

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 26 日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K04564

研究課題名（和文）可視化ベース温度計測法導入による衝撃波誘起渦生成現象の解明

研究課題名（英文）Investigation of the Shock Wave Induced Vorticity Phenomena by Developing the Temperature Measurement Technique Based on the Visualized Data

研究代表者

松田 淳（Matsuda, Atsushi）

名城大学・理工学部・教授

研究者番号：80415900

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：衝撃波と放電場の干渉による渦生成現象は、超音速流れ場の制御技術応用が期待される現象である。そのような技術の実用化に向けては、放電場周辺の温度分布計測に基づく融合解析による現象理解が不可欠である。本研究では、時間について高解像度での画像取得を試み、衝撃波速度変調現象について温度勾配との関係や局所的な速度変調現象を明らかにすることができた。また、衝撃波速度の温度勾配に対応した速度変調現象を利用した新規計測法となる可視化ベース温度計測法について、その計測理論の有効性を検討し、計測に応用可能な理論としてまとめることができた。これらの成果は、今後の融合解析に向けた重要な成果と考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、衝撃波と放電場との干渉による衝撃波誘起現象について、低電力での放電場生成が可能な直流グロー放電場に着目し、現象理解に向けた実験及び数値解析を実施した。実験では、高解像度での時間分解可視化画像を取得し、はじめて衝撃波の局所速度変調現象を明らかにした。数値解析により、温度勾配の正負と加速減速現象の相関を明らかにできた。更に、数値解析結果からは、当初予想していなかった、特異的な衝撃波減速現象も明らかになり、そのメカニズムや速度の挙動の理解が今後の可視化ベース温度計測方法の確立に重要な課題となることがわかった。

本研究の成果は、今後の工学応用に向けた重要な布石になると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The vorticity phenomena due to the interaction phenomena between the shock wave and the discharge field is expected to control the supersonic flow field. For the realization of the technique, the comprehension of this phenomena is inevitable. In this study, by acquiring the shock wave visualized data by using the high-speed camera with high time resolution, the shock wave propagation velocity was investigated in detail. The relationship between the shock wave velocity modulation and the the temperature gradient was clarified. Based on this result, the theory of the temperature measurement based on the shock wave propagation velocity was developed. The validation of the temperature measurement theory was investigated.

Based on this obtained results, it is expected to develop the temperature model around the discharged field and the by the implementation of the model, the numerical investigation is expected for the further comprehension of the phenomena.

研究分野：圧縮性流体力学

キーワード：Shock Wave Discharge Plasma Vorticity Phenomena

1. 研究開始当初の背景

衝撃波と放電場との干渉によるバロクリニック効果は、超音速流れ場における衝撃波誘起渦型現象として、超音速流れ場における抵抗低減効果を始め、渦導入技術としての応用も期待される現象である。本効果を利用した渦導入技術として、超音速機空気吸い込み式エンジンにおける燃料空気混合効率向上や超音速流れ場における境界層制御等が期待される。

放電エネルギー投入方法として、DC 放電、AC 放電、レーザー等が挙げられるが、DC 放電では、特にグロー放電場の利用により、他の方式に比較して低電力での放電場生成が可能であるため、エネルギー投入効率の向上等が期待される。

従って、DC 放電場と衝撃波の干渉による渦生成効果の現象理解は、今後の工学的応用に向けて重要と考えられる。一方、渦生成現象の実験による直接計測による理解は困難であるため、放電場周辺の温度分布をモデル化し数値解析に実装する、実験と数値解析の融合解析が有力な方法として期待される。以下、主に参考文献 1 の内容に基づいて紹介する。

2. 研究の目的

本研究では、渦生成効果理解のための融合解析に必須となる、放電場周辺の温度計測方法開発に向けた検討を行った。特に、面的計測可能な衝撃波可視化画像から衝撃波速度を評価し、リーマン問題を適用することで温度算出を行う方法の確立に向け、放電場通過に伴う衝撃波速度変動効果について高解像度での可視化実験により調べた。

3. 研究の方法

衝撃波の発生には、無隔膜型の衝撃波管を使用した。図 1 は、衝撃波管測定部の観測窓周辺の様子を示している。図のように、測定部には、くさび型の放電台座があり台座上面に放電電極が設置されている。

