

# ウニ・アワビ漁場造成に係わる 事前評価法の開発

独立行政法人 水産総合研究センター 水産工学研究所 水産土木工学部 桑原久実  
平成 12～14 年度

## 緒言

北海道の後志から渡島にかけての日本海沿岸は、ホソメコンブをはじめとする大型海藻が極浅所に分布を限定され、その沖側は高密度のキタムラサキウニが分布しサンゴモ平原が広がる、所謂“磯焼け”状態にある。ウニ類やエゾアワビ等は、極端に餌料海藻が不足しているため身入り・成長が悪く、漁業振興上の問題となっている。この為、従来から海藻の付着基質を提供する目的で投石やブロック等が数多く設置されてきた。直後は海藻が繁茂するものの、数年経過するとウニの食圧が制御されないため元の磯焼けに戻る場合があり問題となっている<sup>1)</sup>。しかしこの様な海域でも、波当たりが強くウニの食圧を低く抑える場所では、海藻の成長がウニの摂食に勝り、毎年群落を形成する事がわかっている。海藻の成長とウニの食圧がバランスするような環境を評価できれば、良好なウニ漁場の造成が可能と考えられる。

この様な背景から本研究は、まず波浪・水温・光などの影響を考慮してホソメコンブの群落成長と、キタムラサキウニの摂餌と成長を表現できる個体群動態モデルを作成する。このモデルは、磯焼けする場所とコンブ群落を形成する場所を明らかにすると共に、ウニの成長や成熟を求めることができる。更にモデルを用いて、毎年コンブ群落を形成し良好なウニ漁場を造成する構造物の断面形を検討し、その最適な断面形に関する知見が得られた。予測計算により、漁場造成計画の評価を事前に実施可能であるため、事業の効果・効率の向上に活かせるものとする。

## 調査方法

### (1) ホソメコンブ群落成長モデルの概要

今回構築したモデルの中から、まずホソメコンブ群落成長モデルの概要を述べる。

群落光合成理論<sup>2)</sup>に、水中での光の消散を考慮すると、ホソメコンブの単位面積当りの群落光合成速度  $P_g$  ( $g \text{ wet}/m^2 \cdot \text{hr}$ ) は次式となる。

$$P_g = \int_0^F \frac{bKI_0 e^{-CD-KFz}}{1+aKI_0 e^{-CD-KFz}} dF_z \dots\dots\dots (1)$$
$$= \frac{b}{aK} \ln \frac{1+aKI_0 e^{-CD}}{1+aKI_0 e^{-CD-KF}}$$

ここで、 $I_0$  は海面直下における光量子束密度 ( $\mu \text{mol}/m^2 \cdot \text{sec}$ )、 $C$  は水中での光の消散係数 ( $m^{-1}$ )、 $D$  は水深 ( $m$ )、 $K$  は群落吸光係数、 $F$  は葉面積指数を示す。また係数  $b$  は光合成-光曲線の立上り勾配、 $b/a$  は光飽和値での光合成速度 ( $\mu gC/cm^2 \cdot \text{hr}$ ) を表す。松山の光合成速度測定結果<sup>3)</sup>より、解析期間(後述)にあたる季節平均値を作成し、 $a=0.00356$ 、 $b=0.1347$  を用い、群落吸光係数は  $K=0.65$  とした。また佐々木ら<sup>4)</sup>によると北海道日本海側南部での海水の消散係数は  $C=0.12$  となる。葉面積指

数は初期値を  $1.0\text{m}^2/\text{m}^2$  とし、現存量  $\Sigma P_n$  が  $700\text{g wet}$  増えるにあたり  $1.0\text{m}^2/\text{m}^2$  増加させた。ホソメコンブの重量換算については松山の値<sup>5)</sup>を用いることとし、乾重/湿重比は14%、炭素重量/乾重比は28%となる。

