

寄稿

比較操業実験から選択性曲線を求める

SELECTモデルについて^{*1}

東海 正^{*2}・三橋延央^{*2*3}

SELECT Model for Estimating Selectivity Curve from Comparative Fishing Experiments^{*1}

Tadashi TOKAI^{*2} and Takahisa MITSUHASHI^{*2*3}

Abstract

This paper reviewed the SELECT model, an analysis method for estimating selectivity curve from comparative fishing experiments. Concerning codend selectivity of trawl, several methods of comparative fishing experiments e.g. trouser trawl and alternative haul, and their advantages were described with covered-codend method. In general, catch numbers of each length class in a test gear are compared with those in a control gear to obtain size-selectivity of the test gear. It has been however pointed out that a traditional analysis method by POPE *et al.* has two problems. First, data of any length classes with no fish in the control gear are discarded in the calculation procedure of "proportion retained", the ratio of test gear catch to control gear catch. Next, while the numbers of fish encountering the two gears are assumed to be equal in this method, catch numbers by the test gear are often higher than by the control codend in length classes of larger fish. The problems in alternate haul experiments for haddock were illustrated as an example. The SELECT model by MILLAR and WALSH is free of the above problems concerning "proportions". This model fits a function containing a split parameter p and a selectivity curve for proportion of fish encountering the test gear to the total number of fish. For instance, trawl selectivity is usually expressed with logistic curve. Parameter p is the expected proportion of fish, which indicates relative fishing efficiency of the test gear to the control one under controlled fishing effort. The parameters are determined by maximum likelihood analysis. The SELECT model is applicable for analyzing comparative catch data of hooks, gillnets and trap-nets. In appendix of this paper, MS-Excel sheet for the SELECT model was demonstrated and "Solver" made allowance of obtaining parameters to maximize the log-likelihood function on it.

1998年4月1日受付 1998年5月21日受理

^{*1} 本稿は、1997年3月に西海区水産研究所で開催された東シナ海・黄海資源研究会で行った発表、及び国際協力事業団(JICA)の行う技術協力プロジェクトの一環としてアルゼンティン国立水産開発調査研究所(INIDEP: Instituto Nacional de Investigacion y Desarrollo Pesquero, Argentina)で行った網目選択性解析方法についての研修で使用した資料を元に作成した。

^{*2} 東京水産大学
Tokyo University of Fisheries, 4-5-7, Konan, Minato-ku, Tokyo 108-8477, Japan

^{*3} 元JICA長期派遣専門家

1. はじめに

漁具の漁獲特性(例えば、効率や選択性)を求めるために、調査対象の漁具とその対照実験となる漁具を用いた比較操業実験がしばしば行われる。底曳網におけるコッドエンド選択性曲線のパラメータを推定するときにも、この比較操業実験が行われる。こうした実験では、底曳網の調査対象となる大きな目合と非選択と見なすことができる小さな目合のコッドエンドの漁獲物体長組成を比較する。本稿では、まず底曳網における比較操業実験法を、カバーネット法と比較しながら概説する。次に、比較操業実験の一種である交互操業実

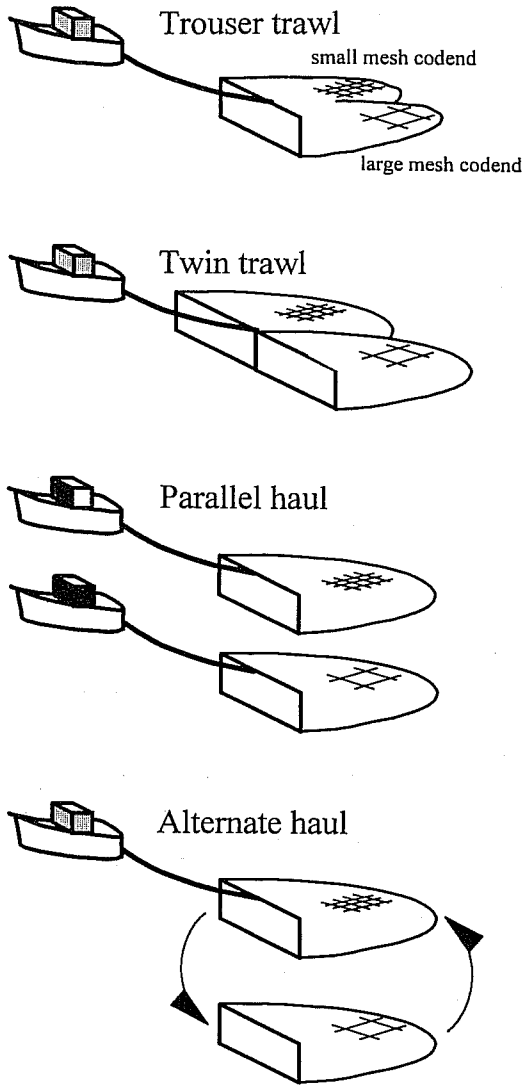


Fig. 1. Four different "paired gear" methods for measuring whole gear selectivity of trawl.

験で得られたハドック (*haddock* *Melanogrammus aeglefinus*) のデータ (POPE *et al.*, 1975) を具体例として、従来用いられてきた比較操業実験のデータの解析方法を、その問題点とともに述べる。そして、そうした問題を解決するために、MILLARによって提案された SELECT モデル (Share Each Length's Catch Total) について解説し、同じデータに対して適用した結果を示す。また、この比較操業実験は、底曳網だけに限らず、その他の漁具、例えば刺網、釣り、かご網などの

選択性を求めるためにも用いられる。最後に、そうした資料の解析に SELECT モデルが適用された例についても紹介する。なお、このモデルは、海外において選択性を解析するための標準的な方法となっている (WILEMAN *et al.*, 1996)。

2. 底曳網選択性操業実験におけるカバーネット法と各種の比較操業実験法

種々の漁具の漁具選択性を求めるために様々な操業実験法が用いられている。特に、底曳網では、種々の実験方法やデータ解析方法の開発や改良が盛んに行われてきた。そこで、まず底曳網の網目選択性を求める調査方法を取り上げる。これには主にカバーネット法 (covered codend method) と比較操業法 (paired gear method) がある。前者は、コッドエンドの網目を抜けた魚をカバーネットで回収するために体長別の選択率が容易に求められるが、カバーネットによる masking 効果などの問題点がある。このカバーネット法は、底曳網の特定の網部分、特にコッドエンド網目選択性を求めるために用いられる。このようにコッドエンド網目選択性が注目される理由は、底曳網に入った魚は、ほとんどの魚種の場合、コッドエンドにまで集められた後にコッドエンドの網目から抜けるためである。このことから底曳網の選択性が主にコッドエンドの網目によると考えられた。一方、後者の比較操業法では、海中の資源と同じ魚種組成や体長組成で漁獲できる漁具の漁獲物と、調査対象である漁具の漁獲物の魚種組成や体長組成を比較することによって、その魚種選択性やサイズ選択性を求める。網目選択性の場合で言えば、十分に小さな目合の袋網によって得られた漁獲物の体長組成は、海中の資源と同じであると仮定している。

底曳網の比較操業法には、このように小さな目合の網と調査対象の目合の網を用いる方法として、次のようなものがある (Fig. 1)。ズボン式網法 (Trouser trawl method, コッドエンド部分に二つの袋網を取り付けたものを使用して操業する) や中仕切網法 (Trouser trawl method with a vertical separator panel, コッドエンドを垂直に張られた仕切網で二つに分けたものを使用して操業する)、同時並行操業法 (Parallel haul method, 2 隻の船がそれぞれの網を同時に並行して操業する)、交互操業法 (Alternate haul method, 同じ船が二つの網を交互に用いて操業する) に (青山, 1965)、最近では並べて取り付け二つの

網を1隻で曳網するツイントロール法(Twin trawl method)がある(WILEMAN *et al.*, 1996).

