

藻留め施設の海藻捕捉効果に関する研究

水産工学研究所 川俣 茂・萩野 静也・山本 正昭

1. はじめに

大形海藻はアワビ，ウニの重要な餌料であるが，流れ藻となって漁場から流出する量が非常に多い。このため，磯根漁場造成では流れ藻をアワビ，ウニの餌料として有効に利用するため流れ藻の滞留を目的とした施設，すなわち藻留め施設（藻留め工）が設置されてきた。藻留め施設としては，異形ブロックや石材を堤状に並べた施設，角型魚礁ブロックに格子をはめ込んだものなど，様々な形状の施設が試行的に設置されていた。しかし，その後の調査により藻留め施設の周辺で流れ藻の滞留が認められないことが多く，その効果に疑問が持たれるようになってきていた。

一方，著者らは藻留め施設の効果について主として室内模型実験によって昭和60年度より系統的な研究を行い，様々な条件下における藻留め施設の適用限界を明らかにしてきた。その結果によると，従来施工されてきた施設では流れ藻の滞留はほとんど期待できないことが予測されていた。

このような状況の中で本研究では，①従来の研究に引き続き，実験的に藻留め施設の適用限界を解明すること，②大規模増殖場造成事業により藻留め施設が設置された事例として宮城県歌津地区を取り上げ，その藻留め施設の適用限界を解明するとともに施設の改善方法を検討すること，③従来の知見から考え得る最適な構造の藻留め施設を開発することを目的とした。

2. 流れ藻の移動限界流速と沈降速度

流れ藻の移動限界流速（流れ藻が移動し始めるときの流速）と沈降速度は流れ藻の挙動を推定するために重要なパラメータであり，実物の海藻を用いてその測定を行った。

1) 流れ藻の移動限界流速

幅60cm, 水深60cmの通水断面積の回流水槽を用いて, 観測部の386cm の区間にわたり礫(平均寸法: 長径49.2mm×短径36.0mm×厚20.1mm, 平均重量67.95g)を敷詰め, 1990年9月13日と11月15日に銚子の海岸で採取した茎部を有するアラメ藻体の移動限界流速を調べ, 図1に示す結果を得た。図の縦軸の移動限界流速 U_c は礫面から高さ10cmにおける平均流速で表した値である。 U_c は流れに対する流れ藻の向きに依存するが, ここでは流れ藻が最も動き難い向き, すなわち茎部が上流へ, 側葉が下流へ向くように置かれたときの値である。概ね水中重量 $\Delta W < 50$ では $U_c \approx 30$ cm/s, $\Delta W > 50$ では $U_c \approx 20$ cm/sとなった。 ΔW の増加に伴い U_c が減少した理由は, 大きい藻体では側葉の遮蔽面積が大きくなり, 摩擦抵抗に対して流体抵抗が相対的に増加したためと考えられる。

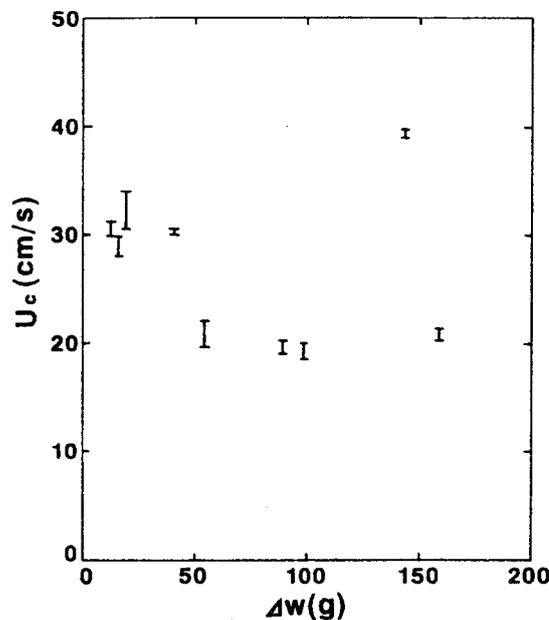


図1 茎部を有するアラメ藻体の移動限界流速

2) 沈降速度

平成3年11月13日, 宮城県歌津町泊浜沖でアラメ成体を基部から切断したもの(全藻体)と側葉の付け根で切断したもの(側葉)を海中で自由落下させ, 5m沈降するのに要する時間を測定した。その結果, 全藻体及び側葉の沈降速度は, それぞれ 8.49 ± 1.65 cm/s ($n=10$)及び 5.61 ± 2.48 cm/s ($n=21$)であった。これらの値を比較すると, 大形の流れ藻は小形のものより巻き上げられ難いことが予測される。

3. 波動下における衝立状藻留め施設の適用限界

従来、藻留め施設としては主にコンクリートブロックなど流れを遮蔽する構造物が設置されてきた。このような施設が波の場に設置されると、施設周辺は強い渦（乱れ）の領域となり、流れ藻は容易に巻き上げられて逸散することが分かっている。藻留め施設の設計では流れ藻が巻き上げられずに留まっている範囲を推定する必要がある。ここでは波の場に衝立状の藻留め施設が置かれている場合を想定し、その適用限界として流れ藻が巻き上げられて施設を飛び越える限界（以下、飛び越え限界という）を水理模型実験によって解明した。

1) 実験装置と実験方法

本研究では現地の1/10の縮尺を想定して模型実験を行った。実験に用いた幅1m，全長100m，高さ2mの造波水槽の縦断面図を図2に示す。図中の勾配1/30のモルタル製斜面には長さ2m，幅1m，厚さ5mmの亚克力樹脂板を張り付けて試験区間を設けた。この試験区間の中央の横断方向には藻留め施設の模型として厚さ20mm，長さ100cm，高さ（=65，80，100，120，150mm）の亚克力樹脂製の衝立を底面に垂直に固定した。また試験区間両端の横断面には高さ40cm，目

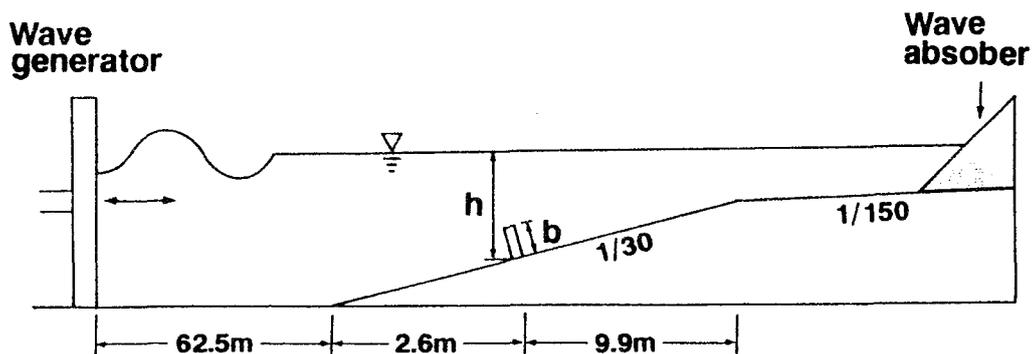


図2 実験に用いた造波水槽の縦断面図

表1 実験に用いた疑似海藻

模型	材料	寸法 (mm)	水中重量 ΔW (mg)	沈降速度 w (cm/s)
M1	セロハン紙	10×100	5.7	1.09±0.17
M2	第2原図用紙	10×100	27.4	2.52±0.67
M3	トレス方眼紙	10×100	13.6	1.75±0.37
M4	ビニールテープ	10×100	48.7	2.34±0.33

合8mm×8mmのネットを底面から張り、後述する疑似海藻の散逸を防止するようにした。

流れ藻の模型として用いた疑似海藻を表1に記す。沈降速度 w は各疑似海藻について計10個を1個ずつ静水中で無造作に放ち、50cm沈降するときの平均鉛直速度として求めた。なお、これらの疑似海藻は素材を所定の寸法に裁断しただけでは平らすぎるため底面に付着して非常に動き難い。このようなことは現場ではあり得ない現象であり、実際の挙動に近づけるため手で揉んでしわをつけたものを実験に供した。

この実験では衝立の設置水深 h (=40, 60, 80cm)と造波周期 T (=2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0s)を所定の値として、疑似海藻100個を衝立の沖側または岸側の近くになるべく重ならないように一様に広げて置き、規則波を5分間与えたときに衝立を飛び越えた疑似海藻の数を数えた。この操作は、造波板のストロークを40mmから5mm単位で減少させて、疑似海藻が衝立を飛び越えなくなるまで行った。

