

# 惑星大気大循環モデル DCPAM による地球のエネルギー収支の 計算結果と観測データとの比較

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

伊藤旭人

# 発表の流れ

- ◆ 経緯と方針
- ◆ 大気大循環モデル DCPAM の説明
- ◆ 解析手法
- ◆ 結果
- ◆ まとめと今後の課題

# 経緯と方針

- ◆現在, 大気大循環モデルを用いた計算の練習中
- ◆地球大気に似た条件で計算を行っている
- ◆スピンアップ時間に興味湧いた
  - ◆スピンアップ時間…数値計算において, 計算開始時刻から初期値によるノイズがなくなるまでの時間
- ◆観測データと比較して, 計算結果が安定解をとるまでの様子を観察

# 経緯と方針

- ◆大気のエネルギー収支という観点からスピンアップ時間を推測する
- ◆具体的には, OLRA(大気上端における外向き長波放射フラックス), OSRA(大気上端における外向き短波放射フラックス), SLRA(地表面長波放射フラックス), SSRA(地表面短波放射フラックス), EvapU(潜熱フラックス), SensA(顕熱フラックス)の合計をとり, 大気に対する収支を見る
  - ◆データ処理の途中にミスがあり, 最後まで解析ができていない

# 大気大循環モデル DCPAM

- ◆地球流体電脳倶楽部有志によって開発されている, 惑星全球大気の物理量を計算する数値モデル
- ◆座標系
  - ◆経度 ( $\varphi$ ), 緯度 ( $\lambda$ ), 気圧を地表面気圧で規格化したもの ( $\sigma = p/p_s$ )
- ◆支配方程式
  - ◆プリミティブ方程式
- ◆放射過程
  - ◆地球用放射モデル (長波, 短波)

# プリミティブ方程式

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

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

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{1}{a} \left( \frac{1}{1-\mu^2} \frac{\partial V_A}{\partial \lambda} - \frac{\partial U_A}{\partial \mu} \right) + \mathcal{D}(\zeta)$$

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

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

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

$t$ : 時間,  $D$ : 発散,  $\zeta$ : 渦度,  $T$ : 温度,

$q$ : 比湿,  $u$ : 東西風速,  $v$ : 南北風速,

$\Phi$ : ジオポテンシャル高度,  $T_v$ : 仮温度,

$\bar{T}$ : 基準温度,  $\mathcal{D}(\zeta)$ : 渦度の水平拡散とスポンジ層における散逸,  $\mathcal{D}(D)$ : 発散の水平拡散とスポンジ層における散逸,  $\mathcal{D}(q)$ : 水蒸

気の水平拡散,  $\mathcal{D}(T)$ : 熱の水平拡散,

$\mathcal{D}'(\mathbf{v})$ : 摩擦熱

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

$Q$ : 熱強制,  $S_q$ : 水蒸気ソース,  $\mathcal{D}'(\mathbf{v})$ : 摩

擦熱

# プリミティブ方程式

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

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

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{1}{a} \left( \frac{1}{1-\mu^2} \frac{\partial V_A}{\partial \lambda} - \frac{\partial U_A}{\partial \mu} \right) + \mathcal{D}(\zeta)$$

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

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

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

$a$ : 惑星半径,  $R$ : 乾燥大気の気体定数,

$C_p$ : 乾燥大気の定圧比熱,  $f$ : コリオリパラ

メータ,

$$\pi = \ln p_s$$

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

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

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

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

$$KE = \frac{U^2 + V^2}{2(1-\mu^2)}$$

$$T' = T - \bar{T}$$

$$T'_v = T_v - \bar{T}$$

$$\kappa = R/C_p$$

# プリミティブ方程式

◆境界条件

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

# 実験設定

## ◆解像度

- ◆T21L26 (切断波数 21, 鉛直層数 26)

