

カタクチイワシ太平洋系群に関して第2回資源管理手法検討部会 において指摘された事項への対応について

令和3年11月29日に開催された「水産政策審議会資源管理分科会第2回資源管理手法検討部会」において、カタクチイワシ太平洋系群に対して指摘を受けた2項目への対応を以下に示す。

検討項目 A

カタクチイワシ太平洋系群の資源評価においては、サバ類による捕食の影響を考慮すべき。

1. はじめに

本件への対応として、令和3年11月26日に、サバ類によるカタクチイワシ太平洋系群の捕食死亡率を推定した論文（田中 2022）が早期公開されたため、その論文に従い、本系群の自然死亡係数（ M ）がサバ類（マサバとゴマサバ）の資源量に応じて変動することを仮定した VPA により親魚量や加入量などを試算するとともに、それらの結果に基づき、再生産関係と生物学的管理基準値の試算も行った。

2. 材料と方法

田中（2022）の方法に従って、サバ類による捕食圧を考慮したチューニング VPA（以下、サバ類捕食 VPA）をカタクチイワシ太平洋系群について実施した。ただし、同論文では、本系群の令和元年度の資源評価結果（上村ほか 2020）に加え、令和元年度のマサバ太平洋系群（由上ほか 2020）およびゴマサバ太平洋系群の資源評価結果（由上ほか 2020）を使用している。そのため、VPA に使用した年齢別漁獲尾数の最終年は 2018 年であり、また、ゴマサバ太平洋系群のデータが存在する 1995 年以降についてチューニングを実施している。本資料では、カタクチイワシ太平洋系群の令和2年度および3年度のチューニングなし VPA による資源評価結果（FRA-SA2020-RC02-1、FRA-SA2021-SC02-1）と比較するため、本系群の年齢別漁獲尾数については 1978～2019 年および 1978～2020 年のデータを用いるとともに、チューニングは原著論文と同様に 1995 年以降について、令和2年度（FRA-SA2020-SC06-1、FRA-SA2020-SC06-2）と令和3年度（FRA-SA2021-SC03-1、FRA-SA2021-SC03-2）のマサバ太平洋系群およびゴマサバ太平洋系群の資源評価結果を用いて実施した。なお、田中（2022）では、サバ類捕食 VPA について、12 種類のシナリオを感度解析的に実施しているが、本資料では同論文におけるベースケースシナリオ（S0）の方法について、データ使用年を拡張する形で適用した。また、結果の図（図 A-2、A-3、A-5）の凡例や脚注における「サバ類捕食 VPA（95-18, 指標 95-18）」は田中（2022）と同じ設定による再現結果を、「サバ類捕食 VPA（78-19, 指標 95-19）」は田中（2022）に 2019 年および 1978～1994 年のデータを追加した令和2年度資源評価相当の結果を、「サバ類捕食 VPA（78-20, 指標 95-20）」は田中（2022）に 2019～2020 年および 1978～1994 年のデータを追加した令和3年度資源評価相当の結果を、それぞれ表す。

サバ類捕食 VPA の数式などの詳細については原著論文に示されているため、ここでは同 VPA の主要な仮定について示す。サバ類捕食 VPA では、 M_t (t 年の M) をサバ類の捕食による $M2_t$ (1/年) とそれ以外の $M1$ (1/年) に分けて扱っている。

$$M_t = M1 + M2_t \quad (1)$$

その上で、1) $M1$ は年によらず一定、2) $M2_t$ には年齢依存性はない、3) $M2_t$ はサバ類の総資源量に比例し、単位重量当たりの捕食圧はマサバとゴマサバで同値、と仮定している。これらの仮定に基づき、M とサバ類資源量の関係は以下の式で表される。

$$M2_t = \sum_{i=1}^2 m_{i,t} \quad (2)$$

$$m_{i,t} = \alpha \bar{P}_{i,t} \quad (3)$$

$$M_\mu = M1 + \bar{M2} \quad (4)$$

$$\bar{M2} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T M2_t \quad (5)$$

ここで、 $m_{i,t}$ はサバ i による年あたりの捕食死亡係数であり、 $i = 1, 2$ はそれぞれマサバ太平洋系群とゴマサバ太平洋系群に相当する。 α はサバ類の単位資源重量あたりの捕食死亡係数 (1/年・トン)、 $\bar{P}_{i,t}$ はサバ i の年間平均資源量である。 $\bar{P}_{i,t}$ を求めるのは、マサバおよびゴマサバ太平洋系群は 7 月を漁期開始とする漁期年計算 (7 月～翌年 6 月) の資源評価であるため、1 月を漁期開始とするカタクチイワシ太平洋系群と比較可能にするためである。なお、1994 年以前の $M2_t$ の推定には、マサバ太平洋系群の資源評価結果のみを使用した。また、 M_μ は現在のカタクチイワシ太平洋系群の資源評価で用いられている年齢別 M の平均値 (1.375) である。 M_μ が、資源評価の年数 T で M_t を平均した \bar{M} と等しい、という制約条件を置くことで、公表済みのチューニングなし VPA との繋がりを持たせている。さらに、 $\bar{P}_{i,t}$ の算出は以下の式による。

$$\bar{P}_{i,t} = \bar{N}_{t,a} w_{t,a} \quad (6)$$

$$\bar{N}_{t,a} = \frac{N_{t,a}(1 - e^{-F_{t,a} - M_{t,a}})}{F_{t,a} + M_{t,a}} \quad (7)$$

ここで、 $\bar{N}_{t,a}$ はサバ i の年齢別年間平均資源尾数、 $w_{t,a}$ は年齢別体重、 $N_{t,a}$ は漁期年計算の年齢別資源尾数、 $F_{t,a}$ は年齢別漁獲係数、 $M_{t,a}$ は年齢別 M を表す。その上で、VPA による親魚量の観測誤差が対数正規分布に従うと仮定したチューニングを以下の式によって行った。

$$B_t = \sum_{a=0}^A r_a w_{t,a} N_{t,a} \quad (8)$$

$$\ln(B_t) = \ln(\hat{B}_t) + \varepsilon_t \quad (9)$$

$$\varepsilon_t \sim N\left(-\frac{\sigma^2}{2}, \sigma^2\right) \quad (10)$$

ここで、 r_a は年齢別成熟率を、 B_t はサバ類捕食 VPA による親魚量を、 \hat{B}_t は卵数法による直接推定の親魚量 (図 A-1) を表す。また、残差 ε_t が対数正規分布に従うと仮定すること

により、未知パラメータの α 、 θ （最高齢の F と最高齢-1 歳魚の F の比）、およびターミナル F（資源評価最終年・最高齢-1 歳魚の F）を最尤法で探索的に求めた。なお、チューニングなし VPA とサバ類捕食 VPA の相違点を整理するため、VPA の主要項目および未知パラメータの推定値を表 A-1 において比較した。

3. サバ類捕食 VPA の試算結果

サバ類捕食 VPA とチューニングなし VPA（令和 2・3 年度の資源評価で用いた VPA）による親魚量や加入量などの試算・推定結果を図 A-2 に示す。チューニングなし VPA で推定された加入量は、2000 年代以降減少傾向を示し、近年は非常に低い水準にあるのに対し、サバ類捕食 VPA で試算された加入量は、2008 年に最も高い値を示すとともに、近年も比較的高い水準に維持されている。また、この高い加入量に伴って、サバ類捕食 VPA によって試算された親魚量は、チューニングなし VPA によって推定された親魚量よりも 2004～2014 年において、かなり高い値となっている。ここで、卵稚仔調査によるカタクチイワシ太平洋系群の仔魚量（前期仔魚の尾数）は、2000 年代以降減少傾向を示し、近年は非常に低い水準にある（図 A-1、A-3）。このことは、近年、本系群は仔魚期からすでに非常に低い水準にあることを示唆しており、サバ類捕食 VPA による加入量の結果と異なるが、1980 年代から現在までの変動パターンについては、仔魚量とサバ類捕食 VPA による加入量は類似したものとなっている。一方、サバ類の捕食に関する知見は非常に限られており、本系群の M がサバ類の資源量に比例するという仮定などの妥当性は不明であることなどから、現時点においてはサバ類捕食 VPA によって得られた結果を、公表済みのチューニングなし VPA による結果と同列には扱えないが、引き続き様々な条件設定の下での検討を行っていく必要がある。

$M2_t$ の年変化を図 A-4 に示す。 $M2_t$ は、2019 年までのデータを用いた場合も、2020 年までのデータを用いた場合も、ともに 2013 年以降、高い値を示している。ただし、データが 1 年更新されたことにより、2019 年の $M2_t$ は 0.3 程度下方修正されており、このことから、サバ類捕食 VPA については更なる検討が必要である。

図 A-5 に、サバ類捕食 VPA とチューニングなし VPA によって試算・推定された M 、漁獲死亡係数 (F) および全死亡係数 (Z) の年変動を年齢別に比較して示す。近年は、全年齢において、チューニングなし VPA による F が、サバ類捕食 VPA による F よりも高い値となっている。また、チューニングなし VPA による Z は高齢魚ほど高くなっており、2・3 歳では 5 程度まで上昇しているが、サバ類捕食 VPA による Z は、いずれの年齢でも 3 程度までとなっている。

チューニング指標値（卵数法による親魚量）への当てはまり結果を図 A-6 に示す。2000 年代における残差の傾向には、田中（2022）を再現したサバ類捕食 VPA と、令和 2 年度および令和 3 年度資源評価相当のサバ類捕食 VPA では大きな相違は認められなかったが、2010 年代においては傾向が異なり、田中（2022）を再現したサバ類捕食 VPA では 2016～2018 年は負の残差を示したが、令和 2 年度資源評価相当のサバ類捕食 VPA では 2016～2017 年が正の残差となるとともに、令和 3 年度資源評価相当のサバ類捕食 VPA では 2016～2018 年が正の残差となった。

