

# ピエゾアクチュエータを用いた境界層制御で起きていること

福西 祐, 伊澤 精一郎, 坂井 岳史, 熊 鰲魁 (東北大工)

What is happening when the boundary layer is controlled using piezo-actuators

Yu FUKUNISHI\*, Seiichiro IZAWA\*, Takeshi SAKAI\*, and Ao-kui XIONG\*

\*Dept. of Machine Intelligence and Systems Eng., Tohoku Univ.

## ABSTRACT

Means to explain the flow structure generated by thin piezo-ceramic actuators are discussed. In our previous experiments, it was shown that the oblique waves, observed in an initial stage of the transition, could be cancelled by generating intercepting-waves using thin piezo-ceramic actuators. The initial aim of this study is explain the generation process of these intercepting-waves by modeling the flow structure using a large number of the vortex tubes. However, it is found that this approach is not useful in the near wall region, because in these areas the diffusion of vorticity pattern on the wall is dominant compared with the convection.

**Key Words :** Flat-Plate Boundary Layer, Oblique Wave, Active Control, Piezo-Ceramic Actuator

## 1 序論

我々は、平板上に一列に設置したピエゾアクチュエータによってT-S波や斜行波など境界層遷移の初期段階に観測される波を相殺するような波を人工的に励起し、境界層の遷移を能動的に抑制する手法の開発を進めて来ている。しかしながら、アクチュエータによってEigenモードの波動が直接流れの中に導入されているわけではなく、どのような過程を経てT-S波や斜行波のモードの速度変動場を形成しているのかについてはよくわかっていない。しかし制御効率の向上を図るという点からはEigenモードに移行しやすい変動の導入が望ましく、過程の正しい理解が必要である。前報<sup>2)</sup>では、実験を模擬した数値シミュレーションを行い、計算結果である渦度場に対して特定の断面における2次元的情報に基づいた現象の説明を試み、渦度場の変動パターンと各渦度変動成分のふるまいを結びつける説明を行った。その過程で、アクチュエータにより変動が導入される領域、その速度変動波が斜行波を形成していく領域、そしてさらにその下流の斜行波が成長していく領域の3つの領域に大きく分けられることを示した。しかしこの種の説明方法の問題点として、説明に都合のいい現象のみに注目することで、本来複雑な現象を簡素化し過ぎて説明しようとしてしまう危険性がある。そこで本研究では、流れ場の3次元の渦構造変化にもとづいたより客観的な解釈を試みるべく、計算結果から得られた渦度場の情報をもとに、境界層内の速度分布を $x$ 方向に101本、 $y$ 方向に8本の合計808本の渦糸で置き換えて、その変形の様子を詳細に調べることにした。

## 2 数値解析法

計算は、3次元非圧縮性 Navier-Stokes 方程式を差分法を用いて直接解く方法で行った。計算アルゴリズムには MAC 法を用いた。その際、空間微分には2次精度の中心差分を、移流項には3次精度の風上差分 (Kawamura-Kuwahara Scheme) を、時間進行にはオイラー前進法を用いた。計算領域は図1に示すように、平板の前縁より660mmの位置から $x$ 方向に240mm、壁面から $y$ 方向に16mm、スパン方向に82mmとした。計算格子数は $x, y, z$ 方向に121, 82, 42で、等間隔の直交格子とした。平板前縁からアクチュエータ後縁までの距離  $L = 0.72[m]$  を代表長さとした場合の局所レイノルズ数は  $7.10 \times 10^5$  であつ

た。この計算では、 $x$ 方向に11点目から30点目までの間の壁面上の格子に、境界条件として時空間的に周期的に変動する流れ方向の速度成分を与え、セラミックアクチュエータが作り出す擾乱を模擬した。1枚のセラミックはスパン方向に10点の格子で表し、これをスパン方向に隙間なく4枚分並べて配置した。

境界層内に導入する速度変動は風洞実験<sup>1)</sup>同様、周波数110Hzの正弦波である。なお、その速度変動の振幅は、アクチュエータ後縁に向かって線形的に大きくなるような設定になっており、その最大振幅は後縁端で主流の0.03%である。アクチュエータは一枚おきに180度ずれた位相で駆動させている。その他の平板壁面には滑りなし条件を、また流出境界および外縁境界には Neumann 条件を与え、流入境界には速度・圧力ともに Blasius 解を与えている。なお、本研究では  $\eta = y\sqrt{U_\infty/\nu x}$  で定義される  $y$  方向の無次元距離  $\eta$  も用いた。

