

1次元モデルによるマイワシ卵稚仔の輸送・生残に関する研究

笠井 亮秀*・岸 道郎*・杉本 隆成*

One-dimensional Model of the Transport and Survival of Japanese Sardine Eggs and Larvae

Akihide KASAI,* Michio J. KISHI* and Takashige SUGIMOTO*

Abstract

We propose a simple one-dimensional model for examining egg and larval survival of Japanese sardine south of Japan. The model includes the loss of eggs and larvae due to natural mortality and transports to off-shore by north-west wind. The results are followings;

1. There is a good relationship between survival rates calculated by the one-dimensional and two-dimensional model. Consequently, we can make good use of the one-dimensional model for the prediction of the strengths of sardine larval catches.
2. The short-period variation in the Kuroshio axis and the natural mortality in the narrow frontal region of the Kuroshio do not significantly affect on the survival rates.
3. The mean mortality rate of sardine eggs and larvae in the coastal and the Kuroshio frontal regions in the first 20 days is estimated to be $0.15d^{-1}$ approximately.

1. はじめに

マイワシ (*Sardinops melanostictus*) はわが国の水産業を支える重要な魚種である。マイワシの漁獲量は1973年以来上昇を続け、現在その漁獲量は約400万トンに達しているが、ここ数年は頭打ちの状況で、数年のうちには激減するのではないかと懸念されており、資源量変動の要因の解明が求められている。

一般に魚類の資源量は、既存の成魚の資源量に毎年どれだけの稚仔魚が加入するかによって決定される。そして卵稚仔期は親魚期に比べ死亡率がきわめて高いため、この稚仔魚の年々の加入量は、ほんの僅かな環境の変化にも大きく影響を受けると考えられる。それ故魚類の資源量は、産卵から加入に至るまでの卵稚仔階段での初期減耗の程度によって左右されると考えられている (HJORT, 1914)。初期減耗の要因としては飢餓による死亡と被食による死亡が挙げられるが、卵稚仔には遊泳能力がほとんどないため、餌や被食者との遭遇はいずれも産卵海域周辺の流れの状況に依存するところが大きい。

1991年12月24日受理。

*東京大学海洋研究所 Ocean Research Institute, University of Tokyo, 1-15-1 Minamidai, Nakano, Tokyo 164, Japan.

この様な視点から、マイワシ卵稚仔の輸送・拡散に対する数値実験が行われている。KOBAYASHI and KURODA (1991) はGEKによる観測に基づく流動場を用いて数値実験を行い、黒潮流路の違いによる卵稚仔の沿岸域への輸送状況は変わらないという結果を得た。しかし、彼らは実験結果をフィールドのデータと突き合わせるには至っていない。KASAI *et al.* (1992) は流体力学に基づく流動場を用いて、拡散方程式を解くことにより、卵稚仔の輸送・拡散を調べた。そして、モデルによって得られた生残率と観測値から求めた生残率との相関が高いことから、マイワシ卵稚仔の生き残りに影響を与える物理的な要因として、冬季の季節風の強さと産卵場の黒潮に対する相対的な位置が重要であり、黒潮の流路はあまり影響を及ぼさないと結論づけている。しかし彼らのモデルでは、20~30日程度の短期的な黒潮流軸の変動は考慮にいれていない。また、卵稚仔の生存を20日後の卵稚仔の位置が黒潮流軸より沿岸側か沖合側かで分けており、死亡率に対する詳しい考察はなされていない。

マイワシ卵稚仔の生き残りを調べるには、どこに輸送されれば生き残りがよいかを決定すること、つまり海域による死亡率を決定することが重要であると考えられる。

小谷ほか(1987)は、本州南方の黒潮及びその周辺海域においてマイワシ稚仔魚の餌である小型かいあし類の調査を行い、マイワシが産卵を行う冬季には、黒潮フロント付近で小型かいあし類が最も多いという観測結果を得た。また、SHIMIZU *et al.* (1989)は、黒潮より沿岸側と沖合側でマイワシ仔魚を採集し、その栄養状態を調査した。その結果、黒潮より沖合側で採集された仔魚に比べて、沿岸側で採集された仔魚の方が、栄養状態が良いと報告している。これらは、沖合域より黒潮フロント付近またはそれより沿岸域の方が生育環境が良いことを示唆するものである。

