

惑星小型化による
鉛直対流を解像した全球大気計算

惑星学専攻 220s403s

市田春菜

惑星小型化による鉛直対流を解像した全球大気計算 目次

1. はじめに
2. 使用したモデル
3. 実験1：大気大循環の熱ロスビー数依存性
4. 実験2：鉛直対流の表現
5. まとめ

はじめに：背景

- 火星大気では、水平スケールが小さい鉛直対流が熱や運動量の主要な輸送過程である
- 鉛直対流は水平スケールが数 km と小さいため、全球大気モデルを用いて鉛直対流を解像しつつ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がある
 - 全球大気の水平方向を高解像度で計算することは、計算負荷が大きい
- 惑星を小型化することにより、格子点の数を固定したまま、格子点間隔を小さくすることができ、水平解像度を上げることができる
- 惑星半径を小さくするだけでは小型化前の惑星と異なる大気循環の構造ができてしまう。

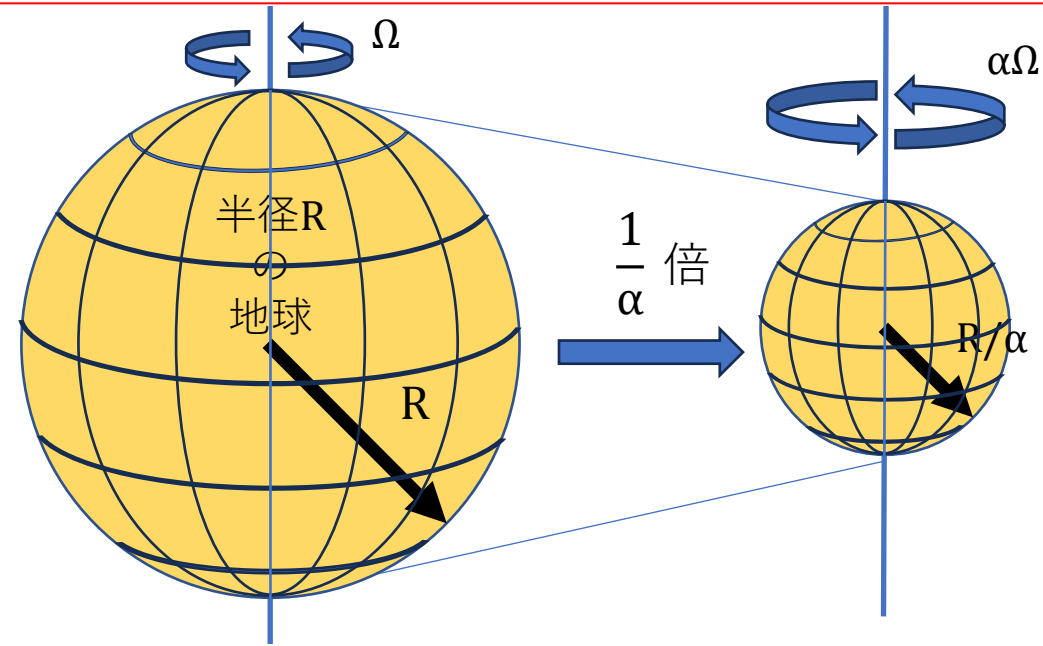
はじめに：惑星小型化の方法

- 惑星半径を小さくし, それに合わせて熱ロスビー数が変わらないよう自転角速度 (Ω) を大きくし, 合わせて放射加熱冷却と摩擦の時定数を調整する.

熱ロスビー数を固定し, 小型化することにより, 計算負荷を小さくして, 1倍惑星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.

$$R_o = \frac{U}{2\Omega a} = \frac{R(\Delta T)_y}{(2\Omega a)^2}$$

U : 風速, Ω : 自転角速度
 a : 惑星半径
 R : 気体定数, $(\Delta T)_y$: 赤道極間の南北温度差



はじめに：先行研究

- Kuang et al. (2005)
 - 熱ロスビー数を地球の値と同じにし, 三次元の雲解像モデル小型化する
- Semane and Bechtold (2015)
 - 熱ロスビー数を地球の値と同じにし, 湿潤大気における全球大気モデルを小型化する実験を行った
- 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いない

