

岩盤河床形状に及ぼす河床勾配の影響 に関する実験的研究

Effect of Riverbed Gradient on Bedrock Channel Configuration
: a Flume Experiment

小山 力*・池田 宏**

Tsutomu KOYAMA and Hiroshi IKEDA

I はじめに

河床・河岸に岩盤が露出した岩盤河川の河道形状は、上流からの流量や流砂量そして砂礫の大きさといった沖積河川の河道形状の支配要因に加えて、岩盤の組織や強度などの性質に強く影響されているためにきわめて多様である。河川における水や物質の流れを水系一貫として把握して河川環境の成り立ちを理解し、それに適切に対処することが求められている今日、河川上流域の地形についての理解はきわめて重要と考えられる。しかし、山間地では一般的である岩盤河川の河道形状についての研究はポットホール（甌穴）に関する研究（伊藤、1979など）を除くときわめて限られている。

最近、緩勾配の岩盤河川にしばしば見られる平滑岩盤侵食河床は、河床礫のきわめて少ない河川において、水流による機械的な侵食作用より岩盤の風化作用が卓越した条件下で発達することが明らかにされた（鈴木・池田、1994；板倉・池田、1997）。一方、傾斜角 6° （勾配0.1）程度のやや急勾配の岩盤河床には、甲府の笛吹川上流の西沢渓谷などの事例で知られている高さ数m程度の小滝（緩勾配の大きな流域を持つ川に見られる滝と区別するために、

急勾配の渓流や沢の高さの低い滝を小滝と呼ぶこと）と淵とが交互に配列した階段状河床形あるいは岩盤ステップ（Wohl, 1992; Wohl and Grodek, 1994）と呼ばれる河床形（写真1）が知ら

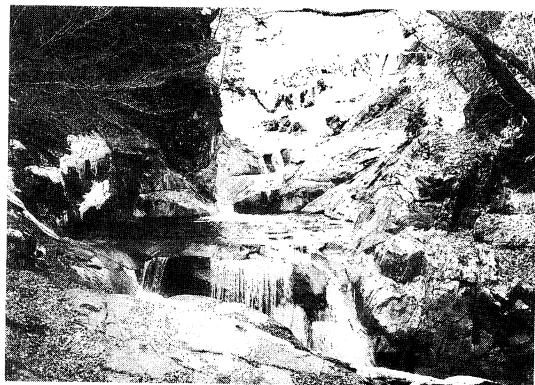


写真1 山梨県、笛吹川上流、西沢渓谷の三重の滝
：花崗岩からなる平均傾斜角 6° （勾配0.1）
の渓床に発達する小滝と淵

れている。沢登りの対象とされるようなさらに急勾配の沢にも類似的小滝はたくさんある。静岡県の大井川上流の支流、押出沢という傾斜角 20° （勾配0.4）の沢の様子を写真2に示す。

岩盤侵食河川地形が勾配によって著しく異なるこ

*筑波大学第一学群自然科学類(現 NTT移動通信網株式会社) **筑波大学地球科学系



写真2 静岡県、大井川上流、東河内川の支流の押出渓の小滝：四万十層群の砂岩層からなる平均傾斜角 20° （勾配0.36）の沢の小滝

とは、たとえばWohl & Ikeda (1997) による水路実験によって示されている。すなわち、幅20cmの小型水路にペントナイトを重量比で30%混ぜた砂を平滑に敷き詰めて、水路勾配を0.01から0.2（傾斜角0.6から 11° ）にまで5段階に変化させて一定流量の流れを与えた結果、緩勾配ではタテスジ模様が形成される比較的平滑な河床が、急勾配条件下では幅／深さ比の小さな起伏に富む河床形に変化することが明らかにされている。

しかし、山間部に見られる沢登りの対象とされるような沢には、傾斜角が 30° 以上のものもある。そこで、本研究ではそのような急勾配の条件下でどのような岩盤侵食河川地形が生じるかを水路実験によって明らかにすることを第一の目的とした。また、四国の大山の南に位置する柳谷村の八釜の甌穴において、岩盤河床上の水流が平面的に蛇行・屈曲して流れることが岩盤侵食河床形に影響していることが小

玉・池田（1984）によって指摘されている。これに注目して、幅の狭い固定壁水路を用いて、水流の側方移動を制約した条件下でも小滝や淵が形成されるかどうかを検討することにした。

滝にはナイアガラの滝とか茨城県の久慈川の支流の滝川にかかる袋田の滝のように、比較的大きな流域をもつ緩勾配の岩盤河川に生じている滝がある。これらの滝のある岩盤河川の河床は平滑岩盤河床であるという共通点があることから、緩勾配の岩盤河川に生じている滝は上流からの粗大な礫が多量に運搬されない条件を備えている川で保存されている地形であると考えられる。これらの滝の成因を究明するためには、急勾配の沢に一般的に生じる小滝の成因との違いを明らかにする必要があろう。これが本研究を行った動機である。

