

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20日現在

機関番号：10101

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2011年度～2012年度

課題番号：23860077

研究課題名（和文） 高速気流条件における高性能プラズマアクチュエータ開発に関する研究

研究課題名（英文） A study of plasma flow field around dielectric barrier discharge plasma actuator for high velocity flow condition

研究代表者

高橋 裕介 (Takahashi Yusuke)

北海道大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：40611132

研究成果の概要（和文）：高速気流条件においても十分な適用を期待できるプラズマアクチュエータの提案を目標とする。それを進める上でアクチュエータ近傍の流体・放電現象を解明するとともに、物理モデル及び解析モデルの提案を行い、定量的に流れの振る舞いを明らかにすることは性能向上に向けた指針を得る上で重要である。ここではアクチュエータの放電によって誘起されるプラズマ流の解析モデルを開発・提案するとともに、電極近傍でプラズマによって生じる電圧降下モデルを提案した。

研究成果の概要（英文）：Final goal of the present research is to develop a high-performance plasma actuator which is applicable for a condition of high-velocity flow. In the present study, to describe plasma flow behavior and potential drop by cathode sheath, numerical simulation models of plasma flow generated by dielectric barrier discharge plasma actuator and plasma near an electrode has been suggested and developed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,200,000	660,000	2,860,000

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：プラズマ流・数値解析・熱化学的非平衡流

1. 研究開始当初の背景
流れの剥離の抑止やノイズの低減等の工学的な用途として流体制御は重要な技術なひと

つである。近年において、機械的な可動部がなく、入力切り替えが容易な Dielectric Barrier Discharge プラズマアクチュエータ

(DBD-PA)が盛んに研究されつつある。DBD-PAは、火花放電への遷移の危険性が小さく、安定的な取り扱いが可能な点においても、今後の大きな発展が期待できるものと考えられる。ただ、DBD-PAを用いたこれまでの研究では、大気圧条件において気流速度10 m/secオーダーの剥離制御しか達成しておらず、今後さらなる制御能力の向上が望まれる。特に航空機の巡航時における抗力低減や、大迎角での離着陸時における翼面上の剥離制御に対して十分な効果を期待する場合、さらなるブレークスルーを要すると見込まれる。

DBD-PAは一般に銅等を用いた陰極と陽極で、カプトン等の誘電体を挟んだ形状となる。高い電圧を印加することによって電極近傍に強い電場が発生する。このときアクチュエータ上の流体が電場による力を受けることで運動量の入力が行われ、誘起流束が生じる。また同時に強い電場によって絶縁破壊が生じ、グロー放電の形でプラズマが形成されるのが特徴である。一般に、電極間に一定の周波数の交流電源を印加し、電極近傍においてmAオーダーの比較的小さな電流と、kVオーダーの比較的高い電圧を有する。したがって消費電力は小さい。アーク放電と比べて、電極壁面温度は低いと考えられる。そのため、放電を維持するために必要な電極表面上の電子放出メカニズムは、強い電場によるトンネル効果から電子が放出される電場電子放出や、イオン種が電極壁面に衝突することによって電子が生じる二次電子放出であると考えられる。

2. 研究の目的

DBD-PAの電極近傍に形成された強い電場が、流れ場にどのような作用をもたらし、運動量の伝達が行われるかは、まだ十分に解明されていないのが現状である。そのため、DBD-PAの電極材料や電極配置、電極の厚さ等の電極デザインがアクチュエータ性能に及ぼす影響も必ずしも明らかではない。したがって、アクチュエータ近傍の物理現象を解明し、物理モデル及び解析モデルの提案を行い、定量的に流れの振る舞いを明らかにすることは、性能向上に向けた指針を得る上で大きな意義を有すると思われる。

ここではまず電極近傍の複雑な物理を明らかにした上で、従来よりも高い性能を有し、航空機等の実際の用途においても十分な流体制御効果が期待できるDBD-PAの開発を研究の目的と設定する。

