

生態を考慮したウニ養殖場の設計について

Design of an aquacultural propagation ground for sea urchin
considering ecology

明田 定満* 佐藤 仁** 谷野 賢二***

松山 恵二**** 吾妻 行雄*****

Sadamitsu AKEDA, Jin SATOH, Kenji YANO,
Keiji MATSUYAMA and Yukio AGATSUMA

ウニ養殖場を計画・設計するためには、ウニの生態学的側面から設計条件を検討することが重要である。そこで、ウニ類の摂餌行動に及ぼす流速と水温の影響に関する現地調査を行い、摂餌行動の限界流速を明らかにした。

《養殖場；ウニ；摂餌行動；限界流速》

In order to plan and design an aquacultural propagation ground for sea urchins, it is important to examine the design conditions from ecological aspects of sea urchin.

Therefore, field surveys concerning the influence of current velocity and water temperature on the feeding behavior of sea urchins was conducted to clarify the critical velocity of the feeding behavior.

Keywords: aquacultural propagation ground, sea urchin, feeding behavior, critical velocity.

1. はじめに

近年、北海道日本海沿岸域において、コンブなどの有用海藻が消失する一方で、無節サンゴモが繁茂することにより、磯魚の減少やアワビ、ウニなどの生産が激減する「磯焼け現象」が顕在化している。北海道立中央水産試験場（以下、中央水試という）は、磯焼け現象は海域の貧栄養に起因し、その持続原因は、①ウニ類など草食性動物による食圧、②無節サンゴモの繁茂、であると推定している¹⁾。中央水試は以上の仮説

に立ち、海藻群落の回復を目指して、磯焼けの持続原因とされるウニ類の食圧を低減させるために、ウニ類を適正密度まで漁場から間引きするとともに、間引きしたウニ類を高密度給餌養殖することを提案している¹⁾。

開発土木研究所では、中央水試が提案した磯焼け対策を具体化するために、図—1に示すような平磯の袋間を利用した養殖場を提案した²⁾。平磯の袋間を利用する利点は、①平磯を消波施設として利用できるため、静穏域を形成しやす

*水産土木研究室副室長 **同室研究員 ***同室長 ****北海道水産部漁政課主幹(前北海道立中央水産試験場増殖部主任研究員)
*****北海道立中央水産試験場増殖部海藻科長

く、②陸上から養殖管理作業(種苗放流, 給餌作業や水揚げなど)を行えることである。これまでに、開発土木研究所では平磯の袋間を利用したウニ養殖場の静穏度を確保するために必要な消波施設の配置規模について、水理実験や非定常緩勾配方程式を用いた数値解析から検討してきた³⁾⁴⁾。また、ウニ類の生物学的側面からウニ養殖場が保持すべき水理機能に関連して、ウニ類の摂餌行動に及ぼす波、流れの影響に関する現地調査を行い、ウニ類の摂餌行動の限界流速について検討した⁵⁾。

本論では、ウニ類の摂餌行動に及ぼす流速と水温の影響について考察するとともに、ウニ類の摂餌行動に配慮したウニ養殖場の設計法の考

え方について提案するものである。

2. 夏季におけるウニ養殖場内の水温塩分特性

養殖対象種であるエゾバフンウニ、キタムラサキウニの養殖制限要因となる夏季の水温塩分特性の現地観測を、平成4年7月30日から9月17日までの50日間、図-2に示す松前町札前地区の袋間を利用したウニ養殖場で行った。なお、観測点はウニ養殖場の消波施設として設置された消波堤の沖側に1地点、内側に3地点である。

(1) 水温

北海道日本海沿岸域の代表的なウニ類であるエゾバフンウニ、キタムラサキウニの水温耐性については、エゾバフンウニは水温が20℃を越えると摂餌行動が低下し、23℃以上が長期間続くと斃死にいたること⁶⁾、またエゾバフンウニより暖海性種といわれているキタムラサキウニにとっても、23℃以上では摂餌行動の低下が見られることが知られている。

ウニ養殖場内外の4観測点ともに、おおむね同じ水温塩分分布を示しているため、一例として、ウニ養殖場内の中央の海底直近における水温塩分時系列を図-3に示す。養殖場内外の水温は、各測点ともに8月中旬から9月上旬ごろまで、エゾバフンウニの適正生息限界水温を越える23℃以上となり、最高25℃に達する。近年、渡島半島日本海沿岸域のウニ養殖場では、高水温に起因するウニ類の斃死が見られ、夏季に風が長期間続けば、養殖ウニ類の大量斃死の危険性が漁業関係者から指摘されている。したがって日本海沿岸域の養殖場や漁港内蓄養施設の計画設計においては、夏季の高水温対策が必要不可欠と思われる。

