

# 省エネかつ高性能な モノづくりに貢献する流体制御

2019年5月14日

電気通信大学  
大学院情報理工学研究科  
機械知能システム学専攻  
准教授 守 裕也

## 目次

1. 研究背景と目的
2. 進行波状吹出し・吸込み制御
3. 外力による進行波制御
4. 熱伝達促進と抵抗低減効果の同時達成制御
5. 想定用途と企業様への期待

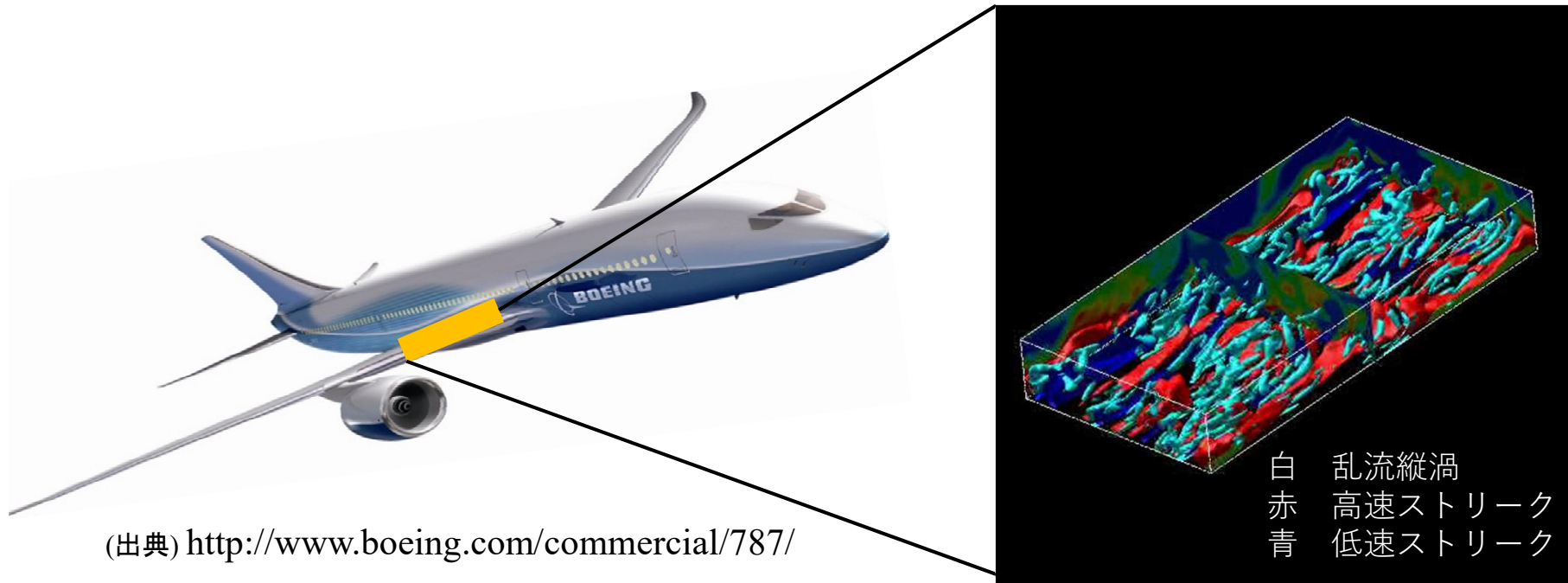
# 1. 研究背景と目的

---

# 流体からうける抵抗

## ◆ 流体抵抗

- 圧力抵抗 → 流線型形状などで低減
- 摩擦抵抗 → 乱流渦に起因，減らすことが困難  
航空機などの燃費増加につながる



# 乱流における壁面摩擦抵抗

## ◆ 壁面上を流れる乱流渦

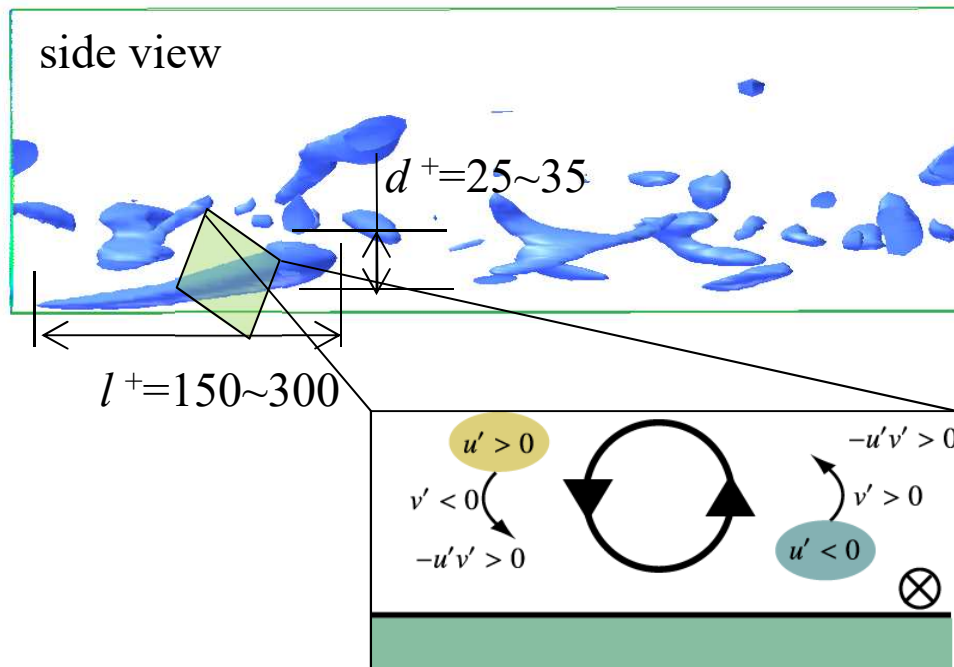


Fig. Vortical structure

乱流構造によって  
高い摩擦抵抗が維持される

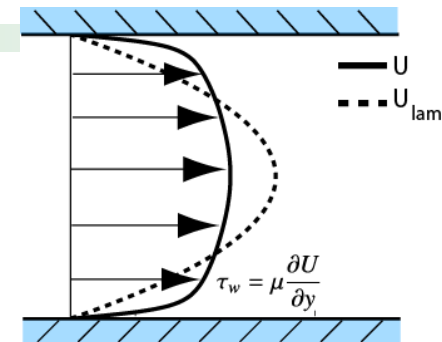
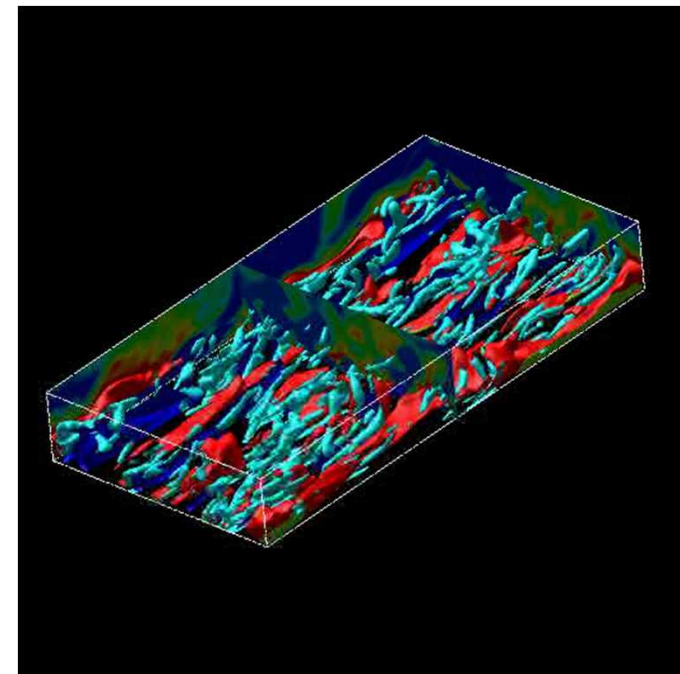
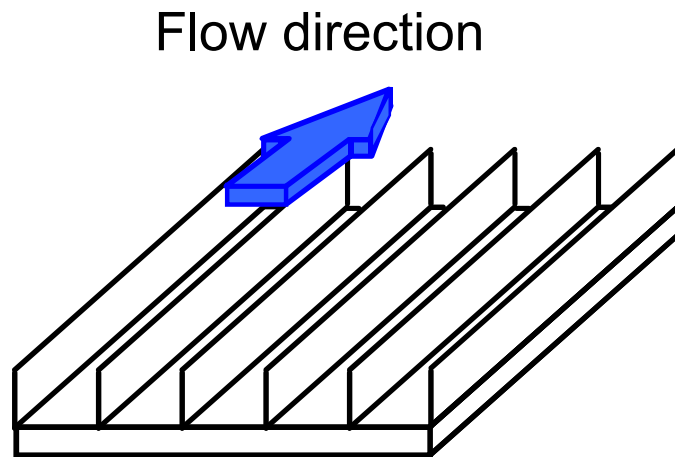


Fig. Mean streamwise velocity under constant flow rate.



