

小型底びき網の網目選択性曲線推定モデル

佐野 二郎
(研究部)

Model for Estimating mesh selectivity curve of a shrimp beam trawl

Jiro SANO
(Research Department)

筑前海域で操業されている小型底びき網漁業の資源管理方策の1つとして魚捕り部の目合拡大をとりあげ、これまで小型魚が保護される効果や漁獲された小型エビ類の活魚出荷割合が向上し全体の単価が向上する効果が期待されることがわかってきた。今後、その実践にあたっては、目合拡大による効果を具体的な数値として求め漁業者に示し、目合拡大の必要性を普及啓発していく必要がある。

目合拡大による資源管理効果は、ある目合の網に入った魚の個体数に対して網目を抜けきれずに網内に残った個体数の割合として定義される網目選択率を求めて推定される。この網目選択率と漁獲対象物の体長の関係を論理式で表したものが網目選択性曲線であり、それを求める手法として、これまで平成2年に中央水産研究所数理生態部で監修された資源解析プログラムを用いた3次拡張スプライン関数で表現する手法が広く用いられてきた。²⁾しかし、このプログラムはN88BASICで作成されていることから操作性が悪く、また本来シグモイド型をとる曲線を複数の3次多項式により示すなど表現性にも問題が見られる。シグモイド型の曲線を推定するには初期値を反復計算で補正していく手法³⁾が知られているが、適正解に収束させるまで数多くの反復計算をおこなう必要があり多大な作業時間を要することから、これまで網目選択性曲線推定手法として用いられた事例はない。

そこで、3次拡張スプライン関数とシグモイド型曲線で表現する手法について、それぞれ求めた網目選択性曲線の適正さ、作業性を比較し課題を検討するとともに、表計算ソフトMS-Excelにアドインされたソフトソルバーにより簡易に推定するモデルの作成を試みた。

その結果、ソルバーを用いた手法は、作業性に優れ求めた網目選択性曲線も非常に適正な形状を示し、網目選択性曲線の推定手法として実用性があるとともに、他の非線形式パラメータ推定手法として応用できる可能性が認められたため報告する。

方 法

検討をおこなうための試料として、2001年9月に唐津湾でおこなった小型底びき網カバーネット試験で漁獲したアカエビの資料を用いた。試験に用いた漁具は図1に示すとおり、小型底びき網漁具の魚捕り部を切断し、替わりに目合10節、12節、14節それぞれのコードエンドを目合20節のカバーネットで覆った試験網を取り付けたものである。カバーネットによる試験では、漁獲物によるコードエンド内の目詰まり（マスキング効果）が問題となる。このマスキング効果を最小限に抑えるため、カバーネットの長さはコードエンドの1.5倍とした。¹⁾曳網時間は30分、曳網回数は2回とし、コードエンド、カバーネットそれぞれに入網したアカエビの体長区間別の尾数を計数し、その結果をもとに目合い別体長区間別の

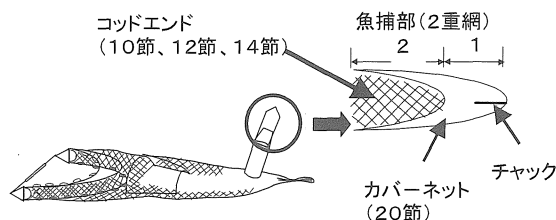


図1 カバーネット試験漁具

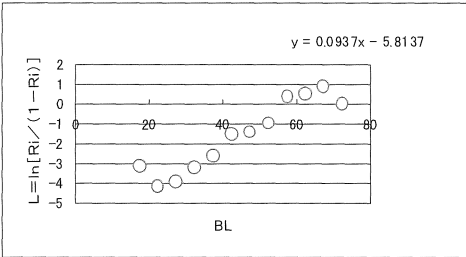
CURVEFIT. BAS操作方法

- 1 MS-DOSを起動させる。
- 2 A>のあとにN88と入力後リターンキー
- 3 RUN "CURVEFIT. BAS" と入力リターン
- 4 データ入力方法(DorK)を入力
- 5 データの入力(データは体長と網目選択率)
EX