桑原ら<sup>6)</sup>によるとウニの食圧を排除した条件でのホソメコンブの現存量は、光・水温の他に波浪流速の影響を強く受けることがわかった。これは葉面からの栄養塩フラックスの吸収に起因すると考えられるが、この影響を底面波浪流速  $u$  (m/s) の影響関数  $U$  で表すことにした。同様に水温  $T$  (°C) の影響関数を  $\tau$  とし、光合成速度との積により、その影響を考慮した。群落の成長速度は、更に呼吸速度  $R$  ( $\text{g wet}/\text{m}^2\cdot\text{hr}$ ) を引いた、総生産速度  $P_n$  ( $\text{g wet}/\text{m}^2\cdot\text{hr}$ ) より決まり、次式となる。

$$P_n = U(u) \cdot \tau(T) \cdot P_g - R \quad \dots\dots\dots (2)$$

呼吸速度  $R$  は、現存量  $\Sigma P_n$  に比例すると考え次式で表した。比例係数は、本多<sup>7)</sup>のカジメ呼吸量を参考に  $r = 0.005$  ( $\text{mgC}/\text{g wet}\cdot\text{hr}$ ) とした。

$$R = r \cdot \sum P_n \quad \dots\dots\dots (3)$$

全天日射量  $Q$  ( $\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{day}$ ) より、各時刻の光量子束密度  $I_o$  ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{sec}$ ) を次式から計算した。

$$\left. \begin{aligned} Q &= \int_0^N I_o dt = \frac{2NI_{\max}}{\pi} \\ I_o &= I_{\max} \sin\left(\pi \frac{t_d}{N}\right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $I_{\max}$  は日最大光量子束密度 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{sec}$ )、 $N$  と  $t_d$  は日長と時刻を示す。水温の影響関数  $\tau$  は、水温別の相対成長速度の測定結果<sup>3)</sup>より解析期間の平均を次式で表現した。

$$\tau(T) = (-0.0104T^3 + 0.1182T^2 + 4.4938T + 38.178)/100 \quad \dots\dots\dots (5)$$

波浪流速による影響関数は、桑原ら<sup>6)</sup>が調査したホソメコンブ現存量と波浪流速の関係から求めた。なお流速は、現地観測の波高データよりエネルギー平衡方程式を用いて平均波高分布を求め、微小振幅波理論より底面波浪流速を計算した。図-1に調査最終日(4/20)の現存量と、調査期間中の平均波浪流速の関係を示す。

この図から、平均流速  $0.08\text{m/s}$  以下では生育できないことがわかる。また、平均流速  $0.08\text{m/s}$  から  $0.40\text{m/s}$  までは、流速の増加に従って海藻現存量が増加し、平均流速  $0.40\text{m/s}$  以上では現存量の増大はさほど見られないものとみなし、波浪流速の影響関数は次式とした。

$$U(u) = \frac{u - u_{\min}}{u_{\max} - u_{\min}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

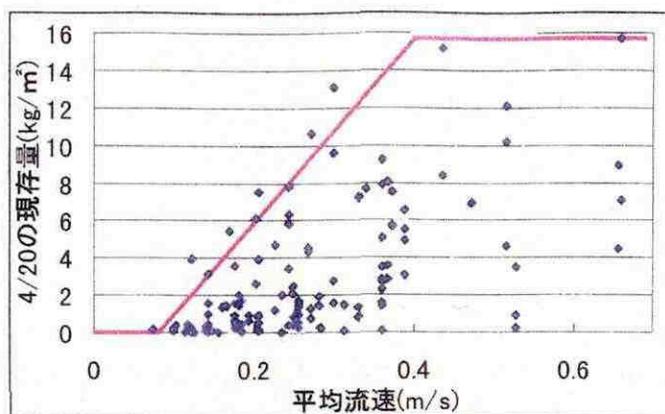


図-1 現存量と流速の関係

このコンブ群落成長モデルの妥当性を見るために、桑原らの調査<sup>6)</sup>と同条件下で計算を行い、実測値との比較を行う。日照値は札幌管区気象台の全天日射量を、水温は調査での実測値を用いた。流速は図-1での計算値を使用している。計算期間については、同時期に行われたホソメコンブ遊走子の着底試験<sup>8)</sup>より、11/20(水温 10.7℃)以降に加入が無かったことから、コンブの成長開始は11/20とし、調査最終日の4/20まで計算した。

