

様式 C-19

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 22 年 5 月 31 日現在

研究種目:基盤研究(B)
研究期間:2007~2009
課題番号:19360224
研究課題名(和文) 河川における生息場の形成・維持に働く土砂流出様式の解明
研究課題名(英文) Patterns of sediment production and outflow required for creation and maintenance of stream habitat structure
研究代表者
竹門 康弘(TAKEMON YASUHIRO)
京都大学・防災研究所・准教授
研究者番号:50222104

研究成果の概要(和文): 森林様式や土石流発生履歴の異なる谷で、土砂生産量や土砂移動量を推定し、生息場構造や底生動物群集との対応関係を追究した。その結果、森林伐採や土石流発生から一定期間後に生息場の多様性が最大化する関係を見出した。また、河床の苔マット被度や浮き石/はまり石率などの生息場特性を説明する土砂供給条件を示した。さらに、ダム下流域の現地調査や人工水路の花粉流下実験を行い、砂州地形による流下粒状有機物の捕捉効率を定量的に示した。

研究成果の概要(英文): Relations of habitat structure and benthic invertebrate community structure to the amount of sediment production and outflow were studied in a set of mountain streams different in histories of deforestation and debris flow. Microhabitat diversity showed the maximum values in a specific period after the last deforestation and/or the last debris flow. Coverage of moss mat on substrates and ratio of exposed stones to partially buried stones could be explained by combined factors of sediment production and the riverbed width. Furthermore, we found that development of sandy bar structure enhanced the trapping efficiency of suspended particulate organic matter (SPOM) by the field observation in the tailwater reaches of dam reservoir and by the laboratory experiment using pine pollens as an SPOM tracer.

交付決定額

(金額単位:円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2007年度 | 6,600,000 | 1,980,000 | 8,580,000 |
| 2008年度 | 5,100,000 | 1,530,000 | 6,630,000 |
| 2009年度 | 3,500,000 | 1,050,000 | 4,550,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 15,200,000 | 4,560,000 | 19,760,000 |

研究分野:応用生態工学

科研費の分科・細目:土木工学・水工水理学

キーワード:河川生態系, 生息場構造, 土砂動態, 土砂生産, 河床地形, 砂州, 流下粒状有機物, 底生動物群集

1. 研究開始当初の背景

先進各国では、植林、治山、砂防、貯水ダム、河川改修や護岸などにより土砂生産が低減した結果、河床低下や沿岸域の土砂不足が社会問題化している。日本では、平成10年に河川審議会が「流砂系の総合的な土砂管理に向けて」を答申し、防災・環境保全・利活用を踏まえた土砂管理計画の策定が求められた。その結果、各地で土砂動態マップの作成、貯水ダムからの排砂や置土などの対策が行なわれるようになったが、その多くは未だ試行段階にあり、環境保全にとって**適正な土砂移動量や滞留量の判断手法の開発**が課題となっている。

また、河川の階層的な構造性は生態学的にも重視され、生物多様性を維持するためには、土石流や洪水などの攪乱によって形成される生息場構造が必要であると考えられるようになった。このため、申請者らは**生息場地形の形成・維持機構を追究する生息場学**の必要性を提案した。

2. 研究の目的

河川における土砂の挙動は、基本的には「土砂の生産過程」、「河道への流出過程」、「河道内での侵食・移動・堆積の過程」によって特徴づけられる。本研究では、これらの特性を併せたものを「土砂流出様式」と定義し、これが河川地形や生息場構造の形成・維持の要因として扱った。河川工学や砂防工学では、「土砂流出様式」を定量的に記述し予測するために、いくつかの流砂量式を開発してきた。通常は、それらに基づいた河床変動モデルと実際の計測によって、河床高の予測等に用いている。その場合は、土砂量の予測が主目的であり、地形類型の成因は目的ではなかったが、本研究では、表-1の四角で囲ったスケールの地形を研究対象として、**生息場の形成・維持の仕組みを水理学的に究明すること**を目的とした。このため、**空隙率、浮石、沈石、載石などの比率、モスマットなどの生息場**を水理計算の目的変数として生息場の動態を予測できるようにすることを目指した。

