

餌料密度からみたマイワシ資源の変動モデル*1

角 南 靖 夫*2

Modeling of the Variability in Stock Abundance of Japanese Sardine
from a Viewpoint of its Food Density

Yasuo Sunami*2

A simulation model was developed for the variation of stock abundance and growth of Japanese sardine *Sardinops melanostictus* and also for the variation of abundance of zooplankton. The relationship between growth of Japanese sardine and variation of water temperature was examined. It was obtained that there was a positive correlation between the trends in growth of fish younger than two years old and the variation of the mean water temperature. The calculation based on the model showed that the fish was in good growth for the increasing period in stock size and in bad growth for the peak period. The density dependent growth was presented for each of age groups of fish by using the feeding model.

1 はじめに

近年地球温暖化現象に代表されるように、地球規模での環境変化が注目されるようになり、水産資源の変動を予測するための環境変化の要素を加えた生態系モデリングが必要とされている。ここではまず単純生態系を取り扱い、卓越単一種資源の変動解析の基本モデルを作成することを目的として研究を行った。対象種としてはマイワシ *Sardinops melanostictus* を選んだ。マイワシ資源は日本、カリフォルニアおよびペルー近海でほぼ時期を同じくして増減し、世界的規模で変動している。

この研究ではモデル海域を設定して、まずマイワシの生活史の数理モデルを作り、マイワシの成長に対する海水温の影響を検討した。ついでマイワシ資源が増大する時にマ

イワシの魚体にどのような変化が現れるかを検討するため、動物プランクトンの資源量変動モデルを作り、餌料密度の面からマイワシ資源の変動を調べた。これらの検討においては Andersen-Ursin らの Danish モデル¹⁾で取り扱われたように、マイワシを年齢別に区分して、成長と資源尾数の両面について、それぞれ検討を行った。

2 マイワシの成長への海水温の影響

2.1 モデル海域の海水温

九州西岸の東シナ海域をモデル海域として、以下のような仮定をおいた。3月初めにふ化したマイワシ稚仔は、その後、4月-5月末には島根半島沖へ回遊し、6月-11月

水産大学校研究業績 第1412号, 1992年6月19日受付.

Contribution from Shimonoseki University of Fisheries, No. 1412, Received June 19, 1992.

*1 この研究は農林水産技術会議の一般別枠研究「地球環境変化」の課題「主要水産資源の変動予測技術の開発」として行った。

*2 水産大学校教養学科自然科学教室 (Laboratory of Natural Sciences, Division of General Education, Shimonoseki University of Fisheries).

末には能登半島周辺に達する。12月-1月末には再び島根半島沖へ回遊し、2月には九州西岸に戻り、このような回遊を毎年繰り返すものとする。このモデル海域における海水温については、1961年から1985年までの各月ごとの表面海水温の平均値のデータを使った²⁾。2月と8月の海水温の平均を1961年から25年間について、それぞれFig.1に示す。2月は東シナ海の海水温であり、Fig.1によれば1966年の2月の海水温は16.6℃と平年よりも数度高く、また1961年の海水温は10.7℃と最低を記録している。8月は能

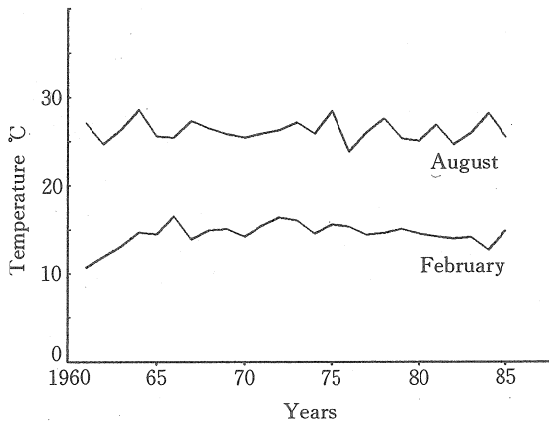


Fig. 1. Trends in mean surface water temperature (Hanawa et al., 1988)²⁾ in the East China Sea, in February and the Japan Sea, in August, for the years 1961-1985.

