

砂床河川における礫の流送に関する 大型水路実験

Large Flume Experiment on Gravel Particle Entrainment in Sandy Bed Rivers

小玉 芳敬*・S. シャロニ**・池田 宏*・飯島 英夫*

Yoshinori KODAMA, Shlomo SHARONI, Hiroshi IKEDA and Hideo IIJIMA

I はじめに

平野を流れる河川を上流から下流へと観察すると、しばしば極めて短い区間で礫床から砂床へと河相が急変する (Yatsu, 1955; 小玉・井口, 1986 など)。礫床区間の最下流部にある握り拳大の礫は、長年その場に停滞して、ほとんど運搬されていないのであろうか? それとも下流の砂床区間を流下しているのでしょうか?

実際河川における礫の移動を捉えるために、トレーサー礫を用いた研究が盛んに行われてきた。従来から広く用いられてきた着色礫による追跡 (例えば高山, 1965) では、河床堆積物中にトレーサー礫が埋まると追跡が不可能となり、回収率は極端に悪い。そのため最近では鉄塊や磁石を礫に埋め込んで、金属探知機や磁力感知器で追跡する手法 (Ergenzinger and Conrady, 1982; Ergenzinger and Custer, 1983; Hassan *et al.*, 1984 など) や、発信機を礫に埋め込んで受信機で追跡する手法 (Ergenzinger *et al.*, 1989; Schmidt and Ergenzinger, 1992 など) などが用いられるようになり、実際河川で極めて高い回収率 (90~100%) を示し、その有効性が既に確かめられている (Hassan and Church, 1991, 1992 など)。なお礫の追跡手法に関しては、Bunte and Ergenzinger (1989) に詳しくまとめられている。

ところが礫の流下様式を捉える従来の研究は、ほとんどが礫床河川を対象としており、礫床から砂床への急変現象や砂床上での礫の流送特性を扱った研究は見当たらない。共著者のシャロニはイスラエルのワジ河川 (Shikma 川) で磁石を礫に埋め込んだ手法を用いて、礫床から砂床への河床材料の急変の原因を探るための予察的な研究を行った。つまり、礫床から砂床への急変が生じた下流側の砂床 (河床勾配: 約1/500) で洪水前に河床表面にトレーサー礫を並べ、4~5日にわたる洪水後 (最大流量: $3 \sim 23 \text{ m}^3/\text{sec}$) に、毎回それらの礫を追跡調査した。その結果、各出水で多くの礫が200m以内の距離流下し、なかには1 km以上の距離流下した礫も確認された。しかも流下した礫の多くは砂床表面から数10cm以内の深さに埋もれていたため、河床表面を見る限りでは、あたかも礫は流送されていないかの如くであった。つまりこの事実は、礫床から砂床への急変現象が、砂の選択的な運搬よりもむしろ、礫の流下様式の急変と密接に関わっていることを示唆している。

本研究の目的は、砂床上を出水時に流下する礫の流下様式を、大型水路を用いた実験で明らかにすることである。本研究では特に河床形との関わりに注目して調べた。

*筑波大学水理実験センター **筑波大学大学院地球科学研究科 (現 ヘブライ大学 (イスラエル)・大学院)

II 実験方法

実験に使用した筑波大学水理実験センターの大型水路(幅4 m, 深さ2 m, 長さ160m)は鋼製で, 水路勾配は1/100と固定である。地点の表記には, 水路起点からの流下距離X mと, 左岸側壁からの距離Y mを用いる。第1図に示した粒度組成の砂を河床材料として水路床に敷いた。つまり, 中央粒径0.4mmの材料で中砂が約55%を占めるものである。

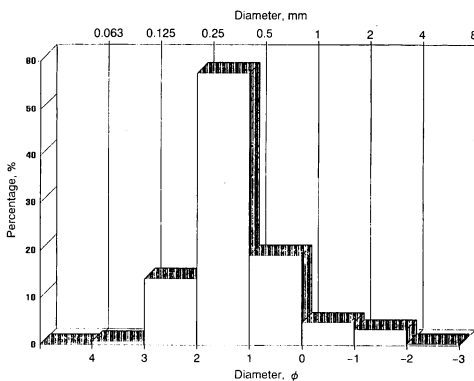
1) 試料礫とその追跡手法

砂床上での礫の流下様式を捉える試料としては, 渡良瀬川下流(川崎橋付近)の現河床から採取した安山岩の円礫を用いた。粒径 $-4.5 \sim -7.0\phi$ (23~128mm)のもので, 0.5 ϕ 間隔で5階級を準備した。試料礫に通し番号(No.)をつけ, 個々の試料礫が認識できるようにした。第1表にそれぞれの長径(a)・中径(b)・短径(c)と乾燥重量を示した。多くの試料礫の b/a と c/b の値が0.67以上であり, つまり試料礫の多くはZing(1935)の形態区分で球状に属するものである。

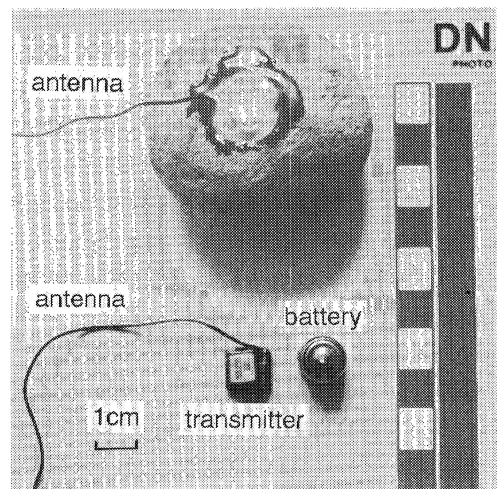
礫を追跡する手法として本研究では2種類用いた。試料礫に超小型発信機を埋設して受信機で追跡する手法と, 釣り糸の先に浮きを付けたものを試料礫に結び付ける手法である。前者はアルキテック(有)のテレマウスとソニー ICF-PRO70を用いたもので, 詳細に関しては飯島(1992)や飯島・シャロニ(1993)に記載されている。超小型発信機を礫に埋設するた

めに振動ドリルを用いて径14mm, 深さ25~30mmの穴を穿孔せねばならない。そのために試料礫の大きさは -5.0ϕ より大きな礫に制限された(第2図)。また安山岩は粘っこい岩質のために穴明け作業に対して比較的割れ難く, この手法に適するものであった。チャートなどの割れ易い岩質の礫にはこの手法は不向きであろう。

$-4.5 \sim -5.0\phi$ の礫については, すべて浮きを用いた手法で追跡した。礫が砂床堆積物中に埋もれても, 停水後浮きは砂床表面に残り, 礫の追跡が可能となる。なお浮きは径10mmと12mmの玉浮きを, 釣り糸は0.8号(0.148mm)を用いた。浮きの径がこれよりも小さいと十分な浮力がなく, しばしば釣り糸ごと砂の中に埋もれてしまい追跡が不可能なことが予備実験からわかった。逆に浮きの径が大きすぎると, 浮力と同時に浮きに作用する流体力のために, 試料礫が運搬され易くなり, 礫の流下様式を捉えるには問題となろう。また釣り糸の長さは, 試料礫が埋もれても浮きが砂床表面に残るに十分な長さで, しかも極力短くした(30~40cm)。さもないと釣り糸同士が互いに絡まり, 試料礫の流下が妨げられるためである。



第1図 実験に用いた砂礫の粒度組成



第2図 発信機を埋設した追跡用試料礫(上)と発信機本体および電池(下)
発信機と電池を合わせた重量は約6 gである。

第1表 追跡用試料礫の一覧

No.	Tag	Weight	Diameter			b/a	c/b	Float	Wb
		g	a	b	c			size	
			mm	mm	mm			mm	g
-4.5~-5.0phi (23~32mm)									
1	F	43	40	31	26	0.78	0.84	12	
2	F	55	45	32	30	0.71	0.94	10	
3	F	40	40	28	27	0.70	0.96	10	
4	F	33	43	30	20	0.70	0.67	12	
5	F	55	50	30	27	0.60	0.90	10	
6	F	24	37	27	18	0.73	0.67	12	
7	F	34	34	30	24	0.88	0.80	12	
8	F	31	35	30	25	0.86	0.83	12	
9	F	30	43	27	21	0.63	0.78	12	
10	F	20	32	28	20	0.88	0.71	12	
11	F	36	35	30	24	0.86	0.80	12	
12	F	21	33	27	20	0.82	0.74	12	
13	F	24	31	29	18	0.94	0.62	12	
14	F	20	30	27	20	0.90	0.74	10	
15	F	41	38	30	24	0.79	0.80	12	
16	F	29	43	28	18	0.65	0.64	12	
17	F	28	39	25	21	0.65	0.84	12	
18	F	36	40	29	20	0.73	0.69	12	
19	F	23	33	23	21	0.70	0.91	12	
20	F	38	36	30	22	0.83	0.73	12	
21	F	33	38	30	23	0.79	0.77	12	
22	F	25	32	25	21	0.78	0.84	12	
23	F	37	33	30	30	0.91	1.00	12	
24	F	27	36	28	20	0.78	0.71	12	
25	F	33	35	29	23	0.83	0.79	12	
-5.0~-5.5phi (32~45mm)									
26	R	114	55	41	34	0.74	0.83		116
27	R	139	64	42	37	0.66	0.88		140
28	R	143	75	42	32	0.56	0.76		147
29	R	113	49	45	40	0.92	0.89		121
30	R	133	60	41	36	0.68	0.88		136
31	R	125	59	42	36	0.71	0.86		131
32	R	112	52	40	37	0.77	0.93		115
33	R	69	44	35	34	0.80	0.97		72
34	R	125	51	45	42	0.88	0.93		129
35	R	112	56	45	38	0.80	0.83		114
36	R	135	48	39	28	0.81	0.72		——
37	R	159	62	44	36	0.70	0.83		161
38	F	51	50	39	18	0.78	0.46	10	
39	F	51	43	33	26	0.77	0.79	12	
40	F	51	43	34	26	0.79	0.76	12	
41	F	34	36	33	22	0.92	0.67	12	
42	F	32	40	34	17	0.85	0.50	12	
43	F	48	44	35	24	0.79	0.69	12	

