

海洋の課題の解決する プラットフォームとしての バイオリギングの可能性： Internet of Animals (IoA)の発展に向けて

岩田高志¹・赤松友成²

1. 神戸大学大学院海事科学研究科
2. 早稲田大学ナノ・ライフ創新研究機構

要旨

バイオリギングとは、動物に記録計を装着し、動物の行動生態や生理、周囲の環境を調べる手法である。これは各個体を座標系の原点とするラグランジュ型の観測手法となる。本研究では、他の観測手法と組み合わせることで、海洋の理解を深めるための新たなツールとしてのバイオリギングをレビューし、さまざまな海洋問題に政策的に取り組むための応用戦略を提案する。バイオリギングを活用した海洋問題への対応例としては、海洋温暖化、気象予測、海洋ごみ、海洋化学汚染、人為的な騒音、海洋保護区の保全、漁業による混獲、海洋高次捕食者が利用する生息地への人為的攪乱などが挙げられる。バイオリギング単独ではこれらの課題を解決するには限界があるが、漂流ブイなど他のラグランジュ型プラットフォームや、オイラー型のリモートセンシングと補完的に活用することで、モデルの予測精度を高め、既存の知識のギャップを埋めることができる。さらに、IoT（モノのインターネット）の派生概念である「Internet of Animals (IoA)」は、機器を装着した動物を介して、人が行くことができない海域から多様なデータをネットワーク経由で収集する将来的なソリューションとして注目されており、その実現にはオープンデータの活用が極めて重要となる。本研究では持続可能な海洋管理政策の策定に資するような、バイオリギングを用いた研究事例や将来的な応用手法を提示している。

1. イントロダクション

1.1. バイオリギングの特性

2003年の国際シンポジウムの開催を契機として学問分野として誕生したバイオリギング (biologging) は、動物に記録計を装着し、それらの生態やその周囲の環境を調べる手法として知られている (Boyd et al. 2004)。現在

では、野生動物の生理・行動を調べるのに欠かせない手段である。動物装着型の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。

海洋観測に広く用いられてきたのはリモートセンシング技術である。人工衛星から受動的に可視光を含む各種波長の電磁波を観測し、放射面の特性を把握する手法である。最も一般的に行われているのは海表面温度の分布である (Merchant et al. 2019)。またクロロフィルなど植物プランクトンに由来する波長は生物生産力を間接的に計測できる (Joint and Groom 2000)。リモートセンシングは地球の座標系を固定して現象を地図上に可視化するオイラー的な観測手段である。また、基本的には海表面の現象のみが対象となり、海中の状況把握は数値モデルなどを介さなければ予測が難しい。

一方で、バイオリギングは動物個体に座標軸の原点を固定したラグランジュ的な観測手段である。船舶による採水や漂流ブイによる海中観測などもこの仲間である。船舶は意図した場所に必要な機材を運搬し、人間も同乗して精密な観測ができる点で、ほかの手法にはない利点がある。一方で、シフトタイムは限られており、その運行費用は高額である。内燃機関に動力を依存しているため、燃料費の高騰が観測努力量の減少に直結する。漂流ブイによる海洋観測はバイオリギングと似たラグランジュ的な観測手段である。例えば ARGOS ブイが全世界の海洋に展開されており、海表面から深度 2000 m までの鉛直観測を多数行っている (Roemmich et al. 2009)。ただし、その位置は制御できない。自律型無人水上機 (Autonomous surface vehicle: ASV) や自律型無人潜水機 (Autonomous underwater vehicle: AUV) は波力や風力を利用した推進装置と制御装置を有しており、ある程度事前に設定した移動経路に沿って運用できる (Whitt et al. 2020)。ただしいずれの装置も大型、精密かつ高額であり、広大で深い海洋の観測に十分とは言えない。

バイオリギングはこうした人工プラットフォームの弱点を補う特性を持っている。動物をプラットフォームとした観測の長所として、i) 3 次元的 (水平・鉛直方向) な広が

りを持つデータ, ii) 時空間的に連続しているデータ, iii) 海氷の下や荒天時など人（船舶）が近づくことができない環境のデータの取得が挙げられる。一方、短所として、i) 観測海域が動物依存のため選択できない, ii) 複数年に渡る継続的な調査が少ない, iii) 装着できる動物個体数が限られるため取得できる独立データ数が少ない、といった点が挙げられる（表 1）。海洋現象をモニタリングする上で、完璧な手法は存在しない。しかし、バイオリギングは海洋データ量を著しく増加させ、データの洪水とも呼ばれる状況を生み出している（Sequeira et al. 2021）。バイオリギングは、動物を用いて連続的かつ動的な海洋観測を行うという独自の手法であり、従来の方法では得られなかった知識のギャップを埋めることができる。本論文では、海洋の各課題を観測・解決するために、バイオリギングと他の手法を適切に組み合わせる方法について述べる。

1.2. 海洋課題と観測

多様な海洋課題を解決するためには、オイラー的な俯瞰データとラグランジュ的な軌跡データを組み合わせることが有効である。上述のように海洋観測プラットフォームには長所と短所があり、それぞれのプラットフォームで得られるデータは、観測手法ごとに解像度が異なる可能性があるため、互いに補完・検証する必要がある。たとえば海洋温暖化のモニタリングにおいては、海表面温度だけでなく海中の温度変化を精密に観測することが極めて重要である（Abraham et al. 2013）。海水の熱容量は巨大であり、水塊全体に蓄積される熱量の輸送とその変化を把握しなければならない（Baggeroer et al. 1998）。このため、リモートセンシングだけでなく ARGOS ブイのような海中に潜って観測する手段が必要となる（Abraham et al. 2013）。さらに、動物を用いたラグランジュ的アプローチにより、気候変動が個々の生物に与える影響の直接観察が可能となる。

近年着目されるようになった海洋ごみ、特にプラスチックによる海洋汚染の影響は十分に把握されていない。海表面から海底まで

表 1 海洋観測プラットフォームの特徴

プラットフォーム	観測型	時間的特徴	空間的特徴	観測項目	制約
バイオリギング	ラグランジュ	○高解像度 ○連続的なデータ ●機器に依存	○3次元的観測 ○高解像度 ○連続的なデータ ○海水下の観測 ●機器に依存 ●調査海域の選択不可	○様々な観測項目 ○映像データ ○動物の動きの追跡 ●機器に依存	動物を捕獲し機器を装着しなくてはならない 機器によっては回収が必要
漂流ブイ	ラグランジュ	○高解像度 ○連続的なデータ	○3次元的観測 ○高解像度 ○連続的なデータ ●調査海域の選択不可	●観測項目が少ない	推進力なし 観測は国際機関の決定に依存
観測船	ラグランジュ	○高解像度	○高解像度 ○調査海域の選択可 ●点または線での観測 ●海水域に接近不可 ●天候に依存	○多様な観測項目 ○物質（水や生物など）のサンプリング ○高精度の観測	非常に高コスト 船舶利用時間が限られている 無人潜水機が競合相手
人工衛星	オイラー	○長期間観測 ●低解像度	○全球観測 ●水中の観測不可 ●沿岸域の観測不可	○様々な観測項目 ○映像データ	全球的にカバーするが、時空間的解像度に限界
定点観測	オイラー	○長期間観測	●点での観測	○様々な観測項目	長期的な維持管理にコストがかかる

白丸は長所、黒丸は短所を示す。

の海洋ごみの分布を把握するのが難しいだけでなく、そのごみが動物に与える影響を明らかにするのは非常に困難である。同様に、化学汚染物質の密度分布や生物への影響に関するデータも不足している。主な課題は、こうしたリスクに実際晒される動物個体との直接的な遭遇を観測することが困難である点にある。

漁業は養殖も含めて、世界的に成長を続けている産業である (Pauly and Zeller 2016)。しかしながら、現在の資源管理のアプローチでは、海洋からの生物資源を持続的に利用するには不十分である。資源の分布だけでなく再生産量も把握し、適切な漁獲規制を伴わなければならない。特に、マグロなどの沖合性の種では、持続可能な資源管理のために、基本的な回遊経路や分布に関するデータが求められている。ラグランジュ的なバイオリギング手法は、長期間にわたって遊泳経路をモニタリングするための強力なツールである。

野生動物と人間社会の共存の問題は世界各地でおこっている (Nyhus 2016)。たとえば、海洋動物による漁具の破損や漁獲物の食害などが報告されている (Jog et al. 2022)。また、漁具は動物にとって危険なものとなる。漁業における混獲は、希少な海洋生物に悪影響を及ぼしている (Soykan et al. 2008)。バイオリギングによって個体を追跡することで、動物が漁具に接近し、捕獲されるまでの行動を性成熟、体サイズ、健康状態といった個体情報とあわせて把握することが可能となる。こうしたバイオリギングデータは、混獲を防ぐためのより具体的な対策を策定する上で有用である。かつて日本の大規模なサケ・マス流し網漁業は、漁獲対象物だけでなく海鳥類や小型鯨類を混獲し海洋投棄していた (Northridge 1991)。これに対し、米国の海生哺乳類保護法 (Marine Mammal Protection Act) の施行や、国際世論の圧力も加わって、この漁法は米国の排他的経済水域 (EEZ) だけでなく公海からも撤退を余儀なくされた。漁獲物や混獲に関するデータに加え、各動物が漁具と遭遇した記録も、人間と野生動物との衝突を緩和するためのリスク評価データとして重要である。

