

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：37112

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12416

研究課題名(和文) 気候変動に伴う河川魚類の分布・生物量変動予測

研究課題名(英文) Study to predict how distribution and biomass of fish species in rivers change with climate change

研究代表者

乾 隆帝 (Inui, Ryutei)

福岡工業大学・社会環境学部・准教授

研究者番号：20723844

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：環境DNA分析と水温データを用いた魚類の分布予測モデルを作成し、温暖化に伴う河川水温上昇が、各種魚類の分布・生物量に与える影響を予測すること試みた。アマゴについては、定量PCR分析の結果と水温データを用いた分布予測モデルを作成した結果、佐波川、小瀬川ともに1℃上昇で生息地が50%前後に、3℃上昇で10%以下になることが明らかになった。江の川および太田川において全種を対象に定量メタバーコーディング分析をおこなった結果、アブラボテやオイカワのように温暖化に伴い分布域および生物量が増加すると予想される種、イワナ属やタカハヤのように減少すると予想される種が存在することが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

河川水温は、河川生態系の生物群集構造や、生物生産力を左右する重要な要素であるが、今後の気候変動に伴う河川水温の変化が河川生態系に与える影響についての詳細は明らかになっていないのが現状である。よって本研究、河川水温変動が、魚類各種の分布・生物量に与える影響を予測することを目的に研究をおこなった。環境DNA分析の結果および現状の水温データを用いた分布予測モデルを作成した結果、今後の水温上昇に伴い、分布域や生物量が増加すると予想される種、あまり変わらないと予想される種、減少すると予想される種の存在が明らかになり、中国地方の河川魚類群集は大幅に変化する可能性が示された。

研究成果の概要(英文)：We attempted to predict the effects of climate change on the distribution and biomass of various fish species by creating a fish distribution prediction model using the results of environmental DNA analysis and water temperature data. A distribution prediction model for *Oncorhynchus masou* was developed using the results of quantitative PCR analysis and water temperature data. The results showed that a 1°C increase in water temperature was expected to reduce the habitat to approximately 50%, and a 3°C increase in water temperature was expected to reduce the habitat to less than 10% in both the Saba and Oze Rivers. Quantitative metabarcoding analysis was conducted for all fish species in the Gono and Ota rivers. The results show that some species, such as *Opsariichthys platypus*, are expected to increase their habitat and biomass with increasing water temperature, while others, such as *Phoxinus oxycephalus*, are expected to decrease their habitat and biomass.

研究分野：応用生態工学

キーワード：環境DNA 河川水温 地球温暖化 魚類 GIS 分布予測

1. 研究開始当初の背景

河川水温は、河川生態系の生物群集構造や、生物生産力を左右する重要な要素であり (Caissie, 2006)、河川生物の生息状況と密接な関係性にあるため、河川環境を把握する上で必要不可欠な環境条件のひとつである。実際、公共用水域での水温上昇傾向が確認されているため (環境省, 2013)、河川水温の変化が生態系に与える影響を明らかにする必要があるが、河川水温の変化が河川生態系に与える影響についての詳細は明らかになっていないのが現状である。本研究の当初の目的は、河川に生息する魚類のうち、河川水温が上昇することによって分布域が拡大することが予想される種と、分布域が縮小することが予想される種をモデル生物とし、環境 DNA 分析を用いて河川内の分布および生物量を明らかにすること、さらに、各地点から得られた水温データにより、各魚類の好適水温環境を明らかにし、河川水温変動が、各種の分布・生物量に与える影響を予測することを目的とすることであった。

2. 研究の目的

当初の予定では、河川に生息する魚類のうち、河川水温が上昇することによって分布域が拡大することが予想される種と、分布域が縮小することが予想される種を対象に、種特異的な環境 DNA 分析 (定量 PCR) を用いて各種の好適水温と、河川水温変動が、各種の分布・生物量に与える影響を予測する予定であったが、研究途中での環境 DNA 分析技術の進歩により定量メタバーコーディング分析が導入できたため、当初の予定よりも研究テーマを拡大し、(1) 分布域が縮小することが予想される種を対象にした河川水温変動に伴う分布域の変化予測 (種特異的な分析を使用)、(2) 定量メタバーコーディング分析を用いた各種魚類の好適水温の把握、(3) 水温が生物量に影響を与える可能性が高い魚類の河川水温変動に伴う生物量の変化予測の 3 点について明らかにすることを試みた。

