

浮遊砂による基質表面の自動更新に伴う 藻場形成に関する研究

STUDY ON THE SEAWEED BED FORMATION BY ABRASION OF BLOCK
SURFACE CAUSED BY SUSPENDED SEDIMENT

瀬戸雅文¹・中山威尉²・水口洋³・田畑真一⁴・斉藤二郎⁵

Masabumi SETO, Takeyasu NAKAYAMA, Hiroshi MIZUGUCHI, Shinichi TABATA and Ziro SAITO

¹正会員 水博 北海道立中央水産試験場 水産工学室 (〒046-8555 北海道余市町浜中町 238)

²正会員 水修 北海道立中央水産試験場 水産工学室 (〒046-8555 北海道余市町浜中町 238)

³正会員 学修 北海道電力総合研究所 石炭灰プロジェクトグループ (〒067-0033 江別市対雁 2-1)

⁴正会員 パブリックコンサルタント(株) 河川海洋部 (〒060-0006 札幌市中央区北 5 西 6-1-23)

⁵株式会社エコニクス 海域事業部 (〒004-0015 札幌市厚別区下野幌テクノパーク 1-2-12)

The growth of the small perennial seaweed assumed to be one of causes of isoyake is restrained by abrasion of the block surface every year. Large annual seaweed can be generated every year if the surface of the block is abraded by the suspended sediment of a high concentration by the rough seas during the winter month. The concrete block with different abrasion hardness was produced by mixing the desulfurizing agent with the fly ash cement by the concentration of 125kg/m³-500kg/m³. The developed block was set up in the surf zone of sand coast, consequently a positive correlation was admitted between the concentration of the suspended sediment and the production of the kelp *Laminaria religiosa*. In addition, the production of the kelp has quadrupled compared with a past concrete block.

Key Words: Seaweed bed, *laminaria religiosa*, suspended sediment, Abrasion

1. はじめに

近年、岩礁域に隣接する砂浜域の碎波帯内にコンブなどの藻場を造成しウニやアワビなど岩礁性有用種の増殖場として利用するための環境改変手法に関する研究が実施され始めている。著者らは、当該域で対象種を適正に増殖・管理するための施設として、縦スリット型藻礁を考案し¹⁾、波特性や安定性など施設の形状に関わる設計条件を明らかにするとともに、施設表面に有用海藻の周年的な着生を目指した被覆基質の開発に着手した。

本研究では、磯焼け現象が進行している北海道日本海南西海域沿岸の有用種であるホソメコンブを主対象とした。大型一年生海藻である本種の生活環は、配偶体期から造胞体期まで1年未満で成熟期に達し、晩秋より1月頃にかけて葉状部の下方に形成される子嚢斑より遊走子が放出される。本種の発生を左右する配偶体期及び幼胞子体期は、物理環境としては強波浪や高濃度の浮遊砂が発生する冬期に対応するが、一度基質に着生した配偶体が強い流動

耐性を備えることや²⁾、浮遊砂に対する耐性を備えていること³⁾が既往知見より次第に解明されつつある。一方、阿部ら²⁾は北海道忍路湾で人為的に裸地を造成し、ホソメコンブ群落の形成機構を追跡した結果、アナアオサなどに代表される他の海藻群落の優占がコンブの発生阻害の主要因となり、ホソメコンブ群落の持続的な形成には占有可能な着生空間の確保が必要条件になると指摘している。

そこで、本研究では、ホソメコンブのような大型一年生の海藻群落を毎年発生させるための一手法として、遊走子の放出期に、基質表面が更新することによって、海藻群落の遷移を抑制し、一年性海藻の着生率の向上を目指した自動更新性基質を開発し、適用性について検討した。基質の自動更新機構については、波浪や浮遊砂などにより基質表面が摩耗し剥離する物理的更新と、基質内に混入された電触材や膨張材などが海水の浸透などと共に徐々に崩壊する化学的更新の可能性が考えられるが、今回は物理的更新の可能性を中心に検討結果を報告する。すなわち、石炭灰コンクリート内に使用済脱硫

