HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	幼魚期の生残率・親魚期の漁獲率の時間変化に対する水産資源の応答
Author(s)	磯田, 豊
Citation	北海道大学水産科学研究彙報, 54(3), 43-52
Issue Date	2003-12
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/21982
Type	bulletin (article)
File Information	54(3)_P43-52.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北大水産彙報
54(3), 43-52, 2003.

幼魚期の生残率・親魚期の漁獲率の時間変化に対する水産資源の応答

磯田　豊

Response of Fish Population to a Time-varying Survival Rate of Offspring or Fishing Rate of Parent

Yutaka ISODA

Abstract

The response of fish stock (A) and catch (F) was investigated in a time-varying survival rate ($\beta>0$) of offspring or fishing rate ($0<f<1$) of parent, by using a simple logistic reproductive model. In the case of periodical β-forcing, a phase of A (or F) abundance lags 0°～90° from a time of maximum-β (>1) when f is a constant and $A \ll A_0$ (A_0: maximum Carrying Capacity). In the case of periodical f-forcing, the phases of A, F and f change in the order of $A \rightarrow F \rightarrow f$ when $\beta=1$ and $A \ll A_0$. At the stock level of $A \sim A_0/2$, the temporal variation of A generated by β- or f-forcing becomes small.

Key words: Fish stock, Catch, Survival rate, Fishing rate, Logistic reproductive model

はじめに

水産資源の変動は直接的には漁獲量変動として現われ，マイワシ・サバ・スルメイカなどの浮魚は数十年単位の豊漁・不漁期を繰り返している．しかし，これらの漁獲量変動の要因として，環境（または自然）変動によるものと漁獲圧の変動によるものを区別することは難しい（川崎，1993）．ここで，環境要因による漁獲・資源量変動とは，環境水温場の変化・海流による卵輸送量の変化・餌環境や餌をめぐる他魚種との競争関係・外敵の影響（食う－食われるの関係）などを通じて資源そのものの動態が左右される場合をいう．このような現状の中で，TAC（許容漁獲量）をはじめとする資源管理では，よくわからない環境要因による資源量変動の部分を平均的な環境からのランダムな偏差と考えて統計的な手法を導入し，主として漁獲圧による動態を論じている．それゆえ，漁獲圧によって真に資源が変動している魚種の資源管理には成功するが，環境要因による場合は失敗する．この意味において，我々は魚種毎に環境・漁獲圧いずれの要因を主として現在の資源が変動しているのかをまず知ることが大切である．

過去の漁業を振り返るとき，しばしば一枚の図に漁獲量とCPUE（努力当り漁獲量）の時系列図が描かれる（田中，1985）．例えば，漁場開発に始まり，漁具の改良が進むにつれてCPUEが増加し，同時に漁獲量も増加，その後，漁獲圧の影響が大きい場合には，まずCPUEが減少，あとを追って漁獲が減少し，乱獲状態になったと判断される．このような議論は非常に簡単なように思えるが，環境・漁獲圧いずれの影響が大きかったのか，環境の良かった時期はいつであったのかを判断できる情報を含んでいる．その情報とは，漁獲量とCPUE（～資源量）の各変動パターンが示す位相関係（または位相差）である．

我々には，対象とする魚種の再生産関係，すなわち内的自然増加率や環境収容量が不明な場合がほとんどである．内的自然増加率の異なる魚種は，全く同じ大きさの漁獲圧（または環境の影響）を受けて資源が減少しても，資源の回復する時間は個々に異なるであろう．また，何らかの要因によって資源が増加しても環境収容量に近づくにつれて，その増加率は次第に押えられるであろう．このように考えれば，漁獲量やCPUEの増加・減少率，その結果として現れる両変動パターンの位相関係は，各魚種がもつ内的自然増加率と環境収容量の情報も陰に表現していることになる．もし，我々がこのような資源動態の力学特性を予め知っておけば，環境要因による資源量変動の有無や現在の資源レベルを知る手がかりを得ることができる．

そこで，本論では理想的な環境・漁獲圧変動で強制される資源動態モデルを用いて，各強制変動と漁獲量及び資源量変動の位相関係を内的自然増加率の違いによって整理し，その特徴を記述する．そして，得られた漁獲量と資源量（～CPUE）の変動パターンから逆に，環境要因として良い・悪い時期を推測できるか否かをまとめる．

Laboratory of Marine Environmental Science, Graduate School of Marine Science Fisheries, Hokkaido University
（北海道大学大学院水産科学研究科資源環境科学講座）

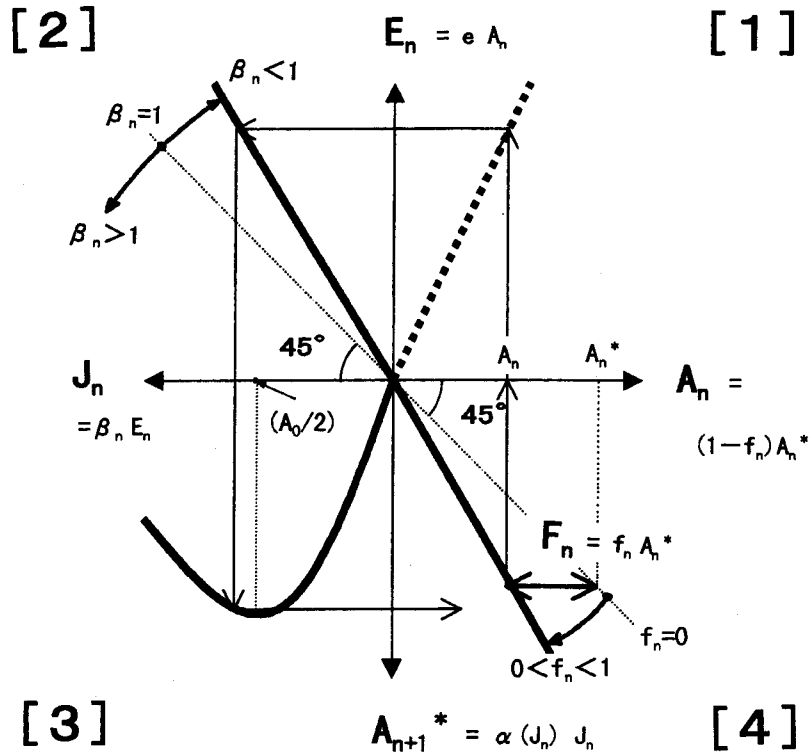

Fig. 1. Schematic view of 3-stage life-history model ($A_n \rightarrow E_n \rightarrow J_n \rightarrow A_{n+1}^*$) used in this study (see text). The ordinate of one life stage becomes the abscissa of the next.

