

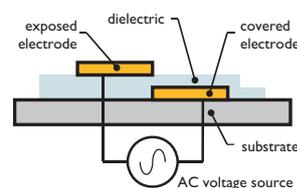
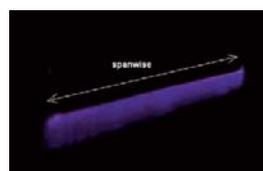
## プラズマ流体アクチュエータによる 超音速航空機の離着陸時空力性能改善

▶ 研究代表者：松野 隆（鳥取大学大学院 工学研究科）

▶ プラズマアクチュエータにより  
超音速機の離着陸時空力性能を向上させる

▶ プラズマアクチュエータの持つ特徴

- ▶ 完全に電氣的に駆動
  - 可動部分を持たない
- ▶ 非常に軽量
- ▶ 利用電力が低い
- ▶ 非常に薄いため、空力的な影響が小さい
  - 完全に埋め込むことも可能
    - 空力ペナルティはゼロ
- ▶ 駆動が非常に高速
  - 入力に対する追従性が優れている
- ▶ モデル化しやすい
  - 制御システム全体が設計しやすい



平成22年度 航空プログラムグループ公募型研究報告会

## 発表内容

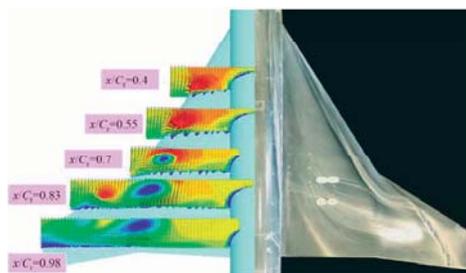
- ▶ 研究背景と技術的課題
- ▶ 研究目的
- ▶ プラズマアクチュエータについて
  - ▶ 概要
  - ▶ 剥離流制御への応用
- ▶ 超音速機離着陸性能改善への応用
  - ▶ 研究課題・計画
  - ▶ 現在の進捗状況



## 研究背景と技術的課題

### 低アスペクト比デルタ翼をベースとする機体の離着陸時空力特性

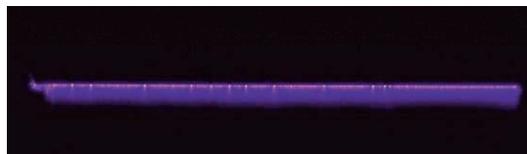
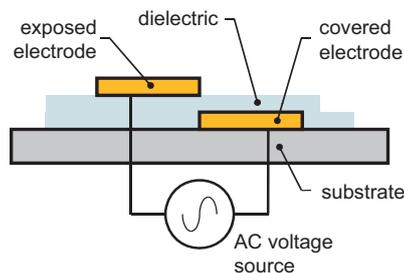
- ▶ 揚力傾斜が小さい
- ▶ 非線形な空力特性 (ex. 非線形ピッチアップ)
- ▶ 流体場が複雑
  - ▶ 渦・剥離流の干渉→機体形状・姿勢に大きく依存
- ▶ フラップ等の高揚力装置の効果は限定的、デメリットが多い
  - ▶ 大迎角飛行：渦・剥離流に支配
  - ▶ 機体形状の制限：超音速巡航時に翼形状へ影響するデバイスは使用困難
- ▶ 技術的課題
  1. 三次元・非定常流れ場構造の解析
  2. 複雑な流れ場の干渉・制御
  3. 流れの制御による空力特性の向上



