

No.11

平板境界層中の斜行波の能動制御の問題点

伊澤 精一郎, 坂井 岳史, 芝本 弘一, 福西 祐 (東北大)

Difficulties around Active Control of Oblique Waves in a Flat-Plate Boundary Layer

S. Izawa, T. Sakai, K. Shibamoto and Y. Fukunishi
Machine Intelligence and System Engineering, Tohoku University
Aramaki-Aoba 01, Aoba-ku Sendai 980-8579, JAPAN

ABSTRACT

The aim of this study is to develop a method to control T-S wave and oblique waves observed at the early stage of transition of a flat-plate boundary layer using an array of thin piezo-ceramic actuators attached on the flat-plate surface. In particular, the difficulties encountered during the experiment is reported. One major problem is that the effects of control are not uniform along the spanwise direction. It is shown that the unevenness is caused by the spanwise deformation of the velocity fluctuation pattern introduced by each piece of actuators.

Keywords : Flat-Plate Boundary Layer, Oblique Wave, Active Control, Piezo-Ceramic Actuator

1. はじめに

本研究では、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することで、境界層の遷移を能動的に抑制する手法の開発を目指している。このように逆符号の波を導入することで遷移の制御を目指した試みとしては、Thomas ら¹⁾による振動リボンを用いたもの、Liepmann ら²⁾の平板上に張ったニクロム片を周期的に加熱する方法などが知られており、また最近では、Nitsche ら³⁾の翼型を対称としたセンサー(熱線)・スロットアクチュエータ(拡声器)・エラーセンサーからなる制御システムによる遷移を制御する試みなどが挙げられる。これら従来の制御手法に対し、我々のグループでは壁面上に貼り付けられた薄いアクチュエータにより流れを制御することを試みてきている。これは実用化を視野に入れているためでもある。

我々のグループでは、これまで PVDF (Poly Vinylidene Fluoride) フィルムによる TS 波・斜行波の励起を試みた実験(海老名ら⁴⁾)、ピエゾセラミック (PZT: lead zirconate titanate) を用いて制御能力を向上させた実験(森田ら⁵⁾) などにより、すでにこの種の平板設置型薄型アクチュエータによって TS 波や斜行波の制御が可能であることを報告している。本論文では、これら層流境界層を対象とした制御方法の開発の過程で実際に直面した幾つかの問題点およびその原因追求を行った結果について報告する。

2. 実験装置

実験は、全長 3,500mm、対面距離 1,010mm の八角形断面形状の密閉型測定部を有する東北大学流体科学研究所の低乱熱伝達風洞で行った。本実験で用いた風速 $U_\infty = 14.0$ [m/s] における主流の乱れ強さ u'_{rms}/U_∞ は、平板に制御装置を取り付けた状態で 0.07% 以下である。

図 1 に実験装置の概観を示す。平板は全長 3,200mm、幅 1,000mm、厚さ 10mm のアルミニウム合金製で、前縁部は長短軸比が 36:1 の楕円状に加工されている。また、平板部との接合部において、主流の乱れを受容しないように、連続的に曲率に変化するような工夫がなされている。座標系の原点は前縁部中央にとり、流れ方向に x 軸、壁面垂直方向に y 軸、スパン方向に z 軸をとる。

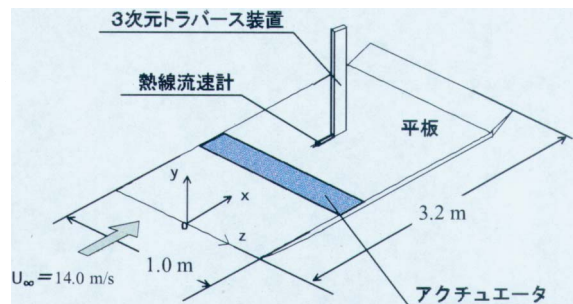


図 1: 実験装置概観

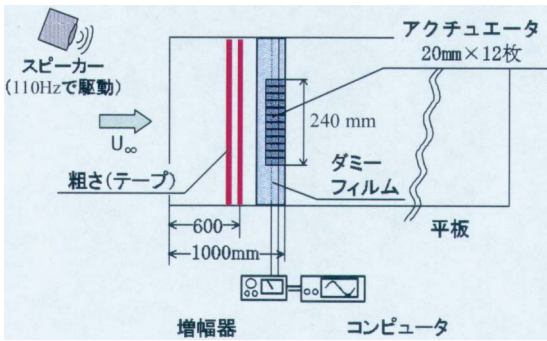


図 2: アクチュエータの設置と粗さ

一様流中の乱れが小さいこともあり、測定領域内では T-S 波等の自然成長は観察されなかった。このような環境下で、風洞整流部上流の壁面に取り付けたスピーカーによる音響攪乱を平板上の粗さ（テープ）で受容させることで、TS 波や斜行波を人工的に励起した（図 2）。斜行波の傾き角 θ は、テープをスパン方向に対して傾けて設置することで変化させた。

