

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：17301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14966

研究課題名（和文）超臨界流体中パルスアーク放電により生成した超高压衝撃波の基礎研究

研究課題名（英文）Basic study on shock waves with extreme pressure in supercritical fluids generated by pulsed arc discharge

研究代表者

古里 友宏（Furusato, Tomohiro）

長崎大学・工学研究科・准教授

研究者番号：70734002

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：瞬間的にエネルギーを放出するパルスパワーによる衝撃波は水質浄化やリサイクルなどに応用されており非常に有用な技術である。超臨界流体は抽出、分解、洗浄など多岐にわたる応用が存在するが、衝撃波の適用例はほとんどない。パルスパワーによる衝撃波を超臨界流体中で発生させることにより、応用の幅が広がる可能性がある。本研究では、パルス放電プラズマによる超臨界流体中衝撃波の応用に向け、レーザーを用いて超臨界二酸化炭素中の衝撃波を可視化した。観測結果より衝撃波の構造やマッハ数がその特性が明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により超臨界二酸化炭素中の衝撃波のマッハ数（衝撃波の流れの速さと音速との比）が超臨界流体の臨界点近傍で極大値をもつことが明らかになった。マッハ数が極大値をもつことは、瞬間的・局所的に高圧力であり大きな密度差を発生させることができるという点において、既存の技術、例えば超臨界二酸化炭素抽出等の技術の改善・超臨界流体中衝撃波の新たな応用技術に繋がると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Shock waves are a very useful technology used in water purification and recycling. On the other hand, supercritical fluids have a wide range of applications, including extraction, decomposition, and cleaning; however, there are few studies of shock wave applications. The generation of shock waves in supercritical fluids by pulsed power has the potential to expand the range of applications. In this study, we visualized shock waves in supercritical carbon dioxide using a laser generated by pulsed discharge plasma. The structure and Mach number characteristics of the shock wave were clarified from the observation results.

研究分野：パルスパワー工学

キーワード：超臨界流体 パルスアーク放電

1. 研究開始当初の背景

超臨界流体は物質の圧力と温度を上昇させる事で転移する高密度流体であり、気体並みの高拡散性、液体並みの高溶解性を兼ね備えているため、有用成分の抽出・難分解性物質の分解・半導体の洗浄・繊維の染色などの多岐にわたる応用分野が存在し、現在も活発に研究開発が行われている。一方で、高電圧パルスパワー工学は目覚ましい発展を遂げており、様々な媒質中(液体・固体)で放電プラズマによる衝撃波利用の報告があり、水質改善やリサイクルなどの分野で注目されている。以上の背景から、超臨界流体中の衝撃波によって新しい応用が生まれる可能性が示唆される。しかし、超臨界流体中の超高圧衝撃波の圧力計測例は存在せず、応用に向けて道具立てもそろっていない状況である。また、放電プラズマ工学の観点からは衝撃波の生成機構も興味深く、この解明によりプラズマ内部の状態の把握に一役買うことになるが、これについても未解明である。

2. 研究の目的

本研究では、超臨界流体中パルス放電の応用に向けた基盤を形成するために、レーザによる衝撃波観測法を用いて超臨界二酸化炭素中の衝撃波の計測法を確立し超高圧衝撃波および放電プラズマ内部の状態を解明することを目的とする。

3. 研究の方法

衝撃波観測・計測手法(マッハツェンダー干渉法・シャドウグラフ法)

本研究では、超臨界流体中においてナノ秒オーダーで瞬間的に加熱されるパルスアーク放電プラズマから発生する超高圧衝撃波をレーザ計測によって計測する。マッハツェンダー干渉計では、2枚の反射鏡と光を半分通し、半分反射するビームスプリッターで構成される。このようにレーザの光路を分けて再度合成することで、任意に干渉縞を作ることができる。この縞のずれ(シフト)は衝撃波による気体分子の圧縮によって誘電率が変化していることに起因しており、このシフト量を調査することで衝撃波中の密度や圧力を定量化することができる。一方で、レーザシャドウグラフ法と呼ばれる密度変化を可視化する手法により、マッハ数の特性を得る。

4. 研究成果

(1) マッハツェンダー干渉計による実験

図1は本研究で構築したマッハツェンダー干渉計の実験系である。パルスジェネレータ(Quantum Composers, INC., MODEL 9520 Series)とディレイジェネレータ(SRS, INC., MODEL DG535)を用いて放電後任意の時間に照射されるように調整したYAGレーザ(Continuum, ML-1, パルス幅 5 ± 2 ns)で放出したレーザの直径をエキスパンダで拡大し、ハーフミラーで二分岐させ、それぞれのレーザをミラーで一点に集めたのち、ハーフミラーで合流させ干渉縞を作る。NDフィルタで光量を抑えてから、CMOSカメラ(Nikon, D610)でシャッタースピードを3 sと設定して干渉縞を撮影した。リアクタ2はリアクタ1の窓での光路長の変化を補うために置いている。