3. 研究の方法

(1) 分布域が縮小することが予想される種を対象にした河川水温変動に伴う分布域の変化予測

環境 DNA 分析 (種特異的な分析) を用いることにより、流域全体のアマゴの分布状況を明らかにし、次に設置型口ガーによって得られた水温の連続データと数値地図システム (GIS) によって算出した地形データを用いてアマゴの分布予測モデルを作成し、さらに、水温変動に伴うアマゴの分布域の拡大・縮小を予測することを試みた。対象河川は、中国地方の一级水系である佐波川および小瀬川である。

2017 年に、佐波川水系の 24 地点と小瀬川水系の 19 地点において環境 DNA 分析に用いるサンプル水を採取した (図 1-1)。各地点ともに、可能な限り瀬の下流で 1L の表層水を採取した。サンプル水は GF/F ガラスフィルターで濾過し、DNA を抽出した後、quantitative PCR (qPCR) を用い、1 サンプルにつき 4 ウェルで、在データを取得することを目的に定量 PCR をおこなった。

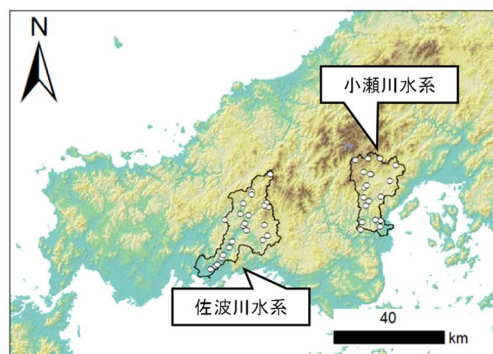


図 1-1 佐波川および小瀬川の調査地点。水系内のプロットは調査地点を示している。

佐波川は、採水をおこなった 24 地点中 19 地点、小瀬川は採水をおこなった 19 地点中 17 地点において、当該調査時期（2017 年 7～9 月）の水温データを取得した。

本研究では、分布予測モデルには、Maximum entropy modelling (Maxent) 3.3.3K を用いた。(Phillips, 2006)。1 サンプルにつき 4 ウェルで PCR をおこない、4 ウェル中 1 ウェル以上検出、2 ウェル以上検出、3 ウェル以上検出、4 ウェル以上検出の 4 通りの分布データと、夏季（2017 年 7～9 月）平均水温、夏季日中（9～15 時）平均水温、夏季夜間（21～3 時）平均水温の 3 通りの水温データを用いて、総当りで解析を行い、最も AUC の高かった組み合わせを選択することとした。次に、最も AUC の高かった分布データおよび水温データに、水温以外で魚類の生息に影響を与えると予想される標高および傾斜角を加え分布予測モデルを作成し、将来約 100 年間で起こりうると思われる水温 1°C、2°C、3°C 上昇時の 3 シナリオにおいて、アマゴの分布域変化を予測した。

(2) 定量メタバーコーディング分析を用いた各種魚類の好適水温の把握

江の川水系および太田川水系で調査をおこなった。採水方法は、江の川水系の 20 地点、太田川水系の 24 地点で（図 2-1）、2020 年の 8 月に、河川の表層水 1 L を採水し、GF/F フィルターを用いて濾過をおこなった後、DNA を抽出した。水温データは、2019 年の 8 月から 2020 年の 8 月にかけて取得した。