第1表 つづき

No.	Tag	Weight	Diameter			b/a	c/b	Float size mm	Wb
		g	a	b	c				g
			mm	mm	mm				
—5.5—6.0phi (45~64mm)									
44	R	175	73	47	40	0.64	0.85		179
45	R	315	88	60	51	0.68	0.85		318
46	R	271	82	52	45	0.63	0.87		273
47	R	164	65	60	35	0.92	0.58		165
48	R	142	69	46	35	0.67	0.76		143
49	R	257	72	53	47	0.74	0.89		261
50	R	147	79	45	41	0.57	0.91		149
51	R	202	71	51	45	0.72	0.88		206
52	R	180	65	45	45	0.69	1.00		185
53	R	119	53	50	40	0.94	0.80		123
54	R	360	86	60	59	0.70	0.98		361
55	R	277	73	60	52	0.82	0.87		279
56	R	225	65	54	46	0.83	0.85		228
57	R	271	68	63	45	0.93	0.71		271
58	R	265	82	60	45	0.73	0.75		268
59	R	168	66	55	37	0.83	0.67		172
60	R	247	73	58	45	0.79	0.78		249
61	R	161	62	51	35	0.82	0.69		165
62	R	152	59	47	40	0.80	0.85		155
63	R	101	54	48	33	0.89	0.69		103
64	R	117	53	48	33	0.91	0.69		120
65	R	159	68	49	33	0.72	0.67		164
66	R	133	66	48	31	0.73	0.65		141
67	F	279	85	54	39	0.64	0.72	12	
68	F	265	77	62	45	0.81	0.73	12	
69	F	189	77	54	35	0.70	0.65	12	
70	F	168	79	53	32	0.67	0.60	12	
71	F	182	70	53	42	0.76	0.79	12	
72	F	268	68	54	51	0.79	0.94	12	
73	F	176	65	55	39	0.85	0.71	12	
74	F	262	76	54	50	0.71	0.93	12	
—6.0—6.5phi (64~91mm)									
75	R	328	73	68	47	0.93	0.69		332
76	R	407	88	74	42	0.84	0.57		410
77	F	258	78	65	44	0.84	0.68	12	
78	F	279	73	70	46	0.96	0.66	12	
—6.5—7.0phi (91~128mm)									
79	R	—	—	—	—	—	—		1800
80	R	1745	148	116	80	0.78	0.69		1750
81	R	1269	145	100	82	0.69	0.82		1271
82	F	1430	127	101	86	0.80	0.85	12	

F : Float Tag R : Radio Tag Wb : Weight before installing radio-transmitter

2) 実験条件

大型水路で流量と下流端の堰高を調節することで、砂礫循環方式により2つの対照的な河床形を作り、それぞれのCASEで実験を実施した。つまり、第3図に示した砂礫堆と砂堆の2つの河床形である。それぞれCASE 1, CASE 2と呼称する。CASE 1 (砂礫堆条件) の実験では流量約350ℓ/sec, 下流端の堰高70cmで、またCASE 2 (砂堆条件) では流量約1,000と1,500ℓ/sec, 下流端の堰高115cmで、それぞれ砂礫を循環させた。

3) 実験手順

各CASEの条件で、はじめに数十時間通水し砂礫を循環させた。そして平均河床勾配が上下流でほぼ一定となり、平均流出砂礫量が安定した動的平衡状態を作りだし停水した。これを初期河床として、試料礫を水路上流側の砂床上にランダムに置き、その平面位置を記録した。つまり、CASE 1では水路上流から15~80mにかけての広い範囲に試料礫を配した。1つの砂礫堆全体に礫を配置するためである。一方CASE 2では、約50~80m区間に試料礫を配した。砂堆の平均波長は3m前後であり、約10波長にわたりまんべんなく試料礫を置いた。この状態からそれぞれのCASEの実験を始めた。

礫の移動や河床形の移動を捉えるために、実験は断続的な通水で行なった。各通水をRUNと呼ぶ。CASE 1では、20分間の通水実験を5RUN、さらに1時間を3RUN、その途中に10分の実験を1RUN挟んで、計9RUN行なった。これらのRUNをB 1

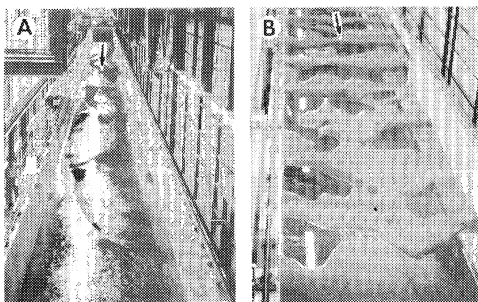
~B 9と呼称する。Bは、BAR (砂礫堆) の頭文字に当たる。CASE 2では20分間の実験を1RUN、約2時間を2RUN、4時間15分を1RUN、さらに流量を増して2時間30分と2時間10分の2RUN、計6RUN行なった。同様にこれらDUNE (砂堆) のRUNをD 1~D 6と呼ぶ。

各RUNの通水中には天井走行電車を使い、随時、表面流速を浮子法により計測し、同時にビデオカメラで流況を撮影した。表面流速は、水路上流端で投下した浮子が20mごとと流下するのに要する時間を水路全体について計測し、それらの平均値から算出した。水位検出筒の水位は一定時間ごとにデータローガに記録され、これを基に水面勾配の平均値を算出した。また流出砂礫量は大型水路の砂礫計量装置で連続的に計測した。水路下流端から流出した試料礫は、ナイロン製の網 (ゴルフ練習用ネット) で捕捉され、試料礫の番号と流出時刻が記録された。

CASE 1では通水中の水深が浅いために、砂礫堆前縁部の前進や転動する試料礫の様子を観察できた。そこでB 6~B 9では実験中、前進する砂礫堆前縁の位置を随時記録し、同時に砂面形を用いて定点 ($X=90\text{m}$, $Y=1.5\text{m}$) で砂面高の変動を、30秒おき (B 6~B 8) と60秒おき (B 9) に計測した。CASE 2では水深が大きく砂堆の前進や試料礫の流下を直接観察することはできなかった。そこでD 3, D 4で砂面計を用いて定点 ($X=90\text{m}$, $Y=2.0\text{m}$) で砂面高変動を計測し、砂堆の流下を捉えた。計測は80秒おき (D 3) と160秒おき (D 4) に実施した。

停水後、河床の平面写真を撮影して、CASE 1では同時に河床形の平面図をスケッチした。またCASE 1のB 1, B 2, B 9終了後と、CASE 2のD 1開始前とD 4, D 5終了後にそれぞれ河床縦断を水路中心線に沿い砂面計を用いて約30~80cmおきに計測した。

試料礫の追跡は、水路内を歩き、まず肉眼で確認される礫の平面位置を記録した。次に河床表面にある玉浮きを頼りに、また受信機を使い、砂に埋もれた礫の平面位置を探索し、それぞれ掘り出して埋没深度を求めた。これらの礫は、引き続きRUNに備えて同じ位置に埋め戻され、河床表面の攪乱も極力直



第3図 大型水路に形成された2つの対照的な河床形
A: 交互砂礫堆 (bar) B: 砂堆 (dune)
停水後に水路下流側から撮影した写真である。

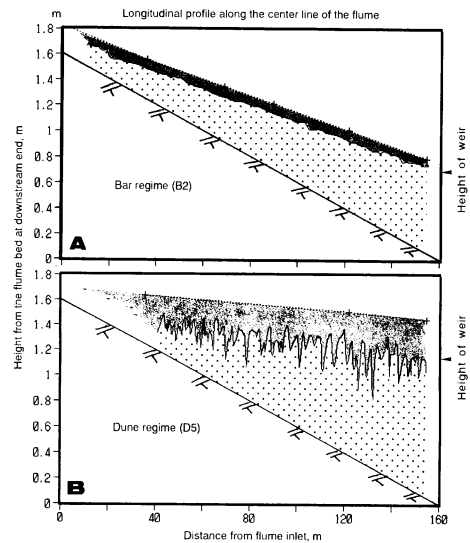
された。以上のことを各 RUN ごとに繰り返し行った。但し、B 7、B 9 と D 1、D 4、D 5 終了後には試料礫の探査を行わなかった。また D 2、D 3 終了後では試料礫の平面位置の追跡だけにとどめ、埋没深度は調べなかった。

なお各 RUN で水路下流端から流出した試料礫の多くを次の RUN 開始前に水路上流部の砂床上に戻し、追跡実験を繰り返した。また CASE 2 の実験前には、CASE 1 の試料礫は全て回収した。

III 実験結果

1) 各 CASE の水理状況

実験中の平均水位を結んだ水面の縦断と、停水後の河床縦断を重ね合わせた一例を各 CASE ごとに第 4 図に示す。これらのデータから水面勾配と平均水深を算出し、さらに平均流出砂礫量・流出砂礫量の変動幅と表面流速の結果を併せ第 2 表にまとめた。各流量ごと (B 1～B 9、D 1～D 4、D 5～D 6) にみると、水面勾配・水深や表面流速の値はほぼ安定していることがわかる。つまり、B 1・B 9 と D



第 4 図 交互砂礫堆 (A) および砂堆 (B) 形成時の河床と平均水位の縦断形
河床縦断形はそれぞれ B2 と D5 終了後、水路の中央線沿いに砂面計を用いて砂面高を計測したデータより描いた。また B2 と D5 通水中の平均水位は、大型水路沿いに約 30m おきに設置された水位検出筒より求めた。

第 2 表 実験条件と結果

Run	Duration	Water discharge	Water surface slope	Mean sediment discharge	Maximum sediment discharge	Minimum sediment discharge	Mean water depth	Water surface velocity	Shear stress	
	T min	Qw l/sec	Sw	Qs g/sec	Qs max g/sec	Qs min g/sec	D cm	Vs cm/sec	τ dyn/cm ²	
CASE 1	B 1	20	330	0.00673	2,200	4,500	130	7.6	141	50.1
	B 2	20	330	0.00699	1,900	4,100	150	7.5	145	51.4
	B 3	20	360	0.00728	2,400	4,700	250	—	142	—
	B 4	20	340	0.00698	2,150	4,100	190	—	153	—
	B 5	20	345	0.00617	2,550	4,050	120	—	—	—
	B 6	60	345	0.00651	2,800	4,700	275	—	137	—
	B 7	10	340	—	2,300	4,900	230	—	140	—
	B 8	60	350	0.00651	3,100	5,500	190	—	139	—
	B 9	60	345	0.00630	2,700	4,300	230	7.5	140	46.3
CASE 2	D 1	20	1,000	0.00200	—	1,860	50	18.6	88	36.5
	D 2	120	1,020	0.00198	430	1,720	65	—	92	—
	D 3	130	1,050	0.00188	455	1,550	55	—	—	—
	D 4	255	1,000	0.00186	433	1,780	35	20.6	88	37.5
	D 5	210	1,570	0.00167	902	2,964	62	30.0	101	49.1
	D 6	190	1,580	0.00163	718	1,916	99	—	103	—

1・D 4 で描いた縦断形は、D 1・D 4 の水面高を除けば第 4 図とほぼ同様であった。CASE 1 は水面勾配：1/150，平均水深：8 cm，表面流速：1.4～1.5m/sec と，小水深・急勾配の流れであった。一方，CASE 2 は水面勾配：1/500～600，水深20～30 cm，表面流速：0.9～1.0m/sec と，大水深・緩勾配の流れであった。平均的な掃流力は，B 1～B 9 と D 5，D 6 がほぼ等しい条件となった。

