

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560183

研究課題名（和文） 誘電体バリア放電誘起噴流の高速化メカニズム解明に関する研究

研究課題名（英文） A study for interpreting acceleration mechanism of flow induced by dielectric barrier discharge

研究代表者

瀬川 武彦（SEGAWA TAKEHIKO）

産業技術総合研究所・新燃料自動車技術研究センター・主任研究員

研究者番号：50357315

研究成果の概要（和文）：誘電体バリア放電誘起噴流の加速メカニズムを解明するため、誘起噴流の流動特性と間欠的に発生するスパイク状電流の解析を行った。巨視的な誘起噴流の流速と誘電体バリア放電の生成様式の関係をも明らかにするため、電圧立ち上がり勾配を一定にした場合の発光時間空間分布をストリークカメラ及び ICCD カメラにより計測した。電圧立ち上がり勾配の増加とともに間欠的に発生する電流の時間間隔は減少するが、その減少率は低下し、空気密度が低下することで誘起噴流の代表速度は減少することが明らかになった。誘起噴流速度は、誘電体バリア放電進展距離、スパイク状電流発生周波数、電圧立ち上がり時間、空気密度の逆数の積に比例して増加する可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：The properties of flow and spike currents induced by dielectric barrier discharge have been investigated to understand the mechanism of flow acceleration. In order to reveal the relationship between large-scale flow speed and dielectric barrier discharge, spatiotemporal distributions of luminescence intensities caused under various gradients of voltage surges are measured by a streak camera and ICCD camera. Time scale of intermittent currents shortens, but its paces of decrease become smaller according to larger voltage surge gradient at room temperature. On the other hand, typical jets speeds tend to decrease by lowering of atmospheric density under elevated temperature at one atmosphere. These results indicated that flow speed induced by dielectric barrier discharge can be linearly scaled by DBD propagation distance, frequency of spike currents, duration of voltage surge, and inverse number of atmospheric density.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：流体工学、噴流、誘電体バリア放電、流体制御

1. 研究開始当初の背景

誘電体バリア放電プラズマアクチュエータ（以下、DBD-PAs）は、絶縁材を挟んで表裏両面に電極を設置しただけの極めてシンプルな構造である。断面に対して電極を非対称配置した直線型 DBD-PAs では、電極間に高電圧高周波信号を入力することで、壁面近傍に水平速度成分が支配的な一方向噴流が誘起される。DBD-PAs は円柱や翼型からの剥離流れを制御するためのアクチュエータとして期待されるが、実際の流体機械へ適用するまでには、温度、圧力、金属管体への装着など、広範囲の作動環境で制御に必要な速度・運動量を持つ噴流を誘起するための手法を、戦略的に研究開発する必要がある。

表面露出電極としてドーナツ型電極を採用した DBD-PAs では、表面露出電極の内部エッジから中心方向へ向う噴流が誘起され、壁面に対して垂直方向の速度成分が支配的な環状噴流が合成される。印加する電圧としては、多くの研究で正弦波電圧が用いられてきたが、peek-to-peek 電圧 (V_{p-p}) 及び周波数 (f_p) の変化とともに電圧立ち上がり勾配 (dV/dt) も変化するため、誘起噴流速度と dV/dt の関係を評価することが困難であった。

研究代表者は本研究を開始する以前、 V_{p-p} 及び f_p の変化に対しても dV/dt を一定にできる電源を開発し、誘起噴流の dV/dt 依存性を調べた結果、常温常圧下では $dV/dt = 200$ volts/ μ sec に固定した場合に噴流の代表速度が V_{p-p} や f_p に対して線形に増加する実験結果が得られた。そこで、 $50 \leq dV/dt \leq 1,000$ V/ μ sec の範囲で調整できる矩形波出力電源を新たに開発し、誘起噴流速度の dV/dt 依存性の解析を開始した。粒子可視化速度測定法 (PIV) により解析した環状噴流の x - y 断面速度分布から、 $130\mu\text{m}$ 厚ポリエステルを絶縁材とする DBD-PAs では、常温常圧下では $150 < dV/dt < 250$ V/ μ sec の条件で噴流速度及び運動エネルギーが最大化されることが明らかになった。また、 dV/dt を一定にした条件下での高時間分解電流測定から、放電現象と誘起噴流を関連付ける手がかりとなる特徴的な電流波形を見出し、誘起噴流の流動特性と電流発生時間間隔の関係を明らかにすることで、噴流加速メカニズムを理解するための簡易モデルを構築できる可能性を示した。

