

修士論文

スナメリ (*Neophocaena asiaeorientalis*) の採餌行動におけるインタラクションの解析

譽田 実希子

2019 年 3 月 11 日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報科学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士（工学）授与の要件として提出した修士論文である。

譽田 実希子

審査委員：

池田 和司 教授	（主指導教員）
向川 康博 教授	（副指導教員）
久保 孝富 特任准教授	（副指導教員）
佐々木 博昭 助教	（副指導教員）

スナメリ (*Neophocaena asiaeorientalis*) の採餌行動におけるインタラクションの解析*

譽田 実希子

内容梗概

鯨類は高度な社会性を持つ生物である。多くの鯨類で協同的な採餌行動が観察されている。しかしながら、スナメリが採餌において協同関係を築いているかは未だ明らかでなかった。しかし、近年、スナメリにも社会性を持つ可能性があることが明らかになって来た。本研究ではスナメリの採餌行動を定量的に解析し、スナメリが採餌行動において他個体とインタラクションを行なっているか明らかにする。

私たちは、スナメリを観察する中でスナメリの採餌行動は大きく3つのフェーズ（動機付け、接近、追跡）に分かれると考えた。採餌行動の中でスナメリが急に加速するポイントを、“接近”から“追跡”へフェーズが切り替わる特徴的な行動と考え、その時点を“追跡”の開始点として設定した。スナメリに最も近い魚群中の最近点を基準とし、距離、角度および曲率について解析を行った。距離はスナメリと最近点間の距離、角度はスナメリの進行方向と最近点間の角度、そして曲率は最近点周辺の曲率を示す。これらの3点においてスナメリの数による影響は認められなかった。また、3点各々の間に相関性や一定の傾向はなかった。この結果を受けて、スナメリの進行方向に偏りがあるか解析を行った。その結果、複数の場合は偏りが見られなかったが、単数では最近点に対して若干の右へ進行する偏りが観察された。しかし、二項検定を用いた検証では偏りに有意な差は認められなかった。結果として、本研究においてスナメリの採餌時におけるスナメリ間のインタラクションは確認されなかった。この結果を受けて、さらなる研究のための提言を行う。

キーワード

スナメリ, 採餌行動, 社会性

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報科学専攻 修士論文, 2019年3月11日.

Analysis of Interaction in Feeding Behavior of Finless Porpoise, *Neophocaena asiaeorientalis**

Mikiko Konda

Abstract

Cetaceans have high social nature. Cooperative feeding behaviors are reported in many cetaceans. However, it is not yet clear whether Finless porpoise is building a cooperative relationship in feeding. Recently, it was reported that Finless porpoise may have social nature. In this research, we tried to quantitatively analyze the feeding behaviors of Finless porpoise and to clarify whether Finless porpoise is interacting with other individuals in the feeding.

In observing Finless porpoise, we made a hypothesis that their feeding behavior is largely divided into three phases (Orienteering, Approaching and Chasing). I considered the time where Finless porpoise suddenly accelerates in the feeding behavior as a characteristic action switching from “Approaching” to “Chasing”. Then, we set $t = 0$ as the starting point of chasing at that point. We set the point of the fish school closest to Finless porpoise (“Closest”) and we analyzed the distance, angle and curvature related to that point. The distance is the distance between Finless porpoise and “Closest”, the angle is the angle between the traveling direction of Finless porpoise and “Closest”, and the curvature is the curvature around “Closest”. There was no significant difference depending on one or more of finless porpoise at these three points. Also, there was no correlation between each of the three points. In addition, we analyzed whether the direction of Finless porpoise progression is biased. As a result, in case of multiple cases, no bias was observed. On the other hand, in the case of a single case, a slight bias towards the right was observed against “Closest”.

*Master’s Thesis, Department of Information Science, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, March 11, 2019.

However, in the verification using the binomial test, there was no significant difference in bias. As a result, interaction between Finless porpoise during feeding of Finless porpoise was not confirmed in this study. Based on this result, we make suggestions for more research development.

Keywords:

Finless Porpoise, Feeding Behavior, Sociality

目次

図目次	v
表目次	1
第 1 章 はじめに	2
1.1 背景	2
1.2 本研究の目的	3
1.3 本論文の構成	3
第 2 章 解析データ	4
2.1 使用動画	4
2.2 スナメリのトラッキング	5
2.3 採餌における単数・複数個体条件の分類	5
第 3 章 スナメリの採餌行動の解析	7
3.1 スナメリに対する魚群の位置関係	7
3.2 スナメリからの魚群の距離	9
3.3 魚群に対するスナメリの進行角度	10
3.4 魚群の局所的な形状	12
3.5 各特徴量の相関性	14
3.6 魚群の近傍点に対するスナメリの進行方向	14
第 4 章 結論と考察	17
4.1 結論	17
4.2 遊泳における反時計回りの優勢	17
4.3 本データを扱う上での問題点と解決案	18
4.4 さらに展開に向けて	19
謝辞	21
参考文献	22

図目次

1	使用動画のサンプル画像.	5
2	スナメリの軌跡と $t = 0$ における魚群の形状.	8
3	$t = 0$ における直線に近似したスナメリの軌跡と魚群の形状.	8
4	スナメリから “Closest” までの距離.	10
5	スナメリの進行方向と “Closest” 間の角度.	11
6	スナメリの進行角度.	11
7	スナメリの進行方向と曲率の範囲.	13
8	“Closest” 付近の曲率の分布.	13
9	スナメリの進行角度, 魚群の曲率および魚群からの距離の関係.	15
10	魚群の曲率とスナメリの進行角度および魚群からの距離の各々の 相関.	15

表目次

1	$t = 0$ におけるスナメリの "Closest" に対する進行方向.	16
2	複数の採餌における $t = 0$ のスナメリの他個体に対する進行方向. .	16

第 1 章 はじめに

1.1 背景

我々人類を含む生物は他個体と関わり合いながら社会生活を行っている。何世代にもわたる社会生活で、多くの種が社会性を獲得して来た。そして、それらは社会性の獲得により様々な恩恵を受けている [1]。近年、野生動物の観察・調査が進むにつれて、より多くの動物において社会性を持つことが明らかになってきている。特に哺乳類において非常に高度な社会性が報告されている。チンパンジーは非常に高い知能を持ち、協力的な採餌を行いその餌を分け合う [2]。さらに、象は他個体の状況を理解し、考慮することができる [3]。

鯨類においても高度な社会性を持つことが知られている。鯨類はホイッスルという音を発信することでコミュニケーションを行っていることは非常に有名である。シャチ (*Orcinus orca*) では、ホイッスルが近距離間の通信で重要な役割を果たしている [4]。ハンドウイルカ (*Tursiops truncatus*) ではホイッスルによって個々の特定を行う [5]。さらには、ハンドウイルカのホイッスルには文脈が存在すると考えられている [6]。また、ハンドウイルカは共同注意を行うことや [7]、個体間で同盟関係を結ぶなど非常に高い社会性を持つ [8]。

