

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 26 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26450263

研究課題名(和文) 潮汐モデルとデータ同化を組み合わせた底魚類の位置推定システムの開発

研究課題名(英文) Geolocation of free-ranging demersal fish using tidal location method, bottom temperature by data assimilation system, and depth data

研究代表者

河邊 玲 (KAWABE, Ryo)

長崎大学・海洋未来イノベーション機構・教授

研究者番号：80380830

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ヒラメなど海底付近に生息する魚の移動追跡を可能とする“潮汐モデルとデータ同化シミュレーションを組み合わせた底魚類の位置推定システム”の開発を目指した。従来型の方法では開放性の海域では位置の推定が難しかったが、底層水温情報と遊泳速度を解析変数に加えた新しいシステムでは分解能の向上が示され、本研究のシステムの有効性が確かめられた。  
また、開発したシステムを用いて、東北太平洋沿岸域におけるヒラメとの移動生態について解析した。東北南部海域における本種のコアエリアが仙台湾内に出現したこと、季節的な南北移動が確認でき、未解明であった本種の移動特性を初めて示された。

研究成果の概要(英文)：Geolocation using the tidal location method (TLM), which uses tidal data recorded by DSTs, has proved helpful in reconstructing the most probable track of tagged fish. In order to extend time range of successful geolocation, it is first necessary to extract the tidal signal from the depth recordings on the DSTs, and then to compare the resulting data to output from an ocean tide model. Furthermore, using statistical criteria within an estimated geographical region of confidence that was constrained by environmental and biological data (bottom depth and swimming speed), to reconstruct the geolocation of the fish. However, the current TLM approach has technical limitations. And so, we developed a new methodology that includes the diurnal K1 constituent, the second largest harmonic constituent, and bottom temperatures predicted by the data assimilated ocean model, the Japan Coastal Ocean Predictability Experiment (JCOPE2).

研究分野：魚類行動生態学

キーワード：バイオロギング データ同化 ヒラメ マツカワ 移動生態

## 1. 研究開始当初の背景

近年、センサとメモリを搭載した機器を水産有用魚類に取り付けて、彼らが経験した情報を記録するバイオロギング技術が盛んに利用されている。機器の小型化と搭載されるセンサは日進月歩で多様化しており、対象生物が「いつ、どこで(水平位置・深度)」、「どんな環境を経験し(水温・塩分・クロロフィル)」、「何をしているか(姿勢や動き・映像)」を同時に記録できるようになりつつある(Rutz and Hays 2009)。バイオロギングはまだまだ発展する余地のある可能性に満ちた技術であり課題も多い。とりわけ、「水平位置」は、資源の解析単位である系群の分布や産卵場を決める要素として、水産学上の重要な情報の一つでありながら、新たな解析手法の開発が立ち後れている。その理由は、海中では電波の減衰が著しく海面に浮上する海産動物で汎用されているGPSが使えないことがあげられる。また、海中では超音波は優れた通信手段であるが、生物を追跡できる対象空間は受信機の数に依存するので、数百km規模で移動する魚を追跡するためには多数の基地局が必要となり、費用対効果が低い。以上の理由から、海産魚類から空間精度の良い位置情報を取得する方法については開発の余地が大いに残されている。

一般に、海中に潜ったままである海産魚類は電波通信を使って測位できない。そこで、初期に考案された測位法は、魚が経験する照度が用いられた(照度測位法)。照度測位法の原理は、魚が経験する毎日の日照時間を照度センサで記録して、日没時刻から経度を、日長時間から緯度を計算するものである。照度測位法は大洋規模で回遊するマグロ類のような漂流性魚類(Block et al. 2011)で汎用されており、日本列島沿岸を1,000km規模で回遊するクロマグロ(Kitagawa et al. 2007)やブリ(井野ら 2008)でも用いられている。照度測位法の誤差は、理想的な観測状態において、経緯度方向それぞれ1°程度とされているが、緯度方向の誤差は経度の誤差と比較して大きいので、照度だけを計算に用いた場合、500km範囲内を移動するような魚の位置推定は難しい。さらに、海中を鉛直的に移動して、海表面に出現するマグロ類には照度測位法は適用できるが、カレイ類・タラ類のような底魚類は照度の観測が難しいので使えない。以上のような理由で、日本近海に生息する底魚類には資源管理対象種が含まれているにもかかわらず、彼らの回遊生態はほとんど未解明のままである。

