



日本バイオリギング研究会会報

日本バイオリギング研究会会報 No. 182

発行日 2021年10月25日 発行所 日本バイオリギング研究会（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 日本バイオリギング研究会



もくじ

総説

海洋生物のエネルギー収支に関するレビュー論文を書いた経緯 渡辺佑基（国立極地研究所）1

新しい発見

ジンベエザメは台風から避難する？ 中村乙水（長崎大学 海洋未来イノベーション機構）2

妊娠したヨシキリザメの季節回遊

藤波裕樹（水産研究・教育機構 水産資源研究所）3

アワビの産卵とその刺激候補としてのフェントン反応

松本有記雄（国際農林水産業研究センター 水産領域）5

ウミドリ用の防水型の風速センサ

高橋英俊（慶應義塾大学 理工学部 機械工学科）7

雑談

動物観とバイオリギング観

塩見こずえ（東北大学 学際科学フロンティア研究所）8

「PSAT を装着、放流直後のヨシキリザメ雄（水産資源調査・評価推進委託事業により撮影）」

撮影場所：北西部太平洋

撮影者：藤波裕樹

海洋生物のエネルギー収支に関するレビュー論文を書いた経緯

渡辺 佑基（国立極地研究所）

バイオリギングを使ってホホジロザメの遊泳行動を計測した論文を、私は2019年に発表した(1)。論文というのは面白いもので、これぞという会心の作が無反応で終わったり、自信のなかった論文に大きな反響があったりする。

この論文は後者であった。どちらかといえば好奇心や野心ではなく義務感に駆られて書いた論文であり、労作ではあっても自信作ではなかった。ところが、出版されてみると評判がよく、頻繁に引用されるようになった。さらには、出版元の編集者から、「あなたの論文はすばらしかった。よかったら関連するレビュー論文を書いてくれないか」という依頼まで受け取った。

もちろん断る理由はない。ただ、私の頭を悩ませたのは、トピックの選択だった。レビュー論文として間口が広すぎもせず、狭すぎもせず、既存の論文との重なりが少ない、適切なトピックを探す必要があった。

思いついたのは、大型海洋生物のエネルギー収支というトピックだった。通常、生物のエネルギー消費量や摂取量は、飼育実験で計測する。しかし、サメやクジラのような大型海洋生物では、それができない。さらに、代謝速度のアロメトリー式（体重との関係式）ですら、大型海洋生物の場合、適用可能な体重の範囲から外れてしまっている。

バイオリギングの技術を使えば、大型海洋生物のエネルギー収支を、ある程度は推定できる。エネルギーの消費量や摂取量の指標になるパラメータ（体の加速度、心拍数、捕食頻度等）を計測することが、近年可能になってきたからである。これは将来性のある研究手法であり、レビュー論文にふさわしいトピックだと私は考えた。

トピックが決まれば、次は共著者探しだ。普段から連絡を取り合っている共同研究者たちの顔が、ぼつぼつと頭に浮かんだ。でも、待てよ、と思った。せっかくなので、今まで接点がなかった研究者、私が個人的にリスペクトしている研究者に声をかけるのがいい。

そこで私は、スタンフォード大学の Jeremy Goldbogen さんにメールした。彼は私より少し年下だが、ヒゲクジラの捕食生態に関して、独自の世界を築いている超一流の研究者だ。私は彼の研究を熱心にフォローしているし、彼も私の研究をよく見ている。しかし、これまで一緒に研究をしたことはなかった。幸い、彼は快く共著者の役割を引き受けてくれた。

実際にレビュー論文を書いてみると、一番大変だったのは、山のような文献を読むことだった。書いている時間よりも、読んでいる時間の方が長かった。でも考えてみれば、レビュー論文の執筆というのは、自分の勉強にもなり、外へのアピールにもなるという、申し分のない仕事かもしれない。

調べながら書いていくうちに、当初用意していた結論とは別の結論に着地することもあった。たとえば、生物の代謝速度の指標として、心拍数がどれほど有用なのかという問題がある。私はそれまで、哺乳類では有用だが、魚類ではそうではない（心臓の一回拍出量の変化が大きいから）と信じていた。

けれども、多くの文献に目を通すうちに、そうではないと思い始めた。哺乳類の中でも、アザラシやクジラのような海生哺乳類の場合、息を止めて潜水を始めた途端、心拍数は激減する。これは潜水反射と呼ばれる現象で、代謝速度とは直接関係がない。だから、海生哺乳類では、心拍数は代謝速度の有用な指標にはならない。一方、魚類の場合は、水中でも常に呼吸をしており、潜水反射がない。心臓の一回拍出量は一定ではないが、総じてみると、心拍数は代謝速度の比較的よい指標になる。哺乳類では駄目で、魚ではオッケ。これは、当初私が想定していた結論とは、全く逆の結論であった。

Goldbogen さんとの共同作業も興味深かった。彼の頭の中の引き出しには、膨大な文献がきちんと整理されて入っているようで、いつも私の知らない、的確な引用文献を指摘してくれた。そうだよなあ、一流の研究者になるには、まず文献だよなあ、身の引き締まる思いがした。

このようにして、時間はかかったけれど、めでたくレビュー論文が完成した(2)。自分で納得できる質の論文に仕上がったので、よかったら読んでみて下さい。

1. Watanabe YY, Payne NL, Semmens JM, Fox A, Huveneers C (2019) Swimming strategies and energetics of endothermic white sharks during foraging. J. Exp. Biol. 222: jeb185603.
2. Watanabe YY, Goldbogen JA (2021) Too big to study? The biologging approach to understanding the behavioural energetics of ocean giants. J. Exp. Biol. 224 (13): jeb202747.

