

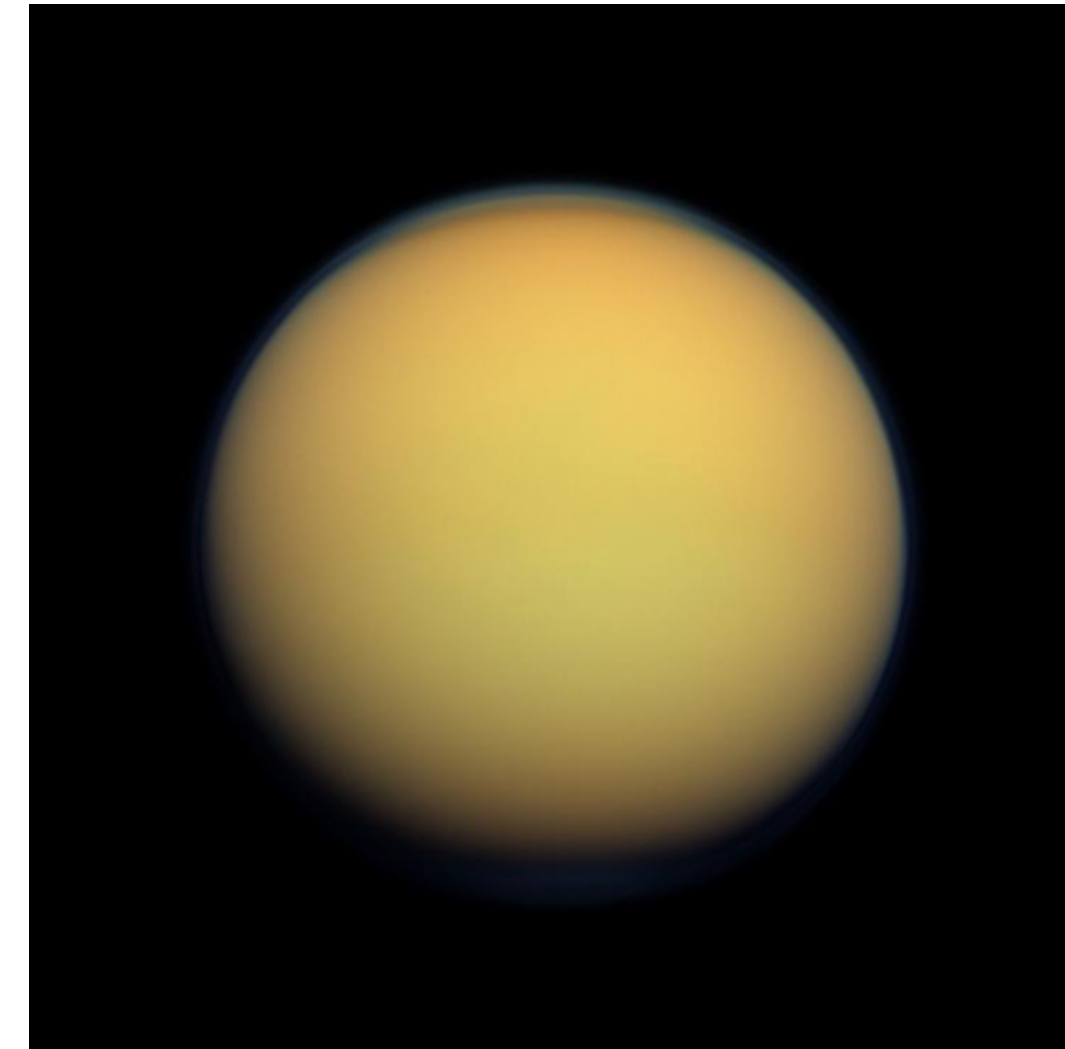
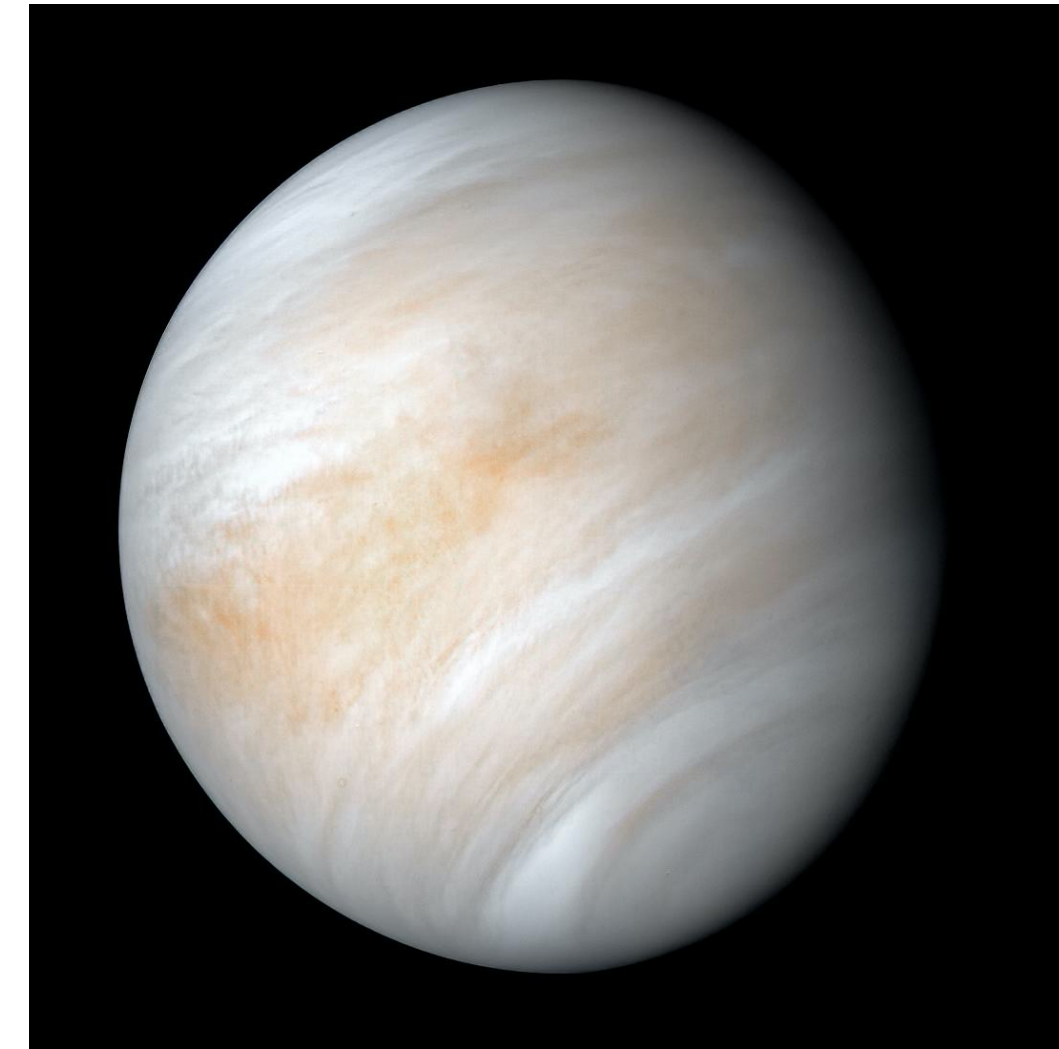
タイタンの成層圏超回転への ヘイズ層の影響

墨 幹¹, 竹広 真一², 大淵 済³, 野村 英子⁴, 藤井 友香⁴

1. 東京工業大学地球惑星科学系, 2. 京都大学数理解析研究所,
3. 大阪物療大学 / 神戸大学惑星科学センター, 4. 国立天文台科学研究部

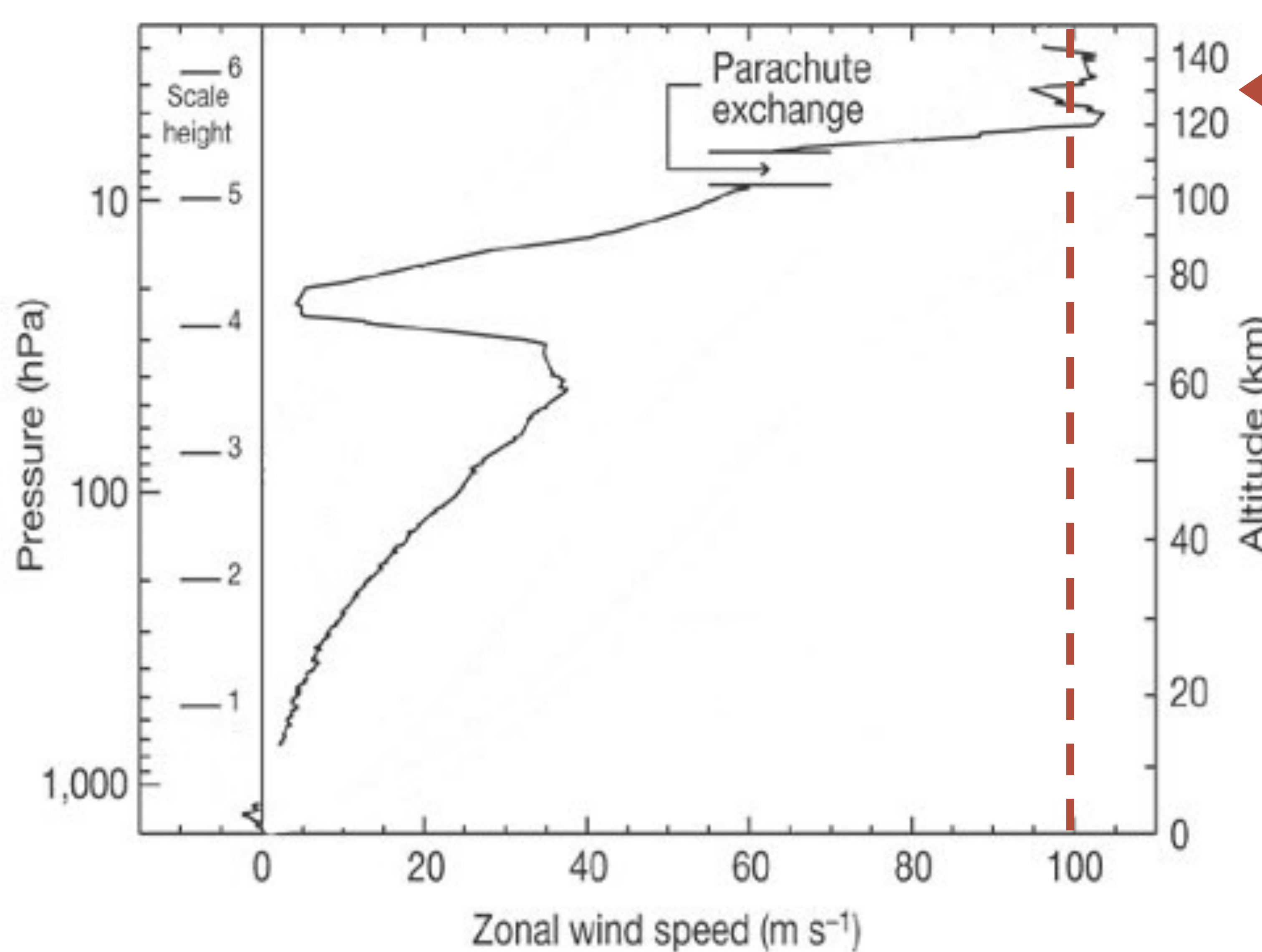
2020/09/24 惑星大気研究会

惑星パラメータの比較



	Earth	Venus	Titan
惑星半径(a)	6371 km	6052 km	2575 km
自転周期($T = 2\pi/\Omega$)	$0.997 T_{\oplus}$	$-243 T_{\oplus}$	$15.9 T_{\oplus}$
赤道自転速度($a\Omega$)	465 m s^{-1}	1.81 m s^{-1}	11.8 m s^{-1}
Rossby数($Ro = U/a\Omega$)	~ 0.02	~ 60	~ 10
太陽放射	1370 W m^{-2}	2617 W m^{-2}	$\sim 14.8 \text{ W m}^{-2}$
haze or cloud 層	-	40 ~ 80 km	100 ~ 400 km