近年、海洋における新たな開発が進んでいる。沿岸域での洋上重力発電施設、深海底鉱物資源開発、船舶による水中騒音などは、海洋生物に影響を与える可能性がある。これらの現象の影響に関するデータの不足が、定

量的な評価を困難にしている。今後、海洋利用が盛んになるにつれ、海洋生物との持続的な共存は、ますます重要な課題となっている。動物の行動や分布に影響を与える海洋環境中の要因は、影響源の近くに物理・化学センサーを設置することで測定が可能である。一方で、影響を受ける対象の動物とその応答は、バイオリギングなしには容易に測定することができない。

これまでのレビュー論文では、バイオリギングの歴史や主要な研究分野について議論されており (Watanabe and Papastamatiou 2023)、動物生態学への貢献や (Wilmers et al. 2015)、海洋動物の保全および管理における役割 (Hays et al. 2019) にも焦点が当てられている。本研究では、バイオリギングを海洋課題の把握に向けた新たなツールとして捉え、関連する観測技術と組み合わせることで政策立案への応用を提案する。

2. 海洋課題の解決手段としてのバイオリギング

2.1. 海洋温暖化と気象予測

気候変動が海洋動物に与える影響を正しく把握するためには、可能な限り多くの海域において、さまざまな海洋物理環境とそれに対する海洋動物の応答を観測する必要がある。ここでは、近年バイオリギングによって実施された観測について紹介する。

表層流や海上風はこれまで人工衛星や海洋観測ブイによって観測されてきた。しかし人工衛星は特定の観測地点に限れば複数の衛星を用いたとしても 1 日数回の観測にとどまる。さらに、海岸から 100 km 以内の沿岸域では、周囲の岩礁や陸水の流入の影響を受けるため、人工衛星による分光測定の空間的精度が低下し、環境情報の取得が困難となる (Pickett et al. 2003)。また、観測ブイは広範囲に設置されているわけではなく、表層流や海上風のように詳細な時空間スケールで刻々と変化する情報を得ることが難しい (Tanaka et al. 2023)。

そこで、海鳥類の一種であるオオミズナギドリ *Calonectris leucomelas* に GPS ロガーを装着することで、オオミズナギドリが海面で漂流している期間のドリフト経路から、表層海流の方向と速度を推定する手法が開発された (Yoda et al. 2014)。このドリフト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、またドリフト経路か

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る (Yoda et al. 2014). さらに、海鳥のドリフト経路と貨物船の航行記録を海流予測モデルに取り込むことで、海流予測精度の向上が示されている (Miyazawa et al. 2015). 海鳥類の飛行速度と進行方向は、GPS ロガーから得られる位置情報から算出される。算出された飛行速度は、海鳥の進行方向に対する風の影響を受けると仮定することで、海鳥が経験した海上風の風向・風速を推定することが可能となり、これらの値は人工衛星による風データと高い相関を示す (Yonehara et al. 2016). さらに、海面上での GPS ロガーによる垂直方向の変位と水平速度の記録から、有義波高や周期といった波浪パラメーターを推定でき、それらの値は波浪観測ブイの値と一致することが示されている (Uesaka et al. 2022). このように、海鳥に装着されたロガーから推定される表層海流、海上風、波浪の情報は、人工衛星や観測ブイでは得られない詳細な時空間分布データを提供する。そのため、バイオリギングによって得られる海鳥由来の観測データを積極的に活用することで、従来の海洋観測データを効果的に補完することができる。

動物をプラットフォームとした海洋観測は、これまで主に極域や寒冷地域で行われており、熱帯域および温帯域を対象とした研究は比較的少ない傾向がある (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、アザラシであることが理由の一つとして考えられる (Boehlert et al. 2001, Fedack 2004, Biuw et al. 2007, Charrassin et al. 2008, Ohshima et al. 2013). 一方で、ウミガメ類は、水平・鉛直方向の三次元的に広い行動範囲を持つ。実際、アカウミガメ *Caretta caretta* に装着された人工衛星対応型発信機によって、深度と水温と水平位置のデータが記録され、広範囲の海洋環境モニタリングが実現された。中には、403 日間にわたって 2600 km 沖合まで泳いだ個体も報告されている (Narazaki et al. 2015). また、ウミガメから得られた水温鉛直プロファイルモデルを同化することで、黒潮・親潮混合水域における海況の推定精度が向上し (Miyazawa et al. 2019), その結果は台風の経路予測に役立つことが示唆されている (Domingues et al. 2019). さらに、パプアニューギニアにおけるヒメウミガメ *Lepidochelys olivacea* から得られたデータを季節予測モデルに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

も改善された (Doi et al. 2019). このようにウミガメ類は今後、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動物として、重要な役割を果たすことが期待される (Bousquet et al. 2020).

地球温暖化は海洋動物の生態にさまざまな影響を及ぼしている。漁業資源の分布は北方へ移動しており (Haug et al. 2017), 北極域に生息する海生哺乳類では、海氷の減少に伴って分布の変化、健康状態の悪化、個体数の減少がすでに確認されている (Kovacs et al. 2011). また、温帯性の海生哺乳類が分布域を北へ拡大しており、北極域に生息する生物との競合をもたらす可能性がある (Kovacs et al. 2011). このように、地球温暖化による海洋動物の分布や体調の変化は示されているが、それらの変化が生じる過程、要因、メカニズムについての詳細な情報は未だ明らかではない。バイオリギング手法は、個体の実際の行動を追跡できるため、気候変動が海洋動物に与える影響を、行動変化を通じて把握できるという利点を持っている。

バイオリギングだけでは、すべての海洋問題に対処することはできないが、従来の観測手法によって生じる観測頻度のギャップや未観測領域を補完する役割を果たしている。ラグランジュ型のバイオリギングによって得られる高密度な移動軌跡データを、広範囲だがまばらに分布する漂流ブイやオイラー型のリモートセンシングと組み合わせることで、モデルの予測精度を向上させることができる。海洋モデリングの観点からは、従来の観測手法では把握できなかった時空間分布を持つ有用なデータを、バイオリギングを含む新たな観測手法により取得することで、異なる分野からの統合データの活用が促進される。二酸化炭素濃度の上昇による急速な気候変動が世界的に進行しているものの、それが海洋生物の移動や分布に与える影響の評価は、まだ始まったばかりである。

2.2. 海洋ごみ

近年プラスチックごみを含む海洋ごみによる海洋汚染が大きな問題として注目されている (Eriksen et al. 2014, Jambeck et al. 2015). 海洋ごみは海洋動物にさまざまな脅威をもたらすことが報告されている (Gregory 2009, Gall and Thompson 2015, Ryan 2018). 例えば、プラスチックは消化管を閉塞・損傷させる可能性があり、また体内に長期間残存すると吸着された有害物質が溶け出したり、満腹感を

誤認させたりする可能性があり、多くの動物の健康を阻害することが考えられる (Ryan et al. 1988, Pierce et al. 2004, Lavers et al. 2014, Gall and Thompson 2015). 海洋ごみの調査手法としては、船上から浮遊ごみを目視観察する方法 (Barnes and Milner 2005, Ryan et al. 2009)、潜水艇によって海底の沈降ごみを観察する方法 (Galgani et al. 1996, Barnes et al. 2009, Chiba et al. 2018) がある。トロール網を用いてごみを回収する方法もあるが (Barnes et al. 2009, Ryan et al. 2009)、これは限られた深度帯にしか対応できず、多大な労力・費用を要する。そのため、海洋ごみの分布を効果的に把握できる単一の手法はなく、より多くの情報を集めるためにも、多角的なアプローチが必要とされる。

ウミガメ類は水面で呼吸、水中および海底で採餌や休息をすることが知られている (Seminoff et al. 2006)。ウミガメ類にカメラを装着することにより、水面・水中・海底の環境を視覚的に捉えることができるため、海洋ごみの分布調査に応用できる。例えば、ウミガメ類にビデオカメラを装着した研究では、水中を漂うビニール袋の映像が撮影された (Narazaki et al. 2013, Fukuoka et al. 2016)。さらに、位置情報と深度を記録する装置を同時に用いることで、海洋ごみの三次元的な分布評価が可能となる。これらのデータは、個体がどの程度の頻度でごみに遭遇しているかも示すことができる。したがって、ウミガメ類や海鳥類、海生哺乳類のような潜水性肺呼吸動物は、海洋ごみの調査において有望な調査手段となる。

海洋ごみの分布がわかっても、それが生物、特に高次捕食者に与える影響を理解することは容易ではない (Gall and Thompson 2015)。その影響を評価するためには、海洋生物がごみに遭遇した際の遭遇率や行動変化、生理的な変化を明らかにする必要がある。例えば、アオウミガメ *Chelonia mydas* は、ビニール袋を誤食する一方で、アカウミガメは、ビニール袋を食べずに通り過ぎる傾向があり、ごみに対する反応には種特異性がある (Fukuoka et al. 2016)。海洋ごみが「いつ・どこで・どのような種類のごみ」として動物に脅威を与えるのかを明らかにすることで、より正確な影響評価や、海洋ごみ排出削減のための政策立案につながる。バイオロギングの最大の利点は、海洋生物に対する海洋ごみの影響や、摂食・絡まりといった直接的な反応を評価できる点にある。

