

**Mitchell and Vallis (2010)**  
**“The transition to superrotation in  
terrestrial atmospheres” のレビュー**

**檜村 博基 (宇宙研)**

Mitchell, J. L. & G. K. Vallis (2010) The transition to superrotation in terrestrial atmospheres.  
Journal of Geophysical Research-Planets, 115, doi:10.1029/2010JE003587

# 0 Mitchell & Vallis (2010) の要旨

- 簡単乾燥プリミティブモデルの数値実験
  - 加熱は自転軸対称
  - 熱ロスビー数を大きくすることで
  - 循環が地球的 → スーパーローテーションへ
- 熱ロスビー数が大きいとき
  - 超回転生成期には、混合順圧傾圧不安定からの波数1の傾圧波が赤道向きの角運動量輸送を担う
  - 超回転生成後は、波数1の順圧不安定波で維持

# ① イントロダクション

- 自転軸対称な大気は 角運動量 down-gradient な拡散がある場合には超回転できない (Hide 1969)
- つまり、up-gradient に輸送する非軸対称擾乱があるときのみ超回転可能  
... (中略) ...
- 金星の超回転を説明するためにも研究されてきた (Gierasch 1975 他)
- 本研究は、超回転を生み出す力学機構とその地球的循環との関係性 (パラメタ依存性) に着目する

## 2 数値モデル

- 乾燥プリミティブ方程式、理想気体、球面 (T42)

- 東西一様なニュートン加熱・冷却

- 安定成層

- 緩和時間 40日、4日 ( $p/p_s > 0.7$ )

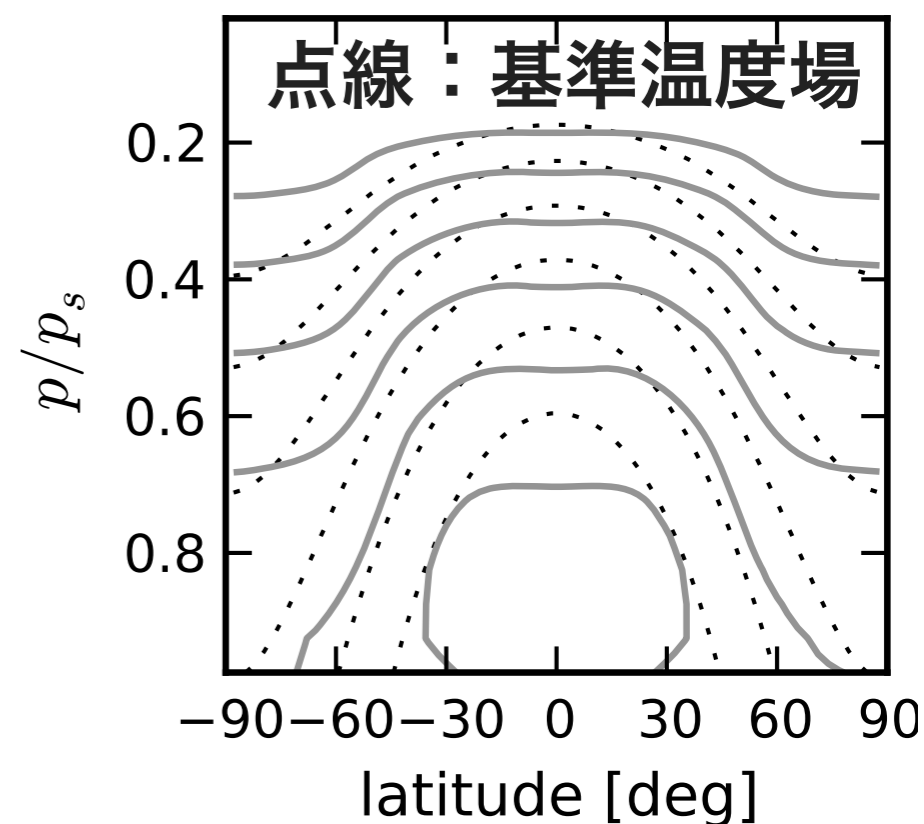
- 地表面摩擦：レイリー摩擦

- 緩和時間は 1日

- 鉛直拡散係数  $0.01 \text{ m}^2/\text{s}$  (非常に小さい)

- 4次の超粘性：大きさ不記載

(grid-scaleのエネルギーを散逸させるためとの記述あり)



Held & Suarez (1987) と同じような設定

# 3 無次元化とパラメータレジーム

運動方程式

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{u} + \mathbf{f} \times \mathbf{u} = -\nabla_p \Phi - r\mathbf{u},$$

$$(\hat{u}, \hat{v}) = \frac{(u, v)}{U} \quad \hat{w} = \frac{wa}{UH} \quad \hat{\Phi} = \frac{\Phi}{2\Omega Ua} \quad \hat{f} = \frac{f}{2\Omega} \quad \hat{t} = 2\Omega t \quad \hat{T} = \frac{T}{T_0 \Delta_H}$$

$U$  のスケールに温度風を使う  $U = \frac{RT_0 \Delta_H}{2\Omega a}$

$$\frac{\partial \hat{\mathbf{u}}}{\partial \hat{t}} + Ro_T (\hat{\mathbf{v}} \cdot \nabla \hat{\mathbf{u}}) + \hat{\mathbf{f}} \times \hat{\mathbf{u}} = -\nabla_{\hat{p}} \hat{\Phi} - E\hat{\mathbf{u}}$$

$$E = \frac{r}{2\Omega};$$

エクマン数

$$Ro_T = \frac{U}{2\Omega a} = \frac{(RT_0 \Delta_H)}{(2\Omega a)^2}$$

熱ロスビー数

他にも  $\hat{t} = 2\Omega \tau$  などが無次元パラメータ

## 4 数値実験

- 地球に比べて
  - 金星は  $\Omega$  が非常に小さい
  - タイタンは  $\Omega$  が小さい &  $a$  が小さい
- モデルコードは有次元なので、 $\Omega$  を変えると  $E$ ,  $\hat{\tau}$  も変わるので面倒
- 本実験では  $a$  を変えることで  $Ro_T$  を変える

**Table 1.** Parameters for Experiment Design<sup>a</sup>

	$Ro_T$		
	0.02	1.3	10.5
$a$	$6.4 \times 10^6$ m	$8 \times 10^5$ m	$2.8 \times 10^5$ m
$\Omega$	$7 \times 10^{-5}$ s <sup>-1</sup>	—	—
$T_o$	285 K	—	—
$\Delta_H$	0.2	—	—

<sup>a</sup>A dash indicates the same value as that of the entry on its left.

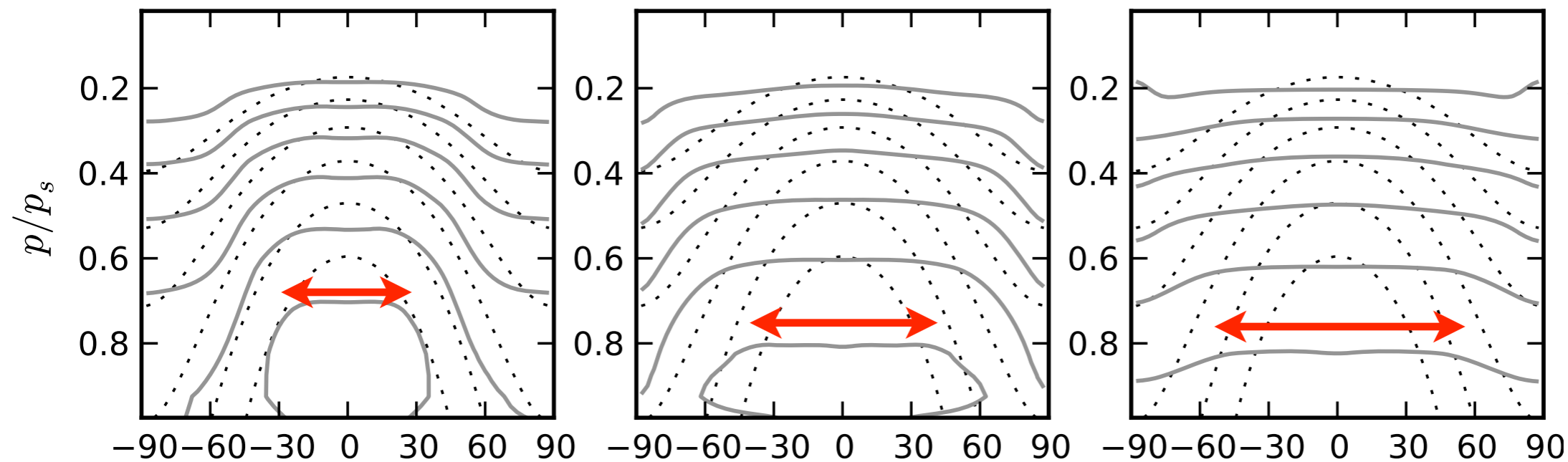
# 4-1 準定常後の平均温度場 / 流速場

$Ro_T = 0.02$

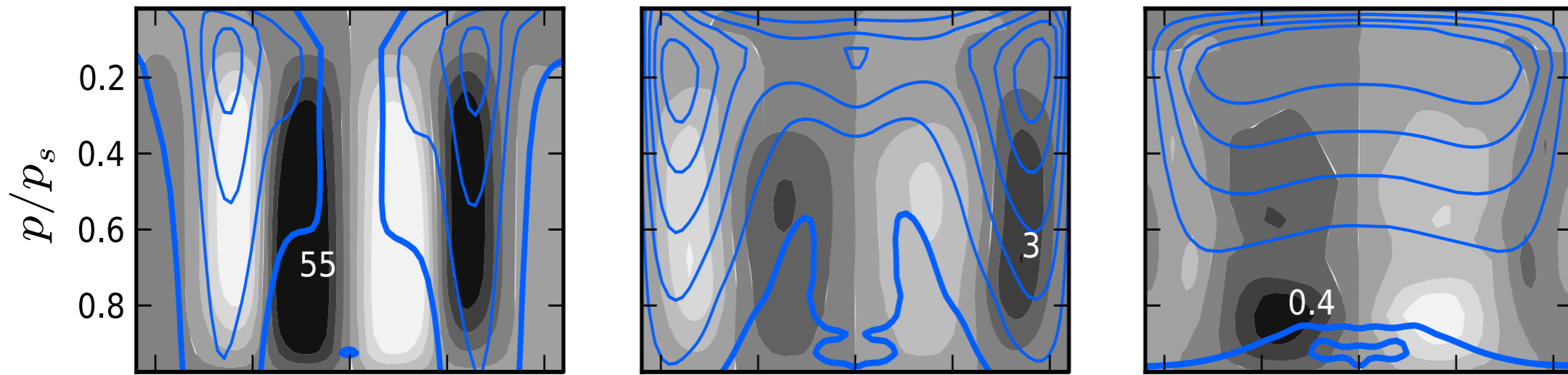
$Ro_T = 1.3$

$Ro_T = 10.5$

実践：平均温度場  
点線：基準温度場



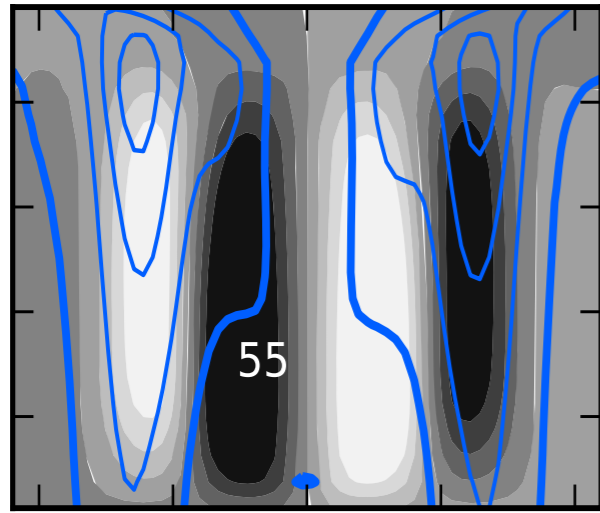
平均流速場



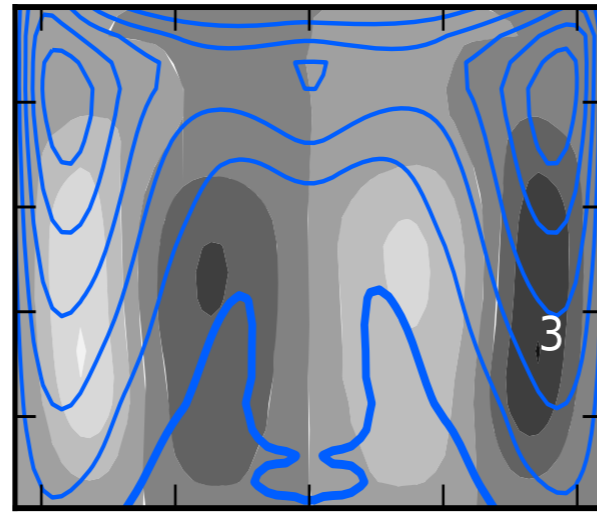
$Ro_T$ ：大ほど、南北に温度一定の範囲が広がる  
→ハドレー循環の拡大に対応

# 4<sub>1</sub> 準定常後の平均温度場 / 流速場

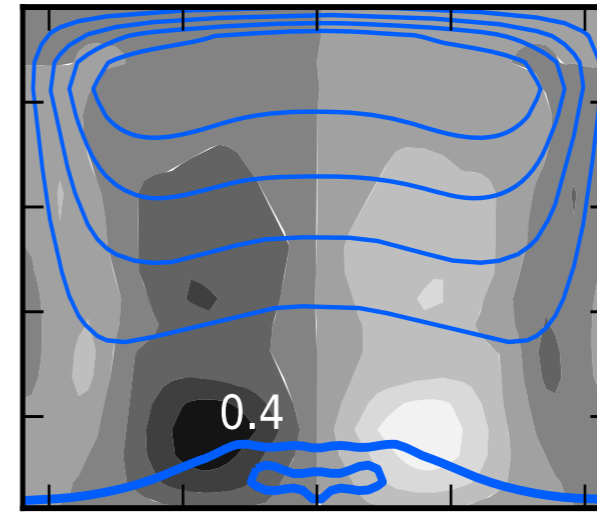
$Ro_T = 0.02$



$Ro_T = 1.3$



$Ro_T = 10.5$



平均流速場

## 平均子午面循環

- $Ro_T: 0.02 \rightarrow 1.3$ 
  - ハドレーセルの拡大、フェレルセルの極側シフト
- $Ro_T: 10.5$ 
  - 境界層 ( $p/p_s > 0.7$ )の中に、弱い
  - 上空では傾いている ← 対称 (傾斜) 不安定