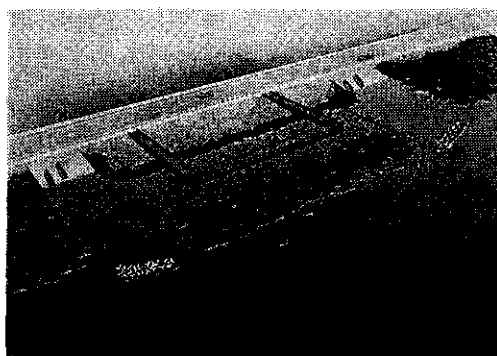


図-1 袋間を利用した養殖場の提案



図-2 袋間を利用した養殖場の一例(松前町札前地区)

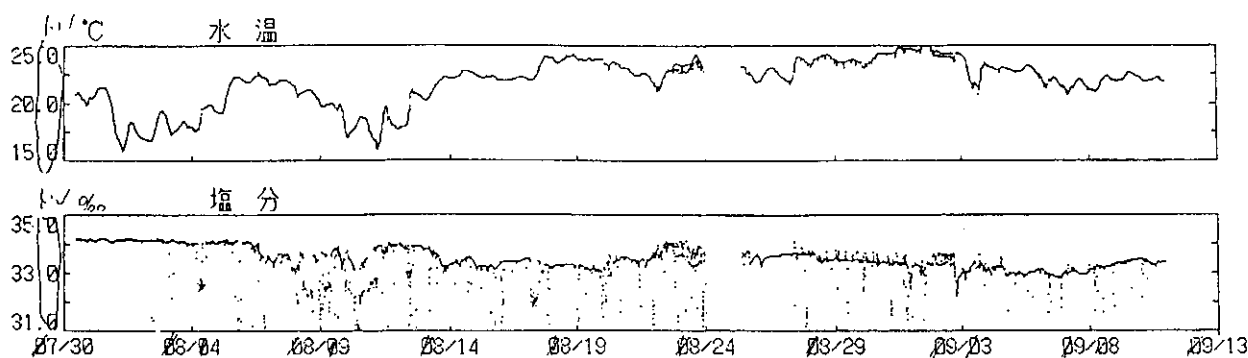


図-3 夏季におけるウニ養殖場の水温塩分の時系列分布(松前町札前地区)

(2) 塩分

河川水の影響を強く受ける海域では、融雪や台風による大量出水の影響でウニ類が大量斃死することが見られる。ウニ類の適正塩分範囲は28~30‰以上と推定されており⁶⁾、河川水の影響を受け低塩分となる海域でない限り、塩分はウニ類の生息制限要因にはならない。なお、観測期間中の塩分は33~34‰であり、ウニ類の生息に支障ない範囲であった。

3. ウニ摂餌環境の制限要因

ウニ類の生物学的な側面から、ウニ養殖場が保持すべき水理機能を明らかにし、消波施設などの整備手法を確立するためには、ウニ類の摂餌環境の制限要因として考えられる波、流れ、水温、塩分などの影響を把握しておく必要がある。これら環境要因の中で水温、塩分については、生息適正範囲や限界値がすでに報告されているが⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾、波、流れの影響や環境要因相互の影響についてはほとんど解明されていないのが現状である。そこで、漁港などの静穏水面を利用したウニ養殖試験水面において、波浪、流況の連続観測とウニ類の摂餌行動の観察から、ウニ類

の行動限界、摂餌限界に相当する波高条件、流速条件を把握しようと試みた。

(1) 観測方法

ウニ類の摂餌活動および波高・流速などの現地観測は、図-4に示す北海道日本海沿岸の寿都町美谷漁港内のウニ養殖試験水面において、水温低下により摂餌行動が抑制される冬季間の平成4年11月26日から平成5年4月13日までの139日間行った。ウニ養殖試験水面にキタムラサキウニ約5000個を放流し、約1週間ごとに餌料(ホッケ, *Pleurogrammus azonus*)を与え、ウニ類の摂餌行動を水中ビデオカメラを用いて1秒1コマの割合で撮影した。波高は水圧式波高計により4時間ごとに0.5秒間隔で約17分間(2000データ)測定した。流向流速、水温、塩分の測定は、20分ごとに1秒間隔で20秒間測定した。

次に、摂餌行動が活発になる春~夏季におけるウニ類の摂餌行動と波、流れの現地観測は、図-4に示す小樽市忍路湾のウニ養殖試験水面において、平成5年5月14日から7月31日までの79日間行った。約5日ごとに餌料(ホソメコンブ, *Laminaria religiosa*)を与え、ウニ類の摂餌行動を水中ビデオカメラを用いて4秒1コ

