

鉛直対流の全球計算に向けた惑星小型化実験

神戸大学大学院惑星学専攻流体地球物理学分野 M2 市田春菜

目次

1, はじめに

2, 実験方法

- 惑星小型化実験
- 大気モデルの概要

3, 実験 1

- 実験設定
- 結果1
- 実験1のまとめ

4, 実験 2

- 実験設定
- 結果2
- 実験2のまとめ

5, まとめ

はじめに

*火星の大気について

- ・ 大気組成は主に二酸化炭素、薄い大気を持つ
 - 地表面気圧は約6 hPa (地球の1/100 以下)
 - 極付近に存在する極冠の影響で、地表面気圧が季節変化する
- ・ 水平規模が数 kmから惑星規模まで、様々な大きさの砂嵐が頻繁に発生している
 - 全球規模の砂嵐は三か月程度維持される
- ・ 鉛直対流が広く起こっていることが知られている
 - 熱や運動量を輸送する鉛直対流は、火星の大気現象にとって重要な現象である



はじめに

- 鉛直対流は水平規模が小さく、大気モデルを使い計算をするためには高解像度である必要がある
 - 全球大気を高解像度で詳細まで計算することは、計算負荷が大きく現実的でない

小型化した火星を作ることで、計算負荷を減らしつつ、
鉛直対流を計算できるようにしたい

モデルの半径を小さくし小型化することで、解像度を維持したまま計算負荷を軽くすることができる

はじめに

小型化した火星を作ることで計算負荷を減らし、
鉛直対流を計算できるようにしたい

- 全球大気モデルを使い、まずは地球大気の条件で実験を行い、
1倍地球と小型化地球でパラメータを変えたことによる大気現象への
影響を調べる

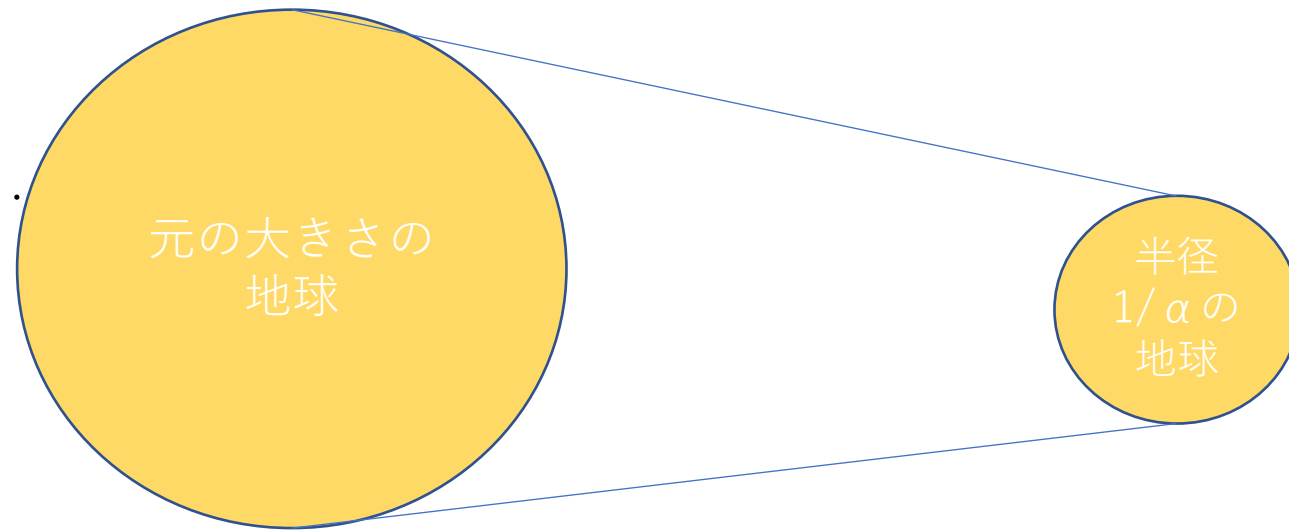
実験1：半径を変えたことによる水平規模の大きい大気現象への
影響を調べる

実験2：静的安定度を負にし、小型化した惑星で鉛直対流が
見られるのか調べる

惑星小型化の方法

- 惑星半径を $1/\alpha$ とし, 半径に合わせて, 自転角速度を α 倍, 摩擦と加熱の時定数を $1/\alpha$ 倍する
 - ロスビー数を1倍の地球と同じにすることで, 半径が変わっても水平規模が大きい現象は1倍の地球と同様の現象が起こる
 - 自転角速度が α 倍増加すると, ロスビー数が一定の時は, 運動の時間スケールが短くなるため, 時定数を $1/\alpha$ にしている

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



・ 使用した大気モデル

- SCALE Global Model(SCALE-GM)

* 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
- ・ 放射過程
 - ニュートン冷却
- ・ 外力
 - レイリー摩擦
- ・ 雲、湿潤、地面
 - 乾燥大気
 - 地面なし

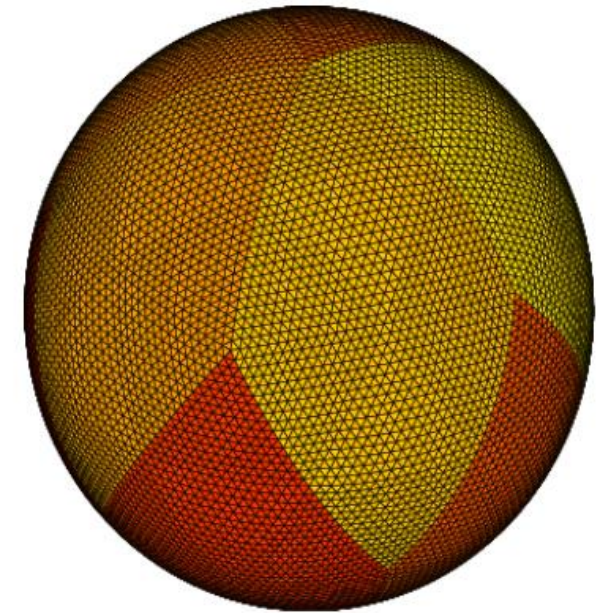


図2)正二十面体格子のイメージ図

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

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

ρ :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

∇ :勾配演算子

$\nabla \cdot$:発散演算子

\otimes :テンソル

\times :外積

t :時間

$\hat{\mathbf{k}}$:垂直単位ベクトル

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

$$e = C_v T$$

$$h = C_p T$$

$$p = \rho R_d T$$

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

- 大気モデルを使い、地球における大規模な循環を計算し、使用している力学コアを物理的なパラメータに依存せずに評価するための実験である。
- 物理過程として、ニュートン冷却とレイリー摩擦を適用している。

• Held and Suarez実験の条件

- 運動方程式(摩擦項)

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \dots - k_v(\sigma)v$$

- 熱力学方程式(加熱項)

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

$$T_{eq} = \max\{200K, \left[315K - (\Delta T)_y \sin^2 \phi - (\Delta \theta)_z \log \left(\frac{p}{p_0} \right) \cos^2 \phi \right] \left(\frac{p}{p_0} \right)^\kappa \}$$
$$k_T = k_a + (k_s - k_a) \max \left(0, \frac{\sigma - \sigma_b}{1 - \sigma_b} \right) \cos^4 \phi$$

$$k_v = k_f \max \left(0, \frac{\sigma - \sigma_b}{1 - \sigma_b} \right)$$

- 地球における係数

$$\sigma_b = 0.7, k_f = 1 \text{ day}^{-1}$$

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

$$(\Delta T)_y = 60K, (\Delta \theta)_z = 10K$$

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

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

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

$$g = 9.8 \text{ ms}^{-2}, a_e = 6.371 \times 10^6 \text{ m}$$

- **実験 1**

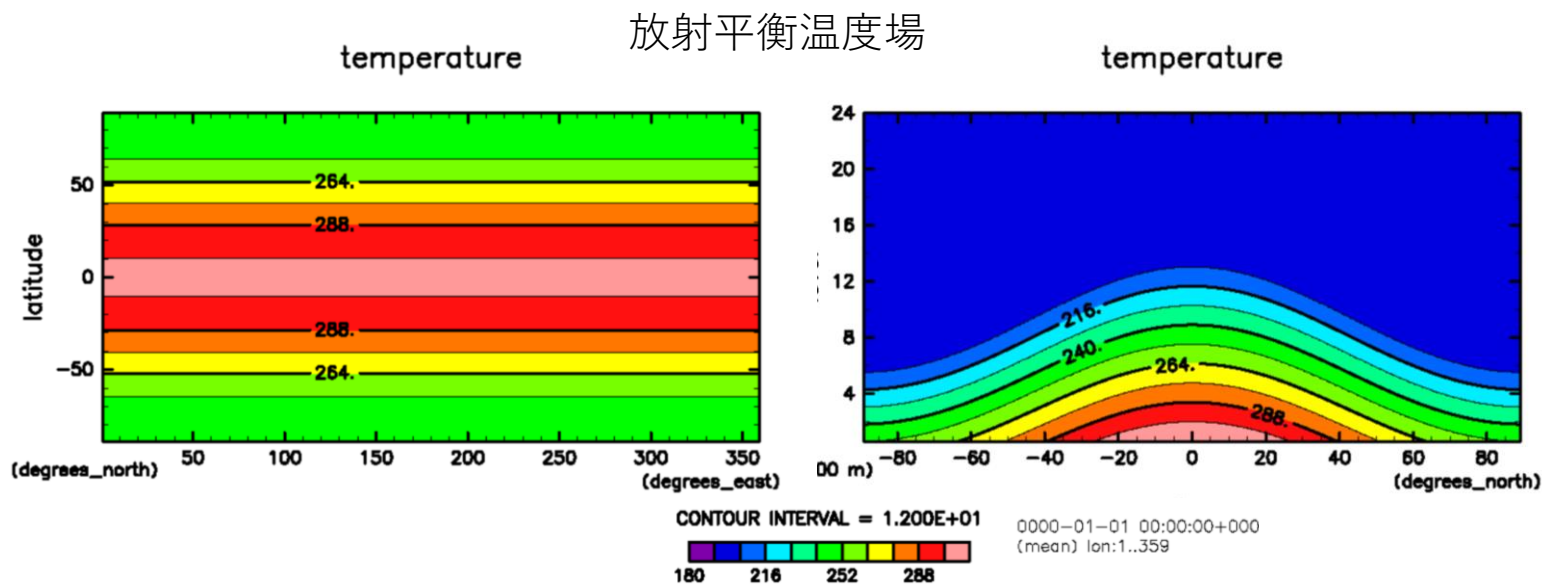
Held Suarez 実験設定を用い、惑星を小型化したことによる水平規模の大きい大気現象への影響を調べる

