

東京電力 正員 伊東雅幸
 東京工業大学 正員 福岡捷二
 鹿島建設 正員 奥津一夫

まえがき 移動床流れでは、流れの水利条件に応じて砂堆、平坦河床、反砂堆、Chute & Pool 等が形成される。本研究では、二次元実験水路で見い出される各河床波の形状・伝播特性について述べる。

各河床波の特性 実験は、長さ8m幅4cmの循環水路を用い給砂によって流路床勾配が平均的に変化しない状態で行なった。図1は、実験で得られた各河床波を模式的に示したものである。河床波と水面波の位相、および水深関係を比べると、下流に移動する反砂堆の位相は、上流に移動する反砂堆と同じであるにもかかわらず、河床波上の水深変化は砂堆と同様に、山部で小さく、谷部で大きくなっている。写真1は下流に移動する反砂堆を、流れにアルミ粉末を懸濁させ可視化したものである。河床波の下流側で流れの剥離を生じていることがわかる。いま、剥離領域の境界を底面と考えると図2に示すように、水深は山部で大きく、谷部で小さくなり、上流に移動する反砂堆と移動方向を除いて、特性は一致する。この剥離領域の存在は、反砂堆の移動方向に重要な役割を果す。すなわち、河床波の上流側で洗掘され、下流側の剥離領域で堆積するため、河床波が下流に伝わる。また、下流に移動する反砂堆の流下方向の水深変化は小さいため(図2)上流に移動する反砂堆のようにJumpを伴うことはない。図3はJumpを伴ない上流に移動する反砂堆の河床波と水面波の走時曲線である。図中の点線は、ほぼ同時に流路内に現われているJumpの発生時を結んだもので、上流側で発生したJumpは消滅することなく短い時間遅れで下流側に伝播していく様子がわかる。図4は、水路最上流端を通り過ぎていく河床波の頂上での水深の時間変化を示す。図中の①印のところでは水深は極大値をとっている。これらの点(t, X)を図3に示したのが①印である。水深の変化が極大になることにより、引き起こされたわずかな流量変化が、すぐ下流の河床波上にJumpを誘起する。このJumpによる流量変化が次の河床波上にJumpを起し、以上のProcessの繰り返しで短い時間遅れで流路全体に現われる。図5はChute & Poolの走時曲線であり、ほぼ一定の速度(C=1.46cm/sec)で上流に移動していることがわかる。Chute & Poolは定常なJumpを伴っているにもかかわらず、一定の河床波形を保っている。これは、射流部で

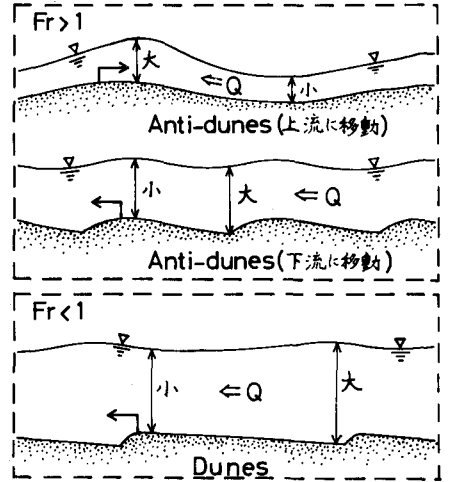


図1 河床波と水面波の位相と水深関係

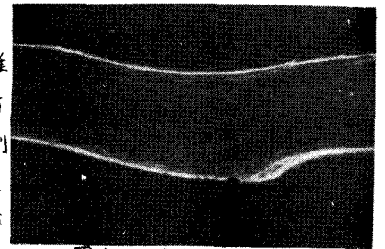


写真1 剥離の存在

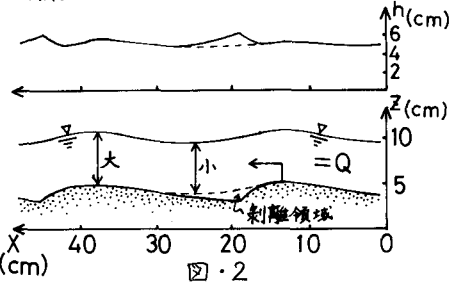


図2

時間変化を示す。図中の①印のところでは水深は極大値をとっている。これらの点(t, X)を図3に示したのが①印である。水深の変化が極大になることにより、引き起こされたわずかな流量変化が、すぐ下流の河床波上にJumpを誘起する。このJumpによる流量変化が次の河床波上にJumpを起し、以上のProcessの繰り返しで短い時間遅れで流路全体に現われる。図5はChute & Poolの走時曲線であり、ほぼ一定の速度(C=1.46cm/sec)で上流に移動していることがわかる。Chute & Poolは定常なJumpを伴っているにもかかわらず、一定の河床波形を保っている。これは、射流部で

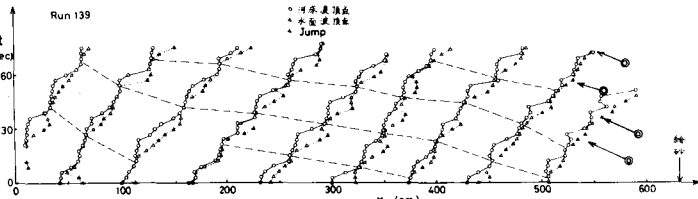


図3 走時曲線

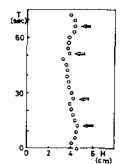


図4

洗掘された砂は、常にすぐ下流のJump(sec)の間に一様に堆積するためであると思われる。

境界条件 反砂堆の境界条件は、上流端に存在する。上流に移動する反砂堆では、上流端においてほぼ一定の

周期で河床波が通過していく。したがって、給砂条件が一定であれば、境界条件は常に上流端に固定され、河床波は流路全域にわたって安定して形成される。一方、下流に移動する反砂堆では、河床波が下流に伝わるため、上流端での給砂条件によって境界条件が強く影響される。もし、給砂が定常でなかったりすると、境界条件が変化するため、流路内に安定な河床波は得にくい。砂堆の境界条件は、下流に存在し、河床波が下流に移動するため、上流に移動する反砂堆と同様に砂堆は、給砂条件にそれほど強く依存することはない、少なくとも水路の下流側ではかなりの時間にわたって定常状態を保つことができる。このように、河床波の移動方向と給砂条件が境界条件を強く支配し、河床波が定常的に存在し得るかどうかが決める重要な要因となっている。