はじめに：目的

- 研究の目的

熱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

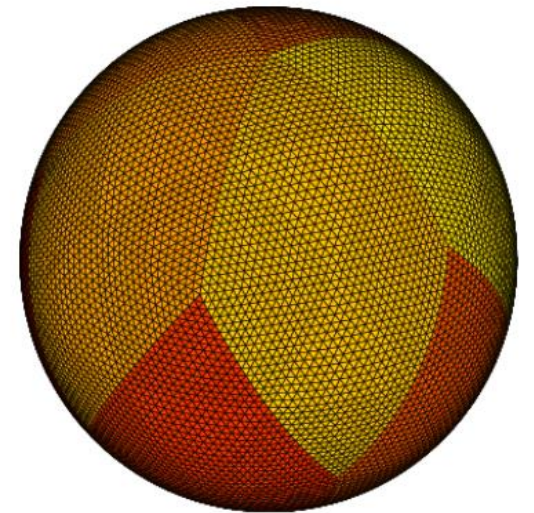
- 惑星半径を小さくしたことによる大気現象への影響を調べる

惑星小型化の有効性を調べるために、
よく知られている地球条件において
惑星小型化実験を行った

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

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

- ・ 熱力学方程式

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

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
 $\hat{\mathbf{k}}$: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：Held and Suarez (1994) の追試を行う

Held and Suarez (1994) :理想化した地球大気対流圏の大規模循環を計算することで, 大気モデルの力学コアを評価するための実験を提案

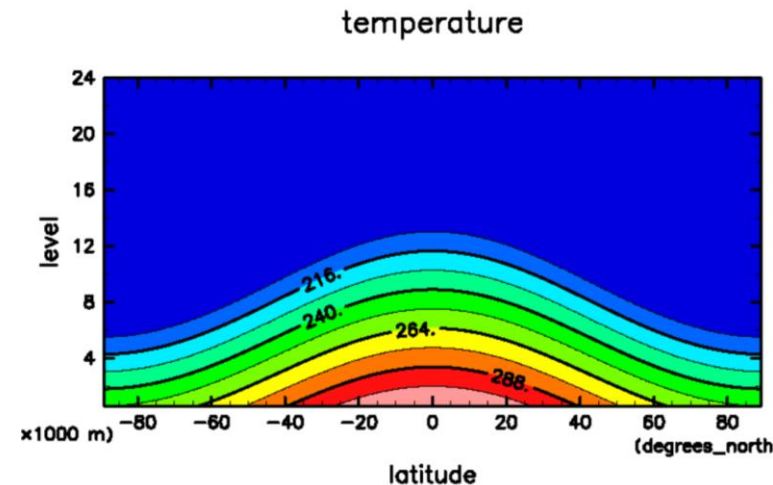
・パラメータ, 格子点間隔

実験	半径	自転角速度	摩擦の時定数	加熱の時定数 1	加熱の時定数 2	熱ロスビー数	水平格子点間隔
	$R (\times 10^6 \text{ m})$	$\Omega (\times 10^{-5} \text{ 1/s})$	$k_f (\times 10^{-5} \text{ 1/s})$	$k_a (\times 10^{-5} \text{ 1/s})$	$k_s (\times 10^{-5} \text{ 1/s})$	Ro_T	$d \text{ (km)}$
1 倍	6.37122	7.292	1.6	0.029	0.29	0.02	223