## ◆初期条件

- ◆静止大気
- ◆ $280 \pm 0.1$  K 程度の範囲の温度分布

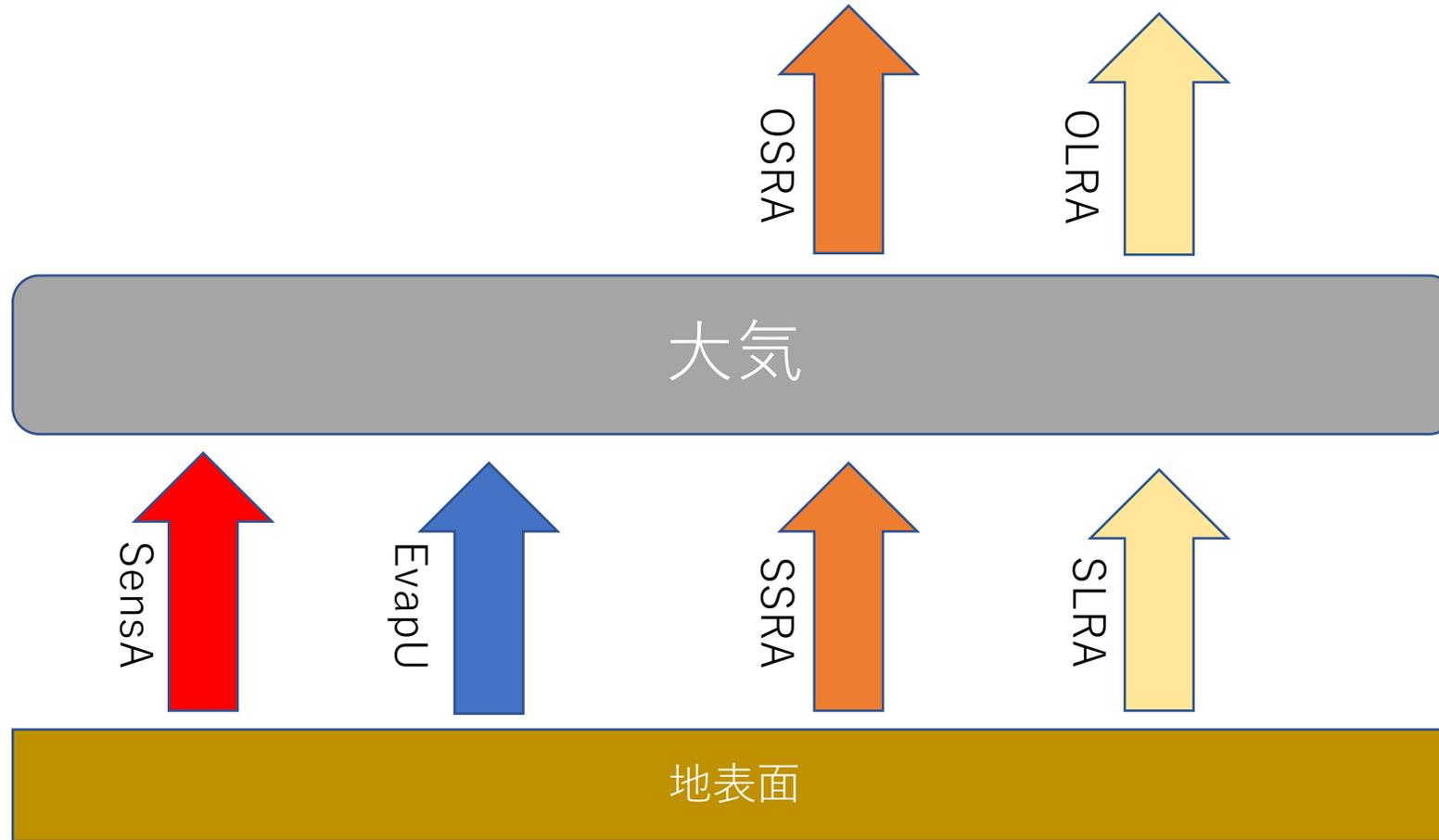
## ◆積分期間

- ◆6 年
- ◆時間ステップは 0.25 日

# 解析手法

- ◆ 計算結果の OLRA, OSRA, SLRA, SSRA, EvapU, SensA について, 時間ステップごとに全球平均値を計算する
- ◆ 全球平均値の年間移動平均値を, 1 時間ステップずつずらしながら計算する
- ◆ 各物理量の年間移動平均値を合計し, 大気についての収支を計算する
  - ◆  $OLRA + OSRA - SLRA - SSRA - EvapU - SensA$
  - ◆ スピンアップ時間程度で収支はゼロに漸近すると予想

# 大気のエネルギー収支の模式図



計算結果のデータでは, 鉛直上向きが正.  
各物理量は正味の量.

# 解析手法

- ◆ 数値計算結果との比較対象として, NCEP-NCAR Reanalysis Data を用いる
- ◆ 1991 – 2020 年の 30 年分の日ごとの平均値を用いる
- ◆ 時間方向に平均をとり, 年平均値を出す
- ◆ 各物理量について, 計算結果から算出した年間移動平均値と観測データの年平均値とを比較する
  - ◆ スピンアップ時間以前は明らかに観測データの値から外れ, その後観測データの値に漸近していくと予想

# 結果

- ◆ 前述の手法で計算結果からの年間移動平均の算出を試みた
- ◆ しかし, 全球平均値を計算する段階でミスを発見
  - ◆ 球面座標系での計算に必要なファクターを加味していなかった
- ◆ 現在解析プログラムの修正中

# まとめと今後の課題

- ◆ スピンアップ時間の見積もりを行うため、計算結果の年間移動平均推移の計算および計算結果の年間移動平均値と観測データの年平均値との比較を計画した
- ◆ まずは解析プログラムの修正を行う
- ◆ スピンアップ時間の理論的側面を知らないなので、その理解に努める

# 参考文献

- ◆ [http://www.gfd-dennou.org/arch/yot/students/tierraki/DCPAM\\_elp/index\\_elp.htm](http://www.gfd-dennou.org/arch/yot/students/tierraki/DCPAM_elp/index_elp.htm) (「DCPAM 地球のような惑星の実験」)
- ◆ [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) (「DCPAM5 支配方程式系とその離散化」)
- ◆ Kevin E. Trenberth, John T. Fasullo, & Jeffrey Kiehl (2009). Earth's Global Energy Budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90:3, 14pp.  
doi: <https://doi.org/10.1175/2008BAMS2634.1>