

令和 2 年 6 月 22 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K12813

研究課題名(和文)大型鯨類をバイオセンサーとした中深層生態系観測

研究課題名(英文)Environmental monitoring of mesopelagic ecosystem using marine top predators as an indicator

研究代表者

青木 かがり (Aoki, Kagari)

東京大学・大気海洋研究所・助教

研究者番号：60526888

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：食物連鎖の頂点に立つ高次捕食者の動態は、優れた環境応答の指標となる。具体的には、高次捕食者が何をどれだけ食べるのか？環境変動や個々の状態(栄養状態等)によってその捕食量はどうか？その動態は、生息環境の健全性の指標にもなりうる。本研究では、海洋の高次捕食動物である鯨類の環境応答を計測する手法を確立することを目的に、次の三つの課題に取り組んだ。1)動物装着型記録計や動物ビデオカメラを用いたハクジラ類の捕食行動の観測 2)マッコウクジラの回遊経路と肥満度の推定 3)遊泳行動とドローン画像から推定したザトウクジラの肥満度の季節変化

研究成果の学術的意義や社会的意義

陸上に比べて海洋では、動物が変化する環境にどのように応答するのか、把握することは難しい。人間が考える問題と、動物にとっての問題は異なる可能性がある。動物に記録計やビデオカメラを装着して、動物目線でその行動を記録するバイオロギング手法は、動物の環境応答を直接計測できる。本研究では、バイオロギング手法を用いて、海洋の高次捕食動物である鯨類の捕食行動、季節や海域、年による肥満度の違いを把握することを示した。

研究成果の概要(英文)：Behavioral responses and body conditions of marine top predators can be good indicators of environmental changes in marine ecosystem. For example, animals might change their behaviors (e.g. time spend for feeding, timing of migration) in response to environmental changes. The body condition of top predators can also be an indicator of habitat health. In this study, we focused on the following three topics to establish a method to measure the environmental responses of cetaceans. 1) monitoring feeding behavior of toothed whales using animal-borne recorders 2) estimating migration routes of sperm whales 3) estimating temporal changes in lipid-store body condition of humpback whales at feeding grounds using aerial photogrammetry and tag-derived tissue density.

研究分野：鯨類の行動生態

キーワード：鯨類 高次捕食者 採餌生態 肥満度 浮力 海洋生態系 バイオロギング

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

中深層は地球表層圏の大部分を占めるにも関わらず、中深層生態系を統合的に観測する手法はない。水面と中深層を高頻度で往復する大型ハクジラ類は効率的な海洋観測のプラットフォームとなりうる。それとともに、食物連鎖の頂点に立つ高次捕食者の動態は、優れた環境応答の指標となる。具体的には、高次捕食者が何をどれだけ食べるのか？環境変動や個々の状態（栄養状態等）によってその捕食量はどうか？その動態は、生息環境の健全性の指標にもなりうる。海洋生態系を観測する手法を確立する上で最も重要な点は、物理環境の変化のみならず、変化した物理環境における動物の応答を把握することだと考える。

2. 研究の目的

本研究では、食物連鎖の頂点に立つ鯨類の行動や栄養状態の変化を指標として、海洋生態系をトップダウン的に観測する手法を確立することを目指した。動物の栄養状態はその生存率や繁殖率に影響を与え (Vikingsson 1995, Christiansen et al., 2014, 2016)、個体数の増減に影響を与える。動物の生態や人間活動の影響を理解するのに、動物の栄養状態を把握することは重要であるが、非致命的な手法を用いて、自然環境下の鯨類の栄養状態を測定することは難しい。また、水面と中深層を高頻度で往復する大型ハクジラ類は効率的な海洋観測のプラットフォームとなりうる。そこで、本研究では、動物に動物装着型記録計を搭載するバイオリギング手法を用い、1) 長期的に動物の行動と栄養状態の変化を追跡することを試みた。また、2) 水生動物の生息域を大きく左右する餌環境の情報を動物自身によって取得するシステムを構築することを目指した。

