

安価なオゾン発生用高圧電源を用いたプラズマアクチュエータの性能評価

板倉嘉哉[†], 平野泰博
千葉大学教育学部

Efficiency Evaluation of Plasma Actuator Using a Low-price High Voltage Power Supply for Ozonizer

by

Yoshiya ITAKURA and Yasuhiro HIRANO (Chiba University, Faculty of Education)

ABSTRACT

DBD (Dielectric Barrier Discharge) plasma actuator is a promising technology on active control of the flow separation. In the present work, performance of the plasma actuator using a low-price high voltage power supply for ozonizer is experimentally investigated for a variety of parameters including dielectric material, width of the lower electrode, and wave form of applied voltage for plasma actuator. It is found that: (1) as for dielectric materials, the efficiency of PTFE (PolyTetraFluoroEthylene) is three times higher than alumina (aluminum oxide); (2) the extension of the lower electrode leads to increase in output without saturation. (3) the voltage waveform of high voltage power supply for ozonizer is not necessarily suitable for plasma actuator owing to insufficient voltage drop during forward discharge.

1. 緒言

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 CO_2 や NO_x 等の削減要求が強まっており、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 CO_2 排出量半減と言う数値目標を掲げている¹⁾。航空機の CO_2 排出量削減における空気力学的課題としては摩擦抵抗の低減があり、受動的及び能動的方法による層流化や剥離制御技術の開発が求められている。

このような状況の中、能動的気流制御技術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²⁾がある。プラズマアクチュエータとは、誘電体を挟むように設置された電極対に高周波・高電圧を印加することにより、電極近傍で誘電体表面に平行な気流が誘起されるものであり、境界層の剥離制御等への応用が期待されている。最近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⁾、印加電圧波形や気体種・気圧等の周囲環境による影響⁴⁾、誘起流れ流速の測定⁵⁾、三電極プラズマアクチュエータによる性能向上⁶⁾等が挙げられる。一方、気流誘起メカニズムへの酸素負イオンの影響⁷⁾やアクチュエータの数理モデルの提案⁸⁾等、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。

プラズマアクチュエータの構成は高圧電源とアクチュエータ電極のみのシンプルなものであるが、高圧電源は数百万円と非常に高価であり、研究着手へのハードルとなっていることは否めない。そこで本報告では、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利用したプラズマアクチュエータの性能を明らかにすることにより、初期投資を抑えた実験装置構築の可能性について検討した。

2. 実験の概要

2.1 実験装置

図 1 に実験で使用した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用高圧電源 (ロジエ電子, 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、印加電圧波形の影響を検討するために、高電圧電力増幅器 (松定, HEOPT-10B10) 及びファンクションジェネレータ (NF, WF1946) も高周波-高電圧の生成に使用した。高圧電源装置については 2.3 節でその詳細を述べる。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 (2x2 mm) に設置された SUS 製ピトー管 (内径 0.8 mm) 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。

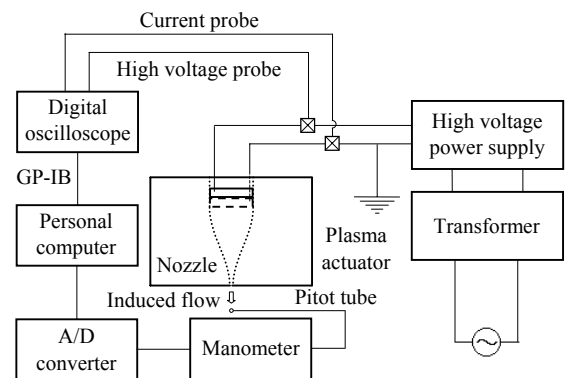


Fig. 1 Experimental set-up.

