

長平板背後の流れのはく離領域に及ぼす スプリッター板の影響

上代良文*, 河田匡仙**, 高橋義一*

The Effects of Splitter Plates on the Separated Flow Region behind a Long Flat Plate with a Blunt Trailing Edge

Yoshifumi JODAI*, Masanori KAWADA** and Yoshikazu TAKAHASHI*

Abstract

An experimental investigation has been made on the separated flow region behind a long flat plate with a blunt trailing edge. The flow was controlled by an additional splitter plate fitted to the trailing edge along the wake center line. The length of the splitter plate, l , was varied from a half, to five times the trailing edge thickness, h . Measurements of pressure distributions and velocity fluctuation were made in the separated flow region under the freestream zero-pressure gradient. The pressure distribution on the wake center line was highly sensitive to the length of the splitter plate in the case of $l/h < 1$. The similarity in the pressure distribution behind the base, using the splitter plate of $l/h \geq 3$, was observed in the present long flat plate when the results were plotted in the form proposed by Narayanan et al. for the backward facing step. The regular vortex shedding was suppressed by using the splitter plate of $l/h \geq 3$.

Key Words : Separation, Wake, Turbulence, Splitter Plate, Pressure Distribution

1. 緒 言

本研究の目的は、流れに平行に置かれた長平板（全長が $100h$, h は板厚）背後に形成されるはく離領域に及ぼすスプリッター板（長さ l , 以下は SP と呼ぶ）の影響を実験的に調べることである。著者らは既報⁽¹⁾において、SP の l/h を変化させたときの背圧と長平板後端近傍の境界層特性について明らかにした。これらは、測定平板背後のはく離領域の挙動と密接に関連していると考えられるため、その時間平均圧力および速度変動の視点から本報告において述べることにする。

関連する研究では、Beamman⁽²⁾ は短平板（全長 $6h$ で圧力抗力の寄与が大きい物体）に SP を設置した実験から、 l/h と背圧や卓越した渦放出の発生周波数変化との関係を調べ、はく離せん断層の挙動に関連づけて報告している。Nakayama ら⁽³⁾ はこの流れ場をモデル化した LES 計算を行い、渦放出特性に

ついて Beamman⁽²⁾ の実験結果と一致する傾向を得ている。これらと同種の研究で、Roshko⁽⁴⁾ や Apelt ら⁽⁵⁾ は円柱背後の渦形成領域に SP を挿入し、背圧や渦放出特性の変化を実験的に明らかにしている。一方、本研究で対象としたような長い平板（摩擦抗力の寄与が顕著）については、はく離領域の調査はほとんどなされていない⁽⁶⁾。後縁ではく離をともなう物体の境界層制御の方法として、後縁にフラップを設置したり、平板下流端表面に二次元突起を取り付けて境界層に逆圧力こう配を発生させてはく離せん断層を押し上げる方法もあるが、本研究では背圧変化のみを利用した流れの制御法として SP を採用する。この方法は、スパン方向渦度を有する境界層に対して、同じく横渦の支配的なはく離渦が直接影響を及ぼす効果を明らかにすることができる点で、縦渦の導入による境界層制御とは異なる意味をもち流体力学的に重要である。

また、翼形や平板の後端付近を滑らかにとがらす

原稿受理 2006 年 11 月 20 日

* 高松工業高等専門学校 機械工学科

** 元高松工業高等専門学校専攻科 機械電気システム工学専攻

よりも、流れに直角に切断することは製作コストの削減や強度確保の点から工業上有効である反面、はく離渦が発生するために流れ場が局所的に乱されて複雑になる。一方で、このような物体の後縁に SP を追加することは製作の上で容易である。ところで、たとえば多段翼列（冷却空気噴出孔を翼表面にもつガスタービン翼などでは後縁が厚肉となる場合がある）における上流段翼後縁のはく離渦の制御を考えると、上流段翼の抵抗低減やストールなどの不安定性の改善、その後流によって下流段翼に発生する渦励振や騒音の改善の可能性などが期待される。このことから、SP がはく離領域に及ぼす影響を明らかにすることは各種流体関連機器の性能改善のための基礎データや後流の初期条件を与える意味において工学的にも重要な研究対象であると考えられる。

以上のことをふまえ、本研究では十分に発達した乱流境界層をもつ平板後端の中心に SP を設置し、その長さ l を 7 種類変えた場合について、平板背後のはく離領域に及ぼす影響を調査する。

