

藻場造成のためのウニの侵入防止技術の開発

水産工学研究所 水産土木工学部 川俣 茂

調査実施年度 10~12年度

緒言

ウニの摂食によって藻場が減少している岩礁が多く存在する。このような場で藻場を成功させるためには、ウニによる食害の防除が必要不可欠であり、そのための技術開発が試みられてきた。これまでに試験されてきた方法には金網、漁網、人工海藻、電気・空気バリアなどの物理的フェンス、化学的忌避物質を溶出する基質、および立縄、延縄などの中層施設がある¹⁾。しかし、いずれの方法も耐波性、耐久性、効果の確実性と持続性、コストの面で問題があり、普及の見通しはほとんどない。

本調査では、ウニによる摂食圧の高い岩礁で海藻を持続的に生育させることができる、沿整事業でも利用可能な技術として2つの方法を検討した。一つは構造物によって流速(波動流速)を増加させる方法であり、もう一つは流動を変えるのではなく低流速でも基質がよく動く装置を開発することである。

前者の方法には、沿整事業で一般に用いられてきたコンクリートブロック、自然石などで水深を浅くする方法が該当する。この方法の技術的確立には、ウニの摂食を抑制し、大型海藻が群落を形成するのに必要な流動条件の解明が必要である。本調査では、北方海域で最大の海藻食害種となっているキタムラサキウニの侵入を防止し、コンブなどの大型海藻が群落を形成するのに要する流動条件の解明のために室内実験と現地調査を行った。

一方、後者の「動く」海藻着生装置については、材料の耐久性だけでなく、摩耗や衝撃力(破断の原因)を生じる弛みが無い構造にする必要がある。そのような構造には回転体と振り子が考えられるが、本調査では回転式として低速の流れの中でも比較的効率的に回転するパドル形水車から成る装置を試作し、予備的な現地実験を行った。また、振り子式については、2つのタイプを検討し、設計のための運動シミュレーションプログラムの作成、効果に関する室内実験と現地実験を行った。

調査方法

1. キタムラサキウニ優占域における群落形成に要する流動条件

室内実験は、図1に示す振動流水槽を用いて行った。水槽の試験区にはコンクリートブロックで階段状の斜面を作り、自然岩礁と同じように流速が場所によって異なる4つの領域(F1、F2、F3、F4)を作った。各流速領域には小形の海藻(アナアオサとマコンブ幼体)を密に着生させた塩ビ板(15×15cm)1枚ずつを固定し、殻径5cm弱のキタムラサキウニ5個をF1に置いて所定の振動流(表1)を与えてその摂餌行動を常時観察した。表1のように水温を段階的

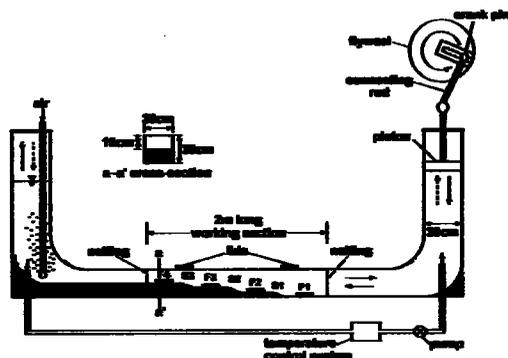


図1 室内実験に用いた振動流水槽

表1 実験条件 (振動周期: 5 s)

	水温			流速振幅 (m/s)			
	初期	最終	増加速度	F1	F2	F3	F4
1回目	7°C	16°C	3°C/7日	0.30	0.36	0.45	0.60
2回目	3.8°C	7.8°C	1.2~1.4°C/5日	0.15	0.18	0.225	0.30

に上げた実験を、流速条件を変えて2回行った。

なお、この実験ではエゾアワビ5個、エゾバフンウニ10個も同時に水槽に入れたが、その観察結果については省略する。

現地調査は、1999年10月下旬~2000年4月下旬に、キタムラサキウニが優占する磯焼け海域に位置する北海道小樽沿岸忍路湾に4本の測線(A、B、C、D)を設けて、コンブなどの大型海藻が孢子着底から成長して群落を形成するまで、ウニの分布、海藻の入植状況と流動を調査した。流動調査では、比較的長期間の観測に耐え得る特別仕様の石膏半球を海藻の入植下限水深付近に設置して、そこでの平均流速(絶対流速の時間平均)を調べた。平均流速からは更に有義波動流速振幅 $U_{max,s}$ (流速振幅の大きい方から1/3の平均)の期間平均を推定した。また流速と水温センサーを有する波向波高計を水深8.3m(R1)と2.1m(R2)に設置して波動流速、水温、波高の経時変化も調べた。

