

産業副産物を利用した人工魚礁

— AI を用いた海洋生物資源生産力向上技術 —

香川大学創造工学部教授 末 永 慶 寛

1. はじめに

わが国沿岸海域では、水産資源の生産力向上のために、人工的に生産された稚魚（人工種苗）を海域に放流し漁獲へ反映させる施策が実施されている。特に、瀬戸内海沿岸海域では、キジハタに代表される岩礁性魚種の種苗生産が盛んで、地域ブランド化にも注力されている。しかし、海域放流後の稚魚の歩留まりについては、大型魚による捕食、餌場や保護・育成場環境の乏しさ、孵化率の低下等により、僅かに1%程度という現状である。このことから、種苗生産から稚魚放流後の歩留まり向上等への水産資源生産力向上技術の開発が急務となっている。

筆者らが開発した稚魚の保護育成機能を有する人工魚礁へ放流した場合の歩留まりは、餌料環境の安定とともに、自然放流による方法に比べて高いことを実証している。また、人工魚礁に搭載した産業副産物（炭酸化多孔質体）を利用した保護育成シェルターに着生した小型餌料生物を稚魚が積極的に摂餌していることも複数の海域で検証している。しかし、稚魚の生残や成長後の帰巢に関する定量的データが乏しく、正確な歩留まりを評価することが困難であった。

本稿では、実際に稚魚が放流されている人工魚礁設置海域においてAIを用いることにより、有用岩礁性魚類であるキジハタを対象とし、天敵となる魚類を判別する手法を開発するとともに、稚魚の分布域および人工魚礁への帰巢率を瞬時にかつ定量的に評価し、効率的な稚魚の放流技術を紹介する。

2. 産業副産物を利用した炭酸化多孔質体の概要

(1) 多孔質体の特徴

一般的にポーラスコンクリートに代表される多孔質体は、空隙径が5～10mm、空隙率20%程度、使用骨材は碎石である。

筆者らは、空隙径15mm以上、空隙率30%程度確保した場合、水産資源の餌料となる小型生物の着生に優れ、好適な餌場環境を提供可能なことを検証しているが、本稿で紹介する多孔質体は、稚魚の保護・育成場、底質環境改善基質としての構造性能を保持するため、ポーラスコンクリートの護岸の構造仕様に準拠し、設計基準強度を10N/mm²以上、空隙率30%に設定した。本多孔質体は、産業副産物である鉄鋼スラグ（高炉徐冷スラグ2010）を主要骨材として製作した。また、Ca₁₀(PO₄)₆(OH)₂なる組成をもち、カルシウム系イオン交換体であり、重金属イオンに対する吸着機能を有する焼成骨粉（以下、HAP）の混入した多機能性多孔質体である。なお、鉄鋼スラグの骨材径を変えることで、空隙径や空隙率の制御も可能となっている。※本稿ではHAP混入による環境改善機能には触れていない。

(2) 多孔質体の製作および強度試験

多孔質体（単位質量1520～1674kg/m³）は、水粉体比27%、空隙率30%で配合し、ペーストフロー値を180mmとした（表－

1）。水、普通ポルトランドセメント、HAP粉末、混和剤、高炉徐冷スラグ2010を混練り用ミキサー内に投入後、練混ぜられた材料を型枠へ投入した。振動締固め機で30～60秒間、振動締固め成型を行った後、養生した（図－1）。養生後、硬化した多孔質体（図－1、平板W:100cm×L:50cm×H:6cm）を脱型し、出荷時まで屋外保管した。また、重金属吸着材料であるHAP粉末の最適配合を検討するため、全質量に対し、0, 5, 10, 15%混入した標準配合を表－1に示す。圧縮強度試験は、φ12.5cm×H25cmの円柱供試体とし、突き棒、ランマ、バイブレータ等を用い3層に分けて締固めを行い作製した。脱型後、材齢28日まで標準養生を行った後、圧縮強度試験を行った。試験結果を表－2に示す。

