

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

**榎村 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

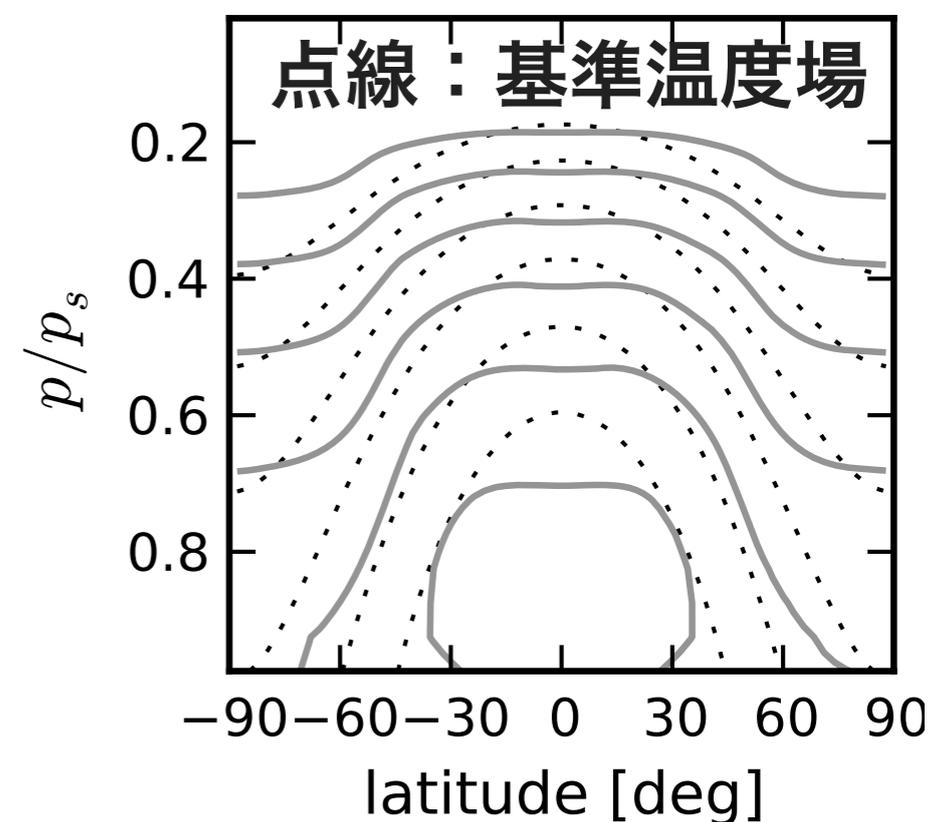
- 簡単乾燥プリミティブモデルの数値実験
  - 加熱は自転軸対称
  - 熱ロスビー数を大きくすることで
  - 循環が地球的 → スーパーローテーションへ
- 熱ロスビー数が大きいとき
  - 超回転生成期には、混合順圧傾圧不安定からの波数1の傾圧波が赤道向きの角運動量輸送を担う
  - 超回転生成後は、波数1の順圧不安定波で維持

# 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.

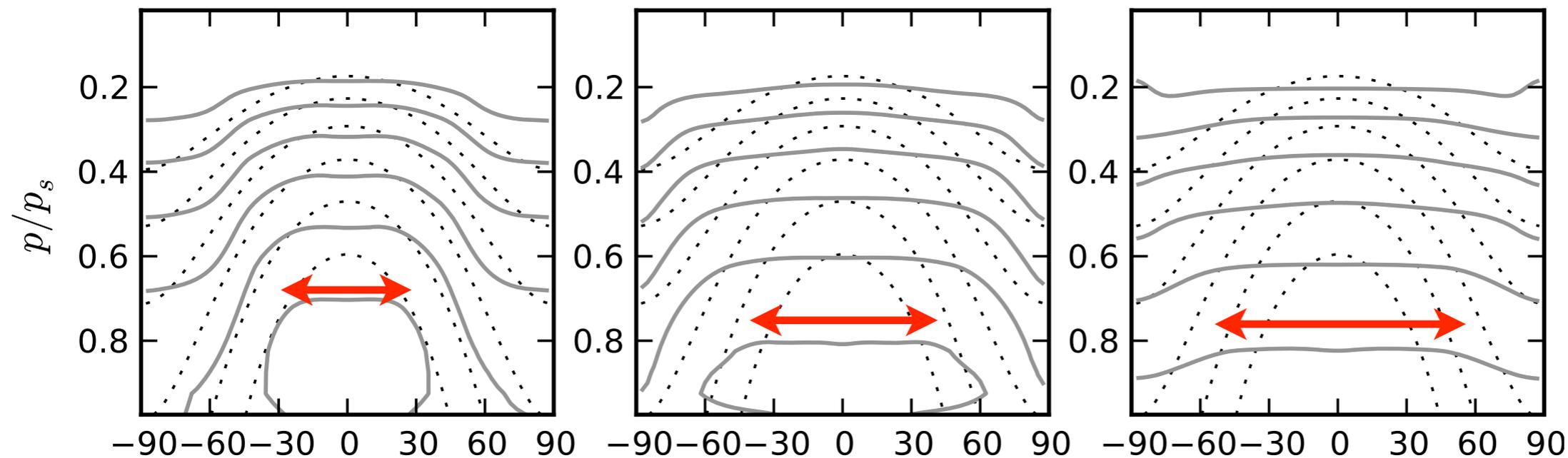
# 4<sub>1</sub> 準定常後の平均温度場 / 流速場

$Ro_T = 0.02$

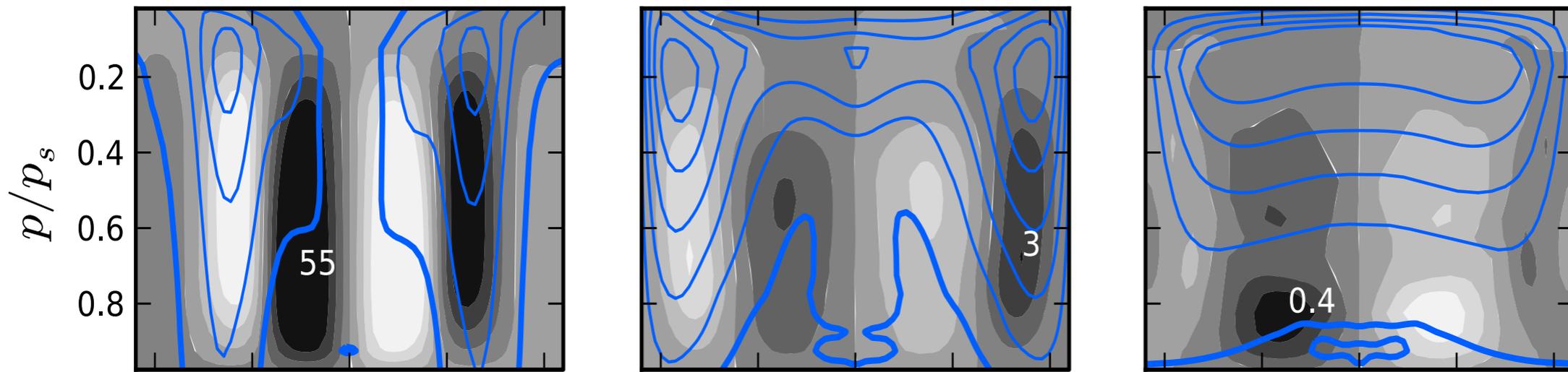
$Ro_T = 1.3$

$Ro_T = 10.5$

実践：平均温度場  
点線：基準温度場



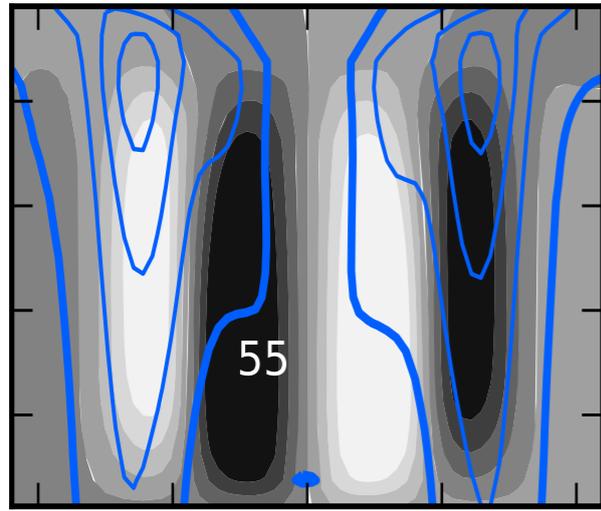
平均流速場



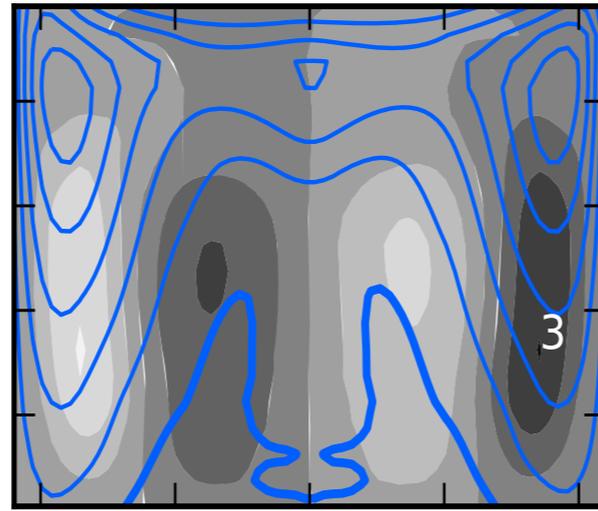
$Ro_T$ ：大ほど、南北に温度一定の範囲が広がる  
→ハドレー循環の拡大に対応

# 4<sub>1</sub> 準定常後の平均温度場 / 流速場

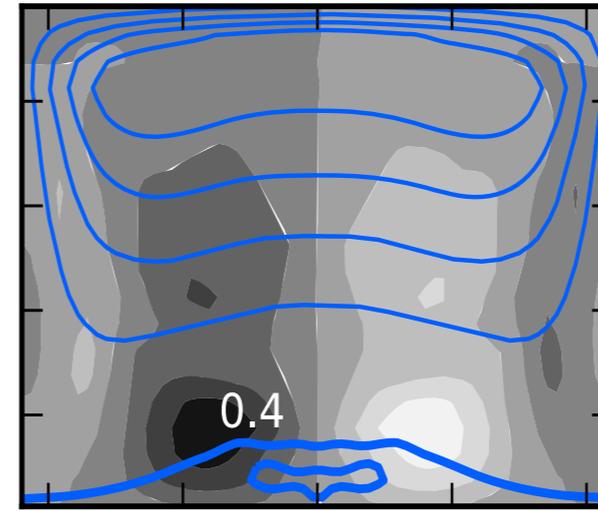
$Ro_T = 0.02$



$Ro_T = 1.3$



$Ro_T = 10.5$



平均流速場

## 平均子午面循環

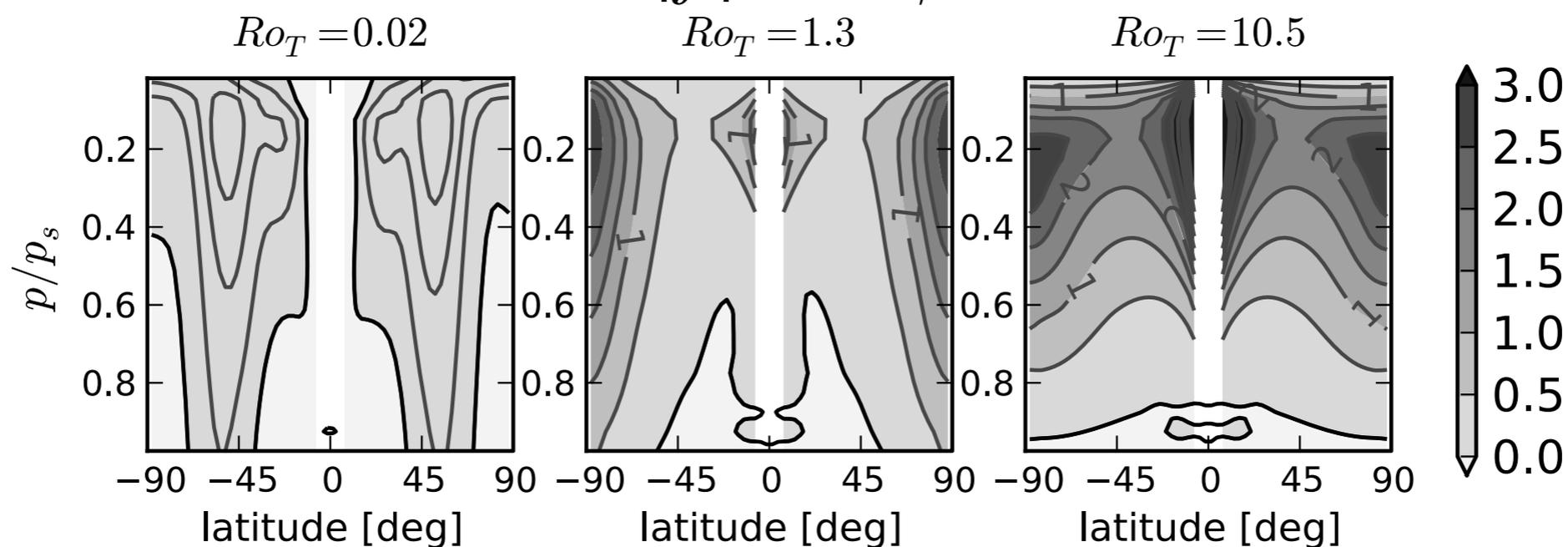
- $Ro_T: 0.02 \rightarrow 1.3$ 
  - ハドレーセルの拡大、フェレルセルの極側シフト
- $Ro_T: 10.5$ 
  - 境界層 ( $p/p_s > 0.7$ )の中に、弱い
  - 上空では傾いている ← 対称 (傾斜) 不安定

