藻留め工の開発研究

水産工学研究所　川俣　茂・山本正昭・武内智行
共同調査機関：青森県漁業振興課
調査実施年度：平成４～７年度

緒言

波当たりの強いアワビ・ウニ漁場では、餌となる海藻のうち、利用されずに流れ藻として外洋へ流出する割合が高い。このため、従来より流れ藻を漁場内に滞留させるための施設（藻留め工）の造成が期待されてきた。しかし、これまでの一連の研究[3)-6)]によって、流れ藻はコンクリートブロック等の施設の部材または底質の凹凸によって発生する乱れによって極めて容易に巻上げられて、流失することが明らかにされていた。このような状況の中で、効果的な藻留め工の開発が急務となり、著者の一人は平成２年に梯形（ﾃｲｹｲ）藻留め装置（特許第 2500324号）を開発した。本装置は側方断面が梯形（台形）をした、斜面を有する１対の袋状格子構造物（図２参照）から成り、流れ藻を斜面を乗り越えさせて捕捉するものである。梯形藻留め装置は、流れ藻の巻上げの恐れのない、砕波帯の沖側で平坦な海底であれば、流れてくる流れ藻を比較的効率よく捕捉し、波浪による流出をかなり抑えることができることが現地実験[7)8)]によって実証された。この成果により、青森県はウニ増殖場造成に梯形藻留め装置を利用することを計画し、青森県と共同で平成４年度に試験装置を用いた事前調査を実施し、その効果と最適な施設配置を検討した。

しかし、梯形藻留め装置は従来の「可動部を持たない施設」としては“最適”であるが、渦が発生しやすい浅い所や起伏のある海底では利用できないこと、あまり激しい波動では流れ藻を流失させてしまうことなど、適用限界がある。そこで、著者の一人は流れてくる流れ藻をより確実に捕捉し、しかもどのような激浪下でも捕捉した流れ藻を絶対に流失させない装置の開発を目指して、新たに扉付流れ藻捕捉装置（特許出願中）を考案した。本装置は波によって装置の内側には開くが、外側にはストッパによって開かないようにした振り子状の扉を、箱形格子籠の側面に取り付けたもの（図12参照）である。扉付流れ藻捕捉装置については、まず捕捉効果、最適構造および設計外力の算定方法を室内模型実験によって明らかにし、次に簡単な試験装置を試作して現地での有効性を調べ、さらに事業にも利用し得る耐久性と施工性を有する試験装置を試作して現地調査を実施した。

本報告ではこれらの調査研究の概要を述べる。なお、詳しい内容については文献10)と11)を参照されたい。

Ⅰ．梯形藻留め装置

１．事業計画の概要

梯形藻留め装置の利用が計画されたのは、青森県野牛地区地先型増殖場造成事業（平成４－６年度実施）である。本地区は津軽海峡に面する下北半島北方沿岸中央に位置し、海岸より約0.5～1.0km沖の水深約9～17mにある（図１）。地区の海底は中央粒径約１mmの砂質堆積物が覆う比較的平坦な地形となっている。

当地区の一帯には、キタムラサキウニが汀線付近から水深50m以深まで広く分布するが，餌となる海藻が少なく，ウニは身入りが少なく水産的価値のない，いわゆる″空ウニ″となっていた。このため，事業では空ウニを移植して身入りを良くする場として，餌料海藻の生育が少ない砂質底に餌料藻場を造成することが計画された。青森県津軽海峡沿岸では従来より投石によるコンブ藻場の造成が図られてきた。しかし，野牛地先においてはウニが高密度に分布し，しかもそれらの移動は砂質底では比較的速いと考えられ[2)]，ウニ侵入防止が藻場造成の重大な課題とされた。青森県の藻場造成では，これらのウニは砂質底に点在する安定した基質に長く留まる性質があることから，藻場区の周囲に間隔を置いて転石帯を造成し，藻場区に侵入してくるウニを転石帯に蝟集・定着させる方法が採られてきた[1)]。また，当海域に出現するキタムラサキウニは小型のものが多く，それらのウニは30m以深の沖の海底で発生し，浅い所へ移動すると推察されている。

このようなウニの移動状況を考慮し，当事業では投石により造成される餌料藻場区（面積240m×490m）へのウニの侵入を抑制するため，図１に示すような二重の対策が計画された。すなわち，第一に従来と同様に餌料藻場区（A）の周囲に20mの距離をおいて幅10mの投石帯（B）を設け，第二にウニの侵入方向が特に多いと考えられる沖側には投石帯のさらに沖側に、30mの距離をおいて梯形藻留め装置による流れ藻滞留区（C）を

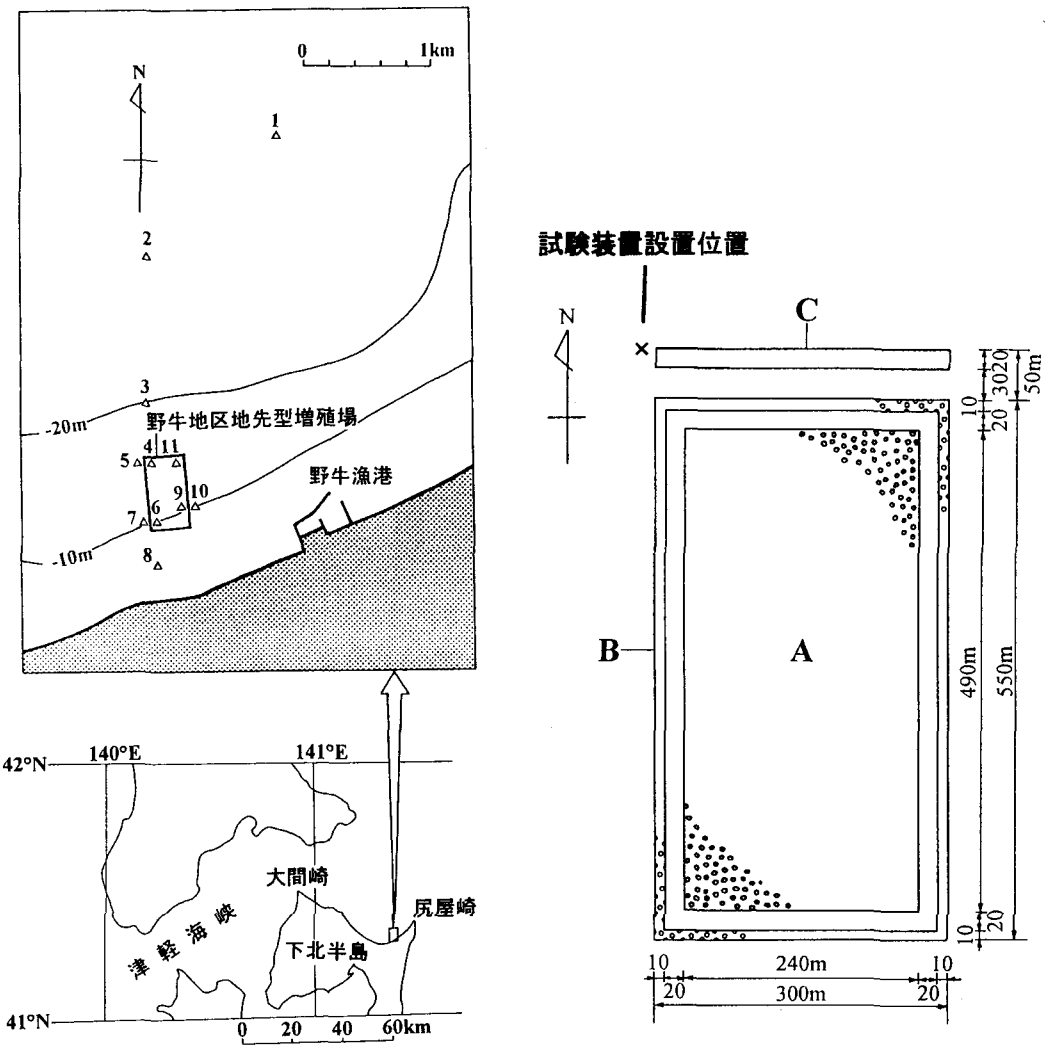

図１　野牛地区の位置図（左）と増殖場造成計画平面図（右）

造成することが検討された。梯形藻留め装置の設置は砕波帯の沖側の平坦な海底としなければならないが、流れ藻滞留区の造成が計画された領域は水深16～17ｍにあり，砕波による乱れの影響はないと考えられること，および海底が平坦であることから，梯形藻留め装置が適用出来ると判断された。