(3) 多孔質体の炭酸化

一般のコンクリート製品はアルカリ度が高く、海域へ沈設後に漁業者等から生物への悪影響を懸念する声もある。そこで、製作した多孔質体を炭酸化養生装置

表－1 多孔質体の標準配合

配合番号	W/P (%)	空隙率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
			セメント	水	スラグ(2010)	混和剤	HAP
H-0%	27	30	247	67	1360	1.24	0
H-5%	27	30	244	88	1206	1.22	81
H-10%	27	30	243	108	1060	1.22	157
H-15%	27	30	245	128	919	1.22	228



図－1 多孔質体の製作状況

表－2 圧縮強度試験結果（材齢28日）

配合番号	H-0%	H-5%	H-10%	H-15%
圧縮強度 (N/mm ²)	10.5	12.6	11.3	9.1

へ搬入し、炭酸ガス濃度 20 % の条件下で 24 時間養生した (図 - 2)。その後、炭酸化の有無による溶出試験を実施し、炭酸化無しの多孔質体ではセメントのアルカリ成分の溶出により pH10.2 であったが、炭酸化した多孔質体では pH8.3 であった。これは、瀬戸内海沿岸部の海水の pH と同等であり、多孔質体表面の炭酸化処理 (24 時間で約 300 μm 厚) により、従来のコンクリートを主としたアルカリ度の高い基質と比較して、本多孔質体の生物親和性の高さが期待された。実際に、海域設置から 90 日後での餌料生物着生量は、炭酸化無しの場合と比べて 2 倍以上高く、特に、空隙率 30 % の多孔質体で稚魚の有用な餌料となる甲殻類、多毛類の着生量が優占していた。

3. 人工魚礁の放流稚魚保護育成機能の評価

(1) 開発した人工魚礁

開発した稚魚の保護育成機能を有する人工魚礁を図 - 3 に示す。本人工魚礁は、4 つの台型ブロックを連結し、炭酸化多孔質体 12 枚のシェルターを搭載している。本シェルターは、餌料培養機能のほか、藻場造成機能、放流後の稚魚の天敵となる生物による捕食、攻撃を抑制するための隠れ場となる空間 (隙間 3 cm) を提供可能な機能を有する。本人工魚礁を図 - 4 に示す香川県観音寺市伊吹島地区 (2011 年 11 月 4 基: 平均水深 15 m) と山口県阿武町奈古地区 (2008 年 10 月 1 基 + 単体型 6 基: 平均水深 8 m) に設

置し、2015 ~ 2020 年にかけて調査を実施した。図 - 3 中の矢印は固定カメラの設置位置を表し、青色が下部梁に 2 か所、赤色は上部梁 1 か所に固定した。

(2) 魚類集集機能

ダイバーによる目視計数、光学魚眼レンズ等による撮影および 3 台の固定カメラにより、人工魚礁内部および周辺に集集した魚類の種類と尾数を調査した。得られた写真、映像から対象魚種が映っている資料を用いて AI による判別を行った。人工魚礁全体では、それぞれ平均約 0.73 尾/空 m^3 、0.45 尾/空 m^3 の魚類が出現した。魚種別では稚魚の天敵生物 (攻撃性、捕食性) となるスズメダイ、カサゴ、メバル等の魚類ほか、イシダイ、ミノカサゴ、ササノハベラ等の大型魚類も確認された (写真 - 1)。ここで、ササノハベラについては、潜水時にキジハタ (成魚) と体色、大きさ、魚礁内での出現場所が類似しており、判別方法を検討

する必要性が生じた (写真 - 2)。一方、人工魚礁の影響範囲が構造物高さの 20 倍程度と実証されていることから、構造物を設置していない対照区 (近隣の転石帯) を設けて魚類の出現種類、量を調査した。伊吹島地区では、メバル 0.86 尾/空 m^3 、スズメダイ 2.12 尾/空 m^3 、キジハタ (成魚) 0.02 尾/空 m^3 、奈古地区では、メバル 0.75 尾/空 m^3 、スズメダイ 1.69 尾/空 m^3 、キジハタ (成魚) 0.03 尾/空 m^3 であり、試験区と比べて 2 ~ 3 倍高い値となっていた。

