HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	漁獲努力の時間変化に対する水産資源の応答
Author(s)	磯田, 豊; 東屋, 知範
Citation	北海道大學水産學部研究彙報, 49(1), 15-29
Issue Date	1998-03
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/24165
Type	bulletin (article)
File Information	49(1)_P15-29.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北大水産彙報
49(1), 15-29. 1998.

漁獲努力の時間変化に対する水産資源の応答

磯田　豊[1)]・東屋　知範[2)]

Response of Fish Population to the Time-Varying Fishing Effort

Yutaka ISODA[1)] and Tomonori AZUMAYA[2)]

Abstract

The fish population is not only affected by the environmental factor, but also the fishing effort which is dependent on the social and the economical human activities. Therefore, it is difficult to discuss the most plausible cause of change in every fish populations in general. We made a simple fish population model forced by the idealized survival rate caused by the environment and by the fishing mortality rates for three types of fishing effort. Modeled time-varying fishing efforts such as the constant, compulsive and variable catchabilities are supposed, and their effects on the temporal change of fish population are examined.

Key word: Fish population, Environmental factor, Fishing effort

緒　　言

水産資源の変動は直接的には漁獲変動として現れ，実際にマイワシ・マサバ・スルメイカなどは数十年単位の豊凶漁期を繰り返してきた。漁獲された魚は我々人間にとっては大切な水産資源であるものの，魚にとっては死亡であり，次世代の再生産には寄与できない。人間が取り残した産卵親魚だけが次世代の資源を生み出し，将来の漁獲（または水産資源）を保証している。この残すべき産卵親魚を取り尽くしたときに乱獲となり，その魚種は絶滅し，人間にとっての水産資源も消滅する。商業ベースにある魚種は少なからず，この人為的な漁獲努力の影響を受けていると考えられ，日本の水産業にも最近，TAC（許容漁獲量）等の資源管理の考え方が導入されようとしている。

一般に，漁獲努力は人間生活に関係した社会的及び経済的な影響を大きく受ける。例えば，数十年単位で増減する魚種の漁獲量が増加し始めれば，その魚をねらった漁業が次第に活性化し，漁獲努力も比例して大きくなることは容易に推測できる。そして漁獲量が減少し始め，経済的価値が低くなったとき，漁業はより経済的価値の高い他の魚種に移ってきたことも事実である。

一方でマイワシやニシンで代表されるように，漁獲努力が非常に低かった時代にも数十年周期の豊凶期が知られており，その変動の原因が主として環境条件の変動にあることが示唆されている。このように水産資源変動の原因には，物理・生物的な環境条件と人為的な漁獲の二つの要因

1) 北海道大学水産学部物理海洋学講座
(*Laboratory of Physical Oceanography, Faculty of Fisheries, Hokkaido University*)
2) 遠洋水産研究所
(*National Research Institute of Far Seas Fisheries*)

がある。しかし，両要因は全く無関係とも考えれない。すなわち，漁獲努力は過去の漁獲量の大きさを見て人為的に増減するものの，その漁獲量の変動は人為的変動とは独立な環境変動の影響も受けているからである。多くの浮魚の資源構造を整理した川崎 (1982) は，資源変動の原因をいろいろな周期変動を含む環境変動だけに求めるのも，漁獲の影響をリッカーの再生産曲線だけで説明しようとするのも事態を単純化し過ぎていることを指摘している。さらに，資源変動の問題は環境と漁獲の二者択一のなかにはないことを強調している。

このような水産資源変動の問題において，我々は環境要因に比べて非常に定量化しにくい漁獲努力の影響をどのように扱い整理すればよいのかが重要なポイントと考える。勿論，漁獲努力量が真の資源量に対して常に一定割合であれば，資源変動の主たる原因は環境要因にあり，漁獲量と産卵親魚量の変動パターンは同じになる (この場合のモデル計算結果は「割合漁獲」として，後節に示す)。漁獲変動の原因を環境要因に求める研究者は，主にこの考え方を前提としている。本研究では，漁獲努力の時間変化が十分に資源変動に影響している状況を設定し，簡単なモデル解析によって漁獲努力の時間変化に対する水産資源の応答を調べた。このような状況では，漁獲量と取り残される産卵親魚量の比が漁獲努力の時間変化によって変動するため，漁獲量と産卵親魚量の変動パターンは必ずしも一致しない。

モデルは適当な再生産曲線に従う魚種を仮定し，モデルの中で人為的な漁獲努力の時間変化と物理・生物的な環境変動を区別して取り入れた。漁獲努力は種々の漁獲方法を想定した漁獲率で，環境変動は適当な振幅と周期を仮定した生残率で表現した。なお，本論文では漁獲率＝漁獲量/産卵親魚量と考えた。そして，漁獲率と生残率の時間変化から逐次計算される漁獲量と産卵親魚量の応答パターンを整理し，各漁獲方法毎に漁獲の影響を考察した。最後に，水産資源管理の目的が「再生産に寄与する産卵親魚を残しつつ，持続可能な漁獲を行うこと」とした場合，その目的を果たす資源管理の一方法について提案する。

実際の資源変動にみられる漁獲の影響

本節ではまず，漁獲の影響を大きく受けたと思われる資源変動の特徴を実際の資料からみておく。

漁獲の影響を明らかに受けた資源変動の例として，世界大戦による漁獲努力の減少や TAC などによる漁獲規制を通して資源が回復したことが挙げられる。Fig. 1(a) は川崎 (1993) から引用した 1905～1937 年におけるアイスランドのタラの漁獲量と資源密度の経年変化の例である。実線は漁獲，破線は資源密度 (CPUE) を示す。資源密度 (CPUE) は漁獲資料から算定されるため厳密ではないものの，漁獲時における産卵親魚量の相対的な大きさを代表していると考えられる。以下の記述は，川崎 (1993) から引用した。「世界大戦中は漁船の多数が徴用されたために漁獲努力が小さくなり，漁獲量も極端に低下した。戦後トロール漁業が本格的に再開されると，漁獲量も CPUE もはね上がり，戦争中に資源が大きく回復したことを示した。CPUE はその後再び低下し始めるが，漁獲量は 1928 年までは高い水準にある。1929 年以後は漁獲量も減少し始め，資源は再び乱獲状態におちいるのである。」

漁獲努力の経年変化はわからないものの，産卵親魚量をできるだけ正しく推定した 1963～1984 年のマサバ太平洋系群の例がある (本間ら，1987)。Fig. 1(b) の破線は産卵数から推定したマサバの産卵親魚量を，太い実線は漁獲資料をもとにコホート解析から推定した資源量を，細い実線は漁獲量を示す。両者の推定資源量は定量的にも大きく異なり，さらに定性的な時間変化パターンも一致していない。このことから，いくつかの資源推定法を併用する必要性が指摘されているが，ではなぜ，このような違いが生じたかの検討はなされていない。後節で議論されるように，正確

