

2018/02/08

修士論文発表会

# 地球型惑星における気候の惑星半径依存性 ーハビタビリティに関する検討ー

北海道大学 理学院 宇宙理学専攻  
惑星宇宙グループ GFD 研究室 M2

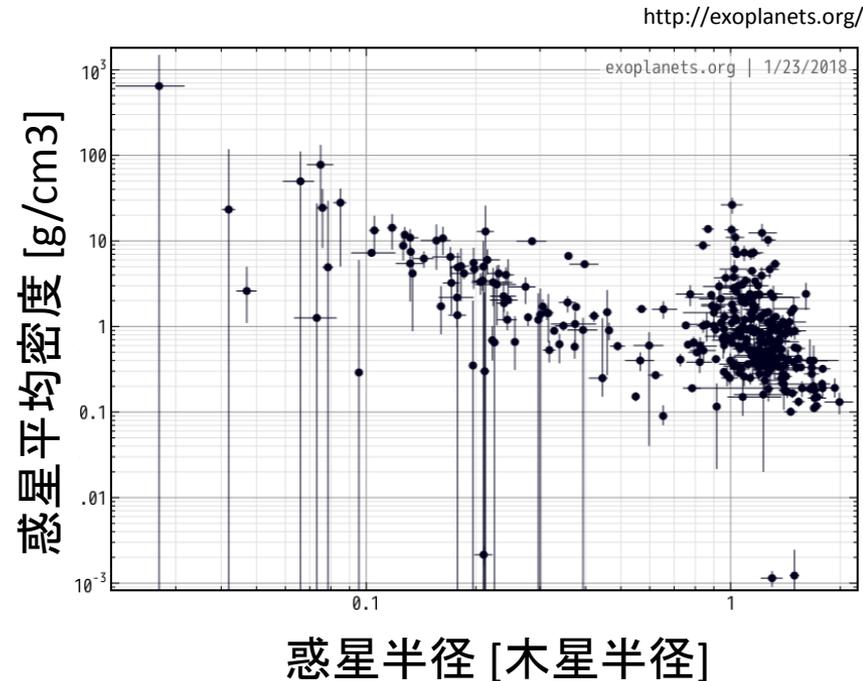
梅内 紫芳

# 1. 研究背景

- 系外惑星研究の近年の動向
  - 密度が地球と同程度である地球型系外惑星の発見
  - 今後の観測による大気の特徴の解明に期待
  - 地球型系外惑星のハビタビリティへの関心

- ハビタビリティを考える視点のひとつ

- 液体の水の存在可能性
  - 惑星表面の**温度分布**を知ることが重要
  - 温度分布などの気候状態は**大気大循環**を調べればわかる
  - 大気大循環を特徴づける軌道・物理的**パラメータの値の幅は広範囲**
    - 色々な場合での温度分布を知る必要がある



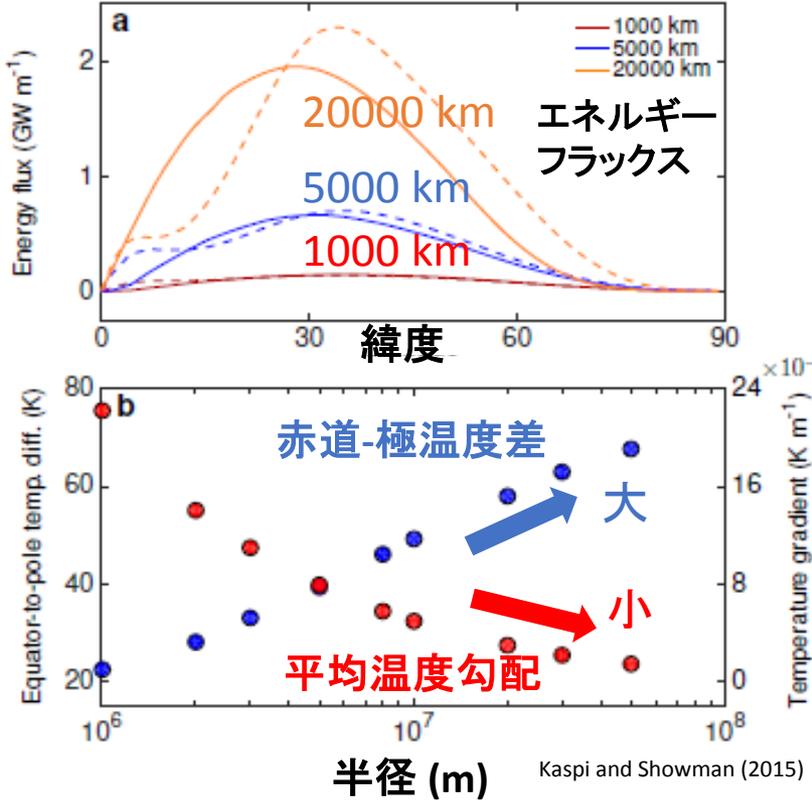
# 2. 先行研究: Kaspi and Showman(2015)

