

水産資源管理談話会報

第37号

(財)日本鯨類研究所 資源管理研究センター

2006年 2月

翻訳・公表希望者は以下の手続きとり、著者の許可を得た上で
翻訳・公表する。

1. 翻訳・公表希望者は文章（FAX、手紙）で著者、表題および
会報の号を明記し、資源管理談話会事務局を通じて要請し、
著者の許可を得て翻訳・公表する。
2. 翻訳公表物を資源管理談話会事務局に送付する。

目 次

お知らせ

VPAの概要と国内資源評価での適用例 松石 隆 ・ ・ ・ ・ ・ 1

国際漁業委員会におけるVPAおよび関連手法について 平松一彦 ・ ・ ・ ・ ・ 14

VPA の概要と国内資源評価での適用例

松石 隆(北大院水)

1. はじめに

VPA とは、年齢別漁獲尾数を使って資源尾数を推定する方法である。この方法は系群・年級群単位で計算する。他の資源量推定法と大きく異なるのは、扱いが面倒な努力量が不要である点である。この方法は、資源評価手法の標準的手法となりつつあり、多くの国際会議や国内の TAC 算定の基礎となる生物学的許容漁獲量 ABC の計算で使用されている。基本的な VPA をもとに、コホート解析、チューニング VPA やセパラブル VPA (マルチコホート)、体長ベースや体重ベースの VPA 等といったさまざまな理論的發展がされている。

2004 年度北海道資源管理委員会に提出された評価表(未公開資料)によれば、北海道立水産試験場が行った資源量評価の 46 海域(系群)のうち 11 海域が VPA による資源量に基づいていた。また、独立行政法人水産総合研究センターが行った我が国周辺水域の漁業資源評価 43 種 85 海域の資源量評価法のうち 30 海域はコホート解析によるものであった(水産庁増殖推進部他 2004)。Fig. 1 は資源評価に関する論文のうちに VPA 等の年齢構成モデルが占める割合を示している(Megrey 1989)。50 年代には 10% 前後だった年齢構成モデルは、80 年代には 45% に達しており、年齢構成モデルが資源評価に関する手法の主流となっていることを示している。

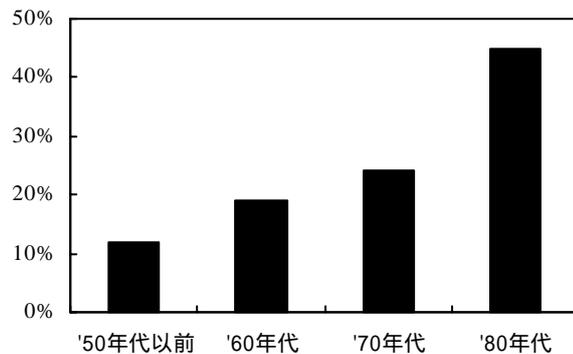


Fig. 1 資源量推定に関する論文の内、年齢構成モデルが占める割合(Megrey 1989)

さて、VPA という言葉と同時に「コホート解析」という言葉も使われ、混同される事もあるが、Pope(1972)には、以下のように書かれている。

Gulland's virtual population analysis (Gulland 1965) is an extremely useful technique when assessing a fishery, because it enables estimates of population at age and fishing mortality to be made independently of the measurement of effort...

Cohort analysis is a new form of virtual population analysis developed by the author to overcome these problems...

このように、Gulland の方法が VPA、これに対して、Pope の近似式が「コホート解析」である事がわかる。

社会学等で研究されている世代解析も「コホート解析」または「コーホート解析」と呼ばれ、VPA や Pope のコホート解析と混同されることがある。水産学分野以外でもこの語が使われていることから、「コホート解析」の方が VPA より一般的な様に思われがちであるが、水産資源解析の専門用語では、Pope のコホート解析は VPA の一つの近似式であり、VPA の方が一般的な意味である。本稿で扱う内容は、Pope のコホート解析を含む VPA である。

本稿では、このように、主流となっている VPA について、その歴史と発展、必要なデータの収集、標準的な VPA の手順、国内における適用例及び VPA の限界と可能性について、検討する。

2. VPA の歴史

VPA は、一種の年齢構成個体群動態モデルである。最初に、年齢構成モデルを用いて水産資源の資源量推定をしたのは、Derzhavin (1922)であろうと、Megrey (1989)は記述している。この考え方は、単純である年級群の累積漁獲量を以てその年級群の加入量を近似できるとしたものであった。ある年級群の最低限の加入資源量に相当する。残念ながら原著はロシア語である。

最初に virtual population(仮想個体群)という語を使用したのは Fry(1949)である。Fry は、ある年級群の累積漁獲量を、仮想個体群 virtual population と呼んだ。また、漁獲方程式を virtual population に適用し、一定の漁獲率・自然死亡係数での資源量を推定するなど、今後の VPA の理論展開の基礎を作った。

Jones (1964)はこの理論を発展させ、漁獲係数の推定に議論を進めた。また、年齢別自然死亡係数が得られた場合の資源量推定法について議論をした。現在は年齢に寄らず一定と仮定することが多い自然死亡係数について、1964年に既に年齢別自然死亡係数について導入が検討されていることは興味深い。しかし、この手法は加入量が一定であるといった平衡状態を仮定しており、変動のある現実の資源に必ずしも十分に適用できるものでは無かったようである。

Murphy (1965)は、漁獲量や自然死亡係数から年齢別の漁獲係数を推定し、個体数推定する方法を提示した。しかし、漁獲係数の算定には繰り返し計算を必要とし、数式表現や計算は単純なものではなかった。

