

AIによる水中カメラ画像解析を用いた複合養殖生物のモニタリング

研究代表者	吉 田 毅 郎	海洋研究開発機構 副主任研究員
共同研究者	北 澤 大 輔	東京大学生産技術研究所 教授
共同研究者	周 金 コ ン	東京大学生産技術研究所 助教

1 背景・目的

近年、世界の一人あたりの水産物消費量と人口の増加によって、水産物の総消費量が急速に増加している。漁獲による生産量は1990年代以降、ほぼ横ばいとなっているため、水産物の消費量の増加を支えているのは養殖業である。生簀を用いた給餌養殖では、排泄物に加えて残餌が環境水中に排出される。これらの拡散範囲は周辺の流速や水深に依存するが、特に閉鎖性の強い沿岸海域においては栄養塩濃度の上昇による藻類の大量発生や、有機物負荷の増大に伴う海底近傍の貧酸素化、硫化物の発生などの環境問題（自家汚染とも呼ばれる）が発生することもある1-4）。この自家汚染を緩和するために注目されているのは、複合養殖または多栄養段階統合養殖（Integrated Multi-Trophic Aquaculture）と呼ばれる技術である。この技術は、養殖生簀の下や周辺で異なる栄養段階の生物を同時に養殖する方法である。養殖魚の排泄物や残餌を他の生物が摂取することで環境を保全するだけでなく、複合養殖した生物を出荷して利益を得ることも期待できる。特に、ナマコは出荷による経済的な利益が期待でき5）、さらに海底の有機物を摂取する特長があるため6）、複合養殖において有望な生物の一種として注目されている。

これまでナマコによる有機物の浄化能力は、水槽実験において多くの検証がされている。例えば、貝類やニジマスなどの排泄物7-9）を用いて、ナマコの成長が確認されている。また、ヨーロッパヘダイの排泄物を用いた生物飼育の比較実験では、ナマコがボラやウニと比べて高い消化率を示している10）。この結果、ナマコは天然の底泥に比べて有機物の同化効率が2～3倍になると報告されている11）。他にもナマコの浄化作用に関する研究が多くある12-13）。同様に、実海域でもナマコを利用した環境負荷の低減が報告されている。例えばYokoyama14）は日本国内のマダイ養殖場において、ナマコの高い生存率や有意な成長率を確認し、同位体手法を用いてナマコが養殖由来の有機物を消費することを示した。また、マルタの養殖場におけるナマコの成長15）や、同位体と脂肪酸の分析を通じてナマコが養殖由来の有機物を摂取することが確認されている16）。実海域でもナマコの摂取行動により海底の有機物利用量が約3割増加すると報告されており17）、養殖システム全体では総有機炭素の利用量が約2割増加すると見込まれている18）。

日本では、様々な魚種が養殖されているが、近年は三陸沿岸においてギンザケ等の養殖が増加している。しかし、上記のように閉鎖性の強い海域で養殖する場合は、長期的には環境への影響が懸念される。複合養殖は有望な方法と紹介したが、ギンザケ養殖においてナマコとの複合養殖についてはまだ十分に研究されていない。その可能性は以前から指摘されてきたが、ギンザケの排泄物を利用した水槽でのナマコ飼育実験や数日間の実海域実験に限定されている19-20）。そこで本研究では、岩手県久慈湾におけるギンザケ（*Oncorhynchus kisutch*）とマナマコ（*Apostichopus japonicus*）の複合養殖を数ヶ月～1年程度の実海域実験を通じて実施した。ナマコはギンザケ養殖の下のカージに収容され、実験中にその成長を記録した。また、水中タイムラプスカメラを用いることで、ナマコを長期間撮影して複合養殖されたナマコの成長や周辺環境の理解に役立てた。そして、水中タイムラプスカメラ画像に対してAIを適用することでナマコの重量を推定するための研究を行った。まず本研究では養殖生簀下において箱網内でナマコの育成実験中に長期間撮影された水中タイムラプスカメラ画像を用いる前に、基礎段階として箱網内を模擬した水槽実験において得られた水中タイムラプスカメラ画像をAIによって解析してナマコの重量推定を行う。深層学習のセマンティックセグメンテーションによりナマコの面積を算出し、そこから重量を推定する近似式を構築する。他研究としては、セマンティックセグメンテーションにより求めた魚の面積から重量を推定する例21-22）はあるが、ナマコについて同様な手法はまだ確立されていない。そのため、本研究においてはセマンティックセグメンテーションにより複合養殖を対象としたナマコの重量を推定することを目的とする。また、物体検出による複合養殖環境下のナマコの行動把握や、実海域実験において得られた長期間の画像に対しても重量推定を適用した。大規模なデータセットで事前学習された基盤モデルの活用も同時に検討し、上記で求めた重量推定の式に適用することで、長期におよぶナマコの成長を把握することが可能かどうか検証を行った。