図 2 は放電場生成に用いた放電回路を示している。本回路を利用して、最大で放電電力 80W の放電場を生成可能である。

図 3 は衝撃波可視化光学系を示したものである。衝撃波の可視化画像取得には、高速度カメラ UltraCAM (NAC Inc) を利用し、400000fps のフレームレートで画像を取得した。

実験結果の解釈のために数値解析も行った。支配方程式には、式 (1) のオイラー方程式を用いた。

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ e \end{pmatrix} + \frac{\partial}{\partial x} \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (e + p)u \end{pmatrix} + \frac{\partial}{\partial y} \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ (e + p)v \end{pmatrix} = 0 \quad (1)$$

本解析において、放電プラズマは放電場周辺に高温の温度変動場を生成する熱源と見なし、式 (2) のように中心からの距離に関する 2 次元ガウス型関数で分布する温度変動場を初期条件として与える温度変動場モデルを利用した。

$$T = T_0 + T_p \cdot \exp \left[- \left\{ \frac{(x - x_c)^2}{d^2} + \frac{\alpha(y - y_c)^2}{d^2} \right\} \right] \quad (2)$$

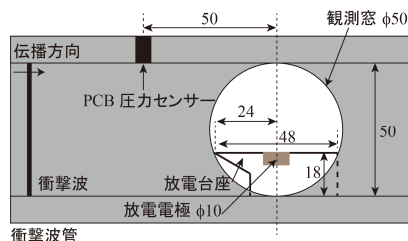


図 1 衝撃波管測定部側面図。

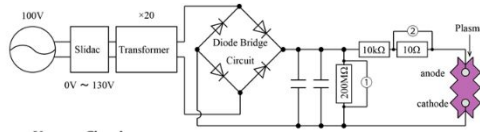
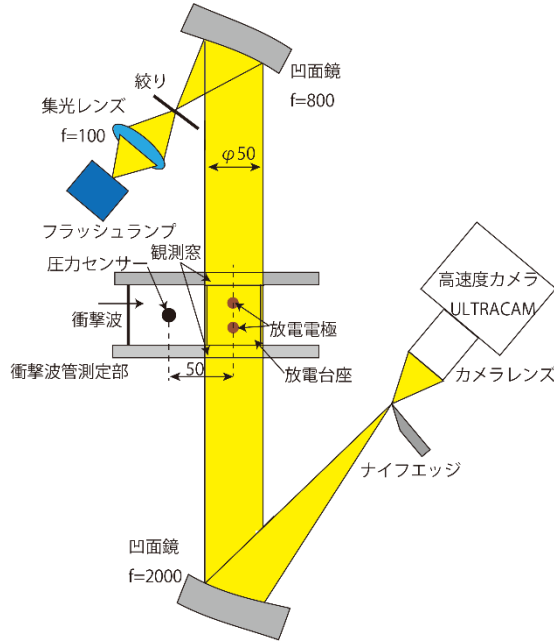


図2 放電プラズマ生成用電源回路



第3図 可視化光学系 .

4 . 研究成果

衝撃波可視化画像に基づいて、下壁から 7mm の位置における衝撃波伝播方向座標の時間履歴を示したものが図4となる。図から、放電が無い場合は、概ね一定速度で衝撃波が伝播するのに対して、放電場を通過する場合、衝撃波速度が放電電極の領域内で速度変調が発生することが示唆される。

図5は図4に基づいて算出された衝撃波伝播速度の時間履歴を示している。図から、放電場無しの場合、衝撃波速度が一定であるのに対して、放電場がある場合は、電極中央に向かって加速した後、減速するような速度変調が発生していることが明確に示されている。

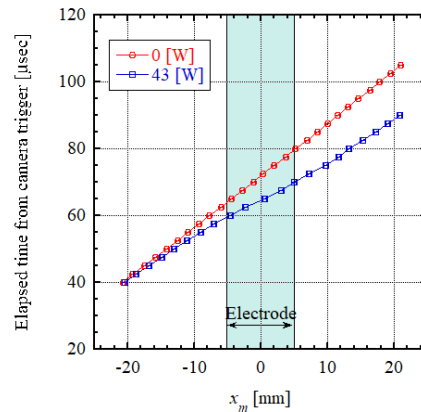


図4 衝撃波位置の時間履歴 .

