

礫床河川における交互砂礫堆形成にともなう河岸の侵食 —混合粒径砂礫を用いた水路実験—

Bank Erosion Associated with Alternating Bar Formation :
Flume Experiment with Sand and Gravel Mixture

米山 哲郎*・松本 栄次**

Tetsuro YONEYAMA and Eiji MATSUMOTO

I はじめに

砂礫堆は、礫床河川において一般的にみられる河床形である。砂礫堆が形成されると水流は集中・発散を繰り返しつつ蛇行するので、河岸に向かって水流が集中する砂礫堆の前縁付近において、堤防決壊や河岸侵食が生じ易いことが知られている。また、砂礫堆は、河床砂礫が活発に移動する出水時に、その形を保ったまま下流へ前進することが知られている。このことは、河岸侵食の危険箇所が前進することを示している。以上のような砂礫堆形成にともなう河岸侵食は、急勾配で砂礫堆の形成されている河川が多い我が国においては、防災上の重要な問題の1つである。

砂礫堆形成にともなう河岸侵食が発生するのは出水時であり、侵食過程を野外で観察することは困難である。そのため、それに関する研究の多くは水路実験の手法を用いて行なわれてきた。砂礫堆による河岸侵食を蛇行の発達の問題と関連づけて取り扱った研究は少なくない。木下(1961, 1962)は、多くの砂礫堆河川で、洪水時に砂礫堆の前縁の下流で河岸侵食が生じていることを示し、それと蛇行の発達との関連を明らかにするために水路実験を行なっている。また、Schumm *et al.* (1987)は、砂礫堆の形成と蛇行との関連で行なわれた水路実験について

詳しくまとめている。このほかにも多くの研究がなされているが、それらによると砂礫堆前縁の下流で河岸侵食が生じ、流路は次第に蛇行性を強めていくことが明らかにされている。

しかし、実験材料に混合粒径砂礫を用いた水路実験が行なわれるようになり(池田・伊勢屋, 1986; Iseya and Ikeda, 1987; Kuhnelt and Southard, 1988など)、混合粒径砂礫の流送過程は均一粒径材料のそれとは全く異なることが明らかになってきた。これらの研究は、河床に粗粒な礫が多くみられる山間地の砂礫堆河川を理解するためには、砂礫堆が形成される条件における混合粒径砂礫の流送過程を理解することが不可欠なことを示している。

ところが、実験材料に混合粒径砂礫を用いた砂礫堆の実験としては、現在のところ、固定壁水路で行なわれた内島・早川(1987)、Lisle *et al.* (1991)など少数の例があるのみである。さらに、河岸に侵食性の材料を用いた実験に関しては、未だその例をみない。

そこで本研究では、1)山地河川で典型的にみられるような混合粒径砂礫の河床に形成される砂礫堆がどのような形態・構造・移動特性をもつか、またそれに関係する砂礫の流送様式がどのようなものであるかを明らかにすること、および、2)そのような砂礫堆をもつ河川における河岸侵食がどのような

*筑波大学大学院環境科学研究科(現 新潟県農地部佐渡農地事務所) **筑波大学地球科学系

形態・強度で生ずるかを明らかにすることを目的として、混合粒径砂礫・側岸侵食性水路を用いた実験を行なった。

II 実験方法

1) 実験装置

実験は、筑波大学水理実験センターの木製平面水路(幅81cm, 有効長7.5m)の中に、侵食性の材料からなる河岸を製作し、砂礫堆が形成されうる水理条件で一定量の水と砂礫を水路上流端に供給し続け、河岸侵食を生じさせた(写真1)。流量は電磁流量計とバルブにより制御した。供給砂礫量は均一な砂礫を載せたベルトコンベアを一定の速度で回転させることにより制御した。水路床勾配は、水路底部とりつけた油圧ジャッキにより0~10%の範囲で任意に変えることができる。

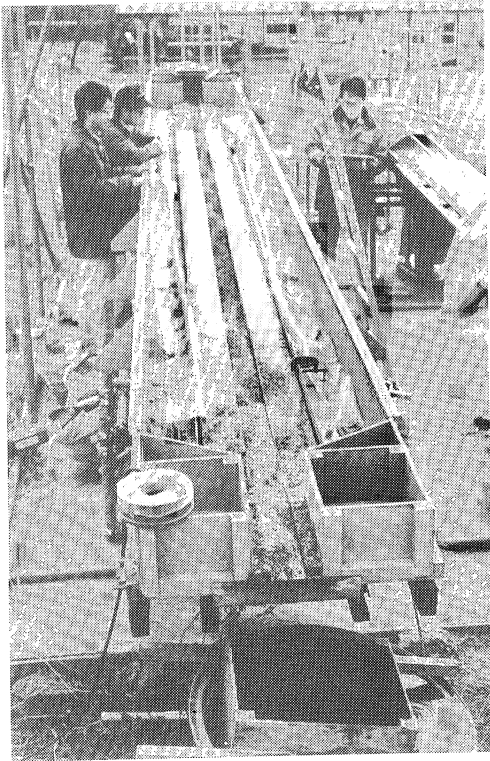


写真1 実験装置 (水路の下流側から撮影)

