

三重水技研報
Bull. Fish. Res. Inst.
Mie
No. 7 1997

ISSN 0913-0012

BULLETIN OF
FISHERIES RESEARCH
INSTITUTE OF MIE
No. 7
DECEMBER 1997

三重県水産技術センター研究報告

第 7 号

平成9年12月

三重県水産技術センター

三重県志摩郡浜島町
FISHERIES RESEARCH
INSTITUTE OF MIE

HAMAJIMA, MIE, JAPAN

三重県水産技術センター研究報告

第 7 号

目 次

イセエビの資源評価と漁業管理

..... 山川 卓 1

Bulletin of Fisheries Research Institute of Mie

No. 7

Contents

YAMAKAWA, T. :

Stock assessment and fisheries management of the Japanese spiny lobster

Panulirus japonicus. 1

イセエビの資源評価と漁業管理**1

山川 卓

Stock Assessment and Fisheries Management of
the Japanese Spiny Lobster *Panulirus japonicus*

Takashi YAMAKAWA

In order to produce an optimal management policy for the Japanese spiny lobster *Panulirus japonicus* fishery, stock assessment was conducted for the lobster tangle net fisheries at Wagu, Mie Prefecture, Japan. Using this as an exemplified case, the optimal fishing policy is discussed for the effective and sustainable utilization of stocks.

1. Introduction

Information in the literature on the life history, ecological features, stock construction, and reproduction of the Japanese spiny lobster is summarized, and the basic requirement for the management is discussed. Because the stock structure and the quantitative relationship with reproduction are still obscure and that fisheries management measures at present vary between different localities, it is necessary to manage the recruited stock at each locality for its effective utilization and ensure the spawning per recruit.

2. Estimation of growth, age composition, and recruitment from multiple length frequency analysis

Based on the separation of different cohorts from compound multiple normal distributions, a method is proposed which can simultaneously analyze multiple length frequency data sets even when there is fluctuation in the interannual growth rate. Growth, age composition, and recruitment of the Japanese spiny lobster were estimated from the analysis. Each parameter can be estimated independently by data set or as common for some or all of the data sets. Parameters can also be selected as unknown or can be fixed. Through simultaneous analysis of the multiple data sets, accurate estimations can be carried out allowing the utilization of the full information inherent in the data. Carapace-length frequency data sets at Wagu, of 62,605 individuals over five fishing seasons from October to April of 1990-1991 to 1994-1995 were analyzed. Judging from the comparison of AIC values, optimality of the model increased through the introduction of variations to allow for interannual and seasonal growth fluctuations, shifts in the standard deviation with growth, and the total mortality coefficient for older age groups. From the estimated von Bertalanffy growth curves, the carapace length in October at each age after settlement as pueruli are calculated as: for males, 45.0mm for the 1st age, 62.4mm for the 2nd age, and 74.1mm for the 3rd age, and for females, 42.3mm for the 1st age, 56.2mm for the 2nd age, and 64.7mm for the 3rd age. Growth fluctuated from year to year, which suggests the presence of a density dependent process. The most prominent age group in the catch is the 2nd age group. Size selectivity of tangle nets for spiny lobster is inferred based on the recruitment process of

**1 東京大学学位審査論文(Thesis submitted for the degree of Doctor of Agriculture at the University of Tokyo, Dec. 1995.)

the 1st age groups during the fishing season and its fluctuation between years. The estimated growth rate is compared with those from the literature.

3. Stock assessment using an expanded DeLury's method

DeLury's method is expanded to fourteen maximum likelihood models to allow for variable catchability coefficients (q_i) according to environmental factors such as water temperature, lunar cycle, and the intensity of ocean waves. Nine statistical models are introduced with different probability distribution functions. Optimality of the models was examined by AIC, and the confidence intervals of the parameters estimated with likelihood ratio statistics. Numerical optimization was performed using the quasi-Newton method. Daily catch-effort-environment data of the Japanese spiny lobster tangle net fishery at Wagu for the fishing season from October 1990 to April 1991 are analyzed. AIC values greatly improved when variable catchability coefficients were assumed. Judging from the estimated parameter values, q_i is large in conditions such as when ① the water temperature is high, ② the phase of the moon is around the new moon, and ③ ocean waves are intense. The variation in q_i is probably attributable to changes in the activity of lobsters according to the fluctuation of environmental factors. As for the statistical models, the negative binomial model was optimal. This result adequately reflects the distributional nature of spiny lobsters in the field which shows a marked degree of aggregation, coupled with other features in the fishing activity. Although the confidence intervals of the estimated parameters are rather broad in the negative binomial model, those calculated through simultaneous analysis using a three-year data set are narrower as compared to those with single-year data set.

4. Stock assessment by statistical catch-at-age analysis using auxiliary information on separability

An assessment model is proposed which treats the multi-cohort analysis (VPA) and the expanded DeLury's method in a united form, and the stock size by year, age, and sex, catchability coefficient, and the selectivity curve are simultaneously estimated. This model corresponds to a statistical catch-at-age analysis with a generalized assumption for separability. Catchability coefficient F_{ijt} by each sex (for females: $l=0$, for males: $l=1$) of age j at t th day in year i is separated into a product of elements as follows and introduced to the basic fishing equation:

$$F_{ijt} = q_{it} \times \rho(L_{ijt}) \times X_{it},$$

where q , $\rho(L)$, and X represent the catchability coefficient, selectivity by size L , and fishing effort, respectively. The likelihood is described using a product of the conditional negative binomial distribution. For the catchability coefficient, model XIV in chapter 3 is utilized. A sigmoid curve is assumed for the selectivity curve. A sex ratio at the first age and virtual relationships for the number of individuals of the successive age groups of each cohort are introduced as restrictions. For natural mortality M , two different cases are introduced: ① M is estimated together with the other parameters, ② M is given as known. Daily catch-effort-environment data for the five years from October 1990 to April 1995 are applied. Annual catch amounts to 65,000–118,000 (mean 91,000) individuals, and the total number of boats operated each year is 2,593–3,447 boats·day (mean of 2,985 boats·day). A reasonable estimation was carried out which reflects shifts in catchability coefficient caused by variations of environmental factors and shifts in selectivity caused by growth of individuals. The initial stock (number of individuals) of each group was estimated, and numbers of individuals caught, natural mortality, and survived to the next year are specified. Annual catch rates estimated are: for the 1st age groups, 16.9–27.2% (male) and 9.9–21.1% (female), for the 2nd age groups, 63.6–74.4% (male) and 52.4–66.2% (female), for age groups older than the 3rd age, 66.7–79.1% (male) and 64.2–76.8% (female). The

estimated selectivity curve indicates that recruitment commences at around 40mm carapace length, then the selectivity greatly increases from 50mm to 60mm. When M is estimated as unknown (①), it converged to an unrealistic value ($M=0$). When M is given as known (②), initial stock number increased as M becomes large, while relatively stable values were obtained for the catchability coefficient and the selectivity curve irrespective of the value of M . Estimation error would be large if the catchability coefficient is simply separated into "a factor inherent by year" and "a factor inherent by age" as in the former way. Flexible models can be selected by the present method depending on the difference of available information and unknown parameters.

5. Fisheries management based on the optimal within fishing season allocation of fishing effort

Optimal in-season allocation of fishing effort was investigated for the spiny lobster tangle net fishery for the purpose of determining the most efficient utilization of the recruited stocks. Considering the shifts in the market price, catchability coefficient, and income from incidental catch *etc.* within a fishing season, optimal allocation of the fishing effort to maximize the total benefit of fishermen was calculated using the maximum principle. If the price of lobster is independent of the amount landed, a maximum fishing effort (30 boats/day) should be undertaken when the fishery is operated, while no fishing effort should be undertaken when the fishery is recessed. If the price of lobsters is affected by the amount landed, there could be cases when an intermediate level of fishing effort is preferable. Optimal in-season strategy is to operate a fishery when a higher marginal benefit from the fishery is expected by adding a unit of new fishing effort. If the revenue from spiny lobsters is considered exclusively as the objective function, fishing efforts should be concentrated during periods when the market price is higher. If operating costs, income from incidental catch and/or profits from side fisheries are also considered, the optimal allocation would vary according to a combination of the factors to be considered.

6. Optimal fishery policy of recruited stock considering the economic value of spawners

A management model is proposed which simultaneously determines the effective utilization of the recruited stock based on a fishing effort allocated over the life span and the security of the spawning stock. A term which represents the economic value of the spawning stock, [(economic value of an egg τ) \times (stock size of females by age) \times (fecundity of each female)], is added to the objective function of the dynamic optimization model derived in chapter 5. Daily catch number of individuals is described by a similar model as in chapter 4. Analysis was conducted for two cases using a maximum principle and a non-linear optimization technique: ① when a special single age group can be selectively caught, ② when several age groups are simultaneously caught. Maximum fishing effort should be undertaken when the "present fishery value" at each time is greater than the sum of the "future fishery value" and the "reproductive value", while no fishing effort should be undertaken otherwise. A fishing effort allocated over the life span is presented for a certain τ in case ① as a combination of the schedule for fishing within a fishing season for each age. Catch should be concentrated on older age groups for a larger τ . In case ②, an optimal selectivity curve is presented in addition to the optimal within season allocation of fishing effort. Raising the age at first capture through revision of the gear and depression of the total fishing effort are required in the actual fishery. A larger selected size is required for larger τ . Spawning per recruit (SPR) increases, while yield per recruit (YPR) decreases, with the increase of τ for both cases ① and ②. An optimal fishery policy which simultaneously attains the effective utilization of the recruited stock and the security of spawning stock can be

determined by manipulating the value of τ , if the necessary number of eggs for maintaining the stock or attaining a MSY is known.

7. Discussion

Methodology for the stock assessment and determination of fisheries management policies for the Japanese spiny lobster are discussed. For effective stock assessment, the introduction and extension of more convenient assessment methods such as CIR (Change in Ratio) method are important, together with the descriptive methods developed in this paper. For optimal fisheries management, discussion concentrates on the relationship between the effective utilization of the recruited stocks and the protection of reproductive stock, and on the importance of utilizing the concept of SPR and the life history parameters. Concrete management methods and the strategy required for their introduction are also discussed. Finally, management assuming for fluctuations of recruits and the utilization of Bayesian decision making are overviewed.

目 次

第1章 序 章

1.1	はじめに	7
1.2	論文の構成	7
1.3	記 号	8
1.4	一般生態と生活史	9
1.5	系群と再生産関係	10
1.5.1	系 群	10
1.5.2	再生産関係	11
1.6	イセエビの漁業管理	12
1.6.1	三重県における現状	12
1.6.2	イセエビ漁業管理の基本的な考え方	12
1.7	調査対象地区の概要	17

第2章 体長組成データの解析による成長の推定

2.1	はじめに	19
2.2	解析モデルの構成	19
2.2.1	基本構成	19
2.2.2	成長と標準偏差, 各群の出現率を表すモデル	20
2.2.3	パラメータの設定	21
2.3	適用データ	21
2.4	結果および考察	22
2.4.1	モデルの妥当性	22
2.4.2	漁獲物の齢別組成と加入および減耗	24
2.4.3	成 長	24
2.4.4	密度従属成長	25
2.4.5	刺網の漁獲選択性	26
2.5	論 議	27

第3章 拡張 DeLury 法による資源評価

3.1	はじめに	30
3.2	モデルの構成	30
3.2.1	拡張 DeLury 法の基本モデル	30
3.2.2	漁具能率を表すモデル	31
3.2.3	各種統計モデルの導入	31
3.2.4	パラメータの推定と妥当なモデルの選択, 信頼区間の解析	32
3.3	適用データ	33
3.4	漁具能率を表すモデルの検討	33
3.5	統計モデルの比較検討	34
3.6	論 議	36

第4章	複数年級群解析による資源評価	
4.1	はじめに	38
4.2	解析モデルの構成	38
4.3	適用データ	41
4.4	解析結果	41
4.5	論議	44
第5章	漁獲努力の漁期内最適配分に基づく漁業管理	
5.1	はじめに	46
5.2	解析モデル	46
5.2.1	目的関数	46
5.2.2	最大原理による最適解の導出	46
5.2.3	数値解析	47
5.3	適用データ	47
5.4	解析結果	48
5.5	論議	50
第6章	産卵資源量の経済価値を考慮した加入資源の最適漁獲方策	
6.1	はじめに	53
6.2	単一年級群の最適漁獲方策	53
6.2.1	モデルの構成と最適解の導出および数値解析	53
6.2.2	モデルの解釈	54
6.2.3	適用データ	55
6.2.4	解析結果	56
6.3	複数年級群の同時漁獲モデル	61
6.3.1	モデルの構成と最適解の導出および数値解析	61
6.3.2	適用データ	62
6.3.3	解析結果	63
6.4	論議	69
第7章	総合討論	
7.1	イセエビの資源評価	72
7.2	イセエビの望ましい漁業管理	72
7.2.1	加入資源の有効利用と再生産管理	72
7.2.2	具体的方策	74
7.2.3	管理方策の導入と将来に向けて	75
要約		77
謝辞		80
文献		81
付録		96

第1章 序 章

1.1 はじめに

イセエビは黒潮の影響を直接受ける太平洋沿岸の岩礁域における最も重要な水産資源のひとつである。

イセエビ属のエビ類は、日本沿岸ではイセエビ *Panulirus japonicus*, シマイセエビ *P. penicillatus*, カノコイセエビ *P. longipes*, ゴシキエビ *P. versicolor*, ケブカイセエビ *P. homarus*, ニシキエビ *P. ornatus* の6種が漁獲される(関口 1986, 1988)**。いずれの種も暖海性で、なかでも最も分布量の多いのがイセエビで、日本全体でのイセエビ類の年間漁獲量1,000~1,500トンの大部分を占める(井上 1981)。

イセエビは主に刺網で漁獲される(野中 1988)。イセエビは高価であり、沿岸漁業の対象資源のなかでもとくに重要な地位を占める。本論文で取り上げた三重県における漁獲金額は11.4億円(1993年)で、浮魚類や回遊魚を除くと魚種別ではアサリ類(25.0億)とアワビ類(18.2億円)に次ぐ金額となっている。

イセエビは定着性が強く大きくは移動しない(木下 1933, 宮村 1954, 野中 1959, Takagi 1972, 金盛・金丸 1985, 石田・田中 1985, 1986, 金盛 1988)ため、古くから漁業者同志の話し合いに基づく自主的な管理が地先ごとに実施されてきた。具体的な管理方策には様々なものがあり(例えば、木下 1933, 野中・大島 1957, 1958, 野中 1959, 大島 1962, 丸山・平井 1964, Nonaka and Fushimi 1994 など), 漁業調整上の理由によるもの, 漁業者の資源保護意識を反映したもの, 経験的な実施効果の体験に基づくものなど, 管理の導入契機や定着過程は地先ごとに異なる。

イセエビに関してはこれまで、棲所に関する生態や分布・移動, 食性, 成熟・産卵, 幼稚仔期の生態などの一般生態や飼育, 蓄養, 漁場造成, 漁獲性状などに関する研究が精力的になされてきた***。いくつかの地域においては, 資源尾数推定が試みられている(野中 1959, 石田・田中 1986, 金盛 1988, 木村・高梨 1993 など)。

しかし, 資源管理や漁業管理を直接取り扱った実証的研究は, 金盛(1987, 1988)の累積生産金額と費用直線の差に基づく検討例がみられる他は禁漁区の設定や休漁の効果の試算(野中・大島 1957, 1958, 野中 1959, 大島 1962, 丸山・平井 1964, 山川・野中 1988, Nonaka and Fushimi 1994)などごく一部に限られている。

1977年の200海里体制への移行を契機として, わが国沿岸周辺域における水産資源の管理と有効利用の重要性が再認識され, 多様な魚種において科学的な調査に基づく資源管理型漁業が全国的規模で推進・展開されるようになった。イセエビについても水産庁補助事業の資源培養管理対策推進事業(地先型)や資源管理型漁業推進総合対策事業(地域重要資源, 沿岸特定資源)などの対象として取り上げられ, 近年, 関連する調査が増加しつつある。

本論文は, イセエビの望ましい資源管理および漁業管理***のあり方に関して指針を提示することを目的(山川 1996)に, 三重県和具地区のイセエビ刺網漁業を具体例に, 資源評価手法と資源(漁業)特性値に関する検討を行い, さらに資源の有効利用を達成するための最適な漁獲方策について数値解析による検討を加えたものである。

1.2 論文の構成

本論文の構成は次のとおりである。

第1章ではイセエビの一般生態と生活史, 系群, 再生産関係について既往知見の整理を行い, 漁業管理の現状も踏まえながらイセエビ漁業管理に関する基本的な考え方について論じた。第2章では体長組成解析をもとに成長, 加入, 漁獲物の齢別組成などを検討した。第3章では漁獲量努力量データの解析に使用されるDeLury法の拡張を行い, 環境要因などによって漁具能率が変化する最尤モデルを導出した。さらに各種の統計モデルを導入し, 妥当なモデルの検討と資源評価を実施した。第4章では漁獲量努力量データに基づく資源評価のための複数年級群モデルを提示し, 漁具能率, 漁獲選択曲線, 年ごとの齢別初期資源尾数などの同時推定を行った。

**2 Kubo (1954) はこれらの他に *P. dasyptus* と *P. polyphagus* を日本産イセエビ類の中に含めたが, *P. dasyptus* は *P. homarus* のシノニムであり (Berry 1974), また, *P. polyphagus* は Doflein (1900) による記録があるのみで, もし日本に分布するにしてもごく稀な種であると考えられる (Kubo 1954)。したがって上記6種が日本に分布すると考えるのが一般的である。

**3 イセエビに関する国内文献目録抄。協会研究資料 43, 日本栽培漁業協会, 1990, 36pp..

**4 漁業とは社会的経済的法則に連動している人間の行為である。本論文では, 生物学的特性に立脚しながら主として水産生物資源の維持・管理を目標とする人的行為を「資源管理」, 生物学的基礎に立ちながら社会的経済的目標を設定して漁業を望ましい状態に維持しようとする管理を「漁業管理」と呼ぶ。「漁業管理」の概念は「資源管理」を内包する。

第5章では加入資源の有効利用を達成するための最適な漁獲方策について漁家経済の視点から検討を行い、漁期における漁獲努力の最適配分について論じた。第6章ではイセエビの生涯にわたる最適漁獲方策について論議した。そこでは第5章で導出した動的最適化モデルに、産卵に関与する親資源量の経済評価に関する項を導入し、産卵量を確保しつつ加入資源の有効利用を図るための漁獲努力の最適配分について検討した。最後の第7章において、全体の論議を踏まえながらイセエビの資源評価と望ましい漁業管理、および導入方法について展望した。

1.3 記号

本論文中で用いる記号は、全て関連の項でその都度説明するが、ここで一覧にして示す。(アルファベット順)

記号	定義
A	季節的成長の振幅を表すパラメータ
AIC	赤池情報量規準 (Akaike Information Criterion)
a	漁具能率式のパラメータ (第3章, 第4章)
a	価格関数式のパラメータ (第5章)
a_α	体長の標準偏差式のパラメータ (第2章)
BPR	加入あたり平均バイオマス (Biomass per Recruit)
BW	体重
b	漁具能率式のパラメータ (第3章)
b	価格関数式のパラメータ (第5章)
b_α	体長の標準偏差式のパラメータ (第2章)
C	漁獲 (除去) 尾数
C_{n+1}	n 期の終了時までには除去されなかった尾数 (第3章)
c	単位努力あたり操業経費 (第5章, 第6章)
c_α	体長の標準偏差式のパラメータ (第2章)
CIR法	Change in Ratio法
CL	頭胸甲長
CPUE	単位努力あたり漁獲量 (Catch per Unit of Effort)
d	漁具能率式のパラメータ
E	雌1個体あたりの抱卵数または産卵数
F	漁獲係数 (第6章)
F_t	最近年の漁獲係数 (terminal F) (第4章)
F_α	各体長組成データセットの個体数 (第2章)
f	漁具能率式のパラメータ (第3章, 第4章)

$f_{i\alpha}$	体長組成における階級別個体頻度 (観測値) (第2章)
g	漁具能率式のパラメータ
H	ハミルトニアン
h	漁具能率式のパラメータ
ITQ	譲渡可能個別割当制 (Individual Transferable Quota System)
i	体長階級を表す添字 (第2章)
i	期または年を表す添字
i_0	水温の変化点 (期)
j	齢を表す添字
$j_{0\alpha}$	成長式の変曲点を表すパラメータ
$j_{1\alpha}$	季節的成長の位相を調節するパラメータ
j_{max}	最高齢
j_{min}	最小齢
j_R	体長組成解析における全減少係数の導入齢
K_α	成長係数
k	負の二項分布のパラメータ
L	尤度または対数尤度
L	平均体長または平均頭胸甲長
$L_{\infty\alpha}$	極限体長
l	漁具能率式のパラメータ (第3章, 第4章)
l	雌雄を区別する添字 (雌: $l=0$, 雄: $l=1$)
l_i	体長階級の中央値 (第2章)
M	太陰月 (=29.53日) (第3章)
M	自然死亡係数 (第4章, 第5章, 第6章)
m	推定すべきパラメータ数
N	資源尾数
N_0	初期資源尾数
N_A	体長組成データセットの数 (第2章)
N_I	体長階級の数 (第2章)
\tilde{N}_T	期間終了時の取り残し資源尾数 (第5章)
P	確率
P_i	初期資源尾数 に対する漁獲率 (除去率) (第3章)
P_{n+1}	n 期の終了時までの残存率 (非除去率) (第3章)
P	総産卵数 (第6章)
P_i	各期における漁獲率 (除去率) (第3章, 第4章)
$p_{i\alpha}$	体長組成データセット内での各齢群の出現率 (第2章)
p	市場価格 (単価) (第5章, 第6章)
\bar{p}	市場価格の平均的推移傾向

Q_{ia}	体長組成データセットごとの各体長階級に含まれる確率 (理論値)
q	漁具能率
R	Fisher の繁殖価 (reproductive value)
r	Richards の式のパラメータ
SPR	加入あたり産卵数 (Spawning per Recruit)
SR_1	1 齢群の性比 (雄の尾数/雌の尾数)
SSBR	Spawning Stock Biomass per Recruit
T	累積漁獲尾数 (第 3 章)
T	期間の終了時 (第 5 章)
T	寿命もしくは漁獲終了時 (第 6 章)
T_n	総漁獲尾数 (第 3 章)
t	時刻または日を表す添字
t_i	水温 (第 3 章)
\bar{t}_i	水温の 5 点移動平均値 (第 3 章)
t_{max}	一年の終了日 (第 4 章, 第 6 章)
u	漁具能率式のパラメータ
V	直接現在価
v	漁具能率式のパラメータ
v_0	10 月における最初の新月の日
w	体重 (第 5 章, 第 6 章)
w	波浪指数 (第 3 章)
X	漁獲努力量
X_{max}	漁獲努力量の上限
X^*	最適漁獲努力量
Y	漁獲量
YPR	加入あたり漁獲金額 (Yield per Recruit)
y	混獲物による単位努力あたり収入
Z	全減少係数
z	漁具能率式のパラメータ
α	データセット番号を表す添字 (第 2 章)
α	漁獲選択曲線のパラメータ
β	漁獲選択曲線のパラメータ
δ	価値の割引率
η	打撃係数 (impact coefficient)
Θ	未知パラメータ (ベクトル)
θ	未知パラメータ (成分)
λ	最大原理における補助変数
μ	平均値
π	円周率 (第 2 章, 第 3 章)
π	兼業漁業による単位努力あたり利益 (第 5 章, 第 6 章)
$\rho(L)$	平均体長 L の群に対する漁獲選択率 (相対的漁獲効率)

σ^2	dispersion parameter (第 3 章)
$\tilde{\sigma}^2$	正規分布の分散 (第 3 章)
$\bar{\sigma}^2$	対数正規分布のパラメータ (第 3 章)
σ	体長の標準偏差 (第 2 章)
τ	産出卵の経済的評価金額を表すパラメータ (第 6 章, 第 7 章)
τ	Mace の絶滅係数 (7.2.1 項)
τ_c	最大原理における補助変数 (6.2.2 項)
ϕ	漁家の所得に関する総現在価値
ϕ_c	収穫価 (将来収穫価; harvest value)
$\chi^2(1, 0.95)$	自由度 1 の 95% χ^2 値
ω	体長階級幅
%SPR	漁獲が行われないときの SPR に対する、漁獲が行われたときの SPR の比

1.4 一般生態と生活史

イセエビは通常、千葉県以南の太平洋岸、瀬戸内海を除く四国、九州全域、奄美諸島、台湾に分布する。時として茨城県あるいは福島県にまで分布することはあるが、本州日本海沿岸には殆ど分布しない (井上 1981)。また、小笠原諸島や沖縄本島にも分布しない (関口 1989)。

イセエビの産卵期は日本の分布域全体についてみると 4 月下旬から 9 月下旬に及ぶ。盛期は海域によって遅速があり、長崎県では 5 月～7 月、和歌山県では 6 月～7 月、静岡県や神奈川県では 7 月上旬～8 月上旬、千葉県では 7 月上旬～8 月中旬である (井上 1981)。抱卵エビの保護のため、産卵期間は各県の漁業調整規則によって禁漁期に定められている (図 1-1)。

県	4	5	6	7	8	9	体長cm	備考
千葉							13.0	
東京							13	・1 小笠原
神奈川							22	
静岡							13	
三重							(4.2)	
和歌山							15	
徳島							13	
高知							13	
愛媛							15	
大分							20	
宮崎							15	
鹿児島							13	・2
沖縄							18	・3
熊本							20	
長崎							15	
佐賀							15	
福岡							20	

() : 頭胸甲長
 ・1: カノコイセエビ・シマイセエビ・ゴシキエビ及びニシキエビを含む
 ・2: イセエビ類 (イセエビ・アオエビ・ニシキエビ・ゴシキエビ及びカノコイセエビをいう)
 ・3: イセエビ類 (イセエビ・ニシキエビ・ゴシキエビをいう)

図 1-1. 各県漁業調整規則によるイセエビの禁漁期間と漁獲制限体長.*

* 出典: 沿岸漁場整備開発事業 増殖場造成計画指針 マダイ・イセエビ編, p271, 増殖場造成計画指針編集委員会編, 全国沿岸漁業振興開発協会発行 (1988).

イセエビの初期生活史については、不明な点が多い。ふ化直後や初期のフィロソマ幼生は沿岸の漁場付近でネット曳きにより採集される (Harada 1956, Murano 1967, 中村 1974) が、中・後期のフィロソマの採集例は限られている (大島 1942, Murano 1971, 野中・若林 1973, 中村 1975, 税所 1983^{**5}, 金盛・吉村 1987, 野中ら 1989)。一般には、ふ化後沖合へ分散したフィロソマはプエルルス幼生として沿岸へ着底するまでの一定期間、浮遊生活を送ると考えられている (大島 1976, 井上 1979, 関口 1985)。フィロソマの期間は不明である (大島 1948, 井上 1981, 水口 1993) が、人工飼育による初期の変態成功例では307日間 (Yamakawa *et al.* 1989)、および340日間と391日間 (Kittaka and Kimura 1989) であった。最近、関根ら(1995)^{**6} は日本栽培漁業協会南伊豆事業場における1989年から1994年の飼育による219尾の変態成功例について整理し、フィロソマの期間は231~417日間、平均322.8日間であったと報告している。

天然海域におけるプエルルスの出現時期は、1980年以前の既往報告の整理 (野中ら 1980) によると、4月下旬から12月下旬にわたる。出現の盛期は報告者、海域、年により違いがある (例えば市来ら 1976, 野中ら 1980, 井上 1981, 金盛・金丸 1980, 金盛 1988 など) が、おおむね6月から10月のあいだの新月~半月期の報告例が多い。浅海の岩礁域へ着底 (伏見 1976, 1978, 野中ら 1980, Yoshimura and Yamakawa 1988, Yoshimura *et al.* 1994, Norman *et al.* 1994) したプエルルスは10~20日間程度 (Yamakawa *et al.* 1989, Kittaka and Kimura 1989, 関根ら 1995) で稚エビへと脱皮し、以後は脱皮を繰り返して成長する (服部・大石 1899, 1901, 木下 1934, Nakamura 1940, 大島 1941, 大島ら 1960, 田中ら 1985, 田中 1988, Norman *et al.* 1994)。

1.5 系群と再生産関係

資源管理の論議において根本的で最も重要な事項は、①管理対象とする資源の再生産の及ぶ空間的広がり、すなわち、系群の存在の有無とその地理的範囲、および②親仔の量的関係 (再生産関係) であろう。本節ではイセエビ資源の系群と再生産について、既往文献による考え方をもとに整理する。

1.5.1 系群

イセエビは長期間にわたる浮遊幼生期を有するため、系群の検討にあたっては幼生の移送・分散過程と沿岸への補給機構の解明が重要である。

フィロソマ幼生をもつイセエビ・セミエビ科のエビ類の中で、幼生の移送・分散・親個体群への加入過程がある程度解明されている種は、オーストラリア産 rock lobster *Panulirus cygnus* (Ritz 1972, Phillips *et al.* 1979, Rimmer and Phillips 1979, Phillips 1981, Phillips and McWilliam 1986, Pearce and Phillips 1988) やニュージーランド産 rock lobster *Jasus edwardsii* (Booth 1994) などごく一部にすぎない。

日本産イセエビの幼生の移送と資源の補給機構については、いくつかの仮説が提起されている。大島(1976)はわが国南部の沿岸でふ化したフィロソマ幼生が黒潮に乗って本州太平洋沿海に幅広く移送される可能性が強いこと、環流域・停滞域の存在が資源の補給を考察する際に重要であることを指摘した。同様に井上(1979)は太平洋沿岸の分布域南部から運ばれた群と地域ごとの群の存在を想定した。野中(1982)は、イセエビ漁獲量の県間相関の検討をもとに資源の補給について考察した。黒潮や対馬暖流とそれらの反流により規定される広範囲に及ぶ場合と、沿岸の環流により規定される狭い範囲で完結する場合の二様式があり、地理的位置によりいずれかの様式が強く表われると考えた。

水口(1978a, 1978b, 1993)はイセエビの移動分散過程について考察し、系群(単位群)に関する作業仮説として、早期に産卵を行い、4~5ヶ月のフィロソマの期間の後に遠隔地へ着底する「回遊群(渡り群)」と、晚期(8月)に産卵を行い、約11ヶ月のフィロソマの期間の後に近傍へ着底する「地着き群」の2型を提起した。関口(1985)は、フィロソマ幼生は黒潮内側沿岸水域から速やかに運び出され、その主要群は沖合の黒潮反流域に分布し、最終期フィロソマ幼生、またはプエルルス幼生として沖縄東方海域から黒潮に入り、本邦沿岸の種々の水域にこれらの幼生が輸送されるという仮説を提唱した。

しかし、これらの仮説はいずれも、未だ立証のための明確な根拠が得られておらず、仮説の域から脱していない。現状ではイセエビ幼生の移送・分散過程および沿岸への補給機構は未解明であり、したがって系群について

^{**5} 税所俊郎, 川村軍蔵, 四宮明彦: イセエビ類幼生の沿岸定着機構に関する研究, 「昭和57年度科学研究費補助金(一般研究C)研究成果報告書」, 1983, pp. 1-23.

^{**6} 関根信太郎, 鈴木重則, 島 康洋, 野中 忠: イセエビフィロソマ幼生の飼育-Ⅷ. フィロソマの期間と成長. 平成7年度日本水産学会春季大会講演要旨集, 1995, p. 66.

も不明として扱わざるを得ない。

近年、魚類では mt-DNA などの遺伝学的分析手法による系群の解析が精力的に行われ、興味深い成果が数多く報告されている。イセエビ類についても外国産の種では、種間の系統類縁関係の解析などにこのような手法が活用されるようになってきたが (Brasher *et al.* 1992 a, 1992 b, Ovenden *et al.* 1992, Ovenden and Brasher 1994), 日本周辺海域のイセエビ類に関しては未着手である。今後、地域別漁獲量の時系列解析などと併せて、このような手法を取り入れた、系群解析に関する実証的研究の待たれるところである。

1.5.2 再生産関係

外国産イセエビ類の再生産関係に関連しては、*Jasus edwardsii* (Saila *et al.* 1979, Anala and Esterman 1986, Breen and Stocker 1993, Yoshimoto and Clarke 1993, Booth and Breen 1994), *Jasus novaehollandiae* (Campbell and Hall 1988, Yoshimoto and Clarke 1993), *Panulirus marginatus* (Clarke *et al.* 1992), *Panulirus cygnus* (Morgan 1979, Morgan 1980, Hancock 1980, Morgan *et al.* 1982, Caputi and Brown 1993, Caputi *et al.* 1993, Yoshimoto and Clarke 1993,

Chubb 1994) などの報告がみられ、幾通りかの余剰生産量モデルをもとに漁獲努力量と持続生産量の関係が検討されている。

日本産イセエビでは降水量などの環境要因と漁獲量の関係 (久保 1940, 丸山1966), 県別漁獲量の相関 (久保 1939, Takagi 1978, 野中 1982), 黒潮流況と着底資源量の関係 (伏見 1976), 漁場面積あたり漁獲量 (野中 1988) などについての検討例はあるが、再生産関係や余剰生産量を直接扱った研究例はみられない。研究例が乏しいのは、系群や資源の補給機構が不明であることに加え、外国の研究例のように漁獲努力量に関する過去の統計資料が利用できないことや漁業開始当初の歴史の古い資料が不足していること**7 などが原因と考えられる。

日本全国のイセエビ資源は単一系群より成ると仮定し、1915年以降の全国の漁獲統計 (図 1-4 a) を用いて、 n 年の漁獲量に対する $(n+2)$ 年, $(n+3)$ 年, $(n+4)$ 年の漁獲量の関係を試作した (図 1-2)。x 軸 (n 年の漁獲量) の値が 1,000t~1,500t の間に集中しており、年代によって漁獲率が異なる可能性もあるため、再生産関係の検討を行うに十分なデータであるとはいえない。日本産イセエビについては、再生産関係は今後の検討課題である。

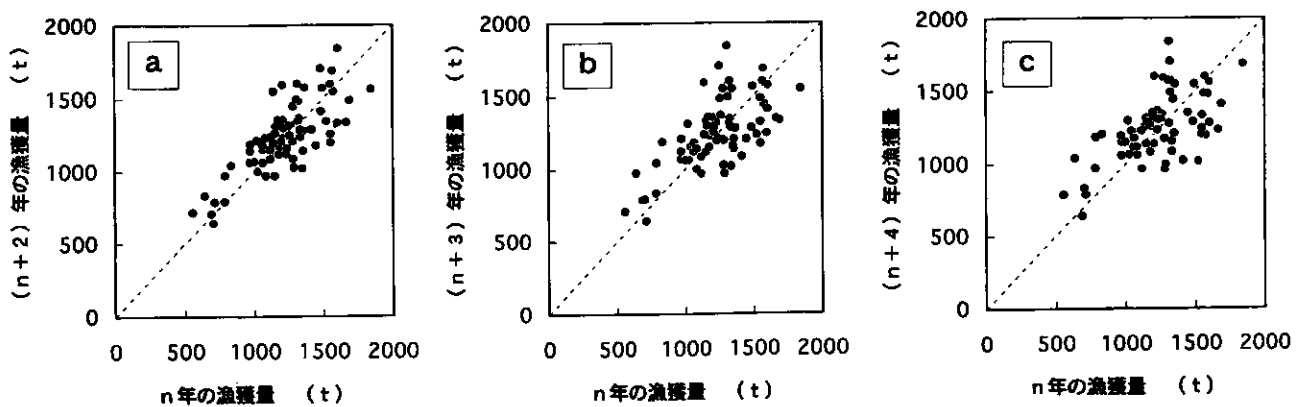


図 1-2. 漁獲統計資料をもとにしたイセエビの再生産関係の試作。

日本全体の n 年の漁獲量に対する a. $(n+2)$ 年, b. $(n+3)$ 年, c. $(n+4)$ 年の漁獲量の関係を示す。

**7 外国の例ではイセエビ類は主にカゴ (lobster pot) で漁獲され、その許可数が漁業開始当初からの漁獲努力量の統計として利用できるのに対し、日本の刺網ではそのような統計資料がない。

1.6 イセエビの漁業管理

1.6.1 三重県における現状

第9次漁業センサス^{**8}によると、イセエビを対象とする漁業管理組織は1993年11月1日現在で全国に延べ214組織あり、魚種別ではアワビ類の547組織、サザエの358組織、ウニ類の352組織に次いで多い。

イセエビ刺網漁業の具体的な管理方策には、禁漁期間や禁漁区の設定、漁獲制限体長（または頭胸甲長）の設定、漁具の制限（網の種類、網目の大きさ、糸の太さ、材質、網数など）、休漁、漁期の短縮、輪採、小型個体の再放流など様々なものがある（木下 1933, 野中・大島 1958, 野中 1959, 大島 1962, 丸山・平井 1964, Nonaka and Fushimi 1994）。禁漁期間と漁獲制限体長については、各県の漁業調整規則で定められている（図1-1）。三重県では、5月1日から9月30日が禁漁期間に定められており（ただし、鳥羽市離島地域以北の海域においては、5月1日から9月15日まで）、頭胸甲長4.2cm以下のエビは採捕および所持・販売が禁じられている。

表1-1に、三重県内の各地先におけるイセエビ刺網漁業の管理実態を、1991年と1993年に実施したアンケート調査結果により示した。三重県漁業調整規則を越えた漁獲制限サイズ（県漁業調整規則による制限は体重で60～70gに相当する）や禁漁期間を自主的に設定している地区もみられる。網の種類に関しては一枚網のみを用いている地区、三枚網のみを用いている地区、両方の網を用いている地区があり、網目の大きさ、網糸の太さ、網の高さ（掛目）、長さ、1隻あたりの使用網数なども多様である。漁場行使方法についても、漁場輪番制を採用している地区、輪採制を敷いている地区、自由操業の地区、グループによる共同操業の地区などがあり、小型エビの再放流サイズ、市場における銘柄区分も様々である。概して鳥羽・志摩など北部の地区では、①比較的大きな漁船で ②三枚網を使用し、③自由操業で ④操業水深は深く、⑤漁獲物全体に占める魚類の比重（金額）が高く、⑥再放流エビのサイズが小さい地区が多い傾向にある。一方、尾鷲・熊野など南部の地区では、①小型の漁船で ②一枚網を使用し、③漁場輪番制を採用して ④操業水深が浅く、⑤漁獲物全体に占めるイセエビの比重（金額）が高く、⑥再放流エビのサイズが大きい地区が

多い傾向にある。

綿糸一枚網からナイロン三枚網への移行は昭和20年代または30年代(1945～1965年)と回答した地区が多かった。

1.6.2 イセエビ漁業管理の基本的な考え方

資源管理には大別して、資源の再生産管理（世代間管理）と、所与の加入資源の有効利用（世代内管理）の2つの側面がある。前者は、資源の変動単位としての系群の概念を導入し、再生産関係や資源動態の制御要因を把握・利用することで資源の効果的な運用を図ろうとするもので、現在から将来にわたる複数の世代を直接または間接の管理対象とする。一方後者は、加入あたり漁獲量や漁獲金額の最大化によって所与の加入資源の効果的な利用を図ろうとするものである。管理対象は単一の世代もしくはその集合であり、世代間の量的な相互作用や系群の概念は導入しない。近年では後者の側面に加え、加入あたり産卵量 (Shepherd 1982, Overholtz *et al.* 1986, Prager *et al.* 1987, Gabriel *et al.* 1989, Clark 1991, Goodyear 1993, Mace and Sissenwine 1993, Mace 1994, Myers *et al.* 1994) の概念を導入することにより、加入資源の有効利用と乱獲の回避を同時にめざした論議が展開されるようになった。これは、いわば世代間管理と世代内管理の中間に位置し、一般に変動が大きく長期間のデータを必要とする stock-recruitment 関係の直接の評価がなくても実施可能な生物学的管理基準 (Biological Reference Points) として注目される。

日本産イセエビは既述のように、系群や再生産関係が不明である。仮に系群の範囲が特定されたとしても地先ごとに管理の形態と現状が大きく異なるため、日本全国が一体となって協調的な管理を実施できる体制や背景が整っているとはいえない。イセエビの資源管理において可能な現実的対応としては、「地先ごとの加入資源の有効利用の視点に基づく管理を主体とし、それに加入あたり産卵量の概念を組み合わせる」のが現状では妥当と考える。

加入資源の有効利用においては経済学的な視点 (Clark 1976, Clark 1985, Doll 1988, Hannesson 1993 など) が重要であろう。管理を行う主体は経済活動を営む「漁家」であることを考慮すれば、資源の有効利用の検討にあたっては漁家経営全体を視野に入れた論議が必須である。イセエビ資源から直接得られる漁獲量や漁獲

^{**8} 農林水産省統計情報部：〔Ⅱ〕漁業管理組織に関する統計。第9次漁業センサス第2報，農林水産省経済局統計情報部編，農林統計協会，東京，1995，pp. 155-211.

表1-1. 三重県内の各地先におけるイセエビ刺網漁業の管理実態。(1991年と1993年に実施したアンケート調査結果より)

地区 番号	漁業管理組織		漁業期間	休漁、月休み等		主漁場の水深		漁場行使の方法
	漁業管理組織	1隻当り 乗組員数		使用漁船 1隻当り 人数	休漁、月休み等	水深	水深	
1	海老刺網	65隻	3~10ト	2~3名	9/16~4/30	正月1~4日、土曜日、祝祭日前日、大瀬3日間	15~90m	先着順、潮時により入網時間を決定 先着順、自由操業(4時出港)
2	海老刺網	6隻	1~2.9ト	2名	9/16~9/30	悪天候の日、祭日2日前、毎星期日、月休み4日間	10~100m	自由操業、投網時間制限
3	海老刺網	36隻	3~7ト	2名	9/16~4/30	毎週土曜日	10~90m	自由操業、投網時間指定
4	海老刺網	25隻	4~10ト	1~2名	9/16~4/30	毎週土曜日(月2回程度)、悪天候日	33~45m	毎年、責任者3名を選出し、調整する
5	海老刺網	13隻	4~10ト	2~3名	10/19~12/28	毎週土曜日および祝祭日の前日	7.5~35m	先着順、投網・揚網時間指定、共同連網3日間
6	海老刺網	48隻	0.7~1.5ト	2名	12/5前後~4/30	12/31~1/5、悪天候日、月夜		3時投網(専用漁場)、それ以外は2時。
7	海老刺網	15隻	1.5~8ト	2~3名	10/1~4/30	12/21~1/6、毎週土曜日、中央市場休みの前日	7.5~22.5m	投網、揚網時間を申し合わせ。
8	海老刺網	18隻	1~5ト	2名	10/1~4/30	12/31~1/6、第2、4土曜日、旧曆15~17日	4.5~10.5m	6区による漁場輪番制
9	海老刺網	6隻	1~5ト	2名	10/1~4/30	12/30~1/4、第2、4土曜日、旧曆15~18日	5~20m	12区による漁場輪番制。残りは自由操業。
10	海老刺網	23隻	0.4~12.55ト	2名	10/1~4/30	12/30~1/3、旧曆15~18日	5~15m	7区による漁場輪番制
11	海老刺網	13隻	1.4~6.88ト	1~2名	10/1~4/29	12/30~1/4、第2、4土曜日、旧曆12~17日	3~15m	輪番漁場(7区)と自由漁場(地磯、入港)
12	海老刺網	21隻	1~1.5ト	2名	10/1~4/30	正月、第2、4土曜日、旧曆14~16日	3~82.5m	先着順、3時出港。
13	海老刺網	36隻	5~15ト	1~3名	10/1~4/30	12/30~1/4、祭日、旧曆11~20日	15m~	先着順、3:30投網開始。
14	海老刺網	15隻	1~2ト	2名	10/1~4/30	12/29~1/5、祭日、旧曆14~20日、悪天候時	15~60m	4時出港
15	海老刺網	18隻	0.8~9.0ト	1~2名	10/1~4/30	10/14、15日、祭日		先着順、自由操業(3時出港)
16	海老刺網	40隻	0.8~1.5ト	2名	10/1~4/30	毎週土曜日、悪天候日、30日	30~36m以浅	3時出港、刺網団体長の指揮、4~7時揚網
17	海老刺網	51隻	1.5~5.0ト	1~2名	10/1~4/30	10/1~4/30		自由操業
18	海老刺網	7~8隻	2.5~11ト	2名	10/1~4/30	正月、祭日	7.5~30m	8区による輪番漁場と自由漁場
19	海老刺網	67隻	2~5ト	1~2名	12月~3/31	正月、第1、3土曜日、旧曆12~18日	7.5~45m	7区による漁場輪番制を先着順で。
20	海老刺網	110隻	0.5~3ト	1~2名	12/1~3/31	12/29~1/5、1~3月の旧曆15~20日	12~45m	5区による輪番漁場と自由漁場
21	海老刺網	28隻	0.5~3ト	1~2名	12/1~4/30(H5)	12/31~1/4、旧曆14~17日		2時出港(世話人の旗揚げ)
22	海老刺網	40(20)隻	1~5ト	1~2名	旧曆9/23~3/22	1/1~1/3、第2、4金曜日、旧曆11~20日		3区による漁場輪番制
23	海老刺網	69隻	1~2.5ト	1~2名	11月旧曆20日~4/30	12/30~1/5、旧曆10~18日	12~37.5m	先着順(2時出港)、標旗により漁場を区分。
24	海老刺網		1~3ト	1~2名	11/1~4/30	12/31~1/2、旧曆13~20日		8区による漁場輪番制(海老刺網組合)
25	海老刺網	8(54)隻	0.56~4.68ト	2名	11/1~4/30	正月、旧曆13~19日		出港・投網時間指定、台合兼台場所設定。
26	海老刺網	120隻	1~5ト	1~3名	11/1~4/30	12/30~1/8、毎週土曜日、旧曆14~16日	5~40m	6区による漁場輪番制
27	海老刺網	39隻	1~3ト	1~3名	11月~4/30	12/30~1/7、毎週土曜日、旧曆14~16日	7.5~45m	8区による漁場輪番制
28	海老刺網	8隻	1~2ト	1~2名	10/1~4/30	金曜夜、旧曆11~19日	12~82.5m	船のト数別の3区先の先着順
29	海老刺網	43隻	0.5~3.64ト	1~2名	10/1~4/30	正月、祭日、旧曆12~20日		9組による漁場輪番制
30	海老刺網	15隻	0~5ト	1~2名	10/1~4/30	12/31~1/3、祭日、旧曆14~17日		2隻による交替制
31	海老刺網	2隻	1.2、1.4ト	2名	10/1~4/30	12/29~1/4、毎週土曜日、月夜	8~10m	10区による漁場輪番制
32	海老刺網	15隻	0.5~2ト	1~3名	10/1~4/30	旧曆11~20日	7.5~30m	上半期、下半期に分け、順位・漁場割りを行う
33	海老刺網	8隻	1~3ト	1~2名	10/1~4/30	旧曆13~20日	15~30m	漁場輪番制
34	海老刺網	15隻	0.8~2.0ト	1名	10/1~4/30	12/30~1/4、祭日、月夜	15~30m	漁場輪番制
35	海老刺網	19隻	0.8~1.5ト	1名	10/1~4/30	悪天候日、旧曆11~20日	2~18m	67所による漁場輪番制(各区域域内では先着順)
36	海老刺網	16隻	0.5~1.3ト	1名	10/1~4/30	旧曆11~20日	2~27m	3組(×37所)による漁場輪番制
37	海老刺網	45隻	0.8~7ト	1名	10/1~4/30	1/1~1/3、祭日、旧曆10~19日		特別な取り決めは無し。操業量に制限。
38	海老刺網	10隻	0.5~1.5ト	1名	10/1~4/30	1/1~1/31	15~30m	漁場輪番制(3区、草業用が2区、副業用が1区)
39	海老刺網	12隻	0.6~1.2ト	1名	10/1~4/30	正月、旧曆11~21日	15~45m	漁場輪番制
40	海老刺網	23隻	1~3ト	1~2名	10/1~4/30	12/29~1/5、旧曆11~19日	4.5~30m	26区による漁場輪番制
41	海老刺網	13隻	0.5~3ト	1~2名	10/1~4/30	月夜休み(10日間/月)		26区による共同操業、7~10制、4区の漁場を輪控
42	海老刺網	26隻	1~2ト	1名	10/1以降~4/30	12/29~1/4、祭日(11/2)、旧曆10~18日。		4隻乗の共同操業、ア・B制、4区の漁場を輪控
43	海老刺網	17隻	1~1.5ト	1~4名	10/1~4/30	1/1~2月末、旧曆11~18日		4隻乗の共同操業、ア・B制、4区の漁場を輪控

*注: できるだけ各地先の実態に即するよう、台併漁協については支所別に掲載した。また、回答の得られなかった地区とイセエビ漁獲量の少ない地区については掲載しなかった。

表1-1. (続き)

地区 番号	網の種類	材質	太さ (燃り数で表示)	目合* (身網)	高さ (柄目)	1隻当りの使用網数**	漁獲物全体に占める 比重の比(金額)
1	3枚網	ナロウ、モリス、ツカス	2~18本	1.6~4.2寸	5はえに制限。普通は3~4はえ。(1はえ:600間)	約1割(H4:4.4%)	
2	3枚網	ナロウ、モリス	6本	3.0寸		約2割	
3	3枚網	ナロウ	9~12本	2.5~3.0寸	18~20掛 (100/3)間×12×6籠	H2:22.1%, H4:11.6%	
4	3枚網	ナロウ	9本又は6本	2.5~2.8寸	22~28掛 15~25丈	約3割	
5	3枚網	ツカス	9本	2.3寸	外網で3目18反	8割	
6	3枚網	ナロウ	4本又は6本	2.3寸	5丈(1丈=2反)以下に制限。解禁3日後から1丈増。	8~9割	
7	3枚網	ナロウ	6本	1.8寸	20掛	42.8%(H3)	
8	3枚網	ナロウ	8本	2.2寸	27掛	約4割	
9	3枚網	ナロウ	6本	2.0寸	48反(100間37切りもの)	約1割弱	
10	3枚網	ナロウ	8本又は10本	2.0, 2.3寸	8反×6石(1反:100間37切りを基準、1石:100間27切り5反)	約5割	
11	3枚網	ナロウ	10本	2.0, 2.3寸	14丈以下(1丈=2反)。普通は12~14丈。	6~6.5割	
12	3枚網	ナロウ	9本	2.2寸	22掛 12丈以下(1丈=2反)。以前は16丈→14丈。	約6割	
13	3枚網	ナロウ	10本以上	2.2寸	25掛 15丈以下(1丈=2反)。以前は15丈以下だった。	約6割	
14	3枚網	ナロウ	8本	2.2寸以上	13丈以下(1丈=2反)。	約6割	
15	3枚網	ナロウ	8~10本	2.2寸以上	10丈以下(1丈=2反)。	約6割	
16	3枚網	ナロウ、外付	4本	2.0寸以上	29掛 10丈以下(1丈=2反)。普通は8~10丈を使用。		
17	3枚網	ナロウ、外付	4本	1.8~2.0寸	30掛 8~16丈。普通は14~15丈が多い。		
18	3枚網	ナロウ	6~8本	2.4~2.6寸	25はえ(1はえ=100間、仕立上り70間)	約6割	
19	1, 3枚網	ナロウ	4~6本	2.2~2.5寸	25~28掛 13丈以下。	約5割	
20	3枚網	ナロウ	8本	2.7寸	23丈以下。普通は18~20丈を使用。1丈=130間	約8割	
21	3枚網	ナロウ、ナミナ	6~8本	2.3~2.5寸	12丈以下(1丈=1反)。	約6.5割	
22	3枚網	ナロウ	8本	2.3寸	50間ものを50枚以内(30枚前後が多い)	約6割	
23	3枚網	ナロウ	9本	2.3~2.5寸	1名乗り6丈(1丈=16間物×4)、2名乗り12丈。	32.9%(H2)	
24	3枚網	ナロウ	6~8本	2.5寸	海老刺網24間を30枚、3枚網を300間。	約7割	
25	1(3)枚網	ナロウ	8(6~8)本	2.7(2.5~2.6)寸	海老刺網:20はえ以下(1人10はえ2人乗)、3枚網:500間以内	87%(H4)	
26	3枚網	ナロウ	6, 9本	2.4, 2.6寸	6丈(24丈)、2人船は11丈(44丈)、22~25間、高さ5尺以内	38%(H2)	
27	3枚網	ナロウ	6, 9本	2.8~3.2寸	23~28掛 12反		
28	3枚網	ナロウ	8, (6)本	2.4, (2.2)寸	8丈(1丈=100間)。	8割	
29	3枚網	ナロウ	6~8本	2.3~2.5寸	6丈(沖掛は10丈)	約8割	
30	3枚網	ナロウ	8本	2.6~2.8寸	本職1名:10丈、本職2名:16丈、兼業:5丈(1丈=50間)		
31	1枚網	ナロウ	8本	3.0寸	仕立上り35間を10枚。高さ6尺。		
32	1, 3枚網	ナロウ	12~18本	2.5寸	28掛 1人3石(1石=60間)	約7割	
33	3枚網	ナロウ	8~10本	3.3寸	6枚	約8割	
34	3枚網	ナロウ	10本	2.7寸	6丈(1丈=1反)以下。	7割	
35	1枚網	ナロウ	10, 12, 14本	3.0寸	6丈(1丈=4反, 60間)。荒天時は4丈も。	約8割	
36	1枚網	ナロウ	12本	3.8寸	本業5丈、副業3丈(1丈=180間)	約9.5割	
37	1, 3枚網	ナロウ	9, 11本	2.7, 3.0寸	6丈(1丈=60間)。2人掛けは12丈まで。家族は2人10丈	6~7割	
38	1枚網	ナロウ	6~10本	2.0寸	長さ250間以内。高さ6尺以内。	約9.5割	
39	1枚網	ナロウ	10本	3.4寸	4枚	約3割	
40	1, 3枚網	ナロウ	6~10本	3.0寸	1枚網4丈、3枚網4丈(1丈=1反)。	45%	
41	1, 3枚網	ナロウ	8, 10本	3.0寸	1枚網5丈、3枚網3丈。		
42	1枚網	(綿糸)	6~12本	3.4寸	10丈(1丈=1反)。		
43	1枚網	ナロウ	3.0寸	3.0寸	5反	約8割	

