

OPRI Perspectives No.17 [2021]

日本のバイオリギング研究

公益財団法人笹川平和財団海洋政策研究所 研究員 岩田高志

1. はじめに

近年海洋においては、気候変動対策、生物多様性保全、水産資源管理、ゴミ問題、水中騒音など解決しなければならない様々な課題に直面している。これらの課題を解決するための手法の一つとしてバイオリギングが挙げられる。バイオリギング (Bio-logging) とは、動物に装置を取り付け、彼らの生態や周囲の環境情報を記録する手法である (図1)。この名称は、2003年に東京で開催された第1回国際バイオリギングシンポジウムで作出された日本発祥の言葉である。バイオリギングは「我々の視覚や認識の限界を超えた現場での野生生物や、それらの周辺環境の現象を調べるもの」と、そのシンポジウムにおいて定義された (Boyd et al. 2004)。本論考では、日本国内における海洋動物の観測プラットフォームとしての可能性、日本の研究者によるこれまでのバイオリギング研究の特徴、日本国内で実施されたバイオリギング研究が海洋の課題解決に貢献した実例を紹介し、最後にバイオリギング研究の今後の展望を示したい。



図1 バイオリギング装置を装着したナンキョクオットセイ。

2. 日本国内における海洋動物の観測プラットフォームとしての可能性

日本列島は縦方向に長く (約1500キロメートル)、各地の異なる環境でバイオリギング調査が実施されてきた。これまで日本国内における海洋動物を対象としたバイオリギング野外調査は少なくとも56箇所以上で実施されている (図2)。野外調査における対象動物は、哺乳類5種、鳥類5種、爬虫類2種、魚類36種、無脊椎動物4種 (カニやエビ)、少なくとも合計52種以上におよぶ。これらのことから日本におけるバイオリギング研究は、調査海域や動物種を限定せず幅広く実施されていることがわかる。場所を問わず様々な種が動き回りながら環境データを収集するため、海洋動物は日本各地における有用な観測プラットフォームとなることが考えられる。

その際、動物の鉛直方向および水平方向の移動範囲の情報は重要となる。鉛直方向では、最大で深度1000 m以深にまで潜水するマッコウクジラ (Amano and

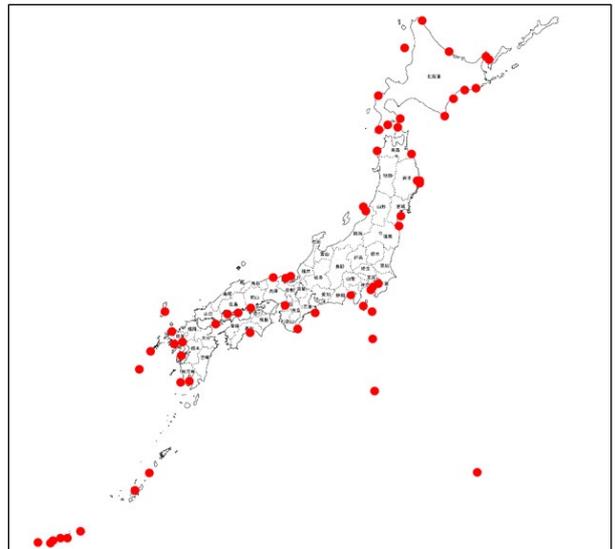


図2 日本国内で実施された海洋動物を対象としたバイオリギング野外調査地 (赤丸)。北海道から沖縄、小笠原まで日本全国で実施されていることがわかる。

Yoshioka 2003, Aoki et al. 2007) は代表的だが、アカウミガメ：340 m (Narazaki et al. 2015)、ウトウ：50 m (Kato et al. 2003)、ジンベエザメ：1400 m (Nakamura et al. 2020)、マンボウ：200 m (Nakamura et al. 2015) など多くの種が、水面から数十・数百mの深度帯まで往復する。水平方向に関しては、装着後の直線移動距離として、オオミズナギドリは数日間で900 km (Yoda et al. 2014)、クロマグロは16日間で1400 km (Itoh et al. 2003)、シロサケは2.5ヶ月間で2800 km (Azumaya et al. 2016)、アカウミガメは1年間で2800 km (Narazaki et al. 2015) を追跡した記録が報告されている。潜水深度や移動距離には個体差などがあるため、必ずしもこれらの範囲を追跡できるわけではないが、鉛直および水平方向に幅広く移動する動物は、観測プラットフォームとして有用である。