- 地球型惑星の大気大循環と軌道・物理的パラメータの関係
  - 自転角速度, 惑星半径, 恒星フラックス, 大気の光学的厚さ, 大気質量, 惑星平均密度 の6種類による依存性について GCM による数値実験

GCM: General Circulation Model  
大気大循環モデル

● **本研究では直接観測で分かりやすい惑星半径に着目**

- 大気大循環の惑星半径依存性実験
  - 1000 から 50000 km の値で実験 (木星半径の 0.01 から 0.7 倍)
  - 密度固定
  - 簡単放射スキーム



## 問題点

- 熱輸送の内訳がわからない
- 渦のスケールと温度差の関係に関する説明が足りない
- 季節変化を無視している
- 水惑星実験のため地形の効果かわからない

# 3. 研究の目的と内容

- 本研究の目的

- ハビタビリティを考える上で重要な惑星表面温度分布がどのようにして決まるのかを, 大気大循環の惑星半径依存性に着目して検討する

- 本研究の内容

- GCM を用いた数値実験で地球型惑星の大気大循環を計算
- 大気大循環の惑星半径依存性について先行研究を検証
  - 南北熱輸送量の成分ごとに分けた評価
  - 渦の長さスケールと赤道-極間温度差の関係性を説明
  - 南北熱輸送量の季節変化の確認
  - 地形の有無による南北熱輸送量の変化を確認
- 惑星表面の温度分布からハビタビリティについて検討

# 4. 実験で用いた大気大循環モデル

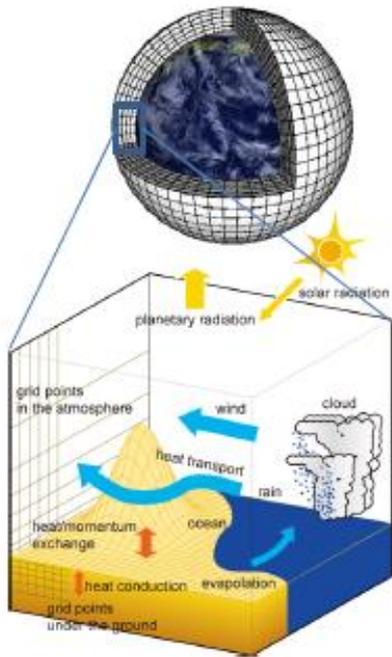
## DCPAM (Dennou-Club Planetary Atmospheric Model)

地球流体電脳倶楽部により開発

<http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>

### 力学過程

- 3次元球殻領域のプリミティブ方程式系を使用
  - 鉛直静水圧近似と薄い大気の近似を行った流体力学の方程式系



### 物理過程

- 乱流混合過程: Mellor and Yamada (1982) level 2.5
- 放射過程: Chou et al. (2001), Chou and Lee (1996)
- 凝結過程
  - 積雲対流: Moorthi and Suarez (1992)
  - 非対流性凝結: Manabe et al. (1965)
- 雲過程: 地球流体電脳倶楽部 (2017)
- 陸面過程: Manabe et al. (1965)

