

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

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（東大海洋研）

1. はじめに

本報告の10年前、1995年8月に筆者は「国際会議で用いられる資源評価手法について—VPAとプロダクションモデルの現状—」の表題で水産資源管理談話会において発表し、その内容を談話会報第15号にまとめた（平松1996）。当時とりあげた手法は以下のようなものである。

- A. ADAPT VPA
- B. Laurec-Shepherd 法
- C. Stock Synthesis Model
- D. ASPIC（非平衡プロダクションモデル）
- E. IWCのRMPで使用されるモデル
- F. Delay Difference Model
- G. ASPM (Age Structured Production Model)
- H. Hitter-Fitter モデル

このうちAからCまでがVPAあるいはその関連手法である。またD、Eがプロダクションモデル、F、G、HがVPAとプロダクションモデルの中間的なモデルである。このうちEとHは鯨類で主に用いられ、魚類の資源評価には、A、B、C、D、G等が主に用いられていた。

あれから10年、資源評価手法はどう変わったか。現在、同じ表題の発表をするとすれば以下のような方法を取り上げることになるろう。

- a. ADAPT VPA
- b. 統合型モデル (Integrated statistical time series analysis)
- c. MULTIFAN-CL
- d. ASPIC
- e. ASPM

このうちa、d、eは10年前と同じで、bとcもCと本質的に同等あるいは関連する手法である。この10年で本質的な変化は無かったといつてよい。しかし、名前は同じでも中身は10年前とは比較にならないほど複雑化、巨大化しているものもある。

本報告ではVPAとその関連手法をとりあげる。VPA以外の手法についても10年前の内容を変更する必要があるが、別の機会に譲りたい。VPAは当初年齢別資源尾数データのみを用いて芋づる式に資源尾数を計算する方法として使われたが（平松2001）、実際の問題に

適用するに当たって種々の問題が生じてきた。これらに対応するために検討され発展してきたのが上記の手法である。単純な VPA ではどのような問題があるのかといった点から話を始め、ADAPT VPA、統合型モデル、MULTIFAN-CL の概要について述べる。なお本稿で取り上げた手法については、確定した用語や訳語の無いものが多い。比較的用例が多いと思われるものに従ったが、これ以外の用語・訳語が使われている場合もあり注意が必要である。

2. 単純な VPA の問題点

ターミナル F (以下 F_t) と自然死亡係数 M を仮定し、年齢別漁獲尾数データを用いて辛づる式に資源尾数を計算する単純な VPA において、精度の高い推定値が得られるためには以下のような条件が必要である。

- ① F_t が正確にわかっている。
- ② 年齢別漁獲尾数が正確である。
- ③ M が正確にわかっている。
- ④ 資源の移入・移出が無い。

しかし、実際にはこれらの条件はほとんど成立していないと言ってよい。それぞれをもう少し詳しく検討し、あわせてその対応策を挙げてみる。

① F_t が正確にわかることはまず無い。しかし、これが少々いい加減でもコホートを遡るにつれて F_t の誤差の影響が薄れて推定精度が向上するのが VPA の特徴である。したがって十分高齢まで年齢分解できているような場合にはそれほど問題とはならない。問題となるのは、年齢分解が不十分で資源量の多い若齢で F_t を仮定する必要がある場合や、漁業に加入して間もないコホートでやはり若齢で F_t を仮定する必要がある場合（すなわち近年のコホート）である。このような場合には F_t の値に結果が大きく依存するため、適当に仮定するわけにはいかない。そこで、近くの年齢の F は一定とか近年の F は一定とかいった、もっともらしい仮定をおいて計算されている。しかしこれらの仮定も常に成立しているとは限らない。寿命よりかなり若齢で F_t を設定する必要がある場合には、年齢によって体長や成熟が変化しており、近くの年齢と F が同じであるとは限らない。また漁業や魚の分布域が年々変化していれば近年の F が一定との仮定は成立していない。このような場合 F_t の仮定の仕方に困ってしまう。

ADAPT VPA は資源量指数に合うように F_t を推定する方法である。 F_t を変化させれば VPA から計算される資源量のトレンドも変化する。得られている資源量指数ともっとも良く合う F_t を推定値とする。

② 年齢別漁獲尾数も正確にはわからない。多くの漁業ではかなり偏った一部のサンプルの結果を全体に引き伸ばして年齢別漁獲尾数を推定している。またたとえ全数調査できたと

しても、適切な年齢形質が無いことによる年齢分解自体の誤差、計測や報告の誤差など誤差要因に事欠かない。 F_t がいい加減でも年齢を遡るにつれてより正確な資源尾数が推定できると述べたが、これはあくまでその計算に使われる年齢別漁獲尾数が正確であつての話である。漁獲尾数に誤差があれば年齢を遡っていても正確にはならない（平松 1988）。

単純な VPA では考慮できない年齢別漁獲尾数の誤差を考慮したのが SVPA（Separable VPA）である。SVPA は単純な VPA および ADAPT VPA と考え方が大きく異なっている。SVPA そのものは現在ほとんど用いられていないが、統合型モデルや MULTIFAN-CL を理解するうえで重要であるため、統合型モデルの章において扱う。

③自然死亡係数に関して何らかの根拠のある数値が得られることはまれで、近縁の魚種からの類推といった方法で仮定されていることが多い。当然信頼性は非常に低いはずである。VPA における資源量推定値は M の値に大きく依存し、資源量推定値の絶対値の信頼性は低いと考えられる。しかし、資源量のトレンドは M にあまり依存しない。

M の値を変えた感度解析を行うことによって、 M の値の不確実性に起因する誤差の評価が行われていることが多い。また MULTIFAN-CL 等ではモデル中で M を推定することも可能である。

④資源は瞬時に均一に混じり合うことは無いが、資源の分布が不均一であっても閉じた資源であれば VPA は適用可能である。ただし海域間での移動が制限されており、海域別に管理を行なうことが適切な場合には、海域間の移動を考慮したモデルが必要となる。また VPA は閉じた資源を仮定しており、外部との移出入が無視できないのであれば、これらを考慮する必要がある。

資源をその中では均一と考えられる幾つかのボックス（海区）に分け、海区間の移動を考慮するモデルが開発されている。推定パラメータは海区の数だけ増加しさらに移動率を仮定または推定する必要がある。

まとめると、問題①に対応するものとして ADAPT VPA が、②に対応するものとして SVPA が考えられ、後者はさらに統合型モデル、MULTIFAN-CL へと進化した。以下、ADAPT VPA、統合型モデル、MULTIFAN-CL について詳解する。問題③、問題④についてはこれらの中でも一部扱われている。

3. ADAPT VPA

単純な VPA では何らかの形で仮定するしかなかった F_t を、資源量指数データに合うように推定するのが ADAPT VPA である。各コホートの F_t を変化させれば資源量推定値は変化する。例えば 2 歳の資源量指数が得られているとすると、その挙動に合うように各 F_t を推定するわけである（図 1）。

年別年齢別資源尾数(漁獲係数) 資源量指数

	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年
0歳					
1歳					
2歳					
3歳					
4歳					

