

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：17102

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25889042

研究課題名(和文) 流域地質が山地溪流の河道・ハビタット特性に与える影響

研究課題名(英文) Effect of three types of geology on the morphology and habitat characteristics of mountain streams

研究代表者

佐藤 辰郎 (Sato, Tatsuro)

九州大学・持続可能な社会のための決断科学センター・助教

研究者番号：20711849

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は山地溪流の河道特性やハビタット(生息場)特性が地質の影響でどのように変化するかを定量的に明らかにすることが目的である。九州中北部の山地溪流において、流域地質が花崗岩、泥質片岩、溶結凝灰岩である合計53地点で物理環境調査(河道測量、ハビタット構成割合、ステップの形状等)を行った。花崗岩は比較的ステップ高が高かった一方、岩盤の露出しやすい溶結凝灰岩はステップ直下流に存在するプールが洗掘されにくいため、ステップ高は高くならなかった。泥質片岩は河川の流れる方向と泥質片岩に発達する片理面の走向の成す角によって河床堆積土砂下層の岩盤構造が変化し、ステップ高に影響を与えていることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：The purpose of the present study was to reveal how the morphology of mountain streams change with geology for improving nature friendly river management. We surveyed 53 sites of mountain streams in north central region of the Kyushu Island, focusing on three main geology there; granite, pelitic schist and welded tuff. As the results, bed material and step-pool morphology were different depending on geology. As for the streams of granite, boulders and sand occupied large percentage of bed material, and step height and pool depth were greater than the other streams with different geology. At the streams of welded tuff, bedrock were exposed in the large part of river bed. In addition, we revealed that step height is passively correlated the stream power index, an index for the sediment transport potential and product of drainage area and gradient, whose relationship are different depending on geology.

研究分野：河川応用生態

キーワード：山地溪流 ステッププール 流域地質

### 1. 研究開始当初の背景

日本の国土の70%は山地で、河川上流域の多くは急峻な山岳地帯が占めている。山地溪流では洪水と土砂流出による災害が多く発生しており、溪流の治水対策は重要課題の一つである。既往の溪流の治水対策は洪水の疎通能力の確保、河道の安定化を目的とし、砂防ダム、床固工などの工法が日本国内の山地溪流で広く採用されてきた。その結果、環境の単調化、縦断的な連続性の分断化、生物多様性の低下など様々な問題が発生している(太田, 1999)。日本では平成2年「多自然型川づくり」の開始以降、治水と環境の両立を目指した川づくりが進められてきたが、山地溪流に関しては土地利用率と人口密度が低いこともあり、あまり重視されてこなかった。平成20年には「中小河川に関する河道計画の技術基準」が定められ、中小河川における多自然川づくりの計画論、設計思想が示された。しかし、適用範囲は中流域に限定されており、山地溪流における自然環境・河川生態に配慮した河道管理手法は確立されていない。

山地溪流河道の研究ではこれまで、Step-Pool 構造と呼ばれる階段状河床形が注目されてきた。Step-Pool 構造の物理的現象に関する研究は、形成メカニズムに関する実験的研究(Whittaker & Jaeggi, 1982; 芦田ら, 1984)をはじめ、形成条件(芦田ら, 1986; 1987)や破壊条件(藤田・道上, 1996; Chin, 1998)、Step の形状特性及び分布特性(藤田・道上, 1999; Chin, 1999; Chartrand & Whiting, 2000)について報告されている。長谷川・藤田(1986)、目黒ら(2001)は、よりマクロな視点から河床形態を捉え、溪流河道は、谷幅スケールの大規模波、流路幅スケール中規模波、水深スケールの小規模波の重なり(Step-Pool 構造)によって構成されていることを明らかにした。一方、河川生態学の見地からは、Step-Pool 構造がもたらす複雑な河床形態、流れ環境が多様な魚類、底生動物のハビタットとなっていることが多く指摘されている(例えば Nakano, 1995)。