(3) 多孔質体シェルターの餌料生物着生機能

キジハタ稚魚の放流時期は、例年 9 ~ 12 月の間に行われ、12 月ごろには水温が 15℃ 以下となり摂餌が減退し始める。摂餌が減退し始める前に十分な餌を供給することで稚魚の生残率を向上可能と考えられ、人工魚礁の餌料生物着生機能により、十分な餌料をキジハタに供給可能



炭酸化装置内に格納



炭酸化養生

図 - 2 多孔質体の炭酸化状況

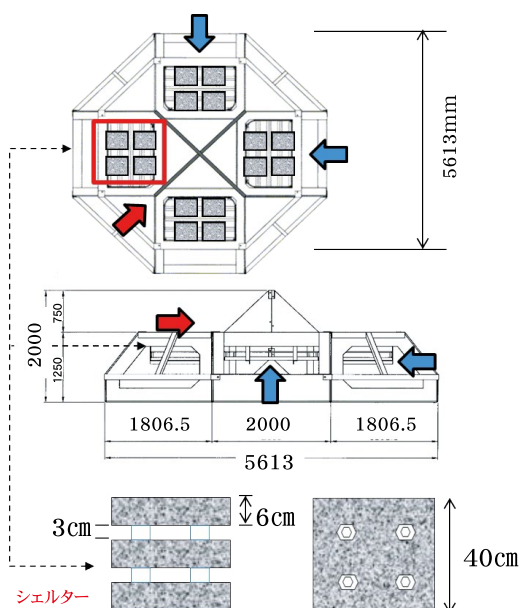


図 - 3 開発した人工魚礁 (赤枠と下図が多孔質体を重ねたシェルター: シェルター 1 基当たり 3 枚の多孔質体を使用)



図 - 4 調査場所 (赤丸が人工魚礁設置場所)

かどうかを検証するため、設置直後から着生生物を分析した。着生生物のうち、稚魚が特に好んで摂餌する選好性餌料生物の着生機能について、2020年度の調査では、シェルターの単位体積当たり約32,900g/m³の着生が確認された（図－5）。設置後約2年経過したところからシェルターへの餌料生物着生量が増加していることが分かる。人工魚礁で 사용되는一般的な多孔質な構造を有する着生基質は、設置後、短期間で目詰まりによる多孔質性の喪失が懸念されている。一方、筆者らは、多孔質体の空隙率を20～30%に制御し、流動制御機能を有する人工魚礁に搭載することにより、目詰まりの抑制と餌料生物着生機能を持続できることを実証しており、初期段階における目詰まりの抑制が選好性餌料生物の増加を促進させたものと考えられる。伊吹島、奈古の両地区でのシェルターへの選好性

餌料生物着生量は、同様の傾向を示し、人工魚礁設置以来、安定していることが確認されている。

魚礁区に放流する稚魚は、魚礁1基当たり、平均1,250尾としており、稚魚1尾、1日当たりの必要餌料量は、体重の2%程度と報告されている。放流稚魚の体重は15～20g程度で、約0.3～0.4gの餌料を必要とする。多孔質体1枚の着生量は約474g、1ブロックにシェルター4基（多孔質体12枚）があるので、設置部位当たりの選好性餌料生物着生量は約5,685gとなる。本人工魚礁は1ブロックに稚魚313尾が分布でき、313尾が1日に必要とする餌料は約95～130gとなる。シェルターへの餌料生物着生量は安定しており、過去5年間の稚魚の胃内容物の調査結果から、放流した稚魚は着生した選好性餌料生物を摂餌しており、本人工魚礁は、稚魚の育成環境として適

していると考えられる。

4. AIによる観測技術の導入

当該海域ではキジハタ以外にもさまざまな魚種が観測されている。その中でも、稚魚の天敵（攻撃性）となるスズメダイや外見が酷似するササノハベラを判別する必要が生じた。特に、スズメダイの蛸集量は極めて多く、それらが稚魚の定着率に影響すると考えられるため、スズメダイの蛸集量評価も不可欠である。ここでは、人工魚礁に設置した定点カメラによるAI判別の実装を試みた。

