

# 厚肉後縁を有する平板乱流後流の発達に 及ぼすスプリッター板の影響

上代良文\*, 元木浩敬\*\*

渡辺陽介\*\*\*, 高橋義一\*

## The Effects of Splitter Plates on the Turbulent Wake developing behind a Flat Plate with a Thick Trailing Edge

Yoshifumi JODAI\*, Hirotaka MOTOKI\*\*,  
Yousuke WATANABE\*\*\* and Yoshikazu TAKAHASHI\*

### Abstract

It is necessary to clarify the characteristics of the turbulent wake behind a body with flow separation in the light of engineering application. In spite of the practical significance of such wake flows, however, fundamental mechanism of the wake flow with separation has been unsolved due to its complexity. So far authors have shown that the development of the mean flow and fluctuating velocity field behind a thick flat plate are different from that of the flat plate with a thin trailing edge. While, the influence of the splitter plate fitted to the trailing edge along the wake center line on the development of the turbulent wake is unknown. With this aim the present experiments were conducted with splitter plate as a flow control device. The development of the turbulent wake with longer splitter plate fitted to the trailing edge of the flat plate resembles to that of the flat plate with a thin trailing edge, which has no flow separation. Increasing the length of the splitter plate, turbulent intensity and Reynolds shear stress decrease in the near wake region.

**Key Words** : Wake, Turbulence, Splitter Plate, Mean Velocity, Turbulent Intensity

## 1. 緒 言

物体背後の乱流後流の特性を知ることは、流体機械の効率化や騒音低減などのために重要である。また、レイノルズせん断応力は乱流による混合、拡散作用と密接に関連しているため、その大きさを調べることは燃焼機器の燃焼効率の改善にも重要である。

実在する翼の例を挙げると、ガスタービン翼では、強度面と熱負荷の制約により後縁はある程度の厚さが必要である。特に冷却空気噴出孔を翼表面に有するガスタービン翼は厚肉後縁となる。また、航空機翼の後縁フラップ用収納くぼみを通る流れも、後縁ではく離が生じる例である。このように後縁で

はく離をともなう流れ場は工学的に重要であるが、その構造が非常に複雑であるために予測が難しい。

平板後流の発達に関する研究を概観すると、Ramaprianら<sup>(1)</sup>は平板(全長1829mm, 板厚 $h=19\text{mm}$ )の後半の約600mmを後縁に向って滑らかに1mmにまで絞った平板後流の実験を行い、それが3つの段階を経て十分発達した乱流後流に達することを明らかにした。また、Chevrayら<sup>(2)</sup>は薄板(全長2400mm,  $h=1.6\text{mm}$ )の後半の600mmを後縁に向って0.25mmにまで先細りさせた実験から、流れが平板後縁から離れると最初に後流中心の速度欠損が著しく変化し、後流外部は $x/\theta_0 \approx 30$ (後縁での境界層の運動量厚さ $\theta_0$ で無次元化した流れ方向距離 $x$ )まで上流の境界層分布を維持することを明らか

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

\*\*\* 元高松工業高等専門学校 機械工学科

にした。一方, Hayakawaら<sup>(3)</sup>は薄板(全長 600mm,  $h=1\text{mm}$ )の後半の 25mmを後縁に向けて 0.2mmにまでとがらせ, 低レイノルズ数における平板後流の近傍後流域に着目し, 乱れの性質を調べた。しかしながら, 上述の研究はいずれもはく離が無視できる流れ場であり, 厚肉後縁を有する乱流後流の発達を系統的に調べた研究は低レイノルズ数における近傍後流のみのDNS計算<sup>(4)</sup>などに限定されている。

そこで, 本研究では厚肉後縁を有する平板の乱流後流の実験を行い, 平均速度場および変動度場の発達に関して薄肉後縁の場合との違いについて調べるものである。その際, 後流の初期条件となる平板背後にスプリッター板(以下は SP と呼ぶ)を設置した場合について, 乱流後流の発達に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

## 2. 実験装置および方法

### 2.1 流れ場の概略および座標系

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 2000mm, 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  $x$ , 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。また主流の圧力勾配によって後流の発達が影響を受けるとの研究結果<sup>(5)</sup>を考慮して, 圧力調整用側板とフラップの傾きを調整して主流を零圧力勾配に設定した。主流の静圧は図 1 の一点鎖線で示すように測定部下壁の  $y=150\text{mm}$ の位置に設けた直径 1mmの壁面静圧孔(片側 40箇所)を利用して測定した。実験は  $x=-1000\text{mm}$ ,  $y=150\text{mm}$ での基準速度  $U_m$ と空気の動粘性係数  $\nu$ に基づく単位レイノルズ数  $U_m/\nu$ を  $9.93 \times 10^5\text{m}^{-1}$  ( $U_m \doteq 15\text{m/s}$ )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

