

山地河川における Step-Pool 構造の形状及び分布特性

権田 豊¹・岡崎達也²・西井洋平²・川邊 洋¹

(平成20年8月7日受付)

要 約

本研究では、山地河川が本来有している特性を明らかにすることを目的に、河川環境の重要な構成要素である Step-Pool 構造に焦点をあて、流域特性・降雨特性の異なる、新潟県および三重県の8つの山地河川、合計35調査プロットにおいて、Step-Pool の形状と河床勾配や流路幅といった河道条件の計測結果を行った。調査結果を用いて、実河川における Step-Pool 構造の形状及び分布特性や Step の成因、形成流量について考察した。その結果、河床勾配、低水路幅、Step 構成礫の礫径の3つは、Step-Pool の形状や分布特性を特徴付ける重要なパラメータであることがわかった。今回の調査結果を基に、地形図などから容易に調べることが可能な流域面積や勾配を用いて、山地河川に存在する Step-Pool 構造のスケールを表す関係式を構築した。

新大農研報, 61(1):67-93, 2008

キーワード：Step-Pool、Step 形状、溪流、新潟県、三重県、河川地形

砂礫を河床材料とする山地河川では、落差のある Step と平坦な Pool からなる Step-Pool と呼ばれる河床形態がしばしば観察される。これは、一般に巨礫や巨石が流路横断方向に並ぶことで Step 状になり、Step と Step の間が洗堀され、Pool 状を呈しているものである。このような形状が、河川縦断方向に連続して形成され、階段状の河床形を形成する。山地河川流域において、河床勾配が2%以上の領域に Step-Pool は分布する (Grant et al., 1990 ; Takahashi, 1994 ; Chin, 1999a)。

Step-Pool はその形成や発達、破壊、Pool 部における土砂の貯留現象を通して、土砂の移動現象を支配していると考えられている (沢田, 1985 ; 芦田ら, 1986)。また、Step-Pool は、山地河川に生息する生物に様々な生息空間を提供しており、河川生態系における重要な物理的環境となっている (谷田, 1996 ; 水野, 1997 ; 竹門, 1997)。

現在、砂防工学の分野では、河川の総合土砂管理や砂防事業における自然環境への配慮が社会的に求められている。そのため、土砂の移動現象や河川生態系の解明が必要であり、両者と密接に関わっている Step-Pool についての知見が重要であるといえる。近年、多自然型川づくり等の一環で人工的に瀬・淵を作る試みが行われているが、設計のための指針などは確立しているとはいえない。自然環境に配慮した河川工事や河川管理を実現するためには、河川が本来有している特性を明らかにし、それを積極的に生かすことが重要であると考えられる。

実河川には様々なスケールの Step-Pool が存在しており、これらのスケールは、形成時の流量、河床材料、流砂量とその粒度分布および河道条件等に対応して決定されると言われている (芦田ら, 1984)。実験水路を用いた研究では、流量や河床材料、流砂量と Step-Pool の形成条件や形状特性との関係について、いくつかの検討が行なわれている。例えば、芦田ら (1984) は水路実験により階段状河床形 (Step-Pool) の発生条件とその機構を示し、形状特性として階段状河床形の波長は反砂堆の波長に一致し、波高は掃流力に依存するとしている。また、長谷

川 (1997) は小規模河床形態を礫列 (transverse rib) と礫段 (step and pool) に分類し、それぞれの成因や発生条件を導いている。しかし、実河川においては、Step-Pool に影響を及ぼすと考えられる様々な要因と Step-Pool の関係についての研究はあまり行われてこなかった。さらに、実河川を対象とした研究は、山地河川の一部の区間を対象に行なわれているにすぎない。このため山地河川全体の河床形状については十分に把握されていない。また、従来の研究は Step-Pool の縦断形状に注目したものであり、Step-Pool の横断形状や Pool 部の形状についての知見は非常に少ないのが現状である。

新潟大学農学部砂防工学研究室では、自然河川における Step-Pool の特性と重要性を明らかにすることを目的とし、これまで流域特性の異なる複数の河川において、上流から下流までの広い範囲を対象に調査が行われ、Step-Pool の形成要因や形状及び分布特性について検討されてきた (例えば、堀ら, 2002 ; 西井, 2003 ; 十河ら, 2003)。

本研究では、河川が本来有している特性を明らかにすることを目的に、河川環境の上でも土砂移動現象の上でも重要な意味を持つ Step-Pool 構造に焦点を絞り、新潟県と三重県の山地河川で調査を行った。本論文は、フィールド調査より明らかになった実河川における Step-Pool 構造の形状及び分布特性と Step の成因、形成流量について述べ、最後に、調査結果に基づき、対象流域の河道条件と Step-Pool 形状の関係式を提案するものである。

山地河川の河床形態

1. 山地河川の特性と河床形態の分類

日本の河川のほとんどはその源を山地に発している。河川は、上流山地から河口に達するまで、上流・中流・下流と流れ下り、それぞれ異なる様相を呈する。また、山地河川は水が流れる場であるだけでなく、土砂が移動する場でもある。日本は国土の

¹新潟大学農学部

²新潟大学大学院自然科学研究科

* 代表著者： gonda@agr.niigata-u.ac.jp

表 1. 山地河川と平地河川の流路特性の相違 (福原, 1992, p2に加筆)

	山地河川	平地河川
河床勾配の目安	~ 1/50	1/50 ~
河床材料	岩盤・巨礫・粘土まで 粒径分布は広く、平均粒径は大きい	砂礫質・細砂質・シルト・粘土 平均粒径は比較的小さい
流砂量	土砂生産源であり、下方・側方侵食 のため大きい	流出は少なく土砂は堆積していく
流量・流路幅及び流速	流量は小さいが流路幅が狭く、急勾 配のため流速は速い	流量は支流の合流で大きい、流路 幅が広く、緩勾配のため流速は遅い
流れの性質	常射流混在しているが、射流部が多い	主として常流
特徴的な形態	Step-Pool、滝、瀬と淵など	蛇行、砂州、網状路

大半が山地でかつ、降水量が多く、世界的にみても土砂生産が活発な地域である (太田・高橋, 1999)。

山地河川を平地河川と比較してみると、その構造は非常に複雑である。これらの流路特性の違いは、勾配や河床材料、流れの性質などにより表現され (表 1)、それらは河川縦断方向に変化する (図 1)。

山地河川の洪水時の流れは平地河川と比べると急流で破壊力、下方・側方侵食力が共に大きい。また、土砂の生産源に近いことから河床の構成材料の粒径が平地河川と比較して大きい。その他にも、山地河川の特徴として、土砂生産量と輸送量の一時的な不均衡があること、出水の形態が流量・流砂量の変化で様々な形態をとることが挙げられる。これらの理由から、山地河川は複雑な形状を呈すると考えられる (福原, 1992)。

山地河川において、流れ方向に河床起伏を計測すると図 2、図 3 のような複雑な凹凸地形が現れる。これらの図は、それぞれ加治川水系姫田川支流灯明沢川、雲出川水系西保谷の縦断測量の結果で、平均勾配高が差し引かれており、流向は左から右に向っている。同図において、①のこぎりの刃状の短い波長の起伏 (平均波長 4.8 m)、②①の短い波長が集まった波長 20 ~ 50 m ほどの起伏、③ 100 ~ 200 m あるいはそれ以上の大きな起伏の存在が見て取れる。これらスケールの異なる 3 つの起伏は、河川工学分野における、流路幅の数分の 1 ~ 1 倍スケールの「小規模河床波」、流路幅の数倍スケールの「中規模河床波」、谷幅スケールの「大規模河床波」という分類にそれぞれ対応している (長谷川, 1997)。砂礫を河床材料とする山地河川では、①、②、③ のようなスケールの異なる河床波が共存して、複雑な状況を呈しており、このことが山地河川の大きな特徴となっている。本研究で、対象とする Step-Pool は小規模河床波に分類される (太田・高橋, 1999)。

また、地形学や河川生態学の視点において、Grant et al. (1990) は、山地溪流を平均勾配 2% 以上の河川とした上で、実際の試験流域の現地調査から、平均流路幅の $10^0 - 10^1$ のスケールの流路長を Channel unit と呼び、5 つの基本単位を設定し、Pool (淵)、Riffles (浅瀬)、Rapids (早瀬)、Cascades (小滝域)、Steps (段落ち) とした。この分類は基本単位毎の河床勾配に対応するものであり、Grant et al. は各単位における河床勾配と粒径が重複しないと、水理条件と Step の形成度で河床形態を区分できるとしている。本論で Step として取り扱う河床形は、この分類の内、Riffles,

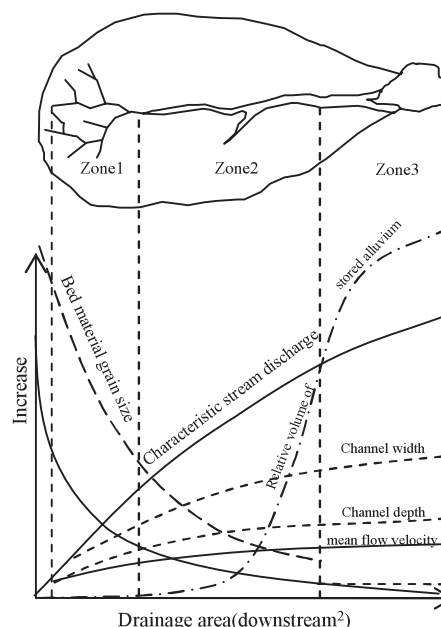


図 1. 河川縦断方向の河道条件の変化 (Robert, A (2000): River Processes から抜粋)

Rapids, Cascades, Steps に含まれる。

2. Step-Pool に関する従来の研究

Step-Pool の研究は、土砂生産源である山地からの土砂流出に関する砂防学的な視点から行われてきた。それは Step-Pool が土砂の生産源である山地河川に一般的に存在し、その形成や発達、破壊、Pool 部における土砂の貯留を通して流出土砂量およびその粒度分布を大きく変動させる要因になっていると考えられているためである (芦田, 1984; 沢田, 1985)。しかし、河川地形学の視点では、平地河川の瀬・淵構造と比べると比較的軽視されてきた。

Step-Pool 構造の物理的現象に関する研究は、水路実験を中心に Step の形状特性について整理されてきており (芦田ら, 1984; Abrahams et al., 1995; 藤田・池田, 1996)、破壊条件

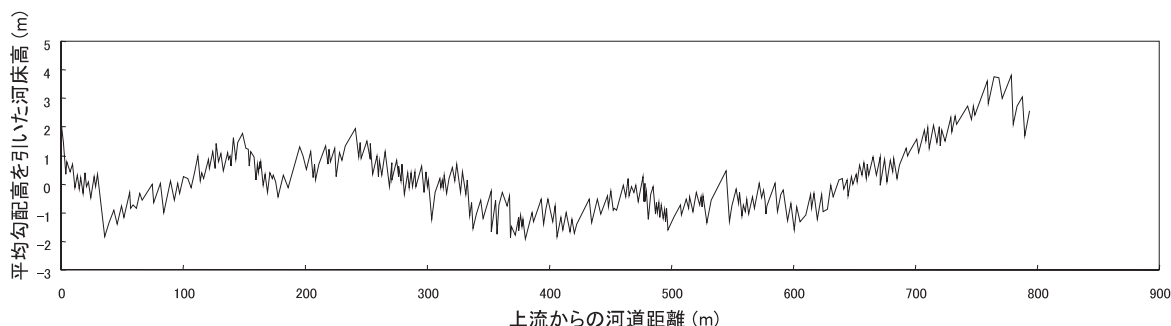


図2. 灯明沢川における縦断河床形状 (平均勾配高差し引き)

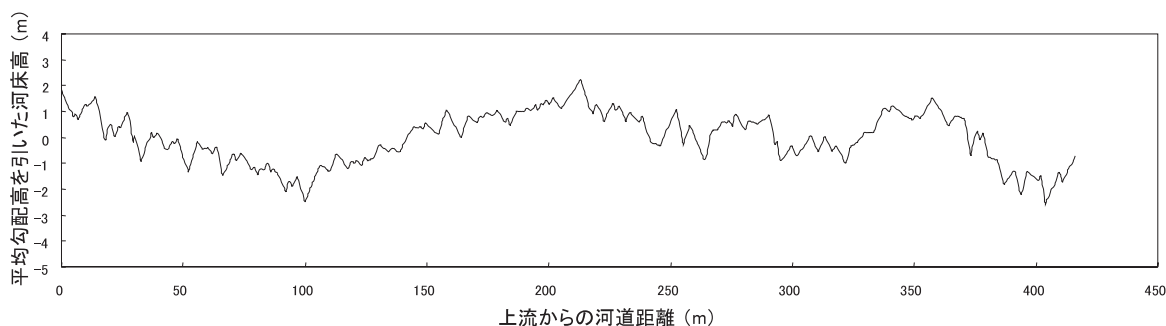


図3. 西俣谷における縦断河床形状 (平均勾配高差し引き)

や形成条件 (芦田ら, 1986a; 芦田ら, 1987)、階段状河床波状の流れの抵抗について報告されている (芦田ら, 1986b)。また、近年ではそれらの知見を実河川に適用した研究事例も世界各国で報告されており、発生要因 (Abrahams et al., 1995; Chartrand and Whiting, 2000; Chin, 1999a)、形成時の出水規模 (芦田ら, 1985; 藤田・道上, 1995; 長谷川, 1997; 堀ら, 2002) や破壊条件の推定 (藤田・道上, 1996; Chin, 1998)、Stepの形状特性及び分布特性 (秋山・眞板, 1997; Chartrand and Whiting, 2000; Chin, 1999b; 藤田・道上, 1995; 長谷川, 1997; 西井, 2003; 十河ら, 2003) についての報告など多岐にわたる。

山地河川の河床形状研究の先駆者ともいえる芦田ら (1984) は、現地での階段状河床形の Step-Pool の観察をもとに水路実験を行い、階段状河床形の発生条件や形状特性に関する知見を得ている。それによると階段状河床形が形成されるためには

- (1) 混合砂であること、
 - (2) 平均粒径よりも大きい砂礫が活発に移動するだけでなく、一方で最大径の礫が停止すること、
 - (3) 流れが限界流・射流であって、分級砂礫によって反砂堆が形成されること、
- の3条件が必要であるとしている。また、形状特性としては、
- (4) 波長 (Step 間隔) が反砂堆の波長 λ にほぼ一致し、
 - (5) 波高 (Step 高) はアーマ・コートの平均粒径程度である
- としている。

また、Step-Pool の形成条件のひとつとして芦田ら (1984) は流れが射流であることを挙げているが、現地調査と固定床上の水路実験の結果から Step-Pool が常流においても形成される

という報告もある (藤田・池田, 1996)。

さらに、芦田ら (1984, 1985) は、上記の知見を実際の山地河川に適用するとともに、現地で見られた Step-Pool の特性値から、河床形形成時の出水規模の推定を試みている。藤田・道上 (1995) や堀ら (2002) も同様に現地への適用を試みている。その結果、藤田・道上 (1995) は、千代川水系河川の階段状河床を調査し、形成流量が5年確率洪水に相当すると報告している。また、堀らは新潟県内の3河川を対象に Step-Pool を調査し、形成流量が5～20年確率に相当するとしている。破壊条件について芦田ら (1986a) は、河床面粗粒化のために抵抗特性と流砂特性が変化し、破壊流量が形成流量よりかなり大きくなることを指摘している。藤田・道上 (1996) は、上述の千代川水系河川にこの考えを適用し、破壊流量の確率年が20～40年になると推定している。

波高 (Step 高) について、河床表面のアーマ・コートの平均粒径程度であることが実河川と実験水路の双方において確認されており (芦田ら, 1984, 1985)、Step 構成礫の最小粒径から平均粒径の間にほぼ一致するという報告 (藤田・道上, 1995) もある。

Chin (1998) は、Step-Pool の安定性について検討し、南カリフォルニアのサンタモニカ山脈の2河川に存在するすべての Step-Pool について5～100年確率洪水で移動すると推定している。また、構成礫の粒径がプロット平均値程度の Step は2年から5年の確率の流量で移動し、Step-Pool の安定性は Step 構成礫の粒径に依存すると報告している。さらに、同調査地において、Step-Pool の周期性についてスペクトル解析を用いて検討しており、河床縦断形状についてスペクトル解析を行い、検出される卓越波長が Step 間隔のプロット平均値に相当する

と報告している (Chin, 2002)。

また、西井 (2003) は、山地河川に存在する Step-Pool の一般的特性を把握するため、規模や地質の異なる新潟県内の6河川を対象に河川の上流から下流までの広い範囲で調査を行った結果、勾配や粒径、流量といった3つの河道条件を Step-Pool のスケールを決定する重要な支配要因であるとした。さらに、Step の構成物と形状の2つから、山地河川に存在する様々なスケールの Step を分類している。

十河ら (2003) は、Step の横断構造に注目し、Step 前面礫数が勾配により決定されるなど、地形要因、特に勾配との関係を明らかにし、Step の横断構造に関する新たな知見を報告している。