タイタンのスーパーローテーション

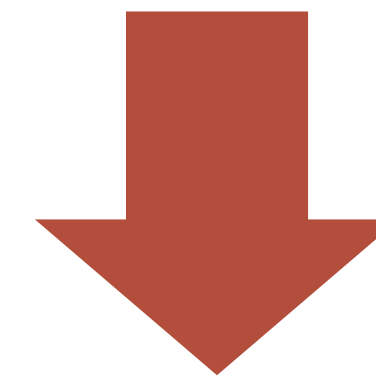


(赤道地表面の回転速度)

$$a\Omega \sim 11.8 \text{ m s}^{-1}$$

← $\times \sim 9$

大気が固体表面の自転を
追い越して回転する状態

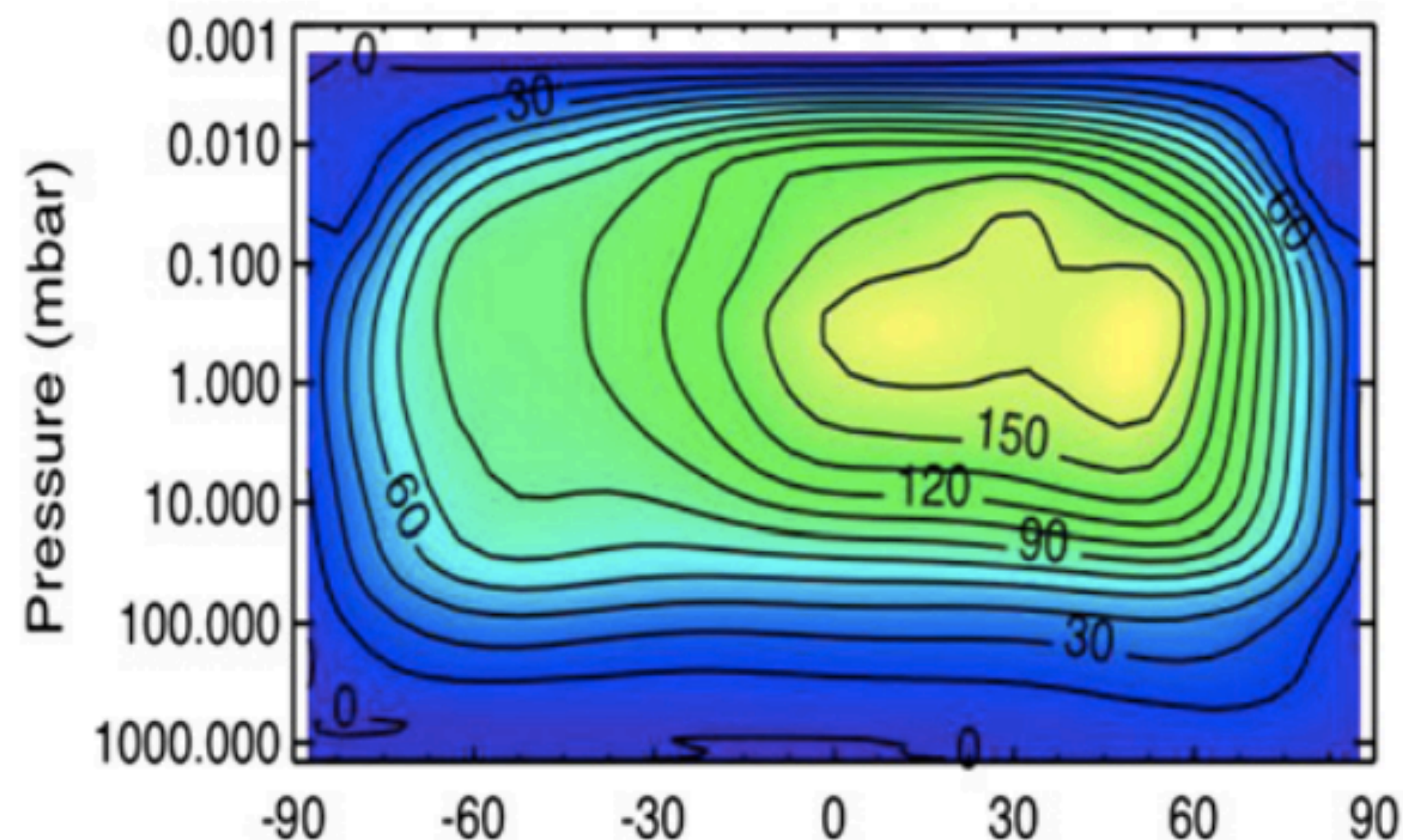


超回転
(スーパーローテーション)

Held (1999)

Bird et al. (2005)を一部改変

先行研究

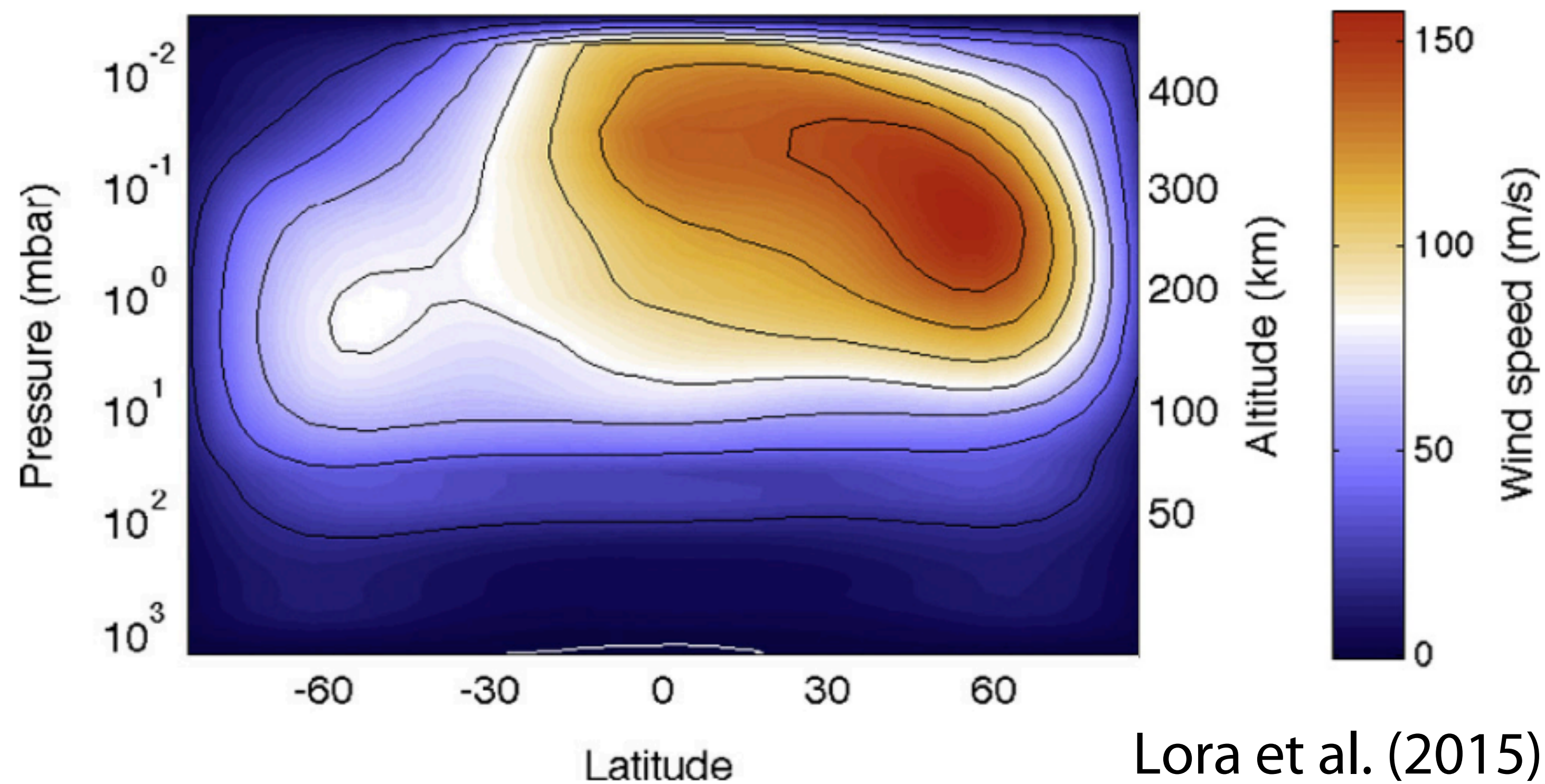


Newman et al. (2011)

- 現実的な大気を想定した3DGCM計算は行われている(Newman et al., (2011), Lebonnois et al., (2012), Lora et al., (2015))

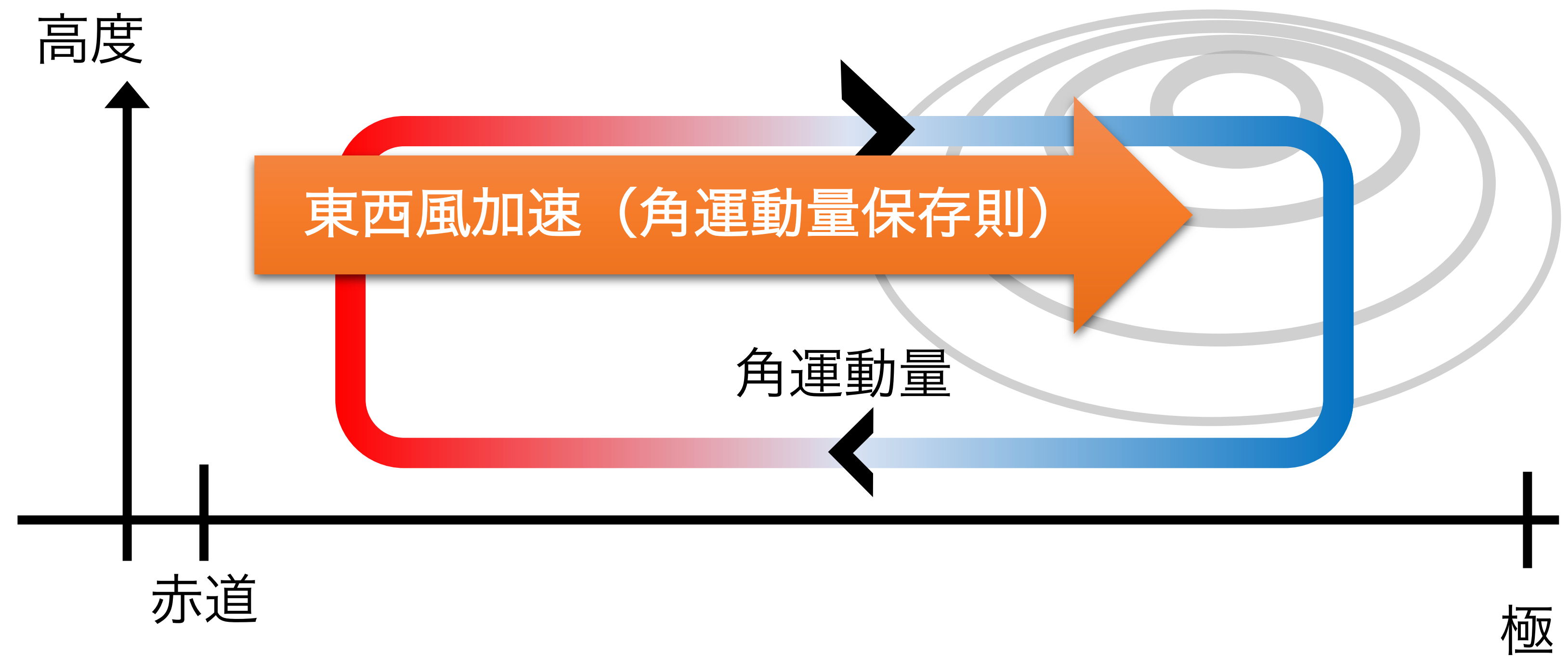
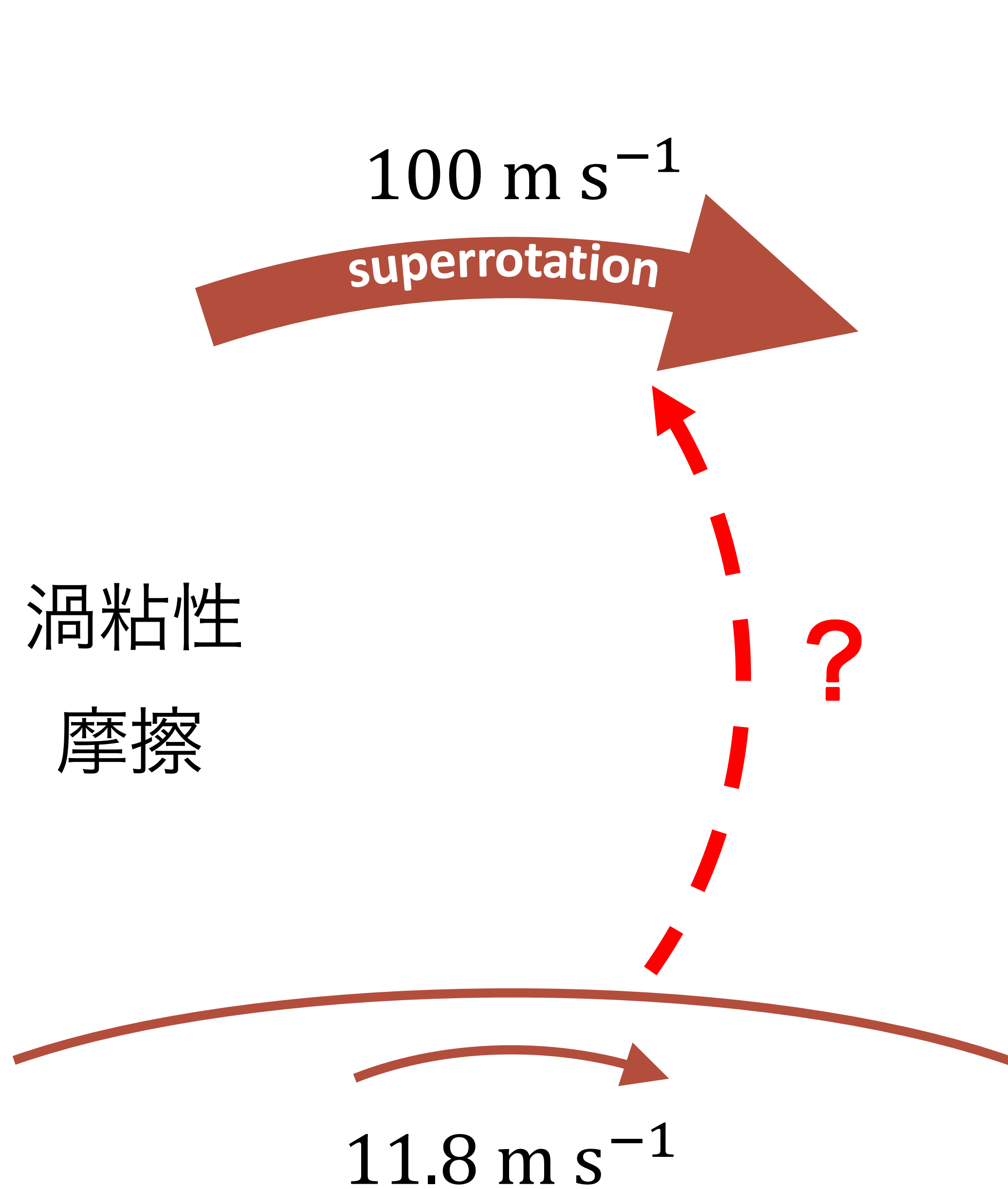
■ 複雑なモデル