II 実験方法

II-1 実験装置

実験装置としては、第一に、水流の側方移動の可能な条件下で水路床勾配を広範囲に変化させること、第二に、水流の側方移動を制約した条件下でやはり勾配を広範囲に変化させることを目的として、以下の2種類の装置を用いた。

（1）側岸侵食性水路

水路の傾斜角が 3° ， 6° ， 10° （勾配はそれぞれ0.05, 0.1, 0.18）という緩勾配の実験には、幅85cm, 深さ10cm, 長さ7mの木製水路を用いた。この水路に10cmの厚さに岩粉を十分に水を加えて平滑に敷き詰め、1週間ほど十分乾燥させた後、幅5cm, 深さ3cmの直線的な初期河道を5本掘った。水路下流端に堰を付けず、上流端に量水槽から樋を使って水を運んで通水した。なお、水路勾配は油圧ジャッキによって調節した。

水路の傾斜角 15° ～ 55° の範囲の急勾配の実験は、1.5mの高さに実験材料を積み上げた山を削って、傾斜角 15° ， 20° ， 25° ， 30° ， 35° ， 40° ， 45° ， 50° ， 55° というように 5° 間隔で計12の凹凸のない平滑斜面をつくり、その12の斜面にそれぞれ幅5cm, 深さ3cm, 長さ1.2mの直線的な初期河道を掘り込んで、量水槽からパイプで通水した。この山は盛られてから数ヶ月以上経つ

ていたため、十分に乾燥していて、内部はよく詰まつており一様であった。

(2) 固定壁矩形水路

水流の側方移動を制約した幅の狭い固定壁矩形水路としては、深さ15cm、長さ1.8mで幅が5cm、3.5cm、2.5cmの水路を各4本ずつ、計12本並べた木製水路を作成して用いた。この12本の水路に13cmの厚さに岩粉を敷き詰め、1週間乾燥させた後、河床面の凹凸を無くするために厚さ12cmまで岩粉を削り取った。水路下流端に堰は付けず、上流端には量水槽から樋を使って通水した。水路床勾配はトラックジャッキを使って 6° 、 20° 、 40° の3段階に変化させた。

II - 2 実験材料

今回の実験では、河床材料として岩粉を用いた。ここで用いた岩粉は、つくば市内の採石場でホルンフェルスを破碎する過程で生じた粒径2.5mm以下のもののこと、主にシルトからなっている。この岩粉は水を加えて練った後に乾燥させると硬化するが、吸水すると一気に軟化するという性質があり、短時間の通水で岩盤侵食河床をつくり出すに適している。なお、岩粉には多少のグラニュール礫が含まれているが、実際の河川で上流から供給される礫と同じような侵食の道具としての働きをするのに役立つと考え、除去しなかった。

後述するように、岩粉を用いた実験によって火山斜面や未固結堆積物からなる人工斜面などの裸地斜面に生じる雨溝（ガリー）ときわめて類似した河道が形成された。このことから、この実験はガリーの形成実験ではないかという指摘を受けた。本研究では、裸地斜面に生じるガリーと岩盤侵食河床とは、形成されるタイムスケールの違いはある、成因的には同じものであろうという考えのもとに実験を行った。

II - 3 実験条件と実験手順

すべての実験について流量は毎秒67ccで一定とした。これは、幅5cm、深さ3cmの初期河道から流水が溢れ出さない程度の流量ということで選んだ。

通水時間は、初期河床が侵食されてほぼ定常状態になるまでの時間を予備実験によって調べて、その時間を越える長さにした。具体的には、側岸侵食性水路実験では、急勾配の 20° ～ 55° の実験では1分30秒間、 10° と 15° では3分間、 3° と 6° では10分間とした。固定壁矩形水路実験では、 40° と 20° の場合には1分30秒間、 6° の場合には3分間とした。

停水後に河床高を縦断測量し、河道の平面形をスケッチした。縦断測量は側岸侵食性水路の場合には、定規を河道に沿わせて置いて上流端からの距離を測り、河道の深さについては初期斜面を基準としてそこからの深さを計測した。平面形のスケッチは、幅15cm、長さ1mのアクリルシートを河道の特徴が顕著に見られる区間の上に重ねてトレースした。

以上のいずれの実験でも実験の容易さから無給砂で行った。このために水路の上流側では侵食が進んで初期河床勾配と比較して減傾斜するような変化が生じた。とはいえ、その変化が最も大きかった傾斜角 55° の実験でも結果としての最終勾配は $2\sim3^\circ$ ほどしか減少しなかったことから、今回の実験では無給砂で実験したことの影響は考えないことにした。