ところで、半日以上連続して海底に身を潜めているような底棲性魚類(底魚類)をバイオロギングすると、深度計によって潮位変動(干満潮時)が記録できる。また、海洋のあらゆる地点の潮位変化、すなわち、潮時と潮位差は潮汐モデルで予測可能であるので、それらを照合することで、個体の位置を推定することができる。これは、英国の研究チーム

によって開発された測位法で、「潮汐測位法」として知られている(Metcalf and Arnold 1997)。潮汐測位法を用いて、欧州・北海に生息するカレイ類(Hunter et al. 2004)、タラ類(Hobson et al. 2009)あるいは北米東岸に生息するタラ類(Gröger et al. 2007)を対象に回遊生態研究が精力的に進められている。一方、研究代表者らも、ヒラメに潮汐測位法を適用して、閉鎖系海域である長崎県大村湾内に放流した個体が湾外に移動することを発見している。このように、潮汐測位法は、底魚類の分布と回遊を知る貴重な手掛かりとなり、生態研究が大きく前進するきっかけとなった。

しかしながら、潮汐測位法には大きな問題がある。測位精度が調査海域の潮汐特性に依存する点がまず挙げられる。前述した欧州・北海や有明海のように干満差が著しく大きい海域では、最高で4kmの高い空間精度(Hunter et al. 2003)が得られる。一方、研究代表者が本研究を開始する以前に行った予備調査では、仙台湾に深度記録計を海底に係留し、海峡部や内湾とは異なる開放性海域における潮汐測位法の位置精度を調べたところ、潮汐測位法だけの計算では多数の候補点が残った。そこで、深度記録計から得た平均深度と海底深度を照合して位置を選定したが、候補点が1点に絞れなかった。さらに、経度方向には100km程度、緯度方向は200-300kmの精度にとどまった。以上より、現行の潮汐測位法が適用できるのは内湾や海峡部の閉鎖性海域に限られることを確認した。ところで、バイオロギングから得られる物理量は深度だけでなく水温もある。そこで、魚が経験した水温と調査海域の海底水温を照合すれば、さらに位置を絞り込めると考えた。

## 2. 研究の目的

底魚類が経験している水温は海底付近であるので、システム開発には海底水温の情報が必要となる。海表面の水温が人工衛星による観測等で充実している一方で、底層水温は観測データに頼らざるを得なかった。しかし、観測データは時空間的に偏在するのが常で、ニーズにあった利用は難しい。そこで本研究では「データ同化数値シミュレーション」を利用する。データ同化は、気温、水温、気圧、風向、風力など利用可能な観測データを数値シミュレーションに導入して、大気・海洋に関する物理量をモデル内の全時空間グリッド上で推定する手法である。そこで本研究では、以下に示すアプローチによって、日本近海のあらゆる海域で底魚類の移動追跡を可能とする「潮汐モデルとデータ同化シミュレーションを組み合わせた底魚類の位置推定システム」の開発を目指した。

(1) 底魚類に深度・水温記録計を取り付けてバイオロギング調査を行い、潮汐情報(観測潮時)と水温情報(経験水温)を

得る。

- (2) 潮汐予測モデルによって観測海域の潮時情報(予測潮時)を得て、(1)で得た観測潮時と照合して一致した点を位置候補点として抽出する。
- (3) (2)で計算した位置候補点が複数あった場合、観測潮時が記録された日の平均深度と、観測海域の海底深度を照合して一致した点を位置候補点として選定する。
- (4) (3)の計算においても位置候補点が複数となった場合、データ同化シミュレーションを用いて観測海域の海底水温を計算して、観測潮時が記録された日の平均水温と照合して一致した点を魚がいたその日の位置として決定する。

以上の(2)~(4)の計算が自動で実行される汎用的なシステムの開発を目指した。

### 3. 研究の方法

#### (1) バイオロギング調査

北海道・東北太平洋をモデル海域に選定し、ヒラメをモデル生物として、標識放流調査を実施した。平成 26 年度には仙台湾及び福島県小名浜沿岸で捕獲された合計 144 個体に深度と温度を記録するアーカイバルタグを取り付けて放流した。前年度までの別調査から得た再捕個体と合わせて合計 77 個体分の深度・水温記録をシステムの開発のために用いた。

