研究会報告

二成分混合流体のベナール対流における局在対流運動

°小川淳司、福井一仁、原田義文（福井大・工）

1．はじめに

二成分混合流体のベナール対流運動は、対流不安定点近傍においてさえ、その動的な振るまいは非常に多彩であり、非線形非平衡系における散逸構造の研究にとって興味深い対象となってきた[1]。ここで述べるような一次元系、すなわち奥行き方向のアスペクト比の小さいスロット状のセルにおけるダイナミクスは、円環状のセルの場合とともに精力的に研究されてきた。二成分系は純粋流体の場合のベナール対流の場合と異なり、濃度場という新たな変数が加わり、これが温度場とソーレ効果を通して結合するために複雑なダイナミクスを引き起こしている。この結合の効果の強さを表す分離比 ψ が重要なパラメータとなる。この分離比の大小によって、対流運動の様相は大きく変わる。特に ψ が負で大きい領域は強非線形領域と呼ばれ、二成分系の特徴が特に強く現れる領域である。これまでは、理論的な取り扱いが可能であるという理由から実験的にも弱非線形領域の場合の研究が多くなされてきた。我々の研究の目的は、強非線形領域での一次元スロットチャネルにおける二成分ベナール対流運動、特に局在対流運動に焦点をあててその時空構造を明らかにすることである[2]。

局在対流とは、対流がセル全体を満たして起こっているのではなく、一部分のみで起こり、残りの部分は非対流領域となって安定化している構造のことである。外部から一様に温めているにもかかわらず、このような局在状態が安定に存在することは興味深い。これまで主に弱非線形領域において研究がなされてきたが、この局在構造は一般にサブクリティカル分岐におけるサドルノード点近傍において観測された。その際局在対流が安定に存在するのは、レーリー数の狭い範囲に限られていた。我々は強非線形領域においては、より広いレーリー数の範囲で安定に存在するであろうという予想のもとに実験を行なった。またこれまで奥行き方向のアスペクト比は広がり方向のそれと比べてそれほど小さくなく、一次元系というよりは二次元的要素も含まれていた。本研究では非常に幅のせまいスロット状のセルを用いて一次元性を強くしている点に特徴がある。強非線形領域でのスロットチャネルにおいて観測された局在対流は、セルの両端に局在した Double Localized State であり、またその2つの進行波は同一方向に進行するものであった。また一方の局在対流においては、ディフェクトによって速度と波数の異なる領域に分かれ、ドメイン構造をとっている。このようなタイプの局在対流は全く新しいものであり、レーリー数の変化に対しても非常に安定である。

現在のところ強非線形領域を扱えるような理論的方法は十分でないが、我々はこのような局在構造を理解するための一つの試みとして、一次元二成分ベナール対流のモデルとして用いられてきた連立複素 Ginzburg-Landau 方程式の計算機シミュレーションを行なった[3),4)]。その結果、実験で観測されているような Double Localized State に比較的近い解が存在することが判明したが、ドメイン構造を見い出すことはできなかった。

2．実験方法

我々が用いた対流用セルは、高さ 5.2 mm、幅 3 mm、長さ 240 mm のスロットチャネルセルである。従って長さ方向のアスペクト比は $\Gamma = 46.2$ となる。作業流体は 8wt% エタノール水溶液を用いた。トッププレートの温度は 10.0°C に固定し、セル下面をヒーターで加熱する。分離比 ψ は濃度のみでなく平均温度にも依存するが、今の場合およそ -0.46 となり、強非線形領域にある。重要なコントロールパラメータは換算レーリー数 r であり、これはレーリー数を無限系の純粋流体のベナール対流の場合の臨界値で割ったもので定義され

る。セル下面に与えられるヒートパワーを逐次的に増大させ、現れる対流パターンをシャドウグラフ法によって観測する。これによって、対流運動を進行波の位相の時空変化として、すなわち一次元系としてとらえることができる。

