

# 流域地質からみた河道特性，河床環境の異質性とそれが底生動物群集に及ぼす影響

Heterogeneities in geomorphic channel-units and riverbed environments and their effects on benthic macroinvertebrate assemblages with particular reference to watershed geology

名古屋大学 減災連携研究センター 副センター長／特任教授 田代 喬

異なる流域地質によって構成される櫛田川流域の山地河川を事例に、流程に沿って水質、河床地形を調査し、瀬・淵における河床材料と底生動物を分析することにより、流域地質が河道特性と群集構造に及ぼす影響を明らかにした。河道特性に関し、瀬の大礫は流程における違いは顕著でないが河川間で扁平度・密度が大きく異なり、上流域に存在する結晶片岩（三波川帯変成岩）や未固結堆積物の影響が示唆された。一方、淵の砂礫粒度については、上流域が秩父帯堆積岩で構成される場合、三波川帯変成岩、領家帯花崗岩を流れる河川よりも相対的に粗かった。三波川帯を流れる河川では、脆く扁平な形状の結晶片岩の石礫が創出する狭小な河床間隙空間によって、携巢型や匍匐型昆虫などの生息が阻害され、（特に淵において）生息密度や種の豊富さが相対的に小さくなった。ただし、瀬では固着型のウスバガガンボ属、淵では平たい体型で流されにくいタニガワカゲロウ属のオニヒメタニガワカゲロウなどが多く生息した。領家帯を流れる河川では、風化した花崗岩に起因する丸い玉石状の大礫と細粒な真砂の影響により河床間隙が埋没し易く、匍匐型昆虫の生息が阻害される一方、細粒分で営巣して礫表面を這いまわる携巢型昆虫は多くなった。また、瀬・淵ともに個体数密度は小さかったが、砂底を利用するフタスジモンカゲロウやキイロカワカゲロウなどにより、淵での多様度は高い傾向にあった。秩父帯や領家帯・三波川帯に跨って流れる河川では、幅広い粒度の材料から多様な河床間隙空間が形成され、間隙をより立体的に利用する遊泳型昆虫が多くなることから、総個体数密度や種の豊富さが大きくなり、相対的に豊かな底生動物相が成立した。

キーワード：流域地質、瀬・淵構造、河床材料構成、底生動物群集、生活型

Geology is one of the crucial components for defining riverbed materials and textures especially in mountainous streams, which might effects on their aquatic communities. In this study, the Kushida River basin, central Japan, composed of different geologic units such as plutonic, metamorphic, and sedimentary terrains, was selected to clarify the relationships between riverbed textures and benthic macroinvertebrates. We conducted field surveys at riffle and pool units in each of the 18 stations (three sites each for six tributaries) by taking into account their watershed geologies and landuses. Sediment samplings, topographic measurements and water quality monitoring (temperature, pH and electric conductivity) were undertaken at these sites. The individuals of macroinvertebrate were picked out from each of the sediment samples and identified at the species level with six "life types", whereas their residual samples were used to analyze the riverbed textures. The topographic, geologic and ecological differences among each of locations in the tributaries have been discussed with the one / two way ANOVA tests. According to the results, it could be understood that there are strong relationships among the watershed geologies, the physical characteristics of riverbed textures and the features of species and life type compositions of benthic macroinvertebrates.

Key words : watershed geology, riffle pool structure, riverbed texture, benthic community, life type

## 1. はじめに

河川は、流域・セグメント・リーチといった異なるスケールからなる階層性を有し、これらが有機的に連携しながらその景観を構成している (Frissell et al. 1986)。このように体系化された概念にしたがえば、上位 (マクロ) 要素が下位 (ミクロ) 要素を支配す

ることは自明である。実際、Davies et al. (2000) や Townsend et al. (2003) は、流域スケールの情報によってリーチスケールの生息場所特性や生息生物群集を記述しようと試みてきた。しかしながら、土地利用や植生分布といった人為的営力による環境影響評価に偏重したアプローチがこれまでに多く、流域地質が生物群集に及ぼす影響を系統的に調べた研究は、異なる地質

の流域から排出された水の溶存物質による生態影響を分析したOlson (2012) などに限られ、河床材料構成にまで着目した事例 (Shearer & Young 2011) は非常に少ないのが現状である。

以上に鑑み、本研究では、流域における表層地質分布に着目し、陸域から産出される砂礫に起因して山地河川に形成される瀬・淵構造や河床材料構成とそれを生息場所として利用する底生動物の関係を整理し、流域地質が河道特性や底生動物群集に及ぼす影響を解明することを目的とした。本研究の成果は、河川の潜在的な生態系を診断することに繋がり、あらゆるインパクトによるレスポンスを評価する際の基礎情報に成り得るものである。

## 2. 河川生態系における流域地質のはたらき

本章では、流域地質が河川の生物群集に及ぼす影響過程に着目した既往知見の整理・分析 (田代・岩田・辻本, 2016) を紹介する。

既往研究では、流域地質は特に砂防分野において取り扱われることが多く、崩壊や土石流の発生機構との関係 (Wallbrink et al. 1998; 相澤 2005)、河川へ流出する水量 (流況) との関係 (虫明ほか 1981) が中心であった。ただし、中下流域の河川景観に関しては、山本 (2004) が河道特性との関連性について言及し、吉野 (1979) が砂礫径分布に及ぼす影響を考察したが、これまで実証的に調査されていない。流域内にモザイク状に入り組んだ地質分布を鑑みるに、流域地質が河川景観に及ぼす影響は、一般に流域規模が大きくなるほど複合的な要因により見え難くなり、上流域において顕著に生じ得るものと想像される。実際、山地域では流域地質が河道特性だけでなく、河床の材料構成に影響を及ぼすことを報告した事例が多い (Kodama et al. 1994; Thompson et al. 2004; Sable & Wohl 2006; 田代ほか 2007; Snelder et al. 2011)。

流域地質が生物群集に及ぼす影響は、少ないながらも古くから調査されてきた。自然度の高い山地溪流の調査からは、河川水中の溶存物質が多いと種の多様度が高くなる傾向が見出されており (Egglisshaw & Morgan 1965; Minshall & Kuehene 1969)、溶存栄養塩 (Holloway et al. 1998)、粒状有機物 (Egglisshaw, 1968; Krueger & Waters 1983) や付着藻類 (Leland & Porter 2000) といった食物に繋がる要因や浸透圧 (Minshall & Minshall 1978; Willoughby & Mappin, 1988) などの生理的要因と関連付けて考察されている。また、流域地質が流出水の水温を変化させ、底生