また、河川管理において、目標とする河床地形や生息場構造を検討するために、**流下粒状有機物の捕捉率、堆積有機物の生産起源、底生動物群集の構成**などを指標として、各種地形条件との関係を明らかにすることも目的とした。これらの関係を用いれば、各河川にとって健全な河川生態系に修復保全するための地形管理目標を設定することが容易になると期待される。

3. 研究の方法

本研究では、河川階層構造のうち蛇行区間・生息場・微生息場スケールの地形類型を

研究対象とした(表1)。また、源流河道から自然堤防河道までの各セグメントに対応した調査地を設け、表2の組み合わせで各課題の調査研究を実施した。

表-1 河川階層に対応した地形類型 (太線で囲った階層地形が本研究の対象となる) (竹門,2004bを改変)

| 河川階層 | 空間スケール | 分類基準 | 類型例 |
|-------------------|----------------------|---|---|
| 河川型 | 流域スケール >1km | 流域面積 縦断曲線 流域配置 流域形状 河道網形状 | 沖積平野型河川 山地急流型河川 大陸型河川 羽状流域、放射状流域、平行流域など |
| 流路・セグメント | 流路スケール 100-1km | 平均勾配 河床材粒径 蛇行程度 | 源流河道 山地溪流河道 扇状地河道 中間地河道 自然堤防河道 デルタ河道 |
| 河川単位・蛇行区間 リーチ | 蛇行区間スケール 1km-10m | 流路形状 縦断形状 湛滞の形態 形成過程 | 直線流路、蛇行流路、網状流路、うろこ状流路 可視の河床型 (Aa, Aa-Bb, Bb, Bc) |
| 生息場 ハビタット | 瀬・淵スケール 100-1m | 流れ形状 局所的勾配 底質配置 形成過程 | 滝 (小滝、薄滝、したたれ) 早瀬 (階段状早瀬、岩盤早瀬、荒瀬) 早瀬 (楕円型早瀬、洗瀬) 平瀬 (平瀬、淵) glide 淵 (M型、R型、S型、D型、O型、B型; 背水型淵) 洲 (固定砂洲、交互砂洲、うろこ状砂洲) |
| 微生息場 マイクロハビタット | 砂溜・砂堆スケール 5m-10cm | 底質配置 形成過程 | 階段状早瀬の礫列(リップ) 砂溜・砂堆・反砂堆 |
| | 底質粒径スケール 1m-1cm | 流速 底質状態 (浮き石、載り石、はまり石、沈み石) 水質 植生 | 無機底質類型 (岩盤、巨石、石礫、砂利、砂、粘土) 有機底質類型 (樹流木、リターパック (落葉落枝)) 植生型 (モスマット、沈水根、抽水植物、沈水植物、浮葉植物) 位置 (上面、側面、下面、湿岩、河床間隙水域) |

表-2. 本研究の調査地と研究分担者の配置関係

| セグメント | 調査地 | 研究担当者 |
|--------|---------------------------------|--------------------------|
| 源流河道 | 富山県高草原川源流 | 藤田・堤・竹門 |
| 山地溪流河道 | 奈良県十津川源流 和歌山県有田川源流 | 竹門・小林・天野 |
| 中間地河道 | 栃木県鬼怒川流域 福井県真名川流域 | 天野・小林 角・竹門 |
| 自然堤防河道 | 京都府木津川流域 京都府桂川流域 京都府宇治川流域 | 竹門・角 武藤・竹門 竹門・角・武藤 |

(1) 土砂流出様式と生息場構造の対応関係

①**土砂生産量の推定**：山地斜面の風化・侵食による土砂生産は、冬期に地盤が凍結融解を繰り返すことに起因する。このような凍結融解による土砂生産量を、現地観測、地盤の熱伝導解析による凍結融解とそれによる土砂生産現象のモデル、ならびに大気と地盤両層の熱移動をそれらの境界である地表面での熱収支を考慮して計算し、地表を含む地中温度分布を求めるモデルによって推定した。

