

機関番号：13701

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20560154

研究課題名（和文） 斜め後方ステップによるはく離・再付着流れの乱流組織構造の解明

研究課題名（英文） Investigation of Turbulent Coherent Structures in the Separation and Reattachment of Flow behind a Swept Backward-Facing Step

研究代表者

山下 新太郎 (YAMASHITA SHINTARO)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：20023236

研究成果の概要（和文）：

本研究では、斜め後方ステップを過ぎる流れを、レイノルズ数 8000 の下で、実験的かつ数値的に調べる。測定法として、単一熱線プローブと、本研究で開発・発展させたフライングワイヤ（FHW）法、および熱線レイク法を用いている。FHW 法を流れのスパン方向に適用するに当たって、乱流境界層のスパン方向乱流組織構造を FHW 法と熱線レイク法で測定し比較したところ、壁面近傍の微細な組織構造を検出できることが確認できた。はく離流れについて、まず、シャープな角部からのはく離を取り扱い、平均および変動速度分布を測定し、角部はく離がない場合の乱流境界層と比較した。このはく離流れ中で FHW 法によるスパン方向測定を実施し、乱流組織構造の流れ方向への変化を考察した。そして、後方ステップ背後のはく離・再付着流れについて、近寄り流れの境界層厚さに対するステップ高さの比を 0.5～1.5 の範囲で変化させ、単一熱線プローブと FHW 法によって平均・変動速度場を調べた。また、FHW 測定から、ステップ背後の壁面近傍における瞬時速度分布を考察し、統計量として流れの順流率を求めた。通常の設定に倣い、流れの再付着点を順流率 50% の位置に定め、ステップ高さの影響を調べたところ、本研究の範囲では顕著な差はみられなかった。

研究成果の概要（英文）：

In the present study, the flow over a swept backward-facing step has been investigated experimentally and numerically. Measurements were made by single hot-wire and flying hot-wire (referred to as FHW) techniques. In order to confirm the applicability of the FHW in the spanwise direction, the standard turbulent boundary-layer was examined by comparing with a hot-wire rake. Mean and fluctuating velocity distributions were measured in the flow separated from a sharp edge, and compared with those in the turbulent boundary layer. The FHW was tried to capture the turbulent coherent structures in the spanwise direction. For two-dimensional backward-facing step flow, the relative step height to boundary layer thickness of an incoming flow were $H/\delta_0 = 0.5, 1.0$ and 1.5 . Mean and fluctuating velocity distributions for $H/\delta_0 = 0.5$ and 1.0 were examined by a stationary hot-wire and flying hot-wire anemometer with I-type probe. Streamwise distributions of the forward-flow fraction, γ , near the wall were calculated, and then reattachment points of the separating flow were evaluated as a location of $\gamma = 50\%$. In the range of $H/\delta_0 = 0.5$ to 1.5 in the present study, the reattachment length is almost constant.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,800,000	1,140,000	4,940,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：乱流

1. 研究開始当初の背景

二次元後方ステップ流れに対しては、これまで非常に多くの実験的・数値的な研究が行われ、十分な成果が挙げられてきた。特に最近では主に Moin らのグループの直接数値シミュレーション (DNS) による一連の研究で、その構造がよく調べられている。

一方、実際上の流れの多くは主流に横流れが重畳された場合の流れや二次流れを伴ういわゆる三次元流れである。斜め後方ステップを過ぎる流れはこの単純化モデルと考えてよい。つまりこの流れは、三次元的なはく離・再付着現象の特性を持つと同時に、三次元流の中では系統的研究が可能で、その結果を普遍化できる基本的な流れの一つといえる。これに対するこれまでの研究例は極めて少なく、国外での代表的な実験的研究として、Fernholz らによる乱流統計量の点計測が挙げられるが、その結果に対しては十分な検証が必要と思われる。数値的研究としては、Kaltenbach らによって DNS が行われているが、その数値結果と物理的解釈にはいくつかの疑問が持たれ、実験的検証と他研究者による数値解析が必要と考えられる。

2. 研究の目的

はく離・再付着を伴う流れ場は実際上多く見られ、各種流体機器の性能、伝熱特性に大きく関与している。しかも、実際上の流れの多くは三次元流れである。本研究課題では、その単純化モデルとして斜め後方ステップを過ぎる流れを取り上げ、乱流場の構造、特に組織構造の実験的解明と DNS 数値解析から流れ現象の解明を行う。