III 実験結果と考察

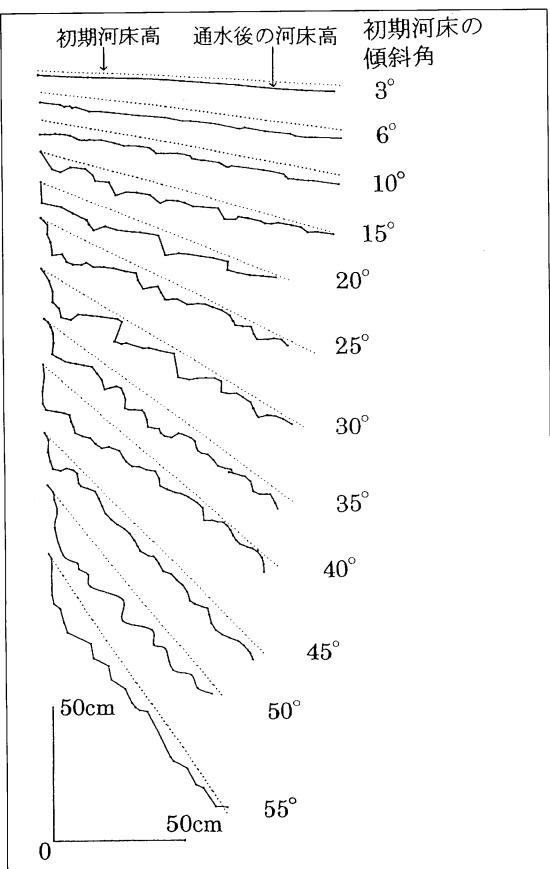
III - 1 側岸侵食性水路における実験結果

側岸侵食性水路実験で得られた河床高の縦断縦断測量結果を第1図に示し、勾配が増すほどに岩盤侵食河床形がどのように変化したかを以下に記載する。

(1) 傾斜角 3° の場合

通水開始から3分20秒後には、上流端から4～5m地点（以下、～m地点という場合は上流端からの距離のことである）までは侵食区間となった。この区間の侵食深はわずかに1～2mmであったが、これ以下の区間では逆に上流側から運搬された砂が堆積したとの対照的であった。

通水10分後には、水路の下流側では河床が上昇して河道から水が溢れ出してしまうほどの区間も見られ、河道幅が10cm程度にまで拡大してバーが生じて大きく蛇行したが、上流側は侵食区間であり続けた。侵食傾向にある区間の河床はほぼ平坦河床であった。停水後の河床には掃流砂が残留して、一見する



第1図 側岸侵食性水路に生じた岩盤侵食河道の河床縦断形

と堆積河床のような外観を呈した。

(2) 傾斜角 6° の場合

通水開始から3分20秒後では、0～4m区間までは侵食区間となり、それ以下は堆積区間となった。侵食による河床低下量は傾斜角 3° の場合よりも大きく、高さ3～4mm程度と小さいながら小滝ができはじめた。

通水6分40秒後には、0～4mまでが侵食区間で4～5mが堆積区間、そして5mよりも下流では再び侵食区間が見られた。侵食区間では高さ6～8mmの小滝が生じて、それぞれの下流側に淵が形成された。

通水10分後にも侵食区間と堆積区間の位置はほとんど変化せず、堆積区間ではシルト質のものが5mm～1cm程度堆積していて、侵食区間では小

滝と淵の起伏が1～1.3cm程度と大きくなつた。ポットホールのようにすぐ上流部に顕著な小滝が見られない淵が生じたのが特徴的であった。局所洗掘によつてゴルジュ（峡谷）のようになった区間も生じた。

(3) 傾斜角が 10° の場合

河床のほとんどが侵食区間となつた。停水後の観察でも、シルトが2～3mm程度の厚さに堆積している部分はなおあるものの、それが数10cm以上の長さにわたつて連続しているような区間は見られなかつた。河床には小滝と淵とが見られ、その大きさも高さ2cm程度で、その数も増加した。写真3は、通水後の河床に見られた小滝の写真である。実際に3分間通水後の写真ではないが、実験時にもこの写真とよく似た河床形が生じた。



写真3 側岸侵食性水路の傾斜角 6° （勾配0.1）の岩粉

(4) 傾斜角 15° の場合

通水1分後には上流部の方が下流部よりも侵食さ

れている傾向が顕著に認められた。これは、水路起点で給砂をしなかったために生じたことで、その他の水路でも同様に見られた傾向である。また、深さが1～2cm程度のポットホールが20～40cm区間、50～70cm区間、80～100cm区間に2つずつ合計6つできた。ポットホールはその後に下流側が削られて高さ2cm程度の小滝のようになり、3分後には高さ4～5cmの小滝になった。堆積区間ではなく、この勾配あたりから上流から流されてきた砂・シルトは淵の部分に薄く堆積してはいるものの、ほとんどが下流端まで流されるようになった。

