

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 4 日現在

機関番号：33919

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760772

研究課題名（和文） グロー放電プラズマと衝撃波の干渉へのバロクリニック効果の影響の実験的解明

研究課題名（英文） Experimental Investigation of the Baroclinic Effect due to the Interaction between the Shock Wave and the Discharged Plasma

研究代表者

松田 淳 (MATSUDA ATSUSHI)

名城大学工学部・准教授

研究者番号：80415900

研究成果の概要（和文）：グロー放電プラズマ（最大消費電力50W）生成システム及び、干渉現象の圧力時間履歴データとマイクロ秒単位の解像度での画像データ同時計測システムを構築した。衝撃波とプラズマの干渉により、衝撃波が湾曲する現象が可視化され、衝撃波の変形を支持する圧力データが得られた。数値解析結果からは、衝撃波の湾曲部での渦生成が示唆された。本研究から、衝撃波とプラズマの干渉による変形現象は渦生成（バロクリニック効果）と関連があることが示された。

研究成果の概要（英文）： In this study, the baroclinic effect due to the interaction between the shock wave and discharged plasma was investigated, from the view point of the vortex generation. For this study, the experimental apparatuses such as the power supply system for the discharged plasma generation, the measurement system for the interaction phenomena were developed. From the visualization results, the curved shock wave was observed due to the interaction with the discharged plasma. Also, the pressure signals suggested that the shock wave was deformed. This pressure signals consistent to the visualization result. From the numerical simulation, it was suggested that the curved shock wave due to the interaction with the discharged plasma was related to the vortex generation. This study suggests that the present results have a possibility to control the vortex generation by novel approach in the supersonic flow.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：航空宇宙流体力学

## 1. 研究開始当初の背景

現在、世界的に次世代型超音速輸送機の開発機運が高まっている。超音速機としては、ヨーロッパのコンコルドが有名であったが、燃費の悪さ（高抵抗）、ソニックブームによる騒音等の問題から2003年に完全引退を余儀なくされた例がある。そのため、次世代機開発のためには、低抵抗、低騒音化が必須条件として挙げられる。

超音速輸送機の低抵抗化の手法としては、エアロスパイクの設置等の先頭形状の工夫

による抵抗低減が従来から検討されているが、スパイクの取り付け強度などの構造的な問題が指摘されている。そのため、超音速飛行体の劇的な抵抗低減には従来とは大きく異なる概念に基づく低減手法の確立が切望されている。

近年、「超音速流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%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」、という報告がされている。また、この抵抗低減のメカニズムとして、模型前方の衝撃波（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、この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制御の可能性等の工学的応用あるいは発展が期待される研究課題の一つと考えられる。

これまで、バロクリニック効果を利用した渦の発生に関する研究としては、主に衝撃波管中に仕切りを設け異種ガスを充填し「人工的な密度差」の存在する媒体中を衝撃波を通過させる手法が主に用いられてきた。しかし、この方法では、仕切り隔膜の影響が無視出来ず、また、その影響を完全に排除するのは困難と考えられてきた。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。

一方、衝撃波管中で直流放電によりプラズマを生成した場合、プラズマ状態はレーザー生成プラズマの時間変化に比較して相対的に遅いため、衝撃波との干渉時間中は近似的に定常プラズマと考えられ、現象理解を単純化できると期待される。本手法では、超音速流中での空力特性改善等の工学適用に重要な要素である、衝撃波現象が抽出されているため、現象の本質は損なわずに「バロクリニック効果による渦生成」現象理解の単純化を図ることが可能と期待される。

しかし、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は多く存在するが、そのほとんどが干渉による衝撃波の減衰、加速等の現象論的報告がほとんどであり、バロクリニック効果や渦生成との関連は殆ど議論されていない。また、放電プラズマと衝撃波の干渉による衝撃波への影響については、従来から「プラズマ固有効果」と「熱的効果」の二つの学説が主張されてきたが、未だ全体的なコンセンサスは取られていない

状況である。このような背景から、放電プラズマと衝撃波の干渉現象を渦生成の観点から捉えることは、工学的応用のみならず、従来の学説に対して新しい学説を提案することに繋がり、学術的価値も高いと期待される。

## 2. 研究の目的

本研究では、衝撃波と直流放電（グロー放電）プラズマの干渉による衝撃波の変形現象について、実験と数値解析手法を組み合わせることで、バロクリニック効果の影響（渦生成）の観点から調べることを目的とする。

