

# 惑星大気大循環モデル DCPAM による地球実験結果 と再解析データの比較

北海道大学 理学部 地球惑星科学科 4年

惑星宇宙グループ GFD研究室

学籍番号: 02120329

梅内 紫芳

# 1. 研究の概要・目的

## ●背景・動機

- 惑星のハビタビリティ(生命存在可能性)について考察する研究が行われるようになった.
- ハビタビリティを考察する上で重要なものの一つとして惑星の全球気候を調べることがあげられる.
- 系外惑星の大気の運動を調べるには, その多様性と観測データの少なさから, 数値モデルを用いる手法が有用.
- 大気大循環モデルを用いて多様な惑星の全球気候を表現し, ハビタビリティについて議論したい.

## ●研究の目的

- 大気大循環モデルの理論的背景や扱い方を勉強する.
- 大気大循環モデルの性能を知る.

## ●研究の概要

- 大気大循環モデルの一つである DCPAM を用いた地球実験
- 実験結果を再解析データとの比較により検証

# 2-1. DCPAM ー概要ー

## ●DCPAM

Dennou-Club Planetary Atmospheric Model

3次元球殻プリミティブ方程式系に従う大気大循環モデル.

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

- 大気大循環モデル(GCM): 大気における全球規模での物質や物理量の移流, 放射・対流などを計算する数値モデル.

## ●座標系

- 水平方向: 緯度  $\varphi$ , 経度  $\lambda$
- 鉛直方向:  $\sigma = p/p_s$  ( $p$ : 気圧,  $p_s$ : 惑星表面気圧)

## ●離散化

- 水平方向: スペクトル変換法
- 鉛直方向: Arakawa and Suarez (1983) の差分法
- 時間方向: 力学過程 セミインプリシット法  
物理過程 陽解法・陰解法

## 2-2. DCPAM ー力学過程支配方程式ー

- 連続の式

$$\frac{\partial \pi}{\partial t} + \mathbf{v}_H \cdot \nabla_\sigma \pi = -D - \frac{\partial \dot{\sigma}}{\partial \sigma}.$$

- 静水圧の式

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} = -\frac{RT_v}{\sigma}.$$

- 運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial t} &= \frac{1}{a} \left( \frac{1}{1-\mu^2} \frac{\partial V_A}{\partial \lambda} - \frac{\partial U_A}{\partial \mu} \right) + \mathcal{D}(\zeta), \\ \frac{\partial D}{\partial t} &= \frac{1}{a} \left( \frac{1}{1-\mu^2} \frac{\partial U_A}{\partial \lambda} + \frac{\partial V_A}{\partial \mu} \right) - \nabla_\sigma^2 (\Phi + R\bar{T}\pi + KE) + \mathcal{D}(D). \end{aligned}$$

- 熱力学の式

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} &= -\frac{1}{a} \left( \frac{1}{1-\mu^2} \frac{\partial UT'}{\partial \lambda} + \frac{\partial VT'}{\partial \mu} \right) + T'D \\ &\quad - \dot{\sigma} \frac{\partial T}{\partial \sigma} + \kappa T_v \left( \frac{\partial \pi}{\partial t} + \mathbf{v}_H \cdot \nabla_\sigma \pi + \frac{\dot{\sigma}}{\sigma} \right) + \frac{Q}{C_p} + \mathcal{D}(T) + \mathcal{D}'(\mathbf{v}). \end{aligned}$$

- 水蒸気の式

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{1}{a} \left( \frac{1}{1-\mu^2} \frac{\partial U_q}{\partial \lambda} + \frac{\partial V_q}{\partial \mu} \right) + qD - \dot{\sigma} \frac{\partial q}{\partial \sigma} + S_q + \mathcal{D}(q).$$

- 境界条件

$$\dot{\sigma} = 0 \quad \text{at} \quad \sigma = 0, 1$$

(記号の説明は付録)

## 2-3. DCPAM —実験の概要・計算設定—

### ●実験の概要

地球大気を想定した条件の下で DCPAM を用いた数値実験を行い、大気での**熱収支**、**水収支**、**水蒸気輸送**を調べる。

### ●計算設定

- 空間解像度 : T42L26 (水平解像度: 128 × 64, 鉛直層数: 26)
- 時間解像度 : 3 分
- 積分時間 : 5 年
- 雲モデル : 簡単雲モデル(雲消滅時間: 1500 秒)
- 表面アルベド : 海上 0.1, 陸上 0.3
- 初期条件 : 等温静止大気
- 地形 : ETOP1 による地形データの平均
- 土地利用 : Matthews, E. (1982, 1984) の補間データ
- 海氷面温度分布 : AMIP II 境界値の気候値の平均
- 海氷面密度分布 : AMIP II 境界値の気候値の平均
- オゾン分布 : CMIP5 設定値の気候値の東西平均