Kwak et al., ICAS 2004-387

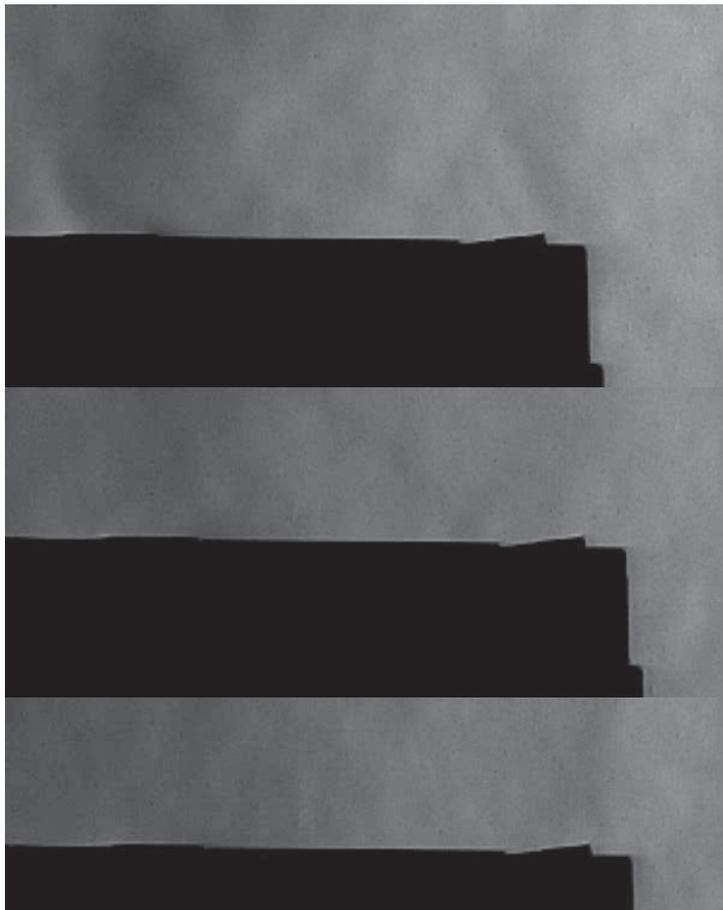


## プラズマアクチュエータ



- ▶ 放電により発生するプラズマによって流体に体積力を与える
  - ▶ 表面ジェットを発生
- ▶ 電極ペアと誘電体の複合構造
  - ▶ kV/kHz/mAオーダーの交流を使用





## PWM (burst) drive

**PTFE t=1.0mm**  
 **$f_p = 23\text{kHz}$**   
 **$V_{pp} \sim 16\text{kV}$**   
**D = 50%**

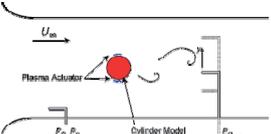
### Steady

**$f_m = 10\text{ Hz}$**

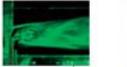
**$f_m = 100\text{ Hz}$**

## 鳥取大学における 低速空力に関するプラズマアクチュエータ研究の一例

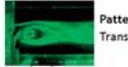
- ▶ 円柱周り流れの制御と抗力低減
  - ▶ パルス(PWM)駆動：渦と同期
  - ▶ 剥離抑制・抗力低減に成功 (~80%)




**Pattern I**  
Accelerated fluctuation of shear layer

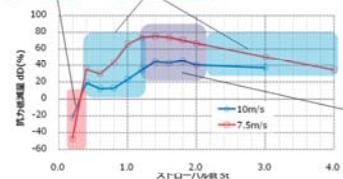


**Pattern II**  
Transitional (wake vortex/attached flow)

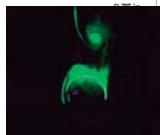


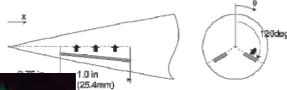
**Pattern III**  
Bistable mode



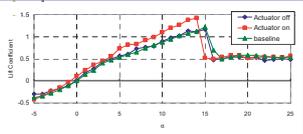


- ▶ 前胴渦の位置制御による航空機のヨー制御
  - ▶ 渦位置の非対称配置・移動遅れを利用



- ▶ 2Dフラップ代替デバイスの開発
  - ▶ 全迎角域での揚力向上
  - ▶ 剥離抑制は前縁スラットと類似



NACA0020/cutback, AoA=10deg



Baseline



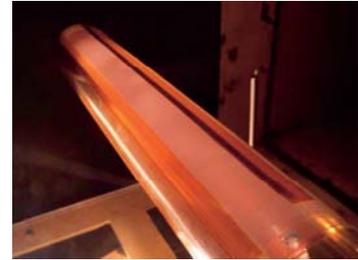
Actuator on

## 研究目的と期待される成果

### ▶ 研究目的

#### ▶ プラズマアクチュエータにより超音速機の離着陸時空力性能を向上させる

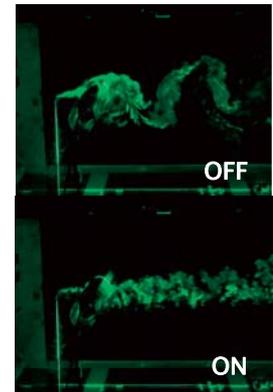
- ▶ スマートな流体制御手法の提案
- ▶ 実機形状模型への適用
  - ▶ プラズマアクチュエータの潜在性能を生かす



