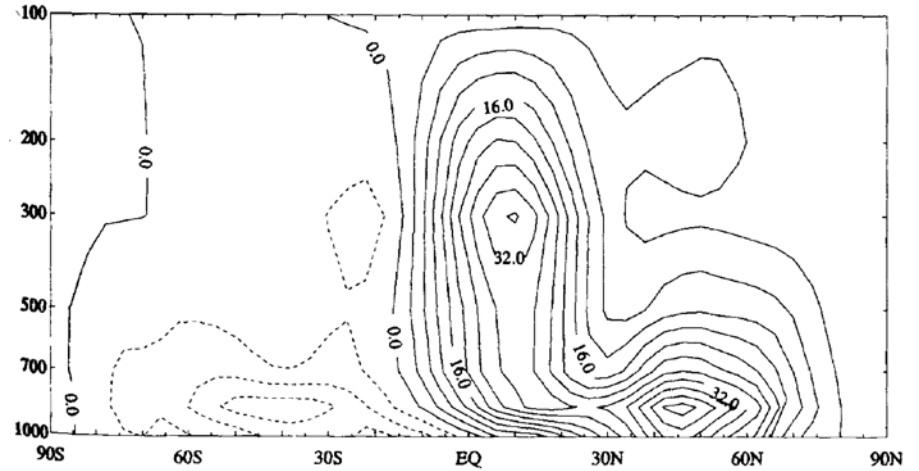
地球大気の循環



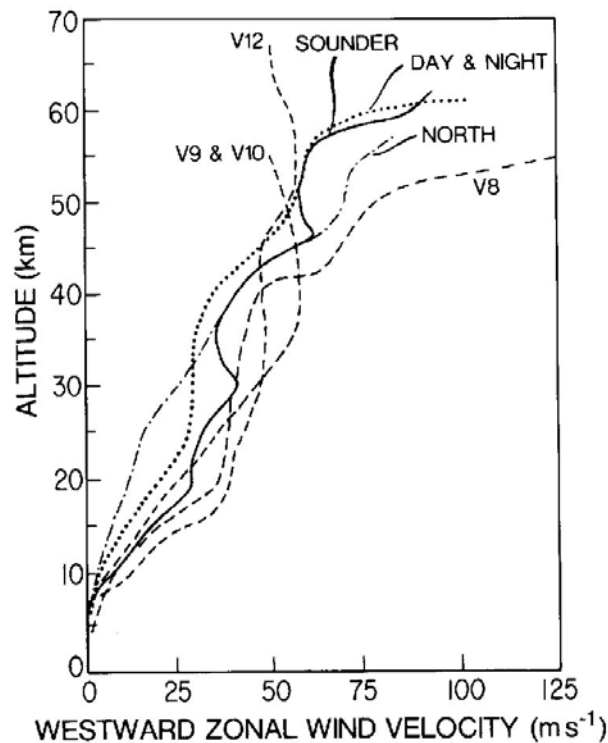
オイラー平均子午面循環



残差平均子午面循環



金星大気の超回転(スーパーローテーション)



金星着陸機が降下途中で測った風速の高度分布



パイオニア・ビーナス探査機(米)による雲頂の紫外線連続画像

雲頂(65km)では大気が自転(周期243日)の60倍の速さで自転方向に循環

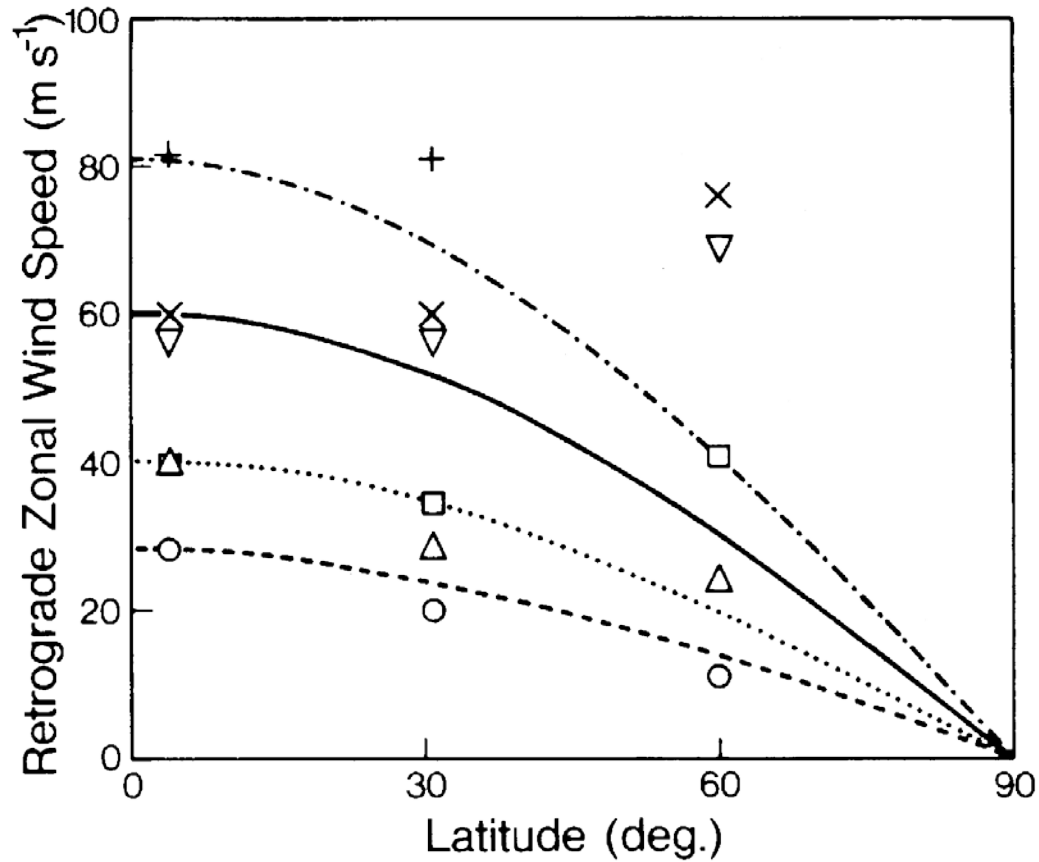


Fig. 10. Latitudinal variation of retrograde zonal wind speeds measured by interferometric tracking of Pioneer Venus probes. The symbols refer to different altitudes: 20 km, (○); 30 km, (△); 40 km, (□); 50 km, (▽); 55 km, (×); and 60 km, (+). The curves represent solid body rotation at different rates. It is assumed that the zonal circulation is approximately symmetric about the equator, so the wind speeds for the Day and Night probes can be plotted at 31°N.

30km以下ではほぼ剛体回転？

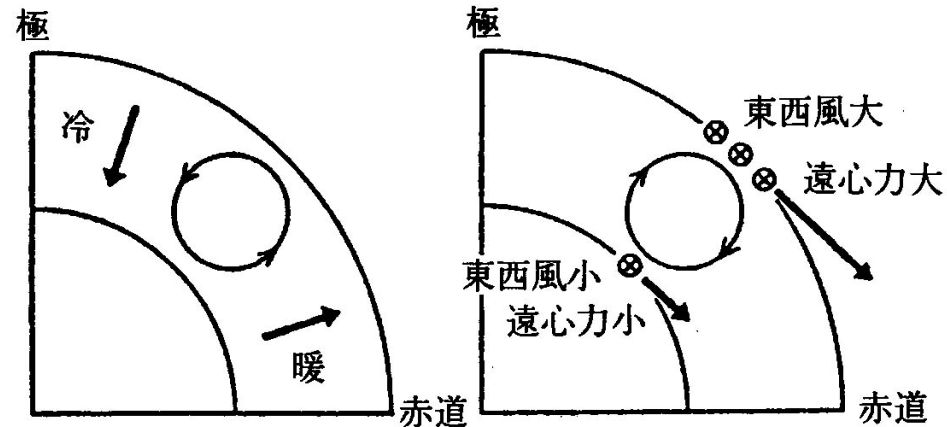
スーパー・ローテーションの問題

- 金星の固体部分の自転周期は243地球日（赤道での速度は1.5 m/s）、1太陽日は117日。このように加熱源の移動が遅い場合の大気循環は、少なくとも放射時定数が短い雲層高度では、昼側で上昇・夜側で下降という夜昼間対流になることが期待される。
- しかし地上観測によってアルベド模様の変化が見出され、100 m/sの帯状風が示唆された。その後探査機による近接撮影やプローブによる風速測定によって、大気が実際に高速で回転していることが確認された。しかも、風向は自転の向きと一致し、金星面上での太陽光加熱の動きとは逆向き。
- 地球にも数十m/sの偏西風があるが、地球の赤道帯の自転速度460 m/sより遥かに遅く、しかも局所的。これに対して金星の帯状風は自転の60倍の速さに達し、しかも全ての緯度に及ぶ。

南北方向の運動方程式で時間変化項ゼロとして

$$\left(\underbrace{2\Omega \sin \phi}_{\text{地球の場合}} + \underbrace{\frac{\bar{u} \tan \phi}{a}}_{\text{金星の場合}} \right) \bar{u} + \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} = 0$$

地球の場合 (地衡風) 金星の場合 (旋向風)

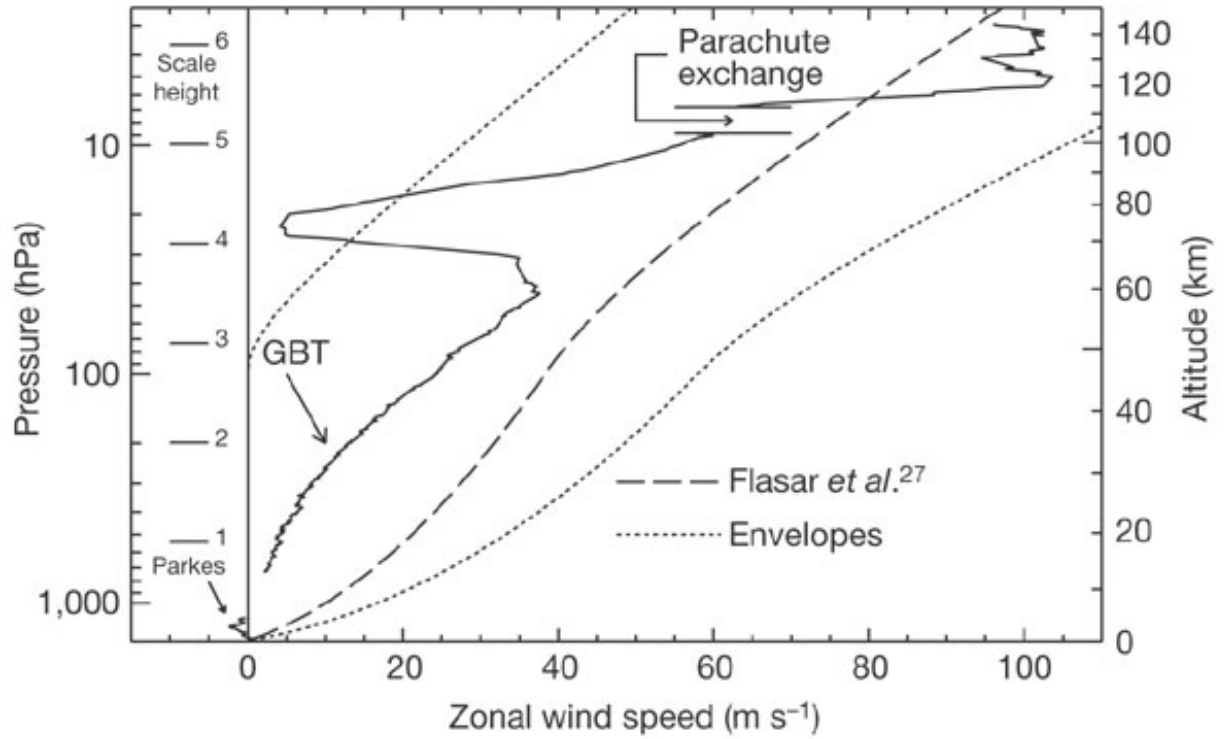
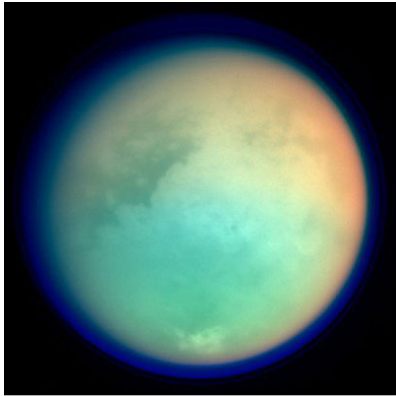


南北温度差(気圧傾度)によるモーメント

鉛直シアーを持つ東西風によるモーメント

(松田・余田, 1985)