4. 再生産関係

サバ類捕食 VPA による試算結果については、前述のように引き続きの検討が必要であるが、参考までに、同 VPA による加入量と親魚量（1978～2019 年の年齢別漁獲尾数を用いた場合の結果）に、「令和 3(2021)年度漁獲管理規則および ABC 算定のための基本指針 (FRA-SA2021-ABCWG02-01)」に従い、再生産関係を当てはめた。また、再生産関係としては、ホッカー・スティック (HS) 型、リッカー (RI) 型およびベバートン・ホルト (BH) 型を当てはめた。なお、加入量の残差における自己相関の有無も考慮するとともに、後述の、レジームで再生産関係を分けたモデルと比較できるように、自己相関パラメータを推定する際は同時推定法（自己相関パラメータもモデルに組み込み、再生産関係式のパラメータと自己相関パラメータを同時に推定する手法）を用いた。また、VPA の最終年である 2019 年の加入量の不確実性は高いと考えられることから、加入量と親魚量については 1978～2018 年のデータを用いた。

全期間のデータに再生産関係を当てはめた結果を表 A-2 と表 A-3 に示す。再生産関係式によらず、残差に自己相関を考慮したモデルの方が補正赤池情報量規準 (AICc) は低くなった。また、AICc 最小の再生産関係は、BH 型の再生産関係式を最小二乗法で当てはめたモデル（自己相関係数は同時推定）であったが、当該再生産関係については、最大尤度となるパラメータの組み合わせが複数存在すると診断されるとともに（表 A-3、図 A-7）、プロファイル尤度についても、尤度が最大となる範囲が広く推定された（図 A-8）。なお、唯一解の問題については初期値を変更することによって解決する可能性があるが、今回の試算では、デフォルト設定の初期値による再生産関係の当てはめを行なったことに留意が必要である。

カタクチイワシ太平洋系群は、数十年スケールの地球規模の気候～海洋生態系の構造転換（レジームシフト）と同期して、マイワシ太平洋系群と逆位相の変化を示しながら、大きく資源変動することが知られていることから、レジームによって異なる再生産関係の当てはめも行った。図 A-2 のように、サバ類捕食 VPA による加入量は 1996 年から 1998 年にかけて急増したため、再生産関係が高加入期（1997～2018 年）と通常加入期（1978～1996 年）の二種類の様態に分けられると仮定した上で、1995 年～1998 年をレジーム移行期とみなして、この間のそれぞれの年を区切り年とした、すべての再生産関係を当てはめた。なお、レジームで分けた再生産関係を当てはめた場合は自己相関を考慮しなかった。

レジームで分けた再生産関係を当てはめた結果を表 A-2 と表 A-3 に示す。AICc は、再生産関係に BH 型を用いた場合に低く、また、最適化手法に最小絶対値法を用いた場合に低かった。その中で、最小絶対値法を用いて求めた、通常加入期から高加入期に 1996 年から 1997 年の間で移行する BH 型の再生産関係の AICc が最小であった。

5. 管理基準値の試算結果

前述したように、サバ類捕食 VPA による試算結果や、それに基づく再生産関係については引き続きの検討が必要であるが、参考までに、それらの再生産関係に基づいた生物学的管理基準値（以下、管理基準値）の試算も行った。

MSY を実現する親魚量 (SBmsy) をはじめとした管理基準値の試算は、令和 3 年度の

本系群の研究機関会議資料（FRA-SA2021-BRP03-1）と同様の手順で行ったが、複数のデータソースを参照しており複雑であるため、使用したデータセットを表 A-4 に整理して示した。また、具体的な計算手順としては、「令和 3（2021）年度漁獲管理規則および ABC 算定のための基本指針（FRA-SA2021-ABCWG02-01）」の 1 系資源の管理規則に従い、4 で検討した再生産関係と令和 2 年度資源評価相当のサバ類捕食 VPA の結果を用いるとともに、各種設定（自然死亡係数、成熟率、年齢別平均体重）については、表 A-5 に示した設定を使用した。さらに、本系群の平均世代時間である 1.4 年の 20 倍の年数のシミュレーション期間後を平衡状態と仮定し、この平衡状態において平均漁獲量が最大化される F 値を F_{msy} 、また、この F_{msy} で漁獲した場合の平衡状態における平均親魚量を SB_{msy} とした。

管理基準値の試算に用いた将来の M_{2t} は、令和 2 年度のマサバ太平洋系群およびゴマサバ太平洋系群の将来予測結果（FRA-SA2020-SC06-1、FRA-SA2020-SC06-2）のうち、サバ類資源が適正に管理された場合（ $\beta=0.8$ の漁獲管理規則に従って管理された場合）に基づく年間平均資源量に、令和 2 年度資源評価相当のサバ類捕食 VPA による α を乗じることにより求めた。この将来の M_{2t} に、令和 2 年度資源評価相当のサバ類捕食 VPA による M_1 を加算して得られた将来の M_t は、将来予測開始直後は高く推移したが、平衡状態に達する時点では約 1.85 となった（図 A-9）。なお、サバ類の将来予測にも不確実性が含まれるが、本資料では将来の平均的な値のみを決定論的に用いたため、サバ類の将来予測における不確実性は、 M_t には反映されていない。

各種管理基準値の試算結果を表 A-6 に示す。レジーム分けしない再生産関係に基づく SB_{msy} については、再生産関係の仮定によって 10.4 万トンから 23.0 万トンの間で異なる値を示したが、AICc 最小モデル（BH 型、最小二乗法による最適化、自己相関係数同時推定）の SB_{msy} が最小値であった。また、この AICc 最小モデルの U_{msy} 、現在の漁獲圧に対する F_{msy} の比（ F_{msy}/F_{cur} ）および MSY は、同モデル以外のレジーム分けしない再生産関係に基づくそれらと比較して 2 倍程度高かった。なお、前述したように、AICc 最小モデルについては、推定時の初期値を変更することによって唯一解の問題が解決する可能性があることから、当該モデルに基づく管理基準値の不確実性は大きいと考えられる。一方、レジーム分けした再生産関係に基づく SB_{msy} については、AICc の低い順から 6 モデルが、いずれも BH 型であったことから、高加入期で 14 万トン程度、通常加入期で 7 万トン程度と類似した値となった。また、 SB_{msy} 以外の各種管理基準値についても、モデルに依らず類似した値を示した。

6. まとめ

サバ類捕食 VPA による加入量は、チューニングなし VPA による加入量よりも 2000 年代以降高い値を示し、近年も比較的高い水準を維持している（図 A-2）。しかし、卵稚仔調査によるカタクチイワシの仔魚量は、2000 年代以降減少傾向を示すとともに、近年は非常に低い水準にある（図 A-1）。この乖離の一因としては、サバ類捕食 VPA では卵数法で推定した親魚量のみでチューニングしていることが考えられるため、今後、信頼度の高い加入量の指標値をサバ類捕食 VPA に導入することができれば、この乖離が解消される可能性がある。

サバ類の捕食については知見が非常に限られており、特に近年の胃内容物については断片的な報告しか存在しない。サバ類捕食 VPA における重要な仮定として、カタクチイワシ太平洋系群の M はサバ類の資源量に比例して増減するというものがあるが、近年のようにマサバ太平洋系群は高水準期にあり、分布を沖合域に拡大しているのに対し、カタクチイワシ太平洋系群の分布は沿岸域に縮小している中でも、このような比例関係を仮定する妥当性などを判断するためには、引き続きサバ類の捕食などに関する知見の収集が必要である。

サバ類捕食 VPA における M は、太平洋海域のサバ類の資源評価が更新されることによって、特に最近年の値が大きく修正され得る（図 A-4、A-9）。このことは、資源評価の年次更新に伴いデータを 1 年分追加して将来予測を行う際に、前年の資源評価結果に基づく将来予測の結果から大きく外れる危険性を示している。

また、 M の不確実性の度合いは、サバ類の資源評価の更新に因ることに加え、サバ類の将来予測の不確実性によっても高まると考えられる。本資料では、将来予測における $M2_t$ の算出には、サバ類の将来予測における平均的な資源量を決定論的な値として用いた。しかし、実際にはサバ類資源についても加入などには確率的な変動があり、平均的な変化を示すことはない。そのため、サバ類資源の不確実性が、本系群の将来予測にどれくらいの影響を与えるかなどを検証する必要がある。

これらのことから、サバ類捕食 VPA については不確実性が大きいと考えられ、引き続き様々な条件設定の下での検討を行っていく必要がある。

7. 引用文献

- 田中栄次 (2022) サバ類資源によるカタクチイワシ太平洋系群の捕食死亡率の推定. 日水誌, **88(1)**, p.2-11. <https://doi.org/10.2331/suisan.20-00067>
- 上村泰洋、林晃、由上龍嗣、井須小羊子、古市生、渡部亮介 (2019) 令和元 (2019) 年度カタクチイワシ太平洋系群の資源評価. 令和元年度我が国周辺水域の漁業資源評価, 水産庁・水産研究・教育機構, 1-36. <http://abchan.fra.go.jp/digests2019/details/201924.pdf>
- 木下順二・上村泰洋・安田十也 (2020) 令和 2 (2020) 年度カタクチイワシ太平洋系群の資源評価. FRA-SA2020-RC02-1.
- 木下順二・安田十也・渡邊千夏子・上村泰洋 (2021) 令和 3 (2021) 年度カタクチイワシ太平洋系群の資源評価. FRA-SA2021-SC02-1.
- 木下順二・安田十也・渡邊千夏子・上村泰洋 (2021) 令和 3 (2021) 年度カタクチイワシ太平洋系群の管理基準値等に関する研究機関会議資料. FRA-SA2021-BRP03-1.
- ABCWG (2021) 令和 3 (2021) 年度漁獲管理規則および ABC 算定のための基本指針. FRA-SA2021-ABCWG02-01
- ABCWG (2021) 再生産関係の推定・管理基準値計算・将来予測シミュレーションに関する技術ノート (令和 3 年度研究機関会議版). FRA-SA2020-ABCWG01-02. 2021 年 2 月 19 日版. <http://abchan2.fra.go.jp/nc3/community/001fa787b4032d1aaf8c4e589746603/c64f0de2b6e39c59ab6845bb293593ce>
- ABCWG (2020) 再生産関係の決定に関するガイドライン. FRA-SA2020-ABCWG01-03.
- 由上龍嗣・西嶋翔太・井須小羊子・上村泰洋・古市生・渡部亮介 (2020) 令和元 (2019)