2.3. 化学物質汚染

海洋に排出・拡散された残留性有機汚染物質 (Persistent Organic Pollutants: POPs) は、様々な移動速度で拡散し、沿岸および沖合の環境に局所的に堆積される (Wania and Mackay 1996)。POPsは海洋生態系の食物網を介して生体内に蓄積され、様々な生物に悪影響を及ぼすため (Goerke et al. 2004)、汚染の著しい海域を特定することは重要である。ムール貝などの二枚貝は海洋汚染物質のバイオセンサーとして使われているが (Monirith et al. 2003)、沿岸域にしか生息しないため、外洋域のモニタリングには適さない。観測船を用いた調査では、時間的・費用的な制限から、観測点が限られており、広大な海域の評価が難しい。

海鳥類を含む海洋高次捕食者は、POPs濃度のバイオインディケーターとなることが考えられており、実際に海鳥類の様々な体組織からPOPsが検出できることが示されている (Yamashita et al. 2018)。例えば、卵 (Hammer et al. 2016)、糞 (Rudolph et al. 2016)、羽毛 (Jaspers et al. 2007)、血液 (Roscales et al. 2010)、尾脂腺分泌油 (Yamashita et al. 2007) といった体組織である。また、海鳥類は沿岸から外洋まで広範囲に採餌するため、POPsのバイオインディケーターとして非常に有用である。GPS ロガーを用いて採餌海域を明らかにし、4箇所繁殖地でのオオミズナギドリ尾脂腺分泌油中のPOPs濃度を比較した研究では、繁殖地ごとに異なるPOPs濃度が示された (Ito et al. 2013)。同様に、複数の非繁殖期の分布海域で採取した尾羽中の水銀濃度を比較することで、水銀の地理的分布に関する知見も得られている (Watanuki et al. 2016)。どの組織を汚染指標として用いるかは、対象種の生態や生息環境、さらには個体の年齢や性別といった特性に応じて判断すべきである (Pacyna-Kuchta, 2023)。複数の指標を併用することで、より正確な評価が可能になる。海鳥の移動を追跡し、組織を分析することで、汚染物質の現在の使用状況、排出、分解、拡散過程を評価することができる。

また、多くの海鳥は化学物質を含むプラスチックを摂取し (Kühn and Van Franeker, 2020)、それらが組織に浸透することが確認されている (Yamashita et al., 2011; Tanaka et al., 2013)。そのため、海鳥をバイオインディケーターとして利用することで、彼らの採餌域におけるプラスチックの分布評価が可能にな

る。このような汚染物質の評価・監視やプラスチック分布調査の手法は、GPS ロガーを装着できるさまざまな海鳥に適用可能である。バイオロギングは、汚染物質を摂取した個体を追跡できる唯一の手法であり、行動の変化を通じて時間的影響を評価することが可能である。従来の組織サンプリングや質量分析とバイオロギングを組み合わせることで、海洋汚染物質の分布や時系列変化をより正確に捉えることができ、海洋生物への影響をより深く理解する手がかりとなる。

2.4. 漁業活動

水産資源管理の目標は、漁業資源のバイオマスを健全な水準に維持しながら、最大持続生産量に近い漁獲量を決定することである (O'Farrell and Botsford 2006)。漁業資源の空間分布を時系列的で把握することは、漁獲効率を高め、自然死亡率を算出する上で重要である (McGowan et al. 2017)。

バイオロギングは、漁業対象種の主な生息地利用、行動圏、回遊経路など動物の基本的な行動を追跡できる理想的な手法である (Crossin et al. 2017)。また、バイオロギングで得られたデータは、漁業資源量や生残率などの推定にも役に立つ (Lowerre-Barbieri et al. 2019)。例えば、エビスザメ *Notorhynchus cepedianus* を対象とした研究では、個体識別標識再捕法 (capture-mark-recapture) にバイオロギングデータを組み込むことで、生存率および個体数推定の精度が向上した (Dudgeon et al. 2015)。水産資源管理には、卵、稚魚、未成魚、成魚といったライフステージの分布、生息場所、出現時期、および個体数に関する情報が求められる。バイオロギングは、元来動物の生態を調べるために開発された手法であることから、それらの動物の生活史の情報を集めるのに適していることがわかる。実際の応用例としては、北海道・厚岸湾におけるニシン *Clupea pallasii* の産卵回遊時期の記録 (Tomiyasu et al. 2018)、アメリカのメイン湾でのホシガレイ *Pseudopleuronectes americanus* の季節的分布、回遊、産卵行動 (DeCelles and Cadrin 2010)、アメリカのウィラバ湾におけるマスノスケ *Oncorhynchus tshawytscha* 亜成魚の生息地選好 (Semmens 2008)、およびスウェーデン西海岸でのタイセイヨウダラ *Gadus morhua* の産卵場への定着性 (Svedäng et al. 2007) などが挙げられる。また、東京湾に生息するマコガレイ *Pseudopleuronectes yokohamae* は、漁業データを使った研究にお

いて、夏季に水深の深い低水温域に移動すると考えられていたが、バイオロギングによって、一部の個体が浅くて温かい海域に留まることが明らかとなった (Mitamura et al. 2020)。このように、バイオロギングは対象魚種の基礎的行動の解明に加え、漁業現場での違法操業船の摘発にも利用されている。たとえば、AIS (船舶自動識別装置) を意図的に切った違法操業船が、レーダー信号を感知するロガーを装着した海鳥によって発見された (Weimerskirch et al., 2020)。

さらに、漁船やその他の漁業活動も広義のバイオロギングに含めることができる。たとえば、漁船の航行記録を収集する VMS (船舶監視システム) は、漁業活動の場所と範囲を評価する手段となる (Campbell et al., 2014)。実際に、2012 年から 2016 年の間に収集された 22 億件以上の AIS 記録を用いて、7 万隻を超える商業漁船を追跡した研究では、商業漁業が海洋面積の 55% 以上に及んでいることが明らかになった (Kroodsma et al., 2018)。また、位置情報にカメラや魚群探知機からの情報を組み合わせることで、漁獲された魚種やバイオマスの情報を蓄積できる。漁船を移動式の海洋観測プラットフォームと見なすことで、バイオロギングと同様の多様な応用が可能となる。今後は、対象魚種と漁業活動に関するロギングデータが統合されることで、効率的な操業計画や資源管理のための有用な情報が得られると期待される。

2.5. 漁業との競合

混獲、食害、漁具の破損などを含む、海洋高次捕食者と漁業との競合は (Nyhus 2016)、世界的に持続的な懸念事項である (Fjälling 2005; Read 2008; Butler et al. 2011; Heredia-Azuaje et al. 2022; Romero-Tenorio et al. 2022)。バイオロギング手法を用いることで、これらの競合を解決するために有用な情報を提供することができる。バイオロギングを用いた、ゼニガタアザラシ *Phoca vitulina* の定置網利用を調べた研究では、アザラシの定置網の利用頻度や滞在時間、利用時刻には個体差があり、定置網を餌場として利用するのは、一部の個体であることが示されている (Masubuchi et al. 2019)。つまり、この海域におけるアザラシの食害を減らすためには、定置網を利用する特定の個体を対象に物理的に驚かすなどの取り組みが、効果的な対策となることがわかる。高緯度の摂餌海域でのザトウクジラ *Megaptera novaeangliae* は、漁船の周

りに集まり、漁船からこぼれ落ちた魚を拾い食うことが、バイオリギングから明らかとなった (Iwata et al. 2024). このクジラの拾い食い行動は、動物および人間の双方にとって混獲、漁具の損壊、漁船との衝突といった潜在的风险をもたらす。現在のところ、クジラを漁船から遠ざける有効な忌避措置は存在しないが、投棄魚を減らしクジラを漁船に近づけさせない対策が推奨される。

混獲は、ウミガメ類の個体数減少を引き起こす要因の一つとなっており、ウミガメ回避装置 (Turtle Excluder Devices: TEDs) を用いる対策が数十年前から推奨されている (Crouse et al. 1987). TED の有効性を評価するために、ウミガメに行動記録計を装着した研究では、アカウミガメとアオウミガメの行動の違いにより、TEDs が機能しない可能性が示され、海域ごとの優占種に応じて TEDs を設計することが提案されている (Shiode et al. 2021). また、バイオリギングにより得られたウミガメの分布は、海洋物理環境と関連していることが明らかとなっている (Polovina et al. 2000, Polovina et al. 2004). このため、ウミガメが好む海洋環境の特徴を理解することは、空間的に明示的な混獲削減政策の策定に貢献すると考えられる (Lewison et al., 2004). 混獲は、ウミガメ類だけではなく海生哺乳類、海鳥類、大型魚類などにおいても個体数減少の原因となっている。したがって、動物が好む海洋環境の特徴を明らかにすることは、行動データへのアクセスさえ確保されれば、複数の海洋頂点捕食者に関わる混獲問題への低コストな対処手段となり得る。バイオリギングは、海洋生態系における生態的・社会経済的ニーズに応え、漁業活動および生態系管理するための科学的な知見を提供する手段となる。

陸域においても、バイオリギングは野生動物の環境利用を解明するために用いられており、インドのヒョウ *Panthera pardus* やアメリカのアメリカグマ *Ursus americanus* の例では、人間との環境的競合を回避する手法の開発に寄与している (Odden et al. 2014, Lewis et al. 2015). 一方、海洋環境においては、動物の分布、密度、個体数、行動が時間階層 (数時間～数年) に応じて変化するため、空間的・時間的な分離がより重要となる。このような空間分布の違いを理解するには、バイオリギングを通じて得られるラグランジュ的な動物の情報が必要不可欠である。このように海洋動物と漁業との競合を回避するためには、従