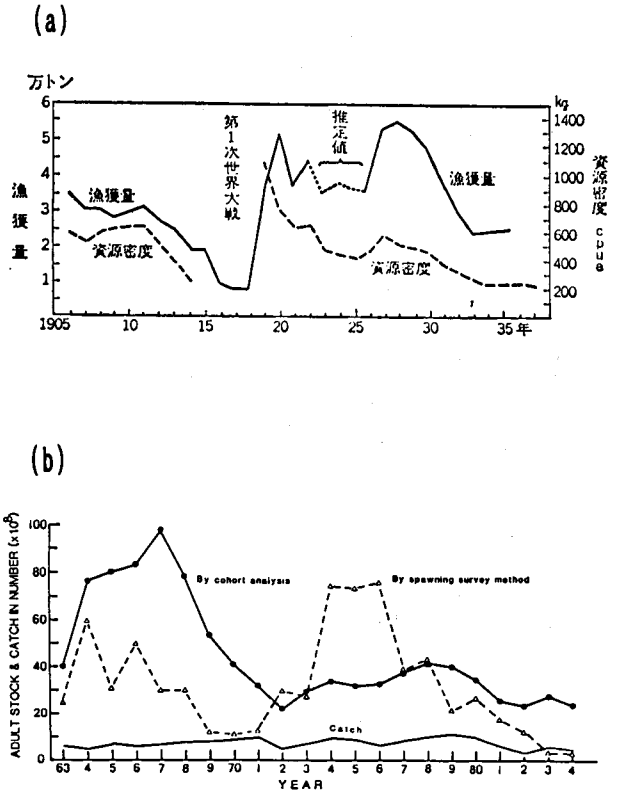

Fig. 1. (a) Annual changes of catch (solid line) and CPUE (dotted line) of cod in number by the fishing ground of the Iceland (Kawasaki, 1993). (b) Annual changes of the adult stocks of Pacific mackeral calculated by the cohort analysis (thick solid line) and the spawning survey method (dotted line), together with the catch in number (thin solid line) (Honma et al., 1987).

な漁獲率がわからなければ漁獲量を用いた資源量推定は難しい。よって，両資源推定値の定量的な不一致は認めても，定性的な変動パターンにも違いがあることは興味深い結果と考える。この例の場合も，アイスランドのタラ資源変動と同様に，漁獲量ピーク以前から産卵親魚量はすでに減少し続けている。

我々は，上記の例に示された漁獲量（または，漁獲量から推定した資源量）と産卵親魚量の変動パターンの相違は資源推定誤差ではなく，漁獲努力の経年変化から生じた意味ある相違と考える。本研究では，特に「漁獲ピーク時にはすでに産卵親魚量が減少傾向にある」という特徴に注目する。

漁獲の影響を取り入れた再生産モデルの構造

浮魚にはマイワシ・マサバ・タラなどの多年魚多回産卵，サケなどの多年魚1回産卵，イカなどの1年魚1回産卵があり，寿命と産卵回数が異なる魚種がある。東屋・磯田 (1996)，磯田・東屋 (1998) は，寿命と産卵回数の違いから生じる魚種毎に異なる特徴的な資源変動を指摘してい

る。先に述べたように資源変動の原因には環境要因と漁獲による人為的要因があるものの，その定量的な区別は難しい。そこで，東屋・磯田 (1996) に従い，二つの変動要因を一つの再生産率で表現し，上記3魚種について資源変動の特徴をまず簡単に紹介する。寿命が l_e 年で初回産卵年齢を l_s 才とし，産卵魚の漁獲や初期減耗などをすべて含めた再生産率を B_n とすると，資源変動は次式で表現することができる。

$$L_n = B_n/(l_e - l_s + 1) \sum_{k=l_s}^{l_e} A_{k,n} \tag{1}$$

$$A_{1,n+1} = L_n \tag{2}$$

$$A_{k,n+1} = A_{k-1,n} (k=2, \cdots\cdots, l_e - 1) \tag{3}$$

ここで，n 年の年齢 k 才の親が $A_{k,n}$, この年の産卵親魚から生まれた稚魚が L_n である。(1) 式は l_s 才から l_e 才までの産卵親魚から再生産率 B_n を通して，稚魚 L_n が生き残ることを示す。$l_e - l_s + 1$ は産卵年数であり，B_n を産卵年数で割ることによって，資源が増減しない平衡生残率を表現することができる。また，(2)(3) 式は年が進むにつれて年齢が加算されることを示す。このモデル

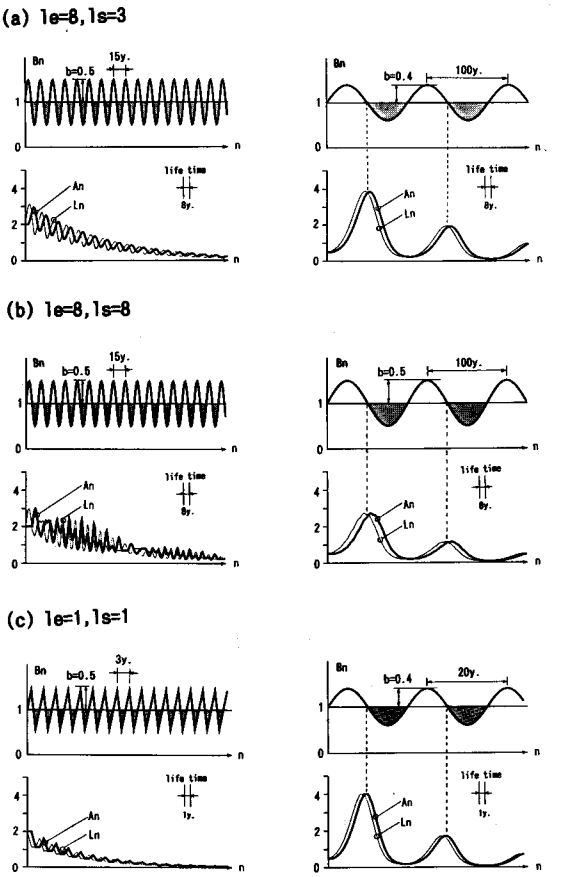

Fig. 2. At each figure, the upper panel is the temporal variation of B_n and the lower panel is the temporal variations of A_n and L_n as response to B_n variations. Figures (a) to (c) correspond to the case of $(l_e, l_s) = (8, 3)$, $(8, 8)$ and $(1, 1)$, respectively.