山地溪流は土砂生産源に近く、流域の地質・地形の影響が顕著であり、河道形態、流量、河床材料が河川毎に大きく異なると考えられる。小出(1973)や須賀(1992)は、地質や地質年代が河床材料の粒度組成や流砂量に強く影響することを指摘した。田代ら(2008, 2011)は、地質の違いにより河床材料の大きさの違いや、大礫の破碎のされやすさ、元素構成比が異なっていることを報告している。また類似した地形を備えていて表層地質が異なる流域では、降雨に対する生産土砂の反応が異なる傾向を見出している(田代ら 2010)。

### 2. 研究の目的

上記の通り、地質によって流出量や生産土砂の量・質が異なることが指摘されてはいる

ものの、そういった違いが河川の物理基盤である河床形態やハビタット構造にどのような影響を与えているのかについては明らかになっていない。そもそも溪流のハビタット構造自体、研究が進んでいない。本研究では、九州中北部で主要な3地質(花崗岩、泥質片岩、溶結凝灰岩)に着目し、河床材料、ハビタットの構成と物理環境、および河床形態(ステップ-プール構造)が地質によって異なるかどうかを検証した。

### 3. 研究の方法

初年度は、熊本県菊池川水系において花崗岩、泥質片岩、溶結凝灰岩を流域地質とする、それぞれ3河川、計9河川(図2-1)を対象に現地調査を行った。調査対象河川の選定に当たっては河川の規模を揃えるため、事前に10mメッシュの標高データ(国土数値情報)をもとに ArcGIS10.2 の水文解析ツールにより河道網を作成し、流域面積が約1.5km<sup>2</sup>~2.0km<sup>2</sup>の地点を抽出した。比較的流域面積が小さい小溪流を抽出したのは、これ以上流域面積が大きくなると、つまり下流になると民家や水田が増え、河川の人為的改変の程度が大きくなるためである。抽出後、現地踏査を行い、出来る限り周辺の人為的改変が少ない溪流を選定した。選定した河川の勾配は1/11~1/33である。現地調査では各河川に200mの調査区(川幅の10倍程度)を設定し、水域のハビタット分類(ステップ、プール、カスケード、平瀬、早瀬)、縦横断測量調査、河床材料調査(ハビタット毎にサイズ別構成礫の割合の記録、澇筋、および河岸堆積部において線格子法)を行った。

また、2年目には前年度に得られた地質別の特徴の一般性を確認すること、および勾配等の流程変化の影響を調べる目的で、気候、降雨パターンが比較的同一と考えられる九州中北部の矢部川、筑後川、嘉瀬川水系にも調査範囲を広げた。前年度と同様の3地質を流れる山地溪流44地点において前年度と同内容の現地調査を行った。

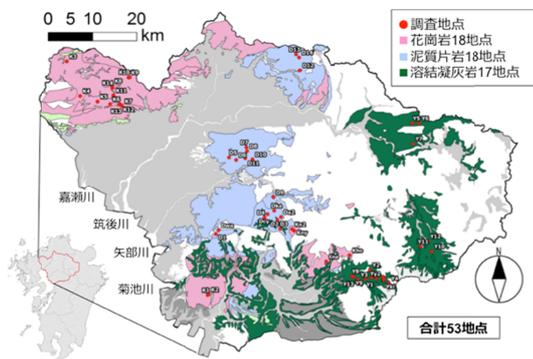


図-1 九州中北部における対象3地質と調査地点の分布

#### 4. 研究成果

同一規模・流程の溪流における地質による違い(初年度菊池川調査成果より)

##### ・河床材料

地質が異なると河床を構成する材料の性質(粒度分布,形状)は明瞭に異なっていた。

ハビタット調査結果から集計して求めた,河川全体での河床表層構成材料の割合を図1に,線格子法により求めた澗筋と河岸の礫の粒径加積曲線を図2-4に示す。地質別に見てみると,花崗岩と溶結凝灰岩は川ごとに粒径加積曲線がばらつく傾向にあるが,泥質片岩は比較的似たような傾向を示していた。

