

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K06201

研究課題名（和文）養魚モニタリング手法の確立を目的とした深層学習による魚体認識と3次元行動計測

研究課題名（英文）Image recognition of fish bodies using deep learning and three-dimensional behavioural measurement for monitoring of reared fish

研究代表者

米山 和良（Komeyama, Kazuyoshi）

北海道大学・水産科学研究院・准教授

研究者番号：30550420

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、深層学習を用いた魚体の画像認識技術を確認させ、魚群の3次元行動の自動計測手法を構築することを目的として、サクラマスを対象に試験を試みた。魚体未検出による移動経路の欠損をカルマンフィルタにより補間した。ステレオ画像計測による3次元計測手法により、サクラマス3個体を対象に深層学習による魚体検出で3次元遊泳軌跡の自動計測を行った。カメラ視線上で複数の魚体が重畳した場合は、カメラ視線の切り替えで未検出個体の位置を推定することで、追跡データを増やすことが出来た。より多くの個体を追跡できるように検出数向上が今後の課題になった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で確立される行動計測手法は、魚類行動学のほか、養成魚モニタリングやFish welfareの指標整理など水産増養殖分野にも強いニーズがある。魚群の3次元計測の実現により、手動による計測にかかる労力低減が見込めるだけでなく、これまで2次元空間で評価されていた魚群行動を、3次元空間に拡張できたことにより、正確な行動評価が可能になる。これまで分析できなかった魚群指標などを明らかに出来ることから魚群行動研究が進むと期待できる。たとえば、増養殖分野では3次元空間上の個体間距離から飼育収容密度を試算できるなど、本研究の波及効果は極めて大きい。

研究成果の概要（英文）：The aims of this study were to establish an image recognition technique for fish bodies using deep learning and to develop an automated method for measuring the three-dimensional behaviour of fish shoals. An image recognition technique for masu salmon was developed using deep learning with the aim of establishing a fish body recognition algorithm. The Kalman filter was applied to interpolate missing trajectories caused by undetected fish bodies. A three-dimensional measurement method using stereo images was employed to measure automatically the three-dimensional swimming trajectories of three individual masu salmon using deep learning. When multiple fish bodies obstructed the camera's line of sight, the position of undetected individuals was estimated through switching of the line of sight, thereby increasing tracking data. Improving the number of detections so that more individuals can be tracked is a challenge for future work.

研究分野：水産工学

キーワード：魚群行動 ステレオカメラ 画像認識技術 3次元行動

様式 C - 19 , F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

国内の水産業は、漁業生産量の減少、および、生産者の減少・高齢化といった厳しい状況にある。水産業を成長産業とするために、ICT, IoT, AI といった先進技術を水産・養殖業現場へ導入することが求められている。特に、世界の養殖生産量は今後増える見通しで、国内の養殖業が技術力で国際的に展開し国際競争力を備える必要がある。そのなかで、養魚を計画的に生産できる養殖生産システムの ICT 化が注目されており、効率・省力化による収益の向上やデータに基づく生産体系の実現に期待が高まっている。養殖生産システムの ICT 化に向けた取り組みとして、水温・溶存酸素等の養成環境の監視・制御技術や自動給餌技術が登場するなか、養魚の異常行動の検出や状態把握に不可欠な養成魚モニタリング技術は開発途上にある。生産システムの ICT 化に必須な養魚情報を集積・管理するためにも養成魚モニタリング技術の確立は喫緊の課題といえる。養成魚モニタリング技術には対象魚の行動を直接計測できるバイオロギングや集団の情報を容易に検知できる音響計測などがある中で、特に光学カメラを用いた魚類の行動計測は、非侵襲・非接触に養魚の状態把握や異常行動検知ができると期待され、養殖生産システムの ICT 化に欠かせないセンシング技術として重要な役割を担うと期待されている。