2. 実験装置および方法

2・1 流れ場の概略および座標系

流れ場の概略は既報⁽¹⁾とほぼ同様である。風洞測定部（幅 527mm、全長 4000mm、高さ 350mm）は長方形断面で、測定平板（長さ $L=2000$ mm、厚さ 20mm）は流路中央に設置されている。図 1 は流れ場の概要、座標系および主要記号を示す。座標は平板後端を原点とし流れ方向に x 、既報とは異なる

り後流中心を原点とし垂直方向に y をとっている。測定平板の前縁から下流 100mm の位置に乱流遷移の促進のため直径 1mm のトリッピングワイヤを設置した。主流を零圧力勾配にするため、圧力調整用側板とフラップの傾きを調整した。主流静圧は図 1 の一点鎖線で示す測定部下壁の $y=150$ mm の位置に片側 40 箇所設けた直径 1mm の壁面静圧孔で測定した。実験は $x=-1000$ mm、 $y=150$ mm での基準速度 U_m と空気の動粘性係数 ν に基づく単位レイノルズ数 U_m/ν を $9.93 \times 10^5 \text{m}^{-1}$ ($U_m \approx 15 \text{m/s}$) として、平板のスパン方向中心線上 ($z/h=0$ 断面) で行った。このとき、主流の乱れ強さはおよそ 0.1% であった。

2・2 スプリッター板および表面圧力測定孔

平板後端の板厚中央部に設置した SP はステンレス製で、その厚さとスパン方向長さはそれぞれ 2mm と 350mm である。SP の長さ l は測定平板の厚み h との比を考慮して、10, 20, 30, 40, 60, 80 および 100mm ($l/h=0.5 \sim 5$) の 7 種類とした。

SP 表面に設けた圧力測定孔（測定側が直径 0.4mm、深さ 1mm で、裏側が直径 1mm、深さ 1mm の段付孔）に圧力取出し用シリコンチューブ（外径 1mm、内径 0.5mm）の一端を挿入して接着し、他端を差圧変換器へ接続した。本圧力測定の精度⁽⁷⁾は 0.1% 未満と見積もられ、次節のピトー静圧管測定の信頼性を保証するために行った。表 1 に SP 表面圧力測定孔の位置を示す。第 1 番目から第 5 番目の孔は、スパン方向原点 ($z/h=0$) 付近に設けてあり、上側および下側の孔は $z/h=\pm 2.5$ 付近に設けてある。（ ）を付した圧力孔での測定は省略した。

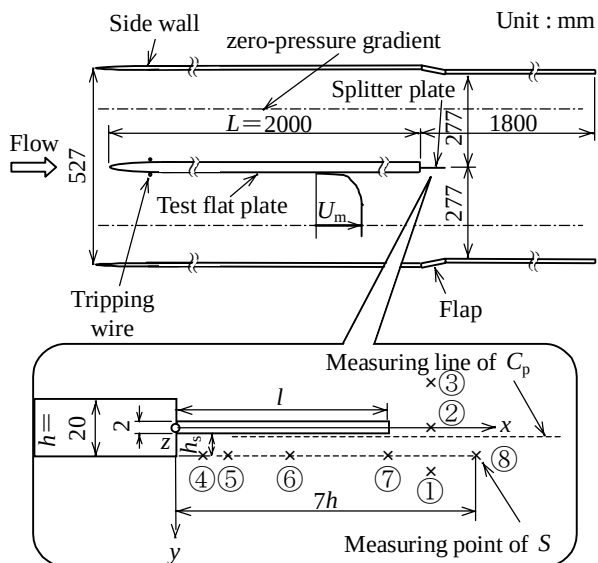


Fig. 1 Configuration of flow field and coordinate system

Table 1 Location of surface holes on the splitter plate in x mm, z mm coordinates

	$l/h=1$	$l/h=1.5$	$l/h=2$	$l/h=3$
Upper hole	12.3, - 50.7	19.4, - 51.8	27.6, - 51.9	24.5, - 51.8
1st hole	6.3, - 0.9	(19.0, - 0.8)	20.2, - 0.9	18.1, - 1.9
2nd hole	12.4, - 0.9	22.0, - 0.8	24.5, - 0.9	21.0, - 1.9
3rd hole	17.8, - 0.8	24.9, - 0.6	27.0, - 0.8	23.4, - 1.8
4th hole	-	27.7, - 0.2	29.4, - 1.1	26.7, - 1.5
5th hole	-	-	33.3, - 0.7	29.9, - 2.0
Lower hole	12.2, 50.3	(19.4, 49.0)	27.4, 48.5	24.8, 49.1

