小型記録計・発信機を用いた魚類の行動・生理解析

牧 口 祐 也¹・青 木 良 徳²・北 川 貴 士²

バイオリギングとは、動物に計測機器（データロガーや発信機）を装着し、人間が直接観察することができない行動・生理情報を環境情報と同時に記録する手法のことである。近年のマイクロエレクトロニクスの発達に伴い、機器の小型化が進み、本手法の魚類への適用が可能になってきた。また、センサの多様化に伴いさまざまな計測項目の測定、例えば、体温、筋電位、心電図、脳波など生理情報を取得することが実現されつつある。これにより、野外での魚類の生理的情報の収集が可能になり、彼らの行動を、周囲の環境といった外的要因に対する内的反応を介した応答として理解することが可能になった。

そこで本稿では、バイオリギングを用いた魚類の行動学・生理学的研究に焦点を当て、研究事例（クロマグロの行動的体温調節、筋電位発信機を用いたサケの遡上行動、心電ロガーを用いたサケの産卵行動解析）について紹介し、今後の応用について述べる。

1. バイオリギング手法を用いた魚類の行動生理学的研究

バイオリギングとは、動物に計測機器（データロガーや発信機）を装着し、人間が直接観察することができない行動・生理情報を環境情報と同時に記録する手法のことである^{8, 26)}。バイオリギングはもともと、海獣類などの大型哺乳類の潜水行動研究のために開発された手法である。当初の計測機器は比較的大型かつアナログであり、計測項目は水深や水温などの環境情報のみであった。近年のマイクロエレクトロニクスの発達に伴い、機器の小型化が進み、本手法の魚類への適用が可能になってきた。また、センサの多様化に伴い、さまざまな計測項目の測定、例えば、体温、筋電位、心電図、脳波など生理情報を取得することが実現されつつある。これにより、野外での魚類の生理的情報の収集が可能になり、彼らの行動を、周囲の環境といった外的要因に対する内的反応を介した応答として理解することが可能になった。しかし、魚類への計測機器の装着・回収の難しさから、これらの研究が進んでいるとは言いがたく、ハードルが高いもの現状である。今後、バイオリギングを用いた魚類の行動学・生理学的研究が発展することは、単に魚類の行動生態を明らかにするだけにとどまらず、水産的に重要な魚種の資源管理に関連した基礎研究として役立つことが期待される。

そこで本稿では、バイオリギングを用いた魚類の行動学・生理学的研究に焦点を当て、これまで筆者らが行ってきた研究事例（クロマグロの行動的体温調節、筋電位発信

機を用いたサケの遡上行動、心電ロガーを用いたサケの産卵行動解析）について紹介し、今後の応用について述べる。

2. クロマグロの行動的体温調節

魚類は体温が水温に等しい変温動物と考えられているが、一部のサバ科魚類やサメ類は水温より高い体温を持つことが確認されている。マグロ属魚類 (*Thunnus*) では血合筋において、静脈血と動脈血が対向流をなす熱交換器が血合筋を取り巻くことにより代謝で生じた熱が体外に排出されるのを防ぎ、結果として体全体の温度が高く保たれている [例えば Carey (1973)⁵⁾]。しかしクロマグロ (*T. orientalis*) に関しては、野外の水温環境下での温度保持の実態や機構に関してはこれまで情報が得られておらず、その方面の研究の進展が急務となっていた。

そこで私たちは、温度（2チャンネル）・水圧・照度センサを備えたアーカイバル・タグと呼ばれるデータロガー（図1, Northwest Marine Technology, Inc., USA, のち Lotek, Canada）を用いたバイオリギング計測を世界に先駆けて、クロマグロの行動研究に適用した。本種の行動、生理（体温）、彼らが経験する海洋環境（水温）を同時に連続計測することで、本種の温帯水域での行動・体温保持の実態を明らかにすることを目的に水産庁との共同研究に取

図1 アーカイバル・タグを腹腔内に装着したクロマグロ タグのケーブルの先端は水温と照度のセンサで、本体内に温度と圧力のセンサがある。現在のタグの性能は格段に向上している。

¹Yuya MAKIGUCHI, 日本大学生物資源科学部海洋生物資源科学科 (〒252-0880 神奈川県藤沢市亀井野1866)

