

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：15501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25550093

研究課題名(和文) エントロピー最小化による持続可能な自然共生型流域圏の構築に関する基礎的検討

研究課題名(英文) Study on Sustainable Eco-Compatible River-Basin by minimizing entropy

研究代表者

赤松 良久 (Akamatsu, Yoshihisa)

山口大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：30448584

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では流域内の自然エネルギーフローを把握するために、流域の大動脈である河川におけるエネルギー生産量を明らかにすることを目標として、河川内の魚類や底生動物量の環境変化に応じた変化を予測する一般化線形モデル(GLM)を構築した。その結果、魚類の河川利用形態別の4区分、底生動物は主要4分類群全てでモデル構築が可能であった。さらに、佐波川の国管理区間全域において、取水が有る場合、無い場合の2通りで流れ場の計算を行い、算出された結果に生物量予測モデルを外挿した結果、取水の影響により生物量が減少することが予測された。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to develop the spatial biomass prediction model of fish and benthic invertebrate in the water system of Saba River. Field surveys were conducted to understand the relation between hydraulic characteristics and biomass of fish and benthic invertebrate, and we established GLM to predict the biomass using the hydraulic characteristics. The change amount of biomass of benthic invertebrate in mainstream of Saba River is predicted by using GLM and calculated hydraulic characteristics by fluid models. The result revealed that the total biomass of fish and benthic invertebrate was reduced by the negative impact of water intake.

研究分野：環境水理学

キーワード：エントロピー エネルギーフロー 生態系モデル 流域圏 佐波川

1. 研究開始当初の背景

今日、人類は地球規模の気候変動に伴う災害の増加や生物多様性の減少、原子力から自然エネルギーへの転換など大きな問題を抱えている。ニュートン以来の機械論的世界観は限界を迎え、化石・原子力エネルギーに依存した社会から脱却し、自然環境と共生した低炭素・脱原発社会へのパラダイムシフトが求められている。我が国においても様々な脱化石エネルギーに向けた取り組みが行われているが、その多くは各分野における個別の対策であり、社会システムとしての持続可能性や方向性を示す研究は限られている。また、社会システムの持続可能性や持続的開発を環境と経済の関係から論じた研究は膨大に存在するが¹⁾、両側面を統合した定量的評価指標はほとんどない。申請者はこれまで自然と社会構造の基本組織体である流域圏に着目した水・物質循環に関わる研究を実施しており、環境的側面と経済的側面に共通するエネルギーフローやエネルギー効率に着目することによって、流域内での自然再生や社会システムの改善に向けた様々な取り組みをエントロピー（無効エネルギー）排出量最小化を持続性の基準として定量的に評価できるとの着想に至った。

2. 研究の目的

本研究では流域内の自然エネルギーフローを把握するために、流域の大動脈である河川におけるエネルギー生産量を明らかにすることを目標として、河川内の魚類や底生動物量を予測するモデルを構築した。さらに、そのモデルを用いて、人間活動（堰による取水）が河川内の生物量に与える影響を明らかにした。

3. 研究の方法

(1) 現地調査

山口県中部を流れる佐波川を対象に現地観測を行った。佐波川は幹川流路延長56km、流域面積460km²の一級水系であり、直轄区間(-1k200~26k200)の本流に15基の堰が存在し、堤高の低い2基を除く13基に魚道が設置されている。佐波川における現地観測概要を以下に示す。

魚類

佐波川本流の St.2, St.3, St.4, St.6 の合計4地点(図-1)を対象に、2014年5月から2014年10月にかけて1カ月に1回、魚類の潜水目視調査を行った。各地点、平瀬を中心とし、河川の縦断(上下流)方向に80m前後の調査範囲を設定した。調査期間中の各地点の流速は、St.2で0.510±0.141m/s、St.3では0.854±0.310m/s、St.4では0.594±0.177m/s、St.6では0.686±0.175m/s(平均値±標準偏差)であった。それぞれの範囲内において、約15m間隔で河川の横断方向に6つのラインを設置し、横断方向にスノーケリングによる潜水目視調査を行い、ラインの前後0.5m、合計1m

