

Quantification of Sea Turtle Swimming Pattern in Examination Room for Managing Welfare

Naoto K. Inoue*

Abstract

ウミガメ保全の一環として、漂着・混獲個体の保護や孵化幼体のヘッドスタートが行われているが、その際ウミガメは制限された飼育環境下で大きな負の影響を受ける。それゆえ、飼育下での福祉を評価する必要があるが、ウミガメに特化した福祉評価法は確立していない。ウミガメの福祉を評価する上では、侵襲性や金銭的・人的コストの低さから行動観察を用いることが有益であると考えられているが、行動の評価基準を統一することや、行動に影響を及ぼす要因のモニタリングが困難であるため、信頼性の高い評価を行うハードルが高かった。しかしこれらの問題は、ウミガメの遊泳を定量的に評価する手法を構築し、環境要因をモニタリングするのではなく統一することで解決できる可能性がある。それゆえ本研究では、直上から撮影した動画から抽出した輪郭形状に対して形状解析と時系列解析を適用し、特定の遊泳パターンから他の遊泳パターンに変化するまでの時間や、特定の遊泳パターンが遊泳時間に占める割合を定量化する手法を構築した。また、光、温度、形状、色、塩分濃度、時刻をそろえた診察室を用意し、同じ巣から生まれたアオウミガメの幼体の遊泳を解析した。このような遺伝と環境要因を揃えた行動解析によって、定量化された遊泳パターンに個体差が見られたことは、本研究の枠組みを用いて個体の内的状態の違いを検出可能であることを示唆している。機械学習やクラスタリングによって本研究の手法を改善したり、定量化した遊泳パターンと他の福祉指標との関連性を調べることで、行動に基づくウミガメの福祉評価の利便性や信頼性をさらに向上させることができる。

Keywords : Conservation, Sea turtles, Shape analysis, Swimming pattern, Time-series analysis, Welfare

1 導入

ウミガメ個体群の多くが絶滅の危機に瀕しており [36]、さまざまな保全活動が行われている。特に、各地の水族館を中心として、漂着個体や混獲個体の保護・放流や、ヘッドスタートを目的とした幼体の飼育・放流が行われている。このとき、自然下では長距離を回遊しさまざまな環境刺激を受けるウミガメは [36]、人工的で狭く刺激の少ない飼育環境において大きな負の影響を受ける [31, 35]。

*Department of Science, Kobe University, Hyogo, Japan. Email:226s405s@cloud.kobe-u.jp

それゆえ、飼育環境におけるウミガメの福祉を評価し飼育環境の改善に努める必要があるが、ウミガメに特化した福祉評価基準は確立されていない [2, 35]。

Diggins et al. (2022) [2] は、Mellor (2017) [19] らが提唱した福祉評価の指標である Five Domains (nutrition, environment, physical health, behaviour, mental) をウミガメに関して吟味した。その結果、血液検査を主とする physical health の評価は侵襲性や金銭的・人的コストが高く、体重測定による nutrition の評価は信頼性に欠け、environment はモニタリング自体が困難である一方、behaviour は侵襲性や金銭的・人的コストが低く、さらに mental を内包するため、ウミガメの福祉評価において最も有用であるドメインであると結論づけた [2]。実際、ウミガメの福祉評価に関する文献のほとんどは行動に注目しており (e.g., [1, 3, 15, 27, 28, 35])、その有用性には意見の一致があるといえる。

しかし、行動観察によって福祉評価を行う上で2つの懸念がある: 行動評価の基準を評価者間で統一することが困難であることと、行動に影響しうる環境要因のモニタリングが困難であることだ。

懸念 1. 評価基準の統一 信頼性の高い福祉評価を行うには、全ての観察者が特定の行動の定義を理解し、評価基準を統一する必要がある [32]。しかし、負の福祉の指標として一般的な [16] ステレオタイプ行動 (異常な繰り返し行動 [5]) の定義として、Terrain et al. (2007) [28] では “Swimming in repetitive patterns around tank. Time began when the animal went into the third repeat of the behaviour”³、Wood (2022) [35] では “Continuous, patterned repetition of a random, non-targeted behaviour”⁴ が提案されているが、ウミガメの遊泳に関するこれらの表現は抽象的である。この定義の曖昧さに加え、一生のほとんどを外洋で過ごすウミガメの生態の理解自体が発展途上であることに加え [36]、保全のフラッグシップ種として利用されるウミガメは属するコミュニティや文化、宗教に依存して多様なイメージを持つ [4]。それゆえ、ウミガメの行動の評価基準を観察者間で統一するには相当な訓練が必要になる。

懸念 2. 環境要因のモニタリング 信頼性の高い福祉評価を行うには、行動に影響を及ぼしうる環境要因を記録し、その影響を考慮した上で行動を評価する必要がある [32]。しかし、時間 [6]、飼育密度 [9]、温度 [10]、光量 [30]、色 [34] といった多くの要因がウミガメの内的状態や行動に影響を及ぼすため、これらの環境要因全てをモニタリングすることは困難である [2]。

総じて、ウミガメの福祉評価にはコストや侵襲性の観点から行動観察が有用であるものの、評価基準の統一と環境要因のモニタリングが困難であることから、信頼性の高い福祉評価を行うハードルは高い。本研究では2つの枠組みを提案することで、行動観察による福祉評価のハードルを下げることを試みた: ウミガメの遊泳を機械的に定量化する手法の利用と、環境要因を統一した診察室での行動測定である。また、本研究の枠組みを親の同種アオウミガメの幼体に対して適用し、その結果を用いて信頼性の高い福祉指標を行うための指針を提供した。

2 手法と材料

ウミガメの遊泳を定量化可能な手法として、加速度計と動画を挙げるができる。このうち加速度計は、自然下のウミガメの行動パターンを把握する目的で利用されており (e.g., [21, 37])、近年では機械学習を用いて加速度データから遊泳パターンを推定する試みもなされている [8]。しかし、多くの保護個体に対する加速度計の装着には高い金銭的・人的コストが必要となるだけでなく、着脱の行為自体がウミガメにストレスを与えてしまう [29]。これに対し動画は、行動に関する客観的なデータを提供することに加え [32]、スマホや監視カメラの普及によって低い金銭的・人的コストで取得可能である (e.g., [13, 30])。特にウミガメは甲羅によって体の動きが制限されており、四肢の動きが移動や採餌において重要な役割を占めることから [38]、動画に捉えられた四肢の動きは遊泳に関する多くの情報を含んでいる。それゆえ本研究では、以下の手順で遊泳を定量化する。

2.1 節 水槽とウミガメとのコントラストを用いて動画から輪郭を抽出する

2.2 節 抽出した輪郭に対し形状解析を適用することで四肢の動きを時系列データとして取得する

2.3 節 取得した時系列データに対して VAR モデルに基づく時系列解析を行うことで遊泳パターンの変化を検出する

2.1 輪郭抽出

遊泳を定量化するには、動画から四肢の動きを取得すればよい。このとき、機械学習を用いて四肢そのものをトラッキングすることが考えられるが、ウミガメは四肢の可動域が広く、2次元動画では頻繁に四肢のトラッキングが途切れてしまう。それゆえ本研究では、四肢の動きを捉えるために、動画の各フレームの輪郭形状を抽出することを考える。これは、ウミガメの甲羅は濃い色をしているため、水槽の色が薄ければコントラストの違いから特別な操作なしに輪郭が抽出可能なためである。