カバーネット法ではmasking効果など通常の漁具にないカバーネットの装着による影響が問題とされた。比較操業法のいくつかも、使用する網や操業方法が通常の操業を再現しているか問題である。ズボン式網は通常の漁具とは形状が異なる。ツイントロール法は、漁具は通常のものと同じとしても、本来は1隻が1網を曳くところを、2網を曳く点で異なる。一方、同時並行操業法と交互操業法では、漁具も操業方法も通常の状態で行うことができる。

解析方法が十分に発達する以前は、青山(1965)の指摘のように、比較操業法では小さな目合の袋網と調査対象となる大きな目合の袋網に、対象生物である魚が同じ尾数だけ入ることが必要とされてきた。ズボン式網法や中仕切網法では網内に入った魚を二つの袋網に分けるので、この点は期待できる。また、ツイントロール法も二つの網が隣接しているので、このような可能性がある。しかし、同時並行操業法では、操業を行う2隻の漁船の能力差やわずかな曳網位置のずれが曳網ごとの漁獲量の違いを引き起こす。また、交互操業法でも、曳網位置の違いによって同じ資源に対する操業が保証できず、入網する魚の尾数に差が生じる可能性が高い。これらのことから、ズボン式網法から交互操業法になるに従って、比較するべき二つの網に入る魚の数が等しいと仮定することが難しくなる。

このような比較操業法の各種が持つ問題点から、従来は比較操業法を避けて選択率を簡便に求められるカバーネット法が用いられた。しかし、本来はカバーネット法の結果が適正であるためには、masking効果無くすための枠付きカバーネット(Hoop covernet)の導入(WILEMAN *et al.*, 1996)や、カバーネットの影響を評価すること(例えば、TOKAI *et al.*, 1990)などが必要である。これに対して比較操業法では通常の漁具には装着されていないカバーネットによるmasking効果などの影響を考慮する必要がない。また、カバーネット法が特定の網部位、特にコッドエンドの網目選択性だけを求めているが、最近では、コッドエンドだけでなく漁具全体の選択性、例えば、網口での選択性や身網途中の網目からの逃避の重要性が説かれ始めている(有元ほか, 1997)。比較操業法では、得られた漁獲物の魚種組成や体長組成を海中の資源のそれらと比べることによって選択性を求めるので、コッドエンド以外の網口などを含めて漁具全体の選択性を求めている。

つまり、コッドエンドの目合を変えた場合など、コッドエンドの網目選択性以外に、例えば網内の水流変化が魚の行動に影響を及ぼした結果としての選択性の変化なども検討できる。こうした利点に加えて、コンピュータの発達とともに後述する解析段階の問題点がここで紹介するSELECTモデルによって克服され、比較操業法による選択性曲線推定の有効性が見直されている(WILEMAN *et al.*, 1996)。

3. POPE *et al.*(1975)による解析方法

POPE *et al.*(1975)が比較操業実験から網目選択性を求めようとした際に、次の二つの仮定をおいた。まず、大きな目合の袋網(大目袋網)と小さな目合の袋網(小目袋網)の二つの袋網を操業したときに、大目袋網に入る魚の尾数は小目袋網のそれと同じである。さらに、体長 l における小目袋網での漁獲尾数 n_{sl} は海中の資源と同じ体長組成を示す。これらの仮定のもとで、体長 l において大きな目合の袋網による漁獲尾数 n_{Ll} を小目袋網での漁獲尾数 n_{sl} と比較することで、大きな目合の袋網の網目選択率 r_l を次式(1)で求めた。

$$r_l = \frac{n_{Ll}}{n_{sl}} \quad (1)$$

しかし、この方法では大きく二つの問題点が生じた。まず、大目袋網の漁獲尾数が小目袋網より多くなる場合があった。実際に、ズボン式網法でさえも、網目を抜けないような十分に大きな体長で、大目袋網における漁獲尾数が小目袋網に比べて多くなった(WALSH *et al.*, 1992)。交互操業実験によるハドックのデータ Table 1の例でも、体長31cm以上で式(1)によって計算した選択率 r_l の多数が1を超え、カバーネット法と同様に当てはめたlogistic式はこれらの選択率をうまく表現できない(Fig. 2)。POPE *et al.*(1975)は、こうした2つの網間の漁獲効率の差が生じた原因の一つとして、異なる目合の網間におけるコッドエンドを通る水の流れの違いを示唆している。青山(1980)は、ズボン式網法(中仕切網法)でさえも、網口が曳網方向と垂直にならないことなどによって、それぞれの網に入る魚の数に差が生じる可能性を指摘している。また同時並行操業法や交互操業法の場合におけるトン数や馬力などの漁船の能力差や海域における魚の分布の不均一性などによってもこの仮定の成立が難しくなる。そして、操業実験データでは漁獲尾数が少ないときに偶然にいずれかの網に偏って魚が多くはいることが生じる。

Table 1. Alternative hauls haddock data from Table II of Pope *et al.* (1975)

Length(cm) codend	Number in control codend	Number in Experimental codend
24	1	0
25	1	0
26	3	0
27	14	1
28	30	5
29	49	19
30	60	29
31	50	51
32	70	91
33	108	120
34	88	118
35	84	107
36	68	78
37	37	52
38	33	40
39	12	17
40	5	17
41	6	14
42	10	10
43	1	4
44	6	6
45	2	2
46	1	5
47	0	1
Total	739	787

The experimental and control codends used 87mm and 35mm mesh respectively.

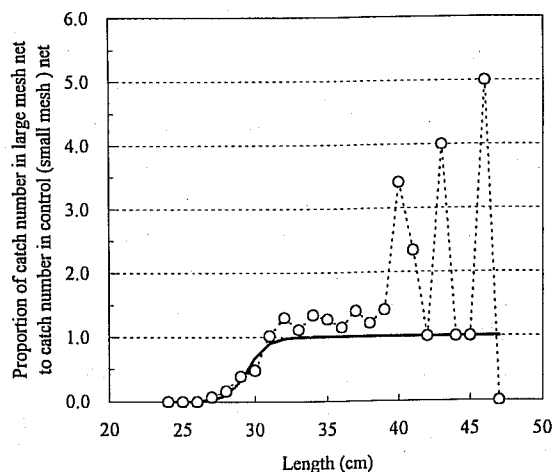


Fig. 2. Plot of proportion retained (ratio of large mesh catch to small mesh control catch).

