

Convective Heat Transport in Compressible Fluids

(京大理 物理) 古川 亮、小貫 明

Introduction

近年、非常に高いレイリー数 (Ra) での熱対流実験が盛んに行われている。レイリー数が低い場合と異なり、レイリー数の高い熱対流現象では熱塊 (thermal plume) の発生、運動が主要な役割を担う。それに起因して速度場、温度場も複雑な時空構造を持つことになり、通常の乱流研究の枠組みを超えて、魅力的な問題を提供している。

非常に高いレイリー数を比較的容易に実現できることから、実験的には超臨界領域の 1 成分流体が使用されることが多い。よく知られているように、臨界点近傍の 1 成分流体では圧縮率が相関距離のべき乗で発散するのに対して、熱拡散係数は相関距離のべき乗で小さくなる。このような臨界異常は、特に系が等体積にある場合、マクロな熱緩和に決定的な影響を与える。ここで系が壁に囲まれて等体積にある場合を考える。容器壁でわずかに温度を上昇させると壁近くの流体は大きな熱膨張を示し、結果として流体全体が断熱圧縮される。このような効果はピストン効果と呼ばれており、理論的に定式化されている [1]。また、一般に高い圧縮性を示す流体の対流現象では熱塊の上昇、下降運動に断熱過程が強く影響を及ぼす。本研究では、このように臨界点近傍で特に顕著になる圧縮性の効果を取り入れた流体方程式に基づき、2 次元流体シミュレーションを行った [2]。我々のシミュレーションの結果は超臨界流体の熱輸送、対流現象に特徴的な振る舞いを再現しており、実験とよく一致する [3]。特に定常状態では定量的な一致を見る。さらに、我々は数値シミュレーションの結果に基づいて現象論的な解析を行った。

Simulation Results

Transient Behavior

熱対流の発生直後、上下の境界の温度差は急激に減衰する。このようなオーバーシュート現象は臨界点の近傍で特に著しいことが実験的に知られていた。我々のシミュレーション結果では次のような機構を明らかにした。高温壁から発生した熱い熱塊は上昇して低温壁に衝突し、そこで瞬間的に大量の熱が吸熱される。その際、ピストン効果によって系全体が断熱的に急冷される。更に、レイリー数が高い状態 ($Ra > 10^5$) では熱塊の上昇、下降運動が十分速くなり熱い熱塊が低温壁に衝突するとほぼ同時に冷たい熱塊が高温壁に衝突する。このこともオーバーシュート現象の原因になる。

steady-state behavior

比較的高いレイリー数の対流実験において、レイリー数とナッセル数 (Nu) の間に $Ra \propto Nu^\alpha$ というスケール関係が成立することが知られている。我々の数値シミュレーションの結果は実験曲線を定量的に再現した。更に、アスペクト比が小さい場合、このようなスケール関係に漸近する為にはより大きなエネルギー注入が必要であることを示した。このようなアスペクト比依存性は以前から実験で観測されており、側壁の抵抗によってマクロな速度場の発達が抑制されることで理解できる。また、ピストン効果によってマクロな温度揺らぎは臨界点に接近するほど増幅されることを示唆した。

上記のような、系全体に関する情報のみならず温度場、速度場などの局所的な構造の解析は熱

対流現象を研究する際の重要な情報になる。我々は、温度場および速度場の時間平均、空間平均(水平方向)をとり、これらを壁からの関数としてプロットした。その結果は、以前に報告されている高いレイリー数の対流に特徴的な構造を再現している。特に新しい結果として、我々は境界層におけるせん断流が壁からの距離 z について対数的に振舞うことを報告した。これまでの理論的考察では、せん断流はこの領域で壁からの距離の線形に振舞うことが仮定されており、我々の結果はこの仮定とは一致しない。

random reversal of macroscopic flow

最近、アスペクト比が 1 程度の実験装置を用いて、マクロな対流方向の反転現象が盛んに調べられている。比較的低いレイリー数では対流の発生時にその対流方向が決定される。他方、高いレイリー数の熱対流実験ではその対流方向がほぼ周期的に反転することが観測されていた。

今回、同様の状況下における数値シミュレーションを行い同様の対流方向の反転現象を示した。高いレイリー数下では常に小さな揺らぎが存在する。そのような揺らぎが熱塊の生成、上昇に伴い擾乱を受け、成長することで以前のマクロな構造がリセットされ、対流方向が反転し得ることを示した。また我々の数値解析の結果は温度場の揺らぎと反転現象の間に密接な相関があることを示した。

Scaling Theory

前述したように、我々の数値シミュレーションの結果は実験で観測されているスケーリング関係を定量的に再現する。そこで、数値シミュレーションの結果を現象論的に解析し、ナッセル数とレイリー数の間に $Nu \propto Ra^{1/4}$ というスケーリング関係式を得た。我々の議論は、実験をよく説明しており、特にプラントル数 (Pr) の大きな場合に有効であると考ええる。よく知られたスケーリング議論としては乱流的な対流を仮定した L.P. Kadanoff[4] や E.D. Siggia[5] の理論があり、それらは $Nu \propto Ra^{2/7}$ を与える。しかしながら、これらの理論を現存する数値シミュレーションやほとんどの実験に対し適用するのは不適切である。なぜならレイリー数が極めて大きくない限り ($Ra > 10^{14}$) 熱塊はバルクで乱流状態を実現するほど十分な運動エネルギーを持ち得ないからである。

参考文献

- [1] A. Onuki and R.A. Ferrel, Physica, A**66**, (1990).
- [2] A. Furukawa and A. Onuki, Phys. Rev. E, **66**, (2001).
- [3] A.B.Kogan and H.Meyer, Phys. Rev. E, **63**,056310 (2001).
- [4] B.Castaing, G.Gunaratne, F.Heslot, L.P.Kadanoff, A.Libchaber, S.Thomae, Xiano-Zhong Wu, S. Zaleski and G. Zanetti, J. Fluid Mech. **204**,1 (1989).
- [5] B.I. Shraiman and E.D. Siggia, Phys. Rev. E, **42**,3650 (1990).