螺旋線条ポーラスメディアによるマナマコ人工種苗の粗放的放流技術の開発

Techniques for Releasing Juvenile Sea Cucumbers inside the Spiral-fibered Highly Porous Media

瀬戸雅文¹・村上紫織²・巻口範人³

Masabumi SETO, Shiori MURAKAMI and Norito MAKIGUCHI

We have developed new techniques to release hatchery-reared juvenile sea cucumbers, *Apostichopus japonicus*, into the sea, and cultivate them at high density inside the spiral-fibered highly porous media placed on the sea bottom, while reducing the likelihood of being eaten by other marine life. Juvenile sea cucumbers of about 0.02 m in size are least susceptible to their dispersion by waves or currents when discharged. The porous media must be 0.2 m or more in thickness to breed juvenile sea cucumbers inside them while preventing being swept away by waves. This thickness level is also effective in decreasing the chance of juvenile sea cucumbers being eaten by spider crabs, *Pugettia quadridens*, their predators.

1. はじめに

マナマコ (*Stichopus japonicus*) は北海道から九州, 中国北部沿岸, 朝鮮半島の岩礁域や, その周辺の砂泥域に生息する棘皮動物である。近年, 中国における干シマコ需要の煽りを受けて輸出量が急増し, 乱獲による漁獲個体の小型化など, 資源状況の悪化が懸念されている。このため, 全国各地でマナマコ人工種苗が生産され, 転石・岩礁地帯やカキ殻礁を対象海域として, 主として潜水作業による海中放流が実施されている。瀬戸ら (2011) は, 海底の安定基質へ固着した稚マナマコが強い流動耐性を発現することを報告している。

写真-1は, 水中放流直後の稚マナコの分散状況を示したものである。放流後, 着底に至るまでの浮遊過程で発生する分散は, 放流効果の検証を困難にするとともに, 放流適地から逸散すれば, 浮泥や漂砂による埋没, 害敵による捕食圧の増加などが懸念される (植草ら, 2012)。

稚マナコを捕食する肉食動物としては, カニ類, ヤドカリ類, ヒトデ類, 魚類が報告されているが, とりわけカニ類に属するヨツハマガニは, 移動性や攻撃性が高く, ウニやアワビの人工種苗に対する厄介な捕食者として知

られている (白石, 1997)。

本研究では, 波浪場に放流されたマナマコ人工種苗の浮遊移動過程を運動方程式で定式化し, 着底時の海底近傍における分散特性を数値解析的に推定した。続いて, 海底近傍まで到達した稚マナコを, 高密度で安定的に捕捉し中間育成するための増殖基質として, 螺旋線条ポーラスメディア (空隙率90%以上の超ポーラスな耐久資材) の利用可能性について検討した。最後に, 稚マナコの代表的な捕食者であるヨツハマガニを用いた捕食実験を実施して捕食行動と稚マナコのサイズとの関連性や, ポーラス材の食害バリアとしての利用可能性を明らかにした。

これら一連の研究成果をもとに, マナマコ人工種苗を船上より放流し, 予め海底面に敷設したポーラス材の内部で, 食害による影響を受けないサイズまで中間育成することを目的とした新たな種苗放流技術を開発した。

2. 稚マナコの波浪による浮遊移動特性

(1) 浮遊運動のモデル化

図-1に示すように, 一様水深 h の二次元水域内の静水面上で波の進行方向に x 軸, 水面から鉛直上方に z 軸をとり, 水面に放流された体長 B_L の稚マナコの波運動に伴う移動過程について考える。波浪に伴う流速 $V(u, w)$ が作用する海中を, 速度 $V_s (V_{sx}, V_{sz})$ で浮遊運動する質量 m の稚ナ

写真-1 稚マナコの分散状況

図-1 稚マナコの運動諸元

1 正会員 水産博 福井県立大学教授海洋生物資源学部
2 福井県立大学海洋生物資源学部
3 北海道栽培漁業振興公社環境技術部

マコには、湿重量 W 、浮力 F_B 、抗力 F_D (F_{Dx} , F_{Dz}) が作用し、 x 軸方向および z 軸方向の運動方程式は、それぞれ次式となる。

$$m \frac{\partial(u - V_{sx})}{\partial t} = m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = F_{Dx} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$m \frac{\partial(w - V_{sz})}{\partial t} = m \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = F_B - W + F_{Dz} \quad \dots\dots\dots (2)$$