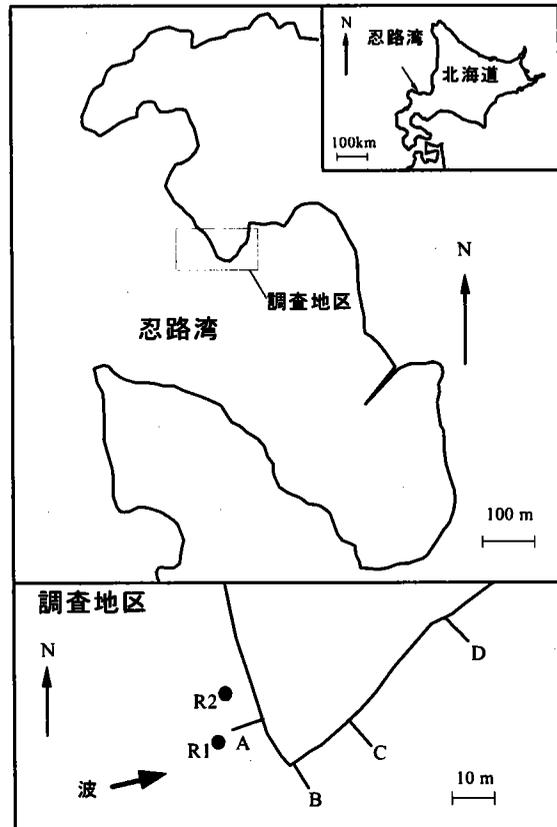


図2 調査地区、測線および測点の位置図

2. 「動く」海藻着生装置

1) 回転式海藻着生装置を用いた予備実験

パドル形水車により回転する塩ビ製試験装置(図3左、回転盤という)を試作し、その対照装置のテーブル状の塩ビ製円盤(図3右、固定盤という)と共に、3月28日、宮城県牡鹿半島太平洋側鮫浦湾内に設置し、ウニの這い上がり防止による海藻着生効果を調べた。設置地点は水深約9mの岩礁で、キタムラサキウニが優占する磯焼け地帯となっていた。

追跡調査は約7ヶ月間5回行い、海藻の着生状況、ウニ、巻貝などの底生植食動物の這い上がり状況を調べた。

2) 振り子式海藻着生装置

振り子式海藻着生装置には、図4に示す4つのタイプ(それぞれI、II、III、IV型という)を考えた。本調査ではこれらのうち、製作の容易さ、耐久性などの面から実現可能性

が比較的高いと考えられた I 型と IV 型について試験を実施した。振り子式装置の開発には図 5 に示すように多岐にわたる課題があるが、本調査では室内実験、装置の設計・製作、現地実証試験を実施し、これらの問題の全般的解決に努めた。