来の海洋空間計画 (marine spatial planning) による空間分離ではなく、海洋時空間計画 (marine spatiotemporal planning) の導入が求められる。

2.6. 保護と保全

海洋には、船舶のエンジン音、軍用ソナー、杭打ち作業音など、さまざまな人為的な騒音が満ちており、これらは海洋動物に影響を与えている (Hatch et al. 2016). 特に鯨類は音を使ってコミュニケーションをとるため、人為的な騒音の影響を受けやすい (Miller et al. 2000, Nowacek et al. 2007, Forney et al. 2017). アメリカ海洋大気庁 (NOAA) は、海生哺乳類の内耳への外傷 (聴覚閾値の永続的な低下: PTS) に基づく曝露基準を定めている (National Marine Fisheries Service, 2018) が、騒音曝露レベルと種ごとの行動応答との関係は複雑なことが多い。したがって、人為的な騒音が動物に与える影響の評価にあたっては、生理的損傷だけではなく、行動にも注目することが重要である。バイオリギング手法を用いて、動物の行動とその周囲の音環境を同時に記録することで、水中騒音が動物に与える影響を評価できる。例えば、船の運航音がアカボウクジラ *Ziphius cavirostris* の採餌行動に影響を与えることが明らかとなった (Soto et al. 2006). また、軍用ソナー音はシロナガスクジラ *Balaenoptera musculus* の採餌行動に影響を及ぼすことが示されている (Goldbogen et al. 2013). キタトックリクジラ *Hyperoodon ampullatus* は、音源からの距離よりも音圧に強く反応する (Wensveen et al. 2019). 一方で、マッコウクジラ *Physeter macrocephalus* はソナー音よりもシャチ *Orcinus orca* の鳴音に強く反応する (Curé et al. 2016). バイオリギングを活用することで、どのような音が動物に影響を与えるのかを特定し、バブルカーテンの利用 (Würsig et al. 2000) やプロペラの騒音を軽減するシステム (Smith and Rigby 2022) など、人為的な騒音の影響を軽減する対策の検討に役立てることができる。

近年では、需要が増加している洋上風力発電が、動物に与える影響を評価するためにもバイオリギングが活用されている。例えば、GPS ロガーにより得られたシロカツオドリ *Morus bassanus* の 3 次元飛行データをもとに、風力タービンのブレードを海面から 30 m 以上に設置することで鳥との衝突リスクを低減できるとの提案がなされた (Cleasby et al. 2015). また、GPS ロガーから得られたゼニガ

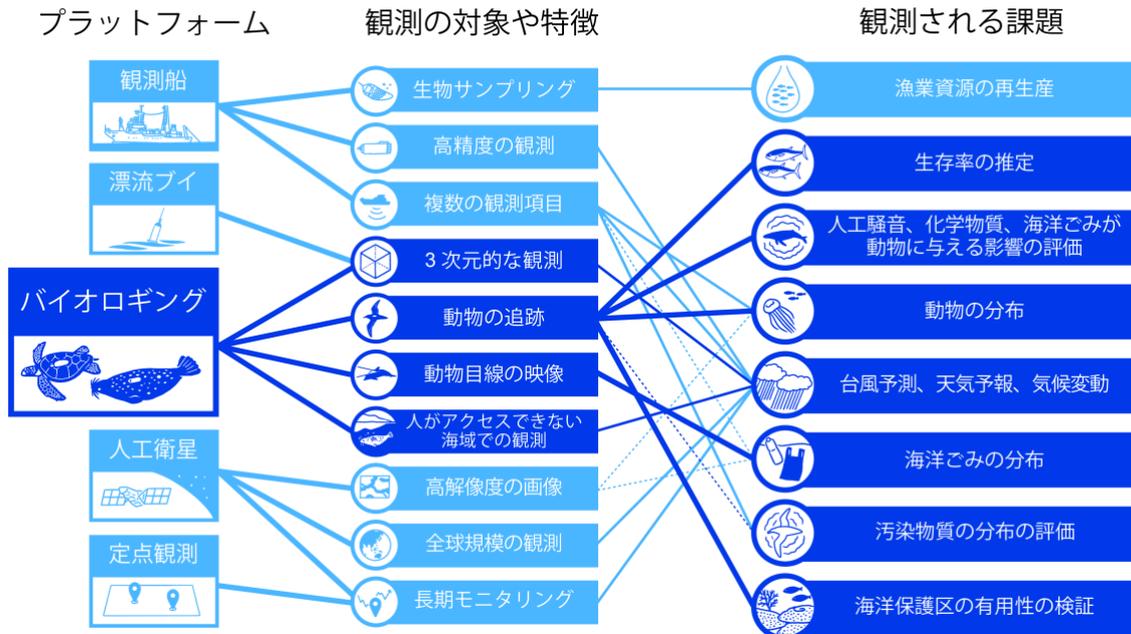


図1 海洋観測プラットフォーム、観測の対象や特徴、観測される課題の関係を示した概念図。“プラットフォーム”から“観測の対象や特徴”の線の太さは一定であり、各プラットフォームに適切なセンサーが搭載されていれば観測が可能であることを示している。一方、“観測の対象や特徴”から“観測される課題”への矢印の太さは、各観測対象の貢献度に応じて変化している。観測される課題の多くは、複数の観測対象の測定を必要とするため、単一の海洋観測プラットフォームだけでは対応が難しい。バイオリギングは、ラグランジュ型プラットフォームとしての特性と自律的な移動能力を持ち、他のプラットフォームではカバーできない観測対象を提供できる点が特徴である。

タアザラシの利用海域情報をもとに、洋上風力発電所の建設に伴う杭打ち騒音の影響が評価され、杭打ちの音がアザラシの聴覚損傷の閾値を超える可能性があるとして予測され、杭打ちのガイドラインを策定する政策立案者へ重要な情報を提供している (Hastie et al. 2015)。このように、洋上風力産業の持続的発展と環境保全の両立には、建設および運用による野生動物への影響評価が不可欠である。

海洋高次捕食者は、生態系の上位に位置し、海洋環境の変化に敏感であることから、生態系の健全性を示す指標となる。生態系の劣化は、頂点捕食者の絶滅から始まることが多い (Turvey et al. 2007)。したがって、重要な生息域を特定することは、海洋生態系のモニタリングにおいて重要である。Tagging of Pacific Predators (TOPP) プロジェクトでは、23種 1791 個体の海洋高次捕食者にタグを装着し、カリフォルニア海流の大規模海洋生態系および北太平洋遷移帯が重要な生息域であることが明らかとなった (Block et al. 2011)。この研究では、高次捕食者にとって重要な海域において、資源管理が不十分であれば、個体数の減少を招き、生物多様性が失われると警鐘を

鳴らしている (Block et al. 2011)。また、生物多様性を維持するために設置された海洋保護区 (MPA) の有効性の検証にもバイオリギングが活発に利用されている。世界最大の海洋保護区であるロス海で実施された研究では、17種・4000 個体以上の海生哺乳類や海鳥類の生息域と、設置された MPA とが一致していたことが明らかとなり、現在推奨されている海洋保護区が有用であることが示された (Hindell et al. 2020)。さらに、British Indian Ocean Territory Marine Protected Area において、ナンヨウマンタ *Mobula alfredi* の水平移動に関する研究から、MPA の規模がマンタの保護に寄与していることが示唆された (Andrzejaczek et al. 2020)。高次捕食者の利用海域のホットスポットの特定や海洋保護区の有用性の検証には、実際の動物の動きを追跡するバイオリギングは、他のプラットフォームでは実施できない、最も効果的なアプローチであることがわかる。

3. データアーカイブ

本研究では、バイオリギングが海洋環境におけるさまざまな喫緊の課題に対処して

いる証拠をレビューした (図 1)。本研究で紹介されたバイオリギングの応用は、他の手法と組み合わせることで海洋問題の解決に大きな可能性を示している。今後、学際的な分析を行うためには、データのアーカイブと包括的な解析が求められる。バイオリギングによって得られるデータはデジタルで保存されるため、アーカイブに適している点もバイオリギング手法の利点である。

「Internet of Animals (IoA, 動物のインターネット)」という用語は、「Internet of Things (モノのインターネット)」から派生したものであり、近年注目を集めている (Kays and Wikelski, 2023)。バイオリギング装置を取り付けることができれば、あらゆる動物がデータ収集のプラットフォームとなり得る。そのプラットフォームは、沖合や水中、あるいは人間の立ち入りが必要な場所を移動することもある。IoA では、ネットワーク接続を通じてバイオリギング機器を装着した動物から、リアルタイムデータやオンラインデータベースに蓄積されたデータなど、さまざまな情報を取得することができる。IoA の発展には、データへのオープンアクセスが重要である。
Movebank

(<https://www.movebank.org/cms/movebank-main>) は、世界最大のバイオリギングデータベースであり、動物の水平移動軌跡を包括的に収集しており、大陸間を移動する渡り鳥の移動ルートなど、ラグランジュ型のビッグデータを蓄積することで、オイラー的な可視化に成功している (Kays et al., 2020)。しかし、深度や加速度、音響、映像などの関連データの共有は、あまり進んでいない。データを有効に活用するには、動物の定性的な行動情報を定量的な物理情報へと変換する必要がある。さまざまなパラメータを登録可能なデータベース、Biologging Intelligent Platform (BiP: <https://www.bip-earth.com/>) が数年前に開発され、BiP には海鳥類の行動データを物理的な環境データに変換する解析機能が搭載されている (Sato et al. 2025)。現在使用されているバイオリギング機器は種類も仕様も多様であり、記録形式、測定項目、サンプリング間隔、単位、データの標準化に関して課題が存在する。既存のデータベース間での協力関係を構築し、データ共有のためのシステムを確立することが、IoA の推進には必要である。これが実現されれば、学際的な研究がさらに進展し、データの価値や活用の幅も大きく広がるだろう。