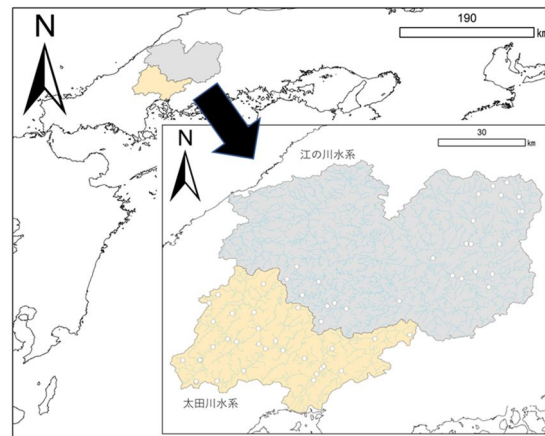


図 2-1 江の川水系と太田川水系の調査地点

本研究では、環境 DNA 分析の手法のうち、定量メタバーコーディング法 (qMiFish, Ushio et al. (2018)) を用いた。

環境 DNA 分析で検出された各種の環境 DNA 濃度のうち、準絶滅危惧種および絶滅危惧種（環境省レッドリスト, 2020）を抽出し、それぞれの水系に 5 地点以上生息している種を検討対象とした。各地点の環境

DNA 濃度と夏季（8 月）平均水温、夏季最高水温、夏季最低水温、冬季（1 月）平均水温、冬季最高水温、冬季最低水温の関係性を調べるため、次関数および二次関数の近似曲線を作成し、相関係数 (R^2) を基準に、生物量の影響を与えている水温条件を検討した。

(3) 水温が生物量に影響を与える可能性が高い魚類の河川水温変動に伴う生物量の変化予測

(2) の研究により江の川水系において夏季水温が生物量に影響を与える可能性が示唆されたウナギ、アカザ Clade1、イワナ属 subsp.、アブラボテ、ヤリタナゴ、サケ属 sp. の 6 種、太田川水系において夏季水温が生物量に影響を与える可能性が示唆されたアカザ Clade1、イワナ属 subsp. の 2 種、そして両水系においてオイカワ、カワムツ、およびタカハヤの 3 種を対象とした。江の川水系および太田川水系の各調査地点の将来水温の予測は、まず 2020 年の気温データを基準に、気象庁の地球温暖化予測情報第 9 巻に公開されている将来気候（2076～2096 年）から RCP8.5 シナリオに基づいた気温増加量（2076 年～2096 年）を算出後、各調査地点における気温増加量と水温増加量の関係式より各調査地点の水温増加量を算出した。なお、将来気温のバイアス補正にはピアニ法を用いており、気温の観測データには農研機構の農研機構メッシュ農業気象データを使用した。そして、2020 年夏季（8 月）平均水温データと生物量の関係式を用い

て、現在の8月における各地点の環境DNAの予測値と、将来の8月の平均水温(2076~2096年の平均値)時の各地点の環境DNA濃度の予測値を算出し、両者を比較することにより、各種の生物量の増減の比較をおこなった。

4. 研究成果

(1) 分布域が縮小することが予想される種を対象にした河川水温変動に伴う分布域の変化予測

3 ウェル以上検出された佐波川水系の9地点、小瀬川水系の5地点の計14地点の分布データと、夏季日中平均水温、標高、および傾斜角のデータを用いて分布予測モデルを作成した結果、AUCが0.778、感度が0.929、分布確率の閾値が0.350のモデルが構築された。図1-2に現状の水温条件での佐波川水系および小瀬川水系における分布予測の結果を示している。夏季日中平均水温が1°C、2°C、3°C上昇時の3シナリオにおいて、アマゴの分布域変化を予測した結果について、佐波川を図1-3に、小瀬川を図1-4に示している。これらの結果から、佐波川、小瀬川ともに1°C上昇で生息地が50%前後に、2°C上昇で生息地が20%前後に、そして3°C上昇で10%以下になることが明らかになった。これらの結果から、中国地方西部においては、アマゴの生息域は、夏季の日中の河川水温が1°C上昇するだけで半減し、3°C上昇するとほぼ生息地が無くなる可能性が高いことが明らかになった。