また波動については、衝立がない状態で、衝立を固定する断面で底面から高さ2.0cmでの流速を電磁流速計で測定し、またその断面から岸沖両側へ各々60cm離れた2点で水位変動を容量式波高計で測定した。これらの測定は、造波機の駆動後、水槽内の波動が定常状態に達してから同時に始め、各計測機器からの出力電圧をパーソナルコンピュータを用いて0.1s毎に1024回AD変換したデータを記録し、キャリブレーションを行って解析した。

2) 本実験における波動の特性

本実験では規則波が入射し、反射波がない状態を想定としたが、通常 of 海岸構造物に関して行う実験より波形勾配が小さかったため、反射波の影響が問題となった。また本実験では底面流速とともに水位変動も測定したが、底面流速は水位変動から理論的に求められる。そこでここではどの程度の反射波が存在し、また底面流速がどの程度の精度で水位変動から推定できるか検討してみた。

いま造波後十分な時間が経過して波動が安定したとすると、水槽内の水位変動は入射波と反射波の合成波形として、

$$\eta = a_I \cos(kx - \sigma t + \epsilon_I) + a_R \cos(kx + \sigma t + \epsilon_R) \quad \dots\dots\dots (1)$$

で表される。ここに、 a_I 、 a_H は入・反射波の振幅、 ϵ_I 、 ϵ_H は入・反射

波の位相角, $k = 2\pi/L$ (L は波長), $\sigma = 2\pi/T$ であり, x は造波板からブロックへ向かう方向を正とする水平座標である。

図3は全実験ケースについて合田ら(1976)の方法により2点の水位変動をフーリエ分析して入・反射波を分離した結果である。反射率 a_R/a_I は入射波の換算沖波波形勾配 H_{10}/L_0 または h の増加に伴い増加したが, ほぼ0.5以下に抑えられていたことが分かる。

また水位変動が式(1)で表されるとき, 微小振幅波理論より求められる底面

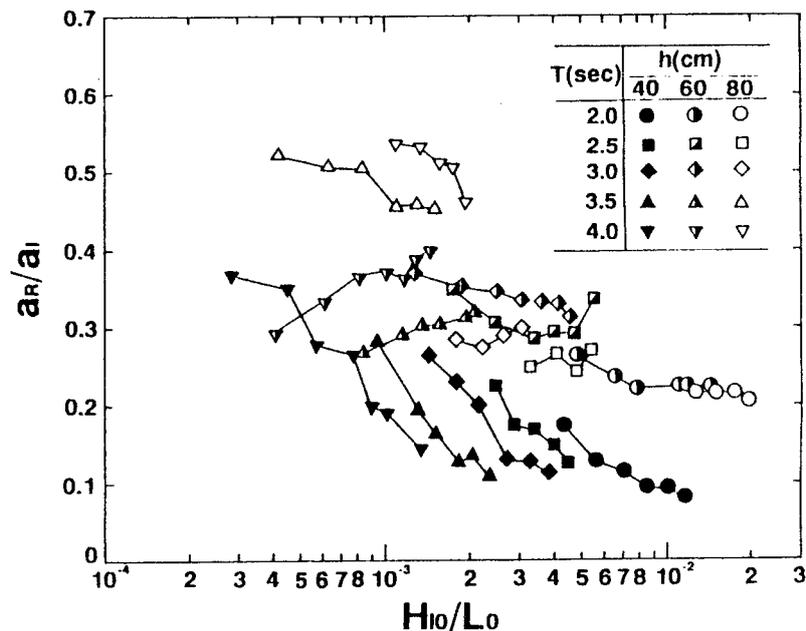


図3 波の反射率の変化

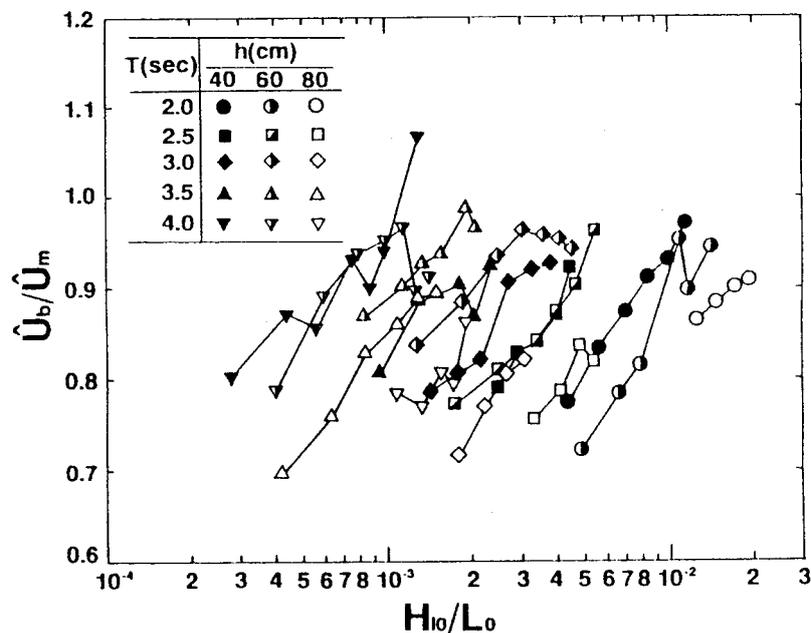


図4 底面波動流速全振幅の計算値と測定値の比較

波動流速全振幅 \hat{U}_b は、

$$\hat{U}_b = \frac{2\sqrt{a_I^2 + a_R^2 - 2a_I a_R \cos(2kx + \epsilon_I + \epsilon_R)} \sigma}{\sinh kh} \dots\dots\dots (2)$$

となる。底面波動流速全振幅について水位変動から式(2)を用いて計算される \hat{U}_b と測定された流速変動全振幅の平均 \hat{U}_m との比を図4に示す。水位変動からの推定は概ね良好であったが、計算値が全体的に測定値より少し小さかった。これは、実際の水面波形がフーリエ分析から得られる造波周期の成分波よりも少し大きかったためである。従って、より詳しく水位変動を解析することにより推定は良くなると考えられるが、以後の議論では簡単に底面波動流速全振幅として測定値 \hat{U}_m を用いた。

3) 流れ藻の挙動

規則波が入射する海底では、流速は岸沖方向に対称に変動するが、1周期にわたり平均すると0となる。しかし砕波点以深の海底を流れにより転動、滑動する物体は、水中重量の底面方向成分が無視できれば、必ず岸方向へ移動する。これは次のような理由による。すなわち、岸向きの流れの時には物体は流体抵抗を受けて波を追うように岸方向へ移動する。そのため、少し長く岸向きの流れを受ける。これに対して、沖向きの流れの時には物体は波の進行と逆向きに動くため、沖向きの流れを受ける時間が少し短くなる。これらの結果、物体は振動しながら少しずつ岸方向へ移動することになる。本実験においても、波動下では衝立がない状態では疑似海藻は振動しながら岸向きに移動するのが観察された。

しかし衝立がある場合には疑似海藻の挙動はかなり異なる。波動が小さい場合、衝立の沖側から接近してきた疑似海藻は衝立の遮蔽効果によりある範囲以内には接近しなくなり、また衝立の岸側近くにある疑似海藻は岸向きへ移動しなくなる。ところが波動がある程度大きくなると、衝立の沖側の疑似海藻は衝立の近くに移動し、衝立から発生する渦によって巻き上げられ、また衝立の岸側近くの疑似海藻も同様に衝立から発生する渦によって巻き上げられる。こうして巻き上げられた疑似海藻は岸沖両側へ分散するが、その大半は衝立を越える傾向にあった。

4) 飛び越え限界の指標

流れ藻の飛び越え限界は次のようないくつかの無次元量の関数で表されると考えられる。

$$f = f \left(\frac{A \hat{\tau}}{\Delta W}, \frac{\hat{U}_m}{w}, \frac{b}{L}, \frac{a_m}{b}, \frac{b}{h}, \frac{\hat{U}_m l}{\nu} \right) \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 ΔW 、 A 及び l は流れ藻の水中重量、面積及び長さ、 a_m は底面近くの水粒子軌道全振幅、 ν は水の動粘性係数、 $\hat{\tau}$ は底面せん断応力の振幅で、本実験の場合、滑面層流状態であったので、微小振幅波を仮定すると、

$$\hat{\tau} = \sqrt{\frac{\pi \nu}{2T}} \rho \hat{U}_m \dots\dots\dots (4)$$

で求められる。ここに、 ρ は水の密度である。式(3)の無次元量 $A \hat{\tau} / \Delta W$ は流れ藻の底面での動き易さを表し、また \hat{U}_m / w は流れ藻の巻き上げられ易さを表すと考えられる。