動画を分割し作成した $t (= 1, 2, \dots, T)$ 番目のフレームの輪郭形状を、 P 個のラベルがついた輪郭座標 (解析例では $P = 100$)、

$$\mathbf{X}_t = (X_{t,1}, X_{t,2}, \dots, X_{t,p}, \dots, X_{t,P}), \quad \mathbf{Y}_t = (Y_{t,1}, Y_{t,2}, \dots, Y_{t,p}, \dots, Y_{t,P}) \quad (1)$$

として得る。この輪郭抽出には python の findcontour 関数 [22] を用い、CE.py スクリプトに実装した。

findcontour 関数 [22] によって抽出される輪郭座標は画像ごとに異なるラベル付けがなされた状態であるため、ラベルを修正し画像同士を比較可能にする作業が必要である。ここでは、機械学習ソフト Deeplabcut [18] を用いて、トラックが途切れることのない項甲板の端 (点 A とする) から臀甲板の端 (点 B とする) をトラックし、これらの座標を用いて、 x, y 平面上で A の座標が $(-1, 0)$ 、B の座標が $(1, 0)$ となるように輪郭座標の回転と規格化を行った (図 1)。また、次節で述べる形状解析を行うには、

ラベルと隣接する点の間隔を統一する必要があるため、R の approx 関数 [25] を用いて輪郭座標を直線近似したのち、尾の先端を始点として、隣接する点間の距離が等しくなるように新たな輪郭座標を設定した。このようにして、調節した輪郭座標

$$\mathbf{x}_t = (x_{t,1}, x_{t,2}, \dots, x_{t,p}, \dots, x_{t,P}), \quad \mathbf{y}_t = (y_{t,1}, y_{t,2}, \dots, y_{t,p}, \dots, y_{t,P}), \quad (2)$$

を得ることができる。調節した輪郭座標のうち x, y いずれかの絶対値が 2.5 を超えているものを含む画像は、影の影響で四肢の伸展が可能な範囲から輪郭が逸脱しているとみなして除外した。そして、代わりに 1 フレーム前の画像の輪郭座標を用いることでデータを補完した。これらの輪郭座標の規格化と調整は、FA.R スクリプトに実装した。

2.2 形状解析

輪郭抽出によって得た四肢の動きを定量的に捉えるため、本研究では形状解析を用いる。形状解析は、閉じた物体の形状を定量化する手法であり、生物に対しては形態の比較を主な目的として利用されてきた (e.g., [20, 26])。形状解析は、輪郭形状に対する楕円フーリエ変換 [14] の適用と、取得したフーリエ係数に対する主成分分析 [7] の適用からなる。

まず、輪郭座標 (2) に対し楕円フーリエ解析を適用するため、座標に時刻パラメータ $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_p, \dots, \tau_P$ を割り当て、 $\tau_P = 2\pi$ とする。これは、 x 座標と y 座標をそれぞれ閉じた波と捉えることに相当する。このとき、 t 番目の画像のラベル p のついた座標 $x_{t,p}$ と $y_{t,p}$ に対して、楕円フーリエ級数展開は、

$$\begin{aligned} x_{t,p} &= a_{t,0} + \sum_{q=1}^{\infty} (a_{t,q} \cos q\tau_p + b_{t,q} \sin q\tau_p) \\ y_{t,p} &= c_{t,0} + \sum_{q=1}^{\infty} (c_{t,q} \cos q\tau_p + d_{t,q} \sin q\tau_p) \end{aligned} \quad (3)$$

と書くことができる。ここで、 $a_{t,q}, b_{t,q}, c_{t,q}, d_{t,q}$ は t 番目の画像における振動数 q の楕円フーリエ係数である。本研究では四肢の動きに注目するため、体全体の中心からのずれを表す定数項 $\cos 0$ の寄与を無視し、周期 1 以上の正弦波・余弦波の影響のみを考える。これらの楕円フーリエ変換は、R の fft 関数 [25] を用いて、FA.R スクリプトに実装した。

楕円フーリエ変換によって得ることのできる楕円フーリエ係数は有限個 (Q 個とする: 解析例では $Q = 40$) であるが、 t 番目の画像の形状は $4 \times Q$ 次元の空間によって特徴付けられることになる。それゆえ、形状の変化を直接解釈したり、時系列解析を適用することは困難である。それゆえ、主成分分析によって、楕円フーリエ係数の線形和から輪郭形状の変化をよく説明する新たな次元 (軸) に情報を圧縮することを考える。このとき、 t 番目の画像の楕円フーリエ係数 $a_{t,q}, b_{t,q}, c_{t,q}, d_{t,q}$ を新たな軸

106 ヘ射影することで得られる値 h_t を、

$$\begin{aligned}
 h_t = & w_{a,1}a_{t,1} + w_{a,2}a_{t,2} + \cdots + w_{a,Q}a_{t,Q} \\
 & + w_{b,1}b_{t,1} + w_{b,2}b_{t,2} + \cdots + w_{b,Q}b_{t,Q} \\
 & + w_{c,1}c_{t,1} + w_{c,2}c_{t,2} + \cdots + w_{c,Q}c_{t,Q} \\
 & + w_{d,1}d_{t,1} + w_{d,2}d_{t,2} + \cdots + w_{d,Q}d_{t,Q}
 \end{aligned} \tag{4}$$

107 とする。 $\mathbf{w} = (w_{a,1}, \dots, w_{a,Q}, w_{b,1}, \dots, w_{b,Q}, w_{c,1}, \dots, w_{c,Q}, w_{d,1}, \dots, w_{d,Q})$ は係数ベクトルである。ここ
 108 で楕円フーリエ係数を新たに、 $(v_{t,1}, v_{t,2}, \dots, v_{t,4Q}) = (a_{t,1}, a_{t,2}, \dots, a_{t,Q}, b_{t,1}, \dots, d_{t,Q})$ として、

$$s_{i,j} = \frac{1}{4Q} \sum_{t=1}^{4Q} (v_{t,i} - \bar{v}_i)(v_{t,j} - \bar{v}_j), \tag{5}$$