実験 1

• 実験設定

- Held and Suarez 実験を 1倍実験としている
- パラメータ、格子点間隔
- 右の表に記載
- 初期条件
- 放射平衡温度場、風速0
- 積分時間
- それぞれの条件で
惑星が500回転する時間

	半径 r	自転角速度 Ω	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

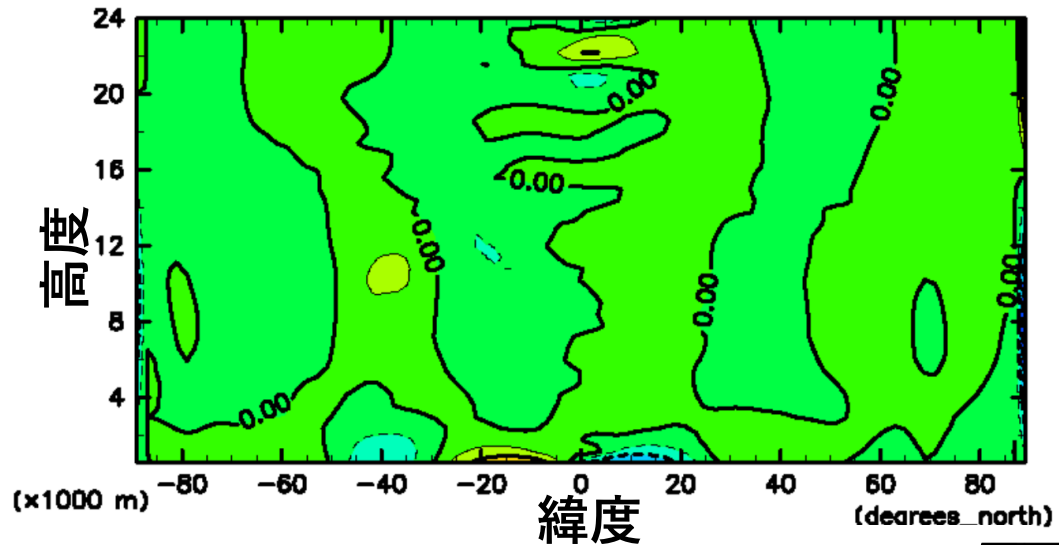


1倍地球におけるHeld and Suarez 実験(コントロール実験)

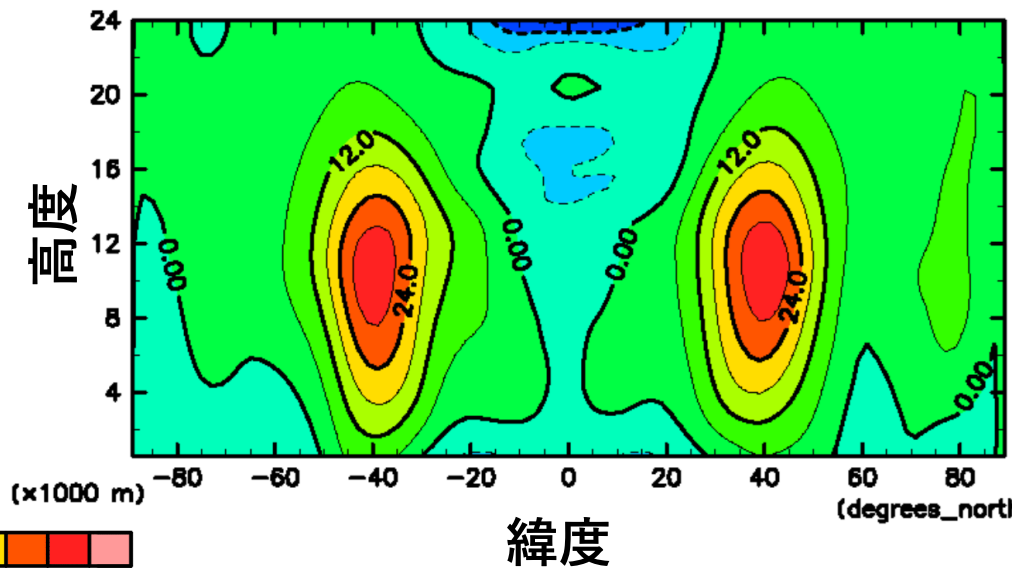
惑星が500回転した時



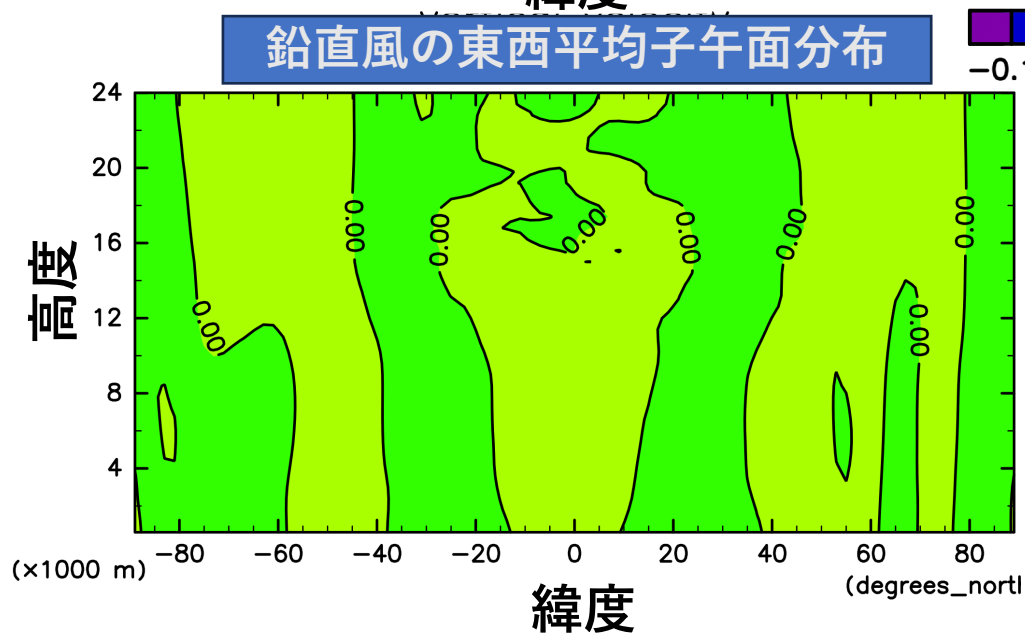
南北風の東西平均子午面分布



東西風の東西平均子午面分布

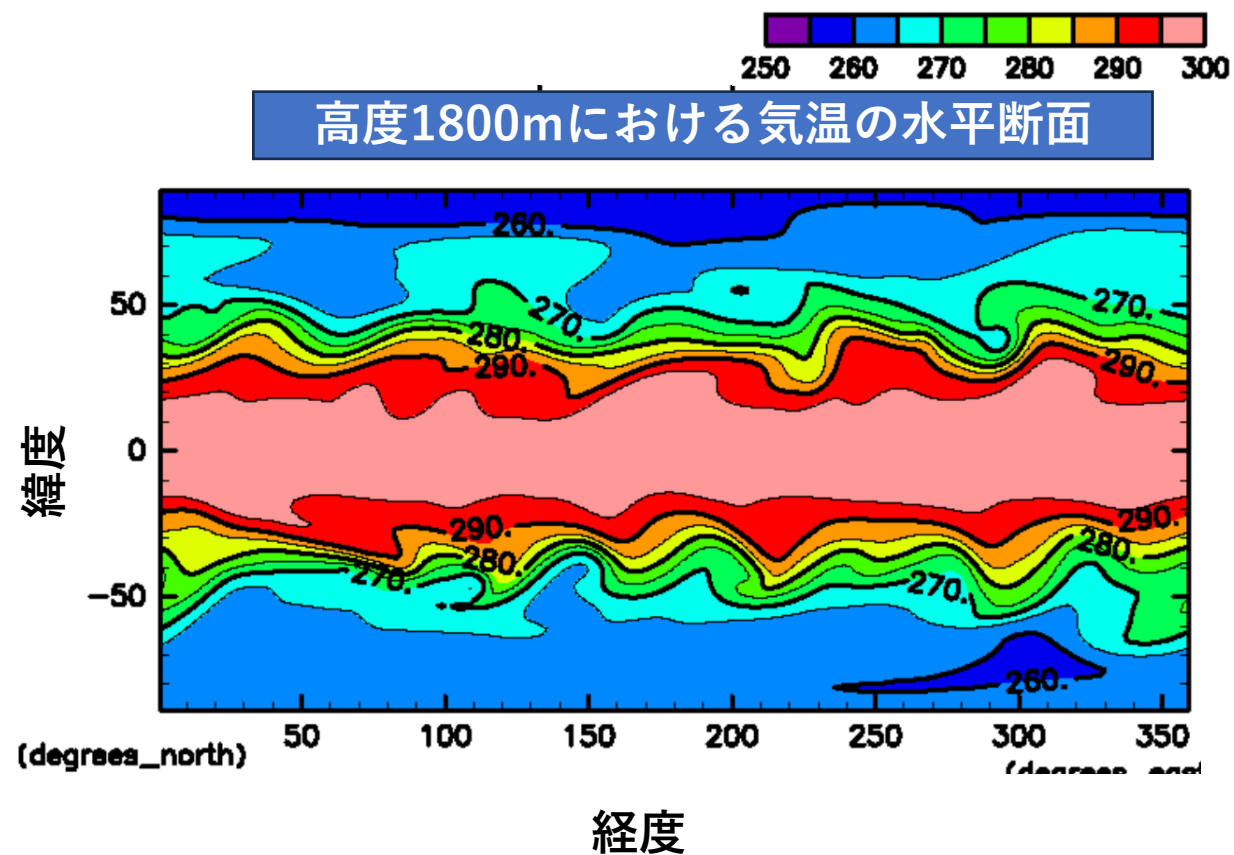
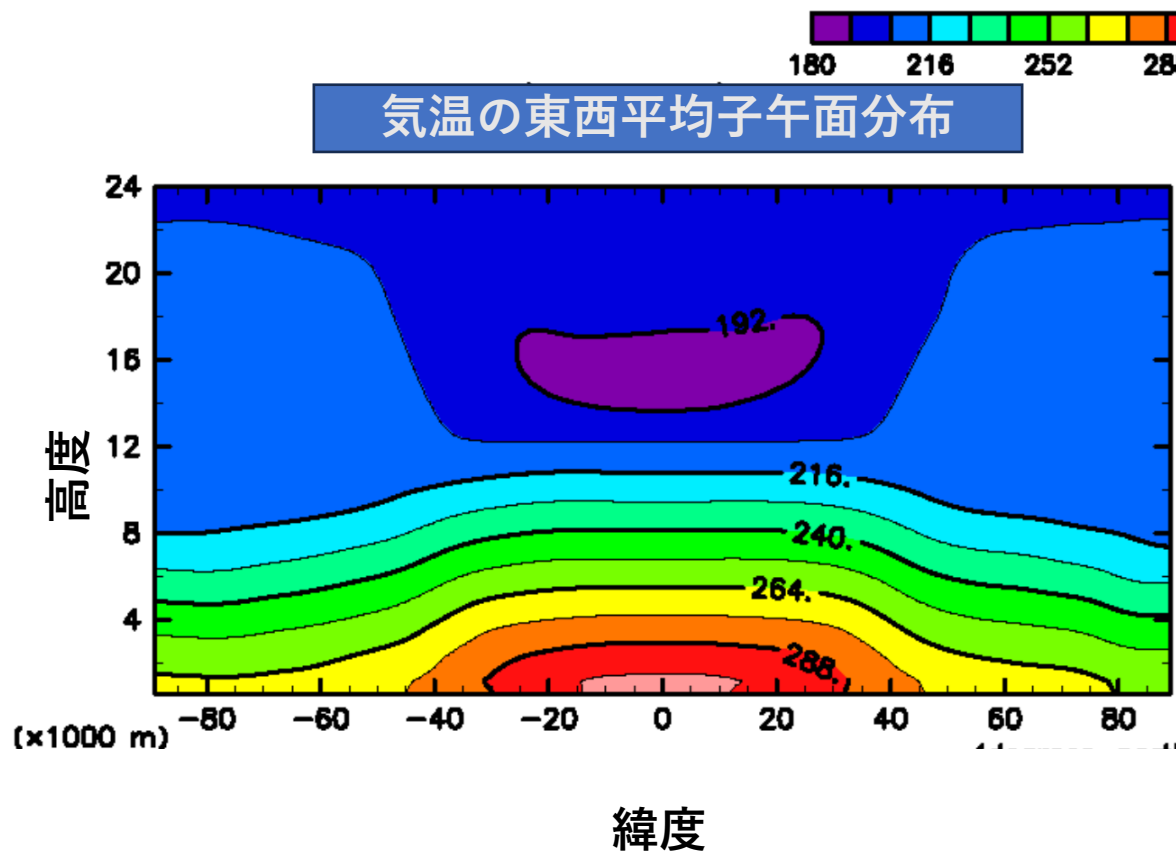