2 方法

2-1 水槽実験

水槽実験の様子を図1に示す。次節で述べるような実際の複合養殖実験で用いられている箱網のサイズや網の目合い、水中タイムラプスカメラと網までの距離などを実物に揃えることで模擬した。実験に用いたナマコの重量は約3~180gである。ナマコの背景を網としてタイムラプスによる撮影を行った。撮影時はナマコ1匹ごとに実施し、各個体において複数の画像を用いた。防水ケース内にタイムラプスカメラ（Brinno製）を収容して撮影を行った。AIによる画像解析としては、深層学習の物体検出やセマンティックセグメンテーションを用いた。物体検出の手法としてはYOLOv5²³⁾、セマンティックセグメンテーションの手法としてはDeeplabV3+²⁴⁾およびSegNeXT²⁵⁾などの既存の深層学習モデルを活用した。物体検出においては約450枚、セマンティックセグメンテーションにおいては約1000枚の画像に対して、訓練データと検証データに分割を行った上で学習モデルを作成した。特に後者のセマンティックセグメンテーションの結果については、ナマコの重量とナマコと識別されたピクセル数の関係をモデル化した。その関係式を用いて、実海域実験で得られた画像についてナマコと識別されたピクセル数から重量を推定する手法を適用した。



図1 水槽実験の様子

2-2 実海域実験

本研究の対象海域は、岩手県久慈湾のギンザケ養殖場である。久慈湾は岩手県の北部に位置し、湾口の水深は約26m、面積は約17.4km²である。湾内でのギンザケ養殖は2019年に久慈湾の水深約20mで開始されたばかりであるため、まだ養殖による自家汚染の影響は少ないと予想される。しかし、湾口では防波堤の建設が進められており、湾内の閉鎖性と有機物の堆積が今後増加する可能性があることから複合養殖が期待されている。そこで、久慈湾のギンザケ養殖付近の環境でナマコの成育実験を行い、複合養殖されているナマコのモニタリングを実施した。実験では2022年12月~2024年4月の間にナマコを飼育する網の形状を変えて試験を実施した。過去には予備的に2ヶ月間の実験を実施したことがあり、本実験では飼育網の条件を変えて数ヶ月~1年の実験を実施した。実験ではクロナマコの稚ナマコ（図2、予備実験では長さ約2~5cm、重さ約5~10g、本実験では長さ約1~6cm、重さ約0.5~11g、年産により異なる、久慈市漁業協同組合より提供）を用いた。ナマコは移動距離が短いことから、飼育にケージは必要ないと思われるが、個体識別のために海底設置型の箱網を用いた。本研究では、ナマコの密度特性を考慮し、異なるサイズの箱網を使用した。本研究では、70×70×40cmと30×45×20cmの大きさの箱網を用いた（図3）。稚ナマコが小さいため、網目の大きさは5mmとした。また、防水ハウジング（Blue Robotics製）内にタイムラプスカメラ（Brinno製）を収容し、箱網内の角部分に固定した状態で10分間隔のモニタリングを実施した。



