

## No. 19

## 斜行 T-S 波を励起する試み

加藤 琢真\*, 福西 祐\*, 小林 陵二\*\*

## An Attempt to Generate Oblique T-S Waves

Takuma KATO, Yu FUKUNISHI  
Faculty of Engineering, Tohoku UniversityRyoji KOBAYASHI  
School of Science and Engineering, Ishino-maki Senshu University

The receptivity of three-dimensional roughness element on a flat-plate boundary layer to outer acoustic disturbances is investigated by wind-tunnel experiments. As a first step towards the final goal to control the three-dimensionalizing process of T-S waves, the property of oblique waves, which appear in the later stage of transition, is studied. It is shown that oblique waves can be generated on a flat-plate boundary layer with inclined roughness element under acoustic forcing.

**Keywords :** boundary-layer transition, receptivity, Tollmien-Schlichting wave

## 1. はじめに

現在の工業界においては、輸送機関の高速化に伴って空力抵抗の低減による効率の向上が必須の課題となってきたため、境界層の層流制御が重要性を増している。

境界層の層流から乱流への遷移過程の初期段階において、不安定波の種となる外乱が境界層内に取り込まれるため、遷移を予知、制御するうえで重要である。特に、外乱が境界層内に取り込まれる現象は受容性<sup>(1)</sup>と呼ばれ、この受容性問題は現在精力的に研究が行われている領域である。

Kobayashi ら<sup>(2)</sup> は、平板上に 2 次元粗さを設置して、主流に音波を与えた場合の実験を行い、音波と粗さとの組み合わせにより T-S 波を効果的に励起できることを報告した。また、2 次元粗さの寸法形状を変化させることにより遷移位置を制御することが可能であることを示した。このように、受容性を利用して与える外乱や物体の表面形状を定めることによって、様々な速度変動を励起し、境界層の安定性を制御することが可能である。

境界層の乱流遷移過程の後期においては、T-S 波の

3次元化が遷移の進行に重要な役割を担っている。しかし、これまでの制御の試みは 2 次元的な速度変動である T-S 波についての研究が主であり、T-S 波の 3 次元分化の際に発生する斜行波を制御する試みは少ない。本研究では、T-S 波の 3 次元化を制御するための基礎研究として、粗さ要素を斜めに設置した平板上に発達する境界層に音波を与えることによって、斜行 T-S 波を励起する試みを行いその性質を調べた。

## 2. 実験装置および測定方法

実験は、東北大学流体科学研究所の低乱熱伝達風洞を用い、測定部が密閉型の状態で行った。図 1 に実験装置の概略および座標系を示す。座標系は平板前縁中央部から主流方向に  $x$  軸、平板に垂直方向に  $y$  軸、スパン方向に  $z$  軸をとる。供試体は全長 3.2m、幅 1.0m、厚さ 10 mm のアルミニウム合金製平板で表面を滑らかに仕上げている。平板前縁形状は、前縁からの音波の受容を抑えるため長短軸比が 36 : 1 の楕円形状とし、また、前縁部と平板部との継ぎ目での曲率を滑らかにするために修正楕円形状を採用している。

速度場の測定は 3 次元トラバース装置に取り付けられた熱線流速計によって行われる。音波は整流部上流（測定部の約 12m 上流）に取り付けられたスピーカーにより与えられる。なお、スピーカー自体は流れには悪影響を及ぼしていないこと、音波は平板前縁に対してほぼ垂

