

令和 8(2026) 年度 資源評価におけるモデル診断手順と診断結果の情報提供指針

2026 年 6 月 1 日¹資源評価高度化作業部会²

モデル診断の概要

我が国の 1 系資源の評価には主に VPA が用いられているが、近年では多くの資源で複数の資源量指数を導入したチューニング VPA が資源量推定に利用されている。チューニング VPA では、最終年の漁獲係数 (F) の推定方法・資源量と資源量指数との間の非線形関係・複数資源量指数間の分散 (σ^2) の推定の有無・リッジ VPA (最終年の F の推定値をペナルティとして尤度に加えた VPA) 導入の有無など多岐にわたるオプションが利用できる。毎年の資源評価で提案されるモデル (ベースケースモデル) は、これらのオプションを組み合わせたものであるが、ベースケースモデルが統計的に見て妥当なものであるか、また、資源評価結果がモデルの仮定に対してどの程度頑健なものであるかをきちんと説明する (モデル診断) が必要である。

本指針では、特にチューニング VPA で実施可能なモデル診断手法を列挙し、これらを実施するための R の関数 (パッケージ frasyr, <https://github.com/ichimomo/frasyr>) を紹介する。それをふまえ、資源評価で用いられるベースケースモデルについて、資源評価会議時に報告書やドキュメントの形で提供することが求められるモデル診断の内容を示す。VPA の手法によって適用できるモデル診断手法は異なるが、それぞれの手法で実施可能なものについてはできるだけ実施し、情報提供することが望ましい。また、VPA 以外の資源評価手法を導入する場合でもここで示された考え方にに基づき同様のモデル診断結果を示す必要がある。frasyr を用いたモデル診断手順と説明は frasyr の vignette としても公開されている (<https://ichimomo.github.io/frasyr/articles/Diagnostics-for-VPA.html>)。

モデル診断の内容と資源評価報告書への掲載の有無

モデル診断結果は定量化できない部分があり、「問題ない」と「問題あり」の閾値を明確に決定することができない。したがって、担当者が「問題ない」と考えても、他の人 (査読者や有識者) は「問題あり」と捉える可能性があり、その逆もあり得る。そこで、「問題あり」の結果のみを示すのではなく、基本的には、計算できる全てのモデル診断の結果はドキュメントとして資源評価前に共有することが望ましい。また、資源評価ピアレビュー委員会によるピアレビューを受ける際にもそのドキュメントを事前にレビューアーに共有しておくことよい。それにより、資源評価結果に対する質問 (たとえば非線形性パラメータ (b) を推定しているが、推定しない場合はどうなるのか? など) に、すぐに回答することができる。あるいは、ドキュメントを配布しておくことでそのような質疑応答を減らし、より本質的な議論をおこなう時間を確保することができる。その上で、資源評価報告書には「一般的に重要なモデル診断結果」と「問題があって今後の課題にしたいなど、評価報告書内で言及される結果」を「補足資料2 計算方法」に

¹ 令和 7 年度版からの変更点: ブートストラップの結果の取り扱いについて変更。自然死亡係数の感度分析の手法について追記。編集上の語句の修正

² English title (author): Procedures for model diagnostics in stock assessment and guidelines for reporting results (fiscal year 2026). (Working Group on Advancing Stock Assessment)

おける補足図として載せる。

表1に、ドキュメントとして示すべき内容の例を網羅的に列挙した。その中で、資源評価報告書の補足資料として掲載すべきものは、基本的には、下線をひいたもの、すなわち、残差分析とレトロスペクティブ解析の結果になる。また、上述しているように資源評価報告書内で言及される重要な結果が他にもあれば、それも適宜補足資料に入れ込む。

モデル診断手法の詳細

(1) パラメータ推定が適切になされているかの確認：do_estcheck_vpa()

モデル診断においては、推定されたパラメータが適切なものになっているかをまず確認する必要がある。適切なパラメータ推定がなされていると判断するための基準として、ここでは、解が収束している、大域解が得られている、ヘッセ行列の逆行列が正定値であることと考える（これらの用語の意味については図1を参照のこと）。

frasyrのdo_estcheck_vpa関数はこれらの項目を確認するための関数である。do_estcheck_vpaは初めにヘッセ行列の逆行列が正定値となっているかどうかと、パラメータ推定が収束しているかどうか（局所最適解が得られている）を確認し、これらが満たされていない場合にはその旨を伝えるメッセージとともに関数の実行が止まる。この場合は、初期値を変えてみる、あるいは推定するパラメータ数を減らすなどの工夫をする必要がある。この条件がクリアされると、do_estcheck_vpaはジッター解析を行う。ジッター解析はパラメータ推定をするときの初期値を様々なものに変えて、それぞれの初期値からパラメータ推定を複数回実施する。それにより、推定値が大域解であるかを確認できる（Carvalho et al., 2021, 図2）。ジッター解析の結果は図（図2）とともに出力され、関数に与えたVPAの推定結果の最大対数尤度とジッター解析で得られた最大対数尤度が等しいことを確認する必要があり、ジッター解析完了後にRのコンソール画面に両者の最大対数尤度が表示される。

(2) 残差分析：plot_residual_vpa()