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, 60 および 100mm ( $l/h=0.5\sim 5$ ) の 4 種類とした。

### 2.3 計測法

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。そして, 定温

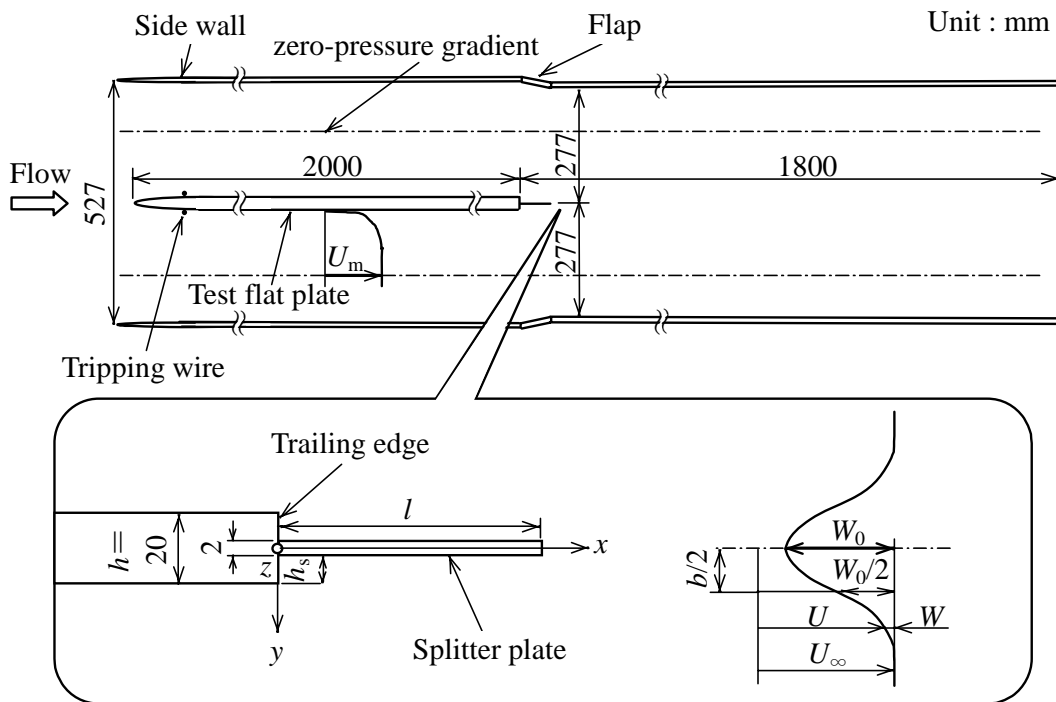


Fig. 1 Configuration of flow field and coordinate system

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。速度分布の測定は、まず SP のない場合に  $x/h=5\sim 75$  の 24 断面について詳細に実施した。その後 SP のある場合には  $x/h=5\sim 75$  の間の 8 断面を目処に測定を実施した。SP の効果の検討には、主に  $x/h=10, 35, 50$  および  $65$  の 4 断面の結果を用いる。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 平均速度場

図 2 は平板後流の流れ方向の 4 測定断面における流れ方向平均速度  $U$  の  $l/h$  による変化を  $-0.5 \leq y/h \leq 5$  の範囲について示したものである。縦軸は基準速度  $U_m$  で無次元化した。いずれの場合も、後縁付近 ( $x/h=10$ ) では後流中心の速度欠損が著しく、下流では平均速度分布の流れ方向変化があまり目立たなくなっている。 $x/h=10$  では、 $l/h$  が大きいほど後流中心での速度欠損が大きい。 $x/h \geq 35$  では、 $l/h=0.5$  のみ SP がない場合よりも主流速度への回復が遅い。図 3 は  $x$ - $y$  平面上の  $U/U_m$  の分布の  $l/h$  による変化を等値線で表したものである。図の左側には参考のために平板後縁および SP の  $y$  方向位置について  $l/h=0.5$  を例にとりて示してある。図 3 から分かるように SP が長い場合 ( $l/h \geq 3$ ) には、後縁直後の後流中心の速度欠損が著しいが、その流れ方