\* 東北大学工学部

\*\* 石巻専修大学理工学部

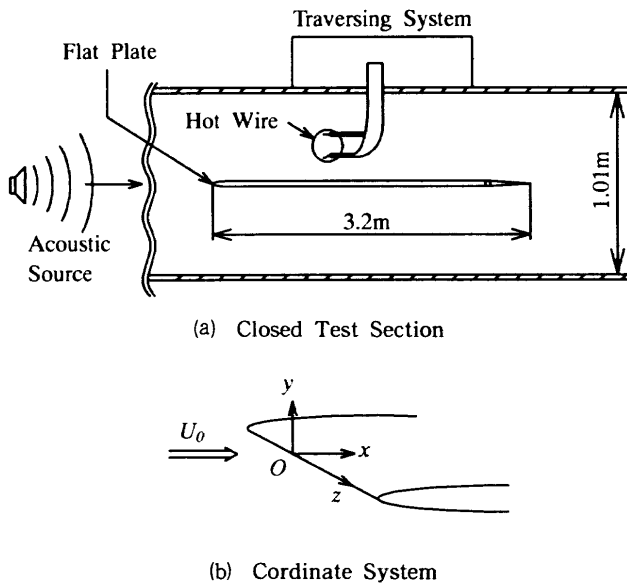


Fig.1 Experimental setup.

直に入射していることが予め確認されている。

主な実験条件を表1に示す。ここで、音波による励起周波数  $f = 177.8\text{Hz}$  は、主流速度  $U_0 = 20\text{m/s}$  において自然に発生するT-S波の周波数とほぼ等しい周波数である。音波の強さ  $\sqrt{u'_{ac}{}^2}$  は音波を供給することによる主流速度変動の増分であり、騒音計により測定された音圧レベルは測定部中央において約90dBである。また、分枝I、分枝IIは中立安定曲線において表1の周波数  $f$  の微小擾乱が成長あるいは減衰を始める位置に相当しており、分枝Iにおける境界層厚さ  $\delta$  および排除厚さ  $\delta^*$  はそれぞれ  $\delta = 2.91\text{mm}$ 、 $\delta^* = 1.03\text{mm}$  である。

3. 実験結果および考察

まず、音波および粗さ要素が境界層の安定性にどのような影響を与えるかを調べた。図2に平板上に自然に発達する境界層、粗さ要素を設置し音波を与えた場合の

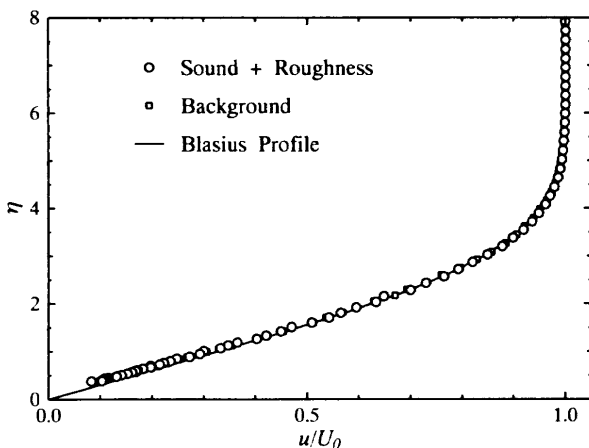


Fig.2 Velocity profile of boundary layer.

境界層のそれぞれの速度分布を示す。ここで縦軸  $\eta$  は、 $y$  方向の無次元距離で、 $\eta = y\sqrt{U_0/x\nu}$  ( $\nu$ : 動粘度) で定義される。速度分布はBlasiusの理論値に良く一致していることから、境界層は粗さ要素、音波がある場合でも層流を保っていることが確認された。このときの測定部 ( $x = 1100\text{mm}$ ) における境界層厚さは4.63mmである。

次に粗さ要素をスパン方向に傾けて設置し、その角度  $\theta$  が励起されるT-S波に及ぼす影響について調べた。図3に粗さ要素を設置した平板の概略図を示す。平板上に粗さ要素を設置する際には、平板前縁から粗さ要素の前端までの距離が、平板中央部 ( $z = 0\text{mm}$ ) において480mmになるようにした。この位置は表1の周波数の擾乱が成長し始める、中立安定曲線の分枝Iに相当する位置である。設置した粗さ要素の幅は  $D = 18\text{mm}$  であり、励起されるT-S波の波長の半分の長さである。過去の研究<sup>(2)</sup>より、このような幅を持つ粗さ要素は非常に強いT-S波を励起することがわかっている。また、粗さ要素の高さ  $h$  は0.10mmで、このときの突起の高さと粗さ要素位置での排除厚さ  $\delta^*$  との比は  $h/\delta^* = 0.10$  である。設置角は  $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$  の4種類である。