さらに、稚ナマコに作用する外力 F_B , W , F_D (F_{Dx} , F_{Dz}) は、それぞれ次式で定式化できる。

$$F_B = \rho_f g V_L \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$W = \rho_p g V_L = mg \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\left. \begin{aligned} F_{Dx} &= \frac{1}{2} \rho_f A C_D (u - V_{sx}) |u - V_{sx}| \\ F_{Dz} &= \frac{1}{2} \rho_f A C_D (w - V_{sz}) |w - V_{sz}| \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 ρ_f は海水密度、 ρ_p は稚ナマコの密度、 A , V_L は、稚ナマコの射影面積、および体積で、 g は重力加速度である。稚ナマコに作用する流体力については、稚ナマコの代表長が数 mm ～ 数十 mm 程度のため質量力は無視し、抗力係数 C_D をもとにモリソン式で評価した。微小振幅波理論をもとに任意の波高 H 、周期 T に対する流速 $V(u, w)$ を与えた。稚ナマコの形態的な特性値 ρ_p , A , V_L 、および C_D を実測し、式 (1)、式 (2) をもとに Lagrange 的に追跡することによって稚ナマコの運動軌跡を推定した。

本研究で使用したポーラス材の諸元を表-1 に示す。本素材は、直径 (P_d) 0.0013 ～ 0.0015 m の樹脂製の線材 (内径 (P_w)) をループ構造に積み重ねながら溶着成形して一体化させた空隙率 (VR) 95.7 ～ 97.3% の超ポーラス体で、水産資材としては、養殖場の外郭施設などに利用されている (糸刈ら, 1992, 写真-2 参照)。さらに、本素材は自然海浜と同程度の反射率と、流れに対する高い透過性を有することが報告されている (瀬戸ら, 1993)。本研究では、海底面に敷設されるポーラス材の材厚 (P_t) が小さいため、ポーラス材による波浪低減効果は無視した。

写真-2 ポーラス材のループ構造

表-1 ポーラス材の諸元

品番	#510	#350
P_t (m/m ³)	30100	14100
P_d (m)	0.0013	0.0015
P_w (m)	0.0071	0.0071
VR	95.7%	97.3%

図-2 稚ナマコの飼育装置

図-3 稚ナマコの形態指標

(2) 稚ナマコの形態特性と捕捉率

本実験に使用したマナマコ種苗は、北海道白老港内で漁獲した成体ナマコより発生させた個体 (麻酔体長 0.002 ～ 0.035 m) を使用した。供試個体は体長別に4段階に大別し円筒容器 (容量 2 L) に収容後、クールインキュベータに収納して水温 15℃ で通気しながら給餌飼育した (図-2 参照, B_{Lm} は平均体長)。図-3 に実験に使用した稚ナマコの体積 V_L 、射影面積 A 、およびピクノメータで測定した密度 ρ_p の体長 B_L による変化を示す。稚ナマコの射影面積は、背面および側面の疣足を除いて得られる伸長方向と垂直な円形状の断面積 (図-1 中の点線で囲んだ部分, 直径 B_{np}) を画像解析より求めた。図-3 より射影面積と体積は体長のそれぞれ2乗および3乗に比例し、稚ナマコの体型は着底初期を除けば成長段階によらず相似形を維持していた。密度には成長に伴う減少傾向が認められるが、体長 0.02 m 以上ではほぼ一定値 (平均 1170 kg/m³) に収束した。図-4 は、稚ナマコの抗力係数の測定概要を示している。小型振動流水槽 (観測部の水路サイズ: $1.5 \times_w 0.15 \times_h 0.1$ m) の水路中心部に縮流部を形成し、水路底面に高感度水中3分力計 (SSK 製 LB25) を内蔵した。水温を 15℃ に設定した上で、3分力計のセンサー部 (直径 0.08 m の円盤) に麻酔体長 0.024 ～ 0.032 m の稚ナマコ 15 個体を 1 個体ずつ吸着させた。約 30 秒静置後、流速 0.17 m/s ～ 0.99 m/s の範囲内で

図-4 抗力計測状況の概念図

定常流を段階的に作用した。各流速に対して迎え角を4段階変化させながら抗力を計測し、射影面積をもとに抗力係数を算定した。

続いて、小型振動流水槽の水路の下流部にポーラス材(材厚0.05m)を配置した上で、上流側より麻酔体長0.005～0.02mの稚ナマコ25個体を5個体づつ繰り返し放流した。主流の流速を0.17m/s～0.86m/sまで9段階的に変化させながら、ポーラス材の内部に捕捉された稚ナマコの個体数を計数し、捕捉率(=(捕捉個体数/放流個体数)×100)を求めた。