(5) 傾斜角20°の場合

まず80～110cm区間に高さ3cmほどの小滝が3つでき、また40～70cm区間では局所洗掘によって1.5cm幅の深い河道ができてゴルジュのようになつた。その後、60cm地点に小滝ができ、その滝は遡上して30cm地点まで達した。同時に80～110cm区間に生じた3つの小滝のうちの一番上流側にあったものが60cm地点まで遡上し、1分30秒後には小滝は結局30, 60, 80cm地点の3つになった。滝の高さは4～6cm程度で、滝と滝の間の区間の河床はきわめて平坦であった。また、いくつかの小滝の下には深さ5mm～1cmの淵が形成された。

(6) 25°の場合

最初に40cm地点と90cm地点に小滝が1つずつできた。その後、はじめにできた小滝は2つとも上流へ遡上していき、それぞれの滝が30cm地点と80cm地点にさしかかるあたりで50～60cm区間2つと100cm地点に1つ小滝ができ5つの小滝はそこからさらに5～10cmほど上流に遡上した。小滝の高さは1分30秒後には4～5cmになり、滝の下にはところどころに深さ1cm程度の淵が見られた。これ以上急勾配の実験では、河道が細く侵食されて蛇行が強まった。

(7) 傾斜角30°の場合

通水後、まず50cm地点に小滝ができた。その小滝は大きくなりながら遡上していき、40cm地点あたりにきたところで60cm地点にもう一つ滝ができる。この2つの小滝以外にはほとんど見られず平坦であるためにどんどん大きくなっているように思わ

れた。停水の20～30秒前に70～100cm区間に小滝が2つできたが、結局あまり大きな滝にはならなかつた。大きい方の滝は高さ8～9cm、小さい方は高さ4～5cmであり、小さい方の2つの滝の直下には淵ができた。

(8) 傾斜角35°の場合

0～30cm区間、50～70cm区間が侵食され、20～30cm間隔で侵食の大きい区間と小さい区間が交互に現れ、その大きな凹凸のなかに、小滝がいくつも見られた。その小滝は遡上し、また複数の小滝が結合しながら大きくなり、小滝があった地点にまた小滝ができて凹凸の数が増えていった。結局、滝の落差は3cm～4cmと小さいが滝の数の多い縦断形となつた。なお、深さが1～2cm程度の淵が2つ生じたが、小滝の大きさの割に深く感じられた。

(9) 傾斜角40°の場合

まず0～40cm区間の河道が幅狭く侵食されて初期河床からの下刻量が6cmに達したのに対し、40～120cmまではだんだん侵食される量が小さくなっていき、100cm地点では初期河床からの侵食量は1cm程度と非常に顕著な違いが見られた。河床には、小滝と確認できるほど激しく深さが変化しているところは見られず、0～40cm区間、60～90cm区間で5cmくらいの波長の凹凸が見られた。その後、60cm地点と90cm地点に小滝ができて遡上していった。1分30秒後になんでも2つの小滝の大きさはあまり大きくなりらず、小滝のない場所では緩やかな波長を持つ凹凸が連続していた。淵は30cm地点でわずかに確認できる小さいものはあったが、傾斜角35°以下の実験で見られたようなシルトの堆積は40°の実験では見られなくなった。

(10) 傾斜角45°の場合

他の水路で見られた傾向と異なり、通水直後から下流側の90～120cm区間での侵食が進み、初期河床よりも3cm程度低下した。これに対して、上流側の0～90cm区間では10cm程度の波長をもった凹凸ができはじめているものの、その侵食量は大きくておよそ2cmであった。その後もわずかにではあるが下流部の方が侵食深が大きい傾向があった。この実験では20cm地点と100cm地点に高さ3～4cm

程度の小滝が生じた。淵はまったく見られなかった。ただし、最上流端に生じた凹地は水路に運んできた水の勢いのために生じたものであるため、淵とは認定しなかった。河道の蛇行の振幅は大きくなり、水路の側面は2~3cm削られた。

(11) 傾斜角50°の場合

通水初期には小滝と認められるものは形成されず、波長がおよそ10cmの凹凸ができた。その後に小滝が30cm地点、60cm地点、80cm地点、110cm地点にできて遡上していった。水流は上下に波打ち、蛇行しており、小滝から落下してもその下で乱流となつて滞っているというよりも、水流が乱れることなく勾配が変化している様子が見られた。30cm地点の小滝は水を供給する時の落差で生じた凹部間で遡上し結合したが、110cm地点にまた小滝ができて、結果として高さ7~9cmの顕著な小滝が連続する河床形となつた。

(12) 傾斜角55°の場合

まず50~70cm区間の河床が5cm程度侵食されて、他の区間よりも侵食量が1~2cm大きくなつた。このとき、小滝は30cm地点、50cm地点、90cm地点にできはじめていた。その後、3つの小滝の間に2つの小滝ができる、結局、15cmくらいの間隔で5つの小滝が遡上し、最終的な停水時には50cm地点と110cm地点に小滝が残つた。