## 平均東西風

- $Ro_T: 1.3$  は超回転への過渡的状态

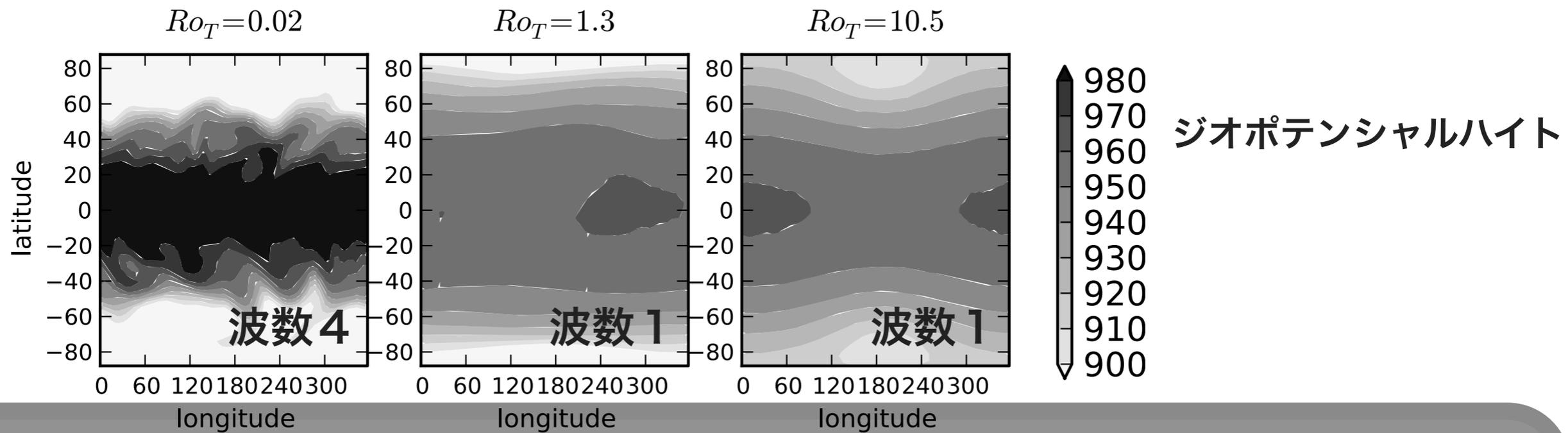
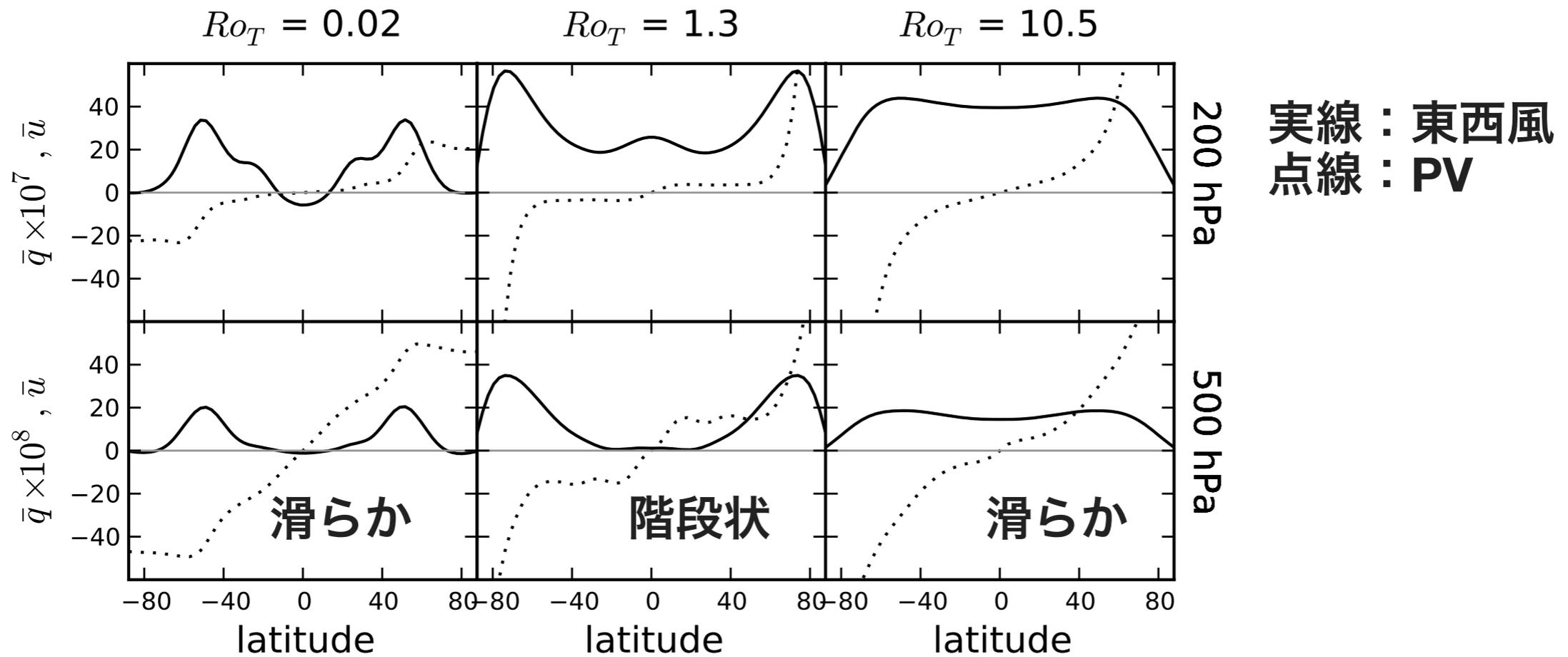
# 4-1 準定常後の局所ロスビー数

- 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  $Ro \equiv \frac{\bar{u}}{|f|a \cos \phi}$

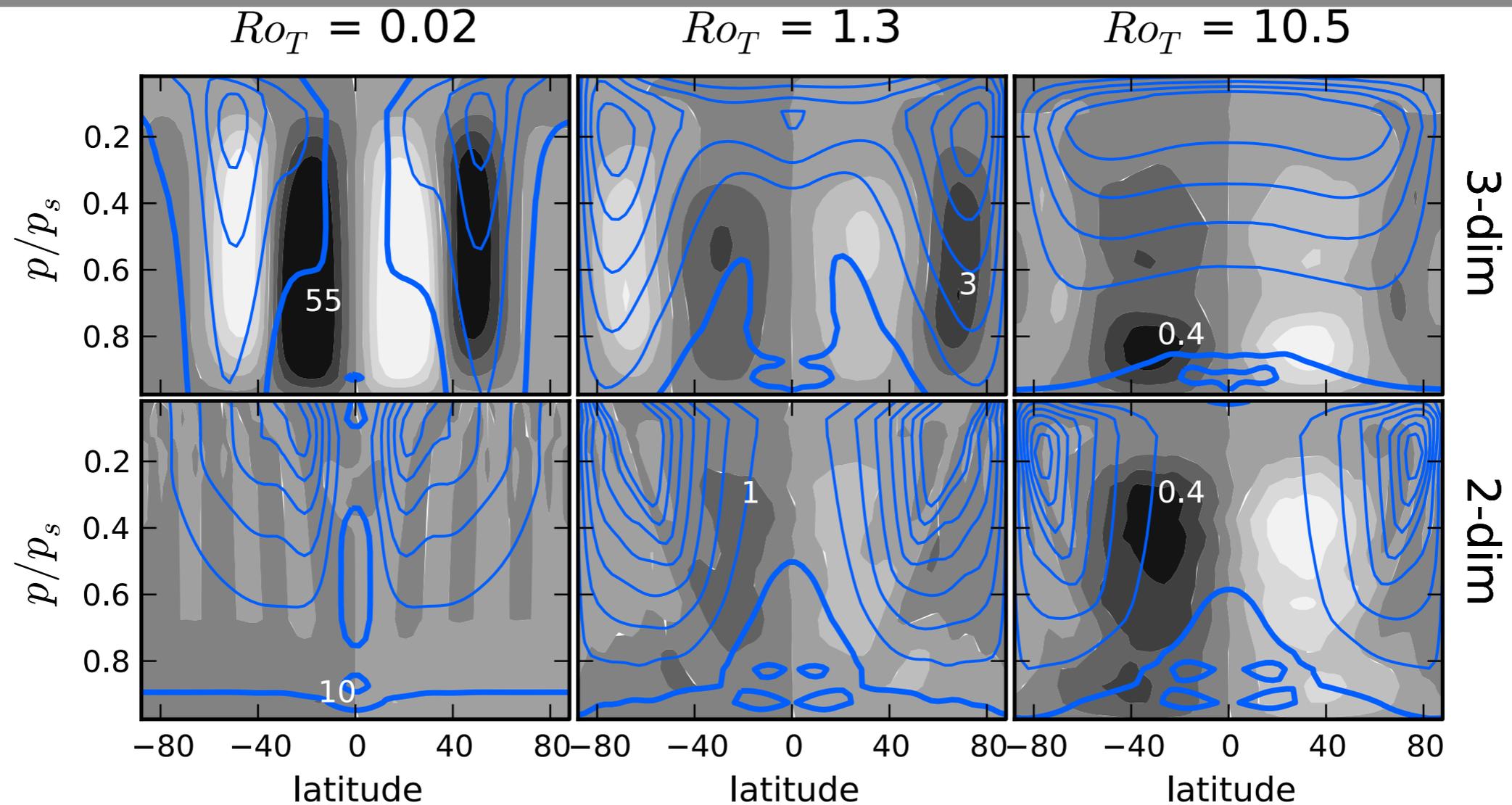


Roはまだ小さい  
→傾圧不安定が起こりうる

# 4<sub>1</sub> PVとジオポテンシャルハイト



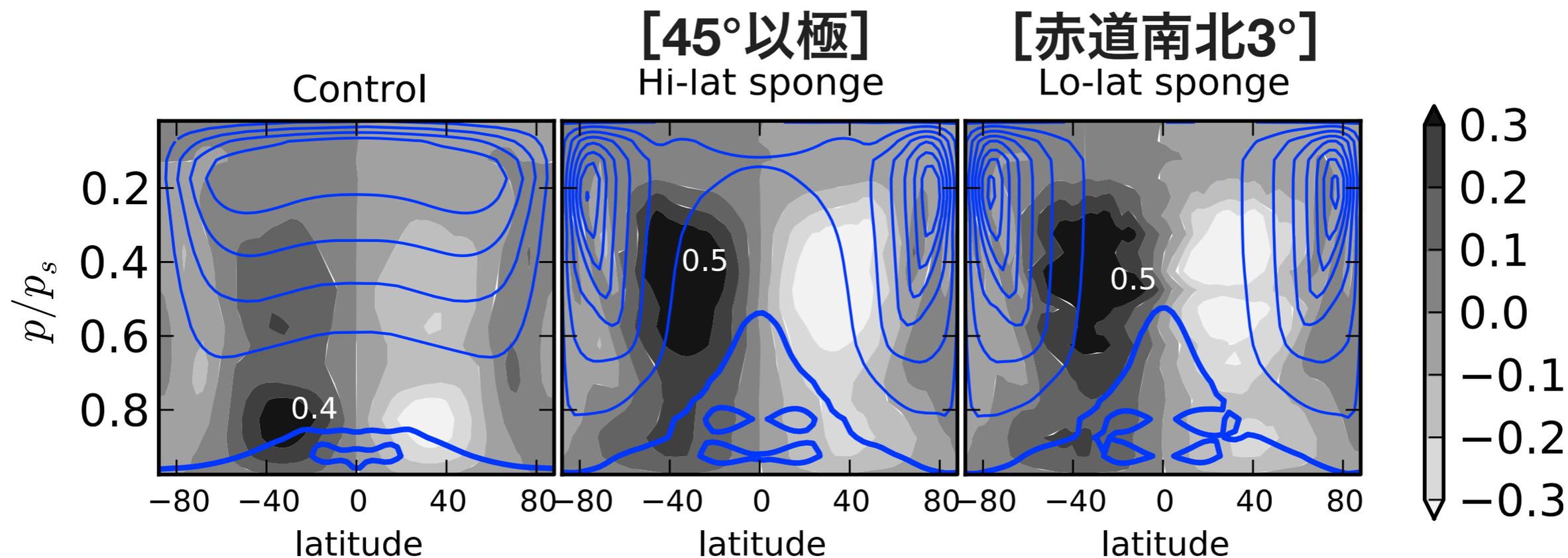
# 4<sub>2</sub> 軸対称テスト



- 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

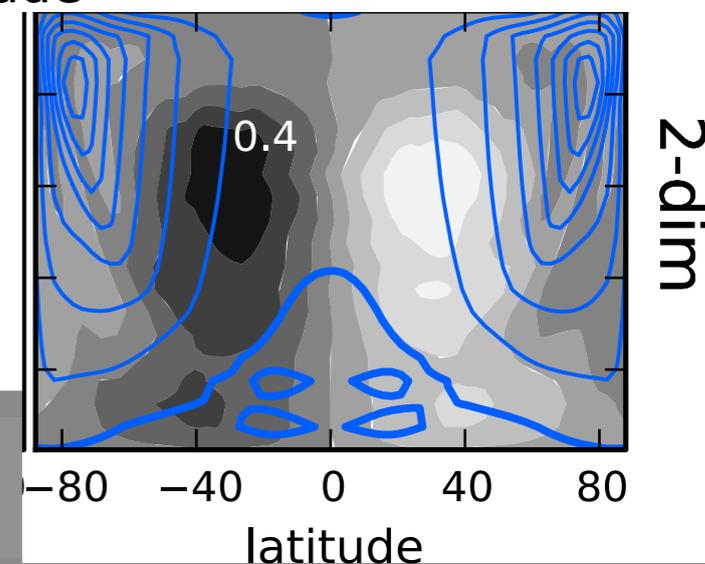
# 4<sub>3</sub> スポンジテスト

- 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 ( $Ro_T = 10.5$ )