２．調査方法

１）試験装置

平成４年10月22日，図２に示すような試験装置２基が流れ藻滞留区として計画された領域の西端，水深16.5ｍに設置され，事前調査が実施された。試験装置の配置については，以下のような考察に基づき，岸沖方向に段違いになるように併設するとともに，その西側側方フェンス部にコンクリートブロック（高さ30cm×幅50cm×長さ300cm）３個を設置した。

初めに装置の段違い配置について説明する。波により振動する流れの成分を波動流，またそれ以外の時間的変化がより緩やかな流速成分を平均流と呼んで区別すれば，概ね，流れ藻の巻上げ・流失は波動流によって，また流れ藻の輸送は平均流によって生じるといえる。梯形藻留め装置による流れ藻の捕捉効果は、まず斜面格子部が波・流れを妨げずに平均流によって運ばれてきた流れ藻をそのまま乗越えさせて装置に取り込み，取り込まれた流れ藻が波動流によって動揺し，浮遊し始めるのを袋状の格子部が防止することによって発現される。従って，平均流と波動流の向きが一致する場合には，装置をその方向に平行に設置すれば，流れ藻の取込

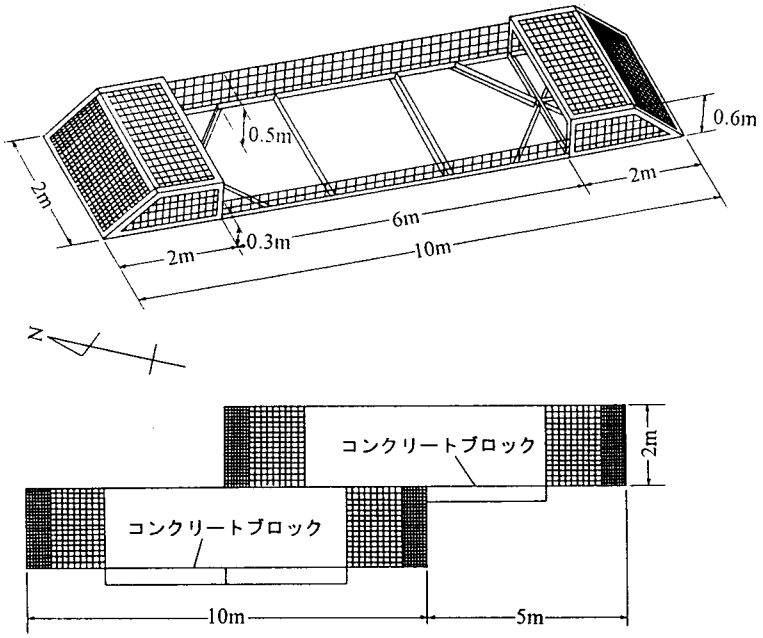

図２　試験装置の斜視図（上図）と配置図（下図）

みと同時に流失防止も効果的に出来るので極めて都合がよい。しかし，当地区では沿岸方向に強い流れの存在が予想され，装置を波動の卓越方向となる岸沖方向に平行に設置すると，流れ藻は沿岸方向の流れによって流されてしまい，取入れ口となる格子斜面部の前面に留まる時間が短く，捕捉効果の低下が危惧された。この対策として考え出されたのが段違い配置である。図のように装置を設置すれば，沿岸方向の流れによって運ばれてくる流れ藻が装置の側面で一時的に止められるため，その捕捉効果の向上が期待された。

次にコンクリートブロックを装置の西側側面に設置した理由について説明する。一般に平均流の影響がある場合，捕捉された流れ藻が装置内の一カ所に寄せられて，装置の側壁を乗り越え易くなる。芙蓉開発（株）（未発表）の調査により，当初，野牛地区では東流が優勢であると考えられ，捕捉された流れ藻が東側フェンスに寄せられ，流失し易くなることが危惧された。しかし，高さ30cmのコンクリートブロックを装置の西側に設置することによって，平均流速がある程度（流れコンブで20～30cm/s程度）以下であれば流れ藻はブロックを容易に飛び越えて，その背後の渦領域に捕捉されることが従来の研究[3]から予想され，堆積による流れ藻の流失をくい止められると考えた。またブロックはウニの移動防止または定着にも寄与すると考えられた。

２）潮流・波動の調査方法

平成４年10月～平成６年３月にわたり計11回，２次元超音波流速計を海底に固定して流速を計測し，波動流速および平均流速を調べた。データ処理ではまず２成分流速データとコンパスデータより磁針偏差を補正して東方分速と北方分速を求め，計測時間毎の平均流速の算出と波動成分の処理を行った。平均流速については，成分ごとに最小２乗法による調和分析を行って恒流および主要４分潮（M_2，S_2，K_1，O_1）流の潮流楕円を求め，その長軸の方向と流速および短軸の流速を算出した。また，各流速成分ごとにフーリエ変換により周期25s 以上の成分を除去した後、逆フーリエ変換により波動成分を求めた。この波動成分については，分散が最大となる向きとして定義される主波動方向θを算出し、その方向における流速成分についてゼロアップクロス法で有義流速全振幅U_wと有義周期T_wを求めた。

３）事前調査

（１）水中テレビによる流れ藻観察

平成４年10月28日および29日，有線式水中テレビカメラを試験装置に設置し，船上より流れ藻の挙動を観察した。また，29日には水中テレビカメラを曳航して，地区周辺の流れ藻の分布状況を調べた。

（２）流れ藻およびキタムラサキウニの分布量の調査

野牛地区の周辺の底生生物量および流れ藻の量を調べるため，図１中の三角形で示す測点St. １～11において，枠取り調査を実施した。

（3）標識コンブ放流追跡調査

平成５年３月20日，付近の防波堤で根元から採取したマコンブ100本に異なる標識を付け，装置の周辺４カ所および試験装置の中に放置し，その後の移動状況を追跡調査した。採取したコンブは葉長が1mになるように切り揃え，標識として蛍光テープを茎部に取付けた。コンブの平均湿重量は144g/本であった。

4）事業によって設置された装置および誘導柵の効果調査

平成６年２月17日，事業によって梯形流れ藻捕捉装置15基が流れ藻滞留区に設置された。同年３月14日，その流れ藻捕捉効果を調べるため，標識を付けたコンブを放流し，追跡調査を実施した。また，この調査では設置された装置に流れ藻を誘導するためのフェンス（誘導柵という）を付設してその有効性も合わせて調べた。標識コンブの放流では装置の南端を結ぶ線上に1mおきに目印を付けたロープ100mを張り，番号札をつけたマコンブ 100本をロープ上１m毎に放置した。放流したマコンブは前述した調査と同様に１mの長さに切り揃え，プラスチック製番号札（重量2.8g）を茎部に紐で結び付けた。誘導柵については，どのような形状および配置が効果的であるかを調べるため，図３に示すような長さ2mのものを５個繋いで長さ10mとし，格子間隔：60mm，法面角（図３，α）：45°，設置方向：40°（北から時計回りに測った角度）を標準（誘導柵No.1）として，これらの３条件をそれぞれ１つずつ変えた，格子間隔を100mmとしたもの(誘導柵No.2)，法面角を90°としたもの（誘導柵No.3），および設置方向を10°としたもの（誘導柵No.4）を装置に取付け，誘導柵を取り付けなかった装置（対照区）と比較して，流れ藻捕捉における有効性を調べた（図11参照）。

