

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 26 日現在

機関番号：17601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820196

研究課題名(和文) 水文学的アプローチによる流域スケールの河川健全度推定モデルの構築

研究課題名(英文) A hydrological approach to developing catchment-scaled riverine integrity model

研究代表者

糠澤 桂 (Nukazawa, Kei)

宮崎大学・工学部・助教

研究者番号：20725642

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)：宮城県名取川流域を対象に構築されている分布型流出・水温モデルを用いて、水理変数と水温変数を計算し、それらを説明変数とする底生無脊椎動物41分類群の生息場適性モデルを構築した。構築された適性モデルから健全度の指標である分類群数、種多様性、平均スコア、B-IBI (Benthic-Index of Biotic Integrity) を流域規模で推定した。分類群数については各分類群に特異的な生息適性値のカットオフ値を定義し、在/不在判定を行うことで計算した。この予測値は観測値と比較すると有意な正の相関 ( $P<0.05$ ) を示すことが分かり、流域の分類群数予測が可能となったと言える。

研究成果の概要(英文)：We computed hydraulic and thermal variables in river using a distributed hydrological-thermal model which has been developed in the Natori River catchment, Japan. These variables were subsequently used as explanatory variables to predict habitat suitability of 41 stream invertebrate taxa. We applied the habitat suitability models to estimate stream health metrics; taxon richness, species diversity, average score per taxon, benthic-index of biotic integrity (B-IBI) throughout the study catchment. We defined taxon-specific cutoff values to determine presence/absence of the focal taxon by habitat suitability values, and used this to calculate the taxon richness. The predicted taxon richness displayed significant positive correlation ( $P<0.05$ ) with the observed taxon richness of stream invertebrates, suggesting usefulness of this predictive model of species diversity.

研究分野：水文生態学

キーワード：水文モデル 生息場適性指数 底生動物 種多様性 健全度 B-IBI 平均スコア

### 1. 研究開始当初の背景

我が国における多自然川づくり基本指針では、河川が本来有する生物の生息・生育ポテンシャルを考慮した河川管理の必要性が提言されている(国土交通省, 2006)。このため、河川生物の適応的生息・生育能力を表現する指標である「河川健全度」の定義および定量的な評価手法の確立が急務である。これまで、河川環境の評価はBODやDOなどの水質指標や生物多様性、景観の評価などから行われてきた。生物多様性や水生昆虫相の構成評価(バイオモニタリング)での河川環境評価は定量的かつ実際の生物生息情報を反映している点で優れていると言える。しかし、従来までの取り組みは一般的に時期・場所が限られており、上流～下流に渡り物理環境が時間的に変動する河川において、スナップショット評価による局所的な情報のみから流域全体を論ずるのは困難であった。

この問題を解決すると考えられるのが、従来まで水資源管理や洪水流量予測に用いられてきた分布型水文モデルの河川環境評価への適用である(図-1)。水文モデルを用いることで、広域で河川の流量や水温など河川生物の生息環境に深く関わる因子をシミュレーション可能であり、これを予測因子として河川生物の生息適性を推定することは有意義である。また、これまで魚類についてのモデルは存在するが、流域スケールで河川底生無脊椎動物群集を評価対象としたモデル研究はほとんど存在しない。底生動物は移動能力が低い、種数が多い、環境感受性が高いことから環境評価の指標生物として有益であり、その生息環境評価は河川生態系保全の観点から重要である。

