

岩盤河床における巨礫の集積による ステップ・プールの形成に関する実験的研究

Experimental Flume Study on the Bed-Step Formation in Bedrock Channels

藤田直二郎*・池田 宏**

Naojiro FUJITA and Hiroshi IKEDA

I はじめに

山地河川において、流れの急な瀬と穏やかな淵とが、縦断方向に交互に現れる様子がしばしば観察される。例えばアメリカ南西部のグランドキャニオンを流れるコロラド川では、この瀬と淵とがほぼ2~3kmおきに交互に流れ、川下りの名所として広く知られている。また、佐藤(1991)は郡山盆地と福島盆地との間の丘陵を流れる阿武隈川の峡谷区間(二本松丘陵区間)において、瀬と淵とが100m~300mおきに現れる様子を図示している。これらの河道区間では、瀬の所には巨礫が集積して勾配が局所的に急になっている。これとは対照的に淵の部分では水深が深く、平水時の流れは極めて穏やかである。

芦田ほか(1984)は、混合砂礫を用いた水路実験により、フルード数が1より大きい流れ(射流)によって階段状河床形が生じ、しかもその波長が反砂堆(antidune)の波長に一致することを示した。岸ほか(1987)はまた現地調査によって得られた河床縦断波形を波長の規模により3つに分類し、その中で波長100~200mのものを土石流など大規模な土砂移動によって形成される大規模河床起伏と呼んで

いる。これらの研究はともに移動床河床形として現れる段階状河床形を対象としており、あくまでも河床を埋める砂礫の表面形態が階段状である現象に注目したものである。

ところが、大井川や阿武隈川をはじめとした山地河川の一部区間において観察される波長が数100mの大規模な段階状河床形は、ステップに集積している巨礫のすぐ下やプールの底に岩盤が見えており、砂礫と岩盤が作る河床表面だけでなく、岩盤表面の形状も階段状になっている。つまり、規模の大きな段階状河床形の中には、このように岩盤侵食河床形と考えられるものが存在する。しかし、従来の研究には波長が数100m規模の段階状河床形を対象とし、さらにそれを岩盤侵食河床形であるという視点で捉えたものはない。

そこで、本研究では、数100mの波長で瀬と淵とが縦断方向に交互に現れる岩盤侵食河床形を、「ステップ・プール(Step-pool)」と呼ぶこととする。これは段階状河床形のうち、ステップ・プールを岩盤侵食河床形だけに限定し、土石流堆積物上に形成される移動床河床形と混合しないためである。また、本稿における「瀬」と「淵」は水面勾配に注目した

*筑波大学大学院環境科学研究科(現 林野庁指導部治山課) **筑波大学地球科学系・水理実験センター

区分であり、水面勾配が急で白く波立つ流れを「瀬」、水面勾配が緩やかで青く流れている流れを「淵」と呼ぶこととする。一方、「ステップ」と「プール」は河床形に注目した区分であり、局部的に急勾配になっている河床を「ステップ」、河床が比較的緩勾配かもしくは流れに対して逆勾配になっている河床を「プール」と呼ぶこととする。さらに、岩盤と砂礫で構成される河道の表面を単に「河床」といい、特に砂礫を取り払った岩盤表面のみを指すときには「岩盤河床」という語句を用いる。

本研究では、大井川中流に見られるステップ・プールを測量した結果、ステップ・プールの瀬には礫が堆積し、淵の底には岩盤が露出して、河床が階段状になっているだけでなく、その下の岩盤の表面も階段状になっていることがわかった。さらに、岩盤河床を想定して火山灰で作った水路床を用いた水路実験により、ステップ・プールが岩盤河床上の巨礫の集積にともなって生じる洗掘により形成される、岩盤侵食河床形であることを明らかにした。

II 大井川中流部の穿入蛇行河道にみられるステップ・プール

1) 大井川中流部の地形、地質と気候

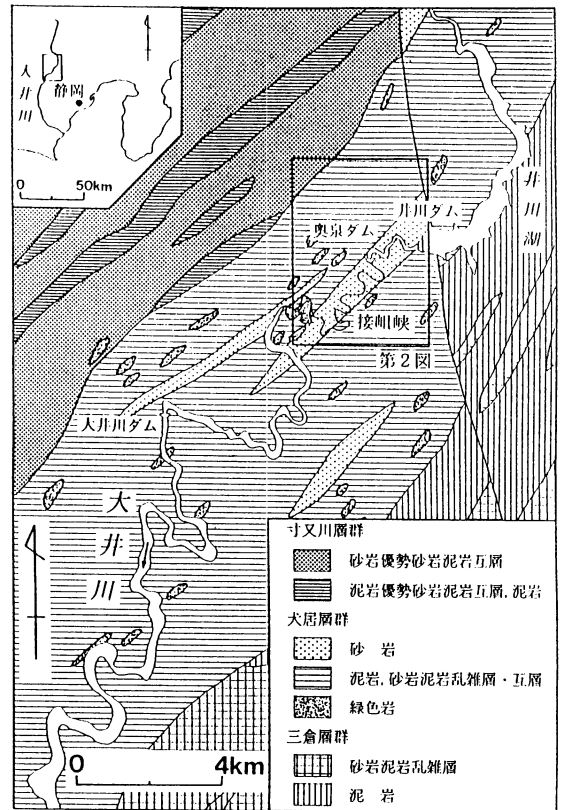
大井川は赤石山脈の間ノ岳（標高3,180m）に源を発し、南流して駿河湾に注ぐ流路延長168km、流域面積1,280km²の河川である。

大井川中流部の地質は、四万十帯の砂岩、泥岩、砂岩泥岩互層よりなり（第1図）、北西から寸又川、犬居、三倉の各層群に区分され、この順に地層が若くなっている（地質調査所、1991）。この地域は、フォッサマグナの西縁にあたり、地殻変動によって山地全体が隆起しており、源流部には崩壊地が多くみられる。その中流部の河道は掘削蛇行や生育蛇行がよく発達しており、その一部の延長12kmの峡谷部は特に接咀峡と呼ばれ、観光地になっている。