## (2) キタムラサキウニ個体成長モデルの概要

キタムラサキウニのホソメコンブに対する摂餌速度 $\Phi$  (g wet/day) は、次式のように、季節的な影響を示す $k(J)$ 、(ここに $J$ は Julian day)、水温による関数 $f(T)$ および殻径 $d$  (cm)と波浪流速の摂餌影響を示す $\Psi(u)$ との積で表すことにした。それぞれは、Kawamata<sup>9)</sup>、川俣<sup>10)</sup>により明らかにされている。

$$\left. \begin{aligned} \Phi &= \Psi(u) \cdot k(J) \cdot f(T) \cdot d^{2.1} \\ k(J) &= 1 + 0.344 \sin\left(2\pi \frac{J-48.5}{365}\right) \\ f(T) &= 0.333\theta(1-\theta), \quad \theta = \left(\frac{T-0.63}{27.36}\right)^{0.653} \\ \Psi(u) &= 1 - \exp\left(-\exp\left(\frac{0.269-u}{0.0382}\right)\right) \end{aligned} \right\} \dots\dots (7)$$

摂餌量の一部は成長・代謝に利用され、同化量より計算される。同化量は摂餌量から排糞量を引いた量と定義される。同化率 $\gamma$  (摂餌量に対する同化量の比)は水温に依存する事が知られ、ここでは明田らの式<sup>11)</sup>を用いる。摂餌量 (g wet kelp) を $I$ 、同化量 (g wet kelp) を $A$ とし、次式より求めた。

$$\left. \begin{aligned} A &= \gamma(T)I \\ \gamma(T) &= (-6.87e^{-3} - 2.04e^{-2} \cdot T)(T-0.63)(T-28.0) \end{aligned} \right\} \dots\dots (8)$$

ウニの個体成長は炭素収支式より求める。ウニの全体重 $w$  (g wet urchin) は、生殖腺重量 $w_g$  (g wet gonad)と殻・身肉の重量 $w_s$  (g wet body)に二分されるとし、炭素重量比を用いて収支式を作成した。

$$\left. \begin{aligned} w &= w_g + w_s \\ \lambda_{ug} \frac{dw_g}{dt} + \lambda_{us} \frac{dw_s}{dt} &= \lambda_{sw} A - R \\ \frac{dw_g}{dt} = \varepsilon \frac{dw}{dt}, \quad \frac{dw_s}{dt} &= (1 - \varepsilon) \frac{dw}{dt} \end{aligned} \right\} \dots\dots (9)$$

炭素重量比 (gC/g wet) は生殖腺については  $\lambda_{ug}$ 、殻と身肉については  $\lambda_{us}$ 、コンブについては  $\lambda_{sw}$  と表した。ウニの乾重/湿重比は高谷・今村の値<sup>12)</sup> (生殖腺 0.276, 身・殻 0.344) を、炭素重量/乾重比は棘皮類の一般的な値 0.4 を用いた。

成長量の内、生殖腺に配分される割合を  $\varepsilon$  とした。この係数は未知なため、通常の成長期には  $\varepsilon = 0.3$  とした。産卵期間や産卵直後は、産卵や生殖巣の回復に栄養を使うため殻径は成長せず、その後、生殖巣が回復すると殻径が増加する。このため、ここでは産卵期間は  $\varepsilon = 0.0$  とし、産卵後は元の生殖腺重量が回復するまで  $\varepsilon = 1.0$  とした。産卵期間は 9/1~10/31 とし、4.0cm を越える個体は産卵を行い、生殖腺指数は最低値 (0.05 に設定) まで線形に減少するとした。

呼吸速度  $R$  ( $\mu\text{l/h}$ ) は櫻井・桑原の式<sup>13)</sup>を用いた。

$$\left. \begin{aligned} R &= e^{\alpha(T)} d^{\beta(T)} \\ \alpha(T) &= 1.263 - 0.176T, \quad \beta(T) = 1.014 + 0.066T \end{aligned} \right\} \dots\dots (10)$$

殻径は、吾妻ら<sup>14)</sup>の測定値からアロメトリー式を作成し、全体重より求めた。

$$d = 1.4 \times w^{0.31} \dots\dots (11)$$

吾妻ら<sup>14)</sup>は更に、室内実験によりキタムラサキウニのホソメコンブに対する摂餌と同化の季節変化を、年齢別 (A~E 群は 1~6 齢に相当) に調べている。この実験値を用いてウニ個体成長モデルの妥当性を検討する。室内実験と同様に飽食および静水 underwater という条件とし、水温も実験での値を使用し、期間も実験と同様に 10 月から翌年の 11 月までの計算を行い、計算値と実験値を比較する。