社会性を示す行動の一つとして採餌行動がある。グループの採餌は、同時追跡から明確に調整された狩りまでの協力範囲とみなされる [9]。いくつかの哺乳動物、さらには鳥類でも協同的または集団の採餌が報告されている ([10, 11, 9])。鯨類においても協同採餌の例が報告されており、ハシナガイルカ (*Stenella longirostris*) [12]、ハンドウイルカ [13, 14]、シャチ [15, 16]、ザトウクジラ (*Megaptera novaeangliae*) [17] などで協同採餌が報告されている。

近年、スナメリにも社会性を持つ可能性があることを示唆する研究結果が報告された [18]。しかし、スナメリが採餌において協同関係を築いているかは未だ明らかでない。我々は観察する中で、スナメリは単独で採餌を行う場合と複数で採餌を行う場合を発見した。スナメリは通常的生活史において群れを形成しない（通常平均群れサイズは 1 ～ 2 匹）[19, 20]。しかしながら、採餌の時や繁殖時などの限定的な環境において群れを形成することが多々あるとされてきた。このようなスナメリの大きな群れは単独個体もしくは小群が集まったものであると考えられている [20]。

群れを形成するハンドウイルカでは、魚群を囲い込む役割（Barrier）と魚群に進入する役割（Driver）を分担し集団採餌を行うことが報告されている [14]。スナメリ各々を観察した結果、Driver および Barrier と類似した行動が観察された。これらの行動が実際に Driver もしくは Barrier と同等の行動である定量的証拠はなく、スナメリの協同採餌の結果かは明らかでない。

1.2 本研究の目的

本研究ではスナメリの採餌行動を定量的に解析し、スナメリが採餌行動において他個体とインタラクションを行なっているか明らかにする。最終的にはスナメリが社会性を持つか明らかにすることを期待する。

まず、はじめにドローンを用いて上空からスナメリの採餌動画の撮影を行った（京都大学 野生動物研究センター 森村先生等）。そして、その動画よりスナメリのトラッキングを行いスナメリと魚群の関係性を観察した。そして、スナメリのインタラクションの有無を明らかにするために、単数における採餌の場合と複数における採餌の場合について解析を行った。

1.3 本論文の構成

第 1 章では動物の社会性について、中でも鯨類と採餌行動について言及する。その上でスナメリの採餌行動の協調性について明らかでないことを説明し、本研究の目的を述べる。第 2 章では、解析するにあつての条件およびスナメリの単複を定義する。第 3 章では採餌時の各特徴量において解析を行いその結果を述べる。そして、最後に本研究の考察と結論を記述する。

第 2 章 解析データ

本研究は、日本九州熊本の有明海周辺に生息するスナメリの採餌行動の解析を行った。スナメリ属 (*Neophocaena*) は 2 種に分かれており、南シナ海からインド洋方面に分布する個体は *Neophocaena asiaeorintalis*, 揚子江から黄海・朝鮮半島沿岸を経て日本にまで分布する個体は *Neophocaena phocaenoides* と分類される [19, 20]。そのうち、本研究の対象生物として *Neophocaena asiaeorintalis* である。

2.1 使用動画

スナメリの行動を解析するにあたって、ドローンで上空から撮影した動画を用いた。この動画は共同研究先である森村教授等、京都大学野生動物センター、によって 2017 年 3 月から 2018 年 5 月の間に、日本熊本県三角西港 ($32^{\circ} 37' 7.4''$ N, $130^{\circ} 27' 13.5''$ E) 沿岸の 1.2 km^2 の範囲で撮影された。使用したドローン (Mavic Pro, DJI Co. Ltd) の動画の画面サイズは 3840×2160 ピクセル、フレームレートは 29.97 fps である。

ドローンは Android OS (VC Technology Ltd) 用のアプリケーション (Litchi ver. 4.6.1-g) を使用して手動で制御を行なった。1 回のフライトあたり合計 15 分程度のビデオ映像を収集できる。飛行は午後 5 時から日没時まで 1 日最大 3 時間行われた。ドローンの飛行高度は海拔 40 から 149 m (asl) の範囲で調整を行なった。

図 1 に動画の 1 フレームの一部を例として示す。中心の暗い部分が魚群、最も白く明るい点が海鳥、そして海鳥より色が暗い点がスナメリである。調査期間中の水の見え方は天候や潮の状況によって日々変化するが、通常 2m 未満である。本研究ではドローンの停止時およびドローンが平行移動時のみ採用した。しかし、平行移動において、ランドマークが存在するもの、および、海鳥が海上で停止しているものに限り採用した。ドローンが回転しているものに関しては採用していない。理由として、ドローンが常時水面に対し垂直に撮影している保証がないためである。

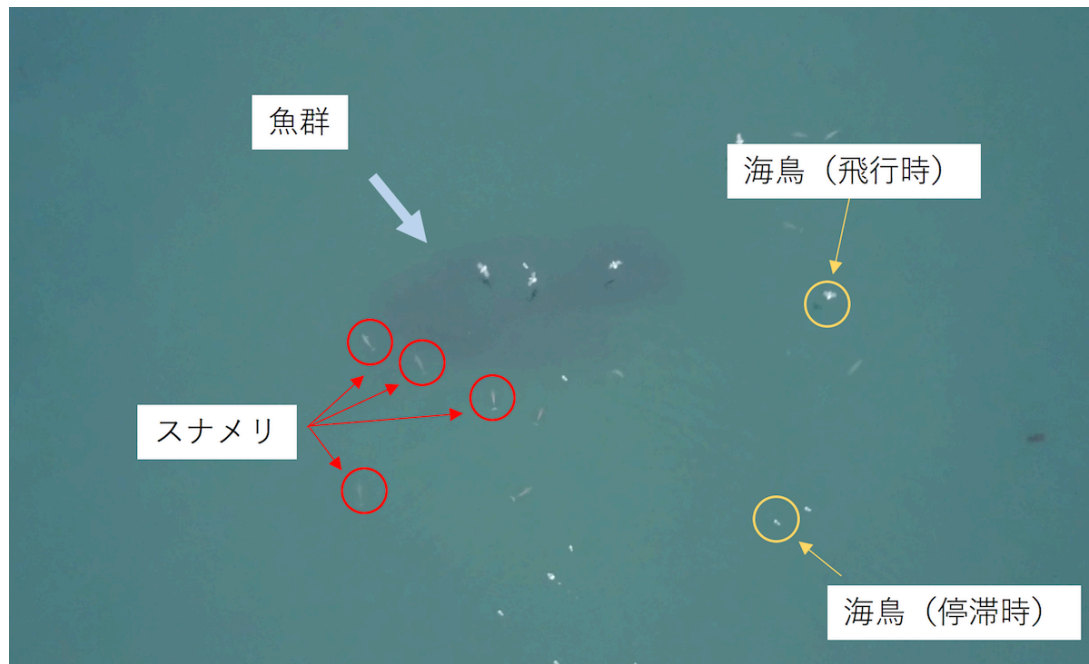


図 1 使用動画のサンプル画像.

2.2 スナメリのトラッキング

トラッキングソフトとしてフリーソフトの Tracker ver. 5.0.5*を使用した. 本研究ではトラッキングは動画 5 フレームごとにトラッキングを行った. トラッキングを行う点はスナメリの両胸ビレの中心とした.