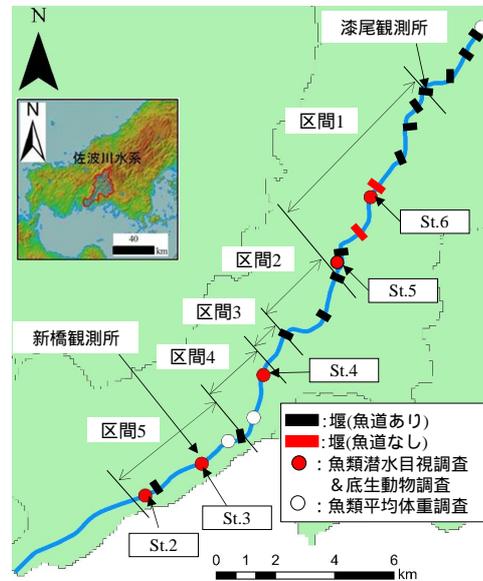


図-1 調査地点と計算区間

内に出現したすべての魚類を同定したのち、「未成魚サイズ」であるか、「成魚サイズ」であるかを区別し、個体数を記録した。記録された各種・各発育段階の個体数(n)を調査面積(各ラインの潜水距離(m)×1m)で除し、6ラインの平均密度(n/m²)から、各地点の各種・各発育段階別の密度を算出した。

佐波川水系内の3地点(の地点)において(図-1)、2014年7月22,24,25日と、2014年10月15日から10月17日にかけて2回、採集調査を行うことにより、各種・各発育段階の平均体重を算出した。採集には、電気ショックャー(LR-24型、スミスルート社)および手網を用いた。採集された魚類はすべて現地で種同定した後、潜水目視観察者により「成魚サイズ」および「未成魚サイズ」に区分し、各個体の湿重量を測定し、平均湿重量を算出した。

底生動物

底生動物の季節変化を明らかにすることを目的として、佐波川本流の Stn.2, Stn.3, Stn.4, Stn.6 の合計4箇所を対象に、2014年4月~2015年3月まで、1ヶ月に1回程度の合計11回の底生動物量の調査を行った(図-1)。各地点で50cm×50cmのコドラートを設置し、コドラート内の河床を攪乱し、下流に設置したベントスサーバーネット(目合0.1mm)を用いて採取した。同時に、採集箇所の流速・水深を測定した。これらの作業を、1箇所につき3地点行った。採取した底生動物は持ち帰り、単位面積当たりの乾燥重量を測定した。

底生動物量と環境条件の関係性を明らかにするための調査を2014年12月11日、12日、19日に、佐波川本流の Stn.2 の6地点、Stn.3 の8地点、Stn.4 の7地点、Stn.5 の6地点、Stn.6 の8地点の合計35地点で行った(図-1)。各 Stn とともにできるだけ多様な水理環境(流速:0.01~0.97m/s、水深:30~100cm)

をカバーすることを目的とし、瀬や淵にかけて、河川の縦断方向（上下流方向）に約 30m 間隔で調査地点を設定した。それぞれの地点において、50cm×50cm のコドラートを設置し、コドラート内の河床を攪乱し、下流に設置したサーブネットを用いて底生動物を採取し、同時に、採集箇所の流速・水深を測定した。採取した底生動物は 70%エタノールで保存し、研究室に持ち帰り、トンボ目以外は科レベルでの同定を行った後、単位面積当たりの乾燥重量を測定した。河床材料に関して、コドラート内の粒径 64mm 以上の表在する礫については、短径および長径を計測し、その結果から平均粒径を算出した。64 mm 未満の河床材料は、持ち帰り乾燥後、2mm のふるいを通過する砂分率を測定した。

(2) 生物量予測モデル

流れ場の計算

本研究では、取水による流量変化が底生動物に与える影響を明らかにするために、取水が行われている場合、行われていない場合の、それぞれの流れ場を算出し、その結果に生物量予測モデルを外挿することによって、底生動物・魚類量の変化を見積もった。