#### (2) システム開発

本研究では潮汐予測モデルとデータ同化シミュレーションを組み合わせた底魚類を対象とした位置推定システムの開発を目指した。位置推定アルゴリズムの流れを図 1 に示した。計算には、MATLAB R2015a (MathWorks 社製)を用いた。システムの詳細を以下に示す。

##### 深度時系列記録からの記録潮汐の抽出

ヒラメのような異体類は 1 日のほとんどの時間を海底に定位している(中塚ら、2014, 日本水産学会誌)。したがって、海底に定位しているときには潮汐に伴う深度変化が記録される。そこでまず、バイオロギング調査から得た深度時系列記録を読み込み、M2 分潮と K1 分潮を想定した回帰モデルを用いて海底に定位しているときに記録される潮汐変化(記録潮汐)を抽出した。

##### 潮汐予測システムによる予測潮汐の算出

北海道から東北太平洋沿岸部(35° ~ 45°N, 135° ~ 144°E)の範囲における予測潮汐を、潮汐予測システム(NAO99b, Matsumoto et al., 2000, 解像度: 0.08°)から計算した。本研究では、メッシュ毎に 10 分の時間幅で出力されるように設定した。次に記録潮汐の開始時刻と終了時刻を用いて、解析範囲内の各格子点の予測潮汐を抽出し、得られた計算結果から、M2 と K1 分潮の位相と振幅を求めた。

調査海域の海底深度情報と記録潮汐が

得られた解析時間窓における深度記録を比較するために、海底地形デジタルデータ(日本水路協会 編)を格子点の解像度に応じてグリッド化し、海底深度のデータベースを作成し、予測潮汐のパラメータに導入した。

先行研究では、深度情報は経度方向の絞り込みは可能だが、緯度方向には難しいと示唆されている。本研究の調査海域では、緯度方向にある程度水温勾配があることから、水温情報を用いて緯度方向の絞り込みが可能であると考えた。そこで、データ同化シミュレーションによって得られた底層水温の数値予測モデル(JCOPE2, Miyazawa et al., 2009)も予測潮汐のパラメータに導入した。

位置候補点の抽出:ここでは、記録潮汐と予測潮汐の特性値(M2 分潮の位相、海底深度値)を照合し、位置候補点を抽出した。

##### 位置候補点の絞り込み(チューニング)

得られた位置候補点が複数出現し、候補点間での地理的差異が大きい場合、位置候補点の中から適切な位置を探す必要がある。そこで、既に絞り込みに使った M2 分潮の位相と深度情報を除いた環境情報(底層水温、M2 分潮の位相および K1 分潮の位相と振幅)を用いて、記録潮汐と候補地地点の海洋環境情報を照合した。照合の際の評価基準として、記録潮汐と予測潮汐の間の環境情報値の差に評価の重みを与えることで、それぞれの環境情報を複合的に評価できるようにした。この計算過程では、設定する重みの値の大きさを照合する環境情報毎に任意に変えることができ、推定される位置の妥当性を判断しながら試行錯誤できる利点がある。候補点の選別を行い、評価値が一定の基準に達している位置候補点を選んだ。そして、これらの位置候補点のうち、評価の最も高い点を推定位置とした。

遊泳速度によるフィルタリング:これまでの解析によって抽出された位置推定点を個別別に時系列に従って確認したところ、現実的にあり得ない遊泳速度となっている移動が認められた。そこで、現実的な点だけを採用するために、ヒラメの平均遊泳速度(0.31 m/s; Kawabe et al. 2004)と同じくヒラメの野外での日間平均遊泳時間(2.0 hour; 中塚ら、2014)を用いて日間移動速度を計算し、これを閾値とした。閾値を超えた移動となる点を削除し、位置推定点を確定させた。

#### (3) 位置精度の推定のための係留試験

推定された位置の分解能を評価するために、先行研究(Hunter et al. 2003)に従い、調査海域に放流調査で使用したものと同型式のアーカイバルタグを海底近くに係留し、得られた深度・水温記録を用いて開発した位置

推定システムから位置を推定し測位分解能を検討した。係留試験は調査対象海域に位置する仙台湾内(38°N, 141°E)とし、水深30mの位置にロガーを係留し約2ヵ月間深度と水温を記録した。回収したロガーは、データをダウンロードし、解析に用いた。

