

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：17301

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14918

研究課題名（和文）魚類の体温調節時における外界との熱交換及び体内の熱移動の解明

研究課題名（英文）Heat exchange with the environment and internal heat transfer during thermoregulation in fish

研究代表者

中村 乙水（Nakamura, Itsumi）

長崎大学・海洋未来イノベーション機構・助教

研究者番号：60774601

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：外温性の魚類は外界の水温を利用して体温を調節しているが、体温調節の際に外界との熱交換を調節していることが明らかとなってきた。外温性魚類の行動的体温調節時における熱交換の調節について明らかにするために、温度環境の異なる海域間での比較、心拍数の計測手法の確立、複数箇所の体温を計測を目指した。それにより、低水温環境中での熱の損失を防ぐ能力や、魚類の体温調節には血流が重要であり体温変化は体内からも起こることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

外温性魚類は水温による体温調節を行っていることから、環境変動によってその行動や生理状態が変化する可能性がある。外温性魚類の行動的体温調節に関する研究については、水温に対する行動についてのみ研究されており、魚類の体内における生理状態の変化を定量的にとらえた研究はない。本研究は、魚類の体温がどのように変化するかを体内の変化も捉えた研究として学術的な意義がある。

研究成果の概要（英文）：Ectothermic fishes use the water temperature to regulate their body temperature, and they regulate heat exchange with environment during thermoregulation. To clarify the regulation of heat exchange during behavioral thermoregulation in ectothermic fishes, comparisons among thermoregulation of fish in different temperature environments, establish a method for measuring heart rate, and measurement of body temperature at multiple locations were conducted. As a result, the ability to prevent heat loss in low-temperature environments and changes in body temperature in fish occur from the deep body were found.

研究分野：生理生態学

キーワード：行動的体温調節 外温性魚類 バイオロギング 体温 心電図

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

動物にはそれぞれ生存に適した温度があり、体温を適切な範囲に保つように調節している。体温調節には、産熱や放熱を変化させる生理的体温調節と温度環境を選択する行動的体温調節がある。海洋環境には温度環境が深度によって大きく変化するという特徴があり、水柱内を自由に移動する能力のある魚類は深度を変えることによって異なる温度環境に入ることによって行動的体温調節を行うことができる。この時、身体が大きな魚類ほど熱慣性が大きくなり、好適温度外の環境中に滞在できる時間は長くなる。

従来、水温に対する魚の体温変化の研究では、魚の体温を身体の一箇所の温度で代表し、体外との温度差によって体温の変化率を説明する熱収支モデルを用いて全身熱交換係数を推定することで、魚の体温の変わりにくさの評価や経験水温からの体温の推定を行ってきた。多くの魚種において全身熱交換係数は水温の方が低く体温が下降する(冷却)時、水温の方が高く体温が上昇する(加熱)時で異なることが知られている。魚類が外界との熱交換を変化させる際には、冷却時に熱の損失を抑える調節と加熱時に熱の吸収を高める調節の2通りが考えられる。外温性魚類であるマンボウは、海面が適温で深場が低水温の環境では、深場で餌を食べて海面で体温を回復する行動的体温調節を示すことが知られている(Nakamura et al. 2015)。熱収支モデルを用いてこの時の全身熱交換係数を推定すると、冷却時に比べて加熱時には約4倍の全身熱交換係数を示す。水温の鉛直プロファイルは海域や季節によって複雑に変化することが知られており、行動的体温調節時の全身熱交換係数の冷却・加熱の差異については生理的な調節が示唆されているが、異なる温度環境において同一の魚種内で全身熱交換係数がどのように変化するかを調べることで、どのような調節が行われているかを調べられる可能性がある。

全身熱交換係数の変化については、血流による調節などの生理的な調節が示唆されている(Kitagawa & Kimura 2006)。実際、死んだ魚を冷水と温水に交互に入れて魚体の温度変化を計測すると、生きている状態と比べると全身熱交換係数が1桁小さく、血液循環は酸素や物質の輸送だけでなく熱の輸送も担っていることがわかる。また、生きている魚に数十分間隔で冷水と温水を交互に経験させて心拍数を計測する実験を行うと、低温に晒された時に極端に心拍数が低下し、その後の体温回復期には平常時よりも高い心拍数を示す。つまり、水温の変化に対する魚の心拍数の変化は、低温に晒されると熱の損失を防ぎ、体温回復時には積極的に熱を取り込むように働く。全身熱交換係数は多くの魚種において冷却時と加熱時で異なることが知られているが、血流により熱交換の促進や抑制が起こるとすると、魚類の行動的体温調節時の熱交換の生理的な調節を知るためには行動的体温調節を行う魚類の心拍数を連続モニタリングして時系列的な熱交換の変化を調べる必要がある。