- 季節変化
- メタンの循環
- 地形
- 土星の重力潮汐...



Lora et al. (2015)

超回転のメカニズム



■単純な子午面循環だと上空は角運動量保存

=>赤道上空は遅い

■どのように超回転は生成、維持されるのか？

=>角運動量を赤道上空に輸送、維持する機構は何か？

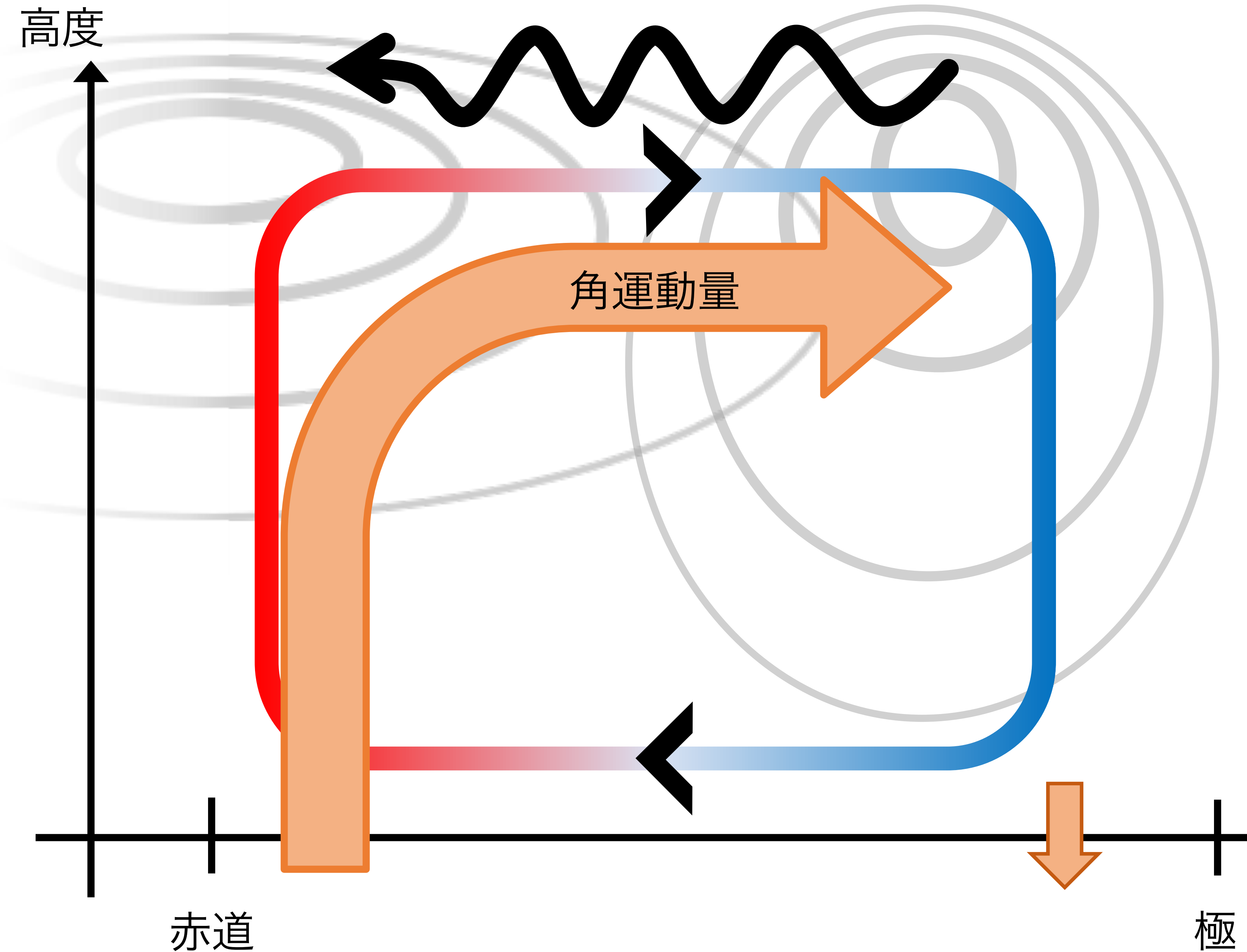
Gierasch メカニズム (1975)

