

II-28 掃流・浮流砂混在条件下の 交互砂州性状に関する実験的研究

北見工業大学工学部 正会員 内島 邦秀
北見工業大学工学部 正会員 早川 博

1. はじめに

従来の交互砂州形成実験は、掃流砂が卓越する条件下で行われてきた。実河川の洪水時では、掃流・浮流砂が混在すること、また、交互砂州上に小規模河床波が存在すること、が普通であろう。後者については、深見¹⁾の実験があるが、前者に近い実験は2例に留まっている。本研究では、既報²⁾と同様に比較的急勾配の条件で、移動床材料として豊浦標準砂を用い、上記の両者を満足する実験を行った。

本研究の目的は、流砂形式が掃流・浮流砂混在の場合に形成される河床波及び交互砂州について、それらが従来の領域区分図で区分されるかどうかを検証すること、また、形成された交互砂州の特性を明らかにすることである。

2. 実験装置と実験方法

豊浦標準砂（平均粒径 $d=0.21\text{mm}$ 、比重 2.65 ）を幅 30cm 、長さ 14m の側壁ガラス張り直線水路に厚さ 6cm で敷均し、水路勾配を6通りに設定して通水した。水路上流端で初期河床を維持するように給砂し、下流端から 2m の位置に設置した水位調整堰で適宜に水位を調節して等流状態を保持した。中流・下流部の2断面で横断方向に3測線を取り、過マンガン酸カリウム水溶液をトレーサーとして平均流速を測定し、所定の流量に対する平均水深を求めた。敷均し平坦河床への最初の通水は、各勾配で $B/h=50\sim60$ の水深を得る流量としたが、通水が下流端に達すると同時に数分間は側岸にほぼ平行な直線状の反砂堆上で水面変位が所々に現れ、その後、下流側から3次元的河床波が発生し、 $10\sim15$ 分で写真1のような河床波が水路全域に形成された。通水時間の経過につれて多少その長径、高さは大きくなるものの固定し長時間通水しても変化しなかった。この時点の水深は形状抵抗によって増大し、勾配 $1/70$ 以上では $B/h=45\sim55$ 、 $1/80$ 以下では $20\sim30$ になった。そこで、本実験では $0.1\sim0.2\text{ l/s}$ の間隔で平坦河床に至るまでの段階的増水実験を行い、河床形状を観察した。段階流量の通水時間は、 $1/70$ 以上で10分前後、 $1/80$ 以下で20分前後とした。勾配 $1/70$ につい

表-1 実験水理諸量

勾配 I	流量 $Q(\text{l/s})$	B/h	h/d	抵抗係数 u_m/u_*	無次元掃 流力 τ_*	無次元有効 掃流力 τ_{*e}	砂粒 Re 数 Re_*	Fr 数
$\frac{1}{50}$	0.5 ~1.2	37 ~57	27 ~41	9.8 ~14.6	0.32 ~0.50	0.23 ~0.40	5.6 ~7.0	1.4 ~2.1
$\frac{1}{60}$	0.7 ~1.7	29 ~47	32 ~51	10.8 ~13.5	0.32 ~0.53	0.25 ~0.45	5.7 ~7.2	1.4 ~1.7
$\frac{1}{70}$	0.5 ~1.8	25 ~44	34 ~61	7.9 ~15.5	0.30 ~0.53	0.16 ~0.43	5.4 ~7.2	1.0 ~1.8
$\frac{1}{80}$	1.0 ~1.8	28 ~35	43 ~53	8.7 ~17.2	0.32 ~0.40	0.22 ~0.36	5.7 ~6.2	1.0 ~1.9
$\frac{1}{90}$	1.0 ~2.3	21 ~28	53 ~71	7.6 ~16.0	0.37 ~0.48	0.20 ~0.43	6.0 ~6.9	0.8 ~1.7
$\frac{1}{100}$	1.4 ~2.4	18 ~23	66 ~79	7.5 ~16.9	0.40 ~0.50	0.22 ~0.37	6.3 ~7.0	0.8 ~1.7

ては、敷均し平坦河床を初期河床とした各段階流量の一定量通水実験を行って、増水実験の各段階の河床形状と大差ないことを確めた。以上の方法で行われた52ケースの実験水理諸量を表-1に示す。河床形態の判断は、通水中の観察と止水排水後に撮られた写真によって行われた。52ケース中、比較的明確な交互砂州が発生した11の実験条件については、別途、30分の通水実験を行い（後に掲載の表-2）、左右砂州先端の走時曲線から砂州長、波速を求め、横断方向に1 cm間隔で測定できる河床形状測定器で波高を測定した。

