

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 2 日現在

機関番号：62611

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21380128

研究課題名（和文）採餌行動計測・画像情報によるキタゾウアザラシの中深層回遊行動の研究

研究課題名（英文）Study on the mesopelagic foraging behavior of northern elephant seals using jaw motion recorders and seal head cameras

研究代表者

内藤 靖彦（Naito Yasuhiko）

国立極地研究所・名誉教授

研究者番号：80017087

研究成果の概要（和文）：海洋の中深層への潜水（深度 500-650 m、最大 1700 m、約 20 分間）を回遊の全期間にわたり休むことなく繰り返すキタゾウアザラシの潜水行動を明らかにするため、顎加速度センサー、及び頭部装着のカメラを用いてこの動物の採餌行動の定量的解析を行った。このアザラシは 2925-4178 回の潜水の 90%の潜水で 23817-58766 回、主としてハダカイワシなどの中深層の小型の餌（10-20 g）をサクションにより採餌し、採餌には明瞭な昼夜パターンがあることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In order to obtain a new insight into the deep diving behavior of the northern elephant seals we measured their feeding behavior using newly developed jaw motion sensors and seal head cameras. The seals dived into deep sea (500-650 m) and foraged numerous number (20,000-40,000) of small mesopelagic prey (10-20 g) by suction feeding mode. Seals modified their diving behavior according to the deal migration pattern of mesopelagic prey.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|-------|-----------|-----------|-----------|
| 21 年度 | 4,300,000 | 1,290,000 | 5,590,000 |
| 22 年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 23 年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 5,300,000 | 1,590,000 | 6,890,000 |

研究分野：農学

科研費の分科・細目：水産学・水産学一般

キーワード：生態・行動

1. 研究開始当初の背景

アルゴスやGPSなどの人工衛星を利用したりモート観測技術の進歩により、回遊動物の移動ルートやホットスポットの存在が明らかになり（Le Bouef et al. 2000, Block et al. 2011）、回遊とハビタートの利用の研究は目覚ましい成果を上げつつある。現在これを利用した大型プロジェクトが世界の海洋で進

められ、数 1000 個体の動物から常時情報が得られ（TOPP: Block et al. 2011）、研究は次の段階に進んでいる。

しかし、回遊行動を理解するためには、移動ルートなどとともに、採餌行動、採餌生物種と採餌量及びそれを得るための採餌努力量についての時系列情報は欠かせない。何故

潜水するのかを理解するためには、潜水行動と採餌行動の研究が不可欠である (Boyd et al. 2004)。水中行動計測ではゾウアザラシやウェッデルアザラシで加速度記録計を利用したストロークの計測や、姿勢計測の研究が進み、浮力による行動調節 (Sato et al. 2003) や消費エネルギーの抑制 (Williams et al. 2000) を行っていることも明らかになっている。さらに、通信衛星では困難な水中の移動軌跡計測も、3軸加速度、3軸地磁気、遊泳速度や深度により可能となった (Davis et al. 1999)。このような技術から潜水動物の水中行動の詳細が明らかになり採餌行動の推測も可能となった。

しかし、一方では、採餌イベントがどの場所で、どの頻度で、どう行われているなどは、採餌の直接計測がないため理解は推測に留まっている。採餌研究では過去に多くの努力が払われて来た。潜水プロフィールから推測する方法 (Chappell et al. 1993) や、餌の温度と捕食者の消化管内温度から採餌を探索する胃内温法など (Wilson et al. 1993) である。また、近年は永久磁石とホールセンサー及びデータロガーにより顎の開閉を計測する方法 (IMASEN 法: Wilson et al. 2002) が考案され、アザラシ、ペンギンで採餌イベントの計測が試みられている (Takahashi et al. 2004)。しかし、IMSEN 法はシステムの装着が複雑なことから、動物への影響が大きいことなどから野外実験では失敗も多いとされ (Takahashi et al. 2004)、新たな方法の開発が求めてられていた。これを受け、研究代表者らは、顎の動作を加速度計で直接計測する簡便な方法を考案した (Naito 2007)。この方法は採餌のみならず、ストロークなども同時に計測でき、行動情報の集積を一段と高める点で、また魚類から鯨類まで対象範囲の広さからも画期的方法と考えられる。