■ Gierasch (1975) 機構の仮定

- 自転軸対称、赤道対称
- 赤道から極までのハドレー循環
- 無限大の水平粘性

■ 循環によって上層極側へ輸送される角運動量は水平粘性によって赤道へ戻される

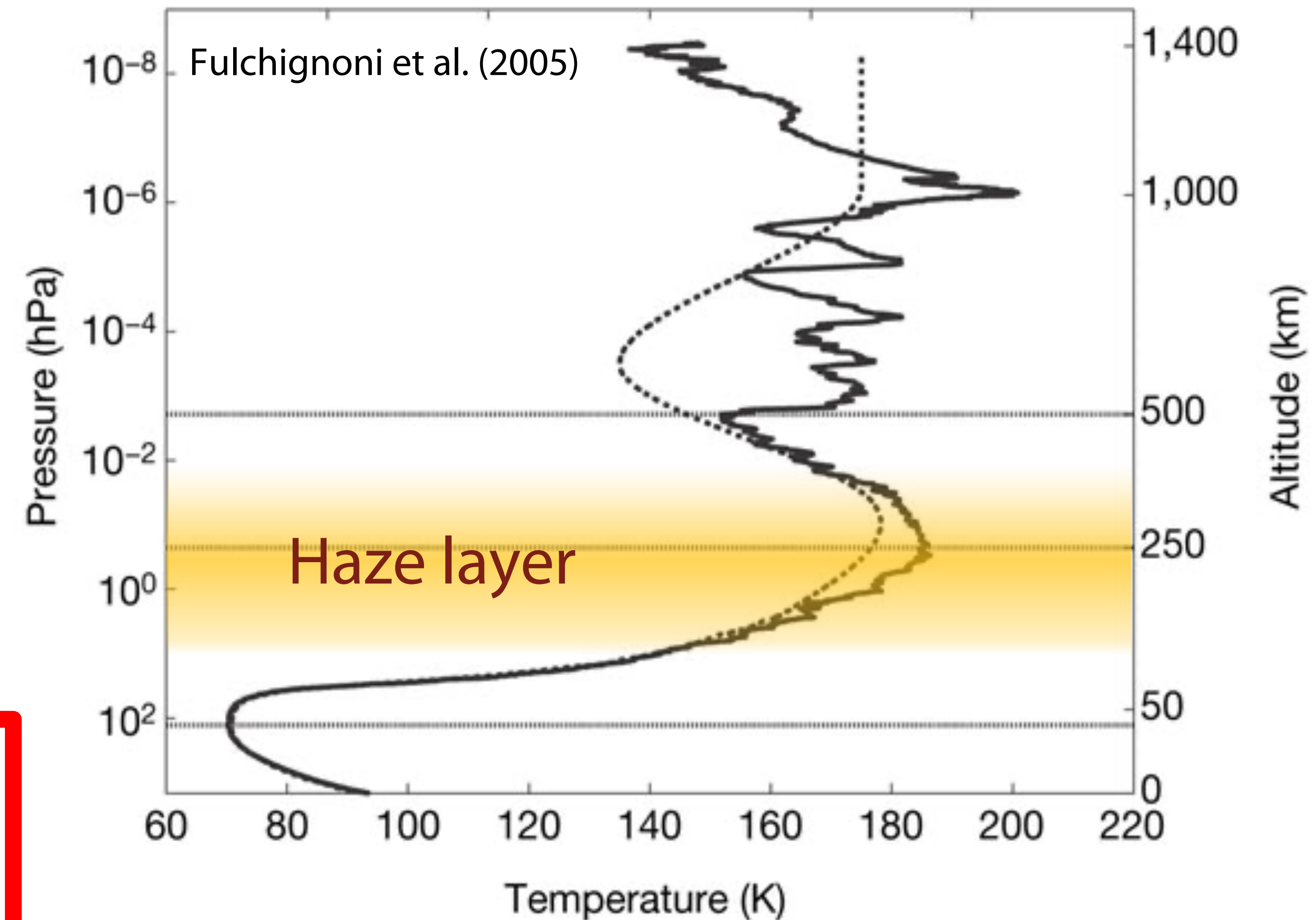
■ 現実的な大気では**波による運動量**
輸送が水平粘性の代替



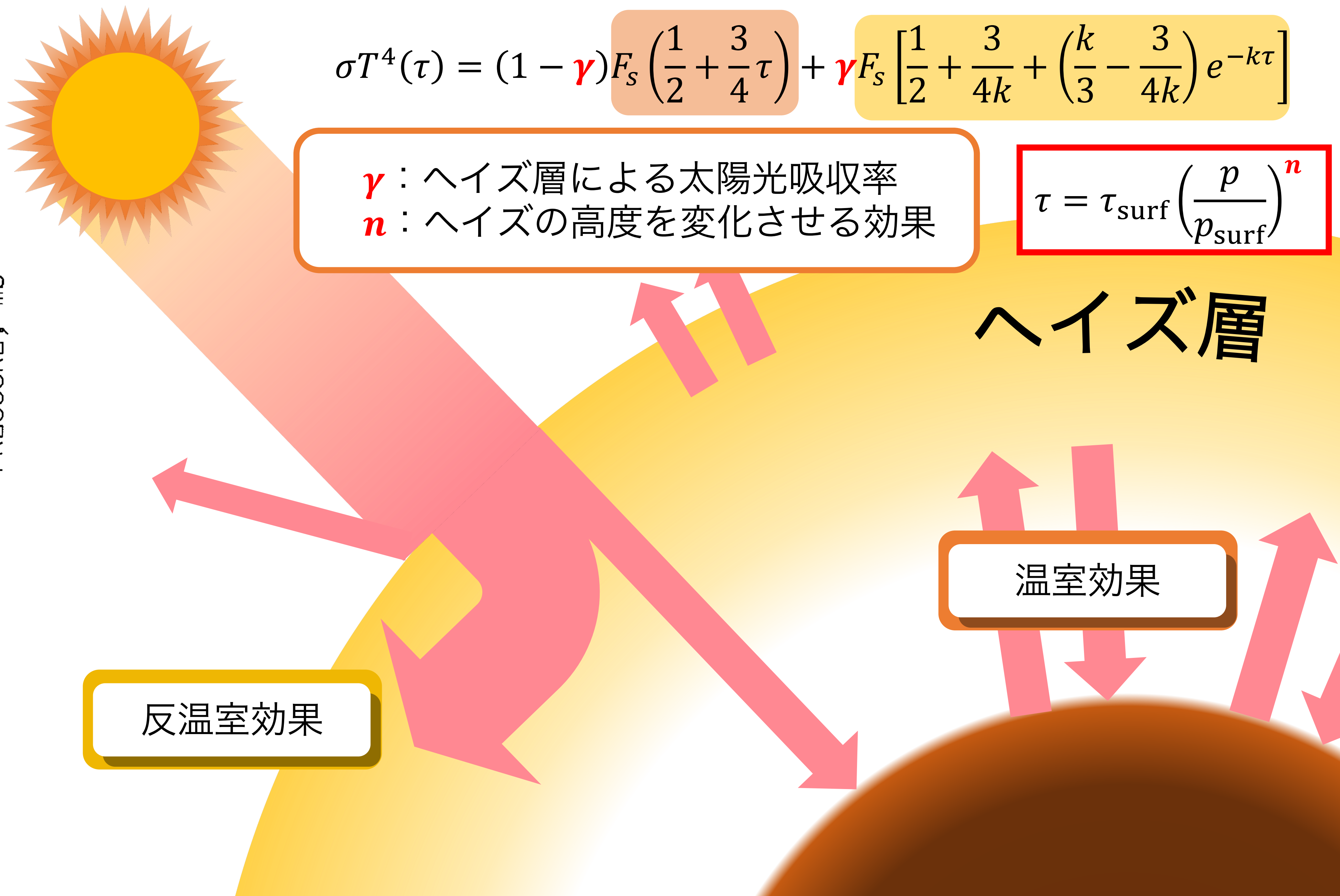
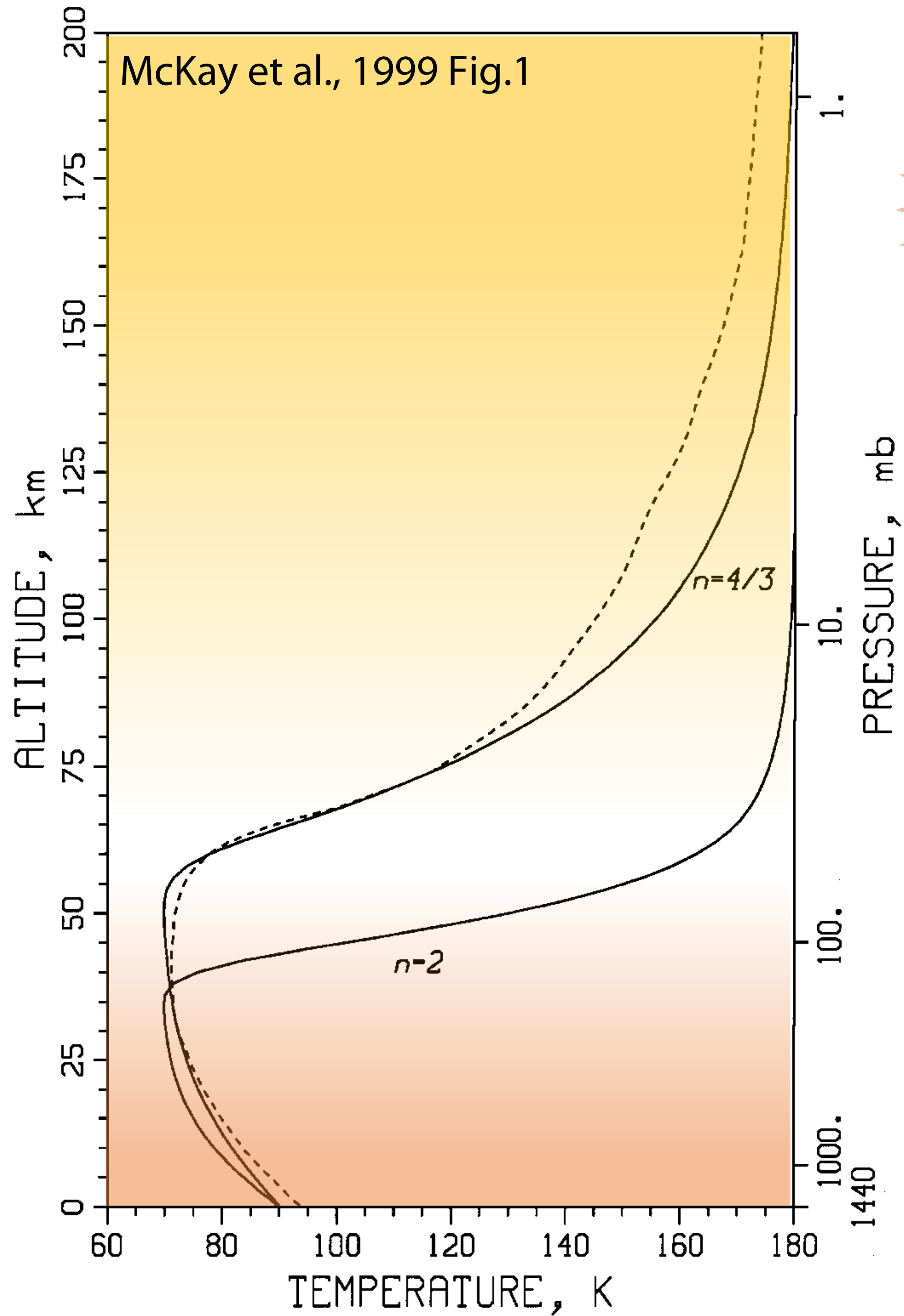
タイタンのヘイズ層

- 循環の形成には大気加熱構造が影響
- タイタンには分厚いヘイズ層が存在し、太陽放射の約90%を吸収
=>鉛直温度構造に大きく影響
- ヘイズ層による超回転への影響は詳しく明らかにされていない

ヘイズによる放射過程をパラメータ化し、大気力学への影響を調べる



放射過程のパラメーター化



$$\sigma T^4(\tau) = (1 - \gamma) F_s \left(\frac{1}{2} + \frac{3}{4} \tau \right) + \gamma F_s \left[\frac{1}{2} + \frac{3}{4k} + \left(\frac{k}{3} - \frac{3}{4k} \right) e^{-k\tau} \right]$$

γ : ヘイズ層による太陽光吸収率
 n : ヘイズの高度を変化させる効果

$$\tau = \tau_{\text{surf}} \left(\frac{p}{p_{\text{surf}}} \right)^n$$

ヘイズ層

温室効果

反温室効果

モデルの設定

■ GCM

- DCPAM (<https://www.gfd-dennou.org/library/dcpam>)

■ プリミティブ方程式

- 静水圧近似
- 薄い大気近似

■ 乾燥大気 – 積雲、凝結なし

■ 放射過程

- 東西一様なフラックス – 日変化なし
- 赤道対称 – 季節変化なし

■ 地表面付近にレイリー摩擦

■ 乾燥対流調節あり

■ 空間解像度

- 緯度 16 × 経度 32 × 鉛直 55 (T10L55)

■ 惑星定数

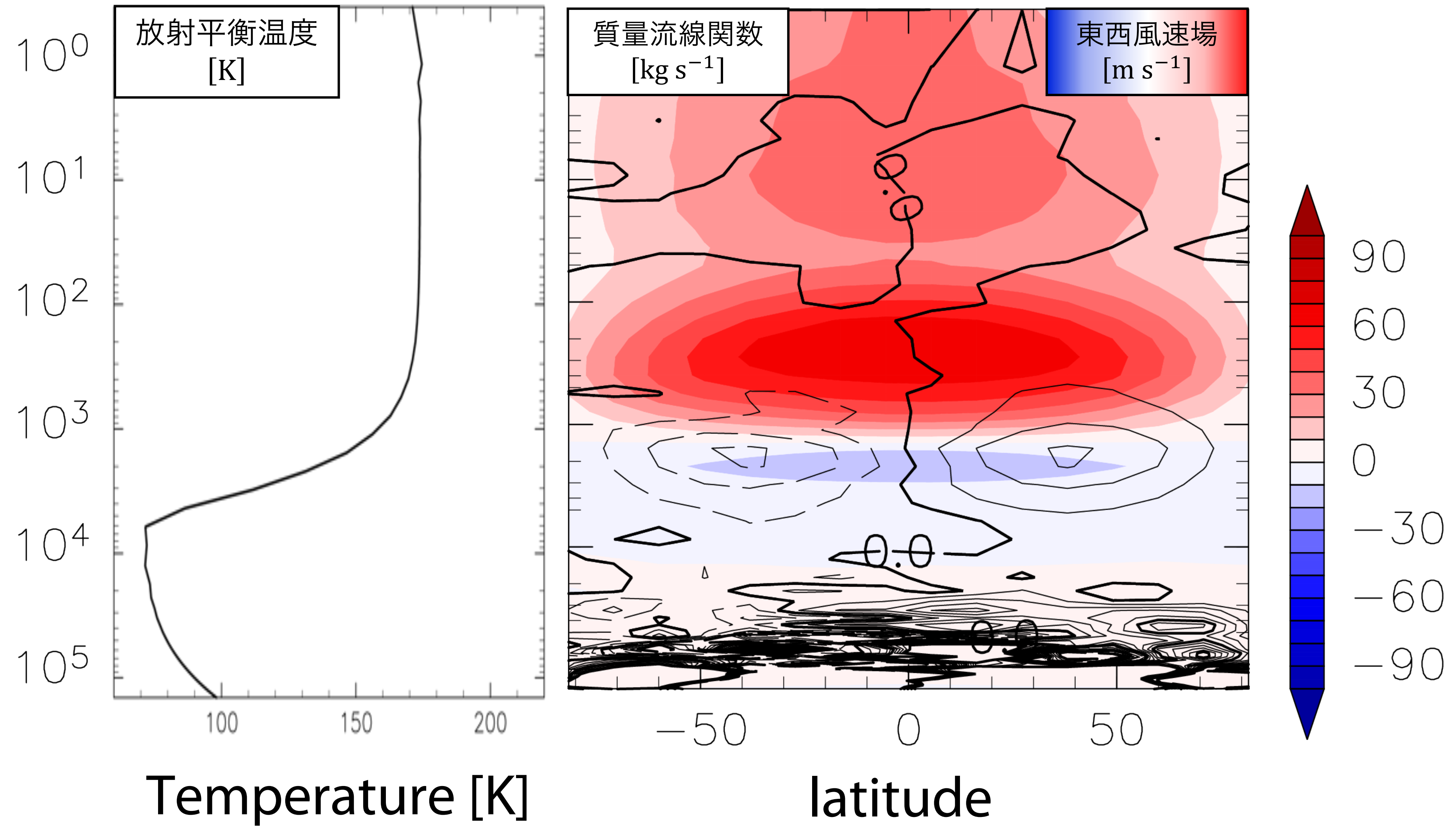
- 惑星半径 = 2575 km
- 自転周期 = 15.9 Earth day
- 重力加速度 = 1.35 m s^{-2}
- 地表面気圧 = $1.476 \times 10^5 \text{ Pa}$