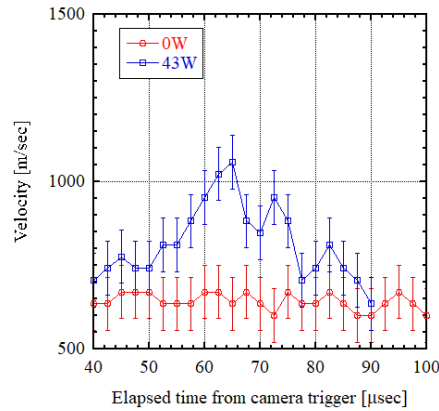


図5 衝撃波速度の時間履歴．

数値解析により、衝撃波速度の時間履歴を調べた結果が図6である．実験と同様、温度一定の場を通過する場合は衝撃波速度は一定である．一方、温度が変化する場合を通過する場合は、衝撃波速度が加速減速する局所的な速度変動が発生していることが確認できる．更に、温度変動場通過後に衝撃波速度が初期速度より減速する現象が示唆されている．

図7は、衝撃波軌跡と初期温度の等高線を重ねて示した図である．図から、衝撃波速度の加速減速現象は、温度勾配の正負と対応していることが示唆される．

図8は、衝撃波速度の時間履歴と衝撃波通過位置における温度の関係を示したものである．図から、温度勾配正の領域で加速し、温度勾配負の領域で減速していることが明確に示され、衝撃波速度の局所変動現象は、温度変動場の温度勾配と関係していると考えられる．

本結果から、衝撃波速度の局所変動を計測することで、衝撃波通過位置における温度を推定する可能性が期待される．理論的には、リーマン問題を適用することで、理論的枠組みを構築することが可能である．本理論の詳細は、文献2にまとめられている．

一方で、図6や図8で示唆されたように、温度が初期温度まで回復した状態直後の領域において、衝撃波速度は初期速度より減速している．文献2にまとめられている理論においては、衝撃波が温度変動場通過直後のマッハ数を用いているため、この「特異的な」衝撃波減速現象の詳細理解が、温度計測精度評価あるいは今後の精度向上へ向けて不可欠となる．「特異的な」衝撃波減速現象の詳細理解は、当初想定されていなかった現象であり、今後最優先で取り組むべき課題と考えられる．

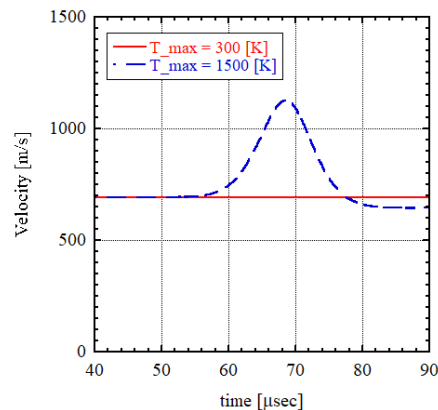


図6 一様温度場 ($T_{max} = 300 \text{ K}$) と温度変動場 ($T_{max} = 1500 \text{ K}$) 通過時の衝撃波伝播速度の時間履歴．