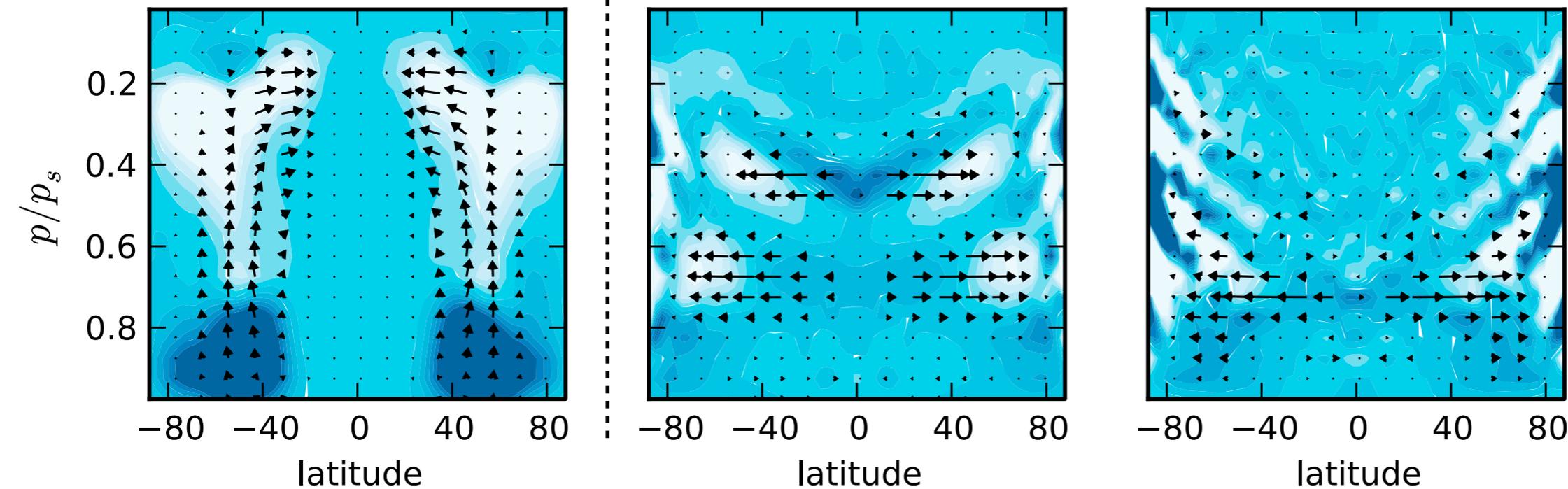
Hi-lat: 超回転が弱い → 高緯度が重要

Low-lat: 超回転しない → 低緯度はより重要



5<sub>1</sub>

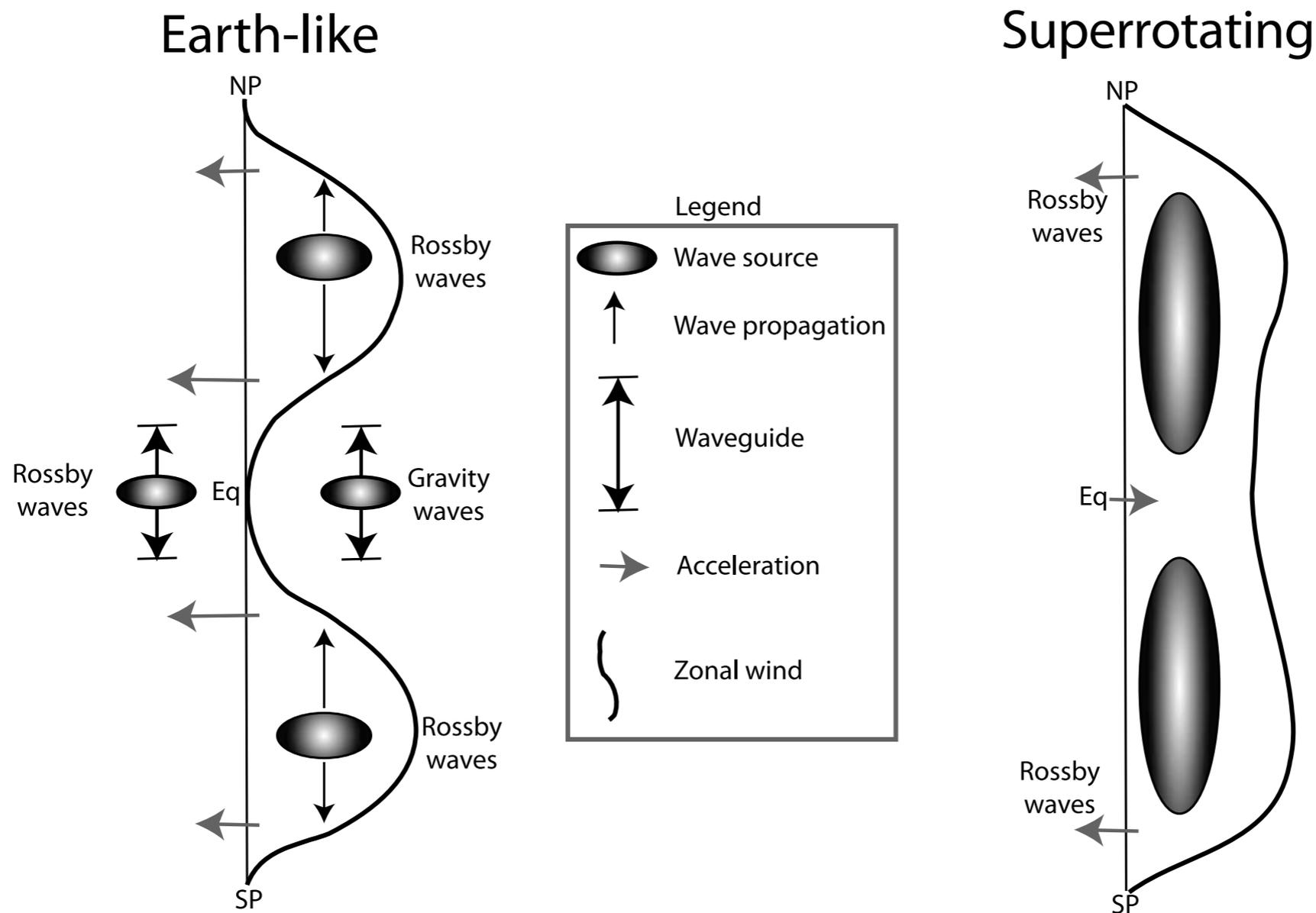
## EPフラックス (波活動)

 $Ro_T = 0.02$ , steady $Ro_T = 10.5$ , spinup $Ro_T = 10.5$ , steady

濃色 : 加速  
淡色 : 減速

- スピンアップ時
  - 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）

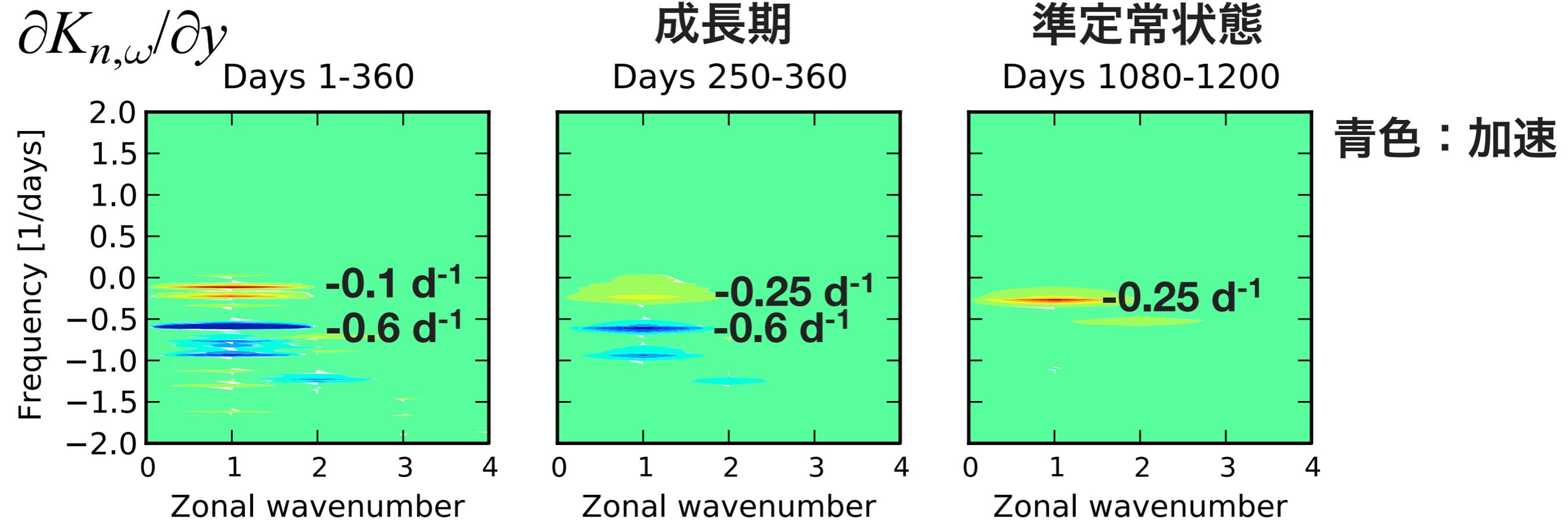
中高緯度からのロスビー波は  
 ← そもそも存在しない、または  
 ← 平均流と作用しない

# 5<sub>2</sub> 渦運動量フラックス Cospectra

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

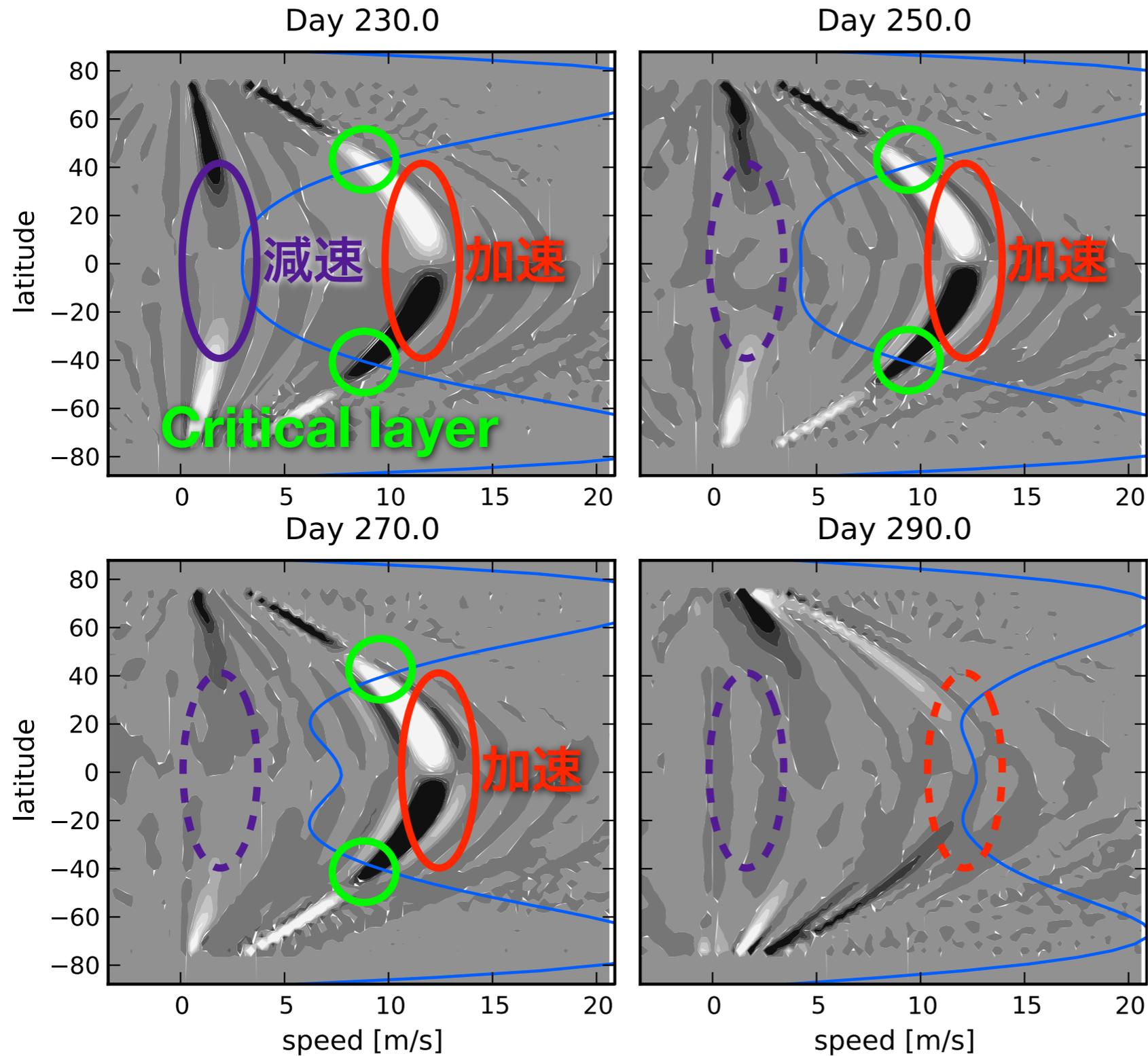
- $U'_{n,\omega} V'_{n,\omega}$  は空間・時間方向でフーリエ変換した係数（\*は共役複素数）
- $Ro_T = 10.5$  を解析