実験条件

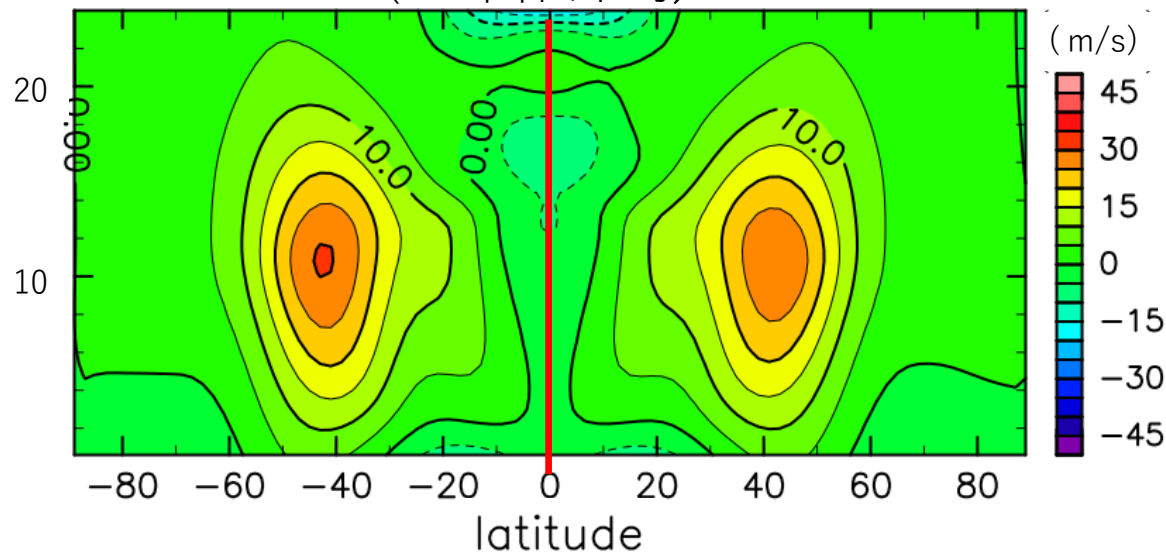
- ・放射過程：ニュートン冷却
- ・外力：レイリー摩擦
- ・鉛直方向の格子点間隔：600 m
- ・湿潤過程, 地表面過程：なし
- ・初期条件：放射平衡温度場, 静止大気
- ・積分時間：惑星が 750 回転する時間
(※350回転平均する)

放射平衡温度場

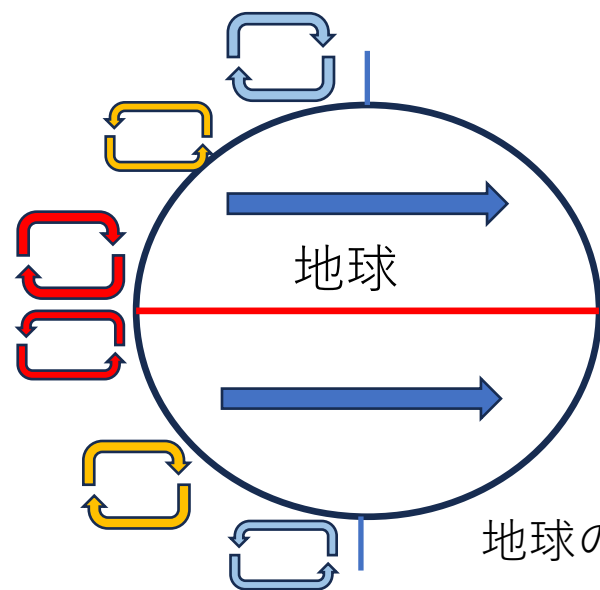
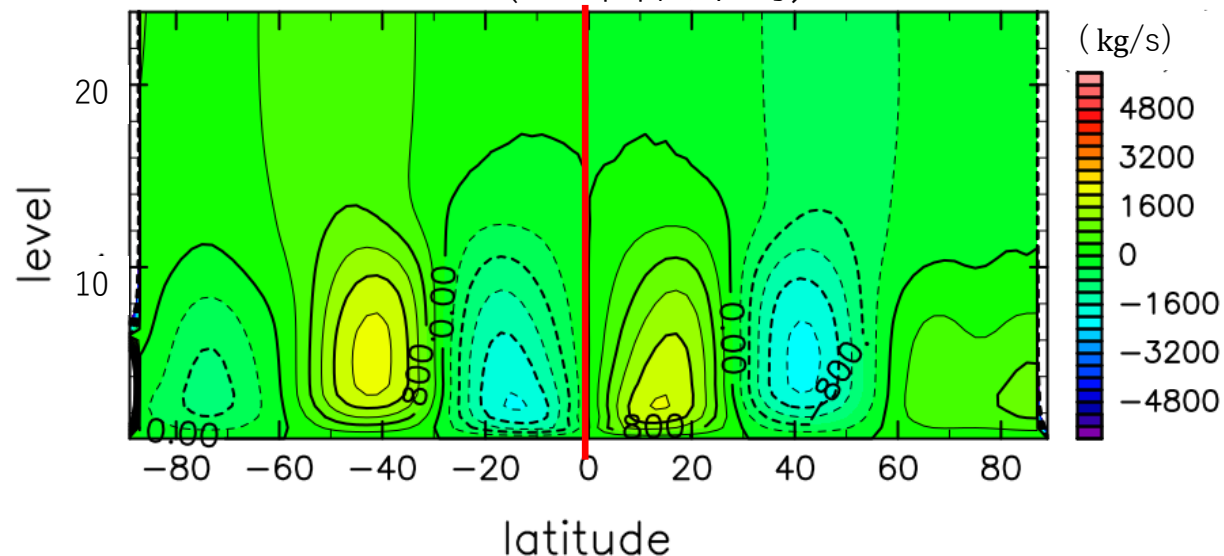


