

設計情報駆動研究会 第2回研究会
2017年10月22日 @ KKRホテル金沢

流体の秩序運動に基づく 機器最適設計への試み

焼野 藍子

東北大学流体科学研究所
航空宇宙流体工学分野 助教

自己紹介

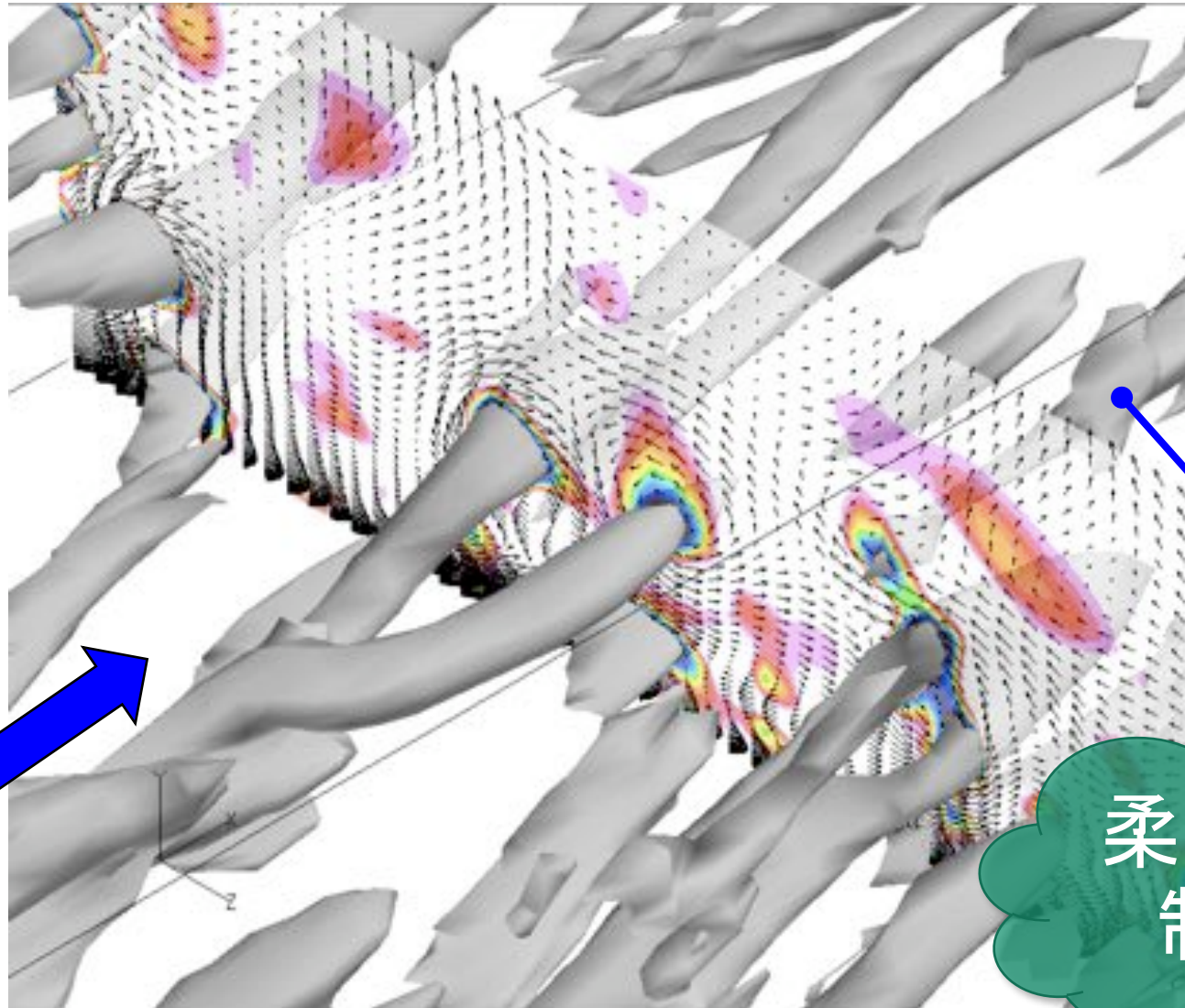
- 名前 焼野 藍子 (やけの あいこ)
- 研究領域 流体力学 (乱流/流体制御/数値流体力学)
- 研究履歴
 - 2017年10月- 現職
 - 2016年4月-2017年9月 海洋研究開発機構
 - 気候変動適応技術開発PT 特任技術研究員
 - 2012年10月-2016年3月 宇宙航空研究開発機構
 - 宇宙科学研究所 招聘研究員
 - 2012年4月-2012年9月 首都大学東京
 - システムデザイン学部航空宇宙工学コース 特任助教
 - 2007年4月-2012年3月 東京大学大学院
 - 工学系研究科機械工学専攻 博士(工学)取得
 - 2003年4月-2007年3月 大阪大学

今日の内容

「流体の秩序運動に基づく機器最適設計への試み」

- 流体制御の分類 -柔よく剛を制す-
- 1. スパン方向壁振動による摩擦抵抗低減制御
 - 1-(a) 壁乱流準秩序構造について
 - 1-(b) スパン方向壁振動による制御性能と制御機構について
- 2. 二次元ハンプ周り剥離制御
 - 制御性能と制御機構について

非線形・散逸性・偶然性 乱流をどのように制御したらよいか？



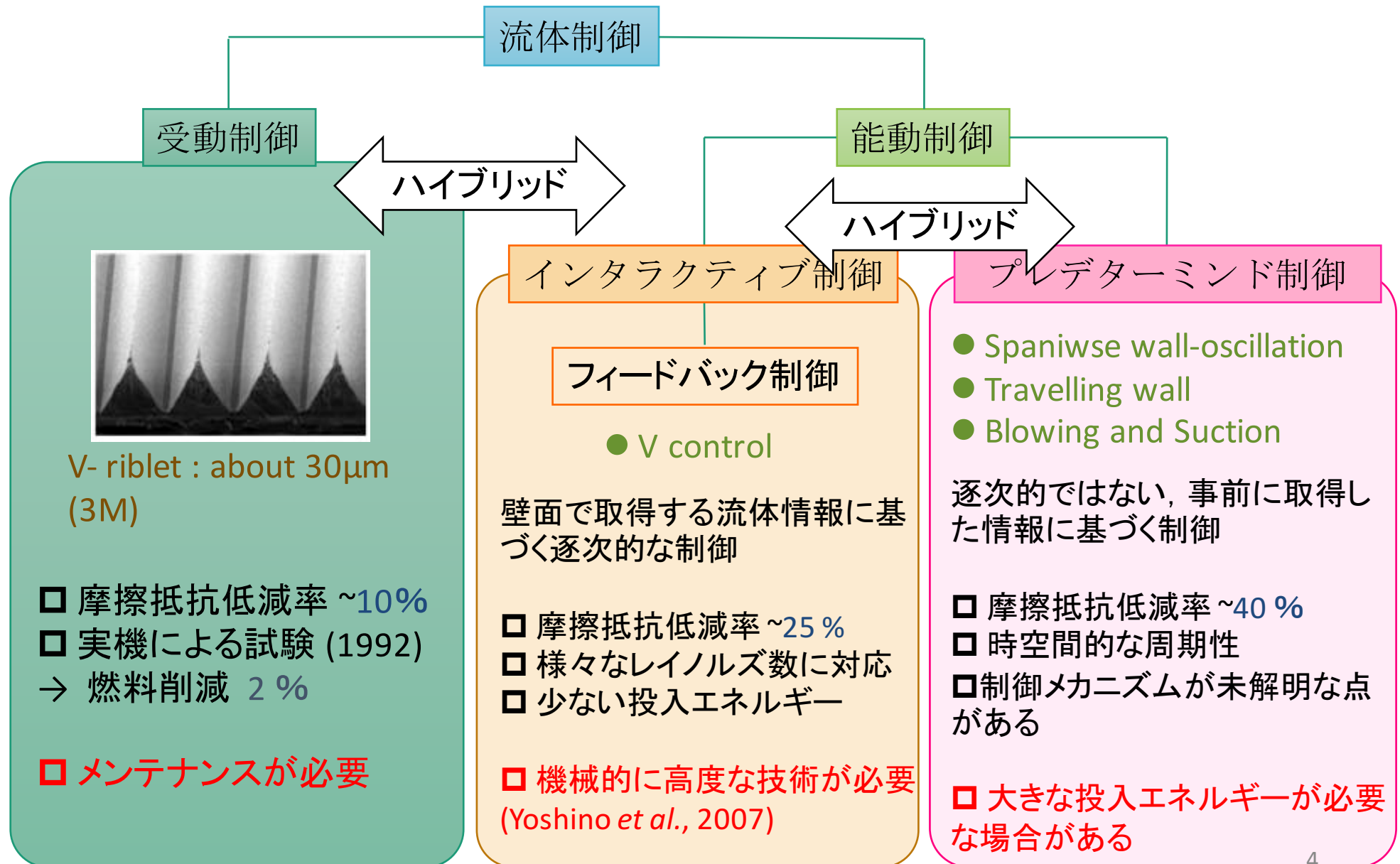
速度勾配テンソルの
第二不変量

$$Q = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

等値面 (gray)
 $Q^+ = -0.013$

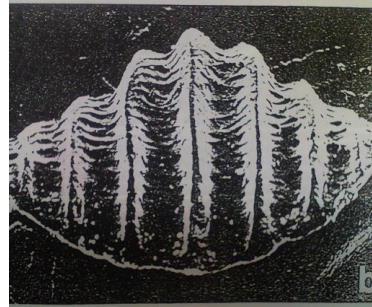
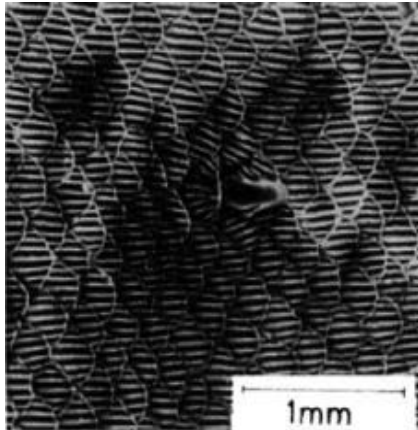
柔よく剛を
制す？

流体制御の分類



受動制御

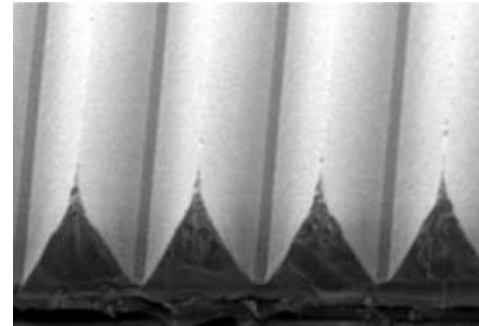
◆ *Placoid scale* (楯鱗/ジュンリン)



Rasci & Muskik (1986)

K. Koeltzsch (2002)

◆ *2D riblets sheet* (3M)



Width :

152 μ m

Materials:

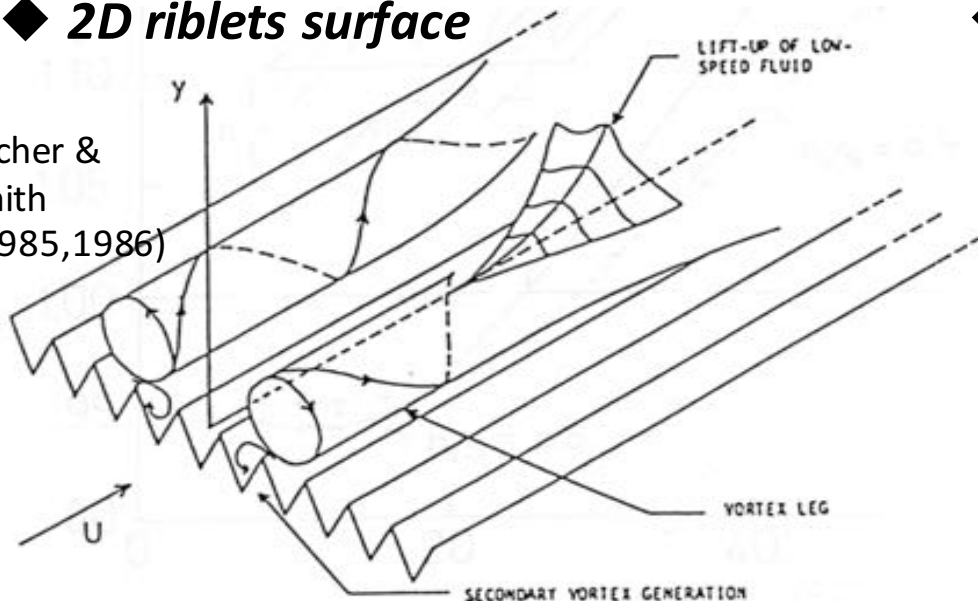
plastic

◆ *3D riblets*

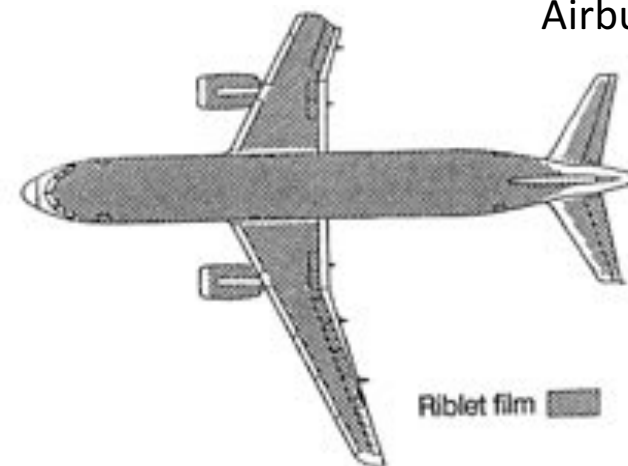
Choi, H. *et al.*, 2008

◆ *2D riblets surface*

Bacher & Smith
(1985,1986)



◆ *Flight evaluation test*

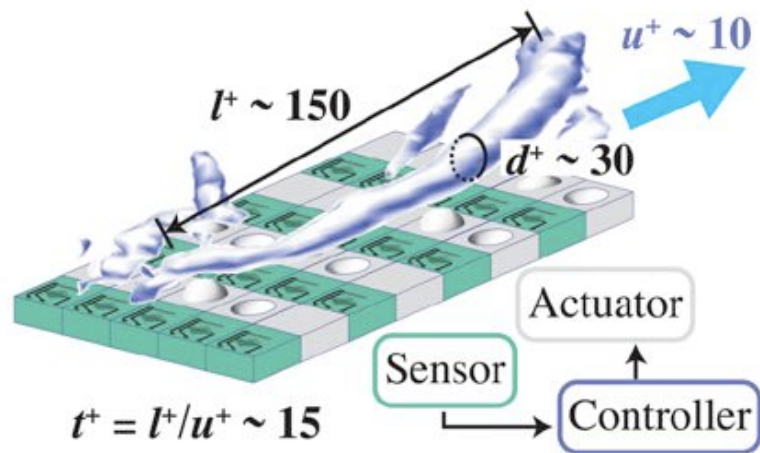


Airbus A320

Szodruch J., *AIAA Paper 91-0685* (1991)⁵

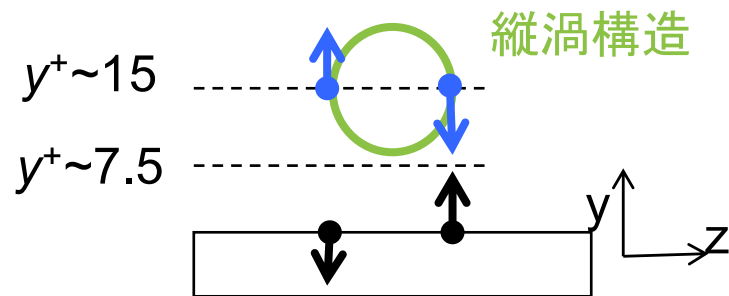
能動制御

フィードバック制御

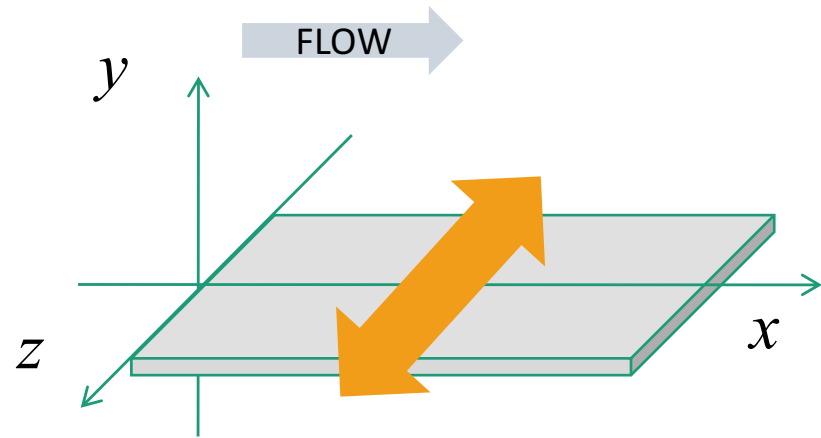


Yoshino et al., 2008

- ◎ 柔軟な制御
- × 高価, 複雑な制御系



プレデターミンド制御



- ◎ 時空間周期的で単純な制御系
- ◎ 高い摩擦抵抗低減率
- × 投入エネルギーが大きい
- × 制御機構が未解明(?)