材を混入した新基質を考案し、鉛直噴流式ブロック摩耗装置を試作して浮遊砂による基質面の剥離特性の定量化を試みるとともに、実海域に設置して、基質表面の自動更新とコンブ着生との関係について実証試験を試みた。

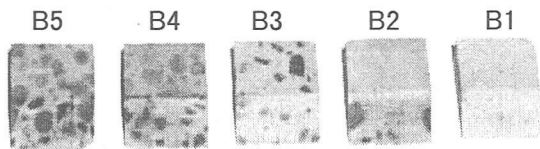


図-1 製作基質の一例

表-1 基質の配合条件 (kg/m³)

分類	石炭灰	セメント	脱硫剤	水	含水比
B1	1130	150	-	448	35%
B2	992		125	444	
B3	885		250	439	
B4	717		375	435	
B5	580		500	430	

2. 基質摩耗実験と実海域への設置

(1) 自動更新性基質

室内摩耗実験用の供試基質の配合は、表-1 に示すように、セメント含有量を、単位体積当たりの普通ポルトランドセメント量で 150kg/m³ に固定した上で、海水浸透に伴う基質表面の膨張崩壊による摩耗強度の変化を発現させるための材質として、北海道電力(株)苫東厚真発電所の乾式脱硫装置より排出された使用済脱硫剤を使用した。使用済脱硫剤は、石炭灰、消石灰、石膏を混合して成形されたアルカリ性の材質が、石炭火力発電の脱硫過程で硫酸化物や窒素酸化物と反応して中性化された粒径 5~6mm 程度の多孔質の硬化体で、吸水作用、吸着作用、浄化作用や、富栄養(硝酸塩)特性などの資源性を有しているが、本研究では、主として吸水性に着目して供試基質に使用した。基質内には使用済脱硫剤を 125~500kg/m³ の 4 段階に濃度を調整して混入した。更に、対象基質として脱硫材を混入しない従来のコンクリート基質(スレート板)も使用した。なお、基質本体の強度を維持するために、普通セメントと比較して海水の化学的浸食による残存強度が長期的に維持されるフライアッシュセメントを使用し、供試基質内には石炭灰が 580~1130kg/m³ の範囲で混入されている。