*: すべて罫尺による表示。1寸は3.7875cmに相当する。
 **: 1反の網地長は通常100間(=150m)に相当する。

表1-1. (続き)

地区 番号	禁漁区 箇所数	禁漁区の利用方法	稚エビ再放流	同放流実績	銘柄区分	イセエビ漁獲量 (ト) S33-H3平均 H3 最高年
1	無		甲長4.5cm(100g)以下 50~70g以下	H4:23kg(約1000尾)	700g以上を区別	1.2 1 3.7
2	無		組合が再放流		大:500g以上,中:200~490g,小:100~190g	0.1 0 0.6
3	無		甲長4.2cm以下		大:600g以上,小:600g以下	5.1 3 10.5
4	無		甲長4.2cm以下		区分なし	2.2 2 9.0
5	17所	年1~2回の操業。収益は漁協へ。	甲長4.2cm以下		大:500g以上,小:500g以下	2.7 2 5.0
6	17所	年間11回程度の操業。収益は町内会へ。参加者は組順で無報酬	甲長5cm又は100g以下	約50尾(H3)	大:800g以上,小中:100~800g	1.3 1 3.0
7	無		甲長4.2cm以下	約50尾	大:400g以上,中:120~400g,小:60~120g	2.9 2 7.0
8	47所	共同操業	甲長4.2cm(60g)以下		区分なし	4.2 3 10.3
9	17所	12月に5日程度の操業。収益は組合と半々で分配。	禁漁区へ放流		区分なし	1.5 1 9.0
10	17所	参加資格者:年間30日以上操業のこと。	60g以下		大:400g以上,中:120~400g,小:60~120g	5.5 3 9.4
11	17所	年間3日間の操業。金額には関係なし。	甲長4.2cm以下		大:380g以上,中:120~380g,小:120g以下	2.3 1 6.0
12	27所	年3~5回操業(2丈出し)。収益は海老組合の費用と不漁年の貯え	80g以下	年間約15000尾	区分なし	1.9 1 3.1
13	77所	有	80g以下	H4:1399尾	大:380g以上,中:120~380g,小:80~120g	20.5 19 38.6
14	有	年4~7日間の操業。収益は均等分配。	79g以下		大:375g以上,中:121~375g,小:80~120g	4.4 3 12.0
15	27所	共同操業。収益は均等分配。	80g以下		大:380g以上,中:130~380g,小:80~130g	3.3 4 7.0
16	107所		80g以下		大:350g以上,中:120~350g,小:80~120g	2.2 2 14.0
17	17所	年1回の共同操業。収益は組合へ。	甲長4.2cm(80g)以下		特大:500g~,大:380g~,中:180g~,小:80g~	3.6 2 9.3
18	無					0.4 0 2.3
19	37所	年2回操業。収益は1/3を均等分配,あとは魚礁設置資金	69g以下	約200尾(H3)	大:500g以上,中:100~499g,小:70~99g	1.3 1 3.0
20	37所		50g以下	約1500尾(H4)	大:640g以上(8掛),小:50~640g	5.9 5 10.0
21	17所	正月前に1~2日操業。(漁協の贈呈用)	100g以下	777尾(H4)	上海老,下海老	2.1 1 6.1
22	37所	投票全面禁止。	100g以下		大:150g以上,中:100~150g	1.1 1 3.0
23	17所	年1回の試験操業。水揚げは区の収益。	100g以下		大:700g以上,中:100~700g	1.8 2 4.0
24	27所	年3~4回操業。水揚げは漁協の自己収益として計上。	59g以下		大:500g以上,中:200~490g,小:60~190g	1.3 1 4.0
25	27所	毎年27所を順次禁漁にする漁場輪流制。水揚:徴収金と均等配分	100g以下	約3600尾(H3)	大:500g以上,小:100~499g	4.6 4 7.5
26	有		50g以下	2328尾(H2)	大:500g以上,小:100~490g	6.4 8 12.1
27	27所		100g以下		大:500g以上,小:100~500g	2.5 2 5.4
28	無		100g以下	約870尾(H3)	大:500g以上,中:100~500g	0.8 0 2.0
29	37所	年2回程度操業。水揚げは均等配分。	100g以下	約1000尾(H3)	大:500g以上,中:100~500g	1.4 0 4.0
30	27所	管理区を設定。	甲長4.2cm以下	約1000尾	大:500g以上,中:100~500g	1.8 2 4.0
31	17所		100g以下		大:500g~,中:300g~,小:200g~,小々:100g~	0.3 0 4.0
32	有		100g以下	1258尾(H2)	大:760g以上,中:500~750g,小:100~490g	2.1 2 4.0
33	無		甲長5cm(100g)以下		大中小	1.1 2 6.7
34	17所	毎年適当な日に解禁。収益は均等分配。	再放流実施		区分なし	2.2 2 8.0
35	有	2~3丈出しの共同操業。均等分配。その他,漁協の必要に応じた	甲長5cm以下	250~450尾/年	大:500g以上,中:100~500g以下	3.3 3 5.4
36	17所	2年に1回操業。均等配分。	再放流実施	1080,1250尾(H4,5)	区分なし	2.0 1 6.1
37	27所	年2回操業。収益は小型船組合の運営費+均等配分	100g以下	1167尾(H3)	禁漁区の1/2のみ500gを擁に上,下に区分。	3.1 0 6.0
38	37所	決められた利用方法はない。	甲長5cm以下		区分なし。	1.7 0 2.8
39	17所	3年間禁漁。4年目に2~3日間操業。1人当たり2丈使用。均等配	100g以下	558尾(H3)	大:800g以上,中:500~800g,小:200~500g	0.8 1 2.0
40	17所	平成3年度から設定。	100g以下		大:500g以上,中:100~500g	2.0 1 10.8
41	無		60g以下		大:350g以上,中:200~350g,小:60~200g	0.4 0 3.0
42	17所		100g以下		区分なし。	2.5 3 5.8
43	17所	年2~3回操業。水揚げは一部を海老網組合の運営費に。	100g以下			3.5 4 8.6

表 1-1. (続き)

地区 番号	備 考
1	昭和10年頃より3枚網を使用。F1D7網は昭和30年頃から。昭和50年頃までは船が小さく(1~2ト),網数は2はえ位であった。昭和58年頃から船の大型化と隻数の増加のため,使用網数を制限。
2	
3	昭和10年に綿糸3枚網を関西地区より導入(2隻)。昭和25年より7ミミ1枚網使用。昭和30年より3枚網を全面使用。旧来綿糸は30番手3つ然り9本。網数は33間×12×4であった。
4	
5	カゴ漁業(1/5~4/30)
6	3枚網の使用は戦前に始まる。F1D73枚網への移行は戦後になってから。糸の太さは綿糸で太かったがF1D7で細くなった。昭和10年頃までは6丈,以後は5丈
7	戦前より3枚網使用。
8	
9	昭和35年頃からF1D73枚網へ逐次移行。
10	
11	昭和35年頃からF1D73枚網へ逐次移行。
12	年間60~80日程度操業。昭和40年頃からF1D73枚網へ逐次移行。(以前は 海老:綿糸1枚網, 魚:綿糸3枚網)
13	
14	30年ほど前から3枚網へ移行。以前は綿糸1枚網→F1D71枚網。
15	昭和22~25年頃より3枚網を使用。F1D7網へは昭和27~28年頃。昭和40年以前は12丈/隻だったがF1D7で細くなったのを現在の網数(10丈)へ。
16	
17	
18	昭和23年頃からF1D73枚網へ移行。現在は実績なし。
19	昭和28年頃より3枚網を使用。F1D7網へは昭和30年頃にそれ以前の14丈/隻から現在の網数(13丈)へ。
20	昭和33年の総会で3枚網の使用禁止を決議,現在に至る。
21	昭和30年頃からF1D73枚網へ移行。太さ,目合,立上り長は以前から変化なし。
22	
23	昭和30年頃からF1D73枚網へ移行。使用網数は以前から変化なし。
24	
25	明治時代は庶網,大正初期から綿糸。昭和55年頃からF1D7網。網数は昭和58年までは12はえ,以後11はえ。63年から10はえ。なお,かご内の数字は3枚網組合,それ以外は海老網組合のもの。
26	昭和30年頃からF1D73枚網へ移行。
27	昭和20年頃より3枚網へ移行。
28	昭和30年頃より3枚網を使用。F1D7網へは昭和28~30年頃。綿1枚網の時は12丈/隻であった。かご内の数字は12~4月,それ以外は10,11月。
29	
30	
31	
32	昭和35年頃より3枚網を使用。
33	
34	昭和26,27年頃より3枚網を使用。F1D7網へは昭和23年頃。綿糸網の時は7丈/隻,20番手6本然りであった。昭和15,16年頃にそれまでの楯こぎ船(4~5ト,2,3名,計7隻)からエンジン船へ。
35	以前は2人掛けを行っていた。戦後,沈子を船に変える。昭和50年代に110匁/㎡の船口ロープに。綿網は以前のちがからへ。
36	
37	昭和49年度より3枚網も使用(当時3丈,53年度より4丈,近年は6丈)。F1D7網へは昭和46(1枚網),49年(3枚網)に導入。
38	3枚網の使用は禁止。F1D7網への移行は昭和45年頃。使用網数,太さは以前から変化なし。
39	
40	昭和30年頃より3枚網も使用。F1D7網もこの頃から。昭和50年頃から現在の網数,網の長さ。
41	昭和40年頃まで綿糸を使用。その後F1D7の網を2~3年使用。F1D7網への移行は昭和43年頃。
42	以前から綿糸1枚網を使用。平成5年からはF1D7網を使用。
43	4隻に全員が分業して共同操業を実施。水揚げ高7~9mを採用。(船代,船頭代は全員で負担,燃料代,網代は個人負担)

金額に加え、イセエビ以外の混獲物による収入や操業経費、期間中の兼業漁業による収入なども検討項目に加えられるべきであろう。第5章以降では以上の点を考慮しながら、望ましい管理方策についての解析を行う。

1.7 調査対象地区の概要

本論文では三重県のなかで最も漁獲量の多い和具漁業協同組合（図1-3，表1-1の地区番号13）を調査対象地区として取り上げた。

図1-4 a, 図1-4 b, 図1-4 cにそれぞれ、日本全国（1905年～1993年）、三重県（1904年～1993年）および和具漁協（1956年～1993年）におけるイセエビ漁獲量の経年推移を示した。全国における漁獲量は、第二次世界大戦以前（1941年以前）は一貫して増加傾向にあったが、戦後（1946年以降）は1964年のピーク（1,845トン）を迎えたあと減少し、1975年以後は1,000～1,200トンの水準で持続している。三重県における漁獲量は、戦前は全国での傾向と同様に増加した。戦後は1952年に最高の296.6tを記録した後、1970年代前半まで減少が続き、以後は100～150 tの間を推移している。和具漁協における漁獲量は、1963年に集計期間中最高の38.6 tで、1970年代前半までは県全体の傾向と同様に減少した。1979年には30 tを記録したが、以後は20 t前後を推移している。期間中の平均漁獲量と変動係数はそれぞれ、全国では

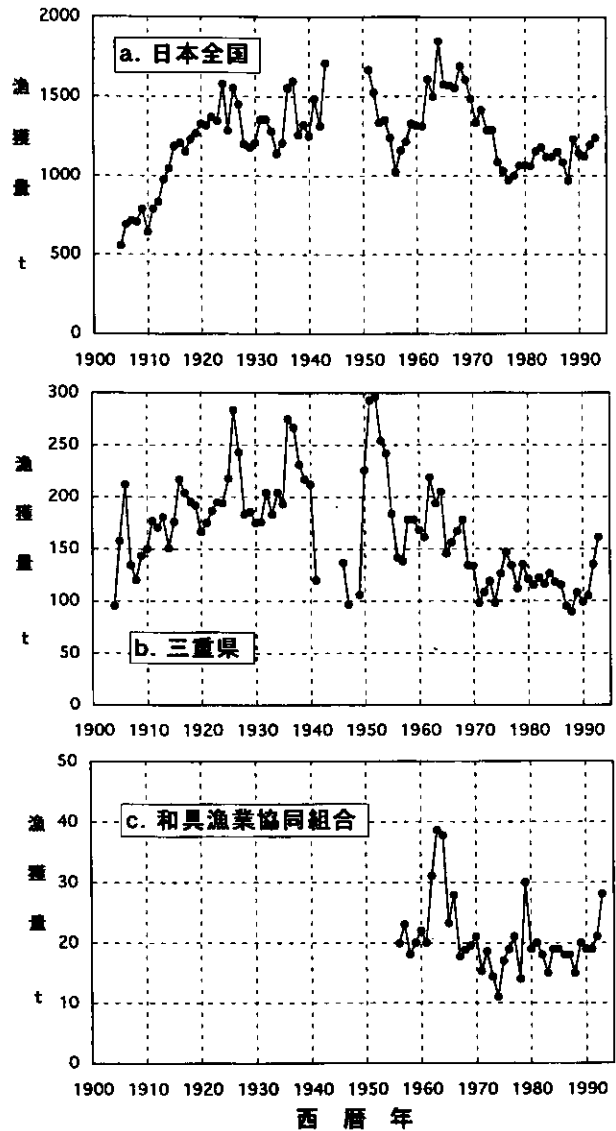


図1-4. イセエビ漁獲量の経年推移。
a. 日本全国, b. 三重県, c. 和具漁業協同組合。（資料：農林省統計表，漁業養殖業生産統計年報，三重県農林水産統計年報，三重県統計書，三重県漁業地区別統計表，和具漁業協同組合の1955年以前の資料は入手できなかったため，表示していない。）

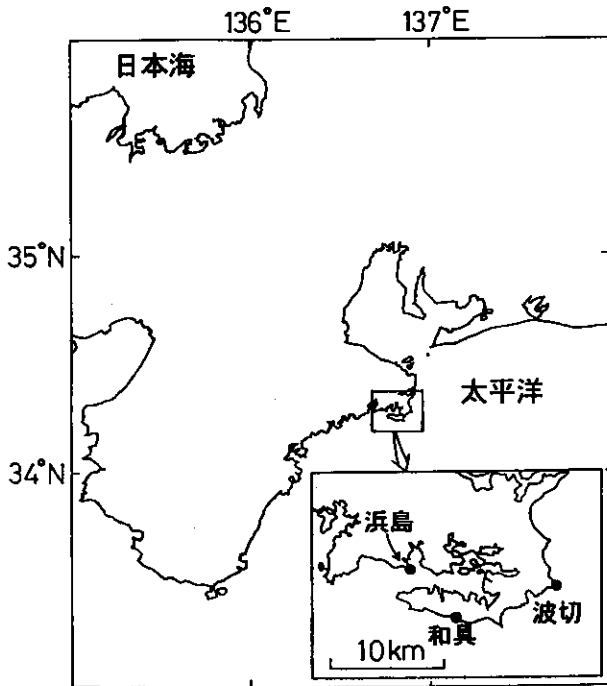


図1-3. 調査対象地区

1,238t, 20.8%，三重県全体では166.9 t, 29.9%，和具漁協では20.7 t, 28.4%であった。

和具地区では、36隻のイセエビ刺網漁業者で構成される漁業管理団体（「海老網同盟会」と称する）が漁協の下部組織として運営されており、漁業者同志の話し合いと合意形成をもとにした管理の推進母体として機能している。当地区では漁場を、休漁日以外なら会員が自由に操業できる「一般漁場」と、通常は禁漁として一定の期間だけ共同（水揚げプール制）で操業を行う「禁漁区」に区分している。そのうち、「一般漁場」での年間漁獲

量は全漁獲量中の70～80%を占める。

漁期は三重県漁業調整規則と同じ10月1日～4月30日である。毎月第2、第4金曜日と正月前後は休漁とするほか、近年では満月前後の旧暦14日～18日は同盟会の申し合わせによって休漁としている。

操業は、10トン前後の船（通常2名、場合によっては3名が乗船）で三枚網を使用して行う。毎日15時に一斉に港を出港後、各自が思い思いの漁場に入網して1晩放置し、翌日の早朝に揚網する。使用網数は1隻あたり13丈以下（1丈の長さは網地長で200間（≒300m）、仕立て上り長で約140m）と定めているが、漁獲量が多く、価格の低下が懸念される時期には9～10丈以下とするなど、弾力的な運用がなされている。網目の大きさは2寸3分（鯨尺；1寸は3.7875cm）以上、太さは10本撚り以上と決められている。揚網は動力ローラーを用いて網をエビごと船上に巻き取って行う。陸上へ運ばれた網は1船あたり5名～10名（平均7.7名）で捌かれ、イセエビやその他の混獲物が網から外されて仕分けされる。操業水深は3mから80mにわたり、イセエビが通常、生息する水深のほぼ全範囲を網羅しているとみなすことができる。一般漁場における水深別の延べ出漁隻数と漁獲重量を年別に集計し、図1-5に示した。

漁獲されたイセエビは大小の別なくすべてが一旦、市場へ集められる。市場職員によって「特大」（380g以上）、「中」（120g～380g）、「小」（80g～120g）、「ボロ」（脚や触角が著しく損傷した個体）の各銘柄に仕分けされる過程で、自主的な取り決めによる制限サイズ以下の小型エビが選別され、同盟会役員の手で後日、まとめて

漁場へ再放流される。小型エビの制限サイズは三重県漁業調整規則による制限サイズ（体重で60～70gに相当）より引き上げ、一般漁場では体重80g以下、禁漁区では120g以下としている。小型エビの再放流実績は毎年15,000尾程度に達する。

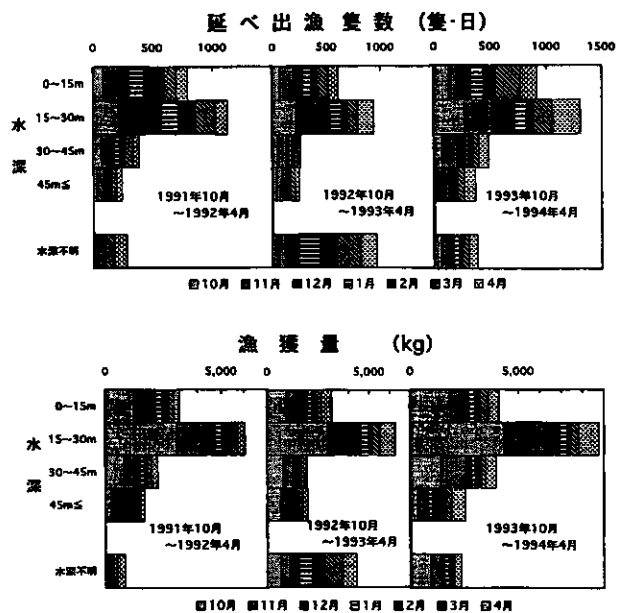


図1-5. 三重県和具地区の一般漁場における水深別の延べ出漁隻数(上)とイセエビ漁獲量(下). 1991年～1992年, 1992年～1993年, 1993年～1994年の3漁期(いずれも10月～4月)について例示した。日々の漁獲伝票と操業水深に関する全漁業者からの報告をもとに集計した。

第2章 体長組成データの解析による成長の推定

2.1 はじめに

対象生物の成長の把握は、水産資源の解析における最重要事項のひとつである。成長の推定結果によって望ましい資源管理のあり方が大きく左右されることも稀ではない。

イセエビは脱皮によって硬組織を更新するため、魚類の耳石、鱗、脊椎骨や貝類の殻などに相当する有効な年齢形質が発見されていない(増田 1954)。成長の推定は、飼育実験(大島ら 1960, 田中ら 1985, 田中 1988)、標識放流(静岡水試伊豆分場 1975^{**9}, 1976^{**10}, 石田・田中 1985, 金盛 1988)、漁獲物または採集個体の体長(頭胸甲長)組成(Nakamura 1940, 大島 1941, 大島ら 1960, 静岡水試伊豆分場 1975^{**9}, 1976^{**10}, Norman *et al.* 1994)などに基づいて行われてきた。しかし、飼育実験で得られた成長が天然海域のものと同じである保証はなく、標識放流による方法も、①標識の装着が成長・生残に与える影響が不明、②解析に十分なデータ数を確保しにくい、③得られる情報が放流時と再捕時のものに限られるため季節的成長を把握し難い、などの問題点がある。

静岡水試伊豆分場(1975^{**9}, 1976^{**10})は雌雄別に集計した頭胸甲長組成の検討により、静岡県南伊豆のイセエビの成長を推定した。これは、Harding (1949)の正規確率紙を用いた方法で複合正規分布への分解を行ったものであるが、①作図による分離手法であるため客観性に欠ける、②1セットのみの測定データに基づく推定であるため信頼性に疑問が残る、などの難点がある。

パーソナルコンピューターの発達と普及に伴い、体長組成解析のための手法やソフトウェアが急速に進歩しつつある(Shepherd *et al.* 1987, Majkowsky *et al.* 1987, Morgan and Pauly 1987, 山川 1997b)。体長組成解析法によると、年齢形質の利用できない種でも成長の推定が行えるほか、年齢組成の推定を通じて加入や減耗などの資源特性の把握やコホート解析へのデータ提供が可能となるなど、資源の定量的な解析への展開も期待できる。従来からの成長乱獲抑制の管理は無論のこと、近年強調

されている加入乱獲回避の管理(松宮 1996a, 1996b, 1996c, 1997, Katsukawa 1997, 勝川・松宮1997)など、資源管理への直接的な応用も可能である。

これらの手法には、①複合正規分布に基づかないもの(Shepherd 1987)、②生物学的仮定を設けずに純粋に複合正規分布へ分離するもの(Hasselblad 1966, MacDonald and Pitcher 1979, 赤嶺・加藤 1988, 堤 1990, 今井 1990, 和田 1993, 堤・田中 1994)、③age-length keyを用いるもの(真子・松宮 1977, 松宮・真子 1978, Kimura and Chikuni 1987, Matsumiya 1990b, Martin and Cook 1990, Akamine and Matsumiya 1992, 山川・松宮 1993)、④成長式を仮定してパラメータを求めるもの(Schnute and Fournier 1980, Fournier and Breen 1983, 田中 1990, Tanaka and Tanaka 1990)、⑤成長式などを仮定したうえで、経時的に採取された複数の体長組成データを一括して解析するもの(Pauly and David 1981, Pauly 1987, Sparre 1987, Fournier *et al.* 1990, 1991)など様々なものがある(山川 1997b)。

これらのうち、⑤の経時的な複数時点でのデータを一括して解析する手法は個別の解析に比べて、推定に用いる仮定の相互比較と妥当なモデルの選択、信頼区間の推定などが見通し良く行え、安定した結果を得ることができる。なかでも体長組成解析ソフトELEFAN(Pauly and David 1981, Pauly 1987)やMULTIFAN(Fournier *et al.* 1990, 1991)は世界的に普及しているが、成長が一定ではなく年ごとに変動する場合などには個別の解析に拠らざるを得ないため、データのもつ情報量を十分には活用できない。

本章では、経時的な複数の体長組成データの一括解析において、年などによる成長の変動があっても解析可能な手法を提示するとともに(Yamakawa and Matsumiya 1997)、イセエビの頭胸甲長組成データに適用し、漁獲物の年齢組成、成長、加入、減耗過程などを精査した(山川 1997a, 1997b)。

2.2 解析モデルの構成

2.2.1 基本構成

ある期間中に市場に水揚げされた漁獲物を母集団として、経時的に採取された複数の体長組成データを考える。各回におけるサンプリングはランダムに行われ、測定誤

**9 静岡県水産試験場伊豆分場：昭和49年度大規模増殖場開発事業調査報告書(下田, 南伊豆地区; イセエビ)。静岡県水産試験場伊豆分場, 1975, pp.1-50。

**10 静岡県水産試験場伊豆分場：昭和50年度大規模増殖場開発事業調査報告書(南伊豆地区; イセエビ)。静岡県水産試験場伊豆分場, 1976, pp.1-69。

差は無視できると仮定する。

第 α 番目の体長組成データセットからランダムに個体を抽出する場合に、その個体が体長階級 i に含まれる確率 (理論値) を $Q_{i\alpha}$ とする。データセット α の体長階級 i に含まれる個体頻度 (観測値) を $f_{i\alpha}$ 、データセット α の総個体数を F_α とするとき、 $|f_{i\alpha}|$ を得る確率 P は多項分布を用いて次のように表せる。

$$P = \prod_{\alpha=1}^{N_A} \left(\frac{F_\alpha!}{\prod_{i=1}^{N_i} f_{i\alpha}!} \prod_{i=1}^{N_i} Q_{i\alpha}^{f_{i\alpha}} \right) \quad (2.1)$$

ここで N_A : データセットの数
 N_i : 体長階級の数

である。

データセット α における j 年齢の体長頻度分布が正規分布 $N(L_{j\alpha}, \sigma_{j\alpha}^2)$ に従うと仮定すると、 $Q_{i\alpha}$ は複合正規分布として次のように表せる。

$$Q_{i\alpha} = \sum_{j=j_{\min}}^{j_{\max}} \frac{p_{j\alpha} \omega}{\sqrt{2\pi} \sigma_{j\alpha}} \exp\left\{-\frac{(l_i - L_{j\alpha})^2}{2\sigma_{j\alpha}^2}\right\} \quad (2.2)$$

ここで $p_{j\alpha}$: データセット α 内での j 年齢の出現率,
 ω : 体長階級幅,
 l_i : 体長階級 i の体長中央値,
 j_{\min} : 最小年齢,
 j_{\max} : 最高年齢,
 $L_{j\alpha}$: データセット α における j 年齢の平均体長,
 $\sigma_{j\alpha}$: データセット α における j 年齢の体長の標準偏差,

ただし、

$$\sum_{j=j_{\min}}^{j_{\max}} p_{j\alpha} = 1 \quad (2.3)$$

である。

以上の基本モデルに、 $L_{j\alpha}$ 、 $\sigma_{j\alpha}$ 、 $p_{j\alpha}$ を表現するいくつかの制約モデルを導入し、パラメータの同時推定を行う。最大化を行う目的関数は対数尤度 L とした。

$$L = \ln(P) = \sum_{\alpha=1}^{N_A} \left\{ \ln(F_\alpha!) - \sum_{i=1}^{N_i} \ln(f_{i\alpha}!) + \sum_{i=1}^{N_i} f_{i\alpha} \ln(Q_{i\alpha}) \right\} \quad (2.4)$$

モデルの妥当性の判定は赤池情報量規準 (AIC; Akaike Information Criterion, Akaike 1973) で行った。

$$AIC = -2(\text{最大対数尤度}) + 2m \quad (2.5)$$

ここで m は推定すべきパラメータの数である。

2.2.2 成長と標準偏差, 各群の出現率を表すモデル
 成長を表すモデルには、Richards の一般式に季節的成長を導入した Akamine (1993)、赤嶺 (1995a) の標準式を用いた。年などによる成長変動があっても解析が可能なように、パラメータはデータセットごとに設定する (Yamakawa and Matsumiya 1997)。

$$L_{j\alpha} = \frac{L_{\infty\alpha}}{\left[1 + r \exp\left\{-K_\alpha(G(j, \alpha) - G(j_{0\alpha}, \alpha))\right\}\right]^{1/r}} \quad (2.6)$$

$$G(j, \alpha) = j + \frac{A_\alpha}{2\pi} \sin 2\pi(j - j_{1\alpha}) \quad (2.7)$$

ここで、

$L_{\infty\alpha}$: データセット α における極限体長,
 r : 式の形に関係するパラメータ,
 K_α : データセット α における成長係数,
 $j_{0\alpha}$: データセット α における成長式の変曲点を表すパラメータ,
 A_α : データセット α における季節的成長の大きさ (振幅) を表すパラメータ,
 $j_{1\alpha}$: データセット α における季節的成長の位相を調節するパラメータ,

である。

上式は $r = -1, -1/3, 0, 1$ のときにそれぞれ、von Bertalanffy 式、その 3 乗式、Gompertz の式、logistic 式と一致する (Akamine 1993, 赤嶺 1995a)。(2.7) 式で $A_\alpha = 0$ と置いて固定すれば、季節的成長を導入しないモデルとなる。

各群の体長の標準偏差 $\sigma_{j\alpha}$ を表すモデルには様々なものが考えられる。ここでは以下の 4 通りが選択できるように設定した。

$$\textcircled{1} \sigma_{j\alpha} = a_\alpha \quad (\text{一定}) \quad (2.8)$$

$$\textcircled{2} \sigma_{j\alpha} = a_\alpha j + b_\alpha \quad (\text{線形}) \quad (2.9)$$

$$\textcircled{3} \sigma_{j\alpha} = \frac{c_\alpha}{1 + \exp\{a_\alpha(1 - b_\alpha j)\}} \quad (\text{シグモイド型; ロジスティック曲線}), \quad (2.10)$$

$$\textcircled{4} \sigma_{j\alpha} = \left[a_\alpha + \frac{b_\alpha}{2K_\alpha} \{1 - \exp(-2K_\alpha j)\} \right]^{1/2} \quad (\text{Tanaka and Tanaka 1990 の式}), \quad (2.11)$$

$a_\alpha, b_\alpha, c_\alpha$: パラメータ。

各年齢の出現率 $p_{j\alpha}$ は、

① (2.3) 式を除いて制約条件を全く仮定しない場合、
 ② ある年齢 (j_R) 以上の群では次式のように、全減少係

数 $Z_{j\alpha}$ に従って減耗すると仮定する場合

$$p_{j\alpha} = p_{jR\alpha} e^{-Z_{j\alpha}(j-j_R)} \quad (2.12)$$

の2通りについて解析を行った。ここで、加入量、および j_{jR} 以後の減耗率は年によって変動しないと仮定した。

本論文ではサイズによる漁獲選択性に起因する、加入群の平均体長の偏り (Fournier *et al.* 1990) は考慮に入れなかった。しかしサイズに従う鋭い漁獲選択性が存在すると、加入齢に達した群の漁場内に分布する個体の平均体長は、実際に漁獲された個体の平均体長とは異なるため、推定結果に偏りが生じる恐れがある。その影響を避けるため、(2.2) 式に体長 l_i に従う漁獲選択率 $\rho(l_i)$ を導入し、

$$Q_{i\alpha} = \sum_{j=j_{\min}}^{j_{\max}} \rho(l_i) \frac{p_{j\alpha} \omega}{\sqrt{2\pi} \sigma_{j\alpha}} \exp\left\{-\frac{(l_i - L_{j\alpha})^2}{2\sigma_{j\alpha}^2}\right\} \quad (2.13)$$

として解析を行うことができる。ここで $\rho(l_i)$ は、シグモイド型の曲線 (ロジスティック曲線; 4.4 式) などが仮定できる。

2.2.3 パラメータの設定

年によって成長の変動がある場合にも一括解析が可能のように、各パラメータはデータセットごとに異なる、複数の値を採りうるようにした。例えば成長変動のために成長係数 $K_{j\alpha}$ の値が年によって異なると考えられる場合には年ごとに別個の $K_{j\alpha}$ を設定できるようにし (年によってパラメータを「非共有」、と称する)、逆に成長変動が無視できる場合にはすべての年について共通の $K_{j\alpha}$ を設定 (すべての年でパラメータを「共有」) できるようにした。共有/非共有の選択は各パラメータごとに独立に行えるため、例えば、 $K_{j\alpha}$ と $j_{j\alpha}$ は年ごとに「非共有」として $L_{\infty\alpha}$ と $A_{j\alpha}$ 、 $j_{j\alpha}$ はすべての年で「共有」する、いずれのパラメータも基本的には「共有」とするが1年目と3年目は $L_{\infty\alpha}$ のみを「非共有」とする、などの自由な設定が可能である。また、「年」に限らず任意のデータセット間でパラメータの共有/非共有が選択できるため、年内の前半と後半で別々のパラメータを用いる、ことなども自由である。共有/非共有の選択は成長式に関するパラメータのみならず、標準偏差に関するパラメータや全減少係数 (およびその導入齢 j_R) についても同様に行える。この手法によればどのようなデータでも一括解析が可能となるため、データの情報量の損失を極力回避しながら頑健で弾力的な推定が行える。

一方各パラメータは、未知として推定の対象にするか、あるいは既知としてあらかじめ設定した値に固定するか

を、任意に選択できるようにした (推定/固定の選択)。例えば、極限体長 $L_{\infty\alpha}$ は年齢形質法で求めた値に固定して他のパラメータの推定に利用する、とか、成長式は固定しておいて各年齢群の出現率の推定のみを行う、などの利用が可能である。他の情報源によって推定された値を既知として導入することにより、当該の解析だけでは情報量が不足して結果が不安定になるような場合でも頑健な推定を行うことができる。なお、当手法の詳細については Yamakawa and Matsumiya (1997) も併せて参照されたい。

2.3 適用データ

三重県和具地区の禁漁区を除いた一般漁場で、刺網によって漁獲されたイセエビの頭胸甲長 (以下甲長と記す) 組成データを用いた (図2-1, 図2-2)。用いたデータは5年分 (1990年-1991年, 1991年-1992年, 1992年-1993年, 1993年-1994年, 1994年-1995年の各漁期) で、漁期開始の10月から漁期終了の4月までの期間のうちの5ヶ月分のデータ (10月, 11月, 12月, 3月, 4月) から成る。1月と2月はイセエビの水揚げが少なく、低水温のために成長も停滞するので、データは収集しなかった。1990年-1991年漁期については、11月から3月のデータはなく、10月と4月の2ヶ月分のデータのみを用いた。

甲長は、ノギスを用いて0.1mm単位で個体ごとに測定した。解析は、雌雄別に集計した1mm間隔の階級区分ごとの出現個体数 (頻度) を基に行った。測定個体数は合計で62,605個体 (雄: 38,486個体, 雌: 24,119個体) であった。これは、調査期間中に一般漁場で漁獲された全個体数のおおよそ14%に相当する。

解析には、表2-1に示したA~H, Jの9通りのモデルを仮定して、比較検討した。成長式は、(2.6) 式で $r = -1$ と置いて von Bertalanffy 式に固定した。季節的成長を導入する場合としない場合について解析し両者を比較した。標準偏差を表すモデルについては① (一定; 2.8式) と④ (Tanaka and Tanaka 1990の式; 2.11式) の2通りで比較を行った。各年齢群の出現率に関して制約条件を全く仮定しない①の場合では、年齢群数 $j_{\max} - j_{\min} + 1$ は4~6群の3通りを仮定し、全減少係数を導入した②の場合では導入齢 j_R を4齢と5齢の2通り (この場合は年齢群数はいずれも10群) とした。パラメータの共有/非共有の設定では、全てのパラメータを「共有」とする場合と、成長係数 $K_{j\alpha}$ と変曲点 $j_{j\alpha}$ のみを年ごとに「非共有」とする場合を設定した。仮定した

パラメータは固定せずに全てを未知として推定した。

なお、ここで「齢」と称するのはプエルルスとして着底後の推定経過年数を指す**11。

2.4 結果および考察

2.4.1 モデルの妥当性

仮定したモデルの妥当性を検討するため、(2.5)式によるAICを計算し表2-1に併記した。

比較を行った9通りのモデルのうち、雌雄ともにモデルAでAICの値が最小で、妥当性が最も高いと判断された。季節的成長を導入しないモデルBでは季節的成長を導入したモデルAよりも妥当性が低下した。甲長の標準

偏差を一定とした場合(C)も、④の(2.11)式に従って標準偏差が変化すると仮定したAの場合に比べて妥当性が低下した。全減少係数を導入しないモデル(D~F)よりも導入したモデル(A, H)で妥当性が高く、さらに3齢, 5齢以上の群が全減少係数に従って減耗すると仮定したモデルG, Hよりも4齢以上の群に全減少係数を導入したモデルAで妥当性が高かった。パラメータをすべての年で共有し、成長の年変動を考慮しないモデルJでは、成長式のパラメータ K_{α} と $j_{0\alpha}$ を年によって非共有としたAの場合に比較して妥当性が著しく低下した。成長には年によって相当ばらつきがあることが示唆された。

表2-1. 体長組成解析において仮定したモデルの妥当性の検討結果。AICの値が雌雄ともに最小となるモデルAが最も妥当性が高いと判断された

モデル	*1	*2	*3	*4	*5	*6 AIC	
	季節的成長	標準偏差式	全減少係数	齢群数	成長の年変動	雄	雌
A	○	④	○(4齢以上)	10	○	7902.36	5846.71 *7
B	—	④	○(4齢以上)	10	○	8886.51	5977.47
C	○	①(一定)	○(4齢以上)	10	○	7991.79	5981.88
D	○	④	—	4	○	7960.62	6109.94
E	○	④	—	5	○	7938.24	6034.28
F	○	④	—	6	○	7957.94	6020.52
G	○	④	○(3齢以上)	10	○	7929.02	5861.24
H	○	④	○(5齢以上)	10	○	7904.73	5861.24
J	○	④	○(4齢以上)	10	—	8586.14	6159.32

*1 ○: (2.7)式の A_{α} , $j_{0\alpha}$ ともに未知として推定, —: (2.7)式で $A_{\alpha} = 0$ と固定.

*2 ①: (2.8)式を導入して一定とする, ④: (2.11)式を導入する.

*3 ○: (2.12)式に従ってカッコ内の齢(j_{R})以上の群に全減少係数 Z_{α} を導入する, —: Z_{α} を導入しない.

*4 $j_{\max} - j_{\min} + 1$.

*5 ○: 導入する(K_{α} と $j_{0\alpha}$ を年ごとに「非共有」とし, その他のパラメータは「共有」する), —: 導入しない(すべてのパラメータを「共有」して推定).

*6 (2.5)式による.

*7 モデルAが最も妥当性が高い.

**11 フィロソマの期間が不明で生後の「年齢」の特定ができないため、便宜的にこのような呼称を用いることにする。本論文では以下すべて同様である。なお、齢の起算はプエルルスの着底盛期である8月1日を基準に行うものとする。すなわち、8月1日を加齢日として計算する。

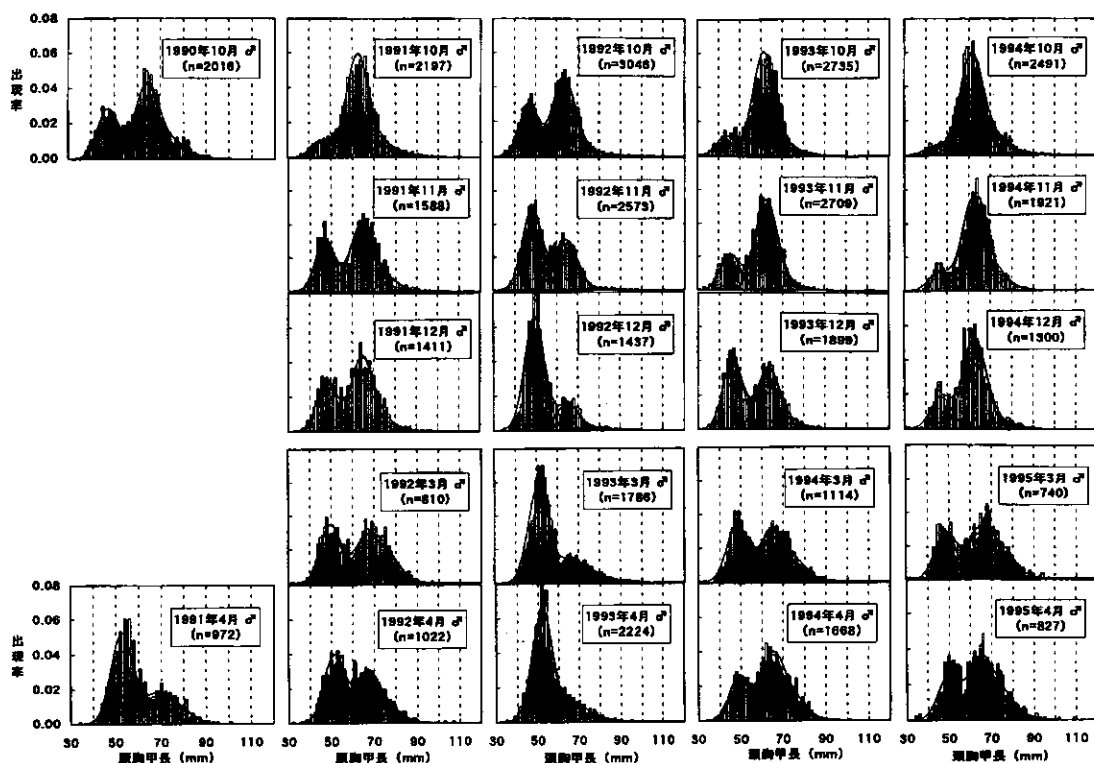


図 2-1. 体長組成解析による年齢群の分離結果 (雄, モデルA). 左の列から順に, 1990年-1991年, 1991年-1992年, 1992年-1993年, 1993年-1994年, 1994年-1995年の各漁期 (いずれも10月~4月) に該当する. 各月とも頭胸甲長の小さい群から順に, 1 年齢群, 2 年齢群, 3 年齢群, ... である. n は各月における測定個体数を表す.

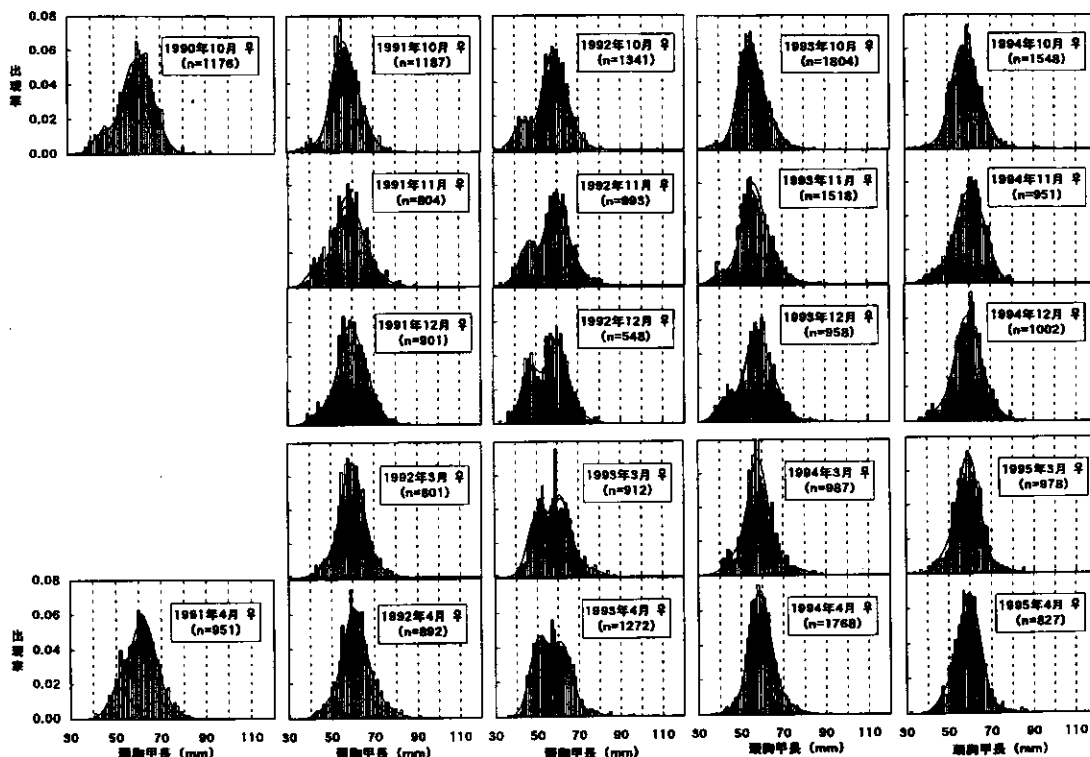


図 2-2. 体長組成解析による年齢群の分離結果 (雌, モデルA). 左の列から順に, 1990年-1991年, 1991年-1992年, 1992年-1993年, 1993年-1994年, 1994年-1995年の各漁期 (いずれも10月~4月) に該当する. 各月とも頭胸甲長の小さい群から順に, 1 年齢群, 2 年齢群, 3 年齢群, ... である. n は各月における測定個体数を表す.

2.4.2 漁獲物の年齢組成と加入および減耗

妥当性が最も高いと判断されたモデルAについて、体長組成解析によるデータセット別の各年齢群への分離結果を雌雄別に図2-1と図2-2に、各年齢群の出現率の詳細を表2-2に示した。

和具地区での漁獲の主群は雌雄ともに2年齢群であった。漁獲への加入は1年齢群では不完全で、漁期の進行とともに加入の増加が認められた。雌の1年齢群の加入は雄に比べて遅れる傾向にあった。3年齢以上の高齢群の出現率は低く、ピークは不明瞭であった(図2-1, 図2-2)。

1年齢群の加入状況は年によって相違していた。例えば雄では、1991年-1992年漁期の前半には2年齢群が漁獲の主群であったのに対し、1992年-1993年漁期では10月時点でも相当数の1年齢群が加入しており、漁期の進行に伴って大部分が1年齢群で占められるようになった(図2-1)。雌では、1991年-1992年漁期には1年齢群の加入は少数で

あったが、1992年-1993年漁期では相当数の1年齢群の加入が認められた(図2-2)。

加入の完了したと考えられる2年齢群について、3年齢までの生残率を計算すると、全データセットの平均値で雄:25.0%, 雌:28.5%となった。すなわち、自然死亡と漁獲による減耗を合わせて年間7~8割の減耗率ということになり、拡張 DeLury 法による推定漁獲率の値(65%; 第3章)も考慮に入れ、2年齢以上の群に対する漁獲圧が相当高いことがわかる。

2.4.3 成長

成長のパラメータの推定結果を表2-3に、推定された成長曲線を図2-3に示した。

成長には雌雄差があり、雌より雄の方が速く成長すると推定された。季節的な成長変動がみられ、冬季には雌雄ともに成長が停滞した。年によって成長に差があり、

表2-2. 体長組成解析におけるモデルAでのデータセットごとの年齢別出現率 $f_{a,t}$ の推定結果. 三重県和具での5年間のデータに適用した。モデルの詳細については本文を参照のこと

	年齢別出現率 (♂)				年齢別出現率 (♀)			
	1年齢群	2年齢群	3年齢群	4年齢群	1年齢群	2年齢群	3年齢群	4年齢群
1990年10月	0.317	0.553	0.107	0.013	0.126	0.517	0.345	0.003
1991年 4月	0.646	0.221	0.124	0.005	0.202	0.633	0.130	0.009
1991年10月	0.106	0.771	0.093	0.017	0.036	0.715	0.236	0.003
1991年11月	0.356	0.517	0.115	0.007	0.142	0.563	0.252	0.011
1991年12月	0.347	0.571	0.072	0.005	0.084	0.592	0.299	0.007
1992年 3月	0.423	0.347	0.220	0.006	0.080	0.786	0.114	0.005
1992年 4月	0.491	0.398	0.098	0.007	0.086	0.703	0.140	0.019
1992年10月	0.344	0.600	0.046	0.006	0.175	0.632	0.187	0.002
1992年11月	0.575	0.404	0.011	0.006	0.251	0.567	0.157	0.006
1992年12月	0.772	0.202	0.015	0.006	0.349	0.559	0.074	0.005
1993年 3月	0.722	0.185	0.068	0.014	0.390	0.544	0.010	0.015
1993年 4月	0.813	0.138	0.041	0.005	0.488	0.482	0.000	0.008
1993年10月	0.131	0.795	0.064	0.005	0.031	0.734	0.215	0.005
1993年11月	0.246	0.713	0.038	0.002	0.075	0.669	0.224	0.008
1993年12月	0.478	0.474	0.038	0.005	0.145	0.554	0.275	0.007
1994年 3月	0.420	0.412	0.156	0.007	0.100	0.838	0.000	0.016
1994年 4月	0.324	0.516	0.150	0.006	0.037	0.847	0.086	0.008
1994年10月	0.062	0.794	0.124	0.012	0.024	0.649	0.303	0.006
1994年11月	0.130	0.723	0.136	0.006	0.077	0.463	0.448	0.003
1994年12月	0.221	0.712	0.049	0.010	0.064	0.639	0.272	0.007
1995年 3月	0.348	0.373	0.244	0.020	0.103	0.863	0.000	0.009
1995年 4月	0.325	0.462	0.186	0.015	0.124	0.852	0.000	0.006

1992年-1993年漁期では他の年より雌雄ともに甲長が大きく、逆に1993年-1994年漁期には雌雄とも小さい傾向がみられた。パラメータをすべての年で共通とし、成長の年変動を考慮しないモデルJで解析したAICの値は、雄では8586.14、雌では6159.32であり、成長式のパラメータ K_{α} と j_{α} を年によって独立としたモデルAでの結果(雄のAIC=7902.36、雌のAIC=5846.71)に比較して妥当性が著しく低下した(表2-1)。

各年齢群の平均甲長の推定値は、雄では1齢43.2mm~46.7mm(45.0mm)、2齢60.8mm~64.0mm(62.4mm)、3齢72.4mm~75.6mm(74.1mm)、雌では1齢38.9mm~44.9mm(42.3mm)、2齢54.0mm~57.8mm(56.2mm)、3齢63.3mm~66.0mm(64.7mm)(いずれも三重県で漁期が始まる10月1日時点での値、カッコ内は5年間の平均値)であった(図2-3)。推定された成長を、三重県(1992)**12の求めた甲長(CL, mm)-体重(BW, g)の関係式

$$BW=0.001005 CL^{2.9601} \text{ (雄)}$$

$$BW=0.001525 CL^{2.6667} \text{ (雌)}$$

を用いて体重に換算して表示すると、雄では1齢が69.7g~87.8g(78.7g)、2齢が192g~223g(207g)、3齢が322g~365g(344g)、雌では1齢が55.1g~83.1g(70.1g)、2齢が141g~172g(158g)、3齢が223g~251g(237g)

(いずれも10月1日時点での値、カッコ内は5年間の平均値)となる。

2.4.4 密度従属成長

年によって成長に差異が生じる原因について、密度従属的な成長変動の可能性を検討した。図2-4には、横軸に漁場における資源密度の指標としての10月における平均CPUE(一般漁場におけるkg単位の総漁獲重量/延べ出漁隻数)の値を、縦軸に各年の成長の遅速を示す尺度としての10月における1齢群と2齢群の推定平均甲長をとり、雌雄別に5年分の各点をプロットした。なお、横軸に漁獲重量ではなく漁獲尾数から計算したCPUEを採用することも考えられるが、個体の大きさによって密度従属過程に及ぼす影響が異なることも考えられるため、ここではすべての年齢群を込みにした資源密度の指標として、いわば体重で重み付けした密度指数としての「漁獲重量によるCPUE」を採用した。

いずれの場合も10月のCPUEが高い年には体長が小さい傾向がみられ、資源密度の高い年ほど成長が劣ることが示唆された。1齢群と2齢群の雌雄の各群における回帰直線の傾きがすべて0であるという帰無仮説(密度独立的な成長)を検定すると、このような観測値が得られる確率Pの値は0.027となり、危険率5%の水準で仮説

表2-3. 体長組成解析におけるモデルAによるパラメータの推定結果、三重県和具での5年間のデータに適用した、季節的成長と標準偏差の変化(④式)、全減少係数(4齢以上)を導入し、成長式のパラメータ K_{α} と j_{α} は年ごとに非共有とした

漁期	Bertalanffyの成長式			季節的成長		標準偏差式		全減少係数
	L_{∞}^{*1}	K_{α}	j_{α}^{*2}	A_{α}	$j_{1\alpha}^{*2}$	a_{α}	b_{α}	
♂	1990年~1991年		0.408	-0.199				
	1991年~1992年		0.403	-0.153				
	1992年~1993年	98.5	0.390	-0.241	0.727	0.001	0.13	5.103
	1993年~1994年		0.395	-0.118				
	1994年~1995年		0.367	-0.235				
♀	1990年~1991年		0.488	-0.653				
	1991年~1992年		0.482	-0.447				
	1992年~1993年	78.3	0.527	-0.321	0.548	0.146	0.01	4.972
	1993年~1994年		0.481	-0.167				
	1994年~1995年		0.454	-0.647				

*1 : mm

*2 : 年

*3 : /年

**12 三重県：平成3年度資源管理型漁業推進総合対策事業報告書(地域重要資源)、鈴鹿地区マアナゴ、和具地区イセエビ、三重県、1992、81pp.

は棄却された（第1自由度が4，第2自由度が12の分散分析）。したがって，10月における平均CPUEと各群の推定平均甲長の間には有意な負の関係が認められ，イセエビには密度従属的な成長変動が存在すると考えられた。

