

令和 4 年 5 月 24 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2021

課題番号：20K21362

研究課題名（和文）クジラはどうして長く潜ることができるのか？心機能評価からのアプローチ

研究課題名（英文）How do cetaceans dive for a long time? Approach from cardiac function evaluation

研究代表者

坂本 健太郎（Sakamoto, Kentaro）

東京大学・大気海洋研究所・准教授

研究者番号：80374627

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：水中で生活する鯨類は直接観察することが難しく、その行動や個体レベルでの生理機能の解明が課題となっていた。我々は、心機能評価というアプローチによって鯨類の卓越した潜水能力に関わる機能について明らかにすることを目的として研究を行った。ハナゴンドウに加速度センサと心電図記録計を装着することで、活動量と心拍数を経時的に計測した。得られたデータより、ハナゴンドウの活動パターンと心機能に関する知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

鯨類が卓越した潜水能力を持つことは昔から知られていたものの、自由に行動する個体から生理機能に関する知見を得ることが困難であったため、その能力は謎に包まれていた。そこで我々は遊泳時の鯨類から心拍数を計測する新たな計測手法を開発した。本研究では遊泳する鯨類から活動度と心電図を計測し、活動量と心拍数が一日の中で変動することを見出した。本研究で得られた成果は、鯨類の卓越した潜水能力を解明するうえで重要な知見になると期待される。

研究成果の概要（英文）：Since it has been difficult to directly observe cetaceans living in the water, the behavior and physiological functions are not fully understood. We conducted a study aimed at clarifying the functions related to the excellent diving ability of cetaceans by the approach of cardiac function evaluation. By attaching an accelerometer and an electrocardiogram recorder to Risso's dolphin, activity and heart rate were measured. From the obtained data, we found diel patterns of activity and heart rate fluctuations.

研究分野：生理生態学

キーワード：心電図

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

鯨類は高度に水中生活に適應した哺乳類である。一生を水中で過ごすことから、巨大な体や卓越した潜水能力など、他の哺乳類には見られない特徴的な形質や能力が進化した。これらの機能の詳細を解明する事は、哺乳類の多様性を明らかにするうえで重要であるため、昔から多くの研究者の興味を集めてきた。一方で、鯨類を始めとした潜水を行う哺乳類は、自然界で生活している姿を直接に観察することが難しく、その研究は死亡した個体から得られた試料を解剖学的あるいは生化学的に分析するといった手段を選択せざるを得ない状況が多かった。そうした経緯から、解剖学的あるいは生化学的な研究に比べて、行動学的あるいは生理学的な手段による鯨類の研究は実施が難しく、知見が乏しい状況となっていた。

2. 研究の目的

鯨類には他の哺乳類には見られない卓越した能力が複数認められるが、その中でも潜水能力に我々は着目した。一時間以上に渡って潜水することが出来る種もあり、これは陸生哺乳類の息こらえ能力の外挿から説明することが難しい。鰭脚類では潜水時に強い潜水反応が惹起され、心拍数が低下することが報告されている。また最近になって、短時間の計測ではあるものの、シロナガスクジラが潜水する時には心拍数が低下することが報告された。心拍数の増減は、体内に酸素を供給する能力の高低と連動しており、心拍数を経時的に評価することで対象動物の潜水能力の一端を評価できると考えられた。

鯨類の心拍数を水中で計測する事は技術的に難しく、これまでに行われた研究では、陸上に被検個体を揚げた状態で計測した事例がほとんどであった。我々は飼育下の小型鯨類を対象に、水中での心拍数計測手法の開発に取り組み、自由遊泳下の個体から経時的に心拍数を計測する事に成功した。そこで、本研究では、心拍数計測手法の開発をさらに進め、長期的に活動量や心拍数の計測を行い、活動量と生理状態を明らかにすることで、鯨類の生理機能の特殊性の一端を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) データ計測