4. 政策提言

「政策 (Policy)」とは、「ものごとの処理における慎重さや知恵」(Merriam-Webster) や「特定の状況において何をすべきかに関する一連の考えや計画で、グループ、企業組織、政府、または政党によって正式に合意されたもの」(Cambridge Dictionary) と定義されている。公共の合意を得るためには、根拠に基づいたステークホルダー間の合意が必要であり、政策には課題を解決するための管理戦略が伴うべきである。

海洋では、人の立ち入りが困難な海域や季節によってデータ取得が制限され、根拠に基づく政策立案が難しい。バイオリギングは、これまで取得が難しかった新たなタイプの海洋データの取得を可能にし、従来のデータと組み合わせることで多様な海洋課題の解決に貢献できる。本研究では、動物搭載型 (ラグランジュ型) とオイラー型の手法によるデータの利用可能性に応じて、環境問題を 3 つのカテゴリーに分類し、カテゴリーごとに、政策立案のための新たな根拠を提供する手法としてバイオリギングを適用した事例を紹介する。今後の海洋政策の形成に向けて、バイオリギングを活用した以下の戦略を提案する。

ケース 1: 動物搭載型 (ラグランジュ型) データはあるが、オイラー型データがない場合

バイオリギングは人為的影響の評価に役立つ。人為的活動の影響を受けている海域でバイオリギングデータがすでに得られている場合、そのデータと洋上風力発電所からの騒音分布、深海鉱物資源開発による採掘活動、極域の海水分布図、海面水温などの影響因子に関するオイラー的マッピングデータと組み合わせることで、重要な知見が得られる。これらの影響因子は、音響伝播モデル、スキヤニングソナー、衛星リモートセンシングを用いて地図上に可視化可能である。バイオリギングデータ単独では個体の行動変化の因果関係を明らかにすることはできないが、位置情報を含むバイオリギングデータと影響因子の地図を比較分析することで、因果関係の特定に有効な結果が得られる。

ケース 2: 動物搭載型 (ラグランジュ型) データはないが、オイラー型データがある場合

Global Fishing Watch (<https://globalfishingwatch.org/>) は、漁業の操業

努力に関するデータを提供しており、貴重なオイラー型データとして活用できる。もし捕食者や餌生物のバイオリギングデータが利用可能であれば、漁業資源の採取がそれらの分布にどのような影響を与えるかを評価できる。環境要因によっては、動物の繁殖成功率の低下や生息地の放棄が起こる。これらの影響の蓄積を個体レベルで評価するには、ラグランジュ型のアプローチが必要となる。さらに、オイラー型データは影響因子の空間的な可視化を可能にするため、バイオリギング情報と組み合わせることで、動物の移動を考慮しつつ、これらの影響を最小限に抑えるための戦略策定が可能となる（例えば、化学汚染物質の分布地図情報だけをもとにすると、単純に汚染濃度が高い海域の浄化に力を入れることになるが、動物の移動情報が加わると、そこそこ汚染濃度が高く動物がよく利用する海域があるなら、その海域を優占して浄化する、などの戦略策定ができる）。対象種の選定は社会的なニーズに大きく左右され、絶滅の危機にある種、主要な漁業資源となる種、地域生態系におけるキーストーン種などが含まれる。対象種が十分に大きく、バイオリギング機器の装着および回収手順が確立されている場合には、バイオリギングによって個体に対するさまざまな環境要因や人為的要因の影響に関する重要な知見を得ることが可能となる。

ケース 3：ラグランジュ型／オイラー型データの両方がある場合

このシナリオは、今後多くの政府によるオープンデータ政策の推進により、ますます一般的になると考えられる。しかし、単にデータを蓄積するだけでは課題解決にはつながらない。学際的な分析が不可欠である。そのためには、特定の分野に限定された研究ではなく、課題志向型の研究が求められる。複数のデータベースを活用し、有効な組み合わせを見出すことが科学者の役割である。人工知能によるビッグデータ解析は、こうした課題を解決するための有効な手段となる。さらに、科学的データと知識を用いて解決策を導き出すことに特化した新しいタイプの人材の育成も重要である。

5. まとめ

バイオリギングは、海洋温暖化、海洋汚染、海洋動物と漁業の衝突、海洋保護区（MPA）の保全といった差し迫った海洋環境問題に取り組むための有効な手法である。特

に、従来の海洋観測手法と統合することで、その価値がさらに高まる。バイオリギングデータが拡充するにつれて、動物の移動や環境との相互作用に対する理解が深まるだけでなく、根拠に基づく政策立案の強固な土台にもなる。バイオリギングの可能性を最大限に引き出すには、グローバルな協力とデータ共有をさらに推進し、種・地域・環境文脈を超えたデータの統合が必要となる。このようにして、バイオリギングは海洋生態系の長期的な持続可能性に関する重要な知見を提供し、科学的研究と効果的な保全政策の実施とのギャップを埋める役割を果たす。人間による海洋への圧力が高まり続ける中で、バイオリギングは、人間活動と海洋生態系の健全性を両立させるための重要な道筋を示している。

引用文献

- Abraham, J. P., Baringer, M., Bindoff, N. L., Boyer, T., Cheng, L. J., Church, J. A. et al., 2013. A review of global ocean temperature observations: Implications for ocean heat content estimates and climate change. *Rev. Geophys.*, 51 (3), 450-483. <https://doi.org/10.1002/rog.20022>
- Andrzejaczek, S., Chapple, T. K., Curnick, D. J., Carlisle, A. B., Castleton, M., Jacoby, D. M. et al., 2020. Individual variation in residency and regional movements of reef manta rays *Mobula alfredi* in a large marine protected area. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 639, 137-153. <https://doi.org/10.3354/meps13270>
- Baggeroer, A. B., Birdsall, T. G., Clark, C., Colosi, J. A., Cornuelle, B. D., Costa, D. et al., 1998. Ocean climate change: Comparison of acoustic tomography, satellite altimetry, and modeling. *Science*, 281 (5381), 1327-1332. <https://doi.org/10.1126/science.281.5381.1327>
- Barnes, D. K. A., Milner, P., 2005. Drifting plastic and its consequences for sessile organism dispersal in the Atlantic Ocean. *Mar. Biol.*, 146, 815-825. <https://doi.org/10.1007/s00227-004-1474-8>
- Barnes, D. K., Galgani, F., Thompson, R. C., Barlaz, M., 2009. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.*, 364 (1526), 1985-1998. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>

本原稿は、Water Biology and Security 誌からの許可を得て、以下の論文を和訳したものである。

- Iwata, T., & Akamatsu, T. (2025). Biologging as a potential platform for resolving ocean environmental issues and threats: Towards the development of the Internet of Animals. *Water Biology and Security*, 100383. <https://doi.org/10.1016/j.watbs.2025.100383>
- Biuw, M., Boehme, L., Guinet, C., Hindell, M., Costa, D., Charrassin, J. B. et al., 2007. Variations in behavior and condition of a Southern Ocean top predator in relation to in situ oceanographic conditions. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 104 (34), 13705-13710. <https://doi.org/10.1073/pnas.0701121104>
- Block, B. A., Jonsen, I. D., Jorgensen, S. J., Winship, A. J., Shaffer, S. A., Bograd, S. J. et al., 2011. Tracking apex marine predator movements in a dynamic ocean. *Nature*, 475 (7354), 86-90. <https://doi.org/10.1038/nature10082>
- 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. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 18 (11), 1882-1893. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2001\)018<1882:APESUI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2001)018<1882:APESUI>2.0.CO;2)
- Bousquet, O., Dalleau, M., Bocquet, M., Gaspar, P., Bielli, S., Ciccione, S. et al, 2020. Sea turtles for ocean research and monitoring: overview and initial results of the STORM project in the Southwest Indian Ocean. *Front. Mar. Sci.*, 7, 594080. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.594080>
- 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, 1-14.
- Butler, J. R., Middlemas, S. J., Graham, I. M., Harris, R. N., 2011. Perceptions and costs of seal impacts on Atlantic salmon fisheries in the Moray Firth, Scotland: Implications for the adaptive co-management of seal-fishery conflict. *Mar. Policy*, 35 (3), 317-323. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2010.10.011>
- Campbell, M. S., Stehfest, K. M., Votier, S. C., Hall-Spencer, J. M., 2014. Mapping fisheries for marine spatial planning: Gear-specific vessel monitoring system (VMS), marine conservation and offshore renewable energy. *Mar. Policy*, 45, 293-300. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2013.09.015>
- Charrassin, J. B., Hindell, M., Rintoul, S. R., Roquet, F., Sokolov, S., Biuw, M. et al., 2008. Southern Ocean frontal structure and sea-ice formation rates revealed by elephant seals. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 105 (33), 11634-11639. <https://doi.org/10.1073/pnas.080079010>
- Chiba, S., Saito, H., Fletcher, R., Yogi, T., Kayo, M., Miyagi, S. et al., 2018. Human footprint in the abyss: 30 year records of deep-sea plastic debris. *Mar. Policy*, 96, 204-212. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2018.03.022>
- Cleasby, I. R., Wakefield, E. D., Bearhop, S., Bodey, T. W., Votier, S. C., Hamer, K. C., 2015. Three-dimensional tracking of a wide-ranging marine predator: flight heights and vulnerability to offshore wind farms. *J. Appl. Ecol.*, 52 (6), 1474-1482. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12529>
- Crossin, G. T., Heupel, M. R., Holbrook, C. M., Hussey, N. E., Lowerre-Barbieri, S. K., Nguyen, V. M. et al., 2017. Acoustic telemetry and fisheries management. *Ecol. Appl.*, 27 (4), 1031-1049. <https://doi.org/10.1002/eap.1533>
- Crouse, D. T., Crowder, L. B., Caswell, H., 1987. A stage-based population model for loggerhead sea turtles and implications for conservation. *Ecology*, 68 (5), 1412-1423. <https://doi.org/10.2307/1939225>
- Curé, C., Isojunno, S., Visser, F., Wensveen, P. J., Sivle, L. D., Kvadsheim, P. H. et al., 2016. Biological significance of sperm whale responses to sonar: comparison with anti-predator responses. *Endang. Species. Res.*, 31, 89-102. <https://doi.org/10.3354/esr00748>
- DeCelles, G. R., Cadrin, S. X., 2010. Movement patterns of winter flounder (*Pseudopleuronectes americanus*) in the southern Gulf of Maine: observations with the use of passive acoustic telemetry. *Fish. Bull.*, 108, 408-419.
- 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. *Front. Mar. Sci.*, 6, 719. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00719>
- Domingues, R., Kuwano-Yoshida, A., Chardon-Maldonado, P., Todd, R. E., Halliwell, G., Kim, H. S. et al., 2019. Ocean observations in support of studies and forecasts of tropical and extratropical cyclones. *Front. Mar. Sci.*, 6, 446. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00446>