2・3 計測法

後流中心圧力分布の詳細な測定には、直径 1.06mm のピトー静圧管（静圧孔の直径 0.4mm）を利用し、管軸を流れ方向に向け、SP の表面に沿った位置に配置した。図 2 は後流中心の圧力係数 C_p の l/h による変化を $x \leq 70\text{mm}$ ($x/h \leq 3.5$) の範囲について示した予備実験の結果である。縦軸は圧力の測定値（ゲージ圧）を基準速度 U_m に基づく動圧で無次元化したものである。まずスパン方向原点 ($z/h=0$) 付近と $z/h=2.5$ 付近とで、SP 表面圧力測定孔の C_p の値はよく一致しており、流れ場の二次元性が良好であることが確認された。また $z/h=0$ 付近において、SP 表面圧力測定孔の C_p の値はピトー静圧管の C_p の分布上によくのっており、ピトー静圧管を用いた後流中心圧力測定の妥当性が確認された。なお、同図中に平板背後の圧力係数（背圧係数）の値も示してあるが、これはピトー静圧管による C_p 分布の延長線上にほぼ一致した。

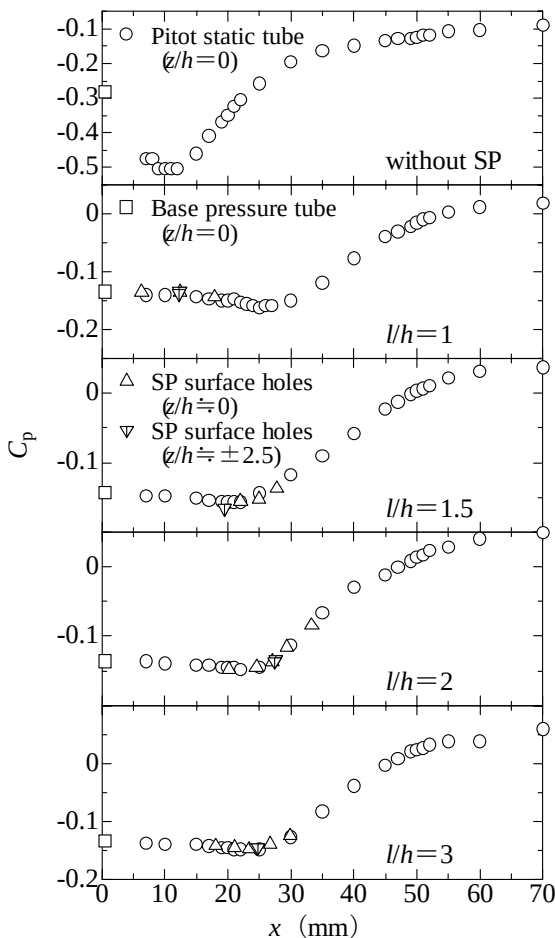


Fig. 2 Pressure distribution behind the long flat plate

平板後端での境界層の瞬時速度の測定には受感部長さ 1mm、直径 $5\mu\text{m}$ のタングステン線からなる I 型熱線プローブを用いた。近傍後流の瞬時速度の測定には受感部長さ 1mm、直径 $5\mu\text{m}$ のタングステン線 2 本からなる X 型熱線プローブ（交差角 $90 \pm 1^\circ$ ）を用いた。いずれも定温度型熱線流速計を利用し、その出力をサンプリング周波数 10kHz、サンプリング時間 10 秒で A-D 変換した。

3. 結果および考察

3・1 後流中心圧力

SP 表面に配置した静圧管による測定値と SP 表面圧力孔による測定値は、よく一致したので（図 2），以下では静圧管による後流中心圧力を用いて詳細な検討を行う。図 3 は後流中心の圧力係数 C_p の l/h による変化を $x/h \leq 8$ の範囲について示す。測定器具の都合により、 $l/h=5$ の場合は x 方向の測定範囲が他とは異なる。縦軸は図 2 と同様に無次元化した。SP なしの場合、 $x/h=0.65$ で最小値 (C_p)_{min} ≈ -0.50 をとった後、下流に向かって増加（圧力回復）し負側から $C_p=0$ の漸近値に近づく。SP を設置すると、 $l/h=0.5$ の場合 $x/h=0.95$ で最小値 (C_p)_{min} ≈ -0.33 をとり、下流に向い SP なしと同様に漸近値に近づく。 $l/h \geq 1$ の場合およそ $x/h=1.1 \sim 1.3$ で最小値 (C_p)_{min} ≈ -0.13 をとり、下流に向い増加しおよそ $x/h=3.2 \sim 3.6$ で正の最大値 (C_p)_{max} をとった後 $C_p=0$ に漸近する。このように、 C_p に対する l/h の効果は $l/h < 1$ と $l/h \geq 1$ とに大別できる。SP の設置によるはく離渦中心の下流への移動、およびその強さの減少 (C_p の回復) は Roshko⁽⁴⁾ が円柱において $l/h \approx 5$ の SP の効果を示した結果と同傾向である。