この地域の年平均気温は13.9℃、年平均降水量は3,053mmである（奥泉ダム気象観測所、1956-1980）。

2) 調査区間の概要

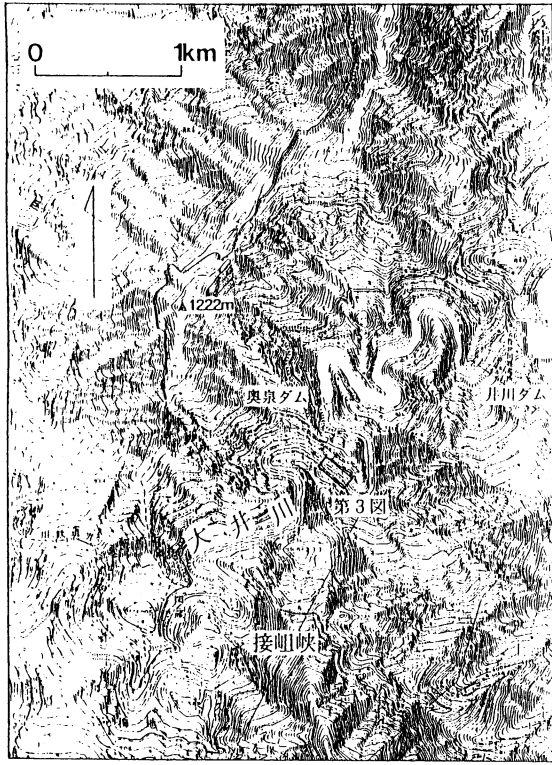
大井川の接咀峡のうち、上流4kmにわたってステッ



第1図 大井川中流部の地質

プ・プールが発達している。それらの中から、典型的なステップ・プールが形成されている区間（長さ350m、標高約530m）を調査対象とした。この区間の平均河床幅は30m、平均河床勾配は1/60であり、約500mの直線河道の一部である。左右両岸の切り立った崖には岩盤が露出しており、その上端から続く急な斜面は、河床からの比高が700mをこえる尾根にまで達しているところもある（第2図）。

調査区間の1km上流には奥泉ダムがあり、それよりさらに2km上流に井川ダムがある。奥泉ダムで取水された水は約20km下流の大井川ダム上流の発電所へ送水されているため、調査区間における通常時の流量は極めて少ない。しかし、1956年から1980年の25年間の奥泉ダムにおける流量データによると、最大日平均流量は1975年8月の1,119m³/secであり、日平均流量で100m³/secを超える出水は毎年のように生じており、日平均流量500m³/secを超える出水



第2図 調査区間
奥泉ダムの下流、河床の標高約520m、高さ500m
の直線区間

も25年間に10回以上観測されている(前田, 1990).
このように、ひとたび豪雨になれば、ダムからの放
水と支谷からの流入とによって増水し、河道全面を
水が流れる(写真1a). このとき、水面は白く見え
る瀬の部分と青く淀んだ淵の部分に区別でき、瀬と
淵とが交互に連なっていることがわかる. しかし、
ダムの放流が停止すると水位は低下して河床が現れ
(写真1b), ステップ・プールの形状や河床構成物質
の詳細な観察と測量が可能となる. ここはまさに、
ステップ・プールの調査に適した場所といえる.



写真1 大井川中流部、接咀峡の奥泉ダム下流の調査区間

- a : 延長500mの直線区間. 平均勾配1/60. 河道幅30m. 前日の豪雨により、上流の奥泉ダムでは30t/secの放水を行っ
ている. 白く見える瀬と青く淀んだ線が交互に並んでいる (1992年11月21日、下流側から撮影).
- b : 奥泉ダムの放水が止まり、河床の大部分が露出している. 礫が集積している瀬と水の淀んだ淵が交互に配列している
(1992年11月23日、下流側から撮影).

3) 調査方法

ステップ・プールの形態を正確に捉えるために、3つのステップを含む長さ350mの区間について縦断測量を行い、また2つのステップを含む長さ230mの区間については10mごとの横断測量を行った。ステップには径50cm～2mの砂岩巨礫が集積していた(写真2)が、巨礫の間から岩盤が確認できる所



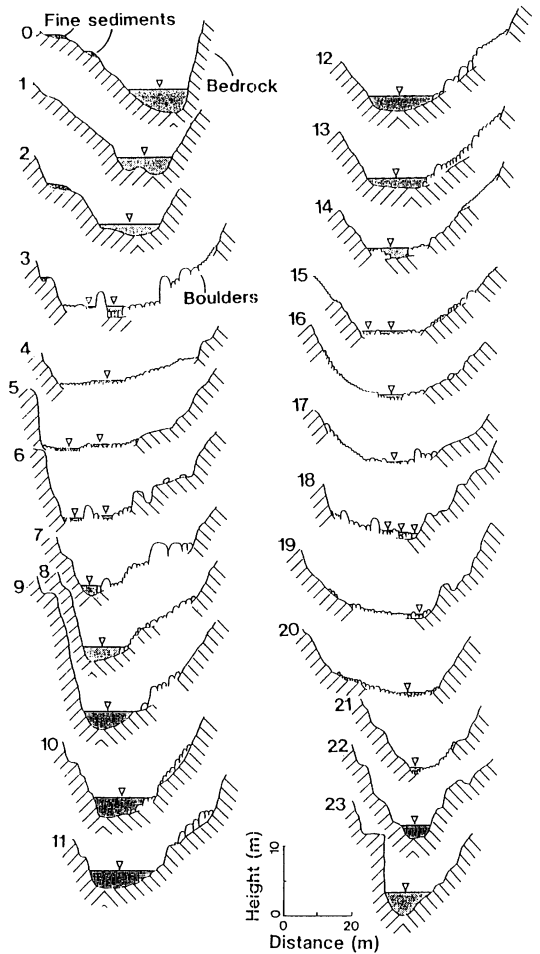
写真2 ステップを構成する巨礫と岩盤
測量区間を上流から下流を見て撮影。淵の水位が下流に向かって階段状に低下している(1992年11月24日、下流を見る)。

は、岩盤と礫を合わせた河床だけでなく、岩盤表面の形状も把握するように心掛けた。なお、淵の水深はおもりと浮子をつけた釣り糸を垂らすことにより計測して、プールの形状を明らかにした。

4) 調査結果

ステップ・プールの連続横断面形を第3図に、縦断形を第4図に示す。第3図は、河床がステップで急勾配となり、プールで緩勾配もしくは逆勾配となるような階段状であることを示している。岩盤表面だけを見ても、ステップで高くなり、プールで低くなるという階段状をなしていることがよく分かる。また、縦断形を見ると「階段状」というよりも「波状」と表現する方がより正確であろう。

さらに第4図を見ると、縦断方向に連なる岩盤河床の波形の中で、山の部分のちょうど上に巨礫が堆積しており、プールの凹状部分や、逆勾配になっている所には巨礫がほとんどないことは注目に値する。つまり従来の常識では、岩盤河床の縦断形が窪んで

