

藻場造成に関する研究

——コンブ・フノリの増殖——

岡 貞 行* ・谷 野 賢 二** ・本 間 明 宏***
吉 田 徹**** ・黄金崎清人***** ・鳴海日出人*****

北海道の日本海沿岸では、「磯焼け」の状況が継続し、藻場の消失によるウニ・アワビなどの植食動物の餌料不足、魚類の産卵場・稚仔魚の生育場の喪失など様々な弊害が発生している。本研究では、海域における栄養塩、水温、照度とコンブ類の発生・生長の関係、着生面の形状や材質等と藻類の発生・生長の関係について室内及び海域実験により明らかにした。実験の結果と表面基質の改良により、藻類の着生面積が増加し、ウニ・アワビの生息空間を考慮した栄養塩溶出型の単体礁を開発した。また、開発した基質は形状や設置水深帯（潮間帯）を考慮することでフノリ礁としても利用可能となり、事業化による効果を確認した。

1. はじめに

北海道の日本海沿岸では、「磯焼け」の状況が継続しており、藻場の消失によるウニ・アワビなどの植食動物の餌料不足、魚類の産卵場・稚仔魚の生育場の喪失など様々な弊害が発生している。これまでに「磯焼け」の対策として岩礁爆破、作渚などにより海藻着生面の改良や新たな基質として自然石やコンクリートブロックを海域へ投入するなど、様々な藻場造成事業が行われてきている。しかし、その成果は十分に得られておらず、特に、藻場が持続的に形成できず、大きな課題となっている。また、漁業生産の低下や漁業者の高齢化が顕著にみられ、高齢者の安全な漁労活動環境の整備、計画的に生産可能な施設が必要となっている（長野, 2002）。

本研究では、海域における栄養塩、水温、照度とコンブ類の発生・生長の関係、着生面の形状や材質等と藻類の発生・生長の関係について室内実験及び海域実験により明らかにし、コンブ類・フノリ等藻類の増殖に寄与することが可能な単体礁の開発を目指すものである。

2. 着生基質の素材に関する検討

コンブ類の発生や初期生長段階において、栄養塩濃度、照度、水温などの環境条件が重要な因子である（徳田ら, 1987）。ここでは、室内培養実験を行い、これら諸条件を明らかにし、藻礁素材として適切な素材について検討を行った。

（1）海藻の初期生長に与える栄養塩の効果

室内培養実験の方法としては、まず成熟したホソメコンブ (*Laminaria religiosa*) およびマコンブ (*Laminaria japonica*) から胞子体を取り出し胞子液を作成し、貧栄養海水に胞子液を添加して培養を開始した。

硝酸態窒素(以下、窒素という)、リン酸態リン(以下、

リンという)の濃度を変えて計 42 条件の人工海水を作成し、培養開始後に卵を形成した雌性配偶体数と幼胞子体数を計数した。また、ホソメコンブの生長におよぼす光量と水温の影響を調べるため、各 3 種類の条件で発生体の生長状態を観察した。培養液は貧栄養海水と海藻用の培養液プロバゾリ液（以下、PES という）を使用した。

a) 窒素とリン濃度が生長に及ぼす影響

卵を形成した配偶体数と幼胞子体数の割合を表一に示す。培養開始 3 日目には全ての栄養条件で発芽したが、雌雄配偶体への生長はみられなかった。97 日目にはリン 0.5 μM ($\mu\text{mol/l}$) 未満のすべての条件で配偶体は認められず、窒素 5.0 μM 以上とリン 1.0 μM 以上の全ての条件で胞子体へ生長しており、卵から胞子体への生長時期に必要な着底基質から溶出させる栄養塩濃度の基準値となった。

表一 栄養塩とホソメコンブの卵および胞子形成

日 時 (日数)	リン酸態リン 濃度 (μM)	硝酸態窒素濃度 (μM)							
		0.0	0.1	0.5	1.0	5.0	10.0	100.0	
1999. 1. 21 (97 日目)	0.00	*	*	*	*	*	*	*	
	0.10	*	*	*	0	0	0	0	
	0.25	0	0	0	0	0	0	0	
	0.50	0	0	0	0	0	0	0	
	1.00	0	0	0	0	38.9	38.5	28.6	
	10.00	0	0	0	0	18.2	37.5	11.5	57.4