3．実験結果

レーリー数を逐次的、すなわち準静的に変化させた場合の対流運動は次の過程をたどる。すなわち、はじめ対流オンセットにおいてセルのある部分で発生した速度の速い進行波対流は、過渡過程において対流領域を除々に広げ、セル全体を満たす進行波対流となる。さらにヒートパワーを増大させるとレーリー数は増化し（順方向)、進行波対流の速度はしだいに遅くなり定常対流へと遷移する。次に反対にレーリー数を減少させていくと（逆過程)、再び対流の進行速度は遅くなり進行波対流へと移行する。局在構造はこの逐次遷移過程の逆過程において、レーリー数が臨界レーリー数 r_c よりもさらに低い値で出現する（図1 a))。この図のようにセルの両端に局在し、同一方向に進行するタイプのもの（Double Localized State) は、これまで見い出されていなかったものである。さらに興味深いことは、時間と空間の二次元面における位相のパターンを見ると、右側の局在領域はドメイン構造をとっていることである。ここでは進行速度の異なる領域がドメインを形成し、その境界にディフェクトが存在すると見倣すことができる。

次にこのパターンのレーリー数の変化に対する安定性を調べるために r を再び増減させるといった一連の実験を行なった。図1 b) から図1 d) を見ると、局在対流は広いレーリー数にわたって安定であり、またその生成消滅過程もはっきりととらえられている。このように局在構造が安定である理由は強非線形領域であることと、ここで用いているセルが従来用いられてきたものに比べて幅が狭いものであることによると考えられる。ドメイン構造の特徴としてディフェクトがあるが、レーリー数の関数として、一定時間間隔におけるディフェクトの数を調べた（図2）。特徴的なのは、レーリー数の増大とともにその数が減少することである。

4．計算機シミュレーション

ここで考えているような一次元系のダイナミクスの理論的な解析は Cross らによってなされており、次の連立複素 Ginzburg-Landau 方程式で記述されると考えられている[4]。

$$\partial_t A - s\partial_x A = (1+ic_0)\partial_x{}^2 A + (1+ic_1)A - \{(1+ic_2)|A|^2 + g(1+ic_3)|B|^2\}A,$$

$$\partial_t B + s\partial_x B = (1+ic_0)\partial_x{}^2 B + (1+ic_1)B - \{(1+ic_2)|B|^2 + g(1+ic_3)|A|^2\}B.$$

ここで A, B はそれぞれ、右進行波、左進行波の複素振幅、s, g はそれぞれ群速度、結合定数である。境界条件は両端において、

$$A - \alpha\partial_x A - \beta\partial_x B = 0, \quad B - \alpha\partial_x B - \beta\partial_x A = 0$$

とする。Cross は $c_i = 0$ すなわち実数係数に限っても実験で見い出されているような Counter Propagating Wave, Localized State (局在対流)、Blinking State などは記述できることを示した。しかしこのモデルでは、今回実験で見い出されているような Double Localized State に相当する解は見い出されていないようである。そこで一つの試みとして、係数を複素係数に拡張して計算を行なった結果、あるパラメーター範囲で Double Localized State に相当する解が存在することがわかった（図3 a)) [3]。しかしこの解は同一方向に進行する二つの局在領域を表しているが、実験で観測されているようなドメイン構造をとっているわけではな

