

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 9 月 13 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02350

研究課題名（和文）ナノ秒パルス放電による超音速流れの剥離抑制に向けた渦生成と過熱機構の解明

研究課題名（英文）Investigation of vortex generation and plasma heating by nanosecond pulsed dielectric barrier discharge for control of shock-wave/boundary-layer separation

研究代表者

杵淵 紀世志 (Kinefuchi, Kiyoshi)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：90648502

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではナノ秒パルス誘電体バリア放電を利用した超音速流中の衝撃波 - 境界層干渉剥離の制御に取り組んだ。放電による渦サイズはあるパルスエネルギー以上で飽和し、サイズ飽和後はエネルギーは過熱に費やされる。放電後の渦の成長には数百マイクロ秒程度を要し、低圧では渦拡散が速い。超音速風洞を製作し剥離の非定常性と3次元性を把握した上で評価を進めた。放電による渦サイズが境界層厚さより大となると境界層表面に渦が生成され、運動量輸送が促進される可能性が示唆された。流れに対し斜め設置した電極により剥離が抑制されることを確認した。抑制効果は限定的であったが効果促進に繋がる電極配置や放電周波数に関する知見が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超音速飛行の課題の一つに衝撃波 - 境界層干渉剥離がある。本研究ではナノ秒パルス放電により渦を生成し、この渦による主流から境界層への運動量輸送による剥離抑制を目指し研究を進めた。静止下において渦の基本的な特性であるサイズ、成長速度、維持時間、密度低下（温度上昇）を定量化することで実用に向け考慮すべき条件を示した。超音速風洞を製作しその特性を把握した上で、境界層中で放電により生成した渦を観察し、運動量輸送の促進には放電位置における境界層厚さと渦サイズの関係が重要であることを示した。流れに対し傾斜した電極により剥離抑制を実証し、実用に向けた効果促進に繋がる電極配置や放電周波数等に関する知見を得た。

研究成果の概要（英文）：This study focused on the control of shock-wave/boundary-layer interaction in supersonic flows using nanosecond pulsed dielectric barrier discharge. The results showed that the vortex size induced by the discharge saturates above a certain pulse energy, resulting in the energy being mainly consumed by temperature increase. Vortex growth after discharge takes several hundred microseconds, and vortex diffusion is faster at lower pressures. A supersonic wind tunnel was developed, then the strong unsteadiness and three-dimensionality of the separation were quantified. It was found that when the vortex size induced by the discharge exceeds the boundary layer thickness, vortices are generated on the surface of the boundary layer, which enhances momentum transfer. The results confirmed that the separation can be suppressed by the canted electrode. Although the suppression effect was limited, we gained insight into electrode configurations and discharge frequencies to enhance the effect.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：超音速流れ 衝撃波 境界層 剥離 プラズマ パルス放電

1. 研究開始当初の背景

近年、超音速旅客機やスペースプレーンの研究開発が活発化している。超音速で飛翔する機体への造波抵抗に伴う過大な空気抵抗、スクラムジェット等空気吸込みエンジンの技術難度の高さが実現への壁となっている。機体周囲やエンジン空気吸込み口に生じる境界層の剥離は、機体への空気抵抗・熱負荷の増加、エンジン不始動を招く。剥離抑制はこれらの実現に向けたブレークスルーとなる。

低速の境界層の剥離は逆圧力勾配によるため、剥離の抑止にはこれに抗する運動量を能動的に境界層へ送り込み、境界層内の低速流れを強制的に加速する方策が考えられる。この代表例である誘電体バリア放電 (DBD) プラズマアクチュエータでは、ミリ秒周期の正弦波を電極に印可しプラズマを生成、電場により加速されたイオンを介して所定方向の流れを誘起する。このイオン風が主流の豊富な運動量を低速の境界層へ輸送する。しかし亜音速での有効性は確認されている一方、超音速流への適用例はない。