流れ場の計算には、河川の流れ場の計算ソフトウェアである iRIC (International River Interface Cooperative)ソフトウェアを用いた。計算に用いたソルバーについては、一般座標系を用いて河川の非定常平面二次元流れの計算を行うことが可能な Nay2D-Flood ソルバーを用いた。計算格子は、2009 年に行われた 200m 間隔の河川横断測量結果を用いた。計算区間は図-1 に示す漆尾観測所を上流端とし、Stn.2 直下を下流端とした。また、取水や支流による影響を考慮するため、6 分割して計算を行った（図-1）。底生動物に関しては 12 月を、魚類に対して 8 月を対象として計算を行った。

支流からの横流入に関しては以下のように算出した。まず、上流端の漆尾観測所の流量（8月の平水流量 18.09m³/s、12月の平水流量 7.32m³/s）と全区間の合計取水流量（8月の平水取水量 6.25m³/s、12月の平水取水量 1.01m³/s）を足した新橋観測所の平水流量（8月の平水流量 24.34m³/s、12月の平水流量 8.33m³/s）の流量差を、計算区間内の全横流入量とした。次にそれを各支流の持つ集水面積割合で割り振って支流の流量を算出した。区間 1 の上流端の流量は最上流端の漆尾観測所の流量を与える。取水を考慮する場合は、区間 2 の上流端では区間 1 の上流端流量に区間 1 の横流入を加え区間 1 の堰による取水量を差し引いたものを与えた。以降、区間 3~6 についても同様に上流端流量を算出した。一方で、取水を考慮しない場合は同様の計算を取水量分を差し引かずに行った。また、下流端に関しては全区間で等流条件として計算を行った。

生物量予測モデルの構築

空間分布調査結果を対象として、目的変数

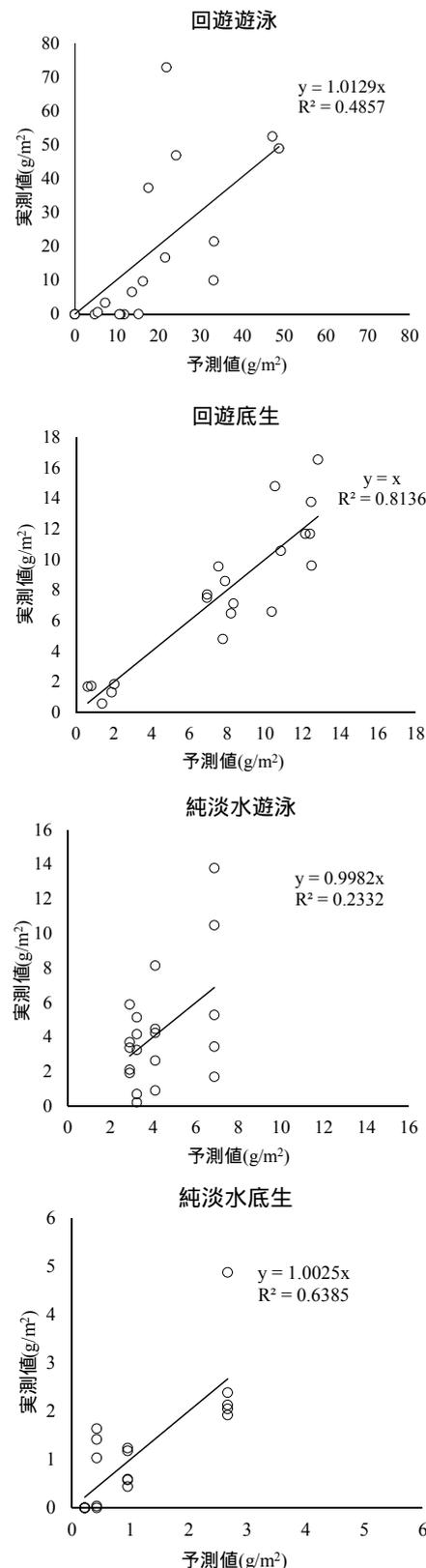


図-2 GLM による魚類量の予測値と実測値の比較

を各分類群の乾燥重量、説明変数を流速、水深、河口からの距離、64mm 以上の礫の平均中径、64mm 未満の河床材料に占める砂分率 (%)とした、一般化線形モデル (GLM) を構築した。また、いずれかの分類群の重量で、

