

DCPAM5 による 地球全球大気の実験

神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻

流体地球物理学教育研究分野 M1

伊藤 旭人

目的

- 惑星気候を代表する物理量（温度, 降水量, 風速, 質量流線関数 …etc）は惑星自身のパラメータの値によって変化する
- 例えば, Kaspi & Showman (2015) では, 数値モデルを用いて自転軸角速度, 太陽定数, 大気質量など計 6 種類の惑星パラメータをそれぞれ一つずつ変化させ, 惑星気候の応答を観察している
- (具体的にどのパラメータに注目するかは決めていないが) 数値モデルを用いた惑星気候のパラメータ依存性についての研究を行う方針

目的

- しかし, モデルを用いて出した結果と現実の惑星大気との整合性を示しておかないと, パラメータを変化させたときの結果の信憑性が得られない
- そこで, まずは標準実験として地球に似た条件における実験を行い, NCEP の再解析データとの比較を行う

使用したモデルの説明

- 大気大循環モデル DCPAM5
- 地球流体電脳倶楽部有志の人々によって開発された惑星大気の
全球の物理量を計算する数値モデル(<http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>)

力学過程

- プリミティブ方程式系
 - 三次元球面座標
 - 水平座標: 経度 (λ), 緯度 (θ)
 - 鉛直座標: 表面気圧で規格化された気圧 ($\sigma = p/p_s$)
 - 静水圧近似, 浅い流体近似, 伝統的近似

力学過程

連続の式:
$$\frac{\partial \pi}{\partial t} + \mathbf{v}_H \cdot \nabla_\sigma \pi = -D - \frac{\partial \dot{\sigma}}{\partial \sigma}$$

静水圧平衡の式:
$$\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} = -\frac{RT_v}{\sigma}$$

運動量方程式:
$$\begin{cases} \frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{1}{a} \left(\frac{1}{1-\mu^2} \frac{\partial V_A}{\partial \lambda} - \frac{\partial U_A}{\partial \mu} \right) + \mathcal{D}(\zeta) \\ \frac{\partial D}{\partial t} = \frac{1}{a} \left(\frac{1}{1-\mu^2} \frac{\partial U_A}{\partial \lambda} + \frac{\partial V_A}{\partial \mu} \right) - \nabla_\sigma^2 (\Phi + R\bar{T}\pi + KE) + \mathcal{D}(D) \end{cases}$$

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

水蒸気の式:
$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} = & -\frac{1}{a} \left(\frac{1}{1-\mu^2} \frac{\partial Uq}{\partial \lambda} + \frac{\partial Vq}{\partial \mu} \right) + qD \\ & - \dot{\sigma} \frac{\partial q}{\partial \sigma} + S_q + \mathcal{D}(q) \end{aligned}$$

鉛直境界条件:

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

物理過程

- 放射過程:
 - 短波… H_2O , O_3 による吸収, 雲による吸収・散乱, レイリー散乱を考慮 (Chou & Lee, 1996; Chou et al., 1998)
 - 長波… H_2O , O_3 , CO_2 , CH_4 , N_2O , 雲による吸収を考慮 (Chou et al., 2001, Chou & Kouvaris, 1991)
- 乱流混合過程: Mellor & Yamada (1982) Level 2.5 の方法に基づく
- 凝結過程:
 - 積雲対流…Relaxed Arakawa-Schubert スキーム (Moorthi & Suarez, 1992) を氷晶を含むように拡張
 - 大規模凝結…Le Treut & Li (1991) を氷晶を含むように拡張
- 雲過程: 移流, 乱流による混合, 凝結過程, 定数時定数による消滅を考慮
- 陸面過程: 熱伝導方程式, バケツモデル (Manabe, 1969)

