

急勾配粗面流れの乱流特性について (1) 河床圧力の変動特性

京大 農学部 久保田 哲也 水原 邦夫 武居 有恒

1 はじめに

砂礫床の上の乱流中バ、砂礫に働く流体力、ひいてはその移動限界に、乱流特性が重要な因子といふことは従来の研究が示している所である。例えば、開谷¹⁾によつて圧力変動に起因する揚力などが考察されている。ところが、砂防の対象となる急勾配粗面流れの特性についての研究は、Bayazit²⁾らの流速変動特性が見られる程度で、圧力変動の研究に至つては皆無である。流体力等を考慮する時点では基礎となるべき乱流特性量の情報は、このように十分得られているとはいひ難い。そこで著者らは急勾配粗面流れの乱流特性を得る為、一連の実験を行なうこととし、まず最初に河床圧力の変動特性を調べたのを報告する。

2 実験

使用水路は可変勾配式で、路床は平均径3.4 mm の礫粗度で粗面化されている。変動圧力は、ほぼ等流とみなせる区間の水路床上に設けた孔よりシリコンチューブによつて導き、圧力変換器で電流に変え、電磁オシロビ記録した。測定孔の径やチューブの長さ、Emmett³⁾の実験結果を考慮し、測定結果に影響が現れないように決めた。圧力測定と同時に水深・勾配・水温を測定、水量を得た。ローパスフィルターを通し得たデータの10 Hz をサンプリング間隔 $\Delta t = 0.05$ 秒、データ総数 $N = 1250$ 、最大ずらし個数 $m = 50$ 、分解バンド幅0.4 Hz として読み取り、100 Hz オバの分、 $\Delta t = 0.005$ 、 $N = 1250$ 、 $m = 50$ 、分解バンド4 Hz として計算し、パワースペクトル等を算出した。更に、変動強度のみを算出する為に $\Delta t = 0.25$ 、 $N = 250$ で別サンプリングした。

3 結果

図1はパワースペクトルである。これは、2.8 Hz 附近に鋭いピークを持つており、ピーク周波数は水理条件に左右されないが、その大きさは勾配とともに大となるようである。図2はスペクトルと同一データの自己相関係数を示しており、スペクトルとともに典型的な狭帯域不規則変動の特徴を示している。また、図3には圧力変動成分の累積確率分布が描かれており、図の実線(正規分布の累積分布)と比較、ほぼ正規分布していることが分る。更に、図5は圧力変動強度 $\sqrt{\rho g^2}$ と掃流 u_{*c} での比と相対水深 h より砂粒レイノルズ数との関係を表わしている。なお、図5のデータは、 $0.002 \leq \tan \theta \leq 0.15$ 、 $1.35 \leq R/d \leq 11.7$ の右範囲の水理条件のものから成り立っている。(注：水深、 h ；摩擦速度、 u_* ；河床礫径、 D ；動粘性係数、 ν ； $\tan \theta$ ；勾配。)

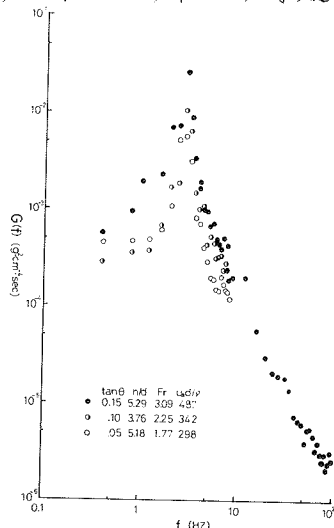


図1 パワー・スペクトル

4 考察および結論

Rotta⁴⁾の式から、壁面圧力変動は、二次元等流下で河床がほぼ平面と見なせる場合、 $V = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 、 $dV = dx \cdot dy \cdot dz$ として、

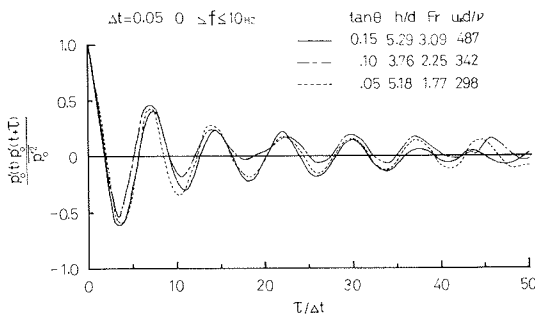


図2 圧力変動の自己相関係数

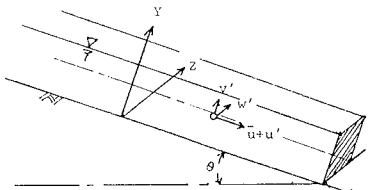


図4 乱流の説明図

性より、 $\overline{\phi^2} = E(\phi^2) = \overline{\phi^2} \dots (3)$ ただし、 \sim ; 空間平均, E (); 集合平均, $-$; 時間平均。(3)式と、 $h/d = 0$ イ $\rho'_0 = 0$ とするを考えると、(2)式より、 $\overline{\rho_0^2}/\overline{\phi_0^2} = (h/d)^\lambda (AR_*^\lambda + BR_*^\lambda + CR_*^\lambda + DR_*^\lambda + E) \dots (4)$, $R_* = \ln(u_*d/\nu)$, λ, A, B, C, D, E は定数。ただし、(4)式の適用範囲は、 $u_*d/\nu > 10/\frac{1}{d}$ イある。