学習手法は、オンライン画像を利用してキジハタ、スズメダイ、ササノハベラの画像に加え、筆者らが撮影した画像を用いてデータセットを構築した。学習用のデータセットとして、収集した画像を左右30度傾ける処理と左右反転する処理を加えることで3,216枚とした。本手法では、深層学習による高速物体検出手法を使用し、grouper（キジハタ）、damselfish（スズメダイ）、wrasse（ササノハベラ）、others（その他）の4種を検出して学習させた。スズメダイについては、小さな個体が複数映り込んだ画像も使い、背鰭と尾鰭で形成されるV字型の特徴的な体形を学習できるようにアノテーションを行った。写真－3のように、比較的透明度が高く、魚体が明瞭に映っている場合は、魚体の向きや影によらず、高精度の判別結果が得られた。また、海中の濁りが強い場合も写真－4のように、背景と魚体のコントラストが明瞭な状況では、魚礁内の暗がりのキジハタ（成魚）とスズメダイを正確に判別することができた。一方、目視では判別できても、魚体自体が小さく輪郭が不明瞭な魚体は検出できない場合があったため、今後は輪郭が不明で小さい個体の判別方法を検討する必要がある。

5. 成魚の帰巢率および稚魚の定着率の解明

（1）過去に放流したキジハタの帰巢率

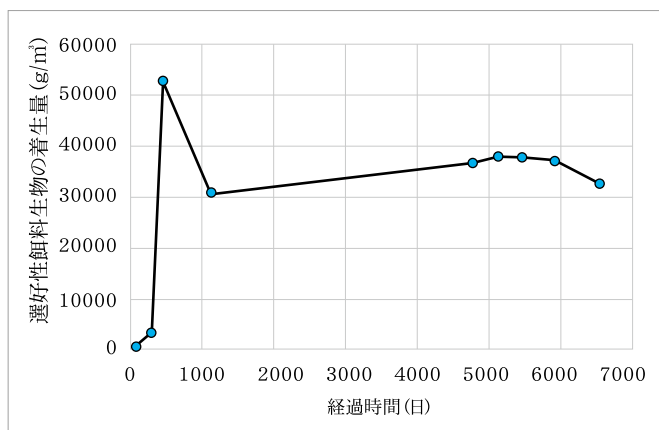
伊吹島地区の漁業統計によると、2010年の操業によるキジハタの漁獲量は1,050kgであった。筆者らは2011年より稚魚の放流を開始しており、2016年の漁獲量は1,510kg、2017年は1,650kg、2018年は2,184kgとなっており増加傾向にある。本人工魚礁への放流には、毎年、体長5～8cmの稚魚1,250尾／基を



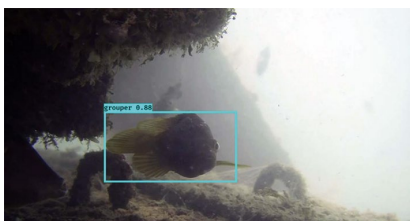
写真－1 人工魚礁内のキジハタ，イシダイ



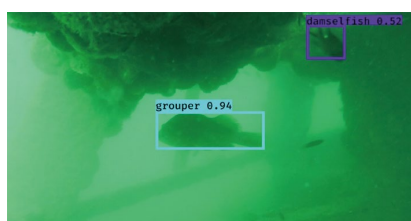
写真－2 人工魚礁内のササノハベラ



図－5 選好性餌料生物着生量の推移（伊吹島地区）



写真－3 AIによる魚類の判別学習（キジハタ）



写真－4 AIによる魚類の判別学習（人工魚礁内でのキジハタとスズメダイの判別）



写真-5 保護・育成シェルターに進入する稚魚



写真-6 保護・育成シェルター内の稚魚



写真-7 多孔質体に繁茂した海藻の例

放流用カゴに入れて魚礁天端部で開放する方法を採用し、稚魚は、標識付きの個体、鰭をカットした個体としており、後に放流魚であることが確認できる。伊吹島地区、奈古地区の両海域では、各調査時に魚礁直上部にスズメダイが群れて蛸集しており、稚魚への攻撃行為によるシェルターへの進入を妨害する状況を確認している。放流開始後では、人工魚礁へ帰巢した個体を確認されることは稀であったが、2018年以降の調査時では、当歳魚～3歳魚の個体が人工魚礁内部で確認されるようになった。このため、2020年の調査では潜水による目視で確認した個体と固定カメラで撮影した映像、画像データからAIによるキジハタ成魚の帰巢率を検討した。