VPA が現在の形に近い物になったのは、Gulland (1965)の論文である。VPA の引用文献としてはこの論文が使われることが多い。Gulland は、最高齢から後ろ向きに計算する VPA の形を作った。このことにより、平衡状態を仮定せずに資源量推定が可能となった。しかし、漁獲係数 F について、漁獲量と資源量から解析的に書けないという問題は残ったままであった。すなわち、漁獲方程式、

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

から、 y 年 a 歳の漁獲尾数 $C_{a,y}$ は漁獲係数 F 、自然死亡係数 M および y 年 a 歳の資源尾数 $N_{a,y}$ から求まるが、この方程式を F について解いて、 F を C, M および N の関数として書き表そうとして

も、そのような数式が $F = \dots$ という形で明示的に書けないのである。そのため、翌年の資源尾数を

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

として計算するときの正確な F の値を簡単に求めることができないという問題があった。

この F の問題を解決したのが、Pope (1972) の論文である。この論文では、 F の計算における誤差を回避するために、年の半分の時点で瞬間的に漁獲すると仮定した。すなわち、(2) の代わりに

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

としたのである。そして、その誤差を検討し、現実的な範囲内で誤差が十分に小さいことを示した。

Pope 以外にもさまざまな近似式が提案されている。Pope (1972) は、年のちょうど真ん中、すなわち 7 月 1 日にパルス的に漁獲すると仮定すると精度がよいとしたが、Allen and Hearn (1989) は 6 月 1 日にパルス的に漁獲すると仮定した方が常識的な漁獲状況の中で、Pope の近似よりも精度がよいことを示した。Evans (1989) は、近似多項式を求めた。Hiramatsu (1995) は、漁期が年内の一定期間の場合、定積分によって解析的に書くことができることを示した。このようにさまざまな近似式が提案された。

以上で紹介した手法は、一つの年級群に注目した解析で、いわゆるシングルコホートと言われるものである。一方、Doubleday (1976) や Pope and Shepherd (1982) は、複数の年級群を同時に解析するセパラブル VPA (SVPA) を提案している。この方法は、ここで、 y 年の a 歳の漁獲係数 $F_{a,y}$ が年別の漁獲強度を表す指数 F_y と年齢別選択率 S_a の積で表されると仮定したものである。すなわち、

$$F_{a,y} = S_a \times F_y \quad (4)$$

この仮定のことをセパラブル(separable)の仮定と呼ぶ。この仮定により、今まで「年数×年齢数」の F を推定する必要があったものを、「年数 + 年齢数」のパラメータを推定すればすべての年のすべての年齢の F が計算できるため、モデルの自由度が多くなる。推定すべきパラメータ数が少なくなった分、例えば自然死亡係数の推定が理論上可能になった。体長コホート等をはじめとして、さまざまな理論的な発展がなされているが、セパラブルの仮定が厳密に成り立つ場合は多くなく、この仮定が崩れた場合の頑健性を検討して使用する必要がある。

一方、近年、広く使われるようになったのが ADAPT あるいはチューニング VPA と呼ばれる方法である。VPA で仮定しなければいけない、最高齢、最近年の F を CPUE や努力量などの外部情報から得ようとするものである。ADAPT の原著 (Gavaris 1988) は入手しにくいですが、Powers and Restrepo (1992) あるいは Butterworth and Punt (1992) に詳細が記述されており、ICCAT のホームページから入手することができる。

以上は基本的に年齢を基本とした資源量推定法であるが、実際には年齢査定が困難であったり、可能であってもされていない魚種が少なくない。このような魚種のために、体長や体重などの体サイズにもとづく資源量推定法が開発されている。

Jones (1981)は、平衡状態を仮定し、また成長が von Bertalanffy の成長曲線に従うと仮定した場合の解析法を提案し、その精度を Lai and Gallucci (1988)が示した。しかし、仮定が厳しすぎて実際に適用できる場面は限られる。

Sullivan et al.(1990)や松石(1996, 1997)の方法は、成長曲線を仮定せず体長の遷移行列を用いた資源量推定法である。この手法は、特に年齢形質が無く、脱皮時にのみ成長するカニ類への親和性が良く多くの適用例がある(Quinn and Deriso 1999, Ueda and Matsuishi 2004, Ueda and Matsuishi in press, Ueda et al. 2001, Zheng et al. 1995, Zheng et al. 1996, 三原栄次 et al. in press, 山口宏史 et al. 2000)。また、タラなどの大型の魚は市場の伝票等に一個体ずつの重量が記載されていることから、これを用いた資源量推定も可能である。上田ら(Ueda and Matsuishi 2004, Ueda and Matsuishi 2005, Ueda et al. 2001)は、北海道南部海域のマダラについて、体重にもとづく解析を行った。

このように、Fry によって開発された VPA はさまざまな発展がなされてきた。最初は資源量推定の一手法であったが、近年は CPUE などの外部情報も取り込みうる統合型モデルの枠組みとしての役割が大きくなっているように思われる。

3. VPA に至るまで

VPA の具体的な手法に入る前に、VPA に用いるデータについて整理をしておきたい。VPA は、年齢別漁獲尾数にもとづく資源量推定法であるが、年齢別漁獲尾数を得るためにさまざまな情報を集める必要があり、またその計算法も多様である。

Age-Length Key(ALK)を用いた標準的な手順は、およそ以下の通りであろう。

1. 漁獲物の体長測定
2. 体長組成を得る
3. 体長 - 体重関係を調べる
4. 体長別漁獲尾数を得る
5. 標本の年齢査定する
6. Age-Length Key を作る
7. 年齢別漁獲尾数を得る
8. VPA で年齢別資源量を推定する

