

# 二枚貝適正養殖量算出モデルの作成に関する研究

養殖研究所飼育環境技術部

阿保勝之\*・杜多 哲\*\*・高柳和史\*・坂見知子\*

調査実施年度：平成9～11年度

## 緒言

我が国の沿岸海域では、アコヤガイ、カキ、ホタテガイ等の二枚貝の養殖が行われているが、養殖漁場の環境特性への配慮を欠いた漁場行使が問題となっており、それぞれの養殖場において適正養殖量を科学的に求める必要性が高まっている。本研究では、平成8年度に大量へい死を生じたアコヤガイについて、成長（エネルギー収支）および餌料環境の動態をモデル化し、研究対象海域における適正養殖量の算定を試みる。

## 方法

本研究では、「養殖対象種の正常な生物生産を保証する生物餌料供給」を適正養殖量を決定するための視点として考え、アコヤガイの餌料要求と海域の餌密度のバランスを適正養殖量を求める際の基本的な考え方としてモデルを開発した。モデルの概要を図1に示した。このモデルは、「アコヤガイ成長モデル」と「餌料生物動態モデル」の2つのサブモデルから成り立っている。前者では、アコヤガイの代謝、成長、生殖巣の発達が環境条件（餌密度、水温、塩分）で決まると仮定し、成長と環境条件の関係をモデル化した。後者では、餌密度の時間変化が、餌生物の増殖、アコヤガイによる摂餌、海水交換による流出のバランスによって決まると仮定して数式化した。

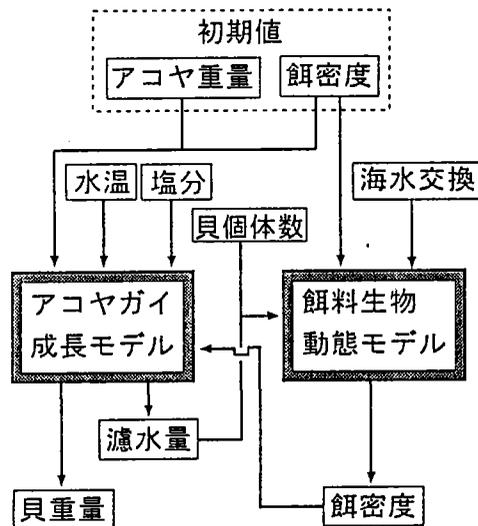


図1 モデルの概要

\*環境制御研究室

\*\*現日本海区水産研究所

成長モデルの検証および餌料生物動態モデル作成のために、三重県の実験海域においてアコヤガイの飼育実験を行うと共に、物理環境と餌料環境（クロロフィル量）の測定を行った。さらに、実験海域の真珠漁場へモデルを適用し、養殖量を変化させた場合の餌密度の変化、アコヤガイの成長量の変化を試算した。

## 結果

### 1. アコヤガイ成長モデル

アコヤガイの成長を計算するために、アコヤガイのエネルギー収支モデルを作成した。モデル作成に当たってはPowellら(1992)<sup>1)</sup>を参考にした。

#### 1) 基礎式

アコヤガイの純生産量(NP)は同化量(A)と呼吸量(R)の差として表せる。純生産量は体組織(s)と再生産(生殖腺組織(g)の増加および産卵・放精)に(1-r):rの割合で分配されると仮定すると次式が得られる。ただし、Wはアコヤガイの重量。

