

アカウミガメが深く潜水するときの心拍数の低下

所属 東京大学大学院農学生命科学研究科 氏名 齋藤綾華

ショートアブストラクト【要旨】

海生爬虫類が深く潜るときの心拍数の変化を明らかにするため、潜水能力の高いアカウミガメが来遊する三陸沿岸域で、ウミガメが自由に潜水するときの心拍数と行動を計測した。その結果、潜水中の心拍数は海面で呼吸するときより低下し、深く潜るほどさらに低くなることが明らかになった。本研究は、このような心拍数の変化を海生爬虫類で初めて確認したものであり、肺呼吸動物が深く潜るための重要な生理的な仕組みを示唆している。

アブストラクト【本文】

【背景】

海には様々な肺呼吸動物が生息しており、クジラやペンギン、ウミガメといった動物は、息を止めた状態で深く長く潜水できる。このような潜水行動を可能にする生理的な仕組みの解明は重要である。海生哺乳類や海鳥を対象とした研究では、潜水中の心拍数は深度や時間、その間の運動の程度によって変化することが明らかになっている (McDonald & Ponganis 2014、Wright ら 2014)。しかし、爬虫類 (ワニ類、ウミヘビ類、ウミガメ類など) の場合、自然環境下で潜水中の心拍数を測定した研究は 4 例しかなく、海生爬虫類が潜水するときの心拍数の変化については、ほとんど研究されていなかった。

ウミガメ類は海を深く潜る唯一の爬虫類である。従来、甲羅のあるウミガメの心拍数を測定する際には、手術で体内に電極を埋め込む必要があり、自然環境下で心拍数を測定するには、実験個体を再捕獲して記録装置を回収しなければならなかった。ウミガメ類は産卵のために上陸する以外、ほとんどの期間を海で過ごす。そのため、これまでに自然環境下で潜水中の心拍数を測定した研究は、産卵期のオサガメを対象とした 1 例のみであった (Southwood ら 1999)。しかし、産卵期の個体は採餌期に比べて浅い深度までしか潜水しないため、爬虫類が深く長く潜るときの心拍数を確かめられなかった。

三陸沿岸域には、夏季になるとアカウミガメ (*Caretta caretta*) の亜成体が採餌のために来遊し、定置網に混獲されることがある。来遊個体を衛星追跡した調査では、アカウミガメにおける最大潜水深度である 340 m の潜水が記録されている (Narazaki ら 2018)。したがって、三陸沿岸域はウミガメが深く長く潜水するときの生理状態を調べることができる限られた海域である。さらに本研究グループは、ウミガメの甲羅に導電性の電極を貼り付けることで、手術をせず心拍数を精密に測定できるバイオリギング手法を確立した (Sakamoto ら 2021、Kinoshita ら 2022)。この方法では記録装置を切り離すことで、実験個体を再捕獲せずに心拍数を測定できる。そこで本研究では、これらのバイオリギング手法を用いて、三陸沿岸域に来遊する採餌期のアカウミガメが、海を自由に潜水するときの心拍数と潜水行動を計測した。これにより、潜水能力の高い海生爬虫類であるアカウミガメが潜水するときの心拍数の変化と、心拍数に対する潜水時間や深度の影響を調べた。

【方法】

2021年から2023年の夏季に、岩手県の大槌湾、船越湾、山田湾にかけて設置された定置網で混獲されたアカウミガメの亜成体5個体を用いた。体重は 59.7 ± 10.9 kg（範囲：46.0–76.3 kg）で、性別は不明であった。混獲個体を保護した後、東京大学大気海洋研究所大槌沿岸センター（岩手県大槌町）の屋外水槽で一時的に飼育しながら実験を行った。

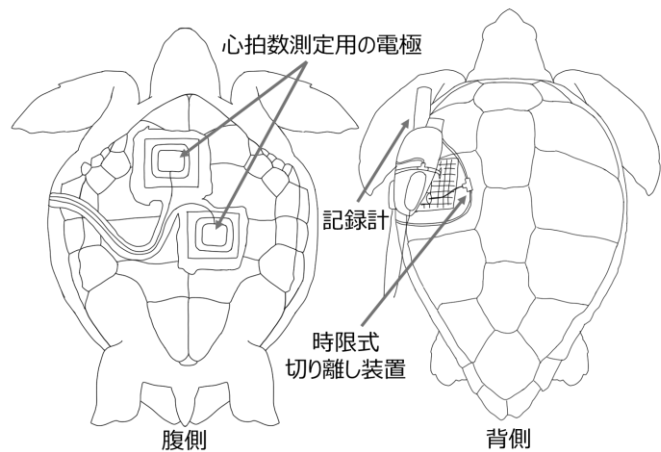


図1. 機器類を装着したウミガメの模式図

ウミガメに心拍数測定用の電極と記録計の入った浮きを装着して海に放流し、心電図、深度、加速度、温度を3日間計測した（図1）。記録計の入った浮きは、切り離し装置によって時限式にウミガメから切り離され、海面に浮上したところを船で回収した。