超音速流に対しては DBD を正弦波ではなく、ナノ秒オーダーの短パルスにより生成する方式 (以下単に「ナノ秒放電」) が注目されている。ナノ秒放電では正弦波駆動と異なりイオン風は誘起されない。代わりに瞬間的な  $\text{GW/m}^2$  級の大パワー投入により高温場を生成し、そこから放出される衝撃波・膨張波背後に渦を得る。この渦が主流から境界層への運動量輸送を担う。短パルス化によりエネルギー散逸の極小化、つまり正弦波駆動を上回る高効率化が期待される。亜音速流での効果はすでに確認されているが、超音速流では未だ実証されておらず、超音速および付随する低下下での物理も十分には解明されていない。

2. 研究の目的

本研究では応募者が取り組んできた衝撃波-境界層干渉剥離の抑制のみならず、広くナノ秒放電による超音速流制御の実現に資するため、各種条件下においてナノ秒放電が渦生成や剥離に及ぼす影響を実験的に明らかにすることを目的とする。具体的には環境圧力や放電部における気流の有無、境界層厚さ等を変化させる。電極配置について、これまで主流に対し垂直 (1 次元的) に設置されてきた放電電極を、これに限らず流れに対し傾斜する等 2 次元的な配置も含め調査する。根幹を成す物理過程として、特に応募者が指摘する衝撃波と主流との干渉による渦生成の促進、プラズマ過熱にも着目する。これらを定量的・体系的に整理しナノ秒放電の超音速流での実用化に向け基盤的貢献を果たす。

3. 研究の方法

まず大気圧下及び実飛行環境を想定した低下下における、静止気体中でのナノ秒放電による高温・低密度場及び渦生成を主に BOS (Background Oriented Schlieren) 法により評価した。平行して吸込み式超音速風洞を新規製作し、その基本特性を調査した。製作した風洞を用い、くさびにより衝撃波-境界層干渉剥離を生成し、超音速流中のナノ秒放電が境界層及び剥離に及ぼす特性を観察し、そのメカニズムを調査した。

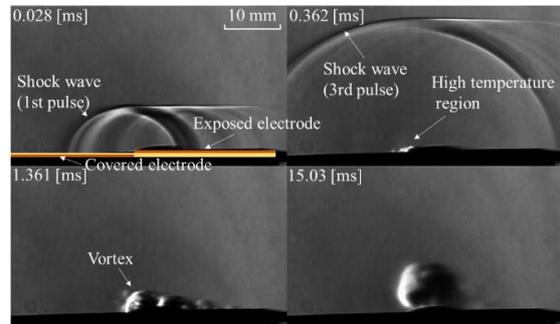


図1 放電後の流れ場のシュリーレン像 (大気圧・静止下, パルスエネルギー63.1mJ)

4. 研究成果

①静止下・大気圧実験

まず大気圧・気流なしの状態でのナノ秒放電の基本特性と高温場・低密度の渦生成現象の整理に取り組んだ。放電電極は電極長 75mm, 電極材として銅, 絶縁層にポリイミドを用いた。放電電源は末松電子超短パルス電源 CUS35KV-10KESP を用いた。パルスエネルギーは Tektronix P6015A 及び Pearson 6585 によ

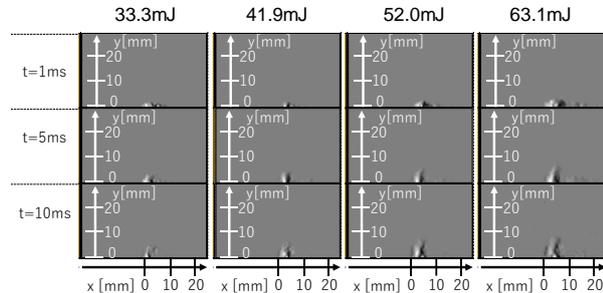


図2 エネルギーに対する BOS 変位像 (大気圧・静止下)

りパルス電圧, 電流を計測し, 電力波形を時間積分することにより求めた。高速度カメラ (Vision Research Inc., Phantom v1211) により光源としてパルスレーザ (Cavilux Ltd., Cavitar Smart) を用いて撮影したシュリーレン法による放電直後の流れ場の様子を図 1 に示す。以降の可視化では全てこの構成を採用している。パルスエネルギーは電源の大気圧下での最大出力の 63.1mJ である。放電から 0.028ms に衝撃波が発生している様子が確認できる。パルス電源のバースト作動により衝撃波が繰り返し放出され, 1ms 後に高温・低密度の渦の生成が確認できる。この渦は時間と共に成長していく。

