

京都大学工学部 正 員 橋津家久
 京都大学大学院 学生員 〇門田章宏
 京都大学工学部 正 員 中川博次

1. はじめに 最近の圧力勾配を有する乱流境界層に関する研究¹⁾によると、これまで普遍性を保つと考えられていた壁面領域の平均流特性に、ゼロ圧力勾配のものと大きく異なるという結果が、詳細な乱流計測および直接数値計算(DNS)によって確認されている。本研究は、非定常開水路流れの粘性底層からバッファー層内の領域を、レーザ流速計によって詳細にかつ高精度に乱流計測し、その平均流速性および圧力勾配に対する影響について実験的に考察したものである。

2. 実験方法および解析方法 流量変化には上流からの履歴の影響を最小限に防ぎ、非定常流れの基本的特性を検討するため、単調増水・単調減水とした。水深の上昇あるいは下降時間 T_d は、30, 90, 120 secの3通り、最大流量 Q_{max} は、最小流量 Q_{min} (=1.2, 3.0 l/s)のほぼ3倍になるように設定された。測定点は、 $y=0.5mm$ の地点から $y/h=0.4$ (対数則領域を僅かに越えたところ)までの領域を、底面近傍では0.1mm間隔で、対数則領域では1mm間隔で、ほぼ50点計測した。

3. 実験結果および考察 図-1に、圧力勾配パラメータ p^+ の変化を示す。図中、 T は水位上昇(あるいは下降)時間で無次元化された時間であり、 $T=0 \sim 1$ が水深の変化する時間帯である。

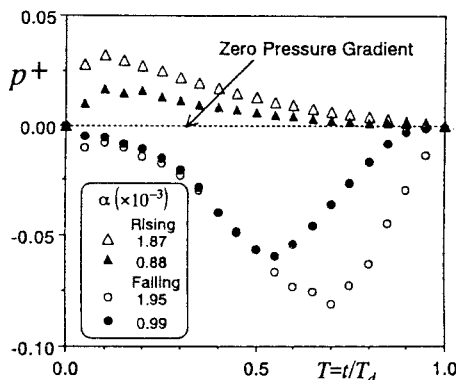


図-1 圧力勾配パラメータ p^+ の変化

図中の α は本研究で用いたマクロな非定常パラメータであり、 $\alpha = (h_{max} - h_{min})/T_d / U_c$ で定義される。ここで、 U_c は乱れの移流速度で断面平均流速で置き換えられる。単調増水ではゼロ圧力勾配から急激に増加し、 $T=1.0$ に近づくにつれて緩やかに減少する。一方、単調減水では圧力勾配の絶対値が単調増水と比較して大きく、そのピークの位置が各実験ケースで大きく変わることが分かる。図-2は、最も圧力勾配の影響が大きい実験ケースにおける平均流速分布を内部変数表示したものである。なお、この図に表示されている摩擦速度 U_* は、対数則分布から評価されたものであり、各位相の分布はそれぞれ縦軸方向に10ずつ移動させて表示されている。全ての位相において、強い圧力勾配の下でも、 $y^+ > 30$ の内層で平均流速が対数則分布しており、また、粘性底層内では $U^+ = y^+$ の直線分布にほぼフィットしていることが分かる。しかしながら、流速分布自身が相似な形状を保ちながら上下に変化し、粘性の影響する領域が変化する。図-3に、粘性底層の厚さを表すパラメータである van Driest damping factor B の変化を示した。

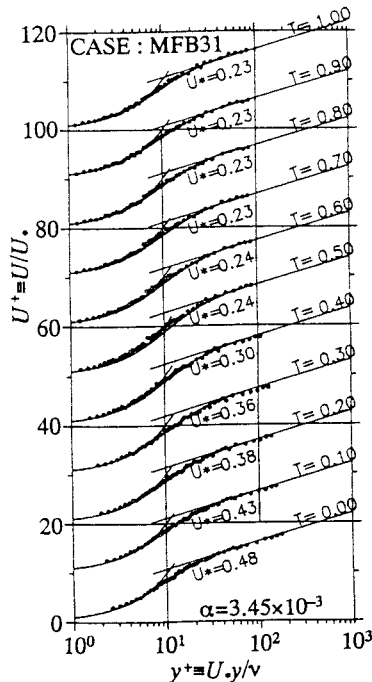


図-2 平均流速分布

単調増水における B の変化は、定常等流時における値($=26$)から減少し、水深がピークとなる以前に最小値に達する。その後、 B が定常等流時の値に戻っていく様子が観察される。単調増水が逆圧力勾配(空間的減速流)に対応することから、このような変化特性は、Naganoら(1990)¹⁾の逆圧力勾配乱流境界層における結果と一致する。一方、単調減水では、単調増水とは逆の傾向を示している。図-4はdamping