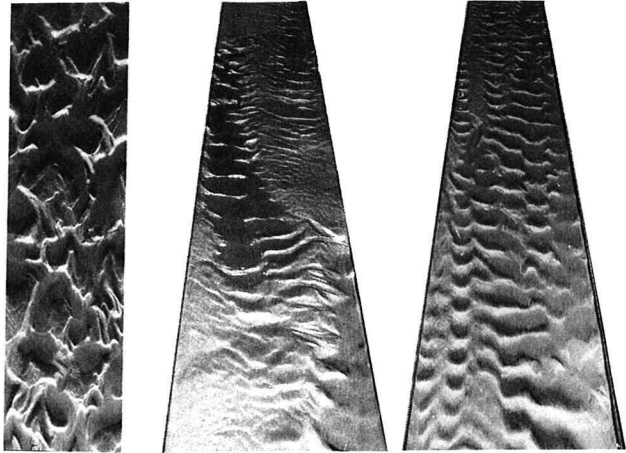


写真-1 写真-2 写真-3
 （上が上流，1：I=1/70, Q=0.7 l/s，2：I=1/70, Q=1.4 l/s，
 3：I=1/70, Q=1.2 l/sの実験条件）

3. 掃流・浮流砂混在条件下の河床形態

図-1は、篠原・椿³⁾による流砂形式の判定図である。 τ_{xe} は、 $\tau_{xe} = (\phi / \phi_0) \tau_*$

（ここで、 $\phi = u_m / u_*$ 、 $\phi_0 = 6.0 + 5.75 \log(h/d_{65})$ ）から求められる。本実験は、掃流・浮流砂混在条件下の実験であることが判る。掃流・浮流砂混在域の河床形態は、図-1の粒径dに対する境界値 τ_{*1} と τ_{*2} について、 $\tau_{*1,2} = h I / (s d)$ （ここで、s：砂粒の水中比重(1.65)）から、Garde・Raju⁴⁾の小規模河床形態領域区分図に表示でき（図-2）、予測できる。同じ領域区分図に実験結果をプロットしたのが図-3である。予測通り遷移領域と反砂堆域に表示される。凡例の河床波共存(○)とは写真-3のように小規模河床波が支配的河床に砂州前縁が現れ始めるが、直ぐに消滅してまた発生するという状況を呈して、砂州が発生したとは認められない河床状態を意味する。写真-1の3次元的河床波及び砂州上の河床波など本実験の小規模河床波は、水路のガラス張り側壁を通しての観察では水面波と河床波は同位相を呈しており、また、Fr数 ≥ 0.8 から、反砂堆と言える。前述の深見の実験2例(□)のうち1例に反砂堆の存在を観察している。図-3には、掃流砂の卓越した河床波の共存しない交互砂州データもプロットしてあるが、全て遷移領域に入る。魚生川⁵⁾の次元解析によって得られた交互砂州形成領域式 $h/B \leq 125(u_{*c}/u_*)^4 I$ を、 $\tau_* = u_*^2 / (sgd)$ 、 $\tau_{*c} = 0.05$ を考慮して変形すると、 $I/s \leq 0.513(B/h)(h/d)^{-2}$ となる。急勾配水路実験による交互砂州形成のB/hの上限値40を代入して図示したのが図-3の破線である。この境界線とGarde・Rajuの区分から交互砂州と共存する河床波の相違を概ね明らかにすることができる。