花崗岩では砂の割合が他の地質より多く,河床全体の約20%~約30%を占めていた。花崗岩は2mm以下の比較的小さな粒径と30cm以上の巨石の割合が高く,二極化する傾向が見られた。花崗岩は風化しやすく真砂を多く産出・供給し,砂の割合が高くなるが,花崗岩はすべて風化するわけではなく,節理ぞいに風化するためコラストーンが産出される。田代ら(2008)の大礫の破碎・磨耗試験によると,秩父帯(堆積岩主体)と三波川帯(変成岩)で大礫の破碎が激しいが,領家帯(花崗岩)の大礫は破碎されにくい。コラストーンとしてある程度の大きさの礫が河川に供給されること,およびそれが硬く破碎されにくいいため,花崗岩では巨礫の割合が他の地質より高いのだと考えられる。

泥質片岩は2mm以下の細粒土砂,および30cmを超える巨礫は少なく,中礫,大礫の割合が非常に高かった。泥質片岩は変成岩の一種で,一般に片理がよく発達し,結晶が同じ方向に並び,層状になって片理ぞいに薄く剥離しやすい特徴を持っている。実際,地質別に扁平度を比較した結果,泥質片岩の扁平度が際立って高かった。扁平であることや,剥離しやすい性質から礫が破碎されやすいため巨礫が少ないのかもしれない。前述の田代らの破碎実験においても,三波川帯(変成岩)の大礫は破碎されやすい傾向が示されている。破碎されやすいものの,花崗岩ほどには砂は存在しない。河道へ供給された段階での砂の量が圧倒的に違うのだろう。一方,溶結凝灰岩は他の地質と比べ岩盤の露出しがちで,平均で見ると水域の河床の約30%,阿蘇山に近い菊池溪谷のサイトでは70%以上が岩盤で構成されていた。岩盤の上に部分的に薄く,また河床に現れている柱状節理の頭部間の隙間に砂礫が堆積している状態で,堆積土砂は砂から中礫,大礫まで均等度の高い分布であった。

以上まとめると,花崗岩は丸い巨礫と砂が多い,泥質片岩は角張って扁平な中礫・大礫が多い,溶結凝灰岩は岩盤の多く露出するというのが各地質の河床材料の特徴であった。

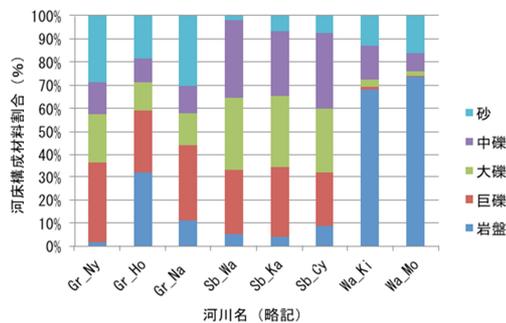


図-2 河床構成材料の割合(Gr:花崗岩,Sb:泥質片岩,Wa:溶結凝灰岩)

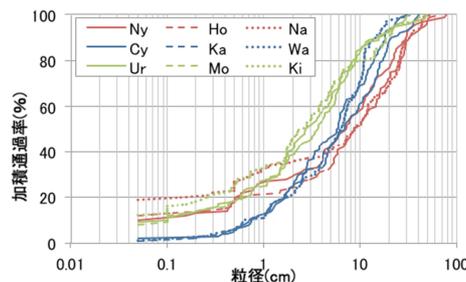


図-3 各河川の澗筋部河床材料の粒径分布(赤:花崗岩,青:泥質片岩,緑:溶結凝灰岩)

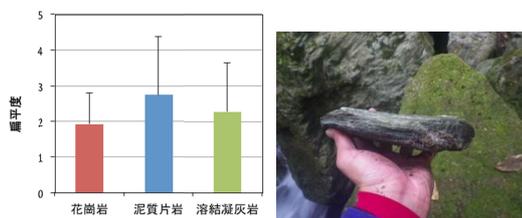


図-4 各地質の扁平度(左),および扁平な泥質片岩の写真(右)