得られた心電図データから心拍数の算出を、深度データから潜水行動の分類を、加速度データから遊泳する際にヒレをかく（ストローク）頻度の算出を行った。潜水している期間と海面で呼吸している期間の心拍数の違いを調べるために、個体差を考慮した線形混合モデルを用いた。また、潜水中の最低心拍数と、潜水行動（最大潜水深度、潜水時間、ストローク頻度）、水温、体重の関係も、同様に線形混合モデルで調べた。ただし、水温と体重を除いたモデルが最もあてはまりが良かったため、最低心拍数と潜水行動のみを含むモデルを採用した。

【結果】

アカウミガメは海で5.1分から最大63.9分、深度1.8mから最大153mの範囲で潜水していた。いずれの潜水の場合も、潜水を開始して数分以内に心拍数は大幅に低下していた（図2）。平均心拍数は、海面で呼吸するとき 20.9 ± 4.1 拍/分（ $n = 260$ ）であったのに対し、潜水するときは 12.8 ± 4.1 拍/分（ $n = 361$ ）まで有意に低下していた。潜水中の心拍数低下の程度は39%（個体ごとでは23%から61%の範囲）であった。潜水している間に心拍数はある程度変化していたものの、海面で呼吸するときと比べると、常に低い値であった。

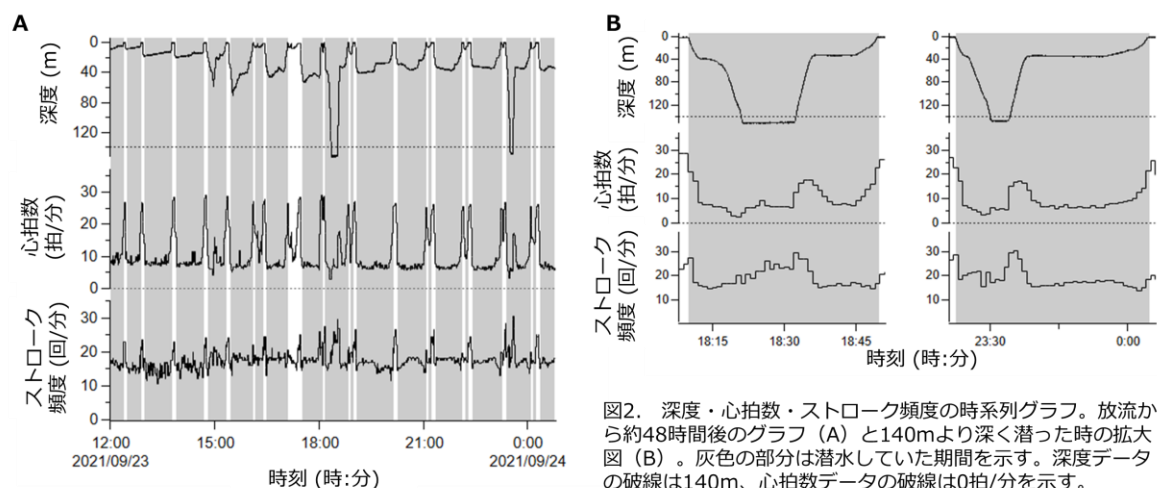


図2. 深度・心拍数・ストローク頻度の時系列グラフ。放流から約48時間後のグラフ（A）と140mより深く潜った時の拡大図（B）。灰色の部分は潜水していた期間を示す。深度データの破線は140m、心拍数データの破線は0拍/分を示す。

さらに、最大潜水深度が深いほど潜水中の最低心拍数はさらに低下していた（図 3A）。特に、アカウミガメが 140 m より深く潜ったときには、ある程度ストロークして泳いでいたにもかかわらず、心拍数が 2 拍/分という非常に低い値まで急激に低下していた（図 2B）。モデルにアカウミガメの実際の潜水行動を当てはめると、1.8 m から 153 m の範囲で潜水中の最低心拍数は 53% 低下することがわかった。それに対して、潜水時間とストローク頻度の影響は小さく（図 3B、C）、心拍数の低下の程度は、潜水時間の増加（5.1 分から 63.9 分）によって 1% 未満、ストローク頻度の増加（0.4 回/分から 25.6 回/分）によって 20% であった。

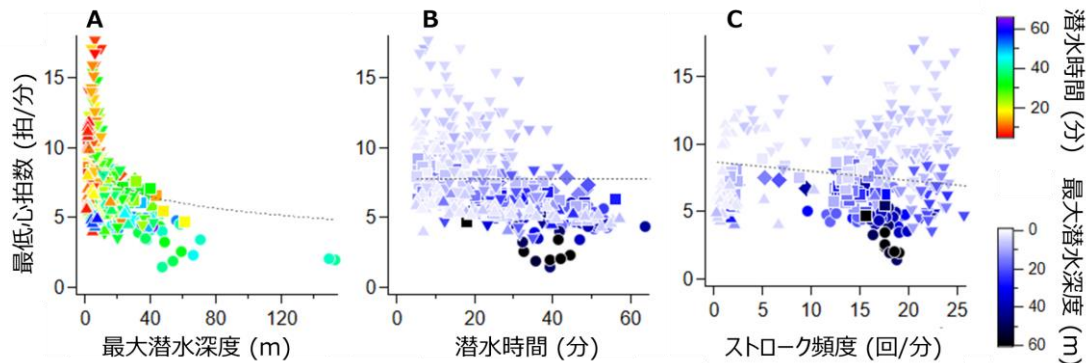


図3. 潜水中の最低心拍数と潜水行動の関係。最大潜水深度 (A)、潜水時間 (B)、ストローク頻度 (C)。カラースケールはそれぞれ潜水時間 (A) と最大潜水深度 (B、C) を示す。破線は算出された線形混合モデルの式を示す (他の変数は平均値を使用して算出した)。マーカーの形は各実験個体を示す。