DATA NO. 1 (X, Y) ?	12.5 ,	0
DATA NO. 2 (X, Y) ?	17.5 ,	0.041666667
DATA NO. 3 (X, Y) ?	22.5 ,	0.015570934
DATA NO. 4 (X, Y) ?	27.5 ,	0.019130435
DATA NO. 5 (X, Y) ?	32.5 ,	0.038303694
DATA NO. 6 (X, Y) ?	37.5 ,	0.068259386
DATA NO. 7 (X, Y) ?	42.5 ,	0.18018018
DATA NO. 8 (X, Y) ?	47.5 ,	0.196078431
DATA NO. 9 (X, Y) ?	52.5 ,	0.272727273
DATA NO. 10 (X, Y) ?	57.5 ,	0.591836735
DATA NO. 11 (X, Y) ?	62.5 ,	0.62962963
DATA NO. 12 (X, Y) ?	67.5 ,	0.705882353
DATA NO. 13 (X, Y) ?	72.5 ,	0.5
DATA NO. 14 (X, Y) ?	77.5 ,	1
- 6 データのプリンター出力の有無(YorN)を入力
- 7 結果出力方法(DorP)を入力
- 8 X軸及びY軸範囲の設定
- 9 グラフ作成
- 10 Xの区間とその区間を補間する区分多項式の係数の表示
EX

	A ₀	A ₁	A ₂	A ₃
【12, 40】	-45.1768	6.61382	-0.289686	4.03514E-03
【40, 55】	-3103.24	206.225	-4.5364	0.0332279
【55, 65】	-19328.8	957.14	-15.7509	0.0864165
【40, 55】	-53608.8	2324.8	-33.492	0.160474
- 11 作業終了

図2 3次拡張スプライン関数の係数を推定するCURVEFIT. BAS操作手順

- 1 Ri=体長Xiの網目選択率
Xi=体長
としたとき、縦軸に $L = \ln[Ri / (1 - Ri)]$ 、横軸にXiをとったグラフを描

グラフから傾きa0とY切片b0を読みとる。(実際には、MS-Excelの
■形近似により係数と切片を推定する)
- 2 求められた線形近似式により各体長のLの値を求め、求められたLからBerksonの表を用いてRi⁰、wiを読みとる。
- 3 各体長別のRi⁰、wiから次の数値を計算する。
- 4
$$\delta b = \frac{\sum (Ri - Ri^0) * (BLi) - \sum Wi * (BLi) \sum (Ri - Ri^0) / \sum Wi}{\sum Wi (BL)^2 - (\sum Wi * (BL))^2 / \sum Wi}$$

$$\delta a = \frac{\sum (Ri - Ri^0) - \delta b * \sum Wi * (BLi)}{\sum Wi (BLi)^2 - (\sum Wi * (BLi))^2 / \sum Wi}$$

次の線形式の傾き(a₁) a₀ + δ a
次の線形式の切片(b₁) b₀ + δ b
- 4 a₁、b₁を用いて2~3の作業に戻り、δ a、δ bが最小になるまで2~3の作業を繰り返す。

図3 Berksonの表を用いた最尤推定の手順

網目選択率を次式により求めた。¹⁾

$$\text{網目選択率} = \frac{\text{コッドエンド内での漁獲尾数}}{\text{カバーネットとコッドエンド内での漁獲尾数}}$$

求めた網目選択率をもとに10節、12節、14節それぞれの目合いにおける網目選択性曲線を、3次拡張スプライン関数により表現する手法としてMS-DOS用N88BASICで作成されたCURVEFIT.BASを用いた手法（以下「3次拡張スプライン法」と略）²⁾、Logistic式で表現する手法としてパラメータをBerksonの最尤推定で求める手法（以下「Berkson法」と略）³⁾、及びMS-Excelアドインソフトソルバーを用いた最小2乗法（以下「ソルバー最小2乗法」と略）及び最尤法（以下「ソルバー最尤法」と略）で推定する手法⁵⁾の4手法でそれぞれ求め、作業時間、労力、求めた網目選択性曲線の性質等について比較をおこなった。

3次拡張スプライン法は1つの基準曲線を複数の3次多項式をつなぎ合わせて表現するものである。この3次多項式パラメータ及び接点を求めるプログラムCURVEFIT.BAS²⁾は図2に示す作業手順に従い実行した。体長区間別の網目選択性曲線は次式で求めた。

$$R(L) = A_3L^3 + A_2L^2 + A_1L + A_0$$

R(L) ……体長Lの時の網目選択率

L ……体長

A₀, A₁, A₂, A₃ ……3次多項式のパラメータ

Logistic式パラメータの推定にあたっては、いずれの手法においても一般的に選択率0.5で対称となるシグモイド型曲線を表現する次式を使用した。

$$R(L) = 1 / (1 + \exp(a + bL))$$

R(L) ……体長Lの時の網目選択率

L ……体長

a, b ……Logistic式のパラメータ

Berkson法によるLogistic式パラメータ推定は図3に示す手順に従い実行した。³⁾

最小2乗法推定は観測値と論理値の残差平方和の和を最小とするパラメータを推定するものであり、線形近似をおこなう際によく使用される。ソルバー最小2乗法によるLogistic式パラメータ推定のためのMS-Excelシート作成例を次に示した。