109 という共分散を考える。 \bar{v}_i, \bar{v}_j はそれぞれ $v_{t,i}, v_{t,j}$ を全ての画像に関して平均した値である。この共
 110 散 $s_{i,j}$ を (i, j) 成分とする分散共分散行列 S を用いることで、新たに作成した軸上でのすべての画像
 111 に関する h_t の分散 V は、

$$V = \mathbf{w}^T S \mathbf{w}, \tag{6}$$

112 と書くことができる。この分散を最大化する問題は、固有値を λ とする固有値問題、

$$S \mathbf{w} = \lambda \mathbf{w}, \tag{7}$$

113 に帰着する。

114 最も分散の大きな軸 (Principal Component 1; pc1) におけるデータの分散は、(7) を解くことで得ら
 115 れる最大固有値 $\lambda^{(1)}$ に対応し、二番目に分散の大きな軸 (pc2) におけるデータの分散は二番目に大き
 116 な固有値 $\lambda^{(2)}$ に対応する。このとき、 r 番目に分散の大きい軸がすべての軸の分散の値に対して占め
 117 る割合 (説明力) は、考慮する pc 軸の総数が R 個のとき、

$$E^{(r)} = \lambda^{(r)} / (\lambda^{(1)} + \lambda^{(2)} + \cdots + \lambda^{(R)}), \tag{8}$$

118 と表すことができる。また、各軸に対応する固有ベクトル $\mathbf{w}^{(r)}$ は、楕円フーリエ係数の各軸に対す
 119 る寄与度を表し、固有ベクトルと説明力の高い pc 軸の情報のみから復元した輪郭形状の視覚的なプ
 120 ロットを用いて、pc 軸の意味を解釈することができる。

121 輪郭形状の主成分分析により、 t 番目の画像の輪郭形状は、pc 軸上での値 $h_t^{(1)}, h_t^{(2)}, \dots, h_t^{(R)}$ によっ
 122 て特徴づけられる。例えば、説明力が E_3 で急減する場合、画像の輪郭形状は2つの値 $h_t^{(1)}, h_t^{(2)}$ で
 123 十分に特徴付けられ、動画に捉えられた輪郭形状の変化を2次元時系列データ $(h_1^{(1)}, h_2^{(1)}, \dots, h_T^{(1)};$
 124 $h_1^{(2)}, h_2^{(2)}, \dots, h_T^{(2)})$ として捉えることが可能になる。これらの主成分分析は、R の prcomp 関数 [25] を

125 用いて、PCA.R スクリプトに実装した。

126 2.3 時系列解析

127 ウミガメの遊泳パターンの変化や継続時間を定量化するために、2.1 節、2.2 節の手法によって取得
128 した時系列を遊泳の特徴量と考え、その変化点を検出する。本研究では変化点の検出に、AR (Auto
129 Regressive) モデルを多変量に拡張した、VAR (Vector Auto Regressive) モデルを用いるが、これには 2
130 つの理由がある。第 1 に、取得した pc 軸に関する時系列は時間方向には互いに独立ではなく、時系
131 列間の依存性を考慮しなければ、動力的に重要な輪郭形状の変化を見逃す可能性があるからだ。第
132 2 に、輪郭形状の変化に関して、前肢の運動は振幅が大きく長い周期を持つ一方で、後肢の運動は振
133 幅が小さく周期は短いため、取得した時系列には遊泳パターンごとに異なる周期成分が卓越すると考
134 えられるからである。VAR モデルは、多変量時系列の関連性を考慮することができ、かつ周期成分
135 を捉えることが可能である。

136 N 次の VAR モデルは、 r 変量ベクトル $\mathbf{H}_t = (h_t^{(1)}, h_t^{(2)}, \dots, h_t^{(r)})$ に対して、

$$\mathbf{H}_t = \boldsymbol{\mu} + \sum_{n=1}^N \boldsymbol{\Phi}_n \mathbf{H}_{t-n} + \boldsymbol{\epsilon}_t, \quad (9)$$

137 と与えられる。ここで $\boldsymbol{\mu}$ は $r \times 1$ の平均ベクトル、 $\boldsymbol{\Phi}_n$ は時系列の依存性を示す $r \times r$ 係数行列で
138 あり、 $\boldsymbol{\epsilon}_t$ は平均 0、 $r \times r$ の共分散行列が $\boldsymbol{\Sigma}$ の多変量正規ノイズである。この VAR モデルのもと
139 で、パラメータ $\boldsymbol{\Theta} = (\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Phi}_1, \dots, \boldsymbol{\Phi}_N, \boldsymbol{\Sigma})$ 、残差ベクトル $\mathbf{e}_t = \mathbf{H}_t - \boldsymbol{\mu} - \sum_{n=1}^N \boldsymbol{\Phi}_n \mathbf{H}_{t-n}$ を用いて、
140 $\mathbf{H}_{t-N}, \mathbf{H}_{t-N+1}, \dots, \mathbf{H}_{t-1}$ が与えられた際の \mathbf{H}_t の条件付き密度関数は、

$$\begin{aligned} f(\mathbf{H}_t \mid \mathbf{H}_{t-N}, \mathbf{H}_{t-N+1}, \dots, \mathbf{H}_{t-1}, \boldsymbol{\Theta}) \\ = (2\pi)^{-N/2} |\boldsymbol{\Sigma}|^{-1/2} \exp \left(-\frac{1}{2} \mathbf{e}_t^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1} \mathbf{e}_t \right) \end{aligned} \quad (10)$$

141 と与えられる。対数をとった条件付き密度関数を $t = n+1, n+2, \dots, T$ の範囲で足し合わせるこ
142 で、VAR モデルの対数尤度

$$l(\boldsymbol{\Theta}) = \sum_{t=N+1}^T \log f(\mathbf{H}_t \mid \mathbf{H}_{t-N}, \mathbf{H}_{t-N+1}, \dots, \mathbf{H}_{t-1}, \boldsymbol{\Theta}), \quad (11)$$

143 を得ることができ、 N 次の VAR モデルの AIC は推定されたパラメータ $\hat{\boldsymbol{\Theta}}$ を用いて、

$$\text{AIC}(N) = \frac{1}{T-N} (-2 \times l(\hat{\boldsymbol{\Theta}}) + 2 \times \text{parameter number}), \quad (12)$$

144 と計算することができる。

VAR モデルを用いた時系列の分割では、任意の候補点で分割した際の AIC と、分割しなかった際の AIC を比較することで決定する。アルゴリズムの 1 段階目では、Kitagawa (2020) [12] の局所 AR モデルを参考とし、分割後の最小区間長を表すパラメータ α を用いて時系列の分割候補点を得る。

1-1: 分割の始点を表す変数 st を 1、分割の候補点を表す変数 $cand$ を α 、分割の終点を表す変数 end を 2α に設定する。

1-2: 始点 st から候補点 $cand$ までの区間 $h_{st}, h_{st+1}, \dots, h_{cand-1}$ の AIC_{sep1} と、 $cand$ から終点 end までの区間 $h_{cand}, h_{cand+1}, \dots, h_{end-1}$ の AIC_{sep2} を計算し、これらの和 $AIC_{sep} = AIC_{sep1} + AIC_{sep2}$ を計算する。

1-3: 始点 st から end までの区間 $h_{st}, h_{st+1}, \dots, h_{end-1}$ の AIC_{int} を計算する。

1-4: AIC_{int} よりも AIC_{sep} が小さければ分割点として h_{cand} を採用し、次の分割を行う始点として、 st を $cand$ に更新し、候補点 $cand$ は α に、終点 end は 2α に更新する。 AIC_{int} よりも AIC_{sep} が大きければ、分割と始点の更新は行わないが、候補点 $cand$ を $cand + \alpha$ に更新し、終点 end を $end + \alpha$ に更新する。