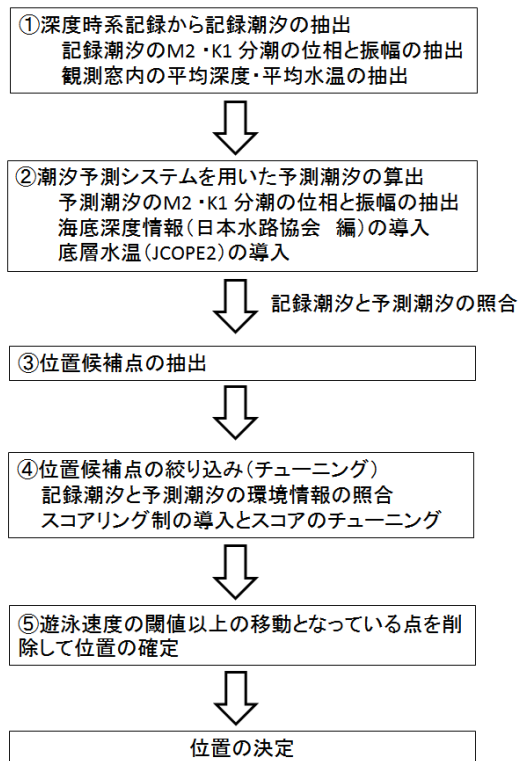


図1 位置推定アルゴリズムのフローチャート

#### 4. 研究成果

##### (1) 係留試験の結果

仙台湾に係留したロガーの推定位置結果を図2に示した。

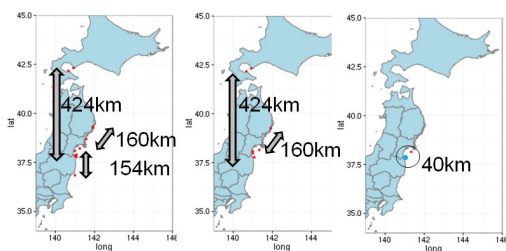


図2 解析アルゴリズムと位置推定の空間分解能。(左) M2分潮と深度、(中) M2分潮・深度・K1分潮、(右) M2分潮・深度・K1分潮・水温をそれぞれアルゴリズムに加えたときの位置推定地点。

M2分潮と深度だけでチューニングすると、位置推定地点は北海道噴火湾から福島県小名浜沖の範囲に出現した(図2左)。また、K1分潮を変数に加えると北海道噴火湾には引き続き位置が出現するものの小名浜沖の点は消失した(図2中)。さらに、底層水温情報を加えると、位置推定結果はかなり改善して仙台湾にだけ出現した(図2右)。以上より、本研究で用いた解析アルゴリズムの有効性が確かめられ、東北太平洋沿岸のような開

放性海域でも利用可能であることが示された。

##### (2) バイオロギングデータの解析結果

開発した位置推定システムを用いて、東北太平洋沿岸域におけるヒラメの移動生態について解析した。

**分布と行動圏推定:** 仙台湾と小名浜沖から放流されたヒラメは、北は岩手県釜石市沖から南は茨城県鹿島灘南部の海域に分布していた(図3)。また、固定カーネル法により推定した95%行動圏は三陸中部から茨城県北部海域の間にあった。一方、コアエリア(95%行動圏)は仙台湾南部から福島県北部の水深30mの海域に出現した。岩手県沿岸部は陸棚域が狭いためヒラメの分布量は相対的に少なく、岩手県中部から南部の沿岸域は親潮第一分枝の影響を強く受けるため、比較的低温であり、ヒラメの南北交流の障害になっている可能性があること、また、過去に実施された標識再捕の結果によると岩手県や青森県沿岸で放流されたものは北に移動する傾向が強いこと(後藤・佐々木, 2015)や、宮城県や茨城県沿岸で放流されたものは南に移動する傾向(二平, 1990)があることから、岩手から青森県と宮城から茨城県の2つの群に分かれている可能性がある。本研究で示された分布の北限と南限については、先行研究で示唆されている生息範囲の傾向とも一致するため、この位置推定システムの妥当性が示されたといえる。一方、仙台湾はこの海域で最大の漁獲量を示す海域として知られ、海域の生産性も高い。本研究からコアエリアが仙台湾に出現したことはこの海域がヒラメの分布の中心になっていると考えられる妥当な結果であり、これも推定システムの有効性を支持する妥当な結果と考えられる。