【ソルバー最小2乗法】

セル範囲	入力内容
\$A\$8:\$A\$21	……体長(10~80mm)を5mm間隔で入力)
\$B\$8:\$B\$21	……コッドエンド内の漁獲尾数(A)
\$C\$8:\$C\$21	……カバーネット内の漁獲尾数(B)

\$D\$8:\$D\$21	……総漁獲尾数(A+B)
\$E\$8:\$E\$21	……選択率(A/A+B)
\$F\$8:\$F\$21	……選択率のLogistic推定値 入力式: =1/(1+exp(A8*\$F\$2+\$F\$3))
\$G\$8:\$G\$21	……残差 入力式: =F8-E8
\$H\$8:\$H\$21	……残差平方 入力式: =G8^2
\$H\$2	……ソルバーの目的セル 入力式: =SUM(H8:H21)
\$F\$2:\$F\$3	……ソルバーの変化させるセル (適正解収束時にはLogistic式パラメータになる)

最尤法による推定の考え方は次のとおりである。

網にある体長階級のN尾の魚が入り、確率pでコッドエンド内で漁獲された場合、この事象は単純ランダムサンプリングのため漁獲される確率は2項分布で表現される。よって2項分布の独立試行の定理により確率pはyの確率密度関数として次式で求められる。⁵⁾

$$p(y) = N! / \{(N-y)! y!\} \times p^y (1-p)^{N-y}$$

すべての体長階級における確率はそれぞれの体長階級の確率密度関数の積となり、この値が最大値になるとき最も適正な式が求められたといえる。ソルバー最尤法によるLogistic式パラメータ推定のためのMS-Excelシート作成例を次に示した。体長階級の積は計算機上の計算できる桁数を超えてしまうため(オーバーフロー)、これを避けるためにもソルバーの目的とするセルはそれぞれの確率密度関数の自然対数値の和とした。

【ソルバー最尤法】

セル範囲	入力内容
\$A\$8:\$A\$21	……体長(10~80mm)を5mm間隔で入力)
\$B\$8:\$B\$21	……コッドエンド内の漁獲尾数(A)
\$C\$8:\$C\$21	……カバーネット内の漁獲尾数(B)
\$D\$8:\$D\$21	……総漁獲尾数(A+B)
\$E\$8:\$E\$21	……選択率(A/A+B)
\$F\$8:\$F\$21	……選択率のLogistic推定値 入力式: =1/(1+exp(A8*\$F\$3+\$F\$2))
\$G\$8:\$G\$21	……階級毎の尤度 入力式: =combin(D8,B8)*(F8^B8)*((1-F8)^C8)
\$H\$8:\$H\$21	……階級毎の対数尤度 入力式: =Ln(G8)
\$H\$2:	……ソルバーの目的セル 入力式: =SUM(H8:H21)
\$F\$2:\$F\$3	……ソルバーの変化させるセル (適正解収束時にはLogistic式パラメータになる)

ソルバーの起動にあたっては最小2乗法、最尤法いずれの推定についても条件を反復計算回数100回、制限時

間5分とし、ソルバー最小2乗法では目的セルを最小に、ソルバー最尤法では目的セルを最大にするように設定した。

結 果

'01年9月に唐津湾でおこなった小型底びき網カバーネット試験で漁獲されたアカエビの目合い別の体長区間別漁獲尾数は表1に示すとおりである。この表から各体長区間別の網目選択率を求め表2に示した。

求められた体長区間別の網目選択率をもとにこれまでの手法である3次拡張スプライン法、Berkson法で網目選択性論理式を求めた。また、新しい手法としてソルバー最小2乗法、ソルバー最尤法の2手法で網目選択性Logistic曲線のパラメータ推定をおこなった。求めた網目選択性曲線論理式のパラメータは表3、4のとおりである。

作業に要した時間を表5に示した。3次拡張スプライン法では1作業当たり30~40分、Berkson法では約7時間要したのに対し、ソルバー最小2乗法、ソルバー最尤法ではグラフ作成のマクロを組み込むことにより数秒で網目選択性曲線の推定が可能であり、作業的にはMS-Excelアドインソフトソルバーを用いた手法が他の手法に比べ優れていた。