アクチュエータとして用いるピエゾセラミックは、一枚当たり幅 20mm、長さ 80mm あり、厚さは電極や配線を含めるとおよそ 0.6mm 程度である。これらを図 2 に示すような位置に、スパン方向に 12 枚並べて取り付ける。このとき、アクチュエータ端部の影響を取り除くため、同じ厚さのダミーフィルムを平板の端まで設置してある。

ピエゾアクチュエータ前縁 $x = 874[\text{mm}]$ における境界層厚さ δ および排除厚さ δ^* は、それぞれ 4.71mm、1.63mm であり、アクチュエータの厚さ h は、 $h/\delta = 0.13$ 、 $h/\delta^* = 0.37$ に相当する。Taneda ら⁶⁾によれば、排除厚さの 30% 以下のスケールの粗さは境界層の遷移に影響しないとされているのに対し、本研究では 37% と若干大きめであるが、境界層の速度分布はアクチュエータによってその厚さ分だけ持ち上げられるものの、下流域では Blasius の理論値に一致した層流状態が保たれている（図 3）ことが確かめられている。ここで、 η は y 方向の無次元距離である。

各アクチュエータへの配線は電氣的に独立しているため、位相の異なる交流電圧を印可することで、それぞれ別々に流れ方向に伸縮させることが可能である。アクチュエータの印可電圧の実効値は 30~50V、駆動周波数はスピーカーと同じ 110Hz の正弦波である。なお、主流速度 $U_\infty = 14.0[\text{m/s}]$ のとき、測定領域全体は不安定領域内にある。

3. 斜行波の能動制御

図 4 は、 $\theta = 15^\circ$ の斜行波を制御した場合の結果である。図の等高線は、アクチュエータの駆動信号を

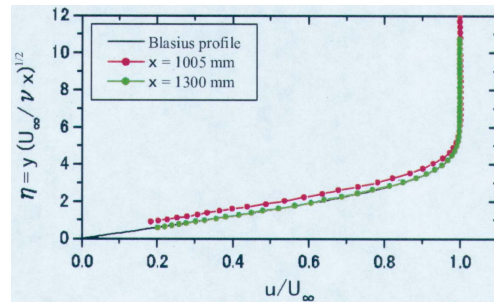


図 3: アクチュエータ下流域における平均速度分布

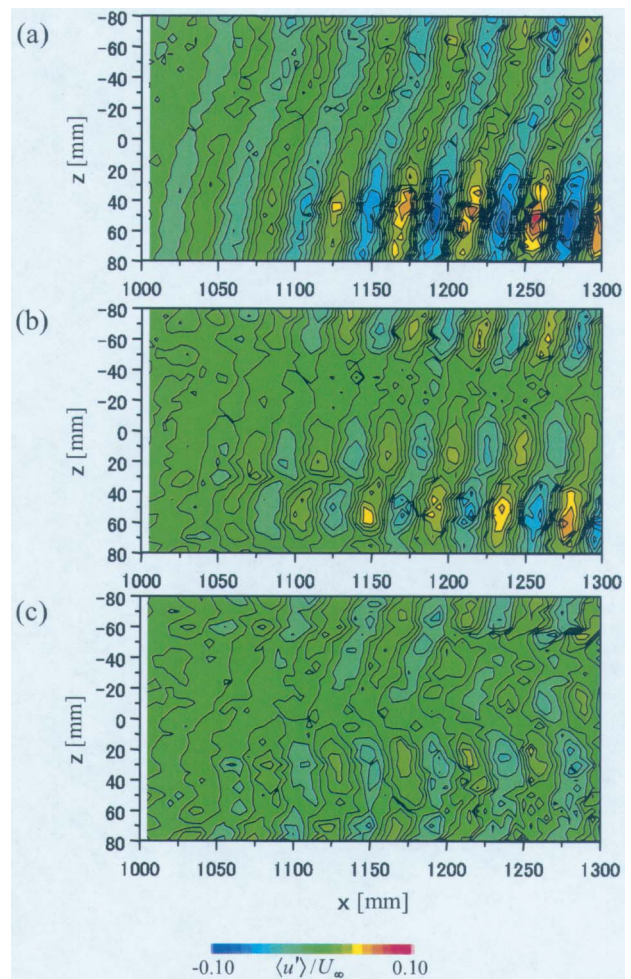


図 4: 速度変動等値線図 ($\theta = 15^\circ$ の斜行波を制御, $\eta = 1.1$)
(a) 音波+粗さ (b) アクチュエータのみ (c) 制御後