の特徴は，親の死亡も全て再生産率 B_n に押しつけて簡単化できる点にある。

Fig. 2(a) にマイワシ・マサバを模した多年魚多回産卵を $l_e=8, l_s=3$ で，Fig. 2(b) にサケを模した多年魚1回産卵を $l_e=8, l_s=8$ で，Fig. 2(c) にイカを模した1年魚1回産卵を $l_e=1, l_s=1$ のパラメータで表現した結果を示す。太い実線が産卵親魚量，細い実線が稚魚量である。また，与えた再生産率 B_n の変動周期は多年魚 (Fig. 2(a, b) の場合，左側が15年，右側が100年であり，1年魚 (Fig. 2(c)) の場合，左側が3年，右側が20年である。再生産率 B_n は次式に示す簡単な正弦曲線で与えた。

$$B_n=1+b\cdot\sin(n\omega) \tag{4}$$

ここで，b は再生産率の振幅，$\omega=2\pi/T$ で T は変動周期である。寿命 l_e が再生産率 B_n の変動周期に近いとき (左側の図)，再生産率 B_n から生じる変動と親子関係 (寿命と産卵年数) から生じる遅れ変動が重なるため，計算された資源変動は複雑な時間変化を示す。特に，多年魚1回産卵 (Fig. 2(b) 左側) は卓越年級群を生じ易く，資源変動の振幅が年毎に大きく変化していることがわかる。ところが，寿命に比べて十分長い周期の再生産率 B_n を与えたときは (Fig. 2 の右側)，3魚種ともに似たような資源変動を示す。共通した変動の特徴は，(1) 再生産率 $B_n>1$ の生き残りに良い環境と資源量極大との位相差が90度であること，(2) 再生産率 B_n は正弦曲線で与えているにもかかわらず，資源量は指数関数的な急増・急減を示すことである。これらの特徴は磯田・東屋 (1998) で議論されているように，1年魚モデルでは常に現れる特徴である。すなわち，寿命よりも十分長い時間スケールにおける資源変動を考えれば，寿命と産卵年数が異なった魚種であっても，1年魚モデルを用いてある程度一般的な議論を行うことができる。よって，本論では数十年スケールの資源変動を対象とし，磯田・東屋 (1998) の1年魚モデルを用いた。ただし，この場合1年魚モデルの n 年は n 世代として解釈する。

モデルの基本的構造は磯田・東屋 (1998) の1年魚モデルと同じであるが，漁獲の影響と環境変動による生残を区別した。n 世代の漁獲対象にならなかった産卵親魚量を A_n, 産卵魚になる前の卵—稚魚—成魚量を L_n, 漁獲量を F_n, 漁獲率を f, 環境要因による生残率を β_n としたとき，資源変動を次式で表現した。

$$L_n=\beta_n\cdot A_n \tag{5}$$

$$A_{n+1}{}^*=\alpha_n\cdot L_n \tag{6}$$

$$F_{n+1}=f\cdot A_{n+1}{}^* \tag{7}$$

$$A_{n+1}=(1-f)\cdot A_{n+1}{}^* \tag{8}$$

(6) 式の α_n は密度効果を示し，本論では次式のリッカー型の再生産曲線で表現した。

$$\alpha_n=a(L_c-L_n)/L_c \tag{9}$$

ここで，a は内的自然増加率，L_c は L_n の最大環境収容量を示す。

(5) 式は n 世代の産卵親 A_n から産卵親自身—卵—稚魚—成魚の生残に影響する環境条件に起因した生残率 β_n を通して，産卵魚になる前までの卵—稚魚—成魚 L_n が生き残ることを示す。以下では，この環境変動に起因した生残率 β_n を簡単に環境変動とよぶ。(6) 式は $n+1$ 世代の漁獲対象となる前までに，卵—稚魚—成魚量 L_n に左右される密度効果 α_n で増減する産卵可能な親量 $A_{n+1}{}^*$ を示す。(5)(6) 式から L_n を消去すると

$$A_{n+n}{}^*=\alpha_n\cdot\beta_n\cdot A_n \tag{10}$$

となる。(10) 式の $\alpha_n\cdot\beta_n$ が再生産率を示すため，$A_{n+1}{}^*$-A_n 関係が再生産曲線上で議論することができる。(7)(8) 式は産卵可能な親量 $A_{n+1}{}^*$ から漁獲率を乗じた $f\cdot A_{n+1}{}^*$ が漁獲量 F_{n+1} に，残りの

$(1-f)\cdot A_{n+1}{}^*$ が漁獲対象にならなかった産卵親魚量 A_{n+1} になることを示す。すなわち，このモデルでは産卵年齢に達しない若齢成魚の漁獲は考慮していない。そして，この生き残った産卵親 A_{n+1} が (5) 式によって，再び次世代の資源量 L_{n+1} を生成する。

環境変動がない場合の漁獲の影響

まず始めに，環境変動が全くない場合 ($\beta_n=1$) の漁獲の影響について調べる。漁獲率の与え方として，割合・強制・変動漁獲の 3 ケースを考えた。

割合漁獲とは産卵可能な親量 $A_n{}^*$ に対し，常に一定割合の漁獲 (漁獲率 : f＝一定) を行うケースである。勿論，漁業者には海にいる産卵可能な親の絶対量はわからない。漁業者が過去の漁獲量の大小に係わりなく，できるだけ多くの漁獲を期待して常に一定の漁獲努力を行い，結果として一定割合の親魚しか漁獲できない場合を考えている。

強制漁獲とは，政治的にある時期の漁獲努力を小さくしたりするケースである。例えば，Fig. 1(a) でみたように世界大戦によって，数年間の漁獲率が強制的に下げられたことなどが考えられる。

変動漁獲とは過去の漁獲量の増減によって漁獲率を変化させる場合で，より現実的な漁獲率の設定方法と考える。漁業者が資金をつぎ込み漁獲努力を大きくしようと判断するときの情報は過去の漁獲量 F_m の増減率であろう。そこで，ある n 世代の漁獲率 $f(n)$ は次式に従うと仮定した。

$$f(n)=f(n-1)+C_f\cdot(F_{n-4}-F_{n-1})/\sum_{k=n-4}^{n-1}F_k \tag{11}$$

ここで，C_f は漁獲率の増減の大きさを左右する適当な係数であり，本論では漁獲係数と呼ぶ。(11) 式は，4 世代分過去における漁獲量が増加 (減少) 傾向にあれば，前世代の漁獲率 $f(n-1)$ から右辺第二項の率だけ増加 (減少) させることを意味している。何世代前の情報が必要かは任意であり，種々の世代を用いた計算を行った結果，本論の結果と基本的には変わらなかった。また，計算途中で漁獲率 f が負の値になる場合があり，そのときには強制的に $f=0.01$ の小さな漁獲率を設定した。

割合漁獲

Fig. 3 は再生産曲線のパラメータとして $a=2.0$, $L_c=5$ を与え，漁獲率 $f=0.0, 0.1, 0.3, 0.5$ とした場合の産卵親魚量 A_n と漁獲量 F_n の定常計算を示す。各時系列において，1 世代毎に各記号をプロットした。図の右側には再生産曲線と 45 度線を示し，定常状態における A_n-A_{n-1} 関係を上段に，$A_n{}^*$-A_{n-1} 関係を下段に示した。産卵親魚量 A_n は漁獲率 f が大きくなるほど減少する。漁獲量 F_n は漁獲率 $f=0.3$ のとき最も多く，最大維持漁獲量があることを示している。これはラッセルによって提案され，シェーファーによって確立された余剰生産量モデルと同じ考え方で説明できる。