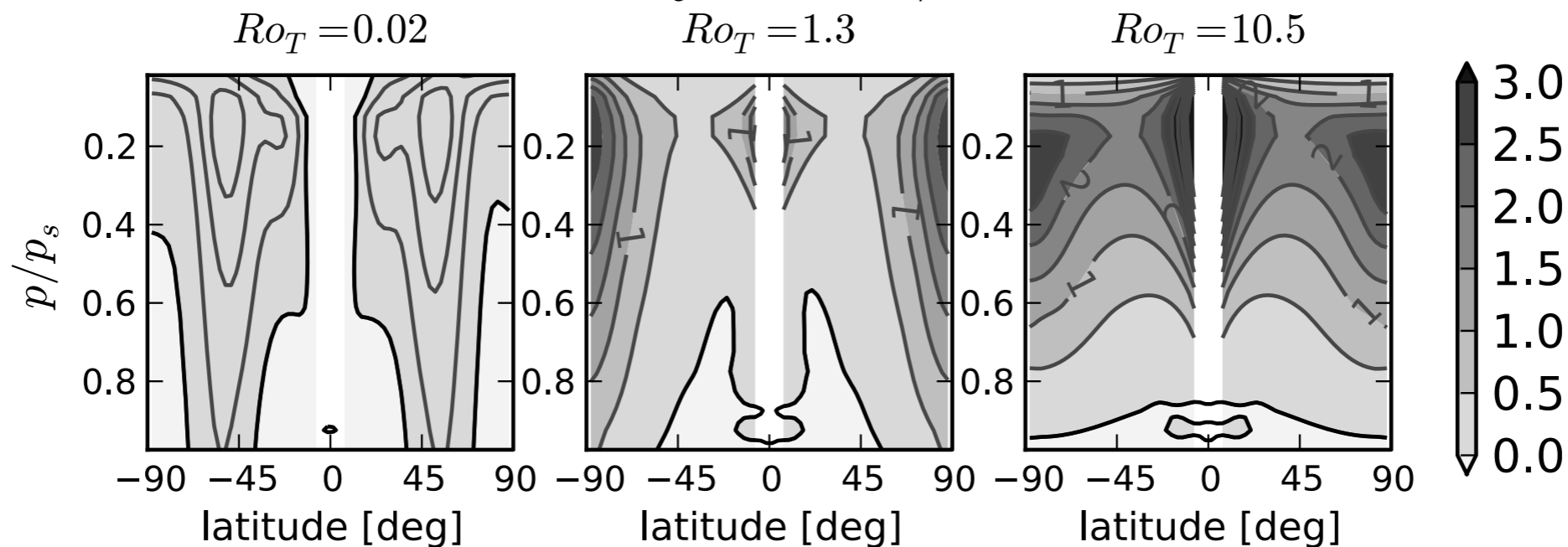
## 平均東西風

- $Ro_T: 1.3$  は超回転への過渡的状态



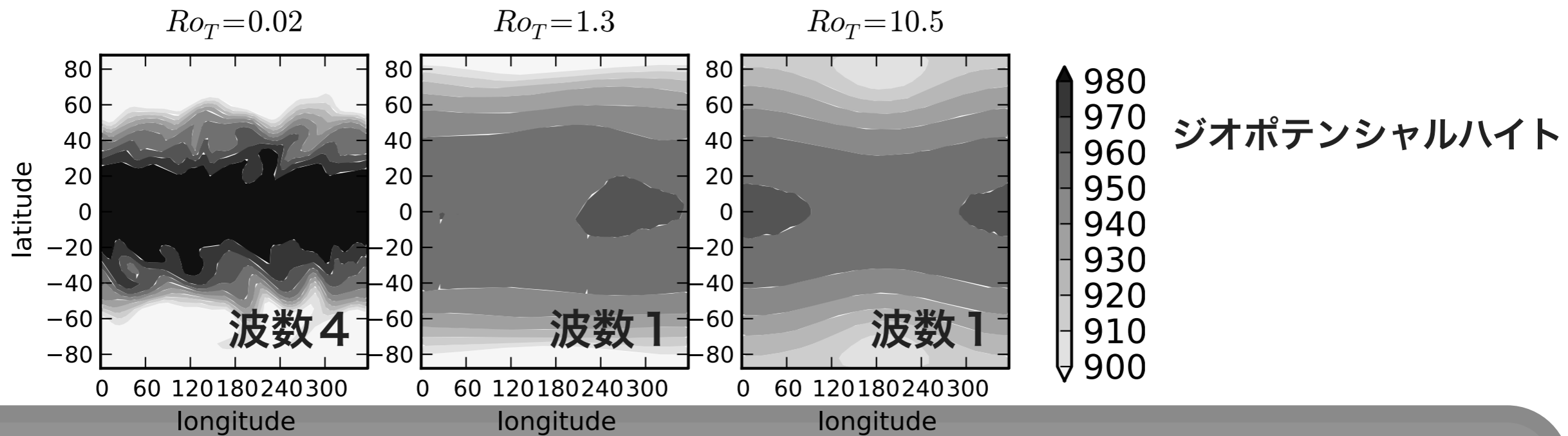
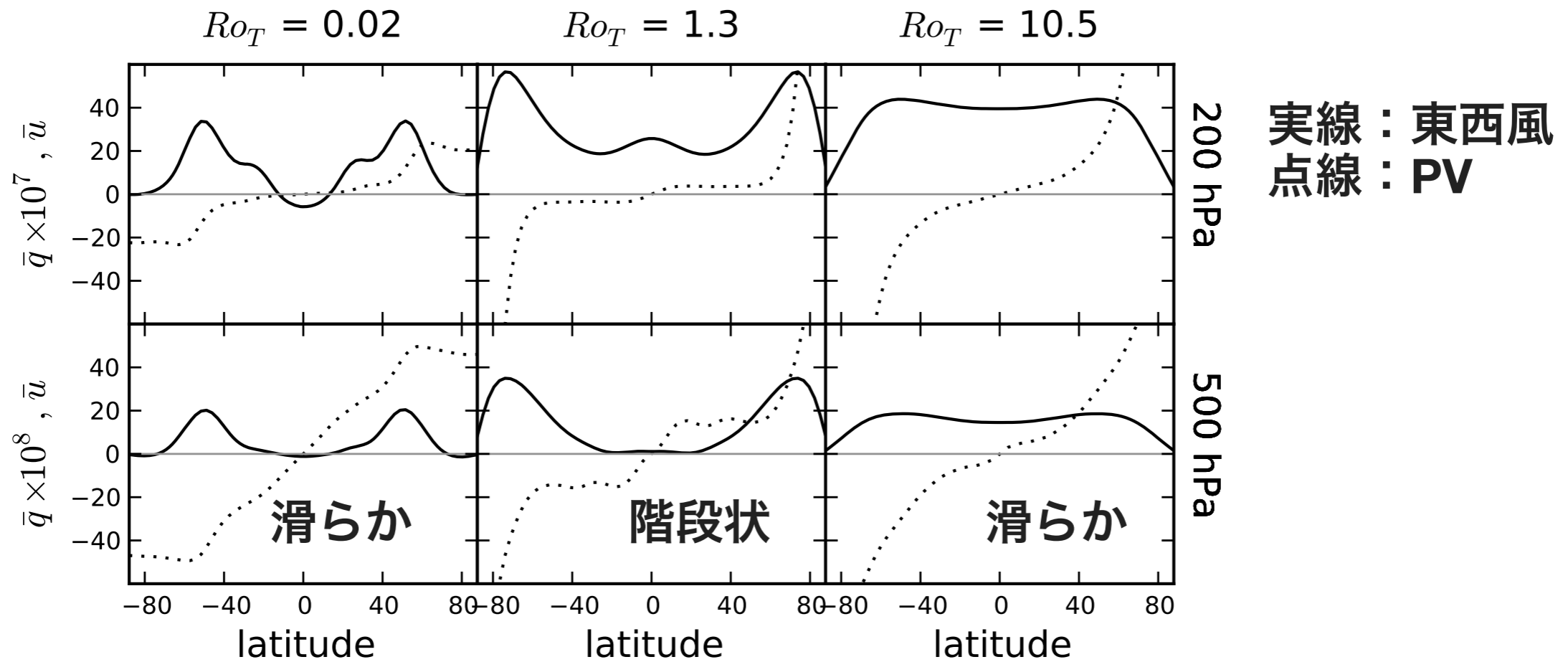
# 4-1 準定常後の局所ロスビー数

- ロスビー変形半径は  $L_d \sim 1500 \text{ km} \sim a_{\text{Earth}}/4$
- $a < L_d$  のときに傾圧不安定は抑制される
  - すなわち  $Ro > 16Ro_{\text{Earth}} = 0.32$
  - 局所ロスビー数  $Ro \equiv \frac{\bar{u}}{|f|a \cos \phi}$

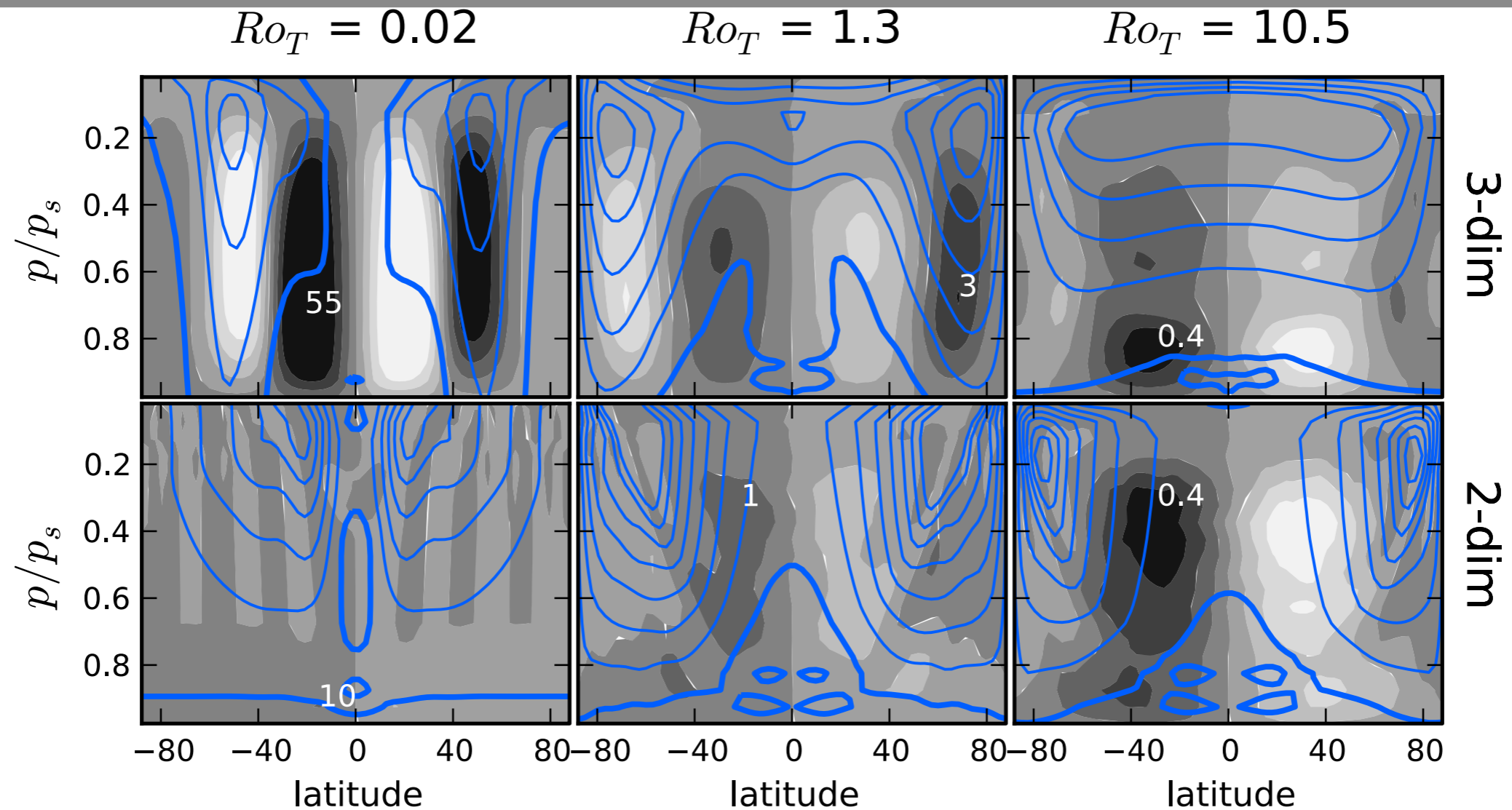


Roはまだ小さい  
→傾圧不安定が起こりうる

# 4<sub>1</sub> PVとジオポテンシャルハイト



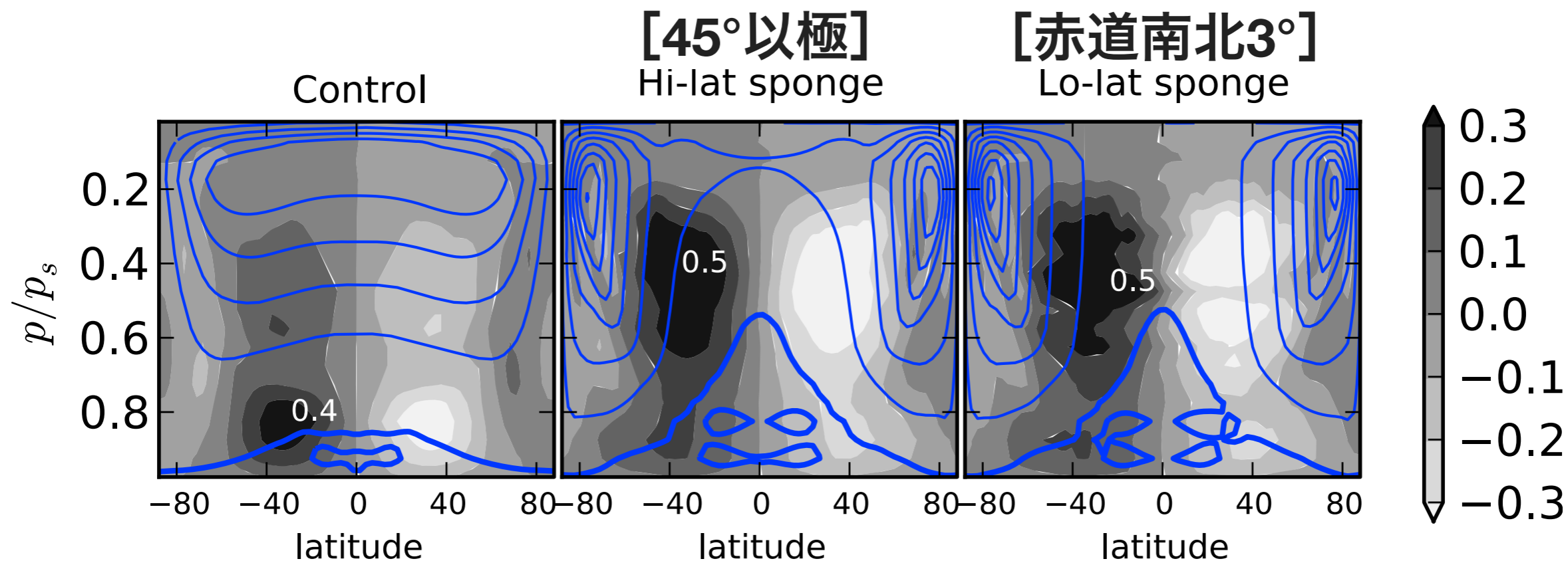
# 4<sub>2</sub> 軸対称テスト



- 超回転しない ← 非軸対称擾乱が不可欠
- Held & Hou (1980) の理論にしたがう
- 子午面循環の強さは、 $Ro_T$ が大きいほうがよく一致