従来、水中映像を用いた魚の行動計測では、背景色や浮遊物等のノイズが原因で通常の画像処理では魚体位置を自動で認識・検出することが難しかった。したがって、画像上の魚体位置の検出はマウスポインタを伴った手動操作に頼っていたが、作業負荷が非常に大きく、自動的に魚体位置を検出する手法の確立が求められていた。また、魚類は3次元に広がる水中を自由に遊泳する。奥行き方向の位置は異なるが画像上では重畳している2個体の識別は、現状の画像処理では自動的に行うことは難しい。これを理由に、光学カメラを用いた魚群行動研究の多くは個体同士が重畳しないように、実験水槽の水深を15 cm程度に制限した2次元空間の計測事例が多い(Fukuda et al. 2011)。しかし、3次元空間で遊泳する対象魚を2次元空間で計測した行動情報は不十分であり、3次元空間での魚群行動解析手法が求められている。自動的な3次元計測を試みた例は少なく、対象も1個体に限定される(坂本ら 2018)。複数個体(魚群)の自動的な3次元計測技術が確立されることで、多くの行動研究が飛躍的に進むと期待される。しかし、水中では色情報をはじめ対象物体の特徴が著しく減少するため、水中画像の計測・画像認識は想像以上に難題である。畳み込みニューラルネットワークの登場以降に、画像認識の正確度は飛躍的に上昇しており、水中映像に映る対象魚は、深層学習の適用で正確に認識できるようになった。3次元空間を遊泳する魚群を撮影する際に、カメラの視線上に2個体以上の魚が重なることが頻りに発生し、現状の手法では、これらの重畳した個体を分離して認識出来ない。画像上で重畳する複数個体の分離が難しい。画像上の重畳個体の分離は2次元画面上では困難を極めるが、対象魚をステレオ計測で立体視することで、重畳個体を3次元空間上で分離できる可能性は高い。以上のように、深層学習による魚体認識と重畳判定、ステレオ画像計測による3次元計測を組み合わせることで3次元空間における魚群行動の自動計測を実現する見込みが高まった。

2. 研究の目的

本研究では、深層学習を用いた魚の画像認識技術を確認し、自動的な魚群の3次元行動計測手法の構築を目的とした。これを達成するために、対象魚の画像認識手法を深層学習によって構築し、養殖生簀・水槽を遊泳する養殖魚の行動自動計測を実施する。確立手法を魚群の3次元行動計測に応用し複数個体を同時に追跡することを試みた。本研究では、新規養殖種として注目されているサクラマスを用いた。

3. 研究の方法

【実験概要】

北海道大学大学院水産科学院実験棟に設置された実験水槽(90×55×26 cm 深、水温 10.4°C)にサクラマス *Onchorhynchus masou masou* 3 個体・18.2±0.2 cm (Mean±SD) を遊泳させた。実験水槽内の側面から中央に向けてステレオカメラを配置しサクラマスの撮影を行った

【カメラ設定とカメラ較正】

金属製の治具に市販のビデオカメラ (Hero8, GoPro) を2機固定しステレオカメラとした(図1)。解像度をフルハイビジョン、フレームレートを 60 fps、手ぶれ補正機能停止に設定して撮影

を行った手ぶれ補正機能停止。2機のカメラで集録された音声記録の位相を根拠に、2機のカメラの時間同期を行った。

ステレオカメラで撮影した物体の3次元空間位置を得るために、DLT法によるカメラキャリブレーションを実施した。3次元位置を既知とする空間特徴点を金属製のフレームに75ポイント設け、これを水中で撮影した。2機のカメラで撮影された特徴点の画像座標と実座標(3次元)の関係から、カメラパラメータを求めた。これにより、計測対象とカメラの幾何学的な関係を求めることが可能になり、2つのカメラ画像上の対象の座標を得ることで、対象の3次元座標を求めることができる。

【魚体の検出】 魚体の画像座標を自動的に取得するために、深層学習のうち、物体検出アルゴリズムであるYOLOv4を用いてサクラマスの画像認識を行い、計測点の自動検出を行った。YOLOv4は、検出対象を関心領域として抽出した教師画像を学習することで、任意の画像上に存在する関心領域を検出し、検出物体のクラス分類と画像上の位置情報を取得できる。ステレオ画像上の同一個体については、エピポーラ線を用いたステレオマッチングを行うことで特定した。

【魚体の追跡】 対象個体の経時的な遊泳位置を取得するためには複数の魚が遊泳しているため、魚体を検出した画像フレームの前後フレームの同一個体を紐づける必要があり、最近傍の個体を同一個体とした。また、個体追跡はカルマンフィルタによる遊泳経路の平滑化を同時に行い、未検出や個体重畳によるオクルージョンが発生した場合は、カルマンフィルタによる個体の予測位置を参考に位置を決定した。特に個体重畳時は他方カメラの画面上では対象魚の位置を検出できる可能性があり、これにより特定されるエピポーラ線とカルマンフィルタによる魚の予測位置を有効に活用し計測データの取得を図った。



