

二粒径混合砂礫の流送に関する水路実験

Flume Experiments on the Transport of Sand-Gravel Mixtures

池 田 宏*

Hiroshi IKEDA

I はじめに

実際河川の流送物質は、大小様々の砂礫の混合物である。河床が一樣粒径粒子からなる場合は、水流に対する粒子の抵抗力は、いうまでもなく粒子の重量に起因する。ところが混合砂礫の場合には、各粒子の移動限界はその粒子の性質のみによっては決まらず、周囲の粒子との相対的な関係によって変化する。河川における流砂現象を複雑にしている一因がここにある。実際河川における流砂量を予測するためにも、また地形や堆積物の成因を考えるうえでも、大きさの異なる砂礫が混合することが流砂現象に及ぼす効果——混合効果についての理解が必要である。

水流による砂礫の流送に関する研究は、一樣粒径砂礫を対象として従来多数行なわれてきた。しかし混合砂礫については、粒径別の移動限界条件が、多少明らかになったところである。したがって、小粒子とともに大粒子までもが移動している状態で、どのような混合効果が生ずるかは十分判っていない。混合砂礫の粒径別の流砂量データは現在のところきわめて限られている。当面は粒径別の移動限界と流砂量のデータの収集が必要な段階にある (White and Day, 1982)。

近年、野外の河川で掃流砂観測が行なわれ、データが集積されつつある (Klingeman and Emmett, 1982)。実際河川における観測が重要なことはいうまでもないが、混合砂礫の流送現象のメカニズムを解明するためには、制御された条件下での水

路実験が有効であろう。

現象を支配する要素の中から、ほかの条件をなるべく一定にして、あるひとつの要素だけを変えてその影響をみるのが実験の方法である。混合砂礫の移動現象について考えてみれば、流量や勾配といった条件を一定に保って底質を変えるか、逆に、底質を変えないで流量や勾配を変えてみるということである。前者の実験は、しかし、給砂方式のわずらわしさのためか、Gilbert (1914) による一連の実験以外にはほとんど例がない。

世界各国で行なわれている混合砂礫の移動に関する実験は、その多くが後者の立場を意図してなされてきた。その方法には3つある (山本, 1978, p. 62)。すなわち1) 水路に混合砂礫を敷きながらして無給砂で行なうもの、2) 1) と同じ初期条件で、水路上流端で河床低下をしないように、水路内に敷いたと同じ砂礫を給砂するもの、および3) 1) と同じ初期条件で、水路下流端に流出した砂礫を水路上流端へ返送して循環させるものである。

各Run毎に水路に同じ砂礫を敷き込むわけであるから、これらいずれの方式も、静的にみれば底質を独立変数として制御しているかに見える。底質が移動しない限りこれは正しい。しかし流砂が生じた場合には、もはや底質を制御していることにはならない。なぜなら、流量や勾配の変化に対する流砂量の変化の仕方が粒径によって異なるため、流量や勾配を変えるとそれにつれて流砂の粒度組成が変わるからである。すなわち動的にみれば

* 筑波大学水理実験センター

(1984年6月4日受理)

ば底質を変えたことになるのである。これは実験の方法という点からはきわめてうまくないことである。一様粒径砂礫の場合には給砂方式でも循環方式でも、結果に顕著な差はない (Rathbun *et al.*, 1969)。ところが混合砂礫の場合には、水路を空にしておいて砂礫を供給しないかぎり、底質の粒度組成を独立変数とした実験は行なえないのである。

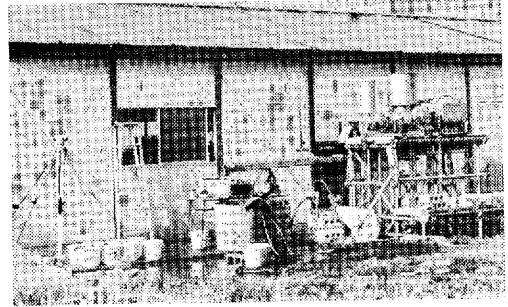
そこで、本研究では混合砂礫の流送実験を給砂方式によって行なった。Gilbert (1914) と同様、混合砂礫の性質を制御しやすいことを主な理由として、礫と砂という大きさの異なる二種類の砂礫の混合物——二粒径混合砂礫を用いた。実験の進め方は Gilbert (1914) の実験と基本的に変わらない。礫と砂の移動速度を実測した点が新たに加えた工夫である。

今回の実験は、以下に述べるように、きわめて小型の実験装置で行なわれたため、実際河川の現象と比較して限られた状態をとり出してみたものにすぎない。具体的には、たとえば砂堆頂部の微小部分を見ていることに相当する。実際、今回の実験で見られた現象は、大型水路実験で観察された砂堆頂部での砂礫の移動様式と酷似していた。本実験結果を実際河川における流砂現象に適用するためには、河床形の形成によって実際河川で生ずる垂直的分級 (vertical sorting) 作用を考慮する必要があるだろう。

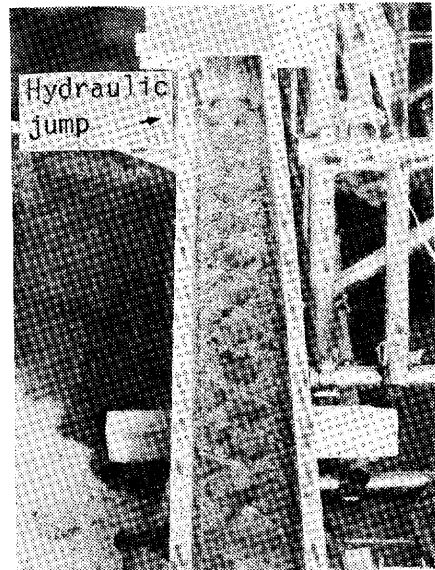
II 実験方法

1) 実験装置

実験装置は、給砂装置2台と給水ポンプ・高水槽・水路・沈砂(量水)槽および貯水槽からなる給砂式水路である(第1図)。水路は幅10cm・深さ7cm・長さ4mの木製水路(第2図)で、ジャッキで勾配を広範囲に変えることができる。水は、口径25mmのポンプ(寺田標準自吸式セルフラポンプ)で貯水槽から高水槽へ汲上げた。水路への給水量はポンプと高水槽を結ぶパイプの途中につけられたバルブを開閉することにより、高水槽の三角堰の越流水位を調節して制御し、各Run開始時



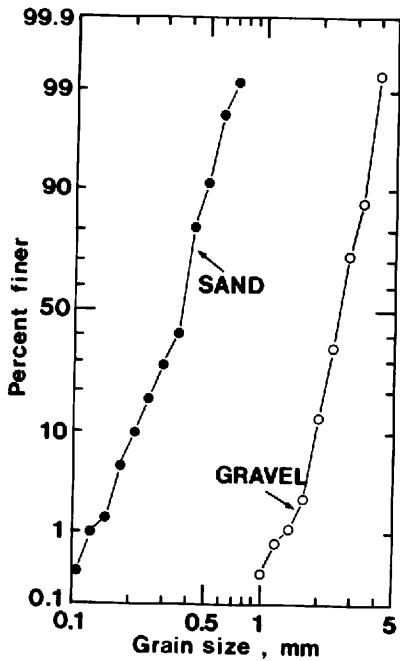
第1図 給砂式水路の全景



第2図 水路と堆積域上流端に生ずる跳水
通水中、下流から上流を見る (Run C-12)