### ▶ 期待される最終成果

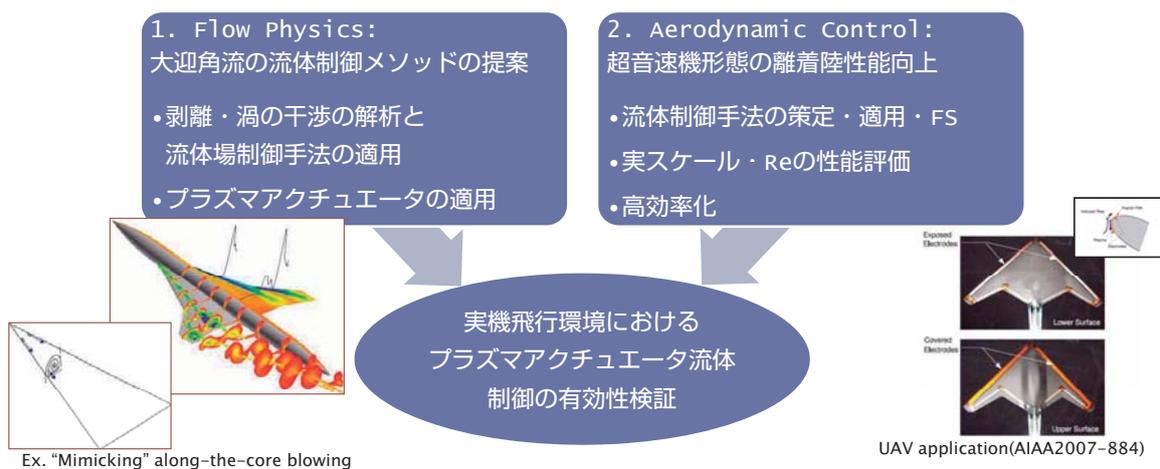
#### ▶ 超音速機実用化において大きな問題となる、低い離着陸性能により生じる課題の解決

- ▶ 航空機の安全性の低下
- ▶ 空港のインフラ整備の必要性
- ▶ 着陸騒音（脚・高揚力装置由来）



平成22年度 航空プログラムグループ公募型研究報告会

## 研究のアプローチと計画



### 研究計画



平成22年度 航空プログラムグループ公募型研究報告会

## 研究課題（今年度テーマ）

---

- ▶ SST空力特性の改善
  - ▶ 離着陸時の揚力傾斜、揚抗比の改善
  - ▶ ピッチアップなどの非線形空力特性の改善
    - ▶ 小型風洞による流体制御手法の調査
    - ▶ 2x2m風洞におけるプラズマアクチュエータ適用試験
      - 実験手法の確立
      - 基礎的な流体制御法の検討
- ▶ プラズマアクチュエータによる流体制御法の研究
  - ▶ 効率的な制御手法の開発
    - ▶ パルス駆動の効果検討（既存データより）
  - ▶ 高レイノルズ数適用性の検討
    - ▶ 既存アクチュエータ性能のレイノルズ数依存性調査



## SST空力特性の改善

## Status: 鳥取大学における風洞試験

- ▶ デルタ翼およびSST主翼模型へのP/A適用
  - ▶ 空気力測定+流れの可視化試験により，提案している流体場・空力変化を生じうるか可能性調査
    - ▶ アクチュエータ位置・構成について，数多くのトライ&エラーでいくつかの有力候補を抽出する
  
- ▶ 進捗状況
  - ▶ 模型製作中（デルタ翼：完成，SST：12月上旬）
  - ▶ P/A素子・駆動系は準備完了
  - ▶ 風洞試験準備中（12月中旬～予定）



平成22年度 航空プログラムグループ公募型研究報告会

## Status: JAXA低速風洞試験

- ▶ 既存SST模型（改修）に対するプラズマアクチュエータの適用試験
  - ▶ 風洞におけるP/A駆動系の構築
  - ▶ 提案している流体場・空力変化を生じうるか可能性調査
  - ▶ レイノルズ数効果の予備検討
  