<http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/plan/>

# 5. 計算設定

- 惑星半径と解像度

惑星半径 [km]	空間解像度	時間解像度	積分時間
2000	T21L26	15 分	5 年
6371			
20000	T42L26		

- 地表面条件は 2 種類

- 地形なし

- swamp 設定 : 海洋の熱容量を 0 と仮定して熱バランスから海表面温度を計算する

- 地形あり

- 地球設定 : 地形や海表面温度分布等を予め与える

- 地表面重力・質量固定

- 初期条件: 等温静止大気

# 6. 結果：南北熱輸送量の惑星半径依存性

## 南北熱輸送

$$\langle [\overline{Sv}] \rangle = \langle [\overline{S}] [\overline{v}] \rangle + \langle [\overline{S^* v^*}] \rangle + \langle [\overline{S'v'}] \rangle$$

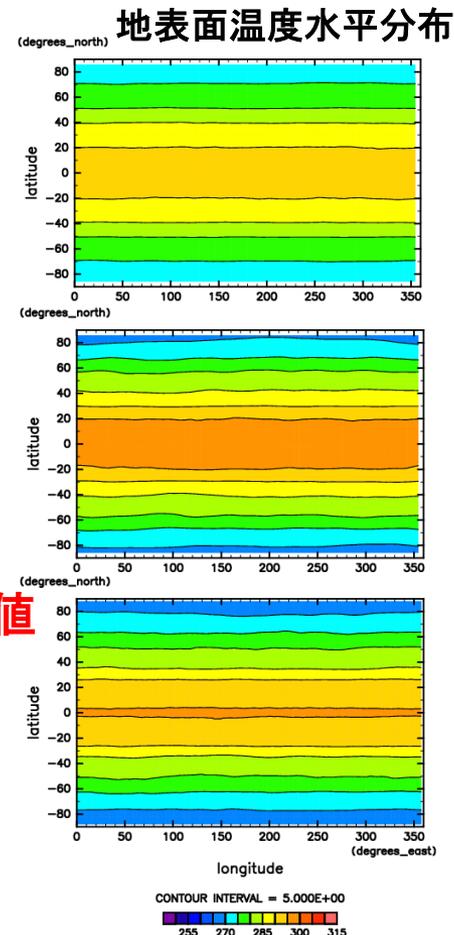
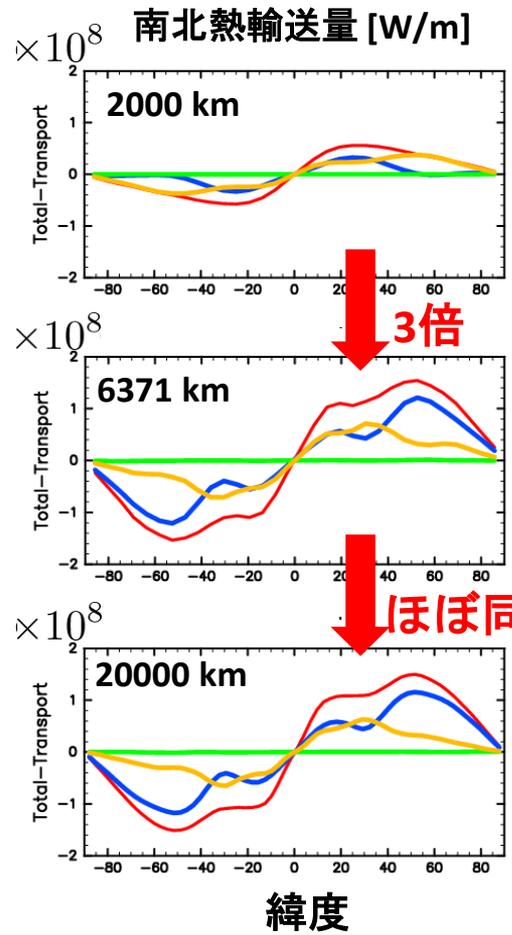
全輸送量      子午面循環      停滞性擾乱      非定常擾乱