²Yoshinori AOKI, Takashi KITAGAWA, 東京大学大気海洋研究所 (〒277-0882 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

Received 31 July 2014, Accepted 5 September 2014

り組んできた¹⁶⁻²⁰⁾。

対馬沖の曳縄で漁獲されたクロマグロの腹腔内にこのタグを装着し、1995年から1998年の11~12月に、合計229の個体を放流した。尾叉長は43~78 cm、0歳もしくは1歳魚と推定されるものを選んだ。

再捕された32個体のタグに記録された遊泳深度、水温、腹腔温の時系列データを解析した。

冬季、冷たい空気に冷却されて水温が下がると海水の体積は小さくなり、密度は大きくなる。すると表層の海水はより低層に沈むようになる。対流である。これにより表層と低層との間で混合が起こり、水温はある程度の深さまで一様になる。この水温が一様な層を表層混合層という。実際には海面では強い風が吹き付けるので、対流に加えて風による混合の効果も大きくなる。東シナ海では、表層混合層は水深100 mくらいになる。この表層混合層内で、クロマグロは夜間表層を、昼間は低層を遊泳しており(図2 a)、遊泳深度の変化に日周性が認められた(図2 a)。腹腔温は、昼夜ともに水温より2℃ほど高く保たれており、この温度差は水温が変化してもほぼ一定であった。

夏場あるいは低緯度海域では、表層は太陽放射によって温められるために、水温は上昇する。そのため表層と低層で急激な温度差が生じる。この温度勾配が生じている層を水温躍層という。クロマグロは一日の大半を深度10 mより浅い水深で過ごしていた。これは、水温躍層付近での急激な温度変化を避けるための行動(行動的体温調節)だと考えられる(図2 b)。しかし、昼間には、躍層下の水深まで移動するようになった。ただし、表層から潜って、再び表層に戻ってくるまでに要する時間は、たかだか5~10分程度であり、この行動を日に10回ほど行っていた。

腹腔温は基本的に水温より高く保たれていたが、どの個体も水温が低くなるにしたがって、両者の温度差は大きくなる傾向があった。腹腔温と水温の関係から、本種が体温を高く保つことができる理由について検討した。その結果、普通の魚に比べて、体の断熱性が高いのに加え、体内で作りだされる熱の量も高いことも分かってきた。しかし、何らかの原因、例えば、長時間躍層下に留まっていたとする。するとそのせいで体温が下がってしまう。体温がいったん下がってしまうと、断熱性が高いがゆえに、冷めた体温も保たれてしまい、その結果、体温が回復するには相当時間がかかってしまうことも分かってきた。そのため、クロマ

グロは水温躍層下への長時間の進入をできるだけ避け、表層混合層内を遊泳しながら行動的体温調節を行い、水温躍層下へ進入するにしても、体温への影響が小さくすむ短時間の移動で済ませていることが分かった。さらに詳細に解析を行ったところ、この短時間の移動の周期性も体温保持に貢献していることが分かってきた。

3. 特異動的作用の検出

体温の奪われる躍層下への移動を繰り返す理由は何かにについても検討した。図2 bの矢印で示したように体温が一時的に低下し、その後徐々に上昇しているところが何ヶ所かあることも分かってきた。これは、一時的な体温低下は、冷たい餌や海水を飲み込むことによって生じたもの、その後の体温上昇は、周りの内臓や筋肉からの熱伝導や、「特異動的作用[specific dynamic action (SDA)]」によるものと考えられることから、水温躍層下への移動は索餌行動と考えられた。

SDAとは、餌の摂取、消化、吸収、同化の際に行われる(不可避免的)酸素消費のことであり¹⁴⁾、多くの魚類でSDAが確認されている^{6, 11, 30)}。クロマグロやミナミマグロ(*T. maccoyii*)のような体温を持つ魚類では、SDAの際、体内で産熱が起こるため[例えばSecor (2009)³⁰⁾、Whitlockら(2013)³⁶⁾]、体温変化からSDAの検出が可能になる。