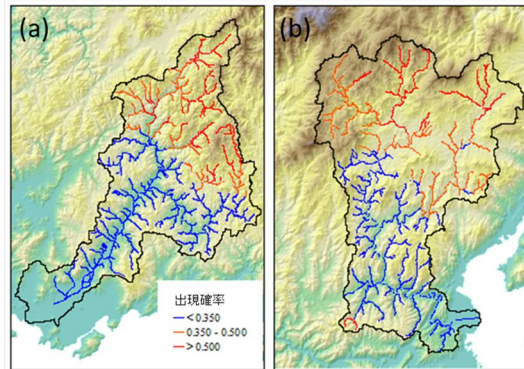


図1-2 現状の水温条件での佐波川水系および小瀬川水系におけるアマゴの分布予測

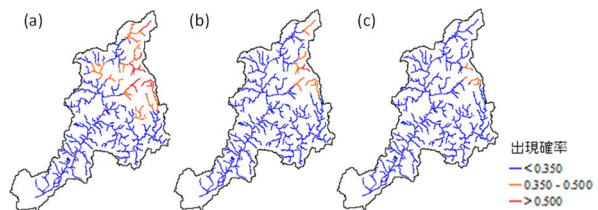


図1-3 夏季日中平均水温が(a)1 , (b)2 , (c)3 上昇した場合の佐波川水系のアマゴの分布予測

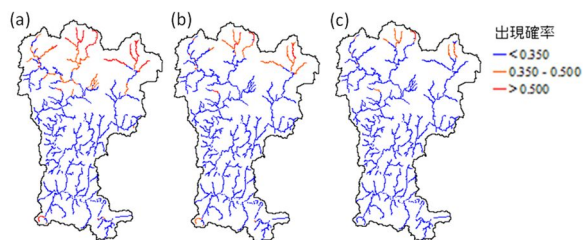


図1-4 夏季日中平均水温が(a)1 , (b)2 , (c)3 上昇した場合の小瀬川水系のアマゴの分布予測

(2) 定量メタバーコーディング分析を用いた各種魚類の好適水温の把握

江の川水系および太田川水系における魚類絶滅危惧種の生物量と水温の関係性を表2-1および表2-2にまとめている。

R2値が0.2を上回る数値は太文字にし、最も影響を与えている項目のセルに着色している。これら

表2-1 江の川水系における魚類絶滅危惧種の生物量と水温の関係性について

単回帰分析により検討した結果

江の川 冬	平均水温		最高水温		最低水温	
	R2値	好適水温(°C)	R2値	好適水温(°C)	R2値	好適水温(°C)
ウナギ	0.13	6.44	0.10	9.31	0.08	4.77
オヤニラミ	0.09	7.54	0.06	9.93	0.09	5.02
カジカ	0.05	6.82	0.09	9.25	0.10	4.62
アカザClade1	0.13	6.31	0.29	9.00	0.10	4.93
アカザClade2	0.11	5.85	0.15	7.90	0.06	3.02
イワナ属subsp.	0.92	4.53	0.69	7.34	0.76	2.50
アブラボテ	0.09	8.02	0.13	10.42	0.02	6.79
インドジョウ	0.07	6.65	0.03	9.29	0.02	5.19
ヤリタナゴ	0.41	8.02	0.06	11.36	0.65	6.79
サケ属sp.	0.33	4.59	0.35	7.77	0.42	2.50
ドジョウ	0.09	7.47	0.15	10.54	0.09	4.76

江の川 夏	平均水温		最高水温		最低水温	
	R2値	好適水温(°C)	R2値	好適水温(°C)	R2値	好適水温(°C)
ウナギ	0.21	24.08	0.13	30.45	0.26	19.56
オヤニラミ	0.10	22.49	0.12	26.44	0.08	18.84
カジカ	0.15	21.74	0.16	25.74	0.12	17.63
アカザClade1	0.30	23.19	0.26	27.15	0.19	19.03
アカザClade2	0.17	18.54	0.16	24.07	0.21	15.70
イワナ属subsp.	0.52	18.32	0.68	19.82	0.56	15.37
アブラボテ	0.19	28.75	0.24	34.34	0.21	22.53
インドジョウ	0.16	24.31	0.10	30.80	0.19	20.10
ヤリタナゴ	0.36	28.75	0.15	34.84	0.34	24.17
サケ属sp.	0.37	18.54	0.32	20.30	0.49	15.37
ドジョウ	0.17	23.62	0.13	27.81	0.15	19.63