②**土砂移動量推定**：河床に設置した金属パイプに流砂が衝突するときの音をカウントして掃流砂量を計測するハイドロフォンによって、流砂量を直接計測する方法を用いた。岐阜県高草原側流域の足洗谷の各支川に、計5機のハイドロフォンを設置し、流域全体の土砂収支観測を行った。

③**山地河道の生息環境測定**：土砂生産量と移動量の推定を行った谷で、小滝、早瀬、平瀬、淵、ワンド、側流、タマリなどの生息場

出現率や15種の微生物の出現率を測るとともに、苔マットの被度や浮き石・はまり石率、底生動物群集の種組成などの調査を行った(図1, 2).

④土石流の履歴効果測定：和歌山県有田川と奈良県十津川の森林伐採履歴の異なる谷における河床地形と微生物場組成の調査によって、土石流発生から数十年スケールの生息場組成や底生動物群集の変化を分析した。

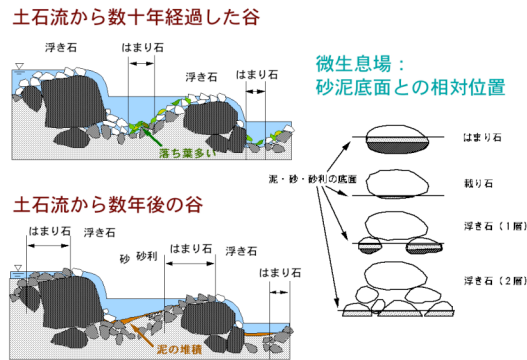


図1. 底質の状態による微生物場所類型

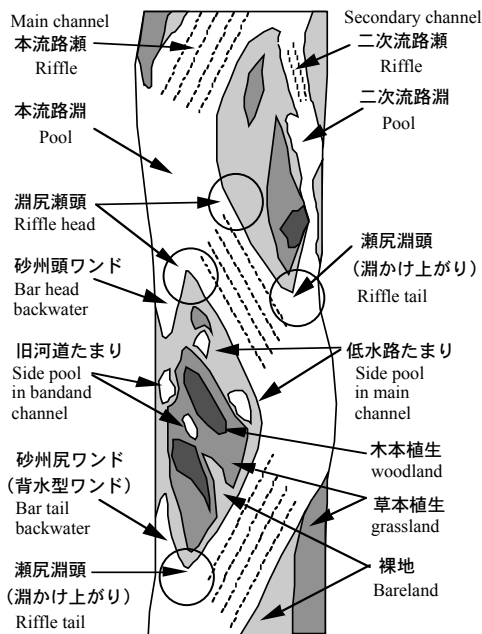


図2. 自然堤防河道における生息場類型

(2) 生息場形成・機能に関する研究

①ダム下流河川の生息場構造：貯水ダム下流では土砂供給が遮断量や通過量を履歴的に推定できるため、本研究の目的に適った調査が可能である。そこで、鬼怒川、九頭竜川、宇治川、木津川、紀ノ川、十津川の各流域でダム下流域の生息場調査を行った。現地では主に微生物の出現率、流下・堆積有機物、底生動物群集の調査を行い、航空写真や数値地図を用いて地形解析を行った。

②河床地形の流下粒状有機物捕捉効率：炭素・窒素安定同位体比を用いてプランクトンをトレーサーとした流下粒状有機物の捕捉効率測定法を開発し、各地の貯水ダム下流で試料の採集と分析を行った。地形条件の異なる河川間の比較によって、捕捉効率に影響する河床地形条件の分析を行った。

③河床地形形成水路実験：淀川水系桂川の落差工・堰を想定対象とし、縦断方向の連続性改善を企図した構造物の撤去を想定した水路実験を行った(宇治川水理実験所)。実験では、均一粒径の河床材料を用い、平均年最大流量時に作用する掃流力を想定した条件を与えて、様々境界条件と形成された河床地形との関係を分析した。掲載された砂州流路に一定量の松花粉(チョウセンゴヨウマツ)を流下させ、直後に水位を落として砂州地形の各部分(図2参照)捕捉された花粉密度を表甫抽出採集によって測定した。