2.3 採餌における単数・複数個体条件の分類

スナメリが他個体の影響を受けているかを明らかにするために, 採餌が単数で行われているか, 複数で採餌を行っているかを次のように定義した. 単数は

1. $t = 0$ のフレーム上に対象以外のスナメリが存在しない場合.
2. 対象のスナメリと他個体間の距離が十分である場合.
3. 異なる方角から魚群へ接近してきた場合.

*<http://physlets.org/tracker/>

4. $t = 0$ において他個体が魚群の方向を向いていない場合.

いずれかを満たしているものと設定した. 一方で複数は,

1. 対象のスナメリと他個体間で同調的な行動が観察された場合.
2. 対象と他個体間の距離が小さい場合.

の双方を満たしているものと設定した.

第3章 スナメリの採餌行動の解析

スナメリと魚群の位置および魚群の形は逐次変化する．解析するにあたって，解析の開始点である $t = 0$ となる基準を設定する必要がある．

私たちは，観察する中でスナメリの採餌行動は大きく“動機付け”，“接近”および“追跡”の3つのフェーズに分かれるという仮説を立てた．“動機付け”とはスナメリが魚を狩りする動機を持つフェーズ，“接近”とは魚群に近づくフェーズ，“追跡”とはターゲットにした魚を獲るフェーズである．

スナメリの採餌行動において，スナメリが魚群の方向へ進行中に，急激にスナメリの速度が加速する行動である．これを，接近フェーズと追跡フェーズの過程が切り替わる特徴的な行動であると考えた．

採餌行動の中でスナメリが急に加速するこのポイントを， $t = 0$ と設定した．急激に加速することから，この点においてスナメリが採餌を本格的に開始する意思決定を行ったと考える．この $t = 0$ においてのスナメリと魚群の関係の解析を行った．しかし， $t = 0$ は厳密にはスナメリの進行速度が急激に加速した点ではなく，スナメリが尾ビレを大きく上下運動させ，結果的に進行速度が加速した点を $t = 0$ と設定した． $t = 0$ からスナメリが目視で観察できなくなるまでトラッキングを行った．

本研究において，サンプルサイズは単数が18個体，複数が15個体の計33個体である．

3.1 スナメリに対する魚群の位置関係

はじめに， $t = 0$ におけるスナメリの進行方向と魚群の関係性を明らかにするために，スナメリの体の向きに対する魚群の配置を観察した．

まず， $t = 0$ における魚群と海の境界の形をとる．魚群の形状は，魚群の暗い部分と海の明るい部分を目視により判定し，手作業により抽出し同定した．次に， $t = 0$ におけるスナメリの体長を求める．頭部と尾部を目視で判定し，手作業で各々に印を入れて体長を算出した．そして，スナメリの体の向きが統一になるように魚群の形状とスナメリの軌跡を回転させた後，それらを重ね合わせた．この時，スナメリの大きさが一定となるようスケールを調節している． $0 \leq t \leq 0.17$ (s) (5 フレーム

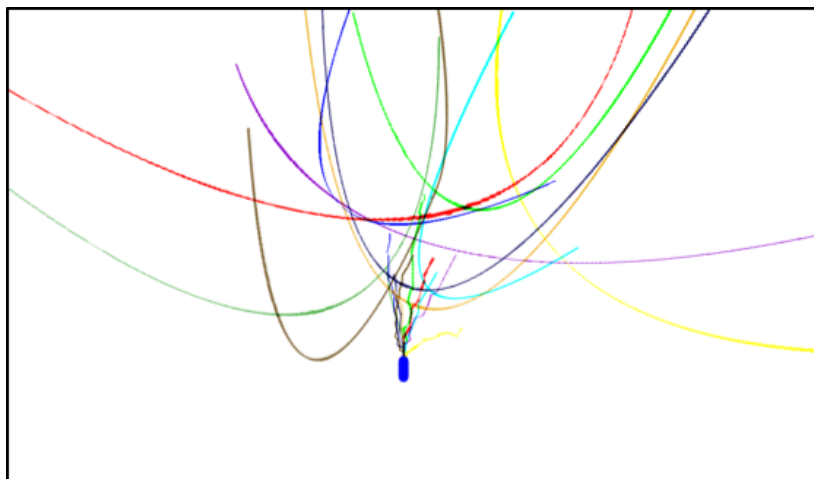


図 2 スナメリの軌跡と $t = 0$ における魚群の形状. 青い点は $t = 0$ におけるスナメリの位置を示す. スナメリの体長はスケールに対して統一化されている. 青い点より伸びる線はスナメリの軌跡を示し, 各軌跡に対して, 対応する魚群の形状は同じ色で示されている.

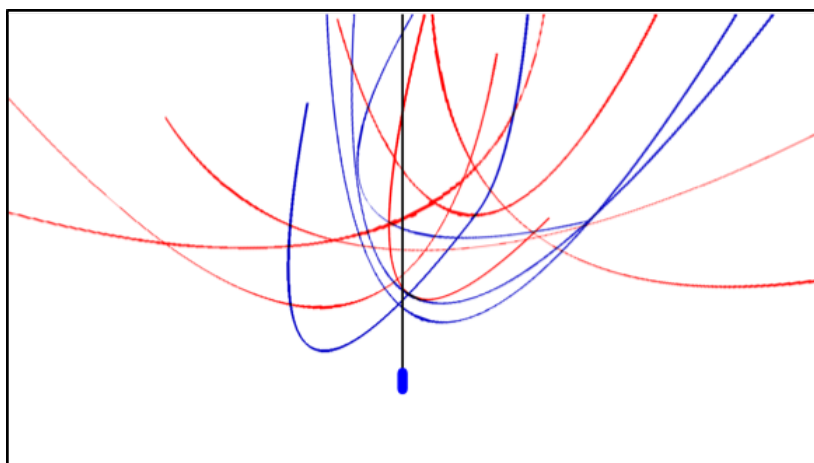


図 3 $t = 0$ における直線に近似したスナメリの軌跡と魚群の形状. 青い点は $t = 0$ におけるスナメリの位置を示す. 赤い曲線は単独での採餌を, 青い曲線は複数での採餌を示す. 黒い直線は直線に近似されたスナメリの軌跡を示す.