一方、河川生態学の見地からは、Step-Pool は山地河川におけるマイクロハビタット (微生物場所)、ハビタット (小生息場所)、ピオトープ (生息場所) までの階層的な棲み場として機能する (桜井, 2003) とされている。ここでいうマイクロハビタットとは、礫や岩の表面や隙間である。また、ハビタットは、Step 部や Pool 部などマイクロハビタットのレベルのものが、かなり均質に集まっているような場所である。さらに、Channel unit のようにさまざまなハビタットが集まってピオトープとなる。

水生昆虫、魚類に注目して上記の Step-Pool 構造の機能について述べると、水生昆虫が生活史を通じて利用している場所条件や、生物群集における作用中心には Step 部の基盤岩や飛沫帯、Pool 部の砂地や堆積型リターパックのように、Step-Pool 構造 (ピオトープ) の中でも特定の部位 (ハビタット) が重要となる例が多く報告されており、一部の水生昆虫にとって重要な、岩盤・岩盤に生えた苔・大きな石・特定の粒度の低質などの微環境要素 (マイクロハビタット) についても、Step-Pool 構造 (リーチスケール) における配置をみるならば、特定の場所に分布する傾向がある (谷田, 1996; 竹門, 1997)。また、魚類に関して言えば、本州に広く分布するハヤの仲間でも発育段階に従って生息場所が変化することが知られており、Step-Pool 構造は、例えばサイドプールや流心から外れたトロ瀬の部分は稚仔魚の重要な生息場所を提供し、出水時には稚魚のみでなく、成魚の避難場所を提供する。その他にも採餌場所、休息場所、産卵場所などさまざまな機能を提供する (水野, 1997)。

このように、これまでの Step-Pool 構造に関する研究は、河川環境に内包される物理的現象として研究が行われてきたが、近年では河川生態学の知見も報告されている。

3. まとめ

Step-Pool 構造は、山地河川に一般的にみられる河床形状である。Step-Pool に関する研究は、水路実験を中心に行なわれ、形成条件や破壊条件、分布・形状特性についての知見が得られ、整理されてきた。近年、それらの知見を実河川に適用した報告もみられるが、実河川における Step-Pool についての知見は、未だ十分とは言えない。

実河川には様々なスケールの階段状河床形が存在しており、これらのスケールは、形成時の流量、河床材料、流砂量とその粒度分布および河道条件等に対応して決定されると言われている (芦田ら, 1984)。しかし、国内における実河川を対象とした Step-Pool に影響を及ぼすと考えられる様々な要因と Step-Pool の関係についての研究は十分であるとはいえない。また、従来の研究は階段状河床形の縦断形状に注目したものであり、

階段状河床形の横断形状 (十河ら, 2003) や Pool 部の形状についての知見 (藤田・道上, 1995; Buffington et al., 2002) は未だ少ないのが現状である。Step-Pool についての知見を蓄積させ、今後の調査研究に反映させる必要があるといえる。

調査概要

1. 調査地

山地河川に存在する Step-Pool 構造の形状及び分布特性を把握するため、2004年10月～12月、2006年11月～12月の期間に、新潟県新発田市の姫田川支流の灯明沢川で河川測量を行った。また、2005年11月に、三重県津市の三重大学紀伊・黒潮生命地域フィールドサイエンスセンター附帯施設演習林内の西俣谷 (雲出川上流域) でも同様に河川測量を行なった。

さらに、本研究では西井 (2003) が調査した、規模や地質の異なる新潟県内の6河川 (佐渡市の古川及び五十浦川、新潟市 (旧西蒲原郡巻町) の乙尻沢、加治川支流で新発田市の大沢および板山川、早出川支流で五泉市の大蔵川) のデータと併せて Step-Pool 構造の形状及び分布特性について結果を比較、考察した。新潟県内の7河川、三重県の西俣谷の河川位置をそれぞれ図4、5に、対象河川の特性を表2に示す。

古川は全長約3.3km、標高約450m付近を源流にもち、流域面積は約3.2km²である。五十浦川は、全長約3.3km、標高約450mを源流にもち、流域面積は約4.2km²である。乙尻沢は全長約1.8km、標高約280m付近を源流にもち流域面積は約0.7km²である。大沢は全長約4.3km、標高約460m (加治川までの標高差約390m) 付近を源流にもち、流域面積は約3.5km²である。大蔵川は、全長約6.2km、標高約800m (最下流調査プロットまでの標高差775m) を源流にもち、流域面積は約3.5km²である。板山川は、全長約6.8km、標高約500m (最下流調査プロットまでの標高差420m) を源流にもち、流域面積は約6.3km²である。灯明沢川は、全長約3.3km、標高約470m (姫田川までの標高差約360m) を源流にもち、流域面積は約3.5km²である。西俣谷は、全長約2.4km、標高約910mを源流にもち、流域面積は約2.6km²である。ただし、大蔵川、板山川、灯明沢川、西俣谷の全長及び流域面積については、Step-Pool の存在した、本流との合流部付近までのものである。

このように、本研究の調査対象河川は、標高は高くはないが、流域面積が小さく、平均勾配が大きい典型的な山地河川の特性を有している。

各流域付近の年平均降水量を比較すると、加治川水系の大沢、板山川、灯明沢川がその他の河川よりも年平均降水量が多い。日本の年平均降水量は1,700mmといわれていることから、これらの流域は他地域と比べても降水量が多いことが分かる。

ただし、月降水量をみると雲出川水系の西俣谷は、紀伊冬温暖夏多雨気候区に属し、降雨は冬季に少なく、夏季に多いという特徴を有す (図6)。さらに、三重大学演習林報告より、1961 - 1995年の最大日雨量をみると、1994年に最大392mmの日雨量が観測されている。これに対して、著者らがこれまで調査を実施した新潟市周辺の山地流域は、年平均降水量は1,500mm～3,000mm程度であるが、冬季に降水量が多い多雪地帯である。このように、両地域の降雨特性は異なっている。

調査対象の8河川は全て土石流危険渓流に指定されており、五十浦川では2基、乙尻沢では7基、大沢では3基、大蔵川では6基、板山川では3基、灯明沢川では1基砂防堰堤もしくは谷止め工が設置されている。古川については河口付近に一部は

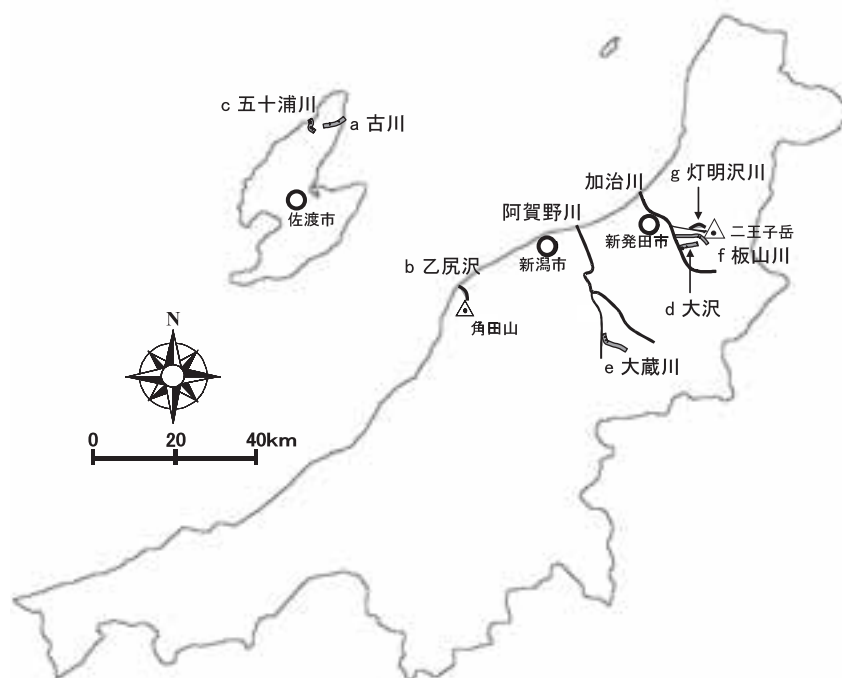


図4. 調査河川位置図（新潟県）

暗渠化されている箇所があるが、それ以外にほとんど人工構造物はみられない。

2. 調査方法

灯明沢川では、姫田川との合流点から源頭部までの間で、Step-Pool 構造が形成・発達している流路内に調査区間（以下プロット）を4箇所設けた（下流より上流へプロット A、B、C、D）。各プロットの長さ、平均勾配、流域面積はそれぞれ、約 90 m～210 m、約 0.05～0.16m/m、約 1.64～3.33km²である（表 3-3）。また、2006 年の追加調査において、プロット B～C 間の約 530 m、平均勾配 0.09 の区間で調査を実施した。西俣谷でも同様に、Step-Pool 構造が発達している流路内で約 390 m、平均勾配約 0.14 の区間で調査を実施した。

西井（2003）は、山地河川全体の河床形状について把握するため、各調査河川の河口付近や本流との合流点、渓谷の出口付近から源頭部までの間で、古川は6箇所、乙尻沢は5箇所、五十浦川は7箇所、大沢は4箇所、大蔵川は5箇所、板山川は4箇所にプロットを設置し、調査を行っている。プロットの長さ、平均勾配はそれぞれ 60～200 m、0.02～0.32m/mである（図7）。

2.1 Step-Pool 形状の計測方法

各プロットで河床形状と河道条件（河床勾配・流路幅）の計測を行った。河床形状の計測は、西井（2003）の計測方法を参考に Step 部と Pool 部に分けて行った。Step 部は Step の縦断形状の指標である Step 高、Step 差高、Step 間隔を計測し、Step の横断形状の Step 幅、さらに Step を構成する礫の数と粒径を計測した。Step 差高と Step 間隔は、Step の頭の部分（図8の丸印）を基準に1つ下流の Step までの垂直距離を Step 高、水平距離を Step 間隔として計測した。Step 高は、Step の頭



図5. 調査河川位置図（三重県）

表 2. 調査対象河川の特性

河川名	流域面積 (km ²)	流路長 (km)	源頭部標高 (m)	平均勾配	年平均降水量* (mm)	調査実施年	主な地質
a 古川	3.2	3.3	450	0.137	1514.1	2000	デイサイト溶岩・火砕岩
b 乙尻沢	0.7	1.8	280	0.156	1745.3	2000	安山岩溶岩・火砕岩
c 五十浦川	4.2	3.5	400	0.125	1514.1	1999・2001	流紋岩・デイサイト・安山岩・玄武岩溶岩・火砕岩 砂岩・礫岩
d 大沢	5.6	4.3	460	0.107	3232.6	2001	斑状花崗岩・流紋岩・粘板岩・砂岩・緑色岩類
e 大蔵川	3.5	6.2	800	0.125	2123.6	2002	チャート
f 板山川	6.3	6.8	500	0.062	3232.6	2002	斑状花崗岩・流紋岩
g 灯明沢川	3.5	3.3	470	0.110	3232.6	2004・2006	斑状花崗岩・砂岩・礫岩
二俣谷	2.6	2.4	910	0.197	2481.9	2005	花崗閃緑岩類

※年平均降水量は、西俣谷を除いては、流域内で降雨の計測を行っていないため、最寄りの AmeDAS データを用いた（西俣谷は、1966 - 1995 年、古川・五十浦川は、1912 - 2006 年、その他は 1976 - 2006 年の平均）。

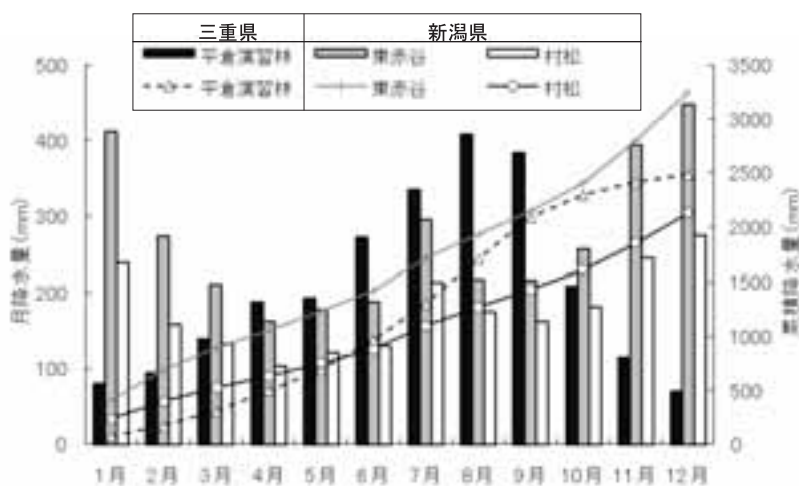


図 6. 三重県と新潟県の降雨特性の比較

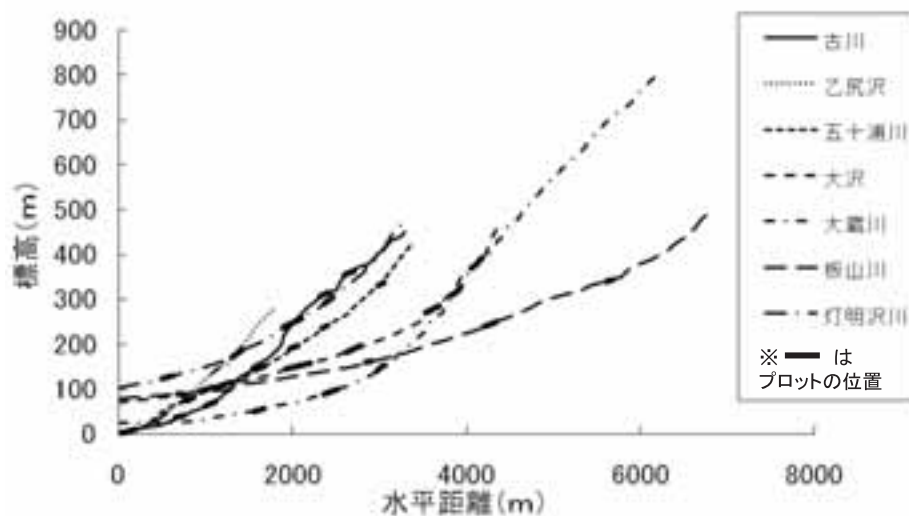


図 7. 調査河川縦断形とプロット位置

の部分と直下の Pool の最深部との垂直距離を Step 高とした。Step 幅は、Step 部の流路横断方向の長さを Step 幅として計測した (図8)。

礫数は、Step を構成している礫の中で長軸が約 30cm 以上のものを対象に、表面から見える範囲で数えている。さらに、Step 部を下流から目視した場合に、目視しうる範囲 (Step 前面部) の河道横断方向の礫数をカウントし、Step 前面礫数とした (図9)。Step 構成礫の粒径は、Step を構成している最大級の礫、上位3つを選び、それぞれの礫の3軸長 (長軸 a、中軸 b、短軸 c) を計測して、幾何平均を行い各礫の粒径 $d_i = (a \cdot b \cdot c)^{1/3}$ を算出し、さらにそれらを算術平均して、Step の構成礫の粒径 $d = (d_{s1} + d_{s2} + d_{s3}) / 3$ とした。

Pool 部の計測は、河床が掘れて深くなっている Pool 部分の長さ、幅、深さと、Pool 直上の水面から Pool の水面までの高さの差を落差として計測した (図9)。それぞれの計測には巻尺とレベル、スタッフもしくはポールを使用し、計測を行なった。

2.2 外観による Step-Pool の分類

本研究の調査対象河川では、砂州や浅瀬、早瀬などはほとんど確認されなかった。主として Step-Pool が占め、まれに Step-Step (Step が連続する構造) や Bedrock がみられた。これは、調査対象河川の流域面積が小さく、急勾配で一般的な山地河川でもかなり上流部の特徴を有しているためであると考えられる。西井 (2003) は、急勾配河川における階段状河床形の分布や形状特性を把握するために、階段状河床形の分類を試みている。西井 (2003) の Step の分類を参考に、Step 部の構成要素と形状より Step を単列型、複列型、大礫単列型、大礫複

列型、巨礫型、岩盤型、浸食型、Wood debris 型、不完全、その他 (小滝、複合型など) に分類した (表3)

単列型 Step (写真1)

1 m 未満の礫で構成され、河道横断方向に礫が1列に並んで Step を構成しているもの。従来の一般的な階段状河床形はこれにあたる。

複列型 Step (写真2)

1 m 未満の礫で構成され、河道横断方向に複数列礫が並んで Step を構成しているもの。

大礫単列型 Step (写真3)

1 m 以上の大礫で構成され、河道横断方向に礫が1列に並んで Step を構成しているもの。平均的な河床の礫よりも一回り大きな礫で、小規模な洪水では移動しないと考えられる大礫が中心となって構成されている。

大礫複列型 Step (写真4)

1 m 以上の大礫で構成され、河道横断方向に複数列礫が並んで Step を構成しているもの。

大礫単列型同様、小規模な洪水では移動しないと考えられる大礫が中心となって、集散的に構成されており、内部に小さな Pool を複数もつものもある。停止した土石流先頭部もしくは大規模な洪水によって形成されたものと思われる。

巨礫型 Step (写真5)