# 3. 再解析データの説明

## ●再解析データとは

地球に関する過去数十年の地上観測や衛星観測などによる気象観測データを GCM を用いて同化し、当時の全球的な気候を表現した格子点データ。

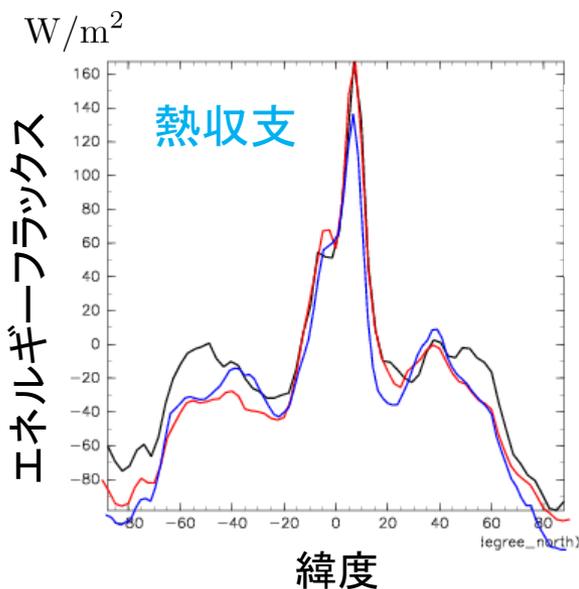
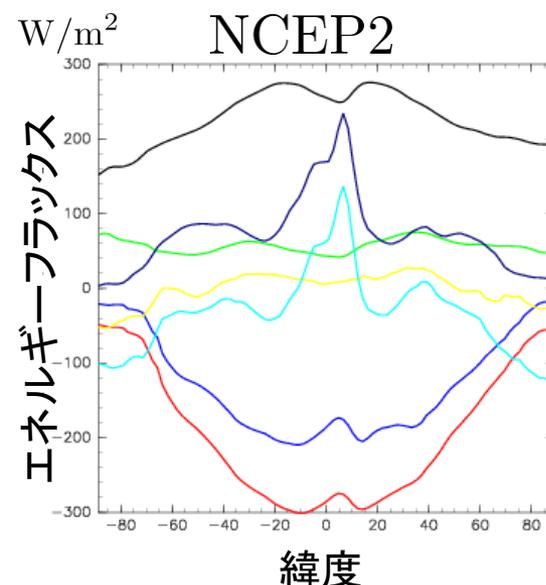
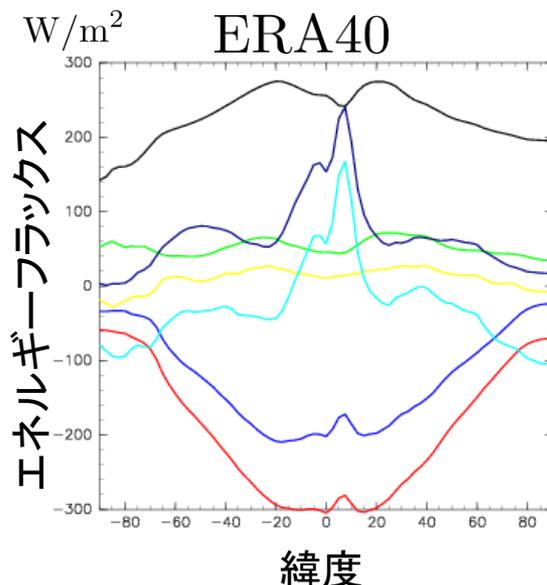
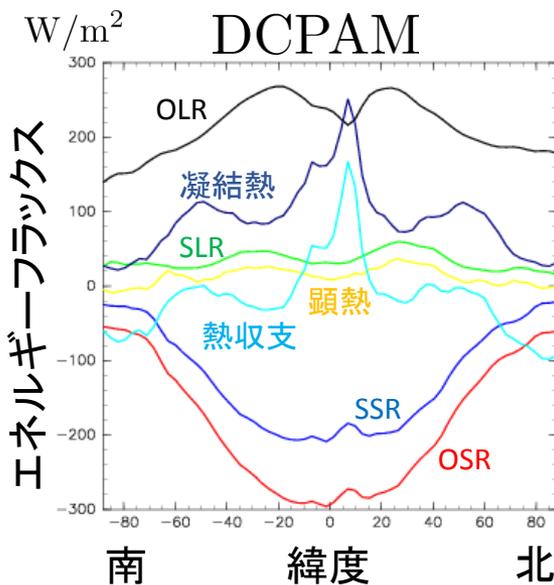
## ●ERA40

- 提供元: ヨーロッパ中期気象予報センター (ECMWF)
- 水平解像度:  $144 \times 73$ , 鉛直層数: 23
- 積分時間: 1957/09/01 – 2002/08/31

## ●NCEP-DOE Reanalysis-2 (以下 NCEP2)

- 提供元: 米国国立環境予報センター (NCEP)
- 東西風・南北風・鉛直速度・潜熱  
→ 水平解像度:  $144 \times 73$ , 鉛直層数 17
- それ以外 → 水平解像度:  $192 \times 94$
- 積分時間: 1979/01/01 – 2015/07/31

# 4-1. 結果 — 熱収支 (年平均) —



DCPAM5 計算結果

熱収支(正味大気加熱)全球平均値  $1.7 \text{ W/m}^2$

— DCPAM  
— ERA40  
— NCEP2

$$\text{熱収支} = -|\text{OLR}| + |\text{OSR}| + |\text{SLR}| - |\text{SSR}| + |\text{顕熱}| + |\text{凝結熱}|$$

- DCPAM の実験結果における高緯度域の凝結加熱率が再解析データに比べ  $10\text{-}20 \text{ W/m}^2$  程度大きい。
- DCPAM 実験結果は実際の地球の放射をよく表現できており, 熱収支も概ねつりあう結果が得られた。