ところで、魚類は鰓呼吸であり、水と接する面積が大きいのは鰓である。そのため、「魚類の体内の熱ほとんどは鰓から体外に流出する」と考えられている(Stevens & Sutterlin 1976)。一般的な魚類の血管系を考えると、鰓から出てきた血液はまず背大静脈を通る。つまり、魚類の身体に体外の熱がまず伝わる場所は、水と接している体表だけでなく身体の最も深部である脊柱周辺である可能性も推測される。身体の内側からも温度変化が起こっているかを調べるためには、魚の体内の温度勾配の変化を調べる必要がある。魚体内部の温度変化を調べることで、水温を利用した魚類の体温調節についてより深く理解することができるようになると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、魚類の体温調節時における全身熱交換係数が変化するメカニズムと体内の熱の移動の実態を把握することを目的とした。魚類の生理状態を野外で連続して計測することが難しいこと、飼育下では魚類に自由に温度環境を選択させることは難しいことから、体温調節時の魚の体内で起こっていることを時系列的にとらえた研究は少ない。また、体温を複数箇所計測し、体温調節時の体内の温度勾配の計測を野外の魚で試みた研究はない。そこで、魚類の行動的体温調節時の生理情報を時空間的(心拍数の時系列変化、体温の空間的分布)に解像度を上げてとらえることを目的に研究を行った。

3. 研究の方法

(1) 温度環境が異なる海域間でマンボウの全身熱交換係数を比較することで、全身熱交換係数の変化が熱の吸収を高める調節、または熱の損失を抑える調節のどちらを行っているかを調べた。本研究では、海面が高水温で深場が適温という温度環境をもつ海域でのマンボウの体温変化のデータを新たに取得し、異なる温度環境における加熱時、冷却時の全身熱交換係数を比較した。

(2) 魚類の心電図を連続で計測する手法を確立するための飼育実験を行った。長崎市内で釣獲したスミツキザメ1個体を長崎大学環東シナ海環境資源研究センターの屋外水槽で飼育した。スミツキザメに心電図口ガーを装着し、心電図の連続計測を試みた。

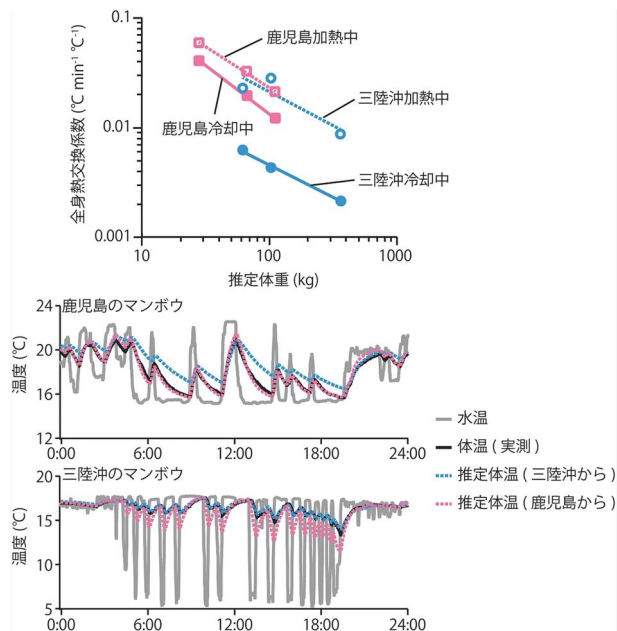
(3) 野外での体内の温度勾配の計測

体温調節時の体内の温度変化を調べるために、魚体の横断面に対する体温の勾配を連続モニタリ

ングするための野外放流実験を行った。ストーク状の温度センサが搭載された体温ロガーを複数同時に使用し、体表からの深さが異なるようにして魚体に挿入して体表から深部まで複数箇所の筋肉温度を測定した。体内の温度勾配の変化を分析するため、体内の熱の拡散を考慮した熱拡散モデルを作成して体内の温度勾配の再現を試みた。