### (3) 個体群動態モデルの概要

コンブ群落成長モデルとウニ個体成長モデルを統合し、コンブ・ウニの個体群動態モデルとする。二つのサブ・モデルは摂餌過程を通じて結びつき、相互に影響を及ぼす関係である。この個体群動態モデルを用いて、ウニ漁場造成時の最適な断面形の検討を行う。

計算条件では、日射量は札幌気象台のデータ、水温は寿都測候所の平年値を用いた。波浪データは瀬棚港の月平均値を使用し、エネルギー平衡方程式より平均波高分布を求め、微小振幅波理論より底面流速を算出した。計算領域は岸沖方向のみとした。今回はウニの深淺移動は考慮していない。毎年 11/1 に 1.4cm の 1 齢群が 4 個/ $\text{m}^2$  加入し、漁期の 6~8 月に 5.0cm (当海域での漁獲対象サイズ) 以上の個体は全て漁獲し、漁獲されなかった個体は全て 15 歳で死亡するとした。計算はウニが全く居ない状態から始め、解がほぼ安定した上で評価を行う。

図-2 に検討ケースを示す。海底勾配 1/25 の地形を想定し、初期地形のケース 0 とした。ケース 1~4 として、天端幅 25m の潜堤状の構造物を、水深 6.5m に天端高を

変えて (6.0m, 5.0m, 3.0m, 1.0m) 設置した. 一方ケース5~7としてリーフ状の構造物を, 水深5.0mから沖延長を変えて (25m, 50m, 75m) 設置した.

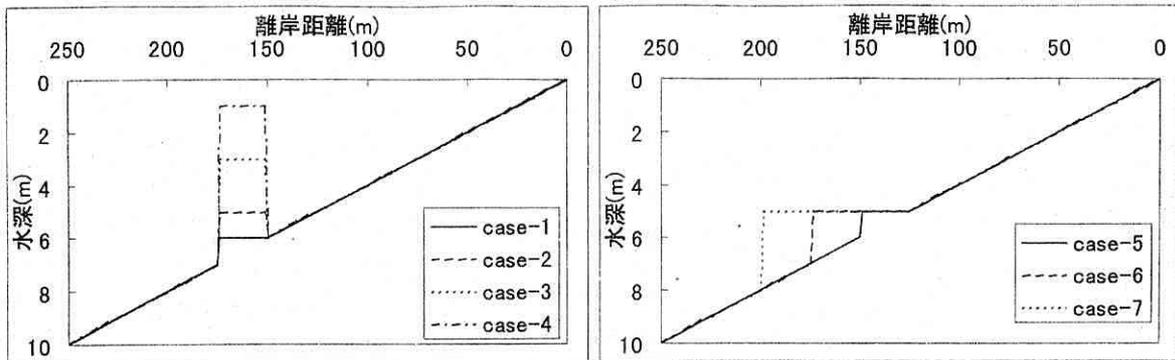


図-2 検討ケース

### 調査結果

#### (1) ホソメコンブ群落成長モデルの計算結果

モデルの計算結果と実測値の比較を図-3に示す. 図は横軸に水深, 縦軸に4/20の現存量 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) をとり, 計算値は実線, 実測値は点で示している. 波当りは, フェンスAからDの順に弱くなる. 実測値では, 水深が浅いとコンブ現存量は大きく, 同一水深ではフェンスAからDの順に小さくなる. 計算値も, 同様な傾向にあり, モデルはホソメコンブ群落の現存量の分布傾向をある程度再現できるものと考えられる.

