

ウニ類を対象とした個体群動態モデルの開発

明田 定満* ・ 桑原 久実** ・ 中村 義治***
奥 出 壮**** ・ 寺澤 知彦*****

天然漁場や造成漁場の生産力評価を行う場合、対象種や餌料生物の資源量動態のみならず、これらの資源量動態に影響する種苗放流、漁獲等の漁業活動の影響も考慮して定量的に評価する必要がある。岩礁漁場の代表的な栽培漁業種であるウニ類を対象として、①代謝を考慮した部位別の個体成長モデル、②漁獲死亡や自然死亡による減耗を考慮した資源量動態モデル、から構成される個体群動態モデルを開発した。ウニ漁場における殻径組成データと個体群動態モデルによる解析結果を比較した結果、個体群動態モデルは漁場造成計画の策定や種苗放流の方法検討等漁場管理に幅広く適用できる可能性を見出した。

1. 緒 言

漁場造成の効果や影響は、造成漁場を直接的間接的に利用する全ての動植物に及び、食物連鎖を通じて相互に影響し合いながら資源量の増減として現れる。そのため、天然漁場や造成漁場の生産力評価や漁場利用計画策定を行う場合、水産有用種や餌料生物（海藻）の資源量動態のみならず、これらの資源量動態に影響する種苗放流、移植、禁漁期等漁業者が行う漁場管理や漁獲の影響も考慮して定性的定量的に検討する必要がある。

そこで、岩礁海域における沿岸漁場整備や栽培漁業の主要対象種であるアワビ類、ウニ類を対象に、①種苗放流、移植、漁獲、禁漁期の設定等、②摂餌に及ぼす水温や波浪等の影響、③成長と減耗、④餌料海藻の生長（物質生産）と減耗、⑤藻食動物の摂餌による餌料海藻現存量の減少等、を考慮した個体群動態モデルの開発を試みってきた（明田他、2002；桑原他、2002）。

本論では、ウニ類（キタムラサキウニ）を対象に、図-1に示す個体群動態モデルの開発の第一段階として、エネルギー収支（代謝）を考慮した部位別の個体成長モデル、減耗（自然死亡、漁獲死亡）を考慮した資源量動態モデルを開発したので、その概要を報告する。

2. 個体群動態モデル

(1) モデルの概要

個体群動態モデルの構築に当たり、代謝（摂餌、同化、呼吸、身肉殻成長、生殖腺成長、産卵放精）を考慮して個体成長のモデル化を試みた。また、個体数増減に及ぼす因子は死亡、稚子加入のみとし、移動（移入移出）は考慮しないものとして、ウニ類の個体数密度の時間変化を以下のように定式化した。ここで、 $N=N(t,l)$ は時刻 t における殻径 l のウニ類の個体数密度、 M 、 F は自然死

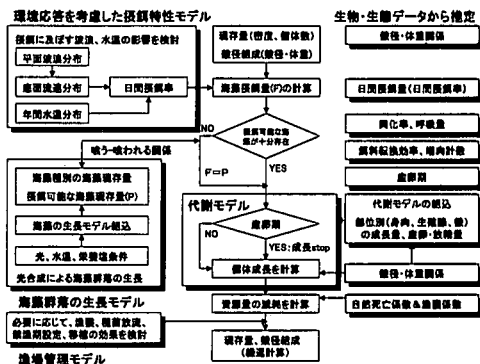


図-1 ウニ類の個体群動態モデルの概要

亡係数、漁獲死亡係数である。

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial (uN)}{\partial l} = -(M + F)N, u = \frac{dl}{dt} \dots \dots \dots (1)$$

代謝に伴うエネルギー収支は、 I 摂餌量、 E 不消化排出量、 P_g 身肉殻成長量、 P_r 生殖腺成長量、 R 呼吸量とすると、 $I = E + P_g + P_r + R$ 、同化量 A は $A = I - E$ と表せる。個体成長は殻径成長 dl/dt で表すものとし、先ず最初に同化量 A を求め、呼吸量 R 、生殖腺成長量 P_r を順次求めた後、身肉殻成長量 P_g は $P_g = A - P_r - R$ として求める。殻径成長 dl/dt は、身肉殻成長量の時間変化 dw/dt から殻径-重量換算式（アロメトリー式）を用いて換算する。なお、個体重量は産卵放精に応じて減少するが、殻径は変化しないと仮定した。