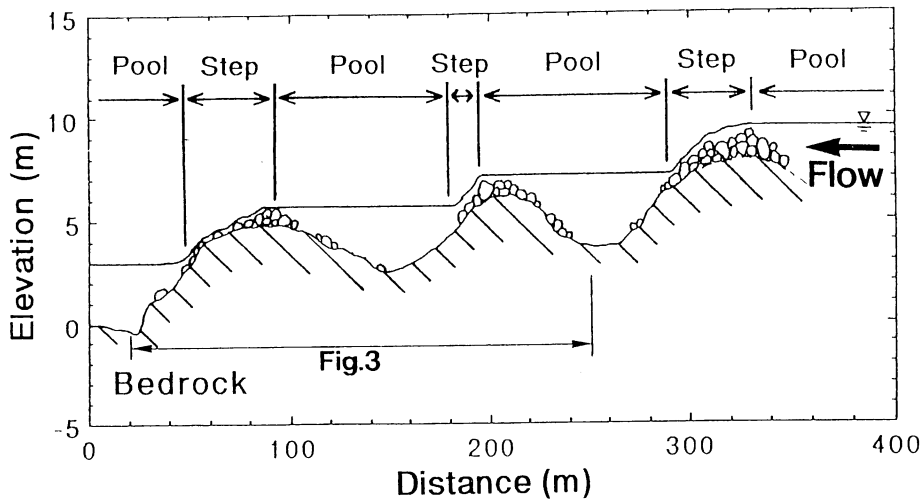


第3図 ステップ・プールの形成された調査区間の河道横断面形

各断面の間隔は10m。下流側から眺めた横断面形を、各測線の間隔に相当する高さ分(10m)ずらして並べてある。測量区間は第4図参照。(1992年11月22、23日測量)

いたり、逆勾配になっている所のほうが、巨礫が停止しやすいと考えられるが、実際には、一見最も不安定と思われるような凸部分に巨礫が集積しているのである。

以上のことから、ステップ・プールは、河岸から供給される巨礫が集積している岩盤は侵食から守られるために相対的に高まりとして残り、巨礫が堆積していない岩盤表面はしだいに侵食されて低下するために形成される、岩盤侵食河床形であることが推察される。しかしながら、大出水時の岩塊の動きや、



第4図 調査区間のステップ・プールの縦断形

河床は波状形になっており、岩盤河床の形状も波状形を示す。プールには岩盤が露出し巨礫がほとんど見られないが、ステップには巨礫が堆積している。(1992年11月22, 23日測量)

岩盤河床の侵食による変化を実際に計測することは困難である。

そこで、(1) どのようにして礫が集積するのか、(2) 集積のための条件は何か、(3) 岩盤侵食に対して礫の集積体がどのように影響するのか、以上の3点を水路実験によって明らかにする。

Ⅲ 粗度のある固定床上における礫の集積に関する実験

1) 実験目的

巨礫の集積がステップ・プールの形成要因となるには、まず岩盤河床上で巨礫が集積しなければならない。そこで、本実験では、粗度を設けた固定床上における礫の移動様式と、礫が集積する条件について明らかにする。

2) 実験装置

実験水路として、長さ4 m、幅14 cm、深さ29 cmの木製矩形水路と、長さ4 m、幅20 cm、深さ29 cmの透明アクリル製の矩形水路を用いた。アクリル水路は透明で、通水中の礫の移動様式や水の流れの観察に適しているので使用した。水路を鉄製の架台にのせ、上流側をワイヤーでつり上げることにより、水路勾配は水平から20°まで自由に变化させることができ

る。また、水は低水槽からポンプによって循環されており、インバータ(可変周波数電源装置)によってポンプを制御して流量を調節するとともに、流量計によって常時測定した。水路下流端には堰を設置して、水面勾配が一定となるように上下させた(写真3)。

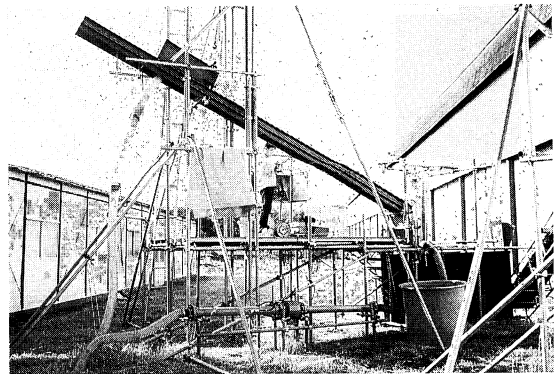


写真3 実験水路

実験水路は鉄製の架台(長さ6 m)にのせ、上流側をワイヤーで上下させることにより、水路勾配を水平(0°)から20°まで变化させることができる。実験には長さ4 m、幅14 cm、深さ29 cmの木製矩形水路と、長さ4 m、幅20 cm、深さ29 cmのアクリル矩形水路を用いた。水と砂は低水槽からポンプによって循環させ、礫は下流端の網により捕捉した。インバータを用いてポンプを制御することにより、流量は自由に設定でき、常に流量計によって監視した。水路の下流端には堰を設置して、水面勾配が一定となるように随時上下させた。

この水路の特徴は、勾配を大きく変化させられる点であり、かなり広い範囲の条件における礫の挙動について調べることが可能である。

3) 実験条件と手順

まずはじめに、径2.5cmの礫を板木に接着させて作った粗度を水路床に設けた(写真4a)。そして、その上に径3cmの礫を重ならない程度に一様に置き(写真4b)これを初期状態とした。次に一定流量を通水して礫の挙動を観察し、通水後には固定床上に残った礫の状態を記録した。通水時には砂礫は供給せず、水路下流端から流出した礫は網によって回収したが、通水中に礫の供給は行わなかった。このような手順によって、以下のような2種類のCaseの実験を行った。

Case 1では幅14cmの木製水路を用いて、勾配を0.03、単位幅流量を 82.1 l/sec/m と一定にして、粗度水路床1mあたりに置く礫の個数のみを変化($41\sim 93\text{個/m}$)させて、それぞれ5分間通水した。また、このうちの一例(Run 1)については、形成

される礫の集積体の位置の時間的な変化を調べるため、5分間の通水を断続的に12回繰り返す実験を行った(第1表)。

さらに、Case 2では幅20cmの亚克力製水路を用いて、Case 1と同様に粗度水路床に礫を置き(95個/m)、勾配と流量とをそれぞれ変化させて礫が集積体を作るための条件を求めた。初期河床上の礫の個数は、水路幅が6cm広がったことと、Case 1の結果とを考慮して決定した。実験手順は、まずある勾配に水路を設定し、粗度上に礫を置き、次に流量を20分ごとに段階的に増加させ、そのときの礫の移動様式について記録した。勾配は0.016から0.36までの6種類に変化させ、流量はそれぞれの勾配と礫の移動状況に合わせて増加させた。また、礫の集積が常流・射流どちらにおいても生じることを示すため、流量、水深、水路幅から平均流速を求め、その値からフルード数を算出した。