資源の動態モデル

本論で用いた3段階の生活史モデル（産卵親量→産卵量→仔稚魚量→次世代の産卵可能な親魚量）の概略図を Fig. 1 に示す．まず，n 世代における産卵可能な親魚量（または加入量）を A_n^*，この世代の漁獲率を f_n とすると，漁獲量 F_n と漁獲を免れた産卵親魚量 A_n はそれぞれ次式で表される（Fig. 1 の第4象限）．

$$F_n = f_n A_n^* \tag{1}$$

$$A_n = (1-f_n)A_n^* \tag{2}$$

産卵親魚量 A_n の平均的な単位産卵量を e とすると，n 世代における（仮の）産卵量 E_n は（Fig. 1 の第1象限）

$$E_n = eA_n \tag{3}$$

となる．ここで，産卵から仔稚魚までを含む幼魚期における生残率を β_n とすると，生き残る仔稚魚量 J_n は（Fig. 1 の第2象限）

$$J_n = \beta_n E_n \tag{4}$$

で表される．(4) 式において，平均的な生残よりも悪い場合を $0<\beta_n<1$，良い場合を $\beta_n>1$ とすれば，β_nの時間変化で環境要因による資源量変動を表現することができる．次に，n 世代で生き残った仔稚魚量 J_n から $n+1$ 世代の産卵可能な親魚量 A_{n+1}^* に至るまでの再生産率 α を J_n の関数とすると（Fig. 1 の第3象限）

$$A_{n+1}^* = \alpha(J_n)J_n \tag{5}$$

となる．本モデルでは Logistic 型の密度効果を考慮し

$$\alpha(J_n) = a(J_0 - J_n)/J_0 \tag{6}$$

とした．ここで，a は最大の再生産率（$J_n=0$ のとき），J_0 は環境に存在できる最大の仔稚魚量になる．なお，(6) 式の仮定が Logistic 型となる理由は磯田 (2000) を参考にされたい．(5) 式に (2) (3) (4) (6) 式を代入し整理すると，A_n^* と A_{n+1}^* の再生産関係を示す次式を得る．

$$A_{n+1}^* = (\gamma+1)\beta_n\{A_0 - \beta_n(1-f_n)A_n^*\} \times (1-f_n)A_n^*/A_0 \tag{7}$$

ここで，$\gamma = ae-1$，$A_0 = J_0/e$ である．Logistic 型の再生産関係において，γ は内的自然増加率，A_0 は環境に存在できる最大の親魚量（本論では最大環境収容量と呼ぶ）となる．なお，本モデルの環境収容量 K は A_0 と γ の関数で表されて $K=\gamma A_0/(\gamma+1)$，そして $\beta_n=1$ の条件のもと，$A_n^*=A_0/2$ で A_{n+1}^* は極大値をとる．

幼魚期の生残率 β_n の周期変動に対する水産資源の応答

本節では最大環境収容量 A_0 の変化が十分に小さく，漁獲圧よりも幼魚期の生残に伴う資源量変動が支配的な場合を考える．

幼魚期の生残率 β_n の周期変動（ω：周波数）を簡単な正弦曲線で表すと

$$\beta_n = 1 + b\sin(n\omega) \tag{8}$$

となる．一例として，$A_0=4.0, f_n=0.3$ の固定値のもと，生残率の振幅を $b=0.4$, 周期 $T(=2\pi/\omega)$ を $T=20$ 世代としたモデル計算結果を Fig. 2 に示した．図の上段は β_n の時間変化を，下段は内的自然増加率 γ を 0〜2 まで変化させたときの A_n^* 分布であり，極大期を太い実線で示した．なお，図には示していないが，$\gamma>2.5$ では A_n^* 変動にカオスが生じ，本論ではこの領域の議論は行なわない．Fig. 2 をみると同じ生残率 β_n の変動においても，γ の違いにより資源（親魚量）の応答特性が異なっていることがわかる．その特徴をまとめると以下のようになる．

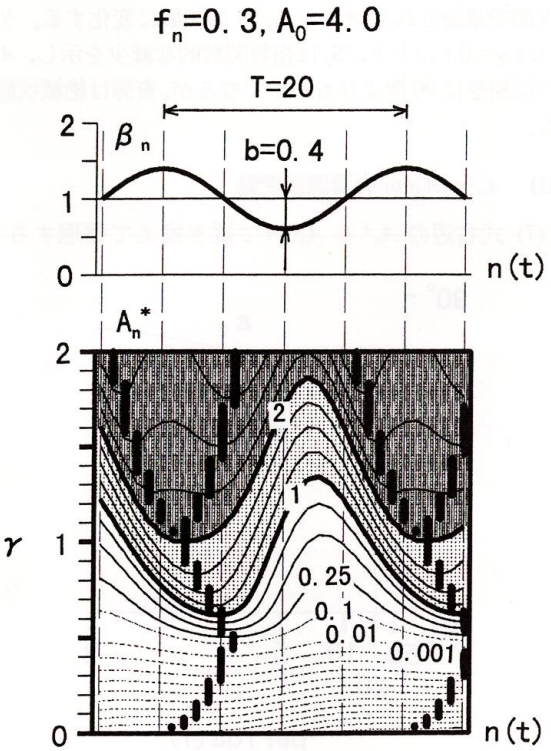

Fig. 2. The upper panel is the variation of survival rate β_n with a period of $T=20$. The lower panel is the temporal variations of $A_n^*(\gamma)$ as response to β_n-variation. Thick solid line shows the maximum value of A_n^* at each γ.

(1) γ が大きい魚種ほど，A_n^* 量が相対的に大きい．

(2) $\gamma\sim0.5[A_n^*\sim A_0/(5\sim100)]$ 付近で，β_n と A_n^* の極大期の位相差は約 90 度となる．

(3) $\gamma<0.5$ $[A_n^*\sim A_0/(100\sim1{,}000)]$ で，β_n と A_n^* の極大期の位相差は小さくなるが，A_n^* 量は常に減少傾向にある．

(4) $0.5<\gamma<1.5$ $[A_n^*\sim A_0/(2\sim5)]$ で，β_n と A_n^* の極大期の位相差は小さくなるが A_n^* の極大期付近に 2 ピークが現れる．

(5) $\gamma>1.5$ $[A_n^*\sim A_0/(1.5\sim2)]$ で，A_n^* の極大期は 2 ピークを保ったまま，β_n と A_n^* は逆位相の関係にある．

そこで次節では，（最大）環境収容量よりも十分小さな資源量変動 $A_n^*\ll A_0$ の場合と資源極大付近の資源量変動 $A_n^*\sim A_0/m$（ここで m は 2 付近の値）の場合に分けて，上述の β_n と A_n^* の位相関係について議論する．