動物の成長速度を制御した可能性 (Huryn et al. 1995; Wiley et al. 1997; Jin and Ward 2007) や、産出される岩石の違いが河床環境や流路地形を変化させ、サケ科魚類の分布 (Nelson et al. 1992; Hicks & Hall 2003) や底生動物の群集構造 (田代・辻本 2015) に及ぼす影響を示した事例が報告されている。

Olson (2012) は、流域地質と底生動物群集の関係をレビューする中で、水質、栄養物、流路地形、流域水文の4項目が、それぞれ浸透圧調整、食物供給、生息場所調整、水温形成といった4要因を介して、流域地質が底生動物群集に影響を及ぼす関係を整理した。こうした中から、水中の溶存物質 (TDS: total dissolved solids) に対する浸透圧調整を通じた生理的応答が唯一のcausal pathと結論付け (Olson 2012)、他の要因に関わる素過程は記述していない。このことは、栄養物、流路地形、流域水文といった他項目が、生産-消費などの生物間相互作用、土砂 (or砂礫) 輸送に伴う地形形成、降水に起因する水・土砂流出といった地質以外の多要因が輻輳する中で成立することによる。Neff and Jackson (2011) やShearer and Young (2011) が、流域を跨いだ地域の河川生物群集を解析するに当たり、説明・目的変数の一つとして流域地質を扱ったことはこうした視点に立った展開と言えよう。ただし、包括的に扱う要因が増えると、地質単独による影響の素過程が捉えにくくなるため、現象解明には必ずしも繋がっていないのが現状と認識される。

以上に鑑み、ここでは流域地質に起因する礫床環境に着目し、底生動物群集に及ぼす影響について描いた概念図を図-1に示す。図では、気象由来の動的な現象は含んでいないが、地質由来の物理・生化学的性質が、水・土砂流出、底質・水質形成といった要因を介

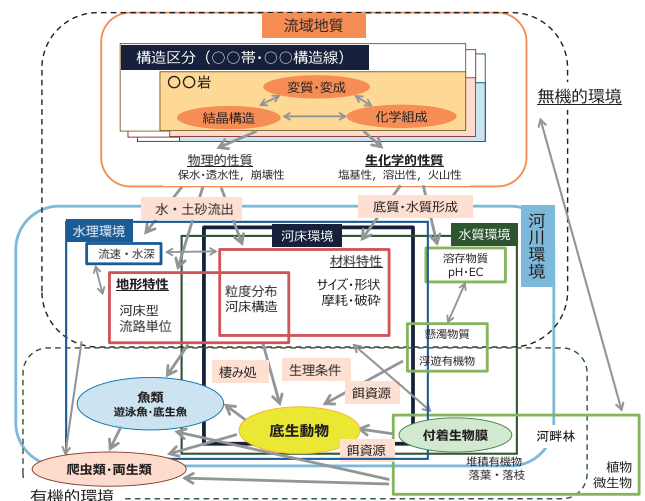


図-1 流域地質に起因して変化する河川生態系の概念図。(田代・岩田・辻本, 2016)

して、水理、河床、水質環境に及ぼす地質の働きと、各種過程を介して生息生物を含む有機的環境に及ぼす影響を概略的に示した。流域地質と河川生態系の関係性を議論する際には、不完全ながらここで記載した背景、要因と過程の関連性についての配慮が必要であるものと考えられる。

### 3. 流域地質の異なる山地河川における実態調査

本章では、三重県松阪市および多気町を流れ、伊勢湾西岸に注ぐ一級河川・櫛田川流域を対象とした調査結果(田代・辻本, 2015)を紹介する。

櫛田川流域の表層地質は、本川に沿うように東西に位置する中央構造線を境として、北側が領家帯(内帯)、南側が三波川帯・秩父帯(外帯)に区分される(図-2)。各表層地質の主構成岩は、領家帯が深成岩(主に花崗岩)、三波川帯が変成岩(主に結晶片岩)、秩父帯が堆積岩となっている。調査場所は、田代ほか(2008)の調査場所から、本川に合流する主要な6支川18カ所を選定した。その内訳は、集水域が単相地質区分からなる3支川(蓮川:秩父帯、仁柿川:領家帯、相津川:三波川帯)と混成した地質区分からなる3支川(月出川、青田川、朝柄川)であり、各河川には源頭部(上流)、合流前(下流)とその中間点(中流)の3流程が含まれる(図-2)。

現地調査は、各調査場所の任意地点における水質計測、瀬と淵における河床堆積物の採取を行った。水質計測は、多項目水質計(YSI / Nanotech Inc.製556MPS)により調査時の水温、pH、導電率、DOを計測した。河床堆積物はいずれも表層から、瀬では浮石を構成する大礫(64-256mm)を、淵では一定面積(20cm×20cm)、一定深さ(5cm)の全量を採取した(それ

ぞれN = 4)。採取の際は、可能な限り攪乱を与えないように下流から掬い取り、膝丈以上の深さの淵ではエクマンバジ採泥器を使用した。瀬の大礫については、金属製ブラシで付着物を擦り落としたのち、サイズ(長径・中径・短径)と質量を計測し、扁平度(=短径/中径)、長短度(=中径/長径)、形状係数(=扁平度/長短度)(Zingg 1935; Krumbein 1941; 口田ほか 1991)を求めた。さらに、楕円体を仮定して藤岡・牛島(2011)を参照し、表面積、体積を推定して密度(=体積/質量)を求めた。淵の砂礫については、比重の軽い有機物を除いた後、ふるい試験(JIS A 1204:2000)を行って粒径加積曲線を作成し、中央粒径( $d_{50}$ )、10%粒径( $d_{10}$ )、30%粒径( $d_{30}$ )、60%粒径( $d_{60}$ )を求めて均等係数( $d_{60}/d_{10}$ )、曲率係数( $d_{30}^2/d_{10}d_{60}$ )を算定した。ここで、均等係数は粒径加積曲線の傾きを、曲率係数はそのなだらかさを表す(社団法人地盤工学会, 2001)。底生動物については、瀬では大礫から擦り落とされた残渣(付着物)、淵では堆積物中の粒状有機物から、肉眼で確認できる個体を抽出してそれぞれ瀬・淵の試料とし、津田(1962)、川合・谷田(2005)、竹門(2005)を参照して、遊泳型、固着型、造網型、匍匐型、携巢型、掘潜型の6種類の生活型に分類した。

