

臨界点近傍流体のピストン効果の直接観察

Direct Observation of "Piston Effect" in a Critical Fluid

宇宙先進技術研究グループ(Advanced Space Technology Research Group)

大西 充、吉原 正一、桜井誠人

Mitsuru Ohnishi, Shoichi Yoshihara and Masato Sakurai

Abstract

Thermal energy applied to a pure fluid near its critical point immediately makes a strong expansion. This causes an adiabatic compression in the front of the expansion and a large density difference is formed there. The difference with adiabatic energy is transported as an acoustic wave. This rapid heat transportation is called "Piston Effect." In our study, an ultra-sensitive and high-speed density measurement system was developed to conduct a quantitative measurement of the "Piston Effect." By using the system, we succeeded to directly observe the elementary process of "Piston Effect." To demonstrate the performance of the system, the measurement of sound velocity in a critical fluid was conducted. Using the FFT method to the experimental results, the sound velocity could be precisely evaluated. The velocity profile versus temperature from the experimental results shows a good agreement with the simulation results and theoretical prediction, that is, the profile should have the scale universality. However, the profile from the experimental results obeys another scale universality if $T - T_c < 0.1\text{K}$. These indicate that our experimental system enables us to quantitatively discuss the critical phenomena.

1. はじめに

気液臨界点に関する古典論から定圧比熱や等温圧縮率が発散することが理論的に導かれる。このため、流体中の熱拡散過程による熱輸送は臨界点近傍では大変低速であると従来は考えられていた。ただし、当時の地上実験では拡散過程から期待される程の熱輸送速度の低下が観察されなかった。この原因として考えられるのは、先ず臨界点近傍では等温圧縮率の発散により密度が非常に重力に敏感となり、静水圧により強い密度分布が形成され、結果として臨界密度から逸脱するため臨界発散が抑制されること、さらに重力が自然対流を発生させるため熱輸送が促進されることが挙げられ、無重力下では熱拡散の理論に従うはずだと考えられていた。しかし、近年になって開発された種々の微小重力実験手段により多くの臨界点現象実験が実施されたが、拡散過程では説明できない高速熱伝播が観測りされて研究者を困惑させていた。その後、この高速熱輸送現象に対し京都大学の小貫教授により理論的な説明²⁾がなされ、「ピストン効果」と命名された。この効果を検証するために、今までに多くの実験や解析³⁻⁵⁾が実施されてきた。臨界点は温度、圧力、密度が1点で決まるため、臨界点の実現には高品位の環境条件制御が必要である。地上実験では静水圧分布による密度勾配形成がある上、熱実験に必須の温度分布形成には自然対流による擾乱がつきまとうため、この実験には微小重力環境が有効だと早くから考えられていた。一方で高品位の温度条件には温度緩和時間が長い環境が必要である。よって、高精度の臨界点実験には長時間の微小重力環境、すなわちスペースシャトルなどを用いた宇宙実験が必然だと考えられていた。しかし、このような機会は極めて限られており、現実には地上実験及び小型ロケットなどを用いた、精度を犠牲にしたものが主体となっている。一方、数値解析は理想的な条件を設定できるが、熱拡散係数が非常に小さくなっているため、非常に薄い熱拡散層が容易に形成され、さらに現象の緩和時間が異常に長くなるため、重力などの影響を含む実際の実験条件に整合させるのは困難であった。よって従来の研究では実験と数値解析が相補せず、定性的な検証に終始し、そのみで「ピストン効果」が存在すると結論していた。また興味深い現象が数値解析や理論解析により予測されているが、それらの計測には従来の実験装置では達成することが不可能な精度と時間分解能を要求されていた。

Table 1 Members of the research team.