に相当)間の位置の誤差をスナメリの体の向きとみなした。その結果を図2に示す。ここでは簡潔に示すために10個体のみ表示した。図2の結果、スナメリの軌跡と魚群の配置において統一性はなかった。

しかし、進行軌跡の多くは直線的であることが明らかとなった。よって、スナメリの $0 \leq t \leq 1$ (約30フレームに相当)の軌跡を最小二乗法を用いて直線に近似し、進行方向を統一化させた。ここでは、単独での採餌と複数での採餌において差があるかを観察するため、魚群の形状を色により差別化した。その結果を図3に示す。ここでは図2と同じサンプルを用いた。軌跡を直線に近似した際、採餌時の個体数条件間で異なるに傾向はなく、全体としても一定の傾向は観察できなかった。

3.2 スナメリからの魚群の距離

3.1項の結果を受けて、魚群の位置関係では一定の傾向がないため、より単純な各特徴量に一定の傾向があると仮説を立てた。スナメリの $t = 0$ における、魚群からの距離に統一性があるのかを定量的に解析を行った。同時に、採餌時にスナメリが他個体とインタラクションしているかを解析するため、単複の差の解析も行った。これを解析するにあたり、スナメリから魚群までの距離をスナメリの体長を基準にした。この基準を用いた理由は、ドローンの高さや位置情報および角度の影響より絶対距離を算出するのが困難であったためである。魚群の基準点としてスナメリから最も近い魚群の点を“Closest”と設定した。スナメリ1頭の体長を1とし、スナメリと“Closest”間の距離をスナメリの体長数として計算した。

まず、3.1項と同様にしてスナメリの体長を算出した。次に、3.1項で取得した魚群の形状から“Closest”を探索した。そして、“Closest”とスナメリ間の距離を算出し、それをスナメリの体長で割った。その結果を図4に示す。

$t = 0$ におけるスナメリの位置の平均は、全体では“Closest”から2.51離れた地点にあった。Kolmogorov-Smirnov検定を用いて検定した結果、有意差が認められなかった ($p = 0.30$)。さらに、同項目においてMann-WhitneyのU検定を用いて検定した結果、有意差が認められなかった ($p = 0.14$)。

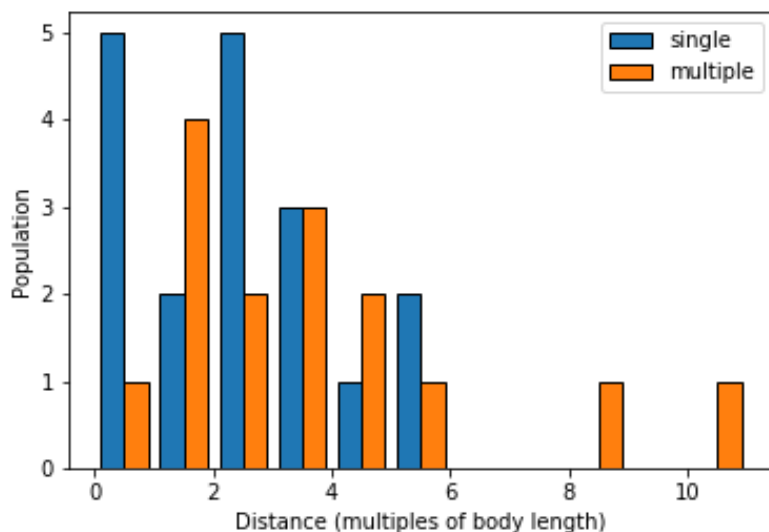


図 4 スナメリから “Closest” までの距離.

3.3 魚群に対するスナメリの進行角度

3.2 項の結果より、距離はスナメリの個体数に影響されないことが明らかとなった。しかし、図 3 でスナメリは垂直でなく斜めに魚群に侵入する傾向が見られた。単独採餌は干渉されずに行動できるが、複数採餌では他個体の影響を受ける可能性があるため、角度では採餌時のスナメリの数に影響を受けると仮説を立てた。よって、 $t = 0$ におけるスナメリの進行方向に統一性があるのかを定量的に解析を行った。ここでは $t = 0$ の直後ではなく最終的にスナメリが進行した方向の解析を行った。同時に、採餌時にスナメリが他個体とインタラクションしているかを解析するため、単複の差の解析も行った。

まず、3.2 項と同様にスナメリの体長、“Closest” を算出した。次に、 $0 \leq t \leq 1$ (s) (約 30 フレームに相当) のにスナメリの進行方向を最小二乗法を用いて近似した。しかし、1 秒間の軌跡をトラッキングできなかったサンプルに関しては観測できたデータの範囲内で近似した。また、1 秒以内に $t = 0$ 時点の魚群の縁に到達したサンプルに関しては、魚群に侵入していない時点までの軌跡を用いている。そして、 $t = 0$ におけるスナメリの位置を中心とし、“Closest” と近似した進行方向間の角度

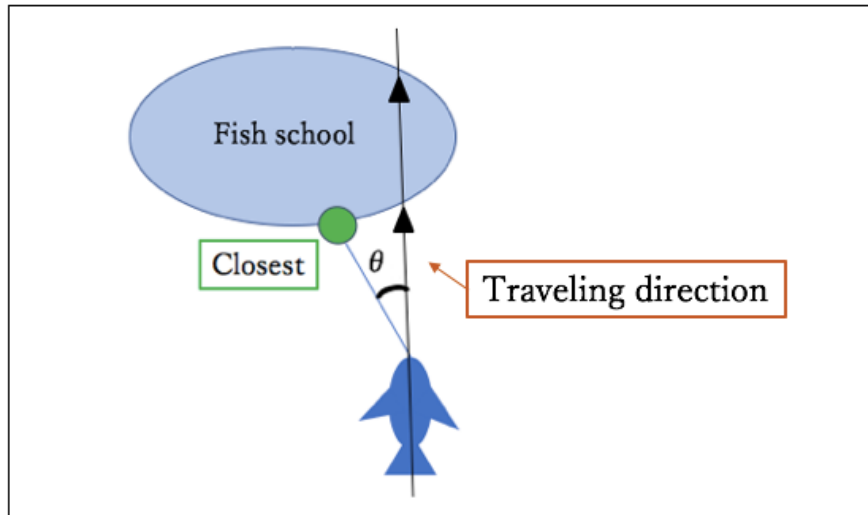


図 5 スナメリの進行方向と “Closest” 間の角度.

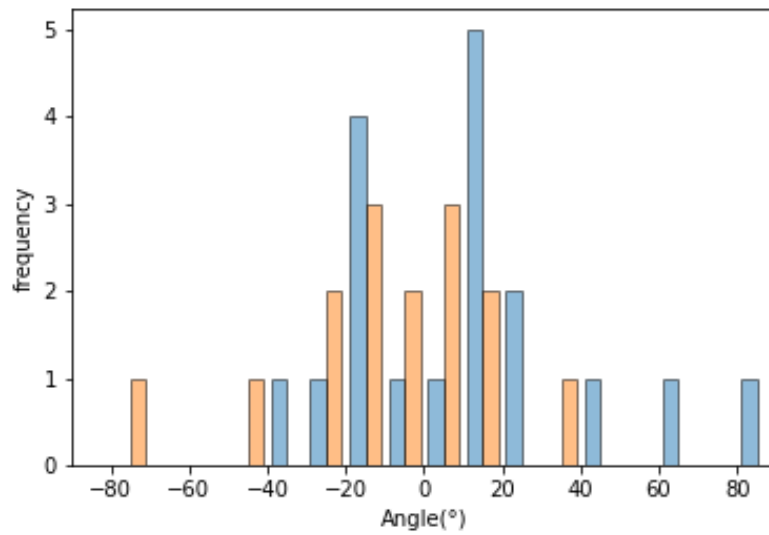


図 6 スナメリの進行角度.