(3) 生息場予測モデルの開発

①階段状河床の生息場描画モデル：流水や流砂の境界条件が生息場に与える影響を視覚的に評価するために、階段状河床のユニット形状を予測するモデルを作成した。階段状河床の小滝の位置を、洪水履歴の洪水規模に応じた波長のステップを重ね合わせる方法で、河幅はレジーム則によって、ステップの構成材料や波高は各流量に対する移動限界粒径から算定した。つぎに、淵の微生物場については、ユニットへの流れ込み形態を集中型と分散型に分類して出現率を調べるとともに、苔マット、リターバックの出現位置を対応させた描画モデルを作成した。

②河床材料の空隙率予測モデル：河床材料の空隙が生態系評価に重要であることに着目し、粒度分布の分類、空隙率と粒度分布の関係、粒度分布の変化解析できる河床変動モデルを開発した。

③構造物撤去による河床地形予測：宇治川水理実験所の水路実験では、堰の撤去条件ならびに流量条件を様々に変えた条件で河床地形の変化をモニタリングし、境界条件と河床地形との関係について経験則を見出した。

4. 研究成果

(1) 土砂流出様式と生息場構造の対応関係

①土砂生産量の推定：高原川源流域では、凍結融解による土砂生産を表すシミュレーションモデルにより、気温・日射・風速等の一般的な気象要素から凍結融解作用を計算できるようになった。このモデルを用いて流域単位の土砂生産ポテンシャル分布を計算し、小流域における土砂移動特性と高い相関が得られた。さらに、将来の気温上昇を想定した入力値を用いた計算では、土砂生産ポテンシャルは、気温上昇に伴って一般的には減

少することが示された。

②土砂移動量推定：土砂生産量や移動量の異なる谷について、5台のハイドロフォンで土砂移動量のモニタリングを行った結果、複数の降雨イベントに対して全地点で正常に流砂パルスが観測され、流域全体での土砂移動現象を捉えることができた。また、土砂生産量の実測とハイドロフォンを用いたキャリブレーションによって、粒径ごとの流砂量の定量化が可能となり、実際の降雨イベントにおける流砂量を精度良く定量化できるようになった。

③山地河道の生息環境測定：高原川源流域において、土砂供給量や河川地形と生息場類型や生物相との関係について群分析、相関分析、回帰分析、主成分分析を行い、苔被度密度や浮き石／はまり石率などの生息場特性を説明する土砂供給条件を明らかにした。とくに苔マットの被覆密度は土砂動態の攪乱指標として優れていることが分かった(図3)。

④土石流の履歴効果測定：和歌山県有田川と奈良県十津川の森林伐採履歴の異なる谷における河床地形と微生物相組成の調査によって、土石流発生から数十年スケールの生息場組成変化を明らかにし、溪流の生息場多様性を維持する土砂攪乱の発生頻度・空間分布を検討した。