湿潤静的エネルギー

$$S = C_p T + g z + L q$$

$C_p$ : 定圧比熱 1004 [J/(kg K)]  
 $L$ : 潜熱  $2.5 \times 10^6$  [J/kg]

上線と上付き˘: 時間平均とそのずれ  
 []と上付き\*: 東西平均とそのずれ  
 <>: 鉛直平均



- 2000 km から 6371 km では輸送量増加
  - 熱輸送の変化の大きさの割に温度差はあまりない
- 6371 km と 20000 km では輸送量の変化ほぼなし
  - 各成分の緯度分布もほぼ変化なし

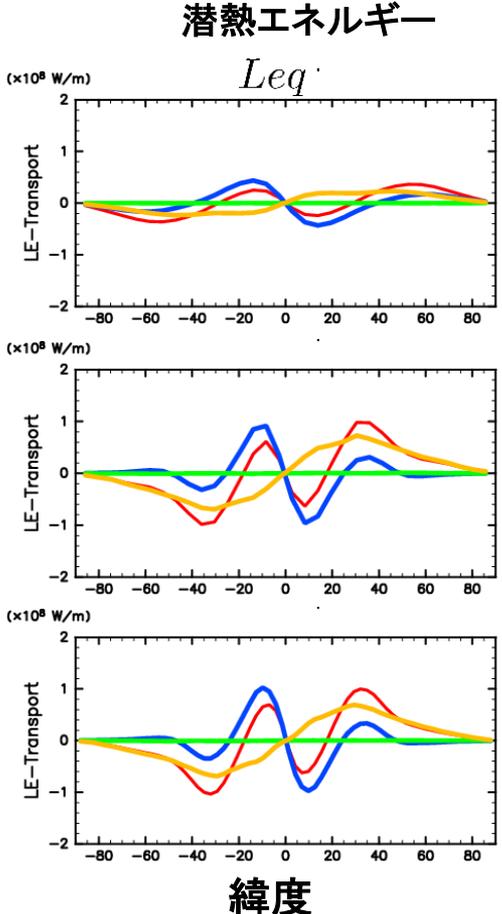
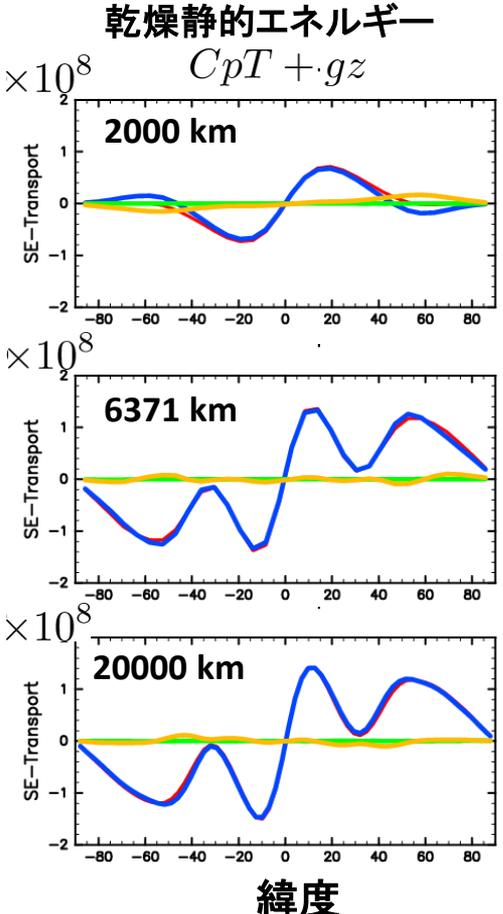
# 6. 結果：南北熱輸送量の内訳