表-1には、各調査場所の流域特性(面積、平均傾斜、比積分値、各地質区分占有率)と調査時点における水質(水温、pH、溶存酸素濃度、導電率)について示す。各調査場所の流域における土地被覆については森林が優占しており、櫛田川下流に流入する朝柄川の中流地点(90.5%)、同下流地点(83.6%)を除いて95%以上に達した。両地点で森林に次いで占有率が大きかったのは水田であり、中流地点で5.3%、下流地点で10.1%を占めた。

欠測値を含むpH以外の水質データに関し、河川、流程を2要因とする二元配置分散分析を行ったところ、導電率についてのみ、河川間に有意な差が検出された( $P = 0.024$ )。河川水の導電率については、土地被覆や流域地質、地下水流入などにより変化することが報告されている(例えば、平田ほか 1999)。ここでは、土地被覆、流域地形や流域地質と河川水の導電率の間に関連性は見出せなかったが、いずれもごく低い導電率を示しており、底生動物の生息状況に影響を与えるほど高い導電率(Olson 2012)は見られなかった。以上より、本研究の調査地では、水質が底生動物の生息に関する制限要因となる可能性は低いものと考えられる。

田代ほか(2007)は、三重県内の主要4水系における山地河川を対象とした調査から、流域地質によって

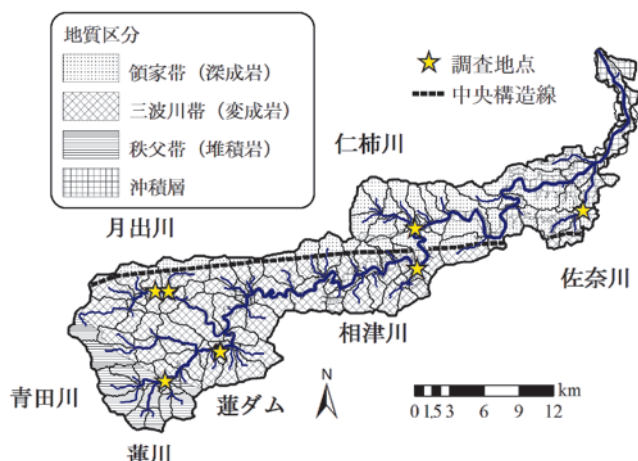


図-2 櫛田川流域の地質分布と調査地点の位置。(田代・辻本, 2015)

表-1 調査場所の流域地形、流域地質および水質。

ただし、\*を付した水質項目は、繰り返しの無い二元配置分散分析により有意差 ( $P < 0.05$ ) が検出されたことを示す。(田代・辻本, 2015)

河川	流程	流域地形			流域地質				水質				
		面積 (km <sup>2</sup> )	平均傾斜 (%)	比積分値	領家帯 (%)	三波川帯 (%)	秩父帯 (%)	その他 (%)	調査日	水温 (°C)	pH	DO (mg L <sup>-1</sup> )	EC (mS cm <sup>-1</sup> )*
相津川	上	0.74	34.28	0.68	0.0	100.0	0.0	0.0	21-Nov-07	10.79	7.95	11.2	0.058
	中	5.75	29.38	0.63	0.0	98.8	0.0	1.2	22-Nov-07	9.54	7.9	11.87	0.06
	下	9.98	31.57	0.66	0.0	90.4	0.0	9.6	22-Nov-07	8.98	7.95	12.36	0.047
月出川	上	1.21	44.57	0.67	98.8	1.2	0.0	0.0	22-Nov-07	7.34	7.67	13.3	0.04
	中	5.56	42.64	0.68	46.5	47.7	0.0	5.9	22-Nov-07	9.31	8.12	11.85	0.061
朝柄川	下	10.15	41.64	0.71	42.7	48.7	0.0	8.6	22-Nov-07	9.18	8.28	12.34	0.068
	上	0.79	28.17	0.74	26.6	73.4	0.0	0.0	4-Dec-07	10.09	8	13.08	0.087
	中	4.18	22.90	0.71	24.5	75.5	0.0	0.0	4-Dec-07	10.94	7.91	13.67	0.082
仁柿川	下	8.89	20.61	0.76	35.6	60.2	0.0	4.2	4-Dec-07	10.44	8.38	14.2	0.094
	上	0.72	38.88	0.69	100.0	0.0	0.0	0.0	30-Nov-07	9.94	欠	11.93	0.08
	中	11.82	32.96	0.71	96.2	3.8	0.0	0.0	4-Dec-07	9.23	8.2	14.06	0.094
青田川	下	24.56	32.95	0.65	94.1	5.2	0.0	0.7	4-Dec-07	9.72	8.64	14.52	0.095
	上	5.32	44.18	0.73	0.0	5.7	94.3	0.0	29-Nov-07	7.12	欠	13.05	0.046
	中	7.86	48.48	0.60	0.0	22.0	78.0	0.0	29-Nov-07	8.18	欠	12.21	0.084
蓮川	下	16.78	48.06	0.56	0.0	59.4	40.0	0.6	29-Nov-07	9.4	欠	12.66	0.082
	上	0.33	69.67	0.76	0.0	0.0	100.0	0.0	11-Dec-07	7.6	8.17	14.46	0.136
	中	13.39	56.94	0.58	0.0	0.0	100.0	0.0	11-Dec-07	10.63	8.4	14.04	0.092
下	25.09	59.50	0.59	0.0	2.5	97.5	0.0	29-Nov-07	12.71	8.78	11.23	0.09	

流域・河川地形が異なることを示した。彼らが有意な差を見出した、流域の平均傾斜や比積分値、河川勾配は、本研究の調査場所においても顕著に異なり(平均傾斜・比積分値は表-1参照)、河川内の砂礫堆積状況にも影響を及ぼしていることから、瀬・淵構造などを含む河川地形も流域地質に起因して変化する可能性が指摘されている(田代ほか 2008)。また、地形とともに河川景観の構成要素となる河畔林を含む植生については、日照、温度や降水などの気象条件に依存するものと考えられる。