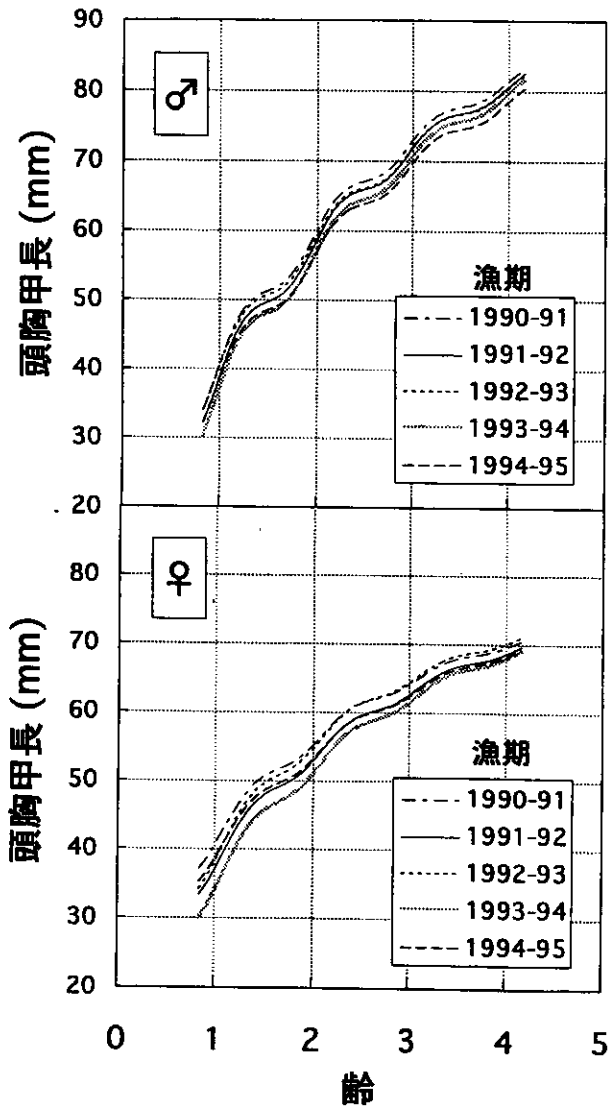


図2-3. 体長組成解析によって推定された，三重県和具地区におけるイセエビの成長曲線（モデルA）。便宜上，プエルスの着底盛期に相当する8月1日を加齢日とした。推定方法の詳細については本文を参照のこと。

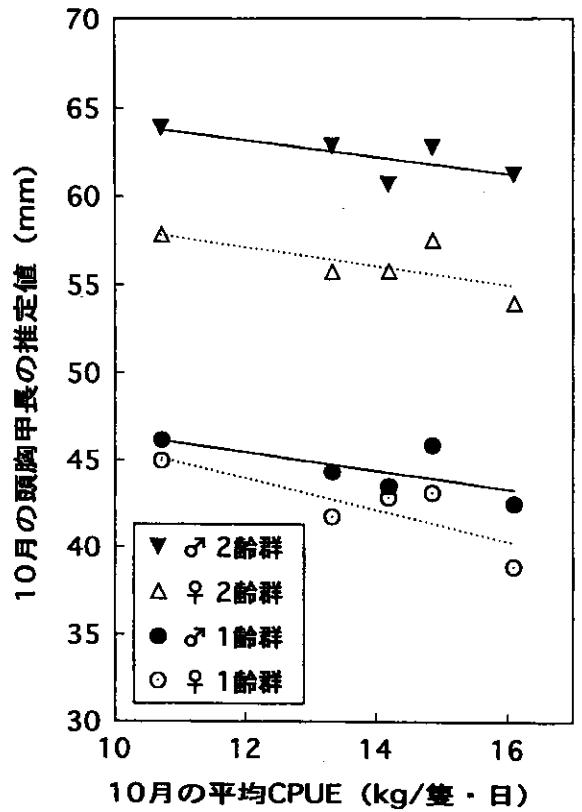


図2-4. 密度従属的な成長変動の検討。横軸に，漁場における資源密度の指標としての10月における平均CPUE（一般漁場における漁獲重量/延べ出漁隻数）の値を，縦軸に各年の成長の遅速を示す尺度としての10月における1齢群と2齢群の推定平均甲長をとり，年別雌雄別に各点をプロットした。回帰直線の傾きがすべて0であるという帰無仮説を検定したところ，危険率5%の水準で仮説は棄却された（第1自由度が4，第2自由度が12の分散分析； $P=0.027$ ）。

2.4.5 刺網の漁獲選択性

漁期内での1齢群の加入の進行と加入状況の雌雄差，年による変動が生じる原因について明らかにするため，イセエビのサイズによる刺網漁具の漁獲選択性について検討した。

加入群の平均甲長と，漁獲物中での各群の出現率の関係を図2-5に示した。漁獲物中での加入群の出現率は，各群の漁獲履歴や他の群の出現状況によっても左右されるが，この値の変化をもとに，サイズに伴う加入の進行や漁獲選択性の変化に関しておおよその傾向を知ることができる。

図2-5によると，40mm前後の群はほとんど漁獲されないのに対して，45~50mmに成長すると急激に漁獲されるようになり，さらに60mmを越える群では加入はほぼ完了していると考えられた。雄に比べて成長の遅い

雌は加入が遅れる傾向にあり、1992年のように他の年に比べて成長が良好な年には加入が進んでいる傾向もみられた。

このような加入過程はサイズ別の行動様式の相違によっても生じることが考えられるが、目合の異なる刺網を用いた試験操業結果によると、目合の相違によって漁獲されるイセエビの大きさが異なる（三重県 1993**¹³, 1997**¹⁴）ことから、このような加入過程は刺網の漁獲選択性に起因している可能性が高い。成長の速いグループほど、早期から加入が始まることが考えられる。雌雄による加入時期の差異や年による加入状況の相違も、各グループの成長と漁獲選択性の関係で理解できる。漁期の進行に伴う1齢群の加入の増加も、漁期内のイセエビの成長と漁獲選択性の関係によって解釈できる。

2.5 論 議

既往の文献によるイセエビの成長の推定結果と本論文での解析結果を比較して図2-6に示した。なお、b)中村(1940)による成長は、刺網漁業へ加入する前の小型群の成長に関して論議するために、Nakamura(1940)に報告された月別の甲長組成データを、本章での一括解析手法を用いて再解析したものである（山川 1997b）。これらのうち、h)田中ら(1985)およびi)田中(1988)の推定値は他の報告例に比べて明らかに小さい。海域間でイセエビの成長速度に遅速のあることは当然考えられるが、f)~i)とk)はいずれも千葉県での調査結果であることを考慮すれば、飼育実験によるh)とi)の推定値は天然海域における成長とは異なっている可能性が高い。d)静岡水試伊豆分場(1975)の値も他より小さいが、正規確率紙における視覚的な分離であるため、客観性に疑問が残る。同報告の第17図では、石廊崎~田牛地先の雄について頭胸甲長75mm以下の範囲に4群を分離しているが、2齢の甲長を50mm台の後半の値として75mm以下を3群に分離するほうが自然であり、他の報告例と同程度の成長の推定値を得ることができる。雌についての第18図の推定でも、実際の成長を過小評価している可能性が高い。これらの報告例(d, h, i)を除けば、本論文による成長の推定結果と既往の報告はいずれもほぼ同様であった。

イセエビの成長は密度従属的な要因によって年ごとに変動することが示された。他のイセエビ類でも密度従属的な成長変動に関しては、いくつかの報告がある（Chittleborough 1976a, Pollock 1987, Breen and Booth 1989, Polovina 1989, Pollock 1991a, 1991b）。本章で導出した解析手法によると、成長変動のある場合でも経時的な体長組成データを一括して解析できるため、データに内在する情報量を有効に活用して精度の高い推定を行うことができる。

データセットごとの個別解析と比較した、一括解析の利点は以下のように整理できる。

- ア) 複数データの集積によって、より多くのサンプルに基づいた精度の高い解析が行える。現場での調査では、1回（あるいは1時期）のみの調査によって解析に十分なサンプル数を確保できるとは限らない。
- イ) 1回のデータでは、サンプリングの時期によって母集団や標本に偏りが生じる可能性があり、複数データ

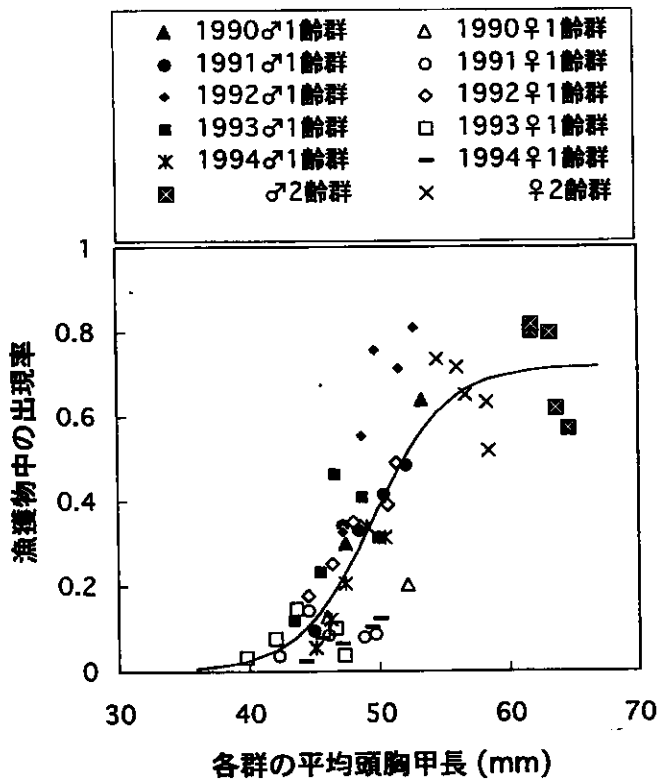


図2-5. サイズによる漁獲選択性に関する検討結果。加入群の平均甲長（年別月別雌雄別）と、漁獲物中での各群の出現率の関係を示した。1つの点が1ヶ月分のデータに相当する。比較の対照として、2齢群についても10ヶ月分のデータのみを雌雄別にプロットした。実線は、非線形最小自乗法によってあてはめられたシグモイド型の曲線（ロジスティック曲線）を表す。

**¹³ 三重県：平成4年度資源管理型漁業推進総合対策事業報告書（地域重要資源）。鈴鹿地区マアナゴ、和具地区イセエビ。三重県，1993，53pp..

**¹⁴ 三重県：平成8年度資源管理型漁業推進総合対策事業報告書（沿岸特定資源）。賢湾地区イセエビ。三重県，1997，22pp..

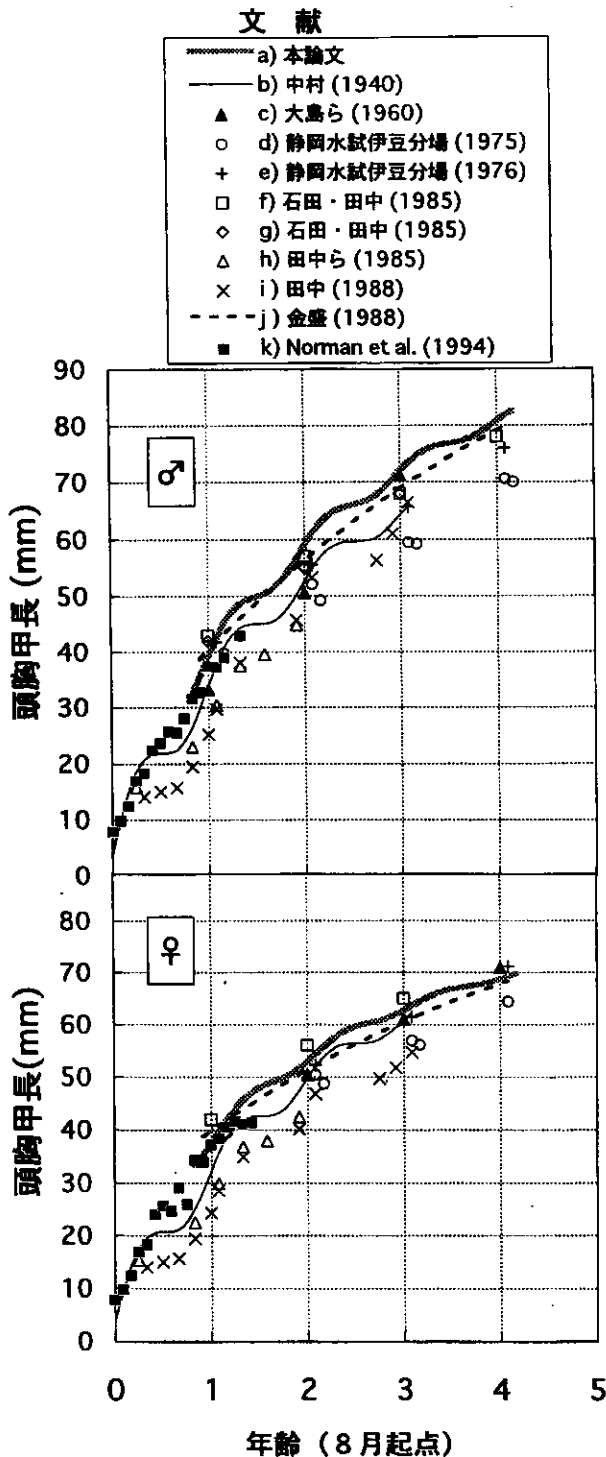


図2-6. 既往の文献と本論文によるイセエビの成長の推定結果の比較。雌雄別の推定値が記載されている文献から抜粋した。上：雄，下：雌。各文献はそれぞれ，a)本論文(三重県和具)，b)本論文での手法によるNakamura(1940)のデータの再解析(千葉県小湊)，c)頭胸甲長組成のモード(神奈川県三崎)，d,e,f)Hardingの方法による年齢群分離(d,eは静岡県南伊豆^{9,10}，fは千葉県大原)，g)標識放流(千葉県大原)，h,i)飼育実験(千葉県)，j)標識放流(和歌山県紀南海域)，k)潜水調査による採集個体の測定値(千葉県坂田)に基づく推定である。

セットの一括解析によって偏りを均一化する効果が期待される。

ウ) 個別データの解析に比べて，群間の平均体長の差や各群の出現比に関してデータの多様性が高くなるため，推定精度の向上が期待される。田中(1954)は正規分布をする二群の混合した分布について，群間の平均の差，標準偏差の比，および各群の出現比を変えた場合に，bimodeとなる条件とこぶの出る条件を求めた。1回のデータでは年齢群の分離が困難な場合でも，複数時点のデータではいずれかに bimode となる条件やこぶの出る条件を満たす可能性が高くなる。松宮・田中(1974)は群間の平均の差と群別の出現比を様々に変化させた場合の二群の混合分布の変化を，サンマを事例で紹介している。

エ) 成長の季節変化を検出することができる。個別の解析では季節変化は統一的には検出できない。

オ) 推定に用いる仮定の相互比較・検討や妥当なモデルの選択などを一貫性を保ちながら見通し良く行うことができる。個別の解析では最適な年齢群数や妥当なモデルがデータセットごとに異なる場合も生じ得る。

成長が変動する場合の一括解析において，本章ではデータセットごとにパラメータの共有/非共有を設定した。成長の変動要因が年に固有で，すべての年齢群に対して同様の影響を及ぼすような場合はこの方法で比較的忠実に変動を再現することができる。一方，年級群に固有の要因によって成長が変動する場合には，データセットごとではなく年級群ごとにパラメータの設定を行う必要がある。その場合は年ごとにパラメータを設定する場合よりも推定すべきパラメータ数が多くなるため計算が多少煩雑になるが，若齢時の成長が後々の体長の大小に大きく影響する場合などには有効であろう。

体長組成解析の問題点として，一般にモードの不明瞭な高齢群に関して，推定精度の低いことが挙げられている。前述の bimode となる条件やこぶの出る条件(田中 1954, 松宮・田中 1974)が満たされない場合は，体長組成データだけからの年齢群の分離は困難である。極限体長 L_{∞} と成長係数 K ，全減少係数 Z ，標準偏差 $\{\sigma_i\}$ ，出現率 $\{p_i\}$ ，年齢群数などの間には相互補完的な関係があることが知られており，精度の高い推定を一層困難にする。例えば， L_{∞} と K の間には一方の値を高くすれば他方が低くなるという関係がみられ，同様に Z と年齢群数にも相互補完的な関係がみられる。

山川(1997b)は体長組成解析法と年齢形質法を結合させた推定の概念図を示した。年齢形質の利用できる種

では、成長に関する情報を年齢形質で補足しながら解析を進め、信頼性の高い結果を得ることが可能である。例えば、極限体長 L_{∞} は年齢形質での推定値に固定して解析したり、体長組成解析の尤度に年齢形質による尤度を同時に組み込んで目的関数とする (Martin and Cook 1990, 北門・山田 1997) ことなどが考えられる。標識放流で得られた情報の組み込み (北門・山田 1997) も有用であろう。しかし、イセエビでは有効な年齢形質が発見されていないので、高齢群に関して成長の推定精度を高めるためには、漁獲圧力が低く、高齢群が漁場内に多く残存しているような地区でのデータを収集して解析することなどが有効であろう。ここで推定された L_{∞} の値は現時点での参考値であり、将来、更に検討を加えることによって、より妥当な値を求める必要がある。

イセエビ刺網漁業ではサイズによる漁獲選択性の存在が示唆され、加入過程にシグモイド型の曲線があてはめられた。刺網の漁獲選択曲線について、魚類では漁獲実験による様々な例が報告されており、「刺し漁獲」が主体の魚種では一般にはドーム型の漁獲選択曲線があてはめられる (石田 1962, Kitahara 1971, Kawamura 1972, 梨本 1979, 松岡ら 1995 など)。これに対して三枚網の内網のたるみ等に関連して「絡まり漁獲」の要素が入ると大型群域での選択率が上昇し、漁獲選択曲線は右に尾を引く形状 (小池・竹内 1985, 小池・松田 1988, 藤森

ら 1990) や双峰性の曲線 (Matsuoka 1991) となることが知られている。イセエビでは選択曲線の形状は明確でないが、棘や付属肢の存在のために絡まり漁獲の要素が大きいと考えられるため、かなり右に尾を引く形状となることが予想される。したがって、イセエビの漁獲選択曲線は極端に大きな体長領域を除けばシグモイド型曲線でおおよそ近似することが可能であろう。

甲殻類は脱皮によって成長するため、個体別にみると外殻の成長は不連続となる。このため甲殻類の成長は、一脱皮あたりの成長量をもとにした不連続モデルで表現されてきた (Hiatt 1948, Wilder 1953, 倉田 1960, Kurata 1962, Mauchline 1976, 1977, Somerton 1980, Easton and Misra 1988, 大富・清水 1994 など)。本論文では、集団の成長を記述する場合は連続モデルの適用も可能と考え、イセエビの成長を連続モデルで表現した。同様の適用はシャコの成長の推定例 (大富・清水 1988, Hamano 1990) などにもみられる。ただし、イセエビ類の雌では抱卵期間中である夏季には脱皮を行わない (猪野 1950, Chittleborough 1976b) ため、一時的に成長が停滞することが知られている。本章で用いた季節的成長のモデル以外に、例えば春季と秋季に成長が速くなり、夏季には成長が停滞するモデルなど、より妥当性の高いモデルが提示できる可能性もある。この点については将来の検討課題であろう。

第3章 拡張 DeLury 法による資源評価

3.1 はじめに

漁獲量努力量データの解析は、資源評価に幅広く利用されてきた。なかでも、最も簡便に利用できるものが DeLury 法 (DeLury 1947) あるいは Leslie 法 (Leslie and Davis 1939) として知られる線形回帰モデルであろう。Moran (1951) および Zippin (1956) は除去法による最尤推定を展開した。数学的厳密性を備えた除去法は、サンプリング努力量が各期において一定の場合のモデルに相当する (Seber 1982)。これらのモデルでは単位努力あたりの、あるいはサンプリングごとの採集 (漁獲) 効率は一定であるとしているが、現実の漁業では採集 (漁獲) 効率が一定という仮定は常に満たされるとは限らない。

従来のイセエビに関する資源評価は、標識放流法 (野中 1959, 石田・田中 1986, 高知県 1987^{**15}) や通常の DeLury 法 (熊本県 1982^{**16}, 宮崎県 1982^{**17}, 高知県 1982^{**18}, 1985^{**19}, 金盛 1988, 木村・高梨 1993) によってなされてきた。このうち DeLury 法によるものは、累積漁獲量に対する CPUE (単位努力あたり漁獲量) が直線的に減少しているとみなせる、秋 (夏) の解禁時からのごく短期間のデータを意図的に選び出すか、あるいは冬季に至るまでの一部の期間のデータのみに基づいて行われるのが普通である。

刺網によるイセエビの CPUE は、漁場内の資源密度に左右されるのみならず、いくつかの環境要因の変動によっても影響を受ける (久保 1962, 久保・石渡 1964, Takagi *et al.* 1975, 余座ら 1977)。Takagi *et al.* (1975) は、冬にイセエビの漁獲量が最低となるのは、主として低水温に起因するイセエビの活動性の低下によると考えた。余座ら (1977) はイセエビの漁獲量は月の周期に強く影響されることを示し、これは月明の増加とともに夜間の遊泳活動が鈍るためと解釈した。また多くのイセエビ漁業者は、海が荒れた状態のときには漁獲量が多くなることを認めている。このような種や漁業に関する資源

評価においては、環境の変化に起因するデータ変動のために推定値が著しく偏っていたり、推定の精度が低いなどの弊害が生じる恐れがあるため、漁具能率を一定とする従来型モデルを改めて、環境要因によって漁具能率が変化すると仮定するのが自然であろう。

資源解析の統計モデルに用いる確率分布関数の選択も、パラメータの推定結果や精度を左右する重要な問題である (平松 1992)。現実のデータをもとに資源解析を行うにあたっては、用いる統計モデルの選択によって推定値の偏りや推定精度が大きく影響を受けることに留意する必要がある。

本章では、まず、DeLury 法 (除去法) の尤度に、水温や太陰月周期、波浪の強さなどの環境要因によって変化する漁具能率 q_i を導入し、 q_i の異なるいくつかの最尤モデルへと拡張した。イセエビ刺網漁業の漁獲量努力量データに適用し、 q_i に関する妥当なモデルを AIC (Akaike 1973, Matsumiya 1990a) によって選択した。次に尤度に、確率分布関数の異なる各種の統計モデルを導入し、AIC と推定パラメータの信頼区間の比較をもとに統計モデルの検討を行った。

3.2 モデルの構成

3.2.1 拡張 DeLury 法の基本モデル

N_0 を初期資源尾数、 C_i を i 期における漁獲によって資源から除去された尾数 ($i=1, 2, \dots, n$) とするとき、 $\{C_i\}$ を与える結合分布を条件付き二項分布の積として表すことができる:

$$L = \prod_{i=1}^n \binom{N_i}{C_i} p_i^{C_i} (1-p_i)^{N_i-C_i}, \quad (3.1)$$

$$N_i = N_0 - T_{i-1}, \quad T_i = \sum_{j=1}^i C_j, \quad (3.2)$$

ここで N_i : i 期における資源尾数,

p_i : i 期における (N_i に対する) 除去率,

である。

除去率 p_i は次式によって表す:

$$p_i = 1 - \exp(-q_i X_i), \quad (3.3)$$

ここで、 q_i : i 期における漁具能率,

^{**15} 高知県: 大規模増殖場造成事業調査総合報告書 昭和61年度版 (中土佐地区)。水産庁, 1987, pp. 22-23.

^{**16} 熊本県: 大規模増殖場造成事業調査総合報告書 昭和56年度版 (牛深地区)。水産庁, 1982, pp. 22-23.

^{**17} 宮崎県: 大規模増殖場造成事業調査総合報告書 昭和56年度版 (都井地区)。水産庁, 1982, p. 36.

^{**18} 高知県: 大規模増殖場造成事業調査総合報告書 昭和56年度版 (月灘地区)。水産庁, 1982, pp. 26-27.

^{**19} 高知県: 大規模増殖場造成事業調査総合報告書 昭和59年度版 (土佐清水地区)。水産庁, 1985, pp.19-21.

X_i : i 期における漁獲努力量,
である。

3.2.2 漁具能率を表すモデル

漁具能率 q_i は環境要因などによって変化すると仮定する。ここでは、いくつかの補助的な環境要因を導入して、以下の14通りのモデルを定める:

$$I. q_i = a \quad (3.4)$$

$$II. q_i = a + bi \quad (3.5)$$

$$III. q_i = a + bi + di^2 \quad (3.6)$$

$$IV. q_i = (a + bi + di^2) \times [1 + u \cos \{2\pi(i - v - v_0)/M\}] \quad (3.7)$$

$$V. q_i = (a + bi + di^2) \times [1 + u \cos \{2\pi(i - v - v_0)/M\}] (w_i + z) \quad (3.8)$$

$$VI. q_i = a(t_i + f) \quad (3.9)$$

$$VII. q_i = a(t_i + f) \times [1 + u \cos \{2\pi(i - v - v_0)/M\}] \quad (3.10)$$

$$VIII. q_i = a(t_i + f) \times [1 + u \cos \{2\pi(i - v - v_0)/M\}] (w_i + z) \quad (3.11)$$

$$IX. q_i = \begin{cases} a(t_i + f) & (i \leq i_0) \\ a(gt_i + h) & (i > i_0) \end{cases} \quad (3.12)$$

$$X. q_i = \begin{cases} a(t_i + f) [1 + u \cos \{2\pi(i - v - v_0)/M\}] & (i \leq i_0) \\ a(gt_i + h) [1 + u \cos \{2\pi(i - v - v_0)/M\}] & (i > i_0) \end{cases} \quad (3.13)$$

$$XI. q_i = \begin{cases} a(t_i + f) [1 + u \cos \{2\pi(i - v - v_0)/M\}] (w_i + z) & (i \leq i_0) \\ a(gt_i + h) [1 + u \cos \{2\pi(i - v - v_0)/M\}] (w_i + z) & (i > i_0) \end{cases} \quad (3.14)$$

$$XII. q_i = \begin{cases} a\{\bar{t}_i + f + l(t_i - \bar{t}_i)\} & (i \leq i_0) \\ a\{g\bar{t}_i + h + l(t_i - \bar{t}_i)\} & (i > i_0) \end{cases} \quad (3.15)$$

$$XIII. q_i = \begin{cases} a\{\bar{t}_i + f + l(t_i - \bar{t}_i)\} \times [1 + u \cos \{2\pi(i - v - v_0)/M\}] & (i \leq i_0) \\ a\{g\bar{t}_i + h + l(t_i - \bar{t}_i)\} \times [1 + u \cos \{2\pi(i - v - v_0)/M\}] & (i > i_0) \end{cases} \quad (3.16)$$

$$XIV. q_i = \begin{cases} a\{\bar{t}_i + f + l(t_i - \bar{t}_i)\} \times [1 + u \cos \{2\pi(i - v - v_0)/M\}] (w_i + z) & (i \leq i_0) \\ a\{g\bar{t}_i + h + l(t_i - \bar{t}_i)\} \times [1 + u \cos \{2\pi(i - v - v_0)/M\}] (w_i + z) & (i > i_0) \end{cases} \quad (3.17)$$

ここで t_i : i 期における水温,
 \bar{t}_i : 水温の5点移動平均値

$$\left(\bar{t}_i = \sum_{j=i-4}^i t_j / 5 \right),$$

i_0 : 水温の変化点(期),

v_0 : 10月における最初の新月の日,

M : 太陰月 (=29.53日),

w_i : i 期における波浪強度の指数,

$a, b, d, f, g, h, l, u, v, z$: (推定すべき) パラメータ,
である。

q_i は、モデルIでは一定、モデルIIとモデルIIIではそれぞれ、期間 i に関する線形関数と二次関数である。モデルIVとVはモデルIIIを拡張したケースで、モデルIVでは太陰月 M を周期とする q_i の周期的変化が導入されている。 u は周期の変動幅を決めるパラメータ、 v は位相を決めるパラメータである。モデルVはモデルIVに加えて波浪の強さを考慮したもので、 w_i の線形関数が導入されている。モデルVIでは、 q_i は水温 t_i の線形関数である。モデルVIIとVIIIはモデルVIを、太陰月周期と波浪を用いて拡張したケースである。モデルIX, X, XIでは水温に関する異なる2つの線形関数が i_0 の前後で別々に定められており、 g はこれら2つの関数の傾きの比を表す。モデルXII, XIII, XIVは水温の移動平均 \bar{t}_i を導入することによって水温の長期変動と短期的変化を別々に扱うことができるようにしたものである。ここで l は、 t_i と \bar{t}_i の差の影響度合を決めるパラメータである。

3.2.3 各種統計モデルの導入

(3.1)式では、 $\{C_i\}$ を与える結合分布を条件付き二項分布の積として表したが、他にも様々な統計モデルの導入が可能である (Akamine *et al.* 1993, 平松 1992, Kitada *et al.* 1994)。例えば、集中分布する生物では二項分布や多項分布などを用いた単純ランダム分布モデルで示されるよりも分散が大きくなることが知られている (Taylor 1953, Moyle and Lound 1960, Lambou 1963, Roessler 1965, Clark 1974, Lenarz and Adams 1980, 北田 1991, Welch and Ishida 1993, Kitada *et al.* 1994)。

ここでは $\{C_i\}$ に関する以下の9通りの結合分布を導入し、拡張 DeLury 法における特性を吟味した。これらは、平松 (1992) や Kitada *et al.* (1994) で検討されたモデルに、条件付き Poisson モデル(A)と対数正規分

布モデル(H), 負の二項分布モデル(I)を加えたものである。

A. 条件付きPoissonモデル

$$L = \prod_{i=1}^n \left\{ \frac{(N_i p_i)^{C_i}}{C_i!} \exp(-N_i p_i) \right\} \quad (3.18)$$

B. 条件付き二項分布モデル

$$L = \prod_{i=1}^n \left\{ \frac{N_i!}{(N_i - C_i)! C_i!} p_i^{C_i} (1-p_i)^{N_i - C_i} \right\} \quad (3.19)$$

C. Bの正規近似

$$L = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}} \left\{ \prod_{i=1}^n N_i p_i (1-p_i) \right\}^{\frac{1}{2}}} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{(C_i - N_i p_i)^2}{N_i p_i (1-p_i)} \right\} \quad (3.20)$$

D. 多項分布の正規近似

$$L = \frac{1}{(2\pi N_0)^{\frac{n}{2}} \left(\prod_{i=1}^{n+1} P_i \right)^{\frac{1}{2}}} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n+1} \frac{(C_i - N_0 P_i)^2}{N_0 P_i} \right\} \quad (3.21)$$

E. Cのover-dispersionモデル

$$L = \frac{1}{(2\pi \sigma^2)^{\frac{n}{2}} \left\{ \prod_{i=1}^n N_i p_i (1-p_i) \right\}^{\frac{1}{2}}} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{(C_i - N_i p_i)^2}{N_i p_i (1-p_i) \sigma^2} \right\} \quad (3.22)$$

F. Dのover-dispersionモデル

$$L = \frac{1}{(2\pi N_0 \sigma^2)^{\frac{n}{2}} \left(\prod_{i=1}^{n+1} P_i \right)^{\frac{1}{2}}} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n+1} \frac{(C_i - N_0 P_i)^2}{N_0 P_i \sigma^2} \right\} \quad (3.23)$$

G. 条件付き正規分布モデル

$$L = \frac{1}{(2\pi \sigma^2)^{\frac{n}{2}}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{(C_i - N_i p_i)^2}{\sigma^2} \right\} \quad (3.24)$$

H. 条件付き対数正規分布モデル

$$L = \frac{1}{(2\pi \sigma^2)^{\frac{n}{2}} \prod_{i=1}^n C_i} \times \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{\left\{ \log C_i - \log(N_i p_i) + \frac{\sigma^2}{2} \right\}^2}{\sigma^2} \right] \quad (3.25)$$

I. 条件付き負の二項分布モデル

$$L = \prod_{i=1}^n \left\{ \binom{C_i + k - 1}{C_i} \left(\frac{k}{k + N_i p_i} \right)^k \left(\frac{N_i p_i}{k + N_i p_i} \right)^{C_i} \right\} \quad (3.26)$$

ここで,

C_{n+1} : n 期の終了時まで除去されなかった尾数,

$$C_{n+1} = N_0 - T_n,$$

P_i : N_0 に対する (i 期における) 除去率,

$$P_i = \{1 - \exp(-q_i X_i)\} \exp\left(-\sum_{j=1}^{i-1} q_j X_j\right),$$

P_{n+1} : n 期の終了時までの残存率 (非除去率),

$$P_{n+1} = 1 - \sum_{i=1}^n P_i,$$

σ^2 : (推定すべき) dispersion parameter,

$\tilde{\sigma}^2$: (推定すべき) 正規分布の分散,

σ^2 : (推定すべき) 対数正規分布のパラメータ,

k : (推定すべき) 負の二項分布の“集中度” (Waters 1959) を表すパラメータ,

$$\binom{C_i + k - 1}{C_i} = (-1)^{C_i} \frac{(-k)(-k-1)\cdots(-k-C_i+1)}{C_i!},$$

である。

3.2.4 パラメータの推定と妥当なモデルの選択, 信頼区間の解析

パラメータの推定は, q_i を表すモデル I ~ IV を (3.3) 式に代入した後, 各統計モデルの尤度 (A ~ I) の対数を最大化することによって行った。最適化は準ニュートン法 (茨木・福島 1991) で行った。

提示された一連のモデルからの妥当なモデルの選択には AIC を使用した。

$$AIC = -2 \log(\text{最大尤度}) + 2m, \quad (3.27)$$

ここで m は推定すべきパラメータの数である。

パラメータの信頼区間は尤度比検定により求めた。

$\theta = (\theta_1, \dots, \theta_m)$: パラメータベクトル,

$\hat{\theta} = (\hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_m)$: 対数尤度を最大にする推定パラメータベクトル,

$\theta_i = (\hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_{i-1}, \theta_i, \hat{\theta}_{i+1}, \dots, \hat{\theta}_m)$

: ある θ_i の値について, 対数尤度を最大にするパラメータベクトル,

とする。

あるパラメータ θ_i に関する信頼区間は次の不等式を満たす領域として与えられる:

$$2 \log \left\{ \frac{L(\hat{\theta})}{L(\theta_i)} \right\} \leq \chi^2(1, 0.95) \quad (3.28)$$

ここで $\chi^2(1, 0.95)$ は自由度 1 の 95% χ^2 値である。

3.3 適用データ

三重県和具における1990年10月-1991年4月漁期のイセエビ刺網漁業に関する漁獲量努力量データを解析した。使用したデータは、①日別の漁獲努力量（操業船隻数；図3-1a）、②日別のイセエビの推定漁獲尾数（図3-1bにイセエビ漁獲尾数と漁獲努力量から計算されるCPUEを示した）、③和具地先の30m水深での水温（図3-1c）、④当該シーズンにおける太陰月周期の情報（図3-1d；この期間の最初の新月の日は1990年10月19日である）、⑤日別の波浪指数（図3-1e）である。

漁獲尾数データには2齢群（漁業資源への加入完了群）の推定尾数を使用した。完全加入群の尾数は、市場に水揚げされた漁獲物の頭胸甲長組成調査によって推定した月別雌雄別の齢別組成（第2章）と、雌雄別の頭胸甲長-体重関係を用いて、日別の漁獲重量を変換することによって求めた。

水深30mにおける水温(図3-1c)は、①和具地先における月ごとの30m水温、②浜島(図1-3)における日別の表面水温を用いて推定した。

波浪指数は、日別の風浪階級値とうねり階級値の合計とした。各階級値は大王埼航路標識事務所による波切(図1-3)での日々の海面の観察によって、10階級の 카테고리データとして表されている。

期の単位は“日”とし、1990年10月1日を第1期($i=1$)と定義した。モデルIX~XIVにおける水温の変化点 i_0 は、水温が最低水準に低下した第133日目(2月10日)とした。

CPUE(図3-1b; 1日1隻あたりの漁獲尾数)は

10月に最高で、2月までは低下するが、3月、4月になると再度上昇する。比較的高いCPUEが、満月よりも新月前後で観察される。

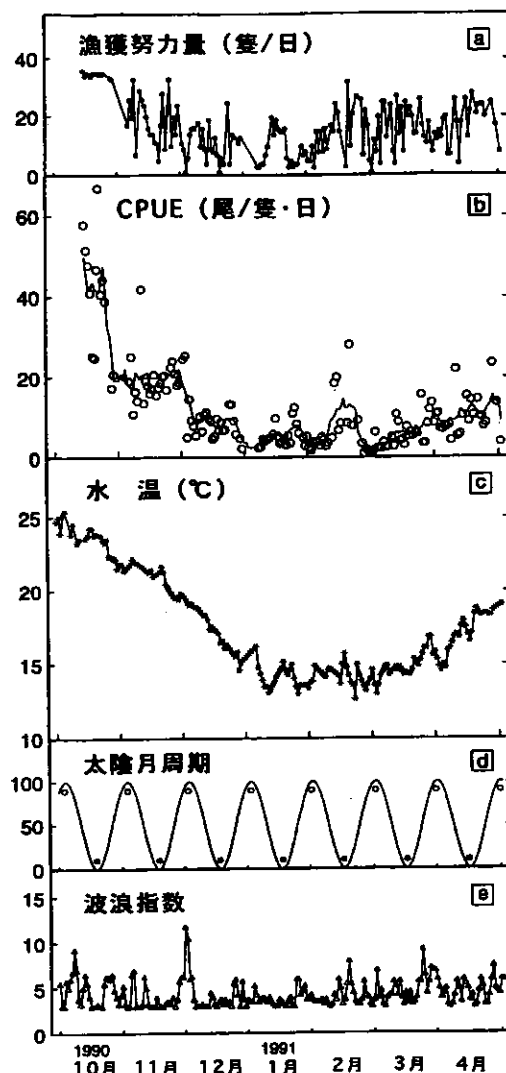


図3-1. 適用データの概要。

a) 和具における1990年10月から1991年4月までのイセエビ刺網漁業の日別漁獲努力量（操業船隻数）、b) それぞれの日におけるCPUE (○) (1日1隻あたりの漁獲尾数) とその1週間移動平均 (—)、c) 和具地先の水深30mにおける水温、d) 太陰月周期（満月時の月光強度に対する、各時点での月光強度の理論的相対比（百分率）；●：新月、○：満月）、e) 日別の波浪指数。

3.4 漁具能率を表すモデルの検討

漁具能率 q_i を表すモデル (I~XIV) の検討には、平松 (1992) における DeLury 法の検討 (マハゼデータ) で最適とされた、over-dispersion を導入した条件付き二項分布の正規近似モデル (モデルE) を統計モデルとし

て用いた。

解析結果の概要を表3-1および図3-2, 3-3に示す。

AICの値は、漁具能率を一定とするモデル(I)よりも、漁具能率が変化すると仮定したモデルで大幅に向上した。AICの値で判断すると、 q_i に関する最も妥当なモデルはモデルXIVであった。表3-1のパラメータ推定値によると、パラメータ a, g は正の値で、 $|v| < M$ であることから、 q_i は ①水温が高く、②月相が新月前後で、③波浪が高い、条件を満たすときに高くなると考えられた。 q_i と水温の関係を、水温下降期と上昇期で別々の関数として扱えば(モデルIX~XIV) AICの値は向上し、さらに水温の5日間移動平均を導入すれば(モデルXII~XIV)、一層向上した。図3-2に、提示されたいくつかのモデルについて、 q_i の推定値の漁期内における推移を示した。最も妥当と選択されたモデルXIVでは q_i の値は大きく変化している。

N_0 の信頼区間(図3-3)はモデルによって大きく異なっていた。信頼区間の幅は必ずしもモデルに使用したパラメータ数には依存せず、むしろ、 N_0 の推定値と総漁獲尾数 T_n ((3.2)式; 適用データでは $T_n = 42,050$) の差との関連性が深いようにもみうけられる。 N_0 が T_n に近い値として推定される場合(すなわち漁獲率が高いとされる場合)は信頼区間は比較的狭くなり、逆に N_0 が T_n から離れた値として推定される場合(すなわち漁獲率が低いとされる場合)は信頼区間は広がる。この点については、さらに詳細な検討を行う必要がある。

3.5 統計モデルの比較検討

前節で最も妥当であると判断されたモデルXIVを漁具能率 q_i のモデルとして採用し、統計モデル(A~I)の比較検討を行った。

表3-2に、モデルごとのパラメータ推定値とその信頼区間を示した。

AICの値は負の二項分布モデル(I)で最小で、他のモデルと大きな差異があった。したがって、負の二項分布モデルが最も妥当な統計モデルと判断された。

モデルA~DのAICの値は他のモデルより著しく大きかった。このことは、分散が平均値にほぼ等しい確率分布によるモデルは不適切で、実際の分散は単純ランダムサンプリングに基づくモデルで示されるよりも相当大きいことが考えられた。モデルEとFの dispersion parameter σ^2 の推定値(=29.1)も over-dispersion の存在を示している。なお、モデルE, FのAICの値はモデルH, Iより劣っていた。このことは、平均のまわりに対称な確率分布によるモデルはイセエビのデータには妥当ではなく、実際の分布は対数正規分布や負の二項分布のように平均値のまわりには非対称であることを示唆する。

推定されたパラメータの信頼区間について詳細な検討を行うため、適用データ(1990年10月-1991年4月)にさらに2ヶ年分のデータ(1991年10月-1992年4月および1992年10月-1993年4月)を加え、3ヶ年分のデータを含む一連のデータセットとして一括解析を行った。^{**20} 単年データと3ヶ年データの各モデルについて、初期資

表3-1. 漁具能率 q_i を表すモデルが異なる場合の、各モデルによって推定されたパラメータの値。1990年10月から1991年4月の和具におけるイセエビ刺網漁業データに適用した。統計モデルには over-dispersion を導入した条件付き二項分布の正規近似モデル(モデルE)を用いた。漁具能率を表す各モデルの詳細については本文を参照のこと。

Model	N_0	a ($\times 10^{-3}$)	b ($\times 10^{-3}$)	d ($\times 10^{-6}$)	f	g	h	l	u	v	z	σ^2	AIC
I	47898	81.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	85.3	2001.3
II	52042	79.6	-0.145	—	—	—	—	—	—	—	—	83.7	1995.8
III	52204	131.0	-1.795	7.91	—	—	—	—	—	—	—	58.4	1906.0
IV	57730	102.8	-1.349	5.69	—	—	—	—	0.240	22.1	—	54.6	1894.2
V	61682	19.0	-0.239	0.966	—	—	—	—	0.273	19.4	0.812	41.0	1850.6
VI	75686	4.75	—	—	-11.6	—	—	—	—	—	—	68.7	1940.9
VII	87380	3.57	—	—	-11.6	—	—	—	0.289	21.5	—	62.8	1924.4
VIII	85603	0.815	—	—	-11.6	—	—	—	0.315	19.1	0.496	47.9	1882.5
IX	51443	10.5	—	—	-14.2	3.62	-49.2	—	—	—	—	47.1	1855.7
X	53863	9.23	—	—	-14.1	3.23	-43.6	—	0.172	22.1	—	45.1	1850.1
XI	56645	1.57	—	—	-14.0	2.77	-37.1	—	0.211	18.8	1.349	34.2	1810.3
XII	53894	9.48	—	—	-14.1	4.19	-58.4	1.11	—	—	—	44.1	1846.0
XIII	58136	7.89	—	—	-14.0	3.61	-49.9	1.17	0.173	22.7	—	41.7	1839.2
XIV	61727	1.35	—	—	-13.8	3.34	-46.1	1.22	0.203	19.3	1.065	29.1	1786.5*

*: モデルXIVが最も妥当性が高い。

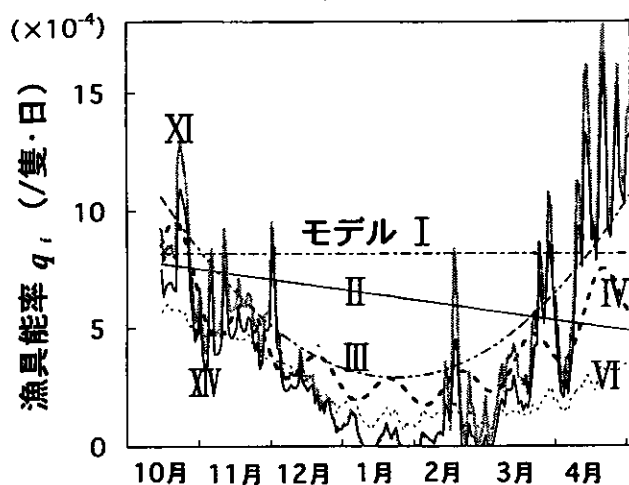


図3-2. 漁具能率 q_i を表すモデルが異なる場合の、モデルごとの推定漁具能率の推移。モデルI, II, III, IV, VI, XI, IXでの推定結果を例示した。

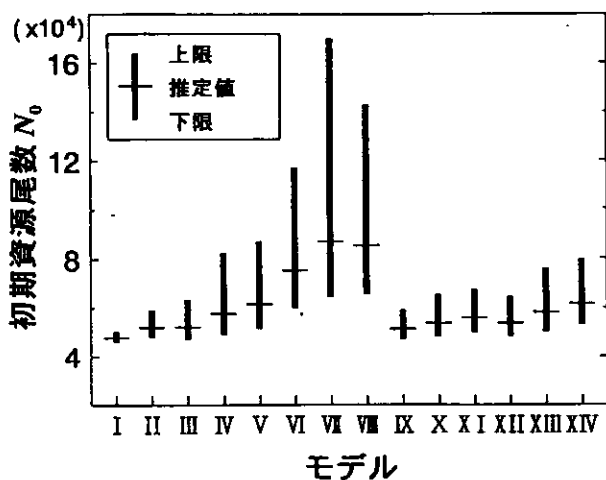


図3-3. 漁具能率 q_i を表すモデルが異なる場合の、各モデルによって推定された初期資源尾数 N_0 の値と95%信頼区間。各モデルの詳細については本文を参照のこと。

源尾数 N_0 の推定値と信頼区間を図3-4に示した。

単年データのモデルA~Dでは信頼区間が著しく狭い(図3-4a, 表3-2)。これらの単純ランダムモデルは他のモデルに比べてAICの値が著しく劣っていたという結果を考慮すれば、これは明らかに過小推定である。パラメータそのものが誤推定となっている危険性もある。逆に、単年データのモデルG, H, Iの N_0 の信頼区間

はかなり広い。モデルGの区間が広いのは、分散が平均に拠らず一定であることと、 (C_i, C_j) ($i \neq j$) の共分散を無視していることに原因があると考えられる。モデルIとモデルHの信頼区間が広いのは、おそらく分布の非対象性が原因であろうが、その広さはAICで最も妥当性が高いと考えられたモデルIを実際に使用するにあたっての障害ともなり得る。

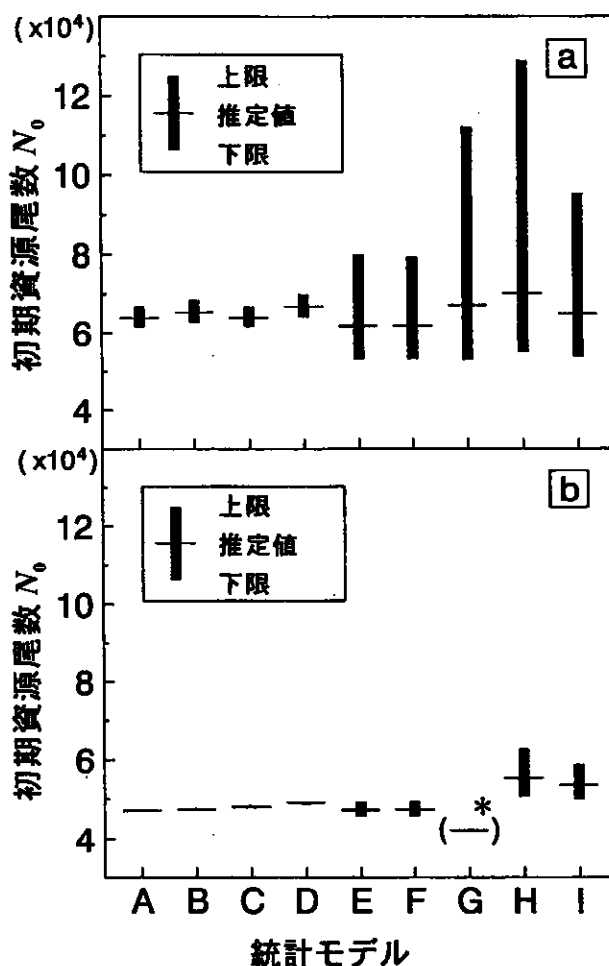


図3-4. 拡張 DeLury 法の各統計モデルによって推定された、1990年10月における初期資源尾数 N_0 の値と95%信頼区間。信頼区間は尤度比検定によって計算した。各統計モデルの詳細については本文を参照のこと。a) 1990年10月~1991年4月の単年データによる解析結果、b) 1990年10月~1991年4月、1991年10月~1992年4月、1992年10月~1993年4月の3ヶ年データの同時解析による推定結果。
* : モデルGでは N_0 の推定値が現実の総漁獲尾数 T_n (=42,050) と等しい値に収束したため、信頼区間を求めることができない。

**20 解析は、3ヶ年分の対数尤度を合計したものを目的関数として行った。ここで、パラメータ a, f, g, h, l, u, v, z (3.17式)、 $\sigma^2, \sigma^2, \sigma^2, k$ は年によらず共通であり、一方、初期資源尾数 N_0 は各年に特有であると仮定した。

表3-2. 拡張 DeLury 法の各統計モデルによって推定されたパラメータの値と95%信頼区間(カッコ内). 1990年10月から1991年4月の和具におけるイセエビ刺網漁業データに適用した. 漁具能率 q_i を表すモデルにはモデルXIVを用いた. 各統計モデルの詳細については本文を参照のこと

Model	N_0	a ($\times 10^{-5}$)	f	g	h	l	u	v	z	σ^2	k	AIC
A	63,944 (61,435-66,864)	1.19 (1.10-1.28)	-13.3 (-13.5--13.1)	3.03 (2.81-3.27)	-41.3 (-44.7--38.1)	1.26 (1.23-1.30)	0.212 (0.194-0.230)	0.29 (-0.09-0.67)	1.11 (0.87-1.38)	—	—	5478.4
B	65,384 (62,695-68,525)	1.16 (1.07-1.25)	-13.3 (-13.5--13.1)	2.95 (2.74-3.18)	-40.3 (-43.5--37.2)	1.27 (1.23-1.30)	0.216 (0.198-0.233)	0.27 (-0.10-0.64)	1.11 (0.86-1.37)	—	—	5531.7
C	63,913 (61,473-66,745)	1.21 (1.12-1.30)	-13.2 (-13.4--13.0)	3.34 (3.11-3.59)	-45.7 (-49.3--42.4)	1.23 (1.20-1.27)	0.188 (0.171-0.205)	0.11 (-0.29-0.52)	1.24 (0.99-1.51)	—	—	5504.0
D	66,752 (63,994-69,972)	1.11 (1.03-1.19)	-13.3 (-13.4--13.1)	3.24 (3.02-3.47)	-44.3 (-47.7--41.2)	1.24 (1.21-1.27)	0.192 (0.175-0.209)	0.12 (-0.27-0.51)	1.22 (0.98-1.49)	—	—	5604.5
E	61,727 (53,080-79,859)	1.35 (0.89-1.91)	-13.8 (-14.3--13.0)	3.34 (2.35-4.74)	-46.1 (-66.2--31.7)	1.22 (1.08-1.41)	0.203 (0.110-0.296)	0.33 (-1.71-2.55)	1.07 (0.01-2.82)	29.1 (23.3-37.2)	—	1786.5
F	61,710 (53,140-79,369)	1.37 (0.90-1.93)	-13.8 (-14.3--13.0)	3.30 (2.34-4.64)	-45.6 (-64.8--31.6)	1.22 (1.07-1.40)	0.201 (0.108-0.294)	0.30 (-1.76-2.53)	1.06 (0.01-2.81)	29.1 (23.4-37.0)	—	1802.9
G	67,085 (52,948-112,231)	1.18 (0.64-1.78)	-13.7 (-14.8--10.6)	3.06 (1.71-5.48)	-42.0 (-76.5--22.4)	1.18 (1.08-1.31)	0.305 (0.205-0.412)	-0.73 (-2.25-0.75)	1.07 (0.21-2.36)	13,337* (10,803-16,731)	—	2006.1
H	70,118 (54,957-128,699)	1.18 (0.49-2.12)	-12.7 (-13.5--11.3)	1.91 (0.98-3.28)	-24.8 (-44.2--11.2)	1.21 (0.85-1.76)	0.259 (0.147-0.367)	0.33 (-1.73-2.65)	0.10 (-0.99-2.39)	0.242** (0.196-0.303)	—	1751.6
I	64,917 (53,708-95,532)	1.11 (0.58-1.83)	-12.6 (-13.4--11.4)	2.73 (1.66-4.34)	-36.5 (-59.3--20.9)	1.22 (0.92-1.69)	0.183 (0.085-0.280)	1.02 (-1.59-4.03)	0.62 (-0.59-3.05)	—	5.98 (4.71-7.53)	1723.1***

*: $\tilde{\sigma}^2$ **: $\bar{\sigma}^2$ ***: モデルIが最も妥当性が高い.

