

# 大規模循環と鉛直対流の全球計算のための ロスビー数を固定した惑星小型化実験

神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻 M2 市田春菜

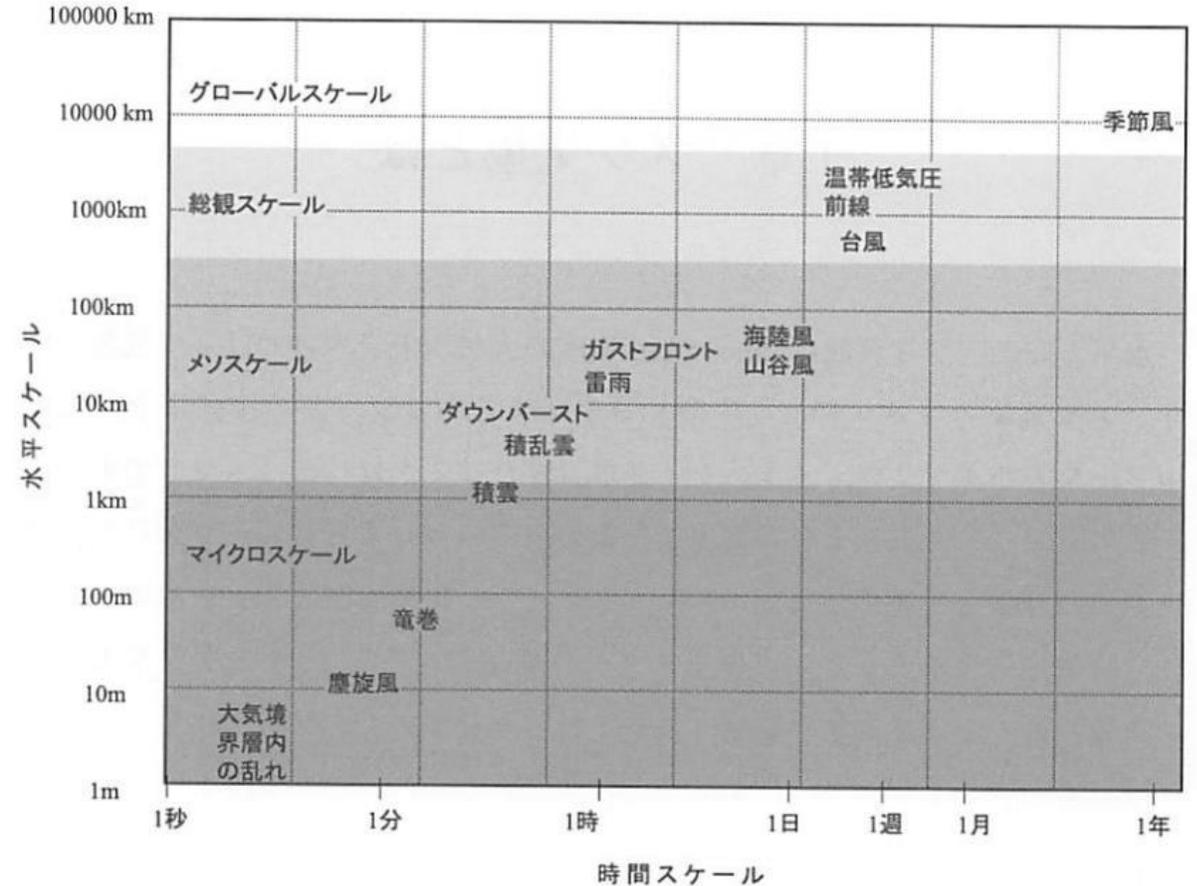
# 目次

1. はじめに
  - ・ 背景
  - ・ 前回までの進捗
  - ・ 今回のセミナーの目的
2. 実験方法
3. 実験1 小型化した惑星での大規模な大気循環の構造を調べる
4. 結果1
5. 実験2 小型化した惑星で大規模な大気循環の構造を維持し、鉛直対流を表現することができるのか調べる
6. 結果2
7. まとめ

# はじめに：背景

- 惑星には水平スケールの異なる、様々な大気現象が同時に存在している
- スケールの異なる現象同士には、相互作用が存在する(小倉, 1978)

例：積雲・積乱雲と台風の関係



地球における様々な大気現象の時間スケールと水平スケール (大野, 2001)

# はじめに：背景

- 火星大気においては、鉛直対流は主要な熱輸送過程であり、それにより生じる水平方向の温度差から大規模循環に影響を与えている。(Odaka et al. (2008))
- 火星大気に存在するダストは火星大気の温度構造と循環構造に影響を与えることが知られている。従来の火星大気大循環モデルを用いた研究では、大気中にダストの供給がうまく表現できず、ダストの遷移である、ダストストームの発生が再現できない(Odaka (2001))..
- この問題にはモデル内で表現できていない風の揺らぎがあるのではないかと指摘されており(Wilson and Hamilton, 1996), 鉛直対流がダストの巻き上げに重要ではないかと考えられる.

# はじめに：背景

- 鉛直対流は水平規模が数km と小さいため, 全球大気モデルを用いて実際の大きさの惑星を計算するには, 細かい格子点間隔で表面を覆う必要である.
  - 全球大気を高解像度で計算することは, 計算負荷が大きい.
- 惑星を相似的に小型化することにより, 格子点の数を維持したまま, 格子点間隔を小さくすることができ, 解像度を上げることができる.
  - 惑星半径を小さくするのみだと, 1倍地球と異なる大気現象の構造ができてしまう.
- ロスビー数を維持し, 小型化することにより, 計算負荷を小さくして, 1倍地球と同様の大気のふるまいを表現することができると考える.

# はじめに：背景

## ロスビー数を維持した惑星小型化の先行研究

- Kuang et al. (2005)

- 3次元の雲解像モデルにおける, 大規模な大気循環と積雲対流の相互作用を計算するための計算効率の良い手法として, 大規模循環と対流循環のスケール差を小さくする惑星小型化を提案している. 積雲対流・雲過程と大規模循環の相互作用に関わる幅広い問題で有用であると期待される.

- Semane and Bechtold (2015)

- 重力加速度も減少し対流の水平スケールを増加させるスケーリングの方法について提案し, Kuang et al. (2005) の惑星小型化と比較をしている.

- 半径を変え惑星小型化したことによりどの程度大気構造が維持されているのかは調べられておらず, また, 乾燥大気における鉛直対流についてもよく知られていない。

# はじめに：背景

- 研究の目的

ロスビー数を固定し, 惑星を小型化することにより, 計算負荷を減らしつつ, 大規模な大気現象と鉛直対流を同時に表現できるようにすること.

- 惑星半径を小さくしたことによる大気現象への影響を調べる
- 全球モデルを小型化することで, 大規模な大気現象と鉛直対流の水平スケールの違う大気現象の間の相互作用を調べることができる.

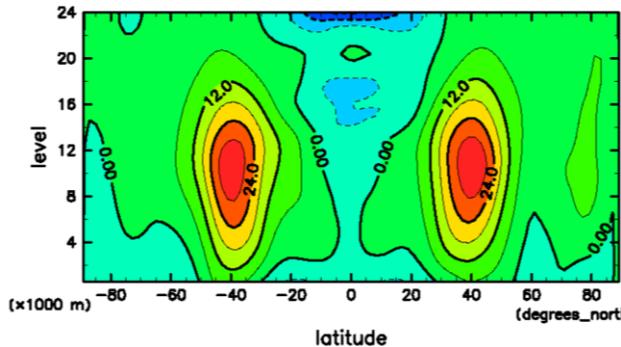
- 惑星小型化を火星に適用することで, スケールの違う大気現象の相互作用により, 火星大気のふるまいがどのように変化するのかを調べることができる.

# はじめに：前回まで

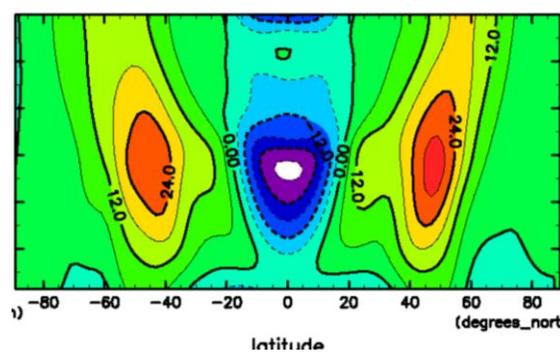
- 前回のセミナーでは地球大気 conditions で惑星小型化実験を行い、等倍の地球と小型化した地球で、パラメータを変えたことによる大気現象への影響を瞬間値のみを使い、調べた。
- その結果、ロスビー数を維持したまま惑星を小型化することで、小型化惑星で大規模な大気現象の構造をおおよそ表現できる可能性があることがわかった。

東西風の東西平均子午面分布の瞬間値(750 回転)

• 1倍惑星 zonal velocity

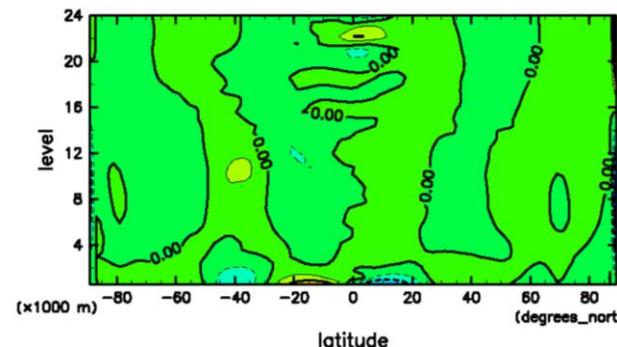


• 1/32倍惑星 zonal velocity

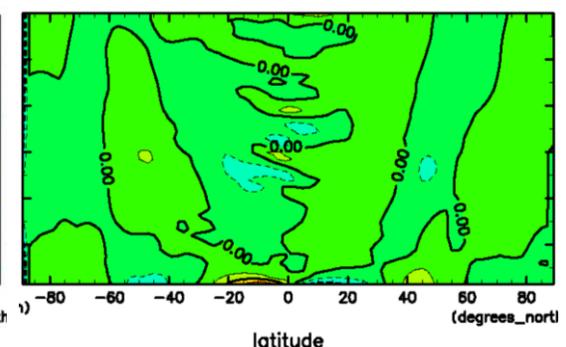


南北風の東西平均子午面分布の瞬間値(750 回転)

• 1倍惑星 meridional velocity



• 1/32倍惑星 meridional velocity



# はじめに：今回のセミナーの目的

- 今回は時間平均や質量流線関数，鉛直流の時間変化などを調べ，ロスビー数を維持し小型化した惑星で大規模な大気現象と鉛直対流が同時に表現することができるのかを調べる.
1. 小型化した惑星で 1倍地球の大規模な大気循環の構造を維持し，表現することができるのか
  2. 小型化した惑星で大規模な大気循環の構造を維持しつつ，鉛直対流を表現することができるのか