鉛直風の東西平均子午面分布



1倍地球におけるHeld and Suarez 実験(コントロール実験)

惑星が500回転した時

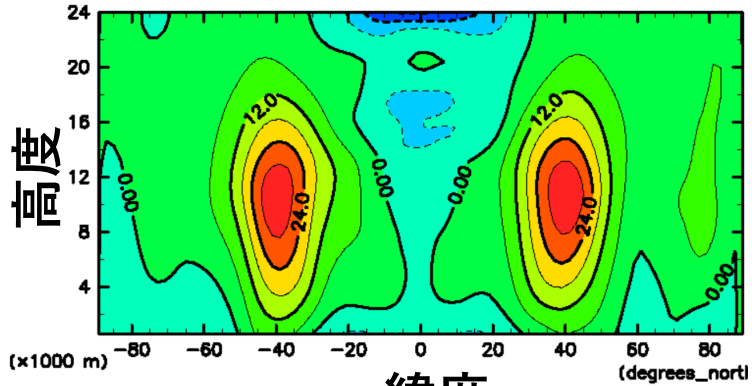




東西風の東西平均子午面分布

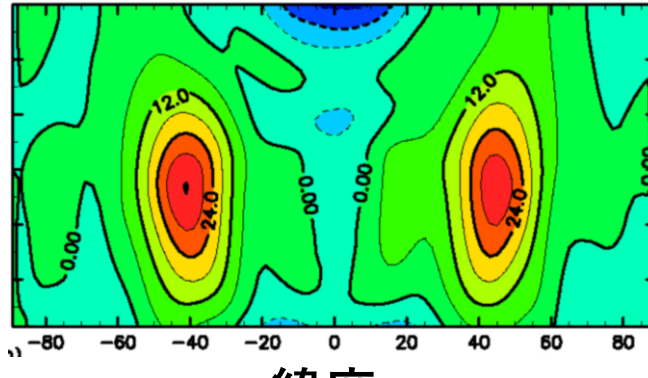
• 半径 1 倍

zonal velocity



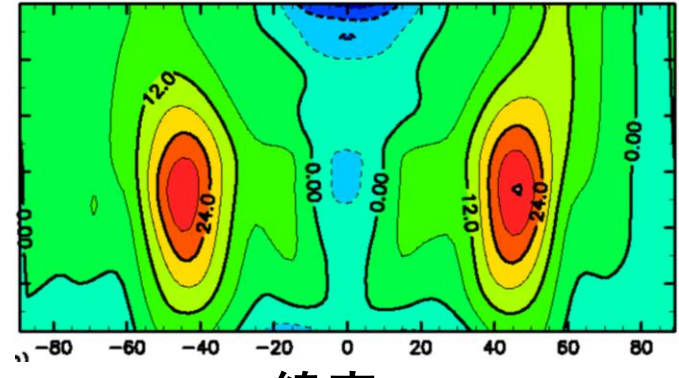
• 半径1/2倍

zonal velocity



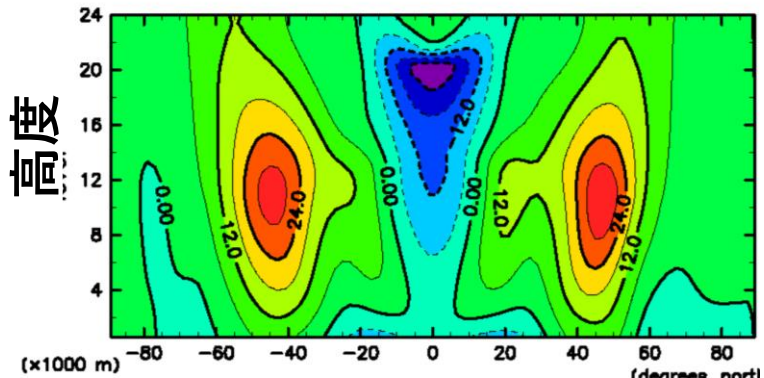
• 半径1/4倍

zonal velocity



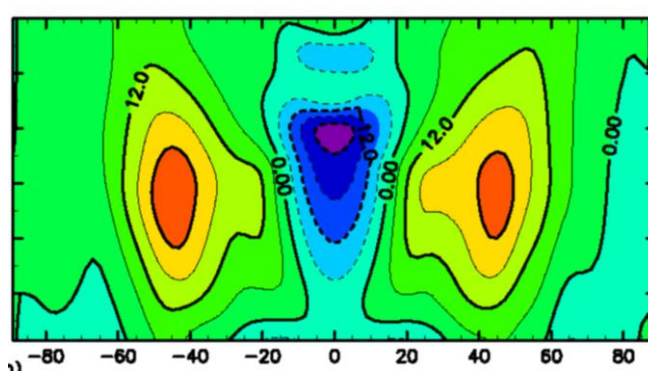
• 半径1/10倍

zonal velocity



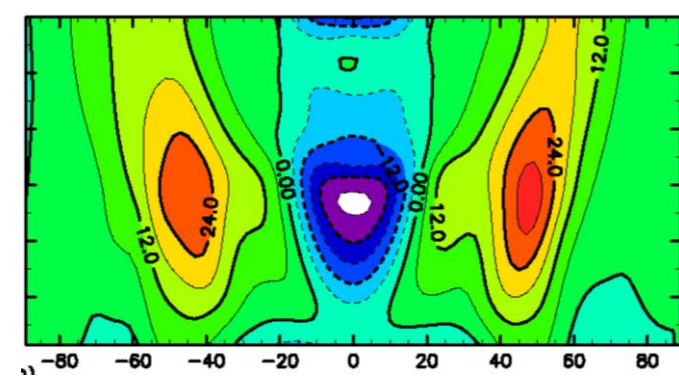
• 半径1/16倍

zonal velocity



• 半径1/32倍

zonal velocity

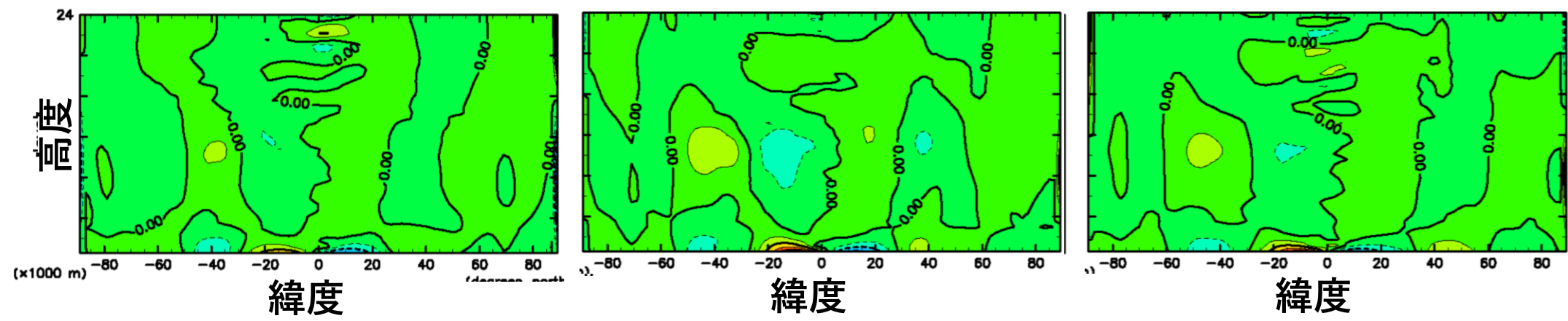


- 東西風の風速分布は大きく変わらなかった
- 半径を変えると赤道上の東風が強い領域の高度が下がってきた

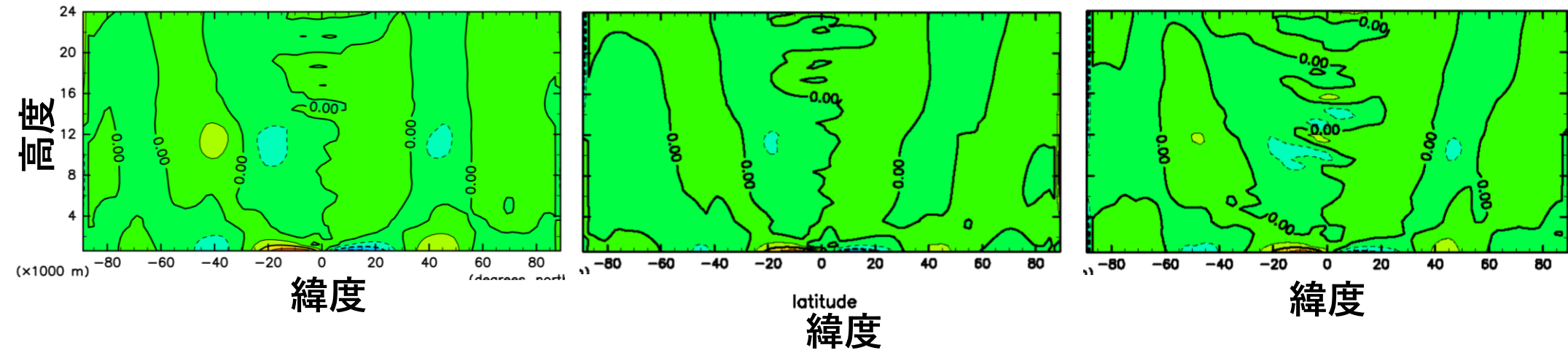


南北風の東西平均子午面分布

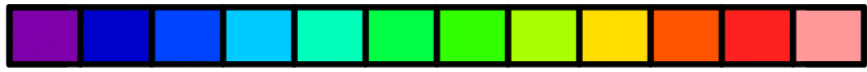
- 半径 1 倍 meridional velocity
- 半径 1/2 倍 meridional velocity
- 半径 1/4 倍 meridional velocity



- 半径 1/10 倍 meridional velocity
- 半径 1/16 倍 meridional velocity
- 半径 1/32 倍 meridional velocity



• 南北風の分布は半径により、大きく変化していない