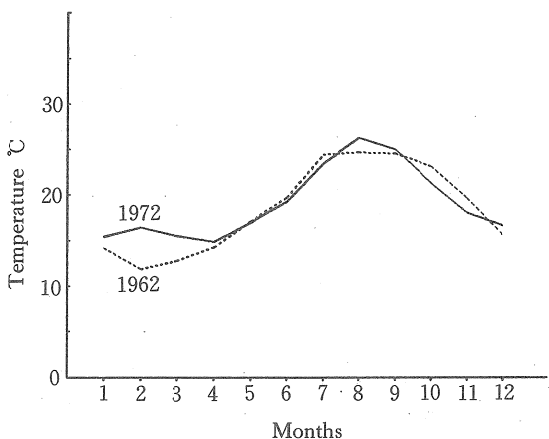


Fig. 2. Trends in mean surface water temperature (Hanawa et al., 1988)²⁾ for the sea area examined, in 1962 and 1972.

登半島周辺の海水温の変化を表し、8月の海水温で一番高かったのは1975年の28.5℃であり、また低いのは1976年の23.8℃であった。次にモデル海域での1962年と1972年の月毎の海水温の平均値をFig.2に示す。1962年の海水温は2月が一番低く11.9℃である。また8月が一番高く24.7℃であった。その10年後の1972年の海水温は4月が一番低く、14.8℃である。また8月が一番高く26.3℃であった。年によって最低海水温度と最高海水温度の違いがかなり現れている。

2.2 マイワシ生活史の数理モデル

九州西岸で3月初めにふ化したマイワシ稚仔は、早いものは2年後から産卵を開始して、6年後に自然死亡すると考えた。この間の成長の様子を微分方程式で表し、マイワシの生活史の数理モデルを作った。

マイワシの成長の同化(摂食)および異化(代謝)への海水温の影響をみるために、マイワシの生活に最適温度の時に1になり、それより離れているときは1より小さくなるような温度に依存する関数形Cを使った³⁾。

$$C = V^Z e^{Z(a-V)} \quad (1)$$

ここでCは同化と異化に関する係数であり、VとZは次のように表す。

$$V = \frac{T_{MAX} - T}{T_{MAX} - T_{OPT}}$$

$$Z = \frac{X^2 (1 + \sqrt{1 + 40/Y})^2}{400}$$

$$X = (\ln Q_{10}) (T_{MAX} - T_{OPT})$$

$$Y = (\ln Q_{10}) (T_{MAX} - T_{OPT} + 2)$$

ここでTは観測された海水温度、 T_{OPT} は魚の生活に最適な温度、 T_{MAX} は海水の最高温度を示す。この関数を実際にモデル海域に適用して、1972年と1978年について求めたCの値をFig.3に示す。ここでマイワシの生活に最適温度は15℃、最高温度は30℃、また Q_{10} は2.0とする。

Q_{10} を変化させると海水温度の高い所で変化が現れる。1978年の8月には海水温が27.6℃と非常に高くなっているため、Cの値は非常に小さくなっている。マイワシの成長はふ化して1才までをひとつの区分として6才までを年齢別に取り扱い、下記の仮定の下で魚の成長(体重)を次の6個の微分方程式で表した。同化の項は体重wの2/3乗に比例するものとした。

$$\frac{dw(i)}{dt} = a(i)Cw(i)^{2/3} - bCw(i) \quad (i = 0 \sim 5) \quad (2)$$

(2)式を適用するにあたって、次のような仮定をおいた。

マイワシは早いものでは2才の春から産卵をするが、この時産卵によって5%の体重が減少するとし、また3才、4才、5才の産卵時には、それぞれ体重の7%、10%、10%の減少が起こるとした。また、春から夏に至る間は摂餌が活発で急激に成長し、夏に入ると成長が鈍化する。秋から冬にかけてはゆるやかな成長をする。その成長の様子(体重)は(2)の微分方程式を解いて、マイワシがそのような成長をするようにパラメータ b の値を2.0と定めた。パラメータ $a(i)$ の値は各年ごとに变化させ、1980年から1985年までの海水温のデータを使い、Table 1の西海区水産研究所のマイワシの各年ごとの成長のデータ(重量)に合わせてある⁴⁾。パラメータ $a(i)$ の値はTable 2に示す。このようにして得られたマイワシの成長の様子はFig. 4に示す。マイワシが丁度2才、3才、4才、5才になったとき、体重が産卵のために急激に落ちている。

