

二成分ベナール対流における二次元局在パターン

福井大工 小川淳司、谷崎啓、原田義文

1. はじめに

二成分系のベナール対流では、純粋流体の場合と異なり濃度場が温度場と結合し、不安定点近傍でさえ興味深い時空構造が現れるため、これまで非平衡開放系における典型的な散逸構造の例として盛んに研究されてきた[1]。特に強いサブクリティカル分岐を起こす場合において、サドル・ノード点近傍で観測される安定な局在対流構造は、非平衡開放系特有の構造として注目され、その形成メカニズム解明のための研究が進められている[2]。本論では、中間アスペクト比円筒セルにおける二次元局在対流パターンの最近の観測結果を報告する。また、その特徴を再現し得るモデルとして、拡張された複素 Swift - Hohenberg モデルを提案し、計算機シミュレーションによって得られた解の挙動について紹介する。

2. 実験

観測セルは円筒形で、高さ 3mm、半径 14.25mmの中間アスペクト比のセルである ($\Gamma=r/d=4.75$)。作業流体は強い非線形性をもつことがわかっている 9.55 wt% t-ブタノール水溶液を用いた。セル上面の温度を 20.0 °C とし下面の温度を変えることにより、レーリー数をコントロールする。二成分系で重要なパラメータとなる分離比は本実験の場合 -0.64 であり、きわめて非線形性の強い系となっている。下面温度を準静的に変化させ、各レーリー数における対流パターンの時空構造をシャドウグラフ法により観測し、スクリーン上に投影したシャドウグラフ像をビデオカメラで記録する。本実験では、対流オンセット (温度差 12.2 °C) 後の、対流パターンの緩和過程が終了した後、局在対流を観測するために、準静的に温度差を減少させる事により、サドルノード点に近づけていった。温度差 9.8 °C において対流パターン領域が減少し始め、その過渡過程において、わずかに温度差を上昇させると、安定な局在対流パターンが観測された。この局在対流領域の内部では、これまでに観測されているものと同様、ディフェクトのつなぎ替えが頻繁に起こり、カオティックな運動が観測される[3]。本実験において、新しい局在対流の性質として、局在対流パターン領域の全体としての遍歴運動が観測された。その際局在領域は、その大きさをわずかに変化させつつ、フロントをセル側壁に接触させたり離したりしながら、空間的に遍歴している (図 1)。この現象は本実験のような極めて非線形性が強く濃度揺らぎが大きい系に特有な現象である。

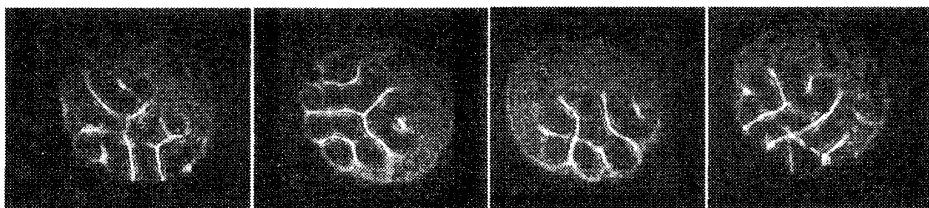


図 1. 局在対流領域の遍歴 (左から 25 min. ごとのシャドウグラフ像、温度差 $\Delta T=9.8^{\circ}\text{C}$)

3. モデル方程式による計算機シミュレーション

局在パターンを記述するモデルとして、これまで複素 Ginzburg - Landau 型のモデル、及び Swift - Hohenberg 型のモデル等が提案されている[4]。二次元系の二成分ベナール対流で観測されている局在対流は、分離比が負の領域で、sub-critical Hopf 分岐を伴うものであり、局在対流領域は、進行波、あるいは、それらが時空的に複雑にからみあったカオティックな運動をしている。従って、モデルは少なくとも、局在領域において定常なパターンではなく、ダイナミック性質をもつ必要がある。我々は、以下のような