- ▶ 進捗状況
  - ▶ 来週より（11/30～）風洞試験予定
  - ▶ 鳥取大学において，P/A駆動系準備完了

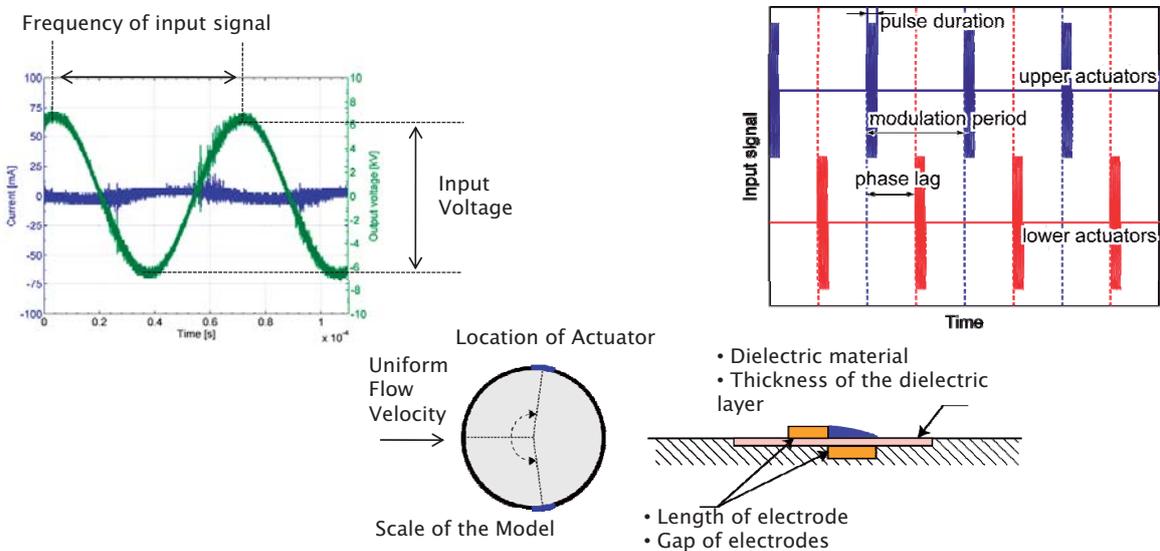


平成22年度 航空プログラムグループ公募型研究報告会

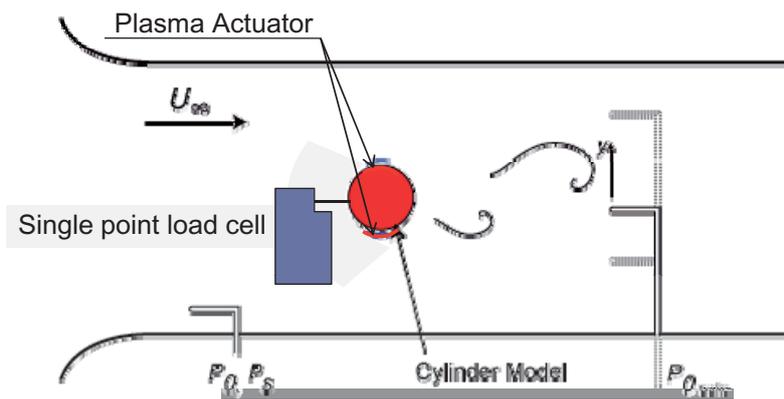
## プラズマアクチュエータの 効率的な制御手法の開発

### バースト駆動による流体制御性能の向上 (円柱剥離流制御)

- ▶ 多変数が影響：最適条件を得ることが困難
  - ▶ パラメータ設計による重要変数抽出：モジュレーション周波数



## 実験装置概要

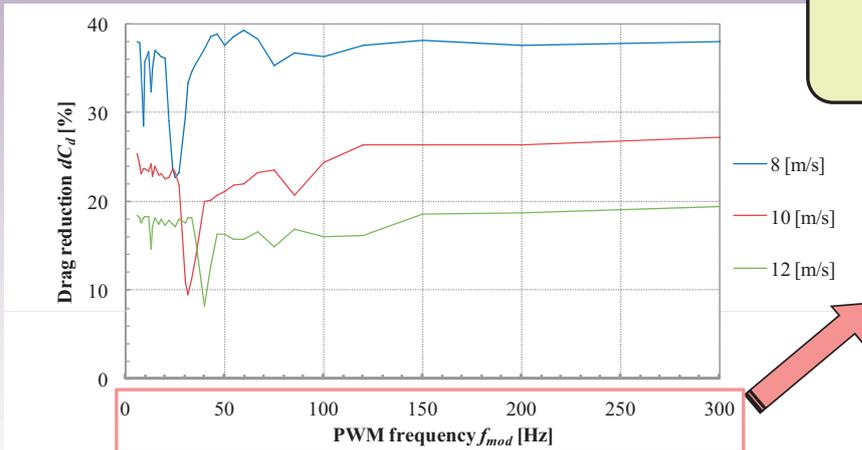


## 実験条件

	Drag Measurement
PWM modulation freq. [Hz]	6 ~ 600
Strouhal number	0.03 ~ 4.5
Location of secondary actuator [deg]	115
Duty cycle [%]	0 ~ 45
Phase lag [deg]	0, 180
Freestream velocity [m/s]	8.0, 10, 12
Reynolds number	3.2, 4.0, 4.8 x10 <sup>4</sup>
Input voltage [kV]	8.4 ~10.5
Frequency for AC input [kHz]	12.0
Thickness of the PTFE layer [mm]	0.9
Width of buried electrode [mm]	30