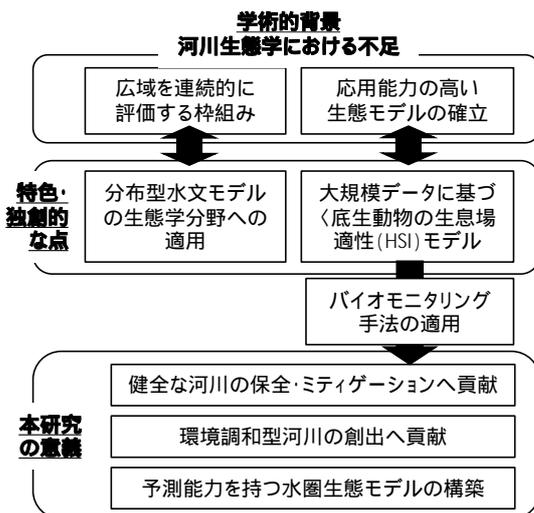


図-1 本研究の学術的背景、特色・独創的な点、意義

### 2. 研究の目的

本研究の一つ目の目的は、宮城県名取川流域を試験流域として、分布型水文モデルを

用いて河川底生無脊椎動物群集(e.g., カゲロウ等水生昆虫)の生息環境をモデルにより予測することである。また、河川無脊椎動物の生息環境予測モデル(HSIモデル)は構築例が少ないため、多様なモデル構築手法を検討し、分類群毎の環境因子に対する選好性を評価する。得られたHSIモデルを用いて、複数の河川健全度指標(e.g., 種多様性, 平均スコア)を流域スケールで図化して予測精度の確認、それぞれの指標の特徴について整理する。従来までは、流域管理において水文モデルは洪水氾濫リスクや水資源量の管理にのみ用いられてきた。本研究では、水文モデルを基礎とすることで、治水・利水に加えて、流域の生態系保全に資する情報を提供可能なモデル開発を目指す。

### 3. 研究の方法

モデル開発の対象流域として宮城県中部に位置する名取川流域(流域面積: 939m<sup>2</sup>)を選定した。本流域には分布型流出・水温モデル(Nukazawa *et al.*, 2011)(以下、水文モデル)が開発されており、流域全体での水理・水温データ取得が可能である。流域内の上流～下流に渡る45地点において底生無脊椎動物群集の現地調査(定量採集)が行われた2006年の1年間を対象に、水文モデルによる流出計算を行い、流量、水深、流速、水温を日毎または時間毎に計算した。流量と水温の計算値は国土交通省水文水質データベースの連続的な観測データと比較してNash-Sutcliffe 効率係数と相関係数により高い精度で再現できていることを確認している(Nukazawa *et al.*, 2015)。また、GISデータとして名取川流域を対象に土地利用や勾配、集水面積等を整備した。

底生動物群集の個体数密度を応答変数、環境変数を予測変数として、41分類群の底生動物群集の生息場適性(HSI)モデルを開発した。モデル化手法としては頻度解析、カーネル密度推定、重回帰分析(変数選択)、Maxent(Phillips *et al.*, 2006)等を採用して分類群毎に予測精度の高い手法を検討した。予測精度の検討にはAUC(Area Under Curve)を用いた(図-2)。