(10)式において $\beta_n=1$ とし，(8) 式を用いて $A_{n+1}{}^*$ を消去すると，

$$A_{n+1}/(1-f)=\alpha_n\cdot A_n \tag{12}$$

となる。定常状態では，$A_{n+1}=A_n$ となることから，

$$\alpha_n\cdot(1-f)=1 \tag{13}$$

の関係が得られ，(5) 式から $L_n=A_n$ 及び (9) 式を用いて定常状態における産卵親魚量 A_n $(n=\infty)=A$ の値を求めると

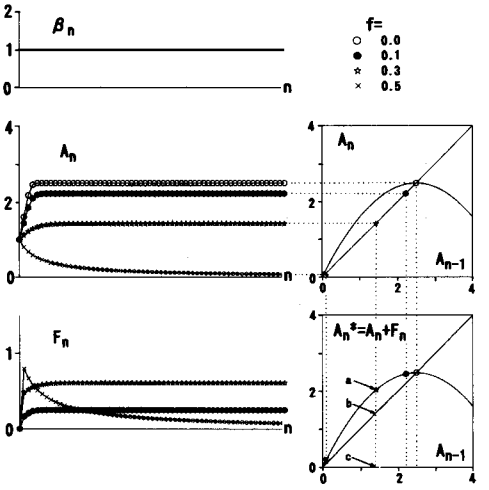

Fig. 3. The left-hand side panels are the temporal variations of $\beta_n=1$(upper), A_n(middle) and F_n(lower) at each temporal constant rate of the fishing mortality from 0.0 to 0.5. The initial value of A_n is $A_0=1$ and the carring capacity of the environment: $a=0.2$, $L_c=5$ is fixed. The right-hand side panels are the A_n-A_{n-1}(upper) and the A_n*-A_{n-1} (lower) relations.

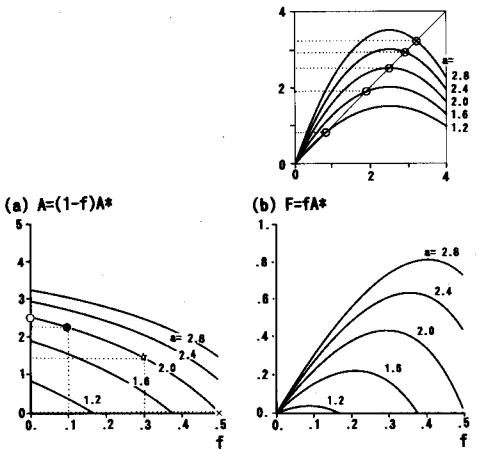

Fig. 4. At the steady state for the temporal constant rate of the fishing mortality, (a) A-f and (b) F-f relations. The upper panel shows the reproductive curves from $a=1.2$ to 2.8.

$$A=L_c-L_c/\{(1-f)\cdot a\} \tag{14}$$

となる。$a=1.2$〜2.8($L_c=5$ は固定) で変化させたときの A-f 関係を Fig. 4(a) に示す。図の上段には a の値毎の再生産曲線を示した。再生産曲線と 45 度線が交差した点の値 (図中の白丸印) が, Fig. 4(a) において漁獲率 $f=0$ のときの産卵親魚量 A になる。a の値が大きい魚種 (内的自然増加率が大きい魚種) ほど相対的に産卵親魚量 A が多く，漁獲率 f が大きいほど産卵親魚量 A は小さくなる。$a=2.0$ の曲線上には Fig. 3 で計算された産卵親魚量の定常値を各記号でプロットした。定常状態における漁獲量 $F_n(n=\infty)=F$ は，(5)〜(7) 式に (14) 式を代入して整理すると，

$$F=\{(1-f)\cdot a-1)\cdot L_c\cdot f/\{(1-f)\cdot a\} \tag{15}$$

となる。Fig. 4(b) に (15) 式の F-f 関係を示す。産卵親魚量 A と同様に a の値が大きい魚種ほど相対的に漁獲量 F も多く，高い漁獲率 f にシフトした最大維持漁獲量 (極大値) をもつことがわかる。$a=2.0$ の最大維持漁獲量は, Fig. 3 の計算でも示されたように漁獲率 $f=0.3$ 付近にある。さ

らに，Fig. 4(b) は低い漁獲率で割合漁獲を行っても，資源の絶滅が有り得ることを示す。この絶滅は資源の内的自然増加率よりも高い率で漁獲を続けた場合に起こる。

再び，Fig. 3 に戻って $a=2.0$ の場合を例に，再生産関係を考える。産卵親同志の A_n-A_{n-1} 関係 (上段) は定常状態であることから，当然 45 度線上にある。再生産曲線上に値がプロットされるのは，下段に示した漁獲前の親量 A_n^* とこの親を生んだ前世代の産卵親魚量 A_{n-1} の $A_n^*-A_{n-1}$ 関係である。☆印の漁獲率 $f=0.3$ を例にとると，線分 ab が漁獲量，線分 bc が産卵親魚量であり，ab/ac が漁獲率 $f=0.3$ になる。このように環境変動のない場合 ($\beta_n=1$) は，必ず再生産曲線上で再生産関係が議論できる。しかし，割合漁獲であっても，後節で示す環境変動がある場合 ($\beta_n\neq1$) にはその議論が難しくなる。

強制漁獲

Fig. 5 は再生産曲線のパラメータとして $a=2.0$, $L_c=5$ を与え，漁獲率 f を下記の正弦曲線で強制的に変動させた場合の産卵親魚量 A_n, 漁獲量 F_n, 漁獲前の親量 $A_n^*(=A_n+F_n)$ の時間変化を示す。

$$f(n)=0.3+0.2\cdot\sin(n\omega) \tag{16}$$

ここで，$\omega=2\pi/20$ とした。この漁獲率 f は Fig. 4(b) (a=2.0) でみた絶滅しない範囲の 0.〜0.5 にあり，変動周期を 20 世代と仮定している。漁獲量 F_n は漁獲率 f の変動に近いものの，産卵親魚量 A_n の影響を受るため変動の形は正弦曲線にならない。そして漁獲量 F_n と産卵親魚量 A_n とはほぼ逆位相の関係にあり，漁獲量 F_n と産卵親魚量 A_n の変動パターンは明らかに異なっている。詳しくみると，漁獲率 f が極小 (f〜0.1) となる付近で産卵親魚量 A_n は急増し，極大値をもつ。このとき，漁獲量 F_n は逆に極小値となる。漁獲率 f が増加すると，漁獲量 F_n は急増するが，このとき産卵親魚量 A_n は減少傾向にある。このような定性的な変動パターンの特徴は，先にみた Fig. 1(a) のタラ資源量の変動パターンに似ている (Fig. 5 の破線枠内を比較)。また，漁獲率の変動はあっても環境変動が全くなければ，A_n^*-A_{n+1} 関係はやはり再生産曲線上で議論できる (Fig. 5 右