図5は、疑似海藻4種類の各々について、 $h = 60\text{cm}$ 、 $b = 10.0\text{cm}$ の条件下

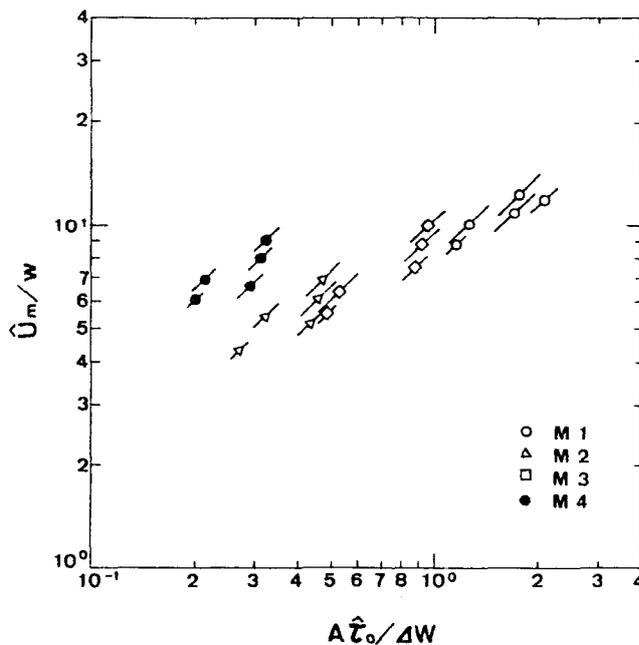


図5 飛び越え限界の $A \hat{\tau} / \Delta W$ と \hat{U}_m / w との関係

で衝立の岸側に置かれた場合に得られた飛び越え限界を示す。図中の縦線の範囲は、ある周期 T で、疑似海藻が衝立を飛び越えた条件のうち造波板のストロ

ークが最小であった状態と、衝立を飛び越えなかった条件のうちストロークが最大であった状態の範囲を示す。 h と b をともに一定としたので、飛び越え限界の指標としてはばらつきが小さいものほどよいと言える。図より、ばらつきの範囲は $A\hat{e}/\Delta W \approx 2\sim 20$, $\hat{U}_m/w \approx 4\sim 12$ であり、後者の方が小さい。さらに飛び越え限界の両無次元量はほぼ単調増加関係にあるので、類似の情報しか与えない。従って飛び越え限界の指標としては \hat{U}_m/w をとれば充分である。

このような相関図による検討を別の無次元量についても行った結果、飛び越え限界の推定には \hat{U}_m/w の次に b/L が有効な無次元量になることが分かった。図6はそのことを示すためのもので、疑似海藻M1を用いて行った実験結果である。他と少しかけ離れている実験値がいくつかあるが、飛び越え限界の \hat{U}_m/w が b/L の増加に伴い増加することがよく表わされている。

図6の横軸を対数として実験値をプロットし直すと、ほぼ直線関係が得られることから、飛び越え限界を表す回帰式が求められる。図中の曲線Aはその回

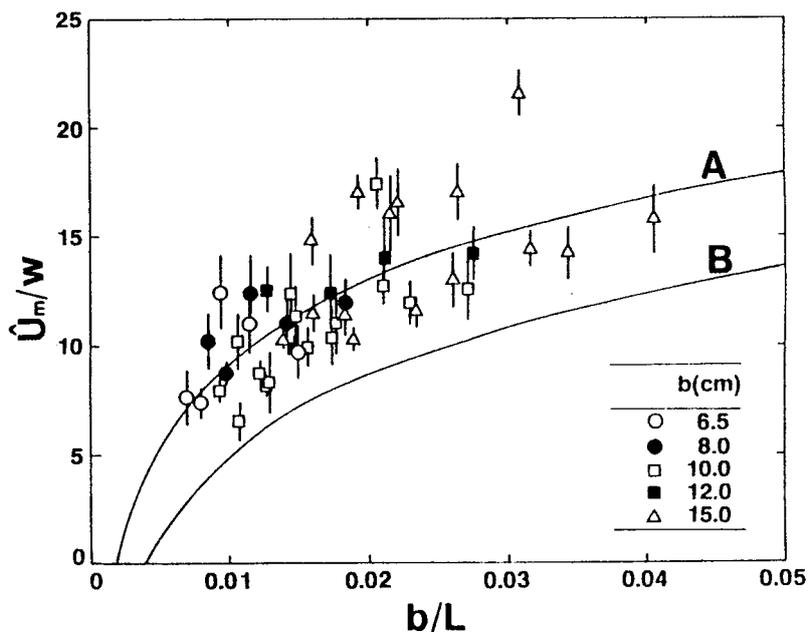


図6 飛び越え限界の \hat{U}_m/w と b/L との関係

帰式

$$\frac{\hat{U}_m}{w} = 34.4 + 5.44 \log \frac{b}{L} \dots\dots\dots (5)$$

を，また曲線Bは曲線Aの縦軸の切片に関する下側95%信頼限界

$$\frac{\hat{U}_m}{w} = 30.1 + 5.44 \log \frac{b}{L} \dots\dots\dots (6)$$

を表す。流れ藻が衝立の岸側にある場合，その条件が曲線Bの下側にあれば流れ藻は衝立を飛び越えることはないと推定される。

5) 流れ藻の飛び越えの岸沖差

$h = 60\text{cm}$ ， $b = 10.0\text{cm}$ として疑似海藻M1の飛び越え個数について調べた結果が図7である。図中の○印が実験条件を示し，その右側の分数の分子及び分母が各々疑似海藻を沖側及び岸側に置いた時の飛び越え個数である。図中の破線で示すように，飛び越え限界の \hat{U}_m/w は明らかに流れ藻が岸側にあるときよりも沖側にあるときの方が大きい。このことは前述した流れ藻の岸向きへの移動と同様に説明できる。すなわち図8 aのように波の峰が衝立を通過する

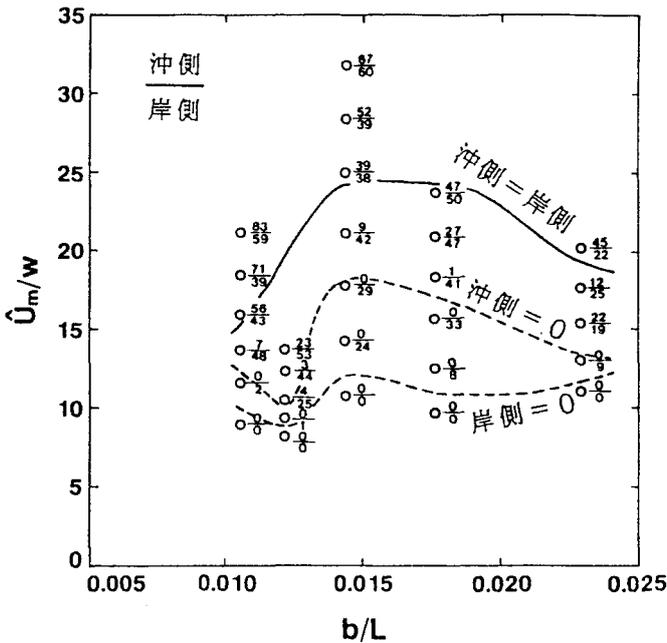


図7 疑似海藻の飛び越え個数の岸沖差 ($h = 60\text{cm}$ ， $b = 10.0\text{cm}$)