# 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, $Ro_T = 10.5$

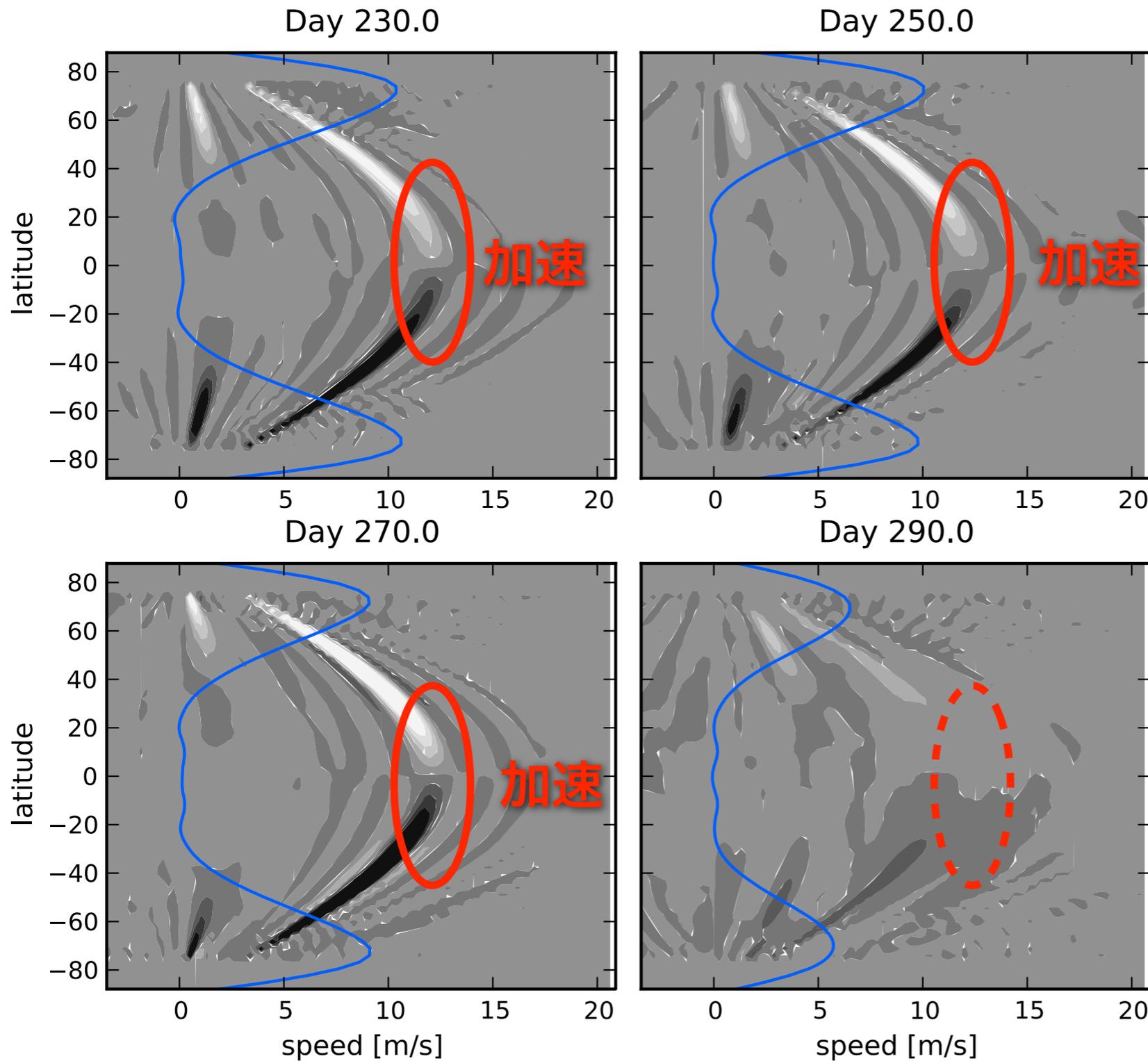


濃色：  
正の運動量フラックス

淡色：  
負の運動量フラックス

平均東西風

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



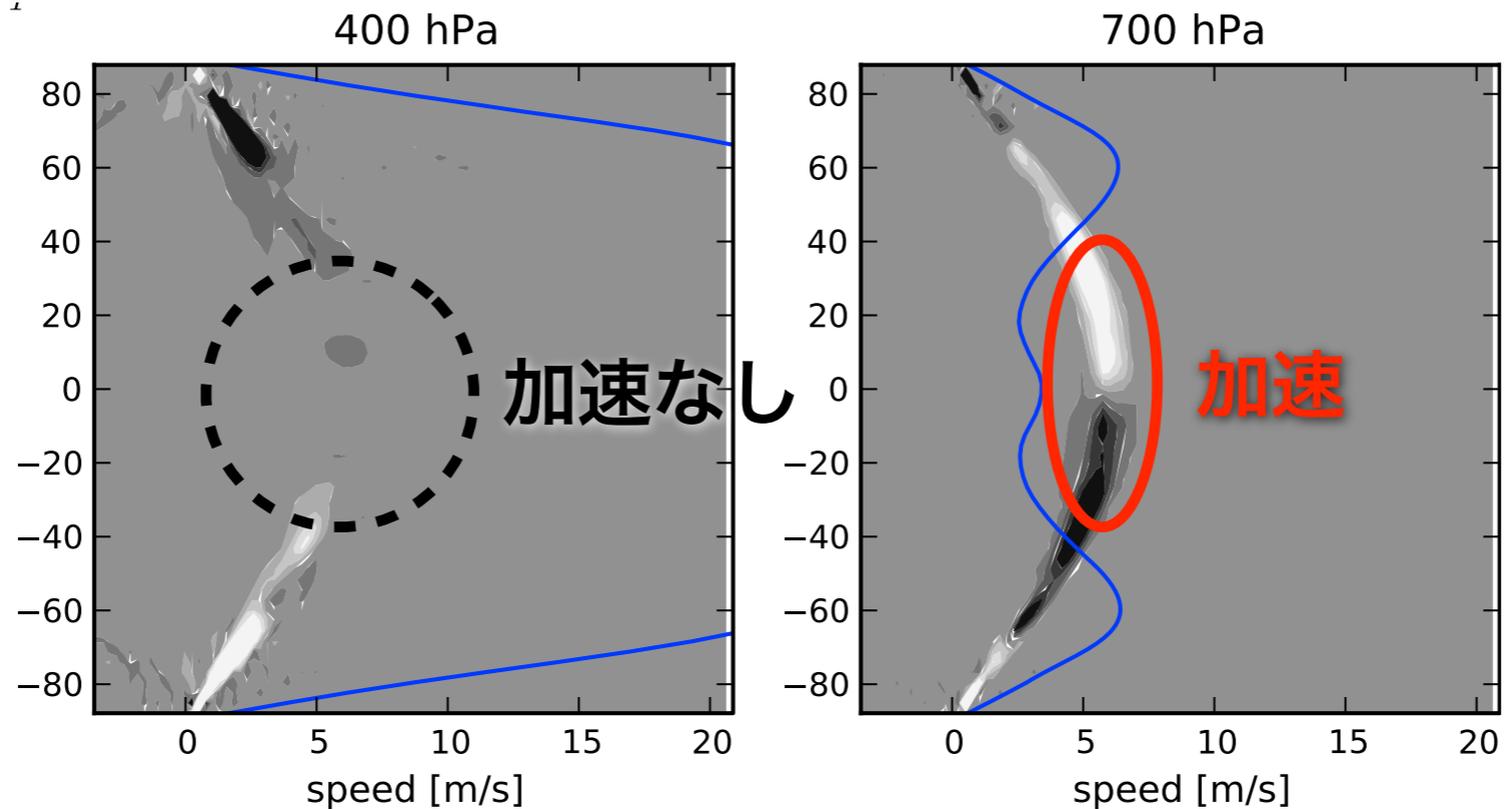
濃色：  
正の運動量フラックス

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

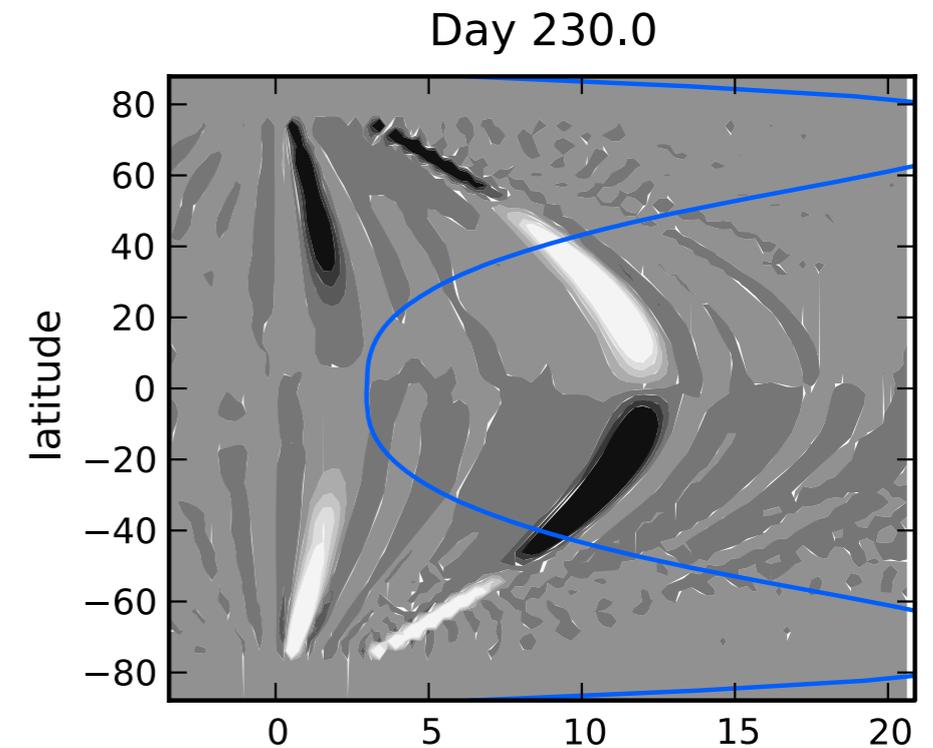
# 5<sub>2.2</sub> 準定常状態



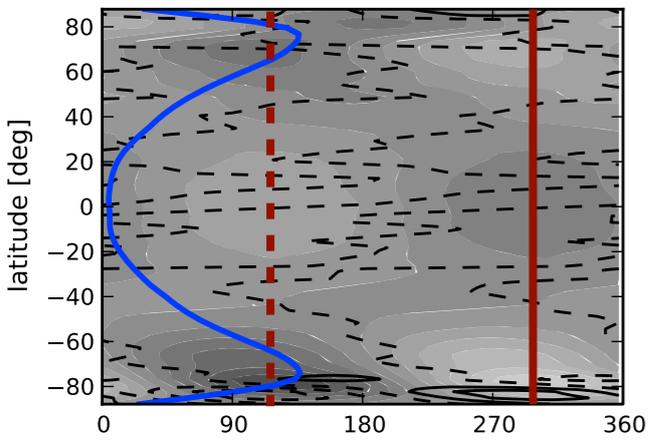
- 上空では、加速はほとんどない
  - → それでも超回転を維持できる
- 境界層上端では加速がある

# 5<sub>3</sub> 超回転を生成する波の構造

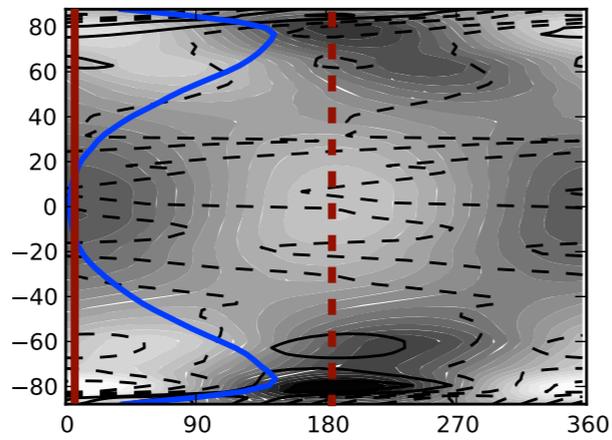
- これまでの診断で分かったこと
  - 波数 1、振動数  $-0.6 \text{ d}^{-1}$
  - 波は平均流に対して、
    - ▶ 低緯度で東進
    - ▶ 高緯度で西進
  - コヒーレントな緯度構造は変わらない



