マクサ栄養体の付着に適した基質

土屋実穂,¹ 滝尾健二,² 安藤和人,^{2a}
川辺勝俊,^{2b} 駒澤一郎,^{2a} 荒川久幸^{1*}

(2009年5月14日受付, 2009年9月2日受理)

¹東京海洋大学海洋環境学科, ²東京都島しょ農林水産総合センター大島事業所

Suitable substrate for thalli attachment of the agar alga
Gelidium elegans (Gelidiales, Rhodophyta)

MIHO TSUCHIYA,¹ KENJI TAKIO,² KAZOTO ANDO,^{2a}
KATSUTOSHI KAWABE,^{2b} ICHIRO KOMAZAWA^{2a} AND HISAYUKI ARAKAWA^{1*}

¹Department of Ocean Sciences, Tokyo University of Marine Science and Technology, Minato, Tokyo 108-8477,

²Oshima Branch, Tokyo Metropolitan Islands Area Research and Development Center of Agriculture, Forestry and Fisheries, Oshima, Tokyo 100-0212, Japan

After the volcanic eruption in 2000, the quantity of agar alga *Gelidium elegans* remarkably decreased in Miyakeshima Island, and so efforts to increase the production are necessary. We identified a suitable substrate to enhance thalli attachment of agar alga and examined its properties.

(1) We set artificial reefs with substrates of mortar blocks, steel fence, stainless steel bolts, and stainless steel bolts covered with chemical fiber fabric on the bottom of the fishing port of Oshima and observed the attachment, adhesion, and growth of thalli of *G. elegans* on each substrate. Many thalli of *G. elegans* attached rapidly to the perpendicular substrate of stainless steel bolts with the chemical fiber fabric. After one year this substrate was mainly covered with *G. elegans*. (2) In the laboratory we examined the change of density of attached thalli on the above four kinds of substrate and also tested five kinds of chemical fiber. Density of attachment and residual ratio of the thalli were the highest on the substrate with chemical fiber fabric. (3) It is considered that the attachment of the thalli is related to the number and curve ratio of prominent fibers in the chemical fiber string.

キーワード：栄養体, 海藻礁, 化学繊維, 基質, テングサ, マクサ, 三宅島

三宅島においてテングサ類は重要な水産資源であり、1991年の漁獲高は1億9千万円にのぼった。¹⁾しかし、2000年7~8月の三宅島雄山における大規模な火山噴火によって、大量の火山灰が島内および沿岸に降下し堆積した。その後、降雨のたびに島内から火山灰が海へ流出し、²⁻³⁾沿岸のテングサ群落の壊滅状態に陥ったことが報告されている。⁴⁾砂防ダムやえん堤が築かれた現在においても、依然として火山灰の流出は続いており、多くの漁場では再生が進まず、特に島東側で回復が遅れている。⁴⁾テングサ群落の荒廃は水産業への影響のみなら

ず、島沿岸の生態系への影響が懸念されるため、テングサ群落の再生が望まれている。

テングサ類の生殖方法には、四分孢子・果孢子による孢子生殖および配偶体・孢子体による栄養体生殖の2種類がみられる。⁵⁾孢子生殖を利用した群落の再生方法として、投石⁶⁾および雑草駆除⁷⁾による新たな着生基質の作出がある。しかし、三宅島沿岸域では流出した火山灰などの粒子が海底の基質面に堆積しており、孢子の着生が阻害されていると考えられる。大井(未発表)は三宅島沿岸の海底堆積粒子量を調査し、テングサ群落が荒

* Tel : 81-3-5463-0467. Fax : 81-3-5463-0467. Email : arakawa@kaiyodai.ac.jp

^a 現所属：東京都島しょ農林水産総合センター八丈事業所 (Hachijo Branch, Tokyo Metropolitan Islands Area Research and Development Center of Agriculture, Forestry and Fisheries, Hachijo, Tokyo 100-1511, Japan)

^b 現所属：東京都小笠原水産センター (Tokyo Metropolitan Ogasawara Fisheries Research Center, Azakiyose, Chichi-jima, Ogasawara, Tokyo 100-2101, Japan)

廃している理由として、海底に堆積した粒子量が多いことによって、胞子の着生率が著しく低くなっていると報告した。このことから、三宅島沿岸域のような粒子の多い海域ではこれらの手法による再生は不適切であると考えられる。

一方、栄養体生殖は、寄り藻として漂う栄養体が、基質に付着し、その場所に仮根で着生し、生育する生殖方法である。これまでの栄養体生殖を用いた手法には、植田⁸⁾のコンクリートと縄による増殖法、藤森⁹⁾の撚縄式養殖法などがあるが、いずれも実用化されているとは言えない。

前報¹⁰⁾において、三宅島の火山灰を用いたブロックでテングサ増殖実験を行い、テングサ類の栄養体が突起物および海藻礁の垂直面に着生しやすいことを明らかにした。

そこで本研究では、突起や垂直面を利用し、栄養体生殖を誘発するテングサ海藻礁の開発を目的として、第一にさまざまな突起基質を有する海藻礁を用いて現場で予備的な実験を行い、第二にテングサ栄養体の付着に適した基質の形状、表面素材について室内実験により検討した。