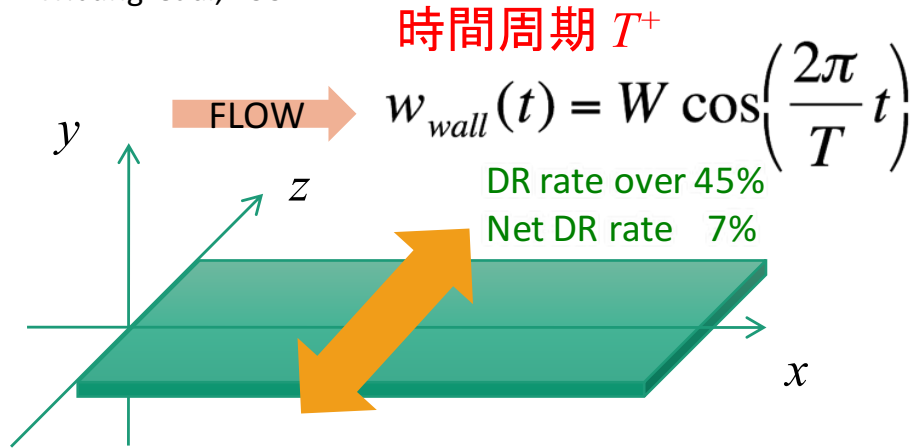
制御の対象

- 制御の手法はさまざま
- 利用する流体物理がそれぞれ異なる
 - **受動制御**
 - 層流化翼
 - 粘性抵抗を低減するため遷移を抑制する
 - ボルテックスジェネレータ
 - 圧力抵抗を低減するため遷移を促進する
 - リブレット
 - (未解明)
 - **能動制御**
 - 電動ファン
 - 渦を生成することで流体混合を促進する
 - 食道のぜん動運動 (プレデターミンド制御)
 - (未解明)

プレデターミンド制御

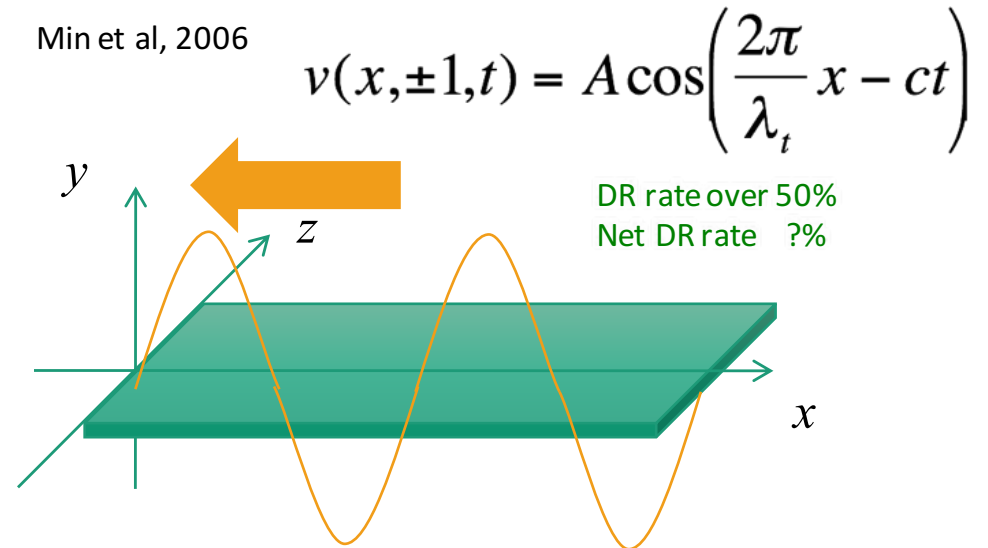
時間周期制御

W. Jung et al, 1992



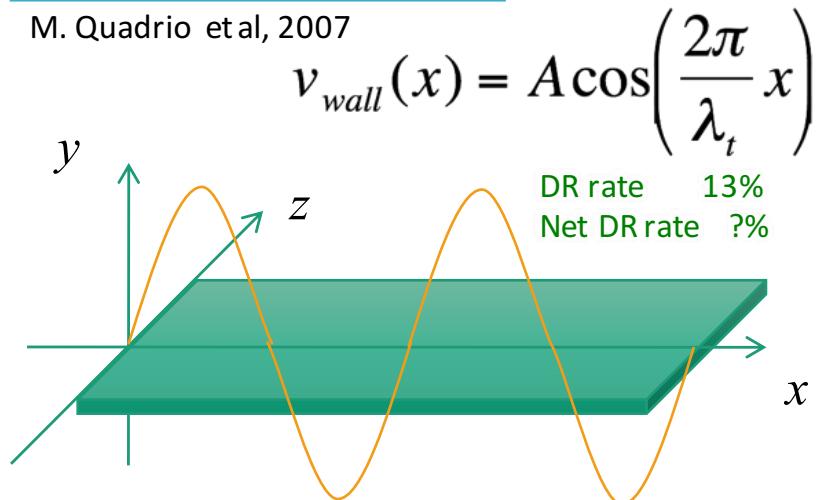
進行波制御

Min et al, 2006



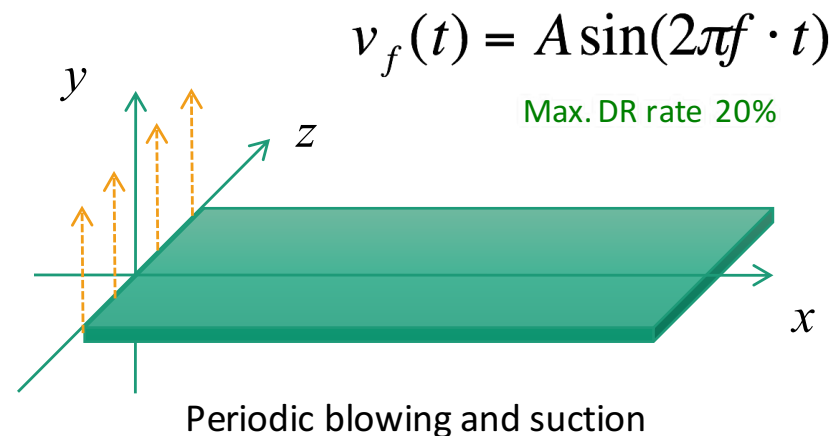
流れ方向周期制御

M. Quadrio et al, 2007



局所制御

Choi et al, 1994



スパン方向壁振動制御

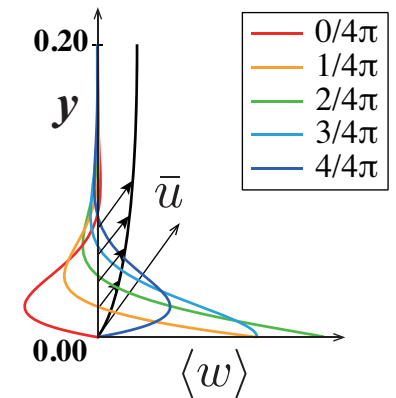
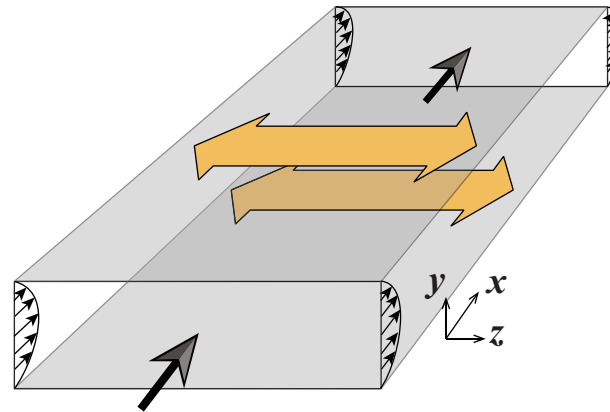
- チャネル両壁を, スパン方向に振動させる制御

- 制御パラメータ

- 大きさ : W_m

- 振動周期 : T

$$w_{wall}(t) = W_m \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$$

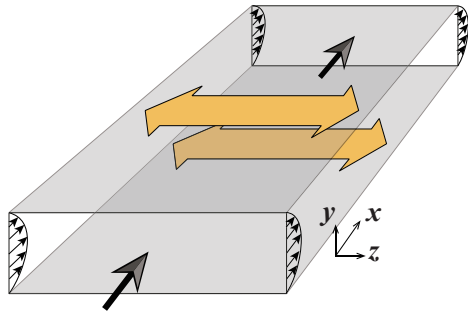
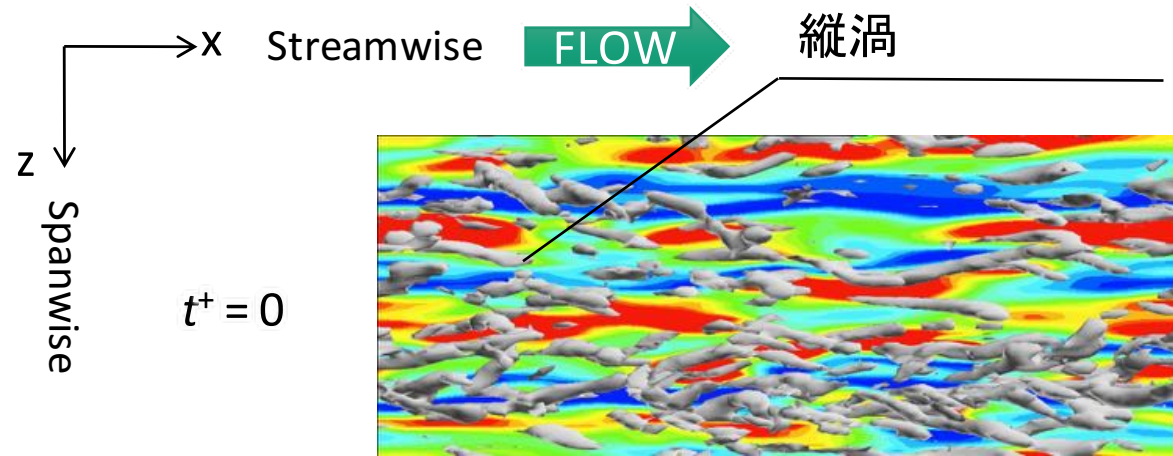


第二ストークス問題の解(層流を仮定)

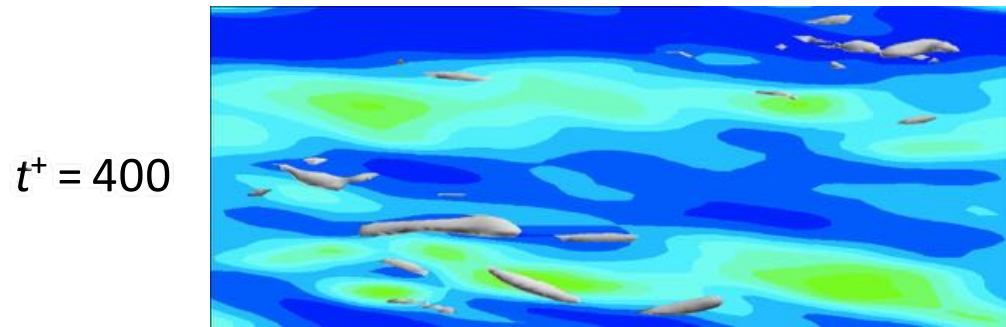
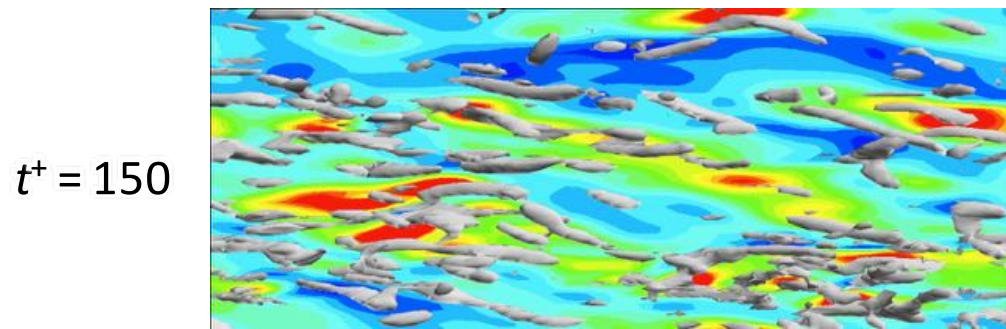
$$\langle w \rangle (y, t) = W_m \exp\left(-\frac{y}{\delta}\right) \sin\left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{y}{\delta}\right), \delta = \sqrt{\frac{T}{\pi}}$$

ストークス層厚さ

スパン方向壁振動制御



$$w_{wall}(t) = W_m \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$$



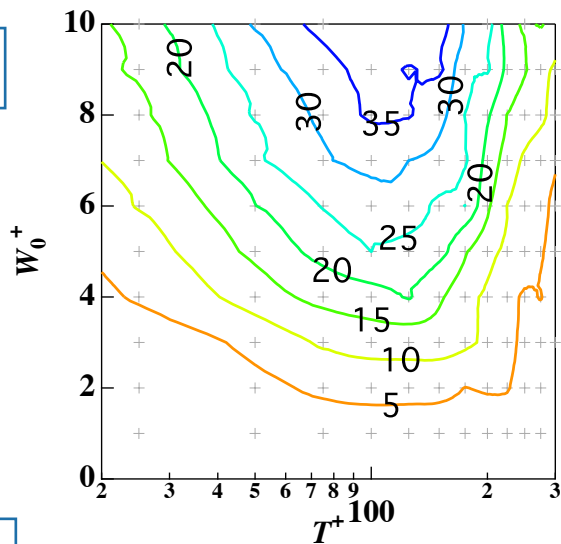
λ_z^+
471.2

Contour : U at $y^+ = 5$ (red 7.0, blue 2.5) Iso-surface : $Q^+ = -0.013$

制御の効果

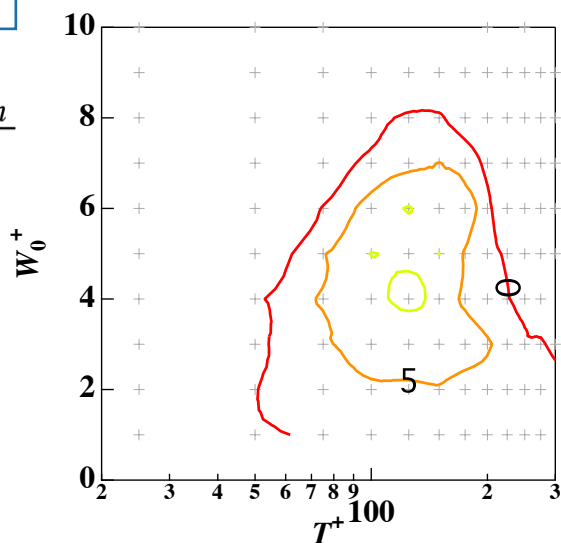
摩擦抵抗低減率

$$DR = \frac{P_0 - P}{P_0}$$



省エネルギー率

$$S = \frac{P_0 - P - P_{in}}{P_0}$$



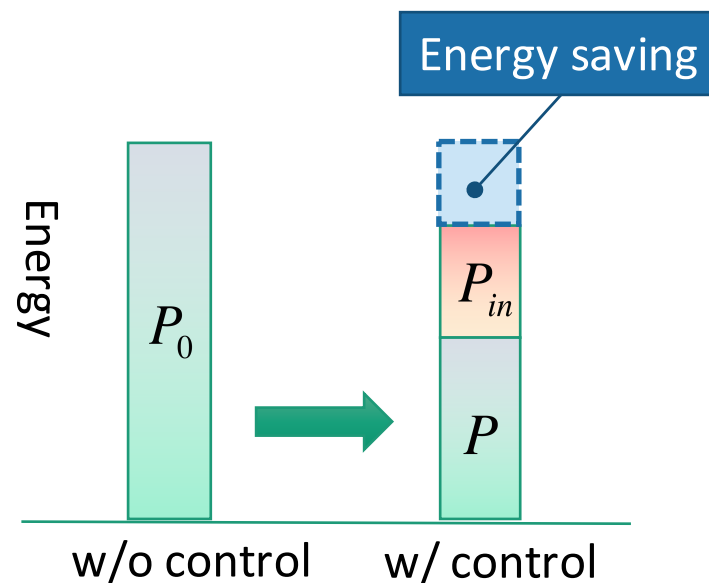
(Yakeno et al, 2010)

圧力勾配一定条件

P_0 : 非制御時のポンプ動力

P : 制御時のポンプ動力

P_{in} : 制御に要するエネルギー



粘性摩擦抵抗とレイノルズ応力

$$C_f = \left(\frac{2\tau_w (= \rho u_\tau^2)}{\rho U_b^2} \right) = \frac{6}{U_b^2 \text{Re}_\tau} + 6 \int_0^{\text{Re}_\tau} \left(1 - \frac{y^+}{\text{Re}_\tau} \right) \left(-\overline{u'v'^+} \right) dy^+$$

(Ref. Fukagata et al., 2002)

$$\bar{u}_b^+ = \frac{\text{Re}_\tau}{3} - \int_0^{\text{Re}_\tau} \left(1 - \frac{y^+}{\text{Re}_\tau} \right) \left(-\overline{u'^+v'^+} \right) dy^+$$

質量流量一定条件

層流による部分 乱流による部分

(Ref. Yakeno et al., 2014)

圧力勾配一定条件

※ レイノルズ応力テンソル

$$-\overline{u'v'} = \sqrt{\overline{u'^2}} \sqrt{\overline{v'^2}} \cdot R_{u'v'}$$

$$\begin{pmatrix} \overline{u'^2} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'^2} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'^2} \end{pmatrix}$$

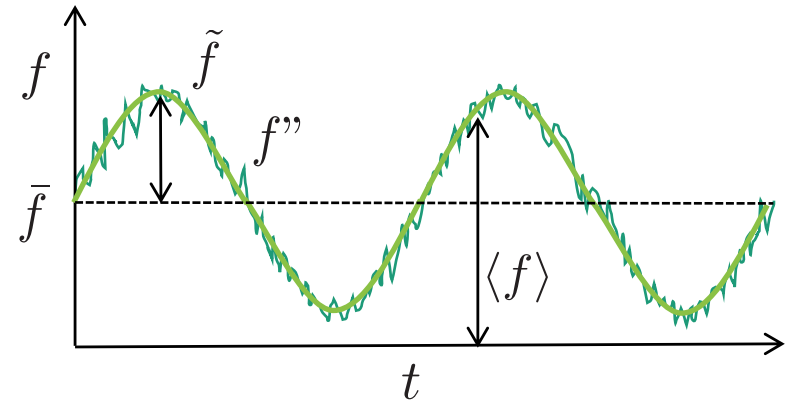
流れ方向速度の乱れ強度
高さ方向速度の乱れ強度
 u' と v' の相関係数

相関係数 $R_{u'v'} = 1$ に近い \rightarrow 縦渦構造

振動場の乱流統計量の解析

$$f = \bar{f} + f' \quad f = \bar{f} + \tilde{f} + f''$$

$$f = \langle f \rangle + f''$$



位相平均

$$\langle f \rangle (x, z, \phi) = \frac{1}{N} \frac{1}{L_y} \sum_{n=1}^N \int_{L_y} f(x, y, z, \phi + 2\pi n) dy$$

位相変動

$$\tilde{f}_{rms}(x, z, \phi) = \frac{1}{N} \frac{1}{L_y} \sqrt{\sum_{n=1}^N \left\{ \int_{L_y} (f(x, y, z, \phi + 2\pi n) - \bar{f}(x, z))^2 dy \right\}}$$

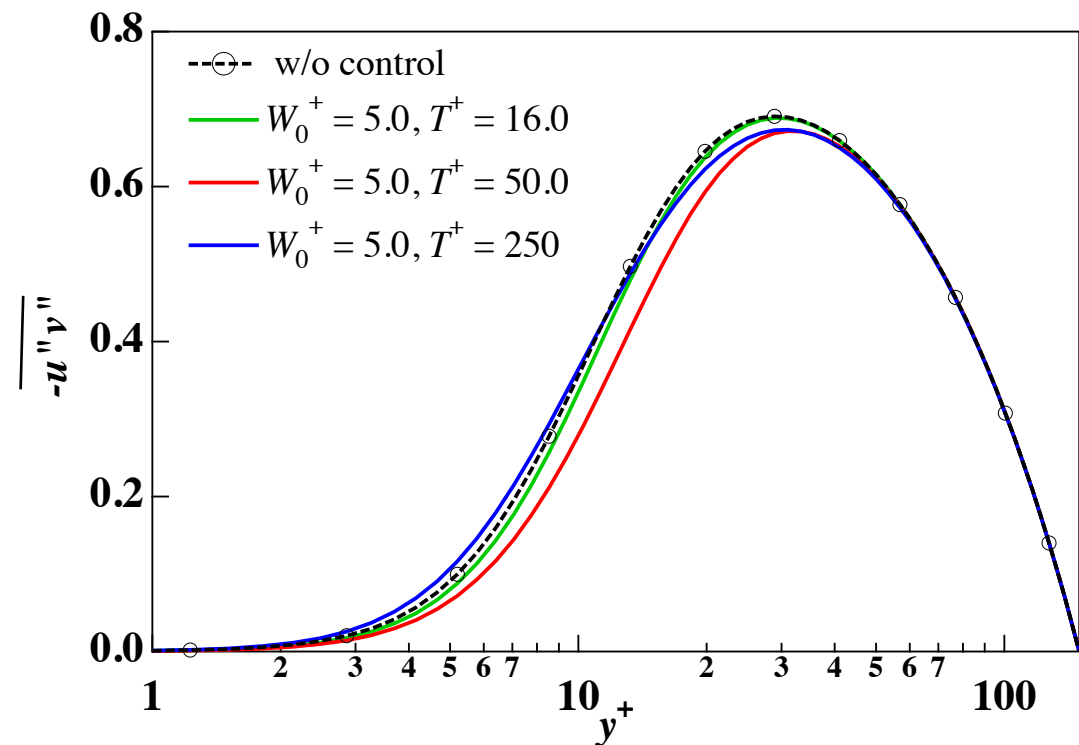
乱流変動

$$f''_{rms}(x, z, \phi) = \frac{1}{N} \frac{1}{L_y} \sqrt{\sum_{n=1}^N \left\{ \int_{L_y} (f(x, y, z, \phi + 2\pi n) - \langle f \rangle (x, z, \phi))^2 dy \right\}}$$

