

能動的気流制御システムの開発

板倉嘉哉¹⁾* 渡邊孝輔²⁾ 平野泰博²⁾

¹⁾千葉大学教育学部 ²⁾千葉大学教育学部・元学部生

Development of Active Flow Control System with Plasma Actuator

ITAKURA Yoshiya¹⁾ WATANABE Kosuke²⁾ HIRANO Yasuhiro²⁾

Chiba University, Faculty of Education

中空円筒電極（陰極）内に先端の尖った棒状電極（陽極）を同軸配置した形式のコロナ放電によるプラズマアクチュエータ（CD-PA: Corona Discharge Plasma Actuator）を製作し、印加電圧及び陽極のオフセットが気流誘起性能に及ぼす影響を明らかにした。その結果と、筆者らがこれまでに明らかにしてきた、大量生産され安価に入手可能なオゾン発生器用高圧電源を使用した誘電体バリア放電によるプラズマアクチュエータ（DBD-PA: Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator）の気流誘起性能をエネルギー流束密度により比較し、その最適な適用範囲を明確にした。以上の知見を基に、電極の交換でDBD-PA、CD-PAのどちらでも駆動可能な、小型で高出力・高効率な能動的気流制御システムの開発を行なった。

キーワード：能動的気流制御（Active flow control） 誘電体バリア放電（Dielectric barrier discharge）
コロナ放電（Corona discharge） プラズマアクチュエータ（Plasma actuator）

1. 緒 論

今後、需要が2倍以上になることが予想される航空輸送において、排出されるCO₂やNO_x等の削減要求が強まっている。ICAO（国際民間航空機関）では、全世界の燃料効率の年2%改善、IATA（国際航空運送協会）では2050年までにCO₂排出量半減と言う数値目標が掲げられており、受動的及び能動的的方法による剥離制御や翼流れの層流化により摩擦抵抗を低減する技術の開発が進められている。

能動的気流制御デバイスとして注目されているものに、誘電体バリア放電を利用したプラズマアクチュエータ^{1), 2)}（以下DBD-PA: Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator）がある。DBD-PAとは、誘電体を挟むように設置された電極対に数kHz、数kVの交流電圧を印加することによりバリア放電が形成され、電極近傍の誘電体表面に平行な気流が誘起されるものである。構造が単純であり、機械的可動部分を有せず高速応答が可能等の利点から実機への応用が期待されている。DBD-PAの応用面からの研究例としては、翼面剥離制御に対する効果と翼面上のアクチュエータ設置位置の影響³⁾、印加電圧特性や気体種・気圧等の周囲環境による影響⁴⁾、三電極プラズマアクチュエータによる性能向上⁵⁾、二次元翼表面の乱流境界層の制御⁶⁾等が挙げられる。また、コロナ放電を利用した直流高電圧駆動によるプラズマアクチュエータ⁷⁾（以下CD-PA: Corona Discharge Plasma Actuator）も提案されており、大規模な高周波・高電圧電源を必要とせず装置全体の小型化が可能であることから、今後の発展が期待されている。一方、誘起さ

れる気流特性への酸素負イオンの影響⁸⁾やプラズマアクチュエータの数理モデルの提案⁹⁾等、気流誘起メカニズム解明に関する基礎的な研究も進められており、その実用化へ向けて着実に成果を上げている。

筆者らも、DBD-PAを機械的駆動部分を持たない送風装置として捉え、誘電体材質や電極構造が気流誘起特性に与える影響を解明し¹⁰⁾、大量生産され、安価に入手可能なオゾン発生器用高圧電源でドライブ可能な高出力、高効率かつ小型なDBD-PAの基本的な設計指針を示してきた¹¹⁾。また、密閉空間における気流制御への応用を念頭に、プラズマアクチュエータ設置の有効性を数値解析により検証してきた¹²⁾。本論文では、これまでに筆者らが実施してきたDBD-PAの性能評価に関する研究成果^{10), 11)}を基礎として、安価なオゾン発生器用高圧電源で駆動されるPAを能動的気流誘起システムとして再評価するとともに、小型直流高圧電源を使用したCD-PAを製作し、その性能を評価した。また、両アクチュエータの性能を誘起される気流のエネルギー流束密度により比較し、その最適な適用範囲を明確にした。以上の知見を基に、電極の交換でDBD-PA、CD-PAのどちらでも駆動可能な、小型で高出力・高効率な能動的気流制御システムの開発を行なった。

2. 実験装置の概要

2.1 DBD-PA実験装置

図1に実験で使用したDBD-PA実験装置全体の概要を示す。高周波・高電圧の生成には容易に入手可能で安価なオゾン発生器用高圧電源（ロジー電子、LHV-12AC）を使用し、印加電圧の調節には高圧電源への入力をスライドトランス（東京理工舎、RSA-1）で変化させた。また、