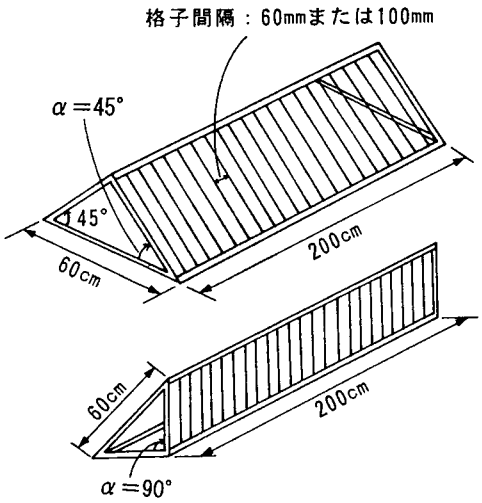

図３　誘導柵の斜視図

３．調査結果

１）流速調査結果

（１）平均流速

潮流の調和分析の結果を表１に、また図４に平均流速を示す。潮流は季節によって異なり，12月～３月には比較的明瞭な最大振幅20cm/s程の１日周期潮が卓越したが，８月～10月には潮流は乱調となり，日周潮が不鮮明になる傾向がみられた。潮流の調和分析では日周潮流のK_1またはO_1分潮流が半日周潮流のM_2またはS_2潮流より支配的であることが示された。図４に示す回帰直線の傾きより求めた，年平均的な潮流の主変動方向は66°（北方を基準に時計回りに測った角度）で，汀線方向にほぼ一致した。また恒流については，潮流の調和分析から季節による変化は認められず，年間を通じて東方に1～4cm/sの流速があることが示された。各平均流速成分の総平均より算出される恒流ベクトルは，大きさ2.71cm/s，方向56°であり，多少沖向きの成分があ

表１　流速データの測得期間と潮流の調和分析

Data	測得期間	M_2			S_2			K_1			O_1			恒流	
		長軸		短軸	長軸		短軸	長軸		短軸	長軸		短軸		
		方向	流速	流速	方向	流速	流速	方向	流速	流速	方向	流速	流速	方向	流速
	平成4年	度	cm/s	cm/s	度	cm/s	cm/s	度	cm/s	cm/s	度	cm/s	cm/s	度	cm/s
1	10/13～10/14	※1	※1	※1	※1	※1	※1	※1	※1	※1	※1	※1	※1	※1	※1
2	10/28	※1	※1	※1	※1	※1	※1	※1	※1	※1	※1	※1	※1	※1	※1
3	12/10～12/20	42	0.8	0.3	74	1.0	0.3	22	0.9	0.6	56	4.4	0.1	34	3.6
	平成5年														
4	2/28～ 3/10	75	0.7	0.0	64	1.0	0.1	80	1.0	0.4	70	3.8	0.3	75	2.6
5	3/20～ 3/22	72	7.2	1.1	68	7.5	1.5	57	17.8	3.9	31	9.3	2.2	55	0.6
6	3/24～ 4/ 3	61	0.5	0.1	66	1.0	0.2	63	2.8	0.3	60	7.1	0.3	66	2.1
7	8/ 5～ 8/23	44	1.3	0.5	132	1.2	0.6	75	3.1	0.5	60	4.4	0.2	56	3.3
8	8/30～ 9/ 9	30	1.2	0.4	157	1.1	0.7	74	2.5	1.1	74	5.5	0.4	66	3.5
9	9/29～10/17	71	2.3	0.1	116	1.0	0.5	61	3.2	0.8	71	3.4	0.2	55	2.5
10	11/ 6～11/24	38	0.9	0.1	36	0.8	0.1	71	4.1	0.0	70	3.4	0.2	49	3.4
	平成6年														
11	3/15～ 3/24	39	1.5	0.0	54	2.1	0.1	40	2.4	0.7	54	12.1	0.1	43	1.8

（注）方向は北から時計回りに測った角度で表す。※1　データ不足により解析不能。

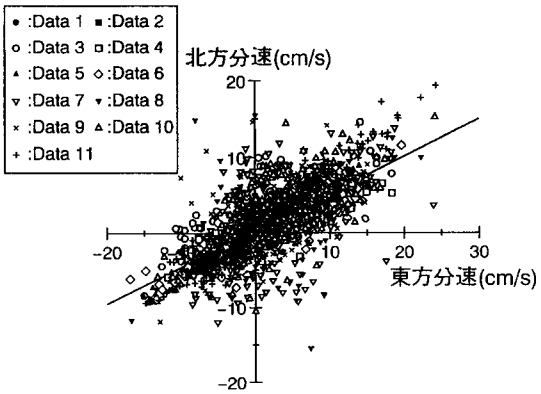

図４　平均流速の東方分速と北方分速の分布

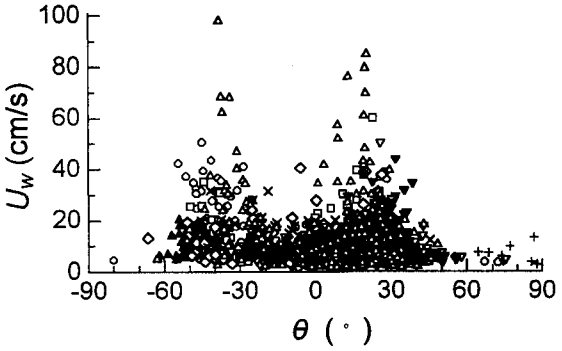

図５　有義波動流速全振幅 U_wと主波向θとの関係
（記号は図４と同じ）

ることが解った。この恒流は津軽海峡本流の恒流（津軽暖流）と同方向であり，津軽暖流の第二次反流 [12]（大間崎と尻屋崎間には時計回りの反流域が形成されているが、その反流域のさらに岸よりには反時計回りの反流域が存在する）と考えられる。

２）波動流速

有義流速全振幅U_wと主波動方向θとの関係を図５に，またU_wと有義周期T_wとの関係を図６に示す。比較的激しい波動流の主方向は約20°と約-40°の２つあり，汀線に垂直な方向（約-20°）で波動流速振幅がむしろ小さくなることが注目された。また底面に大きな波動流を起こす波は２，３日以上継続することは少なく，低気圧の移動に伴って変化する波向が上述の２方向に来たときに波が発達し，大きな底面波動流速を発生すると推察された。しかし野牛地区における周期10s以上の大波浪の頻度は外洋に面する開放的な沿岸に比べてかなり少なく，周期6～7sほどの風波が卓越することが示された（図６）。U_wの累積確率と度数分布を調べてみると，U_wは5～10cm/sにモードがあり，20cm/s以下の確率は90%に達した（図７）。例えば、外洋に面する三陸沿岸における同じ水深16mでは流速全振幅が20cm/s以下となる確率は約10%であると推定されている [9] が、これと比較して，明らかに野牛地区では波の影響が弱く，内湾性が強いといえる。

３）事前調査

（１）流れ藻およびウニの分布と装置の流れ藻捕捉量

枠取り調査によって当地区周辺では，流れ藻としてはフシスジモクが多少みられたが，コンブ類が大部分を占め，また動物についてはキタムラサキウニが圧倒的に多く，そのほか投石にエゾバフンウニが比較的多く観察された。表２にはコンブ類の流れ藻とその捕食者および漁獲物として重要なキタムラサキウニとエゾバフンウニについてのみ分布密度を記した。