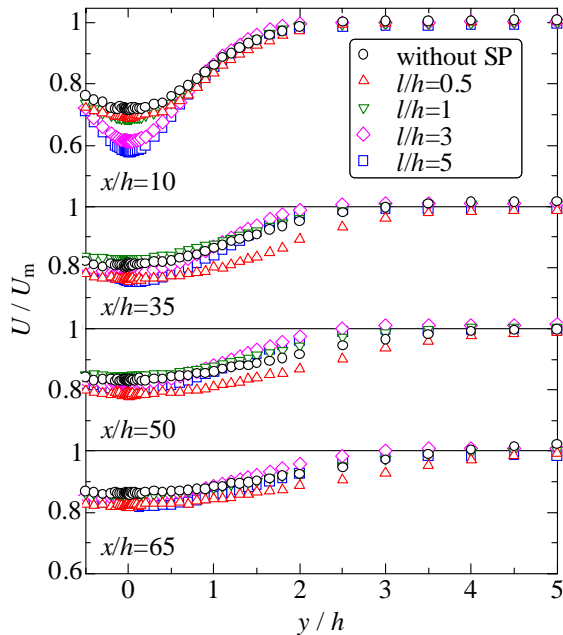


Fig. 2 Mean velocity profiles

向の回復は早い。また、この場合の後流の幅は、SPがない場合よりも狭い。逆に、SPがない場合または短い場合に後流の幅の広がりが早い。特に  $l/h=0.5$  の場合には、後縁直後の速度欠損はそれほど大きくないが、後流の幅の広がりは最も早い。

図 4 は最大速度欠損  $W_0$  (図 1 参照) の流れ方向変化を示す。縦軸は  $W_0$  を局所の主流速度  $U_\infty$  で無次元化した。いずれの場合も、 $W_0$  は流れ方向に減少している。SPがある場合、SPがない場合よりも概ね  $W_0$  が大きい。後縁に最も近い測定断面  $x/h=5$  付近では、SP直後のために  $l/h$  が大きいほど  $W_0$  が大きい ( $l/h=5$  の最上流の測定断面は  $x/h=5.5$  である)。特に  $l/h \geq 3$  の場合に  $W_0$  が大きい。

図 5 は  $W_0$  の  $y$  方向分布に関する半値全幅  $b$  (図 1 参照) の流れ方向変化を示す。いずれの場合も、 $b$  は流れ方向に増加している。 $l/h=0.5$  のみ SP がない場合よりも  $b$  がやや大きくなり、 $l/h \geq 1$  では小さくなる。特に  $l/h \geq 3$  のとき  $b$  が著しく小さくなる。

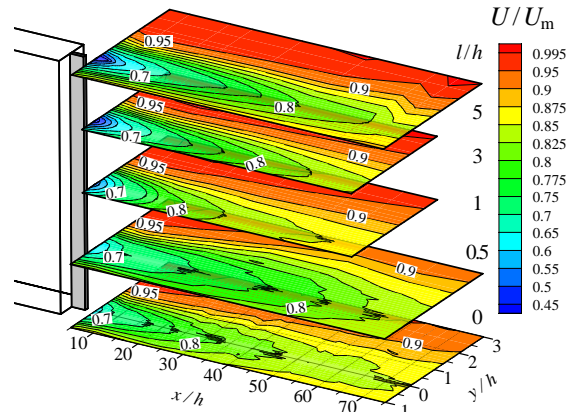


Fig. 3 Mean velocity contours

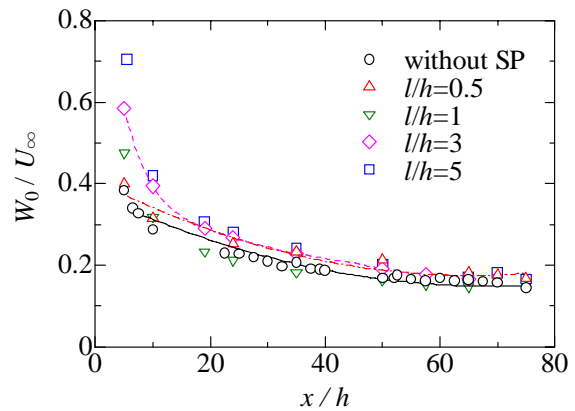


Fig. 4 Velocity defect profiles

なお、本実験の測定は $-1 \leq y/h \leq 7$ の範囲について実施したが、平均速度分布の後流中心に対する対称性が図2から確認できるので、 $y \geq 0$ についての測定結果を2倍して $b$ を求めた。