4. EMG 発信機を用いたサケの遡上行動解析

水棲動物の遊泳速度を計測する際、搭載されたプロペラの回転数から遊泳速度を計測するロガーを用いることが多い。しかし、木の枝や葉などの浮遊物や河岸に河畔林などの障害物が多く存在する河川では、これらがプロペラに絡まる場合が多く、正しく動作しない。そのため、河川では異なる方法で計測する必要がある。そのひとつが、筋肉の活動電位[筋電位(electromyogram, EMG)]から遊泳速度を推定する方法である。本章では、EMG 発信機を用いてサケ(*Oncorhynchus keta*)の遡上行動を追跡した研究例を紹介する。

標津川は北海道東部に位置する標津オホーツク海に注ぐ全長78 kmの二級河川で、毎年9~12月には多くのサケが産卵のために遡上する。本河川下流域には蛇行区間が数多く存在していたが、1932年以降、治水・利水目的で大規模な河川改修が行われ、流路は直線化された。しかし近年、かつての河川環境を取り戻す要望が高まり、2002年に直線化された一部の流路を試験的に再蛇行させる取り組みが行われた。本研究では、再建された蛇行流路を、サケはどのように遊泳しながら遡上しているのかを明らかにする目的で、筋電位発信機をサケに装着し追跡実験を行った。

用いた発信機はLotek社製のもので筋電位を測定し、情報を電波で受信機に向けて発信する計測器である。筋電位は微弱な電位変化であるため、EMG 発信機には安定した電位を導出する電極が2個と(図3 A)、電波発信用のアンテナが1本備わっている。なお、明瞭な筋電位の導出には、魚体の頭から尾鰭にかけて7割程度の体表部の側線付近に電極を固定する必要がある³⁾。本研究では電極の先端に長さ1 mmの真鍮製金属棒を装着し、魚体の筋肉内に固定した。EMG 発信機内には積分器、調整回路、デジタイザー、

図2 東シナ海を遊泳していた個体から得られたデータ (a) 冬季(12月)と(b) 同個体の夏季(6月)のようす。矢印は摂餌をしていたタイミングを示す。

図3 EMG 発信機と装着図 (A), EMG 値と遊泳速度の関係 (B), 実験場所と追跡区間 (C)

(A) EMG 発信機からは2本の電極と1本の送信用アンテナが出ている。電極の先に装着された長さ1 mmの真鍮製金属棒が筋肉中に引っ掛かることで、遊泳中でも安定して電極が筋肉中に固定される。(B) 流速の上昇に伴ってEMG値が上昇している。傾きと切片の値が各個体異なるため、個体ごとに関係式を求めEMG値から遊泳速度を推定する。(C) 実験場所および実験魚の追跡区間。EMG値は0から50までの相対値で表している。

マイクロコントローラーおよび電波発信機が搭載されている。筋電位として記録された波形は自動的に積分され3秒間隔で0から50までの相対値に割り当てられたのちに、EMG値として発信される。このEMG値は個体や装着位置によって個体差が生じるため、遊泳速度を推定する場合、個体ごとにEMG値と遊泳速度についてキャリブレーションを行う必要がある。本研究では、流速調整が可能な循環式水槽 (PT-110R, 西日本流体技研, 長崎) で、EMG発信機を装着した実験魚を遊泳させEMG値と遊泳速度の関係式を各個体で作成した (図3B)。各個体で作成した関係式を用いてEMG値から遊泳速度を推定した。これに加えて、サケの遊泳速度の有酸素運動能力を調べるために、上記の循環式水槽を用いて臨界遊泳速度を求めた。臨界遊泳速度とは有酸素運動と無酸素運動との臨界点となる遊泳速度のことである。この点において酸素消費量が最大となるため、臨界速度から魚の最大有酸素能力を推定することができる^{10, 12)}。なお、サケにとって、臨界遊泳速度を頻繁に超え

るような過度な無酸素運動が続くと、河口から産卵場までの到達の可能性やエネルギーの消耗により繁殖成功を低下させてしまう可能性がある。

室内での実験終了後、EMG発信機を装着した実験魚を標津川に放流し、川岸に沿って受信機 (SRX 400, Lotek, Canada) で情報を蓄積しながら遡上行動を追跡した。追跡区間は、直線化された直線区間と再蛇行化された蛇行区間とした (図3C)。