2) 実験条件

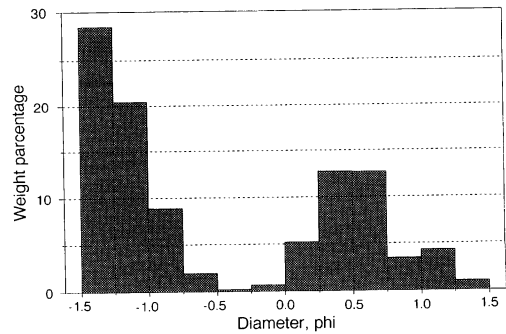
供給砂礫は、淘汰の良い細礫(平均粒径 $d_m=2.77$ mm, 淘汰度 $d_{16/84}=1.39$)と粗砂($d_m=0.78$ mm, $d_{16/84}=1.37$)を重量比6:4の割合で混合したものをを用いた。すなわち、供給砂礫は顕著な双峰性の粒度組成を示す混合粒径砂礫である(第1図)。なお、細礫と粗砂は、以下それぞれ礫および砂と呼称する。砂礫供給量は4 g/sec, 給水量は180cc/secとし、侵食開始時の流路の幅は10cmとした。水路床勾配は、以上の条件によって決定される動的平衡勾配(6.53%)よりわずかに大きくなるように調節した。従って水路上流端では水路床が露出した。予備実験の結果、以上の条件で給水・砂礫供給をつづけると明確な前縁を持つ交互砂礫堆が形成されることが確認されている。

3) 河岸物質

河岸物質としては各種の材料を予備実験などにより検討した。検討した材料は辻本・砂村(1984)および戸田・砂村(1990)が用いた人工岩石、砂と石膏の混合物に水を加えたもの、砂を樹脂で固めたもの、およびベントナイトと砂の混合物である。

その結果、人工岩石は、水中で長時間養生する必要があるため、製作に時間がかかりすぎること、また必要とする量を一度に製作し養生することが困難なことなどにより、考慮の対象外とした。

石膏と砂の混合物は、石膏と砂の比が1:4程度と石膏の比率が比較的高い場合には、強度も均一で、水の浸透によって強度が急激に低下することもなか



第1図 実験に使用した混合粒径砂礫の粒度分布

った。しかしこの混合率では強度が大きすぎ、今回の実験条件では河岸侵食が起こらなかった。混合率を1:8まで下げたものを使って通水すると、当初は適度な速度で河岸侵食が生じたが、通水を継続するうちに、水が浸透し、急激に強度が低下して、河岸はぼろぼろと溶けていった。

砂を樹脂で固めたものは、樹脂の濃度を増減することにより、任意の強度の河岸を製作することができる。しかし、樹脂が硬化するまでに樹脂を希釈した水が下方へと移動してしまうため、均一な強度の河岸を製作することができなかった。

ベントナイトと砂の混合物は、ベントナイトの混合比によって任意の強度の河岸が製作できる。また、コンクリートミキサーを用いて攪拌することにより、均一な強度の材料を大量にしかも短時間で作ることができる。また、河岸材料を水に浸して放置した結果、本実験程度の実験時間では強度が変化しないことが確認された。

そこで本実験では、ベントナイトと供給砂礫用の砂を重量比1:40で混合し、それに総量の28%の水を加えて固めたものを用いることにした。供給砂と同じ粒度組成の砂を用いたのは、侵食によって河岸からもたらされる物質による流送砂礫の粒度組成変化を最小限におさえるためである。

4) 実験手順

実験時間を短縮するために、通水前にあらかじめ水路床に2.5cmの厚さで供給砂礫と同じ粒度組成の砂礫を敷きつめた。また、水路内の現象が定常になるまで河岸侵食が起こらないようにするために、河岸をビニールシートで覆っておいた。

通水を開始して10分程度経過すると、礫が砂よりも速く運ばれて水路下流端から2.5~4.0mの区間に集積し、そこより上流では河床上昇を生じた。さらに通水を継続すると、砂が礫の集積区間まで運ばれようになり、集積している礫の間隙を埋めるようになる。すると礫の易動度が高まり、礫は下流へ運ばれ、礫の集積区間は上流側から解消していった。しかし、前述の通り礫の移動速度は砂よりも大きいため、もとの集積区間の下流で再び礫の集積が生じた。つまり、礫の集積区間が下流に移動したことになる。

礫の集積区間およびそれを追いかける砂の集団が水路下流端から流出してしまうと、河床縦断面形はほぼ直線になり、水路下流端からは供給砂礫量とほぼ等しい量の砂礫が流出するようになった。この時点で、水路内の現象が定常になったとみなし、河岸を覆っていたビニールシートを取り除き、河岸侵食を開始させた。通水開始から定常になり侵食を開始させるまで、190分を要した。

河岸侵食開始後は、10~15分ごとに停水して、河床の平面形のスケッチ・写真撮影、および横断面形の計測を行なった。横断面形は、水路と平行に設置したレールを基準に、定規を用いて横断方向と鉛直方向それぞれ0.5mm単位で計測した。侵食により生じた河岸のオーバーハングは定規によりその深さを測定し、流路幅を補正した。なお、停水は急激に行なったため、それにともなう河床形の変形はほとんど生じなかった。また、再通水の影響もほとんど認められなかった。

