

顆粒状基質を用いた海藻種苗の 粗放的移植技術の開発

THE DEVELOPMENT OF EXTENSIVE TRANSPLANTING TECHNOLOGY ON ALGAE SEEDLING USING GRANULAR SUBSTRATE

服部志穂¹・瀬戸雅文²・青山勲³

Shiho HATTORI, Masabumi SETO, Susumu AOYAMA

¹生物資源修 福井県立大学 生物資源学研究科海洋生物資源学専攻 (〒917-0003 福井県小浜市学園町 1-1)

²正会員 水博 福井県立大学 生物資源学部海洋生物資源学科 (〒917-0003 福井県小浜市学園町1-1)

³サカイオーベックス株式会社 (〒918-8012 福井県花堂北2丁目24-20)

By turning attention to the wake area formed behind the blunt shaped object, where the diffusing dyestuff like minute particle pills up in fluid mechanically, we developed a technology to lead *Sargassum*'s embryo to the wake area of 1mm granular substrate in diameter. We generated a steady flow in range of Reynolds number 3.6~75, by using the diameter of the granular substrate as a standing length, and dispersed the embryo. The embryo was lead to the back of the granular substrate, and clinging was confirmed after 14 days of culturing. After 3 weeks of culturing from the day clinging was seen, the young plant's attaching force exceeded than the fluid force which effect on the young plant in the ocean. We used ferrite particle as the granular substrate, and magnetized it. If it is scattered to the algal reef made of steel, it is suggested that the transplanting technology of this style would be available even in the high waved ocean.

Key Words : granular substrate, wake, *Sargassum* embryo, attaching force, fluid force

1. はじめに

ホンダワラ類を主な構成種とするガラモ場は、多くの魚介類の産卵場、保育場、餌場などに利用され沿岸域の生物生産を支えるとともに、流れ藻や寄り藻となり炭素固定や栄養塩類の移送に重要な役割を果たしている。近年、沿岸域における藻場の消失や衰退が進行し、ガラモ場においても、藻場の維持や造成に向けた調査・研究が実施され始めている。

ガラモ場の造成では、人工種苗に伴う種苗移設法に関わる知見が蓄積され、これまでに天然種苗の長期保存¹⁾や不定胚の形成など海藻種苗の生産に関わる研究で成果が認められる。また、種苗を着生させる基質の材質²⁾や形状に関わる研究開発も、民間企業などを中心に精力的に実施され、高密度(数千個体/cm²)に幼胚を着生させることが可能な基質などが開発・商品化されている。しかしながら、これらの基質上で着生した幼体は、実海域に設置後、急激に着生数を減少させ、最終的には初期の着生密度によらず、基質当たり数個体程度まで減耗することが確認されており、高密度に着生させることに伴う

不合理性も指摘されている。一方、陸上施設で生産された種苗を実海域へ移植するための方法としては、種苗が着生した基質を水中接着剤やボルトで直接岩盤上に固定する技術などが開発されている。しかしながら、基質剤や接着剤が周辺環境に及ぼす影響や、水中で施工される移植作業が海象条件に制限される上、ダイバーによって、岩盤や造成施設の被覆面に貼り付ける手作業が必要となるため、費用対効果面より造成面積が小規模に制限されるなど、多くの問題点が指摘され、環境、便益の両面より移植技術の飛躍的な前進が待望されている。