3. 研究の方法

下記の三つの課題に取り組んだ。

1) 動物装着型記録計や動物ビデオを用いたハクジラ類の捕食行動の観測

1-1) 飼育個体を対象にした捕食行動の抽出

鯨類の採餌行動を知るために、餌捕獲の瞬間を特定することは重要である。動物装着型記録計を用いた研究では、餌に接近する際に出される音 (バズ, Miller et al. 2004, Soto et al. 2008 など) や突進行動 (急加速, Amano and Yoshioka 2003, Aoki et al. 2012) が捕獲行動の指標として用いられている。しかし、実際にその餌を捕獲できたのか、或は捕獲に失敗したのかは分からない。本研究では飼育下のハナゴンドウに動物装着型記録計 (データロガー) を装着し、捕獲時に特異的な加速度波形を特定することを目的とした。

太地くじらの博物館にて、飼育個体を対象とした実験を行った。実験に先立ち、実験対象個体への加速度ロガー (ORI400-D3GT, リトルレオナルド社) の吸盤装着への順化を実施した。順化の過程で吸盤の装着を忌避しないと認められる個体のみを実験に用いた。飼育下のハナゴンドウ2頭を対象に実験を行った。2つの異なる装着位置 (喉元付近と胸ビレ後方) に、加速度ロガーを搭載した吸盤タグを同時に取り付けた。実験の様子をビデオを用いて撮影した。餌は解凍したスルメイカを用いた。5m 四方の生簀内で個体が自由に遊泳できる状況で、投餌を行い、加速度ロガーの記録と擦り合わせ、捕獲に特異的な波形を検出することを試みた。

2) 衛星発信機を用いたマッコウクジラの長期追跡の試み

長期の回遊経路と潜水行動の把握を目指し、五島列島周辺海域において、マッコウクジラの若オスを対象に衛星発信機の装着を行った。2018年においては空気銃を用い、衛星発信機 (splash-10-292A, wildlife computer, 米国) の装着を行なった。2019年には、より長期の行動追跡を目指し、空気砲システム (Aerial Rocket Transmitter System, ARTS, Kleivane, 1998) を用い、より銚先の大きい衛星発信機の装着を試みた (spot-303F, wildlife computer, 米国)。

3) 遊泳行動とドローン画像から推定した、採餌域におけるザトウクジラの肥満度の季節変化

ドローンと動物装着型記録計を用いて、採餌域におけるザトウクジラの栄養状態の季節変化を把握することを目的とした。ザトウクジラは夏季は高緯度で採餌を、冬季は低緯度で繁殖を行う。採餌場に到着したばかりの個体は痩せており、次の長距離回遊と繁殖域での滞在に備え頻繁に採餌を行い十分な脂肪を蓄えることが予想される。ドローンによって上空から投影面積を、動物装着型記録計 (w-3MPD3GT リトルレオナルド社 またはウッズホール D タグ) の遊泳行動のデータから肥満度の指標となる体密度を推定した。野外調査は、カナダ沖合とノルウェー沖合で行なった。

ドローンによって撮影された画像から、体表全体が写っている写真を選択し、投影面積を体長で除することで、面積を標準化した (図 6. Aoki et al. under review)。動物は太れば浮きがちに、痩せれば沈みがちになる。動物の体脂肪率は体全体の密度に反映され、泳ぎ方や移動コストに影響を与える。動物がグライド中の抗力と浮力の差から計算される加速度を、体密度 $800-1200 \text{ kg m}^{-3}$ 、空気量 $0-80 \text{ mL kg}^{-1}$ の間でシミュレーションし、実際の加速度と比較して最も近くなるように体密度を求めた (詳細な方法に関しては Miller et al., 2016, Aoki et al., 2017, Narazaki et al., 2018 を参照)。ドローンを用いて上方から撮影した画像から、投影面積を求め体長で標準化した (Christiansen 2016)。

個体の性別や繁殖状態はバイオプシーサンプルや観察（観察中に複数回にわたって仔クジラと共に見られた等）によって決定された。

4. 研究成果

1) 動物装着型記録計や動物ビデオを用いたハクジラ類の捕食行動の観測

2 個体のハナゴンドウ（個体名 マロン、ハマタ）を対象に、生け簀内で自由に遊泳可能な状態で実験を行った。1 回の実験で、投餌を 10 回行った（図 1）。喉元付近に装着した加速度ロガーによって得られたデータから、捕食に由来すると考えられる周波数を特定することができた（図 2）。胸ビレ付近に装着した加速度ロガーによって得られた加速度データでは、捕食に由来すると考えられる加速度成分は喉元付近に比べ、不明瞭であった（図 3）。