代謝に伴うエネルギー収支の計算は、全て炭素量単位 gC/ind で行うが、摂餌量や餌料転換率に関する既往文献の多くは乾燥重量または湿重量で表示されているため、必要に応じて乾燥重量、湿重量に換算した。

(2) 摂餌と同化

ウニ類の日間同化量は、以下に示す同化係数×日間摂餌量で与える。

$$A = \gamma_u(T) \cdot I(u_{max}, T, d, day, B_s) \dots \dots \dots (2)$$

$$I(u_{max}, T, d, day, B_s) = F_u(u_{max})(1 - e^{-F_s \cdot B_s}) \cdot I_{max}(T, d, day)$$

* 正会員 (独法)水産総合研究センター
** 正会員 農博 (独法)水産総合研究センター
*** 水博 (独法)水産総合研究センター
**** 理博 (株)CTI
***** (株)CTI

A: 日間同化量 gC/day/ind.

$\gamma_u(T)$: 同化係数

I: 日間摂餌量 (振動流速, 水温, 殻径, 季節, 海藻生物量の関数) gC/day/ind.

$F_u(u_{\max})$: 振動流下における摂餌圧変化

$I_{\max}(T, d, \text{day})$: day 日目水温 $T(^{\circ}\text{C})$ における殻径 d (mm) の個体の日間最大摂餌量 gC/day/ind.

f : コンブ摂食に係る係数 m^2/gC

B_s : コンブの生物量 gC/m^2

a) 日間最大摂餌量

Kawamata(1997)は, 水温 $T(^{\circ}\text{C})$, 殻径 $d(\text{mm})$, day 日目におけるウニ摂餌量 $I_{\max}(T, d, \text{day})$ を以下のように定式化した。一例として, 岩手県沿岸 (大船渡湾) における海水温を用いて, 殻径毎の日間最大摂餌量の季節変動を図-2 に示すとともに, $I_{\max}(T, d, \text{day})$ の特徴を以下に示す。日間最大摂餌量 $I_{\max}$ は, ①水温及び殻径のみならず, 季節による影響 (産卵前は良く摂餌するが, 産卵中産卵後は余り摂餌しない) も考慮している。②水温が高くなると摂餌率は増加するが最適水温 10.9°C を超えると摂餌率は減少する。最低水温 $T_{\min}$ 以下, 最高水温 $T_{\max}$ 以上では摂餌しない。③最適水温前後で非対称な水温依存性を持つ。④殻径の大きな個体ほど重量当たりの摂餌量は小さい (殻径のほぼ 2 乗に比例して摂餌, 体重は殻径の 2.6-3.0 乗に比例)。

$$I_{\max} = a\theta(1-\theta) \left[1 + c \cdot \sin \left(2\pi \frac{\text{day} - \text{day}_0}{365} \right) \right] \left(\frac{d}{10} \right)^m \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\theta = \left(\frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \right)^b$$

$a = 0.01365, c = 0.3444, \text{day}_0 = 48.48, m = 2.104$
 $T_{\min} = 0.63, T_{\max} = 27.99, b = 0.6527$

b) 振動流による摂餌圧変化

波動の影響により, 移動や摂餌行動に妨げが起こり摂餌圧が低下する。川俣 (2000) はキタムラサキウニがコンブ類を摂餌する場合, 振動流中と静水中の摂餌速度の

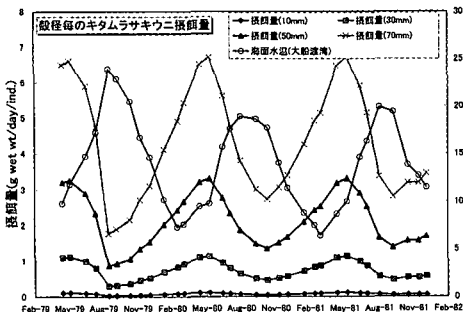


図-2 殻径毎の日間最大摂餌量の季節変化

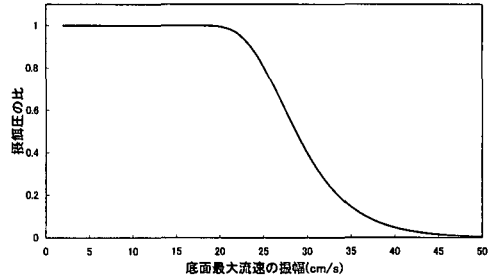


図-3 振動流速と摂餌圧の関係

比を次式のように定式化した (図-3)。

$$F_u = 1 - \exp \left[- \exp \left(\frac{\alpha_u - u_{\max}}{\beta_u} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (4)$$