## ◆ リブレット壁面

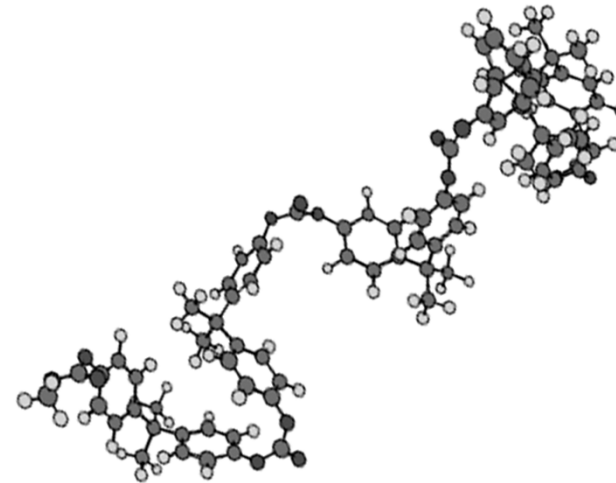
- 壁面表面に設置された微小な溝



- 数%の摩擦抵抗低減効果
- 微小な溝にゴミがつまり、抵抗低減効果の減少
- 清掃による維持コストの増加

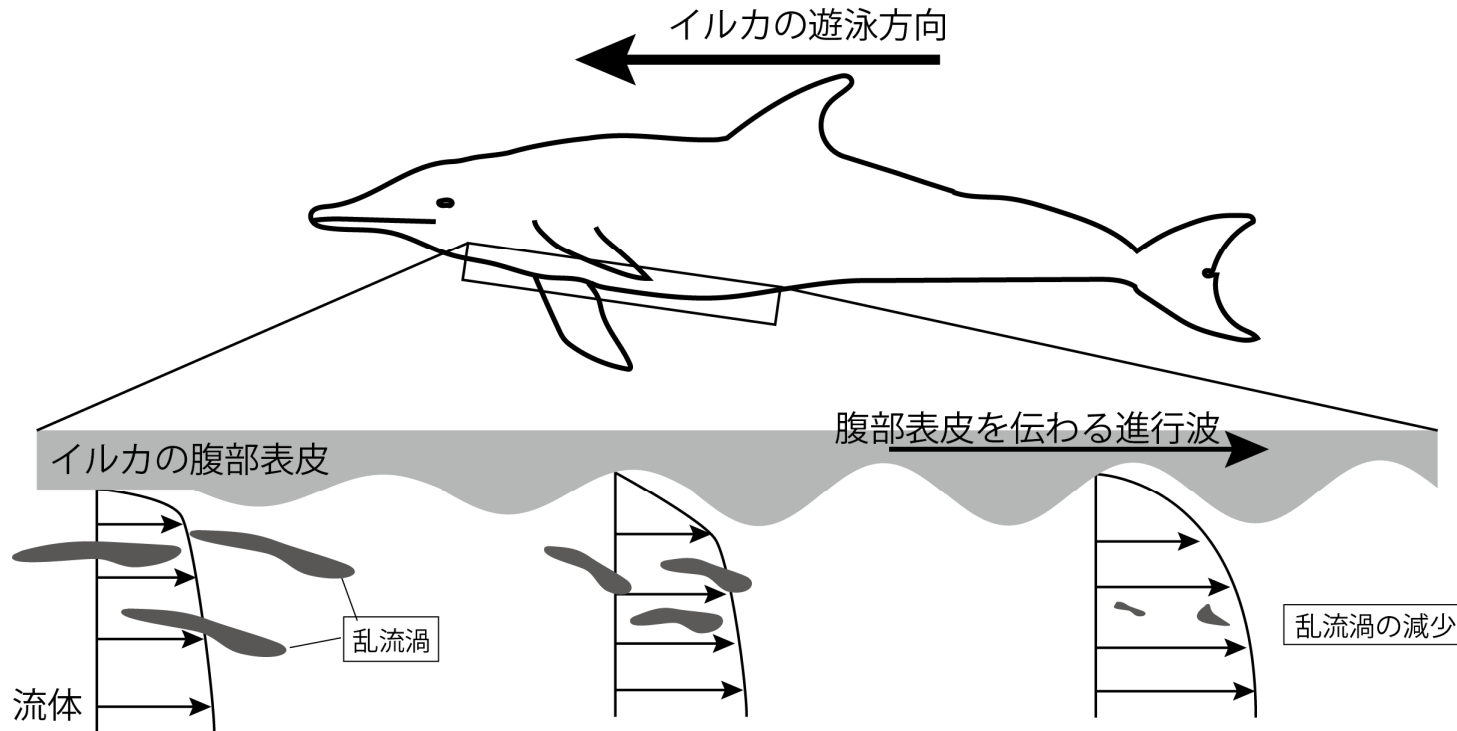
## ◆ 添加物による抵抗低減

- ポリマーや界面活性剤の添加



- 数%の摩擦抵抗低減効果
- 環境負荷の増加

# イルカ腹部の微小振動



## ◆ イルカが高速遊泳する理由の一つ

- イルカ腹部表面の「しわ」が流体抵抗を減らしている可能性
- 壁面に波状壁が作られ、流体の抵抗が減っている??

