

海洋の可視化における観測プラットフォームに係る提言

ーバイオロギングの可能性についてー

笹川平和財団 海洋政策研究所 研究員 岩田高志

(1) バイオロギングの特徴等

バイオロギング (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。現在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 (表 1)。装置で計測できる項目も増えたことにより、バイオロギングは動物の生態解明のツールとしてだけでなく、海洋の課題解決のための観測プラットフォームとしての役割を果たしている。他の観測プラットフォームと比較し、バイオロギングをプラットフォームとした観測で得られる海洋データの長所として、i) 3 次元的 (水平・鉛直方向) な広がりを持つ、ii) 時空間的に連続している、iii) 海底下や荒天時など人 (船) が近づくことができない環境下で取得できる、iv) カメラにより撮影された映像が得られる、といった特徴が挙げられる。一方、短所として、i) 観測海域は動物依存のため選択不可、ii) 回遊・渡りをする種を対象とした場合季節限定的となる、iii) 装置がデータ蓄積型の場合記録期間が数時間から数日間と短く、回収の必要がありリアルタイムでデータが得られない、iv) 一回もしくは数回で終わる短期的な観測が多く長期モニタリングのような観測が少ない、v) 装置が高価であるためデータ数は予算に依存し結果的にデータ数が少なくなる、といった特徴がある。ここでは、バイオロギングの海洋の可視化のためのプラットフォームとしての役割を紹介し、海洋の課題解決に対するバイオロギングの有用性を講じる。

表 1 バイオロ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	データ処理してわかること
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	採餌のタイミング、動物の肥満度 (プロペラと合わせる)
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	三次元遊泳軌跡 (加速度とプロペラと合わせる)
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	風向、風力 (加速度、磁気と合わせる)、表層流水塊、水の密度 (温度と合わせる)
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	

(2) 観測プラットフォームとしてのバイオロギングに係る提言

① ウミガメ類

プラスチックゴミの分布は船上からの目視により観測されているが、実際のプラスチックゴミの多くは海底に沈んでいると考えられている。ウミガメは海底で採餌や休息することが知られていることから (Seminoff et al. 2006, Thomson et al. 2011)、ウミガメを利用することで水面だけでなく、中層に浮遊、海底に沈んだプラスチックゴミの分布の情報を収集できると考えられる。実際にウミガメがビニール袋を捕食する様子が、ウミガメに装着したビデオに撮影されている (Fukuoka et al. 2016)。ウミガメから得られた海洋環境データをモデルに同化することで、親潮・黒潮混合水域の海況がより正確に把握され、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 (Miyazawa et al. 2019)。ウミガメは熱帯域から温帯域において水平方向および鉛直方向の三次元的な行動範囲を持つことから、バイオリギング手法を用いた海洋観測に最も適した動物の一つであるといえる。また彼らは天候や海況に依存せずに移動できるため、流れの早い海流を横切る観測や船では実施できない荒天下の観測が可能となる。他の観測プラットフォームで計測が難しいデータを取得できるという点においても、今後もウミガメは観測プラットフォームとして活躍することが期待される。

② 海鳥類

海上の風向や風力の情報は人工衛星からの観測により推定されるが、沿岸域では電波の乱反射のため推定ができないという課題がある。そこで海鳥を観測プラットフォームとし、海鳥の飛行経路から海上風（風向、風力）をモニタリングしたところ、沿岸域の海上風の情報が得られることが示された (Yonehara et al. 2016)。また海鳥の着水中の漂流経路からその周辺の海流の方向と速さがモニタリングできることも示された (Yoda et al. 2014)。海流もまた人工衛星からの観測により推定されるが、海鳥の漂流データからは人工衛星では得られない詳細なスケールの海流情報が得られるという特徴がある。海洋に排出・拡散された残留性有機汚染物質 (Persistent Organic Pollutants: POPs) は、生物濃縮により動物の体内に蓄積されることから、海鳥を含む海洋高次捕食者は POPs 濃度のバイオセンサーとなることが考えられている。海鳥の採餌海域を追跡し、その海鳥の体組織を分析することで、その海域における汚染物質の現在までの使用、排出、分解性、汚染源からの拡散が評価できることが示されている (Ito et al. 2013)。今後はこの手法を応用することで、各海域におけるマイクロプラスチック濃度を評価できることが期待される。海鳥を観測プラットフォームとして取得できる観測項目は、他の観測プラットフォームでは取得するのが難しい観測項目（沿岸域の風環境や詳細なスケールの海流の把握、海洋汚染の評価）という特徴が挙げられる。さらに海鳥を使った観測手法の汎用性は高く、様々な海鳥種に適用可能なため、今後は海鳥を観測プラットフォームとした観測が様々な海域において実施されることが期待される。