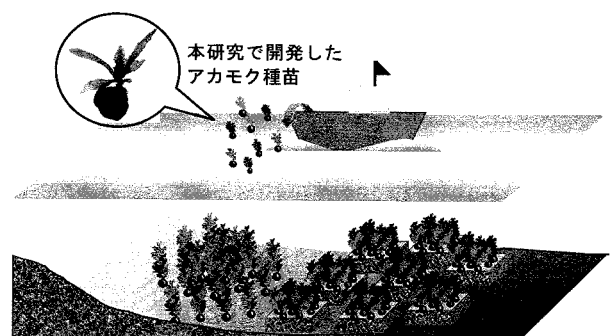


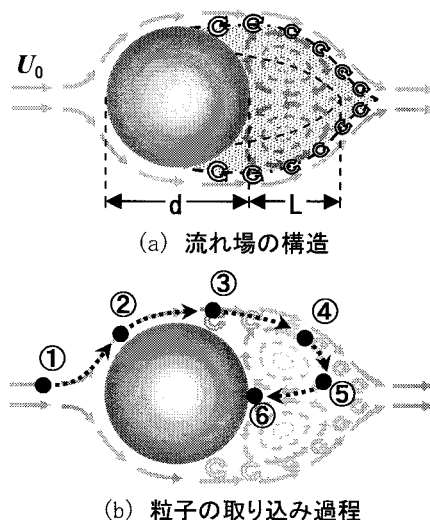
図-1 粗放的移植のイメージ

本研究で開発を目指す顆粒状基質を用いた海藻種苗の粗放的な移植のイメージを図-1に示す。本研究は、ホンダワラ幼胚などの海藻種苗を、直径1～数ミリ程度の顆粒状の基質表面に着生させた上で、造成海域まで運搬し、海水に拡散させながら船上より水中ポンプなどを用いて広域散布することによって、海藻種苗の粗放的な移植技術に関わるブレークスルーを目指したものである。

2. 幼胚の顆粒状基質への固着技術

顆粒状基質を用いて事業レベルで海藻種苗を生産するためには、大量の顆粒状基質に同時に、同じ位置にほぼ同じ密度で幼胚を着生させる技術を開発する必要がある。

図-2は、顆粒状基質を球形で近似した場合の低レイノルズ数領域における物体周辺に形成される後流域の発達パターンを示したものである。球などの流体力学的に鈍い形状物体の表面近傍を通過した流れは、物体形状の急激な曲率変化に追従できずに境界層が剥離し、物体背後に後流域が形成される。後流域の内部水塊は、剥離した境界層に発達する渦列（流下渦）を介して後流域外部と流体を交換し、後流域内の物体背後に逆流渦やよどみ点を形成する。本研究では、後流域内外の流体交換過程（図-1中の①～⑥）を利用して、海藻種苗を顆粒状基質の背後に誘導するための諸条件を明らかにする。



d : 球の直径, L : 後流逆流長さ, U_0 : 主流流速
 ①: 付着後流, ---: 分離流線, ㉿: 流下渦

図-2 後流域への粒子の誘導

(1) 球体後流域の発達特性

顆粒状基質を用いた海藻種苗の培養を想定した、低レイノルズ数領域における直径0.5～4.2mmの球体背後に形成される後流域の発達特性を可視化実験よ

り解明した。図-3に示すように、アクリル製の鉛直循環式可視化水槽（縦20mm×横20mm、観測部水路長さ120mm）を試作し、観測部水路の中央に基質模型を設置した。基質模型は直径が0.65mmから4.2mmまでの4サイズのガラス製球体を、単体、複列2体（配置間隔可変）、および格子状に2次元配列（配置間隔可変）した場合の計16パターンについて可視化実験を実施した。実験では、基質模型を設置後、定量ポンプを用いて水槽底部より精密濾過水を供給し、水槽上部より流出させることによって基質模型に上昇流（平均流速0.043～3.45cm/sの定常流）を作用させた。流体内にトレーサー粒子（ナイロンパウダー、平均粒径13 μ m）を分散後、観測部側面より50mWグリーンレーザーによるシート光（シート厚0.5mm）を照射して基質模型周辺の断面流況をデジタルビデオカメラで撮影後、低密度PIV法を用いて流速分布を計測した。