本実験で使用したアクチュエータの断面構造を図 2 に示す。誘起された気流は、上面に設置したアクリル製 2 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 μm 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 μm のカプトンテープ (3M, 5413) により絶縁処理がなされている。

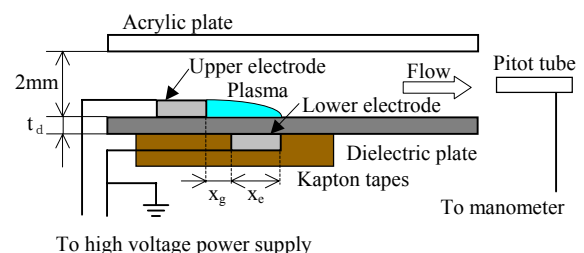


Fig. 2 Details of plasma actuator.

[†] 千葉大学教育学部, 〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33

実験においては、厚さ $t_d=1\text{mm}$ の誘電体を使用し、上部及び下部電極間の間隔 x_g を 0mm 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氣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 に示す条件を課した実験を実施した。なお、PTFEとはPolyTetraFluoroEthyleneのことであり、商品名テフロンとして一般的に知られている。

Table 1 Experimental conditions.

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 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 $v(t)$ 及び放電電流 $i(t)$ の瞬時値より、式(1)にて計算される。ここで T 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 を算出し、式(2)で計算される。ここで、 ρ は気流の密度、 A はノズル出口の断面積である。

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

2.3 高周波-高電圧電源

本報告の目的は、安価なオゾン発生器用高圧電源（LHV-12AC）を使用したプラズマアクチュエータの性能を明らかにするとともに、その電源で生成される電圧波形がプラズマアクチュエータの駆動に適したものかを検証することである。そこで、高電圧電力増幅器（HEOPT-10B10）をファンクションジェネレータ（WF1946）でドライブした任意波形が生成可能な高圧電源も用意し、実験に使用した。それぞれの主要諸元を表 2 に示す。

Table 2 Specification of high voltage power supply.

	LHV-12AC	HEOPT-10B10
Waveform	Fixed	Arbitrary
Slew rate (V/ μ s)	2200	360
Frequency response (kHz)	5 ~ 6	~ 10
Output voltage (kV)	~ 9	~ 10
Output current (mA)	~ 40	~ 10
Weight (kg)	0.65	23

オゾン発生器用高圧電源の特徴としては、小型、軽量であるが大きな出力電流が取り出せ、バッテリー駆動により試験用小型飛行模型機等への搭載も可能であると考えられる。しかし、生成される高周波電圧の波形及び周波数は固定されており、各種電氣的パラメータを変化させた基礎的な実験に使用するには不向きである。参考として、図 3 に

LHV-12AC により生成される高周波電圧波形を示す。その特徴としては、電圧の立ち上がりが非常に速く、スルーレートは実測値で最大 $2.2\text{kV}/\mu\text{s}$ と高速動作が可能である。生成される最大電圧は、公表されているデータで 9kV とあるが、実測値では正側が 15kV 、負側は -6kV であり、約 21kV_{p-p} が生成可能であった。また、その周波数は供試アクチュエータ電極のインピーダンスにより僅かに変化するが、本実験での発振周波数は約 8.6kHz であった。

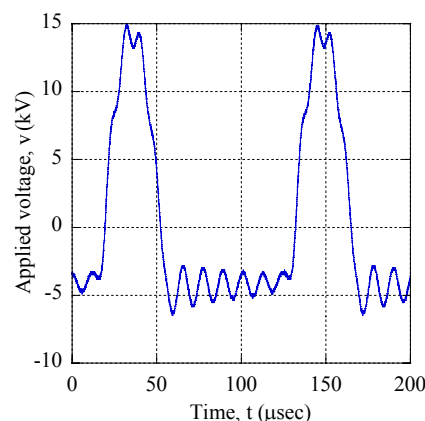


Fig. 3 Typical voltage waveform generated by LHV-12AC.

