

準 2 年周期振動の模擬実験

竹広真一

2016 年 1 月 4 日

この文章では, 内部重力波と平均流の相互作用の結果生じる典型的な大気現象である準 2 年周期振動 (Quasi Biannual Oscillation, QBO) を模擬する数値実験の定式化とその結果の一例を紹介する. 理論的な解説は地球流体電脳倶楽部理論マニュアルの「波と平均流相互作用 (内部重力波)」を参照のこと.

1 問題設定

幅 D の 2 次元チャンネル領域に満たされたブシネスク流体を考える. チャンネルに平行な方向に x 軸, 垂直方向に y 軸をとる. y 方向下向きに重力が働いており, 安定な密度成層状態となっている.

2 次元ブシネスク流体の支配方程式は,

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 u_x + F_x, \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} - \rho g + \nu \nabla^2 u_y + F_y, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + u_y \frac{\partial \rho}{\partial y} + u_y \frac{d\rho_B}{dy} = \kappa \nabla^2 \rho. \quad (4)$$

ここで $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ は 2 次元のラプラシアンである. F_x, F_y は重力波を励起する強制項である. $d\rho_B/dy < 0$ は基本場の密度勾配, ρ は基本場密度からの擾乱を表している.

渦度方程式の z 成分を用い, 流れ関数 ψ を $u_x = -\frac{\partial\psi}{\partial y}$, $u_y = \frac{\partial\psi}{\partial x}$ と導入すると,

$$\frac{\partial\zeta}{\partial t} + J(\psi, \zeta) = -g\frac{\partial\rho}{\partial x} + \nu\nabla^2\zeta + F_\zeta, \quad (5)$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + J(\psi, \rho) + \Gamma\frac{\partial\psi}{\partial x} = \kappa\nabla^2\rho, \quad (6)$$

$$\nabla^2\psi = \zeta. \quad (7)$$

ただし $\Gamma = d\rho_B/dy$, $J(f, g) = (\partial_x f)(\partial_y g) - (\partial_y f)(\partial_x g)$ はヤコビアンである.

境界条件は

$$\psi = \frac{\partial\psi}{\partial y} = \rho = 0 \quad \text{at } y = 0, \quad (8)$$

$$\psi = \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} = \rho = 0 \quad \text{at } y = D. \quad (9)$$

重力波励起項は, 右向きと左向きの位相速度の内部重力波を同じ振幅で励起させる.

$$F_\zeta = kF_0[\sin(kx - \omega t) + \sin(kx + \omega t)]e^{-y^2/\delta^2}, \quad (10)$$

ただし, 初期のある一定時間までは右にすすむ内部重力波のみ励起させる (括弧内第 1 項のみ). ここで k, ω は励起させる波の水平波数および振動数, F_0 は振幅のパラメーターである.

領域上端附近には水平波数が 0 でない成分に対してレイリー摩擦およびニュートン冷却を作用させるスポンジ層を設定する. 一方, 領域下端には水平波数 0 成分 (平均流) に対してのみレイリー摩擦およびニュートン冷却を作用させる.

2 実験設定

- 重力加速度 : $g = 980 \text{ cm/sec}^2$
- 基本場密度傾度 $\Gamma = \frac{d\rho_0}{dz}$: $-2.5\text{e-}3 \text{ g/cm}^{-4}$
- 下面強制の水平波数 : 8 ($k = 0.167$)
- 下面強制の周期 16 sec (振動数 $\omega = 0.4 \text{ sec}^{-1}$)
- 下面強制の振幅 $F_0 = 10.0$
- 動粘性率 $1\text{e-}2 \text{ cm}^2/\text{sec}$
- 拡散率 $1\text{e-}2 \text{ cm}^2/\text{sec}$

3 結果

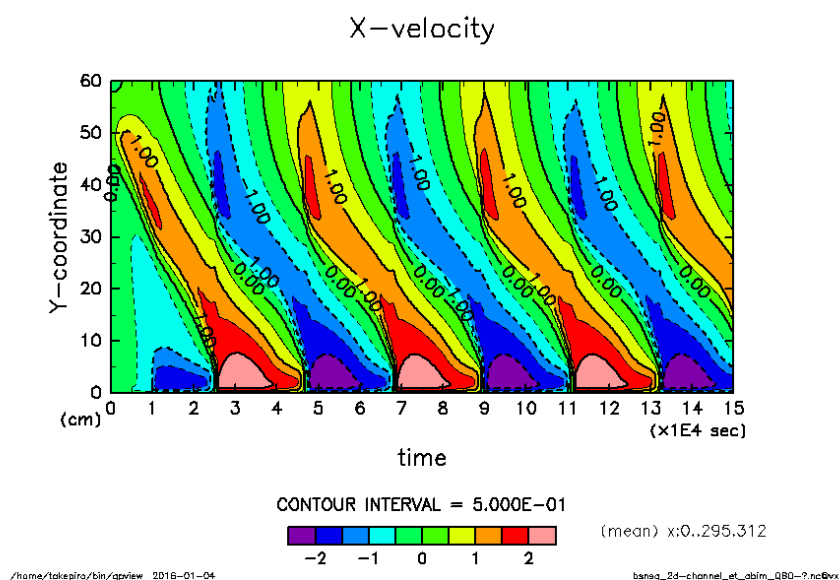


図 1: x 平均水平流の時間高度断面図

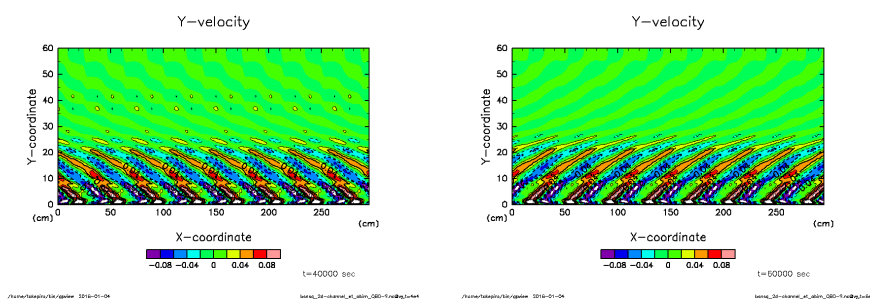


図 2: $t = 4 \times 10^4$ および 6×10^4 での u_y の分布. それぞれ左向きおよび右向き内部重力波が選択的に上空に伝わっている.

文献

地球流体実験集

図 3: 水平平均流の時間変化アニメーション