材料と方法

テングサ属の実験対象種 日本沿岸に分布するテングサ属の中には、マクサ *Gelidium elegans* やオオブサ *G. pacificum* などテングサ属 16 種、オバクサ *Pterocladia tenuis* やカタオバクサ *Pterocladia capillacea* などオバクサ属 3 種が報告されている。伊豆諸島におけるテングサ漁業では、これらのうちマクサおよびオオブサが水揚げの主体となっている。三宅島でのテングサ水揚げ量に対するマクサの割合は、1974 年には 78% を占めていた。¹¹⁾ そのため、現場調査では種を特定できたマクサおよびオオブサを、室内実験では三宅島のテングサ漁獲量に大きな影響を及ぼすマクサを主な研究対象とした。

海藻礁試験 試験礁への海藻着生実験は東京都大島南部の差木地漁港（水深 3 m）において行った（Fig. 1a, b）。試験礁は、鉄筋コンクリート製の土台（L80×W80×H20 cm）に種々の突起物を基質として固定したものである（Fig. 1c）。突起物の種類は Fig. 2 に示した。（a）モルタル製円柱ブロック（ $\phi 5 \times H10$ cm；以下モルタル）、（b）ステンレスボルト（ $\phi 1 \times H11$ cm；以下ボルト）、（c）フェンス（鉄製・防食加工）（20×20 cm）、および（d）混紡化学繊維（ポリエステル 50%，その他（アクリル・レーヨン・ナイロン）50%）で表面を覆ったステンレスボルトの 4 種類である。混紡化学繊維は軍手生地を使用した。モルタル、ボルト、および混紡化学繊維は土台に垂直になるよう 4 基ずつ設置した。フェンスは土台に対して水平に 1 基を設置した。モルタル、ボルト、フェンスは各 2 礁、混紡化学繊維は 1 礁

Fig. 1 Map showing the locations of the field experiment and laboratory experiment.

Symbol ☆ in (b); location where the experimental blocks were deployed. Symbol ◎ in (a); location of Tateyama station of Tokyo University of Marine Science and Technology (TUMSAT). (c); Diagrammatic features of the experimental reef.

Fig. 2 Photograph of experimental substrates.

The substrates of (a) mortar, (b) stainless steel bolt, (c) steel fence, and (d) chemical fiber fabric were used in the field experiment. The substrates of (a), (b), (c), (d), (e) polyethylene, (f) polypropylene, (g) nylon, (h) polyester, and (i) Kuremona (vinylon) were used for the laboratory experiment.

ル、ボルト、フェンスは各 2 礁、混紡化学繊維は 1 礁について試験を行った。まず、2005 年 7 月 29 日に土台のみを海底に設置した。モルタル、ボルト、および

Fig. 3 Sketch of experimental water tank.

Symbol ★ stands for the point where the experimental substrates were set.

エンスの基質は2005年8月5日に、混紡化学繊維の基質は同年9月21日に海中作業によって土台上に固定した。2~3ヶ月毎に潜水観察および写真撮影を行った。2006年9月8日にテングサ類の着生が見られる基質を回収し、マクサの株数および全長を調べ、再び海中へ戻した。2007年7月7日にも同様に基質を回収し、マクサおよびオオブサの株数、全長、および湿重量を測定した。

マクサ栄養体の付着と脱落に関する室内実験 室内実験は、2006年10月から2008年9月にかけて、東京海洋大学（TUMSAT）水圏科学臨海フィールド教育研究センター館山ステーション（千葉県館山市坂田）にて行った。マクサは館山ステーション地先および千葉県館山市伊戸地先にて採取した。採集した個体は葉状部の先端側から全長7 cm（側枝3 cm以下）となるよう切断し（以下、処理マクサ）、実験に供した。

実験装置をFig. 3に示す。水槽は直径100 cm、高さ75 cmの円形である。水槽中央に外径6 cmの円筒形塩化ビニル管を固定して円形水路とした。水槽には水深55 cmまでろ過海水を満たし、ポンプを用いて円形水路内で取水、吐水を行うことにより流れを作った。ポンプ

は変圧器（スライダック SD120、東芝社製）で制御し、流速を調節した。流速は、基質が設置された水路中央の水槽底面から15 cmの高さにおいて5, 10, 20 cm/secとなるように設定した。このときの水路内の流速は、水路中央の水面付近で基質直上より20~50%速かった。また水路外側では10~30%ほど速く、内側では約30%遅かった。処理マクサは水槽中央付近に滞留しやすかったため、中央の塩化ビニル管周囲にエアレーションを配置し、その現象を防いだ。

