

微小重力を利用した基礎物理現象の研究

中部大工 小林 礼人

1. はじめに

スペースシャトルや国際宇宙ステーションを利用することにより、地上と比べてはるかに重力の影響が少ない理想的な実験環境を得ることができる。物体を自由に浮遊させることのできる宇宙環境は、基礎物理学研究にとってまたとない貴重な環境であるといってもよい。静水圧がなく、密度が一樣に保たれる理想的な環境において、液体ヘリウムの常流動-超流動転移実験などの高精度測定が既に行われてきている[1]。こうして得られた精度の高い実験結果に基づき、より精緻な理論での自然現象の解明を目指すことができるのである。

スペースシャトルの中での流体のふるまいなどのように、微小重力下での種々の「不思議な」現象が高等学校で習うごく初歩の物理実験に相当し、古典力学の正しい理解のためにも宇宙環境は利用価値が高いと思われる。地上ではニュートンの運動の法則が実感できない場合も多い。あるいは、法則どおりの現象が見られる宇宙での運動が意外なものとして感じられることもある。地上でのふるまいが異なるために、本来成り立つべき法則を見失っていることはないだろうか。摩擦のない単純な系によってはじめて見出される自然原理はないのだろうか。

基礎物理学分野での微小重力利用の本質的な意義は、新たな実験環境の利用によって自然現象の理解に新たな視点を加えることにある。重力によって破られた「空間の対称性」を回復した世界、他の物体との接触が断たれた孤立した空間、そして、密度や温度のゆらぎが保たれる環境において新たな物理を論じることはできないだろうか。

2. これまでの宇宙環境利用研究

宇宙環境といえば、まず微小重力が思い浮かぶであろう。スペースシャトルが安定に軌道上を航行するとき、その内部の重力環境は地上のおよそ1万~100万分の1といわれている。この微小重力環境を利用した科学研究を「微小重力科学」とよび、合金などの材料創製を中心としてすすめられてきた。また、生物科学においては植物の根の成長などの研究、宇宙医学においては宇宙飛行士の筋肉や骨にみられる変化などが研究されてきた。その他の宇宙環境の特徴としては、地上の100億分の1以下という高真空や、約85%が原子状酸素という大気組成などがあげられる。

基礎物理学分野においても、微小重力を中心とした宇宙環境を利用する研究として有望な3つの研究領域が識別されている[2]。ボース・アインシュタイン凝縮などの巨視的量子現象、臨界点付近での緩和などの臨界点ダイナミクス、反応拡散系などの非平衡現象が基礎物理学分野での当面の課題としてあげられる。特に、気液臨界点近傍での流体ダイナミクスは静水圧の影響を強く受けるため、宇宙環境を利用するテーマとして期待されている。

3. 気液臨界点近傍におけるエネルギー輸送

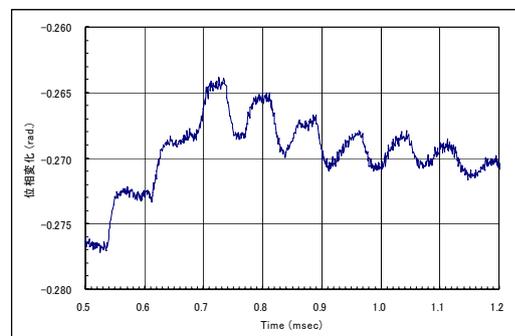
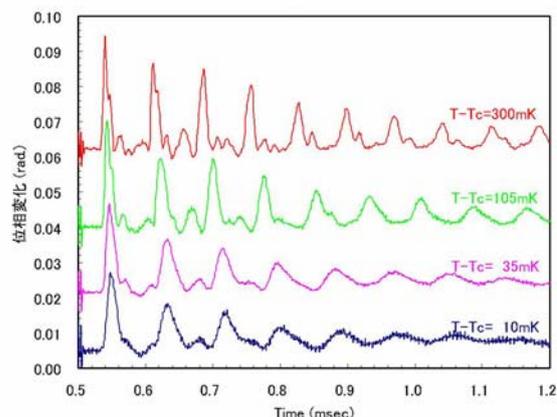
臨界減速は良く知られた現象である。すなわち、臨界点に近づく物質の緩和時間は長くなるのが普通である。流体においても、気液臨界点に近づくにつれて拡散係数は小さくなることが知られている。したがって、臨界流体を入れた容器を熱したときの温度均一化時間も長くなると考えるのが常識的である。しかし、欧州の微小重力実験の結果はそれとは反対の傾向をみせた。つまり、臨界流体を入れた容器を熱すると非常に短い時間のうちに温度が均一化し、流体が加熱に追従するようすが観測されたのである[3]。この現象はのちに「ピストン効果」と名づけられ、微小重力環境を利用した基礎物理学実験における重要な発見の1つとなった。