タイタン大気のスーパーローテーション



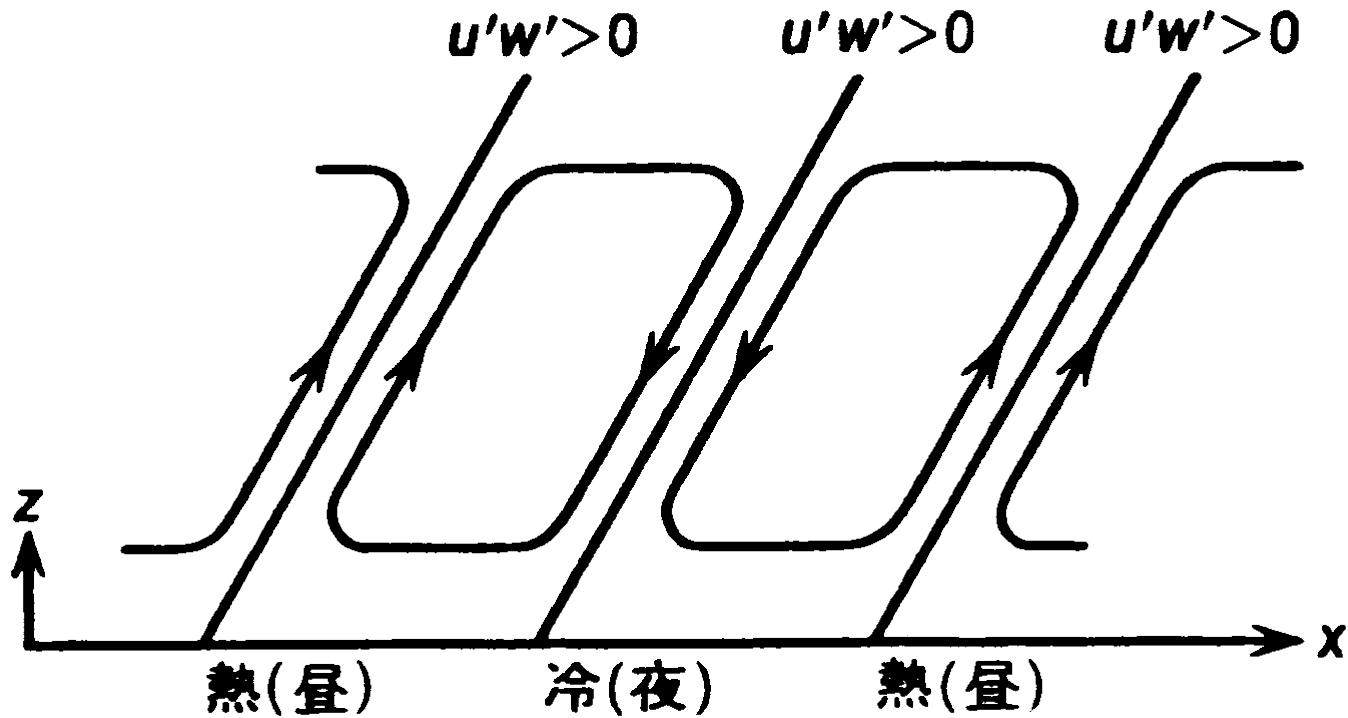
タイタンと金星の違い

- 気温（金星740K、タイタン90K）
- 惑星半径（金星6050km、タイタン2575km）

タイタンと金星の共通点

- 自転が遅い（金星243日、タイタン16日）
- 放射時定数が長い（金星30年、タイタン100年）
- 厚いエアロソル層

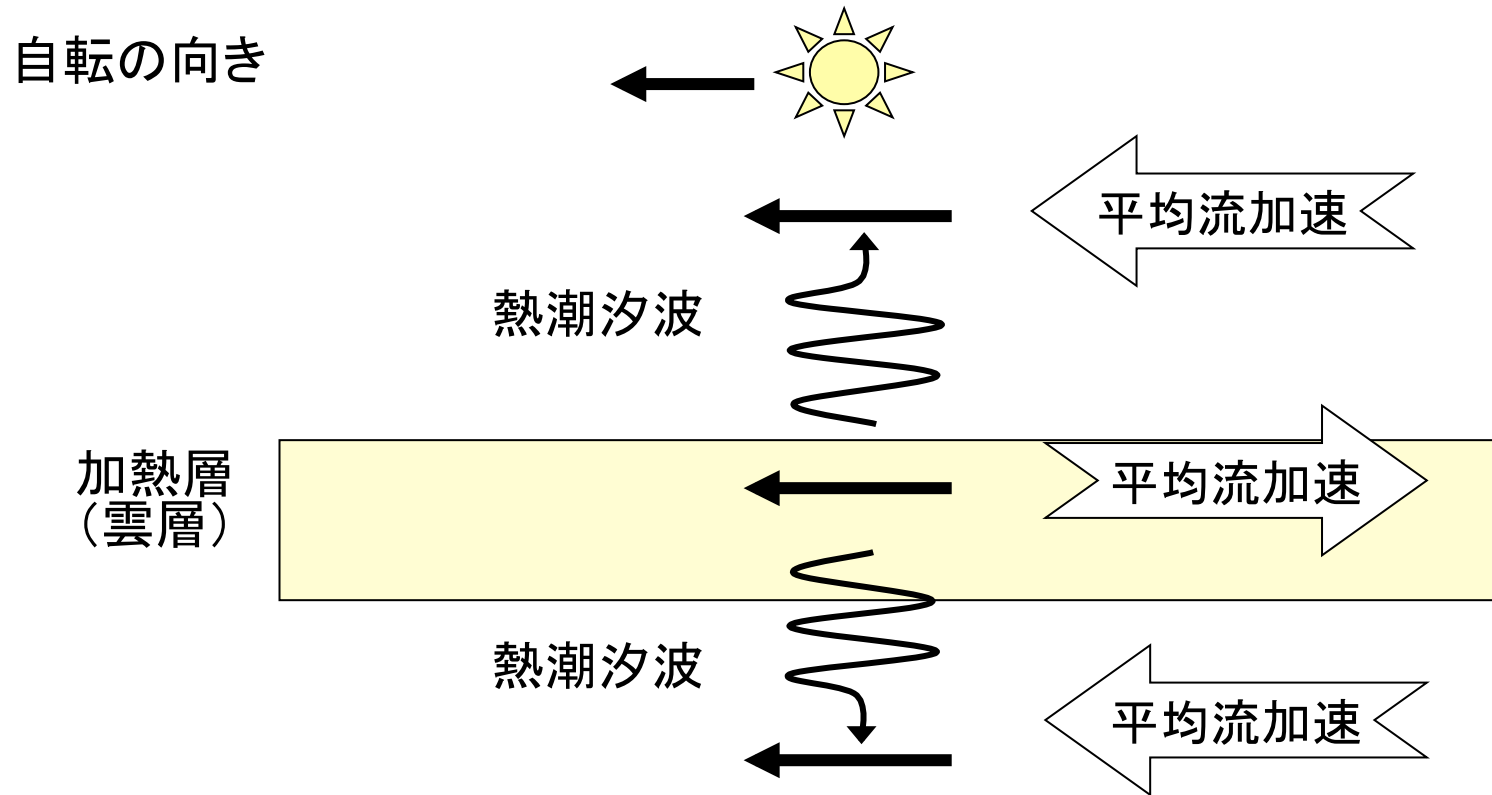
①夜昼間対流によるメカニズム
(Moving flame仮説、Thompsonの仮説)



最近はほぼ忘れられている

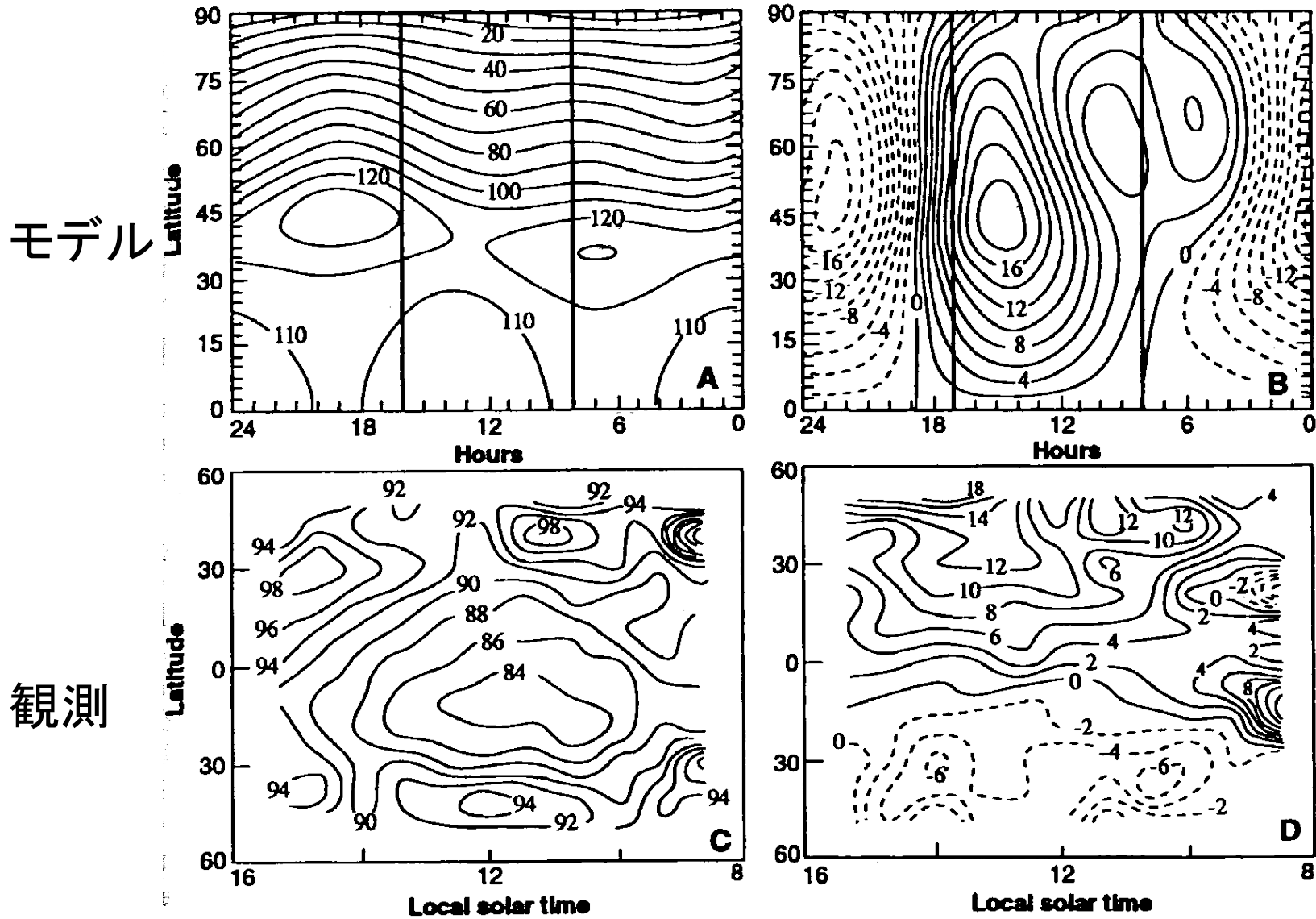
②重力波によるメカニズム その1

「雲層で励起される熱潮汐波」(Fels & Lindzen 1974)



太陽光加熱域の移動により、東向き運動量を持つ重力波が励起されて上下に伝搬 → 雲層が反動で西向きに加速

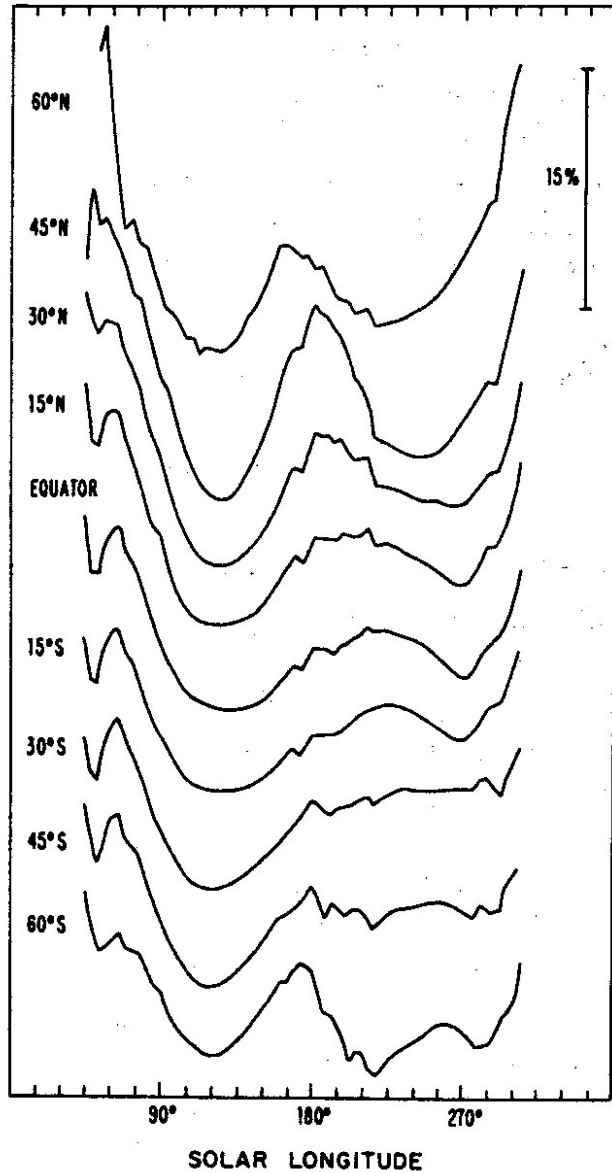
雲頂の熱潮汐波



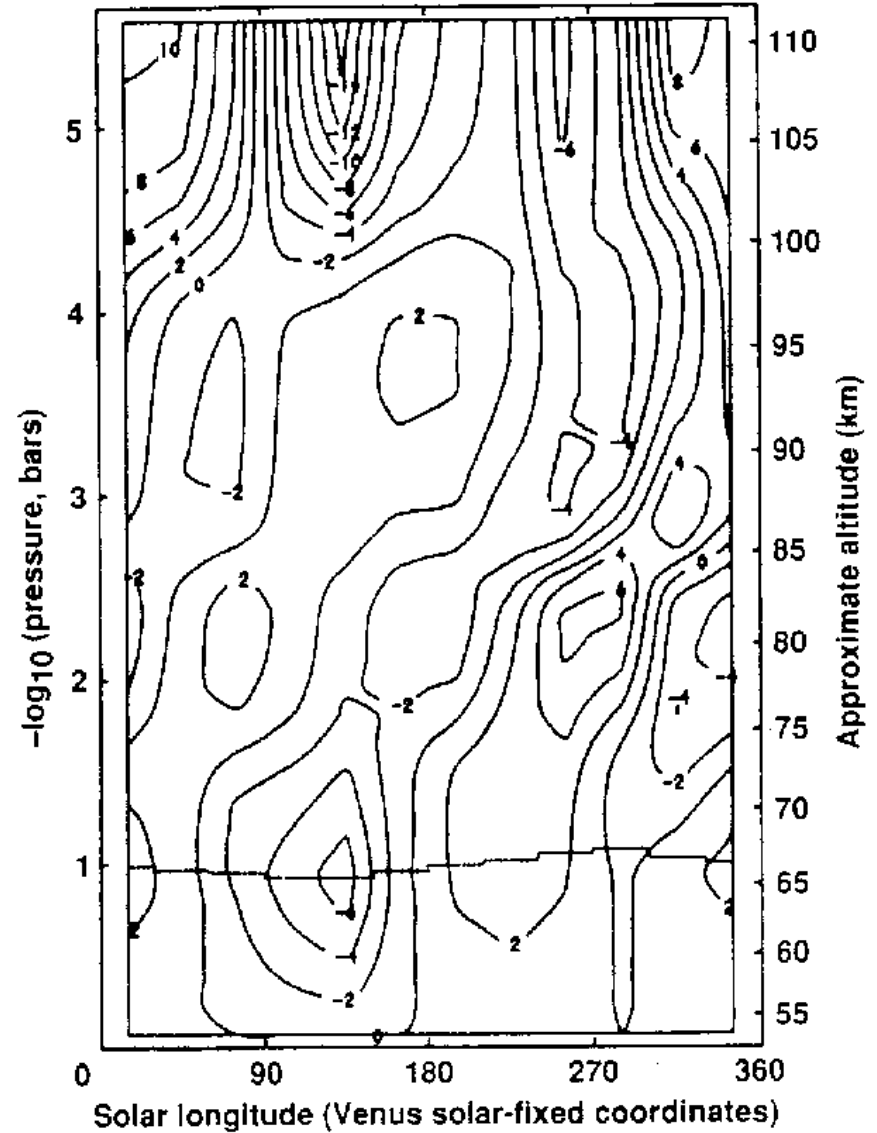
Newman & Leovy (1992)