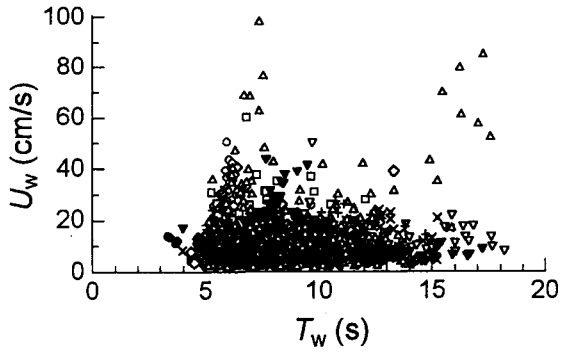

図６　有義波動流速全振幅U_wと周期T_wとの関係
（記号は図４と同じ）

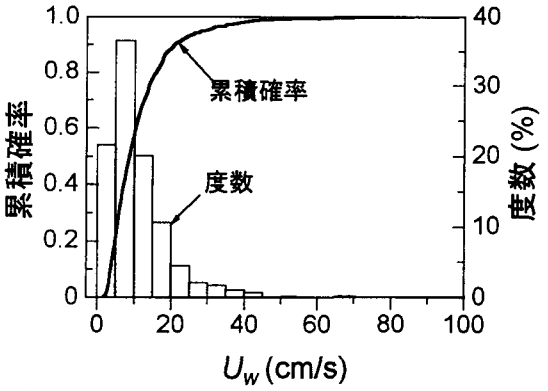

図７　有義波動流速全振幅 U_wの発生頻度分布

表２　流れコンブ、キタムラサキウニおよびエゾバフンウニの分布密度

測点番号	水深(m)	底質区分	平成４年10月28日			平成５年３月21日		
			流れコンブ	キタムラサキウニ	エゾバフンウニ	流れコンブ	キタムラサキウニ	エゾバフンウニ
St. 1	30	砂礫底	-	22(69)	-	-	4(13)	-
2	25	砂礫底	1(276)	21(71)	-	-	8(83)	-
3	20	砂礫底	-	31(110)	-	-	10(76)	1(12)
4	15	投石区	6(422)	66(841)	16(35)	-	42(544)	12(24)
5	15	砂礫底	-	-	-	-	8(63)	-
6	10	投石区	2(135)	15(216)	-	-	57(1306)	18(192)
7	10	砂礫底	2(59)	-	-	-	-	-
8	5	砂礫底	-	-	-	-	-	-
9	10	投石区	3(188)	1(14)	1(10)	2(144)	28(850)	3(56)
10	10	砂礫底	-	-	-	-	-	-
11	15	投石区	2(98)	2(23)	2(2)	-	-	-

(注)単位：本数（または個体数）/2m^2、（）内は湿重量g/2m^{2}を示す。

試験装置設置６日後の平成４年10月28日，装置内に流れ藻の滞留が観察された。その翌日に実施した湿重量測定では，装置内にマコンブ 4702g（34本）とフシスジモク254g（８本）の滞留が確認された。装置に捕捉された流れ藻は西側に集積し，特に東側の装置の中の北西部に約50％の流れ藻が集中的に滞留していた。また，流れ藻の量は装置の外部ではマコンブ４本と内部に比べて明らかに少なかったが，段違い配置により形成された，斜面格子部と側壁との稜角部にマコンブ３本が滞留していた。２日間にわたる水中テレビ観察では流れ藻はほとんど動かなかったが，その分布状況から，装置に接近してきた流れ藻は稜角部に滞留した後，格子斜面を乗り越えて装置に入り，捕捉されなかったものの大部分はそのまま流去したと推察された。10月29日，水中テレビカメラを曳航して行った観察では，流れ藻は平坦な砂質底にはほとんど認められなかったが，事業によって造成された投石区では石に引っかかるように滞留するマコンブが比較的多く見られた。試験装置内の流れ藻の量を，水深10～20mの投石区(St.4，6，9，11)と砂礫底(St.3，5，7，10)の分布量（表２）と比較してみると，流れコンブの平均密度は装置内および砂礫底で各々118g/m^{2}および7g/m^2(SD＝13g/m^2）であり，装置内で明らかに高かったが，投石区でも105g/m^2(SD＝63g/m^2）と高く，装置内と投石区との間に有意な差は示されなかった。但し，試験装置が調査の６日前に設置されたのに対して，投石区はそれより約３ヶ月前の7月7～24日に造成されていたこと、投石区のサンプリングに問題があることから，このような単純な比較では装置の効果が過小評価される可能性があることに注意しなければならない。

流れ藻の分布はその後も調査したが，調査海域には流れ藻がほとんど観察されず，装置の効果を比較検討することが出来なかった。また，投石区におけるコンブの生育量も非常少なく，平成５年３月21日の枠取り調査でSt.9（図１参照）に4本（85g）/2m^{2}が観察されたほかには計測されなかった。これらの原因は，周辺海域に広く認められてきた磯焼け現象，または高い密度で分布するウニによるマコンブ幼芽の捕食と考えられる。

（２）標識コンブ放流調査結果

平成５年３月20日12時0分から12時45分にかけて，図８中のＡ，Ｂ，ＣおよびＤで示す４地点に相異なる標識（白丸，黒丸，三角，四角で表す）をつけたコンブ各20本を，また装置２基の中にも別の標識をつけたコンブ各10本を放置した。図はその翌日21日9時0分から9時48分に調べた標識コンブの位置を左に，また４日後に調べた位置を右に示す。欠測となった２日間の流速をその前後の流速から推測すると，この調査期間の平均流速および波動流速は両者ともほとんど20cm/s以下であったと推定される。コンブの移動状況については，第１回調査で装置外側の稜角部に比較的多くのコンブが集まり，地点Ｄから放流したコンブのうち２本が格子斜面部に乗り，流入直前の状態となっていた。この状況は第２回調査でも継続的に観察され，入りかかっていたコンブ１本が装置の中に取り込まれていた。しかし，第１回調査では西側装置の中に入れたコンブ10本のうち４本が既に流失し，また第２回調査では東側装置の中にあった10本のうち１本が西側装置へ移動するとともに，２本が外部に流失していた。最初のコンブの流失については，コンブ放置時に流速20cm/s程の潮流が存在し，コンブの静置が難しかったことから，放置直後に生じたと推察された。また第２回調査前のコンブ流失については，３月21日14時頃から始まった，有義流速全振幅が最大で約20cm/sに達する北西方向の波動流が発生したため，コンクリートブロックで乱れが発生し，コンブを流失させたと考えられた。

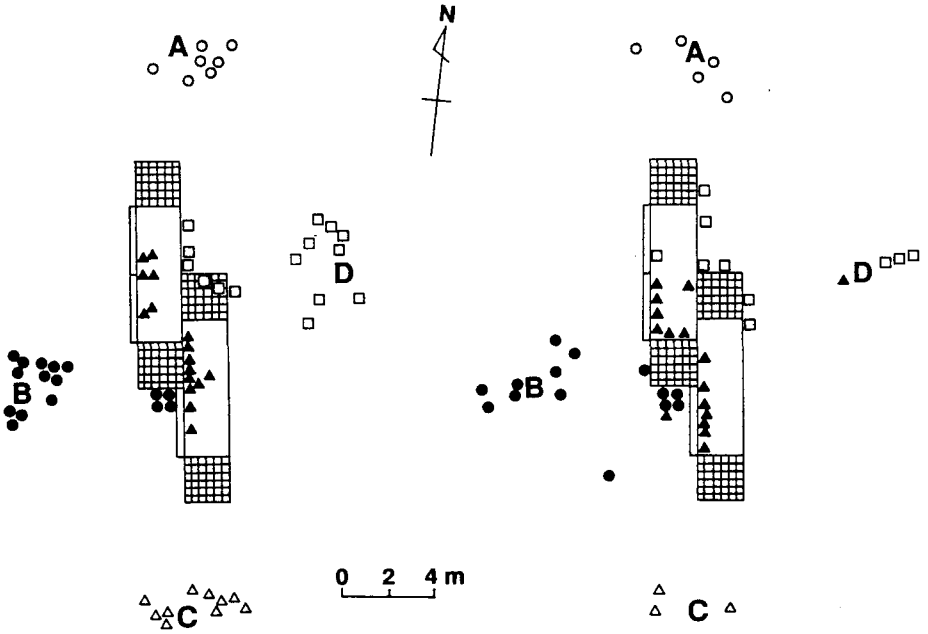

図８　平成５年３月20日試験装置周辺に放流した標識コンブの放流翌日（左図）および４日後（右図）の位置

標識コンブの挙動については，第２回調査で放流したコンブの大部分に多数のキタムラサキウニが蝟集していた。しかし、強い流動の中ではウニは安定した基質がない限りコンブを捕捉することは不可能である。コンブの放流時に潮流によってコンブの静止が難しかったことから，このときの流速（約20cm/s）がほぼコンブの移動限界流速であると推定されるが，この程度の定常流中ではキタムラサキウニは砂質底を容易に移動出来るので，コンブに蝟集し，その移動を止めることが出来ると考えられる。