本研究は和歌山県太地町立くじらの博物館で飼育されているハナゴンドウを対象に実施した。くじらの博物館では、近隣の森浦湾の湾口部を網で区切り、約25万8000平方メートルの飼育空間を作ること、小型鯨類を飼育している。飼育空間は最大深度14メートルで、仕切りとなっている網の長さは380メートルである。ハナゴンドウの体に心電図記録計と加速度センサを取り付けることで、心拍数と活動量の計測を行った。計測は一か月に渡って継続的に行った。

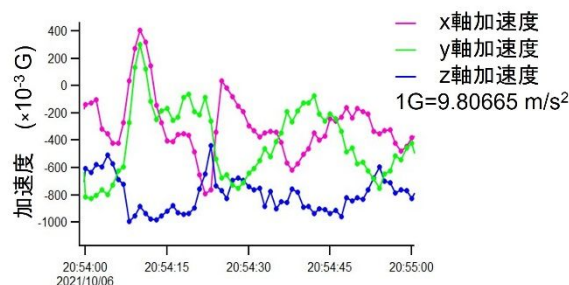


図1 加速度記録

(2) データ解析

3軸加速度センサの計測値から活動量の算出を行った。計測した加速度値を図1に示す。算出を行う時間帯の1分間分のデータを取り出し、毎時刻ごとの各軸の計測値を2乗したうえで合算し、平方根を求めた数値を活動量と定義した。活動量は、静止している時には低い値となり、遊泳などの活動を行っている時には高い値となった。また、計測した心電図から心拍数を算出した。心電図からは心臓の動きに応じて、PQRS波が計測できた。このうち、R波を検出し、各拍動ごとのR波の間隔を計算した(RR間隔)。RR間隔の逆数を計算することで、心拍数を算出した。これらの記録を分析することで、ハナゴンドウの特性を抽出した。

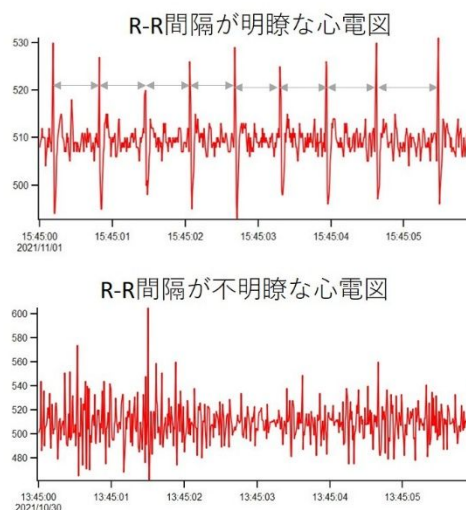


図2 心電図記録

4. 研究成果

(1) 心拍数計測手法の開発

我々が開発した方法によって、ハナゴンドウの心電図が計測でき、心拍数を算出できることが明らかとなった(図2)。得られた心電図波形を精査したところ、一定のバリエーションがあることが

分かった。すなわち、静止時には明瞭な心電図波形が計測できている一方で、遊泳時には筋電位由来と考えられるノイズが混入し、一部は不明瞭な心電図となっていることがあった。全体としては、数割の記録から心拍数を算出することが出来ており、心拍数計測手法として有効であることが明らかとなった。

(2) 一日の中での心拍数の変化

一か月に渡って計測を行ったところ、心拍数は一日の中で大きく変動することが明らかとなった(図3)。また、この傾向は計測期間を通じて変化しなかった。心拍数は午前0時から8時にかけて最も低下し、約40回/分程度で推移した。その後、心拍数は上昇し、13時から16時ごろ最も高くなった。この時の心拍数は80回/分と夜間の心拍数の2倍となった。夕方になると心拍数は低下し始め、18時以降には60回/分程度となり、その状態が24時まで維持された。それぞれの時刻で計測された心拍数に対して多重比較検定を行ったところ、幾つかの時間帯において午前中と昼過ぎで有意な違いが認められた($p < 0.05$)。