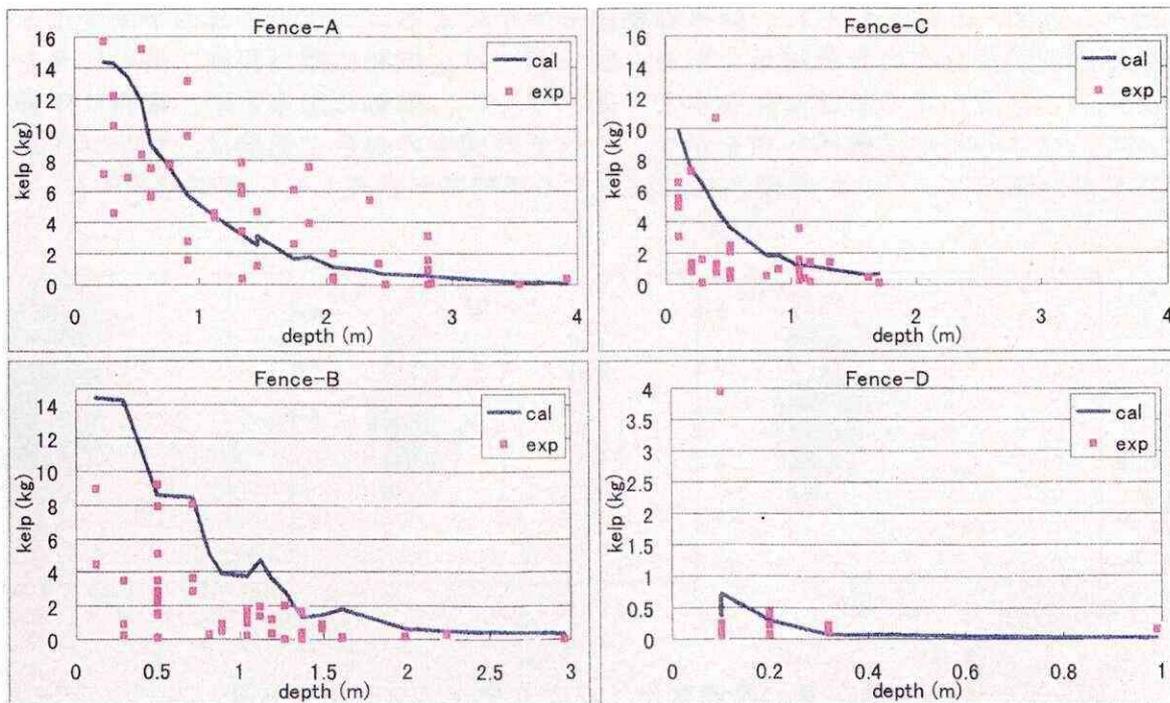


図-3 ホソメコンブ現存量 (2000/4/20) の実測値と計算値の比較図.

(2) キタムラサキウニ個体成長モデルの計算結果

図-4にウニ個体成長モデルの計算結果と実験値の比較を示す。図では、摂餌量と殻径の成長を、横軸に月(10月から翌年の10月まで)をとって、その季節変化を比較したものである。実験値は点で、計算値は線で、年齢群別(A~E群はそれぞれ1~6齢に相当)に示す。

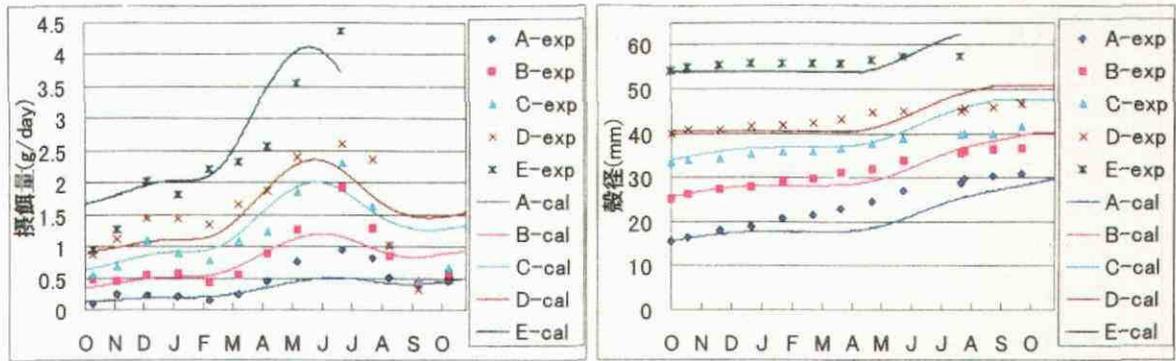


図-4 ウニ個体成長モデルの計算結果と実験値の比較

実験では、殻径の成長は小型群ほど早く、大型群ほど遅い。また各群とも3月から6月にかけて成長する。摂餌量は大型群ほど多いが、各群とも共通して冬季は少なく、7月に極大に達する。計算値は実験値と、この様な傾向と一致しており、キタムラサキウニの摂餌・成長について本モデルは妥当であろうと判断した。