瀬の大礫に関する諸量について二元配置分散分析を行ったところ、扁平度について河川間 ( $P = 0.038$ ) に有意な差が検出され、密度について河川間 ( $P < 0.01$ )、流程間 ( $P = 0.046$ ) に有意な差が検出された(いずれも二要因間の交互作用は確認されなかった)。図-3には瀬の大礫の扁平度、図-4には瀬の大礫の密度について、河川・流程ごとの分布を示す。ここで有意差が確認された要因ごとにSheffe's  $F$  testを実施したところ、密度について、朝柄川と他の5河川との間(いずれも  $P < 0.01$ )に、さらに、上流と下流の地点間 ( $P < 0.05$ ) にそれぞれ有意差が検出された。大礫の扁平度に関しては事後検定における有意差こそ検出されなかったものの(図-3)、流域地質に三波川帯を含む河川(相津川、青田川など)では、結晶片岩(変成岩)の岩体から層状はく離して派生した平たい礫(相澤 2005)によって瀬の河床が形成されていた(田代ほか 2007, 2008)ことを支持するものと考えられる。図-4には、大礫の扁平度の違いによって異なる河床環境の模式図を示す。また、大礫の密度に関し、河川間で有意差が生じたのは(図-5)、一般の岩石よりも比重の小さい未固結堆積物が朝柄川を含む周辺地域に多かったこと(相澤 2005)に起因するものと考えられた。な

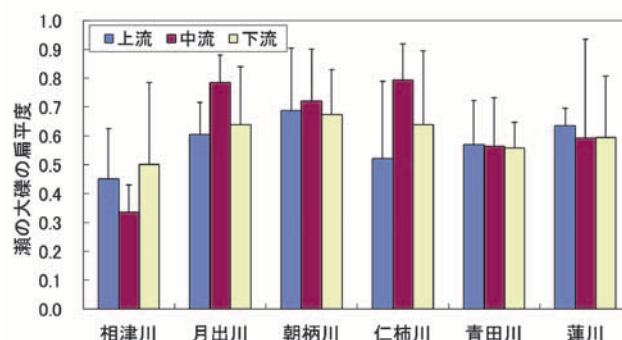
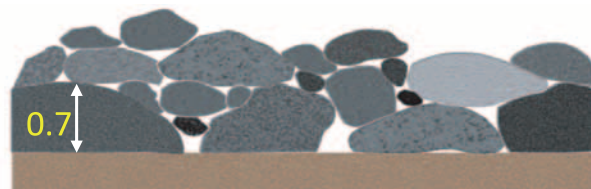


図-3 調査場所の瀬における大礫の扁平度(平均値±標準偏差)。(田代・辻本, 2015)

a) 相津川礫床環境模式図



b) 仁柿川礫床環境模式図

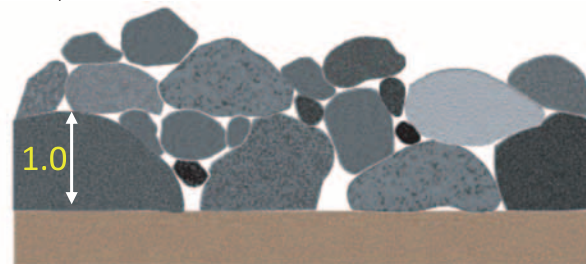


図-4 流域地質によって異なる河床環境の模式図(図中の数値は、礫の扁平度を表す)。(田代・岩田・辻本, 2016)

お、上流より下流の密度が有意に大きかったのは、石礫が河道内を流下する過程において摩擦・破碎作用を受けた結果(Frings 2008)、より固く比重の大きな大礫が残存したものと考えられる。

淵の砂礫の粒度分布に関する諸量について二元配置分散分析を行ったところ、中央粒径について河川間 ( $P$

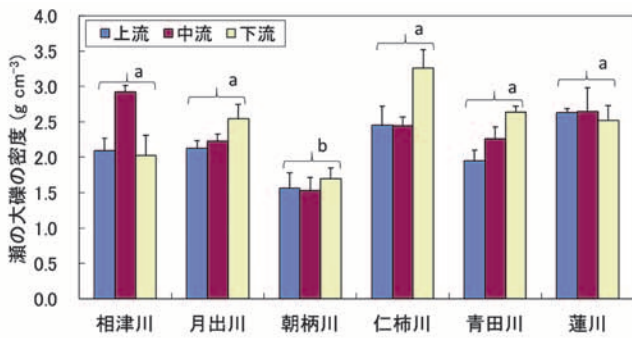


図-5 調査場所の瀬における大礫の密度(平均値±標準偏差)。ただし、英小文字間 (P<0.05) には河川間に有意差があることを示す (Scheffe's F test)。(田代・辻本, 2015)

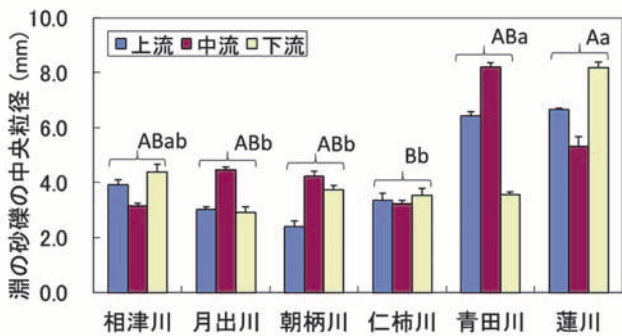


図-6 調査場所の淵の砂礫における中央粒径(平均値±標準偏差)。ただし、英大文字間 (P<0.01) および英小文字間 (P<0.05) には河川間に有意差があることを示す (Scheffe's F test)。(田代・辻本, 2015)

< 0.01) に有意な差が検出された (二要因間の交互作用は確認されなかった)。さらにScheffe's F testを実施したところ、蓮川と仁柿川 (P < 0.01)、蓮川と月出川および朝柄川 (いずれも P < 0.05)、青田川と仁柿川 (P < 0.05) の間に有意差が確認された。図-6には淵の砂礫の中央粒径について、河川・流程ごとの分布を示す。田代ほか (2007, 2008) は、領家帯を流れる河川の淵で細粒分が多いのに対し、秩父帯を流れる河川の淵では粗粒分が多いことを明らかにしている。さらに、この結果を河川勾配、流域面積と合わせて分析し、主に花崗岩から構成される領家帯の岩石は風化して真砂を産出し易いのに対し、堆積岩から構成される秩父帯では風化しにくく表層土発達が発達し貧弱なため、細粒土砂を産出しにくいといった特性 (相澤 2005) に起因するものと結論付けている (田代ほか 2007, 2008)。ここで確認された中央粒径の有意差についてもこうした影響により、領家帯を流れる仁柿川の中央粒径が、秩父帯を流れる蓮川、青田川に比べて有意に小さくなったものと考えられる。