ジンベエザメは台風から避難する？

中村 乙水（長崎大学 海洋未来イノベーション機構）

- かごしま水族館、北海道大学と共同で、海へ帰すジンベエザメの放流後の行動を調べたところ、期間中に調査地付近を台風が通過した。
- ジンベエザメは、放流後は主に深度 40m 以浅に滞在していたが、台風接近中には深度 50m 以深に滞在していた。
- 深度の記録には、台風接近中にはうねり由来と考えられる 12~15 秒周期の変化が記録されていた。
- 深度と水温の関係を見ると台風の通過前後で水塊構造の変化が見られた。

台風は海の表層を大きく攪乱する大規模な気象現象です。台風により発生する高波は、そこに生息する生物にも影響を与えます。例えば、サンゴ礁に住む熱帯魚やサメ類は熱帯低気圧が接近すると深場へと避難することなどが知られています。外洋に生息する魚でも台風通過前後で行動が変化することが報告されています。2019 年 9 月に、かごしま水族館で飼育されていたジンベエザメを海へ帰す際に、放流後の行動を調べる目的でデータロガーを装着しました。データロガーにより 7 日間のジンベエザメの秒単位の詳細な深度変化が記録できました。その間に台風 17 号が九州西方を通過したため、偶然に台風の影響下におけるジンベエザメの行動が記録されていました。7 日後にサメから切り離れたデータロガーの浮上した位置は、放流場所からわずか 5 km しか離れていませんでした。データロガーに記録された深度変化を見ると、放流したジンベエザメは、台風接近前は主に海面付近や表層を泳いでいましたが、台風が接近すると深度 90m まで潜り、たまに浮上するものの台風が通過するまで深いところに留まっていた。海底地形図を見るとこの海域の水深は約 90m だったので、海底まで潜っていたと考えられます。また、深度の記録には 12~15 秒周期の圧力変化が記録されており、台風のうねり由来の周期の長い波の影響がサメのいた深度まで及んでいたことがわかりました。台

風の通過前後で深度と水温の関係を調べると、台風の通過に伴って表層の温かい水が海底付近まで混ざっていました。これまで、長期間の魚の行動データを解析する際には現地の天候などは考慮されてきませんでした。台風のような大規模気象イベントが魚の行動に与える影響を知ること、そのようなデータを解析する際に、魚の行動が変化した要因を知る手がかりの一つになると考えられます。

Nakamura I, Tsuchida H, Tone K, Sasaki A, Komeyama K, Kawabe R (2021) Behavioural response of a whale shark during the passage of a typhoon. Journal of Fish Biology, DOI: 10.1111/jfb.14892.

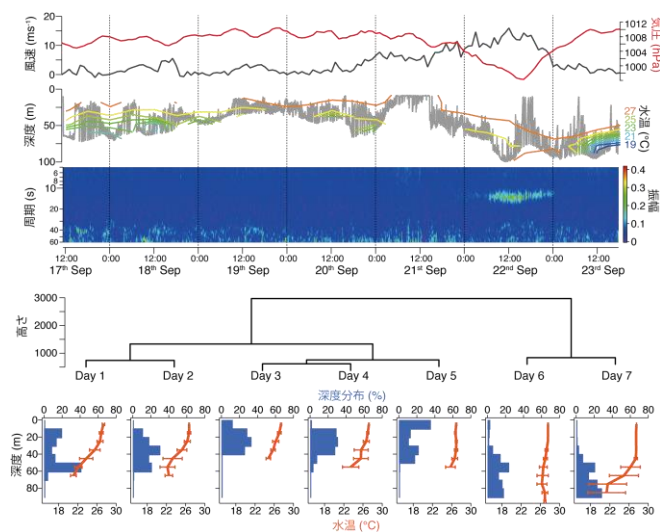


図 1 放流したジンベエザメの行動

枕崎での風速と気圧(気象庁 HP より)は、放流から 6 日目に台風が最も接近した際に、風速は上昇し、気圧は低下していた。ジンベエザメは、放流後は主に深度 40m 以浅に滞在していたが、台風接近中には最大で深度 90m まで潜り、そこに留まっていた。深度のスペクトルを見ると、台風接近中には 12~15 秒周期の変化が見られた。日毎の深度分布を階層クラスタリングすると、台風前後でクラスターが分かれ、台風が接近すると分布が深くなっていた。また、深度と水温の関係を見ると、台風の接近に伴って水温躍層が深くなっていた。

妊娠したヨシキリザメの季節回遊

藤波 裕樹（水産研究・教育機構 水産資源研究所）

全大洋で初めてヨシキリザメ成魚雌の繁殖回遊に関する実証データを得ることに成功した。

- ・ 妊娠初期の雌は秋季から春季にかけて亜熱帯域から温帯域へ北上、春季から夏季にかけて亜熱帯域に南下した。
- ・ 妊娠後期の雌はいずれも春季から秋季にかけて温帯域から亜熱帯域へ南下した。
- ・ 本種の鉛直移動は分布する海域・海洋環境により顕著に異なり、南北回遊の過程で、黒潮・親潮移行帯に短期間滞在したことが示された。
- ・ 以上の結果より、本種は春季に温帯域で出産するために季節的に南北回遊を行うと推察された。

ヨシキリザメは全大洋の温帯域から熱帯域まで広く分布し、外洋域に生息するサメ類の中でもとりわけ資源豊度が高いとされる種です。本種の分布・移動に関する研究は比較的多く、近年では電子標識を用いて本種の水平・鉛直分布に関する情報が様々な海域で報告されていますが、北太平洋（特に西部域）では未だに知見が乏しいのが現状です。北太平洋では漁業データを基に本種の回遊パターンが報告されており、成魚雌が季節的に南北移動することが示されていますが、実証データに基づく詳細な回遊様式は不明でした。本研究では北西太平洋に分布するヨシキリザメ成魚雌を対象とし、妊娠状態を確認したうえで電子標識を装着し、全大洋で初めてこれらの繁殖に関連した行動データの取得を目的としました。