I) $A_n^*\ll A_0$ の資源量変動

$A_n^*\ll A_0$ の仮定において，(7) 式の｛　｝の中は $\{A_0\}$ で近似され，(7) 式は次のように変形される．

$$A_{n+1}^* = (\gamma+1)\beta_n(1-f_n)A_n^* \tag{9}$$

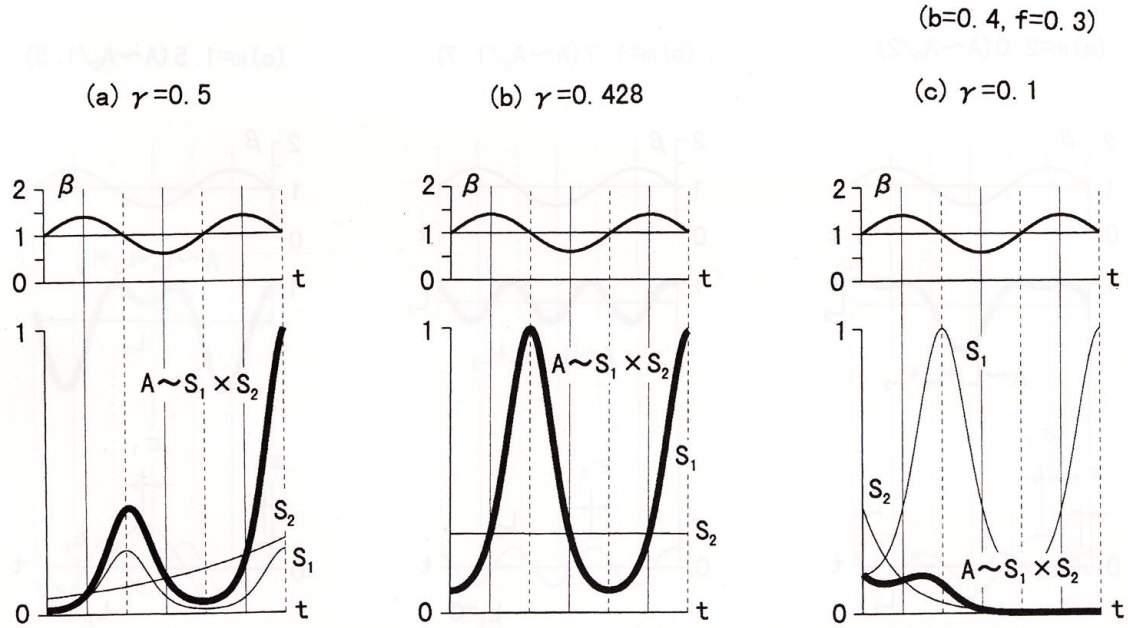

Fig. 3. Temporal patterns of S_1, S_2 and $A\sim S_1\times S_2$ of eq. (12), forced by the periodical β-variation, when the stock is low ($A\ll A_0$) at $\gamma=0.5$ (a), 0.428 (b) and 0.1 (c).

ここで，(9) 式の離散時間 n を連続時間 t に置き換え，$(A_{n+1}{}^*-A_n{}^*)/1$ 世代$\sim dA/dt$，$A_n{}^*\sim A(t)$，$\beta_n\sim\beta(t)$，$f_n\sim f(t)$ とすると，次の線形微分方程式で近似することができる．

$$dA/dt=\{(\gamma+1)\beta(1-f)-1\}A \qquad (10)$$

この (10) 式を振幅 b で周期 ($=2\pi/\omega$：ω は周波数) 変動する生残率

$$\beta(t)=1+b\sin(\omega t) \qquad (11)$$

の強制条件のもとに解く．$A(t)$ の振幅値は初期値に依存するため，ここでは位相に関わる解の形のみを示すと

$$\begin{aligned}A(t)&\sim\exp[-(\gamma+1)(1-f)b\cos(\omega t)/\omega]\\&\qquad\times\exp[\{(\gamma+1)(1-f)-1\}t]\\&=S_1\times S_2 \qquad (12)\end{aligned}$$

の 2 項の掛け合わせの形となる．S_1 の項は sin 波の生残率 β に対し，親魚量 A が cos 波で変動して 90 度の位相差のあること，さらに，cos 波が指数関数の変数であることから A は急増急減することを示している．この 90 度の位相差は，生残の良い ($\beta>1$) 期間が A の多い期間ではなく，A の増加期に対応するためと解釈される．S_2 の項は時間の経過に伴う指数関数的な増減を示し，$\{(\gamma+1)(1-f)-1\}<1$ の場合に A は減少を続けることがわかる．

Fig. 2 の例と同じパラメータ値，$\omega=2\pi/20$, $b=0.4$, $A_0=0.4$, $f=0.3$ を用いて，(12) 式の関係を示したのが Fig. 3 である．Fig. 3(a)～(c) の各ケースは，それぞれ $\{(\gamma+1)(1-f)-1\}<1, \sim1, >1$ となる γ を選択した結果である．各ケースとも上段が β の周期強制，下段は $S_1\cdot S_2\cdot A\sim S_1\times S_2$ の応答をこれら 3 要素の中の最大値で規格化し，時系列として示している．ケース (b) $\gamma=0.1428$ のときに $S_2\sim1$，それゆえ $A\sim S_1$ となり，A の変動は β よりもちょうど 90 度遅れた急増急減を示す．ケース (a) $\gamma=0.5$ のとき，A (または S_2) は指数関数的な増加を示すため，時間の経過と伴に次節で議論される $A_n{}^*\sim A_0/m$ の領域に変化する．ケース (c) $\gamma=0.1$ のとき，S_2 は指数関数的な減少を示し，A と β の位相差は 90 度よりも小さくなるが，資源は絶滅状態へ進む．

II) $A_n{}^*\sim A_0/m$ の資源量変動

(7) 式右辺の $A_n{}^*$ を A_0/m で置き換えて整理すると，

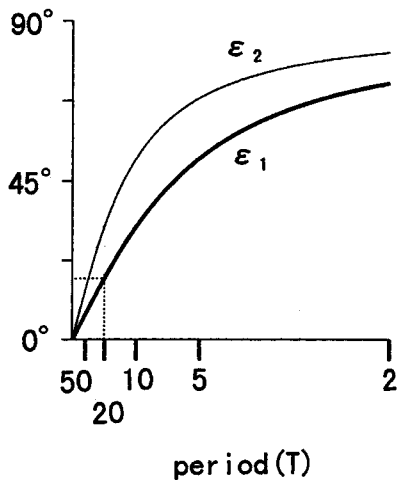

Fig. 4. Phase lag curves of ε_1 and ε_2 as the function of forcing period T.