3ヶ年データについての N_0 の信頼区間(図3-4b)は, 負の二項分布(I)においても, 単年データでの区間に比較して著しく狭くなった。(3ヶ年データにおけるモデルIでのパラメータ N_0 の推定値: 53,419, 信頼区間: 49,864-58,593)**²¹ このように複数のデータを統合すれば, 推定精度の向上にとって有効といえる。

3.6 論 議

本章の主たる内容については, 既にYamakawa *et al.* (1994a, 1994b) に発表した。

DeLury 法や除去法の修正・拡張例はこれまでいくつか発表されてきた。例えば, 自然死亡の考慮(石岡・猪子 1982, 村田・嶋津 1982, Chien and Condrey 1985, 平松 1992), 加入の考慮(Mogi and Yamamura 1981, 小島・石橋 1985), 漁具能率の変化の導入(Paloheimo 1963, Schnute 1983, 平山ら 1989, 山田ら 1989), 補助的情報の利用(Pollock *et al.* 1984, Routledge 1989), 多種漁業への適用(Polovina 1986, Matsumiya and Matsuishi 1989) などがある。本論文では, 診断的扱いの可能な節約型モデリングの見地から, 妥当なモデルの選択にAICを採用した。AICの導入により, 有意水準のあいまいさをなくし, モデルの比較に客観的な見通し

を与えることができる。

イセエビ刺網漁業で導かれた q_i の変化は, おそらく環境要因の変動に伴うイセエビの活動性の変化(久保 1962, 久保・石渡 1964, Takagi *et al.* 1975, 余座ら 1977, McLeese and Wilder 1958, 井上 1964, 小池ら 1993, Koike *et al.* 1995, 小池ら 1996a, 1996b) が原因であろう。イセエビの活動性と照度の関係について小池ら(1993, 1995, 1996a, 1996b)は室内実験を行い, 照度が一定水準以上の場合には行動頻度が著しく減少することを示した。そして月光による夜間の明るさの増加はイセエビの行動を著しく抑制し, それが漁獲量の減少に結びつくこともありうるとした。また, 井上(1964)は養養中のイセエビの摂餌量に関する実験をもとに, 水温の対数値と摂餌量の間には比例関係を認め, さらに摂餌量は満月時に低下することを示した。McLeese and Wilder (1958)はアメリカンロブスターの活動性(1分間あたりの歩行距離)は水温と密接な関係があることを示し, さらに底層の水温と漁獲効率指数, 活動性と漁獲効率指数の間にはそれぞれ線形関係が認められるとした。刺網やカゴなどのトラップ様の漁業について資源パラメータを推定する際には, このような対象生物の行動や活動性の変化が無視できない。

Miller and Mohn (1993)はLeslie法に必要な仮定が

**²¹ 3ヶ年データのサンプル数が単年データの約3倍であることを考慮すれば, パラメータの推定精度はおおよそ $1/\sqrt{3}$ 倍程度に向上することが予想される。しかし, N_0 の信頼区間の実際の向上度合はこの値よりずっと著しかった。別途行った, より詳細な解析の結果から判断すると, 精度の向上度合は対象とするパラメータやデータセットによって相当異なる。この現象については別の機会に詳細に論議したい。

満足されないときに推定結果がどのように影響を受けるかを数値実験によって検討し、漁具能率が一定でなく漁期の途中で増加する場合や漁獲努力が漁場内で均一に分布しない場合などには推定の偏りが大きくなることを明らかにした。本章のモデルは補助的な情報である環境データを導入することによって、漁具能率の変化がある場合にもそれを反映した“自然な”推定を行うことができる。とくに漁期内で短期的に変動する要因（太陰月周期や波浪の大きさなど）によって推定精度が大きく影響を受ける場合には有効であろう。ただし、漁期中を通して単調増加または単調減少する要因に関しては漁獲（除去）による資源密度の低下傾向との分離推定が困難であることが予想されるため、この点について十分配慮する必要がある。

本章では、漁獲の変動を表す統計モデルの相違によって、拡張 DeLury 法の推定結果がどのように影響を受けるかを示すことができた。モデルの違いは推定値そのものにも若干の差異を与えるが、より本質的には精度の推定結果に大きく影響を与えることとなった。これは信頼性の高い資源管理の実施にとっては重要な事項である。

統計モデルの妥当性の判定結果には、分散が大きな影響を与えることが判明した。dispersion parameter σ^2 の導入による AIC の改善はこれまで数例が報告されている（北田 1991, 平松 1992, Kitada *et al.* 1994）。Kitada *et al.* (1994) は dispersion が大きくなる原因として対象種の集群行動に言及し、また北田 (1991) は、「漁業によるサンプリングを前提とする水産資源の解析

の場合、魚のパッチ状分布という生態的特性と効率よく（まとめて）漁獲するという漁具の特性に起因して、多項分布の仮定、即ち単純ランダムサンプリングの仮定は成立しない場合が多いと考えられる」と述べた。

負の二項分布は、集群性を示す生物の分布を記述するのにしばしば使用される（Taylor 1953, Moyle and Lound 1960, Lambou 1963, Roessler 1965, Clark 1974, Lenarz and Adams 1980, Welch and Ishida 1993）。平均を $\mu_i (= N_i p_i)$ とすれば、負の二項分布の分散は Poisson 分布の分散 (μ_i) よりも μ_i^2/k だけ大きい。対象生物の集群の程度が高くなるに従って、集中度を表す尺度 k は 0 に近づき、頻度ゼロの階級を無視すれば分布は Fisher の対数級数則（Fisher *et al.* 1943）に近づく。逆に集群の程度が低くなれば k は無限大に近づき、分布は Poisson 分布へと収束する。 k の推定値が 5.98 であること（表 3-2）は、イセエビは漁場内でランダムには分布せず、何らかの集群性を有することを示唆している。実際、イセエビは定着性の強い種で、分布は岩礁地帯のみに限られている。そして、適当な開口部や空間を有する岩穴、岩の亀裂、間隙などに好んで棲息する（大島 1935, 野中 1966）。複数の個体が 1 つの亀裂に潜んでいることもよく観察される。本章での結果は、漁具の特性、対象種の行動パターン、刺網を仕掛ける場所の選択における漁業者の行動など、漁業活動における様々な特徴とともに、イセエビのこのような分布生態をよく反映しているとみなすことができる。

第4章 複数年級群解析による資源評価

4.1 はじめに

コホート解析（シングルコホート解析，マルチコホート解析，VPA）は年齢別漁獲尾数から資源尾数を推定する代表的な方法で，Jones (1961)，Murphy (1965)，Gulland (1965)，Pope (1972) などに初期の展開がみられる。

シングルコホート解析に代表される従来の方法では，①最高齢および最近年の漁獲係数（terminal F ；以下 F_t と称す）を仮定する必要があるため高齢魚と近年の資源尾数の推定精度が低い，②計算がいわゆる「いもづる式」であり統計学的推定ではない，といった欠点があった。そこで漁獲係数を年に固有な係数と年齢（齢）に固有な係数に分離し（separability の仮定），統計学的にパラメータを推定する“separable VPA”（Doubleday 1976，Pope and Shepherd 1982）やベイズ型コホートモデル（大西ら 1993）が導入されている（VPAの総説については Megrey 1989，Hilborn and Walters 1992 などを参照のこと）。しかし，separability の仮定が成立するためには年齢ごとの選択性が漁期内および漁期の間で変化しないこと，漁期内の漁獲の不均一性が無視できることなどが必要であり（Sims 1982，Hiramatsu 1995），多くの漁業ではこの条件を満たしていない（平松 1994，赤嶺 1995b）。一方，separability の仮定は使わず，漁獲努力量や資源量指数などの補助的な情報を用いて F_t を調節する“チューニングVPA”（Collie and Sissenwine 1983，Laurec and Shepherd 1983，Pope and Shepherd 1985，石塚 1991，宮部 1991，余川 1993）も近年では頻繁に使用されるようになった。

平松 (1990, 1992) は最尤法の立場からコホート解析，標識再捕法，DeLury法がひとつの基本漁獲方程式で統一的に扱えることを示し，それぞれの手法の差異は，単に利用可能な情報と未知パラメータの組み合わせの違いに対応するにすぎないとした。

ここでは，第3章で導出した拡張 DeLury モデルを，複数の年級群を同時に扱う“コホートモデル”として展開する。このモデルは，いわば従来の“separable VPA”

に漁獲努力量と漁具能率，サイズによる漁獲選択性を導入して separability の一般化を図り，パラメータの推定を最尤法で行うようにしたもので，平松 (1990, 1992) の論議にある「基本漁獲方程式による統一的扱い」を具体化したモデルに相当する。解析の単位期間には，通常のコホートモデルでの単位期間である「年」よりも短い期間（ここでは「日」）を使用し，漁獲過程が漁期内で不均一な場合にも対応可能なモデルとした。イセエビ刺網漁業の5ヶ年の漁獲量努力量データに適用して年別年齢別の初期資源尾数，加入群の性比，漁具能率（環境によって変化），漁獲選択曲線，自然死亡係数の同時推定を行った。***22

4.2 解析モデルの構成

解析モデルの概念図を模式的に図4-1に示した。

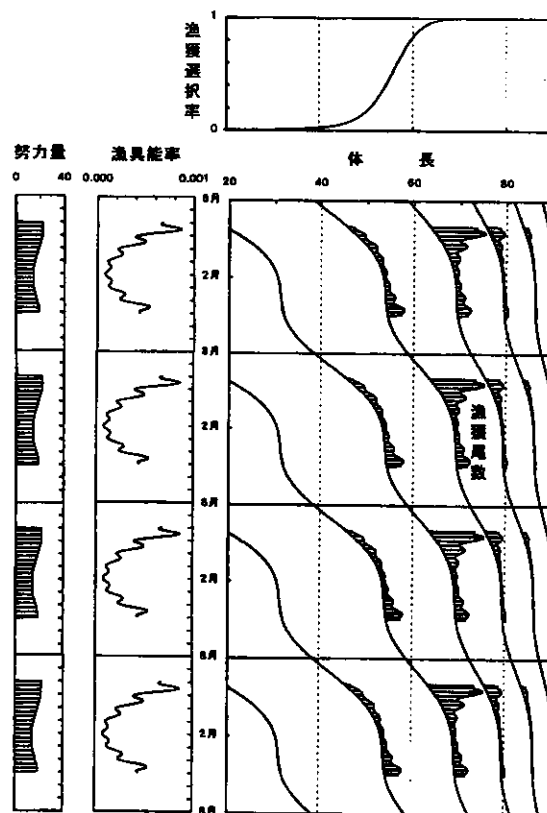


図4-1. 複数年級群解析における解析モデルの概念図。漁獲対象資源は生後，固有の成長曲線に従って成長する。多年魚では，平均体長の異なる複数の年級群が任意の時点において漁場内に混在する。漁具の網目選択性に起因する，対象群の体長を反映した漁獲選択曲線を考える。各時点でのそれぞれの群の漁獲尾数は漁獲努力量，漁具能率（環境によって変化），漁獲選択率（相対的漁獲効率）によって決まるとする。詳細については本文を参照のこと。

***22 山川 卓・松宮義晴：Separabilityに関する情報を活用した複数年級群解析。平成7年度日本水産学会秋季大会講演要旨集，1995，p. 22。

の各群の初期資源尾数 N_{i,j_0} (ただし, (4.6) 式または (4.7) 式によって他から計算できるものを除く), 1 齢群の性比 SR_1 , 漁具能率 q_{it} を表すモデルの各パラメータ (a, f, g, h, l, u, v, z), 漁獲選択曲線のパラメータ (α, β), 負の二項分布のパラメータ k である。自然死亡係数 M については ①未知として他のパラメータと同時に推定する場合 (A), ②既知として与える場合

($M = 0.10/365, 0.15/365, 0.20/365, 0.25/365, 0.30/365$ の 5 段階; B ~ F), を設定した。

パラメータの推定は(4.1)式の対数(対数尤度)の最大化によって, 未知のパラメータを一括して行った。非線形最適化には準ニュートン法を用いた。各パラメータ推定値の95%信頼区間は尤度比検定で計算した。方法の詳細については第3章と同様である。

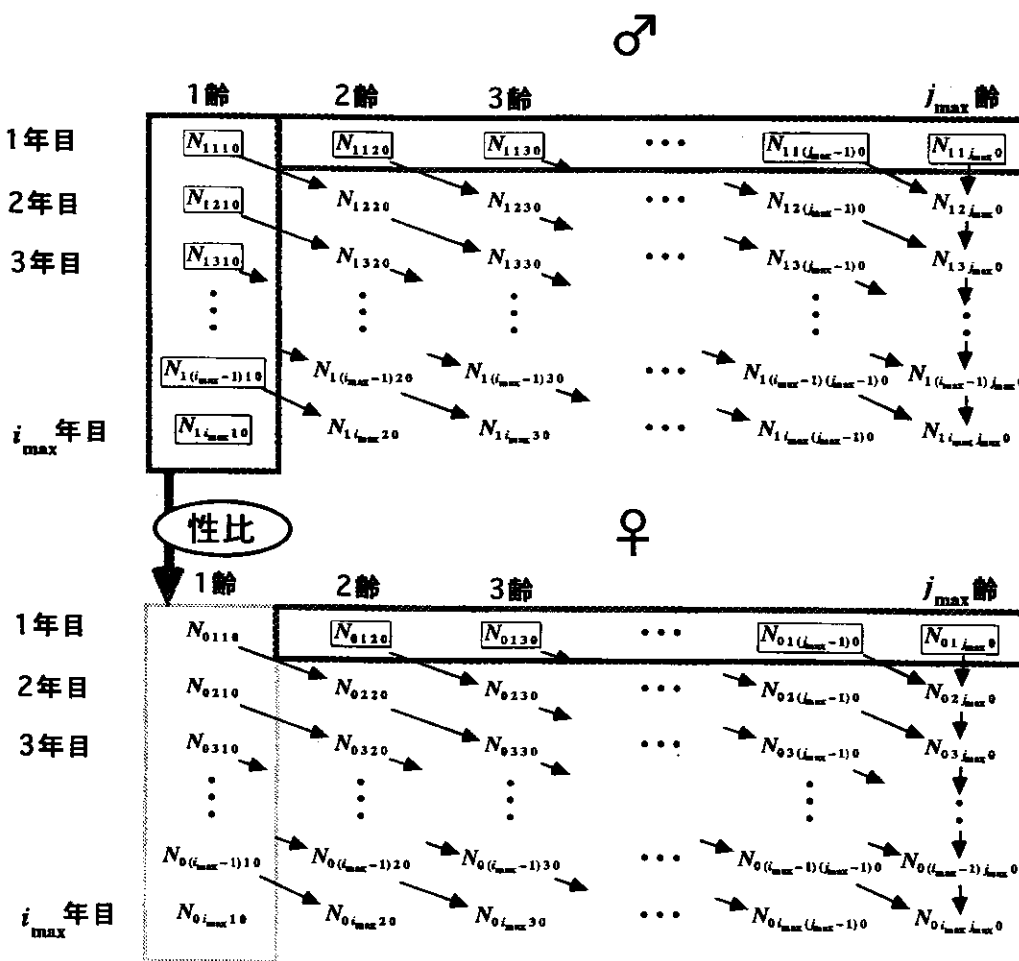


図4-2. 各群の初期資源尾数に関する計算上の関係(模式図)。各年の雄1齢群の初期資源尾数と1齢群の性比, および1年目の雌雄2齢以上の群の初期資源尾数(濃い太線で囲んだ部分)が推定できれば, すべての資源尾数が計算できる。

4.3 適用データ

三重県和具における1990年-1991年, 1991年-1992年, 1992年-1993年, 1993年-1994年, 1994年-1995年のいずれも10月~4月の漁期のイセエビ刺網漁業に関する漁獲量努力量データ(5ヶ年分)を解析した。使用したデータは, a)日別の操業船隻数(図4-3a), b)日別のイセエビの齢別雌雄別漁獲尾数(図4-3b), c)和具地先の30m水深での水温(図4-3c), d)各漁期における太陰月周期(図4-3d), e)日別の波浪指数(図4-3e), f)齢別雌雄別の成長(図4-3f)である。各年の齢別雌雄別の日別漁獲尾数(b)は, 第2章で推定した各年の月別雌雄別の齢別組成(図2-2, 図2-3)と, 雌雄別の頭胸甲長-体重関係(三重県1992**12; 2.4節)を用いて, 日別の総漁獲重量から換算して求めた。プエルルスとして着底後3年以上を経過した群(3齢以上の高齢群)については推定漁獲尾数を合計し, 3+群としてまとめて解析した。雌雄それぞれの年別・齢別の日々の体長 $L_{i,j}$ (f)は第2章で推定した, 年ごとに異なる

成長式(表2-2, 図2-1)から求めた。その他のデータの詳細については第3章と同様である。

なお, 各漁期の漁獲尾数は全群の合計で6.5万尾~11.8万尾(平均9.1万尾), 延べ操業船隻数は2,593隻・日~3,447隻・日(平均2,985隻・日)であった。

4.4 解析結果

解析結果の概要を表4-1および図4-4~図4-7に示す。

すべてのパラメータを未知として推定した場合(A)はAICの値は最も低かったが, 自然死亡係数 M が現実にはあり得ない値($M=0$)に収束した(表4-1)。パラメータの信頼区間の推定においても N に関する制約条件((4.5)式, (4.6)式, (4.7)式, すべての $N \geq 0$)を満足させ, かつ(3.28)式の等号を成立させる値が存在しないケースもみられ, 自然死亡係数 M を未知のパラメータとして同時推定すると全体の推定結果が不安定化すると考えられた。

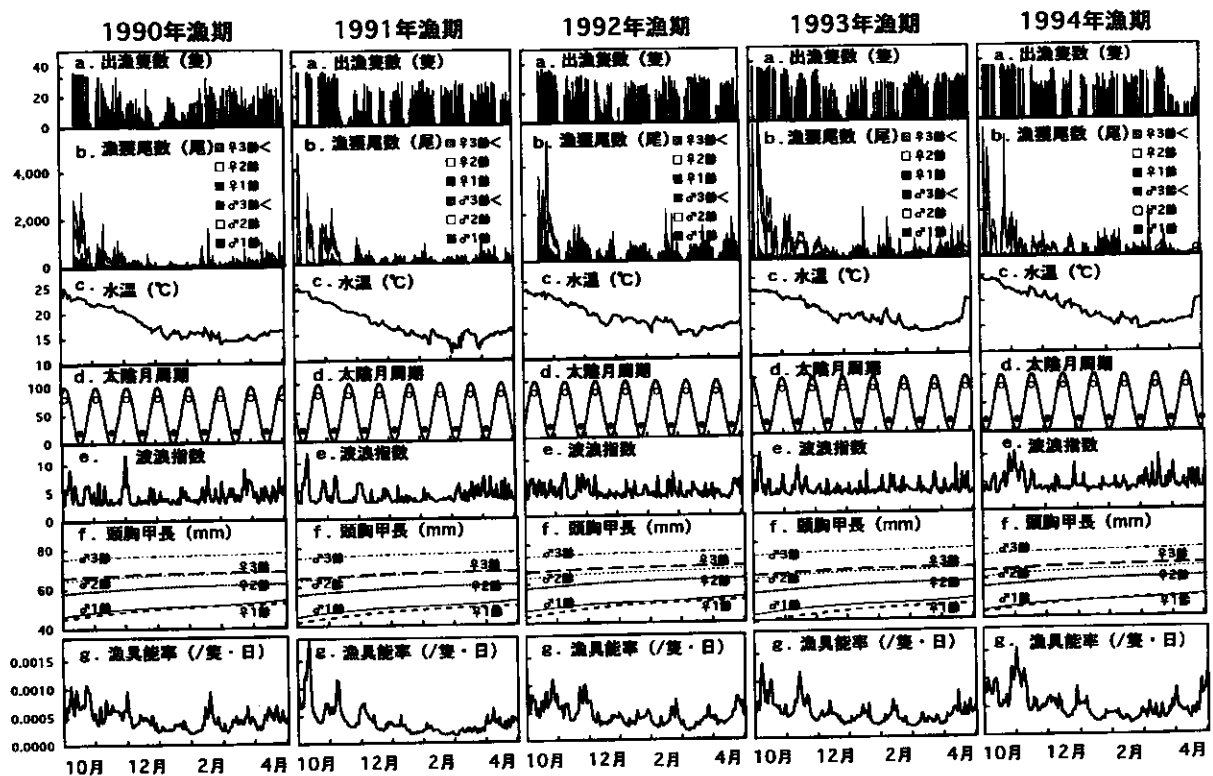


図4-3. 複数年級群解析における適用データの概要。左の列から順に, 1990年-1991年, 1991年-1992年, 1992年-1993年, 1993年-1994年, 1994年-1995年の各漁期(いずれも10月~4月)に該当する。a)和具におけるイセエビ刺網漁業の日別漁獲努力量(出漁隻数), b)日々の齢別雌雄別の漁獲尾数, c)和具地先の水深30mにおける水温, d)太陰月周期(満月時の月光強度に対する, 各時点での月光強度の理論的相対比(%); ●:新月, ○:満月), e)日別の波浪指数, f)齢別雌雄別の成長。併せてg)に, 各漁期における漁具能率 $a_{i,t}$ の推定結果($M=0.2$ とした場合)を示した。

表4-1. 複数年級群解析によって推定されたパラメータの値と95%信頼区間(カッコ内). 三重県和具における1990年-1991年, 1991年-1992年, 1992年-1993年, 1993年-1994年, 1994年-1995年の漁期(いずれも10月~4月)のイセエビ刺網漁業に関する漁獲量-努力量データ(5ヶ年分)に適用した. 自然死亡係数 M を未知として他のパラメータと同時に推定する場合(A)と, 既知として与えた場合(B~F)の各ケースについて解析した. 解析モデルの詳細については本文を参照のこと.

自然死亡係数	初期資源尾数 (1~5年目 雄1齡群)					同 (1年目 雄2, 3齡群)		同 (1年目 雌2, 3齡群)	
	$M \times 365$	N_{1100}	N_{1200}	N_{1300}	N_{1400}	N_{1500}	N_{1600}	N_{1700}	N_{1800}
A 0.00 * (###-###)	45,108 (44,345-45,862)	44,332 (##-45,163)	101,834 (100,435-103,292)	79,782 (75,925-83,911)	33,394 (30,876-36,153)	23,517 (22,581-24,443)	7,365 (6,688-8,118)	21,722 (20,825-22,607)	9,405 (8,669-10,198)
B 0.10 **	46,710 (45,894-47,520)	46,218 (45,341-47,124)	105,415 (103,874-107,060)	83,744 (79,656-88,120)	34,800 (32,166-37,685)	23,842 (22,877-24,801)	7,497 (6,807-8,264)	22,112 (21,185-23,029)	9,569 (8,817-10,378)
C 0.15 **	47,555 (46,711-48,938)	47,213 (46,298-48,160)	107,309 (105,692-109,037)	85,832 (81,622-90,340)	35,541 (32,847-38,495)	24,013 (23,032-24,989)	7,565 (6,870-8,340)	22,319 (21,377-23,255)	9,655 (8,895-10,473)
D 0.20 **	48,430 (47,558-49,301)	48,244 (47,290-49,234)	109,277 (107,579-111,092)	87,997 (83,660-92,642)	36,311 (33,552-39,335)	24,189 (23,191-25,183)	7,636 (6,932-8,418)	22,535 (21,576-23,489)	9,743 (8,976-10,571)
E 0.25 **	49,338 (48,435-50,242)	49,315 (48,319-50,350)	111,322 (109,539-113,230)	90,243 (85,773-95,030)	37,110 (34,285-40,207)	24,371 (23,357-25,384)	7,708 (6,997-8,498)	22,761 (21,784-23,734)	9,835 (9,059-10,672)
F 0.30 **	50,280 (49,345-51,219)	50,427 (49,386-51,509)	113,449 (111,576-115,453)	92,572 (87,964-97,508)	37,939 (35,045-41,112)	24,558 (23,527-25,591)	7,781 (7,064-8,580)	22,996 (22,001-23,990)	9,990 (9,145-10,777)

* : 未知として同時推定 ** : 既知として固定 ### : 推定不能

表4-1. (続き)

1齡群の性比	漁獲選択曲線パラメータ			漁具能率のパラメータ								負の二項分布	AIC
	SR_1	α	$1/\beta$	$\alpha \times 10^4$	f	g	h	i	u	v	z		
A 1.74 (1.71-###)	12.7 (12.2-13.3)	55.4 (54.8-56.0)	8.96 (7.86-10.15)	-10.10 (-10.38-9.77)	1.18 (0.98-1.38)	-11.2 (-14.2-8.2)	0.07 (-0.23-0.35)	0.264 (0.238-0.291)	0.33 (-0.07-0.73)	1.75 (1.20-2.42)	3.38 (3.25-3.55)	40,205.6	
B 1.72 (1.70-1.74)	12.9 (12.4-13.4)	55.5 (54.9-56.1)	8.78 (7.70-9.94)	-9.95 (-10.25-9.60)	1.26 (1.04-1.47)	-12.0 (-15.2-8.9)	0.07 (-0.24-0.37)	0.263 (0.236-0.289)	0.33 (-0.08-0.73)	1.76 (1.20-2.43)	3.38 (3.24-3.53)	40,228.7	
C 1.71 (1.69-1.74)	12.9 (12.4-13.5)	55.5 (54.9-56.1)	8.68 (7.62-9.84)	-9.87 (-10.18-9.51)	1.30 (1.08-1.52)	-12.5 (-15.7-9.3)	0.06 (-0.25-0.37)	0.262 (0.235-0.288)	0.33 (-0.08-0.73)	1.76 (1.21-2.43)	3.37 (3.23-3.52)	40,240.8	
D 1.71 (1.68-1.73)	13.0 (12.5-13.5)	55.5 (54.9-56.1)	8.59 (7.53-9.73)	-9.79 (-10.11-9.42)	1.34 (1.11-1.56)	-12.9 (-16.2-9.6)	0.06 (-0.26-0.38)	0.261 (0.234-0.287)	0.32 (-0.08-0.73)	1.76 (1.21-2.44)	3.36 (3.22-3.51)	40,253.1	
E 1.70 (1.67-1.72)	13.1 (12.6-13.6)	55.5 (55.0-56.2)	8.49 (7.44-9.63)	-9.71 (-10.04-9.33)	1.38 (1.15-1.61)	-13.4 (-16.8-10.0)	0.06 (-0.27-0.39)	0.260 (0.234-0.287)	0.32 (-0.09-0.73)	1.76 (1.21-2.44)	3.36 (3.21-3.50)	40,265.8	
F 1.69 (1.67-1.72)	13.1 (12.6-13.7)	55.6 (55.0-56.2)	8.39 (7.36-9.52)	-9.63 (-9.97-9.23)	1.42 (1.19-1.66)	-13.8 (-17.3-10.4)	0.06 (-0.28-0.40)	0.259 (0.233-0.286)	0.32 (-0.09-0.73)	1.76 (1.21-2.44)	3.34 (3.20-3.49)	40,278.7	

: 推定不能.

自然死亡係数 M を既知として与えた場合(B~F)は, M の値を大きくするほど各初期資源尾数の推定値が大きくなった(表4-1, 図4-4)。しかし, 漁具能率 q_{it} (図4-5)と漁獲選択曲線(図4-6)は M の値の変化に対して安定で, ほとんど変化がみられなかった。AICの値は M が小さくなるほど低くなった。

漁具能率 q_{it} は前章での結果と同じく, (1)水温が高く, (2)月相が新月前後で, (3)波浪が高い, 条件を満たすときに高くなると考えられた。各年で推定された, 漁具能率 q_{it} の推移状況 ($M=0.2/365$ の場合)を図4-3gに示した。

初期資源尾数などの推定結果をもとに, $M=0.2/365$ の場合について, 各年級群の漁獲, 自然死亡, 翌年への

繰り越し状況を図示した(図4-7)。1齡群の初期資源尾数は年によって変動し, 解析を行った5ヶ年間では1992年漁期と1993年漁期で多かった。1齡群の漁獲率は雄では16.9~27.2%, 雌では9.9~21.1%であり, 年によって若干の変動がみられた。これは第2章で示したように, 年による成長の変動が漁獲選択性の差となって表れた結果であると推察される。2齡群の漁獲率は雄では63.6~74.4%, 雌では52.4~66.2%, 3齡以上の群の漁獲率は雄では66.7~79.1%, 雌では64.2~76.8%であり, 相当高い漁獲圧がこれらの齡群にかかっていることが判明した。

推定された漁獲選択曲線(図4-6)から, 和具地区におけるイセエビの加入は甲長40mm前後から始まり,

50~60mmの間で選択性が急激に高まるものと考えられた。この傾向は第2章で推定された傾向(図2-5)とほぼ同様である。

1 齢群の性比は1.69~1.74 (雄の尾数/雌の尾数)であり、1:1から相当ずれていることが示唆された(表4-1)。

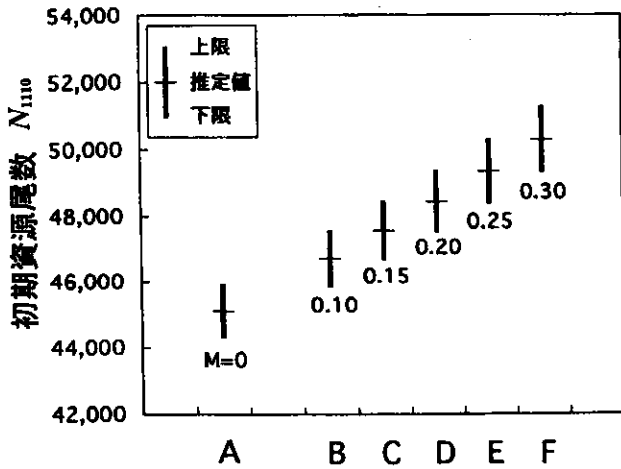


図4-4. 自然死亡係数 M の値を変化させた場合の初期資源尾数の推定値と95%信頼区間の変化。1年目の雄1 齢群での推定結果を例示した。他の群についても同様な傾向が見られた。 $M=0$ については M を未知として他のパラメータと同時推定した場合(A), M を所与とした場合(B~F)の結果である。

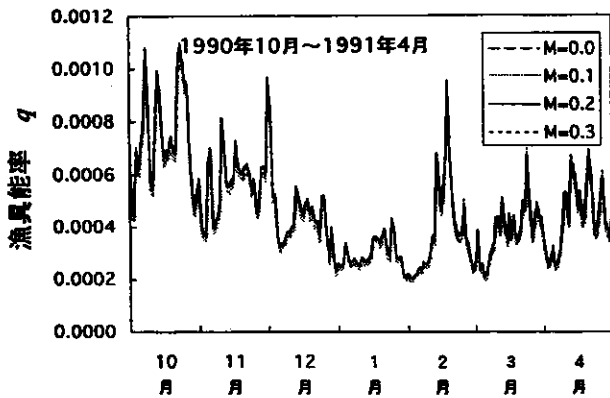


図4-5. 自然死亡係数 M の値の変化に伴う推定漁具能率の変化。1990年10月~1991年4月漁期における推定結果のうち、 M を未知として他のパラメータと同時推定した場合(A; $M=0.0$)と、 M を所与とした場合のうちの3例(B, D, F; $M=0.1, 0.2, 0.3$)を示した。それぞれの漁期の漁具能率の推定結果については図4-3gを参照のこと。

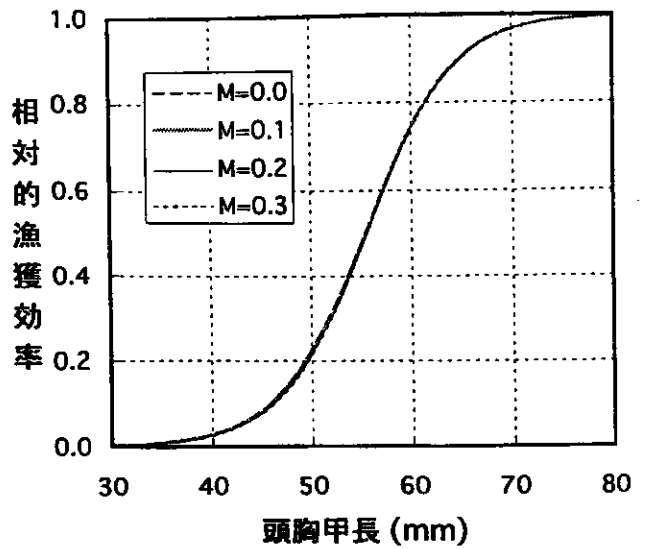


図4-6. 複数年級群解析によって推定された漁獲選択曲線。自然死亡係数 M を未知として他のパラメータと同時推定した場合(A; $M=0.0$)と、 M を所与とした場合のうちの3例(B, D, F; $M=0.1, 0.2, 0.3$)を例示した。

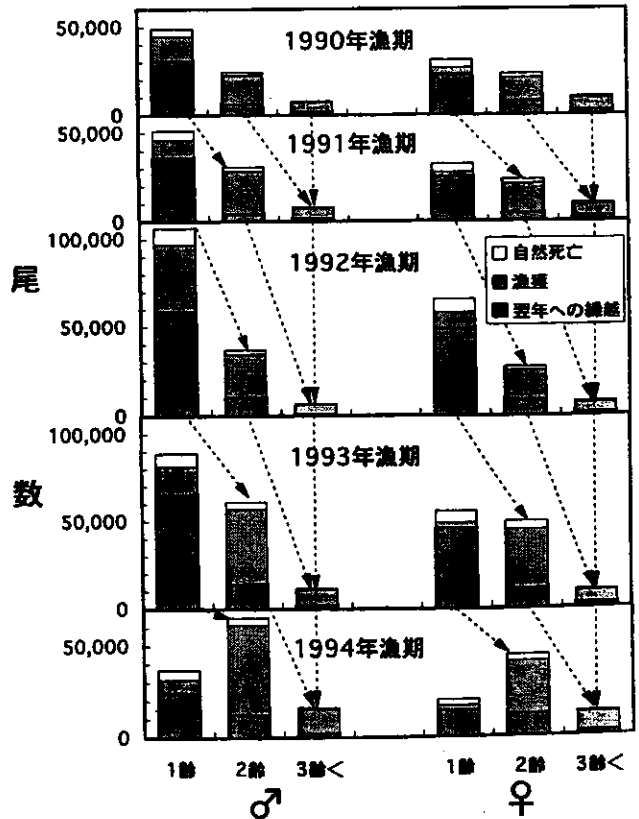


図4-7. 複数年級群解析によって推定された、各年級群の自然死亡、漁獲、翌年への繰り越し状況 ($M=0.2$ の場合)。初期資源尾数のうち、自然死亡および漁獲によって失われなかった残りの尾数が翌年へ繰り越される。

4.5 論 議

漁獲係数を「環境条件などによって変化する漁具能率」×「サイズによる選択率」×「漁獲努力量」の積で表すことにより、刺網によるイセエビの漁獲過程を忠実に反映した「自然な」推定を行うことができた。前章でも示したようにイセエビ刺網漁業では水温や太陰月周期、波浪によって漁期内でも漁具能率が変化する。成長も年によって異なるため、ある一定の漁獲選択曲線に従って漁獲が進行するとしても、現実の1年齢群の漁獲加入状況や各年齢群の選択性は年によって異なる。イセエビ刺網漁業では毎年一定の「齢に固有な係数」を仮定することには無理があり、従来の separable VPA では推定誤差が大きくなるため対応できないと考えられる。

漁獲過程を基本漁獲方程式で統一的に扱うことにより、状況に応じた見通しの良い解析を行うことができる。イセエビ刺網漁業では separability を仮定するにあたって上述の積への分離が妥当であると判断して解析を行ったが、魚種や漁業種類が異なれば妥当な separability のあり方は当然、変化しうる。利用可能な情報と未知パラメータの組み合わせの違いによって分離の形態が異なる場合もあろう。元来コホート解析は、一般に大きな誤差を含む漁獲努力量データを用いなくても資源尾数が推定でき、それがコホート解析の利点のひとつであるとされてきたが、近年では前述のように漁獲努力量や資源量指数を補助的な情報として用いたり、積極的にモデルの中に取り入れた例 (Paloheimo 1980, Fournier and Archibald 1982, Dupont 1983, Deriso *et al.* 1985, Methot 1989, 1990, Megrey *et al.* 1990) もみられるようになった。比較的信頼性の高い漁獲努力量データが得られる場合はそれを活用することによって解析に利用できる情報量を増やすことができるため、精度の高い推定を行うことが可能となる。

漁獲努力量や再生産関係などの情報を活用した年齢別漁獲解析 (catch-at-age analysis, stock synthesis model, NQMR 法など) により、自然死亡係数 M も含めたパラメータ群の同時推定を試みた例が報告されている (Paloheimo 1980, 嶋津 1980^{**24}, 1981^{**25}, Fournier and Archibald 1982, 村田・嶋津 1982, Methot 1989, 1990, Megrey *et al.* 1990)。Paloheimo (1980) は自然死亡係数と漁具能率の推定値の間に高い

負の相関を認めた。村田・嶋津 (1982) は自然死亡係数を変化させても全体の残差平方和の動きは極めて小さいことを理由に、自然死亡係数の推定値の安定性に疑問を投げかけた。本章の解析でも自然死亡係数 M を未知のパラメータとして同時推定すると全体の推定結果が不安定化すると考えられた。元来、自然死亡と漁獲は「漁場に分布する資源の減耗」という点では現象的に共通であり、漁獲量努力量データのみから両者を分離して同時推定するには構造的な困難が伴う。自然死亡係数は別途の調査によって求めた値を所与として与えるほうが本章のような解析においては妥当であろう。

日本産イセエビの自然死亡係数の値を推定した例は文献上みられないが、外国産のイセエビ類についてはいくつかの報告がある (Morgan 1980)。Munro は平均頭胸甲長のデータと成長パラメータを用いて Beverton and Holt (1956) の方法で *Panulirus argus* の年間の全減少係数と自然死亡係数を推定し、未利用資源では $M = 0.52$ /年、中程度に利用されている資源では $M = 0.23$ /年、高度に利用されている資源では $M = 0.14$ /年という値を算出した。*Jasus edwardsii* では $M = 0.10$ /年、*Panulirus cygnus* では $M = 0.226$ /年の値が推定されている (Morgan 1980)。本論文ではこれらの報告を参考に、日本産イセエビについて $M = 0.20$ (/年) 前後の値を仮定し、以後の解析を行った (第6章)。仮定する自然死亡係数の誤差が VPA 解析の推定結果に与える影響については詳細な検討がなされている (Ulltang 1977, Sims 1984)。今後は日本産イセエビについても、より精度の高い自然死亡係数の推定値を得る努力が必要である。

本章での漁獲選択曲線にはシグモイド型曲線を仮定した。一般的には第2章で論議したようなドーム型を基本とする、右に尾を引く関数形 (例えば Methot 1990 の2つのロジスティック関数の積など) を仮定することも可能である。ただし、曲線の右半分 (高齢群域) に関する推定精度を確保するためには、高齢群の年齢別漁獲尾数についても十分に精度の高いデータを使用する必要がある。本章で用いた年齢別出現率や成長に関するデータは第2章での解析結果であり、高齢群域での信頼性は高くない。このため、加入が始まってから漁獲対象の主群となる体長付近での漁獲選択性の変化について検討することを主な目的に、シグモイド型曲線を仮定した。高齢群域

**24 嶋津靖彦: 非線型回帰による N_0, q, M, R の同時推定. 昭和55年度日本水産学会春季大会講演要旨集, 1980, p.180.

**25 嶋津靖彦: 非線型回帰による N_0, q, M, R の同時推定-II. 昭和56年度日本水産学会春季大会講演要旨集, 1981, p.21.

における選択曲線の形状については今後の検討課題である。なお、本章では漁獲選択曲線を未知としてパラメータ推定を行ったが、水槽実験や漁獲実験などを通じて選択曲線があらかじめ判明している場合はそれを既知として導入することで他の未知パラメータの推定に利用することができる。

本章の解析では雌雄および成長段階別のイセエビの行

動には差がないものと仮定し、各群を統一的に扱って解析した。小型群と大型群で夜間や季節別の行動に差があり、漁獲状況に影響を及ぼしている場合などは、漁獲選択曲線や性比に関する推定値も異なってくるため、標識放流やフィールド調査などを通じてイセエビの分布・移動生態や雌雄・成長段階別の行動についても明らかにしておく必要がある。

第5章 漁獲努力の漁期内最適配分に基づく漁業管理

5.1 はじめに

所与の加入資源の有効利用を図ることは、漁業所得の向上に寄与するとともに、資源管理の推進において漁家の経済的な動機を補償するという点で重要な意味をもつ。加入資源の有効利用には、ある漁期内での漁獲量や漁獲努力の効果的な配分を図るという比較的短期の視点からの管理（漁獲調節）と、加入あたり漁獲量や加入あたり漁獲金額の最大化に代表される、対象資源の生涯を対象とした比較的長期の視点からの管理の2通りが大別して考えられる。本章では主に前者、すなわち、漁期内での資源の有効利用を目的とした漁獲努力の最適配分について検討する。

一般に、漁獲物の価格は漁期の進行に伴い大きく変化する。第3章と第4章で示されたように、同じ漁獲努力の投入によっても、期待される漁獲量は資源密度や漁具能率の変化などによって刻々と変化する。現実の漁業では、目的とする種以外の混獲物が重要な収入源となっていることも多い。資源管理を行う主体は経済活動を営む漁家であるため、資源の有効利用を考える際には漁家所得をめぐる兼業構造も考慮に入れる必要がある。このような状況下で所与の加入資源の有効利用を図るためには、どの時期にどれだけの漁獲努力を配分して漁獲を行うかがとくに重要な課題といえよう。

ここでは、最大化すべき目的関数を期間中の漁家の所得に関する総現在価値(Clark 1985, Hannesson 1993)とした。漁具能率および価格、混獲物や兼業漁業による期待収入が漁期内で変化するとし、それらを用いて目的関数を表した。ポントリャーギンの最大原理(Pontryagin *et al.* 1962)を用いて最大化のための漁獲努力の最適配分を導出し、イセエビ刺網漁業に適用して数値解析による検討を行った。^{**26}

5.2 解析モデル

5.2.1 目的関数

対象種の初期資源尾数 N_0 を既知、漁期内における加入と移出入は無視できるとする。漁具能率 q_i が時刻 t

の経過に伴って変化する場合を考える。

時刻 t における資源尾数を N_t 、自然死亡係数を M_t 、1尾あたりの体重を w_t とする。各時刻における漁獲努力量 X_t の任意の配分のもとで、期待漁獲量 Y_t が計算できる。

$$Y_t = N_t \frac{q_t X_t}{M_t + q_t X_t} \{1 - e^{-(M_t + q_t X_t)}\} w_t$$

$$\approx N_t q_t X_t w_t \quad (5.1)$$

$$N_t = N_0 e^{-\int_0^t (M_t + q_t X_t) dt} \quad (5.2)$$

対象種の時刻 t における単価（市場価格）を p_t 、当該漁業の混獲物による単位努力あたり期待収入を y_t 、単位努力あたり操業経費（変動費）を c_t 、当該漁業以外の兼業漁業による単位努力あたり期待利益を π_t 、単位期間あたりの価値の割引率（Clark 1985, 菊池ら1988）を δ 、期間の終了時を T とするとき、期間中の漁家の所得に関する総現在価値 ϕ は以下のように表わせる。ただし、各時点における漁獲努力量には上限 (X_{\max}) があり、それぞれの期では当該漁業か兼業漁業のいずれか一方へ出漁するものとする。また、対象種以外の種では、資源に与える漁獲の影響は無視できるとする。

$$\phi = \int_0^T \left\{ N_t q_t X_t w_t p_t + y_t X_t - c_t X_t + \pi_t (X_{\max} - X_t) \right\} e^{-\delta t} dt \quad (5.3)$$

ϕ を目的変数、 $\{X_t\}$ を制御変数として、 ϕ を最大化する $\{X_t\}$ の配分を考える。なお、制約条件として、期間終了時に一定数以上の取り残し資源尾数 \tilde{N}_T を確保することを付与する。

5.2.2 最大原理による最適解の導出

$\{X_t\}$ の最適な配分は、動的最適化手法の一種であるポントリャーギンの最大原理を用いて以下のように求めることができる。

環境変数を N_t とする。

$$\frac{dN}{dt} = -(M_t + q_t X_t) N_t \quad (5.4)$$

であるから、ハミルトニアン H は次式で表せる。

$$H = \phi + \lambda_t \dot{N}$$

$$= (N_t q_t X_t w_t p_t + y_t X_t - c_t X_t + \pi_t (X_{\max} - X_t)) e^{-\delta t} - \lambda_t N_t (M_t + q_t X_t) \quad (5.5)$$

^{**26} 山川 卓・松宮義晴・山内 淳：イセエビ刺網漁業における漁獲努力量の漁期内最適配分。平成7年度日本水産学会春季大会講演要旨集，1995，p. 200.

ここで、 λ_t は

$$\frac{d\lambda}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial N} \quad (5.6)$$

を満たす補助変数である。

最大原理により、各 t において H を最大とする $\{X_t\}$ が求める解となる。

5.2.3 数値解析

1) 価格 p_t が漁獲量 Y_t と独立に変化する場合

$$H = \{(N_t q_t w_t p_t + y_t - c_t - \pi_t) e^{-\alpha} - \lambda_t N_t q_t\} X_t + \pi_t X_{\max} e^{-\alpha} - \lambda_t N_t M_t \quad (5.7)$$

より、各 t における最適漁獲努力量 X_t^* は以下で与えられる。ここでパラメータの右肩に付したアスタリスク (*) は最適であることを示す添字である。

$$\begin{cases} X_t^* = 0 & \text{if } (N_t q_t w_t p_t + y_t - c_t - \pi_t) e^{-\alpha} - \lambda_t N_t q_t \leq 0 \quad **27 \\ X_t^* = X_{\max} & \text{if } (N_t q_t w_t p_t + y_t - c_t - \pi_t) e^{-\alpha} - \lambda_t N_t q_t > 0 \end{cases} \quad (5.8)$$

$$\lambda_{t+1} = \lambda_t + \frac{d\lambda_t}{dt} = -q_t X_t w_t p_t e^{-\alpha} + \lambda_t (1 + M_t + q_t X_t) \quad (5.9)$$

2) 価格 p_t が漁獲量 Y_t に依存して変化する場合

様々な場合が想定されるが、ここでは一例として、漁獲量が多いと価格が下がる、次のような一般的な価格関数を考える。

$$p_t = \tilde{p}_t (a - b N_t q_t X_t w_t) \quad (5.10)$$

a, b は正の定数、 \tilde{p}_t は漁獲量と独立な変数で、価格の平均的な推移傾向を表す。このとき、

$$H = -b \tilde{p}_t (N_t q_t w_t)^2 e^{-\alpha} X_t^2 + \{(a \tilde{p}_t N_t q_t w_t + y_t - c_t - \pi_t) e^{-\alpha} - \lambda_t N_t q_t\} X_t + \pi_t e^{-\alpha} X_{\max} - \lambda_t N_t M_t \quad (5.11)$$

であるから、 $\frac{\partial H}{\partial X_t} = 0$ を解くことによって、各 t における最適漁獲努力量 X_t^* は以下のように与えられる。

$$\begin{cases} X_t^* = 0 & \text{if } \tilde{X}_t \leq 0 \\ X_t^* = \tilde{X}_t & \text{if } 0 < \tilde{X}_t < X_{\max} \\ X_t^* = X_{\max} & \text{if } \tilde{X}_t \geq X_{\max} \end{cases} \quad (5.12)$$

ここで、

$$\tilde{X}_t = \frac{a \tilde{p}_t N_t q_t w_t + y_t - c_t - \pi_t - \lambda_t N_t q_t e^{-\alpha}}{2b \tilde{p}_t N_t^2 q_t^2 w_t^2} \quad (5.13)$$

$$\lambda_{t+1} = \lambda_t + \frac{d\lambda_t}{dt} = q_t X_t w_t \tilde{p}_t (2b N_t q_t X_t w_t - a) e^{-\alpha} + \lambda_t (1 + M_t + q_t X_t) \quad (5.14)$$

1) と 2) のいずれの場合も実際の数値計算では、適当な λ_0 を与えることから始め、 N_t, λ_t, X_t を $t = 0 \rightarrow t = T$ の方向へ計算する。終端固定問題 ($N_T \geq \tilde{N}_T$) なので、 $t = T$ のときに $[\lambda_T = 0 \text{ かつ } N_T > \tilde{N}_T]$ または $[N_T = \tilde{N}_T]$ が満たされていないければ λ_0 を変えて計算を最初から繰り返す。 $[\lambda_T = 0 \text{ かつ } N_T > \tilde{N}_T]$ または $[N_T = \tilde{N}_T]$ を満たす λ_0 がみつければ、その $\{X_t\}$ が求めるべき最適な漁獲努力量の配分である。

5.3 適用データ

三重県和具地区でのイセエビ刺網漁業 (漁期: 10月~4月) のデータを用いた (図5-1)。解析の単位期間は「日」とし、漁獲努力量 X_t は隻数で表した。1期あたりの出漁可能隻数 X_{\max} は現状を鑑みて30隻とした。初期資源尾数は73,000尾、漁期終了時に残すべき資源尾数 \tilde{N}_T は20,000尾 (漁獲率73%) とした。解析の対象とする期間は短いため、漁期中の自然死亡 M_t 、割引率 δ は無視できるものとした ($M_t \equiv 0, \delta = 0$)。

漁具能率 q_t は、第3章のモデルIVによる1990年10月~1991年4月漁期についての推定値を用いた。解析は2齢群以上を対象として行い、サイズによる漁獲選択性は考慮しなかった ($\rho = 1$)。イセエビの単価 p_t の漁期内における推移傾向は、和具市場における1972年~1993年の20漁期分の日別の単価データを用いて算出した。刺網の混獲物 (魚類、サザエなど) による期待収入 y_t (/ 隻) は1993年10月~1994年4月漁期における日別実績値の13日移動平均値を用いた。単位努力あたり操業経費 c_t は、イセエビ刺網漁業を営む漁業者への聞き取り調査によって推算した。イセエビ刺網漁業以外の兼業漁業による期待利益 π_t は、1993年10月~1994年4月における兼業漁業での水揚げ金額の13日移動平均値から、別途の聞き取り調査による操業経費を差し引いて推算した。期間中に営

**27 等号が成立する場合は厳密には特異解に関する検討を行う必要があるが、単位期間が十分に小さく、目的関数が時刻に関する連続関数として近似できる場合はその影響を無視できる。詳細は赤嶺(1997b)を参照のこと。

5.4 解析結果

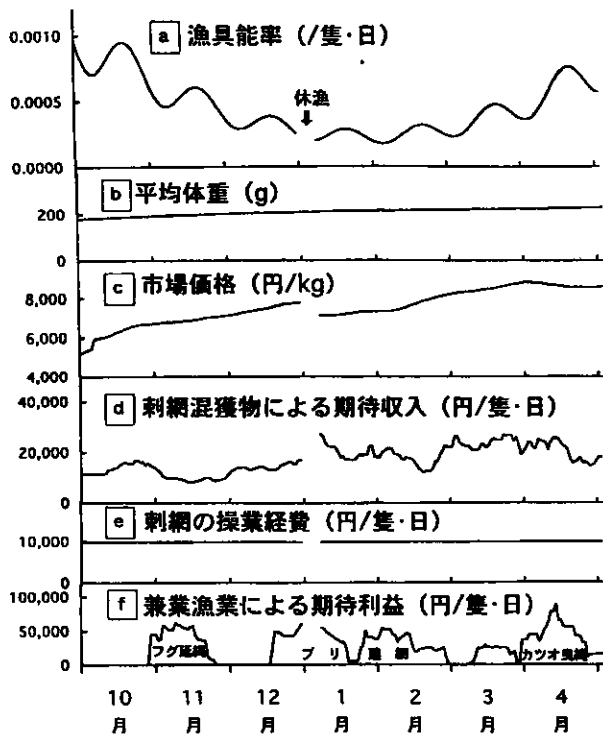


図5-1. 漁獲努力の漁期内最適配分の解析における適用データの概要. a) 漁具能率 q_t , b) 平均体重 w_t , c) 市場価格 p_t , d) 刺網の混獲物による期待収入 y_t , e) 単位努力量あたり操業経費 c_t , f) 兼業漁業による単位努力量あたり期待利益 π_t .

