

平成19年 4月23日

平成18年度「臨界点ダイナミックス」活動報告書

代表者所属 名古屋大学大学院 理学研究科
氏名 三浦裕一

1. 構成メンバー

氏 名	所属
大西 充	JAXA 総合技術研究本部
吉原正一	JAXA 総合技術研究本部
小貫 明	京都大学大学院 理学研究科
三浦裕一	名古屋大学大学院 理学研究科
石川正道	東京工業大学大学院 総合理工
佐藤武郎	東北大学 名誉教授
中納暁洋	産業技術総合研究所 エネルギー技術研究部門

2. 本年度WG 会合開催実績 (議事録 別紙資料)

- (1) 第1回：平成18年9月12日13時～18時半
場所：日本宇宙フォーラム 第3会議室
- (2) 第2回：平成18年11月24日13時～18時半
場所：日本宇宙フォーラム 第4会議室
- (3) 第3回：平成19年2月3日12時～18時半
場所：JAXA 総合技術研究本部 宇宙3号館3階会議室。
- (4) 第4回：平成19年3月10日13時～17時
場所：JAXA 総合技術研究本部 宇宙3号館3階会議室。

3. 活動目的

CO₂を対象として、臨界点近傍における高速断熱緩和過程の解明を目指すものであり、NASDA時代に、微小重力物理分野の先導的研究テーマとして推進されてきた。我々は超高速・高感度の密度測定装置の開発に成功し、音速レベルでの断熱的過程を実測できるようになり、種々の興味ある複雑な熱緩和過程の様相を捉えている。

我々の装置で初めて実測されたパルス加熱による音波の発信過程などは、理論とも良く一致している。しかし、解釈が非常に困難なデータも多く蓄積されている。その解釈を進め、その成果を順次論文にまとめる。

更に臨界点に接近して研究するため、我々の装置に関心を持つ仏の臨界現象研究グループとの交流を進め、近くISSに連結する予定のJEM、DECLICでの共同研究を想定し、我々が試作した小型装置の改良・調整と、完全自動測定のための要素技術の開発も進める。

4. 活動内容

臨界点近傍では、熱膨張係数が発散的に増大しているため、パルス加熱により音波が効率的に発信されることが理論的に予想されていたが、我々はそれを実証してきた。更に、音波が試料容器を往復する時間よりも長く加熱すると、ステップ状の密度変化が観測されることを初めて見出し、論文に発表した。

その実験結果を受けて行われたフランスの理論家 Dr. Carles の計算結果は、全く自由パラメーター無しで実験結果と定量的に一致した。ちょうど京都大学に滞在していた Dr. Carles に、第3回WGに出席いただき、実験結果と彼の計算について詳しく議論した。

更に、加熱時間を延長したステップ実験が行われた。加熱時間が長くなるにつれ、観測される密度のステップの段数は増えていくが、ステップ面に右肩下がり傾向が見られた。加熱時間が延びた分、流体の温度上昇し、試料容器壁への熱伝達による緩和が増えたため、と解釈された。

次に、ステップ実験とパルス実験を比較することにより、緩和機構は平らな面を持つステップの緩和と、その上を伝播している短パルスの緩和、の二つに分けられることが分かった。

前者の緩和は数ミリ秒と比較的長く、短パルスの緩和はそれより一桁程度速い。後者を説明できる計算は、まだ行われていない。また、3種類の行路長の異なるセルでの結果から、壁との反射回数に緩和時間が依存していることは確かめられた。これを利用して、壁の効果とバルク部分の効果を分離して求めることが試みられている。

国際共同研究の可能性も検討している。フランスの臨界現象・流体の研究グループは液滴や気泡などの、流体的研究に興味を持っている。JAXA-ESA 合同の Topical Team シンポジウム (2006 年 10 月 30-31 日、オランダ) で小貫、三浦、及びフランス側の Beysens・Garrabos 両氏と議論した。Beysens 氏らのチームの現テーマ・現到達点・目標を話していただき、我々日本の高速度・高精度の密度測定法の応用の可能性についても議論した。引き続き、将来の共同実験を視野に入れて、Beysens 氏と小貫氏の間で議論されている。