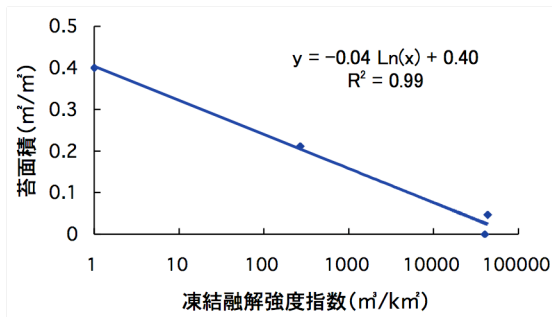


図3. 苔面積(河床面積あたりの密度)と流域の凍結融解強度指数との関係式

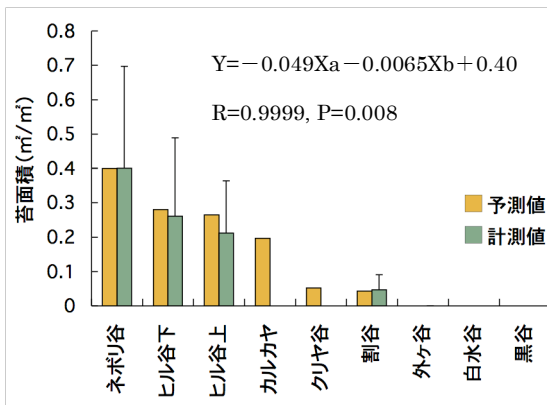


図4. 流域の凍結融解強度指数(Xa)と河道幅(Xb)を用いた苔面積(河床面積あたりの密度)(Y)の予測結果。

(2) 生息場形成・機能に関する研究

①ダム下流河川の生息場構造：鬼怒川上流のダム流域の調査によって、ダム下流では人頭サイズの礫(10-40cm)が少ないことがわかった。出水時の掃流力と可動粒径の関係から人頭礫はダム上流に滞留するため、ダム下流で小径礫が滞留しにくくなり岩床の拡大を加速することが示唆された。また、底生動物現存量は人頭礫が優占する早瀬で大きく、岩床では限られた分類群しか生息しないことがわかった。ダム下流では砂礫、特に人頭礫の減少によって、流れと河床空隙を必要とする底生動物の生息場が減少し、区間全体としての底生動物量が大きく減少したと考えられる。

②河床地形の流下粒状有機物捕捉効率：宇治川、木津川、布目川、真名川流域など、粗粒化程度の異なる貯水ダム下流河道で測定した各種有機物の安定同位体比の測定結果から、貯水池由来の粒状有機物の低減係数に大きな差異が認められた(図5)。各河川の地形との相関分析の結果、河床の径深が小さく、水際線が入り組んだ河道ほど流下粒状有機物の捕捉効率が高くなることを示した。

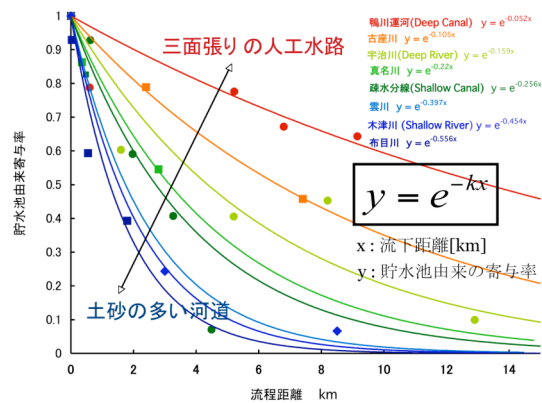


図5. 貯水ダム下流河道における貯水池由来の粒状有機物の低減係数の比較結果。

③河床地形形成水路実験：砂礫堆の有機物トラップ機能を検証するために、様々な形状の砂州地形を形成した実験水路にマツ花粉を流下させる実験を行い、砂州の上流側や側面で浮遊有機物の捕捉機能が高い事実を見出した(図6)。

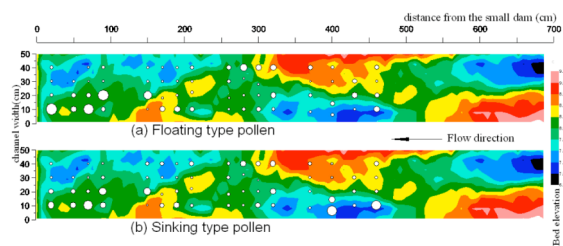


図6. 実験水路に流下させた花粉(比重の異なる2型)の河床捕捉密度の調査事例。白丸のサイズが花粉密度を示す。

(3) 生息場予測モデルの開発

①**階段状河床の生息場描画モデル**: 階段状河床のステップ波長を洪水履歴に応じて重ね合わせ、河幅をレジーム則で予測し、構成材料や波高を各流量に対する移動限界粒径から算定する方法で、階段状河床形のユニットとマイクロハビタットの図を描くことができた。この方法を実際の溪流に適用した結果、階段状河床の形状特性やマイクロハビタットの分布特性を十分再現しうることが示された。