1-5: 1-2 から 1-4 を繰り返すことで、分割点 $(sep_1, sep_2, \dots, sep_m, \dots, sep_M)$ を得る。

アルゴリズムの 2 段階目では、アルゴリズム 1 で得た分割点の周りで、パラメータ $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots)$ を用いて候補点を細かく設定し、その中から最適な分割点を決定する。

2-1: アルゴリズム 1 によって分割された $m - 1$ 番目の点 sep_{m-1} と $m + 1$ 番目の点 sep_{m+1} までの区間を、 m 番目の点の周辺の点 $sep_m + \beta$ で区切り、分割後の AIC_{dsep} を計算する。

2-2: すべての周辺点に対して AIC_{dsep} を計算し、最も小さい AIC を持つものを新たな分割点とし、 sep_m をその分割点 sep'_m に更新する。

2-3: 2-1 から 2-2 を、 $m = 2, 3, \dots, M - 1$ に対して繰り返し、分割点 $(sep_1, sep'_2, \dots, sep'_{M-1}, sep_M)$ を得る。

アルゴリズム 1 と 2 によって、計算コストを減らしつつ、VAR モデルを用いて時系列を客観的に分割することが可能である。このとき、分割点は遊泳パターンが変化した点を示し、分割された区間は回帰係数によって特徴づけられる連続した遊泳パターンを示すと解釈することができる。VAR モデルの推定と AIC の計算にはパッケージ *vars* の関数 `VARselect` と `VAR` [23] を用いて TA.R スクリプトに実装した。

2.4 材料

実験個体の取得は、道の駅紀宝町ウミガメ公園 (33°46'11"N, 136°1'43"E) にて行った。飼育下のアオウミガメ (年齢不明) の交配によって 2023 年の 8 月 5-7 日の間に生まれた幼体のうち、無作為

に 10 匹を選び実験個体とした。実験個体は、ID1 から ID10 に対応するラベルをつけた。実験個体は、マリンソルト (SEA water, GEX Co.,Ltd.) を溶かした水で満たされた白色の半球型ボウル (内径 24cm, 深さ 13.5cm) の中で飼育した。飼育時には水中ヒーター (Tetra) によって水温を 26 度に保ち、餌 (KAMEPROS premium, Kyorin CO.,LTD.; OKINA KAME NO ESA, Kyorin CO.,LTD.) を 1 日に 1-2 回程度与えた。ボウルの水は 1 日に 1-2 回交換した。

動画の撮影は、環境要因を統一した図 2 の環境において、2023 年 10 月 24 日から 11 月 9 日にかけて行った。実験施設のバックヤードのうち、直射日光の当たらず風通しのよい 1800-2200 lx の場所にプラスチックケース (29.7cm × 48.2cm × 15.0cm) を設置した。プラスチックケースの容積の半分程度を水で満たし、その中に水中ヒーター (Tetra) を入れて 26 度に保った。プラスチックケースの水温が一定となったのち、白色の半球型ボウル (内径 23cm, 深さ 13.5cm) を中に入れ (図 1 左も参照のこと)、ボウルの中にはマリンソルト (SEA water, GEX Co.,Ltd.) を溶かした塩分濃度 20ppt の水を入れた。実験個体は 9 時にボウルに入れて 3 時間慣らしたのち、12 時から 13 時の間に防犯カメラ (QBiC CC-2L, Safie, Inc.) を用いて直上から動画を撮影した。データ取得終了後、各個体の直甲長と体重を計測し、健康指標である $BCI = \text{Weight}/\text{SCL}(\text{g}/\text{mm})$ を算出した (表 1)。また、身体的な異常をチェックした結果、ID5 のみ前肢の先が 3mm 程度壊死していた。

ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Experimental day	10/24	10/25	10/26	10/28	10/30	11/01	11/03	11/06	11/08	11/09
SCL (mm)	84	82	94	93	92	83	73	69	81	84
Weight (g)	100	93	128	120	128	99	66	63	87	94
BCI(g/mm)	1.19	1.13	1.36	1.29	1.39	1.19	0.90	0.91	1.07	1.12

Table 1: 実験個体の ID と実験日、直甲長 (mm)、体重 (g)、BCI(g/mm)

3 結果

撮影した動画を 5fps でフレームに分割し、2.1 節の手法によって各個体から輪郭座標を抽出し規格化と回転を行った (図 1 も参照のこと)。動画 1-10 (動画番号は個体の ID に対応) の左下には、各個体から抽出された輪郭形状 ($\mathbf{x}_t, \mathbf{y}_t$) の変化をプロットしている。光の反射によって輪郭形状が曖昧となったものが欠損値と判定され除外された。除外されたフレーム数は各個体の動画を構成するフレームの 0-3% を占めていた。

抽出した輪郭座標に対し 2.2 節の楕円フーリエ解析を実行し、すべての個体の輪郭形状から周期が 1 以上の楕円フーリエ係数を取得した。また、取得した楕円フーリエ係数に対して 2.2 節の主成分分析を実行し、楕円フーリエ係数の寄与を表す固有ベクトル $\mathbf{w}^{(r)}$ と説明力 $E^{(r)}$ を算出した。各 pc 軸の説明力を表 2 に示す。ここで、pc1 と pc2 のみで全体の 46% 程度の説明力があることと、pc1 と pc2

の値のみによる平面上でのプロットの解釈性が高いことから、以降の解析ではこれら 2 つの軸に注目した。

pc axis	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
explanatory power	0.282	0.175	0.100	0.078	0.064	0.047	0.035	0.032	0.025	0.023

Table 2: 各 pc 軸に対する説明力 E

図 3 には pc1 と pc2 の固有ベクトル $\boldsymbol{w}^{(1)}, \boldsymbol{w}^{(2)}$ を示し、図 4 には pc1 と pc2 の値のみから復元した輪郭形状を示す。pc1 には x 座標の正弦成分と y 座標の余弦成分が寄与し、pc2 には x 座標の余弦成分と y 座標の正弦成分が寄与することがわかる。この結果と復元した輪郭形状から、pc1 として漕ぎ運動 (rowing) に対応する形状変化が、pc2 として羽ばたき運動 (flapping) に対応する形状変化が抽出されたと解釈することができる。動画 1-10 の右下には、各フレームに対応した $(h_t^{(1)}, h_t^{(2)})$ の値を図 4 に重ねてプロットしている。

