

II-202

急勾配開水路流れの乱流構造に関する研究

京都大学大学院 学生員 ○中山忠暢
 京都大学工学部 正 員 欄津家久
 京都大学大学院 学生員 伊藤禎将

1. はじめに 山岳河川に見られるような急勾配流れは水面の大きな変動が特徴であり、開水路に特有な自由水面が水面の穏やかな状態とは異なる影響を及ぼす。その結果、流れの内部構造は従来考えられてきたものとは異なる特性を示す。本研究はこのような流れのうちで滑面路床上の乱流を対象として、レーザ流速計を用いて三次元計測を行い、平均的な特性についての考察を行ったものである。

2. 実験方法および水理条件 本実験で使用した水路は長さ10m、幅40cm、高さ40cmの可変勾配型循環式水路であり、勾配を最大1/10まで上げることが可能である。4ビーム後方散乱型2成分ファイバーレーザ流速計を用いて、滑面流れに対して水路側壁と底面下方より水路中央断面における三次元乱流計測を行った。表-1に水理条件を示す。

3. 実験結果および考察 本研究では、まず、Froude数の大きい急勾配流れに対する対数則の適用性の検証を行った。図-1はFroude数に対するKarman定数 κ の変化特性である。摩擦速度 U_* の評価方法には様々なものがあり、最も適切なものの1つである、Reynolds応力分布 $-\overline{uv}$ より求めた U_* を平均主流速に適用して対数則より κ を求めた。また、Tominaga & Nezu (1991)⁹⁾のデータも併記した。これより κ はFroude数に無関係な普遍定数 $\kappa=0.41$ であると言える。図-2はFroude数に対する積分定数 A の変化を示したものであり、常流ではほぼ一定であるが射流状態ではFroude数の増加とともに減少していく特性が見られ、従来の結果と一致している。このことはFroude数が増加するにつれて粘性底層厚が小さくなることと関連しており、van Driestのdamping係数 B が A の増加とともに増加することからもわかる。

開水路に特有な自由水面の影響は鉛直方向の乱れ強度 v' に大きく現れることが従来より指摘されている²⁾。図-3は鉛直方向の乱れ強度 v' の分布を示したものであり、図中の曲線は欄津の普遍関数である。中間領域においてはFroude数に無関係に普遍関数にほぼ一致しており、このことは主流方向の乱れ強度 u' 、横断方向の乱れ強度 w' についても成立している。壁面および自由水面近傍においてはFroude数が増加するにつれて系統的に変化する特性が見られる。特に、壁面近傍においてはFroude数の増加とともに普遍関数からずれる位置が壁面に近づいていく様子が見られ、粘性底層厚が小さくなることと関連している。図-4は水面近傍の乱れ強度 (u', v', w') の分布であり、Froude数の増加とともに乱れが急激に増加している。特に、限界流に近づく乱れは普遍関数から大きくずれ、射流になると若干減少してFroude数の増加とともに再び急増している。このような限界流に近い流れは波状特性を示し、流れがかなり不安定になっている

表-1 水理条件

case	s	h (cm)	b/h	Um (cm/s)	U* (cm/s)	Fr	Re ($\times 10^3$)
A-00	1/20000	7.50	5.33	6.67	0.44	0.08	4.2
A-01	1/10000	7.24	5.52	17.3	0.99	0.21	10.2
A-02	1/5000	6.25	6.40	20.0	1.17	0.26	10.5
A-03	1/1000	5.50	7.27	45.5	2.31	0.62	21.0
A-04	1/500	4.60	8.70	54.4	2.95	0.81	21.3
A-05	1/250	3.47	11.5	72.1	3.74	1.24	21.3
A-06	1/100	4.19	9.55	119.	5.93	1.86	42.7
A-07	1/50	3.42	11.7	146.	7.53	2.53	43.3
A-08	1/25	2.75	14.6	182.	9.72	3.50	43.4
A-09	1/10	2.03	19.7	246.	13.5	5.52	43.3

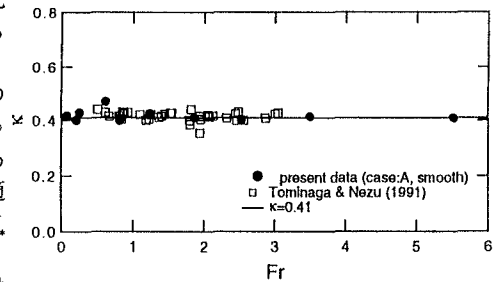


図-1 Karman定数の変化

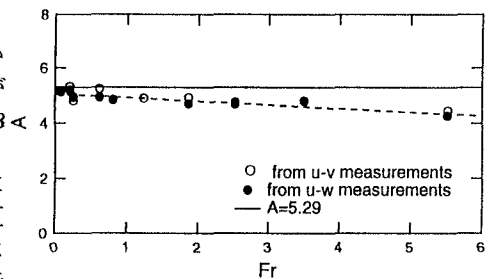


図-2 積分定数の変化

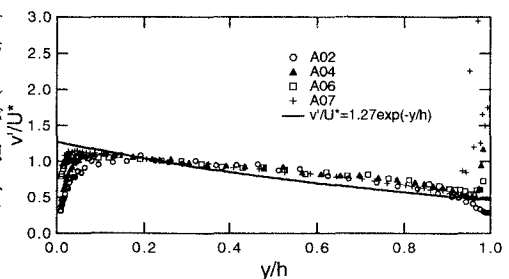


図-3 乱れ強度 v' の分布(y/H 表示)

