



日本バイオロギング研究会会報

日本バイオロギング研究会会報 No. 184

発行日 2021年12月24日 発行所 日本バイオロギング研究会（会長 佐藤克文）

発行人 光永 靖 近畿大学 農学部 水産学科 漁業生産システム研究室

〒631-8505 奈良県奈良市中町 3327-204

TEL & FAX: 0742-43-6274 E-mail: BioLoggingScience@gmail.com（アドレスが変わりました）

会費納入先：みずほ銀行 出町支店 普通口座 2464557 日本バイオロギング研究会



もくじ

新しい発見

ヨシキリザメは体温を調節しながら獲物を探す

渡辺佑基（国立極地研究所） 1

アザラシによる観測で冬期の南極沿岸の海洋環境が明らかに

國分瓦彦（国立極地研究所） 3

海面に浮かぶ海鳥の運動から波浪の現場観測を行う方法を開発

上坂怜生（東京大学大気海洋研究所） 5

野外調査報告

念願のサメ調査

徳永壮真（総合研究大学院大学・国立極地研究所） 8

「ロガーを装着されたイタチザメ」

撮影者：松本 瑠偉 撮影場所：沖縄県

ヨシキリザメは体温を調節しながら獲物を探す

渡辺佑基（国立極地研究所）



<研究の背景>

マグロ類、カジキ類、一部のサメ類などの外洋性大型魚類は、海の表層と深層との間を頻繁に行き来します。まるで肺呼吸のペンギンやアザラシのように、規則正しく水面に浮上することもあります。なぜ、一つの深度帯に留まらずに、こうした行動を見せるのでしょうか。この疑問は 30 年以上前から多くの魚類研究者の関心を引いてきました。

比較的良好に研究されているのは、メバチとマンボウです。潜水行動と体温とを同時に計測するバイオリギングにより、これらの魚の潜水行動は、深層での捕食と表層での体温回復の繰り返しであることが示されています。魚が潜行するにつれ、水温は急激に下がります。しかし、大型魚類は熱の慣性力が大きいので、体温はゆっくりとしか下がりません。このことを利用し、メバチやマンボウは深層で獲物を探し、体が冷え切る前に浮上して表層で体温を回復させるのです。

しかし、多様な外洋性大型魚類において、このパターンがどれほど一般的なのかは今のところわかりません。この点、興味深いのがヨシキリザメです。このサメは熱帯から亜寒帯までの幅広い海域に生息し、時には 1000m 以上の深さにまで潜ります。水平的にも鉛直的にも、非常に幅広い水温帯に適応していると考えられ、体温調節の研究にうってつけの種だと言えます。

そこで本研究では、バイオリギングの手法を用いてヨシキリザメの体温調節行動と捕食行動を計測しました。

<研究の内容>

2019 年の夏に台湾の南東部（台東県成功鎮）において野外調査を実施しました。延縄漁で 2 匹のヨシキリザメを捕獲し、行動記録計、体温記録計、ビデオカメラ等を組み込んだパッケージを取り付け、放流しました。翌日、パッケージがタイマーで切り離され、浮上してくるのを待ち、電波信号を頼りに船舶で回収しました。

データを見てみると、2 匹のヨシキリザメはどちらも放流直後から深さ 200~300 メートルほどの潜水を繰り返していました（図 1）。水温は表層で 30 度、深さ 300m で 13 度でしたので、サメは一回の潜水の間に 17 度も水温変化を経験していたことになります。体温（筋肉の温度）のデータを見てみる

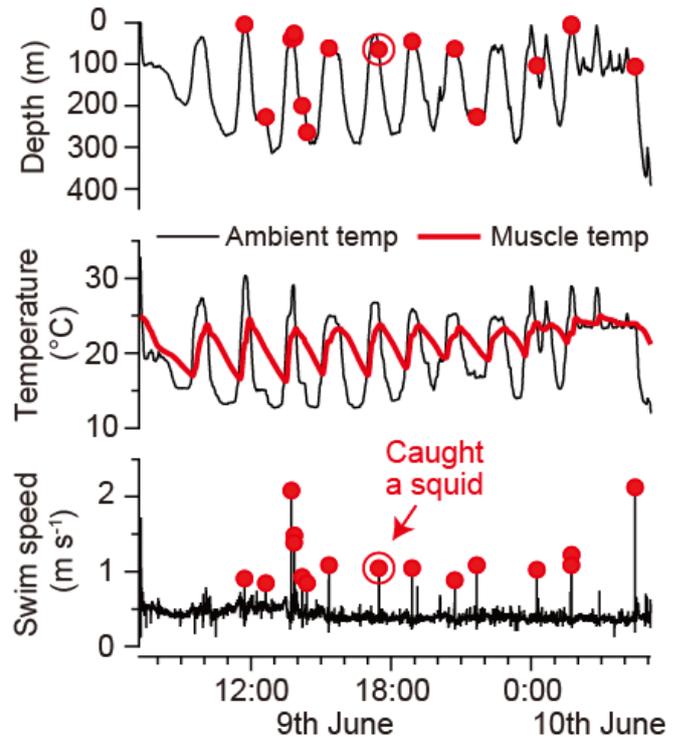


図 1：ヨシキリザメから計測された深度、水温、体温（筋肉の温度）、遊泳速度。赤丸はバースト遊泳イベントを示す。ビデオカメラにより、二重の赤丸で示した箇所ですサメがイカを捕食したことが確かめられた。