本原稿は、Water Biology and Security 誌からの許可を得て、以下の論文を和訳したものである。

- Iwata, T., & Akamatsu, T. (2025). Biologging as a potential platform for resolving ocean environmental issues and threats: Towards the development of the Internet of Animals. *Water Biology and Security*, 100383. <https://doi.org/10.1016/j.watbs.2025.100383>
- Dudgeon, C. L., Pollock, K. H., Braccini, J. M., Semmens, J. M., Barnett, A., 2015. Integrating acoustic telemetry into mark-recapture models to improve the precision of apparent survival and abundance estimates. *Oecologia*, 178, 761-772. <https://doi.org/10.1007/s00442-015-3280-z>
- Eriksen, M., Lebreton, L. C., Carson, H. S., Thiel, M., Moore, C. J., Borerro, J. C. et al., 2014. Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea. *PloS One*, 9 (12), e111913. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>
- 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.
- Fjälling, A., 2005. The estimation of hidden seal-inflicted losses in the Baltic Sea set-trap salmon fisheries. *ICES J. Mar. Sci.*, 62 (8), 1630-1635. <https://doi.org/10.1016/j.icesjms.2005.02.015>
- Forney, K. A., Southall, B. L., Slooten, E., Dawson, S., Read, A. J., Baird, R. W., Brownell Jr, R. L., 2017. Nowhere to go: noise impact assessments for marine mammal populations with high site fidelity. *Endang. Species. Res.*, 32, 391-413. <https://doi.org/10.3354/esr00820>
- Fukuoka, T., Yamane, M., Kinoshita, C., Narazaki, T., Marshall, G. J., Abernathy, K. J. et al., 2016. The feeding habit of sea turtles influences their reaction to artificial marine debris. *Sci. Rep.*, 6 (1), 28015. <https://doi.org/10.1038/srep28015>
- Galgani, F., Souplet, A., Cadiou, Y., 1996. Accumulation of debris on the deep sea floor off the French Mediterranean coast. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 142, 225-234. <https://doi.org/10.3354/meps142225>
- Gall, S. C., Thompson, R. C., 2015. The impact of debris on marine life. *Mar. Pollut. Bull.*, 92 (1-2), 170-179. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.12.041>
- Goerke, H., Weber, K., Bornemann, H., Ramdohr, S., Plötz, J., 2004. Increasing levels and biomagnification of persistent organic pollutants (POPs) in Antarctic biota. *Mar. Pollut. Bull.*, 48 (3-4), 295-302. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2003.08.004>
- Goldbogen, J. A., Southall, B. L., DeRuiter, S. L., Calambokidis, J., Friedlaender, A. S., Hazen, E. L. et al., 2013. Blue whales respond to simulated mid-frequency military sonar. *Proc. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.*, 280 (1765), 20130657. <https://doi.org/10.1098/rspb.2013.0657>
- Gregory, M. R., 2009. Environmental implications of plastic debris in marine settings - entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.*, 364 (1526), 2013-2025. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0265>
- Hammer, S., Nager, R. G., Alonso, S., McGill, R. A., Furness, R. W., Dam, M., 2016. Legacy pollutants are declining in Great Skuas (*Stercorarius skua*) but remain higher in Faroe Islands than in Scotland. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 97, 184-190. <https://doi.org/10.1007/s00128-016-1856-x>
- Harcourt, R., Sequeira, A. M., Zhang, X., Roquet, F., Komatsu, K., Heupel, M. et al., 2019. Animal-borne telemetry: an integral component of the ocean observing toolkit. *Front. Mar. Sci.*, 6, 326. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00326>
- Hastie, G. D., Russell, D. J., McConnell, B., Moss, S., Thompson, D., Janik, V. M., 2015. Sound exposure in harbour seals during the installation of an offshore wind farm: predictions of auditory damage. *J. Appl. Ecol.*, 52 (3), 631-640. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12403>
- Hatch, L. T., Wahle, C. M., Gedamke, J., Harrison, J., Laws, B., Moore, S. E. et al., 2016. Can you hear me here? Managing acoustic habitat in US waters. *Endang. Species. Res.*, 30, 171-186. <https://doi.org/10.3354/esr00722>
- Haug, T., Bøgstad, B., Chierici, M., Gjørseter, H., Hallfredsson, E. H., Høines, Å. S. et al., 2017. Future harvest of living resources in the Arctic Ocean north of the Nordic and Barents Seas: A review of possibilities and constraints. *Fish. Res.*, 188, 38-57. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2016.12.002>

- Iwata, T., & Akamatsu, T. (2025). Biologging as a potential platform for resolving ocean environmental issues and threats: Towards the development of the Internet of Animals. *Water Biology and Security*, 100383. <https://doi.org/10.1016/j.watbs.2025.100383>
- Hays, G. C., Bailey, H., Bograd, S. J., Bowen, W. D., Campagna, C., Carmichael, R. H. et al., 2019. Translating marine animal tracking data into conservation policy and management. *Trends Ecol. Evol.*, 34 (5), 459-473. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2019.01.009>
- Heredia-Azuaje, H., Niklitschek, E. J., Sepúlveda, M., 2022. Pinnipeds and salmon farming: Threats, conflicts and challenges to co-existence after 50 years of industrial growth and expansion. *Rev. Aquacul.*, 14 (2), 528-546. <https://doi.org/10.1111/raq.12611>
- Hindell, M. A., Reisinger, R. R., Ropert-Coudert, Y., Hückstädt, L. A., Trathan, P. N., Bornemann, H. et al., 2020. Tracking of marine predators to protect Southern Ocean ecosystems. *Nature*, 580 (7801), 87-92. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2126-y>
- Ito, A., Yamashita, R., Takada, H., Yamamoto, T., Shiomi, K., Zavalaga, C. et al., 2013. Contaminants in tracked seabirds showing regional patterns of marine pollution. *Environ. Sci. Tech.*, 47 (14), 7862-7867. <https://doi.org/10.1021/es4014773>
- Iwata, T., Aoki, K., Miller, P. J., Biuw, M., Williamson, M. J., Sato, K., 2024. Non-lunge feeding behaviour of humpback whales associated with fishing boats in Norway. *Ethology*, 130 (2), e13419. <https://doi.org/10.1111/eth.13419>
- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A. et al., 2015. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347 (6223), 768-771. <https://doi.org/10.1126/science.1260352>
- Jaspers, V. L. B., Covaci, A., Van den Steen, E., Eens, M., 2007. Is external contamination with organic pollutants important for concentrations measured in bird feathers? *Environ. Int.*, 33 (6), 766-772. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2007.02.013>
- Jog, K., Sutaria, D., Diedrich, A., Grech, A., Marsh, H., 2022. Marine mammal interactions with fisheries: review of research and management trends across commercial and small-scale fisheries. *Front. Mar. Sci.*, 9, 758013. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.758013>
- Joint, I., Groom, S. B., 2000. Estimation of phytoplankton production from space: current status and future potential of satellite remote sensing. *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.*, 250 (1-2), 233-255. [https://doi.org/10.1016/S0022-0981\(00\)00199-4](https://doi.org/10.1016/S0022-0981(00)00199-4)
- Kays, R., McShea, W. J., Wikelski, M., 2020. Born-digital biodiversity data: Millions and billions. *Divers. Distrib.*, 26 (5), 644-648. <https://doi.org/10.1111/ddi.12993>
- Kays, R., Wikelski, M., 2023. The Internet of Animals: what it is, what it could be. *Trends Ecol. Evol.*, 38 (9), 859-856. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2023.04.007>
- Kovacs, K. M., Lydersen, C., Overland, J. E., Moore, S. E., 2011. Impacts of changing sea-ice conditions on Arctic marine mammals. *Mar. Biodivers.*, 41, 181-194. <https://doi.org/10.1007/s12526-010-0061-0>
- Kroodsma, D. A., Mayorga, J., Hochberg, T., Miller, N. A., Boerder, K., Ferretti, F. et al., 2018. Tracking the global footprint of fisheries. *Science*, 359 (6378), 904-908. <https://doi.org/10.1126/science.aao5646>
- Kühn, S., Van Franeker, J. A., 2020. Quantitative overview of marine debris ingested by marine megafauna. *Mar. Pollut. Bull.*, 151, 110858. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110858>
- Lavers, J. L., Bond, A. L., Hutton, I., 2014. Plastic ingestion by Flesh-footed Shearwaters (*Puffinus carneipes*): Implications for fledgling body condition and the accumulation of plastic-derived chemicals. *Environ. Pollut.*, 187, 124-129. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.12.020>
- Lewis, D. L., Baruch-Mordo, S., Wilson, K. R., Breck, S. W., Mao, J. S., Broderick, J., 2015. Foraging ecology of black bears in urban environments: guidance for human-bear conflict mitigation. *Ecosphere*, 6 (8), 1-18. <https://doi.org/10.1890/ES15-00137.1>
- Lewison, R. L., Crowder, L. B., Read, A. J., Freeman, S. A., 2004. Understanding impacts of fisheries bycatch on marine megafauna. *Trends Ecol. Evol.*, 19 (11), 598-604. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2004.09.004>

