COCO

2013/07/01

目 次

第1章 Model description

1.1 海洋モデル

本研究で用いる海洋大循環モデルは東京大学気候システム研究センターで開発された CCSR Ocean Component model (COCO) version 4 である. 以下ではこのモデルについて簡単に述べる.

1.1.1 基礎方程式系

基礎方程式は一般曲線直交座標系で定式されたプリミティブ方程式で, ブシネスク近似および静水圧近似を適用する.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{h_x h_y}\left[\frac{\partial}{\partial x}(h_y uu) + \frac{\partial}{\partial y}(h_x vu)\right] + \frac{\partial}{\partial z}(wu) + h_{xy}uv - h_{yx}vv - fv = -\frac{1}{\rho_0 h_x}\frac{\partial p}{\partial x} + \mathcal{V}_u, \tag{1.1}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{h_x h_y}\left[\frac{\partial}{\partial x}(h_y uv) + \frac{\partial}{\partial y}(h_x vv)\right] + \frac{\partial}{\partial z}(wv) + h_{yx}uv - h_{xy}uu + fv = -\frac{1}{\rho_0 h_y}\frac{\partial p}{\partial y} + \mathcal{V}_v, \tag{1.2}$$

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial y} - \rho g, \tag{1.3}$$

$$\frac{1}{h_x h_y}\left[\frac{\partial}{\partial x}(h_y u) + \frac{\partial}{\partial y}(h_x v)\right] + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \tag{1.4}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{h_x h_y}\left[\frac{\partial}{\partial x}(h_y uT) + \frac{\partial}{\partial y}(h_x vT)\right] + \frac{\partial}{\partial z}(wT) = \mathcal{D}_T, \tag{1.5}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{1}{h_x h_y}\left[\frac{\partial}{\partial x}(h_y uS) + \frac{\partial}{\partial y}(h_x vS)\right] + \frac{\partial}{\partial z}(wS) = \mathcal{D}_S, \tag{1.6}$$

$$\rho = \rho(T, S, P) \tag{1.7}$$

t は時間, x, y は水平座標, z は鉛直座標, (u, v, w) はそれぞれ (x, y, z) 方向の速度, p は圧力, T は温位, S は塩分を表す. g は重力加速度, f はコリオリパラメタである.

係数 h_x, h_y はそれぞれ x, y 方向のメトリクスで

$$h_{x,y} = \frac{1}{h_x h_y}\frac{\partial h_x}{\partial y}, \quad h_{y,x} = \frac{1}{h_x h_y}\frac{\partial h_y}{\partial y} \tag{1.8}$$

である. $\mathcal{D}_T, \mathcal{D}_S$ は拡散項, $\mathcal{V}_u, \mathcal{V}_v$ は粘性項を表す.

$$\mathcal{D}_T = \frac{1}{h_x h_y}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(K_H \frac{h_y}{h_x}\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_H \frac{h_x}{h_y}\frac{\partial T}{\partial y}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_V \frac{\partial T}{\partial z}\right), \tag{1.9}$$

$$\mathcal{D}_S = \frac{1}{h_x h_y}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(K_H \frac{h_y}{h_x}\frac{\partial S}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_H \frac{h_x}{h_y}\frac{\partial S}{\partial y}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_V \frac{\partial S}{\partial z}\right), \tag{1.10}$$

$$\mathcal{V}_u = \frac{1}{h_x h_y}\left[\frac{1}{h_y}\frac{\partial}{\partial x}\left(h_y^2 \frac{\tau_{xx} - \tau_{yy}}{2}\right) + \frac{1}{h_x}\frac{\partial}{\partial y}(h_x^2 \tau_{xy})\right] + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + \frac{\tau_{xz}}{a}, \tag{1.11}$$

$$\mathcal{V}_v = \frac{1}{h_x h_y}\left[\frac{1}{h_y}\frac{\partial}{\partial x}(h_y^2 \tau_{xy}) + \frac{1}{h_x}\frac{\partial}{\partial y}\left(h_x^2 \frac{\tau_{yy} - \tau_{xx}}{2}\right)\right] + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + \frac{\tau_{yz}}{a} \tag{1.12}$$

$$\mathcal{D}_T = \frac{1}{h_x h_y}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(K_H \frac{h_y}{h_x}\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_H \frac{h_x}{h_y}\frac{\partial T}{\partial y}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_V \frac{\partial T}{\partial z}\right), \tag{1.13}$$

$$\mathcal{D}_S = \frac{1}{h_x h_y}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(K_H \frac{h_y}{h_x}\frac{\partial S}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_H \frac{h_x}{h_y}\frac{\partial S}{\partial y}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_V \frac{\partial S}{\partial z}\right), \tag{1.14}$$

$$\mathcal{V}_u = \frac{1}{h_x h_y}\left[\frac{\partial}{\partial x}(h_y \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(h_x \tau_{xy})\right] + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + h_{xy}\tau_{yx} - h_{yx}\tau_{yy} + \frac{\tau_{zx}}{a}, \tag{1.15}$$

$$\mathcal{V}_v = \frac{1}{h_x h_y}\left[\frac{\partial}{\partial x}(h_y \tau_{yx}) + \frac{\partial}{\partial y}(h_x \tau_{yy})\right] + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + h_{yx}\tau_{xy} - h_{xy}\tau_{xx} + \frac{\tau_{zy}}{a} \tag{1.16}$$

ここで, K_H, K_V はそれぞれ水平方向, 鉛直方向の渦拡散係数で, a は地球半径, τ は応力テンソルである. 応力テンソルはモデル内で陽に計算される. 粘性項を u, v を用いて表現すれば以下のようになる.