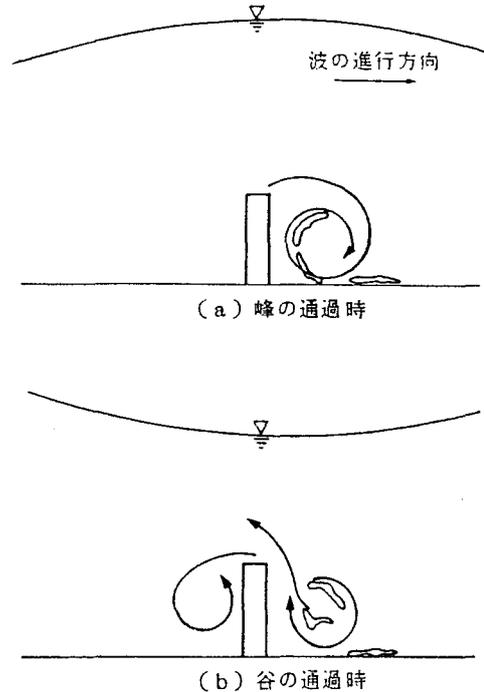


図8 流れ藻の飛び越え機構の説明図

ときには，衝立の先端で剝離した流れ（剝離流）が岸向きに波を追うように移動するため，衝立の岸側背後に比較的強い渦を形成して，底面に滞留していた

流れ藻を巻き上げる。このようにして発生した渦は、流れの向きが沖に変わった直後でも、図8 bのように残って流れ藻を巻き上げ続ける。そして流れ藻が完全に着底しないうちに波の谷が衝立を通過すると、沖向きの上昇する流れによって流れ藻はさらに高く巻き上げられて衝立を越えることになる。一方、沖側の流れ藻を巻き上げる渦は、図8 bのように波の谷が衝立を通過するときに発生する剝離流によって形成されるが、この剝離流は波の谷と反対方向に動くため、発達し難く、衝立の沖側に形成される渦は岸側ほど強くない。これらのことから、岸側の流れ藻は相対的に巻き上げられて衝立を飛び越え易いことになる。

また波高が飛び越え限界を越えて大きくなると、図7の実線で示すように岸側から沖側へ飛び越える数よりも沖側から岸側へ飛び越える数の方が多くなった。これは、入射波高の増加に伴い流れ藻の岸への移動が顕著になるためと考えられる。このことから、激浪時には流れ藻が岸へ打ち寄せられることが容易に予想される。

4. 歌津地区における藻留め施設の効果調査

昭和58～63年度、宮城県歌津地区大規模増殖場に設置された藻留め施設は、図9に示すような角型魚礁ブロックの二側面にFRPの格子をはめ込んだものが2列併設されたものである。各ブロックは、格子がこの施設全体の外周に面するように向けられ、その内部は長さ方向にブロックごとに格子で仕切られるようになっている。このような構造から推察すると、この藻留め施設は漂流してきた流れ藻をその外壁で止める機能と、コンクリート面に着生する海藻から落ちた葉片を内部に止めておく機能を有すると考えられる。ここでは後者の機能について現場調査を実施し、施設の適用限界と改善方法を検討した。

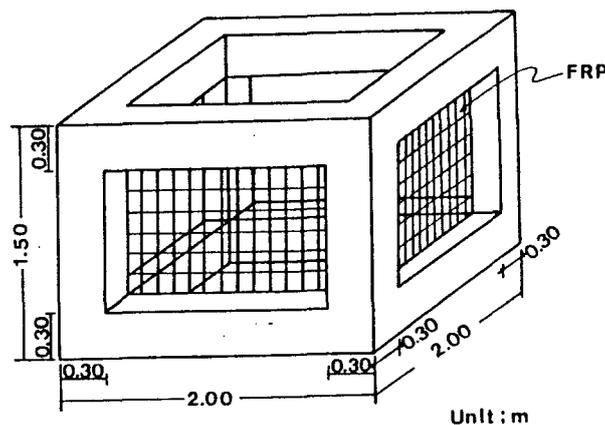


図9 歌津地区の藻留め施設

1) 調査方法

調査は歌津地区工区No.6-2（通称「杉の浜」）で実施した（図10）。当地区は南に開口した湾状地形の東側に位置し，前述した藻留め施設が全長105mにわたり設置されている。この施設では流れ藻の滞留を観察されなかったので，海藻を施設の中に投入してその飛び出しと流速との関係について，陸上から海底ケーブルを通じて観測できる水中テレビと超音波流速計を用いて調べた。観測区は藻留め施設のほぼ中央の，格子で仕切られた1区画に設けた。

この実験は1991年10月24日に実施し，その周辺に着生していたアラメの成体

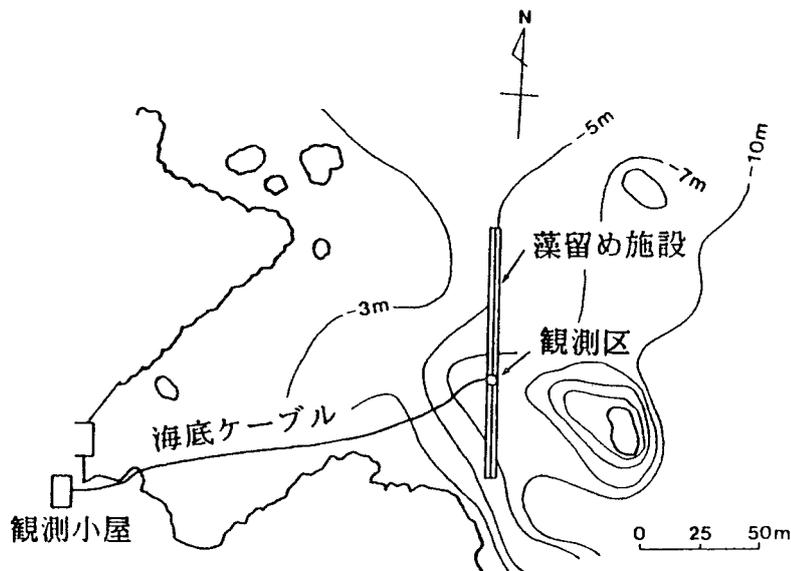


図10 歌津地区における調査地区周辺の地形図

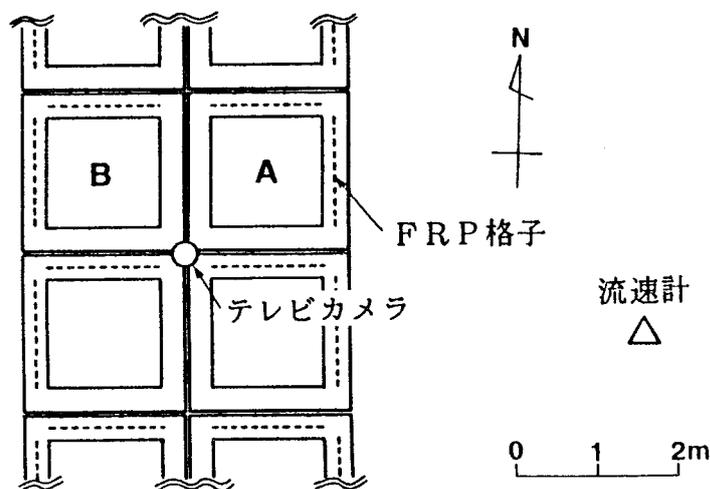


図11 観測区と観測機器の配置図

を採取して、茎部の下部で切断したもの（全藻体）5本，分岐した茎部の先端で二分したもの（半藻体）5本及び側葉の基部で切断したもの（側葉）2.5個体を1組として2組用意し，11時40分に図11に示すAとBに1組ずつ投入した。投入後，アラメの藻体がすべて流出するまで陸上の観察小屋でその挙動と流速を観測した。流速の計測は10分毎に約8分32秒間（0.5s間隔に1024回サンプリング）行った。

また気仙沼水試が1991年10月1日11～12時に同施設の実験区から南に3区画（6m）隔てた3区画（6ブロック）にアラメの全藻体を各ブロック20本ずつ計120本投入し，その後の残留個数をスキューバ潜水で調べた。その期間の流速については1時間毎に約8分32秒間（0.5s間隔に1024回サンプリング）計測を行った。

なお海藻の投入実験は台風の襲来に合わせて1991年9月19日にも実施したが，陸から濁水の影響で透明度が極めて低く，海藻を確認できなかった。

2) 調査結果

アラメの飛び出し実験では投入後約8時間で全ての藻体が流出した。その間の主波向の波動流速全振幅（流速の変動成分の振幅を大きい方から順に並べ，その上位1/3の平均） $\hat{U}_{1/3}$ の時間変化とその流出状況を図12に示す。飛び出し限界の $\hat{U}_{1/3}$ は側葉，半藻体，全藻体の順に大きくなる傾向が見られ，平均的には側葉で24cm/s程度，全藻体で35cm/s程度であったと読み取れる。なお，この期間における有義波の周期は15～17sであった。