表 2-2 太田川水系における魚類絶滅危惧種の生物量と水温の関係性について

単回帰分析により検討した結果

太田川 冬	平均水温		最高水温		最低水温		太田川 夏	平均水温		最高水温		最低水温	
	R2値	好適水温(°C)	R2値	好適水温(°C)	R2値	好適水温(°C)		R2値	好適水温(°C)	R2値	好適水温(°C)	R2値	好適水温(°C)
ウナギ	0.03	6.67	0.11	9.72	0.01	7.44	ウナギ	0.16	21.89	0.11	25.89	0.08	17.24
オヤニラミ	0.19	7.48	0.19	10.58	0.19	5.42	オヤニラミ	0.09	24.81	0.11	30.59	0.11	18.08
カジカ	0.04	9.37	0.01	7.57	0.07	7.44	カジカ	0.09	17.90	0.13	19.29	0.01	15.89
ゲンゴロウブナ	0.38	9.37	0.12	13.67	0.32	7.12	ゲンゴロウブナ	0.11	24.81	0.08	31.23	0.21	20.72
アカザClade1	0.20	8.59	0.22	10.86	0.15	7.44	アカザClade1	0.28	25.10	0.23	29.76	0.22	20.27
アカザClade2	0.15	6.77	0.13	9.77	0.10	4.69	アカザClade2	0.16	21.35	0.17	25.08	0.15	17.34
イワナ属subsp.	0.21	4.39	0.09	7.12	0.21	2.26	イワナ属subsp.	0.18	18.00	0.07	12.07	0.32	14.89
スナヤツメ	0.12	5.10	0.04	8.20	0.23	2.50	スナヤツメ	0.09	18.14	0.04	23.57	0.19	15.29
イシドジョウ	0.04	7.10	0.01	11.83	0.08	5.59	イシドジョウ	0.01	10.82	0.06	20.20	0.10	18.29
サケ属sp.	0.04	5.00	0.02	3.10	0.05	2.26	サケ属sp.	0.04	18.04	0.03	23.05	0.04	14.23
ドジョウ	0.06	5.25	0.02	1.85	0.16	2.50	ドジョウ	0.07	21.20	0.08	25.13	0.04	13.14

の結果から、多くの生物量に影響を与えているのは夏季の水温であることが明らかになった。

(3) 水温が生物量に影響を与える可能性が高い魚類の河川水温変動に伴う生物量の変化予測

江の川水系のウナギ、アカザ Clade1、イワナ属 subsp.、アブラボテ、ヤリタナゴ、サケ属 sp.、オイカワ、カワムツ、およびタカハヤの 9 種と、太田川水系のアカザ Clade1、イワナ属 subsp.、オイカワ、カワムツ、およびタカハヤの 5 種について、現在の 8 月における各地点の環境 DNA の予測値と、将来の 8 月の平均水温（2076～2096 年の平均値）時の各地点の環境 DNA 濃度の予測値を算出し、両者を比較した結果、江の川水系で生息範囲が増加すると予想された種は、アカザ Clade1、アブラボテ、オイカワの 3 種、減少すると予想された種は、イワナ属 subsp.、サケ属 sp.、タカハヤの 3 種だった。太田川水系で生息範囲が増加すると予想された種は、アカザ Clade1 とオイカワの 2 種、減少すると予測された種は、イワナ属 subsp. とタカハヤの 2 種であった。

また、生息範囲が減少すると予想された種について、地点合計での生物量（環境 DNA 濃度の合計値）の増減について比較した結果、江の川水系では、現状の生物量ベースでイワナ属 subsp. は 73%、サケ属 sp. は 72%、タカハヤは 70%、太田川水系では、イワナ属 subsp. は 67%、タカハヤは 68% という予想になった。