(θ) を算出した (図 5) . 図 6 では “Closest” を中心 (0°) として , “Closest” に対してスナメリが右に進行するとプラス, “Closest” に対してスナメリが左に進行するとマイナスと表記する.

$t = 0$ において単数の場合, スナメリの進行方向は “Closest” を中心に左右 $10 \leq \theta \leq 20$ における頻度が高い傾向が観察された. 一方, 複数での場合, その傾向が緩和された. また, 単数の場合は比較的右へ進行する傾向が観察された. そこで, 角度において T 検定, Kolmogorov-Smirnov 検定, Mann-Whitney の U 検定を行なった. スナメリの単数による採餌と複数による採餌の角度を T 検定を用いて検定した結果, 有意差が認められなかった ($p = 0.05$). また, 同項目において Kolmogorov-Smirnov 検定を用いて検定した結果, 有意差が認められなかった ($p = 0.17$). また, 同項目において Mann-Whitney の U 検定を行なった結果, 有意差が認められなかった ($p = 0.05$).

3.4 魚群の局所的な形状

これまでの結果より, 角度と距離は採餌時にスナメリの個体数に依存する明確な証拠が得られなかった. そこで, スナメリは魚群に対し自身に近い地点の魚群の形状によって意思決定をしているのではないかと仮説を立てた. よって本項では魚群の局所的な形状を考慮する. 魚群の形状を定量化するために曲率を用いた. 曲率は “Closest” 付近の魚群形状を用いた.

まず, 3.2 項および 3.3 項同様に スナメリの体長, “Closest” , スナメリと “Closest” 間の距離および進行方向と “Closest” の角度 (θ) を算出する. 次に “Closest” を中心とした, 1 辺 2 (スナメリの体長 1 とする) の正方形を抽出する (図 7). 最小二乗法を用いてその正方形範囲内の魚群の形状を円に近似し, その曲率を求めた. その分布を図 8 示す.

スナメリの単数による採餌と複数による採餌の曲率を Kolmogorov-Smirnov 検定を用いて検定した結果, 有意差が認められなかった ($p = 0.76$). また, 同項目において Mann-Whitney の U 検定を行なった結果, こちらも有意差が認められなかった ($p = 0.05$).

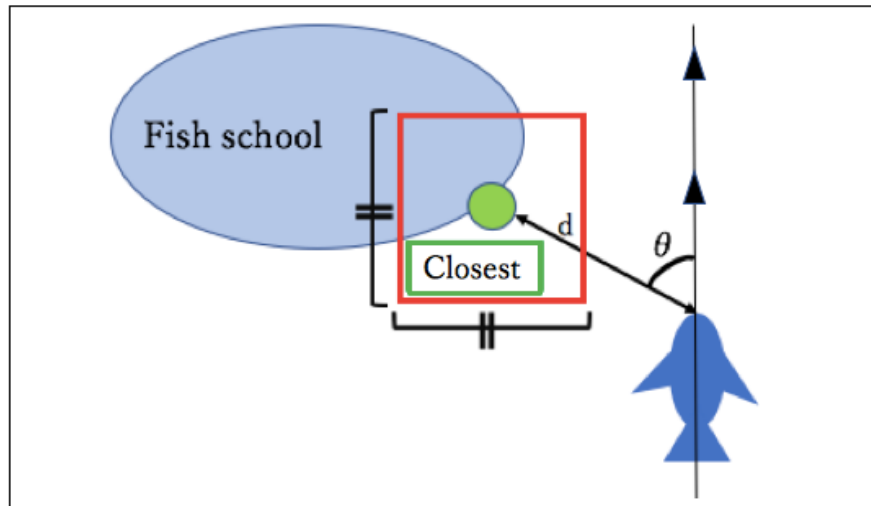


図7 スナメリの進行方向と曲率の範囲.

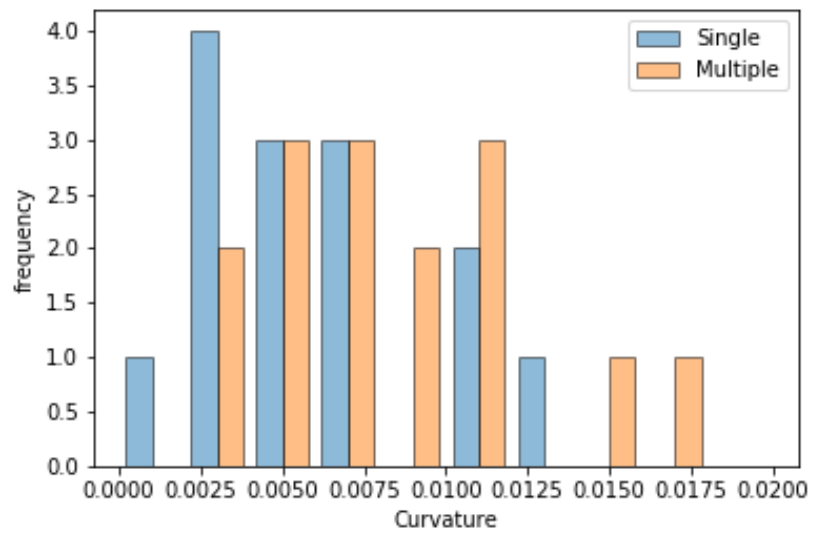


図8 “Closest” 付近の曲率の分布.

3.5 各特徴量の相関性

3.2 項から 3.4 項より、各々の特徴量の中で最近点を避けて進行する以外一定の傾向は認められなかった。そこで単独の特徴量では一定の傾向がないが、他の特徴量間に関係性があると仮説を立てた。距離、角度、および曲率の相関性の結果を図 9、図 10 に示す。

結果として $t = 0$ において、距離、角度および曲率間に相関性や一定の傾向はみられなかった（図 9）。さらに、距離と角度（図 10 A）、距離と曲率（図 10 B）および角度と曲率（図 10 C）いずれに関しても相関性および一定の傾向は認められなかった。

3.6 魚群の近傍点に対するスナメリの進行方向

3.2 項から 3.5 項の結果を受けて、純粋な数理モデルで表現することは困難であると考えた。しかし、3.3 項で特に単数の場合においてスナメリの進行方向が 2 極化する可能性が示唆された。そこで、より行動を単純化し、解析を行なった。本項ではスナメリの方向性のみに焦点を当て、スナメリの進行方向に他個体の影響を受けるか解析を行なった。

まず、3.3 項で得られた角度を正負と単複により区分する。正負による区分とはすなわち、スナメリと魚群の最近点間を直線と結んだ際、その直線に対してスナメリが進行した左右方向のことを示す。

その結果、単数で採餌を行う際右側に 61% 進行し、複数と考えられるものは左に 60% 進行した（表 1）。この結果から、スナメリの採餌時における進行方向には単複による若干偏りがあると考えられる。しかし、スナメリの単数による採餌と複数による採餌の進行方向を χ^2 検定検定を用いて検定した結果、有意差は認められなかった ($p=0.74$)。また、進行方向に偏りがあるかを調べるために二項検定により検証したが、単数の場合も複数の場合もいずれも非有意であった（単数： $p=0.24$ 、複数： $p=0.30$ ）。