と、メバチやマンボウで報告されているように、水温に比べてゆっくりと変化していました。しかし、メバチやマンボウとは異なり、潜水の後に表層に滞在して体温の回復を待つ行動は見られませんでした。ヨシキリザメは連続した潜水の最中、体温が下がり切る前に潜行をやめて浮上を開始し、また体温が上がり切る前に浮上をやめて潜行を開始していました。その結果、体温の変動幅は海水温の変動幅よりも小さく、また体温は深度と無関係でした（図 2）。

2 時間のビデオ映像からは、ヨシキリザメがイカを捕えた様子を一度だけ確認することができました。行動データと照らし合わせると、サメは獲物を捕える際、遊泳速度を急激に上げることがわかりました。そこで、行動データの全体からバースト遊泳イベントを取り出して解析しました。バースト遊泳イベントは特定の深度帯に偏らず、幅広い深度帯で見られました（図 2）。このことから、ヨシキリザメは潜水の最中、体温を調節しながら幅広い深度帯で獲物を探していることが示唆されました。

さらに、体温と水温のデータから、魚体の熱交換係数（水温と体温の差が 1 度の時の体温の変化率）を

計算し、文献に報告されている他の魚種と比較しました。体温の上昇過程においても、低下過程においても、ヨシキリザメの熱交換係数は体重から予測される値にほぼ一致しました（図3）。筋肉中に対向流熱交換器（counter-current heat exchanger）を持ち、生理的な体温調節能力の高いメバチやメカジキは、体温上昇過程の熱交換係数が非常に高いことが知られています。熱交換係数が平凡な値であったことから、ヨシキリザメは生理的な体温調節能力に優れた種ではないことがわかりました。

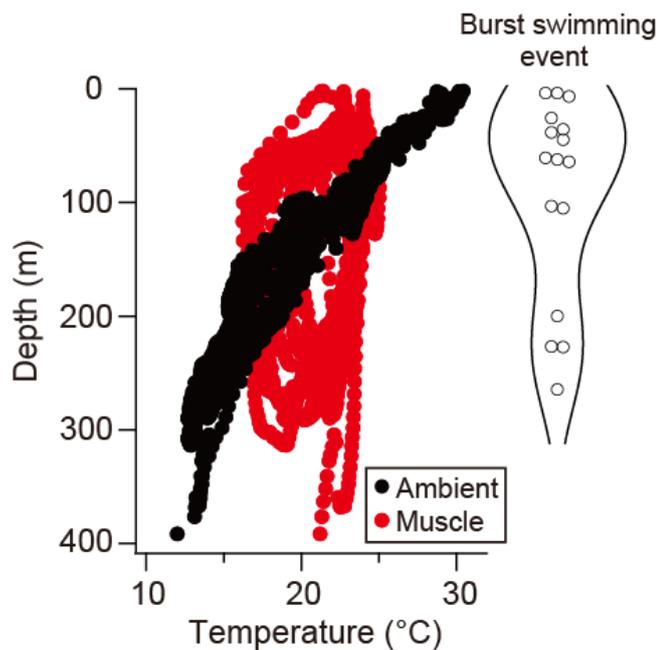


図2：水温、体温（筋肉の温度）と深度との関係。バースト遊泳イベントが記録された深度を右に示す。

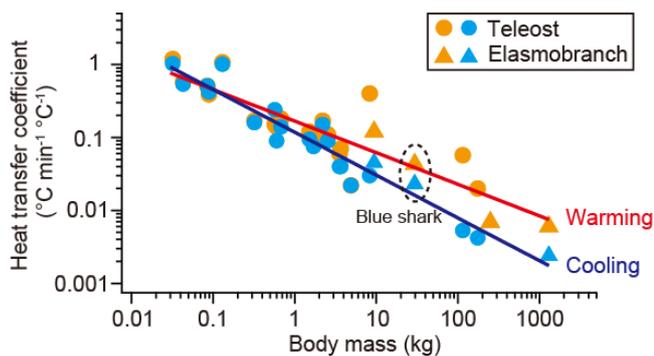


図3：魚類における熱交換係数と体重との関係。体温の上昇過程を暖色で、低下過程を寒色でそれぞれ示す。

<まとめ>

本研究では、ヨシキリザメの体温調節行動を明らかにし、捕食行動との関わりを示すことができました。サメは連続した潜水の最中、体が冷え切る前に潜行をやめて浮上を始め、また体が温まり過ぎる前に浮上をやめて潜行を開始します。そうすることで体温の変動幅を小さくし、幅広い深度帯を通過して獲物を探します。こうした行動パターンは、深層で獲物を探した後、表層で体温を回復させるメバチやマンボウとは異なっていました。また、熱交換係数の解析から、ヨシキリザメの生理的な体温調節能力は平凡であり、むしろ行動的な体温調節によって幅広い水温帯に適応していることが示唆されました。