2 m 以上の巨礫が河道に存在し、その上流に多数の礫が堆積

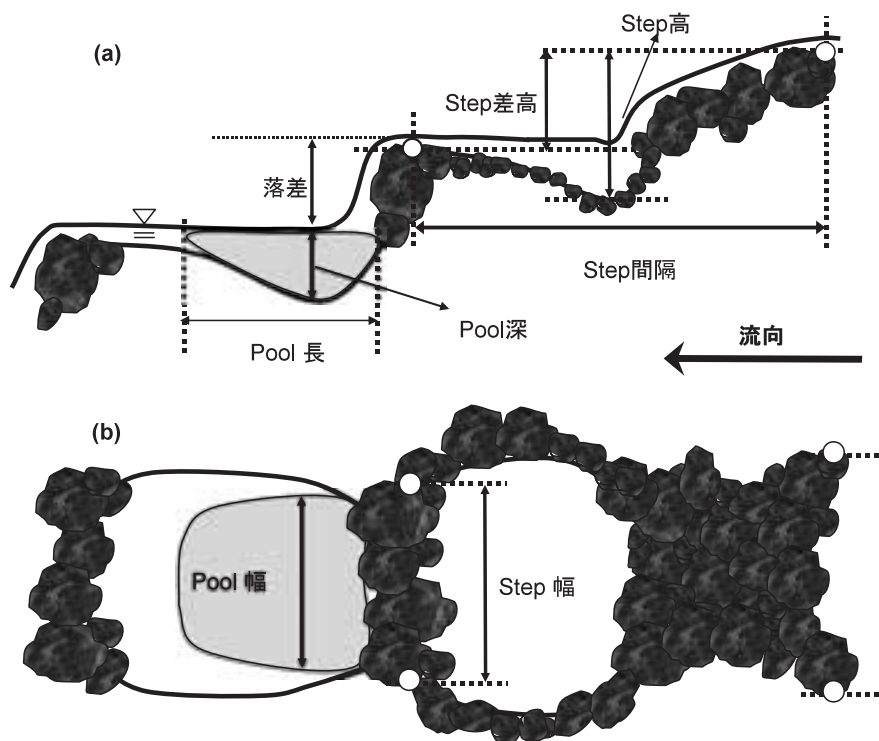


図8. Step-Pool の計測箇所

して1つの Step を形成しているもの。この巨礫は掃流によっては移動しないと思われ、側岸からの岩盤崩落や土石流等により形成されたものと思われる。

浸食型 Step (写真6)

礫がほぼ垂直に積み重なって Step を形成しており、河床勾配の大きな場所でのみ見られた。掃流状態で輸送されてきた礫が垂直に積み重なって停止、堆積することは考え難く、河床に堆積していた土砂礫が浸食され粒径の大きな礫のみが残ることによって形成されると考えた。このため浸食型と命名された(西井, 2003)。

岩盤型 Step (写真7)

河床の岩盤自体が Step を形成し、階段状構造をしているもの。

Woody debris 型 (写真8)

流木や倒木、立木の根や落葉落枝などが Step を形成しているもの。Gomi et al (2003) は、南東アラスカの山地河川の Step や河道形態について、さらに細かく分類しており、Step を構成する木片の長さが 0.5 m 以上、直径が 0.1 m 以上のもの

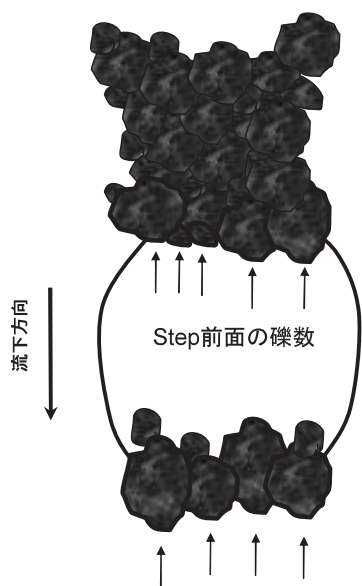


図9. Step 前面礫数の計測方法

を (i) large woody debris (LWD)、木片の長さが 0.5 m 以上、直径が 0.03 ~ 0.1 m のものを (ii) fine woody debris (FWD)、(i)、(ii) の条件を満たさない落葉落枝のような木片から成るものを (iii) woody debris and fine organic debris (FOD) としている。

2.3 河道条件の計測

河道条件については、縦断測量と流路幅の計測を行った。西井 (2003) は、縦断測量の測点を流路の屈曲部及び勾配変換点の流路中心軸上に置いているが、本研究では Step の頭の部分と Pool の最深部に加えて流路の屈曲部及びその他の勾配変換点の流路中心軸上に測点を置き、コンパスあるいはレベルを用いて測量した。流路幅は調査時の低水路幅と溪岸の観察から出水時の流路幅を推測し、高水路幅として計測した。さらに 2 万 5 千分の 1 の地形図を用いて、各プロットの稜線からの距離と流域面積、地形図上の勾配を算出した。

ただし、西井 (2003) のデータでは、大蔵川、板山川、灯明沢川、西保谷については各 Step 位置での低水路幅と高水路幅が計測されているが、古川と乙尻沢は縦断測量の測点上でのみ、低水路幅と高水路幅の計測が行われている。また、五十浦川と大沢については、低水路幅の計測が行われていないため、データの解析時には Step 幅の値で代用した。

さらに、西井 (2003) のデータでは、Step 高の計測が行われておらず、解析時には、(Pool 深 + 落差) を Step 高の値とした。古川の Step 間隔の計測は、ポールもしくはスタッフで直接計測するのではなく、コンパス測量によって求めていることや、不完全もしくは不明瞭な Step を計測対象としていないなど、計測方法の違いにより、古川の各プロットの Step 間隔の平均値は、他の河川とは単純に比較できない。

各プロットにおける、河道条件、Step-Pool の各形状のプロット平均値を表 4、5 に示す。また、各プロットの Step-Pool の各形状のヒストグラムを図 10 ~ 12 に示す。

流出解析

1. 目的

芦田ら (1984, 1985) は、Step-Pool の Step 間隔 (波長) は反砂堆の波長と等しいものとして、次のケネディーの式で求められるとしている。

$$Fr^2 = \frac{2 + k_* \tanh k_*}{k_*^2 + 3k_* \tanh k_*} \quad (1)$$

ただし $k_* = 2\pi(\frac{h}{\lambda})$ Fr : フルード数 λ : Step 間隔 (波長)

である。

表 3. Step の分類 (西井, 2003, p32より加筆)

Step の名称	主な構成物	形状
単列型	礫	礫が 1 列に並んでいる
複列型	礫	礫が複数の列、積み重なっている
大礫単列型	長軸 1 m 以上の大礫	大礫が 1 列に並んでいる
大礫複列型	長軸 1 m 以上の大礫	大礫が複数の列、積み重なっている
巨礫型	長軸 2 m 以上の大礫	巨礫が形成
浸食型	礫	礫がほぼ垂直に積み重なっている
岩盤型	岩盤	岩盤が落差を形成
Wood Debris 型	流木、倒木、落葉落枝	Wood Debris が落差を形成



写真1. 単列型 Step (西俣谷)



写真4. 大礫複列型 Step (西井, 2003)



写真2. 複列型 Step (灯明沢川)



写真5. 巨礫型 Step (西井, 2003)



写真3. 大礫単列型 Step (西俣谷)

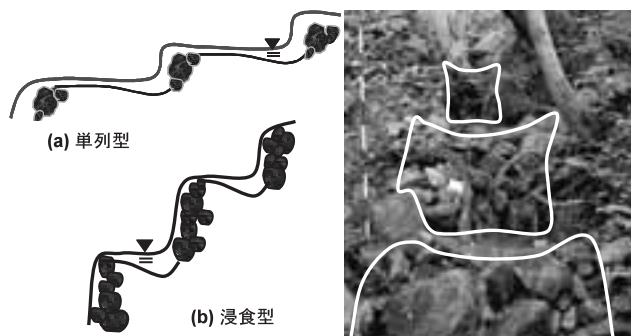


写真6. 浸食型 Step (西井, 2003)



写真 7. 岩盤型 Step (西井, 2003)



写真 8. Woody debris 型 (灯明沢川)

表 4. 河道条件の計測結果

	Reach	Drainage area (km ²)	Mean gradient (m/m)	Mean channel width (m)	Mean particle size (cm)	Surveyed channel length (m)	Number of step-pool units
古川	A	3.16	0.046	3.31	62.4	94	8
	B	2.81	0.050	2.95	83.7	98	6
	C	2.62	0.071	3.18	90.6	114	5
	D	0.86	0.088	1.70	67.5	92	5
	E	0.59	0.080	1.84	62.4	113	7
	F	0.12	0.202	0.85	41.3	109	8
乙尻沢	A	0.57	0.113	1.39	43.8	92	29
	B	0.50	0.117	1.25	47.7	112	38
	C	0.43	0.139	1.67	59.4	97	27
	D	0.32	0.123	1.33	52.5	85	31
	E	0.27	0.196	0.65	54.5	102	26
五十浦川	A	4.23	0.047		57.4	205	24
	B	3.56	0.061		68.0	84	15
	C	3.22	0.054		76.1	129	20
	D	2.80	0.090		126.8	103	15
	E	2.21	0.080		87.8	87	11
	F	1.87	0.096		95.5	77	17
	G	1.32	0.097		53.7	68	18
大沢	A	2.89	0.045		69.8	152	34
	B	2.28	0.038		66.8	195	28
	C	1.20	0.080		88.2	166	34
	D	0.70	0.091		69.0	160	33
大蔵川	A	2.71	0.059	3.77	33.5	153	24
	B	2.31	0.113	3.06	57.0	94	27
	C	1.42	0.317	2.32	75.0	98	25
	D	1.33	0.155	2.70	58.3	117	43
板山川	A	5.70	0.016	4.62	69.3	103	9
	B	4.27	0.041	4.99	88.7	67	14
	C	2.84	0.084	4.95	96.8	120	21
灯明沢川	D	1.15	0.084	3.17	74.1	75	23
	A	3.33	0.051	4.30	65.9	127	19
	B	2.73	0.149	3.58	106.0	118	19
	B2	2.56	0.086	2.64	74.7	530	109
西俣谷	C	1.94	0.098	3.54	72.5	217	48
	D	1.65	0.159	3.39	97.9	105	21
	A	1.24	0.131	2.01	78.2	390	85

表5. Step-Pool 形状の計測結果

	Reach	Mean step-step drop (m)	Mean interval of steps (m)	Mean step width (m)	Mean pool length (m)	Mean pool width (m)	Mean scour depth (m)	Mean step-pool drop (m)
古川	A	0.32		3.32	2.30	1.93	0.38	0.21
	B	0.49		4.44	3.00	3.12	0.63	0.47
	C	0.95		5.77	2.63	1.46	0.51	0.72
	D	0.74		3.95	2.66	2.09	0.51	0.51
	E	0.74		2.96	2.30	1.88	0.43	0.43
	F	1.01		2.97	1.03	0.70	0.33	1.00
乙尻沢	A	0.30	2.79	2.22	1.43	1.36	0.25	0.26
	B	0.37	2.29	2.11	1.47	1.26	0.30	0.36
	C	0.50	2.78	2.63	1.74	1.76	0.33	0.54
	D	0.35	2.47	2.22	1.65	1.47	0.30	0.43
	E	0.63	3.02	2.30	1.23	1.19	0.21	0.63
五十浦川	A	0.55	5.48	3.83	2.19	1.96	0.42	0.32
	B	0.44	4.76	4.07	3.04	2.44	0.55	0.35
	C	0.63	6.56	4.29	2.27	2.00	0.49	0.35
	D	0.99	6.85	5.71	2.98	3.10	0.78	0.48
	E	0.70	6.98	3.81	3.91	2.91	0.74	0.57
	F	0.60	4.19	4.04	2.48	2.44	0.59	0.38
	G	0.60	4.10	3.46	1.90	2.02	0.45	0.41
大沢	A	0.53	4.53	4.78	1.89	1.86	0.38	0.22
	B	0.72	6.99	4.46	2.26	2.24	0.47	0.28
	C	0.74	5.17	4.30	2.29	2.20	0.51	0.35
	D	0.77	4.94	3.58	1.64	1.68	0.44	0.34
大蔵川	A	0.38	3.78	3.83	1.34	1.42	0.40	0.28
	B	0.57	3.48	3.81	1.57	1.63	0.47	0.30
	C	1.34	3.94	3.69	1.45	1.63	0.57	0.91
	D	0.53	3.03	3.53	1.22	1.34	0.42	0.42
板山川	A	0.43	8.40	5.16	3.31	1.88	0.51	0.17
	B	0.61	5.26	5.07	2.69	2.45	0.64	0.25
	C	0.74	5.37	5.12	2.75	2.26	0.59	0.40
	D	0.57	4.37	3.75	1.95	1.73	0.46	0.33
灯明沢川	A	0.34	6.67	4.52	1.85	1.60	0.48	0.23
	B	0.91	6.11	4.38	1.95	1.43	0.56	0.60
	B2	0.42	4.84	4.79	1.82	2.18	0.51	
	C	0.43	4.35	3.83	1.12	0.86	0.44	0.41
	D	0.76	4.82	4.24	1.38	1.14	0.45	0.53
西俣谷	A	0.60	4.60	3.09	1.55	1.34	0.37	0.50

フルード数 (Froude number) とは、流れの中での慣性力と重力の比を表す無次元数、流速と流体中を伝わる波の伝播速度との比 ($Fr=V/\sqrt{gh}$, V : 流速, g : 重力加速度, h : 水深) で表される。フルード数が1より小さい場合の流れを常流、1より大きい場合の流れを射流という。本論文では後述の「Step-Pool の発生機構」の章において、芦田らにならって上式より、2、5、20、50、100、200年確率洪水に対する水理量と Step 間隔の実測値から k^* と Fr を求め、ケネディーの理論曲線と比較する。このための準備として本章では、各調査地における確率水理量を解析する。

2. 確率水理量計算

2.1 水文統計 (確率雨量計算)

5、20、50、100、200年確率洪水に対する水理量を求めるために、5、20、50、100、200年に一度の確率年最大日雨量を、計算により推定する。なお標本となる年最大日雨量は、対象流

域で降雨観測を行っていないため、近隣の気象庁 AMeDAS 観測点のデータ (データ期間 1961-2006年) を使用した。五十浦川については、相川の40年間の年最大日雨量を、大沢・板山川・灯明沢川については二王子の30年間の年最大日雨量を、乙尻沢・大蔵川については、それぞれ巻・村松の30年間の年最大日雨量を使用し解析を行なった。西俣谷については、三重大学紀伊・黒潮生命地域 FSC 附帯演習林で気象観測が行なわれているため、三重大学生物資源学部平倉演習林気象報告 (島田・万木, 1999; 島地ら, 1992) より、データ期間 1961-1995年の年最大日雨量を使用し解析を行なった。解析に用いた手法は以下である。

(a) 正規分布

年最大日雨量や年最大洪水量などの変量 (X) が N 年間にわたって記録されているものとし、その値を $(x_1, x_2, \dots, x_n, \dots, x_N)$ とする。変数 X が x と $x + dx$ との間にある確率が次式

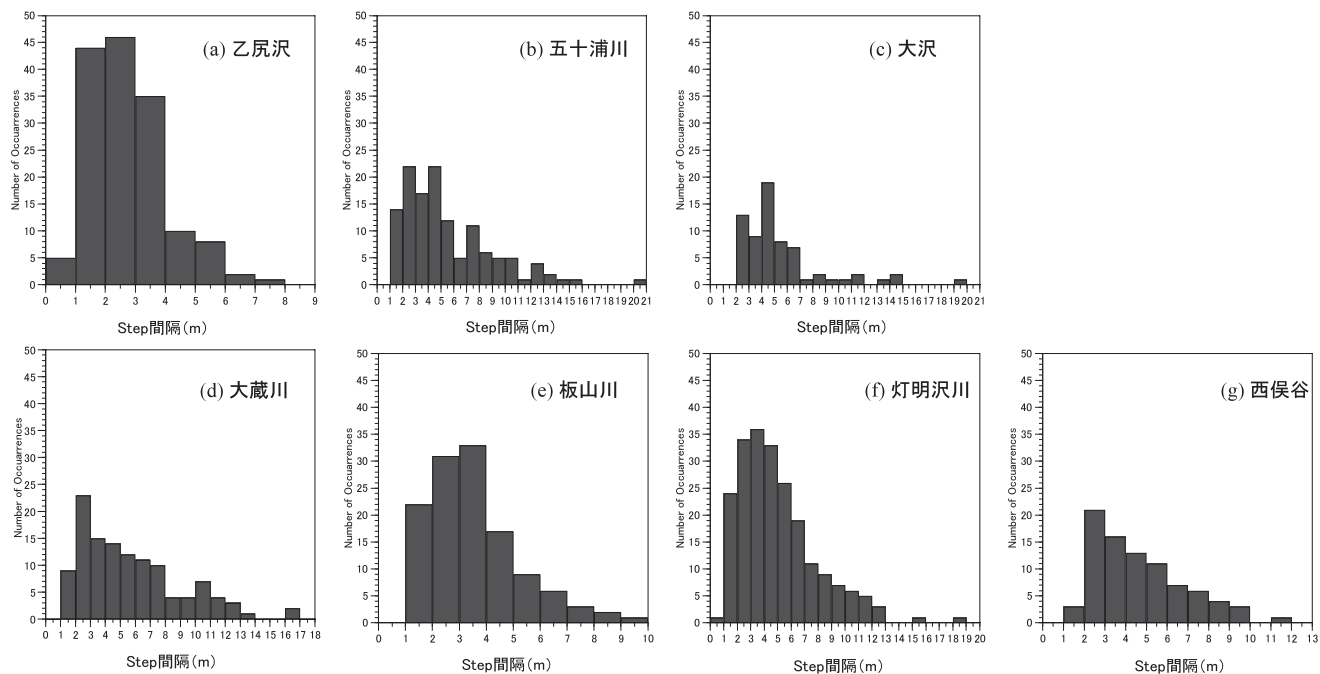


図10. 各河川の Step 間隔のヒストグラム。
 (a) 乙尻沢、(b) 五十浦川、(c) 大沢、(d) 大蔵川、(e) 板山川、(f) 灯明沢川、(g) 西俣谷

