

藻食動物の摂餌・行動に及ぼす波浪の影響 に関する生物工学的研究

水産工学研究所水産土木工学部

川俣 茂・山本正昭・足立久美子・日向野純也

調査実施年度：平成2～5年度

緒言

波浪は藻食動物の食害から海藻を守ったり、アワビおよびウニなどの水産的に有用な藻食動物の分布および摂食の影響要因として重要である。漁場が食害によって磯焼け状態となっている場合でも波当たりを強くすれば海藻群落を維持できる可能性があるろうし、逆に波浪を抑制してアワビ、ウニの摂食量を増やすことも考えられる。実際に藻食動物の摂食圧が高い磯焼け漁場でも波当たりの強い所に海藻が繁茂したり、またアワビ養殖場では投入した海藻が波によって動揺し、アワビが捕捉できないという問題が生じたり、藻留め工により捕捉された海藻が波動によってアワビ、ウニが捕捉できないことが問題として指摘されている。

このようなことから本研究では波によって生じる流れがウニおよびアワビの行動・摂餌に及ぼす影響を実験的に調べ、波浪制御などの漁場造成計画の基礎資料とする。

実験方法

海底面付近では波浪によって生じる流れは底面に平行な振動流となる。この振動流がエゾアワビ、キタムラサキウニに及ぼす影響を調べるため室内生態実験を行った。

本研究で製作した振動流水槽の概略図と仕様を各々図1と表1に示した。本装置はU字型の水槽であり、振動流はピストンの振幅 r および周期 T と試験区の断面積 S によって変えられる。水槽中央水平部の底面には塩化ビニル樹脂製の台を設置して断面積を変えられるようにした。また素早く動物または海藻を出し入れできるようにするため、簡単に開閉できる径15cmの円形の蓋を試験区の3箇所にした。

振動流の最大流速 u_{max} はピストン運動から求めることができるが、図2に $H=30\text{cm}$ としたときの u_{max} の計算値と測定値との比較を示す。流速測定は試験区中心に電磁流速計のセンサを固定して行った。計算

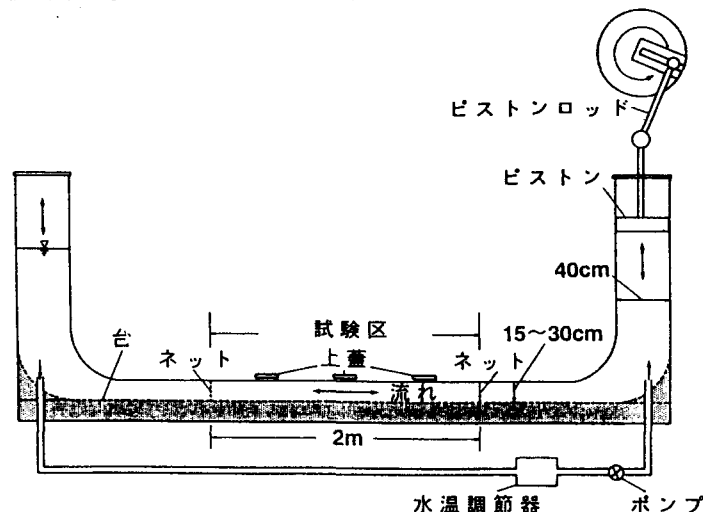


図1 振動流水槽の概略図

表1 振動流水槽の仕様

| | |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 試験区断面 | : 長さ200cm×幅30cm×高さH=15cmまたは30cm |
| 振動流速 | : $u = \frac{80\pi^2 r}{3HT} \sin(2\pi t/T) \left(1 - \frac{\cos(2\pi t/T)}{\sqrt{(L/r)^2 - \sin^2(2\pi t/T)}}\right)$ |
| | ここに、T:ピストン周期, r:ピストン振幅(=0~25.0cm), L:ピストンロッドの長さ(=60cm) |
| 付属機器 | : 自動水温調節装置, タイマー付照明装置 |