2020年以降、コロナ禍のために野外調査ができず、不十分ながら N = 2 で論文にまとめました。今後はデータ数を増やすとともに、心拍数の計測に挑戦し、外洋性大型魚類の体温調節に関わる生理の部分により深く研究していきたいと思っています。

Watanabe YY, Nakamura I, Chiang W-C (2021) Behavioural thermoregulation linked to foraging in blue sharks. *Mar. Biol.* 168:161. doi: 10.1007/s00227-021-03971-3

新しい発見

アザラシによる観測で冬期の南極沿岸の海洋環境が明らかに

國分瓦彦（国立極地研究所）

南極・昭和基地周辺で、ウェッデルアザラシに水温塩分記録計を取り付け、海水で覆われる秋期～冬期の南極沿岸の海域の海洋環境を調べました。その結果、秋に外洋の海洋表層から暖水が沿岸に流れ込み、その暖水を利用することでアザラシが効率よく餌をとっていたことが明らかになりました。この成果は、秋期～冬期の南極海沿岸の海洋循環のメカニズムと海洋生態系の応答プロセスの解明につながると期待されます。

<研究の背景>

南極沿岸にはペンギンやアザラシなど多くの大型動物が生息しています。それを可能にする要因のひとつとして、外洋の深層からの栄養塩に富んだ暖水（注 1）の流入にともなう高い生物生産が挙げられます。このような現象は、深い海底谷や海洋渦の存在など、外洋の深層水が流れ込みやすい条件を備えた海域や、広い大陸棚のある海域などに限られていました。一方、南極沿岸には、定着氷と呼ばれる陸から一続きとなって容易に動かない海氷に覆われた海域が広く存在し、そこでも多くの大型動物が見られます。しかしこの海域は厚い氷に覆われているため船で海洋調査をすることは難しく、どのような仕組みによって多くの大型動物が生息できるのかはよくわかっていませんでした。

<研究の内容>

そこで本研究チームは、南極・昭和基地周辺に生息するウェッデルアザラシに CTD タグという最新の水温塩分記録計(図 1)を取り付け、これまで未知だった冬期の沿岸の海洋環境を計測しました。



図 1：頭に CTD タグを装着したウェッデルアザラシ。

ウェッデルアザラシは最大 904m、96 分間も潜水する南極沿岸の代表的な大型動物です。秋にアザラシに取り付けた CTD タグは塩分と水温を計測し、同時に潜水深度を記録して、そのデータを衛星通信で送信します。本研究では昭和基地周辺から最大 633km も離れた海域まで移動しながらデータを送信しており、冬期の南極沿岸の海洋環境を調べる上でこの手法が有効であることを確認できました。このようにして得られた冬期間の水温塩分データを分析したところ、低温低塩分の水（注 2；図 2 中の黒色の水塊）が観測期間中に観測海域全体で見られたこと、高温低塩分の水（注 3；図 2 中のオレンジ色の水塊）が秋に沿岸の多くの地点の 100～150m の深さで見られ、時期が進むと共に最大 400m まで沈み込んでいたこと、高温高塩分の水（注 1；図 2 中の赤色の水塊）が秋から冬にかけて、深い海底谷など限られた海域の深い深度で見られたことがわかりました。また、アザラシの潜水深度の記録から、どれくらい効率的に餌をとっていたかを示す指標（注 4）を計算し、海水のタイプが餌とり行動にどう影響していたかを分析したところ、低温低塩分の水(注 2)と比べて、高温低塩分の水(注 3) や高温高塩分の水(注 1) でアザラシはより効率的に餌をとっていたことがわかりました。

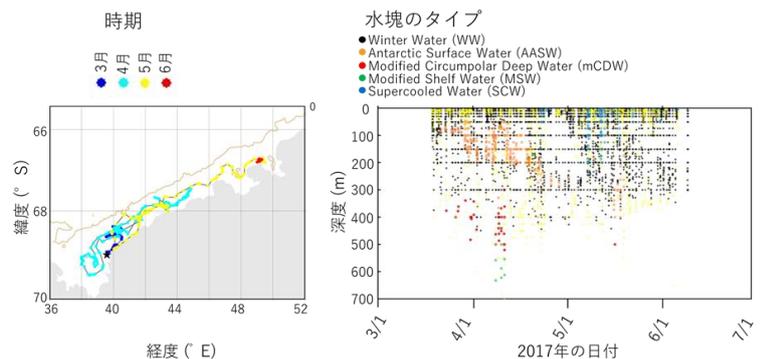


図 2：アザラシの観測した南極沿岸の海洋環境の時系列パターン。左から移動軌跡（★は昭和基地の位置）、時系列に沿った各水塊の深度分布を示す。1 個体の例を示している。