このモデル海域で1961年から1985年までの25年間の海水温のデータを使って、マイワシの成長に海水温の影響がどのように現れるか、(2)の微分方程式を解いて、各年級ごとのマイワシの成長の様子を示したものがFig. 5である。それによるとマイワシの体重はふ化して1-2年間は海水温に依存して変動しているが、5年間たてば殆ど同じになる。

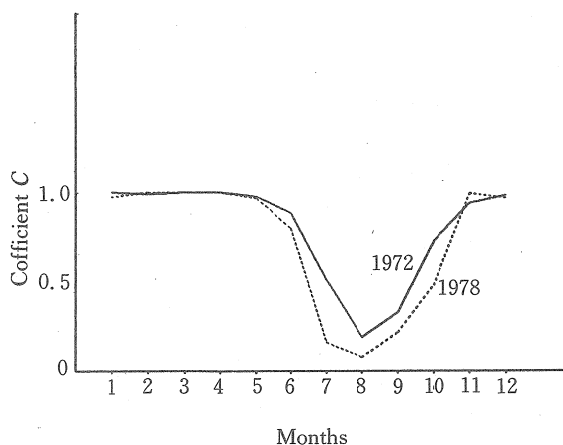


Fig. 3. Trends in value of coefficient, C , in eq. (1) as a function of water temperature in 1972 and 1978.

Table 1. The body weight corresponding to age in Japanese sardine⁴⁾

Age	1	2	3	4	5
g	48.9	74.1	100.1	125.2	148.5

Table 2. Values of parameter, $a(i)$, applied to growth model in eq. (2)

i	0	1	2	3	4	5
$a(i)$	16.55	9.93	10.65	11.30	11.95	11.95

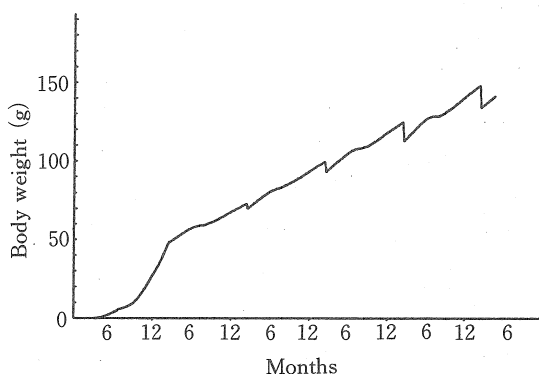


Fig. 4. Calculated growth curve of Japanese sardine.

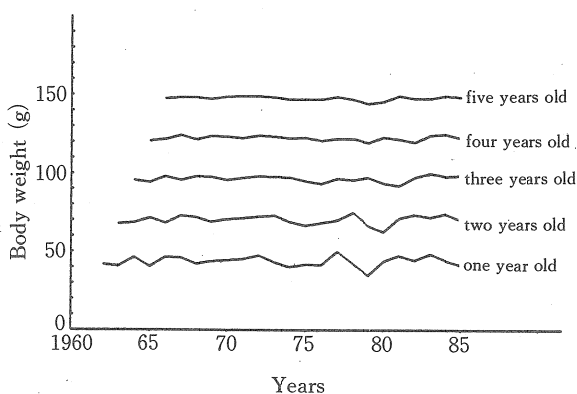


Fig. 5. Trends in body weight of Japanese sardine by ages 1-5 years old, for the years 1961-1985.

3 マイワシ資源の変動

3.1 プランクトンの数理モデル

マイワシは植物プランクトンおよび動物プランクトンのコペポダの卵およびノープリウス ($m_1 = 0.000001$ g), 中型コペポダ ($m_2 = 0.003$ g) および大型コペポダ ($m_3 = 0.011$ g) を主な餌としているものとする。動物プランクトンのコペポダは単位体積 (m^3) 当りの個体数が春と秋にピークが現われるモデルを作った。動物プランクトンの個体数について、次のように表す。

$$\frac{dP(j)}{dt} = -\text{自然死亡} + \text{前の状態から加入} - \text{次の状態への加入} - \text{捕食}$$

マイワシが動物プランクトンを捕食するので、動物プランクトンの個体数は減少する。j 番目のプランクトンが捕食される個数 g_j は

$$g_j = \sum_{i=0}^5 a'(i) \lambda_i C w(i)^{2/3} N(i) \frac{S_{ij} m_j P(j)}{\sum_{k=1}^4 S_{ik} m_k P(k)} \frac{1}{m_j} \quad (3)$$