しかしいずれにしても，段違い配置によって形成された稜角部に比較的多くのコンブが滞留し，明らかに当地区においてはこの配置方法が有効であることが示された。但し，その稜角部に滞留したコンブのうち，装置の中に捕捉されたものはわずかに１本だけであり，コンブが格子斜面部を乗り越えて装置の中に取り込まれるためには少なくとも20cm/s以上の流速が必要であると考えられた。

４）装置の適正な配置

平成５年４月、それ以前の流速調査結果に基づき事業における梯形藻留め装置の配置計画が決定された。図９にその装置の外観図とその配置計画図を示す。太平側からのうねりによる流れ藻の装置からの流失を防止するため装置の長さ方向を22°とし，また東方への恒流による流れ藻の移動を抑えるため，長さ10m，幅２mの装置３台を段違いに設置したものを１組みとして，間隔20mで造成区の幅300mにわたり設置することとした。装置の適正な設置方向については，強い波動が概ね20°と-40°の２方向に同程度の頻度で発生することから，それらの２方向とその中間の-10°とする３案が考えられた。しかし，前述した流速の解析結果より，当地区では流れ藻の挙動に影響を及ぼす程の強い波動流はあまり頻繁には発生せず，むしろ潮流および恒流による流れ藻の輸送が重要であることが示された。従って，装置の設置方向を図９のように東寄りの約20°とすると，袋状の格子部は西寄りの激しい波動に対しては捕捉された流れ藻を効果的に留めることが出来ないが，より効果的に

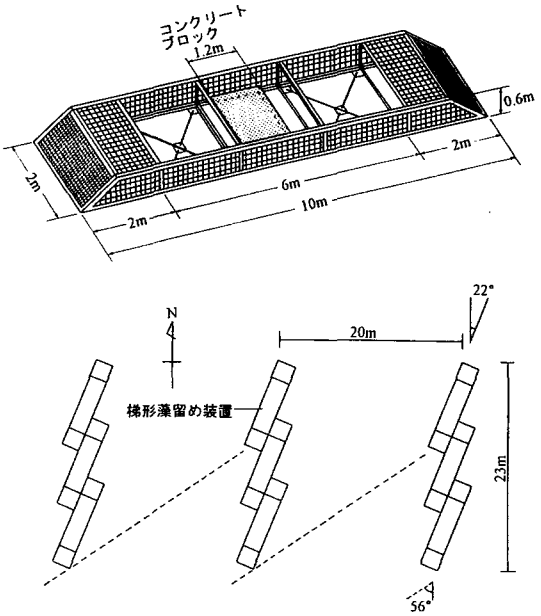

図９　事業により設置された梯形藻留め装置の外観図（上図）とその配置図（下図）

潮流および恒流によって運ばれてくる流れ藻をその外側の稜角部で止め，波動流と潮流を利用して装置の中に流れ藻を取り込むことが出来る。また流れ藻が多い時期（晩夏～秋半ば）には強い波動が太平洋側からのうねりによって比較的多く発生すること（図10）から，この方向が最も効果的であると考えられた。

また，試験装置にはブロックを付設したが，大きな波動流速の向きが一定しないことから，これによる乱れの発生により流れ藻の流出が予想された。このため事業計画ではブロックを付設しないこととした。

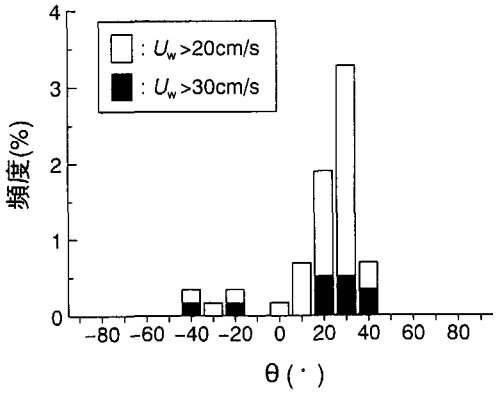

図10　U_w>20cm/sおよびU_w>30cm/sの主波動方向の発生頻度

5）事業後の装置および誘導柵の効果

平成６年３月15日，図11のA-F間に100mのロープを張り、A点から1mおきに１から100の番号札を付けたコンブを置いた。図中の数字はその札の番号を表し、○で囲んだ数字は３月16日の調査時の位置を、また□で囲んだ数字および無記号の数字は４月12日の調査時の位置を表し、無記号の数字はコンブが食い尽くされ札のみが残っていたことを表す。放流翌日では大部分のコンブはほぼ同じ位置に残留し，１本も装置に入っていなかった。しかし，28日後の２回目の調査では潜水観察区域内では装置の中にのみ発見された。発見された標識は，東向きの恒流が存在することから予想されるように，全て東方向へ移動していた。また，この調査でも放流したコンブに多数のキタムラサキウニが群がり，藻体を活発に捕食するのが確認された。

誘導柵による流れ藻の移動抑止効果については，２回目の調査では標識（番号札）の発見率は10%と低く，統計的検討が出来なかった。しかし，発見された標識のすべてが装置の中にあったことから，梯形藻留め装置自体の流れ藻捕捉効果は有意であるといえる。

4．まとめ

梯形藻留め装置の設置が計画された青森県野牛地区地先型増殖場造成事業に関連して，事前調査および事後調査を実施し，以下の結論を得た。

① 恒流（津軽暖流）は周年的に安定しており，その平均値は方向56°，流速2.71cm/sであった。

② 潮流については日周潮流が卓越し，方向66°に最大約20cm/sの振幅で振動していた。また，潮流には季節的変化がみられ，冬季には比較的明瞭な振動が観測されたが，夏季～秋季には乱調傾向がみられた。

③ 底面近くの波動流については，有義流速全振幅が，ほぼ流れ藻の動き始める限界と考えられる20cm/sを超える確率は約10%と低く，当地区の波浪環境は内湾的であることが示された。また比較的大きな振幅の波動流速は，概ね20°および-40°の２方向に発生するが，一般に流れ藻が多くなる晩夏～秋半ばの時期に限ってみると，前者（約20°）の方向に比較的多く発生することが示された。

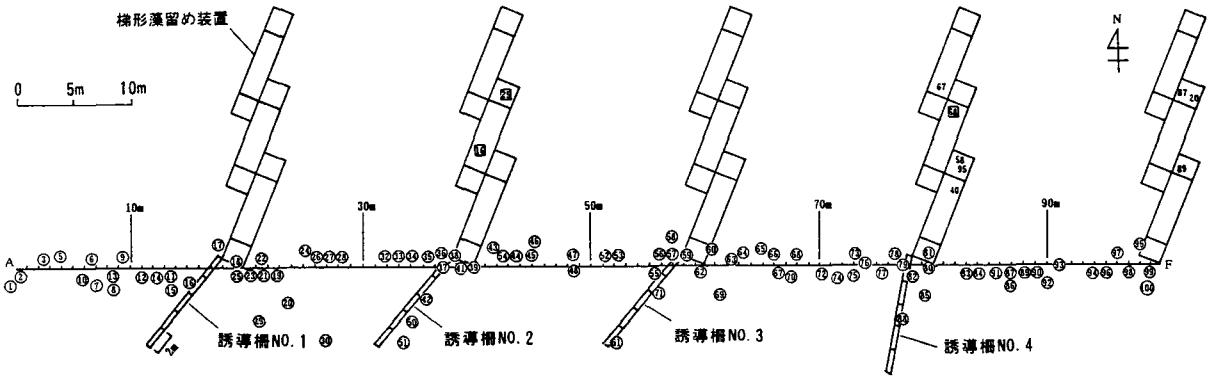

図11　事業により造成された梯形藻留め装置の周辺で実施したコンブ放流追跡調査結果

④ 複数の梯形藻留め装置を段違いに配置することによって，潮流および恒流によって沿岸方向に運ばれる流れ藻を効果的に止め，梯形藻留め装置に入り易く出来ることを確認した。

