K3-44

同軸型 DBD プラズマアクチュエータを用いた噴流制御に関する研究

Study on Jet Control by a Coaxial Type DBD Plasma Actuator

長島弘彦[1]，○根岸勇仁[1]，淵岡賢人[1]，本澤和樹[1]，松森大記[2]，秋元雅翔[3]，木村元昭[3]
Hirohiko Nagashima[1], *Yuto Negishi[1], Kento Fuchioka[1], Kazuki Honzawa[1]
Hiroki Matsumori[2], Masato Akimoto[3], Motoaki Kimura[3]

Abstract: In this study, coaxial type DBD plasma actuator was designed for jet flow diffusion control. DBD plasma actuator gives the induced flow on the boundary layer flow. The main flow was Air and CO_2. DBD plasma actuator was driven by burst-mode and studied diffusion of jet. We applied peak-to-peak voltage 14kv to DBD-PA at time of Reynolds number 1000~7500. The wave forms were sin wave and square wave with all Reynolds number. As a result a section becoming $f_{vortex} > f_{burst}$, $f_{vortex} = f_{burst}$, $f_{vortex} < f_{burst}$ exists in x/d=1(f_{vortex}:vortex development frequency, f_{burst}:burst frequency, x/d:the distance of the plumb direction from the nozzle exit / Nozzle diameter). When f_{burst} is low, it becomes $f_{vortex}>f_{burst}$ and becomes $f_{vortex} < f_{burst}$ when f_{burst} is high.

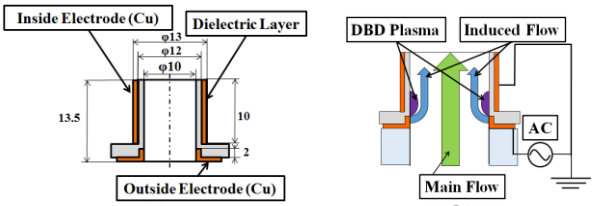
１．緒言

噴流はジェットエンジンやバーナー火炎などに活用されており，これらは噴出した可燃性気体と周囲の空気を均一に混合し燃焼させることで各種反応の促進が期待されている [1)]．本実験では主噴流と同軸方向に誘起流を発生する DBD-PA(Dielectric Barrier Discharge-Plasma Actuator)を設計・開発して，過去の研究よりバースト駆動における誘起速度が連続駆動よりも向上する事例から [2)] 空気と二酸化炭素を主噴流としてバースト駆動で制御を行い，噴流がどのように拡散していくのかを実験を通して考察していく．

２．実験装置・方法

本実験で使用する同軸型 DBD-PA の断面図を図 1(a)，同軸型 DBD-PA の主噴流及び誘起流れの全体図を図 1(b)に示す．誘電体の材質はマシナブルセラミックス，内部電極，外部電極の材質をリン青銅とし，厚さ 0.5mm の円筒状に加工した．これを誘電体にはめ込み DBD-PA を構成した．ここで出口内径 d=10mm である．

実験装置の説明を次に示す．ファンクションジェネレータの波形を高電圧電源に入力し，ピーク電圧を 2000 倍に増幅して DBD-PA に印加する．使用する電圧波形は正弦波，矩形波とし，矩形波の間欠比は 50%とした．噴出流体は空気，二酸化炭素としコンプレッサーから送られてくる空気，ボンベから送られてくる二酸化炭素を調節するためにフローコントローラを通過し，その後コンデンセンション粒子発生装置を通過しノズルから噴出させる．この噴流に Nd:YAG レーザーのシート光を照射し，高速度カメラを用いて可視化撮影(撮影速度 6000fps)を行う．また交流電圧を印加させる際は，オシロスコープを用いて波形の収録を行った．



(a)　(b)

Figure 1.(a) Coaxial type DBD plasma actuator
(b) Flow and plasma

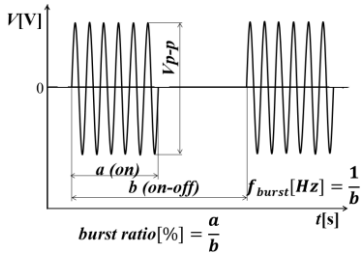


Figure 2. Burst-mode wave form parameter

ここで本実験で用いるバースト波形を図 2 に，ストローハル数を次式に定義する．

$$S_t = \frac{f_{burst} \cdot d}{U} \tag{1}$$

f_{burst} はバースト波における on-off 周期の周波数であり，この時のバースト比は 50%とした．d は出口内径，U は流量より求めた平均速度である．またバースト on 時の周波数は約 7kHz に設定した．実験はストローハル数に従って f_{burst} を V_{p-p} = 14kV 一定のもと印加させて，空気を Re=1000～5000，二酸化炭素を 1500～7500 で流し，渦の生成を制御できているかを確認するために高速度

１：日大理工・学部・機械，　２：日大理工・院(前)・機械，　３：日大理工・教員・機械

カメラで撮影後 0.1 秒間における渦の発生周期を x/d=1 地点でカウント，平均化し，渦の発生周波数 f_{vortex} を算出した. ここで x は鉛直上向きを正とする．f_{burst} と f_{vortex} の比をとってストローハル数による変化を考察する.