形状解析によって取得した pc1 と pc2 に関する時系列に対し、2.3 節の VAR モデルに基づいた時系列解析を実行し、1 時間の時系列を小区間に分割した。このとき、ウミガメの遊泳は少なくとも 10 秒 (フレームにして 50) 以上継続するものと仮定し、アルゴリズム 1 における区間パラメータを $\alpha = 100$ と設定し、アルゴリズム 2 では $\beta = (-25, -20, -15, -10, -5, 0, 5, 10, 15, 20, 25)$ とした。分割された時系列を動画 1-10 の上に示す。

pc1 と pc2 がそれぞれ漕ぎ運動と羽ばたき運動を表していたことから、分割された区間を、ptn1; 漕ぎ運動、ptn2; 羽ばたき運動、ptn3; 漕ぎと羽ばたきの中間的な運動、ptn4; その他、に目視によって分類した。このとき、漕ぎ運動もしくは羽ばたきが時系列の 8 割以上を占めるものを ptn1 と ptn2 に分類し、漕ぎ運動や羽ばたきから構成されるがどちらも 8 割に満たないものを ptn3 に分類した。そして、ptn1,2,3 のどれにも当てはまらないものを ptn4 に分類した。輪郭抽出の段階で、動画 1 は除外されたフレームが多く、動画 2 と 6 は前肢が途切れるフレームが多かったことから、この分離は動画 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10 に対してのみ行った。各個体に対し、分類した遊泳の継続時間の分布をバイオリンプロットとして図 5 に示した。また、各個体の遊泳パターン 1-4 が遊泳時間に占める割合と、他のパターンへの変化の頻度も図 5 に並べて図示した。ここで、pc 軸の説明力は形状変化を説明する量であるのに対し、遊泳時間に占める割合は時間的な卓越を示す量であり、ptn1 の方が必ず ptn2 より卓越する訳ではないことに注意されたい。

個体ごとの遊泳パターンの継続時間やその割合には個体間で違いが見られた。ptn1 が遊泳時間に占める割合が最も大きかったのは ID9 で 25% であった。一方 ptn2 は ID7 と 8 で卓越しており、どちらの個体も遊泳時間の 60% 以上を占めていたが、その継続時間は ID7 に比べて ID8 の方が長い傾向にあった。ptn3 は ID4, 9, 10 で卓越していたが、ID9 と 10 に比べて ID4 は継続時間が長い傾向にあっ

た。ptn4 には床への執着やグルーミング、後退が含まれ、ID5 では遊泳パターンの 40% 以上を占めていたが、継続時間は長くはなかった。ID4, 7, 8, 9, 10 では遊泳時間の 50% 以上を特定の遊泳パターンが占めていたのに対し、ID3 では ptn2 と 3、ID5 では ptn3 と 4 の遊泳時間に占める割合が同程度であった。また、特定の遊泳パターンから他の遊泳パターンへの変化頻度は、変化後の遊泳パターンが遊泳時間に占める割合に比例していた。

4 議論

4.1 遊泳の定量化

抽象的な定義に基づいてウミガメの行動を客観的に評価することには限界があった。本研究ではこの問題に対し、2 次元動画から抽出した輪郭に対し形状解析と時系列解析を応用することで、遊泳パターンを、遊泳の継続時間、特定の遊泳が遊泳時間に占める割合、そして遊泳の変化といった特徴量として定量化することを可能にした。動物の行動レポーターの相対頻度を表すエソグラムはウミガメの福祉評価において推奨されているが [32, 35]、本研究で定量化された特徴量はエソグラムに比べて多くの情報を提供すると考えられる (図 5)。

形状解析によって抽出された pc1 と pc2 はそれぞれ漕ぎ運動 (ptn1) と羽ばたき運動 (ptn2) であったため、これらの運動を軸として中間的な泳ぎ (ptn3) とその他 (ptn4) の計 4 つに遊泳を分類した。リクガメや淡水ガメの主要な運動は漕ぎ運動であるのに対し、ウミガメの主要な運動は羽ばたき運動であることを考えると [38]、ptn1 が遊泳時間に占める割合は ptn2 よりも小さくなることが予想される。しかし、ID4, 9, 10 に関しては遊泳時間の 20% 以上を ptn1 が占め、ptn2 よりもその割合が多かった (図 5)。狭い診察室において直線的な遊泳が制限されたことで ptn1 が卓越している可能性は否定できないが、ID3, 7, 8 では ptn1 に比べて ptn2 が卓越していることから、この結果は個体ごとに異なる内的状態が狭さの制約を超えて反映されたことを示すと考えられる。

ID4, 7, 8, 9, 10 は分類した中で特定の遊泳パターンが遊泳時間の 50% 以上を占めていた。本研究の分類における ptn3 が正の福祉を表すランダム遊泳に対応するのであれば [28]、ptn3 が卓越した ID4, 9, 10 の状態は良好であると判断できるかもしれない。一方、ptn2 のみが卓越する ID7 と 8 は遊泳のバリエーションが少ない負の状態に対応するだろう。ID7 と 8 の BCI が他の個体に比べて低い値を示すことは、これらの内的状態が負にあることを示唆する (表 1)。

特定の遊泳パターンが卓越する ID4, 7, 8, 9, 10 のうち、ID4 と 8 は遊泳の継続時間が長く、遊泳の時間的な変動も少ない傾向にあった。動機が行動を変化させるという観点では、遊泳の継続時間が長いことは遊泳パターンを変化するに足る動機づけが少ない状態であると考えられる [17]。シンプルな環境下ではこの動機づけが発生しにくいと予想できるが、予想に反して本研究の結果で継続時間に大

きな個体差がみられたことは、個体の内的状態に関連して動機づけの機構に差異が生じていることを示唆する。

本研究のシンプルな診察室において、ptn4として床への執着やグルーミング、後退が観察された。床に対する遊泳は閉鎖状況に対処する行動と考えられ、高頻度のグルーミングやそれに伴う後退は皮膚の疾患やストレスに対処する行動であると考えられる。ID5ではこのような ptn4 の占める割合が最も多かった。また、ID5 の遊泳速度は遅く、他の個体に比べて AIC によって選択された VAR モデルの次数が高い傾向にあった。実験当時 ID5 のみ外傷がみられたことを考えると、これらの結果は免疫力の低下や紫外線の不足といった健康状態の悪化を反映していると考えられる。

4.2 診察室での行動評価

既存のウミガメの福祉評価は飼育下で直接行われることがほとんどであったが、行動に影響を与える要因をモニタリングし信頼性の高い評価を行うことは困難であった。本研究ではこの問題に対し、光、温度、形状、色、塩分濃度、時刻を揃えた診察室を用意し遊泳の定量化を行うことで、これらの要因を評価するのではなく統一して解析を行った。

本研究で用いた診察室は狭く刺激が少ないため、ウミガメに負の影響を与える可能性がある [35]。この影響で、内的状況に従って現れるはずの行動が診察室では表面化しなくなる場合、診察室の利用は正当化されない。しかしこの場合、診察室での遊泳パターンに個体差が見られなくなると考えられるが、実際には遊泳の特徴量の個体差を検出することができた。それゆえ、本実験の診察室が内的状態に対応した行動を消滅させたとは考えにくく、環境要因の影響を排除して行動評価を行うことのメリットの方がこのデメリットを上回ると考えられる。

診察室の利用には、行動評価をルーチン化できるというメリットも存在する。例えば、水槽の掃除や外部形態に以上がないかを調べたのち、そのまま個体を診察室に導入し動画による解析を行えば、飼育員の業務の中で自然と福祉評価を行うことができる。福祉評価をルーチン化することにより、個体の内的状態の変化を可能な限り早く察知し、早期に対策を講じることが可能となる [32]。