3. 日本の研究者によるバイオリギング研究の特徴

バイオリギングで使われる装置についてここで簡単に紹介したい。現在バイオリギングで使われる装置で計測可能なパラメータは、深度（圧力）、遊泳速度、加速度、地磁気、水平位置（GPS: Global Positioning System）、心拍、環境温度、塩分（電気伝導度）、溶存酸素、照度、音響、映像（カメラ・魚群探知機）など多岐にわたっている（表1）。これらの装置によって、動物の生理や行動に関する研究が進み、さらに動物が経験した周辺環境のモニタリングができるようになってきた。動物に取り付ける装置は蓄積型（データロガー）と発信型（電波発信機、音波発信機、人工衛星対応型発信機）の二つに大きく分けられる。データロガーは動画や音、加速度など大容量のデータを記録できるが、データを得るためには回収する必要がある。発信機の場合、発信された信号を受信してデータを得るため装置の回収を必要としない。一方で、電波や音波を使った情報の通信量には制限があり、多くの情報を得ることができないため、水温や深度などの単純なパラメータのみの扱いとなっている。蓄積型と発信型を組み合わせた装置もあり、蓄積した大量のデータを装置内に組み込まれたアルゴリズムでデータ変換、間引き、単純化をすることで、電波や音波を介したデータ取得が可能となっているが、それでも装置を回収した方が得られるデータ量は圧倒的に多い。装置についての詳細は書籍「バイオリギング：動物たちの不思議に迫る」および「バイオリギング2：動物たちの知られざる世界を探る」に詳しく記載されている。データロガーを使う手法をバイオリギング、発信機を使う手法をバイオテレメトリーと呼ぶことが多いが、本論考では動物に装置を取り付ける手法をまとめてバイオリギングとする。

表1 バイオリギング装置に内蔵されるセンサーと得られる情報例

センサ	情報	わかること
圧力	深度、高度	潜水時間、潜水深度、飛翔高度
温度	環境温度	水温、気温、体温、胃内温度
加速度	加速度	装着部位の動作、姿勢
プロペラ	対流速度	遊泳速度
光量	環境照度	照度、日照時間、日出日入時刻、発光餌生物の分布、水平位置情報
音	可聴音、超音波	鳴音、音発生源の位置、遊泳速度、咀嚼音
磁気	地磁気	動物の体の向き
電位	心拍、筋電、脳波	心拍数、筋活動量、外部刺激に対する脳の応答など
映像	静止画、動画	動物が見ている環境、餌情報、プラスチックゴミの現状
GPS	水平位置	水平位置、対地速度
電気伝導度	環境塩分	塩分
血液	血液	血中ホルモン、血中酸素濃度等
魚探	魚探	餌生物の魚影
溶存酸素	環境溶存酸素	溶存酸素

日本のバイオリギング研究成果として特筆すべき点は、世界に先駆け加速度センサを用いて動物の行動を解明したことである (Tanaka et al. 2001, Yoda et al. 2001, Sato et al. 2002)。加速度は通常10-100 Hzもしくはそれ以上のサンプリング間隔 (1秒間に10-100回) で記録されるため、動物の詳細な動きを捉えることができる。加速度記録には、姿勢角など傾きによって変化する静的加速度 (低周波成分) と、ヒレや頭の動きなどによって変化する動的加速度 (高周波成分) がある。低周波成分からは、立つ、横たわる、横たわる際の姿勢 (うつ伏せ、仰向け、横向き)、潜水動物の場合は潜行時や浮上時の体軸角度などがわかり、休息行動の理解に使われている (Yoda et al. 2001, Mitani et al. 2010, Watanabe et al. 2015)。高周波成分はヒレや翼の動きの抽出に使われる (Tanaka et al. 2001, Sato et al. 2002, Sato et al. 2003, Watanuki et al. 2003, Aoki et al. 2012, Narazaki et al. 2013)。ヒレや翼の動きから、遊泳や飛翔にかかる消費エネルギーを見積もることができ (Sato et al. 2013)、また潜水時のヒレの羽ばたき頻度から、動物の肥満度 (ここでは健康状態を指す。太っているほど健康状態が良い) を推定することも可能となる (Sato et al. 2003, Watanabe et al. 2006, Adachi et al. 2014, Narazaki et al. 2018, Aoki et al. 2021)。さらに頭や下顎の素早い動きや体全体の激しい動きから動物の捕食イベントの検出がされている (Suzuki et al. 2009, Naito et al. 2009, Iwata et al. 2012)。得られる加速度のデータ量は膨大となることから、バイオリギングデータ解析に特化した Ethographer という加速度解析ツールが開発された (Sakamoto et al. 2009)。Ethographer は、数値解析ソフト IGOR PRO (WaveMetrics, OR, USA) 上で動作するマクロプログラムで、1秒毎などの任意の時間スケールで加速度の周期や強度の情報を元に、動物の行動を遊泳、採餌、休息、飛翔、歩行などに分類できる。これまでは装置に蓄積できるデータ量に制限があるため、サンプリング間隔が短い加速度の長期間記録は難しいという問題があった。そこで、加速度センサが計測する特異的な信号のみをイベントとして記録する装置が開発され、数ヶ月間におよぶ動物の捕食イベントの記録に成功している (Naito et al. 2013)。