⑤ 上記の流速調査結果に基づき、事業による梯形藻留め装置の適正な配置計画を決定した。

⑥ 事業によって設置された装置の周辺に標識コンブを放流し，約１ヶ月後の調査で標識コンブまたは標識が装置の中にのみ発見され，その有効性を確認した。

Ⅱ．扉付流れ藻捕捉装置

１．調査方法

１）室内模型実験

模型実験は縮尺1/10を想定して、造波水路（全長100m×幅1m）の1/30斜面に長さ1.45m×幅1mのアクリル樹脂板を底面に貼り付けて試験区を設けた。試験区の中央部に模型装置を固定出来るようにした。模型装置は奥行300mm、上面高さ155mm、ステンレス製格子面から構成し、幅：98、148、198mm×高さ：49、99、149mmの扉を沖側（造波機側）側面に取り付けられるようにした。扉の位置での水深を0.50mとした。扉の下方または全面には流れを遮るためのアクリル樹脂製遮蔽板を取り付けた。また、ストッパにはばね（ばね常数：1.96、2.90、5.56×10^5 dyne/cm）を用い、扉が丁度底面に垂直になったときに、扉の下端に触れるように装置の外側に固定した。

（１）流れ藻の捕捉機構と捕捉効果

流れ藻の模型として従来の研究[5]と同じ、手で揉んで皺を寄らせた大きさ100mm×10mmのセロハン紙を用いた。この流れ藻の模型を試験区の沖の底面から放流し、波の下におけるその軌跡を調べた。また、放流場所の水路幅方向位置を変えて、捕捉率の変化を調べた。

なお、流れ藻は進行波の下では振動しながら波の進行方向へ徐々に移動する。

（２）扉が閉じるときの衝撃力

扉が閉じるときに発生する衝撃的な力は非常に大きく、設計にはこの衝撃力を推定する必要がある。そこで、衝撃力の算定式を確立するため、荷重計をばねの台座に取付けて、衝撃力を測定した。

この扉に作用する衝撃的な力は、厳密にはかなり複雑な流体現象によって生じると思われるが、衝撃力が問題となる激浪時には、扉の運動エネルギーと扉の前後の領域の水塊の運動エネルギーの和がストッパの歪みエネルギーに完全に変換されると仮定することができる。そこで、扉と一緒に静止する水塊の形を、断面が４分の１楕円形（片方の軸の1/2＝遮蔽板の高さ）で、高さが扉の幅と同じ柱体と仮定すれば、最大衝撃力 F_{max}は

$$F_{max} = k^{1/2}\left[I + \frac{\pi}{4}C\rho b h_s^4\left(\frac{r^2}{h_s^2} - \frac{8}{3\pi}\frac{r}{h_s} + \frac{1}{4}\right)\right]^{1/2}\omega_c \quad \cdots\cdots (1)$$

となる。ここに、kはストッパ全体の弾性係数、Iは扉の慣性モーメント、Cは実験によって求める係数、ρは水の密度、bは扉の幅、h_sは遮蔽板の高さ、rは扉の回転半径（高さ）、ω_cは衝突直前の扉の回転角速度である。ω_cを正確に推定するには、扉の運動を予測する必要があるのでより複雑な計算が必要となるが、激浪時には扉と水塊の運動は近似的に同じと考えられるので、次式により ω_cを求める。

$$\omega_c = u_c/(r - h_s/2) \quad \cdots\cdots (2)$$

ここに、u_cは衝突時の流速である。

２）現地実験

平成６年８月10日に、宮城県牡鹿半島太平洋側鮫浦湾の湾口付近、離岸距離十数m、水深約9mの比較的平坦な転石帯に試験装置（図12）を設置した。周辺の海底状況は、水深３m位まではアラメ群落が形成されていたが、それ以深はキタムラサキウニが点在する磯焼け場となっていた。

試験装置の本体はステンレス（SUS304）で製作し、扉としては、目合82mm×82mmの格子を高さ530mm×幅1900mmの外枠に取付け、さらにその下端から高さ280mmが遮蔽面となるように厚さ5mmのＦＲＰ板を取付けた。扉の質量、重力による復元モーメントおよび慣性モーメントはそれぞれ11.1 kg、

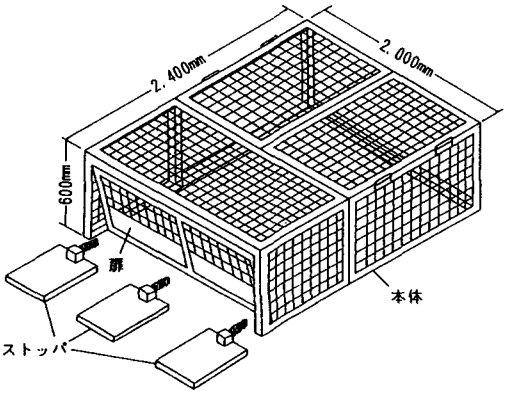

図12　平成６年度試験装置の概略図

34.1Nm、1.54kgm^{2}であった。また、ストッパとして許容圧縮力300kgfの鋼製ばねを400mm×300mm×15mmの鉄板に平行になるように取付けたもの３基を製作した。

装置本体を、扉が岸側を向くように設置し、その周囲数カ所に水中ドリルによって岩盤または巨岩にアンカーボルトを取付け、それと本体をロープで結んで固定した。またストッパを垂下する扉の下端にばねが触れるように扉の前面３カ所に配置し、鉄板を転石に埋め込んだり、階段状になった岩盤に当たるようにして固定した。

波動流速を調べるため、２次元超音波式流速計を海底に設置して、流速観測を行った。

２．結果

１）流れ藻の捕捉機構

扉付流れ藻捕捉装置による流れ藻の捕捉には大別して次の３つのパターンがあることが分かった。

第１パターン：扉の前面から接近してきた流れ藻が、扉が開く方向に動いたときにそのままま っすぐ装置の中に取り込まれる。波動流速が大きく、扉が大きく開き、また流れ藻の動きが激しいときによく見られる。

第２パターン：扉の前面から接近してきた流れ藻が、一旦装置の側方へ流された後、流れの向きが逆転して扉が閉じると扉の直前に引き寄せられて、次に扉が開いたときに流れとともに装置に取り込まれる。波動流速が小さく、扉が大きく開かないときに見られる。

第３パターン：扉の斜め前方から接近してきた流れ藻が、次第に扉に引き寄せられて、装置の側面近くにたどり着き、第２パターンと同様にして、扉の直前に引き寄せられて、装置に取り込まれる。

第２パターンにおいて、流れ藻が扉の側方へ排除されるのは、扉が開き難いために、扉の前面の圧力が上昇して流れの剥離域が形成されるためである。また、一旦扉の側方背後へ流された流れ藻が、次に流れの向きが逆転したときに扉の直前に引き寄せられるのは、次のような側方流によって生じるとみられる。すなわち、流れが反転すると、扉はストッパに衝突して急停止するが、扉（遮蔽板）の前方外側の水塊はそのまま流れ去ろうとするため、負圧が生じる。この負圧によって、扉の側方背後の水塊が扉の直前に引き寄せられて、側方流を生じることになる。第３パターンで扉の斜め前方から接近してくる流れ藻が次第に装置へ引き寄せられるのも、この負圧の効果によると考えられる。図13に第３パターンが顕著に観察された実験例を示す。図中の xは扉からの岸方向距離、yは装置の中央からの側方距離である。