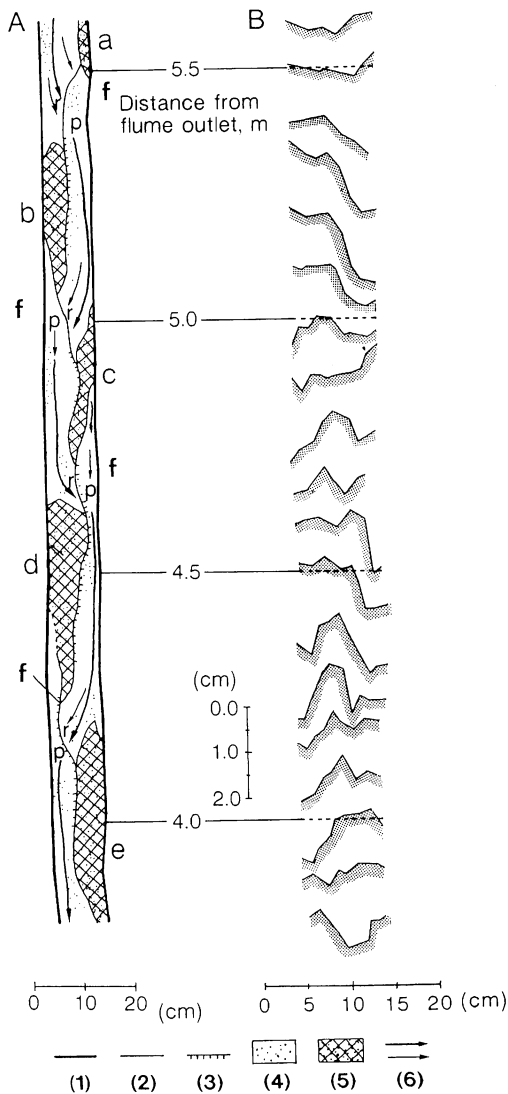
通水中は、水・砂礫の流れ・河床形の変形・河岸侵食の様子などについて詳細な観察を行なった。また、流出砂礫量・表面流速・水深の測定のほか、平面形のビデオ撮影を行なった。流出砂礫量は、水路下流端で三角コーナー用紙製ゴミ袋により流出砂礫を採集し、風乾後、ふるいを用いて砂と礫に分離し、それぞれの重さを電子天秤で0.01g単位まで測定して求めた。表面流速は、浮子法を用いて計測した。水深は河床高と水面高の差から求めた。ビデオ撮影は、砂礫堆前縁位置の時間変化を求めたり、砂礫や水の流れの肉眼観察を補助する目的で行なった。

III 実験結果

1) 砂礫堆の形態および移動特性

第2図は、河岸を覆うビニールシートを取り除き河岸侵食を開始させる直前の河床形を、水路の一部区間について示したものである。平面図(A)の水流線は、停水直前の水流の様子をビデオ画像から読みとったもので、そのうち太線は主流線である。横断面図(B)は、10cm間隔でとった河床横断面形を並べたものである。

これらを見ると、深掘れ(pool)が左右岸交互に



第2図 侵食開始時の河床形の平面図 (A) および横断面図 (B)
 a~e : 砂礫堆 (Bar), f : 砂礫堆の前縁 (Bar front), p : 深掘れ (Pool), r : 瀬 (Riffle),
 (1) : 河岸 (Bank), (2) : 河床形の傾斜変換線,
 (3) : 急崖 (Scarp), (4) : 礫 (Gravel), (5) : Gravel jam, (6) : 水流線 (Flow line)

並んでおり、水流は集中発散を繰り返しつつ蛇行しているのがわかる。つまり河床には交互砂礫堆が形成されている。しかし、この砂礫堆河床は、均一粒径の実験で観察されるものとは、以下の諸点で性質を異にしている：

まず、均一粒径の条件で形成された砂礫堆河床では、流量が少なくて流れの乱れが非常に小さい場合を除き、流路全面を水流が流れ、砂礫堆は絶えず下流へと移動（前進）することが知られている（池田・太田，1987）。

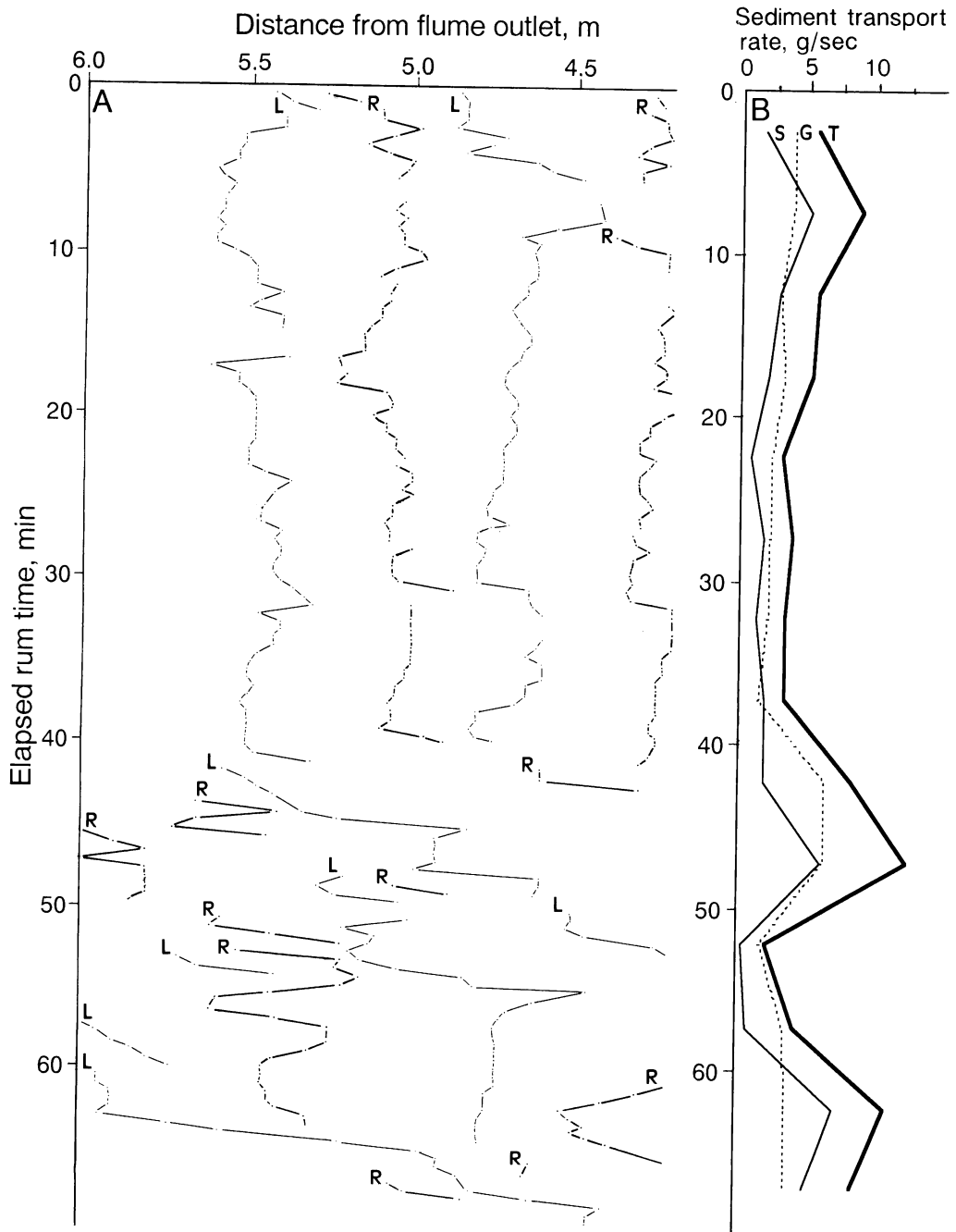
ところが、供給砂礫に混合粒径砂礫を用いた本実験では、運ばれている礫の一部が砂礫堆の背面に集積して水面から顔を出し、島を形成した。以下、礫の集積により形成されたこのような島を gravel jam と呼称する。gravel jam 以外の河床はほとんどの場所で砂がちになっており、砂がちの河床では砂礫がスムーズに運ばれていた。gravel jam が形成された結果、砂礫堆背面における水流の発散は妨げられ、水が限られた範囲を流れるようになり、pool への水流の集中が強まった。また、gravel jam が形成されて砂礫堆背面を通過する砂礫がなくなると、砂礫堆の位置は固定した。