ビデオを用いた研究も数多く実施されている。採餌に関する研究においては、ビデオを用いることで動物が何をどのくらいどのように捕食したかという直接的な証拠を記録できる。例えばクジラがオキアミの群れに突っ込んでいく様子 (Akiyama et al. 2019)、ペンギンが餌のオキアミを一匹ずつついばむ様子 (Watanabe et al. 2013)、アザラシがカイアシ類 (動物プランクトン) や小魚を捕食する様子 (Watanabe et al. 2020)、ウミガメがクラゲを捕らえる様子 (Narazaki et al. 2013)、サメがオットセイを追いかける様子 (Watanabe et al. 2019)、海鳥が人間から餌を与えられる様子 (Yoda et al. 2012) などが明らかになっている。野生動物は無防備の状態となる休息中の姿を見せることはほとんどないため、彼らの休息行動の観察は難しかった。ビデオは野生動物の休息行動の理解にも役立っている。たとえば海底で休息するウミガメ (Fukuoka et al. 2016)、水面ではなく水中で休息するクジラ (Iwata et al. in press) の様子が撮影されている。ビデオは様々な動物の生態を明らかにする強力なツールだが、記録時間は電池容量の制限から数時間から十数時間程度となっているのが現状である。海洋環境を視覚的にモニタリングする上でも長期間記録可能な装置の開発が望まれる。

以上のように加速度センサやビデオを使うことで、海洋動物の詳細な生態が明らかとなってきた。漁業や海洋開発などの人間活動を営む上で、採餌のホットスポットや生息域に関する情報は保全の面で重要となる。特に海洋動物の休息に関しては他の手法で得ることが難しく、情報が不足しているため、今後もバイオリギングによる情報収集が期待される。海洋動物の生態を理解することは、海洋生態系の保全に繋がり、結果として海洋の課題解決に結びついていることがわかる。

4. 日本国内で実施されたバイオリギング研究が海洋の課題解決に貢献した例

バイオリギングによる動物生態の解明が、海洋生態系の保全に繋がることを上述した。ここではバイオリギングが直接的に海洋の課題解決に貢献した日本国内の研究例として、海洋物理環境モニタリングとプラスチックを含めた海洋ゴミのモニタリングについて紹介する。

気候変動に伴う海洋環境変化を正確に把握するためには、可能な限り多くの海域で様々な海洋物理環境をモニタリングする必要がある。これまで海洋物理環境は、観測船、人工衛星、漂流ブイなどの手法により観測されてきた。観測船は、様々なパラメータ且つ詳細なデータが取得できる一方で、費用がかさみ、時空間的に連続した観測が難しいという課題がある。人工衛星は、平面的に広範囲のデータが取得できるのが長所であるが、水面のデータしか計測できず水中のデータを取ることが難しい。漂流ブイは、広範囲のデータを取得できるが、流れにまかせた海域の観測となる。近年バイオリギングは海洋物理環境をモニタリングするための強力なツールであることが世界的に示されている (Harcourt et al. 2019)。バイオリギングは、水平・鉛直方向に時空間的に連続したデータを得ることができ、さらに台風直下や海氷域など船が近づくことが難しい海域のデータを取得できるといった長所が挙げられる。一方で取得できるデータは動物依存であること、複数年に渡る継続的な調査が少ないという短所が挙げられる。日本国内では、海鳥とウミガメをプラットフォームとした観測例が示されている。

海鳥の一種であるオオミズナギドリにGPSデータロガーを装着することで、彼らが海面表層で漂流している期間の経路から、その周辺の表層の海流の方向と速さが推定されている (Yoda et al. 2014)。この漂流経路から推定された海流は、観測船で観測された海流とよく一致しており、また漂流経路から推定された中規模渦は、人工衛星から推定される渦に一致していた (Yoda et al. 2014)。さらに海流予測モデルに海鳥の漂流経路と貨物船の航行記録を取り込むことで海流の予測精度の向上が示されている (Miyazawa et al. 2015)。オオミズナギドリの飛行速度は、GPSデータロガーで得られる位置情報から算出できる。飛行速度はオオミズナギドリの進行方向に対する風の影響を受けると仮定し、彼らが経験した海上風の風向・風速が推定されている (Yonehara et al. 2016)。オオミズナギドリの飛行から推定された風向・風速は人工衛星で推定した風情報と強い相関が示されている