図4に、設置角  $\theta$  を変化させたときの境界層内速度変

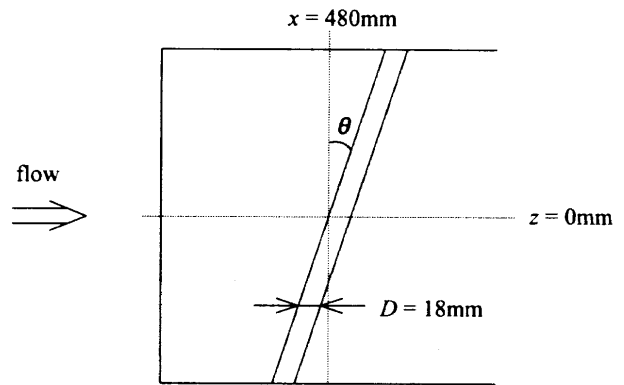


Fig.3 Outline of inclined roughness element.

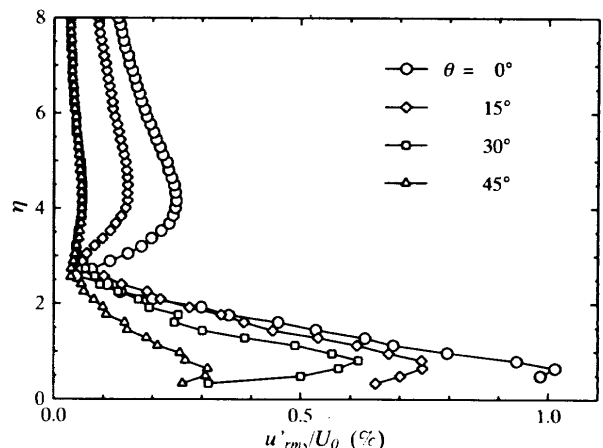


Fig.4 Velocity fluctuations profile for various  $\theta$ .

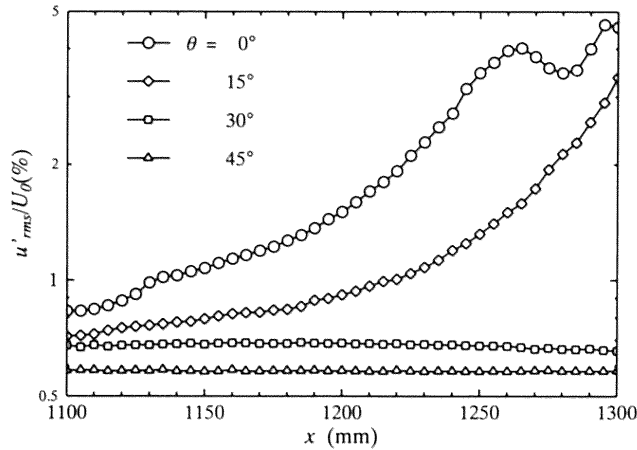


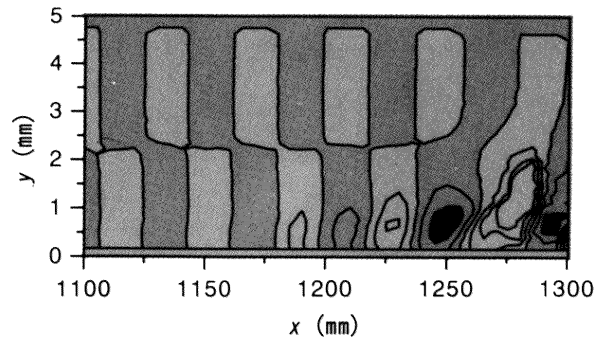
Fig.5 Streamwise velocity fluctuations for various  $\theta$ .