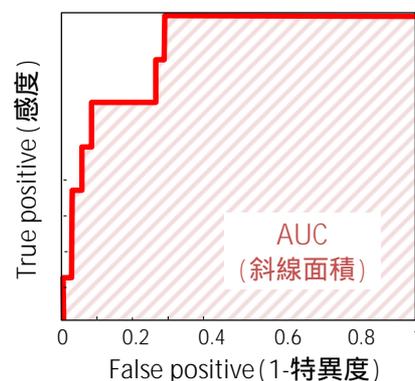


図-2 ROC曲線とAUC

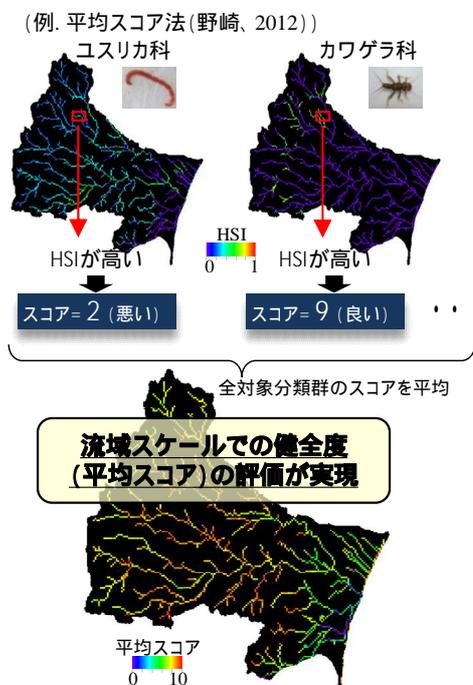


図-3 底生動物の生息適性値(HSI: 1は最適な環境)から健全度指標を予測する方法の概念図。図は平均スコアの計算例を示す。

構築された HSI モデルを用いて、種多様性 (Shannon-Weiner 多様度指数と分類群数), EPT (カゲロウ目, カワゲラ目, トビケラ目の相対割合), 平均スコア (ASPT), B-IBI (Benthic-Index of Biotic Integrity), 群集 HSI 値から合成する主成分得点を流域全体で計算した (図-3)。なお, B-IBI はテネシー川流域にて開発された複数指標から成る健全度指標であるが, B-IBI を構成する 13 指標のうち 4 指標を対象流域の生物相に合わせて除外して用いた。その後, 各健全度指標の特徴及び指標間の相関を Spearman の順位相関係数により調べた。また, 水質項目 (e.g., アンモニウム態窒素, BOD) と健全度指標の相関も調べた。

HSI モデルを用いて分類群数を計算した。まず, 複数手法により構築されたモデルのうち, 最も精度の高い 41 モデルを採用し, 各モデルについて ROC (Receiver Operating Characteristic) 曲線に基づく閾値を用いて分類群毎の在/不在を判定した。これにより HSI 値から分類群毎の在/不在が分かり, この積算により分類群数を計算した。計算値は 2006 年の観測値と比較して精度の検証を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 生息適性モデルの検討

研究代表者らが従来使用していた手法である頻度解析 (e.g., Nukazawa *et al.*, 2011) に加えて Maxent による生息適性指数値を算出し, 精度の比較を行った。この際用いたデータは 2000 年の流出解析結果と 2000 年までに確認された自治体ベースの水生物調査結果 (e.g., ゲンジボタル, カエル類) などであ

る。結果として, Maxent を用いたモデルのが高い AUC 値 (=0.866-0.976) が得られ, これは Maxent の方が今回用いたデータセットに関して予測精度が高いことを意味する。(雑誌論文 1; Nukazawa *et al.*, 2017)

HSI モデルに使用する指標として, 源流域における水生昆虫個体数密度の変化に対する水温指標の寄与度を評価することで, 水温指標の検討を行った。対象とした源流域は人為影響が限りなく小さく, 川幅, 流量, 植生, 河床材料が類似する 10 地点から成る。このため, 水温のみの水生昆虫群集に対する影響を評価する上で適した環境と言える。結果として, 年平均水温や年最高水温はカワゲラ目等の水生昆虫の有力な予測因子であったが, 最大増加率 (Arscott ら, 2001) 等の短期スケールを対象とした指標には高い相関は得られなかった。(雑誌論文 11; Arai *et al.*, 2015)

2006 年のデータを用いて構築されている 41 分類群の底生動物の生息適性モデル (高瀬ら, 2014) を AUC により評価してモデル化手法の検討と環境因子の予測能力をテストした。結果として, 41 分類群の平均 AUC は頻度解析 (=0.76), カーネル密度推定 (=0.76), 線形重回帰 (=0.76) で有意差は確認されなかった。変数選択法による線形重回帰モデルでは, 41 分類群中 31 分類群が統計的に有意なモデルとして構築された。その内, 6 モデルで流速変数, 5 モデルで水深変数, 19 モデルで水温変数, 15 モデルで地理変数が予測変数として選択された。これは水温変数の底生動物生息環境の説明能力が相対的に高いことを示唆する結果である。また, 予測変数に水温変数を有する重回帰モデルでは AUC が相対的に高く他のモデル化手法と予測結果の空間分布が類似する一方, 予測変数に水温変数をもたない重回帰モデルでは AUC が他のモデル化手法より有意に低く ( $P < 0.05$ ), 空間分布も類似していなかった (図-4)。

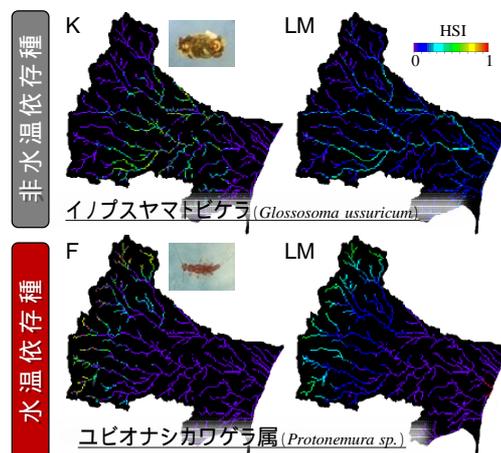


図-4 水温依存種と非水温依存種の生息適性値(HSI)空間分布図。ここで, Fは頻度解析, Kはカーネル密度推定, LMは線形重回帰を用いたモデルを表す。水温依存種は重回帰モデルで水温変数が予測変数のもの, 非水温依存種は水温変数が予測変数ではないものを表す