また、漁獲尾数は整数値であるために特に漁獲尾数が少ないと、式(1)で求めた選択率が真の値と一致するとは限らない。例えば、Fig. 2で、特に漁獲尾数が少ない体長40cm以上の階級では、選択率が大きく変動していることなどである。

このようなときに、従来は大目袋網の漁獲尾数が小目袋網より大きくなった体長階級では、小目袋網の漁獲尾数を大目袋網の漁獲尾数に置き換えて、式(1)の選択率が1を超えないように補正を行った。その後、POPE *et al.* (1975)は、十分に大きな体長の範囲で大目袋網と小目袋網の漁獲尾数の比を求め、この値を用いて小目袋網での体長組成を補正した。この場合でも、小目袋網での体長組成を補正することには変わりなく、その補正係数にどの程度統計的に意味があるのか明らかでない。

実際の計算上もう一つ問題がある。小目袋網の漁獲尾数 n_{sl} が0の体長では、式(1)の選択率は定義されない。Table 1における体長47cmの漁獲尾数がこれに当たる。また、この式(1)で定義される選択率は0から無限大の範囲を持つこと($r_l = 0 \sim \infty$) になり、いくつかの値は非常に大きな値をとる (Fig. 2)。

4. SELECTモデル (MILLAR, 1992; MILLAR and WALSH, 1992)における計算方法

上述した二つの問題を避けるために考えられた推定方法(SELECTモデル)について紹介する。

1) 大目袋網による保持割合の導入

まず、後者の式(1)における計算上の問題点について扱う。式(1)の漁獲尾数の比を扱う代わりに、次式のように両方の目合の袋網で漁獲された尾数のうちで大目袋網によって漁獲された割合を求める。

$$\phi_l = \frac{n_{LI}}{n_{SI} + n_{LI}} \quad (2)$$

この式(2)では、式(1)のように0の値での除算はなくなり、実際にTable 1の体長47cmでも ϕ_l は1として求められている。つまり、この式(2)によれば ϕ_l はすべての数値は0から1の範囲に収まり、式(1)のように極端に大きな値が求まることはない (Fig. 3)。いま大目袋網の選択性曲線が体長 l を変数として以下のlogistic式で表されるとする (POPE *et al.*, 1975)。

$$r(l) = \frac{\exp(a + bl)}{1 + \exp(a + bl)} \quad (0 < r(l) < 1) \quad (3)$$

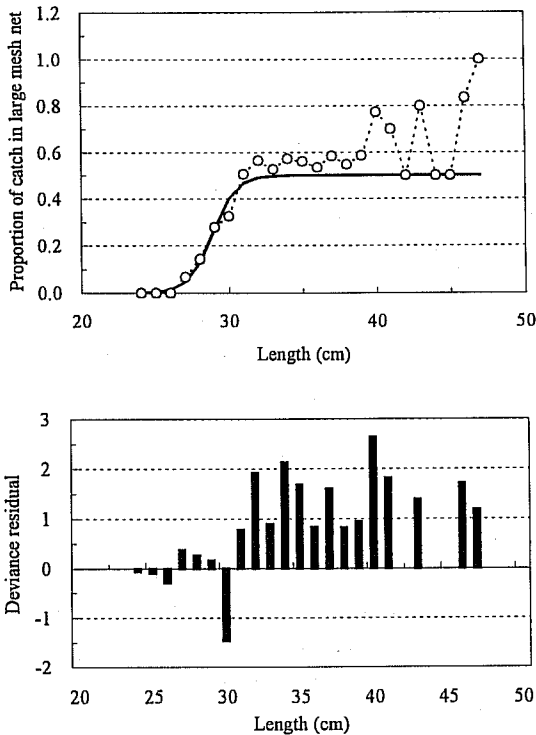


Fig. 3. Fit of equal split model curve to the proportion taken in the large mesh net of the total catch. Plot of the proportion taken in the large mesh codend to the total catch and fitted equal split model curve (above). Standardized residual of each length (below).

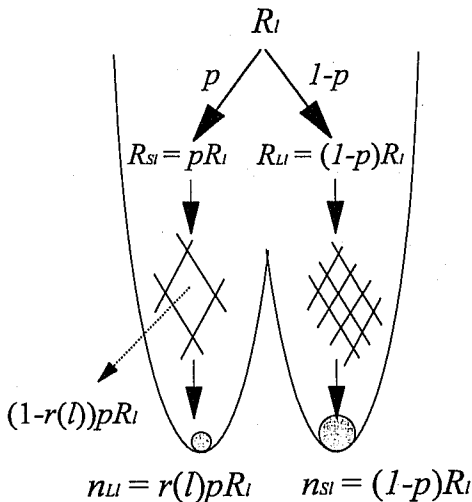


Fig. 4. Estimated split model with split parameter, p .

ただし、ここで a と b は logistic 式のパラメータである。このとき、 ϕ_l が選択性の関数 $r(l)$ を用いてどのように表せるかを次に考える。

2) Equal split model

従来と同様に、小目袋網と大目袋網に入る魚の尾数がすべての体長で同じと仮定した簡単な場合について、 ϕ_l を選択性の関数 $r(l)$ で表すことを考える。このモデルを MILLAR and WALSH(1992) は魚が二つの袋網へ等分されるという意味で Equal split model と呼んでいる。この仮定の下で大きな網目から魚が逃げない場合には、式(2)は 0.5 となる。ここで、取り扱う体長の範囲では小目袋網の選択率は 1 と仮定している。このとき、式(2)の ϕ_l を表す体長 l の関数 $\phi(l)$ は logistic 式 $r(l)$ を用いて次のように表すことができる。

$$\begin{aligned}\phi(l) &= \frac{r(l)}{1 + r(l)} \\ &= \frac{\exp(a + bl)}{1 + 2\exp(a + bl)}\end{aligned}\quad (4)$$

ただし、 $0 < r(l) < 1$ であるので、 $0 < \phi(l) < 1/2$ である。

ここで、カバーネット法において logistic 式パラメータを求めたのと同じように、体長別に式(2)の値に対して式(4)の関数を当てはめることで (Fig. 3), logistic 式 $r(l)$ のパラメータを求めることができる。このパラメータの推定には、後述するように最尤法を用いることができる。しかし、Fig. 3 でも体長 31 cm 以上では、式(2)の値が曲線の上側に並んでいる。つまり、このモデルの場合でも、先の POPE *et al.* (1975) の方法で指摘した前者の問題、二つの目合の網間に均等に魚が入ると仮定した点が問題として残る。

3) Estimated split model

MILLAR(1992) と MILLAR and WALSH(1992) は、両方の網に入った魚のうちで大目袋網に分割されて入った魚の割合を分割率として導入した (Fig. 4)。まず体長 l で大目袋網と小目袋網に入る魚の数をそれぞれ R_{Ll} と R_{Sl} とし、その合計を R_l とする。さらに分割率パラメータ $p = R_{Ll}/R_l$ で表すと、大目袋網と小目袋網に入る魚の数をそれぞれ pR_l と $(1-p)R_l$ で表すことができる。大目袋網に入った後に網目を抜けずに保持される尾数、つまり大目袋網での漁獲尾数 n_{Ll} は $pR_l r(l)$ となる。一方、小目袋網の小さな目合の網目から魚は抜けなくすることから、小目袋網の漁獲尾数 n_{Sl} は $(1-p)R_l$ となる。このとき Equal split model の式