次に、与えられたデータが資源評価モデルによってどの程度説明されているか、また、パラメータ推定の際に与えた仮定にどの程度整合しているかを確認するため、残差分析を行う。チューニングVPAにおいては、年齢別漁獲尾数に誤差は仮定されていないが、資源量指数には対数正規分布の観測誤差が仮定されている。そのため、チューニングVPAでは、資源量指数の対数から資源量指数の予測値を引いた残差の平方和を最小にする最小二乗法によってパラメータ推定がなされている。これは、残差の分布が正規分布に従うと仮定した場合の最尤推定値と同等である。そのため、チューニングVPAにおける残差は、平均が0、分散が σ^2 の正規分布に従い、 σ^2 は一定（等分散）、かつ、個々の残差が独立であることが仮定されている。

このような仮定が満たされているかどうかを検討するため、残差を様々な形でプロットしたものを残差プロットと呼び、モデル診断に用いる。例えば、残差を時系列でプロットした残差の時系列プロットにおいて、ある一定の年代で残差が大きく、別の年代で残差が小さくなるような傾向にある場合、等分散の仮定が満たされていないかもしれない。また、過去は残差が負の値を、最近は残差が正の値を取るような傾向にある場合には、独立の仮定が満たされていないかもしれない。独立の仮定が満たされてい

るかどうかは、例えば、残差の自己相関係数の大きさや有意性を見ることによって数値化できる。

関数 `plot_residual_vpa()` では、各資源量指数の観測誤差の大きさ (σ) と1次の自己相関係数 (ρ) が残差プロット中に併記され、自己相関が有意である場合には*がつく (図3左上)。ただし、残差の自己相関は、用いられている資源量指数だけにバイアスがあることを示すわけではなく、資源量指数が正しいとしても、モデル内の他の部分での仮定の破れ等によって残差に自己相関傾向が現れていることもある。そのため、残差に自己相関がみられたとしても当該資源量指数をすぐに取り除くのではなく、モデル内の他の仮定の妥当性など、モデル全体の設定を総合的に確認し、見直す必要がある。しかし、VPAというモデルの構造上の制約や知見の不足等により、すぐにこのような問題を解決できないことが多い。

現実的な対処法としては、外れ値の影響を考慮したり、資源量指数が十分に資源動向を反映しているかどうかを確認し、複数の資源量指数がある場合には重みづけの方法の変更や、資源量指数と資源量の非線形的な関係を考慮、漁獲能率 (q) が年代によって変化している可能性などを検討する。その上で、まだ残差に自己相関が残っているようなモデルを用いる場合には、残差の自己相関が有意であることを注釈に加えつつ、当該資源量指数を除いた時の感度分析やレトロスペクティブ解析などの結果とともに、その推定結果を用いることもある。その場合は、残差に自己相関が見られる理由 (例えば、資源量指数を参照する資源年齢が異なるから等) について考察の上、本文中に記載する必要がある。残差に自己相関が見られる場合には、レトロスペクティブパターンが出やすいため、レトロスペクティブ解析の結果とも併せてモデルの使用の判断を行うことが望ましい。

`plot_residual_vpa()` の残差の時系列プロットでは観測値の 1.28σ (80%) 区間と 1.96σ (95%) 区間も同時に出力される。 1.96σ 区間は観測値の95%がこの区間内に入ると考えられる範囲であるため、この範囲から逸脱しているデータはパラメータ推定への影響力が大きすぎる可能性があり、そのデータの影響力の大きさや外れ値である可能性について慎重に検討する必要がある。

また、モデルが資源量指数をどの程度説明できているのかを判断するために、資源量指数とモデルの予測値の両方を時系列にプロットした図 (図3右上) も `plot_residual_vpa()` から出力される。資源量指数がモデルによって十分に説明されていない場合、海外の資源評価ではリジェクトされる事例もある (Punt et al., 2020)。

資源量と資源量指数には $CPUE=qB$ という比例関係が仮定されている。これは資源量が大きい場合、資源量指数も大きくなることを意味する。しかし、資源量指数によっては線形関係が認められない場合があり、非線形性のパラメータ (b , $CPUE=qB^b$) を推定することでモデルと資源量指数のフィットが向上する可能性がある (Hashimoto et al. 2018)。 b が1より小さく、資源量の減少に対して資源量指数の減少が鈍感で、ある枯渇レベルに達すると資源量指数が急減する現象を *hyperstability* と呼ぶ。一方、 b が1より大きく、資源量の減少に対して、資源量指数がそれ以上に大きく減少する現象を *hyperdepletion* と呼ぶ。一般に、本パラメータは推定が難しいことが知られているため、本パラメータを推定した場合は、資源量と資源量指数の関係のプロット (図3左下) を通して推定結果が妥当であるか確認する必要がある。

(3) レトロスペクティブ解析 : `do_retrospective_vpa()`

レトロスペクティブ解析は、推定の最終年から1年ずつデータを取り除いて資源評価モデルによる推定を繰り返し行う解析手法である。1年ずつデータを取り除いたモデル (レトロモデル) の推定値と、

得られている全ての時系列データを用いたモデル（フルモデル）の結果の推定値を比較することで、新しいデータが追加されたときの資源量推定値の修正度合いが確認できる（図4）。比較のために用いる資源量推定値としては資源量・漁獲係数・加入量・産卵親魚量などが目的に応じて用いられる。フルモデルからの推定値に対して、各レトロモデルからの推定値が大きく異なっている場合、毎年の資源評価の頑健性が低いことが示唆される。また、フルモデルからの推定値に対して、レトロモデルからの推定値が毎年同じ傾向を持ってずれているような現象を、レトロスペクティブパターンと呼ぶ。このレトロスペクティブパターンが大きい場合は、フルモデルからの推定結果がバイアスしている可能性が高い。