動分布を示す。各設置角  $\theta$  における分布形状は、T-S 波型の特徴的な分布になっている。また、設置角をつけた場合 ( $\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ ) に励起される速度変動は、設置角がない場合 ( $\theta = 0^\circ$ ) に比べて弱くなっていることがわかる。この結果は、3次元攪乱の増幅率が2次元攪乱のそれよりも小さくなるというSquireの理論<sup>(3)</sup>と一致する。

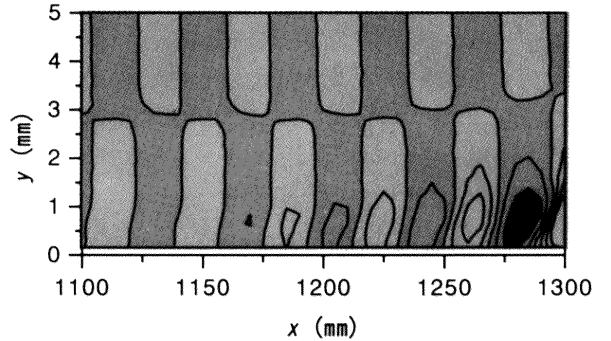
図5は、粗さ要素の設置角を変化させたときの境界層内 ( $y = 1 \text{ mm}$ ) における速度変動の主流方向分布を示している。粗さ要素が前縁に対して平行な場合 ( $\theta = 0^\circ$ ) には、境界層内に非常に強い速度変動が発生しており、急激に成長している。しかし、粗さ要素の設置角を大きくしていくと、速度変動の強さは弱くなり、増幅率も減少する傾向にある。特に、 $\theta = 30^\circ, 45^\circ$  の場合には速度変動はほとんど成長していない。この原因としては、粗さ要素を斜めに設置しているために、粗さ要素の各位置におけるレイノルズ数がスパン方向に異なっていることなどが考えられる。

これらの速度変動の空間的な成長過程を見るために、各設置角  $\theta$  に対する  $xy$  断面 ( $z = 0 \text{ mm}$ ) での速度変動分布を調べた。図6は  $xy$  断面での速度変動  $u'$  の等値線図を示している。各データは与えた音波を基準信号としてアンサンブル平均されている。またこの図において、白い部分は速度変動が負 ( $u' < 0$ ) の領域、黒い部分は速度変動が正 ( $u' > 0$ ) の領域を示している。

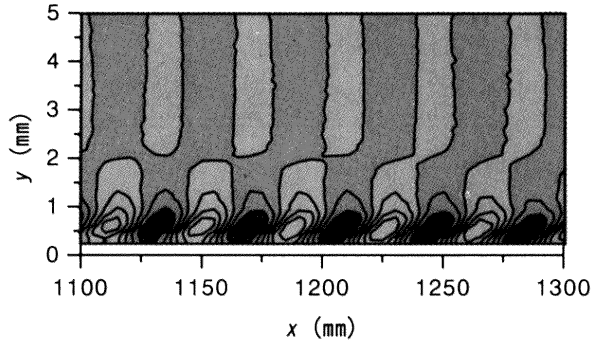
設置角  $\theta = 0^\circ$  のときは、壁面付近での速度変動の等値線が、そこよりやや上流の壁面から離れた位置での速度変動の等値線とつながっており、境界層内に上流に傾いた周期的構造が発生していることがわかる。図5より測定範囲内においてはT-S波は成長していることから、この上流に傾いた周期的構造は成長過程のT-S波の構造を表していることがわかる。設置角  $\theta = 15^\circ$  のときも