4) 実験結果

一連の実験により、ある条件のもとでは河床の礫

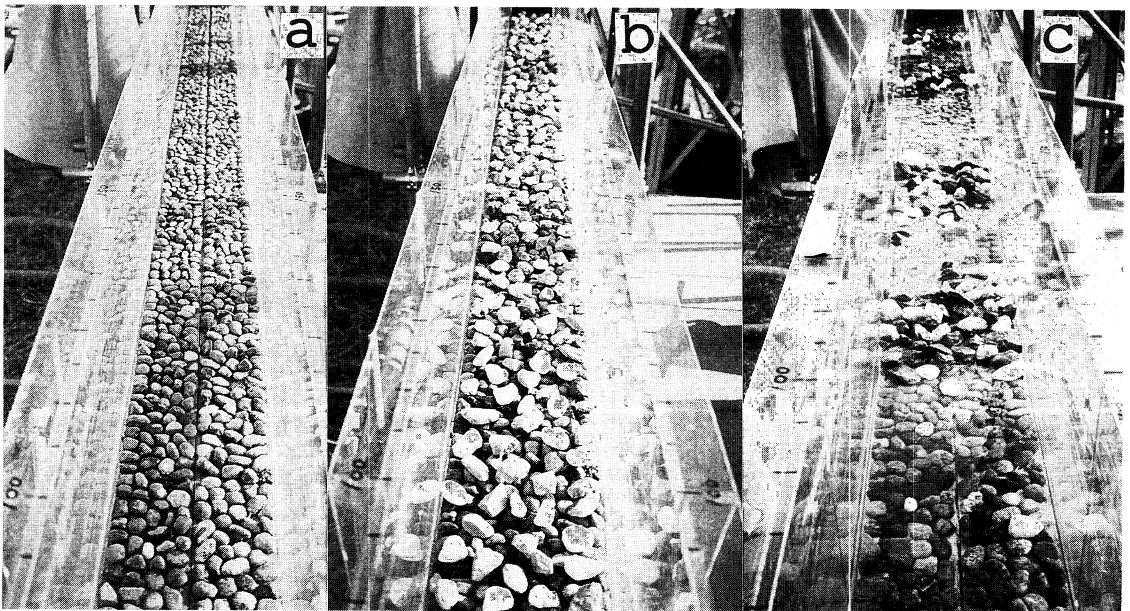


写真4 粗度のある固定床上における礫の運搬・堆積実験

- a : 径2.5cmの礫を板にびっしりと接着させ、これを粗度床とした(Case 1, 2下流側から撮影)。
- b : 径3cmの礫を互いに触れない程度に、一様に粗度床上に置いた。
- c : 一様に置いた礫は、通水後には数ヶ所に集積体を形成した(Case 2, Run 22-4. 通水20分後)。

第1表 実験条件一覧

Case	Run	水路勾配	单位幅流量 l/sec/m	礫数 /m	通水時間 min	流砂量 g/sec	備考
1	1	0.03	82.1	81	60(5×12回)	0	粗度固定床 水路幅14cm
	2	0.03	82.1	41	5	0	
	3	//	//	//	//	//	
	4	//	//	49	//	//	
	5	//	//	//	//	//	
	6	//	//	68	//	//	
	7	//	//	//	//	//	
	8	//	//	75	//	//	
	9	//	//	//	//	//	
	10	//	//	81	//	//	
	11	//	//	//	//	//	
	12	//	//	//	//	//	
	13	//	//	//	//	//	
	14	//	//	//	//	//	
	15	//	//	//	//	//	
	16	//	//	93	//	//	
	17	//	//	//	//	//	
2	21-1	0.016	16.5	95	20	0	粗度固定床 水路幅20cm
	2	//	38.5	—	//	//	
	3	//	51.5	—	//	//	
	4	//	71.5	—	//	//	
	5	//	86.0	—	//	//	
	22-1	0.03	17.0	95	//	//	
	2	//	36.5	—	//	//	
	3	//	50.0	—	//	//	
	4	//	75.0	—	//	//	
	23-1	0.05	13.5	95	//	//	
	2	//	28.5	—	//	//	
	3	//	36.0	—	//	//	
	4	//	52.5	—	//	//	
	5	//	71.0	—	//	//	
	6	//	91.5	—	//	//	
	24-1	0.10	32.5	95	//	//	
	2	//	41.5	—	//	//	
	3	//	50.0	—	//	//	
	25-1	0.27	5.0	95	//	//	
	2	//	16.5	—	//	//	
3	//	19.0	—	//	//		
26-1	0.36	13.5	95	//	//		
2	//	21.5	—	//	//		
3	31-1	0.027	62.5	95	1980	0	侵食実験 水路幅20cm
	2	//	//	—	180	20	
	32	//	//	0	300	//	

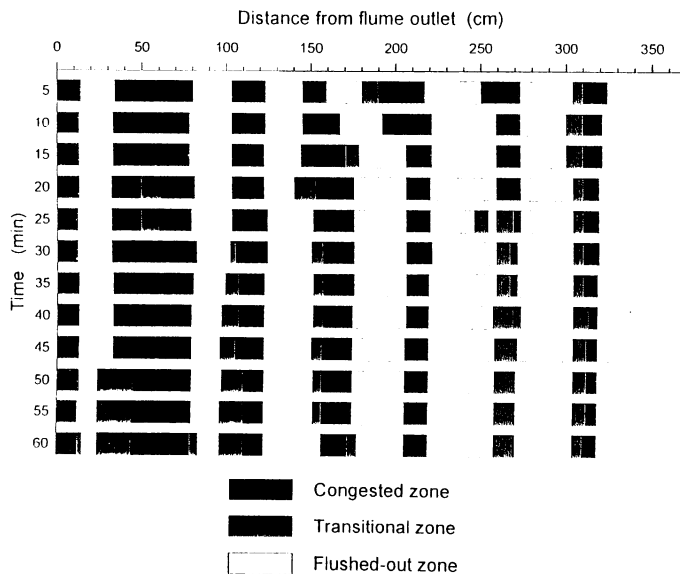
が集積することがわかった(写真4c)。まず礫が集積する程度について述べ、次に、礫の集積体は一度形成されるとその後安定であることを示し、さらには集積体の形成条件について提示する。

粗度を与えた水路床上に礫を置いて通水し、流量を段階的に増加させると、ついには一部の礫が動き出す。この時、全ての礫が一斉に移動し始めるのではなく、動き出す礫とまだ動かない礫がある。そして、動き出した礫が止まっている礫に衝突したとき、その後の動きは3つのパターンがある。つまり、両方の礫が共にそのまま流下する場合と、どちらか一方のみが流下する場合と、両方がぶつかり合ったまま停止する場合である。もしも、偶然的に両方が停止した場合には、次に衝突する礫をも止める可能性が高い。なぜならば、1個よりも2個、2個よりも3個のほうが慣性が大きく、動きにくいからである。そして、4個、5個と次第に集まる礫の数が増加してゆき集積体が大きくなると、上流から転がってくる礫を停止させやすくなるという、正のフィードバックがかかり、より大きな集積体を作るようになる。

