

# 全球気候モデルの問題点とそれらに対する 改善策の提案

GFDL Isaac Held's Blog

# 65 'Small Earth, deep atmosphere, and hypohydrostatic models'の紹介

神戸大学大学院惑星学専攻流体地球物理学分野 M1 市田春菜

# 目次

---

- 1 イントロ
- 2 全球気候モデルの改善策
  - 2.1 グリッドに高分解のモデルを埋め込む
  - 2.2 地球を小さくする
    - 1 半径
    - 2 角速度
    - 3 摩擦、放射
  - 2.3 深い大気
- 3 地球を小さくした大気を計算してみる
- 4 まとめと今後

# 1, はじめに

## 紹介するブログ

- GFDL Isaac Held's Blog

‘# 65 Small Earth, deep atmosphere, and hypohydrostatic models’

- 全球気候モデルの問題点とそれらの改善方法の提案をしている

[65. Small Earth, deep atmosphere, and hypohydrostatic models – Geophysical Fluid Dynamics Laboratory \(noaa.gov\)](#)

# 1, はじめに

- ・大気モデルの特徴

赤道域の小さな対流性の渦から傾圧不安定まで、水平スケールの現象は規模が大きく異なっていること。

惑星全球の大気現象を計算することに不都合が生じる

大気の現象を詳細まで解像するためには、全球すべてを細かいグリッドで覆って、高分解能モデルにすればよい

→計算負荷が高くなり、挙動も遅くなるため実用的でない

# 1, はじめに

スケールの大きい現象、小さい現象どちらも解像し、計算負荷を減らすことのできるモデルを見つけたい

- 1 大気モデルのグリッドに高分解のモデルを埋め込む
- 2 地球を小さくする
- 3 深い大気を作る

## 2, 全球気候モデルの改善策

### 2.1 グリッドに高分解能モデルを埋め込む

全球気候モデルの各グリッドに二次元の高分解能モデルを埋め込む

#### 利点

- ・全球を細かいグリッドで覆うより、少ないグリッド数で解像できる

#### 問題点

- ・どうやって最適な小さい高分解能モデルをつくるか
- ・三次元モデルと二次元のグリッド間の相互作用の考慮
- ・一般的な全球気候モデルより計算負荷が高い

## 2, 全球気候モデルの改善策

### 2.2地球を小さくする

#### 1. 地球半径を小さくしてみる

惑星半径を地球と同じにした大気モデルでは、地球と同様の大気現象を高解像度で計算することは大変。

解決するために、地球の大きさを小さくする、つまり半径を小さくしてみる。

例えば、モデルの惑星半径を地球の $1/10$ にし、水平グリッド間隔を変えずにそのまままで全球を覆うと、グリッドの数は元の大気モデルに比べて $1/100$ になる。

つまり、惑星の半径を小さくし、グリッドの数を減らすことで計算負荷を減らすことができる

・半径のみを小さくしただけのモデルでは、元の地球と異なる現象が起きてしまう  
→半径が小さくなったことに合わせて、角速度も変える必要がある

## 2, 全球気候モデルの改善策

### 2.2地球を小さくする

#### 2 自転角速度を変える

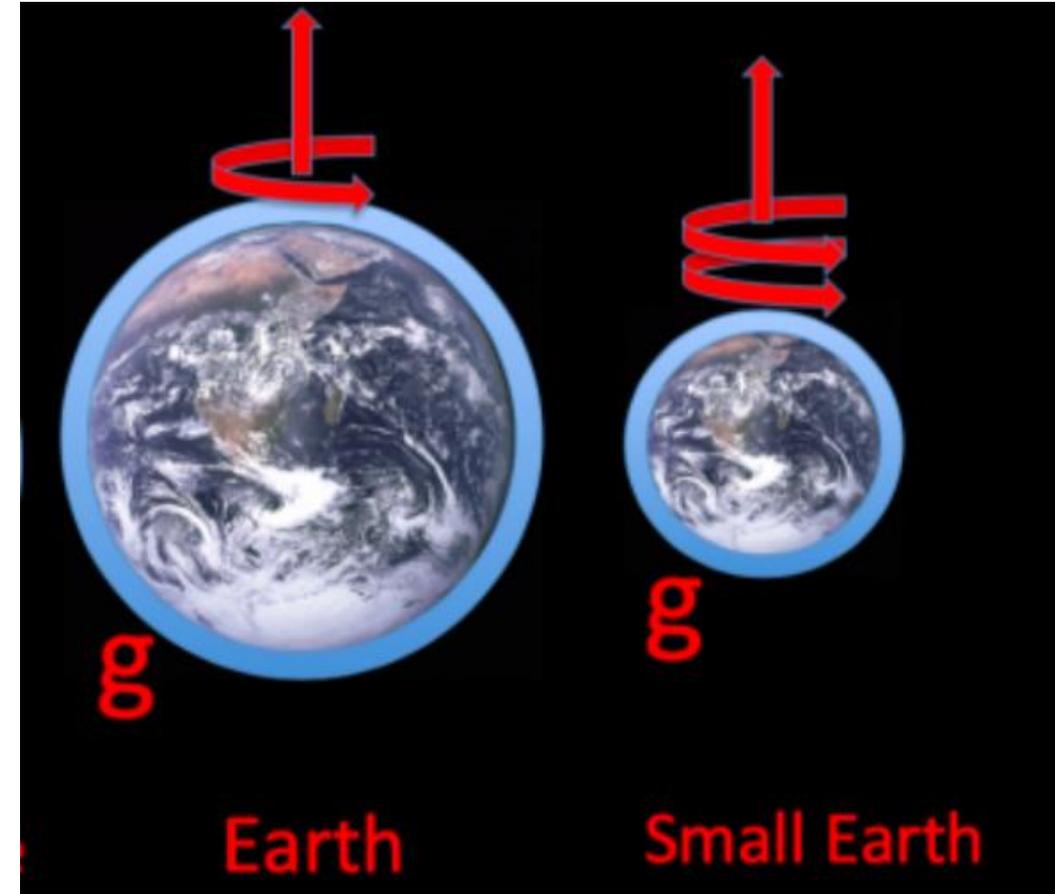
- ・半径を $1/\alpha$ 倍、自転角速度を $\alpha$ 倍する  
→角速度と半径の積が一定になる