実験 1：Held and Suarez 実験 (1倍実験)

($\times 10^3$ m) (a) 東西風の東西平均子午面分布
(350回転平均)



($\times 10^3$ m) (b) 質量流線関数の東西平均子午面分布
(350回転平均)



地球の大気循環のイメージ図

(a)東西風：両半球 40 度高度 10 km 付近に西風の極大値が発生→偏西風(西風ジェット)

(b)質量流線関数：南北循環が両半球に3つずつ発生→ハドレー循環, フェレル循環, 極循環

実験1：惑星小型化実験

熱ロスビー数を固定する/しない場合の実験条件

大規模な大気循環がどのように変化するか調べる

- ・パラメータ, 格子点間隔
 - ・熱ロスビー数を固定しない場合

実験	半径	自転角速度	摩擦の時定数	加熱の時定数 1	加熱の時定数 2	熱ロスビー数	水平格子点間隔
	$R (\times 10^6 \text{ m})$	$\Omega (\times 10^{-5} \text{ m/s})$	$k_f (\times 10^{-5} \text{ m/s})$	$k_a (\times 10^{-5} \text{ m/s})$	$k_s (\times 10^{-5} \text{ m/s})$	Ro_T	$d \text{ (km)}$
1 倍	6.37122	7.292	1.6	0.029	0.29	0.02	223
1/32 倍	0.19910					20.38	7

- ・熱ロスビー数を固定した場合

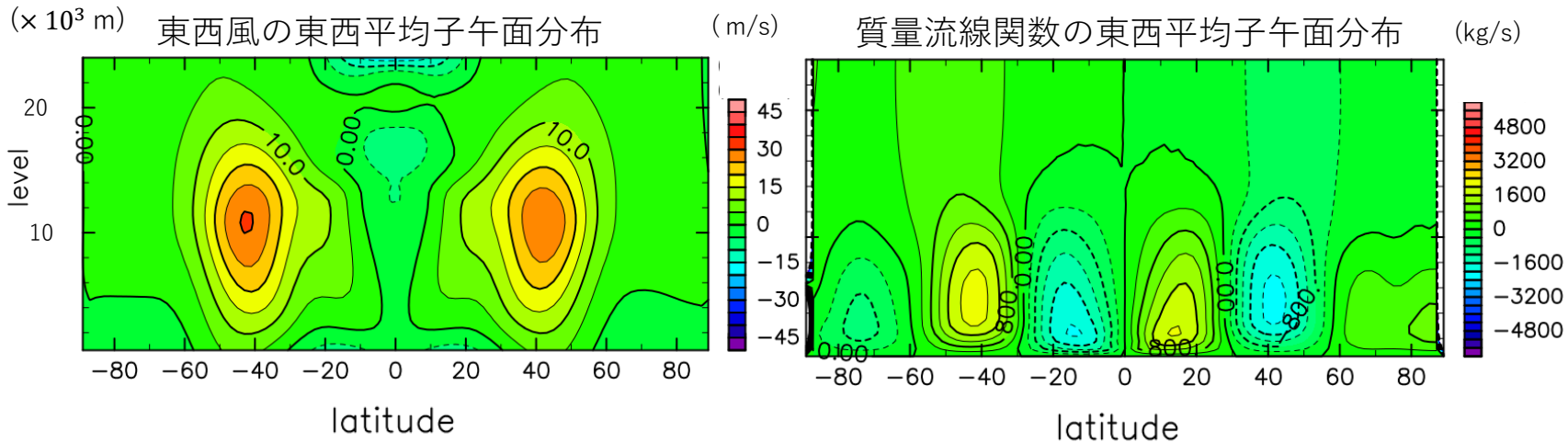
実験	半径	自転角速度	摩擦の時定数	加熱の時定数 1	加熱の時定数 2	熱ロスビー数	水平格子点間隔
	$R (\times 10^6 \text{ m})$	$\Omega (\times 10^{-5} \text{ m/s})$	$k_f (\times 10^{-5} \text{ m/s})$	$k_a (\times 10^{-5} \text{ m/s})$	$k_s (\times 10^{-5} \text{ m/s})$	Ro_T	$d \text{ (km)}$
1 倍	6.37122	7.292	1.6	0.029	0.29	0.02	223
1/32 倍	0.19910	233.34	51.2	0.928	9.28		7