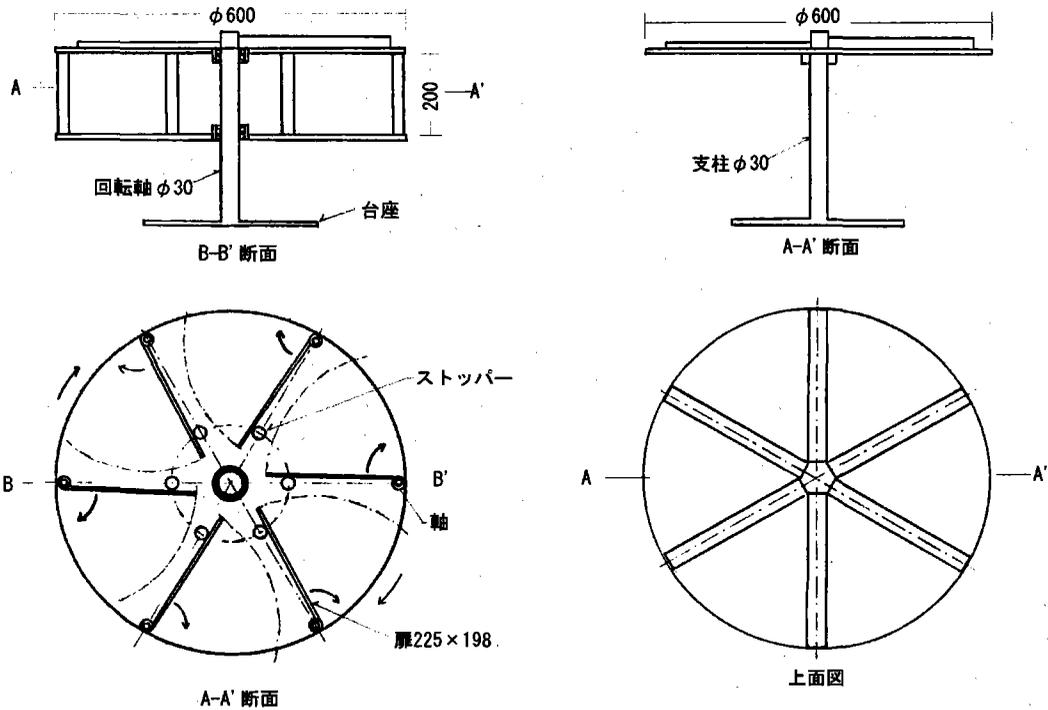


図 3 回転式海藻着生装置（左）とその対照装置の固定盤（右）

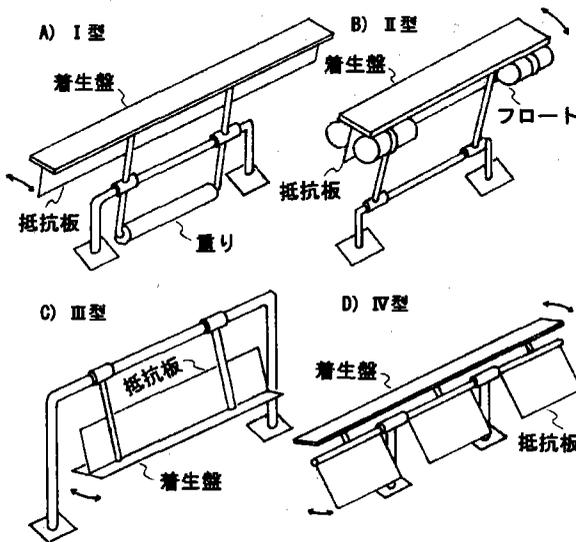


図 4 振り子式海藻着生装置

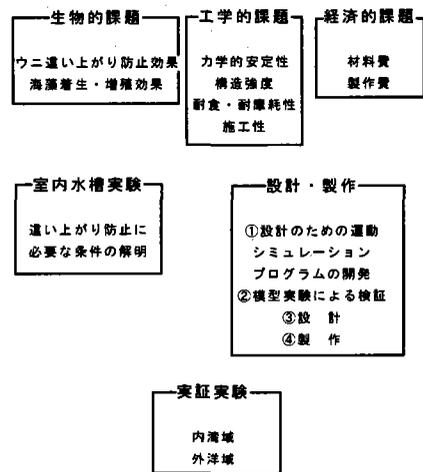


図 5 装置開発の課題と研究の流れ

室内実験は、ウニの装置への這い上がり防止に必要な揺れ条件を解明するために行った。実験には周期 12 s の規則的な波動を発生できる回流水槽を用い、その試験水路（長さ 6 m × 深さ 1 m × 幅 60 cm）に両端をネットで仕切った長さ 1.5 m の実験区を設けた。実験区