レトロスペクティブパターンの強さを表す指標としてMohn's ρ という尺度がある（Mohn, 1999）：

$$\rho = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{\theta_{R,T-n} - \theta_{F,T-n}}{\theta_{F,T-n}}$$

ここで n はレトロスペクティブ解析で遡った年数（最大 N 年まで遡る）、 T はフルモデルの推定最終年、 $\theta_{R,T-n}$ はレトロモデルの推定最終年（ $T-n$ 年）の推定値、 $\theta_{F,T-n}$ はフルモデルの $T-n$ 年の推定値をそれぞれ表す。レトロスペクティブパターンの強さを判断するうえでMohn's ρ の大きさの絶対的な指標は存在しないが、経験則的な事例はまとめられている。Hurtado-Ferro et al. (2015)ではレトロスペクティブパターンが問題視されるMohn's ρ の経験則について、寿命の長い種では-0.15以下または0.2以上、短い種では-0.22以下または0.30以上としている。ただし、この値は長寿命種はyellowtail flounder、短寿命種はPacific sardineの生物学的パラメータを基に、シミュレーションによって算出されたものであり、魚種が異なる場合はこの限りではない点に注意が必要とされている。また、Breivik et al. (2023)によれば、Mohn's ρ の許容範囲は利用可能なデータと評価モデルの複雑さによって異なるため、上記の基準がどの場合にも適用できるわけではないことも指摘されている。レトロスペクティブパターンが認められた場合、これらの値を参考に許容範囲内であるかどうかを議論する必要がある。

また、レトロスペクティブパターンが大きく表れる一つの要因は、モデルに与えられた複数のデータがそれぞれ異なる情報を持つ場合であることが知られている。チューニングVPAの場合には、年齢別漁獲尾数と資源量指数の2種類の質の異なるデータが与えられているが、それぞれが資源状態に対して異なる情報を持つ場合、資源量指数を用いないチューニングなしのVPAではレトロスペクティブパターンが出ないのに、チューニングVPAでレトロスペクティブパターンが大きく表れることがある。特にチューニングVPAはモデルの構造上、近年の資源量推定値は資源量指数に大きく影響を受ける一方で、過去年にさかのぼるほど資源量推定値は年齢別漁獲尾数によって決定論的に決まるため、資源量指数と年齢別漁獲尾数がそれぞれ矛盾した情報を持つ場合にレトロスペクティブパターンが出やすくなると考えられる。このようなケースでは、資源量指数がバイアスしている可能性だけでなく、年齢別漁獲尾数が何らかの理由でバイアスしている可能性も排除できない。そのため、一概にレトロスペクティブパターンだけを理由に用いる資源量指数を選択したり、資源量指数を用いなかったりすることは、資源量指数が正しくて、年齢別漁獲尾数がバイアスしている、ひいては、資源量推定が潜在的にバイアスしている可能性を無視していることになる。また、資源が単調減少 または 単調増加の場合にもレトロスペクティブパターンが現れることがあるため、モデル推定のバイアスの根拠とは断定できない。したがって、Mohn's ρ の値の大きさだけでなく、データの特性や管理に与える悪影響などを総合的に加味した慎重な判断が必要である。レ

トロスペクティブパターンの大きいチューニングVPAの対応の一例として、リッジVPA (Okamura et al., 2017) を導入することで、レトロスペクティブパターンを減らすことが可能と考えられる。

(4) 感度分析 : do_sensitive_vpa()

感度分析は、資源評価モデルにおける様々な仮定の変化が、推定資源量などにどのような影響を与えるかを確認するための診断である。VPAにおいては、生物パラメータ（年齢別成熟率や年齢別体重、自然死亡係数(M)など）や最高齢と最高齢-1歳の漁獲係数の比 (α)、最終年のFの仮定、チューニング指標値間の重み付けなど、様々な仮定が置かれている。これらの仮定を変えて資源量推定を実施した場合、推定結果が変わることが予想されるが、それが意図した程度の変化量なのかを確認する (図5) 必要がある。

特に、以下のような場合には、感度分析を実施し結果を示すことが推奨される。

- 1) 資源評価モデルの設定やパラメータを、前年の資源評価から変更した場合：変更前の設定を用いて感度分析を行い、設定やパラメータ変更の影響の大きさを示す。
- 2) 自然死亡係数は、資源全体のスケールや自然増加率、ひいてはMSY管理基準値に大きな影響を与える重要なパラメータである。自然死亡係数に仮定をおいて資源量推定を行っている場合、または、モデル内でMを推定しているが推定値の不確実性が高い場合には、Mの仮定が資源量推定値および管理基準値に与える影響の大きさについて、感度分析を通じて確認しておくことが望ましい。感度分析で用いるMについては、成長や寿命などの生活史パラメータ等を用いた経験式によって候補値が得られる場合には、その結果として得られるMの範囲や水準を示した上で、それらを用いて感度分析を行う。例えば、<https://github.com/shcaba/Natural-Mortality-Tool> (Cope and Hamel, 2023) では、利用可能な寿命データ、成長パラメータ、繁殖情報などを入力することで、様々な経験式から自然死亡係数を計算できるツールが提供されている。また、各経験式から推定されるMに一定のCV (0.2など) と分布 (lognormalなど) を与えることによって、複数の経験式から計算された自然死亡係数の確率密度分布を計算し、その中央値および平均値や指定した値のパーセンタイルに位置する自然死亡係数を用いた感度分析を行うことも可能である。一方、そのような候補値が得られない場合には、現在使用しているMの値を基準として、例えば ± 0.1 程度の変動を与えた値や、自然死亡係数に一定の係数 ($\times 0.8$ や $\times 1.2$) を乗じた値などを用いて感度分析を実施する。