レイノルズ応力の分布

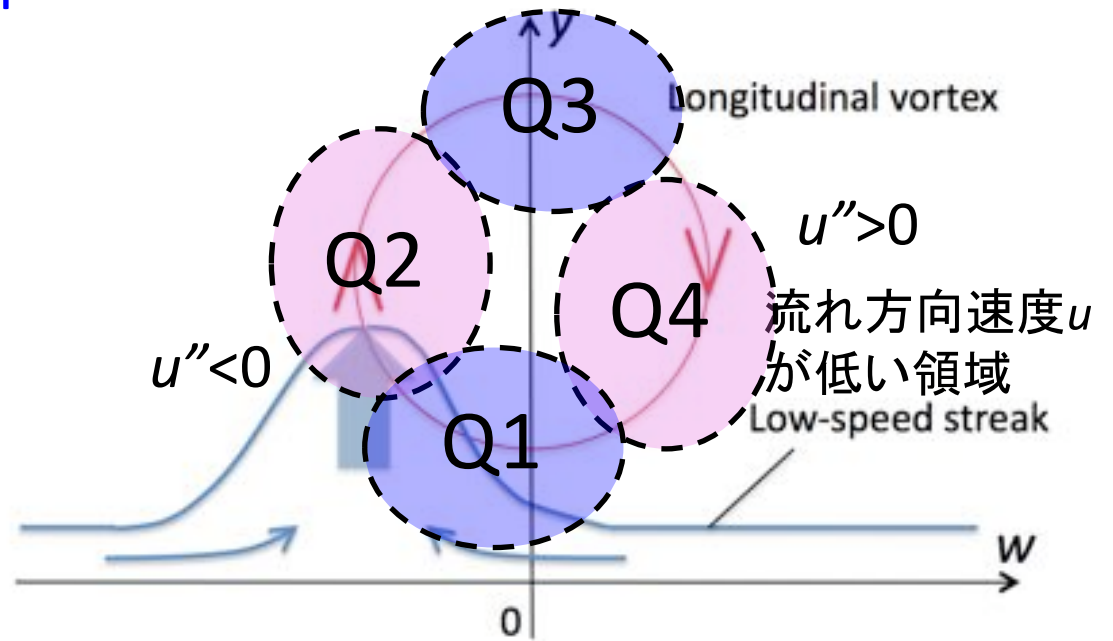
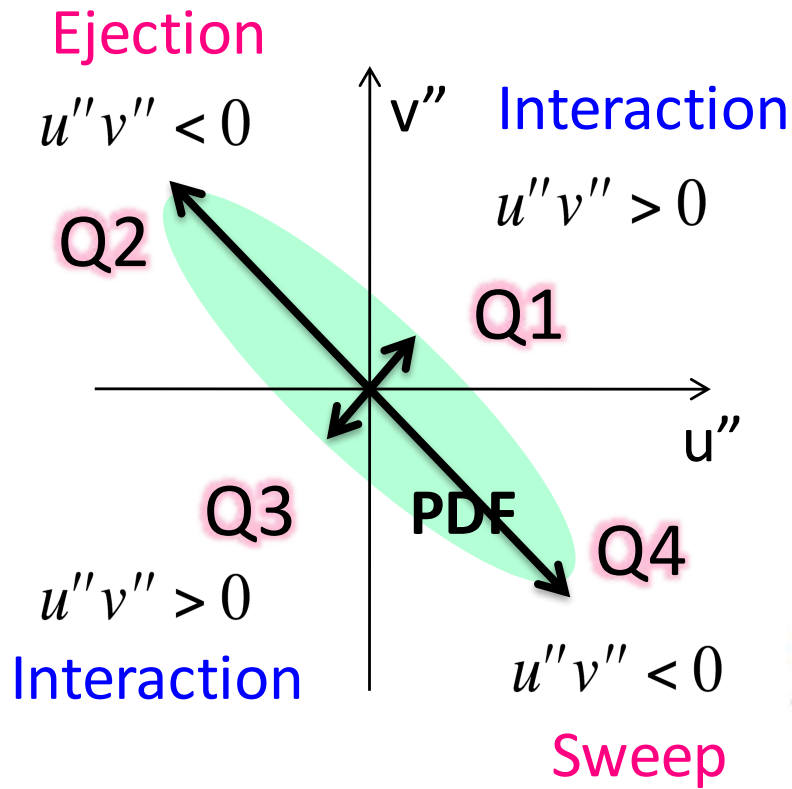
- チャネル乱流場のレイノルズ応力
- レイノルズ応力は位相変動とそれ以外の乱れ成分に分解できる

$$\begin{aligned}
 \overline{u'v'} &= \overline{\widetilde{u}'\widetilde{v}'} = \overline{(\widetilde{u} + u'')(\widetilde{v} + v'')} \\
 &= \overline{\widetilde{u}\widetilde{v} + u''\widetilde{v} + \widetilde{u}v'' + u''v''} \\
 &= \overline{\widetilde{u}\widetilde{v}} + \overline{u''v''} \\
 &= \overline{u''v''}.
 \end{aligned}$$



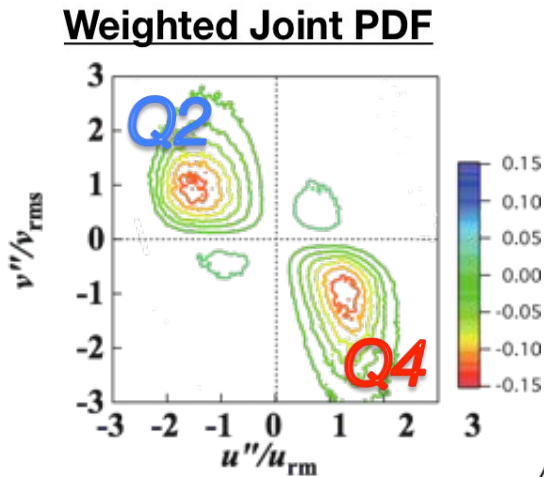
(Yakeno et al., 2014)

渦構造とレイノルズ応力

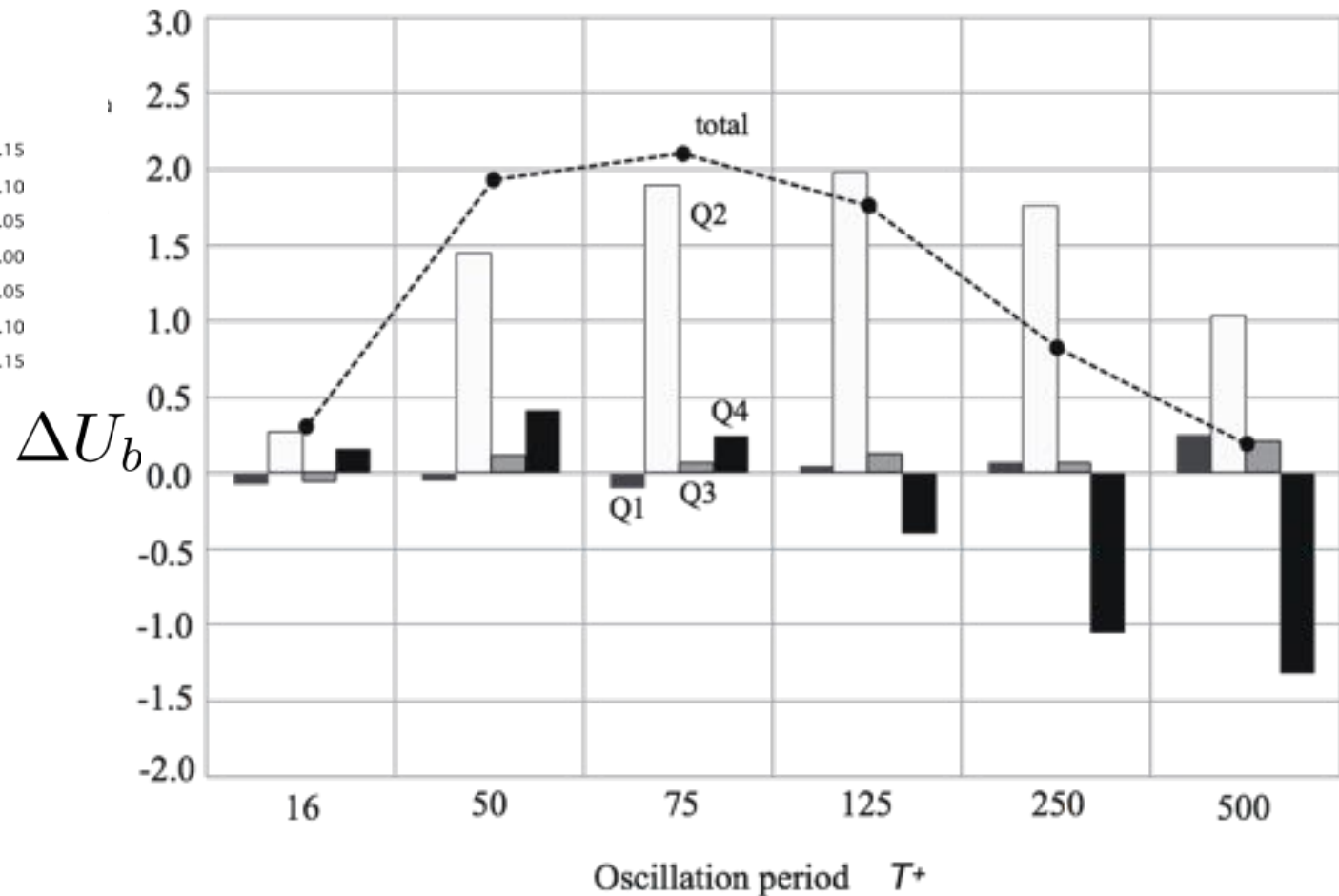


レイノルズ応力四象限の U_b 増加への寄与

$$\bar{u}_b^+ = \frac{\text{Re}_\tau}{3} - \int_0^{\text{Re}_\tau} \left(1 - \frac{y^+}{\text{Re}_\tau}\right) \left(-\overline{u'v'}\right) dy^+$$

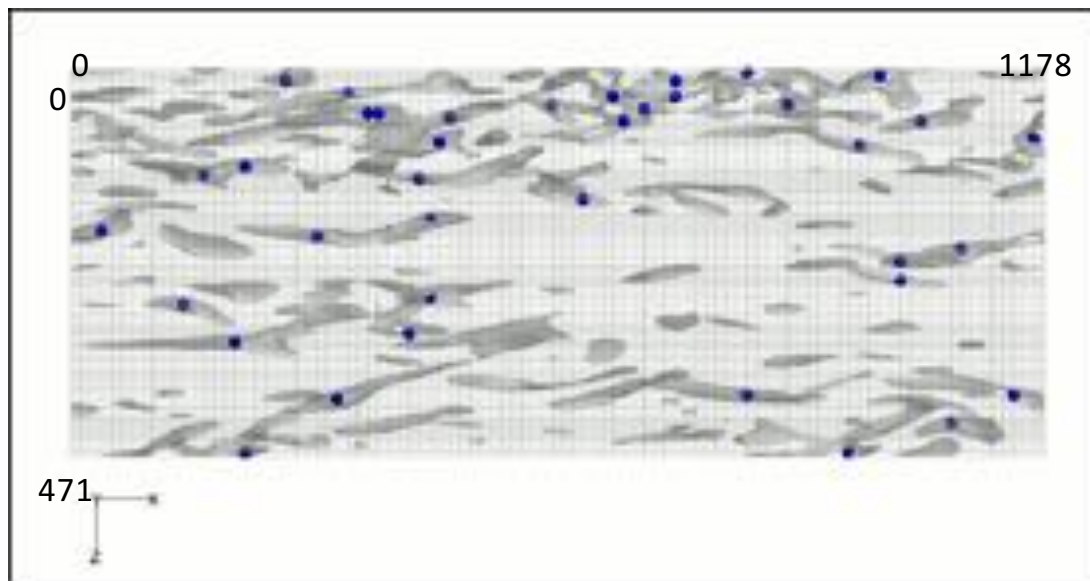


壁面からの高さyの
重み付き積分量



- ✓ $T = 75$ が最適な制御周期, レイノルズ応力 Q2 イベントが最も低減
- ✓ 長い制御周期では, レイノルズ応力 Q4 イベントが増加 → 摩擦が増加する 16

縦渦構造の条件付き抽出

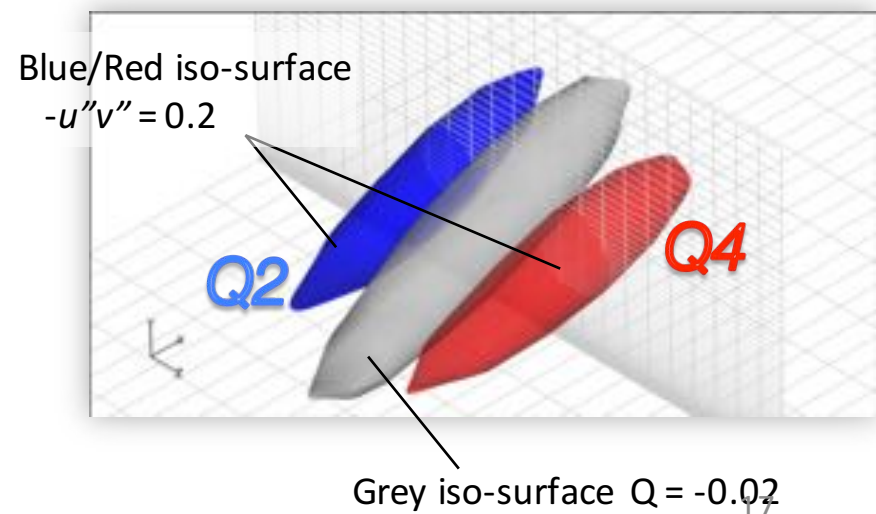


条件付き抽出した縦渦構造と
レイノルズ応力 $Q2$ と $Q4$

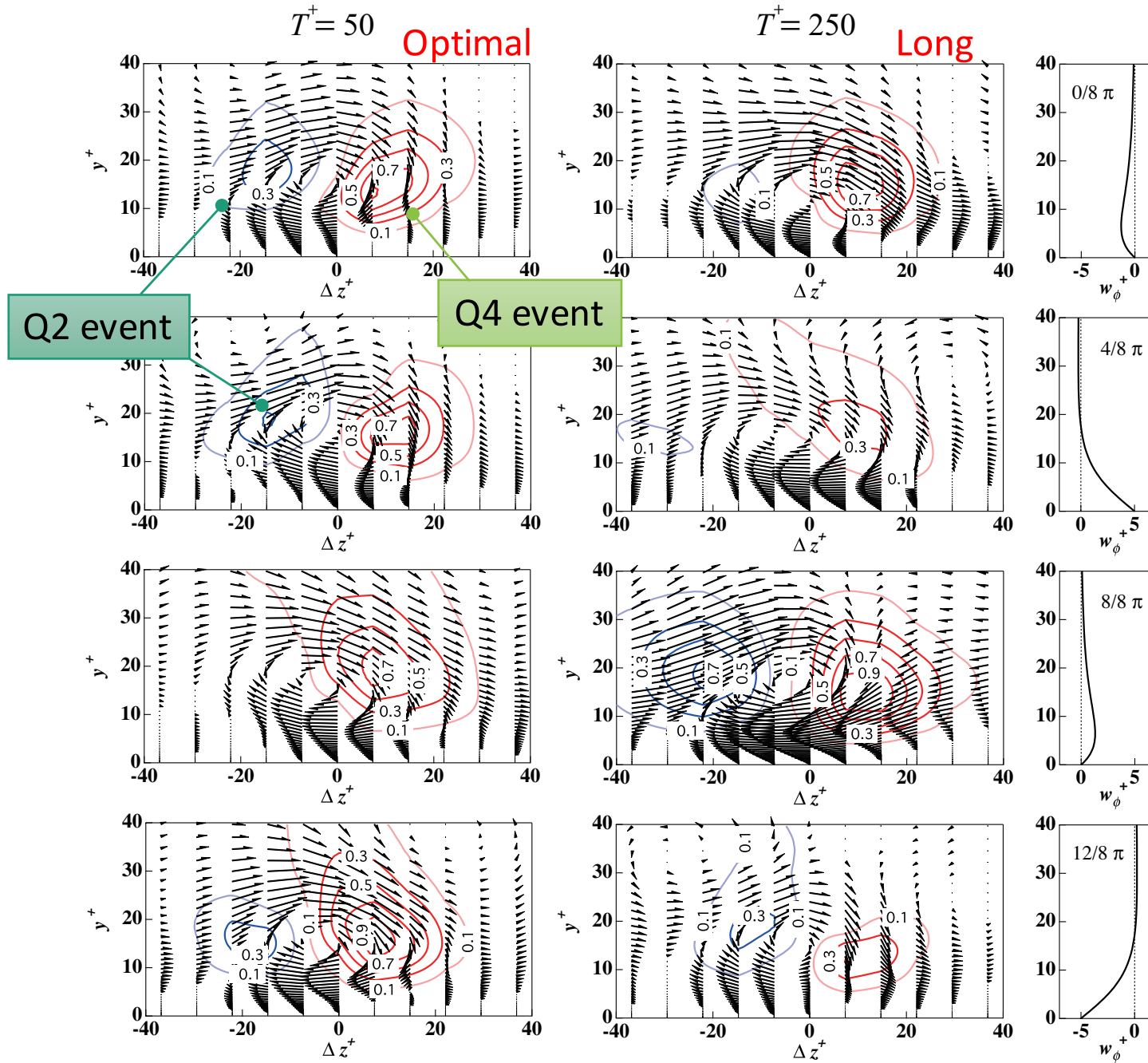
抽出条件

- ✓ $Q = \partial u_i / \partial x_j \partial u_j / \partial x_i < -0.02$
- ✓ Q の最小となる点
- ✓ 回転方向 $\omega_x > 0$
- ✓ 平均する渦構造周りの検査体積

