

回転軸が鉛直方向から傾いた系における sin 型水平シア流と熱対流の相互作用

* 齊藤直彬・石岡圭一 (京大院・理・地惑)

1. はじめに

Hathaway & Somerville (1987) は惑星大気を念頭に置き、回転軸が鉛直方向から極向きに傾いた系で東向き sin 型水平シア流中の熱対流の非線形時間発展を行い、杉綾模様のロール状対流が平均流を加速することを示した。しかし彼らは簡単なエネルギー解析しか行っていない。本研究では回転軸が鉛直方向から傾いた系における sin 型水平シア流中の熱対流の時間発展や線形安定性解析を行い、平均流の加速メカニズムを詳細に解析する。

2. モデル方程式と計算設定

回転軸まわりに角速度 $f/2$ で回転する系のプシネスク流体を考える (図 1)。基礎方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p - \mathbf{f} \times (\mathbf{u} - \mathbf{u}_B) + Ra \mathbf{b} + \nabla^2 (\mathbf{u} - \mathbf{u}_B), \quad (1)$$

$$\frac{\partial b}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{b} + v \frac{\partial b}{\partial y} + w \frac{\partial b}{\partial z} = w + \nabla^2 b, \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (3)$$

ここに、 t : 時刻、 (x, y, z) : 空間のデカルト座標 (z : 鉛直)、 $\mathbf{u} = (u, v, w)$: (x, y, z) 方向の流速、 p : 圧力関数、 b : 浮力、 Ra : レイリー数、 ∇^2 : ラプラシアン、であり、

$$\mathbf{f} = (f \cos \theta \ 0 \ f \sin \theta)^T \ (\theta: \text{緯度}), \quad \mathbf{b} = (0 \ 0 \ b)^T, \\ \mathbf{u}_B = (0 \ v_B \ 0)^T, \quad v_B = Re L_x \cos(2\pi x/L_x). \quad (4)$$

プラントル数は 1 としている。 $\mathbf{u}_B$ は基本流 (Re : レイノルズ数) であり、(1) 式中の $\mathbf{u}_B$ は基本流を定常解とするための項である。

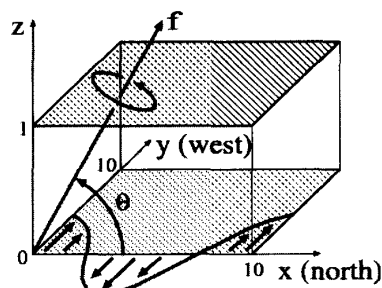


図 1 モデル概念図

境界条件は x, y 方向にそれぞれ $[0, L_x], [0, L_y]$ で周期境界とし、 z 方向には $z = 0, 1$ で Free-Slip・温度 (浮力) 固定とする。

空間離散化にはスペクトル法を用いる。水平方向に Fourier 級数展開 (切断波数 21)、 z 方向にルジャンドル

多項式展開 (切断次数 10) を行う。時間発展には 4 次のルンゲ-クッタ法を用いる。計算領域は $L_x = L_y = 10$ とする。 $\theta = \pi/12$, $Re = 5$, $Ra = 10^4$ とし、 $Ta = 0, 10^4, 3 \times 10^4, 10^5$ の 4 通りの計算を行う。

3. 非線形時間発展

初期に微小温度擾乱を与えて時間発展させた結果、 $Ta = 3 \times 10^4$ および $Ta = 10^5$ の場合は杉綾模様のロール状対流が形成され、特に前者の場合は平均流が大きく加速された (図 2)。

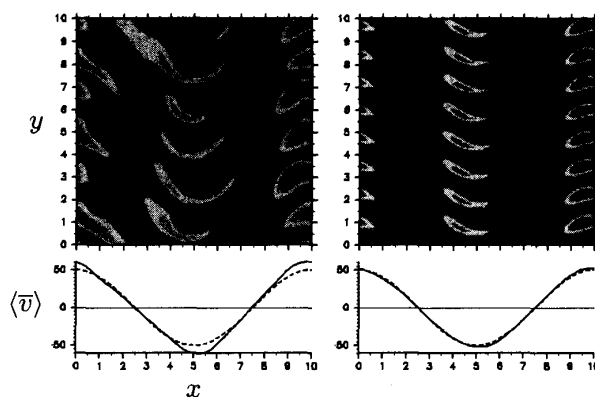


図 2 非線形時間発展の様子。左: $Ta = 3 \times 10^4$, 右: $Ta = 10^5$ 。上: 温度場の x - y 断面図 ($z = 0.5$)。下: y, z 平均した流速 v の x 分布 (点線: 初期分布)。

4. 線形安定性解析

初期場に対する線形安定性解析により、いずれの場合も、発達率最大の固有モードの波数、構造、発達率が時間発展の結果と整合的であった。よって、杉綾模様の構造は初期場の持つ最も不安定な固有モードの構造に対応していることが明らかになった。

5. 固有モードの二次効果の解析および考察

時間発展における平均流の初期場からの偏差 (平均流の加速) の成長率が、固有モードの最大発達率の 2 倍であることから、平均流の加速は固有モードの二次効果に起因すると考えられる。

固有モードの二次効果の解析により、平均流の加速への寄与は Hathaway & Somerville (1987) の言うような直接的な運動量輸送の効果よりも、二次的な鉛直流に働くコリオリ力の効果の方が大きいことを明らかにした。

さらに詳細な解析により、まず擾乱による鉛直上向きの熱輸送が浮力偏差を生み、その浮力偏差が鉛直流を生成し、その鉛直流にコリオリ力が働き平均流を加速する、という過程が最も重要であることを示した。