frasyrではdo_sensitive_vpa関数で実行可能だが、感度分析をしたいパラメータとその値の設定については、パラメータに応じて引数の指定方法が異なる。詳細な引数の設定方法については、関数のヘルプや vignetteを確認されたい。

(5) ジャックナイフ法 : do_jackknife_vpa()

一般的なジャックナイフ法は、推定に用いたデータを1つずつ取り除いてパラメータ推定を繰り返すことである。それにより、各データがパラメータ推定に与える影響の強さを調べることができる。frasyrのdo_jackknife_vpaでは、複数の資源量指数を用いている場合、それぞれの資源量指数の影響を評価するために、資源量指数の系列を1つずつ取り除いて資源量推定を行うことを繰り返す (図6)。複数の資源量指数がありそれぞれの傾向が異なる場合に、どのデータが推定にどのような影響を与えているか確認したい際に有用である。特に、ジャックナイフ法で推定値に対する影響力が大きいと判断された資源量指数の傾向が、その他の資源量指数の傾向と全く異なる場合には、特に影響力が強い資源量指数の信

頼性を確認し、必要があれば、データ間の重みづけの方法を変更するなどの手法を通して、代表性の高い資源量指数の傾向を推定結果に反映させるような検討もおこなう。

また、単一の系列の資源量指数を用いていた場合にも、極端な資源量指数を示す年を除いて資源量推定を行うことで、そのような値に対して資源量推定の感度が高いかを確認することができる。

(6) ブートストラップ法 : `boo.vpa ()`

ブートストラップ法はパラメータの信頼区間を推定するために用いる方法である。データ、ここでは資源量指数の疑似データを生成し資源量推定を繰り返すことで、パーセンタイル点としてブートストラップ信頼区間を計算することができる (図7左)。frasyrで提供されている`boo.vpa`では2通りの疑似データの生成方法が実装されている。ノンパラメトリックブートストラップ法では、資源量指数とモデルから計算された予測資源量指数の残差をリサンプリングする手法である。一方、パラメトリックブートストラップでは対数を取った予測資源量指数を平均に、推定された観測誤差を標準偏差に持つ正規分布から、疑似データを乱数生成する。R関数 `boo.vpa ()` ではパラメトリック法をデフォルトとしている。ノンパラメトリック法では小標本で信頼区間を過小に推定してしまう傾向が強いため、本ガイドラインにおいてもパラメトリック法を基本的に推奨する。

この他に、ブートストラップサンプル分の観測誤差や年齢別漁獲係数、加入量や産卵親魚量などの推定値が得られる。これらをプロットすることで、パラメータ間の相関の強さを把握することができる (図7右)。パラメータ間の相関が強い場合、パラメータ間で影響しあうことで推定が難しい場合がある。

引用文献

- Breivik, N. O., Aldrin, M., Fuglebakk, E. and Nielsen, A. (2023) Detecting significant retrospective patterns in state space fish stock assessment. *Can. J. Fish Aquat. Sci.*, 80, 1509-1518. <http://dx.doi.org/10.1139/cjfas-2022-0250>
- Carvalho, F., Winker, H., Courtney, D., Kapur, M., Kell, L., Cardinale, M., Schirrip, M., Kitakado, T., Yamane, D., Piner, K. R., Maunder, M. N., Taylor, I., Wetzel, C. R., Doering, K., Johnson, K. F., Methot, R. D. (2021). A cookbook for using model diagnostics in integrated stock assessment. *Fisheries Research* 240, 105959
- Cope, J. M., Hamel, O. S. (2022). Upgrading from M version 0.2: An application-based method for practical estimation, evaluation and uncertainty characterization of natural mortality. *Fisheries Research* 256, 106493.
- Hashimoto, M., Okamura, H., Ichinokawa, M., Hiramatsu, K., Yamakawa, T. (2018). Impacts of the nonlinear relationship between abundance and its index in a tuned virtual population analysis. *Fish Sci* 84 (2), 335-347
- Hurtado-Ferro, F., Szuwalski, C.S., Valero, J.L., Anderson, S.C., Cunningham, C.J., Johnson, K.F., Licandeo, R., McGilliard, C.R., Monnahan, C.C., Muradian, M.L., Ono, K., Vert-Pre, K.A., Whitten, A.R., Punt, A.E. (2014). Looking in the rear-view mirror: bias and retrospective patterns in integrated, age-structured stock assessment models. *ICES Journal of Marine Science* 72, 99–110.
- Mohn, R., (1999). The retrospective problem in sequential population analysis: An investigation using cod fishery and simulated data. *ICES Journal of Marine Science* 56, 473–488.
- Okamura, H., Yamashita, Y., Ichinokawa, M. (2017). Ridge virtual population analysis to reduce the instability of

fishing mortalities in the terminal year. ICES Journal of Marine Science 74 (9), 2427-2436

Punt, A. E., Tuck, G. N., Day, J., Canales, C. M., Cope, J. M., de Moor, C. L., De Oliveira, J. A.A., Dickey-Collas, M., Elvarsson, B., Haltuch, M. A., Hamel, O. S., Hicks, A. C., Legault, C. M., Lynch, P. D., Wilberg M. J. (2020). When are model-based stock assessment rejected for use in management and what happens then? Fisheries Research 224, 105465.

