

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420856

研究課題名(和文)空力特性改善応用へ向けた放電プラズマと衝撃波の干渉による流体力学的効果の現象理解

研究課題名(英文)Comprehension of Fluid Dynamic Effect due to the Interaction between Shock Waves and Discharged Plasma for the Improvement of the Aerodynamic Characteristics

研究代表者

松田 淳(Matsuda, Atsushi)

名城大学・理工学部・准教授

研究者番号：80415900

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、超音速機の空力特性向上に向けて、衝撃波と放電プラズマの干渉による流れ場変調効果理解を目指して遂行されたものである。特に、衝撃波マッハ数と放電投入電力を独立に制御したパラメトリックな実験を行い、併せて現象理解のための数値解析も遂行することで、多面的な現象理解を目指した。特に、レーザー光を利用した高時間応答性を有する衝撃波到来検出システムの構築により、衝撃波の放電場通過による加速現象の定量的計測に成功した。更に、衝撃波マッハ数を固定した状態で投入電力依存性について明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This research was conducted for the comprehension of the flow field modulation effect due to the interaction between the shock wave and the discharged plasma, in order to the improvement of the aerodynamic characteristics of the supersonic vehicle. Especially, comprehension of phenomena was attempted by the experiment and numerical simulation.

The newly developed laser schlieren measurement revealed that the shock wave can be accelerated due the discharged plasma, and that the degree of the acceleration depends on the discharged input power. This is the novel result, since this result obtained the parametric experiment between the shock Mach number and discharge input power independently, which has not attained by the previous experiments.

研究分野：空気力学

キーワード：衝撃波 放電プラズマ 衝撃波変調効果 非定常現象 数値解析 超音速流 衝撃波管 直流グロー放電

## 1. 研究開始当初の背景

小型超音速機の開発機運の高まりを受け、世界各国で次世代型小型超音速機開発に向けた取り組みが行われている。次世代型超音速機開発に当たっての代表的な技術課題としては、抵抗低減、騒音(ソニックブーム)低減技術が挙げられる。これらの低減には衝撃波が深く関わっており、「衝撃波を如何に理解し、減衰させるか?」が機体開発の正否を握っていると考えられる。

衝撃波の強さを「どう減衰させるか?」については、これまで、伸縮自在型エアロスパイクのように機体の先端形状を工夫する方法等が提案されてきた。しかし、この手法に対しては、機体先端部の構造強度や装置の複雑化が問題点として指摘されてきた。

近年、「超音速流中へのわずかなエネルギーの注入による流れ場変調を利用した抗力低減」のアイデアが注目され、世界中で研究が行われている。特に、放電やレーザーによりエネルギーを注入し、発生させたプラズマと流れ場の干渉による抵抗低減効果の可能性が期待されている。最近のパルスレーザーを用いた研究結果の報告によると、抵抗低減率(レーザー照射による抵抗低減量/レーザー照射の無い状態での抵抗で定義)は最大で20%以上にも及び、なおかつ、「抵抗低減により節約できたパワー(流速と抵抗減少量の積で定義)は流れ場への投入パワーに勝る」という報告がなされており、実用化が強く期待されている。また、この抵抗低減のメカニズムとして、物体前方の衝撃波(圧力勾配)とプラズマ(周囲との密度勾配)の干渉によるバロクリニック効果に起因する渦の発生が鍵を握っていると考えられている。従って、衝撃波とプラズマの干渉によるバロクリニック効果で発生する渦についての理解(流体力学的効果の理解)こそが、超音速輸送機の空力特性改善や生成渦パラメータの能動的制御による工学的応用(例えば渦による物質混合)への展開が期待される研究課題の一つと考えられる。

しかし、バロクリニック効果による渦の発生について調べられてきたこれまでの研究の大部分は、衝撃波管中に隔膜を設置し意図的な密度差を発生させたものであり、隔膜の影響を完全には除去できないことが実験上の問題点として挙げられてきた。近年では、この影響を排除した実験手法としてパルスレーザー生成プラズマとその膨張過程で発生するプラスト波の干渉を利用した方法も報告されている。しかし、パルスレーザー生成プラズマはその状態量が時間変化するため、生成された渦パラメータとプラズマ状態量との関係の理解が複雑になることが危惧される。更に近年、ロシアの研究グループからは、衝撃波管を利用して、衝撃波とパルス放電を干渉させることでバロクリニック効果について調べた論文が報告されている。しかし、この研究では、入力電力条件がわずかに

