

縦スリット型藻礁の水理特性に関する研究

瀬戸雅文*・水野武司**・山田俊郎***・梨本勝昭****

1. はじめに

近年、沿岸漁場整備開発調査の一環として砂浜域砕波帯周辺海域において、岩礁浅海域に生息するウニやアワビなど付着性有用生物の生息環境を創出することを目的とした造成手法が検討され、デッキプレート式の施設を用いた実証試験などが実施されている（(社)全国沿岸漁業振興開発協会, 1996）。強波浪や浮遊砂の発生など水産生物の生息環境として厳しい水理条件を有する当該域で、増殖対象種を適正に管理し、安定的な再捕・収穫を目指すためには、施設設置に伴う新たな高波浪の出現や流速値の増大などを極力抑えとともに、施設の水理特性を充分把握（単純化）した上で対象種及び餌料となる海藻類の増殖条件に配慮する必要がある。施設の具備すべき条件としては、①施設設置に伴う新たな波浪変形や流れ、漂砂の発生の抑止、②施設に作用する流体力の低減、③有用生物着生のための基質面積の増大、④生物の環境選択性（多様性）への配慮、⑤増殖対象種を種別、年齢別に管理できる構造、⑥メンテナンスフリーで施設表面が磯掃除される構造、などが考えられる。

本研究では、上記条件の多くを満足できる施設として縦スリット型藻礁を考案し、施設の水理特性（上記①に

関連）について検討した。さらに、振動流場におけるコンブの作用流体力を計測し、コンブの着生が藻礁の安定に及ぼす影響（上記②に関連）について検討した。

2. 縦スリット型藻礁の水理特性

2.1 実験装置及び方法

縦スリット型藻礁の主要構成部材である縦スリット壁の複列配置に伴う波浪特性及び縦スリット壁周辺の流速分布の計測を目的として、北海道立中央水産試験場所有の2次元波浪水槽（水路長27.5 m, 水路幅1.5 m, 水路高さ1.7 m）を使用して図-2に示す概要で水理実験を実施した。

水路中央部にアクリル製の縦スリット壁模型（想定縮尺は1/30~1/40）をスリット側面が入射波方向と平行になるように設置し、水深（ h ）を14, 18, 22 cmの3通り

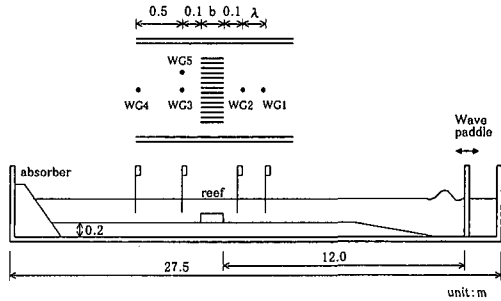


図-2 波浪実験概要図

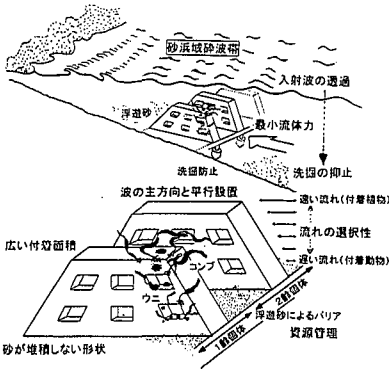


図-1 縦スリット型藻礁イメージ図

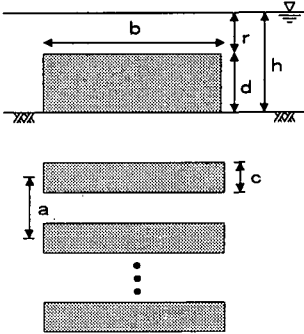


図-3 模型の定義

* 正会員 水産博 北海道立中央水産試験場 水産工芸室
** 北海道大学大学院 水産学研究所
*** (株)西村組
**** 水産博 北海道大学教授 水産学部海洋生産システム学科

