

二成分混合流体対流における漸近挙動：局在構造の自発的発現と集団運動

Asymptotic behavior of binary mixture convection: spontaneous generation and collective motion of localized structures

○渡辺 毅, 北大電子研, 〒060-0812 札幌市北区北 12 条西 7 丁目, E: watanabe@nsc.es.hokudai.ac.jp
 鳥谷部 和孝, 北大理院, 〒060-0812 札幌市北区北 12 条西 7 丁目
 飯間 信, 北大電子研, 〒001-0020 札幌市北区北 20 条西 10 丁目, E: makoto@nsc.es.hokudai.ac.jp
 西浦 廉政, 北大電子研, 〒060-0812 札幌市北区北 12 条西 7 丁目, E: nishiura@nsc.es.hokudai.ac.jp

Takeshi WATANABE, RIES, Hokkaido Univ., Kita 12 Nishi 7, Kita-ku, Sapporo 001-0021
 Kazutaka TOYABE, Grad. Sch. Sci., Hokkaido Univ., Kita 10 Nishi 8, Kita-ku, Sapporo 060-0810
 Makoto IIMA, RIES, Hokkaido Univ., Kita 12 Nishi 7, Kita-ku, Sapporo 001-0021
 Yasumasa NISHIURA, RIES, Hokkaido Univ., Kita 12 Nishi 7, Kita-ku, Sapporo 001-0021

We study asymptotic behavior of binary mixture convection in a large periodic domain. When the trivial state is unstable and the size of the domain is large enough, localized convection cells (pulse) are generated spontaneously in the conductive state and, finally, they are arranged at non-uniform intervals and move in the same direction. We found that the role of time-periodic traveling pulse (PTP) solutions and their strong interactions (collision) are important to approach the final state and thus, phase dependency of pulse-pulse collision is investigated in detail.

二成分混合流体とは、水とエタノールの混合物のように、ある溶媒に良く混和する溶質を溶かすことによって得られる流体のことである。このような流体に対して温度勾配を与えたときに生じる対流現象は一種流体の場合のそれとは大きく異なり、分岐構造の違いにより双安定領域を生じる。また一成分流体の場合と同様の Rayleigh-Bénard 型の対流 (stationary overturning convection, SOC) の他に定常パルス (standing pulse, SP) や周期進行パルス (periodic traveling pulse, PTP) のような局在対流セルが現れる。以下、SP や PTP のような局在対流セルをパルスと呼ぶ。

この種の局在構造は一般に双安定な領域内で安定な熱伝導解と安定な対流解をつなぐことによって構成されと考えられてきたが、近年双安定でない領域でも安定なパルス解が見出された¹⁾。このような解は従来の理論枠組では捉え切れないものであるため、その安定性は考えている領域の有限性に依るものと考えるのが自然である。このことを確かめるため本研究では有限の、しかし十分に大きい空間周期的領域を考え、熱伝導解が対流不安定な状態となる Rayleigh 数で数値実験を行いその漸近状態を調べた。

数値実験は Navier-Stokes 方程式に温度場と濃度場の移流拡散方程式を加えた系に対して Boussinesq 近似を適用することによって得られる方程式の無次元形

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t}(\nabla^2\psi) &= \frac{\partial(\psi, \nabla^2\psi)}{\partial(x,y)} + \sigma \nabla^2 \nabla^2 \psi - \frac{\sigma Ra}{16} \left\{ (1+S) \frac{\partial\theta}{\partial x} - S \frac{\partial\eta}{\partial x} \right\} \\ \frac{\partial\theta}{\partial t} &= \frac{\partial(\psi, \theta)}{\partial(x,y)} - \frac{\partial\psi}{\partial x} + \nabla^2\theta \\ \frac{\partial\eta}{\partial t} &= \frac{\partial(\psi, \eta)}{\partial(x,y)} + \nabla^2\theta + Le \nabla^2\eta\end{aligned}$$

を直接数値積分することによって行った。ただし ψ は流れ関数、 θ は温度場、 η は濃度場を表す。壁面上 $y = \pm 1$ での境界条件は流れ場に対して滑りなし条件、温度固定、質量流束に対して非透過条件を課し、 x 方向には周期 2Γ の周期境界条件を課す。離散化はスペクトル法によって行い、展開係数は選点法によって決定した。ここに現れる無次元数 σ , S , Le はそれぞれ Prandtl 数、分離比、Lewis 数で、値は Kolodner が実験で用いたパラメータ²⁾ $Le = 0.0088$, $\sigma = 7$, $S = -0.123$ を採用した。なお Ra は Rayleigh 数である。

数値計算は熱伝導解 $\psi = \theta = \eta = 0$ が不安定な $Ra = 1960$ で行い、アスペクト比 $\Gamma = 500$ の大きな領域をとり、様々な初期条件からの時間発展を調べた。その結果不安定な熱伝導解から次々

に新しいパターンが生じ、それらが相互作用を繰り返して最終的に、不等間隔に並んで同じ向きに進む PTP の集団運動が実現された。この結果は 2 次元空間周期領域内における反応拡散系で、一つのスポットが次々に分裂・衝突を繰り返した結果最終的に規則正しく整列しある一定の方向に進行するスポット群に漸近する例³⁾と良く似ている。

次にこのような PTP の集団運動が包括的に実現されるかどうか確かめるために $\Gamma = 500$ の場合の時間発展計算結果から相互作用の素過程として対向するパルスの衝突現象を抽出した。PTP は時間周期的に形を変えながら移動するため、衝突する瞬間の位相によって衝突の結果は異なる。そのため衝突する 2 個のパルスの位相 $[0, 2\pi]$ によって作られる空間 $[0, 2\pi] \times [0, 2\pi]$ を考えることによって相互作用全体を網羅的に調べることが可能である。

衝突実験の結果、衝突によって再び PTP が得られることが明らかになった。PTP が衝突した結果再び PTP が得られるならば系をパルスダイナミクスとして捉える視点が可能である。すなわち PTP は自分の周囲の不安定な熱伝導領域から自発的に生じる波束攪乱を吸収することによって周囲を安定化させ、それによって周囲の熱伝導解が不安定であっても安定に存在することが出来る。しかし、もし熱伝導領域が十分に広い場合周囲で大きく成長した波束攪乱の衝突を受ける。しかし衝突の結果再び PTP が生まれるため、結果的に領域内に複数の PTP が生まれる。それぞれの PTP はそれぞれに周囲を安定化させるため、PTP は可能な最小の距離と最大の距離の間の適当な距離を隔てて同じ向きに進行し、もはや衝突が起これなくなると最終状態となる。

謝辞

本研究の一部は科研費 (21340019) 及び CREST(PJ74100011) の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) O. Batiste, E. Knobloch, A. Alonso, and I. Mercader, Spatially localized binary-fluid convection, *J. Fluid Mech.* **560**, 149–158 (2006).
- 2) P. Kolodner, Collisions between pulses of traveling-wave convection, *Phys. Rev. A* **44**, 6466–6479 (1991).
- 3) Y. Nishiura, T. Teramoto, and K. Ueda, Scattering of traveling spots in dissipative system, *Chaos* **15**, 047509 (2005).