F_u : 振動流による摂餌圧の変化

$u_{\max}$: 底面最大流速 $u(\text{cm/s})$ の振幅

α_u, β_u : 速度に関する定数

c) 同化係数 (同化率)

吾妻他 (1993) による水温と同化率の実験値を以下のように定式化した (図-4)。摂餌水温の範囲が $0.63-28^{\circ}\text{C}$ であることから, $T = 0.63^{\circ}\text{C}$ 以下, $T = 28^{\circ}\text{C}$ 以上で同化率がゼロとなる条件を付加した。式 (5) から最適同化水温は $T_{\text{opt}} = \text{約 } 18.7^{\circ}\text{C}$, その時の同化率は約 66% である。

$$\gamma_u(T) = (a_7 + b_7 T)(T - 0.63)(T - 28.0) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$a_7 = -6.87 \times 10^{-3}, b_7 = -2.04 \times 10^{-2}$

(3) 呼吸

ウニ類特にキタムラサキウニの呼吸に関する知見は少ない。そこで, エゾバフンウニの呼吸に関する研究 (Nagata, 1983) に基づき, 日間呼吸量を以下のように定式化した。右辺の第 1 項は静止時 (無摂餌時), 第 2 項は運動時 (摂餌時) の日間呼吸量を示す。

$$R = R_s + R_I$$

$$R_s = (a_8 T + b_8) w^{c_8}$$

$$R_I = a_I \exp(b_I T) \cdot I(T, d, \text{day}) \cdot d^{c_I} \quad \dots\dots\dots (6)$$

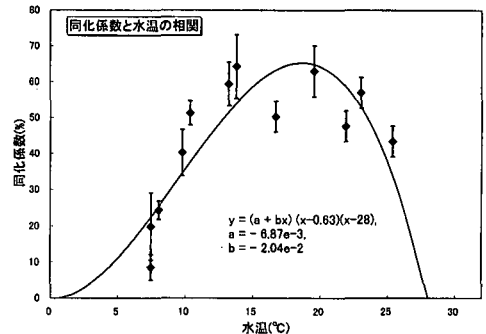


図-4 水温と同化係数の関係

R_s : 静止時呼吸量 gC/day/ind.

R_l : 摂餌時呼吸量 gC/day/ind.

R : 全呼吸量 gC/day/ind.

T : 水温 (°C)

w : 個体重量 gC/ind.

a_s, b_s : 静止時呼吸に関する定数 (温度に係る係数)

c_s : 静止時呼吸に関する定数 (体重に係る係数)

a_l : 摂餌量 I に比例する消費する呼吸量の比例係数

b_l : 摂餌時呼吸に関する定数 (温度に係る係数)

c_l : 摂餌時呼吸に関する定数 (殻径に関する定数)

摂餌時の総呼吸量が同化量より大きくなり、かつ静止時呼吸量が同化量より小さい場合、摂餌するほど痩せることになり不自然であるため総呼吸量は同化量に等しいと仮定した。また、静止時呼吸量が同化量より大きい場合、エネルギーの不足分を生殖腺から補うと仮定した。

(4) 生殖腺成長

殻径 50-60 mm のキタムラサキウニがホソメコンプを摂餌する場合、同化量のうち生殖腺成長に割当てる割合 (生殖腺実効同化率) は乾燥重量ベースで 5-25%, 湿重量ベースで 2-10% であった (吾妻, 1997)。同化量から呼吸量を差し引いた量 $A-R$ を純同化量と定義すると、純同化量の一定割合 r_u を生殖腺成長に割当てると考えて、生殖腺重量の時間変化を次のように定式化した。

$$\frac{dw_g}{dt} = r_u \cdot (A - R) \quad (7)$$

w_g : 生殖腺重量 gC gonad/ind.

r_u : 生殖腺純同化率 (生殖腺増加量/純同化量)