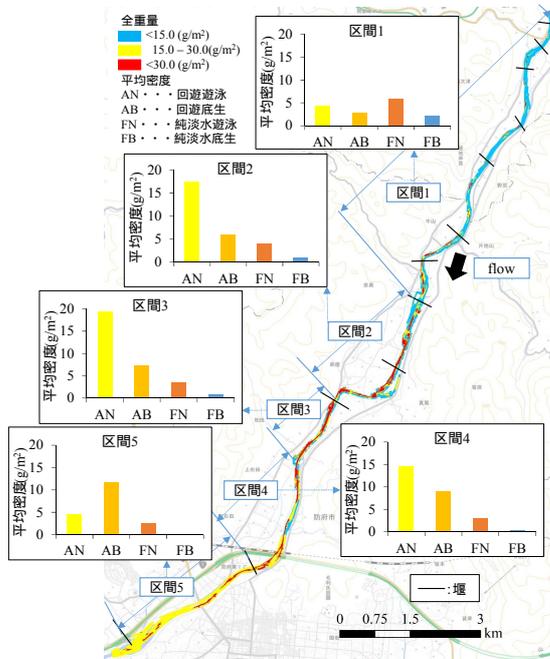


図-3 直轄区間全域における全魚類量の空間分布

各変数が中程度で最大値をとる傾向がみられた場合、各変数の2乗項も説明変数として用いた。モデル選択には赤池情報量基準(AIC)を用い、AICが低い10モデルで実測値と予測値を単回帰分析することにより予測精度を検証した。本研究では、10モデル中最もR2値が高かったものをベストモデルとした。なお、解析には統計ソフトR3.1.2を

4. 研究成果

(1) 魚類

「回遊遊泳魚」、「回遊底生魚」、「純淡水遊泳魚」、「純淡水底生魚」すべてにおいてモデルの構築が可能であった。以下に、AICを基準に選択したベストモデルを示す。なお、Vは流速(m/s)、河口からの距離はL(km)とする。

・回遊遊泳魚

$$(g/m^2) = 46.07822 \times V + 8.67235 \times L - 0.39414 \times L^2 - 51.42240$$

・回遊底生魚

$$(g/m^2) = -2.77748 \times V^2 - 0.74530 \times L + 17.62009$$

・純淡水遊泳魚

$$(g/m^2) = 0.01109 \times L^2 + 2.53649$$

・純淡水底生魚

$$(g/m^2) = 0.00682 \times L^2 - 0.00928$$

これらの結果より、回遊遊泳魚の重量は、流速が速く、河口からの距離が中程度の場合に増加し、回遊底生魚の重量は、流速が遅く、河口からの距離が近い場合に増加し、純淡水遊泳魚および純淡水底生魚の重量は、河口からの距離が遠い場合に増加することが示された。

ベストモデルで算出した予測値と実測値

を単回帰分析し、精度検証を行った結果を図-2に示している。R2を基準にした場合、回遊底生魚の精度が0.8136と最も高く、次に純淡水底生魚、回遊遊泳魚、純淡水遊泳魚と続いた。これらの結果から、本研究の手法を用いることにより、佐波川に出現する淡水魚類の生物量は予測できること、特に底生魚については高精度で予測可能であることが示されたといえる。

