

生態系モデルによる志々伎湾における マダイ当歳魚の環境収容力の推定

加藤 史彦^{*1}・松宮 義晴^{*2}

^{*1}中央水産研究所（故人）、^{*2}三重大学生物資源学部

Estimation of the Carrying Capacity for O-age Red Sea Bream in Shijiki Bay Using an Ecosystem Model

Fumihiko KATO^{*1} and Yoshiharu MATSUMIYA^{*2}

^{*1}National Research Institute of Fisheries Science (the deceased)

^{*2}Faculty of Bioresources, Mie University

Abstract

The long-range studies on the ecology and dynamics of various organisms, chiefly including larvae and juveniles of red sea bream, and on the environmental conditions of the ecosystem, have been performed at Shijiki Bay, Hirado Island, Nagasaki Prefecture. An ecosystem model of Shijiki Bay was developed mainly with regard to the dynamics of O-age red sea bream and verification of the model was carried out. The following summarizes the results.

(1) Basic concept for the development of an ecosystem model of Shijiki Bay, its boundary conditions and state variables and parameters to be introduced into the model were determined by rearranging available information on the bay such as non-biological elements in the bay, ecology, dynamics and production process of zooplankton, phytoplankton and feed benthos, life form of O-age red sea bream, stock variations, and carrying capacity.

(2) Spatial range of the model was decided to be central and inner parts of the bay where the red sea bream settles and grows, and time range of the model was decided to be four months from May 5 which is the normal settling time of the fish to September 5 when the fish starts to migrate toward the open sea.

(3) The model system is divided into seven parts: Copepoda, Gammaridea and Mysidacea which in turn are used as feed by the red sea bream as it grows, wild red sea bream, reared red sea bream, competitors of the fish for feed and their predators.

(4) A total of 37 parameters were used and the relationship among these components and changes in the individual numbers were expressed by a differential equation.

(5) Individual numbers of feed organisms were expressed using a logistic model by incorporating predation pressure into the basal model. As parameters, intrinsic rate of increase, carrying capacity and the number of feed organisms preyed on by the red sea bream and other fish were introduced.

(6) Change in the individual numbers of red sea bream, competitors and predators were expressed using certain parameters such as the decreasing coefficient, feed richness-depending increasing rate and the number of prey.

(7) Initial values of the variables and parameters were determined after analyzing the information obtained mainly from Shijiki Bay and analyzing the results of various sensitivity tests of provisional variables and parameters.

(8) When conditions of Shijiki Bay from 1976 to 1977, a period during which individual numbers of red sea bream juveniles and their changes thereafter had been well detected, were simulated, the results coincided to the most part with the actually examined results. Simulation using the ecosystem model confirmed a generally considered view that the limit of the carrying capacity for red sea bream is about two million individuals.

(9) Simulation of a releasing experiment of artificial red sea bream performed in 1984 showed slight differences from the results of an actual tracing examination. It is necessary to re-examine some parameters such as the survival rate of released fishes.

Key words: red sea bream, carrying capacity, ecosystem model, O-age fish, prey-predator

緒 言

長崎県平戸島志々伎湾では、1975年より農林水産省の大型別枠研究「マリンランシング計画」の一環として長年にわたって、特にマダイ幼期の生態学的研究が続けられてきた。①来遊量の年変動に伴う生活様式の変化、②食物要求量と餌資源量の対比、という二つの方向からマダイ当歳魚の環境収容力へのアプローチが試みられている。

ここでは多くの調査研究によって得られた各種生物の生態、動態およびそれらを取りまく環境に関する知見を整理し、志々伎湾のマダイ当歳魚を中心とした生態系モデルを開発し、生態系モデルの立場から環境収容力の推定や検討を実施した。過去のマダイ資源動態調査ならびに種苗放流実験結果などにより本モデルの検証も行った。将来的には、本モデルを改良して漁獲および種苗放流による負荷が生態系に与える影響を予測し、資源管理型ならびに培養型漁業に対する基礎的知見を得ることを大きな目的としている。

環境収容力は気候や海洋条件、餌の資源量、競合生物の密度などの時間的変動とともに変化し、一定ではないがその場所の平均的条件下でその絶対量を把握することは可能である。この概念は陸上の野生動物の資源管理や放牧場での生産性向上を考える際に、実用的な観点から用いられている。水産生物の場合も、対象種をどのくらいまで増やせるのか、最も効率の良い放流方法や増殖戦略はどのようなものか、いわゆる栽培漁場において種苗の放流密度はどのくらいかといったことを考える場合、

環境収容力の解明は避けて通ることのできない課題となっている。Matsumiya and Ohnishi¹⁾は同じ志々伎のマダイ放流を対象に、仮説的に数式化した環境収容力の影響を吟味し、効果的放流計画を検討した。

志々伎湾とマダイ当歳魚の知見

志々伎湾のマダイ当歳魚を中心とする生態系モデルの考え方や環境条件の設定、あるいは使用する変数の初期値やパラメタの決定を行う際に重要な既往知見の整理を行った。これらは、志々伎湾の地形的概要、理化学的環境、動植物プランクトンやベントスの分布・生態・生産に関する事項に及ぶ。マダイに関しては浮遊期仔魚、着底生活期稚魚、若魚期などの発育段階にわけて、分布・成長・食性・摂餌量・個体数変動、種間・種内関係・食物連鎖などに関する知見を整理した。上記の知見は主として、西海区水産研究所研究報告、第54号1980年と第59号1983年にとりまとめられている。

志々伎湾の概要

志々伎湾は長崎県平戸島の西岸南端近くにあり、北西に向かって開口し、入口が約2 km、奥行き約5 km（面積約10 km²、体積155×10⁷ m³）の小さな湾である（Fig. 1）。水深は湾口部で30～40 m、湾中央部で15～20 m、湾奥部で10 m以浅である。志々伎湾には大きな流入河川がなく、その性格は対馬暖流系の外洋水の影響を受ける開放的なものであり、干満の差は最大で3 m近くとなる²⁾。

水の流れや海底の堆積構造、ベントスの分布状況など

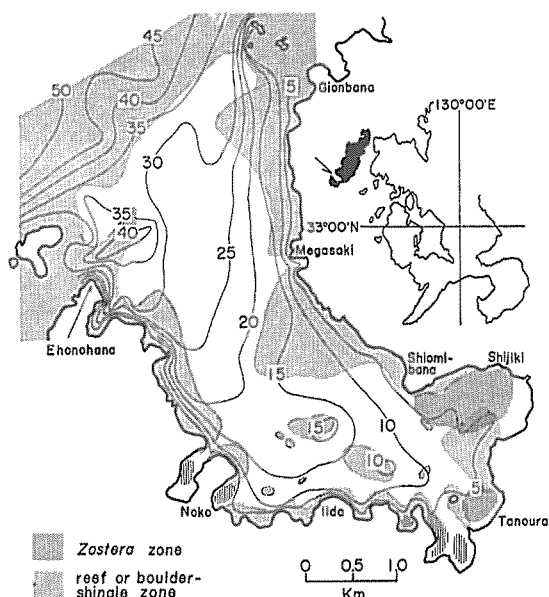


Fig. 1. Location and general topography of Shijiki Bay. Numerals indicate depth in meter.