流れ場を、(1)はく離せん断層、(2)逆流域、(3)再付着域、(4)回復域の4つの領域に便宜上分け、各々について具体的な着目点を設け、実験的解明を行う。数値的研究では、有限差分法による直接数値シミュレーション(DNS)を行う。この数値計算結果の統計処理に基づいて流れの平均的構造と動的構造を調べる。数値解析の結果と実験結果を併せ、双方の矛盾点があれば相補的に解消しつつ、斜め後方ステップによる三次元流れの動的組織構造の詳細を明らかにする。

3. 研究の方法

実験は、断面 $180 \times 400 \text{ mm}^2$ 、全長約 2.5 m の測定部を有する吹出し型風洞で行っている。測定平板(厚さ 10 mm のアクリル樹脂製)は、測定壁面が縮流洞出口壁から 20 mm だけオフセットするように設置し、前縁はく離を

防止するために吸い出し装置を取り付けた。測定平板の上流端は NACA0012 の前縁形状に加工され、前縁の下流 80 mm の位置から薄板(厚さ 1.5 mm 、幅 6.3 mm)が間隔 30 mm で3本貼り付けられている。これによって、乱流境界層の発達を促す。測定平板の対壁は圧力調整板であり、側壁に設けた測定孔で測定部内の圧力分布を確認しながら、ネジ機構を用いて流路高さを調整した。後方ステップの取り付け位置は、測定平板前縁下流 1500 mm である。

座標原点はステップ角部におき、流れ方向に x 軸、壁垂直上方に y 軸、そしてステップ稜線方向に z 軸をとる。ステップ高さを H で表し、角部への近寄り流れの境界層厚さを δ_0 ($x = -0.5 \delta_0$) で表す。ここで、境界層厚さは流れ方向平均速度 U が層外主流速度 U_e の 99.5% となる厚さとする。予備実験より、基準速度 $U_0 = 11 \text{ m/s}$ において $\delta_0 = 33.2 \text{ mm}$ (運動量厚さ $\theta_0 = 3.9 \text{ mm}$) となり、運動量厚さレイノルズ数は $Re_\theta = U_0 \theta_0 / \nu \approx 3100$ であった。本実験では、まず、ステップ無し($H = 0$)の TBL と単純な角部はく離 ($H = \infty$)の BFS_∞ の2条件を調べ、その後、ステップ高さ H を境界層厚さ δ_0 の 0.5 倍、 1.0 倍、 1.5 倍と変化させて測定を行った。

速度の測定には熱線流速計(司測研 HC-30)を用い、出力信号はローパスフィルタ、ADC カード(16 bit 分解能、 20 kHz)を介し Labview で計測処理した。測定用の I 形プローブは自作し、熱線には直径 0.005 mm 、受感部長 1 mm のタングステン線を用いている。測定部内におけるプローブの位置決めには3次元トラバサを使用し、このうちの z 方向ユニットにはリアモータ駆動の高速トラバサ

(THK 社製 GLM20、最高速度 3 m/s)を採用した。さらに、流れの順流/逆流測定においては、 x 軸トラバサを高速トラバサとし、後方ステップ背後の $x > 0, y < 0$ の範囲において、I 形プローブを x 軸負方向にフライングさせた。

4. 研究成果

図 1 は、I 形熱線プローブを順次壁垂直方向に移動させて行った点測定の結果を、 $H = 0$ の乱流境界層(TBL)と $H = \infty$ の角部はく離流れ(BFS_∞)について示す。図 1(a)の平均速度分布から両場合を比較して、角部すぐ下流からはく離せん断層が発達を始め、 $x / \delta_0 = 4$ で $y_{0.1} / \delta_0 = -0.4$ に達する。一方、主流側の境界 $y_{0.995}$ は TBL の $\delta_{99.5}$ とほぼ一致しており、 $y_{0.5}$ の位置はほぼ $y = 0$ と一致する。図 1(b)は変動速度の