臨界流体の異常に速いエネルギー伝播であるピストン効果の機構について、小貫らは「加熱壁付近の流体が急速に膨張して密度波を発生させ、その密度波がエネルギーを運んで温度が均一上昇する」という説を熱力学的考察から導いた[4]。この説に従って流体力学的な数値シミュレーションがなされ、加熱後に密度波が流体内を往復して流体の均一温度上昇をおこすようすが示された[5]。これにより、ピストン効果の機構は解明されたかにみえた。

一方で、これまでの実験は秒の時間スケールで加熱後の温度変化をとらえたものであり、ピストン効果の素過程からの検証にはいたっていない。そこで、我々はピストン効果のより基本的性質に迫るべく、加熱によって生じる密度波の発信と流体中の伝播をマイクロ秒の時間分解能で直接観測し、素過程からの解明を試みた。特に、ヒータに与えたエネルギーから密度波へのエネルギー変換効率、密度波の伝播及び反射による減衰の過程を詳細に調べている[6, 7]。

臨界流体を封入した容器の壁をパルス加熱した後の試料セル中央付近での密度変動が右図である。

パルス加熱後、流体の密度が周期的に変動しており、流体中の波動の伝播をとらえたといえる。これはピストン効果の素過程である波動の発信と伝播をはじめて観測したものである。グラフから最初のピーク強度はほぼ同じであるものの、臨界点に近づくにつれて信号が早く減衰することがわかる。



連続的に加熱したときの密度上昇は左図のようになった。グラフにみられる階段状の密度変化は、拡散とは異なるエネルギー輸送機構の存在を強く支持している。

なお、気液臨界点近傍におけるエネルギー輸送の研究成果は、三浦裕一（名大）、小貫明（京大）、石川正道（東工大）、大西充、吉原正一、桜井誠人（宇宙航空研究開発機構）、本多克也、河合潤、松本昌昭（三菱総合研究所）らとの共同研究によるものである。

4. おわりに

日本における基礎物理学分野での宇宙環境利用は、宇宙実験へ向けてそのとりくみが始められたばかりである。宇宙環境利用に関心を持つ研究者はいまだ多くなく、研究コミュニティの醸成など今後の進め方についての課題も多い。このため、宇宙環境利用研究委員会微小重力科学専門委員会のもとに設置された微小重力物理学ワーキンググループ（当時）での検討により、基礎物理学分野での研究推進のための研究シナリオが平成13年秋に制定されている[2]。これまでの活動が日本の物理学研究者の宇宙実験への関心を引き起こし、当該分野の研究が大きく進展することを期待したい。

参考文献

- [1] 宇宙実験最前線、日本マイクロ重力応用学会編、142頁（講談社、1996）。
- [2] 微小重力物理学分野研究シナリオ初版、宇宙環境利用研究委員会（2001）。
- [3] K. Nitsche and J. Straub, Proc. 6th European Symp. on Material Science under Microgravity Conditions (Bordeaux, France, 2-5 December 1986).
- [4] A. Onuki and R.A. Ferrell, Physica A **164**, 245 (1990).
- [5] H. Boukari, J.N. Shaumeyer, M.E. Briggs, and R.W. Gammon, Phys. Rev. A **41**, 2260 (1990).
- [6] H. Kobayashi, T. Takenouchi, M. Ishikawa, K. Honda, J. Kawai, M. Matsumoto, M. Sorai, M. Ohnishi, S. Yoshihara, M. Sakurai, and Y. Miura, Space Activities and Cooperation Contributing To All Pacific Basin Countries, Advances in the Astronautical Sciences **117**, 809 (2004).
- [7] M. Ohnishi, S. Yoshihara, M. Sakurai, Y. Miura, M. Ishikawa, H. Kobayashi, T. Takenouchi, J. Kawai, K. Honda, and M. Matsumoto, Microgravity sci. technol. XVI-I, 306 (2005).