の違いから、本湾は湾口部・湾中央部・湾奥部の3つの水域に区分されている²⁾。マダイ当歳魚の主な生息場となる湾奥部は閉鎖性が強く、底質は細かい砂の水域である。3水域のなかでは最もヨコエビ類・ワレカラ類を中心とした甲殻類と多毛類などのベントスが豊富である³⁾。動物プランクトンはカイアシ類が最も多く、アミ類とともに着底初期のマダイの重要な餌となっている。

志々伎湾には年間を通じて200種類以上の魚類が出現

する。個体数の多い魚類のうち、メイトガレイ・カナガシラなどは湾口部に、タマガンゾウビラメ・ユカタハゼなどは湾中央部に、マダイ・チダイ・サビハゼ・ヒメジなどは湾奥部に生息し、これらのいずれもが季節的に湾内に移入してくるものである^{4,5)}。

マダイ当歳魚に関する既往知見

志々伎湾へのマダイの浮遊仔魚の来遊盛期は4月下旬から5月中旬である⁶⁾。浮遊生活から着底生活への移行は、5月上旬から6月上旬に全長12~15mmで行われる。6月中旬頃には後期稚魚期に移行し、尾叉長40mm前後で完全な底生生活に入る。分布の中心は湾奥部細砂域である。7月に入ると、生活領域を湾中央部の極細砂域やアマモ場・ガラモ場の周辺にも広げ、7月中旬以降には岩礁域に分布するものも出現する。8月になると尾叉長80~90mmに成長し、湾奥部細砂域での分布の集中度は低下する⁷⁾。8月中旬から9月上旬にかけて当歳魚の主群は湾外へ移出する。湾外への移出は通常大きなマダイから始まる (Fig. 2)。

マダイ当歳魚の主な餌料は浮遊生活期が動物プランクトン、前期稚魚期がカイアシ類である。6月から7月にかけてはヨコエビ類とアミ類を中心に、多毛類やワレカラ類も加わる。特にヨコエビ類は量的に多く、湾奥細砂域ではヨコエビ類の現存量と稚魚の分布量に相関関係がみられる。稚魚や若魚の分布域の拡散は食性の多様化と対応している。8月には遊泳力の強い大型のアミ類を主食に、大型のヨコエビ類、クモヒトデ類も摂食するようになる^{8,9)} (Fig. 2)。

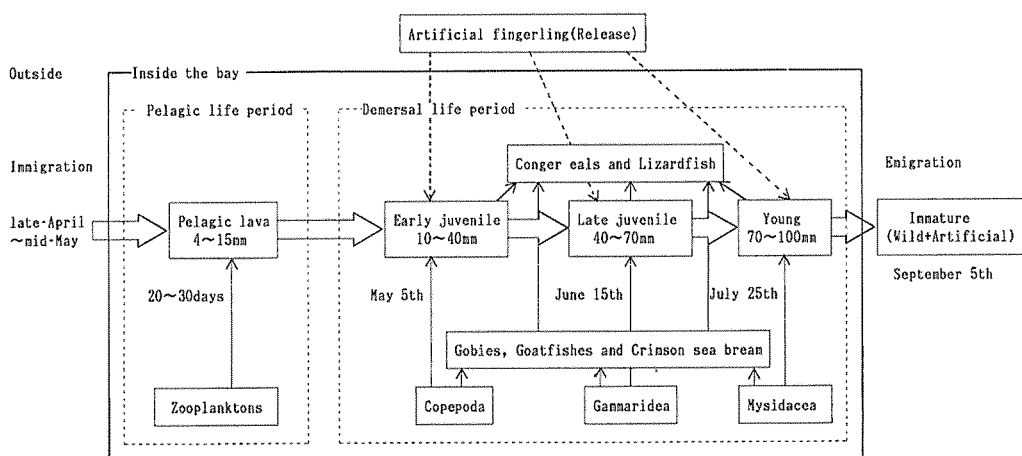


Fig. 2. Life history of 0-age red sea bream and ecosystem with 0-age red sea bream as leader.

マダイ当歳魚との競合種としてはサビハゼ・ヒメジ・スジハゼ・チダイなどが挙げられている^{10,11)}。マダイ当歳魚の捕食魚としては夜間マダイを捕食するマアナゴ・クロアナゴおよび昼間にマダイの摂餌中を襲うマエソ・トカゲゴチ・カサゴ・アナハゼなどがある。マアナゴはヒメジ・スジハゼ・タコ類を、クロアナゴはチダイ・サビハゼ・ヒメジなども捕食している^{12,13)} (Fig. 2)。

来遊量の年変動は20倍近くに達している。1977年の志々伎湾への後期仔魚の来遊数は、4月20日から5月20日の30日間で約 1.29×10^7 尾、着底稚魚数は192万尾と推定されている⁶⁾。着底稚魚の1日当りの生残率を0.950として試算すると、6月中旬の稚魚の尾数は89万となり、湾奥部における最高密度は1.2尾/m²であった。潜水ライントランセクト法により1975年、1976年、1977年の7月中旬の湾内の資源尾数は約6万、6万、42万尾と推定された。1977年7月中旬の湾奥部の平均密度は0.34尾/m²であった¹⁴⁾。

稚魚の来遊量が大きく変化した1975～77年の3年間を比較すると、低密度年にはマダイの主な生息場所はヨコエビなどの餌条件に恵まれた湾奥砂底域に限られるが、高密度年には条件の劣る湾中央部の砂底域やアマモ場、さらにはガラモ場にも生息場所を広げる傾向がみられた¹⁵⁾。高密度の1977年には成長が進んでもカイアシ類を摂取している個体が多く、小型餌料への依存度が高い傾向が認められた⁸⁾。1977年は他の2年と比べて、成長が遅れ魚体は小さく、肥満度も低下し、湾外への移出時期も遅れる傾向がみられた⁷⁾。