3. 結果及び考察

3.1 誘電体材質の影響

図 4 は、下部電極幅 $x_e=8\text{mm}$ 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 $0.00075\sim 0.0025\%$ 程度とかなり低い値を示しており、入力の大部分は光、熱、音、電離及び解離反応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ことがわかる。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倍高い値になっている。

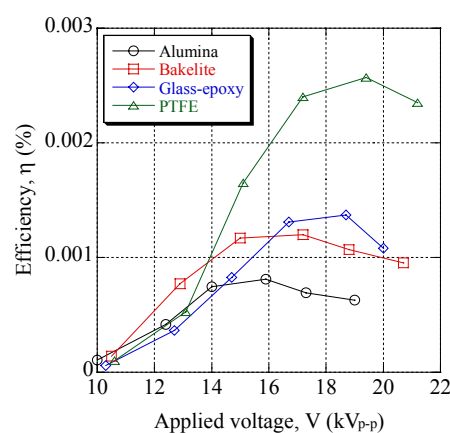


Fig. 4 Efficiency characteristics.

誘電率の違いが効率へ与える影響は入力・出力特性及び放電電流の波形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が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。

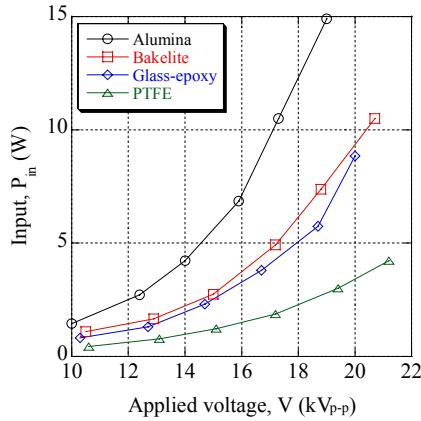


Fig. 5 Input characteristics.

図 6-A~D は、誘電体材質 PTFE, Glass-epoxy, Bakelite 及び Alumina における、17kVp-p 印加時の放電電圧 (青線) と放電電流 (赤線) の時間変化を示したものである。誘電体バリア放電では、誘電体表面で導電路の生成・消滅が繰り返され、プラズマ内の電子が正電極に吸い込まれる際、数 nsec 程度のパルス状の電流が流れることになる。

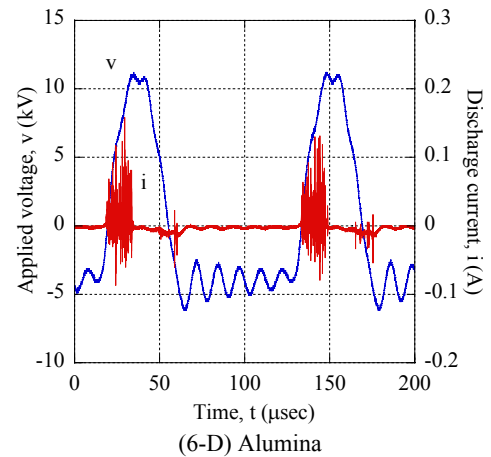
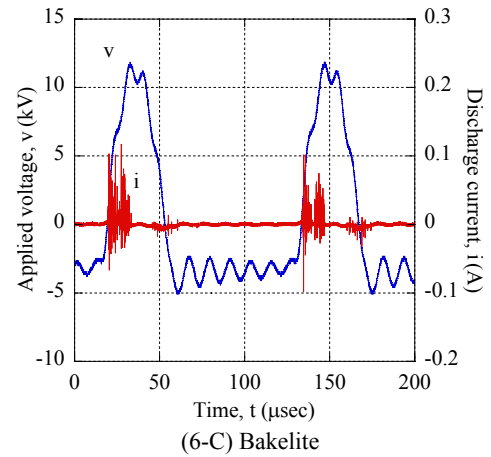
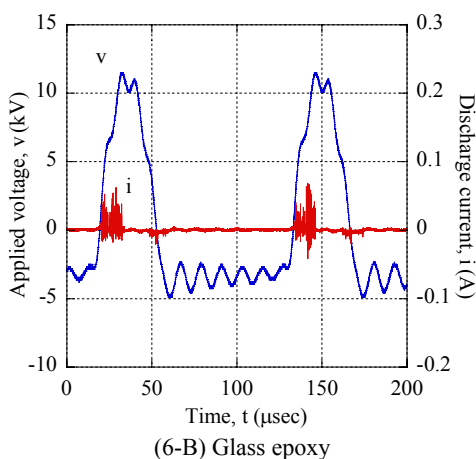
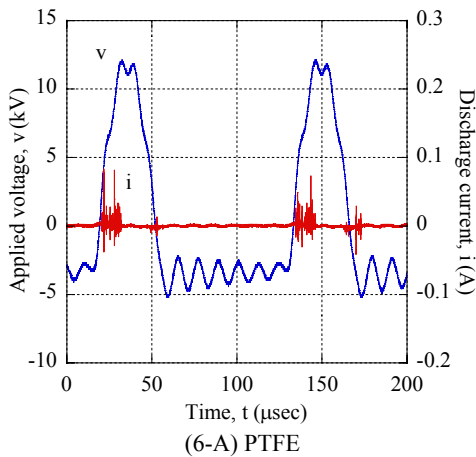