図1. ADAPT VPA の概念図。2歳の資源量指数が得られているとする。これに合うように F_t (4歳の F および最近年の F) が推定される。ただし、全ての F_t が2歳の資源量に係るわけではなく、ここでは濃い色の部分のみである。

ADAPT の語源になっているのは Gavaris(1988)の「An adaptive framework for the estimation of population size」である。ただし、この論文では目的関数の形にして推定する方法について示したものであり、いわゆる ADAPT VPA と共に、後述の統合型モデルの考え方についても示している。しかしながら、その後なぜか ADAPT が資源量指数を用いて F_t をチューニングするチューニング VPA (tuned VPA) の代名詞となってしまった。本稿でも「ADAPT VPA」=「チューニング VPA」とする。なお英語では tuned VPA であって、チューニング VPA というのは適切な用語ではないのかもしれない。しかし、もはやこれで定着してしまっている。

3-1. ADAPT VPA の概要

ADAPT VPA は、資源量推定値がなるべく資源量指数データ I に合うように F_t を調整して推定する方法である。具体的には

$$\sum_{a,y} (I_{a,y} - q_a \hat{N}_{a,y})^2 \tag{3.1}$$

といった目的関数を考え、これを最小にするような F_t を求める。ここで $\hat{N}_{a,y}$ は F_t から芋づる式の VPA で計算される y 年 a 歳の資源尾数、 q は比例係数である。使用するデータと推定するパラメータをまとめると以下ようになる。

使用するデータ：年齢別漁獲尾数 $C_{a,y}$

仮定するパラメータ：自然死亡係数 M

直接推定するパラメータ：(各コホートの) F_t , q

間接的に推定されるパラメータ：年齢別資源尾数 $N_{a,y}$, 年齢別漁獲係数 $F_{a,y}$

ただし推定に当たって、全ての F_t を独立に推定することは無理がある。例えば図1では、全ての F_t が2歳の資源量に関係するわけではない。また、2歳の資源量に影響する F_t を全て独立に推定することも可能であるが、資源量指数データの誤差も無視できず、誤差の影響をまともに受けた推定値となってしまふ。このため、 F_t を推定するといっても全て独立に推定するのではなく、種々の仮定をおいて推定パラメータ数を抑えていることが多い。例えば以下のような仮定が用いられる。

$$\text{最高齢 } A \text{ 歳： } F_{A,y} = \alpha F_{A-1,y} \quad (3.2)$$

$$\text{最近年 } Y \text{ 年： } F_{b,Y} = \frac{\sum_y F_{b,y}}{\sum_y F_{c,y}} F_{c,Y} \quad (3.3)$$

ここで $F_{c,Y}$ は推定する Y 年 c 歳の F , $F_{b,Y}$ は Y 年のそれ以外の年齢の F である。(3.3)式は過去の F_b と F_c の比(選択率の比)を利用して、 $F_{c,Y}$ から $F_{b,Y}$ を推定する方法である。これらを使えば F_t に関してほとんど推定する必要がなくなるが、実際には例えば $F_{2,Y}$ をパラメータとして(3.3)式を用いて $F_{1,Y}$ と $F_{3,Y}$ を推定し、 $F_{5,Y}$ をパラメータとして $F_{4,Y}$ と $F_{6,Y}$ を推定するといった用いられ方をしている。これらの仮定により、通常推定するパラメータ数は q も含めて数個～十数個である。

3-2. ADAPT VPA のバリエーション

実際の適用状況に合わせて様々なバリエーションが考えられているが、ここでは目的関数と F_t に関する仮定の2点を中心に述べる。

目的関数は(3.1)式以外に、対数をとった

$$\sum_{a,y} \left(\ln(I_{a,y}) - \ln(q_a \hat{N}_{a,y}) \right)^2 \quad (3.4)$$

の形で使われることも多い。資源量指数としては、漁業データから得られる CPUE、調査船調査結果などが主に用いられる。年齢別の指数か複数年齢にわたる指数か、単独の指数か複数の指数を用いるかによっていくつものバリエーションがある。また資源量指数に限らず、資源量と何らかの関係にある他の指標、例えば VPA とは独立な F の推定値や標識再捕尾数を用いてチューニングすることも可能であり、資源量指数に関する目的関数に加えてこれらの目的関数を用いて推定されることも多くなってきている。

F_t に関しては(3.2)式、(3.3)式に限らず種々の仮定が用いられている。例えば、(3.2)式において最高齢より一歳若齢の F のみを使うのではなく、3歳程度若齢の F までの平均値を用いる方法、いくつかの年代にわけてその中では F_t は一定として推定する方法などがある。最近年の F に関しても、(3.3)式以外に、 n 年間の F の比を利用して

$$F_{b,Y} = \frac{1}{n} \sum_{y=Y-1}^{Y-n-1} \frac{F_{b,y}}{F_{c,y}} \cdot F_{c,Y} \quad (3.5)$$

といった定式化も考えられる。選択率 s が明らかに変化しており、かつある程度定量的に推測可能な場合には

$$F_{b,Y} = \frac{S_{b,y}}{S_{c,y}} F_{c,Y} \quad (3.6)$$

とすることもできる。またたとえ(3.2)式、(3.3)式を使うにしても推定するパラメータをどこに幾つぐらい置くかでさまざまなバリエーションがある。

3-3. ADAPT VPA の特徴と問題点

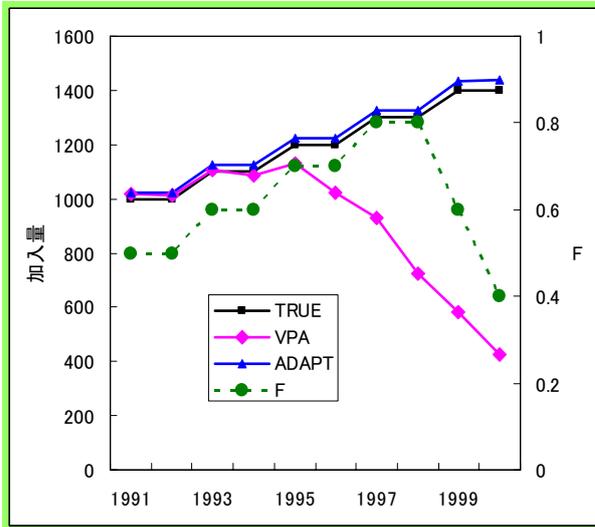
ADAPT VPA は後述の統合型モデルや MULTIFAN-CL に比べ構造が簡単で、単純な VPA の延長線上で十分理解可能である。しかし、単純な VPA では推定が困難であった、近年の F が変化している場合等にも対応可能である。図 2a は近年の F が低下している場合に、最近年の F は過去 3 年の平均値と仮定した VPA と、正確な資源量指数データを用いた ADAPT VPA のそれぞれの加入尾数の推定値を真の値と共に示したものである。実際には加入尾数は増加しているにもかかわらず、単純な VPA では F の低下による漁獲尾数の減少を加入尾数の減少と解釈してしまい、全く異なった推定値となる。これに対して ADAPT VPA は加入尾数のトレンドを正しく捕らえている。