(Yonehara et al. 2016)。海鳥の経路データから推定される表層流や海上風は、人工衛星 (1日数回) では得られない詳細な時間スケールでの情報が得られる。また人工衛星による観測には、海岸近くの岩などにより電波が乱反射するため、海岸から100 km 以内の海上風を推定できないという課題がある (Pickett et al. 2003)。従来の海洋観測データを補完するために、海鳥の観測プラットフォームとしての活躍を今後期待したい。

三陸沿岸に來遊するアカウミガメを対象とした人工衛星対応型発信機を用いた研究では、最長で403日間の位置・深度・水温が観測されている。アカウミガメは最大で放流地点から東に2600 km以上沖まで泳いでいたことから、ウミガメによる広範囲の海洋環境モニタリングの可能性が実証された (Narazaki et al. 2015)。同様のデータを用いて、ウミガメから得られた水温鉛直プロファイルを予測モデルにデータ同化することで、親潮・黒潮混合水域の海況がより正確に把握され (Miyazawa et al. 2019)、その結果は台風の経路予測に役立つと示唆されている

(Domingues et al. 2019)。日本国外の研究例になるが、インドネシアの西パプア州に生息するヒメウミガメから得られたデータを季節予測シミュレーションに取り入れることで、数ヶ月先の海水温変動の予測精度が向上したことが示されている (Doi et al. 2019)。これまで世界各地で運用されている動物をプラットフォームとした海洋観測は、主に極域や寒冷域が対象となっており、熱帯域から温帯域ではあまり実施されていない傾向がある (Harcourt et al. 2019)。動物をプラットフォームとした海洋観測のモデル生物がアザラシ (Boehlert et al. 2001, Fedak

2004, Biuw et al. 2007, Charrassin et al. 2008, Ohshima et al. 2013) であることが理由の一つとして考えられる。ウミガメは水平・鉛直方向の三次元的に広い行動範囲を持つ。熱帯域から温帯域における動物をプラットフォームとした海洋観測のモデル生物として、今後ウミガメが活躍すると期待される。

近年プラスチックを含むゴミによる海洋汚染が問題として注目されている (Jambeck et al. 2015)。ゴミの調査方法には、船上からの目視観察 (Barnes and Milner 2005, Ryan et al. 2009)、潜水艇による観測 (Galgani et al. 1996, Barnes et al. 2009, Chiba et al. 2018)、曳網 (網を曳くこと) による採集 (Barnes et al. 2009, Ryan et al. 2009) などが挙げられる。目視は水面、潜水機は主に海底を対象とした観測をする。曳網は水面から海底まで観測できるが、一度に一つの深度帯のみの観測となる上、多大な労力が必要。これまでの観測手法では、水中 (水面と海底の間の空間) に漂うゴミの現状を把握することは難しく、より効果的な観測手法が必要とされていた。ウミガメは水面で呼吸、水中および海底で採餌や休息をする動物であるため、バイオリギング装置を取り付け、海洋ゴミを観測することが考えられる。実際にウミガメにビデオカメラを装着した研究では、113時間の撮影時間で46回もの水中を漂うビニール袋が記録されている (Fukuoka et al. 2016)。このことは、ウミガメをはじめとする潜水性肺呼吸動物 (海生哺乳類や海鳥類) は、水面から海底まで鉛直的に分布するゴミを調査するための有用なプラットフォームの一つとなる可能性を示している。藻類を主食とするアオウミガメはビニール袋を誤食する一方で、クラゲ類を始めとする動くものを捕食するアカウミガメはビニール袋を食べずに通り過ぎていることが示され、動物種によるゴミへの反応の差が明らかとなった (Fukuoka et al. 2016)。海洋に分布するゴミは、海洋高次捕食者を含む多くの海洋生物に影響を与えていると報告されている (Gall and Thompson 2015)。海洋生態系におけるゴミの影響を正しく理解するためにも、動物種ごとのゴミに対する反応を明らかにする必要があり、バイオリギングを使った観測が効果的である。

5. バイオリギング研究の今後の展望

バイオリギングは、ここまで紹介してきた動物の生態解明、海洋物理環境モニタリング、海洋ゴミの調査に役立つだけでなく、有害化学汚染物質のモニタリング (Ito et al. 2013)、漁業資源管理に必要な魚の生態情報 (Tomiyasu et al. 2018)、漁業被害対策 (Masubuchi et al. 2019) にも寄与している。このようにバイオリギングが海洋の様々な課題解決に役立つことがわかり始めてきた。海洋の課題解決にバイオリギングをこれまで以上に効果的に活用するためには、次のステップとしてバイオリギングデータを共有する必要がある。