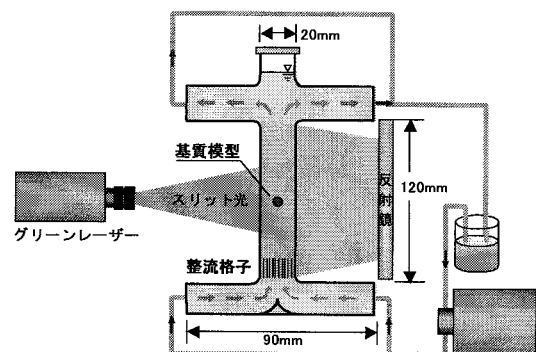


図-3 可視化実験の概要

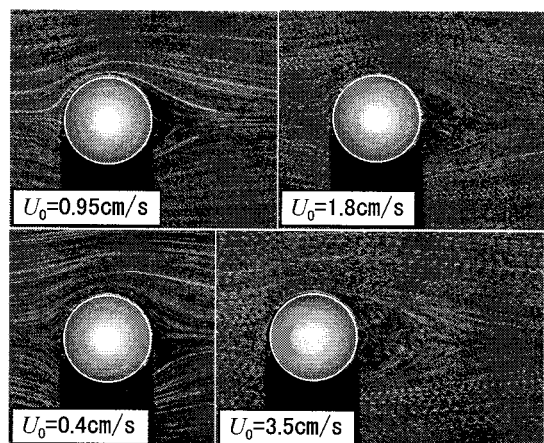


図-4 球後流域の発達状況

図-4は定常流（主流流速 U_0 ）が図中左側より作用した場合の直径4.2mmの球体後流域に形成される双子渦の発達状況を示したものである。主流流速の増加とともに球体の前後における流線の対象性が喪失し、球体背後には双子渦の形成・発達が認められる。図-5は、球体後流域における分離流線の主流方向の長さで定義される後流逆流長さ(L)のレイノルズ数

(Re)による変化を球の直径(d)で基準化して示したものである。これより双子渦が形成される低レイノルズ数領域における後流逆流長さは球体の直径によらずRe数で整理すると同一曲線上にプロットされるとともに、Re数が17.5付近で消滅している。

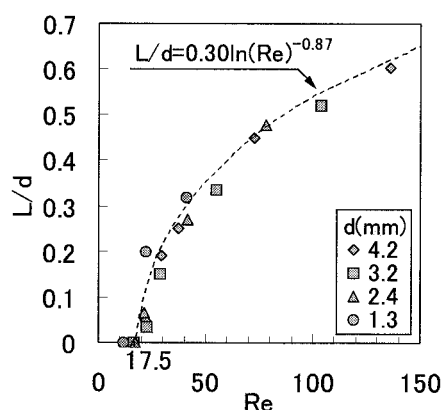


図-5 後流逆流長さの Re 数による変化

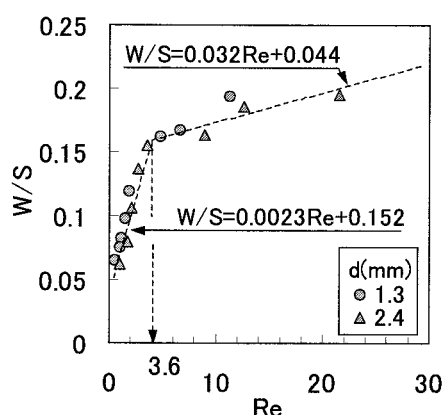


図-6 分離流線断面積の Re 数による変化

図-6は、球体表面より剥離した分離流線で囲まれた領域の流軸方向の断面積(W)のRe数による変化を球体断面積(S)で基準化して示したものである。後流逆流長さが消滅するRe数17.5未満においても、球体の上流側と下流側で流線分布は非対象となり、依然として後流域の形成が認められる。後流域の形成状況を反映する指標である分離流線の断面積WはRe数の変化とともに縮小し、Re数が3.6付近を境に急速に減少し、ポテンシャル流に漸近することがわかる。従って、後流域を利用して顆粒状基質表面に海藻種苗を誘導するためには少なくともRe数3.6以上の定常流を作用させる必要がある。

続いて、大量の顆粒状基質に同時に海藻種苗を誘導することを目的として、基質の配置条件（相互干渉の影響）を検討した。図-7(a)および(b)は、Re数39.9の主流流速に対して法線方向に配置した複列2球の配置間隔B/d (Bは球体の配置間隔, dは球径)が0.75および1.5の場合の断面流線分布を可視化したものである。また、図-7(c)および(d)は、球体を2