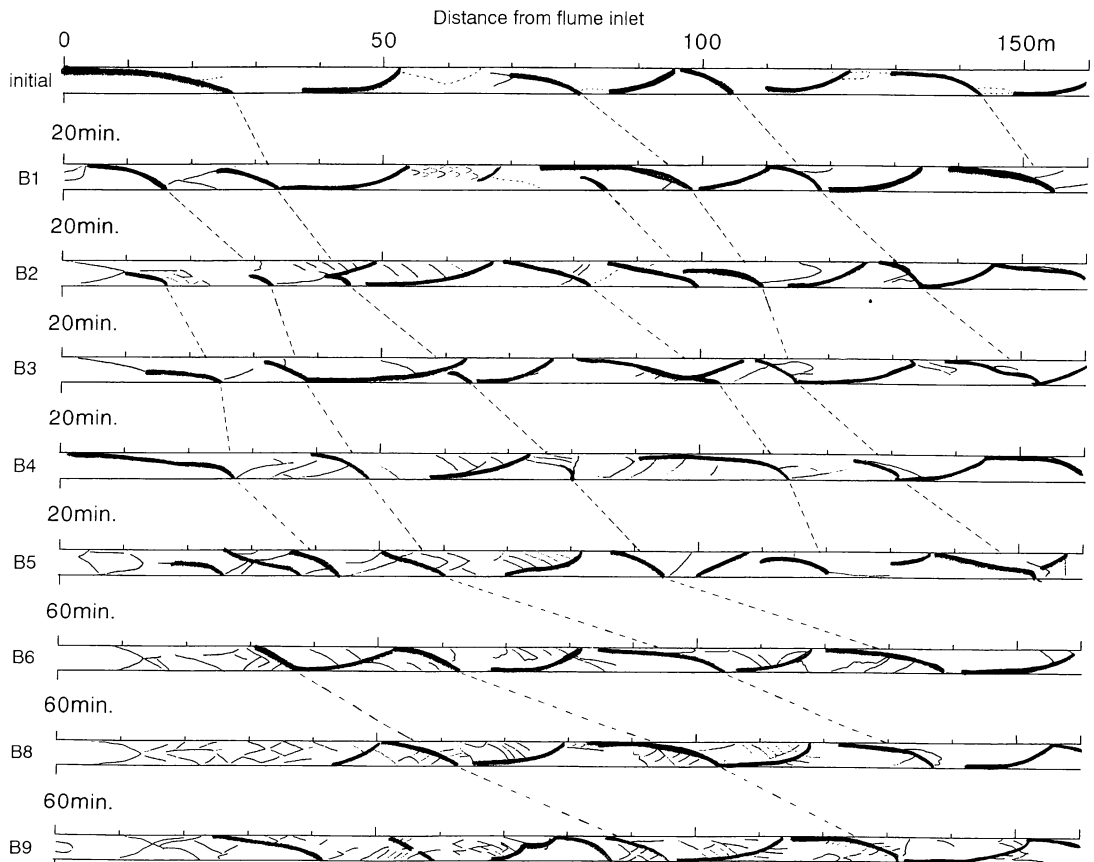
2) 河床形の形状とその移動特性

第 4 図に示されるように河床形の凹凸は，CASE 1 ではほとんどなく平らである。これと対照的に CASE 2 では波長が数 m，比高20-40cm 程の凹凸が河床全面にできている。これがいわゆる砂堆（DUNE）で

ある。

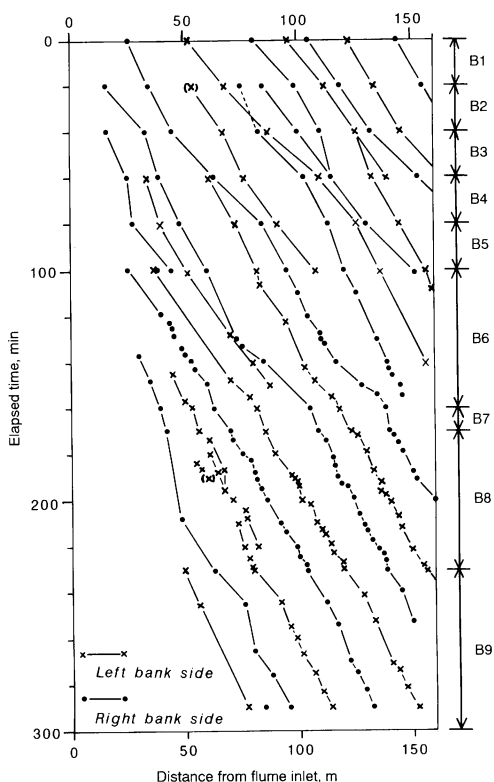
CASE 1 では，各 RUN 後にスケッチした河床の平面図（第 5 図）に示されるように，波長30～40m の交互砂礫堆が形成されていた。砂礫堆前縁部の前進を表す走時曲線（第 6 図）は，砂礫堆が均一な速度で流下していることを示す。また平均流出砂礫量も毎秒2,000-3,000g で安定していた（第 2 表）。

CASE 2 で形成された砂堆は，第 7 図に平面図の一例が示されるように，その峰の走行が3次元的でありトラフの深掘れ位置が散在する（第 8 図）。第 4 図 B で，70-80m 区間と130-140m 区間に極端に河床が低下した地点が認められるが，これはちょうど縦断形の測線上にトラフの深掘れが一致した場合にあ



第 5 図 CASE1 における交互砂礫堆の平面図

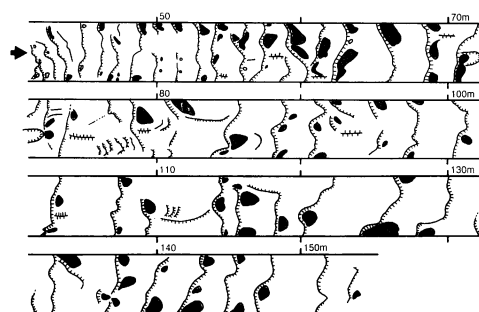
太い実線が砂礫堆の前縁部を示す。平面図は各 RUN 終了後の状態である。各 RUN の通水時間も併せて記入した。また砂礫堆前縁部の前進が追跡できるように，破線で結んである。



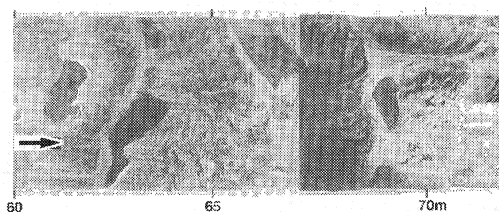
第6図 CASE1における砂礫堆走時曲線

たる。なお CASE 2 では、35m より上流側には水路床が露出していた。これは河床材料の絶対量が足らなかったためであるが、本実験を遂行する上では支障はなかった。

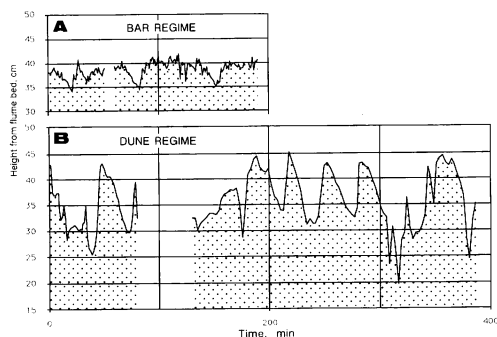
定点における河床高変動を測定することで、河床波の流下様式を捉えた結果を第9図に示す。CASE 1 では、比高5～6cmの峰を持つ交互砂礫堆の前縁が約60分で1波長分前進していることがわかる。これは、第6図の砂礫堆走時曲線からも確認される。さらに砂礫堆の背面に比高1～3cmと低起伏の河床形が幾つも載っており、それらの流下が、河床高変動の小さな凹凸を生み出している。これは、第5図に示された砂礫堆前縁線に斜交する鳥の羽根状の河床形に相当する。一方 CASE 2 では、比高10～15cmの砂堆が約30分で1波長分前進していることがわかる。波長を考慮して河床波の平均的な流下速度を算出すると、砂礫堆の流下速度は毎分約50cm、砂堆は毎分



第7図 CASE 2 の D 3 終了後の砂堆の平面図
平面写真より作成したものである。実線とケバは砂堆の峰と前置斜面を、網はトラフの深掘れ部を示す。なお数字は水路起点からの流下距離を示す。



第8図 Dune の平面写真
D3 停水直後の60～72m 区間の河床平面写真である。水がたまった範囲がトラフの深掘れ部に相当する。



第9図 河床形の流下に伴う、定点での河床高の変動
A：CASE1 (B6～B9) と B：CASE2 (D3～D4) が同一のスケールで示されている。ドット部分は砂の堆積層を示し、線が途切れた部分はデータの欠損箇所である。

第3表 試料礫の追跡結果

RUN # RUN #
before after
No. X : Distance from flume inlet, m
Y : Distance from left wall of the flum, m
Z : Depth from the bed surface, m
T : Gravel output time at the downstream end of the flume