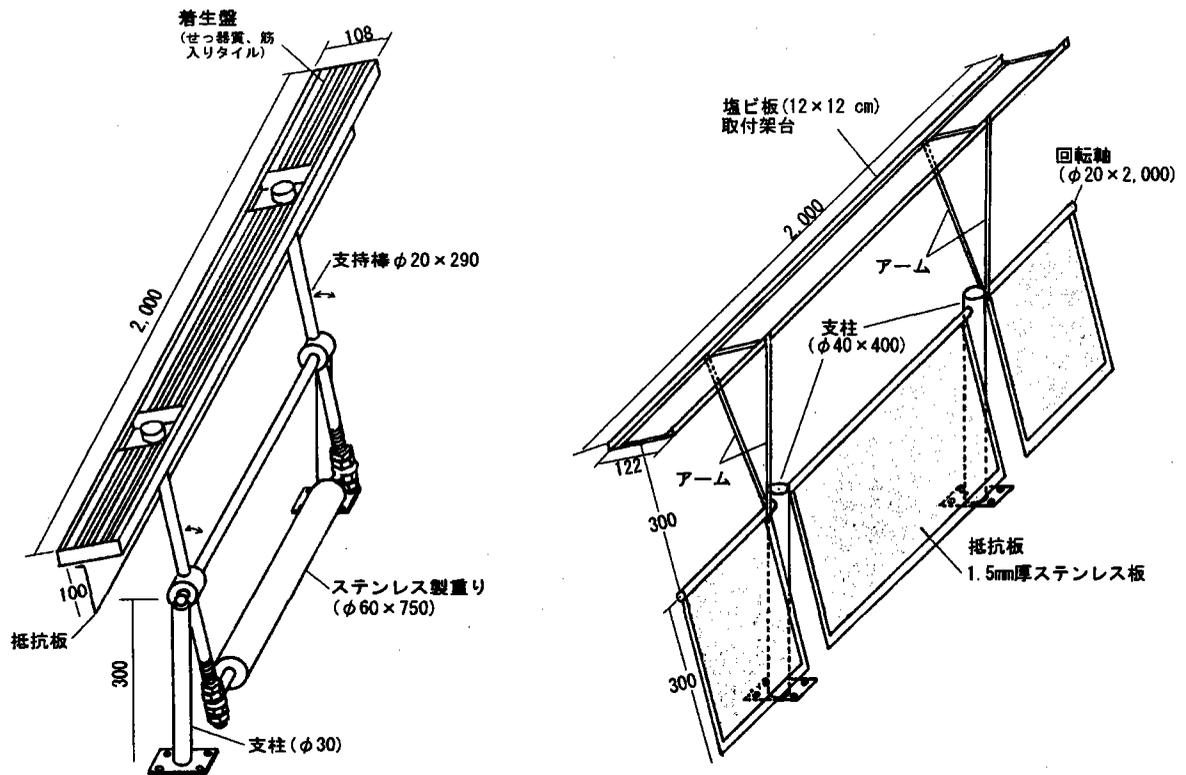


図6 I型(左)およびIV型(右)試験装置の概略図

には藻類を全面的に着生させた、波によって揺れる塩ビ管(長さ30 cm、径20 mm;以下、揺動円柱という)2本を、底面に鉛直に固定された3種類の塩ビ管(長さ30 cm、径10、20、30 mm;以下、固定円柱という)各々2本ずつと共に設置し、キタムラサキウニ50個を入れて波動下における這い上がり状況を調べた。揺動円柱は、上端に浮子と抵抗板を有して立ち上がり、海底直上にあるピンを軸として流れ方向に揺れる構造となっている。観察は、水温を10°Cに保ち、流速振幅を3日間隔に段階的に小さくして行った。

装置の設計・製作については、波動下での動的な力と、着生盤と重りまたは着生盤と抵抗板が逆転しない条件を推定するための運動シミュレーションプログラムを作成した。プログラミングは抗力、加速度による力を考慮してNewmark β 法による時間積分を行い、プログラミング言語Delphi4(インプラズ社)で様々な設計諸元をWindows画面から簡単に入力設定できるようにした。このソフトを用いて材料・構造の検討を行い、試験装置(図6)を設計・製作した。

1999年にI型試験装置を、また2000年にIV型試験装置を2台ずつ試作し、上述した内湾性漁場の鮫浦湾実験場と外洋域にある茨城県ひたちなか市平磯沖水深6.6 mの平坦な岩礁にそれぞれ1台ずつ設置して現地試験を実施した。平磯沖実験場の周辺海域も鮫浦湾と同様に、波当たりの強い低潮線近くにはアラメなどの大型海藻が繁茂するが、それ以外の所ではキタムラサキウニの摂食によって生育が阻害されていた。

調査結果

1. キタムラサキウニ優占域における群落形成に要する流動条件

図7にキタムラサキウニについての室内実験結果を示す。図中の細い棒グラフ1本は1時間毎にキタムラサキウニ5個体が各区分（水平区 F1~F4、斜面区 S1~S3）に滞在していた個数・時間の百分率を示している。キタムラサキウニは4°Cの極低温であっても、 U_{max} が 0.30 m/s 以下では自由に移動して摂餌活動するが、水温が13°C以下であれば流速振幅 $U_{max} = 0.45$ m/s 以上の領域には侵入することもできないことが示された。

調査を実施した忍路湾では、無節サンゴモシかない不毛な岩盤への海藻の着生は12月下旬から3月中旬まで認められた。測線A~D上で海藻が入植出来た領域は、例年より浅く波の影響が恒常的に強い水深の浅い所（約2m以浅）に限られた。これは調査年の水温が例年より高めに推移し（図8）、ウニの摂食が比較的活発であったためと考えられる。