値は実測値によく一致しており、試験区では流れの偏りはあまりなく、振動流は通水断面にほぼ一様に発生していると判断された。

1) 海藻摂食に及ぼす影響

動物および餌料海藻の仕切りとして長さ2mの試験区の両端および中央にネットを設けた。実験ではまず初めに動物を水槽に馴らすため試験区上面まで注入されて所定の水温に保たれた海水の中に動物を1, 2日入れておき、次に上蓋から海藻を入れ、直ちに所定の水位まで海水を追加してピストンを駆動した。実験はピストンの周期と振幅を所定の値に保って24時間または48時間稼働した後、摂食された海藻の湿重量を測定した。

実験動物には岩手県田老町および茨城水試および青森県から入手したキタムラサキウニと、岩手県田老町および宮城県女川町から入手したエゾアワビを用いた。また餌料海藻にはミツイシコンブの乾燥商品(商品名:日高昆布)または乾燥椋前昆布(商品名:歯舞昆布, 種は不明, 葉幅:5cm~15cm)を30~40分間水道水で戻して所定の形(日高昆布:5cm×10cm, 10cm×20cm, 10cm×30cm, 10cm×35cm, 歯舞昆布:葉幅×30cm)に裁断したものと、北海道日本海側で採取された生きたホソメコンブを葉長が50cmになるように切ったものを用いた。前者の海藻についてはそのまま流れ藻の状態に入れるか、または海藻の一端に重りを乗せて振動流で動揺するようにした。また後者の生きたホソメコンブについてはその仮根部を鉛板の重りにひもで結びつけて固定した。

なお乾燥コンブを水で戻したものは海水中で吸水、脱水または粘液の溶出によって多少重量または面積を変化させた。そこで摂食量は投入したコンブが全く食べられずに残ったと仮定したときの湿重量を葉長の変化率や噛み痕から推定し、その値から実際に残っていた湿重量を差し引いた値とした。

2) 移動に及ぼす影響

試験区の強化ガラス製側壁面からスポットライトを照射し、所定の振動流の中でキタムラサキウニを10分間逃避・匍匐させて、1分間毎の移動距離を測定し、その間の最大移動速度を求めた。

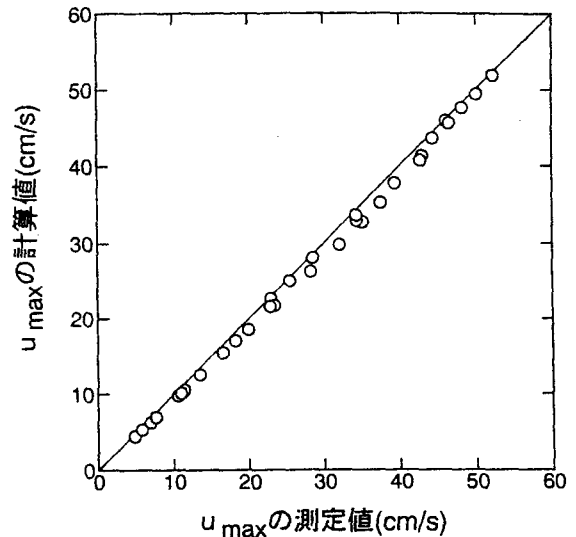


図2 振動流の最大流速の計算値と実測値の比較

結果

1) キタムラサキウニに及ぼす振動流の影響

ここでは単位時間当たりの海藻摂食量を摂食速度と呼んで F で表し、また静水中での F の値を F_s で表す。乾燥コンブを水で戻したものを餌料海藻として用い、水温 10°C で行った殻径 $75\text{mm}\sim 86\text{mm}$ の大型ウニの摂食実験の結果を図3に示した。摂食速度は最大流速 u_{\max} が $<20\text{cm/s}$ では平均的にはほぼ一定で、この範囲内ではウニの摂食は振動流によって抑制されなかったが、 u_{\max} が 25cm/s 程を超えると、海藻の状態に無関係に摂食速度が激減し、約 40cm/s ではほとんど0となった。モデル