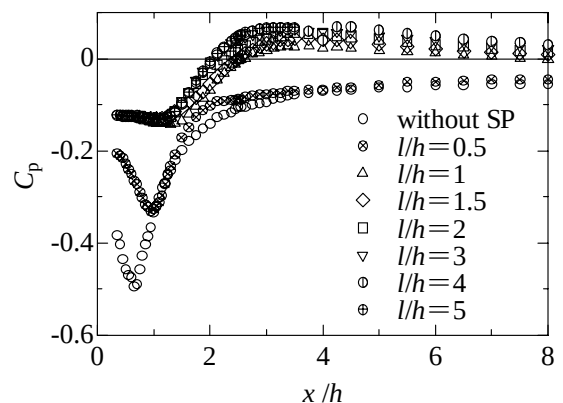


Fig. 3 Pressure distribution along the wake center line

ところで、既報⁽¹⁾で示したように、本長平板の再付着点位置 x_r (測定平板の後端角からの分割流線が SP 表面へ付着した距離と定義) は $2.4h=48\text{mm}$ である。そこで、代表的なはく離・再付着流れの一つであり、はく離領域の壁面形状が本長平板の背後と類似した後ろ向きステップ流との比較を行う。図 4 は、図 3 の C_p 分布を x/x_r に対して示したものである。本長平板の $l/h \geq 3$ の場合 (再付着が生じている場合) の C_p 分布が、仲條ら⁽⁹⁾が後ろ向きステップ流の実験から示した次の性質とかなり似ていることが分かる。すなわち、(1) C_p の最小値をとる x 方向位置 $x_{\min}$ がおよそ $0.4x_r$ 、(2) $x=x_r$ 付近で C_p の急増、そして (3) $x=(0.70 \sim 0.85)x_r$ 付近で $\partial C_p / \partial x$ が最大値をとることである。

さて、SP の設置によって本長平板の後端背後にできるステップ高さ h_s は 9mm である (図 1 参照)。

はく離位置での境界層厚さ δ と h_s との比が本研究とほぼ同一の、Narayanan ら⁽⁹⁾の後ろ向きステップ流の C_p 分布 ($h_s=3\text{mm}$, $x_r=16.8\text{mm}$) を図 4 に実線で示す。長平板の $l/h \geq 1$ の C_p 分布は、Narayanan らの後ろ向きステップ流の C_p 分布と類似している。

図 5 は、Narayanan らの手法にならって C_p 分布を描いたものである。縦軸は、 C_p の最大値 $(C_p)_{\max}$ と最小値 $(C_p)_{\min}$ を用いて規格化したものである。横軸は、 $(C_p)_{\max}$ と $(C_p)_{\min}$ (負値) との平均値をとる流れ方向位置 x^* で無次元化している。Narayanan らの分布を図 5 に実線で示す ($-3.9 < (x-x^*)/h_s < 3.7$ の範囲)。 $l/h < 1$ の場合、 $x=x^*$ 付近で Narayanan らの分布に一致するものの、そこから離れると大きくずれる。一方、 $l/h \geq 1$ ではより広い範囲で Narayanan らの分布と一致しており、本流れ場においても、長さ尺度として x^* を用いると圧力