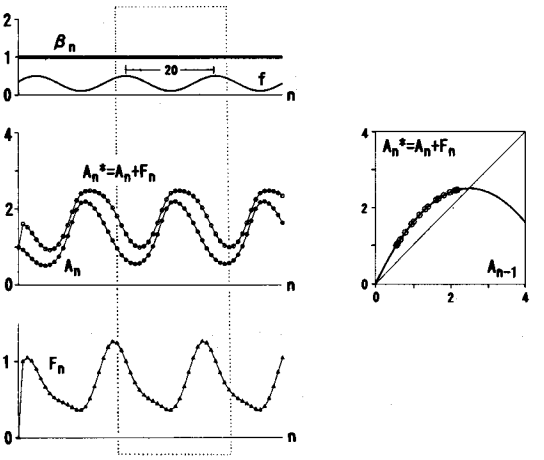

Fig. 5. The left-hand side panels are the temporal variations of $\beta_n=1$ and f(upper), A_n and A_n^*(middle) and F_n(lower), forced by the time-varying fishing mortality rate: f. The initial value of A_n is $A_0=1$ and the carring capacity of the environment: $a=0.2$, $L_c=5$ is fixed. The right-hand side panel is the A_n^*-A_{n-1} relation.

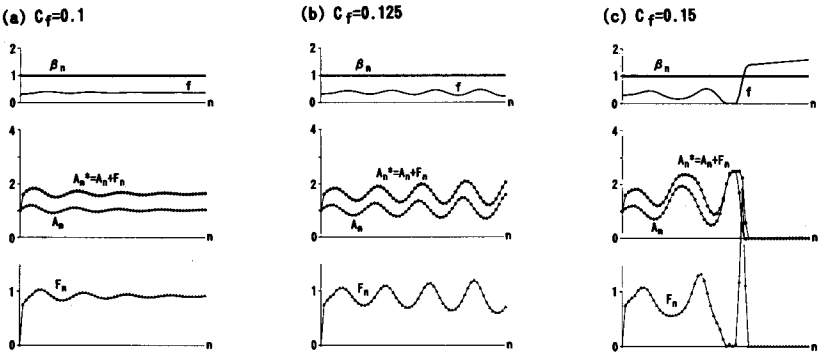

Fig. 6. The upper panel is the temporal variations of f ($\beta_n=1$). The middle and lower panels are the temporal variations of A_n, $A_n{}^*$ and F_n as the response to the calculated f-variation. Figures (a) to (c) correspond to the case of $C_f=0.1$, 0.125 and 0.15, respectively.

側を参照)。

変動漁獲

初期漁獲率を$f(0)=0.3$とし，漁獲係数 C_f が 0.1, 0.125, 0.15 の場合の計算例を Fig. 6(a)～(c) に示す。他のパラメータは強制漁獲の場合と同じである。漁獲係数 C_f が小さいケースは，漁獲率 f の変動が小さく，割合漁獲に近い結果となる (Fig. 6(a))。漁獲係数 C_f が大きくなるに従い振動が生じ始める (Fig. 6(b))。そして，漁獲係数 C_f をさらに大きくすると振動の振幅も大きくなり，資源は絶滅する場合がある (Fig. 6(c))。振動する漁獲量 F_n と産卵親魚量 A_n の位相関係は先に議論した強制漁獲の場合と同じである。

振動を起こす原因は，過去の漁獲変動の情報 ($nd=4$ 世代前) が漁獲率を通して現在の漁獲量に反映され，モデルの構造が一種の遅延微分方程式の形になるためである。$\beta_n=1$ のとき，(5)～(8) 式を用いて漁獲量 F_n の関係式を求めると次式に整理される。

$$F_{n+1}-F_n=-R(F_{n-nd-1})\cdot F_n \tag{17}$$

ここで，$R(F_{n-nd-1})=\alpha_n\cdot f(n\text{-}1)$ とおいた。$f(n\text{-}1)$ は (11) 式より $nd+1$ 世代前の漁獲量 F_{n-nd-1} の情報を含んでいる。$\Delta t=1$ 世代として (17) 式を微分方程式で近似すると，下記の遅延微分方程式の形となる。

$$(dF/dt)/F=R(F(t-td)) \tag{18}$$

ここで，t は時間，$td=nd-1$ である。

環境変動がある場合の漁獲の影響

本節で与える環境変動は生残率 β_n として，(4) 式と同じ正弦曲線とした。すなわち，

$$\beta_n=1+b\cdot\sin(n\omega) \tag{19}$$

以下の解析では，環境変動の周期を 20 世代 ($\omega=2\pi/20$)，再生産曲線のパタメータを $a=2.0$, $L_c=5$ の値に固定した。漁獲率 f の与え方は，「環境変動がない場合の漁獲の影響」と同様に割合・

強制・変動漁獲の3ケースとした。また，この節以降に出てくる時系列図において，$\beta_n>1$ から $\beta_n<1$ に転じる $\beta_n=1$ となる世代を破線で示した。この世代は環境変動 β_nから予測される資源量の極大期を示している (Fig. 2 を参照)。

割合漁獲

環境変動 β_n 以外の値は Fig. 3 のケース ($\beta_n=1$) と全く同じときの計算結果を Fig. 7 に示す。なお，環境変動 β_n の振幅は $b=0.4$ とした。環境変動 β_n による漁獲量 F_n や産卵親魚量 A_n の変動はみられるものの，これらの長期平均値は，Fig. 3 の結果 ($\beta_n=1$) と同じ程度の値になる。それ故，最大漁獲量も漁獲率 $f=0.3$ 付近にあることがわかる。このことから資源変動を長期間の平均値でみる場合には，定常を仮定したシェーファーの余剰生産モデルを用いても議論することができる。

「緒言」でも述べたように，割合漁獲の場合，漁獲量 F_n と産卵親魚量 A_n は全く同じ変動パターンを示す。ただし，漁獲量 F_n から産卵親魚量 A_n の定量的な値を推測することは，最大維持漁獲が存在することから，正確な漁獲率 f がわからない限り難しい。