→ 惑星半径  $a$ , 自転角速度  $\Omega$  としたときのある緯度  $\theta$  における水平方向の風速は

$$u = \frac{\Omega a \sin^2 \theta}{\cos \theta}$$

となる。

半径を $1/\alpha$ 倍、自転角速度を $\alpha$ 倍しても水平方向の風速が変化しない。



Isaac Held's Blog #65より引用

## 2, 全球気候モデルの改善策

### 2.2地球を小さくする

#### 2 自転角速度を変える

惑星半径  $a$ , 自転角速度  $\Omega$  とし、赤道上で静止した空気の輪が、角運動量を保ち、緯度  $\theta$  まで移動したとする。

赤道上、緯度  $\theta$  でのそれぞれの角運動量は

$$L_{\theta=0} = \Omega a^2$$

$$L_{\theta} = (u + \Omega a \cos \theta) a \cos \theta$$

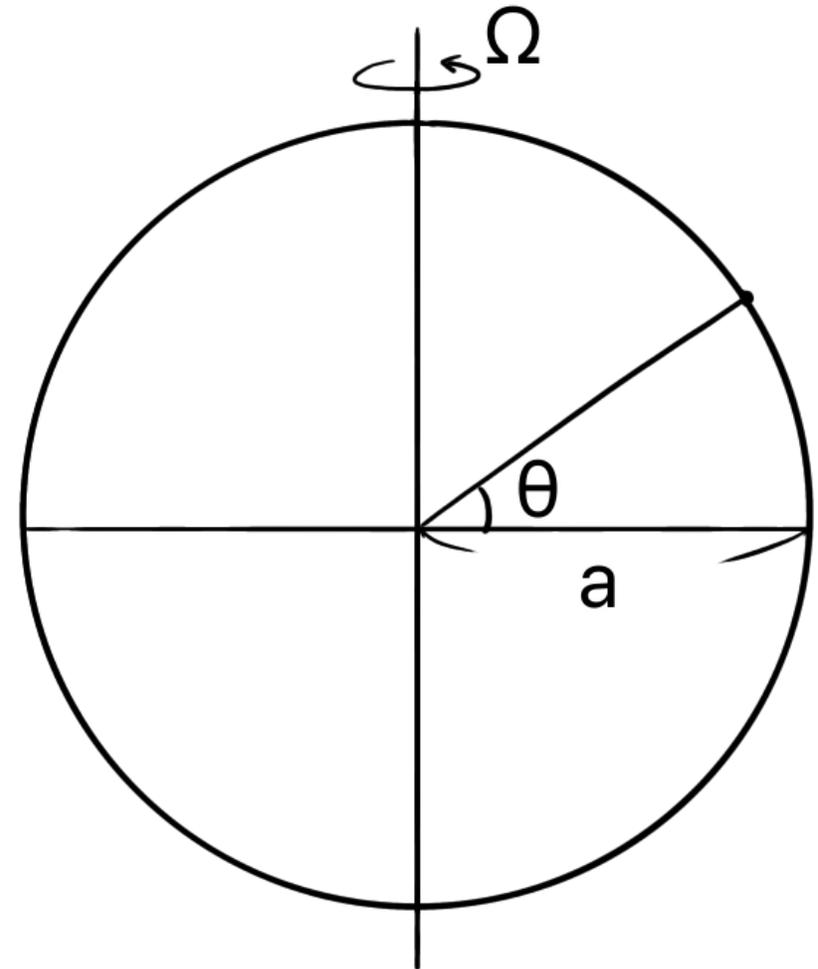
( $u$ : 緯度  $\theta$  での水平方向の風速)

角運動量は保存するため

$$\Omega a^2 = (u + \Omega a \cos \theta) a \cos \theta$$

よって、この地点での輪の速度は

$$u = \frac{\Omega a \sin^2 \theta}{\cos \theta}$$



## 2, 全球気候モデルの改善策

### 2.1地球を小さくする

#### 2 自転角速度を変える

半径を $1/\alpha$ 倍、自転角速度を $\alpha$ 倍すると、惑星のある緯度における東西の風速は、角速度と半径を変えても同じになる

角速度を $\alpha$ 倍すると、傾圧不安定の長さスケールは、元の地球のスケールより $1/\alpha$ 倍に小さくなるが、惑星の半径に対する傾圧不安定の長さスケールの比率はほとんど変わらないため、元の大きさの地球の大気と近い、現象が発生する。