実験魚が比較的流れの緩やかな場所で臨界遊泳速度 (1.64 ± 0.053 BL/秒, $N=13$) を超える速度で遊泳したのち速度を低下させて遊泳していた (定位行動)。BLとはBody Length (体長) で、吻端から尾鰭の付け根までの長さである。BL/秒は1秒間に体長何個分進んだかを意味している。この間、速度は低い値で推移しており、定位中は休息していることが窺われた (図4)。次に、実験を行った2004~2006年の3年間の間で直線区間と蛇行区間で観察された定位行動の時間を比較した。すると、蛇行が復元された直後である2004年には蛇行区間では定位行動はほとんど観察されなかった。しかし、2005年、2006年と蛇行区間に置いて定位行動が観察される時間が直線区間と比べて長くなった (図5)。このことから蛇行区間が復元後、時間経過とともに、区間内に流速や水深の多様性が生まれたため、サケが定位しやすい環境が形成されたものと考えられた²⁴⁾。

図4 蛇行区間を遊泳したサケの遊泳軌跡および遊泳速度の時系列図 2005年の蛇行区間における流速分布図。黒線は典型的な個体番号 #2 のシロザケの遊泳軌跡を表す。数字は直線区間との合流点からの距離 (m) を表す。遊泳軌跡上の黒丸は定位地点を表す。下図はこの遊泳軌跡における EMG 値より推定された遊泳速度の時系列図。点線は遊泳水槽実験により得られた臨界遊泳速度 (1.64 ± 0.053 BL/秒, $N=13$) を表す。

図5 2004年から2006年までの直線区間と蛇行区間におけるシロザケの定位時間
*は有意水準5%を意味する。

5. 心電ロガーを用いたサケの産卵行動解析

本章では、サケの産卵行動時における心電ロガーを用いた心電図解析について紹介する。

魚類の心電位は中枢神経系により制御されており、外部刺激や代謝やストレスなどの内的変化に関連する多くの生理情報を含んでいる^{27, 33)}。心拍数は心電図上にあらわれるR波と次のR波までの時間(秒)の逆数によって求められる。この心拍数の変動(以下、心拍変動)は緊張・興奮時にはたらく交感神経系と、平常・リラックス時にはたらく副交感神経系が拮抗的に連動し、あるバランス(ゆらぎ)を保って制御されている^{1, 2)}。これまでの研究から振動や視覚刺激などのストレスは、一時的に魚類を含む複数の動物種の心電図に影響を与えることが知られている。具体的には、軟体動物、甲殻類、両生類、魚類の一部の動物ではこのような刺激によって心拍数の低下(徐脈)や数秒間の心停止が起こることが知られている^{9, 13, 15, 21)}。

サケは産卵の瞬間口を大きく開け放卵・放精する。このとき、体測筋を強く収縮させ、腹腔内に圧力をかけて水中へ配偶子を放出するため、魚体には大きなストレスとなっていると考えられる^{28, 33)}。そこで、産卵の瞬間のサケの心電図を心電ロガー(W400L-ECG, リトルレオナルド社, 東京)を用いて測定した。

心電図を導出するための電極を作成した。電極には1.5 cm × 3 cmのプラスチック板に2箇所の穴(直径1 mm)を開け、絶縁のためのシリコンチューブで被膜したステンレス線を2本固定し、電極を作成した(図6 A)。2本の電極は心臓を前後で挟むように外科的に固定すると同時に心電ロガーを背鰭前方部に装着し、産卵行動を観察した(図6 B)。

測定の結果、すべてのサケにおいて産卵が観察され、産卵の瞬間、雌で 6.81 ± 0.54 秒($N=8$)、雄で 4.81 ± 0.60 秒($N=7$)心拍が停止していた(図7 A)²³⁾。また、心電図を構成する波形の一部であるT波(心室の再分極を反映し、血中カリウムイオン上昇により、高く鋭く伸長することが報告されている³¹⁾)の変化を産卵前後で比較すると、T波が産卵6時間前に比べて産卵直後では TENT 状に伸長していた(図7 B)。これらの結果から、産卵瞬間の心停止はサケ共通の生理現象であり、産卵前後で心電図のT波の波形に変化がみられることが示された。