表一 供試模型の緒元

$c=15\text{ mm}$ $d=80\text{ mm}$		c/a					
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.0
c/b	0.025	a 150	75	50	37.5	30	15
		b 600	600	600	600	600	600
	0.034	150	75	50	37.5	30	15
		450	450	450	450	450	450
	0.050	150	75	50	37.5	30	15
		300	300	300	300	300	300
	0.100	150	75	50	37.5	30	15
		150	150	150	150	150	150
	0.200	150	75	50	37.5	30	15
		75	75	75	75	75	75

に変化させた上で、各水深条件毎に波周期 (T) が 1.0, 1.4, 1.8 秒の規則波を用いて入射波高 (H_i) を $H_i/L=0.012\sim0.065$, $H_i/h=0.1\sim0.47$ の範囲で 5 通りずつ変化させた。供試模型の緒元を図-3 及び表-1 に示す。実験模型では堤高 (d) とスリット壁の厚み (c) を各 8 cm 及び 1.5 cm に固定した上で、天端幅 (b) を 7.5~60 cm の 5 通り、スリット壁の中心部を基準としたスリット壁の配置間隔 (a) を、1.5 (スリット間隔ゼロ)~15 cm の 6 通りに変化させ、計 30 ケースについて実験を実施した。なお、図-1 におけるスリット壁表面の空隙の影響についてはここでは検討されていない。

実験では、模型の前・後方に各 2, 3 基の容量式波高計を設置し入射波を分離後、反射率 (K_r) 及び透過率 (K_t) を計測した。また模型の天端上 4 cm 及びスリット壁間の流速値を電磁流速計で計測し、解析に供した。

2.2 碎波特性

施設設置に伴う新たな碎波の発生は、浮遊砂や平均流の形成など周辺海域の物理環境に影響を及ぼす。そこで、施設設置前・後において当該域の碎波条件に顕著な差異が生じないための施設スリット壁の配置条件について検討した。

図-4 は、スリット壁の間隔パラメータ (c/a) と施設設置に伴う碎波限界波高比 (H_b/h) の関係を水深パラ

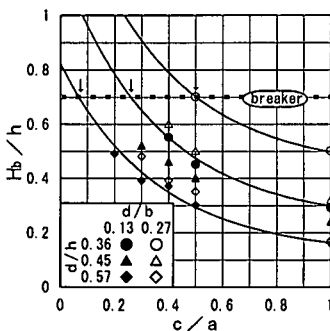


図-4 スリット壁間隔と限界波高の関係

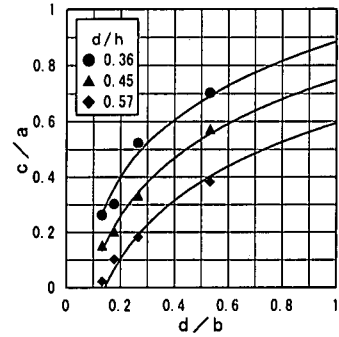


図-5 縦スリット型築物の碎波指標図

メータ (d/h) 及び天端幅パラメータ (d/b) で整理して示したものである。これより、施設による碎波限界波高は、設置水深、天端幅及び堤高に依存しながらスリット壁間隔の拡大とともに曲線的に増大し、施設設置前の当該水深及び入射波条件に対する碎波限界波高値（ここで使用した実験波の条件でほぼ $H_b/h=0.7$ 程度、図中点線）に達することがわかる。図中の各曲線が $H_b/h=0.7$ に達した時点におけるスリット壁間隔パラメータの値は、施設に伴い新たな碎波が生じないために必要とされる、スリット壁の最小配置間隔を意味している。図-5 は、最小配置間隔の天端幅による変化を水深条件で整理して示したものである。これより施設設置水深、天端幅及び堤高をもとにスリット壁の配置間隔を決定することが可能となり、近似的に次式で表現できる（図中に曲線を表示）。

$$c/a=0.311n(d/b)+2.98(h/d) \dots\dots\dots (1)$$

なお、今回の実験では実海域における想定スケールに基づいて堤高（実物換算値で 2.5~3.5 m）とスリット壁の厚さ（実物換算値で 0.4~0.7 m）を固定しているため、堤高に対するスリット壁の厚みの変化に伴う各緒元の変動特性については検討していない。