また、集積体が大きくなると、水流は集積体を避けるように、上方に波打つようになる。そのため、水流が直撃しなくなった集積体は、さらに安定する。このようにして、粗度水路床上に礫の集積体が数ヶ所形成されたのである。

集積体の安定性を確認するために行った、5分間の通水を断続的に12回繰り返した実験の結果を第5図に示す。集積体は通水後2、3分程度で形成され、その後はほとんど変化していない。通水中は礫を供給していないために、上流側の集積体は、それを構成する礫が流下することによって少し不明瞭になるものの、全体的にみると最初に成立した7ヶ所の集積体の位置は変わらず、合計60分間の通水に対して安定であった。一度形成された集積体が、形成時と同様の流れを何度与えても変化しないことは、実際の山地河川における巨礫の集積体も、度重なる増水に対して安定であることを示唆している。

第6図はCase 1の結果をまとめたものである。河床勾配と流量が一定であると、初期河床上に置いた礫の数が多いほど形成される集積体の数も多くなっ



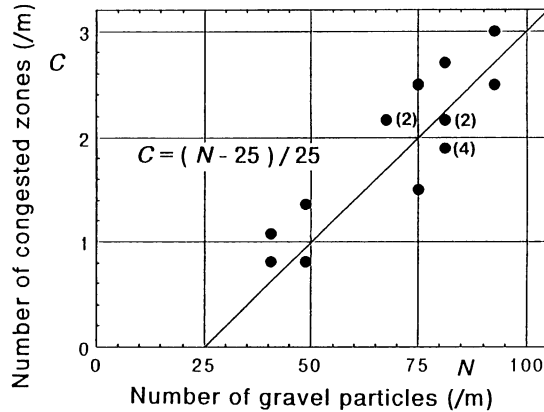
第5図 礫の集積体の安定性 (Case 1, Run 1)

粗度付き固定床上に礫を81個/m並べ、水路勾配0.03、流量82.11/sec/mとして、断続的に5分間の通水を12回繰り返した。通水時間の積算値を左端に示した。5分間の通水ごとに、水路床の状態を、礫が集積している区間 (Congested zone) と、礫が流れ去った区間 (Flushed-out zone) と、その漸移区間 (Transitional zone) とに分けた。ただし、最も下流側の集積区間は、水路下流端の堰によって捕捉された礫の集合体を表しており、他の集積体とは成因が異なる。

ている。参考として図中に示した直線は、河床 1 m あたりの礫の数が 25 個増えるごとに、形成される集積体の数が 1 つ増えることを示しており、この水理条件においては、約 25 個の礫によって一つの集積体が構成されることをも表している。さらに、礫の数が 25 個/m 以下であると集積しないことも示しており、このことは礫の数が少な過ぎると集積体が形成

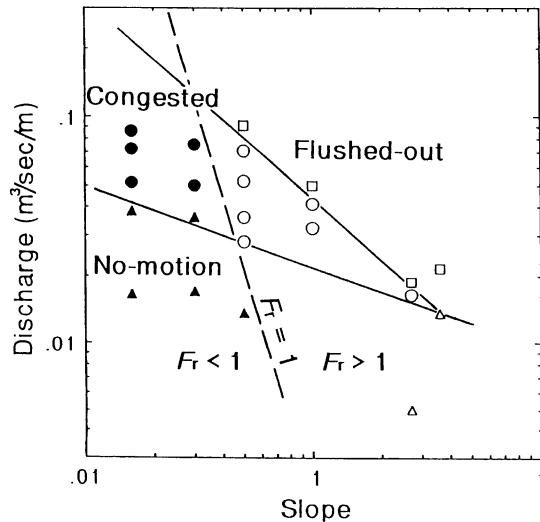
されないという予備実験の観察結果と合致する。

第 7 図は Case 2 の結果をまとめたものである。勾配を一定にして、流量を段階的に増加させると、比較的少ない流量では礫は全く動かないが、ある流量になると礫の一部が動き出して集積する。さらに流量が増すと集積体は崩れ、礫は全て流下してしまう。つまり、礫の挙動は、移動しない、集積する、



第 6 図 初期水路床に並べた礫の数と通水後の礫の集積体の数 (Case 1, Run 1 ~ 17)

初期条件の 1 m あたりの礫数を変化させた一連の実験で、通水後に形成される 1 m あたりの集積体数を調べた。各実験において水路勾配は 0.03、流量は 82.1 ℓ/sec/m、通水時間は 5 分間とした。() 内の数字は重複した実験結果の数を表わしている。



第 7 図 集積体の形成条件 (Case 2, Run 21 ~ 26)

水路勾配と単位幅流量を制御した一連の実験によって、礫の移動様式を 3 つに区分した。三角の記号 (▲, △) はほとんどの礫が動かなかったことを、丸 (●, ○) は一部の礫が動いて集積したことを、四角 (■, □) は全ての礫が流下ことを表す。さらに、通水中の流量と水深からフルード数 (Fr) を求め、常流は黒塗り (▲, ●, ■), 射流は白抜き (△, ○, □) で示した。

流失する、という3つの領域に区分できる。また、礫の集積体は常流・射流に関わらず形成される。

IV 礫の集積体による影響を取り入れた侵食実験

1) 実験目的

粗度床を用いた Case 1, 2 の実験により、ある条件下では、水路床にまばらに置いた礫が通水後に集積するという結果を得た。そこで次の Case 3 の実験では、水路床に火山灰（関東ローム）と水を混ぜて作った侵食材料を用いて、礫の集積体が河床の侵食に与える影響を調べ、礫が集積することがステップ・プールの形成要因の一つであることを示す。

2) 実験条件と手順

長さ4 m、幅20cm、深さ29cmの Case 2 と同じアクリル矩形水路を用い、水路床には粗度を与えた固定床のかわりに、ロームと水を重量比1:1.4の割合で混合したものを厚さ14cm敷き詰めた。水路床材料を均質にするため、ロームと水をコンクリートミキサーを用いて混ぜ合わせた。また、水路床材料を敷き詰めるとき、アクリル水路を水平にし、「こて」を用いて初期状態における表面が水平な平滑面になるようにした。さらに、水路天端と初期表面との比高が一定になっていることを確認するために、自作の簡易ポイントゲージを使用し、水路床材料の厚みが 14.0 ± 0.1 cmになるまで表面を仕上げた。

次に、ロームと水で作った平坦面の上に径3 cmの礫を1 mあたり95個の割合で一様に置き、水路床勾配を0.027にした（写真5a）。そして、はじめの33時間は流量 12.5 l/sec の水のみを循環させ、33時間後から34時間後にかけて、流砂量が 20 g/sec となるように徐々に径1.2mmの粗砂を水路上流端から供給し、下流端から流出した粗砂は、ポンプによって水とともに循環させた。34時間後から36時間後までは、外からの給砂は行わず、水と粗砂を循環させて実験を行った。ただし、水路下流端から流出した礫は網で捕捉し、再供給はしなかった。この侵食実験は、先に述べた大井川の調査区間のフルード歪相似模型実験となるように行った。縮尺は水平方向1/100、鉛直方向1/60として、流量は 500 t/sec とい