図1 市販のビデオカメラ (HERO8, GoPro) を2機組み合わせて作製したステレオカメラ

4. 研究成果

ステレオカメラキャリブレーションを実施し、各特徴点の3次元座標の実測値と推定位置の誤差を算出することで、本研究で準備したステレオカメラの性能を評価した。偏りの指標となる正確度の平均は x 成分で0.25 cm, y 成分で0.13 cm, z 成分で0.83 cm, 合成成分で0.91 cmだった。ばらつきの指標となる精度の平均は x 成分で0.25 cm, y 成分で0.11 cm, z 成分で0.76 cm, 合成成分で0.77 cmであった。すなわち、較正された空間内では、対象とする魚体の3次元位置は1 cm程度の誤差で計測可能なことが分かった。

YOLOv4による魚体検出、エピポーラ拘束による2機カメラのステレオマッチングによる同一個体の紐づけ、カルマンフィルタと近傍法によるフレーム間における同一個体の紐づけにより、3個体の3次元遊泳位置の自動計測を実現した(図2, 3)。



図2 YOLOv4 で検出された実験水槽内の3個体のサクラマス。左画像はステレオカメラの治具の左側に設置したカメラで撮影された画像，右画像はステレオカメラの治具の右側に設置したカメラで撮影された画像を表す。バウンディングボックスは検出したサクラマスを囲っており，左右カメラ画像の同じ色のバウンディングボックスはステレオマッチングで紐付けられた個体を表す。

個体は各々の個体が様々な方向を向いて遊泳し群れを成している様子が見られなかったが，計測した3次元遊泳位置から個体の遊泳速度は $13.2 \pm 7.9 \text{ cm s}^{-1}$ (Mean \pm SD) となり，今後は魚群行動の特徴を表す魚群パラメータの取得が期待できる。また本実験条件下では計測範囲外の値が得られた。該当するシーンを確認したところ，2機カメラで別の個体を紐づけして追跡を行っていたことが分かった。このような誤認識も計測されたことから，さらなる性能の向上と，計測値を外れ値として認識する指標が必要だと分かった。魚群の追跡時に複数の魚体が画像上で重なるオクルージョンが発生し，オクルージョンの発生前と発生後の個体の紐づけができず，追跡が中断され魚体位置が取得出来ない事例が発生した。オクルージョンしたカメラではない，他方のカメラの画像位置から推定されるエピソード線とカルマンフィルタによる3次元位置の予測位置から追跡を維持することにより，オクルージョン前後の個体の紐づけに成功したシーンがあり2分追跡時間が約3.58秒伸びた(図4)。

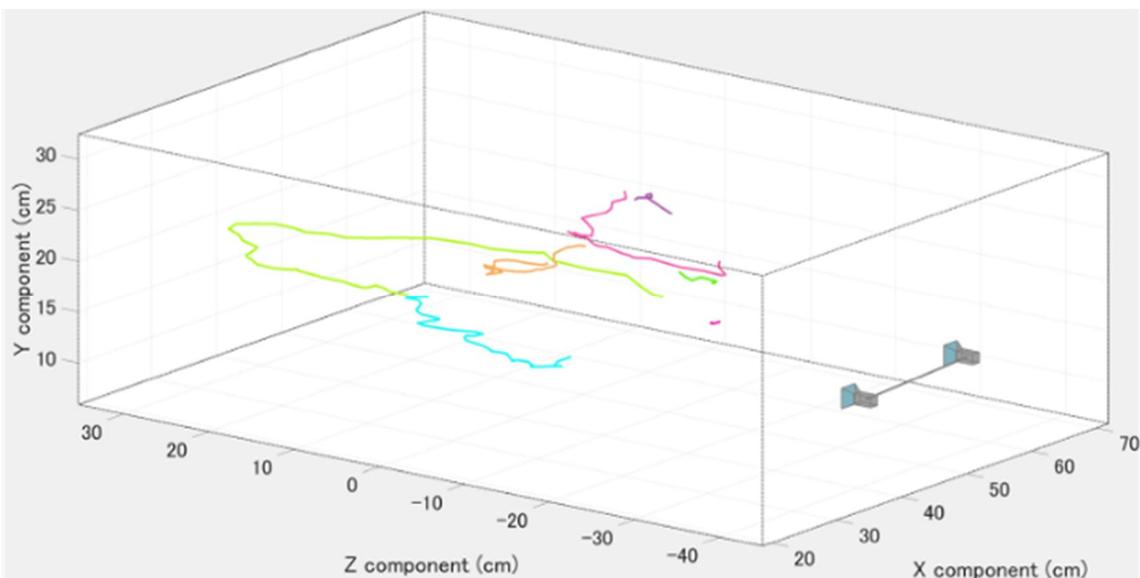


図3 ステレオ画像計測と深層学習により自動追跡されたサクラマスの3次元遊泳軌跡。色の違いは同一個体を表す。



図 4 左カメラの画像上で個体同士が重畳した結果、後方の個体が前面の個体の像に隠れるオクルージョン発生の様子。右カメラではその後方個体を検出できており、左カメラ画像上のその個体位置はカルマンフィルタの予測位置と右カメラのエピポーラ線を根拠に推定した。