## 2, 全球気候モデルの改善策

### 2.2地球を小さくする

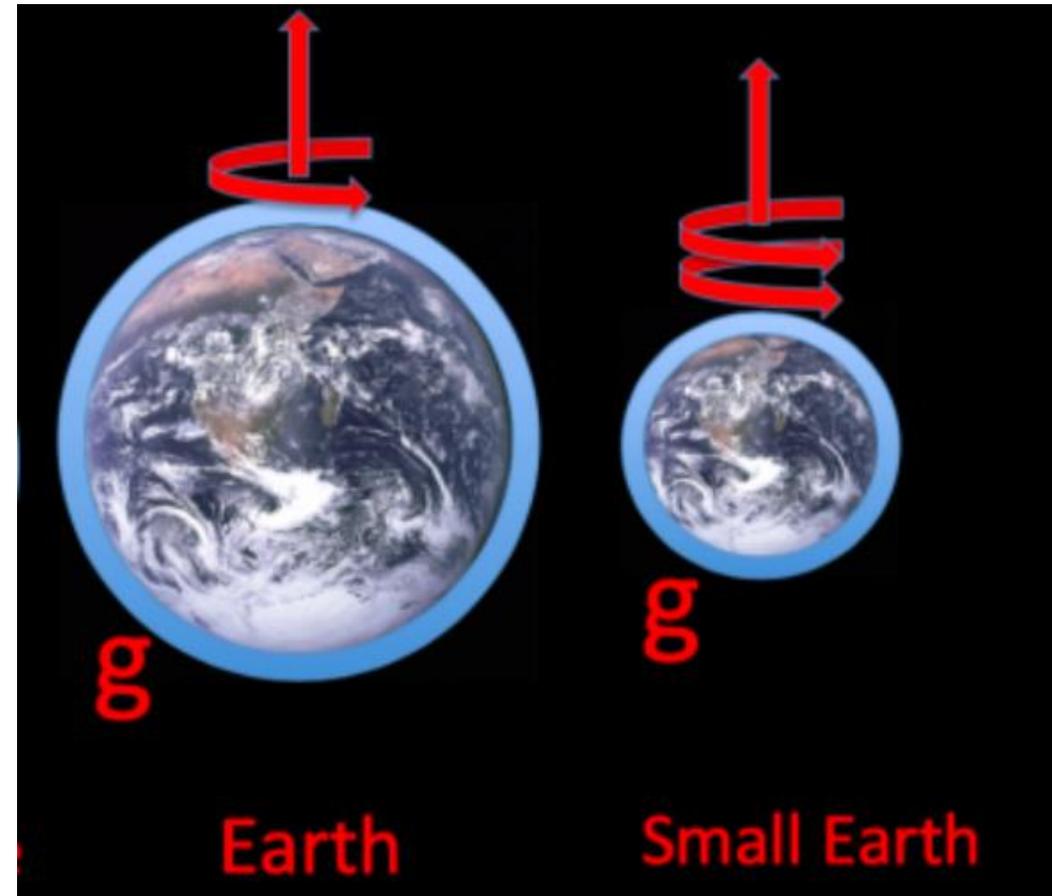
#### 2 自転角速度を変える

傾圧不安定により発生する渦スケールの惑星半径に対する比と風速が元の地球の大気モデルと同じである

惑星半径と風速の比の、力学的な時間スケールが変化する

惑星半径や自転角速度を変えても、速度が固定をされているため、元の大きさの地球モデルから地表面摩擦と放射が変化しない。

→半径や角速度に合わせて、地表面摩擦と放射も考慮する必要がある



Isaac Held's Blog #65より引用

## 2, 全球気候モデルの改善策

### 2.2地球を小さくする

### 3 摩擦、放射を変える

放射や摩擦は惑星半径、角速度を変化させたことによる時間スケールの影響を受けない。

- ・摩擦と放射の時定数を $1/\alpha$ 倍にする。

惑星半径や角速度、放射、摩擦の変化により、大気のアスペクト比が変化する

→大きなスケールの現象はもともとアスペクト比がとても小さいため、アスペクト比の変化による影響がほとんどないほど小さい

→摩擦や放射を変化させても大きなスケールの現象に影響が少なく、  
計算することができる

## 2, 全球気候モデルの改善策

### 3. 大気を深くする

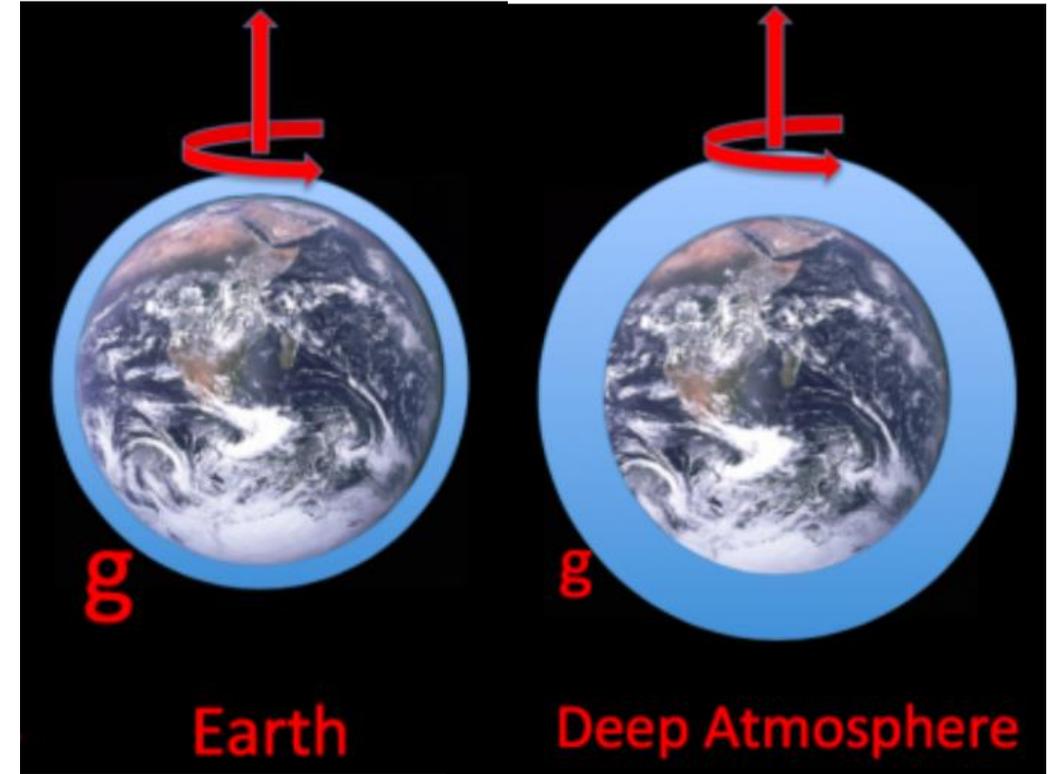
重力加速度を小さくする

→スケールハイトが大きくなり、大気が深くなる。

対流の水平スケールは鉛直方向の広がりにより変化

元の地球で小さいスケールの現象だった対流が、大気を深くすることでより大きなスケールの現象となる。

よって、小さいスケールの現象を計算しやすくなる。



Isaac Held's Blog #65より引用

### 3, 地球を小さくした大気を計算してみる

#### 使用した大気モデル

- SCALE-GM

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面体格子

- 方程式系: 3次元完全圧縮非静力学方程式系

### 3.地球を小さくした大気モデルを計算してみる

- Held Suarez実験 (Held and Suarez [1994])

摩擦と放射を以下の式として定義している。

$$\begin{aligned}\frac{\partial v}{\partial t} &= \dots - k_v(\sigma)v \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= \dots - k_T(\phi, \sigma)[T - T_{eq}(\phi, p)] \\ T_{eq} &= \max\{200K, \left[ 315K - (\Delta T)_y \sin^2 \phi - (\Delta \theta)_z \log \left( \frac{p}{p_0} \right) \cos^2 \phi \right] \left( \frac{p}{p_0} \right)^\kappa \} \\ k_T &= k_a + (k_s - k_a) \max \left( 0, \frac{\sigma - \sigma_b}{1 - \sigma_b} \right) \cos^4 \phi \\ k_v &= k_f \max \left( 0, \frac{\sigma - \sigma_b}{1 - \sigma_b} \right) \\ \sigma_b &= 0.7, k_f = 1 \text{ day}^{-1}, k_a = \frac{1}{40} \text{ day}^{-1}, k_s = \frac{1}{4} \text{ day}^{-1}, (\Delta T)_y = 60K, (\Delta \theta)_z = 10K\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}p_0 &= 1000 \text{ mb}, \kappa = \frac{R}{C_p} = \frac{2}{7}, C_p = 1004 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}, \\ \Omega &= 7.292 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}, g = 9.8 \text{ ms}^{-2}, a_e = 6.371 \times 10^6 \text{ m}\end{aligned}$$

# 4.地球を小さくした大気を解像してみる

## 今回計算した条件



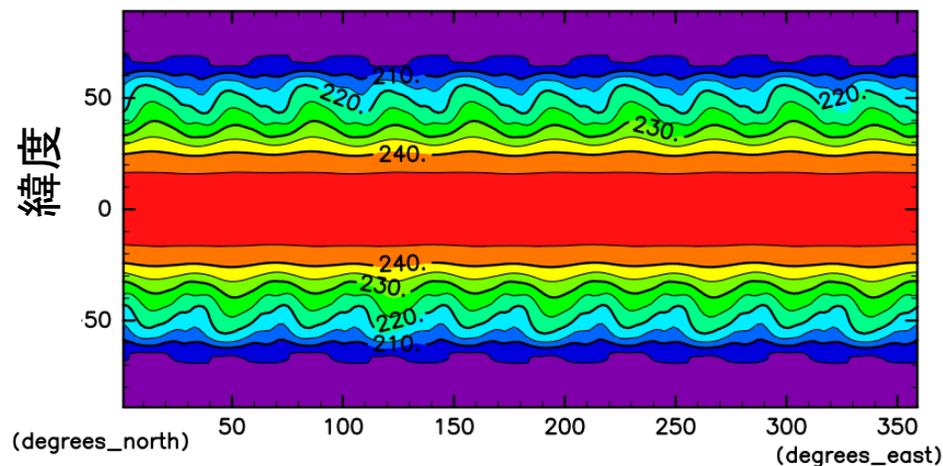
	半径 $r$	角速度 $\Omega$	放射の時定数 $K_t$	摩擦の時定数 $K_v$
Held Surez実験	1	1	1	1
半径のみ1/2倍	0.5	1	1	1
自転角速度のみ2倍	1	2	1	1
放射の時定数のみ2倍	1	1	2	1
半径1/2倍, 自転角速度2倍	0.5	2	1	1
半径1/2倍, 自転角速度2倍, 放射の時定数2倍	0.5	2	2	1
半径1/2倍, 自転角速度2倍, 放射と摩擦の時定数ともに2倍	0.5	2	2	2