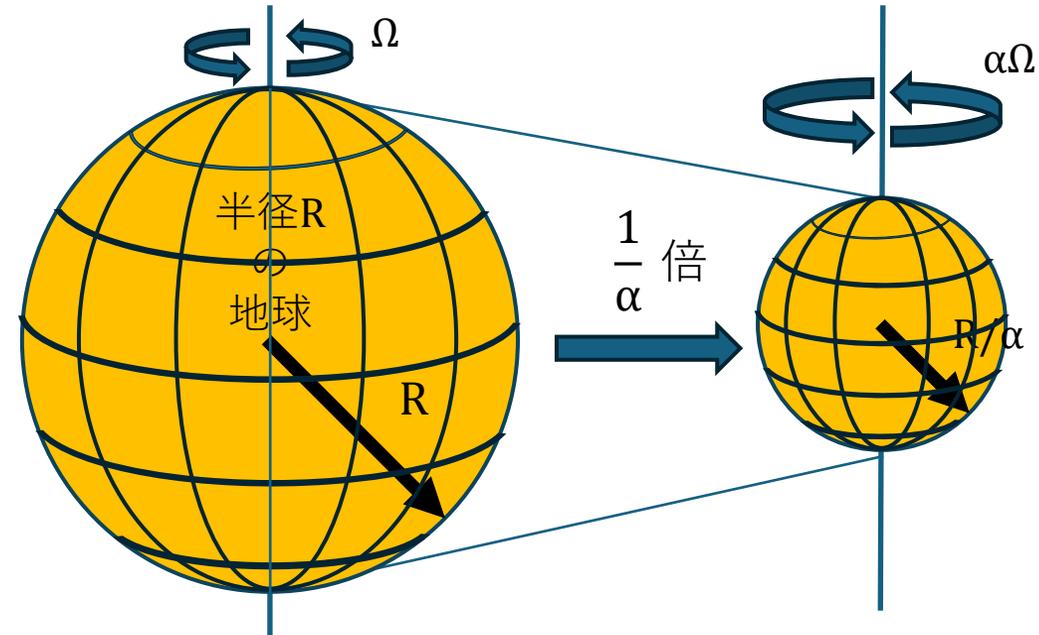
# 実験方法：惑星小型化の方法

- 惑星半径を小さくし, それに合わせてロスビー数が変わらないよう自転角速度 ( $\Omega$ ) を大きくし, 合わせて強制の時定数を調整する.
  - 1倍地球からロスビー数を維持したまま, 半径や自転角速度, 各過程 (移流, 熱強制, 外力) の強さを変えれば, 元の大きさの地球と同様の大気循環の構造を保つと期待される.

ロスビー数

$$R_o = \frac{U}{2\Omega L}$$

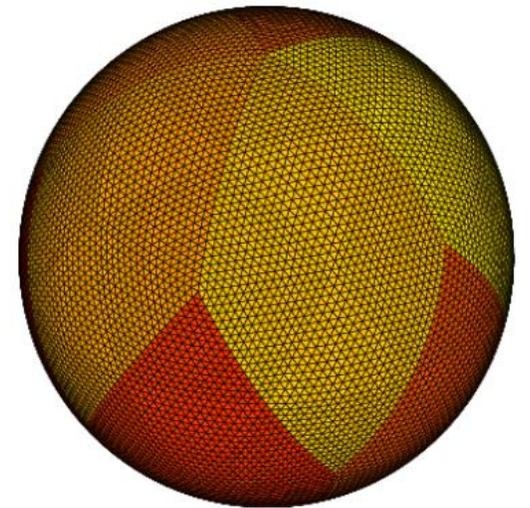
$U$ : 風速,  $\Omega$ : 自転角速度  
 $L$ : 水平方向の長さスケール



# 実験方法：使用した大気モデル

## SCALE Global Model(SCALE-GM)： 3次元全球非静力学大気モデル

- 理化学研究所計算科学研究センター(**RIKEN R-CCS**)を中心に開発が進められている基盤ライブラリである、SCALEライブラリを利用した全球大気モデル。
- 力学コア
  - 格子システム：正20面体準一様格子
  - 方程式系：3次元完全圧縮非静力学方程式系



正二十面体格子のイメージ図

# モデルの基礎方程式

- ・ 連続の式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0,$$

- ・ 運動量方程式

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) = -\nabla p - \rho g \hat{\mathbf{k}} - 2\rho \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v},$$

- ・ 熱力学方程式

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \nabla \cdot (h \rho \mathbf{v}) = \mathbf{v} \cdot \nabla p + q_{heat}$$

$\rho$ :密度  
 $\mathbf{v}$ :速度  
 $e$ :内部エネルギー  
 $h$ :エンタルピー  
 $p$ :圧力  
 $g$ :重力加速度  
 $\boldsymbol{\Omega}$ :地球の自転角速度  
 $\nabla$ :勾配演算子  
 $\nabla \cdot$ :発散演算子  
 $\otimes$ :テンソル積  
 $\times$ :外積  
 $t$ :時間  
 $\hat{\mathbf{k}}$ :鉛直単位ベクトル  
 $C_v$ :定積比熱  
 $C_p$ :定圧比熱  
 $R_d$ :乾燥大気の気体定数  
 $T$ :気温

$$\begin{aligned} e &= C_v T \\ h &= C_p T \\ p &= \rho R_d T \end{aligned}$$

# 実験1：小型化した惑星で1倍地球の大規模な大気循環の構造を維持し、表現することができるのか

1. コントロール実験として、**Held and Suarez (1994)** の追試を行う
  - Held and Suarez (1994) の実験の結果を1倍地球として小型化の基準にする

## Held and Suarez実験 (Held and Suarez (1994))

-ニュートン冷却とレイリー摩擦を物理的過程として使い、地球における大規模な循環を大気モデルを用いて計算し、使用している力学コアを評価するための実験である。

2. ロスビー数を維持しない場合の惑星小型化実験を行う
  - 1倍実験と結果を比較し、大規模な大気循環がどのように変化したか確認する
3. ロスビー数を維持した場合の惑星小型化実験を行う
  - 1倍実験と結果を比較し、大規模な大気循環がどのように変化したか確認する

# 実験1 : Held and Suarez (1994) の追試を行う

## ・ 実験条件

### 外力

- ・ 放射過程 : ニュートン冷却
- ・ 外力 : レイリー摩擦

	半径 $r$	自転角速度 $\Omega$	放射の時定数 $1/k_t$	摩擦の時定数 $1/k_f$	格子点間隔 $d$
1倍実験	6.37122D+6	7.292D-5	1.0	1.0	223 km

## パラメータ, 格子点間隔

: 右の表に記載

- ・ 鉛直方向の格子点間隔 : 600 m

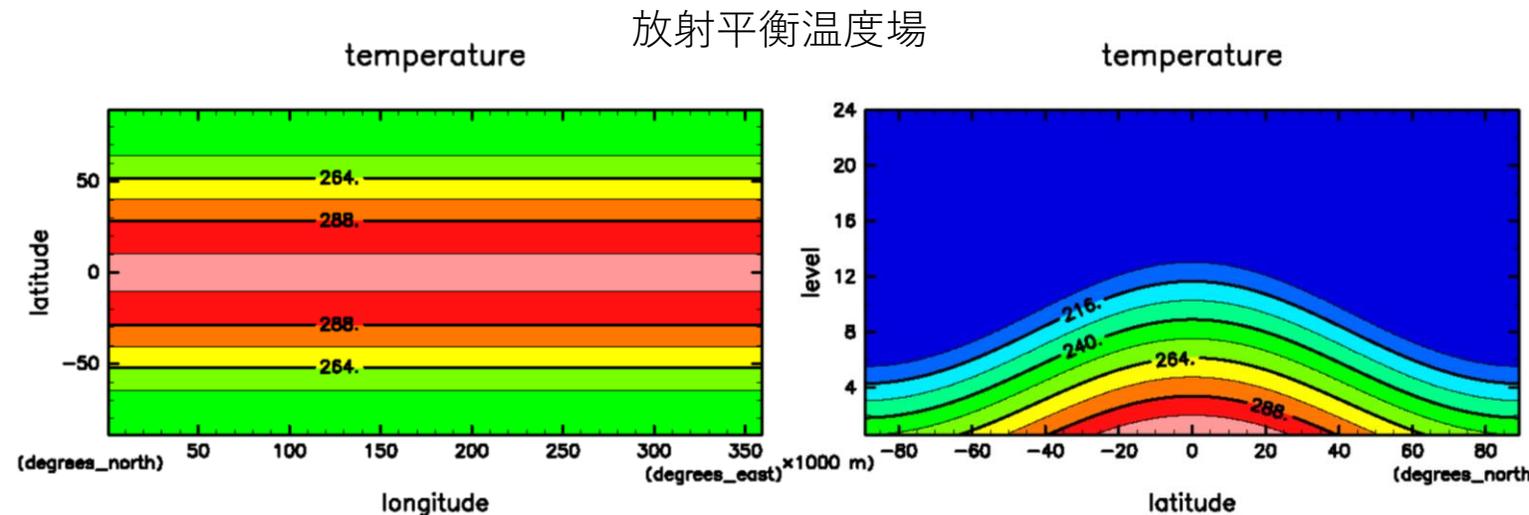
湿潤過程, 地表面過程 : なし

初期条件 :

放射平衡温度場, 静止大気

積分時間 :

各条件で惑星が 750 回転する時間



# • Held and Suarez (1994)の条件

- 運動方程式(摩擦項)

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \dots - k_v(\sigma)v, \quad k_v = k_f \max\left(0, \frac{\sigma - \sigma_b}{1 - \sigma_b}\right)$$

- 熱力学方程式(加熱項)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \dots - k_T(\phi, \sigma)[T - T_{eq}(\phi, p)]$$

$$T_{eq} = \max\left\{200K, \left[315K - (\Delta T)_y \sin^2 \phi - (\Delta \theta)_z \log\left(\frac{p}{p_0}\right) \cos^2 \phi\right] \left(\frac{p}{p_0}\right)^\kappa\right\}$$

$$k_T = k_a + (k_s - k_a) \max\left(0, \frac{\sigma - \sigma_b}{1 - \sigma_b}\right) \cos^4 \phi$$

- 地球における定数

$$\sigma_b = 0.7,$$

摩擦に関しての係数

$$k_f = 1 \text{ day}^{-1}$$

加熱に関しての係数

$$k_a = \frac{1}{40} \text{ day}^{-1}, k_s = \frac{1}{4} \text{ day}^{-1},$$

南北温度差 $(\Delta T)_y = 60K$ ,  
(赤道と極の間の温度差)

鉛直温位差 $(\Delta \theta)_z = 10K$

(1スケールハイト上昇したときの温位差)

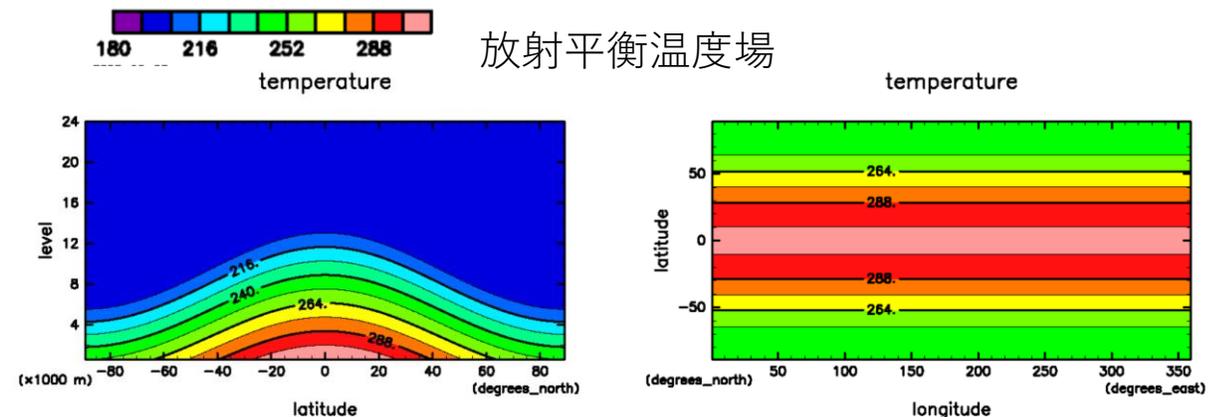
$$p_0 = 1000 \text{ mb}, \quad \kappa = \frac{R}{C_p} = \frac{2}{7}$$