まれる兼業漁業種類は、トラフグ延縄漁業、ブリ建網漁業、カツオ曳縄漁業という主要なものに限定した。

上記のデータについて、A. イセエビの漁獲金額のみを考慮し、混獲物による収入や操業経費、兼業漁業による利益は考慮しない場合 ($y_t \equiv 0, c_t \equiv 0, \pi_t \equiv 0$; 価格は漁獲量と独立), B. Aに加えて刺網の操業経費 c_t を考慮に入れる場合, C. Bに加えて混獲物による収入 y_t を考慮に入れる場合, D. 混獲物による収入 y_t , 刺網の操業経費 c_t , 兼業漁業による利益 π_t のすべてを考慮に入れる場合, E. Bと同様であるが価格関数を導入した場合, F. Bと同様であるが1日に漁獲できる最大隻数 X_{max} を変化させた場合、($X_{max} = 50, 40, 35, 30, 25, 20, 15$) の6通りについて検討した。

和具市場だけに限定した検討では、日々の漁獲量と単価の間には明瞭な関係は認められなかった。Eは価格関数が及ぼす影響について検討するために用いた仮想条件である(価格関数の(5.10)式においては $a = 1.05, b = 0.0005$ とした)。

(5.8)式から、価格が漁獲量と独立の場合、漁獲を行うべき時期には最大の漁獲努力を払い、抑える時期には全く漁獲を行わない方が最適であることが解る。価格が漁獲量に左右される場合は、中間的な漁獲努力量の配分方策もありうる(5.12式)。

A~Fの各ケースについて求められた漁獲努力の最適配分と、期待利益の推定結果を図5-2~図5-7に示した。

目的関数にイセエビの漁獲金額のみを考慮したAの場合(図5-2)は、価格 p_t の高い時期(12月、2~4月)に集中的に出漁し、他の時期には出漁しないのが最適である。刺網の操業経費 c_t も考慮に入れたBの場合(図5-3)は、価格の高い時期に加えて、漁具能率 q_t が比較的高く、効率的な漁獲の期待できる時期(11月、12月の中~下旬)にも出漁する方策が最適である。さら

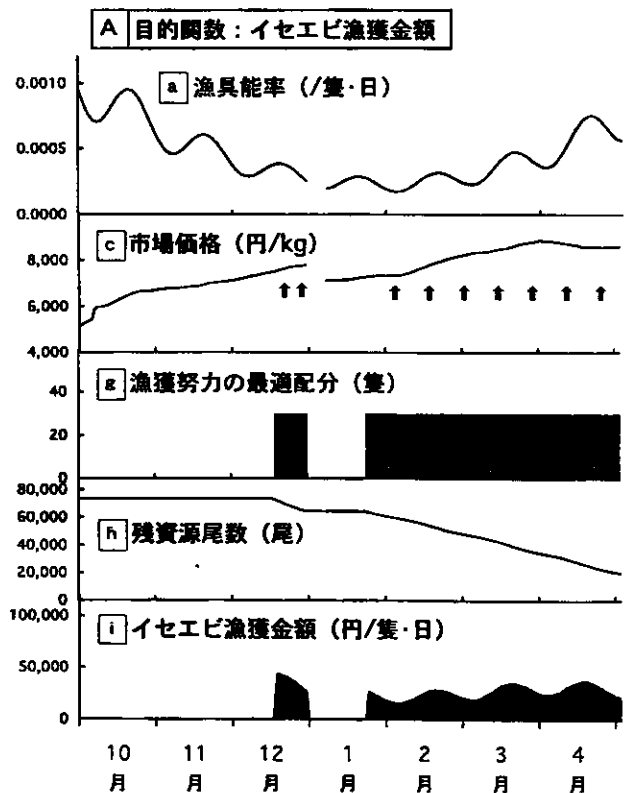


図5-2. 漁獲努力の漁期内最適配分の解析結果. 目的関数をA(イセエビの漁獲金額のみ)とした場合. a) 漁具能率 q_t , c) 市場価格 p_t は参考のために示した適用資料の抜粋である. g) 漁獲努力 X_t の最適配分, h) 漁場内の残存資源尾数 N_t , i) 期待されるイセエビ漁獲金額. 市場価格の高い時期(矢印)に出漁する配分が最適となる。

に、混獲物による収入 y_t も考慮に入れたCの場合（図5-4）は、イセエビに対する漁具能率 q_i が低く、漁獲金額があまり多くは期待できない時期でも、混獲物による期待収入が高ければ出漁するのが良い方策である（1~2月）。混獲物による収入 y_t 、刺網の操業経費 c_t 、兼業漁業による利益 π_t のすべてを考慮に入れたDの場合（図5-5）は、各兼業漁業で相当な利益が期待できる時期には兼業漁業へ優先的に出漁し、イセエビ刺網はその間隙に出漁する方策が最適である。価格関数を導入したEの場合（図5-6）は、漁具能率 q_i が高くて漁獲量が多いと期待される時期には、出漁隻数を少なくすることによって漁獲量を押しさえ、価格の下落を防ぐような配分が最適であるという結果が得られた。1日に

最大隻数 X_{max} を変化させたFの場合（図5-7）では、 X_{max} の値が大きければイセエビの価格 p_t が高く、かつ漁具能率 q_i も比較的高い漁期末に集中して出漁する方策が最適で、 X_{max} の値が低くなるに従って他の時期へも出漁日を順に広げる方策が最適となった。また、 X_{max} を一定として漁期終了時の取り残し資源尾数 \tilde{N}_T を変化させた場合（漁期中の漁獲率を変化させた場合）も同様の現象が認められた。すなわち \tilde{N}_T が大きければイセエビの価格 p_t と漁具能率 q_i が高い漁期末に集中して出漁する方策が最適で、 \tilde{N}_T を小さくすると他の時期へも出漁日を広げる方策が最適となった。

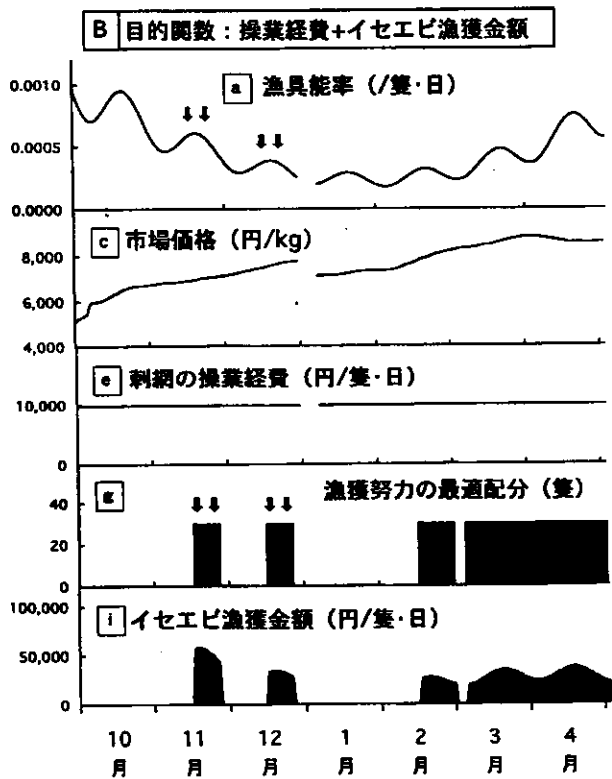


図5-3. 漁獲努力の漁期内最適配分の解析結果。目的関数をB（Aに加えて刺網の操業経費 c_t を考慮に入れる）とした場合。a) 漁具能率 q_i 、c) 市場価格 p_t 、e) 刺網の操業経費 c_t は参考のために示した適用資料の抜粋である。g) 漁獲努力 X_t の最適配分、i) 期待されるイセエビ漁獲金額。市場価格の高い時期に加えて、漁具能率の比較的高い時期（矢印）にも出漁する配分が最適となる。

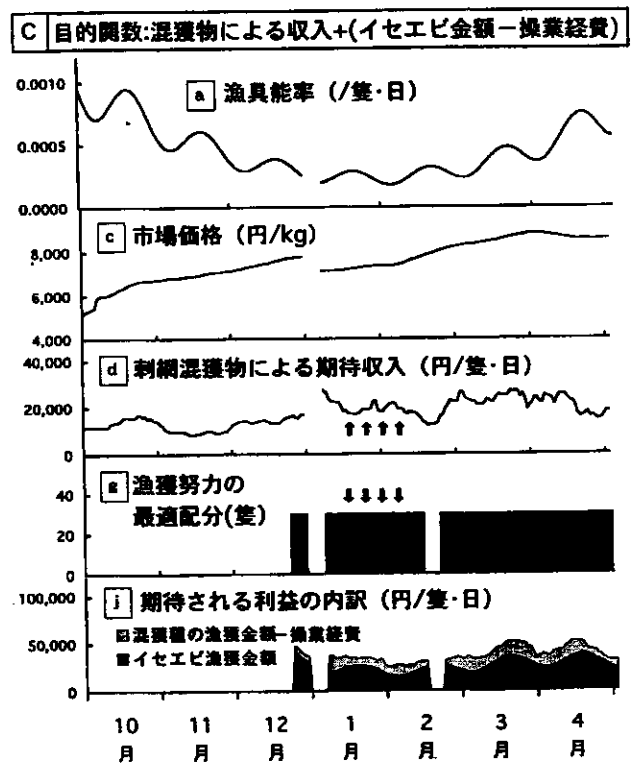


図5-4. 漁獲努力の漁期内最適配分の解析結果。目的関数をC（Bに加えて混獲物による収入 y_t を考慮に入れる）とした場合。a) 漁具能率 q_i 、c) 市場価格 p_t 、d) 刺網の混獲物による期待収入 y_t は参考のために示した適用資料の抜粋である。g) 漁獲努力 X_t の最適配分、j) 期待される利益の内訳。混獲物による期待収入の高い時期（矢印）にも出漁する配分が最適となる。

5.5 論 議

山内(1996)は遡河性魚類などのように漁期終了後に産卵して生涯を終える一回産卵型の種について、資源の有効利用と、資源維持のために必要な取り残し資源尾数を同時に考慮した最適漁獲方策を、最大原理によって導いた。本章で導出したモデルは操業経費、混獲物による収入、兼業漁業による所得、価値の割引率も導入され、より現実に即した対応を可能とした。漁獲係数 F_t を漁具能率 q_t と漁獲努力量 X_t の積で表すことにより、漁具能率の変化と漁獲努力量の調節を独立して扱うこともできる。価格 p_t が漁獲量 Y_t に依存して変化する場合の解析例をも示した。

ポントリャーギンの最大原理は限界価値の時間変化をもとに、制約条件付きの最適化問題を解くことができる。

(5.9)式より、

$$\frac{d\lambda}{dt} = -q_t X_t w_t p_t e^{-\alpha t} + \lambda_t (M_t + q_t X_t) \quad (5.15)$$

これを時刻 t から T まで積分すれば、

$$\lambda_t = \int_t^T q_s X_s w_s p_s e^{-\alpha s} e^{-\int_t^s (q_u X_u + M_u) ds} ds + \lambda_T e^{-\int_t^T (q_u X_u + M_u) ds} \quad (5.16)$$

となる。右辺の第一項は、時刻 t で1個体を残すことによって時刻 T までに得られる漁獲金額の総現在価値であり、一方、第二項は時刻 t で取り残した1個体由来する期間終了時での残存価値で、一回繁殖型の種については時刻 T での産卵に関与する価値の経済的な評価(山内 1996)、多回繁殖型の種では翌期以降へ繰り越される価値に関する経済的評価と解釈できる。 λ_t はこれらを合計した値、すなわち時刻 t で1個体を残すことによ

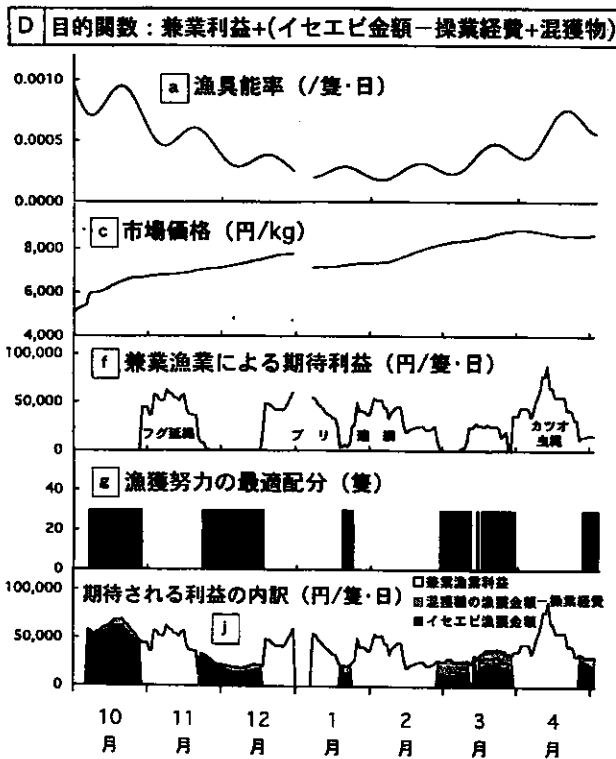


図5-5. 漁獲努力の漁期内最適配分の解析結果。目的関数をD(混獲物による収入 y_t 、刺網の操業経費 c_t 、兼業漁業による利益 π_t のすべてを考慮に入れる)とした場合。a) 漁具能率 q_t 、c) 市場価格 p_t 、f) 兼業漁業による期待利益 π_t は参考のために示した適用資料の抜粋である。g) 漁獲努力 X_t の最適配分、j) 期待される利益の内訳。兼業漁業による期待利益の少ない時期にイセエビ刺網漁業へ出漁する配分が最適となる。

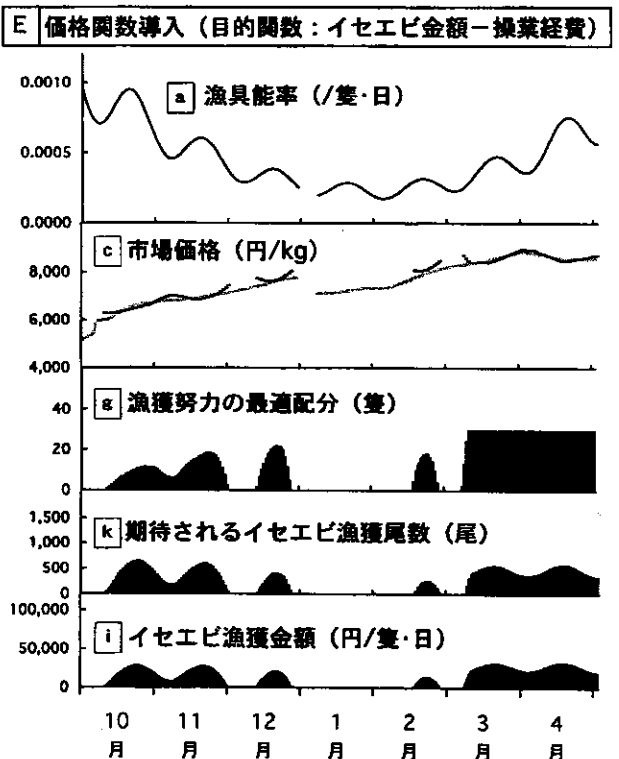


図5-6. 漁獲努力の漁期内最適配分の解析結果。E. 価格関数を導入した場合(目的関数はBと同様)。a) 漁具能率 q_t は参考のために示した適用資料の抜粋である。c) 市場価格の平年における推移傾向 \hat{p}_t (影で示した薄い線)とモデルで予測される価格の実現値 p_t (濃い線)、g) 漁獲努力 X_t の最適配分、k) 期待されるイセエビ漁獲尾数、i) 同イセエビ漁獲金額。漁具能率の高い時期には出漁隻数を抑え目にして価格の下落を防ぐような配分が最適である。

て将来に期待される価値の総合計と考えることができる。

(5.8)式より、時刻 t で単位努力量を投入した場合に直接得られる総現在価値の増加量(限界価値)が、もし単位努力量を投入しなかった場合に(将来)得られるであろう価値の増加量(限界価値)と比較して大きい場合は時刻 t において最大限の漁獲努力を投入し、そうでない場合は全く漁獲を行わないことが最適な方策であることが解る。

最大原理は元来、制御工学の分野で開発されたものであるが(Fan 1966, 近藤 1984), 生活史戦略をはじめとする数理生物学の分野でも積極的に活用されている(King and Roughgarden 1982a, 1982b, Chiariello and Roughgarden 1984, Iwasa and Roughgarden 1984, 巖佐 1985, 1990)。水産学の分野への活用例としては、水産生物の生活史戦略への適用(Kitahara *et al.* 1987, Hiyama *et al.* 1988, 桧山 1992, Hiyama and Kitahara 1993a, 1993b), 資源管理や最適漁獲方策への応用(Reed 1974, Clark 1976, Getz 1979, Reed 1979,

Getz 1980, Reed 1980, Clark and Kirkwood 1984, Clark 1985, Arditi and Dacorogna 1992, Hannesson 1993, Dacorogna *et al.* 1994, Akamine 1996a, 松田 1996, Suzuki and Kitahara 1996, 山内 1996, 赤嶺 1997b, Takenaka and Matsuda 1997) などがある。最大原理は時間軸に代表される、ある一つの軸上における制約条件付き最適化問題の解法として非常に有効である。扱う問題が連続軸上ではなく離散軸上に分布し、求めるべきパラメータ数が多くない場合には、準ニュートン法やマルカール法などの非線形最適化手法や線形計画法(赤嶺 1996b, Akamine 1997a)でも目的関数の直接の最大化によって同様の目的を達成することが可能であるが、一般にこれらの計算には相当な時間を要する。表5-1に、時間軸上の最適化問題に適用した場合の最大原理と一般の非線型最適化手法のそれぞれの特徴を整理した。

現実のイセエビ刺網漁業データへの適用の結果、目的関数への混獲物や兼業漁業収入などの考慮の有無によって漁獲努力量の最適配分が大きく異なった。「資源の有効利用」という一般的な表現は、詳細に吟味すればその意味と内容は様々であり、どのような基準をもとに「有効利用」と判断するかによって望ましい漁業管理形態も大きく異なることになる。

表5-1. 時間軸上の最適化問題に適用した場合の最大原理と一般の非線型最適化手法の特徴

	最大原理	一般の最適化手法
扱える問題	連続軸上, 離散軸上の両方	離散軸上のみ
扱えるタイムステップ数	多い	一般に少ない
計算に要する時間	短い	長い
解析過程の意味付け(根拠の解釈)	可能	単なる離散的な最大化
軸上に並ばない一般の最適化問題	扱えない	扱える

佐久間(1990)は福島県磯部漁業協同組合のホッキガイ漁業の事例をもとに漁業管理の合意形成条件について考察し、「兼業基盤の充実が資源管理への移行をスムーズにした要因と考えられる」とした。さらに、「一部の漁業資源に対する管理が他の資源の利用にも影響することは、資源の限界原理的利用の概念を使うとうまく説明できる」と記した。本章での解析は、望ましい漁業管理について考察する際、対象とする資源から得られる利益の検討に加えて、兼業構造などの諸条件に対する配慮が重

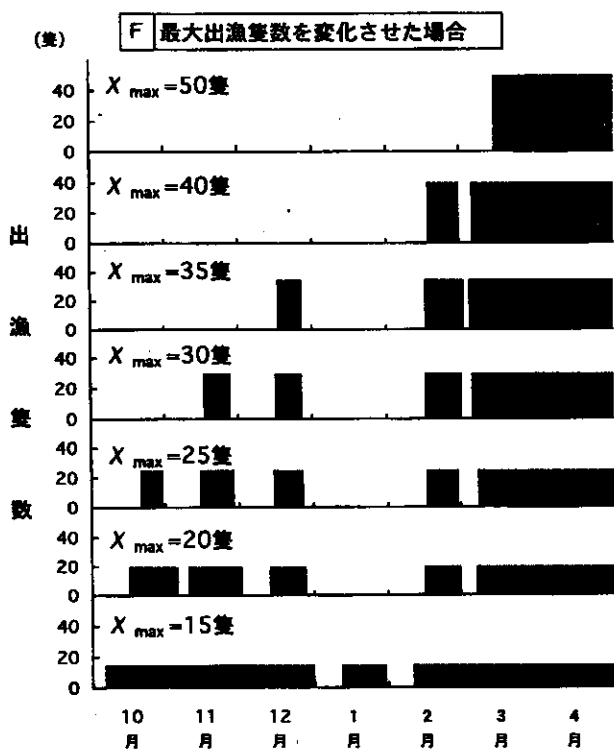


図5-7. 漁獲努力の漁期内最適配分の解析結果。1日に出漁できる最大隻数 X_{max} を変化させた場合(F)。目的関数はBと同様(イセエビの漁獲金額+刺網の操業経費 c_t)とした。 X_{max} が低くなるに従って出漁日を拡げる必要がある。

要な意味をもつことを解析的に提示したもので、資源管理における兼業基盤の考慮の重要性を示唆する。本章で兼業漁業として取り挙げたトラフグ延縄漁業は、和具地区では資源の増加に伴って1990年から新規に開始された漁業であり、この漁業の開始に伴って地域の漁業形態（兼業構造）が大きく変化し、結果的にイセエビ刺網漁業の漁獲努力の最適配分も変化することとなった。

本章の解析では、当該漁業と兼業漁業へは同一の日には出漁しないと仮定した。実際には操業時刻が異なる漁業もあるため、条件によっては同一の日に複数の漁業へ出漁することが可能な場合もあり得る。兼業漁業には全てのイセエビ刺網漁業者が等しく出漁するとは限らず、漁家によって兼業のパターンも若干異なる。ここで検討した最適配分は、すべての漁業者が協力して同一の行動をとる、いわゆる「単独所有者の最適方策」(Clark 1985)であるが、漁業者集団内の諸条件の不均一性と漁業者間の競争原理を前提にする場合はモデルはより複雑となり、得られる最適方策は漁業者ごとに異なったものとなるであろう。

ここでは、将来における状況の変動を考慮しない検討であったため、平均的で、全体の変動傾向をなめらかに

代表するようなデータを極力採用して解析するよう努めた。混獲物や兼業漁業による収入の移動平均値を用いたのもそのためである。固定的な漁獲戦略の組み立てにはこのような方法が有効であろうが、時々刻々と状況が変化する現実の漁業での意思決定過程に於いては、短期的な将来予測と、モニタリング調査等を通じて得られる各時点での情報更新との組み合わせの中で、今回の手法を応用していく方向が考えられよう。

Doll (1988) は従来型の長期的視点に基づく漁業経済モデルについて評論し、経済的側面からみると漁船漁業では短期的な視点が重要であるとした。彼は、従来からの努力量の定義と生産過程に関する仮定について再検討し、漁船の短期的な費用関数、供給曲線や生産関数に結びつけて論議を展開した。Doll の論議は、漁獲努力量の数値的な評価が容易な、底曳網や桁網などの曳き網漁具による漁業に限定されるが、本論文で展開したような、漁獲過程を忠実に反映した（見かけ上変化する）漁具能率の概念を導入すれば、漁獲努力量を基にした漁獲過程の詳細な記述ができるため、刺網漁業やかご漁業などでも短期的な生産関数に基づく漁業経済学的な検討が可能となる。

第6章 産卵資源量の経済価値を考慮した加入資源の最適漁獲方策

6.1 はじめに

前章では所与の加入資源の有効利用を目的として、漁期における漁獲努力の最適配分について検討を加えた。本章ではより長期的な視点に基づき、イセエビの生涯を対象とした最適漁獲方策について論議を進める。

加入資源の有効利用に関する従来の論議は、漁獲開始年齢や漁獲係数を変化させたときに予想される加入あたり漁獲量や漁獲金額の検討が中心であった。代表的なものに、Beverton and Holt (1957) の等漁獲量線図があげられる。イセエビ類については Saito *et al.* (1979), Morgan (1980), Ebert and Ford (1986), Annala and Breen (1989) などの検討例があり、ロブスターについては Campbell (1989) の総説に詳しい。

一般の解析では、漁獲開始年齢以上に達した群は毎年一定の漁獲係数で漁獲され、漁期以内での成長、価格変動は考慮されないなど、単純化された状況が仮定される。これに対して前章の最大原理を導入すると、より柔軟な解析が可能である。例えば、漁獲を行う期間と漁獲休止期間の配置については一切の制約を設けなくても解析が可能であり、数年にわたる漁獲方策と漁期以内での漁獲方策を連続した視点で同等に扱うことができる。

従来の加入あたり漁獲量や漁獲金額の最大化を目標とする管理には、再生産管理の概念は含まれていない。目標とされるのは所与の加入資源から得られる「利得の最大化」のみであり、結果的に資源の維持に必要な産卵量が確保できずに乱獲を招いてしまう危険性を否定できない。乱獲の回避のためには、資源の平衡状態の維持に必要な産卵量の確保のための何らかの歯止め策（基準）を別途検討するか、あるいは「有効利用」の概念の中に産卵量の確保（平衡状態の維持）に関する視点を制約条件としてあらかじめ組み込んでおく必要がある。

ここでは、前章で導出したモデルに、産卵に関与する親資源量の経済評価の概念を導入し、産卵量の確保と加入資源の有効利用を同時に達成するための管理モデルを提示した。イセエビの加入資源に適用し、資源の平衡状態を維持しながら最大限の有効的活用を達成するための最適漁獲方策の検討を行った。^{**28}

6.2 単一年級群の最適漁獲方策

6.2.1 モデルの構成と最適解の導出および数値解析
前章で導出した目的関数 (5.3式) に、産卵に関与する親資源量の経済価値を表す項を導入し、漁業から直接得られる漁家所得（総現在価値）との和を目的関数とする。各年齢群の選択的な漁獲が可能であると仮定する。

$$\Phi = \int_0^T \left[\left\{ N_t q_t X_t w p_t + y_t X_t - c_t X_t + \pi_t (X_{\max} - X_t) \right\} e^{-\delta t} + \tau N_t E_t \right] dt \quad (6.1)$$

ここで、 τ : 産出卵 1 万粒あたりの経済的評価金額を表す係数、

E_t : 時刻 t における 1 個体あたり産卵数 (万粒)、

T : 寿命もしくは漁獲終了時、である。

前章と同様、

$$N_t = N_0 e^{-\int_0^t (M_t + q_t X_t) dt} \quad (6.2)$$

の制約条件を付与する。

$\{X_t\}$ の最適配分は、ポントリヤーギンの最大原理を用いて以下のように求めることができる。

ハミルトニアン H を次式で表す。

$$\begin{aligned} H &= \dot{\phi} + \lambda_t \dot{N} \\ &= (N_t q_t X_t w p_t + y_t X_t - c_t X_t + \pi_t (X_{\max} - X_t)) e^{-\delta t} \\ &\quad + \tau N_t E_t - \lambda_t N_t (M_t + q_t X_t) \end{aligned} \quad (6.3)$$

ここで、 λ_t は

$$\frac{d\lambda}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial N} \quad (6.4)$$

を満たす補助変数である。

ここでは価格 p_t が漁獲量 Y_t と独立に変化する場合を考えるが、価格 p_t が漁獲量 Y_t に依存する場合についても同様に解析を展開できる。

各 t における最適漁獲努力量 X_t^* は以下で与えられる。

$$\begin{cases} X_t^* = 0 & \text{if } (N_t q_t w p_t + y_t - c_t - \pi_t) e^{-\delta t} - \lambda_t N_t q_t \leq 0 \\ X_t^* = X_{\max} & \text{if } (N_t q_t w p_t + y_t - c_t - \pi_t) e^{-\delta t} - \lambda_t N_t q_t > 0 \end{cases} \quad (6.5)$$

^{**28} 山川 卓・松宮義晴・山内 淳：イセエビの産卵資源量の経済価値を考慮した加入資源の最適漁獲方策。平成7年度日本水産学会秋季大会講演要旨集，1995，p. 22.

この場合は終端自由問題なので、横断条件として $\lambda_T = 0$ を付与する。数値計算では、適当な λ_0 を与えることから始め、 λ に関する近似式

$$\lambda_{t+1} = \lambda_t + \frac{d\lambda_t}{dt} \\ = -q_t X_t w_t p_t e^{-\delta t} - \tau E_t + \lambda_t (1 + M_t + q_t X_t) \quad (6.6)$$

と(6.2)式、(6.5)式を用いて N_t, λ_t, X_t を $t=0 \rightarrow t=T$ の方向へ計算する。 $t=T$ のときに $\lambda_T = 0$ が満たされていなければ λ_0 を変えて計算を最初から繰り返す。 $\lambda_T = 0$ を満たす λ_0 がみつければ、そのときの $\{X_t\}$ が求めるべき最適な漁獲努力量の配分である。

6.2.2 モデルの解釈

(6.3)式は資源の平衡状態を維持するという制約条件のもとで、前章の(5.3)式の目的関数から直接導くこともできる(松田1996, Takenaka and Matsuda 1997)。

資源が平衡状態にあるためには N_0 個の卵に由来する時刻 T までの総産卵数 P_T が N_0 以上でなければならない。

$$P_T = \int_0^T N_t E_t dt \geq N_0 \quad (6.7)$$

(6.2)式と(6.7)式の制約条件のもとで(5.3)式の最大化を考えると、ハミルトニアン H は

$$H = \frac{d\Phi}{dt} + \lambda_t \frac{dN}{dt} + \tau_t \frac{dP}{dt} \\ = (N_t q_t X_t w_t p_t + y_t X_t - c_t X_t + \pi_t (X_{\max} - X_t)) e^{-\delta t} \\ + \tau_t N_t E_t - \lambda_t N_t (M_t + q_t X_t) \quad (6.8)$$

となる。

ここで、 λ_t, τ_t はそれぞれ、

$$\frac{d\lambda}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial N} \quad (6.9)$$

$$\frac{d\tau}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial P} \quad (6.10)$$

を満たす補助変数である。

ここでは

$$\frac{\partial H}{\partial P} = 0$$

なので、 τ_t は定数 ($=\tau$) となる。したがって(6.8)式は(6.3)式と等しく、(6.1)式を目的関数として最大化を図ることは、資源の平衡状態を維持するという制約条件のもとで(5.3)式の最大化を図ることと同等であることが証明できる。なお、本章における τ は松田(1996)の η (打撃係数; impact coefficient) に相当し、将来の

産出卵1個あたりの経済的評価 (Takenaka and Matsuda 1997) と解釈することもできる。

(6.4)式より、

$$\frac{d\lambda}{dt} = -q_t X_t w_t p_t e^{-\delta t} - \tau E_t + \lambda_t (M_t + q_t X_t), \quad (6.11)$$

である。これを時刻 t から T まで積分すれば、

$$\lambda_t = \int_t^T q_s X_s w_s p_s e^{-\delta s} e^{-\int_t^s (q_s X_s + M_s) ds} ds \\ + \int_t^T \tau E_s e^{-\int_t^s (q_s X_s + M_s) ds} ds + \lambda_T e^{-\int_t^T (q_s X_s + M_s) ds}, \quad (6.12)$$

となる。右辺の第一項は、時刻 t で1個体を獲り残した場合に、それに由来して T までに得られる漁獲金額の総現在価値、第二項は時刻 t で獲り残した1個体由来する、 T までの産出卵の経済的価値、第三項は時刻 t で獲り残した1個体由来する期間終了時での残存価値と考えることができる。 λ_t はこれらを合計した値、すなわち時刻 t で1個体を残すことによって発生するであろう将来の価値の総和と考えることができる。なお、ここでは横断条件により $\lambda_T = 0$ なので、第三項はゼロとなる。第一項を ϕ_t 、第二項を τR_t

$\left(R_t = \int_t^T E_s e^{-\int_t^s (q_s X_s + M_s) ds} ds \right)$ と置くと、 ϕ_t は松田(1996)の収穫価 (future harvest value) あるいは山内(1996)の将来漁獲価 (future fishery value) に相当し、 R_t は t における Fisher の繁殖価 (reproductive value) に相当する。

(6.12)式は、

$$\lambda_t = \phi_t + \tau R_t \quad (6.13)$$

と書けるので、(6.5)式は

$$\begin{cases} X_t^* = 0 & \text{if } V_t \leq \phi_t + \tau R_t \\ X_t^* = X_{\max} & \text{if } V_t > \phi_t + \tau R_t \end{cases} \quad (6.14)$$

と書き直すことができる。ここで、

$$V_t = \left(w_t p_t + \frac{y_t - c_t - \pi_t}{N_t q_t} \right) e^{-\delta t} \quad (6.15)$$

であり、 V_t は時刻 t において1個体を漁獲することによって得られる漁家所得の総現在価値と考えることができる。

(6.14)式より、時刻 t における1個体の漁獲によって得られる漁家所得の総現在価値の増加量 (V_t ; 本論文では以後「直接現在価」と称す) が、もし漁獲しなかった場合に(将来)得られるであろう漁獲金額の総現在価値 (ϕ_t ; 「将来収穫価」と称す) と産出卵の経済的価値 (τR_t ; 「繁殖経済価」と称す) の総和と比較して大き

い場合は時刻 t で最大限の漁獲努力を投入し、そうでない場合は全く漁獲を行わない方が最適であることが解る。さらに(6.15)式より、期待される漁獲尾数が多いとき ($N_t q_t$ が大きいとき) は混獲物による収入 y_t や操業経費 c_t 、兼業収入 π_t が最適漁獲方策に与える影響は比較的小さいのに対し、資源尾数が少ないか漁具能率が低いために期待漁獲尾数の少ないときは、これらの要因が最適漁獲方策に与える影響が大きくなることを解る。

6.2.3 適用データ

適用データは前章と同様である。イセエビは雄と雌で大きく成長が異なるため、解析は雌雄別々に行った。雄では産卵数 $E_t \equiv 0$ なので、産出卵の経済的評価金額の考慮は行っていない。1日あたりの出漁可能隻数 X_{max} は前章と同じ30隻とした。漁具能率 q_t は、第3章のモデルⅣによる1990年10月～1991年4月漁期についての推定値を用いた。サイズによる漁獲選択性は考慮しなかった ($\rho=1$)。自然死亡係数は $M_{ijt} = 0.20/365$ 、割引率は $\delta = 0.04/365$ とした。成長曲線は第2章で求めた成長曲線のうち、中間的な成長を示している1991年を採用した。1年齢の初期資源尾数は第4章で $M = 0.2/365$ とし求められた尾数の5ヶ年の平均値 (雄66,162尾、雌39,335尾) を用いた。

目的関数には、前章で検討した5通りのケースうち、A. イセエビの漁獲金額のみを考慮し、混獲物による収入や操業経費、兼業漁業による利益は考慮しない場合 ($y_t \equiv 0, c_t \equiv 0, \pi_t \equiv 0$; 価格は漁獲量と独立) を例示的に取り上げ、 τ の値を変化させたときの最適漁獲方策の変化について検討した。B～Eの各ケースについても同様な検討が可能である。

市場価格については、前章では年齢構成を考慮する必要がなかったので全銘柄の平均値を用いたが、ここでは年齢構成を考慮し、各年齢群の平均サイズ別に銘柄別 (「小」; 80g～120g, 「中」; 120g～380g, 「特大」; 380g以上) の価格を当てはめて計算した。図6-1に、銘柄別単価の推移 (和具市場における1972年～1993年の20漁期分の日別の単価データを用いて算出) と1尾あたりの推定体重から計算された、雌雄別年齢別の1尾あたり価格の推移を示した。

雌1個体あたりの産卵数については、金盛 (1988) の頭胸甲長 ($CL \cdot \text{mm}$) と抱卵数 ($E \cdot \text{万粒}$) の関係式

$$E = 1.35CL - 49.64 \quad (\text{一番子}) \quad (6.16)$$

$$E = 0.30CL - 5.13 \quad (\text{二番子}) \quad (6.17)$$

に従った。猪野 (1950) は抱卵エビの飼育および抱卵個体の卵巣状態の観察から、天然では25%程度の雌個体が二番子を形成すると推定した。ここでは一番子と二番子を併せた年間の産卵数として、

$$\begin{aligned} E &= 1.35CL - 49.64 + 0.25 \times (0.30CL - 5.13) \\ &= 1.43CL - 50.92 \end{aligned} \quad (6.18)$$

を使用した。図6-2に(6.18)式と第2章で求められた雌の成長式から計算した年齢別の1個体あたり年間推定産卵数を示した。なお、10歳以降は産卵は行われないと仮定して解析を進めた。

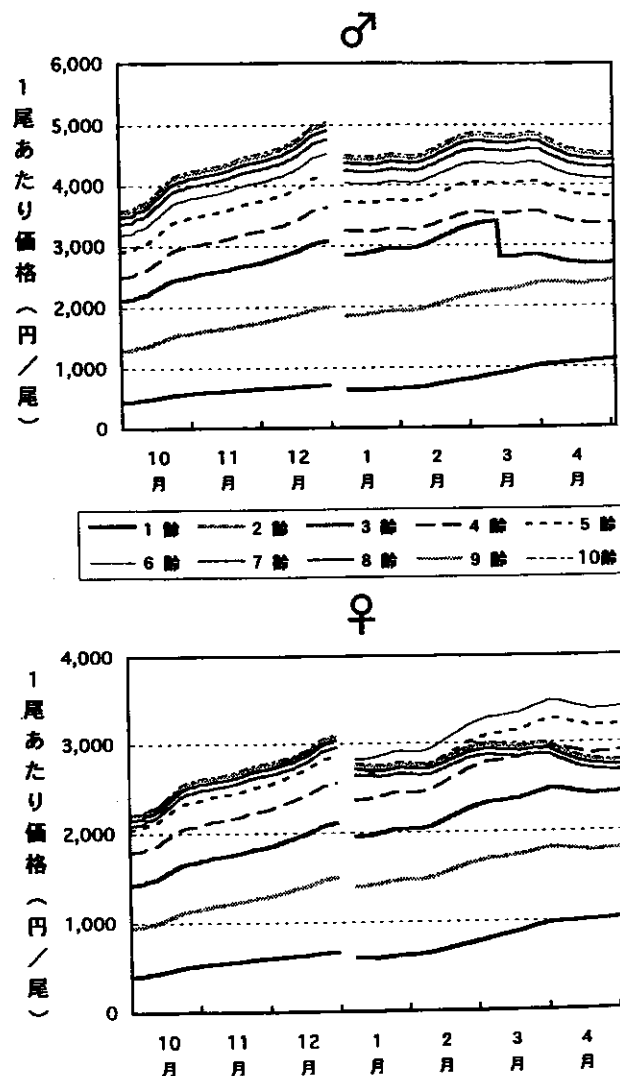


図6-1. 三重県和具におけるイセエビの1尾あたり価格の推移 (年齢別)。上: 雄, 下: 雌。銘柄別単価の推移 (1972年～1993年の20漁期分の日別の単価データから算出) と年齢別の1尾あたり推定体重 (第2章) を用いて推定した。

漁期は三重県漁業調整規則で定められた10月1日から翌年4月30日とし、漁獲努力の最適配分はその期間内で検討した。産卵期およびふ化時期は三重県では6月～8月なので、便宜上、齢の起算日（8月1日；第2章）の直前の7月31日に集中して産卵・ふ化が起こるとして解析した。すなわち、各齢が終了する最後の日に産卵とふ化が起こるとした。漁期が産卵期に及ぶ場合は産卵時期やふ化時期のばらつきについても考慮する必要があるが、この場合は漁期と産卵期は重複しないので問題はないと考えた。

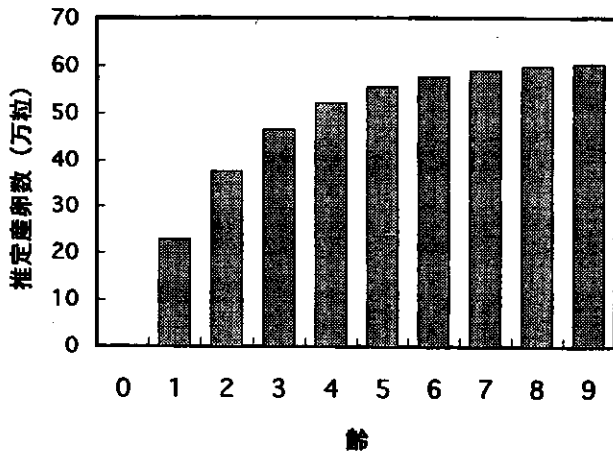


図6-2. イセエビの雌1個体あたりの年間推定産卵数。一番子と二番子の期待値の合計で示した。便宜上、齢の起算日の直前の7月31日に集中して産卵およびふ化が起こると仮定し、(6.18)式に基づいて計算した。すなわち、各齢が終了する最後の日に産卵とふ化が起こるとしたときの齢別産卵数である。

6.2.4 解析結果

解析結果の概要を図6-3～図6-8に示す。任意の τ について漁獲努力の最適配分を求めることができた。

雄の場合(図6-3)と雌で $\tau=0$ とした場合(卵の経済価値を考慮しない；図6-4)では、直接現在価 V_t が将来収獲価 ϕ_t より高い場合は漁獲し、低い場合は漁獲しない方が最適となる。雌雄ともに2齢の最後から漁獲を始め、齢が進むに従って漁獲日数を増やして行く方が最適である。現状では雌雄ともに1齢から漁獲を始め、2齢を漁獲の主群として利用しているので(図2-1, 図2-2), 加入資源の有効利用を図るためには少なくとも漁獲開始齢の引き上げを図る必要がある。

本節では混獲物による収入、操業経費、兼業漁業を考慮していないため、直接現在価は1尾あたり価格に割引率をかけたものに等しい(6.15式)。したがって最適漁獲方策は齢別の成長に加えて、漁期内における価格変動

に大きく左右される。

卵の経済価値を考慮すると、直接現在価 V_t が将来収獲価 ϕ_t と繁殖経済価 τR_t の合計よりも高い場合は漁獲し、そうでない場合は漁獲しない方が最適となる(図6-5, 図6-6)。

τ の値を大きくするに従って、雌の漁獲開始齢をより高く引き上げる必要がある。すなわち、イセエビがより大きく成長するまで待つて、十分産卵させてから漁獲する方が最適となる。産出卵の経済価値を考慮すると、現実の漁業では、 $\tau=0$ のケースで必要と考えられたよりもさらに大幅な漁獲開始齢の引き上げが必要となる。 $\tau=6$ (円/万粒)とすると雌の漁獲開始齢は4齢(図6-5), $\tau=10$ (円/万粒)では5齢となる(図6-6)。なお、 $\tau=10$ (円/万粒)で7齢, 8齢の漁獲を控えるようにするのは、雌の7齢以上の高齢群では6齢群に比較して1尾あたりの価格が計算上、低くなるためである(図6-1)。図6-7に、 τ の値を変化させたときの齢別年間漁獲率(年間漁獲尾数/初期資源尾数×100)の一覧を示した。

τ の変化に伴う、最適漁獲方策で得られる漁獲金額と産出卵数の変化を示した(図6-8)。漁獲金額は加入(1齢群の初期資源尾数)あたりの漁獲金額(YPR; Yield per Recruit), 産出卵数は、漁獲が行われないと仮定した場合の加入あたり産卵数に対する、それぞれの水準で漁獲が行われた場合の加入あたり産卵数の比(%SPR; Spawning per Recruit, Mace and Sissenwine 1993, Mace 1994)で表した。

τ の値が小さい場合はイセエビから直接得られる加入あたり漁獲金額は高く、逆に加入あたり産卵数は少ない。 $\tau=0$ では%SPRの値は31.1%である。 τ の値が大きくなると、 $\tau=4\sim 12$ (円/万粒)の間で漁獲金額は急激に減少し、逆に産卵数は増加する。漁獲金額と産卵数の間にはトレードオフの関係がある。 τ の値が12(円/万粒)以上になると漁獲金額、産出卵数ともほとんど変化しなくなる。これは、卵の経済評価金額を極度に高く設定したために、将来産卵に関与する可能性のある個体(繁殖価が正の個体)は全く漁獲しない方が最適となるためである。

以上のことから、 τ の値を適切な値に設定することにより、資源の維持に必要な産卵数を確保することが可能で、それを制約条件としながら加入あたり漁獲金額を最大化するような最適漁獲方策を決定することが可能である。

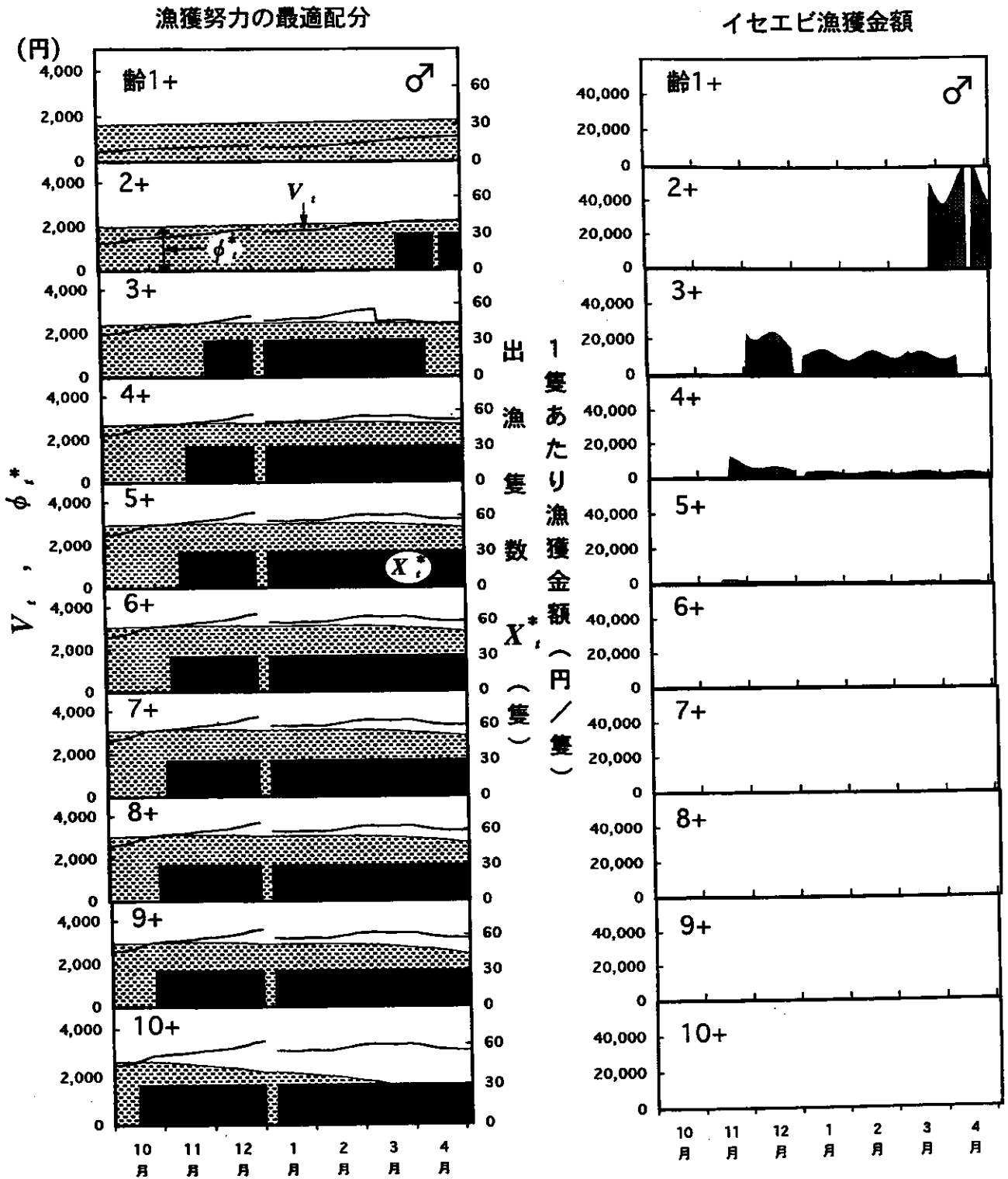


図6-3. 雄における漁獲努力 X_i の最適配分とそれによって得られる1隻あたり漁獲金額。直接現在価 V_i が将来収穫価 ϕ_i より高い場合は漁獲し、低い場合は漁獲しない方策が最適となる。

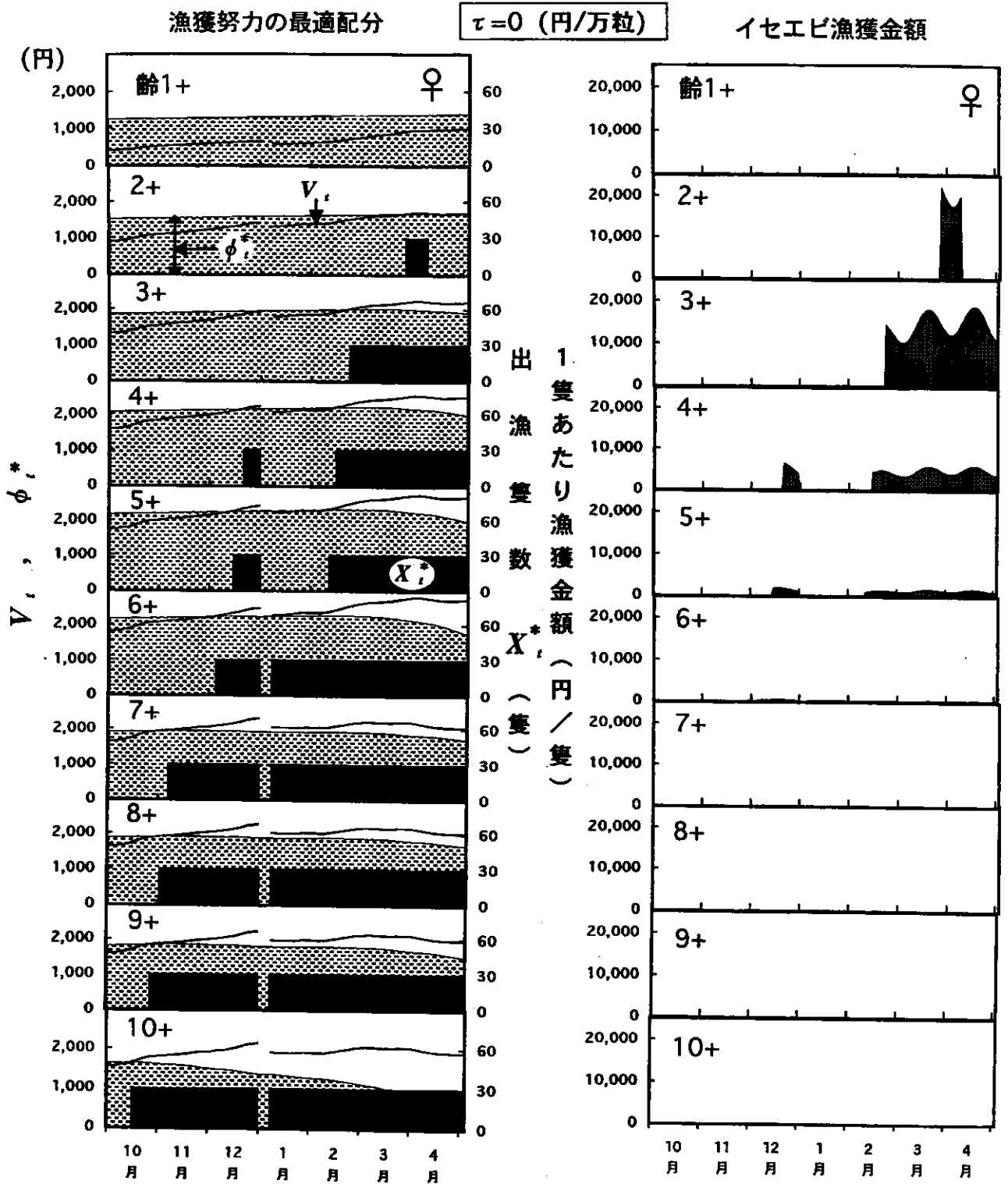


図6-4. 雌における漁獲努力 X_i の最適配分とそれによって得られる1隻あたり漁獲金額。卵の経済価値を考慮しない場合 ($\tau=0$) の解析結果である。直接現在値 V_i が将来収穫価値 ϕ_i より高い場合は漁獲し、低い場合は漁獲しない方策が最適となる。

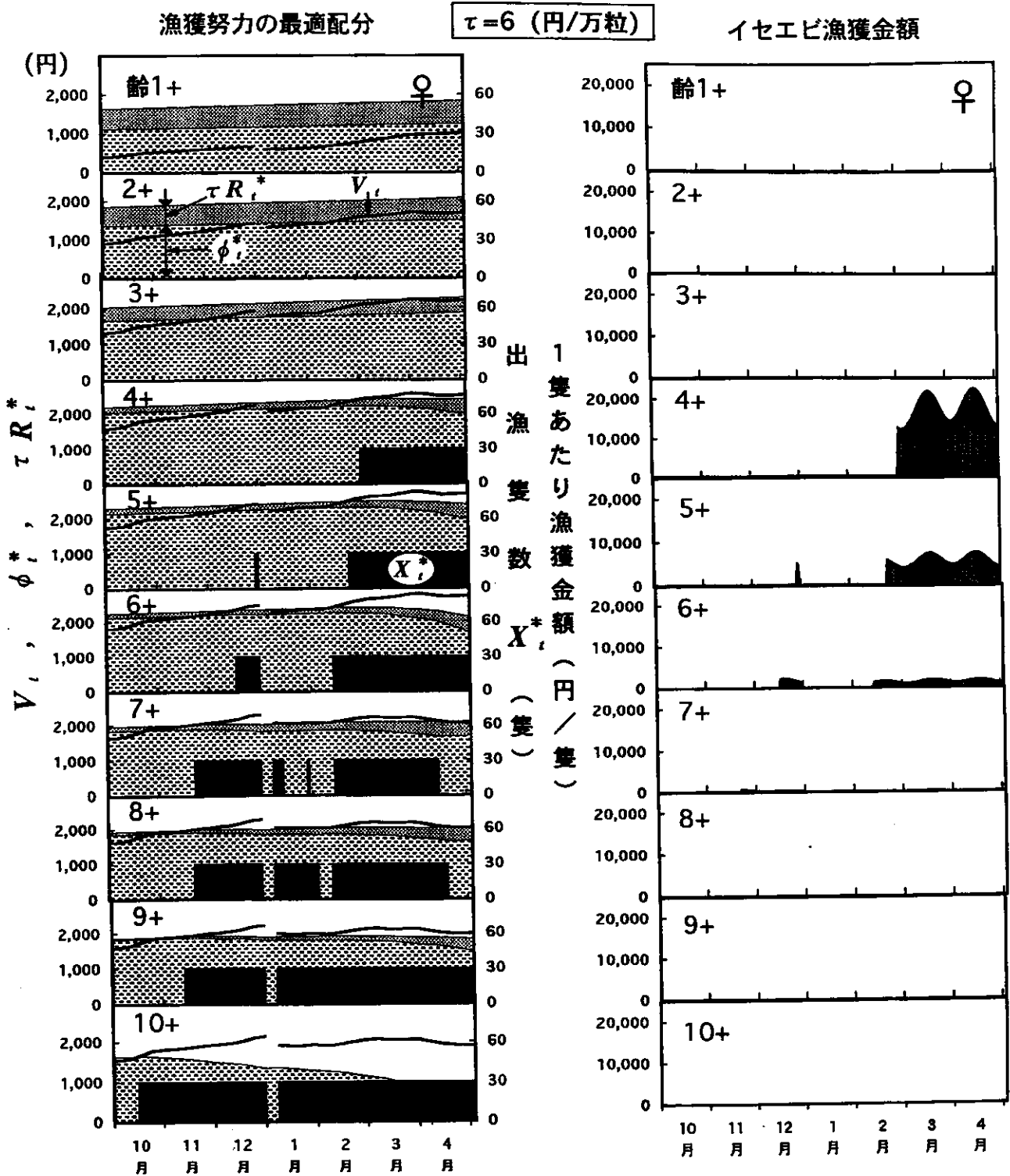


図6-5. 雌における漁獲努力 X_i の最適配分とそれによって得られる1隻あたり漁獲金額。卵の経済評価金額を $\tau=6$ (円/万粒) とした場合、直接現在価 V_i が将来収穫価 ϕ_i と繁殖経済価 τR_i の合計よりも高い場合は漁獲し、低い場合は漁獲しない方策が最適となる。

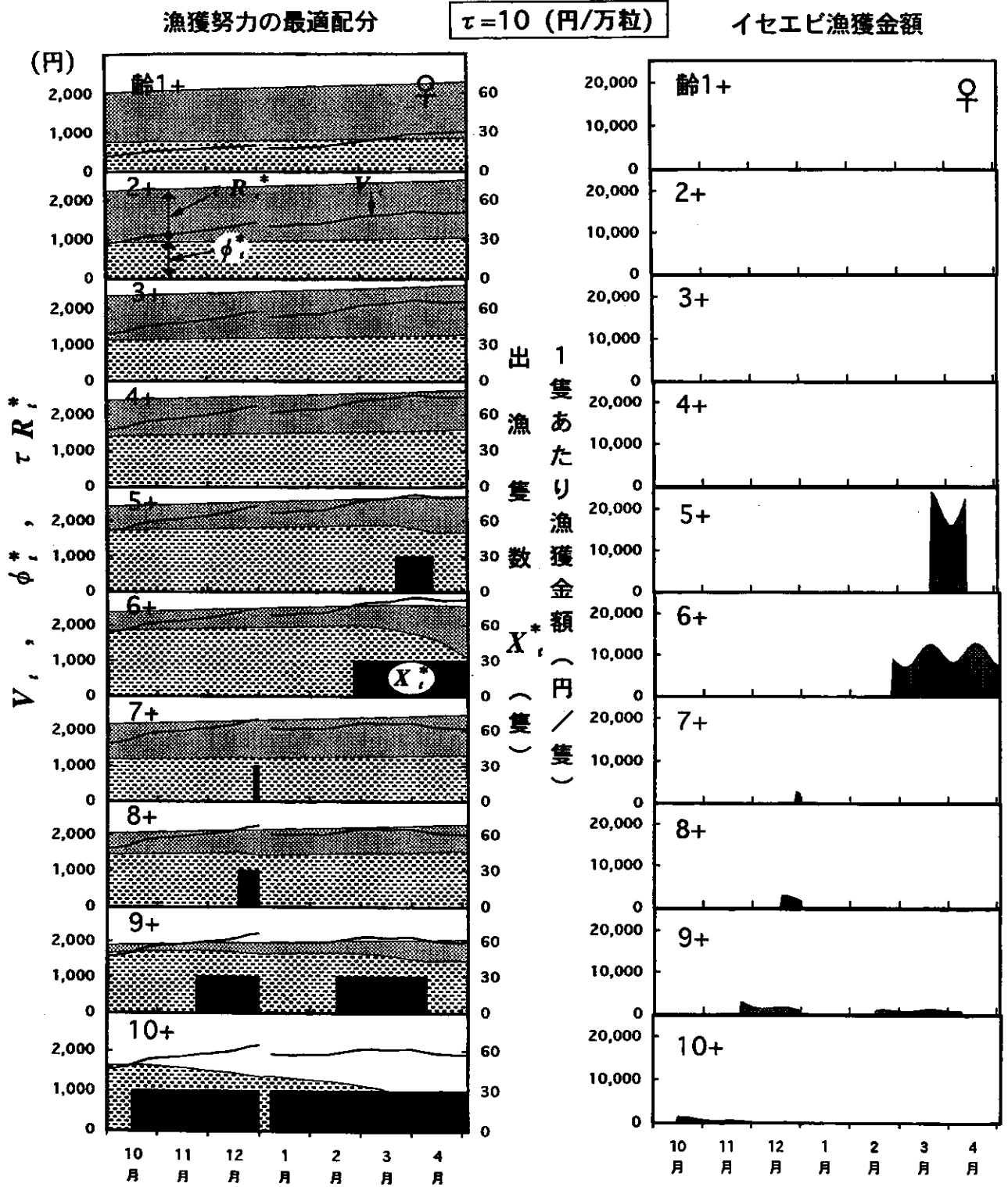


図6-6. 雌における漁獲努力 X_i の最適配分とそれによって得られる1隻あたり漁獲金額. 卵の経済評価金額を $\tau=10$ (円/万粒) とした場合. 直接現在価 V_i が将来収穫価 ϕ_i と繁殖経済価 τR_i の合計よりも高い場合は漁獲し, 低い場合は漁獲しない方が最適となる. $\tau=6$ の時よりも高齢になってから漁獲することになる.