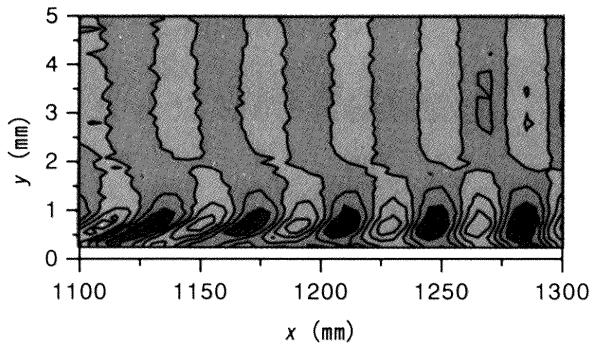
(a)  $\theta = 0^\circ$ , Contour Interval = 0.5 (m/s)



(b)  $\theta = 15^\circ$ , Contour Interval = 0.25 (m/s)



(c)  $\theta = 30^\circ$ , Contour Interval = 0.05 (m/s)



(d)  $\theta = 45^\circ$ , Contour Interval = 0.01 (m/s)

Fig.6 Contour map of velocity fluctuations in  $xy$  plane.

同様に若干上流に傾いた周期的構造が発生しているが、 $\theta = 0^\circ$  の場合に比べて成長は緩やかである。これに対して設置角が  $\theta = 30^\circ$  のときは、この周期的構造が下流に傾いており、速度変動はわずかに減衰しているように見える。さらに設置角を  $\theta = 45^\circ$  にすると、速度変動は成

長過程にあるものの、その強さは非常に弱い。

図 7 に  $yz$  断面 ( $x=1100\text{mm}$ ) における速度変動  $u'$  の等値線を示す。 $\theta=0^\circ$  の場合の等値線は壁面に対して平行になっており、速度変動が 2 次元的であることを示している。これに対して粗さ要素の設置角を大きくしていくと、 $\theta=15^\circ, 30^\circ$  の場合に見られるように、スパン