表 1 の結果より、スナメリが複数で採餌を行う場合は右に、複数で採餌を行う場合は左に進む傾向が見られることから、他個体の影響を受けていると仮説を立てた。そこで、複数時、周辺の別個体に対してスナメリが進行する方向性を検証した。

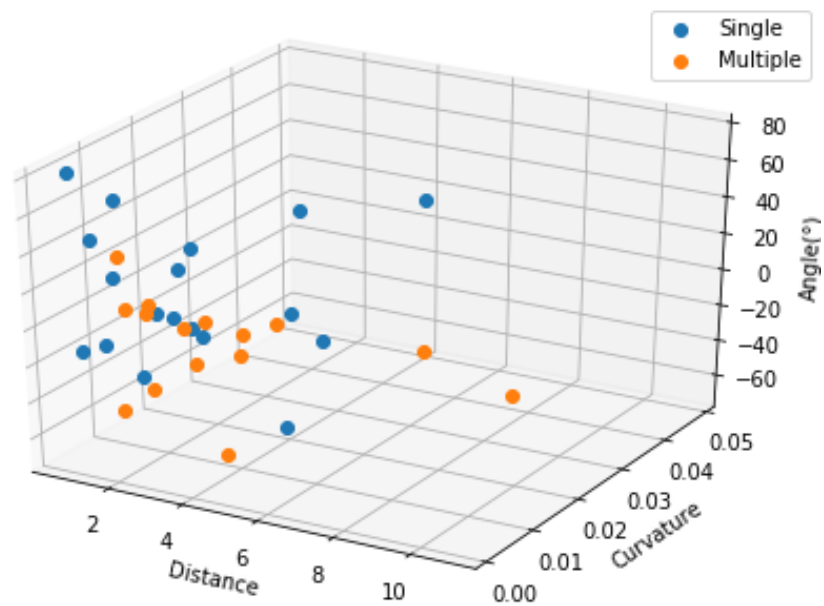


図9 スナメリの進行角度, 魚群の曲率および魚群からの距離の関係.

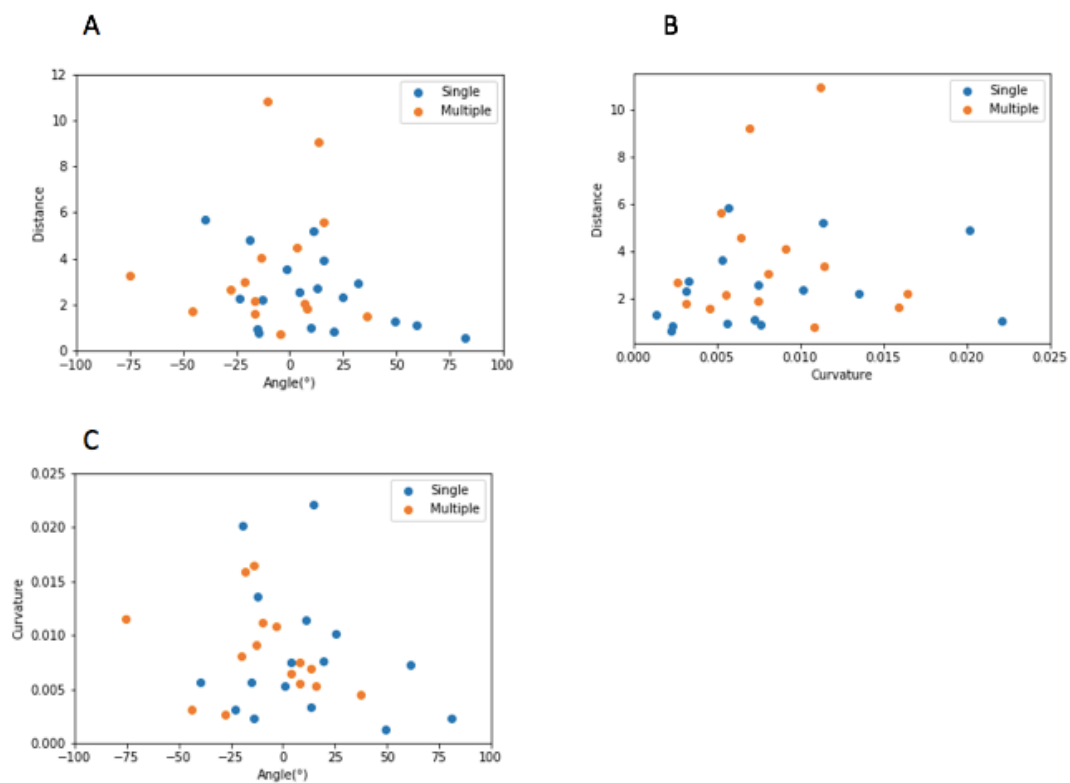


図10 魚群の曲率とスナメリの進行角度および魚群からの距離の各々の相関. A : 距離と角度, B : 曲率と距離の相関, C : 曲率と角度の相関.

表 1 $t = 0$ におけるスナメリの "Closest" に対する進行方向.

	Left	Right	Sum
Sigle	7	11	18
Multiple	9	6	15
Sum	16	17	33

まず, $t = 0$ に値するフレームに $t = 0$ におけるスナメリの位置と “Closest” を探索し, それらを直線で結ぶ. 次に, 3.3 項と同様に $0 \leq t \leq 1$ (s) (30 フレーム) 間のスナメリの進行方向を最小二乗法を用いて直線に近似し, その直線を $t = 0$ に値するフレームに描写する. そして, 対象のスナメリ周辺のスナメリを目視により標識した. 最後に, 目視により “Closest” を中心として, 他個体のスナメリに対し近づいたか遠ざかったか否かを判定した. この時, 対象のスナメリの周辺に目視では判定できないほど等距離に複数の他個体が存在した場合, それら全ての影響を受ける可能性があると考え, その場合は本検証に含めていない. よって, 本検証におけるサンプルサイズは 13 である (複数全体のサンプルサイズは 15). その結果, $t = 0$ からのスナメリが他個体に近く比率 (53%) は他個体から遠ざかる比率と同等である結果となった (表 2).

表 2 複数の採餌における $t = 0$ のスナメリの他個体に対する進行方向.