注 1) 表中の数値は、個体数に対する卵または胞子体を形成した割合 (%) を示す。

注 2) *印は死滅したことを示す。

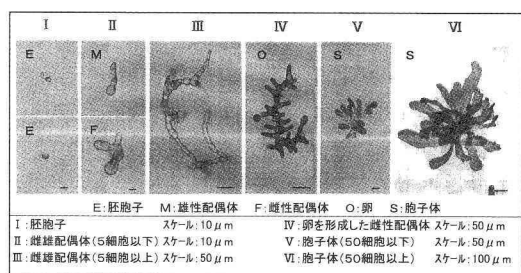
注 3) 表中の「-----」は、卵または胞子体を形成する境界線を示す。

b) 光強度がコンブ類の生長に及ぼす影響

ホソメコンブの生長段階を図一に、コンブ類の生長に及ぼす光量の影響を表二の上段に示す。

ホソメコンブとマコンブともに培養 53 日目までは 89.1 $\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以上の光量で、かつ 1/10 PES 以上の富栄養環境で胞子体へ生長したが、8.51 $\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$ の低い光量では富栄養環境であっても胞子体を形成することはなかった。81 日目には、170 $\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$ の高い光量であれば 1/100 PES まで胞子体を形成し、低い光量でも 1/5 PES 以上の富栄養環境で少数の幼胞子体を形成した。このこ

* 正会員 長崎県水産部水産基盤計画課
** 正会員 工博 北海道東海大学教授 工学部海洋環境学科
*** 北海道開発局留萌開発建設部 次長
**** 日本データサービス(株)
***** 正会員 水博 日本データサービス(株) 部長



図—1 ホソメコンブの生長段階

表—2 光強度・水温とコンブ類の生長

【光量と栄養塩濃度】

月 日	光 量 ($\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$)	海水	栄養塩濃度 (×PES)				
			1/100	1/50	1/10	1/5	1
1999. 12. 9 (81 日目)	170.00	II (III)	V	V	VI	VI	VI
	89.10	II	III	III	VI	VI	VI
	8.51	II	II	III	III	V	V

【水温と栄養塩濃度】

月 日	水 温 ($^{\circ}\text{C}$)	海水	栄養塩濃度 (×PES)				
			1/100	1/50	1/10	1/5	1
1999. 12. 9 (81 日目)	5	II	II	VI (V)	VI	VI	VI
	10	II (III)	V	VI (V)	VI	VI	VI
	15	II	II	II	V (III)	VI (V)	VI

注 1) 表中の記号は、各条件での最も進んだ生長段階を6段階で表す。

注 2) 表中の「-----」は、ホソメコンブの卵または胞子体を形成する境界線を示す。

注 3) 表中の記号はホソメコンブ (マコンブ) で表記している。

とから、貧栄養海水ほど高い光量が必要となることが分かった。

c) 水温がコンブ類の生長に及ぼす影響

コンブ類の生長におよぼす水温の影響を表—2 の下段に示す。培養開始 34 日目では 1 PES 培地中の全水温条件で胞子体に生長し、 5°C と 10°C では 1/10 PES でも幼胞子体が見られた。81 日目になると、 10°C で 1/100 PES まで胞子体を形成し、ホソメコンブについては 15°C の 1/10 PES においても少数の胞子体へ生長した。このことから、貧栄養海水におけるコンブ類の生長には適した水温があり、実験の結果からは 10°C 前後の水温であることが分かった。

さらに、低水温や高水温など、コンブ類の生長条件としては厳しい環境でも、富栄養の条件下では幼胞子体まで生長することが明らかとなった。

(2) 着底基質の検討

a) 脱硫剤の検討

脱硫剤は、火力発電所より年間約 9,000 トン排出され

る産業廃棄物であり、石炭灰・石膏・石灰を混合して成型したペレットに、排ガス中の窒素酸化物を吸着させ、ほぼ中性となったものである。この一部は消臭剤、土壌改良材などに再利用されているが、多くは埋め立て処分されている。本研究では産業廃棄物の再利用という観点からこの脱硫剤に着目し、海藻への影響等について検討を行った。

b) 脱硫剤の性状等

脱硫剤の主成分は、酸化カルシウム、ケイ酸で、窒素を約 0.14~0.45% 含有しており、リンはほとんど含まれていない。吸水率は 20~40% の範囲であり、コンクリートとの配合を考慮すると、5 mm 程度のふり分けを行い、品質を安定的に維持する必要がある。