(4)式中の $\lambda = 1$ とした場合、実験結果は良く整理でき、図5のようになる。例えば、最少二乗法を用いると、 $A \approx 0.270, B \approx -6.73, C \approx 63.0, D \approx -263, E \approx 4.13$ 程度の値を得ることになり、この時の相関係数は、 0.950 イあった。

結局、図5から、本実験の水理条件下では、圧力変動と掃流カエネルギー比が、 u_*d/ν の増加とともに減少し、 h/d の増加とともに増えることが分かる。また、河床圧力変動は、明確な卓越周期を持ち、その確率分布は正規分布に従うと言えよう。更に、パワースペクトル全体の大さの変化は、

$$\int_0^\infty G(f) df = \overline{\rho_0^2} \dots (5) \quad \text{f; 周波数。}$$

なので、(4)式によって決定すると言える。

参考文献

4) J.C. Rotta; Turbulente Strömungen, 1972

1) 関谷光博; 限界掃流カの理論的考察, 農業土木学会論文集 56, 1975

2) M. Bayazit; Free surface flow in a channel of large scale roughness, J. Hyd. Research, 14, No. 2, 1976

3) W.W. Emmett, J.R. Wallace; Errors in piezometric measurement, Proc. ASCE, Hyd. 6, 1964

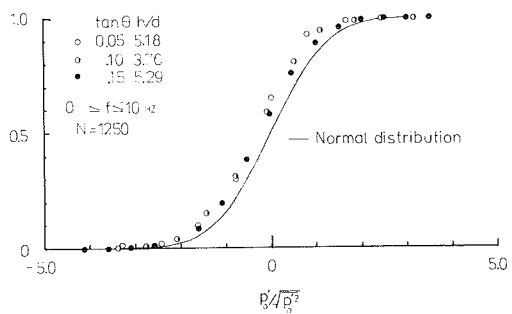


図3 河床圧力変動の累積確率分布

$$\rho'_0(\mathbf{x}) = \frac{\rho}{2\pi} \int_V \left\{ 2 \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v'}{\partial x} + \frac{\partial^2 (u'v')}{\partial x^2 \partial y^2} - \frac{\partial^2 w'^2}{\partial y^2} \right\} \frac{dV}{V} \dots (1)$$

ρ ; 水の密度, u ; 平均流速, v' ; 流速変動成分 (図4),

\mathbf{x} ; 位置ベクトル。(1)式に若干の仮定を用いると、

$$\phi = \rho'_0(\mathbf{x})/\phi_0 = A \{ \ln(u_*d/\nu) + B \}^2 + C \dots (2) \quad A, B,$$

C は $\ln(h/d) + h/d, \alpha d, z/d$ の関数。等流条件とエルゴート性より、 $\overline{\phi^2} = E(\phi^2) = \overline{\phi^2} \dots (3)$ ただし、 \sim ; 空間平均, E

(); 集合平均, $-$; 時間平均。(3)式と、 $h/d = 0$ イ $\rho'_0 = 0$ とするを考えると、(2)式より、

$\overline{\rho_0^2}/\overline{\phi_0^2} = (h/d)^\lambda (AR_*^\lambda + BR_*^\lambda + CR_*^\lambda + DR_*^\lambda + E) \dots (4)$, $R_* = \ln(u_*d/\nu)$, λ, A, B, C, D, E は定数。ただし、(4)式の適用範囲は、 $u_*d/\nu > 10/\frac{1}{d}$ イある。

(4)式中の $\lambda = 1$ とした場合、実験結果は良く整理でき、図5のようになる。例えば、最少二乗法を用いると、 $A \approx 0.270, B \approx -6.73, C \approx 63.0, D \approx -263, E \approx 4.13$ 程度の値を得ることになり、この時の相関係数は、 0.950 イあった。

結局、図5から、本実験の水理条件下では、圧力変動と掃流カエネルギー比が、 u_*d/ν の増加とともに減少し、 h/d の増加とともに増えることが分かる。また、河床圧力変動は、明確な卓越周期を持ち、その確率分布は正規分布に従うと言えよう。更に、パワースペクトル全体の大さの変化は、

$$\int_0^\infty G(f) df = \overline{\rho_0^2} \dots (5) \quad \text{f; 周波数。}$$

なので、(4)式によって決定すると言える。

参考文献

4) J.C. Rotta; Turbulente Strömungen, 1972

1) 関谷光博; 限界掃流カの理論的考察, 農業土木学会論文集 56, 1975

2) M. Bayazit; Free surface flow in a channel of large scale roughness, J. Hyd. Research, 14, No. 2, 1976

3) W.W. Emmett, J.R. Wallace; Errors in piezometric measurement, Proc. ASCE, Hyd. 6, 1964

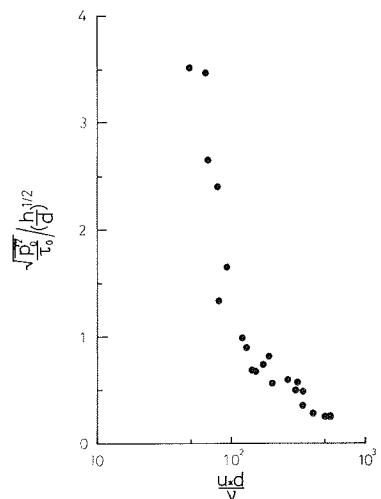


図5 河床圧力変動強度の変化