### 3・2 後流の特性値

本実験では上述のとおり後流の片側のみを測定したため、排除厚さ $\delta^*$ 、運動量厚さ $\theta$ を次のように定義する(平板背後 $y \leq h/2$ の範囲も積分する)。

$$\delta^* = 2 \int_0^\infty \left(1 - \frac{U}{U_\infty}\right) dy \quad \dots \dots (1)$$

$$\theta = 2 \int_0^\infty \frac{U}{U_\infty} \left(1 - \frac{U}{U_\infty}\right) dy \quad \dots \dots (2)$$

図6に $l/h$ をパラメータとして、 $\theta$ の流れ方向変化を示す。 $l/h \leq 0.5$ では $\theta$ が減少した後に増加する傾向を示すのに対し、 $l/h \geq 1$ では $\theta$ が減少後は、流れ方向にあまり変化しない。 $l/h=0.5$ のみSPがない場合よりも $\theta$ が大きいことは非常に興味深い。

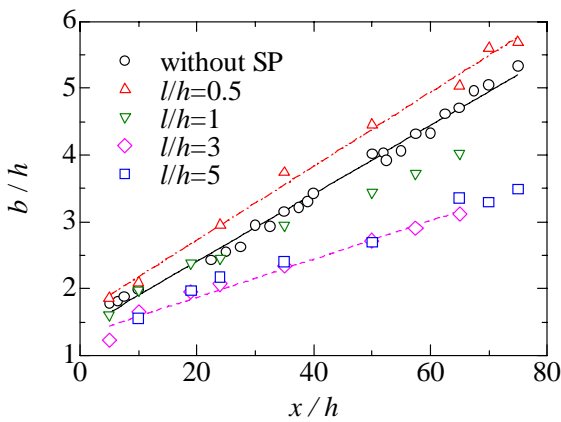


Fig. 5 Full width at half maximum

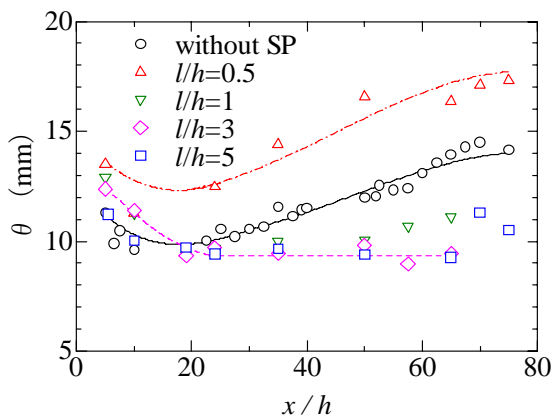


Fig. 6 Momentum thickness

図7に $l/h$ をパラメータとして、形状係数 $H (= \delta^*/\theta)$ の流れ方向変化を示す。後縁近くでは $l/h$ が大きいほど $H$ の値が大きい、 $H$ は流れ方向へ減少し下流では $l/h$ の値によらずほぼ1.1の一定値に漸近している。 $H$ は速度分布形状を表す変数であることから、この $H$ の漸近傾向は下流側の速度分布の形状が $l/h$ によらずほぼ同様となった図2の結果に対応している。しかし、 $H$ の定義から明らかのように $x \rightarrow \infty$ の極限では、 $H=1$ となることを考えると、本測定範囲は厳密には後流の発達段階にあると思われる。