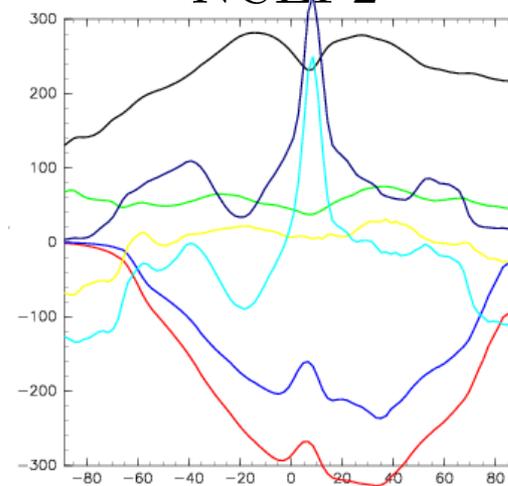
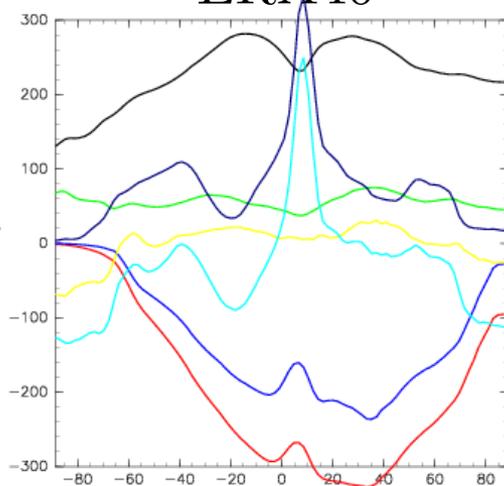
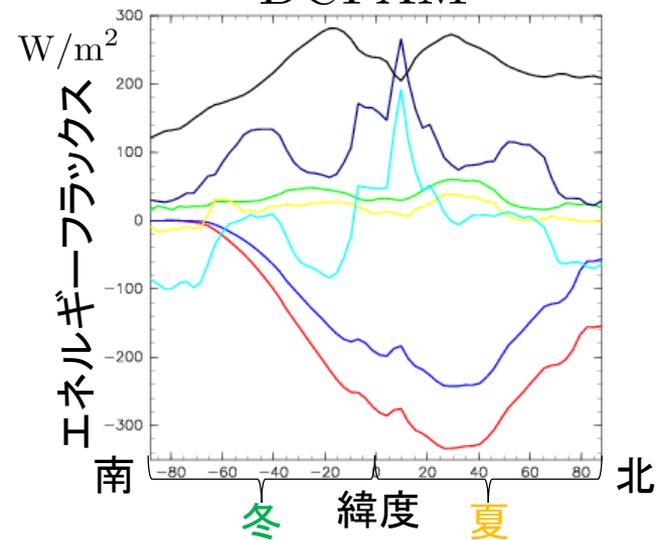
# 4-2. 結果 — 熱収支 (季節平均) —

6-8月

DCPAM

ERA40

NCEP2

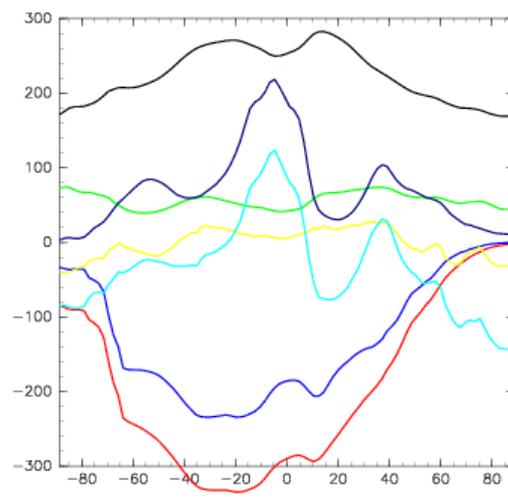
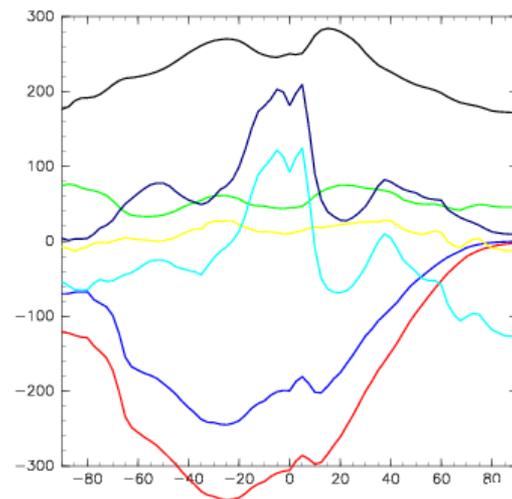
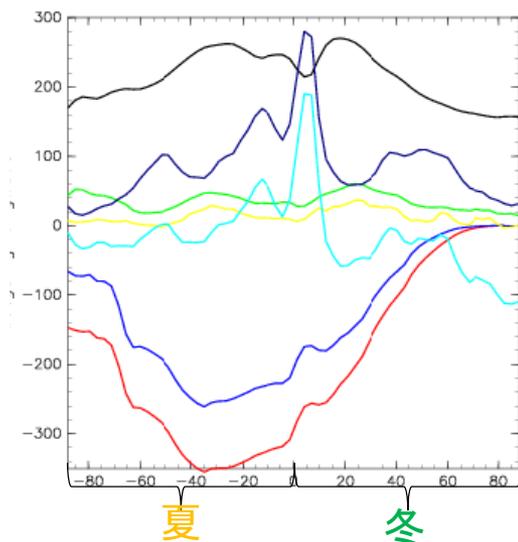