マダイ当歳魚の推定摂餌量から求めたマダイの食物要求量と湾奥砂底域における餌生物の資源量を対比して志々伎湾の環境収容力が検討された。生物個体群が一定水準を保とうとする機構を種内に持っているからには、環境収容力の概念は当然餌資源を食べつくすことのない、餌の再生産可能な状態での一定水域に生活できるマダイの量を意味している。その観点からすると、1977年は環境収容力の限界に近いかなり切迫した状況にあり、種内関係・種間関係に係わる生活様式に影響が出ていたと推定されている¹⁵⁾。

モデルの考え方と定式化

モデルの基本的な考え方

生態学的システムを記述するための空間の範囲は、マ

ダイの着底場を中心とする湾奥域と底生生活期稚魚の主たる生育場である湾奥域が対象となる（面積は約7 km²）。時間的設定範囲は来遊した尾叉長約10 mmのマダイが約15 mmで着底し、主としてカイアシ類を食べながら40 mmに成長する前期稚魚期の約40日間、その後主食をヨコエビ類に変わって70 mmまで成長する後期稚魚期の約40日間、さらにはアミ類食性となって約100 mmに成長し、湾から移出しはじめる若魚期の約40日間で、暦の上では平均的には5月5日から9月5日までの120日間とした (Fig. 2)。

生態系を構成する要素はマダイ当歳魚を軸にして、その餌生物であるカイアシ類、ヨコエビ類、アミ類にそれらの餌をめぐるマダイと競争関係にあるサビハゼ・ヒメジ・スジハゼ・チダイなどからなる競合生物群、さらにはそれらを捕食するマアナゴ・クロアナゴ・マエソなどからなる捕食者群の6つである。種苗放流による負荷も検討できるように、マダイ放流種苗という要素も必要に応じて加えられるようにしてある (Fig. 2)。

対象とする海域は面積が規定されているので、ある限界量を超えて餌生物が生息することは不可能である。そこで餌生物の資源の動態はロジスティックモデルを基本として、それに捕食圧を組み込んで表現した。餌生物以外の構成要素に関しては環境収容力の概念は導入せず、逸散を含む減少率、餌生物の豊度と連動する増加率、被捕食による減少などを用いて数量変動を表示した。

マダイの食性に関しては、尾叉長40 mmまでは、カイアシ類を専食し、その後70 mmまではヨコエビ類を、70 mm以上ではアミ類のみを食べると単純に設定した。マダイ1尾の1日当りの摂餌個体数は、実験で得られているマダイの日間成長量と呼吸量とから、1日の食物要求量を計算し、これを餌生物1尾当りの体重で除して求めた。

設定範囲初日の5月5日に、マダイの全数が同時に来遊し、前後の逐時的加入はないと仮定したため、個体群を増加させる要因はなく、時間の経過とともに自然死亡と捕食生物の食害により、一方的に減少するものとした。ただし、餌生物が多いほど自然死亡が緩和されるようにモデルを工夫した。マダイと競合者の個体群変動を示す式には、両者の直接的な競争を示す係数は導入されず、餌生物の数量が減少すると、競合者の減少率が高まり、逆に増加すると低くなるようモデル化することに

より、両種の関係を具体的に記述した。競合者との関係ではマダイの方が優位にあり餌が不足すると競合者はモデル海域の外に出るため、競合者には系内の餌生物を利用できないようにパラメタが選ばれている。また、捕食者の減少率も餌生物自体の豊度に影響を受けるように設定してある。

モデルの定式化

モデルの数学的記述のために7つの状態変数 (Table 1) と37個のパラメタを導入して餌料生物であるカイアシ類, ヨコエビ類, アミ類の個体数 ($X1, X2, X3$) の変化を、それぞれ下式で表示した。

Table 1. Variables on the ecosystem model and their initial values

Symbol	Variable	Initial value
$X1$	Number of Copepoda	250×10^8
$X2$	Number of Gammaridea	10×10^8
$X3$	Number of Mysidacea	7×10^8
$Y0$	Number of released red sea bream	5.08×10^4
$Y1$	Number of wild red sea bream	$20 \sim 200 \times 10^4$
$Y2$	Number of competitor	10×10^4
Z	Number of predator	3×10^4

$$\begin{aligned} dX1/dt = & ca1 \cdot X1 \cdot (1 - X1/cb1) \\ & - C1Y0 \cdot Y0 - C1Y1 \cdot Y1 - cd1 \cdot Y2 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} dX2/dt = & ca2 \cdot X2 \cdot (1 - X2/cb2) \\ & - C2Y0 \cdot Y0 - C2Y1 \cdot Y1 - cd2 \cdot Y2 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} dX3/dt = & ca3 \cdot X3 \cdot (1 - X3/cb3) \\ & - C3Y0 \cdot Y0 - C3Y1 \cdot Y1 - cd3 \cdot Y2 \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、右辺第1項の $ca1, ca2, ca3$ および $cb1, cb2, cb3$ はそれぞれカイアシ類, ヨコエビ類, アミ類の内的増加率と環境収容力である ($ca1=0.15, ca2=0.185, ca3=0.15/\text{日}$; $cb1=440, cb2=20, cb3=15$ 億尾)。 $C1Y1, C2Y1, C3Y1$ と $C1Y0, C2Y0, C3Y0$ および $cd1, cd2, cd3$ はマダイ放流種苗と天然魚ならびにそれらの競合種各1尾が、1日当りに捕食する餌の個体数である。 $cd1, cd2, cd3$ は定数として与えた ($cd1=1000, cd2=50, cd3=30/\text{日/尾}$)。前二者はマダイの食物要求量を基準に⑫～⑭式で求めた。

食物要求量はマダイの成長につれて増加する。マダイ

天然魚の尾叉長 ($FLY1, \text{mm}$) の成長式はモデルが対象とする期間では定数項 $gcty1$ と係数 $gcey1$ を用い、5月5日からの経過日数 (DAY) の関数として次のように表すことができる。

$$FLY1 = gcty1 + gcey1 \cdot (DAY + 5.0) \quad (4)$$

同様にマダイ放流種苗の尾叉長 ($FLY0, \text{mm}$) の成長も表示できる。

$$FLY0 = gcty0 + gcey0 \cdot (DAY + 5.0 + dd) \quad (5)$$

但し、 $gcty1$ と $gcey1$ は天然マダイの成長を示す一次式の定数項と係数で、多くの調査結果を拠りどころとし年ごとに定めた。 $gcty0$ と $gcey0$ は放流種苗の成長を示すもので上記と同じ値を用いた。 dd は天然魚と放流種苗の大きさの差を日数で是正するものである。