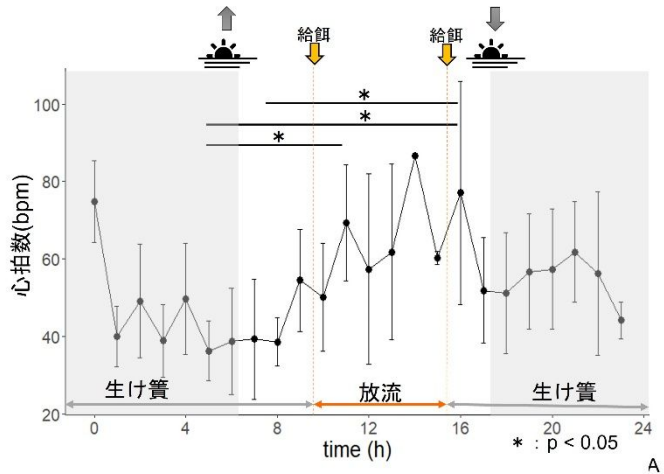


図3 一日の中での心拍数の変化

(3) 一日の中での活動量の変化

心拍数に認められた傾向と類似の変動パターンが活動量にも認められた。すなわち、一日の中では活動量が大きく変動する一方で、この傾向は計測期間を通じて変化しなかった(図4)。活動量は午前0時から6時ごろが最も低く、1.5程度であった(活動量の単位は相対値である)。時間の経過とともに活動量は増加し、午前10時ごろに最大となった(活動量5.0)。その後、活動量は低下し始め、17時ごろに活動量2.5程度の低値で安定した。この活動量は24時まで維持された。

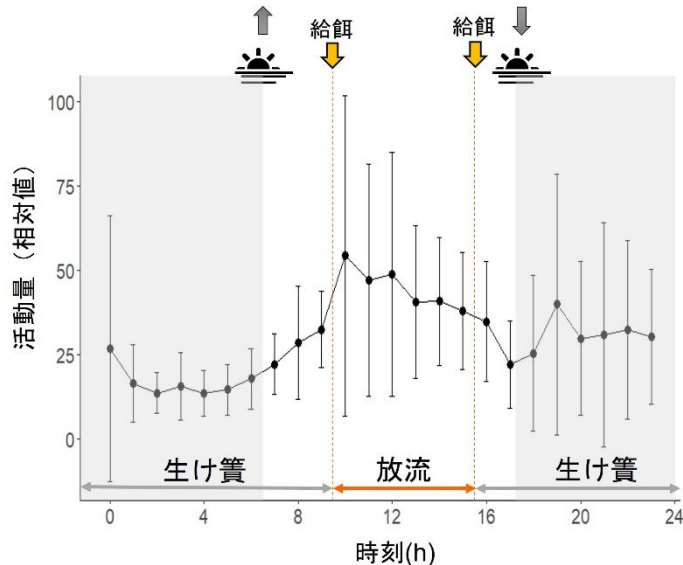


図4 一日の中での活動量の変化

(4) 心拍数と活動量の関係

心拍数と活動量の間には一定の関係性が認められ、活動量が高い時には心拍数も高かった。これは運動量が増加した時には、それに連動して心拍数が増加したのだと考えられる。また、一日の中での心拍数と運動量の変化パターンは、対象個体の飼育環境や飼育様式の影響を受けていることが示唆された。顕著な特徴としては、(1) 日中には活動量と心拍数が高くなり、日没後に低くなった、(2) 広い飼育空間に放流していた時間帯には特に活動量が高くなった、(3) 一日2回の給餌を決まった時間に行っており、定刻の給餌が活動量や心拍数の変動パターンに影響を与えていた可能性があった、と言った点を挙げる事が出来る。一方で、活動量と心拍数の間に相関が認められない事象も見出すことが出来た。特に興味深いのは、活動量は午前10時から16時にかけて徐々に低下したのに対して、心拍数は午前中には上昇し続けて13時から16時ごろにピークを示した点である。このことは心拍数で示される心機能の活性が活動量の増減だけで決定されているわけではなく、別のメカニズムによる調節を受けていることを示唆している。さらに、今回新たに明らかになった事は日没後の活動量と心拍数のパターンは、両者が比較的高い18~24時と一日の中で最も低値を示す0~6時の二つの期間に分けることが出来る事である。前後の時間と比較して心拍数が高い傾向にある10~13時と16~24時の時間帯はいずれも給餌直後の時間帯と符合する。これらの時間帯の心拍数上昇は摂餌後の餌の吸収に伴う酸素消費速度の上昇を示しているのかもしれない。