編集

八木達紀（責任編集）・濱邊昂平・市野川桃子・真鍋明弘

Tatsunori Yagi (Editor-in-Chief), Kohei Hamabe, Momoko Ichinokawa, Akihiro Manabe

表1. ドキュメントとして資源評価報告書とともに提出することが推奨されるモデル診断の候補の例。状況に応じて示すべきもので、すべてを示さないといけないわけではないが、下線を引いた項目は資源評価報告書の補足資料2「計算方法」の図として基本的には示すようにする（マアジ太平洋系群の例：https://abchan.fra.go.jp/wpt/wp-content/uploads/2024/03/details_2023_03.pdf）。

1. 収束の確認とジッター解析 (jitter analysis)

- ・失敗している場合にはパラメータ推定がうまくいっていないことを示すため、これについては必ず成功している結果を載せることになる（特に問題がなければ載せなくて良いが、確認して問題なかったことは記述しておく）

2. 残差プロット

3. レトロスペクティブ解析

- ・基本的に本文に載せることとする
- ・特にレトロスペクティブパターンが問題になる場合や、それによってリッジVPAなどを導入した場合

4. 生物パラメータやチューニング方法についての感度分析

- ・系群特有のパラメータや仮定に対して感度分析したい場合
- ・チューニング方法などで特に昨年度から手法を変えた場合、昨年度の手法を用いたときの結果と比較する
- ・自然死亡係数 (M) や最高齢と最高齢-1歳の漁獲係数の比 (α) など、明確な根拠はないものの毎年利用している値について他の候補の値が指摘された場合、管理基準値を含めた資源量推定結果に大きな影響を及ぼしそうな場合
- ・リッジVPAを用いている場合にはリッジVPAを用いない場合、資源量指数の非線形性パラメータ (b) を推定している場合にはbを推定しない場合など、より単純な仮定をおいたときの結果と比較（リッジVPAやb推定の効果をすぐに確認することができるため）

5. ジャックナイフ

- ・複数の資源量指数の中で傾向の異なる資源量指数がある場合
- ・残差分析などから外れ値の多い資源量指数がある場合

6. ブートストラップ信頼区間

- ・チューニングVPAによって資源評価を実施していて、CPUEのブートストラップによって資源量推定の不確実性が評価できる場合

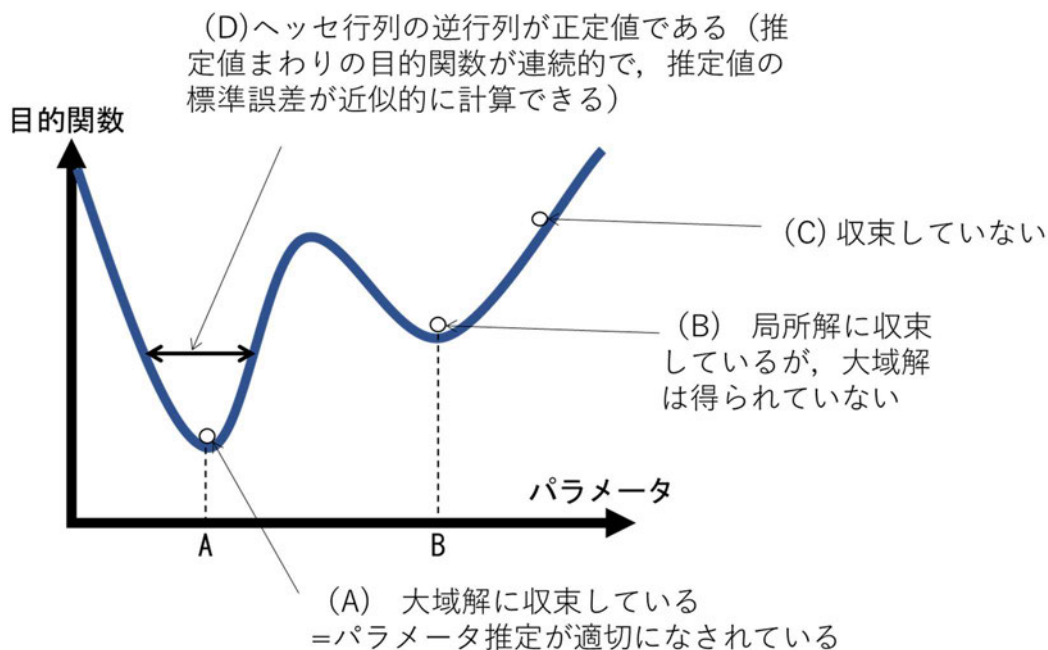


図1. 最適化を用いたパラメータ推定概念. ここで縦軸の目的関数は、最小二乗法の場合には残差平方和、最尤法の場合には負の尤度となり、目的関数が最も小さくなる時のパラメータの値（図のA）がいわゆる「推定値」（最尤推定値）となる. 適切な推定値が得られている場合というのは、解が収束していること（目的関数の微分がゼロになるような値に解が推定されているか）だけでなく、現実的なパラメータの範囲内で最も目的関数の値が小さくなるようなところの解が得られている（大域解が得られている）必要がある. 例えば、図のBは、解が収束はしているが局所解に陥ってしまっており、大域解が得られていない. また、図のCの状態は、解が収束もしていない. さらに、実用上は、大域解を得た上で、ヘッセ行列の逆行列が正定値であること（図のD）も適切なパラメータ推定の条件として求められる.