図-5左は、稚ナマコの抗力係数 C_D のレイノルズ数(Re数)による変化を、個体毎にシンボルを変えてプロットしたものである。稚ナマコの抗力測定においては、主流流速の増加に応じて前端の疣足を伸張方向に萎縮・後退させる個体や、流れを避けるように体型を折り曲げる個体が認められた。図-5左で抗力係数がばらつくのは、稚ナマコの流れに対する迎え角や体型自体が様々に変化することによるものと考えられる。また、実海域に放流された稚ナマコも、沈降過程で流れに対して様々な体勢をとりながら浮遊運動することが考えられる。

図-5右は、Re数を3段階に区分した上で区間平均値として抗力係数を示したものである。これより、抗力係数の分布特性にはレイノルズ数による差異は認められず平均値4.15をとる。図-6は、計測された全ての抗力係数のヒストグラムを示したものである。これより稚ナマコの抗力係数は、平均4.15、標準偏差1.09の正規分布で近似できることがわかった。本研究では、式(1)、式(2)による運動軌跡の計算においては、信頼度95%の信頼区間に相当する下限値2.02、および上限値6.28の範囲内で正規乱数として抗力係数を与えた。

図-7左は、材厚0.05mのポーラス材に対する稚ナマコの捕捉率を3段階の流速区分毎にグループ化し、平均値と標準偏差を示したものである。これより、捕捉率には、主

図-5 抗力係数のRe数による変化

図-6 抗力係数の出現頻度分布

図-7 螺旋線条ポーラスメディアの捕捉率

流流速の増加に応じた減少傾向が認められる。なお、本実験においてはポーラス材の品番(表-1における#510と#350)による有意な差異は認められなかった。

図-7右は、材厚0.05mのポーラス材の捕捉特性が、材厚が増加した場合においても同様に発現するものとして、ポーラス材の材厚 P_t と流速 V を変化させた場合の捕捉率の変化をコンターで示したものである。これより、稚ナマコの捕捉率は、材厚の増加とともに急速に増大し、ダイバーによる放流作業が困難な、底面流速1m/s程度の海域においても材厚0.2m以上を確保すれば8割以上の高い捕捉率を発現できることがわかった。

(3) 浮遊移動と分散幅

図-8は、周期8秒の正弦波が作用する水深5mの海域に、水面付近(水深0m)より一定時間間隔毎に初速度0m/sで放出された稚ナマコ(体長0.02m)の運動軌跡の計算結果の一例を、波高1.0mと2.0mについて示したものである。水面付近で放流された稚ナマコが波向方向にドリフトしなが

ら海底面に分散してゆく様子がわかる。本計算では、1周期内に100個体の割合で稚ナマコを放出し着底時の原点($x=0$)からの最大水平到達距離を分散幅と定義した。

図-9は、水深5mの波浪場に放流された、体長0.005m, 0.015m, 0.025m, 0.035mの稚ナマコのそれぞれについて、波周期を8秒～12秒、波高を0.25m～2.0mまで変化させた場合の分散幅をコンターで示したものである。これより分散幅は体長に反比例しながら、主として波高の増加に依存して拡大していることがわかる。一方、波周期に対

図-8 稚ナマコの移動軌跡と分散幅

図-9 分散幅の周期・波高・体長による変化

図-10 平均分散幅と標準偏差の体長・水深による変化

する依存性については、体長による差異が認められるものの一定の変動パターンは見出せなかった。

図-10は、稚ナマコの放流サイズと水深毎に、波周期を8秒～12秒、波高を0.25m～2.0mまで変化させて算定された分散幅の平均値(平均分散幅)と、分散幅が放流地点を中心とした正規分布に従うものと見なした上で、標準偏差のコンター図を示したものである。平均分散幅や標準偏差には体長の増加とともに減少傾向が認められるが、水深5m未満の浅海域においては、概ね体長0.02m以上の稚ナマコを放流すれば、波浪に伴う分散を低減できることがわかった。

稚ナマコが放流される実海域における波周期や波高値は時空間的に変動しており、放流時の波条件を現地で把握しながら放流適地の微調整や適正放流サイズの選定へ反映させることは困難である。図-10によれば、稚ナマコの放流サイズと放流水深をもとに、稚ナマコの分散幅を概算できる。

3. ヨツハモガニの捕食行動とポーラス材の保護効果

(1) ヨツハモガニの形態特性

捕食実験に供したヨツハモガニは、北海道白老漁港の外郭施設周辺で潜水により採取された鋏脚の欠落が認められない雄のヨツハモガニ(雌と比較して高い捕食能力を有している)を使用した。計測部位と形態指標を図-11および表-2に示す。

供試ガニ(湿重量 W_w)の体型は、図-12に示すように成長過程において相似形を維持しており、鋏脚長(C_L)、および鋏脚の最大開口幅(O_w)の甲幅(C_w)に対する割合は、甲幅の増加とともに微増傾向が見られるが、左右の鋏脚で有意差は認められず、それぞれの平均値は0.76倍、0.26倍程度であった。