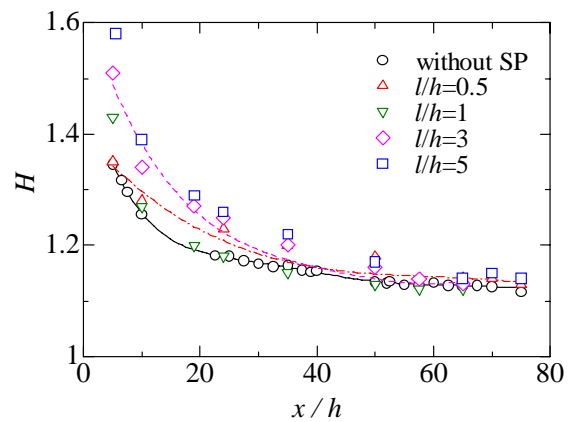


Fig. 7 Shape factor

### 3・3 変動速度場

図8は平板後流の流れ方向の4測定断面における流れ方向変動速度のrms値 $u_{rms}/l/h$ による変化を $-1 \leq y/h \leq 5$ の範囲について示したものである( $l/h=1$ および3は $-0.5 \leq y/h \leq 5$ の範囲)。縦軸は基準速度 $U_m$ で無次元化した乱れ強さを表す。 $u_{rms}/U_m$ のピーク値は後流中心から少し離れた位置にあり、 $y$ の正負両側のピーク値の軸対称性は良好である。 $u_{rms}/U_m$ は後縁付近( $x/h=10$ )では $l/h$ が大きいほど小さくなる。 $u_{rms}/U_m$ のピーク値の $y$ 方向位置は、SPがない場合に $y/h=1$ 、 $l/h \geq 0.5$ では $y/h=0.6$ (測定平板表面の下流付近)と大別できる。 $x/h \geq 35$ において、 $u_{rms}/U_m$ の $y$ 方向分布は $l/h \leq 0.5$ と $l/h \geq 1$ とに大別できる。図8には $x/h=9.4$ および $x/h=32$ でのRamaprianら<sup>(1)</sup>の平板( $h=19\text{mm}$ で、後縁に向って滑らかに絞ってある)の実験結果も示してある。 $l/h \geq 3$ のSPの設置によって、はく離のないRamaprianらと同様な $u_{rms}/U_m$ 分布となることが分かる。図9は $x$ - $y$ 平面上の $u_{rms}/U_m$ の分布の $l/h$ による変化を等値線で表したものである。図9から分かるように $u_{rms}/$

$U_m \geq 0.1$  の領域はSPがない場合と比較すると、 $l/h$  が大きいほど狭くなり、特に  $l/h \geq 1$  では著しく狭くなる。  $u_{rms}/U_m \geq 0.03$  の領域は  $l/h$  が大きいほど  $y$  方向に狭い。

図 10 は平板後流の流れ方向の 4 測定断面における壁垂直方向変動速度の rms 値  $v_{rms}$  の  $l/h$  による変化を  $-1 \leq y/h \leq 5$  の範囲について示したものである。縦軸は基準速度  $U_m$  で無次元化した乱れ強さを表す。  $v_{rms}/U_m$  のピークは、図 8 の  $u_{rms}/U_m$  ほど明確には現われないが後流中心から少し離れた位置にあり、 $y$  の正負両側の軸対称性は良好である。  $v_{rms}/U_m$  の最大値は後縁付近 ( $x/h = 10$ ) において、  $l/h \leq 0.5$

では同程度であるが、  $l/h = 1$  では半減し、  $l/h \geq 3$  ではさらに半減する。図 10 には  $x/h \doteq 9.4$  および  $x/h \doteq 32$  での Ramaprian ら<sup>(1)</sup> の平板の実験結果も示してある。  $l/h \geq 3$  の SP の設置によって、Ramaprian らの  $v_{rms}/U_m$  分布に近づくことが分かる。図 11 は  $x-y$  平面上の  $v_{rms}/U_m$  の分布の  $l/h$  による変化を等値線で表したものである。図 11 から分かるように  $v_{rms}/U_m \geq 0.06$  の領域は SP がない場合と比較すると、  $l/h$  が大きいほど狭くなり、特に  $l/h \geq 3$  では著しく狭くなる。  $v_{rms}/U_m \geq 0.04$  の領域は  $l/h$  が大きいほど  $y$  方向に狭い。  $u_{rms}/U_m$  と比較すると、  $v_{rms}/U_m$  の下流方向への減衰は早い。