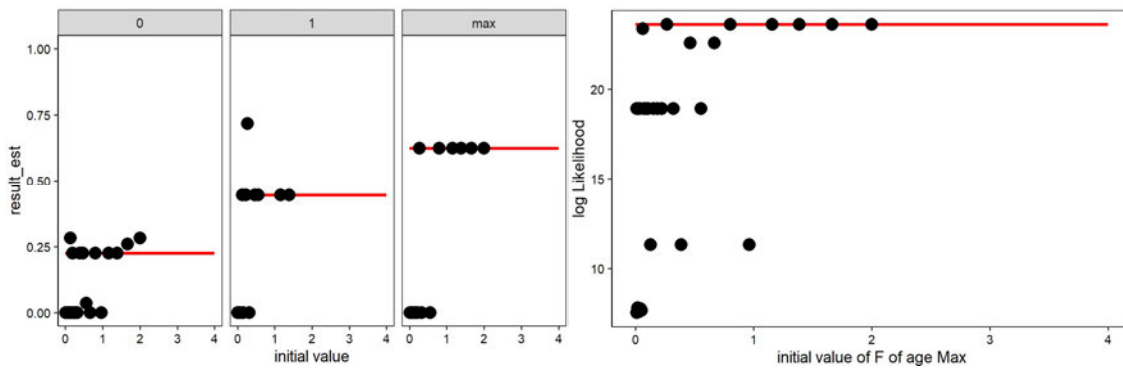


図2. frasyrでジッター解析 (do_estcheck_vpa) を実行した時の作図. 左図は初期値 (横軸) を変えてパラメータ推定した場合のパラメータ推定値 (縦軸) を表す. 赤線はデフォルトの初期値を用いた場合のパラメータ推定値. ここでは0に近い初期値を用いると推定値は極端に小さな値をとる傾向がみられる. 右図は最終年最高齢のFの初期値 (横軸) と対数尤度 (縦軸) を示し, 左図右側の“max”の横軸と対応する. この結果から, 0.5~2までの間の初期値を取れば, 多くの場合で最尤推定値を得られていることが確認でき, 考えうる初期値の範囲でデフォルトの初期値から推定された対数尤度 (右図赤線) よりも大きい結果がないことから, デフォルトの初期値の結果が大域解であることが確認できる.