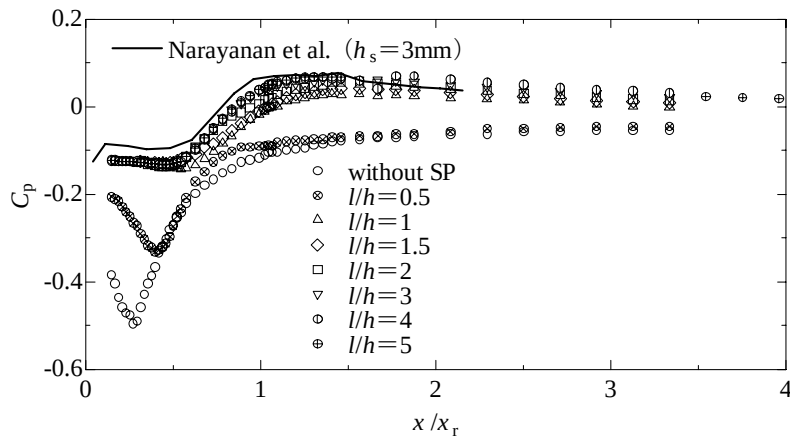


Fig. 4 Pressure distribution plotted in terms of x_r

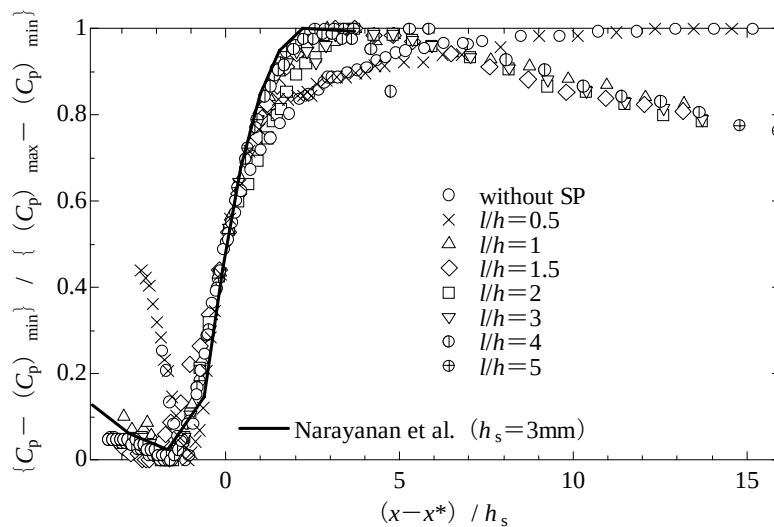


Fig. 5 Normalized pressure distribution plotted in terms of x^*

分布の相似性が見られることが示された。詳しく見ると、 $l/h \geq 3$ では SP が長いほど Narayanan らの分布に近づく傾向がある。なお、 $l/h=4$ での $(x-x^*)/h_s \approx 4.8$ における局所的な規格化圧力係数のくぼみは、SP 後端での微小なはく離（平板後端でのく離と比べて）の存在を示唆しており、図 3 の $x/h=4$ においても見られる。

3・2 平板後端境界層の瞬時速度波形

図 6 は SP がない場合の平板後端位置の境界層内を I 型熱線プローブで測定した瞬時速度波形である。縦軸は流れ方向の瞬時速度 $\tilde{u}$ である。横軸はサンプリング中の任意の 100ms 区間を抜粋したものである。図中の δ は境界層厚さを表わし、 y はこの図のみ平板表面からの距離を表わす。境界層内の内層側で、規則的な卓越周波数をもつ速度変動が明確に現れている。これは平板後端ではなく離したせん断層が近傍後流域ではなく離渦として巻き上がり、渦放出が生じていることを示唆している。壁面近くほど速度変動が大きいのは、乱流境界層が発達したためである。流れ方向変動速度のパワースペクトルのピーク周波数 f を用いて放出渦のストローホル数 S が求まるが

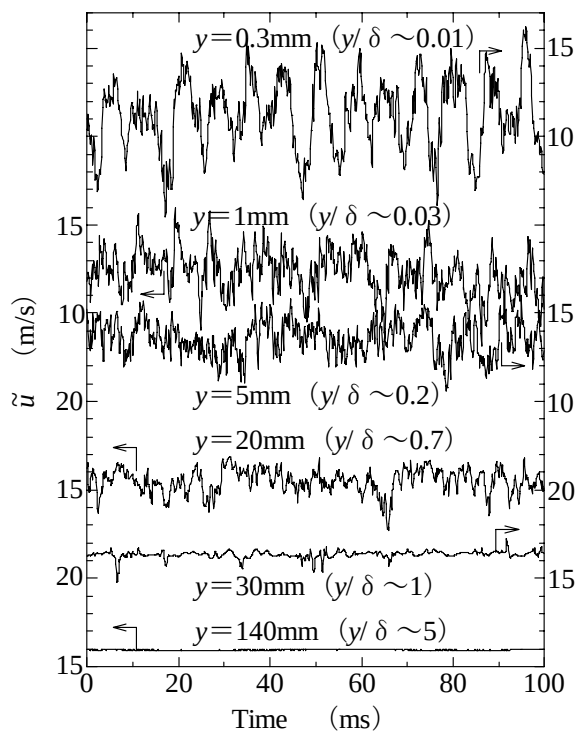


Fig. 6 Some oscilloscope traces of anemometer signal in the turbulent boundary layer at the trailing edge of the long flat plate without SP