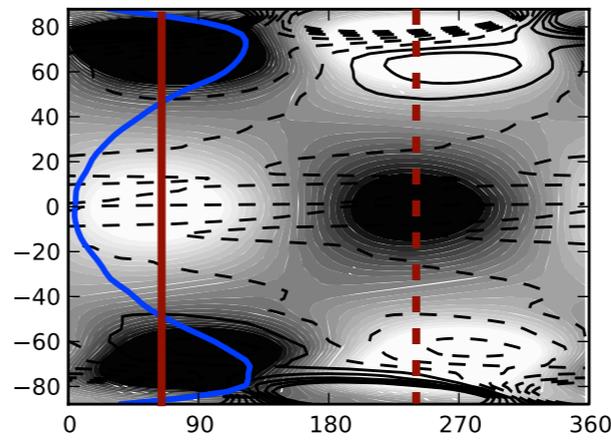
Day 130



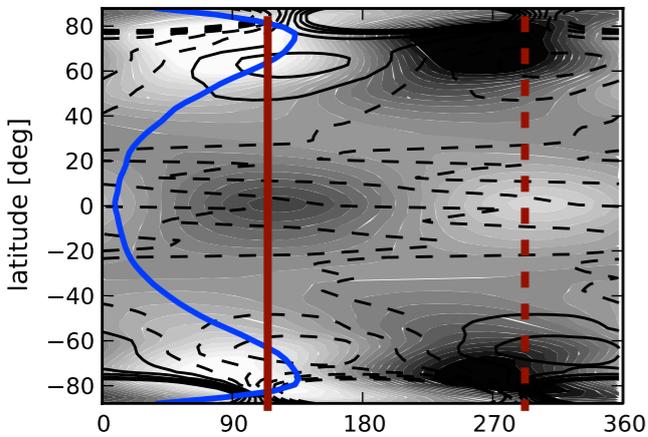
Day 150



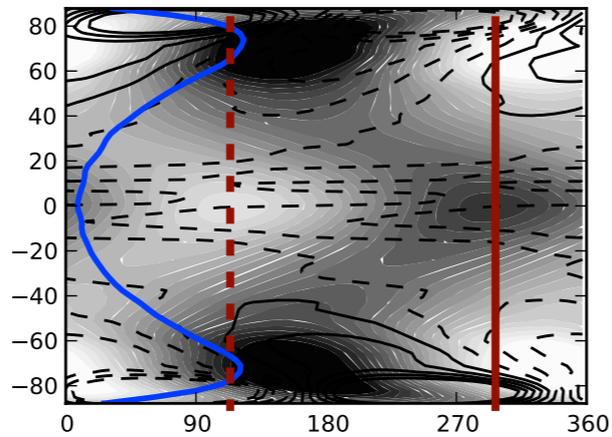
Day 170



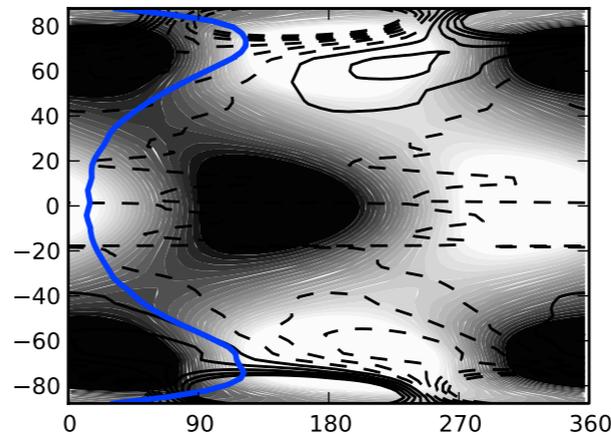
Day 190



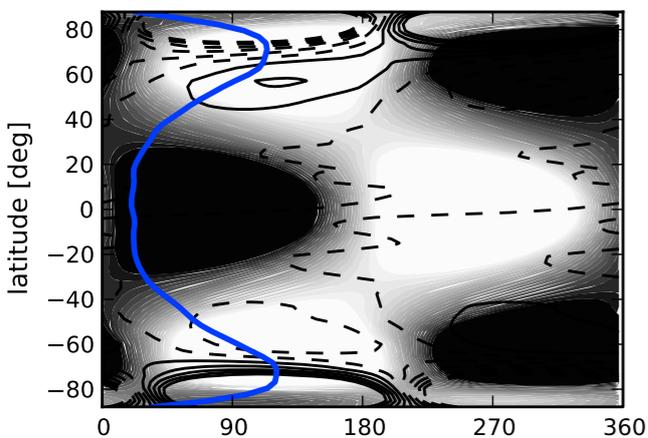
Day 210



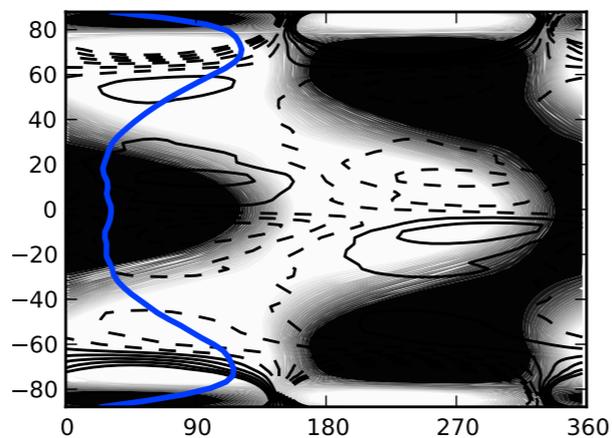
Day 230



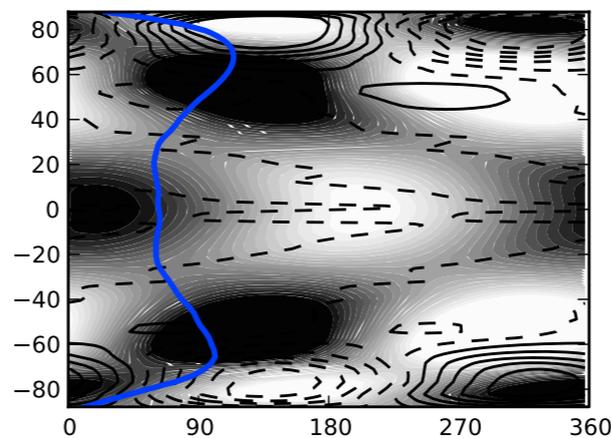
Day 250



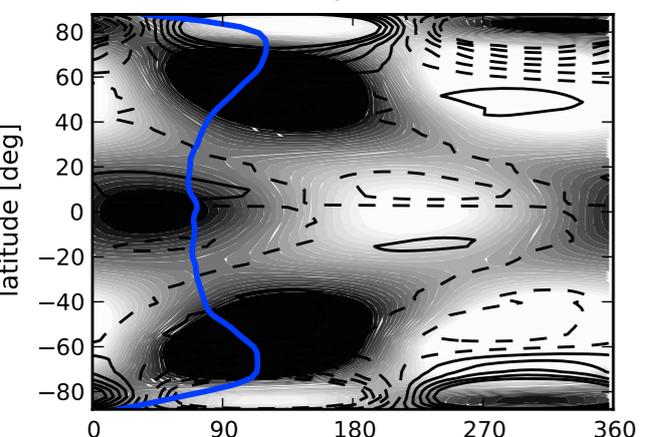
Day 270



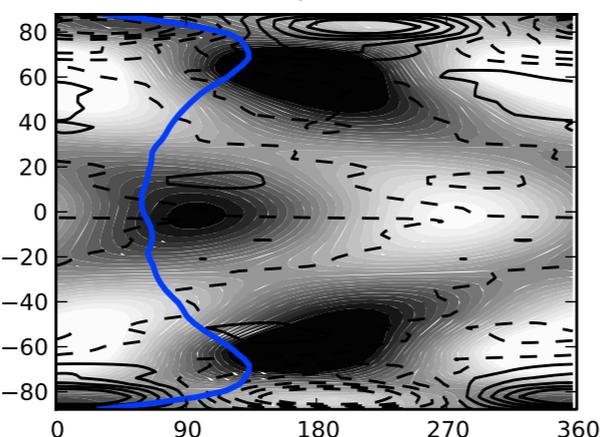
Day 290



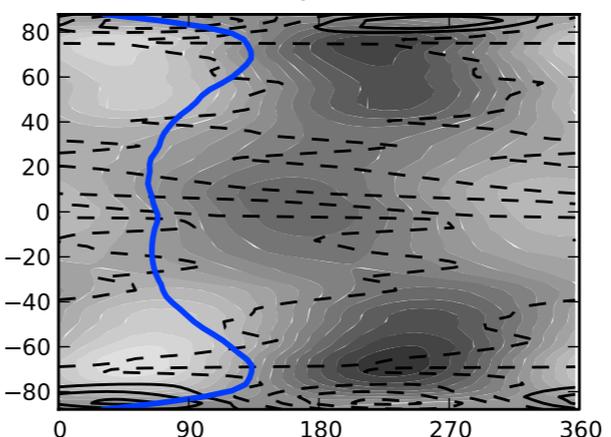
Day 310



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

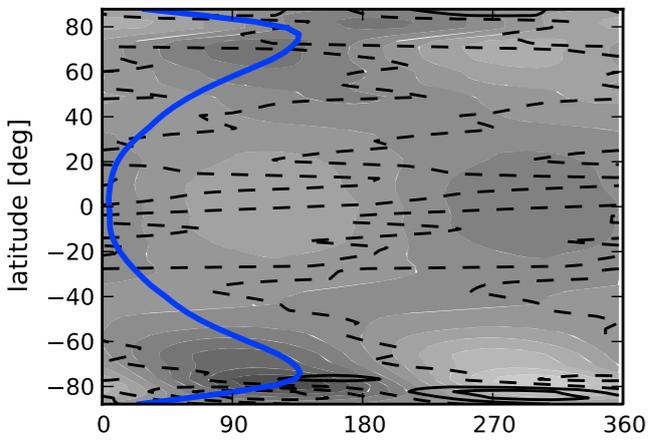
青線：平均流 × 5 m/s

• 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

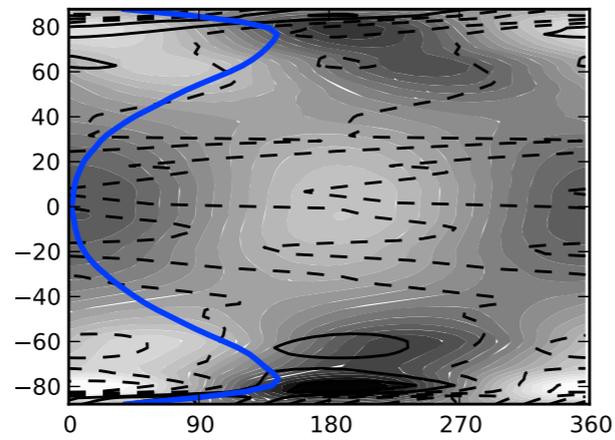