バイオリギング研究では、複数の動物種のデータをまとめて解析することで、海洋動物全般の運動能力について法則の発見や、その法則から外れる動物のあぶり出しがなされている (Sato et al. 2007, Watanabe et al. 2011)。また前節でも紹介しているが、バイオリギングデータを海洋物理環境予測モデルに組み込むことで、海流の予測精度の上昇や正確な海況の把握が可能となる (Miyazawa et al. 2015, Miyazawa et al. 2019)。これらの研究のように、分野に関係なくバイオリギングデータを共有し統合することにより、新しい成果が生み出されることが示されている。バイオリギングデータを共有・統合など有効利用するためにも、どこに何のデータが存在するのかという情報が必要となる。つまり、バイオリギングデータのデータベースが有用と考えられる。現在、世界で一番大きなバイオリギングデータのデータベースとして、Movebankが挙げられる (Cambell et al. 2016)。Movebankにはこれまで1000種以上の動物の移動データが登録されている巨大なデータベースだが、登録されているデータの項目はGPSなどの水平移動データだけである。その他にも、ヨーロッパ限定、アメリカ限定など地域が限定されたデータベースが存在す

る (Cambell et al. 2016)。今必要なのは、登録できる情報に制限がないデータベースである。そこで公益財団法人笹川平和財団海洋政策研究所では、新しいバイオリギングデータのデータベースが作成し、トライアル版をのウェブサイト上で公開する予定である。このデータベースは動物種、計測項目、調査地に制限はないが、日本人研究者が実施した野外調査の情報しか登録されていないのが現状である。これまでバイオリギングは、調査海域ごとのスポット的に海洋の課題解決に貢献してきた。

今後は、全球的に海洋の課題解決に取り組む必要がある。世界最大の海洋保護区である南極のロス海において、南極に生息する海洋高次捕食者（海生哺乳類・海鳥類）17種、4000個体以上のバイオリギングデータを世界中から集約・解析したところ、設定されている海洋保護区と彼らの生息域の重なりが示され、現在推奨されている海洋保護区が有用であることが述べられている (Hindell et al. 2020)。このような研究を推進するためにも、海洋政策研究所として当データベースにグローバルな情報を集める努力をしていきたい。

引用文献

- 1 Boyd, I. L., Kato, A., & Ropert-Coudert, Y. (2004). Bio-logging science: sensing beyond the boundaries. *Memoirs of National Institute of Polar Research, Special issue, 58*, 1-4.
- 2 Amano, M., & Yoshioka, M. (2003). Sperm whale diving behavior monitored using a suction-cup-attached TDR tag. *Marine Ecology Progress Series, 258*, 291-295.
- 3 Aoki, K., Amano, M., Yoshioka, M., Mori, K., Tokuda, D., & Miyazaki, N. (2007). Diel diving behavior of sperm whales off Japan. *Marine Ecology Progress Series, 349*, 277-287.
- 4 Narazaki, T., Sato, K., & Miyazaki, N. (2015). Summer migration to temperate foraging habitats and active winter diving of juvenile loggerhead turtles *Caretta caretta* in the western North Pacific. *Marine Biology, 162*(6), 1251-1263.
- 5 Kato, A., Watanuki, Y., & Naito, Y. (2003). Foraging behaviour of chick-rearing rhinoceros auklets *Cerorhinca monocerata* at Teuri Island, Japan, determined by acceleration-depth recording micro data loggers. *Journal of avian biology, 34*(3), 282-287.
- 6 Nakamura, I., Goto, Y., & Sato, K. (2015). Ocean sunfish rewarms at the surface after deep excursions to forage for siphonophores. *Journal of Animal Ecology, 84*(3), 590-603.