2. 研究の目的

大気圧において常温から高温用まで使用できる電極と絶縁材から構成される DBD-PAs を試作し、高温化に伴う空気密度や材質の違いによる誘電率の変化が噴流速度、イオン生成・加速に与える影響を定量的に評価し、噴流高速化を実現するための入力信号や構造について考察を行う。また、誘

起噴流の速度を最大化する dV/dt におけるイオン生成過程、イオン及び中性粒子加速過程の解明に向け、誘電体バリア放電の生成消滅に起因するマイクロ秒スケールの時間間隔で発生する特徴的なバースト電流の波形解析と、誘電体バリア放電の時間空間分布を測定する。さらに、本研究で実験的に得られた噴流高速化条件をもとに、誘起噴流の誘起速度を説明できる数理モデルを示すことを目的とする。

3. 研究の方法

ポリイミド、石英ガラス、サファイアガラス、アルミナセラムックスを絶縁材とする DBD-PAs を試作し (図 1)、電気容量、電界強度の変化や温度の違いによる空気密度の変化が誘起噴流の流動特性に与える影響を評価するため、PIV を用いて誘起噴流の空間速度分布を解析する (図 2)。また、誘電体バリア放電の生成消滅に起因するマイクロ秒スケールの電流波形をデジタルオシロスコープで高速サンプリングするとともに、図 2 に示すようにストリークカメラを用いて直線型表面露出電極エッジ近傍の誘電体バリア放電時間空間分布を測定する。

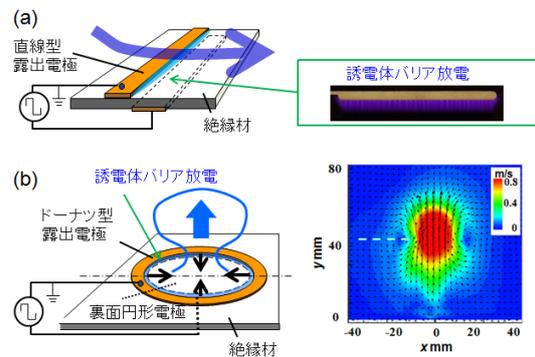


図 1 プラズマアクチュエータ
(a) 直線型, (b) ドーナツ型

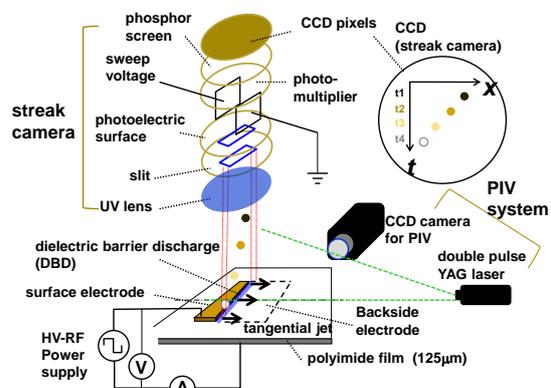


図 2 DBD 誘起噴流の可視化計測

4. 研究成果

絶縁材としてポリイミド、石英ガラス、サファイアガラス、アルミナセラムックスを用い、図1に示すような直線型及びドーナツ型電極を有する DBD-PAs を試作した。ポリイミド製では厚さ 35 μm 銅箔層が圧延された両面銅張積層板の両面位置合わせエッチングにより表裏電極を形成した。石英ガラス及びアルミナセラムックス製では厚さ 50 μm 銅箔をレーザー加工し、導電性接着剤により絶縁材の両面に固定した。また、サファイアガラスはイオンプレーティング法により膜厚 5 μm の銅薄膜を形成し、両面位置合わせエッチングにより電極を形成した。

誘起噴流の空気密度 (ρ_{air}) 依存性を調べるため、表面露出電極の内径が 40 mm のドーナツ型 DBD-PAs を用いて図 1(b)に示すような環状噴流を誘起し、環状噴流軸断面の空間速度分布を PIV で計測した。印加電圧条件は $V_{p-p} = 6.4 \text{ kV}$, $f_p = 10 \text{ kHz}$, $dV/dt = 170\text{V}/\mu\text{sec}$ に固定し、電圧印加から 0.1 秒後の最大流速 (U_{j-max}) を代表速度と算出した。ただし、空気密度は周辺温度より変化させるが、温度上昇に伴って変化する DBD-PAs の静電容量(誘電率)により dV/dt が変化するため、図3に示すように電源出力部に可変抵抗を挿入することで $dV/dt = 170\text{V}/\mu\text{sec}$ に調整した。