この準備の過程にも、さまざまな疑問がわいてくる。例えば、年齢別漁獲尾数の誤差は結果に影響を与えるのか、何回体長測定を行えばよいのか、何カ所で体長測定を行えばよいのか、何個体測定すれば良いのか、何個体標本を集めればよいのか、ALK は毎年作り直さないといけないのか、年齢査定精度はどのような影響するか、などといった点は、現場で漁獲物の測定、生物標本の分析を行い資源量推定する人たちにとっては重要な関心事である。

上記の疑問について全ての問題について、ここで議論することはできないが、Quinn and Deriso (1999)が重要なヒントを示している。これによれば、推定される a 歳の資源量の標準誤差 $SE(N_a)$ は以下のような式で与えられるとしている。

$$SE^2(N_a) = SE^2(N_{a+1})e^{2M_a} + SE^2(C_a)e^{M_a} \quad (5)$$

ここで、 $SE(C_a)$ は a 歳の資源量の標準誤差、 M_a は、 a 歳の自然死亡係数である。この式から、年齢別漁獲尾数の誤差は、推定される年齢別資源尾数の誤差に加算されること、また、誤差は若齢になるほど累積されることがわかる。

このように、当然ではあるが、VPAの計算に入力するデータの誤差が、資源量推定結果に影響を及ぼすため、標本収集や測定に慎重を期さなければならない。

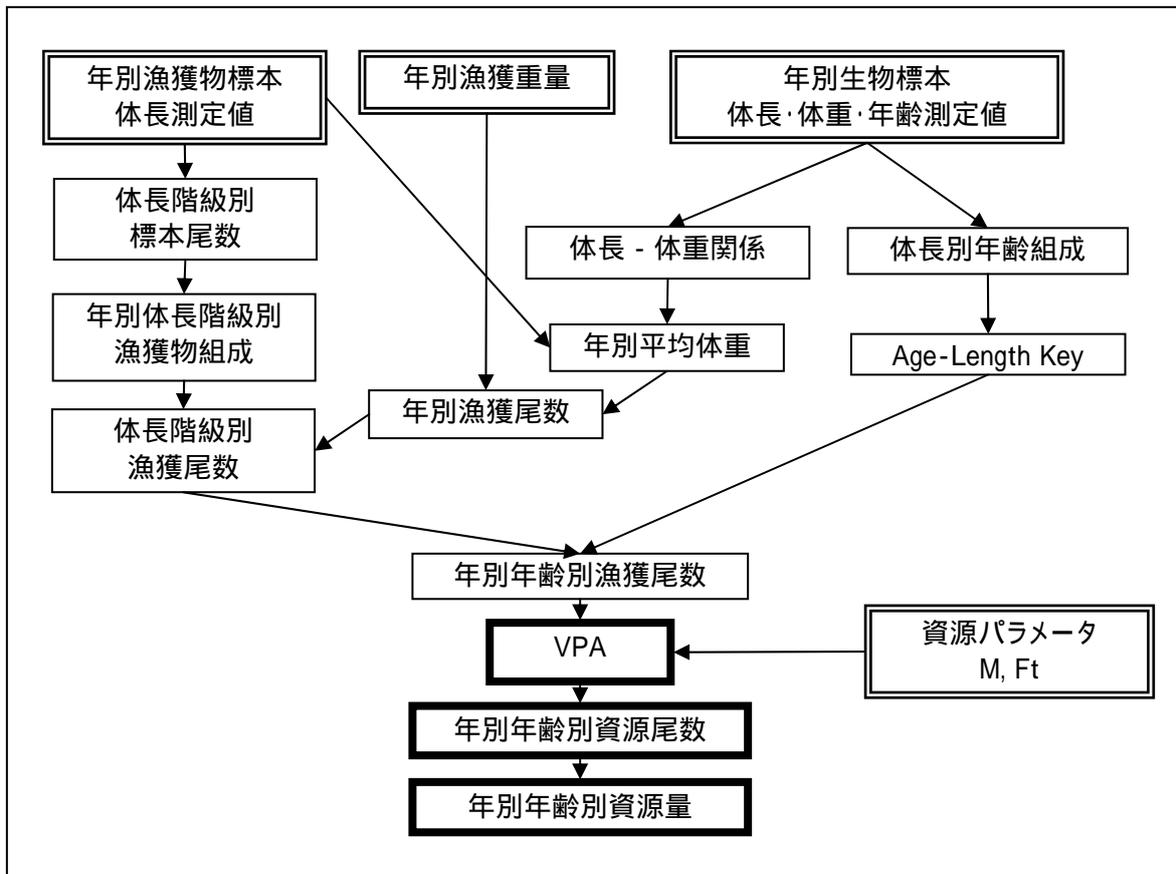


Fig. 2 年別漁獲物標本体長測定値、年別漁獲重量、年別生物標本体長・体重・年齢測定値からVPAを用いて年別年齢別資源尾数、年別年齢別資源重量を得るまでの手順

4. 標準的なVPA

さて、信頼できる年齢別漁獲尾数や自然死亡係数等の資源パラメータが集まったとしよう。これを使ってどのようにVPAの計算を行うかについて概説したい。基本的にはPope(1972)に従うが、最高齢・最近年の漁獲係数(ターミナル F)の推定などには、工夫が必要である。平松(2001)に、実際のVPAの計算方法について非常によい解説がなされているので、ここでは、この内容に沿って概要のみを追うことにする。