表1 カバーネット試験によるアカエビの漁獲尾数

BL(mm)	10節		12節		14節	
	カバーネット	コッドエンド	カバーネット	コッドエンド	カバーネット	コッドエンド
10~15	4	0	12	0	6	0
15~20	69	3	193	1	119	3
20~25	569	9	809	17	381	36
25~30	1,128	22	822	24	281	74
30~35	703	28	372	38	93	87
35~40	273	20	131	37	25	46
40~45	91	20	45	29	7	40
45~50	41	10	26	34	3	66
50~55	32	12	24	86	2	61
55~60	20	29	10	56	0	36
60~65	10	17	3	35	0	15
65~70	5	12	0	4	0	1
70~75	1	1	0	1	0	1
75~80	0	1	0	0	0	0
80~85	0	0	0	1	0	0
計	2,946	184	2,447	363	917	466

表2 アカエビの目合い別網目選択率

BL(mm)	10節	12節	14節
10~15	0	0	0
15~20	0.041667	0.005155	0.02459
20~25	0.015571	0.020581	0.086331
25~30	0.01913	0.028369	0.208451
30~35	0.038304	0.092683	0.483333
35~40	0.068259	0.220238	0.647887
40~45	0.18018	0.391892	0.851064
45~50	0.196078	0.566667	0.956522
50~55	0.272727	0.781818	0.968254
55~60	0.591837	0.848485	1
60~65	0.62963	0.921053	1
65~70	0.705882	1	1
70~75	0.5	1	1
75~80	1		
80~85		1	

表3 3次拡張スプライン法で求めた網目選択性曲線を表す3次多項式係数

目合	体長区間	3次多項式の係数			
		A0	A1	A2	A3
10節	[12, 40]	-45.1768	6.61382	-0.289686	4.03514E-03
	[40, 55]	-3103.24	206.225	-4.5364	0.0332279
	[55, 65]	-19328.8	957.14	-15.7509	0.0864165
	[40, 55]	-53608.8	2324.8	-33.492	0.160474
12節	[12, 40]	-23.4214	3.71923	-0.189452	0.0032536
	[40, 75]	-204.378	7.10843	-0.0196183	0.000283041
14節	[12, 40]	70.3487	-10	-0.289686	4.03514E-03
	[40, 55]	-3103.24	206.225	-4.5364	0.0332279

表4 Berkson法、ソルバー最小2乗法、ソルバー最尤法で推定した網目選択性Logistic式パラメータ

目合	Logistic式パラメータ			
	最尤法推定(Berkson法、ソルバー最尤法)		最小2乗法推定(ソルバー最小2乗法)	
	a	b	a	b
10節	-0.121573647	7.050404127	-0.097667277	5.814855172
12節	-0.175421893	8.02452378	-0.164163616	7.474031125
14節	-0.211702771	7.117569762	-0.201173035	6.782127942

表5 手法別に見た網目選択性曲線推定までの作業時間

網目選択性曲線の論理式	用いた手法	作業時間
3次拡張スプライン関数	3次拡張スプライン法	30~40分
Logistic式	最尤法推定	7時間 数秒
	最小2乗法推定	
	Berkson法 ソルバー最尤法	
	ソルバー最小2乗法	

次にそれぞれの手法で求めた網目選択性論理式から網目選択性曲線を求め図4に示した。12節, 14節の目合ではすべての網目選択性曲線が実際の点分布と近似していたが, 10節の目合では3次拡張スプライン法で求めた網目選択性曲線はいくつもの変曲点をもちながら増加する傾向を示した。

また, Logistic曲線においてもソルバー最小2乗法で求めた網目選択性曲線は, 図5に示すように飛び離れた点による影響を受け, 実際のデータの点分布とやや異なる曲線を示す傾向が見られた。

考 察

手法別にその作業性と求めた網目選択性曲線の適正さを評価し表6に示した。3次拡張スプライン法で使用するプログラムCURVEFIT.BASは操作も比較的安易であり, 処理時間も1作業当たり0.5時間程度と短い。しかし, 求められた網目選択性曲線は本来の網目選択性曲線が体長の増加に従い網目選択率が単調に増加するのに対し, 飛び離れた点の影響を強く受け, いくつかの変曲点をもつ曲線で表現される欠点がある。体長の増加に従い単調に増加する傾向を示す本来の網目選択性曲線を示すために, マダいの網目選択性曲線を求めるにあたり内田らはこの飛び離れた点を除外して推定をおこなっている。⁴⁾飛び離れた点を除外するためには, 今回おこなって推定作業に加え, 飛び離れた点1つ1つについて除外可能かどうかを検定する必要があり作業時間と労力は増加する。また, 検定の結果棄却できない点が残ることもあり, その場合過大若しくは過小に効果を評価するなど適正さにも欠く。