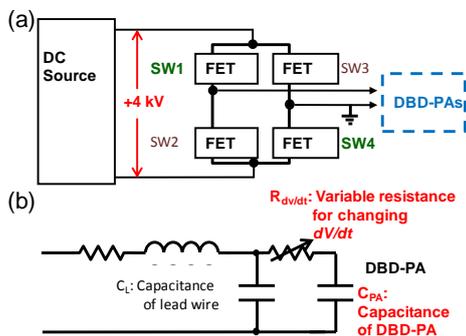


図3 DBD-PAs 及び電源回路ブロック図

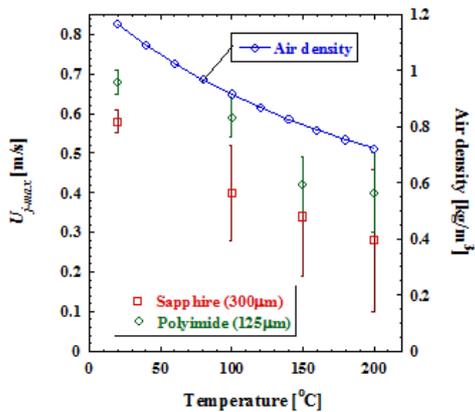


図4 誘起噴流速度の温度依存性

図4は 300 μm 厚サファイアガラス製及び 125 μm 厚ポリイミド製 DBD-PAs を 20 $^{\circ}\text{C}$ から 200 $^{\circ}\text{C}$ の温度雰囲気 に設置した場合の U_{j-max} の変化を空気密度と比較して示しており、密度減少とともに U_{j-max} も減少することがわかる。これらの傾向は 500 μm 厚の石英ガラス及び 500 μm 厚のアルミナセラムックスでも 100 $^{\circ}\text{C}$ までは確認されたが、更なる高温場では電極と絶縁材の剥がれや破断が生じた。これは電極、絶縁材、接着剤の体積膨張率の違いによる歪みの影響であると考えられる。

次に、間欠的に発生するスパイク状電流の解析を行った。図5はエッジ長さ 80 mm の直線型 DBD-PAs (125 μm 厚ポリイミド製) に印加した電圧立ち上がり時 ($-1 \leq V \leq 3 \text{ kV}$, $120 \leq t \leq 140 \mu\text{sec}$) の急峻な勾配 ($dV/dt = 220 \text{ V}/\mu\text{sec}$) において、DC から 50 MHz 域の電流計測が可能なスプリットコア式電流プローブを用いて測定した電流波形 (high-pass フィルタにより高周波成分のみ) を示しており、スパイク状電流が誘電体バリア放電を生成するために供給される電流であると考えられる。スパイク状電流は正弦波を入力した場合は時間的にランダムに発生するが、矩形電圧入力では dV/dt に応じた時間スケールが存在しているように見受けられる。電流波形解析を行った結果、スパイク状電流時間間隔の平均値 (δ_{ave}) は $dV/dt = 100, 200, 700 \text{ V}/\mu\text{sec}$ では、それぞれ $\delta_{ave} \approx 1, 0.5, 0.1 \mu\text{sec}$ であった。ただし、電流波形の解析だけでは、電極のどの場所で誘電体バリア放電が発生している場所を特定することは困難である。