*連絡先著者：板倉嘉哉 y_ita@faculty.chiba-u.jp

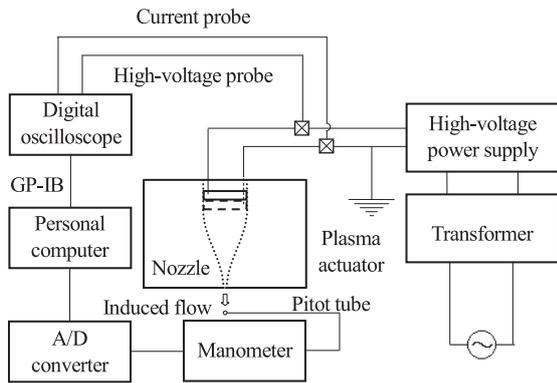


図1 DBD-PA実験装置

アクチュエータ電極への印加電圧及び放電電流の計測には、高電圧受動型プローブ (Tektronix, P6015A) 及び接地側回路に電磁的に結合した電流プローブ (Tektronix, P6021) を使用し、高速デジタルオシロスコープ (LeCroy, 9314CM) により記録した。また、誘起される流速はノズル矩形断面出口部 (2x2mm) に設置されたSUS304製ピトー管 (管内径0.8mm) により計測した。なお、アクチュエータにより誘起される気流は微速であるため、アクチュエータ上面に設置した滑らかな正弦曲線形状をした二次元ノズルで増速することにより計測精度を確保した。

本実験で使用したDBD-PAの断面構造を図2に示す。誘起された気流は、上面に設置したアクリル製二次元ノズルを通り出口へと導かれる。上部電極 (気流誘起側) には長さ40mm, 幅8mm, 厚さ95 μ mの銅箔テープ (Takachi, CUS-8T) を使用した。また、誘電体下側にも同じ銅箔テープ使用して下部電極 (接地側) としているが、上部電極側でのみ放電が生じるように、厚さ66 μ mのカプトンテープ (3M, 5413) により絶縁処理がなされている。

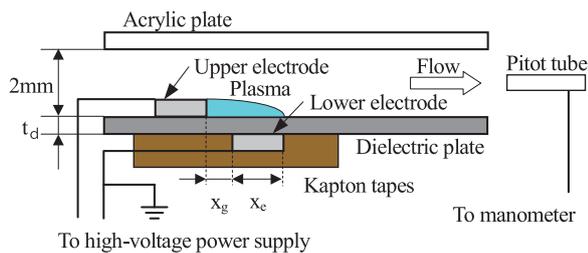


図2 DBD-PA電極部の構造

実験においては、厚さ $t_d = 1$ mm の誘電体を使用し、上部及び下部電極間の間隔 x_g を 0 mm に固定した電極を製作した。また、アクチュエータ性能を左右する電気的パラメータである誘電体材質 (誘電率)、下部電極幅 x_e 及び電極への印加電圧 V (p-p値) が気流誘起特性へ与える影響を調べるために、表1に示す条件を課し実験を実施した。なお、PTFEとはPolyTetraFluoroEthyleneのことであり、Du Pont社の商品名テフロンとして一般的に知られている。

表1 DBD-PA実験条件

Dielectric materials (Relative permittivity)	Alumina (9.7~10) Bakelite (5~6) Glass-epoxy (4~5) PTFE (2.05~2.1)
Lower electrode width, x_e	8, 13, 25 (mm)
Applied voltage, V	0 ~ 21 (kV _{p-p})

2.2 CD-PA実験装置

CD-PAで使用される電極としては、トゲ電極を平行平板電極で挟み込むタイプ¹³⁾等、種々の形式が提案されているが、今回の実験では先端の尖った棒状電極 (陽極) を中空円筒 (陰極) 内に同軸配置した形式のものを使用した。実験に使用したCD-PAの電極構造を図3に示す。陰極には長さ35mm, 内径10mm, 肉厚0.5mmの銅パイプを使用し、直径2mmの銅棒を同軸上に置き陽極とした。陽極先端部は半頂角15°の円錐形状をしており、陰極との間に不均一な電界が形成される構造になっている。電極間に数kVの直流高電圧を印加することにより、陽極先端部にコロナ放電が形成され、ビーフェルド-ブラウン効果 (Biefeld-Brown effect) により流れが誘起される。なお、電極への印加電圧及び放電電流、誘起される気流の計測及び記録方法は前述のDBD-PA実験装置と同じである。

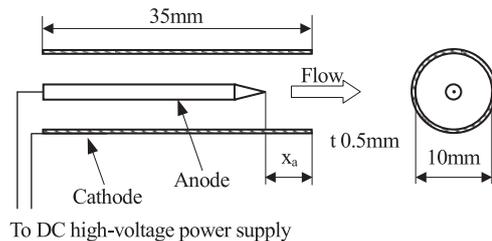


図3 CD-PA電極部の構造

実験では、陰極内径及び陽極先端部の形状は同一とし、陰極端から陽極先端までの距離 x_a と印加電圧 V_d を変化させ、気流誘起特性へ与える影響を調べた。CD-PAの性能評価における実験条件を表2に示す。

表2 CD-PA実験条件

Electrode material	Copper
Anode offset, x_a	0 ~ 10 (mm)
Applied voltage, V_d	4.7 ~ 6.4 (kV)

