

掃流・浮流砂混在条件下の 河床波と抵抗に関する実験的研究

Experimental Study on the Sand Waves and Flow Resistance
under Coexistence of Bed and Suspended Loads

内島 邦秀*

By Kunihide UCHIJIMA

Laboratory experiment is conducted using uniform sand of mean diameter 0.21 mm under the condition that bed and suspended loads coexist. It is ascertained by the observation and the Garde-Raju regime criterion that sand waves produced on this condition are three dimensional antidunes and alternate bars with two dimensional antidunes.

Characteristics and flow resistance of these bed shapes are discussed on the basis of the results of experiments.

Keywords : alternate bars, antidunes, flow resistance,
upper regime flat bed

1. はじめに

従来の中規模河床波及び小規模3次元河床波の形成実験の多くは、掃流砂が卓越する条件のもとで行われてきた。実際河川の洪水時では、掃流砂と浮流砂が混在すること、また、中規模河床波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、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の特性とその抵抗について検討することである。

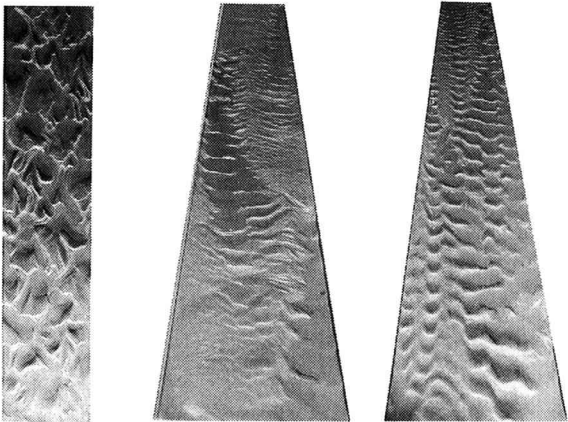
2. 実験装置と実験方法

豊浦標準砂(平均粒径 $d=0.21\text{mm}$ 、比重2.65)を幅 $B=30\text{cm}$ 、長さ 14m の側面ガラス張り直線水路に厚さ 6cm で敷き均し、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節堰で適宜に水位を調節して等流状態を維持した。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て所定の流量に対する平均水深 h を求めた。敷き均し平坦河床への最初の通水は、各勾配で水路幅・水深比 B/h

* 正会員 工修 北見工業大学助教授 工学部土木工学科

(〒090 北海道北見市公園町165)

＝50～60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、数分間は側壁に平行な筋状のStanding Wavesが所どころに現れ、その後、下流側から3次元河床波が発生し、10～15分で写真－1のような河床波が水路全面に形成された。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 $B/h = 45 \sim 55$ 、1/80以下では20～30程度になった。そこで、本実験では0.1～0.21/sの流量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、勾配1/70以上で10分前後、1/80以下で20分前後とした。数ケースについて敷き均し平坦河床を初期河床とした各段階流量の一定流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不いことを検証した。以上の方法で行われた52ケースの実験条件と水理諸



写真－1 写真－2 写真－3
 上が上流で、写真－1, 2, 3の実験条件は勾配1/70で、それぞれ流量 $Q = 0.7, 1.4, 1.1 \text{ l/sec}$ である。

量を表－1に示す。勾配1/70、1/90については段階的減水実験も行い、洪水時を模擬して抵抗特性を調べた。また、交互砂州が形成されたケースから代表的2例を選び、30分通水実験で砂州を追跡して得られた走時曲線図で砂州の特性を調べた。河床波の判定は、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。

3. 掃流・浮流砂混在条件下の河床波

3・1 流砂形式の判定

図－1は、篠原・椿²⁾による流砂形式の判定図である。無次元有効掃流力 τ_{xe} は、(2)と(3)式を考慮して(1)式から求められる。

$$\tau_{xe} = (\phi / \phi_0) \tau_* \quad \dots (1) \quad \phi = u_m / u_*, \quad \phi_0 = 6.0 + 5.75 \log(h/d_{es}) \quad \dots (2)$$

$$\tau_* = h I / (s d) \quad \dots (3)$$

表－1 実験条件と水理諸量

勾配 I	流量 $Q(l/s)$	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_{xe}	砂粒 R_{ex} 数 R_{ex}	F_r 数
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
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
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
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
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
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