鉛直風の東西平均子午面分布

-0.12 -0.06 0 0.06 (m/s)

• 半径 1 倍

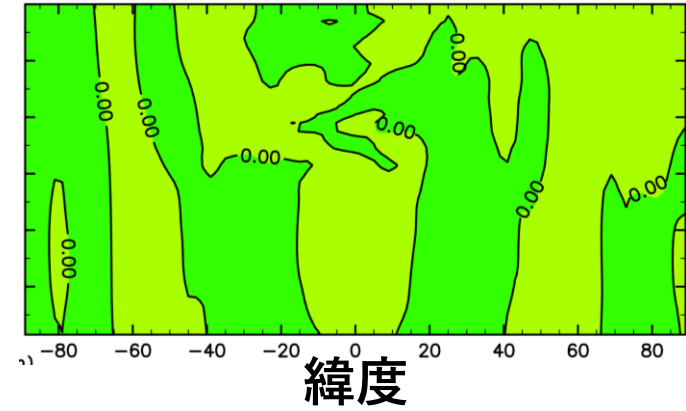
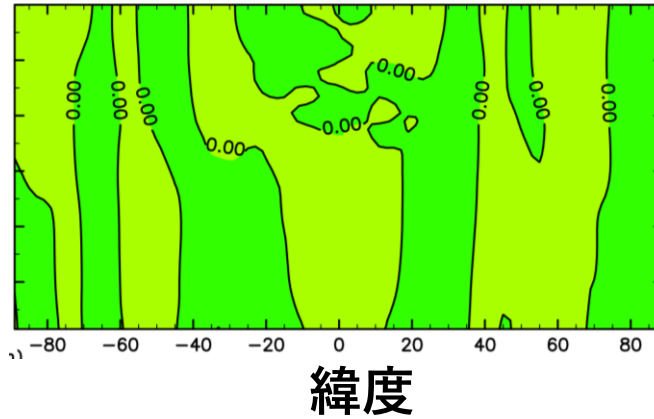
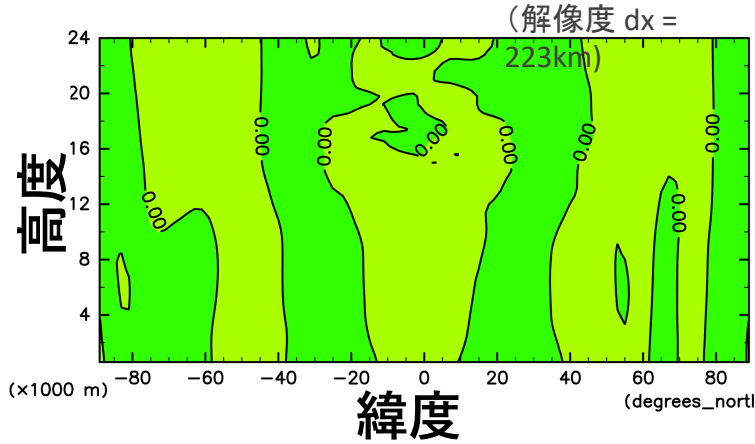
vertical velocity

• 半径 1/2 倍

vertical velocity

• 半径 1/4 倍

vertical velocity



• 半径 1/10 倍

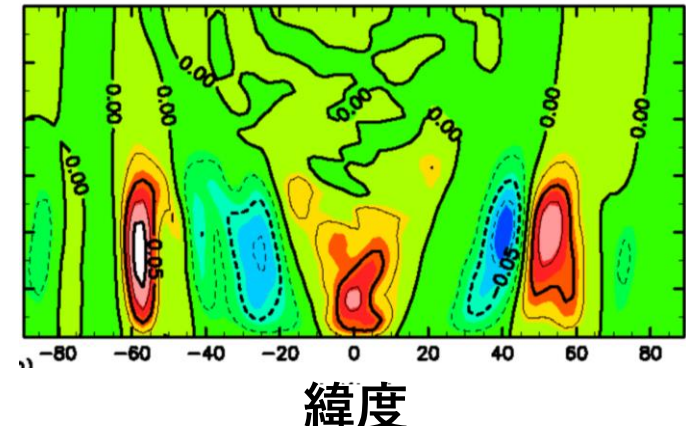
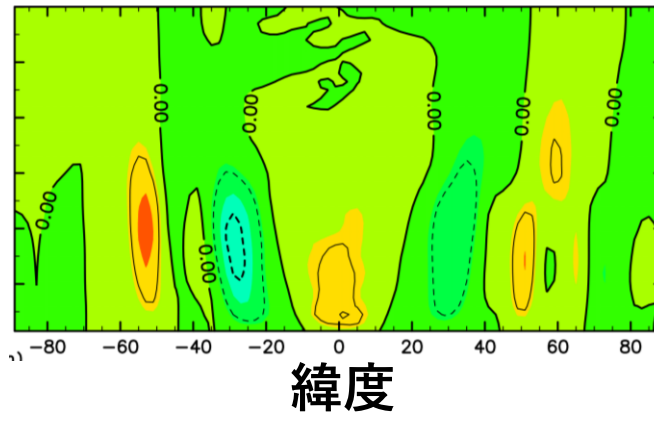
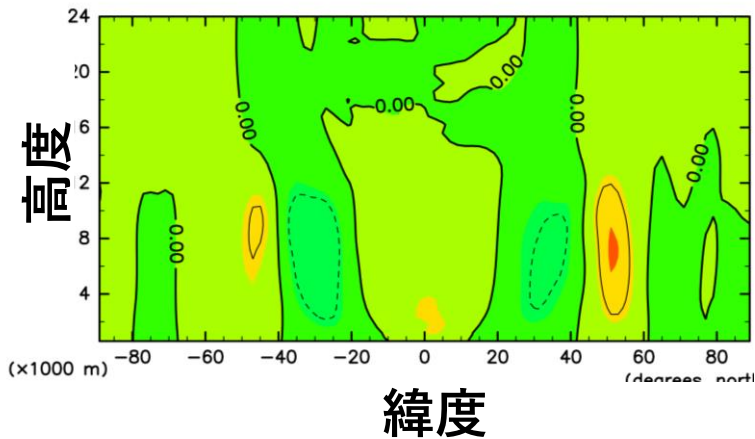
vertical velocity

• 半径 1/16 倍

vertical velocity

• 半径 1/32 倍

vertical velocity



• 上昇流下降流の分布はあまり変わらない

• 小型化した場合には、半径が小さくなるごとに鉛直流が強くなる

鉛直風について

風速 $\boldsymbol{v} = (u, v, w)$, 密度 ρ とする。
連続の式より

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

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0$$

東西平均しているため、 x 微分は無視

$$\frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial w}{\partial z}$$

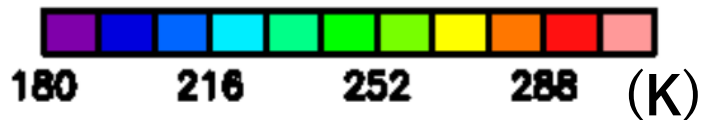
それぞれスケールを $[v] = V$,
 $[w] = W$, $[y] = L$, $[z] = H$ とする