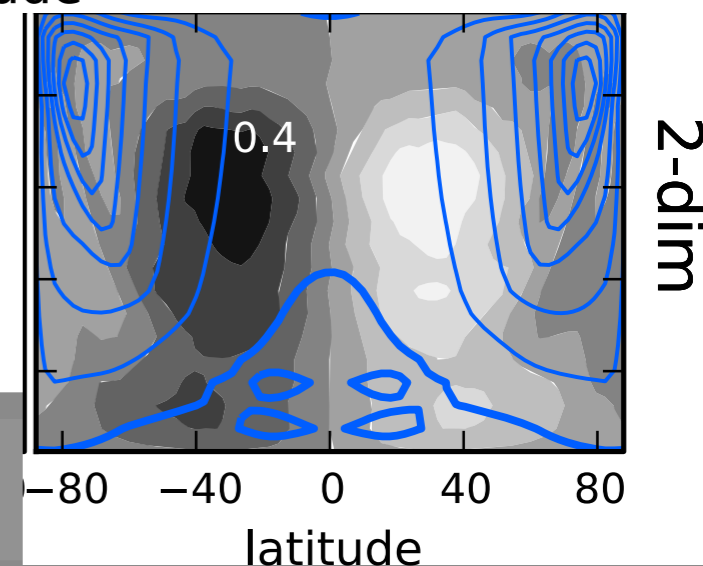
# 4<sub>3</sub> スポンジテスト

- 非軸対称擾乱を強く減衰させる( $\tau \sim 10\text{min}$ )スポンジを高緯度あるいは低緯度に入れた実験 ( $Ro_T = 10.5$ )



Hi-lat: 超回転が弱い → 高緯度が重要

Low-lat: 超回転しない → 低緯度はより重要



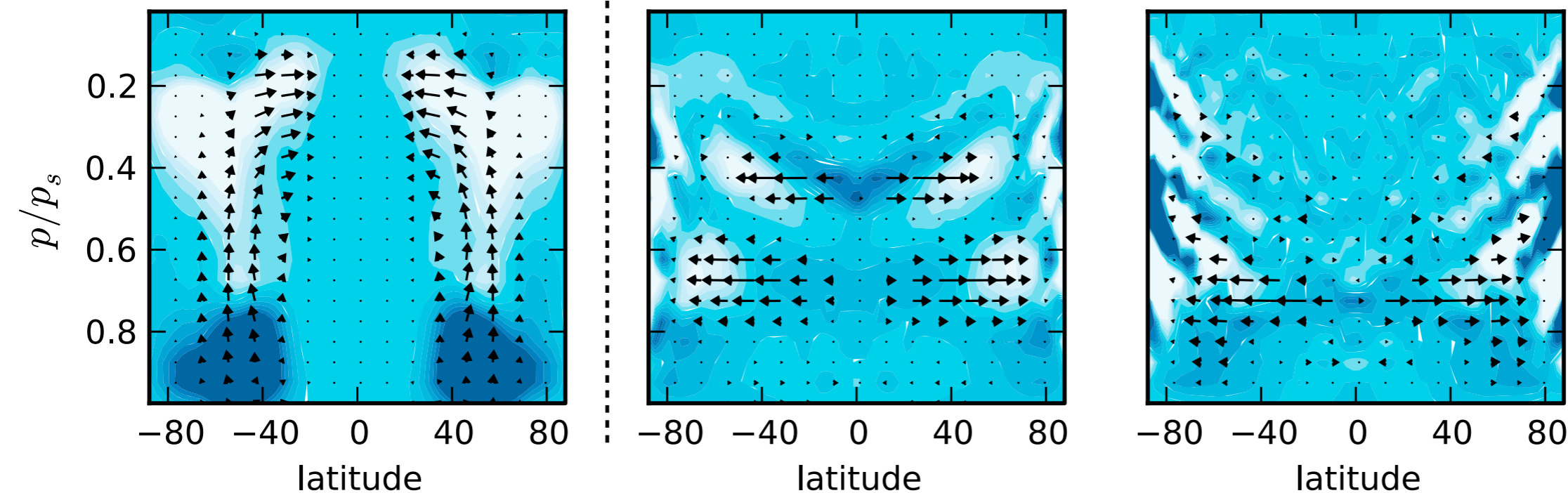
# 5<sub>1</sub> EPフラックス (波活動)

$Ro_T = 0.02$ , steady

$Ro_T = 10.5$ , spinup

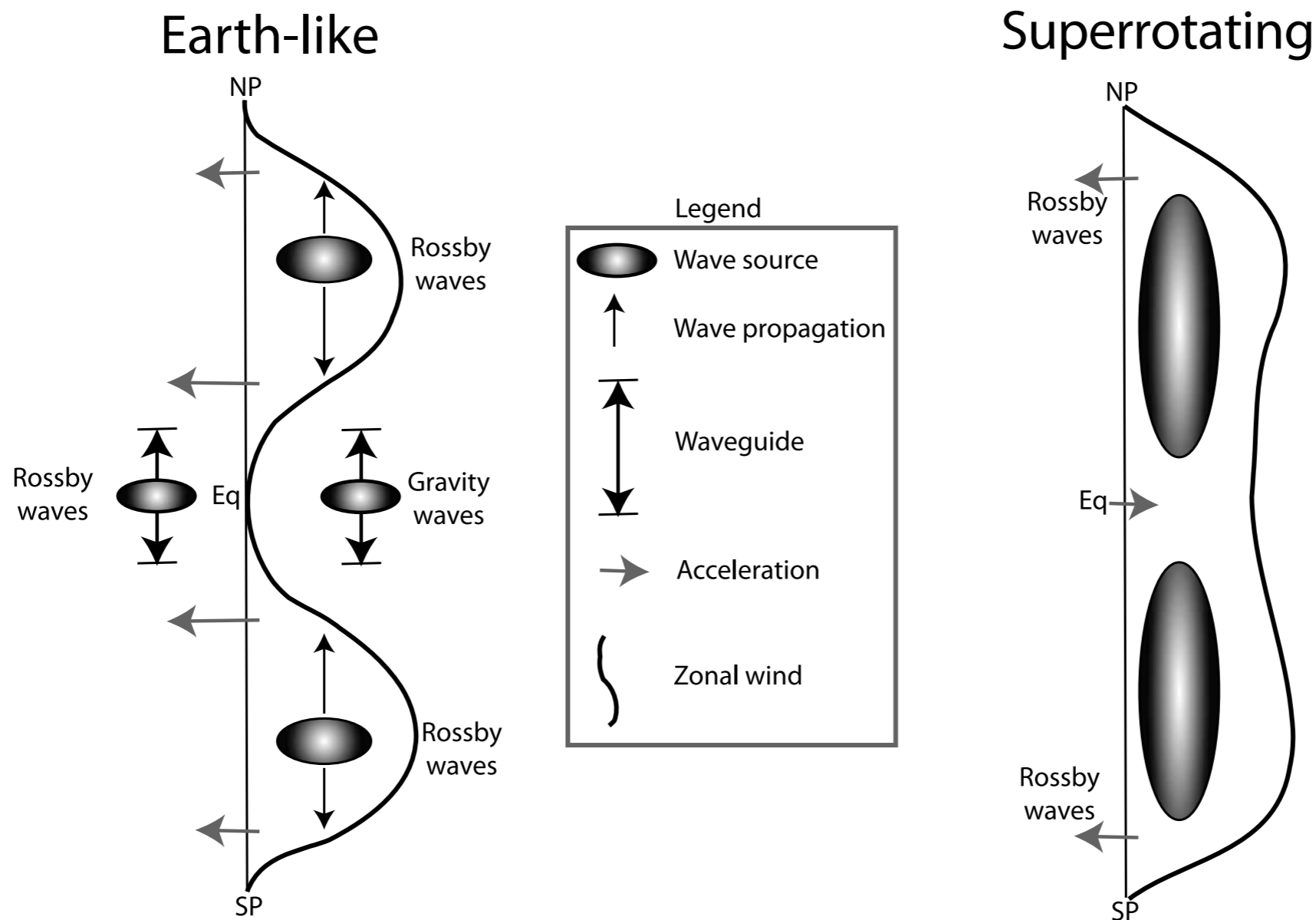
$Ro_T = 10.5$ , steady

濃色 : 加速  
淡色 : 減速



- スピニアップ時
  - EPフラックスは極向き、赤道域を加速
- 準定常状態
  - 波活動は小さい、赤道域の加速も小さい

# 5.1 波・平均流相互作用？



中高緯度で傾圧不安定  
 → 上空、赤道に伝播し砕ける  
 → 低緯度を減速させる（減速機構）

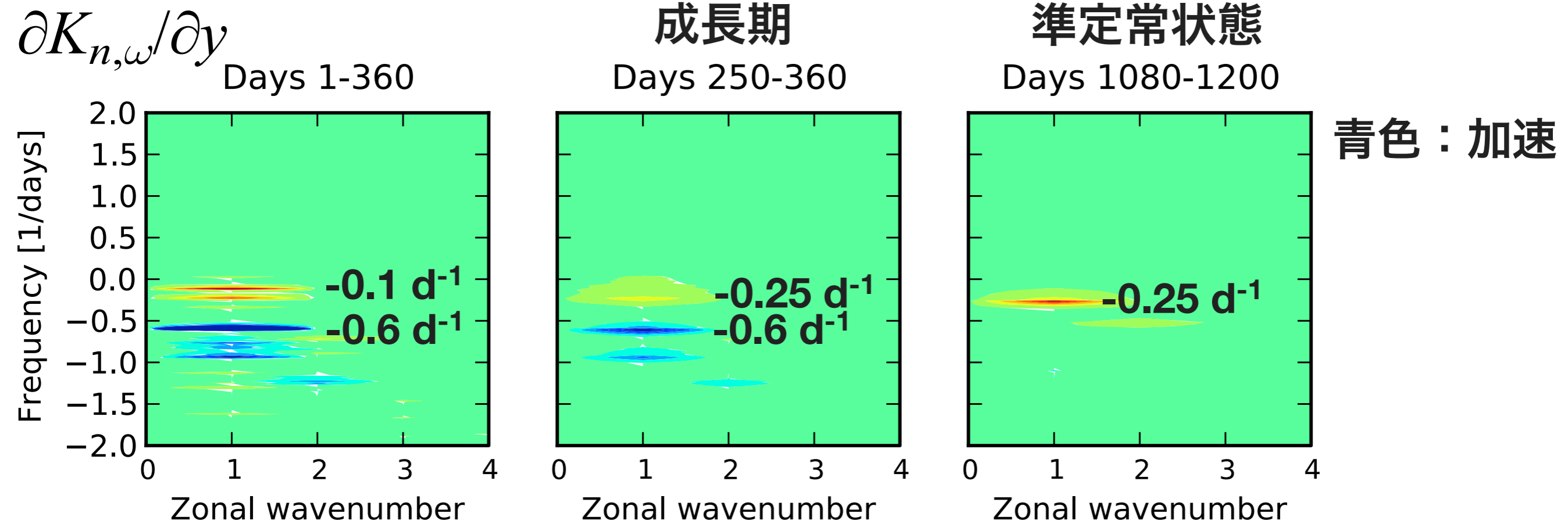
中高緯度からのロスビー波は  
 ← そもそも存在しない、または  
 ← 平均流と作用しない

# 5<sub>2</sub> 渦運動量フラックス Cospectra

$$K_{n,\omega} = 2 \left\langle \text{Re} \left( U'_{n,\omega} V'_{n,\omega}{}^* \right) \right\rangle,$$

- $U'_{n,\omega} V'_{n,\omega}$  は空間・時間方向でフーリエ変換した係数（\*は共役複素数）
- $Ro_T = 10.5$  を解析

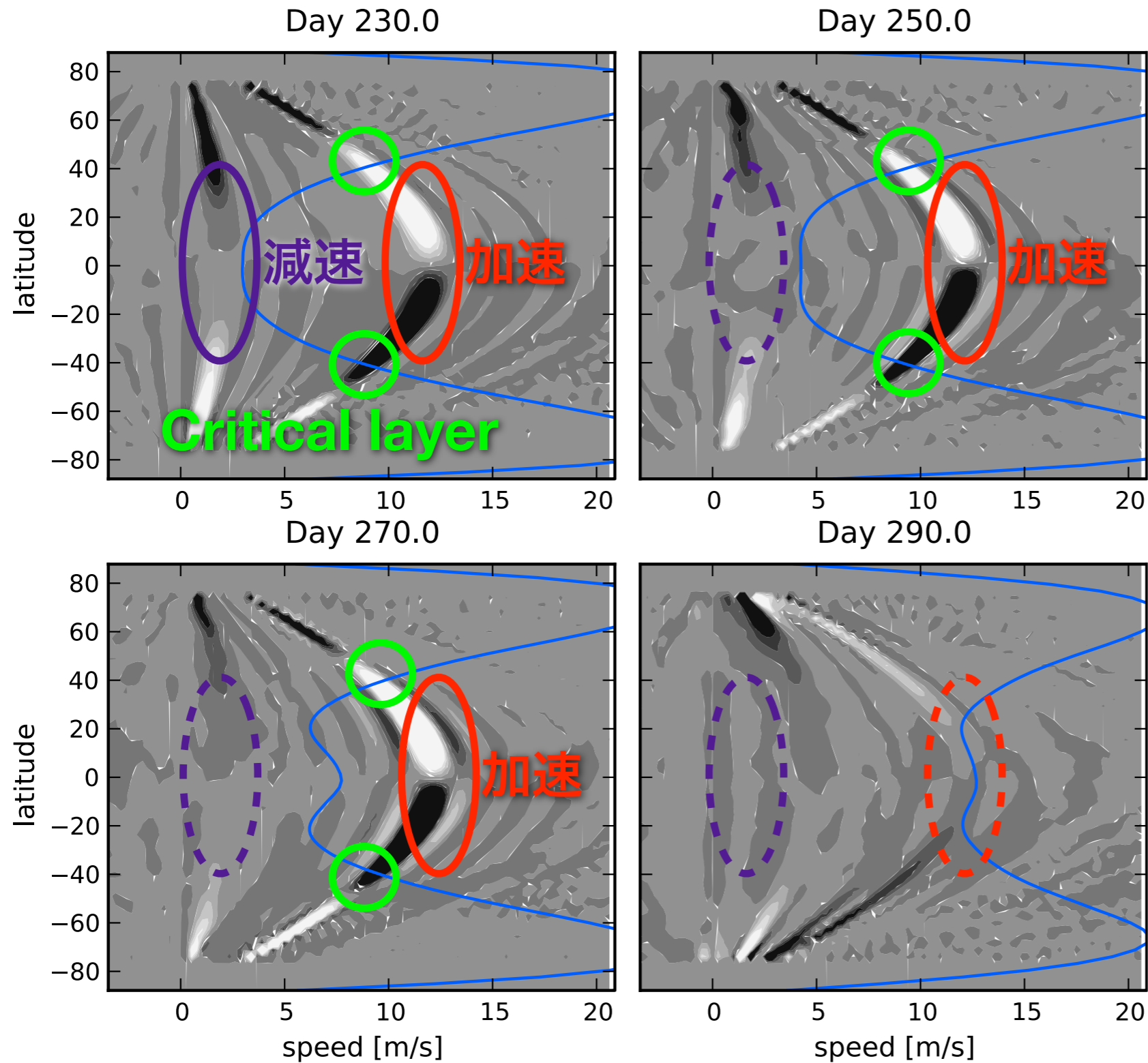
# 5<sub>2.1</sub> 400 hPa, 赤道上で $\partial K_{n,\omega}/\partial y$