低圧比熱 $C_p = 1004 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ,

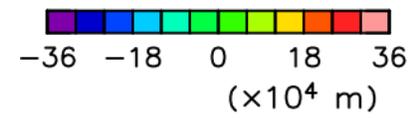
自転角速度 $\Omega = 7.292 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,

重力加速度 $g = 9.8 \text{ ms}^{-2}$ ,

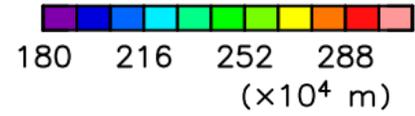
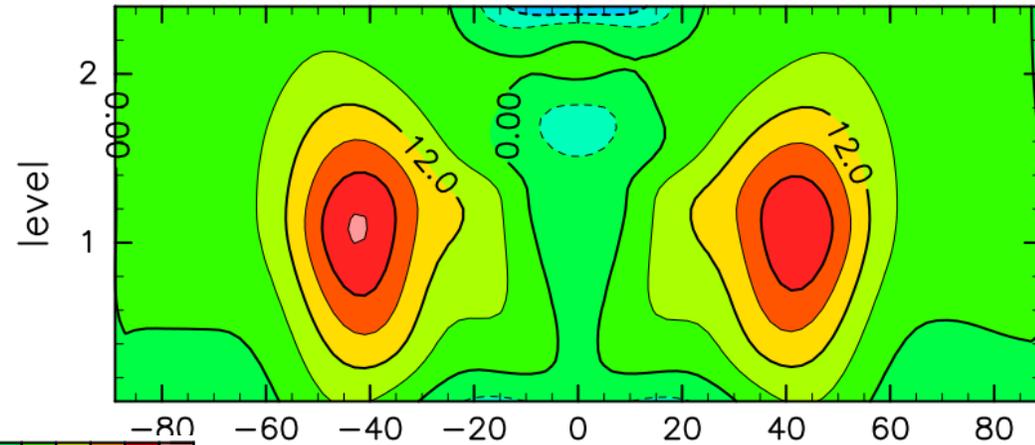
地球半径 $a_e = 6.371 \times 10^6 \text{ m}$



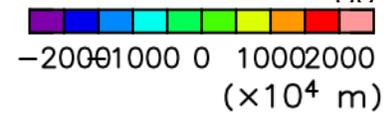
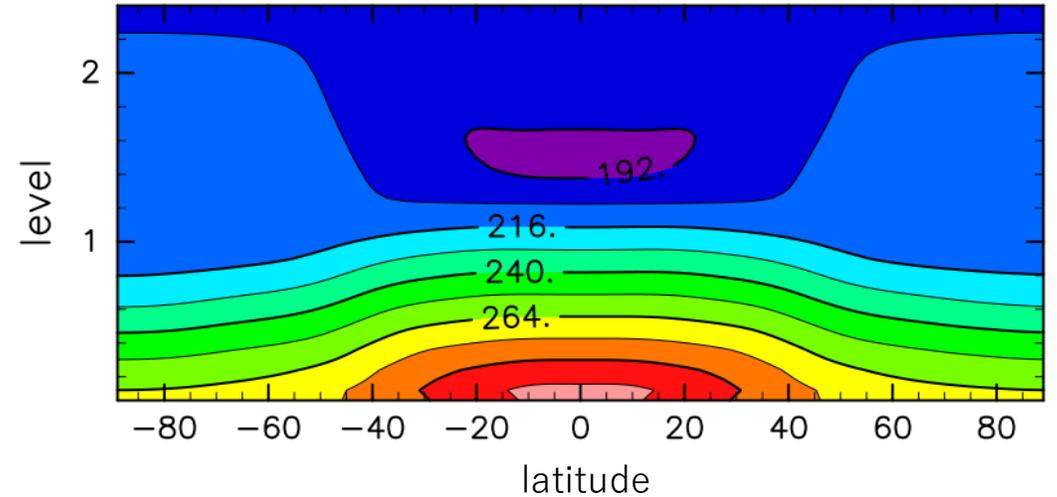
# 結果 1 : 1 倍地球における Held and Suarez 実験(コントロール実験)



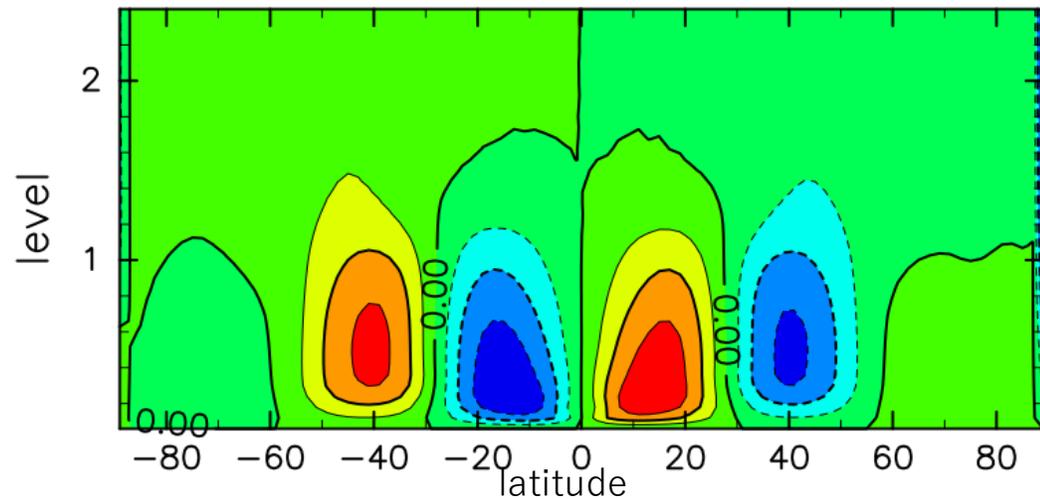
東西風の東西平均子午面分布  
(350回転平均)



気温の東西平均子午面分布  
(350回転平均)



東西平均子した質量流線関数  
(350回転平均)



- 東西風：両半球40° 付近に西風が発生している
- 質量流線関数：循環が北半球南半球に2つずつ
- 気温：両半球緯度40° 付近まで南北方向の温度勾配が小さい

# 実験1：ロスビー数を維持しない場合の惑星小型化実験

- ・ 1倍実験と結果を比較し, 大規模な大気循環がどのように変化したか確認する

地球の気候を表現するための簡易的な熱強制, 外力 (Held and Suarez, 1994) を与える.

- ・ 放射過程：ニュートン冷却
- ・ 外力：レイリー摩擦

	半径 $r$	自転角速度 $\Omega$	放射の時定数 $1/k_t$	摩擦の時定数 $1/k_f$	格子点間隔 $d$
1倍実験	1 倍	1 倍	1 倍	1 倍	223 km
1/32倍実験	1/32 倍	1 倍	1/32 倍	1/32 倍	7 km

パラメータ, 格子点間隔

：右の表に記載,

Held and Suarez 実験の地球半径での実験を1倍実験としている

- ・ 鉛直方向の格子点間隔：600 m

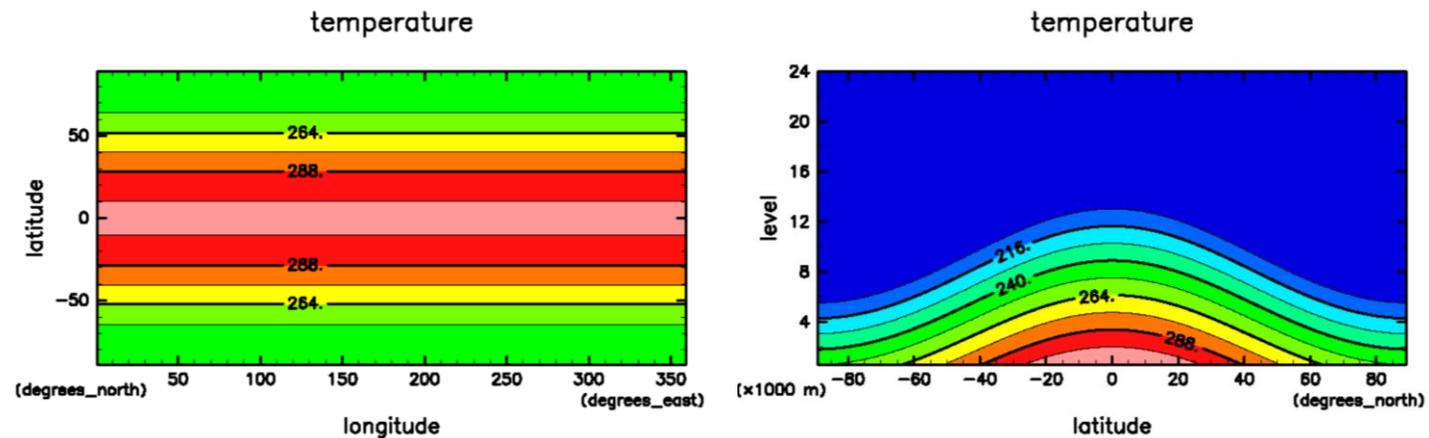
湿潤過程, 地表面過程：なし

初期条件：放射平衡温度場, 静止大気

積分時間：

各条件で惑星が 750 回転する時間

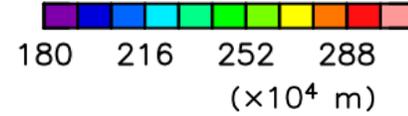
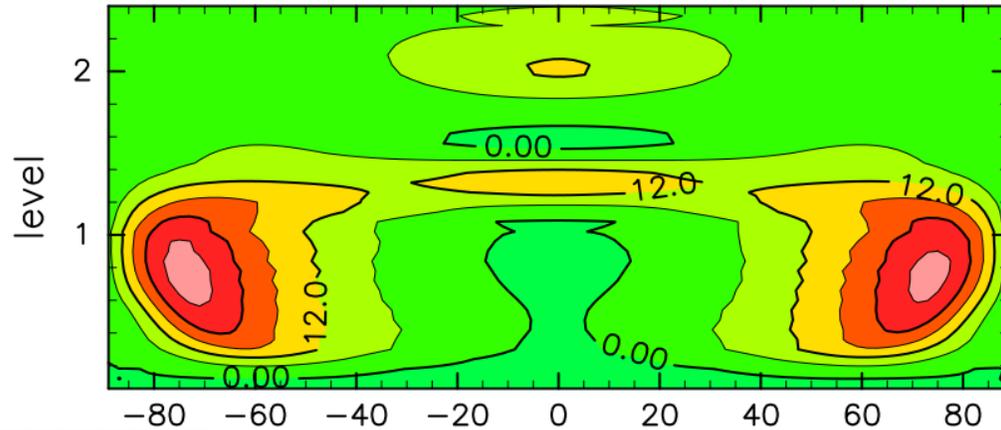
放射平衡温度場