秋期・冬期に低温の水(注 2) が広く見られたことや、高温高塩分の水(注 1) が限られた地点の深い深度で見られ、そこでアザラシが効率的に餌をとっていたことは、他の海域でもこれまでに確かめられてきたことです。一方、高温低塩分の水(注 3) が秋に広い海域の浅い深度で見られ、それが徐々に深い深度へ沈み込んでゆく現象はこの研究で初めて明らか

になった点です。風向風力を使ったモデル計算によってこのような水の由来を詳しく調べると、秋に沿岸を西向きに吹く風が強まることで、外洋から沿岸に向けて表層を流れる流れが強まり、さらに一部の海水は下の方へ潜り込むような力が特に強まっていたことが示唆されました。南極沿岸を取り巻く外洋側の暖かい水には、ナンキョクオキアミなどの高次捕食動物にとって重要な餌生物が生息しています。このような餌生物が、秋に外洋側から風の力によって沿岸へ運ばれてきた結果、沿岸側に生息しているウェッデルアザラシがより効率よく餌をとっていたものと考えられました(図3)。

N. Kokubun, Y. Tanabe, D. Hirano, V. Mensah, T. Tamura, S. Aoki, A. Takahashi (2021) Shoreward intrusion of oceanic surface waters alters physical and biological ocean structures on the Antarctic continental shelf during winter: Observations from instrumented seals. *Limnology and Oceanography* 66, 3740-3753

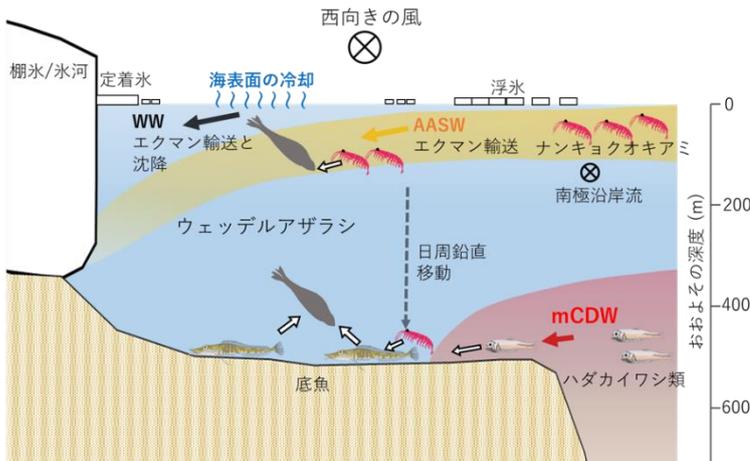


図3：本研究で明らかになった冬期の昭和基地近海の大陸棚上の海洋環境の模式図。色のついた矢印は海水の流れ、白抜き矢印は想定される栄養の流れを示す。各水塊は注1～3と同じ略語で示している。

<今後の展望>

本研究は、南極沿岸域で秋に強まる風の力によって、外洋の表層から海水と餌生物がもたらされている可能性を初めて示しました。今後南極沿岸のいろいろな海域で、どれくらいの海水が流れ込んできているのか、またそれによって沿岸の海洋生態系にどれくらいの影響があるのか、より詳しい仕組みを解明することにつながると期待できます。

<注>

注1：Modified Circumpolar Deep Water (mCDW: 周極深層水)と呼ばれる水塊。

注2：Winter Water (WW: 冬期水)と呼ばれる水塊。

注3：Antarctic Surface Water (AASW: 南極表層水)と呼ばれる水塊。

注4：Residual diving bottom time (Rbt)と呼ばれる指標。プラスの値であれば餌とりに正の影響があったこと、マイナスの値であれば餌取りに負の影響があったと判断する。

海面に浮かぶ海鳥の運動から波浪の現場観測を行う方法を開発

上坂 怜生（東京大学大気海洋研究所） E-mail: leo.u@aori.u-tokyo.ac.jp



みなさまこんにちは。東京大学大気海洋研究所博士課程 3 年の上坂怜生です。この度めでたく、原著論文がオンラインで公開されましたので、ご紹介いたします。バイオロギングを用いた海洋観測は、動物の広大な移動範囲によって人間がアクセスしにくい場所の情報を得られるため、近年とても注目されています。一見すると人間が身勝手に動物を利用しているように見えてしまいそうなバイオロギング海洋観測ですが、動物が経験した環境情報を手に入れられるという点では、保全研究の面から見ても価値があります。今回は、海鳥が海面に着水している際の運動記録から波浪を推定する手法を開発しました。この波浪情報は、海鳥の新しい生態の発見にもつながりました。