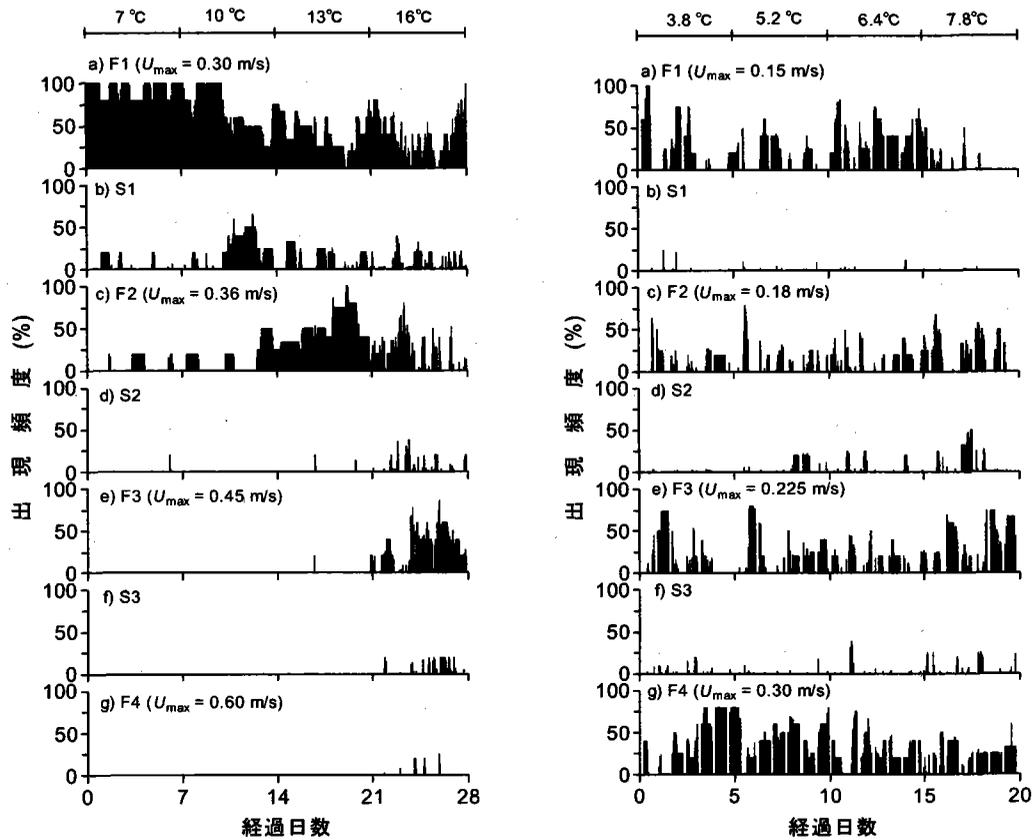


図7 1回目（左）と2回目（右）の室内実験結果：キタムラサキウニの移動分布

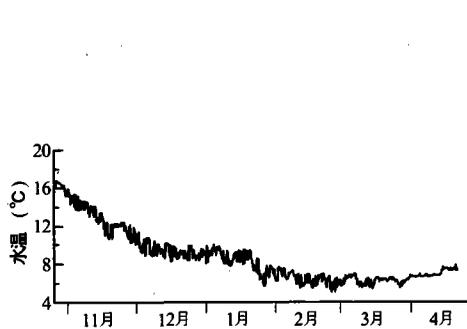


図8 水温の経時変化

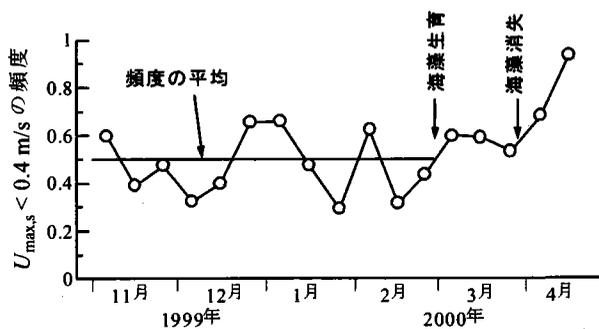


図9 測点R2における $U_{max,s} < 0.4$ m/s の頻度の旬別変化

コンブ群落が発達した下限水深における有義波動流速振幅 $U_{max,s}$ の平均値（表 2）は予想に反して場所によって異なり、遮蔽領域（測線 B、C、D）で外海に面した急斜面（測線 A）より小さくなった。この原因は、遮蔽領域では波高が大きいときには波が砕波などによって顕著に減衰するため、その波動流速の頻度分布が大きい値が無くなったような形になるためと考えられる。群落形成下限水深付近に位置していた測点 R2 における流速測定の結果（図 9）、群落が毎年形成されるための流動条件として、胞子着底～成長期にわたり $U_{max,s} < 0.4 \text{ m/s}$ となる確率が 0.5 未満になることが必要であることが示された。

