第3章　数値モデルの概要

本研究では, 地球流体電脳倶楽部で開発している惑星大気大循環モデル DCPAM5 を用いた．ここでは DCPAM5 の概要を述べる．詳細については DCPAM5 [*1] のドキュメントを参照されたい.

3.1　座標系

座標系は, 水平方向には緯度 φ, 経度 λ, 鉛直方向には $\sigma \equiv p/p_s$ をとった三次元の球面座標系を用いる．ここで p は気圧, p_s は表面気圧である.

3.2　力学過程

ここで述べる力学過程とは, 流体の支配方程式における外力項を除いた部分を指す．大気の運動を記述する方程式系には, 静水圧平衡を仮定したプリミティブ方程式系を用いる．プリミティブ方程式系における, 連続の式, 静水圧平衡の式, 運動方程式, 熱力学の式, 水蒸気の式は以下のように書ける.

連続の式:

$$\frac{\partial \pi}{\partial t} + \boldsymbol{v}_H \cdot \nabla_\sigma \pi = -D - \frac{\partial \dot{\sigma}}{\partial \sigma}. \tag{3.1}$$

静水圧平衡の式:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} = -\frac{RT_v}{\sigma}. \tag{3.2}$$

[*1] URL: `http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/dcpam5/dcpam5_latest/doc/`

運動方程式:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{1}{a}\left(\frac{1}{1-\mu^2}\frac{\partial V_A}{\partial \lambda} - \frac{\partial U_A}{\partial \mu}\right) + \mathcal{D}(\zeta), \tag{3.3}$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \frac{1}{a}\left(\frac{1}{1-\mu^2}\frac{\partial U_A}{\partial \lambda} + \frac{\partial V_A}{\partial \mu}\right) - \nabla_\sigma^2(\Phi + R\overline{T}\pi + KE) + \mathcal{D}(D). \tag{3.4}$$

ここで,

$$U_A(\phi,\lambda,\sigma) \equiv (\zeta + f)V - \dot{\sigma}\frac{\partial U}{\partial \sigma} - \frac{RT_v'}{a}\frac{\partial \pi}{\partial \lambda} + \mathcal{F}_\lambda \cos\varphi, \tag{3.5}$$

$$V_A(\phi,\lambda,\sigma) \equiv -(\zeta + f)V - \dot{\sigma}\frac{\partial V}{\partial \sigma} - \frac{RT_v'}{a}(1-\mu^2)\frac{\partial \pi}{\partial \mu} + \mathcal{F}_\varphi \cos\varphi. \tag{3.6}$$

熱力学の式:

$$\begin{aligned}\frac{\partial T}{\partial t} =& -\frac{1}{a}\left(\frac{1}{1-\mu^2}\frac{\partial UT'}{\partial \lambda} + \frac{\partial VT'}{\partial \mu}\right) + T'D \\ & - \dot{\sigma}\frac{\partial T}{\partial \sigma} + \kappa T_v\left(\frac{\partial \pi}{\partial t} + \boldsymbol{v}_H\cdot\nabla_\sigma \pi + \frac{\dot{\sigma}}{\sigma}\right) + \frac{Q}{C_p} + \mathcal{D}(T) + \mathcal{D}'(\boldsymbol{v}).\end{aligned} \tag{3.7}$$

水蒸気の式:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{1}{a\cos\phi}\left(\frac{1}{1-\mu^2}\frac{\partial Uq}{\partial \lambda} + \frac{\partial Vq}{\partial \mu}\right) + qD - \dot{\sigma}\frac{\partial q}{\partial \sigma} + S_q + \mathcal{D}(q) \tag{3.8}$$

各変数の意味は表 3.1 の通りである. ここで, $\pi \equiv \ln p_s$, $\mu \equiv \sin\varphi$, $T' \equiv T - \overline{T}$, $T_v' \equiv T_v - \overline{T}$, $\kappa \equiv R/C_p$ である.

また, 鉛直方向の境界条件は,

$$\dot{\sigma} = 0, \quad \text{at} \quad \sigma = 0, 1 \tag{3.9}$$

である.

3.3 物理過程

力学過程の方程式系における粘性項や非断熱加熱項は, 様々な物理過程を考慮して計算する. ここではその概要を述べる.

放射過程として, 短波では H_2O, O_3 による吸収, 雲による吸収・散乱とレイリー散乱を, Chou and Lee (1996), Chou et al. (1998), Chou and Lee (1996) に基づ

いて考慮する．長波では $H_2O, CH_4, N_2O, CO_2, O_3$ と雲による吸収を, Chou et al. (2001), Chou and Kouvaris (1991) に基づいて考慮する.

乱流混合過程には, Mellor and Yamada (1982) Level 2.5 の方法に基づく乱流拡散係数を用いる. 惑星表面におけるフラックスの評価には Beljaars and Holtslag (1991) の方法を用いている.

凝結過程には, 積雲対流~~に~~は Relaxed Arakawa-Schubert スキーム (Moorthi and Suarez, 1992) で評価し, 大規模凝結は Le Treut and Li (1991) で評価したものを用いる.

表 3.1: 支配方程式系に含まれる変数の定義

変数	物理量
t	時間
$\boldsymbol{v}_H$	風速
D	発散 $[\mathrm{s}^{-1}]$
$\dot{\sigma}$	σ 系での鉛直速度
Φ	ジオポテンシャル高度 $[\mathrm{m}^2\,\mathrm{s}^{-2}]$
T_v	仮温度
ζ	渦度
a	惑星半径 [m]
$\mathcal{D}(*)$	水平拡散と散逸項
$\overline{T}$	基準温度 [K]
KE	運動エネルギー
$\mathcal{F}_\lambda, \mathcal{F}_\varphi$	小規模運動過程
T	気温 [K]
p	気圧
q	比湿 $[\mathrm{kg\,kg}^{-1}]$
Q	加熱, 温度変化