# 4.地球を小さくした大気を計算してみる

## Held Suarez実験の結果 高度7800mにおける水平断面(解像度 $dx = 223\text{km}$ )

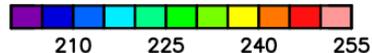
・計算を始めて11日後の気温分布

気温



・波数:10

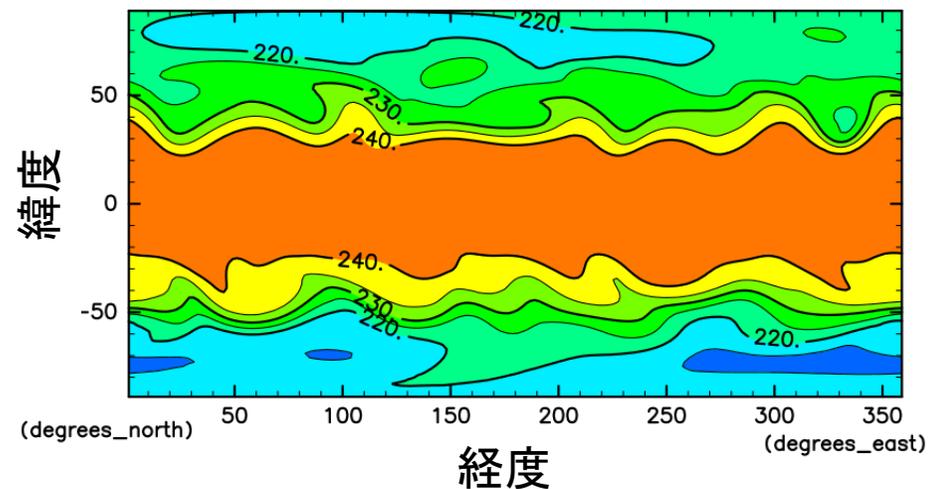
CONTOUR INTERVAL = 5.000E+00



lev=7800 m  
0000-01-11 00:00:00+0000

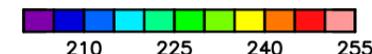
・計算を始めて300日後の気温分布

気温



・波数:5

CONTOUR INTERVAL = 5.000E+00

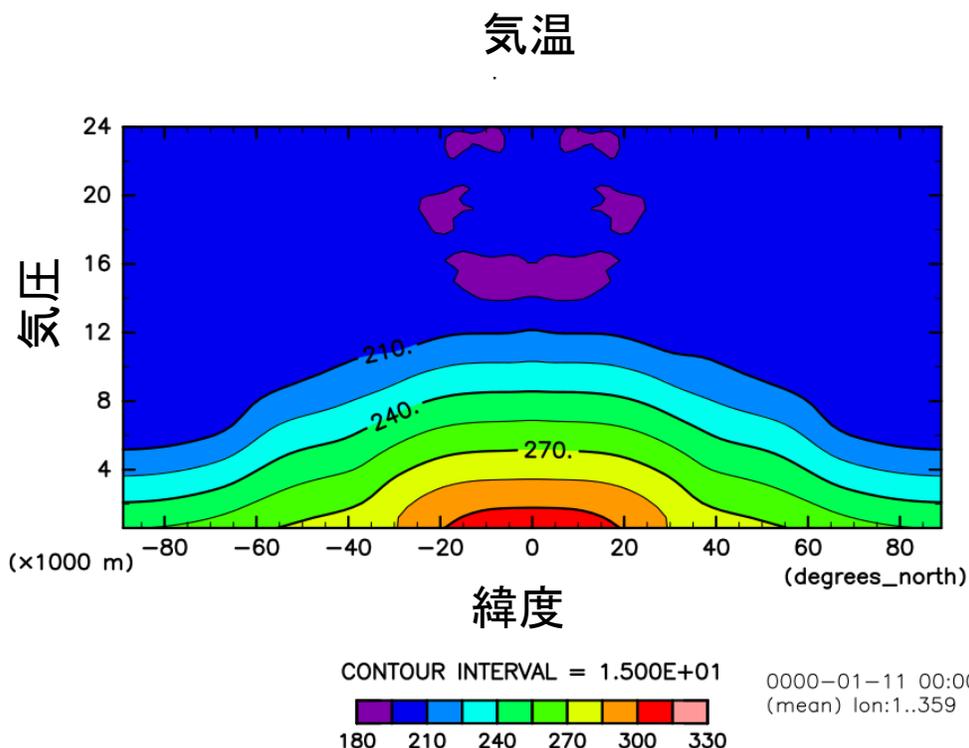


lev=7800 m  
0000-10-27 00:00:00+0000

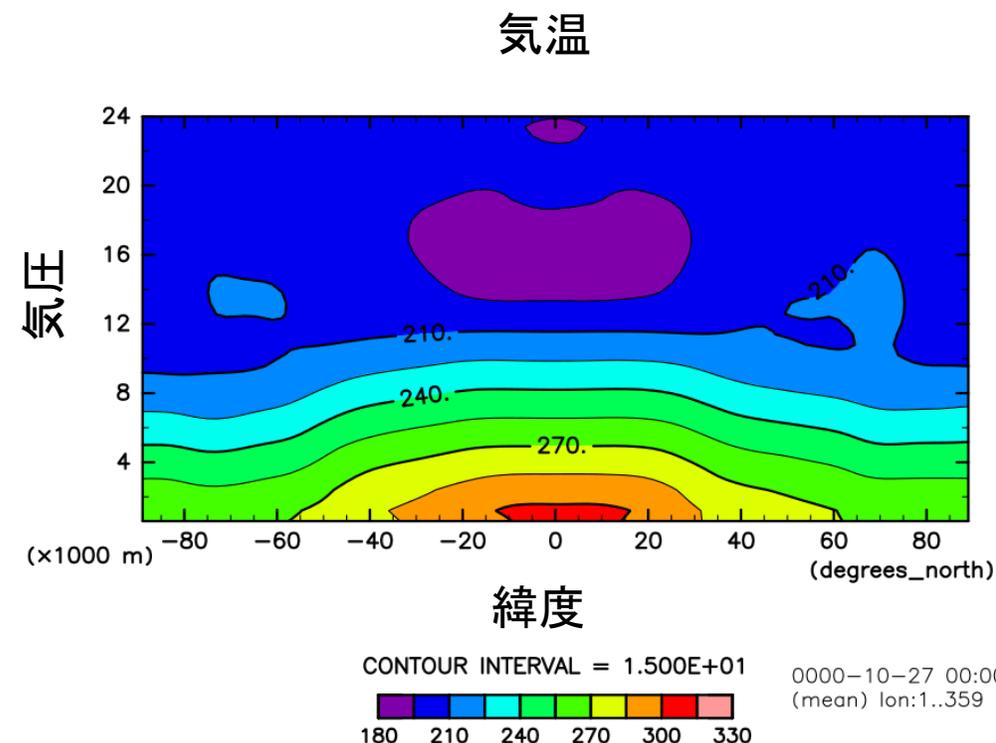
# 4.地球を小さくした大気を計算してみる

## Held Suarez実験の結果 気温の東西平均子午面分布 (解像度 dx = 223km)

・計算を始めて11日後の気温分布



・計算を始めて300日後の気温分布

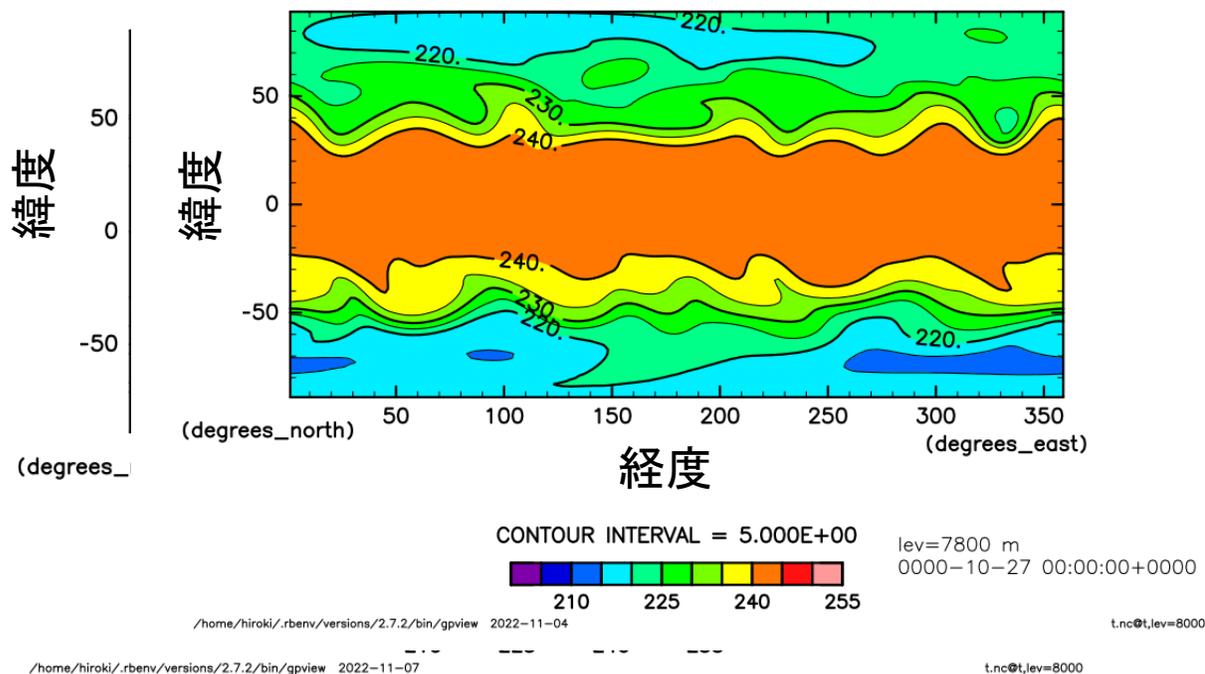


# 4.地球を小さくした大気を計算してみる

## 4.1半径を1/2にする 高度7800mにおける水平断面(解像度 dx = 223km)

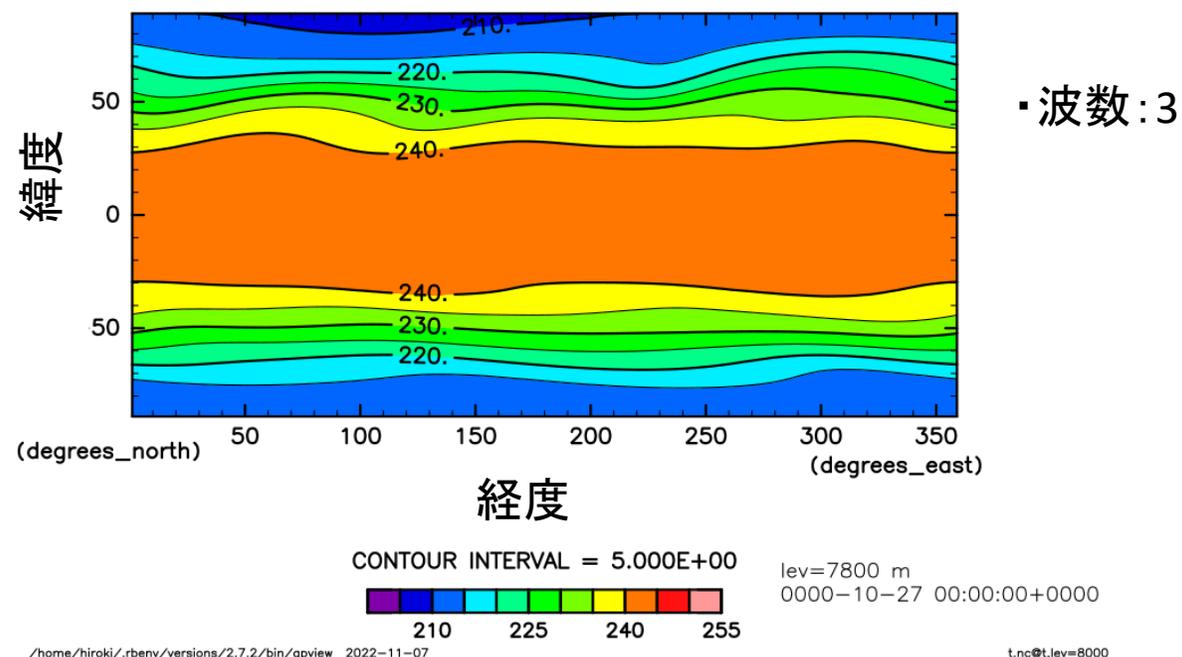
・計算を始める  