。

$$W \sim \frac{VH}{L}$$

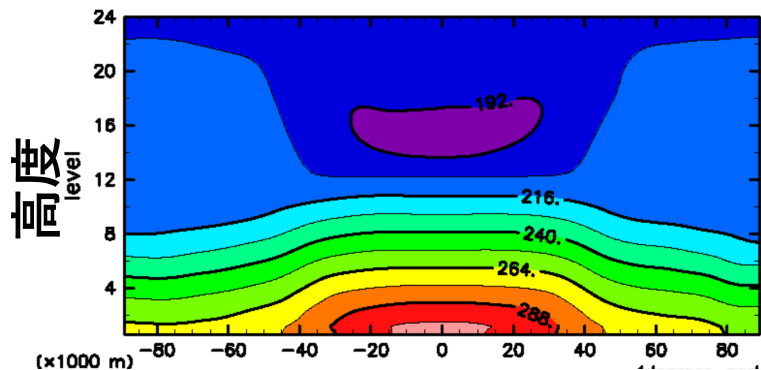
それ半径が1/10のとき

$$W_{1/10} \sim \frac{VH}{\frac{1}{10}L} = 10W$$

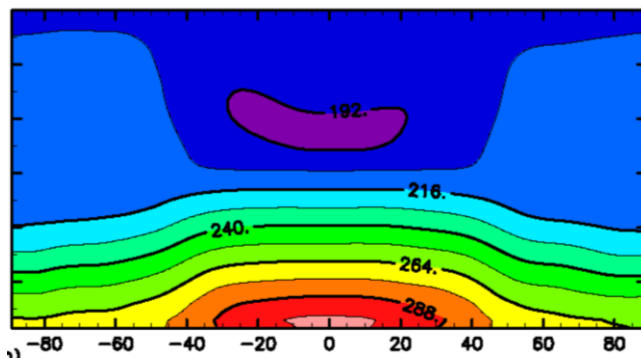


気温の東西平均子午面分布

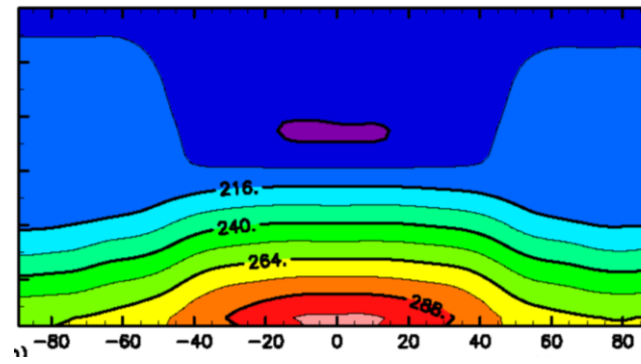
• 半径 1 倍 temperature



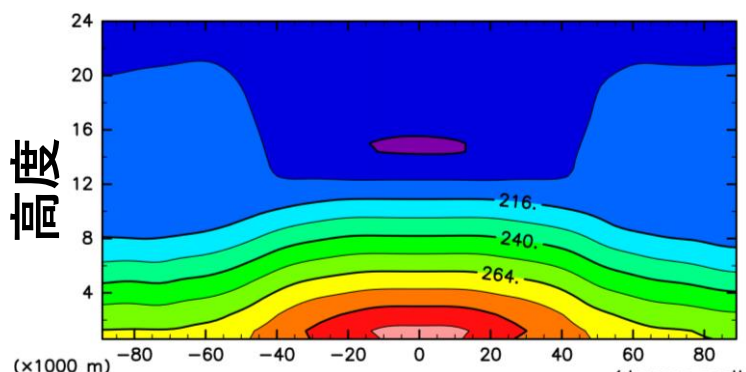
• 半径 1/2 倍 temperature



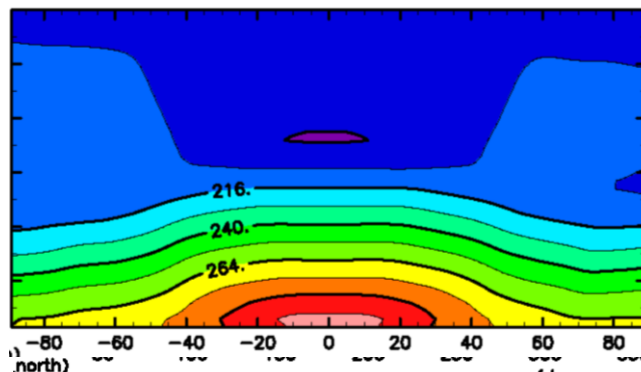
• 半径 1/4 倍 temperature



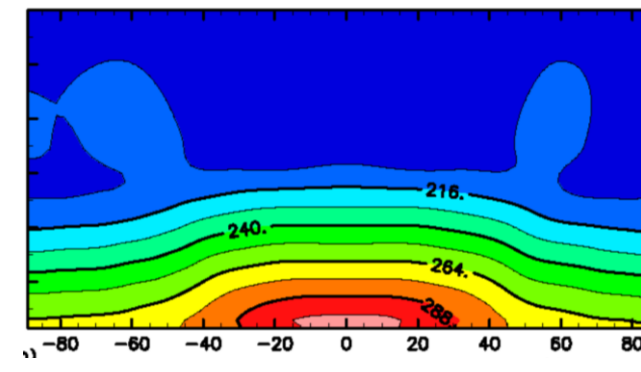
• 半径 1/10 倍 temperature



• 半径 1/16 倍 temperature



• 半径 1/32 倍 temperature

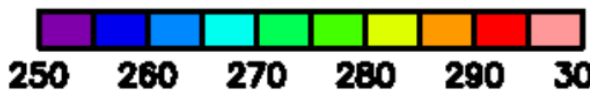


緯度

緯度

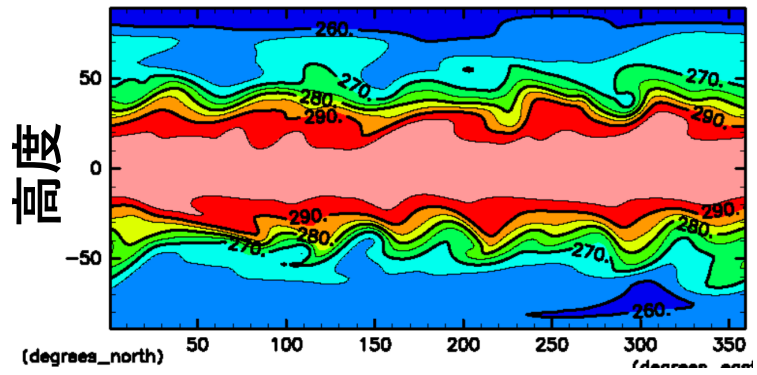
緯度

- 緯度 -40:40 の温度勾配が平らである
- 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

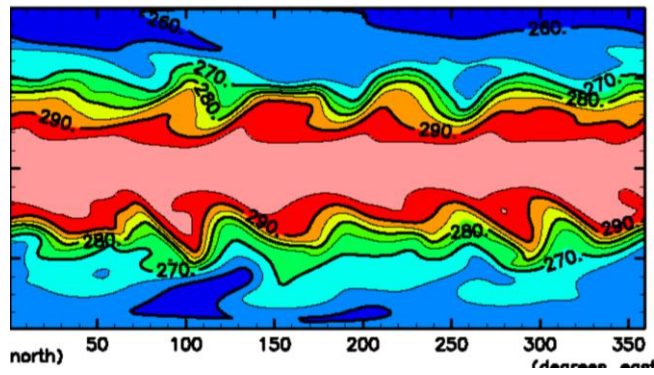


高度1800mにおける気温の水平断面

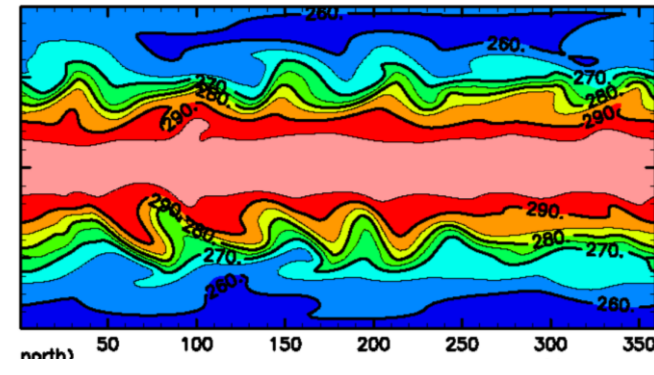
- 半径 1 倍 temperature
- 半径 1/2 倍 temperature
- 半径 1/4 倍 temperature



緯度

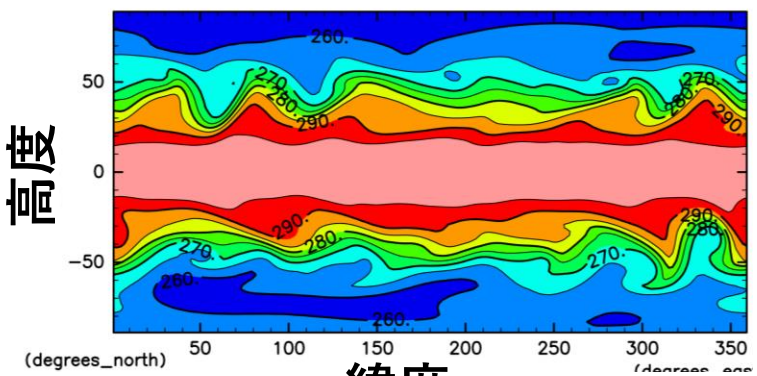


緯度

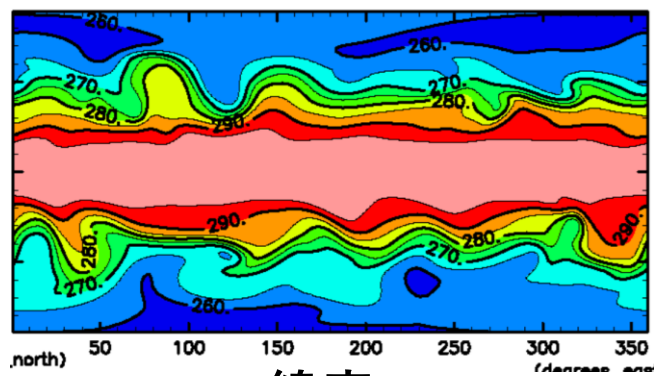


緯度

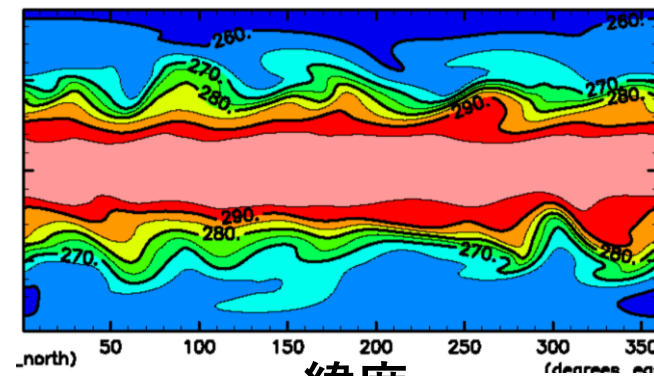
- 半径 1/10 倍 temperature
- 半径 1/16 倍 temperature
- 半径 1/32 倍 temperature



緯度



緯度



緯度

- 半径を変えても波数は同じだった。
- 気温分布の概形は大きく変わらない

結果 1

- 気温
 - 半径が変わっても、気温分布は大きく変わらない
 - 1800mにおける水平断面で見られる波は半径を変えても波数は同じ
- 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
 - 南北風の分布は半径により、大きく変化していない。
- 鉛直風
 - 半径が変わっても、上昇流の分布は変わらなかった。
 - 小型化した場合には、半径が小さくなるごとに鉛直流が強くなっている。