実験設定

- 解像度: T21L26 (水平切断波数 21, 鉛直層数 26)
- 初期条件: 等温静止大気 (280 K)
- 計算時間: 60 年
- 時間ステップ: 30 分
- 地形: ETOPO1 (Amante and Eakins, 2009) を今回の実験の解像度に合わせて平滑化したもの
- 陸面アルベド分布: Matthews (1983, 1984, 1985)による
- 海表面アルベド分布: AMIP II (Atmosphere Model Intercomparison Project II) 境界値の海氷密度分布から生成
- オゾン分布: CMIP5 (Climate Model Intercomparison Project Phase 5) 設定の気候値の東西平均
- 海表面温度分布: AMIP II 境界値から生成

実験設定

- 惑星パラメータ
 - 現在の地球のものを用いる
 - 重力加速度: 9.8 m s^{-2}
 - 惑星半径: 6371 km
 - 自転軸傾斜角: 23.44°
 - 軌道離心率: 0.016713

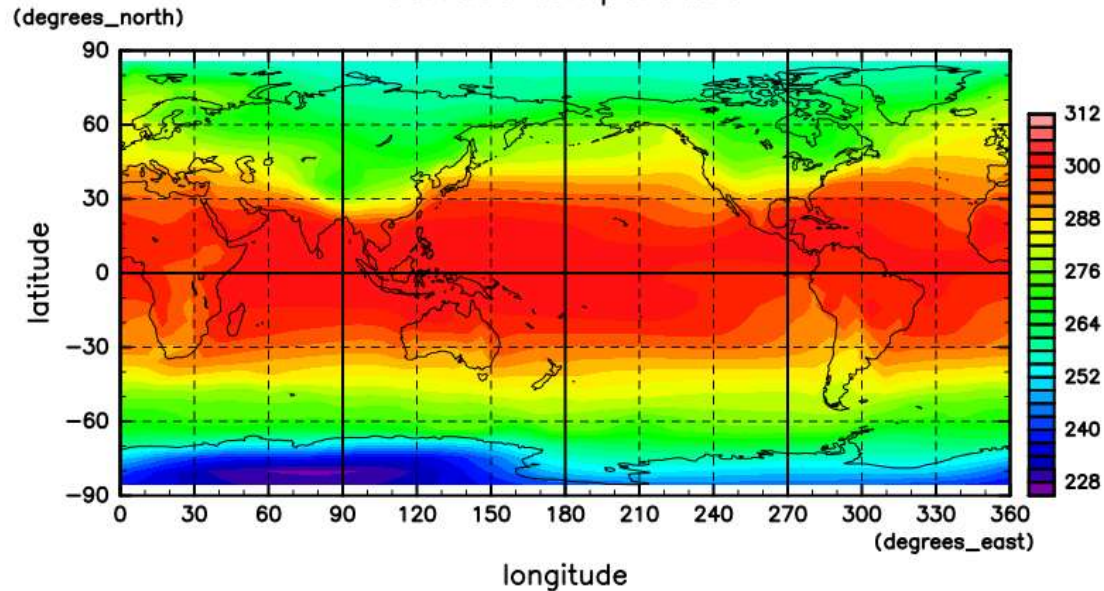
実験結果

- 年平均全エネルギーの時間変化
- 地表面温度分布
- 降水量分布
- 子午面東西平均温度分布
- 子午面東西平均東西風速分布

地表面温度分布

