

過栄養化内湾でのワカメの自立的な世代交代を 可能とさせる繊維材料に関する研究

CHEMICAL FIBER TO ENABLE SELF-SUSTAINING ALTERNATION OF
GENERATIONS OF *Undaria pinnatifida* IN HYPERTROPHIC BAYMENT

上月康則¹・山口奈津美²・山中亮一³・三好真千⁴・

田中千裕²・松本秀政²・野上文子²・岩城嘉宏⁵

Yasunori KOZUKI, Natsumi YAMAGUCHI, Ryoichi YAMANAKA, Machi MIYOSHI,
Chihiro TANAKA, Hidemasa MATSUMOTO, Fumiko NOGAMI and Yoshihiro IWAKI

¹正会員 博(工) 徳島大学教授 ソフト科学部 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

²学生会員 徳島大学大学院先端技術科学教育部 (同上)

³正会員 博(工) 徳島大学講師 ソフト科学部 (同上)

⁴正会員 博(工) 徳島文理大学助教 理工学部機械創造工学科 (〒769-2193 香川県さぬき市志度1314)

⁵学生会員 (〒770-0861 徳島市住吉4丁目2-16)

Amagasaki port was designated as one of the priority areas to restore an water environment in Osaka bay. We have attempted a development of a seaweed *Undaria pinnatifida* bed creation technique that is possible to do self-sustaining alternation of generation even in a hypertrophic water environment affected strongly by fresh water. Field experiments in Amagasaki port was carried out making use of various chemical fibers as a base material of seaweed for three years. As a results, properties of a fiber were found as follows, 1) To be able to stand in sea water and 2) Not to fluctuate intensely even if receiving a wave. A vinylon fiber was the most suitable for the base material for *Undaria pinnatifida* and could give a space to coexistence between *Undaria pinnatifida* and sessile animals.

Key Words : Hypertrophic bayment, *Undaria pinnatifida*, Chemical fiber, Self-sustaining alternation, Habitat isolation

1. 緒論

大阪湾では、歴史的には東京湾よりも早くから都市化とそれに伴う埋立が進められ、湾内に広く存在した浅海域や自然海岸は大幅に減少した。また親水空間や生物の多様性を確保する上で重要な干潟や浅場も同時に失われた。特に湾奥では藻場は消滅し、海浜もわずか10ha程度しか残されず、底泥の堆積、下水処理水の流入、内部生産などによって水質汚濁は慢性化している。

このような過栄養な状態となった大阪湾湾奥の環境を再生するために、平成16年3月に大阪湾再生行動計画¹⁾が取りまとめられた。この計画では、再生への課題、改善すべき点が多い「重点エリア」が設定され、その代表的な環境の一つが尼崎港である。尼崎港は直立護岸に囲まれた埋立地であり、毎年半年間以上貧酸素化し、特に夏期には無酸素となる。

著者らは、大阪湾環境再生研究の一つとして、平成13年より尼崎港の環境再生に向けた研究を行って

きた。しかし、経済活動が優先される水深の大きい港湾にあっては、海面を埋め立て、そこに干潟や藻場などの浅場を創出するといった従来の方法の適用は容易ではないため、階段型の干潟²⁾、筏型の藻場³⁾、護岸に付帯させた浅場⁴⁾など様々に工夫し、実証試験を行ってきた。浅場、干潟については技術化をしてきた。藻場についても、海底での海藻の育成は難しいため、筏にワカメの種糸を吊るす方法で実験を行った結果、水面100m²あたり乾燥重量で最大100kg収穫することができた³⁾。しかし、この方法では養殖種苗用の種糸を毎年付け替える必要があり、技術化にあたっては、より簡便にワカメ藻場を創出する方法を開発することが課題となった。

そこで、本研究では、人手を加えず省メンテナンスで、複数年にわたってワカメ藻場を創出する方法を見出すことを目的に、化学繊維をワカメの定着基盤として用い、調査研究を行った。本論文では、3年間の調査結果から、1) 基質に適した繊維の種類、