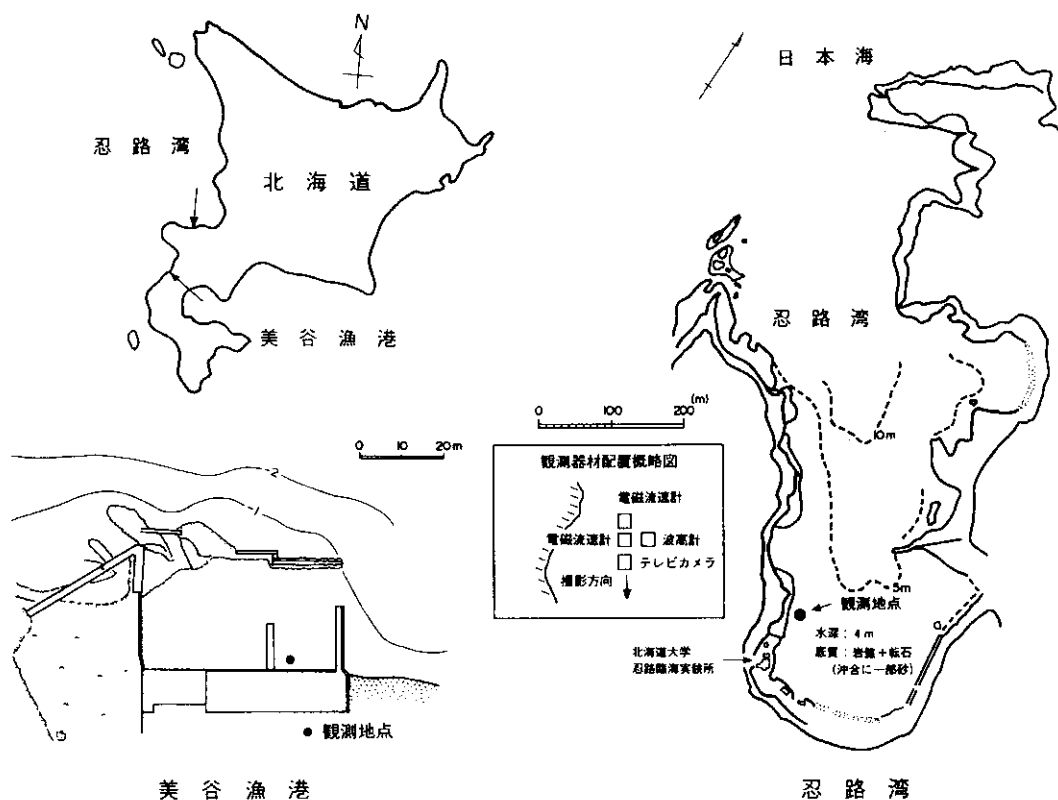


図-4 ウニ養殖試験水面(寿都町美谷漁港, 小樽市忍路湾)

マの割合で撮影した。波高は水圧式波高計により4時間ごとに0.5秒間で約17分間測定した。流向流速、水温塩分は、60分ごとに0.5秒間隔で120秒間測定した。なお、餌料に蟻集したウニ類の大半はキタムラサキウニであり、一部エゾバフンウニが認められた。

(2) 養殖試験水面内の流速と水温の変化

流速は、20秒間(忍路湾では120秒間)に測定された最大値の4時間ごとの平均値 V_{max} とし、水温は4時間ごとの平均値 T で表示した。一例として、美谷漁港における流速と水温の時系列を図-5に示す。美谷漁港におけるウニ養殖試験水面での摂餌行動観察期間中の流速は、時化時に最大値51.6cm/secを記録し、静穏時には8~15cm/sec程度であった。また、水温は観測当初10℃前後であったが徐々に低下し、2月11ころに最も低い4℃まで低下した。その後、約5~6℃の間で推移し、2月の後半から上昇し始めた。

忍路湾におけるウニ養殖試験水面での摂餌行動観察期間中の流速は、北海道南西沖地震津波の来襲時に平均流速54cm/secが観測されたが、それ以外ではおおむね15cm/sec以下であった。水温は観測当初11℃前後であったが、7月末には20℃前後まで上昇した。