調査期間である夏季の平水時の流れ場を、取水や支流による横流入を加味して算出し、その結果に、「回遊遊泳魚」、「回遊底生魚」、「純淡水遊泳魚」、「純淡水底生魚」のベストモデルを外挿して得られた全魚類量の空間分布を図-3に示す。これらの結果から、佐波川水系では、回遊魚は種数としては少ないが重量に占める割合は非常に多いため、生態系において重要な位置を占めていることが考えられる。回遊魚は、堰やダムなどの横断構造物によって遡上や流下が阻害されることがあるが²⁾、これほど多くの比率を占める魚類の移動阻害による河川生態系の変容は大きいことが予想される。今回は、本川にダムおよび堰の両方が存在する河川でのケースであったため、今後は、同様の研究を堰やダムがない河川でも行うことにより、横断構造物が生態系に与える影響を定量評価できる可能性がある。また、本研究手法は、生物量予測モデル、流れ場の計算とともに、高精度のモデルが構築できた場合には入れ替え可能であるため、今後、環境DNA分析等の発展により魚類密度がより高精度に推定できるようになった場合や、流域内の河床材料の粒径が広域で予測できるようになった場合は、より精度の高い総重量推定が可能になる。

(2) 底生動物

生物量予測モデルの結果

総重量の約90%を占めていた優占4分類群であるヒゲナガカワトビケラ科、シマトビケラ科、ヒラタドロムシ科、トンボ目の4分類群を解析対象とし、それぞれの乾燥重量と物理環境との関連性を明らかにするためのモデルを構築した。GLMの結果、4分類群全てでモデルの構築が可能だった。全ての分類群において、ベストモデルに河床材料(64mm以上の礫中径(mm)、粒径が2mm未満の砂分率(%))が選択されているが、河床材料の空間分布をシミュレーションで再現することが困難であることから、そのまま算出した流れ場に外挿することはできない。そこで、河床材料がパラメータに選択されておらず、かつAICが低い上位10モデルで実測値と予測値の予測精度について、新たに検討を行った。なお、単回帰分析のR2値を予測精度の指標として用い、最も精度の良いモデルをベストモデルとした。

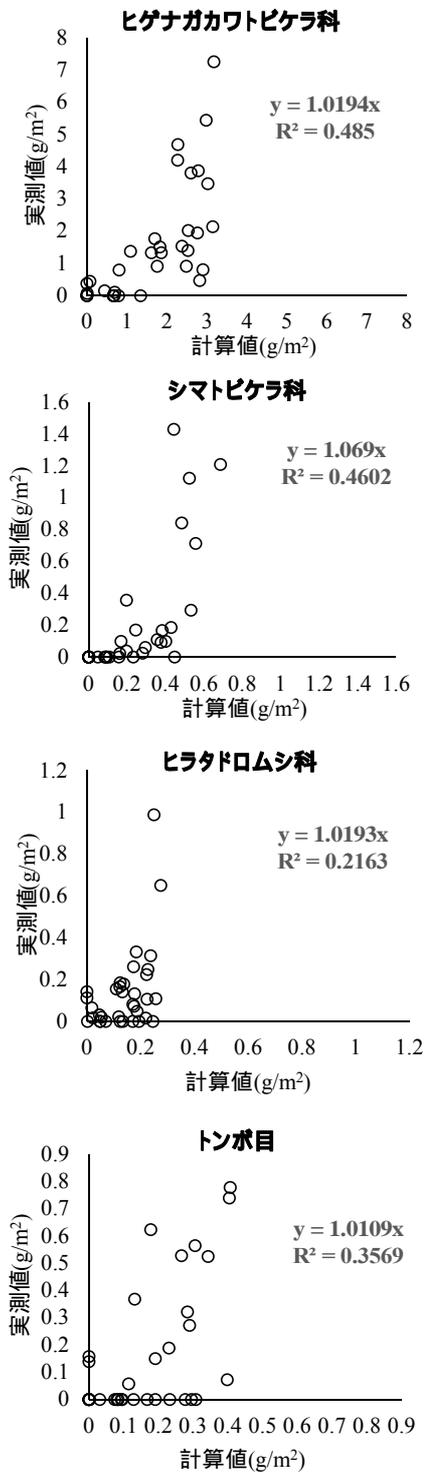


図-4 GLM による底生動物量の予測値と実測値との比較

河床材料を用いない場合のベストモデルを以下に示す。

- ・ヒゲナガカワトビケラ科
 $(g/m^2) = 12.68438 \times V - 10.64801 \times V^2 - 0.01659 \times D - 0.03321$
- ・シマトビケラ科
 $(g/m^2) = 0.46213 \times V - 0.0650 \times D + 0.01612 \times L + 0.15899$
- ・ヒラタドROMシ科
 $(g/m^2) = -0.15484 \times V + 0.05191 \times L - 0.00171 \times L^2 - 0.11315$
- ・トンボ目

