

# 水産資源管理談話会報

第20号

日本鯨類研究所 資源管理研究センター

1999年9月

## 目次

お知らせ	.....	2
有明海と諫早湾における魚類生産	.....	3
(投稿) VPAの入門と実際	.....	9

財団法人 日本鯨類研究所  
資源管理研究センター

〒104-0055 東京都中央区豊海町 4-18東京水産ビル

TEL 03-3536-6521

FAX 03-3536-6522

## お知らせ

久しぶりに、水産資源管理談話会報20号をお届けします。本号は、平成10年6月12日に開催された第28回の田北 徹氏による話題提供「有明海と諫早湾における魚類生産」の記録です。さらに、平松一彦氏から「VPAの入門と実際」を投稿していただきました。

次回談話会は10月下旬に予定しています。

(北原 武)

### 有明海の環境条件

九州西岸に位置する有明海は、島原半島と天草下島の間、早崎海峡でのみ外海と連絡する閉鎖的な内湾である。湾口から中央部では一般に水深が大きい。福岡県と佐賀県が面する奥部には大規模な浅海が発達しており、前の海と称される。奥部西側に位置する支湾であった諫早湾は泉水海とも呼ばれ、堤防による締め切りまでは前の海と同様に大規模な浅海が発達していた。有明海の中央部は、西側が島原半島（長崎県）、東側が熊本県に面している。西側は一般に水深が深く、東側に浅海が広がっている。このような有明海の地形と海洋条件は、鎌田(1985)と井上(1985)に詳しい。

この湾は、わが国で潮位差がもっとも大きいことで知られるが、奥部ほど大きく、湾奥部では6mにも達する。したがって、湾内は潮流が速いが、流向は湾口方向と湾奥方向への単純な往復である。往復する潮流の中で淘汰された堆積物は、浮泥となって奥部浅海と河川感潮域に堆積し、干潮時には広大な泥干潟または砂泥の干潟が形成される。浮泥は潮流に巻き上げられるため、有明海は一般に透明度が低い。特に奥部浅海では常に泥色に濁っている。

前の海と諫早湾は全般的に浅く、河川の影響で塩分が低く、底質が泥で、水温などの条件が変化しやすいという共通の特徴を持つ。中央部東側（熊本海域）も同じく浅い海域が広がる点で湾奥部と共通しているが、海底傾斜、海水流動、外海との距離などの点で海洋条件は湾奥部とかなり趣を異にしており、生物相も湾奥部とは違った様相を示す。

湾奥部には多くの河川が流入している。もっとも大きいのは福岡・佐賀海域の県境を流れる筑後川である。諫早湾奥部には本明川が流入していた。それらの川は、下流域の標高差が小さく、一方有明海の潮位差が大きいので、有明海の潮位の変化が遠く上流にまで及ぶ、いわゆる感潮域が発達している。河川の淡水流量が多い場合は感潮域の上流部に淡水域が存在する。本明川は諫早平野を蛇行し、下流域に感潮域が形成されていた。

### 有明海の魚類相と生活様式

有明海の魚類相については、内田・塚原(1955)が147種を報告しているが、海洋学的にも生物学的にも外海の影響が強い湾口部も含めれば、上記魚種数を遥かに越える魚種が出現する。

それらを生態から分類すると、下記の4つに分けられる。

- 1、有明海の独立系群。同種は近海に生息せず、湾外の個体群との連絡がない。いわゆる有明海特産魚はこの中に含まれる。
- 2、季節的にはほぼ定期的に湾内に来遊する魚種。主たる来遊目的は産卵で、そのような来

遊が他海域では普遍的でないことから、有明海の存在がその系群の成立に必要と考えられる。

3、有明海を含む西日本海域に普遍的な、または各地の内湾に普遍的に分布する沿岸性・内湾性魚類。

4、湾外または外洋に主に分布する。有明海は定常的な生息域ではないが、たぶん海洋条件の一時的な変化により偶発的に湾内に侵入する。

上記の生態区分のなかで1, 2及び3の一部が真に有明海産魚類と呼べる魚種であろう。3および4の魚類は調査を進めるほど増え、菊池(1970)が天草近海の魚類としている魚種のすべて又はそれ以上が出現する可能性がある。

有明海には下記の7種類の特産魚がいる。これらは有明海と、一部の魚種は隣接の八代海にも分布するが、わが国の他のいずれの海域にも分布しない。これらのすべての種は、同種またはごく近縁な種が大陸沿岸に分布しており、大陸と日本列島との地史的な関係を示す遺存種である。なお、特産魚の1種と考えられているデンベエシタビラメ *Cynoglossus lighti* は、他海域にも広く生息するアカシタビラメ *Cynoglossus joyneri* との比較から、筆者は Menon(1977)の指摘どおり同種のシノニムと考えている。

カタクチイワシ科 Engraulididae

エツ *Coilia nasus*

シラウオ科 Salangidae

アリアケシラウオ *Salanx ariakensis*

アリアケヒメシラウオ *Neosalanx reganius*

ハゼ科 Gobiidae

ムツゴロウ *Boleophthalmus pectinirostris*

ハゼクチ *Acanthogobius hasta*

ワラスボ *Taenioides rubicundus*

カジカ科 Cottidae

ヤマノカミ *Trachidermus fasciatus*

しかしながら、コイチ *Nibea albiflora* は有明海と大陸沿岸には分布していて、有明海に隣接する海域には分布しない点で特産魚類と同等な状態にあると考えられるが、瀬戸内海にもいるので特産魚に含められていない。日本列島内のどこかにいけば有明海の群が孤立した系統群であっても特産種ではなく、いなければ隣接の大陸にいても特産種だとする区別は適当でない。そのような意味から、有明海特産種に下記の大陸沿岸との共通種・近縁種を含め、これらを有明海に特徴的な魚類とするべきと考えている。

ニシン科 Clupeidae

ヒラ *Ilisha elongata*

サッパ *Sardinella zunasi*

ボラ科 Mugilidae

メナダ *Chelon haematocheilus*

スズキ科 Percichthyidae

スズキ *Lateolabrax japonicus*

マナガツオ科 Stromateidae

マナガツオ *Pampus argenteus*

ニベ科 Sciaenidae

コイチ *Nibea albiflora*

ウシノシタ科 Cynoglossidae

コウライアカシタビラメ *Cynoglossus abbreviatus*

生活史をもとに、有明海産魚類は下記のように分類される。

- 1、流入河川の感潮域に分布する：アリアケヒメシラウオ。
- 2、流入河川に生息し、有明海奥部に降河して産卵する：ヤマノカミ。
- 3、主に有明海奥部に分布し、流入河川の感潮域に遡上して産卵し、同水域で初期成育期を過ごす：エツ、アリアケシラウオ。
- 4、奥部浅海と干潟に分布し、初期成育期は河川感潮域で過ごす：ハゼクチ、ムツゴロウ、ワラスボ。
- 5、有明海に広く分布するが、初期成育期は河川感潮域で過ごす：メナダ、コイチ、スズキ。
- 6、有明海または有明海の近海に来遊して産卵し、仔魚が湾奥部に移動し、河川感潮域で初期成育期をおくる：マナガツオ、トラフグ
- 7、有明海の中央部から湾口部に分布し、同水域で産卵し、初期成育期をおくる：メイタガレイ、イヌノシタ

有明海の特産魚や大陸との共通種の多くは1から6に分類される種類で、特に産卵と初期成育の面で湾奥部や河川感潮域と強く関係している。すなわち、有明海に特徴的な魚類のほとんどは、奥部水域と河川感潮域の存在のもとにその生活史が成立しているとみることができる。

#### 河川感潮域の意義

湾奥部に流入する河川は、下流域が筑後平野、佐賀平野、諫早平野など、広い平坦地を流れており、有明海の大きな潮位差と相まって感潮域が発達している。その範囲が20km以上に及ぶ河川もあり、有明海の張潮時には水は上流方向に流れる。感潮域では、淡水流入量が多い河川では、又は出水や取水量の低下により淡水流入量が多い場合には、上流部に淡水域が存在する。そこではアミ類 Mysidacea やかいあし類 Copepoda など、稚魚類の

餌となる生物の高い生産があることが経験的に分かっている。有明海の感潮域で餌料生物生産を組織的に研究した例は筆者が知る限りではないが、感潮域からの水が排出される干潟の沖でかいあし類の非常に高い密度が記録されている (Hirota and Tanaka, 1985)。