(3) ウニ類の行動

ウニ類の行動分類は4時間ごとに行い、ウ

ニ類の行動を以下に示す3ランクに分類した。なお、ビデオ解析は観察開始時にウニ個体数が20個体以上いる場合を解析対象とした。

ランクA：動かない。

ランクB：一部のウニが初期位置の近傍を移動する。

ランクC：摂餌行動あり、動きが活発。

水温が10℃未満で餌料がある場合のウニ類の行動に及ぼす流速と水温の影響を、図-6に示す。図は横軸に水温 T 、縦軸に流速 V_{max} をとり、パラメータとして前述のウニ類の行動ランクをとった。図中の実線は、各々の行動ランクの限界を概略示したものである。水温が7℃以下では、ランクCおよびBの流速に対する限界値は水温低下とともに低下する傾向にあり、水温がキタムラサキウニの摂餌限界水温とされる5℃以下になるとほとんど摂餌しなくなる。一方、水温が7℃以上では、ウニ類の行動は水温よりも流速による影響の方が卓越し、ウニ類の行動と流速の関係は、

- ①流速 V_{max} が40cm/sec以上の場合はほとんど動かない。
- ②流速 V_{max} が30~40cm/secの間では、多少移動することはできるが摂餌を行うほど活発な行動は示さない。
- ③流速 V_{max} が20cm/sec以下の場合、活発に行動し摂餌を行う。

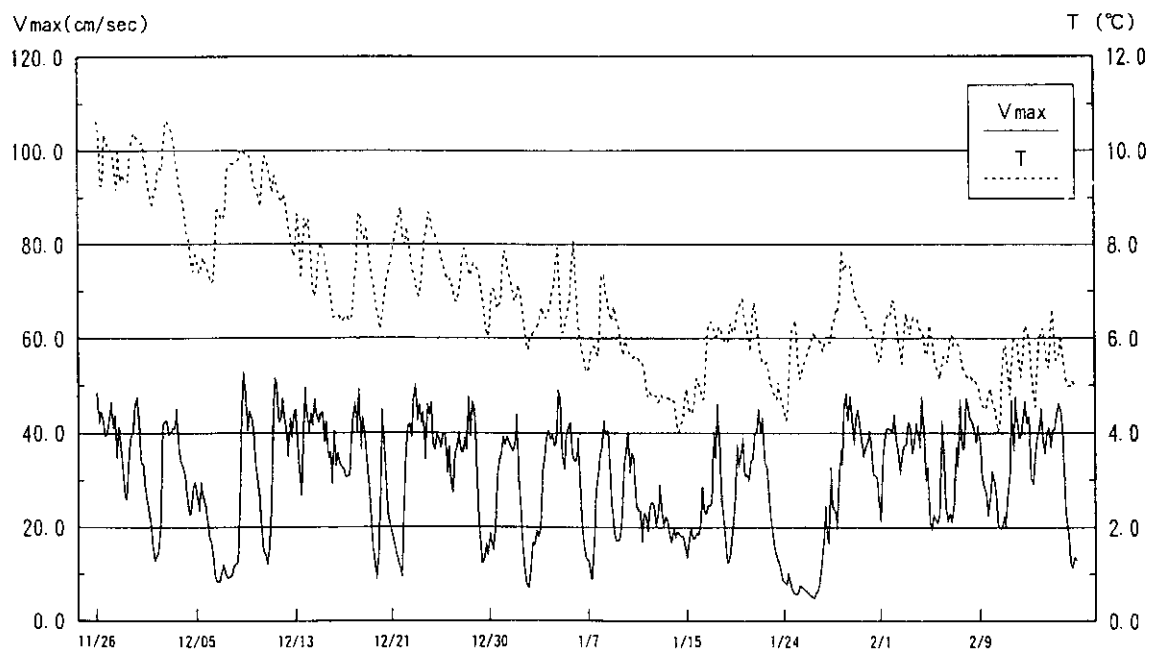


図-5 流速と水温の時系列(寿都町美谷漁港のウニ養殖試験水面)

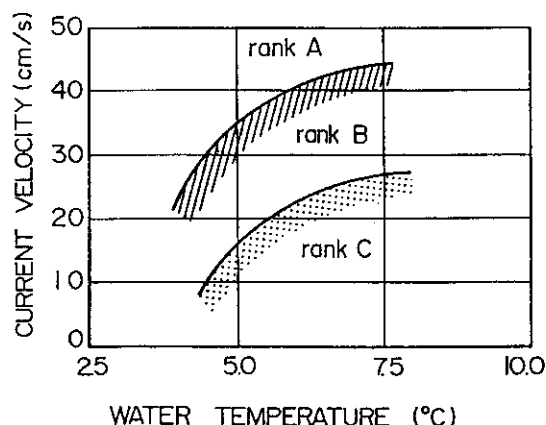


図-6 ウニ類の行動に及ぼす流速と水温の影響

が観察された。以上の観察結果から、ウニ類の行動に及ぼす水温の影響は水温7℃以下に限定されることが窺われる。ウニ類の行動と流速の関係は、摂餌可能な領域は20cm/sec以下、行動可能領域は40cm/sec以下であること、また、50cm/sec程度の流速であれば、流れにより強制的に剝離されないことが明らかになった。