次元格子（配置間隔B/dが0.75および1.5）の交点に平面配置した場合のRe数44.2に対する断面流線分布を可視化したものである。

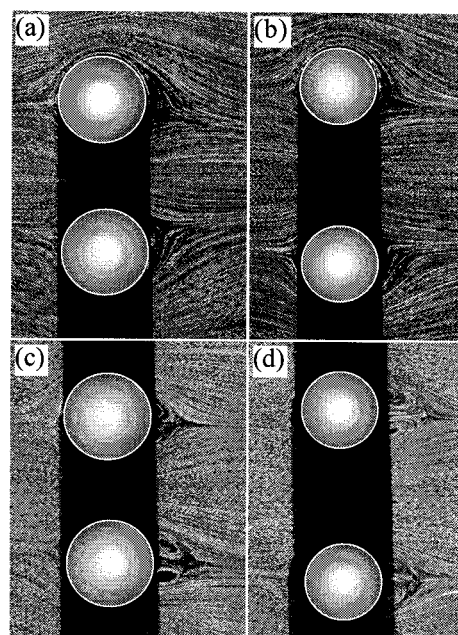


図-7 後流域の相互干渉

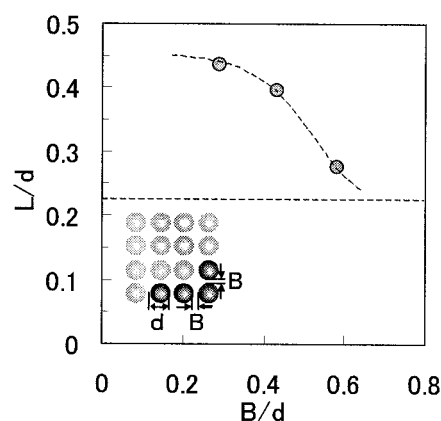


図-8 後流逆流長さの配置間隔による変化

複列2球においては、球体間の流速が2球の外縁流速より低下するため、球体に沿った循環が形成され、B/dが1.5以上においても後流域内のよどみ点が球体間側に引き寄せられる。一方、2次元配列された球体においては、球体に沿った循環は認められずB/dが0.5以上において、後流域内に双子渦、および球体背後によどみ点が形成されている。図-8は2次元配置された球体の背後に形成される後流逆流域長さの配置間隔による変化をRe数が44.2の場合について示したものである。これより、後流逆流域長さは配置間隔の増加とともに急速に単体球の同一Re数における後流逆流域長さ ($L/d=0.24$) に漸近している。

更に、二次元配置における後流逆流長さは、球体

間における流速を代表流速としてRe数を計算すれば、ほぼ図-5と同様に変化することが確認された。

(2) 基質後流域への幼胚の誘導

球体後流域の発達特性より、後流域を利用して大量の顆粒状基質の表面に海藻種苗を誘導するためには、配置間隔B/dが0.5程度以上で顆粒状基質を2次元配置した上で、少なくともRe数3.6以上の定常流を作用させる必要性が認められた。

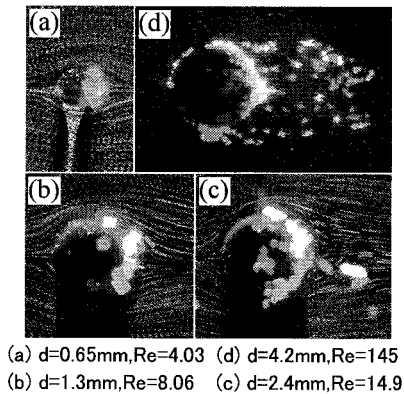


図-9 球体への粒子誘導状況

図-9は海藻種苗（アカモク幼胚）と比重および粒径がほぼ等しい疑似幼胚（比重1.15、粒径0.3mmのナイロンビーズ）を、直径0.65、1.3、2.4、4.2mmの球体後流域へ誘導した状況の一例を示したものである。図中の(a), (b), (c)は何れもRe数が3.6以上17.5未満のため球体背後に後流逆流域や双子渦は形成されないものの疑似幼胚が球体背後に誘導・着底している。疑似幼胚の誘導は双子渦が形成されるRe数17.5以上で促進されるが、双子渦による循環流が卓越すると後流域に取り込まれた疑似幼胚は後流域内を循環し球体背後に着底することが困難となる（図中の(d), Re数145）。すなわち、球体の背後に疑似幼体を着底させるためのRe数には75~100程度に上限が存在することが確認された。