・コントロール実験の気温分布

気温



・計算を始めて300日後の気温分布

気温



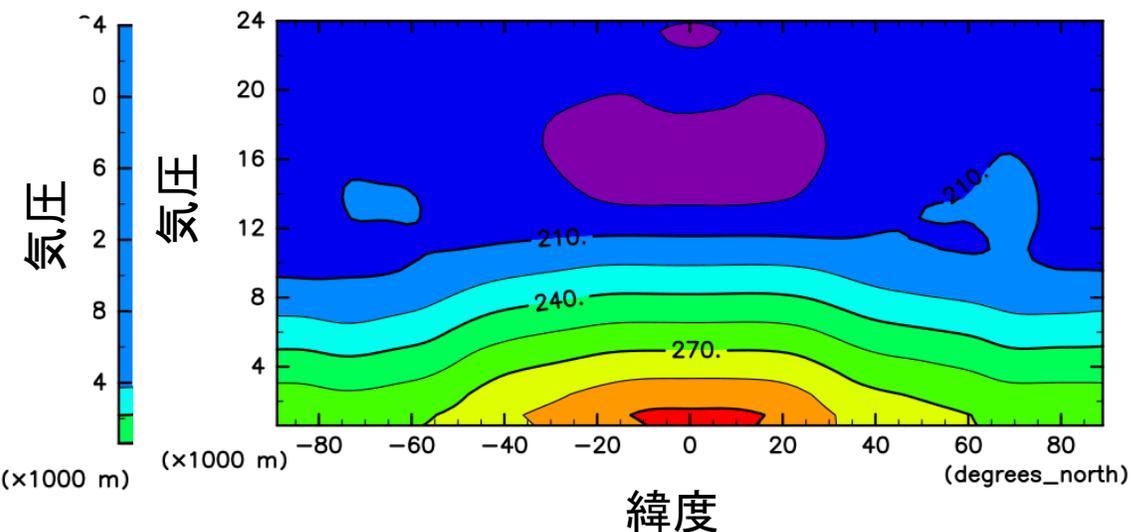
# 4.地球を小さくした大気を計算してみる

## 4.1 半径を1/2にする 気温の東西平均子午面分布 (解像度 $dx = 223\text{km}$ )

・計算を始め

・コントロール実験の気温分布

気温



CONTOUR INTERVAL = 1.500E+01



0000-10-27 00:00:00+0000  
(mean) lon:1..359

/home/hiroki/.rbenv/versions/2.7.2/bin/gpview 2022-11-04

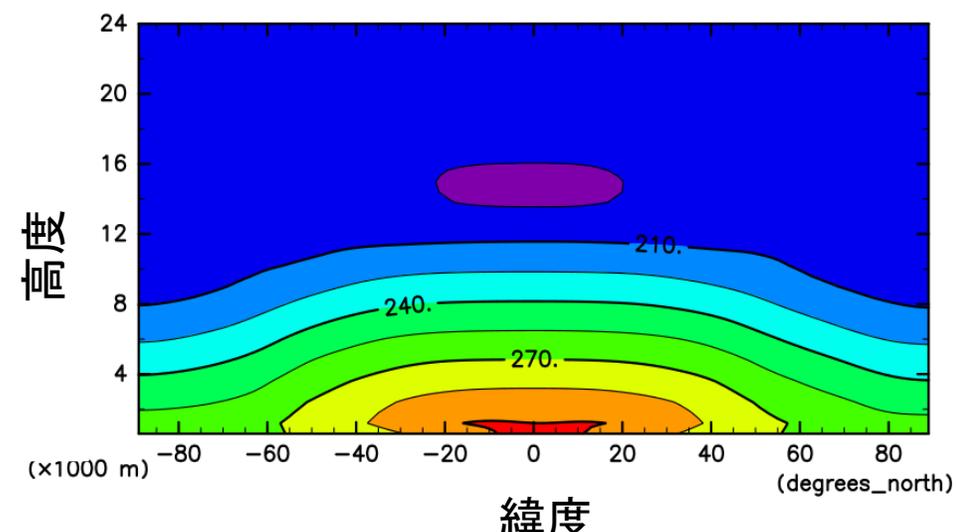
/home/hiroki/.rbenv/versions/2.7.2/bin/gpview 2022-11-06

t.nc@t

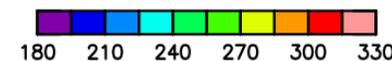
t.nc@t

・計算を始めて300日後の気温分布

気温



CONTOUR INTERVAL = 1.500E+01



0000-10-27 00:00:00+0000  
(mean) lon:1..359

/home/hiroki/.rbenv/versions/2.7.2/bin/gpview 2022-11-06

t.nc@t

# 4.地球を小さくした大気を計算してみる

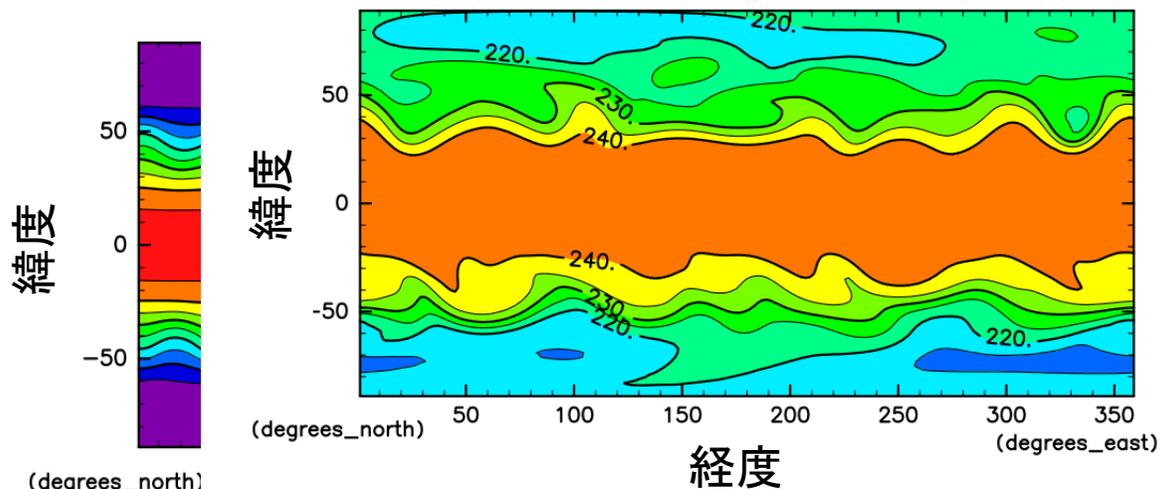
## 4.1半径を1/2倍、角速度2倍

高度7800mにおける水平断面(解像度  $dx = 223\text{km}$ )

