

標識放流調査によるスルメイカの死亡係数推定の試み

Estimation of Mortality Coefficients of the Japanese common squid
(*Todarodes pacificus*) from Tagging Experiments

坂口健司
Kenji Sakaguchi

北海道立中央水産試験場
Hokkaido Central Fisheries Experimental Station

はじめに

スルメイカは日本で最も重要な水産資源の一つであり、適切な資源管理が求められている。水産生物の資源管理のためには、死亡係数などの資源特性値をより正確に推定することが重要である。これまでスルメイカの資源特性値は、標識放流調査^{1,2,3)}やバイオマス解析^{4,5)}などから推定されてきたが、充分信頼できる値が得られたとは言えない。

今回は、1989～1992年に北海道立函館水産試験場および北海道立中央水産試験場が日本海で行ったスルメイカ標識放流調査のデータ^{6,7,8,9)}を用いて、スルメイカの死亡係数の推定を試みた。

報告に先立ち、貴重な助言を頂いた水産総合研究センター遠洋水産研究所浮魚資源部数理解析研究室の平松一彦室長に心より感謝する。

材料と方法

解析に用いた標識放流調査の概要を表1に示した。各年に2～3回実施した標識放流を一まとめとし、実施機関と実施年から、それらの調査セットを「函館水試 1989年」「函館水試 1991年」「中央水試 1991年」「中央水試 1992年」と表わした。これらの標識放流は北海道におけるスルメイカの初漁期である6月から7月上旬に、津軽海峡南西沖から道央日本海において行われたものである。調査には北海道立函館水産試験場所属の金星丸および中央水産試験場所属のおやしお丸が用いられた。標識にはアンカー型タグが用いられた。調査によって色や形状の異なるタグが用いられたが、これらを一まとめとして扱った。放流された標識スルメイカは主に道西日本海の沿岸域や武藏堆周辺海域で再捕された^{6,7,8,9)}。再捕率は1.9～12.1%と調査によって差がみられたが、再捕数は各調査セットとも100尾以上得られた。

死亡係数を推定する解析には、対数線形モデルを用いた。このモデルは再捕のモデルが線形の場合に最も有効と考えられている¹⁰⁾。漁獲死亡および自然死亡を一定と仮定し、放流から再捕までの経過時間と再捕尾数（対数）の関係から求められる回帰直線を、

$$C_i = -a \times i + b \quad (1)$$

とする。ここで、 C_i は経過時間 i ($0, 1, 2, 3, \dots$)における再捕尾数の対数である。このとき全減少係数（Z）、漁獲係数（F）、自然死亡係数（M）は以下の式で求められる^{10)など参照}。

$$Z = a \quad (2)$$

$$F = \exp(b) \times a / (N_0 \times (1 - \exp(-a))) \quad (3)$$

$$M = a - F \quad (4)$$

ここで、 N_0 は放流尾数である。

4セットの再捕データから求めた回帰直線を図1に示した。経過時間の単位は10日とした。

回帰直線は放流直後と長期再捕のデータを除いて求めた。これは調査の都合上、初漁期に漁場外の比較的沖合で放流されたスルメイカが本格的に漁獲対象となるまでに時間がかかるため、放流直後のFが小さいと考えられることと、長期再捕のデータではFが一定と考えにくい上、このモデルは再捕尾数が少ない場合に不安定になりやすいからである。この前処理によって回帰直線の当てはまりが良くなり、決定係数(R^2)は0.869~0.980であった。

前処理を行ったため、Mは全期間で一定、Fは回帰直線を求める期間でのみ一定と仮定した。 $i \geq t$ で回帰直線を求めた場合、Zは(2)式から求められる。一定と仮定した期間のFは(3)式を修正して(5)式のように表される。ここで、 N_t は*i=t*のときの生残数である。(4)式に(5)式を代入してMについての(6)式が得られる。

$$F = \exp(b - t \times a) \times a / (N_t \times (1 - \exp(-a))) \quad (5)$$

$$M = a - \exp(b - t \times a) \times a / (N_t \times (1 - \exp(-a))) \quad (6)$$