表 2 各測線上に形成されたコンブ群落下限水深における $U_{max,s}$ の平均

測線	下限水深 (m)	$U_{max,s}$ の平均 (m/s)
A	1.4	0.59
B	1.1	0.32
C	1.5	0.29
D	0.45	0.37

2. 「動く」海藻着生装置

1) 回転式試験装置

設置約 2 ヶ月後（5 月 30 日）に、回転盤（回転式試験装置）のほぼ全面が藻類によって被われていたのに対して、固定盤には目立った藻類の着生は見られず、基面のままで、キタムラサキウニ 2 個と小形巻貝 10 個程度が付着していた。

約 3 ヶ月が経過した 6 月 25 日には、回転盤はさらに色濃くアナアオサ、モロイトグサ？を含む藻類に被い尽くされたのに対して、固定盤にはキタムラサキウニ 1 個と多数の小型巻貝が付着し、藻類の着生はほとんど見られなかった（図 10）。

8 月 21 日、回転盤の上面と下面には各々キタムラサキウニ 1 個と 2 個の付着が観察されたが、藻類（6 月 25 日に見られた藻類と異なる糸状藻類）がほぼ全面的に着生していた。固定盤については、キタムラサキウニ 1 個と多数の小型巻貝が付着し、その摂食により盤表面には付着生物はほとんどない状態であった。

10 月 22 日、固定盤にはキタムラサキウニ 15 個が付着し、表面が固着性生物に被われていたが、葉状または糸状藻類は全く見られなかった。回転盤は、回転軸から回転部位が消失していた。消失原因はベアリング固定用ピンの電食と考えられた。

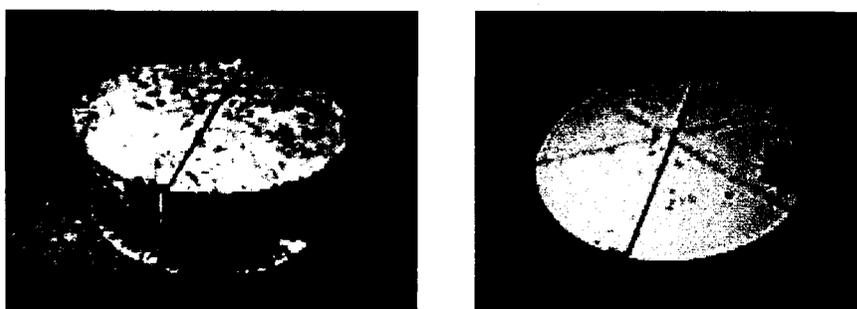


図 10 設置約 3 ヶ月後の回転盤（左）と固定盤（右）

2) 振り子式海藻着生装置に関する調査結果

(1) 効果に関する室内実験結果

波動流中における揺動円柱と固定円柱へのキタムラサキウニの這い上がりに関する実験結果を図 11 に示す。ウニは流速振幅約 0.4 m/s の比較的強い波動流中でも直径 20 mm の固

定円柱に這い上がり、表面の藻類を嚙り摂ることが分かる。これに対して、揺動円柱では流速振幅が 0.13 m/s (振れ角±約 30°) に低下してもウニは全く登らなかった。

(2) 現地実証試験

装置の設置日およびその後の試験経過について表 3 にまとめて記した。

振り子式 I 型試験装置は、外洋域の平磯沖で事故により故障したが、波力に対する強度および安定性の点では全く問題はなかった。しかし逆に、内湾域の鮫浦湾実験場では試験装置は静穏時にほとんど揺れなくなつて着生盤には小型巻貝が登り、効果に多少の問題が生じた。これは、装置の着生盤を軽くできなかつたため、それを立ち上げるのために吊り下げる重りも重くなつて回転軸にかかる荷重(すなわち回転摩擦抵抗)が大きくなつたことと、重りを軽くするために抵抗板をあまり大きくできなかつたことに原因がある。ただし、着生盤に這い上がっていたウニは調査期間を通じて 1 個も観察されず、また着生盤に取り付けたアラメやアナアオサの摂食による消失もみられなかつた。