• 230-290日で両成分とも  
強くなり、赤道の平均流  
が加速される

• 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

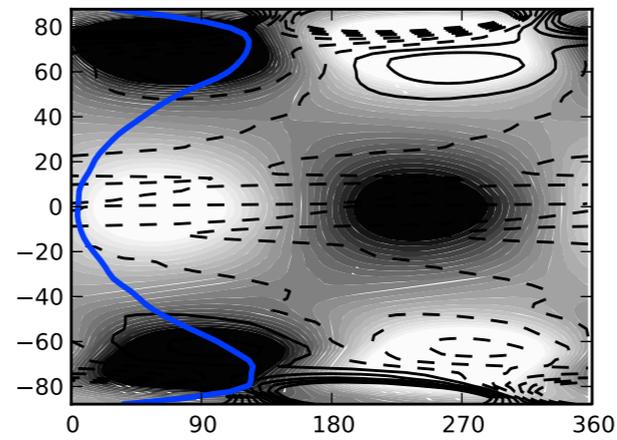
Day 130



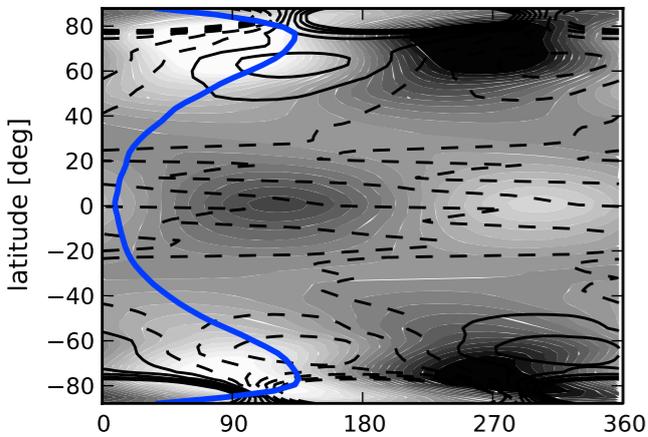
Day 150



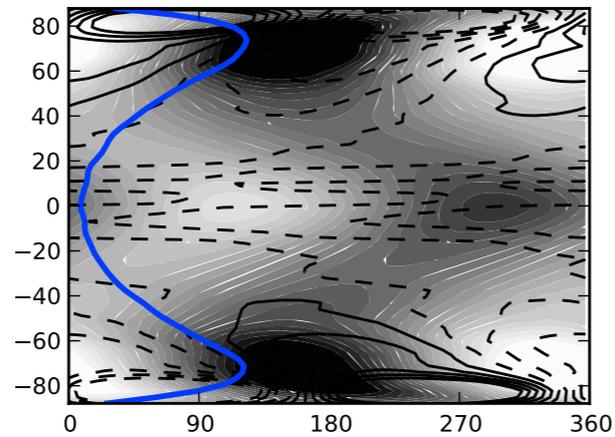
Day 170



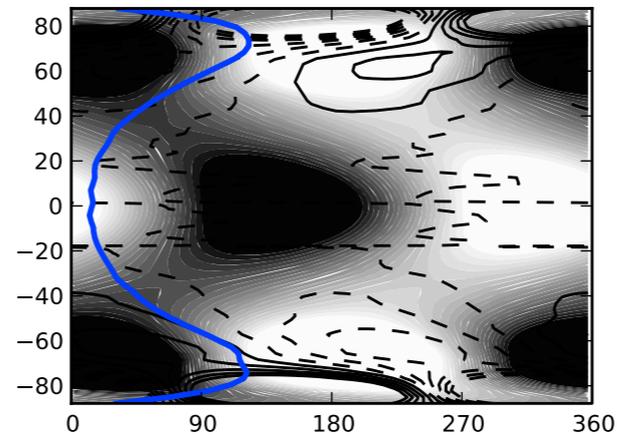
Day 190



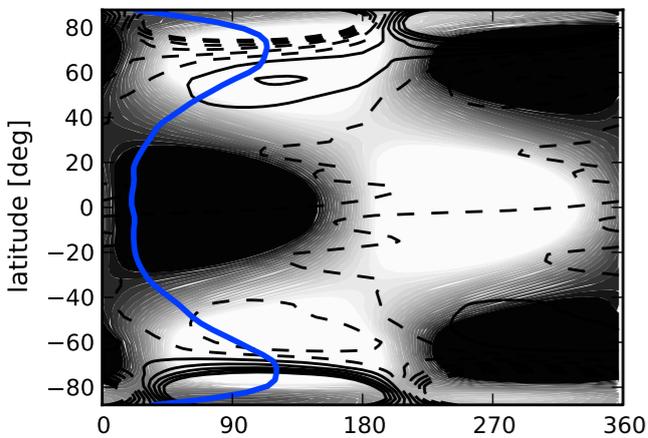
Day 210



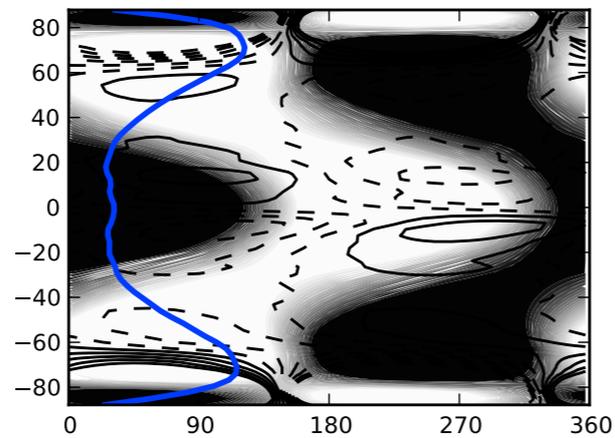
Day 230



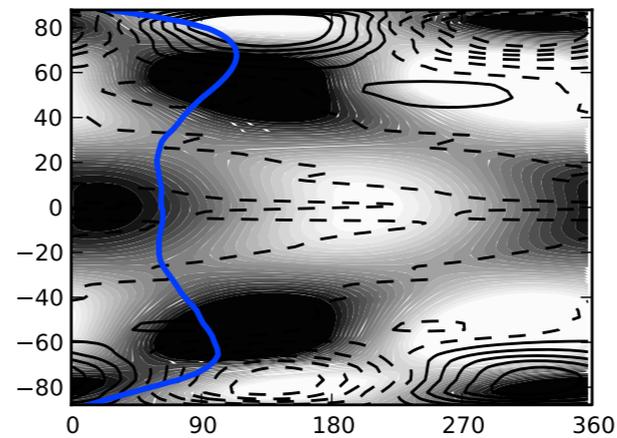
Day 250



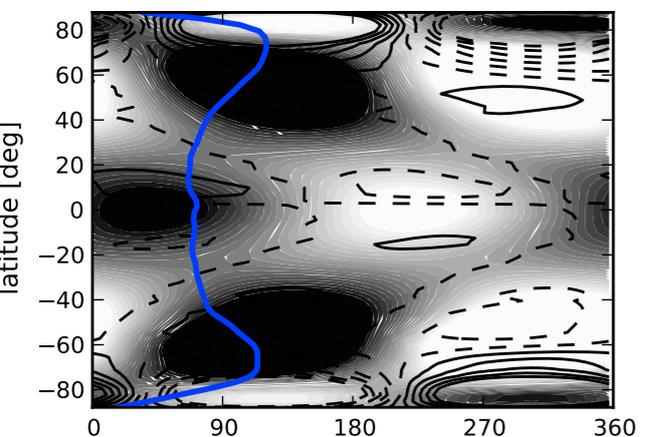
Day 270



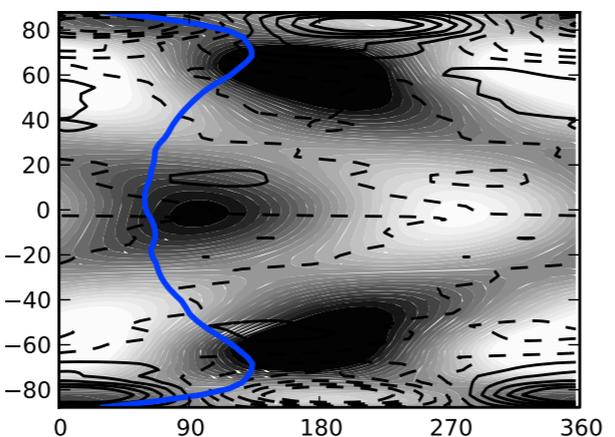
Day 290



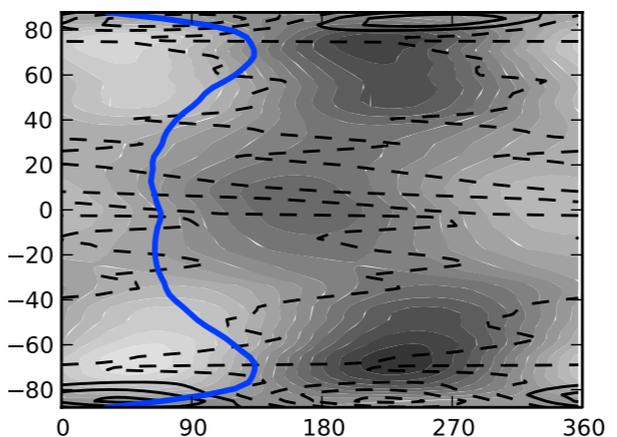
Day 310



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

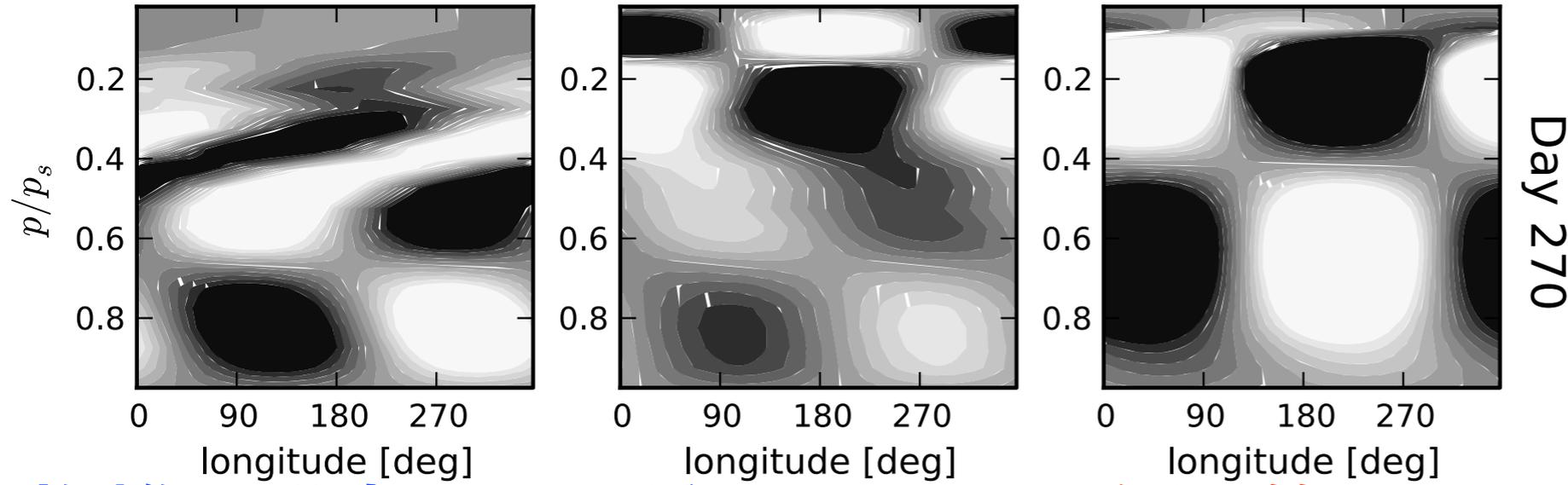
# ジオポテンシャルハイトの偏差（フィルタ済み） 270日

## 経度-高度断面

0N latitude