上記の観察結果は、海底が平坦な岩盤で周囲に流れを遮る障害物がほとんどなく、波浪による流れが直接的にウニ類に作用する環境下で得られたものである。海底面に大小の玉石がある場合、岩盤に突起や亀裂がある場合、ブロックなどの基質が敷設されている場合には、海底が平坦な岩盤の場合より、ウニ類の生息場所近傍の流れは遅くなることが容易に推測される。海底面の凹凸の状況により、どの程度流速が低減するかは不明であるが、施設設計上の限界流速は生物学的な限界流速より大きくなることが窺われる。

川俣ら¹⁰⁾は、振動流水槽を用いて振動流速とキタムラサキウニの行動の関係を検討し、ウニの摂食速度と移動速度に及ぼす振動流の影響を明らかにしている。図-7に示すウニの摂食速度に及ぼす振動流速の関係から、振動流の最大流速が20cm/sec以下では、振動流はウニの摂餌行動に影響を及ぼさないこと、20cm/secを越えると摂食速度が激減し、40cm/sec以上でほとんど摂餌しない状態となることがわかる。また、図-8に示すウニの移動速度に及ぼす振動流速の関係から、振動流の最大流速が20cm/secを越えると、振動流はウニの移動に影響を及ぼし始め、

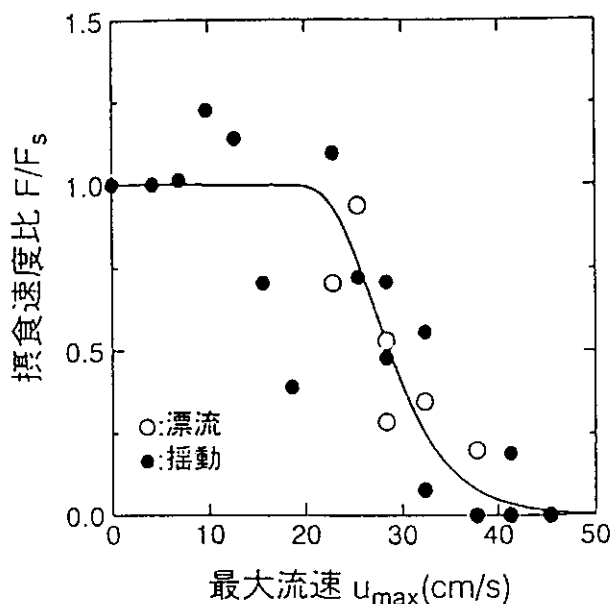


図-7 キタムラサキウニの摂食速度に及ぼす振動流速の影響¹⁰⁾

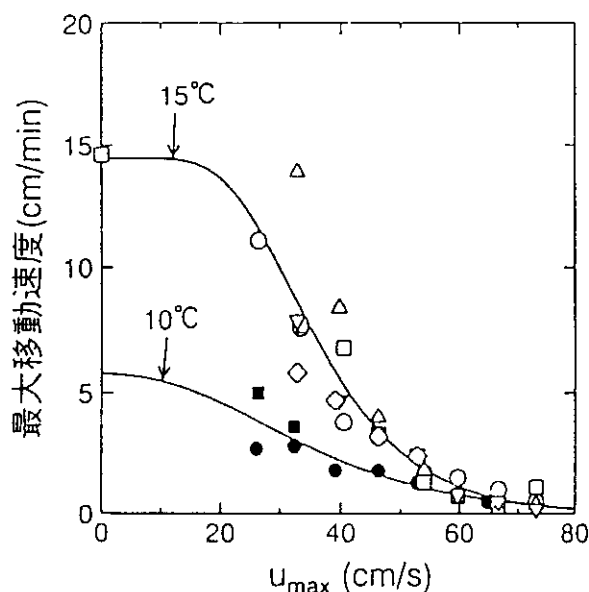


図-8 キタムラサキウニの移動速度に及ぼす振動流速の影響¹⁰⁾

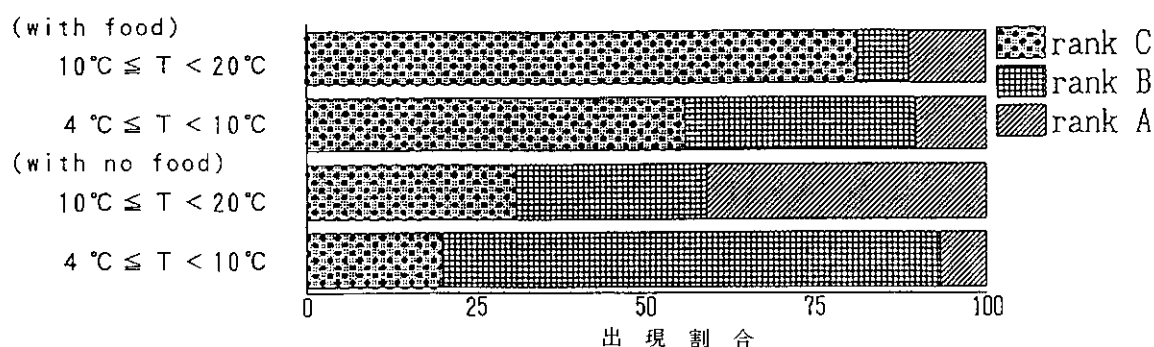
摂餌限界の40cm/secを越える60～70cm/sec程度までは移動可能であることがわかる。

以上の結果から、キタムラサキウニの摂餌や移動に制限がない限界流速は20cm/sec、摂餌限界流速は40cm/sec、移動限界流速は60～70cm/secと推定される。これらの限界流速は現地調査から得られた結果とほぼ同様の値、傾向を示しており、キタムラサキウニの行動の限界流速の概要を把握できたものと考えられる。