・計算を始めて6日

・コントロール実験の気温分布

気温



CONTOUR INTERVAL = 5.000E+00



lev=7800 m  
0000-10-27 00:00:00+0000

t.nc@t,lev=8000

/home/hiroki/.rbenv/versions/2.7.2/bin/gpview 2022-11-04

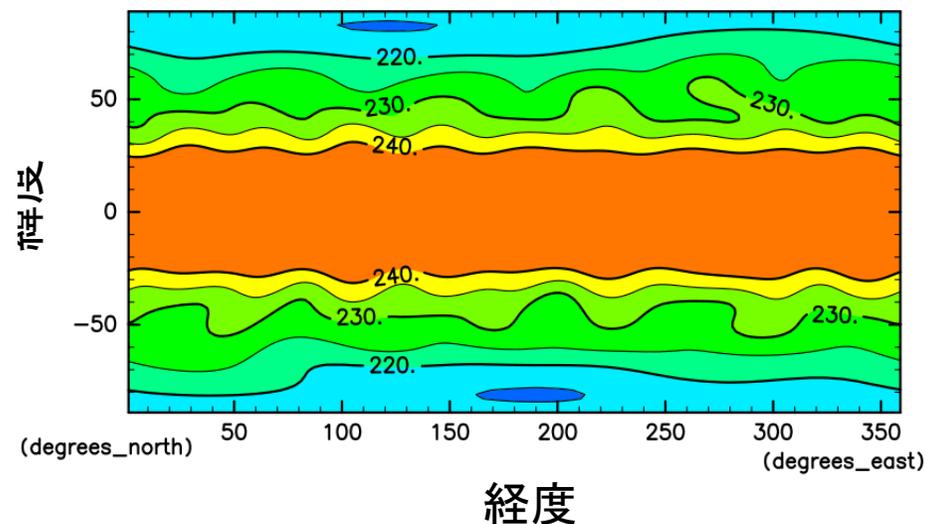
210 225 240 255

/home/hiroki/.rbenv/versions/2.7.2/bin/gpview 2022-11-07

t.nc@t,lev=8000

・計算を始めて300日後の気温分布

気温



CONTOUR INTERVAL = 5.000E+00



lev=7800 m  
0000-10-27 00:00:00+0000

t.nc@t,lev=8000

/home/hiroki/.rbenv/versions/2.7.2/bin/gpview 2022-11-07

210 225 240 255

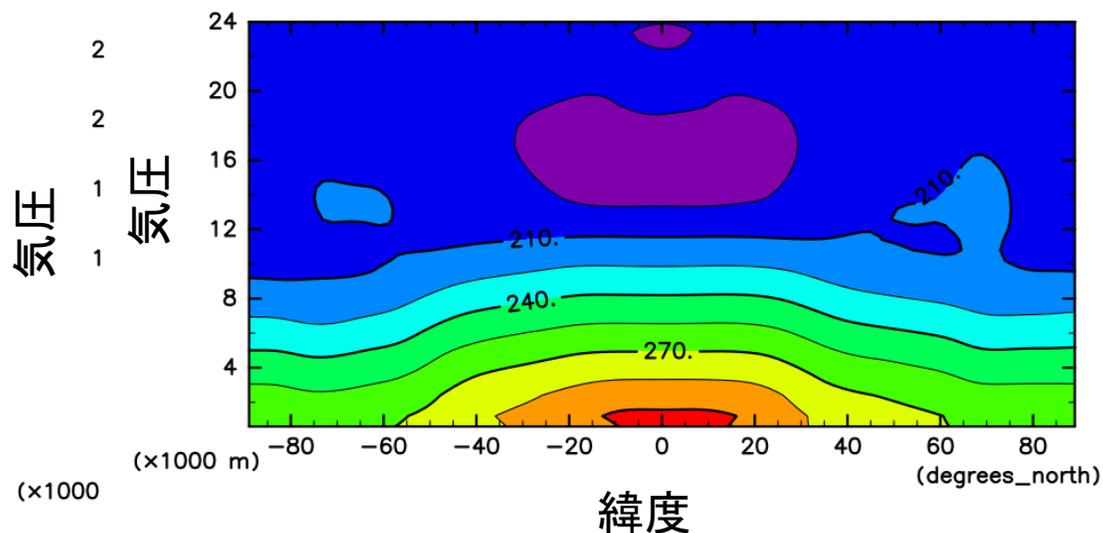
・波数:7

# 4.地球を小さくした大気を計算してみる

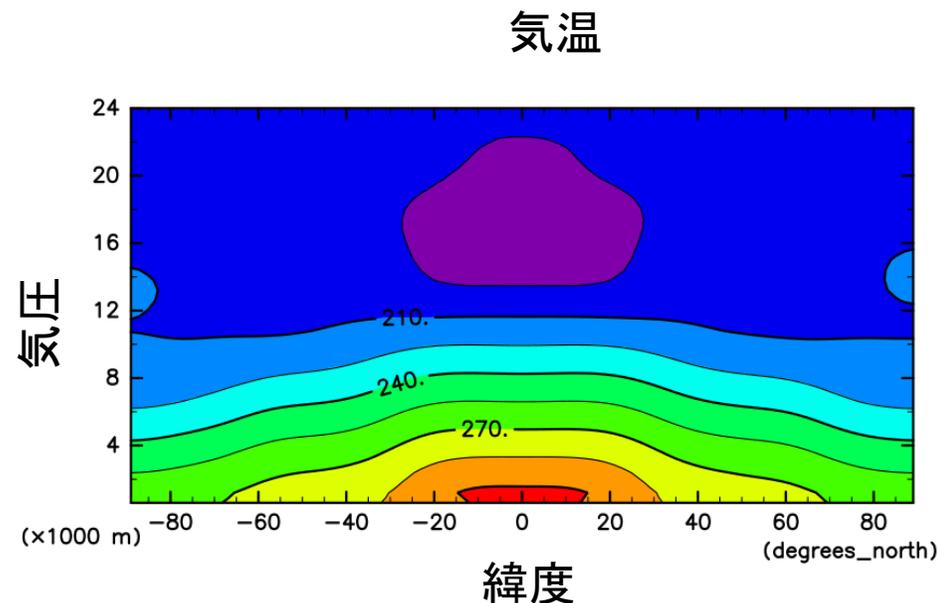
## 4.1半径を1/2倍、角速度2倍

気温の東西平均子午面分布 (解像度 dx = 223km)

・コントロール実験の気温分布  
気温



・計算を始めて300日後の気温分布  
気温



# 4.地球を小さくした大気を計算してみる

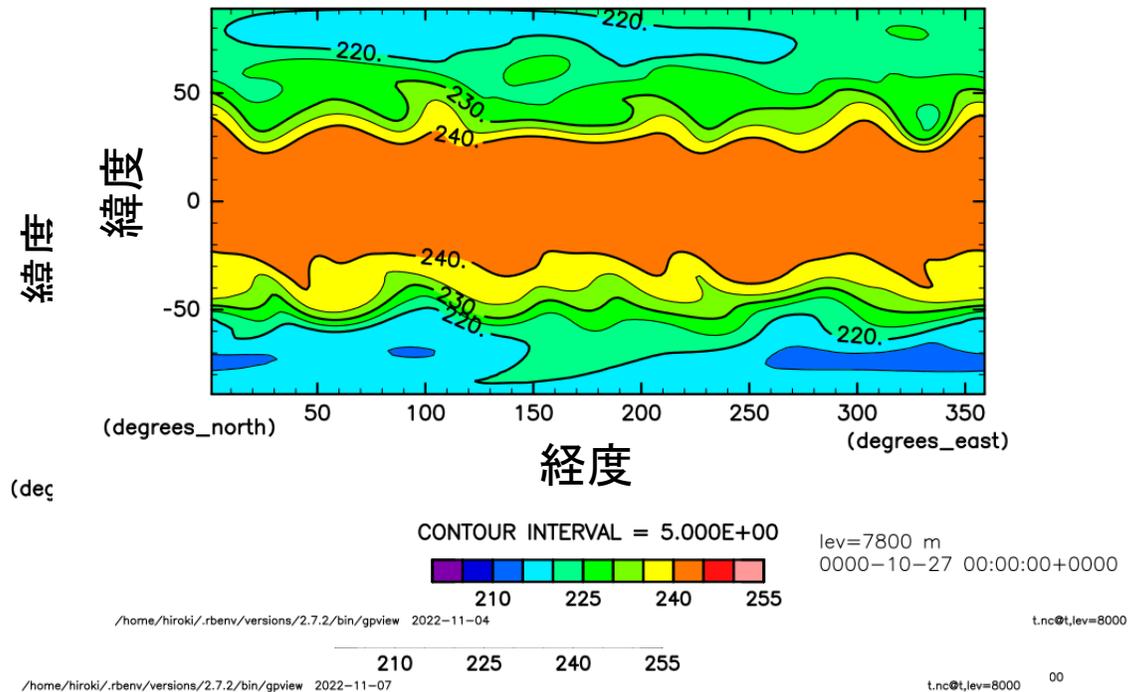
## 4.2半径を1/2倍、角速度2倍、放射の時定数2倍

高度7800mにおける水平断面(解像度 dx = 223km)