2015～2016年10月、2017年5月に計24個体のヨシキリザメの雌（尾鰭前長【吻端から尾鰭欠刻】：141.1-243.3cm）に電子標識（ポップアップタグ）を装着し（図1）、21個体から行動データの取得に成功しました。このうち、17個体は腹部の超音波診断（図2）および血中性ステロイドホルモン濃度（プロゲステロン、17β-エストラジオール）の分析により、妊娠していることが確認されました（10月放流個体は妊娠初期、5月放流個体は妊娠後期）。

衛星経由で受信したデータを用いて回遊経路を推定した結果、妊娠初期の雌は秋季から春季にかけて亜熱帯域から温帯域に北上しており、長期間の行動データの取得に成功した2個体は北上後、春季から夏季にかけて亜熱帯域に南下する（折り返す）移動を示しました。一方、妊娠後期の雌はいずれも春季から夏季にかけて温帯域から亜熱帯域に南下し、南シナ海まで移動した個体も確認されました。四半期別のホットスポットを図3に示します。

ヨシキリザメが顕著な日周鉛直移動を行うことは既に多くの研究で報告されていますが、妊娠個体においても同様で、日中は主に水深200-300mに、夜間は表層域に滞在することが分かりました。鉛直移動は分布する海域および海洋環境によって顕著に異なり、特に黒潮・親潮移行帯では昼夜を問わず水深200m以浅（日中：平均119.0m、夜間：平均46.5m）に分布することが示唆されました（図4に一例を示す）。妊娠個体は季節的な南北回遊の過程で短期間のみ黒潮・親潮移行帯の表層域に滞在していたこと、漁業データを解析した先行研究により黒潮・親潮移行帯は本系群の養育場と報告されていることから、この海域で出産したのではないかと考えています。詳細は論文をご覧ください。

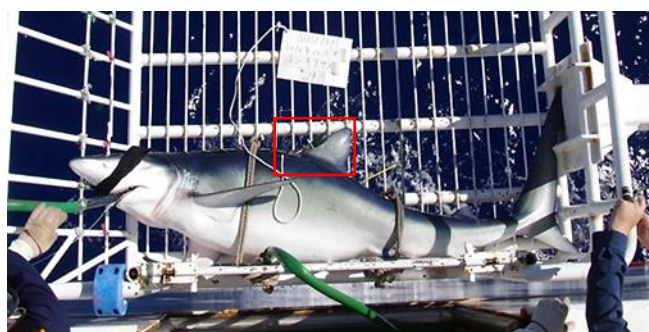


図1. 調査船のスクリュー上で第一背鰭に電子標識（赤枠）を装着されたヨシキリザメ雌。腹部の超音波診断により、妊娠初期であることが確認された



図 2. ヨシキリザメ成魚雌の腹部超音波診断図の例。左：妊娠初期（10 月確認）、右：妊娠後期（5 月確認）

一連の結果から、北西太平洋におけるヨシキリザメの成魚雌は季節的な南北回遊を行い、温帯域（移行帯）で出産している可能性が示唆されました。これは妊娠したヨシキリザメの繁殖回遊を実証データから示した初めての報告です。当該海域におけるヨシキリザメの繁殖周期は 1 年（出産・排卵・交尾は春季～夏季に連続的に生じる）であり、毎年 30-40 尾の子供を出産することが既存の研究により分かっています。このことから、夏季に交尾した成熟雌は亜熱帯域に移動し、胎仔の成長に伴い北上、翌春に生産性の高い温帯域（移行帯）で出産すると考えられます。出産・交尾後に暖かい海域に移動することで、初期の胎仔の成長を促進すること、成熟雄と生息地を隔てることで雄による過剰な交尾行動を回避できるという生態的な利点が考えられます。ヨシキリザメの雌は性成熟に到達後、雄に比べて成長が鈍化する傾向が確認されていますが、出産・回遊といったビックイベントを毎年行っていることからエネルギー配分を成長よりも再生産に費やしていると推察できます。全ては子孫繁栄および産まれてくる子供のための行動、母親の偉大さが分かります。

現在は幼魚や成熟した雄の行動データを解析しており、ヨシキリザメの性別・成長段階での生息地分離について調べています。色々と興味深い結果が出てきているのですが、これはまた別の機会にご紹介させていただきたいと思います。

2015 年より本格的に調査を開始し、タグの早期浮上など様々な問題で苦労が絶えませんでした（タグの装着時にサメに噛まれそうになったことも・・）、多くの方々にご協力をいただき、ようやく論文受理まで漕ぎ着けることができました。この場を借りて御礼申し上げます。色々と思いの詰まった 1 本ですので、是非読んでいただけると幸いです。

（発表論文）

Fujinami Y, Shiozaki K, Hiraoka Y, Semba Y, Ohshima S, Kai M (2021) Seasonal migrations of pregnant blue sharks (*Prionace glauca*) in the northwestern Pacific. Marine Ecology Progress Series 658: 163-179

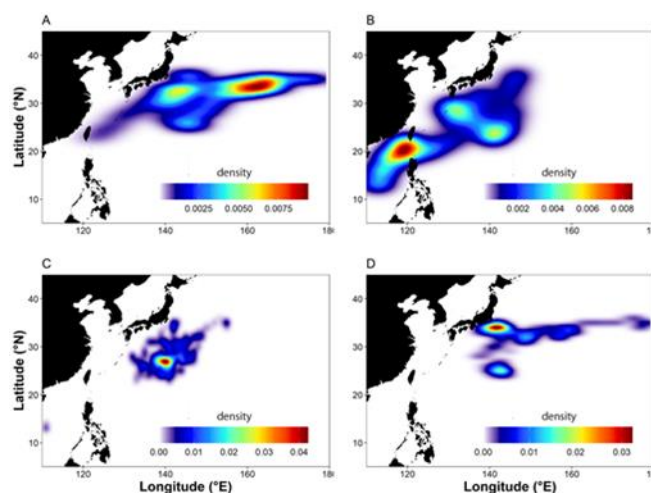


図 3. ヨシキリザメ妊娠個体の四半期別ホットスポット (A: 3-5 月、B: 6-8 月、C: 9-11 月、D: 12-2 月)