表 3 試験装置の試験経過

宮城県鮫浦湾		茨城県平磯沖	
I 型試験装置	IV 型試験装置	I 型試験装置	IV 型試験装置
1999/10/2 設置	2000/8/22 アラメ幼体を着生させた塩ビ板 5 枚を取り付けて設置	1999/8/9 設置	2000/7/14 アラメ幼体を着生させた塩ビ板 5 枚を取り付けて設置
11/18 回転軸が砂を噛み、揺れ鈍化	10/4 剥がれかかったアラメの仮根をゴム紐で押さえ込む	9/9 正常に可動	8/7 架台の滑動により装置破損、回収
12/26 回転軸改良のため回収	11/28 アラメの茎状部がゴム紐に擦れて全藻体が基部から消失	11/26 取り付け不備により重りが脱落し、着生盤破損	9/21 抵抗板の幅を半分とし、架台を滑動に難くした装置を、アラメ幼体を着生させた塩ビ板 5 枚を取り付けて再設置
2000/2/3 改良した装置の再設置	12/22 塩ビ板にコンブの種糸を巻き付ける	2000/7/14 アラメ幼体を着生させた塩ビ板 2 枚を着生盤に取り付ける	2001/2/21 着生盤取付架台が激浪により反転し、支持部から脱落
3/31 アナアオサの着生ロープを着生盤に取り付ける	2001/2/9 着生盤取付架台が激浪により反転し、支持部が折れ曲がる	8/7 正常に可動	
8/22 アラメ幼体を着生させた塩ビ板 2 枚を着生盤に取り付ける		9/21 正常に可動していたが、アラメが基部から消失(絡み付いたロープによる擦れが原因?)	
10/4 剥がれかかったアラメの仮根をゴム紐で押さえ込む		2001/2/21 装置が横転(目印用の浮子を漁船に引っかけられた?)	
11/28 アラメの茎状部がゴム紐に擦れて藻体が基部から消失。			
2000/2/9 損傷なし、揺れが鈍い。			

IV 型試験装置は鮫浦湾でも常によく揺れ、小型巻貝の這い上がりも全くみられなかつた。この結果、装置に取り付けたアラメは、実験の不備により消失したが、食害されることはなかつた。しかし 2001 年 2 月 9 日の調査では、抵抗板が振れ過ぎて海藻の着生盤が回転軸の支柱に衝突して、アームが曲がってしまった。平磯沖では、IV 型試験装置は耐波性能を改良して設置したが、同様に 2001 年 2 月 21 日の調査では過度の振れによりアームが折

れて塩ビ板取付架台（着生盤）が脱落していた。これは、1月28日にあった激浪によるものと考えられた。鮫浦湾実験場所で観察された底面における有義波動流速振幅の最大は0.88 m/s（瞬間最大流速は1.75 m/s）であった。しかし、設計に用いた運動シミュレーションプログラムでは流速振幅2 m/sでも装置は破壊しないと推定されていたことから、設計プログラムに問題があることが示された。

考 察

・流速増加効果のある潜堤などの構造物の設置により、ウニの侵入を防止し、管理作業を要しない持続的藻場造成が可能である。キタムラサキウニの場合、その侵入防止に必要な流速振幅は約0.4 m/sであることが明らかになった。従ってキタムラサキウニの優占域では「流速振幅<0.4 m/s」となる確率が1から0に近づくほど、海藻が生育する機会が高くなる。忍路湾での調査の結果、キタムラサキウニの優占域にコンブ場を毎年造成するためにはその確率を少なくとも0.5未満にすることが必要であると考えられた。

しかし、そのような流速増加工法は必要な費用対効果の点から多くの漁場では適用が制限されると予想される。従って、弱い波動下でも効果的にウニの這い上がりを防止できる「動く」海藻着生装置は、磯焼け問題を打開する有効な技術になり得る。波動流速が非常に遅く、優占するキタムラサキウニの摂食によって海藻が生育しない鮫浦湾で実施した試験により、基質を波動によって動かすことによってウニの食害を防止し、海藻を育成できる見通しが得られた。

本調査では「動く」海藻着生装置として回転式と振り子式を検討した。しかしコスト、製作の容易さおよび効果の面から後者のみに実現可能性があると考えられた。また考えられる振り子式装置の型式（図4）の中で、I型とIV型を試作し、現地試験を行ったが、I型では重量が重くなって製作コストが高くなるだけでなく、摩擦抵抗によってあまり振れなくなるという問題がある。一方、IV型はコストと効果の面で優れており、その本体の材料費は約3万円/2mであり、事業規模で製作すればその製作費を6万円/2m以下にできると試算された。しかし、IV型試験装置は激浪に装置の反転が起り、装置の設計に用いたシミュレーションプログラムに問題があることが分かった。また今回試作した試験装置では、海藻着生盤を立ち上げるために、着生基質に軽量の塩ビ板を用いざるを得なかった。ただし、室内実験結果から海藻着生盤を支持するアームの長さは現在の30cmより短くてもウニの這い上がり防止効果があることが示唆されたことから、この問題は解決可能であると考えられる。

