

## II-169 洪水流の流れの構造に関する実験的研究

京都大学工学部 正 員 村上 正吾

京都大学工学部 正 員 中川 博次

大成建設(株) 正 員 大谷 英夫

1. まえがき. 洪水時における流砂の挙動は河道, 河川構造物の安全性を考える上で不可欠であるにも関わらず, 流れの構造が充分には解明されていないが故に, 掃流砂量, 浮遊砂量の算定あるいは抵抗の予測などの精度にまだまだ検討の余地が残されているものと思われる. 本研究では粗面上の非定常開水路流の流れの構造についての検討を行なうものである.

2. 実験方法. 実験は, 長さ12m, 幅50cmの可変勾配水路を用いた. 電磁流量バルブのパソコン制御により任意波形に従う流量が良好に再現できる. 流速はホットフィルム流速計及びプロペラ流速計によって行なわれた. また, 2器の波高計を流下方向に設置し, 局所的な水面勾配及び流速測定点における水位変化を測定した. 河床は直径0.24cm, 比重2.71のガラスビーズで粗度付けされた. 実験条件はbase flow の水深 $h_b=4\sim 9$ (cm), 平均流速 $U_b=20\sim 60$ (cm/s), Froude数 $Fr_b=0.30\sim 0.90$ , 無次元水位変化率 $\delta=\Delta h/\Delta t/u_{*b}=0.009\sim 0.084$ の範囲で行われた(下付き添字bはbase flow の値を示す). また, ハイドログラフのパターンとしては, ①単一波, ②連続正弦波, ③台形状波, ④等流状態よりの単調な増水波, 減水波の4種を与え, 何れの場合も同一測定点を通過する3~5波を記録した. 非定常データの平均値は2秒間の移動平均を測定波数でアンサンブル平均し, 乱れ変動成分は瞬間値から平均値を引くことにより分離した.

3. 平均流速分布. 正弦波状ハイドログラフ②に対する単位幅流量, 水深, 摩擦速度, 流速係数の時間的変化を図-1に, 図-2には流速分布の変化の一例を示した. 図-2より底面付近では対数則が成立していることが認められる. 圧力勾配の存在する境界層流においても剝離を伴うほどの逆圧力勾配でない限りいわゆる壁法則が成立することより, 本研究でも摩擦速度 $u_*$ は壁法則を適用することによって評価された. 一方, 次式で表される非定常流の運動方程式より求められる摩擦速度との比較が図-3に示されており, 壁法則の適用が図-2と併せて適当であると判断される.  $u_*^2=gRi_b-gb\cdot\partial x/\partial x-h\cdot\partial U/\partial t-h/2\cdot\partial U^2/\partial x\cdots$  (1) 式(1)の適用に当っては $\partial h/\partial x$ 及び $\partial U/\partial t$ については実験値より,  $\partial U/\partial x$ は下流に伝わる波についての演算子関係 $\partial/\partial t=c\partial/\partial x$ と実測の波速 $c$ を用いて評価した. この演算子を形式的に式(1)に適用すると次式が得られる. エネルギー勾配 $I_e=i_b[1+\{1+(c/U_b-1)Fr^2\}U_b/c\cdot\phi_b/Fr_b^2\cdot(\partial h/\partial t/u_*)]\cdots$  (2) ただし,  $\phi_b=U_b/u_{*b}$ ,  $Fr_b=U_b/\sqrt{gh_b}$ である. 従って, 流れの非定常性の強度を示すパラメータとしては $\delta_H=\phi_b/Fr_b^2\cdot(\partial h/\partial t/u_{*b})$ , あるいは $\delta=\Delta h/\Delta t/u_{*b}$ が適当と考えられる. このパラメータは波動特性分類の高橋<sup>1)</sup>, 境界層流の流れ構造に及ぼす圧力勾配の影響パラメータであるClauser<sup>2)</sup>の平衡パラメータ $\beta$ を開水路に適用したものと基本的には一致する. 図-2より外部領域では流速分布は圧力勾配の影響を受け対数則よりのズレが認められ, 図-4のように速度欠損則表示を行なうことにより対数則よりの偏差 $\Gamma$ を評価した. 図-5は正弦波状ハイドログラフに対する $\Gamma$ の時間的変化を示したものであり水位変化に対する位相差 $\phi$ が認められる. Coles<sup>3)</sup>のwake則と $\Gamma$ とを用いると, 洪水流中での流速分布を $u(y)/u_*=\log(30.1y/k_{sb})/\kappa_0+\Gamma(t)\cdot\{\sin(2y/\pi h)\}^2\cdots$  (3) と表示できる. ここに,  $k_{sb}$ =等価粗度砂粗度,  $\kappa_0$ =Kármán定数である. 図-2に示される式(3)と実験値との対応より圧力勾配(水位上昇率)と $\Gamma$ との関係が明確になれば洪水流中での流速分布の評価できるものと思われる. 図-6は①, ④のような水位上昇率がほぼ一定( $\delta$ =一定)と見なされる場合の $\Gamma$ の定常値 $\Gamma_e$ 及び緩和時間( $\Gamma_e$ の95%に至る時間) $T_D$ と $\delta$ との関係を示したものであり, 本実験の範囲でそれぞれ $\Gamma_e=\Gamma_{e0}\delta^{0.5}+\Gamma_{e1}$ ( $\Gamma_{e0}=8.56$ ,  $\Gamma_{e1}=-0.11$ ),  $T_D=8/\delta$ と表される.  $\delta$ が一定の場合がわかると, インパルス応答の概念を用いて任意の流量変動に対する流速分布の変化は次式で表される.  $\Gamma(t)=\int_0^t \Gamma_e(t-\tau)\cdot g_I(\tau/T_D)d\tau\cdots$  (6) ここに,  $g_I(\tau/T_D)$ =インパルス応答関数である. 図-7はインパルス応答関数に指数型を仮定した時のsine状水位変化に対する $\Gamma$ の位相差 $\phi$ とその振幅を実験値と比較したものであり, こうした考え方で平均流速分布の変化が定性的には表示可能と思われる.