河川感潮域と河口域には、広大な泥干潟が形成され、そこがムツゴロウなどの干潟動物の生息域となっている。ムツゴロウの餌は、干潟表面に繁茂する羽状目 Pennatae の珪藻である。この珪藻は堆積物表生(epipellic)で、泥粒子の間隙を埋める水分中に遊在する(e.g. Round, 1971)。低潮時に干潟表面で成育するが、張潮によってはぎ取られ、水中に懸濁して運ばれる間に水中の動物に摂取される(e. g. Baillie and Whelsh, 1980)。有明海に流入する佐賀県の六角川と諫早湾に流入していた本明川の河口では、張潮時に非常に高い水中クロロフィル a 濃度が測定され、有明海の奥部でもこの珪藻が大きな基礎生産を担っていると考えられた。

流入河川の感潮域、干潟の滞筋やその沖の浅海では、長尾類(Natantia)やウナギ *Anguilla japonica* を対象にごく小さい目合いの網を用いる潮待ち網が操業される。その網で上記の特徴的な魚類の稚魚が多く混獲される (田北、1980、1991)。諫早湾に流入する本明川でも感潮域に多くの稚魚類が出現することを確かめている (田北、未発表)。大陸の河口域 (estuary) でも多くの稚魚類が成育することが多くの研究から知られており、河口域が稚魚類のゆりかごと呼ばれる所以である。稚魚類は、張潮と共に河川に入って感潮域に広く分布し、落潮とともに有明海に流れ出る。このように感潮域と有明海奥部を往復しながら成育する。感潮域にはそのような稚魚類の成育を支える餌料条件があり、餌料生産を支える基礎生産機構があると考えられる。有明海湾奥部は流入河川の感潮域と一体になって魚類の初期成育を支えており、河川感潮域は陸水域というよりは有明海の一部と見ることができる。そのような感潮域と湾奥部が存在することで有明海の魚類群集は成立している。

### 諫早湾干拓の影響

諫早湾締め切りで消滅した面積は、有明海全体のわずか2%でしかなく、諫早湾の全体が消滅したわけでもない。また、諫早湾締め切りで直ちに絶滅する種類は1種類もない。多くの有明海特産魚が諫早湾にも分布するとしても、エツ、アリアケシラウオやアリアケヒメシラウオに対し筑後川感潮域が持つような特別な意義は、諫早湾や本明川感潮域にはないというも、たぶん正しいであろう。特産魚類を含め諫早湾に分布する魚類は、締め切りによりその面積分の影響を受ける、またはそれだけの影響しか受けない…すなわち、生息域と再生産の場が一部失われることによる損失にみえる。しかし、有明海は様々な環境を包含する。そして消滅海域 (3550 畝) は、水深 5m 以浅の浅海と干潟で、多くの魚類が産卵し、本明川などの感潮域を多くの魚類が成育場として利用していたことが考慮されねばならない。浅海と干潟が有明海産魚類の生活史成立に欠かせない環境であることの重み付けをした上で消滅面積を考える必要がある。有明海の奥部水域の中で、すべての

5 m以浅の水域を有明海産魚類の特別な水域と見れば、諫早湾締め切りは、魚類にとって必要な生活空間の12%消失を意味する。そして、締め切り以後、佐賀県の干潟で水鳥の密度が過密になり、将来が憂慮されているのと同様、消失した12%を補う環境はどこにもないのである。締め切り堤防の外に将来は干潟が形成されるとする考えには根拠がない。干潟は、環境にその必然性がある初めて形成されるのである。締め切りが行われた海域は有明海中央部に近く、透明度は奥部のように低くなく、しかも諫早湾奥部からの浮泥の供給が遮断されている。干潟が簡単にできるような環境ではないのである。

私は、これまで研究経験から、諫早湾奥部の消失の影響規模は有明海の12%どころではないと感じている。有明海湾奥部には多くの河川が流入し、多くの稚魚類が湾奥部と感潮域で成育している。河川の流量や栄養塩量などの条件は、後背地に依存すると考えられるから、筑後平野を流れる筑後川や矢部川と佐賀平野を流れる六角川や塩田川の生物生産条件は違うであろう。ましてや諫早湾奥部と本明川感潮域の条件は、後背地が全く異なる福岡・佐賀海域並びにその流入河川の感潮域とは違うであろう。

島原半島ではわずか2百年の間に普賢岳の噴火による海域への影響が繰り返され、諫早でひどい洪水が起きたことはまだ記憶に新しい。地域的な濁水も繰り返されている。有明海の成立以来の長い期間には、非常に多くの大きな環境変化が有明海とその生物に及んだと考えられる。それでもなお今日、有明海の独特な魚類相が維持されていることに、機能的に類似した二つの湾奥部の存在がうまく機能したとは考えられないであろうか。前の海に大きな負の影響が及んでも諫早湾が存在していればそれを補い、種を維持できたであろう。二つの湾奥部の少なくとも一方が魚類に必要な条件を提供し続けたと考えるのである。もしこの推測が正しいとすれば、諫早湾奥部の消失により当面は大きな影響が生じなくとも、長期的には魚類の絶滅を含む大きな影響となってあらわれる可能性がある。

#### [参考文献]

- Baillie, P. W. and L. W. Welsh (1980). The effect of tidal resuspension on the distribution of intertidal epipelagic algae in an estuary. *Estuarine Coastal Mar. Sci.*, 10: 165-180.
- Hirota, R. and Y. Tanaka (1985). High abundance of *Oithona davisae* (Copepoda: Cyclopoida) in the shallow waters adjacent to the mud flats in Ariake-kai, western Kyushu. *Bull. Plankton Soc. Japan*, 32: 169-170.
- 井上尚文(1985). 有明海：物理. 日本海洋学会・沿岸海洋研究部会(編)、pp.831-845. 日本全国沿岸海洋誌. 東海大学出版会、東京.
- 鎌田泰彦(1985). 有明海：地質. 日本海洋学会・沿岸海洋研究部会(編)、pp.815-830. 日本全国沿岸海洋誌. 東海大学出版会、東京.
- 菊池泰二(1970). 天草臨海実験所近海の生物相、魚類. 九州大学理学部附属天草臨海実験



所、熊本、pp.52.

Menon, A. G. K. (1977). A systematic monograph of the tongue soles of the genus *Cynoglossus* Hamilton-Buchanan (Pisces: Cynoglossidae). *Smithon. Contr. Zool.*, (238): 1-4+1-129.

Round, F. E. (1971). Benthic marine diatoms. Pages 83-139 *in* H. Barnes ed. *Oceanography and marine biology annual review*, 9, George Allen and Unwin, Ltd., London.

田北 徹(1980). 有明海の魚類. 海洋科学 12: 105-115.

田北 徹(1991). 有明海におけるトラフグとシマフグの幼期の生態. 日本水産学会誌、57: 1883-1889.

内田恵太郎・塚原 博(1955). 有明海の魚類相について. 日本生物地理学会会報、16-19: 292-302.

(投稿)

## VPA の入門と実際

平松一彦 (遠洋水研)

### 1. はじめに

年齢別漁獲尾数を使って資源尾数を推定する VPA は、30 年以上にわたりスタンダードな資源評価手法として使われている。国際漁業委員会はもとより、我が国の TAC 対象種でも VPA で資源評価されているものが多い (平松 1998、平松 1999、和田 1999)。本稿では、VPA の基本的な考え方からはじめて、TAC 対象種の ABC (生物学的許容漁獲量) の算出に使われているようなある程度実用的な VPA を紹介するとともに、その注意点についても触れる。さらに近年主流となっているチューニング VPA についてその考え方を簡単に述べる。VPA はコホート解析とも呼ばれる。両者を区別して扱う場合もあるが、本稿では特に区別しない。

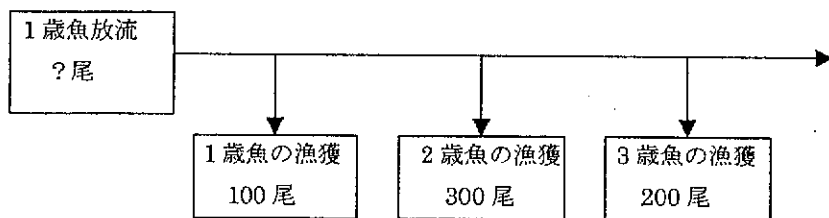
なお本稿は、平成 10 年 10 月に中央水産研究所で開催された、資源管理研究研修会のテキストを加筆修正したものである。