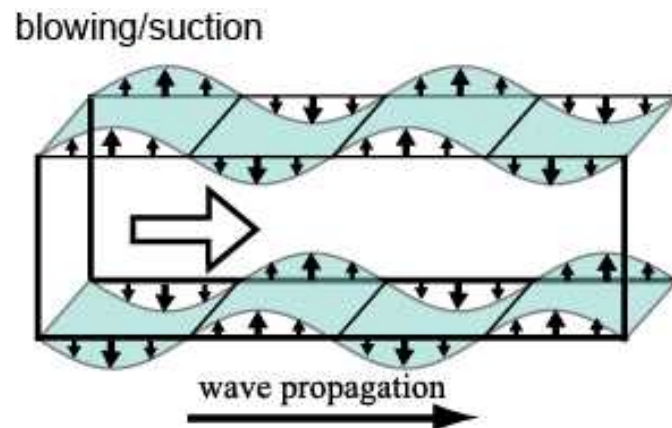
# 新技術の特徴と従来技術との比較

## ◆ 本発表における新技術

- イルカ腹部における微小振動を模擬した**進行波**による乱流制御技術

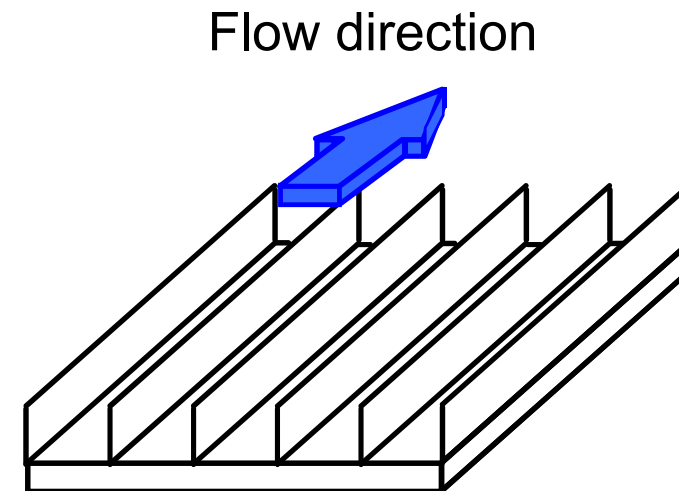
## ◆ 本技術の特徴

- 大きな抵抗低減効果（70%程度）
  - 乱流が層流になる
- 制御にエネルギーが必要
- 簡単な機構で実現できる



## ◆ リブレット（従来技術の例）

- 数%の抵抗低減効果
  - 乱流は維持される
- 制御にエネルギーは不要



## ◆ 3つの制御効果を紹介

### ■ 進行波状吹出し・吸込み制御

→ 理想的な状態での制御効果

### ■ 外力による進行波制御

→ 実現可能なデバイスを使用した際の制御効果

### ■ 熱伝達促進と抵抗低減の同時達成

→ 熱伝達との関係も考慮に入れた時の制御効果



## 目次

1. 研究背景と目的
2. 進行波状吹出し・吸込み制御
