

北海道大学工学部 正員 板倉 忠興
北海道大学工学部 正員 岸 力
北海道大学大学院 学生員 ○ 中山 隆

緒言 本研究は実験水路中で浮遊砂を含む開水路流れの実測を行ない、浮遊砂の輸送機構を明らかにするための基礎資料を得ようとするものである。流れの平均的な性質については、流速分布および浮遊砂の濃度分布に關して幾つかの理論および実験的解析結果と比較を行なった。また、これらの理論は開水路水流の乱流構造に対する幾つかの仮定を行なって展開されたものであり、これらを検討する資料を得るために hot-film 流速計を用いて浮遊砂を含む開水路流れの乱れの実測を行なった。水路は幅 30cm、深さ 50cm、長さ 15m の側面プラスチック張り鋼製で底面はラツカー仕上げである。流下させた砂は比重 $\gamma = 2.65$ 、 $d_{50} = 0.18 \text{ mm}$ であり、水路底に堆積が生じないように水流量を選んだ。測定は水路の中心線上で行ない、底面は水理的に滑らかな状態である。

1. 平均流の特性

一般に浮遊砂を含む流れの流速分布では、①いわゆるカルマン定数 K' が 0.4 より小となり、②且つ水路底に近づく程流速則からはずれて流速は大きな値となることが知られている。流速分布の一例を図-1に示す。

日野¹⁾は理論的にカルマン定数の減少に關する(1)式を導いた。

$$\frac{K}{K'} = \frac{1 + \beta \bar{c}}{2} \left[1 + \left\{ 1 + 4BK(1 + \beta \bar{c}) s_1 \right\}^{\frac{1}{2}} \right] \quad (1)$$

$$s_1 = \frac{g(\gamma - 1)w_0 \bar{c}(h - \delta)}{u_*^3 \ln(h/\delta)}$$

Ordóñez-Ippen²⁾は水路底近くでのずれを考慮した実験式を提案した。

$$\frac{\bar{u} - \bar{u}_{\max}}{u_*} = \frac{1}{K'} \ln \left(\frac{y}{h} - \psi \ln \frac{y}{h} \right) \quad (2)$$

(2)式中の中に対しては(3)式の ψ をパラメーターとして図-2の關係を得ている。

$$C \propto \left(\frac{h - \delta}{\delta} \right)^2 \quad (3)$$

志村³⁾は(4)~(6)式を導き、これらによると前述の①、②を共に説明することが出来る。

$$K' = \frac{A}{\bar{u}/u_* - k_1} \quad (4)$$

$$\frac{1}{K'} = \frac{1}{K(1 - a_1 \lambda)} + \frac{\alpha(\gamma - 1)w_0 \bar{c} g h}{u_*^3 A} \quad (5)$$

$$\frac{\bar{u} - \bar{u}_{\max}}{u_*} = \frac{1}{K'} \ln \left| \frac{\frac{y}{h} + \sqrt{\left(\frac{y}{h}\right)^2 + \beta}}{1 + \sqrt{1 + \beta}} \right|$$

(1), (4), (5)式と実験値を比較してそれを此図-3, 4, 5に示した。11ずれも比較的良く現象を説明している。尚、数値計算の際には、水温が不明のものは $\nu = 0.01 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、水深 h は $\bar{u}_{\max}$ を与えるが、 $\gamma = 2.65$ 、濃度速度 w_0 には鶴見公式を用いた。図-2で K' が 0.4 近傍での相違は、浮遊砂の濃度が