しかし、一方で資源量指数の信頼性に結果が依存することとなった。例えば上記の例で、最近年の資源量指数が真の値の 2 倍または 1/2 であったとすると、ADAPT VPA による加入尾数の推定結果は図 2b のようになってしまう。このような資源量指数に対する推定結果の依存性のため、国際漁業委員会等では CPUE の標準化による資源量指数の推定方法や、複数の資源量指数の中からどの指数をチューニングに使うか等をめぐって大激論になることがある。

実際の適用に際しては、資源量指数の意味する所にも注意が必要である。具体的には、示しているのは個体数がバイオマスか、一年のうちのいつの時期の指数か、対応する年齢範囲と年齢間の重み等に注意を払う必要がある。目的関数の中のモデルから計算される資源量指数は、これに対応したものでないといけない。

ADAPT VPA の基本データは年齢別漁獲尾数と資源量指数であるが、これだけから本当に資源量推定が可能かという根本的な問題も残る。図 3a は 1996 年に ICCAT で実施された西大西洋クロマグロの資源評価結果を示したものである (ICCAT 1997)。2 種類の仮定の下での ADAPT VPA の親魚資源尾数の推定結果を示しているが、両者で絶対値が大きく異なっている。しかし、実は両者の仮定の差はほんわずかで、それぞれの仮定の妥当性に大差なく、資源評価会議ではどちらの結果をベースとするかで紛糾した。

a) VPA vs ADAPT



b) 資源量指数の誤差

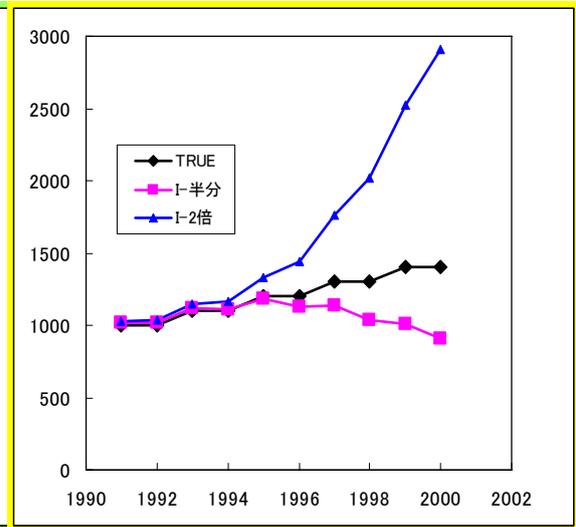
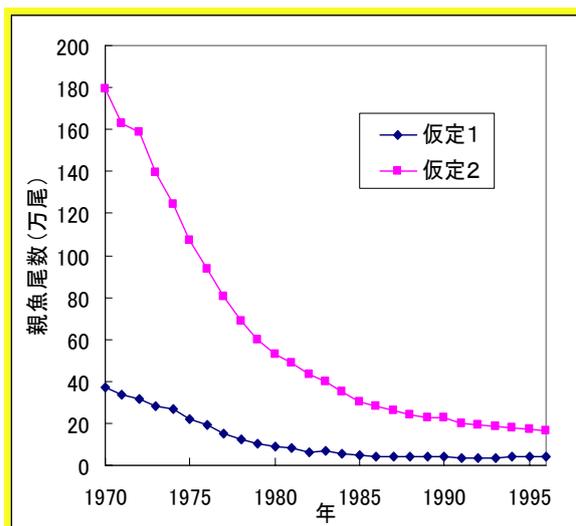


図 2. ADAPT VPA の信頼性。a)近年の F が低下している場合に、最近年の F は過去 3 年間の平均と仮定した VPA、および正確な資源量指数を用いた ADAPT VPA の推定結果。b)最近年の資源量指数が真の値の 2 倍または 1/2 倍であった場合の ADAPT VPA の推定結果。

a) 2種類の仮定による推定値



b) 推定値のトレンドの比較

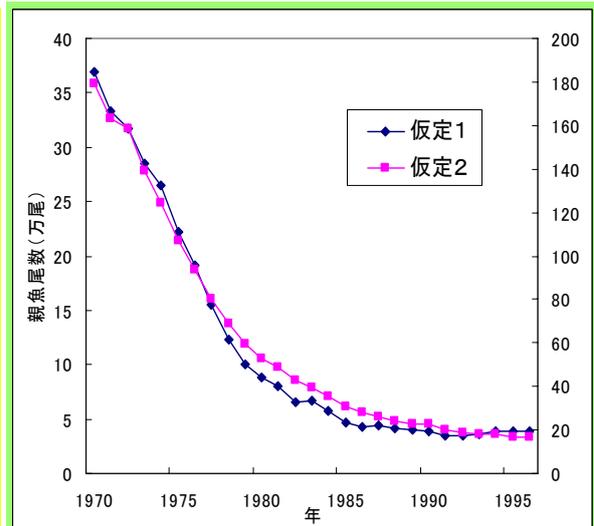


図 3. 西大西洋クロマグロの 2 種類の仮定に基づく資源評価結果。a)絶対値の比較。b)相対値の比較。

さらに、スケールを変えて両者の結果のトレンドを比較すると図 3b のようになる。ADAPT VPA は資源量のトレンドの違いを利用して資源量の絶対値を推定する方法である。ところが図 3 の場合、資源の絶対値は異なっているにもかかわらず、通常資源量指数データはばらつきが大きく、両者の差を検出できるほどの精度は無い。Hiramatsu and Tanaka(2004)はもう少し一般的にこの問題を扱っている。その結論は、漁業の変化が少ない場合は年齢別漁獲尾数と資源量指数のデータのみから資源の絶対値を推定することは困難であり、それ以外の仮定や情報が必要となるというものである。逆に言うと、 F の年変化が少ないときは、ADAPT VPA で用いられている選択率の仮定などに資源量推定値の絶対値が大きく依存することになる。図 3 はまさにこの状態を示していると考えられる。

ADAPT VPA の推定結果はどの程度信頼できるのだろうか。これは適用事例によって大きく異なると考えられる。できれば対象資源に即したシミュレーションデータを発生させ、ADAPT VPA の推定値と真の値との比較をして推定精度の検討をすることが望ましい。これが困難な場合でも、 M の値、パラメータの置き方、選択率の仮定、使用する資源量指数等を変更し推定結果がどれほど変わるかを見る感度解析的な検討により、推定値の信頼性の感触を得ておくことは最低限必要であろう。

4. 統合型モデル

統合型モデルの理解には SVPA の理解が必須である。このためまず SVPA の説明から始める。SVPA は単純な VPA およびその拡張型としての ADAPT VPA とは考え方がかなり異なっている。

4-1. SVPA の概要

SVPA(Separable VPA)は、漁獲係数を年齢に依存する部分（選択率 s_a ）と年に依存する部分 f_y に分解可能とする Separability の仮定

$$F_{a,y} = s_a \cdot f_y \quad (4.1)$$

を用いて、年齢別資源尾数データ（と M ）から年齢別資源尾数を推定する方法である。漁業の変化が無ければ、選択率は毎年一定と仮定することは不自然ではない。この F のモデル化により、年齢別漁獲尾数の誤差を考慮して推定することが可能となる。