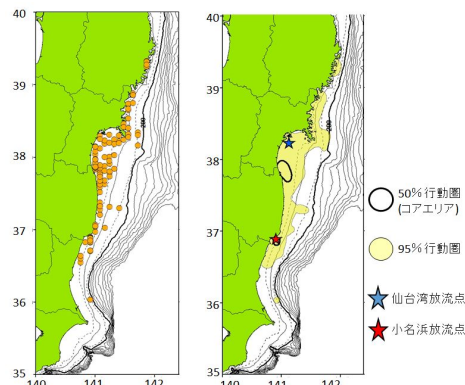


図3 位置推定システムによるヒラメ成魚の分布(左)および固定カーネル法により推定された行動圏(右)

**移動様式とその多様性:** 個別別の移動経路を図4に示した。ヒラメの移動様式は、多様なパターンを示した。小名浜に11月に放流された雄個体(全長: 47cm)は、

春までに仙台湾に移動し、そのまま湾内に留まった(図4A)。一方、仙台湾に6月に放流された雌個体(全長:61cm)および小名浜から6月に放流された雌個体(全長:49cm)は、ともに、放流海域付近に留まり、長距離の移動を示さなかった(図4B,C)。また、仙台湾に6月に放流された雌個体(全長:53cm)は、冬季に沖合の200mの等深線に沿って北上移動した(図4D)。

以上、本研究によって、日本列島全域の沿岸に広く分布しながらも移動生態が未解明であった本種の移動特性が初めて示された。これらの結果は、資源評価の基本単位である系群の見直しに役立てられる。また、東日本大震災に伴い発生した福島第一原発の事故により流出した放射性物質は、生物濃縮によってヒラメをはじめとした底魚類への蓄積が認められている。これらの底魚類が東北太平洋沿岸を季節的に回遊すると、濃縮された放射性物質も生物をプラットフォームとして移動する可能性がある。この点においても、本研究から得られた回遊経路と分布を手掛かりとした放射性物質の伝播の解明に繋がる点において本研究には社会的意義もある。

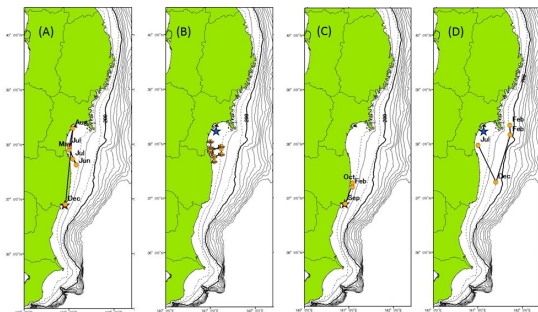


図4 個体別の移動経路。(A)南北移動。(B)仙台湾内を移動。(C)小名浜付近を移動。(D)放流後、沖合を移動。

#### 引用文献

Rutz C & Hays GC (2009) New frontiers in biologging science. *Biology Letters*, 5, 289–292.

Block BA, Jonsen ID, Jorgensen SJ, Winship AJ, Shaffer SA, Bograd SJ, Hazen EL, Foley DG, Breed GA, Harrison AL, Ganong JE, Swithenbank A, Castleton M, Dewar H, Mate BR, Shillinger GL, Schaefer KM, Benson SR, Weise MJ, Henry RW & Costa DP (2011) Tracking apex marine predator movements in a dynamic ocean. *Nature* 475, 86–90.

Kitagawa T, Boustany AM, Farwell CJ, Williams TD, Castleton MR, Block BA (2007) Horizontal and vertical movements of juvenile bluefin tuna (*Thunnus orientalis*) in relation to seasons and oceanographic

conditions in the eastern Pacific Ocean. *Fisheries Oceanography*, 16, 409–421.

井野慎吾、新田 朗、河野展久、辻 俊宏、奥野充一、山本敏博、記録型標識によって推定された対馬暖流域におけるブリ成魚の回遊、*水産海洋研究*、72(2)、2008、92-100.

Metcalfe JD, Arnold GP (1997) Tracking fish with electronic tags. *Nature* 387:665–666.

Hunter E, Metcalfe JD, Arnold GP, Reynolds JD (2004) Impacts of migratory behaviour on population structure in North Sea plaice. *Journal of Animal Ecology* 73:377–385.

Hobson VJ, Righton D, Metcalfe JD and Hays GC (2009) Link between vertical and horizontal movement patterns of cod in the North Sea. *Aquatic Biology*. 5:133–142.