12-2月

DCPAM

ERA40

NCEP2



## 4-2. 結果 — 熱収支 (季節平均の特徴) —

### ● 計算結果と再解析データの共通点

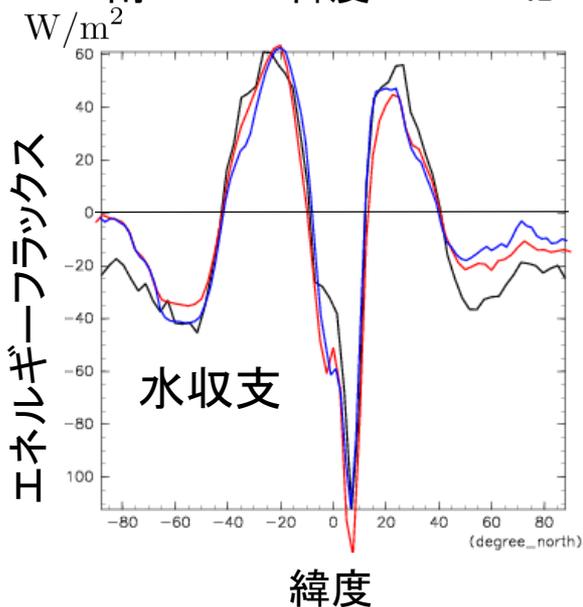
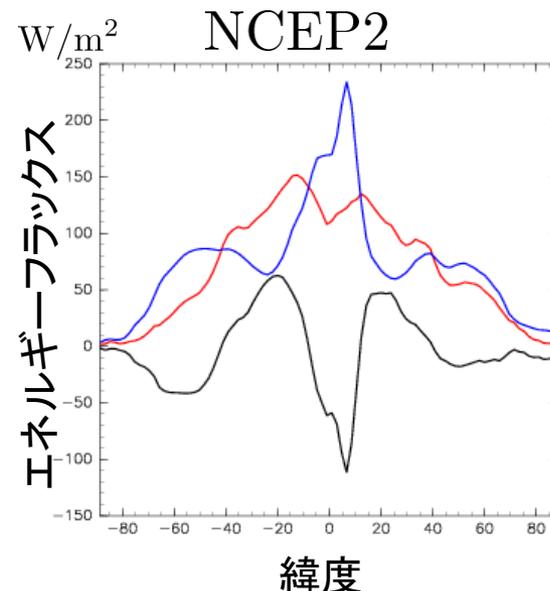
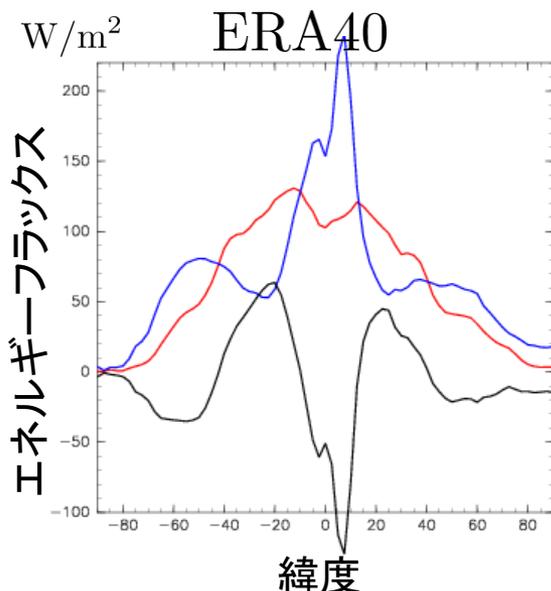
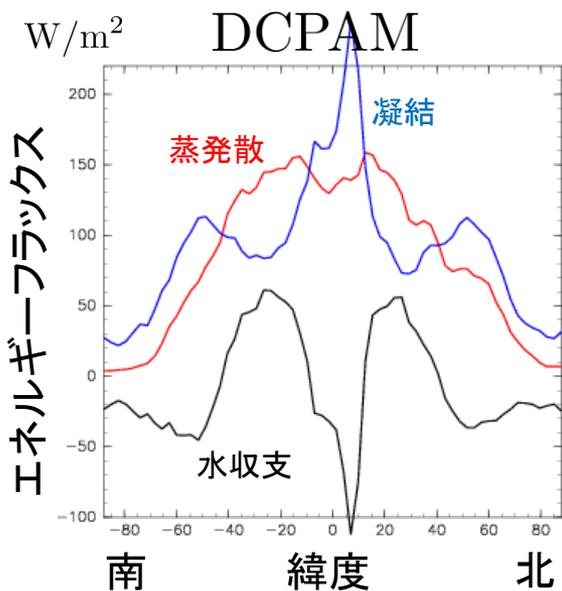
- 放射・大気加熱：夏半球 > 冬半球
- 北半球が夏半球となる6-8月と南半球が夏となる12-2月だと、後者の方が放射の値が全体的に大きい。
  - 南半球は北半球に比べて陸よりも海の方が多い。
  - 熱容量は陸よりも海の方が大きい。

➤ DCPAM の実験結果は、実際の地球における熱収支の季節変化の特徴をとらえている。

### ● 計算結果と再解析データの相違点

- どの季節においても緯度40-60度域での凝結加熱率が再解析データの値と比べ大きい。

# 4-3. 結果 — 水収支 (年平均) —



— DCPAM  
— ERA40  
— NCEP2

DCPAM5 計算結果

水収支全球平均値  $0.2 \text{ W/m}^2$

$$\text{水収支} = |\text{蒸発散フラックス}| - |\text{凝結加熱率}|$$

- DCPAM の実験結果における高緯度域の凝結加熱率が再解析データに比べ  $10\text{-}20 \text{ W/m}^2$  程度大きい。
- DCPAM の実験結果は実際の地球の放射をよく表現できており, 水収支も概ねつりあう結果が得られた。

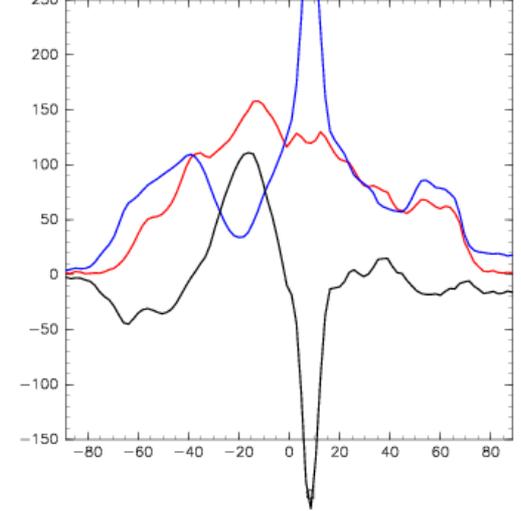
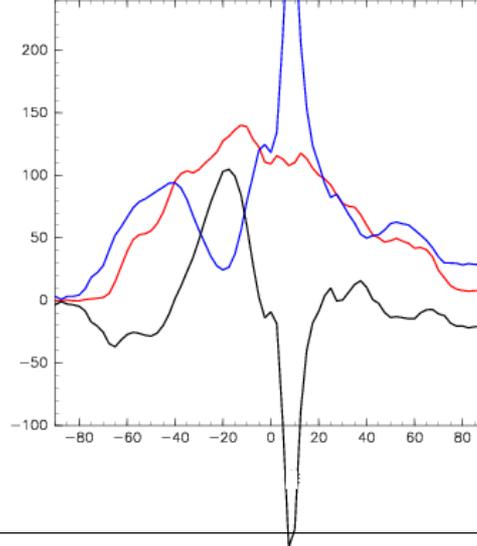
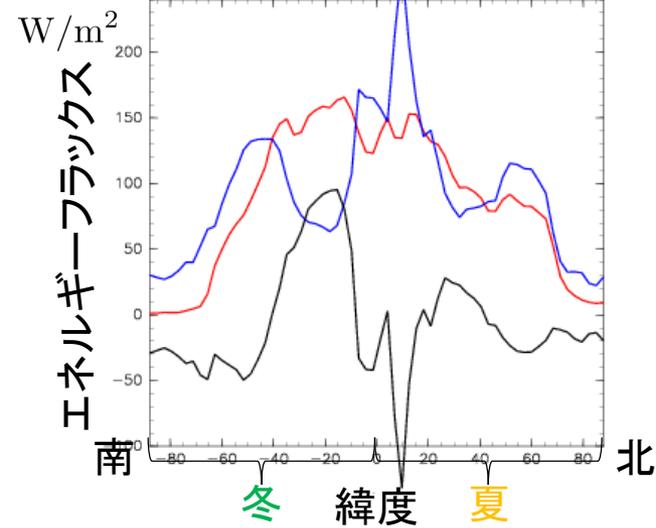
# 4-4. 結果 —水収支(季節平均)—