(2) 室内摩耗実験の概要

供試基質の外形寸法は、図-2 に示すように、板厚 10mm、縦横 30mm で一辺に 45 度のテーパを形成した。

製作された基質は、鉛直噴流式ブロック摩耗装置の中心部に設置した。本装置は、図-3 に示すように

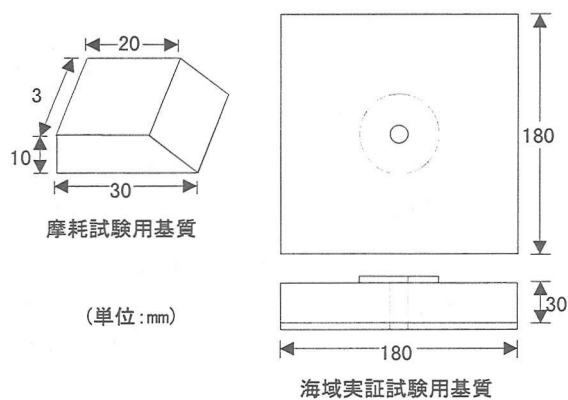


図-2 供試基質の寸法

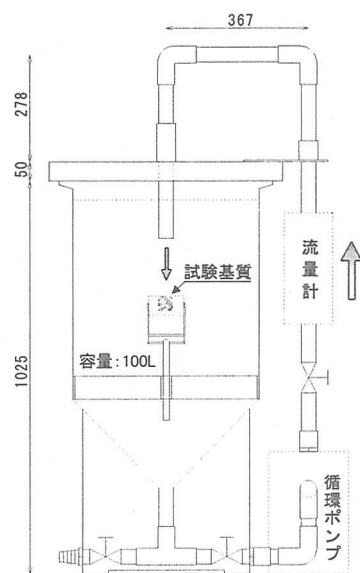


図-3 鉛直噴流式ブロック摩耗装置

丸底式の円形水槽(容量 100L)に循環ポンプを連結することによって水槽内に鉛直方向の噴流を発生させることが可能であり、循環水内に砂などの粒子を混入することにより、浮遊砂などを連続的に基質面に作用させることができる。実験ではポンプの出力をスライダックで調整し、更に循環流量をバルブで調整することによって、最大流速 268cm/s(循環パイプの内径が 30mm の場合)の範囲で主流流速を発生させた。なお、本研究では定常流に対する基質の摩耗特性をもとに、実海域の波浪に伴う振動流場における摩耗特性を推定するため、水粒子の加速度に起因して発生する新たな底面剪断応力による影響は考慮されていない。

(3) 海域実証試験の概要

実海域に設置する基質は、表-1 の配合に加えて、更にセメントの含有量が 100kg/m³ のものについても、脱硫剤混入率(0~250kg/m³)の異なる 3 種類を追加した上で、図-2 に示す形(180×180×30cm)に

形成した。実証実験は北海道檜山管内の江差町泊漁港周辺海域（図-4 参照）で実施し、当該域の水深 3.0m, 6.5m, 7.0m の各水深ごとに天端高さの異なる 3 基のデッキプレート型の基質実験用施設（図-5 参照）を設置した。本施設の両脇には天端面より 25cm 低いステップが配置され、各水深毎に基質の設置高さを 6 段階に変化させるとともに、高さ 150cm の施設については脚部に鉛直方向に亘って地盤面より基質を配置できるようにした。供試基質は施設設置後の摩耗による板厚低下が予測されるため、試験期間内で施設内の基質の安定的が維持されるように、基質の背面にシリコンボンドで板厚 5mm の塩ビ板を張り付けるとともに、基質中心に直径 60mm の塩ビ製ワッシャを使用して施設に固定した。

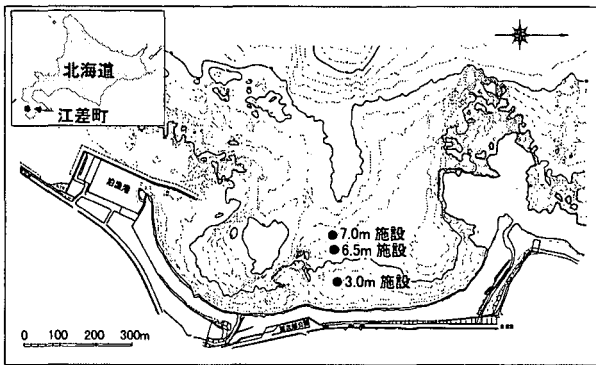


図-4 実験海域における基質試験施設位置状況

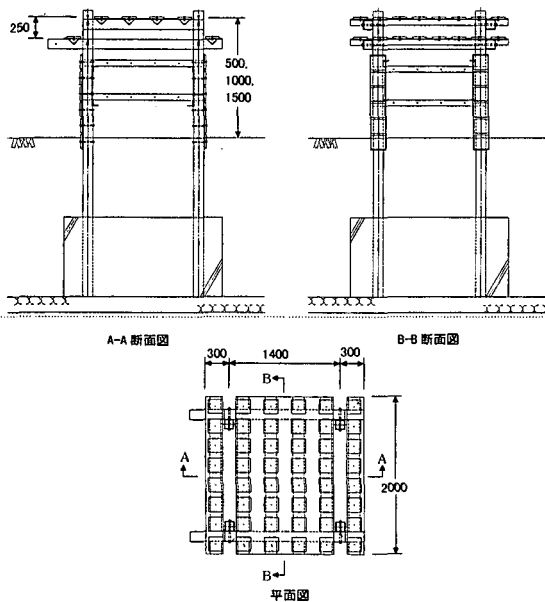


図-5 基質試験施設の概要図

実験用施設への基質の設置は 1999 年 11 月実施し、施設の天端面およびステップ上に計 91 枚、及び水深 3.0m, 7.0m の高天端施設の脚部に計 48 枚の基質を固定した。脚部に固定した基質については、各脚ごとに脱硫剤濃度の異なる基質を配置し、浮遊砂の