1. 研究の背景

海洋の波浪観測を行うことは非常に重要です。なぜならば波浪は、船舶の安全な航行をはじめ、大気と海洋間のエネルギー、物質交換過程などと深く結びついているからです。より低いコストで効率よく波浪観測を行う技術の開発は、観測値を増やし予報モデルの精度を向上させるためにも、大きな需要があります。また海鳥など、生活が波浪の影響を受けていると予想される生物の生態を研究するうえでも、波浪観測を行うことは重要です。例えば、年間を通じて大荒れの海域に生息しているワタリアホウドリが、波が非常に高い状況でも着水して餌を採ることができるのかは非常に興味深い疑問です。本研究では、海洋を中心に生活している 2 種類の海鳥にデータロガーを装着し、水面での精密な運動記録から波浪を推定することで、海洋の波浪観測を行うことを試みました。

2. 研究内容

本研究ではまず、岩手県の三陸沿岸域で繁殖しているオオミズナギドリにデータロガーを装着し、GPS によって海洋での位置や速度（1 秒間に 5 回）を記録しました。オオミズナギドリが海面で休憩している間は、ほとんど受動的に波に揺られています。そのため、波に揺られる運動を GPS によって記録することで、オオミズナギドリを波浪観測ブイのように見立てて波浪観測を行うことができると考えられます。記録された GPS データを見ると、ノイズを多く含んでいるものの、予想通り GPS の高度変化は波浪の動きを捉えることができていました。波浪に由来する運動以外のノイズを

ハイパスフィルターで取り除くことで、オオミズナギドリの海面での運動から波浪の運動を得ることができました。また、オオミズナギドリが着水することが多い海域には、精度を検証するための波浪観測ブイを係留していました。このブイとオオミズナギドリで観測した波浪を比べてみた結果、有義波の波高、周期、波向は互いによく一致しました（図 1）。

オオミズナギドリで観測した波浪はブイとよく一致したものの、波高の範囲は 1 ~ 2.5m とあまり広くありません。そこで今度は、非常に波浪が高いインド洋南部で繁殖しているワタリアホウドリにデータロガーを装着し、同様に波浪観測を試みました。南インド洋でブイを係留するのは簡単ではないので、ワタリアホウドリによる観測結果は、NOAA が提供している New Wavewatch III という波浪数値モデルの推定値と比較しました。その結果モデルの推定値と海鳥による波浪観測値は最大 5m 以上の波高まで非常によく相関する結果となりました（図 2）。

海鳥と波浪の関係の一つとして、波が高いと海の中の餌を視認することが困難になるのではないかということが逸話的に信じられていました。そこで、本研究では最後に、ワタリアホウドリは波が高い環境でも着水するのかどうかを検証しました。インド洋南部では 2 ~ 3m の高さの波が最もよく見られ、時には 4m 以上の波高になることもあります。ワタリアホウドリによって観測された波高の分布を見た結果、インド洋南部の全体的な傾向とほとんど一致し、ワタリアホウドリは、波の高さを気にすることなく着水できるということが分かりました（図 3）。また、波高が高い状況に着水したときも加速度記録を確認すると餌を採っているような信号が確認されたため、ワタリアホウドリの餌の視認性は必ずしも波によって妨害されない可能性が示唆されました。

3. 今後の展望

海鳥で波浪観測を行うことは、気象学的な意義と生物学的な意義の両方があります。海鳥を利用した波浪観測では、波浪ブイによる観測のように大きな装置を船で運ばなくても、安価に外洋の波浪の情報を集めることができます。また、海鳥は世界中に広く分布しているため、いろいろな海域で応用することができます。特にワタリアホウドリが生息している南インド洋のような現場観測値が不足している海域では、非常に価値

が高いことが予想されます。今後は、海鳥による波浪観測結果を風や海流と合わせて自動で処理し海洋気象予報に役立っていくようなシステムの構築が可能になると考えられます。また、生物学的な意義として、海鳥によって観測された波浪は海鳥自身が経験したものであるため、その時の行動と対応させて考えることができます。ワタリアホウドリの着水と波高の関係のように、波浪が海鳥の生活にどのように関係しているのかが、今後明らかになると期待できます。

<紹介論文>

Uesaka L., Goto Y., Yonehara Y., Komatsu K., Naruoka M., Weimerskirch H., Sato K., Sakamoto K. Q. 2022, Ocean wave observation utilizing motion records of seabirds.. *Prog. Oceanogr.* 200. 102713.