温度場で見た熱潮汐波

地上観測による雲頂温度

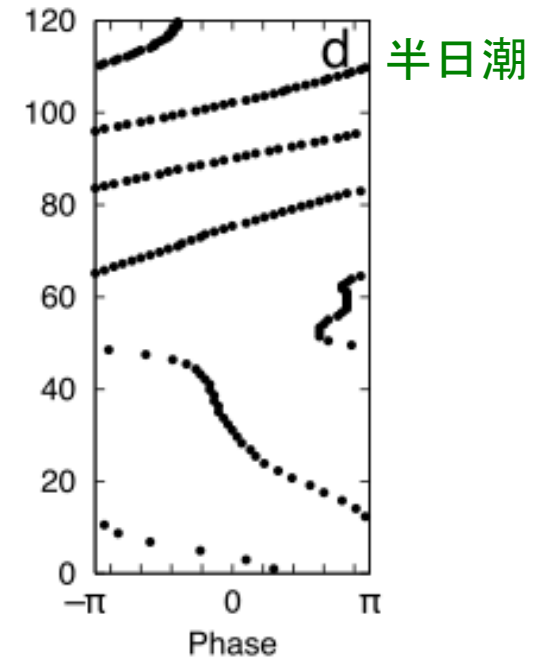
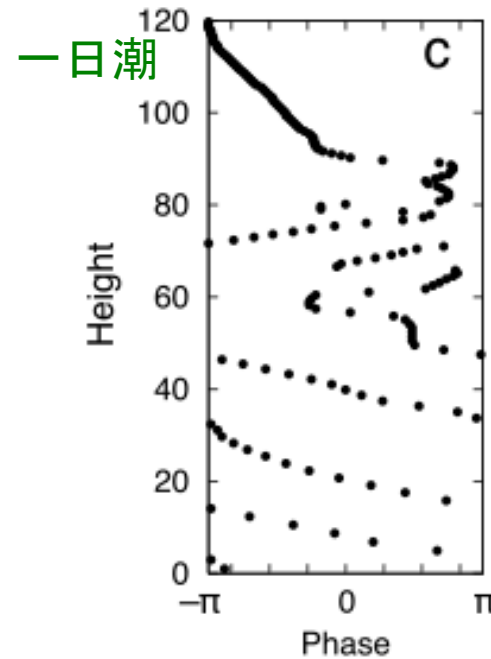
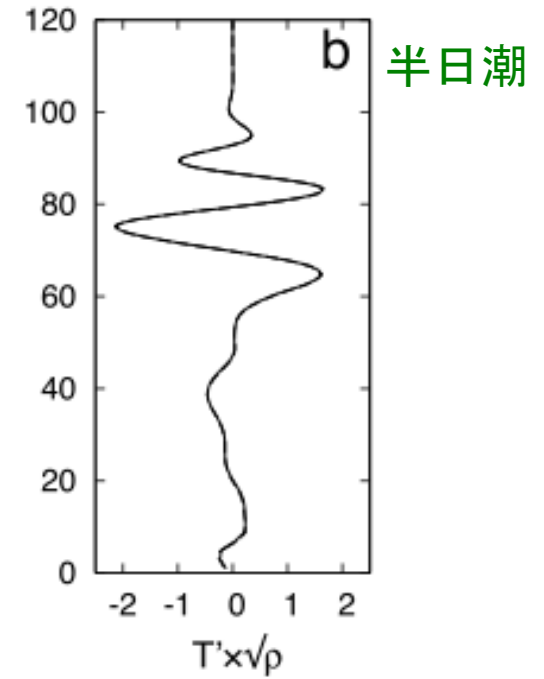
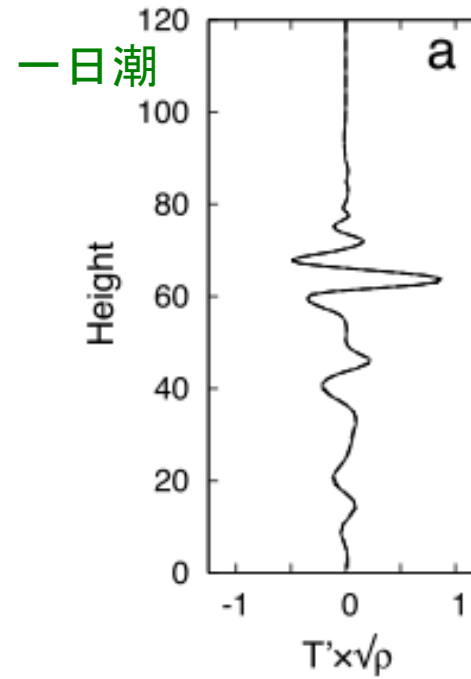


Pioneer Venusによる成層圏温度



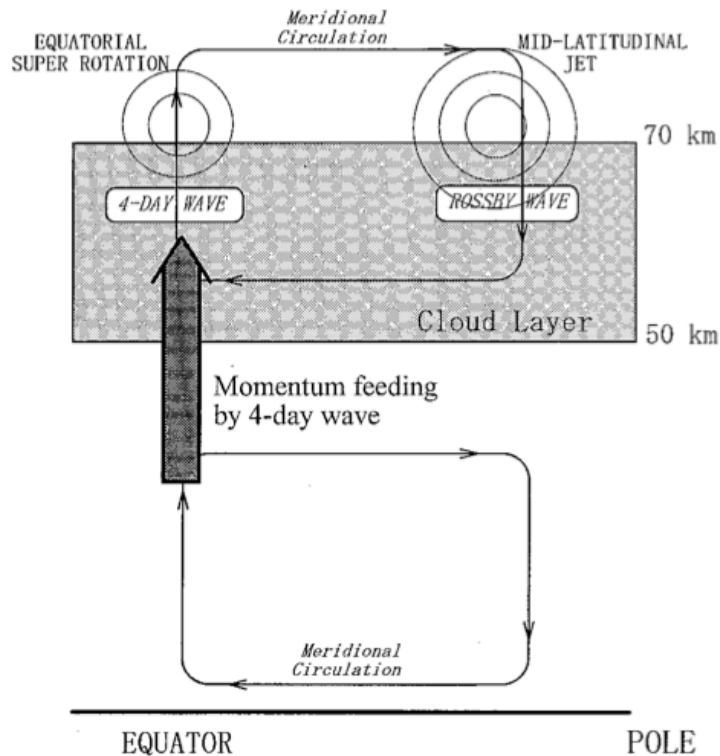
熱潮汐波の鉛直構造 (Takagi & Matsuda, 2006)

下向きに伝播する波が地面近くまで到達して地面に運動量を渡すことにより大気を加速する可能性がある



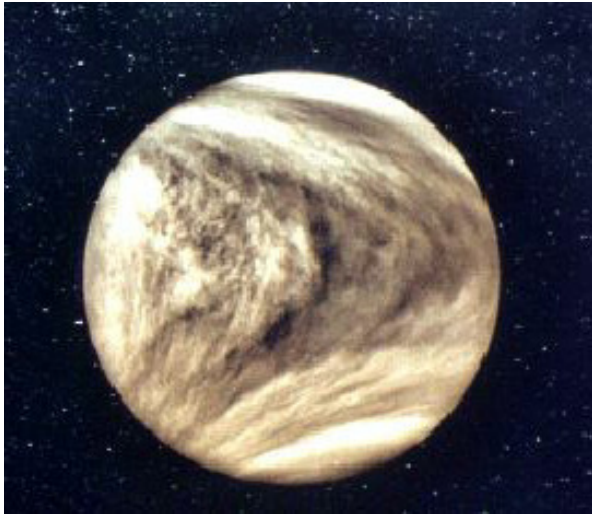
③重力波によるメカニズム その2 「大気下層から上向きに伝搬するケルビン波」

何らかのメカニズムで西向き運動量を持つ大気波動だけが選択的に励起されて(あるいは伝播途中でフィルタリングされて)上方に伝播して散逸すると、上層の大気は西向きに加速される。

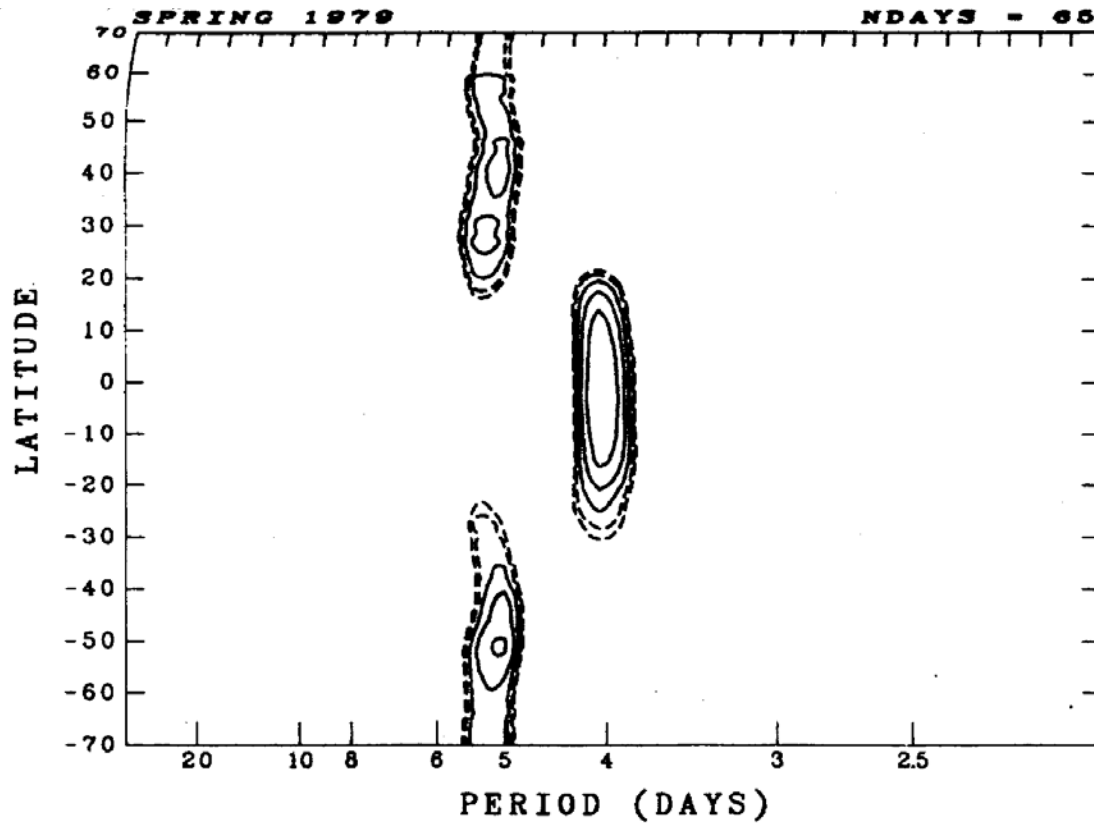


Yamamoto & Tanaka (1997)

FIG. 1. Schematic illustration of a meridional section of the general circulation in the Venus atmosphere.