鉛直方向の濃度勾配と基質表面の剥離やコンブ着生量との関係について検討した。

基質設置後、ホソメコンブの発生時期である冬季を中心に各年、物理環境調査を実施し、当該域の波浪特性、施設周辺の砂面変動、浮遊砂の発生状況（濁度計及び捕砂器）及び水質特性（水温・塩分）を観測した。更に、基質表面への海藻の着生・繁茂状況について年 4 回（4, 7, 9, 11 月）生物調査を実施し、各基質へのホソメコンブの着生本数を計数した。

3. 実験結果及び考察

(1) 自動更新性基質の摩耗特性

基質表面の浮遊砂による摩耗速度 (V) は、基質特性、流れ、及び浮遊砂の諸特性に依存するものと考えられるが、今回は次式で評価した。

$$V = f(\text{基質の強度, 表面摩擦応力, 浮遊砂濃度}) = f_c \cdot f_f \cdot f_s \quad (1)$$

ここに、 f_c は直接的には基質表面の剪断強度となるが、厳密には基質の化学的剥離特性などとも関連して更新機構は複雑となるため、今回は基質に混入した使用済脱硫剤の濃度で評価した。 f_f については摩擦抵抗係数 C_f を用いて、単位面積当たり

$$f_f = C_f \rho (u_s^2 / 2) \quad (2)$$

で評価する。ここに、 ρ は浮遊砂を含んだ海水密度、 u_s は基質表面の主流流速、 ν は海水の動粘性係数である。また、今回試作した基質の粗度を考慮して、基質表面の流れ場に乱流境界層を適用すれば、速度分布の $1/7$ 乗則をもとに $C_f = 0.0735 / (u_s / \nu)^{1/5}$ となる。基質の摩耗速度 V は各諸元毎に基準化すれば

$$V = (f_c / f_{c0}) \cdot (f_f / f_{f0}) \cdot (f_s / f_{s0}) V_0 \quad (3)$$

となり、基質強度、表面摩擦応力、浮遊砂濃度の相互関係を実験的に定量化することによって、近似的に摩耗速度を評価することが可能となる。

図-6 左上は、使用済脱硫剤の混入濃度を 500 kg/m^3 に固定し、浮遊砂濃度 (f_s) を $5.0 \sim 20.0 \text{ kg/m}^3$ の範囲で 4 段階に変化させた上で、表面摩擦応力 (f_f) の変化に伴う摩耗速度の変化を示したものである。これより、摩耗速度 (V) は表面摩擦応力の、ほぼ 1.51 乗に比例する形で主流流速の増加、及び浮遊砂濃度の増加とともに増大しており、以下の式で近似できる。