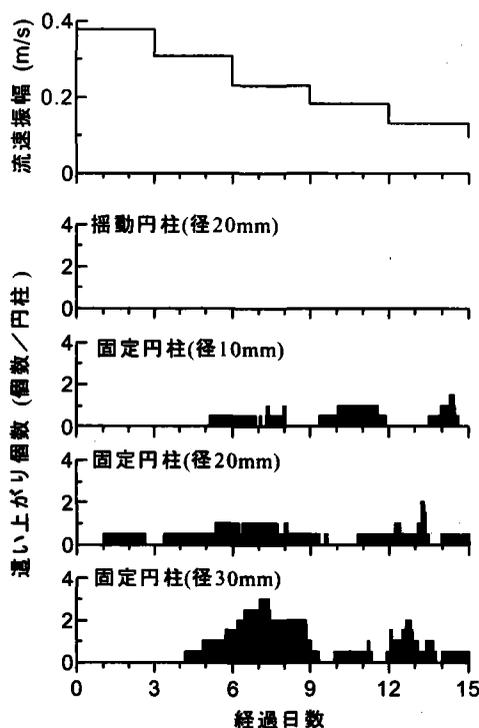


図11 流速振幅とキタムラサキウニの円柱への這い上がり個数の経時変化

摘 要

ウニの食害により藻場の形成が阻害されている岩礁でもウニの侵入を防止し、大型海藻を生育できる、公共事業でも利用可能な技術として以下の2つを取り上げた。一つは土木的流速増加工法である。この技術は、波動流速を増加させる効果のある潜堤などの構造物の設置により、ウニの侵入を防止し、管理作業を要しない持続的藻場造成が可能となるが、ここではキタムラサキウニの優占域でコンブ場の造成に必要な流速条件を検討し、以下のことを明らかにした。

- ・ キタムラサキウニの侵入防止に必要な流速振幅は約 0.4 m/s であり、キタムラサキウニの優占域では「流速振幅<0.4 m/s」となる確率が1から0に近づくほど、海藻が生育する機会が高くなる。
- ・ 忍路湾での調査の結果、キタムラサキウニの優占域にコンブ場を毎年造成するためには、胞子が着底し、群落を形成するまでの「流速振幅<0.4 m/s」の確率を少なくとも0.5未満にすることが必要であることが示唆された。

しかし、波動流速を恒常的にウニの摂食活動を防止できるほど強くするには、かなりの水深を浅くする必要があり、コスト的に適用範囲は非常に限られると考えられる。そこで、弱い流動でも効果的にウニを排除し、海藻を育成できる新しい構造物として、「動く」海藻着生装置を考案し、いくつかの型式の装置を試作し、現地実験を行った。

- ・ 「動く」海藻着生装置として回転式と振り子式を検討したが、コスト、製作の容易さおよび施工性の面から、後者のみに実現可能性が考えられた。
- ・ 振り子式装置は、流速振幅が少なくとも0.1m/sほどに低下してもキタムラサキウニの這い上がりを防止することができ、波動の弱く、ウニなどの摂食によって磯焼け状態になっている岩礁域でも海藻を育成できる可能性が示唆された。
- ・ 振り子式装置の海藻着生盤を支持するアームの長さは、室内実験結果から試作した試験装置のアーム長 30 cm より短くしてもキタムラサキウニの這い上がりを防止できる可能性がある。
- ・ 振り子式装置の中ではIV型がコストと効果の面で最も優れており、その本体の材料費は約3万円/2mであり、事業規模で製作すればその製作費を6万円/2m以下にできると試算された。
- ・ 試作したIV型試験装置は波浪によって反転、破損し、装置の設計に問題が残された。
- ・ 振り子式IV型装置の実用化には、①構造の更なる簡素化、②適正な着生盤の材料と構造の決定、③設計のための運動シミュレーション手法の検証（または確立）が問題として残された。

引用文献

- 1) 川俣 茂、1994：磯根漁場造成における物理的攪乱の重要性。水産工学、31(2)、pp.103-110