に容積30ℓの量水槽で確認した。高水槽から水路へ供給された水はフィルム層を詰めた整流部(水路の上流端から0.5m区間)を経て、水路本体に流れ出すようにした。砂礫を水路内に堆積させるために、水路下流端に高さ3cmの固定堰を設けた。

給砂装置は市販の連続定量供給機(K. K. 粉研製のフンケンオートフィーダー)2台で、ゲート開度と回転速度を変えることによって、乾燥状態の砂礫の供給量を任意に調節できる。しかし運転を一度止めて再開すると、給砂量が10%前後変化してしまうことがあるので、ひとつのRunの中では途中で給砂装置を停止させないようにした。礫



第3図 実験に使用した砂と礫の粒度組成 (篩い分けによる)

第1表 実験用砂礫の粒度組成と比重

	d_{16} mm	d_{35} mm	d_{50} mm	d_{64} mm	d_m mm	$\sqrt{d_{64}/d_{16}}$	σ/ρ
SAND	0.24	0.33	0.37	0.45	0.35	1.4	2.7
GRAVEL	2.1	2.4	2.6	3.2	2.7	1.3	2.6

と砂の供給地点はそれぞれ水路上流端から0.7m・1.1m 地点であった。

2) 実験用砂礫

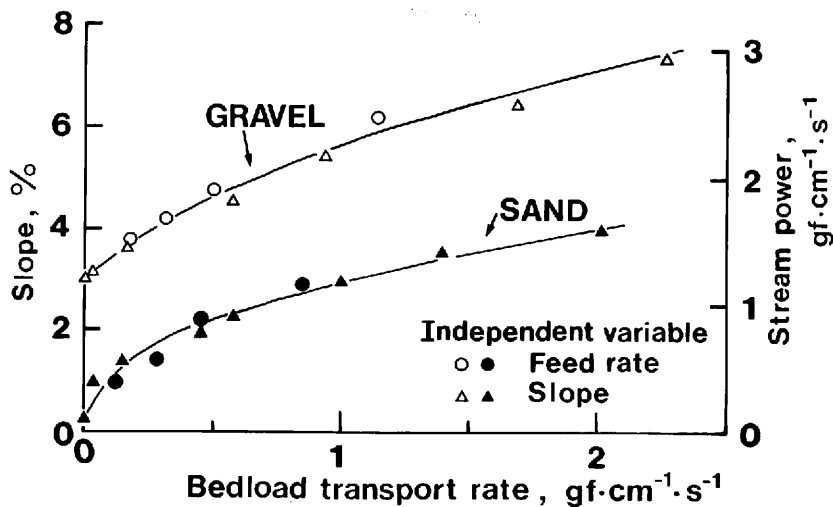
使用した給砂装置では大粒子を供給できないという制約から、目開き4mmと2mmの篩によって篩い分けた径2~4mmのグラニュール(以下では礫と呼ぶ)と、中砂を主体とする分級の良い市販の濾過砂(以下では砂と呼ぶ)を実験用砂礫に選定した(第3図, 第1表)。いずれも河川堆積物で、亜角形~亜円形をしている。この礫と砂を合わせると、粗砂(径0.5~2mm)が欠如した二峰性粒度分布をもつ混合砂礫となるわけである。

実験に用いた砂と礫について、供給量とそれを流送するのに必要なストリーム・パワーないし勾配との関係を第4図に示す。ストリーム・パワー(Bagnold, 1966)とは単位時間・河床単位面積当りの流水のポテンシャルエネルギーの損失率で、次式で表わされる。

$$\omega = \rho g q S - \tau_0 V$$

ここで、 ω :ストリーム・パワー、 ρ :水の密度、 g :重力加速度、 q :単位幅流水量、 S :勾配、 τ_0 :底面剪断応力、 V :平均流速。

実験はすべて給水量一定としたので、ストリーム・パワーは勾配に比例する。この図中には砂あ



第4図 砂と礫の供給量(流砂量)とストリーム・パワーの関係

るいは礫の供給量を制御して、勾配を従属変数として行なった実験データ (○, ●) のほか、河床勾配を独立に与えて水路下流端からの流出砂礫量を測定したデータ (△, ▲) も合わせてプロットした。移動限界ストリーム・パワーは砂で $0.1 \text{ gf cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 、礫で $1.2 \text{ gf cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ と大きな違いがある。しかしある程度流送されている場合には、礫を運ぶには等量の砂を運ぶパワーのほぼ2倍のパワーがあればよい。

3) 実験の手順と測定方法

今回の実験を通じ、給水量は一定 ($400 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$) とした。ポンプを運転し、給水量を調節して水路に給水する。水路床は空にして、予備実験の結果から推定される平衡勾配より若干急な勾配に設定する。ついで給砂装置を運転させ、給砂量を調節した後、給砂を開始する。水路床を流送された砂礫は、水路下流部に生ずるプールに堆積する。ダムの堆砂現象と同様、砂礫はプールを埋積して前進するとともに砂礫の堆積域は水路の上流側へもひろがる。水路の上流端で供給される砂礫を下流へ流送するのにみあったストリーム・パワーが得られる勾配になるまでアグラデーションが進行するわけである。砂礫が堆積してできる河床の勾配より初期の水路床勾配を急にしたのは、給砂点付近の水路床に砂礫が滞留しないようにしたため、これによって給砂地点より下流に堆積域の上流端が位置するようにした (第2図)。

堆積域の長さは Run によって異なったが、1.4 ~ 2.7 m であった。数10分間にわたって給水・給砂を続けると、堆積域の上流端に生ずる跳水の位置が固定して動かなくなる。この状態を平衡状態とみなして各種の測定を行なった。しかし、後述するようにとくに砂の混合比率の小さい Run では混合砂礫の縦断的分級 (longitudinal sorting) 作用のために河床勾配が一定せず、ある範囲で変動を繰り返した。この場合には、なるべく勾配が安定している時をみはからって各種の測定を行なった。

通水中には砂礫の移動様式を観察するとともに河床形や水流の特徴などについて観察し、また写

真を撮影した。そしてパンチ屑をトレーサーとして表面流速測定を3回行なった。また水面高を25 ~ 50 cm おきにポイントゲージでおさえ、オートレベルで測定して水面勾配を求めた。停水後、各地点で河床高をポイントゲージで測定し、河床勾配と水深を算定した。求めた勾配からストリーム・パワーを計算し、流砂効率 (transport efficiency) を算定した。流砂効率は、水路に加えられるストリーム・パワーのうち砂礫を輸送するために使われる割合で次式で表わされる (Bagnold, 1966, 1973)。

$$e_b = i_b \cdot \tan \phi / \omega$$

ここで、 e_b : 流砂効率、 i_b : 掃流砂量 (水中重量)、 $\tan \phi$: 砂礫粒子の動摩擦係数、 ω : ストリーム・パワーである。計算にあたっては $\tan \phi$ を砂礫の静止摩擦角とみなし、0.63として効率を求めた。砂礫の動摩擦係数は礫と砂の混合比率によってかなり変化することが予想されるので、厳密ではない。