しかし、gravel jam は、定常的に存在しているわけではない。Gravel jam の上流端部分は絶えず拡大・縮小を繰り返しており、ときには gravel jam 全体が解消されることもある。このように gravel jam が、解消され砂礫堆の背面を水と砂礫が流れるようになった時、砂礫堆は前進しはじめる。

次に、均一粒径実験では、流出砂礫量は砂礫堆の前進にもなって周期的な変動を示す。ところが混合粒径砂礫を用いた本実験の場合、砂礫流出量は時間の経過とともに不規則に変動した。第3図は、砂礫堆前縁位置の時間変化を示した砂礫堆走時曲線

(A) と、流出砂礫量の時間変化 (B) をあわせて示したものである。いずれの図も、縦軸は、侵食開始からの経過時間である。砂礫堆走時曲線 (A) の横軸は水路下流端からの距離を、流出砂礫量の時間変化の図 (B) の横軸は流路下流端から1秒あたりに流出した砂礫量を示している。

流出砂礫量は、侵食開始から同10分過ぎまでは供



第3図 砂礫堆前縁位置の時間変化(砂礫堆走時曲線, A)および流出砂礫量の時間変化(B)
 流出砂礫量は30秒間の平均値
 L: 砂礫堆前縁(左岸), R: 砂礫堆前縁(右岸), T: 流出砂礫量, G: 礫の流出量, S: 砂の流出量

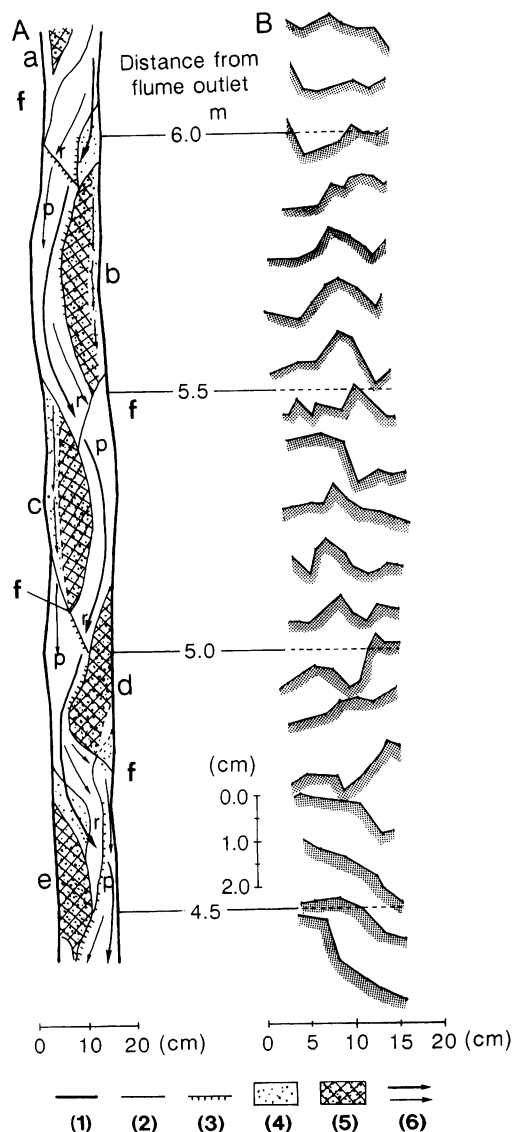
給砂礫量 (4 g/sec) よりも多く、それ以降40分までは供給砂礫量とほぼ等しかった。ところが侵食開始後40分をすぎると、定常に給水・砂礫供給を続けたにもかかわらず、流出砂礫量は急激に増加した。同50分過ぎに一時的に減少した時期をはさむものの、同40~70分までは、供給砂礫量の2~3倍の砂礫が流出している。なお、流出砂礫量が供給砂礫量とほぼ等しかった時期には、河床で侵食も堆積も起こらず、河床高はほぼ一定であったが、流出砂礫量が大きく上回った時期には、河床は低下傾向になっていた。

また、砂礫堆走時曲線を見ると、侵食開始後10分から同40分までのように砂礫堆の前進がほとんどみられない時期と、侵食開始直後の数分間と同40分から70分までのように砂礫堆が活発に前進していた時期とがあることがわかる。