この顎加速度法の課題は加速度を高速でサンプリングするため計測時間が数日と短いこと、また加速度計を長期に顎に装着した場合の影響が評価されていないことから、野外研究には利用されていない。研究代表者らはこの方法をより確実なものとするため、飼育アザラシ (ゴマフアザラシ、ズキンアザラシ) で予備実験をし、データの解析法 (顎の動きの周波数抽出) を含め研究手法の信頼性を確認した。この手法の効果を一層あげるため、研究代表者らはあらたに小型の加速度計を

開発し、実験に備えた。あらたな加速度計は計測深度・時間選択などの機能を有し、メモリーを節約して長期 (30 日) に計測することを可能としている。

現在、採餌生物と採餌環境を探るため、動物搭載用ビデオロガーや静止画像ロガーが利用されている (Marshall 1998, Davis et al. 1999, Watanabe et al. 2004, Takahashi et al. 2004, Kudo et al. 2007)。しかし、現況の画像システムは大きく、計測時間も短いため、利用は限定されている。研究代表者らこの点についても改善を図り、新たに大容量小型画像ロガーを開発した (ストロボ使用時の撮影枚数 8000 枚)。以上に記すようにアザラシ類は情報の集積が最も進んでいる回遊動物といえる。しかしこのアザラシが何故中心層深く昼夜休むことなくくり返し潜水し、回遊行動をするのかの理解には採餌行動研究が不可欠である。

一方、中深層の生物研究は技術的制約により情報の収集は遅れている。近年鯨類はじめ多くの動物が中深層で採餌を行うことが明らかになり、その餌生物量は莫大な量になると推定されている (Whitehead et al. 2002)。低溶存酸素水塊の中深層における生物と生態系研究の必要性が指摘されている (Robison et al. 2005)。本研究はこの世界的な研究課題へ対応するものである。

2. 研究の目的

本研究では中深層採餌回遊のキタゾウアザラシについて、1) 採餌イベントを確実に把握し、採餌効率を求めること、2) 回遊中のエネルギー配分を明らかにすること、3) 採餌効率とエネルギー配分から最適採餌理論 (Krebs 1978) の検証を行うこと、4) 餌生物とその分布を明らかにすること、以上から 5) この動物の中深層回遊における中・短期的エネルギー戦略を明らかにすることを直接の達成目標とする。さらにこの研究を通して、環境変動に対応した研究が遅れている中深層の生物環境と中深層生態系についての基礎資料を提供することも付随的な目標である。

3. 研究の方法

海洋の中深層で採餌し、回遊行動する動物の回遊ルート、採餌イベント及び潜水行動を同時に計測するというまだ世界に例がない課題に取り組むため、長期採餌計測記録計やストローク記録計、及び動物搭載深海小型カメラを新たに開発した。中でも長期採餌記録計は、動物の採餌に際する顎の動きを加速度計

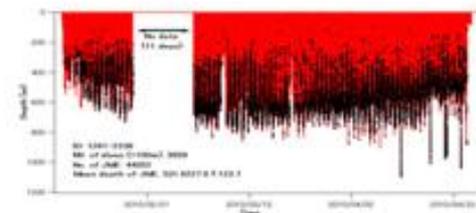
により詳細に計測し、一定の閾値等を利用した採餌行動認識アルゴリズムにより採餌行動をイベント化して長期の記録を可能にしたシステムである。また、長期ストローク記録計も同様に動物の遊泳行動をストロークのピーク値、ストローク回数を記録するものである。動物用深海カメラは、径 22mm、長さ 135mm、重さ 81g と小型でかつ撮影枚数も 12000 枚:ストロボ使用時 7000 枚と高機能である。本研究はこれらの世界の最先端の機器を利用した。現場実験は 2010 年 2 月カリフォルニア州アニョ・ノエボ繁殖上において 4 頭の成熟雌に上記記録計を装着し、5 月に約 2.5 カ月後に全て記録計を回収した。回遊移動経路の計測には、カリフォルニア大学のアルゴス計測によるデータを利用した。なお、現場実験は 2010 年 5 月、2011 年においてもおこなった。