### 2. VPA 入門

#### 2-1. 基本的な考え方

VPA の基本的な考え方を理解するために、簡単な例から始める。

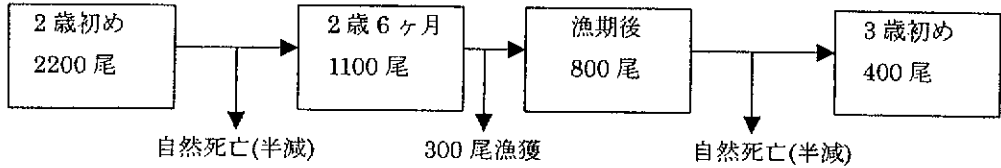
問題 1 : ある池に 1 月に 1 歳魚を多数放流した。そのままにしておくとして一年で 1/4 に減少すること (すなわち生残率が 1/4) が知られている。さて 1 歳の時に 100 尾、翌年 2 歳の時に 300 尾、翌々年 3 歳で 200 尾漁獲されたとする (すべて年の中間の 6 月に漁獲されたとする)。ではもともと何尾放流されたのか？



解答その 1 : とにかく全部で 600 尾漁獲されたのであるから、少なくとも 600 尾は放流されたことになる。一番手堅い答えであるが、自然死亡などを無視しておりかなり過小評価である。

解答その 2 : 3 歳魚が 200 尾とれたということは、その年の 6 月に少なくとも 200 尾はいたことになる。年間の生残率は 1/4 ということは半年の生残率は 1/2 である。従って半年前の 1 月初めに 3 歳魚はこの 2 倍の  $200 \times 2 = 400$  尾いたと推測される。さらに 1 年前の 2 歳の

1月には  $400 \times 4 = 1600$  尾いたはずである。また2歳魚は6月に300尾漁獲されているから、これも考慮すると2歳の1月初めには  $1600 + 300 \times 2 = 2200$  尾いたことになる。この部分わかりにくければ半年単位で考えるとよい。3歳魚400尾は半年前には  $400 \times 2 = 800$  尾。この直前に300尾漁獲されているから、漁獲前には  $800 + 300 = 1100$  尾いたことになる。さらに半年前には  $1100 \times 2 = 2200$  尾となる(下図参照)。同様に考えると1歳の1月の資源尾数は  $2200 \times 4 + 100 \times 2 = 9000$  尾と推定される。



解答その3：上記の推定では3歳魚の生き残りを考慮していない。3歳魚が12月末に100尾生き残っていると仮定する。これも考慮して各年齢での年初めの資源尾数を計算すると、

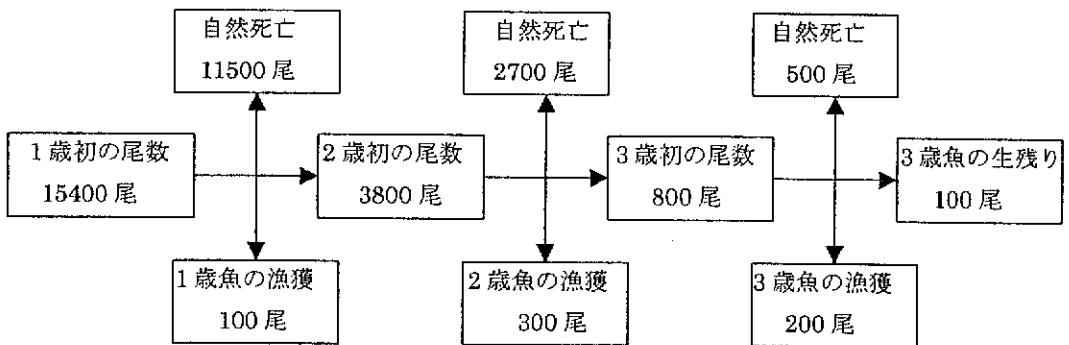
3歳1月： $100 \times 4 + 200 \times 2 = 800$  尾

2歳1月： $800 \times 4 + 300 \times 2 = 3800$  尾

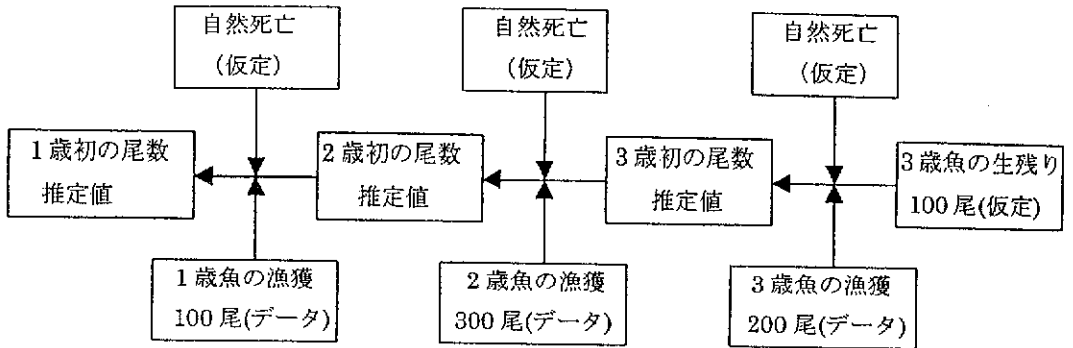
1歳1月： $3800 \times 4 + 100 \times 2 = 15400$  尾

となる。従って15,400尾放流されたと推定される。

これがVPAの本質である。すなわち、ある集団(コホート)から得られた漁獲尾数をベースにして、自然死亡や最終年での生き残りを考慮して、過去に遡って資源尾数を推定する。実際には以下のように放流された魚の数は変化する。



VPAはこの時間的な流れを逆にたどることにより、各年の尾数を推定する。3歳魚の生き残りと各年の漁獲尾数に分かっていれば、自然死亡する割合を仮定して各年の尾数を計算することができる。



上記の計算を自然死亡係数  $M$  を使って数式で書くと以下ようになる。

$$N_{a,y} = N_{a+1,y+1}e^M + C_{a,y}e^{\frac{M}{2}} \quad (1)$$

$N_{a,y}$  は  $y$  年における  $a$  歳魚の資源尾数、 $C_{a,y}$  は  $y$  年  $a$  歳魚の漁獲尾数である。数式で書くとなんとなくいかめしいが、この意味するところは、上記の簡単な計算と全く同じである。

また(1)式を繰り返し使うと

$$N_{a,y} = C_{a,y}e^{\frac{M}{2}} + C_{a+1,y+1}e^{\frac{3}{2}M} + \dots + C_{a+t,y+t}e^{\frac{2t+1}{2}M} + N_{a+t+1,y+t+1}e^{(t+1)M} \quad (2)$$

が得られる。この式は、VPAの本質を良く表わしている。言葉で書けば

$a$  歳の尾数 =  $a$  歳の漁獲尾数  $\times$  自然死亡の補正 +  $(a+1)$  歳の漁獲尾数  $\times$  自然死亡の補正 +  $\dots$  +  $(a+t)$  歳の漁獲尾数  $\times$  自然死亡の補正 +  $(a+t+1)$  歳の生残り  $\times$  自然死亡の補正となる。

## 2-2. 簡単な例

問題2：あるコホートの各年齢での漁獲尾数が以下のものであった時、各年齢の資源尾数を求めよ。自然死亡係数  $M$  は 0.4、漁獲は 6 月とする。また、3 歳魚は 6 月にその時の資源量の 1/2 が漁獲されたことがわかっている。

0 歳：150、1 歳：200、2 歳：250、3 歳：100

解答：3 歳 6 月時点で半分の魚が漁獲されたわけであるから、その直前には  $100 \times 2 = 200$  尾いたことになる。さらに自然死亡係数と漁獲尾数を使って計算をすすめると、各年齢の年初めの資源尾数は

$$3 \text{ 歳} : 200 \times \exp(0.2) = 244$$

$$2 \text{ 歳} : 244 \times \exp(0.4) + 250 \times \exp(0.2) = 669$$

$$1 \text{ 歳} : 669 \times \exp(0.4) + 200 \times \exp(0.2) = 1242$$

$$0 \text{ 歳} : 1242 \times \exp(0.4) + 150 \times \exp(0.2) = 2036$$

となる。

次は多少実例的な例である。

問題3：以下のように各年の年齢別漁獲尾数が得られている。自然死亡係数を0.4とする時、各年各年齢の資源尾数を求めよ。

漁獲尾数	1992年	1993年	1994年	1995年	1996年	1997年
0歳	3160	1013	1067	4143	1553	1362
1歳	142	1490	797	1207	1642	1178
2歳	74	2514	898	412	168	513
3歳	91	339	264	241	161	91
4歳	54	37	41	62	73	27

