

惑星気候のパラメータ変更実験の ための地球パラメータ実験

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 M2

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
- 惑星気候のパラメータ依存性を調べることは, 惑星気候の系統的な理解に繋がる
- 数値モデルを用いた惑星気候の軌道要素依存性について調べる方針

目的

- パラメータ変更実験を行う前に, モデルで出した結果が現実の惑星大気をどの程度表現できるかを調べる必要がある
- 今回は, エネルギー収支について調べた

使用したモデル

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

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

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)

「気候値実験」と「板海実験」

今回, 以下の 2 種類の条件で実験を行った. 詳細な実験設定の違いは後述

- **気候値実験**: 海表面温度分布, 海表面アルベド分布を外部データから与える
- **板海実験**: 深さ 60 m の板海を仮定し, 海表面温度分布, 海表面アルベド分布をモデル内で計算する

実験設定：2 実験共通

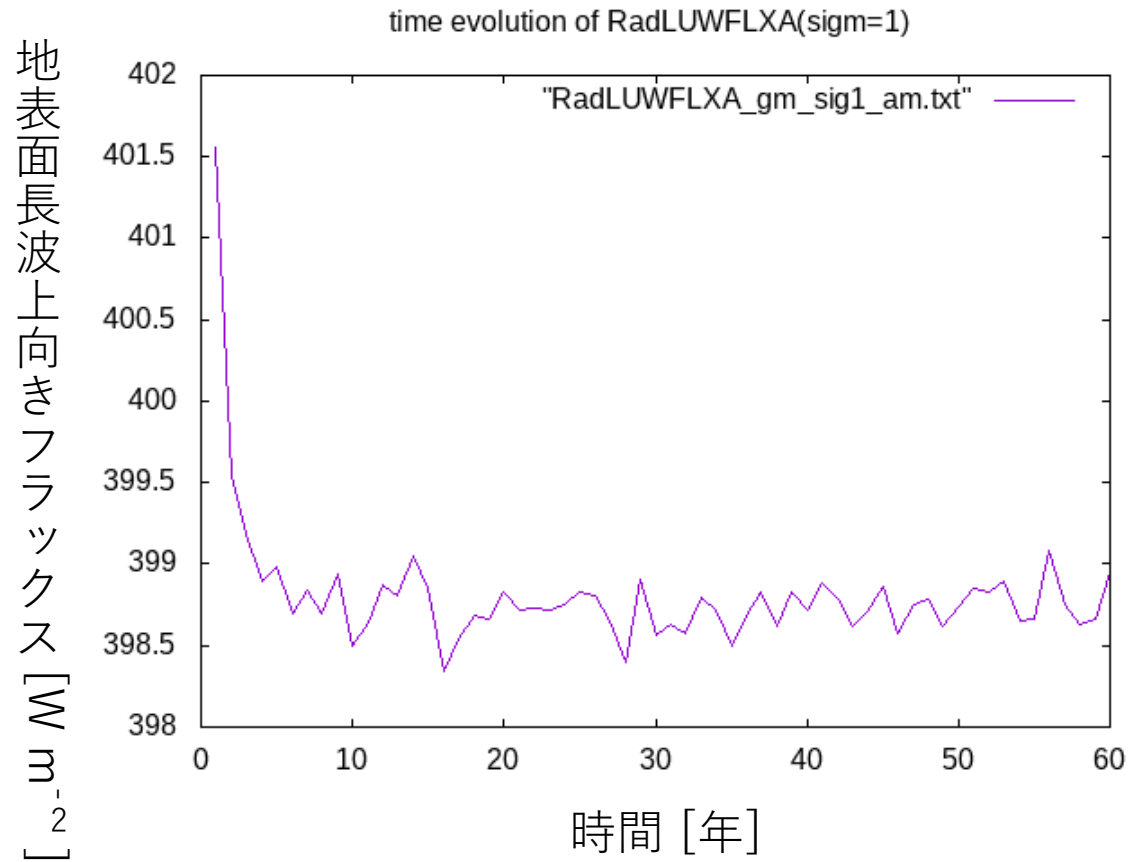
- 解像度: T21L26 (水平切断波数 21, 鉛直層数 26)
- 初期条件: 等温静止大気 (280 K)
- 計算時間: 60 年
- 時間ステップ: 30 分
- 地形: ETOPO1 (Amante and Eakins, 2009) を今回の実験の解像度に合わせて平滑化したもの
- 雲水消滅時定数: 3120 s
- 雲氷消滅時定数: 8400 s
- 惑星パラメータ
 - ▶ 現在の地球のものを用いる
 - ▶ 重力加速度: 9.8 m s^{-2}
 - ▶ 惑星半径: 6371 km
 - ▶ 自転軸傾斜角: 23.44°
 - ▶ 軌道離心率: 0.016713