3次拡張スプライン関数に比べ, Logistic式は網目選択性曲線を適正に表現する。しかしBerkson法では複雑な計算を繰り返しおこなう必要があり, 専門的な統計処理と多くの作業時間を必要とする。反復計算を容易にかつ簡便におこなうためには, 非線形の最適化プログラムを作成するか, 又は特定の統計ソフトを使用する方法が考えられるが, プログラムの作成にあたっては, 相当の知識と労力を要し, かつユーザーも水産関係研究員に限定されることから今後独自に開発される可能性はないと

考えられる。そのため, 汎用性のある統計ソフトを使用した網目選択性曲線推定手法の確立が望ましいと考えられる。

今回, Logistic式パラメータの推定に用いたソルバーは汎用性のある表計算ソフトMS-Excelにアドインされたソフトであり反復計算機能が非常に充実している。シート自体の作成はMS-Excel上でおこなうため容易であり, シートコピーにより他の魚種や目合に対応することも可能である。処理時間は非常に早く, 網目選択性曲線の場合であれば, 線形近似から推定した初期値を入力しなくても短時間で適正解に収束可能であったことから非常に有効な手法であるといえる。

最尤推定は最近資源解析の分野で用いられてきた推定手法であり, その概念はまだ一般的ではない。そのため,

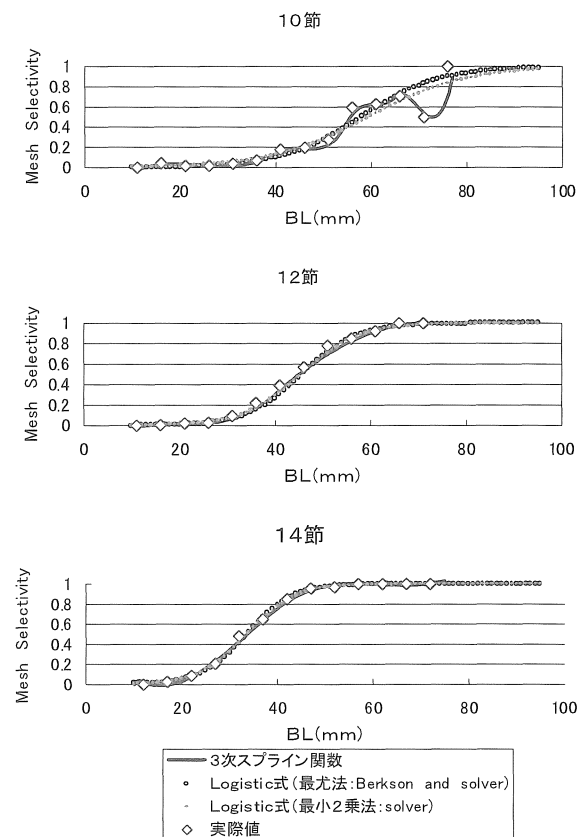


図4 手法別網目選択性曲線

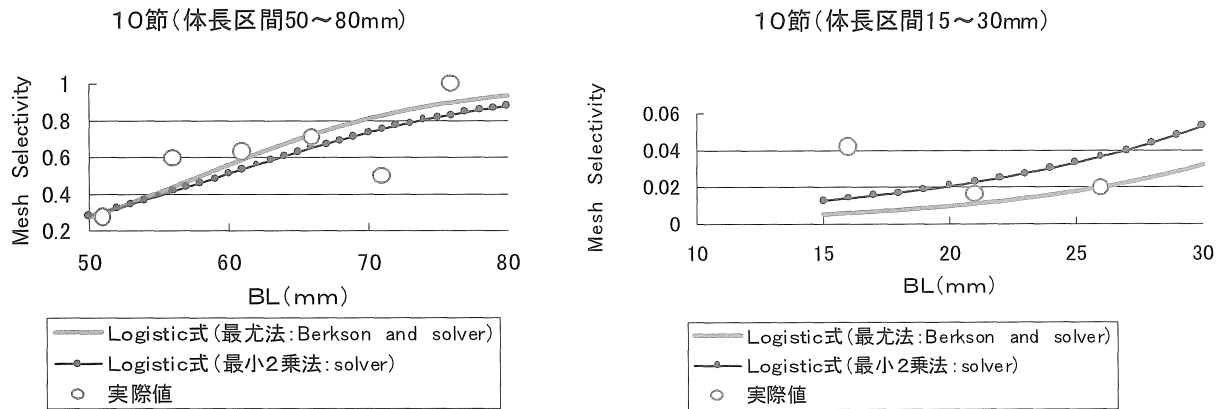


図5 ソルバー最小2乗法，ソルバー最尤法によって推定した網目選択性曲線の形状比較

表6 手法別総合評価

推定に用いた手法	作業上の労力		網目選択性曲線の妥当性		総合評価
	評価	内容	評価	内容	
3次拡張スプライン法	△	30~40分	△	飛び離れた点の影響を強く受ける	△
Berkson法	×	5~7時間	◎	飛び離れた点の影響を受けない	△
ソルバー最尤法	◎	数秒	◎	飛び離れた点の影響を受けない	◎
ソルバー最小2乗法	◎	数秒	○	飛び離れた点の影響をやや受ける	○

一般的に線形近似をおこなう際用いられ、その概念も容易な最小2乗法による推定も試みた。しかし、最小2乗法による推定では、その推定過程で各階級の値を導き出す根拠となるデータ数は考慮されない。そのためデータ数が少ないことから生じた飛び離れた点による影響を強く受けやすく求められた網目選択性曲線は実際の観測値分布から離れた曲線となりやすいことから網目選択性曲線推定手法としては不適である。これに対し最尤推定で使用する尤度は独立試行中起こりうる確率のことであり、データ数の多寡が考慮されていることから飛び離れた点の影響を受けることはなく、最尤推定で求めた網目選択性曲線は全体の点分布に近似した適正なものであるといえる。