また、有害物の溶出試験や生物に対する影響試験（急性毒性、長期毒性）においても、水生動物と環境への影響はみられない。

c) 海藻への影響

脱硫剤は、海藻の発芽と生長に不可欠な窒素を含有しており、海藻（ワカメ、マコンブ）の初期発芽体の生長に与える影響を培養実験により調べた。培養液は脱硫剤浸漬後の上澄み海水とし、通常海水、PES と比較した。

培養条件は、水温は $10\sim 12^{\circ}\text{C}$ 、光周期は 14 時間明期、10 時間暗期とし、ワカメは胞子体の測定（葉長、葉幅）、マコンブは配偶体の細胞数、卵・胞子体形成の観察を行った。

結果、脱硫剤培地でのワカメの葉長は、30 日目に通常海水の約 3~4 倍に達し、PES と同等の生長を示した。マコンブについては、30 日目に PES でのみ卵が形成されたため、欠乏物質と考えられるリンを脱硫剤に添加し培養を継続した。添加から 12 日後には、脱硫剤の全ての濃度で卵、および幼胞子体を形成し、未添加培地での卵形成はなかった。このことから、脱硫剤から溶出する栄養塩は幼胞子体の生長に効果があり、生長阻害はなく安全性にも問題はない。

d) コンクリートへの脱硫剤の配合と栄養塩溶出量

コンクリートと脱硫剤の配合割合により、栄養塩の溶出量および圧縮強度が異なると考えられるため、造形に必要な強度を維持し、海藻の生長に必要な栄養塩を溶出する配合について検討した。検討は配合の異なるテストピースによる栄養塩溶出と圧縮強度の室内実験、海域に設置したテストピースの窒素残存量を分析した。

町口ら (1985) の研究では、ナガコンブで窒素の吸収速度の最大値は $152 \mu\text{g/l}\cdot\text{h}$ であり、栄養塩（窒素）の残存量を算出した結果、30 年後の溶出量はコンクリート 1 m^3 当たりの脱硫剤 450 kg/m^3 の配合で約 $195 \mu\text{g/l}\cdot\text{h}$ を上回る結果を示した。圧縮強度については、配合量 450 kg/m^3 以下で 24 N/mm^2 以上となり、水産庁の沿岸整備

事業で単体礁として要求される強度（設計基準）18～21 N/mm²を満足しているが、新素材であり安全を考慮し、本研究では配合強度（ σ_{28} ）を30 N/mm²とした。

その後、経済性から、脱硫剤に硝酸態窒素をさらに吸着（20 wt%硝酸態窒素溶液に1時間含浸）させることにより、コンクリート1 m³当たり脱硫剤180 kg/m³で、450 kg/m³と同等の性能を得ることができた。

3. 着生基質面の形状に関する検討

藻場造成用のブロックには、大きな粗さの起伏等に加えて、小さな孔や溝の微細な凹凸形状が有効であることが報告されており（明田ら、1996；坪田ら、1998）、着生面積の拡大や、微細な渦流による着生確率を高くする効果あるといわれている。また、平坦な面よりも植食動物の摂餌圧を軽減できると考えられる（谷野ら、1998）。これより基質表面の形状と珪藻の着生状況および植食動物の摂食量の関係を室内・海域実験により明らかにした。

（1）室内実験による検討

実験基質はコンクリート平面、溝付、脱硫剤とコンクリートを混合した多孔質コンクリート（以下、多孔質という）（鳴海ら、1996）および火山礫の4種類とし、流水下で珪藻を培養した。着生状況については、画像解析により着生率を求めた（図-2）。次に、珪藻を着生させたテストピースを用いて、植食動物による摂餌状況を観察し、画像処理による珪藻の摂餌率を比較した（図-3）。

基質別の平均着生率は、多孔質が94.1%で最大となり、コンクリート平面では着生率にバラツキが大きく着生量が少ないことから、珪藻の着生には基質の表面形状が大きく影響していることが分かった。

摂餌率については、ウニとアワビでは火山礫と多孔質で低く、クボガイでは溝付と多孔質で低くなる傾向を示し、溝や微細な凹凸が強く摂餌行動を抑制していることを確認した。

（2）海域実験による効果検証

試験基質は8t型被覆ブロックを用い、上面を溝付（幅10 mmと20 mm、深さ20 mm）、洗い出しによる微細な凹凸形状（多孔質；脱硫剤）、平坦な面の3種類とした。