マクサの着生基質（突起物）として、モルタル(a)、ボルト(b)、フェンス(c)、および同種のボルトを種々の繊維で覆ったものを使用した（Fig. 2）。繊維の種類は、(d)混紡化学繊維（ポリエステル60%・綿30%・レーヨン10%）、(e)ポリエチレン、(f)ポリプロピレン、(g)ナイロン、(h)ポリエステル、および(i)クレモナ（クラレ社製ビニロン原糸）である。混紡化学繊維は軍手生地を使用したため、繊維紐を編んだ布状になっており、被せるようにしてボルトを覆った。その他の繊維紐は繊維のまま巻きつけることによりボルトを覆った。フェンス以外の基質は、固定台に装着し、直立した状態で使用した。また、フェンスは、水槽の底面に水平に配置した。なお、それぞれの基質は水路中央に設置した。

基質へのマクサの付着に関する実験は以下に行った。基質には、モルタル、ボルト、フェンス、ボルトを混紡化学繊維もしくは各種化学繊維で被覆したものを用いた。基質1種類1基を水槽底に設置し、ポンプを始動して、水槽内に一定の流速の流れを作出した。処理マクサ10個体を水槽内に投入すると、投入されたマクサは円形水路に沿って流され、基質に付着するまで移動を続けた。10分後に基質に付着したマクサ個体を計数した。実験は、5, 10, 20 cm/secの3種類の流速について行った。また、それぞれの基質の表面積と平均付着数から、1 cm²あたり付着密度を算出した。各基質の表面積は、ボルト28 cm²、モルタル157 cm²、フェンス240 cm²、混紡化学繊維54 cm²であった。各種化学繊維の基質の表面積はそれぞれ、クレモナ48 cm²、ポリエステル42 cm²、ポリエチレン48 cm²、ポリプロピレン57 cm²、およびナイロン40 cm²であった。各基質について5回ずつ同様の操作を行った。

次に、基質に付着したマクサの脱落に関する実験は以下に行った。新しい基質1基を水槽底に設置した。基質としてモルタル、ボルト、フェンス、ボルトを種々の繊維で覆ったものを使用した。ボルトを覆った繊維は混紡化学繊維、クレモナ、ポリエステル、ポリエチレン、ポリプロピレン、およびナイロンである。また繊維の状態による脱落への影響を検討するために、クレモナ紐を布状に編んだものを使用した。処理マクサ3個体を水槽内に投入し、それらの全てのマクサが基質に付

着したところでポンプを止め、流れが完全に停止した後、水槽内の海水の噴出し口を逆方向へ向け、流れを反転させて種々の流速を基質に与えた。流速は、5, 10, 20 cm/sec の順で5分ごとに変化させ、各流速におけるマクサの残存個体を計数した。また、各流速において残存率 (R) を算出した。残存率 R の算出式は、 $[R=N/I \times 100]$ (N : 突起物に残っているマクサ個体数, I : 初期付着数) である。実験回数は、基質の種類の実験で5回、繊維の種類の実験で10回である。基質へのマクサ個体の付着密度および残存率について、基質間で Steel-Dwass の多重比較による検定を行い、危険率5%における有意差を判定した。

さらに、各種繊維へのテングサの付着機構を知るために、クレモナ、ポリエステル、ポリエチレン、ポリプロピレン、およびナイロンの5種類について繊維表面の特徴を顕鏡し調べた。それぞれの化学繊維紐はボルト ($\phi 1 \times H 11$ cm) に沿わせ、その両端を固定し、流速 20 cm/sec の水路中に10分間放置した。その後、繊維を水中から取り出し、繊維の表面を横方向から顕微鏡デジタルカメラ (DP70-SET-D, オリンパス製) によって撮影した。繊維紐1本あたりの撮影範囲は各繊維7cmとした。この操作をそれぞれの種類の繊維について5回ずつ行った。撮影した画像より、繊維紐から突出した単繊維の数、長さ、および屈曲した繊維の始点と終点の距離を計測した。単繊維の長さ、始点と終点の距離を用いて単繊維の屈曲比 (C) を算出した。屈曲比の算出式は、 $[C=L/D]$ (L : 単繊維長, D : 単繊維の始点と終点の距離) である。繊維紐から突出した単繊維数では、データに正規性が見られたことから繊維の種類間で Tukey の多重比較による検定を行い、屈曲比では Steel-Dwass の多重比較による検定を行なった。それぞれ危険率5%において有意差を判定した。

結 果

大島における海藻礁試験 モルタルと混紡化学繊維を基質とした試験礁の海中での経過をそれぞれ Fig. 4 および Fig. 5 に示す。設置2ヵ月後のモルタル (Fig. 4a) には無節サンゴモ類、アオサ類などの着生が確認された。その49日後 (Fig. 4b), 無節サンゴモ類, アオサ類, トサカノリ *Meristotheca papulosa* などの着生が確認された。設置から6ヶ月後 (Fig. 4c) になると、無節サンゴモ類, 有節サンゴモ類, トサカマツ *Prionitis crispata*, トサカノリ, ハイミル *Codium lucasii*, フシツナギ *Lomentaria catenata* など多種類の藻類の着生がみられた。また、フェンスおよびボルトではモルタルと同様の経過を示した。一方、混紡化学繊維で覆ったボルトを固定した試験礁 (Fig. 5a) は、設置からわずか9日後にはマクサが4基すべての基質に付着していた

