



Title	クロマグロ養殖生産管理効率化のためのモニタリング技術開発に関する基礎的研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	阿部, 悟
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(水産科学)
Dissertation Number	甲第14754号
Issue Date	2022-03-24
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/86072
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Satoru_Abe_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称：博士（水産科学）

氏名： 阿 部 悟

学 位 論 文 題 目

クロマグロ養殖生産管理効率化のためのモニタリング技術開発に 関する基礎的研究

我が国では太平洋クロマグロ（*Thunnus orientalis*）の完全養殖の成功を契機に生産量が拡大を続けている。育成中の養魚における体長や尾数、適切な給餌量や健康状態などの把握は生産管理上欠かせないが、正確に把握することは困難を極めるため、養殖業のスマート化が急務とされており、養殖魚現存数や生物量を効率的にモニタリングする技術開発が強く望まれている。しかし、これまでは個体を直接的に部分サンプリングするなど時間や労力を要するほか生簀内のバイオマスを精度良く推定するまでには至っていない。そこで、本研究では、PTV（Particle Tracking Velocimetry）解析技術に着目し、当該技術を養殖魚のトラッキングや計数に応用し、これまで実現することが難しかった生簀などの閉鎖空間内養殖魚の個体数を推定する基盤技術を構築することにした。PTV解析は流体内の微小粒子を追跡することにより流れを可視化する計測技術で、本研究では粒子を養殖魚個体に見立てることによって、個体のトラッキングで取得された移動ベクトルを計数して空間内個体数を自動推定する。そしてさらに、得られたベクトル情報を解析し、養殖対象魚の状態評価を画像情報から取得するための基礎知見を得ることにより、クロマグロ養殖の生産管理効率化を実現するモニタリング手法を提案することを目指す。

【自動計数手法の基礎技術開発】 PTV解析の応用では個体を抽出するために画像フレーム間差分を用いて背景となる画像領域を除去する手法の適用性について検討した。また、抽出された個体候補領域の画像フレームの時系列データに対しKC法を用いてフレーム間での同一個体の同定を行ない、個体の移動ベクトルを推定できるか検証した。予備実験的にヒメダカ（*Oryzias latipes*）を屋内水槽内に250尾投入して魚眼レンズ付きPIXPRO SP360（Kodak社）を用いて魚群行動を撮影した。個体領域抽出後にKC法を適用して水槽内の個体数を計数したところ、再現率、適合率はそれぞれ0.95、0.98となり、動的背景が少ない画像では安定した計数結果が得られることが期待された。これを受けて、直径20m以上のクロマグロ養殖生簀内で広角レンズを装着したGoPro HERO6（GoPro社）を生簀底網中央に設置して同様の方法で本種推定個体数38尾の養殖魚を計数した結果、再現率は0.33、適合率は0.91と室内実験に比べて再現率が著しく低下する結果となった。これは、照度や濁度などの影響により前述したフレーム間差分の機能が果たせなかったことにより、個体領域抽出が不完全であるためだと考えられ、このことから、PTV解析の画像処理部分における従来法では、個体領域抽出法の再検討が必要であると考えられた。

【深層学習を応用した個体領域抽出手法の検討】 実際の養殖生簀内の計数実現に対して画像処理部のロバスト性を向上させるべく、SegNetおよびDeepLab v3+とよばれる深層学習を応用したセマンティックセグメンテーションを導入しその適用性を検討した。いずれも教師画像としてRGB画像と検出対象クラス毎に事前に塗り分けたラベリング画像のペアを利用する。前者がEncoderとDecoderモジュールを複層構造化して組み合わせているのに対し、後者はASPPとDecoderモジュールを組み合わせて、入力した画像に対して特徴マップを抽出できる。約5000枚の教師画像データセットをクロマグロが含まれる個体画像と背景画像の比率が7:3になるようにして学習させた。生簀内で確認された103尾の個体数に対し、システム全体では従来法を適用したものでは個体数の自動計数が36.9%に留まっていたのに対し、SegNetでは52%、DeepLab v3+では78%と、画像処理部の改良によ