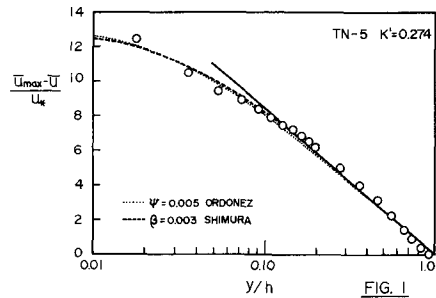


FIG. 1

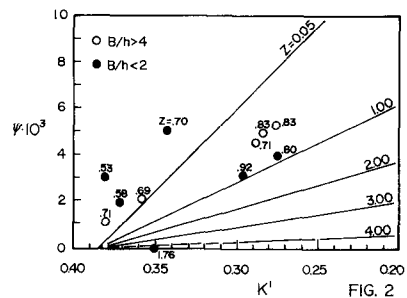


FIG. 2

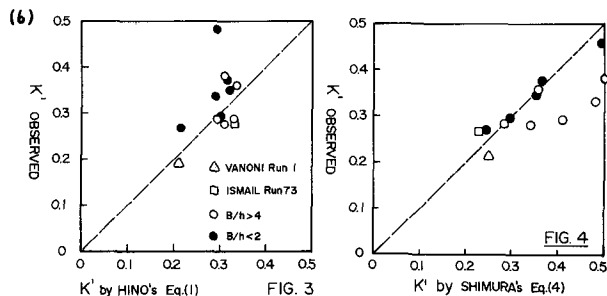


FIG. 3

FIG. 4

比較的小さく、その効果が顕著に表われていないことによるのであろう。

図-4および図-5中の●印の実測値は、水路幅と水深の比 $B/h < 2$ のものである。前述の理論は二次元流に対して展開されたものであり $B/h \approx 2$ が適用の限界と思われる。図-1中に(2)式の中および(6)式の β による曲線を示したが、いずれも水路床近くにおける流速の分布を良く説明している。尚、(2)式の流速分布から Ordonezらは濃度分布を求め、 $y/h < 0.1$ の水路床近くでは(3)式の β が増大し濃度が減少することを報告しているが、今回の測定ではその傾向は見られなかった。

2. 乱れ特性

測定には hot-film X型プロダを使用した。検定にはピトー管を用い、流速計の出力電圧との間に1次式を適用した。2本の検出部の特性を完全に一致させることは殆んど不可能であるので、デジタル化した後それぞれ検出部に対して検定直線を設定した。 $\Delta t = 0.01$ 秒、記録長は各測点について50秒である。

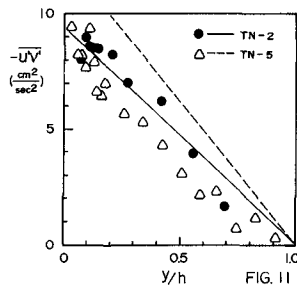
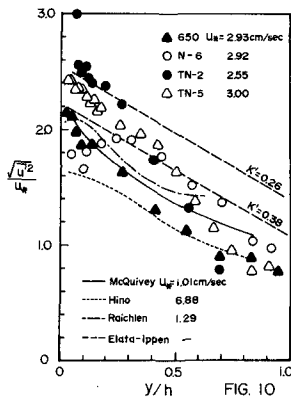
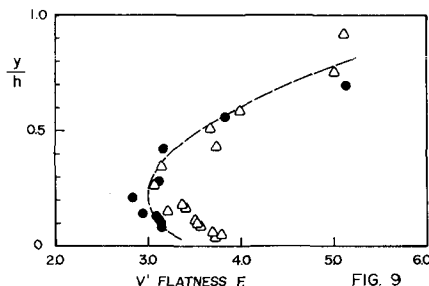
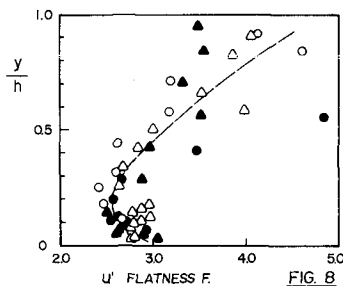
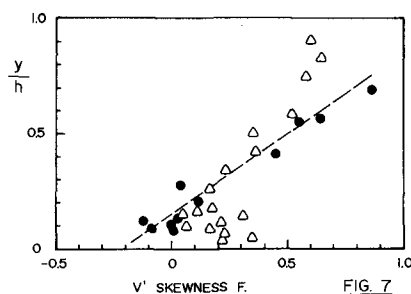
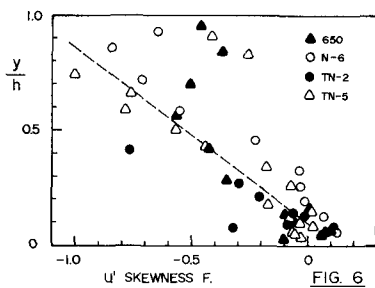
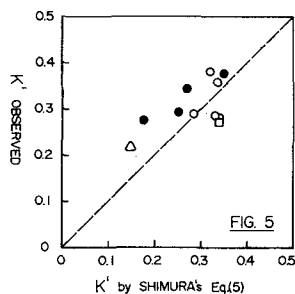
図-6, 7は u' および v' の歪度の分布である。図-8, 9は尖度の分布を示している。歪度は $y/h > 0.3$ では u' は負に偏し、 v' は正に偏している。