(Fig. 5b)。それから49日後 (Fig. 5c), 混紡化学繊維には依然としてマクサが付着し続けていた。翌年の2月 (Fig. 5d) には、混紡化学繊維の基質部分だけでなく、土台部にも小型の海藻の着生が見られた。設置から約1年後 (Fig. 4d, Fig. 5e), マクサが着生している基質は、混紡化学繊維4基のうち3基およびモルタル8基のうち2基であった。

マクサの着生が見られた基質1基あたりのマクサ着生数は、混紡化学繊維14.7個体に対し、モルタル2.0個体であった。基質に見られたマクサはいずれも仮根を形成し着生していた。Fig. 6に基質に着生していたマクサの全長の頻度分布を示す。設置から約1年後 (2006年9月) の基質に着生していたマクサ全長の平均値は、混紡化学繊維では7.3 cm, モルタルでは8.9 cm であり、全長の範囲は混紡化学繊維で1.2~14.5 cm, モルタルで4.5~11.7 cm であった。混紡化学繊維に着生していたマクサは広い範囲の全長を示したが、モルタルでは狭かった。マクサの付着した混紡化学繊維の基質では、マクサが着生した藻類の大部分を占め、無節サンゴモ類やカギイバラノリ *Hypnea japonica* がわずかに確認された。これに対し、モルタルではマクサのほか、無節サンゴモ類, 有節サンゴモ類, ツノムカデ *P. cornea* が確認された。

設置から約2年後 (2007年7月) には、混紡化学繊維基質4基すべてとモルタル8基のうち3基にマクサおよびオオブサの着生が見られた。このときのマクサおよびオオブサの着生数は混紡化学繊維で22.3個体/基, モルタルで3.3個体/基であり、混紡化学繊維で非常に多かった。混紡化学繊維およびモルタルにおいて、全長の平均値はそれぞれ5.5および10.7 cm であり、全長の範囲は1.8~21.0 cm および3.5~16.6 cm であった。混紡化学繊維では全長の範囲が2006年より広がった。また4 cm 以下の小さな個体の数が増加した。基質に着生していた他の海藻種は、混紡化学繊維ではトサカマツ, スギノリ *Chondracanthus tenella*, ハイウスバノリ *Acrosorium yendoii* など8種, モルタルではツノムカデ, トサカマツ, カニノテ *Amphiroa anceps* など8種であった。着生した全海藻に対するマクサおよびオオブサの重量比の平均値 (標準偏差) は混紡化学繊維で50.9% (± 37.9), モルタルで13.9% (± 16.1) であり、前者で高かった。

基質の種類とマクサの付着および脱落との関連 大島での海藻礁試験の結果、混紡化学繊維の基質には海中への設置直後に、マクサ栄養体の付着が見られ、1年後においても多数の個体の着生が確認された。このことから混紡化学繊維の突起はテングサ海藻礁の基質として優れていると考えられた。その理由を調べるために、室内実験を行った。Table 1に基質へのマクサ付着数を流速別

Fig. 4 Temporal change of the experimental substrate of mortar blocks.

a) 30th Sep. 2005 (two months after being set on the sea bottom), b) 18th Nov. 2005, c) 22nd Feb. 2006, d) algae on a block on 8th Sep. 2006.

に示した。

流速 5 cm/sec における基質あたりマクサ付着数はそれぞれモルタル 0.6 (± 0.9) 個体, フェンス 8.4 (± 0.6) 個体, ボルト 0 個体および混紡化学繊維 0.2 (± 0.5) 個体となった。流速の増加に伴って, 付着数はモルタルでは減少し, フェンス, ボルト, 混紡化学繊維では増加した。付着数はフェンスで有意に多かった ($p < 0.05$)。基質によってそれぞれの表面積が異なるため, 基質の単位面積あたりマクサ付着密度へ換算し, Table 2 に示した。流速 5 cm/sec での付着密度は, それぞれモルタル

Fig. 5 Temporal change of substrate of chemical fiber fabric.

a) 21st Sep. 2005, b) 30th Sep. 2005, c) 18th Nov. 2005, d) 22nd Feb. 2006, e) algae on the substrate of chemical fiber fabric on 8th Sep. 2006.

で $0.4 (\pm 0.5) \times 10^{-2}$ 個体/cm², フェンスで $3.5 (\pm 0.2) \times 10^{-2}$ 個体/cm², ボルトで 0 個体/cm² および混紡化学繊維で $0.4 (\pm 0.7) \times 10^{-2}$ 個体/cm² となった。流速 20

cm/secにおける付着密度は、混紡化学繊維で最大値 $6.7(\pm 0.9) \times 10^{-2}$ 個体/cm²を示した。基質あたり付着数においては、どのような流速でもフェンスが有意 ($p < 0.05$) に多かったが、付着密度においては流速 20 cm/sec で混紡化学繊維がフェンスより有意に高くなった ($p < 0.05$)。

Fig. 6 Frequency of total length of *Gelidium elegans*. Upper: Chemical fiber fabric, lower: Mortar. Solid bars and open bars indicate 2006 and 2007, respectively.