6-8月

DCPAM

ERA40

NCEP2

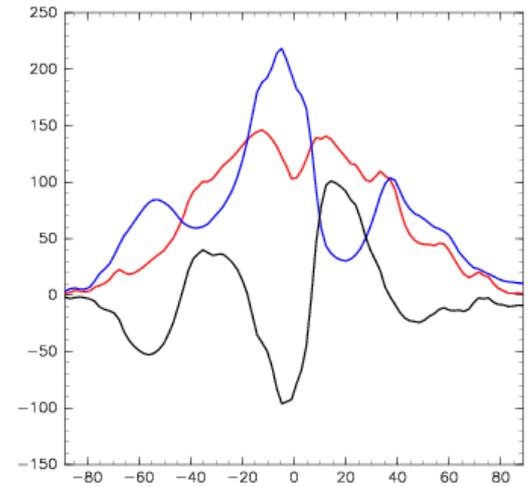
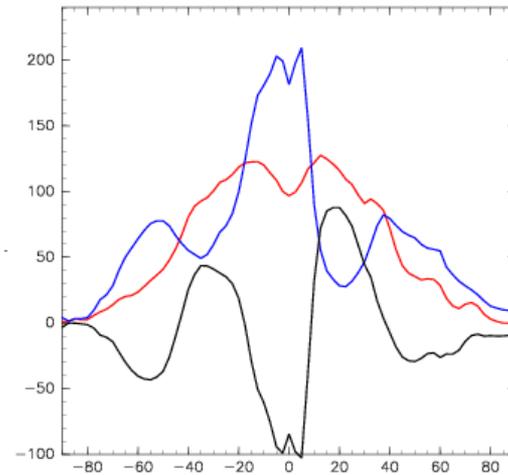
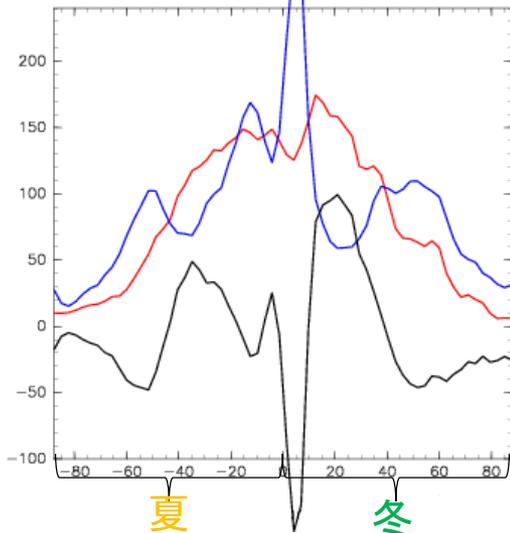


12-2月

DCPAM

ERA40

NCEP2



## 4-4. 結果 —水収支(季節平均の特徴)—

### ●計算結果と再解析データの共通点

- 季節に依らず低緯度域では 凝結加熱 > 蒸発散
- 中緯度域での水蒸気増加 冬半球 > 夏半球

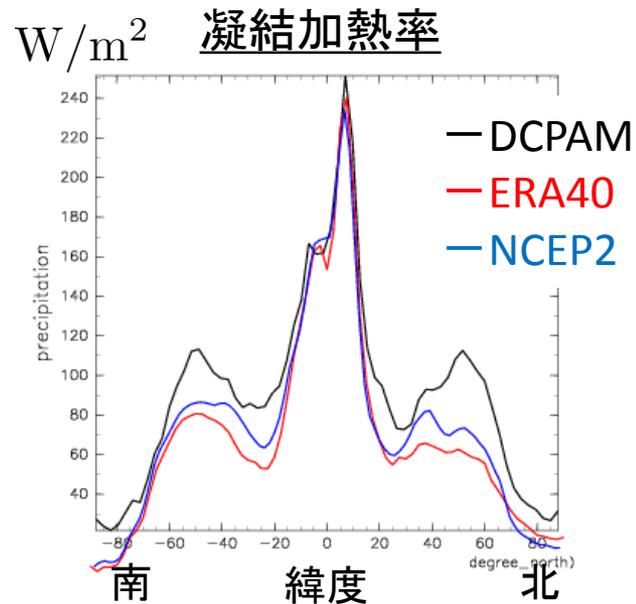
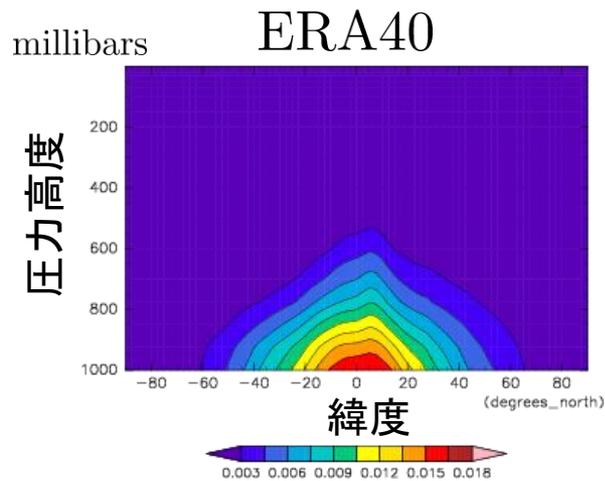
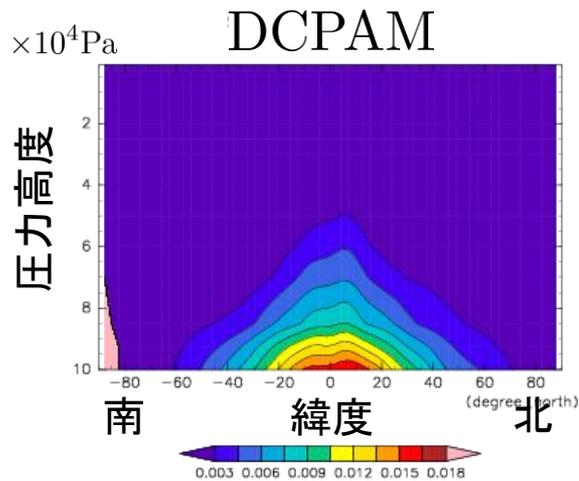
➤ DCPAM の実験結果は, 実際の地球における熱収支の季節変化の特徴をとらえている.