2) 衛星発信機を用いたマッコウクジラの長期追跡の試み

2018 年度に、マッコウクジラの若オス二頭から行動データを得た。1 頭は 5 月下旬から約 1 か月間にわたって（個体番号 1）、もう 1 頭は 7 月下旬から約一週間にわたって追跡した（個体番号 2）。計 140 地点で、水温・行動データを取得した。両個体ともに、衛星発信機を装着していた期間に、他の海域に移動することはなかった。個体 1 では、追跡していた期間、30km 四方の非常に狭い範囲で移動を繰り返しており（図 4）、個体 2 でも同様の傾向がみられた。2019 年度には、より長期の装着を目指すために、衛星発信機の銚先を改良、大型化し、空気砲での取り付けを試みた（図 5）。陸上での試射を実施した段階では、比較的深部まで突き刺すことができたが、実際の調査では、装着後すぐに脱落してしまった。海況に恵まれず、それ以降に衛星発信機の実験を試みることはできなかった。2020 年度に引き続き、野外調査を行う予定である。

中深層へ潜水を行う大型ハクジラ類の移動経路や行動、肥満度の変化を長期にわたって把握するためには、長期の追跡が必要不可欠である。残念ながら、本研究期間中にマッコウクジラへの長期の装着手法を確立することはできなかった。引き続き、装着手法を改良し、長期データを安定して取得できよう装着手法の確立を目指す。

3) 遊泳行動とドローン画像から推定した、採餌域におけるザトウクジラの肥満度の季節変化

計 70 個体に動物装着型記録計を装着し 732 時間の行動データを得た。また計 55 個体を、ドローンによって上空から撮影し（このうち 20 個体は動物装着型記録計を装着した個体）投影面積を求めた（図 6）。

遊泳行動から推定した体密度は、両海域共にばらつきが見られたが（ノルウェー 1029.1–1049.6 kg m⁻³；カナダ 1027.9–1050.9 kg m⁻³）、いずれの個体も周囲の海水より密度が高く（ノルウェー 1027.3 ± 0.7 kg m⁻³；カナダ 1023.3 ± 2.0 kg m⁻³）、採餌域のザトウクジラは肺や気管の空気を除いた場合、負の浮力を持っていることが示唆された。二つの手法で得られた推定値を比較したところ、投影面積のより大きい個体が、より体密度が低い（肥満度が高い）という妥当な結果が得られた（図 7）。階層ベイズモデルにより、二つの観測値から真の体密度（以下、体密度）を推定した。体密度は採餌域の後半に低下し（-2.7 kg m⁻³ per 100 days, 図 8）、採餌によってエネルギーを蓄積していく過程を把握することができた。また、妊娠または授乳中以外の成熟メスと成熟オスの体密度に差異はなかった（メス 1037.4 ± 1.1 kg m⁻³；オス 1037.2 ± 1.2 kg m⁻³ 図 8）。妊娠中のメスは体密度がこれらの個体より低く（-3.5 kg m⁻³、肥満度が高いことを意味する）、逆に授乳中のメスでは体密度が低い傾向が見られた（+6.0 kg m⁻³）。同じ個体で、妊娠、授乳時のデータが異なる年に得られた。この個体でも同様な傾向が見られた（図 9）。得られた個体でも、採餌期前半の体密度は、繁殖期からより遠い採餌域であるノルウェー沖合で、カナダ沿岸より高い（より痩せている、+5.0 kg m⁻³）傾向が見られた（図 8）。本研究により、異なる生活史形質による肥満度の違いや採餌域における季節変化を把握することができた。

引用文献

- Aguilar Soto N, Johnson MP, Madsen PT, Diaz F, Do- minguez I, Brito A, Tyack P (2008) Cheetahs of the deep sea: deep foraging sprints in short finned pilot whales off Tenerife (Canary Islands). *J Anim Ecol* 77: 936–947.
- Amano M, Yoshioka M (2003) Sperm whale diving behavior monitored using a suction-cup-attached TDR tag. *Mar Ecol Prog Ser* 258:291–295.
- 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. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 444: 289–301.
- Aoki K, Sato K, Isojunno S, Narazaki T, Miller PJO. (2017) High diving metabolic rate indicated by high-speed transit to depth in negatively buoyant long-finned pilot whales. *J. Exp. Biol.* 220, 3802–3811. (doi:10.1242/jeb.158287)
- Miller PJO, Johnson MP, Tyack PL (2004) Sperm whale behavior indicates the use of echolocation click buzzes ‘creaks’ in prey capture. *Proc Biol Sci* 271:2239–2247.
- Christiansen F, Vikingsson GA, Rasmussen MH, Lusseau D. (2014) Female body condition affects foetal growth in a capital breeding mysticete. *Funct. Ecol.* 28, 579–588 (doi:10.1111/1365-2435.12200)
- Christiansen F, Dujon AM, Sprogis KR, Arnould JPY, Bejder L. (2016) Non-invasive unmanned aerial vehicle provides estimates of the energetic cost of reproduction in humpback whales. *Ecosphere* 7, e01468 (doi:10.1002/ecs2.1468)