##### ・ハビタットの構成割合・物理環境

各地質において,同一地質の河川におけるハビタットの構成割合については大きな差が見られなかったので,地質毎にまとめたハビタットの構成割合を図2-7に示す。地質別に見ると,花崗岩はステップとプールの割合が50%近くあった。対照的に溶結凝灰岩ではプールの分布割合が少なくなり,70%以上が瀬(早瀬,平瀬,かけあがりの瀬)であった。泥質片岩は花崗岩と溶結凝灰岩の間であった。調査した溶結凝灰岩河川は若干勾配が小さい影響もあるが,岩盤の露出が多い溶結凝灰岩では,河床が掘れにくいいため,プールの面積が減る一方,平瀬の面積が増えるものと考えられた。

図6に各ハビタットの平均水深,平均流速を示す。現地調査で計測した水深,流速を地質毎,ハビタット毎に平均したものをプロットした。また,各ハビタットにおける地質による違いが分かるようにハビタット毎に線

で結んだ。ハビタット毎に水理環境が明瞭に異なることが分かる。ステップ、カスケード、早瀬、平瀬、プールの順に流速が遅く、水深が浅くなった。平均流速については各ハビタットにおいて地質による違いが少なかったが、平均水深には差が見られた。すべてのハビタットにおいて花崗岩の平均水深が深く、次いで泥質片岩、そして溶結凝灰岩は浅い傾向にあった。この特徴はプール部河床に堆積している礫の粒径に起因していると考えられる。ハビタット別の構成材料のプールを比較してみると花崗岩は砂、泥質片岩は中礫、溶結凝灰岩は岩盤の割合が多かった。このことから砂の堆積する花崗岩はプール部河床が掘れやすく、泥質片岩は中礫の割合が多くかつ扁平なため、同程度の河川規模では花崗岩ほど洗掘されないと考えられる。また、溶結凝灰岩は河床が岩盤で構成されているため、洗掘されず、浅く長いプールの形状になりやすいと考えられる。

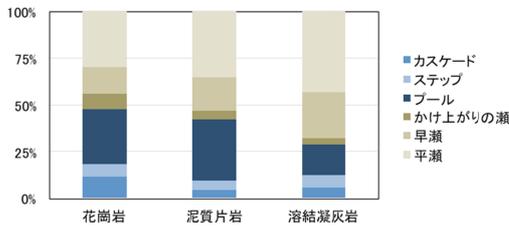


図-5 地質別のハビタットの構成割合

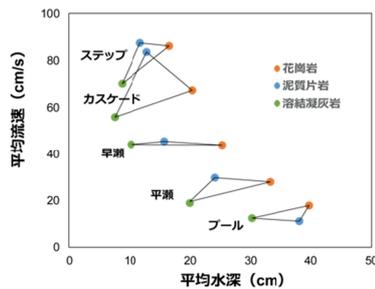


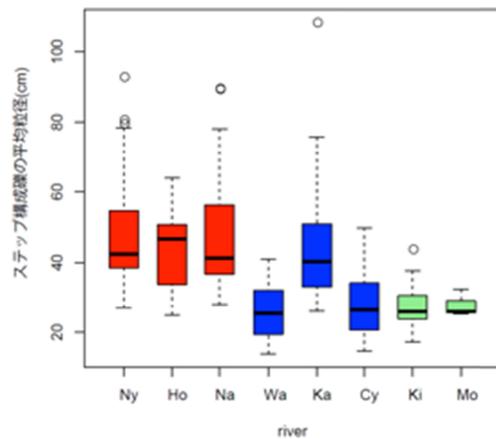
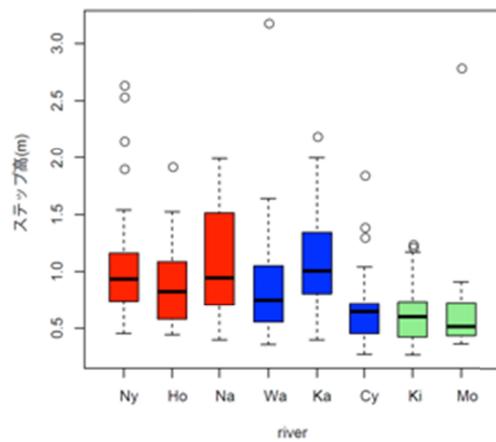
図-6 地質別各ハビタットの平均水深と平均流速