試験礁は、海藻の生息水深帯を考慮し、水深約5 m（ブロック上面の高さ約4 m）に設置し、藻類の現存量を調査した。施工後1年目にはどの基質にも海藻が着生しているが、多孔質でホソメコンブの着生量が最大であり、3年目においてもその効果が維持されている（図-4）。また、試験基質から採取したホソメコンブの葉長と湿重量の関係を見ると、多孔質により大型の葉体となる傾向が顕著にみられた。

以上のことは、基質の表面に微細な凹凸形状や溝を形成することにより藻類の着生が促進され（北原ら、1998）、

窪みの中の幼芽は植食動物の摂餌を免れ、生き残った幼芽が生長するものと考えられる。さらに、栄養塩の供給により、幼芽期に速やかに生長し、大型の葉体になるものとする。

4. 事業化に向けた藻場造成単体礁の開発

事業化に向けた藻場造成単体礁を設計し、滑動・転倒の安定性に関する水理模型実験、海域における単体礁の滑動と転倒に対する安定実験および藻礁としての効果に

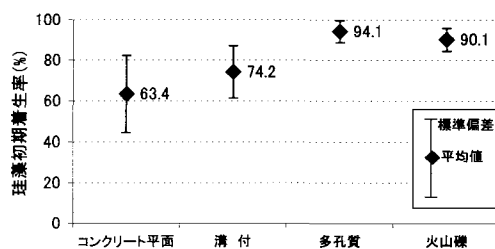


図-2 基質表面形状の差による珪藻の着生率

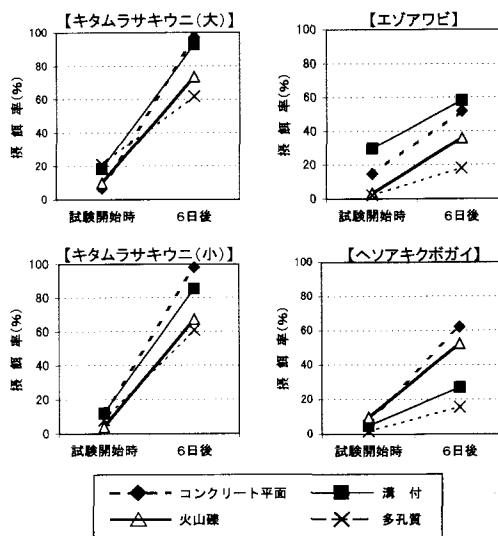


図-3 植食動物による珪藻の摂餌率

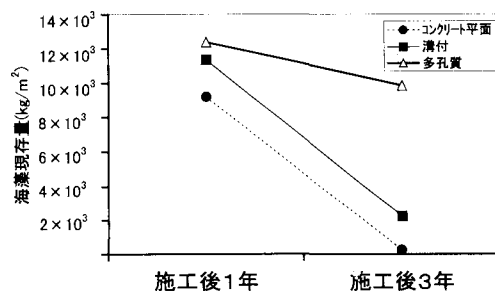


図-4 海藻現存量の推移

について試験を行った。

(1) 安定性に関する水理模型実験

単体礁の形状は四角形とし、横 2 m、縦 2 m、高さ 0.7 m、重量 38.0 kN/m^3 (3.88 tf/m^3) で、実験は縮尺 1/40 の模型を用い、単体礁へ作用する波力を計測した。波は砕波と非砕波に分け、抗力係数 C_D を求めた。さらに、開水路を用いて定常流中に単体礁が移動するときの流速を計測し、安定性について検討を行った。

実験の結果、流れ場の C_D は最大で 1.59、砕波場で 0.56~0.97 の範囲となり、流れ場で求めた値に比べると小さくなることが分かった。沿岸漁場整備開発事業施設設計指針によれば、流れ場であれ、砕波場であれ、同一の C_D を用いることから、本実験結果の 1.59 に安全を考慮し、計算には $C_D=2.0$ を採用した。

単体礁はコンブの育成を目的とするため、設置水深は 6 m 以下が予想される。一方、北海道沿岸部の波高は、時化の場合、水深 5 m 以浅は砕波帯に位置することになる。したがって、単体礁の設計に当たって破砕時が対象となるため、 $C_D=2.0$ を用いることで設計上の十分な安全を確保することができる。