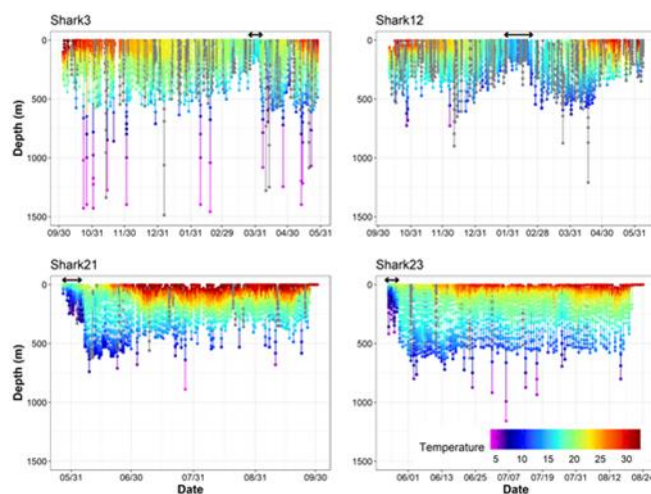


図 4. 妊娠したヨシキリザメ 4 個体の経験水温と滞在深度の時系列データ。Shark 3,12 は秋季に亜熱帯域で放流した妊娠初期の雌、Shark 21,23 は春季に温帯域で放流した妊娠後期の雌。矢印の範囲は黒潮・親潮移行域に滞在した期間を示す

新しい発見

アワビの産卵とその刺激候補としてのフェントン反応

名前 松本 有記雄（水産研究・教育機構 水産技術研究所；現職・国際農林水産業研究センター 水産領域）

研究成果を紹介する機会をいただきましたので、当
時を振り返りながら論文を紹介いたします。

私は水産研究・教育機構で職を得てからはエゾアワ
ビの増養殖や資源管理につながる研究開発に取り組ん
でいます。種苗生産技術の開発をする傍ら、紫外線を
強く照射した海水を水槽に添加することで産卵が誘発
できるという既存の採卵法に興味を持ちました。生理
学的にはヒドロキシルラジカル（ $\cdot\text{OH}$ ）などのフリー
ラジカルと呼ばれる酸化力が強い物質が体内でプロス
タグランジン（PG）の合成を促し、そしてこのPGが
放卵・放精を促していることが分かっています。この
フリーラジカルを発生させる方法として前述の紫外線
照射や過酸化水素（ H_2O_2 ）が用いられており、海産無
脊椎動物の採卵法として広く利用されています。一方
で、私が研究をしていたエゾアワビは夏から秋にかけ
て低気圧が通過した際に産卵することが分かっていた
ましたが、果たして低気圧が通過した時にこのフリー
ラジカルが海中で発生するのだろうか？という疑問が湧
きました。

疑問に思ったものの何の仮説も思いつかず、また低
気圧が通過する海の中で産卵を詳細に記録する手法も
思いつかなかったためそのままになっていました。転
機が訪れたのは、平成 26 年度春季水産学会での野田
琢嗣さんらのジャイロセンサーを使った行動の記録に
関する発表を聞いてからでした。加速度や角速度を記
録することで動物の行動を判別できるというものだっ
たと記憶しています。この発表を聞いた時に、雌のア
ワビの放卵行動を加速度ロガーで記録できるのではな
いかと思いついたのです。アワビの雌は放卵する際、
殻を振りながら生殖腺から卵を放出するためこの動き
を加速度で記録できると考えました（雄は静止状態で
放精します）。

学会から帰ってきて、さっそく 6 軸加速度ロガーを
購入し水槽内で放卵行動を記録できるかを確認しまし
た。狙いどおり、殻を振った際に x,y,z 軸の 3 軸が連
動して変化することが分かりました。しかし産卵時の
加速度なのか、それとも別の行動のものなのかを区別
する方法が必要です。論文を読んでいると加速度の時

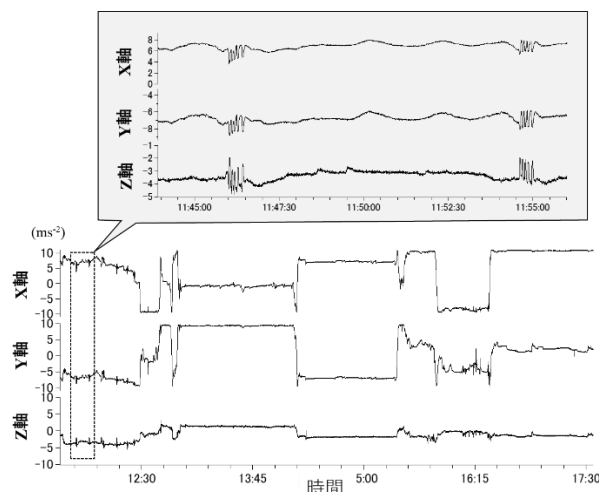


図 1. 3 軸加速度の時系列変化。灰色パネルに放卵部分を抽出した。

系列データを波形とみなして、周波数と振幅で特徴づ
けることで判別する方法が主流なのだとわかりまし
たが、どうしていいかわからない私はここでまたしば
らく研究がストップしました。しかし公開されていた
Ethographer を発見し、見様見真似で解析しなんとか
他の行動と放卵行動を判別することができました。

加速度の変化から産卵を抽出できることが分かった
ので、加速度ロガーを装着したアワビを実際に野外に
放流してみることにしました。低気圧が通過する日
を見極めながら、漁協に船を出してもらいロガーを装
着したアワビを放流しました。回収したデータを見て
みると低気圧通過時には塩分の急激な変化が起
こり、その後放卵していることが分かりました(図 2a)。
ちなみに放卵が確認できなかった期間には低気圧の通
過と塩分の低下は見られていません(図 2b)。