・河床形態（ステッププール構造）

河床形態、特にステップの大きさが地質によって異なる傾向が見られた。図-7に各河川におけるステップの大きさとステップ構成礫の平均サイズ、およびH/L/Sを示す。花崗岩、泥質片岩、溶結凝灰岩の順番で、ステップの構成礫の平均粒径（および最大粒径）、およびステップ高が大きかった。芦田(1984)はステップ形成と安定の条件として混合砂であること、流れが射流であること、平均粒径よりも大きい砂礫が移動して活発な分級現象が起こること、最大粒径が停止すること、を挙げている。Zimmarmann(2001)は洪水時、流量の増大による河床掃流力の増大に伴い、動く礫のサイズも大きくなり、動き出した礫が下流の大きい石に引っ掛かり、その周りに堆積して、ステップが形成される

とした。そのため、ステップの高さは、ステップを構成する礫、つまり河床に存在する最大粒径程度の礫(D84, D90)のサイズと関係が深い(Whol et al, 1997; Chin et al, 1999; 芦田ら, 1984); Costa 1983)。前述の通り、花崗岩ではコアストーンとして丸くサイズの大きい巨礫が多く河道に存在する傾向があり、それらがきっかけとなり大きなステップが形成するものと考えられた。また、粒度分布の幅も広く、芦田の挙げた混合砂の条件をよく満たすため、安定したステップが発達しやすいのかもしれない。

泥質片岩は花崗岩に比べてステップが小さいのは、まず第一に河床に存在する最大粒径の礫サイズ(D84, D90)が小さいことが考えられるが、礫の形状が扁平あることも関係している可能性がある。恩田(2008)は扁平な礫はまとまった段差を作りにくいことを報告している。実際、泥質片岩の河川はグラグラとして歩きにくく、ステップも人が乗ると崩れてしまうものが散見された。礫サイズに加え、扁平な形状のため、安定した大きなステップが形成されにくいと考えられる。溶結凝灰岩のステップが発達しないのは最大粒径の礫が小さいことと、上記でも述べたように河床が岩盤で覆われているため、礫が集積しにくく安定しにくいためだと考えられる。



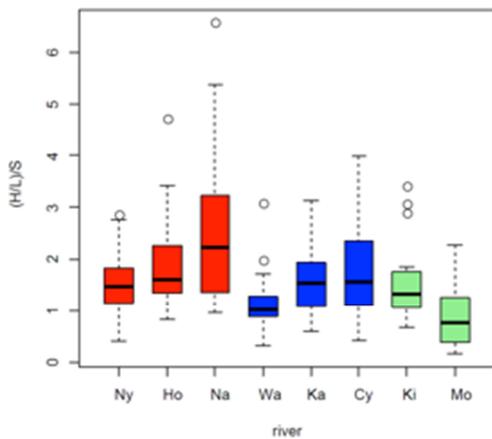


図-7 各河川のステップ高(上), ステップ構成礫の平均粒径(中), H/L/S 値(下)。赤: 花崗岩, 青: 泥質片岩, 緑: 溶結凝灰岩

ステップ部の大きさの違い, およびプール部の洗掘されやすさ(花崗岩: 砂, 泥質片岩: 扁平な中礫, 溶結凝灰岩: 岩盤)を反映して, 河床の凸凹具合を表す指標の一つで洪水時の抵抗にも関係がある H/L/S の平均値は花崗岩 1.91, 泥質片岩 1.53, 溶結凝灰岩 1.36 であった。Abrahams (1995) の研究では自然渓流の (H/L)/S の値は 1 から 2 までの範囲としたが, 今回の調査河川は 1 から 2 の範囲内であった。H/L/S は河床の凹凸の程度を示すため, H/L/S が大きい花崗岩渓流は洪水流に対する抵抗が大きく, 逆に溶結凝灰岩は低いと考えられる。こういった河床状態の違いが洪水の流下速度を変化させ, 下流への洪水到達時間や河岸浸食の程度に影響を与えているのではないかと予測しているが, 今後の課題である。