2) 設置に適した水深帯, 3) 繊維基質へのワカメの定着過程を中心に考察を加えた。

2. 研究方法

(1) 繊維を用いた藻場造成事例と本研究の位置づけ

繊維を用いた藻場造成技術については従来から研究がなされており、代表的なものには、鹿児島県で行われている磯焼け対策研究⁵⁾がある。これは中層網と呼ばれる2重網にホンダワラを植毛状に差し込んだ網を海底から1～2mの中層に設置し、長期間広範にわたって幼胚を添加する方法である。また北海道では、波浪により動揺する基質を用いた藻場再生技術⁶⁾が開発されている。動揺する基質には食害を起こすウニが移動できないため、生長力の弱い幼芽期にはウニの摂餌圧から保護され、十分な大きさに生長したものがウニの餌資源にするという方法である。他にも、炭素繊維を用いた実証研究⁷⁾など行われている。

しかしながら、これらの研究は、ウニなどの食害対策が中心で、水質は比較的貧栄養で、光量が問題とされないような環境で行われている。大阪湾のように基盤となる浅場が消滅し、水質汚濁が激しく、二枚貝、ホヤなどの付着動物や懸濁物の付着の影響を強く受ける場での繊維を用いた藻場創出実験は他に見あたらない。

以上のことから、本研究の新規性、独自性は、①直立護岸で囲まれ、淡水の影響を強く受ける、過栄養化した海域で藻場創出を行うこと、②簡便性に配慮し、陸上から作業のできる直立の護岸を用いること、③自立的な藻場形成を目指す点にあると言える。

(2) 大阪湾湾奥でのワカメ育成研究

a) 大阪湾湾奥で育成可能な海藻と現地実験

川井³⁾は、筏での実証試験を行う前に、港内での育成可能な海藻種を見つける実験を行っている。対象とした海藻は、大阪湾周辺に生育するスサビノリ、フダラク、ムカデノリ、ツルシラモ、ミゾオゴノリカジメ、ワカメ、シダモク、タマハハキモク、イソモク、アナアオサの10種である。その結果、ワカメだけが、生長、成熟し、他の海藻は懸濁物や動物の付着、光量不足などで枯死した。

この成果を参考に、著者らは護岸付帯式浅場でワカメ藻場の創出実験⁸⁾として、ワカメの種苗ロープを設置し、成熟、枯死することを確かめ実験を終えた。ところが、その年の冬には残された種系の“ほつれた所”から再び、新規のワカメが発芽していることが発見され、その後、生長し、藻場を形成していった。なお、このことは「大阪湾湾奥で海藻が自生した」という近年の記録となった。

b) ワカメの生活史

ワカメは1年生の海藻でその生活史を図-1に示す。ワカメは冬期に発芽し、翌年の春には大型の藻体に生長する。成熟したワカメには孢子葉(めかぶ)が形成され、めかぶから遊走子を放出した後に、藻体は枯死する。放出された遊走子は短時間海中を遊泳した後に岩礁等に付着し、後に雌雄の配偶体に生長する。成熟した配偶体にはそれぞれ精子、卵が形成され、受精が行なわれる。受精卵は細胞分裂を行って孢子体に発育し、芽胞体と呼ばれる微小幼芽期を経て約1ヶ月で肉眼視できるサイズの幼芽に生長し、再び藻体に生長していく。

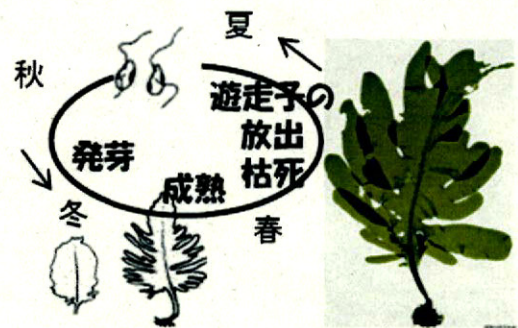


図-1 ワカメの生活史

(3) 調査実験方法

a) ワカメ定着用の繊維基質

写真-1に本研究で用いた5種類の繊維と表-1に繊維材料の物性をまとめた。それぞれの繊維は一般に市販されているものであり、320本を束ね、長さ10cmに揃え、一つの基質とした。これを親ロープに50cm間隔でつなげ、実験に供した(写真-2)。

なお、強度ではアラミドが優れ、ミシンはそれを縁つたものである。ポリエチレンはこの中ではもっとも固く、水中で自立でき、揺動しにくい。またビニロンは直径が細いもののポリエチレンに次いで固