- どの段階も波数 1 が卓越
- 位相速度に変換して、平均流と比べる必要がある



# 5<sub>2.2</sub> 400 hPa, $Ro_T = 10.5$

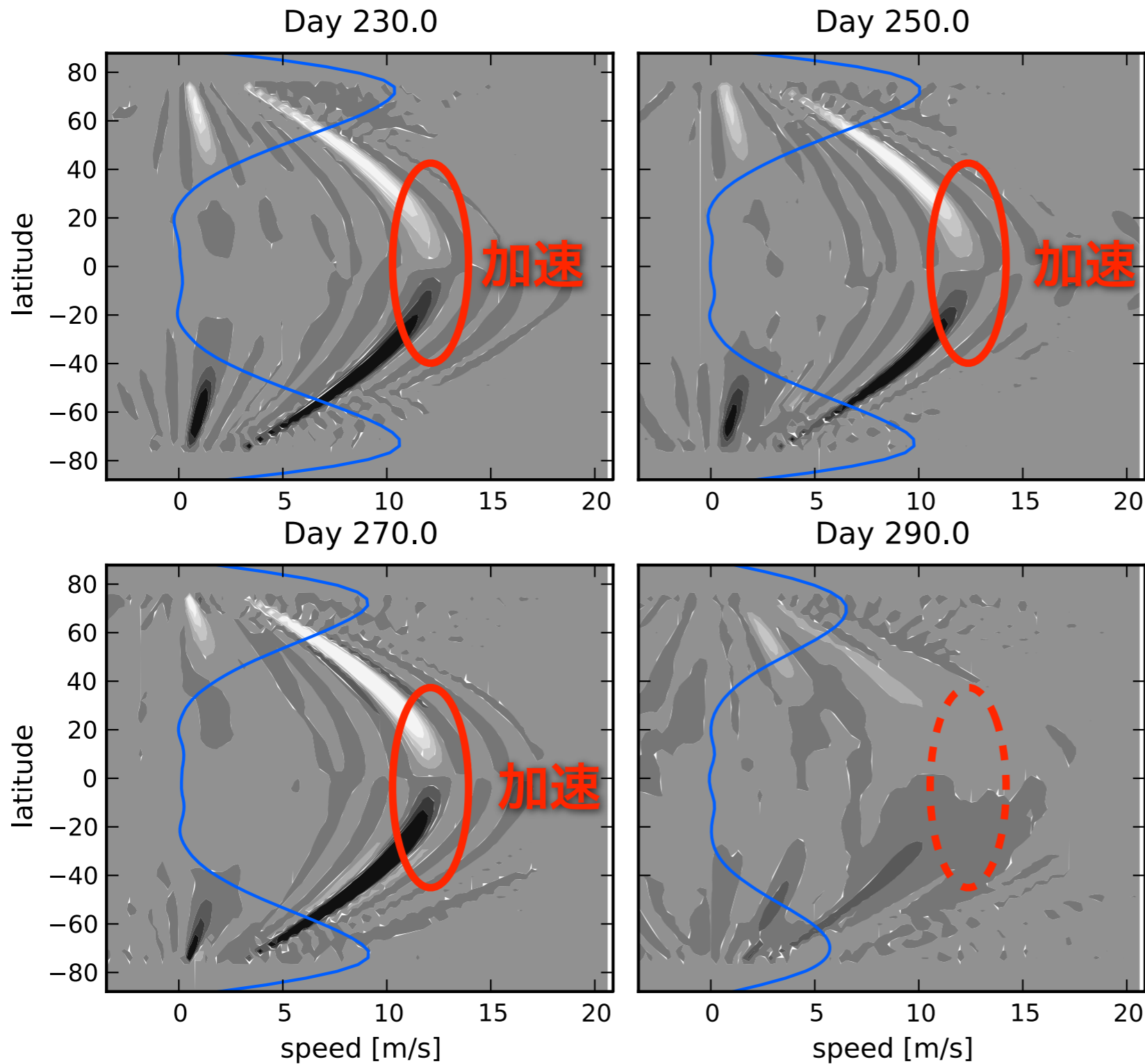


濃色：  
正の運動量フラックス

淡色：  
負の運動量フラックス

平均東西風

# 5<sub>2.2</sub> 700 hPa, $Ro_T = 10.5$



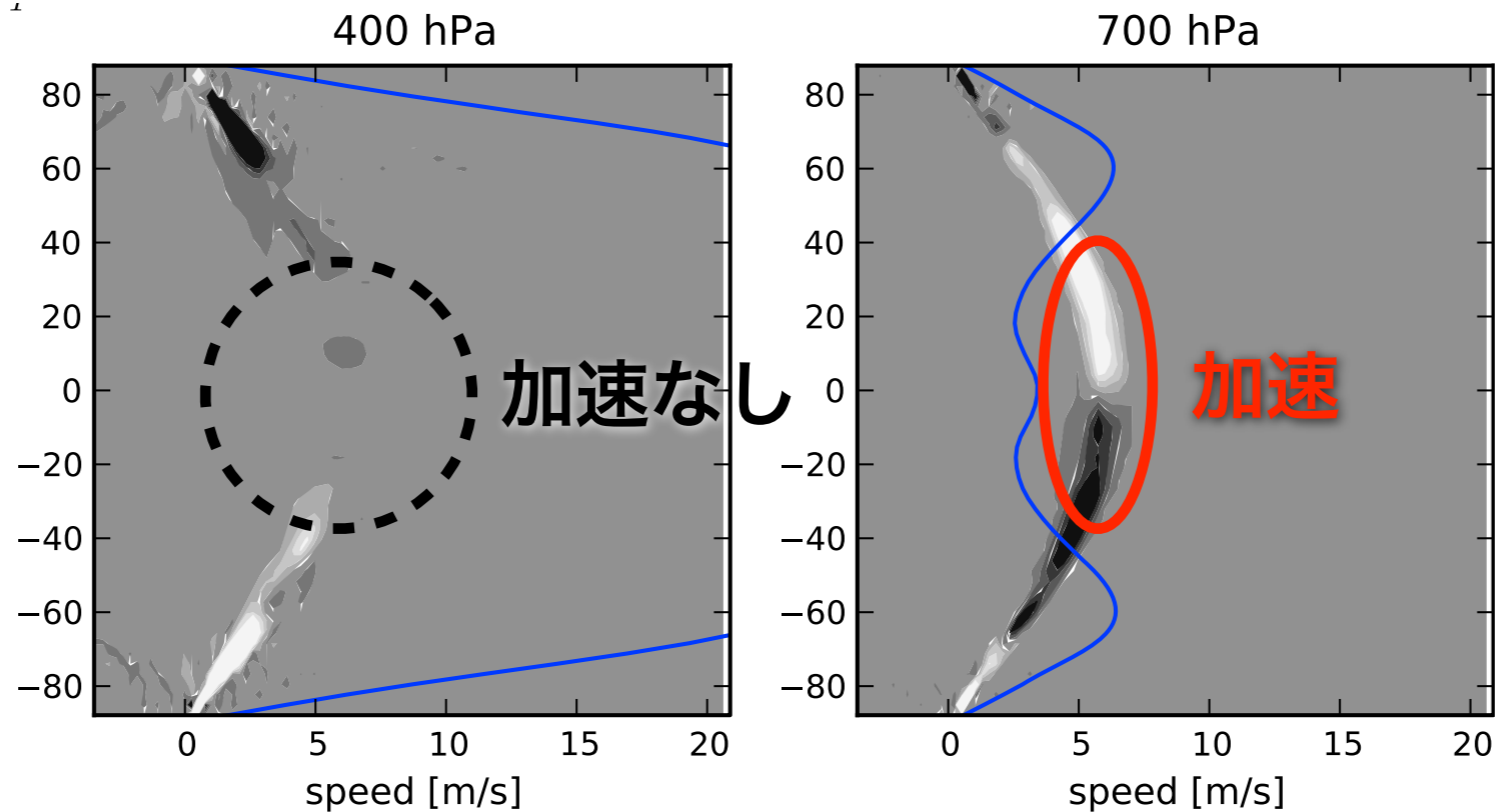
濃色：  
正の運動量フラックス

淡色：  
負の運動量フラックス

## 平均東西風

境界層（レイリー摩擦）が  
東西風の成長を妨げている

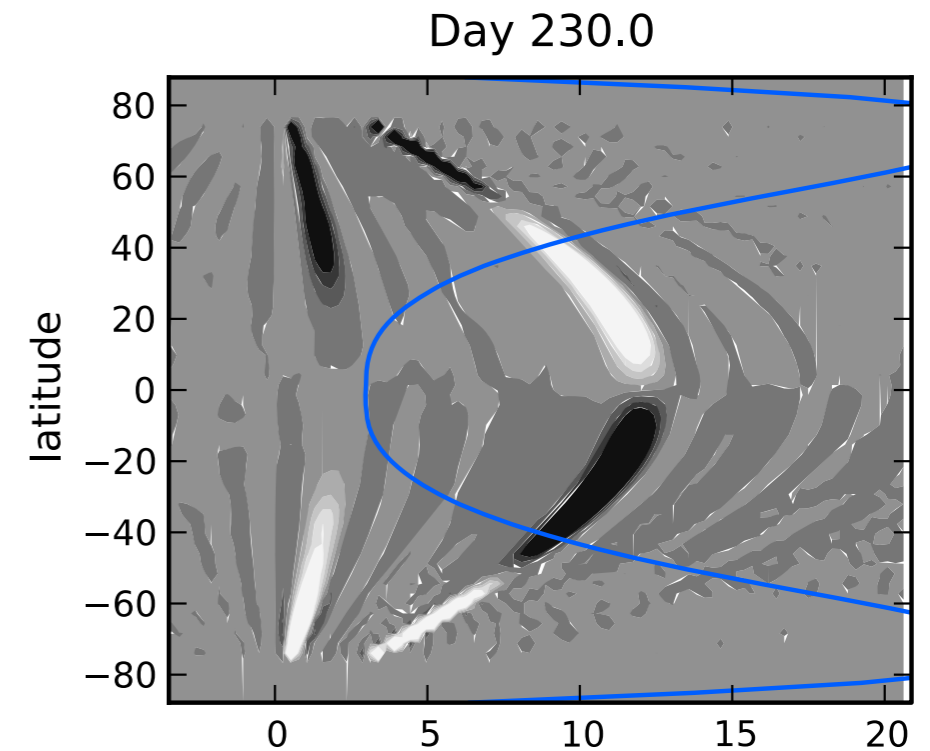
# 5<sub>2.2</sub> 準定常状態



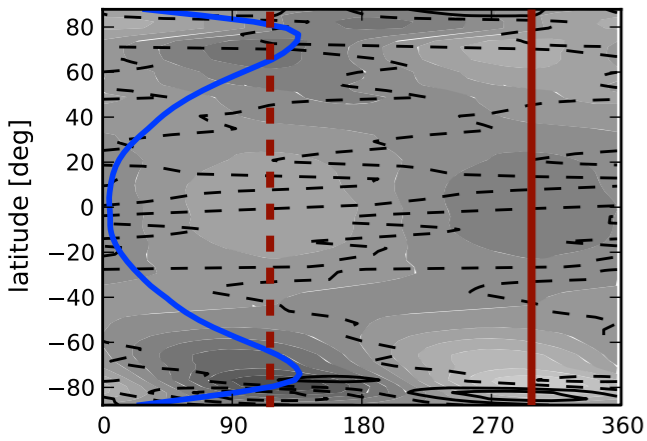
- 上空では、加速はほとんどない  
- → それでも超回転を維持できる
- 境界層上端では加速がある

# 5<sub>3</sub> 超回転を生成する波の構造

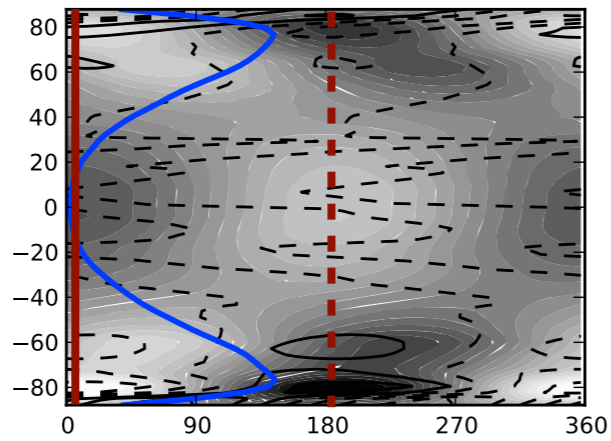
- これまでの診断で分かったこと
  - 波数 1、振動数  $-0.6 \text{ d}^{-1}$
  - 波は平均流に対して、
    - ▶ 低緯度で東進
    - ▶ 高緯度で西進
  - コヒーレントな緯度構造は変わらない