(4)と同様に、体長 l の関数 $\phi(l)$ は logistic 式とそのパラメータによって次式で表わされる。

$$\begin{aligned}\phi(l) &= \frac{p \cdot r(l)}{1 - p + p \cdot r(l)} \\ &= \frac{p \cdot \exp(a + bl)}{1 - p + \exp(a + bl)}\end{aligned}\quad (5)$$

ただし、ここでは $0 < r(l) < 1$ より、 $0 < \phi(l) < p$ となる。

4) パラメータ推定法

選択性を表す logistic 式パラメータ a と b は、式(4)で、また式(5)では分割率パラメータとともに決定できる。式(4)や(5)のパラメータ推定には、魚が網目に保持されるか網目を抜けるかを2項分布で表して、カパーネット法の解析方法と同様に最尤法を用いることができる(平松, 1992, 1993; 東海, 1997)。この場合の尤度関数は次式で与えられる。

$$L = \prod_i \frac{n_i!}{n_{Li}! \cdot n_{Si}!} \phi(l)^{n_{Li}} [1 - \phi(l)]^{n_{Si}} \quad (6)$$

ここで、 $n_i = n_{Li} + n_{Si}$ である。また、式(6)を最大にするパラメータの決定には、式(6)の対数をとって、定数部分を除いた次式の対数尤度関数を最大にするようなパラメータ a と b 、 p を求めればよい(平松, 1992, 1993; MILLAR and WALSH, 1992; WILEMAN *et al.*, 1996)。

$$\text{Log}_e L = \sum_i [n_{Li} \log_e \phi(l) + n_{Si} \log_e (1 - \phi(l))]$$

(7)

この対数尤度関数を最大にするパラメータの探索には、シンプレックスアルゴリズム(NELDER and MEAD, 1983)を用いたBASIC言語のプログラム(平松, 1992, 東海ら, 1994; TOKAI *et al.*, 1996)やFortran言語によるプログラム(MILLAR and CADIGAN, 1991)が利用されるが、表計算MS-Excelのソルバー(東海, 1997)を用いることもできる。また、式(7)を最大にするパラメータを直接に推定するのではなく、一般化線形モデル(Generalized Linear Model, GLM)によってもこれらのパラメータを推定することができ(例えば山田・北田(1997) pp. 210-218を参照)、この場合なども統計パッケージソフトSAS(MILLAR, 1993)などが利用される。

このようにして求めたパラメータの推定値には誤差が含まれる。この誤差によって、そこから求めた選択

性曲線の信頼区間を示すことなどができる。例えば、これは、二つの選択性曲線の差を統計的に比較するときや、こうした誤差を含む推定値をもとに資源管理を行ったときの影響予測の誤差を考える際に重要となる。CADIGAN and MILLAR(1992)はデータの多寡によるSELECTモデルのパラメータ推定値に生じる誤差を検討している。実際に、SUURONEN and MILLAR(1992)は、角目網と菱目網の選択性の差を統計的に検定している。付録1にパラメータ推定値の標準誤差の求め方を示した。しかし、その数式の取り扱いなどは最尤法やGLMに関するある程度の知識がないと理解しにくいので、パラメータの推定のみを必要とするならば、付録1は読み飛ばしても良いであろう。

5) 標準化残差とモデルの適合性

モデルが適合しているか評価するためには、データに対する残差を調べることが望ましい。単純に求めた各体長ごとの残差もまたその体長におけるデータ数に依存する。言い換えれば、本来、評価すべき残差は、データ数を考慮したものでなければならない。そこで、各体長階級ごとの標準化残差(standardized residuals),

$$D_i = \begin{cases} \phi_i - \phi(l) > 0 \text{ のとき} \\ + 2n_i [\phi_i \log_e \left(\frac{\phi_i}{\phi(l)} \right) + (1 - \phi_i) \log_e \left(\frac{1 - \phi_i}{1 - \phi(l)} \right)]^{1/2} \\ \phi_i - \phi(l) < 0 \text{ のとき} \\ - 2n_i [\phi_i \log_e \left(\frac{\phi_i}{\phi(l)} \right) + (1 - \phi_i) \log_e \left(\frac{1 - \phi_i}{1 - \phi(l)} \right)]^{1/2} \end{cases} \quad (8)$$

を用いる(WILEMAN *et al.*, 1996)。これは、観測データと同じ数のパラメータを持つモデルと得られたモデルの体長別の尤度比統計量にあたる(山田・北田, 1997)。この D_i の値を体長に対してプロットしたときに、系統だった偏りが認められた場合、例えば正または負の値に偏っている場合や、ある体長階級で大きな正の値が続く場合などはそのモデルが適切でないことを示している(DOBSON, 1993)。さらに、モデル全体の逸脱度(deviance)は、次式のように求められる。

$$D = \sum_i D_i^2 \quad (9)$$

これは、対数尤度比統計量とも呼ばれ、データ数を $n (= \sum n_i)$ 、パラメータ数を M とするとき近似的に $D \sim \chi^2_{n-M}$ が成り立つことを用いて、適合度を検定できる(DOBSON, 1993; 山田・北田, 1997)。Equal split

Table 2. Parameter estimates, their standard errors(S. E.) and AIC for both models

		Equal split model $p=0.5(\text{constant})$		Estimated split model $p, \text{estimated}$	
Length class number		24			
Fish number in total		1526			
Parameters	Estimates	S. E.	Estimates	S. E.	
a	-36.3	4.44	-27.7	5.78	
b	1.23	0.150	0.916	0.198	
p	0.5		0.573	0.0173	
l_{50}	29.4	0.117	30.2	0.361	
S. R.	1.78	0.217	2.40	0.519	
Parameter number	2		3		
MLL	-58.0		-47.4		
AIC	120		101		

modelとEstimated split modelのいずれが適切なモデルか検討する際にも、変数 p を0.5とする帰無仮説による尤度比検定(MILLAR and WALSH, 1992; 平松, 1992; DOBSON, 1993; 山田, 北田, 1997)を用いることができる。しかし、GLMではなく、式(7)の対数尤度を用いてパラメータを決定した場合には、最大対数尤度が得られているので、次式で示した赤池の情報量規準(AIC)によってモデルを選択することができる(平松, 1992, 1993)。

$$AIC = -2MLL + 2M \quad (10)$$

ここで、MLLは式(7)で求められた最大対数尤度の値である。Equal split modelとEstimated split modelのパラメータ数はそれぞれ2と3であり、両方のモデルでAICを求めて、いずれかAICが小さい方のモデルを適切なモデルとして選択すればよい。

5. 計算結果の例

ここでは、MS-ExcelのソルバーによりTable 1のデータを用いたEstimated split modelの計算例を付録2に、そしてその計算結果をTable 2に示した。Equal split modelでは、目合に比べて十分に大きな体長である32cm以上で、小目袋網に比べて大目袋網の漁獲尾数が多いために、Fig. 3の曲線はFig. 2と同様にプロットの下側にある。実際に、式(8)で求めた標準化残差は32cm以上のすべての体長で正の値を示