年度マサバ太平洋系群の資源評価. 令和元年度我が国周辺水域の漁業資源評価, 水産庁・水産研究・教育機構, 1-48. <http://abchan.fra.go.jp/digests2019/details/201905.pdf>
由上龍嗣・井須小羊子・上村泰洋・古市 生・渡部亮介、金森由妃 (2020) 令和元 (2019) 年度ゴマサバ太平洋系群の資源評価. 令和元年度我が国周辺水域の漁業資源評価, 水産庁・水産研究・教育機構, 1-40. <http://abchan.fra.go.jp/digests2019/details/201907.pdf>
由上龍嗣・西嶋翔太・上村泰洋・古市 生・井須小羊子・渡部亮介 (2021) 令和 2 (2020) 年度マサバ太平洋系群の資源評価. FRA-SA2020-SC06-1.
由上龍嗣・西嶋翔太・上村泰洋・古市 生・井須小羊子・渡部亮介 (2021) 令和 2 (2020) 年度ゴマサバ太平洋系群の資源評価. FRA-SA2020-SC06-2.
由上龍嗣・西嶋翔太・上村泰洋・古市 生・渡部亮介 (2021) 令和 3 (2021) 年度マサバ太平洋系群の資源評価. FRA-SA2021-SC03-1. (速報版、2021 月 12 月 24 日公開、https://www.fra.affrc.go.jp/shigen_hyoka/SCmeeting/2019-1/20211126/detail_masaba_pac.pdf)
由上龍嗣・西嶋翔太・上村泰洋・古市 生・渡部亮介 (2021) 令和 3 (2021) 年度ゴマサバ太平洋系群の資源評価. FRA-SA2021-SC03-2. (速報版、2021 月 12 月 24 日公開、https://www.fra.affrc.go.jp/shigen_hyoka/SCmeeting/2019-1/20211126/detail_goma_pac.pdf)

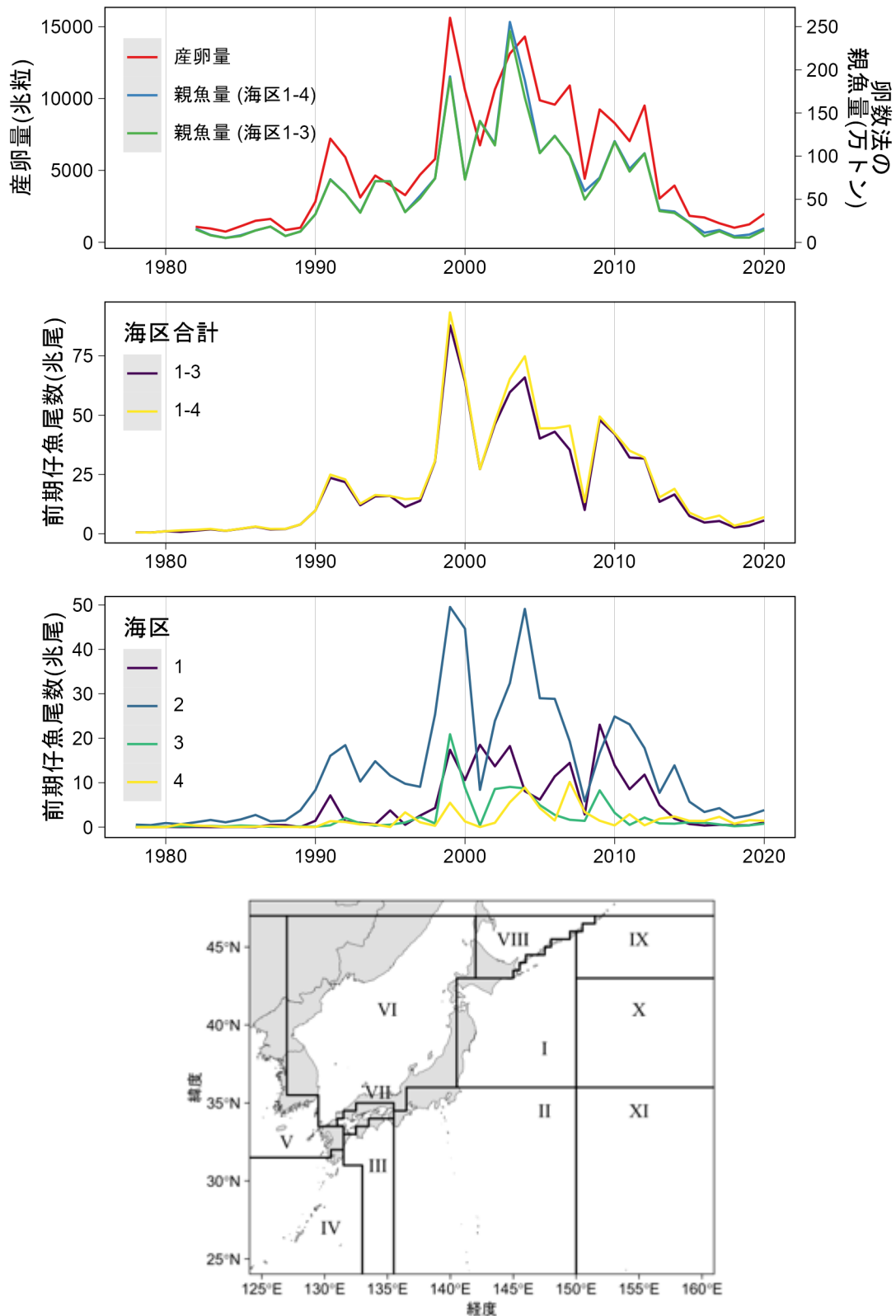


図 A-1. 卵数法による親魚量および卵稚仔調査による産卵量と前期仔魚尾数の年変動
 最上段の図に用いたデータは令和3年度の資源評価報告書に掲載。中二段の図に用いたデータは資源評価報告書には未掲載。最下段の図は卵稚仔調査の海域区分。

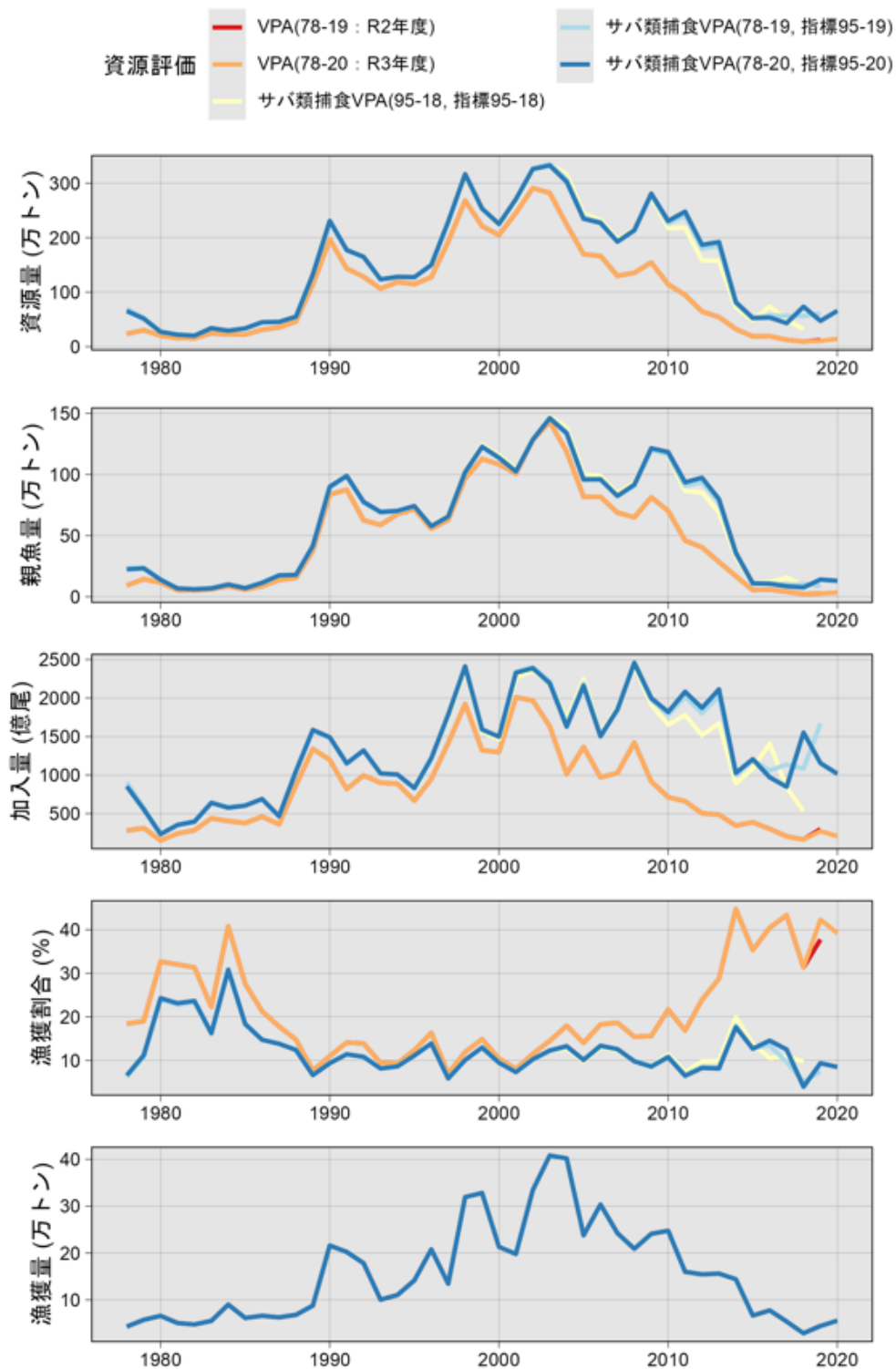


図 A-2. 資源量、親魚量、加入量、漁獲割合および漁獲量

凡例の「サバ類捕食 VPA (95-18, 指標 95-18)」は田中 (2022) と同じ設定による再現結果、「サバ類捕食 VPA (78-19, 指標 95-19)」は田中 (2022) に 2019 年および 1978~1994 年のデータを追加した令和 2 年度資源評価相当の結果、「サバ類捕食 VPA (78-20, 指標 95-20)」は田中 (2022) に 2019~2020 年および 1978~1994 年のデータを追加した令和 3 年度資源評価相当の結果を表す。