r.m.s.値、 u' の分布を示す。はく離せん断層の発達に従い高乱れの範囲が層内で拡大し、これとともに平均速度勾配は減少している。

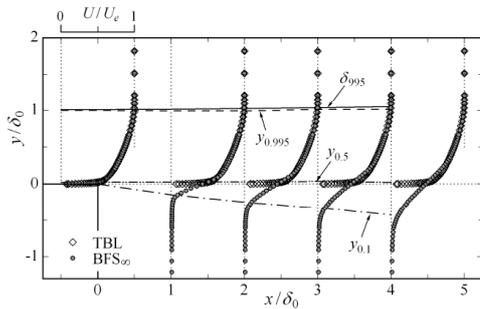


図 1(a) TBL と BFS_{∞} の平均速度分布

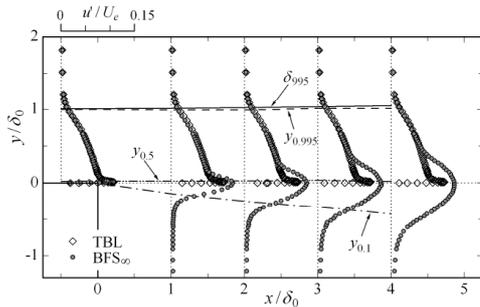


図 1(b) TBL と BFS_{∞} の変動速度分布

乱流組織構造の横方向空間モードの測定では FHW 法をスパン方向に適用し、まず、ステップ上流の乱流境界層において測定結果を検討した。図 2 は $y/\delta_{995}=0.2$ および 0.7 において熱線レイクプローブで測定した相関係数と本測定結果を比較したものである。 $y/\delta_{995}=0.7$ では、流れの平均速度は相対的に大きく ($W_{trv}/U=0.14$)、測定値から求めた相関係数はほぼ自己相関係数と一致してしまうのに対して、 $y/\delta_{995}=0.2$ では $W_{trv}/U=0.35$ となり、熱線レイクプローブの相関係数分布にかなり近づいた。この結果から、乱流境界層などにみられる乱流組織構造は、横方向尺度に対して流れ方向尺度が数倍大きく、フライング速度を流れの平均速度に対して適切に設定すれば、組織構造の一端を観察することは十分に可能であると考えられる。

ステップ高さ $H=\infty$ で行った、FHW 法による横方向モード測定の結果を図 3 に示す。座標表示は壁尺度に変更する。 $x^+ > 100$ では、スパン方向相関長さが僅かに短くなるだけで、大きな変化は見られない。その後、 $x^+ > 400$ でスパン方向相関長さが長くなる結果を示した。以上より、乱流境界層から持ち込まれた壁面近傍の縦長な組織構造ははく離直後に分断され、その後、再組織化し、スパン方向間隔が広がったことが考察できる。

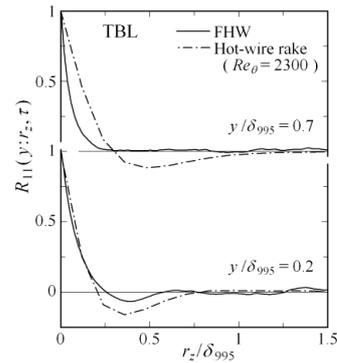


図 2 TBL スパン方向相関測定値の比較

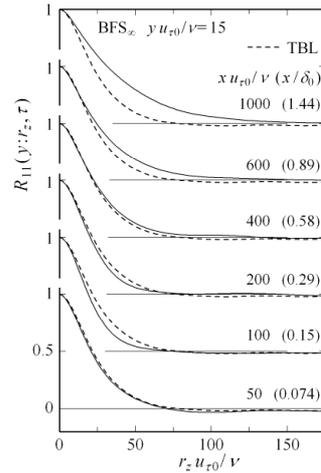


図 3 BFS_{∞} スパン方向相関の流れ方向変化

つづいて、ステップ背後における平均・変動速度の y 方向分布を図 4 に示す。中途のシンボルは $H/\delta_0=0.5$ 、中空は $H/\delta_0=1.0$ である。I 型熱線 (IHW) 測定では、その原理的問題から局所乱れ強さ $u'/U > 0.3$ において測定誤差の拡大が知られている。本流れ場ではおよそ $y/H < -0.1$ の領域がその条件に適合するため、この範囲で FHW 測定を行った。