おそらく塩分低下は降雨の影響を受けたものなの
で、雨水中にフリーラジカルがあって産卵を誘発する
のだらうと考えました。論文を探してみたところ、雨
水中に H_2O_2 が含まれているという論文を発見しまし
た。これだ！と思い雨水に含まれる濃度の H_2O_2 を水
槽に添加したところ、数個体がぐくわずかに放卵・放
精するだけで、野外でみられるであろう一斉産卵とは
程遠い結果になりました。そもそもここで添加した

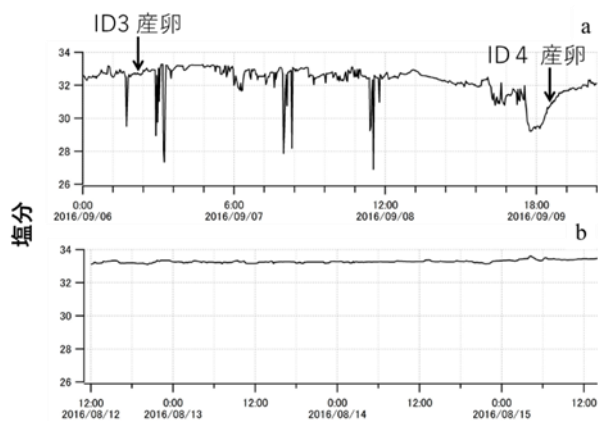


図 2. (a) 放卵が観察された期間の海底の塩分変化. (b)放卵が観察されなかった期間(ID1, 2 を放流)の海底の塩分変化.

H_2O_2 は種苗生産で用いられる濃度よりも低いものです。それでも少しは反応があるのだから何かあるのだらうと思って、さらに水槽の塩分を低下させてみたり水槽に低気圧通過時を想定した流れを与えてみたりしてみましたが、放卵・放精は確認できません。

根本的に何か違うのだらうと思い、 H_2O_2 を用いた産卵誘発を報告した論文を読みかえしてみると、 H_2O_2 が分解される過程で生じるフリーラジカルが産卵を誘発しており、フリーラジカルが生じやすいように海水の pH をアルカリに傾ける操作をした（意識）”と書かれていました。 H_2O_2 単独ではフリーラジカルが発生しにくいことに気が付き、“hydrogen peroxide, free radical, rainfall”で引っかかる論文をかたっぱしから読んでみたところ、タイトルのフェントン反応に行きつきました。フェントン反応は、二価の鉄イオン

(Fe^{2+}) が H_2O_2 によって酸化される過程でフリーラジカル的一种でヒドロキシルラジカル($\cdot OH$)が生じる反応です。雨水には少量の H_2O_2 と Fe^{2+} が含まれているので、このフェントン反応によって生じた $\cdot OH$ が産卵を促しているかもしれません。そこで、 Fe^{2+} と H_2O_2 を水槽に添加する実験を行った結果、約 70%の

個体の放卵・放精を誘発することができました。

ここまでの結果でひとまず論文を書きましたが、“低気圧通過時にフェントン反応が起こる可能性があり、これがエゾアワビの産卵を促しているのかもしれない”という結論にとどめました。 $\cdot OH$ が低気圧通過時の海中で発生していることと、産卵行動のデータが同時に得られるまでは仮説を証明したといえないと今は考えています。

素朴な疑問に基づいて始めた研究ですが、この研究の社会実装に向けた構想があります。今回、フェントン反応という効率よく $\cdot OH$ を発生させる反応によってエゾアワビを産卵させることができました。ということは、他の水産対象種の産卵をフェントン反応によって促せるかもしれません。実際のところ多くの海産無脊椎動物の産卵誘発は安定していないという印象です。毒性の強い過酸化水素を高濃度で使用しているためかもしれません。他方、今回の研究では天然域でのフリーラジカル発生要因に着目しました。アワビと同じように天然で発生するフリーラジカルが他の海産無脊椎動物の産卵を促しているかもしれません。夢のような話ですが、フリーラジカルをモニタリングすることで産卵を予測し、天然採苗や個体群動態の予測に活用できるかもしれません。

1. **Matsumoto Y**, Yatsuya K, Nakatsubo A, Takami H. A biologging technique for monitoring the egg-releasing behavior of Pacific abalone *Haliotis discus hannai* in the wild. **Aquatic Biology**, 27: 119-125, 2018
2. **Matsumoto Y**, Yatsuya K, Fenton reaction as a possible stimulus to induce spawning in Ezo abalone *Haliotis discus hannai* during stormy weather. **Marine Ecology Progress Series**, 669: 241-246 2021

本研究は JSPS 科研費 15K18734 と 19K06217 の助成を受けたものです。

新しい発見

ウミドリ用の防水型の風速センサ

高橋 英俊（慶應義塾大学 理工学部 機械工学科）

初めまして、慶應義塾大学の理工学部機械工学科の高橋と申します。専門がバイオリギング分野とはだいぶ異なる工学系の分野の研究者ということで、まずは簡単に自己紹介させていただきますと、私は MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）技術と呼ばれる微細加工技術を使って、機械的なセンサの研究開発をしている研究者です。代表的な研究開発したセンサとしては、ものを触ったときの圧力とせん断力を両方計測できる触覚センサや 0.1 Pa 以下の空気の圧力差が分かる差圧センサなどがあります。MEMS デバイスの特徴として、 μm のオーダーで構造を製作できるため、小型で高感度なセンサを実現できるというものがあります。私はこれまで、この特徴を生かして、MEMS センサを用いて、微小昆虫の運動中に働く力を計測するという研究を行ってきました。例えば、アリが歩くときに地面から受ける足裏反力や、チョウの羽ばたきによって発生する空気力などを明らかにしてきました。（MEMS の研究者は、普通はもう少し真面目なデバイス開発をしているので変な研究の部類に入ります。）これらの研究結果を実験動物学の学会で発表しているところ、偶然、東京大学大気海洋研究所のグループの人に出会いまして、バイオリギングの分野にも何か面白くセンサ技術を応用できないかと共同研究を始めるに至りました。