III-2 側岸侵食性水路における岩盤侵食河床形に及ぼす勾配の影響

(1) 侵食河床形のタイプ

側岸侵食性水路における岩盤侵食河床形が勾配によってどのように異なるかを調べた結果、それらは次第に移行するものではあるが、第2図に示すようなタイプに分けて説明するとわかりやすいのではないかと思われた。すなわち、タイプ1は最も緩い勾配の時に見られたもので、縦断的にも平滑河床である。タイプ2としたのはとくに小滝と淵、とくに小滝がないのに淵やポットホールが目立つ河床である。

傾斜角が10°以上の急勾配の流れでは、しかし、傾斜角6°の流れと違って、淵は小滝の直下にのみ生じるようになる。これをタイプ3とした。しかし、

模式図	傾斜角(θ°)	侵食河床の特徴
Type1	3	河床は砂・シルトで覆われ、凹凸はほとんど見られない
Type2	6	小滝や淵ができる。淵の中にはポットホール状のものもあった。
Type3	10 ~40	15° ~20°あたりまで小滝の数が増え落差も増すが、それ以降は落差、数ともにあまり大きくなつていかなくなる。一方で淵は徐々に大きさ、数ともに減少していく。
Type4	45 ~55	小滝の落差、数は大きくなつていかなくなる。淵はほとんど見られず、水は落ちるように流れていく。

第2図 岩盤侵食河床形のタイプ

傾斜角45°以上になると、小滝はあるのに、その直下に淵が生じなくなる。小滝を落下した水流は小滝の直下で渦流を生ずることなくすみやかに流下するためである。これをタイプ4とした。

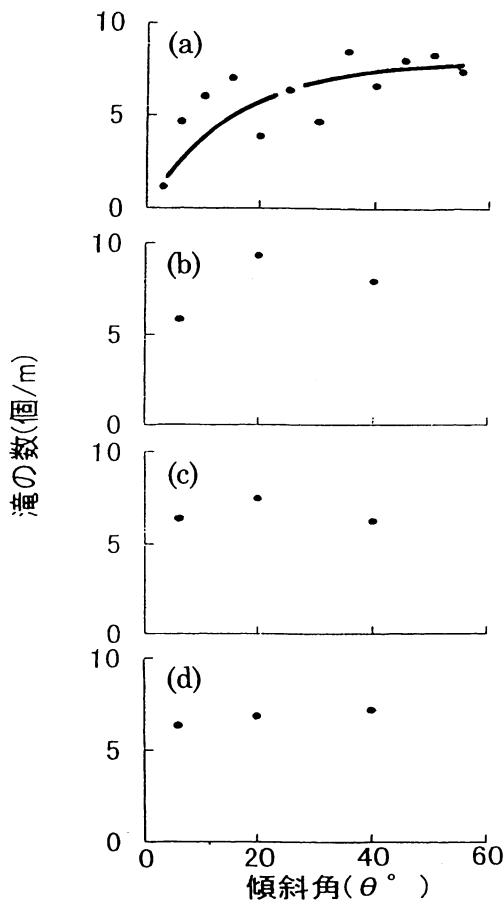
(2) 小滝の高さと数

岩盤侵食河床に生じる小滝の数とその高さとが勾配によってどのように異なるかを固定壁直線水路の結果もあわせて第3図と第4図に示した。

側岸侵食性水路においては、第3図aのように、傾斜角20°までは勾配が大きくなるにしたがって滝の数が急増し、20°以上でも緩やかに増大して、この実験条件下では1m区間に8個（小滝と小滝の間隔は12cm程度）と、ほぼ一定となるようである。同様に、滝の高さも、第4図aに見られるように傾斜角20°までは勾配が増すほど高くなり、それ以上の急勾配の条件下では滝の高さは平均すると4cm程度ではほぼ一定となる。

勾配が増しても、小滝の高さが増さないことから、小滝の数が増えるはずだと考えられるが、実はそうではなく、小滝の数はそれほど増加しない。このわけは、第1図を見るとわかるように、傾斜角35°以上では小滝と小滝の間の平滑河床区間の勾配が急になっている。すなわち、小滝の高さは一定で、その数もあまり増加しないけれど、小滝の直下の洗掘が生じなくなった分だけ、小滝間の平滑河床勾配が大きくなつて、全体としての勾配が高まつている。