生残を決定するもう一つの重要な要因である被食については、マイワシ卵稚仔の主たる捕食者と考えられているカツオノエボシやかに類のメガロパ幼生等の大型プランクトンが、沿岸域よりも外洋域の方に多く生息しているという報告がある(黒田, 1990)。つまり、沿岸域よりも外洋域の方が食害を受ける可能性が大きいと考えられる。しかし、被食による死亡率或いは自然死亡率を決定できるほどの観測、実験等は未だに行われていない。

そこで本研究では、マイワシ卵稚仔の簡単化した輸送・拡散モデルを用いて、黒潮の20~30日程度の短期的な流軸変動がマイワシ卵稚仔の輸送・拡散に及ぼす影響と卵稚仔期における死亡率についての検討を行った。そしてその結果に基づき、マイワシ資源量の増減に対する考察を行った。

2. 資料と方法

2.1. モデル

マイワシ卵稚仔は0~50mを中心として表層100m以浅に分布し(小西, 1984)、産卵後は時間の経過と共に産卵場周辺の流れに従って、しだいに漂流・分散する。故にマイワシ卵稚仔を表層を浮遊する漂流物質と見なせば、その輸送・拡散は以下のような拡散方程式によって表すことができる。

$$\frac{\partial \hat{C}}{\partial t} + u \frac{\partial \hat{C}}{\partial x} + v \frac{\partial \hat{C}}{\partial y} = \kappa \Delta \hat{C} - F(\hat{C}, x, y, t) \quad (1)$$

但し \hat{C} は卵稚仔の密度、 t は時間、 (x, y) はそれぞれ水平直角方向にとった座標、 (u, v) はそれぞれ (x, y) 方向の流速、 κ は渦拡散係数、そして F は死亡、被食等による卵稚仔の減衰を表す。

次に(1)式を1次元に簡単化する。小谷ほか(1987)、SHIMIZU *et al.* (1989)そして黒田(1990)の研究結果に基づけば、マイワシの卵稚仔期における死亡率は黒潮の流軸方向よりも、黒潮を横切る方向に大きく変化す

ると考えられる。そこで卵稚仔の死亡率は黒潮を横切る方向にだけ変化すると仮定し、 y 軸を黒潮流軸に沿う方向にとれば、 F は \hat{C}, x, t のみの関数となる。また、マイワシ卵稚仔の輸送に多大な影響を及ぼす要因として挙げられるのが黒潮の変動、冬季季節風による吹送流、そして産卵場の位置である。これらのうち黒潮流路の変動については、死亡率が黒潮を横切る方向のみに変化すると仮定した場合、A型、C型、N型等に代表されるような大規模な黒潮流路の変動はマイワシ卵稚仔の生残に余り大きな影響を及ぼさない(KASAI *et al.*, 1992)。そこで、Fig. 1に示されるような簡単化したモデルを

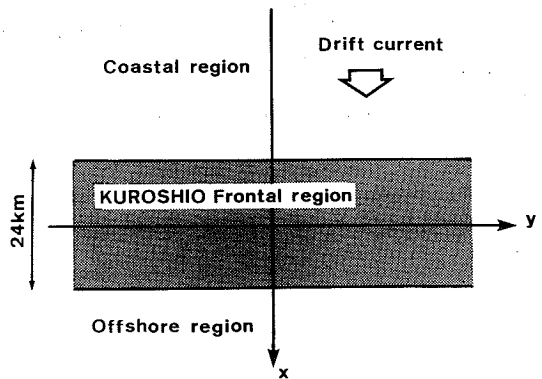


Fig. 1. Schematic view of the one dimensional model.