・計算前

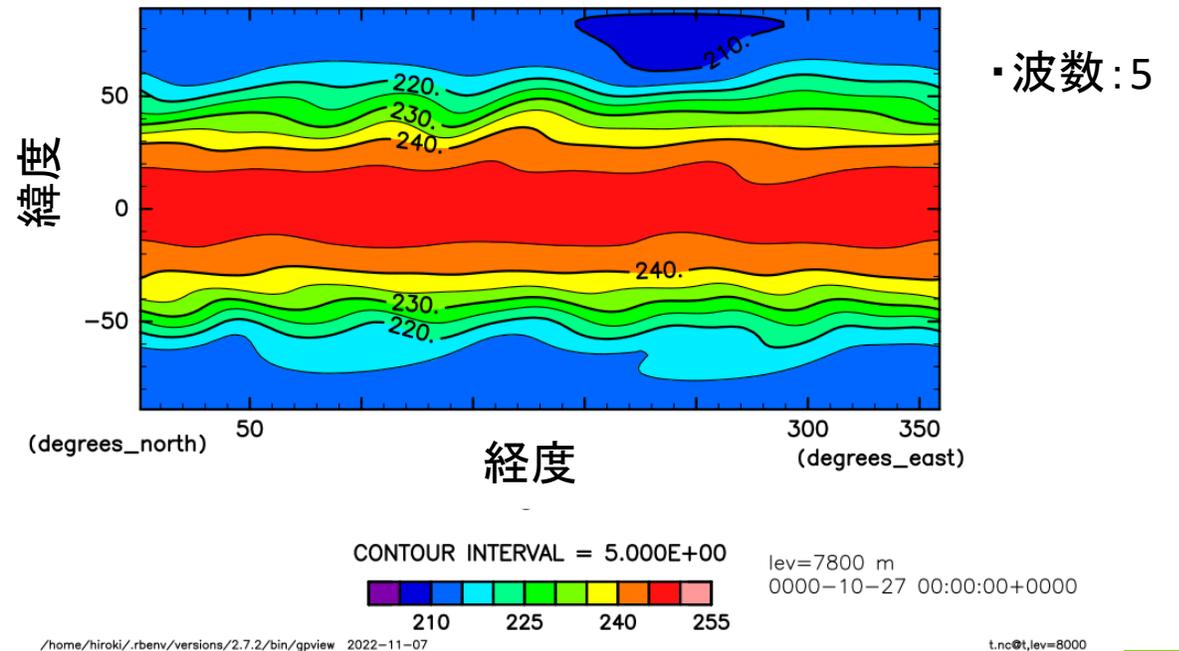
・コントロール実験の気温分布

気温



・計算を始めて300日後の気温分布

気温



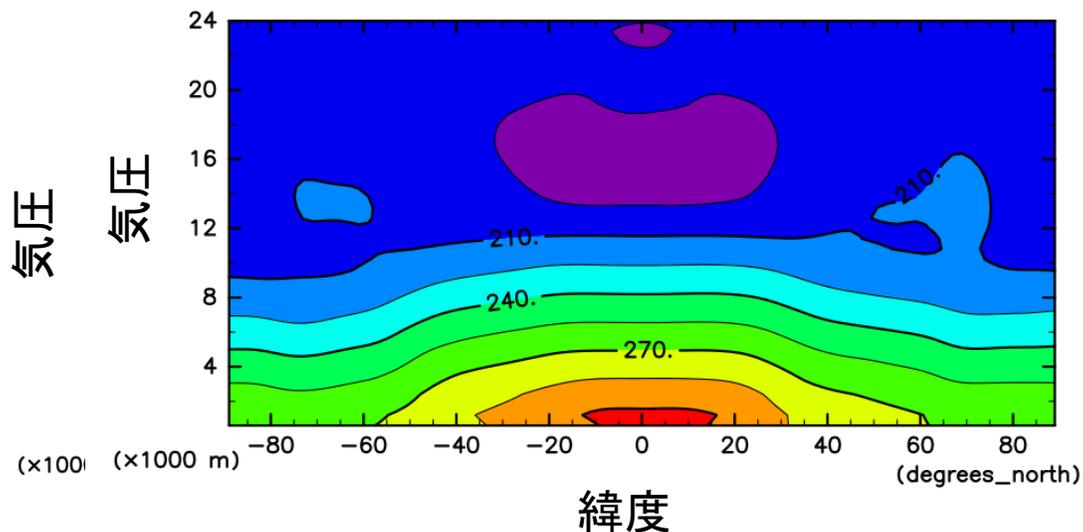
・波数:5

# 4.地球を小さくした大気を計算してみる

## 4.2半径を1/2倍、角速度2倍、放射の時定数2倍

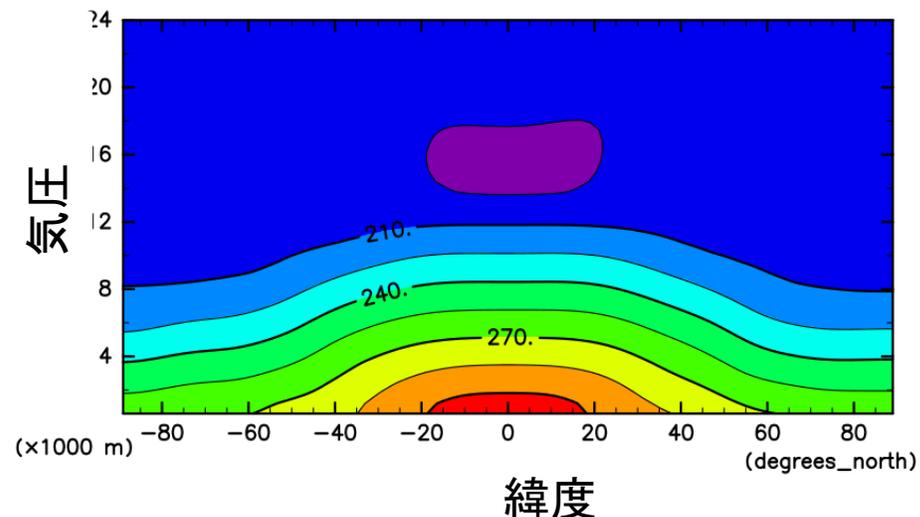
気温の東西平均子午面分布 (解像度 dx = 223km)

・計算  
・コントロール実験の気温分布  
気温



0000-10-27 00:00:00+0000  
(mean) lon:1..359

・計算を始めて300日後の気温分布  
気温



0000-10-27 00:00:00+0000  
(mean) lon:1..359

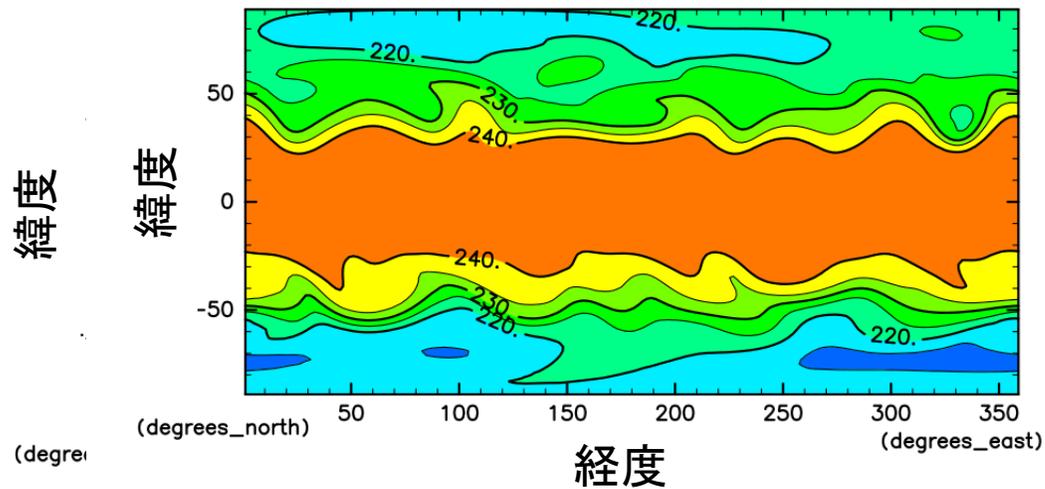
# 4.地球を小さくした大気を計算してみる

## 4.2半径を1/2倍、角速度2倍、放射と摩擦の時定数2倍

高度7800mにおける水平断面(解像度 dx = 223km)