## 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。電源回路は本研究のために自作したものである。

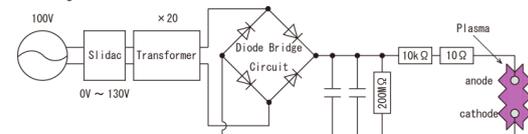


図1 放電プラズマ生成用電源回路

### (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100でマッハ数2の衝撃波を発生可能である。

測定部は一辺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3は衝撃波管測定部の計測系を示したものである。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。測定部の観測窓を通しては、シュリーレン光学系を設置した。

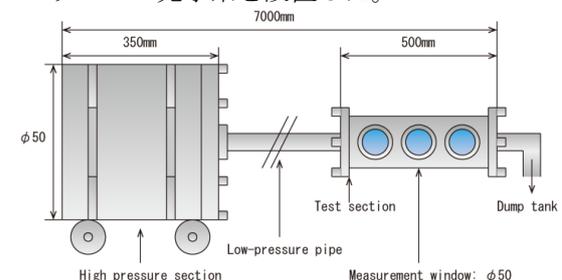


図2 無隔膜型衝撃波管

図4は測定部に設置された電極部分の図である。先端15度の楔形の台座に電極を埋め込み、電極上面は台座と面一となるように設計されている。

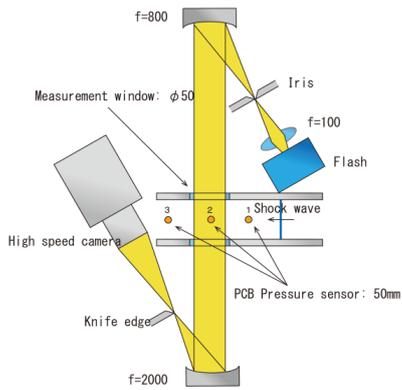


図3 衝撃波管測定部 計測系

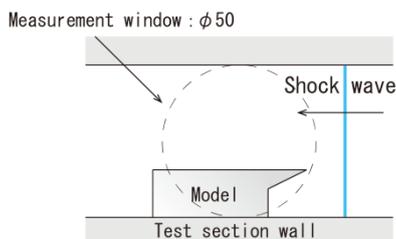


図4 衝撃波管測定部設置 電極埋込模型

### (3) シミュレーション

実験で観測される結果を解釈するため、数値シミュレーションも行った。支配方程式は2次元のオイラー方程式とした。支配方程式の対流項の評価にはMUSCLE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のような温度変調場を与えることで模擬した。シミュレーションコードは、本研究において自作構築されたものである。

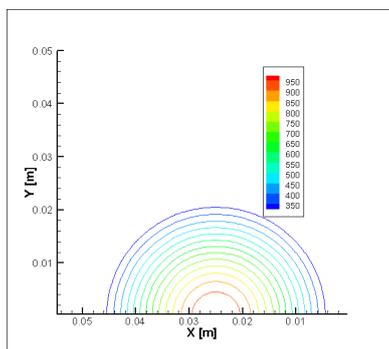


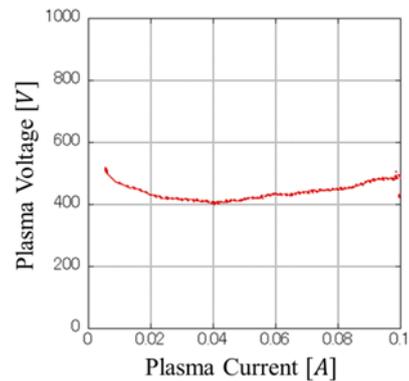
図5 温度変調場モデル

## 4. 研究成果

### (1) プラズマ生成

図6は製作された電源により生成されたプラズマの電流電圧特性曲線を示す。図のよ

うに、電圧は400~500V程度の範囲でほぼ一定の挙動を示しているのに対して、電流は0.01A~0.1Aまで一桁程度変化していること



が確認できる。この特性は、グロー放電プラズマと類似の傾向を示していると考えられる。また、この特性曲線から、プラズマへ投入可能な電力は3W~50Wの範囲であることが確認でき、この範囲でのパラメトリックスタディが可能と期待される。