解答：問題に述べられている条件だけでは計算できない。各コホートの最高齢あるいは最近年（以下の網掛けの部分）

	1992年	1993年	1994年	1995年	1996年	1997年
0歳						
1歳						
2歳						
3歳						
4歳						

の漁獲率が生き残り数が必要である。しかし現実の問題ではそのようなものはわからないから、もっともらしい値を仮定することになる（このあたり、勘と経験と思いつきのよさが必要である）。ここでは全て漁獲率 1/2（漁獲尾数の2倍の魚が年初めにいた）と仮定する。

後はこれまでの例と同じであるが、同一のコホートは表で斜めに存在することに注意する必要がある。例えば、1997年の3歳→1996年の2歳→1995年の1歳→1994年の0歳の順で計算する。かなりの計算量となるが、表計算ソフトを使えば簡単である。結果は

資源尾数	1992年	1993年	1994年	1995年	1996年	1997年
0歳	10716	4730	4563	10336	5412	2724
1歳	5884	4596	2341	2185	3536	2356
2歳	891	3828	1861	917	477	1026
3歳	222	536	507	512	277	182
4歳	108	74	82	124	146	54

となった。ちなみに漁獲率を 1/4 と仮定すると以下のようなになる。

資源尾数	1992年	1993年	1994年	1995年	1996年	1997年
0歳	11439	4997	5168	12619	8926	5448
1歳	6295	5081	2520	2590	5067	4712
2歳	1073	4104	2186	1037	748	2052
3歳	332	659	692	730	358	364
4歳	216	148	164	248	292	108

### 2-3. VPAの特徴

上記の例では、最高齢および最近年の漁獲率の与え方でかなり結果が異なった。しかし両者を比較すると、過去の若齢部分では比較的差が少ない。一般に、年齢をさかのぼる（若齢になる）ほど推定値は最高齢の仮定に依存しなくなることが知られている。これは(2)式を見れば明らかであろう。年齢をさかのぼるほど漁獲尾数の項が増えこの影響が大きくなり、最高齢の部分に依存しなくなる。

一般にVPAの特徴として以下のようなことが知られている。

- (1) 漁獲圧が強いほど推定値は信頼できる（もちろん年齢別漁獲尾数が正確に得られている場合の話である）。
- (2) 最高齢及び最近年の値を変えると、高齢部分及び近年の推定値は変化するが、コホートを遡るにつれてその影響は小さくなる。従って、過去の若齢の推定値ほど信頼できる。
- (3) Mを変えると資源の絶対値は変化するが、相対的なトレンドはあまり変わらない。

言い換えると、漁獲がそれなりに強い時（例えば漁獲係数  $F > M$ ）、過去の加入量のトレンドは信頼性が高い。これに対し、高齢部分と近年の推定値の信頼性は低い。また、多くの年齢に分解されている方が正確である。

### 2-4. 実用上の注意点

#### 2-4-1. 基本式について

ここで用いた(1)式（Popeの近似式などと呼ばれる）はその名前のように近似式と見なされていることが多い。しかしこれは年の中間でパルス的な漁業がある場合には、正確な式である。Popeの式に対し漁獲方程式

$$N_{a,y} = N_{a+1,y+1} e^{F_{a,y} + M} \quad (3)$$

$$C_{a,y} = \frac{F_{a,y}}{F_{a,y} + M} N_{a+1,y+1} (e^{F_{a,y} + M} - 1) \quad (4)$$

を直接用いて計算する方法は、正確なものと見なされている。しかし、これは一年を通じてFが一定であるような漁業に対応する式である。漁期があるような場合や漁獲量にピークがあるような場合にはもはや正確ではない。また上式を使った場合、まず(4)式を数值的

に解いてFを求め、それから(3)式を使って  $N_{a,y}$  を計算することになり、(1)式を使った場合に比べかなりめんどろになる。特に表計算ソフトで簡単に計算できなくなる。

計算の容易さや、自然死亡係数や年齢別漁獲尾数に含まれるであろう誤差の大きさを考えると、多くの場合(1)式で実用上十分ではないかと思われる。もちろん、漁業に関する詳しい情報が得られていればそれを利用すればよい。例えば漁期は年のはじめであれば

$$N_{a,y} = N_{a+1,y+1}e^M + C_{a,y} \quad (5)$$

が適切な式となり、一方年の終わりであれば、

$$N_{a,y} = N_{a+1,y+1}e^M + C_{a,y}e^M \quad (6)$$

が妥当である。また、一定期間(一年のうち  $T_1 \sim T_2$ )一定の漁獲があるような場合には

$$N_{a,y} = N_{a+1,y+1}e^M + C_{a,y} \frac{e^{M \cdot T_2} - e^{M \cdot T_1}}{M(T_2 - T_1)} \quad (7)$$

で表わすことができる (Hiramatsu 1995)。これらの式であれば表計算ソフトで簡単に計算できる。

なお(1)式を用いた場合Fは

$$F_{a,y} = \ln(N_{a,y}/N_{a+1,y+1}) - M \quad (8)$$

あるいは

$$F_{a,y} = -\ln\left(1 - \frac{C_{a,y}e^{\frac{1}{2}M}}{N_{a,y}}\right) \quad (9)$$

で計算される。

#### 2-4-2. ターミナルF

各コホートの最高齢の部分、すなわち2-2の表の網掛けの部分は、生残数よりも漁獲係数(ターミナルFと呼ばれ  $F_t$ と表わされる)で仮定されることが多い。生残数であれば、100尾が適当か、100万尾が適当か見当がつかないのに比べ、漁獲係数であれば、0.1~1ぐらいの値を与えておけば、それほど大きく外れることはない。また生残数はコホートの強さによって大きく変化する可能性があるが、Fであればそのような心配はない。こういったことから、Fの方が仮定しやすい。

ターミナルFからその年齢の資源尾数を計算するには、(1)式を仮定している場合には

$$N_{a,y} = \frac{C_{a,y}}{1 - e^{-F_{a,y}}} e^{\frac{1}{2}M} \quad (10)$$

を使えばよい。なお次に述べるプラスグループを考えている場合には、もう少し工夫が必

要となる（詳しくは、補足 A を参照のこと）。

### 2-4-3. プラスグループ

十分高齢まで漁獲物の年齢分解ができない場合でも、ある年齢以上をひとまとめにして扱う（通称プラスグループと呼ばれる）ことにより、VPA の適用が可能である。ただしプラスグループを考えた場合、特別な考慮が必要なこともあり（補足 A 参照）、またプラスグループが資源全体あるいは親魚資源量に占める割合が無視できないような場合には、これらの推定精度がプラスグループのターミナル  $F$  の仮定に依存することとなり、さまざまな問題が生じる。可能な限り年齢分解しておくことが望ましい。

## 3. 実用的な VPA

現実の資源評価に使われている VPA は入門編で示したような単純なものではなく、様々な工夫がこらしてある。例えば、上記の例では  $F_t$  として適当な値を仮定したが、推定結果はこの仮定した  $F_t$  の値によって異なってしまう。このため  $F_t$  に関しもっともらしいモデルを仮定し、データから  $F_t$  を推定することが試みられている。ここでは、代表的な一例を紹介する。我が国の TAC 対象種の資源評価にも、これと類似の VPA が使用されている。