$(S = f h / U_m)$ ，この値は後流域で検出された S の値（3・4 節参照）とほぼ一致した。なお、図は略すが SP がある場合、 $l/h=0.5$ では平板後端境界層で瞬時速度波形から卓越した周波数が観察され、その S の値は SP がない場合よりも大きい。一方、 $l/h \geq 1$ の場合にこの位置では卓越周波数が観察されなかった。以上のことから、SP の有無および SP の長さによってはく離領域の流れ場の構造が大きく変化することが示唆されたので、次節においてこれを詳細に調べる。

3・3 近傍後流の瞬時速度波形

図 7 は近傍後流域での、いくつかのはく離渦検出位置における任意の時刻の区間について、 x および y 方向の瞬時速度 $\tilde{u}$ および $\tilde{v}$ の出力波形を示したものである（図 1 の①～⑧の位置で、X 型熱線プローブによって測定）。主なものは、 $x=l+0.7h$ 、 $y=0.8h$ （短平板についての Beaman⁽²⁾ の検出位置に近い、図中①）および $x=7h$ 、 $y=0.5h$ （後述の図 8 の S の算出に使用、図中⑧）である。その他、①と同じ流れ方向位置の②と③を、図 6 において境界層の壁面近くで規則的な卓越周波数が明確に現れたので近傍後流の平板表面の下流の④～⑦をそれぞれ検出位置として選択した。なお、 $\tilde{u}$ の図中の実線、破線および一点鎖線は、それぞれ 10m/s、15m/s および 5m/s を示す。同様に、 $\tilde{v}$ の図中の実線、破線および一点鎖線は、それぞれ 0m/s、5m/s および -5m/s を示す。

SP がない場合は、 $\tilde{u}$ および $\tilde{v}$ の出力波形ともに①と③の位置が正弦波に最も近い。一方 SP がある場合は、平板表面の一番下流の⑧の位置の波形が比較的正弦波状であり、 $\tilde{u}$ よりも $\tilde{v}$ の出力波形の方が規則的な渦放出を明確に検出できる傾向にある。 l/h が増加するにしたがい、概ね波形の周期性は不明瞭になっていく。 $l/h=0.5$ の場合、①の図を見ると SP なしの場合よりも変動速度成分の振幅が減少し、かつ周期が若干短い正弦波状の波形となる。これは、SP の設置によりはく離渦の放出時間が短くなり、卓越周波数が増加することを示す。これは、平板後端境界層で検出した場合に $l/h=0.5$ の SP 設置によって S が増加した結果（3・2 節参照）と一致している。 $l/h=1.5$ においては周期が最も短くなり、 S の最大値を生じる。 $l/h=2$ になると、規則的渦放出の周期は逆に増加し始める。ただ、 $l/h>2$ の場合、変動波形の周期性が徐々に不鮮明となり、卓越した規則的な渦放出が弱体化する。

