

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：62611

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25850138

研究課題名(和文) 内温性をもつ特殊なサメ類の行動生態とエネルギー収支

研究課題名(英文) Behavioral ecology and energy budget of endothermic sharks

研究代表者

渡辺 佑基 (Watanabe, Yuuki)

国立極地研究所・研究教育系・准教授

研究者番号：60531043

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：マグロ類と一部のサメ(ホホジロザメ等)は、筋肉の収縮によって生じた熱を体内にため込むことにより、体温をまわりの水温よりも高く保つことが知られている。しかし、高い体温を保つことによる生態的意義があるのかは、ほとんどわかっていなかった。本研究では、様々な種のサメに記録計を取り付け、自然のままの行動を記録した。体温を高く保つ種は、そうでない種に比べて、遊泳スピードが速く、また一年間の回遊の範囲が広いことが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：Tunas and some sharks are known to maintain elevated body temperature by using heat generated by muscle constriction. However, little is known about the ecological significance of elevated body temperature in fishes. In this study, I attached electronic tags to a variety of sharks to record their swimming behavior under natural conditions. I found that the species with elevated body temperature swim faster and migrate further in an annual cycle, as compared to the species without elevated body temperature.

研究分野：海洋動物学

キーワード：行動生態 体温 魚類 バイオロギング

1. 研究開始当初の背景

ほとんどの魚類は変温動物であり、体温はまわりの水温と等しい。しかし、マグロ類(クロマグロ、キハダ、カツオなど)とサメの一部(ホホジロザメ、ネズミザメなど)に限り、まわりの水温よりも5~15度程度高い体温を保つことが知られている。これらの魚は、筋肉の収縮運動によって発生した熱を、特殊な生理機構によって体内にため込むことができる。

興味深いことに、体温を高く保つ魚は、例外なく外洋性で、分布範囲が広く、しかも海洋生態系の最高次に位置する捕食動物である。これはきっと、偶然ではなく必然だろうと多くの海洋生物学者は考えている。体温を高く保つ魚は、まわりの水温にかかわらず、筋肉をいつも適温に保つことができる。そのため、これらの魚は、幅広い水温帯において高い運動能力を発揮でき、強力な捕食動物になれるというのが一般的な見方である。また、高い体温を維持するためには、多くの代謝エネルギー、ひいては多くのエサが必要である。そのため、捕食動物として多くのエサを食べ続ける種でしか、高い体温が進化しなかったとも考えられている。

しかし、このような「高い運動能力、大量摂取、大量消費」仮説は、データの裏付けがなく、ただの推察に過ぎない。実際、今までに体温を高く保つ魚類の運動能力、エサをとる頻度、消費エネルギーなどを自然環境下で測定した研究例はほとんどない。言い換えるならば、一部の魚類に見られる高い体温が、どのようにその種の行動や生態に結びついているのかは、ほとんどわかっていないのが現状である。

2. 研究の目的

そこで本研究では、体温を高く保つサメ、高く保たないサメそれぞれに、最新鋭の記録計を取り付け、自然環境下における行動パターンを詳しく計測した。また、エネルギーモデルを構築し、それぞれのサメについて消費エネルギーを見積もった。系統関係の違いを考慮しながら、それらのパラメータを種間で比較することにより、高い体温をもつ魚の特徴を調べた。そうすることにより、魚類における高い体温の生態学的な意義を明らかにすることを本研究の目的とした。

3. 研究の方法

体温を高く保つ種としては、ネズミザメとホホジロザメからデータを取得した。ネズミザメについては、アラスカ(米)のプリンスウィリアムズ湾において野外調査を実施した。サメを釣り上げ、背びれに記録計を取り付けて放流した。記録計はタイマーで切り離し、水面に浮かんだところを、電波信号を頼