式 (7) によると、殻径や個体重量によらず純同化量に比例して生殖腺を発達させることになるが、性成熟を開始する生物学的最小形である 40-45 mm より殻径が小さい場合、殆ど生殖腺は成長せず身肉殻成長に比べて無視できる。また、十分な餌料が確保出来れば殻径が大きいほど生殖腺重量が大きくなることから、生殖腺重量の時間変化は生殖腺重量に比例すると仮定し、以下のよう修正し定式化した。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dw_g}{dt} &= r_u \cdot \Gamma_u(d) \cdot (A - R) \\ \Gamma_u(d) &= a \cdot d^2 + b \cdot d + c \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$\Gamma_u(d)$: 生殖腺重量比

$a = 1.002 \times 10^{-3}$, $b = -0.4942 \times 10^{-2}$, $c = 6.682 \times 10^{-1}$

生殖腺重量比 Γ_u は殻径毎の生殖腺重量を標準生殖腺重量 $w_{g(std)}$ で割った量と定義し、秋元 (1976) の福岡県永崎地先における殻径毎の生殖腺重量の調査結果を用いて求めた (図-5)。なお、エゾバフンウニの生殖腺純同化率は殻径 5-54 mm で 81% (Nagata, 1983), 1 齢群: 39.4%, 2 齢群: 63.6%, 3 齢群: 80.0% と見積られている (富士, 1989)。実質的な生殖腺純同化率 $r_u \times \Gamma_u$ が 1 より

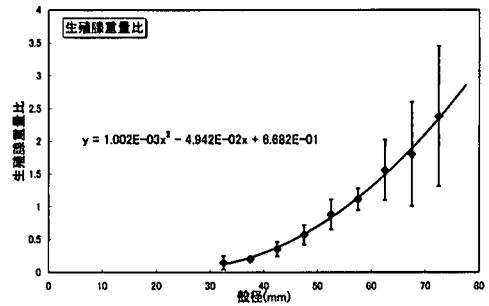


図-5 生殖腺重量比

り大きくなる (生殖腺成長が純同化量を超える) 場合、生殖腺成長量は純同化量と同値とした。

(5) 産卵と放精

キタムラサキウニの産卵期間は地域によらずほぼ 9-10 月であったので、産卵期間は 9/1-10/31, 日間産卵量は毎日一定量を産卵すると仮定した。また、全ての生殖腺を放精放卵するのではなく一部は残すようにした。以上纏めると生殖腺重量変化は次のようになる。

$$\frac{dw}{dt} = \begin{cases} r_u \cdot \Gamma_u(d) \cdot (A - R) & \dots \text{成長期} \\ & \text{(産卵期以外)} \\ - \left[w_{g(9/1)} - \Gamma_u(d) \frac{G_{min}}{100} w \right] / 61 & \dots \text{産卵期} \\ & \text{(9/1-10/31)} \end{cases} \quad (9)$$

G_{min} : 生殖腺指数の年最低値

$w_{g(9/1)}$: 9 月 1 日における生殖腺重量 gC gonad/ind.

r_u は 10-50% の範囲内に入るように試行錯誤により決定した。

(6) 身肉殻の成長

身肉と殻の成長は、純同化量から生殖腺成長量を引いたものとして以下のように定式化した。

$$\frac{dw_s}{dt} = A - R - \frac{dw_g}{dt} \quad (10)$$

w_s : ウニの身肉と殻を合わせた重量 gC/ind.

ウニ類の身肉は殻や生殖腺に比べて極く僅か (殻と身肉の乾燥重量比は 95:5) であり、また飢餓によっても殆ど変化しないため (高谷・今村, 1996), 身肉と殻は呼吸で減少せず、身肉と殻の重量比は変化しないと仮定した。ウニの殻径は身肉+殻の重量 (全重量-生殖腺重量) からアロメトリー式を用いて算出した。

(7) 自然死亡係数

アワビ類 (明田他, 2002) と同様に、殻径別に生残率や減耗率を整理し自然死亡係数を把握する必要がある。桑原・酒向 (2003) は、磯焼け海域である北海道寿都湾美谷地先のウニ漁場において、漁獲対象殻径 50 mm 以下のキタムラサキウニの年間減耗率を 0.3 と推定してお