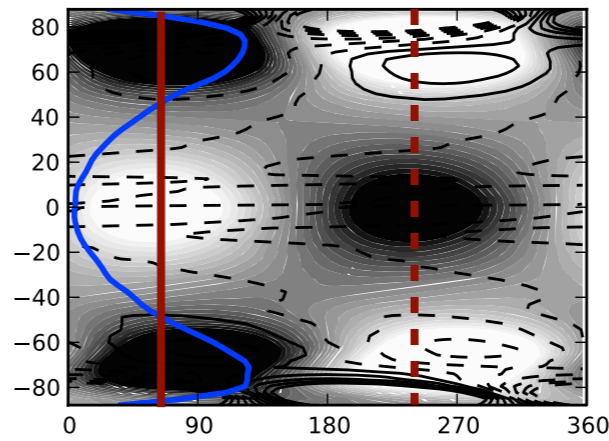
Day 130



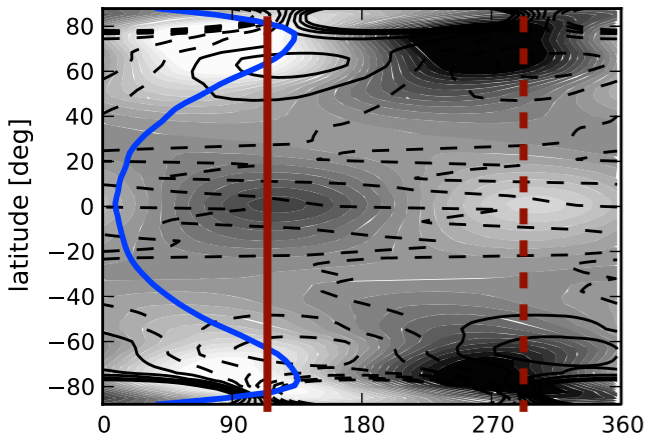
Day 150



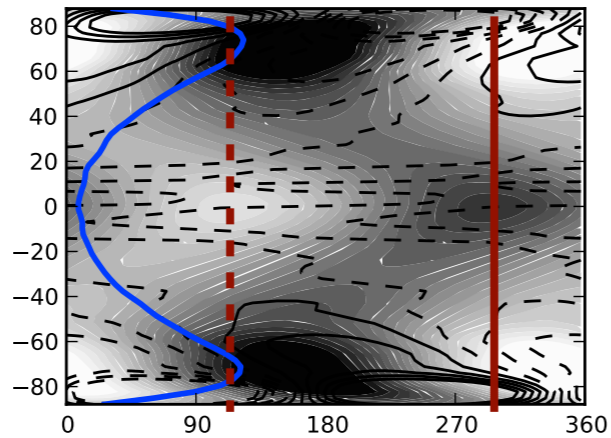
Day 170



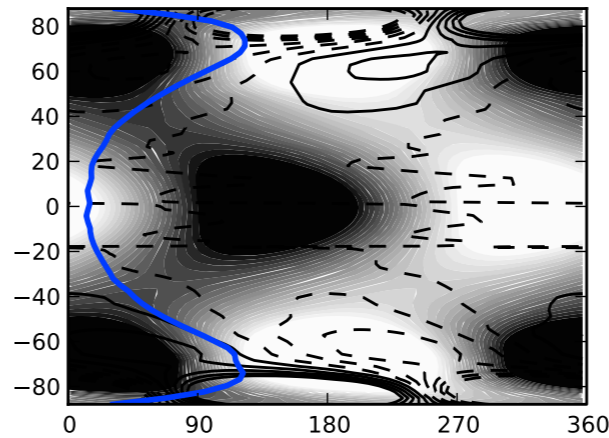
Day 190



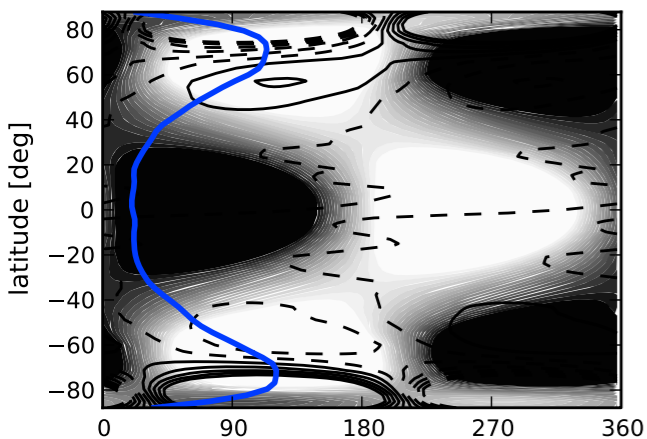
Day 210



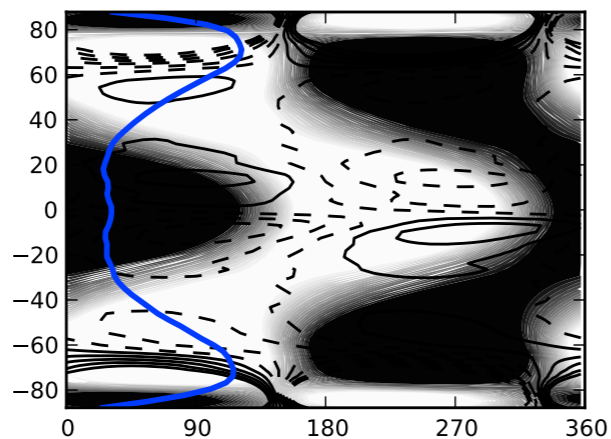
Day 230



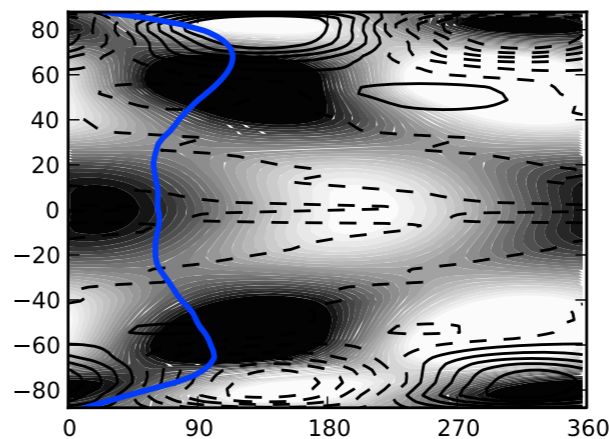
Day 250



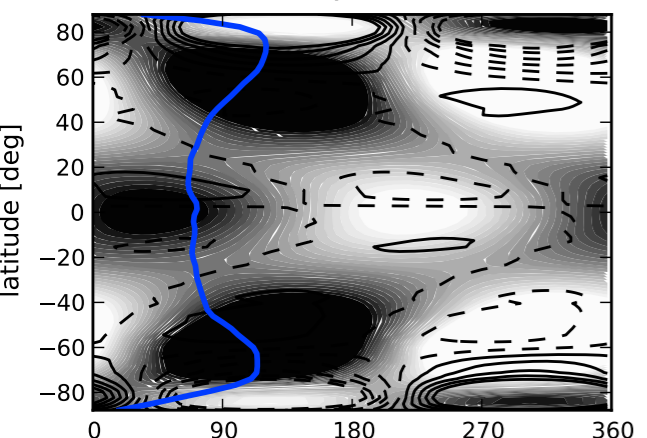
Day 270



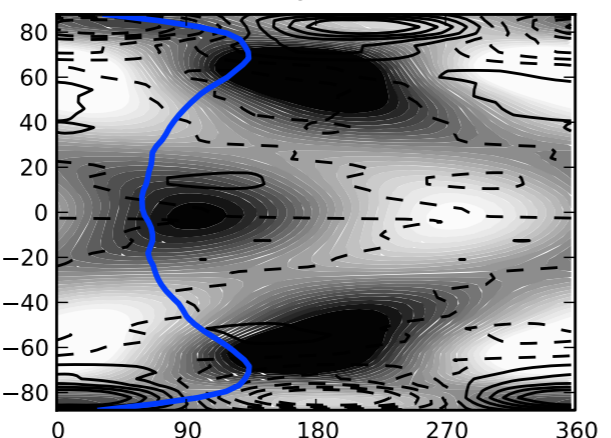
Day 290



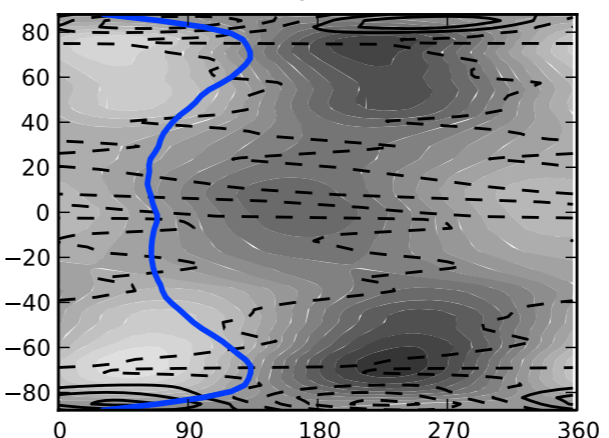
Day 310



Day 330



Day 350



波数1、振動数0.6で  
フィルタリングした

陰影：  
400 hPaジオポテンシャル

等値線：PV

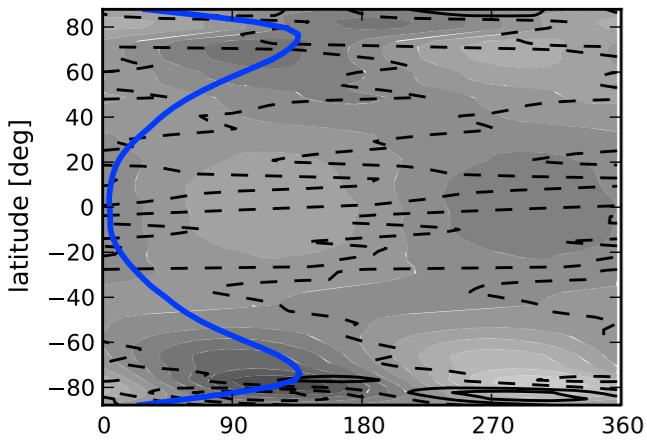
青線：平均流×5 m/s

•130-210日で低緯度の成分(陰影)と高緯度成分が同調(phase)しはじめる

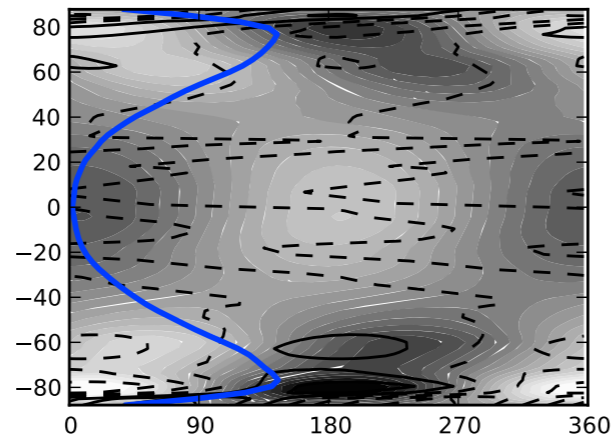
•230-290日で両成分とも強くなり、赤道の平均流が加速される

•その後、両成分とも弱くなり、同調が外れ、平均流加速が止む

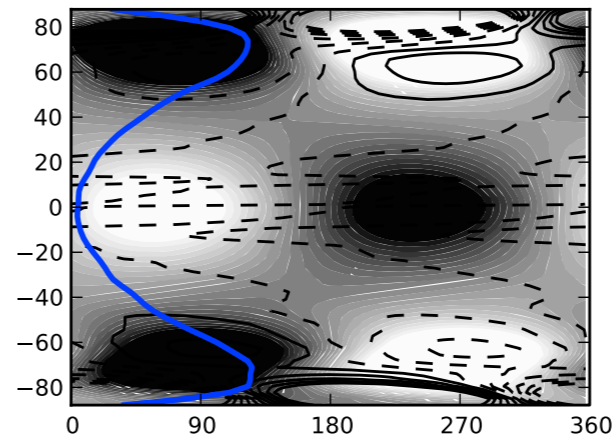
Day 130