う2~3年に1回生じる流量を想定して決めた（第2表）。実験中は、初期状態と、33、36時間後における、水路中央の縦断形を測定した。

さらに、この実験の対照実験として、長さ4 m、幅20cm、深さ29cmのアクリル矩形水路に、水路床材料厚さ14cm、水路床勾配0.027、という同じ条件下で、礫を置かない場合の侵食実験も5時間にわたって行い、河床の侵食に対する礫の影響を明確にした。

3) 実験結果

通水するとすぐに、礫は集積し（写真5b）、実験を通して集積体の位置はほとんど移動しなかった。Case 3における河床の時間的変化を第8図に示す。水のみを流すと、33時間で河床全体が約1 cm低下した。33時間後の縦断形をみると、礫が集積しているところのほうが、かえって少し低くなっていることがわかる。実験中の観察により、礫によって流れが乱され渦を巻いているところに、河床の侵食によって生じたローム土の粒（径3 mm以下）が回転して洗掘している結果と判断した。

33時間後に粗砂を供給して水と共に循環させると、集積体を作る礫と河床との間の大部分は砂で埋まり、集積体で覆われた河床は侵食から守られるようになる（写真5c）。一方、集積体のすぐ下流側では急な流れによる洗掘が起こる（写真6）。このようにして、礫が集積しているところは侵食されずに高まりとして残り、その下流側は深く侵食され、粗砂を循環させ始めてからわずか3時間で、集積体と集積体の間のみが2 cmも低下した。その結果、実際河川でみられるステップ・プールそっくりの河床形が水路上に形成された（第8図）。

なお、河床に礫を置かずに、粗砂を水と共に循環させた侵食実験では、河床は平行に低下することが確認された（第9図）。この結果から、礫の集積体がステップ・プール形成の要因であるという考えの妥当性がさらに高められた。

第2表 實際河川と実験との比較 (Case 3)

	實際河川	歪 模 型	実 験 水 路
勾配 S	0.016	0.027	0.027
川幅 W	20-40 (m)	20-40 (cm)	20 (cm)
流量 Q	500 (t/s)	10.8 (l/s)	12.5 (l/s)
水深 D	3-4 (m)	5-6.7 (cm)	8 (cm)
流速 V	5 (m/s)	65 (cm/s)	78 (cm/s)
フルード数 F_r	0.84-0.92	0.80-0.93	0.88
底面摩擦速度 U_*	89-125 (cm/s)	11-13 (cm/s)	15 (cm/s)
河床構成物質			
岩 盤	砂 岩	—————	コ-ム+水
巨 礫 d_{boulder}	50-200 (cm)	1.4-5.3 (cm)	3 (cm)
中・大礫 d_{cobble}	2-25 (cm)	0.08-0.67 (cm)	0.12 (cm)
移動限界摩擦速度			
$U_{*c \text{ boulder}}$	64-127 (cm/s)	10-22 (cm/s)	15.6 (cm/s)
$U_{*c \text{ cobble}}$	13-45 (cm/s)	1.9-7.6 (cm/s)	2.6 (cm/s)
流砂 (礫) 強度			
$U_*/U_{*c \text{ boulder}}$	0.6-1.1	0.6-1.1	0.96
$U_*/U_{*c \text{ cobble}}$	1.7-5.8	1.7-5.8	5.77

フルード歪相似模型

縮尺比 水平面方向 $L_r = 100$

鉛直方向 $Y_r = 60$

歪比 $L_r/Y_r = 1.7$ 《縦方向に1.7倍の歪》

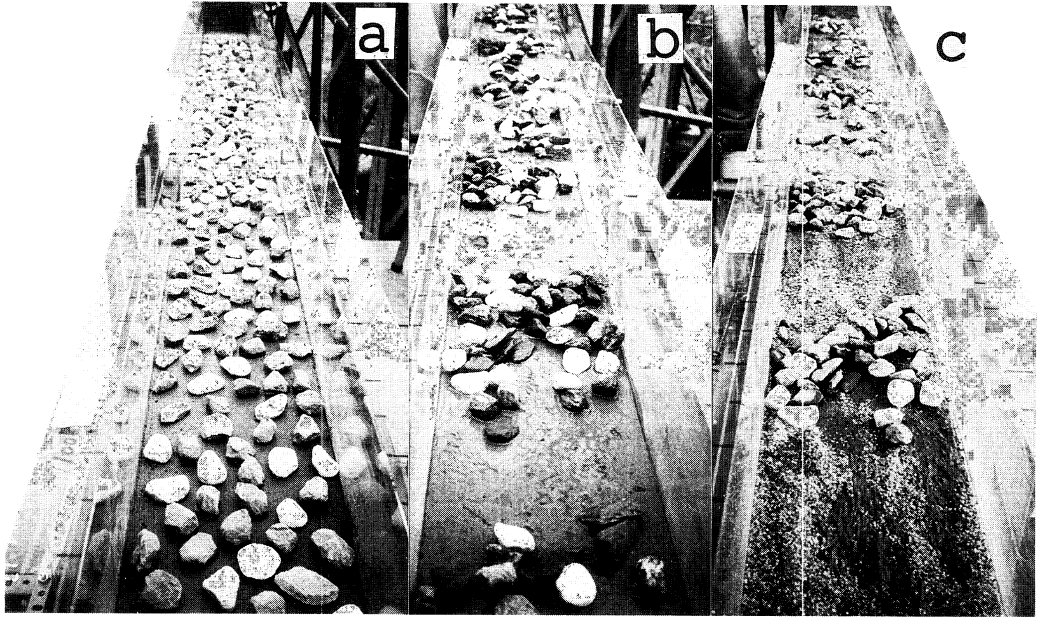


写真5 侵食河床実験によるステップ・プールの形成

- a : 凝集性のある実験材料を水路床に平滑に敷き均した上に、径3 cmの礫を一樣に置いた (Case 3, Run 31. 通水前, 下流側から撮影).
- b : 通水後、数分間で礫は集積した (Case 3, Run 31-1. 6分間通水して停水).
- c : Run 31-1で水のみを33時間循環させたのち、Run 31-2では水流中に粗砂を徐々に加えた。粗砂は集積体の間隙を充填し、集積体と集積体の間の区間では砂による侵食が進んだ (Case 3, Run 31-2. 通水120分後).