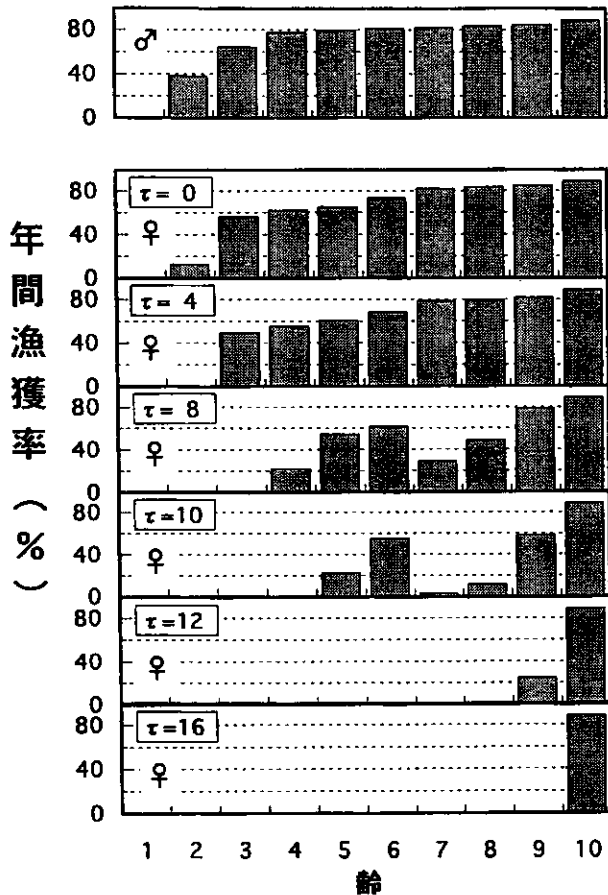


図6-7. 単一年級群モデルにおける、 τ の値を変化させた時の各最適漁獲方策による年齢別年間漁獲率（年間漁獲尾数/初期資源尾数 $\times 100$ ；%）の一覧。 τ が16以上になると結果が変化しなくなるため、 $\tau=16$ （円/万粒）までの範囲を表示した。

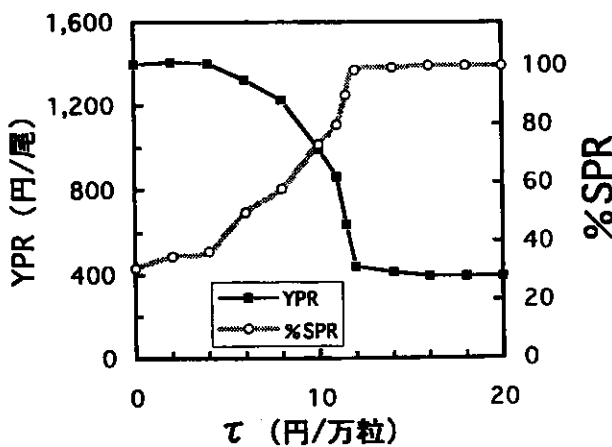


図6-8. τ の変化に伴う、最適漁獲方策で得られる漁獲金額と産出卵数の変化（雌）。単一年級群モデルでの計算結果である。漁獲金額は加入（1年齢群の初期資源尾数）あたりの漁獲金額（YPR；Yield per Recruit）、産出卵数は、漁獲が行われないと仮定した場合の加入あたり産出卵数に対する、それぞれの水準で漁獲が行われた場合の加入あたり産出卵数の比（%SPR；Spawning per Recruit, Mace and Sissenwine 1993, Mace 1994）で表した。 τ が16以上になるとYPR、%SPRともに変化しなくなる。ここでは、 $\tau=20$ （円/万粒）までの範囲を表示した。

6.3 複数年齢群の同時漁獲モデル

前節では特定の年齢群を選択的に漁獲できるという仮定を設けてイセエビの生涯にわたる漁獲努力の最適配分について検討した。しかし、実際の漁場には複数の年齢群が混在して分布しているため、刺網漁業では選択的漁獲は事実上困難である。ここでは、複数年齢群の同時漁獲を前提とした最適漁獲方策を検討するモデルを導出する。魚体サイズによる漁獲選択性や雌雄別の扱いを導入することによって、より現実に即したモデルを構築し、イセエビ刺網漁業への適用を図る。

6.3.1 モデルの構成と最適解の導出および数値解析

資源が平衡状態にあり、 $0 \sim j_{max}$ 歳の雌雄の群が漁場内に混在する状況を考える（図4-1）。刺網にはシグモイド型の曲線で表される漁獲選択性があり、小型群に対しては選択率が低く、大型群に対しては選択率が高いものとする。毎年、ある一定の漁獲努力配分に従って操業を繰り返すとす。1年間が t_{max} 日からなるとし、 $0 \sim t_{max}$ 日目までの漁獲努力の最適な配分と漁獲選択曲線に関する最適なパラメータを同時に算出する。

j 歳 t 日目の雌雄別の資源尾数を N_{ijt} （雄： $l=1$ 、雌： $l=0$ ）、 j 歳群の雌雄別の初期資源尾数を N_{ij0} とする。各 t における漁獲努力量 X_t の任意の配分のもとで、各群の期待漁獲量 Y_{ijt} が計算できる。

$$Y_{ijt} = N_{ijt} \frac{\rho(L_{ijt}) q_l X_t}{M_{ijt} + \rho(L_{ijt}) q_l X_t} \{1 - e^{-(M_{ijt} + \rho(L_{ijt}) q_l X_t)}\} w_{ijt} \approx N_{ijt} \rho(L_{ijt}) q_l X_t w_{ijt} \quad (6.19)$$

$$N_{ijt} = N_{ij0} e^{-\int_0^t (M_{ijt} + \rho(L_{ijt}) q_l X_s) ds} \quad (6.20)$$

ここで、

M_{ijt} : j 歳 t 日目における雌雄別の自然死亡係数、

w_{ijt} : j 歳 t 日目における雌雄別の体重、

L_{ijt} : j 歳 t 日目における雌雄別の体長、

$\rho(L_{ijt})$: 体長 L_{ijt} の個体に対する刺網の漁獲選択率（相対的漁獲効率）、

$$\rho(L_{ijt}) = \frac{1}{1 + \exp\{\alpha(1 - \beta L_{ijt})\}} \quad (6.21)$$

α, β : シグモイド型曲線（ロジスティック曲線）のパラメータ

（50% 選択体長： $1/\beta$ 、50% 選択体長付近における曲線の傾き： $\alpha/\beta/4$ ）

である。

ここでは資源が平衡状態にあると仮定し、最適漁獲方策のもとでの齢構成と総資源尾数が毎年一定である状況を考える。各齢群の初期資源尾数に関する制約条件として、

$$N_{l(j+1)0} = N_{ljt_{\max}} \quad (6.22)$$

を付与する。

複数齢群の同時漁獲、雌雄別の取り扱い、魚体サイズによる漁獲選択性を考慮して目的関数を以下のように表し、その最大化を考える。

$$\Phi = \int_0^{t_{\max}} \left[\left\{ \sum_{l=0}^1 \sum_{j=0}^{j_{\max}} N_{ljt} \rho(L_{ljt}) q_l X_t w_{ljt} p_{ljt} + y_t X_t - c_t X_t + \pi_t (X_{\max} - X_t) \right\} e^{-\alpha t} + \sum_{l=0}^1 \sum_{j=0}^{j_{\max}} \tau N_{ljt} E_{ljt} \right] dt \quad (6.23)$$

ここで p_{ljt} : j 齢 t 日目における雌雄別の単価 (円/kg) ,

t_{\max} : 一年の終了日**29 ,

E_{ljt} : j 齢 t 日目における 1 尾あたりの産卵数、
ただし $E_{ljt} = 0$ (if $l = 1$) ,

である。

$$\frac{dN_{ljt}}{dt} = - \{ M_{ljt} + \rho(L_{ljt}) q_l X_t \} N_{ljt} \quad (6.24)$$

であるから、ハミルトニアン H は次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} H &= \frac{d\Phi}{dt} + \sum_{l=0}^1 \sum_{j=0}^{j_{\max}} \lambda_{ljt} \frac{dN_{ljt}}{dt} \\ &= \left\{ \sum_{l=0}^1 \sum_{j=0}^{j_{\max}} N_{ljt} \rho(L_{ljt}) q_l X_t w_{ljt} p_{ljt} + y_t X_t - c_t X_t + \pi_t (X_{\max} - X_t) \right\} e^{-\alpha t} + \sum_{l=0}^1 \sum_{j=0}^{j_{\max}} \tau N_{ljt} E_{ljt} \\ &\quad - \sum_{l=0}^1 \sum_{j=0}^{j_{\max}} \lambda_{ljt} N_{ljt} \{ M_{ljt} + \rho(L_{ljt}) q_l X_t \} \quad (6.25) \end{aligned}$$

なお、(6.25)式は前節と同様に、資源の平衡状態を制約条件として付与すれば、(6.23)式の目的関数の産卵の経済的評価金額に関する項（最終項）を除いた関数からも直接導くことができる。

各 t における最適漁獲努力量 X_t^* は以下で与えられる。

$$\left\{ \begin{aligned} X_t^* &= 0 \\ &\text{if } \left\{ \sum_{l=0}^1 \sum_{j=0}^{j_{\max}} N_{ljt} \rho(L_{ljt}) q_l w_{ljt} p_{ljt} + y_t - c_t - \pi_t \right\} e^{-\alpha t} \\ &\quad - \sum_{l=0}^1 \sum_{j=0}^{j_{\max}} \lambda_{ljt} N_{ljt} \rho(L_{ljt}) q_l \leq 0 \\ X_t^* &= X_{\max} \\ &\text{if } \left\{ \sum_{l=0}^1 \sum_{j=0}^{j_{\max}} N_{ljt} \rho(L_{ljt}) q_l w_{ljt} p_{ljt} + y_t - c_t - \pi_t \right\} e^{-\alpha t} \\ &\quad - \sum_{l=0}^1 \sum_{j=0}^{j_{\max}} \lambda_{ljt} N_{ljt} \rho(L_{ljt}) q_l > 0 \quad (6.26) \\ \lambda_{lj(t+1)} &= \lambda_{ljt} + \frac{d\lambda_{ljt}}{dt} \\ &= -\rho(L_{ljt}) q_l X_t w_{ljt} p_{ljt} - \tau E_{ljt} \\ &\quad + \lambda_{ljt} \{ 1 + M_{ljt} + \rho(L_{ljt}) q_l X_t \} \quad (6.27) \end{aligned} \right.$$

ただし、横断条件として

$$\lambda_{l(j+1)0} = \lambda_{ljt_{\max}} \quad (6.28)$$

$$\lambda_{0j_{\max}t_{\max}} = \lambda_{1j_{\max}t_{\max}} = 0 \quad (6.29)$$

を付与する（横断条件については付録を参照）。

数値計算では、

①ある α 、 β の初期値の組を与える。

②適当な λ_{000} 、 λ_{100} を与え、 N_{ljt} 、 λ_{ljt} 、 X_t を $t = 0 \rightarrow t = T$ の方向へ計算する。

③ $j = j_{\max}$ 、 $t = t_{\max}$ のときに $\lambda_{0j_{\max}t_{\max}} = 0$ 、

$\lambda_{1j_{\max}t_{\max}} = 0$ が同時に満たされていないならば λ_{000} 、

λ_{100} を変えて ②の計算を繰り返す。 $\lambda_{0j_{\max}t_{\max}} = 0$ 、

$\lambda_{1j_{\max}t_{\max}} = 0$ を満たす λ_{000} 、 λ_{100} がみつければ、その

際の $\{X_t\}$ が仮定した α と β についての最適な漁獲努力量の配分である。

④ α と β の値を変えて②と③を繰り返し、目的関数値を最大とする α と β の組を非線形最適化手法によって求める。

なお、②の計算においては、反復計算を通じて $\{X_t^*\}$ を求める必要がある。その際、各反復ごとの $\{X_t\}$ の更新にあたってステップ幅に適当な制約を設けることにより、 $\{X_t\}$ を振動させずに一定の値へ収束させるよう、工夫する必要がある。***30

6.3.2 適用データ

適用データは前節と同様である。自然死亡係数 $M_{ljt} = 0.20/365$ 、割引率 $\delta = 0.00$ とした。

**29 前節では生涯にわたる漁獲努力の配分の検討を行ったため、積分の終端は T (寿命もしくは生涯の漁獲終了時; 6.1式) としたが、ここでは漁獲努力の配分は漁期内的の検討となるため、積分の終端は t_{\max} (一年の終了日) とする。

目的関数には、第5章で検討した B. イセエビの漁獲金額と操業経費 c_i を考慮した場合 ($y_i \equiv 0$, $\pi_i \equiv 0$; 価格は漁獲量と独立) を例示的に取り上げ、最適な漁獲選択曲線と漁獲努力の配分について、 τ の値を変化させながら検討した。最適な漁獲選択曲線については、①パラメータ α と β の両方が自由に設定できる場合 (ただし、 $\alpha \leq 1000$ の上限を設ける)、②パラメータ α は第4章で求めた現実の値 ($\alpha = 13.01$) に固定し、パラメータ β のみを自由に設定する場合 (すなわち、50% 選択体長は自由に設定できるが、選択曲線の傾きに制約がある場合) の2通りを仮定し、それぞれについて検討を行った。

6.3.3 解析結果

解析結果の概要を図6-9～図6-17に示す。任意の τ について最適な漁獲選択曲線と漁獲努力の最適配分を求めることができた。

漁獲選択曲線に関して、①の、パラメータ α と β の両方が自由に設定できる場合には、あるサイズに満たない個体は全く漁獲せず、それ以上のサイズの個体だけを選択的に漁獲するような、“鋭い”漁獲選択曲線が最適であることが解る (図6-9)。刺網による漁獲を前提とする場合は網目の大きさや糸の太さの調節だけでは“選択の鋭さ”を大きく改善することに限界があると考えられるため、これを達成するためには別の漁獲方法 (例えばカゴ漁業など) の導入も検討する必要がある。②の、 α の値を固定して β のみを変化させる場合 (図6-10) は50% 選択体長付近での傾きは現状での“鋭さ”を前提としているため、最適な漁獲選択曲線は主として50% 選択体長の調節、すなわち刺網の網目の調節などによって達成できる可能性が高い。一方、ここでは解析は行わなかったが、 α と β ともに既知の一定値に固定する場合は、現状の刺網を前提として漁獲努力の最適配分のみを考える問題となる。

いずれのケースでも τ の値が大きくなるほど、最適な選択曲線による50% 選択体長は大きくなり、イセエビの成長後に漁獲する方が最適となった。すなわち、産卵1万粒あたりの経済的評価金額 τ が低い場合はイセエビから直接得られる加入あたり漁獲金額がより高くなるような方が最適であるのに対し、 τ が高い場合は生涯産卵数がより多くなるようにする方が最適となる。

漁期内における漁獲努力の最適配分は、漁獲選択曲線の傾きに関する制約の有無や τ の大きさにかかわらず一定であった (図6-11～図6-14)。年間の出漁日数も一定で、合計で48日となった。 τ の値の変化に伴う最適漁獲方策の変化は、漁獲選択曲線のみの変化として現れる。

図6-15と図6-16に τ の値を変化させた時の、各最適漁獲方策による雌雄別年齢の年間漁獲率の一覧を示した。漁獲選択曲線の傾きが自由に設定できる場合 (図6-15) は、 τ の値が大きいほど漁獲開始年齢の高い方が最適となる。漁獲加入年齢よりも高年齢の群については、雌雄ともにすべての年齢で年間漁獲率が47.1%で一定となり、このケースでは漁獲選択曲線の調節は雌雄別の漁獲開始年齢の調節と同義となる。イセエビでは雌よりも雄の方が成長が速いため (2.4節)、 τ を十分大きくすると雌はほとんど漁獲せずにある年齢以上の雄のみを漁獲することが最適となる。例えば $\tau = 40$ (円/万粒) とすると雄の漁獲は4歳から始まるが、雌の漁獲は9歳の一部と、以後の産卵には関与しないとした10歳群のみとなる。漁獲選択曲線の傾きに制約がある場合 (図6-16) は、 τ の値を大きくするに従っていずれの年齢群でも年間漁獲率が低下する。とくに雌での低下は顕著で、 $\tau = 40$ (円/万粒) とすると雌の年間漁獲率は10歳でも11.1%となった。

τ の値の変化に伴って、最適漁獲方策から得られる加入あたり漁獲金額と生涯産卵数は連続的に変化し、一方の値が高くなると他方の値が低くなるという、トレードオフの関係がみられた (図6-17)。 τ の値が小さい場合はイセエビから直接得られる加入あたり漁獲金額は高く、逆に加入あたり産卵数は少ない。漁獲選択曲線の傾きが自由に設定できる場合は $\tau = 6 \sim 18$ (円/万粒) の間で YPR, % SPR の値が大きく変化した。漁獲選択曲線の傾きに制約がある場合は YPR, % SPR のいずれの変化もなめらかであった。 $\tau = 0$ での % SPR の値は前者では41.2%、後者では37.4%である。 τ の値を適切な値に設定することにより、資源の維持に必要な産卵数を確保しながら加入あたり漁獲金額を最大にするような最適漁獲方策を決定することが可能であろう。

現実のイセエビ刺網漁業で推定された漁獲選択曲線 (第4章) の50% 選択体長 (55.5mm) は、 $\tau = 0$ として求められた最適な漁獲選択曲線の50% 選択体長 (漁獲

**30 ②の X_i の計算で反復計算を行う必要があること、④において目的関数値を最大とする α と β の組を非線形最適化手法によって求める必要があること、の理由により、本節の数値計算ではポントリヤギンの最大原理による解析の大きな利点である「解析の迅速性」を十分活かすことができない。(6.23)式に示される目的関数を最大化する $\{X_i\}$ 、 α と β の組をはじめから直接的に非線形最適化手法によって求める方がむしろ、この問題については計算が速くなる。

選択曲線の傾きが自由に設定できる場合で66.5mm, 制約がある場合で64.5mm) よりも明らかに小さい。現実の漁業では、産出卵の経済的評価金額 τ の大小にかかわらず、最適な漁獲方策に比べて相当多くの小型個体を漁獲していることになる。漁具の見直しなどを通じて漁獲選択体長を引き上げ、小型個体の漁獲を極力回避する必要がある。加えて、現実における延べ出漁隻数は1990年以降の5ヶ年間の実績値で2,593隻・日/年~3,447隻・日/年(平均2,985隻・日/年)であり、最適漁獲方策における1,440隻・日/年の倍程度となっている。出漁日数の

削減による漁獲努力の低減も併せて進める必要がある。

なお、本節の解析では現状を鑑み、漁獲努力量の上限(最大出漁隻数)として $X_{max} = 30$ 隻を付与した。前章(図5-7)と同様に X_{max} を変化させた場合の検討も可能である。 X_{max} の値をより高く設定すれば、より価値の高い日に集中的に漁獲を行うのが最適な配分となり、 X_{max} の値がより小さい場合にはより長期にわたって出漁するのが最適となる。

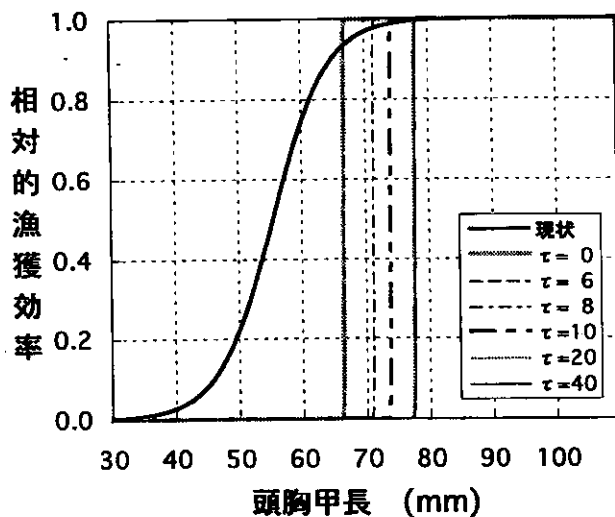


図6-9. 複数年齢群の同時漁獲モデルで求められた最適な漁獲選択曲線。①シグモイド型曲線のパラメータ α と β のいずれもが自由に設定できる場合の推定結果。立ち上がりの“鋭い”選択曲線が最適となる。卵の経済的評価金額 τ が大きくなると50%選択体長が大きくなる。 τ が40以上になると大きな変化がなくなるため、 $\tau = 40$ (円/万粒) までの範囲を表示した。

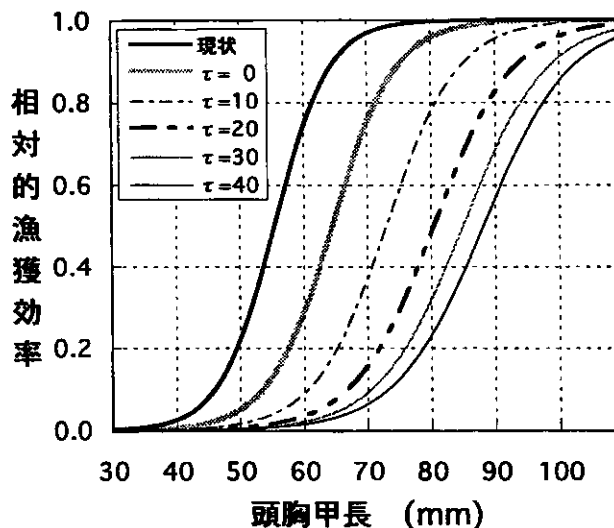


図6-10. 複数年齢群の同時漁獲モデルで求められた最適な漁獲選択曲線。②シグモイド型曲線のパラメータ α の値を固定して β のみを変化させる場合、すなわち、曲線の傾きに制約がある場合の推定結果。 α は第4章で求めた値 ($\alpha = 13.01$) を使用した。卵の経済的評価金額 τ が大きくなると50%選択体長の大きな選択曲線が最適となる。 τ が40以上になると大きな変化がなくなるため、 $\tau = 40$ (円/万粒) までの範囲を表示した。

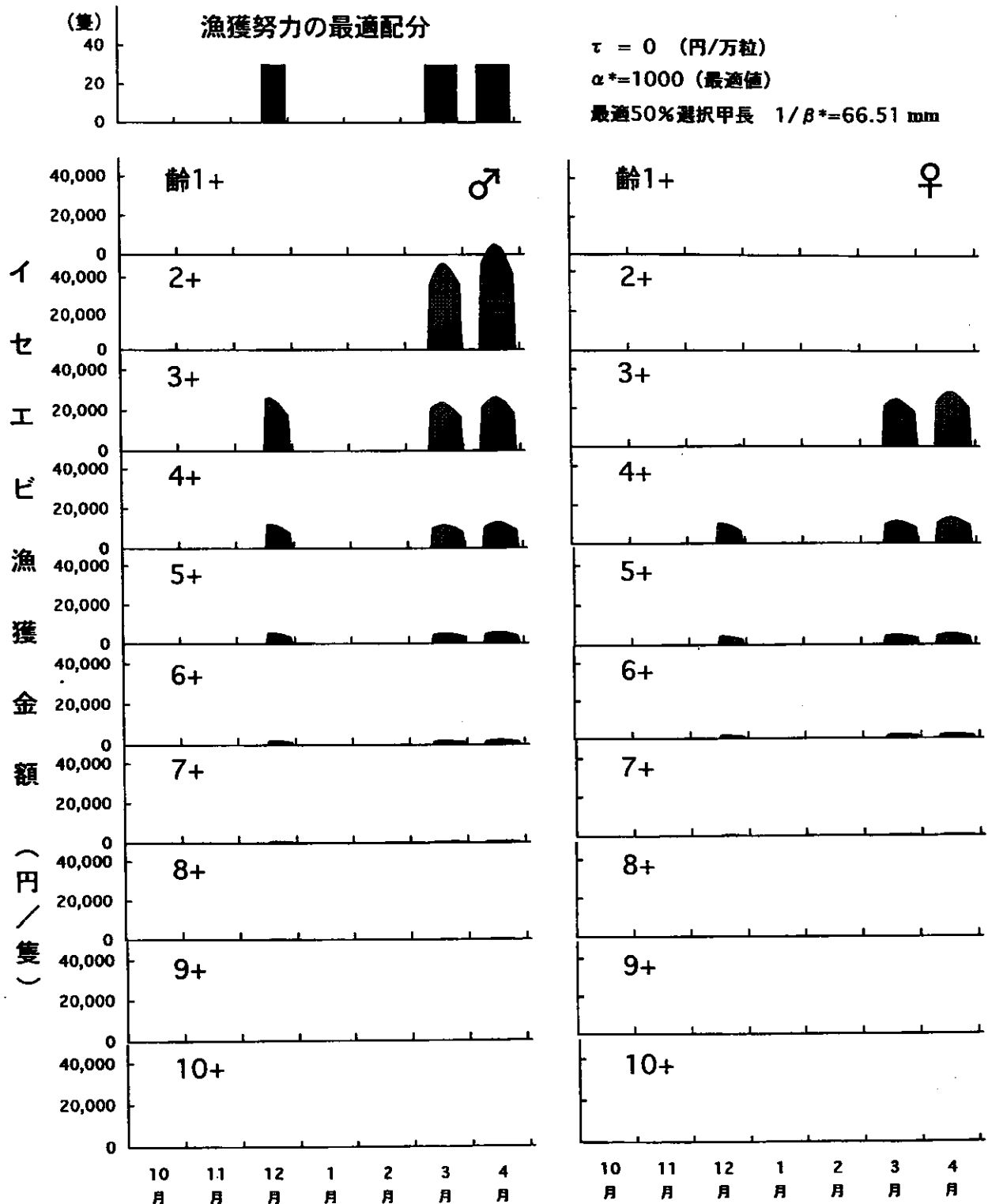


図6-11. 複数年齢の同時漁獲モデルで求められた漁獲努力の最適配分と、それによって得られる雌雄別年齢別の1隻あたり漁獲金額、漁獲選択曲線の傾きが自由に設定でき、卵の経済的評価金額を $\tau = 0$ とした場合の推定結果。

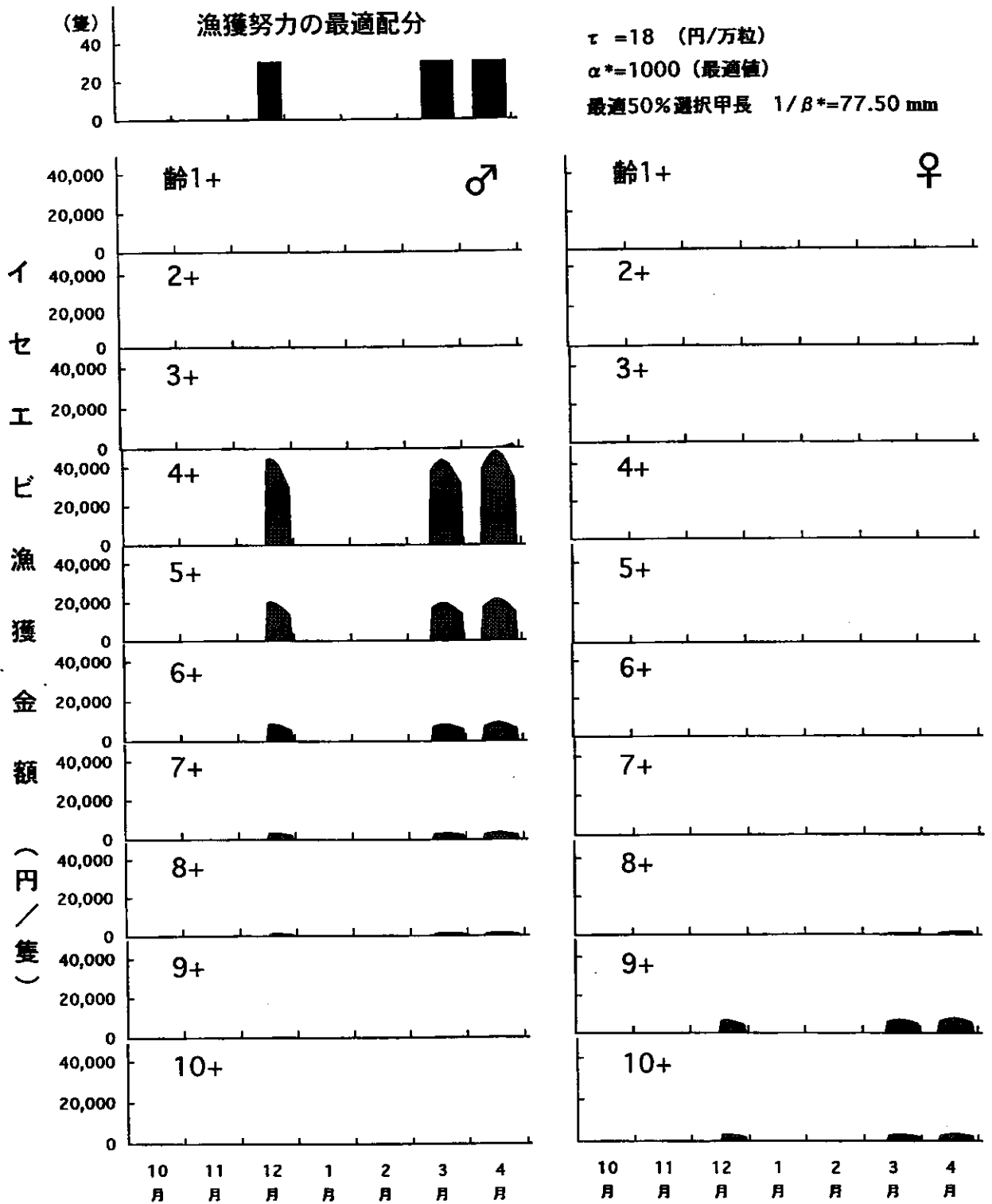


図6-12. 複数年齢の同時漁獲モデルで求められた漁獲努力の最適配分と、それによって得られる雌雄別年齢別の1隻あたり漁獲金額。漁獲選択曲線の傾きが自由に設定でき、卵の経済的評価金額を $\tau = 18$ (円/万粒)とした場合の推定結果。

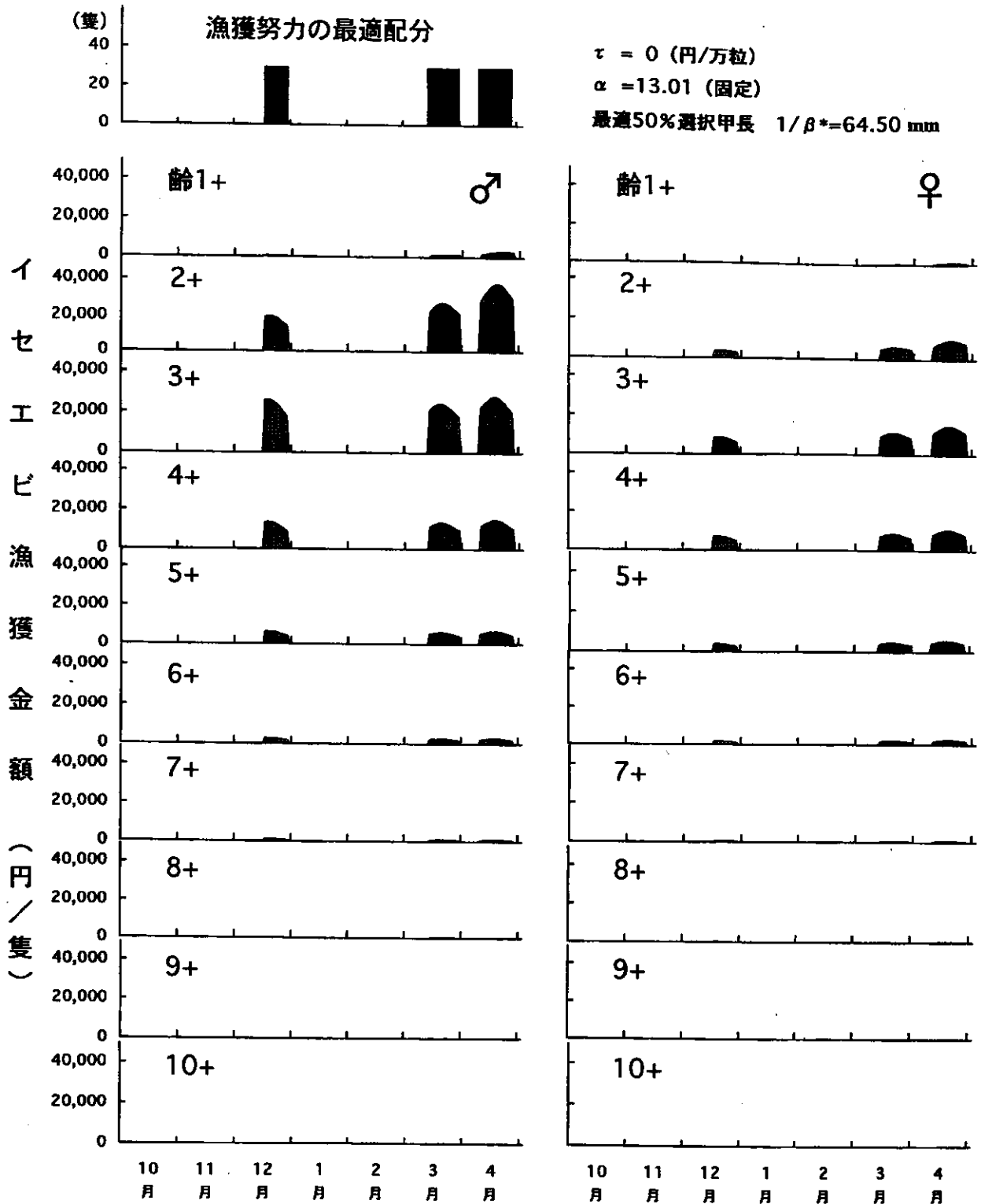


図6-13. 複数年齢群の同時漁獲モデルで求められた漁獲努力の最適配分と、それによって得られる雌雄別年齢別の1隻あたり漁獲金額。漁獲選択曲線の傾きに制約を設け ($\alpha = 13.01$)、卵の経済的評価金額を $\tau = 0$ とした場合の推定結果。

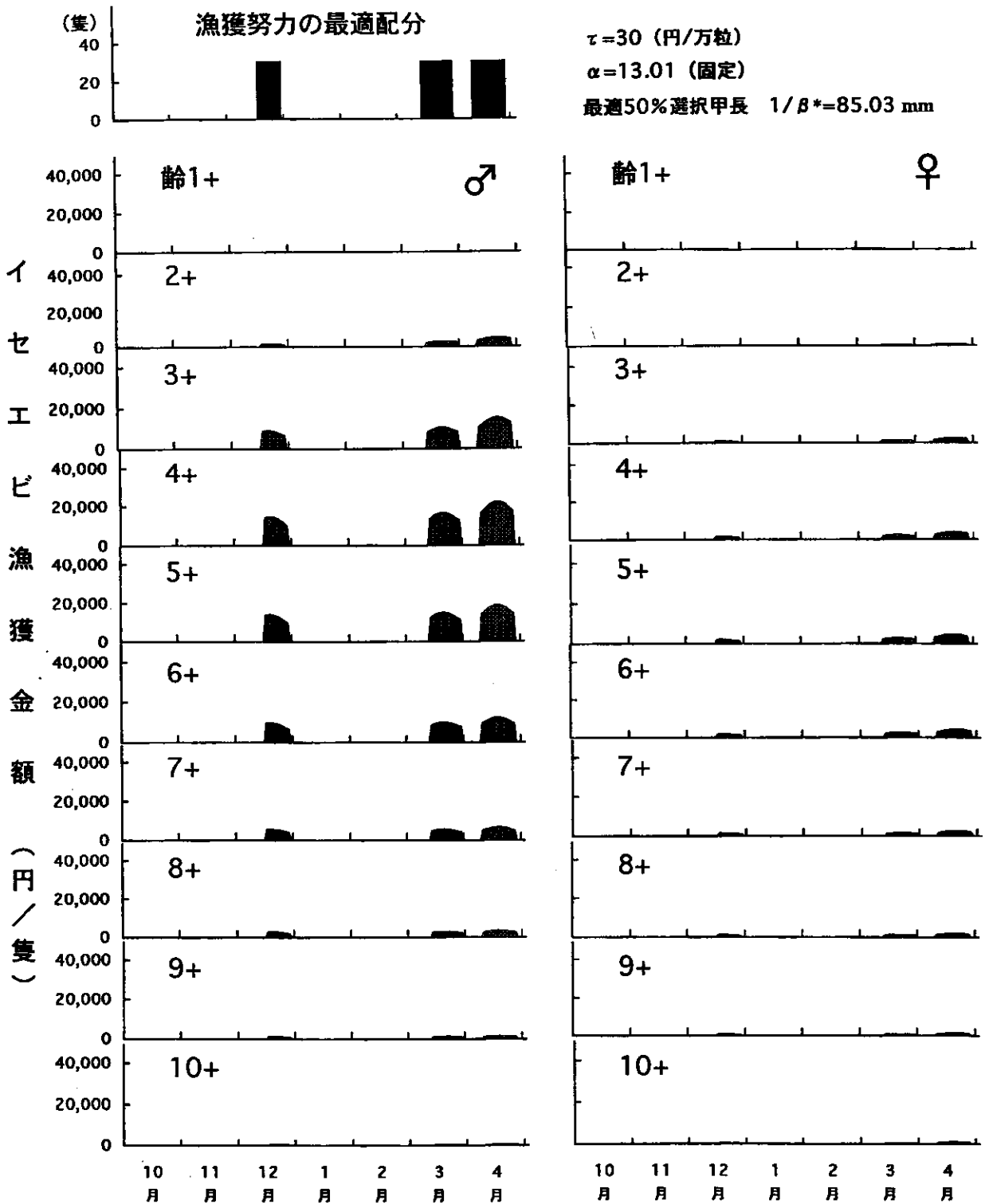


図6-14. 複数年齢群の同時漁獲モデルで求められた漁獲努力の最適配分と、それによって得られる雌雄別年齢別の1隻あたり漁獲金額。漁獲選択曲線の傾きに制約を設け ($\alpha=13.01$)、卵の経済的評価金額を $\tau=30$ (円/万粒) とした場合の推定結果。

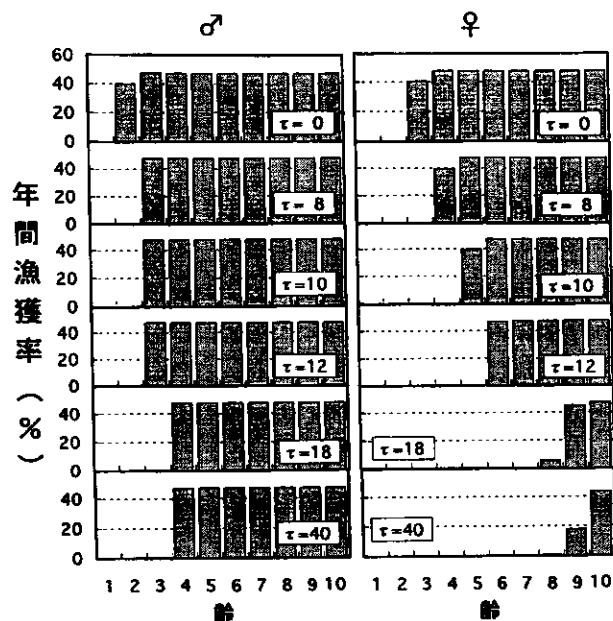


図6-15. 複数年齢群の同時漁獲モデルにおいて τ の値を変化させた時の、各最適漁獲方策による雌雄別年齢別の年間漁獲率 (年間漁獲尾数/初期資源尾数 $\times 100$; %) の一覧。漁獲選択曲線の傾きが自由に設定できる場合についての推定結果である。 τ が40以上になると大きな変化がなくなるため、 $\tau = 40$ (円/万粒) までの範囲を表示した。

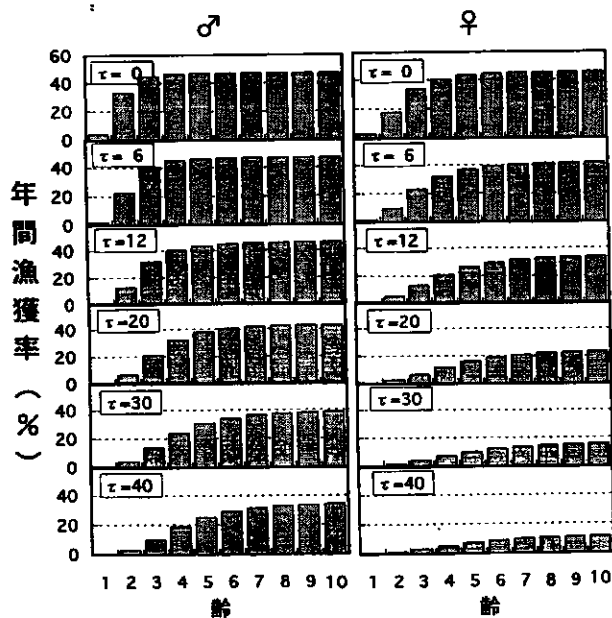


図6-16. 複数年齢群の同時漁獲モデルにおいて τ の値を変化させた時の、各最適漁獲方策による雌雄別年齢別の年間漁獲率 (年間漁獲尾数/初期資源尾数 $\times 100$; %) の一覧。漁獲選択曲線の傾きに制約がある場合 ($\alpha = 13.01$) についての推定結果である。 τ が40以上になると大きな変化がなくなるため、 $\tau = 40$ (円/万粒) までの範囲を表示した。

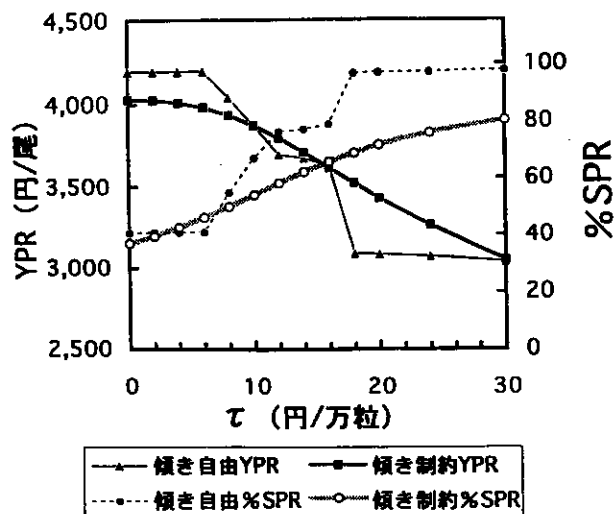


図6-17. τ の変化に伴う、最適漁獲方策で得られる漁獲金額と産出卵数の変化 (複数年齢群の同時漁獲モデル)。漁獲選択曲線の傾きが自由に設定できる場合と、制約のある場合のそれぞれについて示した。漁獲金額は加入(1年齢群の初期資源尾数)あたりの漁獲金額 (YPR; Yield per Recruit), 産出卵数は、漁獲が行われないと仮定した場合の加入あたり産卵数に対する、それぞれの水準で漁獲が行われた場合の加入あたり産卵数の比 (%SPR; Spawning per Recruit, Mace and Sissenwine 1993, Mace 1994) で表した。 τ の値によってYPRと%SPRが大きく変化する、 $\tau = 30$ (円/万粒) までの範囲を表示した。

6.4 論議

産出卵の経済的評価金額の概念を導入することによって、再生産に関する親の価値と、漁獲金額や漁家所得などの経済的諸指標との間の直接的な比較検討ができた。従来別々に行われていた加入あたり漁獲金額の検討に基づく「加入資源の有効利用」と、再生産関係に基礎を置く「資源の持続的管理」の両者を結びつけた総合的な論議の展開が可能である。

卵は直接的な売買の対象とならないため、これまで経済評価の対象としては扱われてこなかった。本来は市場での直接の取引対象とされないものでも経済評価を与えることにより、市場経済原理の仕組みにとりこむことが可能である。例えば環境に対する負荷の高い経済活動についてはそれに見合った課税を行うことで、社会全体の持続的な発展に与える負の影響をコストとして市場原理に組み込むことができる。逆に、社会全体にとっては価値が高くても市場の競争原理の中では存続し得ないよう

な事項については、補助金や奨励金制度としてプラスの影響を経済的に評価し反映させることなどが考えられよう。市場原理のみ追求し乱獲に陥りがちな水産資源についても、漁獲が資源の平衡状態に与える影響を産出卵の経済評価などを通じてコストとして見積もり、その結果を市場原理の内部に組み込むことが考えられる。乱獲回避のために例えば、漁協の歩金や資源管理団体への納入会費、税金、補助金、譲渡可能個別割当制 (ITQ: Individual Transferable Quota System; Clark *et al.* 1988, Dewees 1989, 長谷川 1991, Grafton 1992, Lanfersieck and Squires 1992, Sissenwine and Mace 1992, Arnason 1993, 草川 1994, 桜本・船越 1994 ほか多数) に繁殖経済価を考慮して反映させるなど (税と割当の効果については Clark 1985などを参照) の仕組みが模索されよう。

単一年級群の最適漁獲方策の検討 (6.2節) では、特定の年齢群の選択的な漁獲が可能として論議を展開した。対象魚の1尾あたりの価値が年齢とともに単調増加し、資源尾数の減少を考慮した総価値 (漁獲重量を目的関数とする場合は各時点でのバイオマス) が単峰型となる場合は、漁獲開始年齢以上のすべての群を最大の努力によって漁獲する方策が最適となるため、漁期の進行に併せて使用漁具を交換し漁獲開始年齢を調節すれば、特定の年齢群の選択的な漁獲を行う場合と実質的に同等な漁獲が実現できる。ただし、イセエビでは「特大」の平均単価が「中」よりも低いので、平均体重が380gを超えると1尾あたりの価格が一時的に低下する (図6-1)。また、漁期の進行に伴う価格の推移傾向が「特大」と「中」では若干異なるため、とくに雌では1月から4月にかけて7歳以上の個体の価格が6歳以下の個体の価格よりも低くなる「逆転現象」がみられる。したがって最適漁獲方策も、ある年齢以上の群をすべて漁獲するという方策ではなく (例えば図6-6を参照)、操業時期に併せて漁具を交換するだけでは完全な選択的漁獲と同じ効果を実現することが困難となる。時期ごとに種類の異なる漁具を用意することは経費の上昇も招く。現実的で妥当な漁獲方策は、6.3節で展開したような漁獲努力の漁期内配分と漁獲選択曲線の調節の組合せとなるであろう。ただし、漁期中を通して同一の漁獲選択曲線を仮定するのではなく、ある一定期間ごとに別々の最適な漁獲選択曲線を活用する方策なども場合によっては有効であろう。

本章では τ の値を変化させることによって、最適漁獲方策の感受性に関する検討を行った。 τ は本来、初期減耗や余剰生産量の見積りなど、平衡状態の達成のための

各種の検討をもとに一義的に決定されるべき制約条件である。しかし、現実の水産資源では平衡状態を達成する条件は容易には決定できない。その場合、 τ の値を暫定的に与えて最適漁獲方策を計算し、その後順次変化させながら感受性の検討を行うことによって、現実の漁業で改善すべき点の方向性を示す考え方が有効である。

τ の値を変化させると、各最適漁獲方策で得られるYPRと%SPRは連続的に変化し、一方の値が高くなると他方の値が低くなるという、トレードオフの関係がみられた (図6-8, 図6-17)。Mace (1994) は漁獲加入年齢が成熟年齢に等しく、SPRが加入あたり平均バイオマス (BPR; Biomass per Recruit) に等しい場合は、YPRとSPRの間に次式の関係が導かれることを示した。

$$YPR = F \cdot SPR \quad (6.30)$$

ここで、

F : 加入後のすべての年齢群の年間漁獲係数、
である。(6.30)式を変形すると、

$$F = YPR / SPR \quad (6.31)$$

となるから、 F を介してYPRとSPRはトレードオフの関係にあることがわかる。このことから、 τ の値の変化に伴うYPRと%SPRのトレードオフの関係の直感的な理解が可能である。

本章で用いたパラメータは誤差を含んでいる。自然死亡係数 M については明確な推定値が得られなかったため、諸外国におけるイセエビ類での推定値 (4.5節) を参考に、暫定的な値 ($M = 0.2/\text{年}$) による解析を行った。 M の値が異なれば当然、望ましい管理は異なるだろう。真の M の値が本章で用いた値より小さい場合は最適漁獲方策は若年齢群の漁獲をさらに控える方向に傾き、逆に、真の M の値が大きい場合は若年齢群をより多く漁獲する方策が最適であろう。また、第2章で論議したように、ここで用いた成長曲線は、高齢群の成長に関して推定精度が低いと考えられる。高齢群の真の体長がより大きな場合は、最適漁獲方策では若年齢群の漁獲をより控える必要がある。

本章では繁殖経済価の評価は雌についてのみ行い、雄の漁獲は資源の平衡状態に影響を及ぼさないと仮定して解析を行った。しかし、雄をより多く漁獲することによって漁場内での性比に極端な偏りが生じる場合は、群としての交尾成功回数が低下し受精率へ影響する可能性が考えられる。出口 (1988) は水槽内でのイセエビの交尾・産卵の観察を行い、雄エビよりも雌エビの方が大きい場合は交尾に成功することはほとんどないと報告した。し

たがって交尾成功のためには雌よりも大きな雄個体が漁場内に十分に分布することが必要で、大型の雄に対する相対的な漁獲圧力の高まりは結果的に雌の受精率の低下につながる可能性を否定できない。一方で出口（1988）は、交尾は一晚の間に1～4回行われ、また、それぞれの回での交尾相手は特定の個体に限定されておらず、時に応じて相手を替えることがあると指摘している。このことは雄の個体数が減少しても1尾の雄が複数の雌と交尾できるため、雄の個体数の低下は資源の平衡状態にはあまり影響しない可能性も示唆する。3歳以上の大型群について雄と雌の資源尾数比を試算すると、現状では1：0.91（雄：雌）であるのに対して、第3節で求められた最適漁獲方策では $r = 0$ （円/万粒）の場合で1：1.21（漁獲選択曲線の傾きが自由に設定できる場合）、 $r = 18$ （円/万粒）では1：1.43（同）となり、方策によっては性比に偏りが生じることになる。イセエビの交尾・産卵生態に関するより詳細な知見をもとに、今後十分な検討を行う必要がある。

本章で導出した、最大原理などの最適化手法の応用による加入資源の管理モデル（ここでは「最適化型」と称す；表5-1を参照）と従来からの加入あたり漁獲金額に基づく加入資源の管理モデル（「シミュレーション型」と称す；マル管モデル（汎用モデル）、DoiRap（KAFSモデル）などがある）の特徴を比較し、表6-1に整理した。最適化型では何ら仮定を設けなくても年齢別の漁獲方策と漁期内の漁獲方策を連続した視点で検討できるが、シミュレーション型では漁期内の漁獲方策の動的な検討は困難で、また、年齢別の漁獲方策の検討にも多くの仮定を設ける必要がある。このために結果は仮定に大