基本となる方程式は以下の式である。

$$N_{a,y} = N_{a+1,y+1}e^M + C_{a,y}e^{M/2} \quad (6)$$

これによって、年別年齢別の漁獲尾数を高齢時の推定個体数に自然死亡分を補正しながら加えていくことによって、若齢時の推定個体数を順次計算していく。

計算を始めるに当たって、最高齢、あるいは最近年の年別年齢別個体数が必要である。この点については、漁獲係数の実績から最近年・最高齢の漁獲係数を推定し、漁獲係数と漁獲尾数から個体数を推定するという手順を取る。個体数が推定されている年・年齢についての漁獲係数については以下の式で計算する。

$$F_{a,y} = \ln\left(\frac{N_{a,y}}{N_{a+1,y+1}}\right) - M \quad (7)$$

まず、最近年(Y)最高年齢(A)の漁獲係数 $F_{A,Y}$ を仮に置く。これを用いて、最近年最高年齢の資源量を以下のように計算する。

$$N_{A,Y} = \frac{C_{A,Y}}{1 - e^{-F_{A,Y}}} e^{M/2} \quad (8)$$

しかし、多くの場合、高齢魚の年齢査定が不確かであることや標本個体数が少ないなどの理由で、高齢魚はプールして扱われる事が多い。このような高齢魚個体群をプラスグループという。例えば8歳以上をまとめて扱う場合は8+と記載する。サケ科魚類などでしばしば、満年齢を超えた魚を、満年齢ちょうどの個体と区別するために2+などと記載することがあるが、これとは異なるので注意が必要である。

高齢魚をプラスグループとして扱う場合には、(8)式を用いることが出来ず、以下の式を用いる。

$$N_{A,Y} = \frac{F_{A+Y} + M}{F_{A+Y}} C_{A+Y} \quad (9)$$

$$N_{A+Y} = \frac{N_{A,Y}}{1 - e^{-(F_{A+Y}+M)}} = \frac{1}{1 - e^{-(F_{A+Y}+M)}} \frac{F_{A+Y} + M}{F_{A+Y}} C_{A+Y} \quad (10)$$

ここで、(9)式は、 A 歳のみの個体数、(10)式は A 歳以上のプラスグループの個体数を推定している。 $N_{A-1,Y-1}$ を計算するときは(9)式を、また Y 年の資源量や産卵親魚量を計算するときは(10)の結果を使う。なお、(9)は、

$$\begin{aligned} N_{A,Y} + N_{A,Y-1}e^{-(F_{A+Y-1}+M)} + N_{A,Y-2}e^{-(F_{A+Y-2}+M)} + \dots \\ = N_{A,Y} \left(1 + e^{-(F_{A+Y}+M)} + e^{-2(F_{A+Y}+M)} + \dots \right) = \frac{N_{A,Y}}{\left(1 - e^{-(F_{A+Y}+M)} \right)} \end{aligned}$$

という近似を行っており、高齢魚の個体数や漁獲係数が変動すると厳密には正しくなくなる。また、(9)(10)は、漁獲方程式(1)(2)にもとづいて計算されており、暗黙の内に年間一定の漁獲圧がかかっていることを仮定している。Popeの式(3)を仮定した場合、この2式は

$$N_{A,Y} = \frac{1 - e^{-(F_{A+Y} + M)}}{1 - e^{-F_{A+Y}}} C_{A+Y} e^{M/2} \quad (11)$$

$$N_{A+Y} = \frac{C_{A+Y}}{1 - e^{-F_{A+Y}}} e^{M/2} \quad (12)$$

となり、若干結果が異なる。年の中間でパルス的な漁業が行われている場合は厳密には(11),(12)を用いるのがより正しいが、Pope の式(3)を式(2)の近似式として用いているならば、たとえそれ以外の計算を Pope の式で行っていたとしても(9),(10)を使った方がよいのかもしれない。いずれにしても、その差は僅かであり、結果にはほとんど影響しない。

(8),(9)または(11)式で $N_{A,Y}$ が求まったならば、(5)式で $N_{A-1,Y-1}$ を求める。 $C_{A-1,Y-1}$ は得られているので(6)式で $F_{A-1,Y-1}$ を求める。以降順番に、若齢に向けて順次年級群を追って行けば、最終年最高年齢の年級群については全ての年齢での資源尾数の計算が終わる。しかし、最初に用いた $F_{A,Y}$ は仮の物であったため、現在得られている個体数が最終結果になるわけではない。このことについてはあとで解決することにして、計算を先に進めよう。

ある程度高齢になると、生息場所や体長に変化が少なくなる。その場合、同じ年の隣り合った年齢の高齢魚に対する漁獲圧が異なる理由は見つからない。そこで、

$$F_{A,y} = F_{A-1,y} \quad (13)$$

と仮定しよう。 $F_{A-1,Y-1}$ は、(6)によって既に求まっていたので、 $F_{A,Y-1} = F_{A-1,Y-1}$ によって、一年前に発生した年級群の最高年齢での漁獲係数 $F_{A,Y-1}$ を得る。これを元に、 $N_{A,Y-1}$ 、 $N_{A-1,Y-2}$ 、 $F_{A-1,Y-2}$ と順次年級群を遡ることができる。さらに(13)式の仮定から、 $F_{A,Y-2} = F_{A-1,Y-2}$ と計算でき、さらに1年前に発生した年級群の最高年齢での漁獲係数 $F_{A,Y-2}$ を得る。この手順を順次繰り返していくことによって、最近年に最高年齢になっている年級群およびそれより前に発生している年級群については、全ての年齢で個体数の推定ができたことになる。