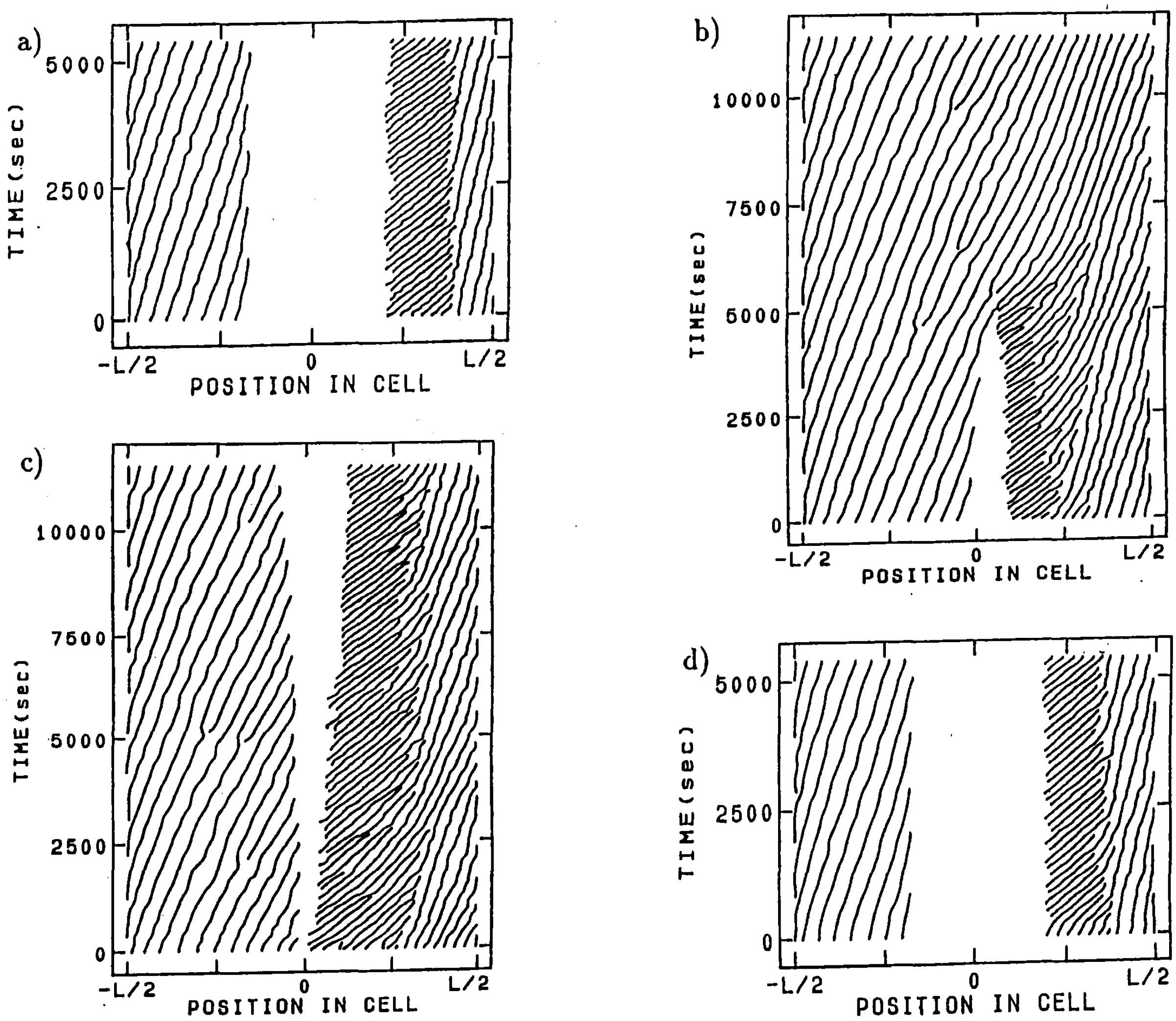

図1. 対流運動における流れの上昇部分の位置の時間変化. a) $r=5.05$, b) $r=5.55$, c) $r=5.13$, d) $r=5.16$.

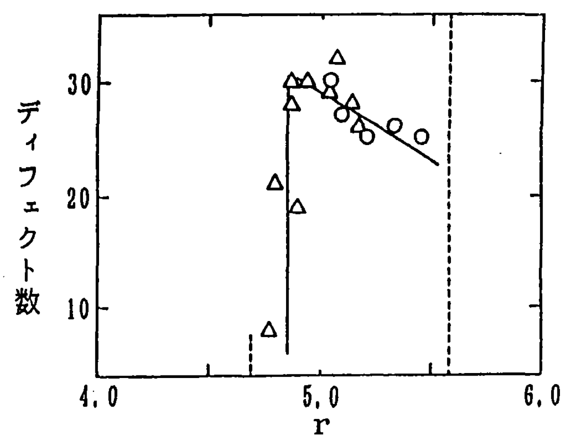

図2. Double Localized State におけるディフェクト数の換算レーリー数依存性（○：順方向, △：逆方向）.