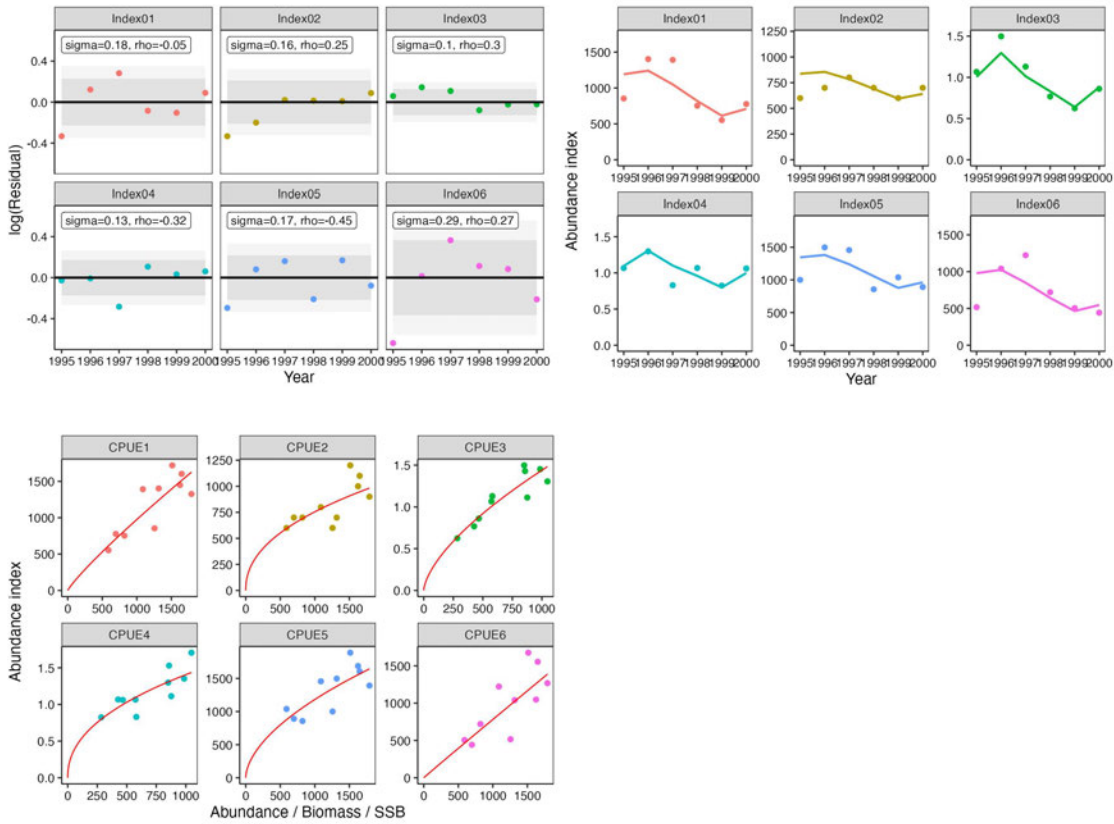


図3. frasyrで残差解析 (plot_residual_vpa) を実行した時の作図結果. 残差の時系列プロット (左上図), 資源量指数の予測値と観測値の時系列プロット (右上図) と資源量指数に対する推定資源量指数のプロットの図 (左下図). 左上図において, σ は観測誤差, ρ は残差の自己相関係数, 薄い灰色は1.96 σ 区間, 濃い灰色は1.28 σ 区間を表す.

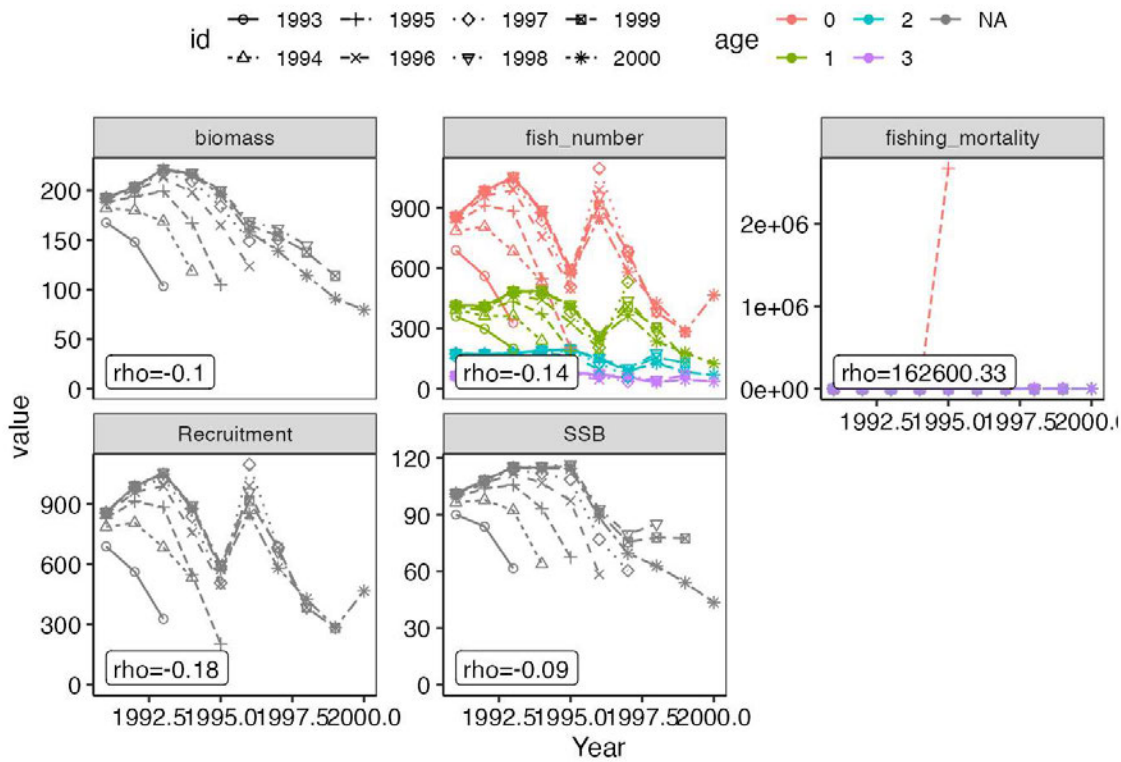


図4. frasyrでレトロスペクティブ解析 (do_retrospective_vpa) を実行した時の作図. 各パラメータ (biomass: 資源量, fish_number: 年齢別資源尾数, fishing_mortality: 年齢別漁獲係数, Recruitment: 加入尾数, SSB: 産卵親魚重量) のフルモデルとレトロモデルの動態, およびMohn's ρ (ρ) を表す.