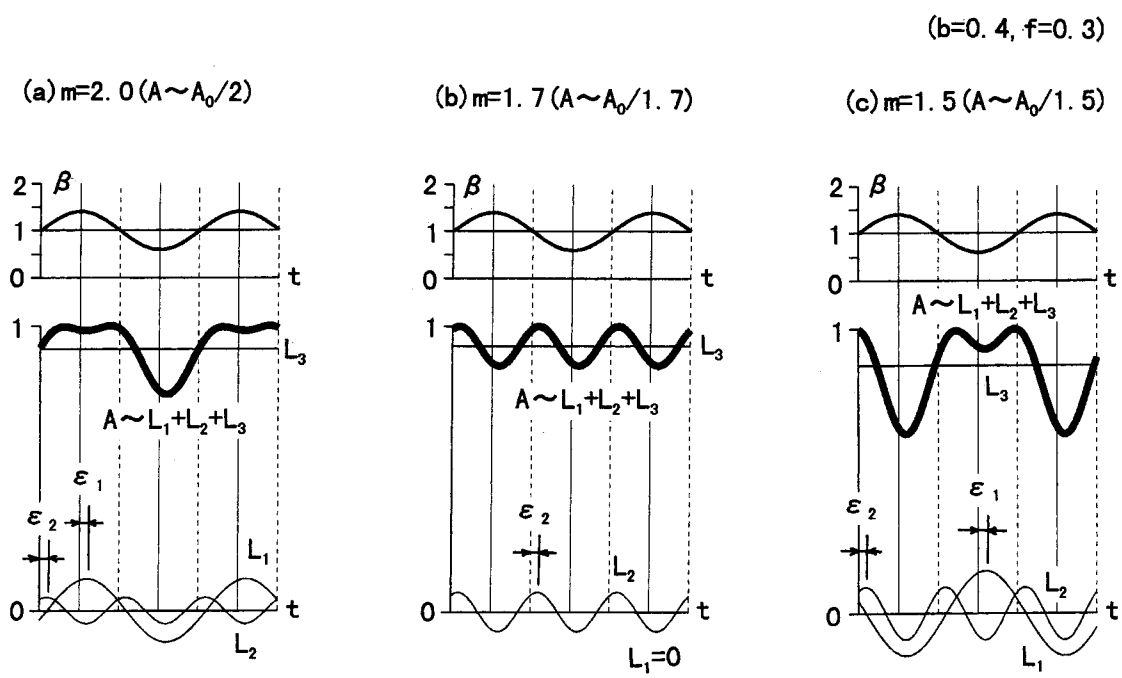

Fig. 5. Temporal patterns of L_1, L_2, L_3 and $A\sim L_1+L_2+L_3$ of eq. (15), forced by the periodical β-variation, when the stock becomes maximum ($A\sim A_0/2$) at $m=2.0$ (a), 1.7 (b) and 1.5 (c).

次式に変形される．

$$A_{n+1}{}^{*}=(\gamma+1)\beta_n\{m-(1-f_n)\beta_n\}(1-f_n)A_0/m^2 \quad (13)$$

そしてI) $A_n{}^{*} \ll A_0$ の場合と同様に，(13) 式を微分方程式で近似すると

$$dA/dt=\beta(\gamma+1)\{m-(1-f)\beta\}(1-f)A_0/m^2-A \quad (14)$$

となる．この (14) 式を (11) 式の強制条件のもとに解き，位相に関わる解の形のみを示すと

$$\begin{aligned} A(t) \sim & 2(m-2+f)b\sin(\omega t-\varepsilon_1)/(1+\omega^2) \\ & +(1-f)b^2\cos(2\omega t-\varepsilon_2)/(1+4\omega^2) \\ & +\{2(m-1)-(1-f)b^2\} \\ = & L_1+L_2+L_3 \end{aligned} \quad (15)$$

の3項の足し合わせの形となる．ここで

$$\varepsilon_1=\tan^{-1}(\omega),\ \varepsilon_2=\tan^{-1}(2\omega) \quad (16)$$

である．ε_1 と ε_2 は強制周期 $T(=2\pi/\omega)$ のみの関数であり，これらの位相遅れを T の関数として Fig. 4 に示した．長周期変動の極限 ($\omega\sim 0$) において，β と A は同位相となり，短周期変動の極限 ($\omega\sim\infty$) において，A の位相は β よりも90度遅れる．例として示した $T=20$ 世代の位相遅れは $\varepsilon_1\sim 17.4^{\circ}$ となり，L_1 の変動は β に対して $T\times(\varepsilon_1/360^{\circ})$ ～1世代程度の遅れを示す．L_1 の項は sin 波の生残率 β に対し，上述した ε_1 の位相遅れがあるものの同周期の応答を示し，L_2 の項は環境収容量付近の非線型性から発生する倍潮（強制周期の半分）の変動を表している．L_3 の項は時間変化しない定数である．

先と同様に $\omega=2\pi/20$, $b=0.4$, $A_0=0.4$, $f=0.3$ のパラメータを用いて，(15)(16) 式の関係を示したのが Fig. 5 である．Fig. 5(a)～(c) の各ケースは，L_1 項の符号を左右する $(m-2+f)>0, \sim 0, <0$ となる m を選択した結果である．各ケースとも上段が β の周期強制，下段は $L_1\cdot L_2\cdot L_3\cdot A \sim L_1+L_2+L_3$ の応答をこれら4要素の中の最大値で規格

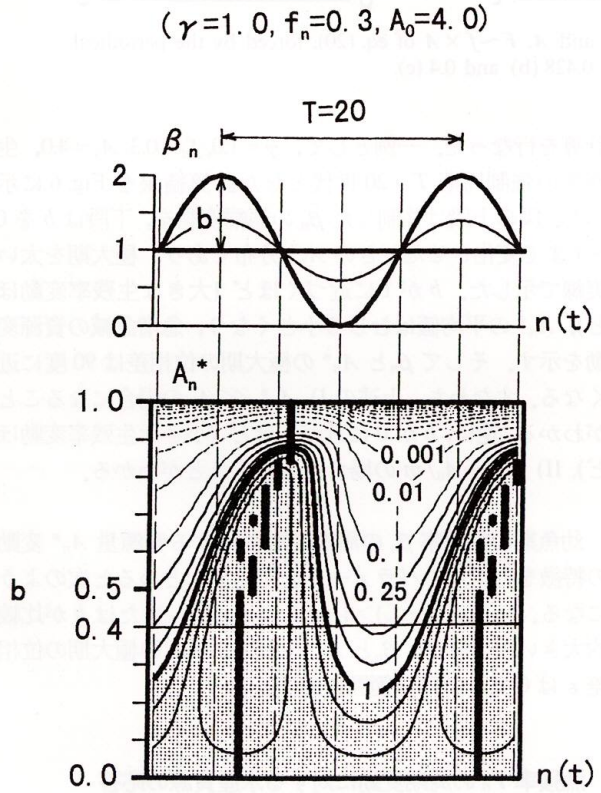

Fig. 6. The upper panel is the example of β_n-variation ($0<b<1$) with a period of $T=20$. The lower panel is the response of $A_n{}^{*}$ as the function of b. Thick solid line shows the maximum value of $A_n{}^{*}$ at each b.

