



Title	マナマコの行動ダイナミクス : 状態推定に基づく行動解析と環境要因の評価
Author(s)	田中, 優斗
Description	この博士論文の全文は利用可能日以降に公開されます。利用可能日以前の閲覧方法は https://www.lib.hokudai.ac.jp/dissertations/copy-guides/ をご参照ください。
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(環境科学)
Dissertation Number	甲第16730号
Issue Date	2026-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16730
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/99575
Type	doctoral thesis
File Information	TANAKA_Yuto_summary.pdf, 全文の要約



学位論文内容の要約/Dissertation Summary

博士 (環境科学)

氏名/Applicant 田中 優斗

学位論文題名/Title of Dissertation

マナマコの行動ダイナミクス：状態推定に基づく行動解析と環境要因の評価
(Behavioural dynamics of the Japanese sea cucumber *Apostichopus japonicus*: behavioural analysis based on state estimation and evaluation of environmental drivers)

海底を緩慢に移動する底生生物は、短時間での移動距離が極めて小さく、位置推定誤差が移動スケールを上回るため、高精度な行動計測が難しい。また、流れによる受動的移動や固着による耐流性といった力学的影響が自発的な行動と重なり、観測された移動から行動状態を識別することも容易ではない。マナマコ *Apostichopus japonicus* はその制約が顕著に現れる種であり、標識装着の難しさも相まって、行動研究は長らく水槽実験やフィールドでの潜水による目視観察に依存してきた。しかし、荒天時や夜間には潜水観察ができないなど、自然条件下での長期的な行動過程を捉えることは困難であった。さらに、近年では魚類等を対象とした音響テレメトリーにより高頻度・長期間の位置データ取得が可能になりつつあるものの、従来の解析手法では時間平均的指標や離散的行動状態の抽出にとどまり、連続的な行動ダイナミクスの解明には至っていない。

マナマコは日本の水産物輸出重要種である一方、資源水準低下の懸念からIUCNレッドリストに絶滅危惧種として掲載されるなど管理・保全の重要性は高い。資源回復に向けた種苗放流が広く行われてきたものの、放流後に海域で生じる個体の散逸により漁獲回収率が低く、放流効果が限定的である。そのため、低利用漁港を活用し、小型個体を無給餌で育成して漁獲する粗放的養殖技術の開発が望まれている。しかし、一部の個体は広域に移動していることが報告されており、漁港内に留めるためには行動制御が必要である。マナマコは岩場や転石帯を選択的に利用することが知られており、港内に転石礁を適切に配置することで行動範囲を制限できる可能性があるが、最適配置パターンの探索を実海域で網羅的に調査することは困難である。

そこで、本研究ではマナマコの行動ダイナミクスを高精度に解明することを目的とした。超音波バイオテレメトリー技術を基軸に、ベイズ理論に基づく状態推定技術とバイオメカニクス（生体力学）的アプローチの統合により、行動に影響を与える環境要因を定量的に評価した。さらに、得られた行動モデルをもとに、転石礁配置など生息環境の空間設計による行動制御の可能性を検討した。

第1章では、模型を用いた回流水槽実験により、マナマコの形態が流れに対して示す力学的特性を評価した。多数の突起（疣足）をもつ体形状は、迎角による作用流体力の変化が小さく、固着行動においてロバスト性を持つ可能性が示唆された。また、実海域の波浪データからマナマコに作用する流体力を推定する力学モデルを構築し、台風接近時の強い流動環境下においても岩等に固着した個体が流失しないことを明らかにした。さらに、岩場や転石礁が下流側に後流渦を伴う流体力学

的陰影を形成し、その再循環流によって近接する個体が構造物付近へ引き寄せられる可能性を示した。これにより、海中構造物が散逸を防ぐシェルターのような機能を持つことが示唆された。

第2章では、音響テレメトリーの観測誤差を補正するためカルマンフィルタ (KF) およびカルマン smoother (KS) を導入し、緩慢な水中生物の行動推定における状態推定技術の有効性を検証した。海中の定点に固定した発信機を用いた検証では、モデル適用前に半径2 m規模でばらついていた位置推定値が、KF適用後には半径15 cm, KS適用後には1.5 mm以内に収束した。これにより、従来手法では困難であった微細な移動・滞留行動を長期間にわたり高精度に追跡する基盤技術を確立した。

第3章では、砂地が底質の8割を占める北海道南西部の漁港内 (水面73 m×80 m, 水深4 m) に、人工的に転石を積み上げた転石礁を1-12地点設置し、季節ごとに小型超音波発信機 (V5-1H, Innovasea) を外部装着した成体マナマコを放流して、時系列位置データから移動様式を解析した。多くの個体は方向転換を含む探索的移動を示し、ランダムウォークモデルを基盤とした記述が可能であった。ランダムウォークのシステムノイズと観測ノイズを規定する標準偏差を観測データから最尤推定することにより、従来の指標では表現が難しかった緩慢な生物の行動特性をノイズパラメータとして統一的に扱う方法論を提示した。このパラメータから換算した平均移動速度は生活環に応じて変化し、夏眠期を含む9-10月に最小の1.1-4.7 cm min⁻¹で、次いで11-6月の回復期・成長期に5.2-10.1 cm min⁻¹, 産卵期を含む7-8月に最大の8.8-17.8 cm min⁻¹となり、行動圏も同順に広がった。産卵期には6日間で放流地点から直線距離60 m離れた岸壁まで大きく移動した個体が確認された。この移動経路における2分間の移動変位の積算距離は446 mに達し、直線距離では捉えられない移動の実質的な規模を明らかにした。一方、夏眠期は転石礁に滞留し、その外縁を移動する傾向が見られた。一般化加法モデル (GAMM) を用いて環境要因が移動速度に与える影響を解析したところ、水温は季節に応じた影響を示し、照度の効果は部分的であった。一方で、流動環境 (波高) および転石礁と個体の距離が移動速度に影響を与える主要な要因となることが推定された。本解析では、実験場での本種の堆積物食者としての餌環境が概ね均質であり、成体に対する捕食圧が低いことを前提とした。

第4章では、非線形状態推定手法 (EnKS) に基づく行動モデルを構築し、マナマコの行動特性を時系列的に定量化した。解析の結果、転石礁は最大50 cm min⁻¹の誘引効果を持ち、その影響範囲は約2 mに及ぶことが示された。また、波高の上昇は移動を制動し、特に波浪時には転石礁への接近頻度が高まる傾向がみられた。これらは、複数の環境因子の時系列変化に応じた行動変化を、行動ダイナミクス解析によって明瞭に分離して捉えられたことを意味している。

第5章では、得られた行動モデルを粒子群最適化アルゴリズム (PSO) と組み合わせ、放流後の散逸防止に適した転石礁配置パターンを推定した。転石礁の間隔をできるだけ狭めずに滞留させる効果を最大化することを目的とした最適化では、放流地点を中心に約7 m間隔で均等に転石礁を配置するパターンが最も高い滞留制御効果を示した。これは、網や籠などの囲い込み構造に依存せず、行動特性そのものを活用して資源管理や養殖技術に応用できる可能性を示すものである。

以上のように、本研究は、生体力学に基づく流動耐性評価、状態推定技術を用いた高精度行動推定、および行動モデルに基づく環境設計という複数のアプローチを統合し、マナマコの行動ダイナミクスを詳細に明らかにした。これらの成果は、マナマコの生態理解と資源管理への貢献にとどまらず、他の生物にも応用可能な普遍的な行動解析基盤を提供し、低利用空間としての漁港を活用した新たな養殖技術の創出にも資するものである。