次に、反対方向への流れを作り基質へのマクサの残存率を調べた (Table 3)。処理マクサを基質に付着させた後、水槽内の流れを止めた時、フェンスおよび混紡化学繊維では1個体の脱落も見られなかった。水槽内に反対方向の流れを与えたところ、モルタルの全ての付着個体はまもなく脱落した。流速の増加とともにフェンスおよびボルトの残存率は低下した。流速 20 cm/sec のとき、ボルトでは全ての個体が脱落した。これに対し、混紡化学繊維での残存率は、流速 20 cm/sec においても 87% であった。混紡化学繊維での残存率は、流速 20 cm/sec において他の基質より有意 ($p < 0.05$) に高かった。混紡化学繊維を使用した基質は、マクサの栄養体を付着させやすく、残存しやすいという性質があることが示唆された。

基質の表面素材とマクサの付着および脱落との関連前節において表面素材として混紡化学繊維を使用した基質はマクサが付着しやすく、脱落しにくい性質を持つことが明らかになった。そこで、数種類の化学繊維について、同様の実験を行った。なお前節において、付着密度では流速 20 cm/sec において結果の違いが最も顕著に現れたことから、流速 20 cm/sec についての結果を Table 4 に示す。

流速 20 cm/sec における基質へのマクサの付着密度はクレモナで最も高く、ポリエステル、ナイロン、ポリ

Table 1 Number of thalli attached on each substrate

Flow velocity (cm/sec)	mortar	fence	bolt	chemical fiber
5	0.6 (± 0.9) ^a	8.4 (± 0.6) ^b	0 ^a	0.2 (± 0.5) ^a
10	0.2 (± 0.5) ^a	9.8 (± 0.5) ^b	0.2 (± 0.5) ^a	1.4 (± 0.6) ^a
20	0 ^a	9.8 (± 0.5) ^c	1.6 (± 0.9) ^b	3.6 (± 0.6) ^b

Values having different superscript letters are significantly different ($P < 0.05$).

(Unit: ind./substrate)

Table 2 Comparison of density of thalli attached on each substrate

Flow velocity (cm/sec)	mortar	fence	bolt	chemical fiber
5	0.4 (± 0.5) ^a	3.5 (± 0.2) ^b	0 ^a	0.4 (± 0.7) ^a
10	0.1 (± 0.3) ^a	4.1 (± 0.2) ^b	0.7 (± 1.4) ^a	2.6 (± 0.9) ^{a,b}
20	0 ^a	4.1 (± 0.2) ^b	5.7 (± 2.9) ^{b,c}	6.7 (± 0.9) ^c

Values having different superscript letters are significantly different ($P < 0.05$).

(Unit: $\times 10^{-2}$ ind./cm²)

Table 3 Residual ratios on substrates under different flow velocity conditions

Flow velocity (cm/sec)	mortar	fence	bolt	chemical fiber
No flow	53 (± 44) ^a	100 ^a	87 (± 27) ^a	100 ^a
5	0 ^a	40 (± 39) ^{a,b}	27 (± 39) ^{a,b}	93 (± 13) ^b
10	—	33 (± 30) ^a	20 (± 40) ^a	87 (± 16) ^a
20	—	13 (± 27) ^a	0 ^a	87 (± 16) ^b

Values having different superscript letters are significantly different ($P < 0.05$).

Table 4 Density of thalli attached on substrates of each chemical fiber

	Kuremona	polyester	polyethylene	polypropylene	nylon
Density of thalli attached ($\times 10^{-2}$ ind./cm ²)	7.5(± 1.7) ^b	5.4(± 1.1) ^{a,b}	4.4(± 2.4) ^{a,b}	3.9(± 1.9) ^a	4.8(± 2.1) ^a

Values having different superscript letters are significantly different ($P < 0.05$).

Table 5 Residual ratios on substrates of each chemical fiber and Kuremona fiber fabric under different flow velocity conditions

Flow velocity (cm/sec)	Kuremona	polyester	polyethylene	polypropylene	nylon	Kuremona fabric
No flow	87(± 22) ^{b,c}	30(± 31) ^a	60(± 29) ^{a,b}	53(± 22) ^{a,b}	37(± 35) ^a	100 ^{b,c}
5	53(± 37) ^{b,c}	13(± 22) ^{a,b}	7(± 13) ^a	23(± 21) ^{a,b}	10(± 30) ^a	77(± 30) ^{b,c}
10	33(± 30) ^b	0 ^a	0 ^a	3(± 10) ^{a,b}	0 ^a	37(± 38) ^{a,b}
20	20(± 22) ^b	—	—	3(± 10) ^a	—	30(± 28) ^b

Values having different superscript letters are significantly different ($P < 0.05$).