底生動物の優占種に関しては、本調査の瀬における採取方法では、遊泳力の強い種や間隙に潜む種が採取できない可能性があることから、淵を対象とした考察

表-2 調査場所の淵における底生動物の種類数, 総個体数と優占種 (総個体数の15%以上)。(田代・辻本, 2015)

河川	地質	上流			中流			下流		
		種類数	種名	個体数	種類数	種名	個体数	種類数	種名	個体数
相津川	三波川帯	6	<i>Ephemera japonica</i>	2	24	Naidinae	17	11	<i>Ecdyonurus</i>	19
			フタスジモンカゲロウ			ミズミズ亜科			タニガワカゲロウ属	
		8			101			58	Leuctridae	10
月出川	領家帯~三波川帯	9	<i>Ephemera japonica</i>	24	49	<i>Ecdyonurus</i>	46	28	<i>Ecdyonurus</i>	40
			フタスジモンカゲロウ			タニガワカゲロウ属			タニガワカゲロウ属	
		39			235	Elminae	42	138	Elminae	23
朝柄川	三波川帯~領家帯	16	<i>Gumaga orientalis</i>	8	12	<i>Thraulius</i> sp.	6	19	Perlinae	12
			ゲマガトビケラ			トゲエラカゲロウ属			カワゲラ亜科	
		34	Elminae	7	20		20	47		
仁柿川	領家帯	11	<i>Geothelphusa dehaani</i>	11	20	<i>Semisulcospira libertine</i>	20	10	<i>Potamanthus formosus</i>	11
			サワガニ			カワニナ			キイロカワカゲロウ	
		31	<i>Ephemera japonica</i>	6	49		49	22		
青田川	三波川帯~秩父帯	17	Chloroperlidae	49	5	<i>Tanypodina</i>	2	29	<i>Ecdyonurus bajkova</i>	112
			ミドリカワゲラ科			モンユスリカ亜科			オニヒメタニガワカゲロウ	
		92			6			242		
蓮川	秩父帯	12	<i>Paraleptophlebia</i> sp.	10	21	<i>Micrasema quadriloba</i>	46	28	<i>Torleya japonica</i>	60
			トビイロカゲロウ属			マルツツトビケラ			エラブタマダラカゲロウ	
		26			168	Chloroperlidae	45	255		

を行う。表-2には、調査場所ごとに任意に選んだ1試料について、計数した種類数、総個体数とともに、総個体数の15%以上を占めた優占種をその個体数とともに示す。地点を通じて優占種となるが多かったのは、オニヒメタニガワカゲロウを含むタニガワカゲロウ属(4地点)、フタスジモンカゲロウ(3地点)とヒメドロムシ亜科(3地点)であった。携巣型トビケラは、朝柄川上流(三波川帯~領家帯)、蓮川中流(秩父帯)において優占した。タニガワカゲロウ属は月出川中・下流(領家帯~三波川帯)、相津川下流(三波川帯)、青田川下流(三波川~秩父帯)において、フタスジモンカゲロウは相津川上流(三波川帯)、月出川・仁柿川の上流(いずれも領家帯)において、ヒメドロムシ亜科は月出川中・下流(領家帯~三波川帯)、朝柄川上流(三波川帯)で優占した。

携巣型トビケラの生息には巢材となる細粒分が必要となるが、三波川帯を流れる相津川では確認されなかったことから、脆い変成岩の砂礫は携巣型トビケラの営巣に不向きで生息を制限した可能性が示唆された。なお、マルツツトビケラは餌とする付着藻類が豊富な生息場所を選好して移動することが知られており(Katano et al. 2005)、蓮川中流における高密度の生息に付着藻類が影響した可能性が考えられた。

モンカゲロウ属は掘潜型でサイズの一様な細かな砂が堆積した淵に高密度に生息し(Dudgeon 1996; 川合・谷田2005; Kobayashi & Kagaya 2002; 丸山・高井2000)、ヒメドロムシ亜科は砂地を好んで生息する(吉富ほか1999)。本調査では、領家帯に多い風化花崗岩から産出された真砂によって、フタスジモンカゲロウやヒメドロムシ亜科が好む、流れが緩やかな砂地(丸山・高井2000; 吉富ほか1999)が形成されたものと考えられる。

タニガワカゲロウ属は匍匐型で、河床材料の表面に張り付いて流出しにくい扁平な体型を有し(Nielsen 1950)、自らの後方の流れの剥離を制御することで抗力を低下させる(Statzner & Holm, 1982)。一部の調査場所で優占したオニヒメタニガワカゲロウは、体長5-7 mmと小型で流れがある場所を好むことから(川合・谷田 2005; 丸山・高井 2000)、三波川帯変成岩のような扁平な礫が含まれ、流量が相対的に大きな中下流の淵で多かったものと考えられる。

底生動物の生息密度を対比する際には、流域の土地被覆が同様に地質構成が異なり、同等の流域面積(10 km<sup>2</sup>程度)を有する地点を対象とし、相津川下流、月出川下流、仁柿川中流、蓮川中流の4地点を選定した。各地点で確認された底生動物の総個体数密度に関し、

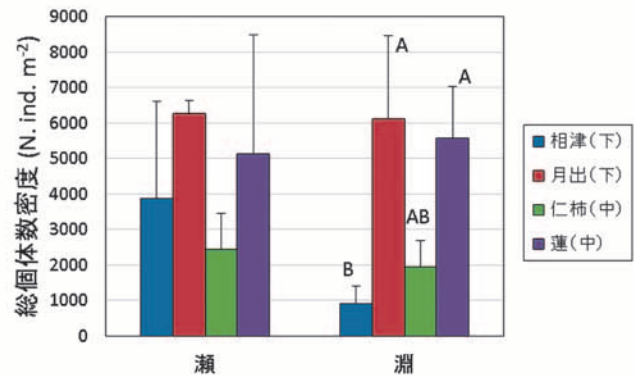


図-7 対象地点の瀬・淵における底生動物の総個体数密度(平均値±標準偏差)。ただし、英大文字間(P<0.01)には河川間に有意差があることを示す(Sheffe's F test)。(田代・辻本, 2015)