2.3 反射・透過特性

図-6 は天端幅が 30 cm 及び 60 cm (d/b で各 0.13, 0.27) の実験ケースについて、施設による新たな碎波が生じない条件下（図-5 参照）における施設の波反射率 (K_r) 及び透過率 (K_t) を波高水深比 (H_i/h) 及びスリット壁間隔 (c/a) をパラメータとして示したものである。

これより、透過率（反射率）はスリット壁間隔が c/a で 0.1~0.5 の範囲においては、天端幅、スリット間隔によらずほぼ同一の曲線上を波高水深比値の増加とともに徐々に減少（増加）する傾向が認められるが、何れの範囲においても $K_t=0.95$ ($K_r=0.25$) 程度以上（以下）と極めて透過性が高く（反射が小さく）、施設による顕著な波の変形は認められない。一方、図-7 は天端幅が 15 cm ($d/b=0.53$) の施設について、スリット壁間が遮蔽 ($c/a=1.0$) された、既存の潜堤に相当する場合の波反射率及び

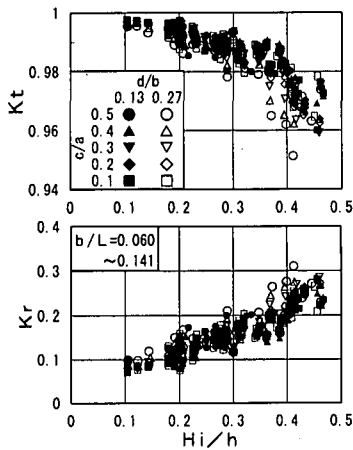
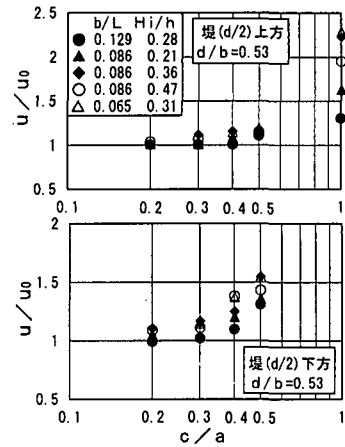
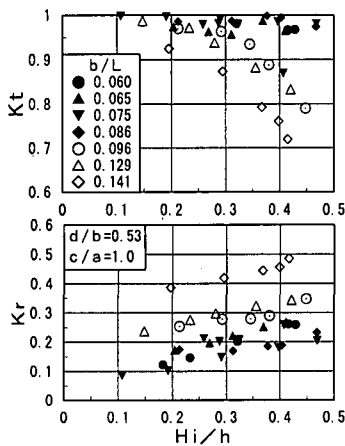
図-6 波反射率及び透過率 ($c/a \leq 0.5$)

図-8 施設周辺の流速分布

図-7 波反射率及び透過率 ($c/a \leq 1.0$)

透過率を示したものである。スリット壁間隔が完全に遮蔽された場合の波浪変形は人工リーフに関する半沢ら(1996)の報告と同様に天端幅に依存し、顕著な反射波の発生や透過波の減衰が認められる。このように、本施設におけるスリット壁間の空隙の有無は、波浪変形に大きく影響し、かつ、スリット間隔の拡大とともに、急激に波浪変形に対する影響が小さくなる特徴を有している。