エチレン、ポリプロピレンの順で減少した。クレモナでの付着密度は前節で示した混紡化学繊維よりも高い値を示した。クレモナでの付着密度はポリプロピレンおよびナイロンに比べ有意 ($p < 0.05$) に高かった。

次に、各種の繊維基質における残存率を Table 5 に示した。残存率は止水状態で 30～87% に低下した。流速の増加に伴って、残存率はどの繊維においても低下し、流れの影響を強く受けることがわかった。クレモナの残存率は、流速 10 cm/sec でポリプロピレン以外の繊維と、流速 20 cm/sec でポリプロピレンと比べて有意に高かった ($p < 0.05$)。

残存率をすべての基質の種類について比べる (Table 3 および Table 5) と、混紡化学繊維で最大であった。これは、この素材が繊維紐ではなく、布状に編みであることに起因する可能性がある。そこで、紐状のクレモナを縦糸、横糸とし、組み合わせることで布状 (8×4.5 cm) に加工し、この布状クレモナでボルトを覆い、同様の脱落実験を行った。Table 5 に布状クレモナでの残存率を示す。止水、5、10 および 20 cm/sec における残存率 (±SD) は、それぞれ 100%、77 (±30) %、37 (±38) % および 30 (±28) % となった。クレモナ紐をボルトに巻きつけた場合の残存率と有意な差は見られなかった。

混紡化学繊維に付着したマクサを顕微鏡で観察すると、繊維がマクサに絡み付いている様子が確認できた (Fig. 7)。そこでそれぞれの化学繊維の表面を顕微鏡によって観察した。

繊維紐を流水中に浸漬するとその表面には、はぐれて突出している単繊維が多数観察された。それらの繊維には、繊維の終点が繊維紐に埋もれているもの (Type I) と突出しているもの (Type II) が見られた。それぞれのタイプについて単繊維の密度を Table 6 に示した。長さ 7 cm の繊維紐における単繊維の密度は、クレモナで

Fig. 7 Photograph of the attachment between fiber twines and branches of *Gelidium elegans*.

Type I および Type II とともに他の繊維に比べて有意に多かった ($p < 0.05$)。一方、ポリエチレンでは Type I が、ナイロンでは Type II が観察されなかった。

次に、はぐれた単繊維の屈曲比を Table 7 に示す。Type I における屈曲比は、最大でクレモナの 3.67 (±6.91)、最小でポリエステル 1.02 (±0.01) であった。Type II においては、最大でポリプロピレンの 1.21 (±0.36)、最小でポリエチレンの 1.03 (±0.05) であった。Type I の屈曲比において、クレモナとポリプロピレンはポリエステルとナイロンに比べ有意に高い値を示した。Type II では、ポリプロピレンはクレモナより有意に高い値を示した ($p < 0.05$)。

考 察

繊維を使用した海藻礁の効果 大島での現場試験において、設置してまもなく混紡化学繊維の基質にはマクサが付着した。1 年経過後にはマクサは完全に着生し、基

Table 6 Densities of prominent fibers in each chemical fiber

Type of prominent fiber	Kuremona	polyester	polyethylene	polypropylene	nylon
Type I (n=5)	1.74(±0.90) ^b	0.23(±0.54) ^a	0 ^a	0.48(±0.52) ^a	0.80(±0.69) ^a
Type II (n=5)	8.26(±3.35) ^c	0.06(±0.14) ^a	0.06(±0.14) ^a	2.45(±1.61) ^b	0 ^a

Values having different superscript letters are significantly different ($P < 0.05$). Type I and Type II are the state where both ends of the fiber are buried within the string and the state where one end only of the fiber is buried within the string, respectively. (Unit: ind./cm)

Table 7 Curve ratio* of prominent fibers in each chemical fiber string

Type of prominent fiber	Kuremona		polyester		polyethylene		polypropylene		nylon	
	N	Mean (SD)	N	Mean (SD)	N	Mean (SD)	N	Mean (SD)	N	Mean (SD)
Type I	61	3.67(±6.91) ^b	8	1.02(±0.01) ^a	0	—	16	1.86(±1.22) ^b	28	1.04(±0.07) ^a
Type II	291	1.10(±0.23) ^a	2	1.13(±0.18) ^{a,b}	2	1.03(±0.05) ^{a,b}	97	1.21(±0.36) ^b	0	—

Values having different superscript letters are significantly different ($P < 0.05$). Type I and Type II are the state where both ends of the fiber are buried within the string and the state where one end only of the fiber is buried within the string, respectively.

* Curve ratio is the ratio of the length to the shortest distance between both ends of prominent fibers.