$$\mathcal{V}_u = \frac{A_H}{h_x h_y}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left\{h_y\left(\frac{1}{h_X}\frac{\partial u}{\partial x} + h_{xy}v\right)\right\} + \frac{\partial}{\partial y}\left\{h_x\left(\frac{1}{h_y}\frac{\partial u}{\partial y} - h_{yx}v\right)\right\}\right] \tag{1.17}$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z}\left(A_V \frac{\partial u}{\partial z}\right) \tag{1.18}$$

$$+ A_H\left[h_{xy}\left(\frac{1}{h_x}\frac{\partial v}{\partial x} - h_{xy}u\right) - h_{yx}\left(\frac{1}{h_y}\frac{\partial v}{\partial y} + h_{yx}u\right) - \frac{u}{a^2}\right], \tag{1.19}$$

$$\mathcal{V}_v = \frac{A_H}{h_x h_y}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left\{h_y\left(\frac{1}{h_x}\frac{\partial v}{\partial x} + h_{xy}u\right)\right\} + \frac{\partial}{\partial y}\left\{h_x\left(\frac{1}{h_x}\frac{\partial v}{\partial y} - h_{yx}u\right)\right\}\right] \tag{1.20}$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z}\left(A_V \frac{\partial v}{\partial z}\right) \tag{1.21}$$

$$+ A_H\left[h_{yx}\left(\frac{1}{h_y}\frac{\partial u}{\partial x} - h_{yx}v\right) - h_{xy}\left(\frac{1}{h_x}\frac{\partial u}{\partial y} + h_{xy}v\right) - \frac{v}{a^2}\right] \tag{1.22}$$

A_H, A_V はそれぞれ水平方向, 鉛直方向の渦粘性係数である.

1.1.2 数値スキーム・パラメタリゼーション

本研究では移流スキームに数値拡散の少ない UTOPIA/QUICKEST (Leonard, 1979; Leonard et al., 1993, 1994) を用いている．等密度面拡散 (Cox, 1987) と傾圧不安定をパラメタ化した層圧拡散 (Gent and McWilliams, 1990), 海面混合層パラメタリゼーション (Noh and Kim, 1999), 海底境界層パラメタリゼーション (Nakano and Suginohara, 2002) を用いている．

静水圧近似下のモデルでは鉛直加速と重力との間に直接的な関連がなく, 不安定成層を解消するメカニズムが存在しないが, 現実には不安定成層は強い鉛直対流によって即座に解消される．鉛直対流の水平スケールは 1km 程度である (Marshall and Schott, 1999)．COCO では不安定成層解消のために対流調節を用いる．不安定成層が生じたカラムにおいて, 不安定成層が解消されるまで下層とのトレーサーの平均操作をタイムステップ毎に行う．対流調節は温度場・塩分場に影響を与える．

本研究では海洋の定常状態を議論するため, 長時間積分の実施が必要である．積分時間を節約するために, 定常状態を議論する場合にのみ有効である Bryan (1984) の加速法を用いる．COCO では運動方程式を barotropic mode と baroclinic mode に分離して解いているので, それぞれの運動方程式における時間変化項に設定した加速係数を乗ずることで定常状態に早く達する．

第2章 参考文献

- Bryan, K., 1984: Accelerating the convergence to equilibrium of ocean-climate models. J. Phys. Oceanogr., 14, 666673.
- Cox, M., 1987: Isopycnal diffusion in a z-coordinate ocean model. Ocean Modelling, 74, 15.
- Gent, P. R. and J. C. McWilliams, 1990: Isopycnal mixing in ocean circual-tion models. J. Phys. Oceanogr., 20, 150155.
- Leonard, B., 1979: A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation. Comput. Method Appl. Mech. Eng., 19, 5998.
- Leonard, B., M. MacVean, and A. Lock, 1993: Positivity-preserving numerical schemes for multidimensional advection. Tech. Memo. 106055, NASA.
- — 1994: The flux-integral method for multidimensional convection and diffusion. Tech. Memo. 106679, NASA.
- Marshall, J. and F. Schott, 1999: Open-ocean convection: Observations, theory, and models. Rev. Geophys., 37, 164
- Nakano, H. and N. Suginohara, 2002: Effects of bottom boundary layer parameterization on reproducing deep and bottom waters in a world ocean model. J. Phys. Oceanogr., 32, 12091227

See [1]

関連図書

[1] K. Bryan.
Accelerating the convergence to equilibrium of ocean- climate models.
J. Phys. Oceanogr., Vol. 14, p. 666673, 1984.

[2] M. Cox.
Isopycnal diffusion in a z-coordinate ocean model.
Ocean Modelling, Vol. 74, pp. 1–5, 1987.

[3] P. R. Gent and J. C. McWilliams.
Isopycnal mixing in ocean circualtion models.
J. Phys. Oceanogr., Vol. 20, pp. 150–155, 1990.

[4] M. MacVean Leonard, B. and A. Lock.
The flux-integral method for multidimensional convection and diffusion.
Tech. Memo., Vol. 106679, p. NASA, 1993.

[5] M. MacVean Leonard, B. and A. Lock.
Positivity-preserving numerical schemes for multidimensional advection.
Tech. Memo., Vol. 106055, p. NASA, 1993.

[6] J. Marshall and F. Schott.
Open-ocean convection: Observations, theory, and models.
Rev. Geophys, Vol. 37, pp. 1–64, 1999.

[7] H. Nakano and N. Suginohara.
Effects of bottom boundary layer parameterization on reproducing deep and bottom waters in a world ocean model.
J. Phys. Oceanogr., Vol. 32, pp. 1209–1227, 2002.