## 3 現象の解析および考察

図2は $xz$ 断面における主流方向の速度変動成分  $u'$  の等値線図である。実験結果とよく似たパターンが再現できていることがわかる。

図3は $xz$ 平面における渦度変動の3成分の等値線図である。ピエゾアクチュエータの伸縮にともなって、その下流側の角からは(a)の実線で囲まれた部分に見られるような  $\omega'_y$  が導入される。一方、バックグラウンドの壁面近傍の平均速度勾配を形成するスパン方向に伸びた仮想的な渦糸は、アクチュエータの伸縮により流れ方向にわずかに歪められるので、静止したアクチュエータとの

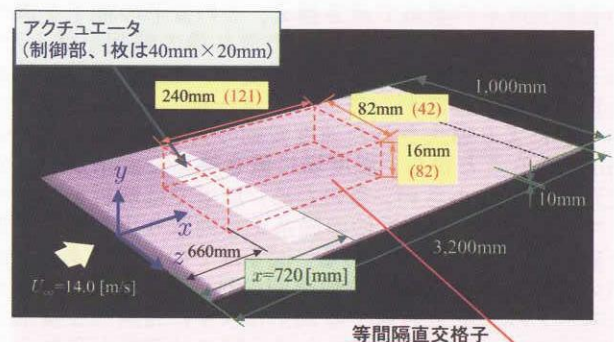


図1: 計算領域と計算格子

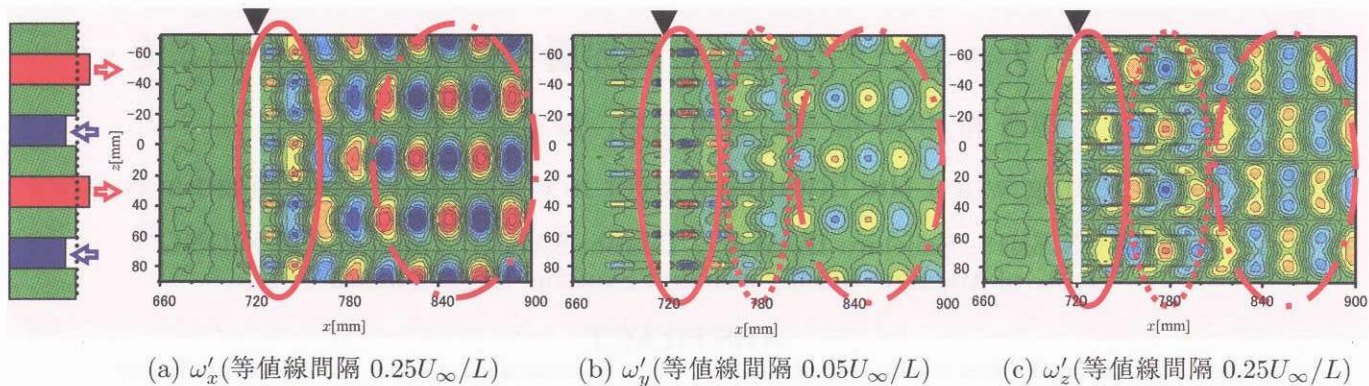


図 3:  $xz$  平面における渦度変動等値線図 ( $\eta \sim 0.5$ )

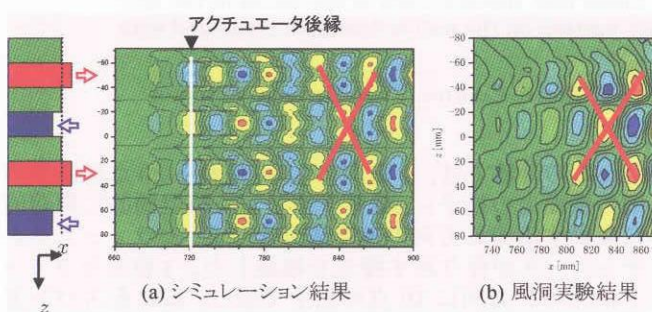


図 2:  $xz$  平面における速度変動  $u'$  の等値線図 ( $\eta = 1.5$ )