り、日間自然死亡係数に換算すると0.001程度となる。

(8) 部位別の重量換算

代謝を考慮した個体群動態モデルでは、部位別成長は炭素量単位（または窒素量単位）で解析を行うため、既往文献と解析結果を比較検討する場合、湿重量－乾燥重量－炭素（窒素）量相互間の重量換算を精度よく行うことが重要となる。従来、既往文献値を組み合わせで換算していたが、生物種や分析条件等が異なるため推定精度に問題が有った。そこで、岩礁漁場の主たる栽培漁業種と餌料海藻について、部位別の湿重量、乾燥重量、炭素（窒素）量を同時に計量分析し換算表を作成した（表-1）。なお、調査時期がウニ類の放精終了期から回復期に当たる冬期であることから、生殖腺の発達による質的变化が考えられるため、生殖腺充実期の春～夏期における推定精度の検討が必要である。

3. 解析結果の一例

(1) 個体成長

岩手県田老地区のウニ漁場を対象に、キタムラサキウニの個体成長及び生殖腺成長に関する実測値（武蔵他，1997）と解析結果の比較を図-6に示す。体重当たりの日間摂餌量と同化量，呼吸速度の解析結果を図-7に示す。殻径及び個体重量の実測値（町口，1993）と解析結果の比較を図-8に示す。礼文、天売、稚内における生殖腺指数の季節変化の実測値（杉本他，1982）と解析結果の比

較を図-9に示す。図-6～図-9から、個体成長モデルの解析結果は、①若齢期に成長が早く、殻径が大きくなるに従い成長速度は鈍り殻径70 mmを超えると殆ど成長しない、②春期から夏期にかけて個体成長、生殖腺成長が著しく、産卵放精に伴い殻径成長が停滞し個体重量が減少する、③摂餌、同化、呼吸の関係も合理的に説明でき

