

SPMODEL サンプルプログラム

水路領域赤道 β 面浅水モデル: 局所熱源に対する非線形応答問題

thermal_responce.f90

山田 由貴子, 小高 正嗣

2004 年 8 月 25 日

目 次

1	概要	2
2	支配方程式系	3
2.1	支配方程式系	3
2.2	境界条件	4
3	離散化	5
3.1	水平離散化	5
3.2	水平方向のスペクトル表現	5
3.3	時間積分	7
3.4	時間フィルター	9
4	使用モジュールとその他の設定	10
5	数値実験	11
6	参考文献	13

1 概要

SPMODEL サンプルプログラム『thermal_responce.f90』に用いられている基礎方程式と境界条件, および, このプログラムを用いた数値実験の方法について解説する. 基礎方程式は赤道 β 面非線型浅水方程式である. 境界条件は, x 方向は周期境界, y 方向は壁面境界としている. 計算はスペクトル法を用いて行い, 展開関数は水平方向にはフーリエ級数, 鉛直方向には境界条件にあわせてフーリエ正弦級数またはフーリエ余弦級数を用いる. スペクトル変換と逆変換および微分演算には, SPMODEL ライブラリ (spml) を用いている. 数値実験として, Gill(1980) および Heckley and Gill(1984) と同様の質量源分布を与えた場合の応答を計算する.

プログラム名

thermal_responce.f90

プログラム取得元

<http://www.gfd-dennou.org/arch/spmodel/2d-channel-esc/shallow-equator/thermal-responce/SIGEN.htm>

SPMODEL サンプルプログラム目次

<http://www.gfd-dennou.org/arch/spmodel/sample.htm>

SPMODEL の使い方

<http://www.gfd-dennou.org/arch/spmodel>

2 支配方程式系

ここでは, 支配方程式系と境界条件を記す.

2.1 支配方程式系

支配方程式系は赤道 β 面浅水方程式系である.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} + \beta y v - g \frac{\partial h}{\partial x} - r_M u + \nu_M \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) u + F_x, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - \beta y u - g \frac{\partial h}{\partial y} - r_M v + \nu_M \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) v + F_y, \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} [(h + H_0)u] - \frac{\partial}{\partial y} [(h + H_0)v] - r_H h + \nu_H \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) h - Q \quad (3)$$

各記号は以下の量をあらわす.

記号	変数/物理定数
x	経度方向座標
y	緯度方向座標
t	時間
u	経度方向流速
v	緯度方向流速
H_0	流体の平均厚さ
h	流体の厚さの偏差
β	赤道 β パラメタ
g	重力加速度
r_M	レイリー減衰係数
r_H	ニュートン冷却係数
ν_M	粘性拡散係数
ν_H	熱拡散係数
F_x	経度方向外力
F_y	緯度方向外力
Q	熱源 (質量源)

表 1: 変数, 物理定数の定義

2.2 境界条件

x 方向の境界条件は周期境界条件とする. x 方向の計算領域を x_m とすると

$$u(x + x_m, y) = u(x, y), \quad (4)$$

$$v(x + x_m, y) = v(x, y), \quad (5)$$

$$h(x + x_m, y) = h(x, y) \quad (6)$$

と表される.

y 方向の境界条件は剛体壁面で $v = 0$, 応力なしとする. すなわち y 方向の境界 $y = \pm y_m/2$ において,

$$v = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

である¹.

¹ただしこの境界条件はふさわしくない. 本来ならば x, y 方向ともに周期境界とするのが正しい. しかし数値計算に SPMODEL ライブラリの `esc_module` を用いているため, このような境界条件に決まる.

3 離散化

この節では方程式系の空間離散化および使用した時間積分法について説明し、プログラム内で実際に用いられている方程式を記述する。

3.1 水平離散化

支配方程式 (1), (2), (3) の水平離散表現は以下である。

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_{i,j}}{\partial t} = & -u_{i,j} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{i,j} - v_{i,j} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{i,j} + \beta y_j v_{i,j} \\ & -g \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)_{i,j} - r_M u_{i,j} + \nu_M \left[\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)_{i,j} + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)_{i,j} \right] + F_{x_{i,j}}, \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_{i,j}}{\partial t} = & -u_{i,j} \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)_{i,j} - v_{i,j} \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)_{i,j} - \beta y_j u_{i,j} \\ & -g \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right)_{i,j} - r_M v_{i,j} + \nu_M \left[\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)_{i,j} + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)_{i,j} \right] + F_{y_{i,j}}, \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h_{i,j}}{\partial t} = & - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} [(h_{i,j} + H_0) u_{i,j}] \right\}_{i,j} - \left\{ \frac{\partial}{\partial y} [(h_{i,j} + H_0) v_{i,j}] \right\}_{i,j} \\ & - r_H h_{i,j} + \nu_H \left[\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right)_{i,j} + \left(\frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right)_{i,j} \right] - Q_{i,j}. \quad (12) \end{aligned}$$