本 WG では、小貫氏から「気泡」に関する計算結果の詳しい説明があった。実験のテーマとしては、定常的な特異な温度分布と、音波の伝播に関わる速い現象が考えられる。それを解明するための実際の実験方法について検討された。18 年度の WG の研究予算の一部をその準備に使用した。

実験結果の詳しい解析から、パルス音波に追随している「尾」のような密度信号が発見された。これまでは、ヒーターから直接到達した音波と、壁で反射した波が重なって観測され、分離できず、詳細な議論ができなかった。そこで、試料容器の中央から加熱した実験結果に着目した。

この条件では、音波はヒーターの両面から発信される。それぞれ容器壁で反射されて戻るが、音波の到達時間から、観測位置に直接届いた音波と反射波を明確に分離できる。この実験結果から、直接届いた音波にも「尾」が追随していること、及び、反射すると「尾」の高さが倍増することが、明確に分かった。音波に「尾」を引く現象は、小貫氏によれば、理論とも合致するとのこと、理論的に定量化できる可能性が出てきた。

この「尾」は主パルスに加えて音速による熱輸送に寄与するが、実験結果から主パルスの約 10 % を輸送していると思われた。

小型の赤外干渉計は一時的に名大に移し、感度測定を行っている。感度実験の予備的な結果が得られている。落下塔や航空機実験を想定して装置の小型化を行った。従来の五分の一程度、総重量 5 kg 以下の小型の三重シールドの温度制御系を製作し、性能試験を行っている。小型化により、高精度の温度制御は技術的に困難になる。現在、温度制御の最適化を行っている途中であるが、すでに 10mK 以内の精度が得られている。

関連する話題として、産総研の中納さんからの研究紹介がなされ、空気の液化に関連した興味ある現象が紹介された。それによると、一定の熱流による温度勾配により、二成分系の場合に分子の大きさが異なることから流体中に濃度勾配が誘起される。しかも、その濃度勾配が、条件により逆転することが示され、そのメカニズムについても紹介された。

5. 成果

(1) 原著論文、

“High-speed observation of the piston effect near the gas-liquid critical point”

Y. Miura, M. Ohnishi, S. Yoshihara, K. Honda, M. Matsumoto, J. Kawai,
M. Ishikawa, H. Kobayashi, and A. Onuki,
Physical Review E (Rapid communications) 74 (2006), 10101-010104.

(2) 日本物理学会発表；

平成 18 年 9 月 26 日、講演番号：26pZA-6

「超臨界流体におけるパルス加熱による音波の発信；減衰機構について」

平成 19 年 3 月 19 日、講演番号：19pRD-11

「超臨界流体におけるパルス加熱による熱拡散層の振動」

(3) 学位論文、特許 無し。

Working Group “Dynamics of the Fluids near the Critical Point”