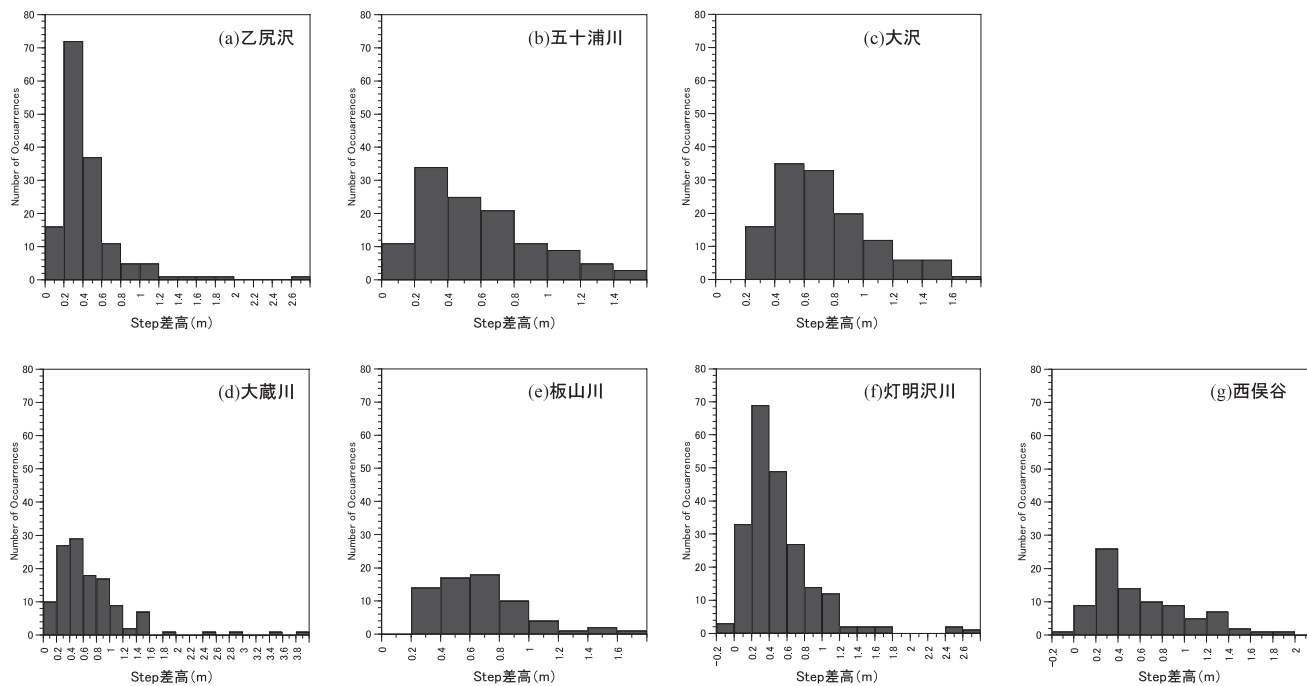


図11. 各河川の Step 差高のヒストグラム。
 (a) 乙尻沢、(b) 五十浦川、(c) 大沢、(d) 大蔵川、(e) 板山川、(f) 灯明沢川、(g) 西俣谷

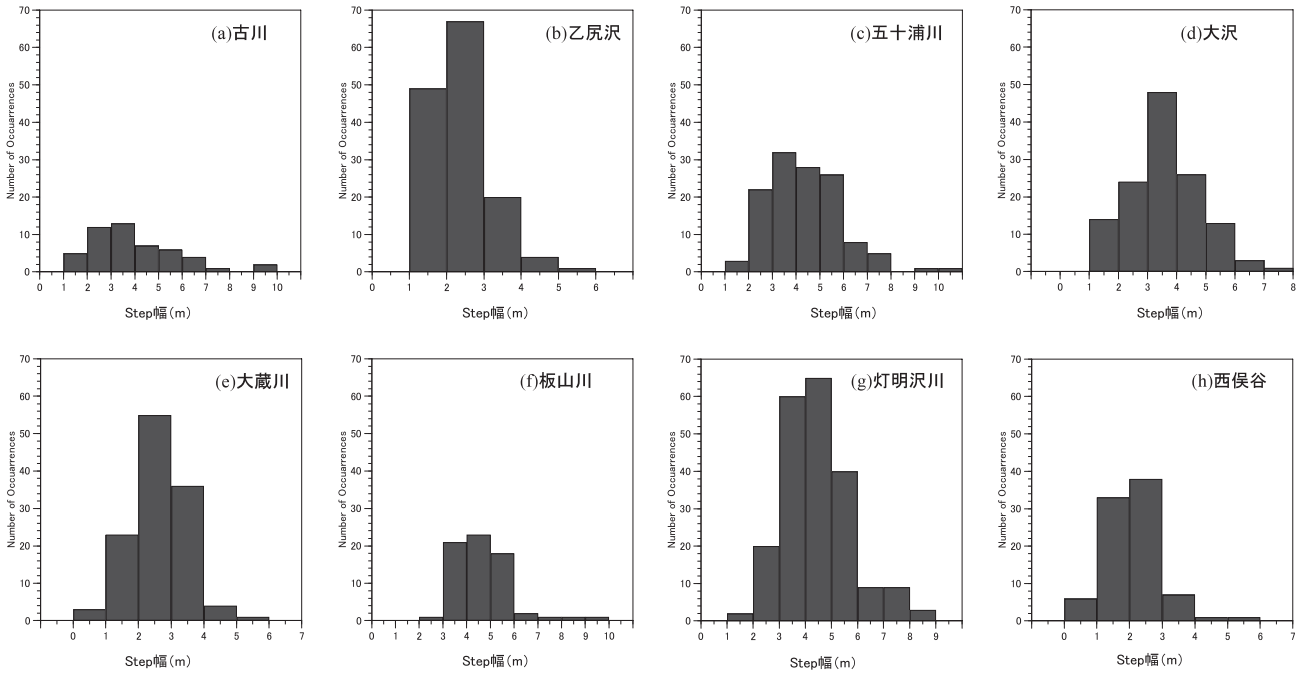


図12. 各河川の Step 幅のヒストグラム。

(a) 古川、(b) 乙尻沢、(c) 五十浦川、(d) 大沢、(e) 大蔵川、(f) 板山川、(g) 灯明沢川、(h) 西俣谷

$$f(x)dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} dx, \quad \int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1 \quad (2)$$

で表されるとき、X は正規分布の法則に従うという。この確率密度関数

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

は観測誤差などのように、作為の入らない偶然量の分布を表すのに適しており、その形は左右対称のつりがね型である。なお、 \bar{x} 、 σ は平均値及び標準偏差で、次式

$$\int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx = \bar{x}, \quad \int_{-\infty}^{\infty} (x-\bar{x})^2 f(x)dx = \sigma^2 \quad (4)$$

で定義され、 σ^2 は変量の平均値 \bar{x} から分散を示す。そこで、変量 X が特定値 x より大きい値を持つ確率、すなわち超過確率を $W(x)$ とすると、

$$W(x) = \int_x^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} dx = 1 - \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} dx. \quad (5)$$

ここで、

$$\xi = (x - \bar{x}) / \sigma \quad (6)$$

$$W(\xi) = \int_{\xi}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\xi^2}{2}} d\xi = 1 - \int_{-\infty}^{\xi} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\xi^2}{2}} d\xi. \quad (7)$$

式(5)の ζ と $W(\zeta)$ との関係は誤差関数表から求めることができ、代表的な値を表6に示す。なお、標本数が有限でN個の場合には、式(4)の \bar{x} 、 σ は式(4)で $f(x)dx = 1/N$ なることを考慮

して、標本値 x_i を用い次式で計算すればよい。

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}, \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad (8)$$

(b) 対数正規法

年最大日雨量や年最大洪水量などの水文諸量の度数曲線は、正規分布のように平均値に関して対称ではなく、非対称の分布をしていることが多い。このような非対称分布を表すのに、一般に広く用いられているのはスレード法 (Slade 法) と呼ばれるものであって、これは正規分布の確率変数 x を対数変換量 $\log_{10}x$ で置き換えたものである。

したがって、 $\log_{10}x_i$ ($i = 1, 2, \dots, N$) の平均値及び標準偏差を

$$\overline{\log_{10} x_i} \equiv \log_{10} x_0 = \frac{\sum_{i=1}^N (\log_{10} x_i)}{N}$$

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\log_{10} x_i - \log_{10} x_0)^2}{N}} \quad (9)$$

とし、また式(6)に対応して

$$\xi = \frac{\log_{10} x - \log_{10} x_0}{\sigma_0} = \frac{\log_{10}(x/x_0)}{\sigma_0}$$

すなわち、

$$\log_{10} x = \sigma_0 \xi + \log_{10} x_0 \quad (10)$$

とすると、 ξ の超過確率 $W(\xi)$ は正規分布と同一の式で表され、表 6 の関係がそのまま用いられる。

(c) 積率法

対数確率紙に資料をプロットした場合、標本点は直線の周りに散らばるのが普通である。本法は最適な理論直線を決めたもので、その結果、対数正規法における式(10)が次式のように修正された。

$$\log_{10} x = \frac{\sigma_0 \xi}{\sqrt{2\sigma_\xi}} + \log_{10} x_0 \quad (11)$$

上式で、 x_0 および σ_0 は式(9)で与えられ、 ξ は超過確率 $W(\xi)$ に応ずるもの、 σ_ξ は標本数 N によってきまる (表 7)。

(d) ガンベル・チョー法

非対称分布に対してアメリカで盛んに用いられるガンベル法は、毎年の最大日雨量ならば、これを 1/365 の確率で起こる量と考え、そのような極地が N 年間観測されたときには、これを $365 \times N$ 個のうちから N 個だけ取り出した標本として順序統計学的に取り扱うものである。ガンベル法は理論的な厳密性は比較的高い方法である。

一方、チョーは非対称分布に関する取り扱い、どの方法でも次の形に導かれることを示した。

$$x = \sigma K + \bar{x} \quad (12)$$

ここに、 \bar{x} は平均値、 σ は標準偏差 (式(8))、 K は度数係数と呼ばれ、ガンベル法では洪水年 T (超過確率 $W = 1/T$) と次のような関係にある。

$$K = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left[0.5772 + \log_e \left(\log_e \frac{T}{T-1} \right) \right] \quad (13)$$

上式より T と K との関係を求めると、表 8 のようになる。

以上が今回行った水文統計の手法である。今回は、それぞれの手法によるばらつきを少なくするため、それぞれの結果を平均して使用した。河川により、一部係数が不明なところがあったので、使用しなかった手法もある。計算結果については表 9 に示す。

注) 水文統計は標本が母集団から無作為に運ばれることを前提としているが、年最大日雨量や洪水量は、長期にわたる気候の周期的な変化の影響を受ける。また、洪水量などは河川の改修とともに、上流区域における氾濫が防止されるという人為的な要因のために、増加する傾向がある。したがって、実際問題に対しては確率洪水量とともに、これらの要素も併せて考慮する必要があり、今後に残された大きな課題となっている。

表 6. 正規分布における ξ と超過確率 $W(\xi)$ との関係

ξ	$W(\xi)$		ξ	$W(\xi)$	
3.2095	0.05%	1/2000	1.8808	3.0%	1/33.33
2.5758	0.5	1/200	1.7507	4.0	1/25
2.3263	1.0	1/100	1.6449	5.0	1/20
2.1701	1.5	1/66.67	1.2815	10.0	1/10
2.0537	2.0	1/50	0.8416	20.0	1/5
1.9600	2.5	1/40	0	50.0	1/2

表 7. σ_ξ の表

N	10	15	20	30	40	50	60	70	80	100
σ_ξ	0.6632	0.6778	0.6851	0.6923	0.6960	0.6982	0.6998	0.7007	0.7015	0.7027

表 8. 度数係数 K

T (year)	200	100	50	25	20	10	5	2
K	3.683	3.173	2.592	2.043	1.867	1.304	0.720	-0.164

表 9. 年確率最大日雨長の算出結果

確率年 (year)	年確率最大日雨量 (mm)				
	相川	巻	二王子岳	村松	平倉演習林
200	190.7	178.5	288.7	215.3	555.1
100	175.3	165.9	262.0	199.3	517.7
50	158.9	151.9	232.9	180.6	464.6
20	137.0	133.1	194.9	155.8	395.1
5	102.4	102.8	136.7	116.6	287.3
2	75.5	78.8	93.9	86.3	206.6

表10. 自然状態での流出係数 f

地質及び地形		浸透能不良母材			浸透能普通母材			浸透能良好母材		
		急峻	斜面	平地	急峻	斜面	平地	急峻	斜面	平地
f	森林	0.65	0.55	0.45	0.55	0.45	0.35	0.45	0.35	0.25
	疎林耕地	0.75	0.65	0.55	0.65	0.55	0.45	0.55	0.45	0.35
	草地	0.85	0.75	0.65	0.75	0.65	0.55	0.65	0.55	0.45
	不毛岩石地	0.95	0.80	0.70	0.80	0.70	0.70	0.70	0.60	0.50

表11. 開発地の流出係数 f

開発地域	都市地区	住宅地区	舗装道路	砂利道路	庭園芝生	樹林	運動場公園
f	0.90 ~ 0.95	0.70 ~ 0.80	0.85 ~ 0.98	0.60 ~ 0.75	0.45 ~ 0.55	0.35 ~ 0.40	0.55 ~ 0.65

$$Q = \frac{1}{3.6} \cdot f \cdot r \cdot A \quad (14)$$

ここに、Q：最大降水量 (m³/sec)、f：流出係数、r：洪水到達時間内の雨量強度 (mm/h)、A：流域面積 (km²)。

流出係数 f は、降水量に対して溪流に流入する雨水流出量に比率で、流域の地被、植生、地形、土地利用状況を勘案して決定する必要がある。

流出係数は、合理式を用いるにあたってもっとも決定が困難な要素であり、いろいろな値が提案されているが、今回は、治山施設の計画等に使用される次表を使用する。

② 雨量強度 (r)

合理式法の雨量強度の算定に用いる降雨強度は、各地での降水量の実測値を元に統計処理されて、降雨継続時間との関係で表現され、その中には、タルボット型、シャーマン型、久野・石黒型、君島型、などがある。特に溪流における洪水流量の計算には、長時間降雨の雨量強度式が用いられている。

今回は、時間雨量の観測地がなく、日雨量だけが観測されていたので、任意継続時間中における降雨強度推定式として次の物部の式を用いることとする。

$$r_t = \frac{R_{24}}{24} \left(\frac{24}{t} \right)^{2/3} \quad (15)$$

ここに、R₂₄：24時間雨量 (mm)、t：洪水到達時間 (h)。

③ 洪水到達時間 (t)

合理式に用いられる洪水到達時間は、流域の最遠点に降った雨がその流域の出口に達するまでに要する時間として定義される。

この時間は通常、降雨が流路に入るまでの時間 (流入時間) 流路の中を流下端に達するまでに要する時間 (流下時間) の輪として求める方法を用いる。

洪水到達時間 (t) = 流入時間 (t₁) + 流下時間 (t₂) (16) で表される。

今回の計算では、流入時間 (t₁) をガーベイ式、流下時間 (t₂) をルチハ式で算出した。

(ア) 流入時間 (t₁)

流入時間は、流路に達するまでの斜面の形状や面積の大小、地表面、勾配、地被状態、流下距離、降雨強度など多くの要素に支配される。

今回は、治山事業の計画等で使われているガーベイ式 (式(17)) を使用する。

ガーベイ式

$$t_1 = \left(\frac{2}{3} \times 3.28 \times L_1 \times \frac{nd}{\sqrt{S}} \right)^{0.467} \quad (17)$$

ここに、t₁：山腹流下時間 (min)、3.28：メートルをフィートに換算する係数、

L₁：流域内最遠点から流路に到達するまでの距離 (m) (山腹流下水平距離)、

S：平均勾配 (S = H/L₁)、H：標高 (m)、nd：遅滞係数 (表12を参照)。

(イ) 流下時間 (t₂)