実験設定：2 実験で異なるもの

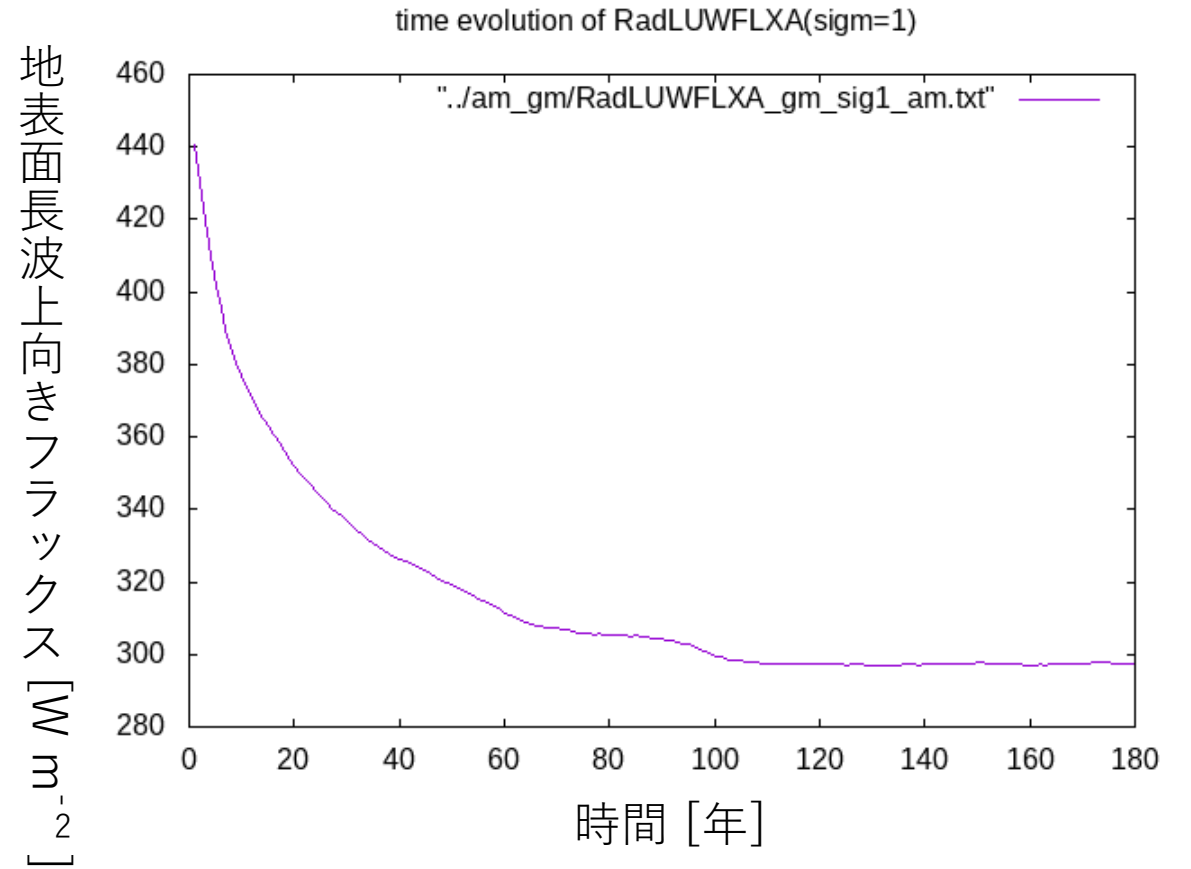
	気候値実験	板海実験
陸面アルベド分布	Matthews (1983, 1984, 1985)による	より簡単な分布
海表面温度分布	AMIP II (Atmosphere Model Intercomparison Project II) 境界値から生成	モデル内で計算
海表面アルベド分布	AMIP II 境界値の海氷密度分布から 生成	海表面温度分布から生成
オゾン分布	CMIP5 (Climate Model Intercomparison Project Phase 5) 設定の気候値の東西平均	無し
積分時間	60 年	180 年