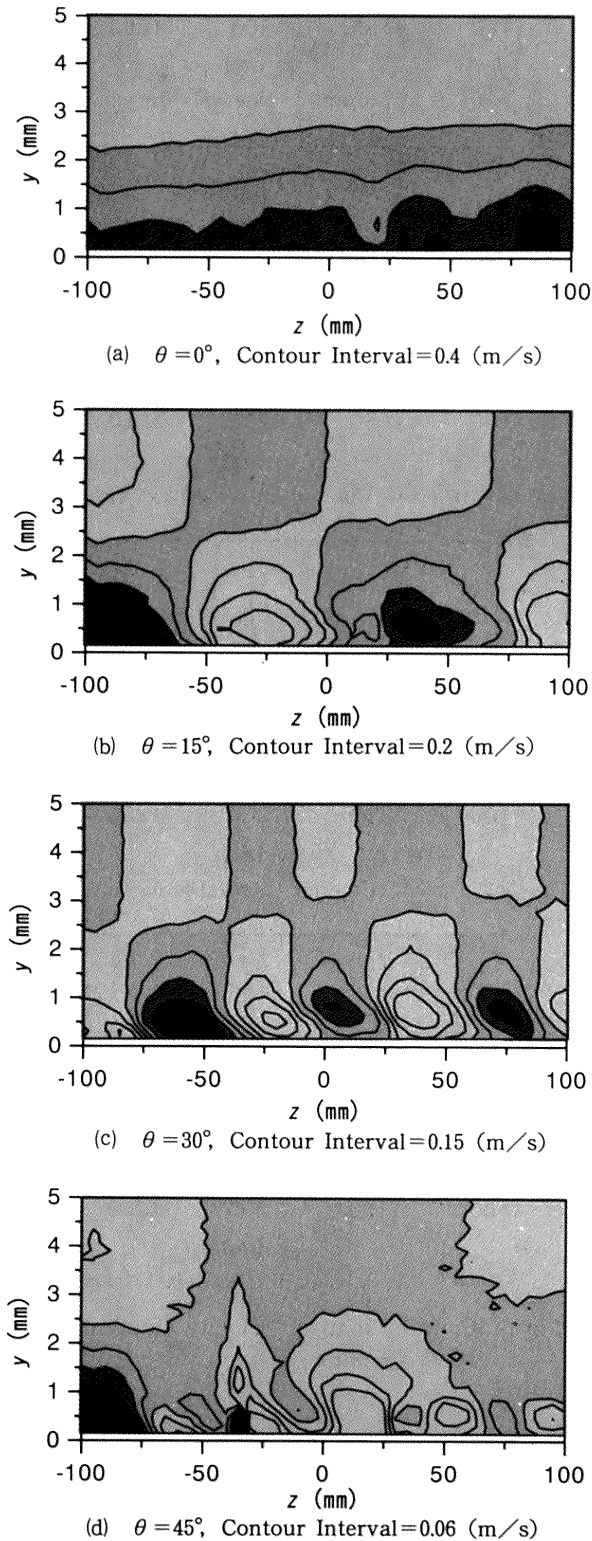


Fig. 7 Contour map of velocity fluctuations in  $yz$  plane.

方向に  $u'$  の周期的な強弱が現れる。つまり、この速度変動は周期性を持った 3 次元的な変動であることがわかる。しかし、設置角をさらに大きくした  $\theta=45^\circ$  の場合には、スパン方向に速度変動の強弱は見られるが、 $\theta=15^\circ, 30^\circ$  で見られた周期性が崩壊している。