に一条件のみに限定されており、パラメトリックスタディによる包括的な理解には至っていない。

バロクリニック効果の包括的な理解には、放電に投入される入力電力と衝撃波マッハ数とを独立に制御するパラメトリックスタディが不可欠と考えられる。研究代表者は、その理解に向けた手段として直流グロー放電プラズマと衝撃波の干渉を利用する可能性に着目してきた。一方で、これまでに直流放電プラズマと衝撃波の干渉を扱った研究例の大部分が、干渉による衝撃波形状の変形、減衰、加速等の衝撃波への影響についての定性的、現象論的報告にとどまっており、干渉によるバロクリニック効果との関係について包括的に調べられた実験研究例はほとんど報告されておらず、数値解析による研究例でバロクリニック効果についてわずかに言及されているのみである。このため現状では、投入電力と渦のスケールの関係等の包括的な現象理解には至っておらず、エネルギー注入法による空力特性改善の実用展開に向けてのボトルネックになることが危惧される。

これまで、研究代表者はプラズマパラメータとバロクリニック効果の関係の実験的理解を目指して、グロー放電による直流放電プラズマの生成のための電源構築から順に取り組んできた。これまでの成果として、衝撃波管中でグロー放電プラズマを生成させる方法を確立し、衝撃波マッハ数と投入電力を独立パラメータとしての実験を可能とした。更に、放電回路への計測素子の追加により、リアルタイムでの放電状態の電流電圧計測が可能となった。これらのデータの利用により、放電投入電力の算出も可能となった。

そこで本研究では、これまでの取り組みの成果を更に発展させ、衝撃波と直流放電(グロー放電)プラズマの干渉による流体力学的効果について、放電投入電力と衝撃波伝播マッハ数に関するパラメトリックスタディ実験と数値解析の両面から、放電場が衝撃波へ及ぼす影響について央の知見を獲得することで、将来の超音速機空力特性向上等の工学的応用や既存の学術的知見の拡大へ貢献することが期待される。

## 2. 研究の目的

放電電力と衝撃波マッハ数を独立に変化させたパラメトリックスタディ実験、特に本研究においては、衝撃波マッハ数2に固定した場合について、放電プラズマの影響についての放電電力依存性について理解を行うことを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 放電プラズマ生成

直流放電プラズマ生成は、図1のように、電源(増幅整流平滑回路)を衝撃波管測定部に設置された電極に接続することで行った。回路2箇所(回路中の、)で作動アンプにより電位差を計測することで、プラズマの

電流電圧特性をリアルタイム計測可能である。この計測データに基づいて放電投入電力が算出される。

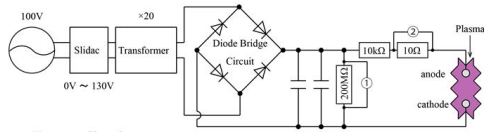


図1 放電プラズマ生成用電源回路

### (2) 衝撃波発生方法

衝撃波の発生には、図2のような無隔膜型衝撃波管を用いた。本衝撃波管では、圧力比150でノミナルマッハ数2.1の衝撃波を発生可能である。

測定部は一边50mmの正方形断面を有している。測定部には観測窓及び圧力センサー用ポートが設置されており、可視化や圧力計測実験が可能となっている。図のように、測定部周辺に50mm間隔で3個の圧力センサー(PCB112A21)が設置されている。