図2 ナマコの写真

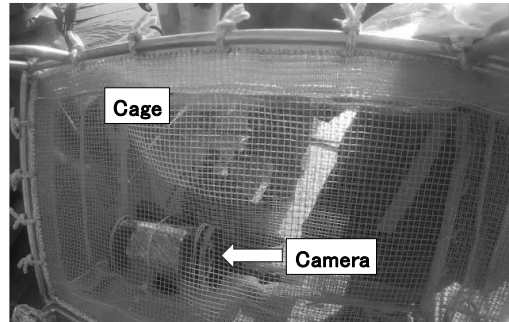


図3 箱網とカメラの写真

過去に実施した予備実験の概要としては、冬季の約2ヶ月間においてナマコは5個体（計42.5g）として小箱網（30×45×20cm）をギンザケ養殖生簀直下の海底に設置した。この際にギンザケ養殖の残餌や排泄物と思われる堆積物が設置した箱網の周辺に見られた。さらに、水中タイムラプスカメラの画像からは、実験開始から約2ヶ月で箱網内部に堆積物が堆積し、カメラが埋没する様子が観察された。そのため、より長期間設置することを考えた場合に、養殖由来の堆積物によって箱網自体が埋没する可能性があるため、本実験では生簀から10m程度離れたフロートの下に箱網を設置することとした。さらに、網の形状も浮遊式や箱網の大型化（75×75×40cm）を図る工夫を行うことで箱網自体が埋没することを防ぐこととした（図4）。実験期間としては、2022年12月～2023年5月、2023年5月～2024年4月にかけて実験を実施した。浮遊式は、ホタテガイの養殖で使用される丸籠（直径50cm、高さ20cm）やザブトン籠（35×35×20cm）を利用した。浮遊式の籠にはカメラの設置が困難であったため、海底設置型の箱網の上部の角にのみ水中タイムラプスカメラを設置してナマコの様子を撮影した。

実海域実験において得られる水中タイムラプスカメラの画像は水槽実験のような理想的な状態ではないため、明瞭にナマコが映らないことも多い。例えば、海水の濁りや深度によって暗い状態になったり、海藻などの付着物や堆積物の影響もある。このような画像に対して、水槽実験で得られたモデルを適用しても高精度に面積を求めることが難しいことも考えられるため、大規模なデータセットで事前学習済の基盤モデルである Segment Anything Model (SAM) 26) も同時に活用することを検討した。SAMを用いることで、ナマコなどあらゆる物体を高い精度でセマンティックセグメンテーションを行うことが可能である。そして、ナマコの部分のみセマンティックセグメンテーションを行い、水槽実験から求められた重量推定の式に適用することで、長期のナマコの成長を把握することが可能かどうか検証を行った。