Fig. 7 の右側上段に示した A_n-A_{n-1} 関係は 45 度線を取り囲む楕円形の変動を示している。すなわち，資源が増加するときには 45 度線の上側を，資源が減少するときには下側を通る変動を示す。ところが，A_n^*-A_{n-1} 関係は必ずしも再生産曲線を取り囲む変動を示さない。環境変動の影響をより詳しく調べるために，b の値を 0.2 と 0.6 にした計算結果を再生産関係として Fig. 8 に示した。A_n-A_{n-1} 関係 (上段) は，Fig. 7 と同様に両ケースとも 45 度線を取り囲む変動を示している。A_n^*-A_{n-1} 関係(下段) の特徴は，$b=0.2$ の結果 (Fig. 8(a)) がわかり易く示している。各漁獲率毎に，再生産曲線上の定常値 (Fig. 3 を参照) 付近で楕円形の変動を示すものの，楕円の長軸方向は原点と曲線上の定常値を結ぶ直線上にある。また，Fig. 8(b) のように環境変動 β_n の振幅が大きくなる ($b=0.6$) と，再生産曲線上で変動しているか否かの判断さえ難しくなる。例えば，実際の資料からフィッティングによって再生産曲線を求める場合を考えてみよう。$b=0.2$ のケースでは，原点から立ち上がるフィッティング曲線の傾きが真の曲線よりも緩やかに計算される可能性がある。$b=0.6$ のケースでは，資源量が増加する際の値が多い場合と減少する際の値が多い場合では

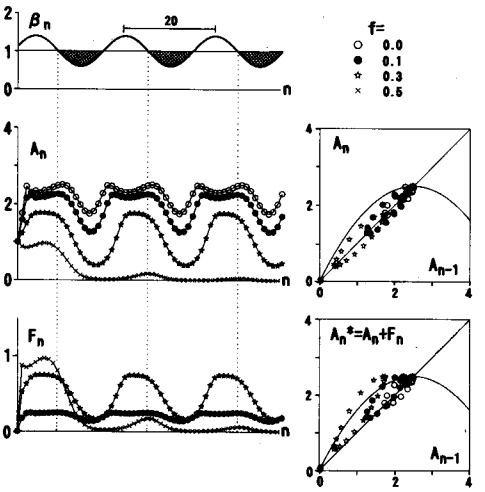

Fig. 7. The same as Fig. 3, but for the case of β_n-variation ($b=0.4$, $T=20$).

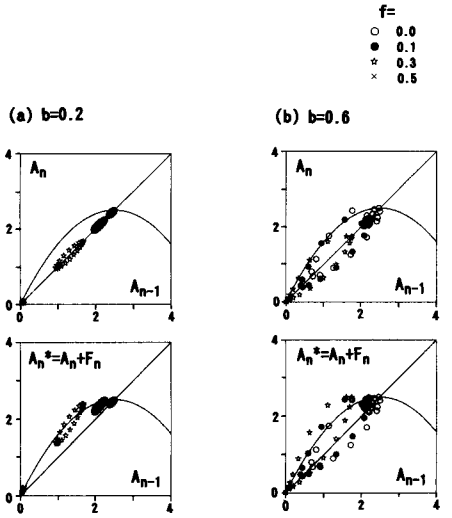

Fig. 8. The A_n-A_{n-1} (upper) and A_n*-A_{n-1} (lower) relations at the case of $b=0.2$(a) and $b=0.6$(b) of β_n.

全く異なったフィッティング曲線が計算される可能性がある。これは，環境変動の影響を受けている魚種の資料を用いて，その再生産関係を議論する際には注意すべき問題と考える。

強制漁獲

漁獲率 f の強制的な変化は，一般に環境変動 β_n とは無関係である。漁獲率 f の変動周期は簡単のため環境変動 β_n と同じ 20 世代とし，両変動の位相差だけを $\theta=0°, 180°, 90°, -90°$ としたときの計算結果を Fig. 9 に示した。与えた強制漁獲率 f の振幅は (16) 式と同じ 0.2 で，環境変動 β_n の振幅は $b=0.4$ である。

$\theta=0°$ のケース (Fig. 9(a)) は，漁獲率 f の変動が環境変動 β_n の振幅を減衰させるセンスに働く。それ故，産卵親魚量 A_n の変動幅は小さくなり，漁獲量 F_n は漁獲率 f と同位相の変動を示す。このケースの漁獲量 F_n は他のケースと比べて最も長期間の豊漁が期待される。

$\theta=180°$ のケース (Fig. 9(b)) は，漁獲率 f の変動が環境変動 β_n の振幅を増幅させるセンスに働く。それ故，Fig. 2 で示した再生産率 B_n に対する応答問題に近くなり，環境変動 β_n と漁獲量 F_n 及び産卵親魚量 A_n の変動の位相差が 90 度に近づいている。

$\theta=90°$ のケース (Fig. 9(c)) の漁獲は，環境変動 β_n に応答した資源量が極大となる時期に漁獲率 f を高くするセンスに働く。すなわち，資源量の増加を止めつつ，漁獲を行うことになる。それ故，産卵親魚量 A_n は最大漁獲率となる以前にピークをもった急増・緩減を示し，位相関係は環境変動 β_n に近い。一方，漁獲量 F_n は漁獲率 f に似た変動を示す。

$\theta=-90°$ のケース (Fig. 9(d)) の漁獲は，環境変動 β_n に応答した資源量が極小となる時期に漁獲率 f を高くするセンスに働く。すなわち，資源量の増加期に漁獲を抑え，減少期に少ない資源量を漁獲する。それ故，漁獲量 F_n は一定振幅の持続的な漁獲変動を示すものの，他のケースと比較して最も小さな漁獲量になる。

上記 4 ケースを A_n*-A_{n-1} 関係としてプロットした結果が Fig. 10 である。先に述べたように，再生産関係に環境変動が加わると，再生産曲線上での議論は一般に難しくなる。特に，$\theta=0°$ のケース (Fig. 10(a)) は，再生産曲線上に全く値が乗っていない。ところが，4 ケースの中で $\theta=90°$

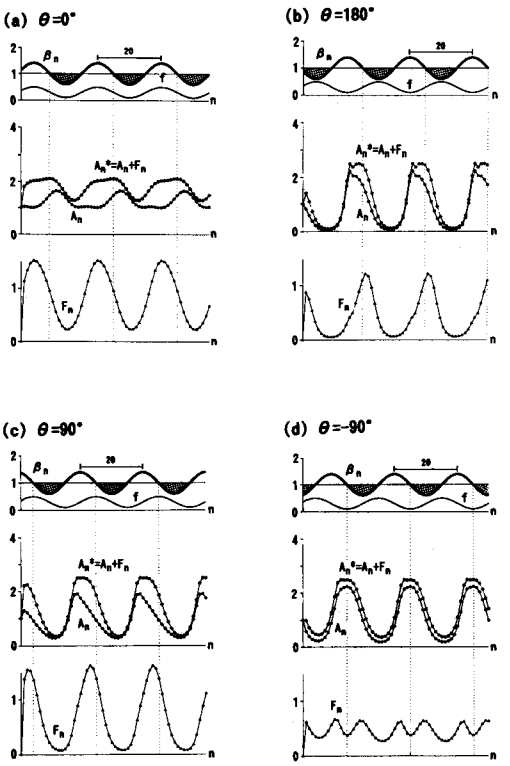

Fig. 9. The same as Fig. 5, but for 4 cases of the phase difference between β_n and f variations, i.e. $\theta=0°$(a), 180°(b), 90°(c) and $-90°$(d).