掃流砂量は、水路下流端で流出砂礫を1分間~15分間、3.5φないし4φの篩で捕砂して求めた。すなわち捕砂した砂礫を電気炉 (110°C) で一晚乾燥した後秤量し、0.25φ (0.84mm) の篩を用いて砂と礫に分け、混合比を求めた。これらの結果を平均して砂礫の水路下流端流出量とした。この値は平衡状態では供給量と一致するはずである。しかし混合砂礫の場合には、縦断的分級作用のために流出砂礫量は時間的に大きく変動する。そのため、今回のように短時間の捕砂では、得られた流出砂量は給砂量と一致しないことが多い。Gilbert (1914) の実験では給砂量と流出砂量とは正確に一致しているが、これは流出砂礫をひとつの Run の終りにまとめて秤量しているためと思われる。

砂と礫の平均移動速度は、砂と礫をベンキで着色したトレーサー粒子を用いて求めた。一回の測定に礫の場合には30 gf または50 gf、砂の場合には2 gf をドライウェルを加えた水で十分ぬらした後、跳水直上に投入した。粒子群の動きが日視できる場合 (後述するように、礫の移動がスムーズな場合には、トレーサー粒子群が一定区間 (0.5 ~ 1 m) を通過するのに要する時間を測定して平

第 2 表 実 験 結 果

Case Run no.	Flume width cm	Discharge cm^3/s	Temperature $^{\circ}\text{C}$	Bedload transport rate gf s^{-1} (a)			Water surface slope %	Depth cm	Water surface velocity cm s^{-1}	Mean bedload velocity cm s^{-1}			Bed state (d)	Motion of gravel (e)
				Total	Gravel	Sand				Gravel (b)	Gravel (c)	Sand (b)		
1	G-10	400	—	0	0	0	3.0	1.2	—	0.7	0.6	BM	C	
	C-9	—	14	1.7	0	0	3.8	1.0	54	0.8	0.7	A	C	
	C-8	—	14	3.1	0	0	2.3	0.9	57	1.1	1.1	A	C	
	A-1	—	14	5.0	0	0	4.3	1.0	59	1.3	2.7	P~T	C	
	A-2	—	14	11.4	0	0	11.0	1.0	65	4.2	1.7	A	C	
	A-3	—	14	16.0	4.6	2.6	13.2	0.8	61	2.1	3.8	0.9 A~T	C	
	A-4	—	15	21.0	8.6	7.4	16.8	5.2	61	3.7	5.4	2.2 A~T	C~J	
	A-4	—	15	23.5	11.4	5.5	15.7	4.5	67	11.1	—	2.4 T	J	
	S-12	—	—	—	0	0	0	0.25	—	—	—	—	BM	—
	C-11	—	—	—	1.2	0	0	1.0	1.6	42	—	1	T*	—
2	C-1	—	15	2.8	0	2.2	1.4	1.1	—	28	11.0	T*	—	
	B-1	—	15	4.6	0	4.2	2.2	0.9	55	—	19	T*	—	
	B-2	—	15	8.5	0	8.1	2.9	0.8	—	32	19	P	—	
	A-7	—	15	11.0	1.6	9.7	2.9	0.8	63	30	19	P	S	
	A-8	—	14	12.9	4.4	8.2	3.2	0.9	63	30	18	P	S	
	B-5	—	14	14.9	6.4	8.5	3.1	0.9	63	26	21	P	S	
	B-4	—	14	16.2	7.8	7.5	3.1	0.8	65	10	10.0	P	S	
	A-4	—	15	18.5	10.0	7.6	3.4	0.8	57	3.3	3.1	2.0 T~A	J~C	
	B-6	—	15	21.0	12.4	9.4	4.6	—	61	3.7	3.8	2.2 T	C	
	B-6	—	15	23.5	15.1	8.4	5.2	0.8	—	2.0	1.8	0.9 A	C	
3	C-8	—	—	5.0	0	0	4.8	1.0	59	1.3	1.1	A	C	
	C-6	—	15	5.0	4.0	1.0	4.3	1.1	51	1.6	1.2	A	C	
	C-5	—	15	5.4	3.8	1.6	4.3	1.0	51	2.4	1.3	A	C	
	C-7	—	15	5.1	3.0	2.1	3.3	1.1	50	1.3	0.9	A	C	
	C-4	—	14	4.5	2.7	1.8	2.5	1.1	48	1.5	1.4	A	C~J	
	C-3	—	14	5.0	2.3	2.7	4.6	0.9	56	3.8	4.6	A	J	
	C-2	—	15	5.1	1.7	3.4	5.1	1.0	56	8.0	8.7	2.6 T	J~S	
C-1	—	15	4.6	0	4.6	2.2	0.9	55	28	4.4	4.4 T*	J		

(a) 乾燥重量

(b) トレーサー粒子の流出率のピーク出現時間から算定

(c) トレーサー粒子の50%流出所要時間から算定

(d) BM: 移動限界, P: 平坦河床, T: 遷移河床, T*: 線状跳床, A: 反砂堆

(e) S: スムーズ, J: 部分的波帯, C: 全面波帯

均移動速度を求めた。トレーサー粒子群が縦断的に分散して、その移動を追跡できない場合（後述するように、礫の移動が渋滞状態になった場合）には、トレーサー粒子投入時から10秒～2分間隔で、水路内にトレーサー粒子がほとんど見えなくなるまで継続的に水路下流端流出砂礫を捕えた。そして礫と砂を別々にして、それに含まれるトレーサー粒子の数を数えた。なお砂の場合には蛍光染料で着色したので、紫外線ランプを使用してカウントした。その結果から、トレーサー粒子の流出率のピークの出現時を読み取って、平均移動速度を算出した。なお、礫については、投入したトレーサー粒子の50%が流出するのに要する時間からも移動速度を求めたが、流出率のピーク出現時から求めた値と大差なかった。

実験は3つのCaseについて行なった。礫の供給量は一定として、砂の供給量のみを変えてその影響を調べたもの（Case 1）、逆に、砂の供給量は一定として、礫の供給量のみを変えたもの（Case 2）、そして、礫と砂を合わせた供給量は一定として、砂と礫の混合比率のみを変えたもの（Case 3）である（第2表）。いずれのRunも、給砂方式による実験のため、Gilbert (1914)による実験同様、流砂濃度がかかなり高いことが特徴である。

III 給砂方式による混合砂礫の流送実験結果

1) 礫の供給量は一定で、砂の供給量を増した場合（Case 1）

Case1の実験結果を第5図に示す。このCaseは、礫の供給量を一定（ 11.4 gf s^{-1} ）にして、砂の供給量のみを段階的に増してその影響を調べたもので、図中には参考のために礫だけについて、供給量が 11.4 gf s^{-1} に達するまでの勾配変化をあわせて示した。