パルスエネルギーに対する放電後の BOS 変位像を図 2 に示す。本 BOS 法ではパルスレーザにランダムパターンを転写し流れに投光する。流れの密度勾配に応じた屈折率変化によりパターンが変位するため、放電無/有のパターンの比較から密度分布を得ることができる。シュリーレン像と同様に放電直後 1ms で電極表面に白黒の濃淡として高温渦が見られ、その後時間と共に成長していく。パルスエネルギーが大きいほど高温渦のサイズも大となり、概ね 5mm~10mm 程度であった。次に図 2 の BOS の変位像を解析し密度分布を算出した。代表例として最大エネルギー (63.1mJ) のケースの分布を図 3 に示す。密度は大気圧の空気密度で無次元化してある。5ms での密度比の最低値は 0.85 程度で、仮に等圧変化とすると 50°C 程度の温度上昇に相当する。

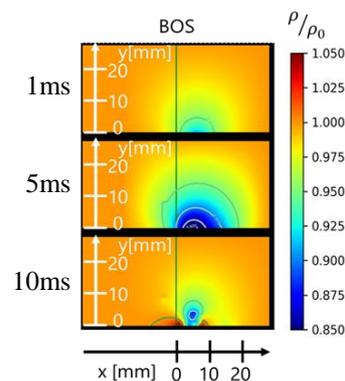


図 3 BOS から算出した密度分布 (大気圧静止下, 63.1mJ)

### ② 静止下・真空チャンバ内低圧実験

超音速流に付随する低圧環境での高温渦の理解のため、真空チャンバ内で気流がない状態で周囲圧力を変化させてナノ秒放電を作動させ、超音速下での流れの現象理解に繋げる。ここではシュリーレン像を基に画像解析により渦の成長を定量評価した。まずパルスエネルギーが概ね一定の下で周囲圧力を変化させた場合の高温渦のサイズの時間発展を図 4 上に示す。低圧環境ほど早期に高温渦のサイズは飽和し定常状態に至り、低圧環境 10kPa ではシュリーレンの感度限界を超え早期に消失している。これは渦度方程式から予測されるように、低圧 (低密度) ほど動粘性係数が大きく渦が早期に拡散するためと考えられる。低圧となる超音速での利用時には配慮すべき重要な知見と考えられる。

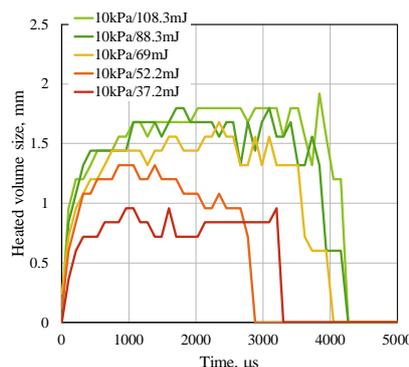
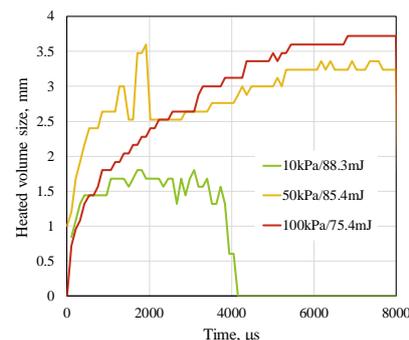


図 4 高温渦サイズの時間発展 (上: 圧力感度, 下: エネルギー感度)

次に周囲圧力を超音速流で想定される圧力 10kPa に固定し、パルスエネルギーを変化させた際の高温渦サイズの時間発展を図 4 下に示す。エネルギーが大きいほど高温渦のサイズも大きくなり、消失までの持続時間も長くなる。しかし、エネルギーに対しサイズは飽和する傾向が見られ、10kPa での到達サイズは最大 2mm 程度であった。ナノ秒放電による境界層制御には、後述するように渦サイズが境界層厚さ程度であることが必要と推測され、一層の渦生成促進の方策が求められる。また図 4 下から静止下での高温渦の成長に要す時間は 10kPa では 200~400μs 程度であった。これは境界層中を移流する渦の成長と減衰に配慮し、作用点 (例えば剥離域) と電極との位置関係の検討の必要性を示している。