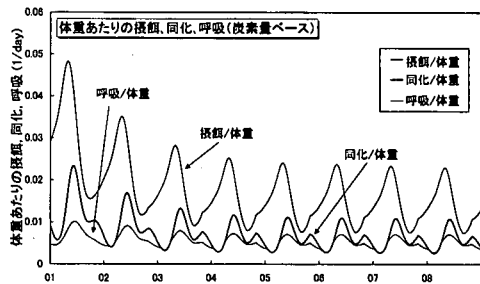


図-7 摂餌、同化、呼吸の経時変化

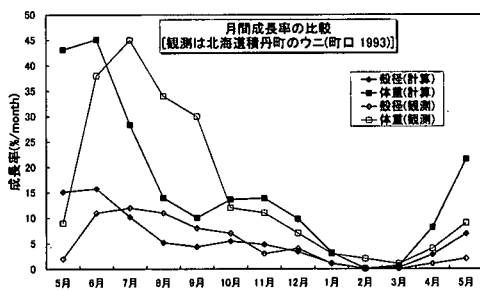


図-8 殻径及び個体重量の実測値，解析値の比較

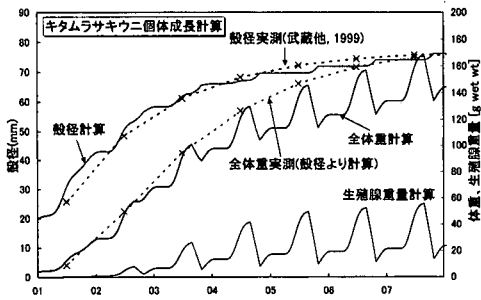


図-6 殻径、個体重量、生殖腺重量の経時変化

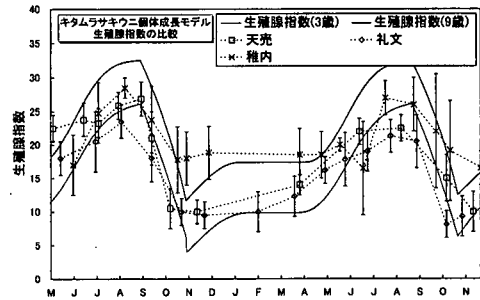


図-9 生殖腺指数の季節変化

表-1 部位別の湿重量、乾燥重量、炭素量、窒素量の重量換算

項目	キタムラサキウニ			エゾバフンウニ			ムラサキウニ			バフンウニ			エゾアワビ			サザエ		
	殻	身肉	生殖腺	殻	身肉	生殖腺	殻	身肉	生殖腺	殻	身肉	生殖腺	殻	身肉	生殖腺	殻	身肉	生殖腺
部位湿重/全体湿重	0.734	0.191	0.075	0.746	0.181	0.073	0.785	0.126	0.089	0.770	0.104	0.126	0.341	0.659	—	0.686	0.304	0.010
部位乾重/部位湿重	0.585	0.202	0.271	0.581	0.251	0.194	0.671	0.138	0.369	0.641	0.234	0.208	0.850	0.196	—	0.958	0.254	0.277
炭素量/部位乾重	0.150	0.270	0.420	0.130	0.200	0.440	0.130	0.320	0.520	0.130	0.280	0.420	0.130	0.400	—	0.120	0.430	0.400
窒素量/部位乾重	0.012	0.050	0.080	0.007	0.030	0.082	0.006	0.050	0.063	0.004	0.038	0.110	0.007	0.120	—	0.002	0.120	0.096
備考	殻径 57.8 mm 湿重 55.82 g			殻径 47.7 mm 湿重 24.02 g			殻径 50.3 mm 湿重 49.66 g			殻径 45.3 mm 湿重 22.95 g			殻径 96.5 mm 湿重 97.20 g			殻径 71.3 mm 湿重 49.73 g		

項目	マコブ			ワカメ			アラメ			カジメ		
	葉部	莖部	根	葉部	莖部	根	葉部	莖部	根	葉部	莖部	根
部位湿重/全体湿重	1.000	—	—	0.744	0.200	0.056	0.577	0.152	0.271	0.468	0.388	0.144
部位乾重/部位湿重	0.225	—	—	0.085	0.110	0.352	0.148	0.207	0.250	0.121	0.088	0.258
炭素量/部位乾重	0.310	—	—	0.300	—	—	0.310	—	—	0.300	—	—
窒素量/部位乾重	0.010	—	—	0.031	—	—	0.024	—	—	0.025	—	—
備考	葉長 130.7 cm			葉長 48.3 cm 葉長 12.4 cm			葉長 51.5 cm 葉長 19.7 cm			葉長 40.3 cm 葉長 40.6 cm		

(注1) 調査時期は平成15年1月。

(注2) 分析個体数は各20個体。

(注3) 採取場所

キタムラサキウニ、エゾバフンウニ、バフンウニは北海道小樽市・ムラサキウニは神奈川県三浦市、サザエは長崎県、エゾアワビは宮城県志津川町、ワカメ、アラメ、カジメは神奈川県三浦市、マコブは千葉県東通村。

(注4) エゾアワビ生殖腺重量は、調査時期が放精終期から回復期であったため、計値が困難であった。

(注5) 海藻類は葉部の炭素量、窒素量を計測した。

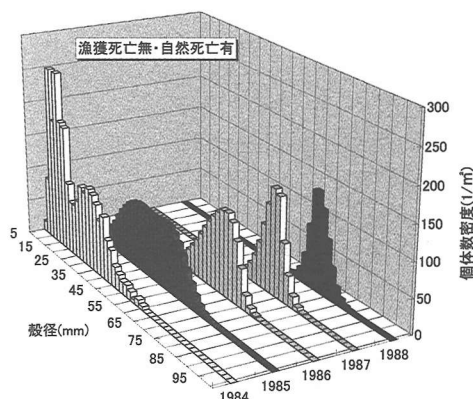


図-10(a) 資源動態の解析結果 (自然死亡のみ)

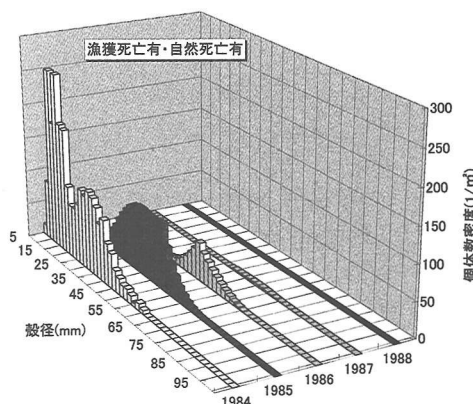


図-10(b) 資源動態の解析結果 (漁獲死亡考慮)

る、等のキタムラサキウニの生物学的特徴をよく表現している。

(2) 資源量動態

1980-95年に調査された奥尻島におけるキタムラサキウニ殻径組成(吾妻, 1997)に基づき, 1984年の殻径組成を初期値として, 自然死亡による減耗のみ考慮した場合の解析結果を図-10(a)に示す。自然死亡と漁獲死亡による減耗を考慮した場合の解析結果を図-10(b)に示す。ここで, 自然死亡係数は0.3 (1/year), 漁獲死亡係数は殻径50 mm以上の個体に対して0.01 (1/day)を与えた。なお, 1985年以降の稚ウニの新規加入は考慮していない。