3. 研究の方法

高速気流条件で翼面上での十分な剥離抑制の実現を目指す。本研究においては次のこ

とに焦点を当て、これらがプラズマアクチュエータによって誘起されるプラズマ流の挙動に及ぼす影響を探索する：(1)放電に伴う流体の熱化学的非平衡的振る舞いや、電極壁面からの電子放出機構、運動量の伝達機構；(2)電極材料や配置、厚み等、デバイスのデザインが性能に伴う流れ場・電場の振る舞い；(3)電極形状による電場の局所的な増強の可能性。以上を通して最終的に性能向上に向けた知見を得るとともに、従来のものに比べて高い性能を持ったDBD-PAを提案する。

本研究では、まずプラズマ気流解析コードを整備した上で、アクチュエータ近傍での物理現象の定量的な調査を行い、高速気流の条件においても十分に流体制御が可能なDBD-PAの開発を目標とする。その開発を行う上で、流れ場の定量的な調査が必要であると考えられるものの、アクチュエータ作動時に誘起されるプラズマ流の振る舞いについて、まだ完全な解明には至っていない。したがってこのような背景のもと、プラズマ流を正確に再現できるような数値解析コードの整備を行うことは意義があると考えられる。

4. 研究成果

図1に示すように平板や翼面上に設置されたDBD-PAによって誘起される流れ場に対して数値解析モデルを提案し、その解析コードの開発を遂行した。放電場は、電場により電子温度が卓越した非平衡的な流れ場であることが予想されるため、熱化学的非平衡流に拡張したNavier-Stokes方程式とともに電場方程式解析を密に連成させることで、流れ場と放電場の相互作用を再現することが重要である。また翼周りの流体現象の時間スケールに比べ、電極近傍の放電現象の時間スケールは短いため、PA電極近傍の放電場を詳細に再現するモデルをそのまま本研究の流体解析モデルに適用することは難しい。DBD-PAを使った流体制御において重要なのは電場によって形成される力と考えられるので、適切なモデルを導入し効率的な解析モデルを提案した。さらに本解析モデルを、平板上のDBD-PAが誘起するプラズマ流れに適用した。平板上の

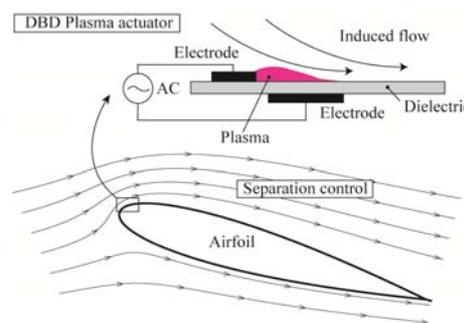


図1. DBD プラズマアクチュエータ

DBD-PA の振る舞いについてはこれまでいくつか実験結果が公開されており、数値解析結果と実験結果との比較を行うことで、モデルの検証と改善のサイクルを効率的に行うことができる。一方、実用的な対象として、パルス的に放電を行う DBD-PA バーストモードに注目し、本解析モデルの適用を図った。その対象として NACA 翼などの翼表面に DBD-PA を設置し、放電時にプラズマによって誘起される流れ場の振る舞いを調査した。

図 2, 3 は本プラズマ流解析モデルを用いて得られた NACA0015 翼周りの重粒子並進温度と電子温度の分布である。なお、電子温度は電極近傍の拡大図となっている。並進温度と電子温度の二つの分布は大きく異なっており、DBD-PA 作動時に強い熱的非平衡性が現れる可能性が示される。図 4 は、DBD-PA 作動時の NACA0015 前縁部における電気力の分布とベクトルを表している。また、図 5 は翼型 NACA0015 の表面圧力係数分布の実験値と解析値の比較である。前縁部近傍において表面圧力が交流電圧と同じ周波数で振動する様子が確認されており、電場の変化に対して流体が追従する様子が再現されている。