N_t はPopeの式(7式)を使って N_{t-1} 、 n_{t-1} 、Mで表される。ここで n_t は*i=t*のときの再捕尾数である。

表1 スルメイカの標識放流調査概要

調査セット名	函館水試1989年	函館水試1991年	中央水試1991年	中央水試1992年
放流年月日	1989.6/9~6/15	1991.6/9~6/11	1991.6/28~7/2	1992.6/15~6/16
放流位置	40°01' N, 139°01' E 40°35' N, 139°30' E 41°00' N, 139°00' E	40°30' N, 138°30' E 41°00' N, 139°00' E	42°31' N, 139°01' E 43°30' N, 139°28' E	43°00' N, 140°00' E 42°20' N, 139°40' E
放流尾数	2792	3080	990	5328
再捕尾数	121	325	120	101
再捕率	4.3%	10.6%	12.1%	1.9%
放流から再捕までの経過日数				
0-9	5	13	10	4
10-19	11	44	35	6
20-29	38	79	23	12
30-39	21	75	14	23
40-49	18	55	17	16
50-59	11	17	10	11
60-69	9	18	3	10
70-79	4	8	3	6
80-89	3	5	4	5
90-99		6		2
100-109	1	1	1	1
110-119		2		2
120-129				
130-139				
140-149				
150-159				1
160-169				1
170-179				
180-189		1		
190-199				
200-209				1
210-219				
220-229		1		