産卵瞬間の心停止の制御機構を明らかにするために、薬理学的実験を行った。サケに心電ロガーを装着したのち、

図6 心電ロガーおよび電極の装着位置の模式図 (A) 電極を固定するためのプラスチック製のプレートには電極を固定する2つの穴とプレートを固定するための縫合糸を通す穴が3つ開いている。電極はシリコンチューブで被膜されており、先端のみ1~2 mm 電極が露出している。(B) 心電ロガーは背鰭前端部にニードルとロックタイを使って固定する。

図7 産卵時におけるサケの心電図(A)およびT波の高さの時系列変化(B) (A) 産卵の瞬間におけるサケの心電図。赤線がメス、青線がオスを示す。下向きの矢印は口開けの開始と終了のタイミングを示す。ほぼ口開けのタイミングで雌雄ともに心臓が停止している。(B) 産卵行動前後の心電図(P波、Q波、R波、S波、T波)を示す。下図はT波の高さを時系列で表している。下向きの矢印は産卵の1回目と2回目をそれぞれ示す。赤線は10分ごとの平均値を示す。産卵前後でT波が高くTENT状に伸長している。

背大動脈にカニューラを挿入し、副交感神経系抑制のためのアトロピン（ムスカリン受容体アンタゴニスト，1.2mg/kg，SIGMA，USA， $N=3$ ），交感神経系のためのソタロール（ β -アドレナリン受容体アンタゴニスト，2.7mg/kg，SIGMA，USA， $N=4$ ）およびコントロールとしてサケ生食塩水1ml（ $N=3$ ）を投与し、産卵行動を観察した。

実験の結果、アトロピン投与個体では心拍の変動が消失していた（図8A）。これは、サケの心拍変動の大部分が副交感神経系により制御されていることを示唆している。投与したすべての個体で産卵行動が確認され、アトロピン投与個体のみ心停止が観察されず、（図8B）産卵前後でのT波のテント状伸長もみられなかった（図8C）。また、副交感神経刺激やアセチルコリンの投与により心拍数が低下する^{7, 22)}。これらのことから、産卵の瞬間におけるサケの心停止は、副交感神経系を介した反射である可能性が示唆された。しかし、数秒間の心停止のうちに、心臓の拍動が再開するメカニズムについては未だ明らかとなっておらず、今後の課題となっている。

図8 薬理実験 [アトロピン投与 (a)，ソタロール投与 (b) およびコントロール (c)] により得られた産卵前後の心拍変動 (A) および心電図変化 (B) 下向きの矢印は口開けのタイミングを示す。アトロピンを投与した個体 (a) のみ心拍変動が消失し、T波がテント状に伸長していない。また、産卵が観察されたにも関わらず、心停止は観察されなかった。

6. 将来展望

本稿では、バイオリギング手法を用いて明らかにされた、クロマグロの行動的体温調節機構、サケのEMG 発信機を用いた遡上行動、サケの産卵時における心電図解析について紹介した。

クロマグロ、サケは大規模回遊を行い、日本近海では重要な漁業資源となっている。しかし、近年、漁獲量低下が懸念されており、適正な資源管理の必要性が生じているに

もかわらず、その基礎となる回遊生態に関する知見はいまだ乏しい。この点において今後も動物の行動・生理状態などを環境情報と同時的に計測することのできるバイオリギングにかかる期待は大きい。本手法で得られた情報により、彼らの行動を、環境の変化に対する内的反応を介した応答として具体的に捉えることで、回遊についての生物学的な知見、特に至近的、究極的、発達の、系統進化的な要因の理解はさらに進んでいくに違いない。

特に動物の生理状態を野外で計測する技術の発展は目覚ましく、最近年では脳波を測定する技術なども開発されている。ハト (*Columba livia*) などの鳥類ではすでに生態研究にも応用されており³⁵⁾、帰巣の際、街や海岸線などを目印 (ランドマーク) として視覚で空間を認識していることが示されている。魚類については、終脳は大部分が嗅覚に関与していると考えられていたが、それに加え、繁殖行動²⁹⁾ や空間認識・ナビゲーション³³⁾ などの機能を持つことも明らかにされつつある。サケは外洋域から母川へ回帰する際に、直線的にオリエンテーション (方向定位) して回帰する³²⁾。メバル (*Sebastes inermis*) は生息域への固執性および回帰行動が嗅覚によって一部制御されていることが証明されている²⁵⁾。従って本手法を魚類にも適用できれば、回遊現象を、魚のものの見方や感じ方といった“認知能力”という点から理解することが可能になる。ただし、魚類の脳波は微弱で電位導出が水中へ逃げやすく、計測の安定化が急務の課題となっている。新しいセンサの開発なども含め、技術改善を進める必要もある。