ここで添字 i, j は格子点 (x_i, y_j) 上の値であることを表す。

3.2 水平方向のスペクトル表現

空間離散化した支配方程式 (10), (11), (12) をスペクトル法を用いて表現する。スペクトル展開は東西方向にフーリエ級数, 南北方向には境界条件にあわせてフーリエ正弦級数またはフーリエ余弦級数を用いて行う。非線形項を扱う場合は, 先に格子点上での非線形項の値を計算し, その値のスペクトルを求める方法 (変換法) を用いる。以下では k, l をそれぞれ x, y 方向波数, K, L を切断波数, I, J を格子点数とする。

$u_{i,j}, v_{i,j}, H_{i,j}$ はスペクトル逆変換によって以下のように展開される.

$$u_{i,j} = \sum_{k=-K}^K \sum_{l=0}^L \exp\left(\frac{2\pi i k x_i}{x_m}\right) \cos\left(\frac{\pi l y_j}{y_m}\right) \hat{u}_{k,l}, \quad (13)$$

$$v_{i,j} = \sum_{k=-K}^K \sum_{l=1}^L \exp\left(\frac{2\pi i k x_i}{x_m}\right) \sin\left(\frac{\pi l y_j}{y_m}\right) \hat{v}_{k,l}, \quad (14)$$

$$h_{i,j} = \sum_{k=-K}^K \sum_{l=0}^L \exp\left(\frac{2\pi i k x_i}{x_m}\right) \cos\left(\frac{\pi l y_j}{y_m}\right) \hat{h}_{k,l}. \quad (15)$$

スペクトル係数 $\hat{u}_{k,l}, \hat{v}_{k,l}, \hat{h}_{k,l}$ はスペクトル変換によって以下のように与えられる.

$$\hat{u}_{k,l} = \frac{1}{x_m y_m} \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} \exp\left(-\frac{2\pi i k x_i}{x_m}\right) \cos\left(\frac{\pi l y_j}{y_m}\right) u_{i,j}, \quad (16)$$

$$\hat{v}_{k,l} = \frac{1}{x_m y_m} \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} \exp\left(-\frac{2\pi i k x_i}{x_m}\right) \sin\left(\frac{\pi l y_j}{y_m}\right) v_{i,j}, \quad (17)$$

$$\hat{h}_{k,l} = \frac{1}{x_m y_m} \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} \exp\left(-\frac{2\pi i k x_i}{x_m}\right) \cos\left(\frac{\pi l y_j}{y_m}\right) h_{i,j}. \quad (18)$$

以上を用いると, (10), (11), (12) のスペクトル表現は以下ようになる.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{u}_{k,l}}{\partial t} = & -\frac{1}{x_m y_m} \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} \exp\left(-\frac{2\pi i k x_i}{x_m}\right) \cos\left(\frac{\pi l y_j}{y_m}\right) u_{i,j} \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} \\ & -\frac{1}{x_m y_m} \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} \exp\left(-\frac{2\pi i k x_i}{x_m}\right) \cos\left(\frac{\pi l y_j}{y_m}\right) v_{i,j} \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_{i,j} \\ & +\frac{\beta}{x_m y_m} \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} \exp\left(-\frac{2\pi i k x_i}{x_m}\right) \cos\left(\frac{\pi l y_j}{y_m}\right) y_j v_{i,j} \\ & -g \left(\frac{2\pi i k}{x_m}\right) \hat{h}_{k,l} - r_M \hat{u}_{k,l} - \nu_M \left[\left(\frac{2\pi i k}{x_m}\right)^2 \hat{u}_{k,l} - \left(\frac{\pi l}{y_m}\right)^2 \hat{u}_{k,l} \right] \\ & +\frac{1}{x_m y_m} \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} \exp\left(-\frac{2\pi i k x_i}{x_m}\right) \cos\left(\frac{\pi l y_j}{y_m}\right) F_{x_{i,j}}, \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{v}_{k,l}}{\partial t} = & -\frac{1}{x_m y_m} \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} \exp\left(-\frac{2\pi i k x_i}{x_m}\right) \sin\left(\frac{\pi l y_j}{y_m}\right) u_{i,j} \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_{i,j} \\ & -\frac{1}{x_m y_m} \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} \exp\left(-\frac{2\pi i k x_i}{x_m}\right) \sin\left(\frac{\pi l y_j}{y_m}\right) v_{i,j} \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)_{i,j} \\ & -\frac{\beta}{x_m y_m} \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} \exp\left(-\frac{2\pi i k x_i}{x_m}\right) \sin\left(\frac{\pi l y_j}{y_m}\right) y_j u_{i,j} \\ & +g \left(\frac{\pi l}{y_m}\right) \hat{h}_{k,l} - r_M \hat{v}_{k,l} - \nu_M \left[\left(\frac{2\pi i k}{x_m}\right)^2 \hat{v}_{k,l} - \left(\frac{\pi l}{y_m}\right)^2 \hat{v}_{k,l} \right] \end{aligned}$$