2.3 プラズマアクチュエータの性能評価

プラズマアクチュエータの性能は、入力 P_{in} (W)、出力 P_{out} (W) 及びその比として得られるエネルギー変換効率 η (%) により評価した。以下にその算出方法を述べる。

アクチュエータへの入力である投入電力は、デジタルオシロスコープにより時系列データとして記録された印加電圧 $v(t)$ (V) 及び放電電流 $i(t)$ (A) の瞬時値より、式(1)にて計算される。ここで T (sec) は周期である。なお、実際の計算においては積分を離散データの総和で置き換

えて入力を算出している。

$$P_{in} = 1/T \int_0^T v(t) i(t) dt \quad (1)$$

出力はアクチュエータにより単位時間に誘起される気流の運動エネルギーとして、ノズル出口に設置されたピトー管で計測された動圧より流速 u (m/s) を算出し、式 (2) で計算される。ここで、 ρ (kg/m³) は気流の密度、 A (m²) はノズル出口の断面積である。

$$P_{out} = 1/2 \rho A u^3 \quad (2)$$

3. 結果及び考察

3.1 DBD-PAの性能評価

DBD-PAの性能評価に関する本節では、DBD-PAとCD-PAの比較において重要となる実験結果を文献11から一部を引用している。DBD-PAの性能評価の詳細については、文献11を参照されたい。

3.1.1 誘電体材質の影響

図4は、下部電極幅 $x_e = 8$ mmにおける、4種の誘電体材質を使用した印加電圧に対する効率特性である。各誘電体とも効率は最大で0.0025%以下とかなり低い値を示しており、入力的大部分は光、熱、音、電離及び解離に消費されることになる。各材質とも、効率は印加電圧に対して極値を取り、印加電圧の上昇は必ずしも高効率には結びつかないことを示している。また、材質ごとの違いとしては、誘電率の高い材質ほど効率の最大値は低下するとともに、最大値を与える印加電圧も低くなるのがわかる。効率の最大値は誘電率の最も低いPTFEがAluminaより最大で約3倍となっている。

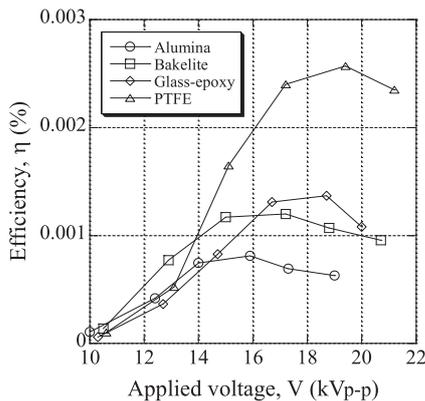


図4 印加電圧に対する効率特性 (下部電極幅 $x_e = 8$ mm)

誘電率の違いが効率へ与える影響は入力及び出力特性から説明することができる。図5に印加電圧に対する入力特性を示す。

入力は印加電圧の上昇に対し指数関数的に上昇しており、その上昇率は誘電率の高い材質ほど高くなっている。誘電率の近いBakeliteとGlass-epoxyでは印加電圧の変化に対し良く似た入力特性を示しているが、誘電率がPTFEの約5倍であるAluminaでは、印加電圧に対する

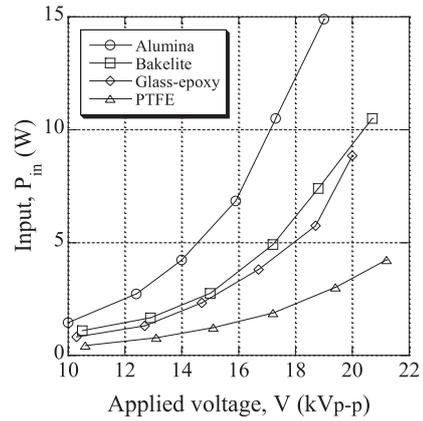


図5 印加電圧に対する入力特性 (下部電極幅 $x_e = 8$ mm)

入力の上昇は非常に急激であり、その値は最大でPTFEの6倍の約15Wにも達している。また、誘電率が最も低いPTFEでは、印加電圧の上昇に対し入力の増加は非常に緩やかであり、急激に上昇することは無い。巨視的に考えると、アクチュエータ電極は一種のキャパシタを形成しており、誘電率が低いPTFEは静電容量も小さく、分極により生じる誘電体表面の電子密度が低いため、同一の印加電圧においても放電電流は小さく、入力は低く抑えることができると考えられる。

図6は印加電圧20kV_{p-p}時の各誘電体における放電部の状態であり、Font²⁾の報告にある、上部電極(露出側)が負電位となるforward discharge時に観察されるグロー型と、正電位となるback discharge時の細糸状に進展するストリーマ型放電の特徴が捉えられている。誘電率の違いは誘電体表面に形成される導路の形状や発光強度にも現れている。誘電率が高い材質ほど、誘電体表面の帯電量も多く、発光強度の強い太い導路が形成されることになり、その電流密度も高いことがわかる。しかし、誘電率の低いPTFEでは、このような太い導路が形成されることは無い。