## 乾燥静的エネルギーの輸送

- 低緯度帯ではハドレー循環による輸送, 中高緯度帯での輸送は極循環による輸送

## 潜熱エネルギーの輸送

- 低緯度帯ではハドレー循環, 中高緯度帯では傾圧渦による輸送



- 緯度40度付近における渦による熱輸送

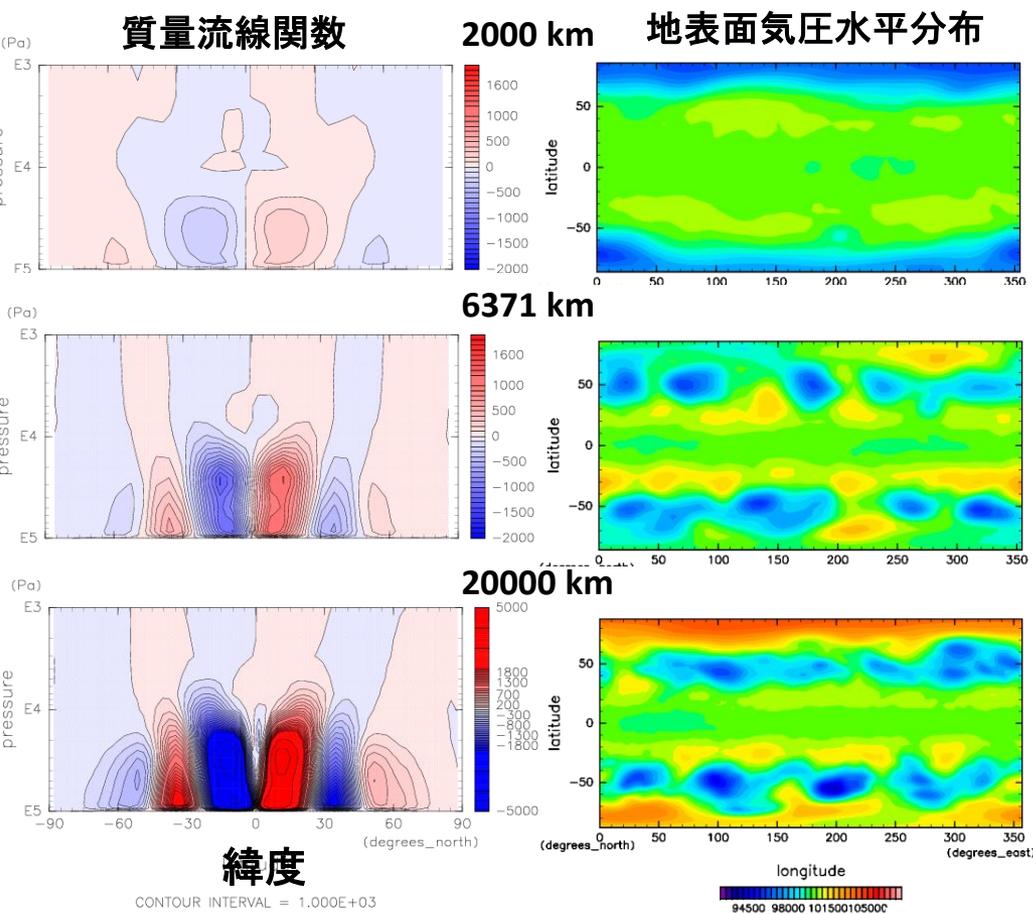
惑星半径 [km]	輸送量 [ $\times 10^8$ W/m]
2000	0.2
6371	0.6
20000	0.6