$$V(\text{mm/Hr}) = 0.65 f_s f_f^{1.51} \quad (4)$$

図-6 右上は、基質強度 (f_c / f_{c0}) の変化率と摩耗速度 (V / V_0) の変化率の関係を表面摩擦応力を指

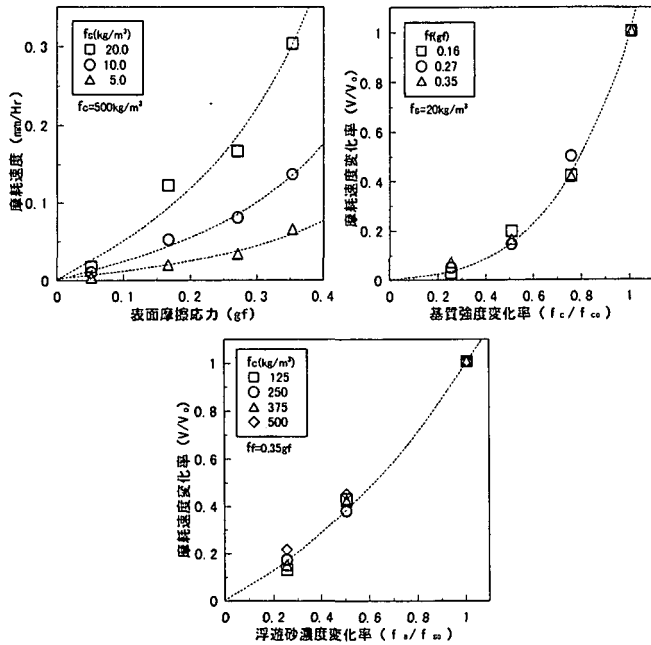


図-6 基質摩耗諸元の特性

標として示したものである。また、図-6下は浮遊砂濃度 (f_s/f_{s0}) の変化率と摩耗速度 (V/V_0) の変化率の関係を基質強度を指標として示したものである。これより、基準化された摩擦速度は、各々基準化された基質強度及び浮遊砂濃度の関数として以下のように同一曲線で近似できた。

$$(V/V_0)_c = 0.017 \exp(4.19(f_c/f_{c0})) \quad (5)$$

$$(V/V_0)_s = 1.014(f_s/f_{s0})^{1.33} \quad (6)$$

これらの近似式を、摩耗推定の基礎式の中に代入して整理することによって、今回考案した自動更新性基質の物理的な摩耗耐性を定量的に評価することが可能となる。

(2) 浮遊砂による基質の摩耗推定

砂浜域砕波帯内外に発生する浮遊砂濃度の諸特性については、室内、現地計測データに基づく実験公式の導出や、近年では、乱流方程式を基礎とした数値モデル構築の試みが精力的に実施されているが、本研究では柴山ら⁴⁾が導出した実験式をもとに、実証試験海域の浮遊砂濃度を推定し、自動更新性基質の摩耗特性をもとに、当該域における摩耗状況について検討した。柴山らによれば、水底より上方に z 軸をとる場合、浮遊砂濃度 $c(z)$ の鉛直分布は、

$$c(z) = c_b \left(\frac{b}{z} \right)^M \quad (7)$$

ここに、 c_b は底面基準点 b における基準点濃度で近似的に以下の式が提案されている。

$$c_b = \frac{10(\psi - 0.05)\nu}{3b\sqrt{(s-1)gd}} \quad (8)$$

ここに、 s は砂の比重、 d は粒径、 ψ は Shields 数である。また、底面基準点 b は、砂漣が形成される場合には砂漣波高の $1/2$ の値、シートフロー状態や砕波点直下などの平坦床の場合には粒径の 100 倍の値を与えている。更に、 M については底質の沈降速度と拡散係数の比で与えた。

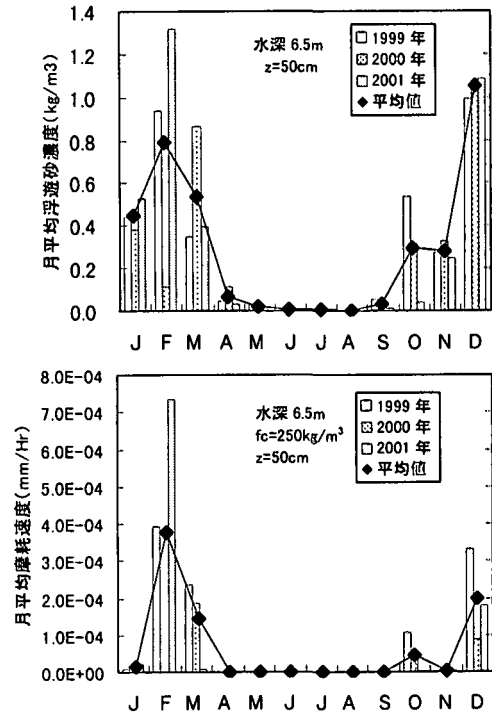


図-7 基質摩耗諸元の特性

図-7 は、北海道南西日本海に配置されている NOWPHAS (全国港湾海洋波浪情報網) の観測点である瀬棚港の波浪観測記録と泊漁港地先の実証試験海域の施設水深 6.5m に設置された波高計の相関解析をもとに、当該域に基質を設置した 1999 年より 2001 年までの 3 年間について、水底より 50cm 上方における推定浮遊砂濃度と、基質 (使用済脱硫剤濃度 250kg/m^3) の摩耗速度の月平均推定値を示したものである。図中の \blacklozenge は、 3 年間の平均値であるが、これより、実証試験海域における浮遊砂濃度及び摩耗速度は、コンブの発生～幼芽の形成期に相当する 12 月～ 2 月にピークをとり、葉体が急速に伸長する胞子体の成長期から子嚢班が形成される成熟期に相当する 4 月～ 9 月は顕著な浮遊砂の形成や基質の摩耗は認められず、本種的生活環が海域の物理環境と調和しながら形成されている状況が推察される。