瀬・淵ごとに河川を要因とする一元配置分散分析を実施したところ、淵において有意な差が確認された(P<0.01)。さらにSheffe's F testを実施したところ、月出川下流、蓮川中流と相津川下流における淵の総個体数密度の間に有意な差が検出された(P<0.01)。続いてSheffe's F testを実施したところ、月出川下流、仁柿川中流、蓮川中流と相津川下流の間に有意な差が検出された(P<0.01)。図-7には各地点における底生動物の総個体数密度を示す。

仁柿川(領家帯)、相津川(三波川帯)、蓮川(秩父帯)は単相地質からなる流域をもつが、このうち、秩父帯を流れる蓮川では、起源が多様な堆積岩により構成されることから、礫の表面形状のみならず、それらが折り重なって生じる間隙についても、より多様な構造を呈しているものと考えられる。こうした河床間隙空間の多様性は、蓮川における総個体数密度を高めたものと推察される。なお、上流域で領家帯、中下流域で三波川帯を流れる月出川においては、河床材料構成が多様になったことが河床間隙空間の多様性を高めたものと考えられ、蓮川と同様に、個体数密度を高めた可能性が示唆された。

生活型に着目した底生動物の分析に際しては、前述した調査方法に鑑み、瀬では固着型、造網型、匍匐型、携巣型について、淵では全6種類の生活型を対象とした。調査場所の瀬における各生活型の個体数密度について一元配置分散分析を行ったところ、携巣型(P<0.01)について河川間に有意な差が検出された。さらにSheffe's F testを実施したところ、携巣型において蓮川中流、月出川下流と仁柿川中流の間に有意差が確認された(いずれもP<0.01)。図-8には、対象地点の瀬における生活型の個体数密度を示す。同様に淵で確認された各生活型の個体数密度について一元配置分散分析を行ったところ、遊泳型、固着型、匍匐型、携巣型(いずれもP<0.01)について河川間に有意な差が

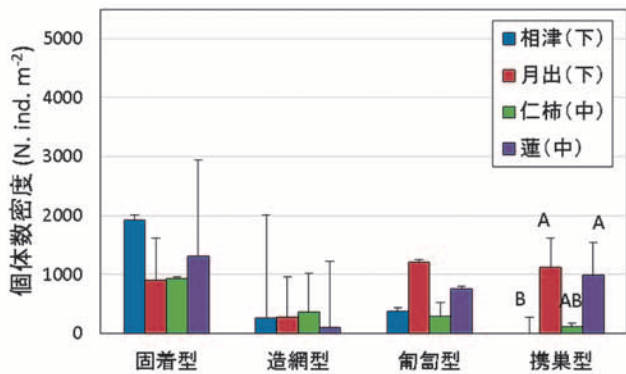


図-8 対象地点の瀬における底生動物の生活型別個体数密度(平均値±標準偏差)。ただし、英大文字間 ( $P < 0.01$ ) および英小文字間 ( $P < 0.05$ ) には河川間に有意差があることを示す (Scheffe's  $F$  test)。(田代・辻本, 2015)

検出された。さらにScheffe's  $F$  testを実施したところ、遊泳型において相津川下流、仁柿川中流と蓮川中流の間 ( $P < 0.05$ )、固着型において月出川下流、蓮川中流と相津川下流の間 ( $P < 0.05$ )、匍匐型において月出川下流、蓮川中流と相津川下流の間 ( $P < 0.01$ )、携巢型において月出川下流、仁柿川中流、蓮川中流と相津川下流の間 ( $P < 0.01$ )に有意差が確認された。図-9には、対象地点の淵における生活型の個体数密度を示す。淵の砂礫には中礫大以上 (16mm以上) の石礫がほとんど含まれなかったため、固着型や造網型といった営巣基盤を必要とする生活型が少なかったと考えられる。これらは河川の違いによらない共通的な特徴であった。

各河川における生活型構成をみると、三波川帯を流れる相津川では、扁平で脆い材料特性を反映して、瀬では大礫に平面的に貼りつく、ウスバガガンボ属などの固着型が卓越した一方、砂粒により筒状の巣を背負って大礫表面を這いまわる携巢型トビケラは見られなかった(図-8)。同様に礫表面を這いまわる匍匐型に関して相津川では少なかった(図-8)。以上より、変成岩から派生した脆くて扁平な材料は、前記したように携巢型トビケラの定着を妨げただけでなく、扁平な砂礫が折り重なって生じる狭い間隙空間は、這いまわるのに適さなかったものと推察される。領家帯を流れる仁柿川は、花崗岩類(深成岩)に由来する丸みを帯びた玉石と細粒な真砂によって特徴づけられており(Thompson et al. 2004; 相澤 2005)、瀬の大礫の間隙にも真砂が堆積している傾向が見受けられた。そのため、営巣材料が確保できることから、携巢型トビケラは多くなったものと考えられる。また、秩父帯を流れる蓮川では、前記したように、起源が多様な堆積岩により構成されることから、多様な河床間隙空間を呈しているものと考えられる。そのため、大礫表面を這いまわる携巢型、匍匐型昆虫が多くなったものと推察さ

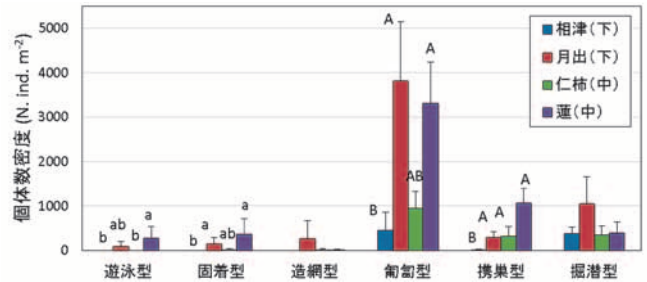


図-9 対象地点の淵における底生動物の生活型別個体数密度(平均値±標準偏差)。ただし、英大文字間 ( $P < 0.01$ ) および英小文字間 ( $P < 0.05$ ) には河川間に有意差があることを示す (Scheffe's  $F$  test)。(田代・辻本, 2015)