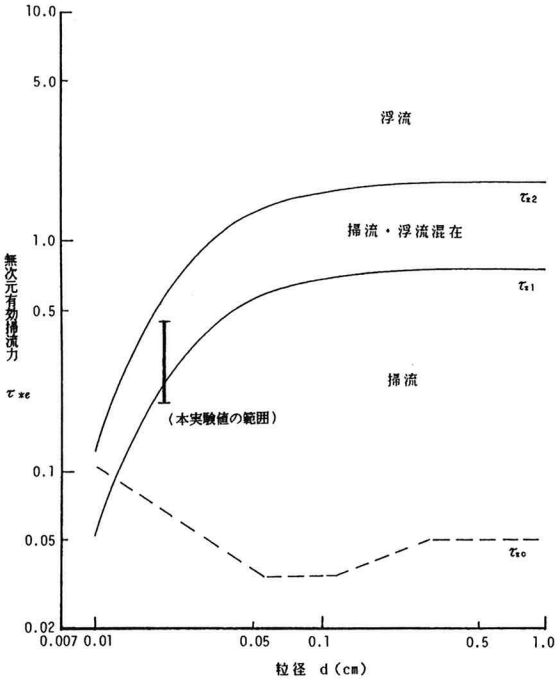


図-1 流砂形式の判定図

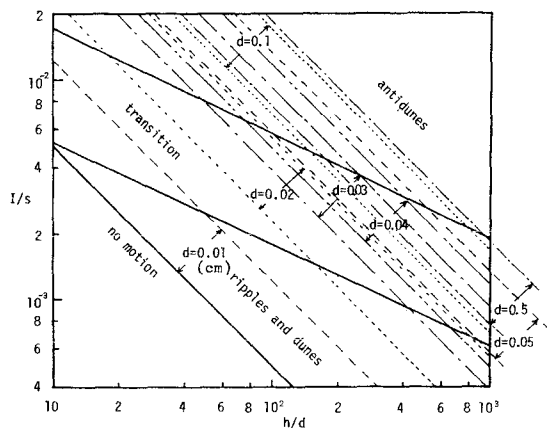


図-2 Garde・Rajuの区分図による混在域の河床形態

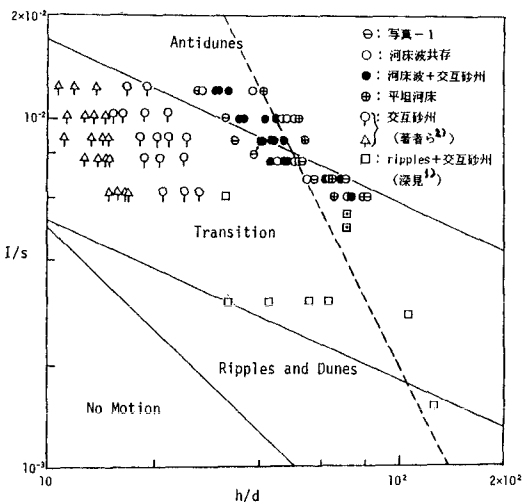


図-3 Garde・Rajuの区分図による検討

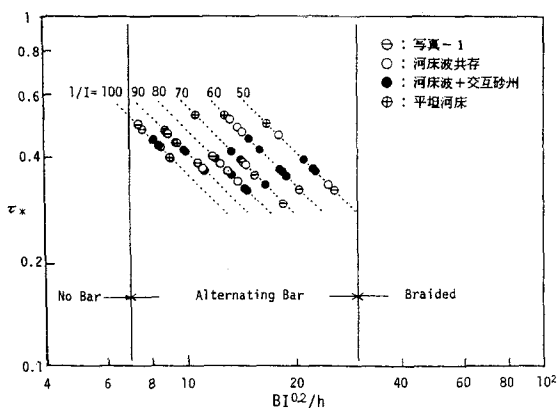


図-4 黒木・岸の区分図による検討

黒木・岸⁶⁾の中規模河床形態領域区分では、図-4のように全てが交互砂州領域に入り、河床波と平坦河床を区別できない。

3次元的反砂堆と見なした河床波の1ケースについて、反砂堆の合体による斜め直線状に連なる河床の盛り上がりの存在を調べるため、2時間通水後の河床形状を横断方向に1cm間隔の29測線を取り、縦断方向に2cm間隔で測定した。測定区間は交互砂州が発生した場合に比較的安定した砂州の出現する下流端からの距離5.0mから6.5mまでの区間とした。測定結果を仮想基準面からの5mm間隔の等高線で表したのが図-5(a)である。(b)図は5断面移動平均値と同様に図示した。(a)(b)両図とも反砂堆の合体による斜め直線状に連なる河床の盛り上がりを示さなく、短対角州のような形状は認められない。したがって、掃流・浮流砂混在条件下の交互砂州形成領域については更に検討する必要がある。