3. 外力による進行波制御
4. 熱伝達促進と抵抗低減効果の同時達成制御
5. 想定用途と企業様への期待

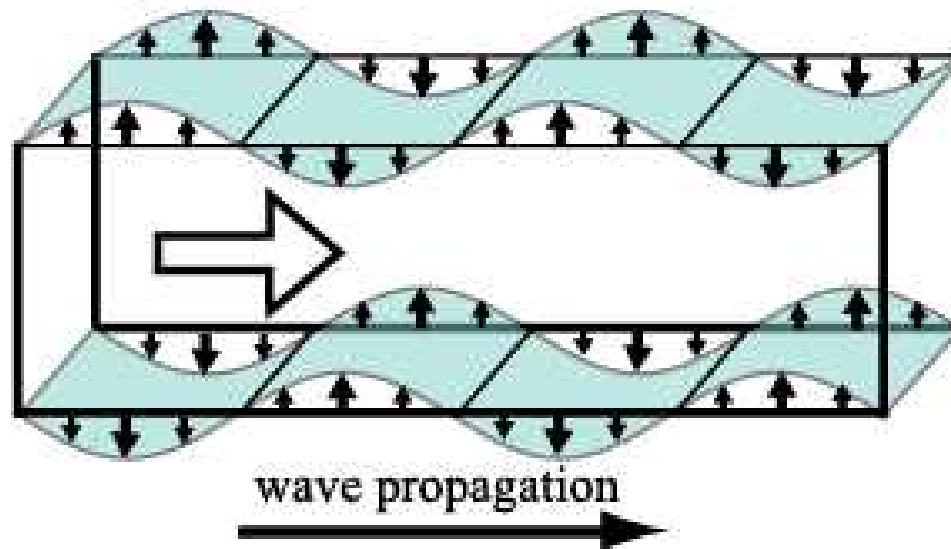
# 2. 進行波状吹出し・吸込み制御

---

# 進行波状吹出し・吸込み制御

(Mamori et al., Phys. Fluids, 2014)

blowing/suction



$$v_w^+ = a^+ \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda^+} (x^+ - c^+ t^+)\right)$$

振幅  $a$   
波長  $\lambda$   
位相速度  $c$

Fig. Traveling wave-like blowing and suction.

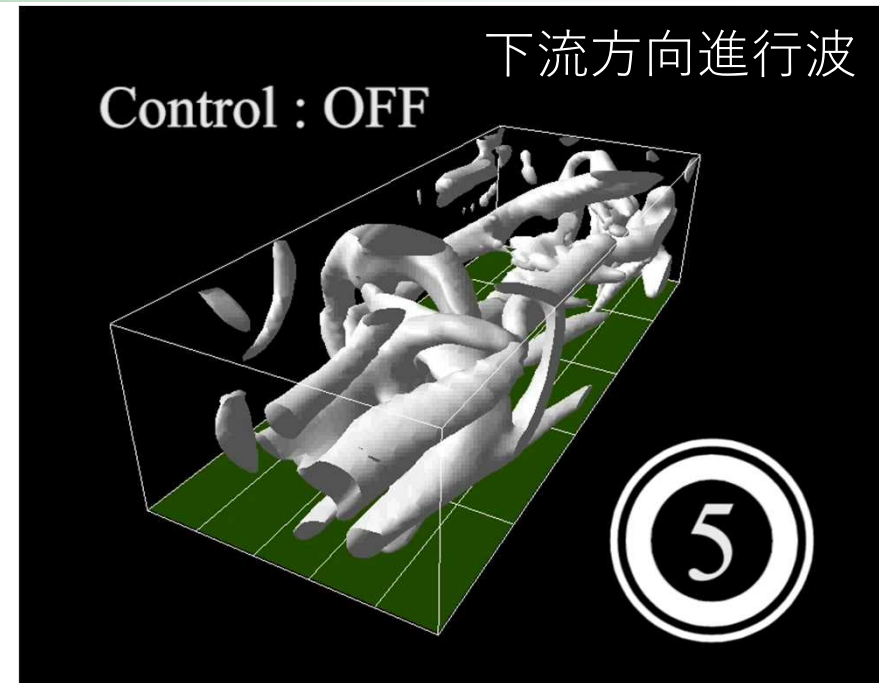
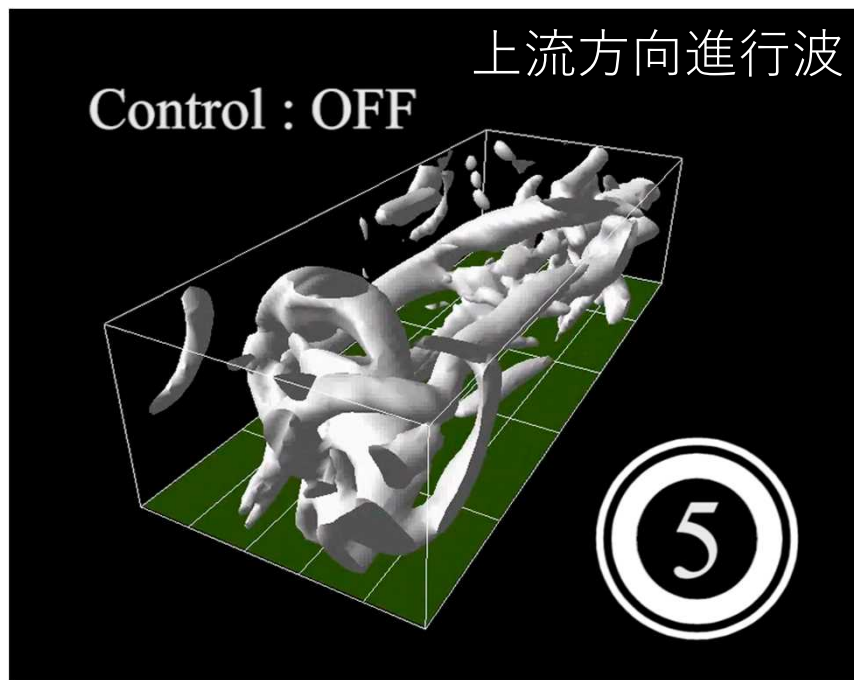
## ◆ 進行波状制御の利点