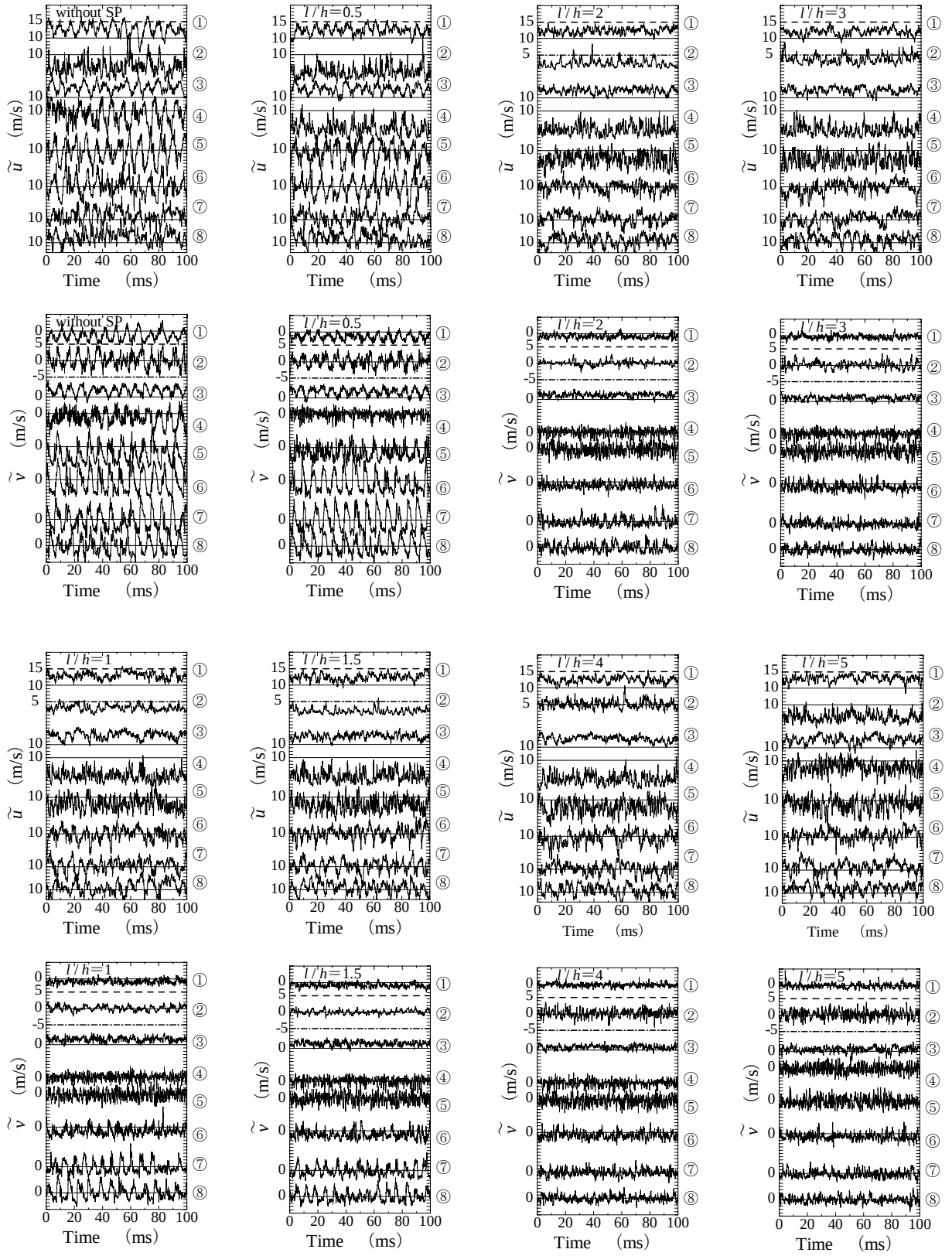


Fig. 7 Instantaneous streamwise and normal velocities in the near wake of the long flat plate with X-hot wire probe at different positions : ① $(l+0.7h, 0.8h)$, ② $(l+0.7h, 0)$, ③ $(l+0.7h, -0.8h)$, ④ $(0.5h, 0.5h)$, ⑤ $(h, 0.5h)$, ⑥ $(2.5h, 0.5h)$, ⑦ $(5h, 0.5h)$ and ⑧ $(7h, 0.5h)$ in (x, y)

3・4 測定平板長とストローハル数

図 8 は、渦検出位置⑧ (l/h の大きい範囲まで S が検出されている) における $\tilde{u}$ の出力波形から求めた S と測定平板の長さ L/h との関係を示したもので、他著者の結果と比較してある。本長平板 ($L/h=100$, 図 1 参照) の結果は、SP のない場合 $S=0.167$ であり、Parker ら⁽¹⁰⁾ の実験結果の延長線上に近い。なお、Beamman⁽²⁾ の短平板 ($L/h=6$) の実験結果およびそれをモデル化した Nakayama ら⁽³⁾ の計算結果の一致は良好であり、これは $L/h=5.7$ における Parker らの結果とも近い。次に、代表的な SP の長さとして $l/h=1.5$ について調べる。これは本長平板、Beamman および Nakayama らの短平板が、ともに $l/h=1.5$ の場合に S の値が最大となる共通点に着目したためである。いずれの場合も SP の設置によって S の値は、平板単体のみにについて測定された Parker らの結果から遠ざかる傾向が明らかとなった。ここで、はく離位置での境界層厚さ δ のみを変化させた $L/h=20$ の Rowe ら⁽⁶⁾ の平板の実験結果は、 δ/h の値が減ると S の値が増加することを示している。これは、はく離せん断層の厚さが相対的に減少すると、それが後流中心を越えて巻き上がるための経路が減少して渦放出周波数が増加したためと考えられる。このことは SP の設置による S の増加機構と類似しているものと思われる。