$$+\frac{1}{x_m y_m} \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} \exp\left(-\frac{2\pi i k x_i}{x_m}\right) \sin\left(\frac{\pi l y_j}{y_m}\right) F_{y_{i,j}}, \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{h}_{k,l}}{\partial t} = & -\left(\frac{2\pi i k}{x_m}\right) \frac{1}{x_m y_m} \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} \exp\left(-\frac{2\pi i k x_i}{x_m}\right) \cos\left(\frac{\pi l y_j}{y_m}\right) (h_{i,j} + H_0) u_{i,j} \\ & -\left(\frac{\pi l}{y_m}\right) \frac{1}{x_m y_m} \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} \exp\left(-\frac{2\pi i k x_i}{x_m}\right) \sin\left(\frac{\pi l y_j}{y_m}\right) (h_{i,j} + H_0) v_{i,j} \\ & -r_H \hat{h}_{k,l} - \nu_H \left[\left(\frac{2\pi i k}{x_m}\right)^2 \hat{h}_{k,l} - \left(\frac{\pi l}{y_m}\right)^2 \hat{h}_{k,l} \right] \\ & -\frac{1}{x_m y_m} \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} \exp\left(-\frac{2\pi i k x_i}{x_m}\right) \cos\left(\frac{\pi l y_j}{y_m}\right) Q_{i,j}. \end{aligned} \quad (21)$$

ここで,

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j} &= \sum_{k=-K}^K \sum_{l=0}^L \left(\frac{2\pi i k}{x_m}\right) \exp\left(\frac{2\pi i k x_i}{x_m}\right) \cos\left(\frac{\pi l y_j}{y_m}\right) \hat{u}_{k,l}, \\ \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_{i,j} &= -\sum_{k=-K}^K \sum_{l=1}^L \left(\frac{\pi l}{y_m}\right) \exp\left(\frac{2\pi i k x_i}{x_m}\right) \sin\left(\frac{\pi l y_j}{y_m}\right) \hat{u}_{k,l}, \\ \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_{i,j} &= \sum_{k=-K}^K \sum_{l=1}^L \left(\frac{2\pi i k}{x_m}\right) \exp\left(\frac{2\pi i k x_i}{x_m}\right) \sin\left(\frac{\pi l y_j}{y_m}\right) \hat{v}_{k,l}, \\ \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)_{i,j} &= \sum_{k=-K}^K \sum_{l=0}^L \left(\frac{\pi l}{y_m}\right) \exp\left(\frac{2\pi i k x_i}{x_m}\right) \cos\left(\frac{\pi l y_j}{y_m}\right) \hat{v}_{k,l} \end{aligned}$$

である.

3.3 時間積分

ここでは時間積分法について記述し, プログラム内で実際に用いられている方程式を記述する. 以下では Δt を時間格子間隔, 時刻 $\tau \Delta t$ における $\hat{u}_{k,l}$ の値を $\hat{u}_{k,l}^\tau$ 等と表す.