これまでの資源解析分野においては網目選択性曲線の推定以外にも、DeLury法による資源量推定などに最小2乗法が用いられている。DeLury法も最小2乗法による線形近似をおこなうと実際の漁獲尾数又は漁獲重量は推定の段階で考慮されていないことから資源量を過大若しくは過小に評価する恐れがある。

今後は網目選択性曲線Logistic式パラメータ推定手法のモデルシートをDeLury法や年級群分類をおこなうHaselblad法などに応用することにより、より適正なパラメータ推定が可能な資源解析推定モデルを作成していきたい。

要 約

- 1) 網目選択性曲線の表現手法として、3次拡張スプライン関数、Logistic式の2曲線で表現し、Logistic式による表現ではBerkson法、ソルバー最小2乗法、ソルバー最尤法の3つの手法でそれぞれ作業性、網目選択性曲線の適正さを比較検討した。
- 2) 作業時間、労力の面ではMS-Excelアドインソフトソルバーを用いる手法が最も適しており、シート作成も容易であった。
- 3) 求められた網目選択性曲線はLogistic式で表現する方がより適正であった。
- 4) 最小2乗法で推定したLogistic曲線は、飛び離れた点に強く影響を受け実際値の分布とかけ離れた曲線をとる傾向が見られた。
- 5) 最尤法で推定したLogistic曲線は飛び離れた点があっても影響を受けず適正な網目選択性曲線を示した。
- 6) 網目選択性曲線推定手法として、ソルバー最尤法による推定が総合的に最も有効であると考えられ、パラメータ推定とグラフ作成を兼ねたモデルシートを作成した。

- 7) モデルシートのコピーにより複数の魚種、複数の目の網目選択性曲線の推定をおこなうことが可能となり、その実用性が実証された。
- 8) モデルシートの論理式を変更することにより、飛び離れた点の影響を受けやすかったDeLury法による資源量推定や網目選択性曲線と同様の非線形論理式パラメータを推定するHasselblad法による年級群分類などへの応用も期待された。

文 献

- 1) 東海正：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－，南西水研研報，26，31-106(1993)
- 2) 東海正：3次拡張スプライン関数を用いたデータの平滑化(逐次分割法)，資源解析プログラム集(Ⅱ)，中央水産研究所 数理生態研究室編，233-240(1990)
- 3) 品質管理誌編集委員会：新しい統計手法集，34-41(1963)
- 4) 内田秀和，濱田弘之：小型底びき網を対象とした目合拡大及び再放流によるマダイ幼魚の保護，福岡水技研報，4，1-8(1995)
- 5) 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，29，57-104