して、曲線が偏って当てはめられていることを示している(Fig. 3)。これに対して、Estimated split modelを用いた結果(Fig. 5)では、標準化残差が体長32cm以上のみならず全体に正負ほぼ均等にあり、曲線がうまく当てはまっていることを示している。このことは、Estimated split modelのAICの方が小さく(Table 2)、パラメータ p をひとつ増やしてもこちらのモデルを選ぶべきであることを示している。これは、パラメータ p が0.5ではなく、二つの網に入る魚の尾数が異なることを意味している。

これらの結果からEqual split modelとEstimated split modelによって求められたlogistic式を用いた選択曲線をFig. 6に示した。両者はわずかに異なり、Equal split modelではわずかに魚が網目を抜けにくく、選択性を過小評価していることになる。また、Estimated split modelの50%選択体長と選択レンジは30.2と2.40となり、Equal split modelの29.4と1.78に比べていずれも大きい値となった(Table 2)。

6. SELECTモデルのその他の漁具選択性への拡張

ここで紹介したSELECTモデルは、底曳網以外の他の漁具に拡張され、利用されている。底曳網と同様に袋網状でlogistic式を選択性曲線に用いることができるかご網に対して、例えば、XU and MILLAR(1993)や鍋島ほか(1995)がこのモデルを適用している。特に、XU and MILLAR(1993)は、標本採集の努力量が2種類の網で異なる場合、つまり延べ操業かご数が異なる

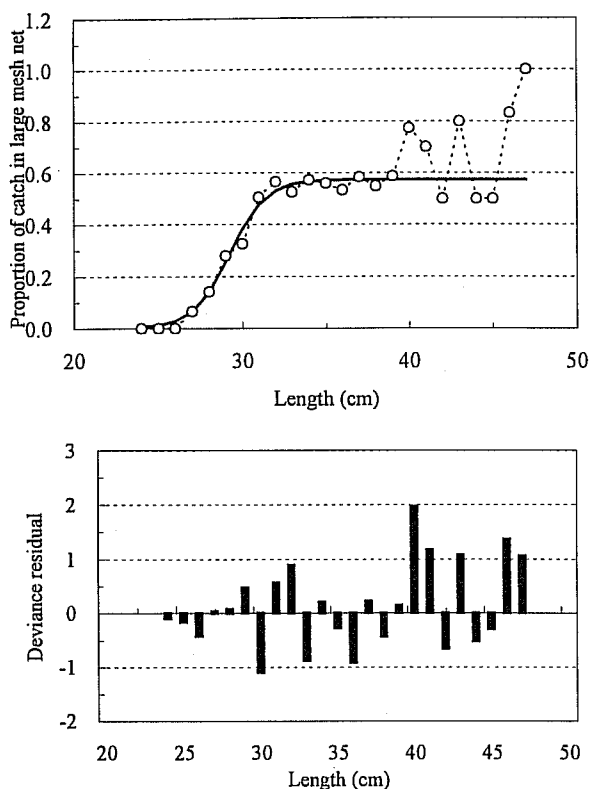


Fig. 5. Fit of estimated split model curve to the proportion taken in the large mesh net of the total catch.

Plot of the proportion taken in the large mesh codend to the total catch and fitted equal split model curve (above). Standardized residual of each length (below).

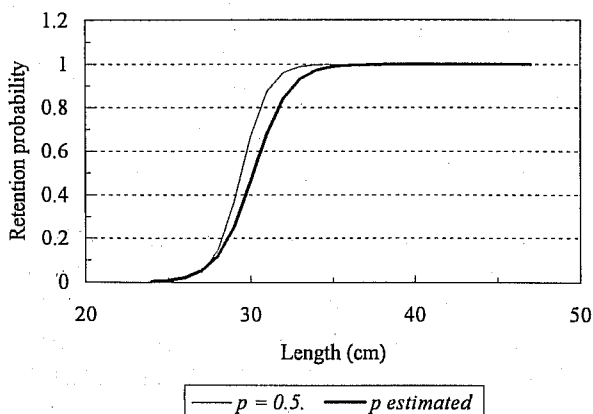


Fig. 6. Plot of fitted logistic selectivity curves.

場合のデータを用いて、ズワイガニのかご網の網目選択性を求めている。また、鍋島ら(1995)は、調査対象の目合と対照実験用の小さな目合の2種類だけではなく、数種類の目合のかご網の選択性を求めている。

本稿では、袋状の網目選択性を表現するのに適した logistic 式によって選択性が表現される場合だけを取り扱った。実際には、この SELECT モデルは logistic 式以外の曲線式にも有効で、MILLAR(1992)はこのモデルによって刺網や釣りの選択性曲線を求めている。しかし、MILLAR(1995)は、その後 SELECT モデルによって釣り鐘型の選択性を示す刺網や釣りの選択性を決定するには、その漁具の漁獲物体長組成だけではなく、対照実験として非選択的な漁獲物体長組成が必要であるとしている。この点は、刺網の選択性の解析に種々採用されている手法(参照 HAMLEY, 1975)を併用することで改善可能だろう。

7. SELECTモデルの利点

この SELECT モデルにおける分割率のパラメータ p は、比較操業実験で努力量(例えば、漁具数や操業回数)が同じときには、用いられた二つの網の相対的な漁獲効率の違いを表す。底曳網の場合では、 $p/(1-p)$ は小目袋網に対する大目袋網の相対的な漁獲効率を表す。また、努力量が異なる場合では、それぞれ p と $1-p$ をそれぞれの漁具の努力量で標準化すれば、同様に相対的な効率を求めることができる。実際に、努力量が異なる場合を XU and MILLAR(1993)は取り扱っている。これまで、漁具の比較操業実験から漁獲効率の比較が論じられる際に、しばしば選択性を考慮することなく単純に漁獲尾数や重量の比を相対的な漁獲効率をする場合があった。つまり、漁具間のサイズ選択性の違いによって小さな体長での漁獲尾数や漁獲重量の差が生じた場合も、それがそのまま効率の差として取り扱われたものがある。この点で、ここで紹介した SELECT モデルで求められた分割率のパラメータ p によって、logistic 式の場合にはサイズ選択性が影響しない程度に十分大きな体長における効率の違いを表すことができ、漁獲性能の差をサイズ選択性とそれを含まない効率にそれぞれ分けて求めることができる。このようにこの SELECT モデルは、漁獲性能のうちで、選択性だけでなくその相対的な効率を比較する際にも有効な手法である。

選択性を求めようとしている漁具と対照実験となる漁具による操業を同時に行わなくとも、これらの漁獲

物体長組成があればこのSELECTモデルによって調査対象漁具の選択性を求めることができる。Xu and MILLAR(1993)が行ったズワイガニのかご網の選択性も、目合の異なる二つの漁具それぞれに漁獲物の測定データを集めて解析を行っている。