(3) 個体群動態モデルによる造成ウニ漁場の最適断面形の検討結果

図-5と図-6はそれぞれ、個体群動態モデルによるコンブ現存量の季節変化とウニの年齢別殻径分布の計算結果である。図-5では、横軸に離岸距離、縦軸に月をとって、コンブ現存量の季節変化を示す。図-6では、横軸に離岸距離、縦軸に年齢をとって、ウニの年齢別殻径分布を示す。それぞれ図中の白色の領域は、コンブ群落が存在しない領域と、ウニが漁獲されて該当する年齢群が存在しない領域を表す。

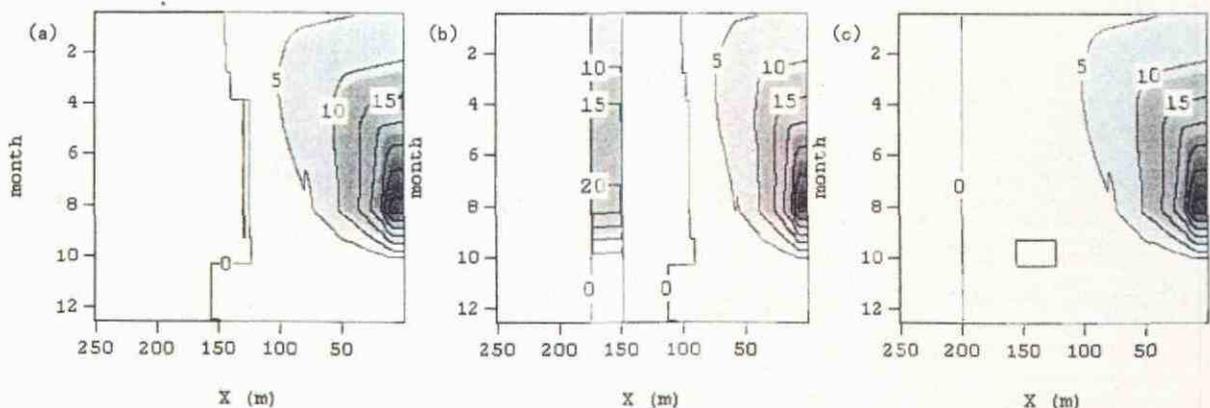


図-5 コンブ現存量の季節変化。左よりケース0, ケース4, ケース7。

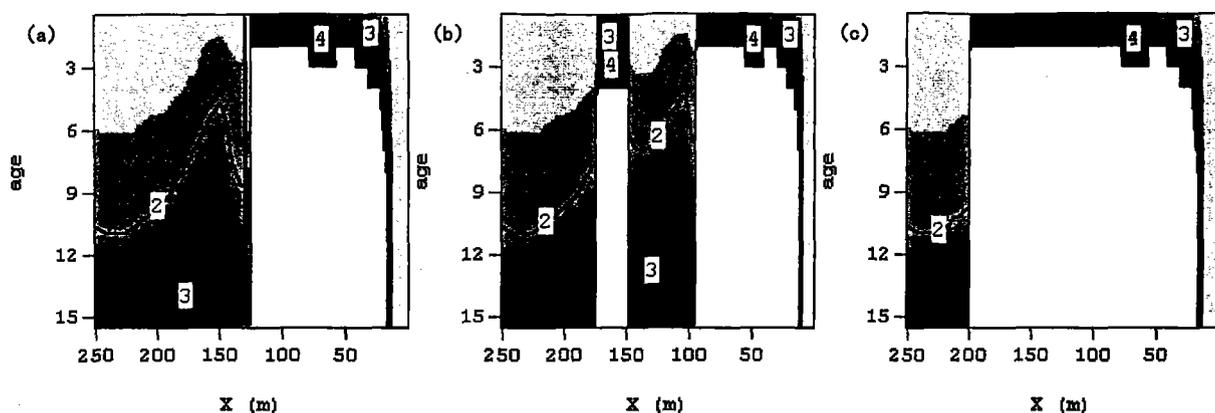


図-6 ウニの年齢別殻径分布. 左よりケース0, ケース4, ケース7.