		B 1 before	B 1 after	B 2 before	B 2 after	B 3 before	B 3 after	B 4 before	B 4 after	B 5 before	B 5 after	B 6 before	B 6 after	B 7 before	B 8 after	B 9 after	D 1 before	D 2 after	D 3 before	D 3 after	D 4 before	D 6 after
-4.5~-5.0phi (23~32mm)																						
1	X	31.0	109.8	109.8	109.8	109.8	109.7	109.7	109.8	109.8	109.8	109.8	160.0	55.0	156.0	160.0	57.5	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0
	Y	2.9	3.8	3.8	3.7	3.7	3.8	3.8	3.8	3.8	3.7	3.7	—	2.2	3.8	—	1.0	—	—	—	—	2.0
	Z	0.00	0.07	0.07	0.06	0.06	0.07	0.07	0.10	0.10	0.09	0.09	—	0.00	0.03	—	0.00	—	—	—	—	0.01
	T	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	52°00'	—	—	7°00'	—	—	—	—	—	—
2	X	33.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	160.0	55.0	69.5	—	—	—	—	—	90.0	96.0
	Y	1.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3.9	3.9	—	—	—	—	—	2.0	3.0
	Z	0.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.00	0.07	—	—	—	—	—	0.00	0.02
	T	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	12°00'	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	X	33.0	35.0	35.0	35.0	35.0	35.0	35.0	—	—	—	—	—	—	—	—	74.0	—	—	75.0	75.0	75.0
	Y	2.9	3.5	3.5	3.7	3.7	3.7	3.7	—	—	—	—	—	—	—	—	3.0	—	—	—	—	2.0
	Z	0.00	0.50	0.50	0.03	0.03	0.05	0.05	—	—	—	—	—	—	—	—	0.00	—	—	—	—	0.15
	T	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	X	23.0	36.5	36.5	36.5	36.5	36.4	36.4	36.4	36.4	36.5	36.5	52.7	52.7	75.6	—	61.0	62.5	62.5	63.0	63.0	—
	Y	3.0	3.8	3.8	3.8	3.8	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.9	—	2.5	—	—	—	—	—
	Z	0.00	0.01	0.01	0.03	0.03	0.06	0.06	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04	0.02	—	0.00	—	—	—	—	—
	T	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	X	31.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	82.0	82.0	82.0	82.5	82.5	—
	Y	1.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.0	—	—	—	—	—
	Z	0.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.00	—	—	—	—	—
	T	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6	X	20.5	—	—	92.7	92.7	92.6	92.6	92.7	92.7	92.8	92.8	132.7	132.7	—	—	—	—	—	—	—	—
	Y	2.9	—	—	3.9	3.9	3.8	3.8	3.9	3.9	3.8	3.8	3.4	3.4	—	—	—	—	—	—	—	—
	Z	0.00	—	—	0.10	0.10	0.09	0.09	0.10	0.10	0.08	0.08	0.05	0.05	—	—	—	—	—	—	—	—
	T	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	X	35.0	111.0	111.0	110.5	110.5	110.6	110.6	110.6	110.6	110.6	110.6	160.0	57.7	63.5	—	64.5	65.0	65.0	—	—	—
	Y	1.4	3.3	3.3	3.2	3.2	3.3	3.3	3.4	3.4	3.4	3.4	—	3.0	6.0	—	3.0	—	—	—	—	—
	Z	0.00	0.06	0.06	0.05	0.05	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	—	0.00	0.05	—	0.00	—	—	—	—	—
	T	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	40°00'	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	X	21.0	132.0	132.0	132.0	132.0	132.1	132.1	132.0	132.1	132.1	132.1	160.0	65.0	66.0	—	58.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0
	Y	0.9	0.7	0.7	0.8	0.8	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	—	3.0	3.9	—	2.5	—	—	—	—	3.5
	Z	0.00	0.11	0.11	0.08	0.08	0.06	0.06	0.03	0.03	0.06	0.06	—	0.00	0.05	—	0.00	—	—	—	—	0.15
	T	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	46°00'	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9	X	34.9	36.5	36.5	—	—	36.4	36.4	36.5	36.5	36.5	36.5	53.3	53.3	103.5	—	72.0	75.0	75.0	—	—	75.0
	Y	3.0	4.0	4.0	—	—	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	3.5	3.5	4.0	—	2.0	—	—	—	—	3.5
	Z	0.00	0.02	0.02	—	—	0.06	0.06	0.03	0.03	0.04	0.04	0.07	0.07	0.06	—	0.00	—	—	—	—	0.15
	T	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	X	35.0	111.8	111.8	—	—	—	—	111.6	111.6	111.6	111.6	132.9	132.9	160.0	—	52.0	52.0	52.0	58.0	58.0	109.0
	Y	2.5	3.9	3.9	—	—	—	—	4.0	4.0	4.0	4.0	3.4	3.4	—	—	3.0	—	—	—	—	1.8
	Z	0.00	0.08	0.08	—	—	—	—	0.05	0.05	0.05	0.05	0.01	0.01	—	—	0.00	—	—	—	—	0.22
	T	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	62°00'	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11	X	29.0	92.7	92.7	92.7	92.7	108.5	108.5	108.5	108.5	108.5	108.5	108.9	108.9	108.9	—	54.2	54.5	54.5	57.0	57.0	57.0
	Y	2.0	3.6	3.6	3.8	3.8	4.0	4.0	4.0	4.0	3.9	3.9	4.0	4.0	4.0	—	1.5	—	—	—	—	2.0
	Z	0.00	0.04	0.04	0.04	0.04	0.02	0.02	0.03	0.03	0.01	0.01	0.05	0.05	0.10	—	0.00	—	—	—	—	0.05
	T	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12	X	35.0	123.5	123.5	141.9	141.9	141.8	141.7	141.7	141.8	141.8	141.8	158.5	70.3	160.0	—	—	—	—	—	—	—
	Y	0.5	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4	0.4	1.8	2.1	—	—	—	—	—	—	—	—
	Z	0.00	0.05	0.05	0.10	0.10	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.00	—	—	—	—	—	—	—	—
	T	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	60°00'	—	38°00'	—	—	—	—	—	—	—
13	X	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.1	15.1	54.5	54.5	54.5	54.5	136.6	136.6	136.6	—	66.5	66.5	66.5	67.5	67.5	67.5
	Y	3.0	3.3	3.3	3.4	3.4	3.3	3.3	3.5	3.5	3.4	3.4	3.6	3.6	3.6	—	2.0	—	—	—	—	2.0
	Z	0.00	0.03	0.03	0.05	0.05	0.03	0.03	0.04	0.04	0.01	0.01	0.11	0.11	0.11	—	0.00	—	—	—	—	0.10
	T	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
14	X	33.0	160.0	60.0	—	—	—	—	160.0	—	—	—	62.5	—	160.0	—	71.0	—	—	—	—	73.0
	Y	1.0	—	2.0	—	—	—	—	—	—	—	—	2.0	—	—	—	1.0	—	—	—	—	0.3
	Z	0.00	—	0.00	—	—	—	—	—	—	—	—	0.00	—	—	—	0.00	—	—	—	—	0.07
	T	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
15	X	—	—	67.0	67.0	67.0	67.0	67.0	67.0	139.8	139.8	160.0	64.0	—	—	—	73.0	160.0	—	—	—	—
	Y	—	—	2.0	2.0	2.0	1.9	1.9	2.0	2.0	2.3	2.3	—	—	—	—	2.0	—	—	—	—	—
	Z	—	—	0.00	0.01	0.01	0.05	0.05	0.03	0.03	0.01	0.01	—	—	—	—	0.00	—	—	—	—	—
	T	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6°00'	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16	X	—	—	67.5	160.0	—	—	—	—	—	—	—	57.5	160.0	60.1	102.0	—	—	—	—	—	—
	Y	—	—	2.0	—	—	—	—	—	—	—	—	1.3	—	1.0	4.0	—	—	—	—	—	—
	Z	—	—	0.00	—	—	—	—	—	—	—	—	0.00	—	0.00	0.07	—	—	—	—	—	—
	T	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
17	X	—	—	66.8	70.5	70.5	70.6	70.6	70.5	70.5	70.6	70.6	100.0	160.0	—	—	66.5	70.0	70.0	70.0	70.0	76.0
	Y	—	—	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	—	—	—	—	3.5	—	—	—	—	3.0
	Z	—	—	0.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	—	—	—	—	0.00	—	—	—	—	0.03
	T	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
18	X	—	—	65.1	65.0	65.0	65.1	65.1	82.0	82.0	82.3	82.3	—	—	—	—	66.5	66.5	66.5	70.0	70.0	70.0
	Y	—	—	1.0	1.2	1.2	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	—	—	—	—	2.0	—	—	—	—	3.0

第3表 つづき

		B 1 before	B 1 after	B 2 before	B 2 after	B 3 before	B 3 after	B 4 before	B 4 after	B 5 before	B 5 after	B 6 before	B 6 after	B 7 before	B 8 after	B 9 after	D 1 before	D 2 after	D 3 before	D 3 after	D 4 before	D 6 after
21	X	///	///	61.5	160.0	///	///	65.0	160.0	///	///	65.0	160.0	35.2	160.0		65.0	69.5	69.5	69.5	69.5	70.0
	Y	///	///	3.5	—	///	///	2.0	—	///	///	1.0	—	1.8	—		1.8	—	—	—	—	2.0
	Z	///	///	0.00	—	///	///	0.00	—	///	///	0.00	—	0.00	—		0.00	—	—	—	—	0.15
	T				20'00"				1'30"				6'00"		28'00"							
22	X	///	///	64.0	64.0	64.0	64.3	64.3	64.3	64.3	80.4	80.4	160.0	35.2	38.5		70.0	74.0	74.0	—	—	—
	Y	///	///	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	1.9	1.9	—	3.1	3.6		3.5	—	—	—	—	—
	Z	///	///	0.00	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	—	0.00	0.03		0.00	—	—	—	—	—
	T												19'00"									
23	X	///	///	57.3	57.4	57.4	136.5	136.5	—	—	136.5	136.5	158.0	38.5	—		71.0	—	—	—	—	74.0
	Y	///	///	1.5	—	1.5	0.1	0.1	—	—	0.1	0.1	0.0	2.1	—		2.0	—	—	—	—	0.1
	Z	///	///	0.00	0.06	0.06	0.03	0.03	—	—	0.04	0.04	0.01	0.00	—		0.00	—	—	—	—	0.15
	T												60'00"									
24	X	///	///	63.0	63.0	63.0	63.0	63.0	160.0	///	///	62.0	160.0	70.7	132.0		70.5	—	—	74.0	74.0	74.0
	Y	///	///	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	—	///	///	1.3	—	1.4	0.1		3.1	—	—	—	—	0.5
	Z	///	///	0.00	0.02	0.02	0.02	0.02	—	///	///	0.00	—	0.00	0.05		0.00	—	—	—	—	0.15
	T								15'00"					21'00"								
25	X	///	///	65.0	—	—	139.7	139.7	—	—	139.5	139.5	160.0	60.0	—		50.0	51.0	51.0	51.0	51.0	51.0
	Y	///	///	2.2	—	—	2.2	2.2	—	—	2.3	2.3	—	3.0	—		1.0	—	—	—	—	2.0
	Z	///	///	0.00	—	—	0.03	0.03	—	—	0.04	0.04	—	0.00	—		0.00	—	—	—	—	0.05
	T												10'00"									
-5.0~-5.5phi (32~45mm)																						
26	X	///	///	55.5	—	—	—	—	160.0	///	///	53.0	83.0	83.0	—		///	///	///	///	///	///
	Y	///	///	2.0	—	—	—	—	—	///	///	1.3	0.3	0.3	—		///	///	///	///	///	///
	Z	///	///	0.00	—	—	—	—	—	///	///	0.00	0.04	0.04	—		///	///	///	///	///	///
	T								18'00"													
27	X	19.0	160.0	57.0	—	—	—	—	—	—	—	—	160.0	60.0	160.0		///	///	///	///	102.0	102.0
	Y	2.7	—	3.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.6	—		///	///	///	///	2.8	2.8
	Z	0.00	—	0.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.00	—		///	///	///	///	0.00	0.30
	T																					
28	X	19.2	124.8	124.8	—	—	—	—	—	—	—	—	160.0	55.0	160.0		///	///	///	///	///	///
	Y	0.1	0.2	0.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.5	—		///	///	///	///	///	///
	Z	0.00	0.05	0.05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.00	—		///	///	///	///	///	///
	T												3'00"	38'00"								
29	X	23.6	—	—	23.8	23.8	23.6	23.6	23.7	23.7	23.7	23.7	160.0	63.4	160.0		///	///	///	///	///	///
	Y	2.2	—	—	2.1	2.1	2.2	2.2	2.0	2.0	2.4	2.4	—	1.2	—		///	///	///	///	///	///
	Z	0.00	—	—	0.06	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	—	0.00	—		///	///	///	///	///	///
	T												27'00"	63'00"								
30	X	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.4	24.4	24.5	24.5	24.4	24.4	—	—	—	160.0	///	///	///	///	///	///
	Y	3.7	3.6	3.6	3.6	3.6	3.5	3.5	3.7	3.7	3.5	3.5	—	—	—	—	///	///	///	///	///	///
	Z	0.00	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	—	—	—	—	///	///	///	///	///	///
	T															36'00"						
31	X	23.5	23.5	23.5	—	—	30.9	30.9	30.9	30.9	31.0	31.0	—	—	—		///	///	///	///	///	///
	Y	1.0	1.0	1.0	—	—	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	—	—	—		///	///	///	///	///	///
	Z	0.00	0.10	0.10	—	—	0.06	0.06	0.08	0.08	0.05	0.05	—	—	—		///	///	///	///	///	///
	T																					
32	X	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	19.9	19.9	20.0	20.0	20.0	20.0	160.0	39.8	—		///	///	///	///	///	///
	Y	2.2	2.2	2.2	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.4	2.4	—	0.7	—		///	///	///	///	///	///
	Z	0.00	0.01	0.01	0.05	0.05	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	—	0.00	—		///	///	///	///	///	///
	T												24'00"									
33	X	22.0	22.0	22.0	22.1	22.1	100.8	100.8	100.9	100.9	115.2	115.2	160.0	70.1	160.0		///	///	///	///	///	///
	Y	2.5	2.2	2.2	2.5	2.5	3.8	3.8	3.9	3.9	3.1	3.1	—	1.5	—		///	///	///	///	///	///
	Z	0.00	0.04	0.04	0.04	0.04	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	—	0.00	—		///	///	///	///	///	///
	T												11'00"	38'00"								
34	X	22.0	91.5	91.5	91.5	91.5	91.3	91.3	—	—	91.7	91.7	160.0	34.8	160.0		///	///	///	///	///	///
	Y	3.0	4.0	4.0	3.9	3.9	3.9	3.9	—	—	3.9	3.9	—	2.2	—		///	///	///	///	///	///
	Z	0.00	0.07	0.07	0.06	0.06	0.04	0.04	—	—	0.07	0.07	—	0.00	—		///	///	///	///	///	///
	T												15'00"	38'00"								
35	X	7.6	76.0	76.0	76.0	76.0	76.0	76.0	76.0	76.0	76.5	76.5	160.0	65.1	160.0		///	///	///	///	///	///
	Y	1.3	1.3	1.3	1.6	1.6	1.4	1.4	1.6	1.6	1.9	1.9	—	0.9	—		///	///	///	///	///	///
	Z	0.00	0.05	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05	—	0.00	—		///	///	///	///	///	///
	T												43'00"	38'00"								
36	X	16.5	16.5	16.5	16.7	16.7	16.5	16.5	16.7	16.7	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6		///	///	///	///	///	///
	Y	3.2	3.2	3.2	3.1	3.1	3.1	3.1	3.2	3.2	3.2	3.2	3.1	3.1	3.5		///	///	///	///	///	///
	Z	0.00	0.05	0.05	0.07	0.07	0.05	0.05	0.04	0.04	0.07	0.07	0.05	0.05	0.06		///	///	///	///	///	///
	T																					
37	X	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	18.9	18.9	18.9	18.9	18.9	18.9	160.0	39.5	—		///	///	///	///	102.5	105.0
	Y	1.5	1.4	1.4	1.6	1.6	1.6	1.6	1.5	1.5	1.7	1.7	—	3.2	—		///	///	///	///	—	0.8
	Z	0.00	0.05	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.05	0.05	0.04	0.04	—	0.00	—		///	///	///	///	0.00	0.20
	T												13'00"									
38	X	34.9	34.9	34.9	34.8	34.8	34.8	34.8	34.8	34.8	34.9	34.9	—	—	34.9		66.5	66.5	66.5	66.5	66.5	66.5
	Y	3.8	3.9	3.9	3.9	3.9	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	—	3.8	—		2.5	—	—	—	—	2.0
	Z	0.00	0.02	0.02	0.03	0.03	0.05	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05	—	0.09	—		0.00	—	—	—	—	0.20
	T																					
39	X	///	///	67.0	104.6	104.6	104.6	104.6	104.6	104.6	104.6	104.6	131.2	131.2	153.0		54.0	54.0	54.0	—	—	54.0
	Y	///	///	2.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	4.0	4.0	1.0		2.5	—	—	—	—	3.0
	Z	///	///	0.00	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.04	0.04	0.01	0.01		0.00	—	—	—	—	0.04
	T																					
40	X	///	///	56.3	102.8	102.8	—	—	102.8	102.8	102.9	102.9	131.9	131.9	160.0							