考える。黒潮は y の正の方向に直進して流れており、一様な吹送流のみが黒潮に直行する方向に付加されていると仮定する。また、卵稚仔の死亡はその密度に比例すると仮定する。この時(1)式は1次元に縮小することができ、

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V \frac{\partial C}{\partial x} = \kappa \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \alpha(x)C \quad (2)$$

となる。但し、 C は y 方向に積分した卵稚仔の密度

$$C(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{C}(x, y, t) dy,$$

V は吹送流の x 成分、 α は卵稚仔の死亡率を表す。本実験では(2)式を時間積分することにより、ある時間における卵稚仔の密度 C の分布を求めた。格子間隔は $\Delta x = 3$ kmとした。拡散係数については、次元解析により

$$\kappa \sim \Delta u \times \Delta x$$

と見積もることができる。ただし、 Δu は隣あう格子間での流速の差である。本実験では格子間隔を3 kmに

とってあるので、概算で $\kappa = 10^5 \sim 10^7 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ となる。本研究では黒潮の短期的な変動の影響を調べるために拡散係数を $10^5 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $10^6 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $10^7 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ と変えて計算を行った。各ケースで使用した拡散係数 κ と死亡率 α の値を Table 1 に示す。卵稚仔の死亡率 α については 0.1 を基準とし、小谷ほか (1987), SHIMIZU *et al.* (1989) そして黒田 (1990) の研究結果に基づいて、海域 (沿岸域, 黒潮フロント域, 沖合域) 別に 1 桁程度変えて設定した。但し、ケース 1 においては KASAI *et al.* (1992) と同様に定めた。また、黒潮フロント域の幅は 24km とした。

Table 1. Description of the cases for the model runs. κ is the eddy diffusivity coefficient and α is the mortality rate of the sardine eggs and larvae.

Case	$\kappa (\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$\alpha (\text{d}^{-1})$		
		Coast	Front	Off-shore
1	10^6	0	0	0 (t<20day) ∞ (t=20day)
2	10^5	0.01	0.01	0.1
3	10^6	0.01	0.01	0.1
4	10^7	0.01	0.01	0.1
5	10^6	0.01	0	0.1
6	10^6	0	0.01	0.1

2. 2. モデル計算に基づく生残率

マイワシの産卵が行われる 12 月～3 月の各月毎の環境要因を考慮して、以下のように 1978 年～1988 年の 11 年間における各年の生残率を計算した。

まず吹送流については、潮岬測候所と鹿児島地方気象台で毎日 9 時と 21 時に 850mb において風向・風速が観測されており、「Aerological data of Japan」としてまとめられている。本実験では 1978 年～1988 年の 1 月～3 月と 12 月におけるそれらの値を用いて各月毎に両地点での平均風向・風速を求め、両地点での値を平均した値からエクマン吹送流を計算した後、その x 成分をその月の V の値とした。産卵場に関しては、水産庁が 1978 年以來「200 海里水域内漁業資源総合調査事業」の一環として「卵稚仔集中調査」を行っている。そして森ほか (1988) が 1978 年～1986 年について、菊池・小西 (1990) が 1987 年～1988 年についてのデータをまとめている。本実験では、この調査結果のうち、マイワシ卵稚仔の産卵場の分布、産卵量のデータを用いた。この調査では、沖合域の産卵調査海域が月によってばらつきがあるため、

各月毎の産卵調査を基に産卵場を決定することができない。それ故、産卵場については各月のデータからではなく、毎年 12 月～3 月の 4 ヶ月間の産卵調査のデータを平均し、それを 12 月～3 月の各月の産卵量と仮定した。上記の方法によると、風向・風速と黒潮の流軸は各月毎の平均値を用いているのに対し、産卵場の位置は年毎の平均値になってしまうが、各月毎の産卵場が決定できない現段階においてはやむをえない。黒潮の流軸については、海上保安庁発行の「海洋速報」をもとに、1978～1988 年の 1 月～3 月そして 12 月について、各月毎に KAWAI (1969) に従って黒潮の流軸を水深 200m における 16.5°C の等温線で定義した。

具体的な方法としては、代表的なマイワシの産卵場である土佐湾近海と薩南海域を含む東経 130° から 136° までの海域において、0.5° メッシュ毎に産卵量と黒潮流軸に対する距離を調べる。そしてその産卵量を黒潮からの距離別に黒潮の流軸方向に積分した値を産卵量の初期条件として用い、(2) 式を時間積分する。(但し、ケース 1 では KASAI *et al.* (1992) と対応付けるために、産卵量として分散率が $2.5 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-1}$ のガウス分布を仮定した。卵稚仔の初期分布の分散の効果は 20 日後にはほとんど滞留率には影響しないことが KASAI *et al.* (1992) によって示されている) その結果得られた密度から、

$$S_m = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} C(x, 20 \text{ day}) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} C(x, 0 \text{ day}) dx}$$