### ●計算結果と再解析データの相違点

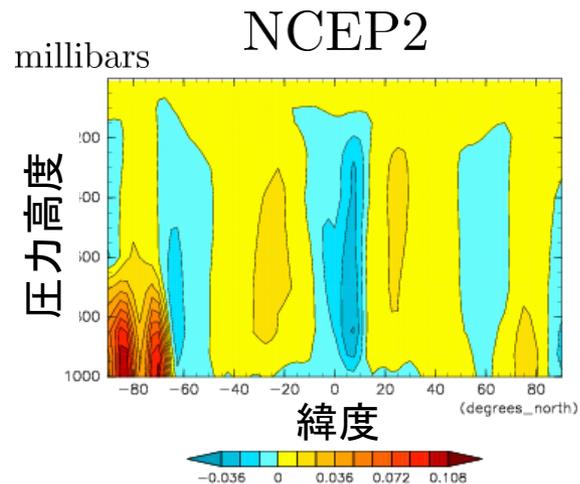
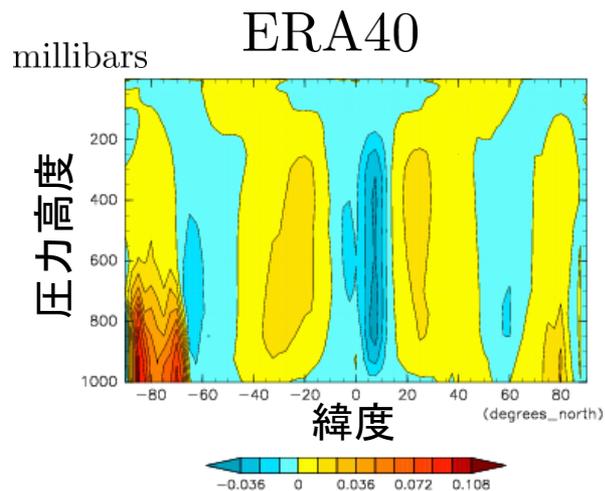
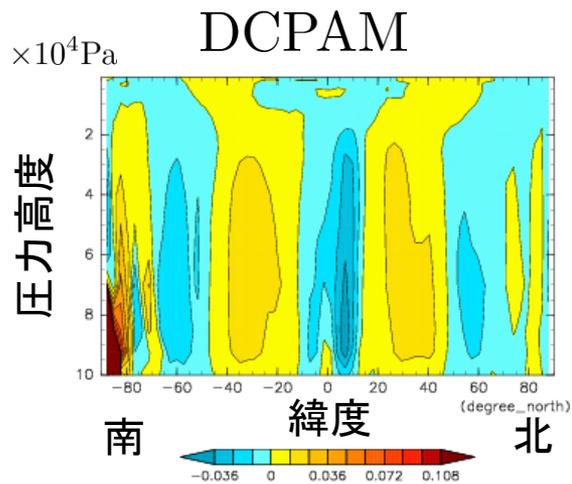
- 夏半球における緯度40-60度域での凝結加熱率が再解析データの値と比べて大きい.
- 冬半球における蒸発散フラックスが再解析データの値と比べて大きい.

# 4-5. 結果 — 循環場の物理量と水蒸気輸送 —

比湿 [kg/kg]

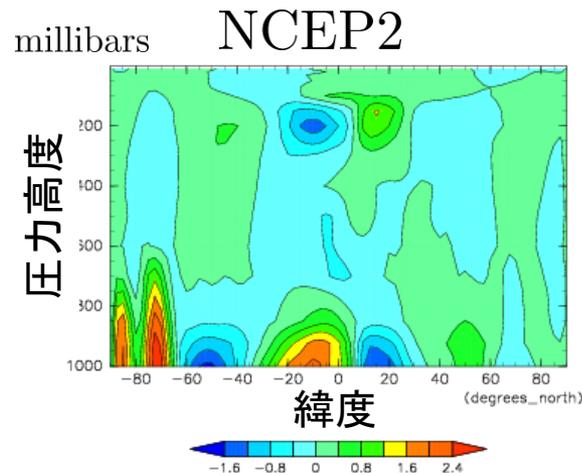
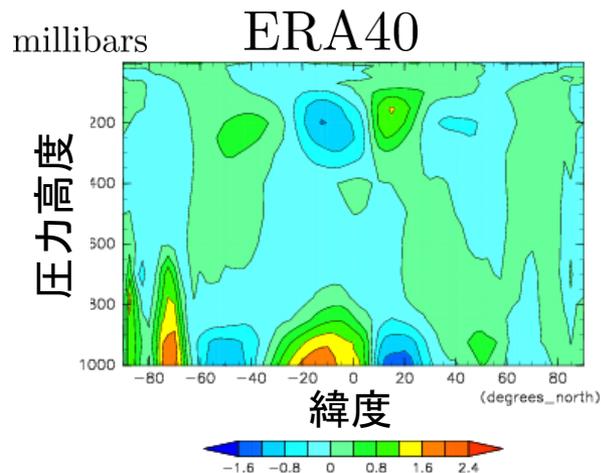
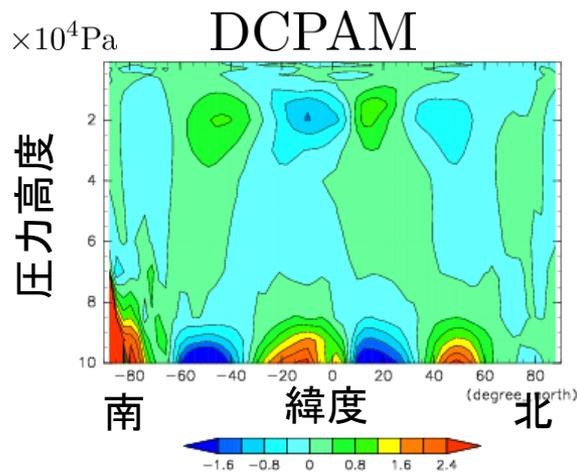