【考察】

本研究では、世界で 2 例目となる、自然環境下でのウミガメの心拍数測定に成功した。アカウミガメが潜水するときの心拍数は、海面で呼吸するときより 39% 低下しており、深く潜るほどさらに低くなった。特に、140 m より深く潜ったときには、心拍数が 2 拍/分という非常に低い値まで急激に低下していた。この値は、爬虫類で報告された心拍数の中で、最も深い場所まで潜水しているときの記録であった。心拍数は潜水時に低くなることに加え、一般的に体が大きい動物や外温動物で低いことが知られている。地球上で最大の内温動物であるシロナガスクジラの場合、海面では 25–37 拍/分だった心拍数が、潜水すると最低で 2 拍/分まで低下したことが報告されている (Goldbogen ら 2019)。体の大きな内温性爬虫類であるオサガメでは、100 m 程度の深さまで潜水したときの心拍数は 10–15 拍/分であることが報告されている (Southwood ら 1999)。本研究で記録された、外温性爬虫類であるアカウミガメの心拍数は、アカウミガメの 1000 倍以上も体重の大きいシロナガスクジラに匹敵する非常に低い値であった。したがって、本研究によりアカウミガメは、活動中の肺呼吸動物としては最も心拍数が低下する動物のひとつであることが示唆された。

さらに、種によって程度は異なるものの、潜水中の心拍数の低下や潜水深度の影響は、海生哺乳類や海鳥の多くの種で確認されている (McDonald & Ponganis 2014、 Wright ら 2014)。一方で爬虫類の場合、これまで自然環境下で心拍数を測定した研究は、浅瀬に生息するワニ類 (Seebacher ら 2005、 Smith ら 1974) やウミヘビ類 (Heatwole ら 1979)、あるいは採餌期より潜水深度の浅い産卵期のオサガメ (Southwood ら 1999) を対象としていた。そのため、これらの研究では潜水時の心拍数の低下がさほど顕著でなく、心拍数に対する潜水深度の影響もはっきりしていなかった。本研究により、アカウミガメが深く潜るとき

の心拍数が明らかになったことで、海生爬虫類が潜水するときにも、海生哺乳類や海鳥と同様の心拍数の変化が起きることが初めて確認された。

これまで潜水時の心拍数に関する研究が行われてきた海生哺乳類や海鳥は、主に採餌のために、目的の深度まで潜り海面へ戻るといった潜水を行う。つまり、潜水深度が深いほど潜水時間も長くなる。そのため、潜水深度が深いほど、または潜水時間が長いほど心拍数が低下することが報告されてきたが、潜水時間と潜水深度の影響は区別できていなかった。これに対し、ウミガメは中層に留まる潜水など様々なタイプの潜水を行い、潜水深度と潜水時間は必ずしも相関しない。本研究では、アカウミガメの潜水中の最低心拍数は、最大潜水深度が深いほどさらに低下するが、潜水時間の影響は小さいことがわかった。この結果は、これまで海生哺乳類や海鳥では明らかにできなかった、潜水時の心拍数変化に対する潜水深度と潜水時間の影響の違いを示唆している。特に、ウミガメが深く潜ったときの急激な心拍数の低下は、活動中の肺呼吸動物としても最低レベルであった。潜水中の心拍数の低下は、体内の酸素の効率的な利用や、深い深度での高い水圧による障害のリスク軽減に関与すると考えられている (McDonald & Ponganis 2014、Wright ら 2014)。潜水中に心拍数が低下することの意義については、今後さらに研究が必要だが、潜水時の心拍数の低下は、肺呼吸動物に共通する、深く潜るための重要な生理的な仕組みであると考えられた。

【まとめ】

本研究では、三陸沿岸域に來遊し深くまで潜水する採餌期のアカウミガメを用いて、世界で2例目となる、自然環境下でのウミガメの心拍数測定を行った。その結果、爬虫類で報告された心拍数の中では、最も深い場所まで潜水しているときの記録を得た。そして、アカウミガメが自然環境下で潜水するとき心拍数が低下し、特に潜水深度が深いほど心拍数がさらに低くなることを明らかにした。このような潜水中の心拍数の変化は、海生哺乳類や海鳥でも確認されている、肺呼吸動物に共通した仕組みであった。したがって本研究は、爬虫類であるウミガメが深く潜るとき心拍数の変化を初めて明らかにし、肺呼吸動物が海で生きるための生理的な仕組みの解明にも貢献するものである。