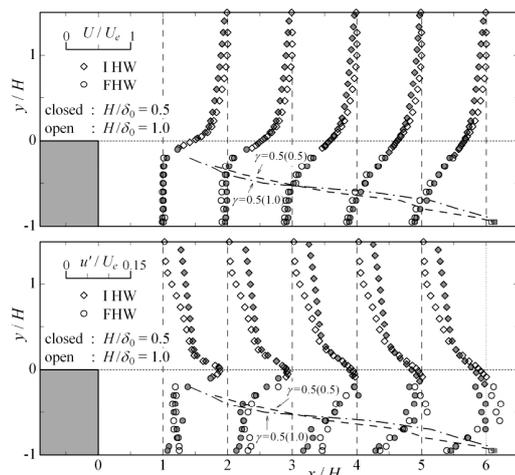


図 4 後方ステップ背後の平均・変動速度分布

まず、 $y/H > 0.1$ の範囲で両者を比較して、 $H/\delta_0=0.5$ の平均速度は小さく、変動速度は大きくなっているが、これは基準長をステッ

ブ高さ H として結果を整理したことによるものである。 $0.1 > y/H > (-0.1 \sim -0.2)$ では、両者の平均速度はほぼ一致し、 $x/H = 3$ までは変動速度も一致する。 $x/H > 3$ になると、 $H/\delta_0 = 1.0$ の変動速度が僅かに大きくなる。そして、 $y/H < -0.2$ では、 $H/\delta_0 = 1.0$ の平均速度が負側にシフトし、変動速度は大きくなる傾向がみられる。

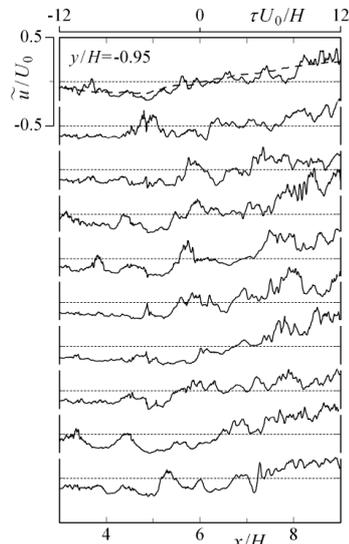


図5 後方ステップ背後の瞬時速度分布

つぎに、再付着流れの順流/逆流特性を調べる。ステップ高さ $H/\delta_0 = 0.5$ において、FWH を用いて得られた 100 セットのデータから 10 セットを無作為に選び、基準速度 U_0 で無次元化された瞬時速度 u の x 方向分布として図5に示す。プローブ設置高さは $y/H = -0.95$ で、壁面からは $0.05 H (\approx 0.8 \text{ mm})$ の位置である。また、図中の破線は平均速度分布を示す。速度分布全体の特徴として、平均速度分布に重畳された高乱流領域の出現が見取れ、この領域は周囲よりも速度が高い。この流れは、はく離せん断層から壁面に向け吹き下りてくる高速な高乱流領域に対応するものと考えられ、流れ方向に $0.5 \sim 1 H$ 程度の規模をもつ。出現頻度の高い範囲は $x/H = 5 \sim 9$ であり、 $x/H < 5$ においても頻度は低いが、同種の流体塊が観察される。

図6には、 $H/\delta_0 = 0.5$ と 1.0 について、 U_0 で無次元化された瞬時速度 u の確率密度関数 $p(u/U_0)$ を示す。何れのステップ高さにおいても、 $x/H = 6 \sim 8$ の分布はほぼ対称形状となる。一方、 $x/H = 4 \sim 5$ の分布は負側に偏っており、上述のように、順方向の変動速度をもった流体塊が間欠的に出現しているためである。

図7は、はく離流れの再付着位置を求めるために計算した順流率 γ の分布を示す。壁面からの測定高さは、上と同じく $0.05 H$ である。ここで、順流率の定義は、 $u > 0$ における確率密度関数の積分値となる。また、図7中のシ

ンボルは $H/\delta_0 = 0.5$ の測定値を代表的に示したもので、破線はその結果から誤差関数を用いてフィッティングした曲線である。 $H/\delta_0 = 1.0$ と 1.5 については、同様にして求めた近似曲線のみを示す。図7より、順流率はおおよそ $4 < x/H < 8$ の範囲で0から1まで単調に変化し、その分布はステップ高さによってほとんど変化していない。