## Impact of PWM modulation frequency



### Drag Reduction

$$\frac{(C_d)_{base} - (C_d)_{PWM}}{(C_d)_{base}} \times 100[\%]$$

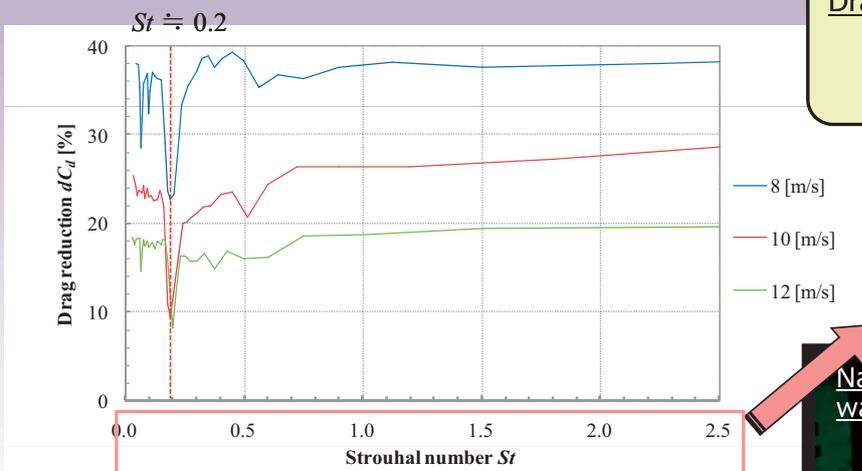
### Strouhal No.

$$St = \frac{f_{mod} \times d}{U_{\infty}}$$

- Performance is not a function of PWM frequency
  - Strouhal Number of PWM frequency is better
- Drag reduced significantly at higher PWM frequency



## Impact of PWM modulation frequency



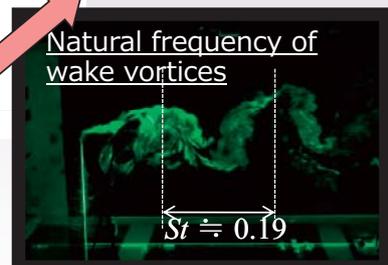
### Drag Reduction

$$\frac{(C_d)_{base} - (C_d)_{PWM}}{(C_d)_{base}} \times 100[\%]$$

### Strouhal No.

$$St = \frac{f_{mod} \times d}{U_{\infty}}$$

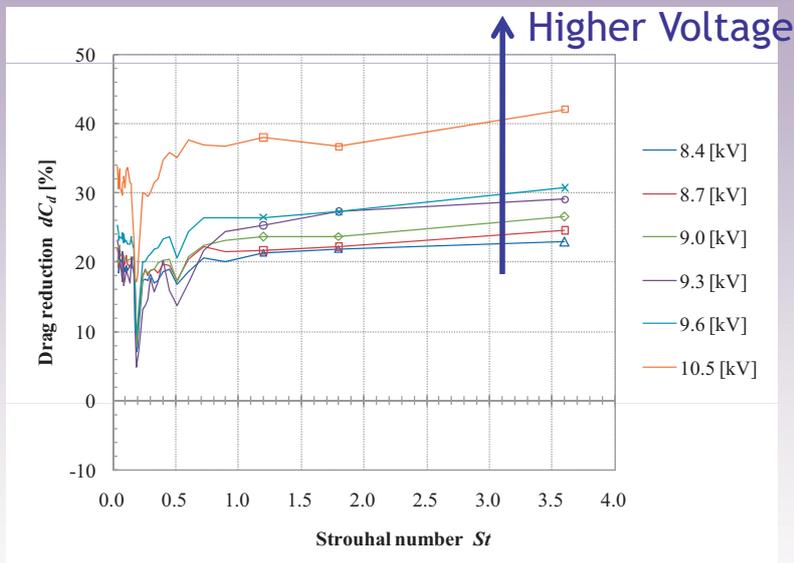
Natural frequency of wake vortices



- Performance is not a function of PWM frequency
  - Strouhal Number of PWM frequency is better
- Drag reduced significantly at higher PWM frequency