Y. Miura¹, M. Ohnishi², S. Yoshihara², M. Ishikawa³, and A. Onuki⁴,

¹ Nagoya University, Nagoya 464-8602, Japan,

² JAXA, Chofu, Tokyo 182-8522, Japan,

³ Tokyo Institute of Technology, Yokohama 226-0026, Japan,

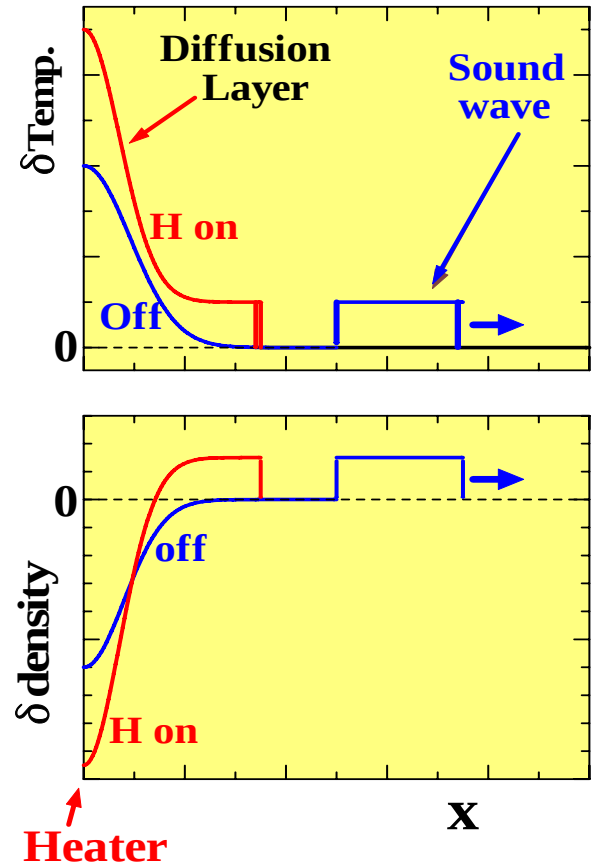
⁴ Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan,

We investigated adiabatic change in a fluid on acoustic timescales near the gas-liquid critical point. We have developed a very sensitive and fast interferometer in order to detect the density change of the fluid smaller than 10^{-4} kg/m³.

Near the gas-liquid critical point, the thermal expansion grows, and the thermal diffusion layer plays the role of a mechanical piston. Figure 1 shows the profiles of the temperature and the density near the heater. A thickness of the thermal diffusion layer is smaller than 100nm because of “critical slowing down” near the critical point, when the heating pulse-width is smaller than 10 microsecond. A sound wave emitted by the thermal piston was observed at the cell center.

We have found that 12% of the heating energy could be transferred by the sound wave. The efficiency of energy transformation agrees with the theory of Onuki.

Generation of a sound wave



Working Group “Dynamics of the Fluids near the Critical Point”

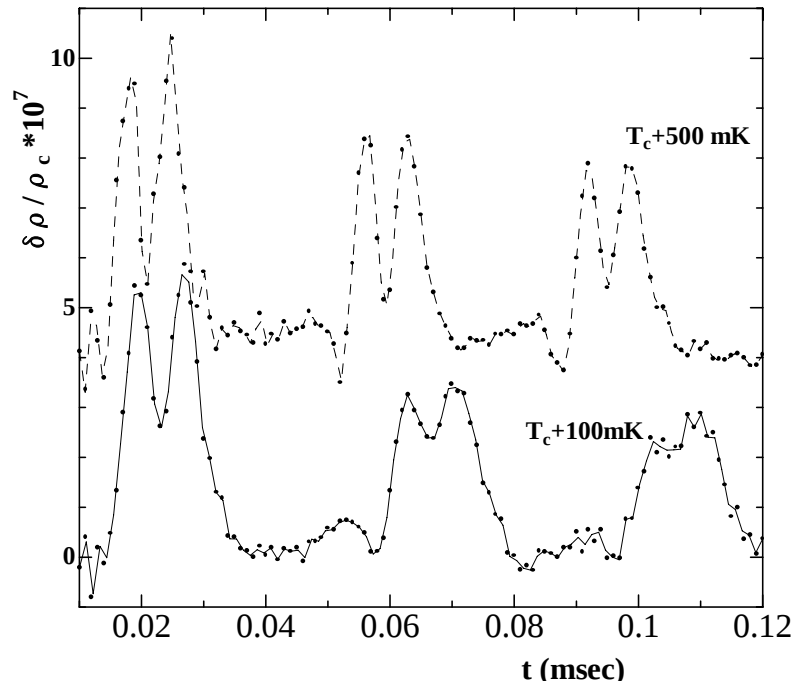


Fig. 2

Figure 2 shows the example of the density change at the cell center, in the case of the pulse width 2.5×10^{-6} sec at the temperatures $T_c + 100$ mK and 500 mK. A heat pulse applied to a film-heater near the cell top at $t = 0$.