SVPA では以下のような目的関数を考え、これを最小とする加入量、 s 、 f 等のパラメータを推定する。

$$\sum_{a,y} (C_{a,y} - \hat{C}_{a,y})^2 \quad (4.2)$$

ここで、 $C_{a,y}$ はデータ、 $\hat{C}_{a,y}$ はモデルで計算される漁獲尾数で

$$\hat{C}_{a,y} = \frac{s_a f_y}{s_a f_y + M} N_{a,y} \{1 - \exp(-s_a f_y - M)\} \quad (4.3)$$

である。また $N_{a,y}$ は

$$N_{a,y} = N_{a-1,y-1} \exp(-s_{a-1} f_{y-1} - M) \quad (4.4)$$

より計算される。1歳から4歳まで、5年間のデータがあったとすると、この時の推定パラメータは図4のようになる。ADAPT VPAでは最高齢と最近年の F をパラメータとしていたが、SVPAでは加入年齢と計算開始年の N をパラメータとする。さらに s と f が推定パラメータとなる。なお、 s と f のうち一つは値を固定するため、この場合では直接推定するパラメータは16個である。

使用するデータと推定するパラメータをまとめると以下のようになる。

使用するデータ：年齢別漁獲尾数

仮定するパラメータ：自然死亡係数

直接推定するパラメータ：加入尾数、計算開始年の年齢別資源尾数、
選択率 s_a 、漁獲の強さ f_y

間接的に推定されるパラメータ：年齢別資源尾数、年齢別漁獲尾数

SVPAの名称はSeparabilityの仮定に由来する。しかし、近年SVPAの名前もあまり使われていないようである(では何と呼べばよいのか?)。歴史的にはADAPT VPAよりSVPAの方が先に検討されている。代表的な論文としてはDoubleday(1976)やPope and Shepherd(1982)が挙げられるが、当時は計算機が未発達でどうやって計算しやすい形に持っていくかというテクニックに重点が置かれており、理解しやすいとは言えない。

	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
s_1	$N_{1,1}$	$N_{1,2}$	$N_{1,3}$	$N_{1,4}$	$N_{1,5}$
s_2	$N_{2,1}$				
s_3	$N_{3,1}$				
s_4	$N_{4,1}$				

図4. SVPAで推定されるパラメータ。加入年齢と計算開始年の N 、各年齢の s と各年の f を推定する。ただし s と f の一つは値を固定する。

ADAPT VPA 等では漁獲尾数が 100 尾であればそれは正確に資源が 100 尾減少したとの立場である。一方、SVPA ではデータが 100 尾であっても、本当に漁獲されたのは例えば 99 尾かもしれないとの立場に立つ。SVPA は単純な VPA や ADAPT VPA のような芋づる式の計算ではなくっており、モデルの構造がかなり異なる。もはや、VPA の名前で呼ばない方がよいのではないかと思うぐらいである。

漁獲尾数の誤差の考慮は現実的であるが、選択率一定の仮定は現実的でないことが多い。またデータ数に比べて推定するパラメータ数が多いため、それぞれのパラメータの推定精度は悪いことが多い。これらの理由により SVPA は現在ではほとんど使われていない。

4-2. 統合型モデルの概要

SVPA の欠点を補い、代わって用いられるようになったのが統合型モデルである。統合型モデルの基本構造は SVPA と同じであるが、資源量指数によるチューニングも行う。いわば SVPA と ADAPT VPA を合体させたような方法で、目的関数は

$$\sum_{a,y} (C_{a,y} - \hat{C}_{a,y})^2 + \sum_{a,y} (I_{a,y} - q\hat{N}_{a,y})^2 \quad (4.5)$$

となる。推定するパラメータは SVPA と同じであるが s_a の時間変化が考慮されることが多い。具体的には、 s_a をある期間で一定として期間ごとに推定したり、 s_a が時間および年齢に対し緩やかに変化するという束縛条件において $s_{a,y}$ の形で推定したりする。

使用するデータと推定するパラメータをまとめると以下のようになる。

使用するデータ：年齢別漁獲尾数、資源量指数

仮定するパラメータ：自然死亡係数

直接推定するパラメータ：加入尾数、計算開始年の年齢別資源尾数、
選択率 s_a 、漁獲の強さ f_y

間接的に推定されるパラメータ：年齢別資源尾数、年齢別漁獲尾数

なお「統合型モデル」という名称を使用しているが、これは確定された用語ではない。英語での表記も様々で統一されたものは無く、全くレビュー著者泣かせである。最近では Integrated statistical time series analysis といった記述になっていることもあるが、これも定着しているとは言えない。本稿ではとにかく Separability の仮定を用いかつ資源量指数等でチューニングを行って推定する方法を統合型モデルと呼ぶことにする。

4-3. 統合型モデルの特徴と問題点

チューニングを行うことにより、SVPA に比べ推定精度を向上させかつ柔軟な選択率の仮定を可能とした。年齢別漁獲尾数データの精度が低かつ漁業形態が変化して選択率一定を仮定できないような場合を中心に適用されている。このような特徴を持った漁業は珍しくなく、統合型モデルの使用も広がりつつある。

一方でモデルの構造はますます複雑になり、推定するパラメータ数も多くなる。また統

合型モデルでは目的関数の重み付けの問題が顕著になる。本来、(4.5)式は w を重みとして

$$\sum_{a,y} (C_{a,y} - \hat{C}_{a,y})^2 + w \sum_{a,y} (I_{a,y} - q\hat{N}_{a,y})^2 \quad (4.6)$$

とすべきものである。目的関数の重み付けの問題は、ADAPT VPA で複数の指数を用いた時にも生じるが、漁獲尾数と資源量指数といった異質のものを合わせた場合に顕著になる。それぞれのデータの信頼性に基づき分散の逆数を重みとすれば良いが、現実にはデータの信頼性など定量化できないことが多い。

目的関数は(4.6)式のような最小 2 乗法タイプではなく、尤度関数を用いられる場合も多い。例えば漁獲尾数に関する尤度関数として多項分布などが用いられている。尤度関数が妥当であれば重み付けの問題も解消できるが、実際には種々の工夫が必要である。例えば年齢別漁獲尾数の分布をそのまま多項分布と考えることには、これらが完全なランダムサンプリングで得られたものではないことから無理があり、漁獲尾数そのままではなく有効漁獲尾数で考えたり、あるいは多項分布よりロバストな分布が使われる。

最近の複雑化した統合型モデルの一例として、Butterworth et al.(2003)がある。

5. MULTIFAN-CL

MULTIFAN-CL は 1990 年代後半からまぐろ類の資源評価手法に適用されつつある手法で(Fournier et al. 1998)、最近では太平洋を中心に急速に広がりつつある。MULTIFAN-CL は一口で言えば漁獲物の体長組成を基本データとした方法であるが、それだけにとどまらない種々の特色を持つ。MULTIFAN-CL はこれまで我が国ではあまり紹介されてこなかったもので、本稿ではやや詳しく述べる。まず ADAPT VPA との比較から始めて、その概要、特徴と問題点について述べる。なお MULTIFAN-CL も幾つかのバージョンがあるが、ここでは近年のもの(Hampton and Fournier 2001)に準拠する。