マダイ天然魚と放流種苗の日間成長量 ($GTY1, GTY0$) と日間呼吸量 ($RTY1, RTY0$) は、 mg 乾燥重量/日を単位として次のべき乗式が求められている。

$$GTY1 = 0.00420 \cdot FLY1^{2.269} \quad (6)$$

$$RTY1 = 0.00182 \cdot FLY1^{2.334} \quad (7)$$

$$GTY0 = 0.00420 \cdot FLY0^{2.269} \quad (8)$$

$$RTY0 = 0.00182 \cdot FLY0^{2.334} \quad (9)$$

上記から天然マダイおよび放流魚の食物要求量 ($FTY1, FTY0, \text{mg}$ 乾燥重量/日) が定まる。

$$FTY1 = (GTY1 + RTY1) / ca \quad (10)$$

$$FTY0 = (GTY0 + RTY0) / ca \quad (11)$$

但し、 ca は食物消化率で、ここでは0.8を用いている。マダイ天然魚1尾が1日に摂食するカイアシ類, ヨコエビ類, アミ類の数 $C1Y1, C2Y1, C3Y1$ (単位, 万尾) はこの食物要求量に相当するものとし、それぞれの餌生物1尾の平均体重 $cw1=0.01, cw2=0.40, cw3=1.00 \text{ mg}$ (乾燥重量) を用いると以下になる。放流種苗による各餌生物の捕食数 ($C1Y0, C2Y0, C3Y0$) も同様である。

$$C1Y1 = P1Y1 \cdot FTY1 / cw1 / 10000 \quad (12)$$

$$C2Y1 = P2Y1 \cdot FTY1 / cw2 / 10000 \quad (13)$$

$$C3Y1 = P3Y1 \cdot FTY1 / cw3 / 10000 \quad (14)$$

$$C1Y0 = P1Y0 \cdot FTY0 / cw1 / 10000 \quad (15)$$

$$C2Y0=P2Y0 \cdot FTY0 / cw2 / 10000 \quad (16)$$

$$C3Y0=P3Y0 \cdot FTY0 / cw3 / 10000 \quad (17)$$

上の6つの式(12)~(17)で用いている $P1Y1$, $P2Y1$, $P3Y1$ および $P1Y0$, $P2Y0$, $P3Y0$ はマダイ天然魚ならびに放流種苗の成長に伴う食性の変化を示すスイッチ関数で、マダイの尾叉長 ($FLY1$, $FLY0$, ともに単位は mm) に応じて以下の値をとるように単純化した。

$$P1Y1 = \begin{cases} 1.0 & (FLY1 < 40) \\ 0.0 & (40 \leq FLY1) \end{cases}$$

$$P2Y1 = \begin{cases} 0.0 & (FLY1 < 40) \\ 1.0 & (40 \leq FLY1 < 70) \\ 0.0 & (70 \leq FLY1) \end{cases}$$

$$P3Y1 = \begin{cases} 0.0 & (FLY1 < 70) \\ 1.0 & (70 \leq FLY1) \end{cases}$$

$$P1Y0 = \begin{cases} 1.0 & (FLY0 < 40) \\ 0.0 & (40 \leq FLY0) \end{cases}$$

$$P2Y0 = \begin{cases} 0.0 & (FLY0 < 40) \\ 1.0 & (40 \leq FLY0 < 70) \\ 0.0 & (70 \leq FLY0) \end{cases}$$

$$P3Y0 = \begin{cases} 0.0 & (FLY0 < 70) \\ 1.0 & (70 \leq FLY0) \end{cases}$$

個体数の変動に関しては下式のように表現した。マダイ天然魚 ($Y1$) と放流種苗 ($Y0$) および競合種 ($Y2$) の個体数変動は、各々の減耗係数 $ce1=ce0=0.02$, $ca2=1.00$ /日と捕食者の個体数 (Z) による1尾1日当たりの被捕食尾数 $cg1=cg0=cg2=100$ 尾/日/尾などの関係式とした。

$$dY1/dt = Y1 \cdot (-ce1 + VY1) - cg1 \cdot Z \quad (18)$$

$$dY0/dt = Y0 \cdot (-ce0 + VY0) - cg0 \cdot Z \quad (19)$$

$$dY2/dt = Y2 \cdot (-ce2 + VY2) - cg2 \cdot Z \quad (20)$$

但し, $VY1$, $VY0$, $VY2$ は餌の豊度によりマダイ天然魚と放流魚および競合者の減少率を調整する係数で、餌生物カイアシ類, ヨコエビ類, アミ類各1尾がマダイ天然魚と人工種苗および競合者の生残率の向上に与える影響度 $cf1$, $cf2$, $cf3$ と $ck1$, $ck2$, $ck3$ および $ch1$, $ch2$, $ch3$ を用いて次の3つの式で表示した ($cf1=ck1=1.0 \times 10^{-9}$, $cf2=ck2=2.0 \times 10^{-8}$, $cf3=ck3=3.0 \times 10^{-8}$, $ch1=1.16$

$\times 10^{-7}$, $ch2=2.0 \times 10^{-6}$, $ch3=2.5 \times 10^{-6}$ /尾)。

$$VY1 = P1Y1 \cdot cf1 \cdot X1 + P2Y1 \cdot cf2 \cdot X2 + P3Y1 \cdot cf3 \cdot X3 \quad (21)$$

$$VY0 = P1Y0 \cdot ck1 \cdot X1 + P2Y0 \cdot ck2 \cdot X2 + P3Y0 \cdot ck3 \cdot X3 \quad (22)$$

$$VY2 = ch1 \cdot X1 + ch2 \cdot X2 + ch3 \cdot X3 \quad (23)$$

(21)と(22)式には前述したマダイの食性変化を示すスイッチ関数が含まれている。競合者 ($VY2$) には時間の経過に伴う食性の変化はないと仮定した。

捕食者の個体数 (Z) の変動も、マダイと同様に減耗係数 $ci=0.01$ /日、餌となるマダイ、放流種苗、競合者1個体が、生残率の向上に与える影響度 $cj1$, $cj0$, $cj2$ を用い、以下のように表示した。被捕食による減少の項はない ($cj1=1.75 \times 10^{-8}$, $cj0=cj2=2.0 \times 10^{-8}$ /尾)。

$$dZ/dt = Z \cdot (-ci + cj1 \cdot Y1 + cj0 \cdot Y0 + cj2 \cdot Y2) \quad (24)$$