流下時間の算出にはルチハ式がもっとも普通に用いられ、特に山地河川に対しては適合性がよいといわれている。

ルチハ式

$$t_2 = \frac{L_2}{72 \left(\frac{H}{L_2} \right)^{0.6}} \quad (18)$$

ここに、t₂：流下時間 (hr)、L₁：流路延長 (km)、H：流路の高低差 (km)。

以上のことより、洪水到達時間 t を算出することができ、①、②、③の方法より流出量の推定ができる。以上が、合理式法による流出量の推定方法である。

Step-Pool 形状の形状特性及び分布特性

現地観測の結果、各河川でスケールの異なる様々な Step-Pool が観測された (図10～12)。Step 構成礫は、単列型で1列、複列型で2～5列になって河道横断方向に並び、短軸を鉛直方向に向けていることが多かった。Pool 部には、砂層とこれを覆う Step を構成する礫よりも小さい大小の礫が存在し、芦田ら (1984, 1985) や沢田 (1985) の指摘する砂礫の貯留効果が顕著に認められた。また、Woody debris 型の Step の上流部においても砂礫が堆積している様子が認められた。これらの砂礫は、魚類や水生昆虫の生息に好適な場を提供しているものと推定される。灯明沢川の現地観測中に、Pool 部や Woody debris 型 Step の上流部の流速が低い区間でヤマメが遊泳している様

表12. 遅滞係数 nd

地被状態	nd
不透水面	0.02
よくしまった裸地 (なめらか)	0.10
裸地 (普通の粗さ)	0.20
疎草地及び耕地	0.20
牧草地または普通の草地	0.40
森林 (落葉林)	0.60
森林 (落葉林、落葉等堆積物)	0.80
森林 (針葉樹林)	0.80
密草地	0.80

子がしばしば確認された。

本章では、著者らの調査から得られた知見を西井 (2003)、十河 (2004) の成果に加えて報告する。ただし、本研究ではデータを比較する際に個々の Step-Pool といった局所の値ではなく、主として各データのプロット平均値を用いている (表4, 5)。

1. 河川縦断方向の河道条件の変動

河道条件や水理条件は、従来、図1に示されるように、河川の縦断方向に相互に関係しながら、傾向を持って変化していくといわれている (Church, 1992)。しかし、本研究のように山地河川だけに注目すると、局所的にその傾向に一致しない、もしくはばらつきが大きくなり、関係性が明瞭に現れない場合がみられた。

1.1 プロット勾配

一般的に、河床勾配は河川縦断方向に沿って下流に向かうほど減少する ($r^2 = 0.52$)。しかし、本研究の対象流域では、必ずしもその傾向はみられない (図13(a))。特に大蔵川のプロットC、灯明沢川のプロットBは、上流に位置するプロットに比べ非常に勾配が大きくなっていった。

1.2 Step 構成礫の粒径

Step 構成礫の粒径 (以下、粒径) と流域面積の関係を図13(b)に示す。Costa (1983) によると、Step を構成する礫は Step-Pool 河床の D_{84} あるいは D_{90} の粒径であるとみなせる。これら最大級の礫の粒径は、上流へ行くほど大きくなるように思われるが、本研究の対象流域では、最上流のプロットより下流側のプロットで粒径の上限値が最大となり、その地点より上流側では粒径は小さくなっていった。

最大級の礫の粒径がこのように変化する理由については、本調査の結果からは分からないが、Step-Pool の形成や破壊に関わる出水による影響というよりも、地質構造や地形的な影響などの、より大きな時間スケール、空間スケールで作用する営力の結果であると思われる。

1.3 流路幅

図13(c)より、全体的な傾向として低水路幅は下流側に向かって大きくなる傾向がみられた ($r^2 = 0.77$)。また、高水路幅は各プロットで約5~20mの範囲にあり、拡幅部や狭さく部といった河道の地形的影響を受けており、局所的な変化が大きいと考えられる。

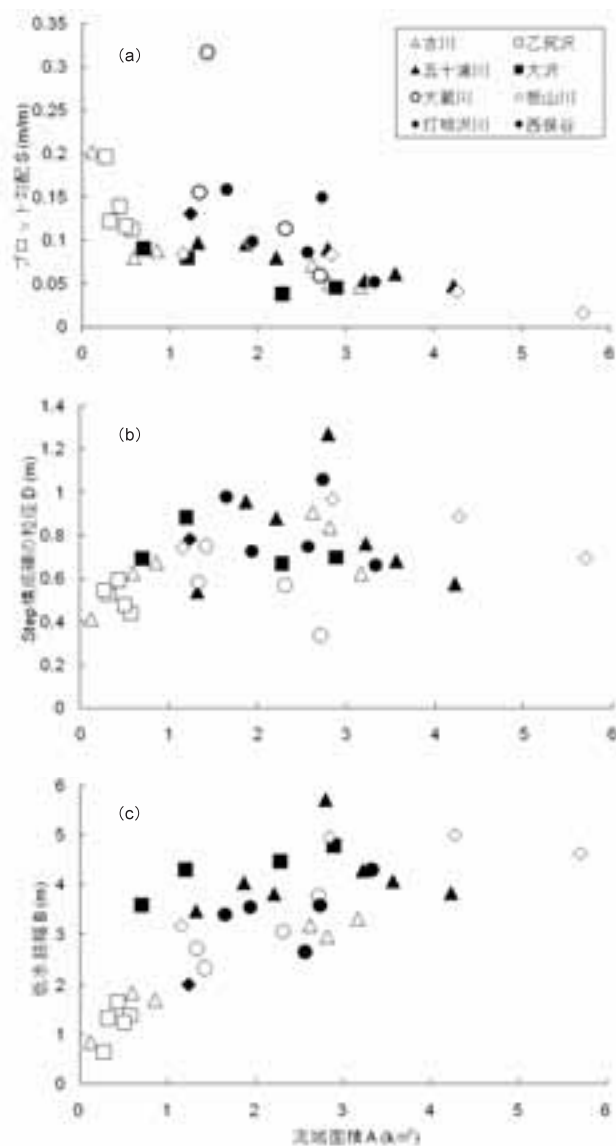


図13. 流域面積と河道条件の関係。

(a) プロット勾配、(b) 粒径、(c) 低水路幅

2. Step 縦断形状 (Step 差高 Δ , Step 間隔 λ , 局所勾配 β)

Step-Pool の形状は、Step 差高と Step 間隔によって特徴付けることができ、多くの研究者が、この2つの形状に注目し、Step-Pool の形状特性について検討してきた。

2.1 Step 差高

新潟県と三重県の8河川について、Step 差高 Δ と粒径 D の関係をみると、全体的な傾向として、粒径が大きくなるほど、Step 差高も大きくなる傾向がみられた (図14, $r^2 = 0.22$)。

本研究の対象河川で、Step 差高と粒径の比をみると、古川のプロットFと大蔵川のプロットCを除いて、 $0.5 \leq \Delta / D \leq 1.2$ の範囲にあった。この関係は、従来の知見に一致するものである。古川のプロットF、大蔵川のプロットCでは、Step 差高は、粒径の2倍程度であった。両プロットは、共にプロット勾配が

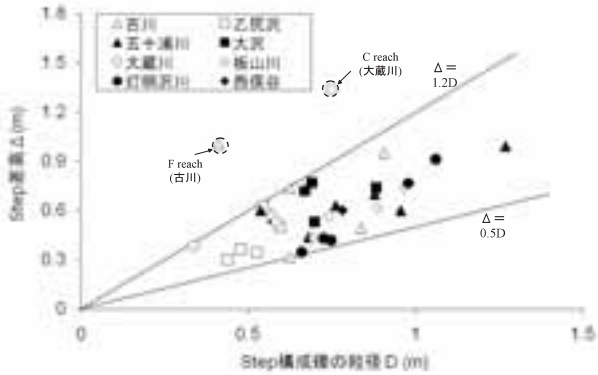


図14. Step 構成礫の粒径と Step 差高の関係

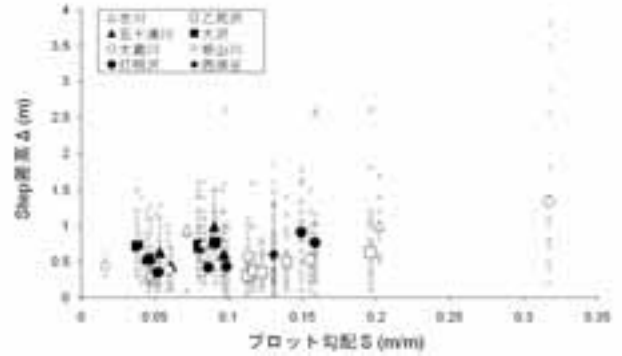


図15. プロット勾配と Step 差高の関係

0.2 よりも大きく、急勾配であった。

図 15 に Step 差高とプロット勾配の関係を示す。全体的にみると、プロット勾配の増大に伴い、Step 差高が大きくなる傾向がみられる ($r^2 = 0.32$)。また、Step 差高の上限値について、西井 (2003) は、勾配が 0.15 までの範囲では、約 1.5 m で一定となり、勾配 0.2 以上の範囲では上限値が 1.5 m よりも大きな値となったと報告している。しかし、今回新たに調査を実施した灯明沢川・西俣谷では、勾配が 0.15 より小さいプロットでも 1.5 m を超えるような Step 差高を形成する Step-Pool がしばしば観測された。これは Step 差高に強い影響を与えていると考えられる粒径が、他の河川よりも大きかったためと考えられる。

2.2 Step 間隔

図 16 に、Step 間隔と低水路幅の関係について示す。両者に正の相関がみられた ($r^2 = 0.62$)。Chin (1989, 1999a) や Chartrand and Whiting (2000) は、Step 間隔は低水路幅を用いて評価できると報告している。Chin (1999a) は、サンタモニカ山脈の Step-Pool の調査結果から、Wavelength (Step 間隔) と Channel Width (低水路幅) の比が約 0.91 ~ 2.18 の範囲にあると報告している。また、Chartrand and Whiting (2000) は、アイダホ西部・中西部の Step の調査結果から、Wavelength / Channel width が約 0.6 ~ 1 の範囲にあるとしている。新潟・三重の 8 河川で、同様に Step 間隔 λ と低水路幅 B の比の平均値をみると、乙尻沢のプロット E と西俣谷を除いて約 0.9 ~ 1.9 であった。これは、両プロット共に、他のプロットに比べて低水路幅が小さかったためである。乙尻沢については、他のプロットに比べ、流域面積が小さいために、低水路幅も小さかったと考えられる。西俣谷については、調査を実施したのが冬季で、流量が少なかったために低水路幅が小さくなったと思われる。ここで、Step 間隔と Step 幅の比をみたところ、乙尻沢のプロット E、西俣谷のプロット平均値はそれぞれ、約 1.4、1.6 となった。

また、Chartrand and Whiting (2000) の Step 間隔と低水路幅の比のデータは、新潟県・三重県の 8 河川と Chin (1999a) のカリフォルニアのデータに比べ値が小さかった。これらを単純に直接比較することは出来ないが、Step-Pool 構造と河床条件の関係が任意の地点で共通のモデルで表されるのではなく、河道条件が Step 形状に与える影響の程度が地域や河川によって異なる可能性が示唆された。ここで、河道条件と Step 形状

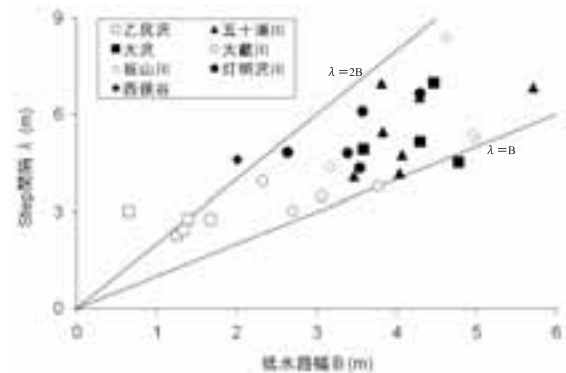


図16. 低水路幅と Step 間隔の関係

の関係に差を生じさせる要因として、地形、地質、降雨量、比流量などが考えられる。

これまで、多くの研究者が Step 間隔と河床勾配の間に負の相関があることを報告している (Judd, 1964; Whittaker, 1987; Chin, 1989; 秋山・眞板, 1997; Chartrand and Whiting, 2000; Gomi et al., 2001)。本研究の対象河川においても、プロット勾配と Step 間隔の平均値の間に逆べき乗の関係がみられた (図 17)。

Judd (1964)、Whittaker (1987)、Abrahams et al. (1995) などによる Step の縦断形状と河床勾配の関係式は、次式にて表される。

$$\lambda = H/aS^b \quad (19)$$

ただし、 λ = Step 間の距離、 S = 河床勾配、 H = Step 高、 a 、 b は定数である。

Whittaker (1987) は、ニュージーランドの 26 step-pool reach の調査結果から、次式を得た。

$$\lambda = 0.311S^{-1.188} \quad (20)$$

また、秋山・眞板 (1997) は、河床勾配と Step 間隔の上限値との関係を次式にて表した。

$$\lambda_m = 0.096S^{-2} \quad (21)$$

ただし、 λ_m = Step 間隔の上限値である。

これらの式を新潟・三重の結果にあてはめてみると、Step

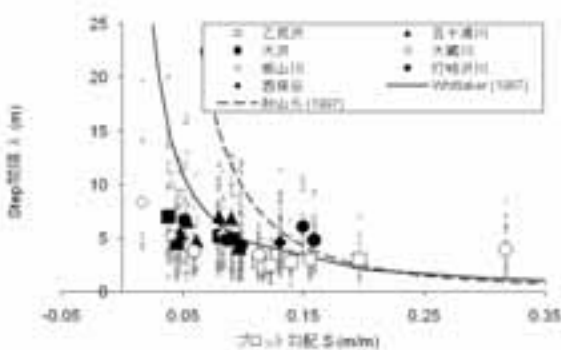


図17. プロット勾配と Step 間隔の関係

間隔のプロット平均値は勾配 0.07 ~ 0.15 の範囲では式(20)のまわりにばらついていて、しかし、それ以外の範囲では式(20)から離れて分布していた。また、Step 間隔の上限値は、勾配 0.13 未満の範囲では、Step 間隔の上限値は式(21)とよく一致した。しかし、勾配 0.13 以上の範囲では式(21)を越えるデータが存在した。

2.3 Step-Pool が形成する局所勾配

Step 差高と Step 間隔の比 (Step 差高 / Step 間隔) を $\beta (\Delta / \lambda)$ とすると、新潟・三重の 8 河川で β のプロット平均値は、 $0.06 \leq \bar{\beta} < 0.36$ の範囲にあった。ここで、 $\bar{\beta}$ とプロット勾配 S の関係を図 18 ($r^2 = 0.75$) に示す。全体的にみると、ほとんどのプロットで、 $(\Delta/\lambda)/S$ が 1 より大きい値をとっていた。また、プロット勾配が大きくなるほど、 $\bar{\beta}/S$ の値が 1 に収束する傾向がみられた。

ここで、局所勾配 $\bar{\beta}$ とプロット勾配 S の関係について考えてみる。

まず、局所勾配 β は Step 間隔、Step 差高をそれぞれ、 λ 、 Δ とすると次式となる。

$$\beta = \Delta_i / \lambda_i \quad (22)$$

次に、 $\bar{\beta}$ はプロットの Step-Pool units の数を N とすると次式で表すことができる。

$$\bar{\beta} = \frac{\beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_{N-1} + \beta_N}{N} \quad (23)$$

一方、プロット勾配 S は、次式にて表される。

$$S = \frac{H}{L} = \frac{\Delta_1 + \Delta_2 + \dots + \Delta_{N-1} + \Delta_N}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_{N-1} + \lambda_N} \quad (24)$$

ただし、 H = プロットの標高差、 L = プロットの河道距離。ここで、式(22)を変形し、式(24)に代入すると、

$$S = \left(\frac{\lambda_1}{L}\right)\beta_1 + \left(\frac{\lambda_2}{L}\right)\beta_2 + \dots + \left(\frac{\lambda_{N-1}}{L}\right)\beta_{N-1} + \left(\frac{\lambda_N}{L}\right)\beta_N \quad (25)$$

を得る。このとき $x_i = (\lambda_i/L)$ 、 $y_i = \beta_i$ とし、2 変量の相関係数 r を考えると、

$$r = \frac{N \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{\{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2\} \{N \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2\}}} \quad (26)$$

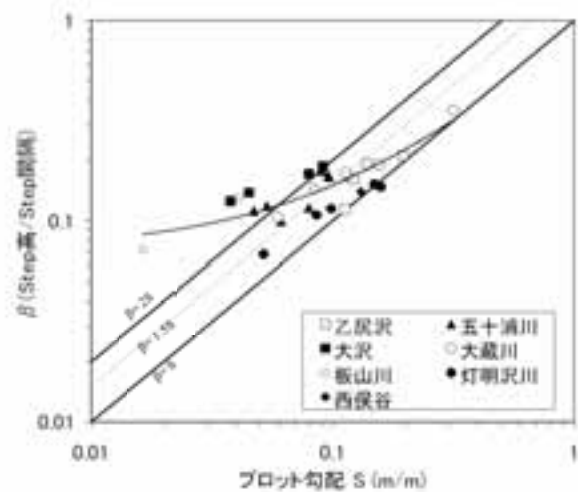


図18. プロット勾配と $\beta (\Delta / \lambda)$ の関係

ここで $x_i y_i = \left(\frac{\lambda_i}{L}\right)\beta_i$ 、 $\sum x_i = \sum (\lambda_i/L) = 1$ 、 $\sum y_i = \sum \beta_i$ であること