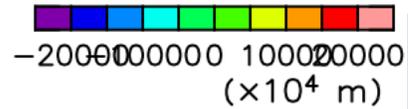
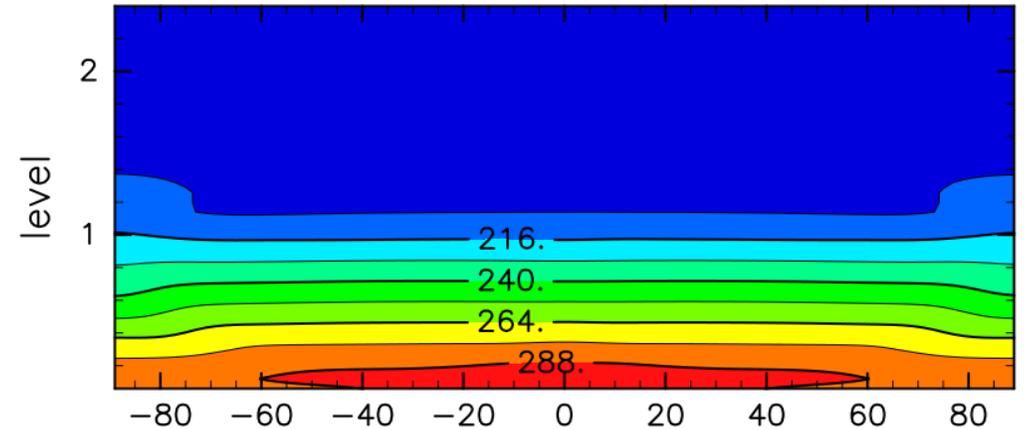
# 結果1：ロスビー数を維持しない場合の惑星小型化実験



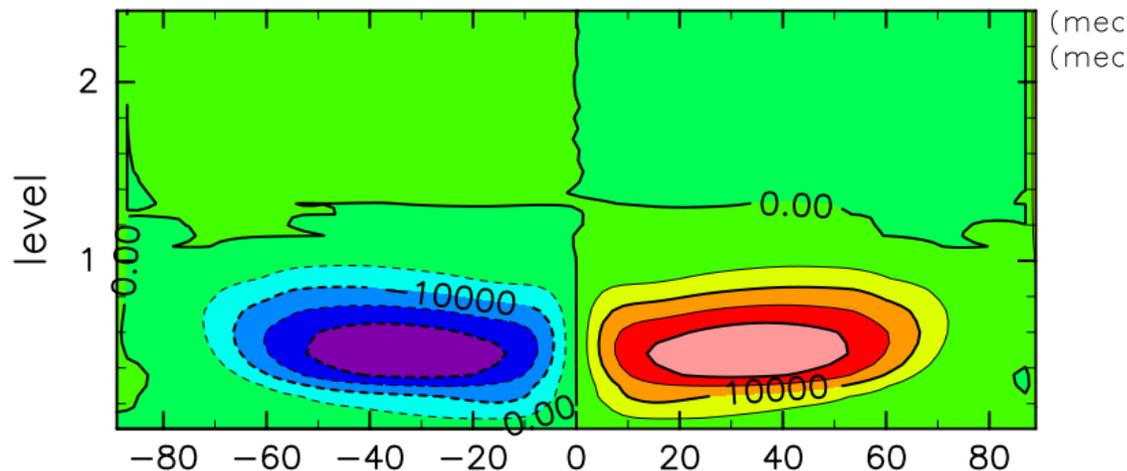
東西風の東西平均子午面分布  
(350回転平均)



気温の東西平均子午面分布  
(350回転平均)



東西平均子午面流線関数  
(350回転平均)



・惑星半径1/32倍, 自転角速度1倍としている

- ・東西風：両極付近に西風が発生している  
赤道付近の強い西風が吹いている
- ・質量流線関数：循環が北半球南半球に1つずつ
- ・気温：両半球緯度60度まで温度勾配が小さい

# 実験1：ロスビー数を維持した場合の惑星小型化実験

- 1倍実験と結果を比較し, 大規模な大気循環がどのように変化したか確認する

地球の気候を表現するための簡易的な熱強制, 外力 (Held and Suarez, 1994) を与える.

- 放射過程：ニュートン冷却
- 外力：レイリー摩擦

パラメータ, 格子点間隔

：右の表に記載,

Held and Suarez 実験の地球半径での実験を1倍実験としている

- 鉛直方向の格子点間隔：600 m

湿潤過程, 地表面過程：なし

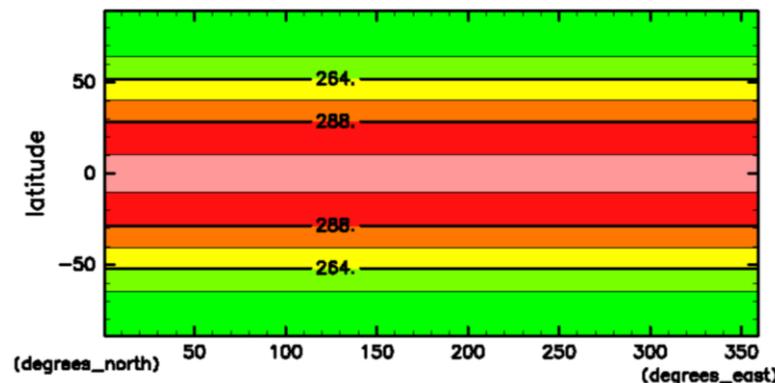
初期条件：放射平衡温度場, 静止大気

積分時間：

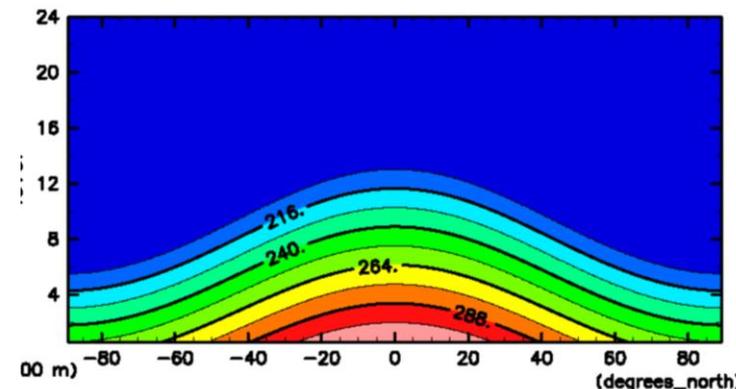
各条件で惑星が 750 回転する時間

	半径 $r$	自転角速度 $\Omega$	放射の時定数 $1/k_t$	摩擦の時定数 $1/k_f$	格子点間隔 $d$
1倍実験	1 倍	1 倍	1 倍	1 倍	223 km
1/2倍実験	1/2 倍	2 倍	1/2 倍	1/2 倍	111 km
1/4倍実験	1/4 倍	4 倍	1/4 倍	1/4 倍	55 km
1/10倍実験	1/10 倍	10 倍	1/10 倍	1/10 倍	22 km
1/16倍実験	1/16 倍	16 倍	1/16 倍	1/16 倍	13 km
1/32倍実験	1/32 倍	32 倍	1/32 倍	1/32 倍	7 km

temperature 放射平衡温度場



temperature





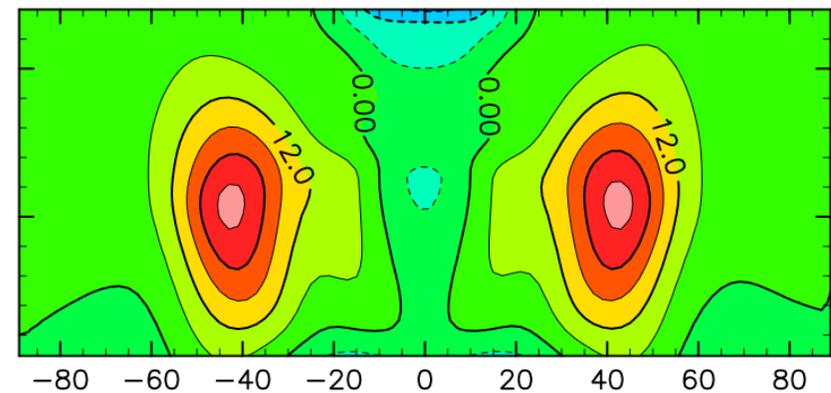
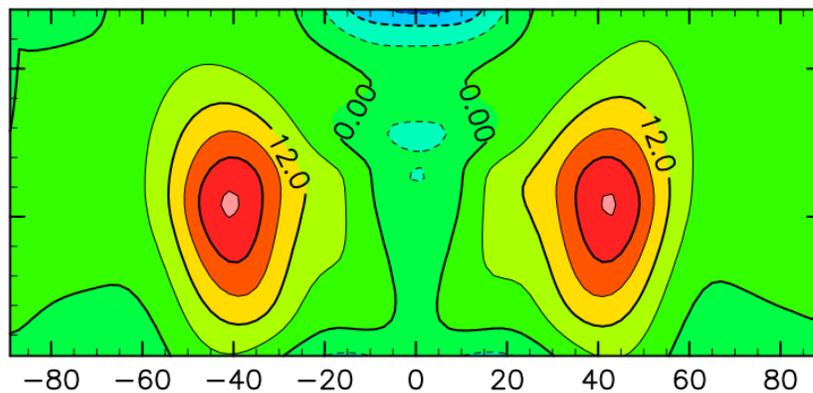
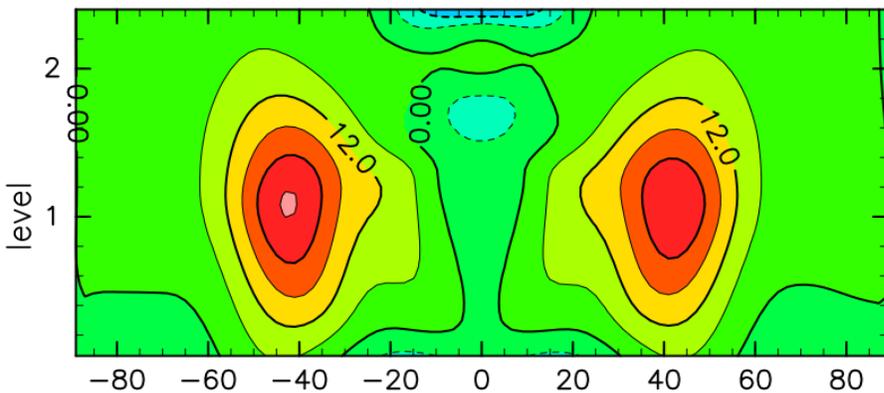
東西風の東西平均子午面分布(350回転平均)