The double-peak signals have been observed, the first peak is a direct wave from the heater and the second is a wave reflected from the cell top.

Working Group “Dynamics of the Fluids near the Critical Point”

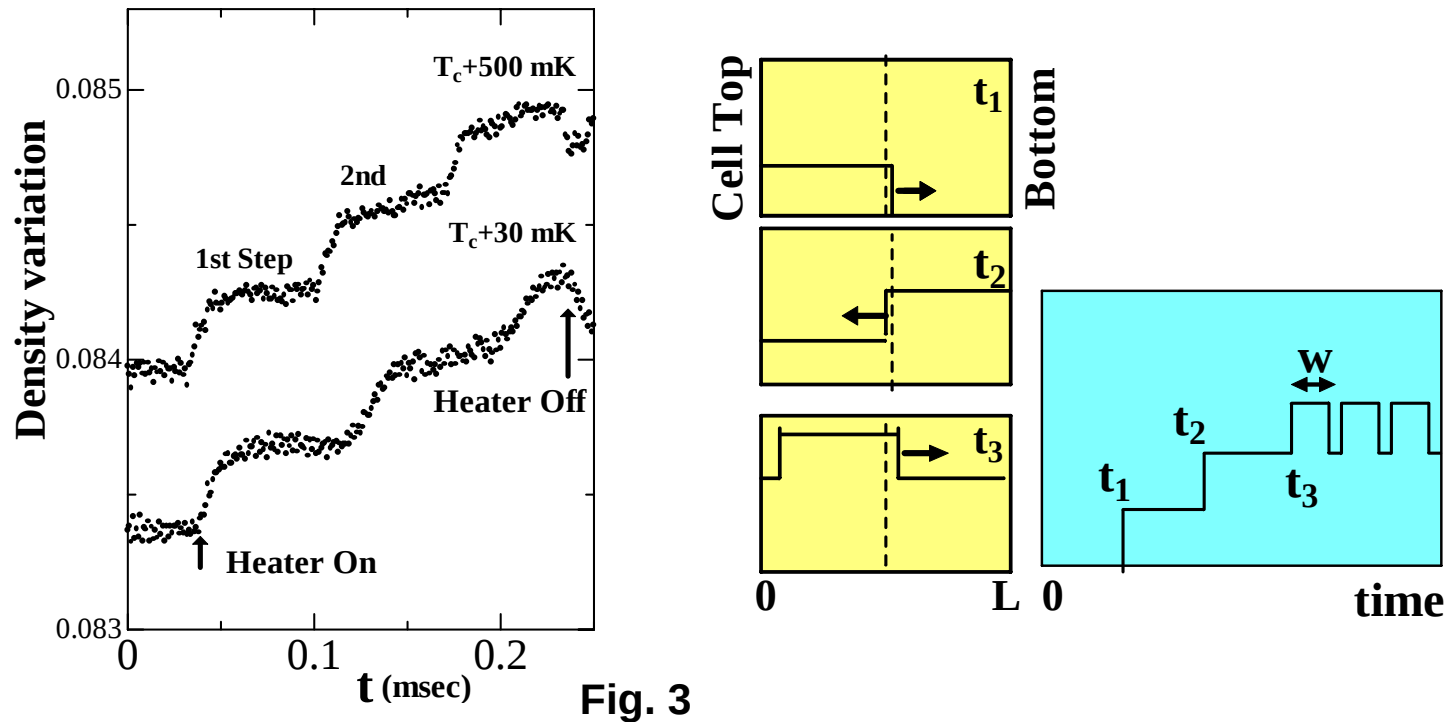


Figure 3 shows a step-like density-change observed at the cell center near the critical point. The width of the heating-pulse is 2×10^{-4} sec. and the height of the density step is almost 10^{-4} kg/m³. Our results are consistent with the theory of Onuki and Carles.