$$F/F_s = 1 - \exp[-\exp\{(\alpha - u_{\max})/\beta\}] \dots\dots\dots(1)$$

はこのような関係をよく表現できることから、モデル(1)に実験値を当てはめ、非線形最小2乗法により2個のパラメータ α と β を決定すると、実験式

$$F/F_s = 1 - \exp[-\exp\{(27.1 - u_{\max})/4.27\}] \dots\dots\dots(2)$$

が得られた。ここに u_{\max} の単位は cm/s である。図3が明示するように曲線で示される式(2)は実験値によく一致している。

水温を 13°C として、生きたホソメコンブを用いて行った大型および小型(殻径 $50\text{mm}\sim 55\text{mm}$)のウニの摂食実験の結果を図4に示した。この実験では u_{\max} が 20cm/s 程で大型ウニの摂食速度が振動流の弱いときよりも増加する傾向が認められたが、振動流の影響は前述の場合とほぼ同様で、摂食速度は最大流速が 30cm/s 弱を超えると激減して、 $u_{\max}\sim 40\text{cm/s}$ でほとんど0となった。ここで、最大流速 20cm/s 程の振動流中で摂食が増加した原因については充分によくわかっていないが、用いたホソメコンブの基部が比較的細くて硬かったため、弱い振動流中ではコンブ藻体が底面から立ち上がった状態のままで、ウニに発見され難かったのに対して、適度な振動流の中ではコンブが動揺してウニに察知され易くなり、捕食が早まったことなどが考えられる。小型ウニについてはサンプル数が小さくばらつきが大きい、その分布の上限は式(2)にほぼ一致する結果となった。

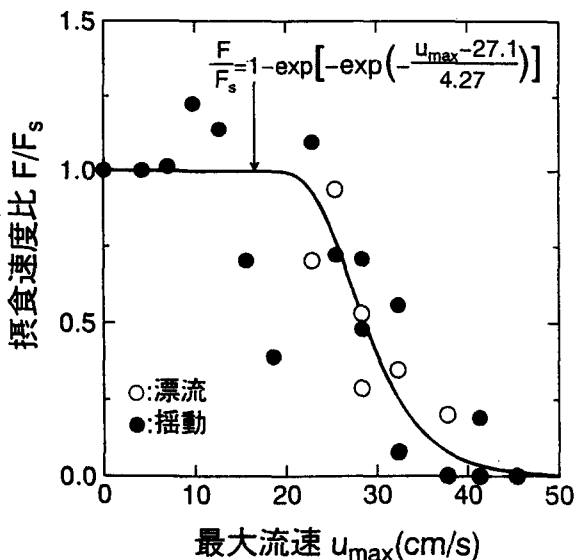


図3 キタムラサキウニの摂食速度に及ぼす振動流の影響. 水で戻した乾燥コンブの $30\times 30\text{cm}$ の矩形葉片をそのまま入れた場合(○)と重りで一端を押さえた場合(●). 水温 10°C . 振動周期(5~10s)を変えて流速を変化.

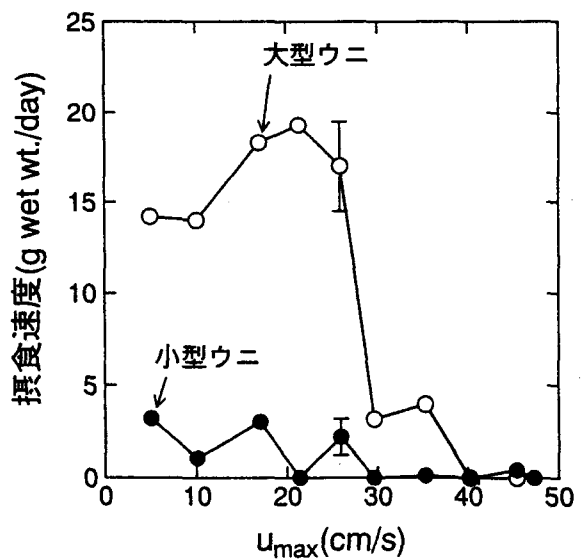


図4 キタムラサキウニの摂食に及ぼす振動流の影響. 長さ 50cm の生きたホソメコンブを底面に仮根部を固定. 水温 13°C . 振動周期を5sとしてピストンの振幅を変えて流速を変化.