上記の流出砂礫量変動の周期は、砂礫堆の前進速度より明らかに大きくなっており、この変動は、砂礫堆の前進にともなう流出砂礫量変動より1オーダースケールの大きな現象である。しかし、砂礫堆が固定あるいは前進する時期と流出砂礫量との間には密接な関係が認められる。すなわち、流出砂礫量が相対的に少ない時期には大多数の砂礫堆は固定し、流出砂礫量が相対的に多い時期には砂礫堆の多くが活発に前進している。以下、流出砂礫量が少なく砂礫堆が固定した侵食開始後10~40分を流出砂礫量安定期、流出砂礫量が多く砂礫堆が活発に前進した同40~70分を流出砂礫量増大期と呼称し、2つの時期それぞれで砂礫堆の形態、水・砂礫の流れ、河岸侵食の様式がどのようなであったかを述べる。

2) 流出砂礫量安定期の砂礫堆と河岸侵食

第4図は、流出砂礫量安定期の典型的な砂礫堆河床の平面図 (A) および横断面図 (B) (侵食開始から25分後) である。平面図中の a~e は砂礫堆を示す。この時期の gravel jam は礫のみが数層かみ合った状態で強固に発達しており、かつ流路の半分以上を占めている。侵食開始前 (第2図) と比べ河岸侵食が進行して流路幅は拡大しているが、gravel jam が広く発達しているため、砂礫がスムーズに運ばれる範囲の面積は、侵食開始時と大きく変わっていない。



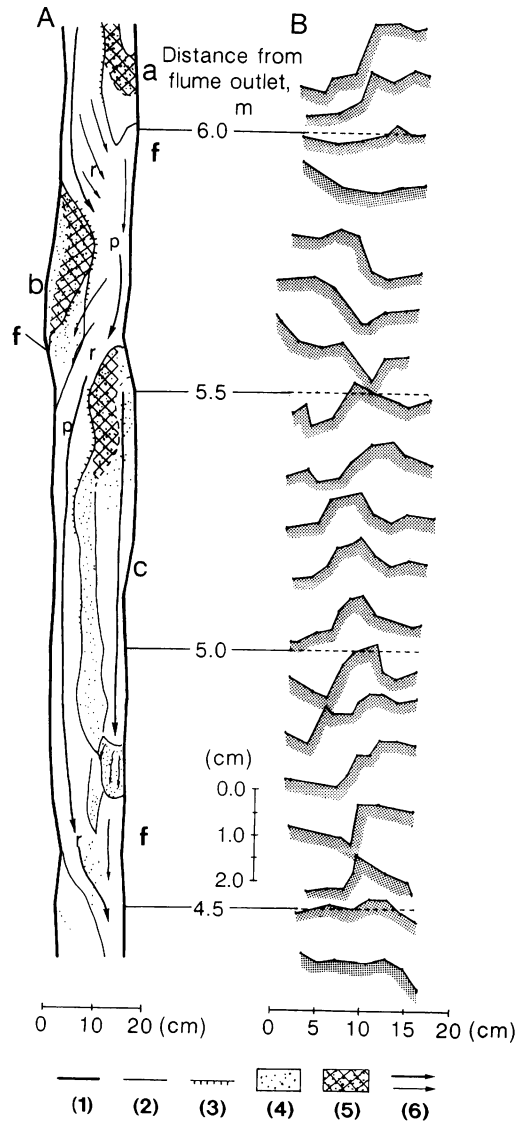
第4図 流出砂礫量安定期の河床形の平面図 (A) および横断面図 (B) (侵食開始から25分後)
a~e: 砂礫堆 (Bar), f: 砂礫堆の前縁 (Bar front), p: 深掘れ (Pool), r: 瀬 (Riffle),
(1): 河岸 (Bank), (2): 河床形の傾斜変換線,
(3): 急崖 (Scarp), (4): 礫 (Gravel), (5): Gravel jam, (6): 水流線 (Flow line)

流出砂礫量安定期であっても gravel jam は拡大・縮小を繰り返しており、砂礫堆 c のように gravel jam の河岸寄りの部分が取り去られることも多い。そのため、砂礫堆の横断面形は一般に凸型を呈している。また、まれに gravel jam が完全に解消され、砂礫堆が前進することもあった。しかし、gravel jam がすみやかに再形成されたため、その前進量は小さかった。Gravel jam の拡大は、流送中の礫の一部がその上流端に付加することにより生じた。その結果、水や砂礫がスムーズに運ばれる区間は上流へと押しやられ、上流に隣接する砂礫堆の前縁が侵食を受け、砂礫堆が上流へ後退する場合もある。第3図の流出砂礫量安定期における砂礫堆の小さな(10~20cm程度)の前進・後退は、以上のような gravel jam の縮小・拡大にともなって生じたものである。

流出砂礫量安定期には、通常、gravel jam の発達によって、水や砂礫がスムーズに流れる範囲は狭められ、水流は河岸の狭い範囲に集中し、その部分を活発に侵食した。ただし、gravel jam が急速に縮小あるいは拡大している一時的な変動時には、河岸侵食は顕著でなかった。すなわち、gravel jam が縮小しつつある時には、gravel jam からもたらされた砂礫を多量に含んだ流水は、河岸に沿って河岸にほぼ平行に直線的に流れた。そのため、河岸に対する攻撃性は減少した。一方、gravel jam が急速に拡大しつつある時には、水流は強く屈曲し、河岸を攻撃したが、流送中の礫の多くが gravel jam に貯留されてしまったため、河岸に衝突する礫の量は少なく、結果として、河岸侵食は進行しなかった。