<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2021.102713>

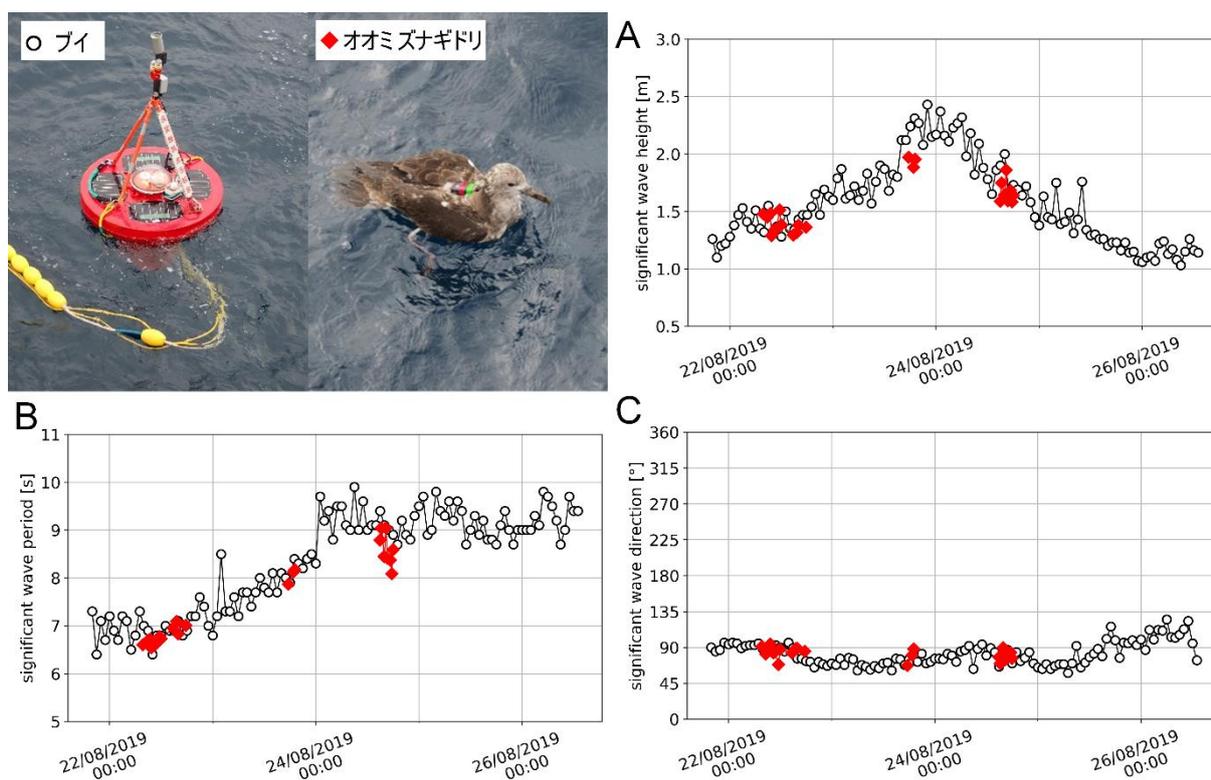


図 1. 波浪ブイ(白丸)によって観測した波高(A)、波の周期(B)、波向(C)とオオミズナギドリ(赤四角)による波浪観測結果の比較。

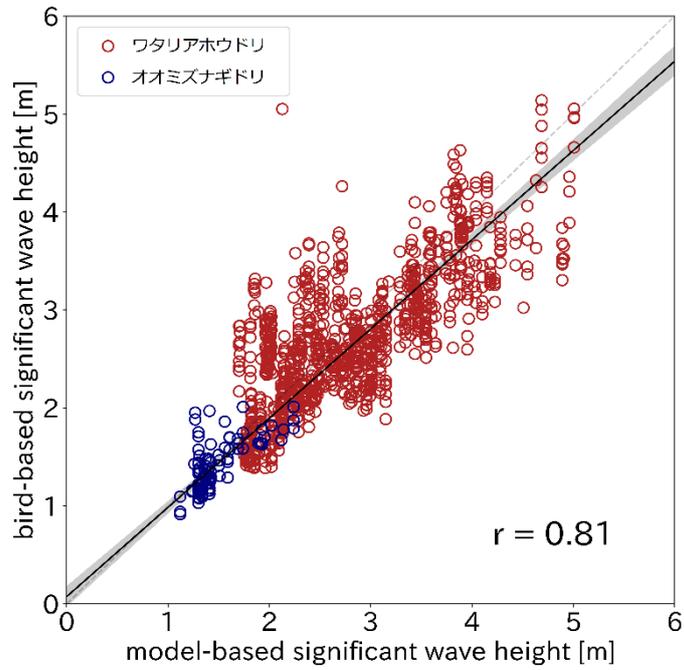


図 2. 波浪モデルによる波高の予測値(X 軸)と海鳥によって観測された波高(Y 軸)の比較。点線、実践、灰色の領域はそれぞれ、 $y=x$ の線、回帰直線、回帰直線の 99%信頼区間を表す。