基準として位相毎にアンサンブル平均を取ることで求められた主流方向の速度変動 u' を表している。赤は正の、青は負の速度変動である。テープと音響攪乱によって励起した斜行波は、スパン方向にその振幅の強さが一様ではなく（図 4(a)）、振幅の大きい領域 ($z = 50[\text{mm}]$) と小さい領域 ($z = -30[\text{mm}]$) が見られた。図 4(b) は、音波を入射せずに、スパン方向に一列に並んだ 12 枚のアクチュエータの位相と振

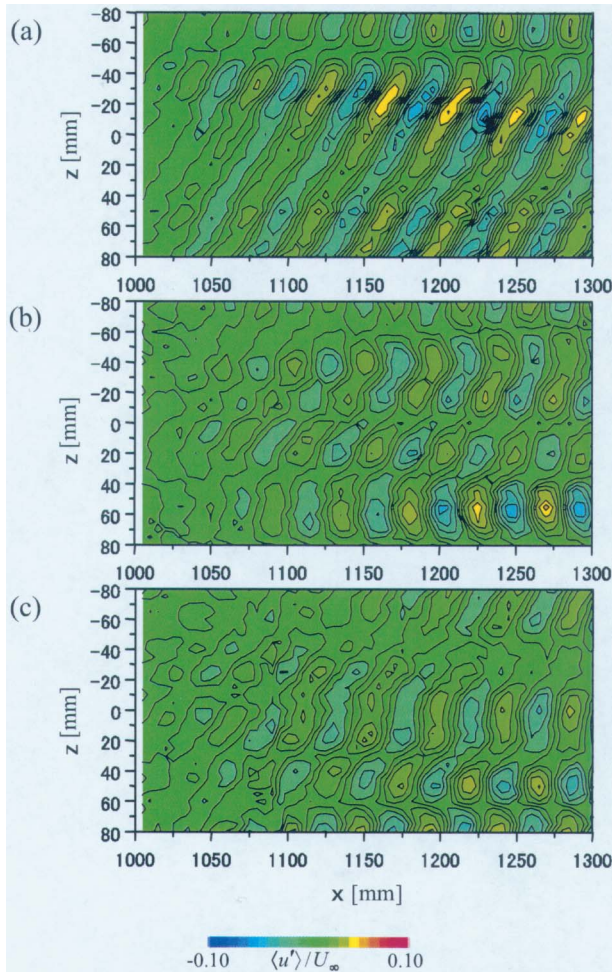


図 5:速度変動等値線図 ($\theta=30^\circ$ の斜行波を制御, $\eta=1.2$)
 (a) 音波+粗さ (b) アクチュエータのみ (c) 制御後

幅を調整することで、制御対象であるこの斜行波と位相が 180 度異なった波を人工的に作り出そうとした結果である。両者の変動のパターンは良く一致してことから効果的な制御が期待されたが、図 4(c)に示す、テープと音響攪乱によって励起した斜行波をアクチュエータが作る斜行波により打ち消す実験の結果を見ると、予想された通り、測定領域の全域にわたってほぼ完全に抑制することに成功したと結論付けることができる。

図 5 は、励起する斜行波の傾き角を 30 度にした場合の結果である。 $\theta=15^\circ$ の場合と同様に、アクチュエータを調整して制御対象の波 (図 5(a)) を模擬することを試みたが (図 5(b))、斜行波の変動のパターンを一致させることができず、波打ったような分布しか作り出すことができなかった。この結果制御効果にもむらが見られ、制御が効きすぎた領域 ($z=50$) や不足した領域 ($z=80$) では、取り残された波が再び成長し始めている (図 5(c))。