4.3 今後の指針

今後の指針を4つ挙げる。1つ目の指針は、機械学習手法を利用した輪郭抽出である。実際に解析を行う場合、動画の解像度や診察室、そして個体の大きさや種が異なることが想定される。これらの条件下では、影の写り込みやウミガメと水槽のコントラストが低下することで、輪郭抽出が失敗することもあると考えられる。このような問題は診察室の環境を整えることでも解決できるが、より福祉評価をリーズナブルなものにするためには、コントラストや手動で抽出した輪郭を教師として学習を行い、学習に基づく輪郭抽出を実装することが望ましい。

2つ目の指針は、クラスタリング手法の利用である。本研究の実験では試験的に、分割された時系列に対して目視による分類を行ったが、この際に介入する主観も排除すべきである。本研究で定量化された特徴量を客観的に分類するには、時系列クラスタリング手法を用いることができると考えられる。本研究の時系列解析では VAR モデルを仮定しているため、クラスタリングには VAR モデルをベースとした非類似度を用いる必要があるが、piccolo (1998) [24] や Kalpakis et al. (2001) [11] らの非類似度を多次元に拡張することで適切な分類が可能であると考えられる。

3つ目の指針は、他の福祉指標との整合性の調査である。行動に基づく福祉評価はさまざまな利点を持つが、行動に加えて血液検査などの結果を用いて多角的に福祉評価を行うことがベストである [32, 33]。本研究によって定量化される遊泳パターンの割合や継続時間と、ストレス指標であるコルチコステロンや健康指標であるグルコース濃度との関連性を調べることで、負や正の福祉を示す信頼性の高い行動指標を提案することができる。

4つ目の指針は、個体レベルでの福祉評価である。遺伝や環境、経験、そして個性に応じて、同じ種であっても飼育下で受ける負の影響は個体ごとに異なるため、福祉評価は集団レベルではなく個体ごとに行うことが望ましい [32, 33]。本研究において、同じ親から生まれ同じ環境で育った幼体が、非常にシンプルな環境下で個体ごとに異なる遊泳パターンを示したことは (図 5)、福祉評価において行動形質の揺らぎを無視すべきではないことを示唆している。本研究の手法において、pc 軸の構築や時系列解析を個体レベルで行い、その結果を蓄積することで行動のベースを作成し、新たな結果をベースと比較することで個体レベルの評価を簡単に行うことができる。

これらの指針に沿った手法の改善、あるいは他の指標との関連性が調べられることにより、定量化した遊泳からウミガメの福祉を高い信頼性で評価することができるようになる。

References

- [1] Arena, P. C., Warwick, C., & Steedman, C. 2014. Welfare and environmental implications of farmed sea turtles. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 27, 309-330.
- [2] Diggins, R., Burrie, R., Ariel, E., Ridley, J., Olsen, J., Schultz, S., ... & Lloyd, J. 2022. A review of welfare indicators for sea turtles undergoing rehabilitation, with emphasis on environmental enrichment. *Animal Welfare*, 31(2), 219-230.
- [3] Escobedo-Bonilla, C. M., Quiros-Rojas, N. M., & Rudín-Salazar, E. 2022. Rehabilitation of marine turtles and welfare improvement by application of environmental enrichment strategies. *Animals*, 12(3), 282.

- [4] Frazier, J. G. 2005. Marine turtles: the role of flagship species in interactions between people and the sea. *Mast*.
- [5] Garner, J. P. 2006. Perseveration and stereotypy: systems-level insights from clinical psychology. *Stereotypic animal behaviour: fundamentals and applications to welfare*, 121, 142.
- [6] Gregory, L. F., Gross, T. S., Bolten, A. B., Bjorndal, K. A., & Guillette Jr, L. J. 1996. Plasma corticosterone concentrations associated with acute captivity stress in wild loggerhead sea turtles (*Caretta caretta*). *General and comparative endocrinology*, 104(3), 312-320.
- [7] Hotelling, H. 1936. Simplified calculation of principal components. *Psychometrika*, 1(1), 27-35.
- [8] Jeantet, L., Dell'Amico, F., Forin-Wiart, M. A., Coutant, M., Bonola, M., Etienne, D., ... & Chevallier, D. 2018. Combined use of two supervised learning algorithms to model sea turtle behaviours from tri-axial acceleration data. *Journal of Experimental Biology*, 221(10), jeb177378.
- [9] Jessop, T. S., Limpus, C. J., & Whittier, J. M. 1999. Plasma steroid interactions during high-density green turtle nesting and associated disturbance. *General and Comparative Endocrinology*, 115(1), 90-100.
- [10] Jessop, T. S., Limpus, C. J., & Whittier, J. M. 2002. Nocturnal activity in the green sea turtle alters daily profiles of melatonin and corticosterone. *Hormones and behavior*, 41(4), 357-365.
- [11] Kalpakis, K., Gada, D., & Puttagunta, V. 2001. Distance measures for effective clustering of ARIMA time-series. In *Proceedings 2001 IEEE international conference on data mining*. IEEE. 273-280.
- [12] Kitagawa, G. 2020. *Introduction to Time Series Modeling with Applications in R*. Chapman & Hall/CRC.
- [13] Kudo, H., Nishizawa, H., Uchida, K., & Sato, K. 2021. Boldness–exploration behavioral syndrome in wild sub-adult green sea turtles caught at Oita, Japan. *Applied Animal Behaviour Science*, 236, 105216.
- [14] Kuhl, F. P., & Giardina, C. R. 1982. Elliptic Fourier features of a closed contour. *Computer graphics and image processing*, 18(3), 236-258.
- [15] Lloyd, J., Ariel, E., Adams, D., & Owens, L. 2012. Environmental enrichment for sea turtles in rehabilitation: Preliminary study.

- [16] Maple, T. L., & Perdue, B. M. 2013. Zoo animal welfare (Vol. 14). Springer.
- [17] Mason, G., & Rushen, J. 2008. Stereotypic animal behaviour: fundamentals and applications to welfare. Cabi.
- [18] Mathis, A., Mamidanna, P., Cury, K. M., Abe, T., Murthy, V. N., Mathis, M. W., & Bethge, M. 2018. DeepLabCut: markerless pose estimation of user-defined body parts with deep learning. *Nature neuroscience*, 21(9), 1281-1289.
- [19] Mellor, D. J. 2017. Operational details of the five domains model and its key applications to the assessment and management of animal welfare. *Animals*, 7(8), 60.
- [20] Neto, J. C., Meyer, G. E., Jones, D. D., & Samal, A. K. 2006. Plant species identification using Elliptic Fourier leaf shape analysis. *Computers and electronics in agriculture*, 50(2), 121-134.
- [21] Okuyama, J., Kawabata, Y., Naito, Y., Arai, N., & Kobayashi, M. 2009. Monitoring beak movements with an acceleration datalogger: a useful technique for assessing the feeding and breathing behaviors of sea turtles. *Endangered Species Research*, 10, 39-45.
- [22] OpenCV Documentation. 2023. findContours. OpenCV.
- [23] Pfaff, B. 2008. Analysis of integrated and cointegrated time series with R. Springer Science & Business Media.
- [24] Piccolo, D. 1990. A distance measure for classifying ARIMA models. *Journal of time series analysis*, 11(2), 153-164.
- [25] R Core Team. 2023. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- [26] Rohlf, F. J., & Archie, J. W. 1984. A comparison of Fourier methods for the description of wing shape in mosquitoes (Diptera: Culicidae). *Systematic Zoology*, 33(3), 302-317.
- [27] Smith, M. C., Michaels, C. J., & Narayan, E. J. 2020. Stereotypic pacing and faecal corticosterone metabolites as non-invasive indicators of stress in rehabilitating green turtles (*Chelonia mydas*).
- [28] Therrien, C. L., Gaster, L., Cunningham - Smith, P., & Manire, C. A. 2007. Experimental evaluation of environmental enrichment of sea turtles. *Zoo Biology*. 26, 407-416.