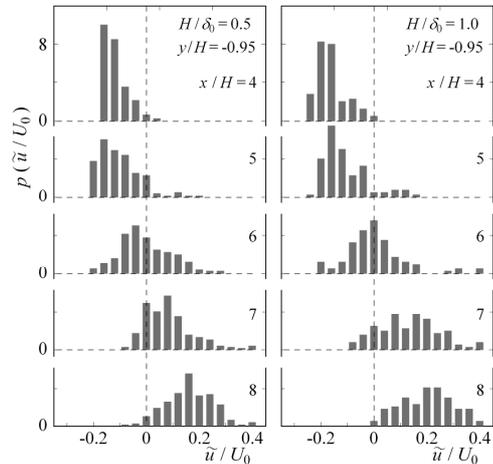


図6 瞬時速度成分の確率密度分布

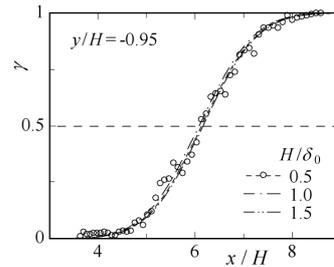


図7 順流率の流れ方向変化

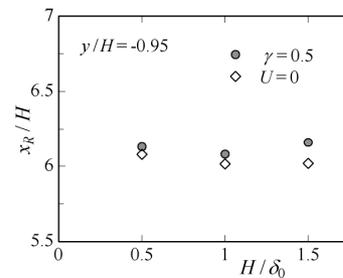


図8 再付着距離

従来の定義に倣い、順流率の分布から $\gamma = 0.5$ となる x 座標を読み取り、再付着距離 x_R とする。図8は、再付着距離をステップ高さに対して示す。図中には、平均速度 U が零となる x 座標も合わせて示しており、 x_R よりいくらか上流に位置することが分かる。これは、瞬時速度の確率密度関数が再付着位置近傍で僅かに負側に偏ることによる。図8から分かるように、この実験範囲においてステップ高さの影響は顕著ではないが、 $H/\delta_0 = 0.5$ において再付着距離は若干伸びている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計10件)

- ①高田拓樹, 山下新太郎, 井上吉弘, 受井嘉治, 三次元壁せん断流の速度スケーリング則に関する実験的研究(回転円筒上乱流境界層), 日本機械学会東海支部第60期総会・講演会, 2011年3月14-15日, 豊橋技術科学大学
- ②井上吉弘, 永田和也, 山下新太郎, 後方ステップによるはく離流れに関する実験的研究(2次元ステップ), 日本機械学会流体工学部門講演会, 2010年10月30-31日, 山形大学
- ③山下新太郎, 受井嘉治, 井上吉弘, 回転円筒上の層流境界層へのPade近似の応用, 日本機械学会山梨講演会2010, 2010年10月23日, 山梨大学
- ④澤貴行, 井上吉弘, 山下新太郎, 低Re数における円形壁面噴流の可視化実験, 可視化情報学会全国講演会, 2010年10月7-8日, 霧島市国分シビックセンター
- ⑤S. Yamashita, Y. Inoue, K. Sasaki and T. Nagahama, Experimental Study on Turbulent Coherent Structures in a Separated Boundary-Layer from a Sharp Edge, 8th International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modeling and Measurements, 2010年6月9-11日, Marseille, France
- ⑥青山健一, 井上吉弘, 山下新太郎, 回転円柱まわりの流れ場に関する研究(一様回転時の円柱近傍の流れ), 日本機械学会東海支部第59期総会・講演会, 2010年3月10日, 名城大学
- ⑦井上吉弘, 長濱達也, 山下新太郎, 後方ステップによるはく離流れの乱流組織構造に関する実験的研究, 日本機械学会2009年度年次大会, 2009年9月15日, 岩手大学
- ⑧西塚隆晃, 井上吉弘, 山下新太郎, 矢野治久, 三次元壁面噴流に関する実験的研究(運

動量積分方程式), 日本機械学会東海支部第58期総会・講演会, 2009年3月17-18日, 岐阜大学

- ⑨Y. Inoue, H. Ohya and S. Yamashita, Visualization of Vortex Structures in a Wake Behind a Circular Cylinder Rotating in a Uniform Stream, The Second International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows, 2008年9月16-19日, Berlin, Germany
- ⑩Y. Inoue, K. Kondo and S. Yamashita, A Comparative Study on Near-field Flow Structures in a Circular Free Jet and a Square Free Jet, The 6th International Symposium on Ultrasonic Doppler Method for Fluid Mechanics and Fluid Engineering, 2008年9月9-11日, Prague, Czech Republic

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

6. 研究組織

(1)研究代表者

山下 新太郎 (YAMASHITA SHINTARO)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号: 20023236

(2)研究分担者

井上 吉弘 (INOUE YOSHIHIRO)

岐阜大学・工学部・准教授

研究者番号: 00176455