その中の一つとして、オオミズナギドリ用の防水型の風速センサが論文になりましたので、この場をお借りして紹介させていただきます。ウミドリの飛行中の対気速度を直接計測するために、ウミドリに取り付け可能な風速センサがバイオリギング分野で長年求められてきましたが、要求仕様が厳しいため、これまでそのような適したセンサがなく、今回、そのようなセンサを研究開発したというものです。

風速センサというのは非常に多くの検出原理があり、例えば、プロペラの回転数によって風速を見るプロペラ式、温められた熱が風によってどのくらい冷やされるかを見る熱式、ドップラーシフトを見る超音波式などが挙げられます。そういった中でも飛行機などによく使われており、全圧と静圧の差を見ることで風速を検出するピトー管式は計測原理が単純であり、堅牢性がある特徴を有します。そのため、ピトー管式の風速センサがウミドリの飛行のような厳しい要求仕様に対して、適した検出原理であると考えました。

ウミドリに取り付けるためには、センサが小型軽量



図 1 東海大学でのオオミズナギドリの剥製を使った風洞実験。

であること、消費電力が小さいことなどが挙げられ、これらを解決するために、これまで研究開発してきた大きさ $1.5\text{ mm} \times 1.5\text{ mm} \times 0.25\text{ mm}$ の MEMS の差圧センサチップをセンサ素子として、ピトー管の筐体内に埋め込むこととしました。3D プリンタを利用することで、複雑な三次元構造を持つ形状を持つピトー管の筐体を製作しました。また既存のロガーに電氣的に接続できるような回路構成としました。センサの重量は筐体や基板を合わせて長さが 37.5 mm、重量が 3.5 g となりました。

さらにウミドリに取り付ける際の重要な要求仕様として、彼らは海に餌を獲りに潜るため、センサは防水機能を持つ必要があります。飛行機についているピトー管は当然のことですが、飛行機が海に潜ることを想定していませんので、防水にはなっておりません。そのため、同じ構造のピトー管を海中に入れると管の中に海水が入り、正しく計測できないあるいは壊れてしまうという問題がありました。そこで、ピトー管の空気の流入口である全圧孔と静圧孔に空気は通すが水は通さないナノポーラス構造が形成された撥水性のアルミナメンブレンを貼り付けることで、防水機能を実現しました。空気は通すため、海上での飛行中の風速を計測することができ、一方で、ナノホールアレイのラプラス圧によって、ウミドリが海に潜った際の水深 10 m 以上の水圧にも耐えられるように製作しました。

試作したピトー管形状の防水型の風速センサをオオミズナギドリの背中に取り付け、実際にオオミズナギドリが飛行中に受けるであろう風速を計測できるかどうか、図 1 に示すような風洞実験を行いました。図 2 に背中に取り付けたセンサの拡大写真を示します。鳥

の風に対する角度や風速を変えたときの応答を計測し、センサの応答から 5~20 m/s のレンジにおいて風速を計算できることを示しました。また海水と同じ濃度の塩水の中にセンサを入れ再び空中に出した後、メンブレンに付いていた水滴が取れば、センサは塩水に入れる前と同じように風速を計測できることを示しました。

今回開発した風速センサを用いて、実際のウミドリでのバイオリギング実験まで是非進めたいと思っています。実験結果が出ましたら、また報告させていただければと思います。

<紹介論文>

H. Takahashi, M. Naruoka, Y. Inada and K. Sato, "Seabird biologging system with compact waterproof airflow sensor," *J. Robot. Mechatron.*, vol. 33, no.3, pp. 466-474, 2021.
<https://doi.org/10.20965/jrm.2021.p0466>



図 2 オオミズナギドリの背中に取り付けられた風速センサ。

雑談

動物観とバイオリギング観

塩見 こずえ（東北大学 学際科学フロンティア研究所） [shiomikozue\[atmark\]gmail.com](mailto:shiomikozue[atmark]gmail.com)

先日、ロボット工学分野の学生さんたちが集まる研究会で講演する機会をいただきました。参加されていた方々は、動物が環境中でうまく振る舞っているメカニズムの理解とそれをロボットに応用することを目指しているそうです。

この講演の準備と発表をきっかけに考えた「動物とは?」「移動とは?」について、バイオリギング研究をしている皆さんのご意見を聞いてみたいと思い、この記事を投稿いたしました。

私にとって動物とは

もう 10 年も前 (!) のことになるのですが、博士論文を書いていた頃に、当時指導をしてくださっていた先生から「研究してきた動物はこういう生き物である、という自分なりの対象動物観があるはず。それを博士論文にぶつけるべし。」というアドバイスをいただいたことがありました。

私は海鳥の行動、特に移動経路をバイオリギングで調べています。先生からそうに言われた後、「海鳥観…別にないな…」としばらくは思い浮かばなかったのですが、当時の私が最終的に出した答えは、「私にと

って、動物は環境に転がされている球みたいなものである」でした。凸凹や溝のあるところへ球を放り込むと、その凸凹や溝によって球の動き/経路がある程度決まってくると思います。そのような感じで動物も、行動を選んでいようように選ばれているというか、そうしたいからというよりそうせざるを得ないからそうしているというか…。