図-8 は、実証海域の水深 6.5m 施設の天端面上に設置された自動更新性基質を対象に、 1999 年 11 月より 2002 年 1 月までの 3 年間の冬期 (コンブ遊走子が放出されている期間を目安) における有義波高、有義波周期の推定時系列と (7) 式より計算され

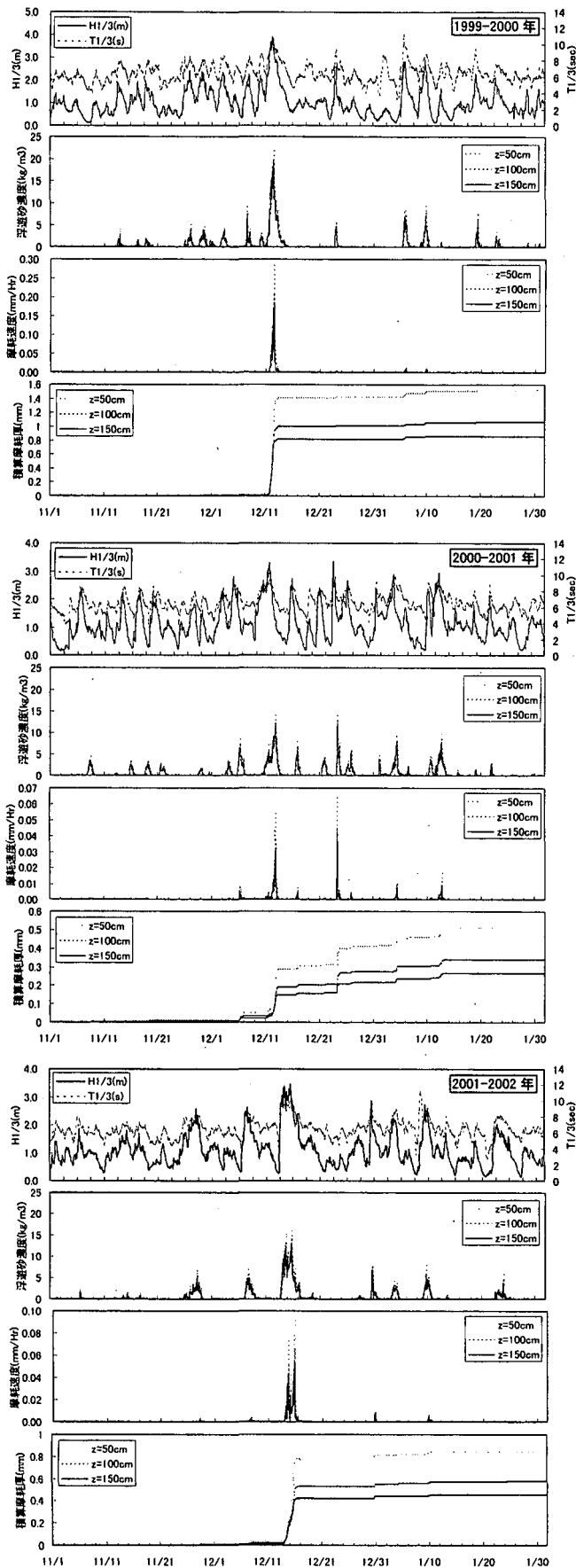


図-8 有義波高・有義波周期の時系列，及び浮遊砂濃度，基質摩耗速度，積算摩耗厚の推定時系列（水深 6.5m，使用済脱硫剤濃度 500kg/m³）

る推定浮遊砂濃度，及び，(3)式より計算される自動更新性基質（使用済脱硫剤濃度 500kg/m³）の基質表面の摩耗速度と積算摩耗厚の推算結果を示したものである。これより，当該海域における冬季高波浪期を象徴して有義波高値が頻繁にピークをとりながら複雑に変化するのと比較して，浮遊砂濃度は間欠的にピークを取りながら変動しており，何れの年においても 10kg/m³ 以上の高濃度を記録したのが 1~2 回，5 kg/m³ 以上を記録したのが 6~7 回を程度発生していることがわかる。また，2000 年冬期間における浮遊砂濃度の最大値は，他の年と比較して小さめに推移し，浮遊砂に伴う基質の摩耗も段階的に発生し積算摩耗厚も最大で 0.5mm 程度（z=50cm）と少ないのに対して，2000 年冬期以外の年については，冬期間で最も高濃度の浮遊砂が発生した高波浪の継続期間内に生じた摩耗厚が冬季の累積摩耗全体の大半を占めることが示唆される。

(3) 基質の自動更新とコンブの着生効率