4. 結 言

長平板後端に設置したスプリッター板 (SP) が、平板背後のはく離領域に及ぼす影響を調べ、以下の

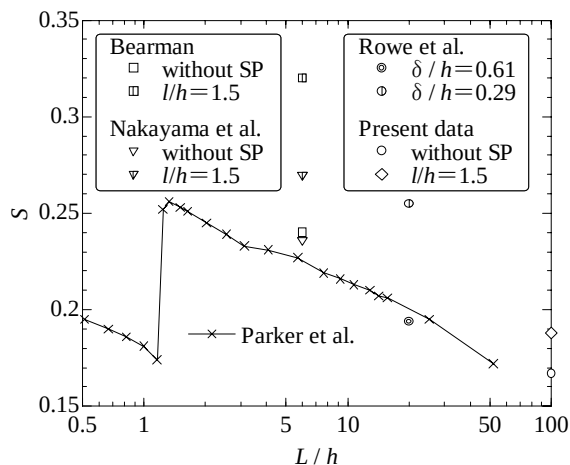


Fig. 8 Strouhal number and length of the flat plate

ことが明らかとなった。

- (1) 後流中心の圧力係数 C_p の分布に対する l/h の効果は $l/h < 1$ と $l/h \geq 1$ とに大別できる。 $l/h=0$ から 1 にかけて C_p は大きく回復するとともに、その最小値位置 $x_{\min}$ は下流へ移動する。 $l/h \geq 1$ の場合、 C_p の分布の変化は小さい。
- (2) 長さ尺度として x^* を用い、 C_p の分布を規格化して表すと $l/h \geq 3$ ではほぼ相似性が成立する。
- (3) SP を設置するとストローハル数 S の値は増加するが、 $l/h \geq 3$ では渦放出が抑制される。

本実験には高松工業高等専門学校の卒業研究学生諸氏のご協力を得た。また財団法人南海育英会平成 18 年度教育研究助成を受けた。ここに記して謝意を表する。

文 献

- (1) Jodai, Y. et al., The Effects of Splitter Plates on Turbulent Boundary Layer Developing on a Flat Plate near the Trailing Edge, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 72, No. 719(2006), 1735-1742.
- (2) Beamman, P. W., Investigation of the Flow behind a Two-Dimensional Model with a Blunt Trailing Edge and Fitted with Splitter Plates, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 21, Pt. 2(1965), 241-255.
- (3) Nakayama, A. and Noda, H. LES Simulation of Flow around a Bluff Body fitted with a Splitter Plate, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 85, Iss. 1(2000), 85-96.
- (4) Roshko, A., On the Drag and Shedding Frequency of Two-Dimensional Bluff Bodies, *NACA Technical Note*, No. 3169(1954), 1-29.
- (5) Apelt, C. J. and West, G. S., The Effects of Wake Splitter Plates on Bluff-Body Flow in the Range $10^4 < R < 5 \times 10^4$. Part 2, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 71, Pt. 1(1975), 145-160.
- (6) Rowe, A. et al., Influence of Boundary-Layer Thickness on Base Pressure and Vortex Shedding Frequency, *AIAA Journal*, Vol. 39, No. 4(2001), 754-756.
- (7) The Japan Society of Mechanical Engineers ed., *JSME Data Book : Flow Measurements*, (1986), 46, The Japan Society of Mechanical Engineers.
- (8) Nakajo, I. and Honami, S., A Study of Separation and Reattachment of a Turbulent Flow behind a Backward-Facing Step(1st Report, Effect of Streamline Curvature on a Turbulent Reattaching Flow), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 50, No. 460(1984), 3159-3165.
- (9) Narayanan, M. A. B. et al., Similarities in Pressure Distribution in Separated Flow behind Backward-Facing Steps, *Aeronautical Quarterly*, Vol. 25(1974), 305-312.
- (10) Parker, R. and Welsh, M. C., Effects of Sound on Flow Separation From Blunt Flat Plates, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 4, No. 2(1983), 113-127.