入力初期値とパラメタの感度分析

上述の数学的関係式をコンピュータで動的に実験するため、連続系シミュレーション言語 ACSL-PC (Advanced Continuous System Simulation Language) を用いて、パソコン用プログラムを作成した。刻み幅0.1日で4次のルンゲ・クッタ法により積分を行い、色々な個体数を計算しモデルのシミュレーションを実施した。但し、放流種苗についての積分は指定した放流日 (5月5日) がこないと開始されない。

モデルで用いた7つの変数の初期値 (Table 1) は調査結果にもとづくものであるが、多くは経験的な推測値をもとに、それをテストランによって改良したものである。但し、マダイ天然魚の初期尾数はその年の来遊量、人工種苗の初期値はその年の放流尾数そのもの、すなわち実測値である。

用いたパラメタ (媒介変数) の数は37個である。これらのなかで、餌の豊度がその餌に依存する種あるいは生物群の生残率に与える影響の尺度である関数 $VY1$, $VY0$, $VY2$ は、それぞれの種の減耗係数 $ce1$, $ce0$, $ce2$ と組み合わせて、非常に技巧的な使い方をしている。競合者の場合にはマダイに比較して、両パラメタの絶対値を大きくとっており、これは餌の豊度に関連して、個体群の系からの出入りが大きくなることを示している。つまり、競合関係にあるといえどもマダイの方が餌の利用な

どで優位にあり、餌不足の時は競合者はいったん系外に移出する、といった各生物の生態的関係が具体的に表現されている。

志々伎湾における長い研究の歴史をとおして培われた沢山の経験的知見はあるものの、初期条件やパラメタは正確な値が求められているものはわずかであり、推測にもとづくものが多い。そこで、これらの値を様々に変えて試験的なシミュレーションの実行を何回も行った。この感度試験においてパラメタ値の変更は一定の規則にもとづいて行っていないが、その値の妥当性の判断は各構成要素の個体数の変動や挙動が常識的な範囲に納まっているか否か、例えばマイナスや異常に大きな値をとらないかといった基準に拠った。

例を挙げると、カイアシ類の内的増加率と環境収容力は、それぞれ0.10/日と400億尾が専門家により提示されたが、様々な試行の末0.15/日と440億尾という値に納まった。前述した餌の豊度が生残率に与える影響の尺度は最も感度の高いパラメタであった。このようにあるパラメタに複雑な意味あいを多くもたせると、そのパラメタの感度が高まり、モデルのふるまいも大きく影響されることが判明した。

シミュレーション結果

マダイの成長が良好であった1976年と、遅滞した1977年（前々章を参照）のマダイ1尾の1日当りの摂餌尾数（カイアシ類、ヨコエビ類、アミ類）はFig. 3のとおり

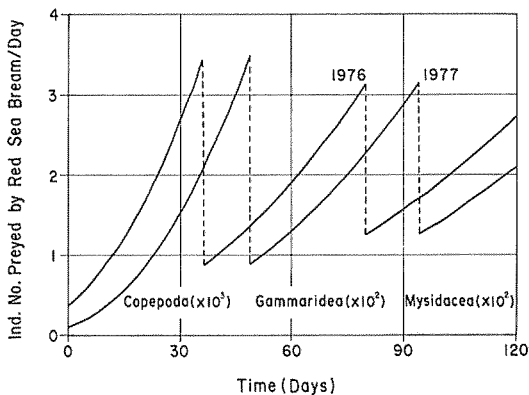


Fig. 3. Change of individual number for Copepoda, Gammaridea and Mysidacea preyed by red sea bream per day.

である。(4)式の成長を示すパラメタ $gcyl1$ は1976年が11.41, 1977年が4.76 mm, $gcyl1$ は1976年が0.69, 1977年が0.66 mm/日とした。餌の種類がスイッチする尾叉長40 mm および70 mm に到達する時期の兩年のちがい、およびマダイの成長とともに摂餌個体数が増加する様相が描かれている。

マダイの来遊量が低レベルの事例としてマダイ天然魚の初期値を40万尾とし、シミュレーションを行った場合の、餌生物3種 ($X1$, $X2$, $X3$) の5月5日から120日間の個体数の変化をFig. 4に、マダイ ($Y1$)、競合者 ($Y2$)、捕食者 (Z) の個体数の変化をFig. 5に示した。餌生物の個体数はどの種もかなりのレベルを維持している。マダイの個体数は60日後の7月中旬は約13万尾に減少しており、これは1976年の実態¹⁵⁾とよく符合した。

1977年には約190万尾のマダイが来遊し、マダイの生育状況などから鑑みてこの湾の環境収容力に近いものと推察されている⁷⁾。この場合のシミュレーション結果では餌生物の個体数変化の中の、カイアシ類 ($X1$) とヨコエビ類 ($X2$) の最小値は、再生産可能な限界の値を保持していると推察される (Fig. 6)。計算されたマダイの個体数 ($Y1$) は40日後の6月中旬には80万尾強で実測値とほぼ同じ値となり、60日後の7月上旬には約60万尾で実測値の42万尾¹⁴⁾よりやや高くなっていた (Fig. 7)。仮りに、マダイの初期値を200万尾にしてシミュレーションを行うと69日目に競合者 ($Y2$) の個体数がマイナスとなり、初期値を240万尾とすると49日目に競合者の、91日目に餌生物のヨコエビ類の個体数がマイナスとなった。上記の結果は志々伎湾の環境収容力を推定する上で多くの示唆を与える。

人工種苗の放流実験に該当する例を挙げて検討を加えた。1984年6月15日（5月5日より41日経過）に平均尾叉長55.4 mmのマダイ種苗を4.03万尾放流した場合のシミュレーションを行った (Fig. 8)。この年の天然魚の来遊水準は非常に低いと推定されているので、天然魚の初期値は30万尾を与えた ($gcyl1$ は19.26 mm, $gcyl1$ は0.72 mm/日, dd は9日)。放流魚 ($Y0$) の個体数変化は放流種苗の追跡調査結果と若干の相違がみられた。シミュレーションの第113日目に放流種苗の個体数はマイナスとなったが (Fig. 8)、実際には生残個体は存在しているところから推察すると、天然魚と等しく与えた放流魚の生残率などの各種パラメタを再検討する必要があると示唆