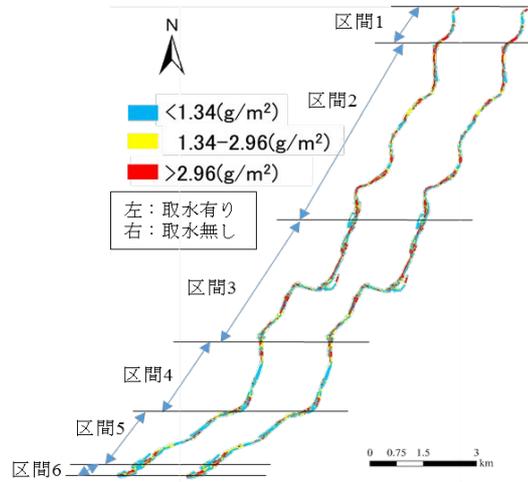


図-5 計算区間における4区分の底生動物の合計量の空間分布

$$(g/m^2) = 0.79155 \times V - 0.72101 \times V^2 + 0.00090 \times L^2 - 0.11702$$

図-4 より、全ての分類群において、河床材料を用いた場合のほうが、用いない場合よりも精度が高くなることを見て取れるが、最優占分類群であるヒゲナガカワトビケラ科およびシマトビケラ科については、河床材料を用いない場合でも、比較的高精度のモデルが構築できた。一方、ヒラタドROMシ科およびトンボ目については、河床材料を用いない場合に精度の低いモデルとなった。これらの分類群の重量を高精度に予測するためには、河床材料のデータは必要不可欠であることが示唆された。本研究で、取水による底生動物量への影響を見る際には、ヒラタドROMシ科およびトンボ目の現存量は、ヒゲナガカワトビケラ科およびシマトビケラ科に比べて小さかったため、これらの分類群が全生物量に対する影響は低いと判断し、これらの分類群についても、河床材料を用いないモデルを採用した。

取水による生物量への影響

iRIC ソフトウェアを用いて算出した取水が行われている場合と行われていない場合の流れ場に、生物量予測モデルを外挿して得られる4区分の底生動物の合計量の分布を図-5に示す。国管理区間内における4区分の底生動物の合計量は、取水が行われている場合と行われていない場合の両方で、下流部で少なく、上流部で多い傾向が見られた。また、取水の影響で流速が変化する金波用水(区間4上流端)より下流部、防府総合用水(区間5上流端)より下流部では、取水無しの場合に、底生動物量が増加する傾向が見られた。

次に、取水が行われている場合と行われていない場合の両方で、国管理区間全体における4分類群それぞれの総重量(kg)と、平均密度(g/m^2)の算出を行った。総重量および平均密度の算出結果をそれぞれ表-1,2に示す。4分類群全てにおいて、取水が行われていない場合に比べ、取水が行われている場合に生物量が減少すると予測された。特に、佐波川で

表-1 取水の有無における全重量の比較

| | ヒゲナガ カワトビ ケラ科 | シマト ビケラ 科 | ヒラタ ドロム シ科 | トンボ目 | 全体 |
|----------|---------------------|-----------------|------------------|-------|--------|
| 取水なし(kg) | 2004.8 | 426.0 | 212.1 | 223.0 | 2865.9 |
| 取水有り(kg) | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 取水による影響 | 5.0%減 | 2.9%減 | 0.2%減 | 2.8%減 | 4.1%減 |