- 大きな抵抗低減効果を持つ
- センサーを必要としない

## ◆ 直接数値シミュレーション

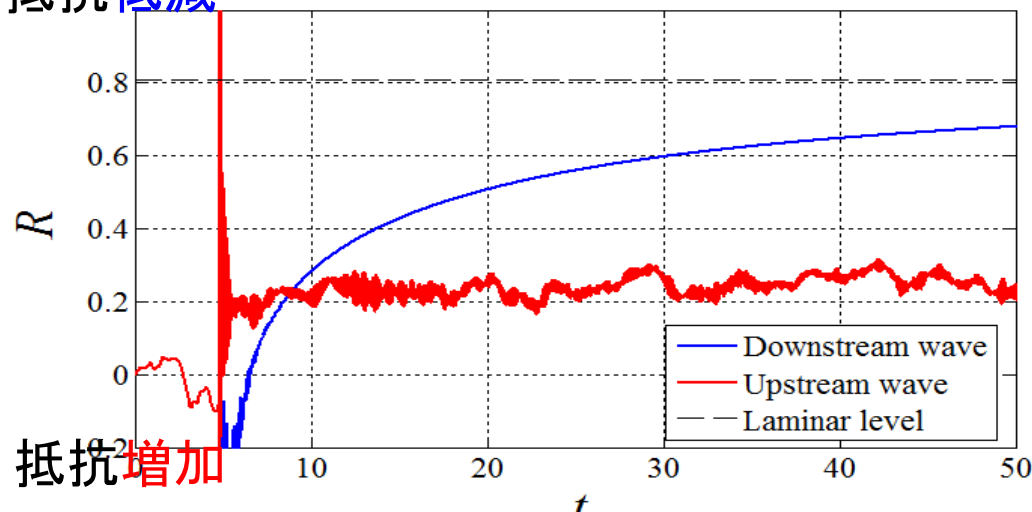
- 乱流モデルなどを使わないので正しい答えが出る
- 低レイノルズ数流 (Re=5600)
- 平行平板間流 (簡単な系)

# 乱流の再層流化



Mov. Visualization of channel flow controlled by traveling wave-like blowing and suction.

抵抗低減



下流方向進行波

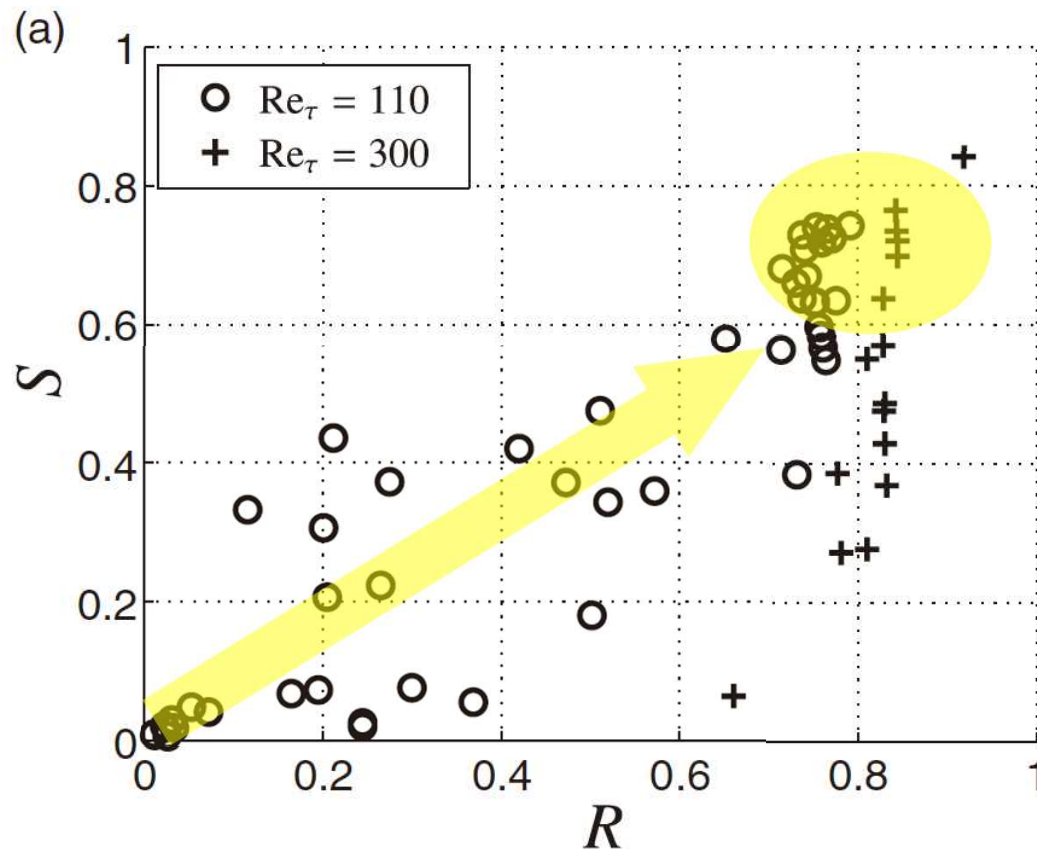
→ 再層流化 (70%抵抗低減)

上流方向進行波

→ 乱流維持 (20%抵抗低減)

Fig. Time variation of drag reduction rate.