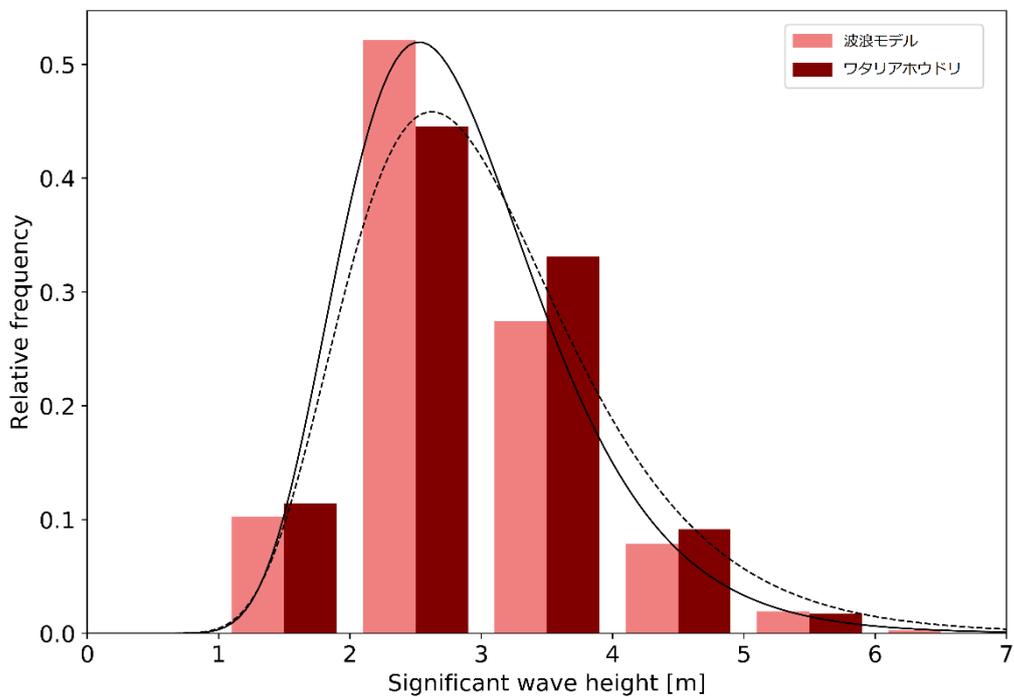


図 3. 南インド洋の波高の分布(薄橙)とフタリアホウドリが着水した箇所の波高の分布(赤)。点線と実線はそれぞれの分布を対数正規分布でフィッティングしたもの。

念願のサメ調査

徳永壮真（総合研究大学院大学・国立極地研究所）

初めまして、総研大修士1年の徳永です。私は昔からサメが好きで（特にホホジロザメはダントツ!）、フィールドに出てサメの調査をすることをずっと夢見てきました。そして先日、ついに念願のサメ調査が実現したので、その模様をご報告します。

調査地は沖縄本島中部に位置する読谷村です。本来であれば、「お目当てのサメが獲れるかどうか」というところから始まりますが、今回は事前に生け簀にサメを確保して頂きました。生け簀に到着してまず目に入ったのは、巨大なサメ…ではなく、大量の軽石でした。後日、軽石の撤去作業をお手伝いしたのですが、かなりの時間と労力がかかり、軽石の漂着が深刻な問題になっている理由がわかりました。



生け簀に入った軽石の撤去作業の様子。なかなか減らない…。

そうなるはず心配なのは、生け簀内のサメです。生け簀を覗き込んでみると、我々の心配をよそに、1匹のイタチザメが元気そうに泳いでいました。イタチザメといえば、人間を襲うこともある大型のサメです。この個体は全長約2mと小さめでしたが、間近で見るとやはり迫力がありました。大きな怪我也見当たらなかったため、予定通り、この個体にロガーを付けることにしました。



生け簀内を泳ぐイタチザメ。時折こちらを見ているようにも。

いよいよロガー装着の日。イタチザメを船上に移してロガーを取り付けます。小型の個体とはいえ、噛みつかれたら大変です。サメの様子をうかがいながら、体表にロガーを取り付けるための穴を開けようと試みますが…これがめちゃくちゃ硬い！表面はサメ肌でザラザラしており、防御力が凄まじい。その後の体温ロガーの挿入にもかなり苦戦しましたが、何とかロガーを取り付け、すぐに放流しました。予定通りいけば、4日後にロガーが切り離されて海面に浮上し、位置情報を発信し始めるはず。ロガーを回収できるのかという不安も少しありましたが、頭の中は念願のサメ調査に参加できた嬉しさでいっぱいでした。