(2) 健全度指標の予測

頻度分析により構築された HSI モデルのうち観測値との整合性の高い 32 分類群を用いて、健全度指標を流域全体で推定した(図-5)。全体の傾向としては中流～上流域で健全度は高いが、ASPT は下流の広瀬川と名取川の合流地点付近で局所的に数値が高下する特徴があり他の健全度指標と異なる傾向を示した。この理由は、ASPT が、対象とする分類群が少ない場合にその分類群のスコアに依存することが挙げられる。つまり、下流の市街地における ASPT の増加は、その場所の分類群数が少ない(n=1-6)ため、一部のスコアの高い分類群が出現するために起こったと考えられる。この問題を解決するためには、より上位の分類レベルに属する分類群を対象とした健全度指標(i.e., EPT や B-IBI)の併用が望ましいと考えられる。

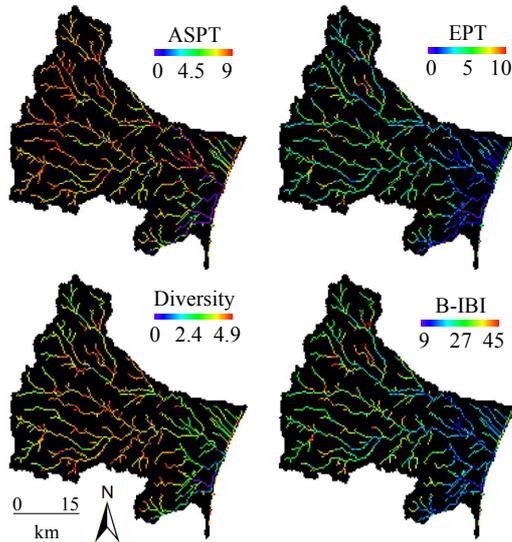


図-5 健全度指標の空間分布図

B-IBI と EPT は非常に高い相関を示した(R=0.9, P<0.01)。これは、EPT のようにシンプルな評価指標で、B-IBI のように高度な指標を代用できる可能性を示唆する結果である。また、32 分類群の底生動物の HSI から合成された主成分得点の内、第一主成分は特に B-IBI や EPT と類似した分布かつ高い相関を有していた。これは、主成分分析を適用することにより、底生動物相を決定づける主要な因子として新たな健全度指標が合成された可能性を示唆する。

健全度指標と水質 5 指標の相関について、B-IBI、EPT、ASPT、多様度指数において BOD、SS、溶存無機窒素と有意な負の相関を示した(表-1)。Einheuser *et al.* (2012) はミシガン州の Saginaw 川流域を対象に複数の健全性指標を推定するモデルを構築し、健全性の空間パターンに最も寄与する要因は栄養塩負荷であると結論付けている。また、名取川流域において、水使用量と汚濁負荷量に基づいて例(土田ら, 2004)においては、流域の健全性において栄養塩濃度の寄与が大きいことが示唆されている。一方、本研究においては、

栄養塩濃度指標の内、健全度指標と相関を有していたのは溶存無機窒素のみであった。Saginaw 川流域においては約 43%が農業利用されており、これは本研究において対象とする名取川流域のもの(約 12%)と大きく異なる。また、本研究においても、土地利用区分間における健全度は大きく異なっていた。以上より、異なる地域における健全度を検討する場合、対象地域を占める土地利用の構成に注意を払う必要がある。

表-1 Spearman の順位相関分析による健全性指標と水質指標の関係性。数値は相関係数(P<0.05, 太字は P<0.01)を示す。

	BOD	SS	NOxN	NH4	PO4
BIBI	-0.35	<b>-0.43</b>	...	...	...
EPT	-0.35	<b>-0.44</b>	-0.32	...	...
ASPT	...	<b>-0.44</b>	<b>-0.4</b>	...	...
Shannon	-0.34	<b>-0.55</b>	...	...	...
PC1	...	...	...	...	...
PC2	...	0.29	<b>0.41</b>	...	...
PC3	0.31	...	...	...	...
PC4	...	...	...	...	...
PC5	...	-0.3	...	...	...