対象海域でダイバーによる目視計数の結果、キジハタの人工魚礁当りの蛸集量と帰巢率は伊吹島地区での当歳魚は8尾／基（0.64%）、2年前放流魚は3尾／基（0.24%）、奈古地区では当歳魚は4尾／基（0.32%）、2年前放流魚は6尾

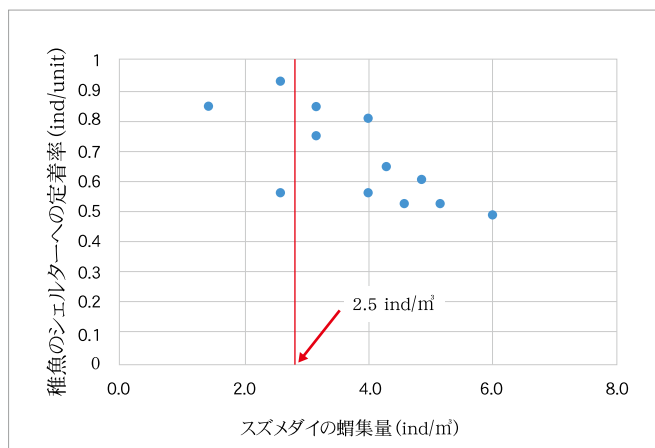


図-6 スズメダイの蛸集量と稚魚の定着率の関係

／基（0.48%）、であった。また、固定カメラで撮影された画像をAIで判別した結果、画像内で目視できるキジハタの個体数と概ね一致しており、画角や解像度の調整や機材数の増加によって人工魚礁内のキジハタ蛸集量を常時把握できる可能性が示唆された。

（2）放流稚魚のシェルターへの定着率

放流した稚魚は、スズメダイに追われる個体以外は速やかにシェルター内に進入した（写真-5, 6）。スズメダイの生息密度と稚魚のシェルターへの定着率を検討した結果、人工魚礁上部への蛸集量が2.5尾／空m²以下の条件下で、稚魚をシェルター近傍で放流すれば定着率を向上できることが示唆された（図-6）。AIによる判別結果は、ある程度鮮明な個体に関しては十分に検出可能であり、他魚種との区別できている。一方で、目視ではスズメダイと判断できるが、AIで検出できない個体も見られ検出率に課題が残った。ただし、適合率は高いため、学習精度の向上に加え、データを蓄積し、統計的な処理を行うことで全体量を推計できると考える。

6. おわりに

本稿では、産業副産物を利用した多孔質体の生物着生機能とそれを搭載した人工魚礁に稚魚を放流する場合の天敵生物の蛸集状況と稚魚の定着率との関係を定量的に評価し、AIを用いた魚類判別手法について紹介した。今後の精度向上のためには、水深が深く不鮮明な個体や岩礁性魚類特有の岩礁等に身を寄せている状態の個体の判別方法を検討する必要がある。

る。これについては、構造物内で魚類が身を寄せる箇所に小型かつ広角のカメラの設置および動画データとの組合せを試す予定である。また、天敵生物にも好的な環境を提供することが予想され、今後はシェルターの設置方法、設置場所等も課題となる。放流方法の重要な点は、稚魚を天敵生物に極力気付かれないように身を隠せる場所に入れることであり、今回のような保護用シェルターや隙間の多い岩礁帯等に放流する際、コストや労力を低減可能な方法が望まれる。解決策として、船上から水中ドローン等で魚礁上部の天敵生物の密度をAIで把握した後、海面から放流魚をばら撒く分散放流が挙げられる。これに本成果を適用することで、作業の効率化と稚魚の資源加入量増加に繋がるものと考えられる。

最後に、本稿では触れなかったが、本多孔質体の海藻類着生機能も検証（炭素固定量は約4 kg-C/m²/年）しており、海中林の形成に伴うブルーカーボンへの貢献も期待される（写真-7）。

※本研究の一部は、JST 共創の場形成支援プログラム JPMJPF2306の支援を受けたものである。