3. 幼胚の顆粒状基質での培養技術

(1) 供試幼胚および基質

ホンダワラ類の生活環を図-10に示す³⁾。母藻（複相世代）の成熟とともに雄性生殖器床（精子）と雌性生殖器床（卵子）が形成され、受精後、細胞分裂を経て幼胚に発生した仮根によって着生生活に移行する。本研究ではホンダワラ類のアカモク *Sargassum horneri* (Turner) C. Agardh と、フシスジモク *Sargassum confusum* の幼胚を使用した。アカモク幼胚は、2005年5月中旬に佐賀県玄海町地先で採取した母藻より人為的に採取後、300 μ m~350 μ mの

篩に残った幼胚（長径298 $\pm$ 36 μ m、短径213 $\pm$ 32 μ m）を使用した。フシスジモク幼胚は、2006年6月中旬に福井県三国町地先で母藻を採取し、150 μ m~200 μ mの篩に残った幼胚（長径177 $\pm$ 16 μ m、短径100 $\pm$ 20 μ m）を使用した。

幼胚を着生させる顆粒状基質にはフェライト顆粒を使用した。高比重磁性体（比重4.8）であるフェライトは酸化鉄を主成分とするセラミックスで、海水中や生体内で安定しているため、MRI造影剤などにも使用される無害・安価な磁性材料である。本研究では1.0~1.4mmの篩に残った顆粒（中央粒径1.2mm）と、2.00~2.80mmの篩に残った顆粒（中央粒径2.4mm）を培養に使用した。

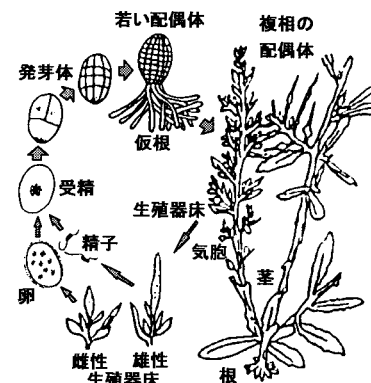


図-10 ホンダワラ類の生活環

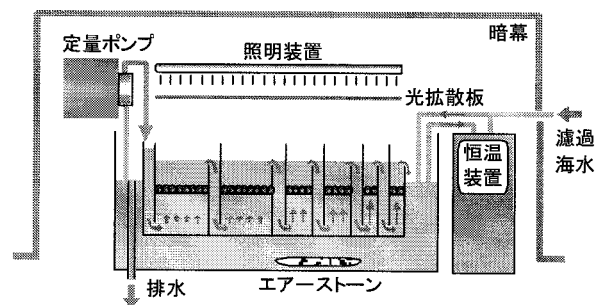


図-11 培養装置の概念図

(2) 培養条件および成長

幼胚の培養は図-11に示すように、流速条件を3段階に変更可能なカスケード式水槽を試作して実施した。図中で示すように、区画の幅を変化させ、同一流量を流入することで流速を3段階に変化させる方式である。各流速設定区内を5区画に区分し、区画内の水面下5cmに顆粒状基質が固定できるようにプランクトンネットを配置した。水槽内に精密濾過海水を供給後、定量ポンプで各区画内に上昇流を形成した。予め、供試幼胚の沈降速度を計測し、沈降速度より小さく、後流域による幼胚の誘導が期待できる条件として培養流速を0.04~0.27cm/sの範囲内で設定した。培養水温は供試幼胚の成長に関わる既往

知見をもとウォーターバス方式で20℃に調温し、各区画とも光量が $50 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ となるように調光して12hL-12hDで通水培養を行った。更に、同一の水温および光条件で止水培養区および基質条件（ $3 \times 3 \times 1\text{mm}$ 角の亚克力平板）が異なる培養区を設定し比較対象とした。