5-1. ADAPT VPA との比較

ADAPT VPA による資源評価では、まず漁獲尾数、努力量、体長組成データなどを基礎データとして、年齢別漁獲尾数、資源量指数が作成される。そしてこれらを用いて ADAPT VPA により年齢別資源尾数や漁獲係数が推定される(図 5)。ADAPT VPA を用いるためには、あらかじめ年齢別漁獲尾数を作成し、CPUE の標準化などにより資源量指数を得ておく必要がある。さらに、モデルで使用される自然死亡係数 M などのパラメータは他の情報から得ておく必要がある。また、対象としている資源は一様で構造を持たないと仮定して解析するのが普通である。

これに対し、MULTIFAN-CL では漁獲尾数、努力量、体長組成データなどをそのまま利用する(図 6)。これらのデータの加工・処理はモデルの内部で一挙に行われる。また標識再捕のデータも同時に用いて解析される。これらのデータは海区・漁業種類別に入力され、モデル内部では対象としている資源や漁業の空間構造も考慮し、海区間の移動なども扱う。

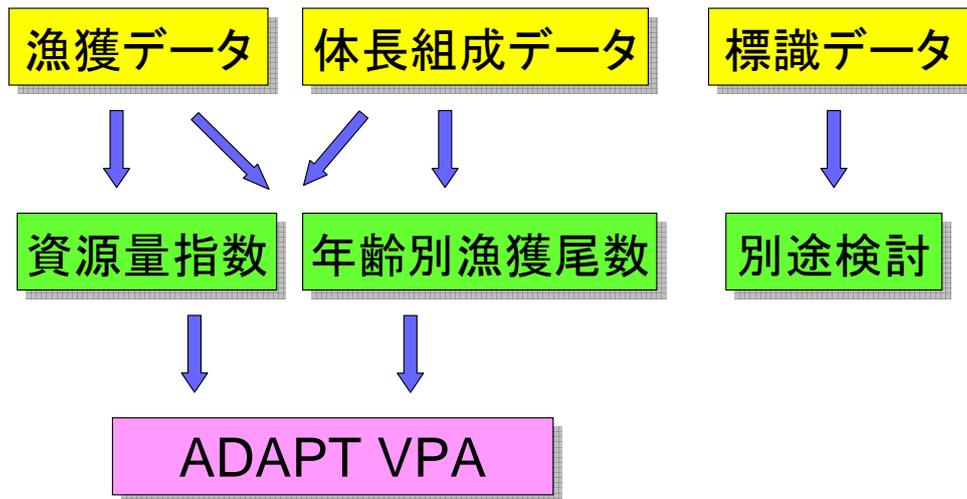


図 5. ADAPT VPA による資源評価の流れの概念図

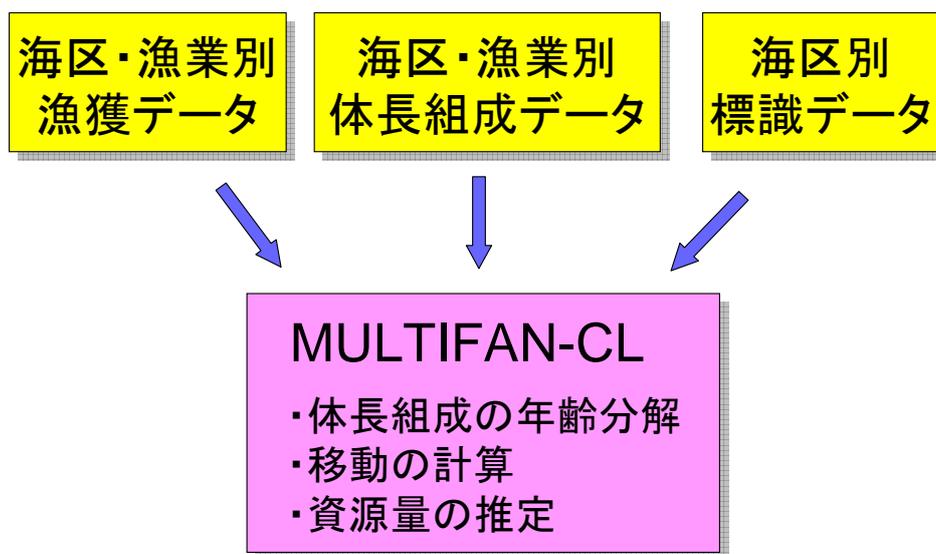


図 6. MULTIFAN-CL による資源評価の流れの概念図

このように、生データを直接利用する点、資源・漁業の空間構造を考慮する点が従来の ADAPT VPA 等との大きな違いである。

5-2. MULTIFAN-CL の概要

基本となる入力データは漁獲物の体長組成であるが、モデル中の資源動態は通常の年齢

ベースの式で表される。 y 年、 a 歳魚の資源尾数は

$$N_{a,y} = N_{a-1,y-1} \exp(-F_{a-1,y-1} - M) \quad (5.1)$$

で表される。漁獲係数 F は separability を仮定し、さらに努力量データ E を用いて

$$F_{a,y} = s_a q_y E_y \exp(\varepsilon_y) \quad (5.2)$$

と表わす（実際には漁業別に扱われる）。ここで s は選択率、 q は漁具能率、 ε はこの関係式からの外れを表す。 q に関しては年々の変動を考慮し

$$q_{y+1} = q_y \exp(\eta_y) \quad (5.3)$$

とする。ここで η_y は年々の変動を示す。

移動はあらかじめ指定された海区間で、タイムステップの最初に瞬間的に生じると仮定する。移動する割合は移動率に関するパラメータで決定される。ある海区のある年齢の資源尾数は、移出入によって増減したあと、(5.1)式、(5.2)式により自然死亡係数 M と努力量 E に起因する漁獲によって減少することになる。

標識放流魚は基本的に非標識魚と同じ動態を示すと仮定する。すなわち非標識魚と同じ成長、死亡、移動を仮定する。ただし放流直後は混合が十分ではないことが想定されるため、放流直後の漁獲係数のみは別扱いされる。

使用するデータと推定するパラメータをまとめると以下のようになる。

使用するデータ：年月・海区・漁業種類別の全漁獲尾数（漁獲量）、漁獲努力量、漁獲物体長（体重）組成、海区・年月別の放流魚体長組成、放流体長・海区・漁業・年月別の再捕尾数。