### 3-1. 基本的な考え方

年齢分解が十分高齢まで可能な場合には、以下のような仮定により、高齢部分の  $F_t$  を推定することができる。a 歳と a-1 歳で生物学的にほとんど変わりがなければ（例えば体長がほとんど同じ、分布域が同じなど）、漁獲に対しても同じ影響を受けると考えることができる。したがってある年の a 歳と a-1 歳の漁獲係数は同じと仮定することは不自然ではない。すなわち、

$$F_{a,y} = F_{a-1,y} \quad (11)$$

既に見たように、年齢別漁獲尾数を使って y 年 a 歳の  $F$  あるいは  $N$  から、y-1 年 a-1 歳の  $F$  および  $N$  を計算することができる。従って(11)式を使えば、最近年の  $F_{a,y}$  を一つ仮定すれば、 $F_{a,y} \rightarrow F_{a-1,y-1} \rightarrow F_{a,y-1} \rightarrow F_{a-1,y-2} \rightarrow F_{a,y-2}$  といった順で、それ以前の  $F_a$  をいもづる式に計算することができる。そして  $F_a$  が得られれば、そのコホートの資源尾数は全て求まる。

		...	y-3 年	y-2 年	y-1 年	y 年
...						
a-1 歳						
a 歳						

一方、これでは計算できない近年のコホートについては、 $F$  は同じ年齢の過去の  $F$  の平均値を仮定する。例えば  $F_{a,y}$  は過去 3 年の  $F_{a-1}$  の平均値と等しいと仮定して



$$F_{a-1,y} = \frac{1}{3}(F_{a-1,y-1} + F_{a-1,y-2} + F_{a-1,y-3}) \quad (12)$$

とする。

	...	y-3年	y-2年	y-1年	y年
...					
a-1歳					
a歳					

さて  $F_{a,y}$  は適当に仮定した値であったが、ここで(11)式を利用して、(12)式から得られた  $F_{a-1,y}$  から  $F_{a,y}$  を推定する。すなわち計算された  $F_{a-1,y}$  の値を  $F_{a,y}$  に代入し、上記の一連の計算を再度行う。これを  $F_{a,y}$  の値が変化しなくなるまで繰り返し、最終的な  $F_{a,y}$  を得る。

上記の手順により各年の  $F_{a-1}$  が求まれば、 $F_{a-2}$  についても最近年を除いては計算できる。 $F_{a-2,y}$  は(12)式を用いて推定する（この場合は繰り返しの必要は無い）。以下同様にして最近年の  $F$  の推定に(12)式を用いて、全ての年齢別資源尾数を計算することができる。

### 3-2. 計算の実際

このような計算はやはり表計算ソフトと相性がよい。手順をまとめると以下のようになる。

- ① 適当な  $F_{a,y}$  の値を仮定する。
- ② これから(10)式を使って  $N_{a,y}$  を計算する。
- ③ さらに(1)式及び(9)式を使って  $N_{a-1,y-1}$  及び  $F_{a-1,y-1}$  を計算する。
- ④  $F_{a,y-1} = F_{a-1,y-1}$  とする。
- ⑤  $F_{a,y-1}$  を使って②以下を繰り返し  $N_{a,y-1}$  や  $N_{a-1,y-2}$  などを計算する。これを繰り返すことにより各年の  $F_a$  はすべて求まる。
- ⑥ (12)式を用いて  $F_{a-1,y}$  を計算し、これを新たに  $F_{a,y}$  として②以下の計算を行う。
- ⑦  $F_{a,y}$  と  $F_{a-1,y}$  が等しくなるまでこれを繰り返す。
- ⑧ 若齢の部分の計算する。最近年は(12)式を使う。

このうち⑥と⑦の繰り返し計算は、エクセルのソルバーなどを使ってもっと簡単に計算することができる。例えば目的のセル（目的関数）を  $F_{a,y} - F_{a-1,y}$  とし、これを0とする  $F_{a,y}$  を求めればよい。なお実際の計算では目的関数を  $F_{a,y} \cdot F_{a-1,y}$  とすると、 $F_{a,y} \rightarrow 0$  となることがあるため、例えば  $F_{a,y}/F_{a-1,y}$  を1に近づける方がよいようである。

### 3-3. 特徴と注意点

第2章で扱ったVPAでは  $F_t$  の仮定がいかにも恣意的であり、同じ年齢別漁獲尾数データを使っても、研究者の主観により異なる結果を導く可能性があった。しかしここで述べた

方法であれば、誰がやろうとも同じ結果が得られる。そういった意味で客観的な推定方法となっている。

問題は(11)式と(12)式の2つの仮定がどれだけ妥当であるかである。十分高齢まで年齢分解されている場合には、(11)式は適切な仮定となっていると考えられる。しかし、十分高齢まで年齢分解ができていない場合には、 $a-1$ 歳と $a$ 歳以上とでは、選択率が異なっている可能性がある。

一方、(12)式は近年漁業に大きな変化が無いことを仮定している。漁獲努力量や選択率に経年変化があれば、この仮定は成立しない。例えば、操業回数が前年までに比べて半分に減少したとすると、(12)式では $F$ を過大評価することになる。なおここでは過去3年間の漁獲係数の平均値に等しいと仮定したが、もちろん状況にあわせて、5年でも1年でもよい。

### 3-4. モデルの変形

最近年、および高齢の部分については様々なモデルが考えられる。最近年については選択率が仮定または推定できる場合には、これを利用することもできる。例えば各年齢の選択率 $S_a$ を利用して

$$F_{b,y} = \frac{S_b}{S_a} F_{a,y} \quad (13)$$

から推定することも可能であろう。

一方、 $F_{a,y}=F_{a-1,y}$ の仮定は、 $F_{a,y}=\alpha F_{a-1,y}$ に一般化することができる。ただし、一般に $\alpha$ の推定は困難であることが多い。

## 4. チューニング VPA 入門

最近年の $F_t$ の値を過去の平均値から仮定する方法は、漁業に変化が無い場合には妥当であるが、努力量や選択性に何らかの変化があれば問題が生じる。年齢別漁獲尾数以外に資源量指数や努力量の情報が得られている場合に、これらを利用して $F_t$ を推定する方法がチューニング VPA である。チューニング VPA は様々な批判があるものの、現在最もスタンダードな VPA の方法となっている。ここではその概要について紹介する。

### 4-1. 基本的な考え方

資源量指数が利用可能な場合を考える。チューニング VPA では VPA から計算される資源量と資源量指数が最もよく合うように、 $F_t$ を決める。例えば以下のように0歳と1歳の資源量指数が得られているとする。この時、以下の0歳と1歳の資源尾数の推定値が上記の資源量指数の増減となるべくよく一致するように、ターミナル $F$ (網掛けの部分)を推定する。

	1992年	1993年	1994年	1995年	1996年	1997年	1998年
0歳の指数	1.5	1.3	1.0	0.8	0.8	0.6	1.0
1歳の指数	1.5	1.4	1.2	0.8	0.7	0.7	0.7

資源尾数	1992年	1993年	1994年	1995年	1996年	1997年	1998年
0歳							
1歳							
2歳							
3歳							
4歳							
5歳							

具体的には例えば

(資源量指数-比例係数×ある  $F_t$  の下で VPA から計算された資源量) の2乗の和を最小にするような  $F_t$  の値を求める。数式で表現すれば、目的関数

$$\sum_y (I_y - qN_y)^2 \quad (14)$$

を最小にする  $F_t$  を推定することになる。ここで  $I$  は資源量指数、 $N$  は VPA から計算される資源尾数、 $q$  は比例係数である。資源量指数に合うように  $F_t$  を調整するということで、チューニング VPA と呼ばれている。

資源量指数などの利用可能な情報が多数あれば、最高齢・最近年の全ての  $F_t$  をパラメータとして推定することが可能である。しかし、現実にはそれほど十分な情報があることはまずない。このため最高齢の部分は何らかのモデルによって推定し、最近年の  $F_t$  をパラメータとして推定することが多い。最近年についても全て独立なパラメータとして推定するのではなく、一部を推定し、残りは何らかのモデルを仮定して推定することが多い。資源量指数が年齢別に得られているのか、ある年齢群に対して得られているのかといった条件により、細かい部分で解析方法が異なってくる。

ここでは、全年齢込みの資源量指数が一つ得られている場合を考える。この時、例えばまず3章で示したような VPA を行い、近年の選択率を推定する。最近年にこの選択率を用い、最近年の完全加入の  $F$  の値をパラメータとして上記の残差平方和を最小にする  $F$  の値を求める。

#### 4-2. 計算の実際

これも表計算ソフトで以下の手順で計算可能である。

①まず3章で示した VPA を行い、最近年の各年齢の選択率  $S_b$  を推定する。例えば最近年の漁獲係数から、 $F_{c,y}$  を完全加入の漁獲係数として、 $S_b = F_{b,y} / F_{c,y}$  より求める。