礫の供給量を次第に増すと、それを流送するために要求されるストリーム・パワーは増大するために、勾配が次第に増す。礫のみを 11.4 gf s^{-1} 供給した Run A-1 の河床は平坦河床と遷移河床の境界の状態、礫は河床全面で転動し躍動した。

礫の供給量はそのままにして、それに加えて砂

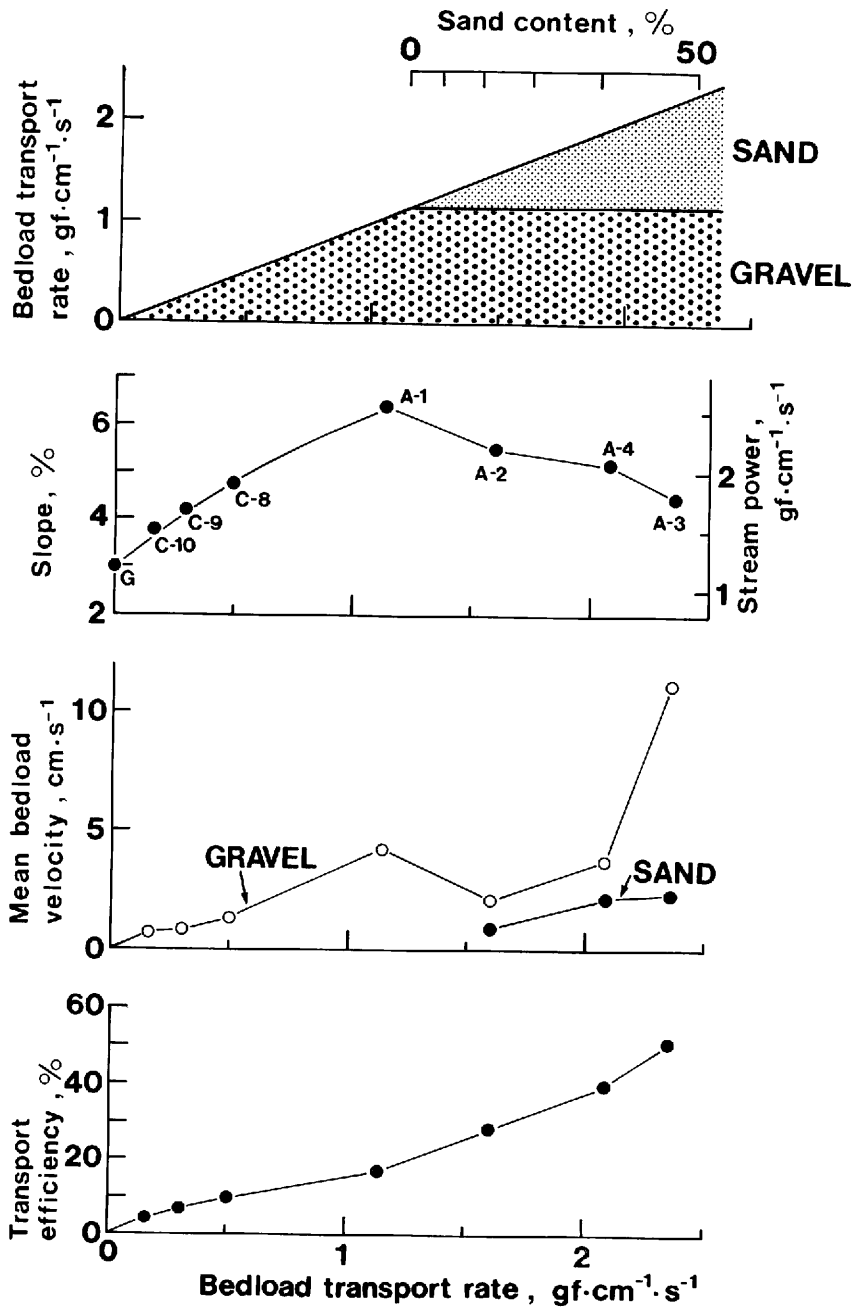
を供給したところ、その影響は顕著で、給砂位置が水路幅全体に一樣でなく、わずかでも偏ると、砂の集中する側で礫が盛んに移動して河床が低下するため、河床高が横断方向に一樣でなくなることがわかった。そこで釘を多数打った板を傾斜させて給砂地点に置き、砂礫が水路幅全体に一樣に撒布されるようにした。

Run A-2 では、Run A-1 に引き続いて、水路内の礫を排出せずに砂を供給したところ、砂は礫の間隙に入り込んで、30分たっても水路下流端へは排出されず、流出砂礫量が供給量に近くなるまでには2時間を要した。それゆえ、以下の実験では各Run開始時には水路床を空にしておくか、あるいは砂礫を供給せずに通水して河床を低下させた後に砂礫の供給を開始し、アグラデーションをして平衡状態をつくり出させて、以前のRunの影響を消した。

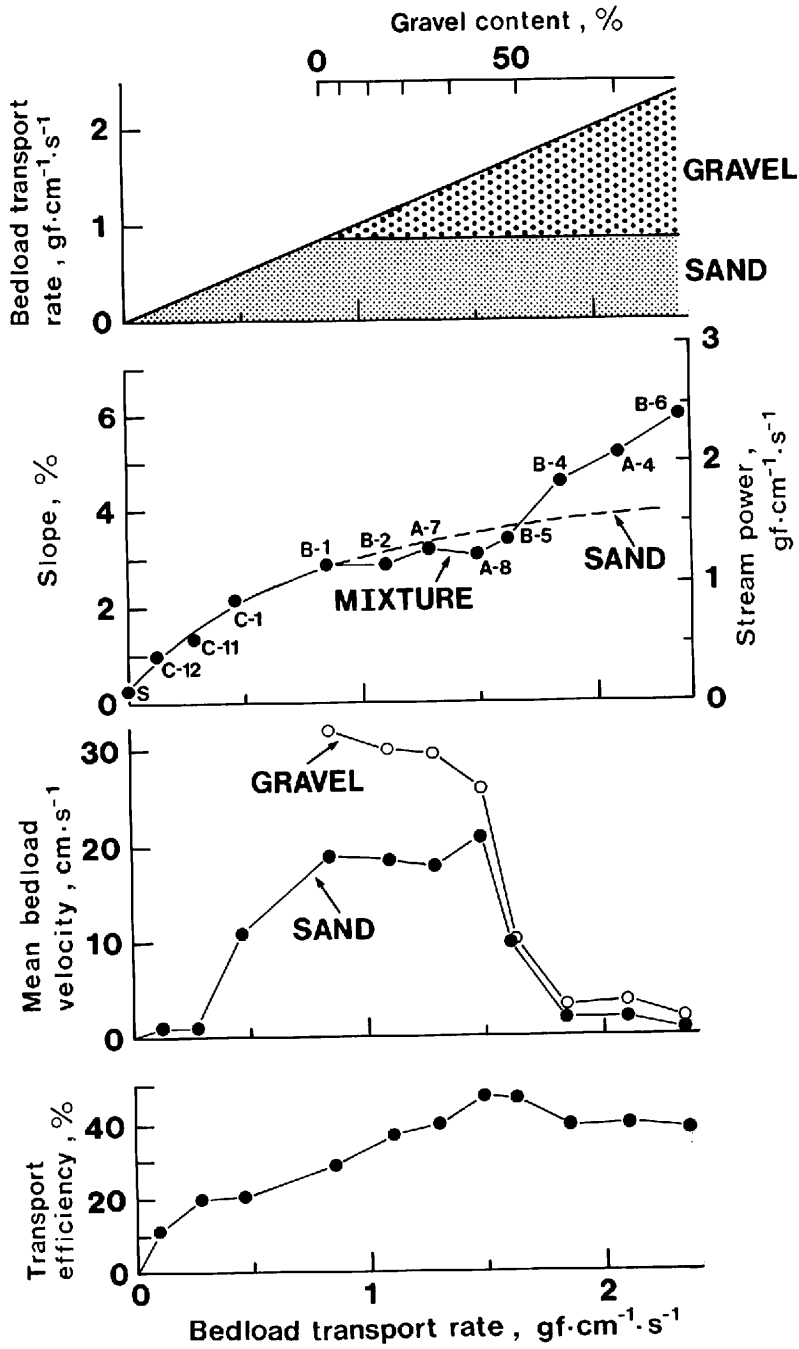
Run A-2 では、砂と礫をあわせた流砂量は増大したにもかかわらず、勾配すなわちストリーム・パワーはかえって減少した。移動しない礫の間隙を砂が埋めた結果、礫の移動様式は礫のみの場合（Run A-1）と比較して明瞭に変化し、河床全面に波長12～13cmの反砂堆が生じた。礫は反砂堆の下流側斜面で地送り状を呈して集団的に滑動した。その結果、反砂堆は毎分1mの速度で遡上した。