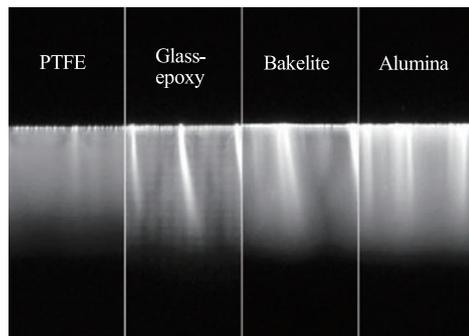


図6 各誘電体における20kV_{p-p}印加時の放電部の状態 (下部電極幅 $x_e = 8$ mm)

ピトー管で計測されたノズル出口部での動圧から出力を算出した結果が図7である。誘電率が高い材質ほど出力は大きくなるが、これは誘電率が高いほどforward discharge時に誘電体表面に付着する電子量が多くなり、周囲の中性粒子に運動量を与え気流を誘起するback dischargeで生成される酸素イオン密度を高めるためと考えられる。また、出力の印加電圧依存性はある電圧以上

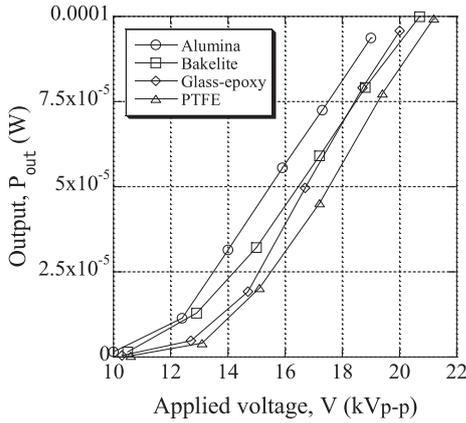


図7 印加電圧に対する出力特性 (下部電極幅 $x_e=8$ mm)

で線形に変化しており、その勾配は材質によらずほぼ一定になっているのがわかる。

以上の結果より、入力印加電圧の上昇に対し指数関数的に上昇し、誘電率の高い材質ほどその上昇率は高くなるが、出力は印加電圧に対し一次関数的に上昇するため、その比である効率は最大値を経て低下することになる。また、誘電率が低い材質ほど出力は小さいが、入力の急激な上昇を抑えることができるため、効率は高くなる。

3.1.2 下部電極幅延長の効果

誘電率の低い材質を使用するとforward discharge時に誘電体表面に蓄積される電子量が少なく、同じ印加電圧においても誘電率の高い材質よりも出力は低下することになる。しかし、誘電率の低いPTFEにおいても、下部電極幅を延長することにより、誘電体表面の電子蓄積面積は増加し、back discharge時の電子加速領域も拡がることにより出力の増大を期待することができる。そこで、下部電極幅 x_e を8, 13, 25mmに延長したアクチュエータを製作し実験を行った。

図8は、誘電体材質PTFE、下部電極幅8, 13, 25mmにおける印加電圧に対する出力特性である。下部電極幅8mmにおいては、印加電圧19kV_{p-p}以上で出力の増加率が鈍化し始めているのがわかる。ストリーマは下部電極幅以上には伸展できないため、印加電圧の上昇に対し出力は飽和するようになる。また、印加電圧が13kV_{p-p}以下では、ストリーマは伸展途上にあり電極幅延長による

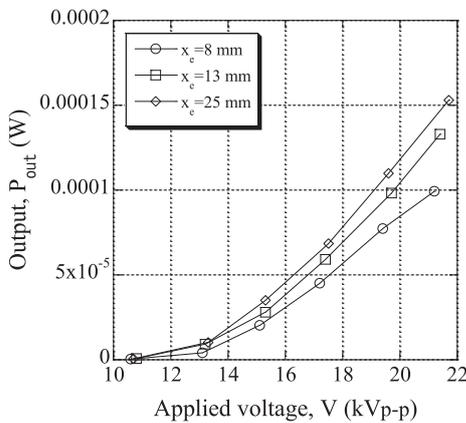


図8 印加電圧に対する出力特性 (誘電体材質PTFE)

効果は得られず、出力増加に有意な差を見ることはできない。しかし、それ以上の印加電圧において、下部電極幅13, 25mmでは、印加電圧の上昇に対し出力は飽和することなく増加傾向にあり、ストリーマの伸展により出力は最大で約1.5倍にも増大し、その効果を確認することができる。下部電極幅延長によるストリーマの伸展は、誘起される気体へ輸送される運動量を増大させ、出力の向上に有効であると言える。

図9は、誘電体材質PTFE、下部電極幅8, 13, 25mmにおける印加電圧に対する入力特性である。下部電極幅延長が入力に与える影響はほとんど無いと言える。下部電極幅の延長は誘電体表面の電子蓄積面積を増加させ、出力の増大をもたらすと仮定したが、それが正しければ放電電流は増加し入力も増大することになると考えられる。なぜ、このように下部電極幅の延長が入力には影響を与えず、出力のみ増大させるかは、非定常電界計算を実施することにより、電極近傍の静電エネルギー分布等からそのメカニズムを詳細に検証する必要がある。今後の検討課題である。