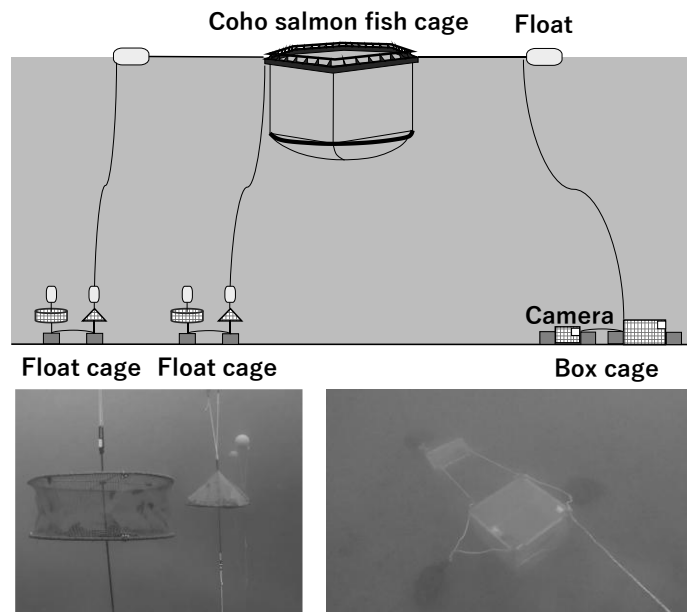


図4 実験の概要（上）と設置の様子（下）

3 結果

3-1 水槽実験

セマンティックセグメンテーションによるナマコの解析結果の例を図5に示す。図5は水中タイムラプスカメラによる写真であり、ナマコ1匹と背景に網が貼ってある。同様に、セマンティックセグメンテーションの結果も表示しており、ナマコと識別された部分を元画像と重ねて示している。結果の図からは、背景である網や砂などとナマコ本体を上手く識別できていることが分かる。セマンティックセグメンテーションの評価指標の一つとして用いられているIoU (Intersection over Union) を求めると、検証データに対して0.87であり、水槽実験で得られた画像に対しては良好なモデルが作成できたと言える。ここではナマコの疣足は入れずに教師データを与えたため、セマンティックセグメンテーションの結果もナマコの外形のみを捉えている。ナマコの重量に対して疣足は大きな影響はないと考えられ、かつ学習データを準備する際の効率化のために疣足は除外している。



図5 セマンティックセグメンテーションで使用したナマコの例

次に上記のモデルを検証データの画像に適用し、複数のナマコの重量とセマンティックセグメンテーションによりナマコと検出されたピクセル数の関係を図6に示す。図からはナマコの個体ごとに伸縮などによるばらつきが大きいことが分かる。特にナマコが大きいほどピクセル数にばらつきが見られた。図では全てのデータから求めた近似曲線を重ねて表示している。図から得られた近似曲線を用いることで、目安としてのナマコの重量推定が可能となる。図6はナマコのピクセル数と重量の関係を表す一部の結果であり、関係式を求める際にはより多くの結果をもとにしている。この図を基に、更に実験に用いるナマコの数を増やして近似式を求めた。その結果としては、ナマコの出荷サイズの目安となる100-120g以下の範囲ではRMSE=6.8gが得られた。また、近似曲線の決定係数は0.87であった。ある程度ばらつきは大きい、誤差はある程度許容した上で目安として重量推定を行うモデルとして使用することが可能と考えられる。多数のナマコを撮影することで様々なばらつきを考慮して重量推定を行うことが必要とも言える。

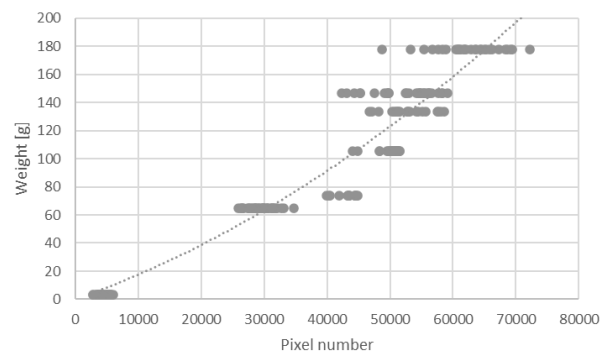


図6 ピクセル数と重量の関係

3-2 実海域実験

前述のように冬季の約2ヶ月間においてナマコ5個体を用いて過去に実施した予備実験では、1個体あたりの平均体重は8.5gから19.1gに大きく増加した。この結果から箱網内の有機物を摂取していることが明らかである。養殖生簀下の海底には、養殖に由来する有機物が大量に観察されたことから、ナマコが養殖由来

の有機物を摂取することで成長し、それと同時に養殖による環境負荷を低減していることが推察される。本実験の結果としては、個体数の変化があったが、2022年12月～2023年5月までのナマコの平均体重は海底設置型の箱網(大)で1.2gから3.3g、浮遊型では3.0-6.9gから2.6-3.5gと減少傾向であった。結果の比較として500m程度離れた養殖の影響がないと考えられる地点でのコントロール試験では、2022年12月～2023年2月で4.1gから1.7gに減少であった。この結果から、明らかにコントロール試験では成長の減少が見られたことから、養殖生簀下においてナマコの成長が有意であると言える。また、箱網(小)の結果については、ナマコの生存が確認できず全期間での計測不可であった。これはやはり堆積物による埋没の影響などが要因と言える。ナマコを選別し直して実施した2023年5月から2024年4月までのナマコの平均体重は、海底設置型の箱網(大)で1.9gから5.8gに、浮遊型で3.6-4.9gから4.6-9.1gに増加した。実験の終盤では箱網が大波で破損し、2023年5月の21匹から2024年4月の生存率はわずか1匹と低かった。しかし、水中タイムラプスカメラで撮影した画像では、2024年2月末に比較的大きなナマコ(図7)が確認された。その重量は、2024年4月に1匹だけ生存していたナマコで測定された5.8gよりも大きいものと推定される。従って、箱網への曳航ロープが大波の影響を避けるのに十分な長さであれば、ナマコは2024年4月に生存しており、海底設置型の箱網の平均重量は浮遊型よりも大きかった可能性が高いと言える。