第3表 つづき

		B 1 before	B 1 after	B 2 before	B 2 after	B 3 before	B 3 after	B 4 before	B 4 after	B 5 before	B 5 after	B 6 before	B 6 after	B 7 before	B 8 after	B 9 after	D 1 before	D 2 after	D 3 before	D 3 after	D 4 before	D 6 after
42	X Y Z T	/// /// ///	/// /// ///	68.0 3.4 0.00	— — —	— — —	126.4 3.6 0.05	126.4 3.6 0.05	— — —	— — —	126.7 3.7 0.05	126.7 3.7 0.05	126.6 3.5 0.10	126.6 3.5 0.10	144.5 1.0 0.05		50.0 2.0 0.00	51.0 — —	51.0 — —	51.0 — —	51.0 — —	51.0 2.0 0.07
43	X Y Z T	/// /// ///	/// /// ///	67.0 3.2 0.00	160.0 — —	/// /// ///	/// /// ///	60.0 2.0 0.00	115.0 3.9 0.02	115.0 3.9 0.02	115.0 3.8 0.03	115.0 3.8 0.03	132.3 2.2 0.05	132.3 2.2 0.05	160.0 — —		64.0 1.0 0.00	66.5 — —	66.5 — —	66.5 — —	66.5 — —	67.0 1.0 0.02
-5.5~-6.0phi (45~64mm)																						
44	X Y Z T	28.0 2.6 0.00	106.5 4.0 0.08	106.5 4.0 0.08	106.8 4.0 0.09	106.8 4.0 0.09	106.8 4.0 0.09	106.8 4.0 0.09	106.8 4.0 0.09	— — —	— — —	128.5 2.8 0.04	128.5 2.8 0.04	160.0 — —		/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	101.5 — 0.00	105.0 2.0 0.15	
45	X Y Z T	28.0 3.2 0.00	28.5 3.0 0.05	28.5 3.0 0.05	28.5 3.1 0.05	28.5 3.1 0.05	28.4 3.1 0.03	28.4 3.1 0.03	28.5 3.0 0.06	28.5 3.0 0.06	28.5 3.1 0.04	28.5 3.1 0.04	28.6 3.2 0.08	28.6 3.2 0.07	28.4 3.0 —		/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	97.0 — 0.00	— — —
40'00"																						
46	X Y Z T	20.7 2.0 0.00	20.7 1.9 0.06	20.7 1.9 0.06	— — —	— — —	20.7 1.9 0.08	20.7 1.9 0.08	20.6 1.9 0.06	20.6 1.9 0.06	20.8 2.2 0.04	20.8 2.2 0.04	20.7 2.0 0.07	20.7 2.0 0.08	— — —		/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///
47	X Y Z T	19.0 3.6 0.00	22.7 3.3 0.03	22.7 3.3 0.03	22.6 3.4 0.03	22.6 3.4 0.03	— — —	— — —	22.6 3.6 0.05	22.6 3.6 0.05	— — —	— — —	160.0 49.8 0.00	160.0 — —		/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	103.5 0.00	106.0 2.5 0.20	
48	X Y Z T	/// /// ///	/// /// ///	57.0 0.1 0.00	68.0 0.0 0.01	68.0 0.0 0.01	68.0 0.0 0.04	68.0 0.0 0.04	68.0 0.0 0.04	68.0 0.0 0.04	68.0 0.0 0.04	68.0 0.0 0.04	68.0 0.0 0.04	68.0 1.0 0.04		/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	
49	X Y Z T	17.0 1.0 0.00	107.0 4.0 0.05	107.0 4.0 0.05	— — —	— — —	107.0 4.0 0.09	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	50.0 3.0 0.00	50.1 3.2 0.06	50.1 3.2 0.08		/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	
50	X Y Z T	28.0 1.0 0.00	160.0 — —	59.4 1.8 0.00	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	160.0 58.8 0.00	— — —		/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	
7'00"																						
51	X Y Z T	22.5 1.0 0.00	80.0 3.9 0.02	80.0 3.9 0.02	80.0 3.9 0.03	80.0 3.9 0.03	110.8 3.8 0.03	110.8 3.8 0.03	111.6 3.9 0.05	111.6 3.9 0.05	111.5 3.8 0.05	111.5 3.8 0.04	128.9 3.8 0.04	128.9 3.8 0.04	— — —		/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///
52	X Y Z T	23.0 1.8 0.00	27.0 0.05	27.0 3.0 0.05	27.0 3.0 0.05	27.0 3.0 0.05	26.9 3.0 0.04	26.9 3.0 0.04	27.0 3.0 0.04	27.0 3.0 0.04	27.0 3.0 0.05	27.0 3.0 0.05	— — —	— — —		/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	
53	X Y Z T	16.3 2.0 0.00	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	119.2 3.9 0.05	119.2 3.9 0.05	— — —		/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///
54	X Y Z T	24.4 2.6 0.00	24.4 2.7 0.04	24.4 2.7 0.04	— — —	— — —	24.3 — 0.05	24.3 — 0.05	24.5 2.4 0.04	24.5 2.4 0.04	24.6 2.8 0.05	24.6 2.8 0.05	24.5 2.9 0.06	24.5 2.9 0.06	160.0 — —		/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	103.0 0.00	103.0 2.5 0.22
55	X Y Z T	76.0 3.0 0.00	108.0 4.0 0.07	108.0 4.0 0.07	108.2 4.0 0.06	108.2 4.0 0.06	108.3 4.0 0.10	108.3 4.0 0.10	108.5 4.0 0.11	108.5 4.0 0.11	108.4 3.9 0.07	108.4 3.9 0.07	— — —	— — —	66'00" 160.0 —		/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///
50'00"																						
56	X Y Z T	16.4 3.0 0.00	16.4 3.0 0.04	16.4 3.0 0.04	16.6 3.0 0.05	16.6 3.0 0.05	16.4 3.0 0.06	16.4 3.0 0.06	— — —	— — —	16.5 3.0 0.05	16.5 3.0 0.05	16.5 3.1 0.07	16.5 3.1 0.07	16.4 2.8 0.06		/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	105.5 0.00	108.0 1.8 0.20
57	X Y Z T	16.9 1.9 0.00	17.4 1.9 0.03	17.4 1.9 0.03	17.4 1.8 0.06	17.4 1.8 0.06	17.3 1.9 0.06	17.3 1.9 0.06	17.3 2.0 0.04	17.3 2.0 0.04	17.4 2.0 0.05	17.4 2.0 0.05	17.3 1.9 0.08	17.3 1.9 0.08	141.0 2.5 0.02		/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	100.0 — 0.00	100.0 2.5 0.18
58	X Y Z T	16.0 0.8 0.00	16.0 0.8 0.05	16.0 0.8 0.05	— — —	— — —	16.1 0.8 0.05	16.1 0.8 0.05	16.1 0.8 0.06	/// /// ///	/// /// ///	63.0 3.0 0.00	160.0 — 0.00	45.0 2.0 0.00	160.0 — —		/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	95.0 2.0 0.00	97.0 — 0.20
59	X Y Z T	15.3 0.1 0.00	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	3'00" 160.0 —	38'00" 50.1 2.3	160.0 — 0.00		/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///
60	X Y Z T	25.1 2.1 0.00	25.0 2.0 0.08	25.0 2.0 0.08	— — —	— — —	25.1 2.0 0.05	25.1 2.0 0.05	25.0 2.0 0.03	25.0 2.0 0.03	25.2 2.3 0.05	25.2 2.3 0.05	24.9 2.1 0.07	24.9 2.1 0.07	25.0 2.0 0.07		/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///
61	X Y Z T	27.5 1.5 0.00	160.0 — —	54.0 3.2 0.00	54.0 3.1 0.04	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	50.0 1.0 0.00	75.8 0.1 0.02	75.8 0.1 0.02	108.0 0.0 0.03		/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///
62	X Y Z T	26.0 0.6 0.00	26.4 0.6 0.04	26.4 0.6 0.04	40.0 0.5 0.03	40.0 0.5 0.03	42.0 0.5 0.05	42.0 0.5 0.05	78.4 0.6 0.04	78.4 0.6 0.04	78.4 0.7 0.06	78.4 0.7 0.06	78.3 0.9 0.06	78.3 0.9 0.06	96.0 1.0 —		/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///	/// /// ///
20'00"																						