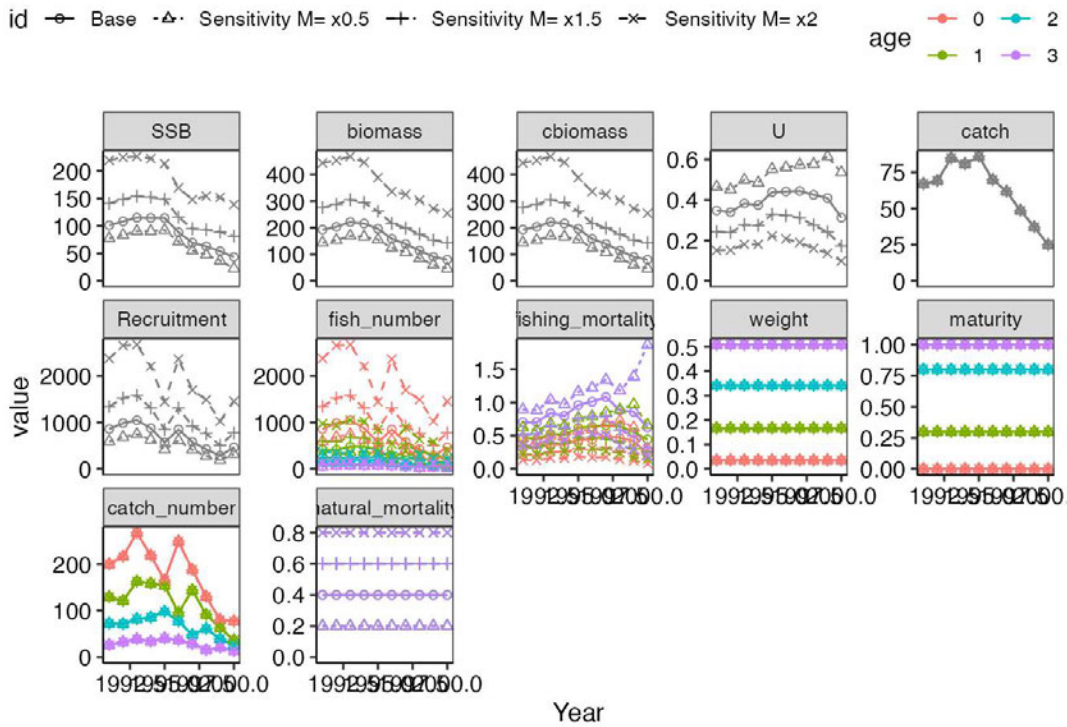


図5. frasyrで自然死亡係数 (M) についての感度分析 (do_sensitive_vpa) を実行した時の作図. 各パラメータ (cbiomass : 漁獲資源量, U : 漁獲割合, catch : 漁獲量, weight : 年齢別体重, maturity : 年齢別成熟率, catch_number : 年齢別漁獲量, natural_mortality : 年齢別自然死亡係数) の動態結果を表す.

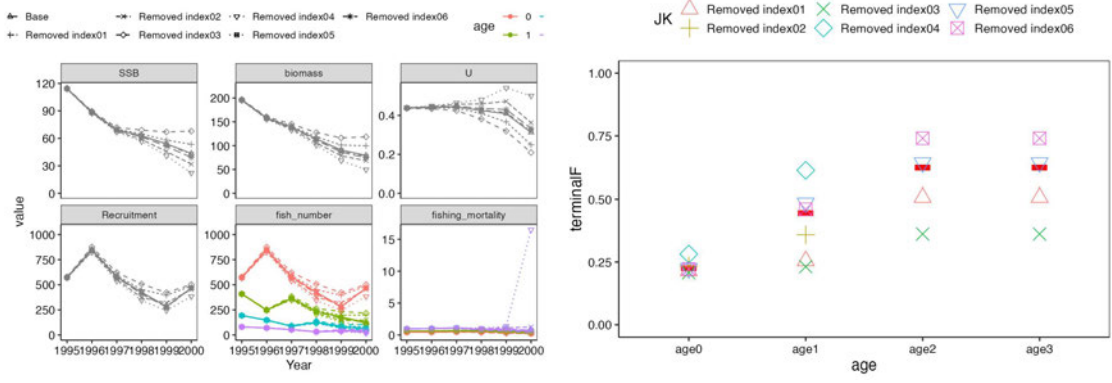


図6. frasyrでジャックナイフ法 (do_jackknife_vpa) を実行した時の作図. 左図は資源量指数の種類を1つずつ取り除いた場合の各パラメータの動態結果を表す. 右図は各年齢の最終年の漁獲係数の推定値を表す. 左図の漁獲係数を見るとIndex4を取り除くと極端な推定値を取っていることから, Index4の推定への貢献度が高いことが示唆される.

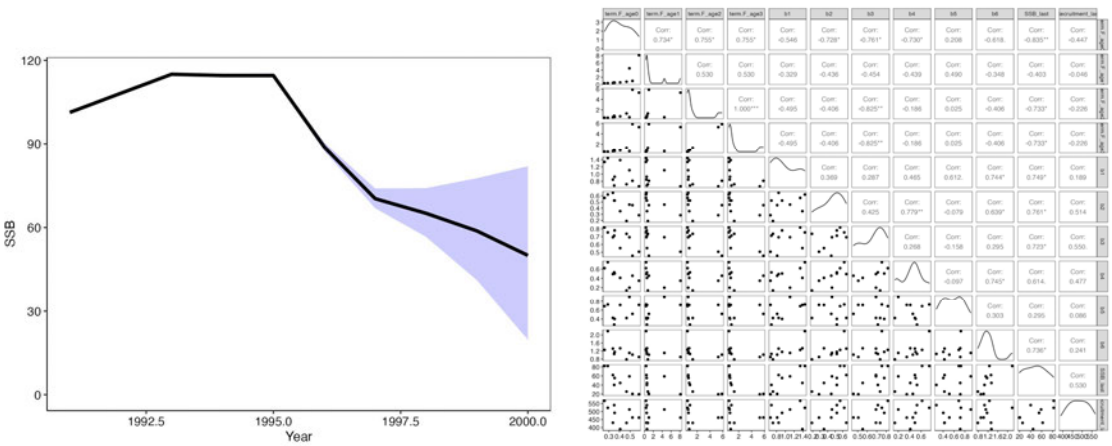


図7. frasyrでブートストラップ法 (plot_vpa) を実行した時の作図. 左図はSSBの推定値 (黒実線) と95%信頼区間 (青色) を表す. 右図は各推定パラメータの関係をプロットしたものである.