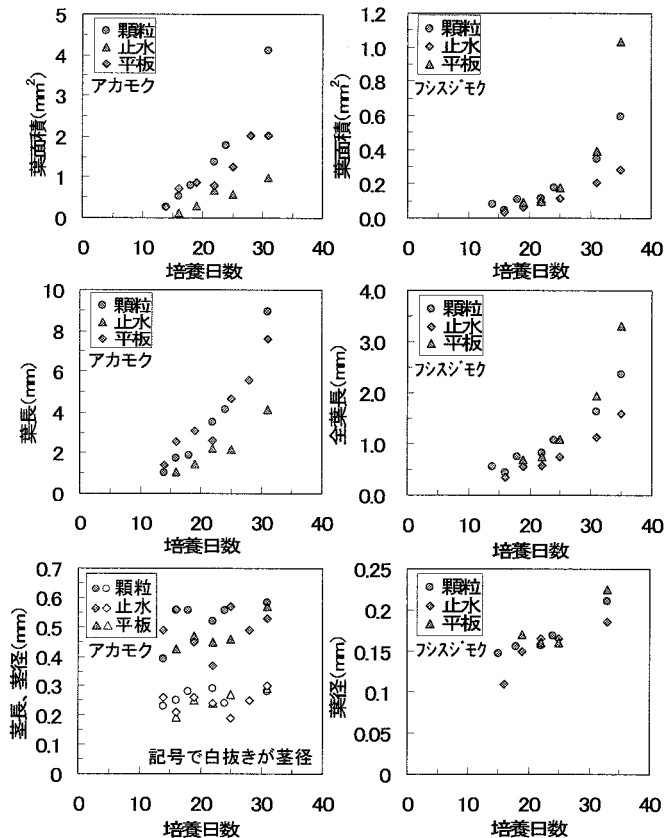


図-12 幼胚諸元の経時変化

図-12は顆粒状基質に着生したアカモク、およびフシスジモク幼体の生長に伴う葉面積、全葉長、茎長、茎径（葉径）の変化を、固着力の発現が認められた培養14日以降について計測したものである。これより、葉面積および全葉長は培養後3週間以降に急激に増大するのに対して、茎長、茎径は培養期間内はほぼ一定値を維持した。また、アカモク、フシスジモク共に、顆粒状基質に着生した通水培養による幼体が、止水培養と比較して葉面積、全葉長ともに顕著に増大した。本実験では培養海水中にPESIなどの栄養強化培地は使用しなかったが、通水培養では海水中に溶存する栄養塩類が効率的に吸収され生長が促進されたものと考えられる。なお、多年生のフシスジモク幼体の生長は一年生のアカモク幼体と比較して総じて遅いことがわかる。

(3) 幼体の固着特性

培養期間中、定期的に幼体の茎部をピンセットで摘み上げ、基質側の荷重を連続的に増加させること

によって幼体の固着力を計測した。

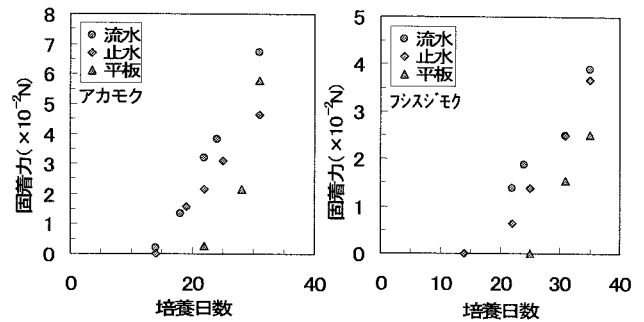


図-13 固着力の経時変化

図-13は培養日数の変化に伴うアカモクおよびフシスジモク幼体における固着力の発現状況を示したものである。アカモク、フシスジモク共に粒状基質における固着力（基質を移動させても基質から幼体が脱落しない状態）は培養後14日目より確認され、それ以降急速に増加し、培養1ヶ月後には、アカモクで $6.08 \times 10^{-2}\text{N}$ に達し、フシスジモクはアカモクの概ね1/2程度の固着力を有していた。平板に着生した幼体の固着力は培養3週間目より確認され顆粒状基質より1週間程度発現が遅れた。これは、幼体の仮根が顆粒状基質を覆うように伸び、表面にある凹凸を利用しているためであると考えられた。