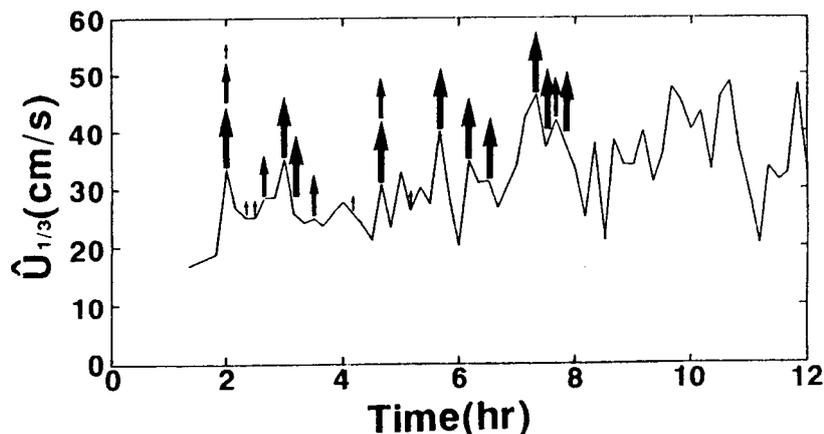


図12 アラメ藻体投入時からの $\hat{U}_{1/3}$ の時間変化とその流出状況
大，中，小の矢印は各々全藻体，半藻体，側葉の流出を示す。

また気仙沼水試が実施したアラメ藻体投入実験では、投入した 120本のうち約48時間後に残留していたものは、格子に突き刺さっていた 2本だけであった。図13はこの期間における $\hat{U}_{1/3}$ の時間変化を示す。明らかに1991年10月 3日の調査前に $\hat{U}_{1/3}$ がアラメの全藻体の飛び出し限界をかなり越えており、アラメ藻体がほとんど流出した理由を理解できる。

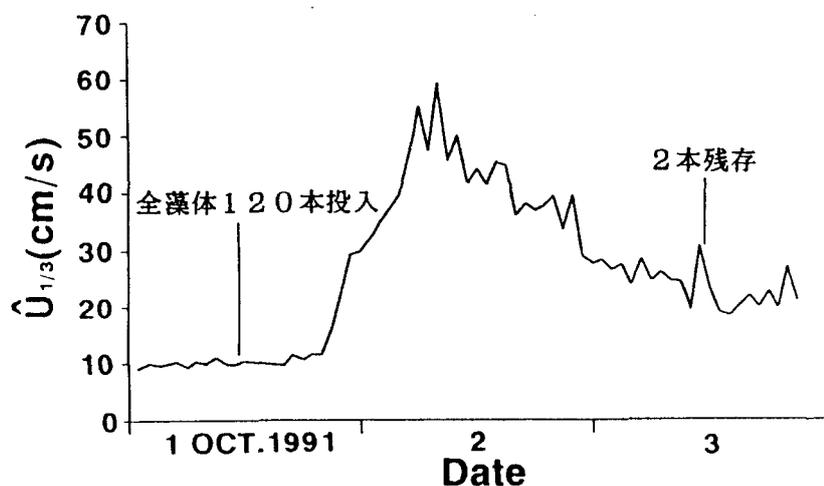


図13 アラメ藻体投入実験期間における $\hat{U}_{1/3}$ の時間変化

3) 考察

アラメの全藻体と側葉の沈降速度 w は各々 8.49cm/s と 5.61cm/s であるので、この藻留め施設の適用限界の $\hat{U}_{1/3}/w$ は 4.1 と 4.3 とほぼ同じになる。このことは無次元量 $\hat{U}_{1/3}/w$ が海藻の種類に依存しない普遍的な値であるという考えを支持している。歌津地区の藻留め施設の構造は水理模型実験で対象とした衝立と異なるが、高さ $b = 1.5\text{m}$ の衝立と仮定して実験と現場の適用限界を比較してみる。現場実験では概ね波の周期 $T = 16\text{s}$ 、水深 $h = 7\text{m}$ であったので、微小振幅波理論より波長 $L = 130\text{m}$ と推算される。従って実験式(5)及び(6)より算定される適用限界の平均と下側95%信頼限界の $\hat{U}_{1/3}/w$ は各々 10.1 と 5.8 になり、現場実験で得られた値は実験式からの推定値より明らかに小さい。この原因として、歌津地区の藻留め施設は格子を用いているが、流れを遮蔽するコンクリートの面積が大きく、施設の中に複雑な流れを発生し易い構造となっていることが上げられる。衝立の場合、底面には単純な鉛直渦の影響しか及ばない

ので、推定値の方が大きくなったとみられる。また現場の波が不規則波であったのに対して、水理実験では規則波で実験を行っていることも多少関係していると考えられる。しかし以上のような条件の相違があったにもかかわらず、実験式(5)は2倍程度の誤差に留まったことから、おおよその目安として流れを遮蔽する藻留め施設の適用限界算定式として式(5)を用いることができよう。

次に歌津地区における藻留め施設の効果と改善方法について検討してみる。調査を実施したNo.6-2工区では側葉の飛び出し限界の $\hat{U}_{1/3}$ は約24cm/sであったが、これを波高に換算すると設置水深7mで約22cmとなる。波高がこの値より大きい波は一般にかなりの頻度で発生するので、施設の中に落ちたアラメの側葉を滞留させるという機能はほとんど期待できない。従って2列配列のブロックを1列にして全長を大きくして、この施設のもう一つの考えうる機能、すなわち漂流してきた流れ藻をその外壁で止める機能を高めるようにした方がよいと考えられる。この工区では図10に示すように入り江の入口のほぼ半分を遮断しているので、ブロックの配列を1列とすることによって入り江の入口を全て遮断することができる。すると、前述したように大波浪時には流れ藻は岸へ移動し、流れ藻が沖へ流出するのは波高が小さいときになるので藻留め施設により流れ藻を入り江内に長時間滞留させることができると考えられる。

5. 梯形藻留め装置の開発

流れを遮蔽する構造の藻留め施設を波が支配的な流れの場に設置した場合、剝離渦の発生により容易に巻き上げられるため、流れ藻の滞留はあまり期待できないことが明かとなった。このことから波の場では流動をほとんど妨げないスクリーン型が有効であるといえる。ここでは最初にスクリーン型藻留め施設について現場実験を行い、施設の周辺における流れ藻の挙動を調べ、次にそれに基づいて考え得る最適な藻留め施設として梯形藻留め装置を開発し、その実証実験を行った。

1) スクリーン型藻留め施設の現場実験

(1) 方法

1989年に宮城県江ノ島荒やぶ浜(図17参照)において、東北水研との共同に

に静穏であったため非常に緩かであったが、ビデオ解析により以下のことが推察された。

- ① 流れ藻は格子バーに絡付かず，流れ藻が塊状となってスクリーン面に押し付けられるようにして滞留する。このため，塊状に滞留した流れ藻は平均流の反転に伴い容易にスクリーンから離れる。従って，スクリーンを置いただけでは接近したり離れたりしている間に拡散して，スクリーンの脇から流出する可能性が高い。
- ② 有義波高は非常に小さかったにもかかわらず，流れ藻がある量堆積するとスクリーンを飛び越える。

2) 梯形藻留め装置の開発

(1) 従来の知見と梯形藻留め装置の基本構造

藻留め施設に関する従来の知見を整理すると，以下の3つことがいえる。

- ① 海藻群落が形成される岩礁域では，碎波や海底の凹凸で発生する擾乱が激しく，流れ藻が巻き上げられないようにすることは施工上ほとんど不可能である。従って藻留め施設の設置場所は少なくとも碎波領域より沖側の平坦な海底とする必要がある。
- ② 一般に流れ藻はあらゆる方向に動くので，藻留め施設はある領域を取り囲む形状・配置とする必要がある。
- ③ 波動の方向に遮蔽物を設けると，渦が発生するため流れ藻は巻き上げられ易い。従って波動を妨げない構造・配置とする方が効果的である。

①と②より効果的な施設として碎波領域の沖にある海藻群落を取り囲むようなものが考えられるかもしれない。しかし碎波領域以深では大形海藻の生育量が少なくなることが，特に餌料海藻が不足する海域に多いので，そのような施設の適地は限られている。藻留め施設が小規模でも効果的であるためには，通過する流れ藻が高い効率で捕捉され，流出し難いものでなければならない。

以上のような考察から著者が考案したのが図16に示すような構造を基本とする装置である。本装置はその側方断面形状が梯形（台形）であることから梯形藻留め装置と呼んでいる。梯形藻留め装置は基本的には1対の格子部及びその両脇に配置される脚部と連結側壁から構成される。図では脚部と連結側壁を各