次に移動実験の結果を図5に示した。ウニの移動に及ぼす振動流の影響は摂食の場合とほぼ同様に最大流速が20~30cm/sを超えると顕著になった。しかしウニの移動は摂食限界の u_{max} ~40cm/sを超えても比較的活発であり、 u_{max} が70cm/s程まで可能であった。このウニの移動限界における u_{max} は水温および殻径に依らずほぼ一定の値となっていることが注目される。

ウニの摂食限界の u_{max} が移動限界のそれよりも低くなる理由は明らかで、殻の下側に口を有するウニは摂食時には管足のかなり部分を基盤から外して海藻の上に登らなければならないためである。このメカニズムの力学的解明に興味を持たれるが、しかしいずれにしてもキタムラサキウニの摂食に対する振動流の影響は少なくとも殻径5cm以上の個体ではほぼ式(2)で表すことができると考えられる。

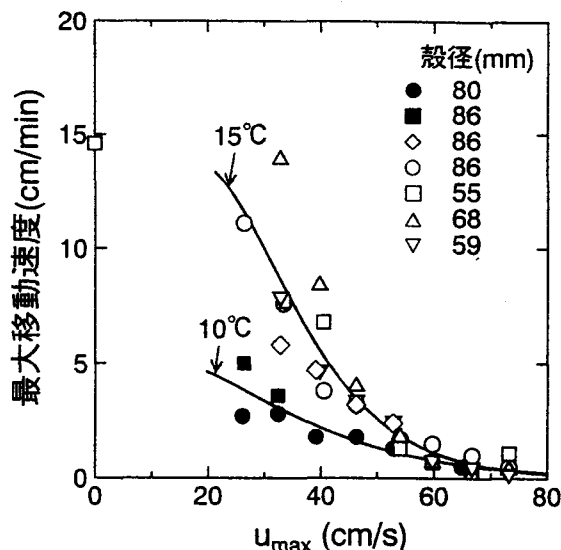


図5 振動流中におけるキタムラサキウニの最大移動速度. 水温は黒印: 10°C, 白印: 15°C.

2) エゾアワビの摂食に及ぼす振動流の影響

92年8月6日~9月22日に小型(殻長53~75mm)および大型(殻長90~96mm)のエゾアワビを用いて行った流れ藻の摂食実験の結果を図6に、また94年4月22日~5月16日に小型(殻長57mm~62mm)および大型(殻長97mm~103mm)のエゾアワビを用いて行った揺動コンブの摂食実験の結果を図7に示した。10°Cの低水温

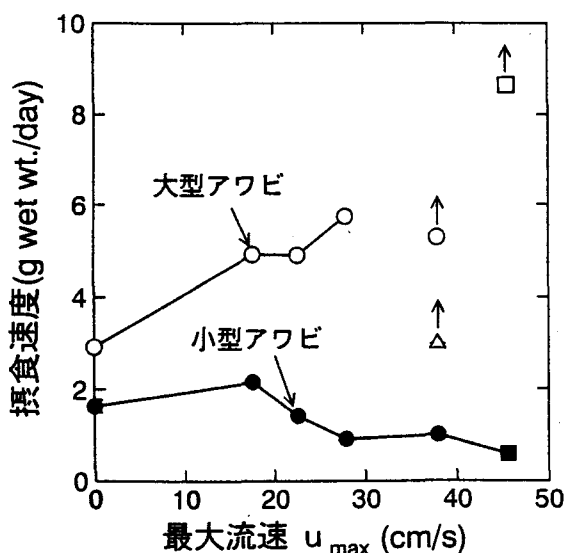


図6 大型(白印)および小型(黒印)のエゾアワビの摂食に及ぼす振動流の影響. 水温20°Cで、水に戻した乾燥コンブを流れ藻の状態に入れた場合. 海藻の大きさ: 5×10cm(円), 10×20cm(三角形), 10×30cm(正方形). 矢印は入れた海藻が全て食べられたことを示す。