紫外での明暗の周期的変化
→ケルビン波とロスビー波？



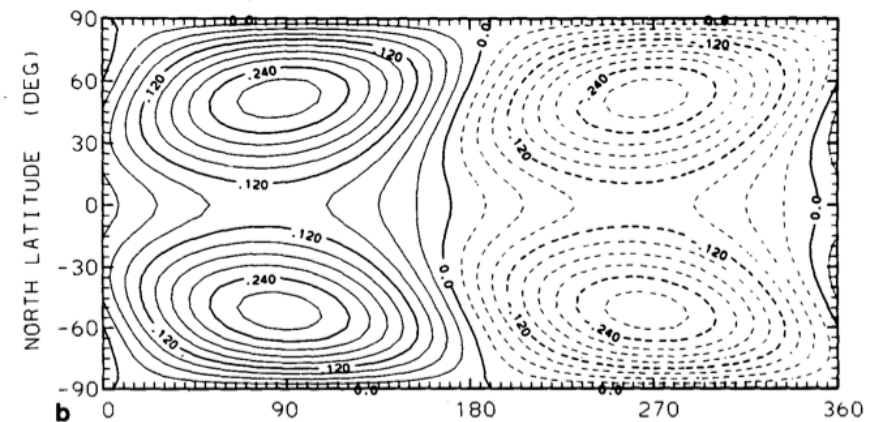
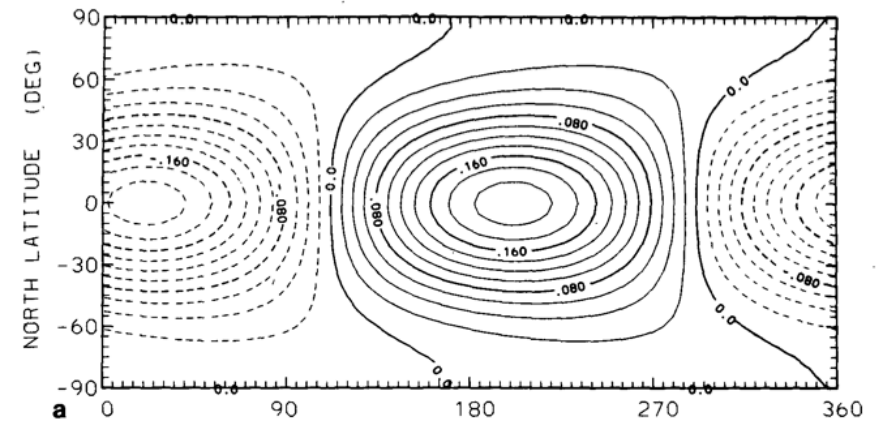
ケルビン波らしき風速変動の
振幅(5-10 m/s)から見積もつ
た加速率 ~ 0.2 m/s/day

(Del Genio & Rossow, 1990)

金星大気の線形応答

Covey & Schubert (1982)

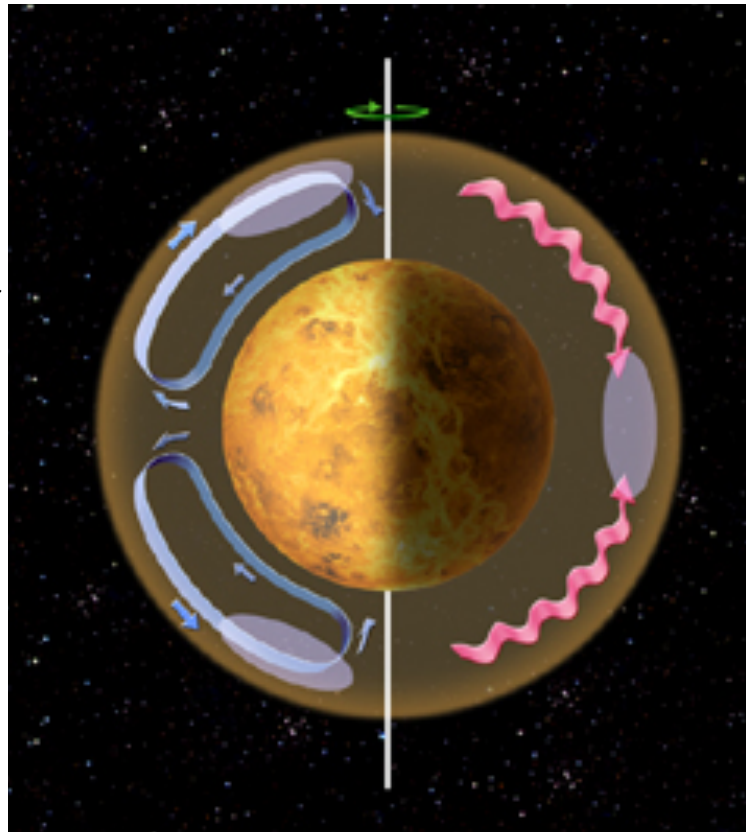
- 観測されているような風速・温度構造を基本状態として、様々な周波数の力学強制に対する応答を線形プリミティブ方程式系で解く
- 地表面で強制したときには雲頂ではケルビン波に似た正の内部位相速度の波が見られた
- 雲頂で強制したときには雲頂ではケルビン波に似た正の内部位相速度の波とロスビー波に似た負の位相速度の波が見られた
- これらの波は観測されている4日波と5日波に対応？



③子午面循環によるメカニズム (Gierasch, 1974; Rossow & Williams, 1979)

ハドレー循環

低緯度で角運動量を
上向き輸送、高緯度で
下向き輸送



水平粘性(何らか
の大規模擾乱)

角運動量を赤道
向きに輸送

結果として大気上層に角運動量が蓄積

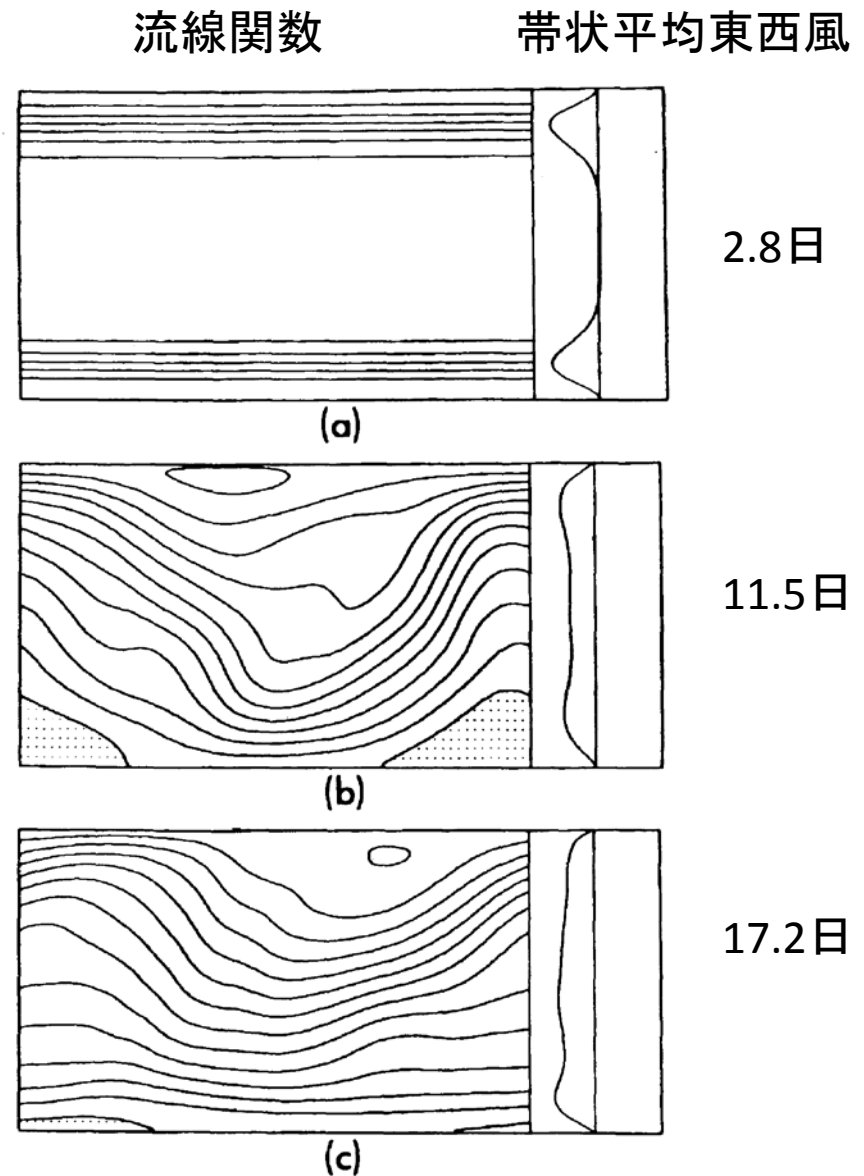
低速回転惑星上の2次元乱流の数値実験

(Williams and Rossow 1979)

金星と同じ自転速度(周期
243日)

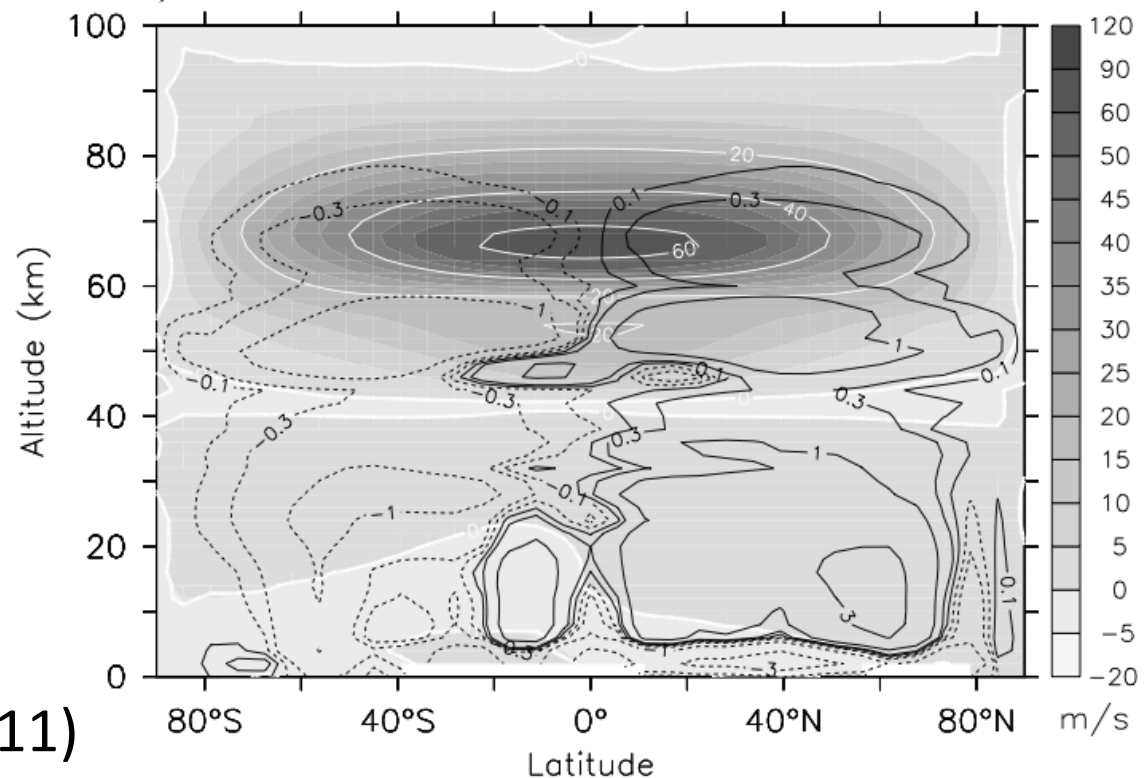
高緯度でジェット型の強制

→ 順圧不安定により渦生成、
赤道向き角運動量輸送



金星GCM実験

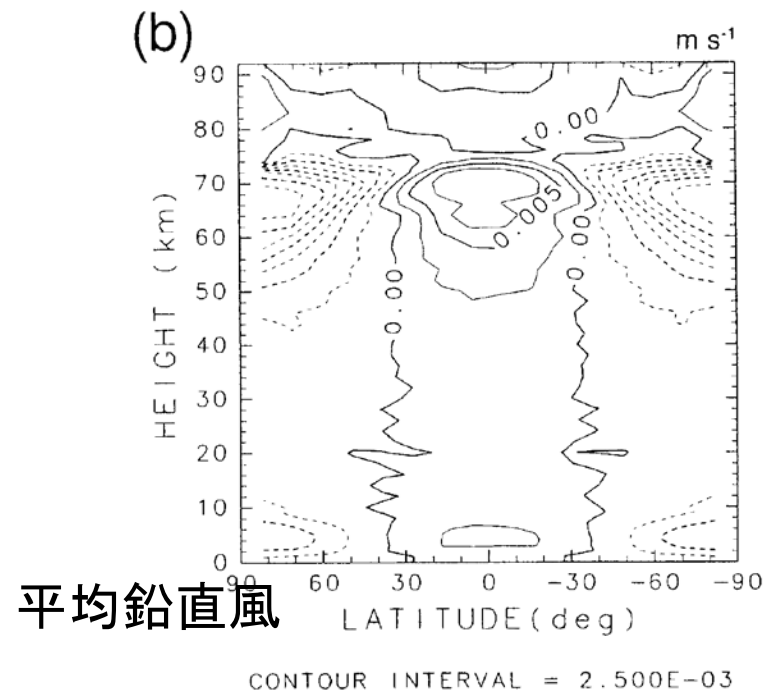
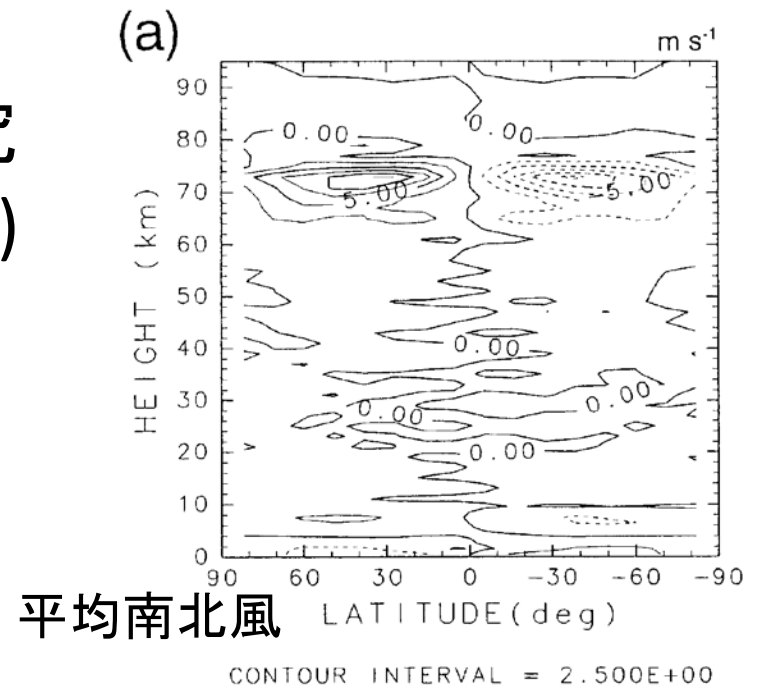
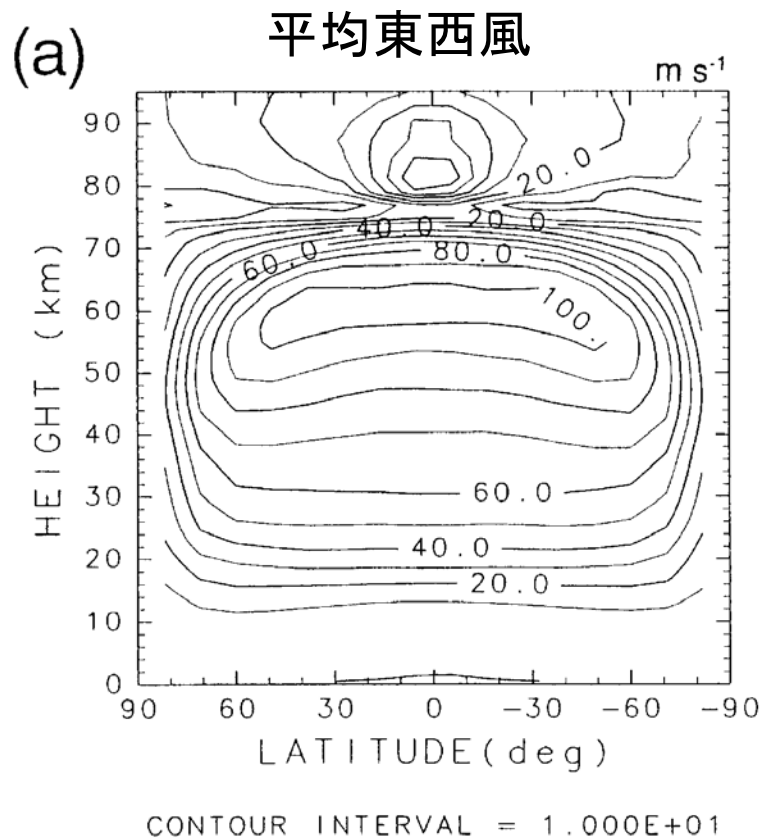
- 試みは多くあるが現実的な設定条件で大気全層のスーパーローテーションが生じたものはほとんどなく、発現条件についてコンセンサス無し
- 雲層高度に限っては熱潮汐とGierasch機構によりスーパーローテーションが生じるらしい