れる。この推論は、上流域で領家帯を流れ、中・下流域で三波川帯を流れる月出川の下流において、蓮川と同じような生活型構成であったことによっても支持されるものと考えられる。

#### 4. おわりに

本研究では、流域地質が河道特性や河床環境を通じて河川の底生動物群集に及ぼす影響を解明することを目的とした。はじめに、国内外で企画・実施された流域地質から河川の各種過程を考察した既往研究の分析から、礫床河川における水理環境、河床環境、水質環境に対する流域地質のはたらきを整理した。さらに、これらを介して生物群集がカスケード的に影響を受ける様相を示し、流域地質によって変化する礫床河川の生態系を概念的に整理した。続いて、異なる流域地質によって構成される櫛田川流域の山地河川を事例に、流程に沿って水質、河床地形を調査し、瀬・淵における河床材料と底生動物を分析することにより、流域地質が河道特性と群集構造に及ぼす影響を明らかにした。

本研究で対象とした山地河川は、ダムの下流などは避けて人為的改変が少ない場所を対象とすることにより、河川地形や生態系の潜在的特性を示したものである。今日、多くの山地河川でダムが建設されている中で、河道特性、河床環境、ならびに、底生動物相が改変されており、それらの修復が求められている。しかしながら、本来の景観や生態系が既に喪失した状況下において、現在の対応は、Before-After-Reference-Control-Impactデザインなどの概念的整理に依拠するばかりでは、修復目標とすべき景観や生態系の設定に困難が付きまとう。図-1など、本論でも一部整理した流域地質が河川生態系を成立させる影響パスの記述は、今後も指向し続ける必要のある研究課題であるが、こうした因果関係の解明は変質された生態系の管理に資する根源的な知見に繋がるものと考えられる。

(流域の) 表層地質は、日本列島を形成してきた地殻変動とともに、各種地形の形成や土地被覆の分布に多大な影響を及ぼしてきた。普段、目にする景観(地形や被覆)の背景にあるメカニズムを解き明かし、生態系の管理に活かしていくためには、例えば河川をフィールドとした場合でも、水・土砂の流れの素過程に注視する水理学や、無機的環境に対する生物応答や生物間の相互作用を扱う生態学だけでは不十分であり、地学的理解の裏付けを伴った有機的な現象理解を進めるべきであろう。こうした「原点」に回帰することの重要性を指摘し、本稿の結びとしたい。

## 謝辞

本研究の実施に際し、名古屋大学の辻本哲郎名誉教授、戸田祐嗣教授には研究計画の段階から多くの有益な助言をいただいた。いであ株式会社環境創造研究所の吉成暁氏には、底生動物の分類に関する有用な情報をいただいた。現地観測や試料分析においては、登立公平氏、岩田祐輝氏、および、小出博之氏を始め、名古屋大学水理学研究室の学生諸氏にご助力いただいた。また、本研究は、WEC応用生態研究助成(2008～2009年度、助成番号2008-5号)の支援を受け、水源地生態研究会・ダム湖と下流の生態研究グループ(一般財団法人水源地環境センター)の調査研究の一環として実施された。ここに記して御礼申し上げる。

## 参考文献

- 1) 相澤泰造(2005) 三重の地質と斜面リスクマネジメント。(財)三重県建設技術センター, 津, 120p.
- 2) Davies N.M., Norris R.H. & Thoms M.C. (2000) Prediction and assessment of local stream habitat features using large-scale catchment characteristics. *Freshwater Biology* 45: 343-369.
- 3) Dudgeon D. (1996) The life history, secondary production and microdistribution of Ephemera spp. (Ephemeroptera: Ephemeridae) in a tropical forest stream. *Arch Hydrobiol* 135: 473-483.
- 4) Egghishaw, H.J. and Morgan, N.C. (1965) A survey of the bottom fauna of streams in the Scottish Highlands. Part II. The relationship of the fauna to the chemical and geological conditions, *Hydrobiologia* 26: 173-183.
- 5) Frings R.M. (2008) Downstream fining in large sand-bed rivers. *Earth Science Reviews* 87: 39-60.
- 6) Frissell C.A., Liss W.J., Warren C.E. & Hurley M.D. (1986) A hierarchical framework for stream habitat classification: viewing streams in a watershed context. *Environmental Management* 10: 199-214.
- 7) 藤岡奨・牛島省(2011) 多相流場の解法による上昇気泡群の気液界面面積評価。第25回数値流体力学シンポジウム, E11-1, 8p.
- 8) Hicks, B.J. & Hall, J.D. (2003) Rock type and channel gradient structure salmonid populations in the Oregon Coast Range, *Transactions of the American Fisheries Society* 132: 468-482.
- 9) 平田健正, 井伊博行, 長谷部正彦, 江種伸之, 坂本康, 桑川高德, 西山幸治, 酒井信行, 岩崎宏和(1999) 土地利用特性の河川水質に及ぼす影響—大阪府石川流域—, 土木学会論文集No.614 / II-46: 97-107.
- 10) Holloway, J.M., Dahlgren, R.A., Hansen, B. & Casey, W.H. (1998) Contribution of bedrock nitrogen to high nitrate concentrations in stream water. *Nature* 395: 785-788.
- 11) Hury A.D., Benke A.C. & Ward G.M. (1995) Direct and indirect effects of geology on the distribution, biomass, and production of the freshwater snail *Elimia*, *Journal of the North American Benthological Society* 14: 519-534.
- 12) Jin H.S. & Ward G.M. (2007) Life history and secondary production of *Glossosoma nigrior* Banks (Trichoptera: Glossosomatidae) in two Alabama streams with different geology. *Hydrobiologia* 575: 245-258.
- 13) Katano I, Mitsunashi H., Isobe Y., Sato H. & Oishi T (2005) Reach-scale distribution dynamics of a grazing stream insect, *Micrasema quadriloba* Martynov (Trichoptera), in relation to current velocity and periphyton abundance. *Zoological Science* 22: 853-860.
- 14) 川合禎次・谷田一三(2005) 日本産水生昆虫一科・属・種への検索, 東海大学出版会, 東京.
- 15) Kobayashi S. & Kagaya T. (2002) Differences in litter characteristics and macroinvertebrate assemblages between litter patches in pools and riffles in a headwater stream. *Limnology* 3: 37-42.
- 16) Kodama Y. (1994) Downstream changes in the lithology and grain size of fluvial gravels, the Watarase river, Japan: Evidence of the role of abrasion in down-stream fining. *J. Sedimentary Res.* A64 (1) : 68-75.
- 17) Krueger, C.C. & Waters, T.F. (1983) Annual production of macroinvertebrates in 3 streams of different water-quality. *Ecology* 64: 840-850.
- 18) Krumbein W. C. (1941) . Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology* 11 (2) : 64-72.
- 19) 口田登・辻垣武彦・森田博史(1991) 捨石による基礎マウンドの形状および力学特性に関する考察. 港湾技術研究所報告, 30 (1) : 347-382.
- 20) Leland, H.V. & Porter, S.D. (2000) Distribution of benthic algae in the upper Illinois River basin in relation to geology and land use., *Freshwater Biology* 44: 279-301.
- 21) 丸山博紀・高井幹夫(2000) 原色川虫図鑑. 全国農村教育協会, 東京.
- 22) Minshall, G.W. & Kuehne, R.A. (1969) An ecological study of invertebrates of the Duddon, an English mountain stream, *Archiv für Hydrobiologie* 66: 169-191.
- 23) Minshall, G.W. & Minshall, J.N. (1978) Further evidence on the role of chemical factors in determining the distribution of benthic invertebrates in the River Duddon, *Archiv für Hydrobiologie* 83: 324-355.
- 24) 虫明功臣・高橋裕・安藤義久(1981) 日本の山地河川の流況に及ぼす流域の地質の効果. 土木学会論文報告集, 309: 51-62.
- 25) Neff, M.R. & Jackson, D.A. (2011) Effects of broad-scale