$$A - R = NP = (1-r)NP + rNP = ds/dt + dg/dt + E = dW/dt + E \quad (1)$$

この式で、同化量A、呼吸量R、純生産が再生産に向けられる割合r、さらに産卵放精する条件を与えれば、アコヤガイの成長量ΔWを求めることができる。

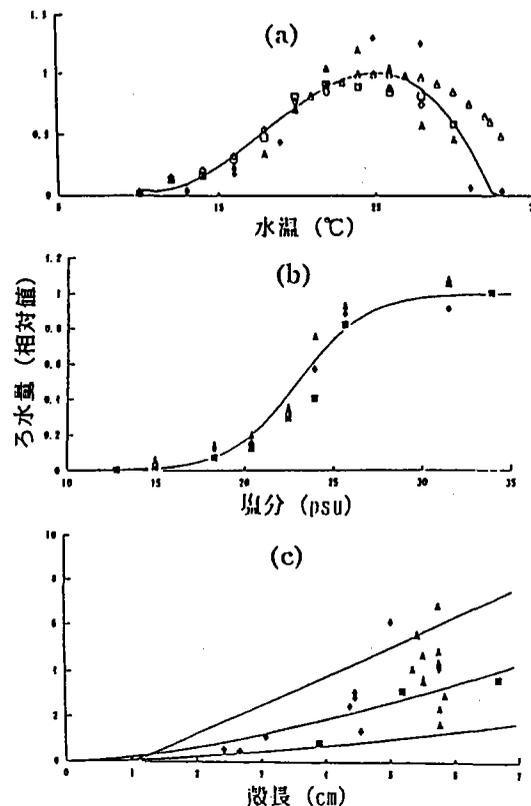


図2 アコヤガイのろ水量に及ぼす水温、塩分、大きさの影響。(a)ろ水量と水温の関係。(b)ろ水量と塩分の関係。(c)ろ水量と殻長の関係。ただし、ろ水量は相対値で表している。

## 2) 同化量

アコヤガイが餌を摂取する量はろ水量Fと餌密度Cによって決まる。さらに同化効率をeとすると同化量はこれらの積で与えられる。

$$A = e \cdot F \cdot C = e \cdot f_T(T) \cdot f_S(S) \cdot f_W(W) \cdot C \quad (2)$$

この式で $f_T(T)$ および $f_S(S)$ は、それぞれ水温と塩分の影響を表す最大値1の無次元の関数であり、 $f_W(W)$ は最適な水温と塩分のもとでアコヤガイの大きさによって決まるろ水量である。それぞれの関数を以下のように決定した。関数の決定に際しては、アコヤガイの飼育実験に関する文献を利用した。

### (1) 水温の影響

アコヤガイの濾水量と水温の関係を求めた飼育実験結果(宮内, 1962<sup>2)</sup>; 沼口, 1994<sup>3)</sup>)を用いて、水温の影響についての関数 $f_T(T)$ を決定した。それぞれの実験結果からまず10°Cから33°Cの平均ろ水量を求めた。この値を用いて実験結果を無次元化し、最小自乗法によって3次式を当てはめた。さらに得られた3次式の極大値でわって最大ろ水率が1になるように調整し次式を得た(図2-a)。

$$f_T(T) = 2.568 - 0.5451T + 0.03597T^2 - 0.000667 T^3 \quad (10.9 \leq T \leq 32.2) \\ = 0 \quad (T < 10.9, T > 32.2) \quad (3)$$

### (2) 塩分(比重)の影響

宮内(1962)<sup>2)</sup>の飼育実験結果を用いて塩分(比重)の影響についての関数 $f_S(S)$ を決定した。この実験結果では、比重( $\sigma_{ts}$ )が20以上ではほとんど影響がなく、20以下になると急にろ水量が少なくなっている。この実験結果から比重を塩分に換算し、シグモイド曲線をあてはめて次式を得た(図2-b)。

$$f_S(S) = 1 / (1 + \exp(-0.5353229(S-23))) \quad (4)$$

### (3) 大きさの影響

宮内(1962)<sup>2)</sup>, 辻井・大西(1957)<sup>4)</sup>の実験結果を用いて、大きさの影響についての関数 $f_W(W)$ を決定する。図2-cは、殻長(L)とろ水量(F)の関係を表したものである。ただし、ろ水量は25°Cの値に換算してある。実験値は大きくばらついており実験条件や測定方法による影響が大きい。ここでは、アロメトリ一の形をあてはめて次式を得た。

$$f_W(L) = 0.0075 L^{1.5} \quad (\text{単位: } m^3/h/ind) \quad (5)$$

ろ水量は大きくばらついているので、ろ水量を補正するパラメータを導入し、さらに殻長と乾燥重量( $W_D$ )の関係をを用いると、上式は以下ようになる。

$$f_W(W_D) = 0.00211 \alpha W_D^{0.4513} \quad (6)$$

### (4) 同化効率

伊藤(1978a)<sup>5)</sup>は餌料中および糞中の有機物含量を測定し同化効率を求めている。このときの同化効率と餌濃度との関係は、大きくばらついているが、餌濃度が高いと同化効率が低い傾向がある(図3)。ここでは、両者の関係は季節によらないとして、同化効率を次式で表した。