Run A-4 では、砂の供給量をさらに増したところ、勾配はさらに減少した。河床の反砂堆は河床全面に一樣に生じなくなり、その移動を連続的には追跡できなくなった。これは礫が集団的に移動する範囲と個別に移動する範囲とが混在するようになったためである。河床面での礫の移動を全体としてみれば、疎密流動の様相を呈してくる。

給砂量をさらに増したRun A-3で、上記の傾向はさらに顕著となった。すなわちRun A-3では勾配はいよいよ減少し、また河床の反砂堆は断続的になり、むしろ礫の間隙を砂が埋めて生じた平滑な河床が卓越し、そのところどころに移動中の礫が集積しているといった状態になった。平滑な河床上では礫の移動速度はきわめて速く、礫の



第5図 礫の供給量は一定で、砂の供給量を増した場合の勾配の変化 (Case 1)



第6図 砂の供給量は一定で、礫の供給量を増した場合の勾配の変化 (Case 2)

平均移動速度は砂の供給比率が増すほど、勾配が減少するにもかかわらず大きくなった。ただし礫だけの場合 (Run A-1) と比較して、砂が加わって勾配が減少した Run A-2 では、礫の移動速度は減少した。

砂の供給量をこれ以上増すことができないので Case 1 の実験はこれまでとした。

2) 砂の供給量は一定で礫の供給量を増した場合 (Case 2)

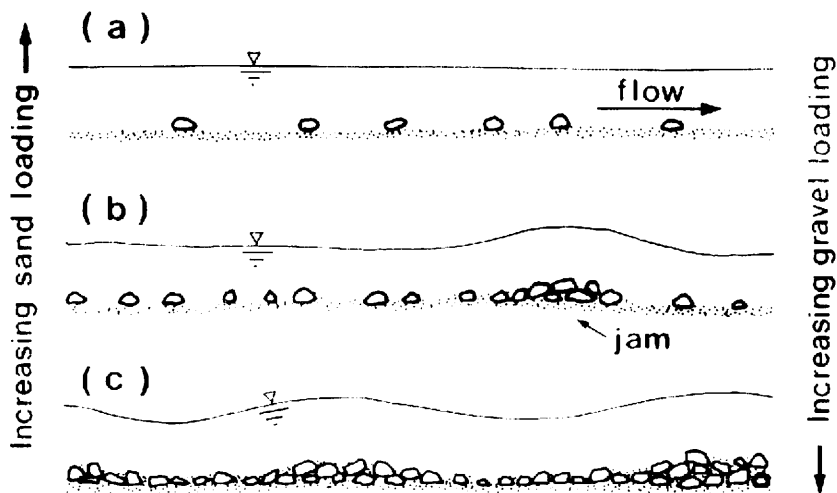
Case 2 の実験結果を第 6 図に示す。この Case は砂の供給量を一定 (8.5 gf s^{-1}) に保って礫の供給量を 15 gf s^{-1} まで増して、その影響を調べたものである。図中には参考のために、砂のみの場合について、供給量が 8.5 gf s^{-1} に達するまでは実線で、それ以上の給砂量については破線で勾配の変化を示した。砂だけを 8.5 gf s^{-1} 供給した Run B-1 では、河床は平坦河床であった。

Run B-2 では砂の供給量は変えずに礫を 1.6 gf s^{-1} 追加した。礫は、砂からなる河床表面に停止することなく、砂床上に突出してきわめて高速で転動し続けた。その様子を第 7 図 (a) に模式的に表わした。この状態は、高速道路上を自動車がスムーズに流れているのと同変良く似ている。