Held and Suarez 実験では、静的安定な基準温度場を使用しているため、本来見たい対流はみられない

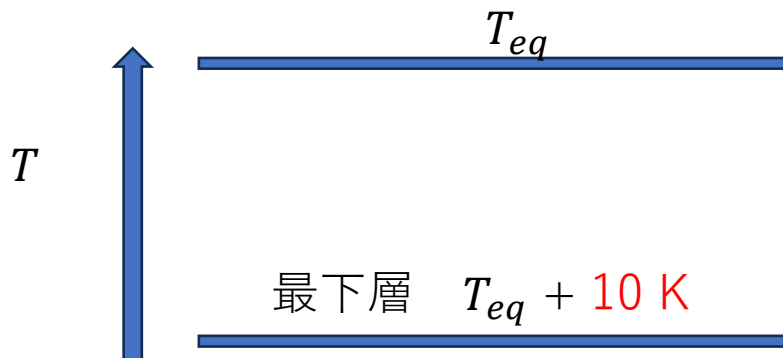
→ **1/32** の小型化地球を使い、静的不安定な状態に強制するような基準温度場を作り、小型化した惑星で鉛直対流が見られるのか調べる

実験 2

- 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500回転した時の大気現象を計算し、比較する。

- ニュートン冷却の基準温度場の鉛直温度差 $(\Delta\theta)_z$ を 10 K \rightarrow 1 K、モデルの最下層のみ +10 K とした

- 静的不安定な状態に強制するような基準温度場にし、鉛直対流を起こりやすくした。



大気モデルのイメージ

- 放射平衡温度

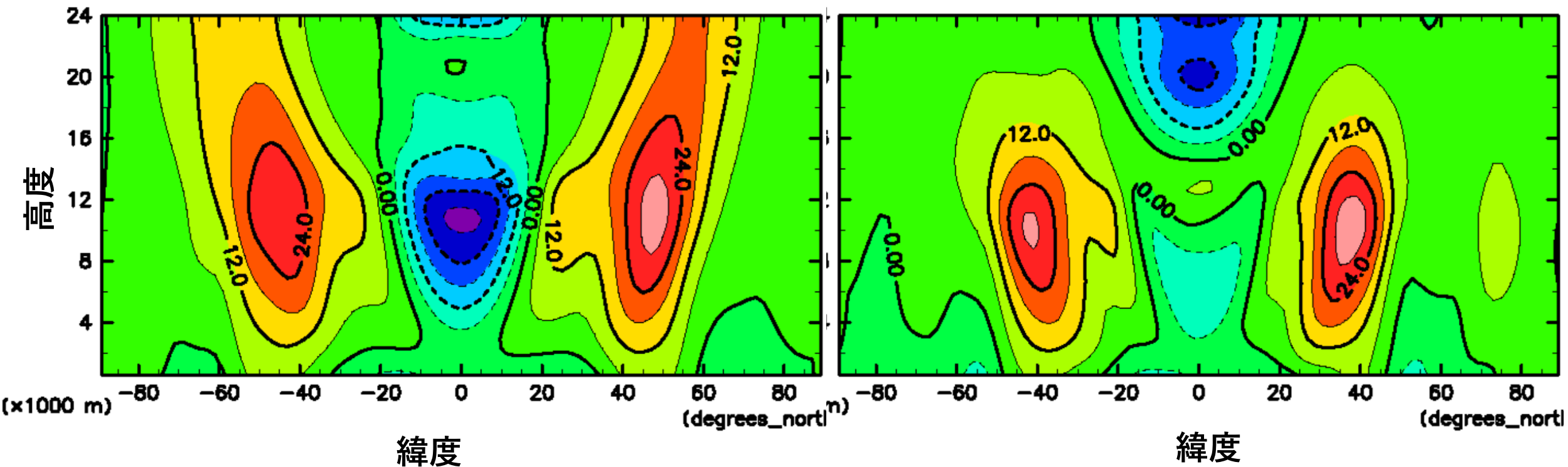
$$T_{eq} = \max \left\{ 200\text{K}, \left[315\text{K} - (\Delta T)_y \sin^2 \phi - (\Delta\theta)_z \log \left(\frac{p}{p_0} \right) \cos^2 \phi + 10 \right] \left(\frac{p}{p_0} \right)^\kappa \right\}$$

東西風の東西平均子午面分布

• 1/32

zonal velocity

• 1/32 + 静的安定度：負
zonal velocity



• 西風ジェットが吹いている場所が少し赤道よりになった

CONTOUR INTERVAL = 6.000E+00



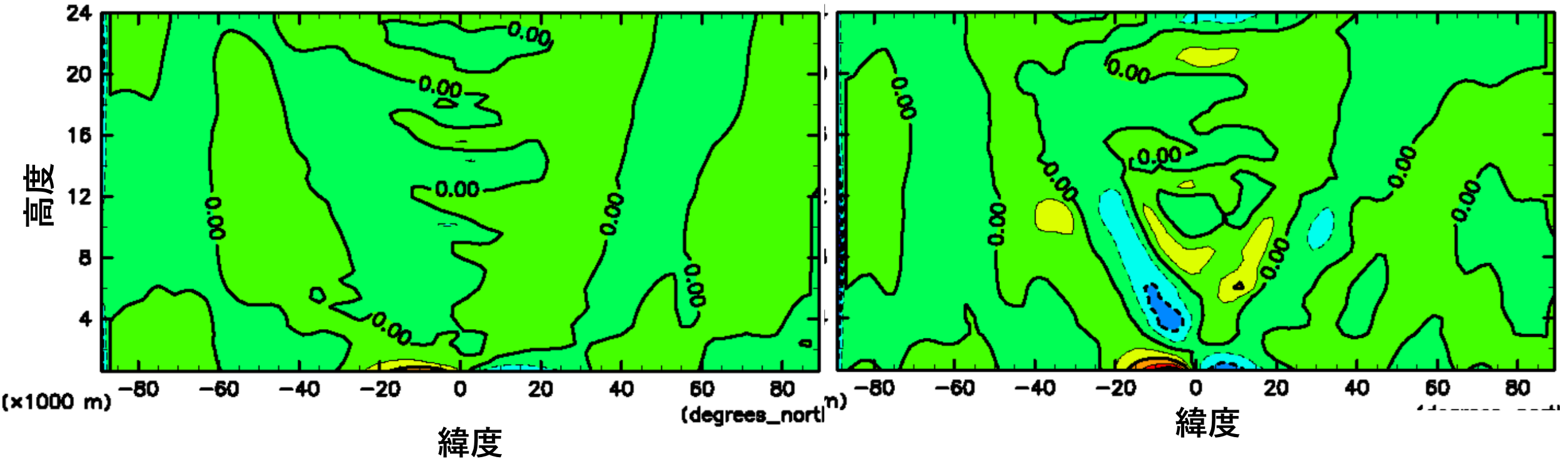
0000-01-24 10:30:00+0000
(mean) lon:1..359

南北風の東西平均子午面分布

• 1/32

meridional velocity

• 1/32 + 静的安定度：負
meridional velocity



- どちらも赤道付近に南北風がある
- 安定度を変えたときのほうが、南北風の強い領域がある

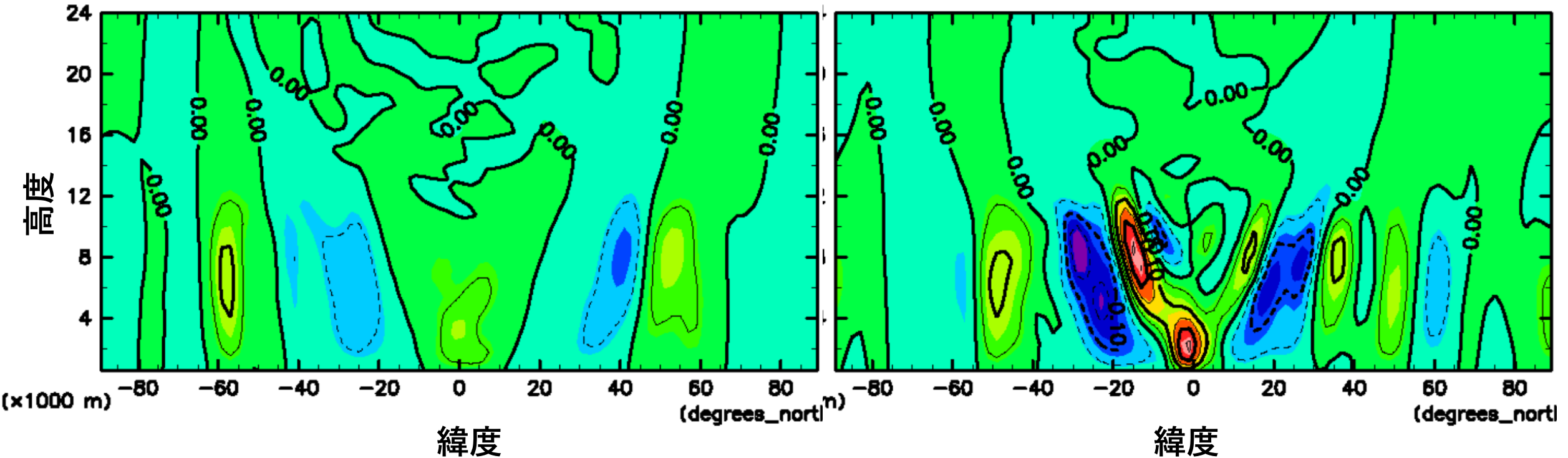
鉛直風の東西平均子午面分布

• 1/32

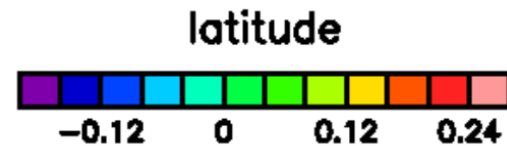
vertical velocity

• 1/32 + 静的安定度：負

vertical velocity



- 上昇流と下降流の分布はあまり変わらない
- 鉛直流の風速が強くなっている



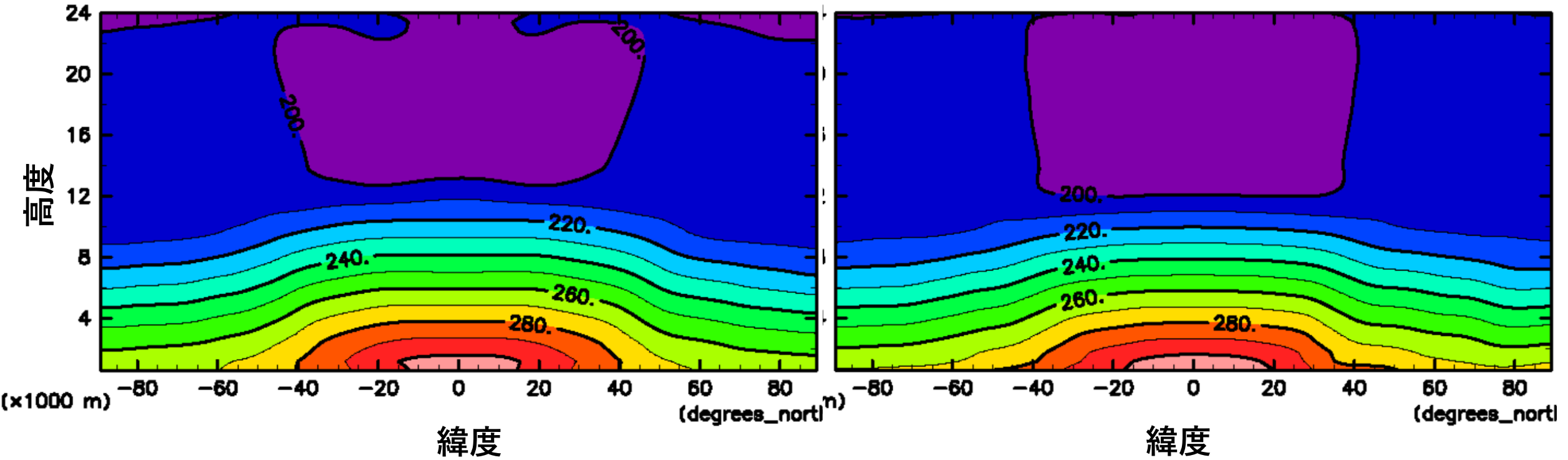
0000-01-24 10:30:00+0000
(mean) lon:1..359