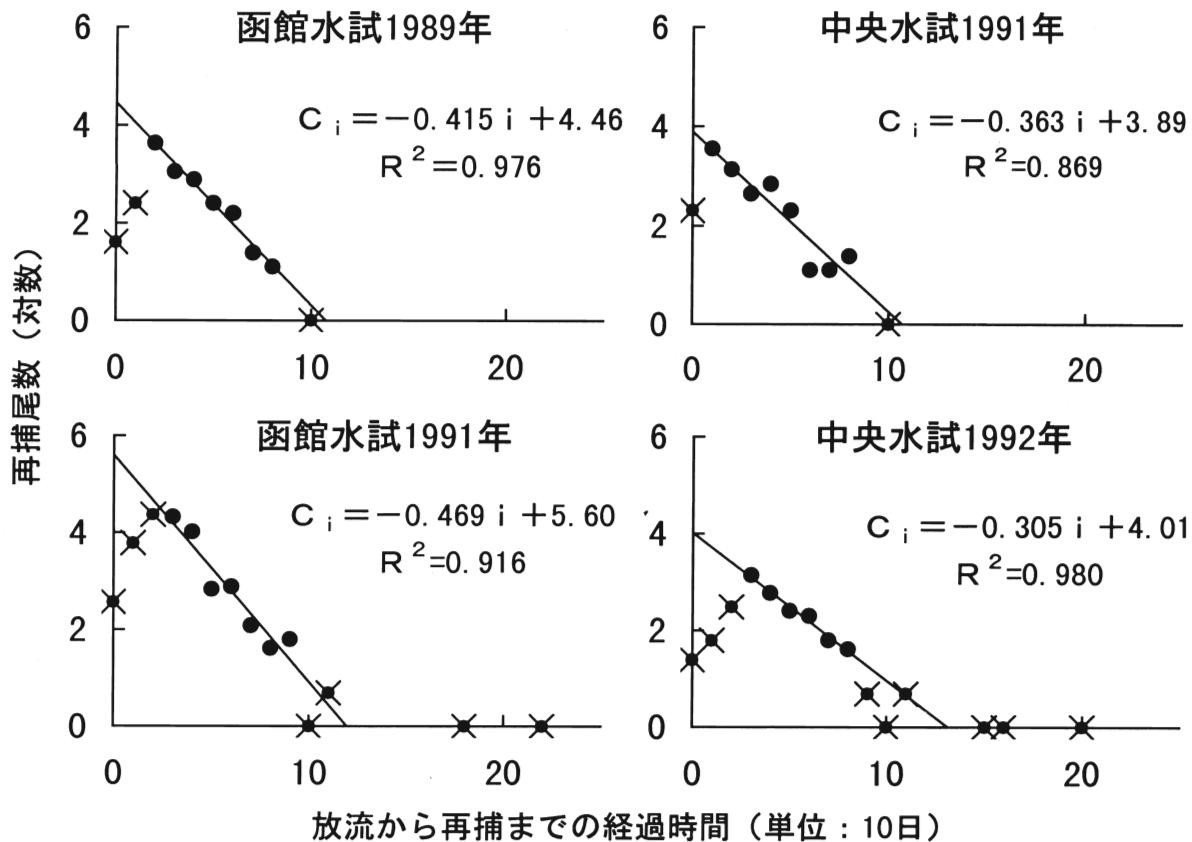


図1 スルメイカの再捕尾数の変化と回帰直線

注) ×印のデータを除いて回帰直線を求めた。

$$N_{i+1} = N_i \times \exp(-M) - n_i \times \exp(-M/2) \quad (7)$$

(7) 式を $i = t$ から $i = 0$ まで順番にさかのぼると、 N_t は N_0 、 n_i 、 M で表される。 N_0 と n_i が既知であるため、 N_t は M の関数で表されることになる。このようにして得られた N_t についての式を (6) 式に代入し、Microsoft Excel の「ソルバー」を使い、右辺と左辺の差が 0 になるときの M の値を求める。 F は (5) 式に N_t についての式とすでに求めた M を代入して得られる。ここまで計算で得られた値を補正前の資源特性値とし、さらに F と M を補正した。

標識放流調査から資源特性値を求めるときの系統的誤差原因について Ricker があげた A、B、C の 3 型の誤差が考えられる^{11, 12)}。特に、A 型の誤差である標識放流直後の死亡やタグの脱落、再捕イカの発見報告の不十分さは、Z を F と M に分離するときに M を過大評価、F を過小評価させる。このため、これまでスルメイカの資源特性値を推定する際に問題にされてきた¹³⁾。この問題を解決するため、漁獲能率 (q)、漁獲強度 (f)、有効放流率、発見報告率を考慮して、A 型の誤差から F と M を補正した。ここで、有効放流率とは標識を付けて放流したスルメイカが放流直後に死亡したり標識が脱落したりせずに正常に放流される率、発見報告率とは標識の付いたスルメイカが漁獲された場合にその情報が調査機関の担当者まで届く率とした。

一般に q 、 f 、 F は (8) 式の関係にあるので、(8)、(9) 式で q と M を一定と仮定する

と、2種類の f と Z の値から q 、 F 、 M を推定することができる。

$$F = q \times f \quad (8)$$

$$Z = F + M \quad (9)$$

補正には「中央水試 1991 年」と「中央水試 1992 年」の放流データを用い、(10)～(12)式から M 、 F_{1991} 、 F_{1992} を求めた。

$$F_{1991} = F_{1992} \times f_{1991} / f_{1992} \quad (10)$$

$$Z_{1991} = F_{1991} + M \quad (11)$$

$$Z_{1992} = F_{1992} + M \quad (12)$$

ここで、 Z 、 F 、 f の添え字は放流年を示している。 Z は回帰式から得られた値を用いた。 f は回帰直線を求めた期間の再捕時期と海域を考慮して、両年の 7 月中旬～8 月下旬の余市港における小型イカ釣船の延べ操業隻数（旬平均）で代表させた。なお、この 2 年間では漁獲努力量に変化がみられたと推測されている⁹⁾。

さらに、「 $\alpha = \text{有効放流率} \times \text{発見報告率}$ 」とし、(6)、(7)式から得られた M と N_0 についての式における N_0 を αN_0 に置き換え、修正された M を代入したときの α を求めた。また、「函館水試 1991 年」についても、修正された M で計算したときの α を求めた。これは「中央水試 1991 年」と「函館水試 1991 年」が放流群の体サイズが同程度で、再捕時期と海域が重なるため^{7,8)}、両者の α を比較する意味で行った。「函館水試 1989 年」については F と M の補正是行わなかった。

結果と考察

4 セットの再捕データから得られた補正前の資源特性値を表 2 に示した。 Z は 0.305～0.469、 F は 0.012～0.092、 M は 0.293～0.380 と推定された。すでに述べたように、A型の誤差は Z を F と M に分離するときに M を過大評価、 F を過小評価させる。また、B型の誤差である長期にわたる標識イカの自然死亡の増加またはタグの脱落、漁場からのイカの移動によって、 Z は過大に推定されていると考えられる。その他 C型などの誤差の影響も否定できないが、総合的に判断して、この補正前の推定値は Z と M は過大評価、 F は過小評価されていると考えられる。つまり、 M は得られた最も小さい値である 0.293 よりも小さいと考えられる。