Fig. 6 Applied voltage and discharge current.



電圧波形は誘電率により大きく変化することは無いが、電流は誘電率の高い材質ほど、パルス状電流の波高値が上昇するとともに、その頻度も密になっており、前述した入力増大を裏付けている。誘電率の高い材質ほど、上部電極が負極となる放電時に誘電体表面の帯電量が多くなるため、このような電流特性を示すことになる。

図 7 は印加電圧 20kVp-p 時の各誘電体における放電部の状態であり、Font⁹⁾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電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電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、このような太い導電路が形成されることは無い。

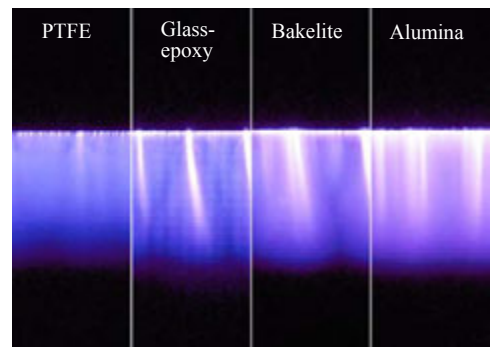


Fig. 7 Over-head photos of discharge region.

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 8 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。

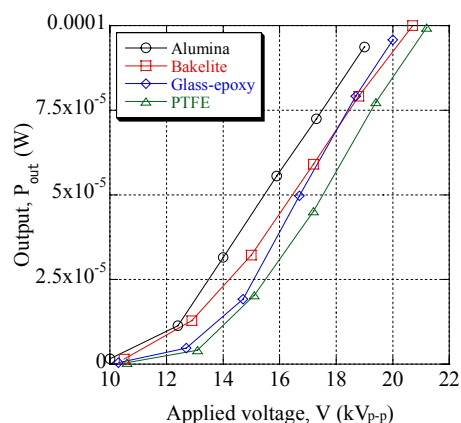


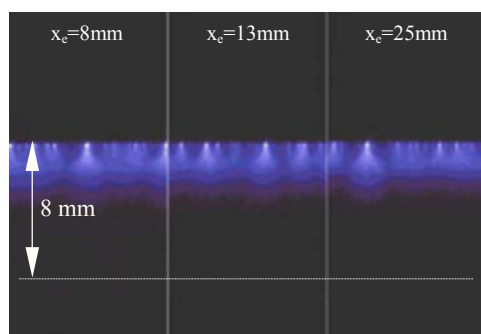
Fig. 8 Output characteristics.

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。

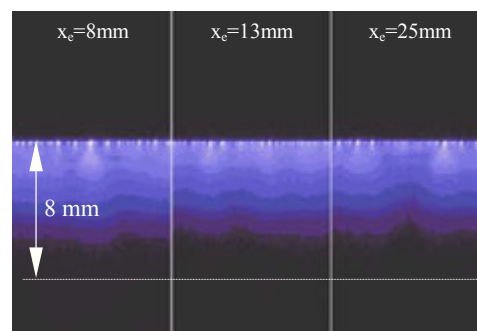
3.2 下部電極幅延長の効果

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広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_c 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。

