

気液共存系熱対流における熱輸送と内部構造

Heat transfer and inner structure of two-phase thermal convection

- 松井裕太郎, 東大理, 東京都文京区本郷 7-3-1, mti@daisy.phys.s.u-tokyo.ac.jp
 佐野雅己, 東大理, 東京都文京区本郷 7-3-1, sano@phys.s.u-tokyo.ac.jp
 Yutaro Matsui, the University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033
 Masaki Sano, the University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033

We report experimental results of a gas and liquid two-phase thermal convection system in samples of pure water (H₂O). When thermal difference ΔT was applied to the system, boiling and condensation occurred and the latent heat of vaporization provided an additional heat transfer mechanism. At a relatively low heat flux region, temperature gradient is generated in the vapor phase along the vertical direction. We attribute this temperature gradient to convection structure of the vapor.

1. はじめに

コンテナの中に流体を封入し、下部より加熱を行い上部より冷却すると温度勾配に対応した密度勾配が生じる。上下での温度差がある閾値を越えると密度差に駆動された流れが生じ始める。内部の流れの様子は温度差の上昇に伴って対流状態から乱流状態へと発達していく。このような熱対流系のメカニズムについては、理論、計算、実験の各方面で膨大な数の研究がなされている⁽¹⁾。しかしながら、熱対流系の研究の対象は気体のみあるいは液体のみといった単一相系であるのがほとんどであり、気液が共存した系における熱対流実験の物理サイドからのアプローチは稀である⁽²⁾。そこで本研究では一般的な熱対流系と同様の伝熱ジオメトリを持つ単純化された密閉式二相共存系サーモサイフォンを作製し、純水を作動流体として実験を行った。

2. 実験の概要

まず、実験装置の概要を述べる。本実験系は内径 100mm 高さ 228mm (アスペクト比 $\Gamma \sim 0.45$) である。伝熱面は一般の熱対流系と同様に下面と上面に設けられている。それぞれジュール熱により加熱し、恒温水を循環させることで冷却する。また伝熱機構は銅製でありクロムコートされている。円筒部分にはアクリルパイプを使用しており、内部の沸騰及び凝縮の様子を観察できる。温度測定は伝熱面に埋め込まれたサーミスタ (各伝熱面に放射状に 8 個ずつ、精度 0.01C) によって行う。内部圧力の測定は装置の上方に設置されたダイヤフラム真空計 (圧力分解能 13Pa) によって行う。また、内部蒸気の温度、圧力の詳細を測定するためにサーミスタとピエゾ素子からなる測定系を作製した。これにより、蒸気の温度と圧力の垂直方向の分布を測定することが出来る。

次に実験方法の概要を述べる。始めに系内部をロータリーポンプで脱気し、 10^1 Pa 程度の真空にする。次に純水を封入する (充填率 3%)。また、封入時に混入した空気や溶解ガスはロータリーポンプを用いて除去する。理想的には系内部には水と水蒸気のみが存在しており、平衡では飽和状態にある。このとき、熱対流の実験と同様にコントロールパラメータとして冷却面の温度(T_t)と加える熱流(Q)を決定し、内部の状態として加熱面の温度(T_b)と内部圧力(P_s)を測定する。

3. 結果

系の熱輸送の指標として実効的な熱伝導率($\lambda_{eff} \equiv QA/\Delta TL$)を導入する。ここで A は系の断面積、 ΔT は上下での温度差、 L は系の高さである。本実験では熱輸送効率を向上することを目的とした設計を行っていないにもかかわらず、 λ_{eff} は 200W/mK にも及び、金属にも匹敵する熱伝導率を有することが分かった。次に内部蒸気の温度と圧力の詳細な測定を行った結果を Fig.1 に示す。比

較的熱流が低い領域では上部付近に蒸気の温度勾配が発生していることがわかった。熱流の上昇と共にこの勾配は消失し、蒸気の温度は一樣となる。一方で圧力に関しては熱流によらず分布は一樣であった。また、温度勾配の生じていない部分に関しては蒸気の温度と圧力の関係は、系に沸騰や凝縮が生じている強く非平衡な状態にあっても共存曲線の関係を満たしていることが分かった。

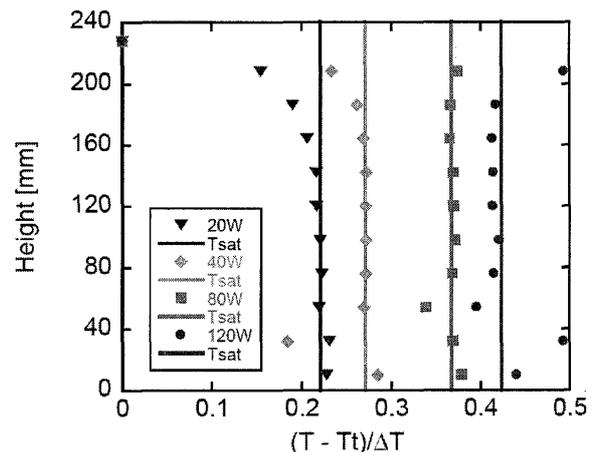


Fig. 1 Temperature distribution

内部蒸気の高さ方向の温度分布。縦軸は高さ、横軸は無次元化した温度。実線はダイヤフラム真空計で測定した圧力より計算した飽和温度。圧力と温度は共存曲線上にあることが分かる。

4. 考察

低熱流領域における温度勾配は気相の対流構造によるものであると考えられる。蒸気温度と冷却面温度の差を温度差と考え、気体を用いた熱対流の先行研究の結果と比較すると、気相部分は対流状態に相当するため、本実験においても対流による温度勾配が形成されている可能性は十分にある。さらに、温度勾配が生じているときに真空ポンプによる脱気を行い流れ場をかく乱すると、勾配が速やかに消失することからも、流れ場由来の温度構造であることが分かる。よって、沸騰による流れ場のかく乱が激しくなるため、高熱流領域では温度勾配が消失すると考えられる。

参考文献

- (1) G Ahlers, S. Grossmann and D. Lohse, "Heat transfer and large scale dynamics in turbulent Rayleigh-Benard convection", Rev. Mod. Phys., 81 (2009) pp.503-537.
- (2) Akira Onuki, "Dynamic van der Waals theory", Phys. Rev. E, 75 (2007) pp.036304-1-036304-15