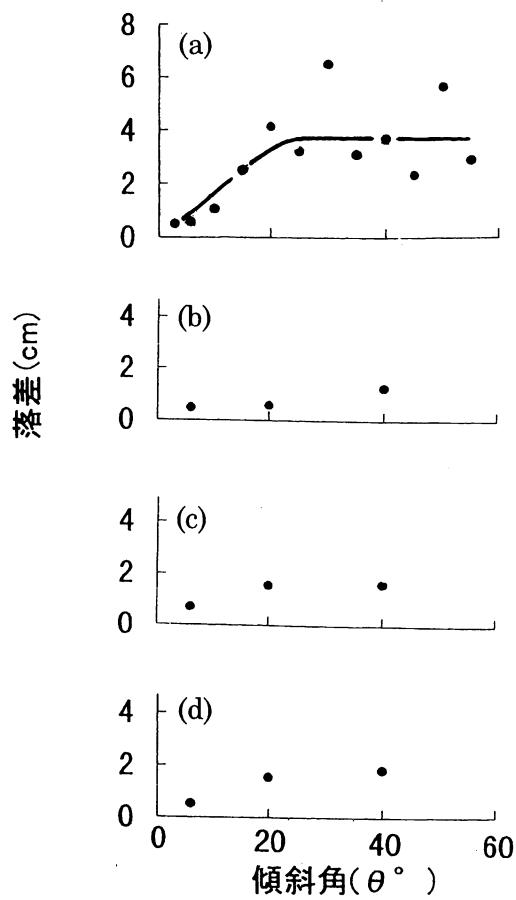
以上の側岸侵食性水路実験は実際の現象と比較す



第3図 小滝の数に及ぼす勾配の影響
a：側岸侵食性水路；b，c，d：それぞれ幅5cm，幅3.5cm，幅2.5cmの固定壁水路

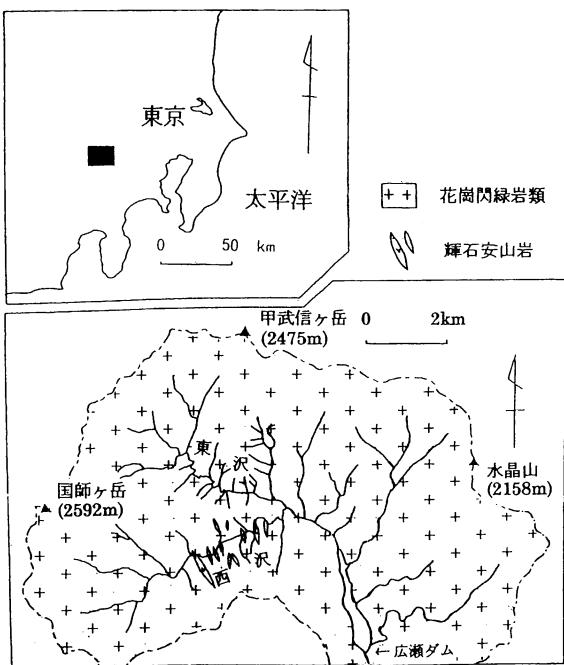
ると大変小さなスケールでなされたとはいっても、上述したような岩盤侵食河床形の特徴は、実際の河谷でも認められるようである。すなわち、沢登りの対象とされるような急勾配の渓流や沢の縦断形は、たとえば奥秩父・両神の谷100ルート（奥秩父渓谷調査団、1997）、奥多摩・大菩薩・高尾の谷123ルート（奥多摩渓谷調査団、1996）、丹沢の谷110ルート（丹沢渓谷調査団、1995）などといった沢登りの案内書から概要を知ることができる。これによると、沢登りの対象とされるのは傾斜角が6°（勾配0.1）程度から岩屑の安息角にはほぼ等しい34°程度の沢まである。