きく依存する。一方、解析結果は最適化型では点推定値で表示されるのに対し、シミュレーション型では通常、面（または線）のグラフとして表示されるため、最適方策付近の「適当方策」（原田・松宮 1995）や複数の独立した方策を組み合わせで実施した場合の各要因間の「寄与度」に関する視覚的な理解はシミュレーション型の方が容易である。各要因の組み合わせ（座標）ごとに（それに対応する形で）制約を付与しながらそれぞれ最適化を行うことにより、最適化型とシミュレーション型の両者の長所を併せもった解析を行うことができる。そのような解析は将来的に利用価値が高いと考えられる。

表6-1. 最大原理などの最適化手法の応用による加入資源の管理モデル(最適化型)と加入あたり漁獲金額などに基づく加入資源の管理モデル(シミュレーション型)の比較図

	最適化型	シミュレーション型
最適化	行う	行わない
年齢別の漁獲方策	仮定を設けずに検討可能	仮定を設けて検討
漁期内の漁獲方策	仮定を設けずに検討可能	仮定を設けて検討
モデルにおける仮定	必要最小限	多い
解析過程の意味付け(根拠の解釈)	可能(最大原理)	できない
結果の表示	点で表示	面(または線)で図示
最適方策付近の「適当方策」の直観的理解	困難	容易
複数の独立した要因間の「寄与度」の比較	困難	容易

第7章 総合討論

7.1 イセエビの資源評価

第3章では漁獲量努力量データの解析によってイセエビの資源評価を行った。モデルの構築にあたっては、データの発生過程（漁獲過程）をできるだけ忠実にモデルに反映させることに留意し、AICによって妥当性の検討を行った。具体例として適用した三重県和具地区のイセエビ刺網漁業データは、集中的な調査の結果入手した相当多くの情報量を含むデータである。このためかなり複雑なモデルに対しても適用が可能で、妥当性が高いと判断された。

必要なデータが入手できれば他地区でも同様な解析ができるが、データの質や量が異なれば、妥当なモデルの判定結果は異なると予想される。地区によっては第2章で解析したような経時的な体長組成データの入手が困難な場合も多い。別の地区で推定された成長曲線や性比を用い、比較的容易に入手できる銘柄別漁獲量などのデータを中心に解析が行えるような、より簡便で適用範囲の広いモデルの開発が望まれる。研究者全般への普及を含めた汎用性の高いソフトウェアの開発も重要であろう。

資源尾数や管理効果を評価する簡便で有効な手法として、性別、サイズ別、種別、天然魚と放流魚、標識魚と無標識魚などの型が異なる動物の2時期における組成の変化から個体数などを推定するCIR (Change in Ratio) 法が開発されている (Chapman 1955, Chapman and Murphy 1965, Paulik and Robson 1969, Otis 1980, Pollock *et al.* 1985, Conner *et al.* 1986, Udevitz and Pollock 1991, Dawe *et al.* 1993, 松宮・小出水 1995, Udevitz and Pollock 1995)。2時期の間の増減は漁獲、自然死亡、加入のいずれか1つに基づくと仮定して、現存量や生産力（繁殖率）、漁獲率、生残率などを推定するもので、少ない情報を有効に活用できる点に利点がある。イセエビの漁業管理においても、網目の大きさの調整や小型個体の再放流、漁獲努力量の削減、禁漁区の設定などの各管理方策の導入前後で銘柄組成や雌雄比が変化すると予想されるため、CIR法の適用によって管理効果の迅速かつ比較的簡便な判定が可能であろう。CIR法は資源（漁業）管理にとっても強力な手法となりうる。

7.2 イセエビの望ましい漁業管理

7.2.1 加入資源の有効利用と再生産管理

イセエビ類の漁業管理に関して、累積生産金額と費用直線の差に基づくモデル (金盛 1987, 1988)、余剰生産量に基づく生物経済モデル (Campbell and Hall 1988, Clarke *et al.* 1992)、加入あたり漁獲量と産卵数の検討に基づくモデル (Annala and Breen 1989)、再生産を考慮した時空間シミュレーションモデル (Walters *et al.* 1993)、一定または確率変動を伴った加入をもとにして許容漁獲量 (TAC) を検討する生物経済モデル (Breen *et al.* 1994) など様々な管理モデルが提案されている。

水産資源の特徴（再生産、無主物、自然変動など）から鑑みて、再生産の概念を考慮しない資源管理には絶対的な限界がある。加入量一定の前提の下、加入量や管理方策の初期条件を与え、将来の資源状態と漁獲を予測し、資源診断を経て管理する従来のYPR (Yield per Recruit) 型の資源管理は、実際的に有効な適用範囲は一部に限定される。

第6章で行ったように産出卵の経済評価の概念を導入すれば、地域単位の管理（加入資源の有効利用）と系群全体での管理（再生産管理）を、評価金額 τ を介して結びつけることができる。加入資源の有効利用は、地域単位での漁業者の所得向上と密接に結びついており、管理対象資源の範囲が漁業者の行動範囲とおおよそ一致する場面が多いため、漁業者団体の自主的な管理が比較的醸成されやすいという利点がある。一方、資源の再生産管理は系群全体を対象としたもので、通常、個々の漁業者の行動範囲より広い範囲の資源が管理対象となる。このような場合、管理の実行者と受益者が一致する保証がないため、個々の漁業者は全体の（将来の）利益を考えて行動するよりも、個々の目の先の利益を求めて当面の漁獲に専念することとなる。産出卵の経済的評価金額 τ を導入すれば全体の再生産管理を漁業者の所得へとりこむ形で評価できるようになるため、各地域での管理が行われた自然の結果として系群全体での再生産管理が達成できることになる。図7-1に概念的な模式図を示した。

(6.1)式や(6.23)式を目的関数として現実の漁業管理へ適用する場合、右辺の漁家所得に関する項での対象資源の範囲は、加入後の移動を考慮した任意の範囲（例えば定着性の強い資源については地先ごとの所与の加入資源など）で良いが、産卵に関する項での対象資源の範囲は再生産の及ぶ全範囲、すなわち系群の範囲と一致して

いる必要がある。このため、資源の平衡状態の維持を制約条件として付加した加入資源の有効利用においては、厳密には系群全体を管理対象に選定する必要がある。しかし前述のように、イセエビ刺網漁業では地区ごとに別個の管理が定着してきた経緯があるため、全体で同一の基準による管理を実施することは実際上困難である。当面の暫定的な措置として、地先ごとに目標とする産卵数 B^* をそれぞれ設定する（すなわち、 τ を地先別に設定することによって(6.1)式や(6.23)式を基にした加入資源の管理を地先別に行い、全体での合計産卵数を勘案しながら段階的に望ましい方向へ近づけていくという手法が有効であろう。第6章での方法を用いれば、目標卵数を暫定的にでも設定できれば対応する最適な漁獲スケジュール（戦略）が具体的に提示できるため、従来の余剰生産量モデルなどによるアプローチよりも現実的な対応が可能である。

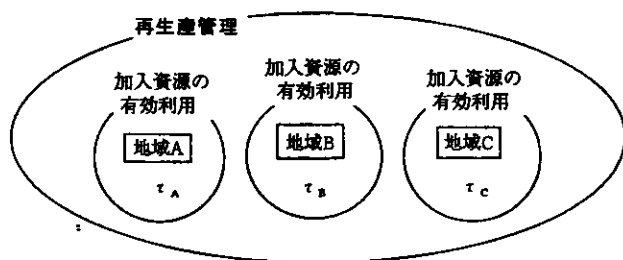


図7-1. 地先ごとの加入資源管理と系群全体での再生産管理の関係（模式図）。

近年、生物学的管理基準（Biological Reference Points）のひとつとして、加入あたり産卵量（Spawning per Recruit ; SPR, Spawning Stock Biomass per Recruit ; SSBR）や産卵ポテンシャル（Spawning Potential ; SP）の概念が多くの魚種で重用されるようになった（土井 1973, Shepherd 1982, Overholtz *et al.* 1986, Prager *et al.* 1987, Gabriel *et al.* 1989, Clark 1991, Goodyear 1993, Mace and Sissenwine 1993, Mace 1994, Myers *et al.* 1994, Shepherd *et al.* 1995, 松宮 1996a, 1996b, 1996c, 和田ら 1996, 勝川・松宮 1997, 松宮 1997）。SPRに基づく管理基準は資源全体での親と仔の量的関係に関する直接的な評価がなくても適用が可能であり、資源の乱獲の回避と有効利用の達成のための簡便かつ現実的な基準として注目される。第6章での手法とSPRに基づく管理基準は、加入あたり産卵数の考え方で共通であり、両者を組み合わせながら現実の漁業管理へ有効に活用できる。

乱獲を回避するために最低限必要なSPRの閾値（補償%SPR）について、Mace and Sissenwine (1993) は27種91資源のデータで検討した結果、補償%SPRは平均で20%弱（18.7%）、8割のケースで30%以下であったとし、生活史の不詳な種では保守的な基準として、まずは補償%SPR=30%を採用することを薦めた。Goodyear (1993) は対象とする資源によほど強い密度依存性がある（=回復力が高い）場合を除いて%SPRが20%以下になるのは避けるべきだとした。Clark (1991) は管理基準として35%SPRを採用すれば幅広い再生産関係において高い生産性が達成できることを導いた。実際、アメリカの漁業管理委員会で乱獲を回避するための閾値として採用されている基準値は多くの魚種で%SPR=20~35%の範囲に入るといふ(Mace and Sissenwine 1993)。

第4章で推定された漁獲率の値をもとに概算すると、現状の和具におけるイセエビ刺網漁業の%SPRは15%程度と見積もられ、明らかに漁獲過剰であると考えられた。仮に、漁獲選択曲線と漁期内の漁獲努力の配分パターンは現実のままに固定し、努力量水準の一律削減によって%SPRの調節を行うとすると、%SPR=30%の達成のためには現在の努力量の38%水準、%SPR=40%の達成のためには同24%水準にまで削減する必要があると試算された。最適漁獲方策を導入すると、卵の経済評価を行わないケース（ $\tau=0$ ）でも%SPRは37.4%（漁獲選択曲線の傾きに制約がある場合）と41.2%（傾きが自由の場合）となり、相当の改善が予想される（第6章）。

自然死亡係数 M の値が異なる場合や、加入後にも密度依存死亡や密度依存成長のある場合は%SPRの推定値も異なってくるため、現実への適用においてはこれらの資源特性の精査が重要である。第4章で展開した複数年級群解析では、自然死亡係数 M を未知として他のパラメータと同時推定すると全体の推定結果が不安定化した。自然死亡係数の推定（鉄 1974）にはこれまでBeverton-Holtの方法、土井の方法、Paulyの方法、田内-田中の方法、Widrigの方法、Rikhter-Efanovの方法、Paloheimoの方法などが提案されてきたが、いずれの方法にも一長一短がある。近年、数理生態学分野における成果を応用し、生活史戦略の検討に基づいて自然死亡係数などの生活史パラメータの理論的推定が試みられている（Myers and Doyle 1983, Kitahara *et al.* 1987, 陳ら 1988, Hiyama *et al.* 1988, Chen and Watanabe 1989, 桧山 1992, Hiyama and Kitahara 1993a, 1993b）。イセエビにおいても、このような生活史戦略理論に基づく検討は、資源管理に必要な生活史パラメータの推

定の基礎（原田 1992, 桧山1992）として有用であろう。

再生産管理を組み込んだ資源管理において、自然死亡に限らず成長や成熟などの生活史パラメータの利用（Clark 1991, Winemiller and Rose 1992）はSPRの利用とあわせて、今後ますます重要度が高まると考えられる。例えば、補償% SPRは生活史パラメータの似通った近縁種では近い値になることが知られている（Mace and Sissenwine 1993）。どのような生物学的管理基準が最良かは、生活史パラメータ、とくに密度効果（補償作用）に関連するパラメータに強く依存しているという（Mace 1994の絶滅係数 r や原田 1995**³¹の内的自然増加率に關係する定数による管理など）。補償% SPRが不詳の種についても近縁種での推定結果をデフォルト値として事前確率に与えて当面の管理を推進し、随時、情報更新を行いながら望ましい管理へと近づけていくといった利用が可能である。生活史パラメータの活用は、多様な種についての実用的な管理基準を早急に策定することが求められる現在の状況において、現実的かつ体系的な対応を可能とするものであり、精力的な研究の進展が待たれる。

7.2.2 具体的方策

第6章での解析結果から、現実のイセエビ刺網漁業では、出漁日数の削減などによる年間の総漁獲努力量の低減と漁獲努力の漁期内最適配分を図るとともに、漁具の見直しを通じて漁獲選択曲線を右へシフトさせ、漁獲開始齢の引き上げを図る必要のあることが明らかになった。このうち、漁獲努力量の低減と最適配分のための具体的方策としては、禁漁期間の延長による漁期の短縮や休漁日の設定、プール制の導入、網数の制限、禁漁区の設定や、輪採制の導入（木下 1933, 野中 1959, 丸山・平井 1964, Nonaka and Fushimi 1994）などに加えて、出漁日の望ましさに応じて会費や税などの代償を課する方法（例えば、漁期の進行に応じて変化する税の導入についてはClark 1985を参照）が考えられる。

漁獲選択曲線のシフトについては、網目の拡大や三枚網から一枚網への変更などで調節が可能である（小池・竹内 1985, 小池・松田 1988, 三重県 1993**¹³など）。三重県(1993)**¹³はイセエビ刺網の種類（一枚網、三枚網）と網目の大きさ（2寸, 2寸3分, 2寸8分）の異なる6種類の網を使用して和具地区で試験操作を行い、漁獲物の種組成と漁獲重量、罹網したイセエビの体長の

比較を行った。その結果、三枚網では種やサイズによる選択性が一枚網に比較して鈍く、混獲物を含めた総漁獲重量は一枚網のおおむね2倍であったと報告している。一方、一枚網では混獲物の罹網が少ないため、混獲物に対するイセエビの漁獲重量比が三枚網よりも相対的に高く、また、網目が大きくなるに従って罹網するイセエビの平均甲長も大きくなる傾向がみられたとした。同様に、三重県南鳥町阿曾浦地区において行われた一枚網の網目の異なる試験操作（三重県 1997**¹⁴）でも、大きな網目の網ほど、罹網するイセエビが顕著に大型個体に偏ったことが報告されている。

漁獲開始齢の引き上げを図る手段としては再放流サイズの引き上げも有効であろう。しかし、一旦漁獲された個体は罹網とその後の扱いによって多少とも損傷しており、再放流を行っても適切な棲息場所に落ちつくまでは害敵に襲われる危険性が高くなる。したがって、漁具の見直しを通じて漁獲開始齢の引き上げが可能な場合は、再放流サイズの調節によって引き上げを図るよりも大きな管理効果が期待される（Brown and Caputi 1986, Waters and Huntsman 1986, Prager *et al.* 1987, Goodyear 1993）。なお、再放流個体のその後の生残率推定については前節のCIR法が活用できる。

第6章で導かれた最適な漁獲選択曲線は、あるサイズ以下の個体は全く漁獲せず、それ以上のサイズの個体だけを選択的に漁獲するような、“立ち上がりの鋭い”漁獲選択曲線で、実現のためには刺網以外の漁獲方法の導入の検討も考えられる。外国でのイセエビ類の漁獲はlobster potと称するカゴ様のトラップや人工シェルターで行うのが一般的で（Bowen 1980, Pollock 1986, Baisre and Cruz 1994, Booth and Breen 1994, Briones and Lozano 1994, Briones *et al.* 1994, Brown and Phillips 1994, Cruz and Phillips 1994, Ehrhardt 1994, Fonteles-Filho 1994, Hunt 1994, Munro 1994, Pollock 1994, Polovina 1994）、刺網で漁獲を行う国は日本やフランス（Ceccaldi and Latrouite 1994）など少数に過ぎない。多くのタイプのlobster potにはescape gap（あるいはescape vent, escape port, escape panel）と呼ばれる脱出口が備えられており、そこから一定サイズ以下の小型個体が抜け出ることができる（Stasko 1975, Krouse 1978, Fogarty and Borden 1980, Krouse 1989, Miller 1990）。同様なカゴ漁業は日本ではズワイかごやベニズワイかご、ケガニかごなどにみられ、網目ごとの

**³¹ 原田泰志：再生産関係が不確実な状況での管理方策の評価について。平成7年度日本水産学会秋季大会講演要旨集，1995，p.12.

漁獲選択性や脱出口の効果が明らかにされている (Sinoda and Kobayashi 1969, 谷野・加藤 1971, 小池・小倉 1977, 小池 1981, Watanabe and Sasakawa 1984, Sinoda *et al.* 1987, 西内 1991, 武野 1994^{**32}, 佐藤・西内 1997)。宮崎県青島漁協ではイセエビをカゴで漁獲していたことが報告されており (黒木 1972), 現在でも同県都農漁協ではイセエビカゴ漁業が許可されているという (宮崎県農政水産部水産課中部水産業改良普及員室; 私信)。イセエビの漁獲選択曲線の改善のためには, このようなカゴによる漁獲の検討も有効であろう。

本論文での漁業管理の検討においては密度依存効果は考慮していない。しかし現実には, イセエビには密度依存性の成長変動が見られた (第2章, 図2-4)。密度従属的な成長変動, 成熟体長や抱卵数の変化, 死亡率の変化はイセエビ類では数多く報告されている (Chittleborough and Phillips 1975, Chittleborough 1976a, 1976b, Pollock 1987, Ford *et al.* 1988, Breen and Booth 1989, Polovina 1989, Phillips 1990, Pollock 1991a, 1991b, DeMartini *et al.* 1993)。資源の動的平衡に関連した強い密度依存性 (陳ら 1989) がある場合は, 望ましい管理は異なったものになると考えられる。漁業資源への加入後に密度依存性の成長変動や成熟状況の変化がみられる場合はSPRの推定結果も異なるであろう。Pollock (1993)は稚エビ期の密度従属的な生残や成長変動, 成エビの成熟サイズの変化による生産産卵量の変化などをもとに, イセエビ類に対する漁獲が資源に与える影響について考察を行った。漁獲による再生産量の変化と加入資源量の変動, 密度効果による次世代再生産量の変化などが相互に依存する過程を模式的に表し, イセエビ類の資源は補償が限界に達する程度に漁獲圧力が高まった場合は崩壊に向かうとした。密度依存過程は資源の再生産・補償過程に於いて重要な役割を果たすものであり, 日本産イセエビに関してもこの点について, より詳細な研究を行う必要がある。

本論文では管理の導入の結果として市場価格が大幅に変化することは考慮に入れなかった (ただし, 第5章では仮定的な例として価格関数を導入した場合について検討した)。しかし, 管理の導入の結果, 大型個体の漁獲量が大幅に増加することが予想されるため, 各銘柄の価格の推移傾向そのものが変化することもありうる。価格関数を導入した資源管理がいくつかの漁業で検討されており (山口ら 1992, Sylvia 1994 など), 今後はイセエ

ビの価格変動機構に関する詳細な検討を行い, その成果を漁業管理に反映させることも重要な課題のひとつである。

7.2.3 管理方策の導入と将来に向けて

三重県(1993)^{**13}は, イセエビ刺網漁業に関する数種の資源管理方策について, 導入後の10年間に予想される漁獲量と漁獲金額の変化をシミュレーションによって試算した。漁獲開始齢の引き上げや漁獲努力量の削減を行うと10年後には現状より高い水準で漁獲量・漁獲金額は安定するが, 管理方策の導入直後の1~2年目には急激な漁獲量・漁獲金額の落ち込みが生じることを予測した。

本論文で導出した最適漁獲方策を現実の漁業に適用する場合にも一時的な漁獲の低下は予想されることであり, それが望ましい漁業管理形態への移行の妨げとなることも十分考えられる。これを回避するためには, ①望ましい管理方策を一気に導入するのではなく, 数年間にわたって徐々に望ましい方策へと近づけていく方法, ②加入資源の変動をモニタリングし, 加入量の多い年を契機に望ましい管理を導入する方法 (Tanaka 1996), ③方法①と②を組み合わせたもの, などが考えられる。

①については例えば, 出漁日数の削減によって総漁獲努力量の低減を図る際に, 望ましい日数へ数年間をかけて徐々に削減していくことや, 網目の拡大によって漁獲開始齢の引き上げを図る際に, 全ての網を望ましいものに一斉には交換しないことなどが考えられる。三重県(1993)はこのような段階的な移行により, 漁獲量や漁獲金額の一時的な低下は大幅に改善され, 漁業現場に受け入れられやすい導入が可能であることを示した。

②については, 加入量のモニタリングが可能であることを前提とする。第4章の複数年級群解析では年ごとの齢別初期資源尾数の推定が可能であることを示した。現状での漁獲対象の主群は2齢群であるため, 前年の漁期終了時での1齢群の資源量の評価ができれば当年の漁況が事前に, ある程度予測できることになる。木村・高梨(1993)は, 千葉県での終漁期の5月のCPUE (1日1隻あたり漁獲量)は次期の解禁時の8月のCPUEと高い相関があるため, 禁漁前の漁獲量をもとに次の8月以降の漁況を予測することが可能であるとした。このような手法の応用によって, 加入量のモニタリングと漁獲量の事前予測が可能である。

^{**32} 武野泰之: 脱出機能を有したベニズワイカゴ, 平成6年度日本水産学会秋季大会講演要旨集, 1994, p.8.

外国産イセエビ類についてはプエルルス来遊量の変動に関する経年的なモニタリングがコレクターによる採集調査によってなされている。西オーストラリア産ロックロプスター *Panulirus cygnus* では3齢群と4齢群の資源量指数は着底時のプエルルス着底量指数と高い相関があるため、4年後の漁獲量がプエルルス着底量指数によっておおよそ予測できるという (Phillips 1986, Caputi and Brown 1986)。日本産イセエビについてはプエルルス来遊量の経年推移に関する定量的な報告はないが、コレクターの形状や採集条件、来遊量の季節変動などに関しては相当の知見の蓄積がある (例えば市来ら 1976, 野中ら 1980, 井上 1981, 金盛・金丸 1980, 千葉県水産試験場 1984^{**33}, 1986^{**34}, 金盛 1988 など)。今後、定量的な調査の進展が期待される。

本論文では資源が平衡状態にあると仮定して望ましい漁業管理の検討を進めてきた。しかし、年々の加入資源量は一般に環境などの影響で大きく変動する。伏見(1976)は、 n 年7~10月における黒潮流軸の石廊崎からの平均離岸距離と $(n+1)$ 年秋から $(n+2)$ 年春にかけての石廊崎のイセエビI齢群漁獲量との間に負の相関を認め、黒潮流況の変化によってプエルルスの着底量が大きく左右されることを示した。今後は加入資源量の変動(不確実性)を前提として加入群の漁期前モニタリング調査や漁期中に収集された情報などを活用する (Walters and Collie 1988, Walters 1989, 原田 1995^{**31}) ことによって、変動するイセエビ資源を対象とした効果的な管理に

ついて検討する必要がある (山川・松宮 1994)。

原田(1995)^{**31}は、再生産関係が不確実な状況での管理方策の評価について数理解析によって検討し、とくに管理効果を「最適な管理が行われた場合の何割の生産をあげられるか」で評価した。このようなアプローチによれば再生産関係の情報が少なく不明要素の多い状況下でも、広い範囲の再生産関係について「適当」(原田・松宮 1995)かつ安全な管理方策を決定することが可能である。

Clark (1985) は不確実な状況下での管理決定に関して、①不確実性を無視する確定的方法、②不確実性を考慮して確定的方法に何らかの (例えば“安全乗数”的な) 調整を加える方法、③不確実性を確率分布 (事前分布) で表し、資源観測・評価の成果をその分布の更新という形で反映させていくベイズ型決定解析の方法があると記した。そして、③が合理的な決定を行う唯一の望みを与えてくれる方法であろうと結論している。ベイズ的アプローチによれば次々と更新される各種情報を客観的手順でその都度、取り込みながら意思決定を行うことが可能であり、今後はこのような手法を用いた実際的な研究の進展が待たれる (例えば, Walters 1975, Lord 1976, Walters and Hilborn 1976, Mendelsohn 1980, Ludwig and Walters 1981, 1982, Mangel and Clark 1983, Clark and Kirkwood 1984, Clark *et al.* 1985, Mangel and Beder 1985, Fried and Hilborn 1988, Frederick and Peterman 1995 など)。

^{**33} 千葉県水産試験場：昭和57・58年度大規模増殖場開発事業調査結果報告書 (外房北部地区；イセエビ)。千葉県水産試験場，1984，80pp..

^{**34} 千葉県水産試験場：昭和59・60年度大規模増殖場開発事業調査結果報告書 (外房北部地区；イセエビ)。千葉県水産試験場，1986，58pp..

要 約

イセエビの望ましい漁業管理について指針を示すことを主目的に、三重県和具地区の刺網漁業を具体例に、資源評価手法と資源（漁業）特性値を精査し、資源の有効利用と再生産管理のための最適漁獲方策を検討した。

1. 序 章

一般生態と生活史、系群、再生産関係について既往知見を整理し、漁業管理の基本的な考え方を論じた。系群や再生産関係が不明であり、漁業管理の現状も多様なため、地先ごとの加入資源の有効利用を主体に、加入あたり産卵量概念を組み合わせて管理するのが妥当であるとの方向性を示した。

2. 体長組成データの解析による成長の推定

複合正規分布への分解に基づいて経時的な複数の体長組成データを一括して解析する手法を提示し、成長、加入、漁獲物の齢別組成などを検討した。尤度は多項分布で表現した。成長式は Richards の式（Bertalanffy式、Logistic式、Gompertz式を包含）を用い、成長の季節変動を導入した。標準偏差は齢によらず一定のほか、齢に従う3通りの関数が選択できる。各群の出現率には、①何の制約もない、②ある齢以上の群に全減少係数を導入、の2通りが仮定できる。各パラメータは未知として推定する場合と、既知として固定する場合が任意に選択でき、年による成長変動にも一括解析での対応が可能のように複数の値を採用できる。妥当性の判定はAICの大小で行う。1990年から1995年までの5年間の各漁期（10月～4月）の10月、11月、12月、3月、4月の雌雄別の頭胸甲長組成データ（おおよそ6万尾）に適用した。

複数データの一括解析により、妥当なモデルが見通し良く選択でき、安定した推定結果が得られた。成長の季節変動、標準偏差の変化、全減少係数の導入によって妥当性が高まった。年によって成長が異なり、密度従属的な成長が示唆された。各齢群の推定甲長の5年間の平均値は、雄では1齢が45.0mm、2齢が62.4mm、3齢が74.1mm、雌では1齢が42.3mm、2齢が56.2mm、3齢が64.7mm（いずれも10月1日時点での値；齢はブルスから起算）であった。漁獲対象の主群は2齢群であった。漁期内での1齢群の加入の進行状況と年変動に基づき、刺網漁具の漁獲選択性を推算した。

3. 拡張 DeLury 法による資源評価

漁獲量努力量データの解析に頻用される DeLury 法の拡張を行い、環境要因によって漁具能率が変化する最尤モデルを導出した。各種の統計モデルを導入し、妥当なモデルの検討と資源評価を行った。

期ごとの既知の漁獲尾数と漁獲努力量、推定すべき初期資源尾数と漁具能率を用いて尤度（基本モデル）を表現した。漁具能率を表すモデルとして、従来の一定型に加えて、水温や太陰月周期、波浪などで変化する、I～XIVの14通りのモデルを導入した。統計モデルには、A 条件付き Poisson 分布の積、B 条件付き二項分布の積、C Bの正規近似、D 多項分布の正規近似、E Cにover-dispersionを考慮、F Dにover-dispersionを考慮、G 条件付き正規分布の積、H 条件付き対数正規分布の積、I 条件付き負の二項分布の積、の9通りを導入した。モデルの妥当性はAICの大小で判定した。パラメータの推定は準ニュートン法で行い、95%信頼区間を尤度比検定で計算した。1990年10月～1991年4月漁期の、日別の漁獲量-努力量-環境データに適用した。漁業資源への完全加入群である2齢以上を漁獲尾数として用いた。

漁具能率が一定のモデルよりも、変化するモデルで妥当性が大幅に向上した。モデルXIVが最も妥当と判断された。①水温が高く、②月相が新月前後で、③波浪が高い、条件で漁具能率は高くなり、各環境要因の変動に伴うイセエビの活動性の変化を反映していると考えられた。

統計モデルでは、負の二項分布モデル（I）が最も妥当であった。平均と分散がほぼ等しい単純ランダムモデル（A, B, C, D）ではAICが著しく大きく、実際の分散は相当大きいことが示唆された。このことは、集中分布とみなせるイセエビの分布生態を反映していると考えられた。統計モデルの相違によって推定値の信頼区間は大きく異なった。負の二項分布モデルによる信頼区間は相当広がった。1991～1992年漁期と1992～1993年漁期を加えた3年間のデータを一括して解析した結果、信頼区間は実用に耐えうる程度にまで狭くなった。

4. 複数年級群解析による資源評価

マルチコホート解析と拡張 DeLury 法の統一的扱いによる複数年級群モデルを提示し、年別齢別雌雄別資源尾数、漁具能率、漁獲選択曲線を同時推定した。従来型VPAの“separabilityの仮定”を一般化したモデルに相当する。

i 年 t 日目 j 齢群の雌雄（雌： $l=0$ 、雄： $l=1$ ）の漁

獲係数 F_{ijt} を次式の積に分解して基本漁獲方程式に導入し、最尤法でパラメータ推定した。

$$F_{ijt} = [\text{漁具能率}_{it}] \times [\text{サイズ}(L_{ijt}) \text{ による選択率}] \\ \times [\text{努力量}_{it}]$$

尤度は負の二項分布の積で表した。漁具能率は前章のモデルXVを、漁獲選択曲線はシグモイド型曲線を仮定した。各年級群の資源尾数には計算上の関係と1齢群の性比を制約として導入した。自然死亡係数 M は ①未知として他のパラメータと同時推定する、②既知として与える、場合を設定した。1990年10月から1995年4月までの5年間の日別漁獲量-努力量-環境データに適用した。年間漁獲尾数は6.5万尾~11.8万尾(平均9.1万尾)で、延べ操業船隻数は2,593隻・日~3,447隻・日(平均2,985隻・日)であった。

環境による漁具能率の変化や成長変動による漁獲選択率の変化を反映した自然な推定が行えた。各群の初期資源尾数が推定され、齢別雌雄別の群ごとに漁獲、自然死亡、翌年への繰越し状況が明示された。年間漁獲率は1齢群では16.9~27.2%(雄)と9.9~21.1%(雌)、2齢群では63.6~74.4%(雄)と52.4~66.2%(雌)、3齢以上の群では66.7~79.1%(雄)と64.2~76.8%(雌)であった。推定された漁獲選択曲線によると加入は頭胸甲長40mm前後で始まり、50~60mmで選択率が高まった。 M も未知として同時推定する(①)と、現実にはあり得ない値($M=0$)に収束した。 M を既知として与える(②)と初期資源尾数は M の値に伴い増大したが、漁具能率と漁獲選択曲線においては安定した結果が得られた。従来のように漁獲係数を“年に固有な係数”と“齢に固有な係数”へ分離するだけでは推定誤差が大きい。利用可能な情報と未知パラメータの違いによって柔軟なモデル選定が可能である。

5. 漁獲努力の漁期内最適配分に基づく漁業管理

所与の加入資源の有効利用を目的に、漁獲努力の漁期内最適配分を検討した。初期資源尾数が既知の閉じた資源を考えると、漁具能率の変化を考慮し、漁獲努力の任意の配分のもとで日別の期待漁獲量が計算できる。価格の推移、操業経費、混獲物や兼業漁業による収入を考慮した漁家所得の合計を最大にする、漁獲努力の漁期内最適配分をポントリヤギンの最大原理で求める。漁期終了時には一定数以上の獲り残し尾数を確保し、1日の漁獲努力量には上限(出漁30隻)を設定する。考慮する要因の目的関数が異なる、6通りの解析を行った。兼業漁業

はトラフグ延縄、ブリ建網、カツオ曳縄の各漁業とした。

価格が漁獲量と独立の場合、漁獲すべき時期には全隻が出漁し、抑える時期には全く出漁しない方策が最適である。価格が漁獲量に左右される場合は、中間的な出漁隻数の配分もありうる。単位漁獲努力の新たな付加によって得られる限界利益が高い時期と漁業を選択して出漁する方策が最適である。目的関数にイセエビの漁獲金額のみを考慮した場合は、価格の高い時期に集中的に出漁する方策が最適となる。目的関数に操業経費、混獲物や兼業漁業による収入を考慮すると、要因の組合せに応じて漁獲努力の最適配分が変化した。

6. 産卵資源量の経済価値を考慮した加入資源の最適漁獲方策

前章で導出した動的最適化モデルに、産卵に関与する親資源量の経済評価に関する項を導入し、漁獲努力の生涯配分に基づく加入資源の有効利用と産卵資源量の確保を同時に図る管理モデルを提示した。前章での目的関数に、産卵に関与する親資源量の経済評価項[卵の経済的評価金額 τ ×雌の齢別資源尾数×抱卵数]を加え、最大化のための漁獲努力の最適配分を求めた。日別の漁獲尾数は第4章と同様のモデルで表現した。解析は、最大原理と非線形最適化法を用いて ①特定の単一齢群を選択的に漁獲できる場合、②複数の齢群を同時に漁獲する場合、について行った。

産出卵の経済的評価金額の導入により、加入資源の有効利用と再生産管理の結合が可能となった。各時点での“直接現在価”が、“将来収穫価”と“繁殖経済価”の和と比べて大きい場合は全隻が出漁し、それ以外は全く出漁しない方策が最適となる。任意の τ について、方法①では漁獲努力の生涯最適配分を齢別の漁期内方策として明示できた。 τ が大きいほど、高齢群を集中的に漁獲する最適方策が得られた。②では漁獲努力の漁期内最適配分に加え、 τ が大きいほど50%選択体長の大きな、鋭い最適漁獲選択曲線が得られた。現実の漁業では、漁具の見直しに拠る漁獲開始齢の引き上げと総漁獲努力量の低減が必要である。①、②共に、 τ の増大に伴い加入あたり産卵数(SPR)は多くなり、加入あたり漁獲金額(YPR)は減少した。資源の維持やMSYの達成に必要な産卵数が予察できれば、 τ の調節によって必要卵数を確保しながら加入資源の有効利用を図る、最適漁獲方策が決定できる。

7. 総合討論

イセエビの資源評価と望ましい漁業管理について展望した。資源評価については本論文で展開した手法に加えて、CIR (Change in Ratio) 法などの簡便な評価手法の導入と普及が重要であることを論じた。望ましい漁業管理については、加入資源の有効利用と再生産管理の関

係、SPRの概念や生活史パラメータの利用の重要性について論じ、具体的な管理方策や導入戦略についても考察した。最後に、加入資源の変動を前提とした管理およびベイズ型的意思決定による管理について論じ、将来を展望した。

謝 辞

本研究をとりまとめるにあたり、終始温かく励ましてくださるとともに懇切な御指導と御校閲を賜った東京大学海洋研究所の松宮義晴 教授に深く感謝申し上げます。また同じく御校閲を賜った清水 誠 東京大学名誉教授、同大学海洋研究所の沖山宗雄 教授、および杉本隆成 教授、ならびに同大学大学院農学生命科学研究科の谷内透 教授に感謝申し上げます。

この研究は三重県水産技術センターの小泉 勝 前総括研究員、西村守央 主幹研究員をはじめとする同センターの職員の方々の長年にわたる温かい励ましと御協力によるところが大きかった。和具漁業協同組合の故 磯和大典 前組合長、伊藤 弘 参事をはじめ、同組合の職員の方々ならびに漁業者の方々には調査にあたって甚大な御協力をいただいた。三重県栽培漁業センターの方々ならびに南勢志摩県民局伊勢農林水産事務所水産部普及員室

の方々、志摩町水産農林課の方々には調査に多大なる御協力をいただいた。これらの方々には厚く御礼申し上げます。

東京水産大学名誉教授の野中 忠 博士、同大学水産学部の北原 武 教授、同学部の北田修一 助教授、東海大学海洋学部の大西修平 博士、東京大学教養学部の岸野洋久 助教授、同大学海洋研究所の松田裕之 助教授、長崎大学水産学部の山内 淳 助教授、水産庁中央水産研究所の赤嶺達郎 博士、遠洋水産研究所の平松一彦 博士には論文作成にあたって有益な御助言をいただいた。三重大学生物資源学部の白木原国雄 教授および原田泰志 助教授には文献の入手等にご便宜をはかっていただくとともに、貴重な御助言をいただいた。豊橋技術科学大学建設工学系の小出水規行 博士、東京大学海洋研究所の森山彰久 技術官、勝川俊雄 氏には文献の入手や内容の吟味に関してご便宜いただいた。千葉大学理学部の Christopher Paul Norman 博士には英文校閲を賜った。以上の方々には厚く御礼申し上げます。

文 献

- Akaike, H.: Information theory and an extension of the maximum likelihood principle, in "2nd International Symposium on Information Theory" (ed. by B. N. Petrov and F. Csáki), Akadémiai Kiadó, Budapest, 1973, pp. 267-281.
- Akamine, T.: A new standard formula for seasonal growth of fish in population dynamics. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **59**, 1857-1863 (1993).
- 赤嶺達郎: 水産資源学における成長式に関する数理的な研究. 中央水研報, **7**, 189-263 (1995a).
- 赤嶺達郎: コホート解析 (VPA) 入門. 水産海洋研究, **59**(4), 424-437 (1995b).
- Akamine, T.: Application of the maximum principle to the yield isopleth diagram. *Bull. Natl. Res. Inst. Fish. Sci.*, **8**, 59-60 (1996a).
- 赤嶺達郎: 離散型漁獲方程式と線型計画法. 水産海洋研究, **60**, 252-258 (1996b).
- Akamine, T.: Optimum fishing policy by linear programming on discrete fishing equations. *Fisheries Sci.*, **63**, 155-156 (1997a).
- 赤嶺達郎: 成長・生残モデルにおける最適制御理論. 中央水研報, **10**, 135-167 (1997b).
- 赤嶺達郎, 加藤史彦: 複合正規分布のパラメータ推定, 「パソコンによる資源解析プログラム集」(東海区水産研究所数理統計部編), 東海区水産研究所, 東京, 1988, pp. 177-188.
- Akamine, T., H. Kishino, and H. Hiramatsu: Non-biased interval estimation of Leslie's removal method. *Bull. Japan Sea Natl. Fish. Res. Inst.*, **42**, 25-39 (1993).
- Akamine, T. and Y. Matsumiya: Mathematical analysis of age-length key method for estimating age composition from length composition. *Bull. Japan Sea Natl. Fish. Res. Inst.*, **42**, 17-24 (1992).
- Annala, J. H. and P. A. Breen: Yield- and egg-per-recruit analyses for the New Zealand rock lobster, *Jasus edwardsii*. *N. Z. J. Mar. Freshwat. Res.*, **23**, 93-105 (1989).
- Annala, J. H. and D. B. Esterman: Yield estimates for the New Zealand rock lobster fishery, in North Pacific Workshop on Stock Assessment and Management of Invertebrates. (ed. by G. Jamieson and N. Bourne), Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci., Vol. 92, National Research Council Canada, Canada, 1986, pp. 347-358.
- Arditi, R. and B. Dacorogna: Maximum sustainable yield with continuous age-structure. *Math. Biosci.*, **110**, 253-270 (1992).
- Arnason, R.: ITQ based fisheries management, in "Risk Evaluation and Biological Reference Points for Fisheries Management" (ed. by S. J. Smith, J. J. Hunt, and D. Rivard), Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci., Vol. 120, National Research Council Canada, Canada, 1993, pp. 345-356.
- Baisre, J. A. and R. Cruz: The Cuban spiny lobster fishery, in "Spiny Lobster Management" (ed. by B. F. Phillips, J. S. Cobb, and J. Kittaka), Fishing News Books, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1994, pp. 119-132.
- Berry, P. F.: A revision of the *Panulirus homarus*-group of spiny lobsters (Decapoda, Palinuridae). *Crustaceana*, **27**, 31-42 (1974).
- Beverton, R. J. H. and S. J. Holt: A review of methods for estimating mortality rates in exploited populations with particular references to sources of bias in catch sampling. *Rapp. P.-V. Reun., Cons. Int. Explor. Mer*, **140**, 67-83 (1956).
- Beverton, R. J. H. and S. J. Holt: On the dynamics of exploited fish populations. *Fish. Invest.*, Ser. II, **19**, 533pp. (1957).
- Booth, J. D.: *Jasus edwardsii* larval recruitment off the east coast of New Zealand. *Crustaceana*, **66**, 295-317 (1994).
- Booth, J. D. and P. A. Breen: The New Zealand fishery for *Jasus edwardsii* and *J. verreauxi*, in "Spiny Lobster Management" (ed. by B. F. Phillips, J. S. Cobb, and J. Kittaka), Fishing News Books, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1994, pp. 64-75.
- Bowen, B. K.: Spiny lobsters fisheries management, in "The Biology and Management of Lobsters" (ed. by J. S. Cobb and B. F. Phillips), Vol. 2,

- Academic Press, New York, 1980, pp. 243-264.
- Brasher, D. J., J. R. Ovenden, J. D. Booth, and R. W. G. White: Genetic subdivision of Australian and New Zealand populations of *Jasus verreauxi* (Decapoda: Palinuridae) — preliminary evidence from the mitochondrial genome. *N. Z. J. Mar. Freshwat. Res.*, **26**, 53-58 (1992a).
- Brasher, D. J., J. R. Ovenden, and R. W. G. White: Mitochondrial DNA variation and phylogenetic relationships of *Jasus* spp. (Decapoda: Palinuridae). *J. Zool.*, **227**, 1-16 (1992b).
- Breen, P. A. and J. D. Booth: Puerulus and juvenile abundance in the rock lobster *Jasus edwardsii* at Stewart Island, New Zealand. *N. Z. J. Mar. Freshwat. Res.*, **23**, 519-523 (1989).
- Breen, P. A., D. J. Gilbert, and K. Chant: Bioeconomic modelling of the New Zealand fishery for red rock lobsters (*Jasus edwardsii*), in "Spiny Lobster Management" (ed. by B. F. Phillips, J. S. Cobb, and J. Kittaka), Fishing News Books, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1994, pp. 302-310.
- Breen, P. A. and M. Stocker: Evaluating the consequences of constant catch levels on the red rock lobster, *Jasus edwardsii*, population of New Zealand, in "Proceedings of the International Symposium on Management Strategies for Exploited Fish Populations" (ed. by G. Kruse, D. M. Eggers, R. J. Marasco, C. Pautzke, and T. J. Quinn II), Alaska Sea Grant College Program Report No. 93-02, University of Alaska Fairbanks, Alaska, 1993, pp. 39-59.
- Briones, P. and E. Lozano: The lobster fisheries in Mexico, in "Spiny Lobster Management" (ed. by B. F. Phillips, J. S. Cobb, and J. Kittaka), Fishing News Books, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1994, pp. 144-157.
- Briones, P., E. Lozano, and D. B. Eggleston: The use of artificial shelters (*casitas*) in research and harvesting of Caribbean spiny lobsters in Mexico, in "Spiny Lobster Management" (ed. by B. F. Phillips, J. S. Cobb, and J. Kittaka), Fishing News Books, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1994, pp. 340-361.
- Brown, R. S. and N. Caputi: Conservation of recruitment of the western rock lobster (*Panulirus cygnus*) by improving survival and growth of undersize rock lobsters captured and returned by fishermen to the sea. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **43**, 2236-2242 (1986).
- Brown, R. S. and B. F. Phillips: The current status of Australia's rock lobster fisheries, in "Spiny Lobster Management" (ed. by B. F. Phillips, J. S. Cobb, and J. Kittaka), Fishing News Books, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1994, pp. 33-63.
- Campbell, A.: The lobster fishery of southwestern Nova Scotia and the Bay of Fundy, in "Marine Invertebrate Fisheries: Their Assessment and Management" (ed. by J. F. Caddy), John Wiley and Sons, New York, 1989, pp. 141-158.
- Campbell, H. F. and S. R. Hall: A bioeconomic analysis of the Tasmanian rock lobster fishery 1947-84. *Tech. Rep. Tasmania Mar. Lab. Dep. Sea. Fish.*, **28**, 1-13 (1988).
- Caputi, N. and R. S. Brown: Relationship between indices of juvenile abundance and recruitment in the western rock lobster (*Panulirus cygnus*) fishery. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **43**, 2131-2139 (1986).
- Caputi, N. and R. S. Brown: The effect of environment on puerulus settlement of the western rock lobster (*Panulirus cygnus*) in Western Australia. *Fish. Oceanogr.*, **2**, 1-10 (1993).
- Caputi, N., C. F. Chubb, and R. S. Brown: Relationships between spawning stock, environment, recruitment and fishing effort for the western rock lobster, *Panulirus cygnus*, fishery in Western Australia. *Crustaceana*, **68**, 213-226 (1993).
- Ceccaldi, H. J. and D. Latrouite: The French fisheries for the European spiny lobster *Palinurus elephas*, in "Spiny Lobster Management" (ed. by B. F. Phillips, J. S. Cobb, and J. Kittaka), Fishing News Books, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1994, pp. 83-90.
- Chapman, D. G.: Population estimation based on change of composition caused by a selective removal. *Biometrika*, **42**, 279-290 (1955).

- Chapman, D. G. and G. I. Murphy: Estimates of mortality and population from survey-removal records. *Biometrics*, **21**, 921-935 (1965).
- 陳 賽斌・平山信夫・石野 誠: 資源の動的平衡及び生物学的諸特性値間の相互関連性. 水産海洋研究, **53**, 18-27 (1989).
- Chen, S. and S. Watanabe: Age dependence of natural mortality coefficient in fish population dynamics. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **55**, 205-208 (1989).
- 陳 賽斌・渡邊精一・高木和徳: 魚類の老齢期生長の解析および繁殖開始年齢と寿命の推定. 日水誌, **54**, 1567-1572 (1988).
- Chiariello, N. and J. Roughgarden: Storage allocation in seasonal races of an annual plant: optimal versus actual allocation. *Ecology*, **65**, 1290-1301 (1984).
- Chien, Y. H. and R. E. Condrety: A modification of the DeLury method for use when natural mortality is not negligible. *Fish. Res.*, **3**, 23-28 (1985).
- Chittleborough, R. G.: Growth of juvenile *Panulirus longipes cygnus* George on coastal reefs compared with those reared under optimal conditions. *Aust. J. Mar. Freshwater Res.*, **27**, 279-295 (1976a).
- Chittleborough, R. G.: Breeding of *Panulirus longipes cygnus* George under natural and controlled conditions. *Aust. J. Mar. Freshwater Res.*, **27**, 499-516 (1976b).
- Chittleborough, R. G. and B. F. Phillips: Fluctuations of year-class strength and recruitment in the western rock lobster *Panulirus longipes* (Milne-Edwards). *Aust. J. Mar. Freshwater Res.*, **26**, 317-328 (1975).
- Chubb, C. F.: Reproductive biology : issues for management, in "Spiny Lobster Management" (ed. by B. F. Phillips, J. S. Cobb, and J. Kittaka), Fishing News Books, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1994, pp. 181-212.
- Clark, C. W.: Mathematical Bioeconomics: the Optimal Management of Renewable Resources, John Wiley & Sons, New York, 1976. (竹内 啓, 柳田英二共訳: 生物経済学: 生きた資源の最適管理の数理., 啓明社 1983, 342pp..)
- Clark, C. W.: Bioeconomic Modelling and Fisheries Management, John Wiley & Sons, New York, 1985, 291pp.. (田中昌一監訳: 生物資源管理論, 恒星社厚生閣, 東京, 1988, 300pp..)
- Clark, C. W., A. Charles, J. R. Beddington, and M. Mangel: Optimal capacity decisions in a developing fishery. *Marine Res. Econ.*, **2**, 25-53 (1985).
- Clark, C. W. and G. P. Kirkwood: On uncertain renewable resource stock: optimal harvest policies and the value of stock surveys. *Univ. British Columbia Inst. Appl. Math. Stat. Tech. Rep.*, **84** (4), 1-18 (1984).
- Clark, I. N., P. J. Major, and N. Mollet: Development and implementation of New Zealand's ITQ management system. *Mar. Resour. Econ.*, **5**, 325-349 (1988).
- Clark, S. H.: A study of variation in trawl data collected in Everglades National Park, Florida. *Trans. Am. Fish. Soc.*, **103**, 777-785 (1974).
- Clark, W. G.: Groundfish exploitation rates based on life history parameters. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **48**, 734-750 (1991).
- Clarke, R. P., S. S. Yoshimoto, and S. G. Pooley: A bioeconomic analysis of the Northwestern Hawaiian Islands lobster fishery. *Mar. Resour. Econ.*, **7**, 115-140 (1992).
- Collie, J. S. and M. P. Sissenwine: Estimating population size from relative abundance data measured with error. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **40**, 1871-1879 (1983).
- Conner, M. C., R. A. Lancia, and K. H. Pollock: Precision of the change-in-ratio technique for deer population management. *J. Wildl. Manage.*, **50**, 125-129 (1986).
- Cruz, R. and B. F. Phillips: The artificial shelters (*pesrueros*) used for the spiny lobster (*Panulirus argus*) fisheries in Cuba, in "Spiny Lobster Management" (ed. by B. F. Phillips, J. S. Cobb, and J. Kittaka), Fishing News Books, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1994, pp. 323-339.
- Dacorogna, B., F. Weissbaum, and R. Arditi: Maximum sustainable yield with continuous age-structure and density-dependent recruitment. *Math. Biosci.*, **120**, 99-126 (1994).
- Dawe, E. G., J. M. Hoenig, and X. Xu: Change-in-

- ratio and index-removal methods for population assessment and their application to snow crab (*Chionoecetes opilio*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **50**, 1467-1476 (1993).
- 出口吉昭: イセエビ, 「エビ・カニ類の種苗生産」(日本水産学会監修, 平野礼次郎編) 水産学シリーズ, Vol. 71, 恒星社厚生閣, 東京, 1988, pp. 64-75.
- DeLury, D. B.: On the estimation of biological populations. *Biometrics*, **3**, 145-167 (1947).
- DeMartini, E. E., D. M. Ellis, and V. A. Honda: Comparisons of spiny lobster *Panulirus marginatus* fecundity, egg size, and spawning frequency before and after exploitation. *Fish. Bull.*, **91**, 1-7 (1993).
- Deriso, R. B., T. J. Quinn II, and P. R. Neal: Catch-age analysis with auxiliary information. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **42**, 815-824 (1985).
- Deweese, C. M.: Assessment of the implementation of individual transferable quotas in New Zealand's inshore fishery. *N. Am. J. Fish. Manage.*, **9**, 131-139 (1989).
- 土井長之: 東シナ海・黄海産マダイの適正漁獲係数を見積る簡便法. 日水誌, **39**, 1-5 (1973).
- Doll, J. P.: Traditional economic models of fishing vessels: a review with discussion. *Marine Resource Economics*, **5**, 99-123 (1988).
- Doubleday, W. G.: A least squares approach to analyzing catch at age data. *ICNAF Res. Bull.*, **12**, 69-81 (1976).
- Dupont, W. D.: A stochastic catch-effort method for estimating animal abundance. *Biometrics*, **39**, 1021-1033 (1983).
- Easton, M. D. L., and R. K. Misra: Mathematical representation of crustacean growth. *J. Cons. int. Explor. Mer*, **45**, 61-72 (1988).
- Ebert, T. A. and R. F. Ford: Population ecology and fishery potential of the spiny lobster *Panulirus penicillatus* at Eniwetak atoll, Marshall Islands. *Bull. mar. Sci.*, **38**, 56-67 (1986).
- Ehrhardt, N. M.: The lobster fisheries off the Caribbean coast of Central America, in "Spiny Lobster Management" (ed. by B. F. Phillips, J. S. Cobb, and J. Kittaka), Fishing News Books, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1994, pp. 133-143.
- Fan, L. T.: The Continuous Maximum Principle, John Wiley & Sons, New York, 1966. (中谷貴寿, 和泉陽平訳: 最大原理とその応用, コロナ社, 東京, 1968, 423pp.)
- Fisher, R. A., A. S. Corbet, and C. B. Williams: The relation between the number of species and the number of individuals in a random sample of an animal population. *J. Anim. Ecol.*, **12**, 42-58 (1943).
- Fogarty, M. J. and D. V. Borden: Effects of trap venting in gear selectivity in the inshore Rhode Island American lobster, *Homarus americanus*, fishery. *Fish. Bull.*, **77**, 925-933 (1980).
- Fonteles-Filho, A. A.: State of the lobster fishery in North-east Brazil, in "Spiny Lobster Management" (ed. by B. F. Phillips, J. S. Cobb, and J. Kittaka), Fishing News Books, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1994, pp. 108-118.
- Ford, R. F., B. F. Phillips, and L. M. Joll: Experimental manipulation of population density and its effects on growth and mortality of juvenile western rock lobsters, *Panulirus cygnus* George. *Fish. Bull.*, **86**, 773-787 (1988).
- Fournier, D. A. and C. P. Archibald: A general theory for analyzing catch at age data. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **39**, 1195-1207 (1982).
- Fournier, D. A. and P. A. Breen: Estimation of abalone mortality rates with growth analysis. *Trans. Am. Fish. Soc.*, **112**, 403-411 (1983).
- Fournier, D. A., J. R. Sibert, J. Majkowski, and J. Hampton: MULTIFAN a likelihood-based method for estimating growth parameters and age composition from multiple length frequency data sets illustrated using data for southern bluefin tuna (*Thunnus maccoyii*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **47**, 301-317 (1990).
- Fournier, D. A., J. R. Sibert, and M. Terceiro: Analysis of length frequency samples with relative abundance data for the Gulf of Maine northern shrimp (*Pandalus borealis*) by the MULTIFAN method. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **48**, 591-598 (1991).
- Frederick, S. W. and R. M. Peterman: Choosing