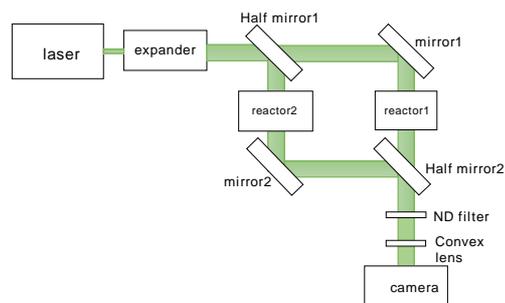


図1 マッハツェンダー干渉計

図2に放電後 $10 \mu\text{s}$ の衝撃波の観測画像を示す。プラズマから円筒状の衝撃波が発生し、衝撃波の背後にフリンジシフトが起こっている様子が観測された。図3に図2の模式図を示す。衝撃波が届いていない超臨界二酸化炭素で満たされたエリアをSF、外側の暗い層をA層、明るい干渉縞のシフトが顕著にみられる層をB層、そして針電極に一番近い、気流とみられる影が確認できる内側の暗い層をC層とした。SFとA層の境界で干渉縞が屈折していることから、SFとA層の境界を衝撃波面とした。B層では、干渉縞のシフトが著しいことから、負圧の影響だと考えられる。負圧とは、例えば衝撃波の一つである爆風では波形

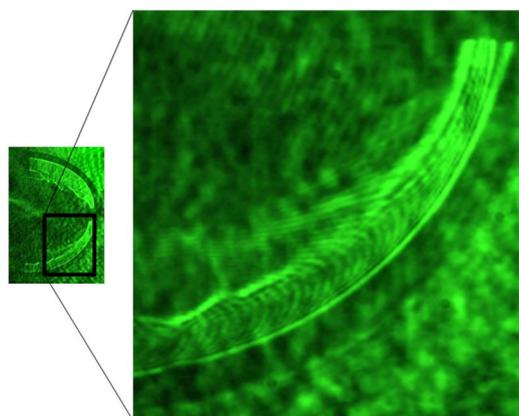


図2 超臨界CO₂中衝撃波の干渉縞のシフト

が正圧と負圧の繰り返しになる。負圧の生じる原因は爆発ガスが膨張し周囲の圧力以下になると爆発ガスが収縮することで発生する。C層は黒い影になっていることから、プラズマ加熱によって媒質が膨張し、密度が小さくなっている低密度領域と考えられる。B層とC層の領域の界面で攪乱のようなものが確認できる。これは、C層に比べB層の密度が大きいと考えられるから、レイリーテイラー不安定性に起因すると考えられる。

(2) シャドウグラフ法による実験

本実験では、図4に示すように、シャドウグラフ法により、Nd: YAG レーザ(パルス幅 : 5 ± 2 ns)を使用して観測した。カメラの露光時間は0.5 sである。放電の発光を抑えるためにNd フィルタを使用した。YAG レーザの出力タイミング(衝撃波の取得タイミング)はパルスジェネレータ(Quantum Composers, INC., MODEL 9520 Series)とディレイジェネレータ(SRS, INC., MODEL DG535)を用いて調整した。巻数比1 : 3のファインメット製のPT(Pulse Transformer)を用いてパルスパワー発生装置から出力される電圧を昇圧した。二酸化炭素を封入した高圧リアクタの内部には針対平板電極がギャップ間隔約1 mmで設置されている。針の材料はエロージョンの影響を低減するために融点の高いタングステンを用いた。リアクタの高電圧印加部は耐絶縁性・耐熱性に優れたブッシング(PEEK : Poly Ether Ether Ketone 樹脂製)を用いて絶縁している。電圧測定には高電圧測定用プローブ(パルス電子技術, EP - 100K)を用い、電流計測にはカレントモニタ(Pearson Electronics, model 6595, 減衰比2 : 1)にアッテネータ(Pearson Electronics, model A10, 減衰比10 : 1)を接続し、デジタルオシロスコープ(Tektronix, DPO4104B - L)によって測定した。

図5は超臨界CO₂中(T = 305 K, P = 7.53 MPa)における典型的な電圧電流波形である。電圧上昇後、破壊電圧に達すると、電圧の崩落とともに大電流が流れ、減衰振動波形となった。この特徴から、電極間に低抵抗のアーク放電が形成されていることが分かる。

図6に衝撃波のマッハ数の媒質密度依存特性を示すマッハ数は高圧ガス相において、媒質密度の増加に伴い上昇し、超臨界相においては、臨界密度近傍(466 kg/m³)で極大値をもつことが分かった。一般にマッハ数は比熱比の上昇により大きくなることが考えられているため、比熱比の媒質密度依存性を図6中に示した。CO₂中の比熱比は臨界密度(466 kg/m³)近傍で極大値をもつため、比熱比のパラメータがマッハ数の極大値を示す要因であると考えられる。なお、比熱比の極大値は、超臨界流体の臨界異常により引き起こされている。

< 引用文献 >

- [1] T. Furusato, Y. Inada, M. Sasaki, Y. Matsuda, and T. Yamashita, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 53, No. 40, 40LT01, 2020.