(2) 捕食特性と鋏脚の到達深度

ヨツハモガニによる稚ナマコの捕食実験は、図-13に示

図-11 計測部位

表-2 ヨツハモガニの形態指標

形態指標	最小	最大	平均±SD
C_w (m)	0.0213	0.0409	0.0304±0.0053
W_w (kg)	0.0058	0.0247	0.0135±0.0058
C_{L-Left} (m)	0.0129	0.0344	0.0236±0.0062
$C_{L-Right}$ (m)	0.0124	0.0365	0.0235±0.0057
O_{w-Left} (m)	0.0030	0.012	0.0080±0.0031
$O_{w-Right}$ (m)	0.0040	0.013	0.0081±0.0029

図-12 形態指標の甲幅による変化

図-13 捕食実験概念図

図-14 捕食サイズと鉄脚の到達深度

すように、大型クールインキュベータ内にガラス水槽を2器配置し、水深0.07mまで濾過海水を充填後、各水槽に稚ナマコ5個体と1週間無給餌飼育したヨツハモガニ1個体を収容した。水槽上方より高感度IRカメラ（最低被写体

照度0.0005Lux）、側面よりIRライトを配置し、水温15℃で暗条件下の捕食行動を12時間に亘って微速度撮影した。撮影は稚ナマコとカニを交換しながら12回繰り返し、動画解析より捕食された稚ナマコのサイズと攻撃回数を調べた。続いて、水槽底部に化繊ネットで捕捉した稚ナマコ5個体を収容後、その上部に水槽一面に亘って材厚0.05mのポーラス材を敷設した。水槽内に海水を充填後、ポーラス材の上部にヨツハモガニを放ち、稚ナマコに対する捕食行動を水槽側面より撮影して鉄脚のポーラス材の内部への到達深度 D を調べた。

図-14左はヨツハモガニに捕食あるいは攻撃された稚ナマコの直径（図-1の B_w ）と鉄脚口幅 O_w の関係を示したものである。稚ナマコの直径がヨツハモガニの鉄脚口幅より小さい個体は捕食され、それ以上のサイズの稚ナマコでは攻撃の有無に有意差が認められなかった。図-14右より、ヨツハモガニ鉄脚部のポーラス材内部への到達深度は、甲幅 C_w が線条のループ内径 P_w の4.5倍程度を有する個体でピーク値をとり、最大0.02m程度までポーラス材の内部に進出した。このため、稚ナマコ放流用の基質としてのポーラス材の厚みは、0.02m以上を確保すれば捕食バリアとして機能することがわかった。

4. 結論

マナマコ人工種苗を船上より放流した場合の分散幅は、図-10をもとに推定され、全国的に放流実績の多い水深5m程度の海域に、体長0.02m以上の稚ナマコを放流すれば、放流地点を中心に4.4m（標準偏差に相当）以内に7割弱、8.8m以内に9割以上の個体が着底するものと推定された。稚ナマコ種苗の着底が想定される海底面の近傍に、材厚0.2m程度の螺旋線条ポーラスメディアを敷設すれば、図-7よりポーラス材に着底した稚ナマコの8割以上がポーラス材の内部に捕捉され、ヨツハモガニに対する食害バリアとして機能する。図-12、および図-3より、ポーラス材の内部で体長0.048m以上まで成長した稚ナマコは、その後、周辺海域へ分散してもヨツハモガニからの食害を受けづらいことがわかった。

参考文献

- 糸列長敬・瀬戸雅文・邵仙玉・中村 充 (1992)：ポーラスメディアの消波特性に関する研究，海岸工学論文集，第39巻，pp.606-610.
- 植草亮人・吉田奈未・柏尾 翔・戸梶裕樹・浅見 愛・中原功太郎・五嶋聖治 (2012)：マナマコ種苗の放流初期における発見率低下要因，北海道大学水産科学研究彙報，Vol.62, No.2, pp.43-49.
- 白石一成 (1997)：肉食動物のキタムラサキウニに対する捕食に及ぼす水温の影響，水産増殖，Vol.45, No.3, pp.321-325.
- 瀬戸雅文・糸列長敬・邵仙玉・橋本 剛・中村 充 (1993)：ラセン繊維ポーラス材の消波・流体力特性，海洋開発論文集，第9巻，pp.223-228.
- 瀬戸雅文・佐藤総一郎・巻口範人・小形 孝 (2011)：マナマコ人工種苗の管足より発生する固着力と流動耐性，土木学会論文集B3 (海洋開発)，Vol.67, No.2, pp.316-321.