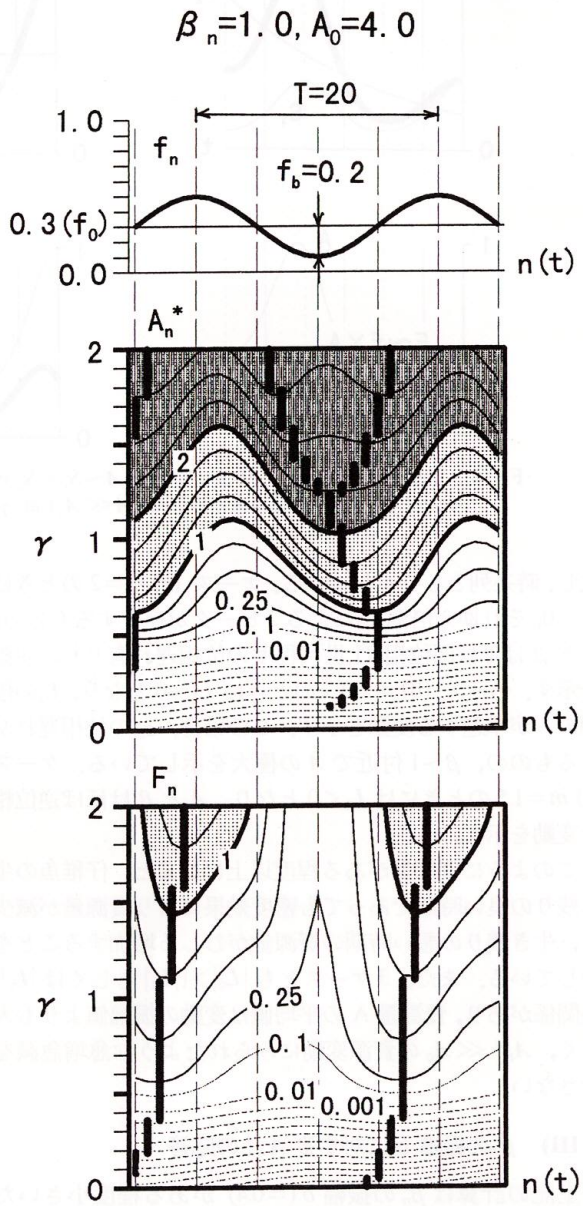

Fig. 7. The upper panel is the variation of fishing rate f_n with a period of $T=20$. The lower two panels are the temporal variations of $A_n{}^{*}(\gamma)$ and $F_n(\gamma)$ as response to f_n-variation. Thick solid line shows the maximum value of $A_n{}^{*}$ and F_n at each γ.

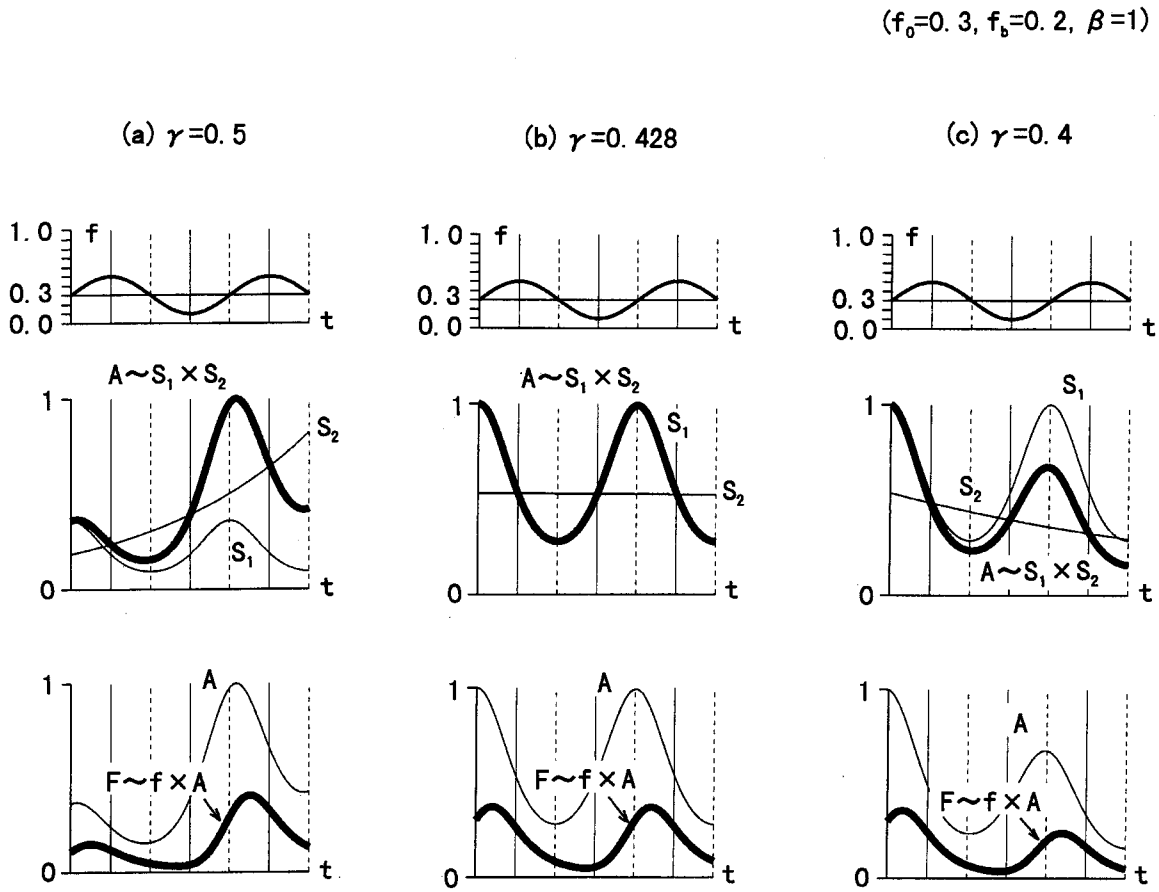

Fig. 8. Temporal patterns of S_1, S_2 and $A \sim S_1 \times S_2$ of eq. (19) and A, $F \sim f \times A$ of eq. (20), forced by the periodical f-variation, when the stock is low ($A \ll A_0$) at $\gamma=0.5$ (a), 0.428 (b) and 0.4 (c).

化し，時系列として示している．ケース (a) $m=2$ のときに $L_1>0$, それゆえ倍潮 L_2による 2 ピークが存在するものの，A と β はほぼ同位相（1 世代程度の位相遅れ有り）の変動を示す．ケース (b) $m=1.7$ のときに $L_1 \sim 0$ となり，L_2の倍潮のみが卓越する変動を示す．この場合，ε_2 の位相遅れがあるものの，$\beta \sim 1$ 付近で A の極大を示している．ケース (c) $m=1.5$ のときには $L_1<0$ となり，A と β はほぼ逆位相の変動を示す．

このように資源量がある程度以上になると，仔稚魚の生き残りの良い時期であっても密度効果により資源量が減少し，生き残りの悪い時期の資源量がむしろ増加することを示している．また，3 ケースとも $|L_3|>(|L_1|$ もしくは $|L_2|)$ の関係があり，資源量 A の平均値は変動の振幅値よりも大きく，$A_n^* \ll A_0$ の資源変動にみられたような急増急減を示さない．