# エネルギーの削減率



摩擦抵抗低減率,  $R$

$$R = \frac{W_{p, \text{Dean}} - W_p}{W_{p, \text{Dean}}}$$

■  $R > 0$ , 抵抗低減

■  $R < 0$ , 抵抗増加

エネルギー削減率,  $S$

$$S = \frac{W_{p, \text{Dean}} - (W_p + W_a)}{W_{p, \text{Dean}}}$$

■  $S > 0$ , 正の効率

■  $S < 0$ , 負の効率

Fig. Relation between drag reduction rate and net saving rate.

## ◆ 乱流の再層流化

- 大きな抵抗低減と大きなエネルギー削減率

## 目次

1. 研究背景と目的
2. 進行波状吹出し・吸込み制御
3. 外力による進行波制御
4. 熱伝達促進と抵抗低減効果の同時達成制御
5. 想定用途と企業様への期待

# 3. 外力による進行波制御

---

## ◆ 対向型プラズマアクチュエータによる進行波制御を模擬

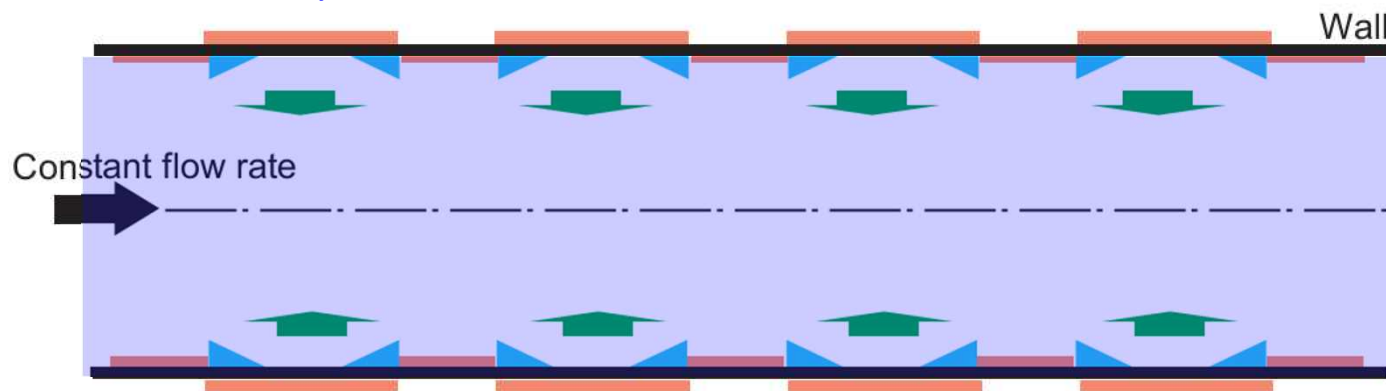
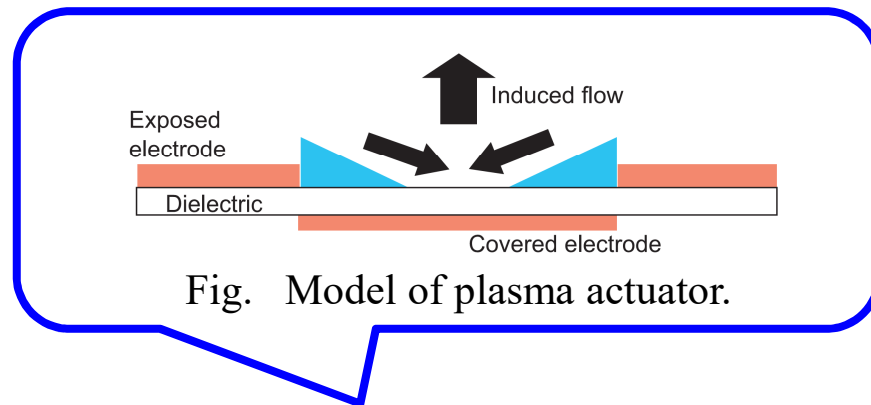


Fig. Channel flow installed plasma actuator.