領域区分 図6は、二次元・三次元河床波の発生領域を示す。二次元データは、Guyら²⁾の測定値を使用した。この図によると二次元・三次元の各河床形態を統一的に区分することができる。二次元データについては、摩擦速度(U_*)は側壁の影響を除くため、径深分離法により求めた底面部分の径深を用いて($\sqrt{gR_0I}$)で与え、縦軸には底面の形状抵抗が卓越するため、 R_0/g の代わりに R_0/g_0 を用いている。

最大波高 福岡・山坂¹⁾は、Jumpを伴ない上流に移動する反砂堆の最大波高を理論的に求めた。ここでは下流に移動する反砂堆の最大波高の算定を試みる。吉川・石川²⁾は、① 砂堆頂上では、底面せん断力(τ_0)はある臨界値を持ち、それ以上大きくなることはない。② この臨界値(τ_{c0})は砂堆領域と平坦河床領域の境界を表わす関係式を満足する。という考えのもとに砂堆の最大波高を算定した。①の考え方を下流に移動する反砂堆に適用する。臨界せん断力(τ_{c0})を図6の実線で示すように、下流に移動する反砂堆の領域と平坦河床領域の境界より求めると、 $\tau_{c0} = 0.4 \tau_{c0}(R_0/g_0)^{0.75}$ (1) となる。次に、下流に移動する反砂堆の河床頂上での流れを曲率をもつ境界上のポテンシャル流れで近似し(図7)、流れから決まる、底面せん断力(τ_0)を底面流速(v_0)より見積る。このとき底面流速は次式となる。 $v_0 = \frac{1}{R} \ln \frac{q}{1 + \sqrt{R_0}} \quad (2)$ 。ここで、下流に移動する反砂堆の河床形状は、

剥離による死水領域を考えると、正弦波形 $z = \frac{H}{2} \cdot \sin \frac{2\pi}{L} x \quad (3)$ で近似できる。よって河床波頂上での曲率半径は、 $\frac{1}{R} = 2\pi \frac{H}{L} \quad (4)$ となる。(2)式に(4)式を代入すると、底面せん断力は、 $\tau_0 = \frac{\rho}{2} v_0^2 = 2\rho g \left\{ \frac{H}{L} \ln \frac{q}{1 + \sqrt{R_0}} \right\}^2$

(5) となる。底面せん断力(τ_0)が、臨界せん断力(τ_{c0})と等しくなったとき最大波高が決まるので、(1)、(5)より $\frac{H}{L} \ln \frac{q}{1 + \sqrt{R_0}} = 0.01 \frac{1}{\sqrt{F_d}} \sqrt{\frac{R_0}{g_0}} \quad (6)$ ($F_d = \frac{v_0^2}{(\sqrt{R_0} - 1)gh}$) が求まる。(6)式が最大波高を規定する式となる。図8はこの式による理論値を実測値と比較して示す。理論値は実測値をかなり良く説明している。

1) 福岡・山坂, 第16回災害シンポジウム論文集, 1979.

2) 吉川・石川, 土木学会論文報告集 No. 281, 1979.

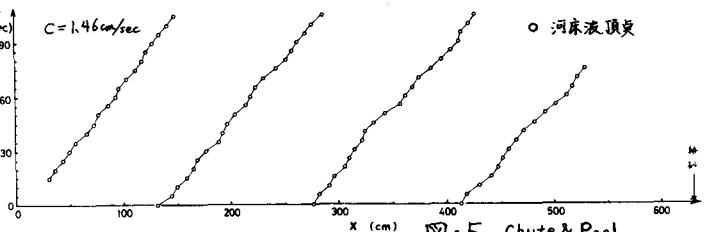


図5 Chute & Poolの走時曲線

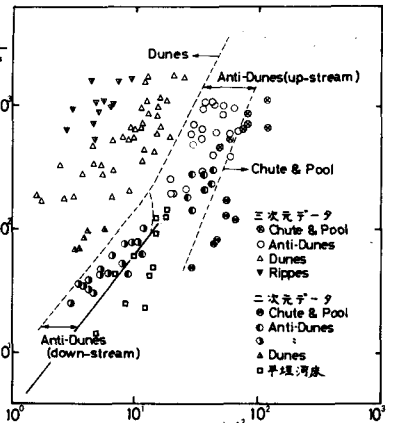


図6 領域区分図

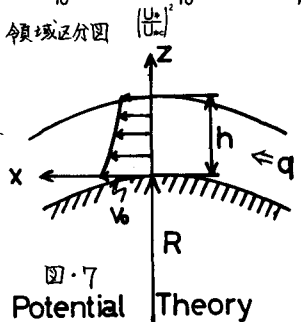


図7 Potential Theory

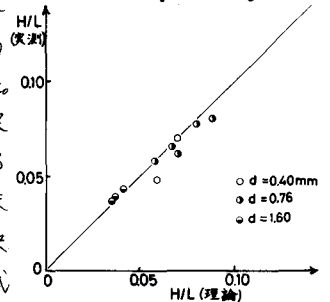


図8 下流に移動する反砂堆の最大波高