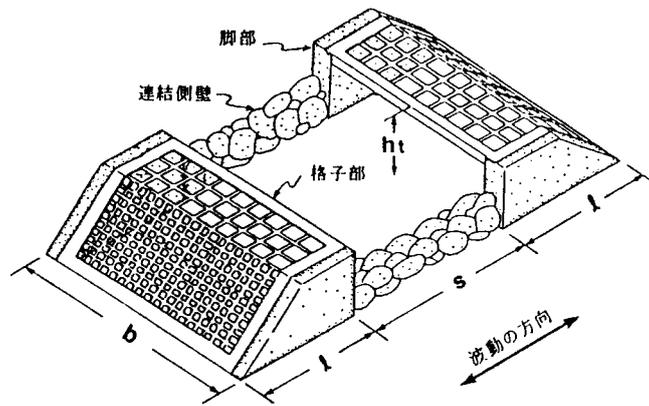


図16 梯形藻留め装置の基本構造

タブロックと石積みとしたが、力学的安定が確保されれば格子として格子部と一体としてもよい。また設置方向は連結側壁が波動の方向に平行になるようにする。

いま梯形藻留め装置が碎波点以深で流れ藻が運ばれてくる平坦な海底に連結側壁が波向に平行になるように設置されているとする。また沿岸方向の流速は比較的小さく流れ藻は主として振動しながら岸沖方向に移動するものとする。波動流速または平均流速がある程度大きくなると、岸沖から装置に漂着した流れ藻はそのまま移動して格子部を乗り越えて装置内に取り込まれる。このことは前出のスクリーン型の実験から推察される。このとき梯形藻留め装置は岸沖方向の流動を妨げないため、流れ藻がそのまま移動して装置内に取り込まれ易く、また前述した衝立のように波動の遮蔽によって強い渦が発生し流れ藻が巻き上げられて流出することはない。また装置内の流れ藻が波動によって動揺することはあるが、巻き上げられようとする流れ藻を格子部の上面と斜面が抑えるとともに、連結側壁が流れ藻の沿岸方向への散らばりを防ぐ。このような理由で梯形藻留め装置は流れ藻が流入し易く流出し難い構造となっている。更に安定所要重量が通常の漁場施設に比べて小さく、施工費を軽減できるという特長がある。

以上の説明から分かるように本装置の格子部斜面の勾配が小さい程、また両格子部間距離 s と格子部の奥行 l が大きい程効果的である。しかし格子部の高さ h_t については小さくすると取り込みは良くなるが滞留は悪くなるので、最適値が存在するはずである。

(2) 梯形藻留め装置の設計・施工に関する室内模型実験

現地実験の実施に際して梯形藻留め装置の設計と施工について大まかな目安を得るため、簡単な室内模型実験を実施した。

実験では縮尺1/10を想定して全長100m、高さ2m、幅1mの造波水槽を用いた。造波水槽には勾配1/30のモルタル製傾斜面が設けられ、その傾斜面上の水深約60cmの位置に梯形藻留め装置の縮尺模型 ($h_t = 30\text{mm}$, $l = 35\text{mm}$ 及び 50mm , 幅 $b = 200\text{mm}$, 斜面勾配: 1/2及び1/1, 目合: $6\text{mm} \times 6\text{mm}$ 及び $10\text{mm} \times 10\text{mm}$) を設置した。実験では流れ藻の縮尺模型として表1の疑似海藻M1 20~30個を梯形藻留め装置の模型の造波機側(沖側)近傍に放置した後、波を起こしてその挙動を調べた。

実験により推察されたことを以下に上げる。

- ① 梯形藻留め装置の周辺の底層に適当な乱れがあれば、格子部の斜面勾配は1/1程度でも流れ藻の取り込みに大差はない：最初、疑似海藻は装置に衝突を繰り返すだけで、格子部を乗り越えるものはほとんどなかった。この結果は格子部斜面の勾配を変えても同様であった。そこで底面が平坦過ぎて乱れないことが原因と考えて、梯形藻留め装置の沖側に長径2~3cm程度の玉石を疎らに置いて乱れを発生させると、疑似海藻は多少浮遊して容易に斜面を乗り越えるようになった。ただし実際の海底にはこの程度の乱れを発生させる粗度が存在し、浮遊を誘発するものは必要ないと考えられる。
- ② 側方からの逸散を防止するため、連結側壁を隙間がないように設置しなければならない：実験では格子部の模型をはさむように直方体のブロックを置いたが、本実験のように完全な二次元流に近い場合でもブロックを除くと疑似海藻は急速に両脇から流出した。
- ③ 格子部には少なくとも流れ藻の長さ程度以上の奥行が必要である：装置内の流れ藻の飛び出しは突然装置より高く巻き上げられて起こるのではなく、流れ藻の立ち上がり次第に高くなって起こる。従ってある程度の奥行があれば浮遊し始めた流れ藻は格子部上面の端に衝突した後、流れ藻のうち格子部より下の部分が更に奥に移動して上の部分を引っ張るため、立ち上がった部分を下へ引き戻すことができる。
- ④ 梯形藻留め装置の高さは流れ藻の浮遊する高さの上限より少し低くする：

これは流れ藻が入り易く出難くするためである。その高さは底面の粗度と流れの状態に依存すると考えられるが、玉石を置いた本実験では現地換算で50～60cm程度であった。

(3) 梯形藻留め装置の現場実験

A. 実験方法

現地実験は1990年 7月～11月，前出のスクリーン型と同様に東北水研（担当：菊池，浅野，川村）との共同により宮城県江ノ島荒やぶ浜で実施した。装置には表2に記す鋼製格子部6基と長さ60cm×高さ40cm×幅40cmのコンクリートブロック10個を連結側壁として用いた。装置の設置場所は前出のスクリーン型とほぼ同じ位置で図17に示す小湾の入口の近くの水深約16m，岩盤の上に砂が薄く堆積する平坦な海底とした。図18に装置と観測機器の配置図を示す。この実験では歌津地区の現場調査で用いた水中テレビと超音波流速計のほかに超音波波高計を装置内と周辺に配置して陸上の監視塔から敷設した長さ約230mの海底ケーブルを通じてカメラの操作とデータ収集をできるようにした。流速と波高については，監視塔でAD変換器付データレコーダーにより1時間毎に0.5sの間隔で1024回または2048回のサンプリングを行い，1日1回パソコン通信で茨城県波崎町の水産工学研究所へ転送できるようにした。またテレビ観察については激浪の到来を予想して著者が現地に赴いて行い，ビデオ録画することとした。装置内に捕捉された流れ藻の湿重量は定期的に菊池らによって測定された。

B. 調査結果

流速と波高のデータの測得率は通信機器の故障により1/3程度となった。また波高については流れ藻等の漂流物が障害となり正常なデータをあまり多く得ることができなかった。以下には全般的な流況及び流れ藻の滞留量についての

表2 試作器の諸元

格子部 斜面：目合50mm×50mm，径3.2mm，勾配1/1
格子部上面・脚部：目合100mm×100mm，径4mm
$h_t = 50\text{cm}$ ， $l = 200\text{cm}$ ， $b = 200\text{cm}$