また、魚類の多くは集群するため、集団としての動態を計測する必要がある、一度に多個体を計測できるようなシステムも必要となってくる。しかし、一つのロガーからは単個体の情報しか入手できず、ロガーの価格が高価で放流数に限りがあるため、回収数が少ないことが制約となっている。また、ロガー自体も魚類に装着するには依然として大型で、データ容量が小さく、バッテリー寿命が短いといった問題を抱えている。このようなボトルネックを克服しデータ回収率を上昇させることが重要であるが、近年これに関する研究プロジェクトも動き出している (http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/project/33/33_16.html)。数年以内にかなりの技術的進展がみられるであろう。魚類の行動を数日レベルでしか計測できなかったものが、飛躍的に進歩するに違いない。特に気候変動に伴う分布域の変化、漁場形成要因の追究といった面などでも重要な役割を果たしていくとおもわれる。

謝 辞

サケの産卵行動実験を行うにあたり、多大な技術支援をいただいた標津サーモン科学館館長の市村政樹氏に深く感謝を申し上げます。

文 献

- 1) Altamiras, J.: Comp. Biochem. Physiol. A, 124, 447-460 (1999)
- 2) Altamiras, J., Aissaoui, A., Tort, L. & Axelsson, M.: Comp. Biochem. Physiol. A, 118, 131-139 (1997)
- 3) Beddow, T.A. & McKinley, R.S.: J. Fish. Biol., 54, 819-831

- (1999)
- 4) Canfield, J.G. & Mizumori, S.J.: J. Neurosci. Methods, 133, 127-134 (2004)
 - 5) Carey, F.G.: Sci. Am., 228, 36-44 (1973)
 - 6) Clark, T.D., Brandt, W.T., Nogueira, J., Rodriguez, L.E., Price, M., Farwell, C.J. & Block, B.A.: J. Exp. Biol., 213, 2379-2385 (2010)
 - 7) Cohn, A.E. & Macleod, A.G.: Am. Heart J., 21, 356-364 (1941)
 - 8) Cooke, S.J., Hinch, S.G., Wikelski, M., Andrews, R.D., Kuchel, L.J., Wolcott, T.G. & Butler, P.J.: Trends Ecol. Evol., 19, 334-343 (2004)
 - 9) Cuadras, J.: Comp. Biochem. Physiol. A., 66, 113-117 (1980)
 - 10) Farrell, A.P. & Steffensen, J.F.: Fish Physiol. Biochem., 4, 73-79 (1987)
 - 11) Fitzgibbon, Q.P., Seymour, R.S., Ellis, D. & Buchanan, J.: J. Exp. Biol., 210, 290-298 (2007)
 - 12) Hammer, C.: Comp. Biochem. Physiol. A., 112, 1-20 (1995)
 - 13) Ide, L.M. & Hoffmann, A.: Physiol. Behav., 75, 119-126 (2002)
 - 14) Jobling, M.: J. Fish Biol., 18, 385-400 (1981)
 - 15) King, A.J. & Adamo, S.A.: J. Exp. Biol., 209, 1101-1111 (2006)
 - 16) Kitagawa, T., Kimura, S., Nakata, H. & Yamada, H.: Fish. Oceanogr., 13, 161-180 (2004)
 - 17) Kitagawa, T., Kimura, S., Nakata, H. & Yamada, H.: Fisheries. Sci., 73, 98-106 (2007)
 - 18) Kitagawa, T., Nakata, H., Kimura, S., Itoh, T., Tsuji, S. & Nitta, A.: Mar. Ecol. Prog. Ser., 206, 251-260 (2000)
 - 19) Kitagawa, T., Nakata, H., Kimura, S. & Tsuji, S.: Mar. Ecol. Prog. Ser., 220, 253-263 (2001)
 - 20) Kitagawa, T., Sartimbul, A., Nakata, H., Kimura, S., Yamada, H. & Nitta, A.: Fisheries. Sci., 72, 1166-1176 (2006)
 - 21) Laming, P.R. & Austin, M.: Comp. Biochem. Physiol. A., 68, 515-518 (1981)
 - 22) Liebow, I.M. & Hellerstein, H.K.: Am. Heart J., 41, 266-279 (1951)
 - 23) Makiguchi, Y., Nagata, S., Kojima, T., Ichimura, M., Konno, Y., Murata, H. & Ueda, H.: PLoS One, 4, e5993 (2009)
 - 24) Makiguchi, Y., Nii, H., Nakao, K. & Ueda, H.: Fisheries. Manag. Ecol., 15, 425-433 (2008)
 - 25) Mitamura, H., Arai, N., Sakamoto, W., Mitsunaga, Y., Tanaka, H., Mukai, Y., Nakamura, K., Sasaki, M. & Yoneda, Y.: J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 322, 123-134 (2005)
 - 26) Naito, Y.: Aquat. Mammal., 36, 307-322 (2010)
 - 27) Olson, K.R. & Farrell, A.P.: in D.H. Evans & J.B. Claiborne (eds.) The physiology of fishes, 3rd edition, pp. 119-152, CRC Press (2006)
 - 28) Satou, M., Shiraishi, A., Matsushima, T. & Okumoto, N.: J. Comp. Physiol. A., 168, 417-428 (1991)
 - 29) Satou, M., Takeuchi, H.A., Takei, K., Hasegawa, T.,