■ 計算設定

- 積分時間 – 力学なしで10万日計算後、
力学ありで10万日計算（実時間で8日程度）
- 時間刻み – 1分

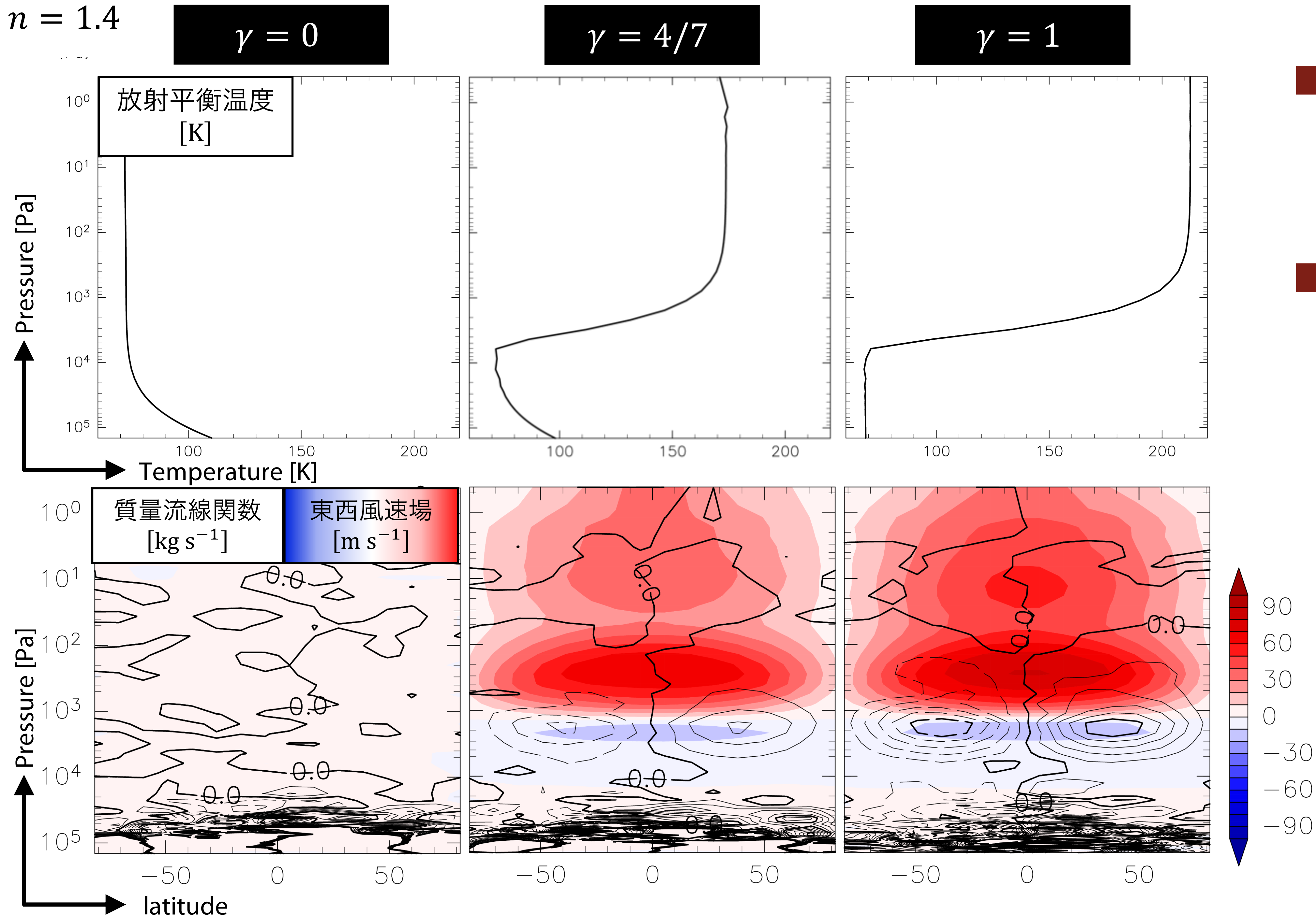
■ 国立天文台のスパコン Cray XC50 を使用

タイタンパラメータによる計算



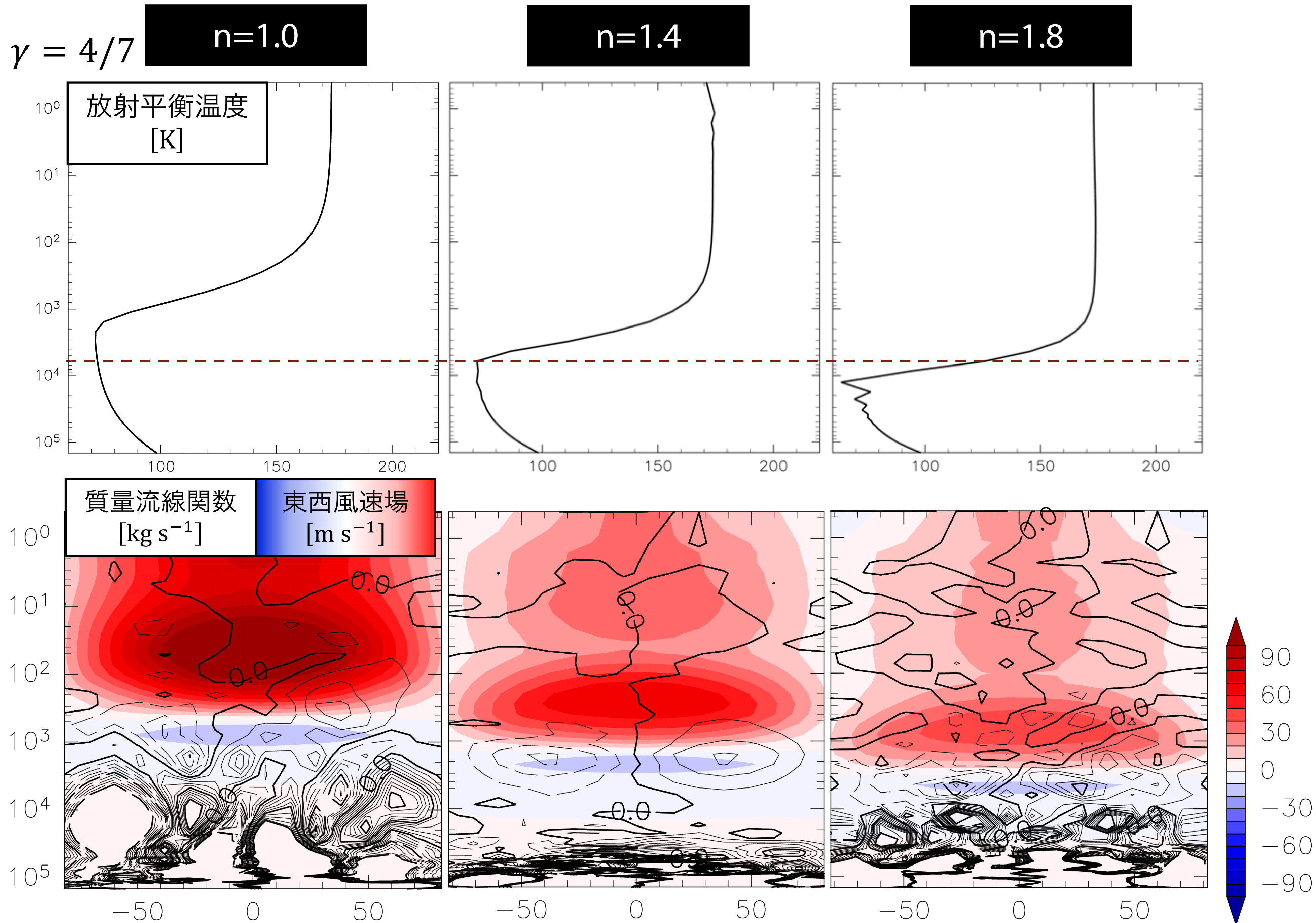
タイタン大気 ($n = 1.4, \gamma = 4/7$) の場合、赤道上空で $\sim 70 \text{ m s}^{-1}$ の西風

放射フラックス吸収率の影響 (東西風速場)



- 上層で放射が吸収される場合、超回転が発生、維持
- 超回転が維持される高度付近には赤道から極への循環が存在

ヘイズ鉛直分布の影響 (東西風速場)



■ヘイズによる放射吸収高度を低くすると、超回転高度も下がり、風速も減少する

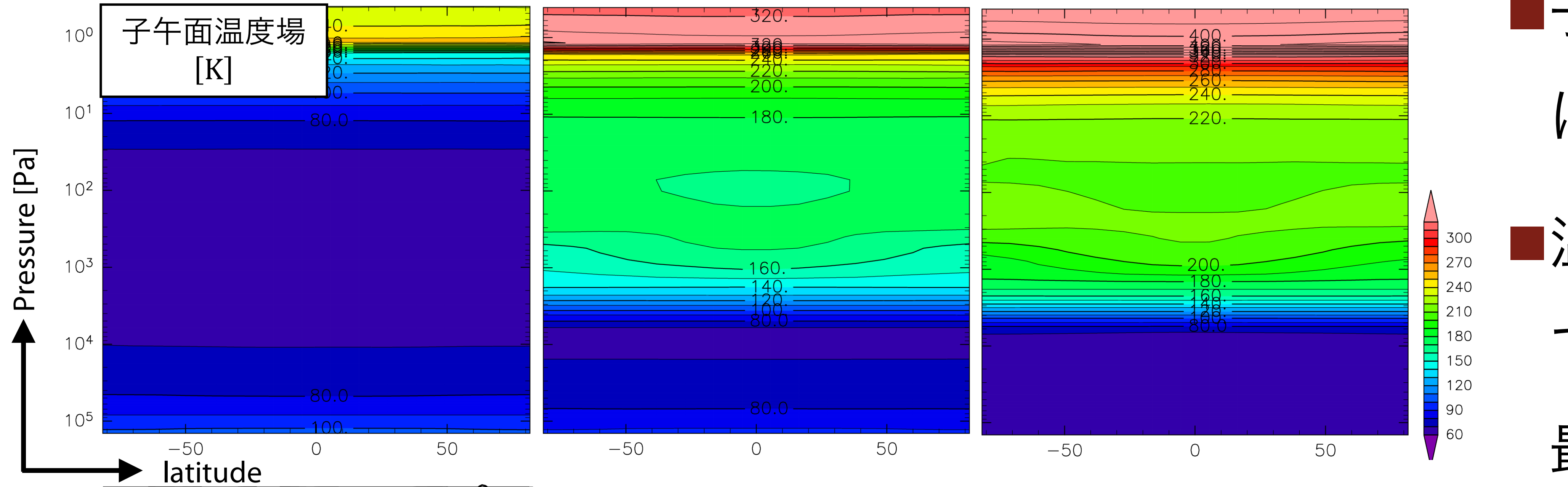
放射フラックス吸収率の影響 (温度場、加熱率)