4. 研究成果

本研究では回遊中のアザラシから始めて長期の採餌行動(採餌イベント)、長期のストローク行動(ストローク加速度の最大振幅及びストローク数)、および換毛後回遊の 1 個体の画像データが得られた。これらのデータを中心に解析を行った結果以下のことが明らかになった。

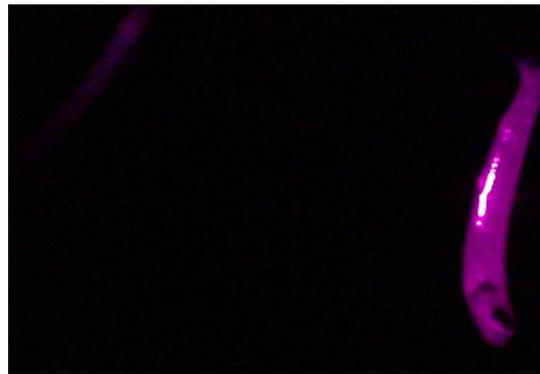
1) 採餌行動

キタゾウアザラシ(体重 351–459kg)は 67.6–80.4 日間の回遊期間中に体重は 32kg–73kg に増加し、この間 2925–4178 回の潜水(深度 515.7 ± 180.9 m to 563.9 ± 183.2 m)を行い、23817–58766 回の採餌を行った。潜水行動と採餌行動には明瞭な日周変動が見られ、アザラシは夜間は浅く、短い潜水を多く繰り返し、昼には深く、長い潜水を行っていた。また、採餌イベントと同時に記録された加速度の記録からアザラシは中深層の小型の餌をサクシオンにより採餌していることも明らかになった。



(アザラシの回遊中の潜水(赤線)と採餌イベント(黒点))

採餌イベント回数と、中深層の餌の推定カロリー値とアザラシの代謝量から推定した餌のサイズは約 10–20g であること推定された。採餌行動解析から本種の特異な採餌動も明らかになった。昼間の潜水において V 字型の深い潜水(>900m)は従来移動潜水と考えられていたが、採餌イベント解析からこの潜水は極めて活発で積極的採餌であり、好適な餌をおよぼす採餌潜水と考えられた。中深層の動物相構造の解明に重要な発見と考えられた。



(アザラシの頭部に搭載した深海カメラが写したハダカイワシ)

2) 非採餌潜水行動

アザラシの潜水の 90%は採餌潜水であるが、採餌以外の潜水が 10%あることも判明した。非採餌潜水は、採餌潜水より潜行速度、浮上速度とも遅く、潜水時間は長いことが明らかになった。非採餌潜水にはドリフト潜水として知られる潜行途中から自重により自然落下する潜水も含まれていた。非採餌潜水の機能についてはドリフト潜水で指摘されている睡眠や餌の消化など以外に、連続深度潜水と関係する生理的機能についても考慮された。

3) ストローク行動

このアザラシの極めて深い潜水行動を行うため、採餌成功による皮下脂肪の蓄積ともなう体比重の変動が潜水の浮上ストロークに影響すると予測された。実際、ストローク行動解析の結果、アザラシは回遊初期に浮上時にストローク活動を活発にし、採餌が安定して行われ皮下脂肪の蓄積が進むとストローク活動は低下する傾向が見られた。

即ちストローク活動はアザラシの栄養状態の良好なインデックスになることを示すことができた。回遊中のアザラシの栄養インデックスについては、既にドリフト潜水のドリフト時の潜行速度を用いた先行論文でも発表されているが、ドリフト潜行率による方法では皮脂肪蓄積が一定以上に進むとドリフ

トが見られなくなるため、全回遊期間を通してのインデックスにはならない。この点では本研究の方法は皮下脂肪増大による測定可能限界と関係なく回遊の全期間を通して有効であり、回遊中の栄養状態を知る方法として画期的成果上げたと言える。