って計数性能の向上が図られたが、システム全体の性能は高い水準でないことから個体の追跡能力自体がシステム全体のボトルネックになっている可能性が示唆された。

【運動解析部の再検討および撮影環境の影響評価】 運動解析部の追跡性能がシステム全体の性能に影響を及ぼしている可能性があるため、画像処理部の出力を運動解析部に入力する際の処理の妥当性について検討を行った。実海域の養殖生簀内を対象とする場合、個体の遊泳深度に応じて撮影画像上に投影される個体の画素数や形状は大きく変化する。そこで、画像処理部から出力される領域情報を座標情報の集合と捉え、領域座標を運動解析部に入力することで各個体領域を構成画素単位で移動ベクトルに算出する方法を提案し評価したところ、個体数 140 尾前後に対して、改良前のシステムでは 48 尾の検出結果に対し、改良後には 89 尾となり検出能力が向上した。システム実装時の運用評価を行うため、照度と濁度のパラメータが個体数検出性能に与える影響を評価した。生簀内の底網中央部に照度計 UA-002-64 (Onset 社) を設置し、生簀内水面の濁度を計測するため濁度計 TR-55 (KPK 社) を用いた。濁度が 0.66 FTU 未満の場合、個体へのラベリング性能に照度が与える影響をロジスティック回帰モデルにより評価したところ、955 lx でピーク値をとった。また、計数システム全体の個体検出性能に対して照度が与える影響を解析したところ、1400 lx 程度でピークとなり、ロジスティック回帰モデルによる検出率は 0.75 となった。一方、濁度が 0.66 FTU 以上となるとラベリング能力および個体検出能力のばらつきが大きくなり、照度との関係は明瞭でなくなり、個体検出のための環境が悪化していることが示唆された。

【養殖クロマグロの行動状態評価】 個体数計数システムでは、連続的な各個体の 2 次元平面画像上での移動ベクトル情報を取得できる。これにより、給餌や環境による個体行動の変化をベクトルの状態の変化として読み取れる可能性がある。そこで、連続する移動ベクトルのノルム差 D 、なす角 θ 、渦度に類似した指標 ω の評価指標を算出し、養成環境の違いがこれらの指標に差をもたらすか分析した。給餌時と非給餌時では、 θ の値で有意な差が確認された。給餌時は養殖魚の飽食度合いを判断する必要があるが、 θ を算定することによりこの評価が可能となるかもしれない。また、平常時と台風接近時における個体行動評価を行ったところ D と ω で有意差が確認された。台風接近時では、養殖魚や生簀が波浪動揺により翻弄され、養魚に対して生簀網が接触することにより個体にダメージを与える可能性もあるため、こうした指標を用いて、波浪動揺を低減させるために施設を沈下させるなどの操作が必要かどうかその判断基準を得ることができる可能性がある。

流体の可視化技術である PTV 解析技術を、養殖生簀内の個体数計数に応用するため、撮影画像内の個体領域抽出手法に深層学習を応用したセマンティックセグメンテーションを導入したほか、画像処理により得られた個体領域の情報を領域構成画素単位で移動ベクトルに算出する方法を提案し、安定して個体追跡が実現できることが確認された。当該システムを実装した場合、適切な撮影環境を統計モデル分析した結果、照度は 1400 lx~1500 lx、濁度は 0.66 FTU 未満であることが推奨された。これは直径 20 m で養成されているクロマグロ養殖施設では冬期でしばしば経験できる環境であり、夏期ではその機会は減少すると予想される。計数結果から取得されたベクトル情報から、連続する個体移動ベクトルを加工することにより、給餌時の養殖魚の飽食度や台風接近時の養殖魚の行動異常を観測できる可能性があり、本研究で提案したシステムの適用は単なる個体計数だけでなく、行動特性の評価から養殖魚管理の自動化を前進させる可能性があることが示唆された。