質を優占していた。一方、基質としてモルタルブロックを用いた海藻礁は、1年後の調査時においてマクサ以外の藻類が多く着生していた。基質あたりのマクサの着生数を比較すると、混紡化学繊維への着生数は14.7個体、モルタルへの着生数は2.0個体となり、約7倍の違いがみられた。

ここで、現場海域における海藻群落の形成過程について考えてみる。現場海域では様々な種類の藻類が生育しているため、付着面上には種々の胞子が到達していると想像できる。付着面上に胞子が到着した後、着生、成長のそれぞれの段階において競争が生まれ、やがて環境適性や成長での優位性で勝った種が、場を占有し群落を形成すると考えられている。¹²⁾ また、室内実験の結果、混紡化学繊維はマクサの栄養体が付着しやすく脱落しにくかったが、モルタルにはマクサの栄養体はほとんど付着しなかった。以上より、混紡化学繊維の基質を用いた場合、遷移の初期段階においてマクサの栄養体が付着し、着生面を占有することができるため、群落を形成する可能性が高くなると考えられる。

さらに、1年後に着生したマクサの全長は混紡化学繊維で1.2~14.5 cmと範囲が広く、モルタルでは4.5~11.7 cmとその範囲が狭かった。室内実験によると、モルタルに付着した栄養体はわずかな流れで脱落した。現場海域では、モルタルへの栄養体の付着、着生はほとんどみられないと考えられる。すなわち、モルタルでは胞子生殖のみが行われているため、マクサの全長の範囲が比較的狭かったのではないだろうか。一方、混紡化学繊維の場合は、小さい全長(4 cm以下)の個体が比較的多くみられた。これらの個体が栄養体によるものか、胞子によるものかはっきりしたことは分からない。混紡化学繊維の基質では、栄養体生殖と胞子生殖の両方が行われているのではないだろうか。

現場実験において、混紡化学繊維の基質にはマクサが多数着生した。一方、海藻礁基質周辺の土台部上面にはマクサの着生がみられなかった。大須賀と山崎¹³⁾はコンクリートブロックの上面にはテングサの着生は非常に少ないと報告している。さらに実験を行った差木地漁港は砂地であり、海底の砂が土台上に堆積していた。基質への胞子の着生が粒子により阻害された可能性がある。これらのことから、海中粒子の多い海域への設置を目的とする海藻礁の作製の際には、土台部分の上部水平面の少ない、鉛直面の多い構造とする工夫が必要であろうと考えられる。

混紡化学繊維の基質へのマクサの付着要因 現場試験において、混紡化学繊維の基質にはマクサの栄養体が速やかに付着し、着生した。この現象は混紡化学繊維基質の表面がマクサを付着させ、脱落させない機能を有していることに起因すると考えられる。

化学繊維の種類別の付着実験において、単位面積あたりのマクサ付着数はクレモナで最も多かった。また、クレモナの単繊維の本数は他の繊維より有意に多く、屈曲比はType Iでポリエステルおよびナイロンより有意に高かった($p < 0.05$)。このことから、マクサ栄養体の基質への付着は基質表面から突出した単繊維の数および屈曲比の大きさに起因していると考えられた。これらの結果より、寄り藻として漂っていたマクサが基質に接触すると、化学繊維の表面の単繊維がマクサの葉状部に接触し、絡みつくことにより付着現象を起こすと推察される。

予備的な実験の一つとして、トサカノリを用いて、付着実験を行ったところ、混紡化学繊維に全く付着が見られなかった。(未発表)このことから、この付着現象はマクサの葉状部の形状と化学繊維の表面構造によって生起していると考えられる。テングサ類の海藻ではオオブサのようにマクサと類似した葉状形態のものがある。こ

これらのうち、どの種においてマクサ同様の付着効果が見られるのか今後検討しなければならない。

マクサが基質から脱落しない機構について考える。化学繊維の種類別の脱落実験の結果、混紡化学繊維の残存率は、他の紐状の化学繊維と比較してどの流速においても高かった。混紡化学繊維はその状態が紐ではなく、布状であった。そこで、化学繊維の中で最も残存率の高いクレモナ紐を布状に加工し、残存率を比較した。その結果、布状のクレモナの残存率は、紐状のクレモナの場合と有意な差が見られなかった。今回のクレモナ布は混紡化学繊維布と比べて、目合いが大きかった。繊維布の表面構造の効果については、目合いのサイズを変えるなど、今後更に検討が必要である。しかしながら、混紡化学繊維の布は他繊維の紐状のものより視覚的に表面に多数の凹凸（網目）が見受けられる。マクサの葉状部は枝が多数に分枝しているため、それら多数の枝が凹凸に引っかかることによって、逆方向の流れの中でも付着し続けることができるのではないかと考えられる。

これらの結果より、混紡化学繊維の基質においてマクサの付着率および残存率が高い理由は、繊維紐から突出した単繊維数の多さおよび表面の凹凸の構造に起因すると考えられた。

三宅島における海藻礁の可能性 本試験基質はマクサの増殖に選択的に効果を発揮することがわかった。本基質を使用した海藻礁の設置の際に設置時期、海域に注意を払うことで、この効果を最大限に利用することが出来ると考えられる。

三宅島におけるテングサ類ではマクサが優占種である。¹³⁾ マクサが海藻礁を占有するためには、海藻礁の設置後すみやかにマクサの栄養体が新たな基質に付着し、さらに付着した栄養体から胞子が放出されて基質に生育することが望ましい。