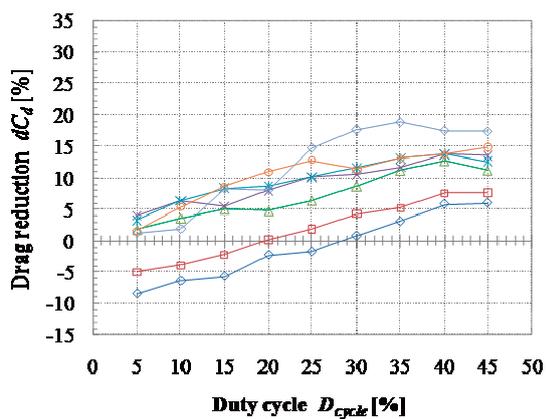
## Effect of Applied Voltage



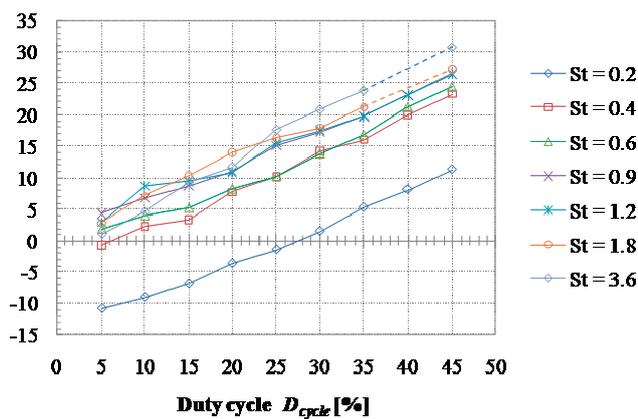
$\phi = 180$  deg  
(alternate actuation)



## Effect of Duty Cycle ( $V_{pp} = 9.6$ kV)



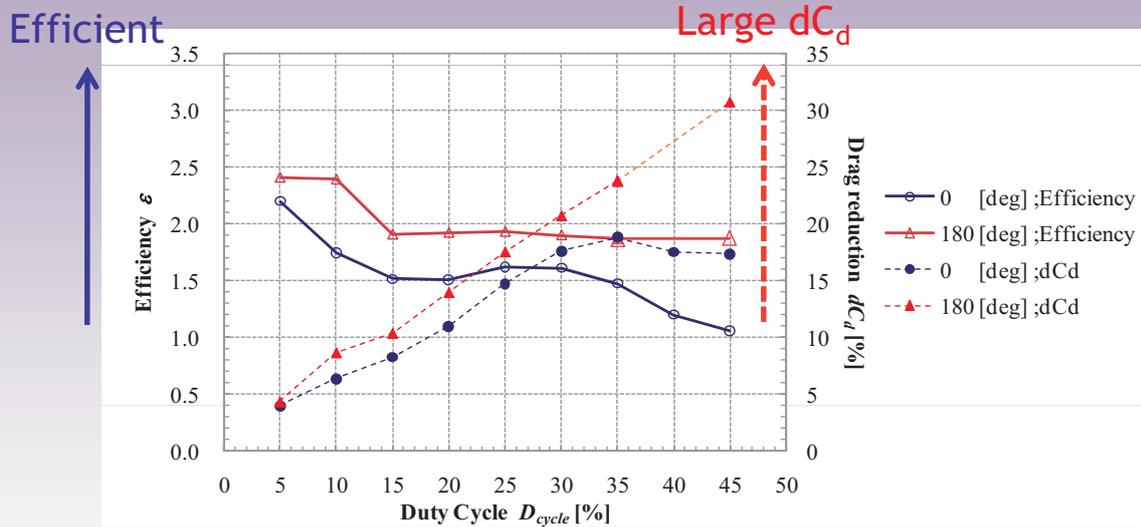
$\phi = 0$  deg  
(parallel actuation)