で表す。ここで $a'(i)$, λ_i と C はマイワシの成長を表す式 (8) の同化および代謝の項に含まれる量であり、また $w(i)$ と $N(i)$ はマイワシの重量と個体数をそれぞれ表す。P(1) はコペポダの卵およびノープリウス、P(2) は中型コペポダ、P(3) は大型コペポダの個体数をそれぞれ表す。

また植物プランクトンの個体数 P(4) は一定として、その重量は 200 g/m^3 とした。

動物プランクトンの個体数については次のように表せる。

$$\frac{dP(1)}{dt} = -M_1 P(1) + d - e P(1) - g_1 \quad (4)$$

$$\frac{dP(2)}{dt} = -M_2 P(2) + e P(1) - f P(2) - g_2 \quad (5)$$

$$\frac{dP(3)}{dt} = -M_3 P(3) + f P(2) - g_3 \quad (6)$$

上記(4)~(6)式については次のような仮定をおいた。 M_1 , M_2 , M_3 は死亡係数を表し、それぞれ0.8とする。この死亡係数には自然死亡によるほかに、マイワシ以外の魚および動物プランクトンによる捕食による死亡も含まれる。 d はコペポダの卵およびノープリウスの加入量であり、年間10万粒/ m^3 とする。 e と f は次の状態への移行の割合を表す。動物プランクトンのブルームが春と秋に起こり、その時には状態の間のプランクトンの移行量が増大するものとする。移行量の割合 e と f の値は3月中旬および9月中旬から1.2ヶ月間は0.4とし、その他の期間は0.2とする。

3.2 マイワシの成長

マイワシの成長については0才から6才までの年齢別に取り扱い、それぞれ6個ずつの微分方程式で表した。成長

Table 3. The selection ratio, S_{ij} of planktons applied to eq. (7)

Prey j		Eggs and Nauplii of Copepoda	Middle Sized Copepoda	Large Sized Copepoda	Phytoplankton
		1	2	3	4
Age of Sardine i	0	0.5	0.5	0.0	0.0
	1	0.1	0.3	0.3	0.3
	2	0.0	0.2	0.3	0.5
	3	0.0	0.0	0.3	0.7
	4	0.0	0.0	0.2	0.8
	5	0.0	0.0	0.2	0.8

を表す(2)式の同化を表す項に、次の餌料密度に依存する項を入れた。

$$\lambda_i = \frac{\sum_{j=1}^4 S_{ij} m_j P(j)}{\sum_{j=1}^4 S_{ij} m_j P(j) + Q_i} \quad (7)$$

ここで S_{ij} は餌料選択係数で、それらは Table 3 に示されるように定めた。マイワシはふ化して餌を摂り始めるときはコペポダの卵およびノープリウスを食べる。稚仔から1才までは平均するとコペポダの卵およびノープリウスと中型コペポダをそれぞれ1:1の割合で食べているものとする。成魚になると主に植物プランクトンを食べるものとする。 Q_i は半飽和定数を表し、その値は $Q_i = \sum S_{ij} m_j P(j)$ のとき λ_i は1/2になるように Q_i を定めた。 Q_i のそれぞれの値を Table 4 に示す。魚の成長を表す式は次のように表される。

$$\frac{dw(i)}{dt} = a'(i) \lambda_i C w(i)^{2/3} - b C w(i) \quad (i=0 \sim 5) \quad (8)$$

パラメータ $a'(i)$ と b は(2)式と同じように、1980年から1985年までの海水温のデータを使い、Table 1のマイワシの重量のデータに合わせた。そのようにして定められた $a'(i)$ の値は Table 4 に示す。 b の値は2.0と定めた。

Table 4. Values of parameter, $a'(i)$, applied to eq. (8) and values of half saturation constant, Q_i , applied to eq. (7)

i	0	1	2	3	4	5
$a(i)$	23.40	18.74	20.27	22.41	23.81	23.81
Q_i	4.75	68.55	107.60	145.72	163.82	163.82