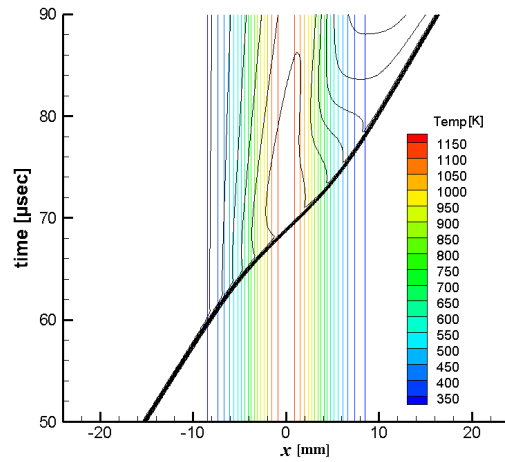


図7 温度等高線及び圧力等高線を重畳した $x-t$ 線図，温度変調場 ($T_{max} = 1500$ K) 通過時．

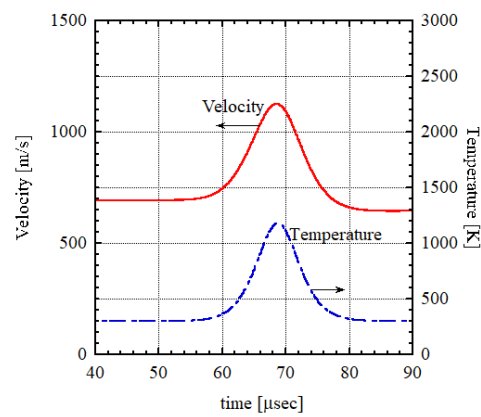


図8 衝撃波伝播速度と衝撃波位置での温度の時間履歴，温度変調場 ($T_{max} = 1500$ K) 通過時．

参考文献

1. 松田 淳，井上知樹，政二誠幸，鬼頭卓大，「直流グロー放電場による衝撃波速度局所変調効果」航空宇宙技術 vol. 20, pp105-113, 2021.
2. 松田 淳，大隅広之，山崎将成，「衝撃波伝播速度に基づく温度場計測の可能性検討」航空宇宙技術 vol. 17 pp245-254, 2018.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 松田 淳, 井上知樹, 政二誠幸, 鬼頭卓大	4. 巻 20
2. 論文標題 直流グロー放電場による衝撃波速度局所変調効果	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 航空宇宙技術	6. 最初と最後の頁 105, 113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -
1. 著者名 松田 淳, 岡田賢二, 小泉眞二, 青山直樹, 鬼頭卓大	4. 巻 19
2. 論文標題 衝撃波と放電プラズマの干渉実験用直流放電装置試作及び性能確認実験	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 航空宇宙技術	6. 最初と最後の頁 57, 62
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -
1. 著者名 松田 淳, 鈴木啓太, 青山直樹, 鬼頭卓大, 大脇秀登	4. 巻 18
2. 論文標題 直流グロー放電場との干渉による衝撃波湾曲効果	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 航空宇宙技術	6. 最初と最後の頁 37-46
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -
1. 著者名 松田 淳, 大隅広之, 山崎将成	4. 巻 17
2. 論文標題 衝撃波伝播速度に基づく温度場計測の可能性検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 航空宇宙技術	6. 最初と最後の頁 245 254
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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27件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 森 一真, 松田 淳
2. 発表標題 放電エネルギーによる衝撃波変調効果の多次元数値解析
3. 学会等名 2021年度日本機械学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菱田修介, 井上知樹, 森 一真, 松田 淳
2. 発表標題 変調密度場を通過する衝撃波背後流れ場のCFDによる現象理解
3. 学会等名 2021年度日本機械学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福與大晟, 鬼頭卓大, 片岡裕喜, 酒井峻平, 松田 淳
2. 発表標題 衝撃波形状可視化結果に基づく衝撃波背後流れ場の解釈
3. 学会等名 2021年度日本機械学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森 一真, 菱田修介, 井上知樹, 松田 淳
2. 発表標題 放電場による温度変調場の熱伝導に基づくモデル化
3. 学会等名 日本伝熱学会東海支部講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shuusuke Hishida, Kazuma Mori, Taisei Fukuyo, Tomoki Inoue and Atsushi Matsuda
2. 発表標題 Verification for validity of the flow field behind the shock wave after through the density modulated field
3. 学会等名 32nd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森 一真, 菱田修介, 松田 淳
2. 発表標題 パロクリニック効果を伴う衝撃波変調現象の三次元数値解析
3. 学会等名 第71期機械学会東海支部総会・講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 片岡裕喜, 鬼頭卓大, 松田 淳
2. 発表標題 衝撃波速度を利用した放電場温度計測手法の精度検討
3. 学会等名 第71期機械学会東海支部総会・講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 酒井峻平, 菱田修介, 福與大晟, 松田 淳
2. 発表標題 放電場通過時の衝撃波形状変調と衝撃波背後流れ場との関係理解
3. 学会等名 第71期機械学会東海支部総会・講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 政二誠幸, 井上知樹, 木村祥真, 福與大晟, 鬼頭卓大, 松田 淳
2. 発表標題 放電場と衝撃波の干渉による衝撃波加速現象の投入電力依存性
3. 学会等名 2020年度日本機械学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森 一真, 松田 淳
2. 発表標題 放電エネルギーによる衝撃波変調効果検討に向けた数値解析コード構築