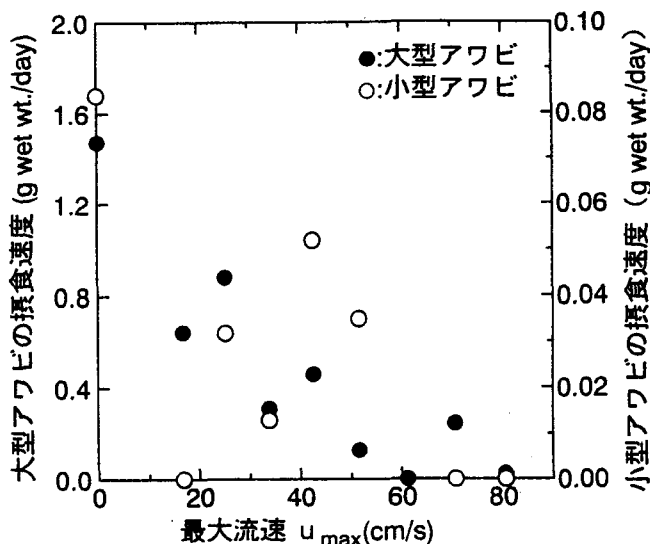


図7 エゾアワビの摂食に及ぼす振動流の影響. 水温10°Cで、水に戻した乾燥棒前昆布(長さ30cm)を重りで押さえて揺動させた場合.

下では最大流速の増加に伴い、大型および小型のアワビの摂食速度とも直線的に減少し、 u_{max} が80cm/s程で0になった。一方、20°Cの高水温下では u_{max} の増加に伴い、小型個体では低水温の場合と同様に減少したが、大型個体では反対に $u_{max} < 約50\text{cm/s}$ の範囲では増加する結果となった。この相異の原因はこの実験からだけでは明らかに出来ないが、その原因としてエゾアワビの運動能力が水温の上昇によって向上し、捕食限界の u_{max} が増加したことが、または図6の実験では餌料海藻を流れ藻の状態と与えたため、 u_{max} の増加に伴い餌の動揺振幅が増加してエゾアワビに探知されやすくなったことが上げられる。しかしいずれにしても、エゾアワビの捕食限界の u_{max} はキタムラサキウニより大きく、水温10°C以上であれば小さくとも80cm/s程以上であることが判った。