表-1 基質材料の物性

名称	素材	比重	吸水	基質材料の直径	備考
アラミド	ハラ・アラミド	1.39	無	12μm	高強度、高弾性、耐摩耗性に優れる
アラミド・ミシン	ハラ・アラミド	同上	無	0.13mm	アラミドを縁りミシン糸にしたもの
ポリエチレン	ポリエチレン	0.95	無	1.48mm	繊維が固い、漁業用のPEロープをほぐして基質材料とした
ビニロン	ポリビニルアルコール	1.3	有	0.16mm	摩耗強度に優れる
混合素材	ビニロン60% ポリエチレン40%	1.2	やや有	0.73mm	荷造りロープをほぐして基質素材とした

く、水中で自立するが、ゆるやかに揺動する。

なお、基質の動きについては、水中でのビデオ観察の他、風速2.8～9.8m/secの範囲で変化させた風洞実験を行い、考察を加えた。風洞実験では、基質を垂下させ、そこに水平方向から風をあてて、風力と基質が浮き上がった角度との関係を求めた。



アラミド・メッシュ

アラミド

ポリエチレン



ビニロン



混合素材

写真-1 繊維基質

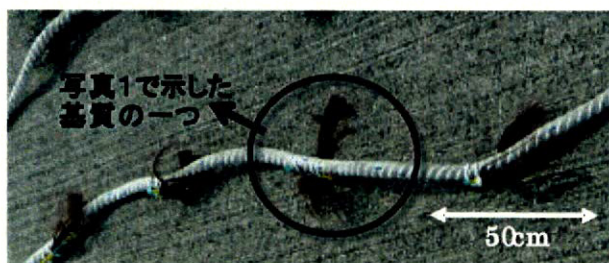


写真-2 繊維基質設置方法

b) 護岸付帯式浅場上での実験

2008年5月に各繊維基質の付けたロープを尼崎港（図-2右）に設けたDL-1.0mと-1.5mの護岸付帯式浅場上に護岸に向かって垂直となるように設置した（図-2左）。ワカメの遊走子の供給は、母体となる成熟したワカメを大阪湾内から採集し、網目のバックに入れて、ロープ周辺に置くことで行った。

c) ビニロン繊維を用いた実験

実用化では基質を岸壁に付帯させることを考えており、ここでは、ビニロン繊維を用い、現地実験を行った。ビニロン繊維基質は、ワカメの他、フダラク、カジメなどの藻場が広がる大阪湾小島漁港に2009年5月から約2週間沈没させ、周辺のワカメからの遊走子を自然に付けた。その基質付きロープを尼崎港の岸壁で鉛直方向に設置し、海藻の発芽プロセスなどを観察した。