によって各月毎の生残率 S_m が計算できる。最後に前年の 12 月と当年の 1 月～3 月の 4 ヶ月の生残率の値を

$$S_n = \frac{S_m(12) + S_m(1) + S_m(2) + S_m(3)}{4}$$

と平均し、この S_n を実験によるその年の生残率とする。

マイワシ卵稚仔は産卵された後、卵として約 3 日間、その後前期仔魚として約 3 日間浮遊生活を送る。そして、後期仔魚になると (産卵後約 6 日) 自ら泳ぎはじめ、視覚を使って餌を捕らえる。しかしこの時期はまだ流れと共に移動しており (近藤, 1988), 黒潮を横切って自ら沿岸域に到達できるほどの遊泳力はないと考えられる。そこで本研究では、比較するためのデータ (森ほか, 1988; 菊池・小西, 1990; 黒田, 1990) があり、卵稚仔が浮遊物質とみなせる産卵後 20 日 (体長 10mm 前後) までの計算を行った。

2. 3. 観測結果に基づく生残率

産卵量については森ほか (1988) そして菊池・小西 (1990) に、そして稚仔魚の存在量については黒田 (1990)

にまとめられている卵稚仔量データを用いて、以下のよう
に観測に基づく生残率を決定した。

まず近年日本太平洋岸域において、マイワシ卵はその
ほとんどが土佐湾近海と薩南海域で産卵されている。森
ほか(1988)や菊池・小西(1990)に基づいて計算する
と、特に1980年以降土佐湾近海と薩南海域で産卵された
マイワシ卵の合計は、日本太平洋岸域全体におけるそれ
の約9割を占めている。一方、採集された稚仔魚に関し
ては、土佐湾近海や薩南海域で産卵されても黒潮などの
流れによって東方に流されているものも多いと思われる。
そこで、各年の12月～3月に日本太平洋岸域で産卵され
たマイワシ卵のうち、薩南域で産卵された卵の数を E_s 、
土佐湾近海で産卵された卵の数を E_r 、そして同時期に
日本太平洋岸域全域で生息している体長10mmまでの後
期仔魚の数を L とする。体長10mmの仔魚は生後20日
から1ヶ月程経た仔魚にあたる。それらの値を用いて、

$$S_f = \frac{L}{E_r + E_s}$$

で定義される S_f を観測結果に基づいた生残率とする。

但しマイワシ卵稚仔の詳しい調査は1978年の1月から
しか行われていないため、1978年の生残率については、
観測値に基づく生残率についてもモデル計算に基づく生
残率についても、1977年の12月分は除いて1978年1月～
3月の3カ月間の値を用いて計算した。

3. 結 果

3.1. 1次元モデルと2次元モデルの比較

KASAI *et al.* (1992) はマイワシ卵稚仔が産卵され
た後20日目に黒潮流軸よりも沿岸側に輸送されていれば
生き残り、沖合側に輸送されていれば死亡するという条件
の下に、(1)式を時間積分することにより卵稚仔の生き
残りを調べた。その結果Fig. 2に示すように、観測に
基づく生残率とモデルによって計算した生残率の傾向が
ある程度一致するという結果を得ている。そこで、ここ
では1次元モデルである(2)式をKASAI *et al.* (1992)
と同じ生残条件の下に計算した結果と比較することによ
り、1次元モデルの妥当性を検証する。つまり、卵稚仔
の初期分布は観測値から判断して薩南海域と土佐湾にお
いてそれぞれ沿岸域か沖合域にガウス分布を設定し、生
残条件は計算を始めて20日目までは全て生残しており、
20日後に沿岸域またはフロント域に滞留していれば生き
残り、沖合域に流出していれば死亡するとした。