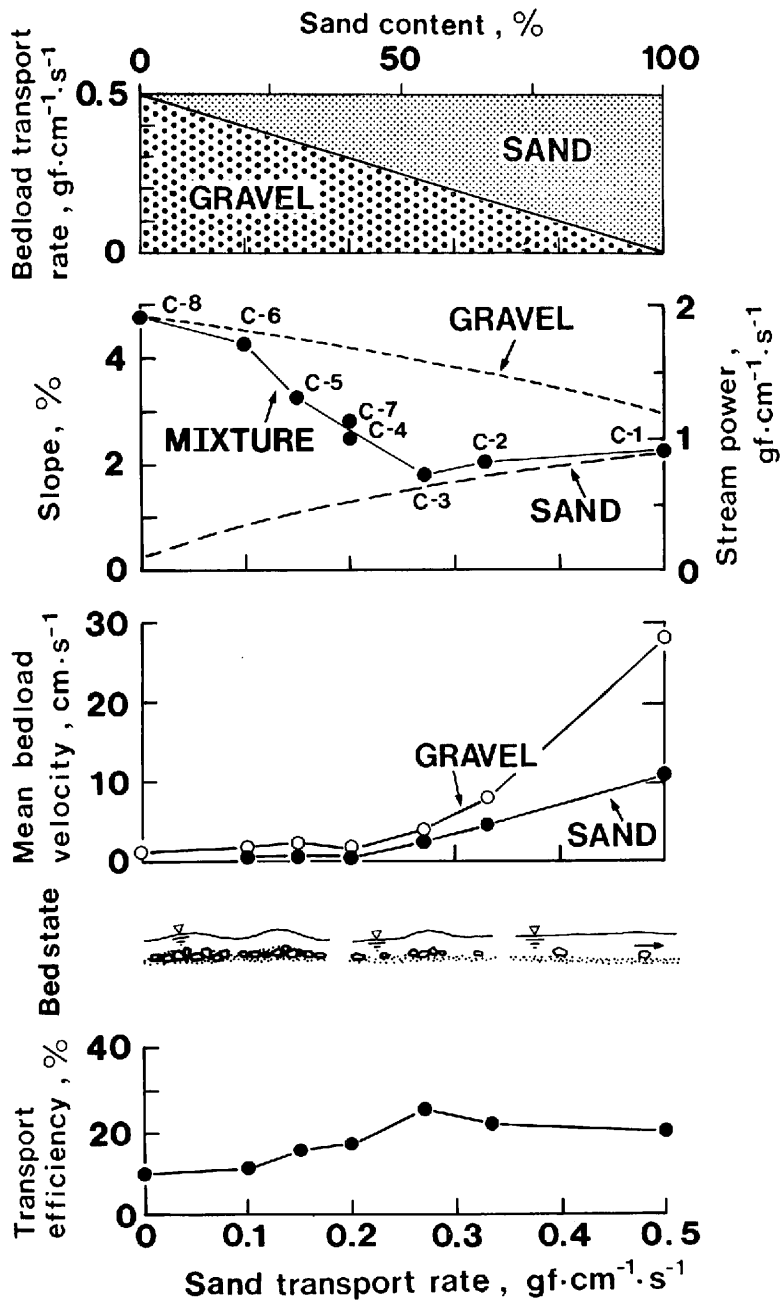
そこで、この状態を、礫の移動がスムーズな状態と呼ぶことにする。

礫の供給量を増した Run A-7・Run A-8 では、砂床面上を移動する礫の分布密度が増し、礫の移動速度がわずかに減少したが、スムーズな砂床面上を礫が高速で移動するという点では目立った変化は生じなかった。礫の供給量を増すにつれて水流が流送しなければならない流砂量は増大しているにもかかわらず、砂と礫の混合物を輸送するのに必要な勾配は、礫と砂の混合比率が 50% 程度まではほとんど増加しなかった。

ところが礫の供給量を砂の供給量とほぼ等しいまでに増した Run B-5 で、平滑な砂床面上を転動していた礫が水路の途中ではじめて集積して小さな山を生じた。そして水面はそこで盛り上がった。その様子を第 7 図 (b) に模式的に表わした。高速道路を走ってきた自動車が局部的に渋滞している様子と同変良く似ているので、渋滞と呼び、礫の集積 (渋滞) が水路の所々に発生している状態を部分的渋滞と呼ぶ。スムーズな区間での礫の移動速度はあまり減少していないにもかかわらず、部分的渋滞のため、礫の平均移動速度は半減した。



第 7 図 礫の流送状態を示す模式図
(a) スムーズ (b) 部分的渋滞 (c) 全面的渋滞



第8図 砂と礫を合わせた供給量は一定で、混合比率のみを変えた場合の勾配の変化 (Case 3)

礫の供給量を 10 gf s^{-1} に増した Run B-4 では、礫の集積箇所は水路1 mあたりに1箇所ほど、しかも1箇所につき2山ほどになった。このため礫の平均移動速度は極端に小さくなり、同時に勾配が急増した。なお Run B-5 までは、平衡状態になるとその後は勾配は変動しなかったが、Run B-4 では堆積域の上流端に生ずる跳水位置が上流・下流に変動した。後述する縦断的分級作用が発生したためである。

礫の供給量が 12 gf s^{-1} に達した Run A-4 については Case 1 で述べたとうり、礫の集積箇所が多数生じ、勾配はさらに増した。

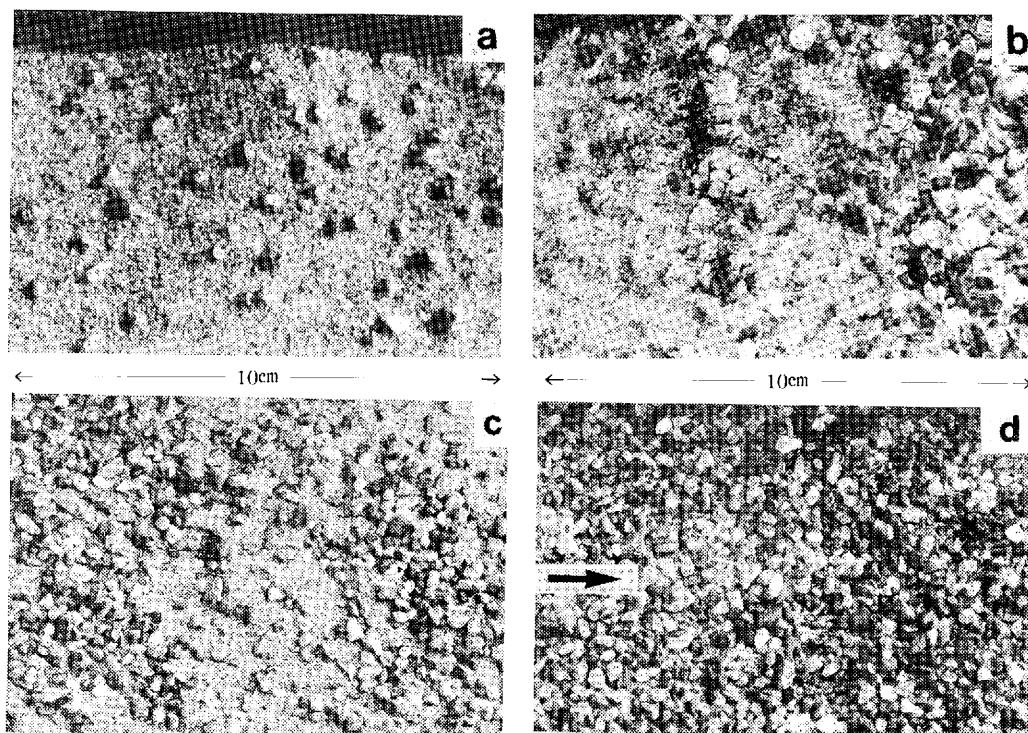
礫を砂の2倍近く供給した Run B-6 では、河床全面で渋滞が生じ、水面は水路全面で波立った。この様子を第7図(c)に模式的に表わした。この状態を全面的渋滞と呼ぶ。水面の波は停止波であるが、上流側の1波が消滅すると下流側に新たな波立ちが生じて波群としては流下した。砂の移

動速度は Case 2 でも Case 1 と同様、礫の移動速度の半分程度のことが多かった。

3) 砂と礫を合わせた供給量は一定で、混合比率のみを変えた場合 (Case 3)

Case 3 の実験結果を第8図に示す。この Case は礫と砂を合わせた供給量を 5 gf s^{-1} と一定に保って、礫と砂の混合比率のみを変えてその影響を調べたものである。図中には参考のために礫と砂を別々に流送するのに必要なストリーム・パワーを破線で記入した。