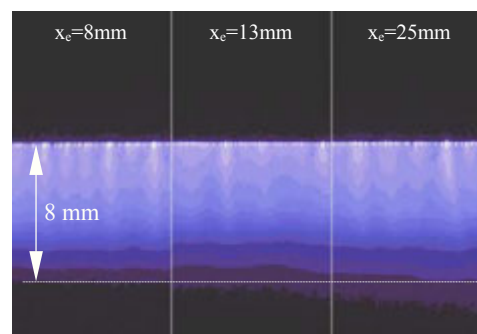
図 9 は、誘電体材質 PTFE、下部電極幅 8, 13, 25mm における放電部の状態を 16 階調化処理し、発光部の輪郭を強調した写真である。印加電圧 10 及び 15kVp-p においては、下部電極幅によらず放電領域は同じ範囲にとどまっており、ストリーマの進展を目視では確認することはできない。20kVp-p 印加時は、電極幅 8mm ではストリーマが下部電極幅全域にまで拡がり、それ以上進展できない状態であるが、電極幅を 13 及び 25mm に延長すると、僅かにではあるが下流側へのストリーマの伸展を確認することができる。



(9-A) 10 kVp-p



(9-B) 15 kVp-p



(9-C) 20 kVp-p

Fig. 9 Over-head photos of discharge region.

図 10 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 19kVp-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進展できないため、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 13kVp-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。

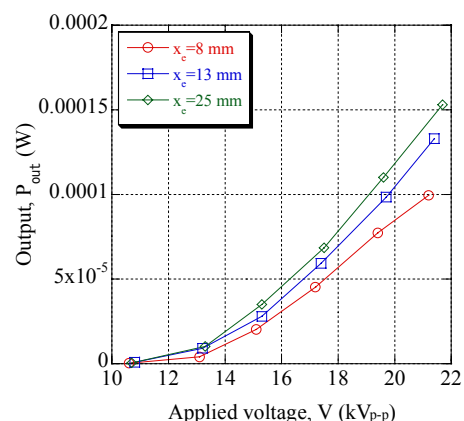


Fig. 10 Output characteristics.

図 11 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。

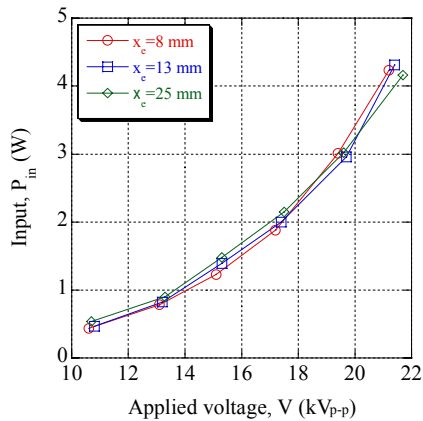


Fig. 11 Input characteristics.

図 12 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高電位側へシフトしているのがわかる。

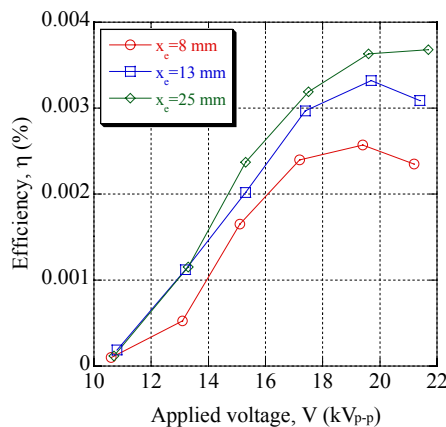


Fig. 12 Efficiency characteristics.

下部電極幅延長の効果を異なる視点から描いたのが図 13 であり、効率と出力の関係を示している。

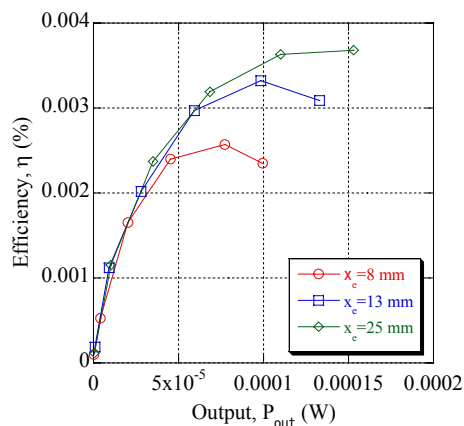


Fig. 13 Efficiency vs output characteristics.