2.4 流速分布特性

図-8は天端幅15 cm ($d/b=0.53$)、水深18 cm ($d/h=0.45$)の実験ケースについて、スリット壁の間隔を変化させた場合の天端上より各4 cm ($d/2$) 上方及び下方における水平流速値(u)を、施設が無い場合の同一水深における流速値(u_0)で基準化して示したものである。これより、スリット壁間が完全に遮蔽されている従来型の潜堤($c/a=1.0$)においては天端上の流速値が、天端幅と入射波の諸元に依存して大きく変動し、最大で施設設置前の2.2倍程度の流速値に達するのに対して、 c/a が0.5

以下のスリット壁の配置間隔においては、天端上における流速値の増大が u_0 の1.2倍程度以下と施設設置前とほとんど変化しないことがわかる。

更に、天端上より $d/2$ 下方のスリット壁間の中心部における流速値についても $c/a < 0.3$ の範囲では波浪条件によらず水平流速値は施設設置前の1.2倍程度以下の値に留まり、スリット壁間における顕著な流速値の上昇は認められない。

3. 付着コンブの作用流体力

藻礁は有用水産動物の餌料となるコンブ等海藻類の着生を主目的とした施設であるが、付着海藻が波浪より受ける流体力は施設基質面に作用し、施設の滑動や転倒など安定条件を検討する際の設計条件の一つと考えられる。

3.1 実験装置及び方法

コンブへの作用流体力の計測は、中央水産試験場所有の大型振動流回流水槽(平均水深1.0 m、水路幅1.5 m、観測部長さ8.0 m)を使用して実施した。本水槽は海水対応の鉛直循環式の回流水槽で管路内部に配置された2対4基のインペラをコンピュータで制御することにより流速-200 cm/s～+200 cm/sの範囲で任意の流速条件(定常流、振動流など)を水路内に形成することができる。供試コンブは釧路町沿岸の水深

表-2 供試コンブ緒元

葉 長 (mm)	2470～3368
平均葉幅 (mm)	45.0～75.0
平均葉厚 (mm)	0.86～1.28
葉湿重量 (g)	174.57～392.84
葉水中重量 (g)	6.28～14.14
葉平均比重	1.062
茎 長 (mm)	27.0～70.0
茎 長 径 (mm)	27.4～68.9
茎 短 径 (mm)	25.5～64.7

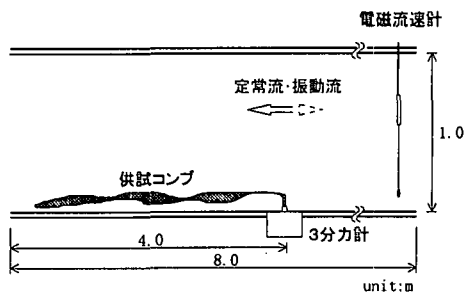


図-9 流体力計測実験概要図

3 m 付近に着生していたナガコンブとガツガラコンブで、葉長 (LL) 247~337 cm, 平均葉幅 4.5~7.5 cm の範囲のコンブを使用した。供試コンブの諸元を表-2 に示す。

実験では、図-9 に示すように供試コンブの根部を直径 14 mm 長さ 30 mm の円筒状ステンレス製治具内にシリコンで固定した上で水槽中心底部に設置された水中 3 分力計 (x, y, z 成分, 精度 1 gf で試作) のセンサ接続部に固定した。水槽内に定常流 (18.9~95.8 cm/s) 及び振動流 (周期 (T) を 6.0~10.0 秒, 流速振幅 ($u_{\max}$) を 19.8~88.9 cm/s) を発生させ、電磁流速計を用いて主流の流速変動を計測するとともに、コンブの揺動状況をビデオテープに記録した。コンブ葉体には予め 50 cm 刻みでマーカを添付し、これをもとに、振動流に伴うコンブ葉体の伸張振幅を計測した。実験ではコンブの葉体部を葉先より 50 cm ずつ切断・短縮することにより、様々な葉長葉幅比のコンブ形状について検討している。なお、実験期間中の水槽内海水温はほぼ 11.8°C で一定であった。