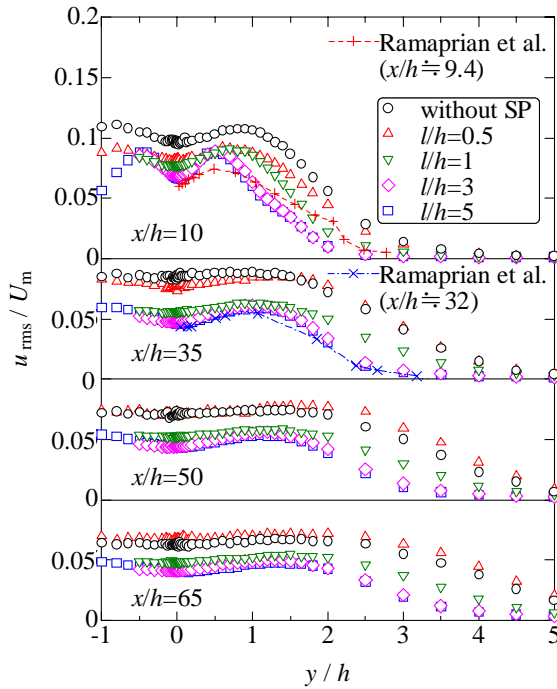


Fig. 8 Streamwise fluctuating velocity profiles

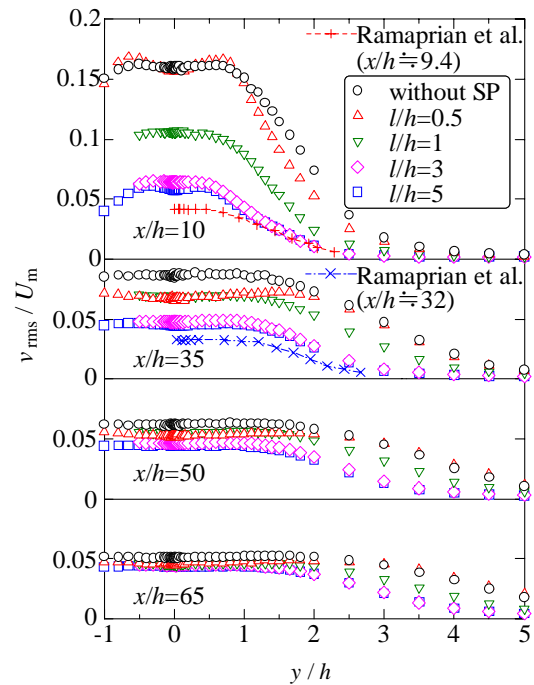


Fig. 10 Normal fluctuating velocity profiles

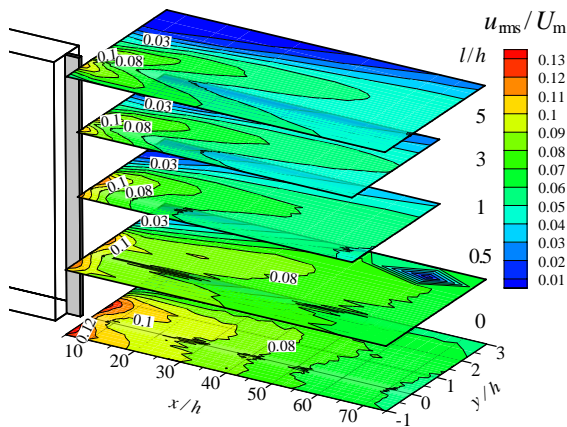


Fig. 9 Streamwise fluctuating velocity contours

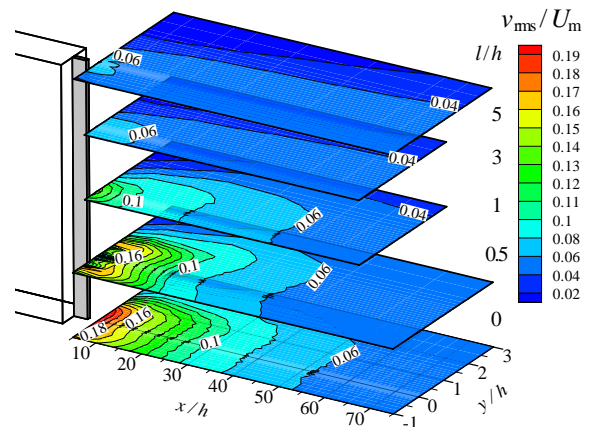


Fig. 11 Normal fluctuating velocity contours

図 12は平板後流の流れ方向の 4 測定断面におけるレイノルズせん断応力 $\overline{uv}$ の $l/h$ による変化を $-1 \leq y/h \leq 5$ の範囲について示したものである ( $l/h=1$  および 3 は $-0.5 \leq y/h \leq 5$ の範囲) . 縦軸は基準速度 $U_m$ の 2 乗で無次元化した.  $x/h=10$ における $-20 \overline{uv} / U_m^2$ の正負のピーク間の応力幅は, SPがない場合に0.177,  $l/h=0.5$ で0.164,  $l/h=1$ で0.145,  $l/h=3$ で0.109,  $l/h=5$ で0.101の程度で $l/h$ が大きいほど減少する. 図 12には $x/h=9.4$  および $x/h=32$ での Ramaprianら<sup>(1)</sup>の平板の実験結果も示してある.  $l/h \geq 3$ のSPの設置によって, Ramaprianらと同様な $-20 \overline{uv} / U_m^2$ 分布となることが分かる. 図 13は $x$ - $y$