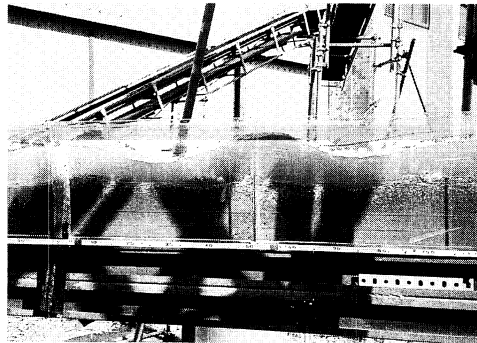
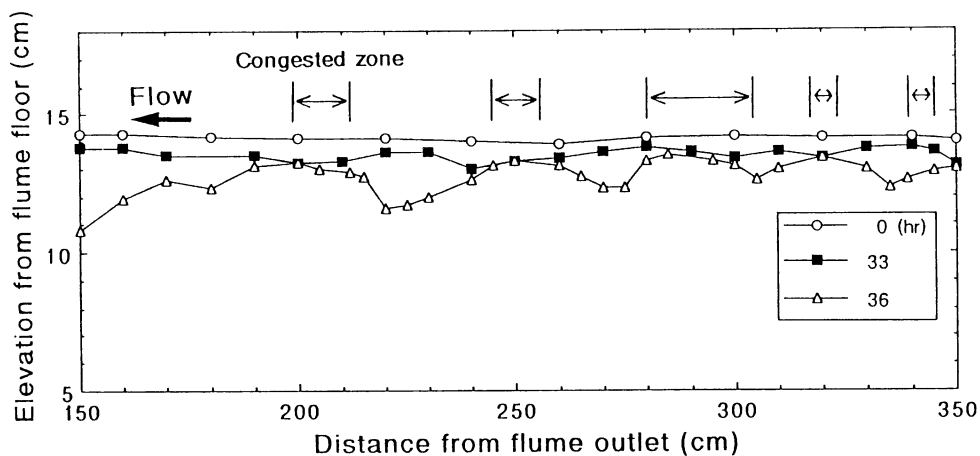


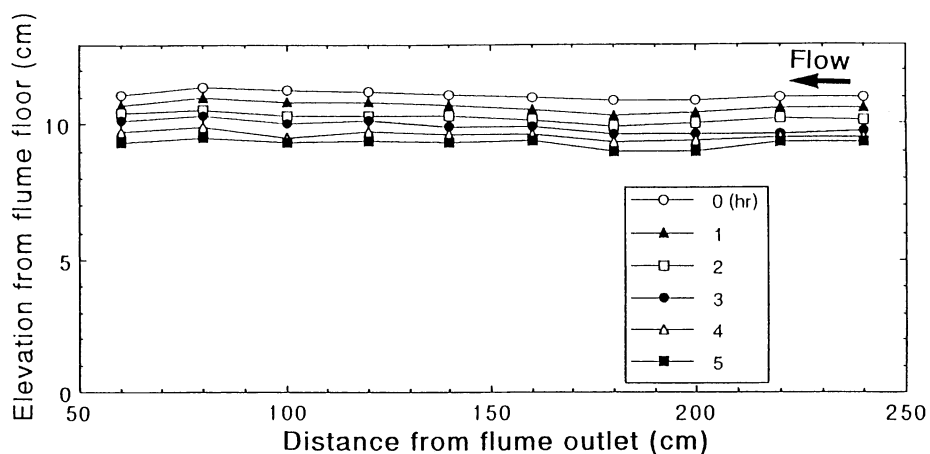
写真6 ステップ・プール河床上の水流の水面形状

水路左岸側から撮影。写真右側が上流礫の集積体の少し上流側で水面が高まっている。アンティデューンとは異なる (Case 3, Run 31-2. 通水120分後).



第8図 礫の集積体が侵食に与える影響 (Case 3, Run 31).

はじめに礫を水路1 m区間あたり95個置き、水路床勾配0.027、流量151 l/secの条件で通水したときの縦断形の変化。水のみを循環させた最初の33時間は、わずかではあるが水路床は平行に低下した。その後、粗砂を加えて循環させると、集積体の礫と水路床の間は粗砂によって充填され、水路床は侵食から守られるが、その下流では急な流れによる洗掘が生じて、その結果プールが形成した。



第9図 礫が存在しないときの侵食実験 (Case 3, Run 32).

河床に礫を置かずに、Case 3, Run 31と同じ条件 (水路勾配0.027、流量151 l/sec、流砂量20 g/sec) を与えた場合、水路床は一様に低下した。礫の集積体が存在しなければ、波状形の侵食河床は形成されない。

V 考 察

1) 礫の集積体の形成過程

粗度を与えた固定床上における礫の挙動を観察した水路実験により、礫の移動様式が3種類に大別できることがわかった。すなわち、河床上の礫は弱い水流においては移動しないが、流れがより強くなると一部の礫が移動して集積体を形成し、さらに強い流れを与えると集積体は崩れ、礫は流下するのである。洪水時の流れを直接観察することは困難だが、実際河川においても、河岸や支谷から河床に供給された巨礫が、大出水時に集積体を形成すると考えられる。

掃流物質の移動様式に関する従来の研究は、移動床上についてのものがほとんどであり、固定床上についてのは少なく、ましてや粗度を与えた固定床を用いた水路実験は極めて稀である。Case 1では、粗度固定床上に礫をまばらに置いて通水するというユニークな手法により、礫の移動様式には、停止する、流下するという従来の区分に加えて、集積するという領域が存在することが明らかになった。

Case 1の水路実験は、岩盤河床上に散在する巨礫の挙動を模擬するための有効な手段といえる。今後、実験条件や結果を数量化していくことにより、集積体の形成に関する定量的な議論を行う予定である。

さらに水路実験では水流が変化しない限り、一度形成された集積体は安定であることも確認された。実際河川においても、現地観察と過去の空中写真判読によって、礫が集積しているステップ・プールの位置が長期間にわたって変化していないことが確認できた。このことは、礫の集積体が安定である間に、その下流側に生じる急な流れが岩盤を侵食してステップ・プールを形成するという仮説の根拠の一つである。

2) 集積体の形成要因

Case 1の結果によれば、巨礫が集積するにはある程度の分布密度で巨礫が存在する必要がある。大井川中流部においても、巨礫が多く供給される砂岩の岩盤の区間にはステップ・プールが見られるが、

岩盤が泥岩からなる河道にはステップ・プールが見られない。ゆえに、巨礫の存在とそれが集積体を形成することがステップ・プールの形成要因になっていると考えられる。このことをさらに明確にするためには、上流及び下流の詳細な調査によって岩質と河床形との関係を比較する必要がある。

Case 2において、礫の集積が常流においても生じることが確認された。礫の集積体がステップ・プールの形成要因であることを考慮すると、ステップ・プールは常流の流れにおいても形成されることが予測できる。芦田ほか(1984)はステップ・プールの形成条件の一つに射流の流れであることを挙げているが、これは移動床を用いた実験によるもので、本研究とは実験条件が異なるため、安易な批判は避けるべきであろう。しかし、ステップ・プールが常流の流れにおいても形成されるであろうことは、本研究による新しい知見である。