熱強制, 外力, 湿潤過程, 地表面過程, 初期条件, 鉛直方向の格子点間隔はすべて 1 倍実験と同じ.

積分時間：各条件で惑星が 750 回転する時間

結果 1 熱ロスビー数を固定しない場合(350回転平均)

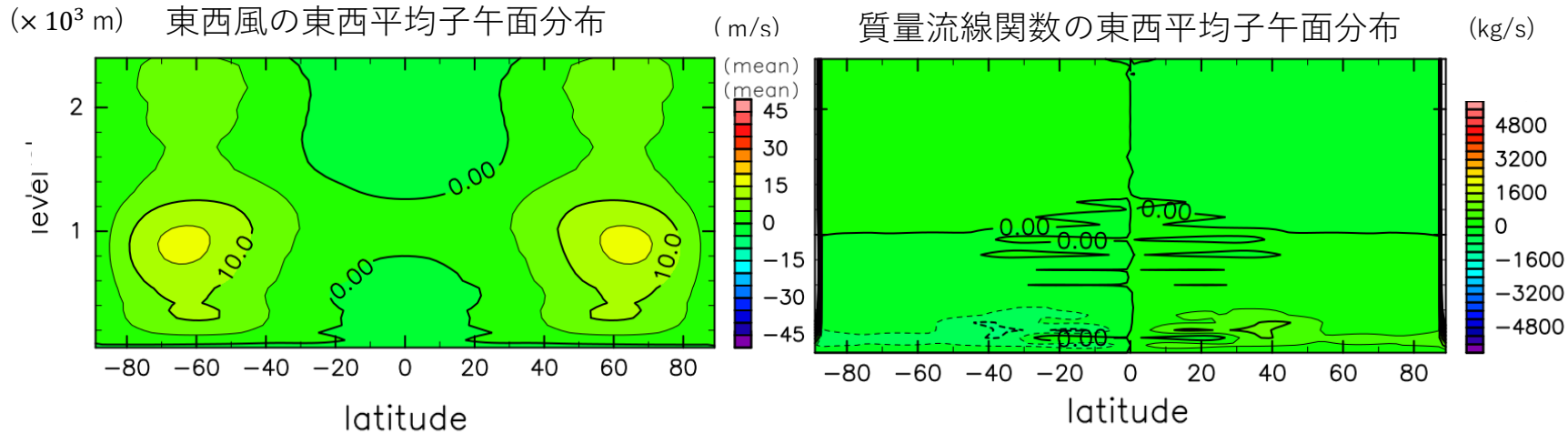
(a) 1 倍実験 (熱ロスビー数 : 0.02)



東西風分布

- ・西風ジェットが極側に移動し、西風の極大値の風速が遅くなった。

(b) 1/32 倍実験(熱ロスビー数 : 20.38)