考察

実験結果の妥当性を検討するため、事例として三陸沿岸を対象としてキタムラサキウニ、エゾアワビおよび大型海藻の垂直分布と波動流速との関係を調べてみた。

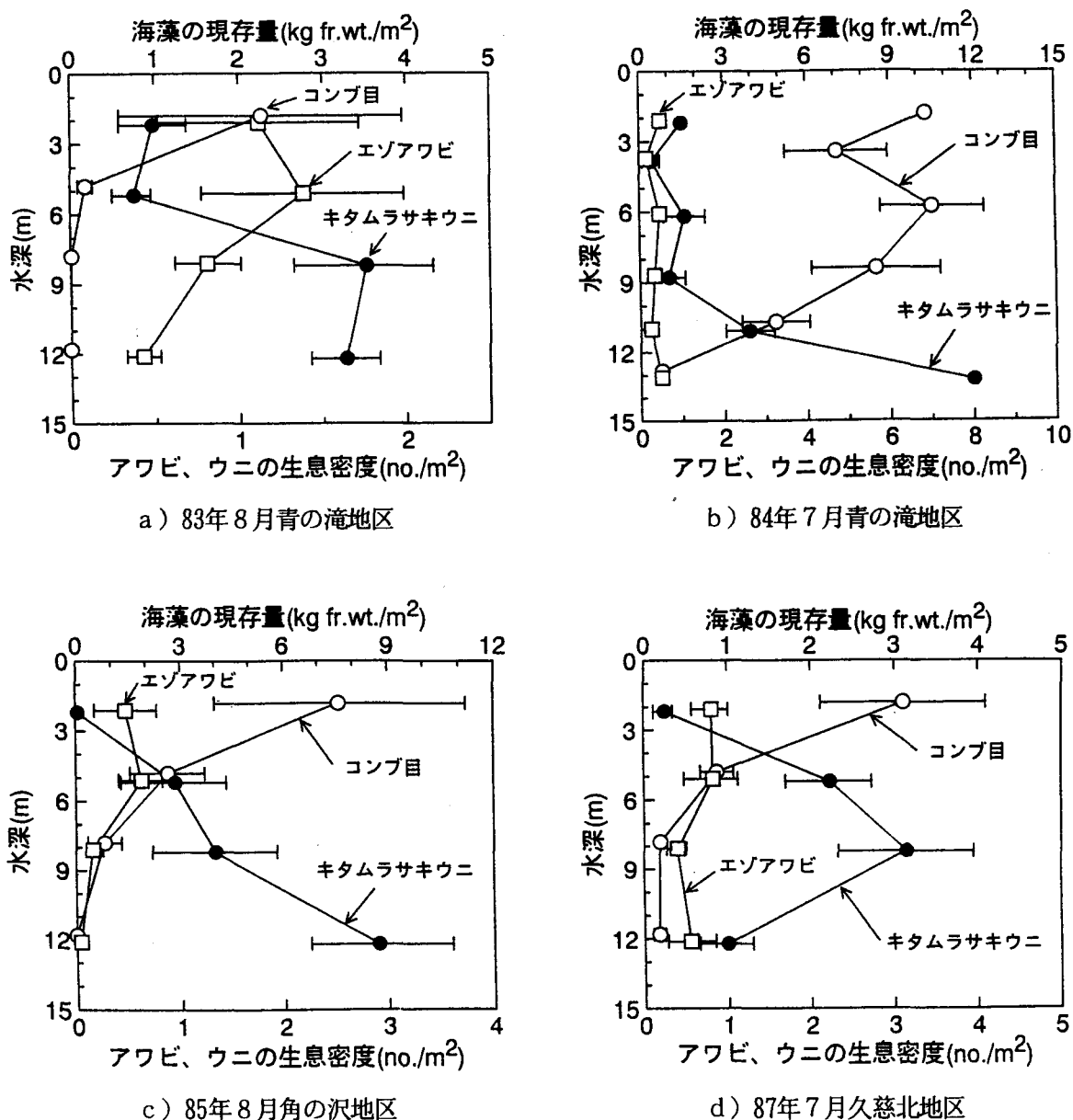


図8 三陸沿岸におけるコンブ目、エゾアワビおよびキタムラサキウニの垂直分布^{5) 6) 7)}

図8は岩手県が三陸の磯根漁場で夏期に実施した杵取り調査の結果^{6) 6) 7)}より、エゾアワビ、キタムラサキウニおよびコンブ目の垂直分布を示したものである。エゾアワビは水深5 m以浅の浅い所に多く生息する傾向があるのに対して、キタムラサキウニはいずれの地区でも波浪の影響が強い浅所で少なく、深所に多く分布した。この分布の相異は実験から判った波動に対する両種の抵抗力の差異に因ると考えられる。また図8では特に浅所でキタムラサキウニが少なくコンブ目が繁茂し、逆に深所ではキタムラサキウニが多くコンブ目が少ないという垂直分布様式が注目される。このコンブ目とキタムラサキウニの分布境界の水深は一定でなく、84年には他の年に比較して明らかにコンブ目の分布帯が深所へ拡大し、それに伴いキタムラサキウニの高密度帯が押し下げられるように深所へ移行した。84年にコンブ目を主体とした大型海藻が非常に繁茂したのは、一般に水温が冬から初春にかけて異常に低かったためであると考えられている。図9が明示するように84年の2月～4月の水温はキタムラサキウニがほとんど摂食しなくなるといわれている5℃以下であった。このため、この時期に幼芽であった海藻が捕食されずに生残り、急速に成長して繁茂したと考えられている。