しかし、それより新しい年級群については最近年のそれぞれの年齢での個体数または漁獲係数を推定しないと計算できない。もし、ここ数年、漁具や漁獲努力量に大きな変化が無く、年別の漁獲係数や選択率に変化がないと仮定できるならば、過去数年の漁獲係数の平均値を以て、最近年の漁獲係数と推定することができるかもしれない。既に、 $F_{A-1,Y-1}$ 、 $F_{A-1,Y-2}$ 、 $F_{A-1,Y-3}$ は得られているので、

$$F_{A-1,Y} = \frac{1}{3} (F_{A-1,Y-1} + F_{A-1,Y-2} + F_{A-1,Y-3}) \quad (14)$$

として、最近年に最高齢に達したコホートより1年後に発生したコホートの最近年の漁獲係数が推定できる。そうすれば、(7)式同様

$$N_{A-1,Y} = \frac{C_{A-1,Y}}{1 - e^{-F_{A-1,Y}}} e^{M/2} \quad (15)$$

として、最近年の個体数が推定され、これを元に(5)にしたがって、全ての年齢での個体数を推定すればよい。さらにこの過程で $F_{A-2,Y-1}$ が推定されるので、

$$F_{A-2,Y} = \frac{1}{3}(F_{A-2,Y-1} + F_{A-2,Y-2} + F_{A-2,Y-3}) \quad (16)$$

から $N_{A-2,Y}$ を求めて、このコホートの計算を行う。順次この手順を繰り返していくことによって、最終的には全ての年で全ての年齢での個体数と漁獲係数が推定される。

しかし、この計算の前提として、 $F_{A,Y}$ は仮の物であった。 $Y-1$ 年以前は、すべて(13)式に従って $F_{A,y} = F_{A-1,y}$ となっているが、 $F_{A-1,y}$ については、(14)式で得られているため、(13)式が成り立っていない。そこで、仮に置いた $F_{A,Y}$ を動かして、探索的に $F_{A,y} = F_{A-1,y}$ となる $F_{A,Y}$ を求める。この作業は非線形最適化法を用いることになるが、エクセルのソルバーを使えば短時間で得ることができる。

$F_{A,Y} = F_{A-1,Y}$ となる $F_{A,Y}$ が求まり、それにもとづいて計算された全ての年、全ての年齢での個体数推定値が得られれば、これが最終結果となる。

5. 国内での VPA の適用例

VPA が標準的な資源量推定手法として広く用いられていることは前述した。Table 1 は平成 16 年度我が国周辺水域の漁業資源評価の資源評価手法(水産庁増殖推進部他 2004)をまとめたものである。TAC 対象種のうちズワイガニ、スルメイカは除いている。多くの系群でコホート解析を採用している事がわかる。また、チューニング VPA を用いており、チューニングに使用する指標も複数用いている例も少なくない。

では、スケトウダラ太平洋系群を例に、より詳細に見てみよう。この系群は常磐沖から北方四島にかけて分布している。主産卵場は噴火湾で、若齢期に東北地方太平洋に分布し、成魚は道東太平洋で底曳網、噴火湾では刺し網で漁獲される。成熟開始年齢は 3 歳で、8 歳前後まで漁獲対象となる比較的寿命の長い魚種である。

Table 1 平成 16 年度我が国周辺水域の漁業資源評価(TAC 対象魚類)に用いられた資源評価手法(水産庁増殖推進部他 2004)

魚種	系群	資源評価手法	備考
マイワシ	太平洋系群	コホート	チューニング 6 指標
	対馬暖流系群	卵稚仔調査・コホート等	
マアジ	太平洋系群	コホート	チューニング無し
	対馬暖流系群	コホート	
マサバ	太平洋系群	コホート	チューニング 5 指標
	対馬暖流系群	コホート	
ゴマサバ	太平洋系群	コホート	チューニング無し
	東シナ海系群	コホート	
サンマ	太平洋北西部系群	掃海面積法	
スケトウダラ	日本海北部系群	コホート	F の一部を手動で微調整
	根室海峡	CPUE 等	
	オホーツク海南部	CPUE 等	
	太平洋系群	コホート	

Fig. 3 は、スケトウダラ太平洋系群の再生産関係である(水産庁増殖推進部他 2004)。このように、卓越年級群が発生することがあり、卓越年級群が資源を支えることが多い。しかし、再生産関係は不明確であり、多分に海洋環境等、親魚量以外の要因に依存して加入量が決定されているのだろう。このような資源に対しては、近年の加入量の多寡が、資源管理を考える上で重要な関心事である。

この系群の資源量推定は ADAPT によるチューニング VPA によって行われている。チューニングする指標は 1 歳魚の現存量 $I_{1,y}$ (科学魚探調査結果・7 年分) と沖合底曳網の CPUE $X_{a,y}$ (2 ~ 6+ 歳・14 年分) である。以下の目的関数を用いて、これらの指標とコホート解析結果が一致するような最近年の漁獲係数 F を求めている。

$$SSQ = \sum_y (\ln(I_{1,y}) - \ln(qN_{1,y}))^2 / 7 + \sum_y (\ln(X_{a,y}) - \ln(bN_{a,y}))^2 / 5 / 14 \quad (17)$$

ただし、 q, b は定数である。

Fig. 4 は、チューニングをしたときとしないときの資源量推定結果の違いを示している。ご覧のように最近数年間の資源量推定結果がチューニング有りとチューニング無しで大きく異なっている。どちらが正しいのかは、まだ結論することはできないが、今までのところ 2000 年や 2003 年に過去最大の加入があった事を示すような状況は無く、チューニングをした推定結果の方が事実に近いという印象が強い。

チューニングをしなかった場合、加入量の推定精度を検討するために、レトロスペクティブ(retrospective)解析をおこなった。資料は 1981 年から 2003 年のスケトウダラ太平洋系群年齢別漁獲尾数を使用し、自然死亡係数など、VPA の詳細は、北海道区水産研究所が行っている計算に極力近い物とし