3) 集積体が河床侵食に与える影響

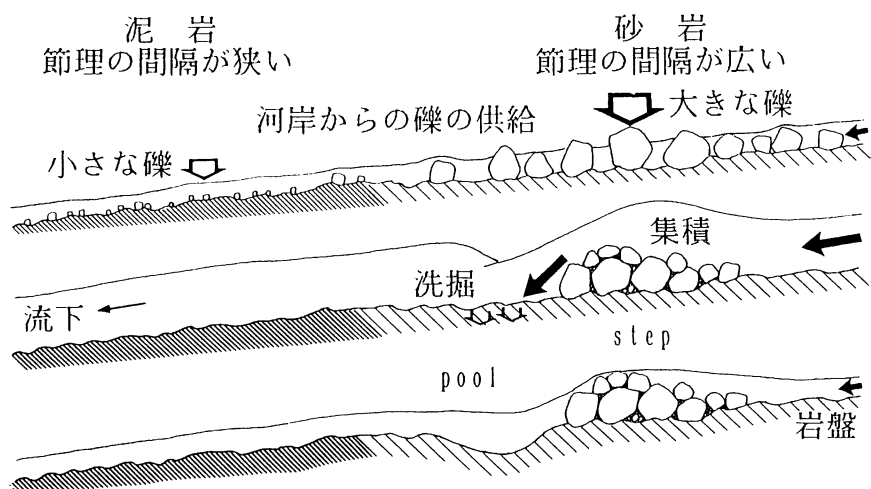
Case 3の結果から、礫の集積が河床侵食に影響を及ぼしてステップ・プールが形成されることがわかった。実際河川においても礫の集積体の下流側に生じる速い流れが岩盤を洗掘することにより、プールが形成されると考えられる。

またCase 3において、水のみを33時間循環させたときに、集積体が存在するところのほうが僅かながら侵食低下量が多かった。この結果は、粗砂と水を循環させたときとは全く逆である。実際河川においても、掃流土砂量の変化に起因する侵食プロセスの違いが生じている可能性がある。

4) ステップ・プールの形成過程

野外調査とそれに基づく水路実験の結果を踏まえると、実際河川のステップ・プールの形成過程は、以下のように説明できる。

砂岩のように節理の間隔が大きな岩盤の区間では、河岸や支谷から岩塊や巨礫が河床上に供給され、それらは洪水時に移動して集積する。そして、形成された集積体の間隙を掃流物質が充填することによって下部の岩盤の洗掘によって淵がつけられるために



第10図 ステップ・プールの形成過程の模倣図

岩盤が砂岩の区間では、河川や支岸や支谷から供給された巨礫が大出水時には集積し、その間隙を砂礫が充填するために直下の岩盤は侵食されない、一方、集積体の下流側に生じる速い流れにより岩盤が洗掘されるため、ステップ・プールが形成される。しかし、岩盤が泥岩からなる区間においては、河岸から供給される巨礫が少なく、大出水時に巨礫は集積しないため、ステップ・プールは形成されない。

ステップ・プールが形成される（第10図）。

しかし、ステップ・プール形成後の変化を含めた長いタイムスケールにおける河床変化については、ほとんど解明されていない。これを解決するには、巨礫の摩擦や、気候変動・地殻変動に伴う流量・供給砂礫量の変化など、複雑に関係する事象を解きほぐしていく必要がある。

VI おわりに

本研究は、ステップ・プールが岩盤河床上の巨礫の集積にともなって生じる洗掘により形成される岩盤侵食河床形であることを、水路実験によって明らかにしたものである。

大井川中流部における現地調査の結果をもとに、水路実験を行った結果、(1)河床の礫はある水流に対し、停止、集積、流下という3種類の移動様式を示し、一度形成された集積体は水流が変化しない限り固定され移動しない。(2)等しい水理条件においては、礫の分布密度が高いほど多くの集積体が形成され、1つの集積体を構成する礫の数はほぼ等しい。(3)集

積体は常流・射流を問わず、勾配や流量に規定される一定の領域の流れにおいて形成される。(4)集積した礫と岩盤との間を掃流物質が充填して岩盤の侵食を妨げる一方で、集積体の下流側の岩盤は急な流れにより洗掘されるためにステップ・プールが形成される。ということがわかった。

現地調査と水路実験の結果を総合すると、ステップ・プールの形成過程は次のようになる。河岸や支谷から供給された巨礫は洪水時に移動して集積し、形成された集積体の間隙を掃流物質が充填することによって下部の岩盤は侵食から守られて残るが、集積体の下流側では岩盤が洗掘されて淵が生じ、ステップ・プールが形成される。

謝辞

本研究を行うにあたり、上武大学商学部の伊勢屋ふじこ教授には、現地測量・水路実験両面にわたって御教示をいただいた。筑波大学水理実験センターの小玉芳敬技官（現 鳥取大学助教授）には、現地測量・水路実験に関するさまざまなご指導をいただいた。また同センター飯島英夫技官には、実験水路の製作や測器の保守において御協力いただいた。

現地調査においては、筑波大学農林技術センター井川演習林の砂坂元幸助教授（現 筑波大学農林技術センター助教授）、遠藤 徹技官ほかの皆様に、便宜をはかっていただいた。さらに、現地測量や水路実験において、当時筑波大学自然学類学生の杉浦友宣氏、鈴木陸仁氏、自然学類卒業生の小玉美宇氏をはじめとする多くの方々に御協力していただいた。

このように多くの方々に支えられて本研究を進めてまいりました。ご協力して下さった皆様に深く感謝いたします。

なお、本研究は筆者のひとりである藤田の1992年度筑波大学自然学類卒業論文を加筆・修正したものである。

引用文献

芦田和男・江頭進治・安東尚美（1984）：階段状河床形の発生機構と形状特性。京都大学防災研究所年報，27(B-2)，341-353。

奥泉ダム気象観測所（1956-1980）：『奥泉水力発電所奥泉ダム流量月報』中部電力株式会社。

奥泉ダム気象観測所（1956-1980）：『奥泉発電所堰堤気象観測所降水量月報』中部電力株式会社。

岸 力・森 明巨・長谷川和義・黒木幹男（1987）：山地河川における土砂輸送と河床形状に関する調査研究。研究費報告書『比較河川学の研究』代表者 岸 力，343-364。

佐藤 浩（1991）：『阿武隈川，郡山－福島間における急勾配区間の成因』平成2年度筑波大学自然学類卒業論文，50p。

地質調査所（1991）：『日本地質図体系 中部地方』朝倉書店，24-25。

前田浩則（1990）：『山間地の曲流河道における凸岸部への巨礫の集積－大井川中流部の事例とモデル実験－』平成元年度筑波大学自然学類卒業論文，71p。