Fig. 2に観測に基づく生残率、KASAI *et al.* (1992)
による2次元モデルの計算による生残率、そして1次元

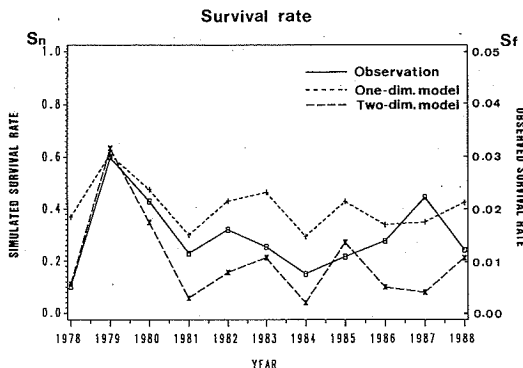


Fig. 2. Yearly variations of the survival rates calculated by observation, one-dimensional model (case 1) and two-dimensional model.

モデルの計算による生残率を示す。1次元モデルと2次元
モデルによる生残率の傾向はよく一致し ($r = 0.95$),
マイワシ卵稚仔の生き残りを調べる上では1次元モデル
でも卵稚仔の輸送・拡散をよく表現できるといえる。

3.2. 黒潮の短期変動の効果

黒潮流路は数年のスケールの大規模な変動と共に20～
30日の短期的な変動をすることがよく知られている。こ
の短期的な変動は特に大蛇行しているときに激しいとい
われており (KAWABE, 1985), マイワシ卵稚仔の輸
送にも影響を及ぼしている可能性が高い。黒潮流路の短
期変動が激しくなれば、黒潮域と沿岸域との海水交換が
活発になり、卵稚仔が広範囲に拡散されることが予想さ
れる。そこで本実験では、拡散係数を変えることにより
黒潮の短期的変動の卵稚仔輸送に及ぼす影響を調べた。

Fig. 3にケース3 ($\kappa = 10^5 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 沿岸域とフ
ロント域で生き残りが良く、沖合域で悪いケース) の
1979年1月の分布例を示す。時間がたつにつれ卵稚仔は
拡散し、吹送流の効果によって沖向きに移流する。死亡
率の大きい沖合域に流出してしまうと、密度はかなり低
くなる。

Fig. 4に、拡散係数をそれぞれ $10^5 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 10^6
 $\text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, そして $10^7 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ に設定した場合の年毎
の生残率の結果を示す。3ケースの年変化の傾向があまり
変わらないことから (それぞれの相関係数は互いに0.8
以上), 黒潮の短期的な変動はマイワシ卵稚仔の生き残
りにはあまり影響を及ぼさないと考えられる。

3.3. 死亡率の効果

死亡率に対する考察を行うために、黒潮のフロント域、

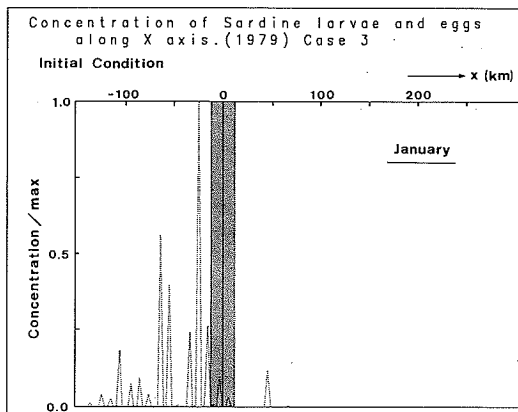


Fig. 3 a. Initial distribution of eggs and larvae. Shaded part indicates the Kuroshio frontal region.

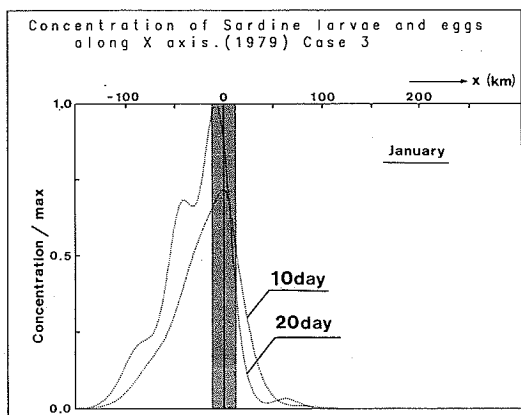


Fig. 3 b. Distribution of eggs and larvae at 10d and 20d after the beginning of the calculation.

