

氏名	さとう しんたろう 佐藤 慎太郎
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 航空宇宙工学専攻
学位論文題目	Development of Low-Voltage Operated Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator (低電圧駆動誘電体バリア放電プラズマアクチュエータの開発)
論文審査委員	主査 東北大学教授 大西 直文 東北大学教授 澤田 恵介 東北大学教授 浅井 圭介 東北大学教授 佐藤 岳彦 東北大学准教授 野々村 拓

論文内容要約

本論文は、気体放電を利用した能動的気流制御デバイスである誘電体バリア放電 (Dielectric Barrier Discharge: DBD) プラズマアクチュエータの実用化に向けて、流体モデルを用いた実用的な計算時間での実行が可能な放電数値シミュレーション手法を確立し、DBD プラズマアクチュエータの性能を向上するうえで重要となる物理過程の抽出を行い、低電圧で駆動可能な DBD プラズマアクチュエータの提案・実証を行うものである。

可動部を有さない能動的気流制御デバイスとして、DBD プラズマアクチュエータが注目を集めており、その実用化に向けた研究が精力的に行われている。誘電体を挟み込むように2枚の電極を配置し、電極間に高圧・高周波数の交流電圧を印加することで空気に曝された電極近傍において弱電離プラズマが生成される。生成された荷電粒子が電場によって加速され、電気流体力 (electrohydrodynamic: EHD) 力を介して荷電粒子の運動量が中性粒子に輸送され、気流が誘起される。この誘起流れはイオン風として古くから知られており、DBD プラズマアクチュエータはこのイオン風を利用して流体機器周りの流れを能動的に制御することができる。DBD プラズマアクチュエータは従来の気流制御装置と比較して構造が簡素であり、応答性に優れるといった利点を持つ一方で、誘起されるイオン風の速度や生成効率が低く、気流制御効果は比較的低速度域 (30 m/s 程度) に限られていることが課題であり、実用化のためには DBD プラズマアクチュエータの性能向上が求められている。

DBD プラズマアクチュエータは気体放電によってイオン風を誘起するため、性能向上には放電現象のレベルから気流生成までの過程を理解し、イオン風の生成に適した放電を発生させることが重要となる。DBD プラズマアクチュエータにおける詳細な放電過程の解明に向けて、プラズマ流体モデルを用いた数値シミュレーションが行われているが、放電シミュレーションは計算コストが高く、大規模計算や EHD 力の増大を目的とした電圧波形・電極形状の実施が困難であり、計算コストの削減が求められている。

また、DBD プラズマアクチュエータが実用化に至っていない原因として高出力・高電圧を印加する必要があることが挙げられる。現在の DBD プラズマアクチュエータは、数十 kV 以上の電圧を印加することで気流の制御を試みているが、この場合は高圧電源が必要となる。高圧電源は価格が高額になり易いことに加え、周囲のデバイスとの放電防止対策や安全距離を設定する必要があり、取り扱いが難しいことが実用上での欠点となる。さらに、出力が高くなると一般的に電源重量が増加するため、高出力電源を航空機に実装することは困難である

ため、航空機の翼周り流れの制御に適用する場合は低出力・低電圧の電源で駆動できる DBD プラズマアクチュエータを開発する必要がある。

このような観点から、筆者は実用的な計算コストで実行可能な放電シミュレーションの計算手法を確立し、シミュレーションの結果に基づいて低電圧で駆動可能な DBD プラズマアクチュエータの提案およびその実証実験を目的として研究を行った。

まず、DBD プラズマアクチュエータにおける放電過程の数値シミュレーションの低コスト化を目的として新しい電場計算手法の提案を行った。プラズマ流体モデルは一般的に、荷電粒子に対する連続の式と静電ポテンシャルに対する Poisson 方程式で構成されるが、従来手法ではタイムステップ毎に Poisson 方程式を解く必要があり、計算コストのほとんどは電場計算部分に費やされていた。本研究では、電荷密度の時間変化が十分小さい場合は、電位分布は Laplace 方程式として近似した式から求めることが可能であり、タイムステップ毎に Poisson 方程式を解く必要がないことを示した。テストケースとして正弦波電圧を DBD プラズマアクチュエータに印加した計算を行ったところ、Laplace 方程式による近似解法を用いた場合でも荷電粒子の数密度空間分布や電流波形、および生成される EHD 力は従来手法と良く一致することを確認し、電場計算部分において高速化率が 10 倍以上になることを示した。この手法を用いることで、EHD 力の生成に適した電圧波形や電極形状の最適化計算や、放電過程の 3 次元数値シミュレーションを現実的な計算コストで実行することが可能になると期待される。さらに、提案した手法は DBD プラズマアクチュエータに限らず、プラズマ流体モデルを用いたあらゆる放電計算へ適用可能であり、空間的・時間的に大規模な数値シミュレーションの大幅な計算コストの削減に貢献することができる。