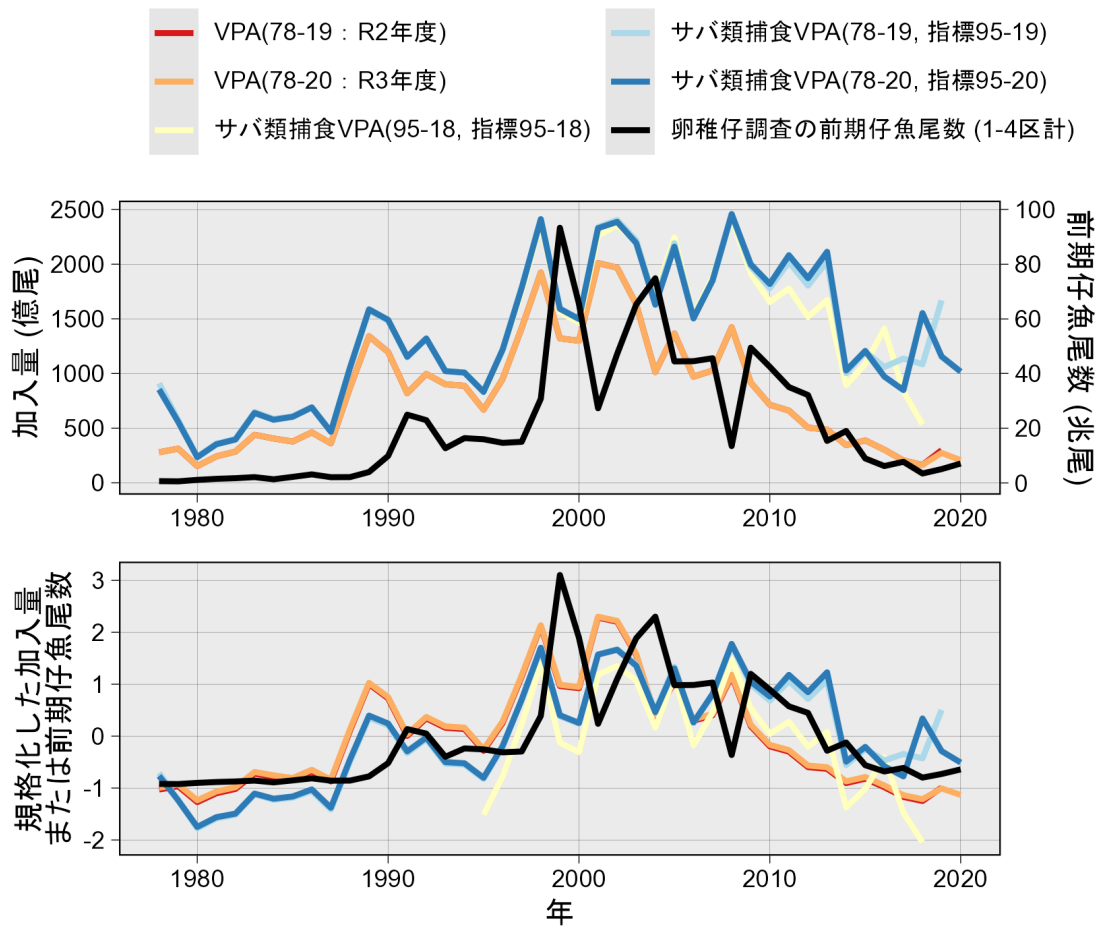


図 A-3. VPA による加入量と卵稚仔調査による前期仔魚尾数の経年変化の比較 (上) 規格化しない場合、(下) 規格化した場合

凡例の意味は図 A-2 と同様である。比較のために、図 A-1 から卵稚仔調査による前期仔魚尾数 (1~4 区計) を抜粋して示す。

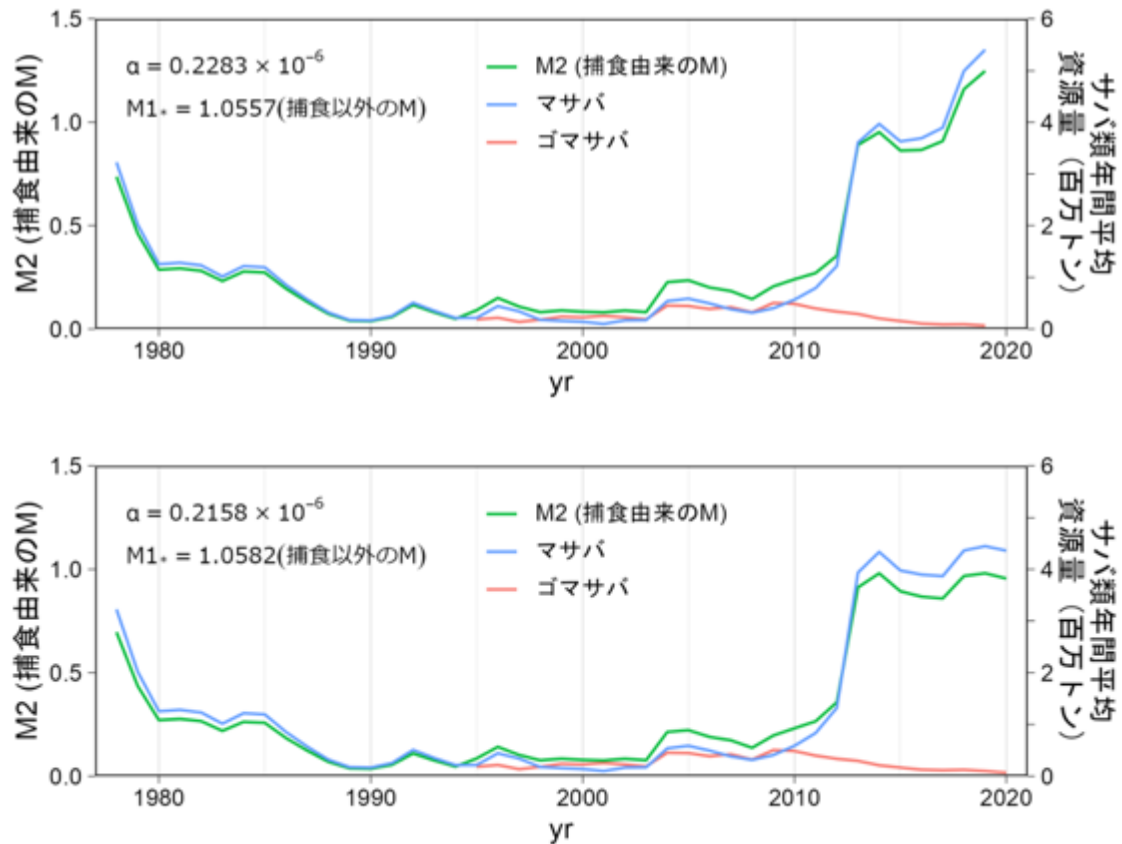


図 A-4. サバ類の捕食による M (M2) とサバ類の年間平均資源量 (上) 2019 年までのデータを用いた場合、(下) 2020 年までのデータを用いた場合

α はサバ類の単位資源重量あたりの捕食死亡係数、 $M1$ はサバ類の捕食以外による M を表す。上図の作成には、令和 2 年度のカタクチイワシ太平洋系群の資源評価結果 (FRA-SA2020-RC02-1) と、令和 2 年度のマサバ太平洋系群 (FRA-SA2020-SC06-1) およびゴマサバ太平洋系群 (FRA-SA2020-SC06-2) の資源評価結果を使用した。下図の作成には、令和 3 年度のカタクチイワシ太平洋系群の資源評価結果 (FRA-SA2021-SC02-1) と、令和 3 年度のマサバ太平洋系群 (FRA-SA2021-SC03-1) およびゴマサバ太平洋系群 (FRA-SA2021-SC03-2) の資源評価結果を使用した。なお、1994 年以前の M2 の推定にはマサバ太平洋系群の資源量のみを使用した。