時間積分は陽解法を用いて行う. 拡散項と減衰項は Euler スキーム, その他の項に対しては Leapfrog スキームを適用する.

$$\begin{aligned} \hat{u}_{k,l}^{\tau+1} &= \hat{u}_{k,l}^{\tau-1} \\ &+ 2\Delta t \left\{ -\frac{1}{x_m y_m} \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} \exp\left(-\frac{2\pi i k x_i}{x_m}\right) \cos\left(\frac{\pi l y_j}{y_m}\right) u_{i,j}^\tau \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{i,j}^\tau \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{1}{x_m y_m} \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} \exp\left(-\frac{2\pi i k x_i}{x_m}\right) \cos\left(\frac{\pi l y_j}{y_m}\right) v_{i,j}^\tau \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_{i,j}^\tau \\
& + \frac{\beta}{x_m y_m} \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} \exp\left(-\frac{2\pi i k x_i}{x_m}\right) \cos\left(\frac{\pi l y_j}{y_m}\right) y_j v_{i,j}^\tau \\
& - g \left(\frac{2\pi i k}{x_m}\right) \hat{h}_{k,l}^\tau - r_M \hat{u}_{k,l}^{\tau-1} - \nu_M \left[\left(\frac{2\pi i k}{x_m}\right)^2 \hat{u}_{k,l}^{\tau-1} - \left(\frac{\pi l}{y_m}\right)^2 \hat{u}_{k,l}^{\tau-1} \right] \\
& + \frac{1}{x_m y_m} \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} \exp\left(-\frac{2\pi i k x_i}{x_m}\right) \cos\left(\frac{\pi l y_j}{y_m}\right) F_{x,i,j}^\tau \Bigg\}, \tag{22}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\hat{v}_{k,l}^{\tau+1} &= \hat{v}_{k,l}^{\tau-1} \\
& + 2\Delta t \left\{ -\frac{1}{x_m y_m} \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} \exp\left(-\frac{2\pi i k x_i}{x_m}\right) \sin\left(\frac{\pi l y_j}{y_m}\right) u_{i,j}^\tau \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)_{i,j}^\tau \right. \\
& - \frac{1}{x_m y_m} \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} \exp\left(-\frac{2\pi i k x_i}{x_m}\right) \sin\left(\frac{\pi l y_j}{y_m}\right) v_{i,j}^\tau \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)_{i,j}^\tau \\
& - \frac{\beta}{x_m y_m} \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} \exp\left(-\frac{2\pi i k x_i}{x_m}\right) \sin\left(\frac{\pi l y_j}{y_m}\right) y_j u_{i,j}^\tau \\
& + g \left(\frac{\pi l}{y_m}\right) \hat{h}_{k,l}^\tau - r_M \hat{v}_{k,l}^{\tau-1} - \nu_M \left[\left(\frac{2\pi i k}{x_m}\right)^2 \hat{v}_{k,l}^{\tau-1} - \left(\frac{\pi l}{y_m}\right)^2 \hat{v}_{k,l}^{\tau-1} \right] \\
& \left. + \frac{1}{x_m y_m} \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} \exp\left(-\frac{2\pi i k x_i}{x_m}\right) \sin\left(\frac{\pi l y_j}{y_m}\right) F_{y,i,j}^\tau \right\}, \tag{23}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\hat{h}_{k,l}^{\tau+1} &= \hat{h}_{k,l}^{\tau-1} \\
& + 2\Delta t \left\{ -\left(\frac{2\pi i k}{x_m}\right) \frac{1}{x_m y_m} \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} \exp\left(-\frac{2\pi i k x_i}{x_m}\right) \cos\left(\frac{\pi l y_j}{y_m}\right) (h_{i,j}^\tau + H_0) u_{i,j}^\tau \right. \\
& - \left(\frac{\pi l}{y_m}\right) \frac{1}{x_m y_m} \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} \exp\left(-\frac{2\pi i k x_i}{x_m}\right) \sin\left(\frac{\pi l y_j}{y_m}\right) (h_{i,j}^\tau + H_0) v_{i,j}^\tau \\
& - r_H \hat{h}_{k,l}^{\tau-1} - \nu_H \left[\left(\frac{2\pi i k}{x_m}\right)^2 \hat{h}_{k,l}^{\tau-1} - \left(\frac{\pi l}{y_m}\right)^2 \hat{h}_{k,l}^{\tau-1} \right] \\
& \left. - \frac{1}{x_m y_m} \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} \exp\left(-\frac{2\pi i k x_i}{x_m}\right) \cos\left(\frac{\pi l y_j}{y_m}\right) Q_{i,j}^\tau \right\}. \tag{24}
\end{aligned}$$

3.4 時間フィルター

計算モードの増幅を抑制するため Asselin (1972) の時間フィルターを 1 ステップ毎に適用する.