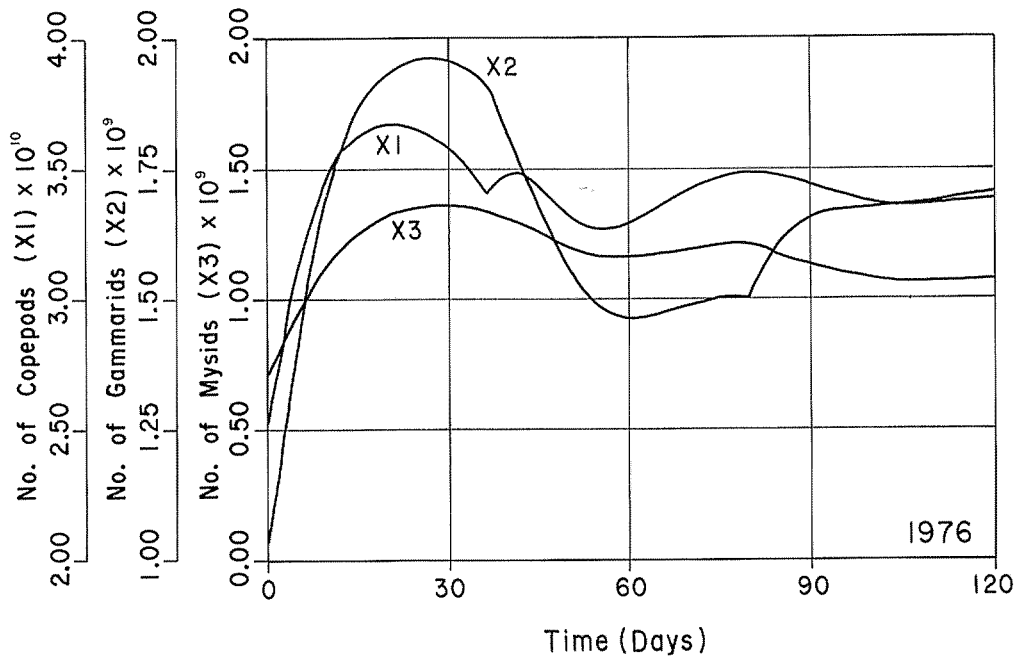


Fig. 4. Simulation of variations in number for Copepod (X_1), Gammarid (X_2) and Mysid (X_3), in the case of 40×10^4 for initial value of the number of wild red sea bream.

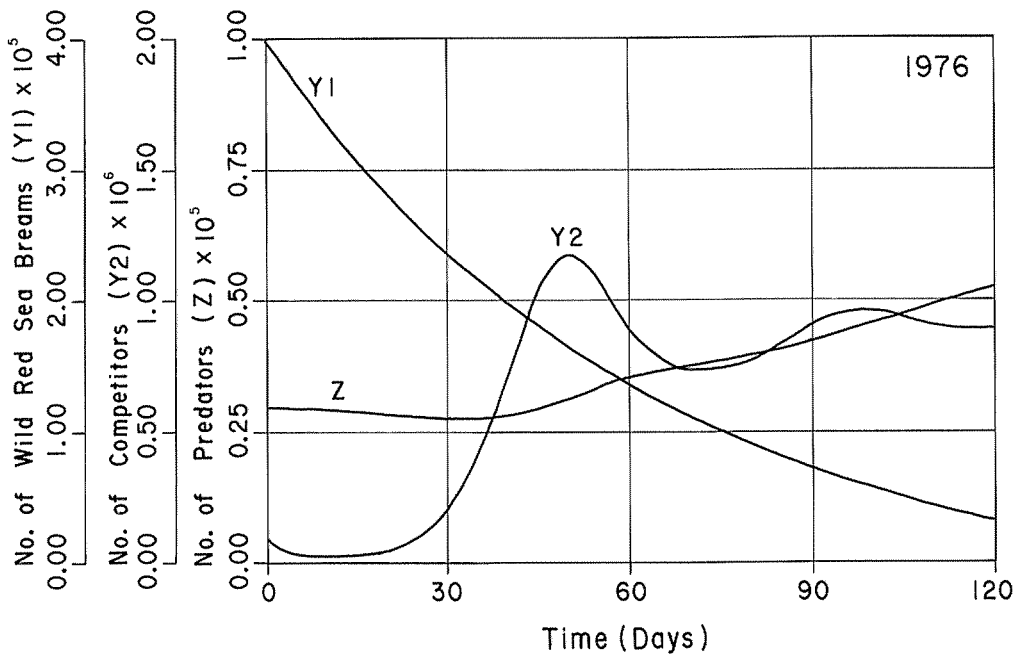


Fig. 5. Simulation of variations in number for wild red sea bream (Y_1), competitor (Y_2) and predator (Z), in the case of 40×10^4 for initial value of the number of wild red sea bream.

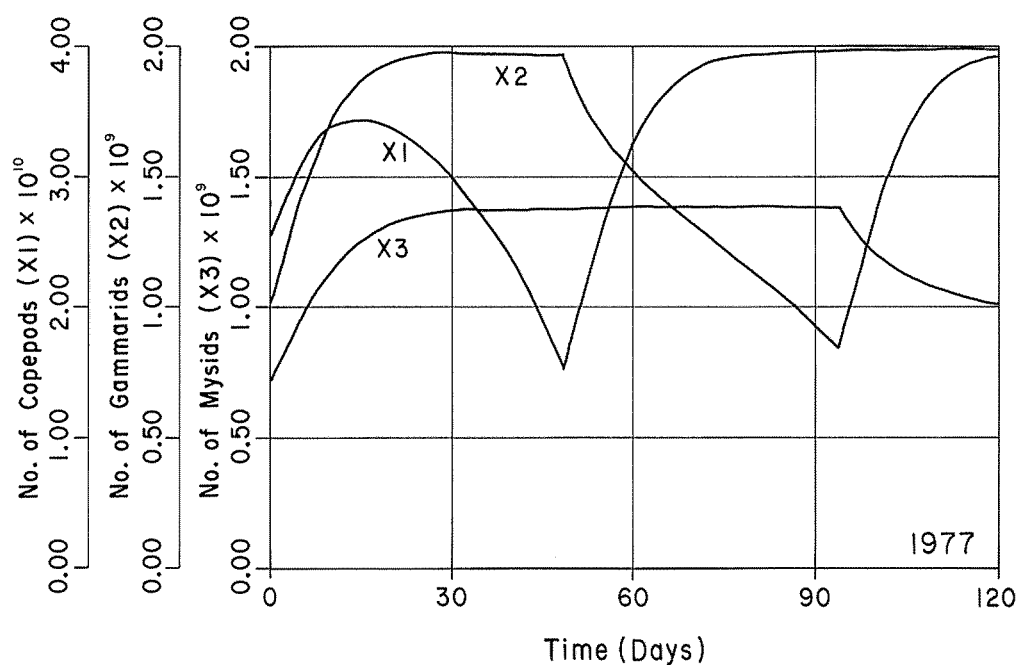


Fig. 6. Simulation of variations in number for Copepod (X_1), Gammarid (X_2) and Mysid (X_3), in the case of 190×10^4 for initial value of the number of wild red sea bream.