ここで、 u_m ：平均流速、 u_* ：摩擦速度、 d_{65} ：65%粒径、 τ_* ：無次元掃流力、 I ：勾配、 s ：砂粒の水中比重である。図-1の破線は岩垣公式による無次元限界掃流力 τ_{xc} を示す。同図に表示した本実験値の範囲から、本実験の流砂形式は掃流・浮流砂混在形式であることが判る。

3・2 河床波の予測と判定

図-1の粒径 d に対する境界値 τ_{x1} と τ_{x2} について、(3)式から d をパラメーターとして図-2のように、Garde・Raju³⁾の領域区分図に表示でき、掃流・浮流砂混在域の河床波を予測できる。写真-1の3次元河床波及び写真-2の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。図-2と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。予測及び観測通り遷移領域と反砂堆の領域に表示される。凡例の河床波共存(○)とは、写真-3のように小規模河床波(反砂堆)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断定できない河床状態を意味する。前述の深見¹⁾の実験2例(□)のうち1例に反砂堆の存在を観測している。図-3には、掃流砂の卓越した小規模河床波の共存しない交互砂州データ⁴⁾もプロットしたが、全て遷移領域にはいる。鮎川⁵⁾の中規模河床波形成領域式、 $h/B \leq 125 (u_{xc}/u_*)^4 I \cdots (4)$ を、 $\tau_* = u_*^2/(sgd)$ 、 $\tau_{xc} = 0.05$ を考慮して変形すると、 $I/s \leq 0.513 (B/h) (h/d)^{-2} \cdots (5)$ となる。(5)式に急勾配水路実験による交互砂州形成⁶⁾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小規模河床波の相違を概ね明らかにすることができる。本実験では、勾配一定のもとで流量を増大して行くと、3次元流下反砂堆、河床波共