Malomed[5] らの方程式を拡張した5次の複素 Swift-Hohenberg モデルを採用し、その解の挙動を計算機シミュレーションにより調べた。[6]

$$\partial_t \psi = \varepsilon \psi - g_1(1 + \Delta)^2 \psi + g_3 |\psi|^2 \psi - g_5 |\psi|^4 \psi + i\beta \Delta \psi$$

g_i, β は複素係数であり、 $\psi(x, y, t)$ は複素オーダーパラメータで、波の振幅 $f(x, y, t)$ と

$f = \psi \exp^{-i(\omega - \beta)t} + c.c.$ のように関係付けられる。ここで、 ω は Hopf 周波数、 β は群速度 v と

$v = 2\beta$ の関係にある。図2に内部に動的な運動を内在する局在解を示す。これは、今回実験で観測された遍歴運動は示さないが、局在構造は動的なパターン変化を内在している。

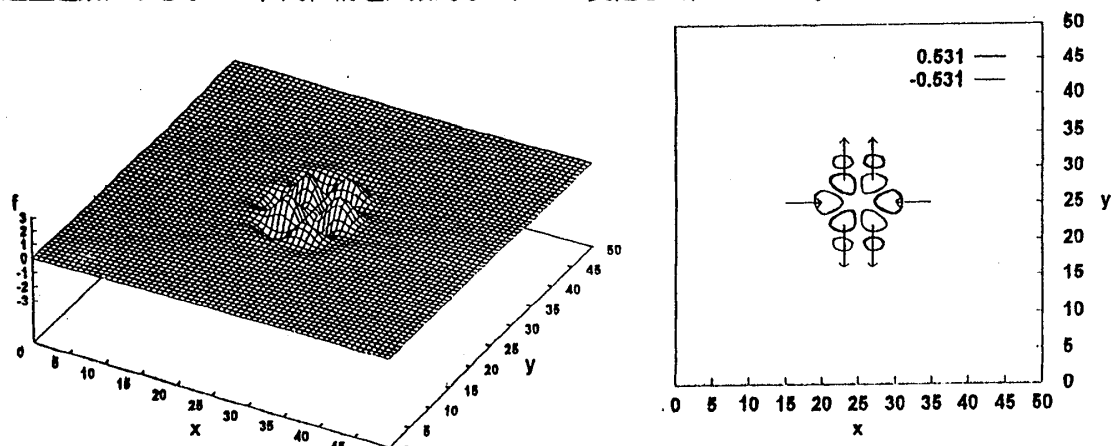


図2. 局在構造 (a: $f(x, y, t)$, b: 等高線図) $\varepsilon = -1.507, g_1=1, g_3=3, g_5=1+0.25i, \beta=0, \omega=1$.

4. まとめ

我々は、二次元系における二成分レーリーベナール対流において、局在対流の遍歴現象を見出した。これは、強い非線形性に由来するものと考えられる。二次元系での局在対流を含めた対流パターンを記述するモデルとして、拡張された複素係数 Swift-Hohenberg モデルの計算機シミュレーションを行った。適当な係数、パラメータにおいて、ダイナミカルな内部運動をもつ局在解が存在することを確かめた。さらに実験で観測されている局在対流の遍歴現象を定性的に表すような解が存在するかどうか研究中である。

参考文献

- [1] M. C. Cross, P. Hohenberg, Rev. Mod. Phys. 65, 851 (1993).
- [2] P. Kolodner, D. Bensimon and C. M. Surko, Phys. Rev. Lett. 60, 1723 (1988) ; P. Kolodner, Phys. Rev. E 48, R4187 (1993).
- [3] 安藤康司、渋谷茂伸、小池徹、原田義文、日本物理学会第47回年会予稿集3、27p-PS-109 (1992) ; K. Lerman, E. Bodenschatz, D. S. Channel, and G. Ahlers, Phys. Rev. Lett. 70, 3572 (1993).
- [4] O. Thual and S. Fauve, J. Phys. France 49, 1829 (1988) ; R. J. Deissler and H. R. Brand, Phys. Rev. E 51, R852 (1995) ; H. Sakaguchi, H. R. Brand, Physica D 97, 274 (1996).
- [5] B. A. Malomed, Z. Phys. B 55, 241 (1984).
- [6] A. Ogawa, R. Ito, A. Tanizaki and Y. Harada, Proceedings of the 2nd Tohwa Univ. International Meeting, Statistical Physics, ed. M. Tokuyama and I. Oppenheim, P.147 (World Scientific, 1998) ; 最近 H. Sakaguchi により同様のモデルに関する理論的研究がなされている。