りに探し出して回収した。ホホジロザメについては、オーストラリア南部のネプチューン島周辺海域にて野外調査を行った。エサをまいてサメを調査船の近くにおびき寄せ、クランプを使って背びれを挟み込む形で記録計を装着した。ネズミザメと同様、記録計はタイマーで切り離し、電波信号を頼りに探し出して回収した。

体温を高く保たない種としては、ヨゴレ、オグロメジロザメ、ツマグロからデータを取得した。ヨゴレについては、パハマのキャット島周辺海域にて野外調査を実施した。オグロメジロザメとツマグロについては、パルミラ環礁(米)にて野外調査を行った。いずれの種についても、ネズミザメと同様、釣り上げて記録計を背びれに取り付けて放流し、タイマーで記録計のみを切り離して回収した。

その他、文献を用いて、自然環境下で測定された魚類の遊泳スピードのデータをまとめられるだけ集めた。比較のため、魚類以外の海洋脊椎動物(海生哺乳類、海鳥、ウミガメ)についても、遊泳スピードのデータをまとめられるだけ集めた。今までに調べられた、遊泳スピードと代謝速度の関係、代謝速度と水温の関係、および代謝速度と体サイズの関係などを整理し、それらの関係式を用いて、魚類各種について、自然環境下における遊泳エネルギーコストを推定した。さらに、文献を用いて、今までに記録計を用いて調べられた海洋脊椎動物(魚類、海生哺乳類、海鳥、ウミガメ)の回遊パターンを集められるだけ集めた。その中から、一年間でループを描くような季節的な回遊パターンのみを取り出し、端から端までの最短距離をグーグルアースを用いて計算した。

集められたデータを、系統関係に応じて重みづけをする統計手法を用いて解析した。まず、文献情報に基づき、データの集まった種の系統樹を解析ソフト「Mesquite」を用いて作成した。次に、系統樹をデータ解析ソフト「MatLab」に移し、専用のスクリプトを使って回帰分析を行った。最後に、各回帰式の当てはまりのよさをAICに基づいて評価した。

4. 研究成果

魚類の平均的な遊泳スピードを種間で比較すると、大きな魚ほど速く泳ぐ傾向があった(図1)。体温を高く保つ魚と、そうでない魚では、回帰式に有意な差があった。同じ体の大きさで比較すると、体温の高い魚は、そうでない魚に比べて、2.7倍速く泳ぐことがわかった。

高い体温は筋肉の活性を高め、より素早い収縮を可能にする。そのため体温の高い魚は、そうでない魚に比べて、尾びれを素早く振り、より速く泳ぐことができることが示唆された。古くから、マグロやホホジロザメは高速遊泳魚と見なされてきたが、本研究では、そ

それを初めて科学的に裏付けることができた。また、興味深いことに、体温の高い魚の遊泳スピードは、海生哺乳類や海鳥のそれに近かった(図1)。この結果は、魚類のみならず、海洋脊椎動物全体において、体温の高低がそのまま遊泳スピードに結びついていることを示唆している。

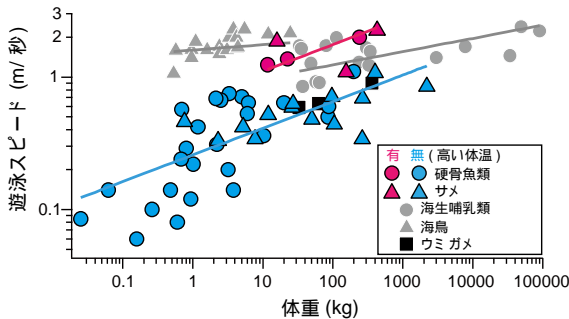


図1 体重と平均遊泳スピードの関係

次に、それぞれの魚種について、遊泳にかかるエネルギーコスト(Cost of transport=単位体重あたり、単位距離を進むのに必要なエネルギー量)を推定した。大きな魚ほど、エネルギーコストは低くなる傾向があった(図2)。体温を高く保つ魚と、そうでない魚では、回帰式に有意な差があった。同じ体の大きさで比較すると、体温の高い魚は、そうでない魚に比べて、エネルギーコストが1.8倍高くついていることがわかった。