We also developed a very compact interferometer and the temperature regulation system, for the free-fall experiment and for the parabolic-flight experiment.

WG「臨界点ダイナミックス」第1回会合議事録

日時：平成18年9月12日（火）13時～18時半

場所：日本宇宙フォーラム（大手町）第三会議室

出席者：大西、吉原、佐藤、足立、中納、小貫、三浦、

議題

(1) International Topical Team の件、

日本側の代表者は小貫先生とする。

オランダの会合には、各人のスケジュールにより、小貫、三浦が出席することになった。

(2) 本論文の進捗状況、

音波の緩和の解析状況を三浦が報告した。

ステップ実験とパルス実験を合わせて図示すると、ステップの緩和と、その上を伝播している短パルスの緩和に分けられることが分かる。前者の緩和は数ミリ秒と比較的長く、短パルスの緩和はそれより一桁程度速い。後者を説明できる計算は、まだ行われていない。短パルスの緩和は単純な指数型になっていないが、幅 $5\ \mu\text{s}$ 以下の結果は、信号が小さいものの、パルスの干渉効果が少なく、エコー全体の形をスケールすることにより、緩和の温度変化を求めやすい。また、3種類の行路長の異なるセルでの結果から、壁との反射回数に緩和時間が依存していることは確かである。壁の効果とバルク部分の効果を分離して求める。

(3) 18年度の地上公募の申請内容、

これまでの実験を航空機や落下塔で行った場合に期待できる事を中心に、流体実験も含めた。具体的には、結果が出てからWGで相談して決める。

(4) 本年度 WG の活動方針、

小貫先生から、フランスのグループは液滴や気泡などの、流体的研究に興味を持っていることが指摘された。そこで、今後の国際共同研究を考える上で、気泡と音波の関係などを研究することが、時間分解能が高い我々の装置を生かす方向ではないか、との指摘がなされた。その第一段階として、二相領域での実験がある。この実験から、気液界面での音波の反射と透過の様子が観測できる。現在の装置の改造を必要とせずに、直ちに実行できる実験である。実験の日程は、後日に相談して詰める。

WGの研究予算については議論する時間が無かったので、メールベースで議論したい。購入したり、外注して製作すべき物を、三浦まで連絡してほしい。例えば、予算は上の実験に関連して使うことが、考えられる。新データとして、大西・吉原さんから、これまでより長く加熱したステップ実験の結果が報告された。段の数は増えていき、ステップ面に右肩下がりの傾向が見られる。加熱時間が延びた分、流体の温度上昇と、それによるセル壁への熱的な緩和が増えたため、と見られる。

(5) 産総研の中納さんからの研究紹介、

現在、液化天然ガス（LNG）の気化熱を有効利用して、空気の液化が行われているとのこと。それに関連した興味ある現象が紹介された。それによると、一定の熱流による温度勾配により、二成分系の場合には分子の大きさが異なるために濃度勾配が誘起される。しかも、その濃度勾配が、条件により逆転することが示された。そのメカニズムについても紹介された。この現象は、液化窒素と酸素の新しい分離方法の開発にもつながる。中納さんには、今後このWGに加わっていただけるよう、手続きをする。

以上

WG「臨界点ダイナミクス」第2回会合議事録

日時: 平成18年11月24日(金)13時-18時半
場所: 日本宇宙フォーラム(大手町)第4会議室
出席者: 大西、吉原、佐藤、中納、小貫、三浦、

議題

- (1) International Topical Team の件、
オランダでの会合に、小貫、三浦が出席した。

JAXA-ESA 合同研究会報告

- ・日時: 2006年10月30-31日
- ・参加者: 小貫明、三浦裕一
- ・結果概要: 前日の29日にもフランス側の Beysens・Garrabos 両氏と議論した。
Beysens 氏らのチームの現テーマ・現到達点・目標を了解した。
我々日本の高速度・高精度の密度測定法の応用の可能性についても議論した。
アクションおよび今後: 無重力下の気液転移の関与する流体现象について、現在のところ
Beysens 氏と小貫氏の間で議論されている。
共同の会議のレポート(資料配布)。
将来の共同実験を考慮している。