1999 年 11 月に実験海域の基質試験用施設の天端面及び脚部へ設置した自動更新性基質について，ホソメコンブの着生状況等に関する調査結果をもとにコンブの着生本数と浮遊砂濃度との関係などについて検討した。

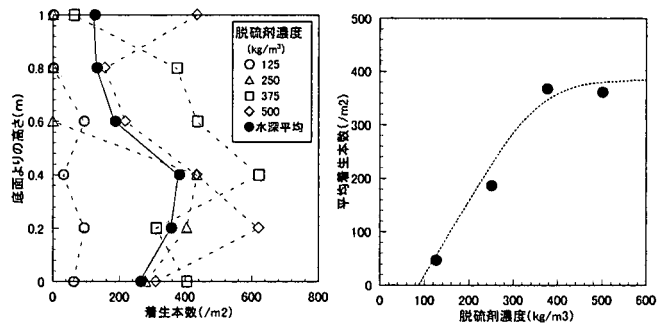


図-9 施設脚部におけるコンブ着生状況

図-9 は，水深 7m に設置された高天端施設の 4 本の脚部に，各脚毎に使用済脱硫剤の濃度を変えて 6 枚ずつ鉛直方向に配置した自動更新性基質の 2000 年 9 月時点におけるコンブ着生本数を示したものである。これより，コンブの着生本数は概して使用済脱硫材の濃度が高いほど，水底面よりの高さが小さいほど多いことがわかる。なお，図-9 において，水底面とほぼ同じ位置に設置された基質が直上の基質と比較して，若干コンブ着生本数が少ない原因としては，水底地盤面の季節的な上下動が影響したことが考えられる。

図-10 は水深 7.0m，6.5m，及び 3.0m の天端面に設置された自動更新性基質と水深 7.0m の脚部に設置された自動更新性基質の冬期における平均摩耗速

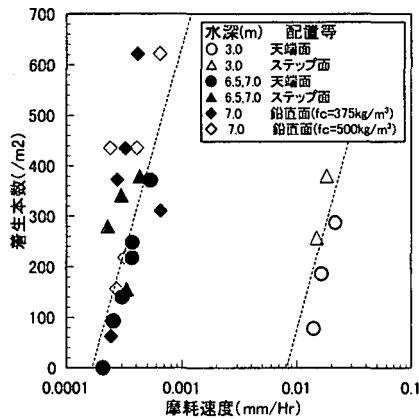


図-10 浮遊砂濃度とコンブ着生本数の関係

度とコンブの着生本数との関係を示したものである。これより、何れの施設、及び天端面上に設置された自動更新性基質においても、平均摩耗速度の増加とコンブの着生本数の間に正の相関が認められる。なお、水深3.0mとそれ以外(水深6.5~7.0m)が同一曲線で評価できない原因としては、光強度などコンブの生残に関わる諸条件が水深で大きく異なっていることなどが考えられる。