	Closer	Opposite	Sum
Multiple	7	6	13

第 4 章 結論と考察

4.1 結論

魚群の形を抽出し、スナメリの体の向きを統一させた結果、位置関係に一定の傾向は認められなかった。

この結果を受け、スナメリの単複により分布が異なると採餌開始時のスナメリと最近点間の距離、スナメリの進行方向と最近点間の角度および最近点を中心とした曲率の分布の解析を行ったが、いずれにおいてもスナメリの単複において差が認められなかった。さらに、距離、角度および曲率各々に対して相関性を確認したが、相関性は認められなかった。

この結果より、さらにスナメリの動きを単純化し、スナメリの最近点に対する進行方向の割合を解析した。その結果、単数の場合は最近点に対して右に、複数の場合は最近点に対して左に進行する傾向が見られた。複数の場合において、最近点に対する他個体への接近の有無に関して、他個体へ接近する個体数と他個体から遠ざかる個体数は同等程度であった。しかし、これらの進行方向においていずれにおいても進行方向に有意な偏りは認められなかった。

以上より、本研究においてスナメリの採餌時におけるスナメリ間のインタラクションは確認されなかった。

4.2 遊泳における反時計回りの優勢

本研究ではスナメリの進行方向の偏りに有意差は認められなかったが、単数のスナメリによる採餌において若干ながらスナメリからの魚群の最近点に対して右（魚群に対して反時計回り）に進行する傾向が観察された。メキシコ湾に生息しているクライメンイルカ（*Stenella clymene*）では採餌の際に海面付近の多くの個体が魚群に対して反時計回りに遊泳することが観察されている [22]。鯨類ではないが、オオクチバスは採餌行動においてラテラリティが存在する [23]。このように生物の採餌行動においてラテラリティが存在する事が多々ある。

鯨類では採餌行動以外でも多くの反時計回りの遊泳が確認されている。鯨類の遊

泳には偏りがあることは Lilly によって最初に提唱された [24]. この後、アメリカとロシアの双方で行われた研究でバンドウイルカでは反時計回りの方向性遊泳バイアスがあることが示唆された [25]. さらに、カリフォルニアのモンレー湾ではカマイルカ (*Lagenorhynchus obliquidens*) において睡眠中に反時計回りのバイアスがあることが報告されている [26]. これまでの多くの研究より、北半球における鯨類の反時計回りの遊泳の優位性が支持されている. 一方、南アフリカのハンドウイルカは時計回りの遊泳が優位的であることが報告されている [27]. これらの報告より、鯨類の回遊の方向性は地球規模の力に依存する可能性が示唆されている.

本研究は日本の有明海に生息するスナメリを対象としているため、単数の採餌においてそれらが反時計回りの優位性を持つ可能性がある. 本研究では全体のサンプル数が 33, 単数による採餌時のサンプルサイズが 18 であった. その条件下で約 60% の個体が最近点に対して右に進行していた. 本研究対象において進行方向の偏りを明らかにするためには、より多くの個体を解析し、サンプルサイズを大きくする必要がある.

4.3 本データを扱う上での問題点と解決案

本研究ではドローンによって撮影した動画をもとに解析を行った. しかし、これらの動画は解析を行う上でいくらか問題点が存在した.

1 つ目の問題点は上空からの撮影のため、カメラが固定されていないことである. そのため、動画の撮影範囲が一定でない. スナメリの動きが流動的なだけでなく、魚群も移動する. 魚群を常時映像内に収めるためには、カメラを断続的に移動させる必要がある. 海上では、常時停止したランドマークが存在しない場合が多く、移動による補正が困難である. さらに、最適な撮影状態を維持するためにドローンが回転する場合がある. カメラの傾きの情報がないため、ランドマークが存在しない海上の位置を補正することはもはや不可能である. ドローンの位置の取得は GPS により可能であるが（風による位置情報の振れ幅は不明）、カメラの傾きまで求めることはできない. この問題を解消するために、より広い範囲での撮影を行う必要がある. しかし、撮影高度の高い動画を用いて解析を行ったが、光の反射により長時間のスナメリのトラッキングは困難であった. これらの問題を解消するために、広角レ

レンズの利用を提案する。広角レンズであれば、高度が低い条件下でより広範囲の撮影が可能になる。広角レンズを用いる問題点として、レンズによる歪みの補正処理が必要になることである。

2つ目の問題点は魚群の境界が明らかでないことである。魚群の識別は上空からの色の変化によって決定している。しかし、魚群の境界の正当性は不明である。この問題を解決するために、ソナーの利用が好ましいと考える。ソナーを海上/海中に複数設置し、魚群の位置と形状を立体的に捉える（3D ソナーは開発され販売されている）。上空からの映像とマッチングさせる。この手法により、魚群の正確な境界を明らかにする。

3つ目の問題点はスナメリが海中に潜水することによる画面からの消失である。一度潜水したスナメリに関しては目視でも同一個体の特定は困難である。本研究の中で動画からスナメリの抽出を試みた結果、スナメリを抽出することに成功した。しかし、スナメリが一時潜水すると、スナメリを継続的にトラッキングすることができなかった。結果として、本動画からスナメリを自動でトラッキングすることは困難であることが明らかとなった。この問題を解決するためにスナメリに Global positioning system（GPS）の装着が有用であると考え、スナメリに GPS を装着することで海中を潜水する個体のトラッキングが期待できる。実際に GPS によるトラッキングは多く生物のトラッキングで用いられており [28, 29]、海洋生物でも用いられている [30, 31]。

4.4 さらに展開に向けて

本研究ではスナメリが加速する点のみに焦点をおき解析を行った。しかし、この点においてスナメリがインタラクションを行っている証拠は認められなかった。そこで他の特徴量に着目し、解析を行う必要がある。他の鯨類の採餌では魚群へ侵入する行動と囲い込む行動の役割分担が報告されている [17, 19, 20]。本研究で解析したサンプルの多くは魚群へ進入していく動きを示した。そのため、囲い込む行動について解析する必要があるかもしれない。

最後に研究を発展させていく上で解析に利用すると有益になると考えられる情報を提案する。

1 つ目がスナメリが採餌に成功したか否かの情報である。この情報を取得することで、グループサイズと採餌の成功率の相関性を明らかにすることが可能である。

2 つ目がスナメリの飢餓状態についてである。スナメリの採餌動画を観察する中で、魚群へ接近したにも関わらず魚群にアタックしないスナメリが存在した。また、採餌が終了し魚群から離れていく個体と、魚群にアプローチおよびアタックする個体が混在していた。飢餓状態と非飢餓状態ではスナメリの行動に差が生じると考えられる。行動に統一性を持たすためにはこれらを分類する必要がある。

3 つ目が他の有用であると考えられる情報は海中での振る舞いである。本研究に用いた動画では海上付近のスナメリの振る舞いしか観察できない。しかし、ザトウクジラでは海上付近と海中で採餌の際に行動が異なることが報告されている [17]。スナメリの海中戦略が明らかになることで、スナメリの採餌戦略が明らかになる可能性がある。スナメリの採餌時の水中での振る舞いを明らかにするために海中の映像が必要である。

また、スナメリは採餌を行うにあたって他個体だけでなく、魚群とインタラクションを行っている。すなわち、スナメリのモデルを考えるにあたり、魚群との関係性を明らかにするには魚群のモデルが必要である。そのためには、まず魚群の種類が明らかでなければならない。また、魚群のモデルを適用させるフィールドの情報（水深、地形）も重要であると考えられる。

さらに、音情報が非常に有用であると考えられる。ここにおける音情報とはイルカをはじめとする鯨類がコミュニケーションを行うときに用いるホイッスル音やバーク音のことを示す [4, 5, 6]。スナメリの単複により音の大きさや質によりスナメリがインタラクションを行っているか推定できる可能性がある。