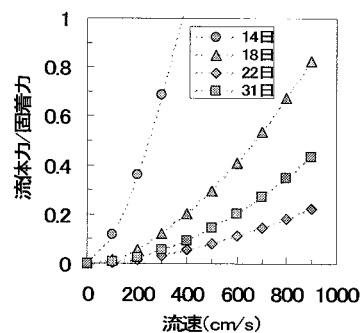


図-14 幼胚に作用する流体力と固着力の関係

図-14は、幼体の茎部を円柱形状で近似した上で作用流体力を葉状部に作用する表面摩擦抵抗と加算することによって幼体に作用する流体力を推算し、固着力と比較した計算例を示したものである。アカモクに限らずフシスジモクについても同様に固着力の発現が認められる14日以降であれば、実海域において幼体に作用する流体力は、固着力を大幅に下回り、幼体が基質に固着する14日以降（～1ヶ月の期間内）は、波浪や流動などの物理的な外力で幼体が基質より脱落することは生じにくいことが示唆された。すなわち、顆粒状基質を用いた種苗移植においては、固着力の発現が認められる14日目以降の幼体を移植に用いれば、移植後の幼体の安定性は顆粒状基質の物理的な安定性に依存することがわかった。

4. 海藻種苗の実海域における安定性

(1) 顆粒状基質の安定性

中央粒径0.6mm, 1.2mm, 2.4mmのフェライト顆粒を使用して, 小型回流水槽(水路幅150mm, 水深100mm, 観測部水路長さ1500mm)の底面における相当粗度を0, 0.3, 0.6, 1.2, 2.4mmの5段階に変化させた上で, 主流の流速を10cm/s~300cm/sまで5cm/s刻みで増加させ, 顆粒状基質の移動限界流速を計測した. なお, 底面には板厚の異なる板状のネオジ磁石を配置し, 磁力に伴う吸着力を0~ $3.8 \times 10^3 \text{N/m}^2$ まで4段階変化させた.

図-15は吸着力の変化に伴うフェライト顆粒の移動限界流速を相当粗度をパラメータとして示したものである. 移動限界流速は, 顆粒状基質の粒径の増加とともに低下し, 相当粗度の増加とともに増加する傾向が認められた. 更に, 移動限界流速はフェライト顆粒に作用する吸着力の増加とともに急速に増大し, 底面流速が300cm/sを超える条件下においても安定性が認められた. 従って, 鋼製の藻礁においては, 当該域の波浪等の外力条件を満たすようにフェライト顆粒を着磁すれば任意の海域において本手法が有効であることが示唆された.

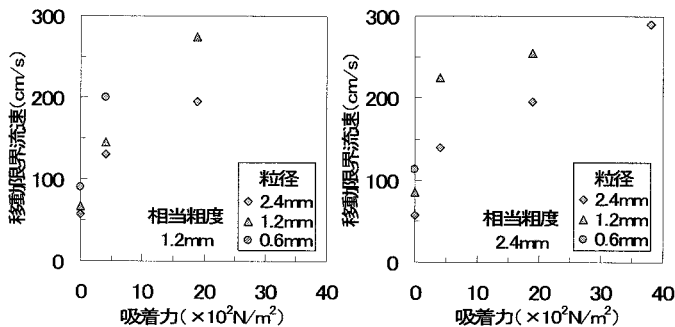


図-15 基質に作用する吸着力と移動限界流速の関係

(2) ガラモ場への適用性

平成10年度より5ヶ年に亘る海藻分布調査より夏期にホンダワラやアカモクの着生が確認されるとともに, 水深2m以深で石灰藻の分布が拡大している福井県坂井市三国町安島地先のガラモ場(図16(a)参照)を対象として, アカモク種苗に対する本手法の適用性を検証した. 本海域では, 5月下旬に本種の成熟および流れ藻としての流出, 8月下旬頃に水深3m以浅で幼体の生育が確認されている. このため, 本手法を用いて5月下旬に当該域に海藻種苗を移植した場合の水深3m以浅における波浪に対する安定性を検討した. 数値シミュレーションには, 京都大学回折効果を考慮可能な多方向不規則波浪浅海変形数値モデルを使用し, 対象海域を $5 \times 5 \text{m}$ 格子に分割後, 福井港の波浪統計資料より算定された1年確率波