3. 学会等名 第52回学生会卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菱田修介, 政二誠幸, 松田 淳
2. 発表標題 放電場による衝撃波速度変調効果の数値解析
3. 学会等名 第70期機械学会東海支部総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福與大晟, 鬼頭卓大, 政二誠幸, 松田 淳
2. 発表標題 放電場通過による衝撃波形状変調現象の可視化
3. 学会等名 第70期機械学会東海支部総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoki Inoue, Yuki Yokoyama, Kenji Okada, Atsushi Matsuda
2. 発表標題 Development of the discharge field model for the precise CFD simulation of the interaction between shock wave and plasma
3. 学会等名 31st International Symposium on Space Technology and Science, (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shoma Kimura, Atsushi Matsuda
2. 発表標題 Numerical simulation for the nozzle flow
3. 学会等名 31st International Symposium on Space Technology and Science, (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoyuki Masani, Takuhiro Kito, Kohei Kuno, Katsuhiko Endo, Keishin Matsunami, Atsushi Matsuda
2. 発表標題 Visualization of the shock wave interacted with the DC discharge field
3. 学会等名 31st International Symposium on Space Technology and Science, (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井上知樹, 鬼頭卓大, 岡田賢二, 横山雄基, 松田 淳
2. 発表標題 伝熱現象に基づく密度変動場モデルを用いた衝撃波との干渉CFD解析
3. 学会等名 2019年度日本機械学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木村祥真, 松田 淳
2. 発表標題 超音速ノズルを使用したデバイス開発のための2次元ノズル解析用CFDコード構築
3. 学会等名 2019年度日本機械学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井上知樹, 松田 淳
2. 発表標題 放電場との干渉による衝撃波変調現象の数値解析
3. 学会等名 第17回日本流体力学中部支部講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 政二誠幸, 鬼頭卓大, 久野航平, 遠藤克彦, 松波圭真, 松田 淳
2. 発表標題 放電場と干渉する衝撃波の形状変調の定量的評価
3. 学会等名 第17回日本流体力学中部支部講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 政二誠幸, 鬼頭卓大, 松田 淳
2. 発表標題 衝撃波形状湾曲効果における放電電力依存性
3. 学会等名 第69期機械学会東海支部総会・講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鬼頭卓大, 岡田賢二, 横山雄基, 井上知樹, 松田 淳
2. 発表標題 衝撃波と放電場との干渉現象解析に向けた放電場周辺温度分布モデルについて
3. 学会等名 2018年度日本機械学会年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 諏訪田航平, 鬼頭卓大, 松田 淳
2. 発表標題 エアロキャプチャー技術応用へ向けた希薄空力特性の初期検討
3. 学会等名 第96期 日本機械学会流体工学部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鬼頭 卓大, 岡田 賢二, 横山 雄基, 井上 知樹, 諏訪田 航平, 松田 淳
2. 発表標題 1次元リーマン問題適用による温度計測と可能性検討
3. 学会等名 第96期 日本機械学会流体工学部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井上 知樹, 岡田 賢二, 横山 雄基, 松田 淳
2. 発表標題 衝撃波とプラズマの干渉現象CFD解析用放電場モデル構築
3. 学会等名 第96期 日本機械学会流体工学部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木村祥真, 松田 淳
2. 発表標題 超音速ノズルを利用したデバイス設計に向けたノズル内流れ数値解析
3. 学会等名 第96期 日本機械学会流体工学部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井上 知樹, 岡田 賢二, 横山 雄基, 松田 淳
2. 発表標題 衝撃波とプラズマの干渉現象に関するCFD解析用新放電場モデルの実装
3. 学会等名 第68期機械学会東海支部総会・講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木村祥真, 松田 淳
2. 発表標題 二次元超音速ノズルにおける亜音速流れ数値解析
3. 学会等名 第68期機械学会東海支部総会・講演会
4. 発表年 2018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
---------	---------