40N latitude

80N latitude



複雑：鉛直シアーが原因

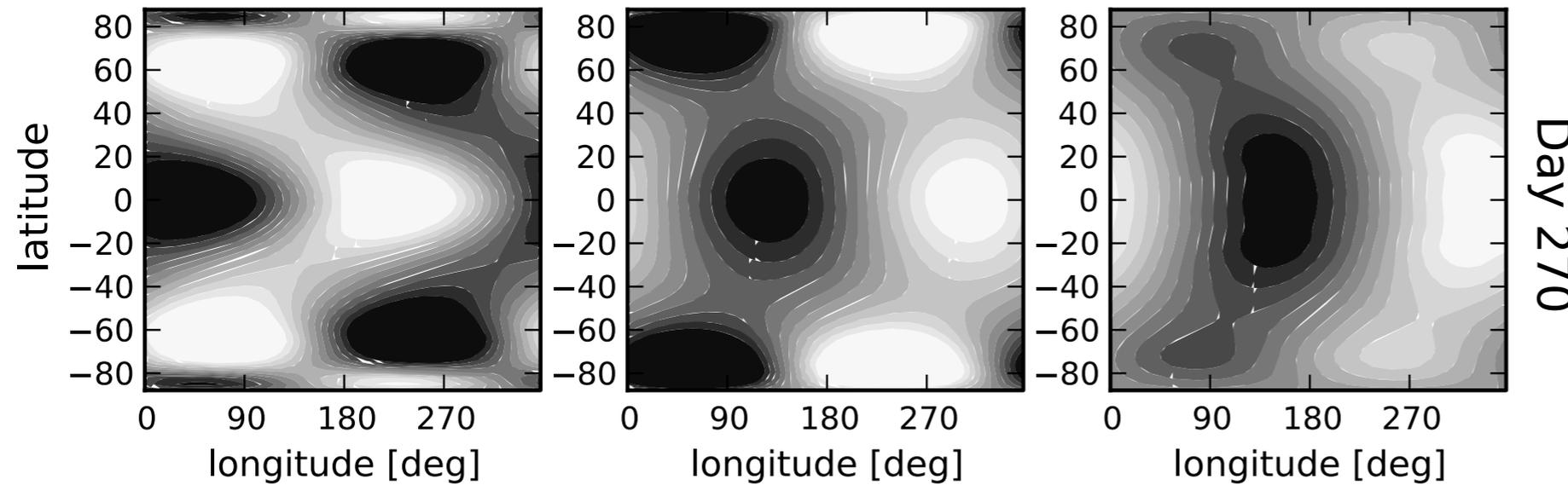
傾圧第1モード

## 経度-緯度断面

400 hPa

700 hPa

900 hPa

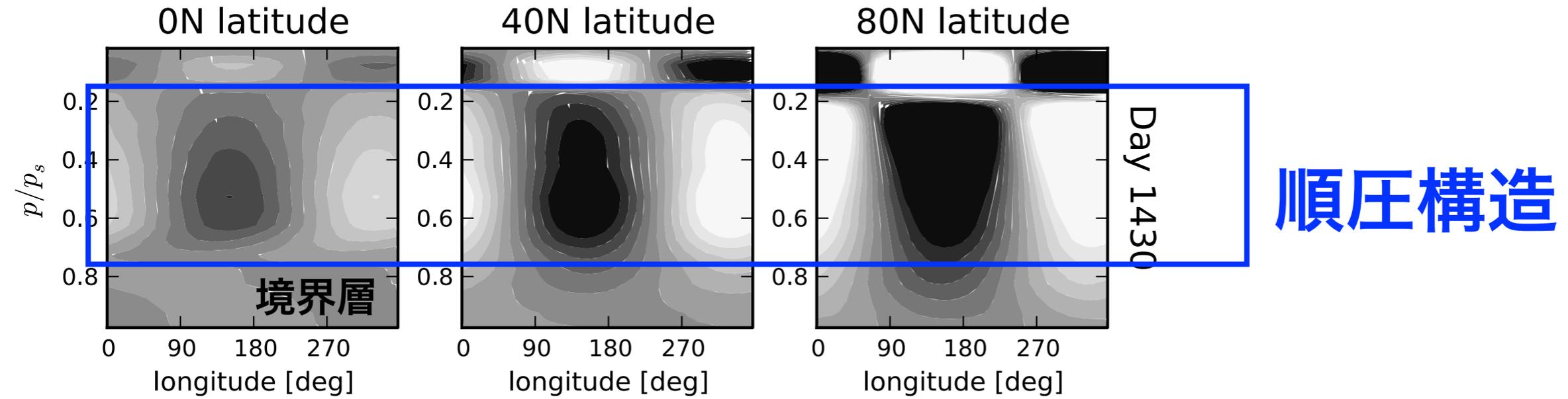


傾きが大きくなる ←

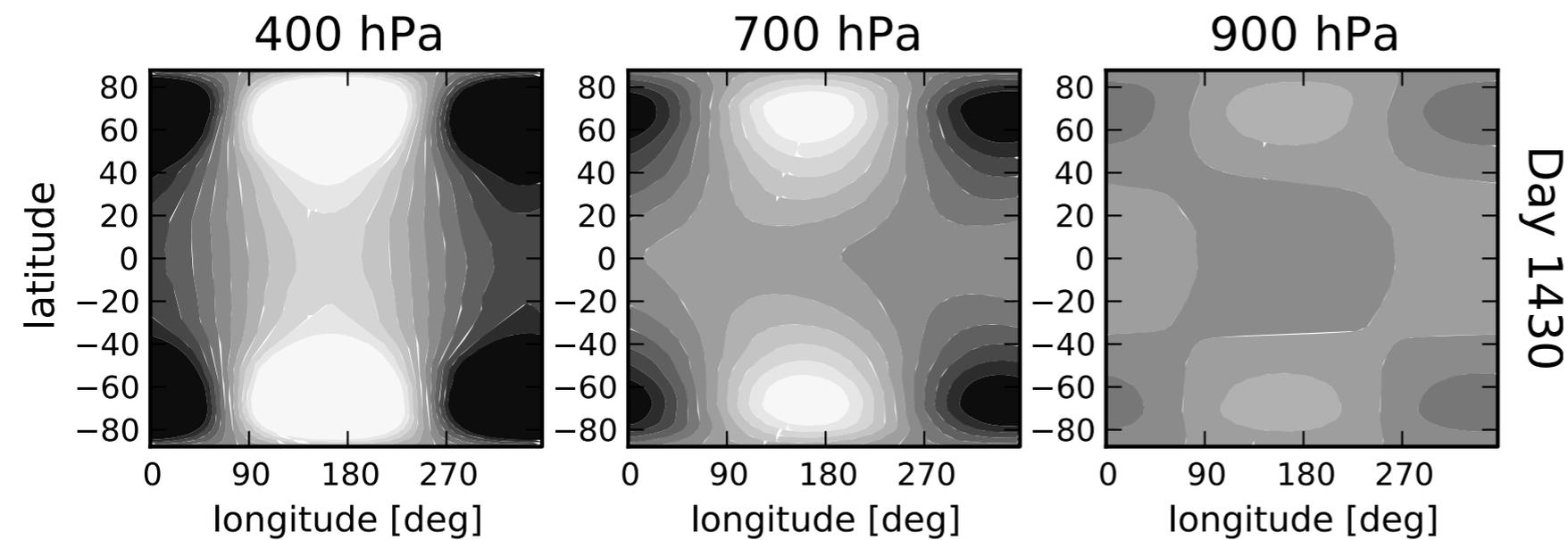
コヒーレント

# 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



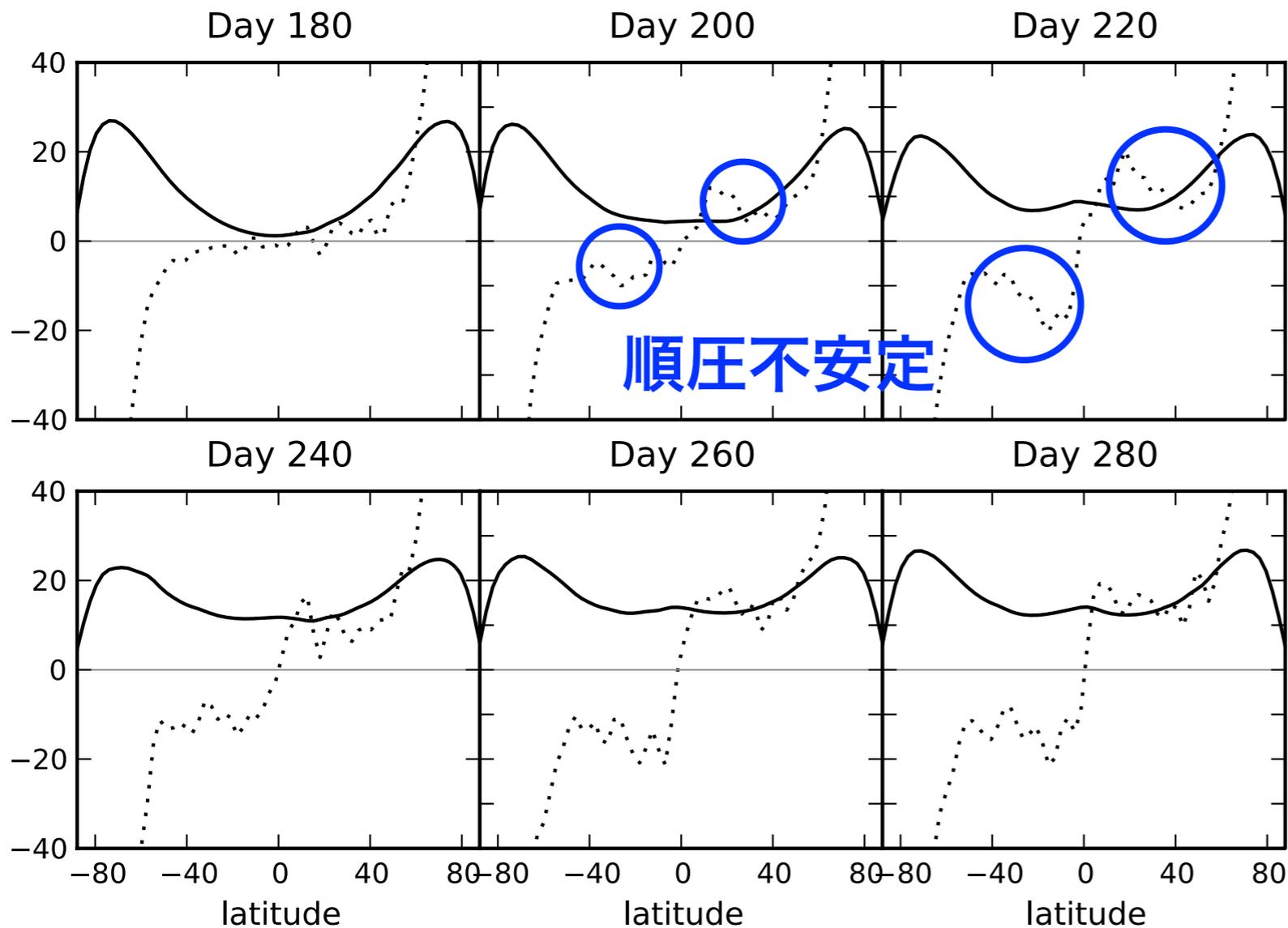
## 経度-緯度断面



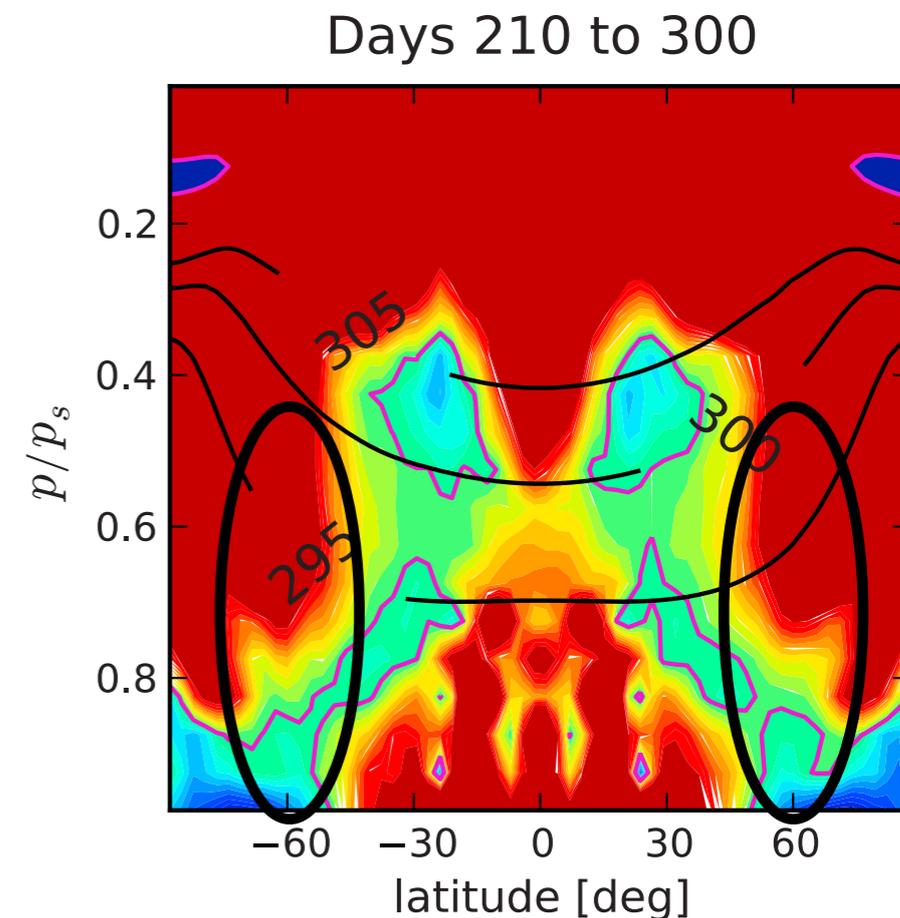
**Uniform structure**

# 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

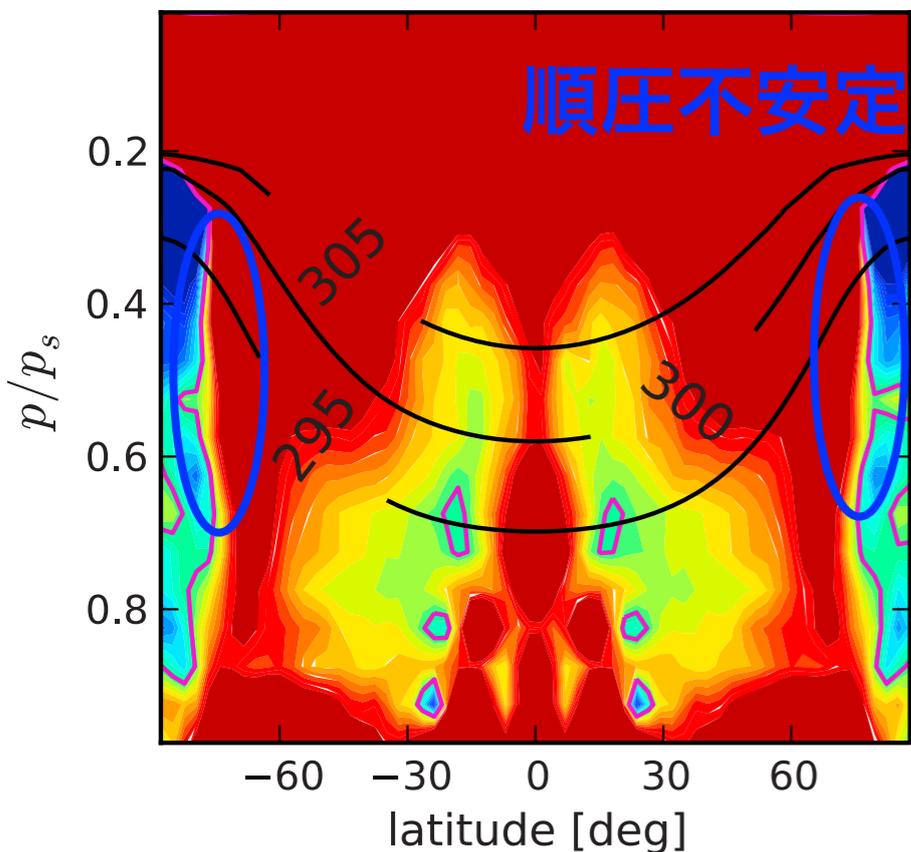


傾圧不安定

# 5<sub>4</sub> 準定常後

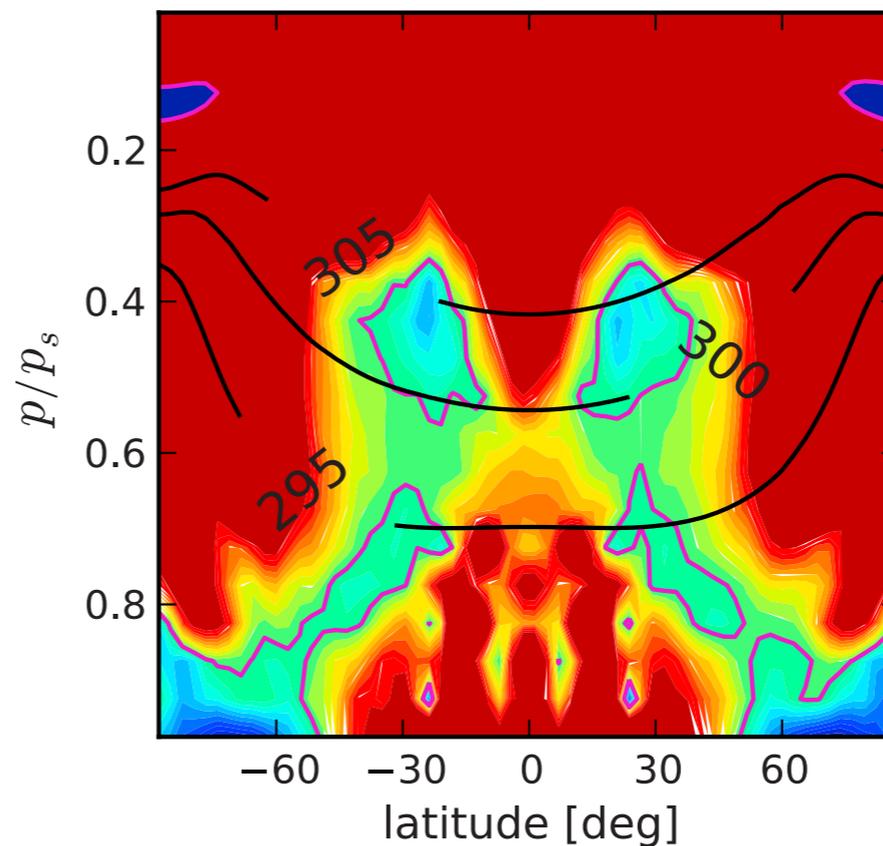
## 準定常後

Days 750 to 1050



## スピニアップ

Days 210 to 300



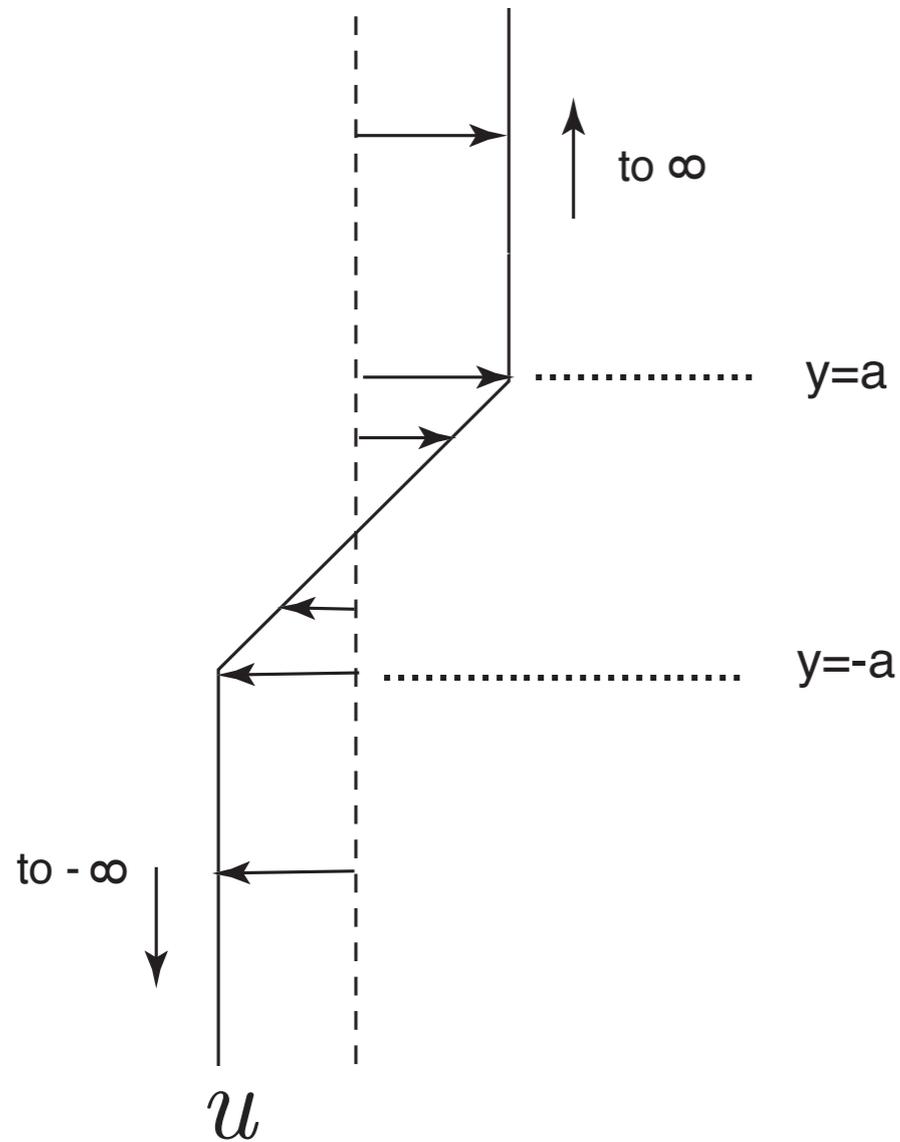
# 5<sub>5</sub> 順圧不安定 [47]