エネルギーフラックスの時間発展

気候値実験

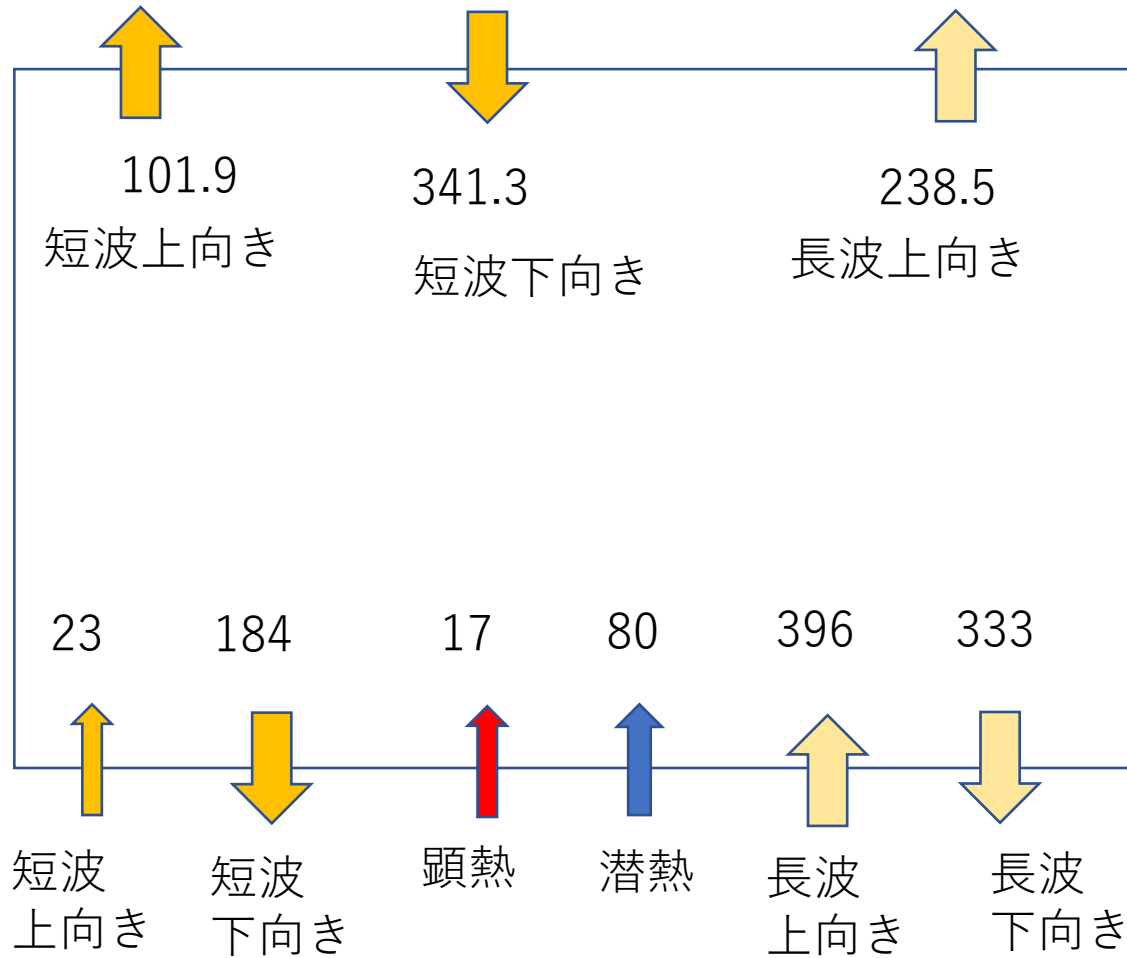


板海実験

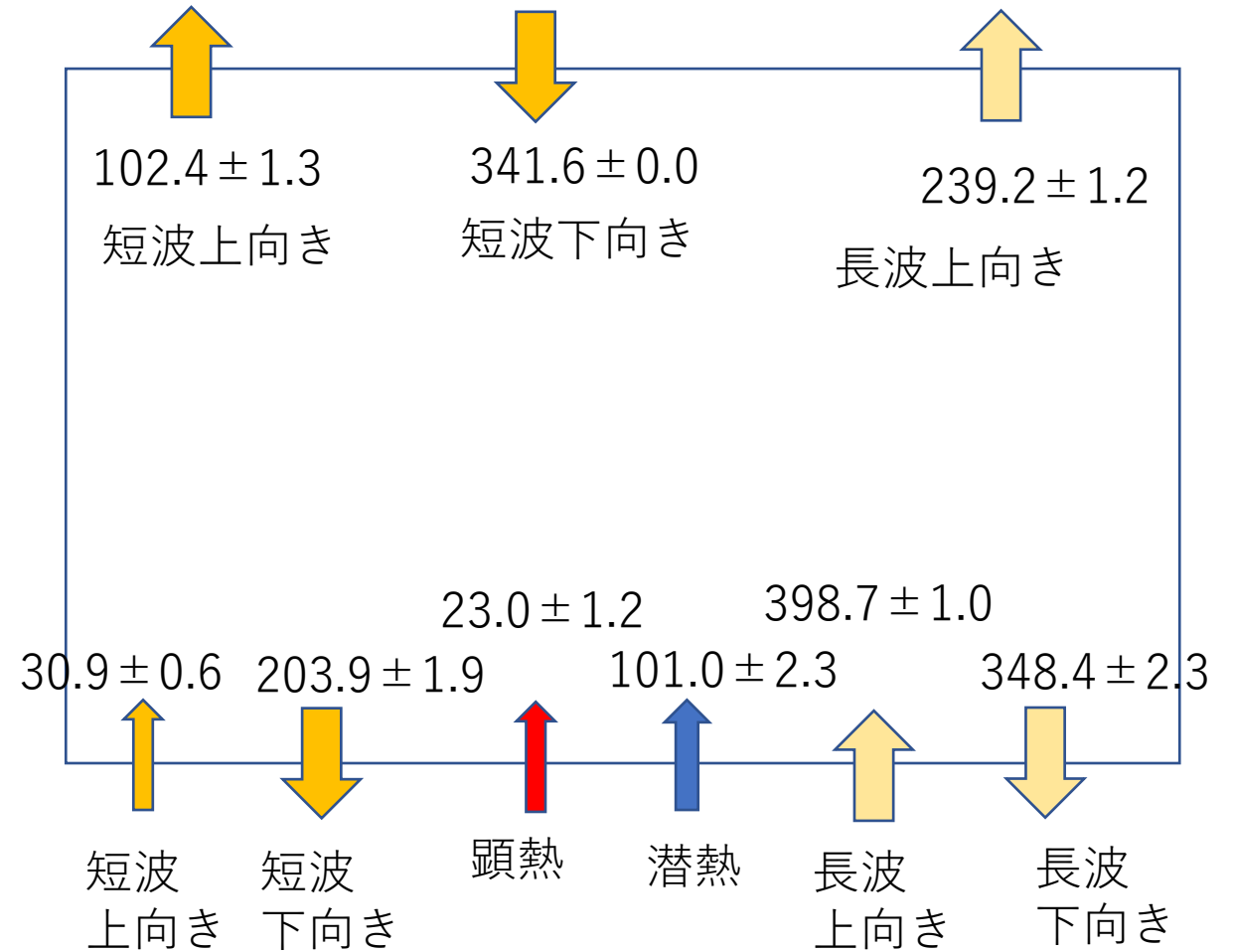


気候値実験では 10 年, 板海実験では 100 年で準定常状態に達したと判断

エネルギー収支の様子：観測結果と気候値実験



Trenberth et al. (2009) FIG.1 (観測結果)