一方で、本研究で同時に追跡できた個体計測数は3個体に留まったが、今後はより多くの個体を追跡できるように検出数を向上させることが課題になった。

本研究は、当初予定していた養殖生簀での魚群行動の計測が叶わなかったことから遅延したが、最終的に画像認識技術による複数個体の3次元魚群行動の自動計測のアルゴリズムを構築できた。また、本研究を実施するにあたっては、コロナ禍で試験が叶わなかったことから研究の実実施計画が遅延したが、実験室内で飼育していたウニを使い手法の検証を行ったり、実測の魚群行動パラメータを計測し(古田ら 2022)、それを利用した魚群シミュレーションを実施したり(高橋・米山 2023)、魚群行動計測に関して様々な可能性も本研究課題で見いだすことが出来た。

本研究が目指した行動計測手法は、魚類行動学のほか、養成魚モニタリングや Fish welfare の指標整理など水産増養殖分野にも強いニーズがある (Barreto et al. 2022)。魚群の3次元計測の実現により、手動による計測にかかる労力低減が見込めるだけでなく、これまで2次元空間で評価されていた魚群行動を、3次元空間に拡張できたことにより、正確な行動評価が可能になる。これまで分析できなかった魚群指標などを明らかに出来ることから魚群行動研究が進むと期待できる。たとえば、増養殖分野では3次元空間上の個体間距離から飼育収容密度を試算できるなど、本研究の波及効果は極めて大きいと考える。

最後に、本研究を支援して下さった関係者の皆様、研究室の学生の皆様に感謝申し上げます。

文献

- Fukuda Hiromu, Sawada Yoshifumi, Takagi Tsutomu (2011) Ontogenetic changes in behaviour transmission among individuals in the schooling of Pacific bluefin tuna *Thunnus orientalis*, *Aquat. Living Resour.*, 24, 113-119, DOI:doi:10.1051/alr/2011136.
- 古田直哉, 石田梓, 高橋勇樹, 藤岡紘, 河端雄毅, 米山和良 (2022) 携帯型ステレオカメラを用いた海上生簀における天然クロマグロ *Thunnus orientalis* 幼魚の魚群モニタリング, *日本水産学会誌*, 88, 264-270, DOI:10.2331/suisan.21-00038.
- 高橋勇樹, 米山和良 (2023) クロマグロ *Thunnus orientalis* 幼魚を対象とした生簀網内の行動シミュレーション, *日本水産工学会誌*, 59, 179-190, DOI:10.18903/fisheng.59.3_179.
- 坂本誠, 米山和良, 田丸修, 鳥澤真介, 高木力 (2018) ステレオビジョンによるマサバの3次元遊泳行動計測: パーティクルフィルタを用いた自動計測, *日本水産学会誌*, 84, 787-795, DOI:10.2331/suisan.17-00071.
- Michelle Orietta Barreto, Sonia Rey Planellas, Yifei Yang1, Clive Phillips, Kris Descovich (2022) Emerging indicators of fish welfare in aquaculture, *Review in Aquaculture*, 14, 343-361, DOI: 10.1111/raq.12601