- 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

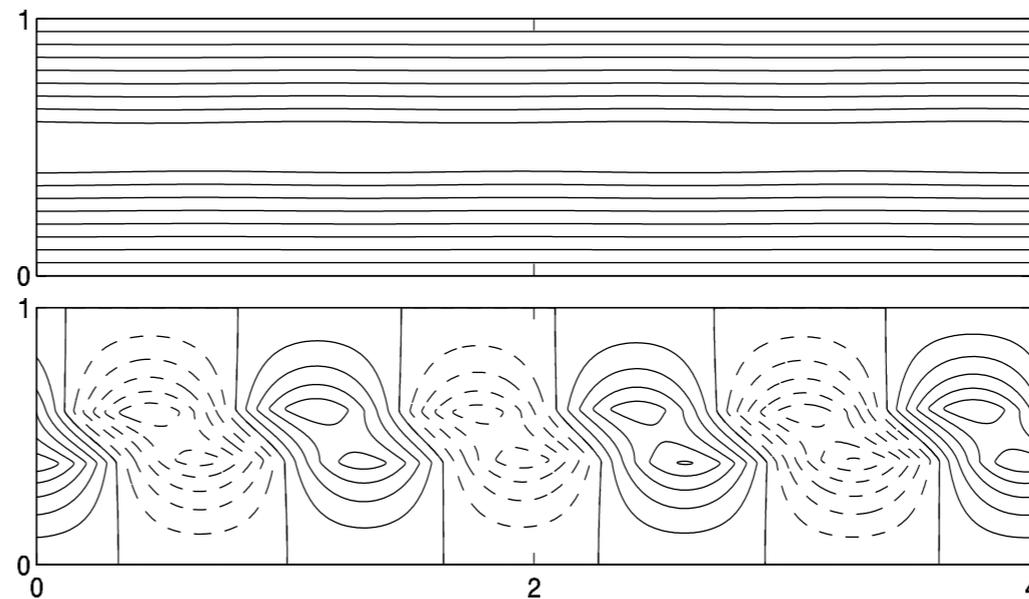
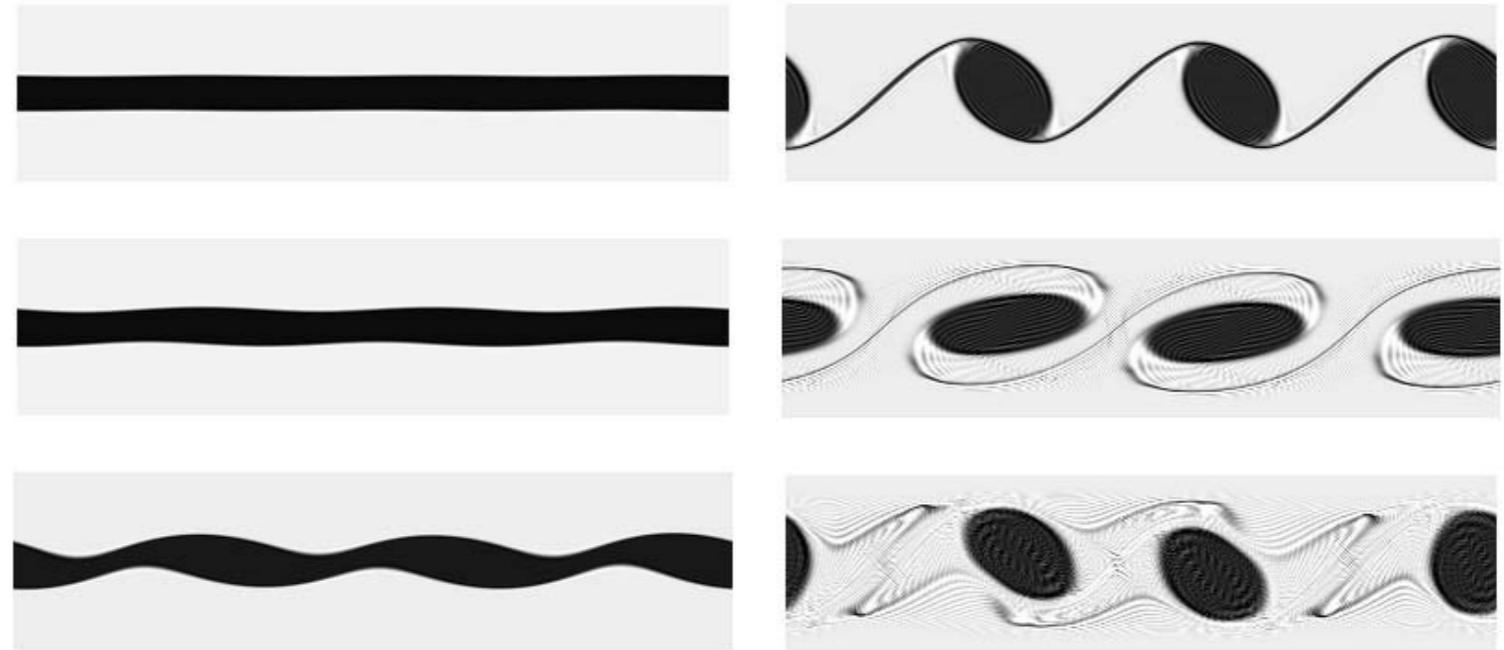
こういうこと？

# 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

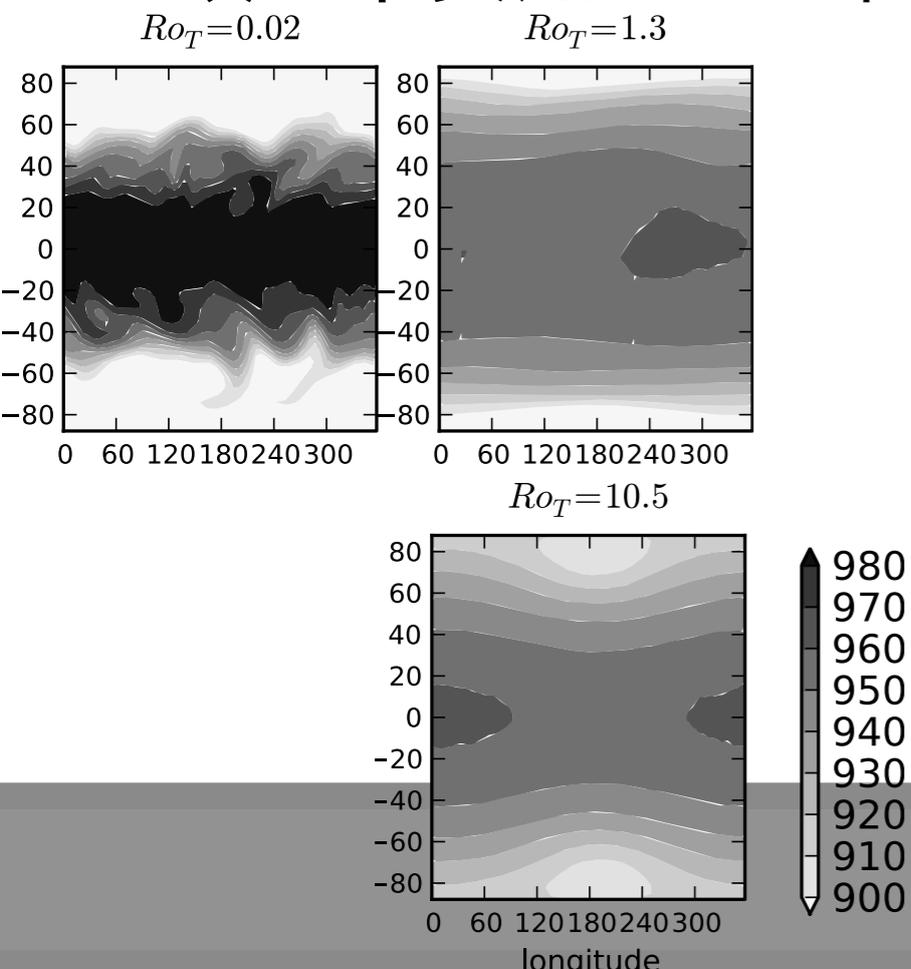
**Fig. 6.7** Total streamfunction (top panel) and perturbation streamfunction from the same numerical calculation as in Fig. 6.6, at a time corresponding to the second frame. Positive values (a clockwise circulation) are solid lines, and negative values are dashed. The perturbation pattern grows exponentially,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

## 6 太陽系のなかの超回転

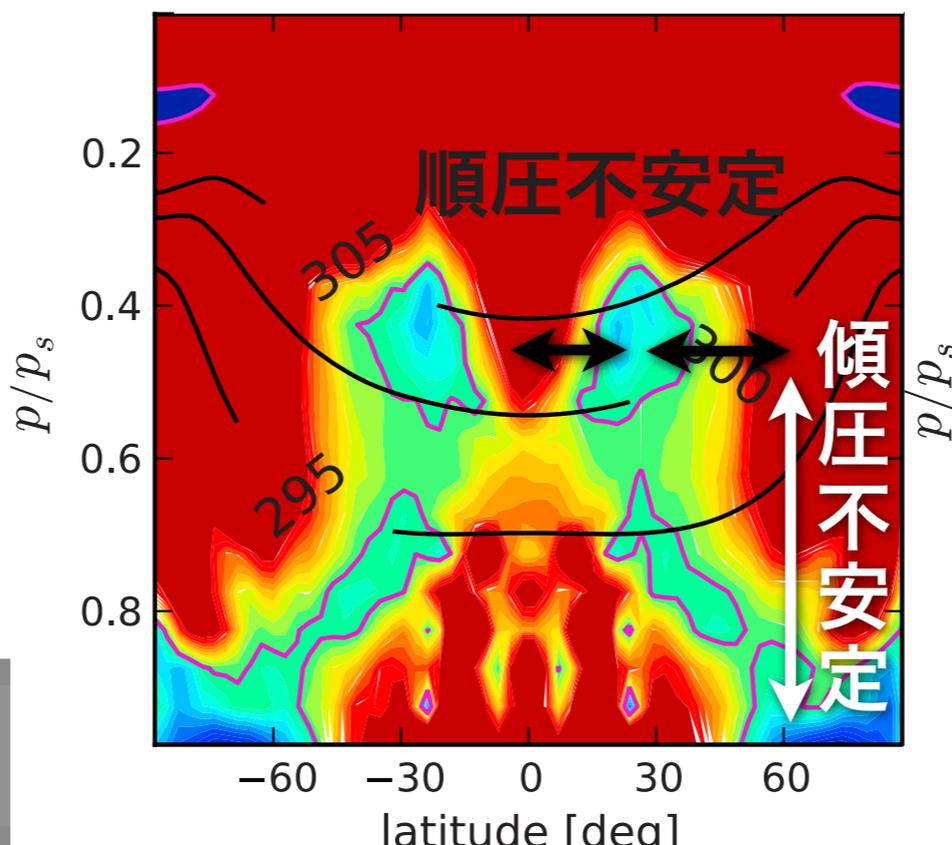
- 金星は  $Ro_T \sim 1200$
- タイタンは  $Ro_T \sim 30$
- 火星は  $Ro_T \sim 0.1$
- タイタンの超回転メカニズムは本実験に近いかも
- 火星は、transition ( $Ro_T = 1$ ) に近いけど、将来的に自転角速度が変わって超回転になることはなさそう

# 7 Conclusions

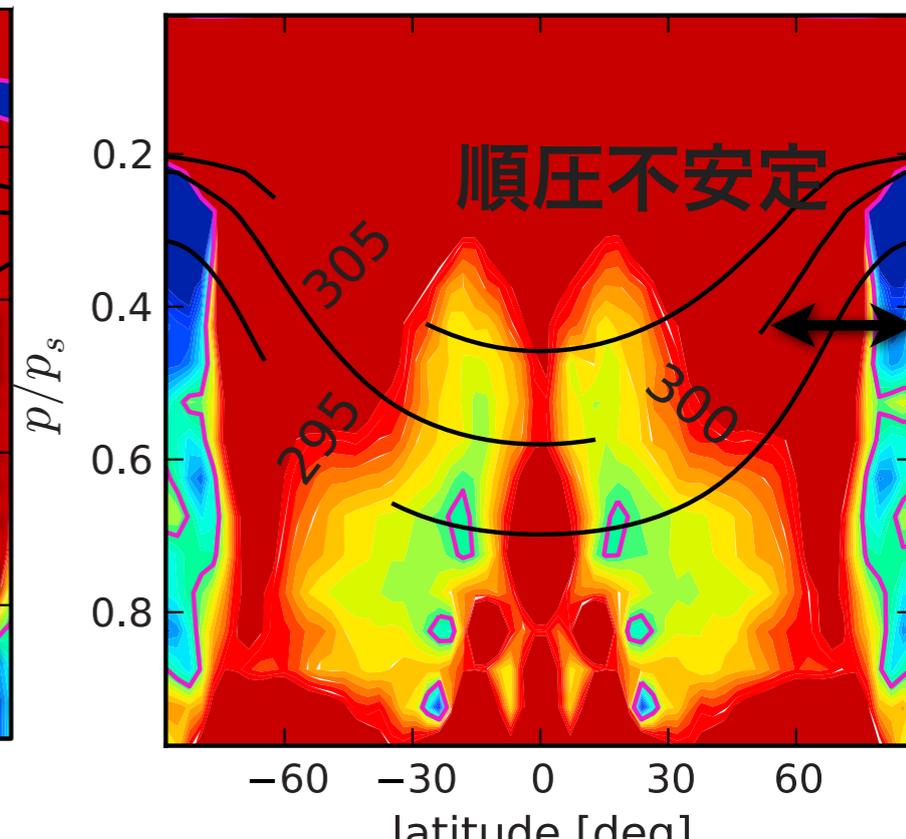
- 地球型惑星の大気循環は $Ro_T > 1$ で超回転になる
  - $Ro_T < 1$ なら、惑星規模より小さいロスビー波が中緯度で生まれ、赤道側に伝播して壊れる→赤道の西風を減速→超回転にならない
  - $Ro_T > 1$ なら、傾圧不安定のスケールが惑星規模よりも大きくなりロスビー波の生成源が弱くなる。波数1が卓越する
  - 成長期には傾圧・順圧の両不安定が効いてくるが、準定常後は、順圧不安定のみが関係する



## 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