図3はレーザーシュリーレン光学系を示したものである。図のように、測定部の観測窓を通して、間隔115mmで2本のレーザーを設置した。

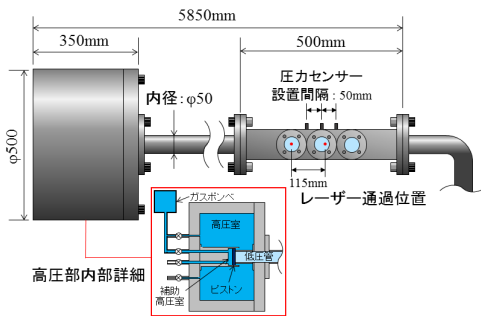


図2 無隔膜型衝撃波管

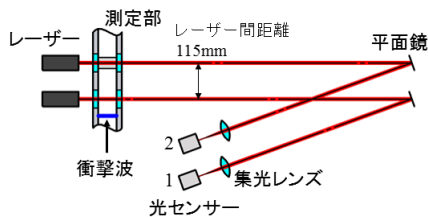


図3 衝撃波管測定部 計測系

### (3) 数値解析

数値解析においては、2次元のオイラー方程式を支配方程式とした。支配方程式の対流項の評価にはMUSCL法により3次精度に拡張したAUSMDVスキームを用いた。放電プラズマは、初期条件において図5のような温度変動場を与えることで模擬した。本解析においては、図4のような変動温度場を垂直衝撃波が通過する場合の衝撃波速度変動について調べた。

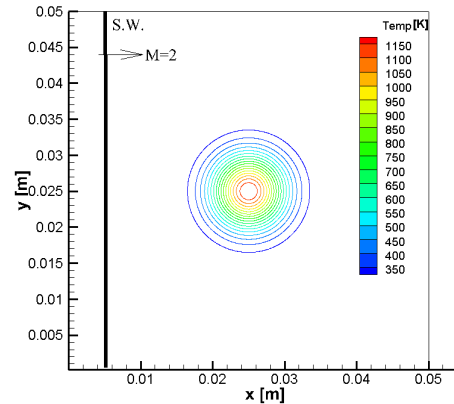


図4 温度変動場

## 4. 研究成果

### (1) レーザーシュリーレン計測結果

図5は、無放電時の衝撃波通過によるレーザーシュリーレンの出力信号を示している。図のように、上流側センサー、下流側センサーの順に衝撃波到来に伴う信号が観測される。図6は、放電電力 $W$ 時のレーザーシュリーレン信号を示している。図5と6を比較すると、放電場を通過した場合、上流側センサー出力から下流側センサー出力までの時間が短くなることわかる。これは、放電場を衝撃波が通過することで衝撃波が加速される可能性を示唆している。

同様の実験を、放電電力をパラメトリックに変化させておこなうことで、衝撃波加速現象への放電電力依存性について調べた。無放電時の上流下流レーザー通過時間と放電時の通過時間との差( )と放電電力との関係を示したものが、図7となる。図から、放電電力の増加に伴い、 が大きくなることわかる。 が大きいほど、加速の影響が強く表われていることに対応しており、図から、放電電力の増加に伴い、衝撃波の加速が促進される傾向が示唆される。

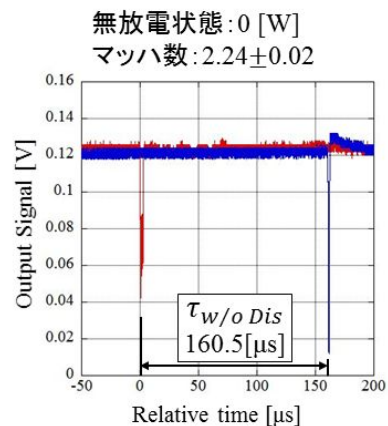


図5 レーザーシュリーレン出力(放電無し)

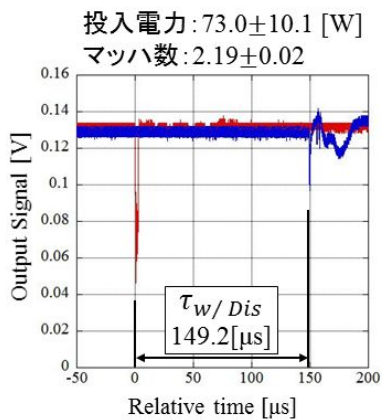


図6 レーザシュリーレン出力（放電有り）

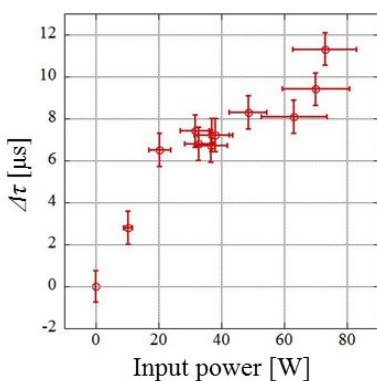


図7 放電電力と衝撃波レーザー通過時間差の関係

(2) 数値解析結果

前節で得られた実験結果について、衝撃波の加速と解釈することの妥当性について検討するために数値解析を行った。

図8は、 $y=0.025$  の位置における、 $xt$  線図を示したものである。図中には、カラーで温度の等高線を、黒で圧力の等高線を示している。図のように、変調温度場通過前は初期条件で与えられた衝撃波速度で、進行する様子が見られる。一方、温度変調場を通過する際に、衝撃波の加速が見られることが確認できる。