本原稿は、Water Biology and Security 誌からの許可を得て、以下の論文を和訳したものである。

- Iwata, T., & Akamatsu, T. (2025). Biologging as a potential platform for resolving ocean environmental issues and threats: Towards the development of the Internet of Animals. *Water Biology and Security*, 100383. <https://doi.org/10.1016/j.watbs.2025.100383>
- Lowerre-Barbieri, S. K., Kays, R., Thorson, J. T., Wikelski, M., 2019. The ocean's movescape: fisheries management in the bio-logging decade (2018–2028). *ICES J. Mar. Sci.*, 76 (2), 477-488. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsy211>
- 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. *Mar. Mammal Sci.*, 35 (1), 58-71. <https://doi.org/10.1111/mms.12514>
- McGowan, J., Beger, M., Lewison, R. L., Harcourt, R., Campbell, H., Priest, M. et al., 2017. Integrating research using animal-borne telemetry with the needs of conservation management. *J. Appl. Ecol.*, 54 (2), 423-429. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12755>
- Merchant, C. J., Embury, O., Bulgin, C. E., Block, T., Corlett, G. K., Fiedler, E. et al., 2019. Satellite-based time-series of sea-surface temperature since 1981 for climate applications. *Sci. Data*, 6 (1), 223. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0236-x>
- Miller, P. J., Biassoni, N., Samuels, A., Tyack, P. L., 2000. Whale songs lengthen in response to sonar. *Nature*, 405 (6789), 903-903. <https://doi.org/10.1038/35016148>
- Mitamura, H., Arai, N., Hori, M., Uchida, K., Kajiyama, M., Ishii, M., 2020. Occurrence of a temperate coastal flatfish, the marbled flounder *Pseudopleuronectes yokohamae*, at high water temperatures in a shallow bay in summer detected by acoustic telemetry. *Fish. Sci.*, 86, 77-85. <https://doi.org/10.1007/s12562-019-01384-2>
- Miyazawa, Y., Guo, X., Varlamov, S. M., Miyama, T., Yoda, K., Sato, K. et al., 2015. Assimilation of the seabird and ship drift data in the north-eastern sea of Japan into an operational ocean nowcast/forecast system. *Sci. Rep.*, 5 (1), 17672. <https://doi.org/10.1038/srep17672>
- 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 Dyn.*, 69, 267-282. <https://doi.org/10.1007/s10236-018-1238-5>
- Monirith, I., Ueno, D., Takahashi, S., Nakata, H., Sudaryanto, A., Subramanian, A. et al., 2003. Asia-Pacific mussel watch: monitoring contamination of persistent organochlorine compounds in coastal waters of Asian countries. *Mar. Pollut. Bull.*, 46 (3), 281-300. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00400-9](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00400-9)
- 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. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066043>
- 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. *Mar. Biol.*, 162, 1251-1263. <https://doi.org/10.1007/s00227-015-2666-0>
- Northridge, S. P., 1991. Driftnet fisheries and their impacts on non-target species: a world wide review (No. 320-321). FAO fisheries technical paper.
- National Marine Fisheries Service, 2018. 2018 revision to: Technical guidance for assessing the effects of anthropogenic sound on marine mammal hearing (version 2.0): Underwater thresholds for onset of permanent and temporary threshold shifts.
- Nowacek, D. P., Thorne, L. H., Johnston, D. W., Tyack, P. L., 2007. Responses of cetaceans to anthropogenic noise. *Mammal Rev.*, 37 (2), 81-115. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2907.2007.00104.x>
- Nyhus, P. J., 2016. Human-wildlife conflict and coexistence. *Annu. Rev. Env. Resour.*, 41, 143-171. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-110615-085634>
- Odden, M., Athreya, V., Rattan, S., Linnell, J. D., 2014. Adaptable neighbours: movement patterns of GPS-collared leopards in human dominated landscapes in India. *PLoS One*, 9 (11), e112044. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0112044>
- O'Farrell, M. R., Botsford, L. W., 2006. The fisheries management implications of maternal-age-dependent larval survival. *Can. J.*

- Iwata, T., & Akamatsu, T. (2025). Biologging as a potential platform for resolving ocean environmental issues and threats: Towards the development of the Internet of Animals. *Water Biology and Security*, 100383. <https://doi.org/10.1016/j.watbs.2025.100383>
- Fish. Aquat. Sci., 63, 2249-2258.
<https://doi.org/10.1139/f06-130>
- Ohshima, K. I., Fukamachi, Y., Williams, G. D., Nihashi, S., Roquet, F., Kitade, Y. et al., 2013. Antarctic Bottom Water production by intense sea-ice formation in the Cape Darnley polynya. *Nat. Geosci.*, 6 (3), 235-240.
<https://doi.org/10.1038/ngeo1738>
- Pacyna-Kuchta, A. D., 2023. What should we know when choosing feather, blood, egg or preen oil as biological samples for contaminants detection? A non-lethal approach to bird sampling for PCBs, OCPs, PBDEs and PFASs. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, 53(5), 625-649.
<https://doi.org/10.1080/10643389.2022.2077077>
- Pauly, D., Zeller, D., 2016. Catch reconstructions reveal that global marine fisheries catches are higher than reported and declining. *Nat. Commun.*, 7 (1), 10244.
<https://doi.org/10.1038/ncomms10244>
- 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. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 20 (12), 1869-1879. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2003\)020<1869:QSCWNB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2003)020<1869:QSCWNB>2.0.CO;2)
- Pierce, K. E., Harris, R. J., Larned, L. S., Pokras, M. A., 2004. Obstruction and starvation associated with plastic ingestion in a Northern Gannet *Morus bassanus* and a Greater Shearwater *Puffinus gravis*. *Mar. Ornithol.*, 32, 187-189.
- Polovina, J. J., Kobayashi, D. R., Parker, D. M., Seki, M. P., Balazs, G. H., 2000. Turtles on the edge: movement of loggerhead turtles (*Caretta caretta*) along oceanic fronts, spanning longline fishing grounds in the central North Pacific, 1997–1998. *Fish. Oceanogr.*, 9 (1), 71-82. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2419.2000.00123.x>
- Polovina, J. J., Balazs, G. H., Howell, E. A., Parker, D. M., Seki, M. P., Dutton, P. H., 2004. Forage and migration habitat of loggerhead (*Caretta caretta*) and olive ridley (*Lepidochelys olivacea*) sea turtles in the central North Pacific Ocean. *Fish. Oceanogr.*, 13 (1), 36-51. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2419.2003.00270.x>
- Read, A. J., 2008. The looming crisis: interactions between marine mammals and fisheries. *J. Mammal.*, 89 (3), 541-548.
<https://doi.org/10.1644/07-MAMM-S-315R1.1>
- Roemmich, D., Johnson, G. C., Riser, S., Davis, R., Gilson, J., Owens, W. B. et al., 2009. The Argo Program: Observing the global ocean with profiling floats. *Oceanogr.*, 22 (2), 34-43.
<https://doi.org/10.5670/oceanogr.2009.36>
- Romero-Tenorio, A., Mendoza-Carranza, M., Valle-Mora, J. F., Delgado-Estrella, A., 2022. Interactions between small-scale fisheries and marine mammals from the perspective of fishers in the Mexican tropical pacific coast. *Mar. Policy*, 138, 104983.
<https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.104983>
- Roscales, J. L., Munoz-Arnanz, J., Gonzalez-Solis, J., Jimenez, B., 2010. Geographical PCB and DDT patterns in shearwaters (*Calonectris* sp.) breeding across the NE Atlantic and the Mediterranean archipelagos. *Environ. Sci. Tech.*, 44 (7), 2328-2334.
<https://doi.org/10.1021/es902994y>
- Rudolph, I., Chiang, G., Galbán-Malagón, C., Mendoza, R., Martinez, M., Gonzalez, C. et al., 2016. Persistent organic pollutants and porphyrins biomarkers in penguin faeces from Kōpaitic Island and Antarctic Peninsula. *Sci. Total Environ.*, 573, 1390-1396.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.091>
- Ryan, P. G., 2018. Entanglement of birds in plastics and other synthetic materials. *Mar. Pollut. Bull.*, 135, 159-164.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.06.057>
- Ryan, P. G., Connell, A. D., Gardner, B. D., 1988. Plastic ingestion and PCBs in seabirds: is there a relationship? *Mar. Pollut. Bull.*, 19 (4), 174-176. [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(88\)90674-1](https://doi.org/10.1016/0025-326X(88)90674-1)
- Ryan, P. G., Moore, C. J., Van Franeker, J. A., Moloney, C. L., 2009. Monitoring the abundance of plastic debris in the marine environment. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.*, 364 (1526), 1999-2012.
<https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0207>