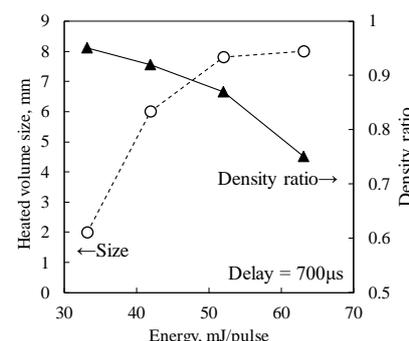


図 5 パルスエネルギーに対する高温渦サイズと密度比 (大気圧静止下)

図 5 に大気圧下における放電から 0.7ms 後の高温渦サイズ (BOS で得た密度比から同定) と密度比をパルスエネルギーに対して整理した。前述の低圧と同様、エネルギーに対しサイズは 50mJ 程度以上で飽和してしまう傾向にある。一方で、密度比は低下を続けている。パルスのエネルギーは、高温渦の成長と密度低下 (温度上昇) に費やされるが、今回の構成では 50mJ を超えるとサイズとしては飽和し、主に温度上昇にエネルギーが費やされることが明らかとなった。大きな密度勾配は渦を促進する可能性があるが、境界層の過熱は亜音速域の拡大と擾乱の伝達を促進するため、剥離抑制に向け配慮すべき重要な知見が得られた。

### ③ 超音速風洞実験

マッハ 2.57 (主流速度 580m/s) の吸込み式風洞を新規に設計・制作した。テストセクションは幅 80mm, 高さ 60mm の矩形断面を有す。ピトー管, 主流静圧計測を通し設計通りの性能が得られていることを確認するとともに、境界層の特性を把握した。

次に図 6 に示すように電極を風洞内底面に流れに対し垂直に配置し、その位置を①~③の 3 通りに変化させナノ秒放電の境界層への影響を調査した。電極を垂直に配した理由は放電が生成する渦の可視化を容易にするためである。各電極設置位置では境界層が成長途中であり、下流ほど電極位置での境界層

が厚くなっている。すなわち①～③の電極位置の結果を比較することで放電位置での境界層の厚さの影響を調べることができる。環境圧は6～50kPaであり、低圧ほどプラズマのインピーダンスが低下するため、電流が増大しパルスエネルギーとしては大気圧での63.1mJより大きくなり、約100mJであった。

図7に放電無しと電極位置②(風洞スロートから50mm下流)のケースのシュリーレン像を示す。放電無しのシュリーレン像から境界層厚さは4.4mm程度であることがわかる。電極位置②では境界層中のせん断により引き伸ばされた形状を有する渦塊の存在を確認した。渦塊は境界層中を主流速度よりやや低い558m/sで移流していた。この渦塊の移流を分析するため、図8に①～③の電極位置について、シュリーレン像を元に作成した固有直交分解(POD: Proper Orthogonal Decomposition)の偏差像を示す。①では境界層表層の偏差が大きく、渦の存在を示唆している。②は表層及び境界層底部の偏差が大きい。一方、③では境界層の低部の極薄い層にのみ強い偏差が表れている。この結果は、電極での境界層厚さによって、その下流の境界層内の渦の存在領域が決まることを示唆している。境界層が薄い位置での放電により境界層表層、すなわち主流と境界層との界面に渦を生成でき、主流から境界層への運動量輸送に有利な可能性が示唆された。これは静止下で調査した加熱渦のサイズとも密接に関係していると考えられ、電極位置③での境界層厚さは2.7mm程度であり、前述の渦サイズ2mmを超える厚さとなっており境界層への影響が底部に制限されているものと推測される。すなわち、境界層へ有意に影響を及ぼすには、放電位置での境界層厚さ及び放電により生成される渦のサイズに配慮する必要があるとの知見が得られた。

#### ④超音速剥離抑制実験

次に図9上図のように超音速風洞内上部にくさび(鋭角13度)を設置して斜め衝撃波を生成し、底部の境界層と干渉させることで衝撃波-境界層干渉による剥離を生成した。ナノ放電による剥離抑制効果の調査に先立ち、剥離領域の各種計測を行った。