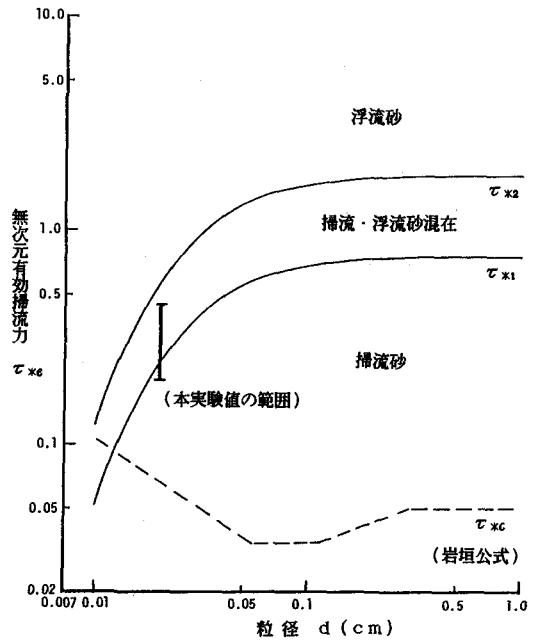


図-1 流砂形式の判定図

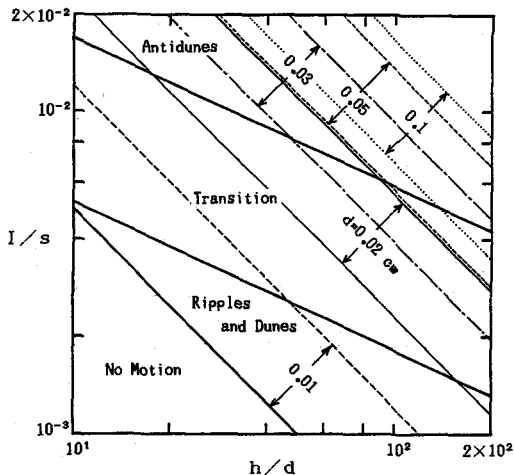


図-2 Garde・Rajuの区分図による河床波の予測

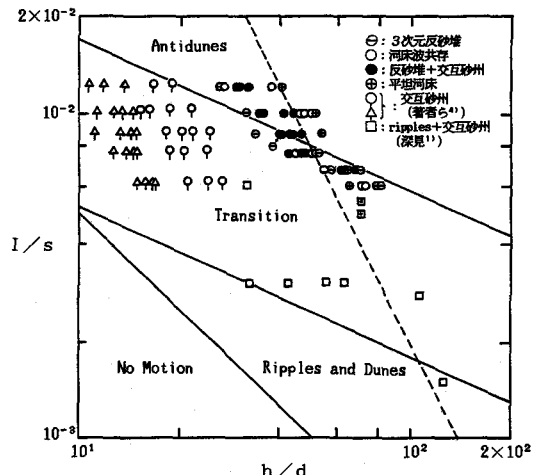


図-3 Garde・Rajuの区分図による河床波の判定

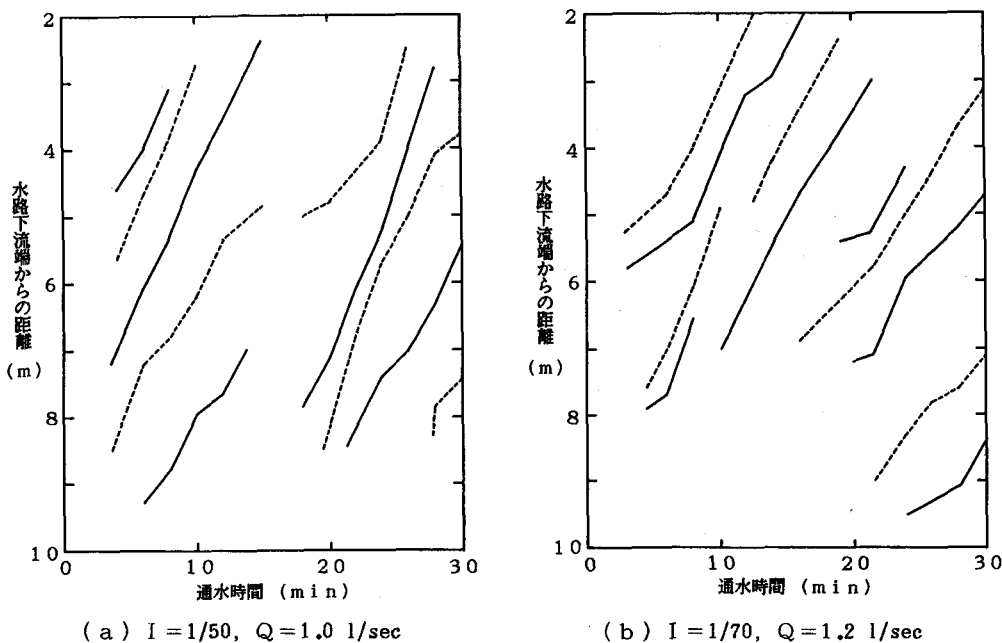


図-4 交互砂州の走時曲線図 (——: 右砂州先端、-----: 左砂州先端)

存(前述)、反砂堆を伴う交互砂州、平坦河床(いわゆる upper regime flat bed⁷⁾)に河床形が変化した。試みに、勾配1/70で平坦河床時より大きな流量を通水したところ、2次元遡上反砂堆が発生した。

3・3 交互砂州の特性

反砂堆を伴う交互砂州が発生した条件のうち、11ケースについて数き均し平坦河床を初期河床面とする30分間通水実験を行った。左右砂州先端の位置を2、3分間隔で追跡して得た走時曲線の代表例を図-4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、傾きが砂州移動速度を表す。(a)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樣な速度で移動し、通水後15分で消滅している。2、3分後に再発生した砂州は砂州長、移動速度とも一樣でないことが分かる。一方、(b)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樣となる。このような砂州の発生、消滅は全ケースで起り、特に勾配1/80以上の場合に顕著であった。