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6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 Komeyama Kazuyoshi, Ikegami Atsushi, Fukuda Kichinosuke, Ishida Azusa, Sasaki Yuto, Maeno Hitoshi, Asaumi Shigeru, Uchida Takashi, Katahira Yusei, Seki Akio, Oka Tetsuo, Shiina Yasuhiko, Takahashi Yuki	4. 巻 90
2. 論文標題 Body size estimation method for seasonally growing farmed yellowtail <i>Seriola quinqueradiata</i> in an aquaculture net cage using a stereo camera	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Fisheries Science	6. 最初と最後の頁 227 ~ 237
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12562-023-01736-z	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 Takahashi Yuki, Ikegami Atsushi, Maeno Hitoshi, Asaumi Shigeru, Seki Akio, Oka Tetsuo, Shiina Yasuhiko, Komeyama Kazuyoshi	4. 巻 90
2. 論文標題 Evaluating bias in stereo camera measurements using swimming behavior simulations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Fisheries Science	6. 最初と最後の頁 269 ~ 279
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12562-023-01742-1	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 Takahashi Yuki, Komeyama Kazuyoshi	4. 巻 18
2. 論文標題 Development of a feeding simulation to evaluate how feeding distribution in aquaculture affects individual differences in growth based on the fish schooling behavioral model	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 e0280017
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0280017	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 高橋 勇樹、米山 和良	4. 巻 59
2. 論文標題 クロマグロ <i>Thunnus orientalis</i> 幼魚を対象とした生簀網内の行動シミュレーション	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本水産工学会誌	6. 最初と最後の頁 179 ~ 190
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18903/fisheng.59.3_179	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 FURUTA NAOYA、ISHIDA AZUSA、TAKAHASHI YUKI、FUJIOKA KOU、KAWABATA YUUKI、KOMEYAMA KAZUYOSHI	4. 巻 88
2. 論文標題 携帯型ステレオカメラを用いた海上生簀における天然クロマグロThunnus orientalis幼魚の魚群モニタリング	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 NIPPON SUISAN GAKKAISHI	6. 最初と最後の頁 264 ~ 270
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2331/suisan.21-00038	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 山崎祐人, 池上温史, 渡辺孝行, 能登正樹, 高橋英祐, 山羽悦郎, 高橋勇樹, 米山和良	4. 巻 61
2. 論文標題 海上生簀でのステレオカメラを使用した養殖サクラマスの成長推定	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 水産工学	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) 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 米山和良、高橋勇樹	4. 巻 34
2. 論文標題 魚群モニタリングを目的とした携帯型ステレオカメラ	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 画像ラボ	6. 最初と最後の頁 23-29
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 無
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11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 佐々木勇人, 山崎祐人, 米山和良
2. 発表標題 ステレオ画像計測による魚体計測値の変化を利用した遊泳速度の推定
3. 学会等名 令和5年度日本水産学会春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 米山和良, 高橋勇樹, 浦 和寛
2. 発表標題 画像認識技術を用いたキタムラサキウニの行動モニタリング手法の構築
3. 学会等名 2021 年度日本水産工学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 米山和良, 佐々木勇人, 山崎祐人, 市川悠人, 池上温史, 石田梓, 高橋勇樹, 館岡篤志, 浅井咲樹, 藤岡紘
2. 発表標題 自然海域を遊泳するクロマグロの体測 画像計測と捕獲計測の比較
3. 学会等名 2023 年度水産海洋学会研究発表大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 池上温史, 佐々木勇人, 福田吉之介, 米山和良
2. 発表標題 養殖ブリの尾鰭振動に伴うステレオカメラ計測尾叉長の変化
3. 学会等名 令和5年度日本水産学会秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 米山和良, 佐々木勇人, 山崎祐人, 市川悠人, 池上温史, 館岡篤志
2. 発表標題 北海道松前沖における漂流物に蝟集した魚類のカメラ計測
3. 学会等名 令和5年度日本水産学会秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐々木勇人, 西川 凜, 山崎祐人, 米山和良
2. 発表標題 画像体側データから推定される尾鰭振動数を用いたサクラマス ¹ の遊泳速度推定
3. 学会等名 2023年度日本水産工学会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 米山和良, 福田吉之介, 佐々木勇人, 池上温史, 高橋勇樹, 浅海 茂, 西森 靖, 内田 隆, 片平裕生, 関 昭生, 岡 哲生, 椎名康彦, 岡崎良亮
2. 発表標題 養殖ブリの成長モニタリング技術 AIステレオカメラによる養成魚群の季節的な成長変化の追跡
3. 学会等名 令和5年度日本水産学会春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 米山和良, 市川悠人, 佐々木勇人, 山崎祐人, 池上温史, 高橋勇樹, 館岡篤志
2. 発表標題 北海道松前町沖でのステレオカメラを用いたクロマグロ魚群の計測
3. 学会等名 令和5年度日本水産学会春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山崎祐人, 松尾周佳, 西川凜, 渡辺孝行, 能登正樹, 池上温史, 高橋英祐, 山羽悦郎, 高橋勇樹, 米山和良
2. 発表標題 なぜサクラマスの体サイズはばらつくのか? PITタグとカメラ計測による成長追跡
3. 学会等名 2023年度日本水産増殖学会第21回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 米山和良, 高橋勇樹, 浦 和寛
2. 発表標題 画像認識技術を用いたキタムラサキウニの行動モニタリング手法の構築
3. 学会等名 2021年度日本水産工学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西川凜, 佐々木勇人, 米山和良
2. 発表標題 サクラマスを対象とした画像認識技術による魚群行動計測
3. 学会等名 令和6年度日本水産学会春季大会
4. 発表年 2023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	高橋 勇樹 (Takahashi Yuki) (00761701)	北海道大学・水産科学研究院・准教授 (10101)	

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
---------	---------