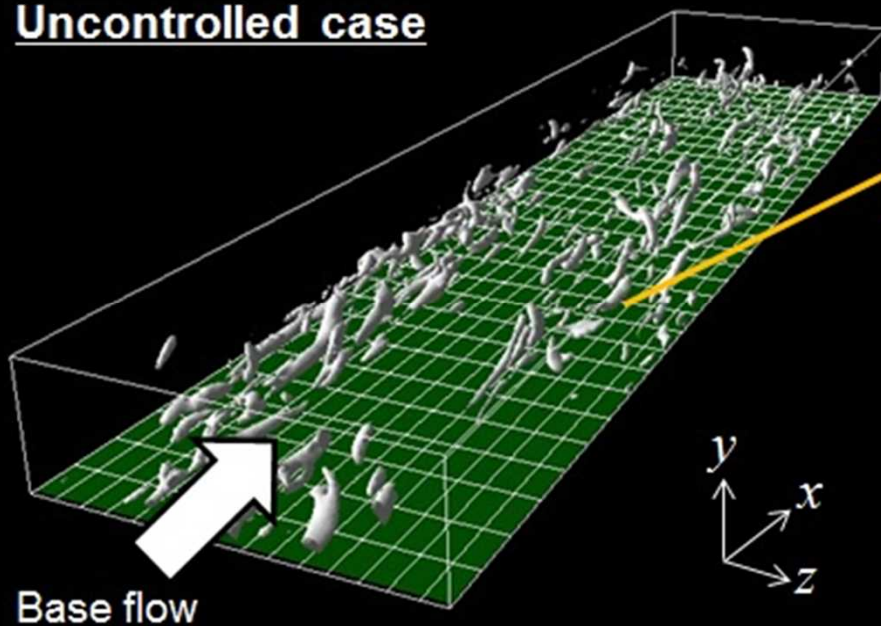
外力による制御が可能か、  
直接数値計算を用いて検証



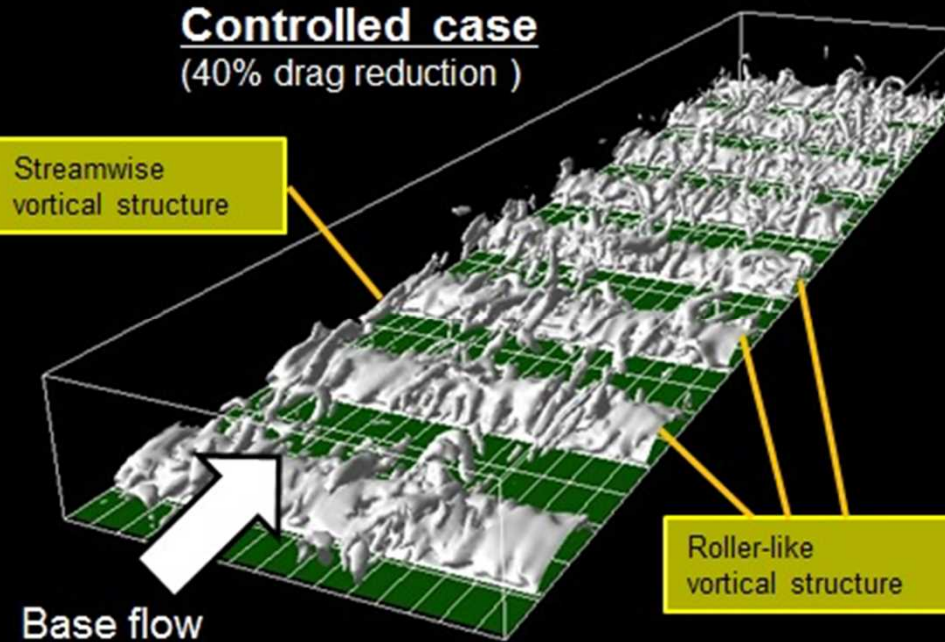
簡単な分布を用いて  
外力分布を理想化

# 外力による流体制御

Uncontrolled case



Controlled case  
(40% drag reduction )



◆ 波を動かさなくても、40%の抵抗低減

## 目次

1. 研究背景と目的
2. 進行波状吹出し・吸込み制御
3. 外力による進行波制御
4. 熱伝達促進と抵抗低減効果の同時達成制御
5. 想定用途と企業様への期待

# 4. 熱伝達促進と抵抗低減効果の同時達成

---




# 摩擦抵抗低減と伝熱増加の同時達成

流体の支配方程式


$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = -\frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i}$$

温度の支配方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial u_j T}{\partial x_j} + \frac{1}{\text{RePr}} \frac{\partial^2 T}{\partial x_j \partial x_j} + Q$$



流体と熱の方程式はそれぞれよく似ている（強い相似性）ため、  
ふつうは摩擦が減ると熱伝達は減少



理論的な解析結果などから、

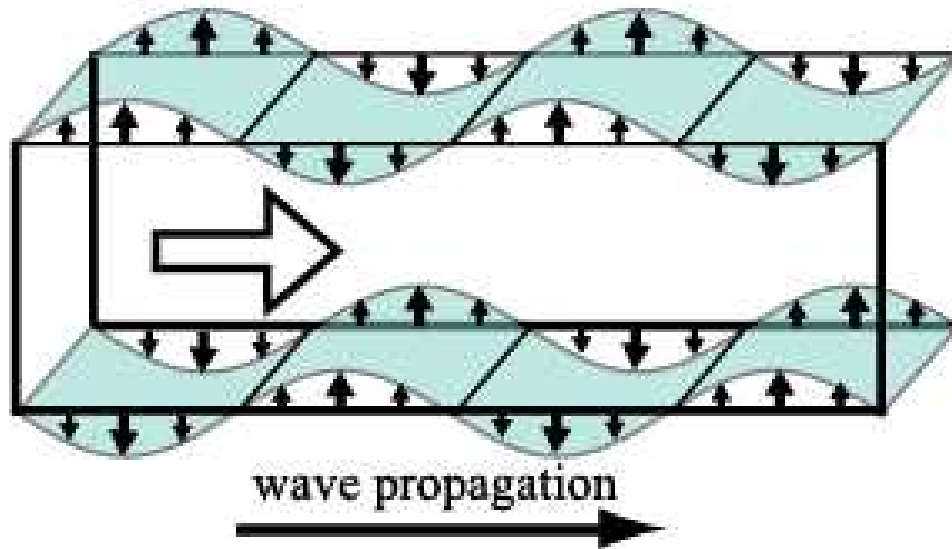
進行波は、「摩擦の低減、熱伝達の促進」の同時達成  
が可能であることが示唆



数値シミュレーションによりその効果を調査

# 進行波状吹出し・吸込み制御

blowing/suction



$$v_w^+ = a^+ \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda^+} (x^+ - c^+ t^+)\right)$$