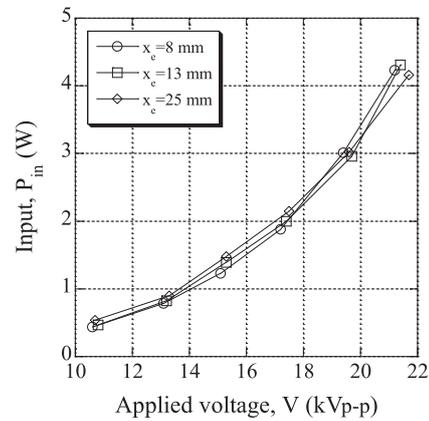


図9 印加電圧に対する入力特性 (誘電体材質PTFE)

図10はPTFEにおける入力及び出力測定結果から算出された効率特性であり、パラメータは下部電極幅である。下部電極幅の延長は、入力の増大を伴うことなく出力を増大させる効果があるため、同一印加電圧においてエネルギー変換効率は向上することになる。また、電極幅を延長することにより、効率が最大値を取る印加電圧も

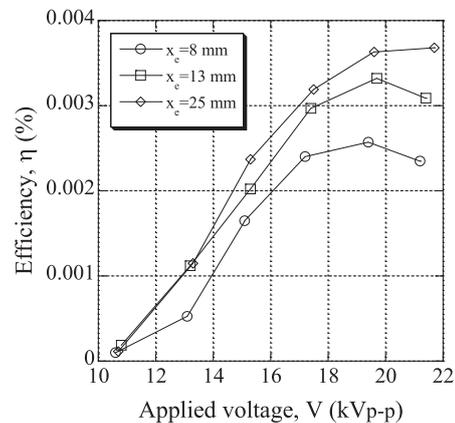


図10 印加電圧に対する効率特性 (誘電体材質PTFE)

高電位側へシフトしているのがわかる。

下部電極幅延長の効果を異なる視点から描いたのが図11であり、効率と出力の関係を示している。下部電極幅を延長しても出力がある範囲であれば、効率と出力の関係は同じ曲線を描いており、ストリーマの伸展途上では電極の延長幅に影響されず、出力に対しエネルギー変換比率が等しくなる領域が存在していることがわかる。しかし、出力の増加に対し電極幅が小さいものから効率は極値をとり低下することになる。また、効率が最大となる出力は下部電極幅が広がるほど高くなっている。このような、出力とともに効率も向上する性質は、アクチュエータの最適運転にとって望ましい特性であると言えるが、下部電極幅の延長は小型化とは相反するものとなる。

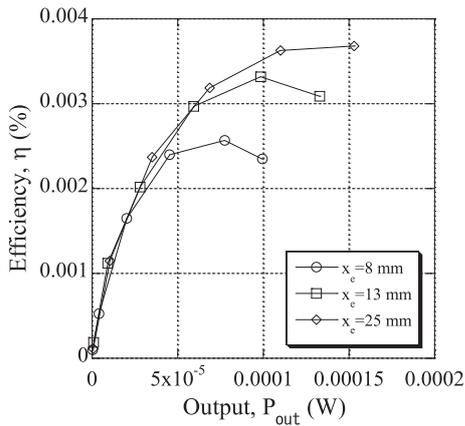


図11 出力に対する効率特性 (誘電体材質PTFE)

3.2 CD-PAの性能評価

CD-PAでは、陰極端から陽極先端までの距離 x_a (以下陽極オフセットと呼ぶ)を変化させ、その気流誘起性能を評価した。

図12はピトー管で計測されたノズル出口部での動圧から出力を算出したものである。全ての陽極オフセットにおいて、印加電圧の上昇に対し、出力も増加しており、印加電圧により誘起される気流の流速を制御できることを示している。印加電圧の上昇により電極間の電界が強まり、コロナ放電中のイオンがさらに加速され、中性粒子との運動量交換が増大することにより、誘起される気流の流速も増加するためと考えられる。また、陽極オフセットが0～

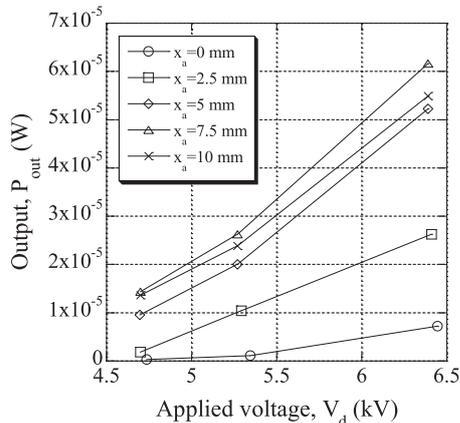


図12 印加電圧に対する出力特性

7.5mmまでの変化に対しては、全印加電圧において出力は増大しているが、10mmでは7.5mmにおける出力よりも低下することになる。陽極オフセットの増加は放電領域を拡大し出力の増大に有効であるが、その値には陰極部内径や陽極直径に依存した最適値が存在すると考えられる。

図13は印加電圧4.7, 5.3, 6.4kVにおける、陽極オフセットに対する出力の変化を示している。出力は陽極オフセットに対し極値を取り、出力が最大となる陽極オフセット値は印加電圧に依存せず、7.5mm近傍にあると考えられる。今回の実験からは、陽極オフセットの最適値が存在することは確認できたが、その値が何により決まるのかは未解明である。今後の研究課題である。