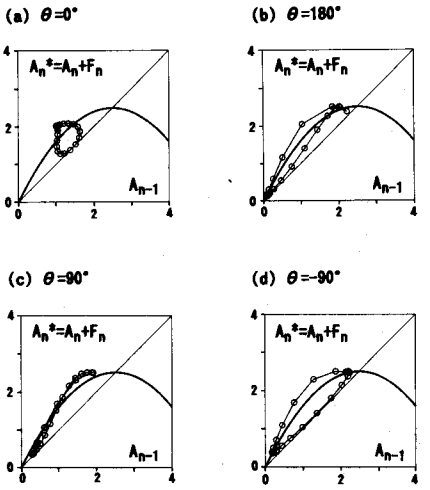

Fig. 10. The A_n*-A_{n-1} relations at 4 cases of $\theta=0°$(a), 180°(b), 90°(c) and $-90°$(d).

のケース (Fig. 10(c)) では，再生産曲線上に値が乗った比較的きれいな再生産関係を示している。この理由は，環境変動 β_n から生じる資源量の増減を抑えるセンスの漁獲のため，まるで環境変動がなかったような β_n〜1 の状態に近づくことによる。実際に，$\beta_n=1$ で漁獲率の変動のみを与えた

Fig. 5 と Fig. 9(c) の時系列を比較すれば，両者の漁獲 F_n 及び産卵親魚量 A_n はよく似た変動パターンを示している。

変動漁獲

環境変動 β_n があり，さらに漁獲率 f が過去の漁獲量の増減によって決まる本ケースの計算結果が，最も現実的な漁業を再現していると考える。漁獲係数 C_f と環境変動 β_n 以外の値は Fig. 6 のケース ($\beta_d=1$) と全く同じで，環境変動 β_n の振幅は $b=0.4$ とした。環境変動がない場合 ($\beta_n=1$)，漁獲係数 $C_f=0.1$(Fig. 6(a)) のケースにおいても資源は絶滅しなかった。ところが，環境変動のある本ケースの場合，$C_f>0.1$ の値を用いると計算途中で資源が必ず絶滅してしまう。そこで，$C_f=0.025, 0.05, 0.1$ の 3 ケースの結果を Fig. 11 に示した。なお，漁獲係数 C_f が 0.1 以下であることから，遅延微分方程式から生じる振動は顕著に現れてこない。

$C_f=0.025$ のケース (Fig. 11(a)) では，漁獲率 f の変動は小さく，$f=0.3$ の割合漁獲に近い変動を示す。$C_f=0.1$ のケース (Fig. 11(c)) では，計算途中で資源は絶滅してしまう。$C_f=0.05$ のケース (Fig. 11(b)) において，資源は絶滅することなく，興味深い漁獲率 f の時間変化が計算された。この計算された漁獲率 f と環境変動 β_n の位相関係は，前節で議論した強制漁獲 $\theta=90°$ のケース (Fig. 9(c)) によく似ていることがわかる。それ故，時系列図の上段に示した A_n^*-A_{n-1} 関係もほぼ再生産曲線上に値がプロットされている。このような漁獲率 f の経年変化が計算された理由は，資源変動の主導権が過去の漁獲量 F_nによって決まる漁獲率 f になく，あくまでも環境変動 β_n にあることによる。従って，資源量が多くなる時期，すなわち環境変動 β_n から 90 度位相が遅れた時期に漁獲率 f は大きくなったと考えられる。さらに，Fig. 11(b) で計算された漁獲量 F_n と産卵親魚量 A_n の変動パターンの違いは，マサバ太平洋系群にみられた「漁獲 (F_n) ピーク時にはすでに産卵親魚量 (A_n) が減少傾向にある」という特徴をうまく再現していると考える。

上記のモデル計算結果から，漁獲努力の経年変化が考えられる魚種であれば，産卵数から推定した産卵親魚量と漁獲量から推定した資源量は必ずしも一致しないことがわかる。さらに，漁獲量が増減する主因は，強制漁獲でない限り環境要因にあると考えられる。そこで，漁獲量 F_n と産卵親魚量 A_n の情報から逆に環境変動 β_n パターンを推察することを考えてみよう。まず，漁獲率

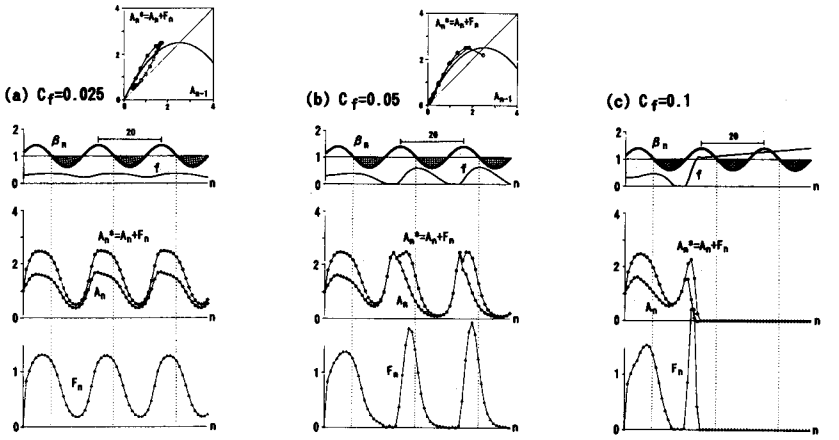

Fig. 11. The same as Fig. 6, but for the case of β_n-variation ($b=0.4$, $T=20$) and $C_f=0.025$(a), 0.05(b) and 0.1(c). The upper panel shows the A_n^*-A_{n-1} relation.