4. 乱れ特性. 図-8は $u'$ ,  $v'$ の増水期と減水期の鉛直方向分布を比較したもので $v'$ は図中に点線で示されている瀬津の普遍分布式とほぼ一致している。 $u'$ は増水期の底面付近の乱れ強度の増加が認められるのに対し減水期は普遍分布式とほぼ一致している。図-9は乱れの周波数スペクトル密度関数 $S(f)$ の形状係数の時間的変化を示したものである。いま、 $S(f)$ の $j$ 次モーメント $M_j$ を、 $M_j = \int_0^\infty f^j S(f) df$ とする。この時、 $M_0/M_1$ は平均周期を、 $M_0/M_2$ はほぼ平均交差時間を表わし、さらに $q_m = \sqrt{1 - M_1^2/M_0 M_2}$ は分布の広がりを表わす。図中\*は等流時の値で基準化していることを示し、従って増水期には、高周波成分が増加、一方減水期には逆になることが図よりわかる。 $q_m$ の時間的変化はあまり認められずスペクトル分布の広がり幅自体の変化は小さいと思われる。

5. あとがき. 洪水流の流れ構造の時間的変化を流砂機構へ適用することを考えると、今後、さらに $\delta$ と平均流特性、乱れ特性量との関係を検討していく必要があると考えられる。

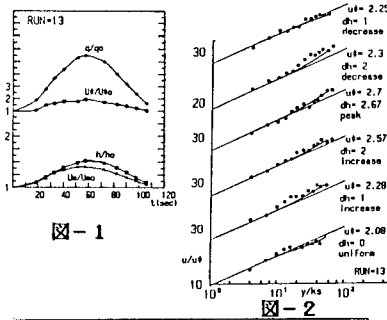


図-1

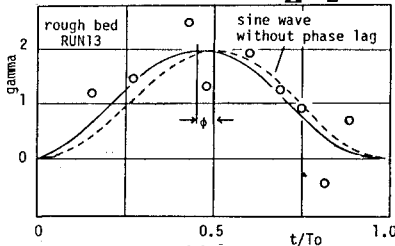


図-2

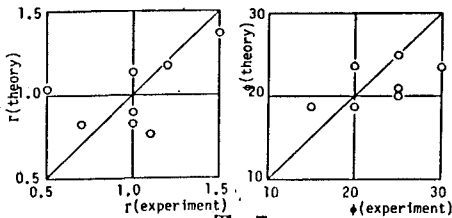


図-3

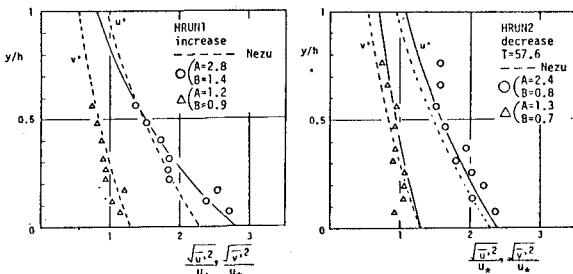


図-4

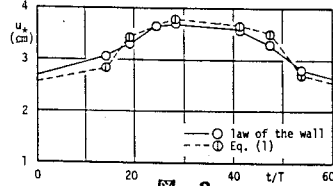


図-5

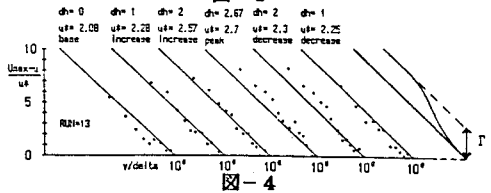


図-6

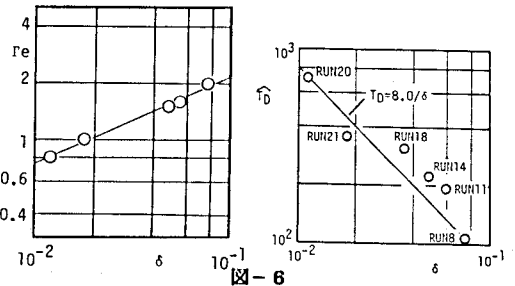


図-7

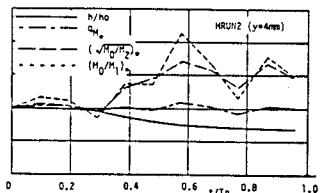
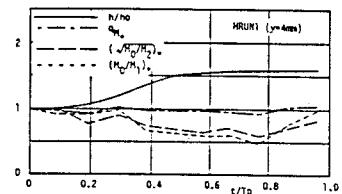


図-9

- 参考文献 1) 高橋: 京大防災年報, 第12号, 1969. 2) Clauser: J. Aero. Sci. 21, 1954.  
3) Coles: J. Fluid Mech. 1958.