これまでの私たちの研究では、コウテイペンギンはおそらく酸素消費量が一定量に達する前に水面へと引き返すルールで潜水していること (Shiomi et al. 2012 JEB, BLS 会報 2012 年 2 月号) や、オオミズナギドリはおそらく夜間に海の上を飛ばなくて済むように巣に戻り始めるタイミングとルートを選んでいること (Shiomi et al. 2012 *Anim Behav*, BLS 会報 2012 年 1 月号; Shiomi et al. 2019 *Behaviour*, BLS 会報 No.156) などを報告してきました。もともとは動物のナビゲーション能力や帰巣能力のような「すごさ」のメカニズムを解明したいと思っていた気がしますが、実際には「何ができるか」よりも「何ができないか」を見ていることが多く、そういった制約が動物の動きの輪郭を作っていると感じるようになったのだと思います。

その動物観は、その後に読んだ書籍などの影響も受けつつ少しずつ強化されて今に至ります。

…と、ここまで私見を述べてきましたが、このような動物の捉え方は別に新しくはなさそうです。例えば、移動コストの空間分布を表現した energy landscape、捕食者分布などから推定される landscape of fear のように、特定の特徴量に注目して環境構造を推定することによって動物の行動を駆動する要素を探るランドスケープ解析などが既にあり、環境と動物を一体化したものとして扱うアプローチは割と一般的であるようにも思えます。

さらには、ロボット制御においても環境との相互作用によって生じる運動パターンが注目されているそうです。動物研究でもロボット研究でも、動くものの本体と環境を切り離さずに見ることが鍵になってくるというのは興味深いと思いました。

動物観のひさびさアップデート

話を戻しまして。冒頭の研究会の発表準備をしながら、なんとなくひっかかっていることがありました。一つは、上述のように動物の「できないこと」を中心に見てきた私にとって、動物は環境中でうまく振る舞っているというよりは様々な制約の中でなんとかやっているというイメージが強かったため、動物がロボットのお手本的な存在になっていることに違和感を覚えたこと、もう一つは、ロボットを動かすためには多かれ少なかれ制御則が必要であるという話を読んだことで、(本当に本当にあたりまえすぎるのですが) 動物が環境に転がされているだけであるはずはないよなぁと思い出したことです。

それらのひっかかりについて考えている時にふと、動物はどこでもうまくやれるわけではないな？ということに気が付きました。これまた何をいまさら…と思われそうな話ですが、ロボットのお手本として動物を見直してみると、いつでもどこでもお手本のような振る舞いができるわけではなく、「うまくやれる領域」からはみ出せば環境との関係性は失われてしまい、もはやうまくは振る舞えなくなるよなぁと思ったのです。環境とうまくやれる領域に留まれるところに動物の主体性があるのかもしれない。

そんなこんなを踏まえて、「動物とは」を改めて以下のように整理しました。

動物とは、

- ・ 資源や安全な場所を求めて移動する生き物
- ・ うまくやれる領域内に留まれる生き物

である。そして「うまくやれる領域」と「うまくやる方法」は、身体の構造や知覚特性などの動物自身のスペッ

クと環境の組み合わせでおおよそ決まる。結果として、動物は環境に転がされている球のように（自由に行動を選んでいではなく選ばれているように）見える。

バイオリギング観もアップデート

「動物はうまくやれる領域に留まりつつ移動する生き物である」と考えると、バイオリギングは「動物がうまくやれる領域」の輪郭を記録することを可能にした手法であると言えます。そして私の研究では、どのような要素を考慮すれば記録されたその輪郭が「うまくやれる領域とうまくやれない領域の境界線」となり得るのかを考える/調べることによって、動物や動物行動の実態を理解しようとしているのではないかとスッキリ整理し直せた気分になっています。

勝手な解釈ですが、今月号の中村さんのジンベエザメのお話を読んだ時も、うまくやれる領域に留まっているね！と思いました。

それで…？

このように動物観やバイオリギング観をアップデートしたことによって何か新しい研究が生まれるのか、自分以外の人にとっても嬉しいことは何かあるのか、肝心のところはまだ掴みきれておりません。引き続き考えていきたいと思っていますが、暫定案を箇条書きしてみます。

- たくさんのデータを集めていくと、例外的に「うまくやれない領域」にはみ出してしまったケースが記録されることがあります。研究会に参加されていた方から、そういう時の振る舞いや境界線ギリギリの領域での振る舞いを調べることで、うまくやれる領域に留まれる仕組みを理解できるのではないかと、というコメントをいただきました。これまではうまくやれている行動や説明可能な行動に注目しがちでしたが、次のステップとしてそこから外れた行動をじっくり調べることも確かに重要そうです。
- 既存のランドスケープ解析にもうひと工夫を加えて、うまくやれる/やれないの境界線を推定できたらいいなー
- できることなら、動物たちと「うまくやれる領域」の関係が形成された進化の過程についても切り込んでみたいなー

これといった結論のない長文になってしまいましたすみません。もしよかったら、皆さんの動物観やバイオリギング観についても教えていただけたら嬉しいです。よろしく願いいたします。 おわり

御礼

この記事を書くにあたり、共同研究者の依田憲さんとのディスカッションからアイデアやヒントをたくさんいただきました。ありがとうございました。

関連文献 ※出会った順

『アフォーダンス』

(佐々木正人 著)

他の本で出てきた「アフォーダンス」という言葉に興味湧き、読んでみた

『Power of Movement in Plants』

(Charles Darwin 著)

『アフォーダンス』の中で引用されていた

『生態学的視覚論：ヒトの知覚世界を探る』

(ジェームズ・J. ギブソン 著)

「アフォーダンス」という言葉を創った人

会報 No.178 綿貫さんの書評記事内で言及あり

『野性の知能』

(ルイーズ・バレット 著)

会報 No.139 依田さんによる書評あり

『共創システムと無限定性 ―安心な社会システムの回復をめざして―』

(三宅美博, 2006, 日本機械学会誌)

ロボット研究をしている方に教えていただいた

『知能はどこから生まれるのか? : ムカデロボットと探す「隠れた脳」』

(大須賀公一 著)