笛吹川上流の東沢と西沢の流域（第5図）の沢を対象として、小滝と淵の数と沢の勾配との関係を第

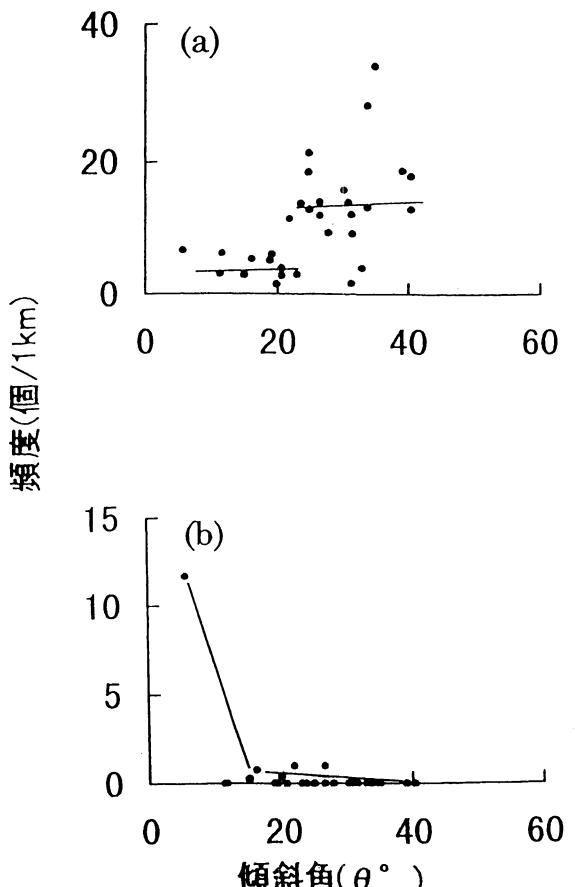


第4図 小滝の高さに及ぼす勾配の影響
a：側岸侵食性水路；b，c，d：それぞれ幅5cm，幅3.5cm，幅2.5cmの固定壁水路

6図に示した。第6図aに見られるように、小滝の数は沢の勾配が増すほどに著しく増加しており、これらの沢に生じている小滝は一般に高さ数mのものが卓越していて、実験と同様に小滝の高さが沢の勾配に支配されていないことを示している。なお、淵は、傾斜角が6°の西沢渓谷および東沢渓谷には大変見事なものが生じているが、より急勾配の沢では第6図bに見られるように淵の数は極端に少なくなり、勾配が30°以上の急な沢では淵は形成されないなどの事実も実験結果と共通している。とはいっても、急勾配の沢は一般に流量も小さくなるから、岩盤侵食河床形に及ぼす流量の効果についても検討が必要であるし、岩盤の組織や強度などの影響（田中ほか、1993）についての検討も残されている。



第5図 山梨県、笛吹川上流の西沢および東沢流域の沢

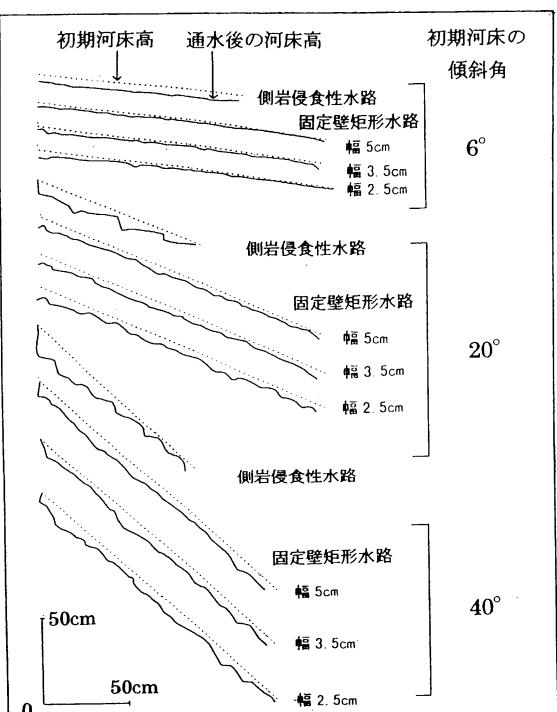


第6図 山梨県、笛吹川上流の西沢および東沢流域の沢における小滝と淵の数に及ぼす勾配の影響
a：勾配と小滝の数の関係、b：勾配と淵の数の関係（資料：奥秩父渓谷調査団、1997）

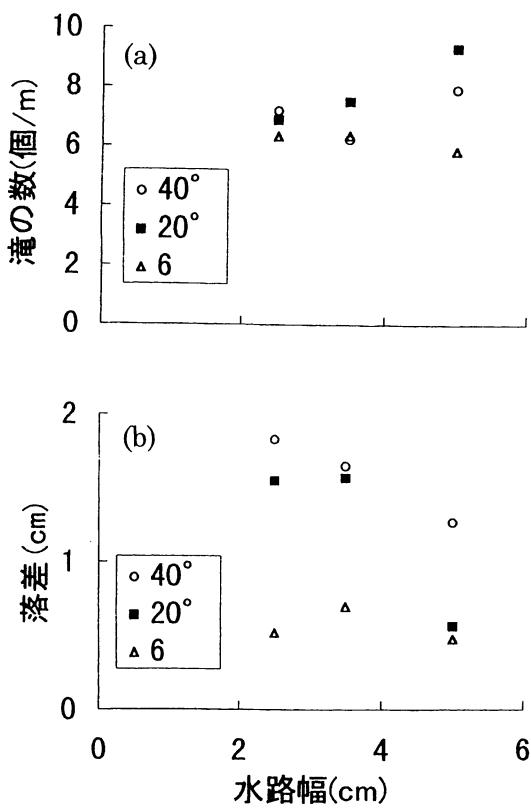
III-3 幅の狭い固定壁矩形水路における岩盤河床形

水流の側方移動を制約した幅の狭い固定壁直線水路における実験結果を、第7図に側岸侵食性水路における実験結果と対照させて示す。一見して、幅の狭い固定壁直線水路に生じる岩盤侵食河床形は側岸侵食性水路の場合と比較して起伏が小さいことがわかる。