②最近年の完全加入の  $F$  を仮定する。最近年の各年齢の漁獲係数  $F_{b,y}$  は①で求めた選択率とこの  $F$  から、 $F_{b,y} = S_b \cdot F$  で決まる。

③最高齢では  $F_0 = F_{a-1}$  の仮定をする。

④これらの仮定により  $F_1$  の値が全て決まり、過去の全ての年齢別資源尾数を計算できる。

⑤得られた資源尾数の推定値から、資源量指数に対応する値を計算する。例えば資源量指数が 0 歳から 4 歳までの資源尾数に対応するものであるなら、VPA で推定されたこれらの資源尾数の単純な和、0 歳～4 歳の資源量に対応するのであれば各年齢の体重を掛けてバイオマスに換算したものを使うことになる。

⑥資源量指数と⑤で計算された予測値との残差平方和を計算し、これを最小にする  $F$  を求める。

最後のステップではやはりソルバーを使って答えを求めることができる。ところで(14)式のような目的関数を仮定した場合には、 $q$  の推定値は

$$\hat{q} = \frac{\sum_y I_y N_y}{\sum_y N_y^2} \quad (15)$$

として解析的に表わすことができる。したがって  $q$  はこの式を使えば、推定すべきは  $F$  のみとなる。

#### 4-3. 特徴と注意点

チューニング VPA では、資源量指数にバイアスがあつたりすると、奇妙な結果（例えば資源量が異常に高い、あるいは絶滅寸前）が得られることがあるため十分な注意が必要である。使用する資源量指数はバイアス等の可能性について十分検討しておく必要があるし、得られた結果をそのまま鵜呑みにするのは危険なことがある。

また目的関数を計算するにあたっては、チューニングに使う資源量指数が何を示しているのか十分検討し、それに対応する予測値を計算する必要がある。具体的には、どの年齢範囲に対応するのか、年齢による選択率を考慮する必要があるのか、個体数が重量か、一年のうちいつの資源量に対応するか、といった点を考慮する必要がある。

上記の例では、全年齢込みの資源量指数が一つだけある場合を考えたが、年齢別に複数得られている場合なども考えられる。さらに高齢部分の漁獲係数の計算方法や目的関数の形などでも数多くの方法があり、チューニング VPA には様々なバリエーションがある（田中 1999、和田・時村 1999）。

またチューニングに使うのは資源量指数に限る必要はなく、資源量と直接・間接に関係するさまざまな情報を使うことができる。使える情報を可能な限り取り込んで、総合的に推定するというのが近年の傾向である。

(14)式のような目的関数を最小化することによって、 $F_1$  を推定する方法は、一般に ADAPT あるいは ADAPT VPA と呼ばれている。上記の VPA はこの ADAPT の簡単な形をしている。

次に目的関数を用いる ADAPT とは少し異なるチューニング VPA を紹介する。

#### 4-4. Laurec-Shepherd VPA

3章で述べた VPA では、最近年の F は過去数年の F の平均値と等しいと仮定している。しかし既に述べたように努力量が増えているような場合、この仮定は問題がある。例えば今年は何回も操業回数が昨年までの半分であったとすると、今年の F は昨年までの値の半分と仮定する方が妥当である。努力量の情報を用いて、これをもっとシステムテックを行うのが Laurec-Shepherd VPA と呼ばれるものである。

各年の努力量が得られている時、漁獲係数と努力量の関係を用いて漁具能率  $q$  をまず推定し、それから最近年の漁獲係数を推定する。具体的には最近年の F を(12)式で推定する代わりに、まず  $y-1$  年までの漁獲係数 F と努力量 X の値を使って

$$F_{a,y} = q_a X_y \quad (16)$$

の関係式から線形回帰などで  $q$  を推定する。そしてこの  $q$  と最近年の努力量から F を推定する。他の部分は、通常の VPA と同様に考えればよい。

例えば、 $a$  歳の各年の漁獲係数と努力量が以下のようであったとする。

	1993年	1994年	1995年	1996年	1997年
漁獲係数	0.50	0.55	0.45	0.40	
努力量	100	110	90	80	50

1993年から1996年までのデータを使って(16)式から  $q=0.005$  となる。これから1997年の F は0.25と推定される。一方、(12)式を仮定すれば、0.47である。

## 5. 議論

### 5-1. 比較

表1のデータを用いて、3章で示した VPA と4章の ADAPT 型のチューニング VPA の2種類を使って資源尾数と漁獲係数を推定した。結果をそれぞれ表2と表3に示す。

ここで示した例では、チューニング VPA でほぼ満足できる答えを得ることができた。しかし、必ずしもこちらの方が優れたモデルというわけではない。ここでは正確な資源量指数データを使ったが、実際には誤差を含んだデータしか得ることができない。誤差の大きさによっては、チューニングによって現実離れた結果が得られることもある。信頼性の低い資源量指数しか無い場合には、むしろ資源量指数を使わないモデルの方が適切な推定ができるかもしれない。それぞれの魚種や漁業の特徴、利用可能なデータの種類とその信頼性を考慮して、VPA のモデルを考える必要がある。

ここで例として取り上げたデータはあくまでも教科書的なきれいなものである。現実には自然死亡係数は信頼すべき推定値がないため適当に仮定することになり、年齢別漁獲尾数にもかなりの誤差やバイアスが予想される。また漁業は時として大きな変化をし、選択率が年によって大きく変わることがある。ここで示した例のように妥当な推定ができる保証は無い。こういったデータやモデルに関する不確実性の考慮も大きなテーマとなってい

る（補足 B、D 参照）。

## 5-2. まとめと展望

もともとは年齢別漁獲尾数のデータを使って、いもづる式にそのコホートの資源尾数を計算するというのが VPA であった。しかし、その後資源量指数などさまざまな情報を取り込んで、統計学的に推定するという方向に大きく変化している（補足 C 参照）。

現在、VPA は複雑化・巨大化の方向にあるが、残念ながらそれによって資源評価の精度が飛躍的に向上したとは思えない。特に、国際漁業委員会等では、生物情報の不足やデータの信頼性をかえりみず、モデルのみが毎年毎年より複雑な方向に進化しているようにも感じられる。

VPA を現実の資源に適用するに際しては、さまざまな検討が必要になる。例えば、ブラスグループは何歳にするか、高齢部分はどのような仮定を置いて計算するのか、推定するパラメータは何個にするか、資源量指数として何をを用いるか、チューニングの時点はいつか、選択率はどうなっているのか、など。これらを考えるには、漁業の実情、生物学的知見、データの信頼性などの知識とそれをどうモデルに反映させるかという知識や経験が必要である。年齢別漁獲尾数を準備すればあとはプログラムが計算してくれるというわけにはいかない。

特にチューニング VPA に関しては、細かい部分のモデル化の方法やノウハウは様々なものがあり、本稿の記述では実用的に使うには不十分である。機会があれば稿を改めて整理してみたい。

いずれにせよ使用するデータの信頼性をふまえて、適切な手法を選択することが重要であるが、なかなか難しく日々頭を悩ませているところである。

## 引用文献

- 赤嶺達郎. 1995. コホート解析(VPA)入門. 水産海洋研究, 59(4):424-437.
- Hiramatsu, K. 1995. A theoretical study of equations used in virtual population analysis. Fisheries Science, 61(5):752-754.
- 平松一彦. 1995. 統計モデルによる CPUE の標準化. 漁業資源研究会議北日本底魚部会報, 28:87-97.
- 平松一彦. 1996. 国際会議で用いられる資源評価手法について. 水産資源管理談話会報 15: 3-24.
- 平松一彦. 1998. 米国沿岸の資源評価・資源管理手法について. 資源管理談話会報, 19:25-40.
- 平松一彦. 1999. 国際漁業委員会におけるまぐろ類の資源評価と資源管理. 月刊海洋, 号外 17:76-80.
- 能勢幸雄・石井丈夫・清水 誠. 1988. 水産資源学. 東京大学出版会, 東京, pp.217.