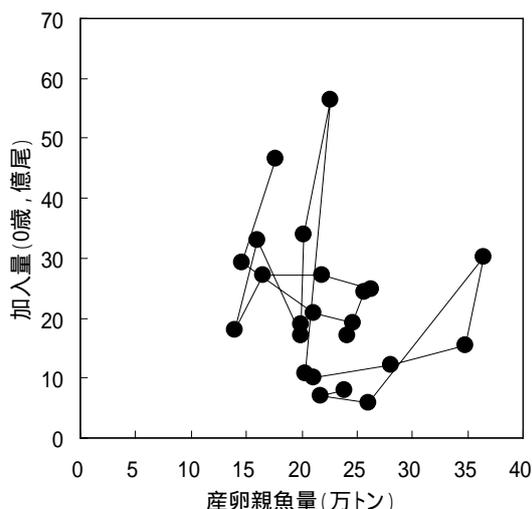


Fig. 3 スケトウダラ太平洋系群の再生産関係 (水産庁増殖推進部他 2004)

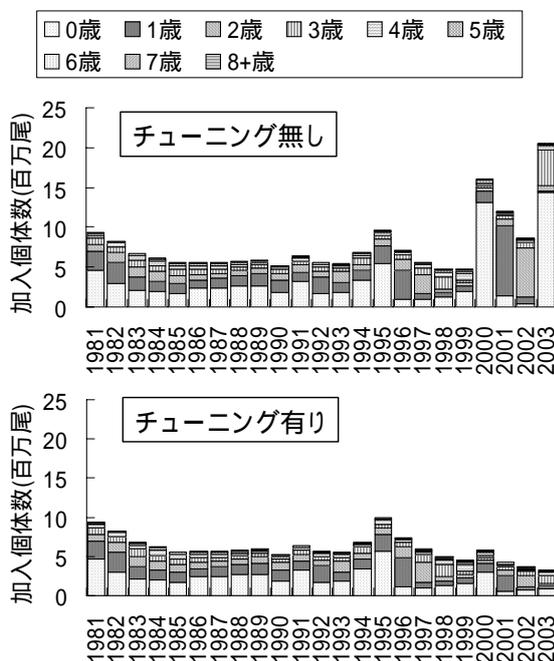


Fig. 4 VPA によるスケトウダラ太平洋系群資源尾数推定結果年齢別漁獲尾数(水産庁増殖推進部他 2004)を使用して、松石が試算

た。この年齢別漁獲尾数を最近年から1年分ずつ削除してコホート計算を行う。例えば、2001年以降のデータを削除することによって、2000年現在の資源量推定を再現することができる。2000年級群については2000年時点では0歳魚の漁獲尾数だけが情報がないが、2003年になると、それぞれの年に0歳、1歳、2歳、3歳で漁獲された漁獲尾数が蓄積されているので、加入量の推定がより正確に出来るはずである。データの蓄積によって、どの程度推定値が収束していくのかをこの解析で示すことができるのである。

Fig. 5がこのレトロスペクティブ解析の結果である。ご覧のように、最近年の推定は非常に不安定であることがわかる。特に、この資源の場合は、最近年の資源量推定値を大幅に過大評価する傾向があるようである。

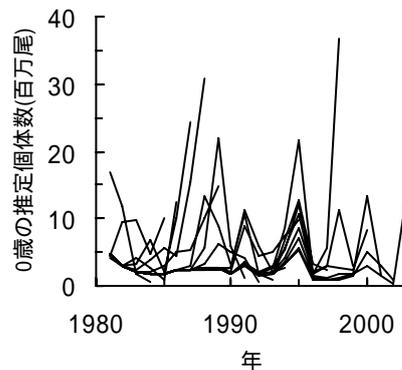


Fig. 5 スケトウダラ太平洋系群のVPAによる0歳魚個体数推定値レトロスペクティブ解析結果

では、何年程度のデータの蓄積が必要なのだろうか。Fig. 6はスケトウダラ太平洋系群の1984～1994の0歳時個体数推定結果について、使用するデータ年数と最終結果に対する推定値の比率を示したものである。6年程度の蓄積があれば、多くの年級群で最終結果に近い加入尾数が推定されている。しかし、資源管理をするのならば、加入から6年後に加入量が推定されても手遅れである。

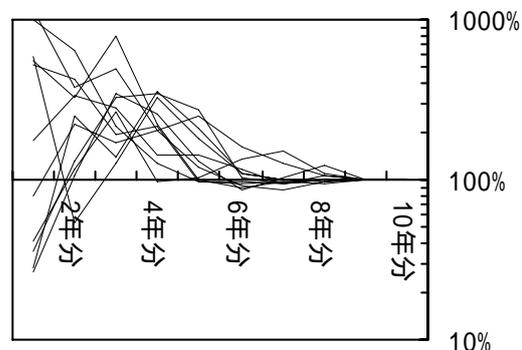


Fig. 6 スケトウダラ太平洋系群の1984～1994の0歳時個体数推定結果。使用するデータ年数と最終結果に対する推定値の比率

6. VPAの限界と可能性

VPAの欠点としてよく指摘されるのは、近年の資源量推定値の精度が悪いこと、推定が困難な自然死亡係数に結果が依存すること、

- 年齢査定が必要なこと、
- 移入・逸散のある資源には利用が困難なこと
- といった点である。

VPAによる近年の資源量推定値は精度が悪いのは、VPA特有の問題ではない。漁獲加入してから10年たった年級群については、10年分の年齢別漁獲尾数情報が有る。年によって潮按配が悪く漁獲が少なかったり、あるいはたまたま漁場が沿岸に形成されて漁獲効率が良かったりしても、数年間の内にそれらの要因による偏りは均されて、安定した資源量推定値が得られる。一方、近年加入した年級群については、年齢別漁獲尾数情報が少ないので、資源量以外の要因による