III) β_nの振幅 b に対する A_n^* の応答

上記の計算は β_n の振幅 b (=0.4) がある程度小さいため，γ の値に対応する資源量 A_n^* の大きさで分類することができた．しかし，A_n^* の大きさは生残率 β_n の振幅 b の大きさによっても変化する．そこで，本節では再び (7) 式を用いて，γ が一定条件のもとで b の値を変化させたモデル計算を行なった．一例として，$\gamma=1.0, f_n=0.3, A_0=4.0$, 生残率の強制周期 $T=20$ 世代とした計算結果を Fig. 6 に示した．図の上段は強制した β_n の振幅変動を，下段は b を 0 ～1 まで変化させたときの A_n^* 分布であり，極大期を太い実線で示した．b が 1 に近づくほど（大きな生残率変動ほど），A_n^* の平均値はむしろ小さくなり，急増急減の資源変動を示す．そして β_nと A_n^* の極大期の位相差は 90 度に近くなる．すなわち，上述の I) $A_n^* \ll A_0$ の場合になることがわかる．逆に，b が 0 に近づくほど（小さな生残率変動ほど），II) $A_n^* \sim A_0/m$ の場合に近づくことがわかる．

幼魚期の生残率 β_n の周期変動に対する資源量 A_n^* 変動の特徴をモデルのパラメータを用いてまとめると次のようになる．$(\gamma+1)(1-f_n)>1$, $A_n^*<A_0/2.0$, または b が比較的大きい場合には，β_nと A_n^*（または F_n）の極大期の位相差 ε は $0^\circ<\varepsilon<90^\circ$ の範囲にある．

漁獲率 f_n の周期変動に対する水産資源の応答

本節のモデルにおいても最大環境収容量 A_0 の変化が十分に小さいと仮定し，幼魚期の生残よりも漁獲圧に伴う資源量変動が支配的な場合を考える．一般に，漁獲圧が周期

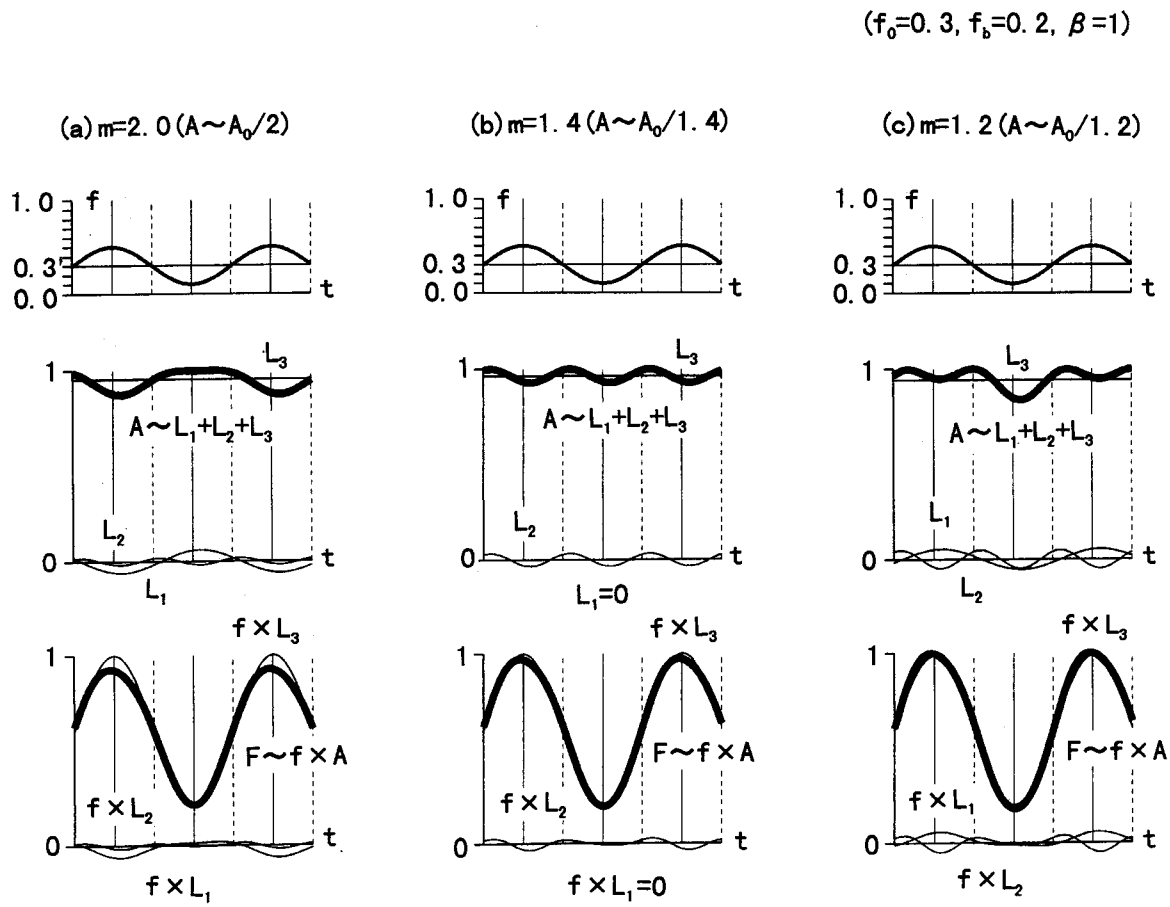

Fig. 9. Temporal patterns of L_1, L_2, L_3 and $A \sim L_1+L_2+L_3$ of eq. (21) and A, $F \sim f \times A$ of eq. (22), forced by the periodical f-variation, when the stock becomes maximum ($A \sim A_0/2$) at $m=2.0$ (a), 1.4 (b) and 1.2 (c).

的に変動することは考え難いが，過去2回の世界大戦中一時的に漁獲圧が減った状況，漁場開発初期や乱獲に至る過程を部分的に表現したモデルとして理解されたい．なお，本モデルでは漁獲圧の変動を漁獲率の変動として表現する．

漁獲率 f_n の周期変動を簡単な正弦曲線で表すと

$$f_n = f_o + f_b \sin(n\omega) \tag{17}$$

となる．$\beta_n=1.0$, $A_0=4.0$ の固定値のもと，平均の漁獲率を $f_o=0.3$, 振幅を $f_b=0.2$, 周期 $T(=2\pi/\omega)$ を $T=20$ 世代とし，(7) 式を用いたモデル計算結果を Fig. 7 に示した．図の上段は強制した f_n の変動を，中下段は γ を 0～2 まで変化させたときの A_n^* と F_n の分布であり，極大期を太い実線で示した．同じ漁獲率 f_n 変動においても，γ の違いにより A_n^* の応答が異なっている点は生残率 β_n 変動の場合とよく似ている．本モデル計算で最も注目すべき点は，A_n^* と F_n の極大期が大きく異なっていることである．これらの特徴をまとめると以下のようになる．

(1) f_n 極小期を β_n の極大期に対応すると考えれば，A_n^* 変動は Fig. 2 と全く同じ特徴を示している．これは (7) 式をみれば，f_n と β_n の各パラメータが同じ働きをすることから理解できる．