次に、補正後の資源特性値を表 3 に示した。「中央水試 1991 年」と「中央水試 1992 年」の M は 0.093、 F は 0.212～0.271 に補正された。 Z が変わらないため、 M が小さくなった分だけ F は大きくなかった。

表 2 補正前のスルメイカの資源特性値

	函館水試 1989年	函館水試 1991年	中央水試 1991年	中央水試 1992年
Z	0.415	0.469	0.363	0.305
F	0.035	0.092	0.056	0.012
M	0.380	0.376	0.307	0.293

注) Z 、 F 、 M はいずれも 10 日当たりの値。

表 3 補正後のスルメイカの資源特性値

	函館水試 1989年	函館水試 1991年	中央水試 1991年	中央水試 1992年
Z		0.469	0.363	0.305
F		0.376	0.271	0.212
M		0.093	0.093	0.093
f			296	232
α		15%	18%	3.5%

注) Z 、 F 、 M はいずれも 10 日当たりの値。

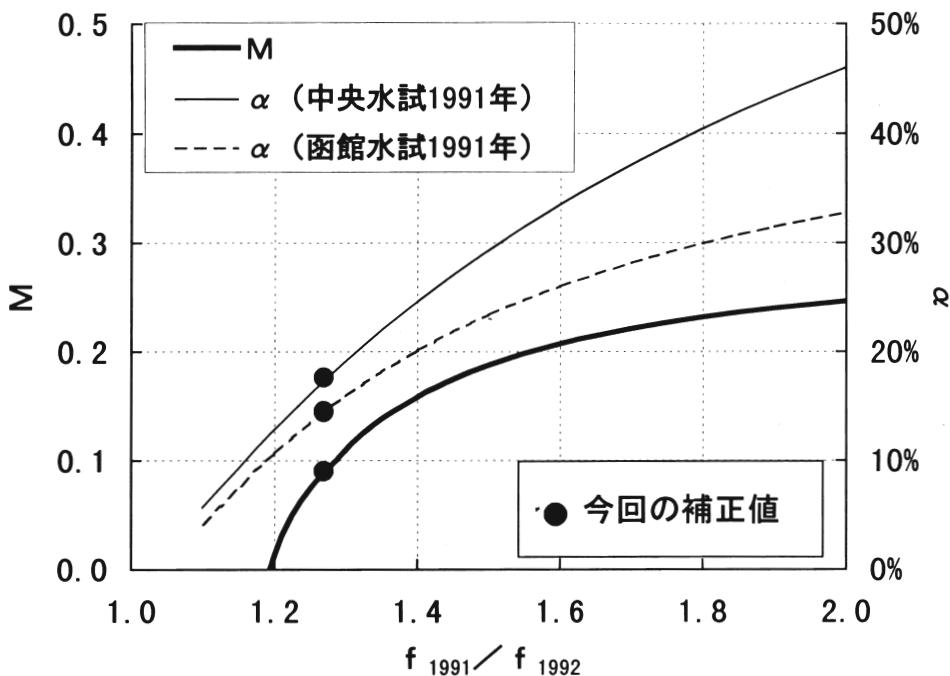


図2 f の比によるMと α の変化

α は「中央水試 1991 年」で 18%、「中央水試 1992 年」で 3.5%と、「中央水試 1992 年」の方が小さくなった。つまり、2 年間で有効放流率と発見報告率が変化したと考えられる。具体的には、「中央水試 1992 年」の放流群は「中央水試 1991 年」に比べての体サイズがかなり小さい^{8,9)}ため、放流直後の死亡率が増加し有効放流率が低下したことが推察される。また、1991 年は道西日本海でアンカー型タグを用いた大量の標識放流が行われた最初の年であり、1992 年はその翌年である。このため、1991 年は多くの漁業関係者がアンカータグを初めて目にし興味を持って積極的に報告したが、その翌年の 1992 年は漁業関係者の意識が慣れによって低下し発見報告率も低下したことが想像される。このことについて、この年代に漁業者からの再捕報告の割合が減少し、遊漁者からの報告が目立ってきたという指摘がある（中田私信）。一方、「函館水試 1991 年」の放流データにMの補正值を代入したときの α は 15%であった。この値は、放流群の体サイズが同程度で再捕時期と海域が重なっている「中央水試 1991 年」^{7,8)}の α と比較的近い値であり、現実的である。