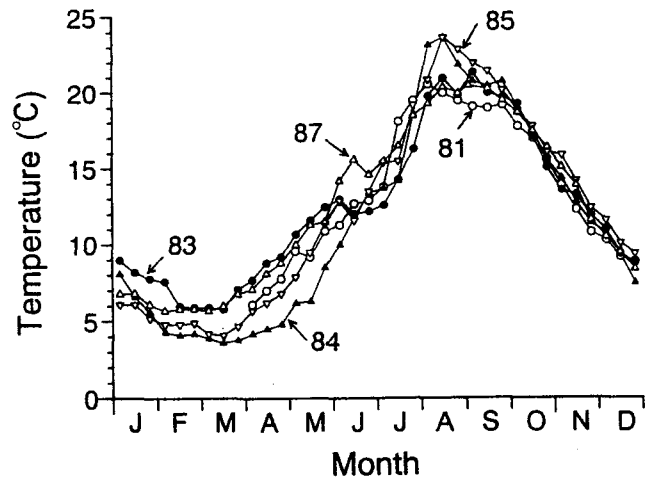


図9 久慈湾表層水温の経年変化^{8) 9)}

この事実は平年における海藻の分布下限が光条件の制約によって決まっているのではなく、キタムラサキウニなどの植食動物の摂食によって決まっていることを示唆している。しかし海藻の生育量あまり多くない平年にもキタムラサキウニが浅所にある大型海藻の密生帯にあまり侵入せずその沖側縁辺部に蝟集するのは波浪による海水の動揺がキタムラサキウニの活動を抑制しているためと考えざるを得ない。

そこで三陸沿岸の波浪の影響を定量的に評価するため、岩手県が島ノ越漁港で2時間毎に観測している沖波波高データのうち1986～1991年の有義波の波高および周期の記録を用いて水深毎の波動流速の最大値 u_s の確率分布を推算してみた。計算では主要18分潮による推定潮位により平均海面の変化を考慮して、勾配1/10の平坦な漁場に沖波が海岸線に垂直に入射したと仮定し、合田¹⁾の碎波限界式で与えられる碎波水深より深い所では微小振幅波理論と首藤²⁾および磯部・堀川³⁾の式を用いて u_s を推定し、また碎波帯では磯部⁴⁾の現地観測結果を参考にして

$$u_s \sim 0.3\sqrt{gh} \dots\dots\dots(3)$$

で概算した。ここに、 g ：重力加速度、 h ：水深。

図10はその結果得られた水深毎の u_s の累積確率分布である。実験で発生させた規則的な振動流の u_{max} と現場の有義波から得られた u_s を同一視することに多少の問題が残るが、キタムラサキウニの摂食限界を $u_s = 40\text{cm/s}$ と考えると、外洋からの波浪を直接受ける漁場ではキタムラサキウニが海藻を摂食できる期間は、水深2 mまでは1%以下と非常に短く、キタムラサキウニはほとんど摂食できないと予想される。この予想は図8で示された水深2 mでのキタムラサキウニの密度がほとんど0であったことに合致している。水深が2 mより深くなると、キタムラサキウニが摂食できる期間は急に長くなり、水深8 mでは50%を超える。キタムラサキウニが高密度に生息することを考慮すると、8 m以深では大型海藻はほとんど食い尽くされると考えられるが、海藻の生育量が少なかった年の調査結果はそのことを明確に示している。