初期地形ケース0の結果では、離岸距離 $X=150\text{m}$ （水深 $6.0\text{m}$ ）より沖では年間を通じてコンブが生育しない、磯焼けの状態とわかる。これは水深が深く底面流速が小さい為、ウニの食圧は制御されず、冬季に着底した遊走子が食べ尽くされるからである。また4月以降には $X=125\text{m}$ （水深 $5.0\text{m}$ ）まで、磯焼けが拡大する。これは冬季が終わり、波浪流速が低減し、また水温が上昇したためウニの摂餌活動が活発になり、コンブが十分に生育する前に食べられてしまった為と考えられる。これらの領域では、餌となるコンブ群落が生育しないため、ウニは15歳でも殻径 $5.0\text{cm}$ に達せず、漁獲されない。

また浅い領域の $X=20\text{m}$ （水深 $0.8\text{m}$ ）より岸側ではコンブ群落が繁茂するがウニは漁獲されない。これは年間を通じて流速が速いため、ウニは摂餌活動が阻害され成長が遅れるためである。以上より、良好なウニ漁場と評価できる範囲は、 $X=20\sim 125\text{m}$ の領域となる。

次に天端水深 $1.0\text{m}$ の施設を設置したケース4について見る。ケース0ではコンブの生育が見られなかった $X=150\sim 175\text{m}$ （水深 $6.0\sim 7.0\text{m}$ ）で、施設設置によりコンブが生育することがわかる。しかし、その背後域では逆に磯焼け領域が $X=95\text{m}$ （水深 $3.8\text{m}$ ）まで広がっている。ウニの殻径分布図を見ても同様に、施設上は漁場となるが、その背後域において漁場にならない領域が広がっている。これは天端水深を極端に浅くしすぎたため、施設天端上で碎波してしまい、背後域で流速が低下したと考えられる。このケースでは、施設未設置時よりも全体の漁獲数が減少している。本ケースの様に構造物の影響が構造物周辺海域に及ぶことが考えられる為、施設の効果を評価する際には設置部のみでは無く、既存の漁場を含めた面的な評価が必要である。

$X=150\text{m}$ からリーフ状に沖へ $75\text{m}$ 張り出した施設を設置したケース7では、コンブが生育できる領域及びウニが漁獲される領域が共に、前の2ケースに比べ大幅に増加しており、 $X=20\sim 225\text{m}$ の範囲が漁場として評価される。しかし沖への拡張は水深が増す為、施設規模が増大し、多大な費用を要し投資効率が悪くなる恐れがある。

### 考察

全8ケースにおいて行った計算結果を表-1にまとめた。施設を設置したことによ

る収益の目安としてウニ漁獲個体数増分、経費の目安としては施設の断面積とした。これらの比（収益/経費）を用いて、効率的な施設形状を評価することにした。この値が大きいかほど効率的である。

表-1 最適断面の検討結果まとめ

|        | ウニの漁獲(個/m <sup>2</sup> ) |     | 施設断面積<br>(m <sup>2</sup> ) | 増加漁獲数<br>単位断面積 |
|--------|--------------------------|-----|----------------------------|----------------|
|        | 漁獲数                      | 増加分 |                            |                |
| case-0 | 432                      | -   | -                          | -              |
| case-1 | 432                      | 0   | 12.5                       | 0.00           |
| case-2 | 516                      | 84  | 37.5                       | 2.24           |
| case-3 | 488                      | 56  | 87.5                       | 0.64           |
| case-4 | 424                      | -8  | 137.5                      | -0.06          |
| case-5 | 524                      | 92  | 12.5                       | 7.36           |
| case-6 | 624                      | 192 | 50.0                       | 3.84           |
| case-7 | 724                      | 292 | 112.5                      | 2.60           |

潜堤状のケース1～4では天端を上げ過ぎると、全体での漁獲数は増加せず、むしろ逆効果である。コンブ群落は春以降も維持される水深までで天端高は十分である。

また人工リーフ状のケース5～7では、沖延長を長くするほど漁獲数の増加が見られた。しかし沖延長を長くすると構造物の断面積が非常に大きくなり費用が増すため、（収益/経費）の比も上昇し効率的でない。漁場面積を増やすには、ある程度の沖出し距離を設けて沿岸方向に施設を延ばすほうが効率的である。

### 摘要

本研究では北海道南西部日本海側の海域を想定して、ホソメコンブ群落の成長とキタムラサキウニの個体成長に関する個体群動態モデルの開発を試み、効率的な施設断面の検討を行った。今回の成果は次の点などにあり、これらを活かしてウニ漁場造成の施設計画や管理・運営等に本モデルを応用できるものと考えている。