• Held and Suarez  
(コントロール実験)  
( $\times 10^4$  m)

zonal velocity

• 半径1/2 zonal velocity

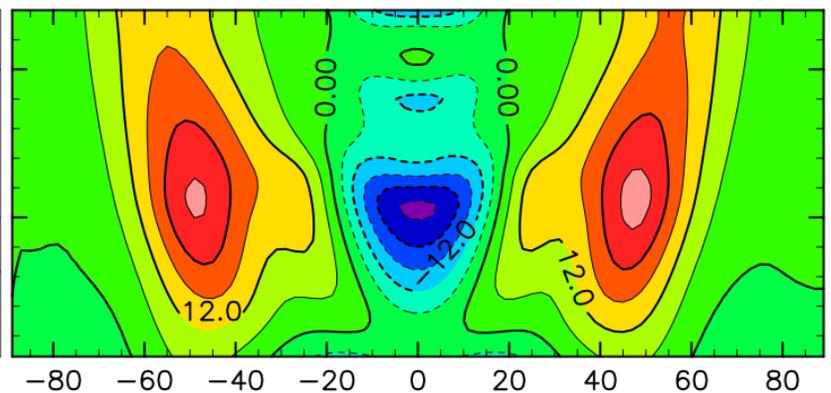
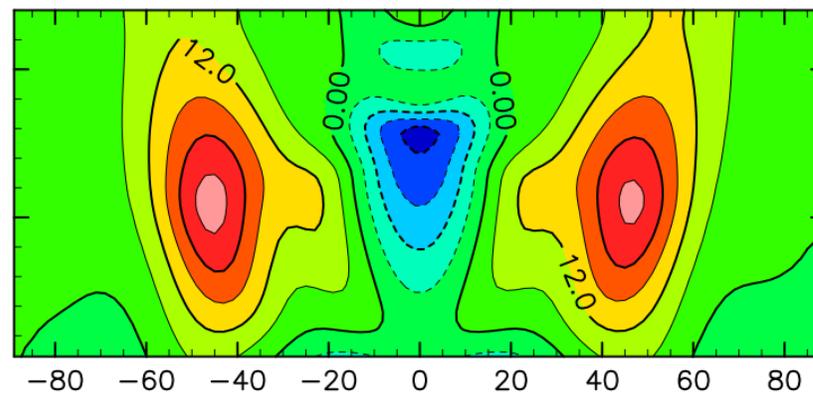
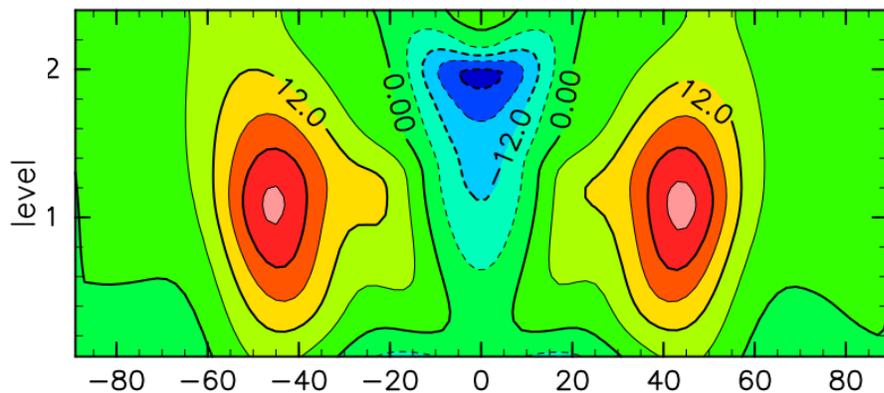
• 半径1/4 zonal velocity



• 半径1/10 zonal velocity  
( $\times 10^4$  m)

• 半径1/16 zonal velocity

• 半径1/32 zonal velocity



• 半径が異なる惑星でも北半球南半球ともに緯度40度付近に強い西風ジェットが発生していた



-2000 1000 0 1000 2000

・ Held and Suarez

(コントロール実験)

( $\times 10^4$  m) meridional velocity

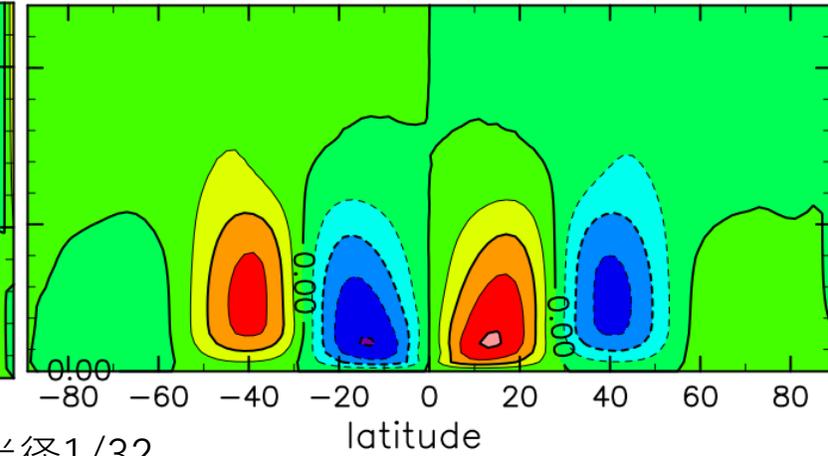
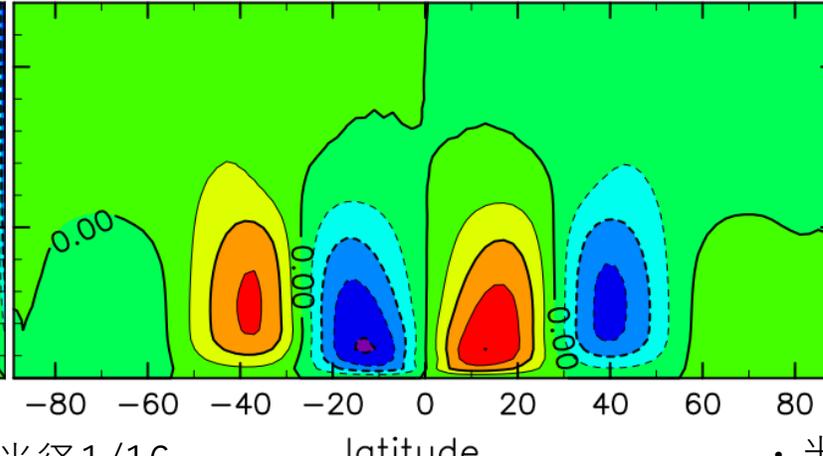
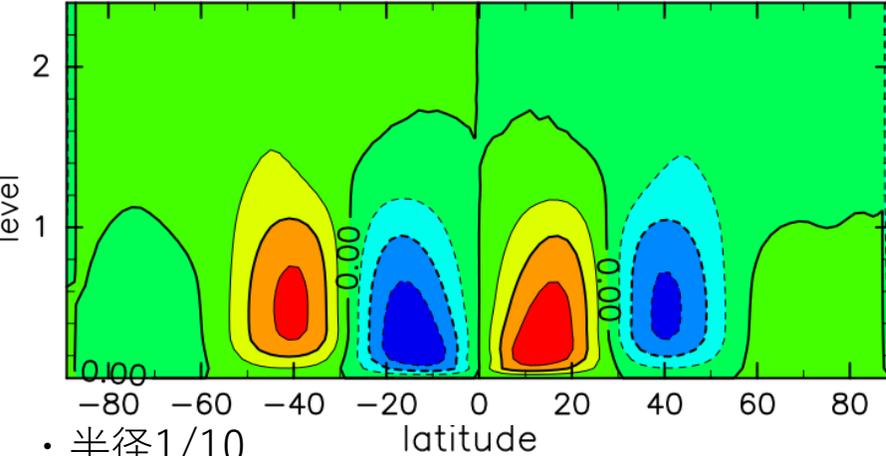
子午面流線関数(350回転平均)

・ 半径1/2

meridional velocity

・ 半径1/4

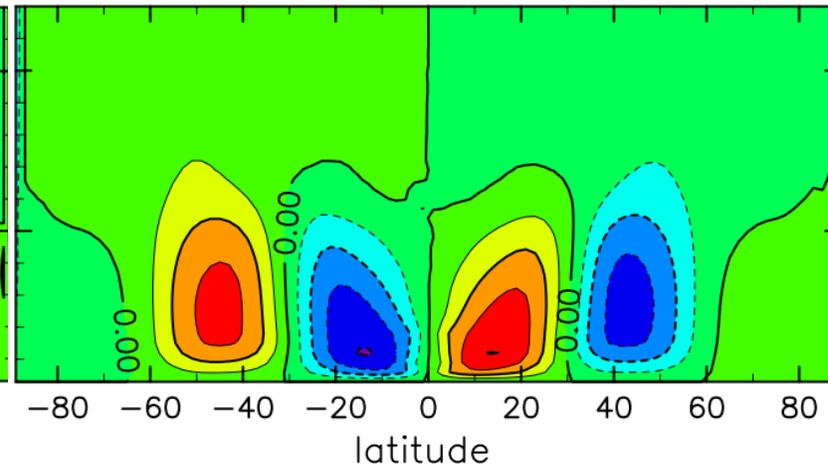
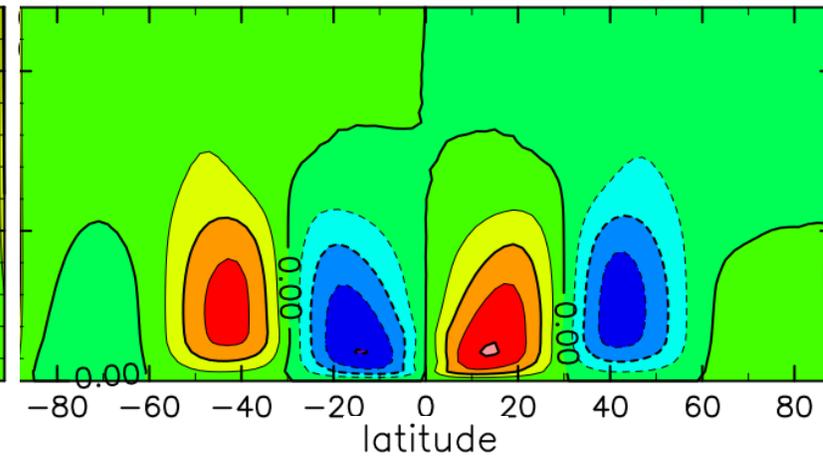
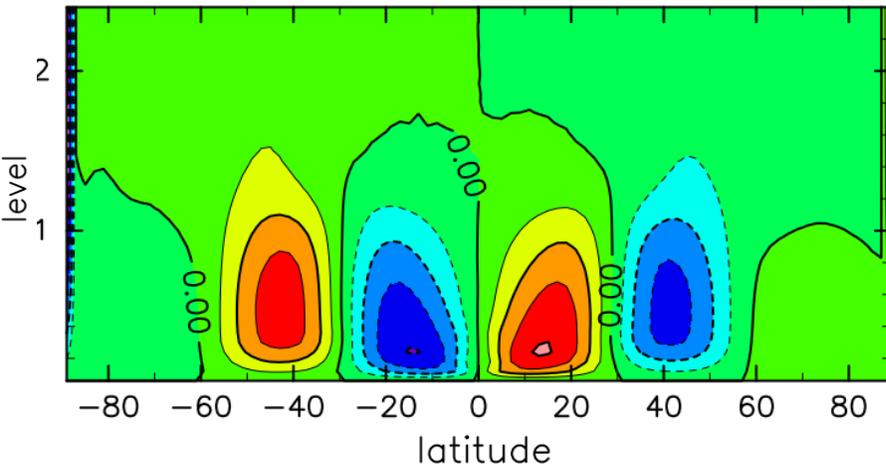
meridional velocity



・ 半径1/10  
( $\times 10^4$  m) meridional velocity

・ 半径1/16  
meridional velocity

・ 半径1/32  
meridional velocity



・ 半径が異なる惑星でも北半球, 南半球に緯度20度付近に1つずつ, 40度付近に1つずつ南北循環が見られた

# 結果1：ハドレー循環のロスビー数

- 東西平均した質量流線関数を用いてハドレー循環の緯度範囲を調べ、小型化した惑星におけるハドレー循環のロスビー数を計算した。
- ここでの代表的な風速は各惑星における、ハドレー循環の南北風の最大値としている

ハドレー循環のロスビー数

	南半球	北半球
半径1倍	0.36186	0.28714
半径1/2倍	0.35549	0.29390
半径1/4倍	0.29673	0.31168
半径1/10倍	0.29276	0.31045
半径1/16倍	0.27634	0.31045
半径1/32倍	0.30619	0.30167