沿岸域そして沖合域の順に生き残りがよいと仮定した場合と、黒潮流軸より沿岸側で良く沖合側で悪いと仮定した場合の実験を行った。前者はSHIMIZU *et al.* (1989), そして黒田 (1990) の観測結果に、後者は小谷ほか (1987) の観測結果に対応したケースである。Fig. 5 に黒潮流軸より沿岸側でよいとした場合 (ケース3), フロント域, 沿岸域, 沖合域の順によいとした場合 (ケース5), そして沿岸域, フロント域, 沖合域の順によいとした場合 (ケース6) の年毎の生残率を示す。それぞれのケースにおける生残率の変化の振幅に差はあるもの

の, 年毎の変化の傾向に大きな差は見られない (それぞれの相関係数は互いに0.95以上)。

4. 考 察

黒潮の短期的な変動について拡散係数の値を変えることによりその影響を調べた。ケース1の実験のように, 卵稚仔の生残を20日後に黒潮流軸より沿岸側に輸送されていれば生き残り, 沖合側に輸送されていれば死亡する

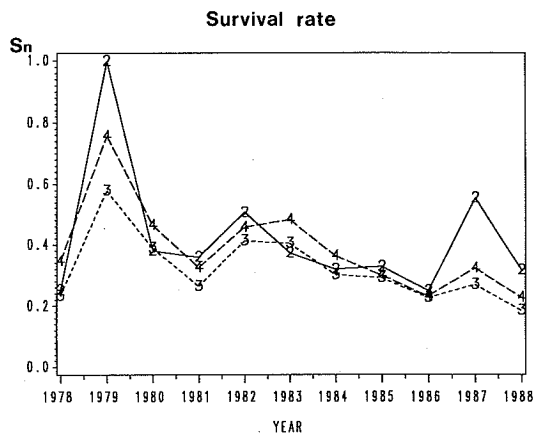


Fig. 4. Yearly variations of the survival rates simulated by case 2, 3 and 4. The numbers in the figure correspond to the case numbers.

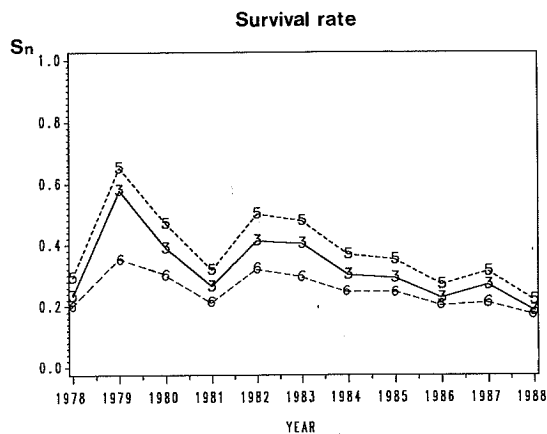


Fig. 5. Yearly variations of the survival rates simulated by case 3, 5 and 6. The numbers in the figure correspond to the case numbers.

とした場合、その生残率 S は、

$$S = \text{Erfc} \left(\frac{\beta}{\sqrt{\beta^2 + \frac{1}{4\kappa T}}} \frac{VT + x_0}{2\sqrt{\kappa T}} \right)$$

で求められる (KASAI *et al.*, 1992)。但し β は卵稚仔の初期分布の分散率、 T は産卵されてからの時間、そして x_0 は産卵場から黒潮流軸までの距離である。この式からも分かるとおり、拡散係数 κ の値にはそれが大きいほど生残率 S を 0.5 に近づけるという効果しかない。卵稚仔を時間と共に死亡させながら計算を行った他のケースの生残率も定性的にはケース 1 の生残率と変わらないので、拡散率が小さいと他の効果の影響、風の効果や産卵場の位置の効果など、がより強く生残に効いてくるものの、拡散係数自体は生残率を大きく左右するものではないと考えられる。故に、マイワシ卵稚仔の生残がその輸送された海域から黒潮流軸までの距離にのみ依存する本モデルでは、拡散すなわち黒潮の短期的な変動は、マイワシ卵稚仔の生き残りには余り影響を及ぼさないといえる。