(2) F_n の極大期は f_n 極大期の前，90 度の範囲内にある．

(3) γ が大きいほど F_n の変動振幅は大きく，F_n と f_n の極大期は一致する傾向にある．

これらの特徴は，漁獲圧が大きく働いている魚種の場合，漁獲量変動は必ずしも資源量変動を代表していないこと，両変動の位相関係は内的自然増加率が異なる魚種毎に異なることを示している．次節では，生残率変動と同様に，$A_n^* \ll A_0$ と $A_n^* \sim A_0/m$ の場合に分けて，$f_n \cdot F_n \cdot A_n^*$ の3者の位相関係について議論する．

I) $A_n^* \ll A_0$ の資源・漁獲量変動

この場合の近似式は (10) 式と同じである．(10) 式を平均の漁獲率 f_o, 振幅 f_b で周期 ($=2\pi/\omega$: ω は周波数) で変動する漁獲率

$$f(t) = f_o + f_b \sin(\omega t) \tag{18}$$

の強制条件のもとに解き，位相に関わる解の形のみを示すと

$$\begin{aligned} A(t) &\sim \exp[(\gamma+1)(1-f_o) f_b \cos(\omega t)/\omega] \\ &\quad \times \exp[\{(\gamma+1)(1-f_o)-1\} t] \\ &= S_1 \times S_2 \end{aligned} \tag{19}$$

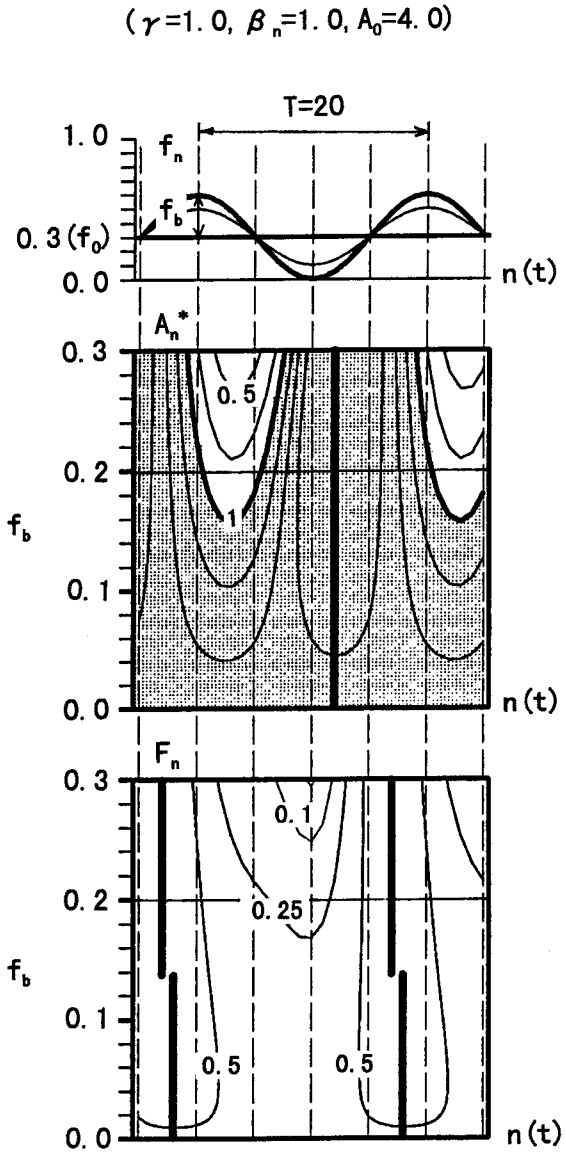

Fig. 10. The upper panel is the example of f_n-variation ($0<f_b<0.3=f_0$) with a period of $T=20$. The lower two panels are the responses of A_n^* and F_n as the function of f_b. Thick solid line shows the maximum value of A_n^* and F_n at each f_b.

となる．この (19) 式は (12) 式の β を $-f_b$ で置き換えたものと同じである．そのため，$A(t)$ 変動の特徴は先の述べた生残率変動の場合と同じであり，ここでは議論を繰り返さない．漁獲量を F とすると，(1) 式の関係より

$$F=fA \sim f(S_1\times S_2) \tag{20}$$

となる．ここで，資源が長期的に増加・停滞・減少する 3 ケースの γ(=0.5, 0.428, 0.4) を選択し，(19)(20) 式を用いた f (上段)，$S_1\cdot S_2\cdot A\sim S_1\times S_2$ (中段)，$F\cdot A$ (下段) の各時系列を Fig. 8(a)〜(c) に示した．いずれのケースにおいても，下段に示した F の極大期は f 極大期の前 90 度の範囲内にあることがわかる．これは f 極小期の後 90 度の範囲内で A が極大期をもつために，f と A の積で表現される F の極大期は必ず f 極小期の後 90〜180 度 (または f 極大期の前 90 度) の範囲内となる．

II) $A_n^*\sim A_0/m$ の資源・漁獲量変動

この場合の近似式も (14) 式と同じであり，(18) 式の強制条件のもとに解き，$A(t)$ の位相に関わる解の形を示すと

$$\begin{aligned}A(t)\sim&\{2(1-f_o)-m\}f_b\sin(\omega t-\varepsilon_1)/(1+\omega^2)\\&+f_b^2\cos(2\omega t-\varepsilon_2)/(1+4\omega^2)\\&+\{2(m-1+f_o)(1-f_o)-f_b^2\}\\=&L_1+L_2+L_3\end{aligned} \tag{21}$$

となる．ここで，ε_1 と ε_2 の位相は (16) 式と同じである．また，漁獲量は

$$\begin{aligned}F=&fA\\\sim&f(L_1+L_2+L_3)\end{aligned} \tag{22}$$

となる．

(21)(22) 式を用いて，(a) $m=2.0$, (b) $m=1.4$, (c) $m=1.2$ における f (上段)，$L_1\cdot L_2\cdot L_3\cdot A\sim L_1+L_2+L_3$ (中段)，$F\cdot f\times L_1\cdot f\times L_2\cdot f\times L_3$ (下段) の各時系列を Fig. 9 に示した．3 ケースとも $|L_3|>(|L_1|$ もしくは $|L_2|)$ の関係があるため，漁獲量は $F\sim f\times L_3$ (L_3 は定数) で近似される．すなわち，f の極大期と F の極大期はほぼ一致することになる．

III) f_n の振幅 f_b に対する A_n^* の応答

生残率 β_n の振幅値 b の変化に対する A_n^* の応答と同様に (7) 式を用いて，γ が一定で f_n の振幅 f_b を変化させた場合の計算を行なった．一例として，$\gamma=1.0$, $\beta_n=1.0$, $A_0=4.0$, $f_o=0.3$，漁獲率の強制周期 $T=20$ 世代としたモデル計算結果を Fig. 10 に示す．図の上段は強制した f_n の振幅変動を，中下段は f_b を $0\sim f_o$ まで変化させたときの A_n^* と F_n の分布であり，極大期を太い実線で示した．f_b が f_o に近づくほど，A_n^* の変動振幅は大きくなるが，一方で f_n が小さくなる資源回復期があるため平均的な A_n^* 量は大きく変化せず，A_n^* の極大期も変化しない．したがって，F_nの極大期もほとんど変化しない結果となる．