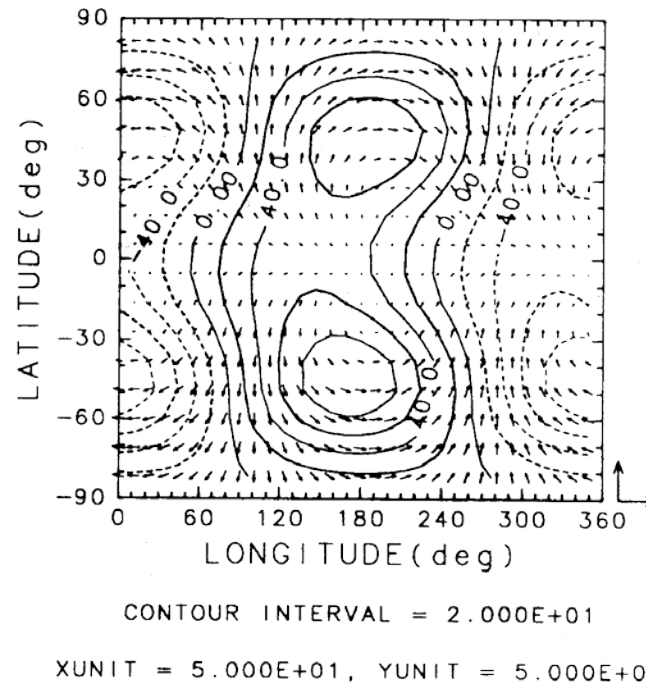
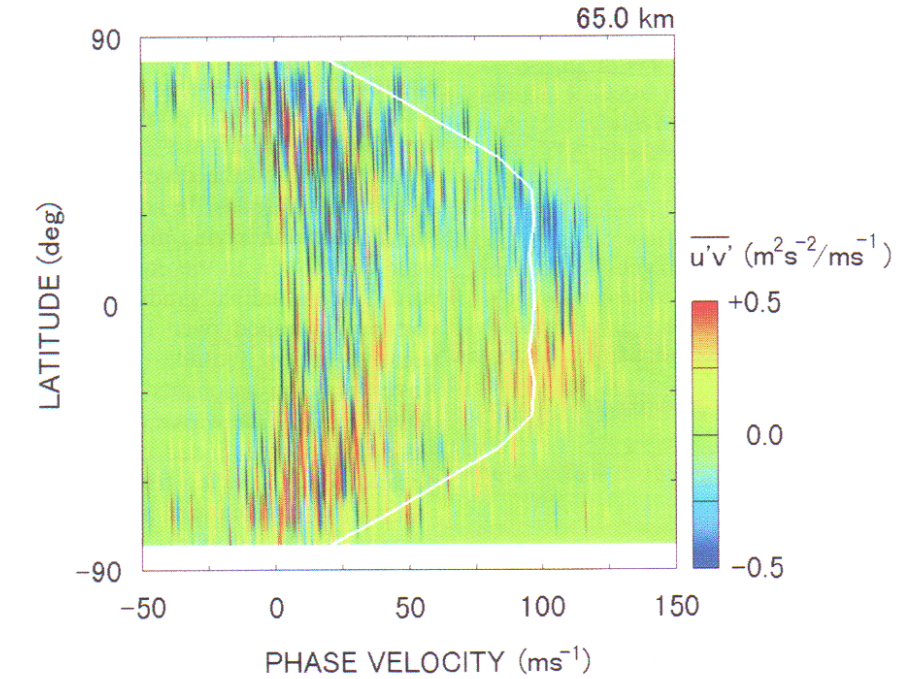
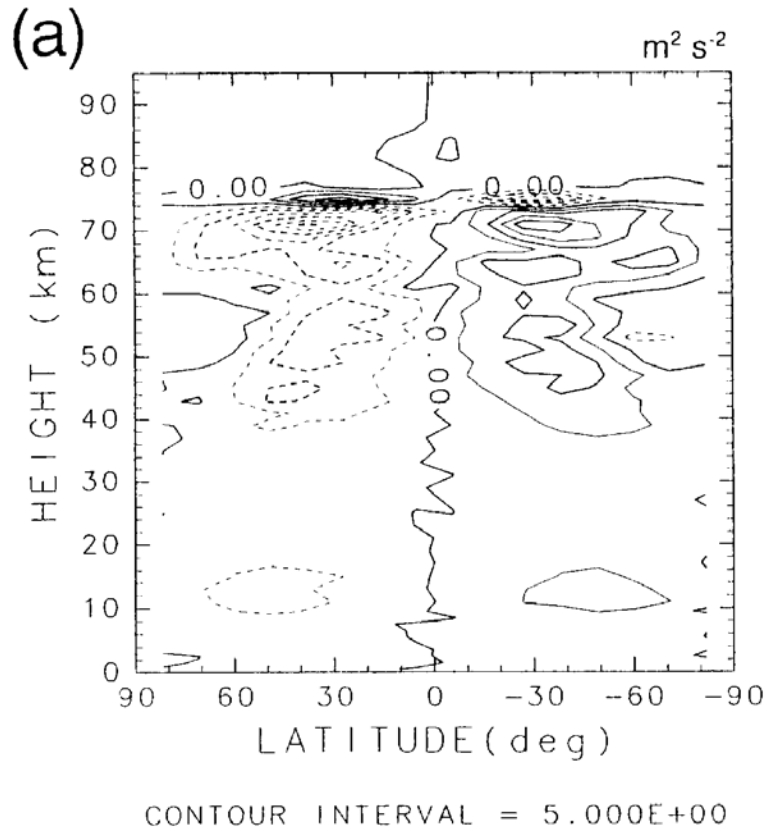
Lebonnois et al. (2011)

GCMモデルによる先駆的研究 (Yamamoto & Takahashi, 2003)

* 下層大気に現実より大きな熱強制を与え、
強い子午面循環を持続している



運動量南北輸送 ($u'v'$)



ロスビー波や混合ロスビー重力波などの惑星規模の波動によって赤道向き運動量輸送
理由は不明

地球対流圏の角運動量南北輸送

傾圧不安定によるロスビー波
の励起と南北伝播

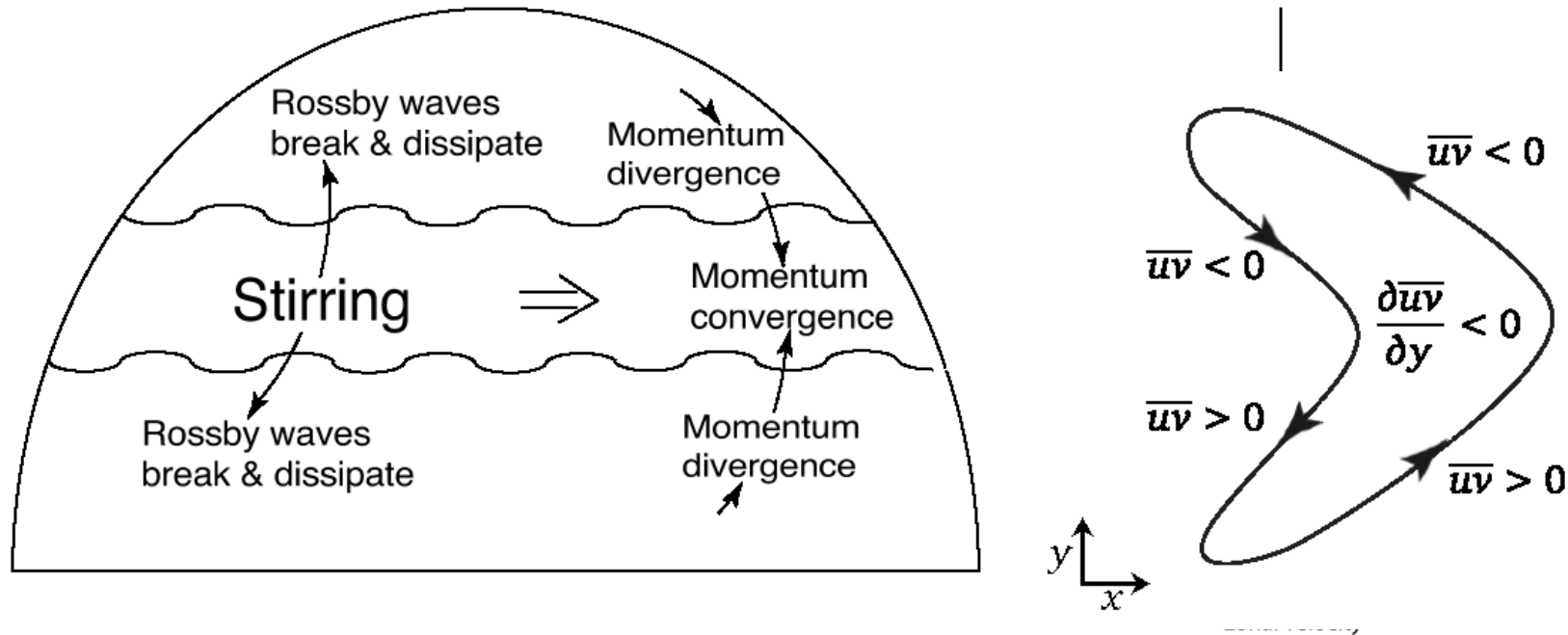
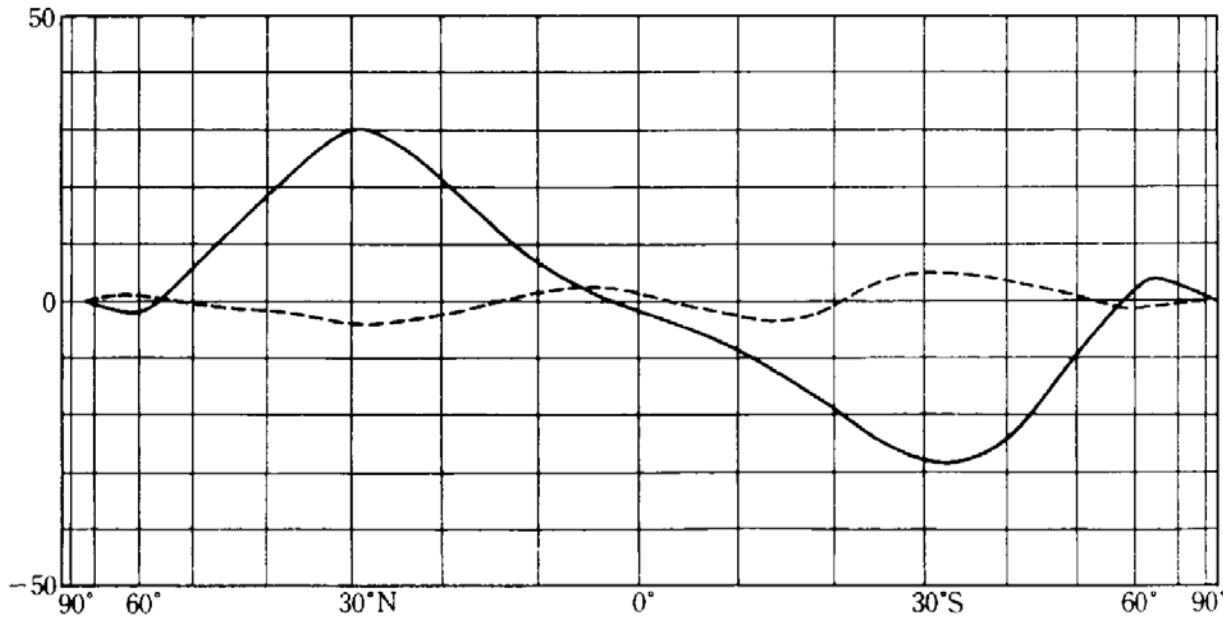


Fig. 3.4 Generation of zonal flow on a β -plane or on a rotating sphere. Stirring in midlatitudes (by baroclinic eddies) generates Rossby waves that propagate away from the disturbance. Momentum converges in the region of stirring, producing eastward flow there and weaker westward flow on its flanks.