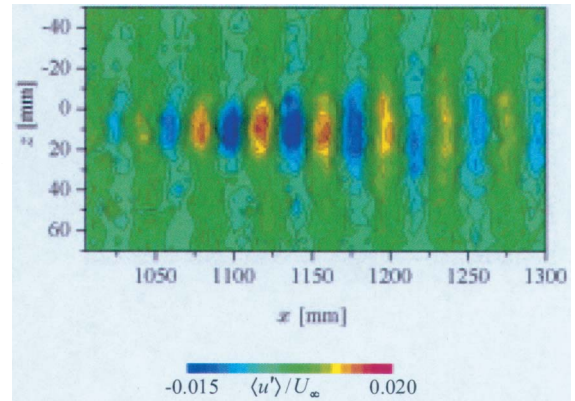


図 6:速度変動等値線図 ($U_\infty=12.0$ [m/s], $\eta=0.9$)

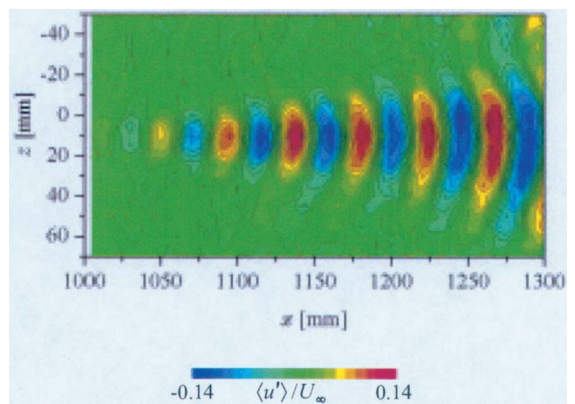


図 7:速度変動等値線図 ($U_\infty=14.0$ [m/s], $\eta=1.0$)

4. 1 枚のアクチュエータによる速度変動の導入

斜行波の傾き角を大きくすると制御がうまくいかない原因を探るため、1 枚のアクチュエータだけを駆動させたときに、導入された速度変動がどのように成長しているのかについて調べることにした。

実験装置および実験条件はこれまでと同じであり、 $z=0\sim 20$ [mm] に位置するアクチュエータを 1 枚だけ駆動させる。主流速度は、12.0、14.0、16.0 [m/s] と変化させた。印可電圧の実効値は 50V である。

図 6 は、主流速度 $U_\infty=12.0$ [m/s] の場合の結果である。アクチュエータにより導入された速度変動は、スパン方向に平行に成長し、 $x=1,100$ [mm] ぐらいから速度変動の成長が頭打ちとなってやがて減衰していく様子がわかる。線形安定性理論によると、この流速では下流側測定領域の一部 ($x > 1,075$ [mm]) が安定領域に入っており、実験の結果は安定性理論の予測とよく一致している。この減衰域では波が減衰しながらもスパン方向に 2 次元的に伸びて行く様子が観察された。

主流速度を 14.0 m/s に上げた場合の結果を図 7 に示す。12.0 m/s の場合と異なり、 $x=1,060$ [mm] 付近か

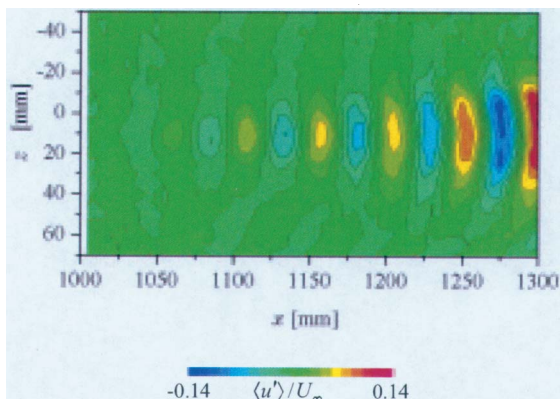


図 8:速度変動等値線図($U_\infty=16.0$ [m/s], $\eta=0.9$)

ら、速度変動のパターンがスパン方向に対して弓状に変形し始め、下流に行くほどその度合いが大きくなっていることがわかる。また、導入された変動はスパン方向に広がりながら流下するが、その成長は $x=1,100$ [mm]を過ぎた辺りから頭打ちとなっている。

流速をさらに上げると、変動が弓状に変形し始める位置はより下流にシフトするようになる。図 8 は、 $U_\infty=16.0$ [m/s]のときの速度変動の等値線図である。 $x=1,280$ [mm]付近から、変動が弓なりに変形していく様子がわかる。測定領域を $x=1,400$ [mm]まで広げて測定したが、この範囲内では速度変動は成長と変形を続けていることがわかった。