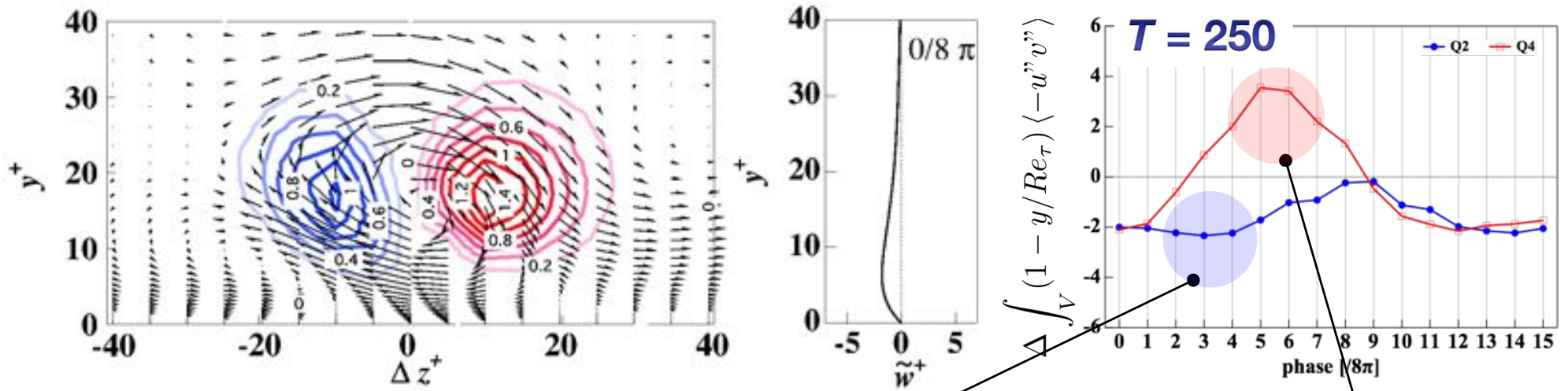
$$\lambda_x = -60 \sim 60$$
$$\lambda_y = 60 \quad \lambda_z = -60 \sim 60$$



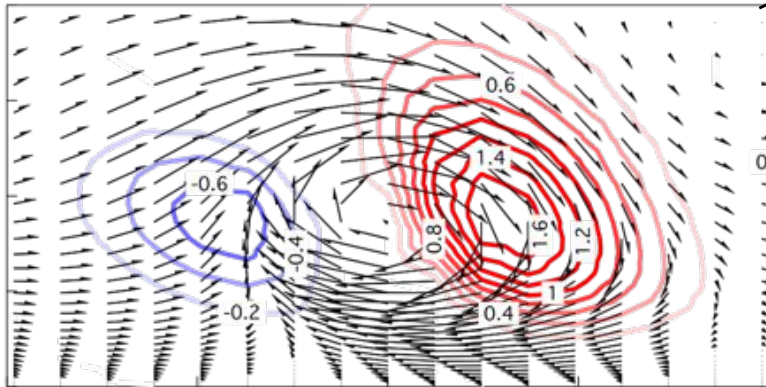
レイノルズ応力の位相変化



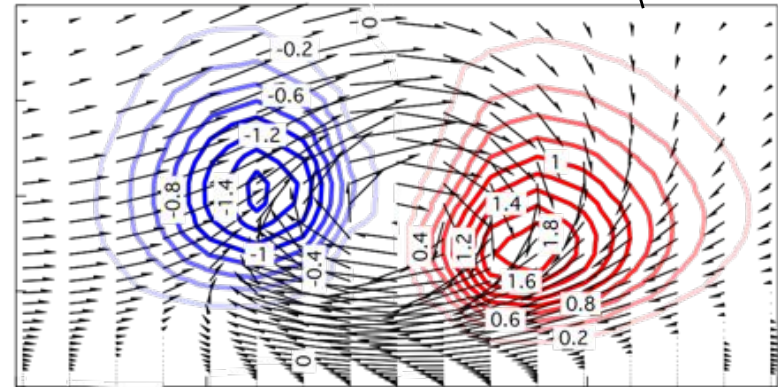
Q2とQ4 低減/増加の起こる位相



Q2の低減

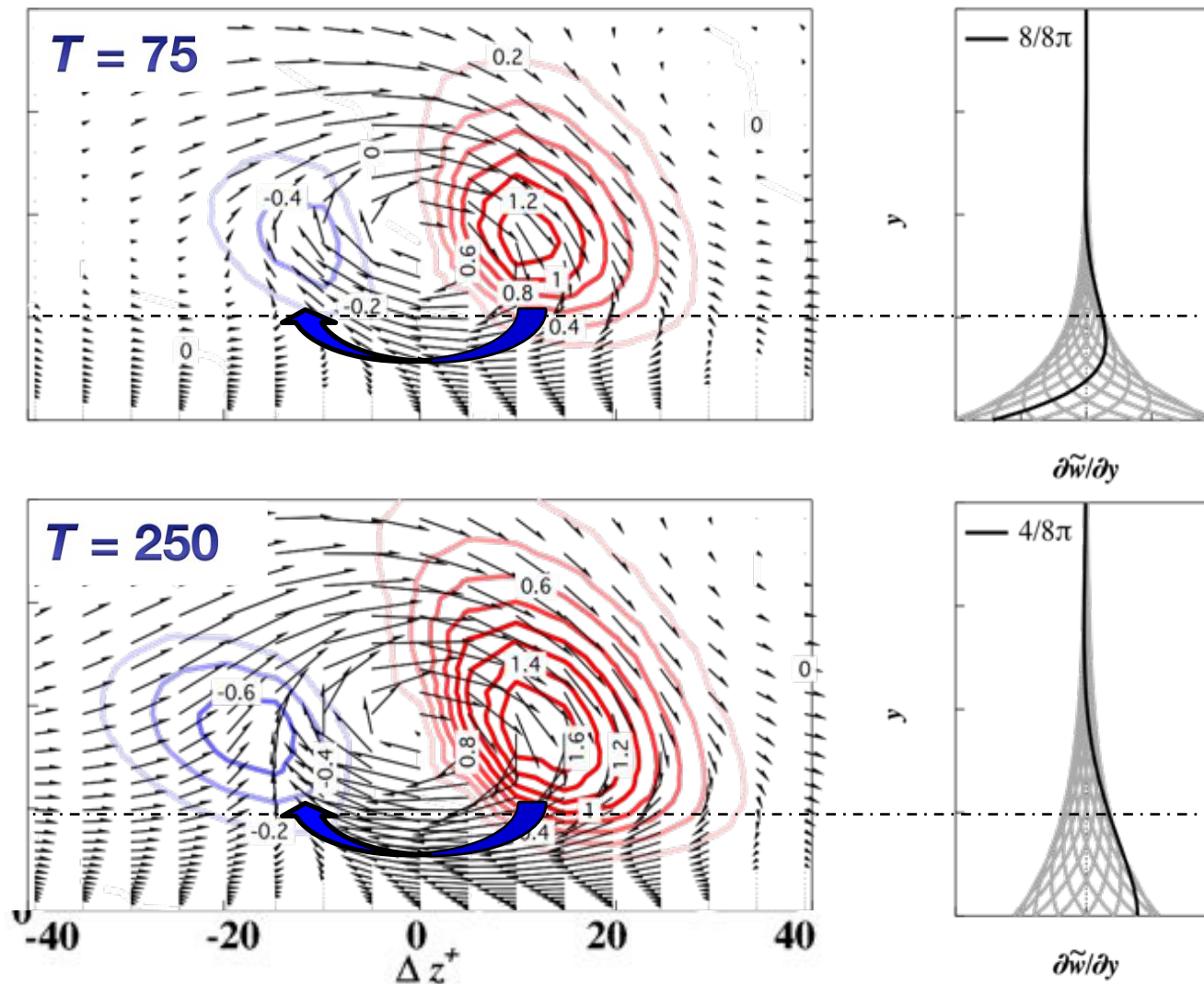


Q4の増加



Q2 の低減

(Yakeno et al., 2014)



Q2の低減は $\partial\tilde{w}/\partial y$ が渦の下部 $y = 10$ で最大となる位相となっている

縦渦構造とスパン方向傾き

(Yakeno et al., 2014)

- 乱流エネルギー方程式 \bar{u}_i means $\langle u_i \rangle_\phi$

$$\frac{\partial \overline{u''^2}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x_k} \overline{u''^2 u_k''} + \text{Re}^{-1} \nabla^2 \overline{u''^2}$$

Production $-2\overline{u'' v''} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + 2\frac{p''}{\rho} \left(\frac{\partial u''}{\partial x} \right) - 2\frac{\partial}{\partial x} \overline{u'' p''} + \varepsilon_{11}$

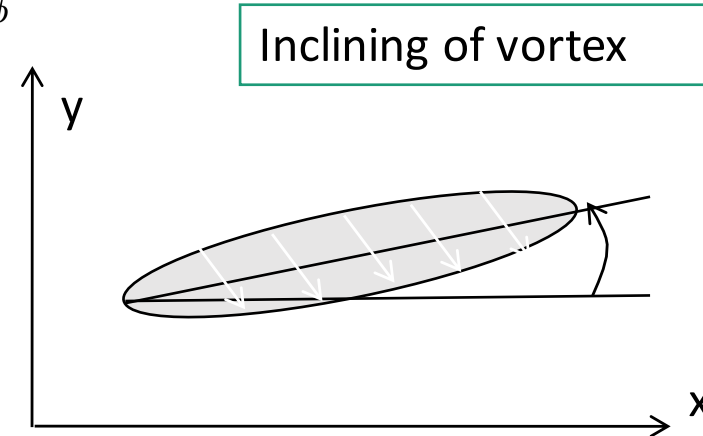
$$\frac{\partial \overline{v''^2}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x_k} \overline{v''^2 u_k''} + \text{Re}^{-1} \nabla^2 \overline{v''^2}$$

Redistribution $\therefore \frac{\partial u_i''}{\partial x_i} = 0$

$$+ 2\frac{p''}{\rho} \left(\frac{\partial v''}{\partial y} \right) - 2\frac{\partial}{\partial y} \overline{v'' p''} + \varepsilon_{22}$$

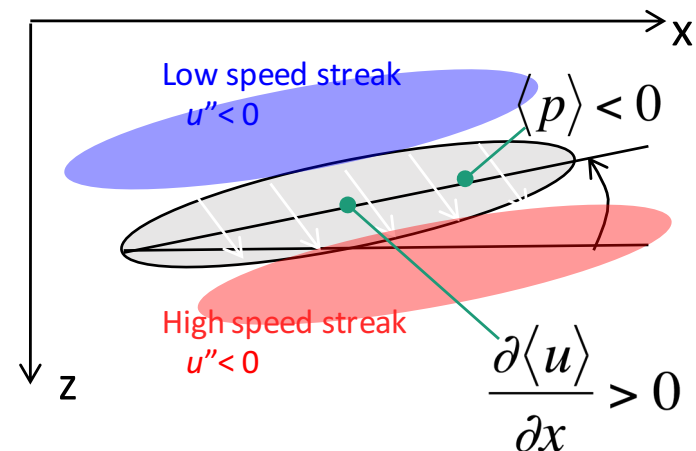
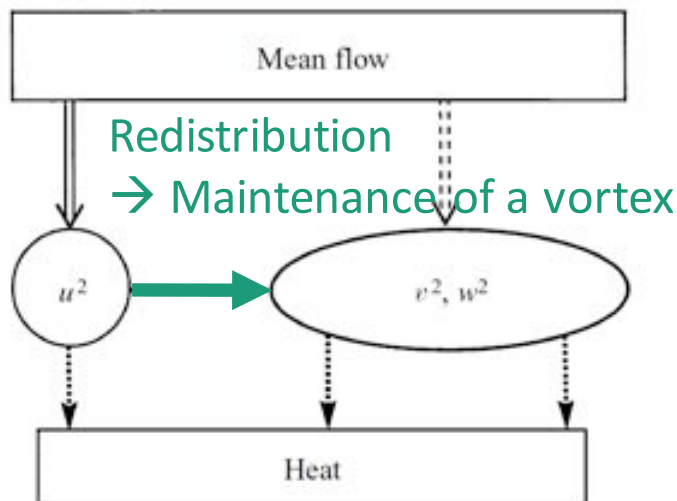
$$\frac{\partial \overline{w''^2}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x_k} \overline{w''^2 u_k''} + \text{Re}^{-1} \nabla^2 \overline{w''^2}$$

$$- 2\overline{v'' w''} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + 2\frac{p''}{\rho} \left(\frac{\partial w''}{\partial z} \right) - 2\frac{\partial}{\partial z} \overline{w'' p''} + \varepsilon_{33}$$



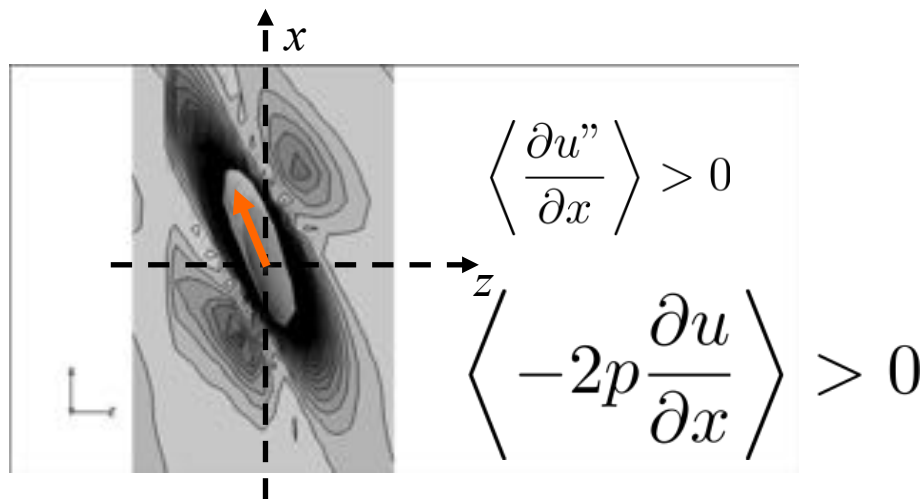
$$\langle p \rangle \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial x} < 0$$

tilting of vortex

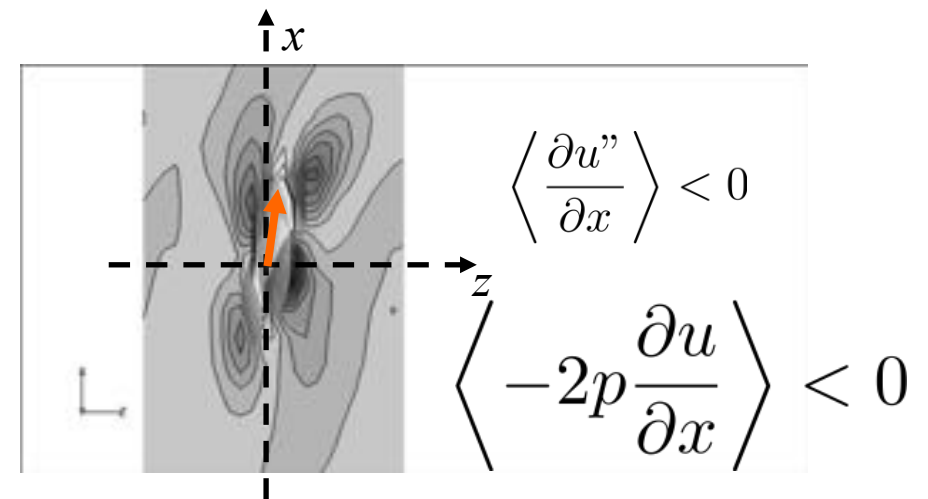


縦渦構造の傾き

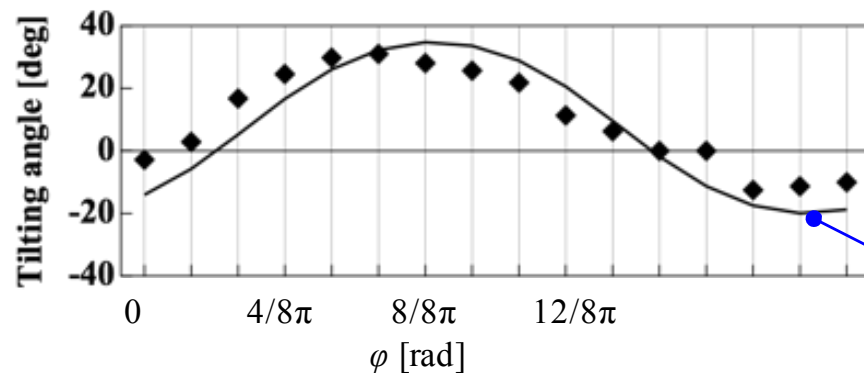
正の方向



負の方向



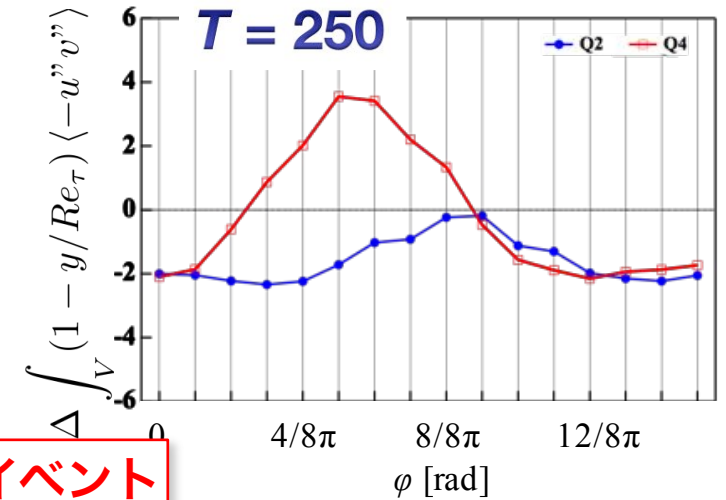
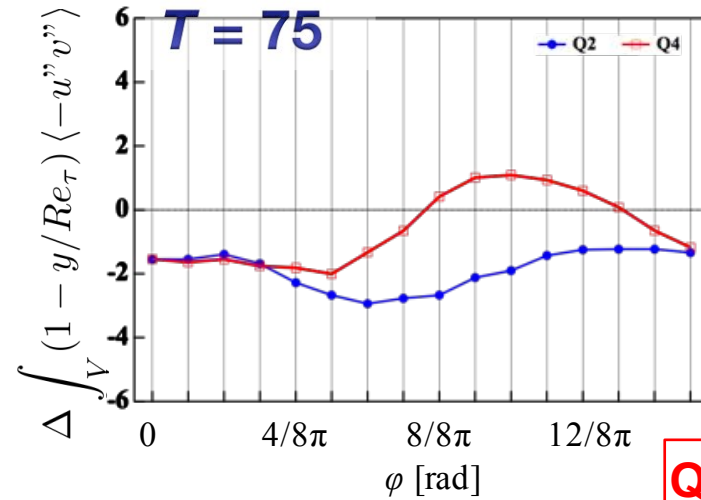
Iso-surface $Q = -0.02$
grey contour $\langle -2p'' \partial u'' / \partial x \rangle$