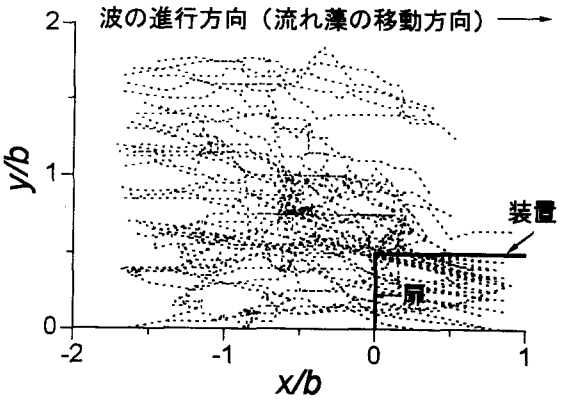

図13　扉周辺での流れ藻の軌跡

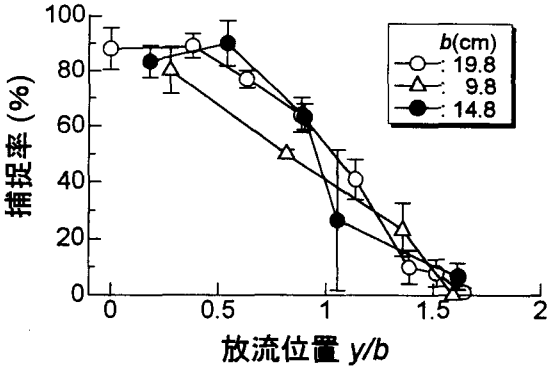

図14　扉の幅bを変えたときの放流位置による捕捉率の変化（r=99mm, h_s=49mm, 流速全振幅：71.3cm/s, 波の周期：2.0s）

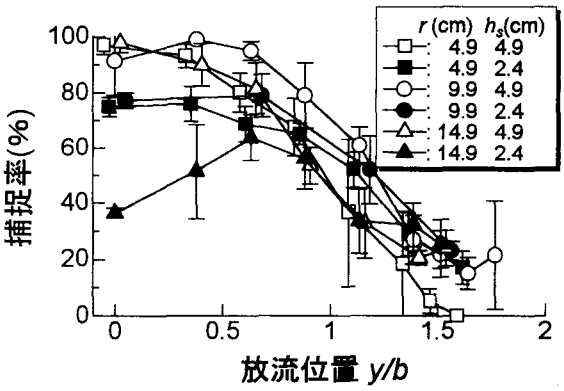

図15　扉の高さrまたは遮蔽板の高さh_sを変えたときの放流位置による捕捉率の変化（b=198mm, 流速全振幅：23.2cm/s, 波の周期：2.0s）

２）流れ藻の捕捉効果

図14に扉の幅bのみを変えて調べた流れ藻の捕捉率の変化を示す。この実験条件では、扉の前面から接近してくる流れ藻は約90％のほぼ一定確率で捕捉されるが、前述したように流れ藻の接近経路が装置からはずれても捕捉率は急にはゼロとならず、その距離の増加に伴い減少するものの、扉の幅ほど離れた所から接近してき

た流れ藻まで捕捉できる可能性があることがわかる。従って、装置の効果は扉の２倍の幅を通過する流れ藻を完全に捕捉するのと同じことになる。

図15に扉の高さと遮蔽板の高さを変えたときの流れ藻の捕捉率の変化を示す。この例から遮蔽板の高さが49mm（実物で49cm）ほどあれば、最高に近い捕捉効果が期待できるが、24mm（実物で24cm）にすると、捕捉効果は有意に低下すると推察される。

３）衝撃力の算定

図16に式１および式２により求めた衝撃力係数 C の実験値をプロットした。図の横軸の M_f は

$$M_f = \rho b h_s (r - h_s/2) u_c^2 \quad \cdots\cdots (3)$$

で求めた流体力による特性モーメントであり、また M_g は重力による復元モーメントである。M_f/M_g が大きいほど、扉の運動に対する流体力の寄与が相対的に大きくなり、扉と水とが同じように運動すると期待できるが、図より、M_f/M_g の増加（波浪の激化）に伴い、係数 C は漸近的にある定数（≃1）に近づくことがわかる。従って、激浪時（M_f/M_g>0.5）では C=1とすれば設計上十分であると考えられる。

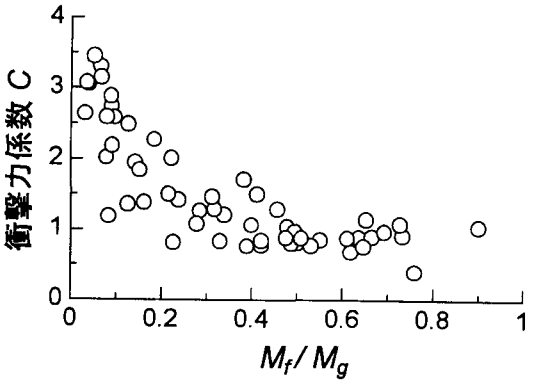

図16　衝撃力係数 C の M_f/M_g に対する変化

４）第１回現地実験

平成６年８月10日に設置した試験装置については、９月16日、設置時に装置に入れた標識付アラメ10本のうち、９本の残留が確認される（発見されなかった１本については標識が脱落したか、見落としされたと考えられる）とともに、扉が動き難くなるほどの満杯状態にアラメが捕捉されていた。その量は、標識アラメを除いて43本（推定湿重量：60～100kg）であった。

しかし、次の10月１日の調査では、ストッパがはじき飛ばされ、また装置の固定ロープが一部がはずれて、装置が転石の上に乗り上がり、アラメは全て流失していた。この被害は、９月18～19日に三陸沿岸を超大型の台風第9424号が通過したときに生じたと考えられた。この時、三陸沿岸での波高は数十年確率波高に相当すると言われており、実験場所の海底では有義波動流速振幅1.2m/sを観測した。

10月１日に装置を修復したが、10月27日の調査では、周辺の海底には流れ藻は全くなかったが、装置に新たにアラメ７本、総湿重量4.7Kgの流れ藻が捕捉されていた。

12月１日、流れ藻は装置の中にも周辺の転石帯にも全くなく、キタムラサキウニのみが点在していた。

５）第２回現地実験

第１回現地実験では、装置は流れ藻を満杯になるまで捕捉し、しかも捕捉した流れ藻を流失させないように出来るという、予想以上の好結果が得られた。しかし、問題点としては①ステンレスでは耐食性に問題があり、部材厚をある程度厚くしなければならないが、扉については波に対する追従性の点で重量を大きく出来ないので、より比重の小さい金属の使用が望まれること、②装置の固定にアンカーボルトの利用は一般に困難であり、通常の重量物による固定が望ましいこと、③施工上、ストッパと本体とを一体とすることが望まれること、④捕捉された流れ藻は本体の奥から溜まるが、約0.4m以上の高さに積み重なることはなく、装置

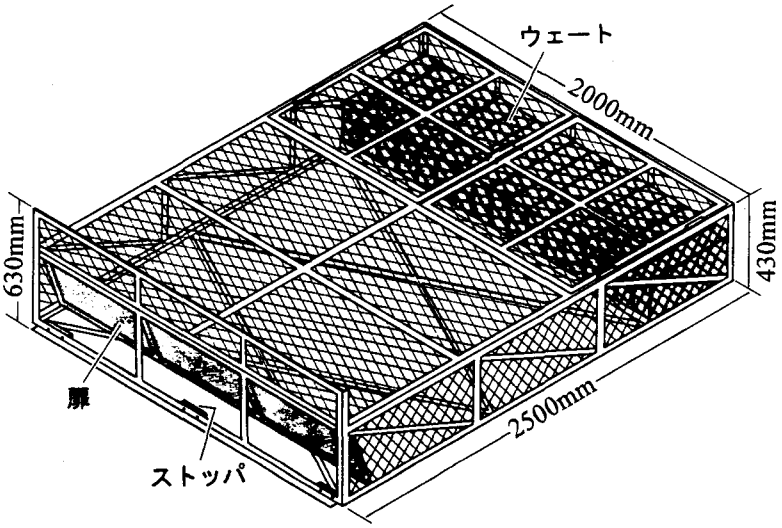

図17　改良した試験装置の概略図

表３　装置内の流れ藻の量とキタムラサキウニの分布密度

調査日	装置内の流れ藻の湿重量	備考	キタムラサキウニの密度 ()内は平均殻径±SD(mm)	
			装置周辺からの50cm以内の領域	対照区8m²
平成７年				
８月22日	なし	標識付アラメ10本を搬入	0個	8個(46.2±16.7)
９月13日	標識アラメ　9.4kg	(10本)	4個(67.0±10.1)	16個(28.9±17.6)
10月13日	無標識アラメ38.2kg 標識アラメ　5.7kg	(9本)	243個(62.9± 9.0)	10個(53.9±13.8)
11月30日	無標識アラメ10.4kg 標識アラメ　0.8kg	大部分が茎部と仮根	148個(60.0±10.2)	22個(58.1± 8.9)
12月22日	無標識アラメ 9.7kg 標識アラメ　0.1kg	全て茎部と仮根	102個(68.1± 7.6)	33個(60.2±11.0)
平成８年				
３月１日	無標識アラメ10.2kg エゾノネジモク0.4kg		329個(59.5±18.0)	20個(54.5± 6.9)