# 6. 結果：ハドレー循環と傾圧不安定領域の渦

- ハドレー循環：低緯度帯で熱輸送
- 傾圧不安定領域の渦：中高緯度帯の傾圧不安定領域で熱輸送

## ハドレー循環

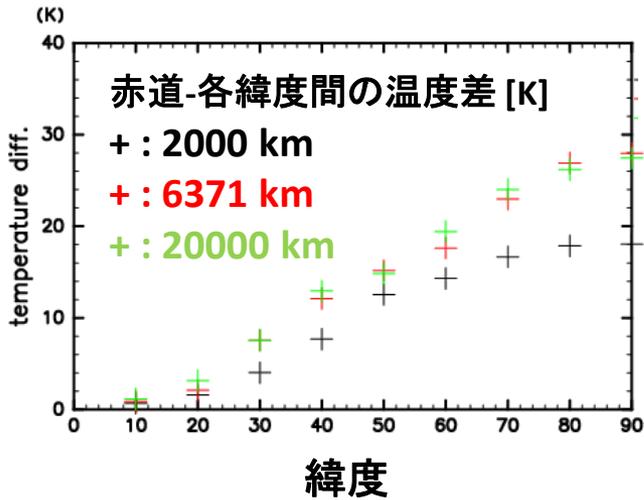
- 2000 km とその他では緯度幅に差がある
- 6371 km と 20000 km では緯度幅にはあまり差がないが強さには差がある
- Held & Hou (1980) の理論によれば緯度幅は 3 倍程度の差が生じるはず



惑星半径 [km]	ハドレー循環 緯度幅
2000	40 度
6371	30 度
20000	30 度

# 6. 結果：南北温度分布の惑星半径依存性

- **Kaspi and Showman(2015) の主張**  
「惑星半径が大きくなると典型的な渦の長さスケール  $L$  が惑星半径  $R$  に比べて小さくなる。熱輸送が効率的でなくなり、赤道極間温度差が大きくなる」
- **本研究の結果**
  - 2000 km と 6371 km は温度差に 10 K 程度の差がある
  - 6371 km と 20000 km はほぼ同程度の温度差
  - 渦のスケールによる影響の程度は確かめられない



惑星半径 [km]	渦の長さスケール [km]	惑星半径との比 $L/R$	赤道極間温度差 [K]
2000	2060	1	18
6371	3500	0.5	28
20000	6700	0.3	28

↓ 小  
↓ 大

## 7. 考察: 重力の惑星半径依存性も考慮すると

- 惑星半径の増大に伴う  $L/R$  の変化率は小さくなるはず
  - 惑星半径が大きくなると重力が大きくなる
  - 重力が大きくなると変形半径が大きくなる
  - 変形半径が大きくなると惑星半径との比の変化率は小さくなる
- Kaspi and Showman (2015) との比較

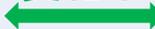
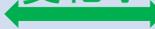
$$L_d = \frac{\sqrt{gH}}{f}$$

	重力変化	熱輸送の変化率
Kaspi and Showman(2015)	考慮する	大
本研究	考慮しない	小

- この結果は重力の惑星半径依存性の有無によるものではない
  - 大気安定度の変化をしてみる必要がある
  - 放射スキームの違いによる影響の有無や程度も検証する必要がある

## 8. まとめ

- 地球型惑星のハビタビリティを考える上で重要な惑星表面温度分布の惑星半径依存性について GCM を用いて調べた

惑星半径 [km]	2000	6371	20000
南北熱輸送量	大 	変化小 	
ハドレー循環緯度幅	小 	変化小 	
ハドレー循環強度	大 		
渦の長さスケール	小 		
赤道極間温度差	大 	変化小 	

- 地形ありの場合  
海域面積の多い南半球では潜熱エネルギーの輸送が卓越し、陸域面積の多い北半球では乾燥静的エネルギーの輸送が卓越する

### ● 今後の課題

- 熱輸送量や、熱輸送によって決まる温度分布はハドレー循環や渦による効果が大いだが、その程度の定量的な評価を試みる
- 惑星半径の変化に伴うハドレー循環や渦の特徴の変化について定量的な評価を試みる
- 重力を固定した場合と密度を固定した場合とで生じる結果の差が何に依るものかを検証する