- 7 Nakamura, I., Matsumoto, R., & Sato, K. (2020). Body temperature stability in the whale shark, the world's largest fish. *Journal of Experimental Biology, 223*(11).
- 8 Yoda, K., Shiomi, K., & Sato, K. (2014). Foraging spots of streaked shearwaters in relation to ocean surface currents as identified using their drift movements. *Progress in Oceanography, 122*, 54-64.
- 9 Itoh, T., Tsuji, S., & Nitta, A. (2003). Migration patterns of young Pacific bluefin tuna (*Thunnus orientalis*) determined with archival tags. *Fishery Bulletin, 101*(3), 514-534.
- 10 Azumaya, T., Sato, S., Urawa, S., & Nagasawa, T. (2016). Potential role of the magnetic field on homing in chum salmon (*Oncorhynchus keta*) tracked from the open sea to coastal Japan. *N. Pac. Anadr. Fish Comm. Bull, 6*, 235-241.
- 11 日本バイオリギング研究会. (2009) バイオリギング：最新科学で解明する動物生態学. 京都通信社, 京都, 223 pp.
- 12 日本バイオリギング研究会. (2016) バイオリギング 2：動物たちの知られざる世界を探る. 京都通信社, 京都, 223 pp.
- 13 Tanaka, H., Takagi, Y., & Naito, Y. (2001). Swimming speeds and buoyancy compensation of migrating adult chum salmon *Oncorhynchus keta* revealed by speed/depth/acceleration data logger. *Journal of Experimental Biology, 204*(22), 3895-3904.
- 14 Yoda, K., Naito, Y., Sato, K., Takahashi, A., Nishikawa, J., Ropert-Coudert, Y., ... & Le Maho, Y. (2001). A new technique for monitoring the behaviour of free-ranging Adelie penguins. *Journal of Experimental Biology, 204*(4), 685-690.
- 15 Sato, K., Naito, Y., Kato, A., Niizuma, Y., Watanuki, Y., Charrassin, J. B., ... & Le Maho, Y. (2002). Buoyancy and maximal diving depth in penguins: do they control inhaling air volume?. *Journal of Experimental Biology, 205*(9), 1189-1197.
- 16 Mitani, Y., Andrews, R. D., Sato, K., Kato, A., Naito, Y., & Costa, D. P. (2010). Three-dimensional resting behaviour of northern elephant seals: drifting like a falling leaf. *Biology letters, 6*(2), 163-166.
- 17 Watanabe, Y. Y., Baranov, E. A., & Miyazaki, N. (2015). Drift dives and prolonged surfacing periods in Baikal seals: resting strategies in open waters?. *Journal of Experimental Biology, 218*(17), 2793-2798.
- 18 Sato, K., Mitani, Y., Cameron, M. F., Siniiff, D. B., & Naito, Y. (2003). Factors affecting stroking patterns and body angle in diving Weddell seals under natural conditions. *Journal of experimental Biology, 206*(9), 1461-1470.