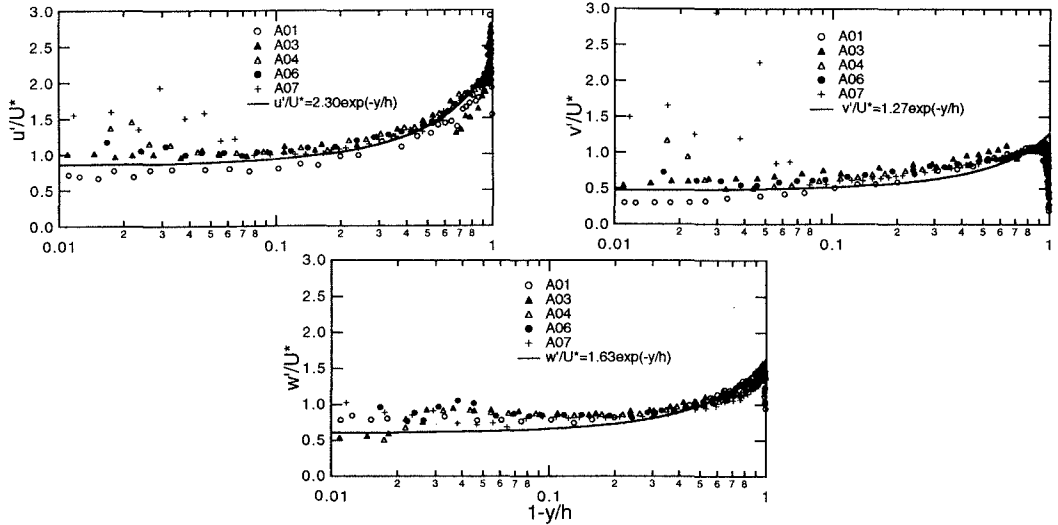


図-4 乱れ強度の分布(水面近傍)

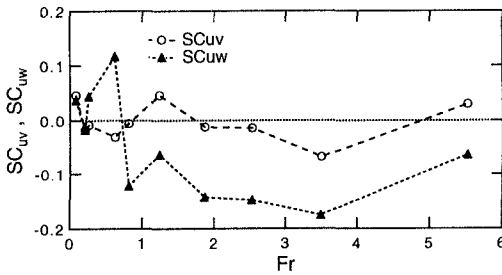


図-5 2次流パラメータの変化

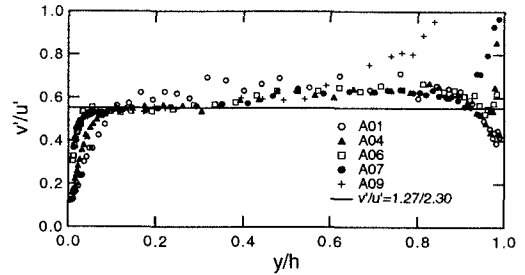


図-6 乱れ強度比の分布(y/H表示)

ことが原因である。vに関しては、水面の穏やかな常流においては乱れの低減によって普遍関数よりも小さくなるのに対して、射流では逆に大きくなる。wはFroude数が増加してもuおよびvほど急激には増加しない。

以上のようなFroude数の大きな流れにおける特性は、従来、アスペクト比の大きい流れでは発生しないと考えられていた2次流が発生し易いことが原因となっている可能性がある。そこで、2次流評価パラメータとして次式を定義する。

$$SC_{uv} = \frac{1}{H} \int_0^H \left[\left(\frac{-\overline{uv}}{U_*^2} \right)_{EXP} - \left(1 - \frac{y}{H} - \frac{1}{\kappa R_* \xi} \right) \right] dy, SC_{uw} = \frac{1}{H} \int_0^H \left(\frac{-\overline{uw}}{U_*^2} \right)_{EXP} dy \quad (1)$$

ここで、 $R_* \equiv U_* H / \nu$, $\xi \equiv y / H$ である。図-5は SC_{uv} , SC_{uw} の分布を示したものである。これより、鉛直方向のReynolds応力 $-\overline{uv}$ はFroude数にはほぼ無関係に理論式に一致するのに対して、横断方向のReynolds応力 $-\overline{uw}$ はFroude数の増加とともに極端に一方に偏る特性がうかがえる。2次流セル群と特定するためには、更に断面全体での評価を行う必要がある。

図-6は乱れ強度比 v/u' の分布を示したものであり、直線は櫛津の普遍関数の比である。この値は摩擦速度 U_* の値に影響されない生の計測データであると言える。自由水面近傍においてはFroude数によって値が大きく変化し、乱れの再配分が複雑に変化することが示唆される。したがって、数値計算を行うにあたっては以上の影響を考慮に入れた乱流モデルが必要である。

4. おわりに 本研究において、Karman定数はFroude数に無関係な普遍定数であることが示された。また、Froude数の増加とともに乱れ特性は大きく変化し、2次流の発生の可能性が示された。特に、水面近傍でのFroude数による変化特性を考慮に入れた乱流モデルは未だ存在せず、以上の影響を考慮に入れた乱流のモデル化が必要である。

<参考文献>

- 1) Tominaga, A. and Nezu, I. : Mem. Fac. Eng., Kyoto Univ., 53(3), pp.151-177, 1991.
- 2) Nezu, I. and Nakagawa, H. : Turbulence in Open Channel Flow, IAHR Monograph, Balkema, 1993.