3.3 マイワシの資源尾数

マイワシの資源尾数の変動を次式によって表した。

$$\frac{dN(i)}{dt} = -k_i N(i) \quad (i=0 \sim 5) \quad (9)$$

ここで k_i はマイワシの死亡係数を表す。この係数は自然死亡のほかに、漁獲による死亡も含まれるものとする。

3.4 マイワシの加入量

マイワシの加入量の変動に関する要因としては産卵量、卵の質および水温等の環境があるが、ここでは産卵量

とその密度に依存する加入量を考える。渡辺泰輔氏が指摘しているように、4万粒の卵から、受精して2週間後には生残率が3.5%になり、1年後には10尾以下になるという⁵⁾。このモデルでは3月初めに1尾のマイワシが4万粒の卵を産卵して、2週間後には5mgの稚仔1400尾になるとして、この時点からモデル計算をする。1年後には10尾以下になるように k_0 の値を5.0と定めた。毎年の加入量がほぼ一定になるように、 $k_1=1.3$, $k_2=1.1$, $k_3=0.9$, $k_4=0.9$ と定め、6年目には、ほとんど全部自然死亡するように $k_5=2.0$ と定めた。1尾のマイワシ親魚は産卵期に、4万粒の卵を放出して体重を7g減らすものとする。産卵して2週間後には3.5%の加入量になるように密度に依存する次の形を使った。

$$R = R_0 \frac{Q}{R_0 + Q} \quad (10)$$

ここで R は加入した稚仔の数、 R_0 は1尾のマイワシが産卵した卵の数(4万粒)、 Q は3.5%の加入量になるように1450と定めた。ふ化して2年目のマイワシの成魚のうちで、体重が74.1g以上になっているものが産卵に参加するものとする。また雌と雄は同数とする。

3.5 計算の初期値

このモデルで使用した初期値は Table 5 に示す。個体数は単位体積 (m^3) あたりの数を使う。資源量は個体数と重量の積で表す。

Table 5. Initial values for the number of plankton, $P(i)$, of i species, for number of the Japanese sardine, $N(i)$, at i age, per cubic meter and for body weight, $w(i)$ of Japanese sardine

$P(1)$	100000		
$P(2)$	3000		
$P(3)$	1800		
$w(0)$	0.005 g	$N(0)$	5
$w(1)$	48.9 g	$N(1)$	0.34
$w(2)$	74.1 g	$N(2)$	0.01
$w(3)$	100.1 g	$N(3)$	0.0034
$w(4)$	125.2 g	$N(4)$	0.0014
$w(5)$	148.5 g	$N(5)$	0.0005

3.6 マイワシ資源量

1972年から急激にマイワシ資源が増大している。この年級のマイワシは大きく成長し、その後は資源量の多い時には小さいマイワシが捕獲されている。一方この時期のプランクトンの量も東北海区では1955年と1970年とを比べれば15年間に数倍も増大している⁶⁾。これはプランクトン資源

量の変動の範囲内で比べた量になっている⁷⁾。そこでこのモデルでも、餌料密度を変化させることによってマイワシ資源の変動を調べた。1971年から植物プランクトンが1割増加、またコペポダの卵およびノープリウスの加入量が5倍に増加したとすれば、Fig.6のようにマイワシの魚体の重量が1才魚では1973年、2才魚は74年、3才魚は75年、4才魚は76年に、他の年に比べて一番大きくなっている、

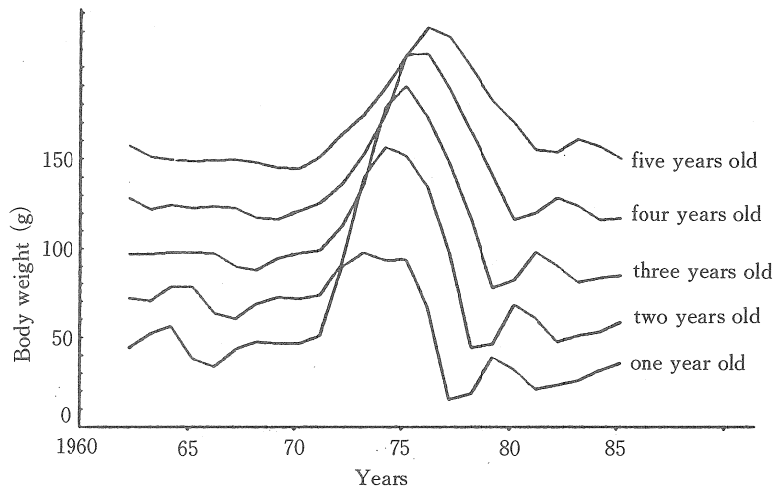


Fig. 6. Trends in body weight of Japanese sardine by ages, for the years 1961-1985, based on the model of the phytoplankton and zooplankton predation by Japanese sardine (eq. (8)).