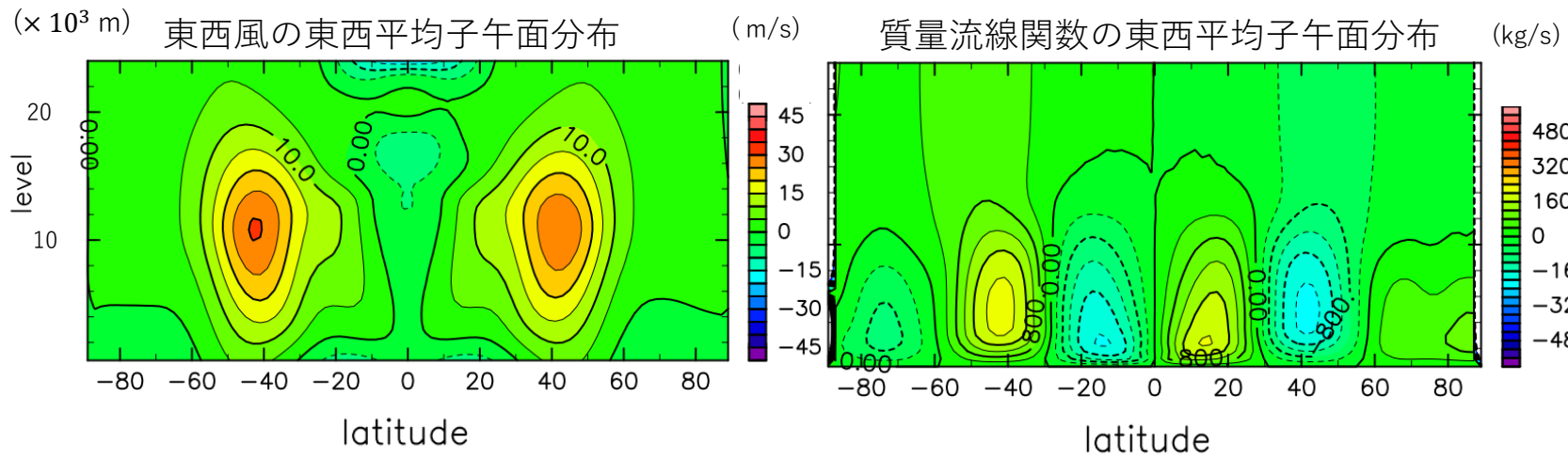
質量流線関数

- ・南北循環が両半球に1つずつになった

熱ロスビー数を固定しない小型化惑星では、1 倍実験と大きく異なる大規模な大気現象が発生する

結果 1 熱ロスビー数を固定した場合(350回転平均)

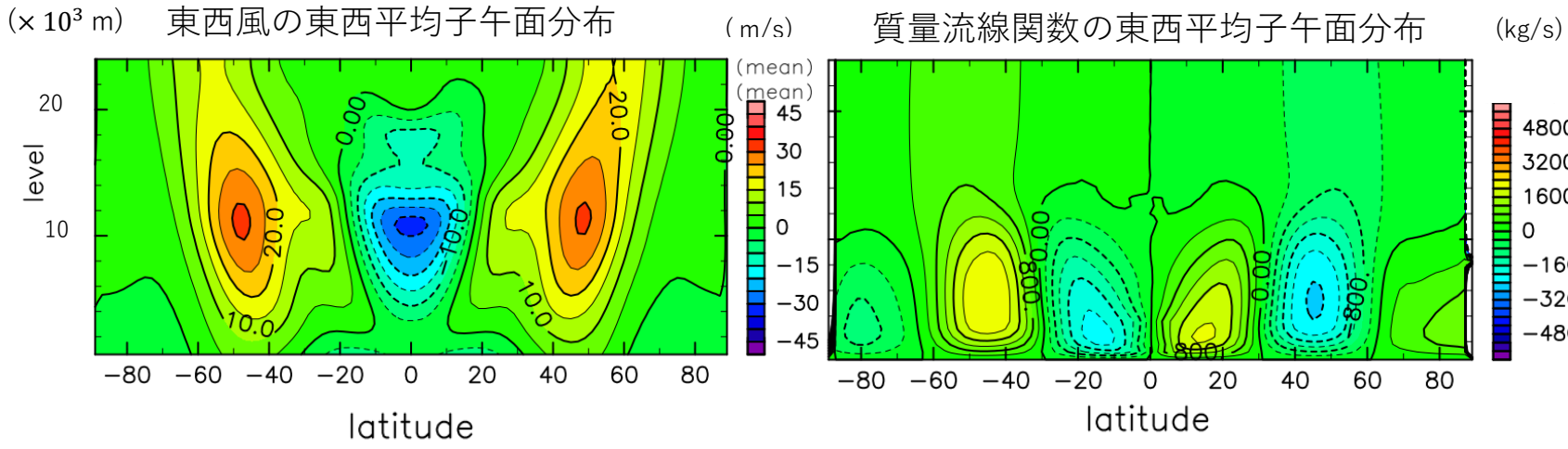
(a) a, Ω 実験 (熱ロスビー数 : 0.02)



東西風分布

- ・半径を小さくしても、両半球緯度約 20 度 - 60 度に西風ジェットが発生
- ・1/32 倍惑星の両半球において西風の強い領域が高度 24 km 付近まで伸びた

(b) a/32, 32Ω 実験 (熱ロスビー数 : 0.02)



質量流線関数

- ・半径を小さくしても 3 つの南北循環が発生
- ・半径が小さくなると、ハドレー循環の上部が極側に傾いた

熱ロスビー数を固定し惑星半径を小さくした計算では小型化前の大規模循環の構造や分布に似た大気現象を表現できる

実験2: 小型化した惑星の鉛直対流

- モデルの最下層を対流不安定に強制する.