($H_{1/3}=1.42 \text{m}$, $T_{1/3}=6.33 \text{s}$, 主波向W, アカモクは1年生海藻のため)をもとに底面流速を推算した.

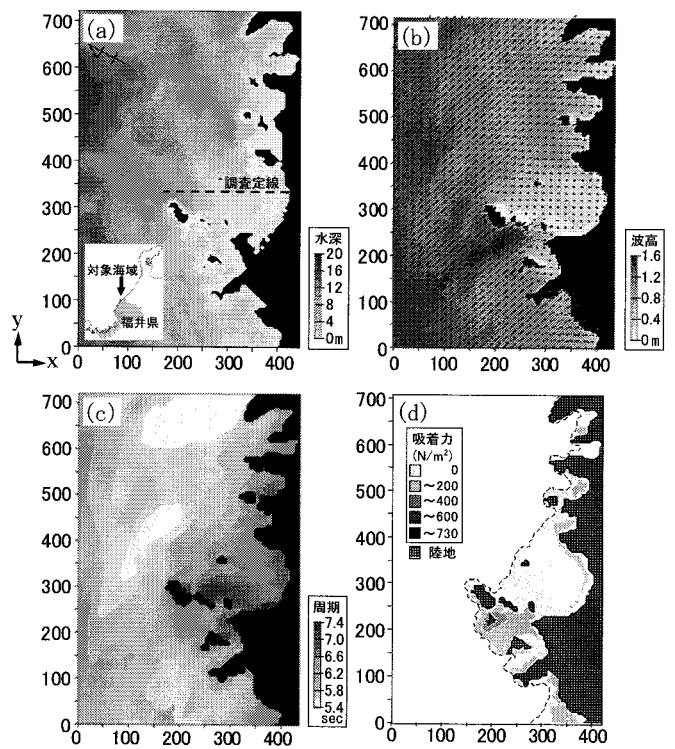


図-16 安島地先の水深, 波浪, および移植条件

図-16は対象海域の波高・波向分布(b), 周期分布(c), および, (d)は, 底面流速より算定される水深3m(図中の点線)以浅における本移植手法の適用状況を示したものである. これより, 未着磁の状態でも移植した場合でも対象海域面積の65.9%においては顆粒状基質の安定性が確保されるとともに, 顆粒状基質に 730N/m^2 以上の吸着力を付与した上で, 鋼製の藻礁と組み合わせた藻場造成を実施すれば, 計算対象海域の全てにおいて, 海藻種苗を安定的に移植することが可能となるものと推定された.

最後に, 本研究に使用した不規則波浪の数値モデルは京都大学防災研究センターの間瀬肇氏が開発されたソフト⁴⁾を使用した. また, 供試フェライト顆粒は同和鉱業株式会社の池田浩也氏より提供いただいた. 記して謝意を表する.

参考文献

- 1) 吉田吾郎, 吉川浩二, 内村真之, 寺脇利信: 一年生ホンダワラ類アカモク冷蔵種苗の成長と成熟, 藻類, 第49巻, pp. 177-184, 2001.
- 2) 磯尾典男, 高橋達人, 岡田光正: 藻場造成用基質としての炭酸固化体の評価, 日本水産学会誌, 66巻4号, pp. 647-650, 2000.
- 3) 瀬川宗吉: 原色日本海藻図鑑, 48, 保育者, 東京, pp196, 1996.
- 4) 間瀬肇, 高山知司, 国富将嗣, 三島豊秋: 波の回折を考慮した多方向不規則波の変形計算モデルに関する研究, 土木学会論文集, 628号, II-48, pp. 177-187, 1999.