- Quinn II, T.J. and R.B.Deriso. 1999. Quantitative Fish Dynamics. Oxford University Press, New York, pp.542.
- 桜本和美. 1998. 漁業管理のABC-TAC制度がよくわかる本一. 成山堂書店, 東京, pp.200.
- 嶋津靖彦. 1983. コホート解析. 水産資源の解析と評価 (石井丈夫編), 恒星社厚生閣, 東京:30-45.
- 田中栄次. 1999. 国際会議で用いられている資源評価の手法について. 南西外海の資源・海洋研究, 15:95-113.
- 田中昌一. 1985. 水産資源学総論. 恒星社厚生閣, 東京, pp.381. (増補改訂版(1998), pp.406.)
- 和田恵子・時村宗春. 1999. チューニング VPA について. 月刊海洋, 号外 17:81-86.
- 和田時夫. 1999. SPR 概念の活用と適用例. 月刊海洋, 号外 17:104-108.
- 山田作太郎・田中栄次. 1999. 水産資源解析学. 成山堂書店, 東京, pp.151.

#### 補足 A：最高齢部分の扱い方

十分高齢まで年齢分解されており、最高齢の部分の資源量に占める割合がほとんど無視できれば、どのような計算方法をとっても結果はほとんど変わらない。しかし、年齢分解が不十分で、年齢分解の最高齢でもかなりの資源量となる場合には慎重に扱う必要がある。以下に示す式のどれを使うかによって、かなり結果が異なることがある。

ターミナル F が与えられた時の最高齢の資源尾数は、

$$N_a = \frac{F_a + M}{F_a} C_a \quad (A1)$$

あるいは

$$N_a = \frac{F_a + M}{F_a} C_a \frac{1}{1 - e^{-(F_a + M)}} \quad (A2)$$

で計算されることが多い。

(A1)式は資源と漁業が一定の定常状態を仮定した時の、a 歳以上の漁獲尾数と a 歳の資源尾数を表わす関係式である。従って正確には

$$N_{a+} = \frac{F_{a+} + M}{F_{a+}} C_{a+} \quad (A3)$$

である。この左辺はあくまで a 歳の資源尾数であるので、これから  $N_{a+1}$  を計算するにはこの値を使えばよいが、親魚尾数などを計算するには a+1 歳以上も含める必要があるため注意が必要である。定常状態での a 歳以上の資源尾数は

$$N_{a+} = \frac{F_{a+} + M}{F_{a+}} C_{a+} \frac{1}{1 - e^{-(F_{a+} + M)}} \quad (A4)$$

で与えられる。

(A2)式は a 歳の漁獲尾数と資源尾数の関係を表わしている。漁獲物に a+1 歳以上も含まれる場合にこの式を使うと、(A4)式を見れば明らかなように推定された資源尾数は a 歳以上の資源尾数となる。したがって、この資源尾数を使って a-1 歳を計算すると過大評価となる。

これらは全て、年間で F 一定の漁獲係数を前提とした式である。Pope の式を使った場合には同様の関係式は以下のようになる。

$$N_a = \frac{C_a}{1 - e^{-F_a}} e^{\frac{M}{2}} = \frac{1 - e^{-(F_{a+} + M)}}{1 - e^{-F_{a+}}} C_{a+} e^{\frac{M}{2}} \quad (\text{A5})$$

$$N_{a+} = \frac{C_{a+}}{1 - e^{-F_{a+}}} e^{\frac{M}{2}} = \frac{C_a}{(1 - e^{-F_a})(1 - e^{-(F_{a+} + M)})} e^{\frac{M}{2}} \quad (\text{A6})$$

必要に応じ、これらを使い分けるべきであろう。

最初に述べたように、a 歳以上の資源尾数が小さい場合にはどの式を使おうが全体的な資源量推定にはほとんど影響しない。これらが無視できない場合には、適切な式を使い分ける必要がある。実際には、高齢部分の年齢分解が困難で、かなりの年齢をプラスグループとしてひとまとめで扱うことがある。このような場合には、定常状態を仮定した上記のモデルではあまり適切とはいえず、プラスグループの計算をもっと正確に行う必要がある。

基本となる関係式は

$$N_{a+,y+1} = N_{a+,y} e^{-(F_{a+,y} + M)} + N_{a-1,y} e^{-(F_{a-1,y} + M)} \quad (\text{A7})$$

である。Pope の式を使えば

$$N_{a+,y+1} = N_{a+,y} e^{-M} - C_{a+,y} e^{-\frac{1}{2}M} + N_{a-1,y} e^{-M} - C_{a-1,y} e^{-\frac{1}{2}M} \quad (\text{A8})$$

となる。この時  $F_{a+} = F_{a-1}$  であれば

$$\frac{N_{a+,y}}{N_{a-1,y}} = \frac{C_{a+,y}}{C_{a-1,y}} \quad (\text{A9})$$

が成立し、

$$N_{a+,y} = \frac{C_{a+,y}}{C_{a+,y} + C_{a-1,y}} N_{a+,y+1} e^M + C_{a+,y} e^{\frac{1}{2}M} \quad (\text{A10})$$

$$N_{a-1,y} = \frac{C_{a-1,y}}{C_{a+,y} + C_{a-1,y}} N_{a+,y+1} e^M + C_{a-1,y} e^{\frac{1}{2}M} \quad (\text{A11})$$

となる。 $F_{a+} = \alpha F_{a-1}$  の場合には上記のような形には書けず、(A7)式あるいは(A8)式と(4)式などを組み合わせて用い、数値的に求める必要がある。



## 補足 B: 不確実性の検討

### (1) 自然死亡係数

自然死亡係数はほとんどの魚種でまともに推定されていない。寿命や成長から仮定されたり、近縁の種の値で代用している場合がほとんどである。このため VPA で使われる  $M$  にはかなりの誤差があるものと考えられる。 $M$  の誤差の影響は  $M$  の値を変化させた感度解析で検討されることが多い。 $M$  の値を変えれば資源の絶対値は変化する。

資源管理が目的である場合には、 $M$  の値を変えることによって資源管理にどのような影響を及ぼすかという観点から検討する必要がある。  $M$  の値によって資源量推定値がかなり変化しても、管理方針 (ABC の値) にそれほど影響がないようであれば、あまり深刻に考える必要はないかもしれない。一方、 $M$  の値によって ABC の勧告値が大きく変わるようであれば、真剣に  $M$  の推定の研究を始めるか、あるいは  $M$  の値によらないロバストな資源評価や資源管理の方法を検討する必要がある。

### (2) 年齢別漁獲尾数

漁獲圧が強いほど VPA の精度は上がると述べたが、これはあくまでも年齢別漁獲尾数が正確に得られている場合である。漁獲尾数の推定にバイアスがあったり、年齢分解に問題があれば当然信頼性は低くなる。年齢分解の誤差の影響は、モンテカルロシミュレーションによって評価される。すなわち、年齢別漁獲尾数データを予想される誤差でランダムにふらし、推定値を計算する。一方、バイアスの影響は感度解析的な手法をとることになる。

### (3) 資源量指数

チューニング VPA の信頼性は、チューニングに使用する資源量指数の信頼性に大きく依存する。複数の資源量指数が使われる場合、同一年齢に対する指数でありながら、矛盾するトレンドを示す指数が存在することがある。どちらの指数がより信頼性が高いか、十分な検討が必要であるが、判断できないような場合には両者が使われることになる。このような場合、一方の指数を取り除いて計算し、推定結果がどう変化するかといった感度解析的な検討が必要となる。

## 補足 C: VPA の歴史

VPA に関しては過去 30 年間に膨大な研究があり、これをまとめるのは容易ではない。ここではごく簡単に以下の 4 種類にまとめてみる。

### (1) 単純な VPA の時代

1970 年代には第 2 章で述べたような単純な VPA が使われていた (ようである。この頃のことにはよく知らない)。日本語の資源解析の教科書ではシングルコホート解析と呼ばれているが、最近こういった呼び方はほとんど聞かれない。

## (2) SVPA の時代

1970年代後半から1980年代前半にかけてはSVPA(Separable VPA)が研究されていた。SVPAについては本稿では全く述べなかったが、日本語の資源解析の教科書ではマルチコホート解析と呼ばれている(この呼び方も最近ほとんど聞かれない)。

SVPAは選択率が年によって一定であると仮定し、漁獲係数を年齢依存の選択率 $S_a$ と年に固有な $F_y$ との積として表わす。

$$F_{a,y} = S_a \cdot F_y \quad (C1)$$

そして、例えばデータとして得られている年齢別漁獲尾数をもっとも良く再現するようにこの $S_a$ と $F_y$ を推定する。例えば

$$\sum (C_{a,y} - \hat{C}_{a,y})^2 \quad (C2)$$

という目的関数を考え、これを最小にするパラメータを求める。ここで $C_{a,y}$ は年齢別漁獲尾数データ、 $\hat{C}_{a,y}$ は

$$\hat{C}_{a,y} = \frac{S_a F_y}{S_a F_y + M} N_{a,y} \{1 - \exp(-S_a F_y - M)\} \quad (C3)$$