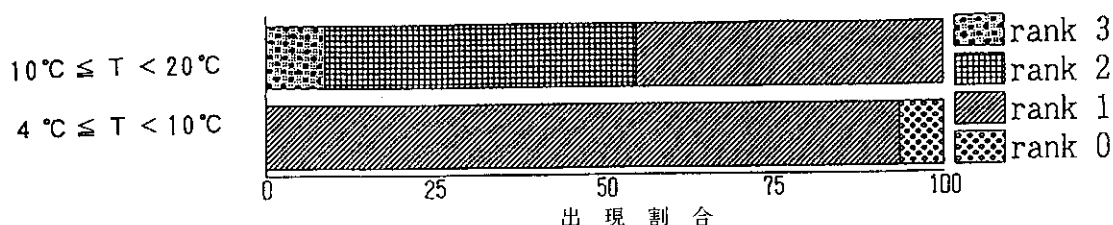
活発に行動し、摂餌する $V_{max} \leq 20 \text{ cm/sec}$ に

おけるウニの行動について、餌の有無と水温の関係¹¹⁾を図一9に示す。水温が10℃以上ではウニが活発に行動し摂餌するランクCが50%を超える。一方、餌がない場合には、ウニの行動は水温に係わりなく不活発であり、ランクA、Bが70%程度となったことから、ウニ類特にキタムラサキウニの行動は餌料の存在により行動的になることが推測された。

ウニ類の行動の餌料に対する指向性を明確にするために、動きのある個体のうち、餌に向かって移動する個体数の割合を以下に示す4ランクに分類し、水温との関係を調べた¹¹⁾。



図一9 ウニ類の行動に及ぼす餌の有無と水温の影響¹¹⁾



図一10 餌に向かうウニ類の行動と水温の関係¹¹⁾

餌料がない場合、ウニの行動に方向性を認められなかった。また、ウニは日没時および日の出時に活発になる日周行動を示すことが指摘されているが¹²⁾、今回の調査でも、岩、玉石など逃避場所のある個体は日没時に行動を開始し、日の出時に岩陰に退避する行動が観察された。

4. ウニの摂餌活動を考慮したウニ養殖場の設計について

波浪の影響が強い静水面付近の浅所にはウニ類の生息量が少なく海藻類が繁茂しており、逆に深所ではウニ類の生息量が多く、海藻類がきわめて少ない。このようなウニ類と海藻類の垂直分布は北海道のみならず、日本全国の多く

- ランク1：なし
- ランク2：一部
- ランク3：半数程度
- ランク4：半数以上

解析に使用したデータは、 $V_{max} \leq 20 \text{ cm/sec}$ 、観察開始時のウニ個体数が20個体以上、行動するウニ個体数が10個体以上とした。餌に向かうウニの行動と水温の関係を 図一10に示す。水温が10℃以上であれば、活発に餌に向かって行動する様子が認められる。一方、水温が10℃以下ではランク1が94%を占め、餌に向かう行動を示す個体がわずかであることがわかる。なお、