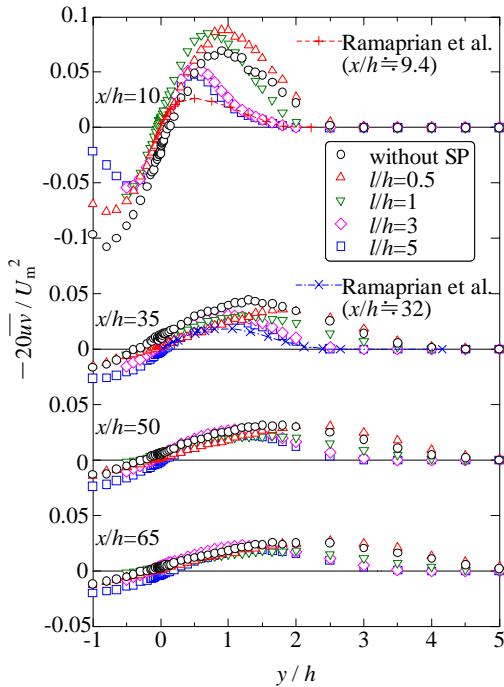


Fig. 12 Reynolds shear stress profiles

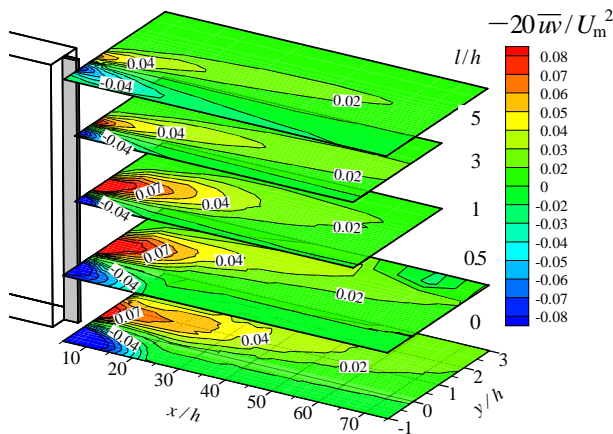


Fig. 13 Reynolds shear stress contours

平面上の $-20 \overline{uv} / U_m^2$ の分布の $l/h$ による変化を等値線で表したものである.  $-20 \overline{uv} / U_m^2$ の絶対値が比較的大きい領域は $l/h$ が大きいほど狭くなり, 特に $l/h \geq 3$ で著しく狭くなる.

図 14 に正規化した無次元レイノルズせん断応力 $G$ が漸近特性に達する過程を示す. 縦軸は $-\overline{uv}$ を最大速度欠損 $W_0$ の 2 乗で無次元化したもの, 横軸は後流中心からの壁垂直距離 $y$ を半値全幅 $b$ で無次元化したものである. 図中の実線は次式で表わされる十分発達した後流の漸近特性<sup>(1)</sup>を表している.

$$G = \frac{-\overline{uv}}{W_0^2} = 8(\ln 2)0.0341 \frac{y}{b} \exp\left\{-4\left(\frac{y}{b}\right)^2 \ln 2\right\} \dots \dots (3)$$

$l/h \leq 1$  と  $l/h \geq 3$  とでは,  $G$ の分布に大きな相違が見られる.  $l/h \leq 1$ の場合, 最上流の測定断面 $x/h=10$ においても比較的実線の分布に近い. それに対し,  $l/h \geq 3$ の場合では, 実線から大きく逸脱している状態から下流へ向うにつれ徐々に実線の漸近特性に近づく傾向が見られる. また,  $x/h=35$  ( $x=700\text{mm}$ ) において $l/h \geq 3$ の分布は, Ramaprianら<sup>(1)</sup>の $x/h=32$  ( $x=610\text{mm}$ ) における分布とほぼ一致する. このことは, はく離をともなう厚肉後縁の後流でも, SPの設置によってはく離のない薄肉後縁の後流の特性に近づけることができることを示唆している.