- Kleivane L. 1998. A New Pneumatic Launching Device ARTS (Aerial Rocket Transmitter System) Especially Developed and Designed to Improve Tagging and Instrumentation of Baleen Whales. Bodø, Norway: Restech A/S
- Miller PJO, Narazaki T, Isojunno S, Aoki K, Smout S, Sato K. (2016) Body density and diving gas volume of the northern bottlenose whale (*Hyperoodon ampullatus*). J. Exp. Biol. **219**, 2458-2468. (doi:10.1242/jeb.137349)
- Narazaki T, Isojunno S, Nowacek DP, Swift R, Friedlaender AS, Ramp C, Smout S, Aoki K, Volker BD, Sato K, Miller PJO. (2018) Body density of humpback whales (*Megaptera novaengliae*) in feeding aggregations estimated from hydrodynamic gliding performance. PLoS ONE **13**, e0200287 (doi:[10.1371/journal.pone.0200287](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200287))
- Vikingsson GA. (1995) Body condition of fin whales during summer off Iceland. Dev. Mar. Biol. **4**, 361-369.



図 1. 加速度データロガーを左体側と喉元付近に装着したハナゴンドウ（個体ハマタ）。

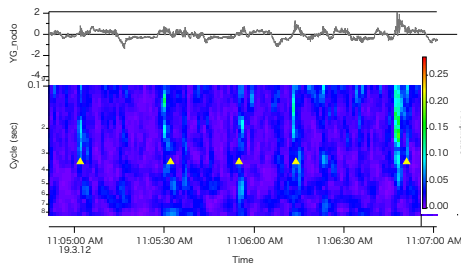


図 2. ハナゴンドウ（個体ハマタ）の喉元付近に装着した加速度データロガーより得られた長軸方向の加速度データのスペクトラム。黄色三角付近で餌を飲み込んだ。捕食に由来すると考えられる周波数が 3-10Hz 付近に見られる。

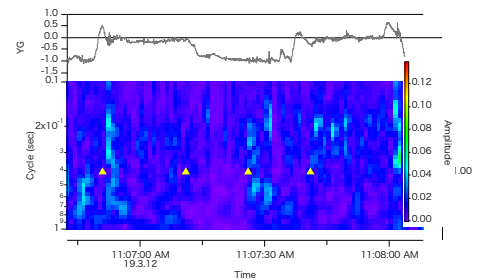


図 3. ハナゴンドウ（個体ハマタ）の胸ビレ後方付近に装着した加速度データロガーより得られた長軸方向の加速度データのスペクトラム。黄色三角付近で餌を飲み込んだ。捕食に由来すると考えられる加速度成分は喉元付近に比べ、不明瞭であった。



図 4. マッコウクジラ（個体番号1）の1ヶ月間の出現位置。



図 5. 空気砲を用いて、マッコウクジラへ衛星発信機を装着する

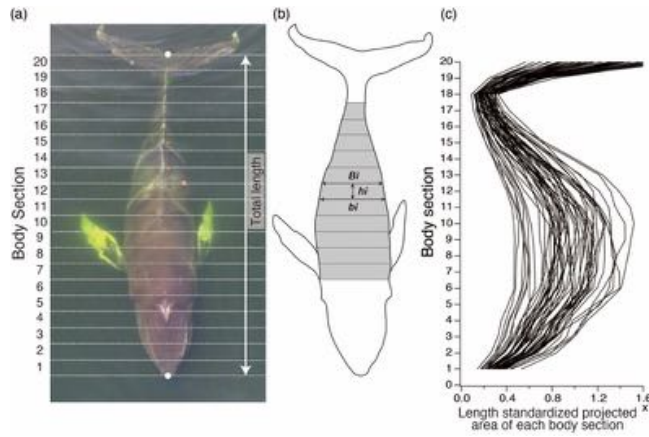


図 6. ドローンによって上空から撮影されたザトウクジラ。中央の図の灰色部分の投影面積を体長によって標準化した。得られた個体全ての標準化された投影面積。個体間で変動が大きい。