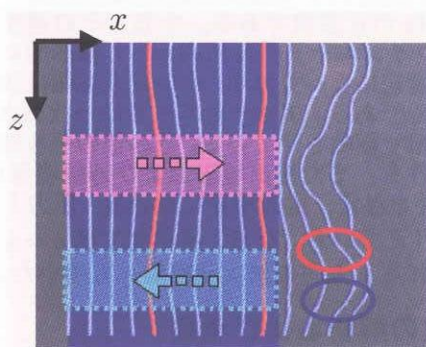


図 4: アクチュエータ近傍領域における渦糸の変形

境目からは  $\omega_x'$  が発生する ((b))。このとき、アクチュエータの表面近くでの速度勾配も変化するため、 $\omega_z'$  も生成している ((c))。

これら渦度変動成分のパターンの変化は、渦度場を渦糸に置き直して考えてみるとわかりやすいのではないかと考え、計算結果から得られた渦度場の情報をもとに、境界層内の速度分布を  $x$  方向に 101 本、 $y$  方向に 8 本の合計 808 本の渦糸で置き換え、その変形の様子を調べることで渦構造変化に基づいた流れ場の解釈を試みた。もともと境界層中に存在する渦度は、乱流に遷移し始める前の段階ではスパン方向にはほぼ一様である。アクチュエータにより導入された速度変動の大きさはただか数  $\mu\text{m}$  であることから、渦度場に置き換えた渦糸が受ける変形は非常に小さい。このため、以下では解析をしやすくするために、壁面近傍の渦糸を一系列取り出しその変形を誇張して表示させてある。図 4 はその一例である。渦糸の変形と渦度変動の等値線図の対応がわかる。アクチュエータの上空を通過する渦糸は次々に周期的な変形を受けるので、その結果これら渦糸群には疎密が現れるが、流下する過程で他の渦糸と干渉して変形を受け、しだい

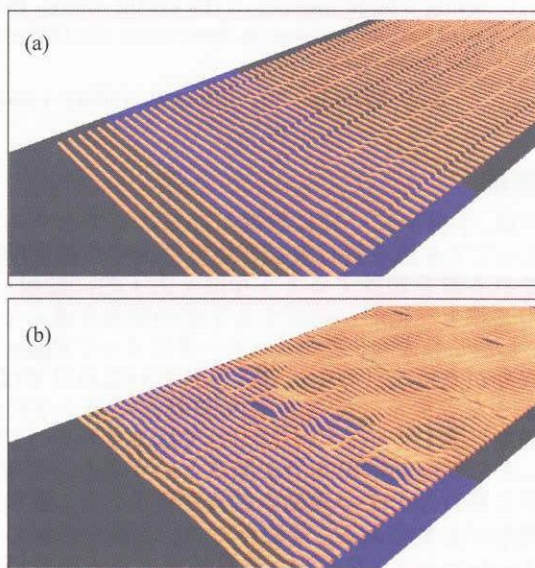


図 5: 渦糸つくるパターン (a) ある瞬間における渦糸の分布 (b) 上流から流下した渦糸の分布

に滑らかな形になりやがて斜行波を形成する。この説明は一見すると合理的に思われるが、そこには根本的に問題があることがわかった。

もし壁面近傍の渦度場の変遷が渦糸の相互干渉として捉えることが可能であるならば、ある瞬間の渦度場を渦糸に置き換えたもの (図 5) と、上流から流した渦糸が受ける累積的な変形プロセス (図 5) は一致するはずである。ところが、両者は明らかに異なっている。この違いは、臨界層より壁よりの領域においては、移流ではなく壁面の渦度パターンの拡散が支配的であることに由来しており、壁面近傍の渦度場の説明を渦糸の相互干渉で行うのは正しくない。

#### 4 結 言

流れ場を渦糸を用いて表すことで、現象をより客観的に解釈する試みを行った。しかし、臨界層より壁よりのパターンは移流ではなく壁面の渦度パターンの拡散に支配されているため、この方法での解釈は適切でないということが分かった。

#### 参考文献

- 1) Y. Fukunishi, *et al.* Proc. of 4th Pacific Int. Conf. on Aerospace Science and Technology, pp.109-112(2001).
- 2) 福西祐ほか 5 名, SP56(2002),No.14(p.49-52)