$$\bar{\hat{u}}_{k,l}^{\tau} = (1 - 2\epsilon_f)\hat{u}_{k,l}^{\tau} + \epsilon_f(\bar{\hat{u}}_{k,l}^{\tau-1} + \hat{u}_{k,l}^{\tau+1}), \quad (25)$$

$$\bar{\hat{v}}_{k,l}^{\tau} = (1 - 2\epsilon_f)\hat{v}_{k,l}^{\tau} + \epsilon_f(\bar{\hat{v}}_{k,l}^{\tau-1} + \hat{v}_{k,l}^{\tau+1}), \quad (26)$$

$$\bar{\hat{h}}_{k,l}^{\tau} = (1 - 2\epsilon_f)\hat{h}_{k,l}^{\tau} + \epsilon_f(\bar{\hat{h}}_{k,l}^{\tau-1} + \hat{h}_{k,l}^{\tau+1}). \quad (27)$$

ここで ϵ_f はフィルターの係数である.

4 使用モジュールとその他の設定

スペクトル変換と逆変換, 微分演算は SPMODEL ライブラリ (spml) の `esc_module` に含まれる関数を用いて行う. フーリエ正弦および余弦変換, それらの逆変換の際の数値積分は台形公式を用いて行う. spml が下位で使用する ISPACK の仕様から, 格子点数 I, J は偶数で, かつ $I/2, J/2 = 2^a 3^b 5^c$ (a, b, c は 0 または整数) でなければならない. 非線形項の計算によって生じるエリアジングを防ぐため, 格子点数 I, J と切断波数 K, L は $I > 3K, J > 3K/2$ を満たすように与える.

5 数値実験

数値実験として, Gill (1980) および Heckley and Gill (1984) と同様の定常な質量源分布を与えた場合の応答を計算する. 質量源分布は以下のように与える.

$$Q = \begin{cases} Q_0 \exp(y^2/b) \cos\left(\frac{\pi x}{2a}\right) & -a \leq x \leq a \\ 0 & x < -a, x > a \end{cases} \quad (28)$$

初期条件は $u = v = h = 0$ である. パラメータは表 2 にまとめた値を用いる.

格子点数 I, J と切断波数 K, L はそれぞれ $I = 64, J = 32, K = L = 16$ とする. 時間格子間隔 Δt は 0.02, 計算ステップ数は 1,000 ステップとする. Asselin (1972) の時間フィルターの係数 ϵ_f には, 標準的な値 0.05 を用いる.

パラメータ	数値
g	1.0
H_0	1.0
β	1.0
r_M	0.1
r_H	0.1
ν_M	0.02
ν_H	0.02
F_x	0.0
F_y	0.0
Q_0	0.01
a	2.0
b	2.0
x_m	18.0
y_m	9.0

表 2: 使用したパラメータの値

図 1 に厚さ分布の時間変化の様子を示す. 東向きにケルビン応答, 西向きにロスビー応答が伝播していることが分かる. ロスビー応答の伝播距離はケルビン応答の約 $1/3$ である.