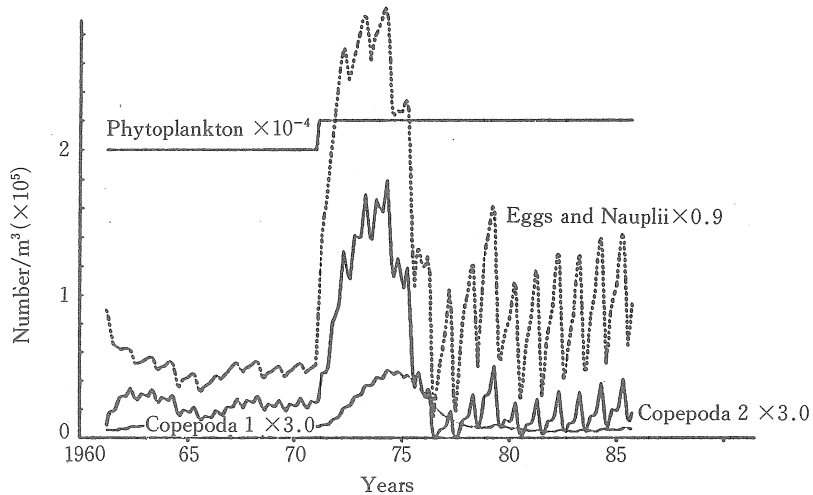


Fig. 7. Trends in the number of plankton, copepoda 1 (middle sized) and copepoda 2 (large sized).

すなわちこのモデルでは1972年の春にふ化した1972年級のマイワシは大きく成長し、その後、マイワシ資源の密度が大きくなったときにはマイワシの魚体は小さくなること示された。

Fig.7はプランクトンの個体数を示す。大型コペポダの個体数の初期値は1800個/m³とする。コペポダの卵お

よびノープリウスの加入量の増大によって、中型および大型コペポダの個体数にピークが現われ、マイワシ資源の増大と共に減少する。

Fig.8にマイワシ、プランクトンの資源量およびマイワシの加入量を示す。マイワシの資源は1972年から増大し4年後にはピークをうち、高水準のまま推移している。マイ

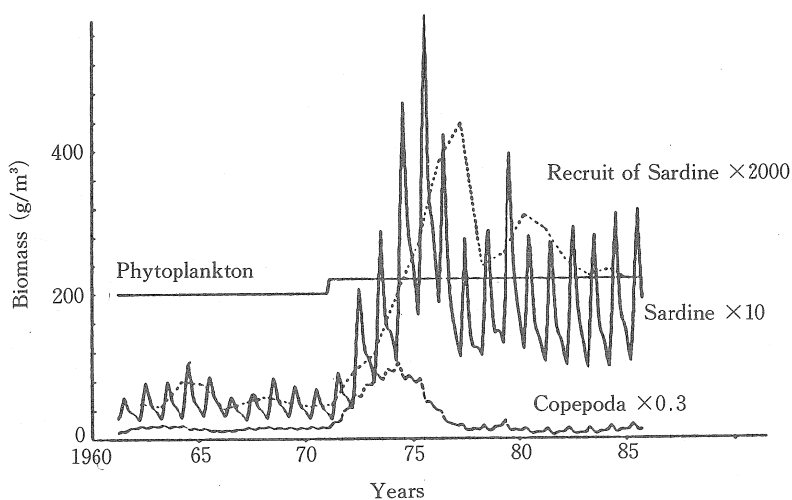


Fig. 8. Trends in calculated biomass of Japanese sardine, zooplankton (copepoda) and phytoplankton and recruit of Japanese sardine. The calculation is made by assuming that fish is hatched in March.