$$e = \beta / (\beta + C) \quad (7)$$

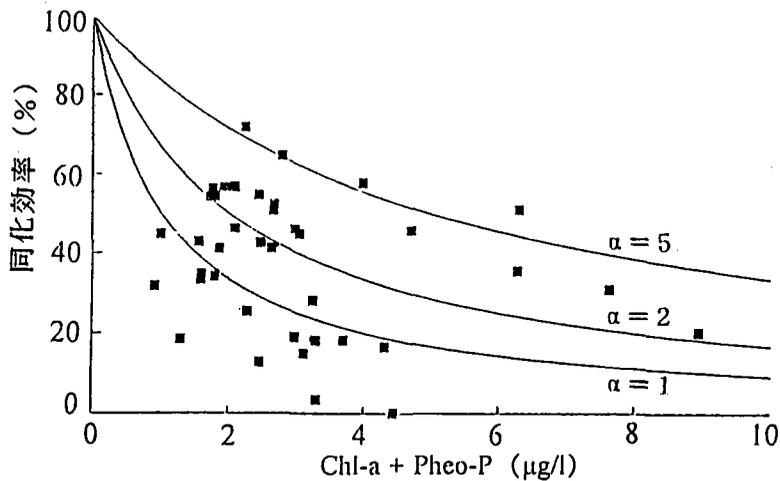


図3 アコヤガイの同化効率と餌料密度 (Chlorophyll-a + Pheophytin;  $\mu\text{g/l}$ ) の関係。

ただし、 $e$  は同化効率、 $C$  は餌濃度、 $\beta$  は同化効率に係わるパラメータである。図3には、 $\beta = 1, 2, 5$  の場合を示してある。

### 3) 呼吸量

伊藤 (1976<sup>6)</sup>, 1978b<sup>7)</sup>) は、アコヤガイの特定個体について年間を通して酸素消費量を測定している。この実験結果を用いて、呼吸量 (エネルギー消費量) を表す式を求めた。一般に標準代謝量は体重の $3/4$ 乗に比例することが多くの動物で知られているので、呼吸量が水温と貝の大きさ (乾燥肉重量の $3/4$ 乗) の関数であると仮定し、対数回帰により次式を得た。

$$R' = 0.023149 T^{2.4932} W_D^{0.75} \quad (8)$$

ここで、 $R'$  は酸素消費量 ( $\mu\text{g atoms/h/ind}$ )、 $W_D$  は乾燥肉重量 ( $\text{g}$ )、 $T$  は水温 ( $^{\circ}\text{C}$ ) である。これをカロリー単位に直すと、エネルギー消費量  $R$  ( $\text{cal/h/ind}$ ) は、

$$R = 0.0012527 T^{2.4932} W_D^{0.75} \quad (9)$$

## 4) 再生産

### (1) 再生産効率

純生産 (NP) が再生産と体組織に  $r : (1-r)$  の割合で分配されるとする。ここでは、非産卵期 (9月~2月) と産卵期 (3月~8月) に分けて以下のように再生産効率を設定した。ただし、 $T$  は水温 ( $^{\circ}\text{C}$ ) である。

$$\text{非産卵期: } \begin{cases} r = 0.05 & (T > 20) \\ r = 0.05 (T-13) / 7 & (13 < T < 20) \\ r = 1 & (T < 13) \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{産卵期: } \begin{cases} r = 0.95 & (T > 20) \\ r = 0.95 (T-13) / 7 & (13 < T < 20) \\ r = 0 & (T < 13) \end{cases} \quad (11)$$

## (2)産卵

放卵・放精にはそれまでの生殖巣の発達の程度や、水温・塩分の刺激などが関係すると考えられる。しかし、これらをモデルに組み込むまでの知見は整っていない。ここでは、カキに関するPowellら(1992)<sup>11</sup>のモデルにならって生殖腺重量(g)が生物量(W)の20%を越えると産卵・放精するものとした。

## 5) 計算例

成長モデルの妥当性を検証するため、英虞湾におけるアコヤガイの飼育実験結果(関, 1972<sup>9)</sup>;伊藤, 1978b<sup>7)</sup>)をモデルを用いて再現した。まず、春(5月)の乾重量を初期値として与え、その後の環境条件(水温, 塩分, 餌密度)を与えて、アコヤガイの成長を計算した。ただし、ここでは水量に関するパラメータ $\alpha$ を2, 同化率に関するパラメータ $\beta$ を2として計算を行った。その結果, 良好な漁場(図4-a, b), 過密養殖により生産性の低下した湾奥部漁場(図4-c)のいずれにおいても, モデル計算値は実測値とよく一致し, モデルの有効性が示された。