から、 $\sum x_i y_i = S$ 、 $(\sum x_i)(\sum y_i) = N\bar{\beta}$ である。

つまり、式 (26) は λ と β の相関係数 r を表しており、 $S > \bar{\beta}$ のとき $r > 0$ となり、 λ と β に正の相関があるといえる。また、 $S < \bar{\beta}$ のとき $r < 0$ となり、 λ と β に負の相関があると解釈することができる。本研究で調査を実施したプロットでは、 $S < \bar{\beta}$ であったため、 $r < 0$ となり、 λ と β に負の相関がある。つまり、 λ が大きくなると β が小さくなり、逆に λ が小さくなると β が大きくなる。したがって、 Δ に対する λ のスケールが変化することでプロットの勾配が決定されていると考えられる。

3. Step 横断形状 (Step 幅)

新潟・三重の 25 プロットにおける Step 幅と低水路幅の関係をみたと、Step 幅と低水路幅の間に正の相関があり ($r^2 = 0.70$)、低水路幅が大きくなるほど Step 幅も大きくなっていった (図 19)。Step 幅と低水路幅の比 (Step 幅 / 低水路幅) のプロット平均値をみると、古川のプロット D・F、乙尻沢のプロット E を除いて約 1.0 ~ 2.0 の範囲にあった。ここで、大礫や巨礫から成る Step は、礫が流路から大きくはみ出す場合があり、Step 幅の値が大きくなる。したがって、大礫型や巨礫型の Step の出現頻度の高いプロットでは、(Step 幅 / 低水路幅) が大きくなったと考えられる。逆に、単列型が優先するプロットでは、Step 幅と低水路幅は同程度であった。さらに、上記の古川のプロット D・F、乙尻沢のプロット E は、河川の最上流域に位置し、流域面積が小規模であるために低水路幅が小さくなったと思われる。

Step 幅と粒径の関係をみると、粒径が大きくなるほど、Step 幅も大きくなる傾向がみられた (図 20, $r^2 = 0.70$)。図 19, 20 から、Step 幅は低水路幅と粒径から影響を受けていると考えられる。ここで、Step 幅と粒径の比 (Step 幅 / 粒径) を δ とすると、 δ は約 4.4 ~ 12.0 の範囲にあり、全体の平均値は 5.98 であった。また、河川ごとにみると δ はプロット勾配の増加に伴い減少していた (図 21)。

Step 前面礫数の各プロットの平均値は、4.1 ~ 9.5 個の範囲

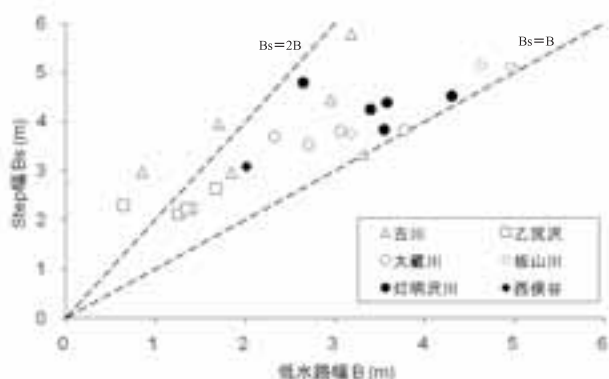


図19. 低水路幅と Step 幅の関係

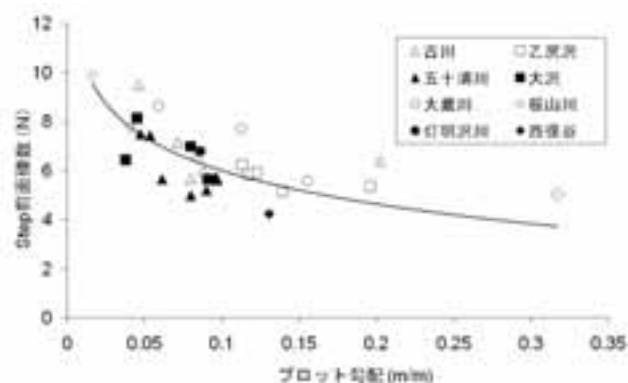


図22. プロット勾配と Step 前面礫数の関係

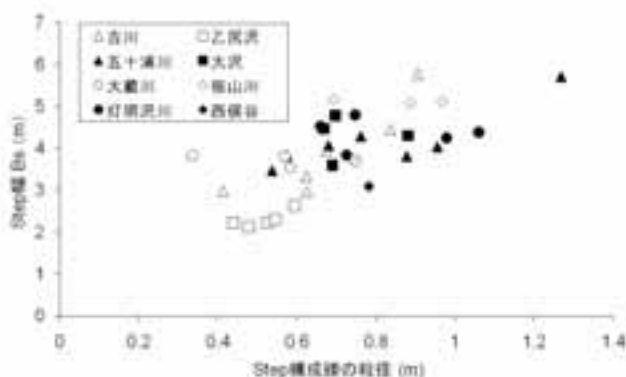


図20. Step 構成礫の粒径と Step 幅の関係

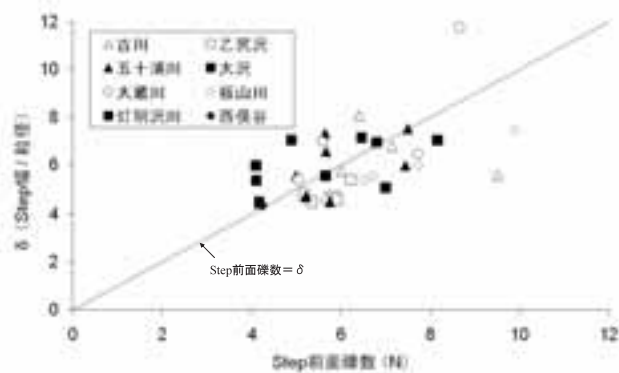


図23. Step 前面礫数と δ の関係

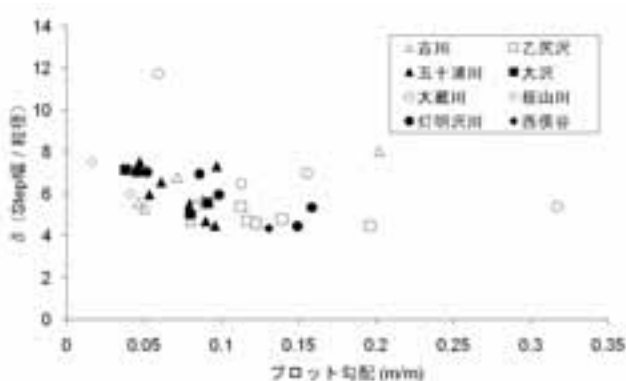


図21. プロット勾配と δ (Step 幅 / 粒径) の関係

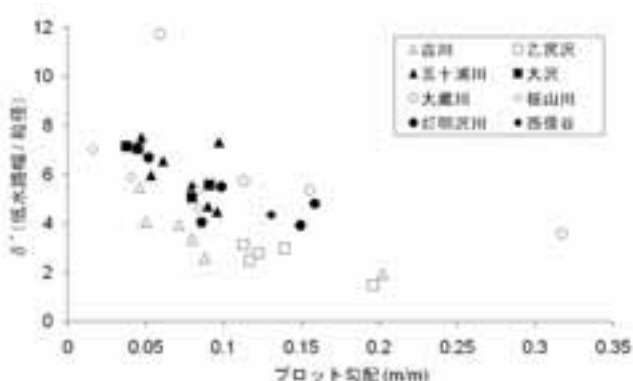


図24. プロット勾配と δ' (低水路幅 / 粒径) の関係

にあり、全体の平均値は5.95であった。また、プロット勾配の増加に伴い、小さくなる傾向を示し、8河川ともほぼ同一の曲線で近似できるものであった(図22, $r^2 = 0.54$)。Step 前面礫数と δ (Step 幅 / 粒径) は、値の範囲やプロット勾配との関係が同様な傾向を示した。図23に、各プロットにおける δ と Step 前面礫数の関係を示した。多少のばらつきがあるものの、 δ と Step 前面礫数が1 : 1になる直線の周りに分布していた。ここで、 δ は Step 幅が粒径の何倍かを表すものであり、

Step 前面礫数と同程度とみなせるものであると考えられる。

次に、低水路幅と粒径の比(低水路幅 / 粒径)を δ' とすると、 δ' は約2.9~11.7の範囲にあり、全体の平均値は5.37であった。また、 δ' は、 δ や Step 前面礫数と比べるとばらつきが大きいですが、プロット勾配の増加に伴い小さくなっていった(図24)。

したがって、各々のプロット勾配と Step 前面礫数との関係が類似していたのは、勾配の増加に伴い、低水路幅が小さくなった、あるいは粒径が大きくなったために、 $\delta \cdot$ Step 前面礫数

が勾配の増加に伴って減少したためと考えられる。したがって、Step 幅と粒径、低水路幅は相互に関係性がみられ、Step 幅のスケールは粒径と低水路幅どちらか一方、もしくは両方の影響を受けていると考えられる。本章の 1. で述べたが、一般的に河川縦断方向に低水路幅は大きくなり、粒径は小さくなる。したがって、河川縦断方向への流域面積の増大や河床勾配の減少に伴い、 δ' (低水路幅 / 粒径) が大きくなることが予測できる。また、河床形態についても Steps から Cascades, Rapids, Riffles, Pool へと変化していく (Grant, 1990)。したがって、(低水路幅 / 粒径) の値により、Channel units や Step の形成可否の評価が可能かもしれない。ここで、Step が形成されているプロットと大蔵川、板山川のプロット A より下流の Step が形成されていない区間の δ' (低水路幅 / 粒径) を比較した結果を図 25 に示す。同程度のプロット勾配で比較した場合、Step が形成されていない区間は、形成されている区間と比べて δ' の値が大きかった。

前述したように河床勾配が 2 % 以上の領域に Step-Pool が分布するとされている。図 25 より、プロット勾配が 0.02 前後の領域では、Step-Pool の形成可否が低水路幅と粒径の相対的な関係によって決定されるという可能性が示唆される。しかし、Step が形成されていない区間のデータが少ないために本調査の結果からだけでは、はっきりしない。

4. Pool 形状

堀ら (2002)、西井ら (2003) によると、Pool 部の各形状、Pool 長、Pool 幅、Pool 深は互いに正の相関があり、平均的な Pool 形状は相似形を成している。また、西井 (2003) は、Pool 長、Pool 幅、Pool 深の相似比が、それぞれ約 5 : 5 : 1 であったと報告している。本調査においても、Pool 形状が相似である結果が得られたが、Pool 形状の相似比について西井 (2003) の報告に本調査の結果を併せて検討した結果、平均的な Pool 形状の相似比は、4 : 4 : 1 であった (図 26)。

また、低水路幅や Step を構成する礫の粒径が大きいほどその直下に形成される Pool の形状が大きくなるという傾向がみられた (図 27, 28)。ここで、相対水深 (Pool 深 / 構成礫の粒径) を求めると、約 0.41 ~ 0.96 の範囲にあり、全体の平均値は約 0.67 となった (図 29)。また、Pool 深と Step 高の比 (Pool 深 / Step 高) とプロット勾配の関係をみると、勾配が大きくなるほど、(Pool 深 / Step 高) は小さくなる傾向があった。(図 30)。つまり、上流に向かうほど Pool 部の相対的な未堆砂容積 (土砂貯留に利用可能なスペース) が小さくなっていると思われる。また、Step 間隔や Step 前面礫数と同様にプロット勾配との間に逆べき乗の関係がみられ、ほぼ同一の曲線で近似することができた ($r^2 = 0.68$)。

4. まとめ

西井 (2003)、十河 (2003) の報告に、本研究の調査結果を加えて Step-Pool の形状及び分布特性について検討したところ、以下のことが明らかになった。

Step の縦断形状について、西井 (2003) は勾配と Step 差高及び Step 間隔の関係について、プロット勾配 0.2 を境に従来の知見と傾向が異なると報告した。しかし、本研究の調査結果では勾配 0.2 よりも小さいプロットでも、Step 差高や Step 間隔の上限値が既存の報告に比べ大きい値を示し、従来の知見と異なる傾向がみられた。

プロット勾配 S と β (Step 差高 / Step 間隔) の関係について、

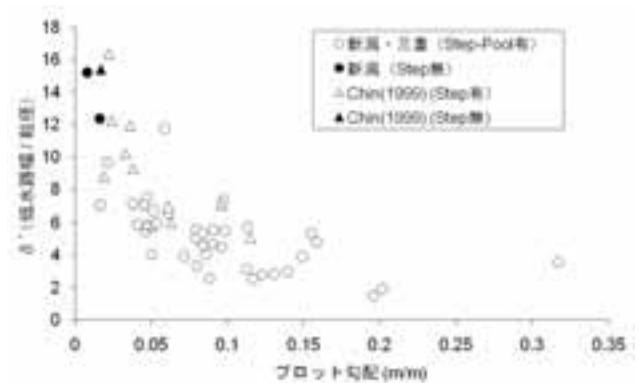


図 25. プロット勾配と δ' (低水路幅 / 粒径) の関係

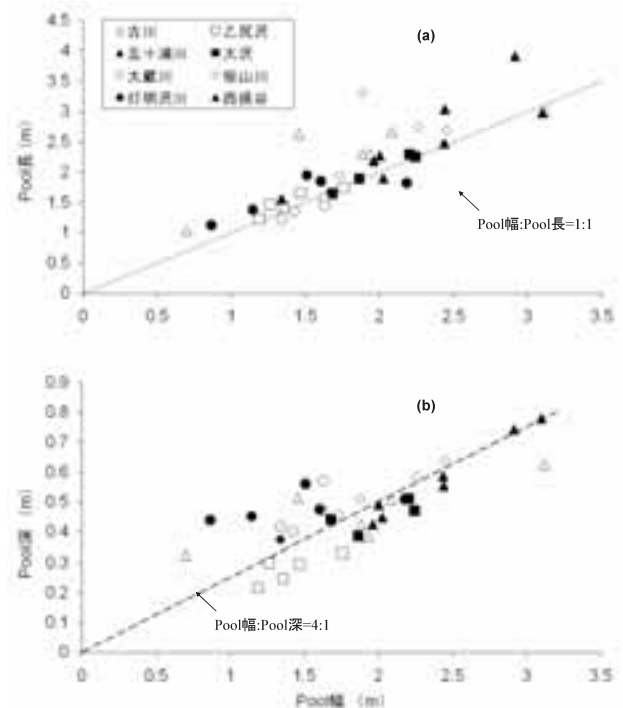


図 26. Pool 幅との関係 (a, Pool 長 ; b, Pool 深)

勾配が急な区間ほど β/S の値が 1 に近づく傾向がみられた。このことから、勾配が急な区間では、Step 差高 Δ と Step 間隔 λ の相関関係が高くなり、 Δ が大きくなるほど、 λ も大きくなるという関係となると考えられる。一方、緩勾配になるほど、 Δ と λ のばらつきが大きくなり、 Δ が大きくなっても、 λ が Δ に比例して大きくならない場合が生じると考えられる。

Step の横断形状について、Step 幅と構成礫の粒径の比をみると、Step は Step を構成する最大級の礫、約 6 個で形成されており、Step 前面礫数と対応していた。

Step 幅のスケールは、低水路幅と粒径によって決まり、低水路幅と粒径の比は勾配によって決定されると考えられる。また、勾配によって Step 部を安定に保つことが可能な Step 前面礫数や低水路幅と粒径の比が存在すると考えられるが、本研究の調査結果からだけでは、はっきりしない。