分担	研究者	所属
リーダー、実験技術	三浦 裕一(招聘)	宇宙科学研究本部/名古屋大学
プロジェクト調整	石川 正道(招聘) 竹之内 武義 小林 礼人	宇宙科学研究本部/東京工業大学 宇宙科学研究本部 宇宙科学研究本部
理論および数値解析、 実験系設計	河合 潤 本多 克也 松本 昌昭	三菱総合研究所
実験系構築、実験実 施、データ解析	大西 充 吉原 正一 桜井 誠人	総合技術研究本部

以上の背景のもと、微小重力環境が有効な基礎科学分野の一つとして臨界点近傍流体研究を定量的かつ精緻な議論によって進め、新しい領域を拓くことが宇宙開発事業団(当時)を中心に検討された。その後、平成14年より名古屋大学、航空宇宙技術研究所(当時)、三菱総合研究所を含めた研究チームが構成され、平成15年の宇宙3機関統合により宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部が中心となって研究を進め、平成16年度末まで研究を実施した。Table 1に平成16年度末時点でのチーム構成を示す。このチームは宇宙実験をより有効に実施するため、まず地上実験での限界を見極めることに着手した。そこで高精度臨界点近傍流体計測システムを構築し、この精度を検証するためにパルス加熱実験を行い、平成15年度宇宙航空研究開発機構総合技術研究本部宇宙領域研究成果報告書「臨界流体のピストン効果 直接観察」で報告した様に「ピストン効果」素過程の直接検出に成功した。この成果を受け、平成16年度は精密な音速測定を実施すると共に素過程の集合体である「ピストン効果」そのものの検出を試みたので、この結果を報告する。また、小型ロケット実験によって臨界点にさらに近づくことに挑戦するため、実験装置を小型化し、臨界点近傍での迷光を克服できる赤外線レーザー干渉計を製作し、定量的な計測も試みている。これらの結果は別の機会に報告する。

2. 音速計測

Fig. 1に実験に用いた5mm高実験セルの概略を示す。その他3mm高、10mm高の実験セルを用いた。これらのセルによる密度波の観測結果の一例にFig. 2に示す。それぞれの実験セル内の流体密度はほぼ臨界値、温度は臨界温度より100mK高いと見積もられている。ヒータ加熱で形成された熱パルスが密度変化として実験セル内を何度も往復するため、複数のピークが観察されている。熱パルスは音速で往復していると考えられ、よって平均的なパルス間隔と実験セル高から音速を求めることとした。平均的なパルス間隔は計測データにFFTを適用することで求めた。Fig. 3左に音速の温度依存性と実験セル高の関係を示す。研究チームで数値解析により計算された音速 c も示す。理論的には、臨界点近傍では物性値は $(T - T_c)^\gamma$ に比例すること(べき乗則)が予測されている。ここで γ は臨界指数と呼ばれている。よって音速もべき乗則に従っていると考えられ、数値解析結果を含め、実験結果はべき乗則に従っており、臨界指数はほぼ一致していると言える。しかし絶対値に10%程度の誤差があり、また、実験結果は音速がセル高に依存していることを示しており不可解である。しかし、計測波形を詳細に検討した結果、①実験セル内には薄膜ヒータと上面壁には熱的・電氣的な絶縁を取るための流体が充填された0.5mmの隙間があり、②薄膜ヒータからこの隙間にも実際には熱パルスが発射されており、③これが上面壁に反射した後、薄膜ヒータをすり抜けると結論された。ただ薄膜とはいえ、ヒータを熱パルスがすり抜けるのは奇妙な現象であり、現在のところ未検証の仮説である。しかし、こ

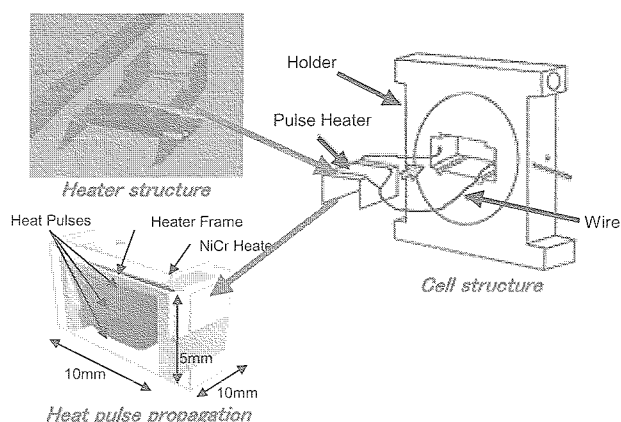


Fig. 1 Schematic of the experimental cell.