ロガー装着の様子。サメは暴れずにいてくれました。

翌日。朝・昼と位置情報が更新されていないことを確認して安心した私は、のんびりと夕飯のポキ丼を食べていました。同行者と談笑し、腹も膨れたところで、軽い気持ちで位置情報を確認してみると…「あれ、ロガー浮いてる!?!」。なんと予定より大幅に早く、たった1日でロガーが浮上していました。慌てて翌朝に釣り船をチャーターし、ロガーを回収。幸い1日分のデータは取れていましたが、3日目から起動するはずだったビデオロガーには当然何も映っておらず…。どうやらイタチザメの激しい泳ぎに耐えられず、結束バンドがすっぽ抜けてしまったようでした。無念。

そんなわけで、トラブルもあった人生初のサメ調査でしたが、夢のような時間を過ごすことができました。同行してくださった指導教員の渡辺佑基先生と長崎大の中村乙水先生、調査に全面協力してくださった沖縄美ら海水族館の方々に感謝申し上げます。ちなみにリベンジマッチは来月の予定です。頑張ります！

事務局からお知らせ

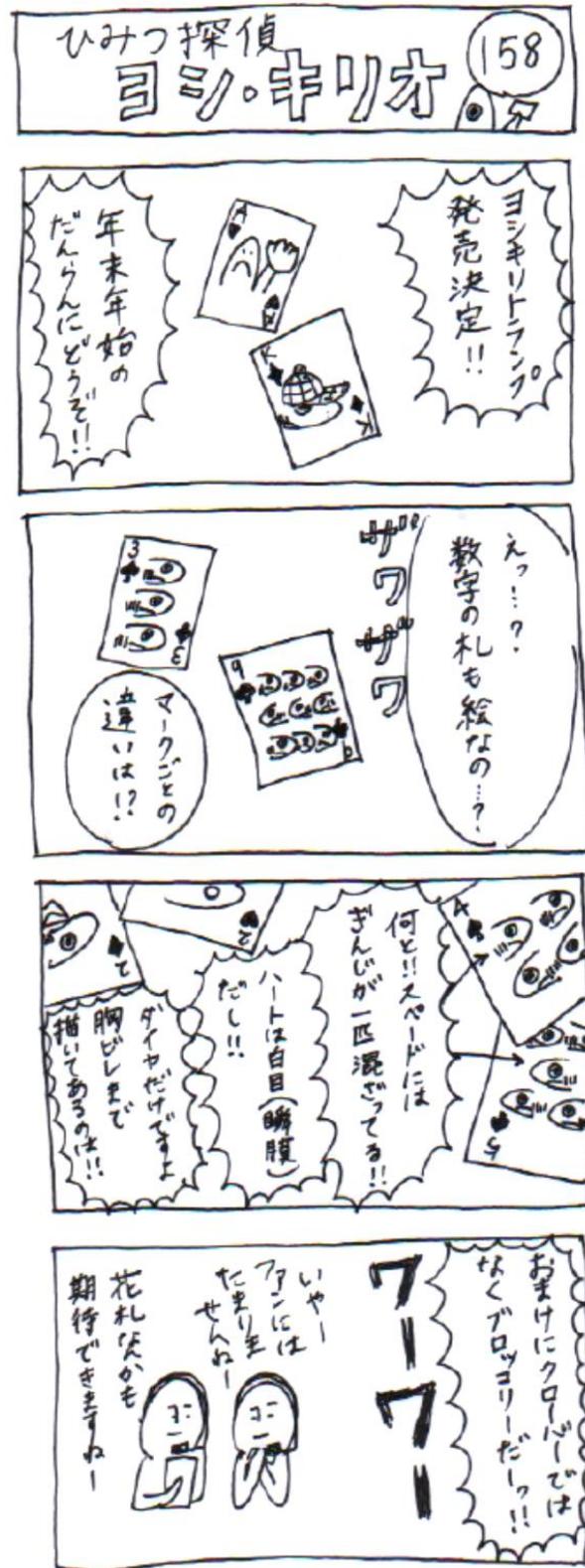
会費納入のお願い

- 会費の納入にご協力をお願いいたします。
正会員5000円、
学生会員（ポストドクも含みます）1000円です。
2年間会費未納ですと自動的に退会になりますのでご注意ください。
- 住所・所属の変更はお早めに事務局
(BioLoggingScience@gmail.com) まで
メールアドレスが変わりました

編集後記

約2年ぶりに野外調査に行きました。コロナ禍の前に買った最新ガジェット（イリジウムネットワークでアルゴスの位置情報が取得できるタブレットです）を楽しみにしていたのに、放流したサメが遠くに行かなかったので出番なし。頼むから次は携帯の圏外まで泳いでください。【YW】

カレンダーを発送しました。お手元に届いていない方は事務局までご連絡ください。残りは1部440円（税込・送料込）で販売いたしますので、こちら事務局までご連絡ください。【YM】



【S.K】