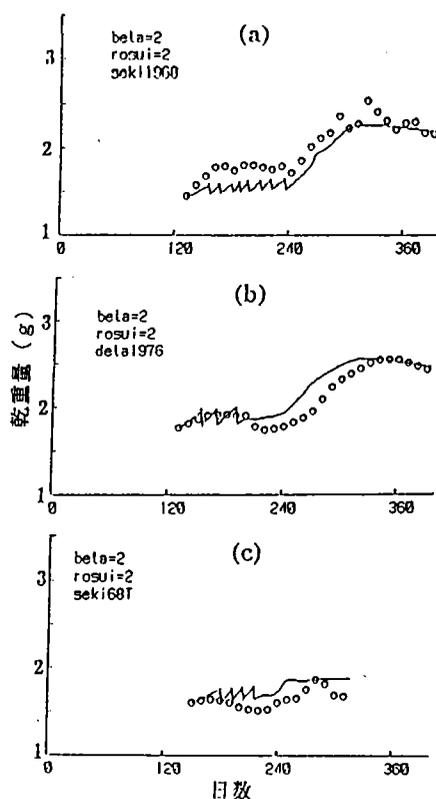


図4 英虞湾におけるアコヤガイの成長。実線はモデルによる計算値, ○は測定値。

(a)浜島浦 (1968), (b)浜島浦 (1976), (c)湾奥部 (1968)

## 2. 餌料生物動態モデル

### 1) モデルの概要

開発したアコヤガイ成長モデルを用いて, 養殖場の評価や適正養殖量の算出を行うためには, 餌料環境の動態モデルを開発する必要がある。つまり, アコヤガイの養殖量を変化させた場合の餌密度の変化を計算し, アコヤガイの成長に反映させなければならない。餌料濃度は, 餌料プランクトンの増殖, アコヤガイによる摂食および海水交換等によって決まる。これらの多くは各養殖場毎に異なっており, それぞれに調査する必要がある。

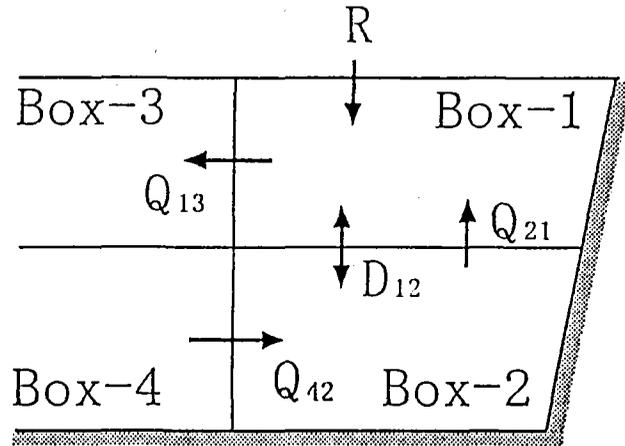


図5 ボックスモデルの模式図。

餌密度の変動は、増殖、自然死亡、アコヤガイによる摂餌、海水交換による流出のバランスとして以下のように表される。

$$V \cdot dC/dt = (a - b)VC - FBC + Q \quad (12)$$

ここで、 $C$ は餌密度（クロロフィル濃度）、 $V$ は海域の容積、 $a$ は増殖率、 $b$ は自然死亡率、 $B$ はアコヤガイ個体数、 $F$ はろ水量、 $Q$ は海水交換による系外への流出である。この式のうち、 $F$ は(1)の成長モデルにより求めることができるので、餌密度 $C$ が測定されていれば、未知なものは海水交換による $Q$ と純増殖率 $(a - b)$ である。ここでは、海水交換速度を推定することにより、純増殖率を上式により計算する。これらの値が求まれば、アコヤガイの養殖量 $(B)$ を変えた場合の餌密度 $(C)$ の変化を予測することができる。

## 2) 海水交換

海水交換を推定する方法としては、ボックスモデル解析を用いる（木村ら、1985<sup>9)</sup>。海域をいくつかのボックスに分け、ボックス内の塩分収支により海水交換係数を求める。ここでは、内湾で鉛直循環流が卓越する成層期を想定し、海域を2層2ボックスに分け、湾内水が上層から流出し、湾外水が下層から流入するモデルを採用した（図5）。各ボックス内の塩分収支を考えると、次式が得られる。

$$\left\{ \begin{array}{l} R + Q_{21} - Q_{13} = 0 \\ V_1 \Delta S_1 / \Delta t = S_2 Q_{21} + D_{12}(S_2 - S_1) - S_1 Q_{13} \\ Q_{42} - Q_{21} = 0 \\ V_2 \Delta S_2 / \Delta t = -S_2 Q_{21} + D_{12}(S_1 - S_2) + S_4 Q_{42} \end{array} \right. \quad (13)$$