# 参考文献

- Chou, M.-D., and K.-T. Lee, 1996: Parameterizations for the absorption of solar radiation by water vapor and ozone, *J. Atmos. Sci.*, 53, 1203-1208.
- Chou, M.-D., M. J. Suarez, X.-Z. Liang, and M. M.-H. Yan, 2001: A thermal infrared radiation parameterization for atmospheric studies, NASA Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation, 19, NASA/TM-2001-104606.
- Held, I. M., Hou, A. Y., 1980: Nonlinear axially symmetric circulations in a nearly inviscid atmosphere., *J. Atmos. Sci.*, 37, 515-533.
- Kaspi, Y., Showman, A. P. 2015: Atmospheric Dynamics of Terrestrial Exoplanets over a wide range of Orbital and Atmospheric Parameters, *ApJ*, 804, 60.
- Manabe, S., Smagorinsky, J., and Strickler, R.F., 1965: Simulated climatology of a general circulation model with a hydrologic cycle, *Mon. Weather Rev.*, 93, 769-798.
- Matthews, E., 1983: Global vegetation and land cover: New high-resolution data bases for climate studies. *J. Clim. Appl. Meteor.* 22, 474-487.
- Matthews, E., 1984: Prescription of Land-surface Boundary Conditions in GISS GCM II: A Simple Method Based on High-resolution Vegetation Data Sets. NASA TM-86096. National Aeronautics and Space Administration. Washington, D.C..
- Matthews, E., 1985: Prescription of land-surface boundary conditions in GISS GCM II: A simple method based on high-resolution vegetation data bases, NASA Report No. TM 86096, 20.
- Mellor, G. L., and T. Yamada, 1974: A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers, *J. Atmos. Sci.*, 31, 1791–1806.
- Moorthi, S., and M. J. Suarez, 1992: Relaxed Arakawa-Schubert: A parameterization of moist convection for general circulation models, *Mon. Wea. Rev.*, 120, 978–1002.
- NOAA, ETOPO1 Global Relief Model, <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/relief/>
- PCMDI, AMIP Sea Surface Temperature and Sea Ice Concentration Boundary Conditions, <http://www-pcmdi.llnl.gov/projects/amip/AMIP2EXPDSN/BCS/>
- PCMDI, CMIP5 Overview, <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>
- Showman, A. P., Wordsworth, R. D., Merlis, T. M., and Kaspi, Y. 2014: Atmospheric Circulation of Terrestrial Exoplanets(The University of Arizona Press), 277-326.
- 地球流体電脳倶楽部, 2014: DCPAM5 支配方程式とその離散化, [http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/dcpam5/dcpam5-20160612/doc/basic\\_equations/pub/basic\\_equations.pdf](http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/dcpam5/dcpam5-20160612/doc/basic_equations/pub/basic_equations.pdf)

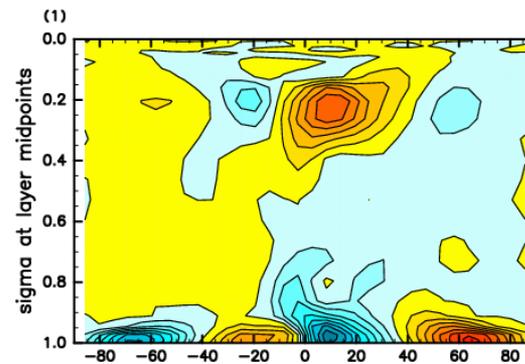
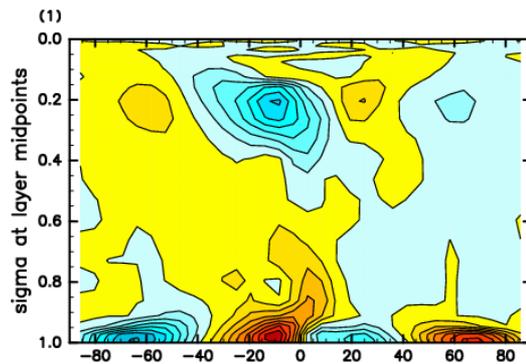
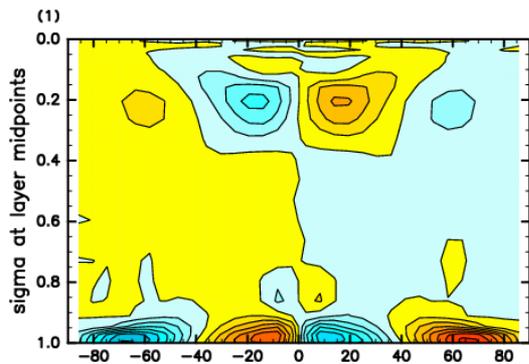
# 南北風