②**河床材料の空隙率予測モデル**: 河床材料の空隙が生態系評価に重要であることに着目し、粒度分布の分類、空隙率と粒度分布の関係、粒度分布の変化解析できる河床変動モデルを開発した。このモデルによって、流出する土砂粒径条件を変えた場合の空隙率の変化を予測できるようになった。ただし、現場の現象との対比により検証する課題が残されている。

③**構造物撤去による河床地形予測**: 宇治川水理実験所の水路実験によって、初期条件として構造物の上流が満砂の場合、構造物の撤去によって上流側河床が低下すると共に、上流側の砂州地形が、撤去面積に応じて短対角州→交互砂州→(水みちの発達)→複列砂州のように遷移することが示された。また、平均年最大流量は砂州に代表される中規模河床形態の形成および移動を規定するのに対し、小流量は主として構造物近傍の局所河床低下および水みちの発達に寄与することがわかった。構造物撤去後の河床変動プロセスは、上流部に形成される砂州地形が単純に下流へ移動するのではなく、撤去直後に構造物直上部に水みちの拡大に伴う局所的な河床低下が起こり、それが上流から移動してきた砂州により一旦埋め戻され、その後上流へ向けて徐々に河床低下が起こり初期状態の河床こう配へ漸近するという複雑な過程をたどると考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 36 件)

- ①Ock, G. and Takemon Y. : Estimation of Transport Distance of Fine Particulate Organic Matter in relation to Channel morphology in Tailwaters of the Lake Biwa and Reservoir Dams. *Landscape and Ecological Engineering*, 査読有, 2010, DOI: 10.1007/s11355-009-0099-y
- ②Kobayashi S., Gomi T., Sidle R.C. and Takemon Y. : Disturbances structuring macroinvertebrate communities in steep headwater streams: relative importance

of forest clearcutting and debris flow occurrence. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 査読有, Vol. 67, 2010, pp. 427-444.

- ③Kato Y., Hori M., Okuda N., Tayasu I. and Takemon Y. : Spatial heterogeneity of trophic pathways in the invertebrate community of a temperate bog. *Freshwater Biology*, 査読有, Vol. 55, 2009, pp. 450-462.

- ④小林草平・中西哲・藤原正季・矢島良紀・赤松史一・天野邦彦: 山地河道のダム下流における河床露盤化と河床材料特性, 河川技術論文集, 査読有, Vol. 15, 2009, pp. 453-458.

- ⑤角 哲也, 藤田正治: 下流河川への土砂還元の現状と課題, 河川技術論文集, 査読有, Vol. 15, 2009, pp. 459-464.

- ⑥渡辺幸三, 八重樫咲子, 菊池裕二, 竹門康弘, 風間聡, 大村達夫: DNA 多型マーカーによるヒゲナガカワトビケラの流域内移動分散パターンの評価, *水環境学会誌*, 査読有, Vol. 32, 2009, pp. 253-258,

- ⑦Muto, Y., Kanda, K., Zhang, H. and Nakagawa, H. : An experimental study on upstream bed response due to falling works improvement, International Association of Hydro-Environment Engineering and Research Congress, 査読有, Vol. 33, 2009, CDROM.

- ⑧Zhang, H., Kanda, K., Muto, Y. and Nakagawa, H. Numerical Simulation of Bed Evolution Process Due to Weir Reconstruction, International Association of Hydro-Environment Engineering and Research Congress, 査読有, Vol. 33, 2009, CDROM.

- ⑨Kohzu A, Tayasu I, Yoshimizu C, Maruyama A, Kohmatsu Y, Hyodo F, Onoda Y, Igeta A, Matsui K, Nakano T, Wada E, Nagata T and Takemon Y : Nitrogen-stable isotopic signatures of basal food items, primary consumers and omnivores in rivers with different levels of human impact. *Ecological Research*, 査読有, Vol. 24, 2009, pp. 127-136.

- ⑩Takemon, Y., Imai, Y., Kohzu, A., Nagata, T. and Ikebuchi, S. : Spatial distribution patterns of allochthonous and autochthonous benthic particulate organic matter on the riverbed of a mountain stream in Kyoto, Japan. *Water Down Under 2008*, 査読有, 2008, pp. 2393-2403.