d) モニタリング方法

2008年5月からは原則月1回、水質計測機器で水温、DO、塩分、光量子束密度、透明度などを測定した。同時に潜水調査では、基質やその周辺に生息する生

物を写真撮影、目視観察を行った。

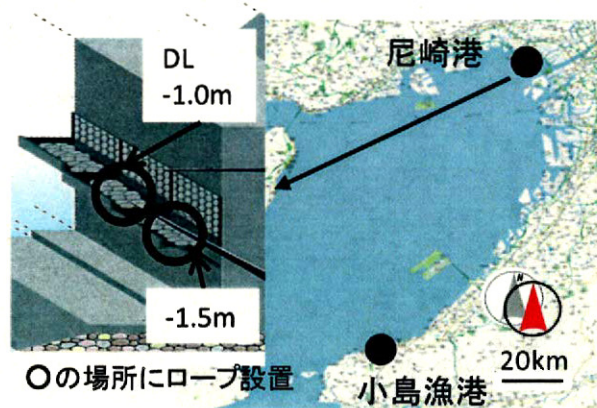


図-2 繊維設置場所

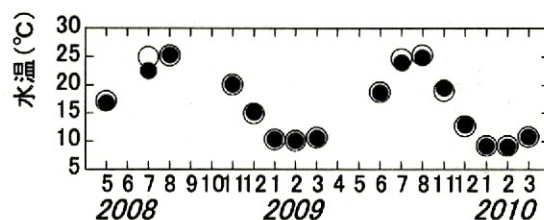
3. 現地実験結果および考察

(1) ワカメに適した繊維基質

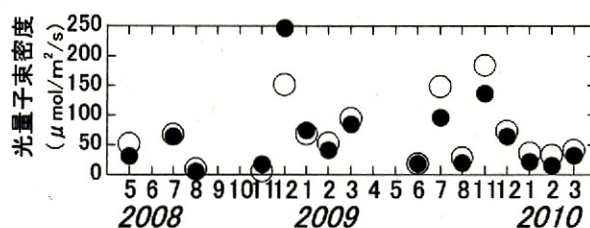
a) 水質

ワカメの生長に適した水温は、地域によって異なるが、それらをまとめると15～30℃の間にあり⁹⁾当調査でもその範囲内にあった。光量子束密度は、ワカメ配偶体の生長、成熟には、50～100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 前後の光量が適している⁹⁾とされるが、尼崎港では配偶体が生長、成熟する秋期の晴天時であっても濁りが激しく、50 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ を下回ることもあった。塩分は27psu以上が適当¹⁰⁾とされているが、淀川からの出水の影響を強く受けるために、それを下回ることが観測時にも認められた。またDOは、2008年の夏期にはDL-1.5mの浅場にあっても貧酸素化といわれる4mg/Lを下回っていた。

以上のように、尼崎港では塩分、光量などの水質面でも、ワカメが生長するのには厳しい環境であることがわかる。

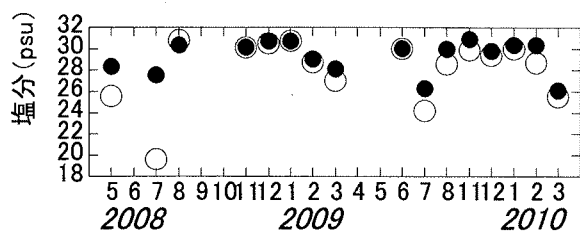


a) 水温

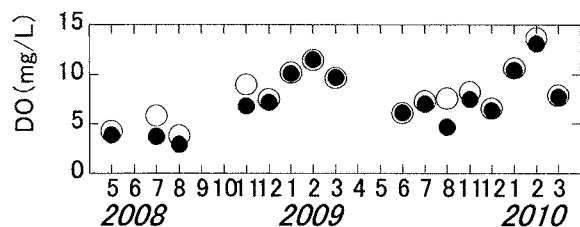


b) 光量子束密度

○ : DL-1.0m, ● : DL-1.5m



c) 塩分



d) DO

○ : DL-1.0m, ● : DL-1.5m

図-3 水質調査結果

b) 繊維基質別ワカメの発芽数

2009年1月には、繊維基質上にワカメの発芽が確認されたが、繊維の種類によって発芽数は異なり、5種類の中で最も多かったのはビニロンで、繊維基質1つあたりに平均32株のワカメがみられ、春には葉長1.8mに生長した(図-4)。なおワカメは浅場上や親ロープなどにはほとんど定着していなかった。

ここで、風洞実験における風速 U_a と海水中における流速 U_w の関係は、空中と水中における圧力抗力を等しいと仮定すると式(1)のようになる。

$$U_w \cong 0.03U_a \quad (1)$$

たとえば風洞実験における風速 $U_a=10\text{m/s}$ は海水中における流速 $U_w \cong \text{約}0.3\text{m/s}$ に対応していると考えることができ、この程度の流速は実験海域において頻繁に認められた。なお、この条件におけるレイノルズ数は、風洞実験、流速換算値のいずれも 10^4 のオーダーで一致しており、両者の流れの相似性は保

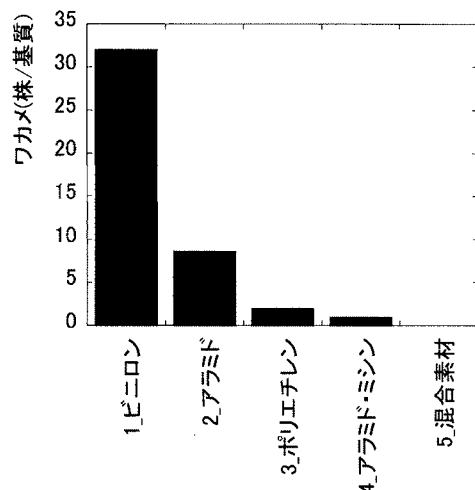
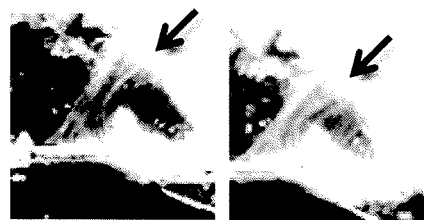