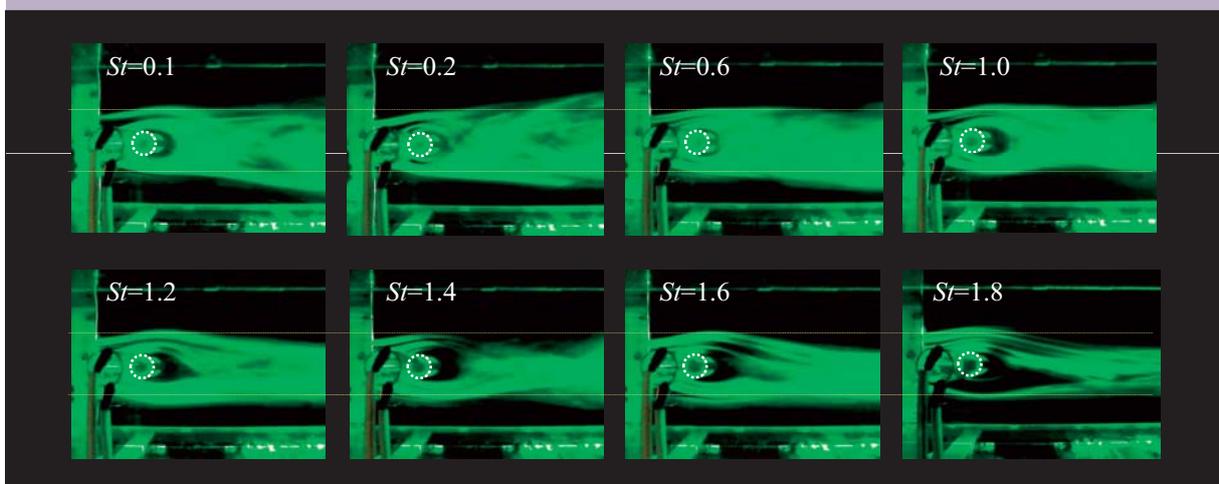
$\phi = 180$  deg  
(alternate actuation)



## Efficiency and absolute performance



## Variation of the flow pattern with PWM modulation at $U=10\text{m/s}$

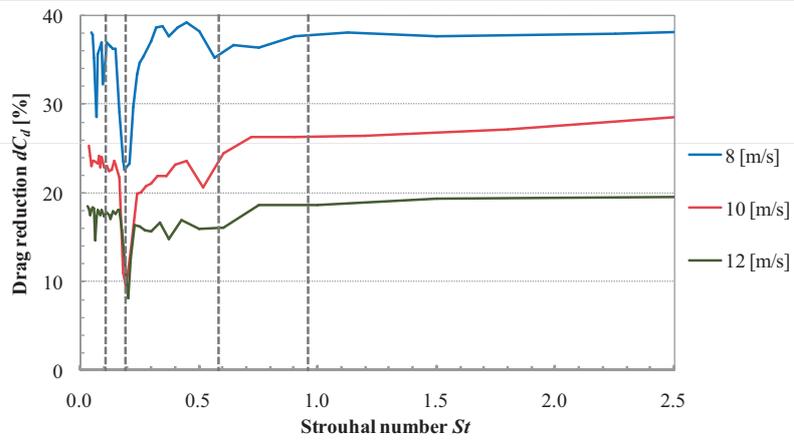
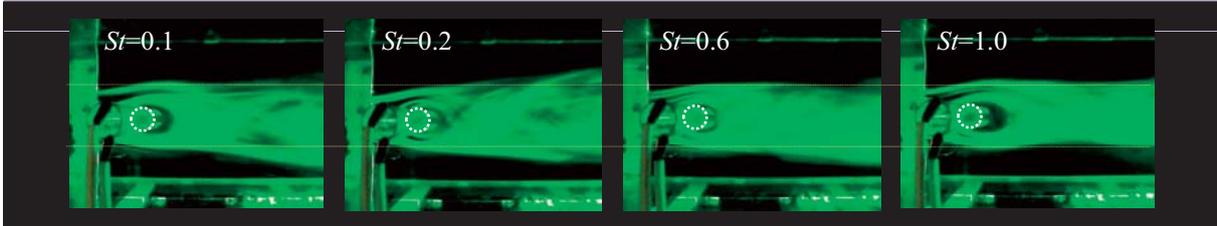