- Iwata, T., & Akamatsu, T. (2025). Biologging as a potential platform for resolving ocean environmental issues and threats: Towards the development of the Internet of Animals. *Water Biology and Security*, 100383. <https://doi.org/10.1016/j.watbs.2025.100383>
- Sato, K., Watanabe, S., Noda, T., Koizumi, T., Yoda, K., Watanabe, Y. Y., et al., 2025. Biologging intelligent Platform (BiP): An integrated and standardized platform for sharing, visualizing, and analyzing biologging data. *Mov. Ecol.*, 13 (1), 23.
- Seminoff, J. A., Jones, T. T., Marshall, G. J., 2006. Underwater behaviour of green turtles monitored with video-time-depth recorders: what's missing from dive profiles? *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 322, 269-280. <https://doi.org/10.3354/meps322269>
- Semmens, B. X., 2008. Acoustically derived fine-scale behaviors of juvenile Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) associated with intertidal benthic habitats in an estuary. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 65 (9), 2053-2062. <https://doi.org/10.1139/F08-107>
- Sequeira, A. M., O'Toole, M., Keates, T. R., McDonnell, L. H., Braun, C. D., Hoenner, X. et al., 2021. A standardisation framework for bio-logging data to advance ecological research and conservation. *Methods Ecol. Evol.*, 12 (6), 996-1007. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13593>
- Shiode, D., Okamoto, J., Shiozawa, M., Uchida, K., Miyamoto, Y., Hu, F., Tokai, T., 2021. Differences in the behavioral characteristics between green and loggerhead turtles in a setnet bycatch simulation. *Fish. Res.*, 242, 106036. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2021.106036>
- Smith, T. A., Rigby, J., 2022. Underwater radiated noise from marine vessels: A review of noise reduction methods and technology. *Ocean Eng.*, 266, 112863. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112863>
- Soto, A. N., Johnson, M., Madsen, P. T., Tyack, P. L., Bocconcelli, A., Fabrizio Borsani, J., 2006. Does intense ship noise disrupt foraging in deep-diving Cuvier's beaked whales (*Ziphius cavirostris*)? *Mar. Mammal Sci.*, 22 (3), 690-699. <https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.2006.00044.x>
- Soykan, C. U., Moore, J. E., Zydalis, R., Crowder, L. B., Safina, C. et al., 2008. Why study bycatch? An introduction to the Theme Section on fisheries bycatch. *Endang. Species Res.*, 5 (2-3), 91-102. <https://doi.org/10.3354/esr00175>
- Svedäng, H., Righton, D., Jonsson, P., 2007. Migratory behaviour of Atlantic cod *Gadus morhua*: natal homing is the prime stock-separating mechanism. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 345, 1-12. <https://doi.org/10.3354/meps07140>
- Tanaka, K., Takada, H., Yamashita, R., Mizukawa, K., Fukuwaka, M. A., Watanuki, Y., 2013. Accumulation of plastic-derived chemicals in tissues of seabirds ingesting marine plastics. *Mar. Pollut. Bull.*, 69 (1-2), 219-222. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.12.010>
- Tanaka, K., Ichikawa, K., Akamatsu, T., Kittiwattanawong, K., Arai, N., Mitamura, H., 2023. Spatiotemporal variations in the acoustic presence of dugongs and vessel traffic around Talibong Island, Thailand: Inputs for local coastal management from passive acoustical aspects. *Ocean Coast. Manag.*, 245, 106810. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106810>
- Tomiyasu, M., Shirakawa, H., Iino, Y., Miyashita, K., 2018. Tracking migration of Pacific herring *Clupea pallasii* in a coastal spawning ground using acoustic telemetry. *Fish. Sci.*, 84, 79-89. <https://doi.org/10.1007/s12562-017-1153-6>
- Turvey, S. T., Pitman, R. L., Taylor, B. L., Barlow, J., Akamatsu, T., Barrett, L. A. et al., 2007. First human-caused extinction of a cetacean species? *Biol. Lett.*, 3 (5), 537-540. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2007.0292>
- Uesaka, L., Goto, Y., Yonehara, Y., Komatsu, K., Naruoka, M., Weimerskirch, H. et al., 2022. Ocean wave observation utilizing motion records of seabirds. *Prog. Oceanogr.*, 200, 102713. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2021.102713>
- Wania, F., Mackay, D., 1996. Tracking the distribution of persistent organic pollutants. *Environ. Sci. Tech.*, 30 (9), 390A-396A. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es962399q>
- Watanabe, Y. Y., Papastamatiou, Y. P., 2023. Biologging and biotelemetry: tools for understanding the lives and environments of marine animals. *Annu. Rev. Anim. Biosci.*, 11,

本原稿は、Water Biology and Security 誌からの許可を得て、以下の論文を和訳したものである。

- Iwata, T., & Akamatsu, T. (2025). Biologging as a potential platform for resolving ocean environmental issues and threats: Towards the development of the Internet of Animals. *Water Biology and Security*, 100383. <https://doi.org/10.1016/j.watbs.2025.100383>
- 247-267. <https://doi.org/10.1146/annurev-animal-050322-073657>
- Watanuki, Y., Yamashita, A., Ishizuka, M., Ikenaka, Y., Nakayama, S. M., Ishii, C. et al., 2016. Feather mercury concentration in streaked shearwaters wintering in separate areas of southeast Asia. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 546, 263-269. <https://doi.org/10.3354/meps11669>
- Weimerskirch, H., Collet, J., Corbeau, A., Pajot, A., Hoarau, F., Marteau, C. et al., 2020. Ocean sentinel albatrosses locate illegal vessels and provide the first estimate of the extent of nondeclared fishing. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 117 (6), 3006-3014. <https://doi.org/10.1073/pnas.1915499117>
- Wensveen, P. J., Isojunno, S., Hansen, R. R., von Benda-Beckmann, A. M., Kleivane, L., Van Ijsselmuide, S. et al., 2019. Northern bottlenose whales in a pristine environment respond strongly to close and distant navy sonar signals. *Proc. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.*, 286 (1899), 20182592. <https://doi.org/10.1098/rspb.2018.2592>
- Whitt, C., Pearlman, J., Polagye, B., Caimi, F., Muller-Karger, F., Copping, A. et al., 2020. Future vision for autonomous ocean observations. *Front. Mar. Sci.*, 7, 697. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00697>
- Wilmers, C. C., Nickel, B., Bryce, C. M., Smith, J. A., Wheat, R. E., Yovovich, V., 2015. The golden age of bio-logging: How animal-borne sensors are advancing the frontiers of ecology. *Ecology*, 96 (7), 1741-1753. <https://doi.org/10.1890/14-1401.1>
- Würsig, B., Greene Jr, C. R., Jefferson, T. A., 2000. Development of an air bubble curtain to reduce underwater noise of percussive piling. *Mar. Environ. Res.*, 49 (1), 79-93. [https://doi.org/10.1016/S0141-1136\(99\)00050-1](https://doi.org/10.1016/S0141-1136(99)00050-1)
- Yamashita, R., Takada, H., Murakami, M., Fukuwaka, M. A., Watanuki, Y., 2007. Evaluation of noninvasive approach for monitoring PCB pollution of seabirds using preen gland oil. *Environ. Sci. Tech.*, 41 (14), 4901-4906. <https://doi.org/10.1021/es0701863>
- Yamashita, R., Takada, H., Fukuwaka, M. A., Watanuki, Y., 2011. Physical and chemical effects of ingested plastic debris on short-tailed shearwaters, *Puffinus tenuirostris*, in the North Pacific Ocean. *Mar. Pollut. Bull.*, 62 (12), 2845-2849. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.10.008>
- Yamashita, R., Takada, H., Nakazawa, A., Takahashi, A., Ito, M., Yamamoto, T. et al., 2018. Global monitoring of persistent organic pollutants (POPs) using seabird preen gland oil. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 75, 545-556. <https://doi.org/10.1007/s00244-018-0557-3>
- Yoda, K., Shiomi, K., Sato, K., 2014. Foraging spots of streaked shearwaters in relation to ocean surface currents as identified using their drift movements. *Prog. Oceanogr.*, 122, 54-64. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2013.12.002>
- Yonehara, Y., Goto, Y., Yoda, K., Watanuki, Y., Young, L. C., Weimerskirch, H. et al., 2016. Flight paths of seabirds soaring over the ocean surface enable measurement of fine-scale wind speed and direction. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 113 (32), 9039-9044. <https://doi.org/10.1073/pnas.1523853111>