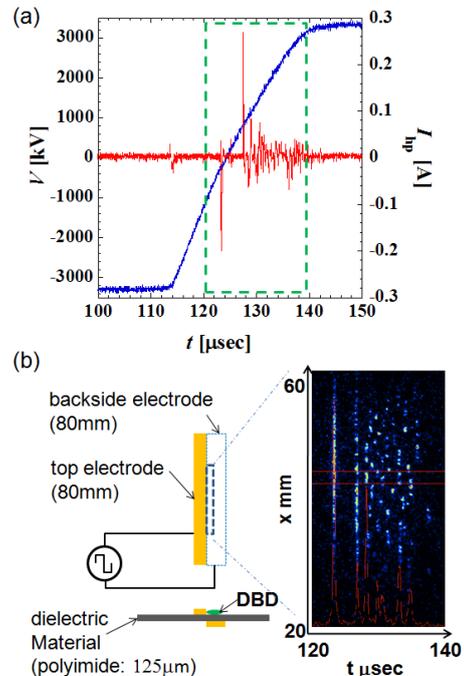


図5 (a)電圧立ち上がり時に見られる電流波形、(b)誘電体バリア放電時間空間分布

そこで、発光現象の時空間分布を撮影できるストリークカメラとナノ秒の発光現象の空間分布を取得できる ICCD カメラを用い、スパイク状電流の時間スケールと比較した。分光器を用いて誘電体バリア放電のスペクトラムを測定した結果、発光現象は N_2 の 2nd negative 帯が支配的であり、波長は 400 nm 以下の紫外域であるため、ストリーク画像の取得には UV レンズを用いた。図 2 に示すように、直線型 DBD-PAs の表面露出電極近傍に発生する誘電体バリア放電の発光強度時空間分布を取得するためにストリークカメラシステム（浜松ホトニクス：C1587 及び ORCA-03G）を設置した。図 5(b)は、エッジ長さ 80 mm を有する直線型 DBD-PAs の中心近傍 40 mm の領域について、スリット幅 150 μm で 20 μsec 間の誘電体バリア放電の発光時空間分布を図 5(a)の破線で囲まれた電流波形と同時計測した結果を示している。スパイク状電流に対応し、空間に対しては比較的一様なプラズマ自発光が時間的に生成・消滅を繰り返す様子が見られる。ただし、局所的に時間遅れが生じる場合や、空間的・時間的に不均一な発光現象が見られる場合もある。誘電体バリア放電の空間的な不均一性を可視化するために、ICCD カメラ（Andor iStar 734 Series）を用い、瞬時の誘電体バリア放電空間分布を計測した。図 6 は $dV/dt = \pm 230 \text{ V}/\mu\text{sec}$ において δt_{ICCD} を変化させた場合の誘電体バリア放電空間分布であり、発光分布がゲート時間の増加とともに空間全体に広がる様子がわかる。 dV/dt の極性の違いにより放電進展の分布が異なるが、 $dV/dt = +230 \text{ V}/\mu\text{sec}$ の場合にはストリーマ状の誘電体バリア放電が特定の距離を進展した後にはほぼ直角に屈曲することがわかる。一方、 $dV/dt = -230 \text{ V}/\mu\text{sec}$ では比較的一様な放電分布が見られるが、極性に関わらず放電の進展距離は dV/dt に依存することが明らかになった。また、200 μm 厚のサファイアガラス製直線型 DBD-PAs を用い、 $dV/dt = \pm 300 \text{ V}/\mu\text{sec}$ における誘電体バリア放電空間分布を解析した結果、図 6 の結果より誘電体バリア放電の進展距離が増加する一方、屈曲する現象は同様に見られた。

以上の実験結果からマイクロ時間スケールのイオン生成過程とマクロ時間スケールの噴流速度の関係を結び付けることを試みる。定性的には、電圧や周波数を増大させることで DBD-PA 誘起噴流は高速化できるが、本研究のように V_{p-p} 及び f_p を一定として dV/dt のみ変化させた場合、 dV/dt の違いによる誘電体バリア放電の生成・消滅過程が噴流加速に与える影響を議論することができる。最も単純なモデルとして、誘起噴流の速度は誘電体バリア放電により生成されるイオンの総数に比例する可能性が議論されている。これは、

生成されるイオン総数が多ければ、加速されるイオンがニュートラルな分子との衝突頻度も増加し、結果として同じで電界分布が形成された場合でもマクロな流れも高速化すると考えられるためである。本研究の開始当初、誘電体バリア放電の発生頻度 ($f_{\text{DBD}} \sim 1/\delta t_{\text{ave}}$) と急峻な立ち上がり電圧が持続される時間 ($\delta T_{dV/dt} \sim (dV/dt)^{-1}$) の積、即ち $\zeta = dV/dt \times T_{dV/dt}$ がイオン総数と比例関係にあると予測した。本研究で行った実験結果から ζ を算出した結果、図 7 に示す PIV 計測の速度分布から得られた運動エネルギー (E) の傾向と整合性が認められるが、実際は $1/\delta t_{\text{ave}}$ を求める