鉛直速度 [m/s]

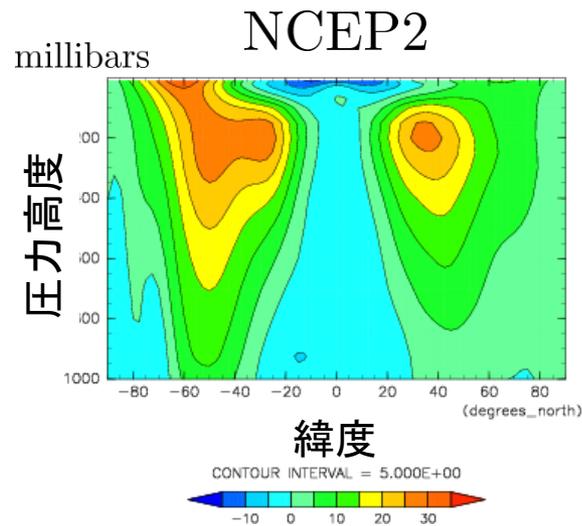
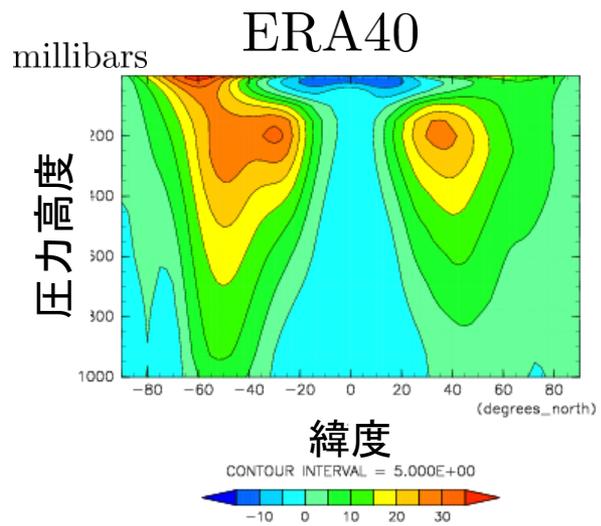
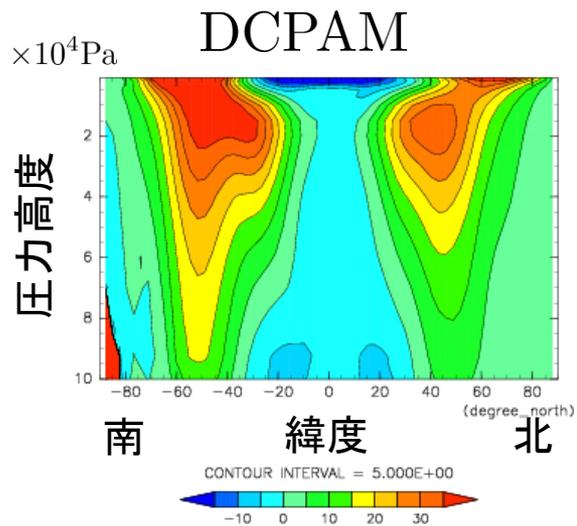


# 4-5. 結果 — 循環場の物理量と水蒸気輸送 —

南北風速 [ m/s ]



東西風速 [ m/s ]



# 4-5. 結果 — 循環場の物理量と水蒸気輸送 —

## ● 計算結果と再解析データの共通点

- 比湿 : 大気中の水蒸気は低緯度域で多く, 高緯度・高高度になるほど減少.
- 東西風 : 赤道付近と極付近で東風, 中・高緯度域で広く西風, 中緯度・圧力高度 200 hPa 付近で特に強い西風が分布.
- 南北風 : 緯度40度付近を境に低緯度側は赤道向きの風, 高緯度側は極向きの風が分布.
- 鉛直速度 : 赤道付近で上昇流, 中緯度域で下降流が分布.

➤ DCPAM の実験結果は, 実際の地球における, 風や比湿の緯度分布の特徴をとらえている.

## ● 計算結果と再解析データの相違点

- DCPAM の実験結果は再解析データと比べて全体的に風が強い.

## ● 水蒸気輸送

- 赤道付近で生じた大気中の水蒸気はハドレー循環の上昇流に運ばれて降水となる.
- ハドレー循環の下降流域に当たる中緯度域の大気中の水蒸気は南北風により赤道側と極側両方へ輸送される.

# 5. まとめ・展望

## ●まとめ

- DCPAM を用いて地球実験を行い, 実験結果が実際の地球の気候をどれほど表現できているかを再解析データと比較して検証した.
  - DCPAM による実験の結果得られたデータは再解析データの特徴と概ね一致する結果が得られた.
  - 再解析データとの相違点は用いるモデルの違いによるもの.
- 本研究を通して, DCPAM の扱い方と力学過程に関する理論的背景を学ぶことができた.