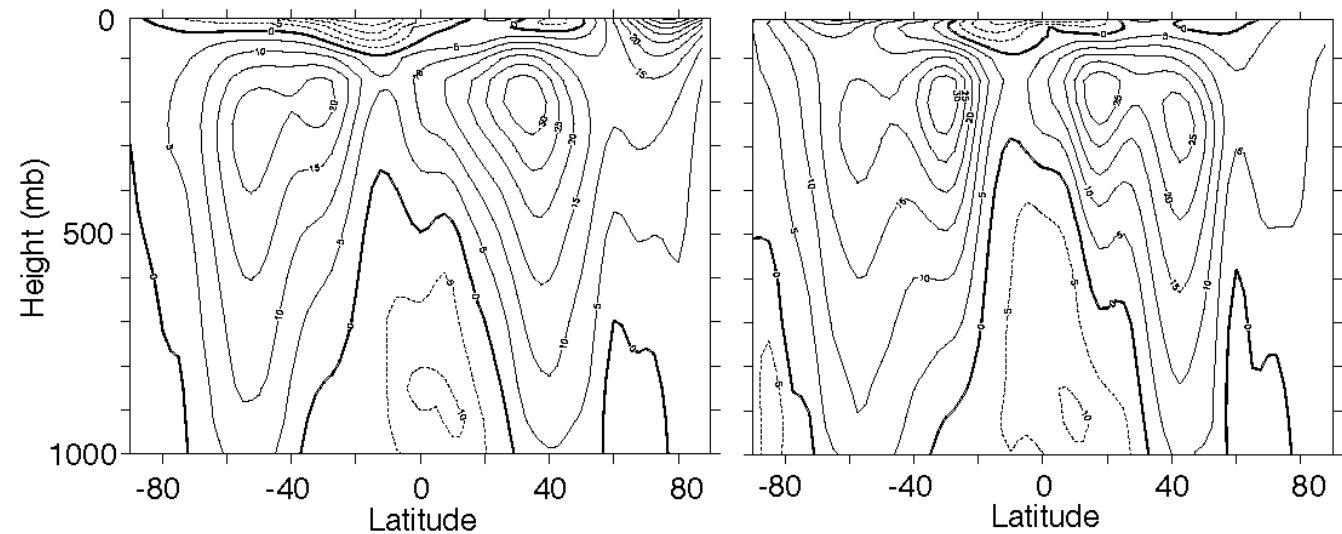
(Vallis, 2005)



地球の場合、擾乱は
低緯度から高緯度へ
角運動量を運ぶ

金星では逆方向？

図 8.6 子午面内循環による絶対角運動量の極向き輸送量 (破線) と擾乱による輸送量 (実線) の年平均 (Lorenz, 1967).
単位は $10^{18} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$.



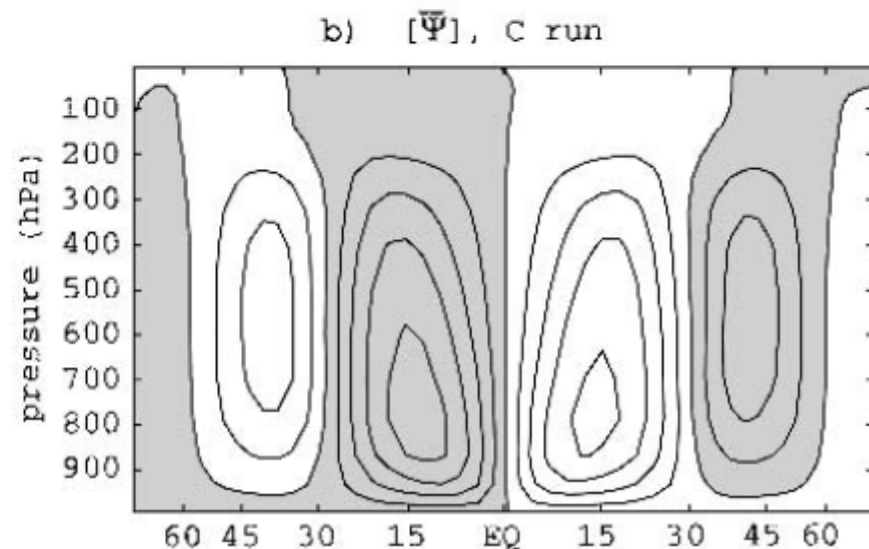
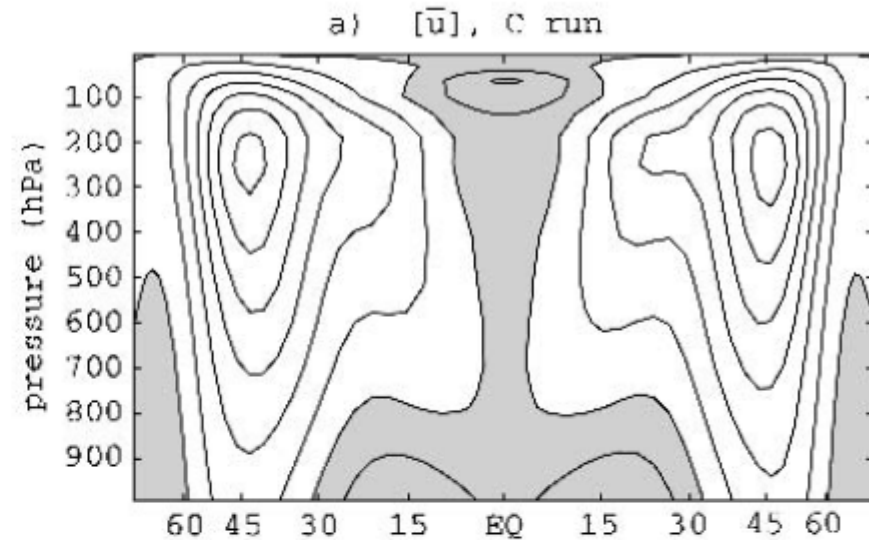
(Vallis, 2005)

Fig. 3.1 The time-averaged zonal wind at 150°W (in the mid Pacific) in December-January February (DJF, left), March-April-May (MAM, right). The contour interval is

地球の熱帯対流圏の超回転可能性 (Kraucunas & Hartmann, 2005)

簡略化GCMによるパラメタ
実験により、観測されてい
る熱帯の東風のバランス
を考察

南北対称、東西一様な加熱
強制だと赤道域で東風
(超回転しない) →



赤道域に波数2の定常な加熱強制を付加

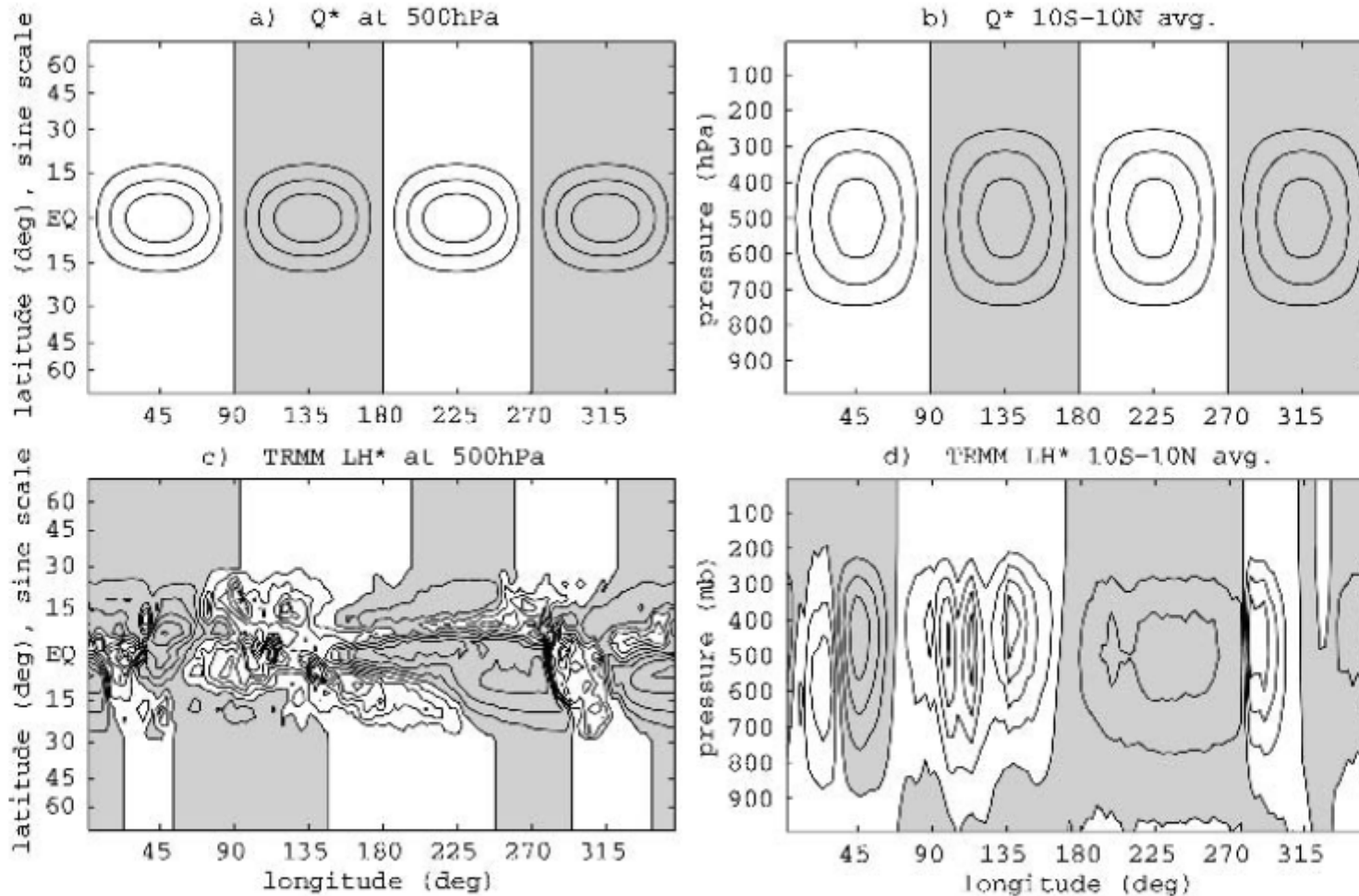
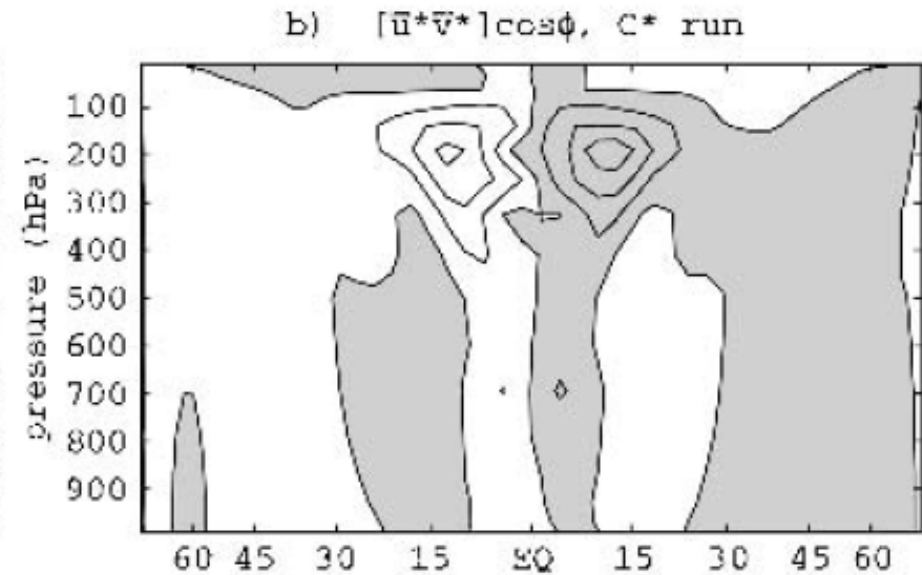
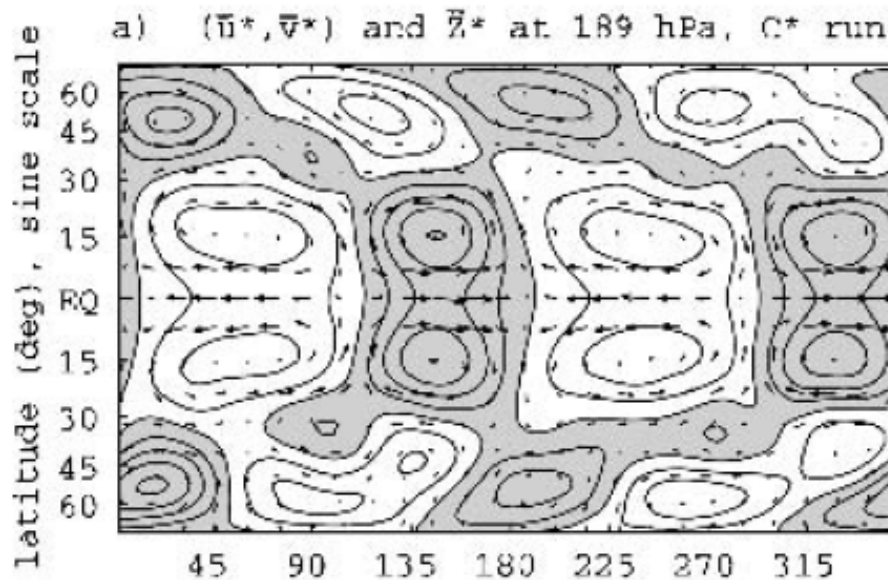
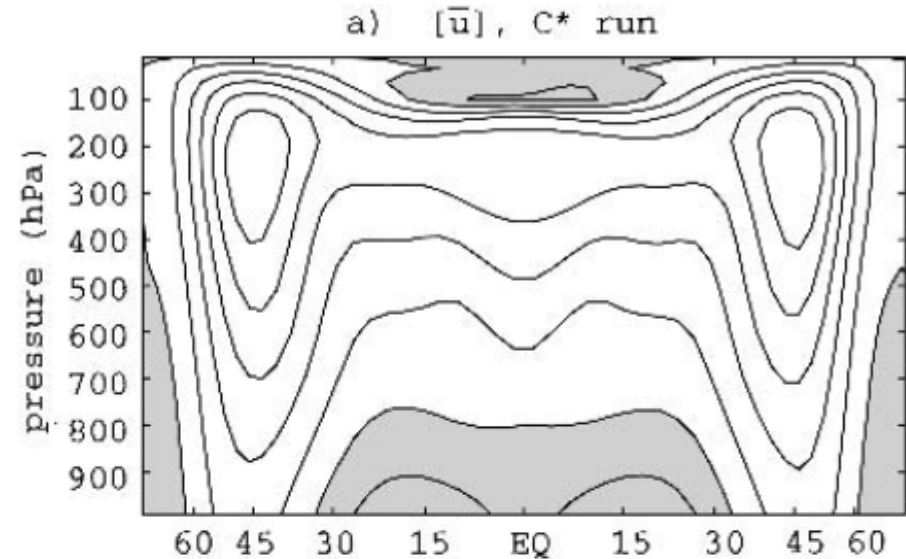
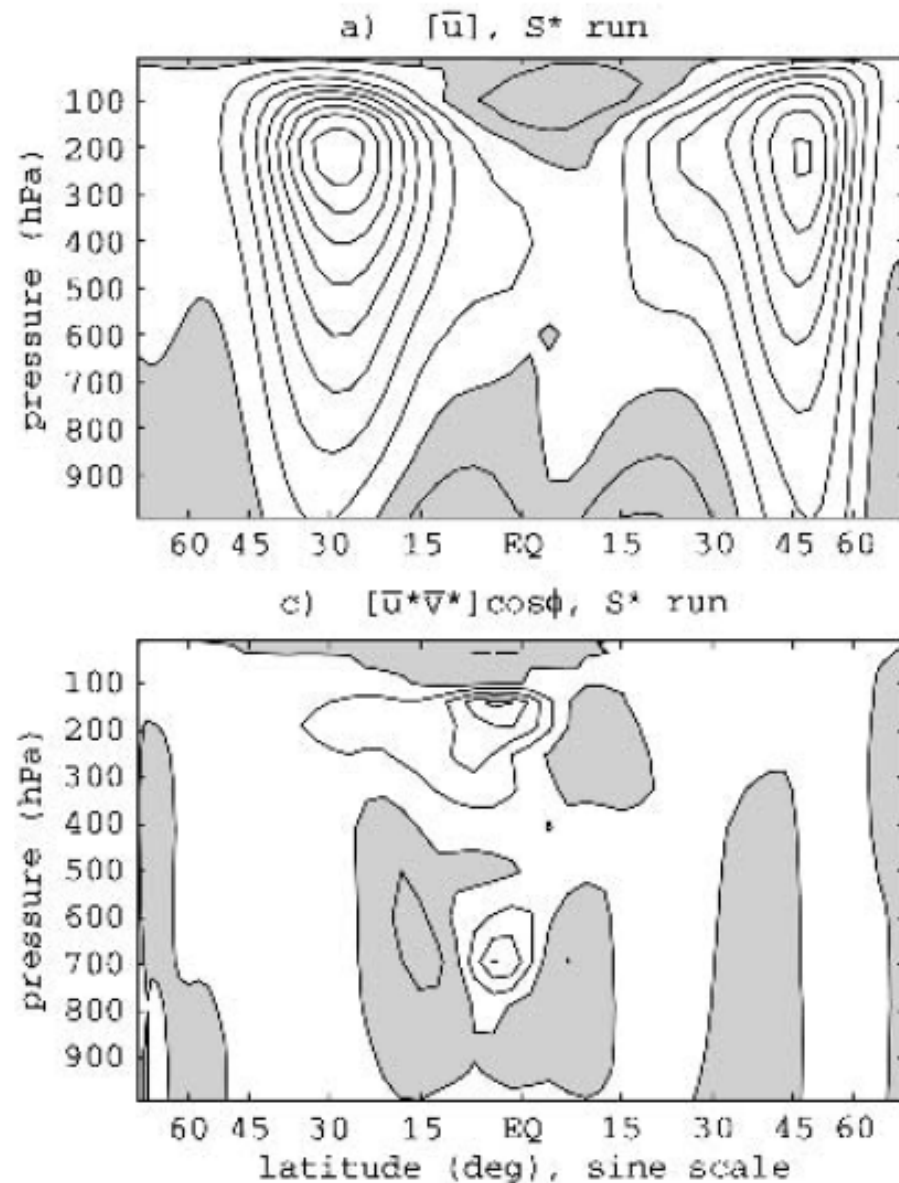