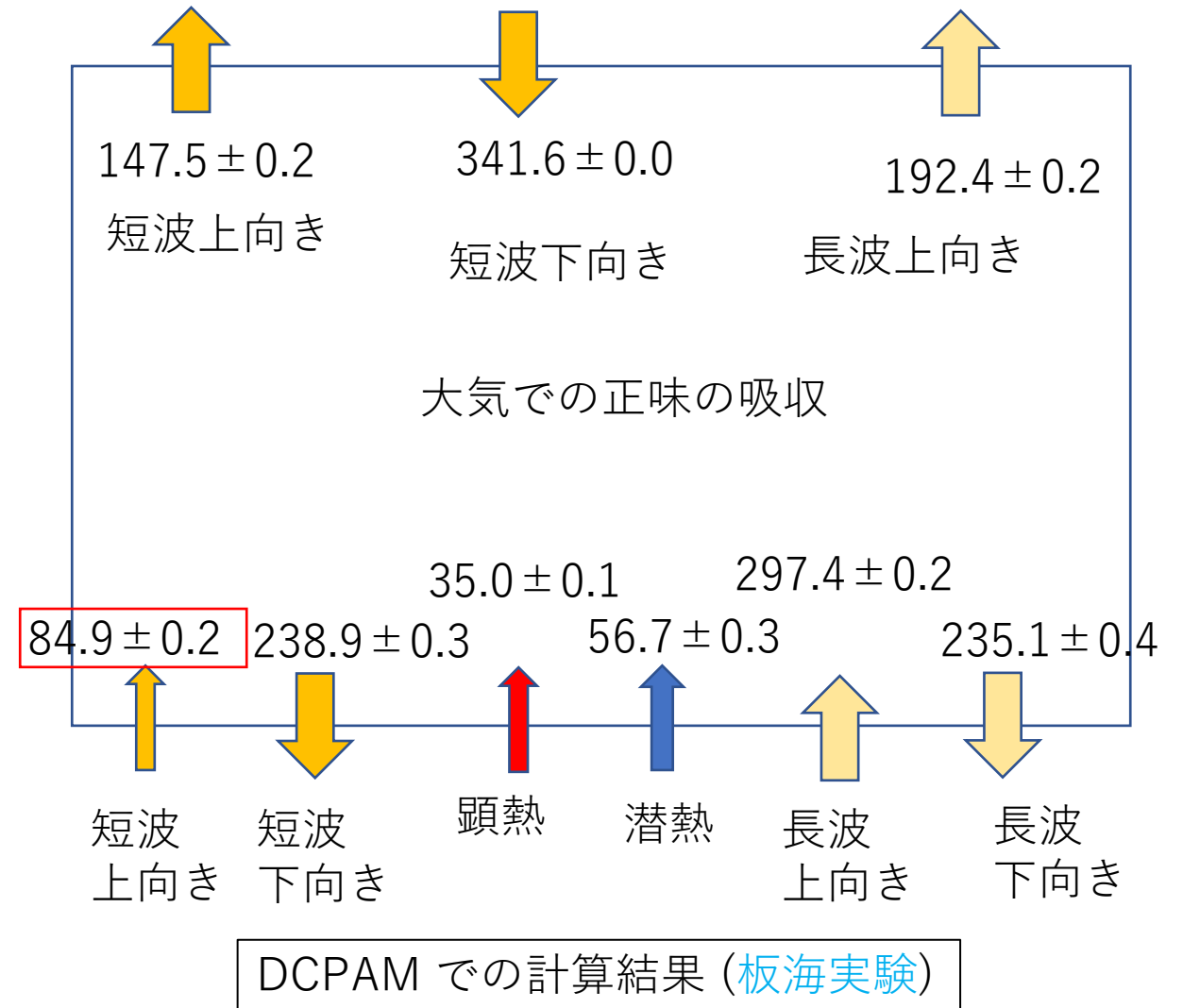