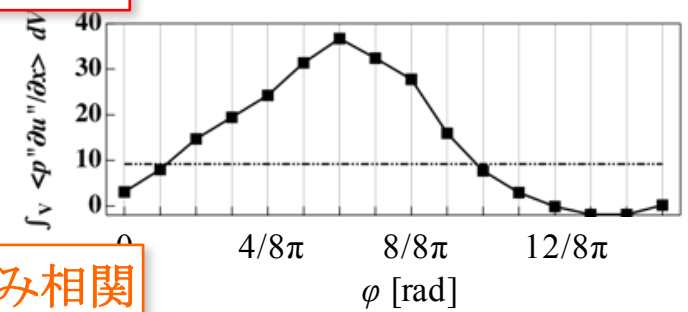
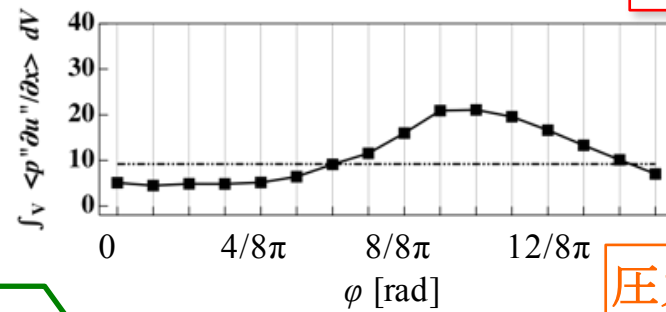
$\arctan \left(\frac{\partial \tilde{w} / \partial y}{\partial \bar{u} / \partial y} \right)_{y \sim 15}$

Q4の低減と増加

(Yakeno et al., 2014)



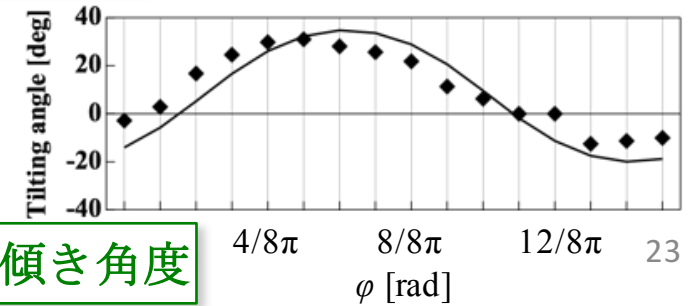
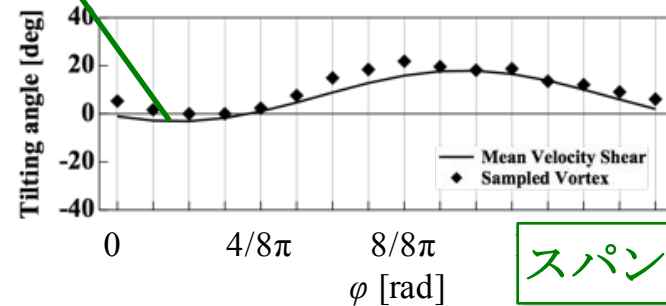
Q4イベント



圧力歪み相関

縦渦構造の傾き角度は
y~15 付近の
平均速度勾配の傾きに
一致する

$$\arctan \left(\frac{\partial \tilde{w} / \partial y}{\partial \bar{u} / \partial y} \right)_{y \sim 15}$$



スパン方向傾き角度

摩擦抵抗低減効果

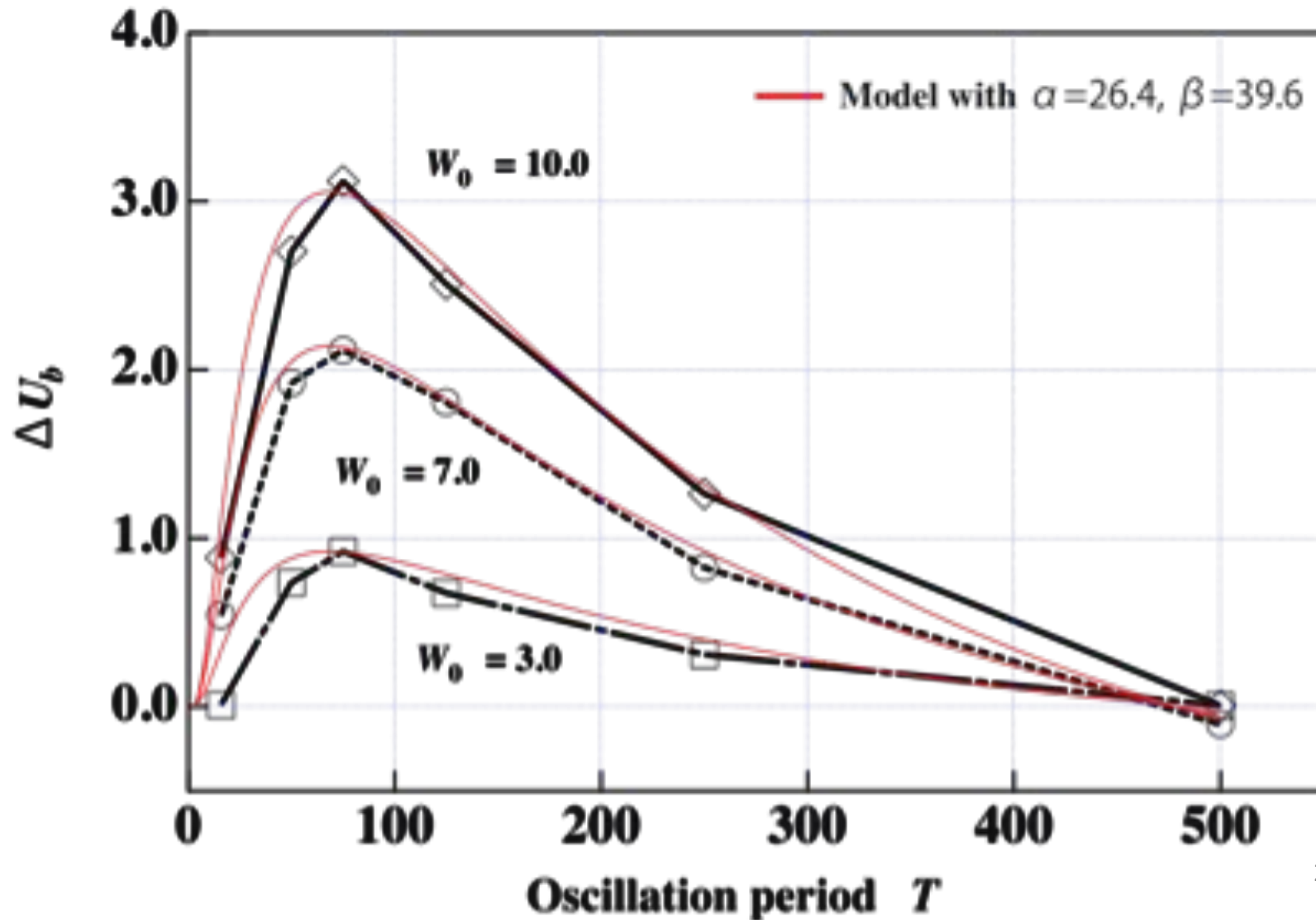
- ✓ Q2イベントの低減は渦の下部 $y \sim 10$ での渦回転と反対方向の平均速度剪断が最大となる位相で起こる
- ✓ 長い周期でのQ4の増加は渦の存在する $y \sim 15$ 付近の平均速度剪断により渦構造が傾けられ、渦内部の圧力ひずみ相関が増加し、生成が増加するために起こる
- ✓ 摩擦抵抗低減効果は、ストークス層の解析解から得られる $\partial \tilde{w} / \partial y$ によって以下のように見積もられると考えられる

$$\Delta U_b \text{ model} = \alpha \left(\frac{\partial \tilde{w}}{\partial y} \Big|_{y=10} \right)_{rms} - \beta \left(\frac{\partial \tilde{w}}{\partial y} \Big|_{y=15} \right)_{rms}$$

Q2 の低減

Q4 の増加

バルク流量増加 ΔU_b

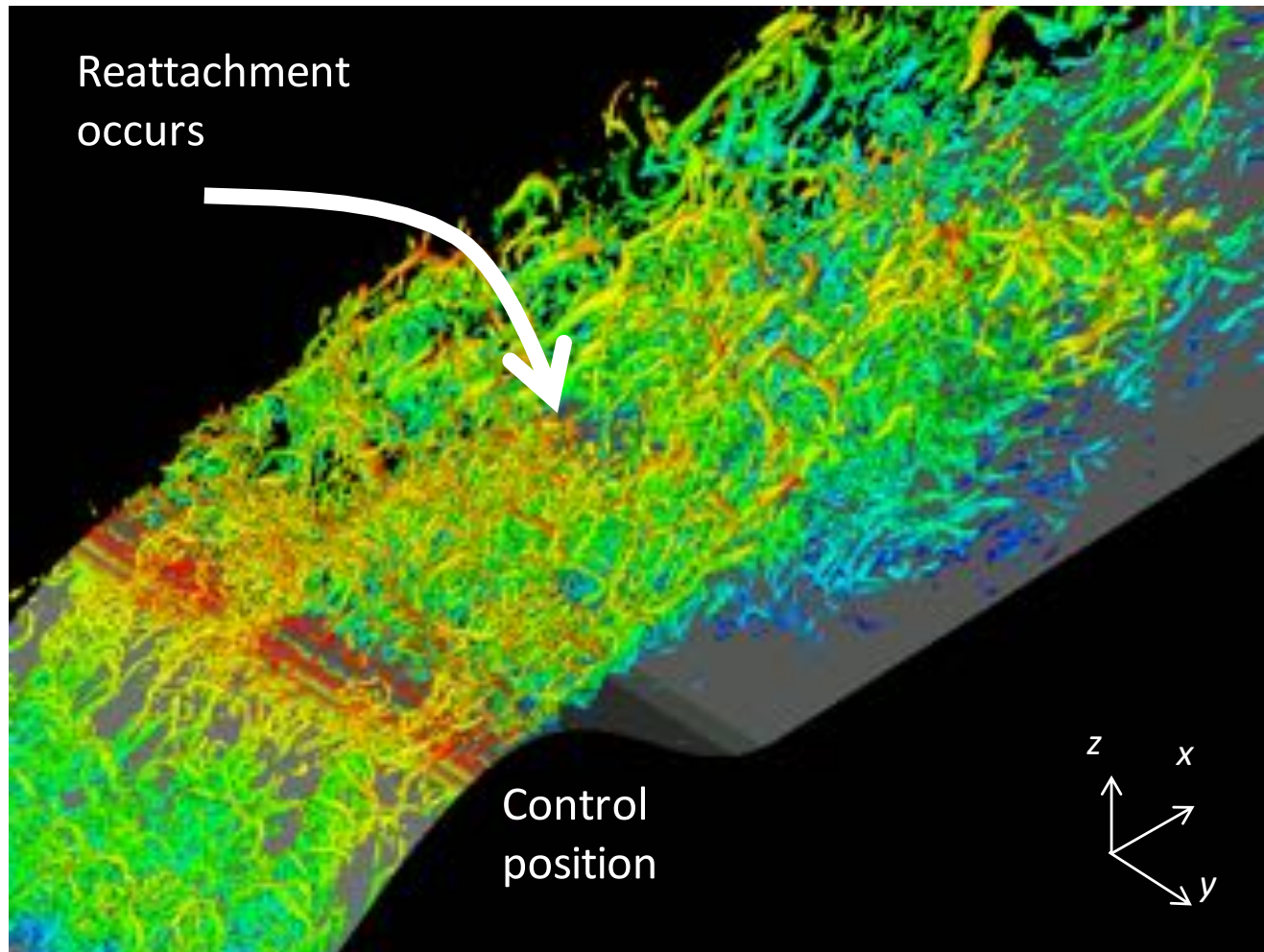


今日の内容

「流体の秩序運動に基づく機器最適設計への試み」

- 流体制御の分類 -柔よく剛を制す-
- 1. スパン方向壁振動による摩擦抵抗低減制御
 - 1-(a) 壁乱流準秩序構造について
 - 1-(b) スパン方向壁振動による制御性能と制御機構について
- 2. 二次元ハンプ周り剥離制御
 - 制御性能と制御機構について

二次元ハンプ周り剥離制御

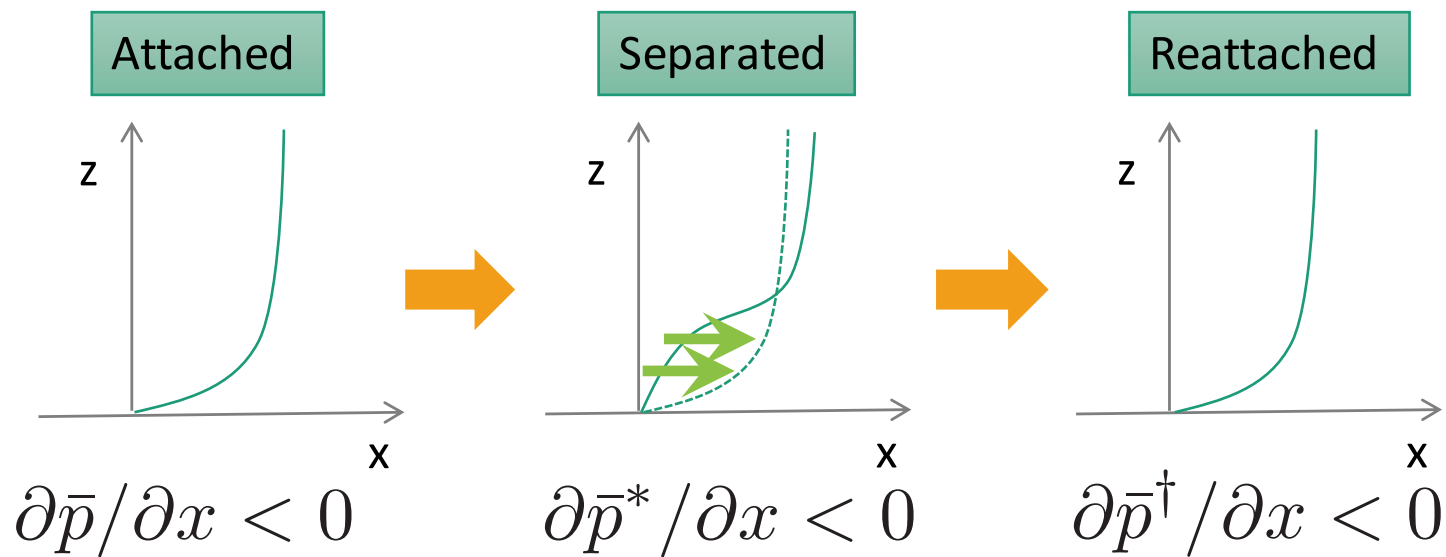


Iso-surfaces of Π
(the second
invariant of
 $\partial U_i/\partial x_j$) colored
with velocity

そもそも剥離制御では何をするのか？

- 圧力抵抗の低減が目的
- 方法: 運動量を付与する
 - 流速を増加する
 - 乱れを増加する

速度分布の変化
→ 剥離領域の低減



そもそも剥離制御では何をするのか？

- 圧力抵抗の低減が目的
- 方法: 運動量を付与する
 - 流速を増加する
 - 乱れを増加する

速度分布の変化
→ 剥離領域の低減

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \frac{1}{Re_h} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x_j \partial x_j} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \left[\frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right]$$

乱れ成分の増加による
運動量の付与

流体制御デバイス プラズマアクチュエータ

• Characteristics

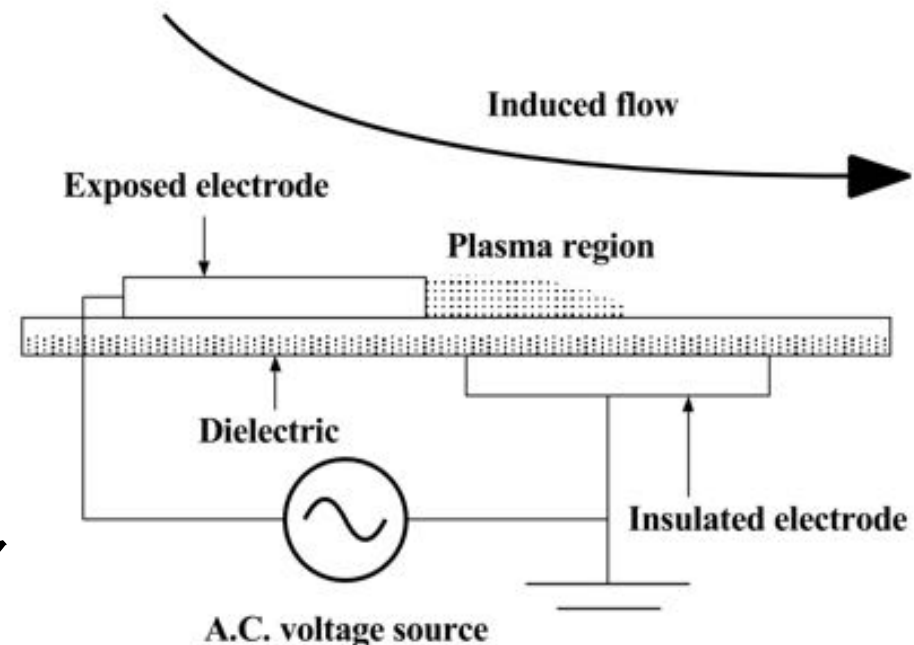
- 単純なシステム
- 機械的に動かない
- 流量の増減がない
- 高電圧が必要(危険)

• Consist of

- 薄い絶縁材料を金属膜で挟んだ構造
- 交流電圧を付与するとプラズマ状態が作られる
- 電離状態で生じた陽イオンの移動が空気流となる

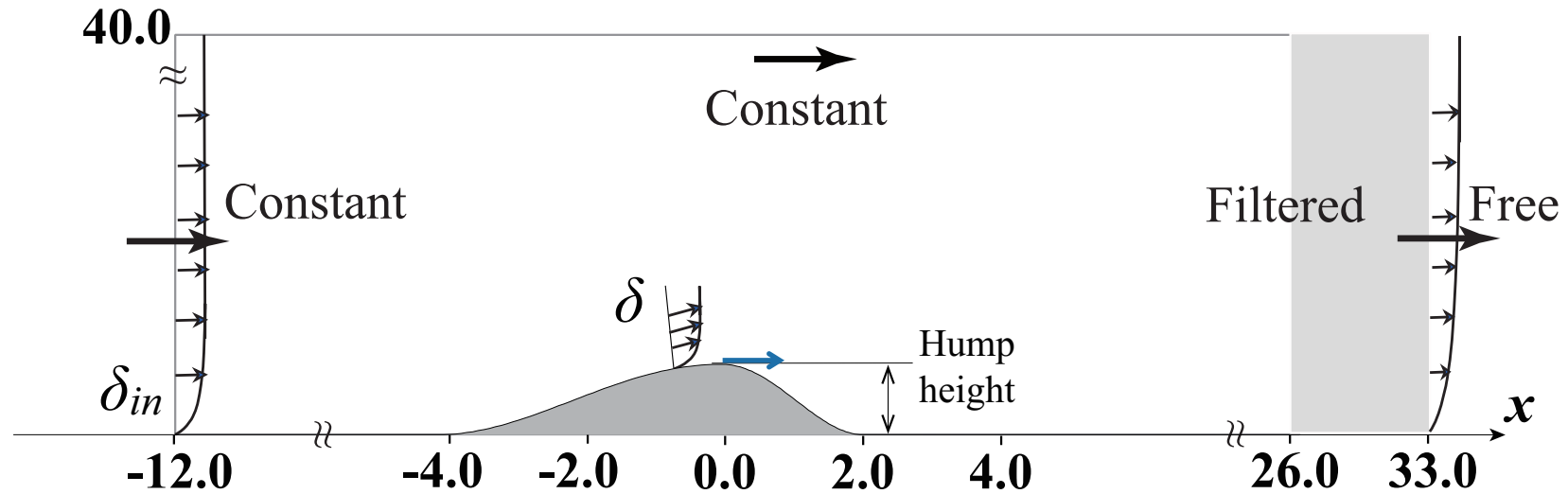
• Computation & Experiment

- Moreal, 2007, Corke et al., 2009, Cho and Shyy, 2010, Wang et al., 2013, Aono et al., 2015