・パラメータ, 格子点間隔

実験	半径	自転角速度	摩擦の時定数	加熱の時定数 1	加熱の時定数 2	最下層の放射平衡温度	熱ロスビー数	水平格子点間隔
	$R (\times 10^6 \text{ m})$	$\Omega (\times 10^{-5} \text{ m/s})$	$k_f (\times 10^{-5} \text{ m/s})$	$k_a (\times 10^{-5} \text{ m/s})$	$k_s (\times 10^{-5} \text{ m/s})$	$T_{eq} \text{ (K)}$	Ro_T	$d \text{ (km)}$
1 倍	6.37122	7.292	1.6	0.029	0.29	$T_{eq} + 10$	0.02	223
1/32 倍	0.19910	233.34	51.2	0.928	9.28	$T_{eq} + 10$		7

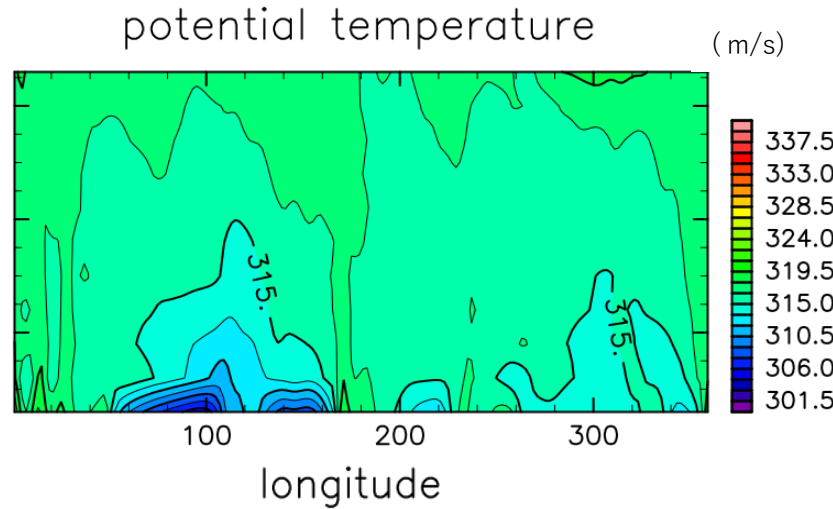
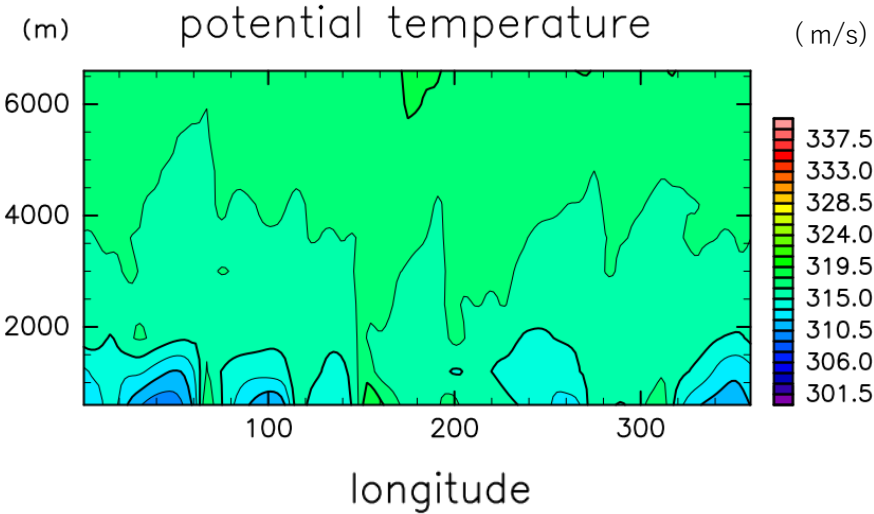
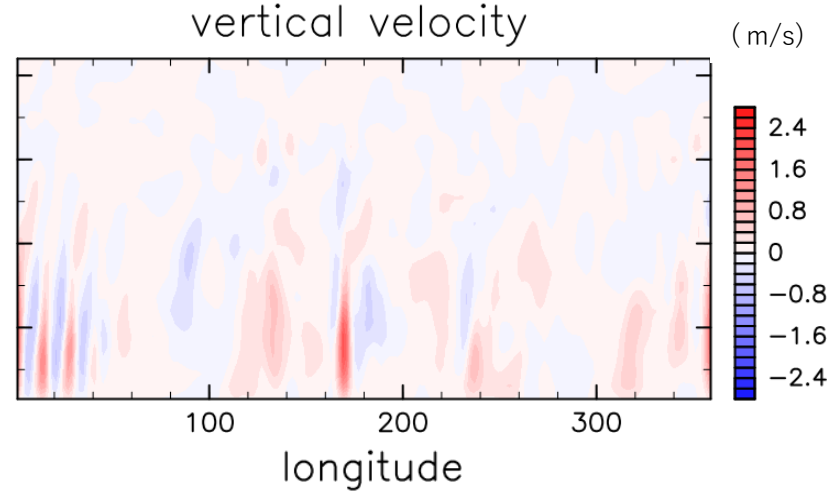
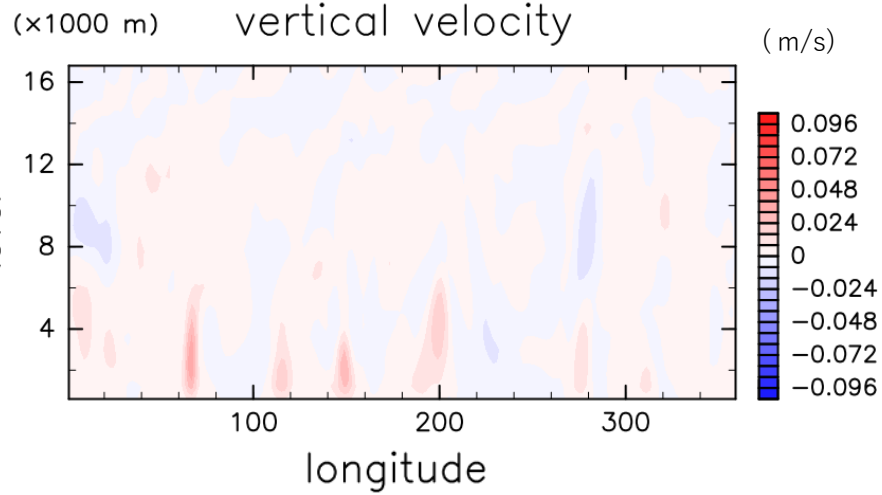
実験設定