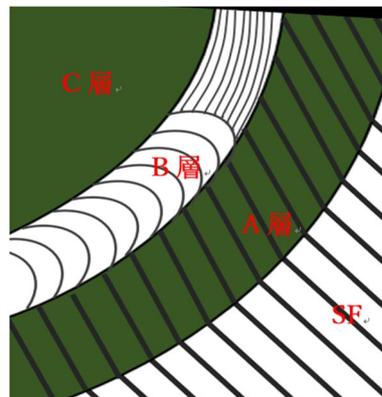


図3 衝撃波近傍の干渉縞の模式図

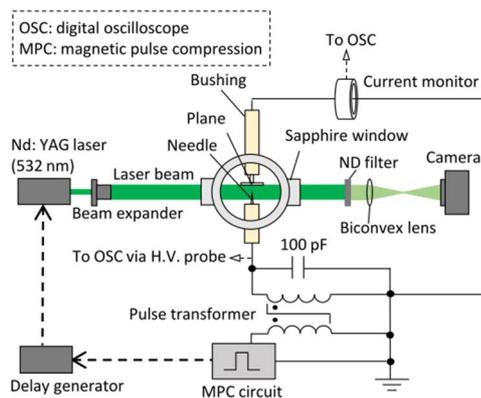


図4 マッハ数計測のためのシャドウグラフ法実験系 [1]

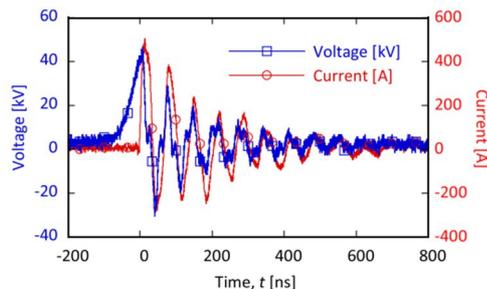


図5 超臨界CO₂中パルスアーク放電の電圧電流波形 [1]

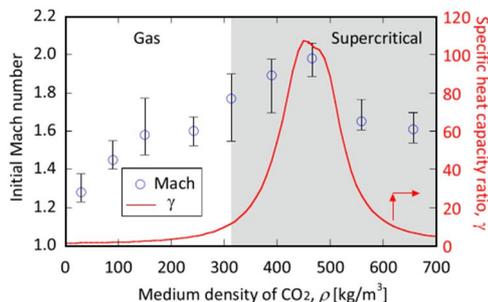


図6 マッハ数およびCO₂比熱比のCO₂密度依存性 [1]

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Furusato Tomohiro, Inada Yuki, Sasaki Mitsuru, Matsuda Yoshinobu, Yamashita Takahiko	4. 巻 53
2. 論文標題 Shock-wave propagation in supercritical CO2 induced by nanosecond-pulsed arc plasma	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 40LT01 ~ 40LT01
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6463/ab98c5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 古里友宏
2. 発表標題 パルスアーク放電により生成した超臨界二酸化炭素中衝撃波の伝搬特性
3. 学会等名 静電気学会東北・関西・九州支部合同研究会 / 第435 回生存圏シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古里友宏, 稲田優貴, 松田良信, 山下敬彦
2. 発表標題 超臨界二酸化炭素中のナノ秒パルスアーク放電プラズマから発生する衝撃波の観測
3. 学会等名 2019 年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 後藤宏輔, 古里 友宏, 富澤敏樹, 佐々木満, 稲田優貴, 山下敬彦
2. 発表標題 超臨界二酸化炭素中ナノ秒パルスアーク放電プラズマによる衝撃波生成過程の観測
3. 学会等名 誘電・絶縁材料/放電・プラズマ・パルスパワー/高電圧合同研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Goto, N. Ashizuka, T. Furusato, T. Kiyan, M. Sasaki, T. Yamashita
2. 発表標題 Shock waves in supercritical carbon dioxide generated by pulsed arc discharge plasma
3. 学会等名 International Conference on Phenomena in Ionized Gases (XXXIV ICPIG) and the 10th International Conference on Reactive Plasmas (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関