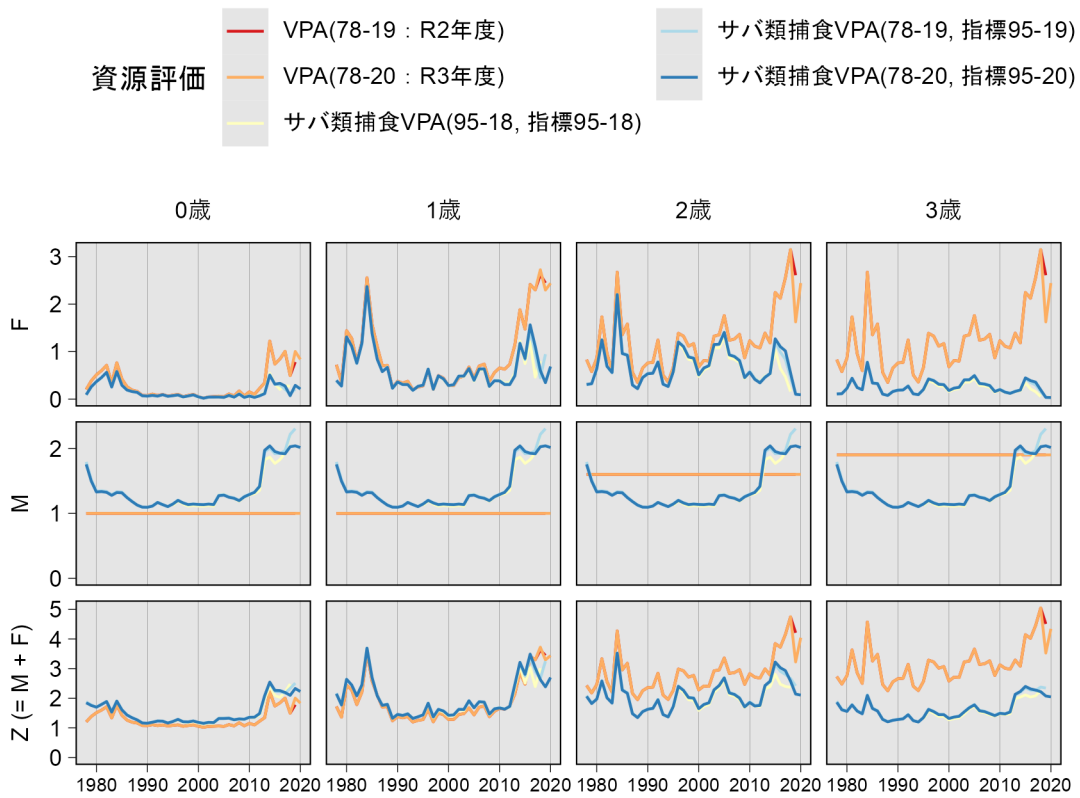


図 A-5. 年齢別の F、M および全死亡係数 Z

左から順に 0 歳、1 歳、2 歳および 3 歳の結果を表す。凡例の意味は図 A-2 と同様である。

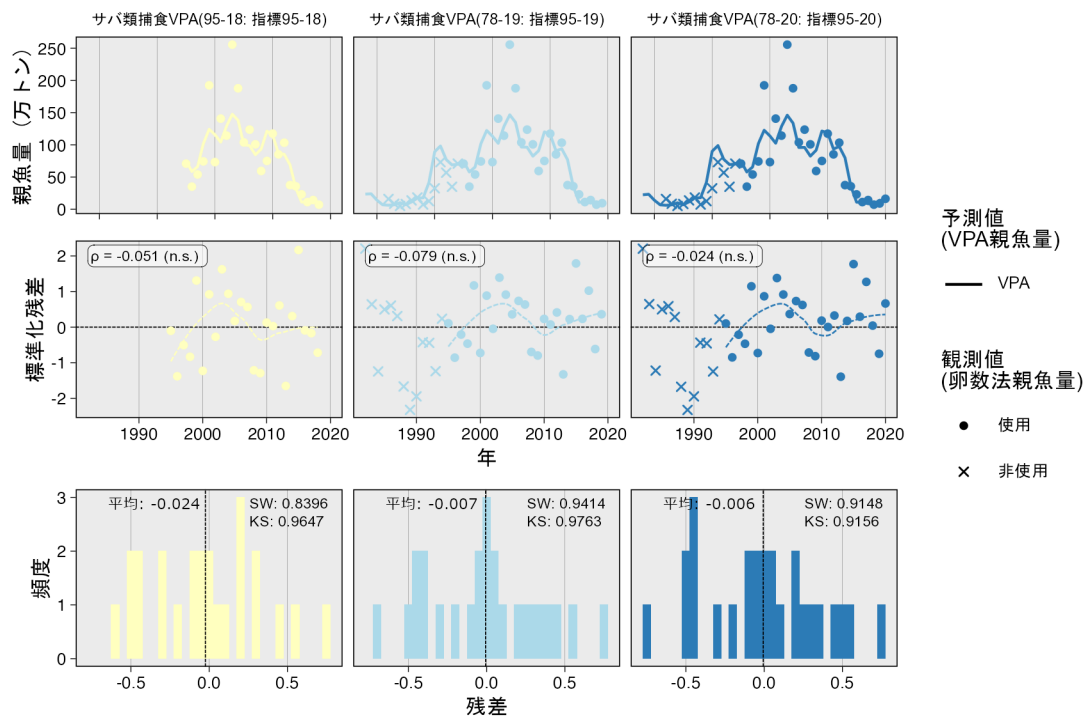


図 A-6. サバ類捕食 VPA (チューニング VPA) の残差プロット

左から田中（2022）を再現したサバ類捕食 VPA、令和 2 年度資源評価相当のサバ類捕食 VPA、令和 3 年度資源評価相当のサバ類捕食 VPA の結果を示す。予測値と観測値のトレンド図（上段）内の実線は VPA の親魚量の変化を、黒丸はチューニングに使用したデータを、×印はチューニングに使用しなかったデータを示す。標準化残差パネル（中段）内の左上の数値は標準化残差の自己相関係数（AR1）を表し、いずれのサバ類捕食 VPA でも有意ではなかった。また、図中の破線は標準化残差のスムージング曲線を示す。残差ヒストグラム（下段）内の右上の数値は Shapiro-Wilk 検定（SW）と Kolmogorov-Smirnov 検定（KS）の P 値である。どちらも帰無仮説は「正規分布に従っている」である。

```

$convergence
[1] "1. 収束しています (OK)"

$hessian
[1] "2. Hessian行列の対角成分が正定値になっています (OK)"

$boundary
[1] "3. どの推定パラメータも壁(boundaries)にあたっていないのでOKです (OK)"

$optim
[1] "4. パラメータが大域解に達しているのでOKです (OK)"

$loglik_diff
 [1] 5.338823e-09 2.512930e-08 2.615522e-08 0.000000e+00 1.373559e-07
 [6] 2.249629e-08 5.383937e-08 2.357965e-07 7.213162e-07 1.683113e-07
[11] 2.836521e-07 2.128327e-07 1.735000e-08 2.591214e-07 9.945859e-08
[16] 6.133590e-09 5.661962e-09 3.625003e-08 2.919407e-07 1.468022e-08
[21] 1.138066e-07 2.075092e-08 1.969343e-07 2.442769e-08 3.402291e-07
[26] 1.987124e-07 1.300378e-07 1.743454e-08 5.574696e-09 1.024939e-07
[31] 1.060140e-07 6.361436e-07 5.953032e-08 1.688895e-07 5.354737e-07
[36] 1.694866e-08 2.233433e-07 3.930372e-09 1.206278e-08 7.173176e-08
[41] 3.825649e-09 1.722441e-07 2.267695e-07 1.943020e-07 4.733737e-08
[46] 6.392739e-09 5.982382e-07 5.554655e-08 5.718338e-08 3.465816e-09
[51] 7.209094e-07 7.502120e-08 1.383878e-08 2.965260e-09 5.470318e-08
[56] 2.648588e-07 9.877769e-08 4.176438e-08 7.060668e-09 5.032765e-01
[61] 5.861977e-08 6.648554e-08 1.683098e-10 7.338410e-08 3.524586e-07
[66] 7.336049e-08 3.177042e-08 4.755139e-08 2.605644e-08 1.085669e-07
[71] 7.155695e-08 8.913312e-08 4.542091e-08 8.226193e-08 1.379984e-07
[76] 1.455574e-08 6.076497e-08 3.974001e-08 4.297636e-08 5.876968e-09
[81] 4.946082e-08 4.714187e-07 2.428007e-07 1.520554e-07 1.772217e-08
[86] 2.043454e-07 3.282631e-07 2.904783e-08 3.825975e-08 2.843732e-08
[91] 4.418269e-07 4.150090e-08 4.245550e-08 1.662727e-09 4.840308e-08
[96] 2.865756e-07 3.194045e-07 8.226449e-07 3.702015e-08 1.651484e-07

$pars
[1] "5. 同じ最大尤度(1e-06よりも小さい違い)を持つ複数のパラメータが見つかりました
(L1かつHSでよく見られます) 。"

$par_summary
      a          b          sd          rho
Min.  1.795524 1.160078e-05 0.3125574 0.6400679
1st Qu. 1.797095 1.161376e-05 0.3125586 0.6402792
Median 1.797518 1.161718e-05 0.3125591 0.6403383
Mean   1.797483 1.161689e-05 0.3125591 0.6403372
3rd Qu. 1.797956 1.162114e-05 0.3125596 0.6403974
Max.   1.799565 1.163436e-05 0.3125613 0.6405372

$percent_bias_summary
      a          b          sd          rho
Min.  -0.096671990 -0.12351480 -6.612140e-04 -0.034224824
1st Qu. -0.009225795 -0.01179705 -2.919995e-04 -0.001230414
Median  0.014300186  0.01764707 -1.357012e-04  0.008002697
Mean    0.012328102  0.01513147 -1.326177e-04  0.007837584
3rd Qu.  0.038688880  0.05179697  2.113696e-05  0.017230159
Max.    0.128205731  0.16558521  5.814601e-04  0.039062618