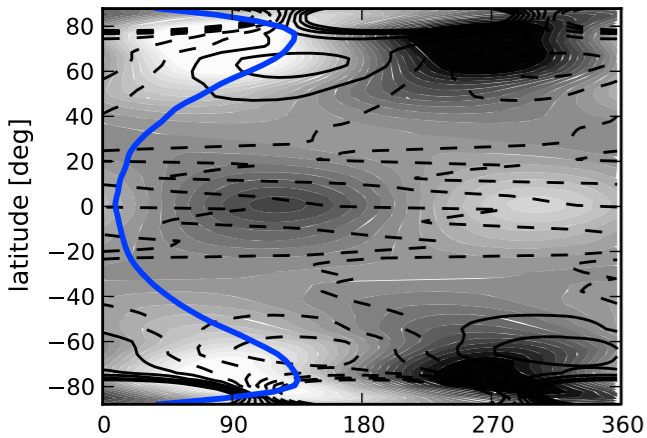
Day 150



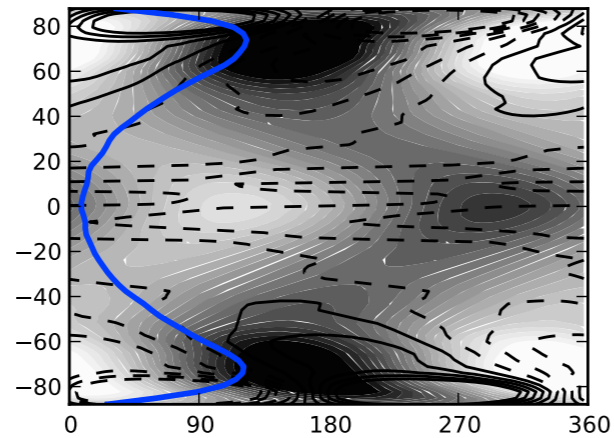
Day 170



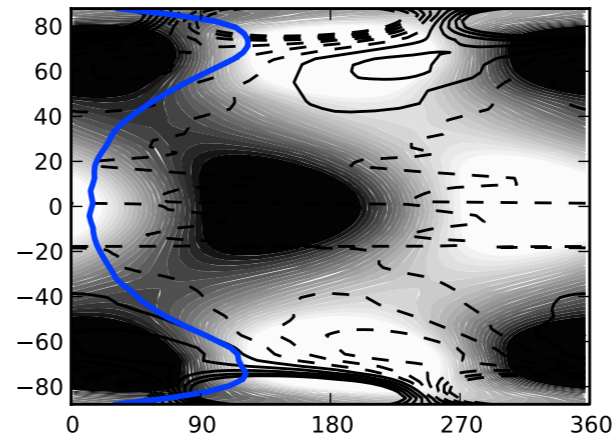
Day 190



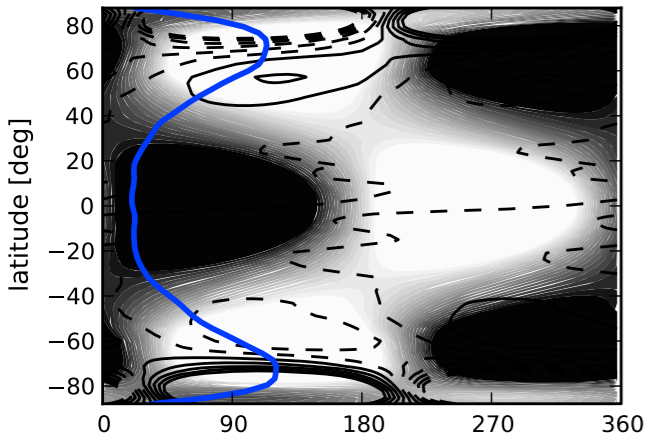
Day 210



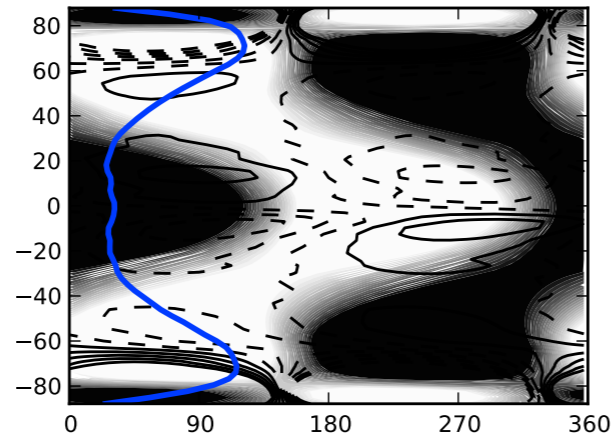
Day 230



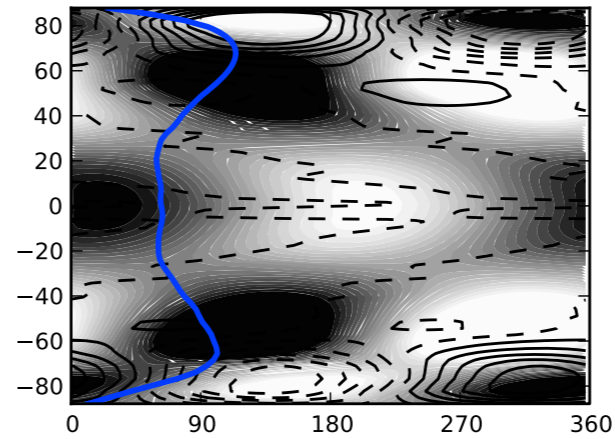
Day 250



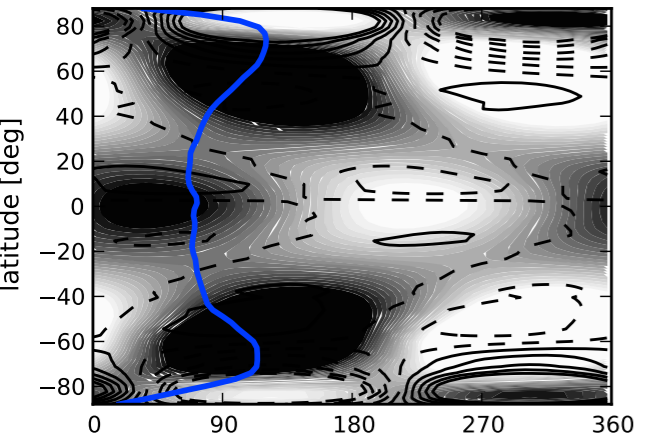
Day 270



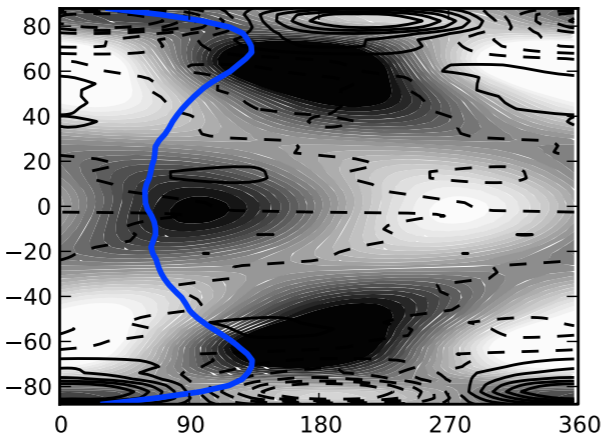
Day 290



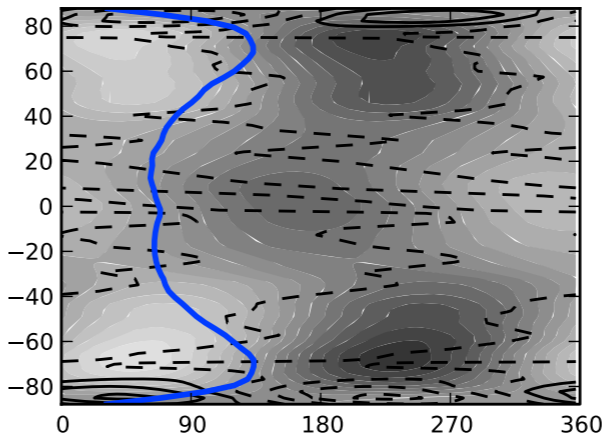
Day 310



Day 330



Day 350



•赤道のV字構造はケルビン波(重力波)の特長だが、その位相速度(12 m/s)は重力波のそれと一致せず

•40°以極では、波は平均流に対して西進しているが、赤道の成分と逆位相を保っている

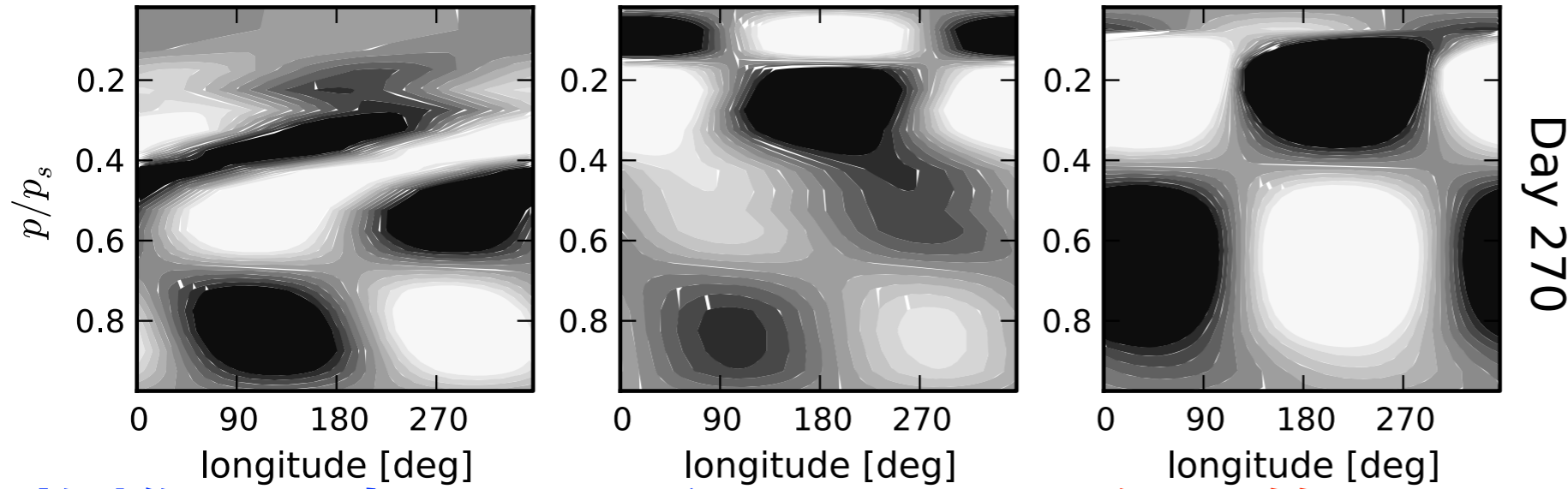
# ジオポテンシャルハイトの偏差（フィルタ済み） 270日

## 経度-高度断面

0N latitude

40N latitude

80N latitude



複雑：鉛直シアーが原因

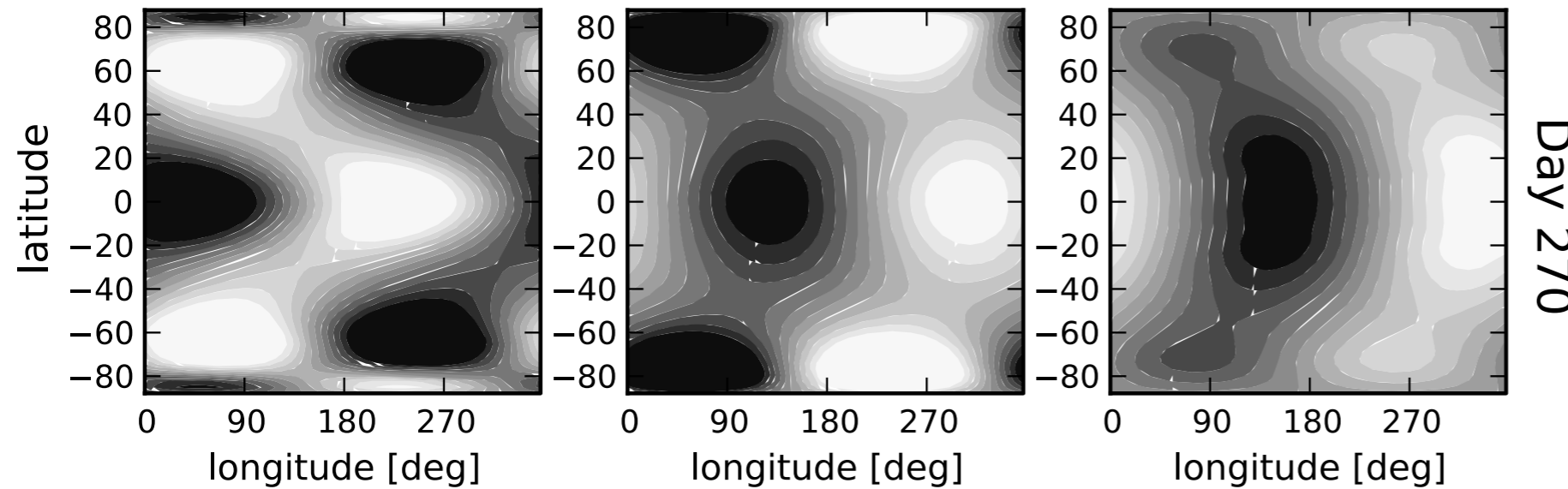
傾圧第1モード

## 経度-緯度断面

400 hPa

700 hPa

900 hPa

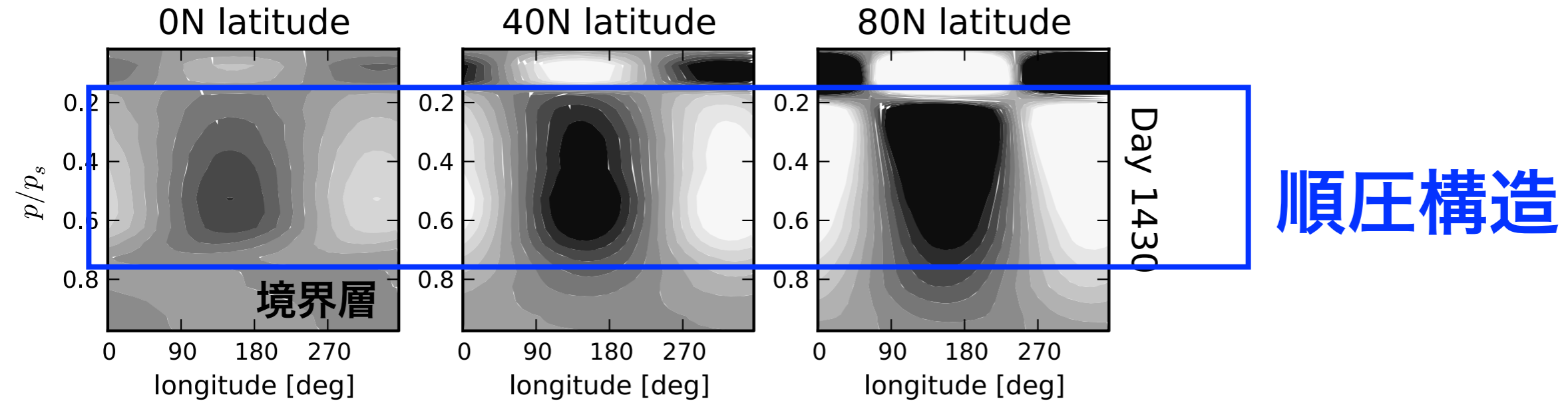