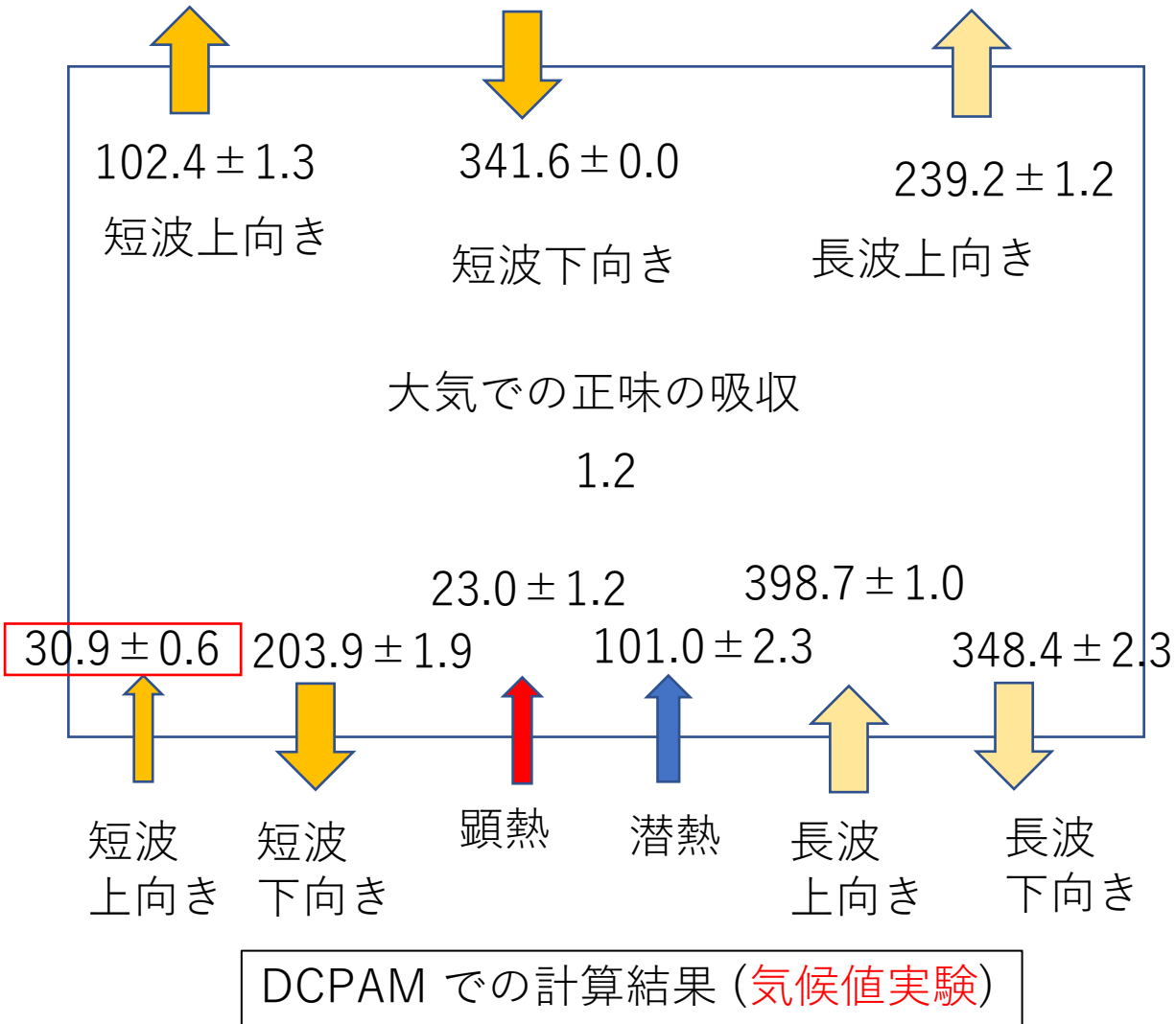