直接推定するパラメータ：海区別加入尾数、初期資源尾数、成長式、自然死亡係数、漁具能率、選択率、移動率、標識報告率など。

間接的に推定されるパラメータ：海区・年齢・年別資源尾数、漁獲係数、漁獲物体長組成の予測値、CPUE、MSY など。

パラメータ推定は尤度関数と事前分布（束縛条件）の最大化による。入力データである、海区別・漁業別の漁獲物体長組成データ、全漁獲尾数、標識再捕データに関する尤度関数を考え、この最大化によりこれらのデータをもっともよく再現するパラメータ値を推定する。ただし、パラメータ数が非常に多いため、連続する年や年齢では変化が少ないといった束縛条件や事前分布を付ける。

直感的に言えば、加入尾数や初期資源尾数などのパラメータの値をまず仮定し、これと入力データである努力量の値を使ってモデルの内部で資源動態や漁獲尾数を計算し、それが入力データである漁獲尾数、体長組成、標識再捕尾数をうまく再現できているかを見ていることになる。そしてもっともうまく再現できるようなパラメータの値を推定値とする

わけである。ADAPT VPA では資源量指数に合うようにパラメータを推定していたが、ここでは漁獲尾数、体長組成、標識再捕尾数に合うようにパラメータを推定するわけで、推定方法自体に大きな差があるわけではない。一方、推定するパラメータ数は格段に多くなり、ADAPT VPA では数個～十数個であるが、MULTIFAN-CL では数百個～数千個に及ぶ。

5-3. MULTIFAN-CL の特徴と問題点

MULTIFAN-CL の主要な特徴として以下の点が挙げられる。

- ・漁獲尾数、努力量、漁獲物体長組成、標識再捕結果といった生データを直接利用し、モデルの内部で加工・処理を一挙に行う。
- ・資源および漁業の空間構造を扱う。漁獲量・努力量などのデータは各海区の漁業ごとに与える。そして資源の海区間の移動を考慮する。
- ・パラメータの海区・漁業・年齢・漁業・時間依存性を考慮する。従来一定と仮定されることが多かった、漁具能率 q の時間依存性、 M の年齢依存性、加入尾数の海区による違いなどを考慮する。

これらの特徴により以下のような利点を持つ。

- ・モデルの仮定、誤差構造などに関し整合性のある取り扱いが可能である。例えば、ある体長区間の魚をある年齢とみなすといった年齢分解の方法では、年級群の大きさに差があった場合、大きな年級群ほど他の年齢に推定されやすいといったバイアスを生じる。年級群の大きさも含め、一挙に解析を行えばこれらのバイアスは生じにくい。また年齢分解の誤差も資源評価の誤差に考慮することが可能となる。
- ・現実の資源・漁業の構造に即した解析が可能である。資源・漁業の空間構造まで考慮した評価が可能である。また、漁具能率の経年変化などを考慮することも可能である。

一方で、モデル内部の構造は複雑となる。また推定されるパラメータ数も多い。パラメータ数は海区数や漁業数に依存するが、最近の適用例では数千個に及ぶものもある。モデルの構造や性質、各パラメータの意味などを把握するのは容易ではないし、推定に際してはかなりの試行錯誤が必要となる。モデルの妥当性や推定値の妥当性の評価のためにはシミュレーションによる検討が不可欠であろう。このような試みも一部で行われているが (Iannelli 2000)、さらに今後検討が必要であろう。

MULTIFAN-CL のユーザーズガイド (Kleiber et al. 2003) によれば、この方法は漁獲物体長組成の時系列データから成長式と年齢別漁獲尾数を推定する方法である MULTIFAN (Fournier et al. 1990) と、年齢別漁獲尾数、全漁獲量、努力量から年齢別資源尾数等を推定する統合型モデルの一種である Fournier and Archibald (1982) の資源評価モデルを結合させたものである。当初、空間構造なしで南太平洋のビンナガに適用された (Fournier et al. 1998)、その後空間構造や移動を積極的に考慮したモデルに拡張された (Hampton and Fournier 2001)。東太平洋のまぐろ資源の管理を行っている IATTC (全米

熱帯まぐろ委員会)では、ほぼ同じモデルが A-SCALA(age-structured statistical catch-at-length analysis)の名前で作成され、東部太平洋の資源評価に用いられている (Maunder and Watters 2003)。

まとめると MULTIFAN-CL の特徴としては、生データあるいはそれに近いデータを用いて、モデル内で一挙に推定を行う点、資源や漁業の空間構造を考慮したモデルとなっている点、パラメータの海区・漁業・年齢・時間依存性を考慮可能な点が挙げられる。これによって、資源や漁業の実態により即した資源評価を、一貫した形で行うことが可能となる。しかし、モデルは複雑になり、そのプログラムはブラックボックス化してしまう恐れがある。またモデルの妥当性や推定結果の妥当性の検討にも十分留意することが必要である。

6. 議論

ここまで説明してきた VPA および関連手法の相互関係を図 7 に示す。単純な VPA に資源量指数でチューニングをしたものが ADAPT VPA、Separability の仮定を用いたのが SVPA である。そして資源量指数と Separability の両方を用いたのが統合型である。さらに VPA に限らず資源評価手法全般ということであれば、各手法の進化系統樹は図 8 のようになろうか。歴史的に見れば、単純な VPA は 1970 年代、SVPA は 1970 年代後半から 80 年代前半、ADAPT VPA と統合型モデルは 1980 年代後半から、ASPM と ASPIC は 1990 年代前半から、MULTIFAN-CL は 1990 年代後半から本格的に使用されている。