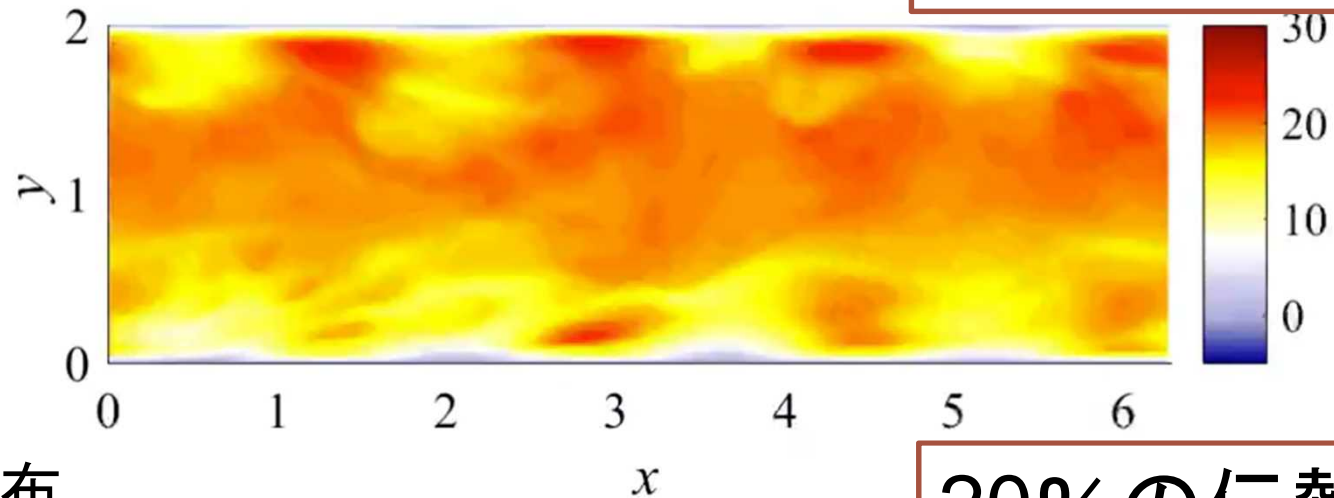
振幅  $a$   
波長  $\lambda$   
位相速度  $c$

Fig. Traveling wave-like blowing and suction.

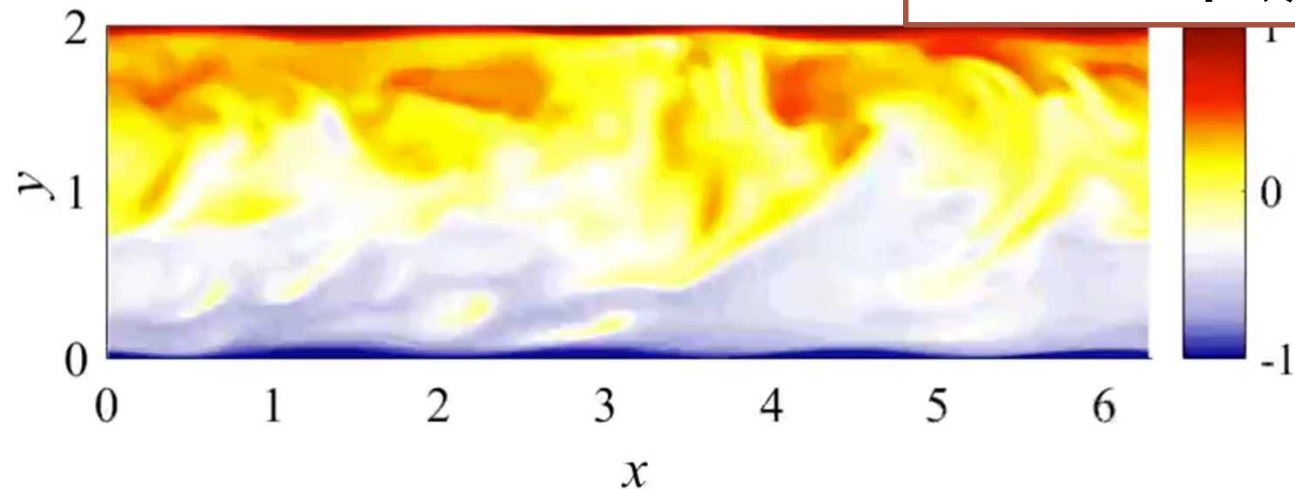
- ◆ 熱伝達も考慮に入れた数値計算を実施
- ◆ レイノルズ数  $Re=5600$
- ◆ プラント数  $Pr=1.0$  (参考: 空気  $Pr=0.71$ )

# 上流進行波制御を用いた熱伝達促進制御

速度分布



温度分布



Mov. Streamwise velocity and temperature.

## 目次

1. 研究背景と目的
2. 進行波状吹出し・吸込み制御
3. 外力による進行波制御
4. 熱伝達促進と抵抗低減効果の同時達成制御
5. 想定用途と企業様への期待

## 5. 実用化への課題など

---

## ◆ 現状明らかなこと

2. 進行波状吹出し・吸込み制御 → 再層流化により70%近い抵抗低減
3. 外力による進行波制御 → 波を進行させなくても40%の抵抗低減
4. 熱伝達促進と抵抗低減効果の同時達成制御 → 進行波制御により達成

## ◆ 想定される用途

- 飛行機や電車、船舶など乗り物に適用し、燃費削減
- ダクトなどの配管における流体輸送効率の向上
- エアコンなどの熱交換器
  - 熱伝達促進 + 摩擦抵抗低減によるエネルギー効率の向上

## ◆ 未解決な点

- 高いレイノルズ数流れにおける制御効果
- より実用的な流れ場における制御効果

- 1. 輸送機器や配管など、流体の効率的な輸送方法を検討中の企業と共同研究を希望**
  - 自動車関連企業様、重工業企業様など
- 2. 抵抗低減のみならず、熱伝達の促進も可能**
  - 新分野への拡張を検討する企業様とも共同研究希望
- 3. 進行波だけではなく、熱流体制御に興味のある企業との共同研究を希望**
  - 流れの数値計算から原因を調査

# お問い合わせ先

国立大学法人 電気通信大

産学連携センター

産学連携コーディネータ 今田 智勝

TEL 042-443-5871

FAX 042-443-5726

Email [imada@sangaku.uec.ac.jp](mailto:imada@sangaku.uec.ac.jp)