図-11は基質を海域に設置した翌年の夏期繁茂期に相当する2000年7月と、更に1年後の2001年7月の生物調査結果をもとに、水深6.5m及び7.0m施設の天端上に設置された全ての自動更新性基質における単位面積当たりの着生本数の平均値を、比較対象基質であるスレート板上の平均着生本数とともに示したものである。

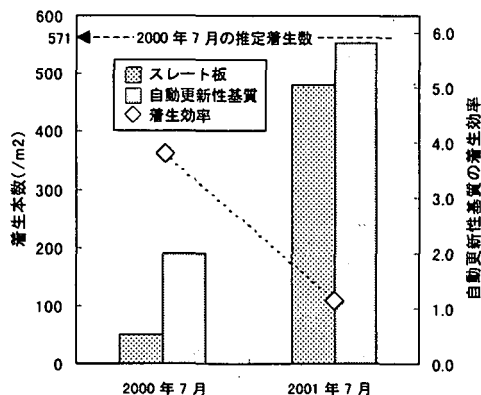


図-11 自動更新性基質の着生効率

これより、当該域周辺におけるホソメコンブの発生密度が全般的に低位で推移した2000年夏期における自動更新基質への着生密度は、既存の基質を代表するスレート板と比較して約4倍程度大きな値をとり、コンブ発生時期に新たな裸地を提供する自動更新性基質の有効性が示唆された。また、全域的にホソメコンブの発生が比較的良好であった2001年夏期の着生密度はスレート板の発生密度の1.2倍程度に留まっているが着生本数は単位面積当たり552

本と十分な高密度を維持している。コンブの着生密度は基質の特性とともに、冬期発生期の栄養環境など海域の生産力の消長に大きく左右されるが⁵⁾、スレート板への着生密度を海域の生産力の指標(2001年は2000年の約9.7倍の生産力を有すると仮定)とした上で、冬期の平均摩耗速度とコンブ着生密度の関係より2000年夏期のホソメコンブ着生密度を推定した結果(図-11参照)は実測値と概ね一致することから、冬期における新たな基質面の形成状況がホソメコンブの発生及び着生密度を推定するための重要な指標の一つとなることが検証された。

4. おわりに

北海道日本海の冬季沿岸域は、季節風の影響で高波浪がほぼ恒常的に存在するが、波浪に伴う顕著な浮遊砂の発生頻度は、高波浪の発生頻度と比較して遙かに少ない。今回開発対象とされた新基質の摩耗頻度は、浮遊砂の発生頻度より更に低い確率で発生し、基質の摩耗強度を調整することによって、年に1~数回程度、自動的に表面が更新される基質を開発できる可能性が示唆された。また、実海域調査より、砂浜域砕波帯近傍に設置された自動更新性基質に着生するコンブの着生本数と浮遊砂濃度には正の相関が認められ、浮遊砂による基質の物理的な自動更新がコンブの着生に対してプラス方向に寄与していることが検証された。

今後、実海域に設置された自動更新性基質を回収し、基質表面の摩耗状況を調査することによって、本研究で導出した摩耗式の適用性などについて、更に検証調査を実施してゆく予定である。

最後に、本研究は(社)マリノフォーラム21が実施する海域環境保全技術の開発研究会における岩礁性藻場造成技術開発種目の一部として実施されたものであり、関係各位に記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 瀬戸雅文, 水野武司, 梨本勝昭: 縦スリット型藻礁の設計条件に関する研究, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 946-950, 1999.
- 2) 阿部英治, 垣内政宏, 松山恵二, 金子孝: 忍路湾産ホソメコンブの成長について, 北海道水産試験場報告, 第27巻, pp101-110, 1985.
- 3) H. Arakawa, Y. Arai, M. Seto and T. Morinaga: Influences on survival of brown algal zoospore exerted by drifting particles, Fisheries Science, No. 68(in press).
- 4) 柴山知也, W. Rattanapitikon, 岡安章夫: 砕波帯内の浮遊漂砂量の算定モデル, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 432-435, 1994.
- 5) 瀬戸雅文, 川井唯史, 巻口範人: 海洋深層水の放水による岩礁性藻場造成に関する基礎的研究, 海洋開発論文集, 第17巻, pp. 123-128, 2001.