外力, 湿潤過程, 地表面過程, 初期条件, 鉛直方向の格子点間隔, 積分時間はすべて 1 倍実験と同じ.

結果 2 赤道における鉛直風と温位分布(750回転時)

(a) 1 倍実験 (熱ロスビー数 : 0.02)

(b) 1 / 32 倍実験 (熱ロスビー数 : 0.02)



・どの半径においても、最下層付近の温位が高い場所で経度10度ほどの上昇流, 下降流が発生

・半径が1/32倍惑星において、水平スケール約30 kmの強い鉛直流が発生 → 鉛直対流ではないか

・半径が変化すると、鉛直風の風速が強くなった

小型化した惑星において、鉛直対流を表現することができた

まとめ

- 惑星半径を小型化し, 小型化前の惑星の大気現象が小型化惑星においても表現できるのか, また小型化惑星で鉛直対流が表現できるのかを調べた
 - ▶ 熱ロスビー数を固定することにより, 小型化した惑星において, 小型化前の大気現象の構造や分布に似た大規模循環が発生した
 - ▶ 1/32 倍の小型化惑星では最下層付近で温位が高い地表面付近の大気で水平スケール約 30 km の上昇流と下降流が発生した
 - 鉛直対流が発生したと考えられる
- 小型化前の東西風分布とは異なる赤道上の東風や風速分布のずれ, 鉛直風が強くなったことは大気のアスペクト比が変わったことが原因と考えられる