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。

3.3 印加電圧波形の影響

3.1~3.2 節では、安価なオゾン発生器用電源を使用したプラズマアクチュエータの各種特性を解明してきた。しかし、その特性はあくまでも図 3 の印加電圧波形によるものであり、必ずしもアクチュエータの駆動に最適な電圧波形であるとは言えない。そこで、本節ではオゾン発生器用電源により生成される波形の、アクチュエータ駆動における有効性について検証する。

図 14 に実験に使用した 3 種の印加電圧波形の例を示す。図中の赤線の波形はオゾン発生器用電源 (LHV-12AC) によるものであり、青線はその波形と同一周波数 (8.6kHz) で正及び負側の波高値が同じになるように波形全体を正側へ偏移させた正弦波 (Offset sinusoid) を示している。また、緑線の波形は周波数及び正側の波高値が同じとなる、通常正弦波 (Sinusoid) である。

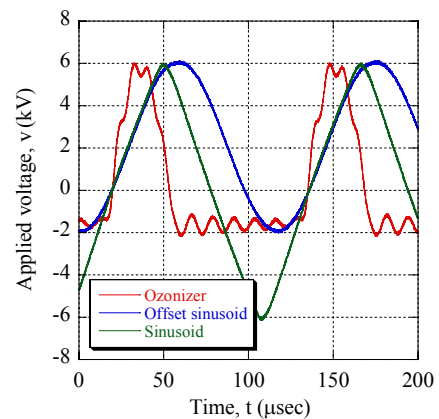


Fig. 14 Applied voltage waveform.

図 15 は、前述した 3 種類の電圧波形を使用し、誘電体材質 PTFE、下部電極幅 8mm における、印加電圧に対するノズル出口部で測定された流速 u の関係を示す。なお、横軸の印加電圧は正側の波高値 (kV_p) で示している。

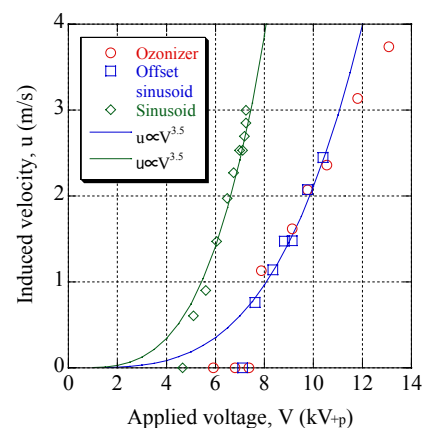


Fig. 15 Induced velocity characteristics.

どのような印加電圧波形においても、電圧の上昇に対し誘起される流速も上昇することには変わりはないが、その電圧依存性は電気的特性が良く似たオゾン発生器用電源波形と偏移正弦波では、 10kV_{p} 以下ではほぼ同じ特性を示している。しかし、正弦波を印加した時の誘起流速特性は大きく異なり、オゾン発生器用電源使用時の約 70%の印加電圧で同じ流速を得ることが可能であり、プラズマアクチュエータにより誘起される流速は、印加電圧波形に強く依存することを示している。同じ形態のプラズマアクチュエータに関するEnlon¹⁰⁾の実験では $u \propto V^{3.5}$ となることが報告されている。正弦波及び偏移正弦波を印加することにより得られた流速も、印加電圧の低い部分で 3.5 乗の曲線から外れるが、ほぼ同様な印加電圧依存性を示している。しかし、オゾン発生器用電源による電圧波形では、印加電圧が高くなるほど 3.5 乗則からのずれが著しくなっており、その波形に何らかの本質的な問題が有るのではないかと考えられる。