がほぼ一定の割合漁獲に近いものであれば (例えば, Fig. 11(a)), 漁獲量と産卵親魚量は似たような変動パターンを示す。それ故, 苦労して産卵数から産卵親魚量を推定しなくても, 入手し易い漁獲資料から環境変動パターンを推察できる。人為的に操作される変動漁獲であっても, Fig. 11(b) のように環境変動 β_n から生じる資源量の増減を抑えるセンスの漁獲であれば, 漁獲量 (または漁獲率) の変動は環境変動とほぼ 90 度の位相差をもつようになる。すなわち, 漁獲努力の経年変化の有無に係わらず, 環境変動パターンを推察するには産卵親魚量よりも漁獲量の情報が有益と考える。加えて, 漁獲努力に経年変化のある魚種こそ, 再生産曲線を用いた再生産関係が議論し易くなることも興味深い。

資源管理からの考察

前節の変動漁獲の例は資源管理ではないものの, 漁獲係数 C_f を人為的に調整する管理が考えられる。しかし, この場合の漁獲係数 C_f の設定には注意深い調整が必要である。なぜなら, わずかな漁獲率 f の違いでも資源の絶滅が起こり得るからである。これは, Fig. 11 の (b) と (c) の漁獲率 f が途中までよく似ているにもかかわらず, 他方が絶滅することからもわかる。持続可能な漁業を行うには, 次世代の子孫を生成する産卵親魚を残した漁獲を行うことが大切である。そこで, 変動漁獲と同じ考え方で, 今度は過去の産卵親魚量 A_n の増減情報をもとに漁獲率 f を変化させる。よって, 漁獲率 f を決定する式は, (11) 式の F_n を A_n で置き換えた次式となる。

$$f(n)=f(n-1)+C_f\cdot(A_{n-4}-A_{n-1})/\sum_{k=n-4}^{n-1}A_k \tag{20}$$

この (20) 式を用いた漁獲率の管理を行った場合, 0.1 以上の比較的大きな漁獲係数 C_f を用いても資源は絶滅しない。なぜなら, 過去の産卵親魚量 A_n から少しでも減少すれば漁獲率 f を下げ, 産卵親魚量 A_n が増加したときのみ漁獲率 f を上げるためである。例として, 漁獲係数 C_f を 0.1, 0.3, 0.5 とした場合の計算結果を Fig. 12 に示す。漁獲係数 f 以外のパラメータは Fig. 11 の計算と同じである。

$C_f=0.1$ のケース (Fig. 12(a)) では, 漁獲率 f の変動は小さく, Fig. 8 の割合漁獲 ($f=0.3$) に近い変動を示す。$C_f=0.3$ のケース (Fig. 12(b)) において産卵親魚量 A_n はほぼ一定値を保ち, 資源

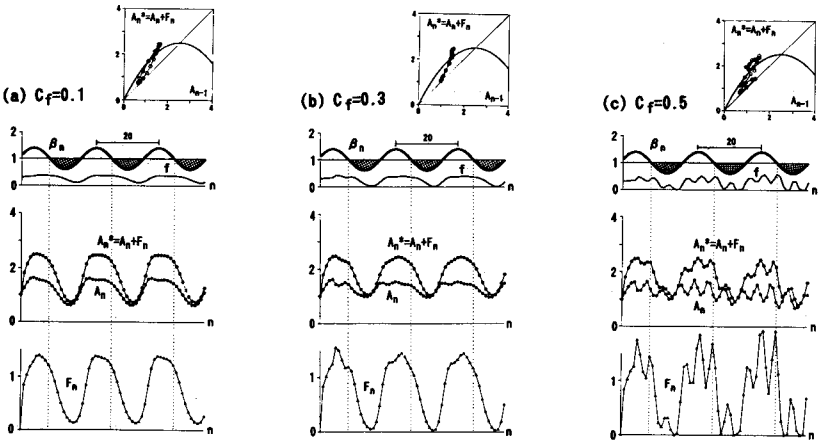

Fig. 12. The same as Fig. 11, but for the case by using the past information of A_n-variation and $C_f=0.1$(a), 0.3(b) and 0.5(c). The upper panel shows the A_n*-A_{n-1} relation.

の絶滅をうまく抑えた漁獲が行われている。$C_f=0.5$ のケース (Fig. 12(c)) では，産卵親魚量 A_n は平均的には一定値を保ちながらも小さな振動を始める。ここでは示さないが，$C_f>0.5$ になると振動の振幅はさらに大きくなり，資源は計算途中で絶滅してしまう。あまりにも大きな漁獲係数 C_f は 1 世代毎に極端に上下する漁獲率 f を設定するためである。

Fig. 12(b) で計算された漁獲率 f と環境変動 β_n の位相関係をみると，今度は先に議論した強制漁獲 $\theta=0°$ のケース (Fig. 9(a)) によく似ていることがわかる。それ故，強制漁獲 $\theta=0°$ でみられた特徴と同様に，漁獲量 F_n は漁獲率 f とほぼ同位相になり，比較的長期間の豊漁が形成されている。また，各時系列図の上段に示した A_n^*-A_{n-1} 関係も同様に，再生産曲線上には値が乗らない結果となる。このような資源管理では，産卵親魚量 A_n の変動幅を強制的に小さくするために，漁獲率 f の変動が環境変動 β_n の振幅を減衰させるセンスに働いたと考えられる。言い換えれば，環境変動による資源の増減を強制的に抑えるように漁獲がコントロールした結果である。

本節で提案した資源管理では，産卵親魚量は十分にあるにもかかわらず，漁獲禁止の期間があり得ることを漁業者に納得してもらう必要がある。しかし，今現在の海に豊漁期と同程度の魚がいるのを知っている漁業者に，ほんの少し産卵親魚量が減っただけで漁獲努力を下げるよう指導するだけでも現実的には難しいことかもしれない。

お わ り に

本研究では,環境要因による魚の生残があるなかで割合・強制・変動漁獲を行った状況をモデル化し，各漁獲方法の影響について考察した。しかし，本論で提案したモデルを実際の資源変動研究に直接利用することはできない。なぜなら，モデルでは適当に与えた再生産関係 (内的自然増加率 a と環境収容量 L_c の値) が実際にはよくわかっていないことと，魚種毎に異なる再生産関係は同じ漁獲率であっても資源の回復度合いが大きく異なるためである。

それ故，本論で注目したポイントは，漁獲努力の時間変化から生じる漁獲量と次世代の再生産に寄与する産卵親魚量の変動パターンの違いである。両変動パターンを各漁獲方法毎に整理したことにより，実際の再生産関係がわからなくても，漁獲がどのように資源変動に影響を与えているかはある程度推測できる。実際の資料解析では，正確な産卵親魚量を推定することが非常に難しいため，産卵可能な親量の変動パターンを表現している資源密度 (CPUE) の情報が有用と考える。今後は，本モデルの適用範囲である寿命よりも十分長い時間スケールに注目して，各魚種毎に漁獲量と資源密度 (CPUE) の経年変化を調べ，漁獲影響の有無及びその大きさを調べていきたい。

最後に，北海道大学水産学部の桜井泰憲博士には，種々の魚に関する漁獲の影響について貴重な助言及び議論をして頂き，深く感謝する。

文　　献

東屋智範・磯田　豊 (1996). 環境変動の影響を受けた魚の長期資源量変動モデル. 1996 年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, 479-480.

磯田　豊・東屋智範 (1998). 再生産率の時間変化に対する水産資源の応答. 北大水産彙報, **49**, 1-14.

川崎　健 (1982). 浮魚資源. 恒星社厚生閣.

川崎　健 (1993). 魚の資源学. 大月書店.

本間　操・佐藤祐二・宇佐美修造 (1987). コホート解析によるマサバ太平洋群の資源推定. 東北水研報, **121**, 1-11.