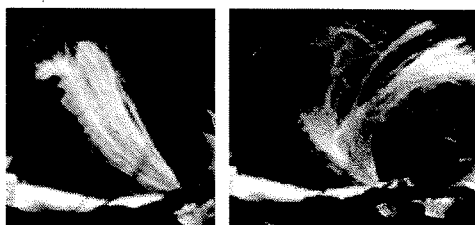
図-4 ワカメ発芽数

たれていると判断した。そこで、圧力抗力に対する各繊維材の応答特性を、風洞実験により得られた傾斜角により比較すると、 4.9 m/s の風速に対して角度が大きかったものは順に、アラミド・ミシン(55°)、アラミド(49°)、混合素材(42°)、ポリエチレン(31°)、ビニロン(23°)となり、アラミドやアラミド・ミシンの材料は他のものに比較して揺動しやすかった。また水深DL-1.5mの浅場上に設置した繊維を水中カメラで観測した結果(図-5)からも、流れが繊維の向きに順方向から3秒後に逆へとなった場合には、アラミド系の繊維は大きく花が咲いたように広がるのに対し、ビニロンは先端が微動し、ポリエチレンは少しゆらゆらとする程度で同じ波に対する挙動は大きく異なっていた。混合繊維は塊となって、流れの向きの変化に少し遅れるように揺れる様子が見られた。また二枚貝の個体数と繊維基質への付着物との関係(図-6)を見ると両者には正の相関があったが、それらの量と発芽数との間には明確な関係は見られなかった。

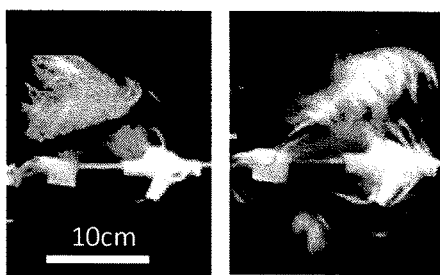
以上の結果から、ワカメの定着、発芽に適した繊維材料の要素については次のように推察することができた。まずアラミド系の繊維のように、水中での揺動が大きいと、遊走子の定着や発芽が難しいと考えられる。また混合素材のように水中で塊となって動くものは、その中に二枚貝が加入すると、二枚貝が出す足糸によって繊維同士が互いに固定され、絡み合い、団子状になりやすくなる。



a) ビニロン



b) アラミド・ミシン



c) アラミド

0秒 → 3秒

図-5 水中での基質の揺動状況

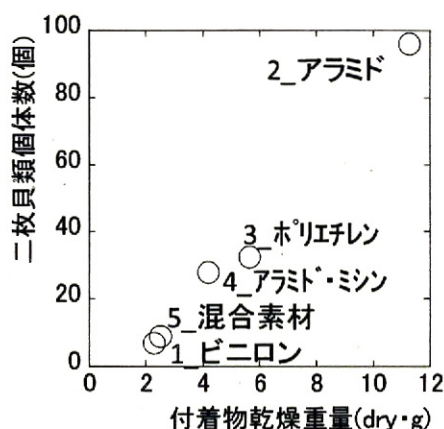


図-6 繊維基質上の二枚貝個体数と付着物量

その一方で、ビニロンとポリエチレンは水中で直立し、絡み合うこともなく、波浪によっても大きくは揺動しない。ただし、今回用いた材料では、ビニロンの方が繊維の径が細かいため、特にその先端がポリエチレンのものに比較して、細かく揺れやすいことが、ワカメの遊走子の定着などに有利であったと考えられる。

このように、ワカメの定着基質として好ましい繊維の条件は、定性的ではあるが、海中で波を受けて、揺動しつつも直立しているもので、不適なものは大きく揺動し、繊維が絡み合い、団子状になるような繊維であると把握することができた。

(2) 直立岸壁でのワカメ育成実験

2010年3月には岸壁に設置したビニロン繊維基質には、海藻ではワカメの他にアオサ属、カバノリ、フダラクの4種の海藻が定着、生長していた。カバノリ、フダラクは大阪湾湾奥では見られない種であるので、小島漁港での種付けされたものがここで発芽、生長したと思われる。尼崎港では、ワカメしか生息できないとされていたが、繊維基質上では他の海藻も生長できたことは興味深い。