で計算される。SVPAでは、 $S_a$ 、 $F_y$ 、 $N_{0,y}$ などがパラメータとなる。

この計算は上記の単純なVPAに比較するとはるかに複雑である。特に計算機がまだ現在ほど発達していなかった時代であるので、この複雑なモデルをどう解くかという点にかなりの研究努力が払われたようである。

このSVPAがあまり使われなくなった原因としては、

- ①多くの漁業で選択率に年変化がないという仮定が成立しないこと。
- ②推定精度が悪い、すなわち年齢別漁獲尾数だけの情報では推定に不十分なことが挙げられる。

田中(1985)や能勢ら(1988)の水産資源学の教科書や、嶋津(1983)の解説にはSVPAまでが紹介されている。しかしその後、これ以降のVPAの発展はほとんど紹介されてこなかった(最近出版された桜本(1998)や山田・田中(1999)、あるいは田中(1985)の増補改訂版(1998)ではチューニングVPAについても述べられている)。ここまでのVPAでは努力量の情報は全く使っていない。このため、我が国ではVPAは努力量を用いない解析方法であるという理解がすっかり定着してしまい、努力量やCPUEを積極的に利用するチューニングVPAは邪道である見なされていたように思う。もともとVPAが考案された背景には努力量の測定と評価の困難さという問題があったのであろうが、その後の発展は全く別の方向をたどっている。

### (3) チューニング VPA の時代

1980 年代中頃から現在まで、盛んに研究されまた実際の資源評価に用いられているのがチューニング VPA である。内容については本文で触れたのでここでは述べない。現在、各種の国際漁業委員会や各国沿岸の資源評価に使われている。

### (4) 統合型 VPA の時代

チューニング VPA とほぼ同時期の 1980 年代後半から現在まで、やはり勢力的に研究されまた実際に資源評価に用いられている。統合型 VPA というのは正式な用語ではないが、適切な名称は無いようである。Separability の仮定も使いながら、チューニング VPA のように資源量指数やその他の情報もとりこんで、推定する方法である。

選択率はある期間内で一定、あるいは漁業別に選択率を考えその漁業の中では一定と仮定するといったように、SVPA に比べ大幅に制限が緩められている。ただし、推定するパラメータの数は非常に多くなる。チューニング VPA より使用例は少ないようだが、現在を代表するモデルであることには違いない。

### (5) 参考文献について

チューニング VPA や統合型 VPA は漁業委員会に会議のドキュメントとして提出され、きちんとした原著論文になっていないことが多い。またレビューも不十分で、和文はもちろん英文でも 1980 年代後半以降の適切なレビューはほとんど無いのが現状である。Quinn and Deriso(1999)、平松(1996)の解説とその引用文献を参考にさせていただきたい。また SVPA までの話が主であるが、赤嶺(1995)とその引用文献も参考になろう。

## 補足 D：その他

本稿では取り上げられなかったが重要な話題として、CPUE の標準化、区間推定の方法、推定結果の検討方法などがある。

チューニングに使われる資源量指数は、漁獲量/努力量といった生の CPUE が使われることはまずない。GLM (一般線形モデル) により CPUE に影響を与えるさまざまな要因を取り除いて、標準化した値を使うのが一般的である。GLM による CPUE の標準化については、平松(1995)に簡単な紹介がある。

チューニング VPA で推定される資源尾数や漁獲係数の区間推定には、資源量指数の残差を利用したブートストラップ法が使われることが多い。平松(1996)にごく簡単な紹介がある。残念ながらこれらの計算は表計算ソフトではもはや困難で、独自にプログラムを作るか、資源解析用に作られたソフトを利用する必要がある。

VPA、特にチューニング VPA の結果を検討するために、資源量指数の残差を検討したり、Retrospective Analysis といわれる方法が使われる。これらについても平松(1996)に簡単な紹介がある。

表1. 仮定した資源尾数、漁獲係数とそれから計算される漁獲尾数及び資源量指数。加入量は年々増加した後1993年をピークとして低下、漁獲係数に関しては選択率は年によらず一定、努力量は1992年まで一定の後増加したと仮定した。資源量指数は0歳～4歳までの資源尾数に対応する値が、誤差なしで得られていると仮定した。自然死亡係数 $M=0.4$ 、漁業は一年の中間でパルスの。

資源尾数	1988年	1989年	1990年	1991年	1992年	1993年	1994年	1995年	1996年	1997年
0歳	1000	1200	1400	1600	1800	2000	1800	1600	1400	1200
1歳	497	497	596	695	795	894	935	793	664	547
2歳	235	235	235	281	328	375	394	384	304	237
3歳	105	105	105	105	126	148	156	151	136	99
4歳	45	45	45	45	45	54	58	56	49	40

漁獲係数	1988年	1989年	1990年	1991年	1992年	1993年	1994年	1995年	1996年	1997年
0歳	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.36	0.42	0.48	0.54	0.60
1歳	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.42	0.49	0.56	0.63	0.70
2歳	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.48	0.56	0.64	0.72	0.80
3歳	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.54	0.63	0.72	0.81	0.90
4歳	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00

漁獲尾数	1988年	1989年	1990年	1991年	1992年	1993年	1994年	1995年	1996年	1997年
0歳	212	255	297	340	382	495	505	499	478	443
1歳	120	120	144	168	192	251	297	278	254	225
2歳	63	63	63	76	89	117	138	149	128	107
3歳	31	31	31	31	38	50	60	63	62	48
4歳	15	15	15	15	15	20	24	25	24	21

資源量指数	1988年	1989年	1990年	1991年	1992年	1993年	1994年	1995年	1996年	1997年
0～4歳	1882	2082	2381	2727	3094	3471	3342	2983	2552	2123

表2. 3章のVPAによる推定結果

資源尾数	1988年	1989年	1990年	1991年	1992年	1993年	1994年	1995年	1996年	1997年
0歳	1051	1255	1456	1658	1864	2082	1906	1756	1643	1581
1歳	533	531	633	733	833	937	990	864	768	710
2歳	260	259	257	306	354	401	423	421	351	307
3歳	123	123	122	121	143	165	173	170	160	131
4歳	57	57	57	56	55	65	69	67	62	57

漁獲係数	1988年	1989年	1990年	1991年	1992年	1993年	1994年	1995年	1996年	1997年
0歳	0.28	0.28	0.29	0.29	0.29	0.34	0.39	0.43	0.44	0.42
1歳	0.32	0.32	0.33	0.33	0.33	0.40	0.46	0.50	0.52	0.49
2歳	0.35	0.35	0.36	0.36	0.37	0.44	0.51	0.56	0.59	0.55
3歳	0.37	0.37	0.38	0.38	0.39	0.47	0.55	0.61	0.63	0.60
4歳	0.37	0.37	0.38	0.38	0.39	0.47	0.55	0.61	0.63	0.60

表3. 4章のADAPT型のチューニングVPAによる推定結果

資源尾数	1988年	1989年	1990年	1991年	1992年	1993年	1994年	1995年	1996年	1997年
0歳	1047	1249	1446	1640	1834	2031	1827	1628	1438	1263
1歳	531	528	629	726	822	917	956	811	683	573
2歳	259	258	256	303	349	393	409	398	316	250
3歳	123	122	121	120	141	161	168	161	145	107
4歳	57	57	56	56	55	64	67	64	56	47

漁獲係数	1988年	1989年	1990年	1991年	1992年	1993年	1994年	1995年	1996年	1997年
0歳	0.28	0.29	0.29	0.29	0.29	0.35	0.41	0.47	0.52	0.56
1歳	0.32	0.33	0.33	0.33	0.34	0.41	0.48	0.54	0.61	0.66
2歳	0.35	0.36	0.36	0.36	0.37	0.45	0.53	0.61	0.68	0.74
3歳	0.37	0.38	0.38	0.38	0.39	0.48	0.57	0.65	0.73	0.80
4歳	0.37	0.38	0.38	0.38	0.39	0.48	0.57	0.65	0.73	0.80