気温の東西平均子午面分布

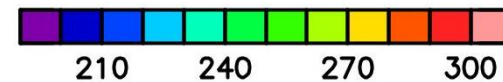
• 1/32

temperature

• 1/32 + 静的安定度：負
temperature



CONTOUR INTERVAL = 1.000E+01



0000-01-21 07:30:00+0000
(mean) lon:1..359

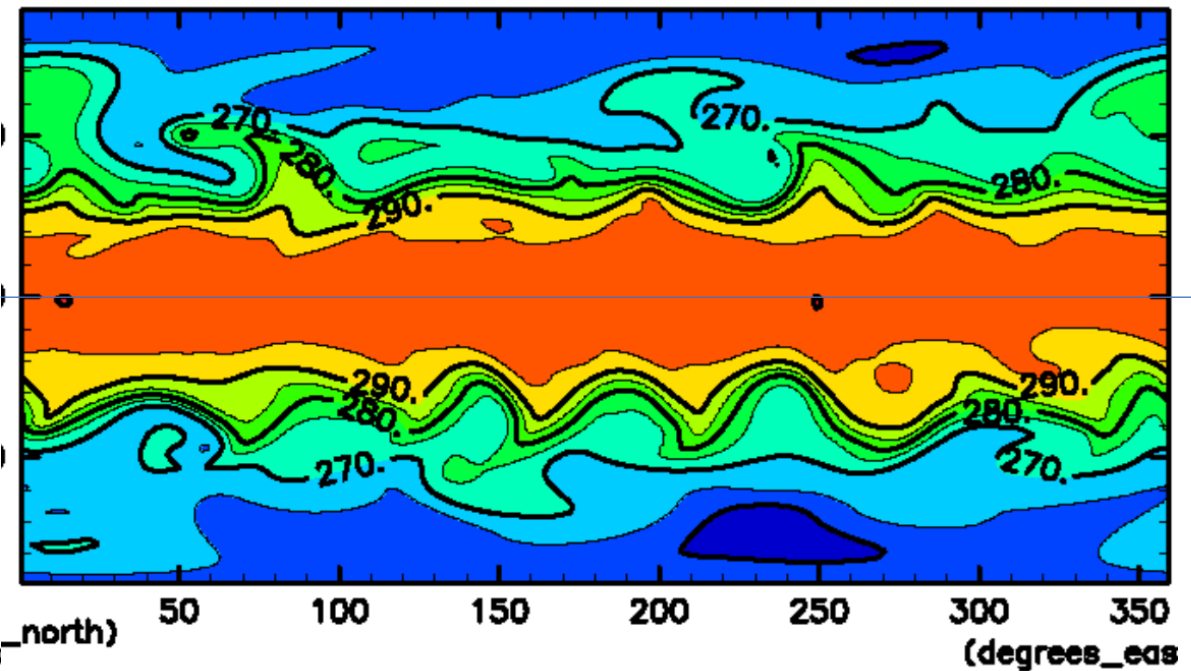
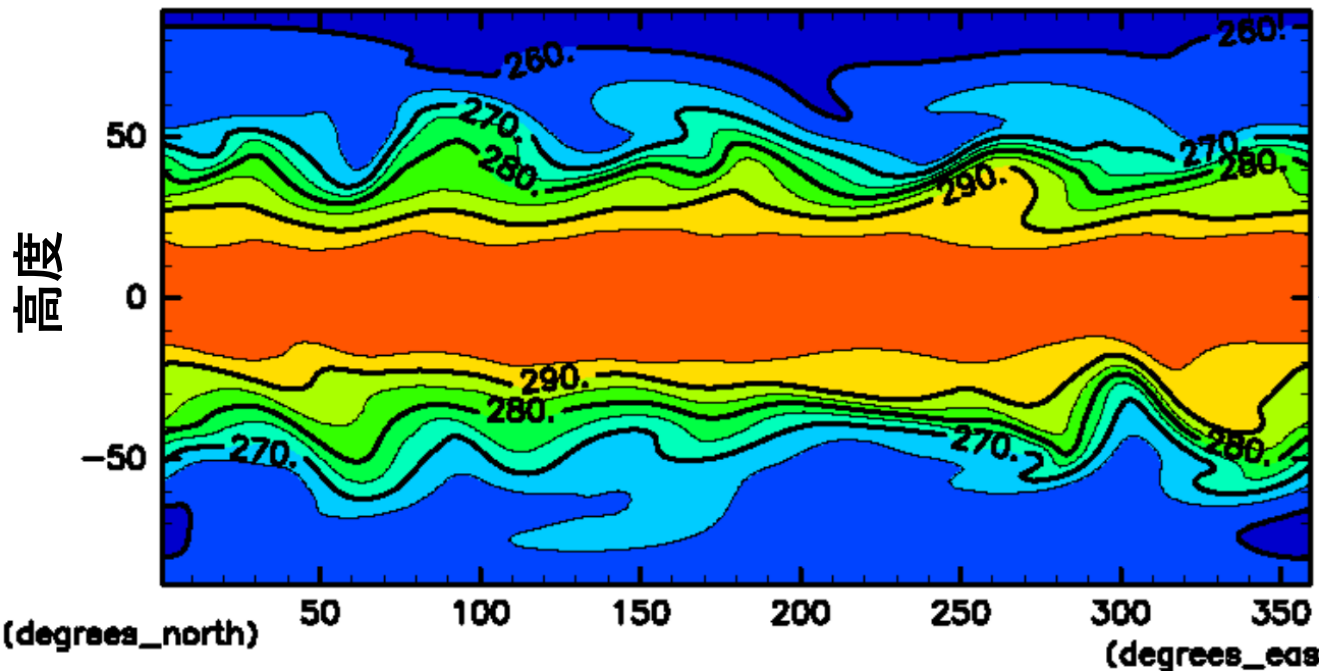
• 東西平均した気温分布はあまり変わらない