(2) 海域における試験

本単体礁が製作・運搬・沈設等の作業上安全であることを確認するために、構造計算と設置海域における安定計算を行い、試験礁を製作し北海道日本海に面する乙部町等の 4 海域に試験設置し、滑動、転倒に関する検証実験を行った。海域設置後の試験礁の安定状況について、潜水による目視観察を行った結果、全調査地点において滑動・転倒はみられず、その安全性を確認することができた。また、海域における栄養塩溶出型単体礁の効果を検証するために、藻類の着生状況について 1 年毎に試料採取し種類と湿重量の追跡調査を行った。

結果、1 年生のホソメコンブが 95% 以上優占しており、現存量も $10\sim20 \text{ kg/m}^2$ 前後で推移していた。周辺の天然岩礁や普通コンクリートブロックに海藻の着生はほとんどみられず、藻類の現存量に顕著な差がみられ、多孔質単体礁の藻類着生の有効性と継続性を確認できた。

(3) 事業化における単体礁の改良

脱硫酸剤を使用した藻場造成単体礁については、9 年にわたる海域実験により海藻の着生効果と群落の持続的形成が確認できた。しかし、アワビ等の有用魚介類が単体礁の下部空間に蛸集し漁獲作業が困難となる状況にあるため、海藻の有効着生面積を大きくするとともに、ウニやアワビの生息空間を考慮した単体礁の形状について検討した。

水槽実験による振動流下において、 5 cm/s 以上の流速を発生させ、溝の深さ・幅と放流サイズのウニ・アワビの行動特性をみた。実験開始から 1 時間以内に溝や窪み

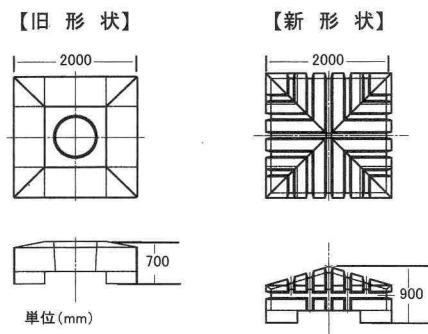


図-5 コンブ単体礁の形状

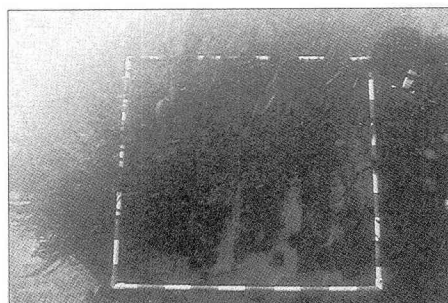


写真-1 フクロフノリの着生状況

などの陰となる部分に 95% 以上の個体が蛸集し、溝の幅は、殻長（径）の 2 倍以上、深さは殻高の 2 倍以上が有効であることが分かり、天然海域の観察結果とも一致した。また、溝の効果は上部や側面でも有効であった。以上より、図-5 に示す新形状のブロック（溝幅 80 mm）による海域実験を行った。結果、旧形状よりも海藻の着生面積比で約 32% 増加し、放流したウニやアワビが溝部に蛸集する効果も確認できた（写真-1）。

5. フノリ増殖礁への応用と事業効果

コンブ造成ブロックの研究を基に、北海道上磯町地先における未利用水域（潮間帯）の有効活用が可能なフクロフノリ増殖礁（以下、フノリ礁という）の開発を行った。まず、フクロフノリ（*Gloiopeltis furcata*）の繁茂水深帯（D.L.-20~80 cm）を考慮した着生試験を行った。試験基質は、コンクリート、セラミックブロック、FRP 板、自然石および多孔質の 5 種類とした。試験礁は孢子発生時期（5 月中旬~6 月下旬）に設置し、孢子を着底基質に散布後 2 ヶ年に渡り着生・生長状況の調査を実施した。設置後の 1 月から 4 月にかけて試験基質から 4 回採取し、 1 m^2 当たりの平均漁獲量（1 回あたりの平均値）を比較した結果、多孔質（粗面）が約 0.8 kg/m^2 で最大となった（図-6）。