Schematic diagram is from
Aono, Sekimoto, Sato, Yakeno,
Nonomura and Fujii, 2015

剥離制御の直接数値計算

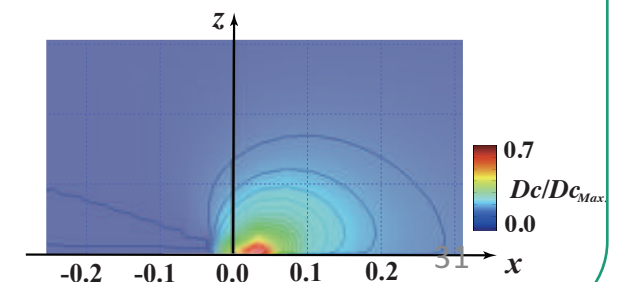


$$Re_h = \frac{\rho_{inf} u_{inf} h}{\mu_{inf}} \quad \begin{matrix} 4,000 \\ 16,000 \end{matrix}$$

$$M = \frac{u_{inf}}{a_{inf}} \quad 0.2$$

- 変数は ρ_{inf} , u_{inf} , h (ハンプ高さ) で無次元化
- 流入境界条件: ブラジウス境界層 ($\delta_{in} = 0.25$)
- 流出境界条件: 2nd order filtering
- 制御体積力はハンプ頂上 ($x_{act} = 0.0$)

Suzen model



支配方程式中のプラズマアキュエータ体積力

- 支配方程式

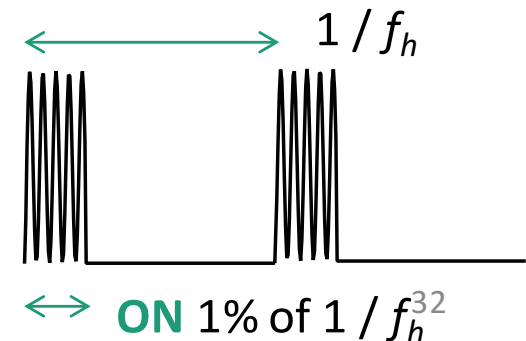
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_k}{\partial x_k} = 0,$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_k + p \delta_{ik})}{\partial x_k} = \frac{1}{Re_h} \frac{\partial \tau_{ik}}{\partial x_k} + S_i,$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial ((e + p) u_k)}{\partial x_k} = \frac{1}{Re_h} \frac{\partial u_l \tau_{kl}}{\partial x_k} + S_k u_k + \frac{1}{(\gamma - 1) Pr Re_h M^2} \frac{\partial q_k}{\partial x_k}.$$

$$S_x = D_c \sin^2(2\pi F_{base} t)$$

$$F_{base} (= f_{base} h / u_{inf}) = 240 \quad (\text{very high})$$

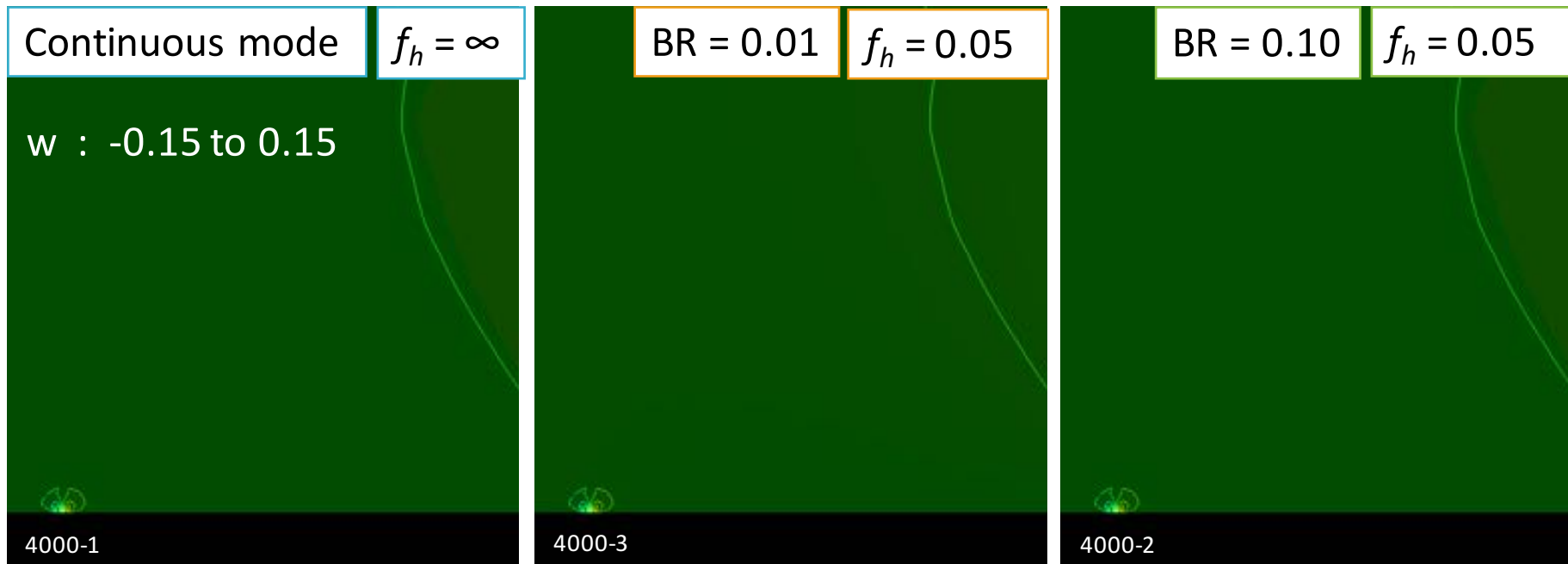


プラズマアクチューエータ体積力の誘起流れ

- ベース周波数 (f_{base}) は高く, バースト比 (BR/f_h) は小さく設定 (1%) \ll 2D vortex scale

2Dテスト計算

※ we use $BR = 0.01$

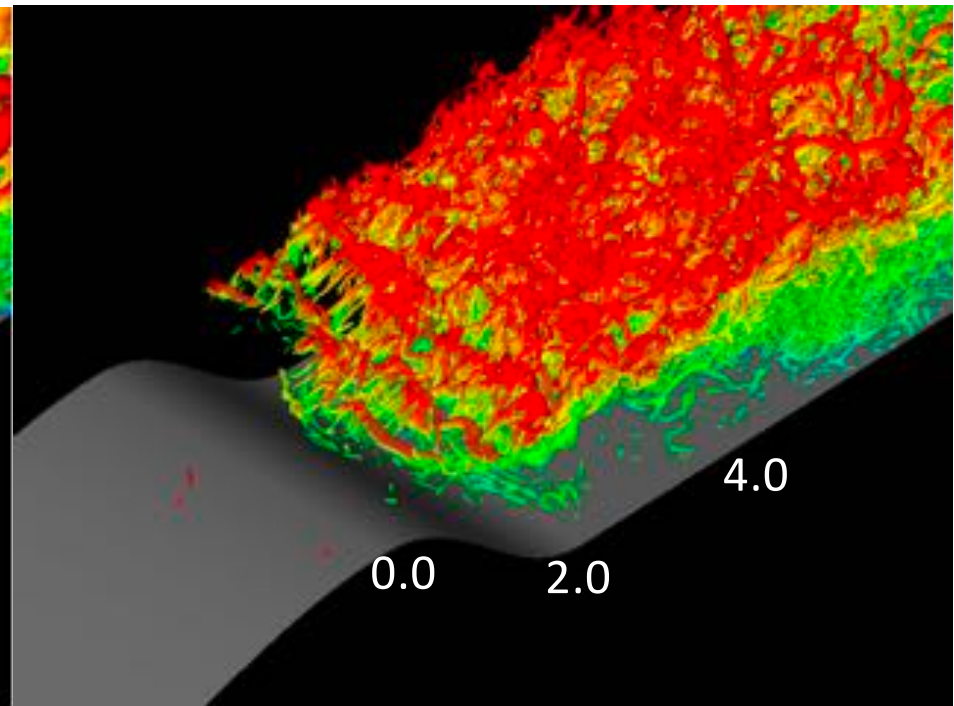
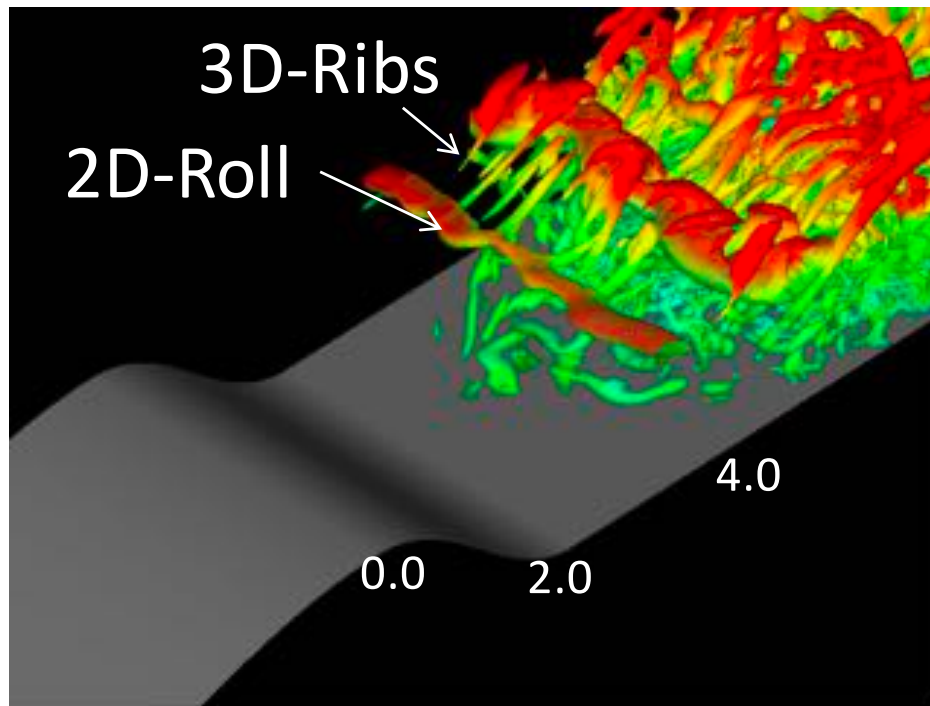


計算結果 制御なし

(Yakeno et al., 2015)

$Re_h = 4,000$

$Re_h = 16,000$



$Q = 0.1$
Contour $u : -1.0 - 1.0$

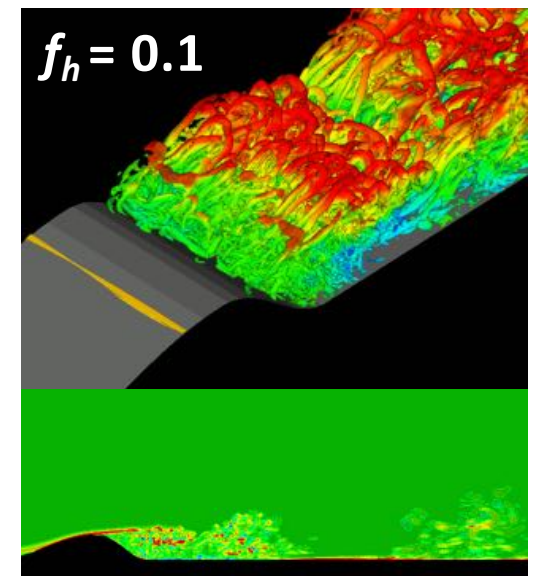
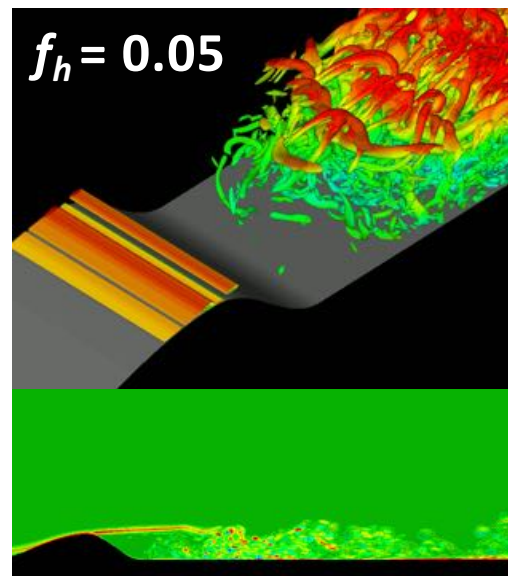
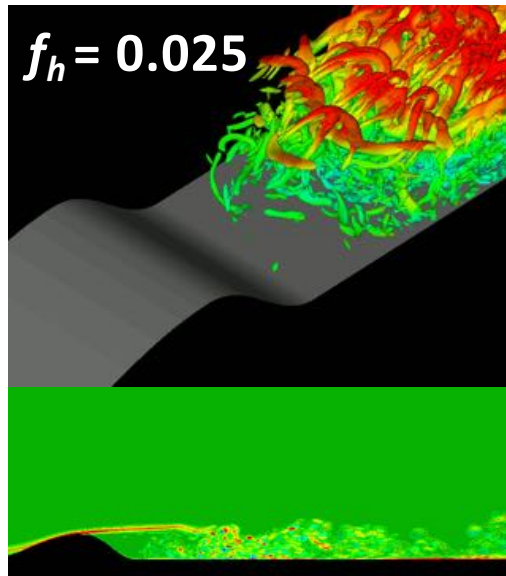
$Q = 1.0$
Contour $u : -1.0 - 1.0$

後流には二次元のロール渦が発生, その間に三次元のリブ構造が生じ, これに伴いスパン方向速度変動は増加していく

制御結果 制御あり

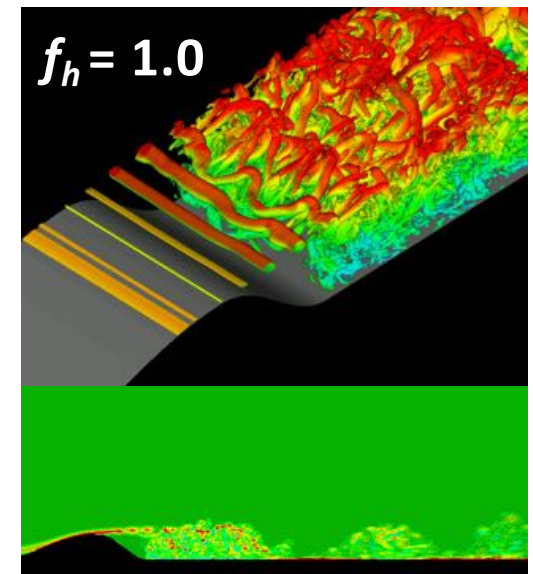
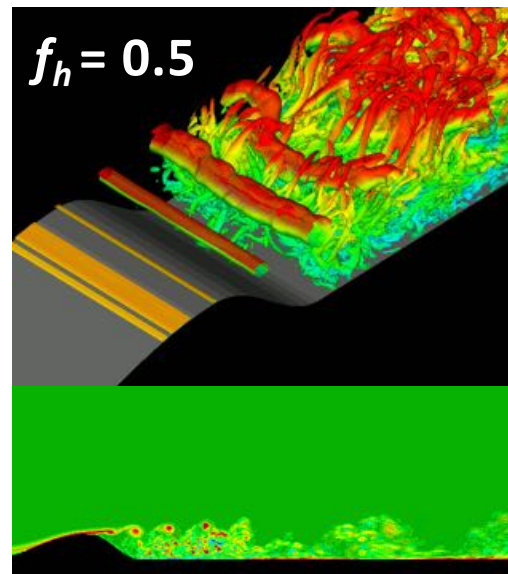
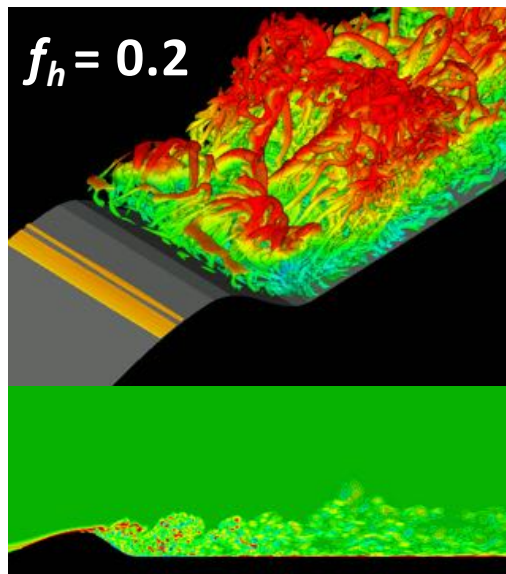
(Yakeno et al., 2015)

$$Q = 0.1$$



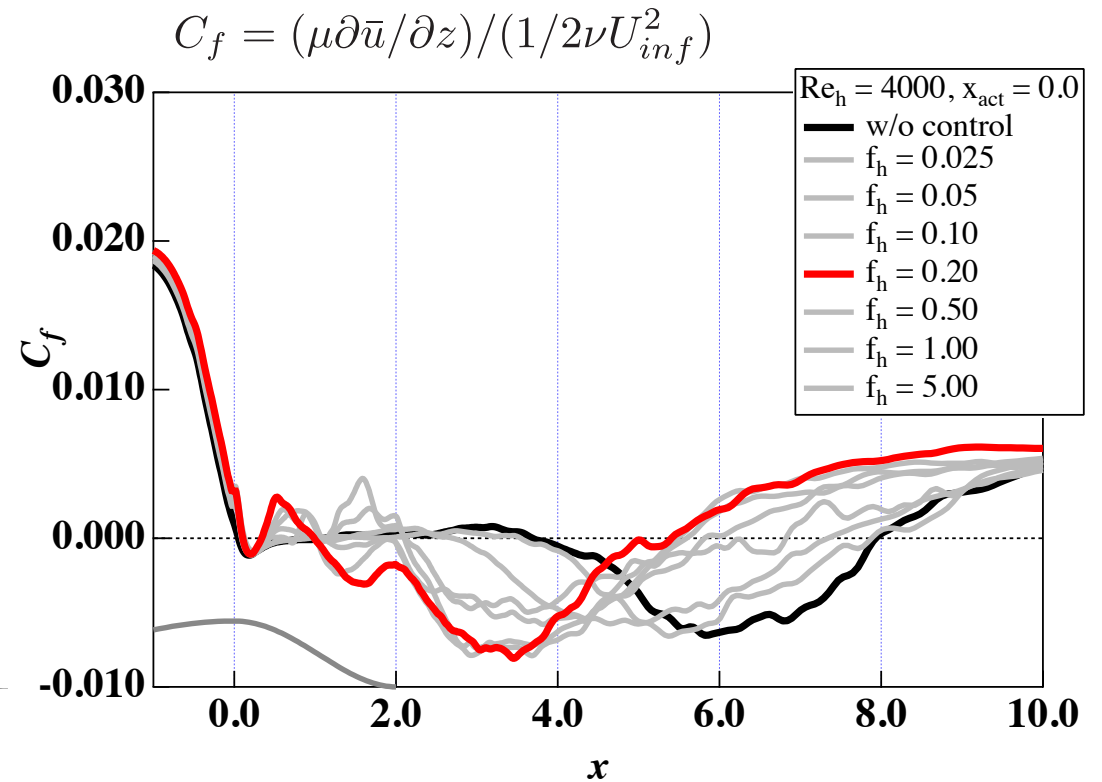
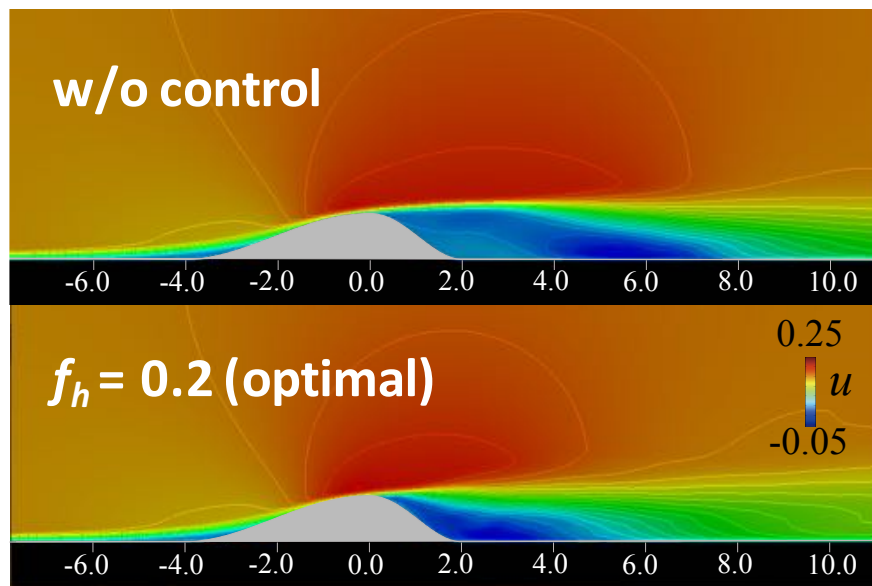
u