い。また、この局在対流の安定化のためには、両端の側壁の効果が大きいと考えられることから、局在対流の長さ L_c の全システム長 L に対する依存性を調べた（図3 b))。L_c は L に対して、

$$L_c = L^{\alpha}$$

の関係があり、$\alpha = 1$ から $\alpha = 0$ へ遷移する。すなわちシステム長が長くなると進行波から Double Localized State へと移り、局在対流領域の長さはシステム長に無関係となる。

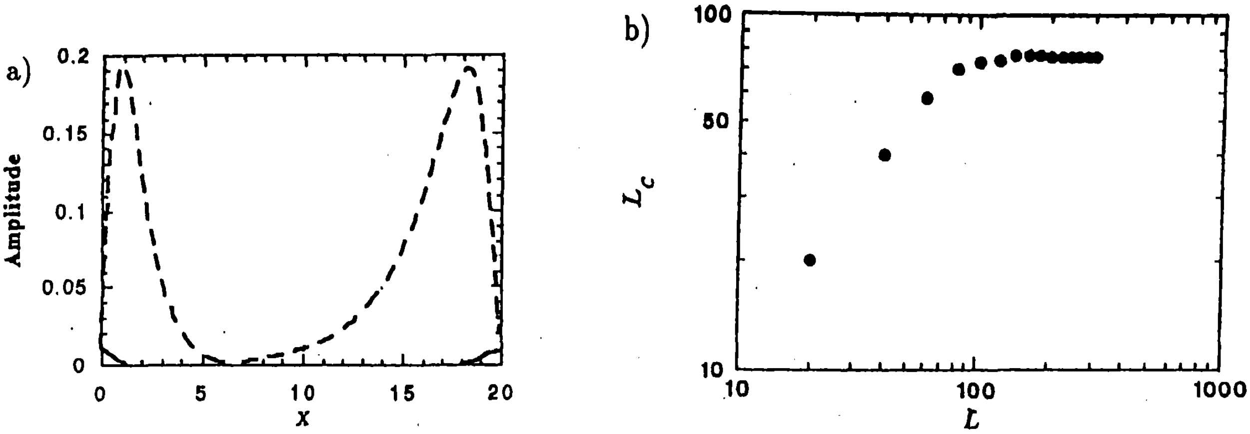

図3．a) Double Localized State. 破線は右進行波、実線は左進行波を表す（$s = 1$, $g = 9$, $\alpha = \beta = -0.06$, $c_0 = 0.5$, $c_1 = c_2 = 0.5$, $c_3 = 0.1$）．b) 対流領域の長さ L_c のシステム長 L 依存性（長さは適当にスケールしてある）．

5．まとめ

本研究では次のことを明らかにした。

1) 換算レーリー数 r の変化に対して広い範囲で安定な Double Localized State を見い出した。このとき二つの対流領域における進行波は同一方向に進行するものである。
2) Double Localized State の対流領域はドメイン構造をもち、ディフェクト数は r の増加とともに減少する。
3) 連立複素振幅方程式の計算機シミュレーションの結果、Double Localized State に近い解が存在する。また、システム長に依存して進行波から Double Localized State へ遷移する。

今後の課題としては、どのようなメカニズムで Double Localized State が生じているのか明らかにすることである。そのためには、局在対流状態の一次元的な情報だけでなく対流ロールの構造そのものを調べる必要もあろう。この方向の実験として、現在スペックル速度相関法による二次元流れ場の測定も行なっている。計算機シミュレーションに関しては、ここで扱ったモデルは、スーパークリティカル分岐を示すものであったが、サブクリティカル分岐に拡張した計算も現在進行中である。

参考文献

1) M. C. Cross and P. C. Hohenberg, Rev. Mod. Phys. **65**, 851 (1993).
2) Y. Harada, Y. Masuno, K. Sugihara, K. Nomura and H. Yahata, in *Pattern Formation in Complex Dissipative Systems*, ed. S. Kai, (World Scientific, 1992).
3) A. Otake, A. Ogawa and Y. Harada, (in press).
4) M. C. Cross, Phys. Rev. A**38**, 3595 (1988).