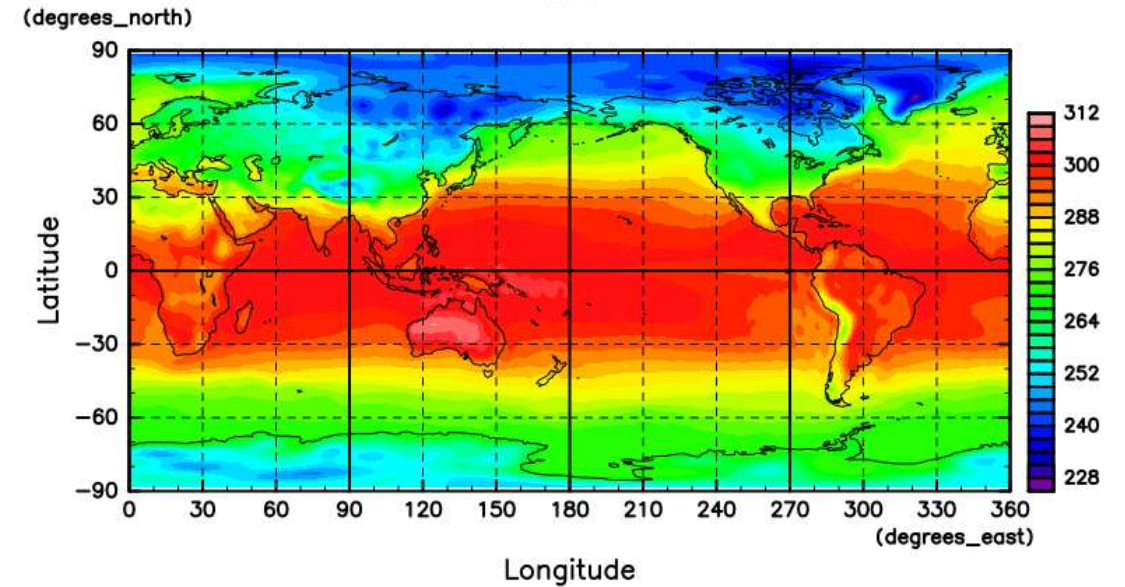
DCPAM5 による計算結果

surface temperature



NCEP の再解析データ

skt

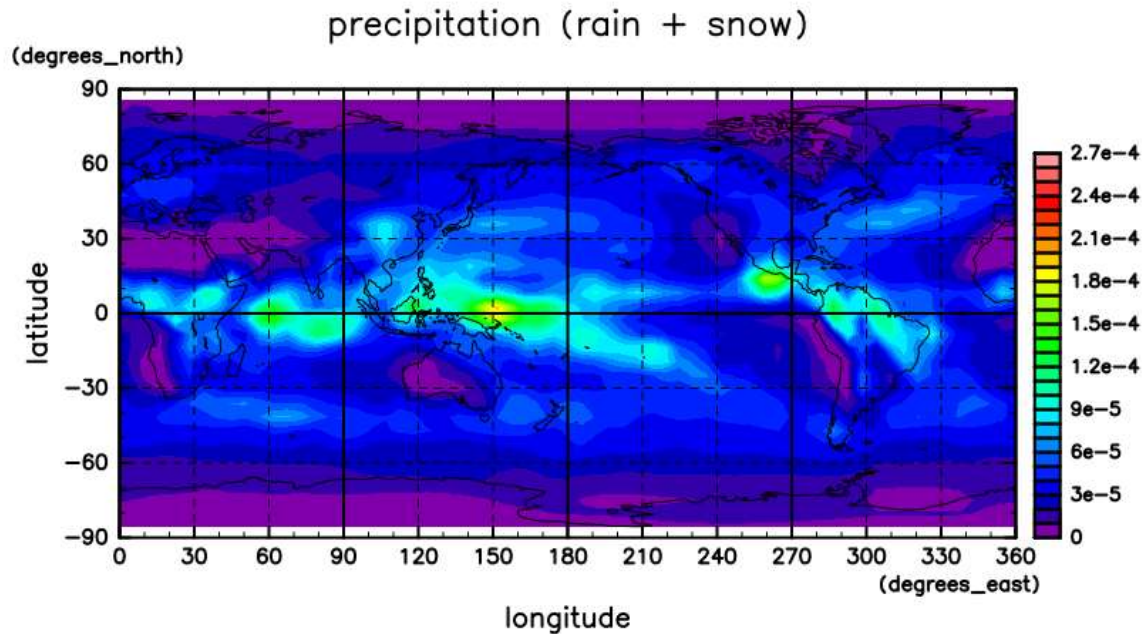


DCPAM5 による計算結果: 30 – 60 年の時間平均
NCEP の再解析データ: 1991 – 2020 年の時間平均
単位: K

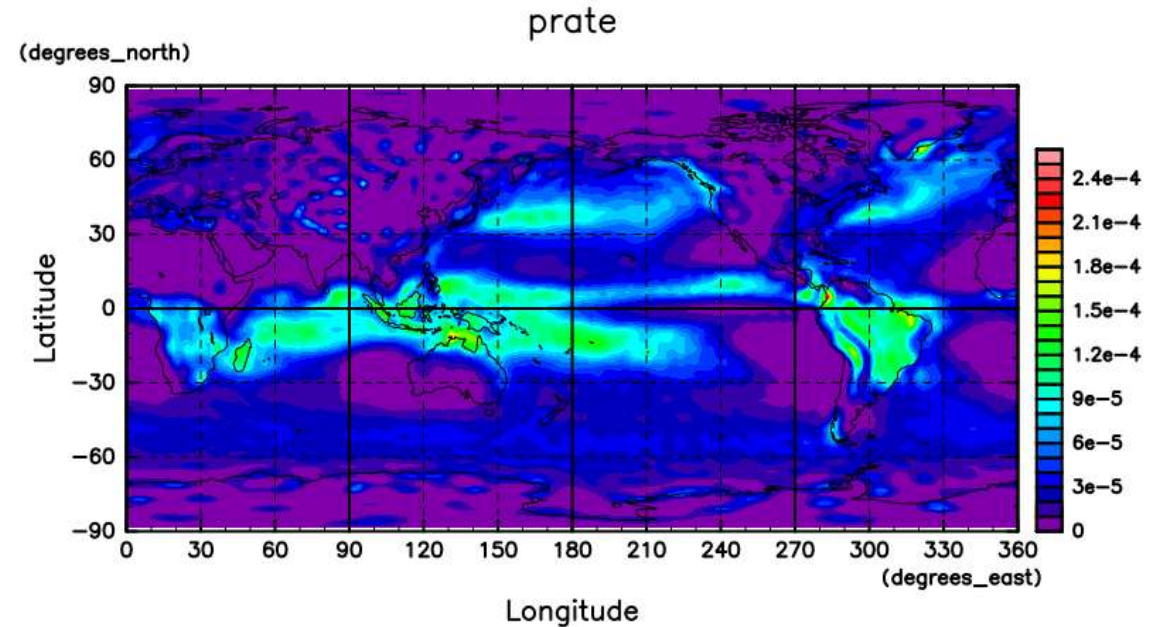
計算結果は再解析データに比べ、
北極付近でより高温
南極付近でより低温

降水量分布