Height

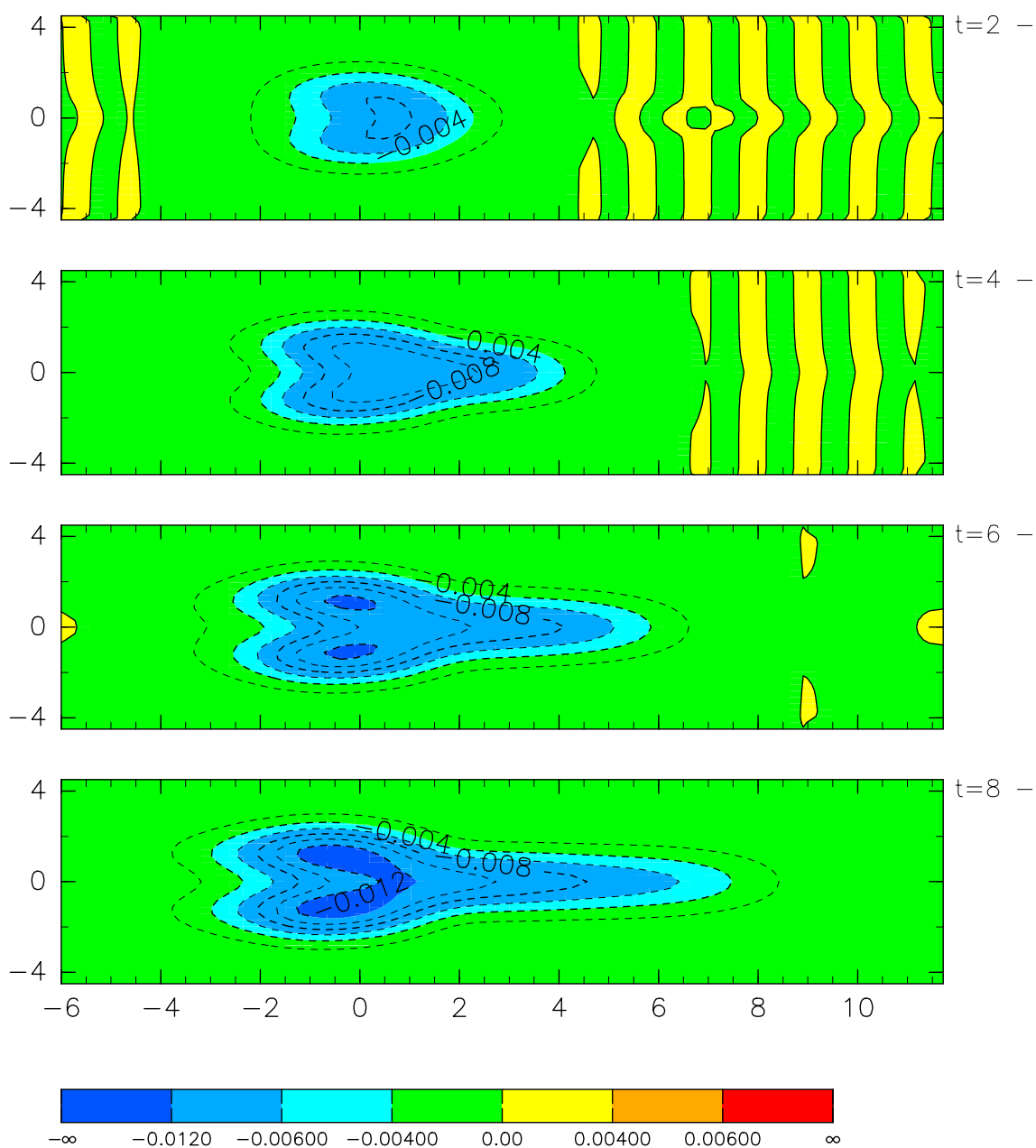


図 1: 厚さの分布の時間変化の様子. 上から順に $t = 2, 4, 6, 8$ の結果.

6 参考文献

- Asselin, R. A., 1972: Frequency filter for time integrations. *Mon. Wea. Rev.*, **100**, 487–490.
- Gill, A. E., 1980: Some simple solution for heat-induced tropical circulation. *Qurt. J. R. Meteorol. Soc.*, **106**, 447–462.
- Heckley, W. A., and A. E. Gill, 1984: Some simple analytical solutions to the problems of forced equatorial long waves. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **110**, 203–217.
- 竹広真一, 石岡圭一, 豊田英司, 石渡正樹, 林祥介, SPMODEL 開発グループ, 2002: 階層的地球流体力学スペクトルモデル集 (SPMODEL), <http://www.gfd-dennou.org/arch/spmodel/>, 地球流体電脳倶楽部.

謝辞

本資源は, 地球流体電脳倶楽部のインターネット上での学術知識の集積と活用の実験の一環として

<http://www.gfd-dennou.org/arch/spmodel/>

において公開されているものである (©地球流体電脳倶楽部スペクトルモデルプロジェクト spmodel@gfd-dennou.org 2002.). 本資源は, 著作者の諸権利に抵触しない (迷惑をかけない) 限りにおいて自由に利用していただいて構わない. なお, 利用する際には今一度自ら内容を確認することを願います (無保証無責任原則).

本資源に含まれる元資源提供者 (図等の版元等を含む) からは, 直接的な形での WEB 上での著作権または使用許諾を得ていない場合があるが, 勝手ながら, 「未来の教育」のための実験という学術目的であることをご理解いただけるものと信じ, 学術標準の引用手順を守ることによって諸手続きを略させていただいている. 本資源の利用者には, この点を理解の上, 注意して扱っていただけるようお願いする. 万一, 不都合のある場合には

spmodel@gfd-dennou.org

まで連絡していただければ幸いである.