- (2) 小貫氏から「気泡」に関する研究テーマの詳しい説明があった。
定常的に生じる特異な温度分布と、音波の伝播が関わる速い現象が考えられる。
実際の実験方法について議論された。
WG研究予算も、その準備に使用する。

- (3) データの解析状況を三浦が報告した。
パルス音波に追従する密度の周期的振動を現象論的に整理している。
粘性が入らない線形応答の数値計算からは、密度がマイナス側に振れる現象は説明できない。
実験結果から、周期の温度変化は音速でスケールできることが確認できた。

また、MRIの松本氏の流体方程式を用いた数値計算の結果を、論文にまとめることになった。

赤外干渉計は一時的に名大に移し、感度測定を行い、技術論文にまとめる。
そのための温度制御の機構は、新たに小型軽量の物を製作し、費用はWGの研究予算を使用する。

以上

WG「臨界点ダイナミクス」第3回会合議事録

日時： 平成19年2月3日（土）12時－18時半

場所： JAXA 総合技術研究本部 宇宙3号館 3階会議室。

出席者： Carles、大西、吉原、佐藤、中納、小貫、三浦、

議題

- (1) Dr. Carles より、ピストン効果に関して最近 彼が行った計算の解説と、実験提案がなされた。
それによると、まず、我々のステップ実験の結果は、全く自由パラメーターが無くとも計算と一致した。
音波が往復に要する時間と加熱時間との僅かな違いにより、ステップの形に大きな影響、窪みや盛り上がり、が現れることが示された。
また、周期的に加熱した場合の計算結果が示され、加熱のタイミングを調節すると、セルの中央部に音波が積算集中して、大きな信号が得られることが分かった。
これは、定在波に対応するものであり、その実験可能性について議論された。
- (2) 小貫氏から、音波の反射による変形についての計算が、一部行なわれているとの示唆があった。
- (3) データの解析状況を三浦が報告した。
中央加熱による実験結果から、ヒーターから直接届いた直接波、及び最初の反射波が完全に分離できた。それぞれの音波には「尾」が追随していること、及び、反射すると、「尾」の高さが倍増することが、明確に分かった。
ただし、この効果は温度依存性が大きくないので、バルク粘性によるものかどうかは、まだ分からず、検討を要する。
音波に「尾」を引く現象は、小貫氏によれば、理論とも合致するとのことで、理論的に定量化できる可能性が出てきた。
- (4) 赤外干渉計は一時的に名大に移し、感度測定を行う予定である。

以上

WG「臨界点ダイナミクス」第4回会合議事録

日時：平成19年3月10日(土)13時～18時半

場所：JAXA 総合技術研究本部 宇宙3号館 3階会議室。

出席者：大西、佐藤、石川、小貫、三浦、

議題

- (1) データの解析状況を三浦が報告した。
ピストン効果によって発信された音波にはパルス信号の後に「尾」が追隨して伝播していること、及び、反射すると、「尾」の高さが倍増することが、前回のWGで報告した。
今回、その「尾」が輸送する熱量の比率が見積もられた。
この「尾」を引く現象は、小貫氏によれば、バルク粘性が無視できる条件では容易に計算が可能との指摘があり、計算していただくこととなった。
- (2) 名大に移送した赤外干渉計の感度実験の予備的な結果が、三浦から報告された。
干渉縞の測定結果から、損傷はない模様である。
小型の温度制御系の部品が完成したので、これから組み立て、性能試験を行う。
- (3) 来年度のWGについては、小貫先生を代表として、
仮題「臨界点近傍における流体ダイナミクス」として申請することとなった。
- (4) 次年度は、本テーマに関連する研究者に参加を呼びかけ、メンバーを増やすことになった。

以上