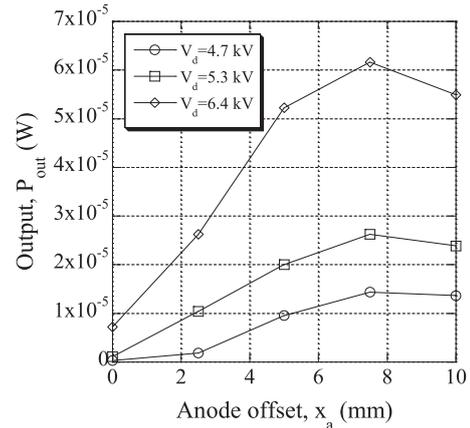


図13 陽極オフセットに対する出力特性

図14に印加電圧に対する入力特性を示す。全ての陽極オフセットに対し、電極への入力印加電圧の上昇とともに増加しているが、その値は最大でも0.15W以下と非常に小さい。また、陽極オフセットが増加すると入力も増大するが、5 mm以上においては、あまり大きな変化は見られず、7.5mmと10mmにおいてグラフはほぼ重なっている。陽極オフセットの増加により、放電の自続に必要な電流も増大するが、ある陽極オフセット値以上では必要入力が必要となることを示唆している。

CD-PAのコロナ放電によって流れる電流は数 μ A程度と小さく、印加電圧が数kVであっても、電極へ供給される電力は約 10^{-1} W程度である。単純に比較することはできないが、前述した同規模のDBD-PAの入力である $10 \sim 10^2$ Wの1/100以下である。

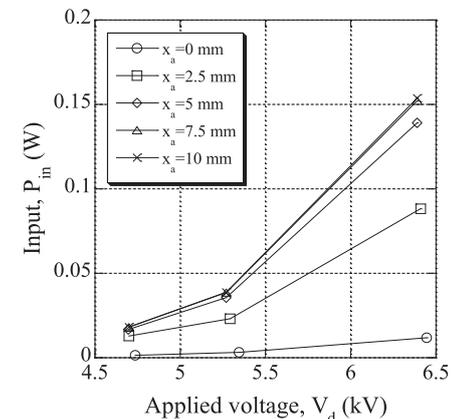


図14 印加電圧に対する入力特性

実験で得た入力と出力の比を百分率で表示したエネルギー変換効率を図15に示す。陽極オフセット5mm以上では、印加電圧の上昇に対し、効率は低下する特性を示している。しかし、陽極オフセット0mmにおいては、印加電圧の上昇に対し、効率は増加しており、全く異なる特性を示している。これは、図12及び図14から説明することができる。陽極オフセット5mm以上の電極では、印加電圧に対して入力は急激に増加することになるが、出力は印加電圧に対して入力ほど急激には増加しないため、その比である効率は低下することになる。しかし、陽極オフセット0mmにおける入力の増大は陽極オフセット5mm以上の電極に比較して非常に緩やかであるため、効率は印加電圧の上昇に対して増加することになる。

出力が小さく実用性の乏しい陽極オフセット0mmを除外すれば、出力が最大である陽極オフセット7.5mmのものが最も効率が良い電極形状となった。今回、実験で製作した陰極部内径10mm、陽極直径2mmの電極においては、陰極端から陽極先端を7.5mmオフセットして取り付けることにより、高出力かつ高効率なCD-PAが構築できることになる。

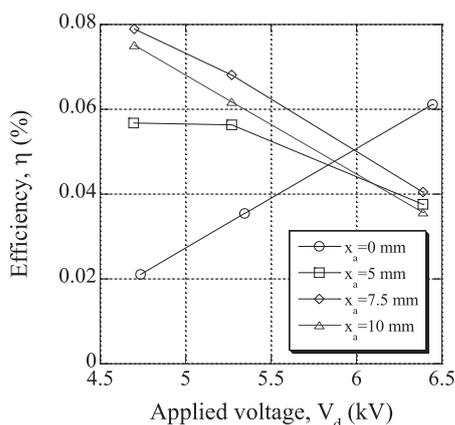


図15 印加電圧に対する効率特性

3.3 DBD-PAとCD-PAの性能比較

DBD-PAとCD-PAの性能は装置のスケールに依存する出力では比較できないため、出力をノズル出口面積で除したエネルギー流束密度 ϕ (W/m²) によりその性能を比較する。

図16は入力に対するエネルギー流束密度特性を描いたものである。DBD-PAには誘電体材質に効率が最も良いPTFEを使用し、出力が最大となる下部電極幅25mmで製作したものを、CD-PAには効率、出力ともに最大となる陽極オフセット7.5mmで製作したプラズマアクチュエータを使用した。両プラズマアクチュエータともに入力の増加に対して、誘起される気流のエネルギー流束密度が増大し、ほぼ同じオーダーのエネルギー流束密度領域で稼動していることがわかる。しかし、その入力の値には大きな開きがあり、CD-PAはDBD-PAの約1/100の入力で同じエネルギー流束密度を発生させることが可能である。CD-PAの場合、消費電力が低いことにより、バッテリー等での駆動が可能であり、可搬型の気流制御システムを構成することが可能となる。しかしその構造上、