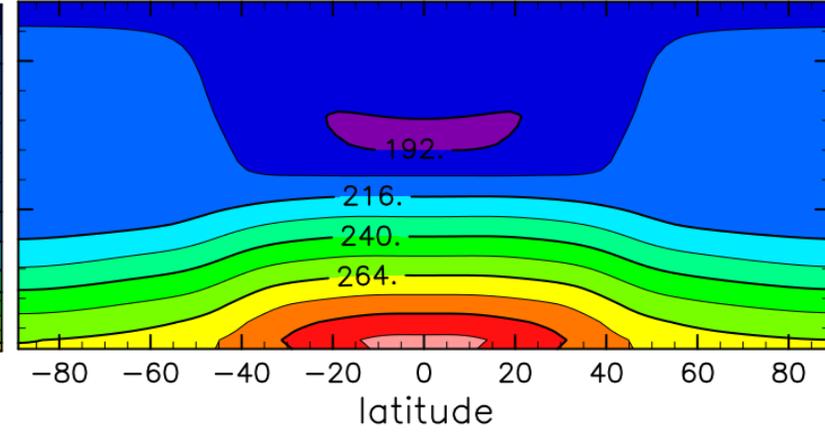
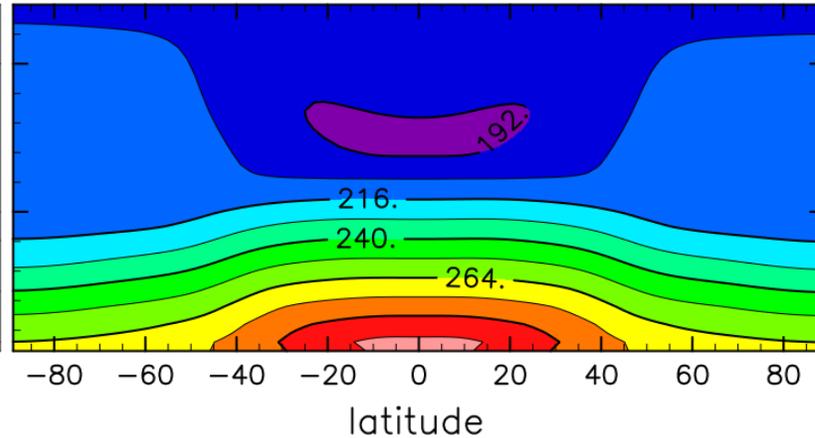
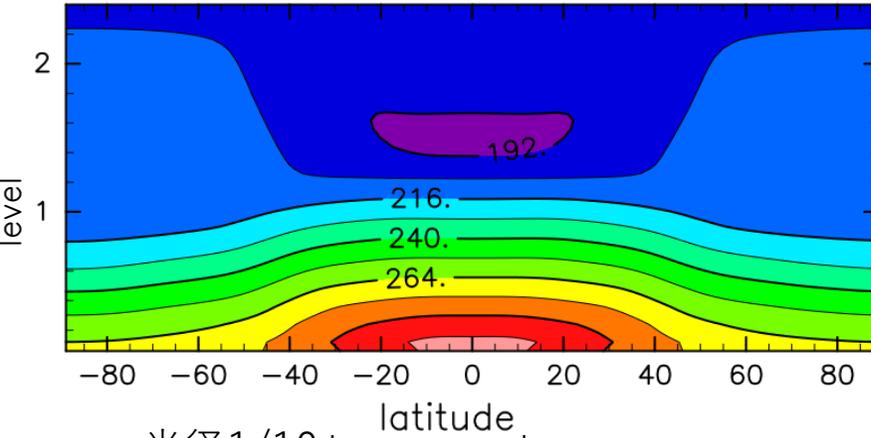
180 216 252 288

気温の東西平均子午面分布(350回転平均)

• Held and Suarez  
(コントロール実験) temperature  
( $\times 10^4$  m)

• 半径1/2 temperature

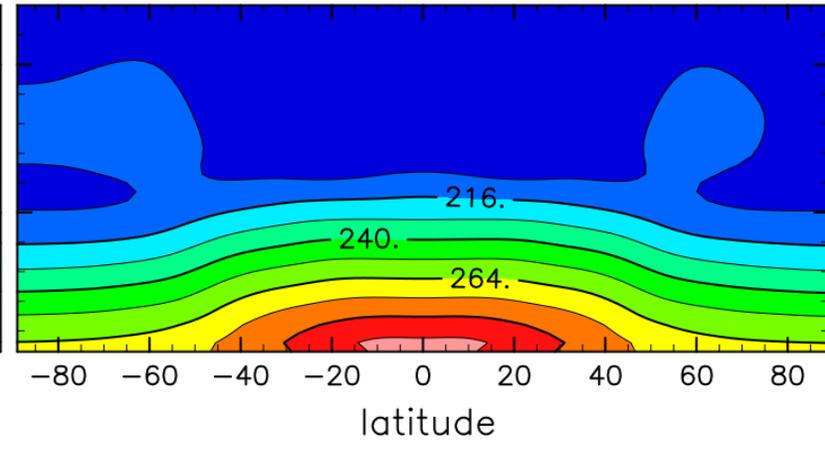
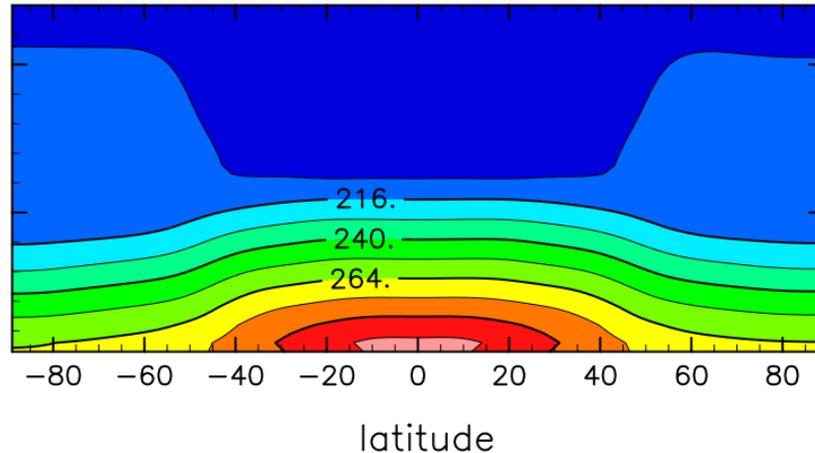
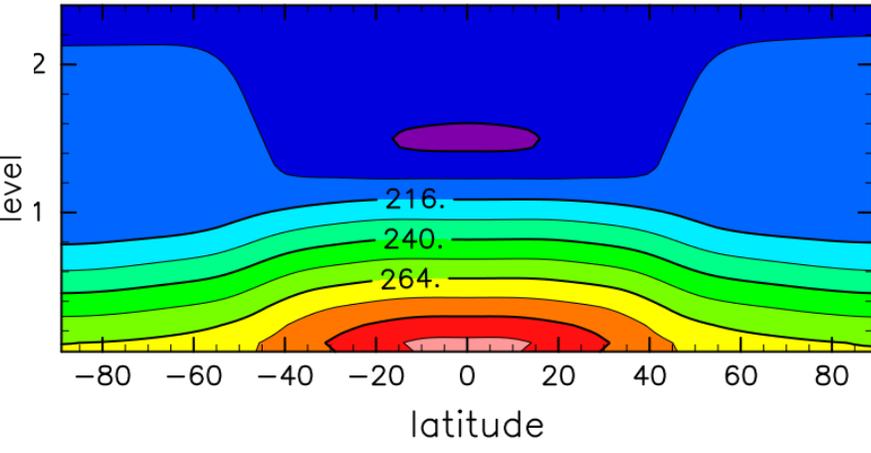
• 半径1/4 temperature



• 半径1/10 temperature  
( $\times 10^4$  m)

• 半径1/16 temperature

• 半径1/32 temperature



- 緯度-40:40の温度勾配が小さい
- 気温の子午面分布は,半径を変えても気温分布は大きく変わらない

# 結果 1

- ・ 東西風

- 半径を変えても西風ジェットが吹いている位置はあまり変わらない
- 風速分布は大きくは変わらない
- 半径を変えると赤道上の東風が強い領域の高度が下がってきた

- ・ 南北風の質量流線関数

- 半径が異なる惑星でも北半球、南半球に 2 つずつ南北循環が見られた

- ・ 気温

- 半径が変わっても、気温分布は大きく変わらない

- ・ ハドレー循環のロスビー数

- 北半球のロスビー数はおおよそ近い値となっていた
- 南半球もばらつきはあるが、おおよそ近い値となっていた

ロスビー数を変えずに惑星半径を小さくした計算では  
大規模循環の構造への影響は少ないと考えられる

# 鉛直対流の計算にむけて

- 実験1 は大規模な大気現象を調べるための温度場だったため、静的安定度が負になることはなく、鉛直対流が発生しない条件になっていた
- 実験2 では、地表面が暖められ、鉛直対流を発生する現象を再現するために、加熱の条件を変え、モデルの最下層の静的安定度を負にし、実験を行う

実験2：小型化した惑星で大規模な大気循環の構造を維持しつつ、鉛直対流を表現することができるのか

1. モデルの最下層を静的安定度を負に変えた小型化惑星で大規模な大気循環の構造を維持できるのか調べる
2. モデルの最下層を静的安定度を負に変えた小型化惑星の鉛直風を調べ、鉛直対流が発生するのか調べる

# 実験2: 小型化した惑星で大規模な大気循環の構造を維持しつつ、鉛直対流を表現することができるのか

- 1/32 の小型化地球を使い、静的安定度が正と静的安定度が負の条件における惑星が750回転した時の大気現象を計算し、比較する。

## 実験設定

- モデルの最下層の静的安定度を負に強制するような温度場を与える。

	半径 $r$	自転角速度 $\Omega$	強制の時定数 $1/k_t, 1/k_f$	鉛直温度差 $(\Delta\theta)_z$	最下層の放射平衡温度
1/32倍実験	1/32 倍	32 倍	1/32 倍	10	$T_{eq}$
1/32倍実験	1/32 倍	32 倍	1/32 倍	10	$T_{eq}+10$

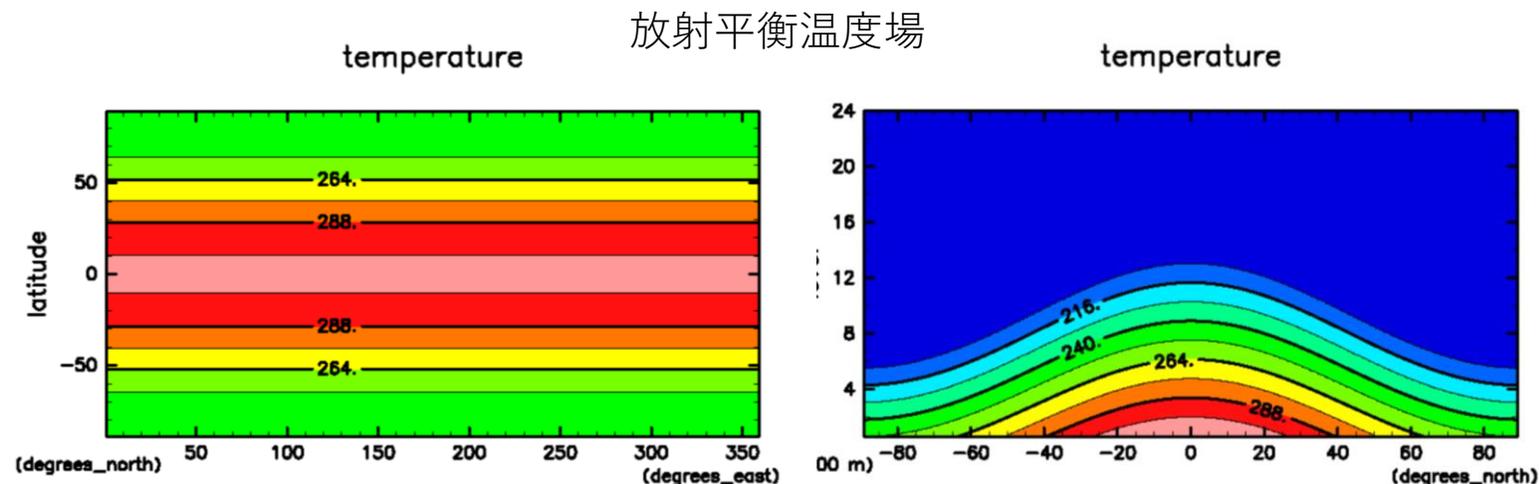
- 外力：レイリー摩擦
- パラメータ：右の表に記載,
- 水平方向の格子点間隔：7km
- 鉛直方向の格子点間隔：600 m