図6 プラズマ電流電圧特性曲線

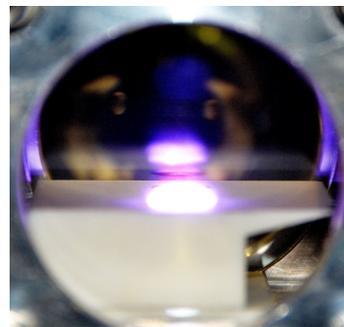


図7は、生成された放電プラズマの様子を示したものである。図のように、電極間でプラズマによる発光が確認できる。

図7 プラズマ生成の様子

### (2) 圧力計測

図8は圧力センサー2, 3の時間履歴を示したものである。図の縦軸はセンサー1の衝撃波背後の圧力値で無次元化したものである。波形の立ち上がりは、衝撃波の到来に対応している。センサー2, 3はそれぞれ観測窓中心部(電極中心)、下流50mmの位置に対応する。この図の特にセンサー3の結果から、プラズマとの干渉により、衝撃波背後の圧力が減少する傾向が示唆される。また、プラズマとの干渉によりセンサー3の立ち上がり時刻(図中 $\Delta\tau$ )が早まる傾向も示唆される。

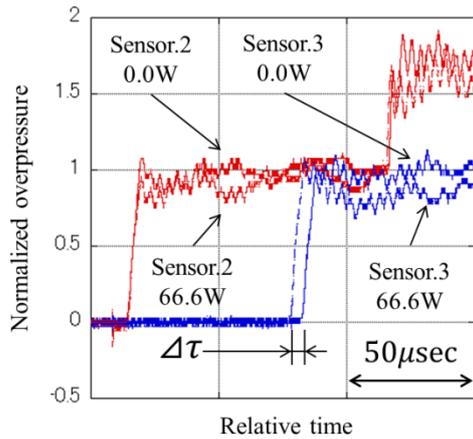


図8 センサー2, 3の圧力時間履歴

図9はセンサー3の衝撃波背後の過剰圧の平均値とプラズマ投入電力との関係を示したものである。図のように投入電力の増加に伴い過剰圧の平均値が減少する傾向が示唆されるが、減少量が衝撃波到来後のセンサーのrms値と同程度のため、本結果については、今後、センサーの特性も含めた検討が必要である。

図10は図8中の $\Delta\tau$ とプラズマ投入電力の関係を示したものである。図から、プラズマとの干渉により $\Delta\tau$ が増加する、つまり、立ち上がり時刻が早まる傾向が示唆される。また、計測誤差に比較して有意な結果と考えられる。この $\Delta\tau$ が発生する要因としては衝撃波が加速されること、あるいは、衝撃波形状が変形すること等が考えられる。

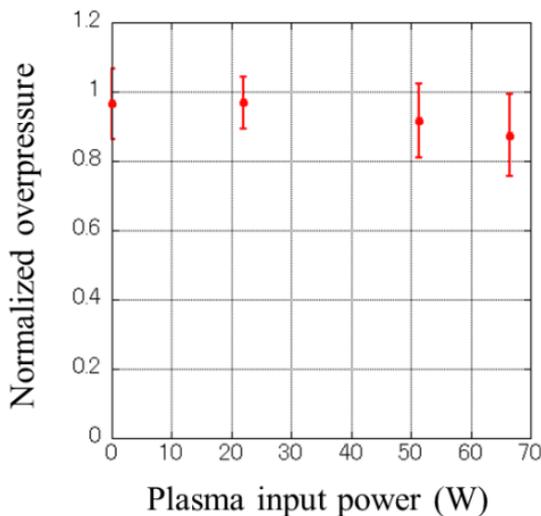


図9 センサー3の過剰圧平均値とプラズマ投入電力の関係

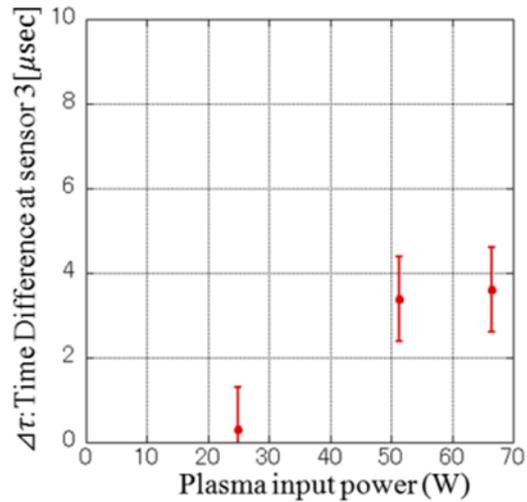


図10  $\Delta\tau$ とプラズマ投入電力の関係

### (3) シュリーレン可視化

図11及び12は、伝播衝撃波のシュリーレン可視化結果である。衝撃波マッハ数は両条件とも2.0である。図11は放電が無い状態を、図12は放電がある場合の結果である(光学系の感度の関係から放電プラズマは不可視状態である)。これらの図から、放電無しの場合には、垂直衝撃波が伝播していく様子が確認できる。一方、放電場を通過する場合は、図12に示すように湾曲した衝撃波が通過していく様子が見られ、放電場の影響により、衝撃波形状が大きく変形する様子が確認できる。本可視化結果は圧力計測で $\Delta\tau$ が放電投入電力の増大に伴い増加する図10の結果と整合性があり、図10の結果は衝撃波形状の変形の影響が顕れている可能性が高いことを示唆していると考えられる。