また、本実験では観測の少ないマイワシの卵稚仔期に於ける死亡率について考察するために、死亡率を変えた実験を行った。しかし死亡率のパターンを変えても、年々の生残率の振幅に差がでただけで、その全体的な傾向はあまり変わらないという結果が得られた。これはフロント域の幅が沿岸域の幅に比べて狭いことによると考えられる。本実験において卵稚仔がフロント域に留まる時間は、沿岸域に留まる時間や沖合域に流されてしまっただけからの時間に比べて短いため、フロント域での死亡率の生残に対する効果は小さい。この結果から判断すれば、死亡率を空間的により滑らかに (例えば指数関数的に変化するように) 与えても、生残率の年変化の傾向は変わらないと予想される。しかしフロント域は収束域になっており、卵稚仔が集中するという考えもある。本実験ではその効果が含まれていない。この効果を取り入れると、フロント域での生き残りの効果が重要になってくるので、今回の実験結果とは異なる結果が得られるかもしれない。今後モデルを発展させる上で考慮すべき重要な点であろう。

本実験では沿岸域での死亡率をケース 3 では $\alpha = 0.01 \text{ d}^{-1}$ と設定した。その結果生後 20 日のマイワシ仔魚について、観測に基づく生残率と実験による生残率の間に約 20 倍のずれが生じた (Fig. 2, 4)。この結果から、沿岸域とフロント域での死亡率は一樣であるとした場合、それらの海域での死亡率 α は、

$$\frac{\exp(-0.01 \times 20)}{\exp(-\alpha_r \times 20)} = 20$$

より概算で、1日あたり

$$\begin{aligned} \alpha_r &= \frac{\log 20}{20} + 0.01 \\ &\approx 0.15 \end{aligned}$$

と見積もることができる。

最後に本実験の結果に基づき、1970年代のマイワシ資源量の急増と近年の横ばいまたは漸減の原因を考察する。黒田 (1988) によると、マイワシ資源量が急増した 1970 年代前半における産卵場は、その前後の時期と大きく変化することなく沿岸域に形成されている。つまり、KASAI *et al.* (1992) の結果と本実験の結果からマイワシの生き残りに影響する可能性がある物理的な要因と結論づけられた吹送流と産卵場から黒潮フロントまでの距離のうち、問題となるのは沖向きの吹送流の効果のみとなる。そこで Fig. 6 に 1956 年から 1988 年までの冬季季節風の年変化を示す。これは潮岬と鹿児島での 850 mb における 12 月～3 月までの風の東西成分の年毎の平均値を表したものである。この図から分かるとおり、資源量が低迷していた 1960 年代と急増した 1970 年代から 1980 年代にかけての季節風の東西成分の強さを比べた場合、両者のレベルに大きな差はみられない。したがって、マイワシ資源量の急増は、卵稚仔輸送に伴う初期減耗ではなく、それ以外の餌環境の変化やマイワシ自身の生理的な変化などによる初期減耗、または初期減耗以外の要因に基因すると考えられる。

一方資源量の漸減の様子は、今回の実験結果にも表れており、Fig. 4, Fig. 5 に表されているように、近年生残率が徐々に下がってきている。これは主として産卵場が黒潮流域やそれよりも沖合にまで拡大してきたことよっている。松川ほか (1991) は黒潮周辺海域のプランクトン組成を観測し、その結果沿岸域や黒潮フロント域ではマイワシの餌となるような小型のプランクトンが多く、黒潮流域から外洋域にかけては競争者や捕食圧となる肉食性の大型プランクトンが多いと報告している。この観測結果は、本実験においてフロント域より沖合側では生残が悪いとした条件が正しいことを示唆している。それ故、本実験の結果から判断すれば、ここ数年の資源の減少傾向は、産卵場の沖合化によって引き起こされた初期減耗率の増大によるものと思われる。

本研究の最終的な目標は、数十年単位のマイワシの資源

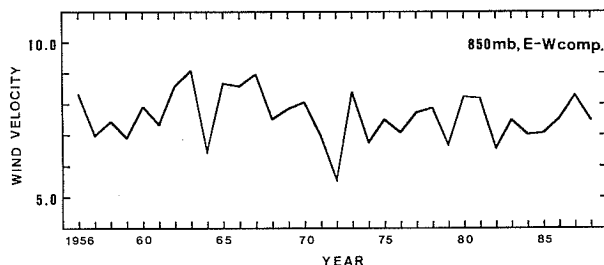


Fig. 6. Interannual variations of east-west components of wind at a level of 850mb winter during 1956-1988.