DCPAM での計算結果 (気候値実験)

平均期間…気候値実験: 10 ~ 60 年目までの 50 年間
板海実験: 120 ~ 180 年目までの 60 年間

単位: $W m^{-2}$

エネルギー収支の全球平均：気候値実験と板海実験

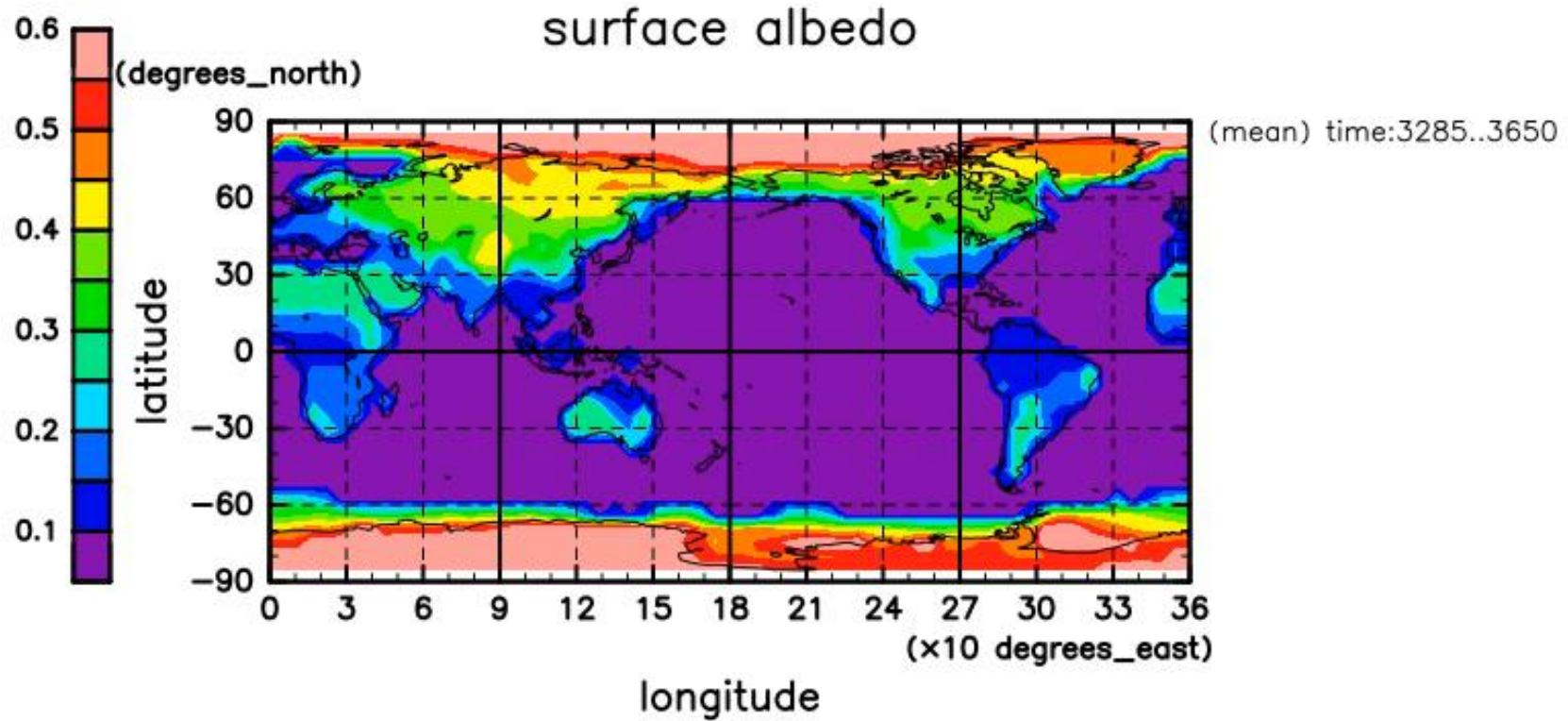


気候値実験と板海実験でエネルギーフラックスは大きく異なる

単位: $W m^{-2}$

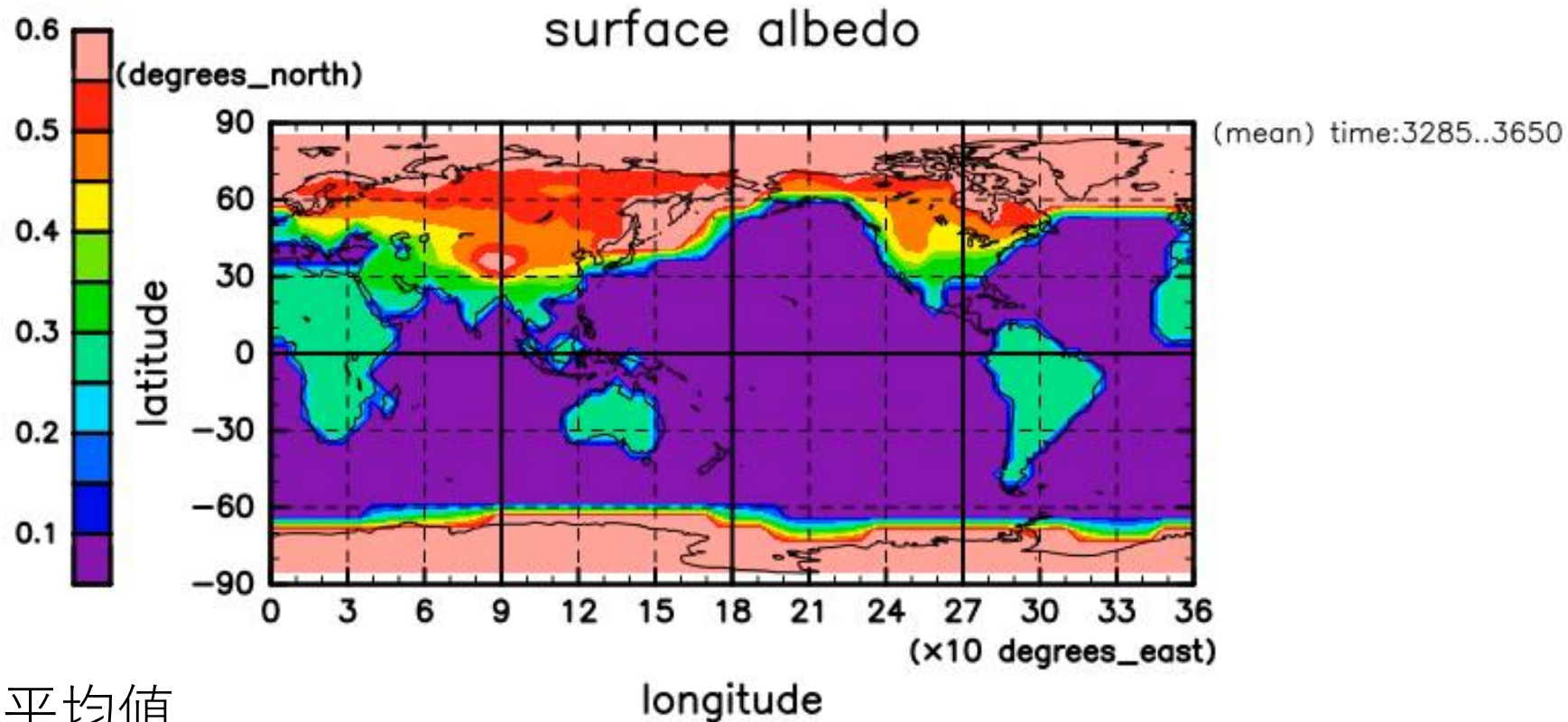
平均期間…気候値実験: 10 ~ 60 年目までの 50 年間
板海実験: 120 ~ 180 年目までの 60 年間

表面アルベドの全球分布 (気候値実験)



10 年目毎の年平均値

表面アルベドの全球分布 (板海実験)



10年目毎の年平均値

板海実験において、氷線がより低緯度に移動している

(松田修論 (2018) において、初期条件の違いが氷線緯度の違いを生むことが示唆されている)

高アルベドの領域が気候値実験と比べて大きいため、表面上向きフラックスがより大きくなったと考えられる

まとめ

- エネルギー収支について、観測結果と気候値実験の結果は概ね一致した
- エネルギー収支について、気候値実験と板海実験の結果は大きく異なった
 - ▶ 表面アルベド分布の違いが上記の差異をもたらしたと考えられる
- 松田修論 (2018) の結果を受けると、板海実験において適切な初期条件を置く必要がある

今後の課題

- 板海実験において、より気候値実験の結果に近い初期条件を探す
 - 既に行った実験のデータを元に
 - 子午面東西風分布の時間発展
 - 子午面流線関数分布の時間発展
 - 子午面温度分布の時間発展
- を調べる
- 惑星気候の軌道要素依存性について調べた研究の調査

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.ja)
- 松田 (2018). 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, 神戸大学大学院理学研究科修士論文
- 「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)
- K. E. Trenberth et al. (2009). Earth's Global Energy Budget, Bulletin of the American Meteorological Society, 311-324.
- Kaspi, Y., & Showman, A. P. (2015). ATMOSPHERIC DYNAMICS OF TERRESTRIAL EXOPLANETS OVER A WIDE RANGE OF ORBITAL AND ATMOSPHERIC PARAMETERS. The Astrophysical Journal, 804:60, 18pp. doi:10.1088/0004-637X/804/1/60