3) 流出砂礫量増大期の砂礫堆と河岸侵食

第5図は流出砂礫量増大期における砂礫堆の平面図(A)および横断面図(B)である。この時期には、砂礫堆 b のように gravel jam が顕著に発達した砂礫堆と、砂礫堆 c のように gravel jam が解消され、砂礫堆背面上を砂礫が運ばれるようになった砂礫堆とが観察された。流出砂礫量安定期と異なり、このような gravel jam が解消された砂礫堆が多いのがこの時期の特徴である。この2つのタイプの砂礫堆はどちらかの形態をとりつづけるのではなく、数分ごとに gravel jam の集積と解消を繰り返した。



第5図 流出砂礫量増大期の河床形の平面図(A)および横断面図(B) (侵食開始から50分後)
a~c: 砂礫堆(Bar), f: 砂礫堆の前縁(Bar front), p: 深掘れ(Pool), r: 瀬(Riffle),
(1): 河岸(Bank), (2): 河床形の傾斜変換線,
(3): 急崖(Scarp), (4): 礫(Gravel), (5): Gravel jam, (6): 水流線(Flow line)

流出砂礫量増大期においても、流出砂礫量安定期と同様に gravel jam が発達している砂礫堆は固定し、gravel jam をもたない砂礫堆は前進した。砂礫堆 c のように gravel jam が完全に解消されなかった砂礫堆では、残存している gravel jam をきっかけとして礫の集積がはじまった。その場合、礫の集積の進行にともなって、gravel jam を迂回する水流の屈曲は強まっていき、自らの前縁を侵食した。第 2 図の流出砂礫量増大期における砂礫堆の固定および前進・後退は、以上述べた砂礫堆背面における礫の集積および解消に対応して生じたものである。

集積帯が解消されてしまった砂礫堆では、河床の広い範囲が水が流れるため、gravel jam が発達した砂礫堆より河岸への水流の集中は弱かった。しかし、gravel jam が解消の過程にある間は、運ばれている砂礫の量が多く、河岸に多数の礫が衝突して河岸侵食が進行しているのが観察された。また、砂礫堆の前進・後退にともなって水流が河岸に集中する場所すなわち水衝部が絶えず変化した。そのため、流出砂礫量増大期である侵食開始後 40~70 分の間では、河岸は直線的に侵食され後退した (第 5 図)。

4) 河岸侵食様式と侵食速度

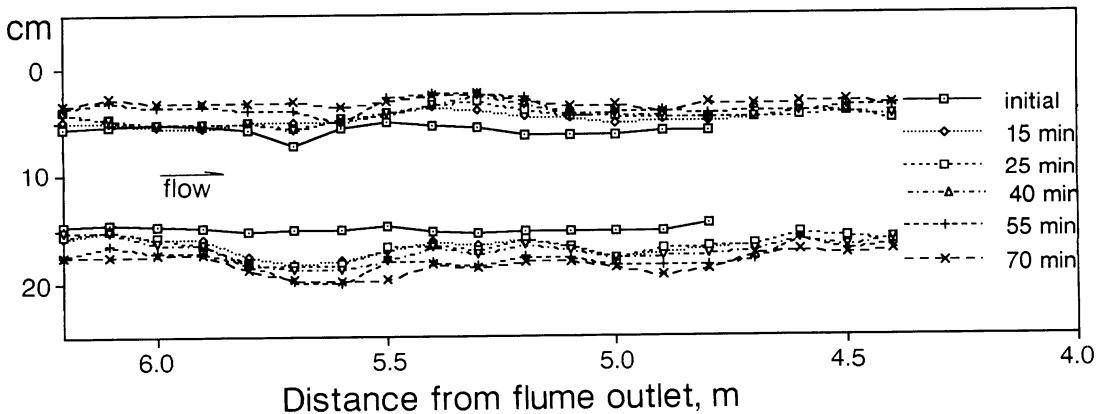
第 6 図は、河岸の位置の変化を横断面形の計測の繰り返しにより求めたものである。前述の通り、侵食開始後 5 分から 40 分までが流出砂礫量安定期、同 40~70 分が流出砂礫量増大期である。これをみると、

流出砂礫量安定期には、右岸の 6.2~5.5m, 5.0~4.7 m, 左岸の 5.6~5.2m などの限られた範囲で河岸侵食が進行し、河岸は左右岸交互に、スプーンでえぐられたような円弧状に侵食されている。一方、流出砂礫量増大期には、それまでほとんど侵食を受けなかった部分も侵食され、河岸はより直線的になっている。

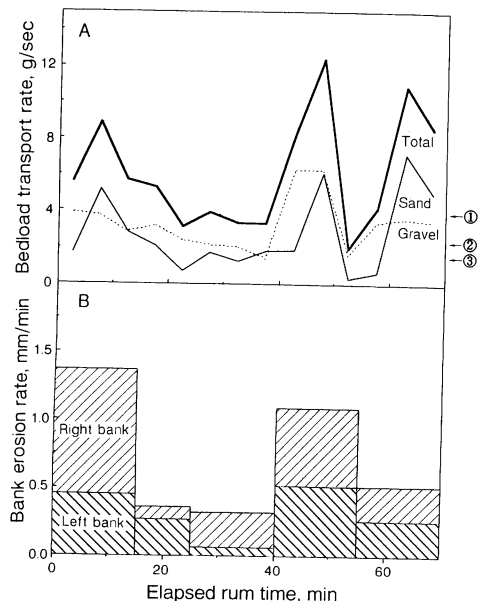
第 7 図は、流送砂礫量 (A) と河岸侵食速度 (B) の時間変化を示したものである。河岸侵食速度は各回の横断面形の計測で得られた河岸位置の差 (mm) を経過時間 (分) で除したものを、水路下流端から 6.2~4.8m 区間の全測線について平均したものである。