以上の実験の結果、 $\theta=30^\circ$ の斜行波の制御がうまくいかなかった原因が以下に示すように説明できた。図 5 (a)に示したテープと音響攪乱によって励起した斜行波に、1枚のアクチュエータが作り出す速度変動を重ねたものが図 8 である。図中(a)の、丸で囲んだ領域付近の速度変動を抑制するために、その上流側 $y=0\sim 20$ [mm]にあるアクチュエータの駆動信号を強くあるいは弱くして新たな波を作ったとする。このとき、このアクチュエータが新たに作り出す速度変動は図 8 (b)のようになっており、元の速度変動場に重ね合わせるとアクチュエータ下流の $y=0\sim 20$ [mm]の範囲にある変動は相殺されるものの(図 8 (c)青丸)、隣接する $y=-20\sim -40$ [mm]にある変動は逆に増幅されてしまう(図 8(c)赤丸)。したがって、制御対象である波に対応して局所的に強い変動を導入して抑制しようとしても、変動は弓状に広がってしまうため隣接する位置では速度変動を逆に強めてしまう、という事態に陥る。この効果は斜行波の傾き角が大きいほど顕著になる。

5. まとめ

平板上に貼り付けたピエゾアクチュエータによって、斜行波を能動制御する際の問題点について報告した。傾き角の大きな斜行波を制御することが難

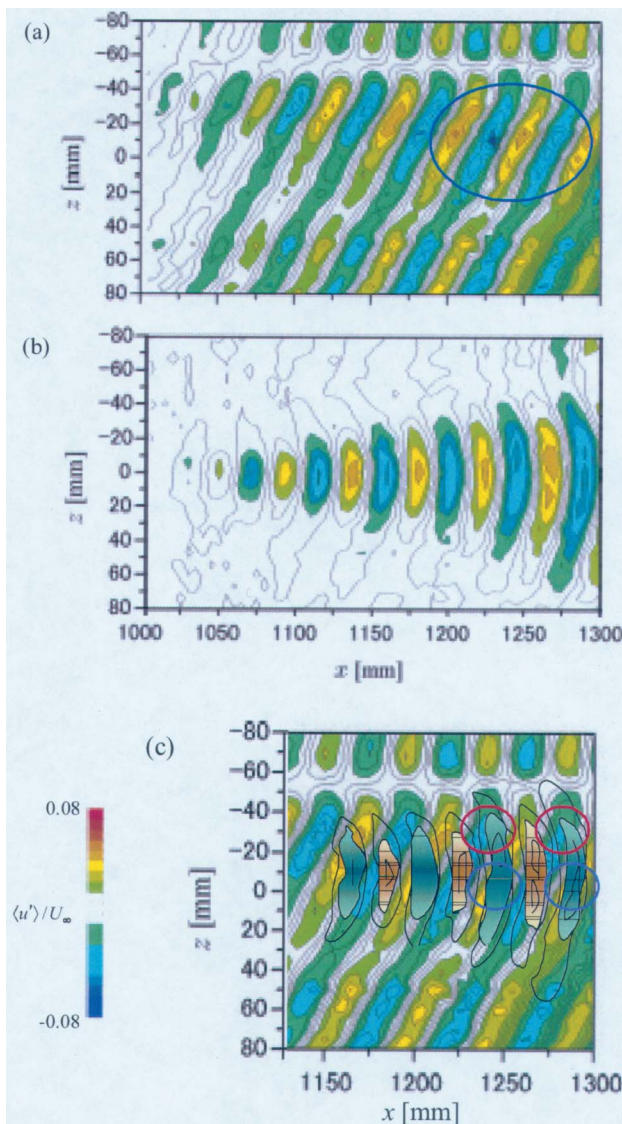


図 8:速度変動等値線図($U_\infty=14.0$ [m/s])

(a) $\theta=30^\circ$ の斜行波を制御, $\eta=1.2$ (b) アクチュエータを1枚駆動, $\eta=1.0$ (c) 重ね合わせ

しい原因を説明することができた。

参考文献

- 1) Thomas, A. S. W. : J. Fluid Mech., Vol.137 (1983) pp. 233-250.
- 2) Liepmann, H. W., Brown, G. L., Nosenchuck, D. M. : J. Fluid Mech., Vol.118 (1982) pp.187-200.
- 3) Sturzebecher, D., Nische, W. : Proc. 5th International Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements, (2002).
- 4) 海老名 勲, 福西 祐: 日本機械学会論文集(B), Vol.65, No.673 (1999) pp.3042-3047.
- 5) Morita, K., Fukunishi, Y. : Proc. of Workshop on Drag Reduction of Aircraft and Ground Transportation, (2000) pp.24-25.
- 6) Taneda, S. : J. Phys. Soc. Japan, Vol.46 No.6 (1979), pp.1935-1942