Gröger JP, Rountree RA, Thygesen UH, Jones D, Martins D, Xu Q, Rothschild BJ (2007) Geolocation of Atlantic cod (*Gadus morhua*) movements in the Gulf of Maine using tidal information, *Fisheries Oceanography*, 16:317–335

Hunter E, Aldridge JN, Metcalfe JD, Arnold GP (2003) Geolocation of free-ranging fish on the European continental shelf as determined from environmental variables I. Tidal location method. *Marine Biology* 142:601–610.

中塚直征、安田十也、勝又博子、古川誠志郎、栗田 豊、河邊 玲、長崎県沿岸に生息するヒラメ *Paralichthys olivaceus* の遊泳行動の時空間変動、*日本水産学会誌*、80(3)、2014、339-348.

Matsumoto K, Takanezawa T and Ooe M (2000) Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/Poseidon altimeter data into hydrodynamical model: A global model and a regional model around Japan, *Journal of Oceanography*. 56:567–581.

Miyazawa Y, Zhang R, Guo X, Tamura H, Ambe D, Lee J-S, Okuno A, Yoshinari H, Setou T, Komatsu K (2009) Water mass variability in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis. *Journal of Oceanography*, 65:737–756

Kawabe R, Naito Y, Sato K, Miyashita K, Yamashita N (2004) Direct measurement of the swimming speed, tailbeat, and body angle of Japanese flounder (*Paralichthys olivaceus*). *ICES Journal of Marine Science*. 61:1080–1087

後藤友明、佐々木律子、標識放流・再捕データに基づくヒラメ若齢魚の岩手県北部からの移動パターン、*岩手県水技セ研報*、8、2015、5-11.

二平 章、北海道・東北沿岸海域における人口種苗ヒラメの標識放流、*茨城水試研*

報、28、1990、97-111.

## 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1件)

Kawabe R, Nakatsuka N, Wada T, Sawaguchi S, Murakami O, Kamiyama K, Kito K, Furukawa S, Kayaba T (2017) Behaviourally mediated thermal experience in relation to final oocyte maturation by free-swimming barfin flounder (*Verasper moseri*). Fisheries Research. 186: 544-564. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.fishres.2016.08.023>) (査読有り)

### 〔学会発表〕(計4件)

岸野 薫、中塚直征、勝又勝郎、栗田 豊、佐久間 徹、島村信也、古川誠志郎、河邊 玲：常磐海域におけるヒラメの移動生態に関する研究 - 3、位置推定システムの改良：開放性沿岸域への応用を目指して、平成28年度日本水産学会春季大会、東京海洋大学(東京都港区) 2016年3月28日

K. Kishino, K. Katsumata, S. Furukawa, N. Nakatsuka, Y. Kurita and R Kawabe (2015) Geolocation of free-ranging demersal fish using tidal location method, bottom temperature by data assimilation system, and depth data. 10th International Workshop on the Oceanography and Fisheries Science of the East China Sea, Jeju (Korea), Nov. 1-3, 2015.

岸野 薫、中塚直征、栗田 豊、佐久間 徹、島村信也、河邊 玲：常磐海域におけるヒラメの移動生態に関する研究 - 1、周年の滞在深度・経験水温特性、平成27年度日本水産学会春季大会、東京海洋大学(東京都港区) 2015年3月30日

西野公規、栗田 豊、佐久間 徹、島村信也、中塚直征、河端雄毅、Gregory N Nishihara、河邊 玲：常磐海域におけるヒラメの移動生態に関する研究 - 2、野外の経験水温記録を指標とした年間標準代謝量の推定(予報) 平成27年度日本水産学会春季大会、東京海洋大学(東京都港区) 2015年3月30日

### 〔図書〕(計0件)

### 〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：

出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等  
研究室HP：

<http://sites.google.com/site/biologgingkawabehp/>

研究室 Facebook ページ：

<http://www.facebook.com/BiologgingKawabe/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

河邊 玲 (KAWABE, Ryo)

長崎大学・海洋未来イノベーション機構・教授

研究者番号：80380830

### (2) 研究分担者

勝又 勝郎 (KATSUMATA, Katsuro)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境観測研究開発センター・グループリーダー代理

研究者番号：80450774

古川 誠志郎 (FURUKAWA, Seishiro)

長崎大学・水産・環境科学総合研究科(水産)・プロジェクト研究員

研究者番号：90701235

(平成26年度まで研究分担者)