図7 水中タイムラプスカメラ画像中のナマコ

3-3 AI を用いた画像解析

まず物体検出については、過去の予備実験で得られた水中タイムラプスカメラ画像に対して、AIを用いた画像解析からナマコの行動を把握した。実験で用いた箱網としては網目10mmの画像をテストとして使用した際に、水中タイムラプスカメラによって撮影された画像を使用している。結果の例として、ナマコが矩形によって検出されている様子を図8に示す。解析の結果から、箱網内でのナマコは天井付近に集まりやすいような行動が見られるなど、複合養殖環境におけるナマコの生態の一部を把握することができた。



図8 物体検出されたナマコの例

次に、実海域で得られた水中タイムラプスカメラによる画像の例とセマンティックセグメンテーションの結果を図9に示す。例として図8に水槽実験でのモデルを適用すると、ナマコの一部のみしか識別しておらず誤差が大きいことが分かる。これは実海域では様々な背景や水質などにより画像が劣ることが要因といえる。例として図9ではナマコの背景に箱網の枠が入るとセグメンテーションの精度が落ちるような問題も生じた。もともと背景が網のみの状態で学習を行ったためと考えられる。ナマコの背景が理想的な網面になるということは実海域の画像では限られることが課題として挙げられた。

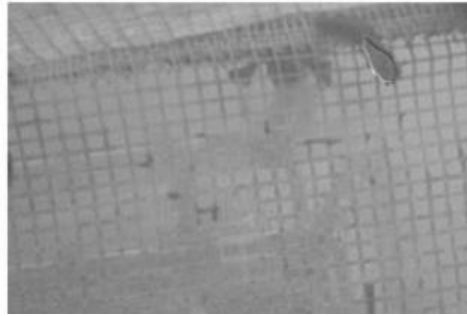


図9 実海域での画像に適用した例

そこで、Segment Anything Model (SAM) の活用を検討して、ナマコのセマンティックセグメンテーションを再度行った(図10左)。SAMは多数のデータを学習済の基盤モデルであり、学習データを用意しなくてもセマンティックセグメンテーションを適用することが可能なモデルである。SAMを用いることで、あらゆる物体に対し高い精度でセマンティックセグメンテーションを行うことが可能であり、図9で示したような学習にはない背景のパターンのナマコについても精度良くセマンティックセグメンテーションを行うことができる。ここではSAMを用いて、水中タイムラプスカメラ画像の中の解析対象とするナマコを手動で指定し、セマンティックセグメンテーションされたナマコのピクセル数から面積を求め、上述の近似式を用いて重量に換算した結果を図10右に示す。この図から長期に渡るタイムラプスカメラの画像からナマコの成長を時系列で確認することが可能となることが示された。図中の点線は数ヶ月間のデータから得られた回帰式を示している。同期間における実測値は1.2gから3.3gであり、平均で数グラム増加している傾向は一致している。全体的に大きめに重量の推定結果が出ているが、SAMでは一回り大きくナマコの部分をセマンティックセグメンテーションによって抽出してしまう傾向が見られたことが要因と考えられる。特に、図9のナマコにおいては、ナマコの重量が比較的小さいため誤差が大きくなると考えられるが、より大きな個体(例えば10g以上など)に対して適用することで誤差はより小さくなると予想される。つまりSAMによって一回り大きくナマコをセグメンテーションしてもその影響は小さくなると言える。