・計算 ・コントロール実験の気温分布

気温



CONTOUR INTERVAL = 5.000E+00  
210 225 240 255

lev=7800 m  
0000-10-27 00:00:00+0000

t.nc@t,lev=8000

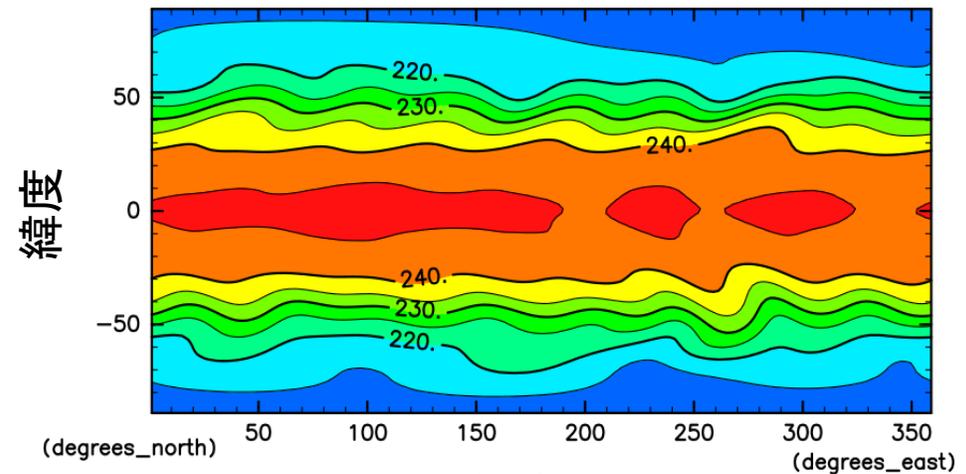
/home/hiroki/.rbenv/versions/2.7.2/bin/gpview 2022-11-04

/home/hiroki/.rbenv/versions/2.7.2/bin/gpview 2022-11-04

t.nc@t,lev=8000

・計算を始めて300日後の気温分布

気温



・波数:7

CONTOUR INTERVAL = 5.000E+00  
210 225 240 255

lev=7800 m  
0000-10-27 00:00:00+0000

t.nc@t,lev=8000

/home/hiroki/.rbenv/versions/2.7.2/bin/gpview 2022-11-07

# 4.地球を小さくした大気を計算してみる

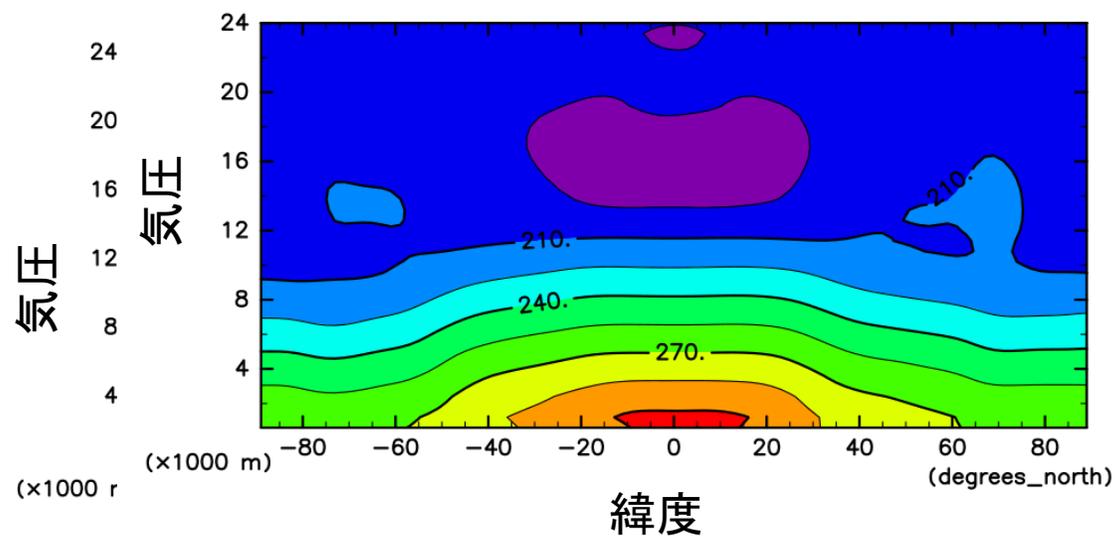
## 4.2半径を1/2倍、角速度2倍、放射と摩擦の時定数2倍

気温の東西平均子午面分布 (解像度  $dx = 223\text{km}$ )

・計算を始

・コントロール実験の気温分布

気温



CONTOUR INTERVAL = 1.500E+01  
180 210 240 270 300 330

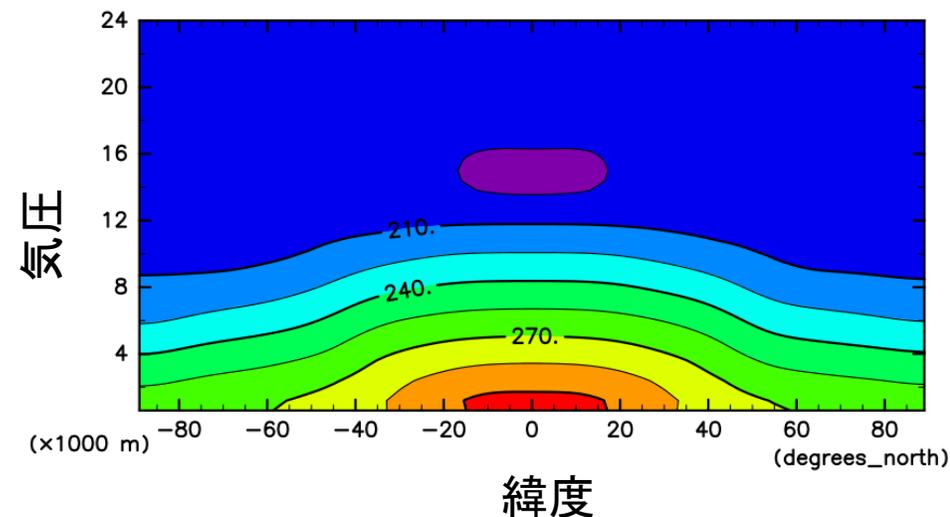
0000-10-27 00:00:00+0000  
(mean) lon:1..359

/home/hiroki/.rbenv/versions/2.7.2/bin/gpview 2022-11-04

t.nc@t

・計算を始めて300日後の気温分布

気温



CONTOUR INTERVAL = 1.500E+01  
180 210 240 270 300 330

0000-10-27 00:00:00+0000  
(mean) lon:1..359

/home/hiroki/.rbenv/versions/2.7.2/bin/gpview 2022-11-06

t.nc@t

## 5.まとめ

---

- ・大気モデルの問題点

水平スケールの現象は、対流から傾圧不安定まで、現象の規模が大きく異なっていること

- ・1グリッドに高分解のモデルを埋め込む

- ・全球を細かいグリッドで覆うよりも、少ないグリッド数で解像することができる

- ・2, 地球を小さくする

元の大きさの地球の大気現象を、小さくした地球の大気現象で計算をしたい

- ・惑星半径を小さくする

- ・3, 深い大気にする

重力加速度を小さくし、スケールハイトが大きくなることで、大気が深くなる。

## 5.まとめ

---

- ・計算結果について
  - ・半径のみ小さくすると、極付近まで波が広がっていた。
  - ・高度7800mにおける気温分布の水平断面は、半径と角速度を変えたときが最もコントロール実験の気温分布に似ていた。
  - ・摩擦と放射を変えたときは気温の東西平均子午面分布がコントロール実験と似ていた

## ・今後やりたいこと

---

火星の大きいスケール、小さいスケールの現象を小さな火星の大気モデルを使って計算できるようにしたい。

- ・火星の惑星半径、自転角速度、放射などのパラメータを変えてみる
- ・論文を読み、よりよいパラメータを探す
- ・火星の小さいスケールの現象、鉛直対流の計算を行いたい

# 参考

---

- GFDL Isaac Held's Blog# 65 'Small Earth, deep atmosphere, and hypohydrostatic models
- 「A Proposal for the and Intercomparison of the Dynamical Cores of Atmospheric General Circulation Models 」 著: Issac M Held and Max J Suarez
- 「Simulations of the Atmospheric General Circulation Using a Cloud-Resolving Model as a Superparameterization of Physical Processes」  
著: MARAT KHAIROUTDINOV, DAVID RANDALL, AND CHARLOTTE DEMOTT