- geological changes on patterns in macroinvertebrate assemblages, *Journal of the North American Benthological Society* 30: 459-473.
- 26) Nelson, R.L., Platts, W.S., Larsen, D.P. & Jensen, S.E. (1992) Trout distribution and habitat in relation to geology and geomorphology in the North Fork Humboldt River drainage, northeastern Nevada, *Transactions of the American Fisheries Society* 121: 405-426.
- 27) Nielsen A (1950) The torrential invertebrate fauna, *Oikos* 2: 176-196.
- 28) Olson J.R. (2012) The influence of geology and other environmental factors on stream water chemistry and benthic invertebrate assemblages. All Graduate Theses and Dissertations. Paper 1327. Utah State University, <http://digitalcommons.usu.edu/etd/1327>.
- 29) Sable, K.A. & Wohl, E. (2006) The relationship of lithology and watershed characteristics to fine sediment deposition in streams of the Oregon Coast Range, *Environmental Management* 37: 659-670.
- 30) Shearer K.A. & Young R.G. (2011) Influences of geology and land use on macroinvertebrate communities across the Motueka River catchment, New Zealand. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* 45 (3) : 437-454.
- 31) Snelder, T. H., Lamouroux, N. & Pella, H. (2011) Empirical modelling of large scale patterns in river bed surface grain size, *Geomorphology* 127: 189-197.
- 32) Statzner B. & Holm T.F. (1982) Morphological adaptations of benthic invertebrates to stream flow – an old question studied by means of a new technique (Laser Doppler Anemometry) . *Oecologia* 53: 290-292.
- 33) 社団法人地盤工学会 (2001) 土の粒度試験. 土質試験-基本と手引き-. 地盤工学会土の試験実習書編集委員会編 : 27-38, 丸善, 東京.
- 34) 竹門康弘 (2005) 底生動物の生活型と摂食機能群による河川生態系評価. *日本生態学会誌* 55: 189-197.
- 35) 田代喬, 岩田裕輝, 辻本哲郎 (2016) 流域地質に起因する礫床環境の異質性とそれが底生動物群集に及ぼす影響. *河川技術論文集* 22: 445-450.
- 36) 田代喬, 登立公平, 辻本哲郎 (2008) 流域地質構造が河床材料特性の流下方向変化に及ぼす影響. *河川技術論文集* 14: 121-126.
- 37) 田代喬, 佐藤圭輔, 中村直斗, 登立公平, 辻本哲郎 (2007) 流域の地質構造・地形特性に着目した河川景観の階層性の分析. *河川技術論文集* 13: 279-284.
- 38) 田代喬, 辻本哲郎 (2015) 流域地質の異質性からみた山地河川の河床材料構成と底生動物の関係: 櫛田川流域における現地観測. *応用生態工学* 18 (1) : 35-45.
- 39) Thompson C.J., Croke, J., Ogden R. & Wallbrink P. (2004) A morpho-statistical classification of mountain stream reach types in southeastern Australia, *Geomorphology* 81: 43-65.
- 40) Townsend C.R., Dolédec S., Norris R., Peacock K. & Arbuttle C. (2003) The influence of scale and geography on relationships between stream community composition and landscape variables: description and prediction. *Freshwater Biology* 48: 768-785.
- 41) 津田松苗 (1962) 水生昆虫学. 北隆館, 269p.
- 42) Wallbrink P.J., Murray A.S., Olley J.M. & Olive L.J. (1998) Determining source and transit times of suspended sediment in the Murrumbidgee river, New South Wales, Australia, using fallout <sup>137</sup>Cs and <sup>210</sup>Pb. *Water Resources Res.* 34 (3) : 879-887.
- 43) Wiley M.J., Kohler S.L. & Seelbach P.W. (1997) Reconciling landscape and local views of aquatic communities: lessons from Michigan trout streams. *Freshwater Biology* 37: 133-148.
- 44) Willoughby, L.G. & Mappin, R.G. (1988) The distribution of *Ephemereilla ignita* (Ephemeroptera) in streams - the role of pH and food resources, *Freshwater Biology* 19: 145-155.
- 45) 山本晃一 (2004) 構造沖積河川学: その構造特性と動態. 山海堂, 東京, 690p.
- 46) 吉野文雄 (1979) 山地流域の構成地質が河床砂礫径分布に及ぼす影響. *土木技術資料* 21 (10) : 535-540.
- 47) 吉富博之, 白金晶子, 疋田直之 (1999) 矢作川水系のヒメドロムシ. *矢作川研究* 3: 95-116.
- 48) Zingg T.\* (1935) Beitrag zur Schotteranalyse, *Schweizer Miner. Petrogr. Mitt.*, 15: 39-140.
- (\*印を付した文献は直接参照していない)