この図では、流出砂礫量が相対的に少ない侵食開始後 5~40 分は河岸侵食速度が小さく、流出砂礫量がとくに多かった 40~55 分は河岸侵食速度が大きくなっているなど、一般に、両者の間には正の関係があることが読みとれる。

ただし、侵食開始直後の 15 分間は、流出砂礫量が供給砂礫量の 2 倍程度であったにもかかわらず河岸侵食速度は非常に大きくなっている。これは、流出砂礫量が多かったことのほかに、流路幅が狭い、つまり水深が大きかったこと、および侵食を開始するまでの通水によって河岸の強度が若干低下してしまったなどのためと考えられる。また、侵食開始後 40~70 分では、流出砂礫量が多いものの、河岸侵食速度は



第 6 図 河岸侵食による両河岸の後退



第7図 流出砂礫量 (A) および河岸侵食速度 (B) の時間変化
 流出砂礫量は30秒間の平均値
 ①：供給砂礫量，②：礫の供給量，③：砂の供給量

15～40分の1.5倍程度と比較的大きくない。これは、河岸侵食による拡幅によって水深が減少してしまったためと考えられる。

以上のことから、流路幅の影響なども考えられるものの、流出砂礫量が相対的に小さい時期には河岸侵食速度が小さく、流出砂礫量が相対的に多い時期には河岸侵食速度が大きいといえる。

IV 考察

1) 流出砂礫量変動の発生機構

本実験では、長時間一定量の給水・砂礫供給をつづけたにもかかわらず、砂礫供給量と流出砂礫量がほぼつりあった時期（流出砂礫量安定期）と、流出砂礫量が供給砂礫量をはるかに上回った時期（流出砂礫量増大期）とに大きく分かれた。これは砂礫堆の前進ともなっていて生ずる流出砂礫量の変動より1オーダー大きなスケールの変動である。このような

流出砂礫量の大規模な変動がいかんして生じたかについては、今回の実験で十分に解明することはできなかったが、目下のところ筆者らは以下のように考えている。

混合粒径砂礫の流送過程では、砂と礫の流送速度に違いがある。流れが強く砂と礫が共に運ばれるときには、礫のほうが砂より速やかに流送され、礫は下流に選択的に堆積する。このため、水路の上流部には砂が多く堆積し、下流部には礫が多くなるという砂と礫の縦断的な分級が生じる。このような水路上流部の砂がちな部分において、何らかの理由で河床低下が生じ、砂が放出されると、下流の河床はその砂によって平滑化され、砂礫が緩い勾配でも運ばれるようになる。こうして河床低下が水路全体に波及し、その結果、流出砂礫量が増加する。実際、今回の実験でも、流出砂礫量増大期には、河床は全般的に低下傾向を示していた。

上述のような砂と礫の縦断的な分級および河床の低下は、本実験のように短い実験水路では水路の全長を一単位として生じたが、より長い流路では、砂がち区間と礫がち区間、あるいは侵食傾向の区間と堆積傾向の区間とが大きく交互に繰り返す形となるであろう。そして、この繰り返しが下流へ前進するのにもなっていて、一定の区間でみれば、侵食傾向と堆積傾向、すなわち流出砂礫量の増減が大きな時間的周期で繰り返されると考えられる。このように水平的に長波長の侵食・堆積区間の繰り返しとそれらの移動は、木下（1962）が栃木県蛇尾川の扇状地区間の調査から報告した「掃流うねり」に相当する可能性が高いと考えているが、この点については今後の検討が必要である。

2) 砂礫堆の固定・前進の機構

本実験では、砂礫堆背面で礫が gravel jam をなして集積したときには砂礫堆は固定し、それが解消されたときには砂礫堆は前進した。このような砂礫堆の挙動（固定・前進）には、流送砂礫中の砂が大きな役割を果たしていると考えられる。

すなわち、上流の河床低下などにより生じた砂の比率が高い砂礫の流れが、gravel jam に到達すると、砂が gravel jam の礫の間隙を埋め、河床の粗度を減

少させる。こうして易動度が高まった gravel jam の礫は、はがされたようにして下流へと急速に運ばれ、gravel jam が解消されてしまう。それにより、背面上を砂礫が運ばれようになると、それらの一部が砂礫堆前縁に順次堆積・付加し、砂礫堆は前進する。

逆に、流送砂礫中の砂の比率が減少すると、水深が浅い砂礫堆背面での礫の易動度が低下し、そこに礫が引っかかって停止するようになる。このようにいったん数個の礫が背面で停止すると、それが障害物として働くため、礫の集積が急激に進行し、流れを対岸の pool の方へ押しやってしまう。その結果、背面を越える水および砂礫の流れはなくなってしまい、砂礫堆前縁での砂礫の堆積は起こらない。つまり砂礫堆は固定してしまう。

3) 流出砂礫量変動と河岸侵食様式・速度

砂礫堆形成にともなう河岸侵食様式および侵食速度は流出砂礫量の変動に対応しており、相対的に流出砂礫量が少ないとき（流出砂礫量安定期）には河岸は円弧状に侵食され、侵食速度は小さかった。反対に、流出砂礫量が相対的に多いとき（流出砂礫量増大期）には河岸は直線的に侵食され、侵食速度は大きかった。

このような河岸侵食様式の違いは、2つの時期の砂礫堆移動特性に起因していると考えられる。すなわち、流出砂礫量安定期には、gravel jam によって水や砂礫の流れの範囲が規制されており、河岸の水衝部は狭い範囲に限られる。しかも砂礫堆がほとんど固定しているため、その位置は大局的に変化しない。そのため、河岸の限られた部位のみが侵食される。一方、流出砂礫量増大期には、水衝部が砂礫堆の前進にともなって移動し、河岸は直線的に侵食される。