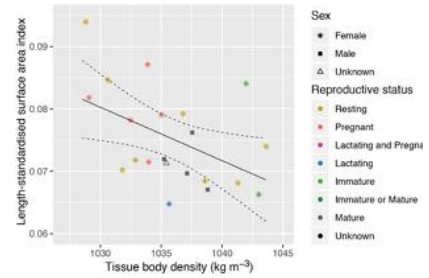


図 7. 標準化された投影面積と体密度との関連。投影面積が大きいほど（太って見えるほど）、体密度が低い。

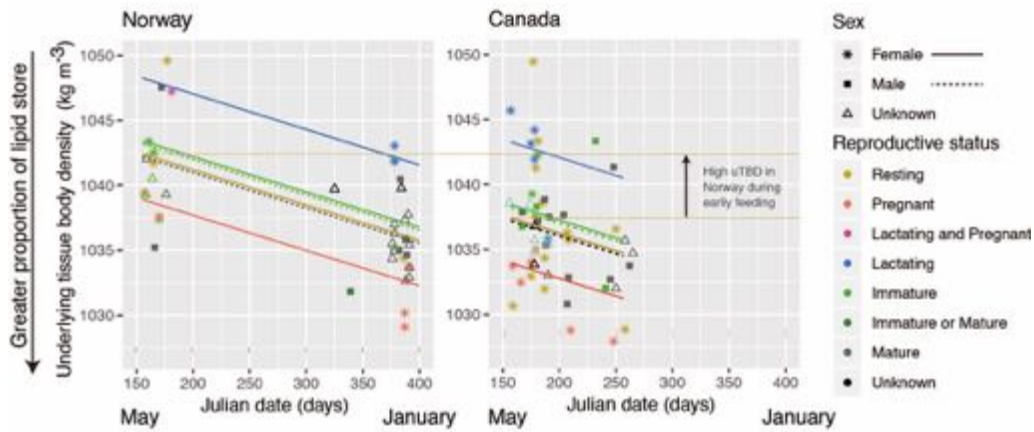


図 8. ノルウェー沖合とカナダ沖合における、採餌期間中の体密度の変化。

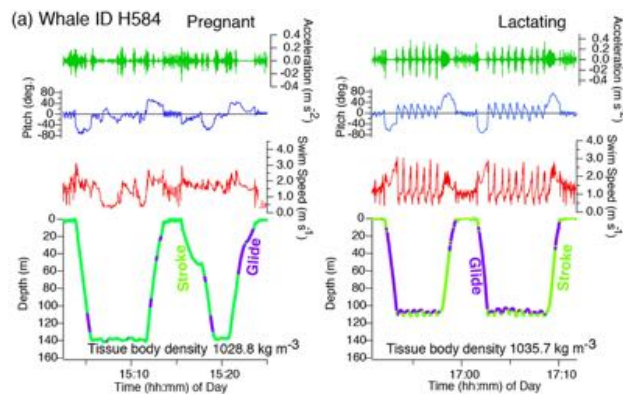


図 9. ザトウクジラの遊泳行動の時系列データ。同じ個体 (H584) から得られた。妊娠時の体密度は、授乳中に比べて低く（すなわち肥満度が高い）、妊娠時には授乳時に比べて、潜降時にグライド（尾びれを振らずに潜る）ことが少なかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 3件／うちオープンアクセス 2件）

| | |
|--|--------------------|
| 1. 著者名 Saana Isojunno, Kagari Aoki, Charlotte Cure, Petter Helgevoold Kvadsheim, Patrick J.O. Miller. | 4. 巻 9 |
| 2. 論文標題 Breathing patterns indicate cost of exercise during diving and response to experimental sound exposures in long-finned pilot whales | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Frontiers in Physiology | 6. 最初と最後の頁 1462 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01462 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 該当する |