4. 研究成果

(1) 行動記録計と体温センサを装着して鹿児島湾に放流した体サイズの異なるマンボウ3個体から鉛直移動と体温変化のデータを取得した。三陸沖で取得した冷水中で採餌して海面で体温を回復する行動を繰り返すマンボウの全身熱交換係数(Nakamura et al. 2015)と比較すると、本研究で得られたマンボウの全身熱交換係数は、加熱時には海面で体温回復をする時の全身熱交換係数と同等の値を示したのに対して、冷却時には冷水中で採餌する時よりも高い値を示した(Nakamura & Yamada 2022)。それぞれの海域で得られた全身熱交換係数を用いて経験水温から体温を推定すると三陸沖のマンボウは冷却時に体温が下がりにくいことがわかる(図)。このことからマンボウは、体温回復時に熱の吸収を高める調節ではなく、低水温環境において熱の損失を防ぐ調節を行っていることが示唆された。つまり、マンボウは冷水中での体温の低下を防ぐことで冷水中に豊富に存在する餌の利用を可能にしていると考えられる。



(2) スミツキザメ1個体から48時間の連続した心電図データを得ることができた。心電図からR波を抽出し、R波の間隔から心拍数を算出したところ、水温の変化と遊泳・着底という行動の変化に関して心拍数が変化することがわかった。また、魚体へのダメージが軽微で簡便な電極の設置方法を確立したことで今後、野外での応用が期待される。

(3) マンボウ5個体から複数箇所の体温データを得られ、体深部で一番大きな温度変化が観察された。熱拡散モデルによる温度勾配の変化の再現では、断熱性の高い厚い皮に包まれており、身体深部に水温の影響が直接流入するという条件のモデルによって温度勾配を再現できることがわかった。このことから鰓で水温に影響された血液が体深部に流れ込むことによって身体の内側からの温度変化が起こり、断熱性のある皮によって体表からの水温の影響は小さいことが示唆された。このような体の構造は、冷たい血液が体深部に流れ込むのを防ぐことで、深海潜水時の体温低下を緩和するのに有効かもしれない。

上記の研究をまとめると、魚類の熱交換は主に鰓で行われ、鰓で水温に影響された血液が体深部に流入することで体内の方から体温が変化すること、そのため体温の変わる速度は心拍数に影響される可能性があり、熱の損失を防ぐ調節は血流の調節により可能になることが示唆された。今後は野外での体温変化と心拍数の同時計測を行うことで外温性魚類の生理状態の変化から体温調節時の熱交換の調節能力について明らかになると考えられる。

<引用文献>

- Nakamura I, Goto Y, Sato K (2015) Ocean sunfish rewarm at the surface after deep excursions to forage for siphonophores. *Journal of Animal Ecology* 84, 590-603.
- Kitagawa T, Kimura S (2006) An alternative heat-budget model relevant to heat transfer in fishes and its practical use for detecting their physiological thermoregulation. *Zoological science* 23, 1065-1071.
- Stevens ED, Sutterlin AM (1976) Heat transfer between fish and ambient water. *Journal of Experimental Biology* 65, 131-45.
- Nakamura I, Yamada M (2022) Thermoregulation of ocean sunfish in a warmer sea suggests their ability to prevent heat loss in deep, cold foraging grounds. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 546, 151651.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 中村 乙水	4. 巻 72
2. 論文標題 行動的体温調節の観点から見た海産魚の採餌戦略	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本生態学会誌	6. 最初と最後の頁 85 ~ 94
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18960/seitai.72.1_85	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 Nakamura Itsumi, Yamada Morihiko	4. 巻 546
2. 論文標題 Thermoregulation of ocean sunfish in a warmer sea suggests their ability to prevent heat loss in deep, cold foraging grounds	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Experimental Marine Biology and Ecology	6. 最初と最後の頁 151651 ~ 151651
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jembe.2021.151651	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 Nakamura Itsumi, Tsuchida Hiroyuki, Tone Kazuki, Komeyama Kazuyoshi, Sasaki Akira, Kawabe Ryo	4. 巻 99
2. 論文標題 Behavioural response of a whale shark during the passage of a typhoon	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Fish Biology	6. 最初と最後の頁 2052 ~ 2055
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1111/jfb.14892	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 1件）

1. 発表者名 中村乙水、山田守彦
2. 発表標題 マンボウは内側から冷えたり温まったりする
3. 学会等名 第18回日本バイオリギング研究会シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Itsumi Nakamura, Morihiko Yamada
2. 発表標題 Ocean sunfish body temperature changing from the core during behavioral thermoregulation
3. 学会等名 The 8th International Bio-Logging Science Symposium (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

マンボウは防寒対策ができる？水族館との共同研究によって明らかになったマンボウの能力
<https://www.nagasaki-u.ac.jp/ja/science/science249.html>
 マンボウの体温低下抑止能力
<https://itsumola.wixsite.com/itsumi/manbou3>

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

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