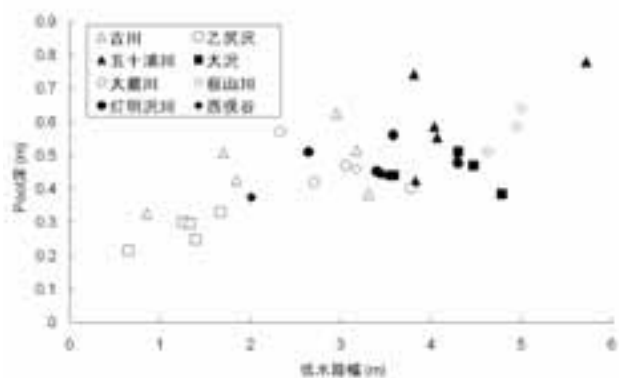


図27. 低水路幅と Pool 深の関係

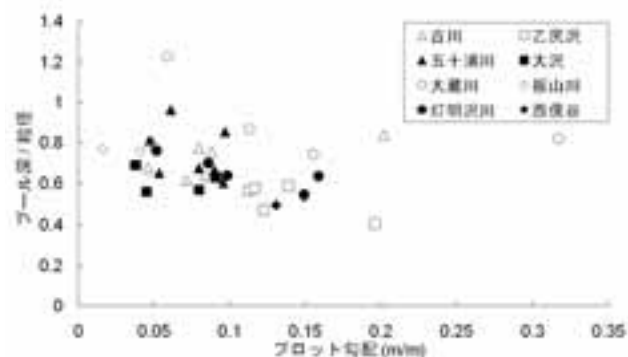


図29. プロット勾配と (Pool 深 / 粒径) の関係

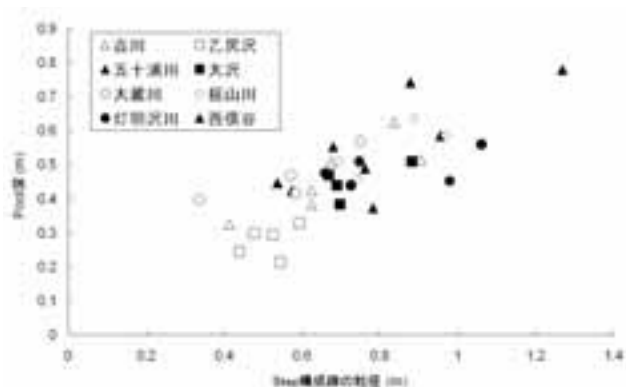


図28. 粒径と Pool 深との関係

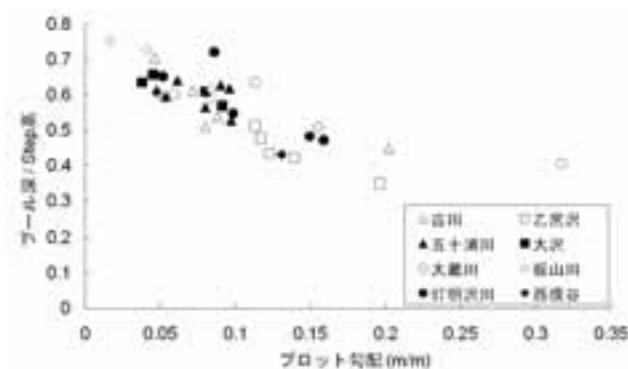


図30. プロット勾配と (Pool 深 / Step 高) の関係

平均的な Pool 形状は、相似形をなし、その相似比は約 4 : 4 : 1 であった。また、上流側の低水路幅や粒径が大きいほど、直下の Pool が大きくなる傾向がみられた。しかし、比較的安定した Step 部と異なり、Pool 部における砂礫の貯留や流出は、Step 部の形成や破壊よりも短い時間スケールの出水で生じていると思われる。したがって、Pool 形状は流量や落差だけではなく、上流からの流砂量や粒度分布にも影響を受けていることが予想される (沢田, 1985; 藤田, 2005)。河道条件と Pool 形状の関係は単純なものではなく、Pool のスケールを決める要因も複数存在し、その関係は複雑であると考えられる。

以上より、Step-Pool と河道条件の関係をまとめると、図 31 のようになる。

調査概要の章で新潟県の 7 河川と三重県の西俣谷では降雨特性が異なることを述べた。掃流や土石流に代表される土砂の移動現象の主要因は降雨であり、直感的には降雨特性の違いにより、Step-Pool の形状や分布特性にも影響が現れると思われたが、Step-Pool と河道条件の関係について今回の調査結果をみると、西俣谷のデータと新潟県の 7 河川のデータとを比較した結果、明瞭な違いは認められず、同じような傾向を示した。

ただし、乙尻沢は全体的に他の河川に比べて、低水路幅や Step-Pool のスケールが小さかった。これは、乙尻沢が他の河川に比べて降雨量、流域面積ともに小規模であるためと考えられる。したがって、降雨や流域面積、地質、地形などの流域特

性の差異は、Step-Pool の形状及び分布特性に直接的な影響を与えるというよりも、河道条件に影響を与えていると思われる。つまり、流域特性は、河道条件を介して間接的に Step-Pool と関係していることが推察される。

Step-Pool の発生機構

1. Step-Pool の発生と反砂堆

Step-Pool の形成過程に関しては、山地河川の河床形態の章でも述べたが、水路実験の観察から、分級砂礫による反砂堆の形成とその固定化、ならびに河床波の峰近傍への巨礫の集中といったプロセスが推察されている (芦田ら, 1984)。長谷川 (1997, 2005) は、小規模河床波を礫列 (transverse ribs) と段落ち (Step-Pool) に分類し、いずれも反砂堆形成や分級作用を成因として射流下で形成されるが、後者は水面波の共振条件のもとで生ずると報告している。

また、Chin (1999a) や Chartrand and Whiting (2000)、Lenzi (2001) は、実際河川における step wavelength (Step 間隔) の実測値から求めた波数と反砂堆の発生領域を比較した結果から、反砂堆が Step-Pool 形成の重要な要因の一つであると報告している。

そこで本章では、Step-Pool の波長 (Step 間隔) が反砂堆の波長と等しいものと仮定し、Step 間隔とフルード数の関係について検討する。

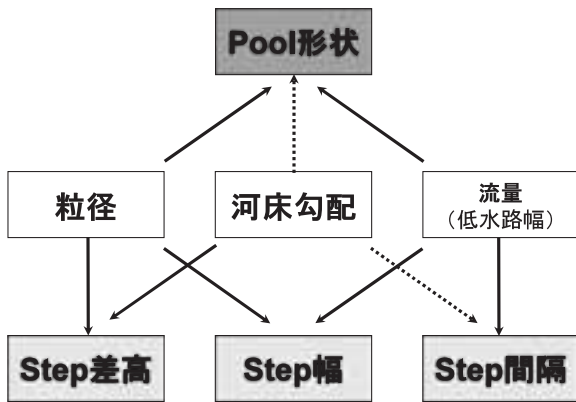


図31. 河道条件と Step-Pool 形状の関係(西井, 2003, p31に加筆)
矢印が関係を示し、実線・点線はそれぞれ、正の相関・負の相関を示す。

2. Step-Pool の形成と間隔の検討

流出解析の章で述べたように、芦田ら (1985) に従い、Step 間隔が Kennedy による次式

$$F_r = \frac{2 + k_* \tanh k_*}{k_*^2 + 3k_* \tanh k_*} \quad (1)$$

ここで、 $k_* = 2\pi \left(\frac{h}{\lambda}\right)$ F_r :フルード数 λ :波長 (Step 間隔)

から求められる反砂堆の波長 λ と等しいものと仮定し、Step 間隔の実測値と確率雨量から求めた 2・5・20・50・100・200 年確率流量に対応する水理量から、各プロットの無次元化波数 k^* ($= 2\pi h/\lambda$, h :水深、 λ :Step 間隔) とフルード数 F_r を求め、Kennedy の理論曲線と比較した。古川を除く新潟県内の 6 河川の各プロットと三重県の西俣谷の Step 間隔の実測値を用いて、解析を行った。結果を藤田・道上 (1995) による千代川水系河川の解析結果と併せて図 32 に示す。

藤田・道上 (1995) の千代川水系河川の結果によると、5 年確率洪水の場合、データの分布が Kennedy の理論曲線にはほぼ一致している (図 32 (b), 32 (c))。既存の Step-Pool は、過去の洪水履歴のもとに形成されたものであるため、藤田らは、千代川水系河川の階段状河床形の形成流量は 5 年確率洪水に相当すると考えた。本研究の対象河川では、全体的に見ると、2～5 年確率の場合、データの分布が Kennedy の理論曲線とほぼ一致していた (図 32 (a), 32 (b))。

藤田らに従えば、本研究の対象河川には、形成流量が 2～5 年確率洪水に相当するプロットが存在すると思われることができる。このことから、式 (1) を用いて、過去の出水履歴や降水履歴から実際河川に存在する Step-Pool の平均的な間隔の予測が可能であり、逆に Step 間隔から、その河川の平均的な Step を形成した支配流量を推定することが可能であると考えられる。したがって、式 (1) を用いることで人工的に Step-Pool 構造を造る際の間隔の目安を得ることができると考えられる。

各プロットの Step 間隔の平均値 λ_m 、最大値 λ_{max} の Step-Pool の形成流量を、式 (1) から逆算した結果をそれぞれ表 13, 14 に示す。

表 12 より、本研究の対象河川のほとんどのプロットの平均的なスケールの Step-Pool は、2 年未満の確率洪水に対応して

形成されるものと考えられる。また、同程度の Step 間隔でも河川やプロットによって形成流量の再起確率が異なっている場合があった。このような結果が得られた理由は、例として、乙尻沢のプロット D や大沢のプロット C・D は、河川の最上流に位置し流域面積が他のプロットと比べて小さかった。特に乙尻沢に関しては、他の流域に比べて降水量が小さいために、形成流量の確率洪水が大きくなったと考えられる。また、板山川や灯明沢川では、谷底の幅が各プロットで約 5～20 m の範囲にあり、拡幅部や狭く部といった河道の地形的影響を受けており、局所的な変化が大きいためと考えられる。

次に、各プロットの Step 間隔の最大値 λ_{max} に対応する形成流量を Kennedy の式から逆算して求めたところ、ほとんどのプロットで 200 年確率洪水よりも大きい流量となった (表 14)。

各プロットにおける Step 間隔の最大値の多くは、構成礫の粒径が 1～2 m を越えるような大礫複列型や巨礫型のような Step によるものであった。Kennedy の式は、砂礫が掃流による各個運搬によって移動することを前提としたものであるが、対象河川の多くが土石流危険渓流であること、大礫複列型 Step の形状が土石流堆積物に類似していることを考えると、このような大礫複列型や巨礫型の Step は、停止した土石流先頭部や側岸からの巨礫の供給などによって形成されたものと思われる。したがって、大礫複列型や巨礫型の Step は山地河川で一般的に見られるような単列型の Step とは成因が異なっている可能性がある。

また、実河川に存在する Step-Pool は単一波長ではなく、個々の unit をみると、不規則、あるいは不完全な Step もみられる。これは、ある出水に対し、Step の強度の違いにより、ある波長の unit が、消滅・分裂した結果を反映しており、既存の Step-Pool が過去の洪水履歴のもとに形成されたためと思われる。したがって、今後は Step-Pool 河床の変形・破壊過程に関する詳細な議論が必要である。

2. まとめ

Step 間隔の実測値と各流域の 2・5・20・50・100・200 年確率洪水に対応する水理量から各プロットの無次元化波数 k^* ($= 2\pi h/\lambda$, h :水深、 λ :Step 間隔) とフルード数 F_r を求め、Kennedy の理論曲線と比較した結果、本研究で調査を実施した新潟県・三重県の 8 河川の多くのプロットの平均的なスケールの Step-Pool が、2 年未満の確率洪水に対応して形成されたと考えられる。また、同じ河川のプロットや Step 間隔が同程度なプロットでも、Step 形成時の水理量の再起確率が異なる場合があった。これは、降水量や流域面積、川幅のスケールの違いによるものと考えられる。

以上のことから、Step-Pool は、それぞれの山地河川のシステムの中でそれぞれのプロセスを経て形成され、洪水による攪乱を繰り返し経験して、動的に維持されていると考えられる。したがって、Step-Pool の形成過程は、降雨量や地形、地質、比流量などを包括して考察する必要がある。また、多くの Step-Pool が 2 年未満の確率洪水に対応して形成されるとすると、2～3 年程度の短期間の観察でも、明瞭な Step-Pool 構造の分布の変化が見られる可能性があると考えられる。したがって、今後追跡調査により、形成流量の算出結果の妥当性を確認したい。

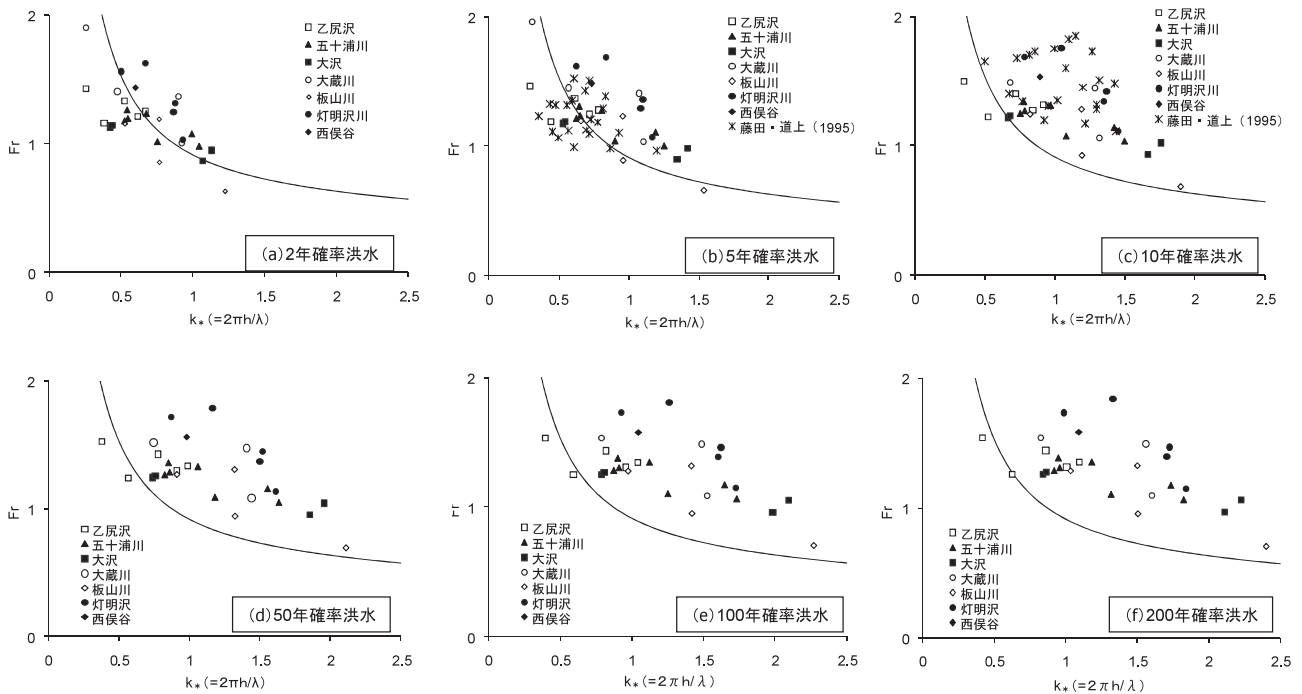


図32. 確率洪水による Step-Pool の波数 k^* とフルード数 Fr の関係。

(a) 2年確率洪水、(b) 5年確率洪水、(c) 20年確率洪水、(d) 50年確率洪水、(e) 100年確率洪水、(f) 200年確率洪水す。

表13. Kennedy の式より算出した Step 間隔のプロット最大値 λ_{max} に対応する出水の水力条件

河川名	λ_{max} (m)	流速 (msec-1)	水深 (m)	流量 (m^3sec^{-1})	確率年 (year)	河川名	λ_{max} (m)	流速 (msec-1)	水深 (m)	流量 (m^3sec^{-1})	確率年 (year)		
乙尻沢	A	5.10	2.91	0.47	6.6	大蔵川	A	9.00	3.63	1.07	33.2	200	
	B	5.00	2.9	0.46	8.8		B	6.30	3.27	0.56	11.8	2-5	
	C	6.70	3.51	0.53	9.3		C	8.50	4.68	0.44	31.4	> 200	
	D	5.00	2.92	0.45	10.8		D	6.60	3.55	0.50	20.7	> 200	
	E	7.10	3.85	0.48	14.2		> 200	板山川	A	19.70	4.95	4.46	134.9
五十浦川	A	12.50	4.21	1.58	49.0	> 200	B		11.00	3.87	1.55	93.6	> 200
	B	11.00	4.06	1.23	38.9	> 200	C		13.30	4.72	1.22	81.6	> 200
	C	16.50	4.97	1.85	64.7	> 200	D	8.60	3.71	0.85	14.7	20-50	
	D	12.70	4.67	1.12	40.6	> 200	灯明沢川	A	15.70	4.91	1.87	51.3	100-200
	E	12.00	4.43	1.15	34.8	> 200		B	10.67	4.60	0.77	32.2	20-50
	F	11.50	4.46	1.01	37.1	50-100		C	12.20	4.64	1.05	27.7	50
	G	10.00	4.13	0.89	32.4	100-200		D	9.51	4.42	0.67	15.1	5-10
大沢	A	12.40	4.17	1.61	42.4	> 200	西俣谷		11.40	4.67	0.86	67.1	> 200
	B	20.00	5.28	2.62	80.4	> 200							
	C	15.00	5.01	1.38	40.8	> 200							
	D	12.70	4.67	1.13	38.0	> 200							

調査結果に基づく流域特性と Step-Pool のスケールの関係式

日本では 2002 年 12 月に「自然再生推進法」が成立したが、これより 12 年前の 1990 年 11 月に、自然環境への意識の高まりにより、当時の建設省河川局は河川管理について、河川が本来もっている生きものの生息環境に配慮して事業をすすめることを支持した「多自然型川づくり」の通達を出している。その

後、1993 年 5 月に、日本も「生物多様性条約」を受諾し、それを受けて 1995 年 10 月には「生物多様性国家戦略」が閣議決定された。このような流れの中で、1997 年に「河川法」が改正され、それまでの「治水」と「利水」に加えて、「河川環境の保全」が河川管理の目的の中に法的にも明記された。

このように日本国内の河川管理における自然環境の保全、言い換えれば野生動物の生育・生息環境の保全と再生は、自然環境の改変にかかわりをもつ他の分野の社会事業に比べて、先