ここで、 $V_1$ 、 $V_2$ はそれぞれボックス1、2の容積、 $Q_{21}$ はボックス2からボックス1への輸送係数、 $Q_{13}$ はボックス1からボックス3への輸送係数、 $Q_{42}$ はボックス4からボックス2への輸送係数、 $D_{12}$ は鉛直拡散、 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ はそれぞれボックス1、2、3、4内の平均塩分、 $R$ はボックス1への淡水流入量である。

### 3) 餌料生物収支

海水交換として上に挙げた $Q_{21}$ ,  $Q_{13}$ ,  $Q_{42}$ ,  $D_{12}$ を考えると、ボックス内の餌料生物密度の収支は次のようになる。ただし、養殖アコヤガイは上層（ボックス1）にのみ存在すると仮定する。

$$\begin{cases} V_1 \Delta C_1 / \Delta t = C_2 Q_{21} + D_{12}(C_2 - C_1) - C_1 Q_{13} - C_1 F_B + C_1(a-b)V_1 \\ V_2 \Delta C_2 / \Delta t = -C_2 Q_{21} + D_{12}(C_1 - C_2) + C_4 Q_{42} \end{cases} \quad (14)$$

この式において、海水交換に係わる係数 $Q_{21}$ ,  $Q_{13}$ ,  $Q_{42}$ ,  $D_{12}$ はボックスモデル解析により求めることができ、アコヤガイによる摂餌はアコヤガイ成長モデルにより求めることができる。したがって、餌密度 $C$ を測定すれば、純増殖率 $(a-b)$ を上式により計算することができる。これらの値が求めれば、アコヤガイの養殖量 $(B)$ を変化させた場合の、餌密度 $(C)$ の変動を予測することができる。

### 3. モデルの適用例

開発したモデルでは、水温、塩分、海水交換、アコヤガイの養殖量などの環境条件が分かっているならば、餌密度の時間変化とアコヤガイ重量の時間変化（成長）を初期値から順次計算することができる（図1）。これにより、養殖量を変化させた場合の餌密度の変化およびアコヤガイの成長量の変化を計算することができる。ただし、餌料動態モデルのパラメータ（純増殖率、海水交換）は各養殖場毎に毎年異なっており、それぞれに調査を行って決定する必要がある。ここでは、三重県五ヶ所湾の真珠漁場におけるモデルの適用例について述べる。