変動を解明することにある。その手段として数値実験は有効な手法であるが、実験に必要な時空間別の産卵量や餌の量、そして死亡率など未だに多くの生物学的パラメータが正確に求められていない。今後数値モデルを進展させる上で、これらのパラメータを観測や飼育実験によって明らかにしていくことが必要不可欠であろう。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、有益なご意見をいただいた東京大学海洋研究所中田英昭助教授、並びに九州大学応用力学研究所増田章教授に感謝の意を表する。

文 献

- HJORT, J. (1914) Fluctuations in the great fisheries of northern Europe viewed in the light of biological research. Rapp.P.-v.Reun.Cons. int. Explor. Mer, **20**, 1-228.
- Japan Meteorological Agency Aerological data of Japan, 1978~88.
- 海上保安庁水路部 海洋速報, 1978~88年.
- KASAI, A., M. J. KISHI and T. SUGIMOTO(1992) Modeling the transport and survival of Japanese sardine larvae in and around the Kuroshio Current. Fisheries Oceanography, **1**, 1-10.
- KAWABE, M. (1985) Sea level variations at the Izu Islands and typical stable paths of the Kuroshio. J. Oceanogr. Soc. Japan, **41**, 307-326.
- KAWAI, H. (1969) Statistical estimation of isotherms indicative of the Kuroshio axis. Deep Sea Res. Supple, **16**, 109-115.
- 菊地 弘・小西芳信 (1990) 日本の太平洋岸(常磐~薩南海域)におけるマイワシ, カタクチイワシ, サバ類の月別, 海域別産卵状況: 1987年1月~1988年12月. 中央水産研究所業績, pp72.
- KOBAYASHI, M. and K. KURODA (1991) Esti-

mation of main spawning grounds of the Japanese sardine from a viewpoint of transport condition of its eggs and larvae.

In, Long-term variability of pelagic fish populations and their environment, ed. T. KAWASAKI, S. TANAKA, Y. TOBA and A. TANIGUCHI, 109-116.

近藤恵一 (1988) 資源最高水準期における日本産マイワシの分布・移動について. 東海区水産研究所研究報告, **124**, 1-33.

小西芳信 (1984) 南西外海域における黒潮と卵稚仔の分布. 南西ブロック海洋研究会報, **1**, 11-18.

小谷祐一・小坂 淳・渡辺良明・高橋章策・小達和子・渡部泰輔 (1987) 冬季の黒潮及びその周辺海域における海洋環境と小型かいあし類の分布. 黒潮の開発利用調査研究(第II期)成果報告書(その1), 337-347.

黒田一紀 (1988) 本邦の太平洋沿岸域におけるマイワシ主産卵場の変遷. 水産海洋研究会報, **52**, 289-296.

黒田一紀 (1990) マイワシの初期生活期を中心とする再生産過程に関する研究. 東京大学農学系研究科博士論文, pp293.

松川康夫・中田 薫・黒田一紀・羽田照男 (1991) マイワシ生残に関わる黒潮周辺海域のプランクトン組成とその経年変化. 中央ブロック卵稚仔プランクトン調査研究担当者協議会研究報告, **11**, 114-117.

森 慶一郎・黒田一紀・小西芳信 (1988) 日本の太平洋岸(常磐~薩南海域)におけるマイワシ, カタクチイワシ, サバ類の月別, 海域別産卵状況: 1978年1月~1986年12月. 東海区水産研究所業績D, **12**, pp321.

SHIMIZU, H., K. NAKATA and H. NAKANO (1989) Comparison of nutritional condition of sardine larvae, *Sardinops melanostictus* (T&S) taken from the coastal and offshore region of the Kuroshio Current. Nippon Suisan Gakkaishi, **55**, 179.