DCPAM5 による計算結果



NCEP の再解析データ

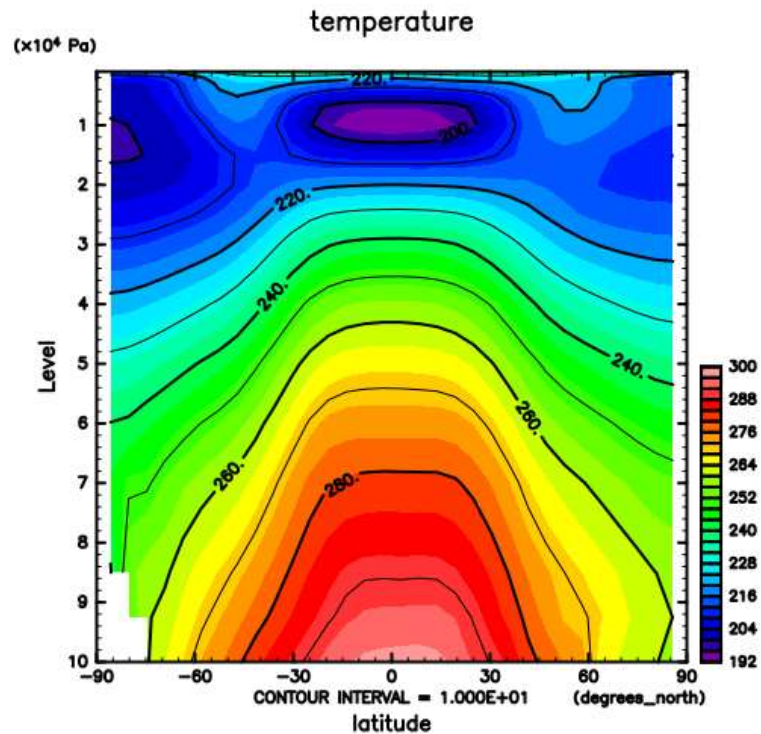


DCPAM5 による計算結果: 30 – 60 年の時間平均
NCEP の再解析データ: 1991 – 2020 年の時間平均
単位: $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$

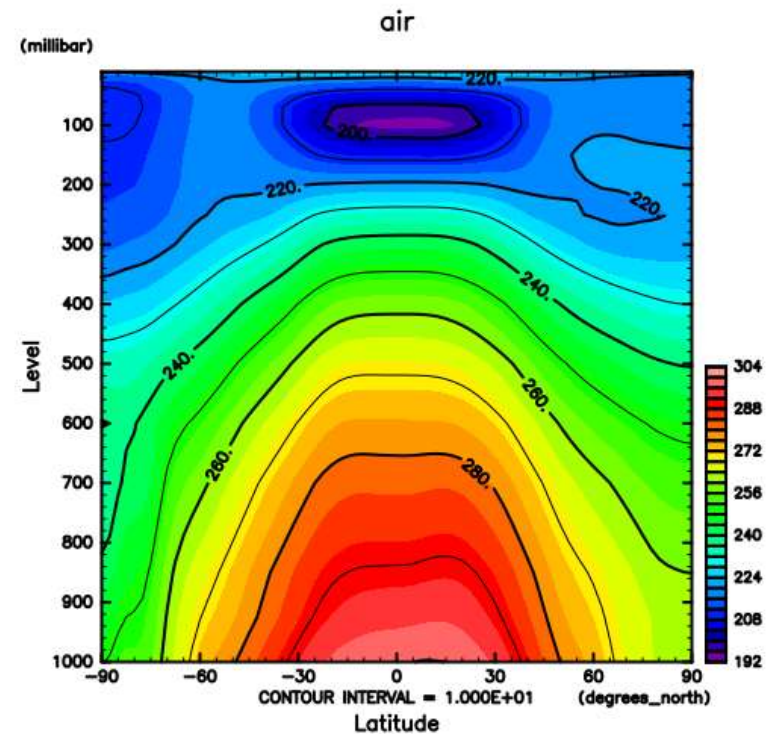
計算結果は再解析データに比べ、
北緯 30° – 75° の陸上において、
局所的な変化が無い
→計算結果の解像度がより小さいためか