河岸侵食速度の違いは、河岸に衝突する砂礫の量に起因していると考えられる。流出砂礫量安定期には gravel jam によって水流の範囲が狭められているため、水流は河岸に強く集中する。しかし、水流中において有効な研磨材の働きをする砂礫の量が少ないため、河岸侵食速度は小さい。とくに gravel jam が拡大しつつあるときには砂礫の量が非常に少ない。

一方、流出砂礫量増大期には gravel jam が顕著に発達せず、水は河床の広い範囲に拡散して流れるため、河岸への水流の集中は流出砂礫量安定期ほど強くはない。しかし、この時期には大量の砂礫が流送されており、それらが河岸に衝突するため河岸が大きく侵食されると考えられる。

V おわりに

ベントナイトと砂の混合物を河岸物質とした側岸侵食性の水路（初期河道幅10cm）において、交互砂礫堆が形成される条件で、一定量の水（180cc/sec）と細礫（平均粒径2.77mm）と粗砂（同0.78mm）を重量比6：4で混合した混合粒径砂礫（4 g/sec）を供給しつづける実験を行なった。その結果、以下のことが明らかになった。

1) 混合砂礫の砂礫堆河床では、運ばれている礫の一部が砂礫堆の背面に集積して島（gravel jam）を形成する。Gravel jam が形成されると砂礫堆は前進しなくなり、反対にこれが解消されると砂礫堆は前進する。

2) 水と砂礫の供給が一定であるにもかかわらず、供給砂礫量と流出砂礫量がほぼ等しい時期（流出砂礫量安定期）と、流出砂礫量が供給砂礫量を大きく上回る時期（流出砂礫量増大期）といった、流送砂礫量の急変が生ずる。混合砂礫河床には、砂礫堆移動スケールより一次元大きな時・空間スケールの周期的河床変動がある可能性があり、上述のような流送砂礫量の急変は、この大規模河床変動の一過程を示すものとする。

3) 流出砂礫量安定期の砂礫堆には、gravel jam が強固に発達しており、砂礫堆はほとんど前進しない。一方、流出砂礫量増大期には gravel jam が頻繁に解消され、砂礫堆は活発に前進する。

4) 流出砂礫量安定期には、位置がほぼ固定した砂礫堆に規制されて蛇行する水流によって河岸は円弧状に侵食され、流出砂礫量増大期には、砂礫堆が頻繁に移動するため河岸は全面的に侵食され直線的な河岸が形成される。

5) 河岸侵食速度は、少量の砂礫しか含まない水流で侵食された流出砂礫量安定期より、多量の砂礫

が流送され、河岸に多くの砂礫が衝突した流出砂礫量増大期の方が大きい。

一般的には河川の上流で崩壊などが生じなければ流送砂礫量は増大しないと考えられてきた。しかし、本実験の結果は、上の2)項で示したように、粗粒な礫が卓越する河川では外的な要因が変化しなくても河川自身もつシステムによって流送砂礫量が変化し、河岸侵食の様式・速度が変化する可能性があることを示している。実際河川における砂礫堆形成にともなう河岸侵食を理解するためには、より広い時・空間スケールで砂礫の流送過程や砂礫堆の特性を明らかにする必要がある。

謝 辞

本研究は、米山が平成3年度に筑波大学大学院環境科学研究科に提出した修士論文の一部をまとめたものである。

筑波大学地球科学系の池田宏助教授には研究を進めるにあたって多くの点で有意義なご助言をいただいた。環境科学研究科流域環境研究室および地球科学系地形学分野の諸先生および院生諸氏には、ゼミをはじめ機会あるごとに議論していただいた。水理実験センター小玉芳敬技官・飯島英夫技官には、実験の計画からまとめにいたるまでご援助いただいた。実験に際しては、流域環境研究室の院生諸氏をはじめ多くの方々に協力していただいた。とくに自然科学類学生長谷川祐二氏の献身のご協力なしには本実験は行ないえなかった。また、駒沢大学地理学科の田村紀子さんには、図の清書をしていただいた。

以上の方々のご協力を深く感謝いたします。

文 献

- 池田 宏・伊勢屋ふじこ (1986) : 混合砂れきの流送に伴う縦断的分級. 第30回水理講演会論文集, 217-221.
- 池田 宏・太田明雄 (1986) : 直線水路における停止砂礫堆の形成. 筑波大学水理実験センター報告, No.10, 105-113.
- 内島邦秀・早川 博 (1987) : 流量が減少した場合の交互砂礫堆の変形特性. 第31回水理講演会論文集, 683-688.
- 木下良作 (1961) : 石狩川河道変遷調査. 科学技術庁資源局資料, 36, 138pp.
- 木下良作 (1962) : 石狩川河道変遷調査一参考編一. 科学技術庁資源局資料, 37, 174pp.
- 辻本英和・砂村継夫 (1984) : 砕波による波食棚の形成に関する一実験. 水理実験センター報告, No.8, 45-48.
- 戸田真夏・砂村継夫 (1990) : 割れ目をもつ人工岩石床の流水による侵食実験 (要旨). 地形, 11, 295.
- Kuhnle, R. A. and Southard, J. B. (1988) : Bed load fluctuations in a gravel bed laboratory channel. *Water Resources Research*, 24, 247-260.
- Iseya, F. and Ikeda, H. (1987) : Pulsations in bedload transport induced by a longitudinal sediment sorting : a flume study using sand and gravel mixtures. *Geografiska Annaler*, 69A, 15-27.
- Lisle, T. E., Ikeda H. and Iseya, F. (1991) : Formations of stationary alternate bars in a steep channel with mixed-size sediment : flume experiment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16, 463-469.
- Schumm, S. A., Mosley, M. P. and Waver, W. E. (1987) : *Experimental Fluvial Geomorphology*. John Wiley and Sons, 405pp.