の高さをこの最高の高さに下げること、が上げられた。

以上のことを考慮して、事業にも適用出来るよう（但し、大きさは検討要）に改良した装置（図17）を新たに製作し、平成７年８月10日、第１回現地実験と同じ位置に設置した。この試験装置はストッパとウェート以外は全て耐食性に優れたチタンで製作した。本体は目合100mm×50mmのチタンメッシュで被い、また扉は高さ400mm×幅1960mmで、全面遮蔽板とした。但し、扉の上方には高さ20cmの格子を設け、扉が閉じたときに流れ藻が巻き上がって、装置を飛び越えるのを防ぐようにした。

ストッパとしては、直方体の天然ゴム（受圧面30×85mm、厚さ61mm）３個を装置の前面下端に配置した。天然ゴムのヤング率は約5×10^{6}N/m²であるので、このストッパ全体の弾性係数は6.27×10^{5}N/mとなるが、衝撃力を出来るだけ抑えるために天然ゴムに中空部を設けた。これにより、設計では弾性係数を実質的にその半分の3.14×10^{5}N/mに出来ると仮定して、設計流速u_c=1.2m/sとして設計衝撃力を式(１)および式(２)を用いて計算し、$F_{max}=1.37\times10^{4}$N(1390kg)を得た。さらに引っ掛かり抵抗も含めた見かけの摩擦係数を0.8として鋼製ウェートの所要重量を求めると、1920kgを得たので、60kgの鉄塊32個を製作した。このウェートを、装置本体内部の最奥部に、電食防止用のゴムマット（厚さ10mm）を敷いて設置した。

流れ藻の捕捉量と装置の周囲50cm以内の領域および対照区として近くの転石帯上に設けた4m²枠２枠においてキタムラサキウニとエゾアワビの分布量を調べた。分布量調査では個数と平均殻径（殻長）を調べたが、個数が10個を超えた場合には無作為に10個を抽出して、測定を行った。また、設置後最初の調査（８月22日）では標識付アラメ10本を装置の中に入れてその残量の経時変化を調べた。

平成７年８月10日に装置を設置したが、例年流れ藻が最も多く発生するとみられる９月になっても、流れ藻は装置の中にも周辺にも全く見られなかった（表３）。これは、９月の調査日までの有義波動流速振幅が前回の調査では40cm/sを超えたのに対して、今回は20cm/s以下と小さかったことからも明らかなように、時化がなかったために海藻が流失しなかったと考えられた。しかし、その後、９月17日に有義波動流速振幅が40cm/sを超え、30cm/sを超える時化の日が１週間ほど続いた。10月13日の調査では、前年度の調査と同様にアラメがほぼ満杯に近い状態まで捕捉され、顕著なキタムラサキウニの蝟集が観察された（表３）。

その後、装置の中の流れ藻の量はウニの摂食と流れ藻の供給量の減少によって減少し、11月30日には10月13日の量の約1/4までに減少し、さらに12月22日には装置内の流れ藻は摂食され難い茎部と仮根だけとなった。この間のウニの摂食は非常に激しく、流れ藻の滞留量は急速に減少したが、２月14日に新たな流れ藻の捕捉が観察され、３月１日の測定で約10kgのアラメ藻体の残留が確認された。

８月22日に装置に入れた標識付アラメ10本は、ウニの摂食によって量的に減少したが、流失することなく、少なくとも10月13日まで９本が残留（１本は標識のみ発見）し、捕捉された流れ藻は細片化しない限り、流失しないことを再確認した。

エゾアワビについては、設置時には転石帯に多少観察されたが、設置後、３月１日に殻長96mmの個体１個が装置の中で発見されるまで全く発見されなかった。この原因として、扉が閉まるときに発生する衝突音が考え

られる。しかし、平成８年３月以降行った調査では、アワビ数個体が観察されるようになってきており、”慣れ”による蝟集の可能性がある。

装置は約７ヶ月経過した平成８年３月１日時点では扉の変形やストッパの損傷は認められず、装置は正常に機能していた。また格子および扉には付着生物が着生してきたが、その量は微少で、格子が目詰まりを起こしたり、扉が開きにくくなったりするとは考えられなかった。今後の経過を調べる必要があるが、キタムラサキウニなどが静穏時に、装置に着生して付着生物を摂食しているようで、今後も付着生物の量が周辺の岩盤以上に増えることはないように思われた。

３．まとめ

扉付流れ藻捕捉装置を考案し、室内模型実験の現地実験により以下のことを明らかにした。

① 流れ藻の捕捉範囲は、扉の前面だけでなく、扉の両端から扉の幅離れた所まで及ぶ。

② 流れ藻の捕捉効果は遮蔽板の高さが50cm程度あれば最高に近いが、25cm程度では有意に低下する。

③ 激浪時の衝撃力は次式で求められる。

$$F_{\max} = k^{1/2}\left[I + \frac{\pi}{4}C\rho b h_s^4\left(\frac{r^2}{h_s^2} - \frac{8}{3\pi}\frac{r}{h_s} + \frac{1}{4}\right)\right]^{1/2} u_c/(r - h_s/2)$$

ここに、kはストッパ全体の弾性係数、Iは扉の慣性モーメント、ρは水の密度、bは扉の幅、h_sは遮蔽板の高さ、rは扉の回転半径（高さ）、u_cは衝突時の流速、C=1である。

④ 装置は流れ藻を満杯近くまで捕捉することが出来る。

⑤ 捕捉された流れ藻は細片化しない限り、流失しない。

⑥ 捕捉された流れ藻はウニ等に有効に利用される。

また、改良した装置は約７ヶ月経過した時点でも故障なく機能しており、現在、ストッパおよび扉の強度劣化を検討しているが、これらの点について詳細に検討して製作すれば、充分に事業に利用できるといえる。

参考文献

1) 足助光久, 1983：コンブ藻場の造成とその効果, 水産土木, 20(1), pp. 37-44.

2) 青森県水産増殖センター, 1987：大規模増殖場開発事業調査報告書（石持地区）, 青水増資料, S52, No. 8, pp. 78

3) 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

4) 川俣茂, 1987：流出海藻の滞留施設, 水産土木, 24(1), pp. 53-60.

5) 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, 水産工学研究所研究報告, 9, pp. 1-8.

6) 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.

7) 川俣茂, 1992：磯根漁場における流れ藻の挙動とその捕捉装置の開発, 海岸工学論文集, 39, pp. 891-895.

8) 川俣茂・萩野静也・山本正昭, 1993：藻留め施設の海藻捕捉効果に関する研究, 平成３年度沿岸漁場整備開発事業に関する水産庁研究所研究報告書, 水産庁振興部開発課, pp. 139-164.

9) 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, pp. 103-110

10) Kawamata,S.and H.Suzuki,1995: Development of a drift-algal trap for nearshore rocky aquaculture. Proc. of ECOSET '95, pp.628-633.

11) 川俣茂・植村康, 1996：青森県野牛地区における梯形藻留め装置の配置計画と効果に関する現地調査, 水産工学研究所技報（印刷中）

12) 堀定清・新田清, 1989：津軽海峡域における海水流動機構の解明, 津軽暖流域に関する総合研究報告書, 科学技術庁研究調整局, pp. 14-55