砂州横断形状は、先端部下流の洗掘深の発達が弱く、各河床横断面の最大高低差に大きな相違がない形状となる。これは本実験で形成された砂州に共通した特徴である。

4. 河床波の流水抵抗

勾配1/70と1/90については段階的減水実験も行い、河床波の変遷に伴う抵抗の変化を捉えることによって、洪水時の抵抗特性を説明できるかどうかを検討した。図-5に勾配1/70の場合の流量の変化とこれに対応して測定された水深 h 、砂州長 l 、砂州波高 H の変化を示した。先述したように通水時間は平衡な河床を得るのに十分であり、流れの非定常性は無視できる。1/70では減水期に形成された交互砂州が存続し、通水流量1.2 l/sec未満で浮州が出現したため、この時点で通水を中止した。

図-6は、(2)式の流速係数 ϕ と平坦河床の流速係数 ϕ_0 の比をとり、これと流量との関係で抵抗の変化を見ようとしたものである。図中の実線と点線はそれぞれ増水期と減水期で交互砂州が発生した実験値の描点を連ねている。交互砂州形成時は $\phi/\phi_0 = 0.80 \sim 1.0$ で抵抗は小さい。大きく見ても交互砂州の形状抵抗は平坦河床のそれより20%増、即ち、全抵抗の20%を占める程度である。この結果は、池田⁸⁾の検討結

果と符合する。3次元流下反砂堆形成時は $\phi/\phi_0 = 0.5 \sim 0.6$ ($\phi = 8 \sim 10$) であって抵抗は大きい。このことは、特に3次元反砂堆で顕著であったが、流下反砂堆が砂堆と同様に流水の剥離現象を伴うからである⁹⁾。勾配1/90では流量が減少するに従い抵抗が大きくなるが増水期よりは小さく、最初の流量で同程度となりループ性を示している。減水期の通水時間は増水期と同じであるが、減水期は掃流力の低下によって直前の流量で形成された河床波の履歴を伴う。このため同じ流量でも増水期と減水期とは異なる河床波が発生する。1.4 l/sec通水時の河床波に注目すると、増水期が3次元反砂堆で、減水期が河床波共存であった。即ち、減水期は交互砂州の履歴の効果を強く受けて、抵抗は小さくなる。石川¹⁰⁾は利根川・川俣地点の観測値を解析して、低水路の流れの抵抗は減水時で小となる結果を得ている。実際河川では、洪水の伝播に伴って上流からの土砂供給によって河床材料が粗な砂礫で置換される場合も考えられ、この場合抵抗が大となり得る。当然、本実験成果は基礎的現象の一面を示したものであり、相似性についての検討が必要である。

5. おわりに

移動床材料として豊浦標準砂を用い、比較的急勾配の条件のもとで、これまでに、砂州を対象とした実験としてはあまり例を見ない掃流・浮流砂混在条件下の実験によって、以下の事項が明らかになった。

(1) 掃流・浮流砂混在域(図-1)の小規模河床波はGarde・Rajuの領域区分図から予測できる。本実験では流下反砂堆で予測通りであった。

(2) 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し、砂州は発生、消滅を繰返す。

(3) 河床が平衡に達する時間間隔での段階的増水実験では、勾配一定のもとで、3次元反砂堆→河床波共存(反砂堆の支配的河床に不安定な砂州前縁を伴う)→反砂堆を伴う交互砂州→平坦河床(upper regime flat bed)の順で河床は変遷する。さらに流量を増すと、2次元遡上反砂堆が発生した。