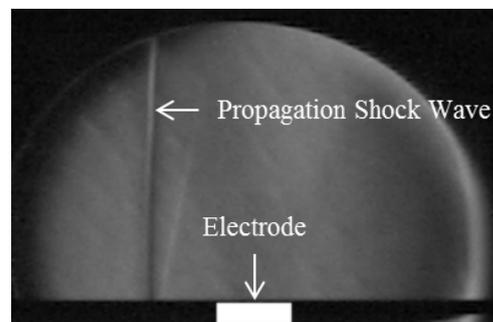


図11 シュリーレン可視化結果(0W)

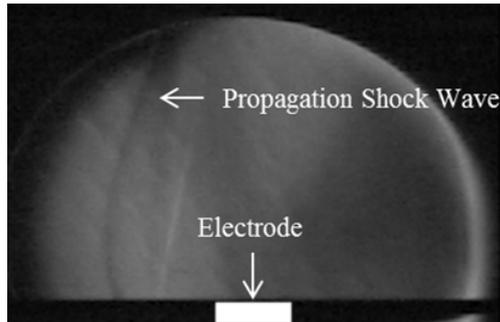


図 1.2 シュリーレン可視化結果 (2.2 W)

(4) シミュレーション

図 1.3 は、図 5 の温度変調場をマッハ 2 で通過する衝撃波伝播の様子をシミュレーション結果を示したものである。図のように、温度変調場（密度変調場）の通過により、衝撃波形状が伝播方向へ向けて湾曲する様子が確認できる。この傾向は、実験で可視化された結果と同様の傾向を示していると考えられる。

図 1.4 は、衝撃波背後の流れ場における渦度分布を示したものである。衝撃波の湾曲部付近に渦度が生成されていることがわかる。このことは、衝撃波とプラズマの干渉による衝撃波の湾曲は渦の生成と強い関連があることを示唆していると考えられる。

本実験系での渦生成のメカニズムとしては、衝撃波による圧力勾配とプラズマ生成による密度勾配に起因するバロクリニック効果が作用している可能性が高いと考えられる。

本成果は、衝撃波伝播経路内にエネルギー（本研究ではプラズマ生成のための電気エネルギー）を印加することで渦が生成されることを示唆している。渦スケールは投入エネルギーと相関があると考えられる。

今後、生成渦のスケール等の制御手法を研究することで、本成果の工学的応用に繋がるものが期待されるものである。

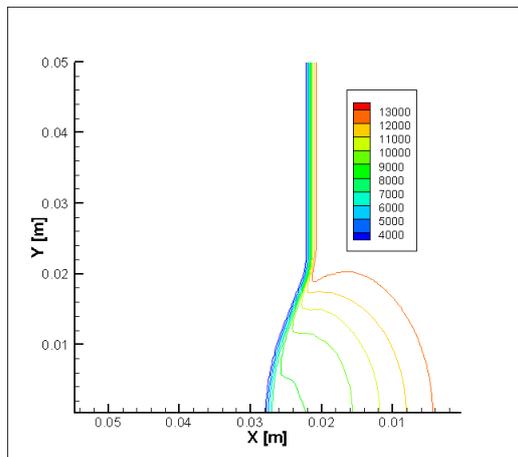


図 1.3 数値解析結果 圧力等高線

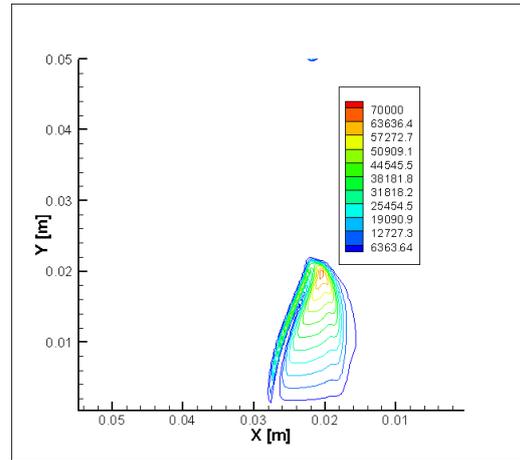


図 1.4 数値解析結果 渦度等値線

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)

(1) 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," Proc. 29th ISTS, vol. 29, pp1-6, 2013.