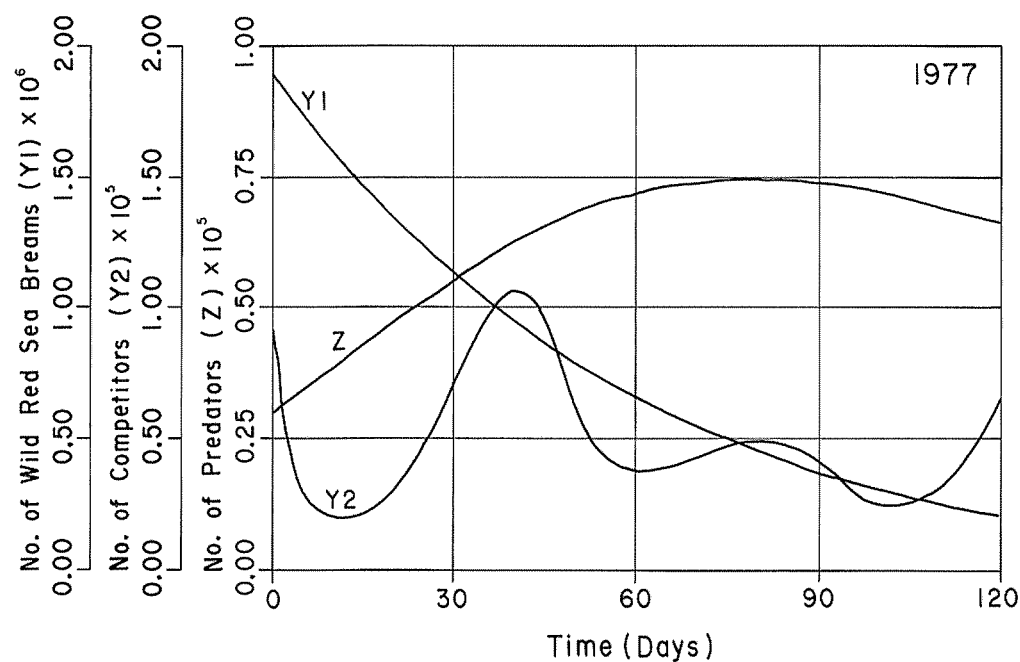


Fig. 7. Simulation of variations in number for wild red sea bream (Y_1), competitor (Y_2) and predator (Z), in the case of 190×10^4 for initial value of the number of wild red sea bream.

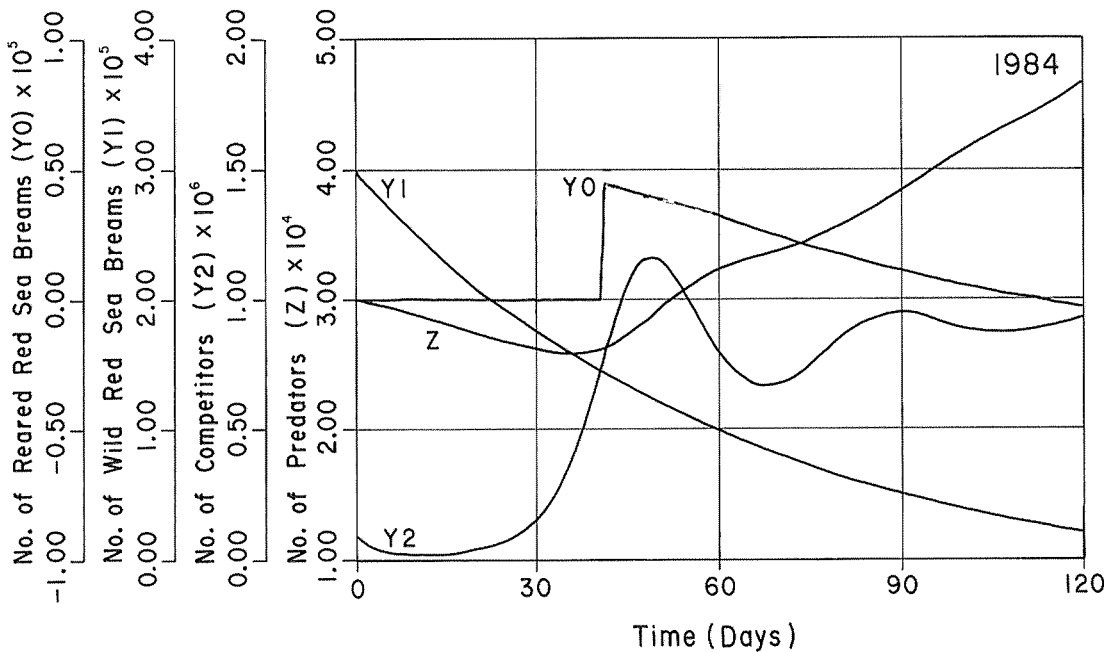


Fig. 8. Simulation of variations in number for reared red sea bream (Y_0), wild red sea bream (Y_1), competitor (Y_2) and predator (Z), in the case of 30×10^4 for initial value of the number of wild red sea bream.

された。なお、同様な放流実験は1983年（5.08万尾放流）にも実施された。

考 察

本報のモデル作りには限られた時間と空間において、今までに得られた研究の成果を総合的に表現し、何らかの方法でそれを検証、実証することに力点が置かれている。モデルの作成はなるべく単純なものからはじめ、複雑なものへ進むという方針をとっている。志々伎湾の研究成果をすべて網羅し、複雑な生物生産過程を正確に模倣するようなことは意図していない。そのため種の相違やニッチの構造を無視したモデルとなっており、生態系モデルに関する成書のなかにあげられている問題点のすべてがこのモデルにあてはまる。問題点を列挙すると下記のようなものである。

- ① モデルの各コンパートメントが種単位ではなく、きわめて大きな分類群となっている。
- ② 基礎生産からの積み上げ型のモデルでありながら、

植物プランクトンなどによる光合成が組み込まれていない。

- ③ マダイの系への加入が逐次的でなく、同時に全数が来遊するように設定している。来遊時期も固定的である。
- ④ マダイの食性の変化が不連続であり、一つの時期に一種のみを専食している。
- ⑤ 環境収容力にゆとりがなくなった場合のマダイの分布、食性の変化、競合者の食性の変化がうまく導入されていない。