$n = 1.4$

$\gamma = 0$

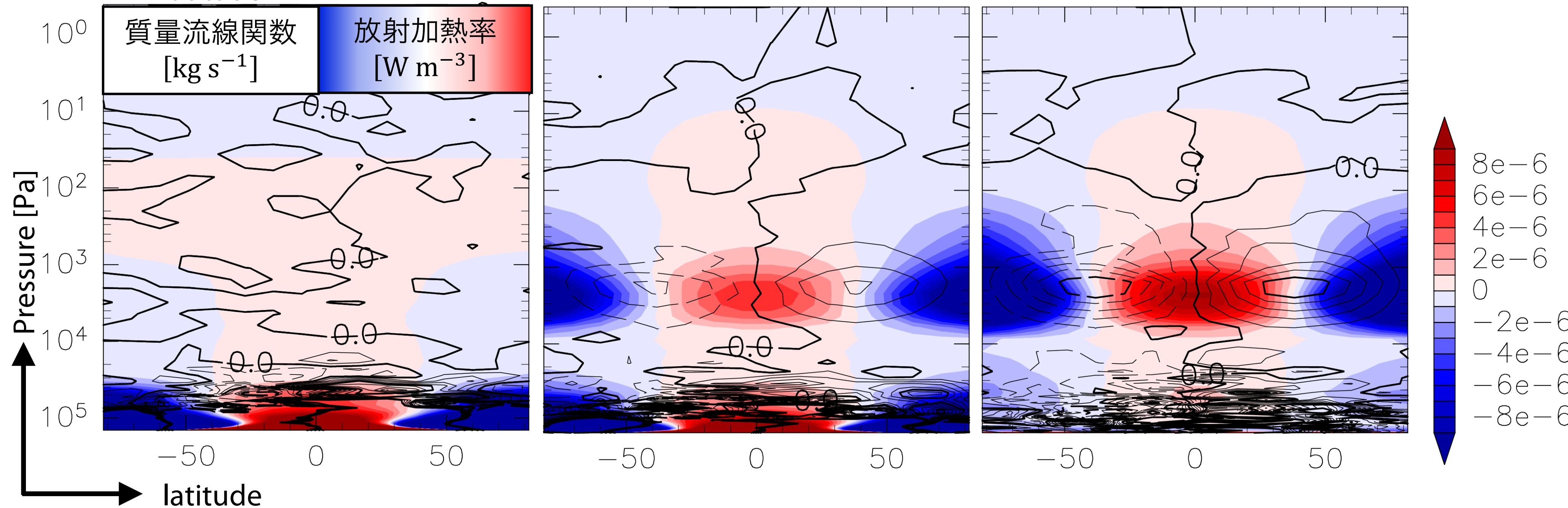
$\gamma = 4/7$

$\gamma = 1$

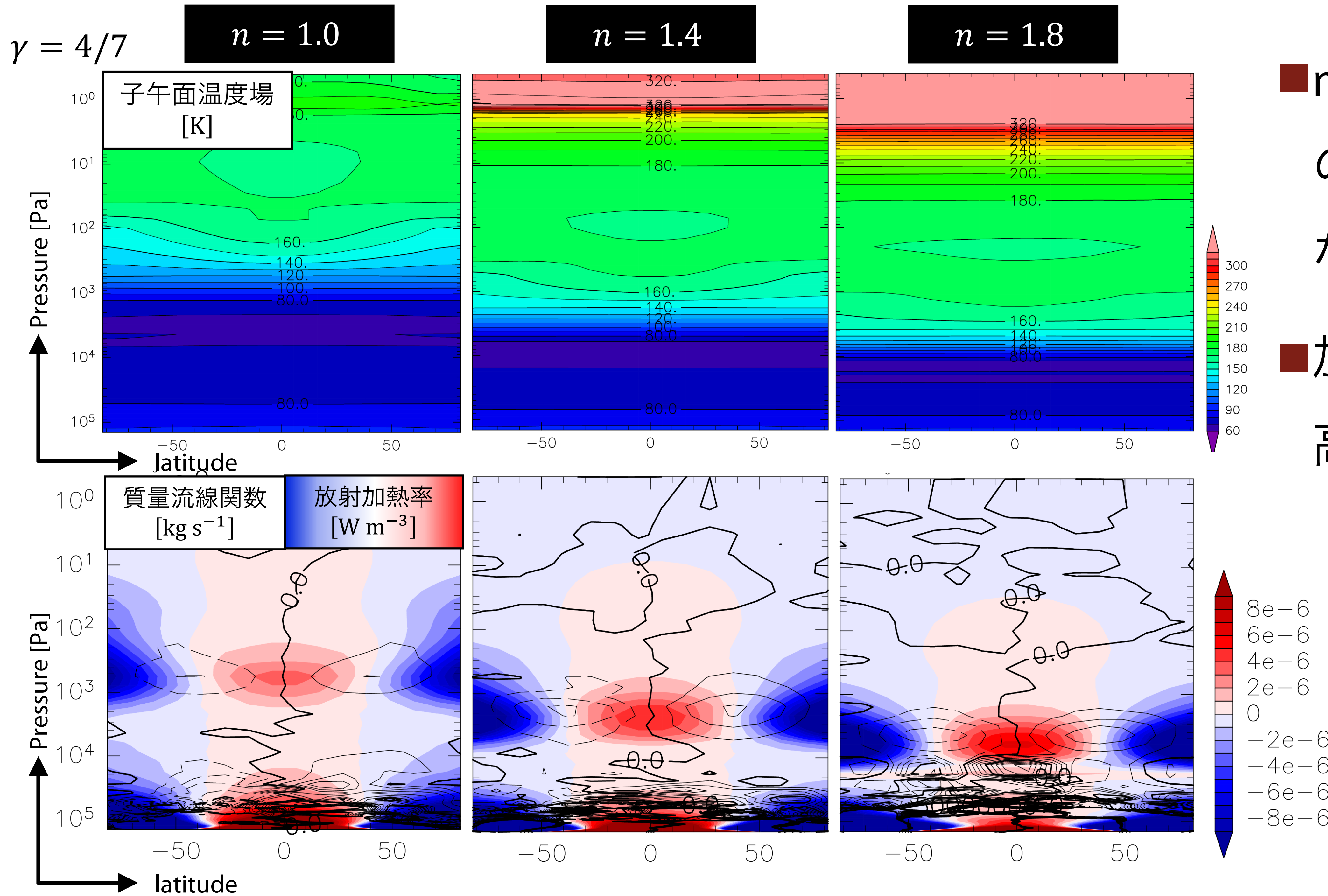


■ 子午面温度場は緯度方向に
ほぼ一様

■ 温度が急上昇する高度付近
で赤道-極の加熱率の差が
最も大きく、循環が発生



ヘイズ鉛直分布の影響 (温度場、加熱率)



- n を変化させても南北方向の温度勾配はほとんど変化なし
- 加熱率の南北変化が大きい
高度は n に合わせて変化

EP-Flux & Divergence (γ)

EP flux (惑星半径と地表面密度で規格)

$$\hat{\mathbf{F}} = (\hat{F}_\phi, \hat{F}_{z^*}) : \text{波による負の角運動量輸送 } \hat{F}_\phi = \sigma \cos \phi \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z^*} \frac{\overline{v'\theta'}}{\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z^*}} - \overline{u'v'} \right), \quad \hat{F}_{z^*} = \sigma \cos \phi \left(\left[f - \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial \bar{u} \cos \phi}{\partial \phi} \right] \frac{\overline{v'\theta'}}{\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z^*}} - \overline{u'w'} \right)$$

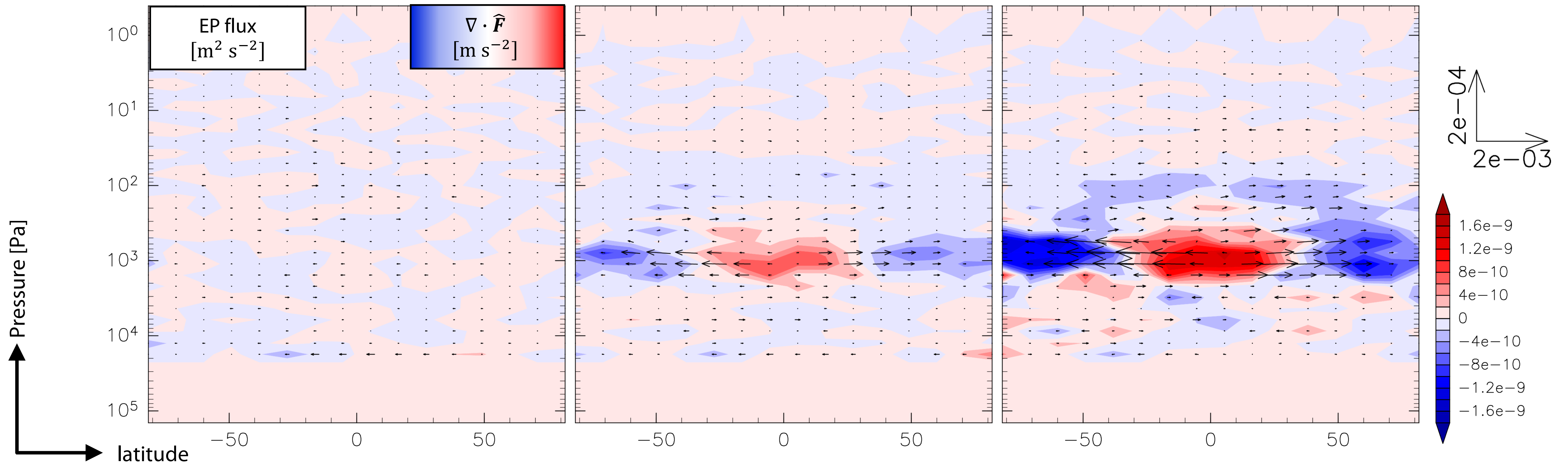
$$\nabla \cdot \hat{\mathbf{F}} = \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial (\cos \phi \hat{F}_\phi)}{\partial \phi} + \frac{\partial \hat{F}_{z^*}}{\partial z^*} : \text{波の角運動量輸送による平均流加速}$$

$n = 1.4$

$\gamma = 0$

$\gamma = 4/7$

$\gamma = 1$



EP-Flux & Divergence (n)

EP flux (惑星半径と地表面密度で規格)

$$\hat{\mathbf{F}} = (\hat{F}_\phi, \hat{F}_{z^*}) : \text{波による負の角運動量輸送 } \hat{F}_\phi = \sigma \cos \phi \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z^*} \frac{\overline{v'\theta'}}{\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z^*}} - \overline{u'v'} \right), \quad \hat{F}_{z^*} = \sigma \cos \phi \left(\left[f - \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial \bar{u} \cos \phi}{\partial \phi} \right] \frac{\overline{v'\theta'}}{\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z^*}} - \overline{u'w'} \right)$$

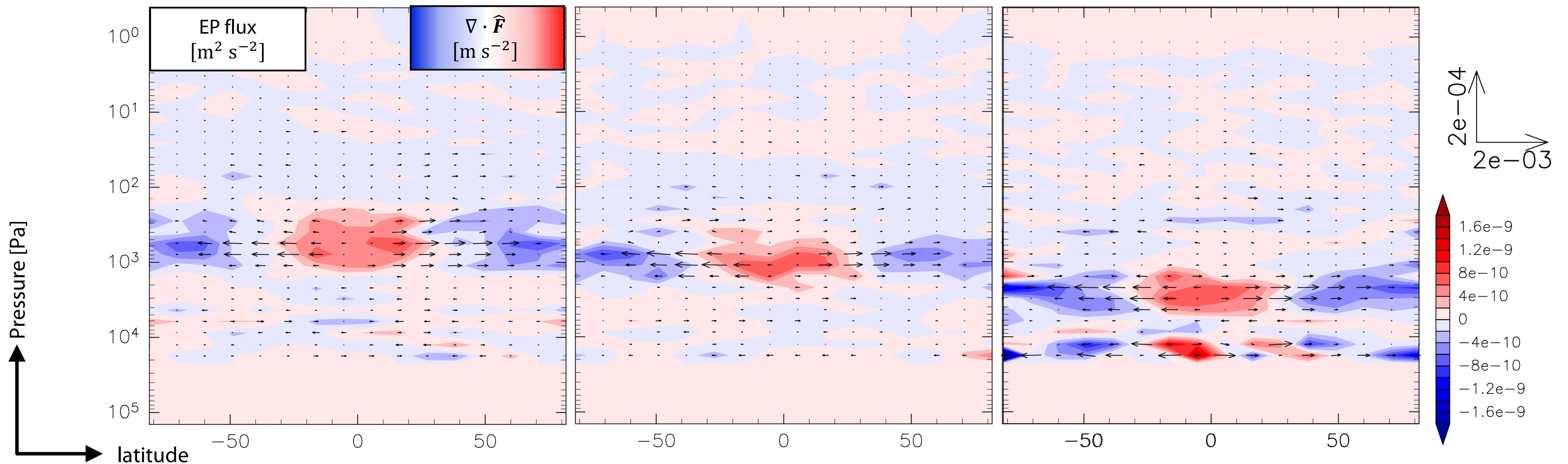
$$\nabla \cdot \hat{\mathbf{F}} = \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial (\cos \phi \hat{F}_\phi)}{\partial \phi} + \frac{\partial \hat{F}_{z^*}}{\partial z^*} : \text{波の角運動量輸送による平均流加速}$$