(2) Atsushi Matsuda, Katsuya Shimizu, Kakuei Suzuki, Akihiro Sasoh, Keiichi Murakami, Takashi Aoyama, "Combined Experimental and Numerical Diagnostics for Near-field Flow around a Supersonic Flight Model," Transactions of JSASS Aerospace Technology of Japan, vol. 9, pp37-44, 2011.

(3) Jae-Hyung Kim, Atsushi Matsuda, Takeharu Sakai, Akihiro Sasoh, "Efficient Wave Drag Reduction with an Acting Spike Induced by Laser-Pulse Energy Depositions," AIAA Journal, vol. 49, No. 9, pp2076-2078, 2011.

(4) 大久保正幸、豊田 篤、山下 博、小川俊広、大林 茂、清水克也、鈴木角栄、松田 淳、佐宗章弘、「胴体先端形状修正による翼胴型超音速複葉翼のソニックブーム低減化」、日本航空宇宙学会論文集、Vol. 59, No. 688, pp119-125, 2011

(5) Jae-Hyung Kim, Atsushi Matsuda,

Akihiro Sasoh, “ Interactions among baroclinically-generated vortex rings in a bow shock layer ” Physics of Fluids, vol.23, No.2, Article No. 021703, 2011.

〔学会発表〕(計13件)

- ① 近藤義明、百松悠斗、奥野良太、山本遼太郎、松田 淳、佐宗章弘、「衝撃波とプラズマの干渉による衝撃波変調現象の可視化」平成24年度衝撃波シンポジウム、北九州、2013年3月
- ② 永田健二、松田 淳、「自由ピストン型高速気流発生装置ピストン圧縮部シミュレーション」日本機械学会東海支部 第62期総会・講演会、津、2013年3月
- ③ 近藤義明、山本遼太郎、松田 淳、佐宗章弘、「衝撃波と直流グロー放電プラズマの干渉による流れ場変調現象可視化」日本機械学会東海支部 第62期総会・講演会、津、2013年3月
- ④ 近藤義明、杉浦寛喜、松田 淳、「衝撃波現象の高時間分解可視化計測」日本機械学会東海支部学生卒業研究発表会、名古屋、2012年3月
- ⑤ 山本遼太郎、松田 淳、佐宗章弘、「流れ場変調へ向けた放電プラズマ生成法」第49回中部・関西支部合同秋季大会、名古屋、2012年11月
- ⑥ 近藤 義明、大隅 広之、松田 淳、佐宗 章弘、「無隔膜衝撃波管装置の概要と今後の研究展開」第49回中部・関西支部合同秋季大会、名古屋、2012年11月
- ⑦ 永田健二、松田 淳、「1次元移動重合格子法によるピストン圧縮管内シミュレーションコードの構築」第49回中部・関西支部合同秋季大会、名古屋、2012年11月
- ⑧ 近藤義明、松田 淳、佐宗章弘、「エネルギー注入による衝撃波変調実験に向けた衝撃波管装置と計測系」2012年度日本機械学会年次大会、金沢、2012年9月
- ⑨ 山本遼太郎、佐藤祐輔、松田 淳、佐宗章弘「流れ場変調のための放電プラズマ生成実験」2012年度日本機械学会年次大会、金沢、2012年9月

⑩ 松田 淳、近藤義明、山本遼太郎、佐藤祐輔、杉浦寛喜、佐宗章弘、「衝撃波と変調密度場の干渉実験へ向けた衝撃波管装置概要」平成23年度衝撃波シンポジウム、柏、2012年3月

⑪ 山本遼太郎、佐藤祐輔、松田 淳、「放電プラズマ生成用電源の試作と性能試験」日本機械学会東海支部学生卒業研究発表会、名古屋、2012年3月

⑫ Kakuei Suzuki, Katsuya Shimizu, Atsushi Matsuda, Akihiro Sasoh, Masahide Katayama, “Generation of gelatin Neumann jet driven by an impactor with a velocity below 800 m/s,” 28th International Symposium on Shock Waves, July, 2011.

⑬ 佐宗章弘、酒井武治、酒井康彦、長田孝二、松田 淳、「Fly By Light Power : 繰返しレーザーパルスによる空力性能の向上」日本航空宇宙学会 第39期年会講演会、東京、2011年4月

〔図書〕(計1件)

(1) 加藤征三、義家 亮、丸山直樹、松田 淳、吉田尚史、廣田真史  
「熱エネルギーシステム 第2版」  
共立出版、2013年2月出版

〔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：