謝辞

本研究をするにあたり、日頃より有益な助言と丁寧なご指導を賜りました 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 数理情報学研究室 池田和司 教授に深く感謝申し上げます。また、研究発表の際、貴重なご助言を賜りました 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 光メディアインタフェース研究室 向川康博 教授に厚く御礼申し上げます。本研究を遂行するにあたり、日頃より多くの有益なご助言と丁寧なご指導を頂きました 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 数理情報学研究室 久保孝富 特任准教授に深く感謝申し上げます。

本研究を進めるにあたり、スナメリの採餌動画の撮影およびご提供、ならびに多くの有益なご討論を賜りました森村成樹 特定准教授をはじめとする 京都大学 野生動物研究センターの方々に厚く御礼申し上げます。

大学院生活全般にあたり様々な面で支えて頂きました奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 数理情報学研究室の皆様にも深く御礼申し上げます。

最後に、大学院修了まで多大な支援を頂いた家族に深く感謝し、ここに謝辞とさせていただきます。

参考文献

- [1] Hodge, Sarah J. "Helpers benefit offspring in both the short and long-term in the cooperatively breeding banded mongoose." *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 272.1580 (2005): 2479-2484.
- [2] Boesch, Christophe, and Hedwige Boesch. "Hunting behavior of wild chimpanzees in the Tai National Park." *American journal of physical anthropology* 78.4 (1989): 547-573.
- [3] Plotnik, Joshua M., et al. "Elephants know when they need a helping trunk in a cooperative task." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108.12 (2011): 5116-5121.
- [4] Thomsen, F., D. Franck, and J. K. B. Ford. "Characteristics of whistles from the acoustic repertoire of resident killer whales (*Orcinus orca*) off Vancouver Island, British Columbia." *The Journal of the Acoustical Society of America* 109.3 (2001): 1240-1246.
- [5] Janik, Vincent M. "Whistle matching in wild bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*)." *Science* 289.5483 (2000): 1355-1357.
- [6] Janik, Vincent M., Dietmar Todt, and G. Dehnhardt. "Signature whistle variations in a bottlenosed dolphin, *Tursiops truncatus*." *Behavioral Ecology and Sociobiology* 35.4 (1994): 243-248.
- [7] Pack, Adam A., and Louis M. Herman. "Dolphin social cognition and joint attention: Our current understanding." *Aquatic Mammals* 32.4 (2006): 443.
- [8] Wiszniewski, Joanna, Culum Brown, and Luciana M. Möller. "Complex patterns of male alliance formation in a dolphin social network." *Journal of Mammalogy* 93.1 (2012): 239-250.
- [9] Kitchen, Dawn M., and Craig Packer. "Complexity in vertebrate societies." *Levels of selection in evolution* (1999): 176-196.
- [10] Ellis, David H., et al. "Social foraging classes in raptorial birds." *Bioscience* 43.1 (1993): 14-20.

- [11] Creel, Scott, and Nancy Marusha Creel. "Communal hunting and pack size in African wild dogs, *Lycaon pictus*." *Animal Behaviour* 50.5 (1995): 1325-1339.
- [12] Benoit-Bird, Kelly J., and Whitlow WL Au. "Cooperative prey herding by the pelagic dolphin, *Stenella longirostris*." *The Journal of the Acoustical Society of America* 125.1 (2009): 125-137.
- [13] Gazda, Stefanie K., et al. "A division of labour with role specialization in group-hunting bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) off Cedar Key, Florida." *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 272.1559 (2005): 135-140.
- [14] Gazda, Stefanie K. "Driver - barrier feeding behavior in bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*): New insights from a longitudinal study." *Marine Mammal Science* 32.3 (2016): 1152-1160.
- [15] Similä, Tiu, and Fernando Ugarte. "Surface and underwater observations of cooperatively feeding killer whales in northern Norway." *Canadian Journal of Zoology* 71.8 (1993): 1494-1499.
- [16] Pitman, Robert L., and John W. Durban. "Cooperative hunting behavior, prey selectivity and prey handling by pack ice killer whales (*Orcinus orca*), type B, in Antarctic Peninsula waters." *Marine Mammal Science* 28.1 (2012): 16-36.
- [17] D'Vincent, Cynthia G., Russell M. Nilson, and Richard E. Hanna. "Vocalization and coordinated feeding behavior of the humpback whale in southeastern Alaska." *Scientific Reports of the Whales Research Institute* 36 (1985): 41-47.
- [18] Morimura, Naruki, and Yusuke Mori. "Social responses of travelling finless porpoises to boat traffic risk in Misumi West Port, Ariake Sound, Japan." *PloS one* 14.1 (2019): e0208754.
- [19] Shirakihara, Miki, Kunio Shirakihara, and Akira Takemura. "Distribution and seasonal density of the finless porpoise *Neophocaena phocaenoides* in the coastal waters of western Kyushu, Japan." *Fisheries science* 60.1 (1994):

41-46.

- [20] 粕谷俊雄 (2011) 『イルカ - 小型鯨類の保全生物学』 東京大学出版会
- [21] Jefferson, Thomas A., and John Y. Wang. "Revision of the taxonomy of finless porpoises (genus *Neophocaena*): the existence of two species." *Journal of Marine Animals and Their Ecology* 4.1 (2011): 3-16.
- [22] Fertl, D., A. J. Schiro, and D. Peake. "Coordinated feeding by Clymene dolphins (*Stenella clymene*) in the Gulf of Mexico." *Aquatic Mammals* 23 (1997): 111-112.
- [23] Yasugi, Masaki, and Michio Hori. "Lateralized behavior in the attacks of largemouth bass on *Rhinogobius* gobies corresponding to their morphological antisymmetry." *Journal of Experimental Biology* 215.14 (2012): 2390-2398.
- [24] Lilly, John Cunningham. *Man and dolphin*. New York: Doubleday, 1961.
- [25] Ridgway, Sam H. "The central nervous system of the bottlenose dolphin." *The bottlenose dolphin* (1990): 69-97.
- [26] Goley, Patricia Dawn. "Behavioral aspects of sleep in Pacific white - Sided Dolphins (*Lagenorhynchus Obliquidns*, Gill 1865) 1." *Marine mammal science* 15.4 (1999): 1054-1064.
- [27] Stafne, Guinevere M., and Paul R. Manger. "Predominance of clockwise swimming during rest in Southern Hemisphere dolphins." *Physiology & behavior* 82.5 (2004): 919-926.
- [28] Kays, Roland, et al. "Terrestrial animal tracking as an eye on life and planet." *Science* 348.6240 (2015): aaa2478. g tracks of African Penguins." *Marine biology* 145.2 (2004): 215-223.
- [29] Grémillet, David, et al. "Offshore diplomacy, or how seabirds mitigate intra-specific competition: a case study based on GPS tracking of Cape gannets from neighbouring colonies." *Marine Ecology Progress Series* 268 (2004): 265-279.
- [30] Schofield, Gail, et al. "Novel GPS tracking of sea turtles as a tool for conservation management." *Journal of Experimental Marine Biology and*

Ecology 347.1-2 (2007): 58-68.

- [31] Ryan, P. G., et al. "GPS tracking a marine predator: the effects of precision, resolution and sampling rate on foraging tracks of African Penguins." Marine biology 145.2 (2004): 215-223.