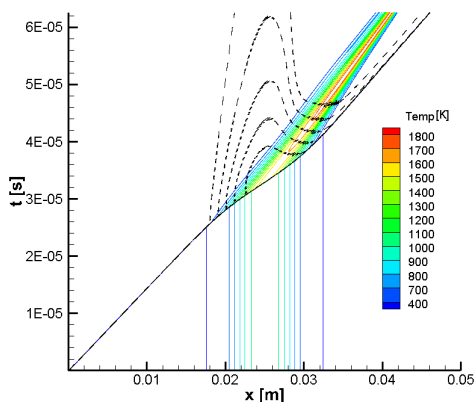


図8 温度変調場通過時の  $xt$  線図

図9は、衝撃波速度及び衝撃波位置における温度の時間履歴を示したものである。図から、温度変調場の温度勾配が正の場合は衝撃波が加速していること、負の場合には衝撃波が減速していることが明確にわかる。

以上の検討から、放電場通過により、放電無しの場合に比較して衝撃波が加速することが可能性が確認された。

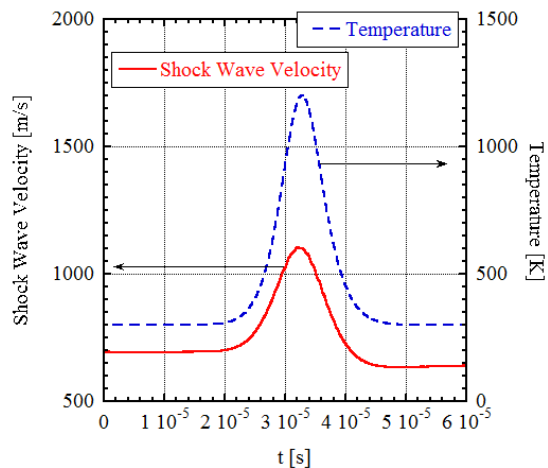


図9 衝撃波速度及び通過位置の温度履歴

本研究では、衝撃波マッハ数と放電電力を独立に制御することで、放電場が衝撃波に及ぼす影響について放電電力に関してパラメトリックに調べ、放電電力依存性を明らかにすることができた。

以上の成果より、更に、今後放電場の温度分布計測と数値解析との融合解析を行うことで、現象の多面的理解に繋がることが期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計5件)

松田 淳、近藤義明、青山直樹  
「簡易型無隔膜衝撃波管の試作及び性能確認実験」  
航空宇宙技術 査読有 掲載決定 2016

Atsushi Matsuda, Naoki Aoyama,  
Yoshiaki Kondo  
“ Shock Wave Modulation by the Discharged Plasma in the Shock Tube ”  
International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2015 (ATEM '15), アブスト査読有 OS-21-3, 2015.

松田 淳、永田健二  
「ガンタンネルのピストン挙動に対する無次元ピストン特性量依存性」  
航空宇宙技術 査読有 vol.14, p137-144, 2015

Naoki Aoyama, Masanari Yamasaki, Keita Suzuki,  
Atsushi Matsuda, Akihiro Sasoh  
“ Shock Wave modulation due to the Discharged Plasma, ”  
30th International Symposium on Space Technology and Science, アプスト査読有 ISTS e-31p, 2015.

Akihiro Sasoh, Tatsuya Harasaki, Takuya Kitamura, Daisuke Takagi, Shigeyoshi Ito, Atsushi Matsuda, Koji Nagata, and Yasuhiko Sakai  
“ Statistical behavior of post-shock overpressure past grid turbulence, “ Shock Waves, 査読有 vol.24, No.5, pp489-500, 2014.