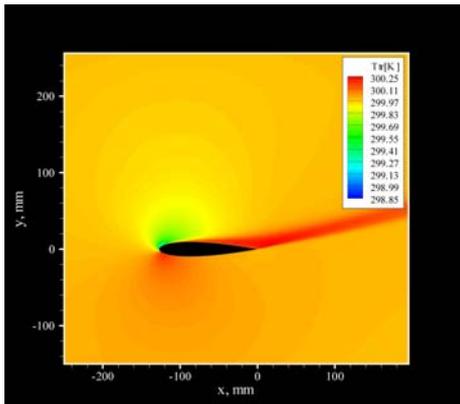


図 2. NACA0015 周りの並進温度分布

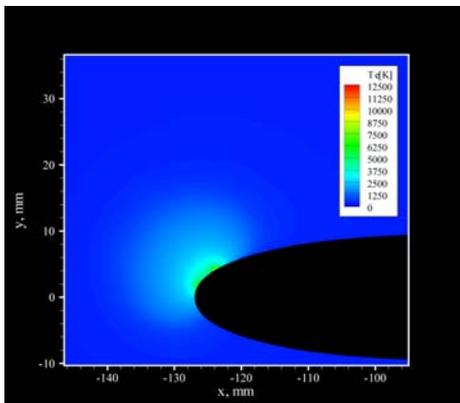


図 3. NACA0015 近傍の電子温度分布

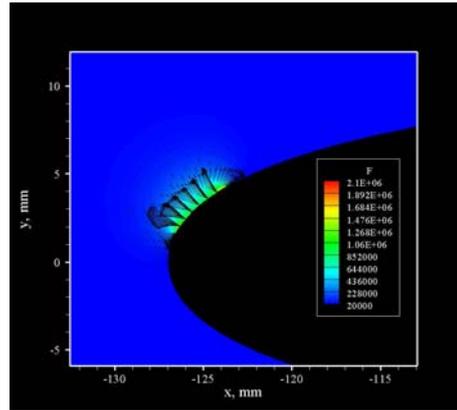


図 4. NACA0015 前縁部において DBD-PA によって誘起された電気力の分布と電気力のベクトル

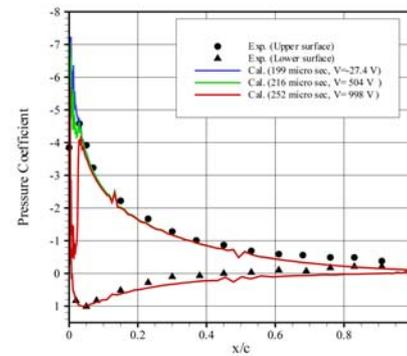


図 5. NACA0015 の表面圧力係数分布(解析結果と実験結果の比較)

また、DBD-PA の放電メカニズムにおいて、陰極から生じる電子の振る舞いや電圧降下などの電極シースによる影響が無視できないと考えられる。電極シースによる電圧降下は投入電力を評価する上で重要なファクタでもあり、プラズマ流解析モデルの精緻化を行う上でも、その導入は有効であると考えられる。ここではプラズマ流解析モデルの開発に並行して、放電場におけるカソードシースモデルが提案された。これは、タングステンなどの放電中に高温で動作する電極に対して、従来考慮されてきた熱電子放出や二次電子放出に加え、強い電場によって電子の放出が促される電場電子放出も考慮するものである。DBD-PA のような電極材料が銅などで、タングステンなどと比べ比較的低温で放電を生じる場合において、適用が可能であると期待される。

図 6 はここで提案されたシースモデルを用いて得られた、陰極近傍の電圧降下と電子温度のプロファイルである。

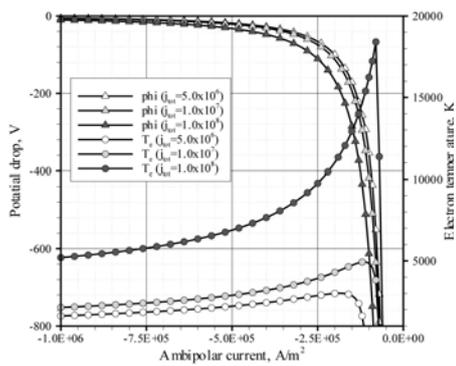


図6. 陰極シースにおける電圧降下と電子温度の両極性電流に対するプロファイル

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1件)

Yusuke Takahashi, Hisashi Kihara, Ken-ichi Abe, “Improvement of Potential Drop Predictions for Plasma Wind Tunnels by Cathode Sheath”, Journal of Thermophysics and Heat transfer, Vol. 26, pp.540-544, 2012.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 裕介 (Takahashi Yusuke)
北海道大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号：40611132