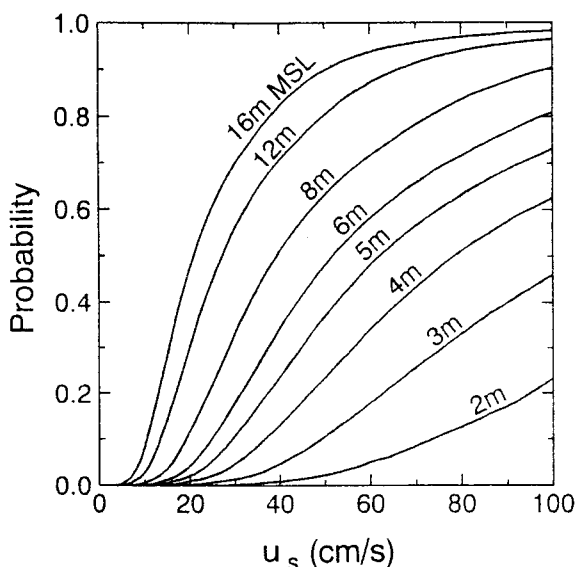


図10 三陸沿岸における水深毎の u_s の累積確率分布

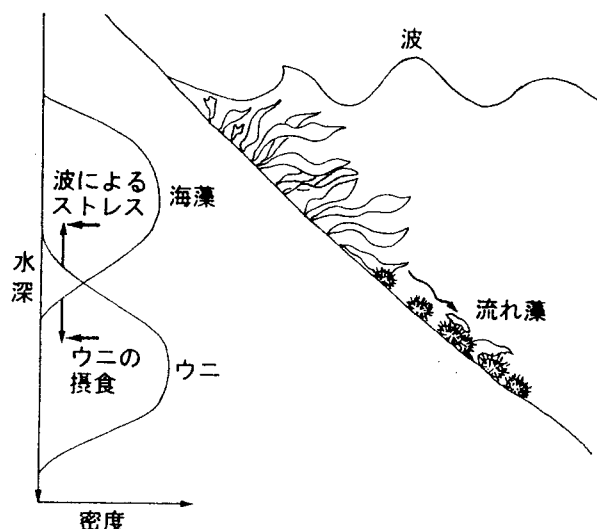


図11 大型海藻とキタムラサキウニの垂直分布の形成概念図

以上の結果をまとめると、海藻・ウニの垂直分布にみられる明瞭なパターンの形成過程は図11のように模式的に示される。海藻群落は光合成生産に有利な浅所に発達するが、その下部からウニの食害を受ける。しかし浅所では波浪による海水の動揺が激しくなるため、ウニの摂食活動が抑制される。このためウニが活発に摂食できる水深までは海藻が消失し、ウニ個体群の大部分は摂食が安全にできる深所において海藻群落から流出してくる流れ藻を捕食することとなる。このような過程から容易に推察されるようにウニの摂食圧が強い磯焼け状態の漁場でも、波浪制御や浅場の造成によって海藻群落をウニの食害から守ることが出来ると考えられる。

摘要

振動流水槽を用いた室内実験によりキタムラサキウニ（殻径>約5cm）およびエゾアワビ（殻長>約5cm）に及ぼす波浪の影響を調べ、以下の結果が得られた。

- ① 振動流の最大流速を u_{max} で表すと、キタムラサキウニの摂食速度は u_{max} が約26cm/sを超えると急激に減少し、40cm/s程でほとんど0になり、その摂食抑制の程度は式(2)で与えられる。
- ② キタムラサキウニは $u_{max} > 70$ cm/s程でほとんど動けなくなる。
- ③ エゾアワビの振動流に対する抵抗力はキタムラサキウニより強く、水温10°Cで $u_{max} \sim$ 約80cm/sまで海藻を摂食した。また水温20°Cでは殻長9cm程の大型個体は $u_{max} <$ 約50cm/sの範囲で振動流が強くなるほど流れ藻の摂食速度が増加した。振動流によるアワビ摂食抑制は殻長、水温および海藻の状態に依存すると考えられ、今後の課題として残された。

また三陸沿岸の生物分布を調べるとともに波動流速の確率分布を推定し、本実験結果が妥当であることを確かめ、波浪が磯焼け漁場において海藻の生残に重要な役割を果たしていることを明示した。

引用文献

- 1) 合田良實, 1975: 浅海域における波浪の碎波変形, 港湾技術研究所報告, 14, 59-106.
- 2) 首藤伸夫, 1974: 非線形長波の変形, 第21回海岸工学講演会論文集, 土木学会, 57-63.

- 3) 磯部雅彦・堀川清司, 1981: 砕波帯付近における流速場の浅水変化に関する研究, 第28回海岸工学講演会論文集, 土木学会, 5-9.
- 4) 磯部雅彦, 1981: 砕波に伴う水粒子速度の鉛直分布観測, NERC Rep. No. 14, TR-80-2, 第5回合同総合現地観測報告書, 海岸環境工学研究センター, 251-260.
- 5) 岩手県, 1986: 昭和58・59年度大規模増殖場造成事業調査報告書(青の滝地区), 1-68.
- 6) 岩手県, 1987: 昭和60年度大規模増殖場造成事業調査報告書(角の沢地区), 1-54.
- 7) 岩手県, 1989: 昭和61・62年度大規模増殖場造成事業調査報告書(久慈北地区), 1-38.
- 8) 岩手県栽培漁業センター, 1981-1986: 昭和56~61年度岩手県栽培漁業センター事業報告.
- 9) 岩手県南部栽培漁業センター, 1987: 昭和62年度岩手県南部栽培漁業センター事業報告.