漁獲の多寡に影響を受けやすくなる。情報があれば、計算の仕方の工夫もできるが、情報が無いのであれば、仮定に頼らざるを得ない。

このようなことを考えると、特に資源管理に影響の大きい最近年の資源量推定値については、機械的に VPA を適用するわけにはいかない。前章で示したように、機械的に適用すると、時には桁の違う推定値が出てきてしまうこともある。かといって、もちろん恣意的に資源推定値を決定することもできない。この問題を根本的に解決するには、なによりも情報量を増やすことだろう。CPUE や魚探調査結果、その他資源量の指標となりうる種々の年齢別漁獲尾数以外の情報を組み入れて、チューニングを行うと、より現実的な結果になってくることが期待される。

自然死亡係数 M による結果への影響は大きい。試しに $F=0.3$, $M=0.2$ といった現実的なパラメータから作った模擬年齢別漁獲尾数を用いて、 $M=0.4$ と仮定して VPA を行うと、加入量が 2 倍近く過大推定された。 M を正確に推定する必要があるわけであるが、残念ながら、海洋に生息する回遊資源に対して M を正確に推定することは、実際にはかなり困難である。国内の多くの資源評価では、2.5 を寿命で割る「田中の方法」(田中昌一 1960)を用いている。寿命を用いて自然死亡係数を推定する同様の試みは Hoenig(1983)でもなされている。また、生息環境における表面水温と成長曲線のパラメータから自然死亡係数を推定する方法(Pauly 1980)、生殖腺重量から推定する方法(Gunderson 1980)などもある。また、多くの解析では、自然死亡係数の年齢(体長)依存は考慮していないが、例えばスケトウダラ太平洋系群のように、自然死亡の年齢依存を考慮した VPA を行っている資源もある。実際の計算で年齢別自然死亡係数が与えられても、計算はさほど煩雑にはならない。自然死亡係数と体長との関係を示した研究も報告されている(Beyer et al. 1999, Lorenzen 2000)。自然死亡係数の推定に関する総説も書かれている(Hightower 1998, Vetter 1988)。どの手法が正しいとはなかなか結論づけられないが、いろいろ試して妥当な推定値を探すと良いだろう。自然死亡係数の推定値が誤っていると推定資源量の絶対値は偏るが、資源動向の評価には影響が少ないのは救いである。

VPA は年齢ベースの資源量推定法であるから、当然、漁獲物の年齢査定ができないと推定できない。どうしても年齢査定ができない魚種については、前述の体長ベースの資源量推定法を使用するのも一案である。また、体長組成分解等によって年齢を決定することも、候補の一つとして考えられる。年齢別漁獲尾数が不正確であれば、当然、推定される資源尾数の精度は悪くなるが、年齢査定が完璧でないことを理由にして年齢ベース解析をあきらめ、年齢をプールの解析にしてしまうのは大幅に情報量を失うことになる。不正確であったとしても、漁獲物の組成には資源動態に関する情報が含まれているのであるから、それを利用しなければ、推定精度が落ちるのは当然である。

VPA は年齢ベースの解析であるから、短命な資源に対しては使用が困難である事が多い。しかし、寿命が長い魚ならば VPA に適しているか、というと、必ずしもそうではない事もある。例えばホッケなどのように、高齢になると、岩礁地帯などに移動して漁獲の対象とならない魚種は注意が必要である。標準的な VPA は系群単位、年級群単位で計算し、移入・逸散については考慮されていない。しかし、高齢になると漁獲対象とならない魚種は、逸散をしている事になり、これについて

の考慮が必要になってくる。また、回遊経路や系群の単位が不明確な魚種、その魚種を対象とする漁業の一部に漁獲実態が把握されていない漁業が含まれている場合も注意が必要である。

このようにいろいろな限界はあるが、さまざまな資源量推定法の内でも、VPA は情報を最大限に取り込むことができる資源量推定法なので、取り込む情報が正しければ、当然精度も上がってくる。また、CPUE や努力量の変動、 M の年・年齢依存などについても取り込む事ができる。VPA の限界を認識する必要はあるが、自信を持って使って良いと確信している。