の海岸で観察されており、水産土木研究室が瀬棚港、松前港で実施した生態調査においても同様な垂直分布が認められている¹³⁾。実海岸で観察されるウニ類と海藻類の垂直分布に対して物理的な解釈を行うために、川俣ら¹⁰⁾は、波浪出現率から水粒子速度の確率分布を算出し、ウニ類の摂餌限界流速を40cm/secとすれば、水深2mでの摂餌可能期間は1%以下、水深5mでは約25%程度、水深8mでは50%を超えることを示している。

磯焼け対策のためのウニ養殖は、磯焼け漁場や餌料海藻の少ない深所にいる商品価値の低いウニ類を、秋～春季に高密度に飼育し、給餌養殖を施すことにより、商品価値を高め、遅くと

も初夏までに出荷することを計画している。日本海沿岸域のウニ養殖場には冬季間の激浪が作用すること、自然界の生息密度以上に高密度に給餌養殖することから、ウニ養殖場、特に消波施設を計画、設計する際には、冬季間の激浪対策とともに、従来以上にウニ類の生態に配慮することが求められる。ウニ類の生態に配慮したウニ養殖場を整備するためには、養殖場内の底面流速を、ウニ類の適正生息限界流速以内に所要期間制御する立場に基づき、ウニ養殖場の波波施設の配置(法線長、離岸距離など)や構造(天端高、天端幅、空隙率など)を決定することが望ましい。

ここで、ウニ養殖場を計画、設計する際に検討すべき漁場内の所要静穏度は、①養殖施設の保全、②養殖作業、③養殖対象種の生育管理(具体的には、養殖対象種の行動限界や摂餌許容限界)から検討して定める。①は、養殖施設(ウニ養殖場に設置される石材、ブロックなどの付着基質)が、波浪により破壊されたり移動転倒しないように、施設の耐波許容限界波高以下にウニ養殖場内の波浪を制御する。②は、養殖作業、(給餌、磯掃除、出荷などの日常管理)のための作業限界波高以下に、ウニ養殖場内の波浪を制御する。海面養殖の場合、限界波高は1.0 m程度である。③は、波浪によりウニ類の摂餌を阻害しない、行動を阻害しない程度にまで養殖場内の波浪を制御する。ウニ養殖期間は秋～春季、遅くとも初夏までであるので、1～3年確率波以下の波浪が対象となる。

上記の所要静穏度を考慮した消波施設の機能設計のフロー⁴⁾を図-11に示し、その概要を以下に説明する。なお、消波施設に使用するブロックの所要重量は、別途算定する。

- ①対象海域の波浪出現率から、波高の未超過確率を求める。
- ②消波施設の規模配置を仮定し、養殖場内の波浪出現率を推定する。
- ③養殖施設の保全、養殖作業日数や餌料効率などを勘案した所要静穏度と、養殖場内の波浪出現率を比較検討し、所要静穏度を満足しない場合は②にもどる。
- ④ウニの摂餌限界流速、生息限界流速を勘案