漁獲死亡による減耗が無い場合, 図-10(a)に示すように, 1984年に出現した殻径10 mm前後の年休群は個体数を減じながら1985年には25-45 mm, 1986年には40-55 mm, 1987-88年には65-75 mmまで成長する。殻径別に自然死亡係数を与えていないためか, 1984年に見られた10 mm前後, 40 mm前後の卓越年休群が個体成長に伴い, 1985年以降判別出来なくなる等, 資源動態モ

デルの改善点を把握することが出来た。

一方, 漁獲可能なウニ殻径を持つ個体のうち97%以上を漁獲することに相当する漁獲死亡による減耗を与えた場合, 1985年以降, 殻径50 mmを超える個体が漁獲され始め, 1987年には1984年に出現した卓越年休群は殆ど漁獲され尽くすことが分かる。今回開発した個体成長モデル, 資源量動態モデルの応用として, 種苗放流, 移植, 漁獲, 禁漁期の設定等による影響を定量的に評価検討し得る可能性が見出された。

5. 結 言

本論をまとめると, (1) エネルギー収支(代謝)を考慮した部位別の個体成長モデル, 漁獲死亡や自然死亡による減耗を考慮した資源量動態モデルから構成される個体群動態モデルを開発した。(2) 個体群動態モデルを用いて, 漁場造成計画の策定や種苗放流の方法検討等, 漁場管理に幅広く適用できる可能性が示唆された。

最後に, 本論は水産基盤整備調査費による調査課題「ウニ・アワビ漁場造成のための適地選定に係る事前評価法の開発(H12-14)」により実施したことを付記して, 関係各位に謝意を表するものである。

参 考 文 献

- 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プに対する摂餌と同化, 北海道立水産試験場報告, NO. 40, pp. 21-29.
- 吾妻行雄 (1997): キタムラサキウニの個体群動態に関する生態学的研究, 北海道立水産試験場報告, NO. 51, pp. 1-66.
- 秋元義正 (1976): 福岡県におけるキタムラサキウニの移植について, 水産増殖, VOL. 23, NO. 4, pp. 149-154.
- 明田定満・桑原久美・中村義治・奥出 壮・寺澤知彦 (2002): エゾアワビの個体群動態モデルの開発, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1171-1175.
- 川俣 茂 (2000): 北日本沿岸におけるウニ及びアワビの摂食に及ぼす波浪の影響と評価, 北海道大学学位論文, 151 p.
- 桑原久美・明田定満・西向章哲 (2002): 個体群動態モデルを用いたウニ漁場評価手法の開発, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1246-1250.
- 桑原久美・西向章哲 (2003): ウニ漁場造成に係わる事前評価手法の開発, 平成15年度日本水産工学会学術講演会講演論文集, pp. 69-72.
- 杉本 卓・田嶋健一郎・富田恭司 (1982): 北海道北部沿岸域におけるキタムラサキウニの生殖周期, 北海道立水産試験場報告, NO. 24, pp. 91-99.
- 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), 北海道立水産試験場報告, NO. 49, pp. 27-30.
- 富士 昭 (1989): ウニの生態, うみうし通信, VOL. 2, pp. 17-23.
- 町口裕二 (1993): キタムラサキウニ天然種苗の成長と摂餌について, 北海道区水産研究所報告, NO. 57, pp. 81-86.
- 武蔵達也・西洞孝広・内田 務 (1997): 岩手県沿岸における寄生貝クリイロヤドリニナがキタムラサキウニに与える影響, 岩手県水産技術センター研究報告, NO. 1, pp. 27-35.
- Kawamata, S. (1997): Modelling the feeding rate of the sea urchin *Strongylocentrotus nudus* (A. Agassiz) on kelp, *Journal of experimental marine biology and ecology*, VOL. 210, pp. 107-127.
- Nagata, M. (1983): Bioenergetics of the benthic herbivorous populations in a rocky intertidal habitat, *Bulletin of the Japanese society of scientific fisheries*, VOL. 49, NO. 1, pp. 33-40.