フノリ礁の形状としては、着底面積を増加させるため

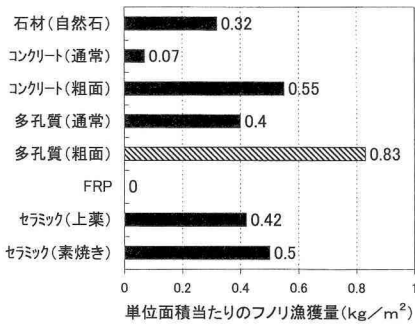


図-6 試験基質別のフノリ漁獲量の比較

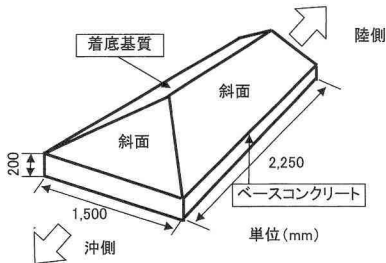


図-7 フノリ単体礁の形状



写真-2 フクロフノリの着生状況

平坦な斜面を対にした山型の形状を持つ単体礁とした。また、この構造は高齢者による漁獲作業時の負担を軽減させ、漁獲効率も向上させることが可能となる。(図-7)。

事業化により2001年から2004年の3年間で合計488基設置され(写真-2)、1漁期(12月～4月)中の平均漁獲量を試算した結果、試験調査時より37%増の約1.1 kg/m²となっている。2004年3月の段階で、フクロフノリは1キロあたり千円から3千円で出荷されており、漁業者1人当たり1日10キロ以上採取することになるので、2時間程度の操業で1万円以上の収入を得ることが

可能となっている。2004年4月からは、同海域の当別地区に同規模のフノリ礁が整備され、完成後は両地区で2千5百万円程度の生産が可能と試算されている。

6. おわりに

コンブ・フノリ等藻類の増殖に寄与することが可能な単体礁を開発した結果を以下にまとめた。

1) 脱硫剤から溶出される栄養塩は、培養結果より幼孢子体の生長に対しては非常に効果のあることが確認された。また、窒素を補強することで海藻着生の継続性のある単体礁の生産が可能となった。

2) 着生基質の表面に微細な凹凸や植食動物の生息空間と表面積の増加を考慮した溝を設けることにより、珪藻やコンブの着生を促進させるとともに、食圧の負荷を軽減させ着生量を維持させることが可能となった。

3) 潮間帯においてもフクロフノリ礁としても利用でき、未利用漁場の有効利用が可能となった。また、冬期の漁業閑散期において安定した漁業収入を確保することが可能となった。

謝辞：本研究にあたり、北海道開発局、北海道庁、また、関係地区の各市町村、漁業協同組合、水産試験場、水産技術普及指導所の関係各位に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 明田定満・谷野賢二・中内 勲・高橋義昭・小野寺利治 (1996): 表面処理の相違によるコンクリート面への海藻着生状況について, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 1246-1250.
- 北原繁志・佐々木秀郎・竹田義則・鳴海日出人・袖野宏樹・谷野賢二 (1998): 沿岸構造物における藻場造成手法の開発, 海洋開発論文集 Vol. 14, pp. 59-64.
- 坪田幸雄・竹田義則・北原繁志 (1998): 沿岸構造物における藻場創出機能の設計手法について, 開発土木研究所月報, No. 547, pp. 19-28.
- 徳田 廣・大野正夫・小河久朗 (1987): 海藻資源養殖学, 第10巻, (株) 緑書房, 354 p.
- 長野 章 (2002): 水産基本法「漁港漁場整備法」の制定とその背景, 日本水産学会誌, Vol. 68, No. 2, pp. 227-238.
- 鳴海日出人・小林 創・黄金崎清人・川嶋昭二 (1996): 石灰系廃棄物を利用した効果的な藻礁(ピオユニット)の研究, 海洋開発論文集, Vol. 12, pp. 485-490.
- 町口祐二・三本菅義昭・岡田行親 (1985): 再生期におけるナガコンブの無機態窒素吸収と生長について, 水産庁北海道区水産研究所研究報告, No. 50, pp. 45-61.
- 谷野賢二・黄金崎清人・佐々木秀郎・北原繁志・袖野宏樹・鳴海日出人 (1998): 基質の表面微地形による海藻着生促進と摂餌圧軽減の効果について, テクノオーシャン'98, pp. 353-356.