```

図 A-7. レジーム分けしない場合の AICc が最小の再生産関係 (BH 型、最小二乗法、自己相関同時推定) に関する推定パラメータの診断メッセージ

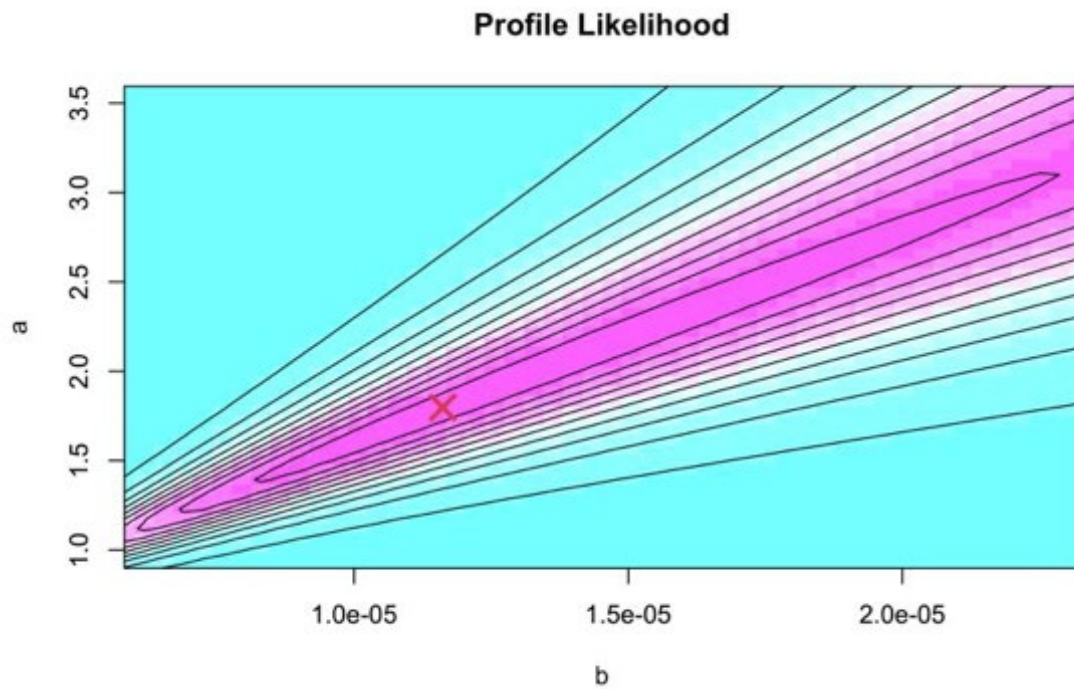


図 A-8. レジーム分けしない場合の AICc が最小の再生産関係（BH 型、最小二乗法、自己相関同時推定）のプロファイル尤度

最大尤度を示すパラメータの範囲が広く、同等な尤度を有する複数のパラメータの組をもち得る。

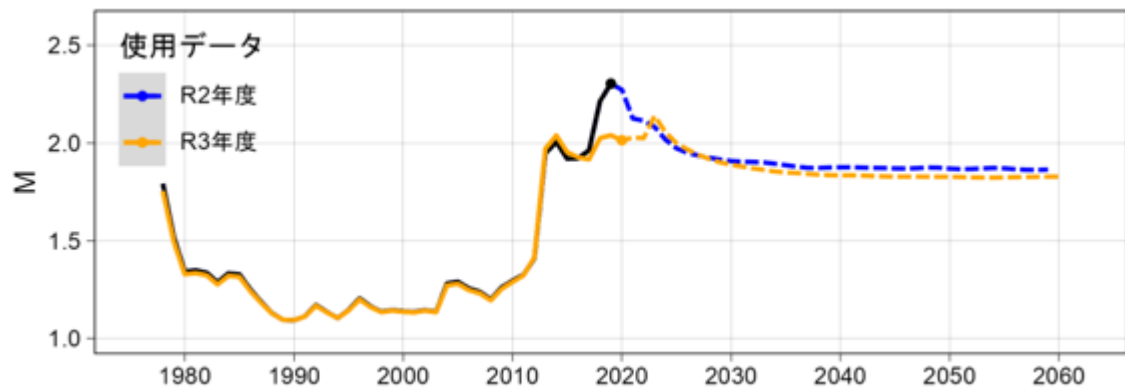


図 A-9 サバ類捕食 VPA で試算された令和 2 年度と令和 3 年度の資源評価結果に相当するカタクチイワシ太平洋系群の M

管理基準値の試算には、令和 2 年度資源評価相当のサバ類捕食 VPA による M を用いた（黒実線および青破線）。青破線は、令和 2 年度のマサバおよびゴマサバ太平洋系群の将来予測における平均的な資源量を年間平均資源量に換算した後、令和 2 年度資源評価相当のサバ類捕食 VPA による α （サバ類の単位資源重量あたりの捕食死亡係数、図 A-4 上）を乗じて算出した M である。橙破線は、令和 3 年度のマサバおよびゴマサバ太平洋系群の将来予測における平均的な資源量を年間平均資源量に換算した後、令和 3 年度資源評価相当のサバ類捕食 VPA による α （図 A-4 下）を乗じて算出した M であり、本資料における検討では使用していないが、参考のために示した。2021 年の M は 1 年分のデータが追加されたことで 0.2 程度下方修正された。

表 A-1. 公表済みのチューニングなし VPA とサバ類捕食 VPA の構造比較

項目	チューニングなし VPA		サバ類捕食 VPA (田中 2022 の S0 シナリオ)	
計算方法	Pope の近似式			
年齢群	0-3 歳 (プラスグループなし)			
年齢別成熟率	0 歳 = 0%, 1-3 歳 = 100%			
年齢別漁獲尾数	農林統計および主要港の漁獲量と体長測定データより算出			
年齢別体重	漁獲量と漁獲尾数から算出			
チューニング	なし		あり 指標値: 卵数法による親魚量(I-IV 区計)	
M	年齢勾配あり 年変動なし		年齢勾配なし 年変動あり	
最高齢の F	3 歳 F = 2 歳 F ($\theta = 1$)		3 歳 F = $\theta \times 2$ 歳 F (θ は推定パラメータ)	
最終年の F	0-2 歳 F: 過去 3 年平均 3 歳 F: 推定パラメータ		0-1 歳 F: 過去 3 年平均 2 歳 F: 推定パラメータ 3 歳 F: $\theta \times 2$ 歳 F	
近年の選択率	0 < 1 < 2 = 3 歳		3 < 0 < 2 < 1 歳	
推定する パラメータ	最終年・最高齢の F		最終年・最高齢 - 1 歳の F 最高齢と最高齢 - 1 歳の F の比 θ サバ類の単位資源重量あたりの捕食死亡係数 α 指標値の観測誤差 σ	
パラメータの 推定値	令和 2 年 度資源評 価	F: 2.6079	サバ類捕食 VPA (78-19, 指標 95- 19) : 令和 2 年度 資源評価相当のサ バ類捕食 VPA	F: 0.1135 θ : 0.355 α : 0.2283×10^{-6} σ : 0.3533
	令和 3 年 度資源評 価	F: 2.4429	サバ類捕食 VPA (78-20, 指標 95- 20) : 令和 3 年度 資源評価相当のサ バ類捕食 VPA	F: 0.0914 θ : 0.352 α : 0.2158×10^{-6} σ : 0.3621
			サバ類捕食 VPA (95-18, 指標 95- 18) : 田中 (2022) の再現	F: 0.1579 θ : 0.331 α : 0.2711×10^{-6} σ : 0.3416

α はサバ類の単位資源重量あたりの捕食死亡係数 (1/年・トン)

表 A-2. 再生産関係式の各パラメータの試算値

● レジーム分けしない再生産関係

再生産モデル	最適化手法*	自己相関係数推定	AICc	a	b	sd	自己相関係数 rho
BH	L2	同時	30.63	1.80e+00	1.16e-05	0.313	0.640
RI	L2	同時	37.87	6.88e-01	1.40e-06	0.342	0.574
BH	L2	なし	41.10	9.28e-01	4.59e-06	0.368	0.000
BH	L2	2段階	41.10	9.28e-01	4.59e-06	0.338	0.566
HS	L2	同時	41.14	6.94e-01	2.13e+05	0.356	0.569
BH	L1	なし	43.46	8.93e-01	4.15e-06	0.370	0.000
BH	L1	2段階	43.46	8.93e-01	4.15e-06	0.340	0.563
RI	L2	なし	50.57	6.28e-01	1.27e-06	0.413	0.000
RI	L2	2段階	50.57	6.28e-01	1.27e-06	0.363	0.633
RI	L1	なし	51.09	6.57e-01	1.25e-06	0.417	0.000
RI	L1	2段階	51.09	6.57e-01	1.25e-06	0.362	0.632
HS	L2	なし	52.28	5.83e-01	2.79e+05	0.422	0.000
HS	L2	2段階	52.28	5.83e-01	2.79e+05	0.381	0.586
HS	L1	なし	52.56	6.06e-01	2.81e+05	0.425	0.000
HS	L1	2段階	52.56	6.06e-01	2.81e+05	0.381	0.583

● レジーム分けした再生産関係（AICcの上位6シナリオ）

再生産モデル	最適化手法*	レジーム	AICc	a	b	sd
BH	L1	1997-（高加入）	14.01	2.10e+00	9.76e-06	0.179
BH	L2	1997-（高加入）	14.49	2.11e+00	1.01e-05	0.178
BH	L1	1997-（高加入）	15.05	2.10e+00	9.76e-06	0.271
BH	L1	1996-（高加入）	17.10	2.19e+00	1.06e-05	0.191
BH	L2	1996-（高加入）	17.10	2.11e+00	1.02e-05	0.191
BH	L1	1996-（高加入）	17.55	2.19e+00	1.06e-05	0.276
BH	L1	-1996（通常加入）	14.01	1.06e+00	8.21e-06	0.348
BH	L2	-1996（通常加入）	14.49	9.14e-01	6.84e-06	0.345
BH	L1	-1996（通常加入）	15.05	1.06e+00	8.21e-06	0.271
BH	L1	-1995（通常加入）	17.10	1.06e+00	8.21e-06	0.356
BH	L2	-1995（通常加入）	17.10	9.29e-01	7.11e-06	0.353
BH	L1	-1995（通常加入）	17.55	1.06e+00	8.21e-06	0.276
BH	L2	通常加入期	26.11	1.04e+00	1.84e-05	0.288

緑背景（最下段）の数値は、公表済みの再生産関係に関する結果（FRA-SA2021-BRP03-1）。

* L1：最小絶対値法、L2：最小二乗法

表 A-3. 再生産関係モデルの診断結果

● レジーム分けしない再生産関係

再生産モデル	最適化手法	自己相関係数推定	収束	ヘッセ行列	境界値	大域解	唯一解	AICc
BH	L2	同時	OK	OK	OK	OK	問題あり	30.63
RI	L2	同時	OK	OK	OK	OK	OK	37.87
BH	L2	なし	OK	OK	OK	OK	OK	41.10
BH	L2	2段階	OK	OK	OK	OK	OK	41.10
HS	L2	同時	OK	OK	OK	問題あり	OK	41.14
BH	L1	なし	OK	OK	OK	OK	OK	43.46
BH	L1	2段階	OK	OK	OK	OK	OK	43.46
RI	L2	なし	OK	OK	OK	OK	OK	50.57
RI	L2	2段階	OK	OK	OK	OK	OK	50.57
RI	L1	なし	OK	OK	OK	OK	OK	51.09
RI	L1	2段階	OK	OK	OK	OK	OK	51.09
HS	L2	なし	OK	OK	OK	OK	OK	52.28
HS	L2	2段階	OK	OK	OK	OK	OK	52.28
HS	L1	なし	OK	問題あり	OK	OK	問題あり	52.56
HS	L1	2段階	OK	問題あり	OK	OK	問題あり	52.56

最適化手法の略語（L1、L2）の意味は表 A-2 と同じ。

● レジーム分けした再生産関係（AICc の上位 12 シナリオ）

再生産モデル	最適化手法	分割年	レジーム間で異なるパラメータ	収束	ヘッセ行列	境界値	大域解	唯一解	AICc
BH	L1	96/97	a,b,sd	OK	OK	OK	OK	OK	14.01
BH	L2	96/97	a,b,sd	OK	OK	OK	OK	OK	14.49
BH	L1	96/97	a,b	OK	OK	OK	OK	OK	15.05
BH	L2	95/96	a,b,sd	OK	OK	OK	OK	OK	17.10
BH	L1	95/96	a,b,sd	OK	OK	OK	OK	OK	17.10
BH	L1	95/96	a,b	OK	OK	OK	OK	OK	17.55
BH	L2	97/98	a,b,sd	OK	OK	OK	OK	OK	17.59
BH	L1	97/98	a,b,sd	OK	OK	OK	OK	OK	17.86
BH	L1	97/98	a,b	OK	OK	OK	OK	OK	18.83
BH	L2	96/97	a,b	OK	OK	OK	OK	OK	20.28
HS	L1	96/97	a,b,sd	OK	問題あり	OK	問題あり	OK	21.45
BH	L2	95/96	a,b	OK	OK	OK	OK	OK	21.88