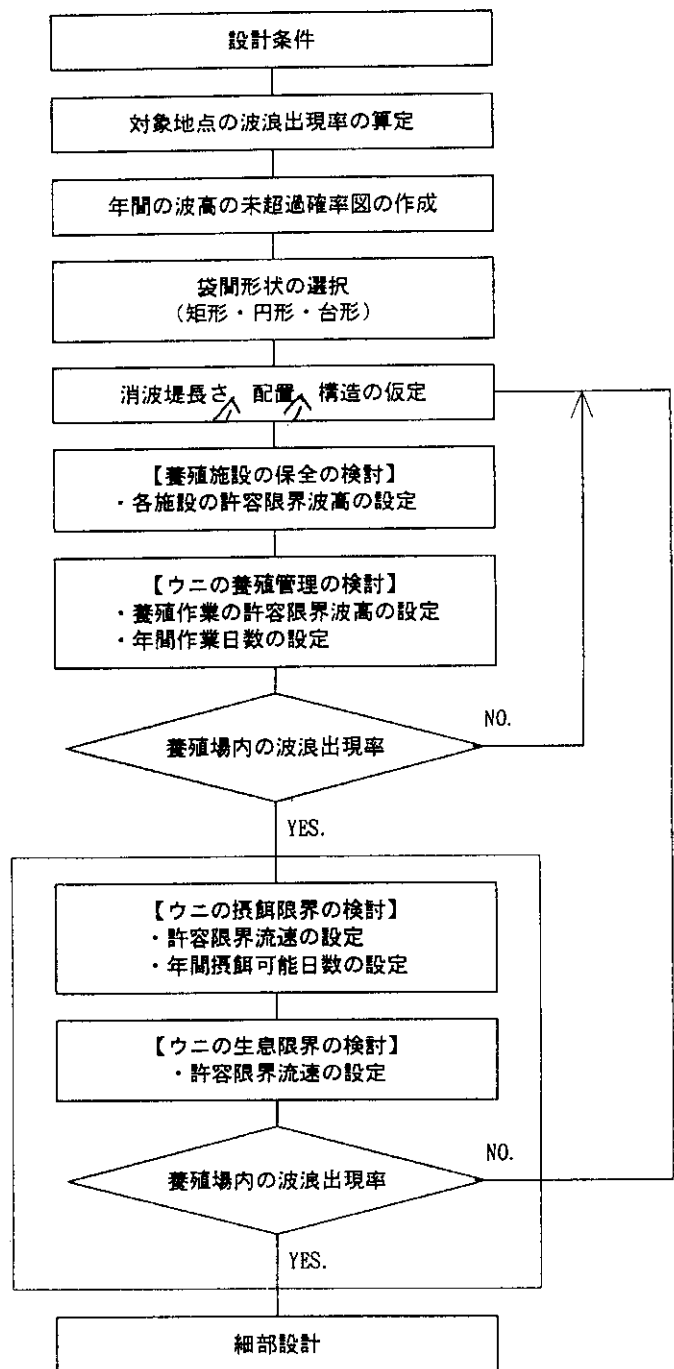


図-11 消波施設の機能設計のフロー

した所要静穏度と養殖場内の波浪出現率を比較検討し、所要静穏度を満足しない場合は②にもどる。

- ⑤消波施設などの細部設計を行う。

5. 結 語

北海道日本海沿岸域に生息するウニ類、特にキタムラサキウニの摂餌行動に及ぼす水温と流速の影響をある程度明らかにすることができた。

北海道のような寒冷地海域にウニ養殖場を計画する場合、夏季の高水温対策と冬季の波浪制御が重要となることがわかった。

本研究は、沿岸漁場整備開発調査費による直轄調査課題「磯焼け地帯における磯場環境制御技術に関する研究」(平成2～5年度)による補助を受けて実施したこと、ウニの摂餌行動と物理環境に関する現地調査は、中央水試増殖部と共同で行ったことを付記する。また、大森康弘氏(現 農林水産省中四国農政局高知西南開拓建設事業所)には、水産土木研究室在籍中に現地調査を担当して戴いた。

本論の最後に当たり、調査の実施に数々の御配慮戴いた水産庁開発課、北海道開発局農業水産部水産課の関係各位に対し謝意を表す。

参考文献

- 1) 松山恵二：北海道の磯焼けの対策，育てる農業，No.217，pp.2～12，1991.
- 2) 佐藤 仁・明田定満・谷野賢二：磯場の袋間を利用した増養殖水面の水理特性について，海洋開発論文集 vol.9，pp.385～389，1993.
- 3) 佐藤 仁・明田定満・谷野賢二：傾斜堤による袋間内の波浪制御について，開発土木研究所月報，No.484，pp.2～10，1993.
- 4) 佐藤 仁・明田定満・谷野賢二：袋間を利用したウニ養殖場の造成について，第37回(平成5年度)北海道開発局技術研究発表会発表概要集(4)，pp.215～218，1994.
- 5) 佐藤 仁・明田定満・谷野賢二：ウニの摂餌活動における波・流れの影響について，土木学会第48回年次学術講演会講演概要集第2部，pp.974～975，1993.
- 6) (財)海洋生物環境研究所：沿岸至近域における海生生物の生態知見，貝類・甲殻類・ウニ類編，平成3年3月.
- 7) 増殖場造成指針作成委員会編：増殖場造成指針，地球社，1982.
- 8) (社)日本水産資源保護協会：環境条件が魚介類に与える影響に関する主要要因の整理，1983，年3月.
- 9) (社)日本水産資源保護協会：水生生物生態資料，1983.
- 10) 川俣 茂・足立久美子・山本正昭：キタムラサキウニに及ぼす波浪の影響，平成6年度日本水産工学会学術講演会講演論文集，pp.85～88，1994.
- 11) 谷野賢二・明田定満・佐藤 仁・松山恵二・吾妻行雄・中多章文：ウニの摂餌活動に及ぼす物理環境要因について，テクノ・オーシャン94論文集，1994.(印刷中)
- 12) 富士 昭：北海道のウニとその増殖，日本水産資源保護協会，1969.
- 13) 武内智行・増田 亨：松前港における水産生物生息分布状況調査，海岸工学論文集，第38巻(2)，pp.921～925，1991.