３．実験結果および考察

矩形波と顕著な違いがなかったため正弦波におけるレイノルズ数毎の空気，二酸化炭素のカウント結果を図 3，4 に示す．グラフは縦軸を f_{burst} と f_{vortex} の比，横軸をストローハル数とする．ここで図 3，4 に共通して言えることは $f_{burst}<f_{vortex}$，$f_{burst}=f_{vortex}$，$f_{burst}>f_{vortex}$ の 3 区間が存在することである. 図 3, 4 より空気の $f_{burst}=f_{vortex}$ となる区間を表 1，二酸化炭素を表 2 に示す．2 つの表よりレイノルズ数が大きくなるにつれて $f_{burst}=f_{vortex}$ の区間が狭くなっていくことがわかる．これは主噴流に対する誘起流の相対速度が下がったためだと考える．ここで 2 つのグラフの形が概ね同じことから工業利用を考慮し，プロパンと分子量が近い二酸化炭素に着目をする．図 5 にプラズマの影響を確認することも含め (a)にプラズマ off を，(b): $f_{burst}<f_{vortex}$，(c): $f_{burst}=f_{vortex}$，(d): $f_{burst}>f_{vortex}$ として Re=2000 の可視化画像を示す. まず(a)と(b)，(c)，(d)を比べるとプラズマをかけたことによって渦の発生位置が x/d=3.5 から 1.0 に移動することが確認できる．これは誘電体バリア放電発生による誘起流の影響である．(c)は特徴として拡散が off より早くなり，等間隔に渦の発生を確認することができた．これは渦の発生周波数とバースト周波数が同期したためと考える．(b)は大きな渦と小さな渦の繰り返しであり，大きな渦はプラズマが on の時，小さい渦は off になった時に形成されたことが確認できた．off 時に発生した渦をカウントしたことにより，比が大きくなったと考える．(d)は渦の発生周期は早くなっているが渦が小さくなっている. これはバースト波形の on の周期が短く，on-off 周期も短いため，渦が十分に発達することができず，小さい渦の連続となってしまったといえる.

４．結論

同軸型 DBD プラズマアクチュエータの噴流拡散制御の実験において次の知見を得た.

(1)流体を二酸化炭素にしてもプラズマアクチュエータを駆動させることで拡散が促進される.

(2)正弦波，矩形波共に印加するバースト周波数と発生する渦の周波数の関係が $f_{burst}<f_{vortex}$，$f_{burst}=f_{vortex}$，$f_{burst}>f_{vortex}$ となる 3 つの区間が確認でき，f_{burst} によって渦の発生を制御できる.

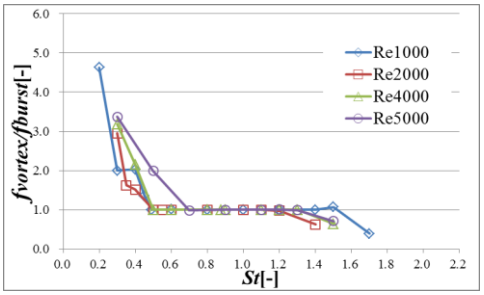


Figure 3.Vortex development frequency / Burst frequency - Strouhal number (Air)

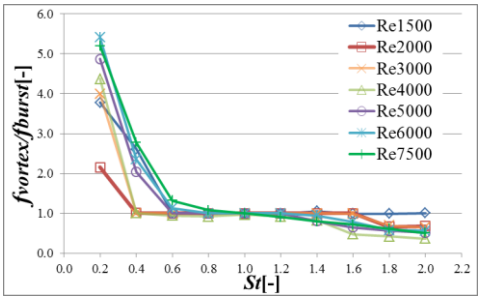


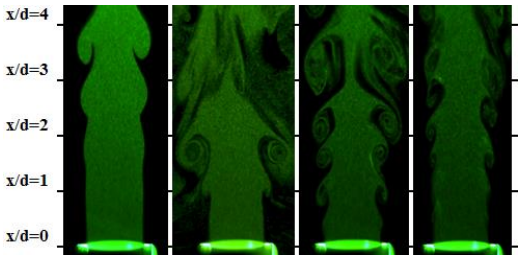
Figure 4.Vortex development frequency / Burst frequency - Strouhal number (CO_2)

Table 1. $f_{burst}=f_{vortex}$ of Air

Reynolds number	section(St)	difference of sections
1000	0.5～1.5	1.0
2000	0.5～1.2	0.7
4000		
5000	0.7～1.3	0.6

Table 2. $f_{burst}=f_{vortex}$ of CO_2

Reynolds number	section(St)	difference of sections
1500	0.6～2.0	1.4
2000	0.4～1.6	1.2
3000		
4000	0.4～1.4	1.0
5000	0.6～1.2	0.6
6000	0.8～1.2	0.4
7500	1.0	0.0



(a)off　(b)St=0.2　(c)St=1.0 (d)St=2.0

Figure 5.Visualization of Flow (CO_2 Re=2000)

５．謝辞

本研究は JSPS 科研費 25420132，16K06131[基盤研究(C)]の助成を受けたものであり，ここに謝辞を表する.

６．参考文献

[1]社河内敏彦：「噴流工学 基礎と応用」，森北出版，pp. i，pp.141，2004.

[2]藤井孝藏，浅田健吾：「DBD プラズマアクチュエータによる翼剥離制御メカニズム-バースト波解析が語るもの-」，ながれ,Vol.29，No.4，pp.259-270，2010.