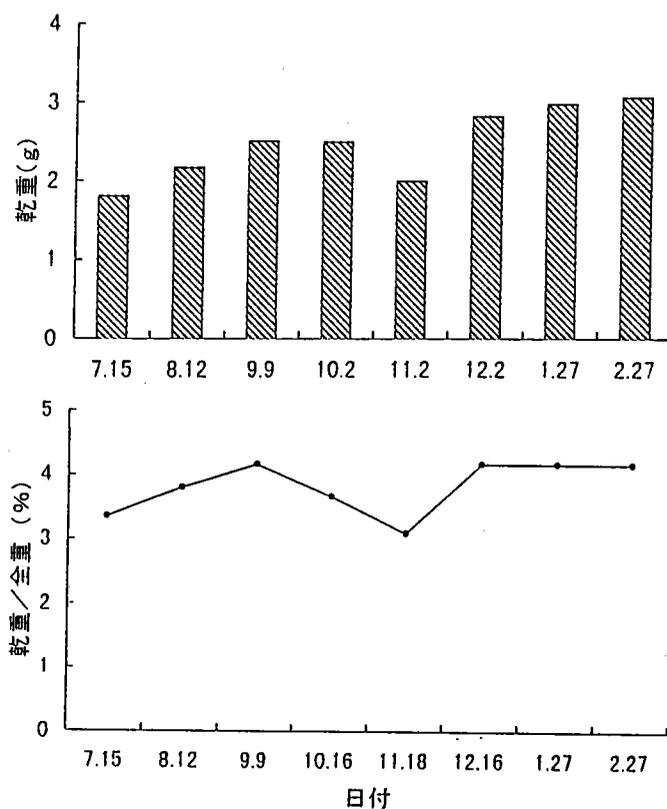


図6 五ヶ所湾におけるアコヤガイの飼育実験結果。

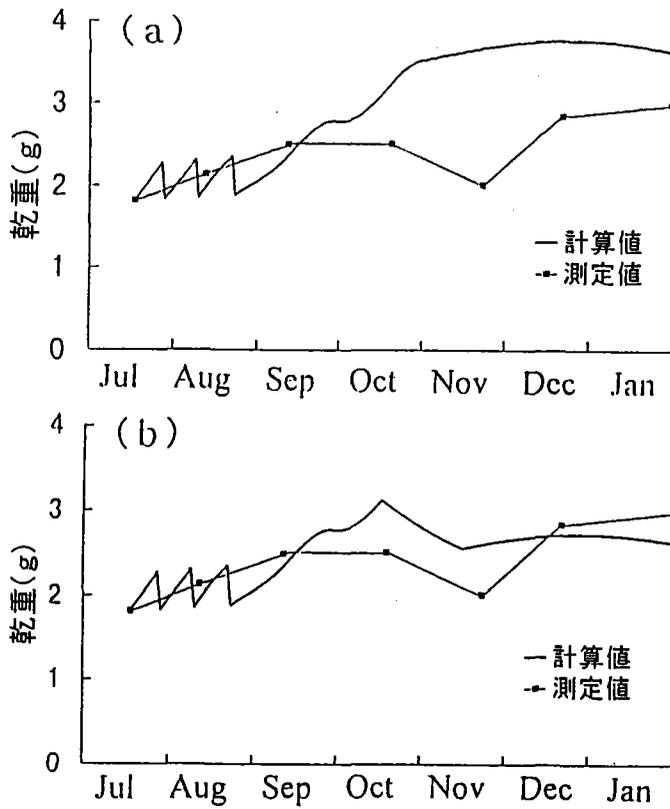


図7 五ヶ所湾におけるアコヤガイの成長（モデルによる計算値および測定値）。

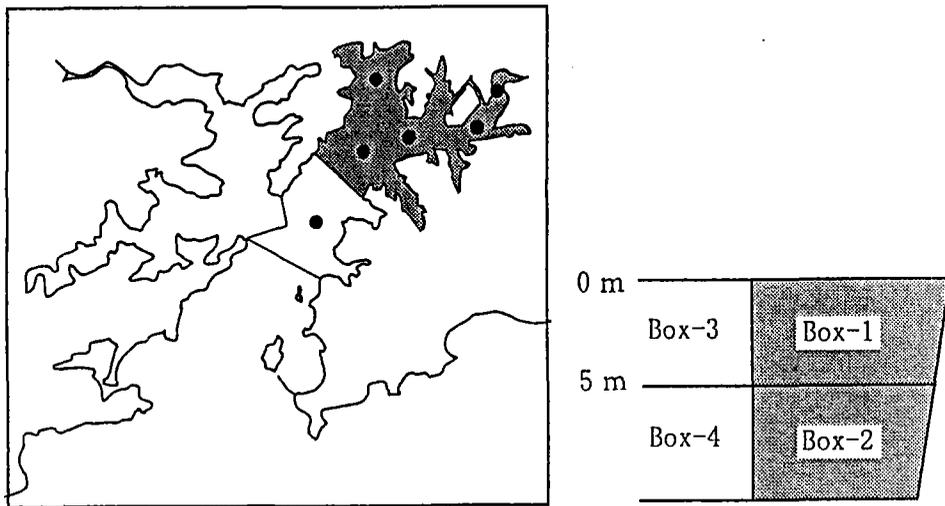


図8 五ヶ所湾における観測点とボックスモデルの海域区分。

### 1) アコヤ成長モデル

まず、1997年に五ヶ所湾内で行ったアコヤガイの飼育実験結果を行いて、アコヤガイ成長モデルのパラメータを決定した。飼育実験では、アコヤガイの成長量（重量変化）および水温、塩分、餌密度（クロロフィルa量）を測定した（図6）。この飼育実験では、10月から11月に成長の低下が見られた。つぎに、測定した水温、塩分、餌密度の環境条件下でのアコヤガイの成長をモデルを用いて計算した。ろ水量および同化効率に係わるパラメータを $\alpha = 2$ 、 $\beta = 2$ として計算したところ、計算結果と測定値は満足できる

ほど一致はしなかった(図7-a)。計算結果では、10月から11月の成長低下を再現できていないことが分かる。これは、モデルには病気などの要素が組み込まれていないためと考えられる。そこで、10月中旬から11月中旬にかけては、病気などの原因によりアコヤガイの同化が阻害されていたものと考えて $\beta = 0$ として再計算した(図7-b)。その結果、計算結果は測定値を概ね再現できた。