レジーム分けした場合は自己相関はないと仮定した。最適化手法の略語（L1、L2）の意味は表 A-2 と同じ。

表 A-4. 再生産関係の当てはめと管理基準値の試算に使用したデータセット

データ	データ使用年	基づいた 資源評価*	データ 存在年	用途
加入量・親魚量	1978～2018年	1	1978～2019 年	再生産関係の当てはめ
(再生産関係)	1978～2018年			管理基準値の試算
年齢別成熟率	2017～2019年			
年齢別体重**	1978～2019年			
選択率	2017～2019年			
サバ類の単位資源重量あたりの捕食死亡係数 α	-			
自然死亡係数	2020～2048年	2、3	2020～2059 年	

* 1: 令和2年度資源評価相当のサバ類捕食 VPA による資源評価結果、2: 令和2年度マサバ太平洋系群の将来予測結果、3: 令和2年度ゴマサバ太平洋系群の将来予測結果

** レジーム分けした場合には近年のレジームに該当する年のみを使用

表 A-5. 管理基準値の試算に用いた各種設定

● レジーム分けなし

年齢	M*	成熟率	平均重量 (g)	選択率	現状の漁獲圧 (Fcurrent) **
0	約 1.85	0.0	6.0	0.23	0.18
1	約 1.85	1.0	12.5	1.00	0.78
2	約 1.85	1.0	18.8	0.60	0.47
3	約 1.85	1.0	23.8	0.21	0.17

平均体重は全年（1978～2019年）の平均値

● レジーム分けあり

年齢	M*	成熟率	平均重量 (g)	選択率	現状の漁獲圧 (Fcurrent) **
0	約 1.85	0.0	6.5	0.23	0.18
1	約 1.85	1.0	13.3	1.00	0.78
2	約 1.85	1.0	19.2	0.60	0.47
3	約 1.85	1.0	23.5	0.21	0.17

平均体重は再生産関係の高加入期（1997～2019年）における平均値

* Mは、サバ類の令和2年度資源評価における将来予測結果に基づいて変動するが（図 A-9）、ここではサバ類が平衡状態に達したときの値を示す。

** Fcurrentは、令和2年度資源評価相当のサバ類捕食 VPA による 2017～2019年の F 値の年齢別平均値である。

表 A-6. 各種管理基準値の試算結果

● レジーム分けしない再生産関係

再生産モデル	最適化手法	自己相関係数推定	AICc	SBmsy	SBlim	SBban	SBmsy/SB0	Bmsy	Umsy	MSY	漁獲量の変動係数(CV)	Fmsy/Fcur	%SPRmsy
BH	L2	同時	30.63	103.9	29.3	3.1	0.360	595.7	17.7%	105.2	0.629	2.581	51.5%
RI	L2	同時	37.87	145.0	45.3	4.8	0.457	594.3	7.9%	46.9	1.010	0.775	78.3%
BH	L2	なし	41.10	112.0	36.8	4.4	0.429	503.6	10.9%	54.7	0.445	1.191	70.1%
BH	L2	2段階	41.10	113.0	35.2	3.8	0.428	505.8	10.9%	55.1	0.818	1.196	70.0%
HS	L2	同時	41.14	177.0	59.9	6.7	0.513	756.7	9.4%	71.4	0.816	0.979	74.0%
BH	L1	なし	43.46	116.2	38.4	4.5	0.433	515.2	10.4%	53.4	0.456	1.118	71.4%
BH	L1	2段階	43.46	116.7	36.4	3.9	0.431	515.4	10.5%	53.9	0.843	1.127	71.2%
RI	L2	なし	50.57	133.8	43.3	4.7	0.475	525.0	5.6%	29.4	0.692	0.514	84.4%
RI	L2	2段階	50.57	115.6	34.7	3.5	0.437	462.2	7.2%	33.4	1.366	0.691	80.1%
RI	L1	なし	51.09	155.4	51.1	5.7	0.481	618.3	6.2%	38.4	0.653	0.581	82.8%
RI	L1	2段階	51.09	133.8	40.4	4.1	0.441	541.9	7.7%	41.5	1.277	0.744	79.0%
HS	L2	なし	52.28	209.0	72.8	8.2	0.560	817.9	5.5%	44.9	0.662	0.502	84.7%
HS	L2	2段階	52.28	149.6	47.1	4.9	0.466	595.8	7.1%	42.3	1.183	0.677	80.5%
HS	L1	なし	52.56	229.4	82.3	9.5	0.574	913.2	6.2%	56.7	0.613	0.580	82.8%
HS	L1	2段階	52.56	168.1	53.2	5.6	0.476	678.1	7.5%	51.1	1.102	0.729	79.3%

最適化手法の略語 (L1、L2) の意味は表 A-2 と同じ。SBmsy (目標管理基準値)、SBlim (限界管理基準値)、SBban (禁漁水準)、Bmsy (MSY を実現する資源量)、MSY (最大持続生産量) の単位は千トン。SB0: 漁獲がないときの親魚量、Umsy: MSY を実現する漁獲割合、Fcur: 現状の漁獲圧、%SPRmsy: MSY を実現するパーセント SPR。

● レジーム分けした再生産関係 (AICc の上位 6 シナリオ)

再生産モデル	最適化手法	レジーム	AICc	SBmsy	SBlim	SBban	SBmsy/SB0	Bmsy	Umsy	MSY	漁獲量の変動係数(CV)	Fmsy/Fcur	%SPRmsy
BH	L1	1997-	14.01	148.9	39.1	4.6	0.331	966.7	19.9%	192.4	0.172	3.237	45.7%
BH	L2	1997-	14.49	145.3	38.1	4.5	0.330	946.6	20.0%	189.0	0.170	3.258	45.6%
BH	L1	1997-	15.05	148.8	39.3	4.6	0.333	956.3	19.7%	188.4	0.261	3.173	46.3%
BH	L1	1996-	17.10	143.1	37.1	4.3	0.326	947.0	20.3%	192.2	0.182	3.358	44.7%
BH	L2	1996-	17.10	143.6	37.6	4.4	0.330	935.0	20.0%	186.8	0.183	3.260	45.6%
BH	L1	1996-	17.55	143.2	37.3	4.3	0.328	937.6	20.1%	188.4	0.265	3.295	45.3%
BH	L1	-1996	14.01	69.3	22.5	2.7	0.420	312.2	11.6%	36.1	0.406	1.297	67.7%
BH	L2	-1996	14.49	65.6	21.7	2.6	0.436	280.2	9.8%	27.5	0.432	1.030	72.5%
BH	L1	-1996	15.05	70.2	22.8	2.8	0.417	319.5	11.9%	38.0	0.312	1.348	66.9%
BH	L1	-1995	17.10	67.4	22.0	2.6	0.422	300.1	11.3%	33.9	0.419	1.252	68.3%
BH	L2	-1995	17.10	62.7	20.7	2.4	0.436	266.6	9.7%	25.9	0.443	1.015	72.7%
BH	L1	-1995	17.55	68.3	22.2	2.7	0.419	307.7	11.6%	35.8	0.320	1.306	67.4%
BH	L2	通常	26.11	112.5	28.3	3.1	0.349	288.7	27.9%	80.5	0.233	0.503	44.8%

最適化手法の略語 (L1、L2) の意味は表 A-2 と同じ。SBmsy (目標管理基準値)、SBlim (限界管理基準値)、SBban (禁漁水準)、Bmsy (MSY を実現する資源量)、MSY (最大持続生産量) の単位は千トン。SB0: 漁獲がないときの親魚量、Umsy: MSY を実現する漁獲割合、Fcur: 現状の漁獲圧、%SPRmsy: MSY を実現するパーセント SPR。緑背景 (最下段) の数値は、公表済みの再生産関係に基づく結果 (FRA-SA2021-BRP03-1)。

検討項目 B

限界管理基準値以下に資源がある場合の再生産関係をよく検討すべき。

1. はじめに

本件への対応として、本系群について検討が行われていないシェファード型とベキ乗型の再生産関係についての検討を行った。

2. 再生産関係

本系群については、令和 2 年度の資源評価結果（FRA-SA2020-RC02-1）に基づき、高加入期（1988～2009年）と通常加入期（1978～1987年および2010～2018年）に分けたベarton・ホルト（BH）型の再生産関係が適用されている。また、当該再生産関係式のパラメータ推定には最小二乗法を使用し、加入量の残差への自己相関については考慮されていない。そこで、当該再生産関係とレジーム分けの期間、パラメータ推定方法、自己相関の有無については同条件の下で、下式のようなシェファード型とベキ乗型の再生産関係を推定した。

シェファード（Shepherd）型再生産関係

$$R(SB_t | a, b, \gamma) = \frac{aSB_t}{1 + (bSB_t)^\gamma}$$

ベキ乗（Cushing）型再生産関係

$$R(SB_t | a, b) = aSB_t^b$$

また、令和 3 年度の本系群の研究機関会議資料（FRA-SA2021-BRP03-1）には、レジーム分けしない場合の BH 型の再生産関係についても示されているため、当該再生産関係と同条件（レジーム分けはしない、自己相関を同時推定、パラメータは最小二乗法により推定）の下での、シェファード型とベキ乗型の再生産関係の推定も行った。

レジーム分けした場合およびレジーム分けしない場合について、ともにシェファード型とベキ乗型の再生産関係の補正赤池情報基準（AICc）は、BH 型の再生産関係のそれらよりも低い値であった（図 B-1、B-2）。しかし、両場合において、3 種類の再生産関係は、観測されている親魚量に亘って非常に類似したものとなっていた。また、推定された再生産関係のパラメータの値を表 B-1 に示す。これらの再生産関係については、シェファード型においても γ が 1 未満の値で最適化されたことから、親魚量の増加に伴って加入量も無限に増加する性質となっている。これらのことから、本系群に BH 型の再生産関係を適用することは適切と判断される。