4) 画像データ

画像データは1個体から得られたのみであり、かつ7000枚の画像中生物が撮影されたのは僅か2枚であった。しかし、撮影された生物はBathylagidaeとMyctophyidaeの仲間であり、北太平洋で一般的に見られる小型の中深層魚類であり、採餌イベント解析から推測された餌タイプと一致した。

本研究は、回遊中のキタゾウアザラシの採餌イベント、ストローク活動を回遊のほぼ全期間にわたり記録することに始めて成功した。これはアザラシのみならずすべての海生哺乳類や大型回遊動物でも初めての成功である。この計測の成功により、海洋動物が海洋をどのように利用し、海洋の生態系にどのように関わっているかを明らかにする上での方法上の道を開いたことは大きな成果である。キタゾウアザラシに限っても従来全く不明であった長期の連続潜水の謎が、中深層での小型の餌を大量に採餌する習性を明らかにすることにより数十年にわたる謎を明らかにするという成果を得ることができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

- ① Aoki, K., Watanabe, Y., Crocker, D. E., Robinson, P. W., Biew, M., Costa, D. P., Miyazaki, N., Fedak, M. A. & Miller, P. J. O. 2011. Northern elephant seals adjust gliding and stroking patterns with changes in buoyancy: validation of at sea metrics of body density (査読有り). *J. Exp. Biol.* 214, 2973-2987 (doi:10.1242/jeb.055137)
- ② Matsumura, M., Watanabe, Y., Robinson, P. E., Millar, P. J. O., Cost, D. C. & Miyazaki, M. 2011. Underwater and surface behavior of homing juvenile northern elephant seals (査読有り).

J. Exp. Biol. 214, 629-634 (doi:10.1242/jeb.048827)

- ③ Iwata, T., Sakamoto, K. Q., Takahashi, A., Edwards, E. W., Stanland, I. N., Trathan, P. N. & Naito, Y. Using a mandible accelerometer to study fine-scale foraging behavior of free-ranging Antarctic fur seals (査読有り). *Mar. Mamm. Sci.* 28, 345-357 (doi:10.1111/j.1748-7692.2011.00482.x)
- ④ Kokubun, N., Kim, J., Shin, H., Naito, Y. & Takahashi, A. 2011. Penguin head movement detected using small accelerometers: a proxy of prey encounter rate (査読有り). *J. Exp. Bio.* 214, i-ii:doi:10.1242/jeb.066795.
- ⑤ Naito, Y. 2010. What is "bio-logging" (査読なし-invited). *Aqua. Mamm.* 36, 307-322 (DOI:10.1578/AM.36.3.2010.307).
- ⑥ Naito, Y., Bornemann, H., Takahashi, A., McIntyre, T. & Ploetz, J. 2010. Fine-scale feeding behavior of Weddell seals revealed by a mandible accelerometer (査読有り). *Polar Sci.* 4, 309-316. (doi:10.1016/j.polar.2010.05.009)

[学会発表] (計4件)

- ① Naito, Yasuhiko. Piece accumulative foraging behavior of female northern elephant seals. 19th Biennial Conference on the biology of marine mammals. Nov. 29. 2011. Tampa City Hall, Florida, U.S.A.
- ② Naito, Yasuhiko. Paradox of diverse divers into the deep depth: A new aspect of foraging behavior of northern elephant seals. Mar. 25, 2011. Wrest Point Hotel, Hobart city, Tasmania, Australia.

[図書] (計1件)

内藤靖彦、佐藤克文、高橋晃周、渡辺佑基、成山堂書店、バイオロギング「ペンギン目線」の動物行動学、2012年3月

6. 研究組織

(1) 研究代表者

内藤 靖彦 (Naito Yasuhiko)
国立極地研究所・名誉教授
研究者番号：80017087

(2) 研究分担者

高橋 晃周 (Takahashi Akinori)
国立極地研究所・研究教育系・准教授
研究者番号：40413918
渡辺 佑基 (Watanabe Yuuki)
国立極地研究所・研究教育系・助教
研究者番号：60531043

(3) 連携研究者

依田 憲 (Yoda Ken)
名古屋大学・環境学研究科・准教授
研究者番号：10378606