最後に資源特性値を推定するにあたって仮定した事項について検討する。第一に全期間のMと回帰直線を求めた期間のFを一定と仮定した。今回は当てはまりの良い回帰直線が得られたため、MとFの合計であるZは回帰直線を求めた期間ではほぼ一定であったと考えられる。しかし、MとFそれが一定であったかどうかについては検討できない。

第二にMを補正するためにqを一定と仮定したが、「中央水試 1992 年」の方が「中央水試 1991 年」よりも沿岸寄りで放流・再捕された^{8,9)}ことから、どちらかというと「中央水試 1992 年」のqの方が大きいと推察される。このことは実際のMが補正值よりもさらに小さいことを示唆している。

第三に f を余市港における小型イカ釣船の延べ操業隻数（旬平均）で代表させた。図2は f が変化した場合の、Mおよび「中央水試 1991 年」と「函館水試 1991 年」の α の変化を示したものである。Mが2年間の f の比によって比較的大きく変化することに注意が必要である。また、近い値になることが想定される「中央水試 1991 年」と「函館水試 1991 年」の α は、 f の比が小さいほど、つまりMが小さいほどその差が小さくなることも注目される。

これらの原因のほかに、ZにB型の誤差が含まれていることも、Mが補正值よりも小さい傾向を示唆している。以上から、スルメイカのMは今回得られたMの補正值(0.093)を目安に、これよりも小さい値が妥当と考えられる。

引用文献

- 1) 町中茂, 宮下民部, 宮島英雄, 笠原昭吾: 1979 年日本海沖合水域におけるスルメイカ標識放流の再捕結果と資源特性値の推定. 石川水試研報. 3, 37-52(1980)
- 2) 笠原昭吾, 結城トミ: "1984 年日本海北部沖合放流イカの再捕結果". イカ類資源・漁海況検討会議研究報告(昭和 59 年度). 北海道区水産研究所, 1985, 28-36.
- 3) 内山勇: "1987 年に実施した日本海におけるスルメイカの標識放流再捕結果について". イカ類資源・漁海況検討会議研究報告(昭和 62 年度). 北海道区水産研究所, 1988, 87-93.
- 4) 土井長之, 川上武彦: 日本近海産スルメイカの生物生産と漁業の管理. 東海水研報. 99, 65-83(1979)
- 5) 安達二朗: "日本海西部海域におけるスルメイカの資源構造および秋生まれ群の資源診断". イカ類資源・漁海況検討会議研究報告(昭和 59 年度). 北海道区水産研究所, 1985, 15-27.
- 6) 中田淳, 高柳志朗, 中道克夫: 平成元年度北海道立函館水産試験場事業報告書. 1991, 57-104.
- 7) 中田淳, 夏目雅史: 平成 3 年度事業報告書. 北海道立函館水産試験場, 1993, 84-110.
- 8) 鷹見達也, 吉田英雄, 佐々木文雄, 土門和子: 平成 3 年度北海道立中央水産試験場事業報告書. 1992, 45-68.
- 9) 中田淳, 吉田英雄, 佐々木文雄, 土門和子: 平成 4 年度北海道立中央水産試験場事業報告書. 1993, 65-73.
- 10) 北田修一: "4. 標識放流と生残解析". 水産学シリーズ. 97, 水産資源解析と統計モデル, 松宮義晴編, 恒星社厚生閣, 1993, 60-71.
- 11) 鉄健司: 日本の水産資源研究における標識放流調査について. 日水誌. 29(5), 482-496(1963)
- 12) 能勢幸雄: "標識放流法による推定". 海洋学講座. 12, 水産資源論, 田中昌一編, 東京大学出版会, 1973, 47-56.