流程の違いが地質-ステップ高の関係に与える影響

流程, 掃流力の影響を考慮しながら, 流域地質が異なると渓流の河床形態(ステップ-プール構造)が異なることが明らかとなった。既往研究において, 河床勾配  $S$  とステップ高には相関があると指摘されているため(Chin, 1999 ほか), 地質によるステップ構造の違いを調べるには勾配への配慮が必要である。本研究でも勾配とステップ高の関係を調べたが, 勾配とステップ高の明瞭な関係性は認められなかった(図-8)。またステップ高はステップ構成礫の影響を強く受け, 強い正の関係性があると指摘されている(Whol et al, 1997; Chin et al, 1999; 芦田ら, 1984)。本研究においても既往の研究のとおりステップ構成礫とステップ高には相関関係が認められた。ここで, ステップを構成する礫はその場における洪水時の掃流力に見合ったものが残っていると考えると, (瓦状の重なり, ステップ礫の噛み合わせ効果もあり, 通常の無次元限界掃流力では合わないけれども), ステップ高(およびステップ構成礫サ

イズ), および単純な掃流力  $= gRS$  に関係性が見出せると考えられる。しかしながら, ステップの形成・破壊に係る流量時の径深  $R$  については設定が難しい。そこで,  $R$  を集水面積  $A$  で代替し, 集水面積  $A \times$  勾配  $S$  をストリームパワーとして, ステップ高との関係性を調べた。水が流下する際に河床や河岸との摩擦によって減少するエネルギーの一部が土砂輸送に消費されるという考えから, ストリームパワーを流砂量や浸食量などと結びつけられた研究が行われてきており, Bagnold (1966) はストリームパワーを  $= gQS$  ( $\rho$ : 水の密度,  $g$ : 重力加速度,  $Q$ : 流量,  $S$ : エネルギー勾配 < 河道勾配で近似できる >) で定義し, 単位河床面あたりのエネルギー消費率をストリームパワーと名付けて土砂輸送を評価している。また芦田(1991) は流域面積  $A$  と河道勾配  $S$  に洪水時の降雨量  $R$  を乗じたものが比堆砂量と相関が良好であると述べている。さらに, 岩盤の侵食率は流域面積  $A$  と河床勾配  $S$  の積と比例することも示されている(Seidl and Dietrich, 1992)。

図-8 に地質毎のストリームパワーとステップ高の関係を示す。ストリームパワーの増加に伴ってステップ高が大きくなり, ストリームパワーの累乗で近似されることが確認された。しかし, その関係性には地質による違いが見られた。前述の同規模・勾配で比較した結果と同じく, 花崗岩のステップが大きい傾向が見られ, やはり花崗岩はステップが大きくなる。一方, 岩盤の露出しやすい溶結凝灰岩はステップ直下流に存在するプールが洗掘されにくいいため, ステップ高は高くならなかった。泥質片岩は河川によるバラツキが大きかった。それには河川の流れる方向と泥質片岩に発達する片理面の走向の成す角によって河床堆積土砂下層の岩盤構造が変化することで関係している可能性がある。

多地点での調査により, 流程, 掃流力の影響を考慮しながら, 流域地質が異なると渓流の河床形態(ステップ-プール構造)が異なることが一般性を高める形で示された。また, 岩盤の影響が極めて大きく, 露岩して深掘しないことに加えて, 河床堆積土砂の下層岩盤の形状が影響を与えている可能性が示唆された。