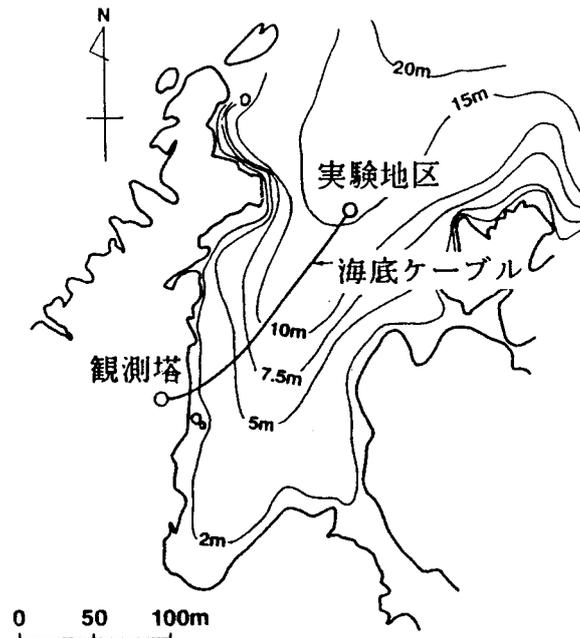


図17 江ノ島における実験地区周辺の地形図

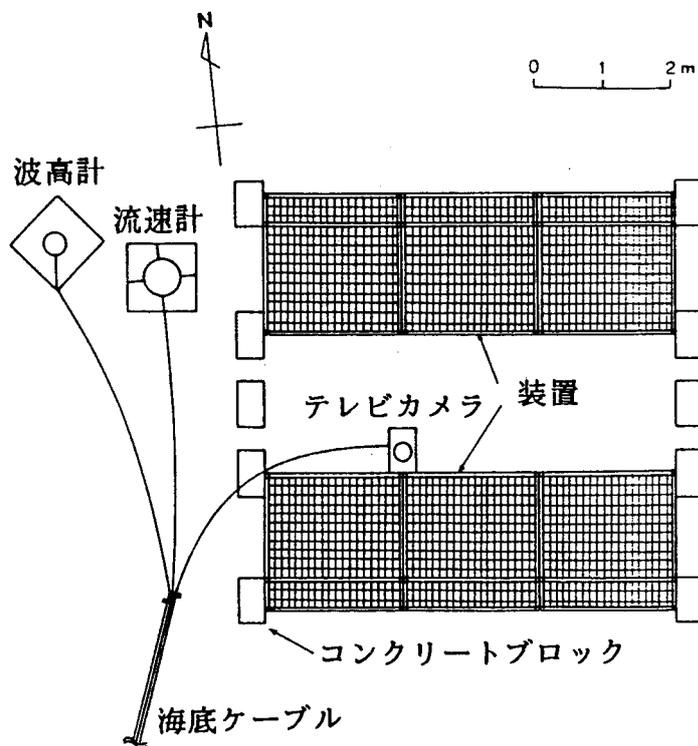


図18 装置と観測機器の配置図

調査結果とテレビ観察に成功した台風19号通過時の調査結果について述べる。

a) 全般的な流況と流れ藻の滞留状況

全期間における主波向と平均流速ベクトルを各々図19と図20に示す。主波向

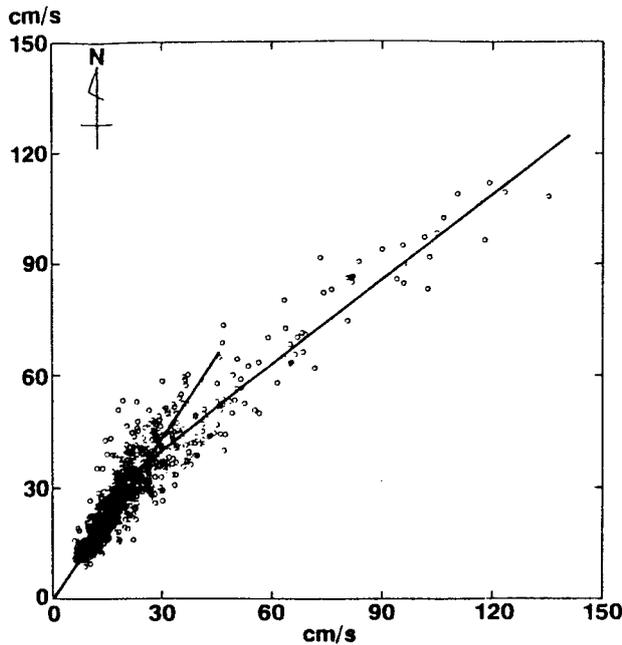


図19 主波向における底面波動流速全振幅の分布

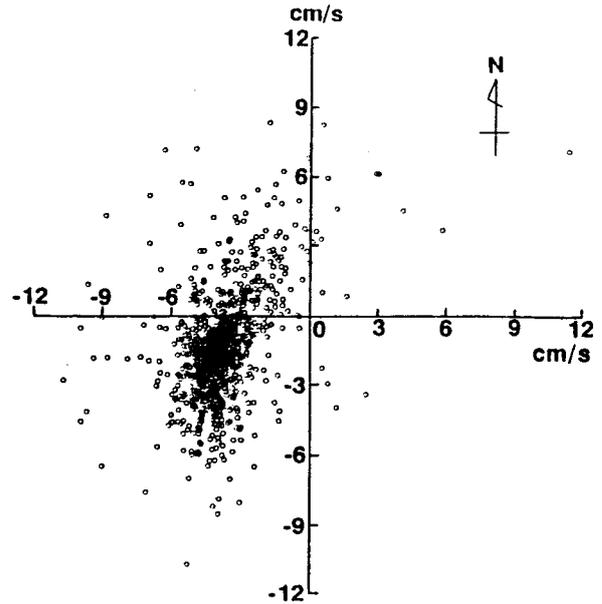


図20 平均流速ベクトルの分布

θ は次式により求めたものである。

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \frac{2\sum u'_i v'_i}{\sum (u'^2_i - v'^2_i)} \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 u' と v' は東方と北方の流速変動成分である。図19では原点から引いた線分の向きと距離が主波向とその方向の底面波動流速全振幅 $\hat{U}_{1/3}$ を表している。装置の設置は場所の制約から決められたが、理想的な設置方向より約 $30\sim 45^\circ$ 北向きになっていたことが分かる。特に大きい波高の波がより東向きから入射していたことは流れ藻の流出に強く作用したと推察される。また図20において約 4cm/s の西寄りの恒流が認められる。この恒流は波動流速と相関が見られないことから、波浪による流れではなく沿岸海流の影響と考えられる。ビデオ観察で明らかに流れ藻が装置内西側に寄せられる傾向が認められたが、このことがその原因であることが分かった。以上2つの不備と連結側壁を間断なく設置しなかった(図18参照)ことから捕捉された流れ藻は西側の連結側壁からかなりの量流出したものと考えられる。

しかし装置がこのように不利な条件で設置されたにもかかわらず、その流れ藻捕捉効果は極めて高かった。図21は単位幅当たりの流れ藻の滞留量を示した

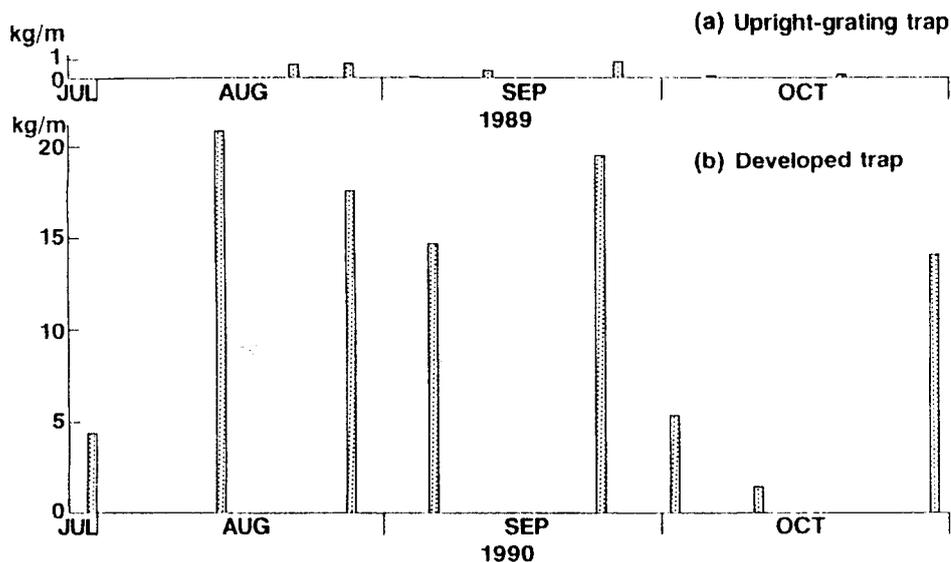


図21 流れ藻の滞留量の変化

ものである。図中 a の滞留量は前出のスクリーン型の値であり，菊池らが同様に流れ藻の滞留量の測定を行った結果を比較して示した。両年の海藻現存量はほぼ同程度であった（菊池らによる）ことを考え合わせると，梯形藻留め装置が調査期間を通じて流れ藻をかなり高い水準で維持していたことは明かである。

b) 台風第19号通過時の流れ藻の挙動と流況

解析ではビデオ画像を早送りで再生して見て平均的な流れ藻の動きを把握するよう努めた。しかし，水中カメラのシールドへの生物の付着や後述する海水の濁りにより，特に夜間の映像は不鮮明であったので，前後関係からの総合的な判断を加えた。