- [29] Thomson, J. A., & Heithaus, M. R. 2014. Animal-borne video reveals seasonal activity patterns of green sea turtles and the importance of accounting for capture stress in short-term biologging. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 450, 15-20.
- [30] Wang, J. H., Boles, L. C., Higgins, B., & Lohmann, K. J. 2007. Behavioral responses of sea turtles to lightsticks used in longline fisheries. *Animal Conservation*, 10(2), 176-182.
- [31] Warwick, C., Arena, P., Lindley, S., Jessop, M., & Steedman, C. 2013. Assessing reptile welfare using behavioural criteria. *In Practice*, 35(3), 123-131.
- [32] Watters, J. V., Margulis, S. W., & Atsalis, S. 2009. Behavioral monitoring in zoos and aquariums: A tool for guiding husbandry and directing research (Vol. 28, No. 1, pp. 35-48). Hoboken: Wiley Subscription Services, Inc., A Wiley Company.
- [33] Whitham, J. C., & Wielebnowski, N. 2013. New directions for zoo animal welfare science. *Applied Animal Behaviour Science*, 147(3-4), 247-260.
- [34] Witherington, B. E., & Bjorndal, K. A. 1991. Influences of wavelength and intensity on hatchling sea turtle phototaxis: implications for sea-finding behavior. *Copeia*, 1060-1069.
- [35] Wood, L. D. 2022. Managing long-term wellness in captive sea turtles. *Animal Welfare*, 31(4), 423-432.
- [36] Wyneken, J., Lohmann, K.J., & Musick, J.A. 2013. *The Biology of Sea Turtles*, Volume 3 (1st ed.). CRC Press.
- [37] Yasuda, T., & Arai, N. 2009. Changes in flipper beat frequency, body angle and swimming speed of female green turtles *Chelonia mydas*. *Marine Ecology Progress Series*, 386, 275-286.
- [38] Zug, G. R. 1971. Buoyancy, locomotion, morphology of the pelvic girdle and hindlimb, and systematics of cryptodiran turtles.