FIG. 3. The imposed tropical eddy heating perturbation, Q^* , (a) at 500 hPa and (b) averaged between 10°N and 10°S, and the annual-mean eddy latent heating distribution derived from TRMM precipitation measurements by Schumacher et al. (2004), (c) at 500 hPa, and (d) averaged between 10°N and 10°S. The contour interval is 0.25 K day^{-1} , and negative values (i.e., latent heating rates that are less than the zonal average at each latitude) are shaded.

- 熱帯大気で西風が生じた
(超回転)
- 波数2の加熱強制で励起された定在ロスビー波が高緯度側に伝搬して西向き角運動量を輸送するために熱帯大気は東向きに加速



- 南北非対称な加熱強制を与えると赤道をまたぐハドレー循環による運動量移流により西風は弱まる
- 現実大気では地形や季節変化に起因する南北非対称なハドレー循環のために超回転が打ち消されている → 微妙なバランスに依存しており、今と異なる気候では地球大気も超回転するかもしれない



東西に正弦波構造を持つ静止熱源によって強制される循環
(Matsuno, 1966)

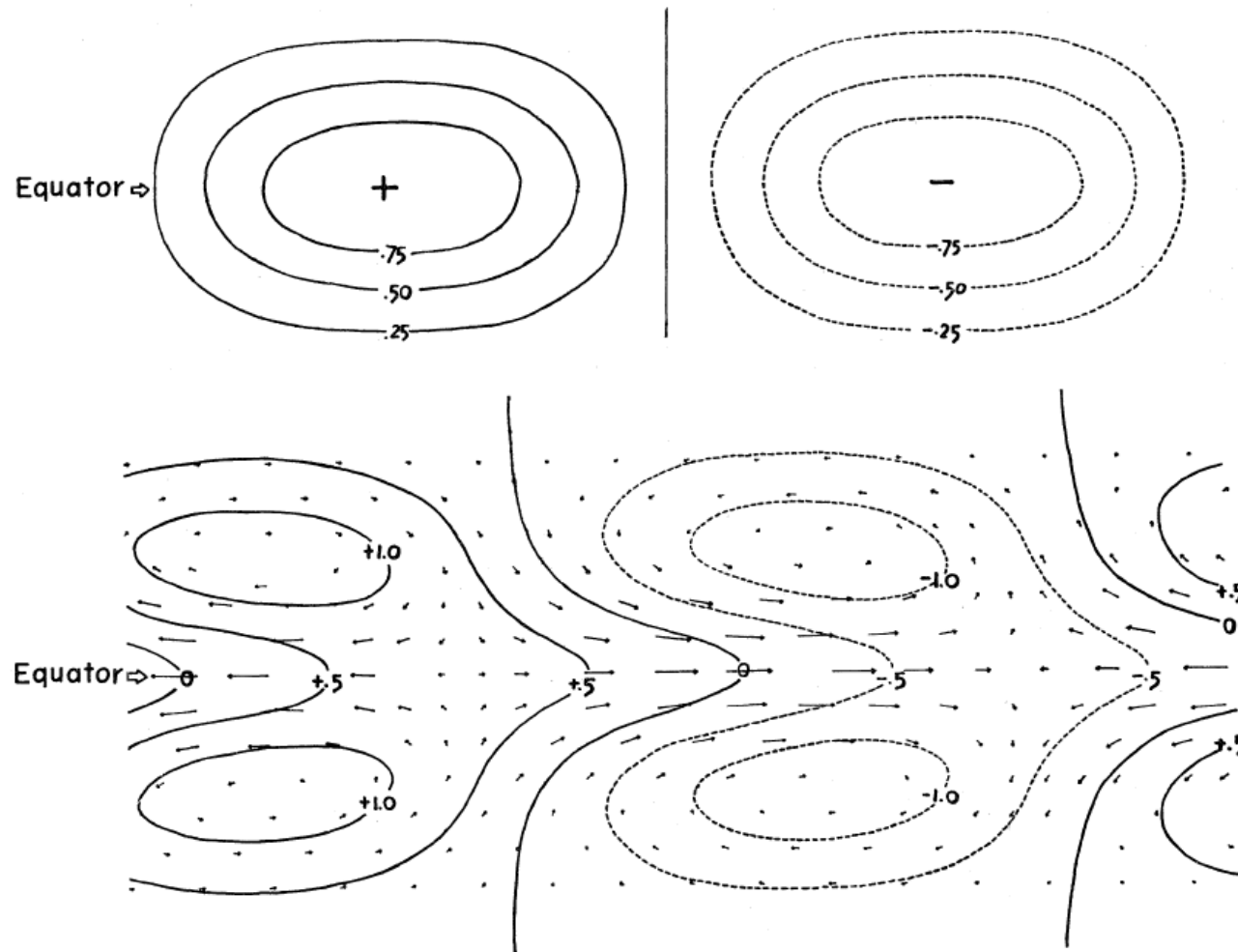


Fig. 9. Stationary circulation pattern (lower) caused by the mass source and sink (upper).

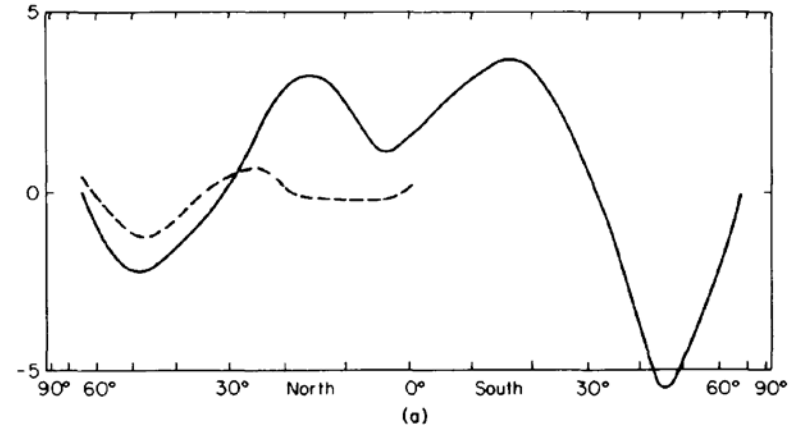
金星の超回転：弱い強制で維持されるシステム？

- 地球対流圏の加速・減速の時間スケール
 中緯度の地表トルク $\sim 2 \times 10^5 \text{ kg/s}^2$
 コラム角運動量 (10m/sとして) $\sim 6.6 \times 10^{11} \text{ kg/s}$
 → 角運動量を失う時間 ~ 40 日
 放射緩和時間も同程度

- 金星では？
 地表トルクは不明
 子午面循環も不明
 放射緩和は30地球年
 粘性緩和は $H=15\text{km}, K=0.1 \text{ m}^2/\text{s}$ なら
 $D^2/K=80$ 地球年

地球では問題にしないような小さな加速が平均構造を決めるかもしれない

地面から大気に与えられる東向きトルク



角運動量の南北輸送

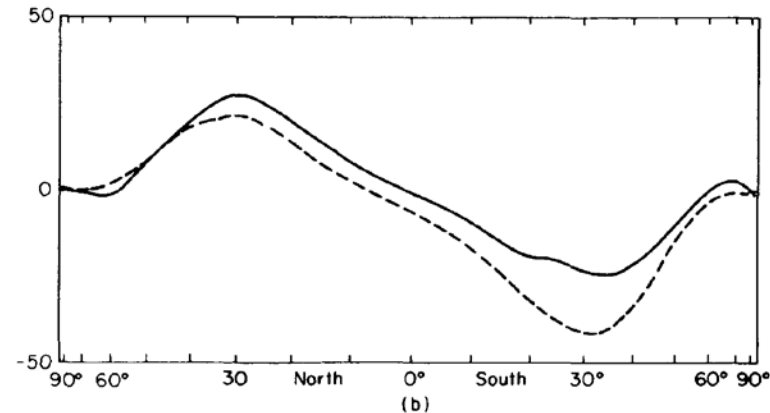
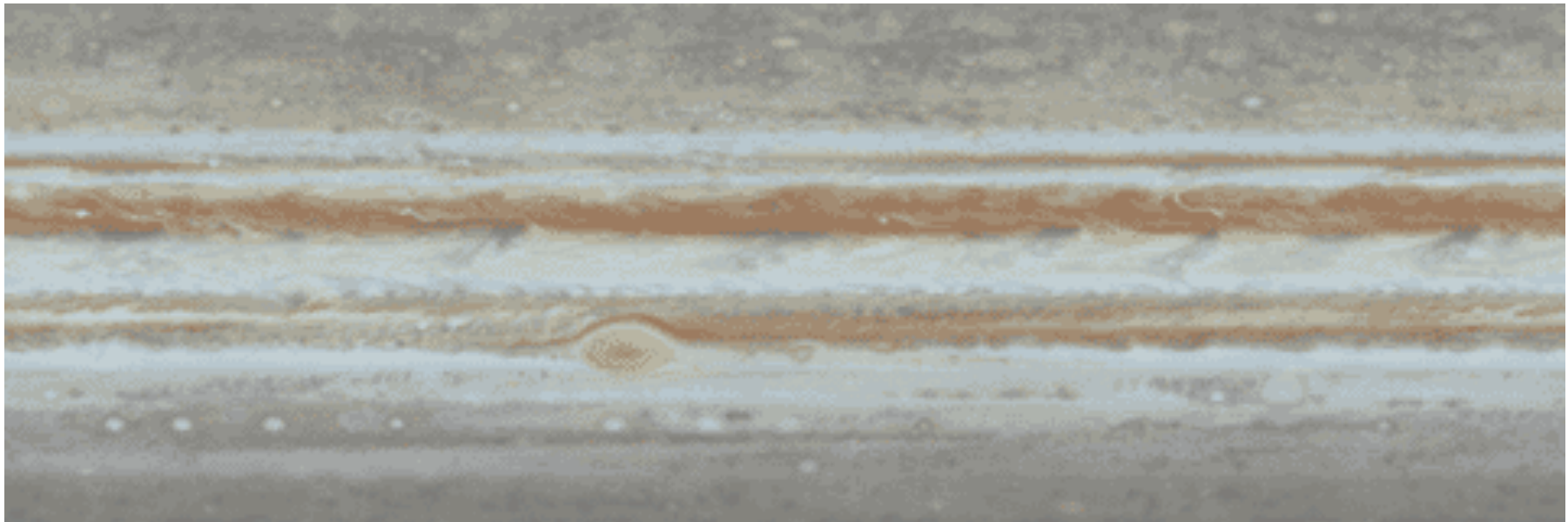
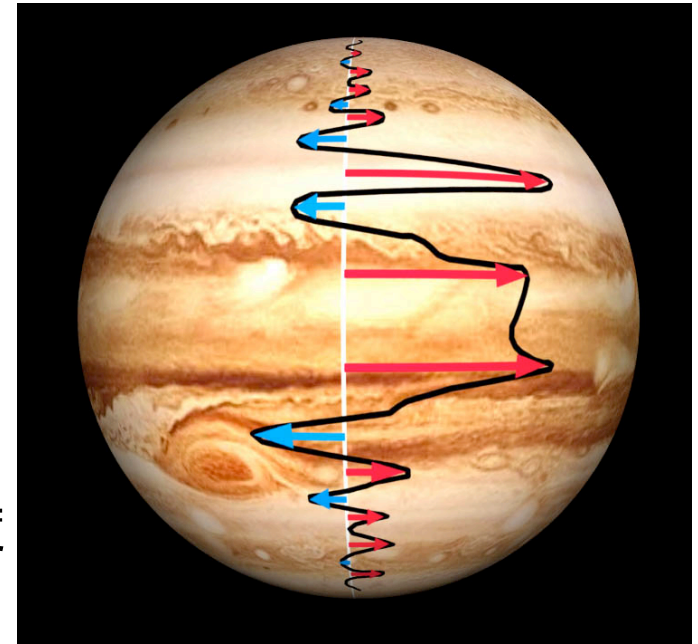