図22に主波向の底面波動流速全振幅 $\hat{U}_{1/3}$ の時間変化と流れ藻の挙動を示す。テレビ観察によると，9月20日午前中までは流れ藻の動揺は振幅50cm程度以下でほとんどなかったが，12時30分頃から浮遊砂による濁りが発生するとともに流れ藻の動揺が激しくなり，その振幅が平均で1m程度，最大で2mを越えるようになった。同日16時には濁りと動揺が更に激しくなり，小葉片の巻き上げが観察されるようになった。同日22時以前の流速データは得られなかったが，海藻の動揺の程度から判断して $\hat{U}_{1/3}$ は80cm/s程度であり，波動は9月21日0時頃に最大に達したと見られ，その後漸減した。

捕捉された流れ藻の主体は長さ1~3m程度の大形のマコンブであり，そのほ

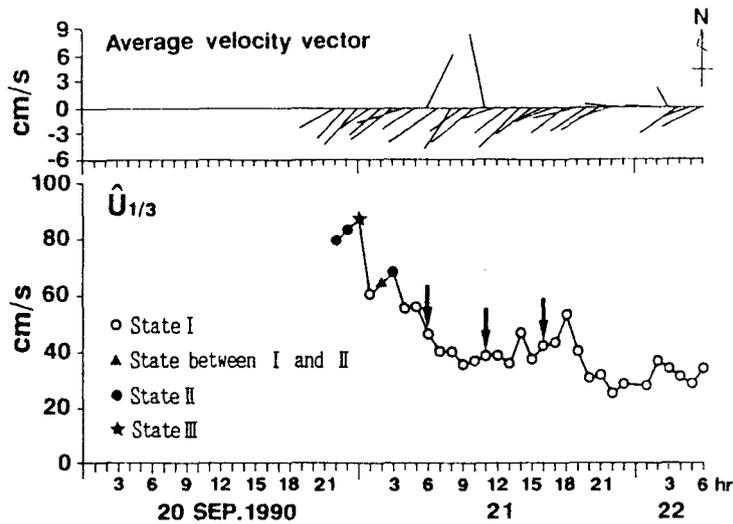


図22 台風第19号通過時の流れ藻の挙動と流れの変化

かに基部から剥がれたアラメと10~30cm程度の雑多な海藻の小葉片が目についた。流れ藻の滞留量は、9月21日3時30分頃までは局所的に（多くの場合、西側の格子部の間に）塊となって滞留する程度であったが、9月21日5時には流れ藻が層状に堆積していたことから、同日4時前後に大量の流れ藻が装置に流入したと推察された。また図22の矢印で示す時点には流れ藻が岸側から装置内に流入するのが観察された。特に10時52分から始まった流入では大形のマコンブの流れ藻が多量に流入するのがはっきりと撮らえられ、20分程度にわたり間欠的に流れ藻の流入が観察された。この沖向きの流れは図22の上図の平均流速ベクトルにもはっきりと現れている。ところでこの流れの起因として長周期波が考えられたが、水位と流速のスペクトルに低周波のピークが現れなかったことやビデオ観察でその後逆向きの流れが見られなかったことからその影響は考え難い。監視塔から撮影した水面の波立ちの状況から波浪に起因した離岸流と推察された。

次に $\hat{U}_{1/3}$ と捕捉された流れ藻の挙動との関係について見てみる。 $\hat{U}_{1/3}$ の増加に伴い、どの流れ藻も全く巻き上げられずに流出しない状態（状態Ⅰ）、小葉片のみが巻き上げられ流出する状態（状態Ⅱ）、基部から剝離した大形の流れ藻も流出する状態（状態Ⅲ）の順に遷移した。この場合、状態Ⅱの閾値は $\hat{U}_{1/3} \approx 66 \text{ cm/s}$ 、状態Ⅲの閾値は $\hat{U}_{1/3} \approx 86 \text{ cm/s}$ であったことが分かる。しか

しこれらの閾値は決定的なものではなく、水中テレビのアンカー用として設置したコンクリートブロック（図18参照）や捕捉された多量の流れ藻による乱れの発生が認められたことから最適な条件での値より低くなったと考えられる。比較的鮮明な映像が得られた9月20日昼午後における流れ藻の挙動をみると、滞留量が多くなければ流れ藻が振幅2m以上の激しい動きをしても格子部が効果的に流れ藻の巻き上げを抑制するのが認められた。またこのときの観察より装置の高さは50～60cm程度が妥当であることが確認された。

（4）考察

A．流れ藻の挙動

流れ藻の実態については、未だ体系的にまとめられるほどよく分かっていないが、従来と今回の調査で得られた知見を整理してみた。

まず発生については、季節的変化はあるが従来認識どおり激浪時に流れ藻の大部分が発生することほぼ間違いない。このとき発生した流れ藻は波が治まらない内では最初の方で述べたように岸方向へ移動する。ただし今回の調査ではその傾向が推察されたが、透明度が低く明白には分からなかった。また浅所では流れ藻が激しく巻き上げられることも推察された。激浪から波高が低下し始めると、岸近くに打ち寄せられた流れ藻はすぐに消失することから次第に沖側に落下していくはずであるが、その要因としてサーフビート、潮汐等による大きな振動と水中重量が考えられる。今回の調査では離岸流と思われる沖向きの流れが流れ藻の沖への輸送に関与していたが、ポケットビーチや湾では離岸流が重要な役割をしていると推察された。このことは、調査（静穏な時に実施）では流れ藻の大部分が装置内沖側に滞留していたと川村（私信）が指摘していたことにも裏付けられる。そして当地で観測されたように湾口まで到達した流れ藻は海流等の恒流により外洋へ運ばれていくものと考えられる。

B．梯形藻留め装置の設計・施工

今回の現地実験により梯形藻留め装置の有効性が実証されたが、以上のような流れ藻の挙動から考えても最初に述べた梯形藻留め装置の設計・施工方法は妥当なものであり、実用に耐え得るものといえる。しかし今後の利用でより大きな効果を期すため以下の事項を指摘しておく。

まず第一に対象生物の生息環境と装置の設置場所との関係に留意すべきであ

ろう。今回の実験では菊池らが装置内に不十分ながら着定基質としてコンクリートブロックを設置し，キタムラサキウニを放流したがすぐに逸散してしまった。キタムラサキウニの生息適地が未だによく分かっていないためにその理由は明確ではないが，隠れ場がない平坦な海底であったこと等がその要因として考えられる。動物の棲み場を装置内につくる場合，それによる流れ藻の巻き上げ・流出に考慮して格子部間距離 s を大きくとる必要があるだろう。

次に梯形藻留め装置の幅を大きくする場合，仕切を入れる必要がある。恒流により流れ藻が一箇所に寄せ集められると流出し易くなるので，仕切として連結側壁を適当な間隔で入れなければならない。

6. まとめ

本研究において，以下の事項が明かとなった。

- ① 礫面における茎部を有するアラメ藻体の移動限界流速は概ね $\Delta W < 50\text{g}$ のもので 30cm/s ， $\Delta W > 50\text{g}$ のもので 20cm/s であった。
- ② 成体アラメの沈降速度 w については茎部を有する藻体で 8.49cm/s ，側葉で 5.61cm/s であった。
- ③ 波動下における衝立状の藻留め施設の適用限界は，式(5)で与えられる。
- ④ 歌津地区の藻留め施設の機能の一つである施設の中に落ちた流れ藻を保持する機能の限界は， $\hat{U}_{1/3}/w = 4.1 \sim 4.3$ であり，この機能による効果は現場ではほとんどない。従って，2列並びにしている現在の配置を1列として施設の延長を大きくし，流れ藻の流出経路を広く遮断するようにする方がよい。
- ⑤ 図16に示すような梯形藻留め装置が開発され，室内実験と現場実験によってその設計法と流れ藻滞留効果が高いことが示された。

参 考 文 献

川俣茂・萩野静也（1987）：二次元一様流中における平板型流れ藻滞留施設に

- ついて，水産土木，23(2)，pp. 1-11.
- 川俣茂（1988）：餌料としての流出海藻とその滞留施設，月刊海洋科学，20，pp. 369-376.
- 川俣茂（1988）：スリット状の開口部を有するブロック型藻留め施設の開発研究，水工研報告，9，pp. 1-8.
- 川俣茂（1989）：藻留め施設，流出海藻トラップによる餌場作り，研究ジャーナル，12(2)，pp. 3-8.
- 川俣茂（1992）：波動下におけるブロック型藻留め工の適用限界，平成4年度日本水産工学会学術講演会論文集，pp. 13-16.
- 川俣茂（1992）：磯根漁場における流れ藻の挙動とその補足装置の開発，海岸工学論文集，39，pp. 891-895.
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池治（1976）：不規則波実験における入・反射波の分離推定法，港湾技研資料，248.