annual

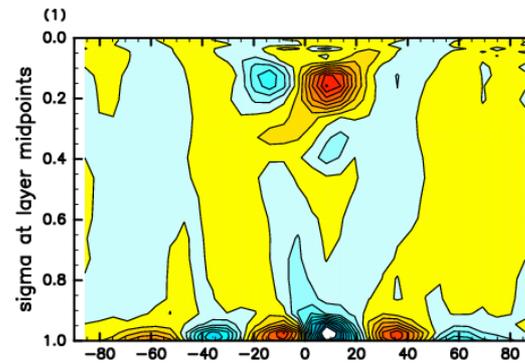
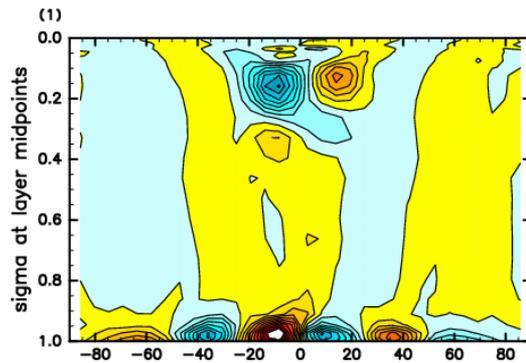
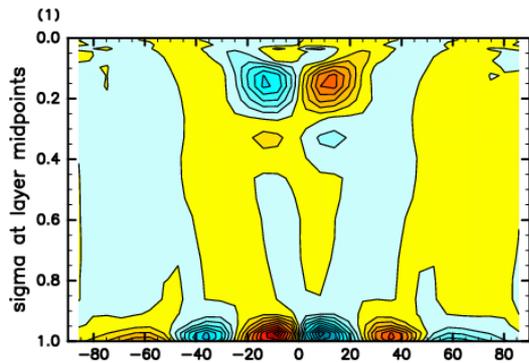
summer

winter

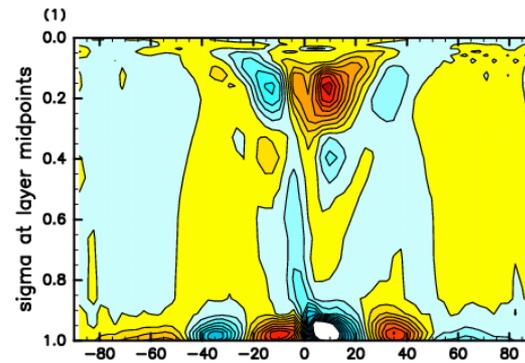
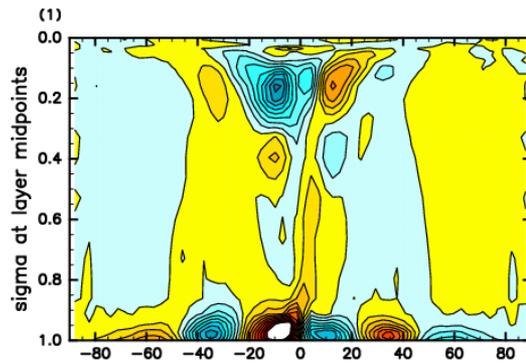
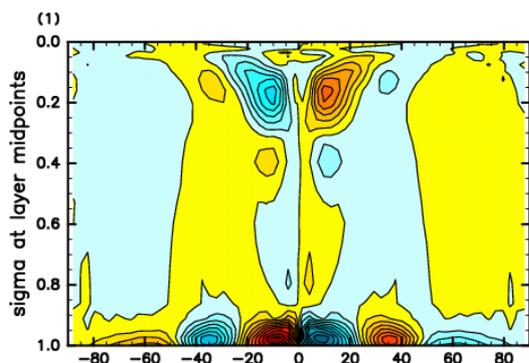
2000  
km



6371  
km



20000  
km



latitude

CONTOUR INTERVAL = 5.000E-01