## ●展望

- 系外惑星を想定するような多様な惑星大気に関して数値実験を行い, 全球気候を表現することで, 惑星のハビタビリティについて議論することを目指したい.
- 離散化の方法や放射・対流の数理表現など DCPAM についてさらに理解を深めたい.

# 参考文献

- Arakawa, A., Suarez, M. J., 1983: Vertical differencing of the primitive equations in sigma coordinates. Mon. Wea. Rev., 111, 34-35.
- ECMWF, ERA-40 Monthly Means of Daily Means, <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/era40-moda/levtype=sfc/>
- Matthews, E. 1983. Global vegetation and land cover: New high-resolution databases 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..
- NOAA, ESRL: PSD: NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (AKA Reanalysis 2), <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html>
- 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/>
- 地球流体電脳倶楽部, DCPAM5 ドキュメント, [http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/dcpam5/dcpam5\\_latest/doc/](http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/dcpam5/dcpam5_latest/doc/)
- 地球流体電脳倶楽部, DCPAM5 支配方程式とその離散化, [http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/dcpam5/dcpam5\\_latest/doc/basic\\_equations/pub/basic\\_equations.pdf](http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/dcpam5/dcpam5_latest/doc/basic_equations/pub/basic_equations.pdf)

# 付録

## 独立変数

$\varphi$  : 緯度 [deg.]

$\lambda$  : 経度 [deg.]

$\sigma \equiv p/p_s$

$t$  : 時間 [s]

$\mu \equiv \sin \varphi$

## モデルで時間発展を計算する予報変数

$\pi(\varphi, \lambda) \equiv \ln p_s$

$T(\varphi, \lambda, \sigma)$  : 気温 [K]

$q(\varphi, \lambda, \sigma)$  : 比湿 [kg / kg]

$\zeta(\varphi, \lambda, \sigma) \equiv \frac{1}{a} \left( \frac{1}{1 - \mu^2} \frac{\partial V}{\partial \lambda} - \frac{\partial U}{\partial \mu} \right)$  : 渦度 [ $s^{-1}$ ]

$D(\varphi, \lambda, \sigma) \equiv \frac{1}{a} \left( \frac{1}{1 - \mu^2} \frac{\partial U}{\partial \lambda} + \frac{\partial V}{\partial \mu} \right)$  : 発散 [ $s^{-1}$ ]

$U(\varphi, \lambda, \sigma) \equiv u(\varphi, \lambda, \sigma) \cos \varphi$

$V(\varphi, \lambda, \sigma) \equiv v(\varphi, \lambda, \sigma) \cos \varphi$

$u$  : 東西風速 [m / s ]

$v$  : 南北風速 [m / s ]

# 付録

## 各時間ステップで診断的に求められる変数

$\Phi \equiv gz$  : ジオポテンシャル高度 [ $\text{m}^2/\text{s}^2$ ]

$$\dot{\sigma} \equiv \frac{d\sigma}{dt} \equiv \frac{\partial\sigma}{\partial t} + \frac{u}{a \cos\varphi} \frac{\partial\sigma}{\partial\lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial\sigma}{\partial\varphi} + \frac{\partial\sigma}{\partial\sigma}$$

$\bar{T}(\sigma)$  : 基準温度 [ K ]

$$T'(\varphi, \lambda, \sigma) \equiv T - \bar{T}$$

$$T_v(\varphi, \lambda, \sigma) \equiv T(1 + (\epsilon_v^{-1} - 1)q)$$

$$T'_v(\varphi, \lambda, \sigma) \equiv T_v - \bar{T}$$

$$U_A(\varphi, \lambda, \sigma) \equiv (\zeta + f)V - \dot{\sigma} \frac{\partial U}{\partial\sigma} - \frac{RT'_v}{a} \frac{\partial\pi}{\partial\lambda} + \mathcal{F}_\lambda \cos\varphi$$

$$V_A(\varphi, \lambda, \sigma) \equiv -(\zeta + f)U - \dot{\sigma} \frac{\partial V}{\partial\sigma} - \frac{RT'_v}{a} (1 - \mu^2) \frac{\partial\pi}{\partial\mu} + \mathcal{F}_\varphi \cos\varphi$$

$$\mathbf{v}_H \cdot \nabla_\sigma \pi \equiv \frac{U}{a(1 - \mu^2)} \frac{\partial\pi}{\partial\lambda} + \frac{V}{a} \frac{\partial\pi}{\partial\mu}$$

$$\nabla_\sigma^2 \equiv \frac{1}{a^2(1 - \mu^2)} \frac{\partial^2}{\partial\lambda^2} + \frac{1}{a^2} \frac{\partial}{\partial\mu} \left[ (1 - \mu^2) \frac{\partial}{\partial\mu} \right]$$

$$KE(\varphi, \lambda, \sigma) \equiv \frac{U^2 + V^2}{2(1 - \mu^2)}$$

$\mathcal{D}(\zeta)$  : 渦度の水平拡散と散逸

$\mathcal{D}(D)$  : 発散の水平拡散と散逸

$\mathcal{D}(T)$  : 熱の水平拡散と散逸

$\mathcal{D}(q)$  : 水蒸気の水平拡散と散逸

$\mathcal{F}_\lambda(\varphi, \lambda, \sigma)$  : 経度方向の小規模運動過程

$\mathcal{F}_\varphi(\varphi, \lambda, \sigma)$  : 緯度方向の小規模運動過程

$Q(\varphi, \lambda, \sigma)$  : 放射・凝結等による加熱

$S_q(\varphi, \lambda, \sigma)$  : 凝結等による水蒸気ソース

$\mathcal{D}'(v)$  : 摩擦熱

$f$  : コリオリパラメータ [ $\text{s}^{-1}$ ]

$a$  : 惑星半径 [ m ]

$R$  : 乾燥大気的气体定数 [ $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]

定数  $\left\{ \begin{array}{l} C_p : \text{乾燥大気の大気定圧比熱} [\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}] \\ \kappa \equiv R/C_p \\ \epsilon_v : \text{水蒸気分子量比} \end{array} \right.$