一連の研究によって、飼育下ハナゴンドウの生理状態と活動量の変化パターンが明らかとなり、鯨類の潜水能力に重要な役割を担う心機能に関する知見を得ることが出来た。

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 1件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Fahlman Andreas, Aoki Kagari, Bale Gemma, Brijs Jeroen, Chon Ki H., Drummond Colin K., F?re Martin, Manteca Xavier, McDonald Birgitte I., McKnight J. Chris, Sakamoto Kentaro Q., Suzuki Ippei, Rivero M. Jordana, Ropert-Coudert Yan, Wisniewska Danuta M.	4. 巻 12
2. 論文標題 The New Era of Physio-Logging and Their Grand Challenges	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Physiology	6. 最初と最後の頁 669158
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fphys.2021.669158	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 該当する

1. 著者名 Sakamoto Kentaro Q., Miyayama Masaru, Kinoshita Chihiro, Fukuoka Takuya, Ishihara Takashi, Sato Katsufumi	4. 巻 376
2. 論文標題 A non-invasive system to measure heart rate in hard-shelled sea turtles: potential for field applications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences	6. 最初と最後の頁 20200222
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rstb.2020.0222	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 Aoki Kagari, Watanabe Yurie, Inamori Daiki, Funasaka Noriko, Sakamoto Kentaro Q.	4. 巻 376
2. 論文標題 Towards non-invasive heart rate monitoring in free-ranging cetaceans: a unipolar suction cup tag measured the heart rate of trained Risso's dolphins	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences	6. 最初と最後の頁 20200225
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rstb.2020.0225	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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 青木かがり, Andreas Fahlman, 鈴木一平, 坂本健太郎, 稲森大樹, 渡辺友梨絵, 船坂徳子, 新妻靖章, 佐藤克文
2. 発表標題 ゆっくり泳ぐか? 速く泳ぐか? 深海へ潜水する鯨類の潜水戦略: パイオメカニクスとスケーリングの視点から.
3. 学会等名 第68回日本生態学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤木早良, 青木かがり, 坂本健太郎, 稲森大樹, 渡辺友梨絵, 船坂徳子, 佐藤克文
2. 発表標題 バイオロギングによる飼育下ハクジラ類の心拍測定:クジラは心拍数を認知的にコントロールしているか?
3. 学会等名 第68回日本生態学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 阪井紀乃, 福井大祐, 白水博, 渡辺友梨絵, 稲森大樹, 船坂徳子, 青木かがり, 坂本健太郎
2. 発表標題 ハナゴンドウの体温・活動量・心拍数の日内変動に関する研究
3. 学会等名 令和4年度日本水産学会春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Fujiki S, Aoki K, Sakamoto KQ, Inamori D, Watanabe Y, Funasaka N, Sato K
2. 発表標題 Measuring electrocardiograms and heart rates of toothed whales using bio-logging devices
3. 学会等名 The 7th International Bio-Logging Science Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sakamoto KQ, Kinoshita C, Saito A, Miyayama M, Fukuoka T, Ishihara T, Sato K
2. 発表標題 Development of a non-invasive method for measuring the heart rate of hard-shelled sea turtles swimming freely in the ocean
3. 学会等名 The 7th International Bio-Logging Science Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Aoki K, Fujiki S, Inamori D, Watanabe Y, Funasaka N, Sato K, Sakamoto KQ
2. 発表標題 Towards non-invasive heart rate monitoring in free-ranging cetaceans: a unipolar suction-cup tag reveals resting heart rate decreases with body mass
3. 学会等名 The 7th International Bio-Logging Science Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021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	青木 かがり (Aoki Kagari) (60526888)	東京大学・大気海洋研究所・助教 (12601)	

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