- ⑥ 競合者と捕食者の摂餌量が定数で与えられており、魚のサイズや季節による変化が表現されていない。

本モデルで用いた構成要素の数は7種と少なくしたにもかかわらず導入したパラメタの数は37個と多く、さらに餌の富度が生残率に与える影響などという実測不能なものも用いざるを得なかった。本モデルの問題点と限界を厳正に評価するならば、次なる生態学的研究の方向やモデル作りにとっての有益な示唆が得られると期待している。

このモデルの最大のポイントはマダイの環境収容力におかれた。このことについては生物学的知見を総合して一応の見解が出されており¹⁵⁾、それとの整合性に最も関心が注がれた。結果的にはモデルが前者を追認する形となり、モデルの作成の際の感度解析などを通して、自然の仕組みの巧妙さと、それを的確にとらえた数多くの生物学的調査・研究には敬服するところが多かった。同時に、モデル作りの有効性を示すものとも考えられ、今後両方向の研究がさらに接近して栽培漁業などの応用的な面での大きな成果をあげる可能性が示唆された。

要 約

長崎県平戸島志々伎湾において長期間実施されてきたマダイの幼稚魚を中心とする各種生物の生態・動態ならびにそれらを取りまく環境に関する研究成果を整理し、マダイ当歳魚の動態を主軸にした志々伎湾の生態系モデルを開発し、モデルの検証を行った。得られた結果は以下のものである。

- (1) 志々伎湾の非生物的要素や動・植物プランクトン、餌料ベントスの生態・動態・生産過程・マダイ当歳魚の生活様式、資源変動、環境収容力などに関する既往の知見を整理し、志々伎湾の生態系モデルの基本的な考え方、境界条件、導入する状態変数やパラメタの決定を行った。
- (2) モデルの空間的範囲は、マダイが着底・成長する湾中央部と湾奥部で、時間的範囲は、標準的な着底時期の5月5日から湾外に移出し始める9月5日までの4カ月間とした。
- (3) 系の構成要素は、マダイの発育につれて順次餌料となるカイアシ類、ヨコエビ類、アミ類、マダイ天然魚、マダイ放流種苗、餌の面でのマダイとの競合者ならびにそれらに対する捕食者の7つである。
- (4) 合計37個のパラメタを用い、これらの構成要素間の関係と個体数の変動は微分方程式をもって表現した。
- (5) 餌生物の個体数はロジスティックモデルを基本とし、それに捕食圧を組み込んで表現した。パラメタとしては内的増加率、環境収容力、マダイなどによる捕食尾数を導入した。
- (6) マダイ、競合者、捕食者の個体数の変動には減耗係数、餌の豊度による増加率あるいは被捕食尾数などの

パラメタを用いて表現した。

- (7) 各変数の初期値やパラメタは志々伎湾を主体とした既往の知見を参考にしたり、仮りに与えた幾多の感度試験の後に確定した。
- (8) 志々伎湾へのマダイ稚魚の来遊数とその後の個体数変化が把握されている1976年と1977年の状態をシミュレーションし、実際の調査とはほぼ一致した結果を得た。マダイの環境収容力の限界は、約200万尾の来遊であるとするこれまでの見解を本モデルでのシミュレーションは追認した。
- (9) 1984年に実施したマダイ人工種苗の放流実験をシミュレーションしたところ、実際の追跡調査結果とは若干の相違がみられた。放流種苗の生残率などのパラメタを再検討する必要があると示唆された。

謝 辞

本研究で用いた生物学的知見の多くは、「マダイ特別研究志々伎グループ」の共同研究により得られたものである。様々の分野の研究者が参集したこのグループの方々には直接的にも間接的にも種々の御援助と有益な示唆を与えていただいた。これらの関連諸情報が本研究をまとめる上で不可欠であったことを記して感謝の意を表する。

引 用 文 献

- 1) MATSUMIYA, Y. and S. OHNISHI: Effective releasing program of artificial fingerlings using a simulation model. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 55: 1759-1765 (1989).
- 2) 木曾克裕: 平戸島志々伎湾の海底地形と海底堆積物の特徴. 西水研研報, 54: 135-140 (1980).
- 3) 東 幹夫, 陣野聡子: 平戸島志々伎湾の底生動物群集—I. マクロベントスと堆積物による生息場所分析の試み. 西水研研報, 54: 195-208 (1980).
- 4) 中坊徹次: 志々伎湾の底生魚類群集—I. 主要種の分布と群集の区分. 西水研研報, 54: 209-230 (1980).
- 5) 中坊徹次: 志々伎湾の底生魚類群集—II. 主要種の季節的消長と群集の季節区分. 西水研研報, 59: 47-70 (1983).
- 6) 田中 克: 志々伎湾におけるマダイ仔稚魚の生態

- に関する研究—I. 浮遊生活期仔稚魚の水平分布. 西水研研報, 54: 231-258 (1980).
- 7) 畔田正格, 池本麗子, 東 幹夫: 志々伎湾における底生生活期マダイ当歳魚の分布と成長. 西水研研報, 54: 259-278 (1980).
- 8) 木曾克裕: 平戸島志々伎湾におけるマダイ当歳魚個体群の摂餌生態—I. 成長に伴う餌料の変化とその年変動. 西水研研報, 54: 291-306 (1980).
- 9) 木曾克裕: 平戸島志々伎湾におけるマダイ当歳魚個体群の摂餌生態—II. 食物を中心にみた生息場所の利用について. 西水研研報, 57: 31-46 (1982).
- 10) 松宮義晴, 村上 司, 鈴木庸行, 岡 正雄: 志々伎湾におけるサビハゼとスジハゼの分布および食性. 西水研研報, 54: 321-331 (1980).
- 11) 木曾克裕: 平戸島志々伎湾におけるマダイ当歳魚個体群の摂餌生態. 西水研研報, 56: 15-26 (1981).
- 12) 松宮義晴, 木下 泉, 岡 正雄: 志々伎湾における魚食性魚類の胃内容物調査. 西水研研報, 54: 333-342 (1980).
- 13) MATSUMIYA, Y. and M. IMAI: Ecology and abundance of conger eel *Conger myriaster* in Shijiki Bay, Hirado Island. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 53: 2127-2131 (1987).
- 14) 松宮義晴, 遠藤義文, 畔田正格: 志々伎湾におけるマダイ当歳魚の資源量推定. 西水研研報, 54: 315-320 (1980).
- 15) 畔田正格: 成育場における環境収容力の検討. マダイの資源培養技術. (田中 克・松宮義晴編, 恒星社厚生閣), pp. 91-105 (1986).