実際の画像においてはナマコの網を背景としてきれいに映るものだけでなく、箱網の角の方に固まっている場合や、カメラから見て斜めの面に映っていることもあり解析に利用できる数は限定される。他の生物が網の外に映る場合や、網に養殖由来の堆積物や海藻などが付着物として映るなど網目が隠れる場合もある。そのため、SAMを活用することはセマンティックセグメンテーションを実施する上で効果的であることが示された。しかし、解析に適したナマコを手動で選択する必要が出てしまう欠点があるため、これを自動化することが今後の課題といえる。一方で、本研究で示したような重量の時系列変化は、複合養殖されたナマコの長期的な成長を把握する上で重要である。そのために、本研究で開発した水中タイムラプスカメラを用いた簡易的な長期モニタリングとAIを用いた重量推定を組み合わせることで、今後複合養殖が広まるための手がかりにつながることを期待される。

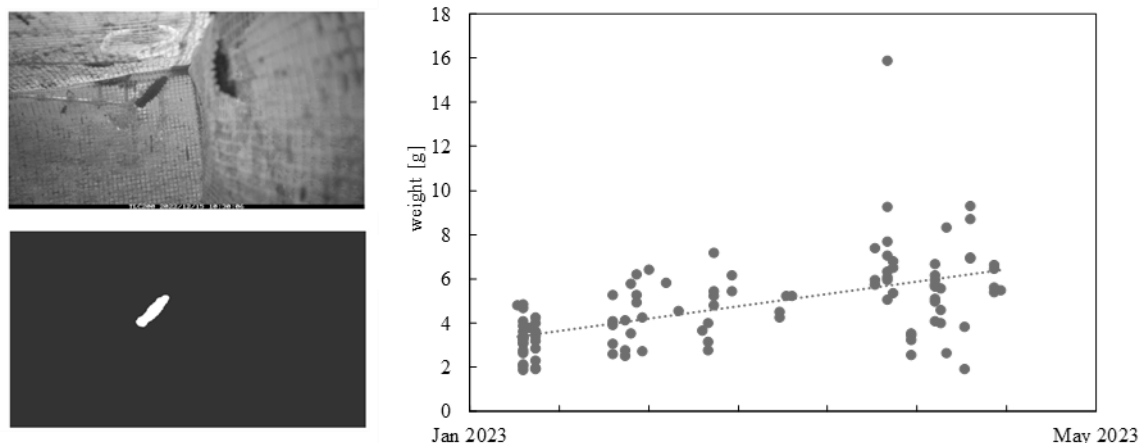


図10 セマンティックセグメンテーション(左)と重量推定の時系列変化(右)

4 結論

本研究においては、まず複合養殖環境を模擬した水槽実験において、水中タイムラプスカメラを用いたナマコの画像から重量を推定する近似式を求めた。ナマコの画像解析においてAIの手法である物体検出やセマンティックセグメンテーションを適用した。次に、実海域実験においては、物体検出を用いて実際の複合養殖環境下でのナマコの行動の把握や、さらにセマンティックセグメンテーションを適用して長期間のナマコの重量変化について推定を行った。ナマコの個体によってはばらつきが大きいため、重量推定の回帰式は目安として使用することが考えられるが、今後も実海域での実験を行う場合にも適用することで水中画像からナマコの重量を推定できると確認された。今回の研究で開発した手法によって、水中での画像からナマコの成長を非接触で長期に渡って把握することが可能となった。本実験ではギンザケ養殖によるナマコの複合養殖の可能性を示す結果も得られ、それと同時に水中タイムラプスカメラとAIによる画像解析手法を用いてナマコの重量推定を長期モニタリングすることの利便性を示した。今後については、水温などの周囲の環境情報と共に解析することで、どのような条件で複合養殖によってナマコが成長していくか考察できる。ナマコの成長だけでなく、海底の有機物なども調査することで環境影響についても同時に考察することが望ましいと言える。また、今後はナマコだけでなく他の複合養殖の生物にも本研究のモニタリング手法の応用が転用できると考えられる。その結果、AIによる水中画像解析を併用して、より効率的な複合養殖の実現や複合養殖自体の発展に寄与することが期待される。