ワカメは、岸壁の繊維上には水深DL-1.3m～-2.8m付近まで確認できた(図-7)。また別途行ったDL-1.0m、-1.5m、-2.0mに基質を連続して並べたものには、浅いDL-1.0mから80株/m、72株/m、22株/mとワカメの株数は多く、数cmに一株の割合でワカメが確認された。ただし、2009年度の護岸付帯式浅場での実験では、水深DL-1.0mに設置したものより、DL-1.5mのものの方が発芽数は逆に多かった。一般に、浅い方が生長に必要な光量も確保しやすく、生長に有利と思われるが、他にも淡水による低塩分化の影響を強く受けるなどの環境要因の影響も大きく、ワカメの生長の年変動は大きくなるようである。

なお、護岸に沿わせて繊維基質を設置した場合には、護岸壁面にワカメが擦れて、葉状部がちぎれるものが多数みられたことから、実用にはこの点にも配慮する必要であることがわかった。

(3) 繊維基質の役割

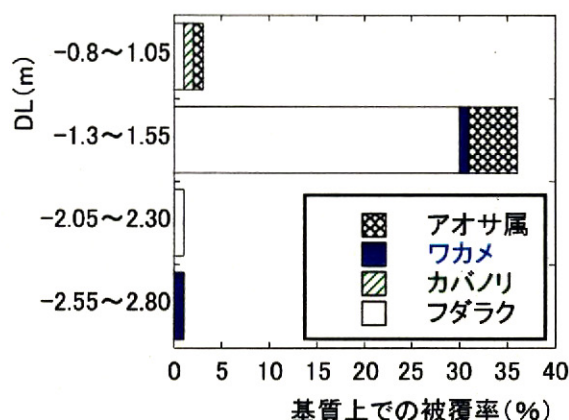


図-7 基質繊維上での海藻の分布 (2010.3)

ビニロンの基質では、夏場にはチグレイソギンチャク、ユウレイボヤが優占し、12月にワカメの発芽が認められた(表-2)。その一方で、壁面では夏期にはムラサキイガイの大量脱落が生じ、一時壁面では生物が見られなくなり、徐々にミドリイガイが加入、優占していく。ただし、それも低水温で脱落死亡する。

表-2 ビニロン基質上でのワカメの生長過程

調査日	ビニロン基質	周辺
2009 7/7	まばらにチグレイソギンチャクが付着	ムラサキイガイやカニの死骸などに大量のヒデが蟄集、摂餌
8/7	繊維全体に付着物が覆い、ユウレイボヤやチグレイソギンチャクが付着	海底では硫酸還元菌がみられる。ヒデはみあたらない
11/28	繊維全体に茶色い付着物がみられ、チグレイソギンチャクが付着	基質設置水深で浅でミドリイガイが優占
12/22	付着物は少なく、ワカメの発芽が確認	ミドリイガイ、カンザシコガイ科が壁面に付着
2010 1/26	ワカメが生長、その他ショウジョウケツリや緑藻綱などがみられた	低温化でミドリイガイが大量死、海底に堆積
2/22	20cm以上のワカメが複数みられた	同水深ではカンザシコガイ科が多い
3/25	ムラサキイガイやミドリイガイなどが少数あった。ワカメは幼葉や30cmを超えるものが30株以上みられた。	ムラサキイガイの幼貝が数多くみられた

例年、3月になると、ワカメが定着する水深帯では、シロボヤが多いが、壁面では、ムラサキイガイ、ユウレイボヤが優占していた(図-8)その後、4月、5月となると、基質上ではワカメが葉長約2mに生長し、多くの動物の採餌、棲み場ともなっており、藻場同様の生態系が形成される⁸⁾一方で、壁面では、一面をムラサキイガイが真黒に覆う。

また護岸付帯式浅場に前年に設置していた基質には本年度もワカメが自然に付着、幼葉が発達、生長していることが確認された。このように、適当な繊維

維基質を設置すると尼崎港のように過栄養化、淡水の影響を受ける海域でもワカメなどの海藻を生育、世代交代させることができるようである。壁面に優占するムラサキイガイは大量付着、大量脱落を起こすために、環境を汚濁させる生物となっているが、本研究の結果、繊維基質を適切に使えば、異なった生物群集の形成を誘導し、そのような汚濁を軽減させることができる可能性を示唆している。