表-2 取水の有無における平均密度の比較

| | ヒゲナガ カワトビ ケラ科 | シマト ビケラ 科 | ヒラタ ドロム シ科 | トンボ目 | 全体 |
|-------------------------|---------------------|-----------------|------------------|------|-------|
| 取水なし(g/m ³) | 1.39 | 0.30 | 0.15 | 0.15 | 1.99 |
| 取水有り(g/m ³) | 1.36 | 0.29 | 0.15 | 0.15 | 1.96 |
| 取水による影響 | 2.5%減 | 0.4%減 | 変化無し | 変化無し | 1.7%減 |

最も多い生物群であるヒゲナガカワトビケラ科については、取水による影響で5.0%の総重量減少、2.5%の平均密度減少が予測された。また、シマトビケラ科は、取水による影響で2.9%の総重量減少、0.4%の平均密度減少が予測された。それらの影響により、全生物量においても4.1%の総重量減少、1.7%の平均密度減少が予測された。これらの結果から、佐波川水系における堰による取水は、非増水期の底生動物量に負の影響を及ぼしている可能性が示唆された。

参考文献

- 1) 中口毅博:持続可能な発展の指標に関する国内外の動向と課題, 環境情報科学, Vol.29(3),p11-15, 2000.
- 2) Morita, K. and Yamamoto, S.: Effects of habitat fragmentation by damming on the persistence of stream-dwelling charr populations, Conservation Biology, Vol.16, No.5, pp.1318-1323, 2002.

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 4 件)

- 1) 乾隆帝, 一松晃弘, 赤松良久, 河野誉仁: 佐波川における魚類量予測モデルの構築, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.72, No.4, I_987-I_1002, 2016.
- 2) 赤松良久, 永野博之, 河野誉仁, 上鶴翔悟, 一松晃弘: 一次元河川生態系モデルを用いた堰が河川環境に及ぼす影響の検討, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.72, No.4, I_1111-I_1116, 2016.
- 3) 赤松良久, 上鶴翔悟, 高村紀彰, 永野博之: 一次元河川生態系モデルの開発と佐波川への適用, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.71, No.4, I_1237-I_1242, 2015.
- 4) 赤松良久, 高村紀彰, 馬場祐貴: 陸域負荷の異なる中国地方一級河川の河川生態環境評価, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.70, No.4, I_1399-I_1404, 2014.

〔学会発表〕(計 4 件)

1) 赤松良久, 永野博之, 上鶴翔悟: 一次元河川生態系モデルを用いた堰が河川生態系に及ぼす影響の検討, 土木学会年次学術講演会, 2015年9月17日, 岡山大学(岡山県岡山市).

2) Akamatsu, Y. and Nagano, H.: Modelling and application of one-dimensional river ecosystem model, The 36th IAHR World Congress, 2015年7月2日, World Forum (Delft-The huge, the Netherlands).

3) 一松晃弘, 赤松良久, 乾隆帝, 高村紀彰: 佐波川における魚類・底生動物量の空間分布予測モデルの構築, 平成27年度第67回土木学会中国支部研究発表会, 2015年5月21日, 山口大学(山口県宇部市).

4) 赤松良久, 高村紀彰, 上鶴翔悟, 永野博之: 一次元河川生態系モデルの開発とその適用, 応用生態工学会第18回研究発表会, 2014年9月18日, 首都大学東京(東京都八王子市).

〔図書〕(計 0 件)

該当なし

〔産業財産権〕

該当なし

〔その他〕

該当なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

赤松 良久 (Yoshihisa Akamatsu)

山口大学大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 30448584

(2) 連携研究者

榊原 弘之 (Hiroyuki Sakakibara)

山口大学大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 90304493

(3) 連携研究者

神谷 大介 (Daisuke Kamiya)

琉球大学工学部・准教授

研究者番号: 30363659

(4) 連携研究者

永野 博之 (Hiroyuki Nagano)

群馬工業高等専門学校環境都市工学科・助教

研究者番号: 30363659

(5) 連携研究者

山本 浩一 (Kouichi Yamamoto)

山口大学大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 50355955