謝辞

本研究は、公益財団法人電気通信普及財団による研究調査助成を受けて実施された。実際の海域調査にあたり、ニチモウ株式会社、株式会社ニチモウマリカルチャー、久慈市漁業協同組合の協力を得た。久慈市役所を通じて岩手県および関係機関の許可の下で実験を実施した。ここに関係者に対する謝意を示す。

【参考文献】

- 1) Islam, M. S., & Tanaka, M. (2004). Impacts of pollution on coastal and marine ecosystems including coastal and marine fisheries and approach for management: a review and synthesis. *Marine pollution bulletin*, 48(7-8), 624-649.
- 2) Chua, T. E. (1992). Coastal aquaculture development and the environment: the role of coastal area management. *Marine Pollution Bulletin*, 25(1-4), 98-103.
- 3) Tacon, A. G. J., Phillips, M. J., & Barg, U. C. (1995). Aquaculture feeds and the environment: the Asian experience. *Water science and Technology*, 31(10), 41-59.
- 4) Edwards, P. (2015). Aquaculture environment interactions: past, present and likely future trends. *Aquaculture*, 447, 2-14.
- 5) Conand, C. (2017). Expansion of global sea cucumber fisheries buoys exports. *Revista de Biología Tropical*, 65(1-1), S1-S10.
- 6) 高橋明義, 奥村誠一. (2012). ナマコ学—生物・産業・文化—. 成山堂書店.
- 7) Zhou, Y., Yang, H., Liu, S., Yuan, X., Mao, Y., Liu, Y., ... & Zhang, F. (2006). Feeding and growth on bivalve biodeposits by the deposit feeder *Stichopus japonicus* Selenka (Echinodermata: Holothuroidea) co-cultured in lantern nets. *Aquaculture*, 256(1-4), 510-520.
- 8) Jin, F., Choi, J. K., Jeong, U., Md, A., Ryu, C. H., Choi, B. D., & Kang, S. J. (2016). Effects of fermented fecal solid diets on growth of the sea cucumber *Apostichopus japonicus*. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 49(2), 161-167.
- 9) Jin, F., Jeong, U., Choi, J. K., Md, A., Kim, K. D., Choi, B. D., & Kang, S. J. (2016). Effect of fish farm fecal solid diets on the growth and energy budget of juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus*. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 49(2), 168-175.