ω_y



時間平均の統計量

流れ方向速度の時間平均分布



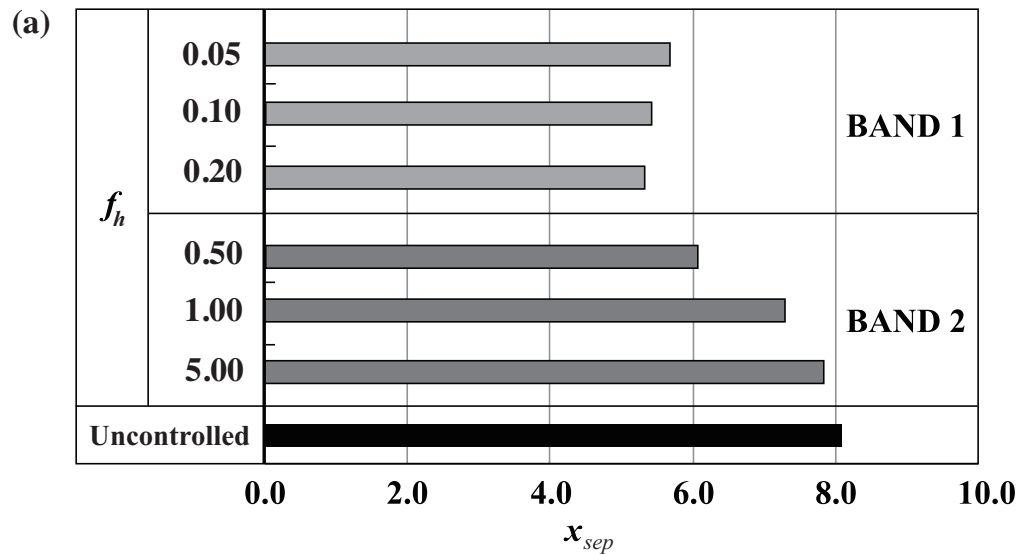
$f_h = 0.2$ の場合で最も早く付着する
過去の知見と一致

剥離領域長さ $x_{sep.}$

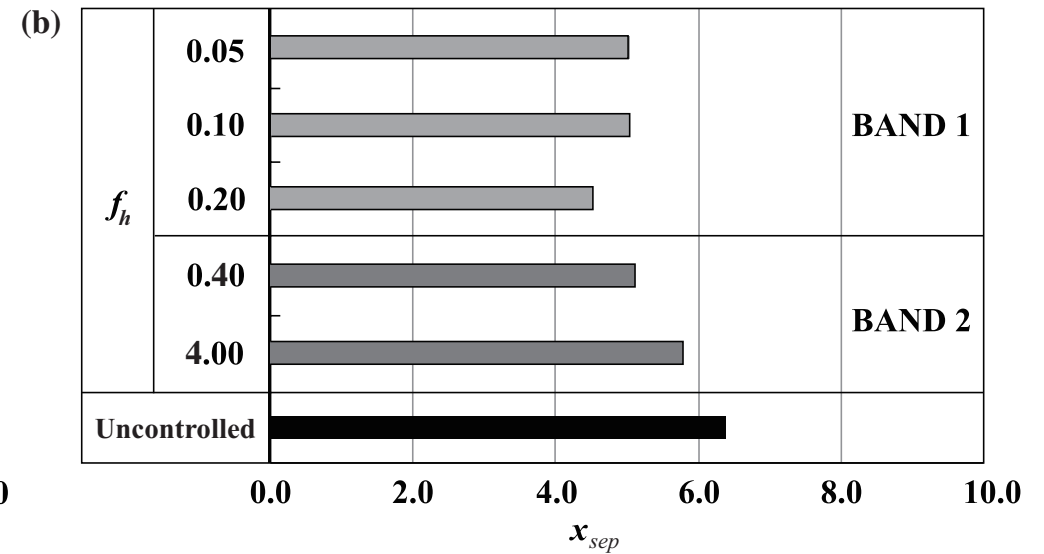
(Yakeno et al., 2015)

剥離位置	$\partial\bar{u}/\partial z = 0$
剥離領域	$\partial\bar{u}/\partial z < 0$
再付着位置	$\partial\bar{u}/\partial z = 0$

Re = 4,000



Re = 16,000



最も早く付着する周波数 $f_h = 0.2$ はレイノルズ数に依存しない！

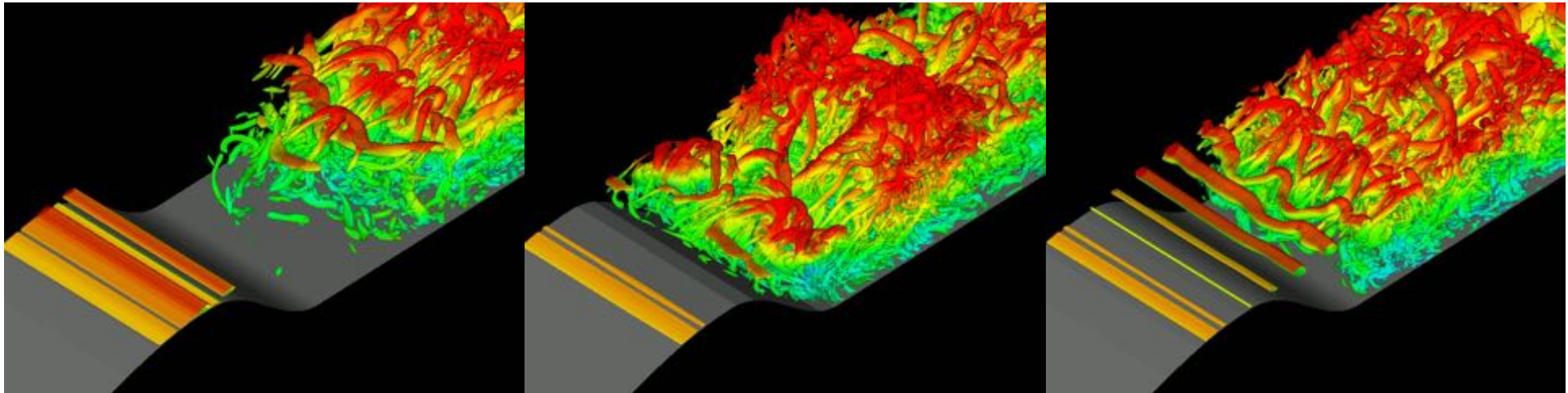
周波数依存性について

(Yakeno et al., 2015)

Low-frequency
($f_h = 0.05$)

Optimal
($f_h = 0.2$)

High-frequency
($f_h = 1.0$)

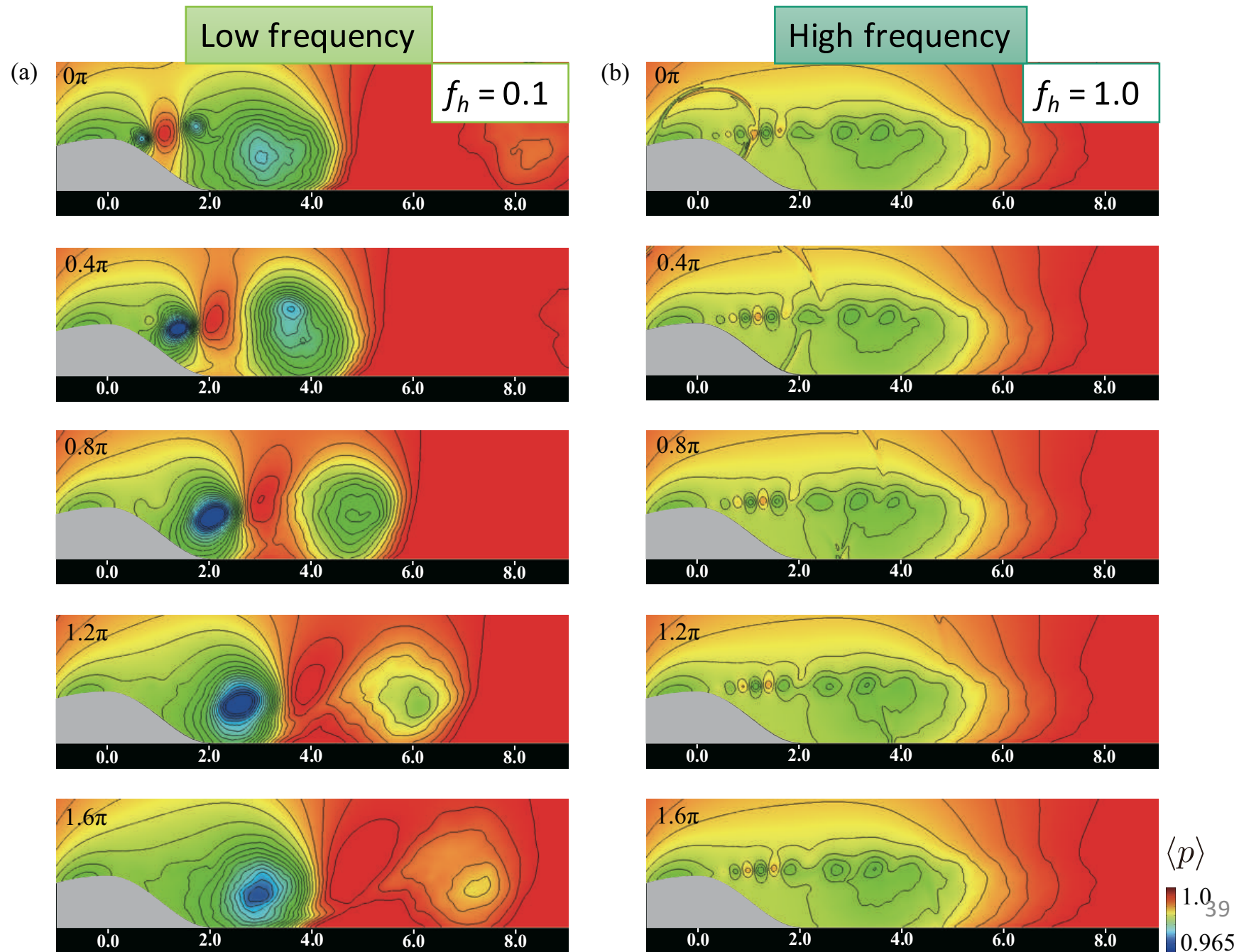


低い周波数では、大きな
ロール渦が一つ生じる

高い周波数では、ロール
渦の列ができる

位相変動の圧力分布

(Yakeno et al., 2015)



自由せん断層の線形安定性

- 基本流

- Hyperbolic-tangent

$$U(z; R) = \bar{U}(1 + R \tanh(z/2\theta))$$

$$\bar{U} = (U_1 + U_2)/2$$

$$R = (U_1 - U_2)/(2\bar{U})$$

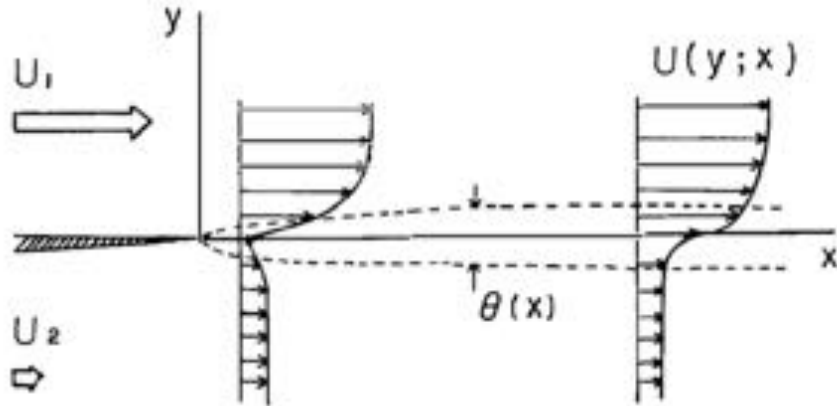
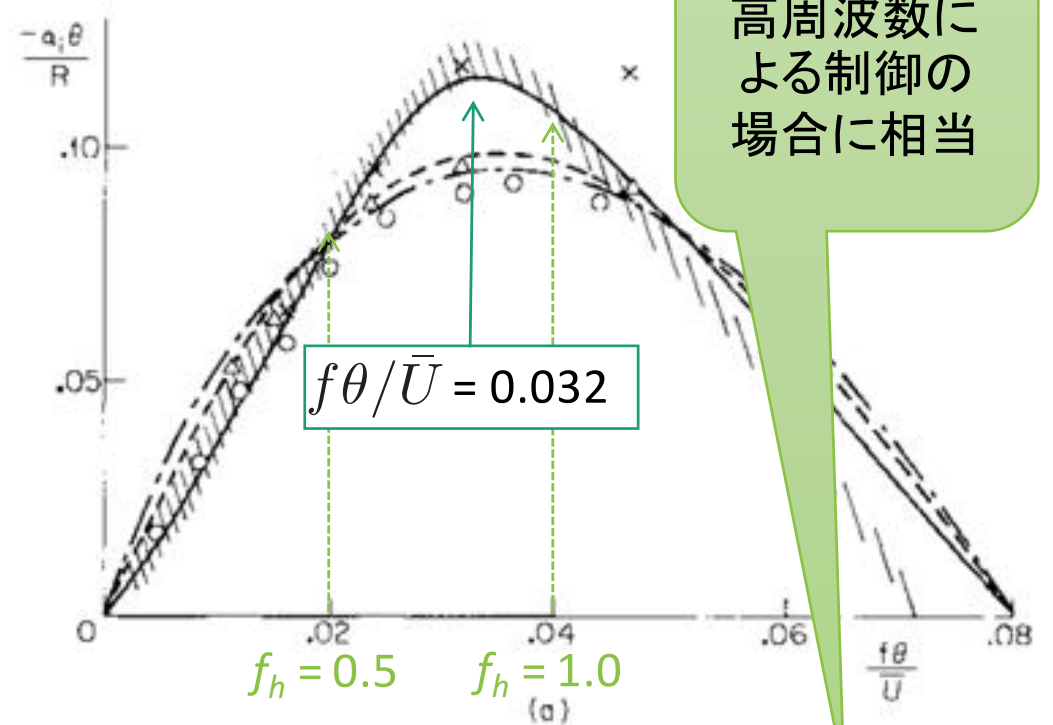


Figure 1 Sketch of spatially developing mixing layer.

(Ho and Huerre, 1984)

- 空間増幅率



$$f\theta/\bar{U} = 0.032$$

$$f_h = 0.5 \quad f_h = 1.0$$

$$\left. \begin{array}{l} \bar{U} = 0.5 \\ \theta = 0.02 \end{array} \right\}$$

$$f_h = 0.8$$

二次元ローレル渦のスケール解析

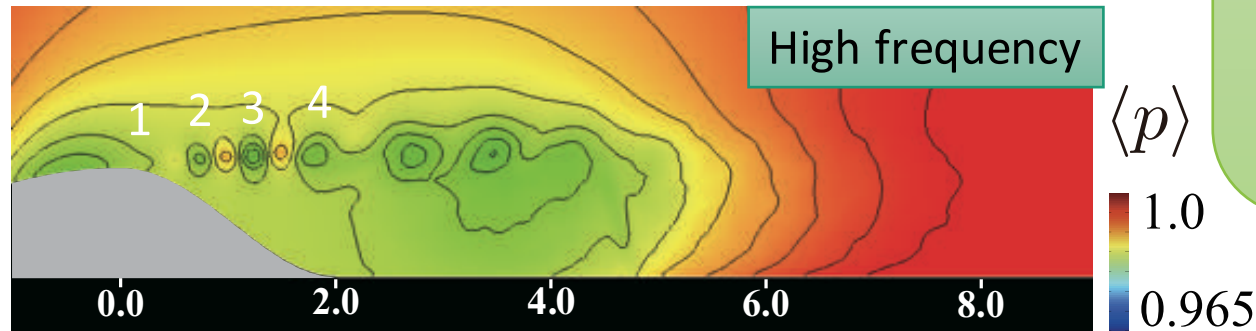
(Yakeno et al., 2015)