③ アザラシ類

海洋高次捕食による漁業被害は世界各地で長年問題視されている (Fjälling 2005, Read 2008, Butler et al. 2011)。バイオロギングを用いることで、漁業被害対策を講じるためにも有用な情報が得られる。例えば、漁業活動の海域がアザラシの採餌海域と重複していることや (van Beest et al. 2019)、いつどのくらいのアザラシが漁網を利用しているのか (Masubuchi et al. 2019) がバイオロギングを用いた研究から明らかとなっている。今後はこれらの情報に加え、動物がどのように漁網に近づき、漁網の中でどのように振る舞い、どのくらいの漁獲物を採餌しているのかなどの情報が利用可能となることで、より効果的な漁業被害対策を講じることができると考えられる。アザラシを観測プラットフォームとした海洋観測は 20 年以上前から実施されており (Boehlert et al. 2001)、特に海氷の張り出しにより他の観測プラットフォームでは計測不可能な南極海周辺の海洋環境モニタリングに活躍してきた (Biuw et al. 2007, Charrassin et al. 2008)。アザラシは水平方向および鉛直方向の三次元的な行動範囲を持ち、毎年ほぼ同じ海域を利用するため定期モニタリングにも向いており、さらに体サイズも大きく比較的大型の記録計を装着可能という点から、バイオロギングを用いた海洋観測に最も適した動物であると言われている (Horning et al. 2019)。今後も本手法を用いた海洋観測を牽引していく動物として期待される。

(3) 観測プラットフォーム (バイオロギング) による課題解決に資する観測体制の提言

バイオロギング手法の本来の用途である動物の生態を解明すること自体が、海洋の課題解決に貢献している。例えば、バイオロギングで計測する最も基本的な動物の生態として、いつどこで採餌をしていたかという情報がある。それらの情報を集めることで海洋のホットスポットが特定されている (Block et al. 2011)。今後はバイオロギングにより特定された海洋のホットスポットをどのように守っていくのかを検討していく必要がある。魚類、特に水産有用種に関して、分布域や回遊の時期の特定は漁場を選定する上で役立つ情報となる。一方で未成熟な魚の分布域や産卵場を特定できれば、そこを避けた漁業をすることで資源の管理ができることが期待される。観光資源としてのクジラの位置情報がわかれば、効率的にホエールウォッチングを営むことができ結果として観光船の燃油の消費が抑えられる可能性がある。また同時に、海洋の最高次捕食者の分布と行動を把握できる。

生物多様性を維持するために海洋保護区が設定されている一方で、海洋保護区の維持にはコストがかかるため実態が伴っていないペーパー保護区が問題となっている。近年、設定されている海洋保護区の有用性を検証する点においてバイオロギングが貢献している。世界最大の海洋保護区であるロス海において、南極の海洋高次捕食者 (海生哺乳

類・海鳥類) 17 種、4000 個体以上の分布域を調べたところ、設定されている海洋保護区と彼らの生息域が重なっている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)。海洋保護区の有用性を検証するために実際の動物の動きを追うバイオロギングは、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考えられる。今後は海洋保護区の有用性の検証だけでなく、海洋保護区を設定する際にバイオロギングデータが考慮される可能性は大いに考えられ、海洋政策の側面においてもバイオロギング手法が活躍することが期待される。

参考文献

Biuw, M., Boehme, L., Guinet, C., Hindell, M., Costa, D., Charrassin, J. B., ... & Tremblay, Y. (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.

Block, B. A., Jonsen, I. D., Jorgensen, S. J., Winship, A. J., Shaffer, S. A., Bograd, S. J., ... & Ganong, J. E. (2011). Tracking apex marine predator movements in a dynamic ocean. *Nature*, 475(7354), 86-90.

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.

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. *Marine Policy*, 35(3), 317-323.

Charrassin, J. B., Hindell, M., Rintoul, S. R., Roquet, F., Sokolov, S., Biuw, M., ... & Timmermann, R. (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.

- Fjälling, A. (2005). The estimation of hidden seal-inflicted losses in the Baltic Sea set-trap salmon fisheries. *ICES Journal of Marine Science*, 62(8), 1630-1635.
- 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, 28015.
- Hindell, M. A., Reisinger, R. R., Ropert-Coudert, Y., Hückstädt, L. A., Trathan, P. N., Bornemann, H., ... & Lea, M. A. (2020). Tracking of marine predators to protect Southern Ocean ecosystems. *Nature*, 580(7801), 87-92.
- Horning, M., Andrews, R. D., Bishop, A. M., Boveng, P. L., Costa, D. P., Crocker, D. E., ... & Hooker, S. K. (2019). Best practice recommendations for the use of external telemetry devices on pinnipeds. *Animal Biotelemetry*, 7(1), 1-17.
- Ito, A., Yamashita, R., Takada, H., Yamamoto, T., Shiomi, K., Zavalaga, C., ... & Kohno, H. (2013). Contaminants in tracked seabirds showing regional patterns of marine pollution. *Environmental science & technology*, 47(14), 7862-7867.
- 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.
- 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.
- Read, A. J. (2008). The looming crisis: interactions between marine mammals and fisheries. *Journal of Mammalogy*, 89(3), 541-548.
- 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?. *Marine Ecology Progress Series*, 322, 269-280.

Thomson, J. A., Heithaus, M. R., & Dill, L. M. (2011). Informing the interpretation of dive profiles using animal-borne video: a marine turtle case study. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 410, 12-20.

van Beest, F. M., Mews, S., Elkenkamp, S., Schuhmann, P., Tsolak, D., Wobbe, T., ... & Galatius, A. (2019). Classifying grey seal behaviour in relation to environmental variability and commercial fishing activity—a multivariate hidden Markov model. *Scientific reports*, 9(1), 1-14.

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.

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.