$\gamma = 4/7$

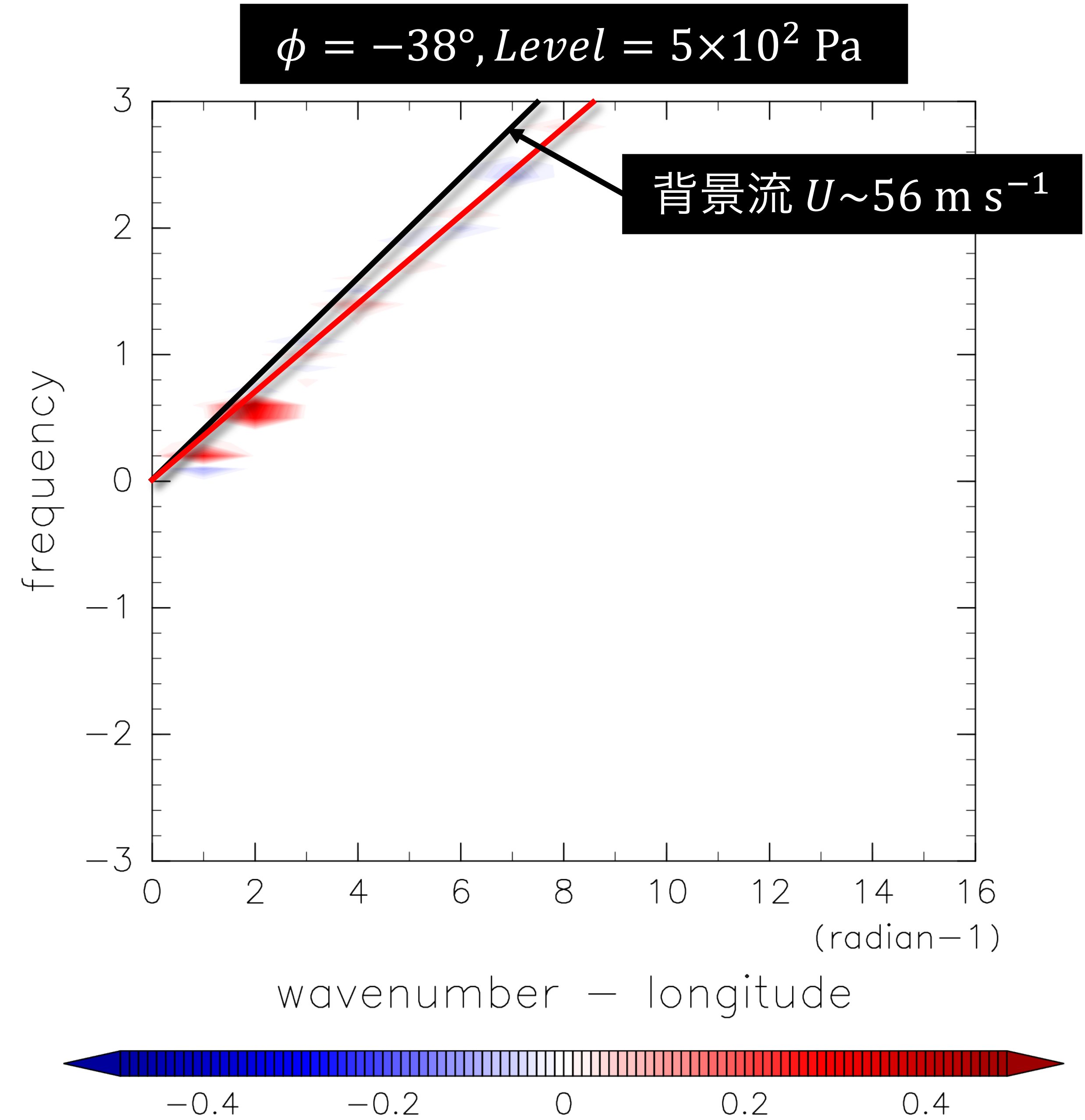
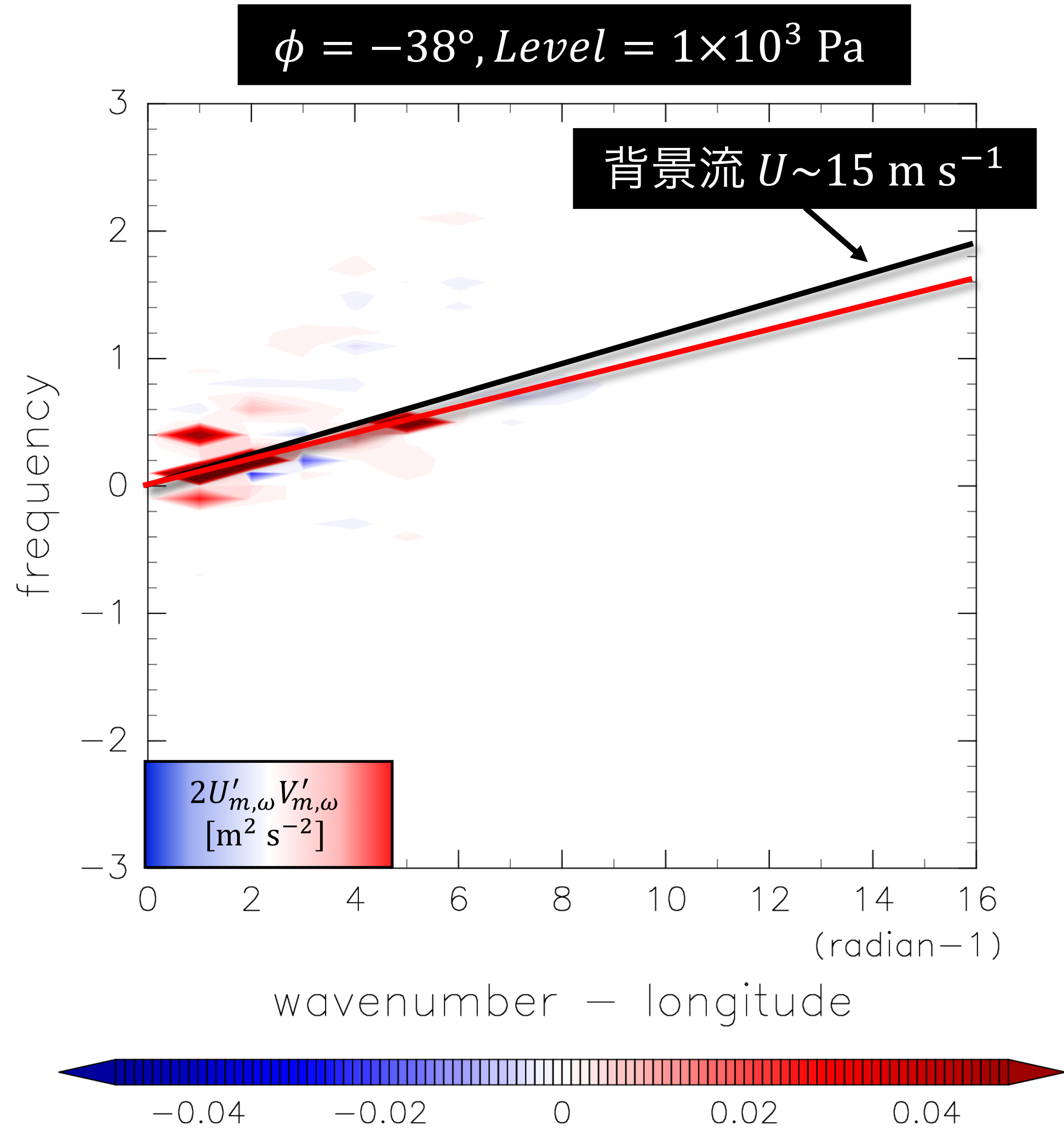
$n = 1.0$

$n = 1.4$

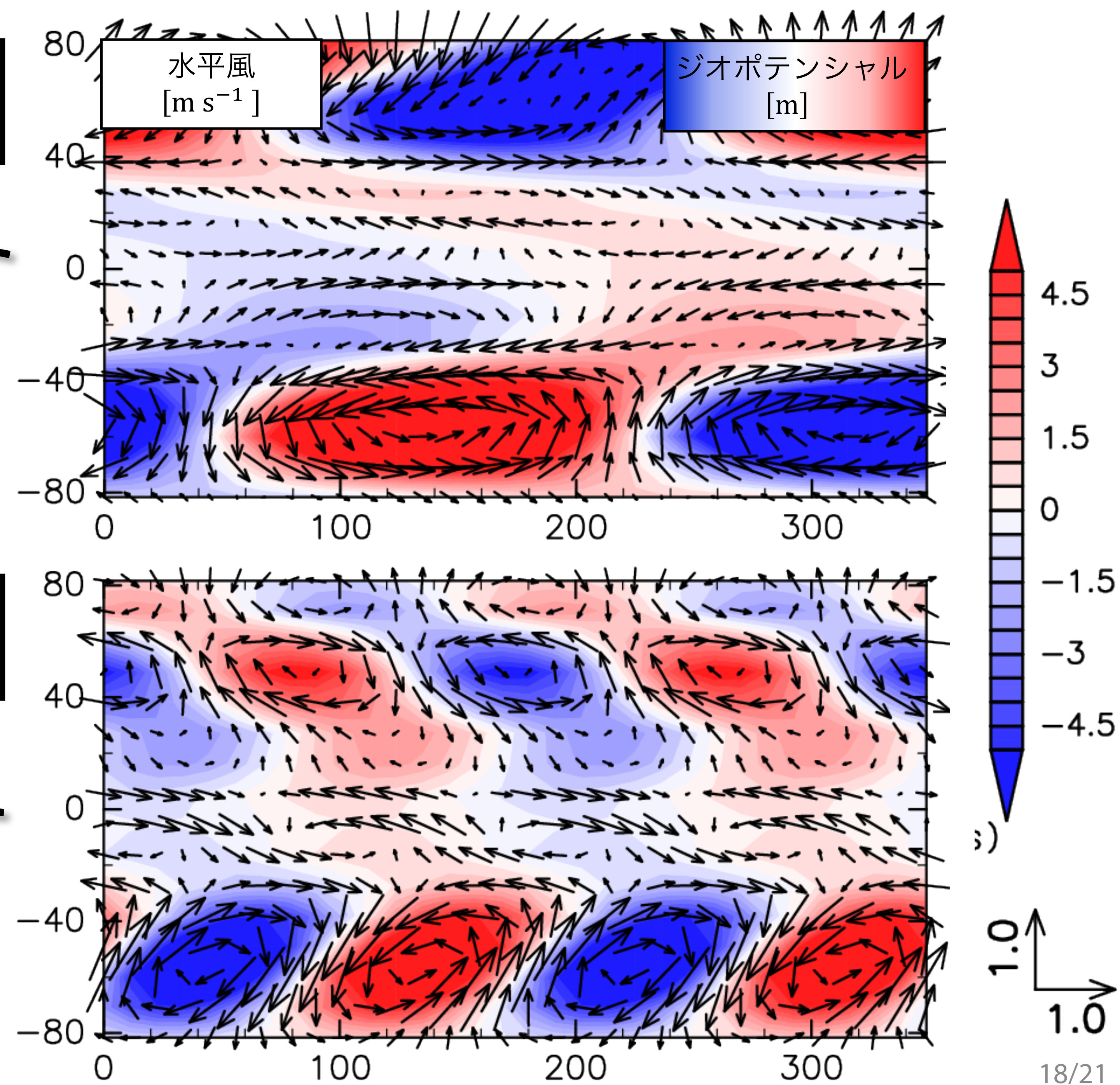
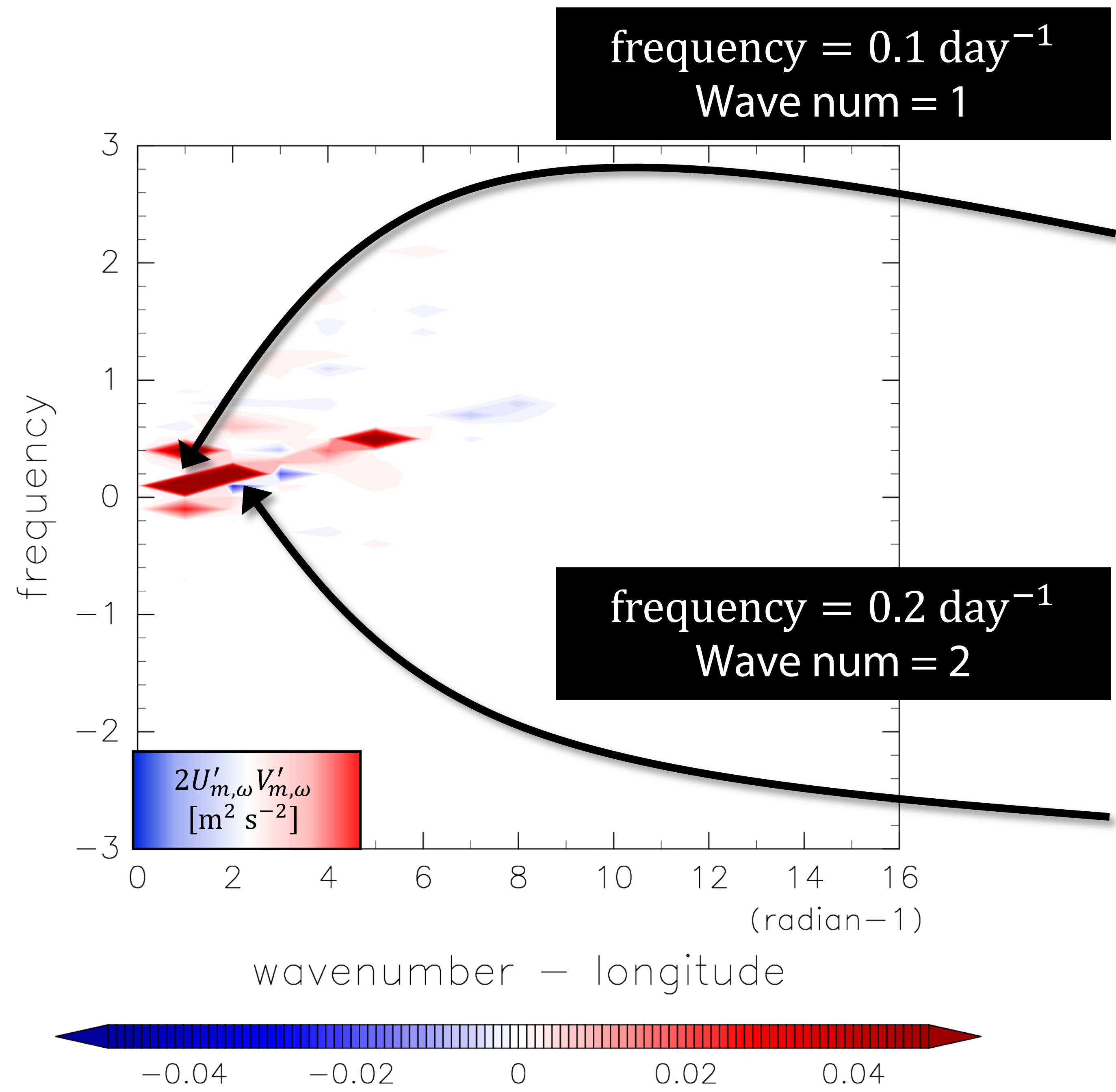
$n = 1.8$