砂のみの場合 (Run C-1) には8 cm ほどの波長をもつ線状跳水利 (trains of antidune waves) が発生し、最上流側の1波が消滅しては下流側に新たな波が発生することを繰り返して、波群 (波群長1 m) としては毎分2 m の速度で前進した。砂のみの Run ではあるが、参考のためにトレーサー粒子を流して礫の移動速度を測定した。礫はスムーズに砂床面上を高速で転動し流下した。



第9図 礫の流送状態 (平面写真)
a : スムーズ (Run C-2, 停水後), b : 部分的渋滞 (Run C-4, 通水中),
c, d : 全面的渋滞 (Run C-6, 停水後)

礫と砂の供給比率が 1 : 2 の Run C-2 では、Run C-1 にみられた線状跳水列は弱まった。礫の移動速度は減少したが、なおもスムーズに砂床面上を転動した(第 9 図 a)。Run C-2 の勾配は砂だけの Run C-1 の勾配よりわずかであるが小さくなった。

礫と砂の供給比率が 1 : 1 に近い Run C-3 で勾配はさらに減少し、線状跳水はさらに弱まった。跳水の上端近くに礫が一時的に集積して、部分的渋滞状態が時おり出現しかかった。礫の移動速度は Run C-2 よりさらに減少した。砂の移動速度は礫の移動速度の半分ほどであった。礫の比率をさらに高めて礫と砂の供給比率を 3 : 2 とした Run C-7・Run C-4 で、明瞭な部分的渋滞が生じ(第 9 図 b)、勾配は急に大きくなった。そして砂礫の縦断的分級現象が顕著に生じた(第 10 図)。すなわち、砂より速い速度で転動している礫の一部が渋滞を生じて堆積し、砂はその上流部の間隙を埋めて貯留され、下流部まではなかなか流送されなくなる。砂が充てんした範囲は礫だけの範囲より緩勾配になる。貯留された礫と砂は水路下流端からの流出砂礫量に時間的な変動を与える。この時、礫と砂についてみると、はじめに礫の流出量が急増し、砂の流出量の増大はその後に

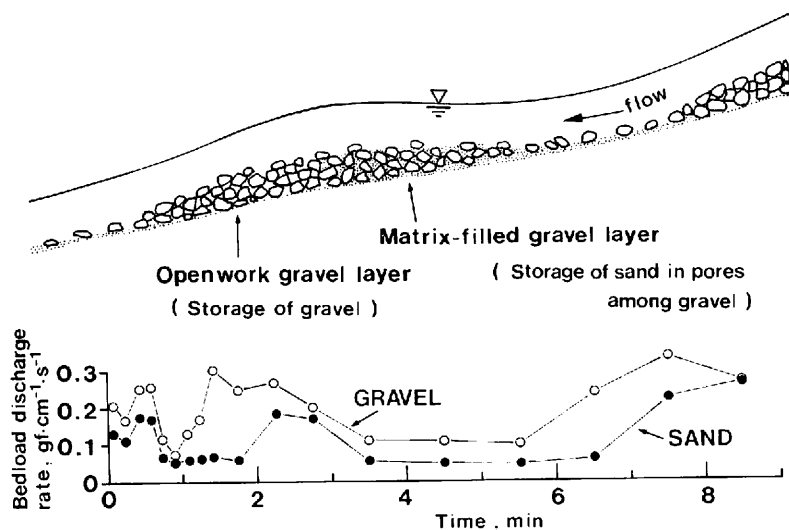
生ずる。

砂と礫の縦断的分級現象は、以上のように小規模な渋滞として生ずる場合のほか、水路全長のスケールでも生じた。この場合、礫の卓越する区間の勾配が、砂が間隙を充てんした区間の勾配より大きいため、礫の卓越した区間が生じたり消滅したりする毎に、河床勾配が増減し、一種の蝶番運動が生じた。

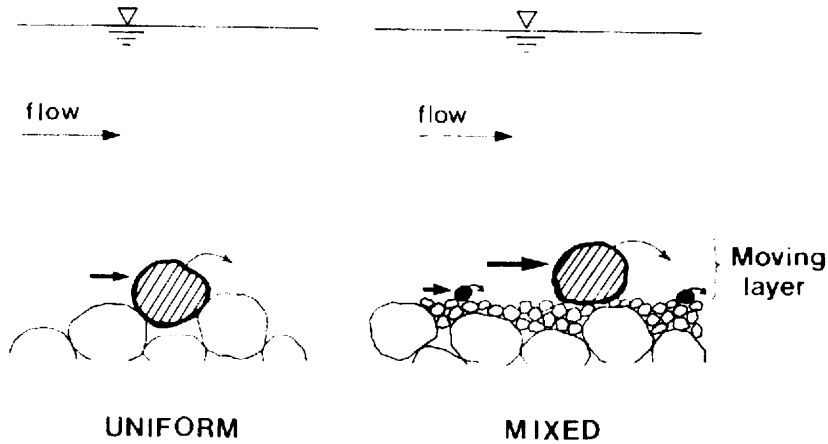
礫と砂の供給比率を 7 : 3 とした Run C-5 では、河床は砂がちではあるものの、礫の移動は全面的渋滞状態となり、勾配はさらに増した。礫と砂の比率が 4 : 1 の Run C-6 では(第 9 図 c, d)、勾配がますます大きくなった。そして礫のみの場合には、河床は波長 9 cm ほどの弱い带状跳水を呈した(Run C-8)。

IV 混合効果について

河床面上に移動しない礫が存在する場合には、砂には遮蔽効果が働く。礫も流送されている場合でも、砂堆の背面のように河床が次第に洗掘低下する場所では、砂に埋っている礫は動かされないため遮蔽効果が働く。しかし河床高の安定した平坦河床上を砂と礫が共に流送されている場合には遮蔽効果とは違った混合効果が生ずることが今回



第10図 縦断的分級作用による流出砂礫量の変動



第11図 一様粒径礫と混合砂礫の流送様式の違い

の実験によって判明した。

すなわち、砂と礫が共に高さの安定した河床上を流送されている場合には、第11図に概念的に表わしたように、砂礫で構成された平滑な河床上を砂は河床近くを、礫はより上方に突出して移動する。このことのために、砂と礫が混合することによって以下に述べる3つの混合効果があらわれる。

1) 減摩効果

Case 1 の実験結果 (第5図) から明らかのように、礫の供給量は一定のままで砂の供給量を増すと、水流が流送しなければならない砂礫の合計量は増加するにもかかわらず、それら混合物を流送するのに必要なストリーム・パワーはかえって減少する。その理由は、砂が混じると、河床の動かない礫の間に砂が入り込んで河床の起伏 (粗度) を減少させ、移動しようとする、あるいは移動している礫と河床面との摩擦抵抗を減少させるためと考えられる。小粒子が混合することによって大粒子の静的および動的な摩擦抵抗を減少させる効果を減摩効果と呼ぶことにする。この効果は砂の混合比率が増すほど強くあらわれる。