## 2) 餌料生物動態モデル

五ヶ所湾では、湾奥部の神津差・下津浦で集中して真珠養殖が行われている。ここでは、この湾奥部の真珠漁場を研究対象海域としてモデルの適用を行った。ボックスモデル解析における海域区分は、図8のような2層2ボックスとした。また、養殖アコヤガイは、湾奥部の上層(ボックス1)にのみ存在するものとした。解析に必要なデータは、各ボックス内の水温、塩分、餌密度およびアコヤガイの現存量である。1997年に図6に示す測点で半月に1度観測を行い、各ボックス内の平均水温、塩分、餌密度を求めた。これらのデータを用いて、塩分収支から海水交換項を求め、さらに餌密度収支から生物項(純増殖率)を求めた。

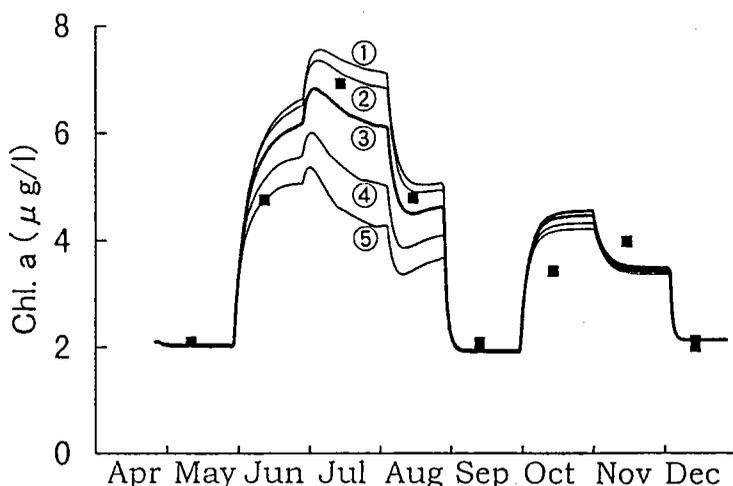


図8 餌料生物動態シミュレーション結果。点：測定値，①養殖個体数0.5倍，②養殖個体数0.8倍，③実際の養殖個体数，④養殖個体数1.5倍，⑤養殖個体数2倍での計算値。

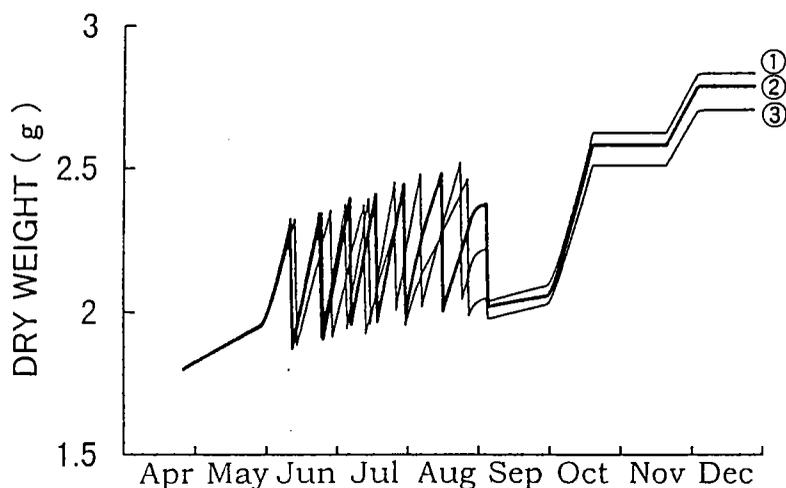


図9 アコヤガイ成長シミュレーション結果。①養殖個体数0.5倍，②実際の養殖個体数，③養殖個体数2倍での計算値。

### 3) 計算結果

上記1), 2) で決定したパラメータを用いてアコヤガイの養殖個体数を変えた場合の餌密度の変化とアコヤガイの成長量を試算した。計算は4月から12月まで行った。餌料生物動態の計算結果を図9に示した。計算条件(アコヤガイの個体数)は、①実際の養殖個体数の0.5倍、②実際の養殖個体数の0.8倍、③実際の養殖個体数、④実際の養殖個体数の1.5倍、⑤実際の養殖個体数の2倍とした。実際の養殖個体数で計算した場合、餌密度(クロロフィルa量)は概ね現場の実測値と一致した。このことは、餌料生物動態モデルの有効性を示している。また、アコヤガイの個体数を減らして計算した場合には餌密度が高く、個体数を増やした場合には餌密度は低く計算され、この傾向は6月から8月に特に強い。このことは、アコヤガイによる摂餌が湾内の生態系に大きな影響を及ぼしていることを示しており、養殖個体数を過度に増やすと餌不足が生じる可能性を示している。