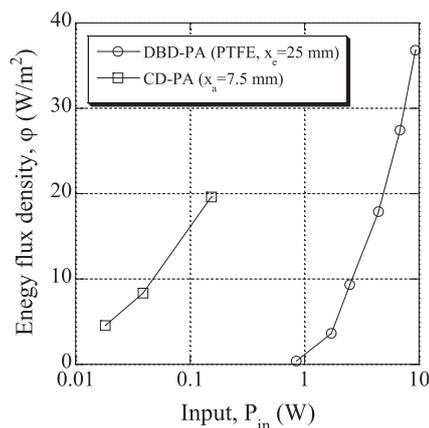


図16 入力に対するエネルギー流束密度特性

電極への印加電圧がある値以上になるとコロナ放電から火花放電に遷移するため、入力には限界があり、エネルギー流束密度は制限され、大出力に対応することができない。一方、DBD-PAは誘電体の絶縁破壊限度までは入力を増加させることが可能であり、大出力にも対応可能である。よって、DBD-PAは大規模な空間の気流制御が可能であるが、電源を含む装置全体が大きくなるため、据置型の気流制御システムに向いているといえる。気流制御を必要とする空間の大・小、商用電源の利用できない場所での気流制御等、使用する環境に合わせてDBD-PAもしくはCD-PAを適切に選択することになる。

4. 能動的気流制御システムの開発

これまでの研究成果を基に、プラズマアクチュエータによる閉空間における能動的気流制御システムを開発する。その備えるべき性能としては、以下の6点が挙げられる。

- (1) 装置全体は小型・軽量であり、設置場所をとらないこと。
- (2) 特に送風部は小型で、既存のケース等にも大幅な改修工事をすることなく、容易に設置可能であること。
- (3) 送風量は容易に設定することができ、能動的に制御可能であること。
- (4) 消費電力が低く、バッテリー駆動にも対応できる可搬性を有することが望ましい。
- (5) ファンの回転等の機械的駆動部分を持たず、静粛性能に優れていること。
- (6) 電極の交換が可能であり、DBD-PAとCD-PAのどちらにも対応可能であること。

これらの要求を踏まえ、開発した能動的気流制御システムを図17に示す。装置全体は送風部と電源部から構成される。送風部はCD-PAとDBD-PAで共通の筐体を使用しているが、目的により電極の交換が可能な構造になっている。また、その形状は幅65mm、高さ35mm、長さ100mm、質量は122gと小型・軽量であり、設置場所を選ばない大きさである。図(17-A)に示すCD-PAの直流高電圧電源はACアダプタもしくはバッテリーで駆動可

能であり、形状は幅70mm、高さ20mm、奥行き70mm、質量はACアダプタを含めて262gである。また、電極への印加電圧は3段階に調整可能であり、送風量を制御することができる。装置全体としても約400gであり、バッテリー駆動も可能なことから、可搬性能に優れた能動的気流制御システムである。図(17-B)のDBD-PAによる能動的気流制御システムの電源部は、商用電源での使用を想定しており、その大きさは幅270mm、高さ170mm、奥行き200mm、質量は4.5kgである。放電部へ供給する高周波電力は $10\sim 10^2\text{W}$ と大きいため、電源部が大型となることは避けられない。また、電極への印加電圧はスライドトランスで調整可能であり、小風量から大風量までを無段階に制御することができる。



(17-A) CD-PA 装置全体



(17-B) DBD-PA 装置全体

図17 能動的気流制御システム

図18にCD-PA用電極装着時の送風部の内部構造を示す。電極部はクラスターロケットを模した、単一電極を3本束ねた構造になっており、送風量を増大させている。

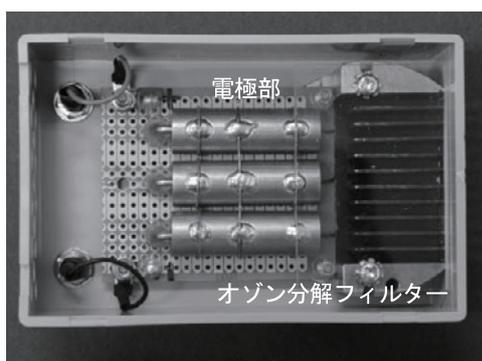


図18 送風部の内部構造

各電極は、運転時の出力とエネルギー変換効率が最も良い陽極オフセットを7.5mmとして製作されている。また、放電により誘起される気流には微量ではあるがオゾンが含まれるため、オゾン分解フィルターを通してから送風口へ供給される。

前述したように、電源部と送風部の電極を交換することにより、CD-PA、DBD-PAのどちらでも運転が可能になっている。DBD-PA用の交換電極を図19に示す。誘電体にはエネルギー変換効率が最大となるPTFEを使用し、写真からは裏側になり確認できないが、下部電極は高出力で効率が最も良い電極幅25mmで製作されている。また、DBD-PAで誘起される気流においてもオゾンが微量に含まれるため、オゾン分解フィルターは必要となる。