この結果は、体温を高く保つことのデメリットをはっきりと示している。なるほど体温の高い魚は、速く泳ぐことができるが、それだけ余分のエネルギーを費やしており、デメリットも大きいことが定量的に示された。

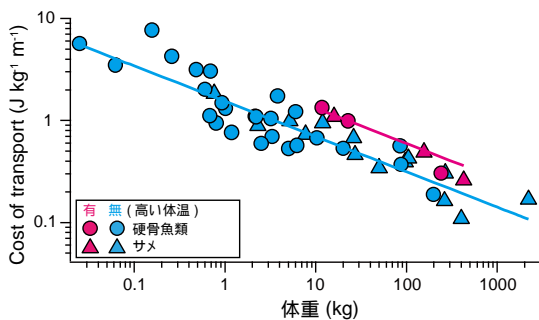


図2 体重とCost of transportの関係

さらに、年間の回遊距離に注目して、比較を行った。体温の高い魚は、そうでない魚に比べて、はるかに長い距離を回遊することがわかった(図3)。

この結果は、高い体温をもつ魚が、速い遊泳スピードの利点をいかして、季節に合わせたより広範囲な回遊を行っていることを示

している。季節に合わせた広範囲な回遊は、効率的なエサ資源の利用を可能にするという意味において、生存上のメリットが大きいと考えられる。また、興味深いことに、体温の高い魚の回遊距離は、海生哺乳類やペンギン(泳いで回遊する海鳥)のそれに近かった(図3)。この結果は、魚類のみならず、海洋脊椎動物全体において、体温の高低が一年間の回遊距離に直接結びついていることを示唆している。

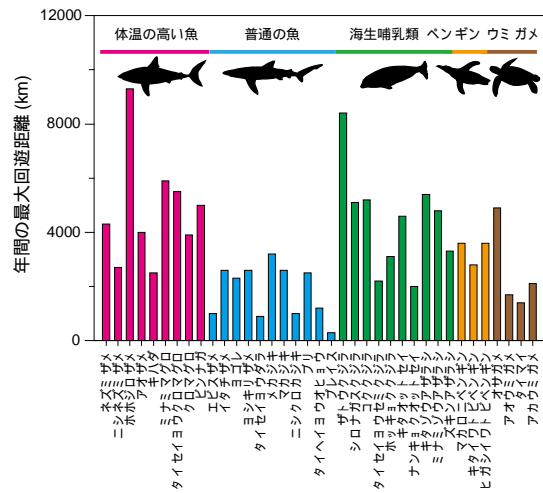


図3 一年間の最大回遊距離の比較

最後に、平均的な遊泳スピードと年間の回遊距離の両方のデータがそろった魚種について、両者の関係を調べた。すると、遊泳スピードが速い種ほど、回遊距離が長い傾向があることがわかった(図4)。この結果は、平均的な遊泳スピードが、その種の回遊パターンに直接結びついていることを示している。

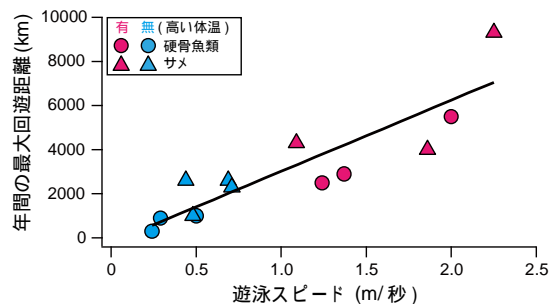


図4 平均的な遊泳スピードと年間の回遊距離の関係

以上の結果をまとめると、次のことがいえる。マグロ類と一部のサメに見られる高い体温は、筋肉の活性を高め、平均的な遊泳スピードを高める効果がある。高速遊泳はエネルギーの消費を増やすため、エネルギーの観点