つぎに、アコヤガイ成長の計算結果を図10に示した。計算条件(アコヤガイの個体数)は、①実際の養殖個体数の0.5倍、②実際の養殖個体数、③実際の養殖個体数の2倍とした。養殖個体数が減少すると、餌密度が高くなり、アコヤガイの摂餌量と同化量は大きくなる。そのため、養殖個体数を減らした場合アコヤガイの成長量は大きくなった。一方、養殖個体数を増やすと餌密度が低くなり、餌不足からアコヤガイの成長量が小さくなった。また、養殖個体数が増えると、産卵期に行われる放卵・放精の回数が少なくなった。これらの結果は、養殖個体数が過度に増えるとアコヤガイの成長や産卵に悪影響が及ぶことを示している。

### 結語

アコヤ成長モデルおよび餌料生物動態モデルは、現場の測定値を概ね再現することができ、アコヤガイの養殖個体数を増やした場合の餌密度の変化およびアコヤガイ成長量の変化を計算することができた。このモデルはボックスモデル解析を基本としているので、簡便であり必要な調査項目も限られていて、各地の養殖場へのモデルの応用が比較的容易である。すなわち、各養殖場においてアコヤガイの飼育実験(成長量、水温、塩分、餌料環境の測定)を行って成長モデルのパラメータを決定し、ボックスモデル解析に必要な塩分と餌料密度の測定を行えば、モデルを作成することができる。ただし、より精度良くモデル化するためには、生態系モデルの構築と利用を今後検討する必要がある。

### 摘要

アコヤガイの餌料要求と海域の餌密度のバランスを適正養殖量を求める際の基本的な考え方とし、アコヤガイの適正養殖量算定のためのモデル開発を行った。

本研究では、アコヤガイの代謝、成長、生殖巣の発達が環境条件(餌密度、水温、塩分)で決まり、漁場内の餌密度が、餌生物の増殖、アコヤガイによる摂餌、海水交換による流出のバランスによって決まると仮定して数式化を行った。

モデルは、アコヤガイの飼育実験に関する文献値をよく再現することができ、モデルの有効性が示された。五ヶ所湾にモデルを適用したところ、現場のアコヤガイの成長と餌料生物密度(クロロフィル量)をよく再現することができた。

養殖個体数を増やすと餌料密度が減少してアコヤガイの成長量が小さくなり、養殖個体数を減らすと餌料密度が増加してアコヤガイの成長量が大きくなることが示された。このモデルは、アコヤガイの養殖個体数を変えた場合の餌密度とアコヤガイの成長量の変化を予測でき、環境保全型養殖の確立に向けた漁場改善計画の策定に資する。

## 参考文献

- 1) Powel, E. N., E. E. Hoffman, J. M. Klink and S. M. Ray 1992. Modeling oyster populations 1. A commentary on filtration rate. Is faster always better?. J. Shellfish Res. 11(2): 387-398.
- 2) 宮内徹夫 1962. アコヤガイの濾過水量Ⅱ. 濾化水量に及ぼす水温と比重に影響. 水産増殖, 10(3): 7-13.
- 3) 沼口勝之 1994. アコヤガイのろ水率におよぼす水温の影響. 水産増殖, 42: 1-6.
- 4) 辻井 禎・大西侯彦 1957. アコヤガイの濾過水量及び捕食の実験的研究Ⅰ 濾過水量について. 国立真珠研報, 3: 194-201.
- 5) 伊藤克彦 1978a. 英虞湾真珠漁場におけるアコヤガイの栄養環境について. 国立真珠研報, 22: 2363-2381.
- 6) 伊藤克彦 1976. 異なる水温条件下におけるアコヤガイの酸素消費量ならびにアンモニア態窒素排泄量と肉重量との関係. 国立真珠研報, 20: 2254-2275.
- 7) 伊藤克彦 1978b. アコヤガイの代謝・成長量からみた養殖深度の特徴. 国立真珠研報, 22: 2337-2362.
- 8) 関 政夫 1972. 養殖環境におけるアコヤガイ, *Pinctada fucata* の成長および真珠品質に影響を及ぼす自然要因に関する研究. 三重県水産試験場報告, 1: 32-149.
- 9) 木村晴保・宗景志浩・渡辺久芳 1985. 講座ボックスモデル. 水産土木, 22: 91-95.