図10にくさびを含む広域のシュリーレン像とオイルフロー法による風洞底部の流線の可視化結果を示す。シュリーレン像から入射衝撃波が底部境界層と干渉し、反射衝撃波を生成すると共に、剥離領域が生成されていることが確認できる。オイルフロー(風洞上部から見た底部の流線)からは、流れは側壁の境界層の影響を受け3次元性を有し、反射衝撃波は弓なりの形状を有していることが明らかとなった。これは側壁の境界層が剥離し、そこから生じる圧縮波により主流部が影響を受けたものと考えられる。シュリーレン像は光路上の密度勾配の積分値となるため、反射衝撃波の3次元性を踏まえた評価が必要であることが示された。これにより同図のシュリーレン像では反射衝撃波はある幅を持って確認されている。オイルフローから、幅の左端が風洞スパン方向中央部、右端が側壁部に対応していることがわかる。

図11はPIV(Particle Image Velocimetry)により取得した剥離域の軸方向流速分布である。本速度分布は西華デジタルイメージのPIVシステムにより撮影した。主流速度は前述の580m/sと概ね一致しており、計測の妥当性が示された。明確な三角形の剥離域の存在がPIVからも確認できる。剥離域の流速はほぼゼロとなっており、逆流を伴う比較的強い剥離渦が存在している。

次に、くさびにより生成した剥離域上流に放電電極を配し、ナノ秒放電による剥離抑制効果を調査した。電極は図9下図の通り主流に対し18度傾け配置した。電極長は110mmである。電極の陽極/負極を入れ替えたケースも調査した。剥離域への影響は図12に示す $x_{85}$ を計測することでを行った。すなわち、剥離域のサイズの変化に伴う反射衝撃波の動きに着目し、壁面から高さ15.3mm位置での風洞スパン方向

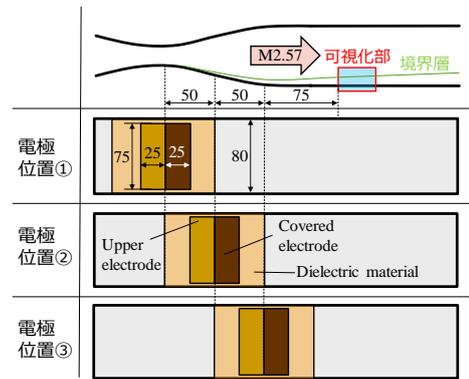


図6 超音速流中でのナノ秒放電調査(単位mm)

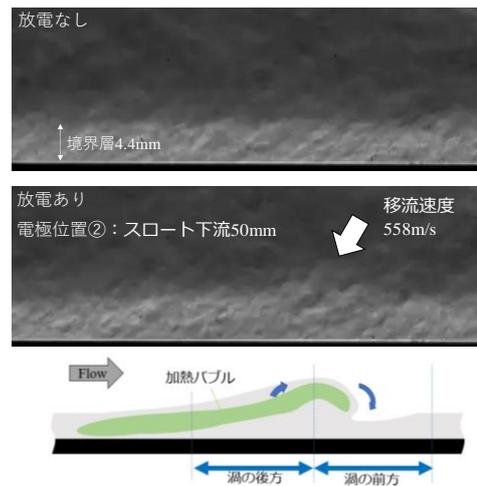


図7 放電無しと電極位置②のシュリーレン像

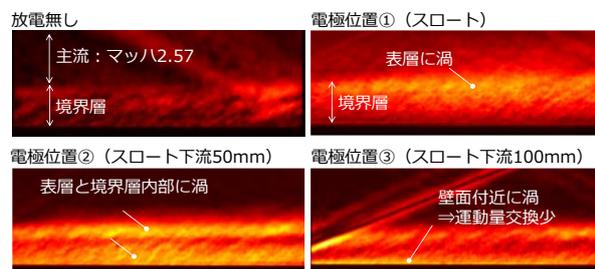


図8 放電無し及び電極位置①～③における可視化部でのシュリーレンPOD偏差像

中央における反射衝撃波の  $x$  座標 (流れ方向を  $x$  とする) を  $x_{rs}$  とし,  $x_{rs}$  を画像解析により抽出した.  $x_{rs}$  が大きいほど反射衝撃波が下流に動き剥離が縮小したことを表している.