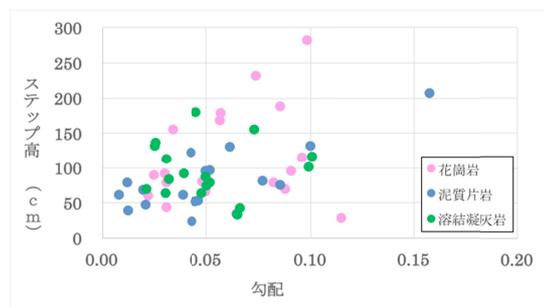


図-8 勾配とステップ高の関係

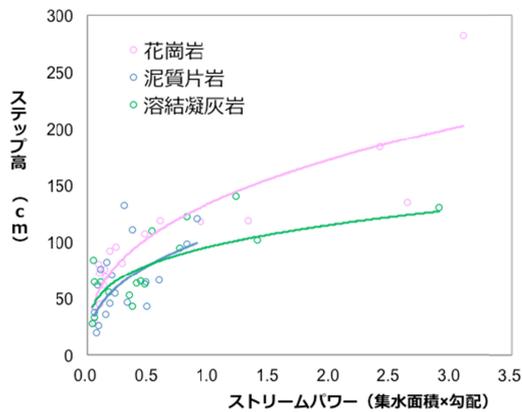


図-9 地質毎のステップ高とストリームパワーの関係

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計2件)

西田健人, 佐藤辰郎, 大山璃久, 野口修司, 島谷幸宏, 山地溪流の河床形態と地質の関係 - 九州中北部 53 地点の現地調査結果 -, 平成 26 年度土木学会西部支部研究発表会講演, pp.175-176, 2015 査読無

佐藤辰郎, 黒木啓孝, 大山璃久, 島谷幸宏, 菊池川流域の地質と山地溪流の Step-Pool 構造の関係, 第 18 回応用生態工学会研究発表会講演集, pp.157-158, 2014 査読無

〔学会発表〕(計6件)

西田健人, 佐藤辰郎, 大山璃久, 野口修司, 島谷幸宏, 山地溪流の河床形態と地質の関係 - 九州中北部 53 地点の現地調査結果 -, 平成 26 年度土木学会西部支部研究発表会, 2015 年 3 月 7 日, 琉球大学(沖縄),

佐藤辰郎, 黒木啓孝, 大山璃久, 野口修司, 島谷幸宏, 地質と山地溪流の河床形態の関係, 第 17 回河川生態学術研究発表会, 2014 年 11 月 12 日, 発明会館ホール(東京)

大山璃久, 一柳英隆, 佐藤辰郎, 島谷幸宏, 小水力発電による減水がカワガラスの採餌行動に与える影響について - 熊本県緑川を事例として -, 応用生態工学会第 18 回大会, 2014 年 9 月 18 日, 首都大学東京(東京)

佐藤辰郎, 黒木啓孝, 大山璃久, 島谷幸宏, 菊池川流域の地質と山地溪流の Step-Pool 構造の関係, 応用生態工学会第 18 回大会, 2014 年 9 月 18 日, 首都

大学東京(東京)

Kasahara T., Ikemi H., Sato T., Kuroki H., Shinozuka K., Minagawa T., Shimatani Y., Stream Ground Water Exchange in Neighbouring Streams with Different Geology, Aquatic Science Meeting 2014, Oregon, USA, 2014.5.22

大山璃久, 一柳英隆, 林博徳, 佐藤辰郎, 皆川朋子, 中島淳, 島谷幸宏, 小水力発電のための取水が溪流生態系に与える影響 ~ 鳥取県加地川加地発電所の事例 ~, 応用生態工学会第 17 回大会, 2013 年 9 月 18 日, 大阪府立大学(大阪)

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

佐藤 辰郎 (Sato Tatsuro)

九州大学・持続可能な社会のための決断科学センター・助教

研究者番号: 20711849