2) 突出効果

砂の混合比率が高まって、平滑な河床面上に礫が孤立して転動するようになると、移動する礫は砂より流速のより大きな高さに突出するため、より強い流体力を受ける。小粒子の混合比率が高く

なると、小粒子が平滑な河床面を形成し、移動する大粒子を必然的に河床面上に突出させ強い流体力を受けさせる効果を突出効果と呼ぶことにする。この効果は礫がスムーズに移動している場合に生じ、礫の混合比率が小さいほど明瞭に表われ、礫の移動速度が大きくなる (第6図)。

3) 連行効果

Case 2 の実験結果 (第6図) から、砂が混合することによる、もうひとつの混合効果の存在が判明した。すなわち、礫と砂の混合物を流送するのに必要なストリーム・パワーは、礫の混合比率が50%以内なら、同量の砂を流送するよりもかえって小さくてすむ。Case 3 の実験結果 (第8図) にも同様のことが示されている。この範囲内では見かけ上、砂よりも礫のほうが動かされやすい。この事実については Gilbert (1914, p. 178) がすでに記述し、その理由は礫が砂に衝突することによって砂を動かすためか、礫が砂床に局所洗掘をひき起こすためと考えられるとしている。

今回の実験結果によれば、礫の平均移動速度が砂よりも常に大きいこと、しかも見かけ上、礫が砂よりも運ばれやすいのは、礫の移動がスムーズな状態であることから、見かけ上、礫が砂より動かされやすい理由は次のように考えられる。すなわち、突出効果によって砂床面上に突出した礫が強い流体力を受けて、水流から大きな運動量を受け取り、

砂床面近傍をよりゆっくり動いている砂粒子と衝突することによって運動量の一部を砂に伝達するために、流砂効率が増すのであろう。この現象をマクロに見れば、移動する礫粒子群が砂粒子群を引きずっているとみなしてもよい。突出効果によって河床面上に突出した大粒子が、より低所にある小粒子を押し進める効果を連行効果と呼ぶことにする。

連行効果は、見方を変えれば、砂が平滑な河床面を形成して、移動する礫をその上に突出させることにより、水流の運動エネルギーを礫を仲介として砂に輸送させている、あるいは流体力を砂に伝達させているともみえる。運動エネルギーの運搬役を果している礫の数が少なくは効率的ではない。礫の移動がスムーズな状態である限り、礫の混合比率が大きいほど連行効果は強く働く。

4) 限界混合比率について

上述したように、連行効果は、礫の移動がスムーズな限り、礫の混合比率の大きいほど強く働く。一方、突出効果は礫の間隙を砂が埋めた平滑な河床上を、礫が突出して移動するために生ずるものであるから、連行効果とは異なって礫の混合比率が小さいほど強く働く。減摩効果も同様である。しかし、これら3つの効果の働き方については定量的にはよく判っていない。実験の結果明らかになったのは、礫の混合比率が大きくなると、ある混合比率を境として、急にこれらの効果が弱まって見えるということである。その限界は、移動する礫が渋滞を生ずるかスムーズな状態を保つかの境界である。

移動する礫が渋滞を起こすと、減摩効果はなお働くものの、突出効果と連行効果の影響は顕著に現われなくなる。これは、礫が渋滞を生じて礫と礫がかみ合うと、摩擦抵抗が強く効くようになるため、礫の性質が現象に強く反映されるからである。逆に砂が多いと多量の礫が存在するにもかかわらず、見かけ上、砂が現象を支配しているように見えることになる。混合砂礫の流砂現象には、礫の移動がスムーズか渋滞を生ずるかが最も強く反映される。

移動する礫の状態がスムーズから渋滞状態へ切り変わる限界の混合比率を限界混合比率と呼ぶことにする。この値は実験条件の範囲内では、Caseによらず、ほぼ50%であった。ただし、この値は流砂量（供給量）比である。礫と砂では移動速度が異なり、砂の移動速度は礫の60%程度であるので、河床面上での存在比率としては砂が60%強を占めている状態に相当する。

V おわりに

礫と砂を混合した二粒径混合砂礫の給砂実験によれば、混合砂礫がほぼ平坦河床をなして流送される場合には、砂の混合比率が増すと、移動しない礫の間隙を砂が埋めることによって河床面が平滑になるため、移動する礫と河床面との摩擦抵抗が減少し（減摩効果）、また礫は必然的に河床上に突出してより強い流体力を受け（突出効果）、砂より速い速度で移動する。このため流体力は礫を仲介にして砂に及ぶ（連行効果）。

これらの混合効果のために、礫が河床面上で個別にスムーズに移動するか渋滞を生ずるかが、混合砂礫の流砂現象に決定的な影響を与える。すなわち、礫の混合比率がある限界値（供給量比率で約50%）以上では、礫は河床上で渋滞を生じ、礫と礫がかみ合い、摩擦抵抗が強く働いて礫の性質が流砂現象に強く反映される。一方、礫の混合比率が限界値以下では、一転して礫の移動はスムーズになり、混合効果が働いて、多量の礫が存在するにもかかわらず、見かけ上、砂の性質が流砂現象を支配する。

謝 辞

本研究を行なうにあたり、混合砂礫の流砂実験についていろいろと御教示をいただいた、建設省土木研究所総合治水研究室長山本見一氏に深く感謝いたします。実験装置の製作は水理実験センターの小島豊盛・飯島英夫両技官によった。実験とデータの整理には地球科学研究科の伊勢屋ふじこさん（現在水理実験センター技官）、自然学類4年の小玉芳敬君（現在地球科学研究科）と仲井敬司君（現在環境科学研究科）に御助

力いただいた。記して、皆様に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 山本見一(1978) : 河川における土砂の移動機構に関する研究ノート——混合粒径河床材料の移動特性。土木研究所資料, 1416号, 226 p.
- Bagnold, R. A. (1966) : An approach to sediment transport problem from general physics. *U. S. Geol. Survey Prof. Paper*, 422-I, 37 p.
- Bagnold, R. A. (1973) : Bed load transport by natural rivers. *Water Resources Research*, 13, 302-312.
- Gilbert, G. K. (1914) : The transportation of debris by running water. *U. S. Geol. Survey Prof. Paper* 86, 263 p.
- Klingeman, P. C. and Emmett, W. W. (1982) : Gravel bedload transport processes. in Hey, R. D., Bathurst, J. C. and Thorne, C. R. ed. (1982) : *Gravel bed rivers*. John Wiley & Sons Ltd., 141-179.
- Rathbun, R. E., Guy, H. P. and Richardson, E. V. (1969) : Response of a laboratory alluvial channel to changes of hydraulic and sediment-transport variables. *U. S. Geol. Survey Prof. Paper*, 562-D, 32 p.
- White, W. R. and Day, T. J. (1982) : Transport of graded gravel bed material. in Hey, R. D., Bathurst, J. C. and Thorne, C. R. ed. (1982) : *Gravel-bed rivers*. John Wiley & Sons Ltd., 181-223.