Higher Strouhal number

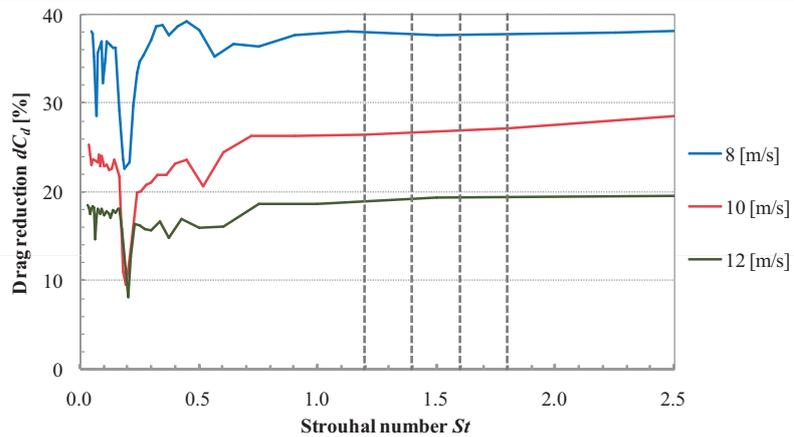
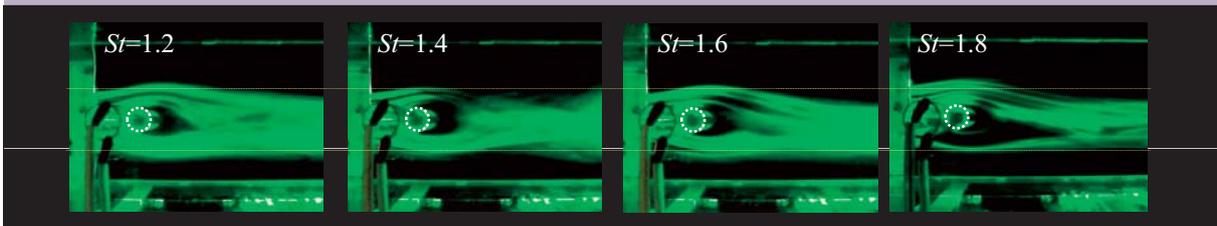
- > Reduction of separated area
- > Reduction of aerodynamic drag



## Variation of the flow pattern with PWM modulation at U=10m/s



## Variation of the flow pattern with PWM modulation at U=10m/s



## 高レイノルズ数適用性の検討

### スケール効果解析予備試験

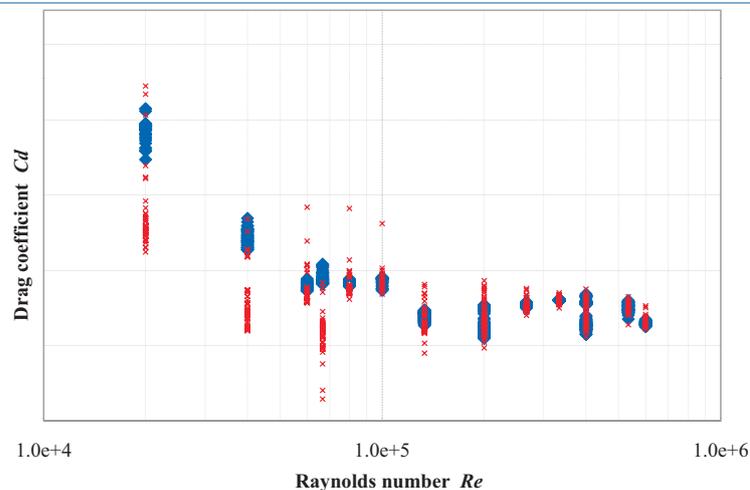
### 実験概要

- ▶ 種々の模型スケール・一様流速度・レイノルズ数におけるプラズマアクチュエータの流体制御性能(抵抗低減性能)を評価
- ▶ 二次元半円柱を対象
  - ▶  $d = 60, 200, 400, 600\text{mm}$
  - ▶  $U = 5.0 \sim 25\text{m/s}$

U \ d	60 mm	200 mm	400 mm	600 mm
5 m/s	20	67	133	200
10 m/s	40	133	267	400
15 m/s	60	200	400	600
20 m/s	80	267	533	x 10 <sup>3</sup>
25 m/s	100	333		



## レイノルズ数効果（※未最適化）



- ▶  $Re \sim 2 \times 10^5$  以上で抗力低減効果が減少
  - エネルギー入力流速・直径に対し相対的に小さくなるため
  - 境界層遷移によりアクチュエータの最適位置が変わるため



平成22年度 航空プログラムグループ公募型研究報告会

## 駆動方法検討に関するまとめ

- ▶ PWM（バースト）駆動のモジュレーション周波数に対し、流体制御性能は強い依存性を持つ
  - ▶  $St=0.2$ : 後流渦とのロックイン→空力抵抗増加
  - ▶  $St=1.8$ : 剥離域の顕著な縮小→大きな抵抗低減効果
    - パルス状駆動により流れの非定常性を緩和
- ▶ ブルートフォース的制御には性能/効率に限界がある
  - ▶ エネルギー効率は高まらない：レバレッジなし
    - ▶ アクティブ流体制御の適用
  - ▶ 既存sDBDプラズマアクチュエータを用いる場合、高動圧/高 $Re$ 環境での性能に問題あり
    - ▶ 駆動変数の条件に応じた最適化
    - ▶ アクチュエータ構成自体の改良・変更



平成22年度 航空プログラムグループ公募型研究報告会