- Matsushima, T. & Okumoto, N.: J. Comp. Physiol. A., 174, 527-537 (1994)
- 30) Secor, S.M.: J. Comp. Physiol. B., 179, 1-56 (2009)
 - 31) Somers, M. P., Brady, W. J., Perron, A. D. & Mattu, A.: Am. J. Emerg. Med., 20, 243-251 (2002)
 - 32) Tanaka, H., Naito, Y., Davis, N.D., Urawa, S., Ueda, H. & Fukuwaka, M.A.: Mar. Ecol. Prog. Ser., 291, 307-312 (2005)
 - 33) Taylor, E.W., Jordan, D. & Coote, J.H.: Physiol. Rev., 79, 855-916 (1999)
 - 34) Uematsu, K. & Yamamori, K.: Comp. Biochem. Physiol. A., 72, 591-594 (1982)
 - 35) Vyssotski, A.L., Dell' Omo, G., Dell' Ariccia, G., Abramchuk, A.N., Serkov, A.N., Latanov, A.V., Loizzo, A., Wolfer, D.P. & Lipp, H.P.: Curr. Biol., 19, 1159-1166 (2009).
 - 36) Whitlock, R.E., Walli, A., Cermenio, P., Rodriguez, L.E., Farwell, C. & Block, B.A.: J. Exp. Biol., 216, 4109-4123 (2013)

Abstract

Behavioral and physiological analyses for fish using miniature archival tags and transmitters

Yuya Makiguchi¹, Yoshinori Aoki², Takashi, Kitagawa²

¹College of Bioresource Science, Nihon University, 1866 Kameino, Fujisawa, Kanagawa 252-0880, Japan

²Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8564, Japan

Biologging is a powerful technique to measure biological information of free-ranging animals and the ambient environmental conditions they experience. Recent technological developments in micro data-loggers and transmitters have made it possible to simultaneously monitor and record the swimming behavior of various species of animals, as well as ambient physical environmental conditions and internal physiological information such as body temperature, electromyogram (EMG), electrocardiogram (ECG) and electroencephalogram (EEG) data. We introduce a few studies on physiological behavior of fishes that used biologging techniques, and provide an overview of several recent research projects: "Behavioral thermoregulation in Pacific bluefin tuna *Thunnus orientalis*", "Migratory behavior of adult chum salmon, *Oncorhynchus keta* assessed by EMG transmitters", and "ECG analysis of adult chum salmon during spawning behavior using ECG dataloggers." We also discuss the directions for future biologging research on fish physiology in natural environments.

Keywords: Pacific bluefin tuna *Thunnus orientalis*, chum salmon, *Oncorhynchus keta*, biologging, data-loggers, electromyogram (EMG), electrocardiogram (ECG), thermoregulation