誘起流速から出力を算出した結果が図 16 である。誘起速度特性と同じく、オゾン発生器用電源波形と偏移正弦波を印加した時は同じ出力特性を示しているが、正弦波を印加した時の出力特性とは大きく異なっている。正弦波の方が低い印加電圧で大きな出力が発生しており、オゾン発生器用電源波形及び偏移正弦波印加時の約 70%程度の電圧で同じ出力が得られている。この印加電圧波形による出力の違いは、以下のように説明することができる。back discharge ではどの波形においても正側の波高値は同じであり、誘電体面上に形成される電界の構造に大きな差は無い。しかし、forward discharge では、オゾン発生器用電源波形及び偏移正弦波印加時に上部電極の負電位は十分に低下しないため、forward discharge 終了時においても誘電体表面の電子密度は低い状態であると考えられる。すなわち、back discharge 時に供給できる電子量が少なく、中性粒子のイオン化が十分に生じないため、大きな出力を得ることができないと考えられる。オゾン発生器用電源は、必ずしもプラズマアクチュエータ駆動用電源として最適ではないと言える。

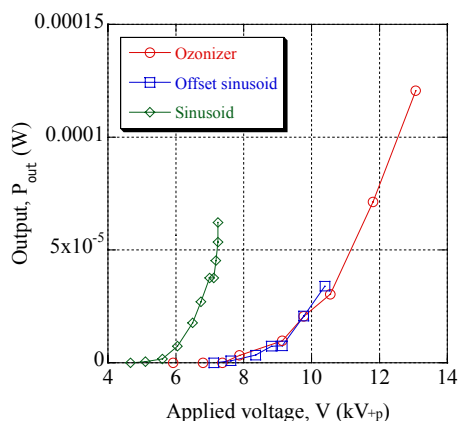


Fig. 16 Output characteristics.

図 17 は印加電圧 6kV_{p} における放電部の状態である。印加電圧波形の違いが、導電路の形状や発光強度にも現れており、back discharge で生成されるイオン密度に大きな違いがあることを目視で確認することができる。



Fig. 17 Over-head photos of discharge region ($V=6\text{kV}_{\text{p}}$).

4. 結言

安価なオゾン発生器用高压電源と 4 種の誘電体の組合せによるプラズマアクチュエータを構築し、各種パラメータがその性能に及ぼす影響を明らかにした。また、オゾン発生器用電源により生成される電圧波形がアクチュエータ駆動に適したもののかについても検討した。本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 誘電率が入力へ与える影響は大きく、誘電率が高いほど入力が大きくなり効率は低下する。プラズマアクチュエータの小型化には誘電率の低い材料の選択が有利である。
- (2) 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り、効率の向上が可能である。しかし電極幅の延長は小型化とは相反することになる。
- (3) オゾン発生器用高压電源により生成される電圧波形では、forward discharge 時に十分な電圧低下が得られないため、正弦波印加時よりも出力は低下することになる。

オゾン発生器用高压電源はプラズマアクチュエータ駆動用電源として最適なものではないが、小型・軽量である特徴を活かし、小型飛行実験機等への搭載が考えられる。

謝辞

本研究で使用したオゾン発生器用高压電源は、JAXA 宇宙科学研究所安部隆士教授にご紹介いただいたものである。有益な情報やアドバイスを与えて下さった安部教授に、この場を借りて感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 渡辺重哉, 岡井敬一, “持続可能な航空の実現に向けて”, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集 (2010), pp. 207-208.
- 2) Post M. L. and Corke T. C., “Separation Control on High Angle of Attack Airfoil Using Plasma Actuator”, AIAA Journal, Vol. 42, No.11 (2004), pp. 2177-2184.
- 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) 大久保辰郎, 小林宙, 手塚亜聖, “膜状誘電体を用いた DBD プラズマアクチュエータの平均誘起流速計測”, 第 42 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 2010 講演集, pp. 169-173.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) G. I. Font, W. L. Morgan, “Recent Progress in Dielectric Barrier Discharge for Aerodynamic Flow Control”, Contrib. Plasma Phys. Vol. 47, No. 1-2, (2007), pp. 103-110.
- 10) C. L. Enlon, T. E. McLaughlin, et al., “Mechanisms of a Single Dielectric Barrier Plasma Actuator: Geometric Effects”, AIAA Journal, Vol. 42, No.3 (2004), pp. 595-604.