第3表 つづき

		B 1 before	B 1 after	B 2 before	B 2 after	B 3 before	B 3 after	B 4 before	B 4 after	B 5 before	B 5 after	B 6 before	B 6 after	B 7 before	B 8 after	B 9 after	D 1 before	D 2 after	D 3 before	D 3 after	D 4 before	D 6 after
63	X	78.0	150.5	150.5	—	—	160.0	///	///	///	///	60.0	160.0	70.0	—	—	///	///	///	///	///	///
	Y	2.5	3.9	3.9	—	—	—	///	///	///	///	1.2	—	2.8	—	—	///	///	///	///	///	///
	Z	0.00	0.10	0.10	—	—	—	///	///	///	///	0.00	—	0.00	—	—	///	///	///	///	///	///
	T						10'00"						10'00"									
64	X	27.0	27.1	27.1	27.1	27.1	27.0	27.0	27.1	27.1	27.1	27.1	—	—	—	—	///	///	///	///	///	///
	Y	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	—	—	—	—	///	///	///	///	///	///
	Z	0.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	—	—	—	—	///	///	///	///	///	///
	T																					
65	X	18.0	18.0	18.0	18.1	18.1	18.0	18.0	17.9	17.9	18.7	18.7	18.6	18.6	18.5	—	///	///	///	///	///	///
	Y	3.0	3.0	3.0	2.9	2.9	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	2.9	2.9	3.0	—	///	///	///	///	///	///
	Z	0.00	0.04	0.04	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.07	0.06	—	///	///	///	///	///	///
	T																					
66	X	25.6	—	—	—	—	25.5	25.5	25.5	25.5	25.5	—	—	—	—	—	///	///	///	///	///	///
	Y	1.8	—	—	—	—	2.0	2.0	1.8	2.0	2.0	—	—	—	—	—	///	///	///	///	///	///
	Z	0.00	—	—	—	—	0.09	0.09	0.06	0.06	0.05	0.05	—	—	—	—	///	///	///	///	///	///
	T																					
67	X	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	59.5	—	—	—	—	64.5	65.5	65.5	65.5	—	—
	Y	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	2.8	—	—	—	—	1.0	—	—	—	—	—
	Z	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	0.00	—	—	—	—	0.00	—	—	—	—	—
	T																					
68	X	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	58.0	58.0	58.0	58.0	58.0	59.0
	Y	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	2.0	—	—	—	—	2.0
	Z	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	0.00	—	—	—	—	0.08
	T																					
69	X	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	85.0	85.0	85.0	85.0	—	64.0	65.0	65.5	67.0	100.0	111.0
	Y	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	1.8	1.4	1.4	1.5	—	1.5	—	—	—	3.0	3.0
	Z	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	0.00	0.05	0.05	0.08	—	0.00	—	—	—	0.00	0.05
	T																					
70	X	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	74.0
	Y	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	3.5	—	—	—	—	—
	Z	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	0.00	—	—	—	—	—
	T																					
71	X	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	65.0	160.0	35.1	52.5	—	52.0	52.2	52.2	52.5	52.5	103.0
	Y	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	3.0	—	0.5	0.0	—	2.0	—	—	—	—	2.0
	Z	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	0.00	—	0.00	0.05	—	0.00	—	—	—	—	0.00
	T											6'00"										
72	X	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	56.0	120.3	120.3	120.2	—	52.0	—	—	52.0	52.0	52.5
	Y	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	1.3	4.0	4.0	4.0	—	1.0	—	—	—	—	2.0
	Z	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	0.00	0.05	0.05	0.09	—	0.00	—	—	—	—	0.10
	T																					
73	X	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	56.0	—	—	56.0	—	///	///	///	///	///	///
	Y	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	3.0	—	—	3.0	—	///	///	///	///	///	///
	Z	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	0.00	—	—	0.07	—	///	///	///	///	///	///
	T																					
74	X	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	34.4	160.0	—	57.0	59.0	59.0	59.0	—	—
	Y	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	3.2	—	—	1.0	—	—	—	—	—
	Z	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	0.00	—	—	0.00	—	—	—	—	—
	T													38'00"								
-6.0~-6.5phi (64~91mm)																						
75	X	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.6	20.6	20.6	20.6	20.7	20.7	20.6	—	///	///	///	///	97.0	98.0
	Y	3.6	3.5	3.5	3.6	3.6	3.4	3.4	3.6	3.6	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	—	///	///	///	///	3.0	3.0
	Z	0.00	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.06	0.06	0.06	—	///	///	///	///	0.00	—
	T																					
76	X	23.5	23.6	23.6	23.6	23.6	23.5	23.5	23.5	23.6	23.6	23.6	23.6	—	—	—	///	///	///	///	///	///
	Y	3.0	3.3	3.3	3.4	3.4	3.3	3.3	3.6	3.6	3.2	3.2	3.2	—	—	—	///	///	///	///	///	///
	Z	0.00	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	—	—	—	///	///	///	///	///	///
	T																					
77	X	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	39.8	160.0	—	64.0	66.0	66.0	66.0	66.0	—
	Y	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	2.0	—	—	3.5	—	—	—	—	—
	Z	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	0.00	—	—	0.00	—	—	—	—	—
	T													45'00"								
78	X	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	—	64.0	65.0	65.0	65.0	65.0	—
	Y	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	—	2.0	—	—	—	—	—
	Z	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	///	—	0.00	—	—	—	—	—
	T																					
-6.5~-7.0phi (91~128mm)																						
79	X	///	///	53.5	53.4	53.4	53.4	53.4	53.4	53.4	53.4	53.4	53.4	53.4	53.4	—	///	///	///	///	93.0	93.0
	Y	///	///	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	—	///	///	///	///	3.0	3.0
	Z	///	///	0.00	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.12	0.12	0.12	0.12	0.09	—	///	///	///	///	0.00	0.25
	T																					
80	X	14.5	14.5	14.5	—	—	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	—	///	///	///	///	94.0	94.0
	Y	2.6	2.7	2.7	—	—	2.4	2.4	2.2	2.2	2.2	2.2	2.0	2.0	2.5	—	///	///	///	///	1.0	1.0
	Z	0.00	0.10	0.10	—	—	0.09	0.09	0.08	0.08	0.07	0.07	0.09	0.09	0.10	—	///	///	///	///	0.00	0.20
	T																					
81	X	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	—	—	13.9	13.9	13.9	13.9	13.8	13.8	13.8	—	///	///	///	///	///	///
	Y	3.1	3.0	3.0	3.0	3.0	—	—	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	—	///	///	///	///	///	///
	Z	0.00	0.04	0.04	0.10	0.10	—	—	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.08	—	///	///	///	///	///	///
	T																					
82	X	13.6	13.5	13.5	—	—	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.7	—	///	///	///	///	///	///
	Y	1.1	1.0	1.0	—	—	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	—	///	///	///	///	///	///
	Z	0.00	0.10	0.10	—	—	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.0										

約10cm となり、河床波の前進速度は砂礫堆の方が砂堆よりも5倍ほど速い。

さらに河床形の観察からも確認されたことであるが、砂礫堆では個々の河床形がほぼ同じような比高であり、トラフの深さが一定している（最大でも10cm）のに対して、砂堆では河床形ごとの、また横断方向での変化が激しく定点におけるトラフの深さは、しばしば大きく変動する。第9図の310分前後に記録された深掘れは、まさに砂堆のトラフの深い部分が通過したものである。平均河床高よりも15cm以上深く掘れている。

以上のような急勾配・小水深の流れで形成された長波長で比高が小さく、流下速度の大きい均一な河床波の砂礫堆上と、緩勾配・大水深の流れで形成された短波長で比高が大きく、流下速度の小さい不規則性の強い河床波の砂堆上とで、果たして礫の移動特性にどのような差異が生じるものであろうか。

3) 試料礫の流下状況

各 RUN 終了後に試料礫を探索したが、ほとんどの礫は砂床面に埋もれており、礫の一部が表面に見えかくれする程度であった。各試料礫ごとの流下を追跡した結果を第3表に示す。ここでXは水路上流起点からの距離、Yは水路左岸からの距離、Zは試料礫最下部の河床表面からの深度で、それぞれメートル単位で表記されている。全てのZ=0.00は、新たに試料礫を河床表面に配した時であった。Tは試料礫が水路下流端から流出した(X=160)ことが確認された時間で、各 RUN の開始からの経過時間で示した。但しB8の場合には、B7の10分間を加えてある。B5とB7、そしてD3～D6では、水路下流端から流出した試料礫はひとつも確認されなかった。斜線は試料礫が各 RUN で使用されなかったことを示す。横線は試料礫が探索できなかった等のデータ欠損箇所である。