第8図には固定壁直線水路に生じた小滝の数と高さが水路幅と勾配によってどのように異なるかを示した。幅5cmのほうが幅2.5cmの場合より滝の数が多く、高さが小さい傾向が認められる。その理由は不明であるが、ともかく、勾配や流量が同じでも、側方移動を制約された幅の狭い水路には低い小滝が



第7図 幅の狭い固定壁水路の岩盤侵食河道の河床縦断形



第8図 幅の狭い固定壁水路に生じた小滝の数と高さに及ぼす勾配の影響
a：水路幅と小滝の数との関係、b：水路幅と小滝の高さとの関係

多数生じる。とくに小滝の高さは第4図に示した側岸侵食性水路の場合と比較すると半減している。

以上のように、側岸侵食性水路実験結果と幅の狭い固定壁水路実験結果を比較すると、河床の凹凸の程度や小滝の数には違いが見られる。側岸侵食性水路では、滝の数は少なく落差が大きい、それに対し固定壁矩形水路の場合は滝の数は多くなるが、落差が小さくなっている。水路で消費されるエネルギーの量は同じでも、その消費の仕方に違いが見られるのである。このことより、実際の河谷に現れる現象をより忠実に再現する実験を行うためには、側岸侵食性水路を用いる実験が望ましい。

IV おわりに

実験材料として岩粉を用いて側岸侵食性水路および水流の側方移動を制約した幅の狭い固定壁直線水路で行った実験の結果、岩盤侵食河床形について、以下の点が明らかになった。

- (1) きわめて緩勾配の岩盤河床は平滑岩盤河床となるが、急勾配の岩盤河床には小滝や淵が生じる。
- (2) 淵は勾配が比較的緩い場合によく発達する。
- (3) 小滝の数と高さとは勾配が増すほど増すが、傾斜角20°以上では小滝の数はなおも次第に増加するものの、小滝の高さはほぼ一定となる。
- (4) きわめて急勾配の岩盤河床では小滝の直下に淵が生じなくなり、小滝と小滝の間の平滑岩盤河床が急勾配になる。
- (5) 水流の側方移動を制約すると、小滝の数は増し、高さは小さくなることによって、岩盤侵食河床の見掛け上の起伏は小さくなる。

急勾配の岩盤河床を流下する水流が小滝や淵を発達させる原因是、水流が移動床であればアンティデューン (antidune) やシャート・アンド・プール (chute & pool) を生じる条件を備えているためであろう。より緩勾配の大きな川の滝の成因を考える場合には、それらを急勾配の渓流や沢における小滝とは区別して考えるべきであろう。

謝 辞

本研究は小山 力による筑波大学自然科学類の平成9年度卒業論文を加筆・修正したものである。研究を進めるにあたり地球科学系の地形分野の先生方にご指導いただいた。筑波大学水理実験センターの山本憲志郎さんと飯島英夫さんは実験装置の製作や実験に際してご協力いただいた。地形学専攻の学生、とくに池田雄二、斎藤健一、平野由佳さんには実験を手伝っていただいた。皆様に深く感謝いたします。

引用文献

- 板倉雅子・池田 宏 (1998) 小櫃川上流域における平滑岩盤河川の河道形状について、筑波大学水理実験センター報告, 22, 9-21.

- 伊藤隆吉 (1979) 「日本のポットホール」 古今書院,
132 p.
- 奥多摩渓谷調査団 (1996) 「奥多摩・大菩薩・高尾
の谷123ルート」 山と渓谷社, 247 p.
- 奥秩父渓谷調査団 (1997) 「奥秩父・両神の谷100ルー
ト」 山と渓谷社, 248 p.
- 小玉芳敬・池田 宏 (1984) 「特別天然記念物「八
釜の甌穴群」調査報告書」, 八釜調査会, 187
p., 154-164.
- 鈴木陸仁・池田 宏 (1994) 愛知県豊川上流の乳岩
川における平滑な岩盤河床の成因について. 筑
波大学水理実験センター報告, **19**, 45-56.
- 田中幸哉・恩田祐一・安形 康 (1993) 河床縦断面
形に対する岩石物性の影響. 地理学評論, **66A-**
4, 203-216.
- 丹沢渓谷調査団 (1995) 「丹沢の谷110ルート」 山と
渓谷社, 255 p.
- Wohl, E. E. (1992) Bedrock benches and boulder
bars: Floods in the Burdekin Gorge of
Australia. Geological Society of America
Bulletin, **104**, 770-778.
- Wohl, E. E. and Grodek, T. (1994) Channel bed-
steps along Nahal Yael, Negev desert, Israel.
Geomorphology, **9**, 117-126.
- Wohl, E. E. and Ikeda, H. (1997) Experimental
simulation of channel incision into a cohe-
sive substrate at varying gradients. Geo-
logy, **25**, 295-298.