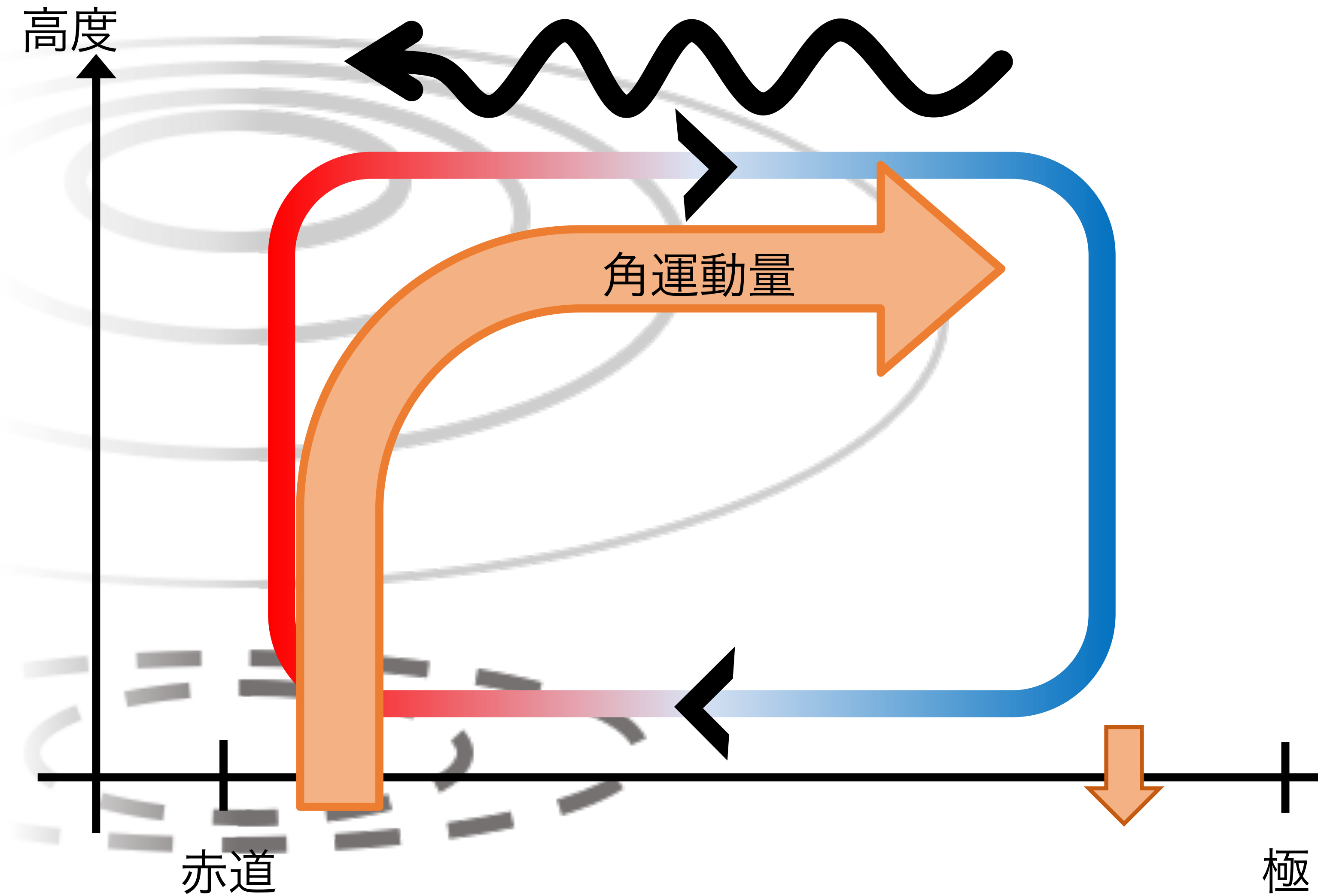
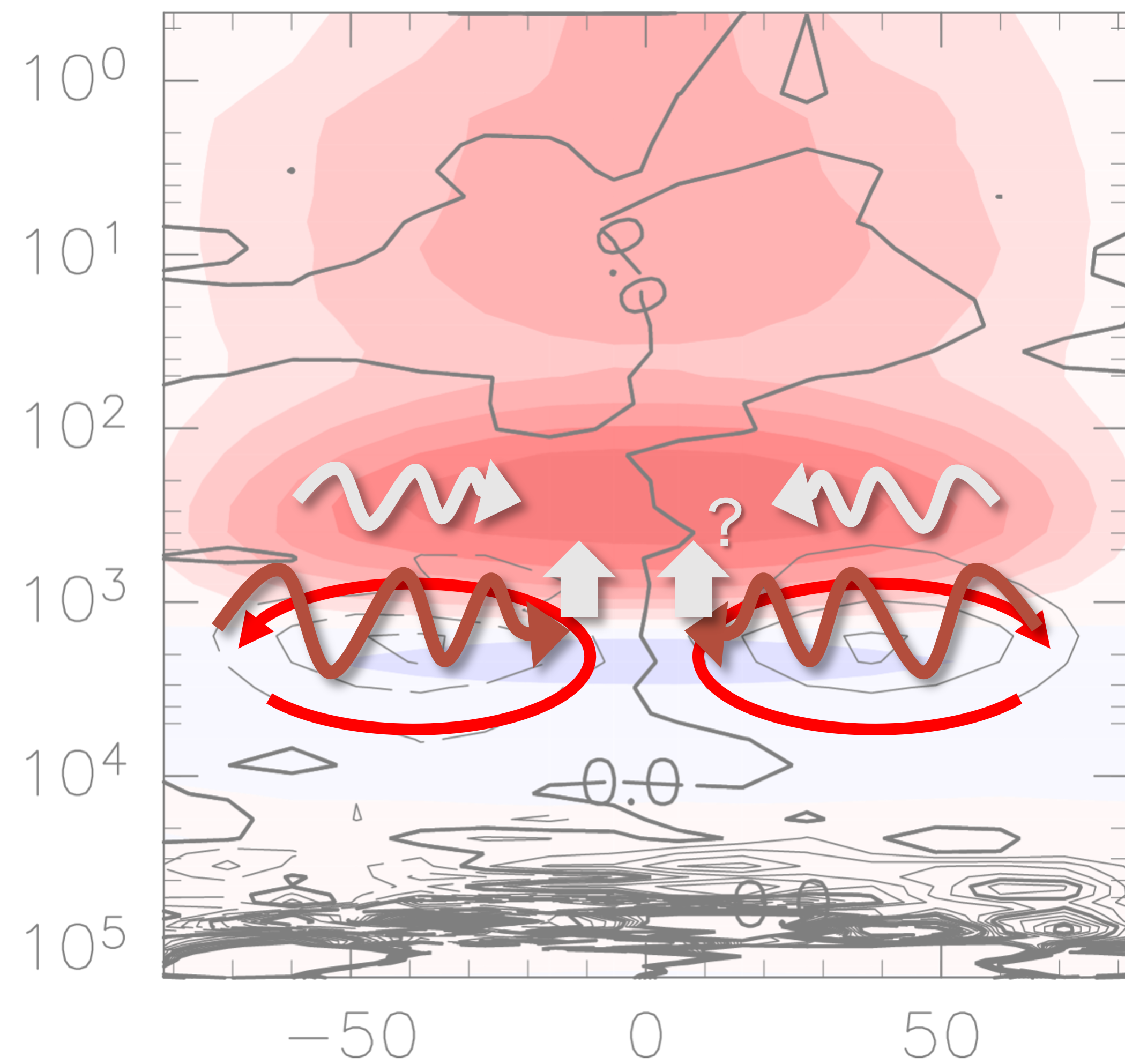
U'V'の分散関係 ($n = 1.4, \gamma = 1$)



波の水平構造

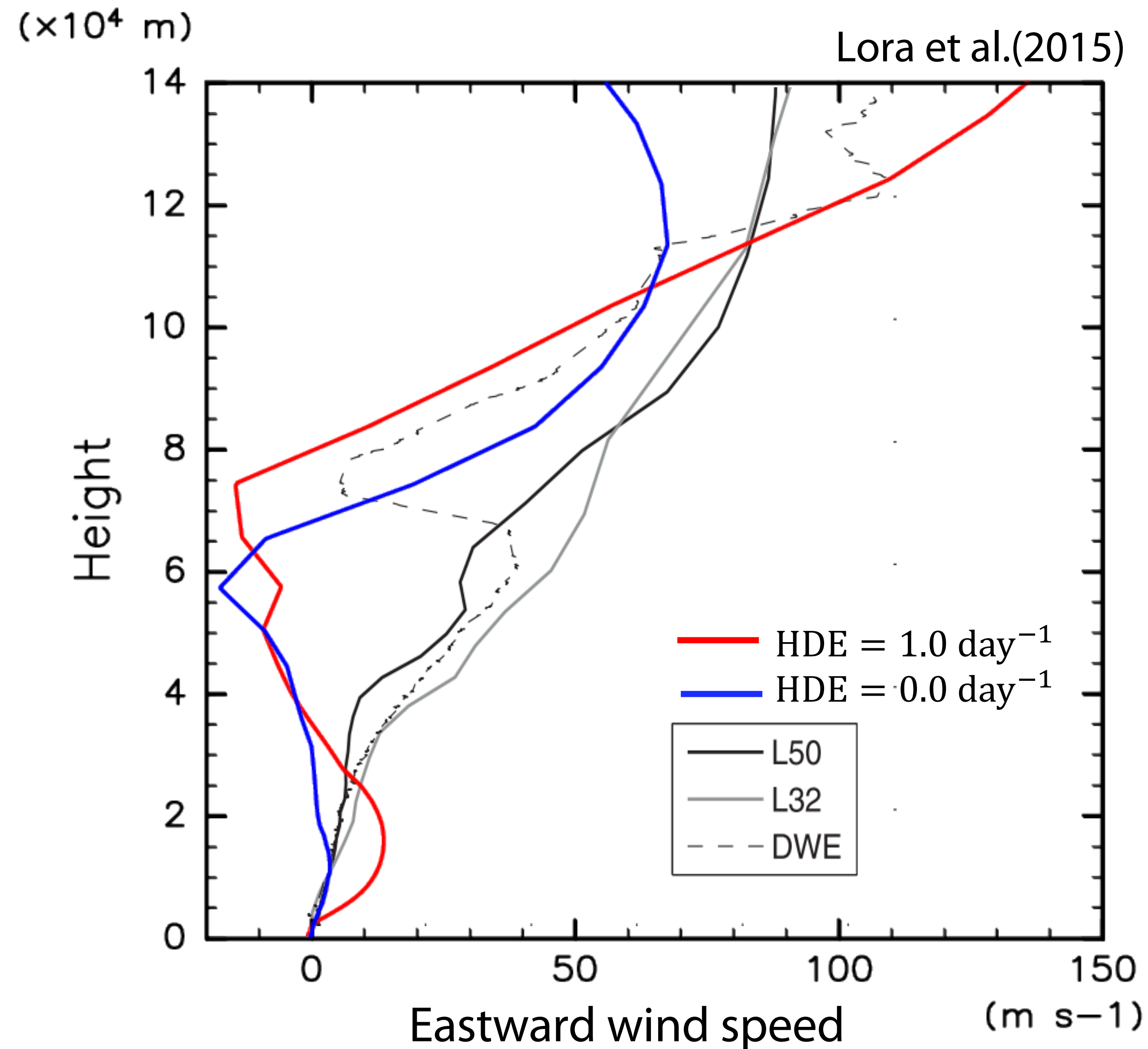


超回転を維持する構造



- ロスビー波による赤道方向へ角運動量輸送により超回転維持
- 波がもっとも発達する高度と風速最大の高度にずれ

観測との比較



- 先行研究 (Lora et al., 2015) と観測は風速-高度の関係がほぼ一致
 - 本研究は下層での風速が弱い
 - 超粘性を入れた計算では上層の風速-高度の関係に近い
 - 高度8km付近の風速が落ち込む領域は先行研究では再現できていない
- =>ヘイズによる純粋な影響によって再現？

まとめ

- タイタンの超回転におけるヘイズ層の影響を調べるため、ヘイズ層による放射場をパラメータ化し、パラメータの値を変化させて3DGCM計算を行った。
- ヘイズ層で太陽光を十分吸収して下層より高温になっている場合に、上層で超回転が発生し、維持された。
- 超回転が生じる高度は、ヘイズ層による太陽光吸収が強い高度に伴って変化した。
- 温度が急上昇する高度付近で、子午面循環が発生。また、その上部で波が発達し、赤道へ東向きに角運動量を輸送していることがわかった。
 - 波はロスビー波構造をとっている。