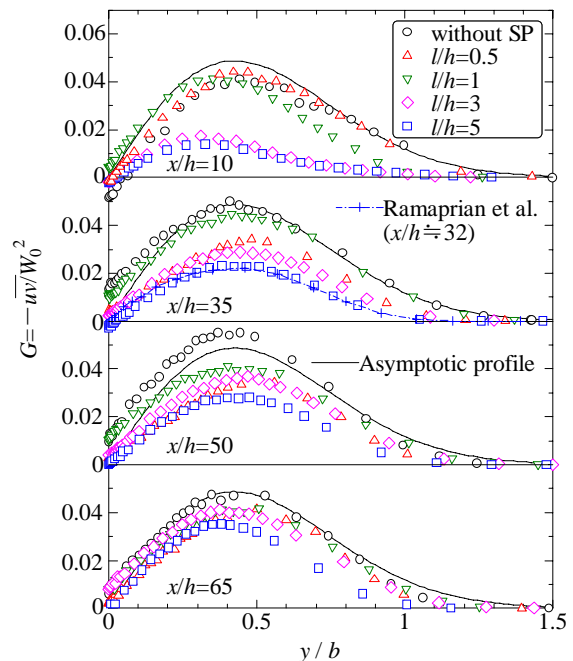


Fig. 14 Approach to asymptotic profile

#### 4. 結 言

厚い測定平板後縁に設置したスプリッター板 (SP) が、その後方で発達する平板乱流後流の特性に及ぼす影響を零圧力勾配の下で実験的に調べ、次の結論を得た。

- (1) 最大速度欠損  $W_0$  は、後縁直後では  $l/h$  が長いほど大きく、特に  $l/h \geq 3$  の場合にその程度が著しい。
- (2) 速度欠損の半値幅  $b$  は  $l/h \geq 1$  では SP が無い場合よりも小さくなり、特に  $l/h \geq 3$  の場合にその程度が著しい。  $b$  は  $l/h=0.5$  のみ SP が無い場合よりもやや大きくなる。
- (3) 運動量厚さ  $\theta$  の流れ方向変化は、  $l/h \leq 0.5$  では減少した後増加する傾向を示すのに対し、  $l/h \geq 1$  では減少後はほぼ一定値となる。
- (4) 流れ方向の乱れ強さ  $u_{rms}/U_m$  は後縁付近では  $l/h$  が大きいほど小さくなる。  $x/h=10$  での  $u_{rms}/U_m$  のピーク値の  $y$  方向位置は、SP なしでの  $y/h \doteq 1$  と  $l/h \geq 0.5$  での  $y/h \doteq 0.6$  とに大別できる。  $u_{rms}/U_m$  の  $y$  方向分布は  $x/h \geq 35$  では  $l/h \leq 0.5$  と  $l/h \geq 1$  とに大別できる。

- (5)  $x/h=10$  でのレイノルズせん断応力  $-20\overline{uw}/U_m^2$  は  $l/h \geq 3$  では著しく減少する。  $x/h=35$  における  $l/h \geq 3$  の  $-20\overline{uw}/U_m^2$  の  $y$  方向分布は、  $x/h \doteq 32$  におけるはく離のない平板後流の結果とほぼ一致する。
- (6) 正規化した無次元レイノルズせん断応力  $G$  の流れ方向の漸近状態への発達過程は、  $l/h \leq 1$  のとき早く、  $l/h \geq 3$  のときは  $x/h \doteq 32$  におけるはく離のない平板後流の結果と同様に遅い。

#### 文 献

- (1) Ramaprian, B. R., Patel, V. C. and Sastry, M. S., The Symmetric Turbulent Wake of a Flat Plate, *AIAA Journal*, Vol. 20, No. 9(1982), 1228-1235.
- (2) Chevray, R. and Kovaszny, L. S. G., Turbulence Measurements in the Wake of a Thin Flat Plate, *AIAA Journal*, Vol. 7, No. 8(1969), 1641-1643.
- (3) Hayakawa, M. and Iida, S., Behavior of Turbulence in the Near Wake of a Thin Flat Plate at Low Reynolds Numbers, *Physics of Fluids A*, Vol. 4, Iss. 10(1992), 2282-2291.
- (4) Yao, Y. F. and Sandham, N. D., Direct Numerical Simulation of Turbulent Trailing-Edge Flow with Base Flow Control, *AIAA Journal*, Vol. 40, No. 9(2002), 1708-1716.
- (5) Liu, X. et al., An Experimental Investigation of the Planar Turbulent Wake in Constant Pressure Gradient, *Physics of Fluids*, Vol. 14, No. 8(2002), 2817-2838.