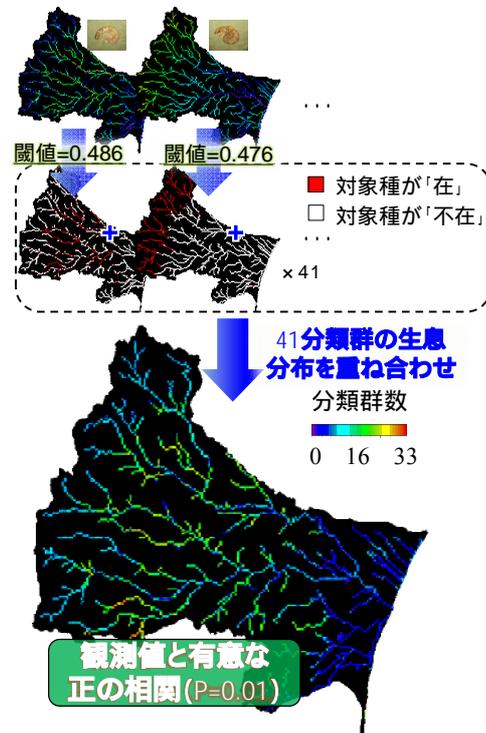


図-6 底生動物群集の HSI モデルから予測された種多様性(分類群数)の空間分布

また、種多様性指標(Shannon 多様度指数と分類群数)について観測値との比較により予測精度を検証した結果、良好な再現性は得られなかった。そこで、底生動物 41 分類群の HSI モデルにおいて複数手法の中から最も AUC が高いもの(平均±SD = 0.81±0.10)を選定し、種特異的な在/不在を定義するカットオフ値を定義し、分類群数を計算した。その結

果, 計算値は 45 地点において観測された底生動物分類群数と有意な正の相関を示した ( $P < 0.05$ ). 得られた分類群数空間パターンは, 中流 ~ 上流域で相対的に高く, 市街地や農地が広がる下流の沖積平野を流れる河川において低下する傾向を示した (図-6). 以上により, 流域規模での河川底生動物種多様性予測が可能となった. 今後は気候変動下における種多様性予測やモデルの他流域への適用などが有意義と考える.