傾きが大きくなる ←

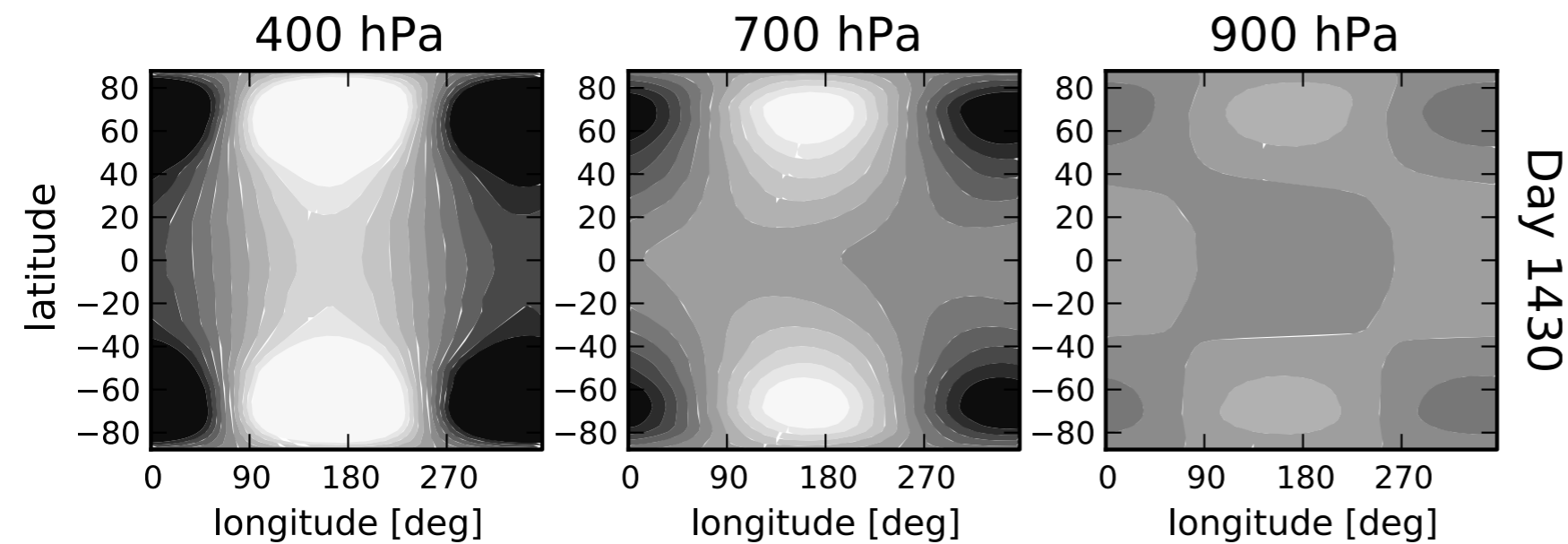
コヒーレント

# ジオポテンシャルハイトの偏差 (フィルタ済み) 準定常後

## 経度-高度断面



## 経度-緯度断面

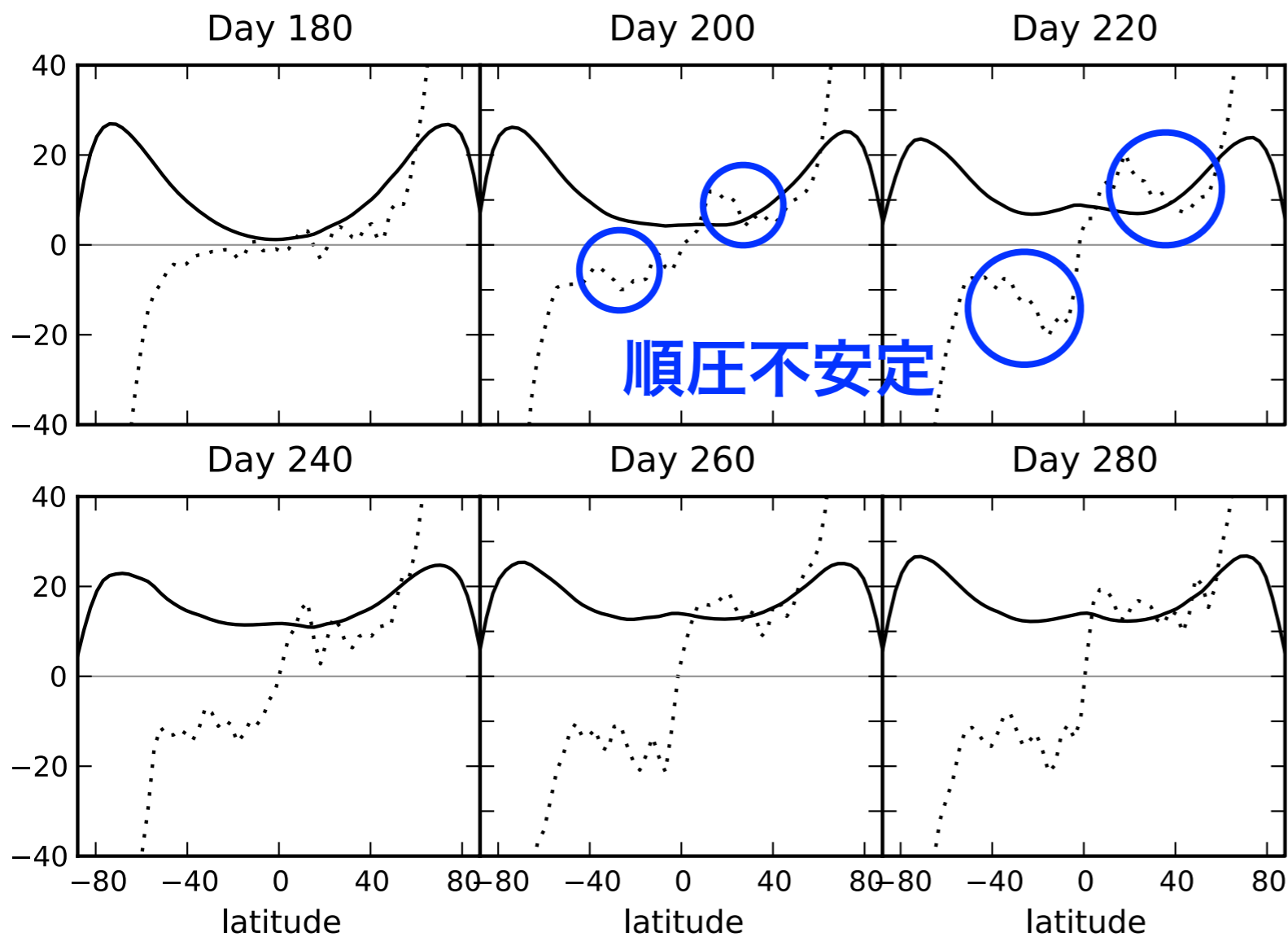


Uniform structure

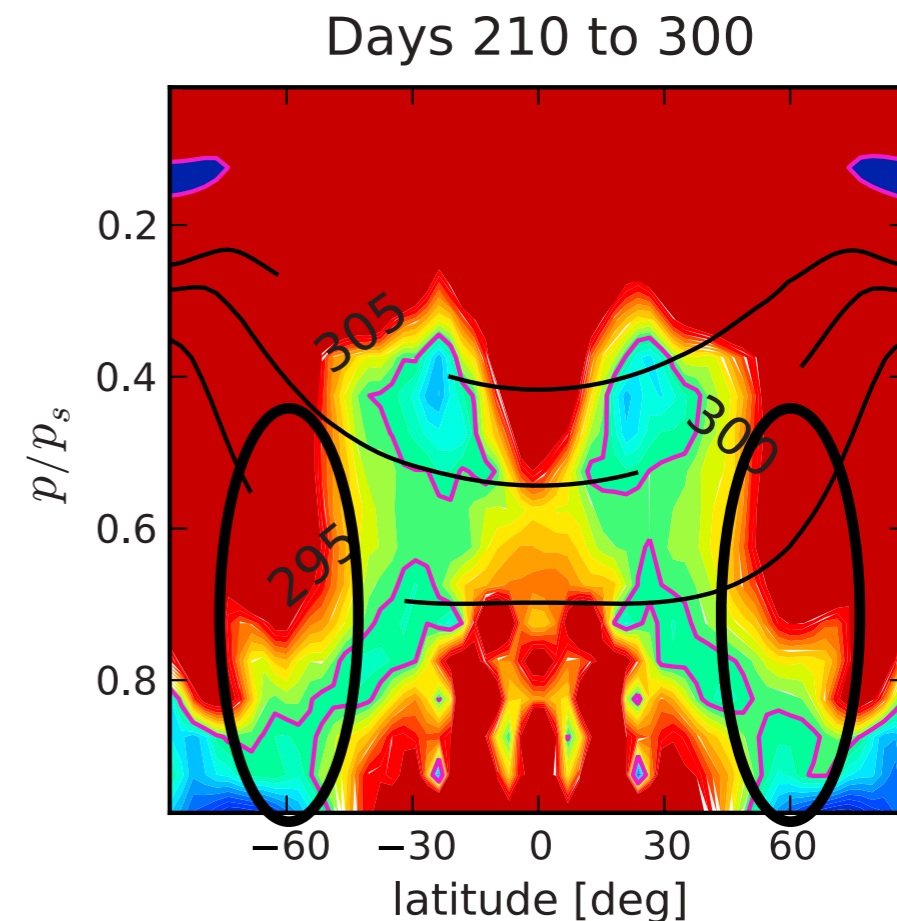


# 5<sub>4</sub> 帯状平均PVの構造

実線：東西風 点線：PV



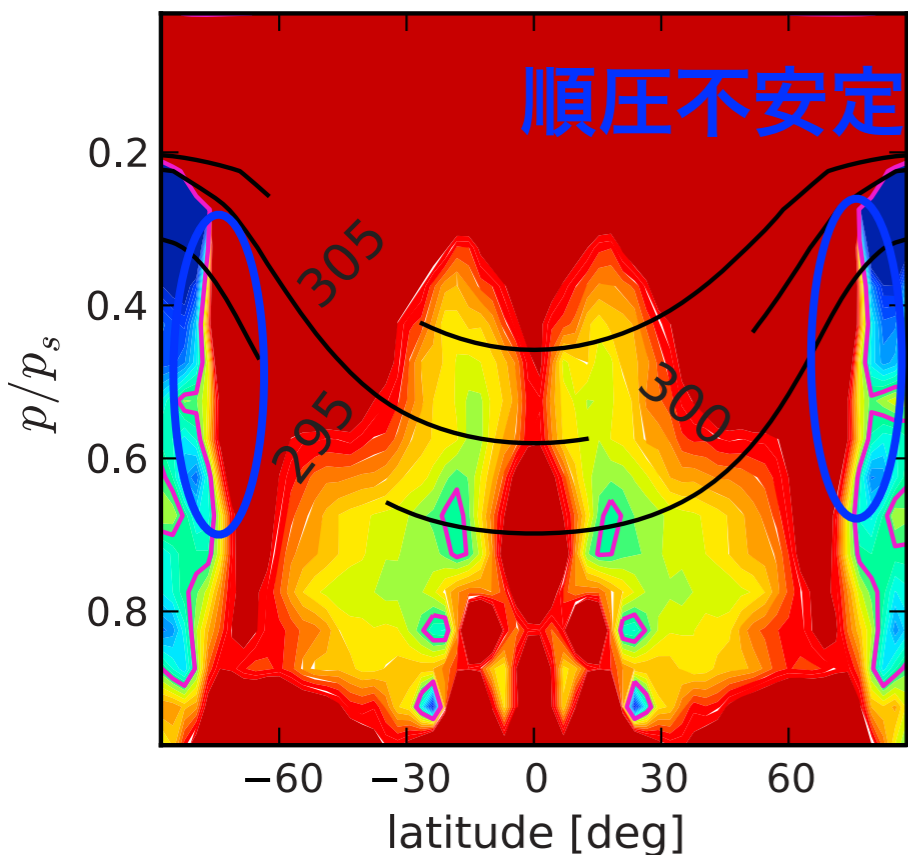
PVの南北勾配  
ピンク色はゼロ線



# 5<sub>4</sub> 準定常後

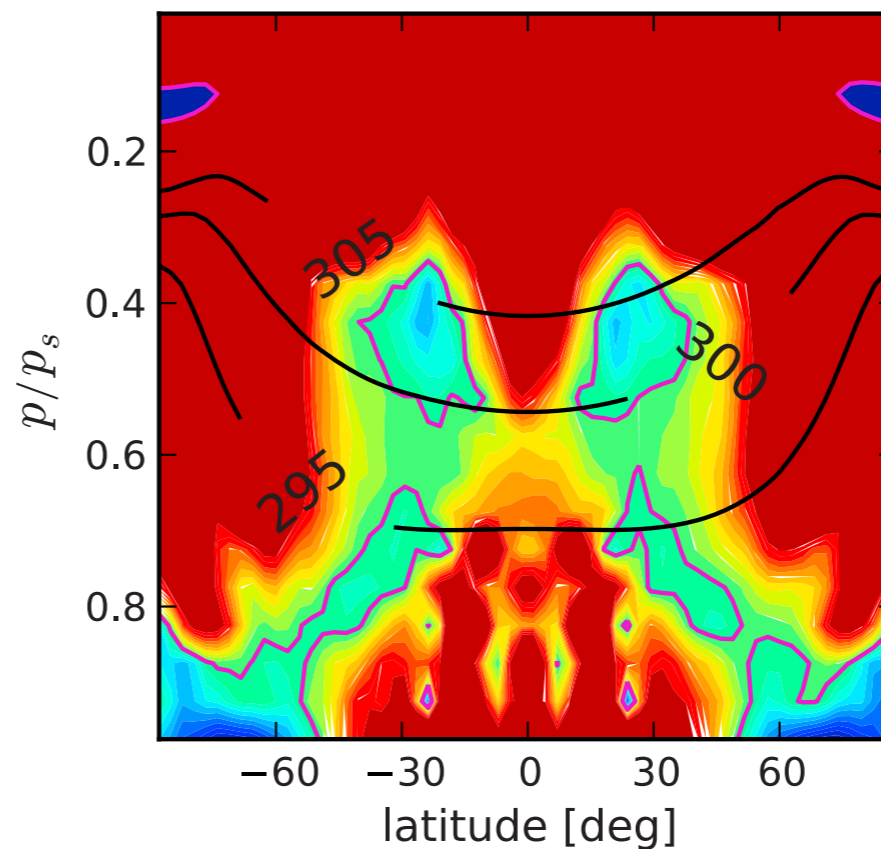
## 準定常後

Days 750 to 1050



## スピニアップ

Days 210 to 300



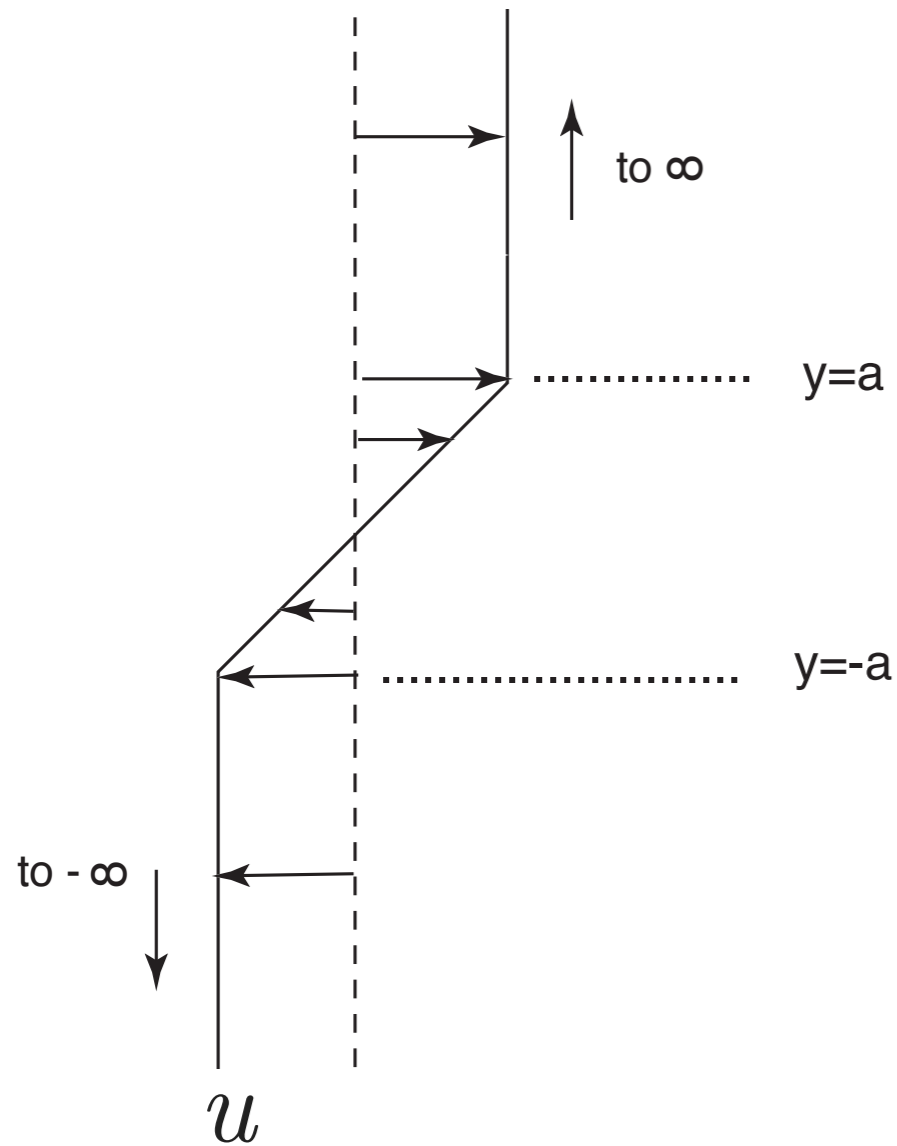
# 5<sub>5</sub> 順圧不安定 [47]

- 1) 渦度勾配があるところでロスビー波が生じる $\bar{u}$
- 2) 渦度勾配が強ければロスビー波は edge wave になる
- 3) もし edge wave が赤道と高緯度に生じ、十分に近ければ、それらは phase lock し、相互作用して不安定を作りうる $\overline{u'v'} < 0$
- 4) 東西風は高緯度で強いので、phase lock するためには波は平均流に対して逆に伝播する必要がある
- 5) ロスビー波がそうなるには、PV勾配が逆符号 $\bar{u}$ であることが必要
- 6) さらに、相互作用する edge wave は南北に広がっていないなければならないので、波数1の構造があらわれる