1 バースト = 1 波

$$\lambda_x = \frac{\bar{u}_{conv.}}{f_h}$$

$$\bar{u}_{conv.} = 0.5$$

$$\lambda_x = 0.5 \quad (f_h = 1.0)$$

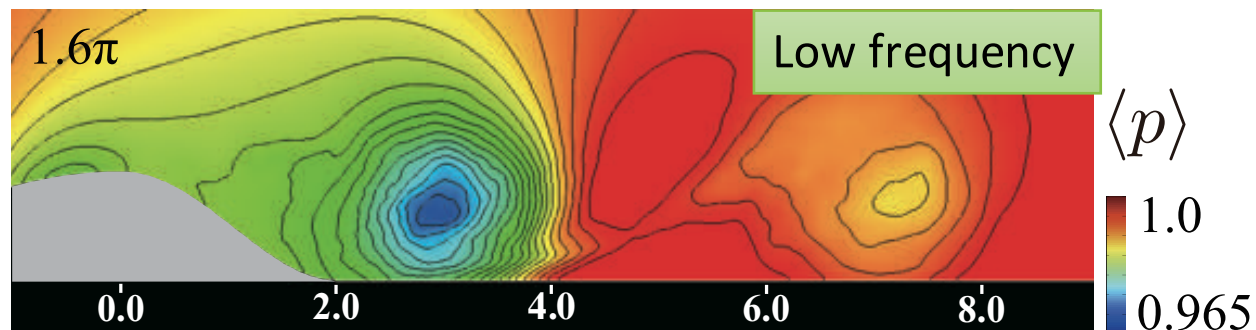


ハンプ高さの渦が作られる時間スケールはおよそ $f_h = 0.25$

(今回試したケースの中で) 最も効果の高い周波数 $f_h = 0.2$ と近い値

$$\bar{u}_{conv.} = 0.5$$

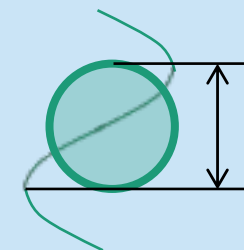
渦の直径が決まっている $D = 1.0$



渦の直径

$$D = 0.5\lambda_x$$

$$\lambda_x = 2.0 \rightarrow f_h = 0.25$$



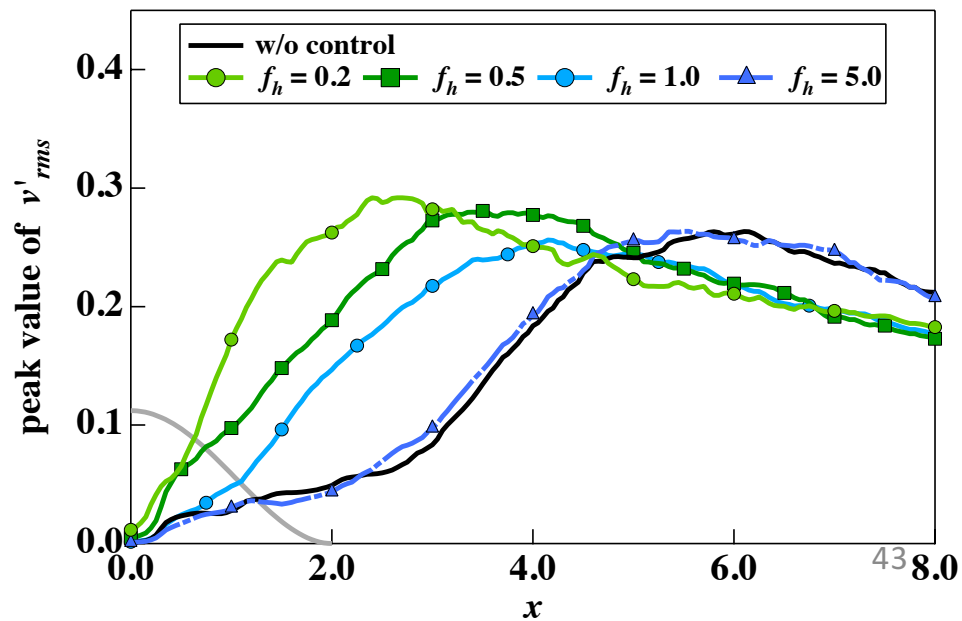
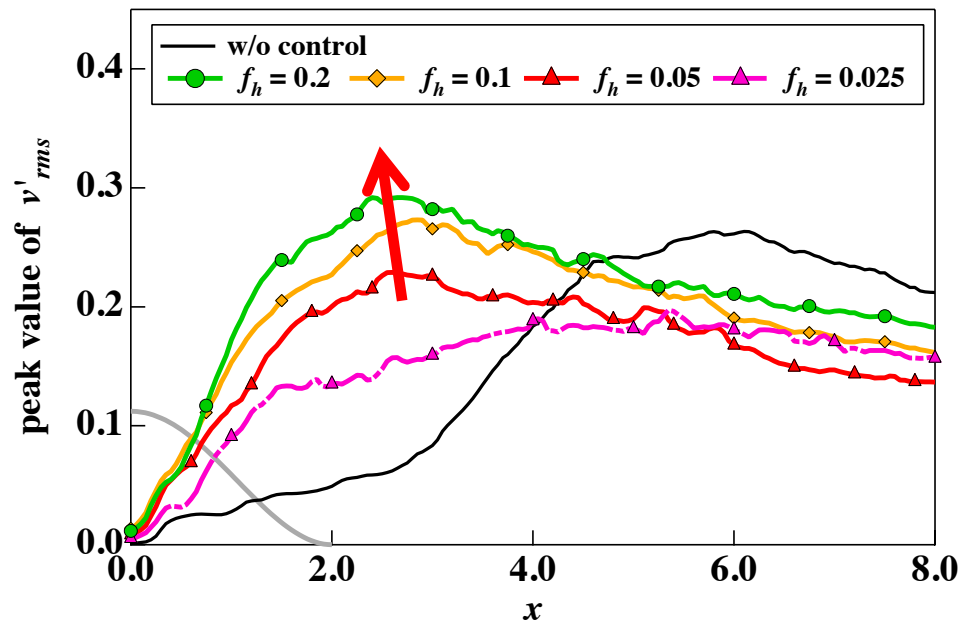
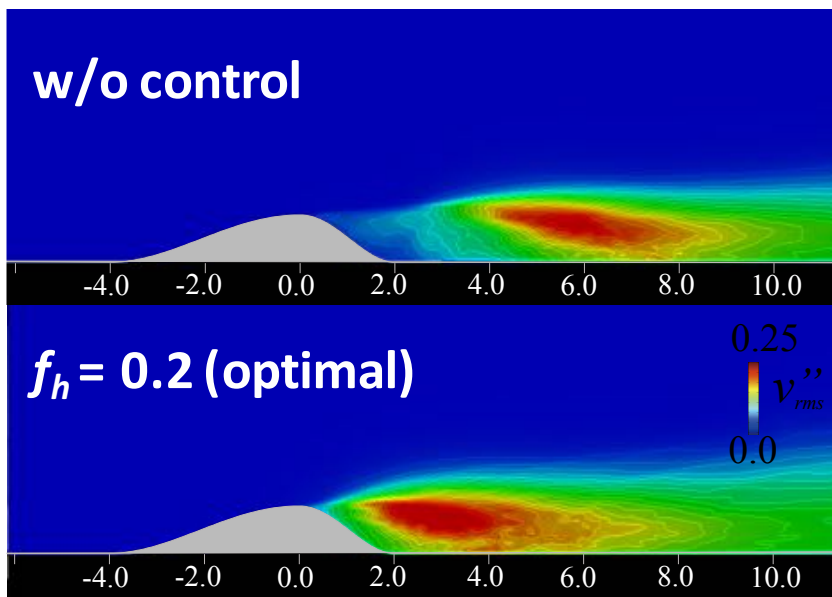
剥離制御まとめ1

- 作られる二次元ロール渦 (位相変動成分) は周波数によって異なる傾向
 - 高周波数の制御駆動では, 二次元ロールの渦列が生成, その波長は振動周波数に依存する
 - 低周波数の制御駆動では, 二次元ロール渦が一つ生成, その波長はハンプ高さで定まる.
- (今回比較した中で)最も効果的な周波数はレイノルズ数によらない
 - いずれのレイノルズ数 ($Re_h = 4,000$ or $16,00$)でも $f_h = 0.20$ がよい
- ハンプ高さスケールの渦が一つ生成する時間スケールは, (今回比較した中で)最も効果的な周波数と同じ
 - ハンプ高さを直径とする渦スケールは $f_h = 0.25$ となる

乱流変動成分

(Yakeno et al., 2015)

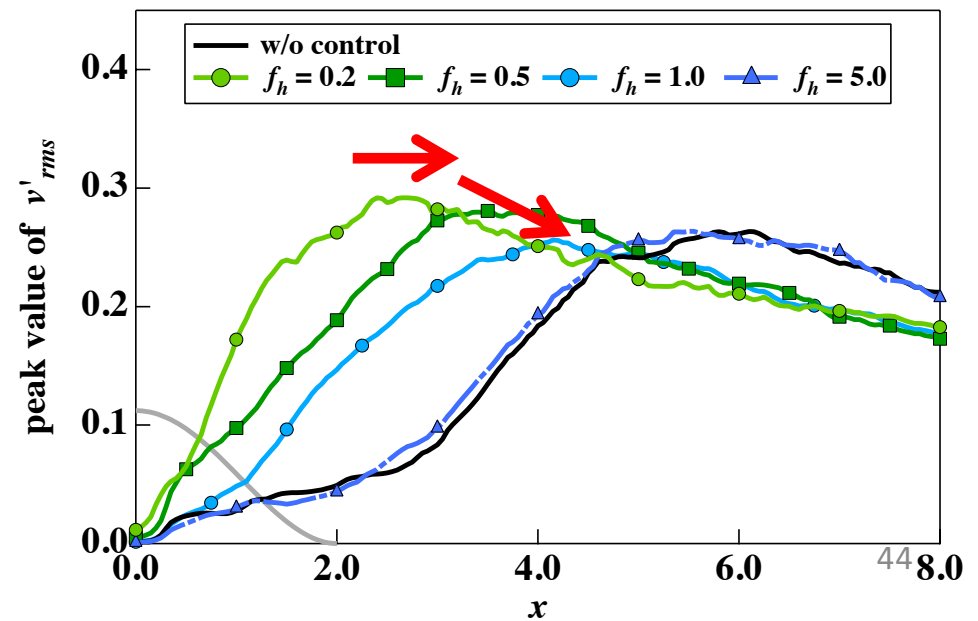
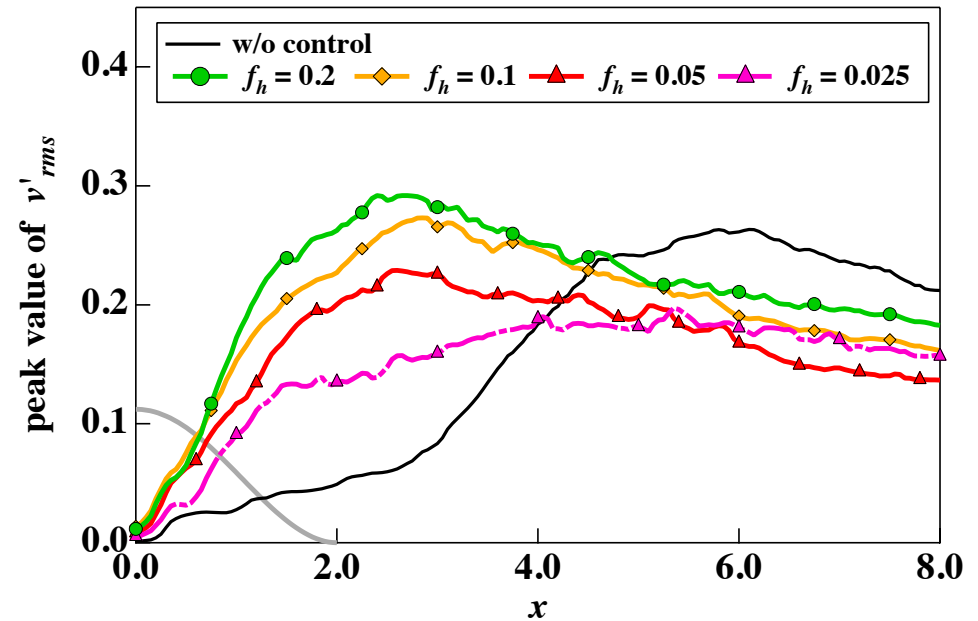
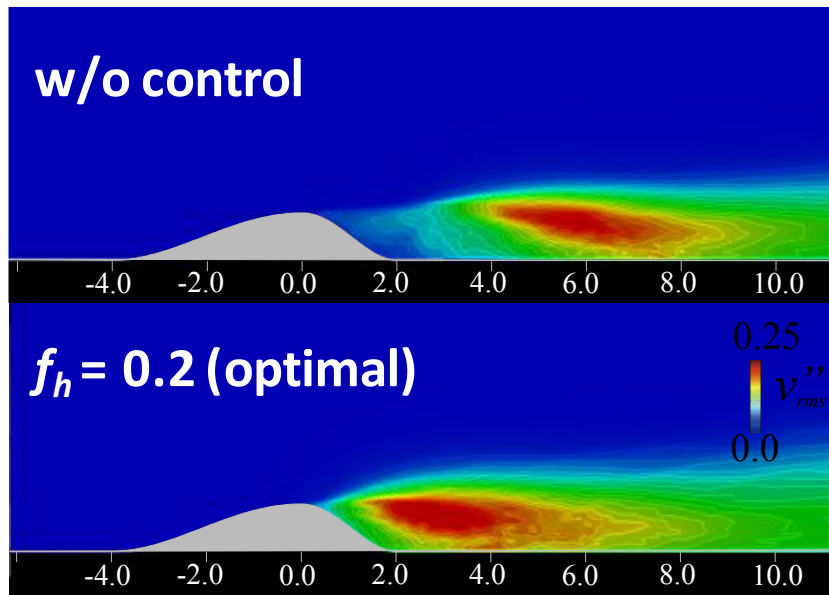
スパン方向速度変動のrms分布



乱流変動成分

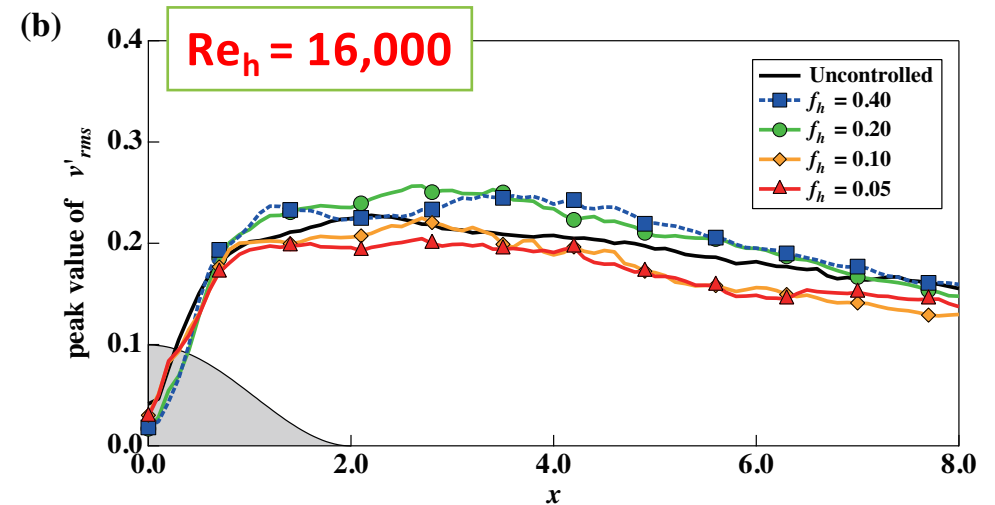
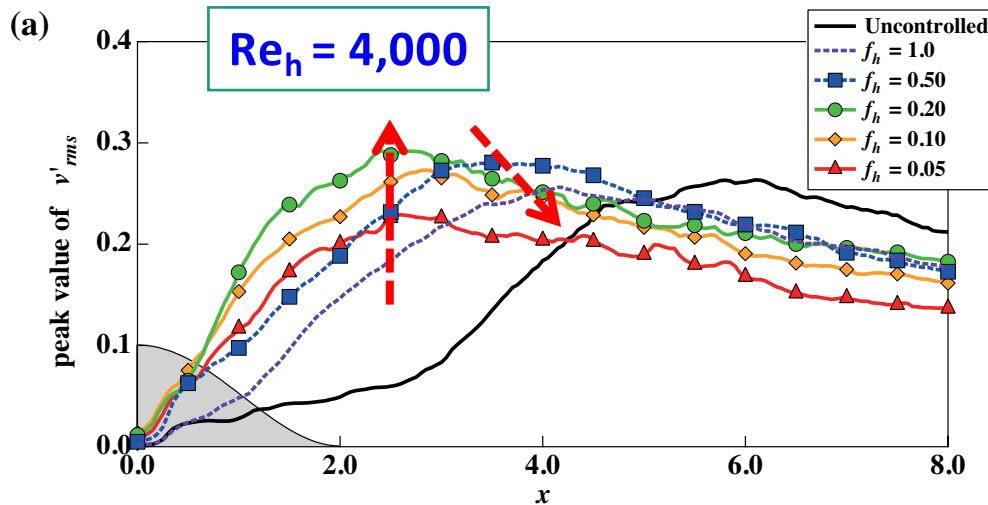
(Yakeno et al., 2015)

スパン方向速度変動のrms分布



乱流変動成分

(Yakeno et al., 2015)



- 高レイノルズ数では、周波数によりあまり変化しない
- 低い周波数(ハンプ高さスケール渦を生成)では後流のロール渦のある付近で増加
- 乱流変動成分のピーク値は、剥離制御の効果と相関している

剥離制御まとめ2

- **三次元リブ構造 (乱流変動成分) の増加は制御性能と相関している**
 - 乱流変動成分の値 $f_h = 0.20$ で最も大きくなる
- **乱流変動成分は, 低い周波数場合に二次元ロール渦が生成する付近で増加している**
 - スパン方向速度成分のrms値は $f_h = 0.20$ のとき $x = 2.5$ 付近で増加する

効果的な周波数とは何か？

- これまでの結果から、効果的な周波数 $f_h = 0.20$ とは以下の要因から定まると考えられる
 - ハンプ高さスケールの渦を生成するのに十分な時間の、低い周波数である
 - その中で、剥離位置近くで乱流変動(三次元リブ構造)を最も増加させる、高い周波数である

剥離制御時の 運動量バランスの変化

過去の結果では、
時間平均でのx方向圧力勾配は
値が小さかった

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{1}{Re_h} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x_j \partial x_j}$$

Increase Increase

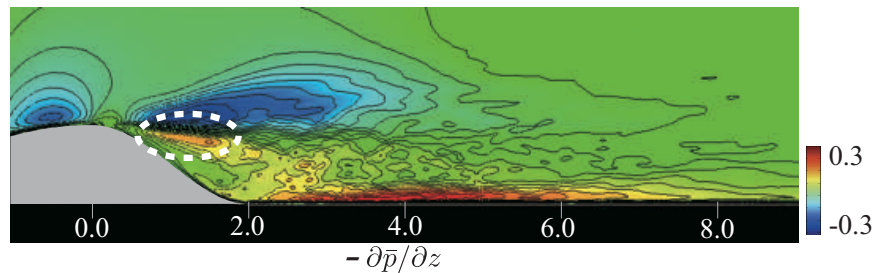
時間平均でのz方向圧力勾配は
剥離性能と関連していた

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{w'^2}}{\partial z} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \frac{1}{Re_h} \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x_j \partial x_j}$$

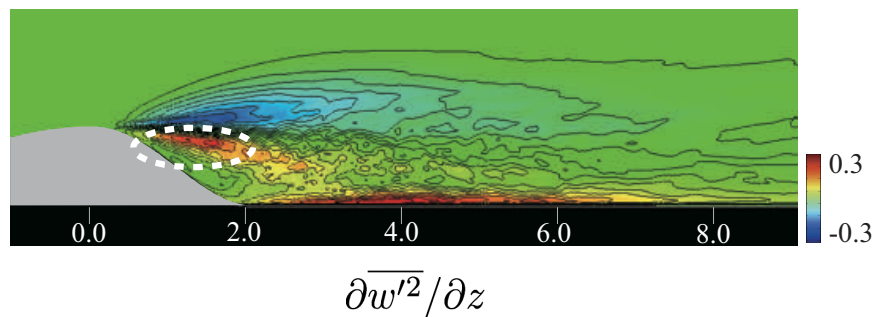
Aiko Yakeno, Soshi Kawai, Taku Nonomura and Kozo Fujii, IJHFF (2015)

剥離制御時の 運動量バランスの変化

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{w'^2}}{\partial z} = - \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \frac{1}{Re_h} \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x_j \partial x_j}$$



剥離制御の効果とこれらの項の大きさは相関している



剥離制御には高さ方向速度変動を作り出すことが重要?!