#### 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 12 件)

1. Nukazawa, K., Kazama, S., Watanabe, K., Catchment-scale modeling of riverine species diversity using hydrological simulation: application to tests of species-genetic diversity correlation. *Ecohydrology*, Vol. 10 (1), e1778, 2017, DOI: 10.1002/eco.1778, 査読有
2. 渡邊健吾, 風間聡, 会田俊介, 糠澤桂, 分布型栄養塩流出モデルを用いた名取川流域の付着藻類量推定, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.73, No.4, pp. I\_1153-I\_1158, 2017, 査読有
3. 糠澤桂, 林達也, 風間聡, 高橋真司, 砂防堰堤のスリット化に伴う生息場と底生動物群集の時系列変化, 土木学会論文集 G (環境), Vol.72, No.7, pp. \_553- \_558, 2016, 査読有
4. 糠澤桂, 水生昆虫の遺伝的な環境適応予測モデルの開発-気候変動による潜在的脅威-, 昆虫と自然, Vol.51 (6), pp.32-34, 2016, 査読無
5. Uchida, U., Nukazawa, K., Kazama, S., Kubota, K., Time series analysis of mitochondrial DNA concentration in freshwater in Japan, Proceedings of The 7th International Conference on Water Resources and Environment Research (ICWRER), g06-03-1-g06-03-6, 2016, 査読無
6. Watanabe, K., Nukazawa, K., Aita, S., Kazama, S., Estimating periphyton dynamics in a temperate catchment using a distributed nutrient-runoff model, Proceedings of The 7th International Conference on Water Resources and Environment Research (ICWRER), 2016, 査読無
7. 糠澤桂, 風間聡, 渡辺幸三, 水文モデルと底生動物の生息場モデルを用いた河川健全度パターンの評価. 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.72, No.4, pp.I\_433-I\_438, 2016, 査読有
8. Arai R., Nukazawa K., Kazama S., Takemon Y., Variation of benthic invertebrate abundance along thermal gradients within headwater streams of a temperate basin in Japan. *Hydrobiologia*, Vol. 762 (1), pp. 55-63, 2015, DOI: 10.1007/s10750-015-2336-8, 査読有
9. Nukazawa K., Kazama S., Watanabe K., A hydrothermal simulation approach to modelling spatial patterns of adaptive genetic variation in four stream insects. *Journal of Biogeography*, Vol.42 (1), pp.103-113, 2015, DOI: 10.1111/jbi.12392, 査読有
10. Nukazawa K., Kazama S., Takase A., Watanabe K., A hydrological approach to revealing relationship between physical habitat and genetic diversity of stream invertebrates. Proceedings of the 19th IAHR-APD Congress, 2014, 査読有
11. Arai R., Nukazawa K., Kazama S., Takemon Y., Thermal effects on benthic invertebrates within the headstreams. Proceedings of the 19th IAHR-APD Congress, 2014, 査読有
12. 糠澤桂, 新井涼允, 風間聡, 竹門康弘, 複数の全球気候モデルを用いた源流域における底生動物個体数密度の将来変化. 土木学会論文集 G (環境), Vol.70, No.5, pp.I\_271-I\_276, 2014, 査読有

[学会発表](計 24 件)

1. 渡邊健吾, 風間聡, 会田俊介, 糠澤桂, 分布型栄養塩流出モデルを用いた名取川流域の付着藻類量推定, 第 61 回水工学講演会, 2017.03.17, 九州大学伊都キャンパス (福岡県・福岡市)
2. 糠澤桂, 風間聡, 渡辺幸三, 流出解析を利用した河川無脊椎生物の生息分布予測モデルの開発, 第 51 回日本水環境学会年会, 2017.03.15-16, 熊本大学黒髪キャンパス (熊本県・熊本市)
3. 糠澤桂, 林達也, 風間聡, 高橋真司, 砂防堰堤のスリット化に伴う生息場と底生動物群集の時系列変化, 第 53 回環境工学研究フォーラム, 2016.12.08, 北九州国際会議場 (福岡県・北九州市)
4. 糠澤桂, 風間聡, 渡辺幸三, 生息場モデルを用いた河川健全度予測手法の開発, 土木学会第 71 回年次学術講演会, 2016.09.07, 東北大学川内北キャンパス (宮城県・仙台市)
5. 渡邊健吾, 糠澤桂, 会田俊介, 風間聡, 付着藻類量の時空間変動推定を目的とした名取川流域の栄養塩濃度推定, 土木学会第 71 回年次学術講演会, 2016.09.07, 東北大学川内北キャンパス (宮城県・仙台市)
6. 糠澤桂, 風間聡, 渡辺幸三, 水文・生息場モデルを用いた河川健全度評価手法の提案, 応用生態工学会第 20 回大会, 2016.09.03, 東京大学農学部 (東京都)
7. Nukazawa, K., Kazama, S., Watanabe, K., Adaptive genetic consequences of climate