漁獲率の周期変動に対する漁獲量 F_n 変動の特徴をまとめると次のようになる．F_n の極大期は必ず f_n の極大期の前 90 度の範囲内にあり，γ が大きな魚種ほど両者の位相は一致する傾向にある．

ま と め

「はじめに」でも述べたように，我々が比較的容易に得ることのできる資源情報は，漁獲量 F，産卵可能な親漁量 A の相対的な変動パターンを示す CPUE，そして $F/A(\sim f)$

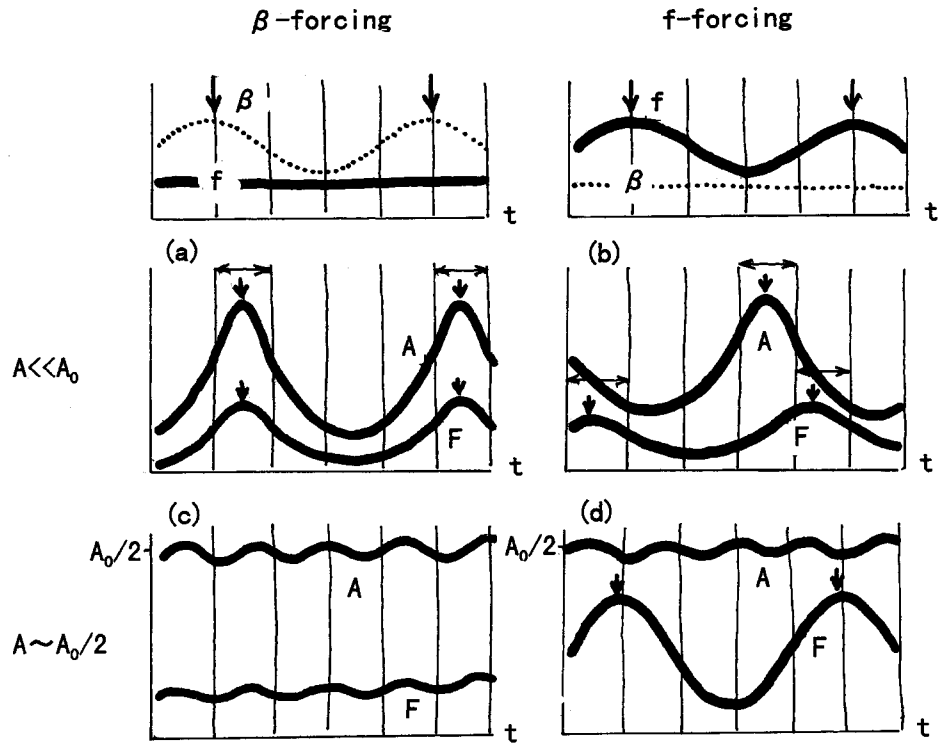

Fig. 11. Schematic patterns of fish stock: A and catch: F, forced by the periodical survival rate: β (left) or fishing rate: f (right) at the stock level of $A \ll A_0$ (a)(b) and $A \sim A_0/2$ (c)(d). Arrow shows the possible phase of maximum-value in each temporal variation.

から示唆される漁獲率 f の3つの時系列である．しかし，何らかの環境要因による幼魚期の生残率 β の変動パターンについてはよくわからない．そこで，既知の変動パターン F, A, f から β をどのように推測できるか（生残率の良い・悪い時期はいつであったのか）に注目し，本モデル結果をまとめてみたい．

Fig. 11 は左側が漁獲圧（f）よりも幼魚期の生残率（β）による資源量変動が支配的な場合（β-forcing），右側が逆に漁獲圧による資源量変動が支配的な場合（f-forcing）である．上段に示した破線 β の変動が今，我々には未知である．中段 (a)(b) は $A \ll A_0$ の場合，下段 (c)(d) は $A \sim A_0/2$ の場合における A と F の変動パターンを模式的に示している．

(a) A と F はほぼ同位相で似たような変動パターンを示し，豊漁・不漁期の A（または F）量が数倍以上違う場合：資源量変動に対する f の影響は小さいと判断され，β の良い時期は豊漁期の前90度の範囲内にあると推測される．

(b) A と F の位相差は大きいものの，両者は似たような周期の変動を示し，豊漁・不漁期の A（または F）量が数倍以上違う場合：f の極小期→極大期の間において，$A \rightarrow F \rightarrow f$ の順に各極大期が変化していれば，資源量変動に対する β の影響よりも f の影響が大きいと判断される．

(c) A と F は同位相の似たような変動パターンを示すが，変動の振幅値が平均値よりも十分小さい場合：資源量は環境収容量に近い状態にあると判断されるが，A（または F）の時系列から β 変動の有無，そして β の良い・悪い時期を推定することは困難である．これは密度効果による倍潮変動が A の時系列に現れている可能性があり，誤った β 変動を推測してしまうためである．

(d) A は時間的に安定した資源を示し，f と F が良く似た変動パターンを示す場合：ケース (c) と同様に，資源量は環境収容量に近く，β 変動の有無を判断することは困難である．

このようにケース (c)(d) の状態であれば，環境要因による資源量変動の有無の判断は難しい．しかし，これは環境や漁獲の影響があっても資源が比較的安定しているためであり，注意深い資源管理の必要のないことを示す．多くの浮魚資源はケース (a) または (b) の状態にあると思われ，位相関係から各魚種はどちらの状態に近いかを判断する必要がある．例えば，太平洋のマイワシ資源は明らかにケース (a) に近く，近年のマイワシ漁獲量の激減要因は1988年以降における稚魚期の低い生残率にあることが推測されている (Watanabe et al., 1995)．

また，環境要因による資源変動には，本論でモデル化した幼魚期の生残率 β の変動以外に，環境収容量 K（または A_0）の変動に伴う場合も考えられる．磯田 (2000) は ω/γ（～変動周波数/内的自然増加率）の値に応じて，0～90度の範囲内で A の位相が K（または A_0）よりも遅れることを示した．このような位相関係は，上述の β 変動を K 変動に

置き換えればケース (a) の場合と同じになる．よって，ケース (a) のような A や F が観察された場合，環境収容量の大きな時期が豊漁期の前90度の範囲内にあったとも推測される．

引 用 文 献

磯田　豊 (2000)　環境収容量の時間変化に対する水産資源の応答．水産海洋研究，**64**, 71-76.
川崎　健 (1992)　魚の資源学．大月書店．
田中昌一 (1985)　水産資源学総論．恒星社厚生閣．
Watanabe, Y., H. Zenitani and R. Kimura (1995) Population decline of the Japanese sardine *Sardinops melanostictus* owing to recruitment failures. Can. J. Fish. Aquat. Sci., **52**, 1609-1616.