- ⑪Watanabe, K., Monaghan, M. T., Takemon, Y. and Omura, T. : Biodilution of heavy metals in a stream macroinvertebrate

food web: Evidence from stable isotope analysis. *Science of the Total Environments*, 査読有, Vol.394, .2008, pp.57-67.

- ⑫Doi, H., Takemon, Y., Ohta, T., Ishida Y. and Kikuchi, E.: Effect of reach scale canopy cover on trophic pathways of caddisfly larvae in a Japanese mountain stream. *Marine and Freshwater Research*, 査読有, Vol.58, 2007, pp.811-817.

[学会発表] (計 33 件)

- ①宇野裕美・竹門康弘・北山兼弘・奥田昇, 熱帯山地林河川の食物網構造と栄養起源の空間異質性, 日本生態学会第 57 回全国大会, 2010.3.19, 東京都.
- ②堤大三, 凍結融解による土砂生産, 土木学会基礎水理部会シンポジウム, 2009.12.21, 東京都.
- ③Ock G, Takemon Y., Muto Y. Dam impacts on POM dynamics and its ecological response in dam tailwater channel. 7th Annual Joint Seminar between Korea and Japan on Ecology and Civil engineering, 2009.9.26, Saitama City.
- ④玉基英, 竹門康弘, 武藤裕則, ダム下流河川の粒状有機物の動態における河道地形の役割, 応用生態工学会第 13 回埼玉大会, 2009.9.25, さいたま市.
- ⑤堤大三, 竹門康弘, 藤田正治, 泉山寛明, 野村理絵, 山地流域における土砂生産と溪流生息場構造との関係評価の試み, 土木学会環境水理部会シンポジウム, 2009.6.19-20. 名護市.
- ⑥鈴木裕一郎・野村 理絵・藤田 正治・竹門康弘・竹林 洋史・堤 大三, 洪水による河川地形と微生物場の変化, 砂防学会, 2009.5.28, 広島市.
- ⑦堤大三, 竹門康弘, 藤田正治, 野村理絵, 山地流域での土砂生産に関わる凍結融解強度分布, 砂防学会, 2009.5.28, 広島市.

[図書] (計 7 件)

- ①竹門康弘, 柿田川における底生動物群集の構造と特徴, 柿田川生態系研究会編, 静岡学術出版, 柿田川の自然-湧水を科学する-, 2010, 47-81.
- ②Gregory L. Morris 著, 角 哲也・岡野真久 (監修), 技報堂出版, 貯水池土砂管理ハンドブック, 2010, 726.
- ③竹門康弘, 第 6 章ダム下流河川の底質環境と底生動物群集の変化, 第 7 章ダム湖プランクトンの流下距離, 池淵周一編著, 京都大学学術出版会, ダムと環境の科学 I ダム下流生態系, 2009, 147-169, 184-188.
- ④角 哲也, 第 4 章ダムによる流況・流砂の変化, 第 8 章ダム下流の生態系保全策, 池淵

周一編著, 京都大学学術出版会, ダムと環境の科学 I ダム下流生態系, 2009, 81-115. 195-209,

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹門 康弘 (TAKEMON YASUHIRO)
京都大学・防災研究所・准教授
研究者番号: 50222104

(2) 研究分担者

藤田 正治 (FUJITA MASAHARU)
京都大学・防災研究所・教授
研究者番号: 60181369

角 哲也 (SUMI TETSUYA)
京都大学・防災研究所・教授
研究者番号: 40311732

武藤 裕則 (MUTO YASUNORI)
京都大学・防災研究所・准教授
研究者番号: 40263157

堤 大三 (TSUTSUMI DAIZO)
京都大学・防災研究所・准教授
研究者番号: 40372552

(3) 連携研究者

天野 邦彦 (AMANO KUNIHICO)
国土技術政策総合研究所・環境研究部・河川環境研究室長
研究者番号: 50280714

小林 草平 (KOBAYASHI SOHEI)
独立行政法人土木研究所・水環境研究グループ・専門研究員
研究者番号: 20378920