このようにSELECTモデルは、選択性だけに限らず一般的に二つの体長組成の違いを表現するものである。例えば、漁獲物における投棄と出荷の選別が魚の大きさに依存するとき、投棄漁獲物と出荷漁獲物の体長組成を用いることで、体長に関する利用度曲線を求めることもできる。従来は、船上での選別の状況を調べるためには、一つの網からの投棄漁獲物と出荷漁獲物を標本として得て、船上での選別率を求めている(東海, 1993)。特に、小型の個体が投棄されて、選別をlogistic式で表されるときに、このモデルによって、操業で得られた漁獲物標本の体長組成と市場での測定によって得られた体長組成を用いて、船上で行われる選別曲線を求めることができる。

このように本モデルは非常に応用性が高いモデルではあるが、比較する体長組成の違いが、着目している要因によるものかを明確にする必要がある。具体的には、二つの漁具の選択性に着目している場合には、操業実験によって得られたそれらの体長組成の違いはすべて漁具の選択性として考えることになる。この前提として、二つの漁具に入る魚の体長組成の違いに、漁具以外の要因によるものが含まれてはならない。例えば、異なる場所で操業された二つの漁具の体長組成に対して、その漁場間で資源そのものにある体長組成の差が影響を及ぼすかもしれない。本モデルの適用に際しては、こうした点に十分留意する必要がある。

謝 辞

本稿の草稿に対して有益な意見をいただきました東京水産大学北田修一博士、遠洋水産研究所平松一彦博士、西海区水産研究所梁 振林博士に感謝します。また、西海区水産研究所の時村宗春博士と国際協力事業団アルゼンティン水産資源評価管理計画チームリーダー千國士郎博士には、それぞれ本稿をまとめる端緒を与えていただき感謝いたします。

引用文献

- 青山恒雄 (1965) 底びき網の網目の選択作用。日水誌, 31, 848-861.
- 青山恒雄 (1980) 底魚資源。恒星社厚生閣, 東京, pp. 102-116.
- 有元貴文, 角田篤弘, F. CHOPIN (1997) 漁獲行為遭遇後の生残性。月刊海洋, 29, 351-356.
- CADIGAN, N. G. and R. B. MILLAR (1992) Reliability of selection curves obtained from trouser trawl or alternate haul experiments. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 49, 1624-1632.
- DOBSON, A. J. (1993) 統計モデル入門 - 一回帰モデルから一般化線形モデルまで -, (田中 豊, 森川敏彦, 栗原孝次訳)。共立出版, 東京, 176pp.
- HAMLEY, J. M. (1975) Review of gillnet selectivity. J. Fish. Res. Bd. Can., 32, 1943-1969.
- 平松一彦 (1992) 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 -. 遠水研研報, 29, 57-114.
- 平松一彦 (1993) 水産資源学における最尤法とAICの適用例, (松宮義晴編「水産資源解析と統計モデル」), 恒星社厚生閣, 東京, 9-21.
- 鍋島靖信・安部恒之・山本圭吾・大本茂之・東海 正 (1995) マアナゴの資源管理のための漁獲制限体長の設定とアナゴかごの適正目合の選定およびその効果の予測について。大阪水試研報, (9), 41-55.
- MILLAR, R. B. (1992) Estimating the size-selectivity of fishing gear by conditioning on the total catch. J. Am. Stat. Assoc., 87, 962-968.
- MILLAR, R. B. (1993) Analysis of trawl selectivity studies (addendum): implementation in SAS. Fish. Res., 17, 373-377.
- MILLAR, R. B. (1995) The functional form of hook and gillnet selection curves cannot be determined from comparative catch data alone. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 52, 883-891.
- MILLAR, R. B. and N. G. CADIGAN (1991) A FORTRAN program for fitting selectivity curves to trouser trawl data. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci., (1783): 1-19.
- MILLAR, R. B. and S. J. WALSH (1992) Analysis of trawl selectivity studies with an application to trouser trawls. Fish. Res., 13, 205-220.
- NELDER, J. A. and R. MEAD (1983) A simplex method for function minimization. Comput. J., 7, 308-313.
- POPE, J. A., A. R. MARGETTS, J. M. HAMLEY, and E. F. AKYUZ (1975) Manual of methods for fish stock assessment. Part III. Selectivity of fishing gear. FAO Fish. Tech. Pap., (41)Rev. 1, 46p.
- SUURONEN, P. and R. B. MILLAR (1992) Size selectivity of diamond and square mesh codends in pelagic herring trawls: only small herring will notice the difference. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 49: 2104-2117.
- 東海 正 (1993) 瀬戸内海における小型底びき網漁業の資源管理 - 投棄魚問題と網目規制 -. 南西水研報, 26, 31-106.
- 東海 正 (1997) MS-Excelのソルバーによる曳網の網目選択性logistic式パラメータの最尤推定。水産海洋研究, 61, 288-298.
- TOKAI, T., H. ITO, Y. MASAKI and T. KITAHARA (1990) Mesh selectivity curves of a shrimp beam trawl for southern rough shrimp *Trachypenaeus curvirostris* and

- mantis shrimp *Oratosquilla oratoria*. Nippon Suisan Gakkaishi, **56**, 1231-123.
- 東海 正, 大本茂之, 松田 皎 (1994) 瀬戸内海における小型底曳網の非有用投棄魚に対する網目選択性. 日水誌, **60**, 347-352.
- TOKAI, T., S. OMOTO, R. SATO, and K. MATUDA (1996) A method of determining selectivity curve of separator grid. Fish. Res., **27**, 51-60.
- WALSH, S. J., R. B. MILLAR, C. G. COOPER, and W. M. HICKEY (1992) Codend selection in American plaice: diamond versus square mesh. Fish. Res., **13**, 235-254.
- WILEMAN, D.A., R.S.T. FERRO, R. FONTEYNE, and R.B. MILLAR (1996) Manual of Methods of Measuring the Selectivity of Towed Fishing Gears. ICES Cooperative Research Report, No. 215., 126p.
- XU, X. and R. B. MILLAR (1993) Estimation of trap selectivity for male snow crab (*Chionoecetes opilio*) using the SELECT modeling approach with unequal sampling effort. Can. J. Fish. Aquat. Sci., **50**, 2485-2490.
- 山田作太郎, 北田修一 (1997) 生物資源統計学. 成山堂, 東京, 263p.