- 19 Watanuki, Y., Niizuma, Y., Geir, W. G., Sato, K., & Naito, Y. (2003). Stroke and glide of wing-propelled divers: deep diving seabirds adjust surge frequency to buoyancy change with depth. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 270(1514), 483-488.
- 20 Aoki, K., Amano, M., Mori, K., Kourogi, A., Kubodera, T., & Miyazaki, N. (2012). Active hunting by deep-diving sperm whales: 3D dive profiles and maneuvers during bursts of speed. *Marine Ecology Progress Series*, 444, 289-301.
- 21 Narazaki, T., Sato, K., Abernathy, K. J., Marshall, G. J., & Miyazaki, N. (2013). Loggerhead turtles (*Caretta caretta*) use vision to forage on gelatinous prey in mid-water. *PLoS One*, 8(6), e66043.
- 22 Sato, K., Aoki, K., Watanabe, Y. Y., & Miller, P. J. (2013). Neutral buoyancy is optimal to minimize the cost of transport in horizontally swimming seals. *Scientific reports*, 3(1), 1-5.
- 23 Watanabe, Y., Baranov, E. A., Sato, K., Naito, Y., & Miyazaki, N. (2006). Body density affects stroke patterns in Baikal seals. *Journal of Experimental Biology*, 209(17), 3269-3280.
- 24 Adachi, T., Costa, D. P., Robinson, P. W., Peterson, S. H., Yamamichi, M., Naito, Y., & Takahashi, A. (2017). Searching for prey in a three-dimensional environment: hierarchical movements enhance foraging success in northern elephant seals. *Functional Ecology*, 31(2), 361-369.
- 25 Narazaki, T., Isojunno, S., Nowacek, D. P., Swift, R., Friedlaender, A. S., Ramp, C., ... & Miller, P. J. (2018). Body density of humpback whales (*Megaptera novaengliae*) in feeding aggregations estimated from hydrodynamic gliding performance. *PLoS One*, 13(7), e0200287.
- 26 Aoki, K., Isojunno, S., Bellot, C., Iwata, T., Kershaw, J., Akiyama, Y., ... & Miller, P. J. (2021). Aerial photogrammetry and tag-derived tissue density reveal patterns of lipid-store body condition of humpback whales on their feeding grounds. *Proceedings of the Royal Society B*, 288(1943), 20202307.
- 27 Suzuki, I., Naito, Y., Folkow, L. P., Miyazaki, N., & Blix, A. S. (2009). Validation of a device for accurate timing of feeding events in marine animals. *Polar Biology*, 32(4), 667-671.
- 28 Naito, Y., Bornemann, H., Takahashi, A., & Ploetz, J. (2009). Fine scale feeding behavior of Weddell seals measured by mandible accelerometer.
- 29 Iwata, T., Sakamoto, K. Q., Takahashi, A., Edwards, E. W., Staniland, I. J., Trathan, P. N., & Naito, Y. (2012). Using a mandible accelerometer to study fine-scale foraging behavior of free-ranging Antarctic fur seals. *Marine Mammal Science*, 28(2), 345.
- 30 Naito, Y., Costa, D. P., Adachi, T., Robinson, P. W., Fowler, M., & Takahashi, A. (2013). Unravelling the mysteries of a mesopelagic diet: a large apex predator specializes on small prey. *Functional Ecology*, 27(3), 710-717.
- 31 Akiyama, Y., Akamatsu, T., Rasmussen, M. H., Iversen, M. R., Iwata, T., Goto, Y., ... & Sato, K. (2019). Leave or stay? Video-logger revealed foraging efficiency of humpback whales under temporal change in prey density. *PLoS one*, 14(2), e0211138.
- 32 Watanabe, Y. Y., & Takahashi, A. (2013). Linking animal-borne video to accelerometers reveals prey capture variability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(6), 2199-2204.
- 33 Watanabe, Y. Y., Baranov, E. A., & Miyazaki, N. (2020). Ultrahigh foraging rates of Baikal seals make tiny endemic amphipods profitable in Lake Baikal. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(49), 31242-31248.
- 34 Watanabe, Y. Y., Payne, N. L., Semmens, J. M., Fox, A., & Huvaneers, C. (2019). Swimming strategies and energetics of endothermic white sharks during foraging. *Journal of Experimental Biology*, 222(4).
- 35 Yoda, K., Tomita, N., Mizutani, Y., Narita, A., & Niizuma, Y. (2012). Spatio-temporal responses of black-tailed gulls to natural and anthropogenic food resources. *Marine Ecology Progress Series*, 466, 249-259.
- 36 Fukuoka, T., Yamane, M., Kinoshita, C., Narazaki, T., Marshall, G. J., Abernathy, K. J., ... & Sato, K. (2016). The feeding habit of sea turtles influences their reaction to artificial marine debris. *Scientific reports*, 6(1), 1-11.
- 37 Iwata, T., Biuw, M., Aoki, K., Miller, P.J.O., & Sato, K. Using an omnidirectional video logger to observe the underwater life of marine animals: humpback whale resting behaviour. *Behavioural Processes*, (in press).
- 38 Harcourt, R., Sequeira, A. M., Zhang, X., Roquet, F., Komatsu, K., Heupel, M., ... & Fedak, M. A. (2019). Animal-borne telemetry: an integral component of the ocean observing toolkit. *Frontiers in Marine Science*, 6, 326.
- 39 Miyazawa, Y., Guo, X., Varlamov, S. M., Miyama, T., Yoda, K., Sato, K., ... & Sato, K. (2015). Assimilation of the seabird and ship drift data in the north-eastern sea of Japan into an operational ocean nowcast/forecast system. *Scientific reports*, 5(1), 1-10.
- 40 Yonehara, Y., Goto, Y., Yoda, K., Watanuki, Y., Young, L. C., Weimerskirch, H., ... & Sato, K. (2016). Flight paths of seabirds soaring over the ocean surface enable measurement of fine-scale wind speed and direction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(32), 9039-9044.
- 41 Pickett, M. H., Tang, W., Rosenfeld, L. K., & Wash, C. H. (2003). QuikSCAT satellite comparisons with nearshore buoy wind data off the US west coast. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20(12), 1869-1879.