高度1800mにおける気温の水平断面

• 1/32

temperature

1/32 + 静的安定度：負
temperature



- 波数が6に対し波数9になっている
- 静的安定度を変えた計算では赤道付近に局所的に気温の高い領域がある

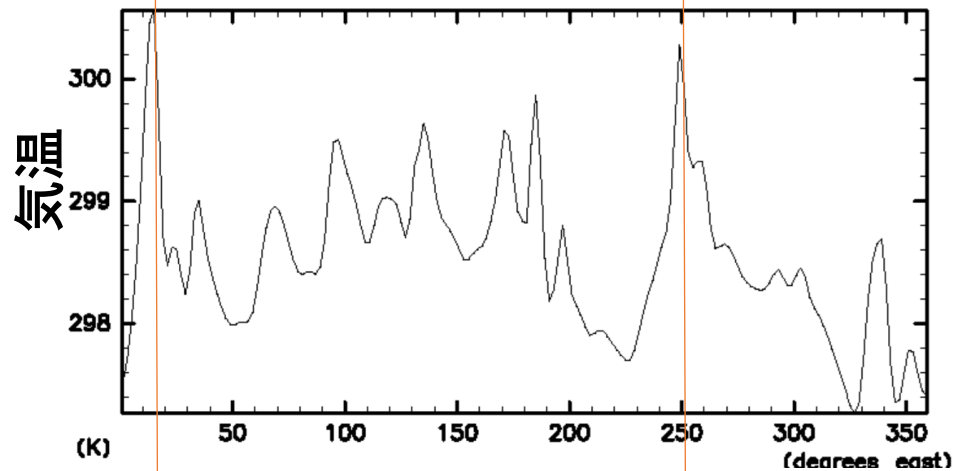
CONTOUR INTERVAL = 5.000E+00



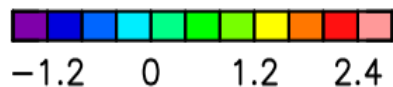
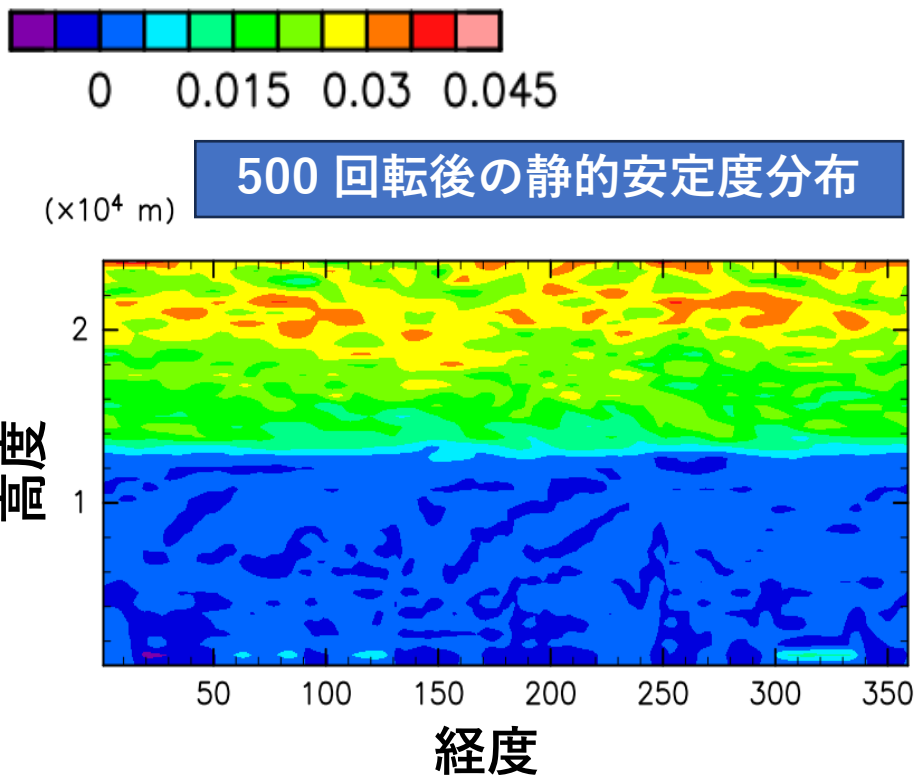
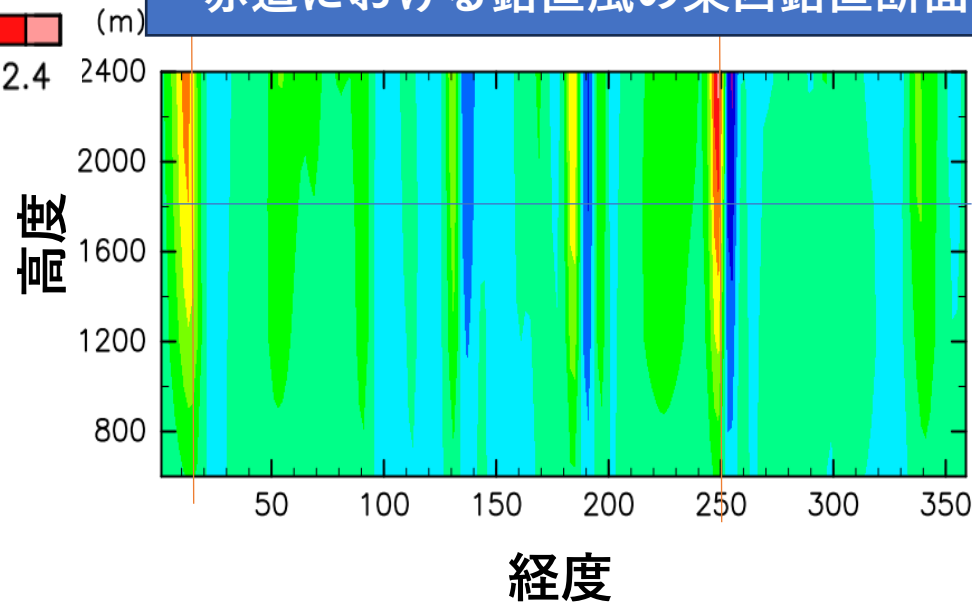
lev=1800 m
0000-01-24 10:30:00+0000

赤道における静的安定度を負にしたときの気温と鉛直流の分布

高度1800m, 赤道における気温の水平断面

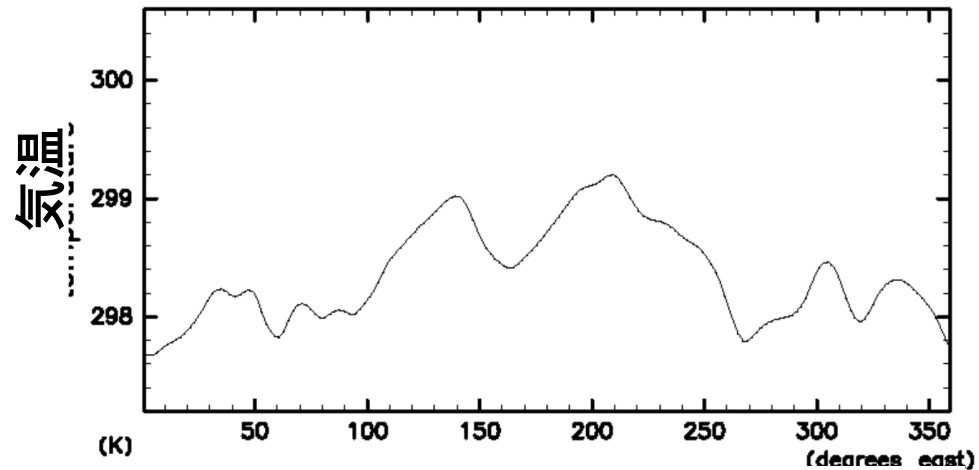


赤道における鉛直風の東西鉛直断面

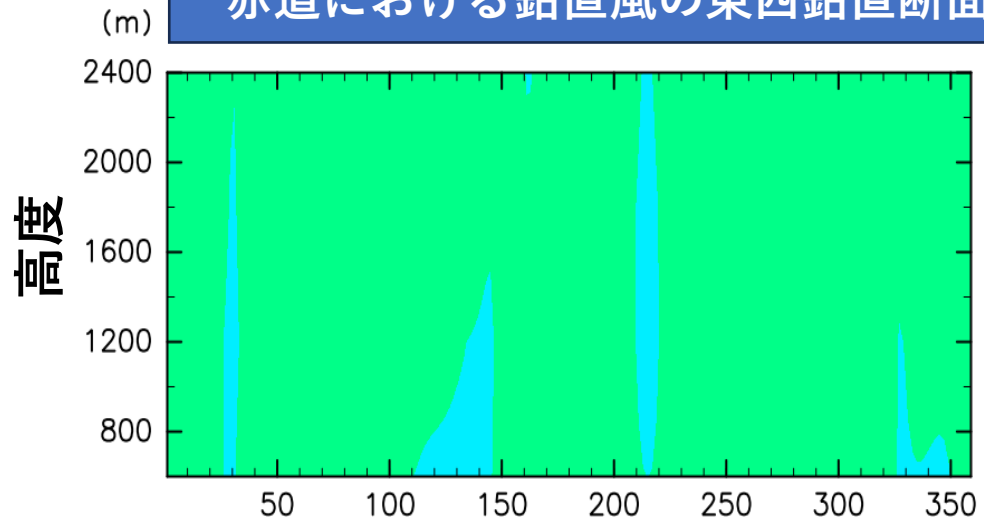


1/32 静的安定度:正

高度1800m, 赤道における気温の水平断面



赤道における鉛直風の東西鉛直断面

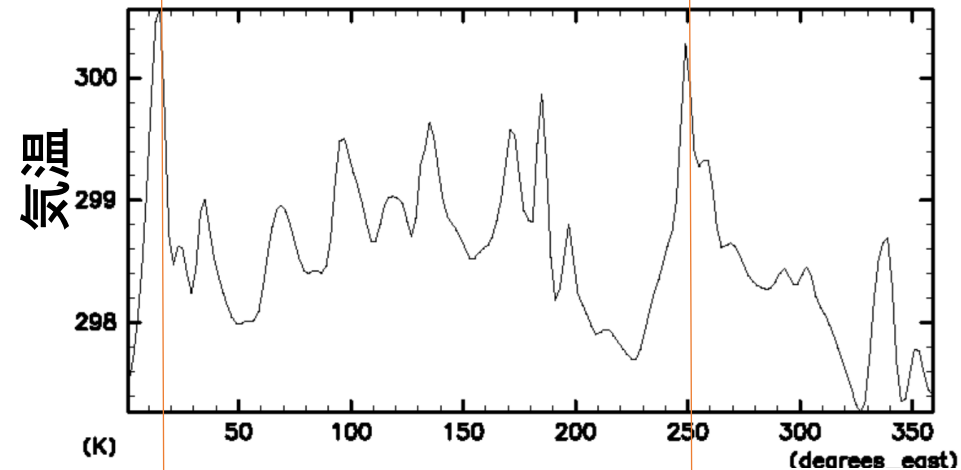


経度

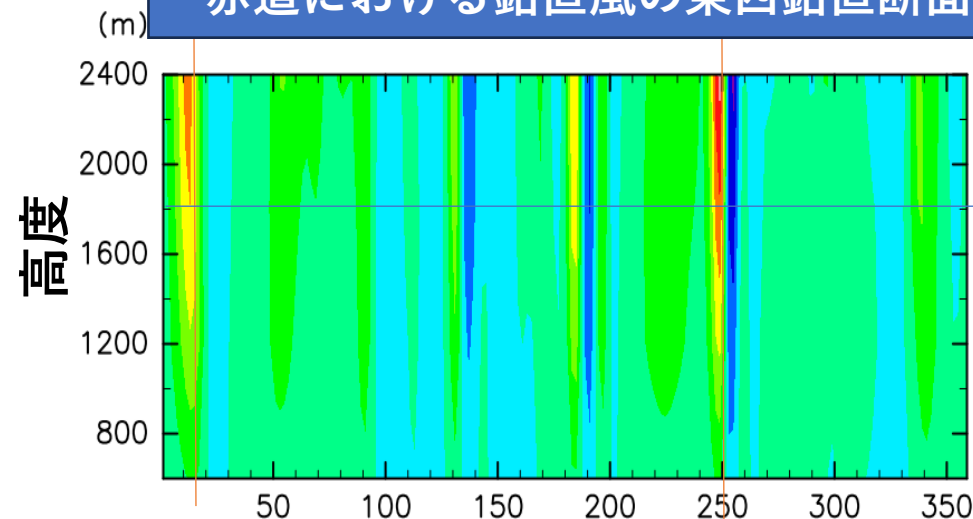


1/32 静的安定度:負

高度1800m, 赤道における気温の水平断面



赤道における鉛直風の東西鉛直断面



経度

結果2

- 静的安定度を変えても、大規模な大気現象は大きくは変わらなかった
 - 局所的な温度上昇をしている領域が発生していた
 - 最下層付近の静的安定度が負になっていた
 - 局所的な温度上昇領域で水平規模の小さい上昇流と下降流が発生
- 鉛直対流である可能性がある

*まとめ

- 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, 大規模な大気現象への影響は少なかった
- 地球条件において惑星を小型化し, 最下層を静的安定度を負に強制するような基準温度を与えた。
 - 鉛直対流のような水平規模の小さい鉛直流が見られた

*今後の課題

- 小型化実験の結果を詳細に解析する
 - 平均場、波数の時間変化や流線関数などを調べる
 - 静的安定度を変える実験をほかの大きさでも計算する
- 今回と同様の小型化実験を火星でも行う。
 - 鉛直対流が見られるのかどうかを調べる

参考文献

- 松田佳久 [2000], 惑星気象学 p22 - 30
- [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/)
- GFDL Isaac Held's Blog# 65 [2015], “ Small Earth, deep atmosphere, and hypohydrostatic models”
- 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”
- [火星とは | 国立天文台\(NAOJ\)](http://www.naoj.org/)
- [札幌 2018年7・8月の空 | 札幌市青少年科学館 \(slp.or.jp\)](http://www.slp.or.jp/)