Fig. 10.12 (a) Average eastward torque per unit horizontal area exerted on the atmosphere by surface friction (solid curve) and by mountains in the Northern Hemisphere (dashed curve) in units of 10^5 kg s^{-2} (b) The observed transport of angular momentum in units of $10^{18} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$ (solid curve) and the required transport (dashed curve) as given by the observed surface torques. (After Lorenz, 1967.)

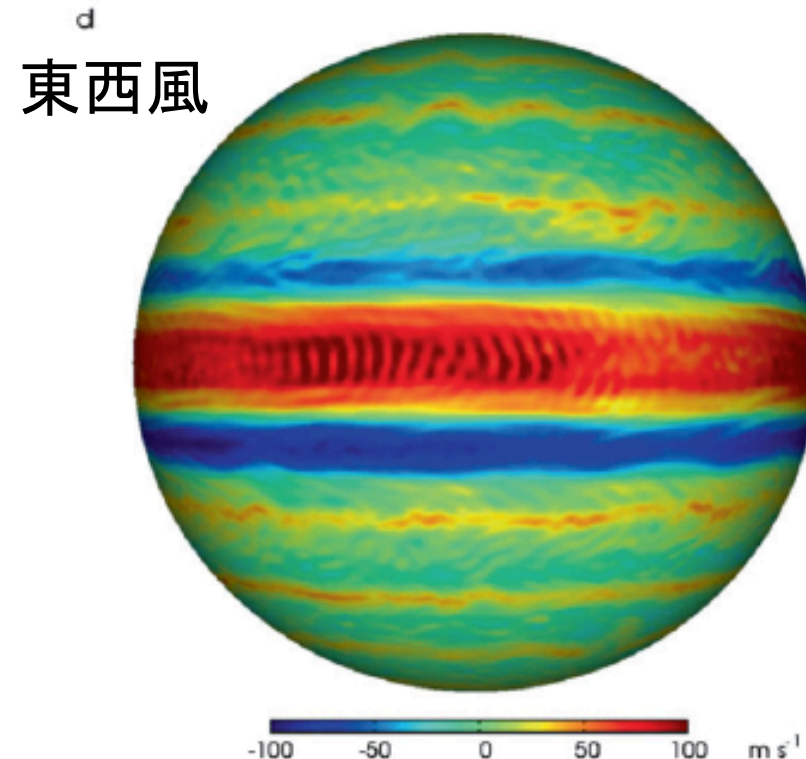
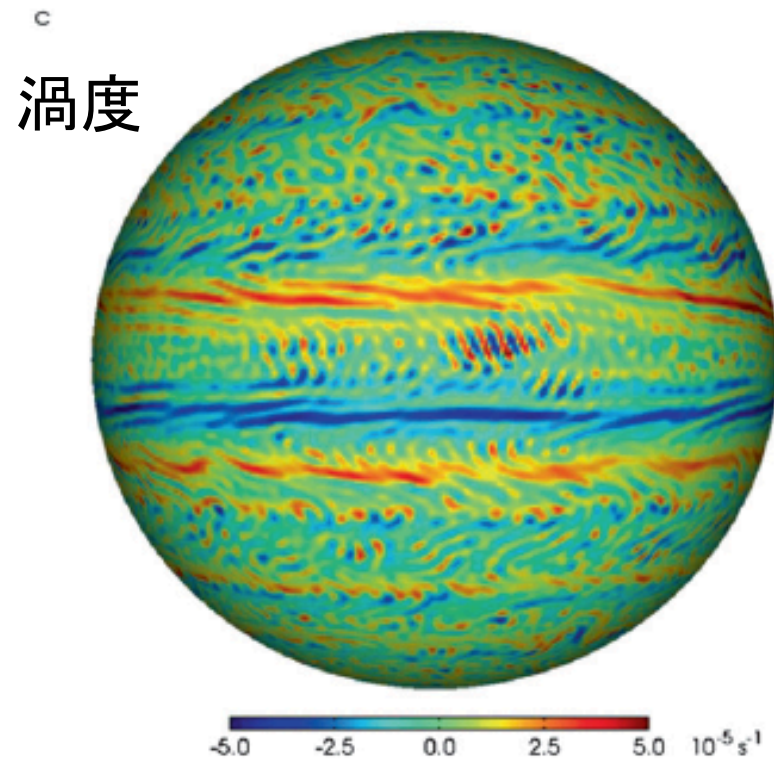
木星の大気循環

(Schneider & Liu, 2009)

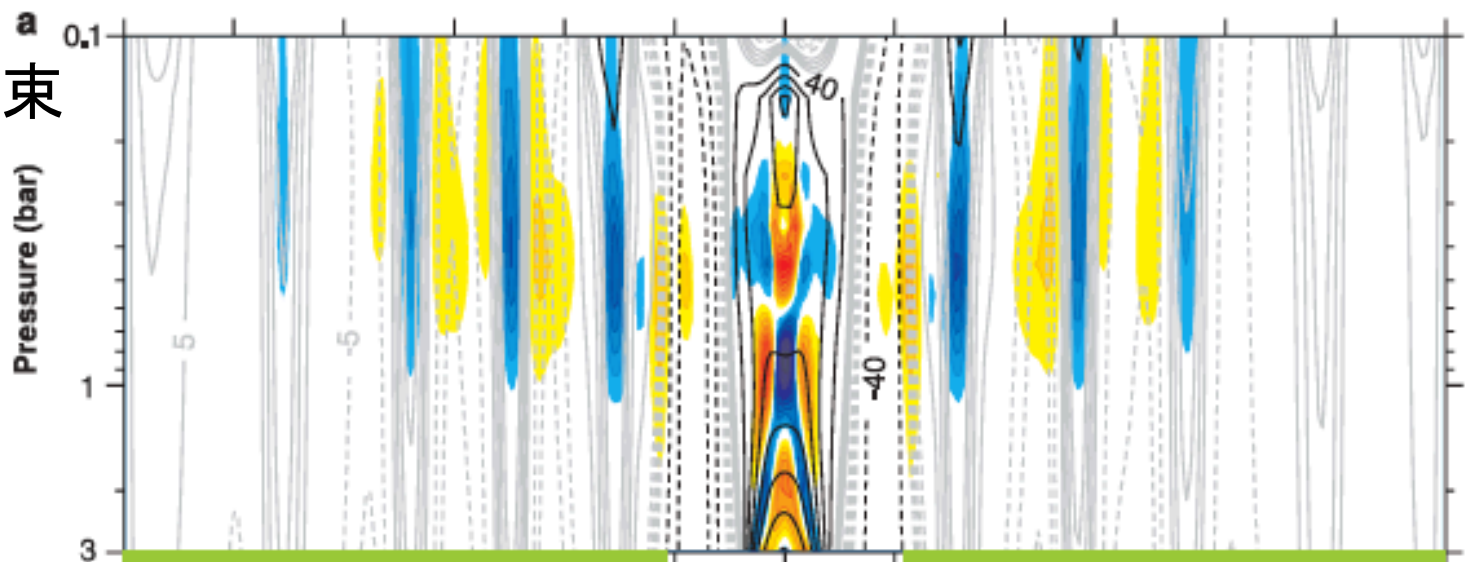
雲追跡による
東西風の緯度
分布



- 赤道では深部からの熱フラックスにより対流が生じ、ここからロスビー波が高緯度に向けて放射される結果、運動量が収束して赤道ジェットが作られる。
- 中・高緯度では太陽光加熱の緯度による違いによって傾圧不安定が生じ、ここから放射されるロスビー波に伴う運動量収束・発散によって西風や東風のジェットが作られる。



運動量収束



温度

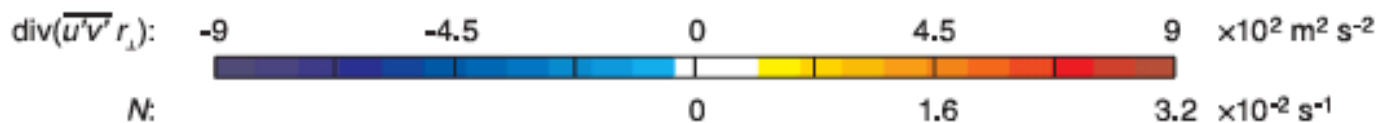
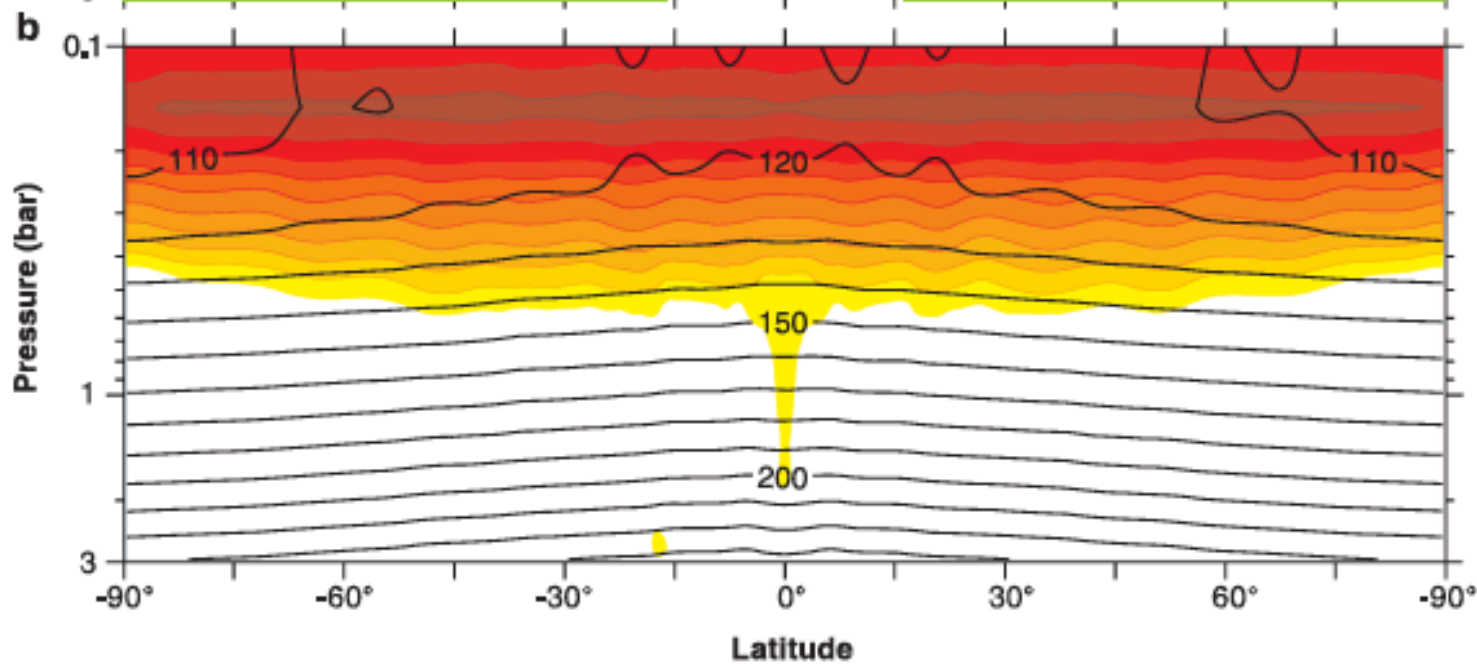


FIG. 4. Flow fields in the latitude–pressure plane in Jupiter simulation. (a) Zonal flow (contours) and divergence $\text{div}(\overline{u'v'} r_\perp)$ of meridional eddy angular momentum fluxes (colors). Gray contours for zonal