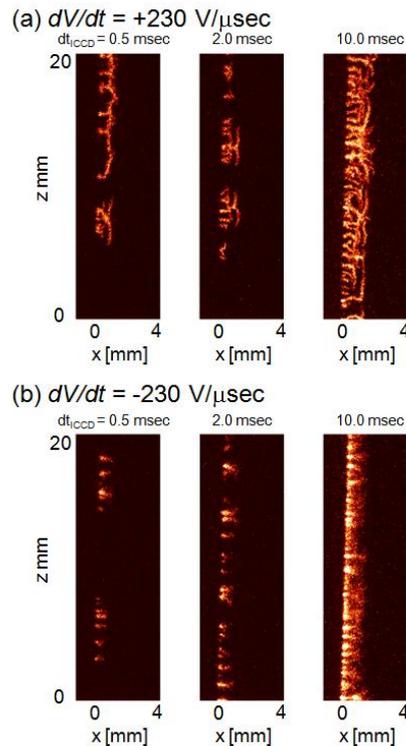


図 6 ICCD カメラによる誘電体バリア放電空間分布

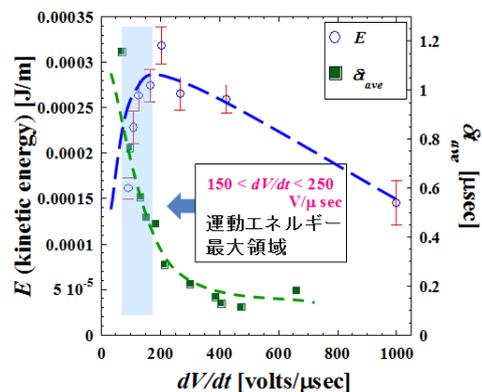


図 7 DBD-PAs 誘起噴流の運動エネルギーとスパイク状電流時間間隔

にあたりスパイク状電流強度に閾値を設けており、閾値によって $1/\delta_{ave}$ が大きく変化する。さらに、スパイク状電流の強度 (I_{DBD}) も発生毎に異なり、 I_{DBD} の違いによりプラズマ発生様式が異なることが本研究の電流波形解析や、ストリークカメラ及び ICCD カメラによる誘電体バリア放電時間空間分布解析から明らかになった。また、高温場における誘起噴流速度の減少は空気密度の低減による影響であると考えられる。以上の結果から、誘起噴流速度は、誘電体バリア放電進展距離、及び間欠的な時間間隔、電圧立ち上がり速度、空気密度の逆数の積に比例すると推察される。

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 2 件)

- ① Walker Ryan Seth, Takehiko Segawa, Mitigation of flow separation using DBD plasma actuators on airfoils: A tool for more efficient wind turbine operation, Renewable Energy, 査読有, Vol. 42, 2012, 105-110.
DOI: 10.1016/j.renene.2011.09.001
- ② 瀬川武彦, 小方聡, 武川信也, DBD プラズマアクチュエータへの入力電圧波形が誘起噴流の流動特性に与える影響, ながれ, 査読無, 29 巻, 2010, 251-258
<http://www.nagare.or.jp/download/noauth.html?d=29-4tokushu3.pdf&dir=64>

[学会発表] (計 7 件)

- ① 瀬川武彦, Jukes Timothy, 高橋栄一, 古谷博秀, DBD プラズマ誘起噴流の加速メカニズム解明に向けた間欠的な電流波形の解析, 日本機械学会 2012 年度年次大会, 2012 年 9 月 11 日, 金沢大学角間キャンパス (石川県)
- ② 瀬川武彦, 高橋栄一, Timothy Jukes, 古谷博秀, 武川信也, DBD プラズマの入力電圧変化時に計測される間欠的なスパイク状電流の解析, DBD プラズマの入力電圧変化時に計測される間欠的なスパイク状電流の解析, 2012 年 3 月 21 日, 広島工業大学 (広島県)
- ③ 瀬川武彦, Timothy Jukes, 高橋栄一, 古谷博秀, 武川信也, DBD プラズマ誘起噴流の入力電圧波形依存性, 日本流体力学会年会 2011, 2011 年 9 月 9 日, 首都大学東京南大沢キャンパス (東京都)
- ④ 瀬川武彦, 武川信也, Kwing-So Choi, DBD プラズマ誘起噴流速度の電圧立ち上がり速度依存性, 日本機械学会 2010

年度年次大会, 2010 年 9 月 6 日, 名古屋工業大学 (愛知県)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 誘電体バリア放電利用空力制御翼装置
発明者: 瀬川武彦、前田哲彦、古谷博秀、町島祐一、武川信也
権利者: 産業技術総合研究所
種類: 特許
番号: 特願 2010-187710
出願年月日: 2010 年 8 月 25 日
国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://staff.aist.go.jp/t-segawa/segawa.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

瀬川 武彦 (SEGAWA TAKEHIKO)
産業技術総合研究所・新燃料自動車技術研究センター・主任研究員
研究者番号: 50357315