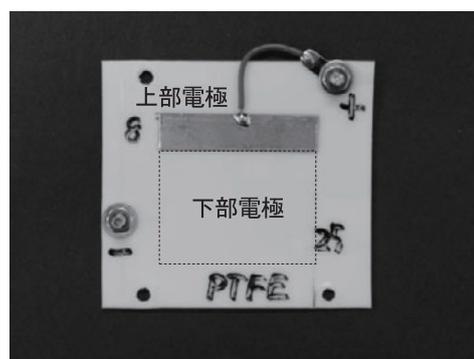


図19 DBD-PA用電極

図20はCD-PAによる送風運転時の様子である。放電部への入力是最小であるが、火力の強い和燭の火炎を吹消すほどの風量がある。また、ファン駆動の送風装置のような風切り音やモータ音を発することも無く、静粛性能にも優れている。開発されたプラズマアクチュエータを使用する本装置は要求される6項目を全て満足しており、能動的気流制御システムとして有効に機能することを確認した。



図20 CD-PA運転時

5. 結論

中空円筒電極(陰極)内に先端の尖った棒状電極(陽極)を同軸配置した形式のコロナ放電によるCD-PAを製作し、印加電圧及び陽極のオフセットが気流誘起性能に及ぼす影響を明らかにした。その結果と、筆者らがこれまでに明らかにしてきたDBD-PAの気流誘起性能をエネルギー

ギ流束密度により比較することにより、その適用範囲を明確にした。また、それらの研究成果を基に、電極の交換でDBD-PA, CD-PAのどちらでも駆動可能な、小型で高出力・高効率な能動的な気流制御システムの開発を行なった。本研究で得られた成果を以下に示す。

- (1) 同軸構造の電極を用いたCD-PAの高出力化において、陽極オフセットには最適値が存在し、今回の実験で使用した電極形状では、出力が最大となる陽極オフセットは7.5mmであった。
- (2) CD-PAはDBD-PAに比較して、1/100の低電力で駆動することができ、バッテリーによる可搬型気流制御システムを構成することが可能である。
- (3) CD-PAでは、単一電極による大出力化には限界があるが、複数の電極を束ねて使用する事により大風量化が可能である。
- (4) CD-PA及びDBD-PAの気流誘起性能を基に最適な構造の電極を設計・製作し、両者で運転可能な能動的気流制御システムを開発した。

謝 辞

本研究は、日本学術振興会の科学研究費補助金（基盤研究（C）25350392）の支援により実施された。

参考文献

- 1) C. L. Enlon, T. E. McLaughlin, et al., "Mechanisms of a Single Dielectric Barrier Plasma Actuator: Geometric Effects", AIAA Journal 42, No.3(2004), pp.595-604
- 2) G. I. Font, W. L. Morgan, "Recent Progress in Dielectric Barrier Discharge for Aerodynamic Flow Control", Contrib. Plasma Phys.47, No.1-2 (2007), pp.103-110.
- 3) 椿野大輔, 田中義輝 他, "プラズマアクチュエータを用いた翼前縁はく離の制御における位置および個数

の影響", 機論 (B編), 73-727 (2007), pp.15-21.

- 4) Takashi Abe, Yuji Takizawa, and Shuichi Sato, "A Parametric Experimental Study for Momentum Transfer by Plasma Actuator", AIAA Paper 2007-187.
- 5) 川口幹祐, 松野隆, 山田剛治, 川添博光, "三電極プラズマアクチュエータの誘起噴流特性", 第43回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム2011講演集, pp.122-126.
- 6) 松野隆, 石黒右恭, 池田幸一 他, "プラズマアクチュエータを用いた乱流境界層速度分布制御", 第47回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム2015講演集, JSASS-2015-2063.
- 7) E. Moreau, L. Leger, G. Touchard, "Effect of a DC Surface Non-thermal Plasma on a Flat Plate Boundary layer for Airflow up to 25m/s", Journal of Electrostatics, 64(2006), pp.215-225.
- 8) J. P. Boeuf, Y. Lagmich, Th. Callegari, et al., "EHD Force in Dielectric Barrier Discharges Parametric Study and Influence of Negative Ions", AIAA Paper 2007-183.
- 9) 西田浩之, 安部隆士, "プラズマアクチュエータにおける放電プラズマのシミュレーションとモデルの検証", 第43回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム2011講演集, pp.227-230.
- 10) 板倉嘉哉, 渡邊孝輔, 平野泰博, "能動的気流制御におけるプラズマアクチュエータの性能評価", 数理科学会論文集, Vol.13, No.2 (2012), pp.23-28.
- 11) 板倉嘉哉, 平野泰博, "プラズマアクチュエータの性能に及ぼす印加電圧波形の影響", 数理科学会論文集, Vol.16, No.1 (2015), 印刷中.
- 12) 古関純香, 櫻井由毅, 板倉嘉哉, "密閉空間における湿度制御に関する数値解析", 第33回数理学講演会論文集 (2014), A-103.
- 13) 片谷篤史, 水野彰, "平行平板によるイオン風の発生技術", 静電気学会誌, 34, 4 (2010), pp.187-192.