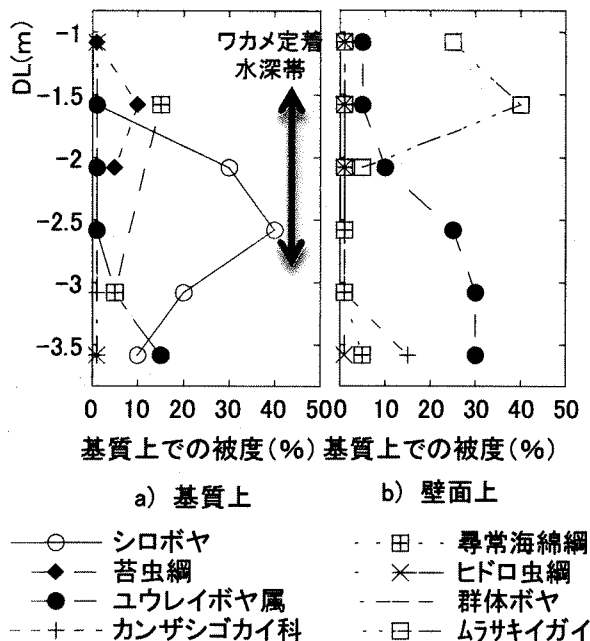


図-8 基質繊維上での主要な動物の分布 (2010.3)

最後に、繊維基質が二枚貝などの動物に阻害されることなく、ワカメが付いた基質をみると、基質の下部にはホヤやイガイ類が生息しているが、先端にはワカメなどの海藻が定着していた。つまり、繊維基質は、海藻と動物との棲み分けといった、場をめぐる競争を回避できる場を提供することが可能であると言えることができる (図-9)。

4. 結論

- 1) 過栄養化し、淡水の影響を強く受ける環境にあっても、適当な水深帯に繊維基質を用いると、ワカメの発芽、成長、藻場形成を促すことができることを明らかにした。
- 2) 繊維基質に求められる物理特性について、定性的に把握し、岸壁で繊維基質を使用する場合の留意点も明らかにすることができた。
- 3) 繊維基質は、海藻と動物の棲み分けを可能にし、壁面とは異なる生物群集の形成、遷移させること、さらにムラサキイガイによる汚濁といった問題を軽減させる効果もあることが示唆された。
- 4) 2009年12月には、2008年春に設置した繊維に自立的に発芽したワカメを見ることができた。その後生

長、成熟しており、本方法を用いると省メンテナンス、かつ複数年藻場を創出できる可能性が示唆された。今後も継続し、モニタリングを行う予定である。



図-9 基質上でのワカメと動物の棲み分け

謝辞：本研究の一部は、「大阪湾センターの護岸等を研究フィールドとした海域環境の再生・創造に係る調査研究助成」を受けて行われたものである。また日本ミクニヤ(株)五島幸太郎氏には調査研究を行うにあたってご支援いただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 大阪湾再生推進協議会：大阪湾再生行動計画，2004。
- 2) 石垣衛，中村由行，上月康則，上嶋英機：過栄養化した閉鎖性水域に造成した干潟に作用する物理的攪乱の影響評価，海洋開発論文集，Vol.20，pp.1019-1024，2004。
- 3) 川井浩史：浮体式藻場による海藻類育成と海藻バイオマス利用，閉鎖性海域における最適環境修復技術のパッケージ化研究報告書，国際エマックスセンター，4-8，2004。
- 4) 三好順也，上月康則，村上仁士：大阪湾奥部における自律的環境修復を促す護岸付帯式海岸構造物の機能評価，日本海水学会誌，Vol.61，No.6，pp.331-336，2007。
- 5) 鹿児島県水産技術開発センター：平成20年度事業報告書，pp.111-123，2009。
- 6) 福田光男，北原繁志，今林弘：ウニによる磯焼け海域での人工動揺基質を用いた藻場造成について，寒地土木研究所，月報89巻，No.673，pp.1-11，2009。
- 7) 田中孝：炭素繊維を用いた人工岩礁材と人工海藻の開発，環境情報科学，特集号，pp.141-146，2006。
- 8) 三好真千，上月康則，山口暢洋，宮地由紀，村上仁士：大阪湾奥でのワカメ育成とその循環的利用に関する実験，海洋開発論文集，Vol.23，pp.949-954，2007。
- 9) 馬場将輔：新潟県産ワカメの生育に及ぼす温度，光量，塩分の影響，海洋生物環境研究所報告，第11号，pp.7-15，2008。
- 10) 日本水産資源保護協会：環境が海藻類に及ぼす影響を判断するための『判断基準』と『事例』，日本水産資源保護協会，104pp.，1992。