- change for stream insects: a hydrothermal simulation approach,,2016.08.30,Colombo (スリランカ)
8. Watanabe K, Nukazawa K, Aita S, Kazama S, Estimating periphyton dynamics in a temperate catchment using a distributed nutrient-runoff model,,2016.06.08, 京都テルサ (京都府京都市)
  9. 糠澤桂, 風間聡, 渡辺幸三, 水文モデルと底生動物の生息場モデルを用いた河川健全度パターンの評価, 第 60 回水工学講演, 2016.03.15, 東北工業大学八木山キャンパス (宮城県・仙台市)
  10. 糠澤桂, 風間聡, 渡辺幸三, 分布型水文モデルと生息場モデルを用いた河川健全度評価, 平成 27 年度土木学会東北支部技術研究発表会, 2016.03.05, 岩手大学 (岩手県・盛岡市)
  11. 渡邊健吾, 糠澤桂, 会田俊介, 風間聡, 分布型栄養塩流出モデルを用いた名取川流域の付着藻類量推定, 平成 27 年度土木学会東北支部技術研究発表会, 2016.03.05, 岩手大学 (岩手県・盛岡市)
  12. Nukazawa K, Kazama S, Watanabe K, Projected adaptive genetic degradation in a caddisfly species under changing climates, 11th International Symposium on Ecohydraulics, 2016.02.07, Melbourne (オーストラリア)
  13. 渡邊健吾, 糠澤桂, 会田俊介, 風間聡, 分布型流出モデルを用いた名取川水系の付着藻類量推定, 土木学会第 70 回年次学術講演会, 2015.09.18, 岡山大学津島キャンパス (岡山県・岡山市)
  14. 糠澤桂, 風間聡, 渡辺幸三, 水文モデルを用いた気候変動下の水生昆虫の適応的遺伝変動予測, 応用生態工学会第 19 回郡山大会, 2015.09.11, 日本大学工学部キャンパス (福島県・郡山市)
  15. 林達也, 糠澤桂, 風間聡, 透過型砂防ダム上下流の河川の底生動物群集の種多様性, 第 23 回地球環境シンポジウム, 2015.09.02, 北海道大学工学部 (北海道・札幌市)
  16. Nukazawa K, Kazama S, Watanabe K, Projecting adaptive genetic variation and species distribution of stream insects under changing climates, 2015 Joint Meeting of JSMB and CJK Colloquium on Mathematical Biology, 2015.08.27, 同志社大学今出川キャンパス (京都府・京都市)
  17. Watanabe K, Nukazawa K, Kazama S, Aita S, Estimating periphyton dynamics in a temperate catchment using a hydrological simulation, The 26th General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, 2015.06.25, Prague (チェコ共和国)
  18. 渡邊健吾, 糠澤桂, 会田俊介, 風間聡, 分布型流出モデルを用いた名取川水系の付着藻類量推定, 平成 26 年度土木学会東北支部技術研究発表会, 2015.03.07, 東北学院大学工学部多賀城キャンパス (多賀城市)
  19. Nukazawa K, Kazama S, Takase A, Watanabe K, A hydrological approach to revealing relationship between physical habitat and genetic diversity of stream invertebrates, 19th Congress of the Asia and Pacific Division of the International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR-APD), 2014.09.23, Hanoi (ベトナム)
  20. Arai R, Nukazawa K, Kazama S, Takemon Y, Thermal effects on benthic invertebrates within the headstreams, 19th Congress of the Asia and Pacific Division of the International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR-APD), 2014.09.23, Hanoi (ベトナム)
  21. 糠澤桂, 風間聡, 渡辺幸三, 分布型流出・水温モデルを用いた水生昆虫の遺伝的多様性の推定, 応用生態工学会第 18 回東京大会, 2014.09.18, 首都大学東京南大沢キャンパス (東京都)
  22. 糠澤桂, 新井涼允, 風間聡, 竹門康弘, 複数の全球気候モデルを用いた源流域における底生動物個体数密度の将来変化, 第 22 回地球環境シンポジウム, 2014.09.05, 中央大学駿河台記念館 (東京都)
  23. 新井涼允, 糠澤桂, 風間聡, 竹門康弘, 地球温暖化に伴う源流域の底生動物群集の変化, 第 22 回地球環境シンポジウム, 2014.09.05, 中央大学駿河台記念館 (東京都)
  24. Nukazawa K, Kazama S, Takase A, Watanabe K, Estimating habitat suitability of stream insects based on hydrological simulation and its connection to genetic diversity, Joint Aquatic Sciences Meeting (JASM) 2014, 2014.05.23, Portland (アメリカ合衆国)
- 〔図書〕(計 0 件)
- 〔産業財産権〕  
出願状況 (計 0 件)  
取得状況 (計 0 件)
- 〔その他〕  
<http://keinukazawa.webcrow.jp/home.html>
6. 研究組織  
(1) 研究代表者  
糠澤桂 (NUKAZAWA, Kei)  
宮崎大学・工学部・助教  
研究者番号: 20725642