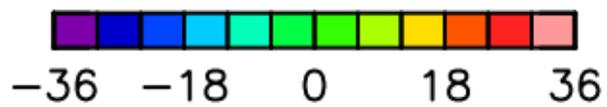
湿潤過程, 地表面過程：なし

初期条件：放射平衡温度場, 静止大気

積分時間：

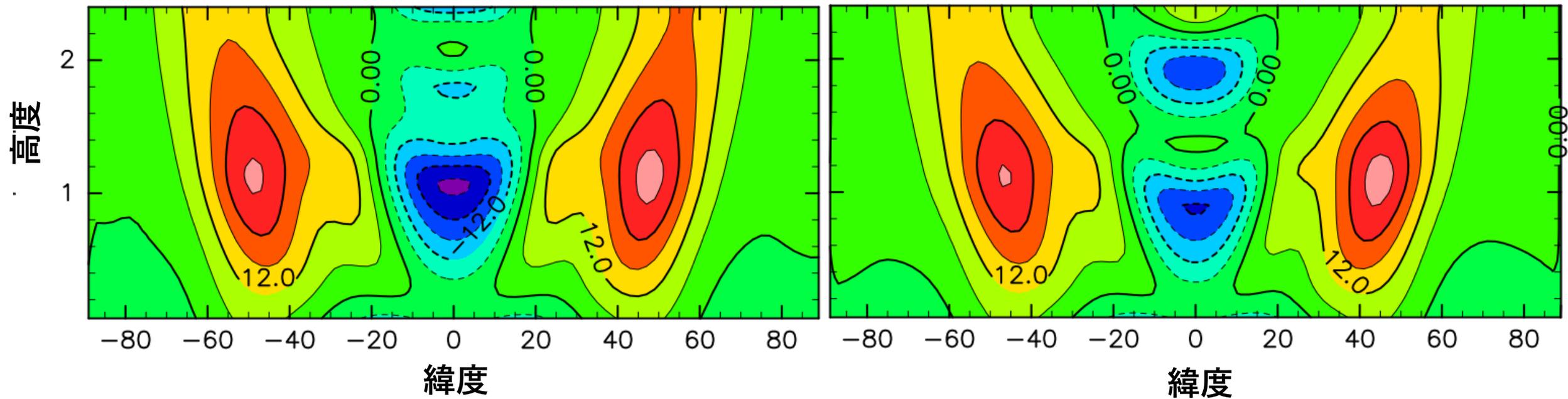
各条件で惑星が 750 回転する時間





東西風の東西平均子午面分布(350回転平均)

( $\times 10^4$  m)      •  $1/32, (\Delta\theta)_z = 10, T_{eq}$       •  $1/32, (\Delta\theta)_z = 10, \text{最下層のみ } T_{eq} + 10$



- 北半球, 南半球の緯度40度付近に強い西風が存在している
- 半径を変えると赤道上の東風が強い領域の高度が下がってきた

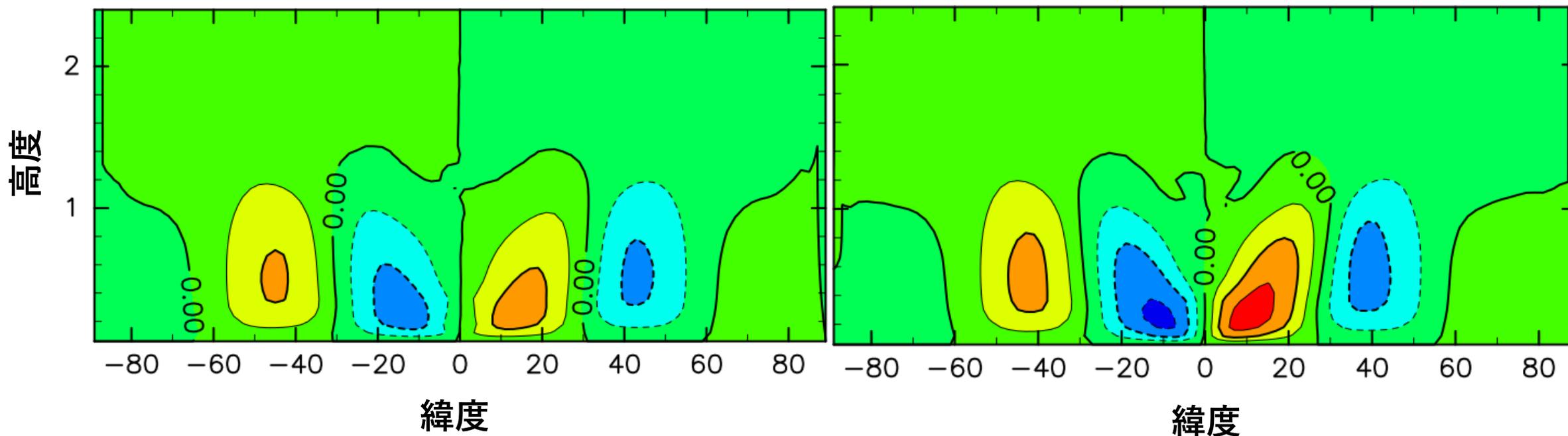
# 南北風の東西平均した質量流線関数(350回転平均)



( $\times 10^4$  m)

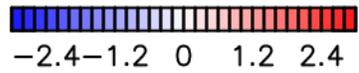
•  $1/32, (\Delta\theta)_z = 10, T_{eq}$

•  $1/32, (\Delta\theta)_z = 10, \text{最下層のみ } T_{eq} + 10$

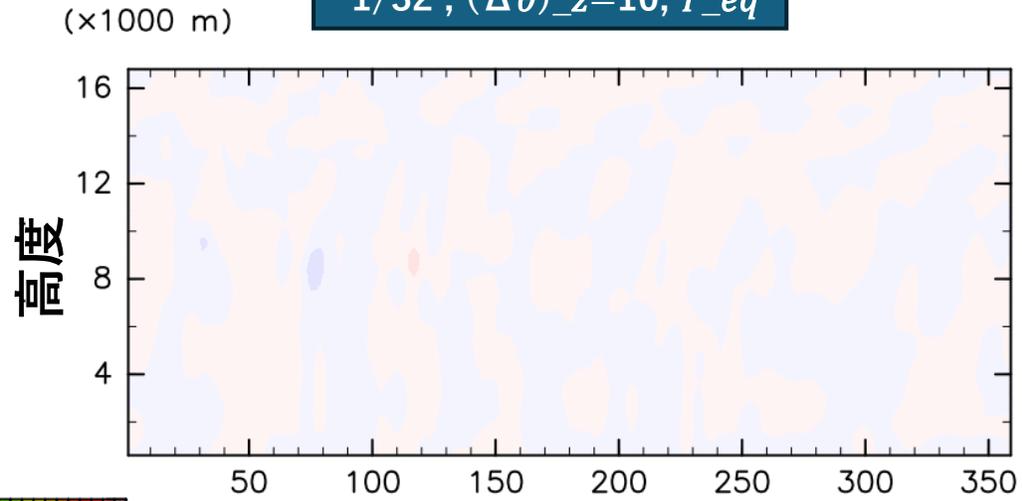


• 半径が異なる惑星でも北半球, 南半球に緯度20度付近に1つずつ, 40度付近に1つずつ南北循環が見られた

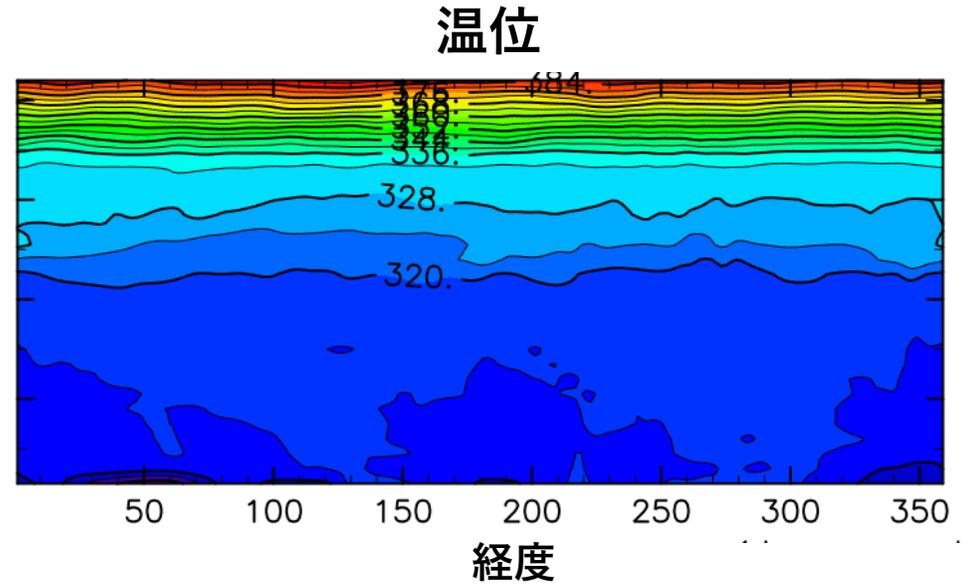
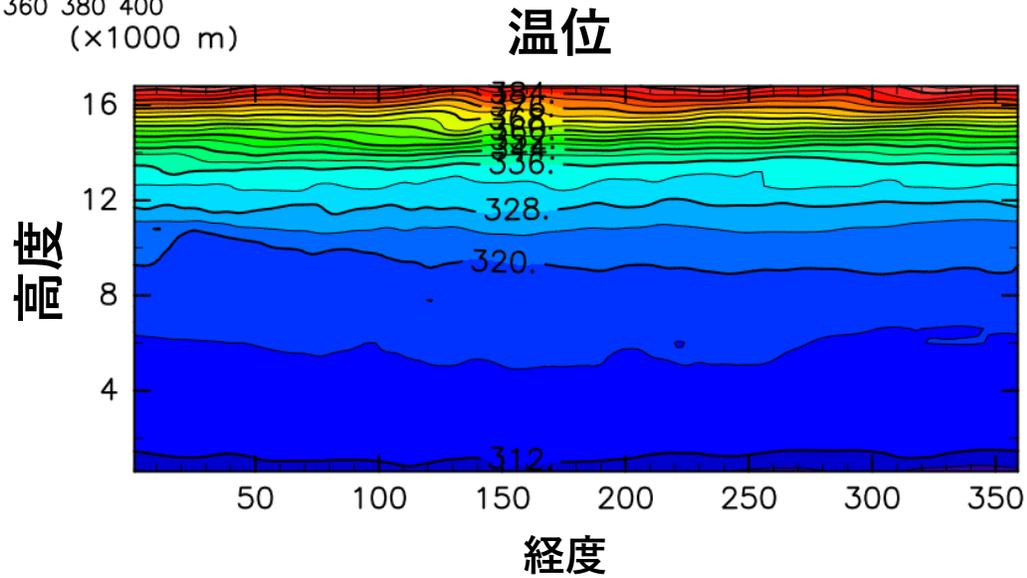
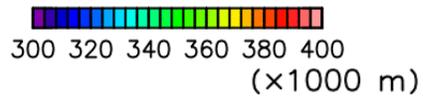
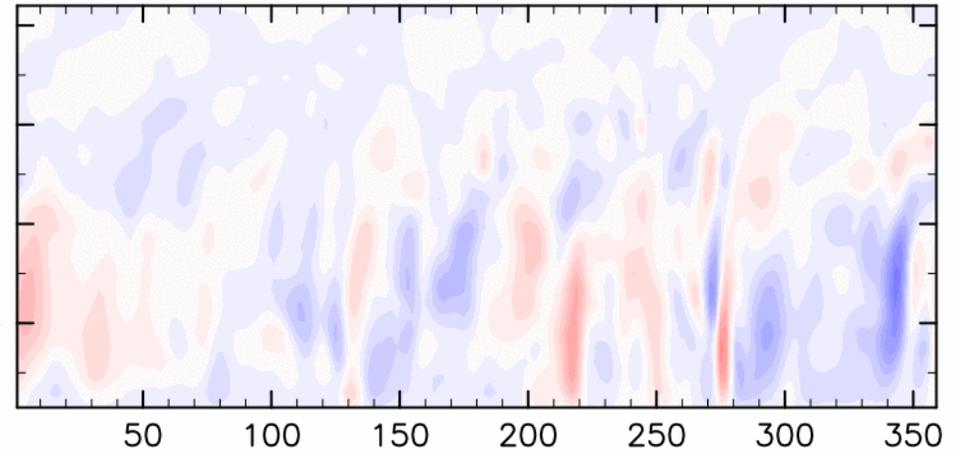
# 赤道における鉛直流と温位の分布(250回転分)