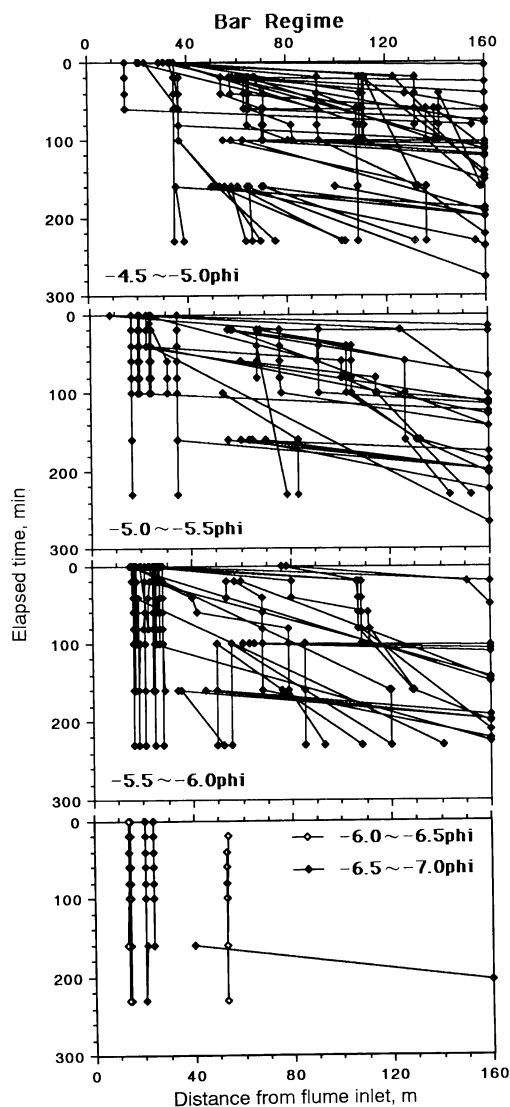
これらのデータを基に、個々に追跡した試料礫の水路縦断方向での分布を各 CASE・粒径ごとに時経列でまとめて第10、11図に示す。縦に延びる線は、試料礫がほとんど流下していないことを示し、一方右横に延びる線は、礫が流下していることを示す。但し、これらの傾きは、実際の礫の転動速度を反映

しているわけではない。つまり、試料礫が探索された点を結んだ訳で、途中の経路（いつ始動を開始したか？途中で一時停止したかどうか？）に関しては情報がいないためである。やや傾きを持って斜め右下に延びる線は、途中の RUN で試料礫が追跡できなかったものか、あるいは長時間にわたる RUN の一時期に流下して途中で止まってしまったものである。実際 CASE 1 でしばしば観察された、転動する試料礫の流下速度は50～80cm/secであった。

CASE 1 (第10図) に関しては、-6.0phi より小さい礫は、数10m 流下して止まるものや、ひとつの RUN の間に一気に100m以上流下して水路下流端から流出してしまうものなど様々である。いずれにせよ多くの礫が流下しており、しかも一旦運搬された礫の移動距離には粒径による違いは認められない。一方、ほとんど流下しない礫の比率は、粒径が大きくなるにつれて増加する。つまり、-4.5～-5.0phi では、25個の試料礫のうちNo3の礫が、-5.0～-5.5phi では、18個のうちNo36とNo38が、-5.5～-6.0phi では、31個のうちNo45、No46、No52とNo56が、全ての RUN で流下しなかった。サンプル数は少ないものの、それぞれ試料礫の4%、11%と13%に相当し増加の傾向が認められる。さらにサンプル数が極めて少なく問題は残るものの、-6.0phi より大きな礫は流下する確率が著しく低い。特に-6.5phi より大きな礫は、流下することなく長軸を流れに垂直に向け、礫のまわりで局所洗掘を生じさせて、砂床面から礫径の半分ほど沈んだ状態で長時間安定していた(第12図)。つまり、本実験条件における移動限界粒径は、-6.0～-6.5 phi にあるといえる。

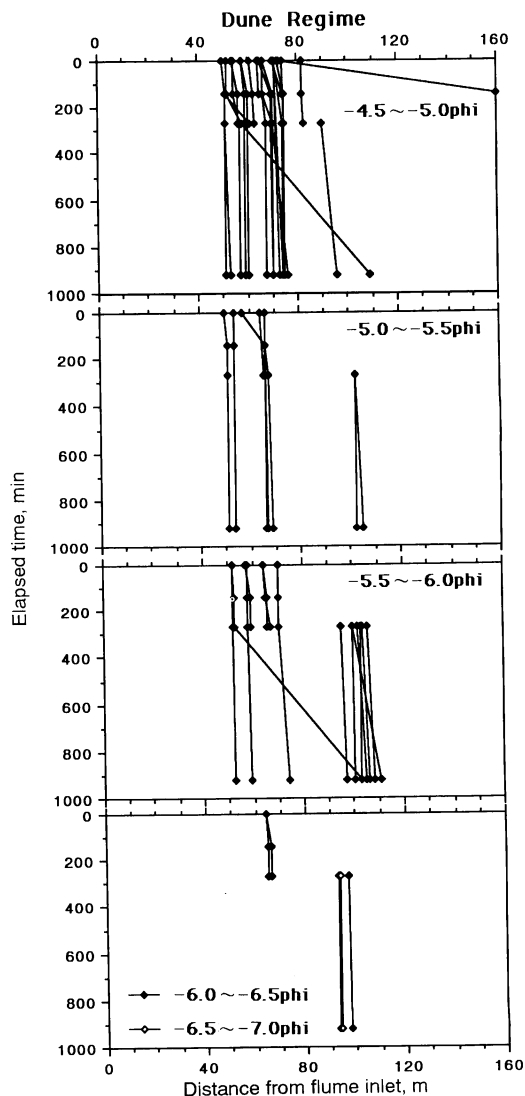
CASE 2 (第11図) に関しては通算900分以上の実験にも関わらず、多くの試料礫は河床表面に置かれた直後の RUN で3m以内の距離流下して止まり、以後ほとんど流下していない。これは全ての粒径に共通して認められる傾向であり、CASE 1の場合と対照的である。但し希に50m以上の距離を流下する礫も確認された(No10、No15、No71)。これらの礫は砂堆を幾波長も越えて流下したことになる。

停水後全ての試料礫は、河床砂の中に埋まっていたが、その埋没深度は CASE 1 と CASE 2 で大変異



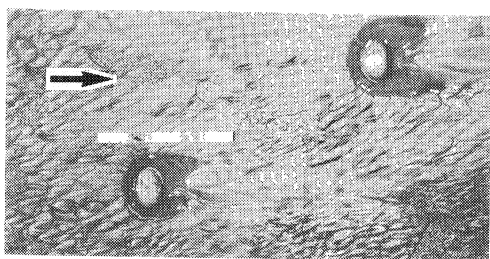
第10図 CASE 1 における試料礫の流下状況
試料礫が確認された点を礫ごとに直線で結んである。

なった。第13図は、各試料礫について積算の流下距離を CASE ごとに求め、B 9 と D 6 終了時に探査された埋没深度との関係をプロットしたものである。但し、B 9 と D 6 の実験中に水路下流端から流出した試料礫はプロットされていない。これらの礫のなかには CASE 1 での積算流下距離が、413m (No21) や、344m (No27) に達したものがあつた。



第11図 CASE 2 における試料礫の流下状況
試料礫が確認された点を礫ごとに直線で結んである。

CASE 1 では、大部分の礫が河床表面から10cm 以内に埋没して、流下距離も広範囲に分布している。さらに注目されることは、積算流下距離125m に及んでも、埋没している礫の下底が10cm 辺りで極めて揃っていることである。さらに長い距離流下した礫は5 cm よりも浅い深度に停止している。これに対して CASE 2 では、河床表面から10cm よりも深い部分に



第12図 CASE 1 で流下せずに河床表面に残った $-6.5 \sim -7.0\phi$ の試料礫の様子
B3 終了後のNo81(左側, 上流側)とNo80(右側).
スケールのひと目盛りは10cm である。

埋没している礫が多数確認され, 長時間の実験にも関わらず積算の流下距離は大半が10m 以下と極めて短い。

河床表面に観察された礫, とはいっても多くは礫の8~9割が砂面に埋もれた状態であるが, それらの分布状況を河床形と対応させて観察した。その結果CASE 1では, 個々の砂礫堆の上流側にしばしば広がる黒色の重鉱物が河床表面を覆った区域では, 試料礫がほとんど観察されなかった。ここは河床形の流下に伴い河床が低下した区域で, 試料礫は洗い出されて流下し, 残留重鉱物が河床表面を覆ったのであろう。砂礫堆上のこれ以外の区域には, ランダムに試料礫が観察された。またCASE 2では砂堆のトラフとクレスト近傍に試料礫が多く観察された。

以上のように本実験条件では, 砂礫堆上を流下する礫は河床表面から10cm 以下, ちょうど砂礫堆の最大波高よりも浅い位置に一時停止し, 河床形の流下に伴い流水にさらされた折にしばしば流下し, その流下距離は, 砂礫堆の波長前後(30~40m)から100m 以上と長いことが明らかにされた。一方, 砂堆上では試料礫のほとんどが10m (砂堆の数波長分) 以下の流下に留まり, むしろ河床砂の深い部分に長時間埋没していることが明らかにされた。すなわち, 礫の流下様式は河床形に強く依存することがわかる。

IV 考 察

1) 砂床上における礫の流下を支配する要因

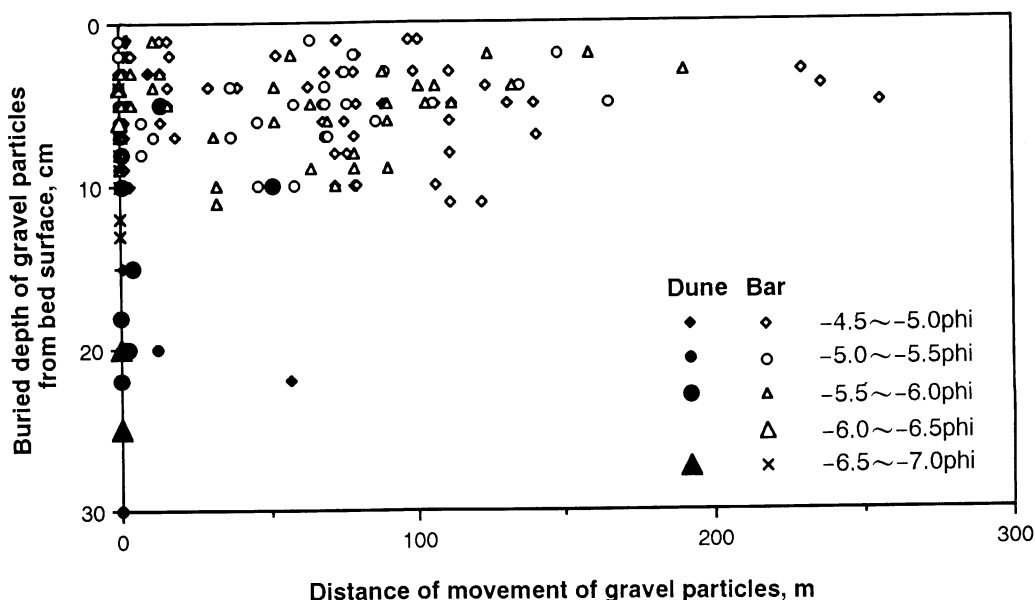
一様粒径の限界掃流力に関する岩垣公式から算出される移動限界粒径は, 本実験の水力条件では1 cm