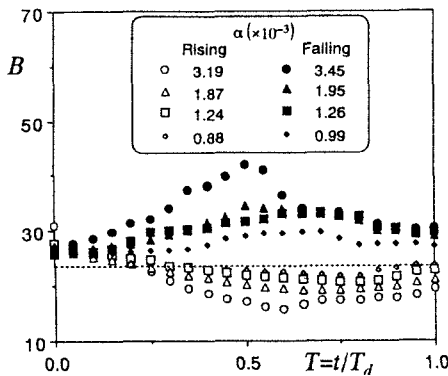


図-3 van Driest Damping Factor B

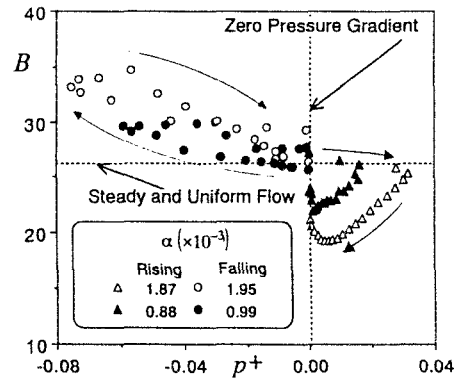


図-4 圧力勾配パラメータ p^+ に対する B の変化

factor B の変化を圧力勾配パラメータ p^+ に対して示したものである。圧力勾配に対する B の変化は、定常等流時の値 ($p^+=0$ で $B=26$) を原点として、単調増水では第4象限に時計回りの変化を、単調減水では第2象限に時計回りの変化を示している。このようなループ状の変化は B と p^+ の変化に位相差が存在しているためであり、両者の関係が線形的に決まる境界層流れとは大きく異なる。すなわち各時刻の圧力勾配で特性が決まるのではなく、多少の遅れを持って変化する開水路特有の現象と考えられる。

乱流境界層の解析では、粘性底層内の流速分布が、比較的大きな圧力勾配の下でも直線分布に従うとし、摩擦速度 U_τ が評価される。そこで本研究でも、同様に粘性底層の式から U_τ を評価し、対数則による摩擦速度の評価方法の妥当性を検討した。図-5は、両者の摩擦速度の比較を行ったものである。0.5(cm/s)前後の領域を除いてほぼ一致しており、対数則による評価方法が、強い非定常性の下でも妥当であることが示されている。図-6は、粘性底層の直線分布式から評価した摩擦速度を対数則に代入してKarman定数 κ が逆算され、それを時間軸に対して示したものである。 κ はどの位相においてもほぼ0.41の一定値を示しているが、単調減水では僅かに上方に逸れ、単調増水では下方に移動する。しかし、ここで示した実験ケースはかなり非定常性の強いクリティカルなケースであるので、通常の開水路における非定常性ならば、ほぼ0.41の普遍定数であると結論づけてよいと考えられる。

4. おわりに 本研究は開水路流れの壁面領域の平均流速分布に及ぼす非定常効果について、2成分レーザ流速計を用いてこの領域を詳細に乱流計測し、その分布特性、摩擦速度の評価法および粘性底層厚の変化特性に関して実験的に考察したものである。

〈参考文献〉

1) Nagano, Y., Tagawa, M. and Tsuji, T.: Turbulent Shear Flows, Springer-Verlag, vol.8, pp.7-21, 1993.

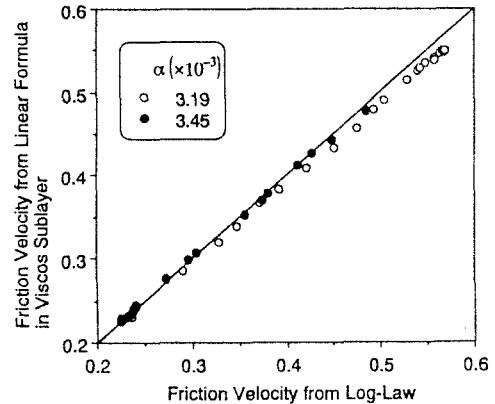


図-5 摩擦速度の評価方法の比較

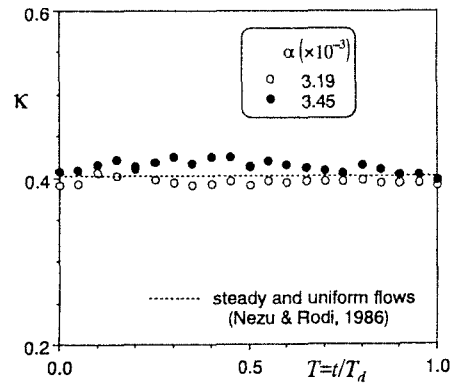


図-6 Karman 定数 κ の変化