すなわち、継続時間は短いが値としては平均値から非常に離れた $u' < 0$, $v' > 0$ の乱れが存在することを表わしている。今本報でも清水中の測定において二つのことを報告している。これは床面附近から u の小さな流体塊が周期的に上方へ移動することによるものと推えらる。(床面附近では非常に正規分布に近い。) 尖度については、水路床面附近では正規分布とみなされるが、 $y/h > 0.3$ では水面に向かって一方的に分布が扁平となることを示している。

図-10は摩擦速度 u_{*} との流束方向の相対乱流強度の分布であり、図中の曲線は清水中における測定例である。今回の実測値と比較すると $y/h > 0.5$

ではほぼ同程度であり、水路床附近では今回の実測値がやや大きくなっている。図中の直線(破線)は Elata-Ippen⁵⁾ の中立浮遊粒子を含む流れの結果であり、水路床附近では比較的近い。

図-11は $\overline{u'v'}$ の分布を示す。流れが2次元等流の場合、平均の Navier-Stokes 式は(7)式となる。



$$\mu \frac{\partial u}{\partial y} - \overline{u'v'} = \rho g z (1 - \alpha)$$

図-11中の曲線は(7)式によるものであり、実測値と比較的良好相関がみられる。

図-12は(8)式による乱れのマクロスケール L_x の分布である。

$$L_x = \bar{u} T_E = \bar{u} \int_0^\infty R(\tau) d\tau \quad (8)$$

L_x は $y/h < 0.5$ では水路床からの距離とともに増大するが、 $y/h > 0.5$ では一定又はやや増大するようであり、水面附近で減少する傾向は明確ではない。大まかには水路床附近で $L_x \approx 0.5h$ 、 $y/h = 0.5$ 附近で $L_x \approx h$ である。

図-13は(9)式によるミクロスケール λ_x である。

$$\frac{1}{\lambda_x^2} = \frac{2\pi^2}{\bar{u}^2} \int_0^\infty n^2 F(n) dn \quad (9)$$

傾向は L_x とほぼ同様であり、大まかには水路床附近で $\lambda_x = 0.1h$ 、 $y/h > 0.6$ で $\lambda_x \approx 0.2h$ である。

図-12, 13中の曲線は清水中の実測例であるが、現段階では差異は明確でない。

図-14は u' のパワースペクトルの例である。水路床に近づく程高周波成分の占める割合が増大することを示している。慣性領域を示す一/5乗則は波数 $k < 2 \text{ cm}^{-1}$ でみられ、粘性領域を示す一/7乗則は観測されなかった。

図-15は v' のパワースペクトルである。傾向は図-14の u' と同様であるが、 u' に比較して分布が非常に一様に近いことが判る。

開水路における乱れの測定には未だに多くの困難が伴うようである。今回使用したhot-film式流速計では安定な動作を行わせることが容易ではなかった。開水路の水表には一般の空気流とは異なった特有の乱流構造が存在するはずであり、現段階では多くの実測値を集積することが理論的解析と相まって必要不可欠であろう。

本研究は、文部省科学研究費(浮遊物質を含む流れの乱流機構に関する研究、代表者: 中央大学服部昌太郎教授)の援助を受けた。また、計算には北海道大学用シミュレータ室 HIDAS-2000, 同大型計算機センター FACOM-260-6Dを使用した。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日野幹雄: 固体粒子を浮遊した流れの乱流構造の変化, 土木学会論文集, 第92号, 1963。
- 2) Ippen, A.T.: A New Look at Sedimentation in Turbulent Streams, JI. of the Boston Soc. of C.E., Vol.58, No.3, 1971。
- 3) 志村博康: 浮遊砂のある流れの基礎的研究, 山形大学紀要(農学), 第4巻, 第4号, 1964。
- 4) 今本博健: 開水路流れにおける乱れの基本的性質について, 土木学会論文報告集, 第197号, 1972。
- 5) Elata, C and Ippen, A.T.: The Dynamics of Open Channel Flow with Suspensions of Neutrally Buoyant Particles, M.I.T. Hyd. Lab., Tech. Rep., No.45, 1961。