ろ、実験セル内には薄膜ヒータと上面壁には熱的・電氣的な絶縁を取るための流体が充填された0.5mmの隙間があり、②薄膜ヒータからこの隙間にも実際には熱パルスが発射されており、③これが上面壁に反射した後、薄膜ヒータをすり抜けると結論された。ただ薄膜とはいえ、ヒータを熱パルスがすり抜けるのは奇妙な現象であり、現在のところ未検証の仮説である。しかし、こ

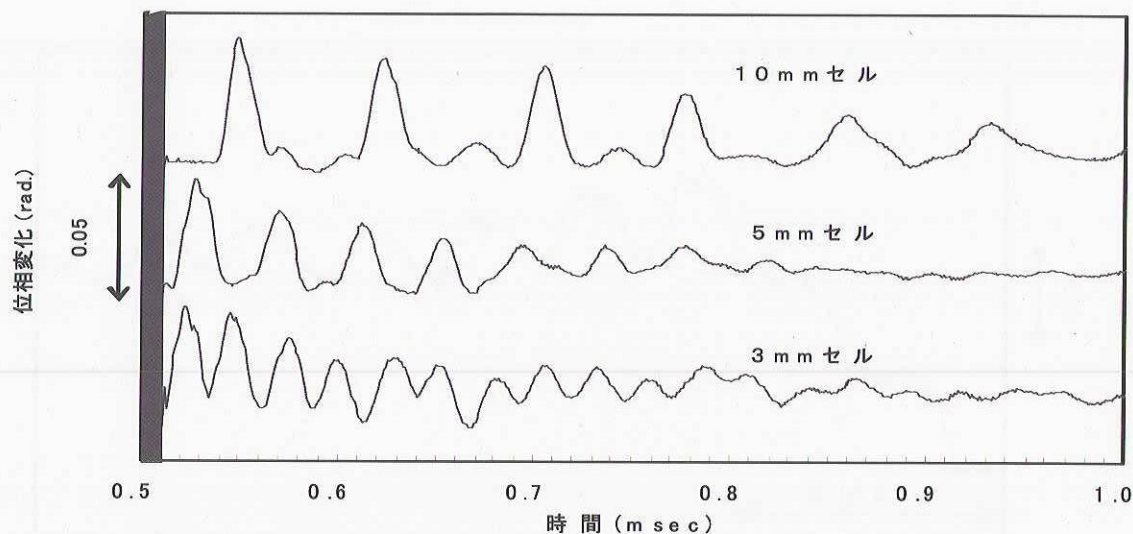


Fig. 2 Comparison of the density signals with different heights as a function of time.