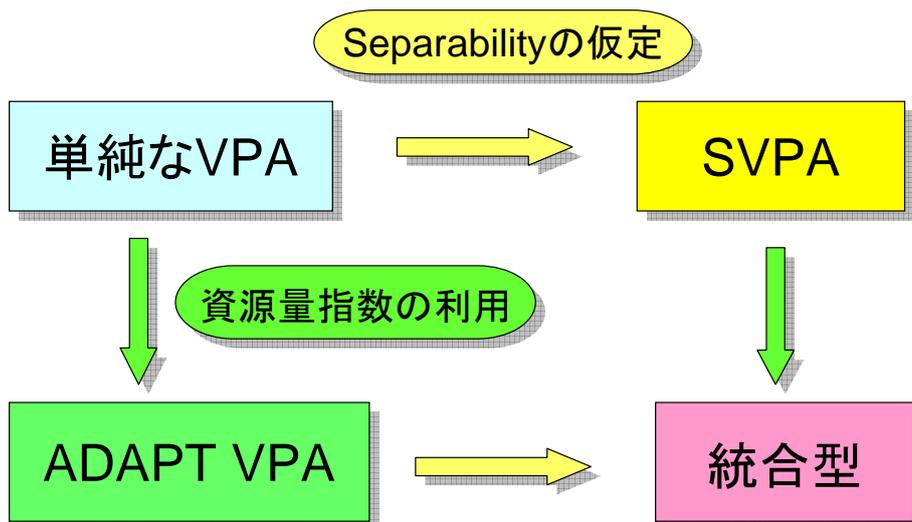


図 7. VPA および関連手法の相互関係。

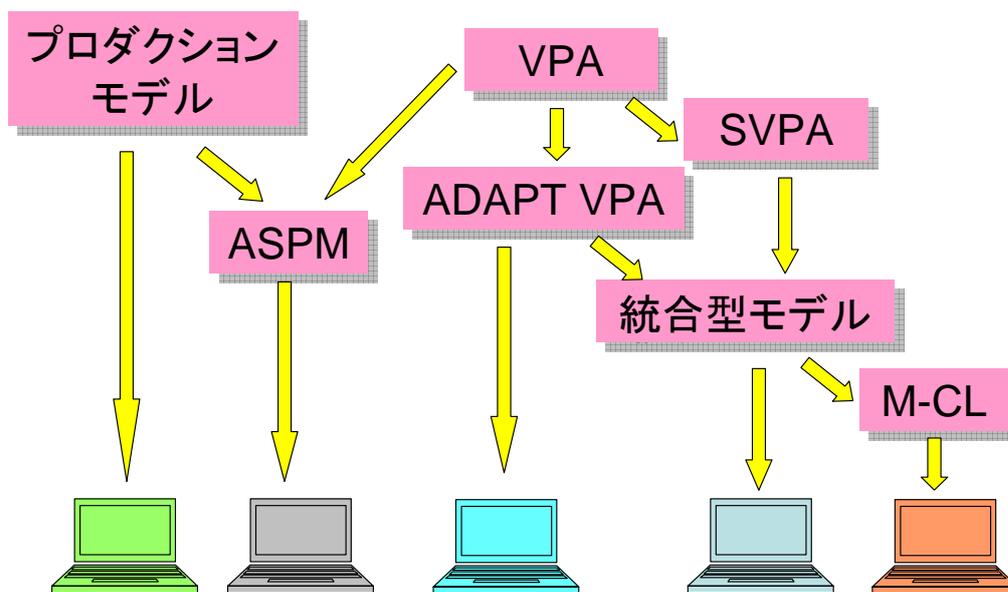


図 8. 資源評価手法の進化系統樹。

これらを踏まえた上で、最近の資源評価手法のトレンドとして以下のものを挙げる事が出来る。

・情報の統合化（ここ 15 年ほど）

年齢別漁獲尾数と資源量指数データではなかなか精度の良い推定が困難であることから、使える情報は何でも取り込んで推定しようとする方向にある。目的関数あるいは尤度関数を用いて推定する場合には、使いたい情報を目的関数や尤度関数に組み込めばよい。そのため、モデルの拡張は容易である（もちろん目的関数間の重み付けの問題が生じるが）。例えば ADAPT VPA である年だけ資源量推定値が得られていたとすれば、

$$(\text{資源量推定値} - \text{VPA で計算された対応する資源量})^2 \quad (6.1)$$

の項を目的関数に加えればよい。

・パラメータの時空間依存性の導入（ここ 10 年ほど）

従来一定としていたパラメータのゆるやかな時空間的な変化を考慮する。例えば漁具能率 q は通常時間的に一定として扱われているが、この時間変化を考慮し時間に依存した q_y を推定する。ただし各 q_y を完全に独立に推定するのではなく、時間変化はゆっくりと生じるとして目的関数に

$$\sum_y (q_{y+1} - q_y)^2 \quad (6.2)$$

といった束縛条件をつける。これらは **Random walk** モデルの名前で呼ばれることもある。(6.2)式は q_{y+1} と q_y の関係として ε_y を (正規) 乱数として、暗に

$$q_{y+1} = q_y + \varepsilon_y \quad (6.3)$$

のモデルを仮定しており、 q_y が **Random walk** していると見なせることによる。しかし、解釈としては、 q_y を前後と大幅には変わらないという束縛条件の下で推定しているとした方がよかろう。

・解析のハイブリッド化 (ここ 10 年ほど)

ASPM やプロダクションモデルと異なる VPA およびその関連手法の特徴として、再生産関係を使わないという点が挙げられる。しかし、目的関数において、例えば **SSB** を VPA で計算された親魚資源量、 α と β をベバートンホルト型再生産曲線のパラメータとして

$$\sum_y \left(N_{0,y} - \frac{\alpha \cdot SSB_{y-1}}{1 + \beta \cdot SSB_{y-1}} \right)^2 \quad (6.4)$$

という項を加えれば、再生産関係を利用した推定も可能となる。統合型モデルにおいて上記の項の重みを重くし、年齢別漁獲尾数の項の重みを軽くすれば推定モデルは ASPM に近いものとなる。当初はある方法のみで使われていた目的関数やモデルが、他の手法でも広く使われるといったことはよくある。例えば、移動の考慮は **MULTIFAN-CL** の特徴として述べたが、実際には **ADAPT VPA** で移動を考慮したモデルも作成されている (Porch 2002)。本稿では幾つかの手法に分類して紹介したが、このような分類がもはや意味が無いような適用例も多くなってきている (やはりレビュー著者泣かせである)。

10 年前より複雑化・強大化した資源評価手法であるが、推定精度は向上したのであるか? 「手法は高度になったが、推定結果の信頼性は 30 年前と大差なし」との手厳しいコメントを聞いたことがあるが、残念ながらこれに明確に反論できないのが現状ではないかなだろうか。毎年資源評価を行うたびに推定結果が大きく変化したり、わずかな仮定の違いによる推定結果の不安定性を見るにつけ、その思いを強くする。

またプログラムが複雑になるほど、ミスの生じる可能性も高くなる。資源評価作業中に入力データのミスやプログラムのバグが発見されて大混乱となることがある。こういった事態を避けるために、**ICCAT** ではマニュアルが作成され **Validation** が済んだプログラムを資源評価にしようすることにしている。しかしこれでも完璧というわけにはいかない。

資源評価手法全般にかかわる問題点として、適当なレビューが無いということが挙げられる (和文・欧文どちらでもない)。例えば VPA のレビューということであれば、**Megrey(1989)**が挙げられるが、既に 15 年以上前のものであり、当然最近の動向は含まれていない。**Hilborn and Walters(1992)**や **Quinn and Deriso(1999)**、あるいは山田・田中(1999)

といった水産資源学の教科書でも最近の VPA 手法についてそれほど詳しくは触れられていない。実際に資源評価で使用されている方法を知ろうとすると、資源評価会議提出文書まで遡る必要が生じる。これらは入手しにくいことが多く、またたとえ入手できても正確な記載がされていないことがある。また随所で資源評価が行われているにもかかわらず推定結果の信頼性に関する研究はそれほど多くなく、さらにそれらの知見が統合化されていない。

しかし、ここ数年、会議提出文書や議事録、会議で使用されているプログラム等が国際漁業委員会のホームページ上で公開され、容易が入手になった。以下に主要なまぐろ関係の国際漁業委員会のホームページと入手可能な情報を挙げておく。またこれらから公表可能なデータを入手することも可能である。

・ ICCAT (大西洋まぐろ類保存国際委員会) : <http://www.iccat.es/>

1972 年以降の会議提出文書、最新の会議議事録、使用されているプログラム等が入手可能で最も充実している。特にこの中の VPA-2box のマニュアル(Porch 2002)は、実際に使用されている VPA プログラムの詳細のみならず、目的関数の重み付けやモデル選択等実際の解析作業に際して問題となる点の記述もあり価値が高い。