表14. Kennedy の式より算出した Step 間隔のプロット平均値 λ_m に対応する出水の水利条件

河川名		λ_{max} (m)	流速 (msec-1)	水深 (m)	流量 (m ³ sec-1)	確率年 (year)	河川名		λ_{max} (m)	流速 (msec-1)	水深 (m)	流量 (m ³ sec-1)	確率年 (year)
乙尻沢	A	2.79	2.09	0.29	2.9	2 ≤	大蔵川	A	3.78	2.27	0.53	10.3	2 <
	B	2.29	1.88	0.24	3.0	2-5		B	3.48	2.36	0.34	5.2	2 <
	C	2.78	2.15	0.26	2.8	2-5		C	3.94	3.03	0.23	10.6	5-20
	D	2.47	1.98	0.25	4.1	200		D	3.03	2.3	0.26	7.0	2-5
	E	3.02	2.39	0.23	4.29	> 200		板山川	A	8.40	2.96	2.06	46.9
五十浦川	A	5.48	2.92	0.91	16.3	2 <	B		5.26	2.51	0.81	35.3	5-20
	B	4.76	2.93	0.75	12.6	2 <	C		5.37	2.83	0.57	23.5	5-20
	C	6.56	2.82	0.79	18.6	2-5	D		4.37	2.72	0.53	5.8	2 <
	D	6.85	3.06	0.59	17.2	2-5	灯明沢川		A	6.67	3.67	0.99	15.2
	E	6.98	2.83	0.59	16.5	5-20		B	6.11	3.43	0.49	14.8	2-5
F	4.19	2.61	0.45	9.2	2-5	C		4.35	3.22	0.61	6.6	2 <	
大沢	G	4.10	2.25	0.36	9.5	2-5	D	4.82	3.67	0.52	5.8	2 <	
	A	4.53	2.81	0.89	12.4	2 <	西俣谷		4.60	2.68	0.35	19.0	2 <
	B	6.99	2.56	0.88	13.3	2-5							
	C	5.17	2.91	0.61	14.3	5-20							
D	4.94	2.29	0.39	9.1	5-20								

進的に進められてきたということが出来る。その結果、今日までにも全国の各地で注目される成果をあげてきた。しかし、一方でこのような転換からまだ年数が浅いので、個々の事業については、なお改善の必要を認めざるをえないものもあり、今後この分野を発展させるためには、なおその理論と方法、ならびに技術の改善が望まれてきたところである(桜井, 2003)。

ここで、「多自然型川づくり」の定義は、河川が本来有している生物の良好な生育環境に配慮し、あわせて美しい自然景観を保全あるいは創出する事業の実施をいう(建設省河川局, 1990. 11月)。「河川が本来有している生物の良好な生育環境」とは、人工的につくられた環境ではなく河川にもともと存在するマイクロハビタットやハビタット、ビオトープのような階層的な野生生物の生息環境であり、それらを配慮した河川管理をしていくことが重要であると考えられる。

本研究では、河川が本来有している特性を明らかにすることを目的に Step-Pool 構造に焦点をあて、新潟県・三重県の 8 河川の山地上流域で調査を行なった。Step-Pool は、それぞれの山地河川のシステムの中でそれぞれのプロセスを経て形成される構造であり、洪水による攪乱と安定を繰り返して経験して、動的に維持されていると考えられる。

また、実河川における Step-Pool と河道条件の関係について全体的な傾向を把握するために、Step-Pool と河床の勾配や粒径、低水路幅といった河道条件との関係を中心に検討を行なったところ、上記の 3 量が Step-Pool のスケールを決定する重要な要因であった。さらに、この 3 量は河川縦断方向に稜線からの距離や流域面積の変化に伴って変化していくと推察される。

そこで、本章では流域面積 A (km²)、プロット勾配 S 、低水路幅 B (m)、ステップ構成礫の粒径 D (m) と Step-Pool の各形状との関係に注目した。各成分のプロット平均値を用い、成分間における相関関係をみたところ、比較的高い相関係数を示す成分は、 $A-S$ 、 $A-\lambda$ 、 $A-B$ 、 $B-\lambda$ 、 $S-\beta$ (Δ/λ) であった。これらの近似式から、Step-Pool の縦断形を特徴付ける 2 つの要素、Step 間隔 λ 、Step 差高 Δ を次式によって表した。

$$\lambda = 3.87A^{0.27} \quad (25)$$

$$\Delta = 4.5SA^{0.27} \quad (26)$$

各プロットの Step 間隔、Step 差高の実測値と式 (25)、(26) から算出した計算値を比較したものが、次の図 33、34 である。地形図などから読み取ることが可能である流域面積や河床勾配を用いて、平均的な Step-Pool のスケールをある程度推定することができた。

ただし、式 (25)、(26) は、新潟県の 7 河川を対象とした調査結果に基づくものであり、どの程度一般性があるかが不明である。今後、他の河川をも対象とし、この法則性の適用度を検討することが今後の課題といえる。

近年、人工的に瀬・淵構造を造る試みが各地で見かけられる。長谷川・上林 (1996) は、水路実験の結果をもとに、Step-Pool 創生のための設計指針を提案しているが、その他に設計のための指針等は、ほとんど見当たらず、経験を蓄積している段階のようである。

山地河川で、健全な生態系や自然景観との調和を考慮して河川工事・河川管理を行なう場合、Step-Pool (瀬・淵) 構造を保全・創生することが重要な課題になると考えられることから、本研究で示した知見が、参考資料となることが期待される。

おわりに

本研究において、河川が本来有している特性を明らかにすることを目的に、河川環境の上でも土砂移動現象の上でも重要な意味を持つ Step-Pool 構造に焦点をあて、流域特性・降雨特性の異なる複数の山地河川で調査を行ない、Step-Pool の形状と河床勾配や流路幅といった河道条件の計測を行った。得られた結果を用いて、実河川における Step-Pool 構造の形状及び分布特性や Step の成因、形成流量について考察し、最終に流域面積や勾配を用いて、山地河川の Step-Pool の平均的なスケールを表す関係式を提案した。本研究で得られた結果は以下である。

(1) 河川測量から得られた Step-Pool の形状や河道条件の各データから、Step-Pool の形状及び分布特性を検討した。その結果、Step や Pool は形状ごとに、河道条件から受ける影響が異なっていた。また、降雨特性の異なる河川間で Step-Pool

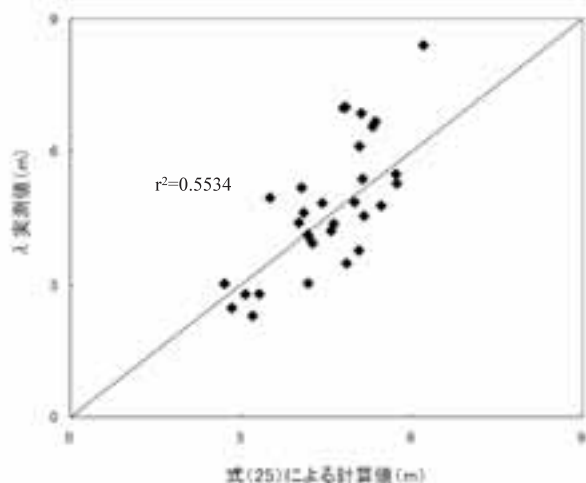


図33. Step 間隔 λ の計算値と実測値の比較

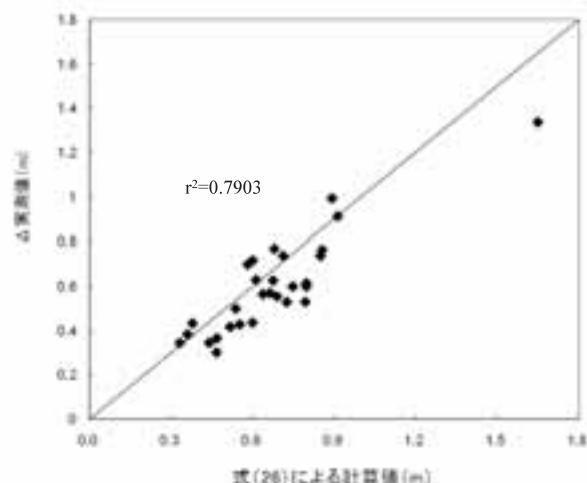


図34. Step 差高 Δ の計算値と実測値の比較

と河道条件の関係に相違点が存在するかどうかを検討したが、明瞭な違いはみられず、従来の知見と同様な傾向を示した。実河川における Step-Pool 構造は、一見複雑に見えるが、勾配や流量、河床材料を指標にその分布や形状特性をある程度説明できる。

(2) Step 間隔の実測値と各流域の 2～200 年確率洪水に対応する水量から各プロットの無次元化波数 k^* とフルード数 Fr を求め、Kennedy の理論曲線と比較した結果、本研究の対象河川の各プロットの平均的なスケールの Step は、2 年未満の確率洪水に対応して形成されたと考えられる。また、Step 間隔が同程度のプロット間でも、Step 形成時の水量の再起確率は異なる場合があった。これは、降水量の違いだけではなく、流域面積、谷底の幅や河床勾配など地形要素の影響によるものが大きいと思われる。したがって、Step-Pool の形成過程は、降雨量や地形、地質、比流量などを包括して考察する必要がある。

(3) 8 河川での調査結果にもとづき、平均的なスケールの Step 差高と Step 間隔を表す関係式を得た。地形図などから容易に調べることが可能な流域面積や河床勾配を用いて、実際の山地河川にみられる Step-Pool の平均的な形状特性値をある程度予測できることが示された。ただし、この式は新潟県の 7 河川、三重県の 1 河川を対象に実施した調査に基づくものであり、どの程度の一般性があるのかが不明であるため、今後この式の適用度をみる必要がある。

これからの河川工事や河川管理の在り方を考える上で、河川が本来有している特性を把握し、その知見を積極的に事業に取り入れいくことが重要であると考えられる。

現存する Step-Pool 構造は、それぞれの山地河川のシステムの中でそれぞれのプロセスを経て形成されたものであると考えられる。また、Step-Pool 構造が洪水による攪乱と形成を繰り返す経験し、動的に維持されていることは、そこに生息する生物にとっても重要なことであると考えられる。本研究では、Step-Pool の幾何学的構造や水理学的要因について着目したが、

この研究をさらに進めていく上で、河川生態学に関する知見や検討を加えていく必要があるだろう。

砂防堰堤などの構造物は自然環境に大きな影響を与えていると考えられているが、今後さらに研究を続け、得られた知見を定量化することが出来れば、自然河川に構造物が入ったことによって、河床形がどう変化したのか、つまり構造物が環境にどのような影響を及ぼしたかを評価する一つの指標にできるのではないかと考えられる。また、本論文で明らかにされた知見は、河川管理や河川工事の計画の策定に際し、参考資料となることが期待される。

最後に本研究を遂行するにあたり、三重県の西保谷での調査に際して、協力していただいた三重大学紀伊・黒潮生命地域フィールドサイエンスセンター附帯施設演習林の沼本晋也助教授に深く感謝いたします。さらに、河川調査を行なうにあたり、砂防運材工学教室の佐藤尚幸氏、田中将徳氏、若杉康夫氏をはじめ、箕口研究室の中村英太氏、紙谷研究室の奈良橋亘氏に冬季の寒い中での調査であるにも関わらず、快く協力して頂きました。ここに記して各位に謝意を表します。

引用文献

Abrahams, A. D., Li, G., and Atkinson, J. F. (1995) : Step-pool streams: Adjustment to maximum flow resistance. *Water Resources, Research* 31, 2593-602.

秋山智弘・眞板秀二 (1997) : 山地森林流域の小渓流における Step-Pool 構造の分析, 平成 9 年度砂防学会研究発表要集, 114-5.

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, 第 27 号, B-2, 341-53.

芦田和男・江頭進治・沢田豊明・西本直史 (1985) : 山地河道における階段状河床形の構造, 京都大学防災研究所年報, 第 28 号, B-2, 325-35.

芦田和男・江頭進治・西本直史 (1986a) : 階段状河床波上における流砂機構, 京都大学防災研究所年報, 第 29 号, B-2,

- 377-90.
- 芦田和男・江頭進治・西野隆之 (1986b) : 階段状河床波上の流れと抵抗則, 京都大学防災研究所年報, 第 29 号, B-2, 391-403.
- 芦田和男・江頭進治・西野隆之・亀崎直隆 (1987) : 階段状河床波の形成・破壊過程における流砂機構, 京都大学防災研究所年報, 第 30 号, B-2, 493-506.
- Buffington, J. M., Lisle, T. E., Woodsmith, R. D., and Hilton, S. (2002) : Controls on the size and occurrence of pools in coarse-grained forest rivers, *River Research and Applications*, 18, 507-31.
- Chartrand, S. M. and Whiting, P. J. (2000) : Alluvial architecture in headwater streams with special emphasis on step-pool topography, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 25, 583-600.
- Church, M. (1992) : Channel morphology and typology. In Calow, P. and Petts, G. E. (eds) , *The River Handbook*. Vol. 1. Oxford : Blackwell Scientific Publications, 126-43.
- Costa, J. E. (1983) : Paleohydraulic reconstruction of flash flood peaks from boulder deposits in the Colorado Front Range, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 94, 986-1004.
- Chin, A. (1989) : Step-pools in stream channels, *Progress in Physical Geography*, 13, 391-408.
- Chin, A. (1998) : On the stability of step-pool mountain streams, *The Journal of Geology*, 106, 59-69.
- Chin, A. (1999a) : The morphologic structure of step pools in mountain streams, *Geomorphology*, Vol. 27, No. 3-4, 191-204.
- Chin, A. (1999b) : On the origin of step-pool sequences in mountain streams, *Geophysical Research Letters*, 26, 231-34.
- Chin, A. (2002) : The Periodic nature of step-pool mountain streams, *American Journal of Sciences*, Vol. 302, February, 2002, 144-167.
- 藤田直二郎・池田宏 (1996) : 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, 筑波大学水理実験センター報告, no. 21, 25-40.
- 藤田正治・道上正規 (1995) : 千代川の淵の構造と魚類の生息, 鳥取大学工学部研究報告書, Vol. 26, No. 1, 181-93.
- 藤田正治・道上正規 (1996) : 階段状河床形態の淵の構造と強度, 平成 9 年度砂防学会研究発表概要集, 37-38.
- 福原隆一 (1992) : 山地溪流の形状に関する研究, 京都大学農学部卒業論文, 48p.
- Gomi, T., Sidle, R. C., Woodsmith, R. D., and Bryant, M. D. (2003) : Characteristics of channel steps and reach morphology in headwater streams, southeast Alaska, *Geomorphology*, 51, 225-242.
- Grant, G. E., F. J. Swanson and M. G. Wolman (1990) : Pattern and origin of stepped bed morphology in high-gradient streams, Western Cascade, Oregon, *Geological Society of America*, Vol. 102, 340 ~ 352.
- 長谷川和義・上林悟 (1996) : 溪流における淵・瀬 (ステップ・プール) の形成機構とその設計指針, 水工学論文集, 第 40 卷, 893-900.
- 長谷川和義 (1997) : 溪流の淵・瀬の水理とその応用, 1997 年度 (第 33 回) 水工学に関する夏季研修会講義集, B コース.
- 長谷川和義 (2005) : 河川上流域の河道地形, *ながれ* 24, 15-26.
- 堀康宏・山本仁志・松崎健・権田豊・西井洋平 (2002) : Step-Pool の形状及び分布特性について (2), 平成 14 年度砂防学会研究発表概要集, 256-257.
- Judd, H. E. (1964) : A study of bed characteristics in relation to flow in rough high gradient natural streams, PhD dissertation, Utah State University, 182 p.
- Lenzi, M. A. (2001) : Step-pool evolution in the rio cordon, Northeastern Italy, *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 991-1008.
- 水野信彦 (1997) : 魚の生態と溪流砂防. 「自然環境と砂防」, 砂防学会 50 周年記念シンポジウム講演集, 19-29.

Characteristics of Step-pool Morphology in the Mountain Streams of Japan

Yutaka GONDA^{1*}, Tatsuya OKAZAKI², Yohei Nishii², Hiroshi KAWABE¹

(Received August 7, 2008)

Summary

In this study, the relationship between channel geometry and step-pool morphology are discussed. The channel geometry, i.e., the channel gradient, channel width, the step-pool dimensions, size and number of step particle, etc., were surveyed at 35 study reaches of eight small basins in Japan. The results show that the channel gradient, channel width, and particle size have various implications for the step-pool geometry. With regard to the longitudinal profile of a step, the relationship between the channel geometry, step wavelength and step-step drop differs from that reported by previous studies at high-gradient reaches (> 0.15 gradient). The channel width and particle size are important variables affecting the step wavelength and step-step drop. Step width, which is the transverse profile of a step, is about 6 times the mean size of the rocks that form the step, and it is probably controlled by the particle size and channel width. The pool geometry is likely to be related to the channel gradient, discharge, and particle size. The characteristics of the distribution and the geometry of the step-pool can be explained by three parameters (particle size, discharge, and channel gradient). Estimation formulae were developed, which estimate local average geometry of the step-pool with catchment area and channel gradient.

Bull.Facul.Agric.Niigata Univ., 61(1):67-93, 2008

Key words : channel morphology; mountain streams; step-pool; Niigata; Mie

¹ Faculty of Agriculture, Niigata University

² Graduate school of Science and Technology, Niigata University

Corresponding author : gonda@agr.niigata-u.ac.jp