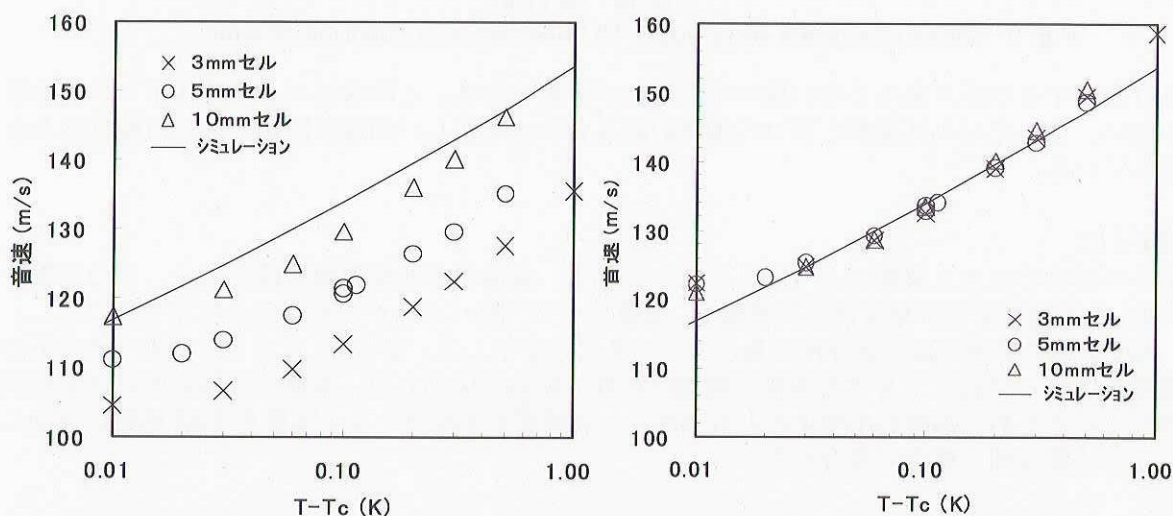


Fig. 3 Comparison of the sound velocities with different heights as a function of temperature without the height correction(left) and with the correction(right).

の空間を実験セル高に加えると実験結果および数値解析結果は Fig. 3 右に示す様、お互いに極めて良く一致する。また実験結果からは、Fig. 3 左では不確かであったが、100mK 程度を境に音速の温度依存性が異なっていることが明確に見て取れる。この理由として、重力の効果以外にも体積粘性の温度依存性の影響⁷⁾の可能性があり、これが正しければ世界でも初めての実験データとなる。

3. ピストン効果観察

これまでの研究では温度がステップ状に上昇することが数値解析⁸⁾で示されている。これは通常経験する熱現象からかけ離れており、パルスの往復以上に常識的には信じがたい。しかし、パルスという「ピストン効果」素過程の直接観察が可能ならば、膨大なパルスで構成されていると考えることができる温度ステップも観察が可能はずである。Fig. 4 に 200 μ 秒という、実験セル高(10mm)からすれば準DCに相当する加熱を行った結果を示す。音速が 120m/s 程度のため、この場合、熱パルスは一往復に少し余る。よって2つのステップが形成された後、パルスの余った部分がセル内を往復していることがわかる。従来、バルク流体中の温度が一樣になる現象を「ピストン効果」と呼んでおり、ステップ形成は「ピストン効果」そのものである。よって Fig. 4 は「ピストン効果」直接観察に世界で初めて成功したことを示している。「ピストン効果」素過程では、パルス前面、後面が相対的に低温のバルク流体に接しているため、進行中も熱拡散を行っている。しかし準DC加熱では、加熱時間を