- 42 Miyazawa, Y., Kuwano-Yoshida, A., Doi, T., Nishikawa, H., Narazaki, T., Fukuoka, T., & Sato, K. (2019). Temperature profiling measurements by sea turtles improve ocean state estimation in the Kuroshio-Oyashio Confluence region. *Ocean Dynamics*, 69(2), 267-282.
- 43 Domingues, R., Kuwano-Yoshida, A., Chardon-Maldonado, P., Todd, R. E., Halliwell, G., Kim, H. S., ... & Goni, G. (2019). Ocean observations in support of studies and forecasts of tropical and extratropical cyclones. *Frontiers in Marine Science*, 6, 446.
- 44 Doi, T., Storto, A., Fukuoka, T., Suganuma, H., & Sato, K. (2019). Impacts of temperature measurements from sea turtles on seasonal prediction around the Arafura Sea. *Frontiers in Marine Science*, 6, 719.
- 45 Boehlert, G. W., Costa, D. P., Crocker, D. E., Green, P., O'Brien, T., Levitus, S., & Le Boeuf, B. J. (2001). Autonomous pinniped environmental samplers: using instrumented animals as oceanographic data collectors. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 18(11), 1882-1893.
- 46 Fedak, M. (2004). Marine animals as platforms for oceanographic sampling: a "win/win" situation for biology and operational oceanography. *Memoirs of National Institute of Polar Research, Special issue*, 58, 133-147.
- 47 Biuw, M., Boehme, L., Guinet, C., Hindell, M., Costa, D., Charrassin, J. B., ... & Fedak, M. A. (2007). Variations in behavior and condition of a Southern Ocean top predator in relation to in situ oceanographic conditions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(34), 13705-13710.
- 48 Charrassin, J. B., Hindell, M., Rintoul, S. R., Roquet, F., Sokolov, S., Biuw, M., ... & Guinet, C. (2008). Southern Ocean frontal structure and sea-ice formation rates revealed by elephant seals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(33), 11634-11639.
- 49 Ohshima, K. I., Fukamachi, Y., Williams, G. D., Nishihashi, S., Roquet, F., Kitade, Y., ... & Wakatsuchi, M. (2013). Antarctic Bottom Water production by intense sea-ice formation in the Cape Darnley polynya. *Nature Geoscience*, 6(3), 235-240.
- 50 Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., ... & Law, K. L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768-771.
- 51 Barnes, D. K., & Milner, P. (2005). Drifting plastic and its consequences for sessile organism dispersal in the Atlantic Ocean. *Marine Biology*, 146(4), 815-825.
- 52 Ryan, P. G., Moore, C. J., Van Franeker, J. A., & Moloney, C. L. (2009). Monitoring the abundance of plastic debris in the marine environment. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 1999-2012.
- 53 Galgani, F., Souplet, A., & Cadiou, Y. (1996). Accumulation of debris on the deep sea floor off the French Mediterranean coast. *Marine Ecology Progress Series*, 142, 225-234.
- 54 Barnes, D. K., Galgani, F., Thompson, R. C., & Barlaz, M. (2009). Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical transactions of the royal society B: biological sciences*, 364(1526), 1985-1998.
- 55 Chiba, S., Saito, H., Fletcher, R., Yogi, T., Kayo, M., Miyagi, S., ... & Fujikura, K. (2018). Human footprint in the abyss: 30 year records of deep-sea plastic debris. *Marine Policy*, 96, 204-212.
- 56 Gall, S. C., & Thompson, R. C. (2015). The impact of debris on marine life. *Marine pollution bulletin*, 92(1-2), 170-179.
- 57 Ito, A., Yamashita, R., Takada, H., Yamamoto, T., Shiomi, K., Zavalaga, C., ... & Watanuki, Y. (2013). Contaminants in tracked seabirds showing regional patterns of marine pollution. *Environmental science & technology*, 47(14), 7862-7867.
- 58 Tomiyasu, M., Shirakawa, H., Iino, Y., & Miyashita, K. (2018). Tracking migration of Pacific herring *Clupea pallasii* in a coastal spawning ground using acoustic telemetry. *Fisheries science*, 84(1), 79-89.
- 59 Masubuchi, T., Kobayashi, M., Ohno, K., Ishikawa, A., & Kuramoto, Y. (2019). Dependency of Japanese harbor seals (*Phoca vitulina*) on salmon set nets at Cape Erimo, Hokkaido, Japan. *Marine Mammal Science*, 35(1), 58-71.
- 60 Sato, K., Watanuki, Y., Takahashi, A., Miller, P. J., Tanaka, H., Kawabe, R., ... & Naito, Y. (2007). Stroke frequency, but not swimming speed, is related to body size in free-ranging seabirds, pinnipeds and cetaceans. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 274(1609), 471-477.
- 61 Watanabe, Y. Y., Sato, K., Watanuki, Y., Takahashi, A., Mitani, Y., Amano, M., ... & Miyazaki, N. (2011). Scaling of swim speed in breath-hold divers. *Journal of Animal Ecology*, 80(1), 57-68.
- 62 Campbell, H. A., Urbano, F., Davidson, S., Dettki, H., & Cagnacci, F. (2016). A plea for standards in reporting data collected by animal-borne electronic devices. *Animal Biotelemetry*, 4(1), 1-4.
- 63 Hindell, M. A., Reisinger, R. R., Ropert-Coudert, Y., Hückstädt, L. A., Trathan, P. N., Bornemann, H., ... & Raymond, B. (2020). Tracking of marine predators to protect Southern Ocean ecosystems. *Nature*, 580(7801), 87-92.