マクサの栄養体生殖は、その葉状部が海水の激しい動揺などにより切れて海中に漂い、岩に接触し着生すると考えられている。¹⁴⁾ 海中に漂っているマクサの葉状部の定量的な季節変化に関する知見は見当たらない。しかしながら、マクサは春季から夏季にかけて成長が著しいことが知られている。¹⁴⁾ この時期には時化によって浮遊する栄養体が発生しやすいと考えられる。すなわち、混紡化学繊維基質の海中への設置は夏季が適しているといえる。また、胞子の着生に関しては岡村¹⁵⁾が静岡県沿岸において時期を変えて投石を行った試験により、翌年のマクサの発生は7月における投石において最も多いこと、オバクサでは大島において7～8月の投石で最も発芽が多いことを報告している。すなわち、三宅島における海藻礁の設置時期は7～8月頃が適していると思われる。

今回の現場海藻礁の設置は9月であり、最適時期と

は異なるものの、約10日後の調査でマクサの付着が観察され、約1年後および2年後においても多数の着生が確認できた。したがって、さらに最適時期に海藻礁を設置することによって、今回以上の成果が得られる可能性があるといえる。

海藻礁の設計に当たっては、礁の上部に栄養体生殖に適した化学繊維による基質を配置し、更にその周辺には胞子の着生場所となる鉛直基質を配置することにより効果を高めることが出来ると考えられる。

三宅島周辺海域には依然として、火山灰起源の粒子が流入している。³⁾ さらに、大井（未発表）は三宅島周辺の海底堆積粒子量を測定し、その粒子量は大島のテングサ群落のそれと比べ著しく多く、テングサの胞子着生が阻害されていると述べている。栄養体生殖は海中の粒子の影響を受けにくいいため、三宅島におけるテングサ群落の再生には適した手法であると考えられる。また、化学繊維基質の下部に鉛直基質を作るとは粒子堆積の低減の面から胞子の着生に有効だろう。

これらのことから、化学繊維基質を持つ海藻礁は三宅島沿岸域のテングサ群落の再生に有効であろうと推察される。今後、三宅島において海藻礁の設置適地を選定し、現場海域において化学繊維基質の効果を検証する必要がある。

謝 辞

実験材料を提供していただいた東京製綱株式会社遠藤隆一氏、現場海藻礁試験にご協力いただいた東京都島しょ農林水産総合センター大島事業所の皆様および室内実験についてご配慮いただいた東京海洋大学臨海フィールド教育研究センター館山ステーションの職員の皆様に心より御礼申し上げます。

文 献

- 1) 東京都の水産（平成4年度版）．東京都産業労働局農林水産部水産課，東京．1992；34-35．
- 2) Arakawa H, Nakayama Y, Morinaga T. Distribution and behavior of high-turbidity water in shallow water area around Miyake-shima Island, Japan. *La Mer* 2007; **45**: 23-34.
- 3) Doi Y, Sasahara K, Yamakoshi T, Nishimoto H. The effect of rainfall intensity on sediment transport in a scoria-rich river on Miyakejima Island, Japan. *Sediment Budgets* 2005; 214-221.
- 4) 東京都島しょ農林水産総合センター．東京都島しょ農林水産総合センター主要成果集平成19年度．東京．2007；8-9．
- 5) 須藤俊造．水産増殖叢書 No. 8 テングサの増殖，東京大学農学部水産学科，東京，1953．
- 6) 加藤 孝．投石によるテングサの増殖効果に関して．日水誌 1955; **21**: 88-91．
- 7) 千葉県水産試験場．石花菜増殖事業．千葉県水産試験場事業報告，千葉．1939; 19-22．

- 8) 植田三郎. テングサの増殖に関する研究 (I). 日水誌 1936; **5**: 183-186.
- 9) 藤森三郎. テングサの新養殖法—撚縄式及苗付式養殖法一. 水産会 1940; **693**: 36-44.
- 10) 滝尾健二, 安藤和人, 杉野 隆, 駒澤一郎, 中村千穂, 荒川久幸. 三宅島の火山灰を利用したテングサ海藻礁の開発とその効果の検証. 日水誌 2009; **76**: 45-53.
- 11) 駒澤一郎. マクサ. 「東京おさかな図鑑」(加藤憲司, 安藤和人編) 東京都産業労働局水産試験場, 東京. 2005; 154-155.
- 12) 伊豆の天草漁業編集会. 伊豆の天草漁業. 成山堂書店, 東京. 1998; 23-25.
- 13) 大須賀穂作, 山崎 浩. テングサ漁場の水中照度と着生量. 水産増殖 1960; **8**: 111-116.
- 14) 岡村金太郎. てんぐさ繁殖試験 (第 2 報). 水産講習所試験報告 1911a; **7**: 72-73.
- 15) 岡村金太郎. 静岡県下てんぐさ繁殖試験 (第 5 報). 水産講習所試験報告 1911b; **7**: 238-246.