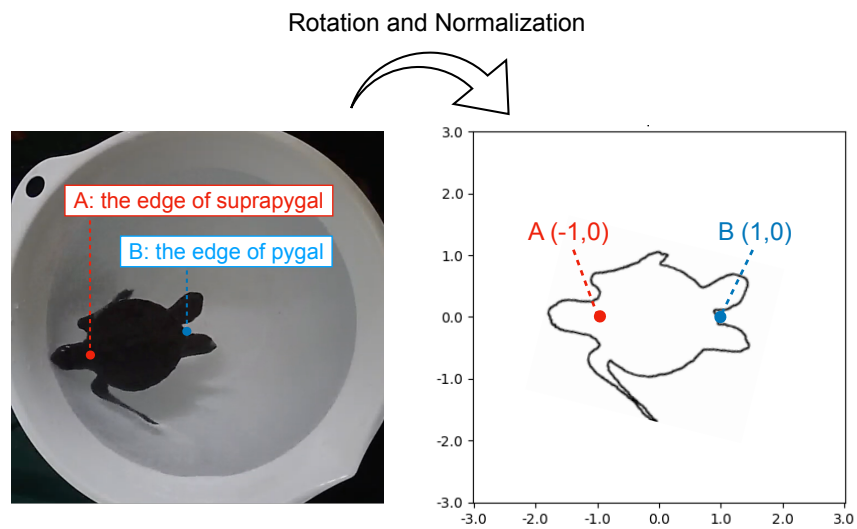


Figure 1: 座標の標準化と回転

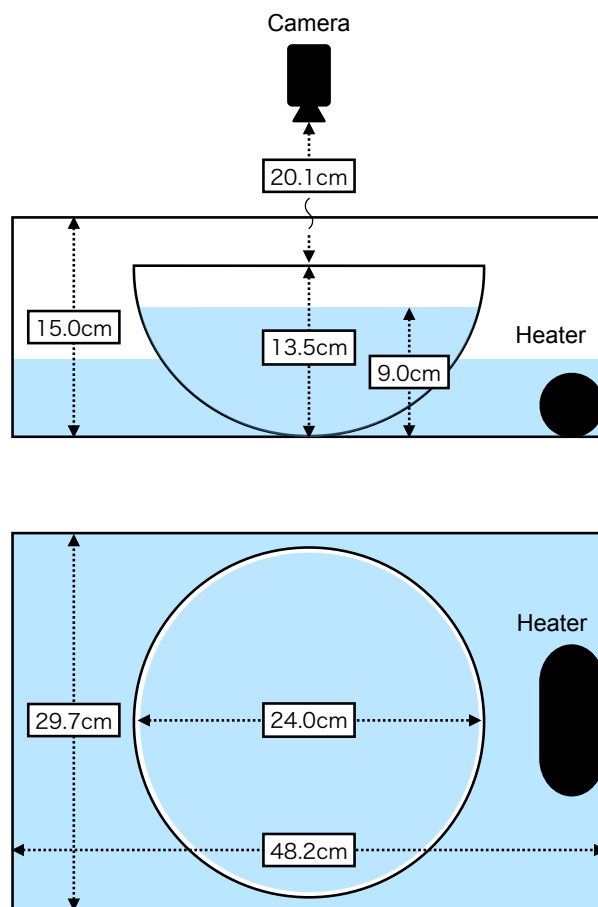


Figure 2: 実験環境

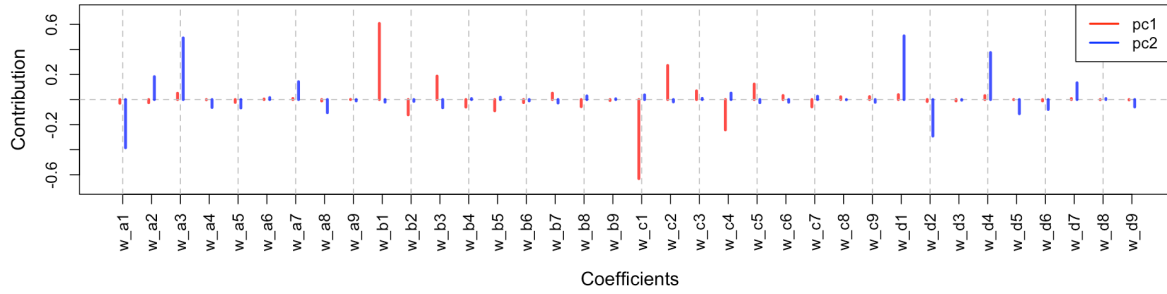


Figure 3: pc1 と pc2 に対するフーリエ係数の寄与 w

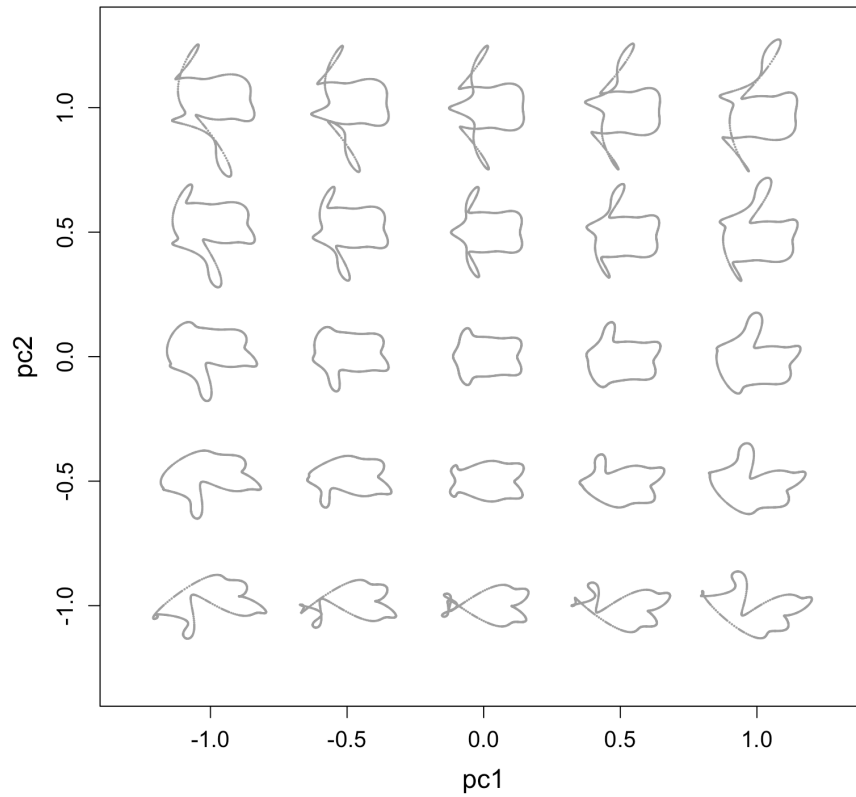


Figure 4: pc1 と pc2 の情報のみを用いて pc 平面上に復元された輪郭形状

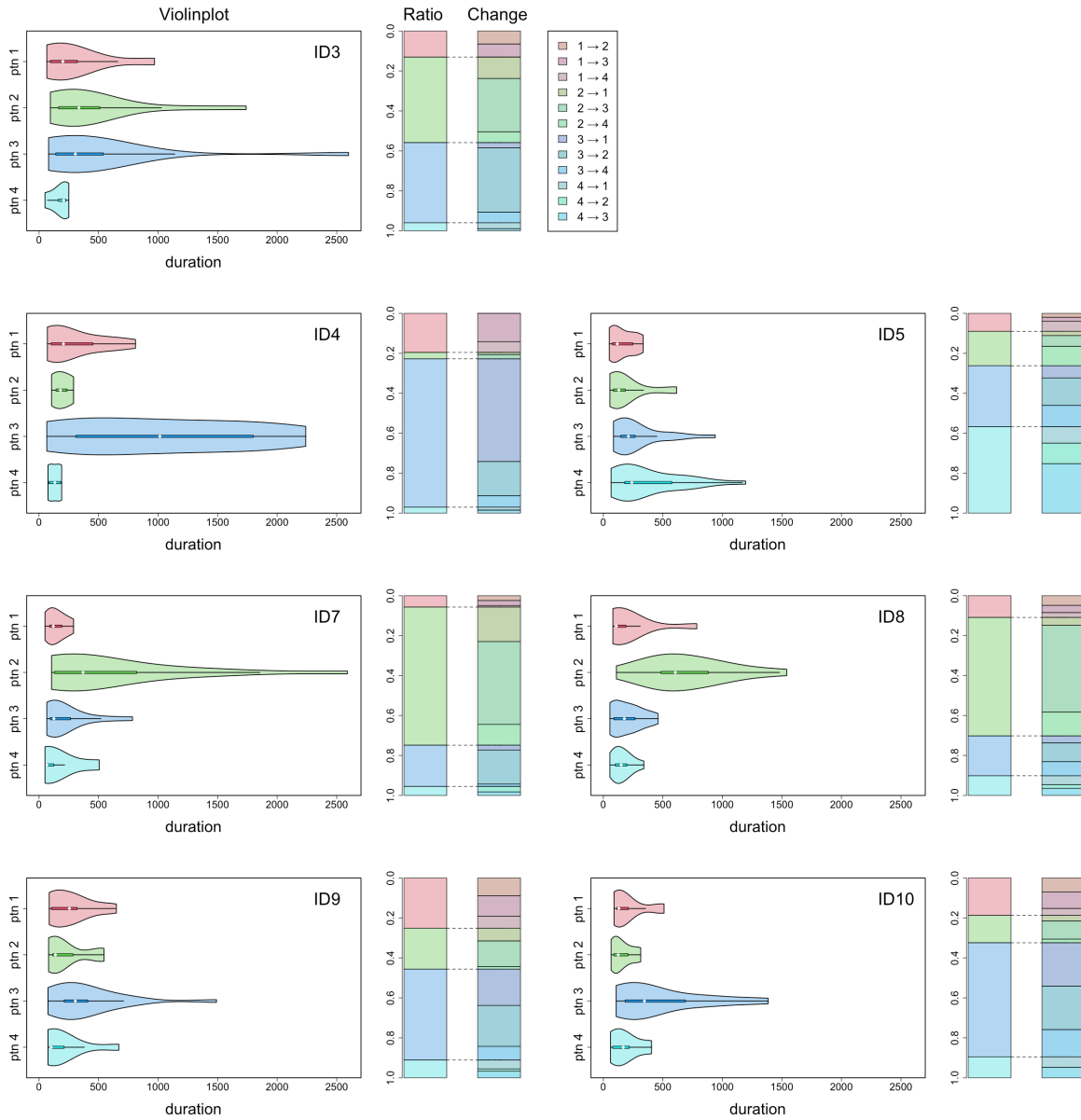


Figure 5: ID3,4,5,7,8,9,10 の遊泳パターン 1-4 の継続時間に関するバイオリンプロットと箱ヒゲ図。各個体のバイオリンプロットの横には、各遊泳パターンが 1 時間に占める割合と異なる遊泳パターンへの変化の割合を積立棒グラフで示している。