- 10) Israel, D., Lupatsch, I., & Angel, D. L. (2019). Testing the digestibility of seabream wastes in three candidates for integrated multi-trophic aquaculture: Grey mullet, sea urchin and sea cucumber. *Aquaculture*, 510, 364-370.
- 11) Ahlgren, M. O. (1998). Consumption and assimilation of salmon net pen fouling debris by the red sea cucumber *Parastichopus californicus*: implications for polyculture. *Journal of the World Aquaculture Society*, 29(2), 133-139.
- 12) 岡本健太郎, 山本潤, 熊谷直哉. (2009). 北方海域でのマナコによる有機物浄化能力の検討. 土木学会全国大会.
- 13) 村上仁士, 上月康則, 鎌倉浩二, 岩村俊平, 豊田祐作. (1999). ナマコを活用した底質改善効果の定量化に関する検討. 海岸工学論文集, 46, 1226-1230.
- 14) Yokoyama, H. (2013). Growth and food source of the sea cucumber *Apostichopus japonicus* cultured below fish cages—potential for integrated multi-trophic aquaculture. *Aquaculture*, 372, 28-38.
- 15) Cutajar, K., Falconer, L., Massa-Gallucci, A., Cox, R. E., Schenke, L., Bardócz, T., ... & Telfer, T. C. (2022). Culturing the sea cucumber *Holothuria poli* in open-water integrated multi-trophic aquaculture at a coastal Mediterranean fish farm. *Aquaculture*, 550, 737881.
- 16) Cutajar, K., Falconer, L., Massa-Gallucci, A., Cox, R. E., Schenke, L., Bardócz, T., ... & Telfer, T. C. (2022). Stable isotope and fatty acid analysis reveal the ability of sea cucumbers to use fish farm waste in integrated multi-trophic aquaculture. *Journal of Environmental Management*, 318, 115511.
- 17) Neofitou, N., Lolas, A., Ballios, I., Skordas, K., Tziantziou, L., & Vafidis, D. (2019). Contribution of sea cucumber *Holothuria tubulosa* on organic load reduction from fish farming operation. *Aquaculture*, 501, 97-103.
- 18) Li, J., Dong, S., Gao, Q., Wang, F., Tian, X., & Zhang, S. (2014). Total organic carbon budget of integrated aquaculture system of sea cucumber *Apostichopus japonicus*, jellyfish *Rhopilema esculenta* and shrimp *Fenneropenaeus chinensis*. *Aquaculture Research*, 45(11), 1825-1831.
- 19) Busby, C. D., Méthé, D., & Parsons, G. J. (2011). Aquaculture Collaborative Research and Development Program (ACRDP). *Aquaculture CanadaOM 2010 and Cold HarvestTM 2010*, 18.
- 20) Nelson, E. J., MacDonald, B. A., & Robinson, S. M. C. (2012). The absorption efficiency of the suspension-feeding sea cucumber, *Cucumaria frondosa*, and its potential as an extractive integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) species. *Aquaculture*, 370, 19-25.
- 21) Chuang Yu, Xiang Fan, Zhuhua Hu, Xin Xia, Yaochi Zhao, Ruoqing Li, Yong Bai. (2020). Segmentation and measurement scheme for fish morphological features based on Mask R-CNN, *Information Processing in Agriculture*, vol. 7, 523-534.
- 22) Arthur F.A. Fernandes, Eduardo M. Turra, Érika R. de Alvarenga, Tiago L. Passafaro, Fernando B. Lopes, Gabriel F.O. Alves, Vikas Singh, Guilherme J.M. Rosa : Deep Learning image segmentation for extraction of fish body measurements and prediction of body weight and carcass traits in Nile tilapia, *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 170, 105274, 2020
- 23) Glenn Jocher et al., (2020). ultralytics/yolov5: v3.1 - Bug Fixes and Performance Improvements. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.4154370>
- 24) Liang-Chieh Chen, Yukun Zhu, George Papandreou, Florian Schroff, Hartwig Adam. (2018) Encoder-Decoder with Atrous Separable Convolution for Semantic Image Segmentation, *ECCV*
- 25) Guo, M.-H., Lu, C.-Z., Hou, Q., Liu, Z., Cheng, M.-M., Hu, S.-M. (2022). SegNeXt: Rethinking Convolutional Attention Design for Semantic Segmentation. *arXiv*, arXiv:2209
- 26) Kirillov, A., Mintun, E., Ravi, N., Mao, H., Rolland, C., Gustafson, L., Xiao, T., Whitehead, S., Berg, A.C., Lo, W.-Y., Dollár, P., Girshick, R.. (2023). Segment Anything. *arXiv*, arXiv:2304.02643

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Monitoring of cage-cultured sea cucumbers using an underwater time-lapse camera and deep learning based image analysis	Smart Agricultural Technology	2023 年 2 月
水中タイムラプスカメラの画像解析による複合養殖ナマコの重量推定	第 30 回海洋工学シンポジウム	2023 年 9 月
養殖海域の底生生物による環境負荷低減効果に関する研究	第 30 回海洋工学シンポジウム	2023 年 9 月
防波堤がもたらす久慈湾の流れ場と養殖排泄物拡散の変化に関する数値解析	生産研究	2024 年 1 月
Estimating body weight of caged sea cucumbers (<i>Apostichopus japonicus</i>) using an underwater time-lapse camera and image analysis by semantic segmentation	Smart Agricultural Technology	2024 年 8 月
岩手県久慈湾におけるマナマコの多栄養段階統合養殖試験と蛸集生物の多様性調査	第 31 回海洋工学シンポジウム	2025 年 3 月