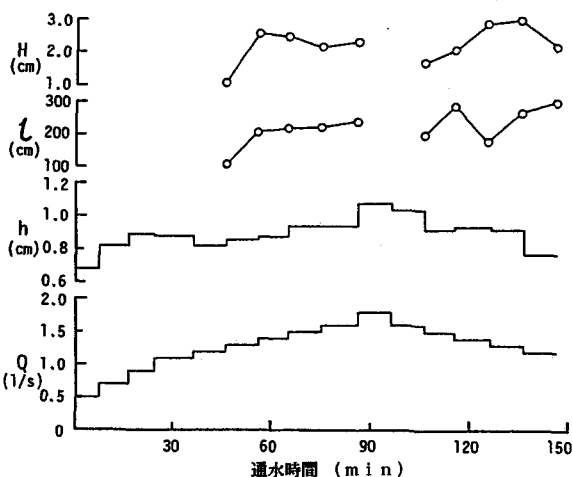


図-5 段階的増水・減水実験における水深 h 、砂州長 l 、波高 H の変化 ($I = 1/70$)

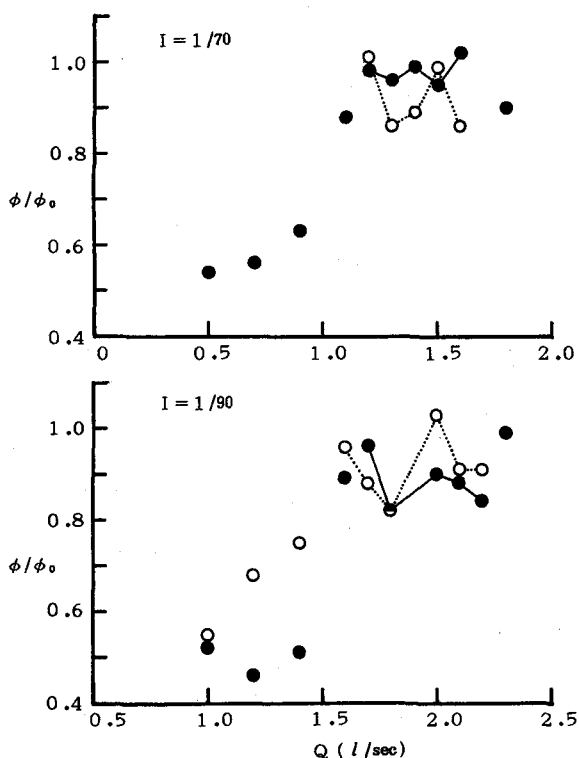


図-6 流速係数の変化 (●: 増水期、○: 減水期)

(4)段階的増水・減水実験によって河床波抵抗を調べた結果、交互砂州の形状抵抗は全抵抗の20%程度で、他の河床波については、減水期は交互砂州河床の履歴効果で増水期と異なる河床形となり、減水期の方が抵抗は小さくなる。

謝辞

本研究の遂行にあたって、北見工業大学工学部 早川 博助手 に支援をいただいた。また、学生であった米元光明(北海道開発局)・渡辺尚宏(北海道開発局)、大田雅之(地崎工業)・金谷文昭(東洋建設)・本間誠(竹中土木)の諸氏は、鋭意実験に協力された。以上の方々に心からお礼申し上げる。

参考文献

- 1) 深見親雄：砂礫堆と砂渾・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、第21巻、第10号、pp.27-32、1979。
- 2) 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, Vol. VII, No. 25, pp. 15-45, 1959。
- 3) Garde, R. and K. G. Ranga Raju: Regime Criteria for Alluvial Streams, Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of ASCE, Vol. 89, No. HY6, pp. 153-164, 1963。
- 4) 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、pp. 697-702, 1983。
- 5) 銚川 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、第207号、pp. 47-50, 1972。
- 6) 泉岩男・池谷浩・伊巻幹雄：急勾配水路における砂礫堆について、新砂防、第109号、pp. 9-19, 1978。
- 7) 中川博次・辻本哲郎：移動床流れの水理、土木学会編新体系土木工学23、技報堂出版、1986。
- 8) 池田駿介：単列交互砂州の波長と波高、第27回水理講演会論文集、pp. 689-695, 1983。
- 9) 福岡捷二・奥津一夫・山坂昌成：急勾配移動床流れにおける河床波の形状、伝播特性、土木学会論文報告集、第323号、pp. 77-89, 1982。
- 10) 石川忠晴：流砂の水理学(吉川秀夫編)、第6章、丸善、pp. 191-220, 1985。