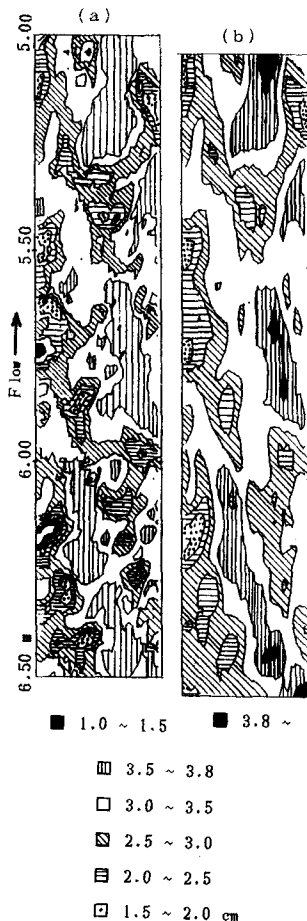
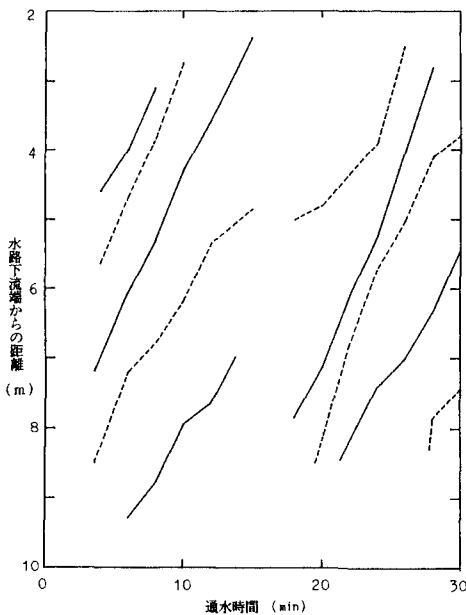


図-5 反砂堆河床形状図
($I=1/70, Q=0.7 \text{ l/s}$ の条件)

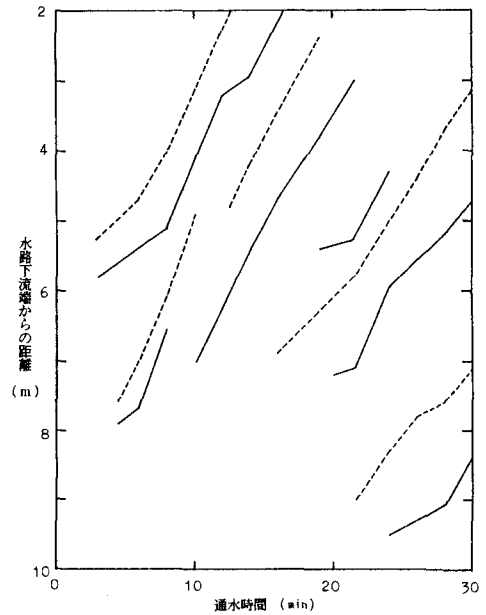
4. 交互砂州の特性

前述したように、段階的増水実験で交互砂州の発生した条件中、表-2の11ケースについて、敷き均し平坦河床を初期河床面とする30分通水実験を行った。左右砂州先端の位置を2、3分間隔で追跡して得られた走時曲線の代表例を図-6に示す。図の左右砂州先端追跡線の縦軸に平行な間隔が砂州長で、傾きが波速を表す。Run5では通水後3分で砂州が発生し、下流端寄りの砂州長の極端に短い砂州は4分後に消滅するものの上流側砂州はほぼ一様な波速で移動し、通水後15分で消滅している。2、3分後に再び発生した砂州は砂州長、波速とも一様でないことが分かる。一方、Run22では通水20分後の再発生砂州の方が初期に発生した砂州より一様となる。このような砂州の発生・消滅の繰返しは全ケースで起り、特に勾配1/80以上のケースで顕著であった。Fr数が1.8前後と大きく、流れの不安定性が強く係わっていると考えられる。表-2の砂州長と波速の測定値は走時曲線図ではほぼ一様な部分の平均値で、波高は横断面の高低差の同一砂州における最大値として、止水排水後に測定した平均値である。

著者らは、同一砂州における横断面の高低差の平均値 H_m は、発達過程にある砂州、平衡に達した安定な砂州にかかわらず、波高 H の $2/3$ となり、変形砂州は $H_m < (2/3)H$ となることで区別できることを示した⁷⁾(図-7)。 $I=1/70$ のケースについてこの関係を示したのが図-8である。 $H_m > (2/3)H$ にプロットされた砂州は、先端部下流の洗掘深が小さく、このため各横断面の高低差に大きな相違がない形状を呈していることが認められた。これは本実験で形成された砂州の大部分に共通した特性である。