3.2 定常流場における流体力

図-10 は、定常流場のコンブに作用する流体力 (F_D) の主流流速 (u) による変化の一例を葉面積 (A) で整理して示したものである。これらの計測データをもとに、抗力係数 (C_D) を計算し、葉長 (LL) を代表長さとした

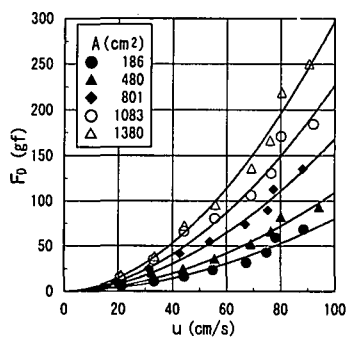


図-10 抗力の流速による変化

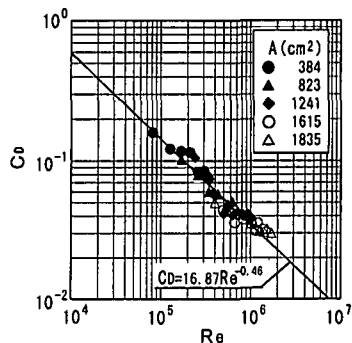


図-11 抗力係数の Re 数による変化

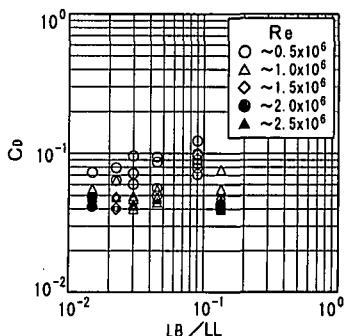


図-12 抗力係数の葉長葉幅比による変化

レイノルズ数 (Re) で整理すると図-11 となる。

これより、何れの葉面積、葉長においても C_D 値は Re 数の関数として同一曲線上で推移し、近似的に以下の式で表現できる。

$$C_D = 16.87 Re^{-0.46} \quad (2)$$

図-12 は、 C_D 値の葉長葉幅比 (LB/LL) による変化を各 Re 数領域別にプロットしたものである。これより、 C_D 値は葉長葉幅比で統一的に整理されず、特に Re 数 $> 1.5 \times 10^6$ 以上においては葉長葉幅比によらずほぼ一定値をとることがわかる。即ち、コンブに作用する流体力は、形状抵抗に比較して表面摩擦抵抗が卓越し、葉面積を抗力算定の際の基準面積として差し支えないことがわかる。

3.3 振動流場における流体力

図-13 は振動流場 ($T = 8$ s, $u_{\max} = 60$ cm/s) のコンブ ($LL = 200$ cm, $A = 1615$ cm²) に作用する非定常流体力の経時変化を流速値とともに示したものである。図中で横軸の 22 秒付近に認められる急激な流体力絶対値の増大は、揺動運動の過程でコンブ葉体が根部サポートに絡まったことによるが、このようなケースはビデオ画像で絡まりの有無を確認後、以後の解析から除外した。図より、作用流体力と流速値の位相はほぼ一致しており、作用流体力に占める質量力成分は極めて小さいことがわか