- 1) 光・水温等の物理環境に波浪流速を加えた形でホソメコンブ群落成長モデルの開発を行った結果、コンブ現存量の分布傾向を再現できた。
- 2) キタムラサキウニ個体成長モデルを作成し、室内実験と比較した結果、殻径の成長および摂餌量の季節変化を再現することが出来た。
- 3) 個体群動態モデルを用いた、ウニ漁場造成計画の評価方法を提案した。本手法により効率的な施設が事前に定性・定量的に推定できる。

本研究の今後の発展方向としては、2つの方向性が考えられる。一つは、開発した個体群動態モデルの汎用性や精度の向上であり、今後の課題としては以下の二つが挙げられる。

- 1) 海域に生育する他種の海藻や、他の植食性動物のモデル化を行い、個体群動態モデルに組み込む。これにより、実海域の生物環境の再現能力が向上するものと考えられる。

- 2) 物理環境の中で考慮できなかった栄養塩濃度の効果を個体群動態モデルに組み込む。今回のモデルは同じような栄養塩濃度の環境下（北海道南西部日本海沿岸）のみの適用に限られるが、栄養塩濃度の効果を組み込むことにより、他の栄養塩濃度の環境下においても適用できるものと考えられる。

もう一つの発展方向は、水産基盤整備事業の現場において利用しやすい形に、本研究の成果を整理することである。今後の課題としては以下の二つが挙げられる。

- 1) 個体群動態モデルの構築・運用は煩雑なため、簡素化を図ると共に、適地選定や漁場施設の天端水深等を推定できる方法を開発する。
- 2) 本研究での考察を活かし、経済性を考慮した施設規模の算定方法を開発する。

### 引用文献

- 1) 船野隆・横山善勝・佐藤巳之助, 1964: 小樽市朝里沿岸のコンクリートブロック礁, 北水試月報, 21 巻, 11 号, pp. 14-23.
- 2) Monsi, M. and T. Saeki, 1953: Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion, Jap. J. Bot., Vol. 14, pp. 22-52.
- 3) 松山恵二, 1998: ホソメコンブの光合成並びに光合成より見た忍路湾におけるホソメコンブの生産, (未発表).
- 4) 佐々木秀郎・竹田義則・北原繁志・鳴海日出人・袖野宏樹, 1998: 沿岸構造物における海藻群落形成に必要な光と流れに関する研究, 第 45 回海講論文集, pp. 1166-1170.
- 5) 松山恵二, 1985: ホソメコンブの生産力推定における光合成速度の季節変化, 北水試報, 27 号, pp. 91-99.
- 6) 桑原久実・川井唯史・金田友紀, 2001: ウニ侵入防止フェンスによる海藻群落の生育特性, 平成 13 年度日本水産工学会学術講演会講演論文集, pp. 61-64.
- 7) 本多正樹, 1999: 造成藻場設計への藻場生産力モデルの利用, 電力土木, No. 280, pp. 75-79.
- 8) 川井唯史・桑原久実・金田友紀, 2000: ウニフェンスを用いた実証試験, 平成 11 年度北海道立中央水産試験場事業報告書, pp. 220-225.
- 9) Kawamata, 1997: Modelling the feeding rate of the sea urchin *Strongylocentrotus nudus* (A. Agassiz) on kelp, J. Exp. Mar. Biol. Ecol., Vol. 210, pp. 107-127.
- 10) 川俣 茂, 2000: 北日本沿岸におけるウニおよびアワビの摂食に及ぼす波浪の影響とその評価, 北海道大学学位論文, 159p.
- 11) 明田定満・桑原久実・山本潤・中村義治・寺沢知彦, 2001: キタムラサキウニの個体成長モデルの開発, 平成 13 年度日本水産工学会学術講演会講演論文集, pp. 99-102.
- 12) 高谷義幸・今村琢磨, 1996: エゾバフンウニの絶食による体成分の変化(短報), 北水試報, 49 号, pp. 27-30.
- 13) 櫻井泉・桑原久実, 1999: キタムラサキウニの貧酸素耐性, 平成 11 年度日本水産学会春季大会講演要旨集, pp. 79.
- 14) 吾妻行雄・中田章文・松山恵二, 1993: キタムラサキウニのホソメコンブに対する摂餌と同化, 北水試報, 40 号, pp. 21-29.