付録1 パラメータ推定値の標準誤差

ここで推定した logistic 式パラメータ a , b と分割率を表すパラメータ p の推定値の分散と共分散は, Fisher 情報行列 I の逆行列 W の要素として求めることができる (平松, 1992; MILLAR and WALSH, 1992; WILEMAN *et al.*, 1996). したがって $W=I^{-1}$ として, 求めるべき各パラメータの分散と共分散は以下になる.

$$Var(\hat{a}) = W_{11} \quad (11)$$

$$Var(\hat{b}) = W_{22} \quad (12)$$

$$Var(\hat{p}) = W_{33} \quad (13)$$

$$Cov(\hat{a}, \hat{b}) = W_{12} = W_{21} \quad (14)$$

$$Cov(\hat{a}, \hat{p}) = W_{13} = W_{31} \quad (15)$$

$$Cov(\hat{b}, \hat{p}) = W_{23} = W_{32} \quad (16)$$

なお, Fisher 情報行列 I の各要素は以下の式で求められる.

$$I_{12} = \sum_i \frac{n_i \cdot d(l)^2}{\phi(l) \cdot (1-\phi(l))} \quad (17)$$

$$I_{12} = I_{21} = \sum_i \frac{n_i \cdot l \cdot d(l)^2}{\phi(l) \cdot (1-\phi(l))} \quad (18)$$

$$I_{22} = \sum_i \frac{n_i \cdot l^2 \cdot d(l)^2}{\phi(l) \cdot (1-\phi(l))} \quad (19)$$

ここで, $d(l)$ は次式に示すように, $\phi(l)$ を a に関して偏微分したものである.

$$d(l) = \frac{p(1-p)\exp(a+bl)}{[1-p+\exp(a+bl)]^2} \quad (20)$$

Equal split model の場合では, 上式に $p=0.5$ を代入して 2×2 行列の Fisher 情報行列を求めればよい. Estimated

split model の場合における Fisher 情報行列の残りの要素は, 以下の通りである.

$$I_{13} = I_{31} = \sum_i \frac{n_i \cdot d(l) \cdot h(l)}{\phi(l) \cdot (1-\phi(l))} \quad (21)$$

$$I_{23} = I_{32} = \sum_i \frac{n_i \cdot d(l) \cdot h(l)}{\phi(l) \cdot (1-\phi(l))} \quad (22)$$

$$I_{33} = \sum_i \frac{n_i \cdot h(l)^2}{\phi(l) \cdot (1-\phi(l))} \quad (23)$$

ただし, $h(l)$ は, $\phi(l)$ を p に関して偏微分した次式である.

$$h(l) = \frac{\exp(a+bl)[1+\exp(a+bl)]}{[1-p+\exp(a+bl)]^2} \quad (24)$$

また, サイズ選択性を評価する際に, 指標として, 網に入った魚の半数が保持される体長, 50% 選択体長 (50% retention length または 50% selection length), l_{50} と選択性の鋭さを示す選択性レンジ S.R. (selection range, $=l_{75}-l_{25}$) が用いられる. この 50% 選択体長 l_{50} と選択レンジ S.R. は, 次のように logistic 式パラメータ a と b で表せる.

$$50\% \text{ 選択体長 } l_{50} = -a/b \quad (25)$$

$$\text{網目選択性レンジ S.R.} = 2 \log_e(3) / b \quad (26)$$

これら 50% 選択体長 l_{50} と選択レンジ S.R. 推定値の分散についても以下の式で求められる (山田・北田 (1997) の pp. 215-216 を参照).

$$Var(\hat{l}_{50}) = \frac{Var(\hat{a}) + 2\hat{l}_{50}Cov(\hat{a}, \hat{b}) + \hat{l}_{50}^2 Var(\hat{b})}{\hat{b}^2} \quad (27)$$

$$Var(S.R.) = \left\{ \frac{2 \log_e(3)}{\hat{b}^2} \right\}^2 \cdot Var(\hat{b}) \quad (28)$$

付録2 MS-Excel ソルバーによるパラメータ推定

ここでは, Table 1 の交互換業法によるハドックの漁獲物体長組成に対して, SELECT モデルの Estimated split model を適用した MS-Excel のワークシートの例を Appendix Figure に示す. この結果から描いた図が Fig. 5 に該当する. またそのワークシートにおける各セルの内容と本文及び付録中で関連する式の番号を Appendix-table に示した. データの入力 ワークシート上のセル A16:C39 は Table 1 のデータである. 列 A が体長階級, 列 B と C がそれぞれ大目袋網と小目袋網の体長別の漁獲尾数である.

パラメータ初期値の概算と入力 選択性曲線 logistic 式のパラメータ a と b および p の初期値をそれぞれセル G5 と G6 および G7 に入力する. MS-Excel ソルバーで用いられている最適化アルゴリズムには準ニュートン法と共役傾斜法があり, いずれの場合も計算を繰り返して最適解を探索する. したがって, すみやかに計算を収束させるには最適解に十分に近い初期値を採用することが望ましい. そこで, この初期値を大まかに見積もる方法を以下に示す. まず, 二つの漁具で努力量が等しいときには, ほとんどの場合にパラメータ p の初期値を 0.5 として良い. また, 式 (25) と (26) より, 50% 選択体長 l_{50} と網目選択性レンジ S.R. によって logistic 式のパラメータ a, b を表すことができる.

SELECTモデルによる選択性曲線推定法

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Logistic Parameter Estimates of Selectivity Curve in Comparative Fishing Experiment with Solver on MS-Excel											=+SM\$5*\$J\$6
2	Estimated split model (p estimated)											=2*LN(3)/SM\$6
3	Data				$S(l) = \exp(a+bl) / [1 + \exp(a+bl)]$	=SQRT(SQ\$10)		Initial value				
4	Data from Pope et al.(1975)				Parameters	Standard error		-8.78889831		(L50% =		40
5	Nominal mesh size				$a = -27.65412$	5.779332392		0.21972246		S.R. =		10
6	87 (mm)				$b = 0.9164449$	0.19834373		=SQRT(SR\$11)				
7	Control small mesh size				Split parameter $p =$	0.572843	0.017347138			Sum of log-likelihood		=2*J9+2*3
8	35 (mm)				Changing cells		=SQRT(SS\$12)			=SUM(J16:J39)		
9										-47.3743835		AIC
10					L50% =	30.175432	0.360818844			Target cell		
11					S.R. =	2.3975522	0.518895833					
12	Catch number				Proportion of catch in large mesh net					=SQRT((SQ\$10+2*SQ\$10*SR\$10+SR\$11*SQ\$10*SQ\$10)/(SQ\$6*SQ\$6))		
13	Mesh	Mesh			$F = p \exp(a+bl) / [1 + \exp(a+bl)]$					=SQRT((2*LN(3)/(SQ\$6*SQ\$6))^2*SR\$11)		
14	Length	87mm	35mm	Total	$N_L / (N_L + N_S)$	$F(S(l), p \text{ estimated})$			Likelihood or log-likelihood			estimated from $S(l)$
15	(cm)	N_L	N_S	catch								
16	24	0	1	1	0	0.0046351		0.99536495	-0.00464583			0.00347
17	25	0	1	1	0	0.0114504		0.98854958	-0.01151648			0.00864
18	26	0	3	3	0	0.0277968		0.9189061	-0.08457134			0.02132
19	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~
39	47	1	0	1	1	0.5728429		0.57284294	-0.5571437			1

	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
1										
2										
3										
4										
5	Model									
6	deviance									
7	14.83721									
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14	Deviance									
15	residual	$d(l)$								
16	-0.09639	0.004598	0.004582	0.109958	2.638994	0.018854	0.018789	0.450936	0.077053	
17	-0.15177	0.011222	0.011125	0.278115	6.952883	0.046259	0.045859	1.146487	0.189049	
18	-0.41127	0.026448	0.077652	2.01896	52.49297	0.110441	0.324258	8.430707	1.354026	
19	~	~	~	~	~	~	~	~	~	
39	1.055598	4.92E-08	9.91E-15	4.66E-13	2.19E-11	1	2.01E-07	9.46E-06	4.086739	