・ CCSBT (みなみまぐろ保存委員会) : <http://www.ccsbt.org/>

1995 年以降の会議報告書が入手可能である。残念ながら会議に提出された個別のドキュメントはまだ電子化されていない。

・ IATTC (全米熱帯まぐろ委員会) : <http://www.iattc.org/>

資源評価報告書等が入手可能。IATTC 自体が資源評価を行っているためかなり詳しい資源評価手法の記述がある。

・ SPC (太平洋共同体事務局) : <http://www.spc.org.nc/oceanfish/>

正確にはこの中の SCTB (まぐろ・かじき常設委員会) のホームページ。近年の会議報告書、会議提出文書が入手可能。MULTIFAN-CL の適用例を見るならここ。

7. 終わりに

10 年前の 1995 年は TAC 前夜であった。「国際会議で用いられる資源評価手法について－VPA とプロダクションモデルの現状－」の発表は、今後否応無く資源評価に携わることになる水研・水試の研究者の方々に、ぜひとも海外の資源評価手法の事例を知ってもらいたいと思って力を入れて準備をしたものである。しかし、談話会出席者は大学関係者が主体でがっかりした記憶がある。それでも、発表をまとめた談話会報はその後の資源評価作業に多少は参考になったようで、ついやした努力は全くは無駄ではなかったように思っている。

10 年後の現在でも、国内資源評価と国際資源評価の間には手法上で大きな相違がある。漁業形態も分布域も異なるため画一化する必要は無く、また複雑な方法が必ずしも優れて

いるとは言えない。それでもその内容をある程度把握しておくことは必要であろうと考え、本稿をとりまとめた。ただし近年の資源評価に関する研究は VPA 関連手法に限っても多岐に渡っており、本稿ではその一部を取り上げたにすぎない。また取り上げた手法もその考え方や概要のみで詳細についての記述は省略したため、実際に適用するには原著論文、会議提出文書、マニュアル等にもどってあたってもらわなければならない。

複雑化・巨大化を続ける VPA とその関連手法であるが、今後どのような方向に向かうのであろうか。ある手法で実際の資源評価を行おうとすると、現実との相違が目についてしまう。本当は年や年齢依存しているパラメータを一定と仮定していたり、データの誤差を無視していたりしている。これらにまじめに取り組み、モデルを現実になら近づけようとするれば必然的にモデルは複雑化する。また資源の動向を示す決定的なデータはなかなか得られず、精度の低い複数のデータを用いて推定せざるを得ないのが普通である。目的関数タイプの推定（あるいは確率モデルを用いた推定）では複数の情報を組み合わせるのは比較的容易である。より多くの情報を組み込んで推定しようとするればモデルは巨大化する。複雑化・巨大化の流れは今後も続くであろう。

一方で複雑化・巨大化による弊害も目につくようになってきている。また必ずしも詳細なモデルが最適なモデルとは限らないとの指摘もある。OM 等のシミュレーションによる資源評価モデルの検討、あるいは資源管理まで含めた検討で、もっと単純な推定方法の方が望ましいことが示される可能性も高い。

今後しばらくは、複雑化・巨大化の流れと、これに反するような単純化の流れの中でモデルの開発が行われていくのであろう。この中で、シミュレーションによる検証は重要な役割を占めるものと思われる。しかし、今後の具体的な方向性はなかなか見えない。

では、また 10 年後...

引用文献

- Butterworth,D.S., Ianelli,J.N., and Hilborn,R. 2003. A statistical model for stock assessment of southern bluefin tuna with temporal changes in selectivity. *Afr. J. mar. Sci.* 25:331-361.
- Doubleday,W.G. 1976. A least squares approach to analyzing catch at age data. *Res. Bull. Int.Comm. NW Atl. Fish.* 12:69-81.
- Fournier,D.A. and Archibald,C.P. 1982. A general theory for analyzing catch at age data. *Can. J. Fish. and Aquat. Sci.* 39:1195-1207.
- Fournier,D.A., Sibert,J.R., Majkoeski,J., and Hampton,J. 1990. MULTIFAN: a likelihood-based method for estimating growth parameters and age composition from multiple length frequency data sets illustrated using data for southern bluefin tuna (*Thunnus maccoyii*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 47:301-317.

- Fournier,D.A., Hampton,J., and Sibert,J.R. 1998. MULTIFAN-CL: a length-based, age-structured model for fisheries stock assessment, with application to South Pacific albacore, *Thunnus alalunga*. *Can.J.Fish.Aquat.Sci.*,55:2105-2116.
- Gavaris,S. 1988. An adaptive framework for the estimation of population size. CAFSAC esearch Document 88/29, pp.12.
- Hampton,J. and Fournier,D.A. 2001. A spatially disaggregated, length-based, age-structured population model of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the western and central Pacific Ocean. *Mar. Freshwater Res.*, 52:937-963.
- Hilborn,R., and Walters,C.J. 1992. Quantitative Fisheries Stock Assessment. Chapman & Hall, New York.
- 平松一彦. 1988. シングルコホート解析の信頼性に関する最近の研究. 遠洋水研報, 27: 1-10.
- 平松一彦. 1996. 国際漁業委員会で用いられる資源評価手法について—VPA とプロダクションモデルの現状—. 水産資源管理談話会報, 15:3-24.
- 平松一彦. 2001. VPA(Virtual Population Analysis), 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—, 日本水産資源保護協会, 104-128.
- Hiramatsu,K. and Tanaka,E. 2004. Reliability of stock size estimates from adaptive framework virtual population analysis. *Fisheries Science*, 70:1003-1008.
- Ianelli,J.N. 2000. Some simulation analysis for evaluating length based stock assessment methods. (<http://www.spc.int/oceanfish/html/SAM/MFCLSimTest.pdf>)
- ICCAT. 1997. 1996 detailed report for bluefin tuna. ICCAT Col. Vol. Sci. pap., 46:1-186.
- Kleiber,P., Hampton,J., and Fournier,D.A. 2003. MULTIFAN-CL User's Guide. (Manuscript) pp.110. (<http://www.multifan-cl.org/>)
- Maunder,M.N., and Watters,G.M. 2003. A-SCALA: an age-structured statistical catch-at-length analysis for assessing tuna stocks in the eastern Pacific Ocean. *Inter-Amer. Trop. Tuna Comm., Bull.*, 22:433-582.
- Megrey,B.A. 1989. Review and comparison of age-structured stock assessment models. *Amer. Fish. Symp.* 6:8-48.
- Pope,J.G. and Shephaerd,J.G. 1982. A simple method for the interpretation of catch-at-age data. *J.Cons. Int. Explor. Mer*, 42:129-151.
- Porch,C.E. 2002. VPA-2BOX version 3.0 User's guide. pp.97. (<http://www.iccat.es/downloads.htm>)
- Quinn,T.J. and Deriso,R.B. 1999. Quantitative Fish Dynamics. Oxford University Press, New York.
- 山田作太郎・田中栄次. 1999. 水産資源解析学, 成山堂書店, 東京.