さらに詳細にこれらの速度変動の構造を調べるため、

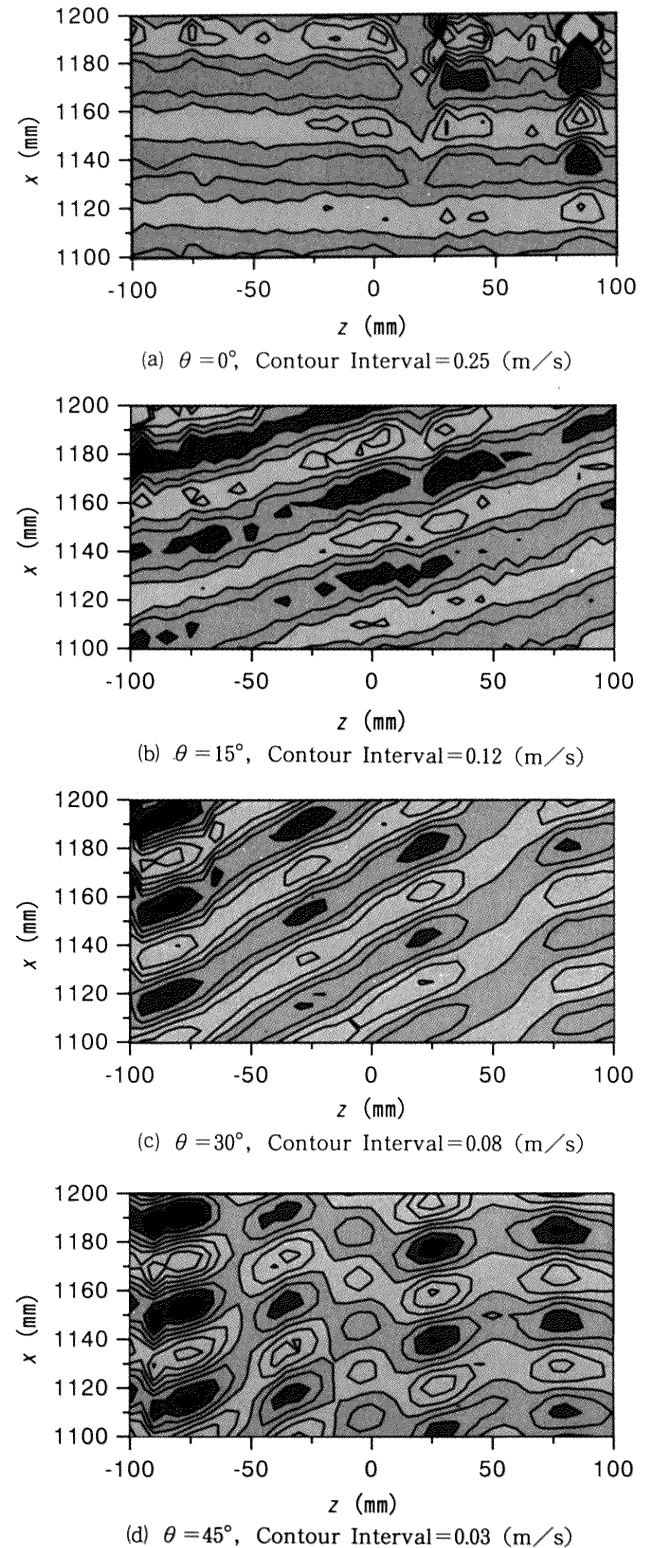


Fig. 8 Contour map of velocity fluctuations in  $xz$  plane.

$xz$  断面 ( $y=1\text{ mm}$ ) での速度変動の測定も行った。図 8 に、設置角  $\theta$  を変化させたときの速度変動  $u'$  の等値線を示す。粗さ要素が前縁と平行な場合 ( $\theta=0^\circ$ ) は、前縁と平行な波面を持つ 2 次元的な構造になっていることがわかる。これに対して粗さ要素がスパン方向に傾いて存在すると、速度変動の位相が等しい線がスパン方向に傾いており、斜行波が発生していることがわかる。また、設置角  $\theta$  が大きくなると、斜行波の波面はより大きく傾いており、このときの波面の傾き角は粗さ要素の設置角にほぼ等しくなる。

しかし、 $\theta=45^\circ$  の場合は、斜行波の分布がスパン方向に途切れており、部分的には前縁に平行な変動が観測されている。同様に、 $\theta=30^\circ$  の場合にも、斜行波の中に前縁に平行なパターンが重なっているように見える。この  $\theta=30^\circ$ 、 $45^\circ$  の場合に見られる 2 次元的な変動は T-S 波であると考えられる。 $\theta=15^\circ$  の場合は斜行波の成分が強いために T-S 波は見られなかったが、 $\theta=30^\circ$ 、 $45^\circ$  と設置角が大きくなるにつれて、励起される変動が弱くなるため、相対的に強くなった T-S 波が見え出し、双方が重なった分布が現れたものと考えられる。

#### 4. まとめ

粗さ要素を斜めに設置した平板上の層流境界層に音波を与えることにより、様々な傾き角を持つ斜行波を励起した。また、斜行波の傾き角（粗さ要素の設置角）が

大きくなるほど、励起される斜行波の強さ、増幅率は小さくなることを確認した。しかし本実験においては、斜めの粗さ要素の各位置におけるレイノルズ数がスパン方向に異なっているため、今後の研究においては、これらの問題を解消するためにも、 piezoelectric や他のマイクロアクチュエータを振動デバイスとして用いて T-S 波、斜行波の励起、制御を試みる予定である。

#### 参考文献

- (1) Morkovin, M. V. : Critical evaluation of transition from laminar to turbulent shear layer with emphasis on hypersonically travelling bodies, Air Force Flight Dynamics Lab., AFFDL-TR-68-149, (1969).
- (2) Kobayashi, R., Fukunishi, Y., Nishikawa, T. and Kato, T. : The receptivity of flat-plate boundary-layers with two-dimensional roughness elements to freestream sound and its control, Laminar-Turbulent Transition, (ed. Kobayashi, R.), Springer-Verlag, (1994), 507-514.
- (3) Squire, H. B. : On the stability for three-dimensional disturbances of viscous fluid flow between parallel walls, Proc. R. Soc. London, A 142, (1933), 621-628.