以下である。ところがCASE 1では径5~6 cmの試料礫が盛んに流下した。砂床上の礫の移動は, 公式の適応範囲外であり当然のことであろう。

次に河床形の形状抵抗を考慮した有効掃流力の概念を用いて, CASE 1とCASE 2とを比較する。つまり平均流出砂礫量が, 河床砂礫の運搬に有効に使われている掃流力に比例すると考えると, D 1~D 4を基準とした有効掃流力は, D 5~D 6でその約2倍, B 1~B 9でその約5~7倍である。ところが第4表にまとめた試料礫の平均流下速度は, -6.5ϕ より小さい試料礫ではD 1~D 6で毎分5 cm 以下, B 1~B 9で, 毎分1 m 前後であった。すなわち有効掃流力でも礫粒子の平均流下速度の違いは評価できない。

砂床河川における礫の移動では, 河床形をパラメータとして考慮しなくてはならない。砂堆のような凹凸の激しい河床形では, トラフでの水流は剝離流となり, ひとたびトラフに捕まった礫は容易には流下できず, やがて砂堆の前進に伴い砂床中に埋没してしまう。さらに本実験の砂堆では, 第7図に示された様に深掘れの位置が散在しており, これらの深掘れ部に捕捉され埋没した礫は, 砂堆がいくつか通過してもそれらのトラフが礫の埋没深よりも浅いため(第9図B), 流水にさらされない。つまり, 礫が流下する機会が少なくなる。さらに埋没した礫が, 砂堆の前進に伴い流水にさらされ運搬されるには, その礫が砂堆背面の上位に露出する状況が望まれる。なぜなら, 上流の砂堆の峰から剝離した水塊が再付着する砂礫堆背面の位置より上位であれば, 礫が運搬され易いからである。ところが礫はトラフの深さに埋没しているため, 平均河床高が安定している時には前述のような状況は希である。そのためにCASE 2で多くの試料礫は, ほとんど流下しなかったものと考えられる。むしろ試料礫は深いトラフが通過する度に, その場で河床の深い方へ深い方へと沈んでいく傾向が強いのであろう。

一方CASE 1の砂礫堆は, 比高が小さく波長が長いもので, 砂礫堆の背面に載る河床形もまた比高の小さなものであった。つまり, ほとんど平坦河床に近い状況である。そのため転動し始めた試料礫にと



第13図 試料礫の積算流下距離と埋没深度

第4表 試料礫の平均流下速度

GRAIN SIZE	RUN	Mean velocity of gravel particles, m/min		
		B1~B9	D1~D3	D4~D6
-4.5~-5.0phi		1.25 (24)	0.04 (20)	0.01 (13)
-5.0~-5.5phi		0.94 (18)	0.01 (5)	0.00 (6)
-5.5~-6.0phi		0.74 (28)	0.00 (7)	0.01 (11)
-6.0~-6.5phi		0.89 (3)	0.01 (2)	0.00 (1)
-6.5~-7.0phi		0.00 (4)	— (0)	0.00 (2)

()内の数字は平均値を算出した試料礫の個数である。流下速度は、個々の試料礫につき第3表のデータから求めた。つまり実験時間は試料礫ごとに異なる。

り、河床の粗度は礫の運動を阻止するほどの強い影響を持たず、多くの礫が一気に水路下流端から流出したのであろう。転動した礫が停止するきっかけは、砂礫堆背面で水深が浅くなることや砂礫堆前縁のトラフに落ち込むことである。停止した礫の埋没深度は10cm以内と浅かったが、これはトラフの深さが均一なことに起因する。つまり埋もれた礫は、砂礫堆一波長が流下する度に河床表面に現れることになる。しかも砂礫堆前縁における水流の剝離域は狭く、そ

の下流側で礫は流水にさらされるため、容易に運搬されたのであろう。

以上のように河床形の凹地の深さが均一なことと、河床がより平坦なことは、礫が河床中に長時間埋没することを防止し、礫の流下を促進する重要な要因に挙げられよう。

2) 礫床から砂床への急変

実際河川でしばしば観察される礫床から砂床への急変現象に関して、本実験の結果は礫が砂床区間を流下している可能性を強く支持するものである。流下した礫は通常砂床中に埋没しており、河床表面を観察する限りは、あたかも砂しか運搬されていない河川と見受けられるのであろう。出水時には河床形が発達・変形するため、埋没していた礫が河床表面に現れ流下すると考えられる。

本実験では、波長の長い比高の小さい河床形が発達したCASE1で礫の流下距離は長く、礫は広い範囲に拡散した。これはちょうど、礫床から砂床への急変点直下で観察される比較的平らな砂床区間における礫の流下を連想させる。この区間で礫は広い範囲に拡散され、同時に砂床中に埋もれるのではなか

ろうか。共著者のシャロニは、礫床から砂床に急変するイスラエルのワジ河川(Shikma 川)で、トレーサー礫の追跡調査をしているが、本実験のように多くの礫が砂床中に埋もれながら流下する事実を捉えている。つまり礫床区間と砂床区間の急変は、流下した礫が砂床中に埋没し、河床表面を砂が覆うために生じる現象ではなからうか。

さらに下流で波長の短い比高の大きな河床区間に入ると、礫の平均流下速度は激減し、礫は砂床中に長期間埋没することになる。同様に河道の平面形に応じて生じる局所洗掘部でも、礫は長期間砂床中に埋没すると予想される。砂床河川堆積物の中に異様に大きな礫の集団が挟在する露頭を希にみるが、これらはまさに、砂床形の凹部や河道の局所洗掘部に捕捉された礫ではなからうか。実際河川ではこの埋没期間に礫は風化し、次に水流に洗いだされた時には摩耗され小さくなるのが容易に想像される。そのために砂床河川では下流方向に礫の量が減少するのではなからうか。

V おわりに

2つの対照的な砂床形、つまり急勾配・小水深の流れによる交互砂礫堆(CASE 1)と緩勾配・大水深の流れによる砂堆(CASE 2)を大型水路に作りだし、それぞれの河床形における礫の流下様式を調べた。礫の追跡には、超小型発信機を埋め込んだ手法と、釣り糸で礫に浮きを結び付けた手法を併用した。

実験の結果、砂床上を流下する礫の多くは、流下時以外には砂床中に埋もれていることがわかった。礫の埋没深度や流下距離は、砂礫堆河床と砂堆河床で全く異なることが明らかになった。つまり河床の凹凸が10cm以下と小さく波長の長い砂礫堆の河床上では、 -5.5ϕ よりも小さな礫は、粒径に関係なく長い距離流下した。そして一時停止した礫のほとんどが、河床表面から10cm以浅に埋没していた。一方、河床の凹凸が大きな砂堆上では、トラフに一旦捕捉された礫はなかなかそこから流下できないことが明らかになった。そしてトラフの深掘れ部分が通過する度に、礫はより深くに(10~30cm)沈み、その結果河床中に長期間埋没することがわかった。

礫の流下様式のこのような違いをもたらした第1の原因は、河床形の特にトラフ地形の特性にある。つまりトラフの深さが浅く、しかも河床波ごとに均一であったCASE 1では、試料礫は河床深くに埋没することなく、砂礫堆の前進に伴い水流にさらされ運搬される。これに対してトラフが深く、しかもその深さが河床波ごとに異なるCASE 2では、一旦深いトラフに捕捉された礫はやがて砂堆の前進に伴い埋没し、それ以後水流にさらされる機会が減る。さらに砂堆のトラフで生じる流れは剥離流であり、たとえ水流にさらされても礫は容易には流下できない。

実際河川でしばしば観察される礫床から砂床への急変に関しては、砂床区間を礫が流下している可能性が高いことを、本研究は示唆している。砂床区間を流下した礫は、砂床にある様々な凹地に捕捉され、河床中に埋もれる。そのために、平水時には河床表面は砂ばかりとなって見えるのであろう。凹地に捕捉された礫は、場合によっては長期間埋没し続け、その間に風化され細粒化をはやめるのではなからうか。

謝 辞

実験を行うに当たり、当時筑波大学環境科学研究科2年の米山哲郎君、自然学類4年の長谷川祐二君・北島美宇さん、地球科学研究科3年の渡部真君にご助力頂いた。砂堆を大型水路内に作り出す水理条件に関しては、上武大学の伊勢屋ふじこ助教授にご御教授頂いた。アルキテック有限会社の伊藤稔・前田真両氏には超小型発信機について技術的なサポートを受けた。製図には宮坂恵美子さんに御協力頂いた。記して皆様に感謝いたします。

なお本研究は、平成3年度文部省科学研究費補助金総合研究(A)(課題番号02302066;種々のスケールにおける流れと流砂運動の同時計測による土砂輸送・河床変動機構の解明、代表:京都大学防災研究所 芦田和男教授)の補助を受けて行われたものである。

文 献

飯島英夫(1992):超小型発信機を用いた河床礫追跡手法の開発。筑波大学技術報告, No.12, 81-85。

- 飯島英夫・S. シャロニ (1993) : 超小型発信機を用いた礫の追跡手法の確立. 筑波大学水理実験センター報告, No17, 190—191.
- 小玉芳敬・井口正男 (1986) : 渡良瀬川下流部の河床勾配急変点付近における河床砂礫の堆積状況. 筑波大学水理実験センター報告, No10, 67—79.
- 高山茂美 (1965) : 溪流河川の河床礫の移動について (その I). 東京教育大学地理学研究報告, 9, 169—188.
- Bunte, K. and Ergenzinger, P. (1989) : New tracer techniques for particles in gravel bed rivers. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 25, 85—90.
- Ergenzinger, P. and Conrady, J. (1982) : A new tracer technique for measuring bedload in natural channels. *Catena*, 9, 77—88.
- Ergenzinger, P. and Custer, S. (1983) : Determination of bedload transport using naturally magnetic tracers : first experiences at Squaw Creek, Gallatin Country, Montana. *Water Resources Research*, 19, 187—193.
- Ergenzinger, P., Schmidt, K.-H. and Busskamp, R. (1989) : The Pebble Transmitter System (PETS) : first results of technique for studying coarse material erosion, transport and deposition. *Z. Geomorph. N. F.*, 33, 503—508.
- Hassan, H. A. and Church, M. (1991) : Distance of movement of coarse particles in gravel bed streams. *Water Resources Research*, 27, 503—511.
- Hassan, H. A. and Church, M. (1992) : Virtual rate and mean distance of travel of individual clasts in gravel-bed channels. *Earth Surface Processes and Landforms*, 17, 617—627.
- Hassan, H. A., Schick, A. P. and Laronne, J. B. (1984) : The recovery of flood-dispersed coarse sediment particles : a three-dimensional magnetic tracing method. Schick, A. P. ed. : *Channel Processes—Water, Sediment, Catchment Controls*—, Catena Supplement 5, Braunschweig, 153—162.
- Schmidt, K.-H. and Ergenzinger, P. (1992) : Bedload entrainment, travel lengths, step lengths, rest periods—studied with passive (iron, magnetic) and active (radio) tracer techniques. *Earth Surface Processes and Landforms*, 17, 147—165.
- Yatsu, E. (1955) : On the longitudinal profiles of the graded river. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 36, 655—663.
- Zing, Th. (1935) : Beiträge zur Schotteranalyse. *Min. Petrog. Mitt. Schweiz*, 15, 39—140.