から見るとデメリットである。しかし、高速遊泳は同時に、広範囲にわたる季節的な回遊を可能にする。広範囲にわたる回遊は、季節的、局所的に発生するエサ資源の有効な利用につながると考えられ、この点において、高い体温には明確なメリットがあることがわかった。

このように、一部の魚類に見られる高い体温が、その種の行動パターンやエネルギー収支に直接つながっていることを本研究によってはっきりと示すことができた。

この研究結果は米国科学アカデミー紀要に発表され(Watanabe et al. 2015 PNAS)、ホホジロザメの写真が雑誌の表紙を飾った。また、新聞や各種ウェブサイト等、国内外の数多くのメディアに研究成果が取り上げられ、その結果、研究者コミュニティに対しても、また一般社会に対しても、非常に大きなインパクトを与えることができた。

それに代わって、主な発表論文等の欄に挙げるように、個々のサメの行動パターン、サメのエネルギー収支を調べる手法、また魚類の水温適応などについて、いくつか論文を国際学術誌に発表することができた。

引用文献

Watanabe YY, Goldman KJ, Caselle JE, Chapman DD, Papastamatiou YP (2015) Comparative analyses of animal-tracking data reveal ecological significance of endothermy in fishes. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 112: 6104-6109
doi:10.1073/pnas.1500316112

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15件)

Payne NL, Smith JA, Meulen DE, Taylor MD, Watanabe YY, Takahashi A, Marzullo TA, Gray CA, Cadiou G, Suthers IM (2015) Temperature dependence of fish performance in the wild: links with species biogeography and physiological thermal tolerance. *Func. Ecol.*, 査読有, 30:903-912
doi: 10.1111/1365-2435.12618

Papastamatiou YP, Watanabe YY, Bradley D, Dee LE, Weng K, Lowe CG, Caselle JE (2015) Drivers of daily routines in an ectothermic marine predator: Hunt warm, rest warmer? *PLoS ONE*, 査読有, 10(6):e0127807.
doi:10.1371/journal.pone.0127807

Watanabe YY, Goldman KJ, Caselle JE, Chapman DD, Papastamatiou YP (2015) Comparative analyses of animal-tracking data reveal

ecological significance of endothermy in fishes. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 査読有, 112:6104-6109
doi:10.1073/pnas.1500316112

Payne NL, Snelling EP, Fitzpatrick R, Seymour J, Courtney R, Barnett A, Watanabe YY, Sims DW, Squire L Jr., Semmens JM (2015) A new method for resolving uncertainty of energy requirements in large marine predators: the 'mega-flume' seagoing swim-tunnel respirometer. *Methods Ecol. Evol.*, 査読有, 6(6):668-677
doi:10.1111/2041-210X.12358

Payne NL, Taylor MD, Watanabe YY, Semmens JM (2014) From physiology to physics: are we recognizing the flexibility of biologging tools? *J. Exp. Biol.*, 査読有, 217:317-322
doi:10.1242/jeb.093922

〔学会発表〕(計3件)

Watanabe Y Ecological significance of endothermy in fishes: do they swim faster? International Conference on Biologging 2014年9月25日 ストラスブール(フランス)

Watanabe Y Comparative analyses of swim speed in marine vertebrates International Ornithological Congress 2014年8月19日 立教大学(東京都豊島区)

渡辺佑基 魚類における内温性の適応的意義 日本水産学会 2014年3月28日 北海道大学水産学部(北海道函館市)

〔図書〕(計1件)

渡辺佑基、河出書房新社、ペンギンが教えてくれた物理のはなし、2014年、246ページ

6. 研究組織

(1)研究代表者

渡辺 佑基 (WATANABE, Yuuki)
国立極地研究所・研究教育系・准教授
研究者番号: 60531043