これらの結果から 絶滅危惧種の中では 温暖化に伴いウナギは変化が少なく、アカザ Clade1、アブラボテおよびヤリタナゴは増加傾向、イワナ属 subsp. およびサケ属 sp. は減少傾向となることが示された。優占種となる普通種 3 種については、両河川ともに、オイカワが増加傾向、カワムツは変化が少なく、タカハヤは減少傾向となることが示された。このように、地球温暖化に伴う河川水温の変化によって、中国地方の河川魚類群集は大幅に変化する可能性が示された。

【引用文献】

- 1) Caissie D.: The thermal regime of rivers: a review, *Freshwater Biology* 51, pp. 1389–1406, 2006.
- 2) 環境省 HP: 気候変動による水質等への影響解明調査（報告）：
<https://www.env.go.jp/press/16500-print.html>
- 3) Phillips, S.J., Anderson, R.P. and Schapire, R.E.: Maximum entropy modeling of species geographic distributions, *Ecological Modelling*, Vol.190, pp. 231–259, 2006.
- 4) Ushio, M., Murakami, H., Masuda, R., Sado, T., Miya, M., Sakurai, S., Yamanaka, H., Minamoto, T., Kondoh, M.: Quantitative monitoring of multispecies fish environmental DNA using high-throughput sequencing, *MBMG*, Vol.2, 1-15, 2018.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Inui Ryutei, Akamatsu Yoshihisa, Kono Takanori, Saito Minoru, Miyazono Seiji, Nakao Ryohei	4. 巻 9
2. 論文標題 Spatiotemporal Changes of the Environmental DNA Concentrations of Amphidromous Fish <i>Plecoglossus altivelis altivelis</i> in the Spawning Grounds in the Takatsu River, Western Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Ecology and Evolution	6. 最初と最後の頁
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fevo.2021.622149	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Doi Hideyuki, Inui Ryutei, Matsuoka Shunsuke, Akamatsu Yoshihisa, Goto Masuji, Kono Takanori	4. 巻
2. 論文標題 Estimation of biodiversity metrics by environmental DNA metabarcoding compared with visual and capture surveys of river fish communities	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Freshwater Biology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1111/fwb.13714	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 乾 隆帝、中尾遼平、宮園誠二、齋藤 稔、赤松良久、河野誉仁、小林勘太	4. 巻 76
2. 論文標題 異なる粒子保持径のガラスフィルターから得られた魚類の環境DNAメタバーコーディングと採集調査の比較	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学)	6. 最初と最後の頁 I_1297-I_1302
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 乾 隆帝、河野誉仁、赤松良久、栗田喜久、後藤益滋	4. 巻 75
2. 論文標題 環境DNAを用いた佐波川および小瀬川における河川水温変化に伴うアマゴ分布域の変化予測	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学)	6. 最初と最後の頁 I_523-I_528
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 乾 隆帝・赤松 良久・岡田 将治・河野 誉仁・中尾 遼平	4. 巻 26
2. 論文標題 環境DNA分析を用いた高知県四万十川と島根県高津川のアユの降下・産卵期の比較～河川水温との関係性を中心に	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 河川技術論文集	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 乾 隆帝、中尾遼平、宮園誠二、齋藤 稔、赤松良久、河野誉仁、小林勘太
2. 発表標題 異なる粒子保持径のガラスフィルターから得られた魚類の環境DNAメタバーコーディングと採集調査の比較
3. 学会等名 第65回水工学講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 乾 隆帝、河野誉仁、赤松良久、栗田喜久、後藤益滋
2. 発表標題 環境DNAを用いた佐波川および小瀬川における河川水温変化に伴うアマゴ分布域の変化予測
3. 学会等名 第64回水工学講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	赤松 良久 (Akamatsu Yoshihisa) (30448584)	山口大学・大学院創成科学研究科・教授 (15501)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	栗田 喜久 (Kurita Yoshihisa) (40725058)	九州大学・農学研究院・准教授 (17102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関