Appendix-figure. MS-Excel sheet for estimated split model of SELECT model.

$$a = -b \cdot l_{50}$$

$$= -2l_{50} \cdot \log_e(3) / S.R. \quad (29)$$

$$b = 2\log_e(3) / S.R. \quad (30)$$

次に、体長に対する大目袋網での割合 ϕ_i をセルF16:F39で求めてFig. 5を図示する。この図で縦軸の値が0.25にあたる体

長が選択性曲線の l_{50} となり、同様に、縦軸の値が0.125と0.375がそれぞれ l_{25} と l_{75} となるので、これらの値から選択性レンジS.R.($=l_{75}-l_{25}$)を求める。これらの値を上述した式に代入してlogistic式のパラメータ初期値を決める。この計算は、セルM5とM6にそれぞれ、Fig. 5から見積もった l_{50} とS.R.を入力すると、セルJ5とJ6でlogistic式パラメータを上式を

Appendix-table. Contents in Appendix-figure, MS-Excel worksheet for Estimated split model of SELECT model

Range of addresses		Contents and referred equations	
Data			
A16:A39	Length class in cm		
B16:B39	Catch number of each length class in experimental codend of larger mesh		
C16:C39	Catch number of each length class in control codend of smaller mesh		
Calculating initial values of parameters			
M5	50% selectivity length estimated roughly from Fig. 5		
M6	Selection range(= $l_{75}-l_{25}$)estimated roughly from Fig. 5		
J5	Initial value of Logistic parameter, a calculated from "M5" and "M6"		Eq.(29)
J6	Initial value of Logistic parameter, b calculated from "M5" and "M6"		Eq.(30)
Parameters, <i>cells changed</i> in Solver			
G5	Logistic parameter, a		
G6	Logistic parameter, b		
G7	Split parameter, p		
Calculating sum of log-likelihood as an objective function, a <i>target cell</i> of Solver			
D16:D39	Total catch number of each length class		Eq.(2)
F16:F39	Proportion of each length in experimental codend to total catch number		Eq.(3)
L16:L39	Retention probability of each length estimated from logistic equation		Eq.(4)
G16:G39	Estimates of $\Phi(l)$, a function of l , length		Eq.(5)
I16:I39	Likelihood of each length		Eq.(6)
J16:J39	Log-likelihood of each length		Eq.(7)
J9	Sum of log-likelihood as <i>target cell</i>		Eq.(7)
Residuals and model checking			
N16:N39	Standardized residual of each length		Eq.(8)
N9	Deviance of whole model		Eq.(9)
M9	Value of Akaike's information criterion(AIC)		Eq.(10)
Standard error of parameters			
H5	Standard error of Logistic parameter, a		Eq.(11)
H6	Standard error of Logistic parameter, b		Eq.(12)
H7	Standard error of split parameter, p		Eq.(13)
H10	Standard error of 50% selectivity length		Eq.(27)
H11	Standard error of selection range		Eq.(28)
P6:R8	Fisher information matrix I_{ij}		
P10:R12	Covariance matrix of estimated a , b and p		Eqs.(11) – (16)
P16:R39+T16:V39	Elements of Fisher information matrix		
P16:P39	I_{11}		Eq.(17)
Q16:Q39	$I_{12}=I_{21}$		Eq.(18)
R16:R39	I_{22}		Eq.(19)
T16:T39	$I_{13}=I_{31}$		Eq.(21)
U16:U39	$I_{23}=I_{32}$		Eq.(22)
V16:V39	I_{33}		Eq.(23)
O16:O39	Partial derivative of $\Phi(l)$ with respect to a		Eq.(20)
S16:S39	Partial derivative of $\Phi(l)$ with respect to p		Eq.(24)

SELECTモデルによる選択性曲線推定法

用いて求めている。なお、得られた値が最適解かどうか確かめるために、いくつかの初期値から計算して、同じ値に収束するか確かめることも必要である。

尤度関数の計算 ワークシート上で、logistic式パラメータ a と b の初期値をセルG5:G7に入力すると、それらから計算した $\phi(l)$ 、体長ごとの大目袋網で漁獲された割合の推定値およびlogistic式から求めた選択率 $r(l)$ の推定値が、それぞれセルG16:G39とL16:L39に計算される。そして、そのパラメータ値において、式(5)と(6)に該当する尤度とその自然対数値である対数尤度がそれぞれ体長ごとにセルI16:I39とセルJ16:J39で計算される。この対数尤度の合計値が、セルJ9で求められる。また、セルM9は、セルJ9の最大対数尤度とパラメータ数から式(10)によって求めた赤池の情報量規準(AIC)の値である。さらに、式(8)による体長階級毎の標準化残差がセルN16:N39で計算されて、その総計となる式(9)がセルN9に示されている。

ソルバーの設定 ソルバーを起動した後に現れるソルバーパラメータ設定画面でJ9を“最大にするべきセル”として指定し、G5:G7を“変化するセル”に指定して、計算を実行する。その他の設定の詳しい説明は東海(1997)にある。計算は対数尤度が最大となったときに終了し、その結果を示すパラメータの最尤推定値がG5:G7に、また最大対数尤度がJ9に書き込まれている。

なお、Equal split modelの場合には、セルG7のパラメータ p の値に0.5を入力して、パラメータ設定画面で“変化するセル”の指定から除いて計算を行うか、もしくはパラメータ設定画面で p の制約条件を0.5に指定する。ただし、Equal split

modelの場合には、パラメータがlogisticパラメータの二つだけとなるので、セルM10のAIC式を“ $-2 * J9 + 2 * 2$ ”として計算する必要がある。

標準誤差の計算 パラメータ推定値の標準誤差を、それぞれセルH5:H7に求めた。また、これらの値を式(27)と(28)に代入して l_{90} とS.R.の標準誤差をセルH10とH11で求めている。このパラメータの標準誤差は、ワークシートの列O以降にある。式(11)～(16)にあたる各パラメータの共分散行列がセルP10:R12に示されている。これを求める元となったFisherの情報行列がセルP6:R8にまとめられている。この情報行列の各要素は、式(17)～(24)における体長毎の計算がO16:V39で行われて、式(17)～(19)と式(21)～(23)がセルP14:R14とT14:V14で求められている。

計算結果の図示 上述したMS-Excelのワークシートの計算結果から、以下の指定によってFig. 5とFig. 6に当たる結果のグラフをそれぞれx-yグラフと棒グラフで図示できる。まず、Fig. 5上のグラフは、X座標の値として体長を示したセルA16:A39を指定し、Y座標の値として観測値であるセルF16:F39と推定値であるセルG16:G39を、それぞれ白丸(点線)と実線(記号なし)で指定したx-yグラフである。次に、Fig. 5下のグラフは、XとY座標の値にそれぞれ体長を示したセルA16:A39と体長別の標準化残差を示したセルN16:N39を指定した棒グラフである。最終的に選択性曲線はFig. 6のように得られる。これは、セルA16:A39の体長をX座標の値として、logistic曲線式から推定した値セルL16:L39をY座標の値としたx-yグラフである。