研究会の予習として読んだ書籍 (おすすめです)

お知らせ

2022 年 BLS カレンダー写真投票結果発表！！

バイオロギング研究会 カレンダー担当 奥山 隼一

2022 年版の日本バイオロギング研究会カレンダーは、写真の選定が終了し、現在印刷前の最後の校正を行っています。12 月上旬には皆様のお手元にお届けできる予定です。カレンダーの製作にあたって、会員の皆さまから多くのお写真をご応募頂きました。この場を借りて御礼申し上げます。

会員投票により行われたカレンダー写真の選考により、上位 6 枚を各月用、表紙として選定し、残りの月と裏表紙の写真をカレンダー制作会社と奥山から成る選考委員により決定しました。選考委員による選考基準は、主に写真の季節性、クオリティ、構図、カレンダー全体としての生物種のばらつき、などを考慮しました。

今年度の研究会シンポジウムは昨年に引き続きオンライン開催となりましたので、この場を借りて会員投票により採用が決定した上位 6 枚を発表させていただきます！！

第 1 位 ニシン (28 票)

写真提供 関 恭佑 (北海道大学)



第2位 コビレゴンドウ (23 票)

写真提供 藤木 早良 (東京大学)



第5位 ワタリアホウドリ (12 票)

写真提供 後藤 佑介 (CNRS)



第3位 イセエビ (16 票)

写真提供 佐々木 幾星 (長崎大学)



第5位 カマイルカ (12 票)

写真提供 三谷 曜子 (京都大学)



第4位 ジェンツーペンギン (15 票)

写真提供 Jean-Baptiste Thiebot (国立極地研究所)



皆さんが投票した写真は、ランキングに入っていましたでしょうか？ちなみに、惜しくも7位となった写真は得票数10票で5枚の写真が同順位で並んでいました。票数を見てわかるように、皆さんのあと1票があればカレンダーに採用されていたかもしれません。次年度はさらに多くの投票をお待ちしております。

残りの選考委員により採用された写真は、カレンダーが届いてからのお楽しみとさせていただきます。今年のカレンダーは良い写真ばかりで自信作です！お手元に届くのを楽しみにお待ちしております！！

事務局からお知らせ

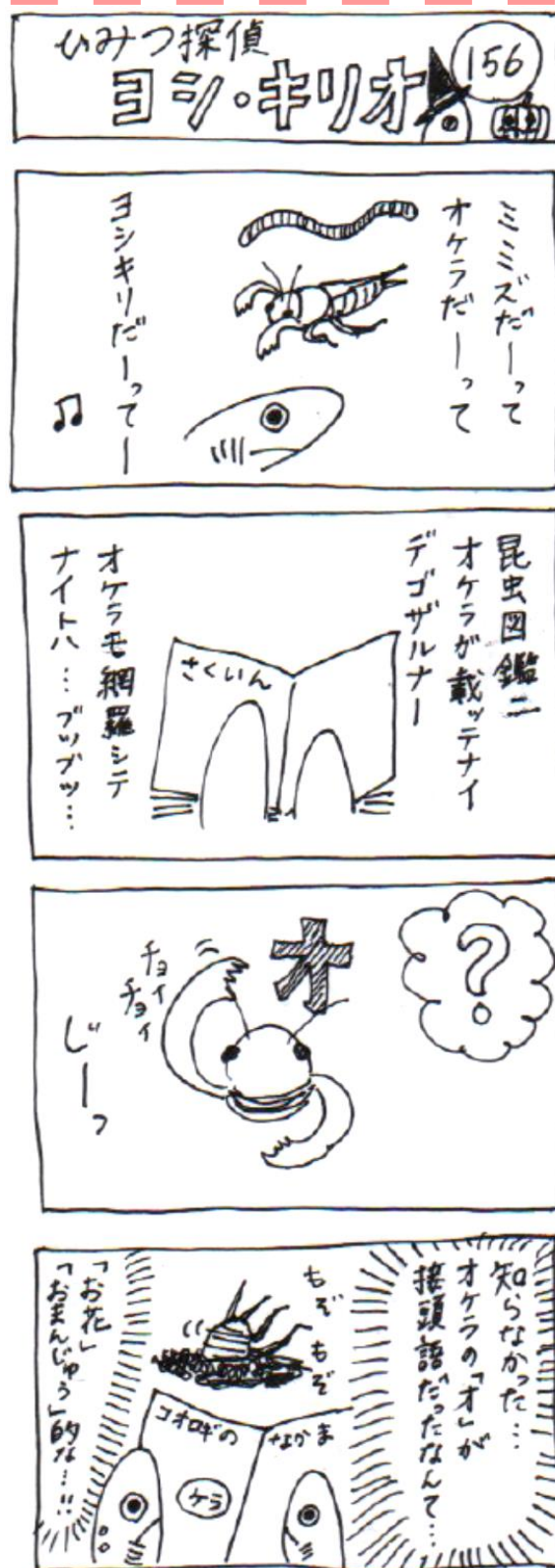
会費納入のお願い

- 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

コロナが収まっている隙をついて、久しぶりに住んでいる石垣島を飛び出して調査に行ってきました。ターゲットは、日本有数の巨大魚にして高級魚であるクエです。タグ付けを行ったところ、皮膚が固すぎて手術用の針はひん曲がる、麻酔がまったく効かないなど、苦労の連続でした。ですが、久しぶりの出張ということもあり、そんな苦労も楽しめる調査でした。【JO】

会報に快く寄稿してくださったみなさま、どうもありがとうございました。今月号の会報、そして先週の国際バイオロギングシンポジウムを通じて、どうしても知りたいことをなんとかして知るために奮闘している人々がバイオロギングの世界を拡げてくれているのだなあと感じました。私はどうしても知りたいことがないのが長年の悩みです。【KS】



【S.K】