| | |
|--|------------------------|
| 1. 著者名 Tomoko Narazaki, Saana Isojunno, Douglas P Nowacek, Rene Swift, Ari S Friedlaender, Christian Ramp, Sophie Smout, Kagari Aoki, Volker B Deecke, Katsufumi Sato, Patrick J.O. Miller. | 4. 巻 13 |
| 2. 論文標題 Body density of humpback whales (<i>Megaptera novaeangliae</i>) in feeding aggregations estimated from hydrodynamic gliding performance | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 PLOS ONE | 6. 最初と最後の頁 e0200287 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200287 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 該当する |

| | |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名 Aoki Kagari, Sato Katsufumi, Isojunno Saana, Narazaki Tomoko, Patrick J.O. Miller. | 4. 巻 220 |
| 2. 論文標題 High diving metabolic rate indicated by high-speed transit to depth in negatively buoyant long-finned pilot whales | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 The Journal of Experimental Biology | 6. 最初と最後の頁 3802 ~ 3811 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1242/jeb.158287 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件／うち国際学会 4件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 Aoki K, Isojunno S, Charlotte B, Iwata T, Kershaw J, Martin Lopez LM, Ramp C, Biuw M, Akiyama Y, Swift R, Wensveen P, Narazaki T, Sato K, Miller PJ0. |
| 2. 発表標題 Photogrammetry supports tag-derived tissue density as a proxy for body condition: Seasonal and locational changes in body condition of humpback whales on their feeding grounds. |
| 3. 学会等名 The 23rd Biennial Conference on the Biology of Marine Mammals, Spain, December 2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 秋山優, 赤松友成, Marianne H. Rasmussen, 岩田高志, 青木かがり, Patrick J.O. Miller, Martin Biuw, Christian Ramp, 佐藤克文. |
| 2. 発表標題 採餌海域におけるザトウクジラの行動時間配分と活動様式. |
| 3. 学会等名 平成31年度日本水産学会春季大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kagari Aoki, Katsufumi Sato, Saana Isojunno, Tomoko Narazaki, Patrick J.O. Miller |
| 2. 発表標題 Does buoyancy affect optimal swim speed? High-speed transits to depth in negatively buoyant long-finned pilot whales |
| 3. 学会等名 The 6th International Bio-logging Science Symposium (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Saana Isojunno, Kagari Aoki, Patrick J.O. Miller. |
| 2. 発表標題 Breathing patterns indicate recovery time and exercise modulated diving costs in long-finned pilot whales |
| 3. 学会等名 The 6th International Bio-logging Science Symposium (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Iwata T., Aoki K., Miller P.J.O., Biuw M., Williamson M and Sato K. |
| 2. 発表標題 A Humpback Whale Utilize Fishing Boats to Foraging on Herring |
| 3. 学会等名 The 22nd Biennial Conference on the Biology of Marine Mammals (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 榎崎友子, Saana Isojunno, Douglas Nowacek, Rene Swift, Ari Friedlaender, Christian Ramp, Sophie Smout, 青木かがり, 佐藤克文, Patrick J.O. Miller. |
| 2. 発表標題 グライド中の加速度から推定した採餌期ザトウクジラの体密度 |
| 3. 学会等名 第13回日本バイオロギング研究会シンポジウム |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 青木かがり, 岩田高志, Joanna Kershaw, Martin Biuw, 秋山優, 佐藤克文, Patrick J.O. Miller. |
| 2. 発表標題 太ったザトウクジラは採餌しない? |
| 3. 学会等名 第13回日本バイオロギング研究会シンポジウム |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 秋山優, 赤松友成, Marianne H. Rasmussen, 岩田高志, 榎崎友子, 青木かがり, Patrick J.O. Miller, Martin Biuw, 佐藤克文 |
| 2. 発表標題 ザトウクジラの休息時間はなぜ陸棲大型草食動物のように短いのか |
| 3. 学会等名 第65回日本生態学会 |
| 4. 発表年 2017年 |

〔図書〕 計1件

| | |
|-------------------------|-----------------|
| 1. 著者名 青木かがり他 荒井修亮監修 | 4. 発行年 2018年 |
| 2. 出版社 筑摩書房 | 5. 総ページ数 39 |
| 3. 書名 旅する動物図鑑 海の生きもの | |

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|--|--------------------------------|----|
| 研究協力者 | 天野 雅男 (Amano Masao) | 長崎大学大学院・水産・環境科学総合研究科 | |
| 研究協力者 | ミラー パトリック (Miller Patrick J.O.) | セントアンドリュース大学・School of Biology | |