Run 5



Run 22

図-6 走時曲線図 (——— : 右砂州先端、 - - - - - : 左砂州先端)

表-2 掃流・浮流砂混在条件下の交互砂州特性諸量

Run No.	勾配 I	流量 $Q (l/s)$	平均水深 $h (cm)$	砂州長 $l (cm)$	波高 $H (cm)$	波速 $C (cm/s)$
3	1/50	0.8	0.58	154	2.7	0.94
5	1/50	1.0	0.66	165	2.4	0.88
12	1/60	1.1	0.80	161	2.3	0.75
13	1/60	1.2	0.82	133	2.7	0.76
22	1/70	1.2	0.84	131	2.4	0.58
24	1/70	1.4	0.94	199	2.2	0.62
29	1/80	1.3	0.86	190	2.3	0.37
31	1/80	1.5	1.03	164	2.4	0.42
40	1/90	1.8	1.21	126	2.2	0.53
48	1/100	1.8	1.31	103	2.6	0.35
49	1/100	2.0	1.29	129	2.4	0.44

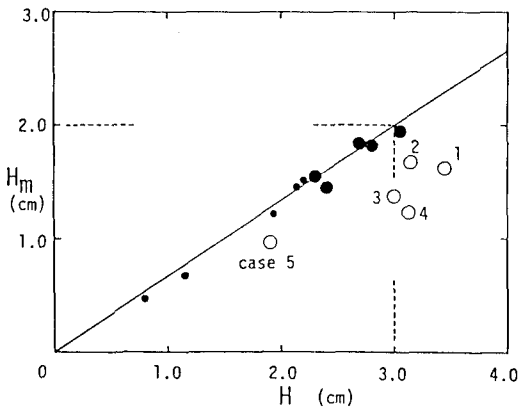


図-7 変形砂州の区別⁷⁾
(○: 変形砂州)

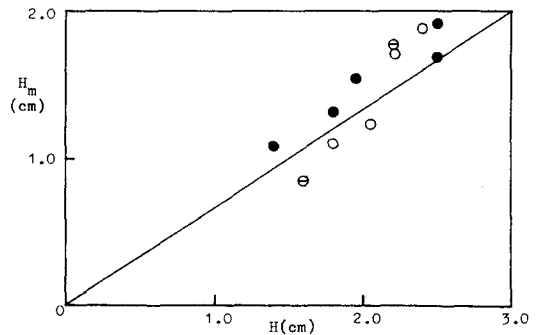


図-8 H_m と H の関係
(○: Run 22, ⊖: Run 24, ●: $Q=1.3 l/s$)

5. おわりに

本研究で明らかになった事項は、以下のとおりである。

- (1) 数均し平坦河床に水深が $B/h=50\sim60$ となる流量を通水すると、10～15分後に3次元的反砂堆が水路全域に発生する。
- (2) 流砂形式が掃流・浮流砂混在域の河床波はGarde・Rajuの領域区分図から予測できる。
- (3) 掃流・浮流砂混在条件下で形成される交互砂州には反砂堆が共存する。
- (4) 掃流・浮流砂混在条件下の交互砂州は発生、消滅を繰り返す。

謝辞 実験に協力された昭和62年度卒研生 米元光明、渡辺尚宏の両氏（ともに現北海道開発局）並びに昭和63年度卒研生諸君に感謝致します。

参考文献

- 1) 深見親雄：砂礫堆と砂漣・砂堆の共存 —— 小規模河床形態を含む中規模河床形態の領域区分 —— 土木技術資料, 21-10, 1979.
- 2) 福岡捷二・内島邦秀・山坂昌成・早川博：交互砂州上の流砂量分布, 第27回水理講演会論文集, 1983.
- 3) Shinohara, K. and T. Tsubaki: On the Characteristics of Sand Waves Formed upon the Beds of the Open Channels and Rivers, Reports of Research Institute for Applied Mechanics, VII-25, 1959.
- 4) Garde, R. J. and K. G. Ranga Raju: Regime Criteria for Alluvial Streams, Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of ASCE, 89-HY6, 1963.
- 5) 早川登：実験水路における交互砂州（砂れき堆）の形成条件, 土木学会論文報告集, 207, 1972.
- 6) 黒木幹男・岸力：中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究, 土木学会論文報告集, 342, 1984.
- 7) 内島邦秀・早川博：流量が減少した場合の交互砂州の変形特性, 第31回水理講演会論文集, 1987.