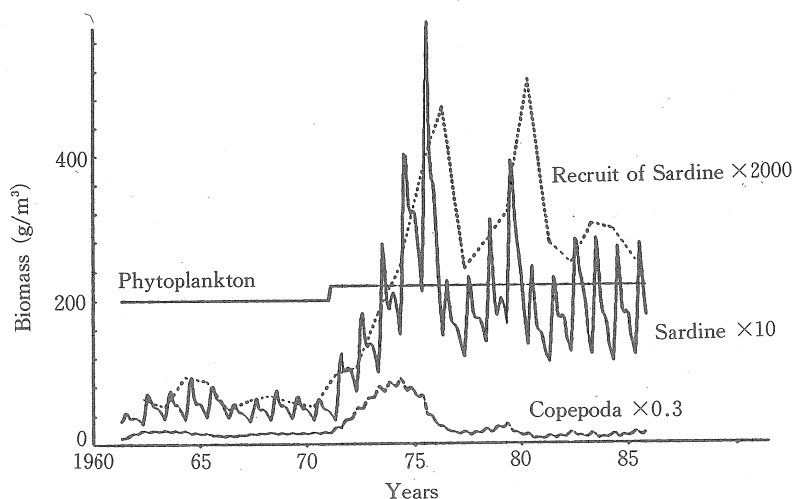


Fig. 9. Trends in calculated biomass of Japanese sardine, zooplankton (copepoda) and phytoplankton and recruit of Japanese sardine. The calculation is made by assuming that fish is hatched in April.

ワシ資源が増大する時にはコペポダの卵およびノープリウスの加入量が増大する必要がある。マイワシ資源量がピークを打つ年が更に数年後に来るようにするにはコペポダの加入量が更に増えることが必要となる。

マイワシのふ化が1ヶ月ずれて4月初めに東シナ海で発生した場合については、Fig.9に示す。この場合にはマイワシの加入量がかなり増大し、また加入量の変動が現われ、それにつれてマイワシ資源にもかなりの変動が起こるといふ結果が得られた。

4 考 察

本研究の結果によると、海水温の変動はマイワシがふ化して1-2年間はマイワシの成長に影響を与える。また海水温の変動は餌料プランクトン量の変動を引き起こし、マイワシ資源の生残、特に初期生残に影響を与える。

Fig.8において、このモデルの動物プランクトンのコペポダの資源量を1970年と1983年とで比べてみれば、1970年の方がコペポダの現存量が多い。1983年では卵およびノープリウスの加入量は5倍に増やしたにもかかわらず、計算結果は高水準のマイワシの捕食により動物プランクトンが少なくなることを示した。

このモデルでは植物プランクトンは一定として取り扱った。動物プランクトンおよびマイワシの捕食による植物プランクトンの個体数の変動を考慮に入ればより現実的なモデルになる。

水産資源の変動予測モデルを作る際に、魚の餌となる植物プランクトンおよび動物プランクトンの資源量および変動量を知ることが重要である。今後は植物プランクトンの光合成による資源量変動および動物プランクトンの資源量変動の数理モデルを作って行く必要がある。またモデル対象海域のマイワシ仔魚、植物および動物プランクトンが作るパッチの分布およびパッチの形成機構およびそれらに及ぼす環境変動の影響をも解明する必要がある。

謝 辞

本研究を遂行するにあたって種々の討論および助言を頂いた青山恒雄元校長および竹下貢二教授に深く感謝の意を表す。さらに本研究で使った海水温のデータを提供して頂いた東北大学理学部の花輪公雄助教授にお礼申し上げる。

文 献

- 1) K. P. Andersen and E. Ursin: *Meddr. Danm. Fisk- og Havunders N. S.*, 7, 319-435 (1977).
- 2) K. Hanawa, T. Watanabe, N. Iwasaka, T. Suga, and Y. Toba: *J. Meteor. Soc. Japan*, 66, 445-456 (1988).
- 3) J.F. Kitchell, J.F. Koonce, R.V. O'Neill, H.H. Shugart, J.J. Magnuson and R.S. Booth: *Trans. Amer. Fish. Soc.*, 103, 786-798 (1974).
- 4) 水産庁研究部: 我が国漁獲対象魚種の資源特性II (平成元年3月) (1989).
- 5) 渡辺泰輔: 沿岸海洋研究ノート, 19, 149-162 (1982).
- 6) 科学技術庁資源調査所: 海洋生物の生産力把握に関する調査. 科学技術庁資源調査会編, 東京, (1980), 289pp.
- 7) 小達和子: 水産海洋研究会報, 52, 150-154 (1988).