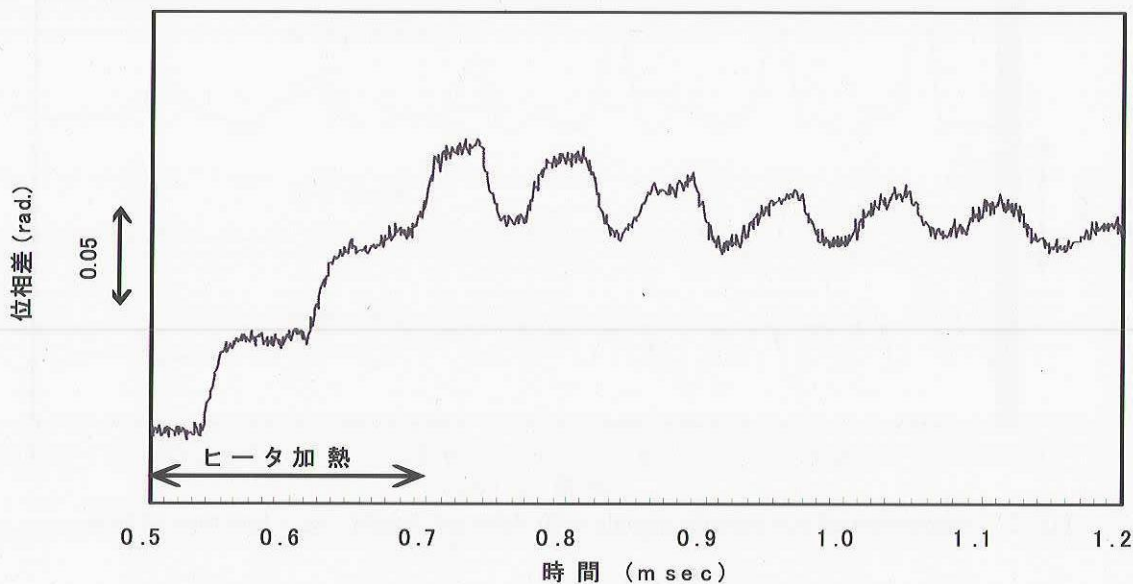


Fig. 3 Density signals from quasi-DC heating as a function of time.

工夫すれば往復するパルスを生じない様にする事が可能である。この時はバルク流体中への熱拡散が発生しない。よってパルス加熱と準DC加熱の組み合わせで新しい領域が開拓できる可能性があると期待されている。

4. おわりに

平成15年度までに地上実験によって「ピストン効果」素過程の直接観察に成功した。この成果を基に、平成16年度は音速の精密測定に挑戦し、薄膜ヒータを熱パルスがすり抜ける現象を見だし、100mK程度を境に音速の温度依存性が異なっていることを示した。また、「ピストン効果」そのものである温度がステップ状に上昇する現象の観測に世界で初めて成功した。本研究は最終的には宇宙実験を目指しているため、装置の小型化にも取り組み、高精度の小型ロケット実験用EM構築に成功している。この成果は別の機会に報告する。

参考文献

- 1) K. Nitsche and J. Straub: The critical "Hump" of CV under microgravity results from the D-1 Spacelab experiment "Warmekapazität," Proc. 6th European Symposium on Material Sciences under Microgravity Conditions, Vol. SP-256(1987), p. 109.
- 2) A. Onuki, H. Hao and R. A. Ferrell: Fast adiabatic equilibration in a single-component fluid near the liquid-vapour critical point, Phys. Rev. A, Vol. 41(1990), p. 2256
- 3) B. Zappoli, D. Bailly, Y. Garrabos, B. Neindre, P. Guenoun and D. Beysens: Anomalous heat transport by the piston effect in supercritical fluids under zero gravity, Phys. Rev. A, Vol. 41(1990), p. 2264
- 4) J. Straub, L. Eicher and A. Haupt: Dynamic temperature propagation in a pure fluid near its critical point observed under microgravity during the German Spacelab Mission D-2, Phys. Rev. E, Vol. 51(1995), p. 5556.
- 5) K. Ishii, T. Maekawa, H. Azuma, S. Yoshihara and M. Ohnishi: Effect of gravitational acceleration on temperature wave propagation in a critical fluid, Applied Phys. Letters, Vol. 72(1998), p. 16.
- 6) 三浦裕一他: 臨界近傍における二酸化炭素流体中のピストン効果研究, ISS科学プロジェクト室研究報告書(2005), 査読中
- 7) A. Onuki: Dynamic equations and bulk viscosity near the gas-liquid critical point, Phys. Rev. E., Vol. 55(1997), p. 403.
- 8) T. Maekawa, K. Ishii, M. Ohnishi and S. Yoshihara: Convective instabilities induced in a critical fluid, Adv. Space Res. Vol. 29(2002), p. 589.