〔学会発表〕(計 21 件)

岡田賢二、小泉真二、松田 淳  
「スペクトル・マッチング法による温度測定に向けたデータベース構築のための窒素分子イオン第一負帯発光スペクトル計算」  
第 47 回学生会卒業研究発表講演会、豊田、2016年3月

末崎 凌、青山直樹、松田 淳  
「直流放電場を通過する衝撃波の変調現象」  
第 65 期機械学会東海支部総会・講演会、豊田、2016年3月

鈴木 啓太、松田 淳  
「衝撃波の温度変調場通過現象シミュレーション」  
第 9 3 期 日本機械学会流体工学部門講演会、東京、2015年11月

松田 淳  
「ピストン駆動方式衝撃風洞のピストン圧縮部シミュレーション」  
第 9 3 期 日本機械学会流体工学部門講演会、東京、2015年11月

Atsushi Matsuda, Naoki Aoyama, Yoshiaki Kondo  
“ Shock Wave Modulation by the Discharged Plasma in the Shock Tube ”  
International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2015 (ATEM ' 15) Toyohashi, October, 2015.

青山直樹、近藤義明、松田 淳、佐宗章弘  
「放電プラズマによる衝撃波変調効果の光学的計測」  
2015年度日本機械学会年次大会、札幌、2015年9月

山崎将成、鈴木啓太、松田 淳

「衝撃波と放電プラズマの干渉現象シミュレーション」  
2015年度日本機械学会年次大会、札幌、2015年9月

Naoki Aoyama, Masanari Yamasaki, Keita Suzuki, Atsushi Matsuda, Akihiro Sasoh  
“ Shock Wave modulation due to the Discharged Plasma, ”  
30th International Symposium on Space Technology and Science, Kobe, (Japan), June, 2015.

山崎 将成、松田 淳  
「温度変調場通過衝撃波の変形現象シミュレーション」  
第 64 期機械学会東海支部総会・講演会、春日井、2015年3月

鈴木啓太、松田 淳  
「2次元非定常圧縮流解析コード構築と衝撃波回折現象シミュレーション」  
第 46 回学生会卒業研究発表講演会、春日井、2015年3月

青山直樹、近藤義明、松田 淳、佐宗章弘  
「衝撃波変調効果への放電パワー依存性」  
第 51 回中部・関西支部合同秋季大会、名古屋、2014年11月

松田 淳  
「レーザー生成プラズマ挙動のシミュレーション」  
第 9 2 期 日本機械学会流体工学部門講演会、富山、2014年10月

青山直樹、近藤義明、松田 淳、佐宗章弘  
「放電プラズマを利用した衝撃波変調効果」  
2014年度日本機械学会年次大会、東京、2014年9月

青山直樹、松田 淳  
「可視化光学系の構築と衝撃波回折現象の可視化」  
日本機械学会東海支部学生卒業研究発表会、名古屋、2014年3月

近藤義明、青山直樹、松田 淳、佐宗章弘  
「直流放電場と衝撃波の干渉による流れ場変調効果」  
平成 2 5 年度衝撃波シンポジウム、相模原、2014年3月

近藤義明、奥野良太、大隅広之、服部友美子、松田 淳、佐宗章弘  
「衝撃波と直流放電プラズマの干渉効果」

第91期 日本機械学会流体工学部門講演会、福岡、2013年11月

大隅広之、松田 淳  
「温度変調場を通過する衝撃波の数値シミュレーション」  
第91期 日本機械学会流体工学部門講演会、福岡、2013年11月

松田 淳、永田健二  
「自由ピストン型衝撃波管ピストン圧縮過程シミュレーション」  
第91期 日本機械学会流体工学部門講演会、福岡、2013年11月

近藤義明、百松悠斗、奥野 良太、松田 淳、佐宗 章弘  
「直流放電プラズマとの干渉による衝撃波変調現象の可視化」

2013年度  
日本機械学会年次大会、岡山、2013年9月

近藤義明、奥野良太、大隅広之、松田 淳、佐宗章弘  
「放電場通過による衝撃波変調効果」  
第45回流体力学講演会、東京、2013年7月

②1 Yoshiaki Kondo, Hiroyuki Osumi, Yuto Hyakumatu, Ryota Okuno, Ryotaro Yamamoto, Atsushi Matsuda and Akihiro Sasoh,

“ Flow Field Modulation by the Interaction between the Shock Wave and Plasma, ”

29th International Symposium on Space Technology and Science, Nagoya, (Japan), June, 2013.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織  
(1) 研究代表者  
松田 淳 (Matsuda Atsushi)  
名城大学・理工学部・准教授  
研究者番号：80415900

(2) 研究分担者  
( )

研究者番号：

(3) 連携研究者  
( )

研究者番号：