放電シミュレーションを行った結果、DBD プラズマアクチュエータでは、誘電体表面における電荷分布が放電形態や生成される EHD 力に大きく影響を与えていることが明らかになり、放電を維持するためには誘電体表面において帯電サイクルを形成する必要があることを示した。この結果に基づき、誘電体表面の電荷の挙動に着目して、EHD 力の生成に適した印加電圧波形および電極配置を提案した。正弦波電圧を印加した場合は、誘電体は (1) 正に帯電、(2) 正電荷の中和、(3) 負に帯電、(4) 負電荷の中和の 4 行程からなる帯電サイクルが形成される。この帯電サイクルに対して、筆者は DC 電圧に繰り返しナノ秒パルスを重ねることで、(1) 正に帯電、(2) 正電荷の中和の 2 行程のみで帯電サイクルを形成する方式を見出し、大幅に EHD 力が増大することを数値シミュレーションによって示した。提案手法では、ナノ秒パルスによって荷電粒子を生成し、DC 電圧によって荷電粒子を加速することができるため、EHD 力の生成に適した電圧波形であると考えられる。また、電極配置については、従来の下部電極は全て誘電体によって被覆されていたことに対して、下流側を部分的に露出させた部分被覆電極を用いることで EHD 力が増大することを示した。ナノ秒パルスによって生成された荷電粒子は、DC 電圧によって下流に向かう方向に加速されるが、ナノ秒パルスによって正電荷が中和される領域は上流側の露出電極近傍に限られ、下流領域では誘電体が常に正に帯電するため、電場が遮蔽されていることがわ

かった。そこで、下流領域に露出電極部分を設けることで電荷の蓄積を防ぎ、電場遮蔽効果を弱めることで EHD 力が增大することを数値的に示した。数値シミュレーションの結果、部分被覆電極を用いることによる EHD 力増大効果はバイアスする DC 電圧が高い時に有効であることがわかり、荷電粒子を加速するためには DC 電圧が重要な役割を担うことを示した。さらに、得られた放電計算の結果を利用して、静止気体中で DBD プラズマアクチュエータが誘起する流れの数値シミュレーションを実施した。その結果、提案した 2 行程サイクルを形成する方式を用いた場合でも、壁面噴流を形成することができることを確認した。また、部分被覆電極を用いることで、より強い壁面噴流を形成できることを示した。

次に、表面電荷制御の概念をプラズマアクチュエータに応用し、低電圧で駆動可能な DBD プラズマアクチュエータを提案した。本研究では、従来用いられていた 2 枚で 1 組の DBD プラズマアクチュエータを 1 つの素子として捉え、それを小型化・複列化することによって高圧電源を必要としない高集積プラズマアクチュエータを提案した。アクチュエータ素子を小型化することによって、駆動電圧を大幅に低減することが可能になる。単一素子を用いた場合は、放電領域が狭まり、誘起流速が低くなることが問題であったが、素子を多数並べることによって、この問題を解決した。複数素子を用いることで、DBD プラズマアクチュエータの性能を向上させる試みは過去にも行われてきたが、従来手法では、複数の素子を密に並べると互いに干渉し、逆流が発生することが問題であった (cross-talk 現象)。この cross-talk 現象によって、アクチュエータ素子を並べる場合はある程度の距離を設けて配置する必要があるが、素子を密に配置することができなかった。筆者はこの問題に対して、新しい電極配置を提案し、この電極に DC バイアスされた繰り返しナノ秒パルスを印加することで、アクチュエータ素子同士が互いの性能を弱め合うのではなく、むしろ強め合う効果が発現することを数値的・実験的に示した。本実験では、パルス電源と DC 電源を別々に用意し、フィルターを介して接続することで DC バイアスされた繰り返しナノ秒パルス波形を実現した。さらに、Pitot 管を用いた誘起流速測定を行い、複数のアクチュエータ素子によって誘起流が追加速されることを示し、提案手法を用いることで駆動電圧を大幅に低減できることを原理的に実証した。最後に、1500 V の電圧で従来の 10 kV 以上の電圧を印加した時と同程度の気流が誘起できることの実証を行った。駆動電圧を 1500 V まで下げることで、DC 電圧を直接スイッチングすることが可能となり、電源装置を大幅に簡素化できることを示した。さらに、DC 電圧を直接スイッチングすることで高い周波数で繰り返しパルスを発生できることを示した。そして、高空間解像度 particle image velocimetry によって誘起流れ場の可視化を行い、最も上流に位置するアクチュエータ素子から壁面噴流が誘起され始め、下流に向かうに従って徐々に加速される様子が確認できた。微細加工技術等を採用することで、提案手法を用いて駆動電圧を更に低減できることが期待される。そして、数百ボルト程度で駆動可能なプラズマアクチュエータが実現できれば、電気自動車や電動航空機が装備しているバッテリーを DC 電源として利用することが可能となり、DBD プラズマアクチュエータを駆動するための電源を追加する必要がなくなるため、DBD プラズマアクチュエータを利用した能動的気流制御システムを容易に実装でき、自動車・航空機の空力性能の飛躍的向上に貢献できるもの

と期待される。