3. 引用文献

Cushing D. H. (1973) Dependence of recruitment on parent stock. J. Fish. Res. Bd Can., 30,

p.1965-1976

Shepherd J. G. (1982) A versatile new stock-recruitment relationship for fisheries and the construction of sustainable yield curves. *J. Cons. Int. Explor. Mer*, **40**, p.67-75

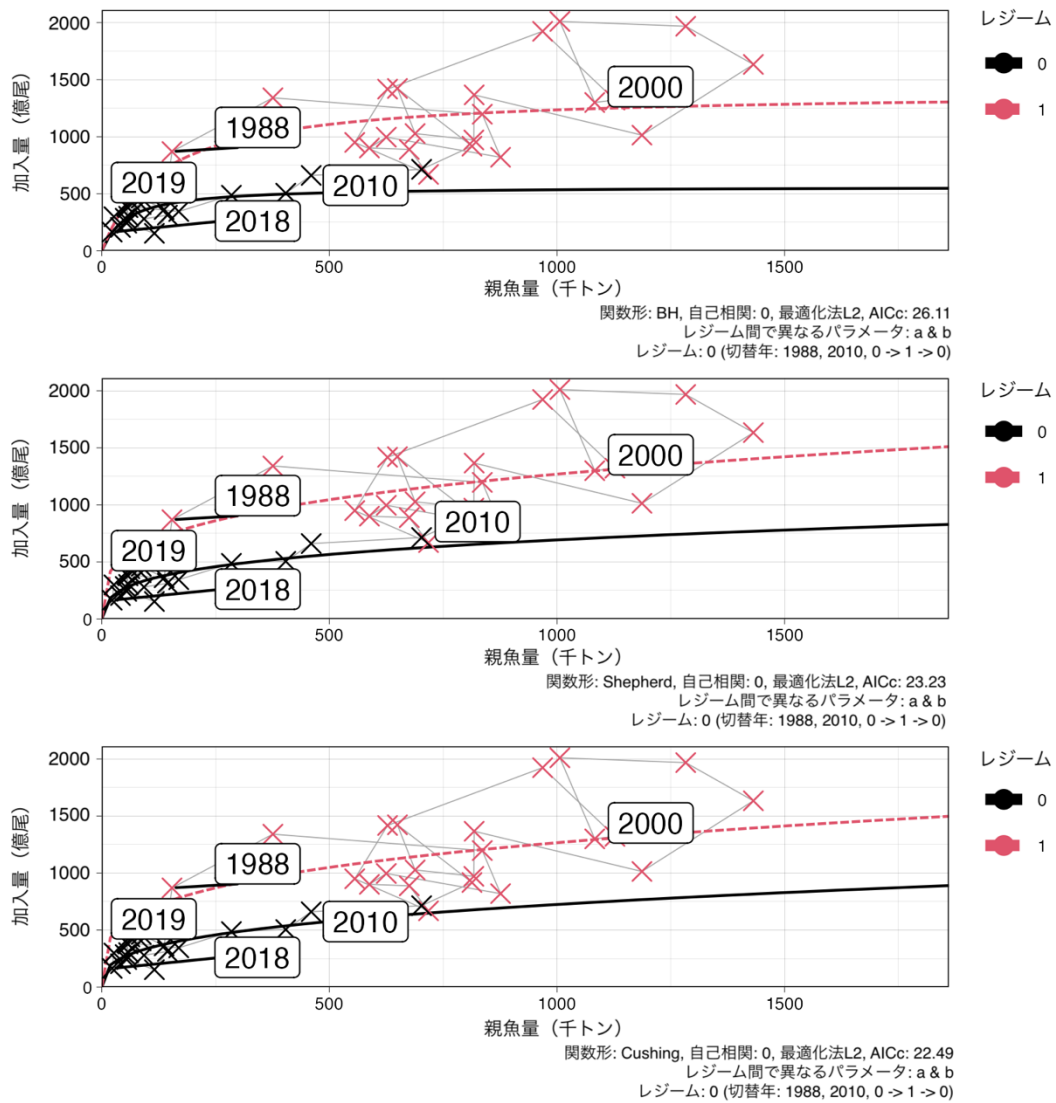
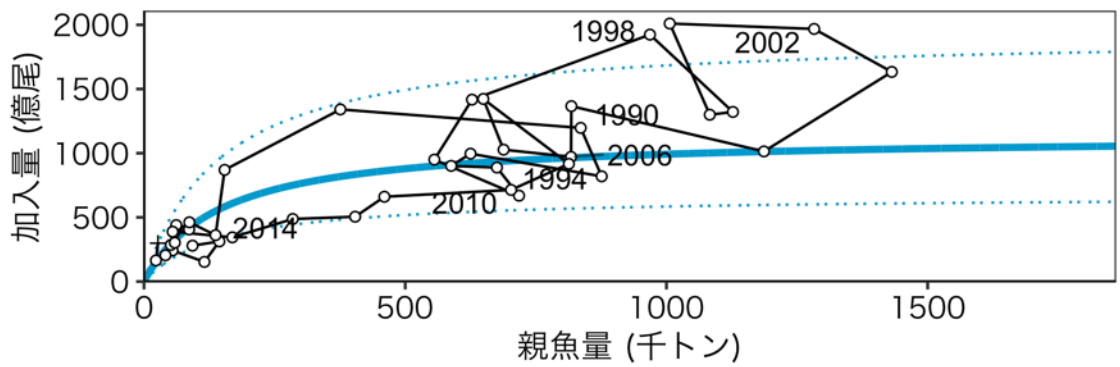
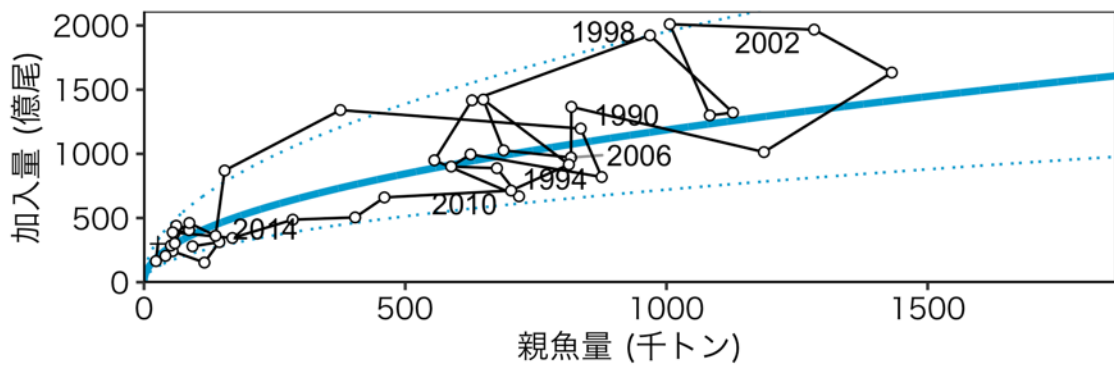


図 B-1 レジーム分けした再生産関係

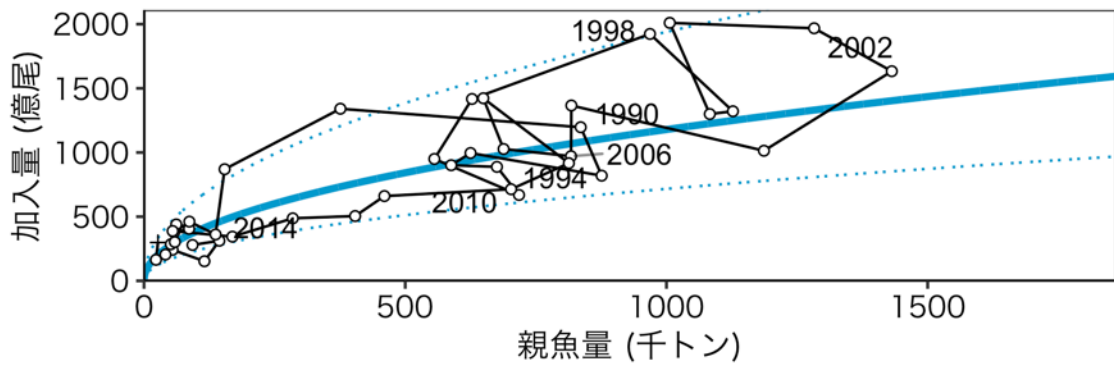
レジーム 0 は通常加入期、レジーム 1 は高加入期を表す。



関数形: BH, 自己相関: 1, 最適化法L2, AICc: 32.81
 パラメータ推定に利用 (丸), 利用していない (バツ)



関数形: Shepherd, 自己相関: 1, 最適化法L2, AICc: 28.21
 パラメータ推定に利用 (丸), 利用していない (バツ)



関数形: Cushing, 自己相関: 1, 最適化法L2, AICc: 27.61
 パラメータ推定に利用 (丸), 利用していない (バツ)

図 B-2 レジーム分けしない再生産関係

表 B-1. 推定された再生産関係のパラメータ値

- レジーム分けあり（通常加入期：1978～1987年および2010～2018年）

再生産モデル	a	b	sd	γ
BH	1.04	1.85E-05	0.288	-
Shepherd	4.77	3.50E-04	0.276	0.72
Cushing	7.50E+02	3.31E-01	0.276	-

最上段の BH 型再生産関係は、FRA-SA2021-BRP03-1 で提案した再生産関係（最小二乗法による最適化、自己相関なし）である。Shepherd 型および Cushing（べき乗）型は、BH 型と同様に、最小二乗法で最適化、自己相関なしで推定した結果である。

- レジーム分けなし

再生産モデル	a	b	sd	rho	γ
BH	7.75E-01	6.81E-06	0.322	0.554	-
Shepherd	6.63E+06	1.55E+09	0.303	0.386	0.51
Cushing	1.44E+02	4.85E-01	0.303	0.391	-

最上段の BH 型再生産関係は、FRA-SA2021-BRP03-1 の補足資料 2 で示した再生産関係（最小二乗法による最適化、自己相関同時推定）である。Shepherd 型および Cushing 型は、BH 型と同様に、最小二乗法で最適化、自己相関係数の同時推定で推定した結果である。