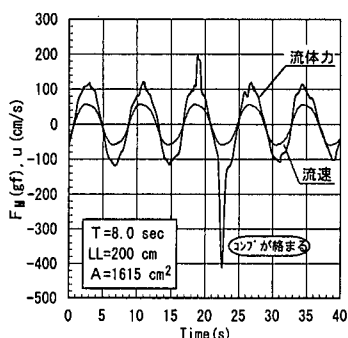


図-13 振動流速と作用流体力の関係

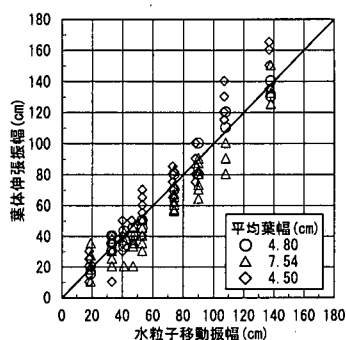


図-14 水粒子移動振幅と葉体伸張振幅の関係

る。

図-14は、コンブ揺動状況のビデオ解析結果より得られたコンブ葉体の伸張振幅（振動流で伸張したコンブ葉体の根部よりの長さ）と、振動流に伴う水粒子の移動振幅の関係を示したものである。これより、コンブの揺動は水粒子の移動振幅とほぼ同じ長さに相当する葉体部が、振動流の発生とともに伸張していることがわかる。

これらの結果をもとに、振動流場のコンブに作用する流体力（最大値 F_{Mmax} ）を抗力成分で代表させ、葉体の伸張部に流体力が作用するものと近似した上で、振動流に伴う水粒子の移動振幅（ LW ）がコンブの葉長（ LL ）より小さい場合には LW を、大きい場合には LL をコンブの代表長さとしてコンブに作用する流体力を（2）式をもとに微小振幅波理論（簡単のために長波近似）で定式化すれば

$LL \geq 2.49H_i T/h^{0.5}$ の場合

$$F_{Mmax} = 0.53LBH_i^2 T^{0.5} h^{-1} \text{ (gf)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$LL < 2.49H_i T/h^{0.5}$ の場合

$$F_{Mmax} = 0.33LB \cdot LL^{0.5} \cdot H_i^{1.5} \cdot h^{-0.75} \text{ (gf)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

図-15は振動流場のコンブに作用する流体力の最大

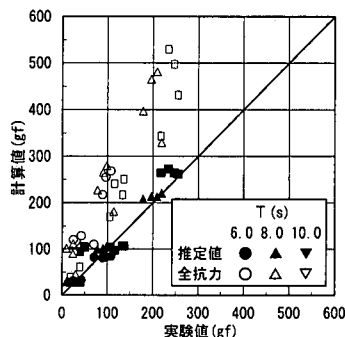


図-15 流体力実測値と計算値の比較

値（ F_{Mmax} ）の実測値と、上式による推定値、及び全葉面積を代表面積として計算される抗力値（全抗力）の関係を示したものである。これより、定常流場の抗力をもとに葉長を代表長さとして計算される流体力（全抗力）は実測値より概して2倍以上大きな値をとるのに対して、上式をもとに計算される推定値は実測値とほぼ一致し、伸張振幅を代表長さとして抗力で近似することによりコンブの揺動に伴い作用する流体力を推定できることがわかった。

4. おわりに

縦スリット型藻礁はスリット壁間隔が $c/a < 0.5$ の範囲では入射波の性質をほとんど変えることなく透過させ、施設周辺における流速値の上昇も、従来型の潜堤や人工リーフと比較すれば極めて微小な範囲に抑えられることがわかった。また、礁に着生するコンブより礁へ作用する流体力を推算可能な簡易式を提案した。優良天然漁場におけるコンブの生育密度は種によるもののほぼ20～40本/m²程度と考えられることから、砕波帯周辺海域において同密度でコンブが繁耗した場合、（3）、（4）式より数百kg/m²の流体力が施設基質面に作用することとなり、広い付着面積を有する縦スリット型藻礁は、縦スリット形状より波浪に伴い直接施設に作用する流体力が比較的小さい反面、礁表面に繁耗するコンブによる流体力の影響を安定計算等に十分考慮する必要があることがわかった。

参考文献

- （社）全国沿岸漁業振興開発協会（1996）：平成7年度特定地域沿岸漁場開発調査北海道函館周辺地域調査報告書，148 p.
 半沢 稔・周 遠強・杉浦 淳・佐藤弘和（1996）：消波ブロックを用いた人工リーフの機能・安定性に関する実験的研究，海岸工学論文集，第43巻，pp. 821-825.