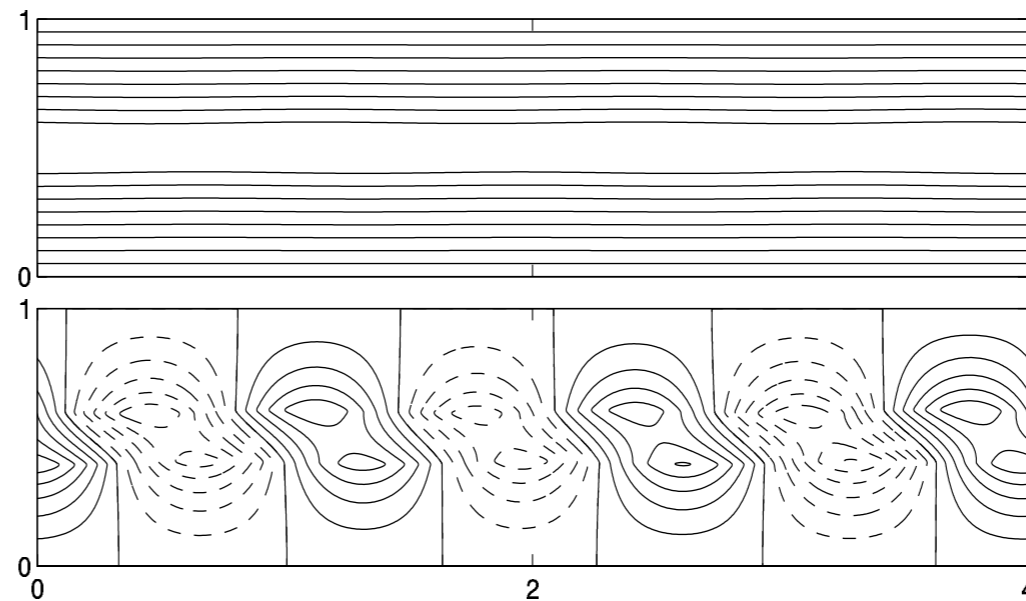
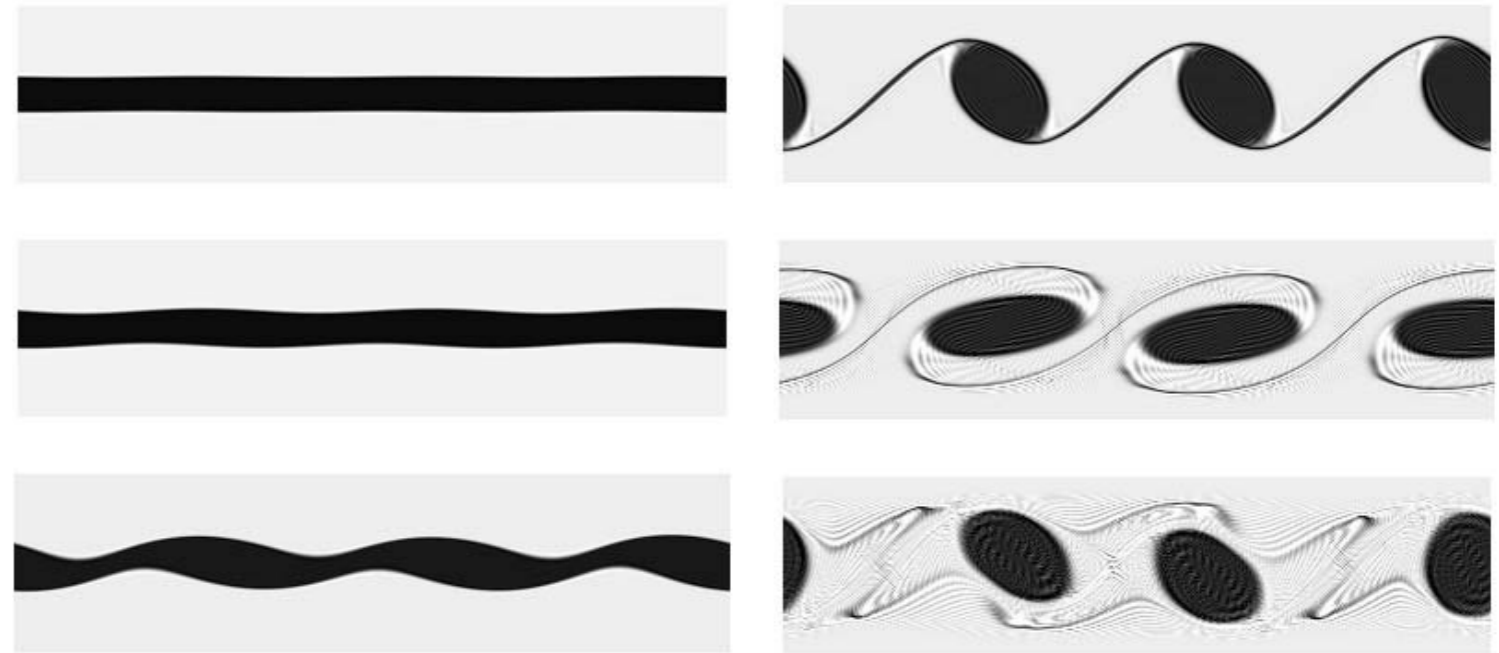
こういうこと？

# Vallis (2006) §6.2.4 Interacting edge waves producing instability

基本場 ( $u$ )



渦度：非線形計算



全体  
流線関数  
偏差

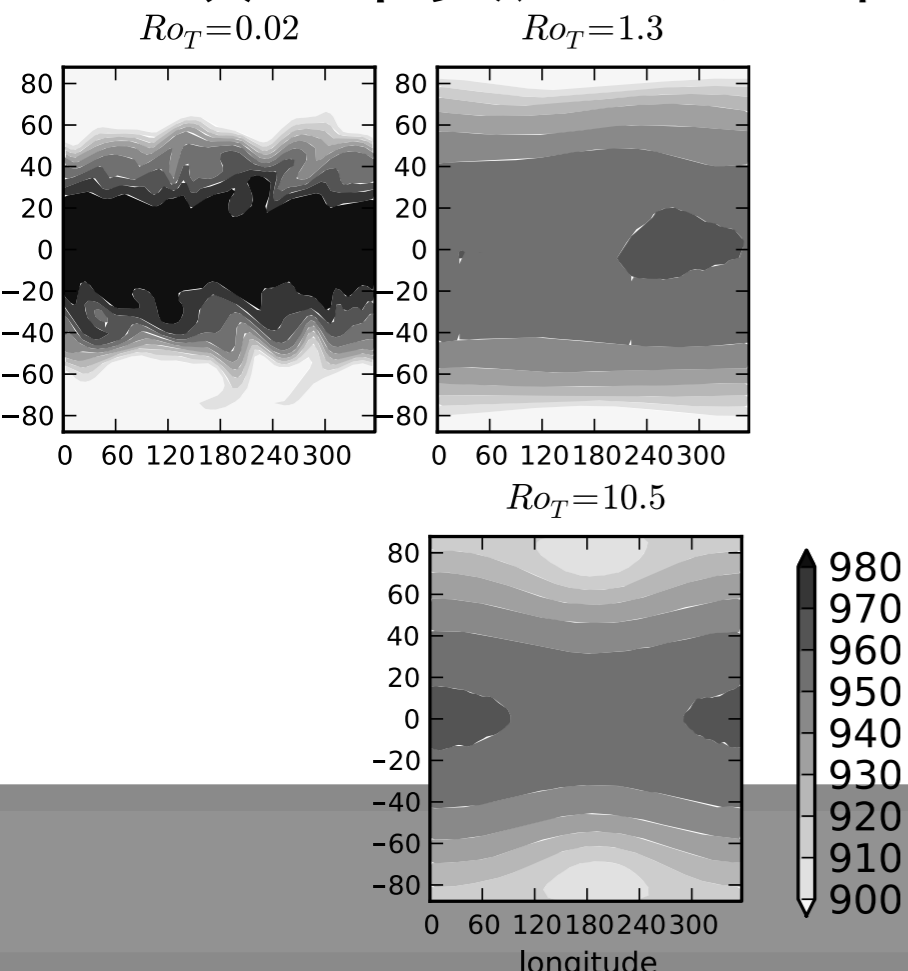
**Fig. 6.7** Total streamfunction (top panel) and perturbation streamfunction from the same numerical calculation as in Fig. 6.6, at a time corresponding to the second frame. Positive values (a clockwise circulation) are solid lines, and negative values are dashed. The perturbation pattern grows exponentially, but is locked in place.

## 6 太陽系のなかの超回転

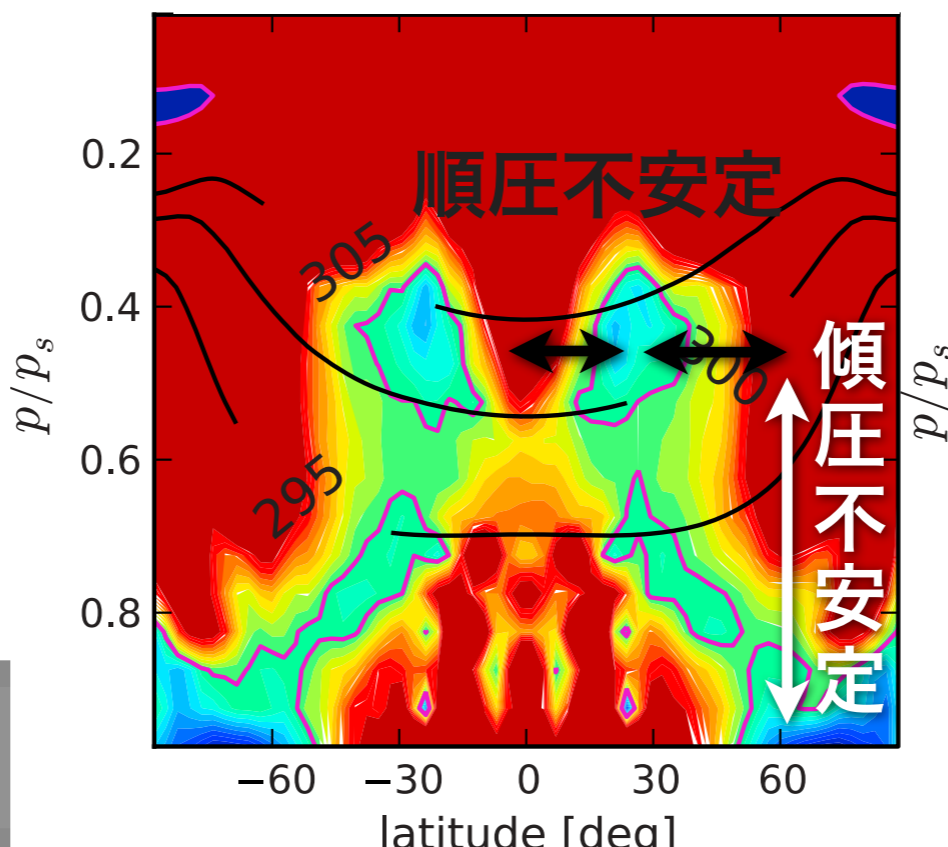
- 金星は  $Ro_T \sim 1200$
- タイタンは  $Ro_T \sim 30$
- 火星は  $Ro_T \sim 0.1$
- タイタンの超回転メカニズムは本実験に近いかも
- 火星は、transition ( $Ro_T = 1$ ) に近いけど、将来的に自転角速度が変わって超回転になることはなさそう

# 7 Conclusions

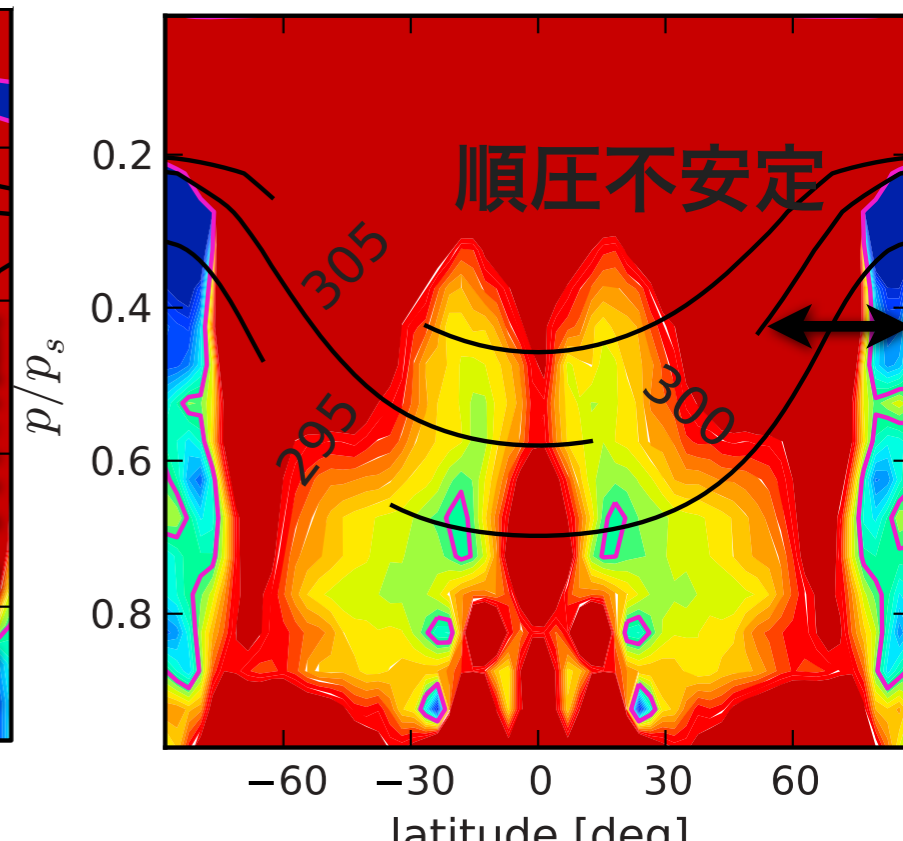
- 地球型惑星の大気循環は $Ro_T > 1$ で超回転になる
  - $Ro_T < 1$ なら、惑星規模より小さいロスビー波が中緯度で生まれ、赤道側に伝播して壊れる → 赤道の西風を減速 → 超回転にならない
  - $Ro_T > 1$ なら、傾圧不安定のスケールが惑星規模よりも大きくなりロスビー波の生成源が弱くなる。波数1が卓越する
  - 成長期には傾圧・順圧の両不安定が効いてくるが、準定常後は、順圧不安定のみが関係する



## 成長期



## 準定常後



# S レビューのまとめ

## • 分かったこと

- 単純な軸対称な加熱でも  $Ro_T$  が大きければ超回転になる
- 超回転生成期には順圧不安定・傾圧不安定の両者が見られる
- 準定常後には順圧不安定のみ
- いずれの段階でも、波数 1 が卓越する
- 循環形態の transition は  $Ro_T \sim 1$

## • よく分からないこと

- 生成期の順圧不安定と傾圧不安定との関わり
- 2つの edge wave の相互作用 → 不安定は予見可能か