- fisheries harvest policies: when does uncertainty matter? *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **52**, 291-306 (1995).
- Fried, S. M. and R. Hilborn: Inseason forecasting of Bristol Bay, Alaska, sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) abundance using Bayesian probability theory. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **45**, 850-855 (1988).
- 藤森康澄, 松田 皎, L. P. Losanes, 小池 篤: 水槽実験による刺網の漁獲効率と網目選択性. 日水誌, **56**, 2019-2027 (1990).
- 伏見 浩: 南伊豆地区におけるイセエビの生態. 水産土木, **12**, 21-26 (1976).
- 伏見 浩: 南伊豆地区におけるイセエビの生活—研究上の問題点と今後の課題—. ベントス研連誌, **15/16**, 60-66 (1978).
- Gabriel, W. L., M. P. Sissenwine, and W. J. Overholtz: Analysis of spawning stock biomass per recruit: an example for Georges Bank haddock. *N. Am. J. Fish. Manage.*, **9**, 383-391 (1989).
- Getz, W. M.: Optimal harvesting of structured populations. *Math. Biosci.*, **44**, 269-291 (1979).
- Getz, W. M.: The ultimate-sustainable-yield problem in nonlinear age-structured populations. *Math. Biosci.*, **48**, 279-292 (1980).
- Goodyear, C. P.: Spawning stock biomass per recruit in fisheries management: foundation and current use, in "Risk Evaluation and Biological Reference Points for Fisheries Management" (ed. by S. J. Smith, J. J. Hunt, and D. Rivard), *Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci.*, Vol. 120, National Research Council Canada, Canada, 1993, pp.67-81.
- Grafton, R. Q.: Rent capture in an individual transferable quota fishery. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **49**, 497-503 (1992).
- Gulland, J. A.: Estimation of mortality rates, in "Annex to Arctic Fisheries Working Group Report", ICES, C.M., 1965, Doc. No. 3, 12pp.
- Hamano, T.: Growth of the stomatopod crustacean *Oratosquilla oratoria* in Hakata Bay. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **56**, 1529 (1990).
- Hancock, D. A.: Research for management of the rock lobster fishery of Western Australia. *Proc. Ann. Gulf Carrib. Fish. Inst.*, **33**, 207-229 (1980).
- Hannesson, P. R.: Bioeconomic Analysis of Fisheries, Fishing News Books, Oxford, 1993, 138pp..
- Harada, E.: Ecological observations on the Japanese spiny lobster, *Panulirus japonicus* (Von Siebold), in its larval and adult life. *Publ. Seto Mar. Biol. Lab.*, **6**, 99-120, (1956).
- 原田泰志: 生活史戦略理論概説. 水産資源管理談話会報, **8**, 3-15 (1992).
- 原田泰志: 漁業生態系管理における情報の価値について. 月刊海洋, **27** (4), 238-243 (1995).
- 原田泰志, 松宮義晴: 資源変動のもとでの放流方策に関する理論的研究. 水産海洋研究, **59**, 85-90 (1995).
- Harding, J. P.: The use of probability paper for the graphycal analysis of polymodal frequency distributions. *J. Mar. Biol. Ass. U. K.*, **28**, 141-153 (1949).
- 長谷川 彰: ニュージーランドのITQ制度について, 「漁業管理研究—限られた資源を生かす道—」(長谷川 彰監修, 廣吉勝治・加瀬和俊編), 成山堂書店, 東京, 1991, pp. 296-311.
- Hasselblad, V.: Estimation of parameters for a mixture of normal distributions. *Technometrics*, **8**, 431-444 (1966).
- 服部他助, 大石芳三: 龍蝦孵化試験第一回報告. 水講試報, **1**, 76-131 (1899).
- 服部他助, 大石芳三: 龍蝦孵化試験第二回報告. 水講試報, **2**, 153-167 (1901).
- Hiatt, R. W.: The biology of the lined shore crab (*Pachygrapsus crassipes* Randall). *Pacif. Sci.*, **2**, 135-213 (1948).
- Hilborn, R. and C. J. Walters: Quantitative Fisheries Stock Assessment—Choice, Dynamics, and Uncertainty, Chapman and Hall, New York, 1992, 570pp..
- 平松一彦: 最尤法によるコホート解析・標識再捕法・DeLury法の統一的扱い. 漁業資源研究会議西日本底魚部会報, **18**, 13-26 (1990).
- 平松一彦: 最尤法による水産資源の統計学的研究—パラメータ推定とモデル選択—. 遠洋水研報, **29**, 57-114 (1992).
- 平松一彦: 水産資源研究の最新動向 (8)資源評価で用いられる数理解析手法について. 水産の研究, **13**,

- 44-48 (1994).
- Hiramatsu, K.: A theoretical study of equations used in virtual population analysis. *Fisheries Sci.*, **61**, 752-754 (1995).
- 平山信夫, 山田作太郎, 菊池 弘, 山田潤一: DeLury法の修正とアワビ採捕漁業への応用. *J. Tokyo Univ. Fish.*, **76**, 7-17 (1989).
- 桧山義明: 水産資源の管理と変動機構の研究における生活史戦略理論の可能性. 水産資源管理談話会報, **8**, 16-27 (1992).
- Hiyama, Y. and T. Kitahara: Relation between surplus energy and body weight in fish populations. *Res. Popul. Ecol.*, **35**, 139-150 (1993a).
- Hiyama, Y. and T. Kitahara: Theoretical consideration of effect of fishing mortality on growth and reproduction of fish populations. *Res. Popul. Ecol.*, **35**, 285-294 (1993b).
- Hiyama, Y., T. Kitahara, and T. Tokai: Numerical prediction of a relation among growth, reproduction and mortality in iteroparous fish populations. *Res. Popul. Ecol.*, **30**, 267-278 (1988).
- Hunt, J. H.: Status of the fishery for *Panulirus argus* in Florida, in "Spiny Lobster Management" (ed. by B. F. Phillips, J. S. Cobb, and J. Kittaka), Fishing News Books, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1994, pp. 158-168.
- 茨木俊秀, 福島雅夫: 制約なし最適化問題に対する準ニュートン法, 「Fortran 77 最適化プログラミング」, 岩波書店, 東京, 1991, pp. 141-166.
- 市来忠彦, 種村一成, 富永叶男, 塩川 司: イセエビのプエルルス幼生および初期稚エビの採捕とその生態, 水産土木, **12**(2), 31-36 (1976).
- 今井千文: 田中の図形法による多峰分布の分解, 「パソコンによる資源解析プログラム集(Ⅱ)」(中央水産研究所生物生態部数理生態研究室編), 中央水産研究所, 東京, 1990, pp. 46-53.
- 猪野 峻: イセエビ(*Panulirus japonicus* (v. Siebold))の産卵回数に関する観察. 日水誌, **15**, 725-727 (1950).
- 井上正昭: 蓄養中におけるイセエビの摂餌量について. 日水誌, **30**, 407-412 (1964).
- 井上正昭: イセエビフィロゾマの移送とその起源についての一考察. 水産土木, **16**, 77-78 (1979).
- 井上正昭: イセエビのフィロゾマ幼生の飼育に関する基礎的研究, 神奈川県水産試験場論文集 第1集, 神奈川県水試, 三浦, 神奈川県, 1981, 91pp..
- 石田昭夫: 刺網の網目選択曲線について. 北水研報, **25**, 20-25 (1962).
- 石田 修, 田中種雄: 大原地先海域におけるイセエビの移動・成長及び放流効果. 千葉水試研報, **43**, 41-50 (1985).
- 石田 修, 田中種雄: 標識放流法による大原地先海域の若齢イセエビの資源量推定. 千葉水試研報, **44**, 3-11 (1986).
- 石岡清英, 猪子嘉生: Cohortの漁獲統計が得られる場合の初期資源量の推定方法—江田島湾のガザミを例として. 南西水研報, **14**, 33-54 (1982).
- 石塚吉生: ミナミマグロ資源評価に適用されるVPAの現状と問題点. 水産資源管理談話会報, **3**, 16-33 (1991).
- 巖佐 庸: 生物の行動と生長に関する適応戦略論. 生物物理, **25** (2), 10-15 (1985).
- 巖佐 庸: 数理生物学入門 生物社会のダイナミクスを探る, HBJ出版局, 東京, 1990, 352pp..
- Iwasa, Y. and J. Roughgarden: Shoot/root balance of plants: the optimal growth of a system with many vegetative organs. *Theor. Pop. Biol.*, **25**, 78-105 (1984).
- Jones, R.: The assessment of long-term effects of changes in gear selectivity and fishing effort. *Mar. Res.*, **2**, 1-19 (1961).
- 金盛浩吉: イセエビ漁業の資源管理の研究—I 経済的面からみた適正漁獲量, 適正漁獲努力量の検討(すさみ地先の事例). 昭和60年度和歌山水試事報, 196-202, (1987).
- 金盛浩吉: 和歌山県紀南海域におけるイセエビの資源生態と漁業管理の研究. 昭和61年度和歌山水試事報. pp.109-209 (1988).
- 金盛浩吉, 金丸誠司: 熊野周辺におけるイセエビの資源生態の研究. 昭和54年度和歌山水試事報. pp.107-185 (1980).
- 金盛浩吉, 金丸誠司: すさみ海域におけるイセエビの資源生態の研究—IV 標識放流調査からみた再捕率と移動について. 昭和58年度和歌山水試事報, 113-121, (1985).
- 金盛浩吉, 吉村晃一: 潮岬沖合域で採集されたイセエビ属フィロゾマについて. 昭和60年度和歌山水試事報, 186-195, (1987).

- Katsukawa, T.: Introduction of spawning potential: improvement in the threshold management theory. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, **7**, 1-5 (1997).
- 勝川俊雄, 松宮義晴: 産卵ポテンシャルに基づく水産資源の管理理論. *水産海洋研究*, **61**, 33-43 (1997).
- Kawamura, G.: Gill-net mesh selectivity curve developed from length-girth relationship. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **38**, 1119-1127 (1972).
- 菊池 弘, 山田作太郎, 平山信夫: 刺し網の選択性を考慮に入れた福島県北沖のイシガレイの資源管理について. *J. Tokyo Univ. Fish.*, **75**, 443-456 (1988).
- Kimura, D. K. and S. Chikuni: Mixtures of empirical distributions: an iterative application of the age-length-key. *Biometrics*, **43**, 23-35 (1987).
- 木村由紀雄, 高梨浩二: 千葉県勝浦地先におけるイセエビ資源量の推定および漁況予測. *千葉水試研報*, **51**, 89-92 (1993).
- King, D. and J. Roughgarden: Multiple switches between vegetative and reproductive growth in annual plants. *Theor. Pop. Biol.*, **21**, 194-204 (1982 a).
- King, D. and J. Roughgarden: Graded allocation between vegetative and reproductive growth for annual plants in growing seasons of random length. *Theor. Pop. Biol.*, **22**, 1-16 (1982b).
- 木下虎一郎: 伊勢蝦の蕃殖保護に関する二三の知見. *日水誌*, **1**, 237-240 (1933).
- 木下虎一郎: 伊勢蝦の Puerulus と其後の変態に就きて. *動雑*, **46**, 391-399 (1934).
- 北田修一: 標識再捕に基づく種苗放流効果の評価に関する統計学的研究, 栽培資源調査検討資料, 日本栽培漁業協会, 東京, 1991, 96pp.
- Kitada, S., K. Hiramatsu, and H. Kishino: Estimating mortality rates from tag recoveries: incorporating over-dispersion, correlation and change points. *ICES J. mar. Sci.*, **51**, 241-251 (1994).
- Kitahara, T.: On selectivity curve of gillnet. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **37**, 289-296 (1971).
- Kitahara, T., Y. Hiyama, and T. Tokai: A preliminary study on quantitative relations among growth, reproduction and mortality in fishes. *Res. Popul. Ecol.*, **29**, 85-93 (1987).
- Kittaka, J. and K. Kimura: Culture of the Japanese spiny lobster *Panulirus japonicus* from egg to juvenile stage. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **55**, 963-970 (1989).
- 北門利英, 山田作太郎: 水産資源の成長とその推定法について. *統計数理研究所共同研究レポート*, **93**, 53-60 (1997).
- 小池 篤: かごの漁具構造と漁獲, 「かご漁業」(日本水産学会編) 水産学シリーズ, Vol. 36, 恒星社厚生閣, 東京, 1981, pp. 51-65.
- 小池 篤, 松田 皎: 三枚網の内網のたるみ, 内網の網目の変化と漁獲. *日水誌*, **54**, 221-227 (1988).
- 小池 篤, 小倉通男: エビ籠, カニ籠における網目, 入口の選択作用について. *J. Tokyo Univ. Fish.*, **64**, 1-11 (1977).
- 小池 篤, 竹内正一: 三枚網の内網の網目の大小が漁獲に及ぼす影響. *日水誌*, **51**, 895-901 (1985).
- 小池 隆, 森川由隆, 前川行幸, 森永 勤: イセエビの夜間行動におよぼす水中の明るさの影響. *日水誌*, **59**, 1689-1694 (1993).
- Koike, T., Y. Morikawa, and M. Maegawa: Under-water brightness in nighttime and behaviors of Japanese spiny lobsters. *La mer*, **33**, 37-46(1995).
- 小池 隆, 林 浩司, 永田 豊: イセエビが感知し得る昼間照度の下限值. *水産海洋研究*, **60**, 34-44 (1996a).
- 小池 隆, 吉見恭子, 永田 豊: イセエビの活動を抑制する夜間照度の閾値. *日水誌*, **62**, 458-459 (1996b).
- 小島 博, 石橋喜美子: 徳島県海部郡産クロアワビの資源特性値の推定. *東海水研報*, **118**, 11-20 (1985).
- 近藤次郎: 最適化法, 現代応用数学講座 6, コロナ社, 東京, 1984, 280pp..
- Krouse, J. S.: Effectiveness of escape vent shape in traps for catching legal-sized lobster, *Homarus americanus*, and harvestable-sized crabs, *Cancer borealis* and *Cancer irroratus*. *Fish. Bull.*, **76**, 425-432 (1978).
- Krouse, J. S.: Performance and selectivity of trap fisheries for crustaceans, in "Marine Invertebrate Fisheries: Their Assessment and Management" (ed. by J. F. Caddy), John Wiley and Sons, New York, 1989, pp. 307-325.
- 久保伊津男: イセエビ *Panulirus japonicus* (v. Siebold) の漁況. I. 府県別漁獲統計に就いて. *日水誌*, **8**, 138-140 (1939).

- 久保伊津男: イセエビ *Panulirus japonicus* (v. Siebold) の漁況. II. 降水量との関係に就いて. 日水誌, 8, 287-291 (1940).
- Kubo, I.: Systematic studies on the Japanese Macrurous decapod crustacea, 3. On the Palinurid lobsters. *J. Tokyo Univ. Fish.*, 41, 95-105(1954).
- 久保伊津男: イセエビ漁獲の時間的变化にみられる双峯性について. 日水誌, 28, 322-325 (1962).
- 久保伊津男, 石渡直典: イセエビの活動性と水中放射照度との関係について. 日水誌, 30, 884-888 (1964).
- 倉田 博: 甲殻類の脱皮時における長さの増大について. 北水研報, 22, 1-48 (1960).
- Kurata, H.: Studies on the age and growth of crustacea. *Bull. Hokkaido Reg. Fish. Res. Lab.*, 24, 1-115 (1962).
- 鉄 健司: 自然死亡, 「資源生物論」(西脇昌治編), 東京大学出版会, 東京, 1974, pp. 72-82.
- 黒木 勝: 宮崎県青島漁協のイセエビ籠漁業について. 栽培技研, 1(2), 11-15 (1972).
- 草川恒紀: 個別割当に基づく漁業管理. 漁業経済研究, 39(2), 55-77 (1994).
- Lambou, V. W.: Application of distribution pattern of fishes in Lake Bistineau to design of sampling programs. *Prog. Fish-Cult.*, 25, 79-87(1963).
- Lanfersieck, J., and D. Squires: Planning models for individual transferable quota programs. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 49, 2313-2321 (1992).
- Laurec, A. and J. G. Shepherd: On the analysis of catch and effort data. *J. Cons. int. Explor. Mer*, 41, 81-84 (1983).
- Lenarz, W. H. and P. B. Adams: Some statistical considerations of the design of trawl surveys for rockfish (Scorpaenidae). *Fish. Bull.*, 78, 659-674 (1980).
- Leslie, P. H. and D. H. S. Davis: An attempt to determine the absolute number of rats on a given area. *J. Anim. Ecol.*, 8, 94-113 (1939).
- Lord, G. E.: Decision theory applied to simulated data acquisition and management of a salmon fishery. *Fish. Bull.*, 74, 837-846 (1976).
- Ludwig, D. and C. J. Walters: Measurement errors and uncertainty in parameter estimates for stock and recruitment. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 38, 711-720 (1981).
- Ludwig, D. and C. J. Walters: Optimal harvesting with imprecise parameter estimates. *Ecol. Modelling*, 14, 273-292 (1982).
- MacDonald, P. D. M. and T. J. Pitcher: Age groups from size frequency data: a versatile and efficient method of analyzing distribution mixtures. *J. Fish. Res. Board Can.*, 36, 987-1001 (1979).
- Mace, P. M.: Relationships between common biological reference points used as thresholds and targets of fisheries management strategies. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 51, 110-122 (1994).
- Mace, P. M. and M. P. Sissenwine: How much spawning per recruit is enough?, in "Risk Evaluation and Biological Reference Points for Fisheries Management" (ed. by S. J. Smith, J. J. Hunt, and D. Rivard), *Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci.*, Vol. 120, National Research Council Canada, Canada, 1993, pp. 101-118.
- Majkowsky, J., J. Hampton, R. Jones, A. Laurec, and A. A. Rosenberg: Sensitivity of length-based methods for stock assessment: report of working group III, in "Length Based Methods in Fisheries Research" (ed. by D. Pauly and G. R. Morgan), ICLARM Conf. Proc. No.13, Manila, 1987, pp. 363-372.
- 真子 渺, 松宮義晴: 銘柄組成による年齢組成推定法. 西水研報, 50, 1-8 (1977).
- Mangel, M. and J. H. Beder: Search and stock depletion: theory and application. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 42, 150-163 (1985).
- Mangel, M. and C. W. Clark: Uncertainty, search, and information in fisheries. *J. Cons. int. Explor. Mer*, 41, 93-103 (1983).
- Martin, I. and R. M. Cook: Combined analysis of length and age-at-length data. *J. Cons. int. Explor. Mer*, 46, 178-186 (1990).
- 丸山武男: イセエビ漁の豊凶要因と予察について. 東海水研報, 45, 81-95 (1966).
- 丸山武男, 平井政治: イセエビの漁獲量の変動・移動及び禁漁区設定の効果について. 東海水研報, 38, 99-123 (1964).
- 増田辰良: 年齢形質としてのイセエビの第1觸角鞭状部について. 日水誌, 19, 1007-1011 (1954)

- 松田裕之: 魚はいつ, 何歳から獲るべきか? = 持続可能な漁業の理論 = 海洋と生物, 18, 120-125(1996).
- Matsumiya, Y.: AIC introduced to Schnute's models by the removal method. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 56, 543 (1990a).
- Matsumiya, Y.: Method for estimating age composition from market size composition: its mathematical examination. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 56, 841 (1990b).
- 松宮義晴: 再生産情報を重視した水産資源管理の理論と実践. 水産資源管理談話会報, 16, 21-31 (1996a).
- 松宮義晴: 再生産情報を重視した水産資源の管理方策. 個体群生態学会会報, 53, 37-43 (1996b).
- 松宮義晴: 水産資源管理概論, 水産資源保護協会, 東京, 1996c, 77pp..
- 松宮義晴: 加入乱獲回避のための水産資源の管理各論. 水産海洋研究, 61, 168-178 (1997).
- 松宮義晴, 小出水規行: Change-in-Ratio Methods による水産資源の評価, 「数理生物学における決定論・確率モデルの基礎理論的研究」, 統計数理研究所共同研究リポート76, 1995, pp. 17-30.
- 松宮義晴, 真子 渺: 銘柄組成による年令組成の推定. 「200カイリ水域内漁業資源調査」, 漁業資源解析のための電子計算機プログラム集, 水産庁, 東京, 1978, pp. 87-91.
- Matsumiya, Y. and T. Matsuishi: Estimation of population parameters by optimizing catch effort allocation. *Res. Popul. Ecol.*, 31, 305-310 (1989).
- 松宮義晴, 田中昌一: 体長組成解析によるサンマのいわゆる大型・中型等の検討. 東北水研報, 33, 1-18(1974).
- Matsuoka, T.: A tank experiment on selectivity components of a trammel-net for *Tilapia mossambica*. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 57, 1331-1338 (1991).
- 松岡達郎・杜 勝久・斉藤良仁: 刺し網のサイズ選択性の計算法とその水槽実験による検証. 日水誌, 61, 880-888 (1995).
- Mauchline, J.: The Hiatt growth diagram for crustacea. *Mar. Biol.*, 35, 79-84 (1976).
- Mauchline, J.: Growth of shrimps, crabs and lobsters—an assessment. *J. Cons. int. Explor. Mer*, 37, 162-169 (1977).
- McLeese, D. W. and D. G. Wilder: The activity and catchability of the lobster (*Homarus americanus*) in relation to temperature. *J. Fish. Res. Board Can.*, 15, 1345-1354 (1958).
- Megrey, B. A.: Review and comparison of age-structured stock assessment models from theoretical and applied points of view. *American Fisheries Society Symposium*, 6, 8-48 (1989).
- Megrey, B. A., A. B. Hollowed, and R. D. Methot: Integrated analysis of Gulf of Alaska pollock catch-at-age and research survey data using two different stock assessment procedures. *INPFC Bull.*, 50, 279-302 (1990).
- Mendelssohn R.: Using markov decision models and related techniques for purposes other than simple optimization: analyzing the consequences of policy alternatives on the management of salmon runs. *Fish. Bull.*, 78, 35-50 (1980).
- Methot, R. D.: Synthetic estimates of historical abundance and mortality for northern anchovy. *American Fisheries Society Symposium*, 6, 66-82 (1989).
- Methot, R. D.: Synthesis model: an adaptable framework for analysis of diverse stock assessment data. *INPFC Bull.*, 50, 259-277 (1990).
- Miller, R. J.: Effectiveness of crab and lobster traps. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 47, 1228-1251 (1990).
- Miller, R. J. and R. K. Mohn: Critique of the Leslie method for estimating sizes of crab and lobster populations. *N. Am. J. Fish. Manage.*, 13, 676-685 (1993).
- 宮村光武: イセエビの標識放流. 三重県水産試験場時報, 176, 53-55 (1954).
- 宮部尚純: 大西洋クロマグロに適用されるVPA手法について. 水産資源管理談話会報, 3, 3-15 (1991).
- 水口憲哉: 模型または理論のもつ意味とその現場における点検, 「増殖技術の基礎と理論—その発展の糸口として」(日本水産学会編), 水産学シリーズ 23, 恒星社厚生閣, 東京, 1978a, pp. 7-19..
- 水口憲哉: 房総沿岸におけるイセエビの移動に関する試論. ベントス研連誌, 15/16, 67-72 (1978b).
- 水口憲哉: 黒潮影響域における幼生分散のいくつかの様相とそのもつ意味. 月刊海洋, 25, 301-305 (1993).
- Mogi, M. and N. Yamamura: Estimation of the attraction range of a human bait for *Aedes albopictus* (Diptera, Culicidae) adults and its

- absolute density by a new removal method applicable to populations with immigrants. *Res. Popul. Ecol.*, **23**, 328-343 (1981).
- Moran, P. A. P.: A mathematical theory of animal trapping. *Biometrika*, **38**, 307-311 (1951).
- Morgan, G. R.: Assessment of the stocks of the western rock lobster *Panulirus cygnus* using surplus yield models. *Aust. J. Mar. Freshw. Res.*, **30**, 355-363 (1979).
- Morgan, G. R.: Population dynamics of spiny lobsters, in "The Biology and Management of Lobsters" (ed. by J. S. Cobb and B. F. Phillips), Vol. 2, Academic Press, New York, 1980, pp. 189-217.
- Morgan, G. R. and D. Pauly: Analysis of length-frequency data: some available programs and user's instructions, in "Length Based Methods in Fisheries Research" (ed. by D. Pauly and G. R. Morgan), ICLARM Conf. Proc. No.13, Manila, 1987, pp. 373-462.
- Morgan, G. R., B. F. Phillips, and L. M. Joll: Stock and recruitment relationships in *Panulirus cygnus*, the commercial rock (spiny) lobster of Western Australia. *Fish. Bull.*, **80**, 475-486(1982).
- Moyle, J. B. and R. Lound: Confidence limits associated with means and medians of series of net catches. *Trans. Am. Fish. Soc.*, **89**, 53-58 (1960).
- Munro, J. L.: Fisheries for spiny lobsters in the tropical Indo-West Pacific, in "Spiny Lobster Management" (ed. by B. F. Phillips, J. S. Cobb, and J. Kittaka), Fishing News Books, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1994, pp. 76-82.
- Murano, M.: Preliminary notes on the ecological study of the phyllosoma larvae of the Japanese spiny lobster. *Inform. Bull. Planktol. Japan*, Commemoration Number of Dr. Y. Matsue's Sixtieth Birthday, 129-137 (1967).
- Murano, M.: Five forms of Palinurid phyllosoma larvae from Japan. *Publ. Seto Mar. Biol. Lab.*, **19**, 17-25, (1971).
- 村田 守, 嶋津靖彦: 北西太平洋海域におけるアカイカの資源特性値について. 北水研報, **47**, 1-10(1982).
- Murphy, G. I.: A solution of the catch equation. *J. Fish. Res. Board Can.*, **22**, 191-202 (1965).
- Myers, R. A., and R. W. Doyle: Predicting natural mortality rates and reproduction—Mortality trade-offs from fish life history data. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **40**, 612-620 (1983).
- Myers, R. A., A. A. Rosenberg, P. M. Mace, N. Barrowman, and V. P. Restrepo: In search of thresholds for recruitment overfishing. *ICES J. mar. Sci.*, **51**, 191-205 (1994).
- 中村和夫: 徳島県沿岸で採集されたイセエビ属フィロソマの採集場所・時期・体長について. 栽培技研, **3**, 105-112 (1974).
- 中村和夫: 徳島県沿海で採集されたイセエビ属フィロソマの体形について. 栽培技研, **4**, 1-8 (1975).
- Nakamura, S.: Ecological studies on the spiny lobster, *Panulirus japonicus* (v. Siebold), with special reference to its conservation, I. *J. Imp. Fish. Inst.*, **34**, 101-113 (1940).
- 梨本勝昭: 刺網の漁獲選択性, 「漁具の漁獲選択性」(日本水産学会編), 水産学シリーズ 28, 恒星社厚生閣, 東京, 1979, pp. 65-81.
- 西内修一: ケガニかごの網目選択性について. 水産技術と経営, **37** (7), 13-21 (1991).
- 野中 忠: イセエビ禁漁区調査の一例. 水産増殖, **6** (3), 9-13 (1959).
- 野中 忠: 棲所に関するイセエビの習性について. 日水誌, **32**, 630-638 (1966).
- 野中 忠: 漁獲に表れたイセエビ資源の性状. 静岡水試研報, **16**, 31-42 (1982).
- 野中 忠: イセエビの漁獲量. 水産増殖, **36** (3), 213-220 (1988).
- Nonaka, M. and H. Fushimi: Restocking, in "Spiny Lobster Management" (ed. by B. F. Phillips, J. S. Cobb, and J. Kittaka), Fishing News Books, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1994, pp. 446-460.
- 野中 忠, 伏見 浩, 影山佳之, 佐々木 正: イセエビ属プエルルス採集についての二・三. 静岡水試研報, **14**, 43-52 (1980).
- 野中 忠, 幡谷雅之, 青山雅俊, 山本健一郎: 日本近海のイセエビ属 phyllosoma の相対成長. 日水誌, **55**, 605-612 (1989).
- 野中 忠・大島泰雄: イセエビの増殖, 特に全漁場休漁, 禁漁区の設置, 及び輪採による効果事例とその効果見積りについて, 水産増殖資料 No. 6, 東大農

- 学部水産学科増殖学研究室, 東京, 1957, 21pp..
- 野中 忠・大島泰雄: 三重県錦町における輪採によるイセエビの生産効果について, 水産増殖資料 No. 14, 東大農学部水産学科増殖学研究室, 東京, 1958, 13pp..
- 野中 忠, 若林カルロス: 本邦南西海域における1970年夏の *phyllosoma* の分布について. 静岡水試研報, 6, 15-18, (1973).
- Norman, C. P., H. Yamakawa, and T. Yoshimura: Habitat selection, growth rate and density of juvenile *Panulirus japonicus* (Von Siebold, 1824) (Decapoda, Palinuridae) at Banda, Chiba Prefecture, Japan. *Crustaceana*, 66, 366-383 (1994).
- 大西修平, 松宮義晴, 原田泰志: ペイズ型コホートモデルの水産資源解析への応用. 三重大生物資源紀要, 9, 49-53 (1993).
- 大島泰雄: イセエビの棲所に就いて. 養殖會誌, 5, 75-83 (1935).
- 大島泰雄: イセエビの生態に関する二, 三の点. 水産学会報, 8, 231-238 (1941).
- 大島泰雄: イセエビ属のフィロゾーマについて. 水産学会報, 9, 36-44, (1942).
- 大島泰雄: イセエビの変態期間と年齢に関する一考察. 日水誌, 13, 210-212 (1948).
- 大島泰雄: 浅海増殖事業—その生産効果—, 海文堂, 東京, 1962, 133pp..
- 大島泰雄: イセエビ資源の培養に関する考え方. 水産土木, 12, 1-3 (1976).
- 大島泰雄, 井上正昭, 小津寿郎, 高橋玄宣: イセエビの蓄養について. 水産増殖, 7, 11-24 (1960).
- Otis, D. L.: An extension of the change-in-ratio method. *Biometrics*, 36, 141-147 (1980).
- 大富 潤・清水 誠: 東京湾における加入完了後のシャコのコの成長および寿命について. 日水誌, 54, 1935-1940 (1988).
- 大富 潤・清水 誠: 東京湾産シャコのコの加入完了前の理論成長および成長パラメータの推定. 水産海洋研究, 58, 21-27 (1994).
- Ovenden, J. R., D. J. Brasher, and R. W. G. White: Mitochondrial DNA analysis of the red rock lobster (*Jasus edwardsii*) supports an apparent absence of population subdivision throughout Australia. *Mar. Biol.*, 112, 319-326 (1992).
- Ovenden, J. R., and D. J. Brasher: Stock identity of the red (*Jasus edwardsii*) and green (*Jasus verreauxi*) rock lobsters inferred from mitochondrial DNA analysis, in "Spiny Lobster Management" (ed. by B. F. Phillips, J. S. Cobb, and J. Kittaka), Fishing News Books, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1994, pp. 230-249.
- Overholtz, W. J., M. P. Sissenwine, and S. H. Clark: Recruitment variability and its implication for managing and rebuilding the Georges Bank haddock (*Melanogrammus aeglefinus*) stock. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 43, 748-753 (1986).
- Paloheimo, J. E.: Estimation of catchabilities and population sizes of lobsters. *J. Fish. Res. Board Can.*, 20, 59-88 (1963).
- Paloheimo, J. E.: Estimation of mortality rates in fish populations. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 109, 378-386 (1980).
- Paulik, G. J. and D. S. Robson: Statistical calculations for change-in-ratio estimators of population parameters. *J. Wildlife Manag.*, 33, 1-27 (1969).
- Pauly, D.: A review of the ELEFAN system for analysis of length-frequency data in fish and aquatic invertebrates, in "Length Based Methods in Fisheries Research" (ed. by D. Pauly and G. R. Morgan), ICLARM Conf. Proc. No. 13, Manila, 1987, pp. 7-34.
- Pauly, D. and N. David: ELEFAN I, a BASIC program for the objective extraction of growth parameters from length-frequency data. *Meeresforschung*, 28, 205-211 (1981).
- Pearce, A. F. and B. F. Phillips: ENSO events, the Leeuwin Current, and larval recruitment of the western rock lobster. *J. Cons. int. Explor. Mer*, 45, 13-21 (1988).
- Phillips, B. F.: The circulation of the southeastern Indian Ocean and the planktonic life of the western rock lobster. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 19, 11-39, (1981).
- Phillips, B. F.: Prediction of commercial catches of the western rock lobster *Panulirus cygnus*. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 43, 2126-2130, (1986).
- Phillips, B. F.: Estimating the density and mortality of juvenile western rock lobster (*Panulirus cygnus*) in nursery reefs. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 47, 1330-1338, (1990).

- Phillips, B. F., P. A. Brown, D. W. Rimmer, and D. D. Reid: Distribution and dispersal larvae of the western rock lobster, *Panulirus cygnus*, in the south-eastern Indian Ocean. *Aust. J. Mar. Freshwater Res.*, **30**, 773-783 (1979).
- Phillips, B. F. and P. S. McWilliam: The pelagic phase of spiny lobster development. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **43**, 2153-2163, (1986).
- Pollock, D. E.: Review of the fishery for and biology of the Cape rock lobster *Jasus lalandii* with notes on larval recruitment. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **43**, 2107-2117 (1986).
- Pollock, D. E.: Simulation models of rock-lobster populations from areas of widely divergent yields on the Cape west coast. *S. Afr. J. mar. Sci.*, **5**, 531-545 (1987).
- Pollock, D. E.: Population regulation and stock-recruitment relationships in some crayfish and lobster populations, in "Crustacean Egg Production" (ed. by A. Wenner and A. Kuris), Crustacean Issues 7, Balkema, Rotterdam, 1991a, pp. 247-266.
- Pollock, D. E.: Spiny lobsters at Tristan da Cunha, South Atlantic: inter-island variations in growth and population structure. *S. Afr. J. mar. Sci.*, **10**, 1-12 (1991b).
- Pollock, D. E.: Recruitment overfishing and resilience in spiny lobster populations. *ICES J. mar. Sci.*, **50**, 9-14 (1993).
- Pollock, D. E.: The fisheries for two *Jasus* species of the South-east Atlantic and for *Palinurus gilchristii* off the Southern Cape coast of South Africa, in "Spiny Lobster Management" (ed. by B. F. Phillips, J. S. Cobb, and J. Kittaka), Fishing News Books, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1994, pp. 91-102.
- Pollock, K. H., J. E. Hines, and J. D. Nichols: The use of auxiliary variables in capture-recapture and removal experiments. *Biometrics*, **40**, 329-340 (1984).
- Pollock, K. H., R. A. Lancia, M. C. Conner, and B. L. Wood: A new change-in-ratio procedure robust to unequal catchability of types of animal. *Biometrics*, **41**, 653-662 (1985).
- Polovina, J. J.: A variable catchability version of the Leslie model with application to an intensive fishing experiment on a multispecies stock. *Fish. Bull.*, **84**, 423-428 (1986).
- Polovina, J. J.: Density dependence in spiny lobster, *Panulirus marginatus*, in the Northwestern Hawaiian Islands. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **46**, 660-665 (1989).
- Polovina, J. J.: The lobster fishery in the Northwestern Hawaiian Islands, in "Spiny Lobster Management" (ed. by B. F. Phillips, J. S. Cobb, and J. Kittaka), Fishing News Books, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1994, pp. 83-90.
- Pontryagin, L. S., V. G. Boltianski, R. V. Gamkrelidze, and E. F. Mischenko: The Mathematical Theory of Optimal Processes, 1962. (関根智明訳: 最適過程の数学的理論, 文一総合出版, 東京, 1967, 380pp..)
- Pope, J. G.: An investigation of the virtual population analysis using cohort analysis. *Int. Comm. Northwest Atl. Fish. Res. Bull.*, **9**, 65-74 (1972).
- Pope, J. G. and J. G. Shepherd: A simple method for the consistent interpretation of catch-at-age data. *J. Cons. int. Explor. Mer*, **40**, 176-184 (1982).
- Pope, J. G. and J. G. Shepherd: A comparison of the performance of various methods for tuning VPAs using effort data. *J. Cons. int. Explor. Mer*, **42**, 129-151 (1985).
- Prager, M. H., J. F. O'Brien, and S. B. Saila: Using lifetime fecundity to compare management strategies: a case history for striped bass. *N. Am. J. Fish. Manag.*, **7**, 403-409 (1987).
- Reed, W. J.: A stochastic model for the economic management of a renewable animal resource. *Math. Biosci.*, **22**, 313-337 (1974).
- Reed, W. J.: Optimal escapement levels in stochastic and deterministic harvesting models. *J. Environ. Econ. Manag.*, **6**, 350-363 (1979).
- Reed, W. J.: Optimum age-specific harvesting in a nonlinear population model. *Biometrics*, **36**, 579-593 (1980).
- Rimmer, D. W. and B. F. Phillips: Diurnal migration and vertical distribution of phyllosoma larvae of the western rock lobster *Panulirus cygnus*. *Mar. Biol.*, **54**, 109-124, (1979).
- Ritz, D. A.: Factors affecting the distribution of

- rock-lobster larvae (*Panulirus longipes cygnus*) with reference to variability of plankton-net catches. *Mar. Biol.*, **13**, 309-317 (1972).
- Roessler, M.: An analysis of the variability of fish populations taken by otter trawl in Biscayne Bay, Florida. *Trans. Am. Fish. Soc.*, **94**, 311-318 (1965).
- Routledge, R. D.: The removal method for estimating natural populations: incorporating auxiliary information. *Biometrics*, **45**, 111-121 (1989).
- Saila, S. B., J. H. Annala, J. L. McKoy, and J. D. Booth: Application of yield models to the New Zealand rock lobster fishery. *N. Z. J. Mar. Freshw. Res.*, **13**, 1-11 (1979).
- 佐久間美明: 漁業管理の合意形成条件について—磯部漁協を事例として—. *漁業経済研究*, **34**, 26-51(1990).
- 桜本和美・船越茂雄: 資源管理, 「現代の水産学」(日本水産学会出版委員会編), 水産学シリーズ 100, 恒星社厚生閣, 東京, 1994, pp. 56-64.
- 佐藤 一・西内修一: ケガニ漁業における小型カニ規制と選択漁獲方策. *月刊海洋*, **324**, 362-366 (1997).
- Schnute, J.: A new approach to estimating populations by the removal method. *Can. J. Aquat. Sci.*, **40**, 2153-2169 (1983).
- Schnute, J. and D. A. Fournier: A new method to length-frequency analysis: growth structure. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **37**, 1337-1351 (1980).
- Seber, G. A. F.: The Estimation of Animal Abundance and Related Parameters. 2nd ed., Griffin, London, 1982, 654pp..
- 関口秀夫: イセエビ親個体群への幼生の加入過程: 研究の現状と将来の展望. *ベントス研連誌*, **28**, 24-35 (1985).
- 関口秀夫: イセエビ類の生活史 1. *海洋と生物*, **8**, 13-18 (1986).
- 関口秀夫: イセエビ*Panulirus japonicus* (Von Siebold)の地理分布をめぐって. *水産海洋研究会報*, **52**, 160-168 (1988).
- 関口秀夫: なぜ, *Panulirus japonicus* (イセエビ)は琉球列島には生息していないのか. *水産海洋研究*, **53**, 315-318 (1989).
- Shepherd, J. G.: A versatile new stock-recruitment relationship for fisheries, and the construction of sustainable yield curves. *J. Cons. int. Explor. Mer*, **40**, 67-75 (1982).
- Shepherd, J. G.: A weakly parametric method for estimating growth parameters from length composition data, in "Length Based Methods in Fisheries Research" (ed. by D. Pauly and G. R. Morgan), ICLARM Conf. Proc. No.13, Manila, 1987, pp. 113-119.
- Shepherd, J. G., G. R. Morgan, J. A. Gulland, and C. P. Mathews: Methods of analysis and assessment: report of working group II., in "Length Based Methods in Fisheries Research" (ed. by D. Pauly and G. R. Morgan), ICLARM Conf. Proc. No.13, Manila, 1987, pp. 353-362.
- Shepherd, S. A., J. L. Baker, and D. W. Johnson: Yield-per-recruit and egg-per-recruit analyses of the Omani abalone, *Haliotis mariae*. *Mar. Freshwater Res.*, **46**, 663-668 (1995).
- Sinoda, M. and T. Kobayashi: Studies on the fishery of zuwai crab in the Japan Sea—VI. Efficiency of the Toyama kago (a kind of crab trap) in capturing the beni-zuwai crab. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **35**, 948-956 (1969).
- Sinoda, M., T. Ikuta, and A. Yamazaki: On changing the size selectivity of fishing gear for *Chionoecetes opilio* in the Japan Sea. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **53**, 1173-1179 (1987).
- Sims, S. E.: The effect of unevenly distributed catches on stock-size estimates using Virtual Population Analysis(Cohort Analysis). *J. Cons. int. Explor. Mer*, **40**, 47-52 (1982).
- Sims, S. E.: An analysis of the effect of errors in the natural mortality rate on stock-size estimates using Virtual Population Analysis (Cohort Analysis). *J. Cons. int. Explor. Mer*, **41**, 149-153 (1984).
- Sissenwine, M. P., and P. M. Mace: ITQs in New Zealand: The era of fixed quota in perpetuity. *Fish. Bull.*, **90**, 147-160 (1992).
- Somerton, D. A.: Fitting straight lines to Hiatt growth diagrams: a re-evaluation. *J. Cons. int. Explor. Mer*, **39**, 15-19 (1980).
- Sparre, P.: A method for the estimation of growth, mortality and gear selection/recruitment parameters from length-frequency samples weighted by catch per effort, in "Length Based Methods in Fisheries

- Research" (ed. by D. Pauly and G. R. Morgan), ICLARM Conf. Proc. No.13, Manila, 1987, pp. 75-102.
- Stasko, A. B.: Modified lobster traps for catching crabs and keeping lobsters out. *J. Fish. Res. Board Can.*, **32**, 2515-2520 (1975).
- Suzuki, N. and T. Kitahara: A management policy for the scoop nets fishery of ayu population in Lake Biwa. *Fisheries Sci.*, **62**, 683-689 (1996).
- Sylvia, G.: Market information and fisheries management: a multiple-objective analysis. *N. Am. J. Fish. Manage.*, **14**, 278-290 (1994).
- Takagi, K.: Migration of the tagged spiny lobster, *Panulirus japonicus*, on the southern Boso Peninsula, Chiba Prefecture. *La mer*, **10**, 95-110 (1972).
- Takagi, K.: Distribution of the Japanese spiny lobster population with special reference to catch statistics in section. *La mer*, **16**, 36-43 (1978).
- Takagi, K., K. Mizuguchi, and A. Ohno: Biological features of the trends shown in the monthly catches by the spiny lobster fishery in Uchiura Bay; Chiba Prefecture. *La Mer*, **13**, 20-24 (1975).
- Takenaka, Y. and H. Matsuda: Effect of age and season limits for maximum sustainable fisheries in age-structured model. *Fisheries Sci.*, **63**, 911-917 (1997).
- 田中栄次: 体長組成解析 (LEFRAN ver. 1.3), 「パソコンによる資源解析プログラム集 (II)」(中央水産研究所生物生態部数理生態研究室編), 中央水産研究所, 東京, 1990, pp. 69-82.
- Tanaka, E.: A method for introducing fishery regulation taking advantage of natural fluctuation in stock size. *Fisheries Sci.*, **62**, 333-339 (1996).
- Tanaka, E. and S. Tanaka: A method for estimating age-composition from length-frequency by using stochastic growth equation. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **56**, 1209-1218 (1990).
- 田中昌一: 体長組成中にあらわれるモードの意義について—I. 正規分布をする二群の混合した分布型. *日水誌*, **20**, 681-688 (1954).
- 田中種雄: 飼育によるイセエビの成長 (続報). *千葉水試研報*, **46**, 15-16 (1988).
- 田中種雄, 金子信一, 石田 修: 飼育によるイセエビの成長. *千葉水試研報*, **43**, 51-57 (1985).
- 谷野保夫, 加藤史彦: ペニズワイかご網の漁獲性能と選択性. *日水研報*, **23**, 101-117 (1971).
- Taylor, C. C.: Nature of variability in trawl catches. *Fish. Bull.*, **54**, 145-166 (1953).
- 堤 裕昭: 体長の計測, 体長頻度分布図の作成および世代解析, 「パソコンによる資源解析プログラム集 (II)」(中央水産研究所生物生態部数理生態研究室編), 中央水産研究所, 東京, 1990, pp. 54-68.
- 堤 裕昭, 田中雅生: グラフ化法およびシンプレックス法をもとにしたコンピュータ・プログラムによる体長頻度分布のコホート解析について. *日本ベントス学会誌*, **46**, 1-10 (1994).
- Udevitz, M. S. and K. H. Pollock: Change-in ratio estimators for populations with more than two subclasses. *Biometrics*, **47**, 1531-1546 (1991).
- Udevitz, M. S. and K. H. Pollock: Using effort information with change-in-ratio data for population estimation. *Biometrics*, **51**, 471-481 (1995).
- Ulltang, ϕ .: Sources of errors in and limitations of Virtual Population Analysis (Cohort Analysis). *J. Cons. int. Explor. Mer*, **37**, 249-260 (1977).
- 和田恵子: 体長組成解析 (各年齢の個体数, 平均体長, 体長の標準偏差を推定), 「種苗放流効果に関する計算ツール集」, 太平洋中ブロック, 1993, pp. 38-50.
- 和田時夫, 佐藤千夏子, 松宮義晴: 加入量あたり産卵資源量解析によるマサバ太平洋系群の資源管理. *水産海洋研究*, **60**, 363-371 (1996).
- Walters, C. J.: Optimal harvest strategies for salmon in relation to environmental variability and uncertain production parameters. *J. Fish. Res. Board Can.*, **32**, 1777-1784 (1975).
- Walters, C. J., and R. Hilborn: Adaptive control of fishing systems. *J. Fish. Res. Board Can.*, **33**, 145-159 (1976).
- Walters, C. J.: Value of short-term forecasts of recruitment variation for harvest management. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **46**, 1969-1976 (1989).
- Walters, C. J. and J. S. Collie: Is research on environmental factors useful to fisheries management? *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **45**, 1848-1854 (1988).
- Walters, C. J., N. Hall, R. Brown, and C. Chubb:

- Spatial model for the population dynamics and exploitation of the western rock lobster, *Panulirus cygnus*. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **50**, 1650-1662 (1993).
- Watanabe, Y. and Y. Sasakawa: A preliminary note on pot selections for the size of the rock crab. *Bull. Fac. Fish. Hokkaido Univ.*, **35**, 225-233(1984).
- Waters, J. R. and G. R. Huntsman: Incorporating mortality from catch and release into yield-per-recruit analyses of minimum-size limits. *N. Am. J. Fish. Manage.*, **6**, 463-471 (1986).
- Waters, W. E.: A quantitative measure of aggregation in insects. *J. Econ. Entomol.*, **52**, 1180-1184(1959).
- Welch, D. W. and Y. Ishida: On the statistical distribution of salmon in the sea: application of negative binomial distribution, and the influence of sampling effort. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **50**, 1029-1038 (1993).
- Wilder, D. G.: The growth of the American lobster (*Homarus americanus*). *J. Fish. Res. Board Can.*, **10**, 371-412 (1953).
- Winemiller, K. O., and K. A. Rose: Patterns of life-history diversification in North American fisheries: Implications for population regulation. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **49**, 2196-2218 (1992).
- 山田作太郎, 趙 柏賢, 平山信夫: アワビ採捕漁業の漁獲能率について. *日水誌*, **55**, 409-416 (1989).
- 山口由二, 山田作太郎, 平山信夫: 福島県北部海域におけるイシガレイ漁業の価格関数を用いた管理について. *日水誌*, **58**, 1219-1227 (1992).
- 山川 紘, 野中 忠: イセエビ禁漁区の性状. *水産増殖*, **36**, 113-119 (1988).
- 山川 卓: イセエビの資源評価と漁業管理. *日水誌*, **62**, 551-554 (1996).
- 山川 卓: 複数体長組成データの解析によるイセエビの成長と齢別組成および加入の推定. *水産海洋研究*, **61**, 23-32 (1997a).
- 山川 卓: 体長組成法, 「水産動物の成長解析」(日本水産学会監修, 赤嶺達郎・麦谷泰雄 編) 水産学シリーズ, Vol. 115, 恒星社厚生閣, 東京, 1997b, pp. 39-51.
- 山川 卓, 松宮義晴: 銘柄別漁獲量から年令組成を推定, 「種苗放流効果に関する計算ツール集」, 太平洋中ブロック, 1993, pp. 86-90.
- 山川 卓, 松宮義晴: 環境情報を導入した水産生物の資源管理. *水産海洋研究*, **58**, 296-298 (1994).
- Yamakawa, T. and Y. Matsumiya: Simultaneous analysis of multiple length frequency data sets when the growth rates fluctuate between years. *Fisheries Sci.*, **63**, 708-714 (1997).
- Yamakawa, T., Y. Matsumiya, and S. Kitada: Comparison of statistical models for expanded DeLury's method. *Fisheries Sci.*, **60**, 405-409 (1994a).
- Yamakawa, T., Y. Matsumiya, M. Nishimura, and S. Ohnishi: Expanded DeLury's method with variable catchability and its application to catch-effort data from spiny lobster gillnet fishery. *Fisheries Sci.*, **60**, 59-63 (1994b).
- Yamakawa, T., M. Nishimura, H. Matsuda, A. Tsujigado, and N. Kamiya: Complete larval rearing of the Japanese spiny lobster *Panulirus japonicus*. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **55**, 745 (1989).
- 山内 淳: 水産資源学への最適理論の応用. 個体群生態学会会報, **53**, 57-62 (1996).
- 余川浩太郎: コホート解析におけるいくつかのチューニング法について. 漁業資源研究会議西日本底魚部会報, **21**, 63-82 (1993).
- Yoshimoto, S. S. and R. P. Clarke: Comparing dynamic versions of the Schaefer and Fox production models and their application to lobster fisheries. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **50**, 181-189 (1993).
- Yoshimura, T. and H. Yamakawa: Microhabitat and behavior of settled pueruli and juveniles of the Japanese spiny lobster *Panulirus japonicus* at Kominato, Japan. *J. Crust. Biol.*, **8**, 524-531 (1988).
- Yoshimura, T., H. Yamakawa, and C. P. Norman: Comparison of hole and seaweed habitats of post-settled pueruli and early benthic juvenile lobsters, *Panulirus japonicus*(Von Siebold, 1824). *Crustaceana*, **66**, 356-365 (1994).
- 余座和征, 野村浩三, 宮本秀明: 底刺網への羅網状態から見たイセエビとサザエの生態について. *日水誌*, **43**, 1269-1272 (1977).
- Zippin, C.: An evaluation of the removal method of estimating animal populations. *Biometrics*, **12**, 163-189 (1956).

付録. 横断条件が(6.28)式と(6.29)式で与えられることの証明

(6.23)式と(6.24)式をそれぞれ,

$$\Phi = \int_0^{t_{\max}} f(X_t, N_{ijt}) dt \quad , \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{dN_{ijt}}{dt} = g(X_t, N_{ijt}) \quad , \quad (\text{A.2})$$

と表す。(A.2)の制約条件の下で(A.1)を最大化する問題は、ラグランジェの未定乗数法より、

$$I = \int_0^{t_{\max}} \left[f(X_t, N_{ijt}) + \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^{i_{\max}} \lambda_{ijt} \left\{ g(X_t, N_{ijt}) - \frac{dN_{ijt}}{dt} \right\} \right] dt \quad , \quad (\text{A.3})$$

の最大化問題に置き換えられる。

右辺第三項を部分積分し、(6.25)式を代入して整理すると、

$$I = \int_0^{t_{\max}} \left(H + \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^{i_{\max}} \frac{d\lambda_{ijt}}{dt} N_{ijt} \right) dt - \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^{i_{\max}} [\lambda_{ijt} N_{ijt}]_0^{t_{\max}} \quad , \quad (\text{A.4})$$

となる。

ここで、(6.22)式の制約条件のもとで(6.28)式および(6.29)式の条件を導入すれば

$$\sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^{i_{\max}} [\lambda_{ijt} N_{ijt}]_0^{t_{\max}} = \sum_{i=0}^1 \lambda_{i00} N_{i00} = \text{定数} \quad , \quad (\text{A.5})$$

となるから、(A.4)式の変分は

$$\delta I = \int_0^{t_{\max}} \left(\frac{\partial H}{\partial X} \delta X + \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^{i_{\max}} \left(\frac{\partial H}{\partial N} \delta N + \frac{d\lambda}{dt} \delta N \right) \right) dt \quad , \quad (\text{A.6})$$

となる。 I が最大となるためには任意の δX および δN について $\delta I = 0$ が成立しなければならないから、

$$\frac{\partial H}{\partial X} = 0 \quad , \quad (\text{A.7})$$

かつ

$$\frac{d\lambda}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial N} \quad , \quad (\text{A.8})$$

でなければならない。

以上により、(6.28)式および(6.29)式を横断条件として付与すれば、(6.20)式、(6.22)式、(6.27)式の条件のもとで(6.25)式のハミルトニアン H を各 t で最大化することにより、(6.23)式の目的関数が最大化できることが証明された。

編集委員 西村守央・山形陽一・中島博司・山川 卓

平成9年12月発行

編集兼発行者 〒517-0404 三重県志摩郡浜島町浜島3564-3

三重県水産技術センター

TEL 05995-3-0016

FAX 05995-3-2225

印刷所 〒516-0036 三重県伊勢市岡本1丁目2-24

(有)青木印刷

TEL 0596-24-1133

FAX 0596-24-3177