図 13 に  $x_{rs}$  の計測結果を放電周波数に対して示す. 電極の陽極/陰極を入れ替えた結果も同図に示している. ナノ秒放電のパルスエネルギーは全て 100mJ である. 反射衝撃波の動きは非定常性を有しており, 図 13 にはエラーバー (標準偏差) として示している. 露出電極を陰極とした場合に  $x_{rs}$  が放電無しに比べ上昇しており, 剥離が縮小したことを示している. ただし反射衝撃波の動きは 0.5mm 程度に留まっており, その効果は微小であった. 剥離が強い逆流を伴っていることも要因だが, 一層の効果促進が望まれる. 周波数を上げていくと 900Hz を超えたところから  $x_{rs}$  が下がり始め, 1000Hz では剥離が大幅に悪化する結果となっている. これは境界層が過剰な放電周波数によりプラズマ過熱され, 境界層のマッハ数が低下し, 擾乱を伝える亜音速域が拡大したためと考えられる.

一方, 露出電極を陽極とした場合には, 放電無しに対し明確な変化が観察されなかった. ナノ秒放電の様子を目視観察したところ, 露出電極を陰極とした場合には放電経路の局所化と強い発光が見られた. このことから, 陰極のケースでは放電の局所化により渦生成が促進され, 剥離抑制に至ったものと推測される.

### ⑤本研究の総括

BOS 法等により渦のサイズと密度低下を定量化することで, 渦サイズはパルスエネルギーの増加に対し飽和する傾向にあり, 現状の構成では 2mm 程度が渦サイズの上限であることが示された. サイズ飽和後はエネルギーは密度低下 (温度上昇) に費やされることが確認された. 過度の温度上昇は亜音速域の拡大による剥離の促進を招く一方で, 密度勾配が渦を促進する可能性もある. また, 放電後の渦の成長には 200~400 $\mu$ s 程度の時間を要することが明らかとなった. 低圧では渦拡散が速く, 超音速流中では早期に喪失する可能性が確認された.

マッハ 2.57 の超音速風洞を製作し, 斜め衝撃波-境界層干渉剥離の特性をシュリーレン法, オイルフロー法, PIV 法により調査した. 剥離域は強い非定常性と側壁効果による 3次元性を有しており, 剥離抑制に向けてはこれらにも着目し整理すべき必要性が認識された. 超音速風洞を用い, 放電が生成する渦のサイズが放電部における境界層厚さより大となると境界層表層に渦が生成され, 主流との運動量交換が促進される可能性が示唆された. すなわち剥離抑制に当たっては, 境界層厚さ, 流速, 剥離域までの距離を踏まえ, 電極位置を決定する必要がある.

斜めの電極配置により境界層の剥離が抑制されることを確認した. 剥離抑制は露出電極を陰極とした際に得られ, 放電の局所化が渦生成を促進したためと推測される. しかし抑制効果は限定的であり, 剥離

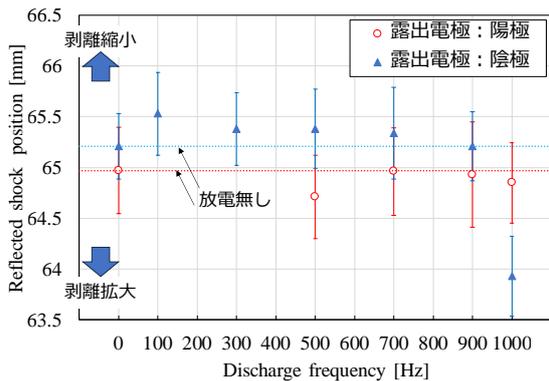


図 13 放電周波数による反射衝撃波の動き ( $x_{rs}$ )

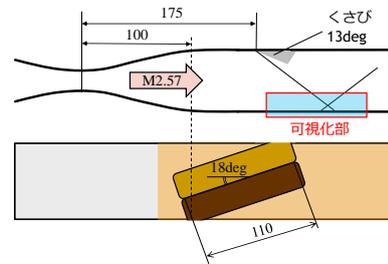


図 9 くさびによる斜め衝撃波-境界層干渉剥離の生成と電極配置 (単位: mm)