7. 謝辞

本稿の草稿に対して貴重なコメントを賜った、北原武氏、平松一彦氏、上田祐司氏に感謝する。

8. 文献

- Allen, K. R., and W. S. Hearn. 1989. Some procedures for use in Cohort analysis and other population simulations. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 46: 483-488.
- Beyer, J., C. Kirchner, and J. Holtzhausen. 1999. A method to determine size-specific natural mortality applied to westcoast steenbras (*Lithognathus aureti*) in Namibia. *FISHERIES RESEARCH* 41: 133-153.
- Butterworth, D. S. and A. E. Punt. 1992. A review of some aspects of the assessment of the western North Atlantic bluefin tuna. *ICCAT Col. Vol. Sci. Pap.* 39(3):731-757.
- Doubleday, W. G. 1976. A least squares approach analyzing catch at age. *Int. Comm. Northwest Atl. Fish. Res. Bull.*, 12: 145-167.
- Derzhavin, A. N. 1922. The stellate sturgeon (*Acipenser stellatus* Pallas), a biological sketch. *Byulleten Bakinskoi Ikhtologicheskoi Stantsii* 1: 1-393.
- Evans, G. T. 1989. Rational approximations to solutions of the VPA equations. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 46: 1274-1276.
- Fry, F. E. J. 1949. Statistics of a lake trout fishery. *Biometrics* 5: 26-67.
- Gavaris, S. 1988. *An adaptive framework for the estimation of population size*. Department of Fisheries and Oceans Biological Station, St. Andrews.
- Gulland, J. A. 1965. Estimation of mortality rates. *Annex to Arctic fisheries Working Group Report*. ICES C. M., Hamburg, January 1965.
- Gunderson, D. R. 1980. Using r-K selection theory to predict natural mortality. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 37: 2266-2271.
- Hightower, J. 1998. Estimating natural mortality.
<http://legacy.ncsu.edu/classes/zo726001/EstimatingM.html>.
- Hiramatsu, K. 1995. A Theoretical Study of Equations Used in Virtual Population Analysis. *Fisheries Science* 61: 752-754.
- 平松一彦. 2001. VPA(Virtual Population Analysis). Pages 104-128 in 田中昌一他, 編. 平成 12 年度資源評価体制確立推進事業報告書 資源解析手法教科書 . 社団法人日本水産資源保護協会, 東京.
- Hiramatsu, K., and E. Tanaka. 2004. Reliability of stock size estimates from adaptive framework virtual population analysis. *Fisheries Science* 70: 1003-1008.
- Hoening, J. M. 1983. Empirical use of longevity data to estimate mortality rates. *Fish. Bull.* 81: 898-903.
- Jones, R. 1964. Estimating population size from commercial statistics when fishing mortality varies with age. *Rapp. p.-v. reun. - Cons. int. explor. mer* 155: 210-214.
- Jones, R. 1981. The use of length composition data in fish stock assessments (with notes on VPA and cohort analysis). *U. N. FAO Fisheries Circ.734*, Rome.

- Lai, H. L., and V. F. Gallucci. 1988. Effects of parameter variability on length-cohort analysis. *J. Cons. int. Explor. Mer* 45: 82-92.
- Lorenzen, K. 2000. Allometry of natural mortality as a basis for assessing optimal release size in fish-stocking programmes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 57: 2374-2381.
- 松石隆. 1996. 漁獲物の体長組成データにもとづくマルチコホート解析法の開発と推定精度の評価. 東京大学, 東京.
- 松石隆.. 1997. 漁獲物の体長組成データにもとづくマルチコホート解析法の開発と推定精度の評価. 北海道大学水産学部紀要 43: 1-80.
- Megrey, B. A. 1989. Review and comparison of age-structured stock assessment models. *Amer. Fish. Soc. Symp.* 6: 8-48.
- 三原栄次, 山口宏史, 上田祐司, 松石隆. *in press*. 北海道噴火湾におけるケガニの甲長に基づく資源評価と資源管理. 日本水産学会誌.
- Murphy, G. I. 1965. A solution of the catch equation. *J. Fish. Res. Board Can.*, 22: 191-202.
- Pauly, D. 1980. On the interrelationships between natural mortality, growth parameters, and mean environmental temperature in 175 fish stocks. *J. Cons. int. Explor. Mer* 39: 175-192.
- Pope, J. G. 1972. An investigation of accuracy of virtual population analysis using cohort analysis. *Research Bulletin of the International Commission for the Northwest Atlantic Fisheries* 9: 65-74.
- Pope, J. G., and J. G. Shepherd. 1982. A simple method for the consistent interpretation of catch-at-age data. *J. Cons. int. Explor. Mer* 40: 176-184.
- Powers, J. E., and V. R. Restrepo. 1992. Additional options for age-sequenced analysis. *ICCAT Col. Vol. Sci. Pap.* 39(2): 540-553.
- Quinn, T. J., II, and R. B. Deriso. 1999. *Quantitative Fish Dynamics*. Oxford University Press, Oxford.
- 水産庁増殖推進部他. 2004. 我が国周辺水域の漁業資源評価. 水産庁増殖推進部, 東京.
- Sullivan, P. I., H. L. Lai, and V. F. Gallucci. 1990. A Catch-at-Length Analysis that Incorporates a Stochastic Model of Growth. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 47: 184-198.
- 田中昌一. 1960. 水産生物のポピュレーション・ダイナミクスと漁業資源管理. 東海水研報 28: 1-200.
- Ueda, Y., and T. Matsuishi. 2004. The Weight-based Virtual Population Analysis of Pacific Cod *Gadus macrocephalus* off the Pacific Coast of Southern Hokkaido, Japan. *Fisheries Science* 70: 829-838.
- Ueda, Y., and T. Matsuishi. 2005. Weight-based yield per recruitment and spawning-biomass per recruitment analyses of Pacific cod *Gadus macrocephalus* off the Pacific coast of southern Hokkaido, Japan. *Fisheries Science* 71: 799-804.
- Ueda, Y., and T. Matsuishi. *in press*. Weight-based yield per recruitment and spawning-biomass per recruitment analyses of Pacific cod *Gadus macrocephalus* off the Pacific coast of southern Hokkaido, Japan. *Fisheries Science*.
- Ueda, Y., T. Matsuishi, and Y. Kanno. 2001. Weight-based population analysis: an estimation method. *FISHERIES RESEARCH* 50: 271-278.
- Vetter, E. F. 1988. Estimation of natural mortality in fish stocks: a review. *Fish. Bull.* 86: 25-43.
- 山口宏史, 上田祐司, 菅野泰次, and 松石隆. 2000. 北海道東部太平洋海域ケガニ資源の甲長コホート解析による資源量推定. 日本水産学会誌 66: 833-839.
- Zheng, J., M. C. Murphy, and G. H. Kruse. 1995. A length-based population model and stock-recruitment relationships for red king crab, *Paralithodes camtschaticus*, in Bristol Bay, Alaska. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 52: 1229-1246.
- Zheng, J., M. C. Murphy, and G. H. Kruse. 1996. A catch-length analysis for crab populations. *Fish. Bull.* 94: 576-588.