子午面東西平均温度分布

DCPAM5 による計算結果



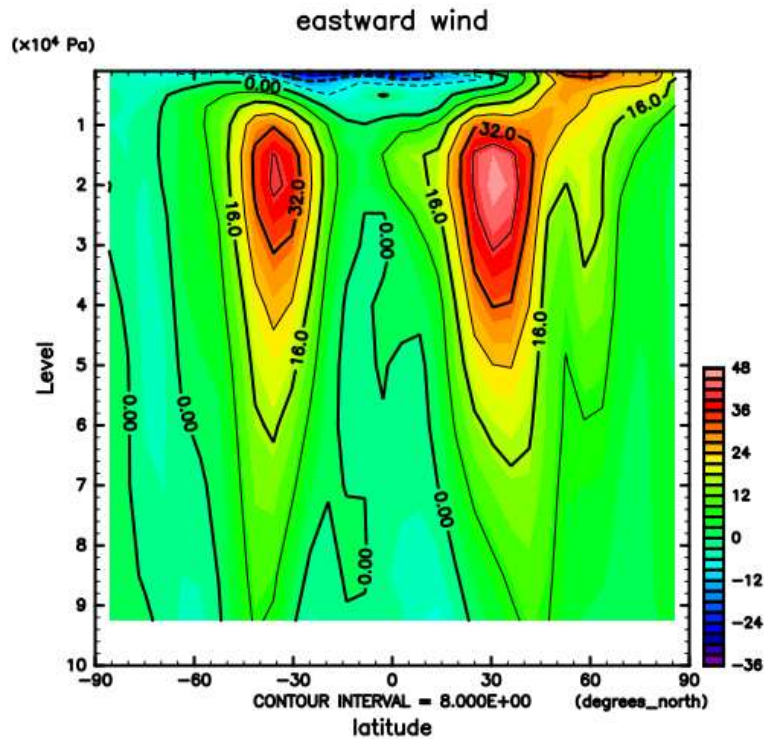
NCEP の再解析データ



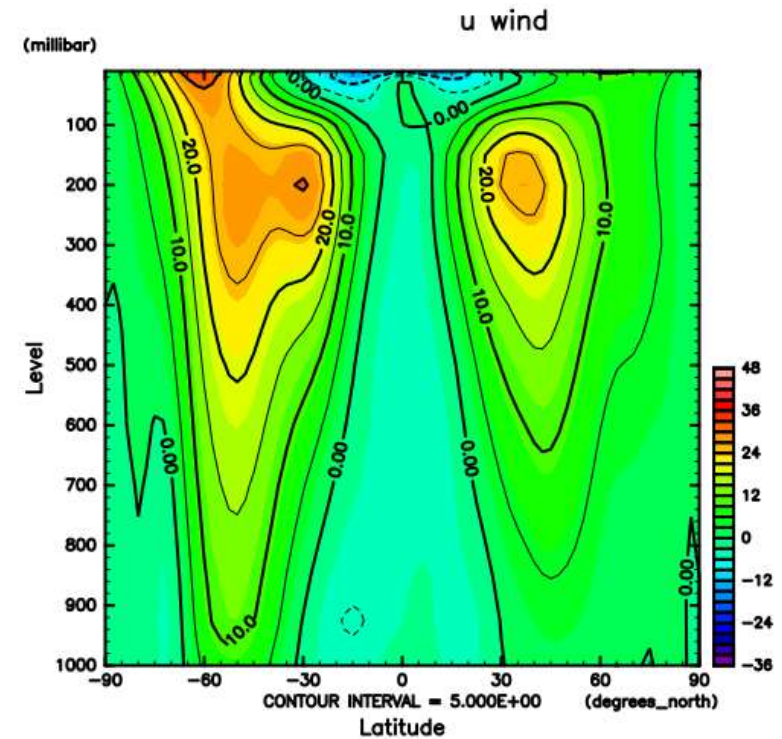
DCPAM5 による計算結果: 55 – 60 年の時間平均
NCEP の再解析データ: 2016 – 2020 年の時間平均
単位: K

子午面東西平均東西風速分布

DCPAM5 による計算結果



NCEP の再解析データ



DCPAM5 による計算結果: 55 – 60 年の時間平均
NCEP の再解析データ: 2016 – 2020 年の時間平均
単位: m s^{-1}

計算結果は再解析データに比べ、
ジェット中心の風速が大きい

まとめと今後の方針

- 惑星気候のパラメータ変化実験を行う前の段階として、地球気候に似た条件で計算を行った
- 今後の方針としては、注目するパラメータを決定し、今回の実験を標準実験として、パラメータ変化実験を行う。
- また、今回行わなかった質量流線関数についての描画を試みる

参考資料

- 「DCPAM 地球のような惑星の実験」 (https://www.gfd-dennou.org/arch/yot/students/tierraki/DCPAM_elp/index_elp.htm)
- 「大気大循環モデルを用いた 地球気候の太陽定数依存性に関する数値的研究」 (松田, 2018)
- 「DCPAM5 支配方程式系とその離散化」 (2014) (http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/dcpam5/dcpam5_latest/doc/basic_equations/pub/basic_equations.pdf)