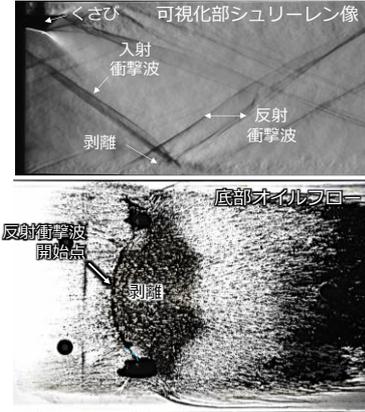


図 10 剥離部周辺のシュリーレン像 (上) と底部オイルフローによる可視化 (下)

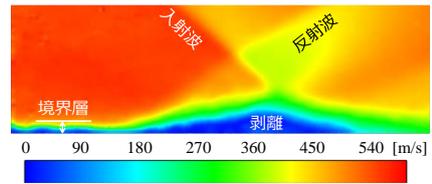


図 11 剥離領域の PIV 結果 (軸方向流速)

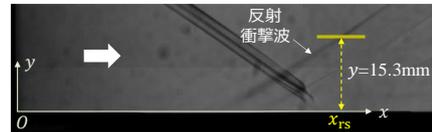


図 12 反射波位置による剥離サイズ同定

域への影響は 0.5mm 程度以下に留まった. 過去の研究で平行の電極配置では十分な渦生成が得られずプラズマ過熱により剥離が悪化することが確認されており, 同様の効果が高放電周波数において観察された. 斜め電極ではナノ秒放電が誘起する流れと主流との干渉が渦生成において重要な役割を担っているものと推測されるが, 今回得られた知見と合わせこの現象を明らかにし, 境界層の特性を踏まえた電極の位置・配置, 放電周波数等に加え, 複数電極の配列, 異なるデバイスとの複合 (例えば極低温冷媒による壁面冷却との組合せ) 等による効果促進に今後も取り組む必要がある.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yuma Miki, Leo Ando and Kiyoshi Kinefuchi
2. 発表標題 Mitigation of Shock Wave/Boundary Layer Interaction by Cryogenic Wall Cooling
3. 学会等名 34th International Symposium on Shock Waves (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 杵淵紀世志
2. 発表標題 ナノ秒パルスDBDプラズマアクチュエータの超音速流への適用
3. 学会等名 第9回プラズマアクチュエータ研究会シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三木佑真, 安藤嶺央, 岩本賢明, 杵淵紀世志
2. 発表標題 NS-DBDにより生成した高温低密度場による衝撃波/境界層干渉の変調
3. 学会等名 衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 安藤嶺央, 三木佑真, 岩本賢明, 杵淵紀世志
2. 発表標題 極低温壁面冷却による衝撃波境界層干渉に伴う剥離抑制の実験的/解析的調査」
3. 学会等名 衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩本賢明, 三木佑真, 松永友裕, 杵淵紀世志
2. 発表標題 ナノ秒パルス誘電体バリア放電による高温低密度場の挙動観察
3. 学会等名 日本流体力学会中部支部講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三木佑真, 安藤嶺央, 岩本賢明, 杵淵紀世志
2. 発表標題 超音速インテークの衝撃波/境界層干渉に伴う剥離の緩和を目指した極低温壁面冷却
3. 学会等名 日本流体力学会中部支部講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三木佑真, 松永友裕, 岩本賢明, 杵淵紀世志
2. 発表標題 ナノ秒パルス誘電体バリア放電による渦生成と超音速流中の境界層への効果
3. 学会等名 流体力学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松永友裕, 三木佑真, 杵淵紀世志
2. 発表標題 超音速流中におけるナノ秒パルス誘電体バリア放電による境界層制御
3. 学会等名 衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三木佑真, 松永友裕, 岩本賢明, 杵淵紀世志
2. 発表標題 同心円状電極を持つナノ秒パルスSDBDプラズマアクチュエーターの基本特性
3. 学会等名 衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松永友裕, 三木佑真, 杵淵紀世志
2. 発表標題 ナノ秒誘電体バリア放電による衝撃波境界層干渉剥離の抑制
3. 学会等名 日本流体力学会中部支部講演会
4. 発表年 2021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