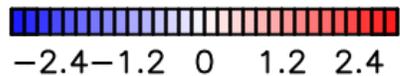


鉛直風分布  
1/32,  $(\Delta\theta)_z=10, T_{eq}$



鉛直風分布1/32,  $(\Delta\theta)_z=10,$   
最下層のみ $T_{eq}+10$

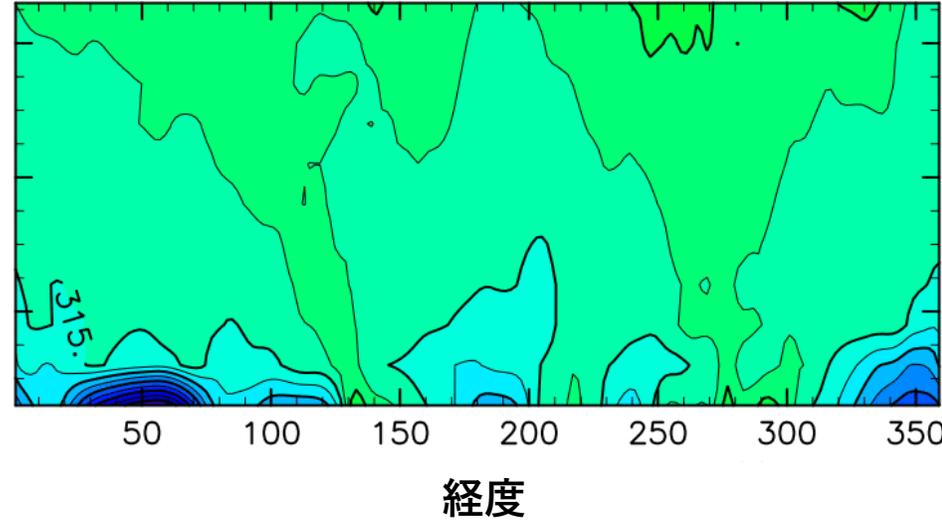
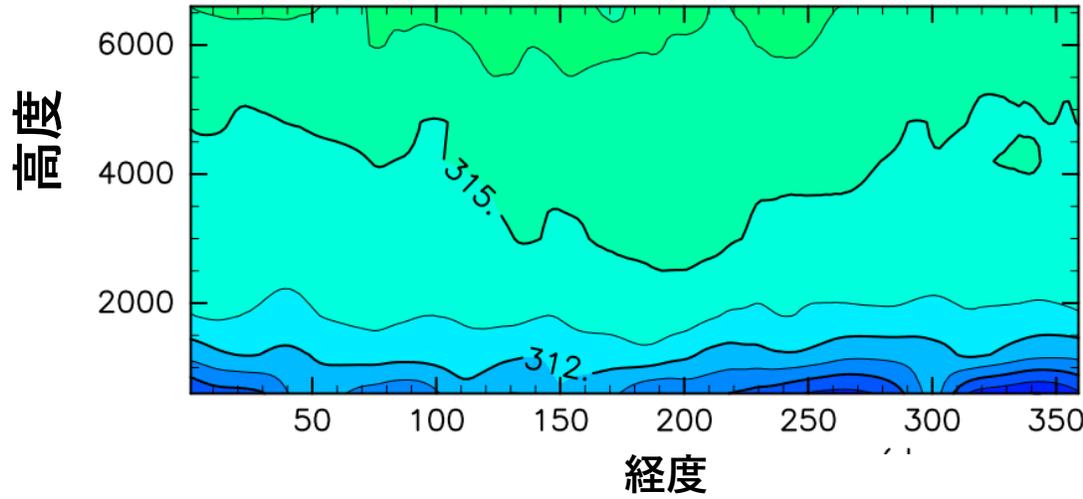
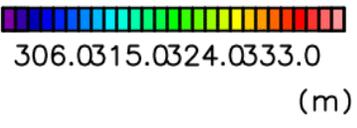
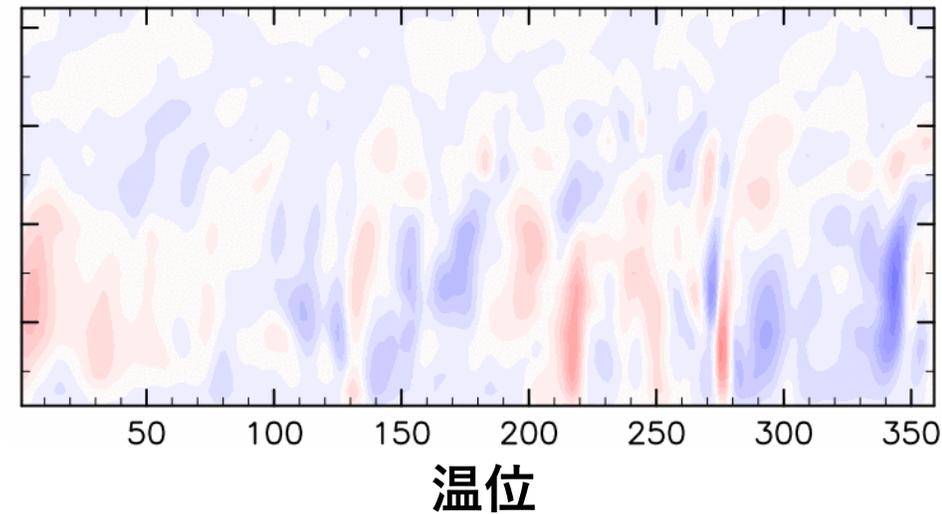
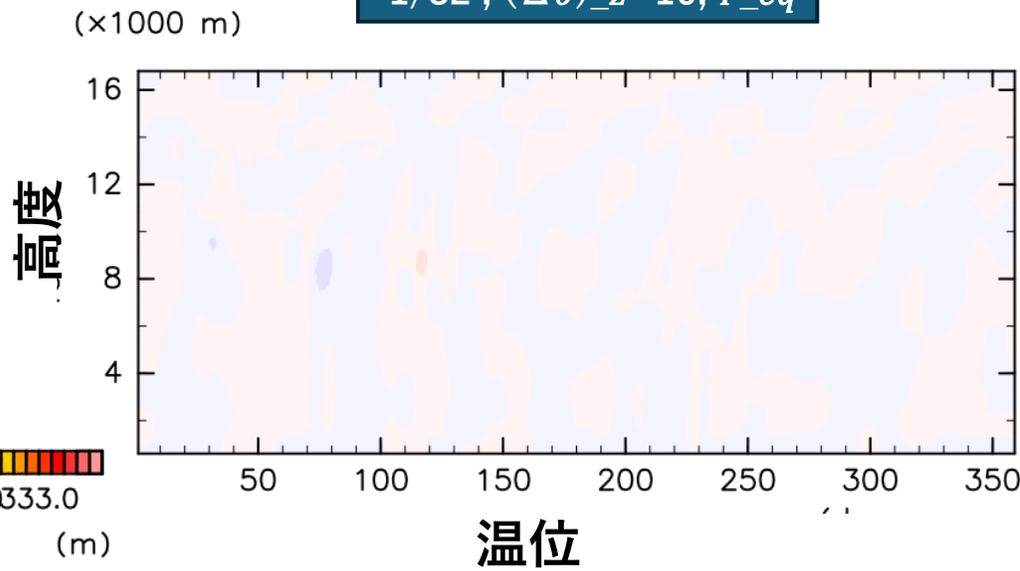




# 赤道における鉛直流の分布(250回転分)

鉛直風分布  
1/32,  $(\Delta\theta)_{z=10}, T_{eq}$

鉛直風分布 1/32,  $(\Delta\theta)_{z=10}$ ,  
最下層のみ  $T_{eq}+10$



・周囲よりも温位が高くなっている場所では強い上昇流, 下降流が頻繁に見られた

# 結果2

- ・ 東西風

- 静的安定度が変わっても, 小型化した惑星で大規模な大気現象を表現することができた

- ・ 南北風の質量流線関数

- 静的安定度が変わっても, 南半球に 2 つずつ南北循環が見られた

- ・ 鉛直風

- 最下層の静的安定度が負になっている場合, 強い上昇流, 下降流が頻繁に見られた

- 水平規模約30 km程度の鉛直対流が発生して いると考えられる

1倍地球と同様の大規模循環の構造を保ったまま,  
鉛直対流を計算することができると考えられる.

# まとめ

- ロスビー数を固定し, 地球条件における惑星小型化実験を行った.
  - 地球を小型化したことによる, 大規模循環の構造への影響は少なかった
- 地球条件においてロスビー数を固定して惑星を小型化し, 最下層を大気の安定度を負に強制するような基準温度を与えた.
  - 1倍地球と同様な大規模循環の構造を保ったまま, 水平規模30km程度の鉛直対流を計算することができたと考えられる.

# 参考

- 松田佳久 [2000], “惑星気象学” p22 – 30
- 大野久雄 [2001], “雷雨とメソ気象” p13 - 14
- [NICAM-DC : NICAM dynamical core package \(riken.jp\)](http://www.riken.jp/nicam/)
- [SCALE Global Model \(SCALE-GM\) \(riken.jp\)](http://www.riken.jp/scale/)
- Masatsugu Odaka “火星大気鉛直対流”, 日本惑星科学会誌 VoL10 .No .22001
- Odaka, Nakajima, Ishiwatari, Hayashi [2001], “2次元非弾性系を用いた火星大気放射対流の数値計算” Nagare Multimedia
- Zhiming Kuang, Peter N. Blossey, and Christopher S. Bretherton [2005], “A new approach for 3D cloud-resolving simulations of large-scale atmospheric circulation”
- Jonathan L. Mitchell and Geoffrey K. Vallis [2010], “The transition to superrotation in terrestrial atmosphere”
- Hirofumi Tomita, Masaki Satoh [2004], “ A new dynamical framework of nonhydrostatic global model using the icosahedral grid”
- Issac M Held and Max J Suarez [1994], “A Proposal for the and Intercomparison of the Dynamical Cores of Atmospheric General Circulation Models”
- Nouredine Semane and Peter Bechtold [2015], “Convection and waves on Small Earth and Deep Atmosphere”