

令和 2（2020）年度マアジ太平洋系群の 管理基準値等に関する研究機関会議報告書

担当水研：中央水産研究所

要 約

令和元年度本系群の資源評価データを用いて、再生産関係および管理基準値案等を検討した。本系群の再生産関係式はリッカー（RI）型再生産関係、およびベバートン・ホルト（BH）型再生産関係の重み付き平均モデルを適用する。パラメータは資源評価により推定された 1982～2017 年の親魚量と加入量を用いて最小二乗法により推定し、残差の自己相関も同時に推定した。再生産関係に基づき、目標管理基準値として、最大持続生産量（MSY）を実現する親魚量である SBmsy（60 千トン）を、限界管理基準値として、MSY の 60% の漁獲が得られる親魚量である SB0.6msy（15 千トン）を提案する。禁漁水準として、MSY の 10% の漁獲が得られる親魚量である SB0.1msy（1.7 千トン）を提案する。MSY を実現する漁獲圧（Fmsy）は、現状（2016～2018 年の平均の漁獲係数）の 0.73 倍である。

親魚量 (千トン)	現状の親魚量 (2018 年) に対する比	初期親魚量 (204 千トン) に対する比	期待できる 平均漁獲量 (千トン)	現状の漁獲圧 (2016～2018 年) に対する比 ＊	説 明
目標管理基準値案					
60	2.61	0.29	38	0.73	最大持続生産量 MSY を実現する親 魚量（SBmsy）
限界管理基準値案					
15	0.65	0.08	23	1.50	MSY の 60% を得 られる親魚量 （SB0.6msy）
禁漁水準案					
1.7	0.07	0.01	3.8	2.00	MSY の 10% を得 られる親魚量 （SB0.1msy）
2018 年					
23	1.00	0.11	19**	1.03	2018 年の値

* 現状の漁獲圧における年齢別選択率に基づき管理基準値案および禁漁水準案を計算する際の、現状の年齢別漁獲係数に乘じる係数を示す。

** 2018 年の実際の漁獲量を示す。

1. 再生産関係

1-1) 使用するデータセット

本系群の再生産関係式の設定は「令和 2（2020）年度漁獲管理規則および ABC 算定のための基本指針（FRA-SA2020-ABCWG01-01）」に従い、以下のデータセットを使用して実施した。解析には R パッケージ frasyr（v2.01）を用いた。frasyr で用いている式の詳細は「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 2 年度研究機関会議版）（FRA-SA2020-ABCWG01-02）」を参照のこと。

データセット	基礎情報、関係調査等
資源量・親魚量	令和元年度 我が国周辺水域の漁業資源評価（水産庁・水産機構）

1-2) 再生産関係の検討

本系群の最大持続生産量（MSY）を実現する親魚量の算出および将来予測計算に使用する再生産関係（補足資料 1）として、ホッカー・スティック（HS）型再生産関係、リッカー（RI）型再生産関係およびベバートン・ホルト（BH）型再生産関係を仮定した場合について検討した。最適化方法として、最小二乗法および最小絶対値法を検討した。データとしては、資源評価で推定された 1982～2017 年の加入量および親魚量を用いた。資源評価の不確実性が高い 2018 年の情報は使用しなかった。再生産関係の検討結果を表 1 に示す。再生産関係から予測される加入量と観測値（資源評価値）の残差は正規分布に従うことが確認されたため、最適化法には最小二乗法を用いた（補足資料 1）。

いずれの再生産関係を当てはめた場合でも残差に高い自己相関がみられ（補足資料 1）、自己相関を考慮する必要性が認められた。また、再生産関係のパラメータと自己相関係数を同時に推定した場合（同時推定）と、再生産関係のパラメータを推定したのちに自己相関係数を推定した場合（二段階推定）では、推定される自己相関係数に大きな違いが見られた（補足資料 1）。二段階推定と同時推定で自己相関係数の差が特に大きい場合には、推定パラメータの安定性を確認した上で同時推定による結果を用いたほうが良いとされている（シミュレーションを用いた自己相関係数の同時推定手法の推定バイアス評価 FRA-SA2020-BRP01-6）。そのため、本系群では自己相関係数を同時推定により求めた。ただし、HS 型ではパラメータ推定に不安定性（局所解が存在）が確認されたため（補足資料 2）、RI 型および BH 型を再生産関係の候補とした（補足資料 1）。また、BH 型はパラメータ推定の精度が RI 型に比べて低い傾向が見られた。

同時推定の再生産関係のうち、補正赤池情報量規準（AICc）を比較すると、RI 型、BH 型の順で低いが、AICc の差は 1.80 で、BH 型を完全に棄却できるほどの差はなかった（表 1）。しかし、RI 型は過去最大親魚量よりも多い親魚量の範囲に強い密度効果が仮定される形となり（図 1）、BH 型と MSY を実現する親魚量は大きく異なった（補足資料 3）。そこで、再生産関係のモデル選択の不確実性を管理基準値の不確実性として反映させるため、RI 型と BH 型を平均した再生産関係も候補として検討した（複数の再生産関係のモデル平均を用いた管理基準値の推定 FRA-SA2020-BRP01-8）。モデル平均は、AICc の差から算出した Akaike weight（Burnham and Anderson, 2002）により重みづけを行った。Akaike weight

の比率はRI型：BH型＝0.71：0.29となった。モデル平均の計算方法や結果の詳細は「複数の再生産関係のモデル平均を用いた管理基準値の推定（FRA-SA2020-BRP01-8）」を参照のこと。

1-3) 再生産関係

候補とした3つの再生産関係（自己相関を同時推定したBH型、RI型、およびそれらの重み付き平均モデル）の不確実性に対する頑健性と、また、それぞれの再生産関係を誤って選択した場合の影響（漁獲量や親魚量の減少リスク）を、簡易的なMSE（Management Strategy Evaluation、管理戦略評価、Punt 2001）により評価した（補足資料4）。簡易的MSEの計算方法は「簡易的MSEを用いた複数の管理基準値の頑健性の比較・HCRの検討（FRA-SA2020-BRP01-7）」を参照のこと。MSEは3つの再生産関係を、それぞれMSYを実現する親魚量を計算する際の再生産関係と真の再生産関係として組み合わせた場合について実施した。その結果、傾向が大きく異なる再生産関係のRI型、BH型のどちらか一方を選択した場合と比較し、重み付き平均モデルを用いた場合には親魚量の減少リスクが中間的な値を示し、また、漁獲量が管理開始当初に誤って大幅に削減されることもなかった。これらのことから、本系群では、自己相関を同時推定したBH型、RI型の重み付き平均モデルを再生産関係として適用し、MSYを実現する親魚量（SBmsy）の計算および将来予測に用いる（図1）。ただし、BH型の再生産関係のパラメータの推定精度が高くないため、重み付き平均モデルを用いた場合の管理基準値の不確実性も評価した。

管理基準値の算出方法は、Fの値を様々に変化させて、設定したF値でそれぞれの平衡状態までのシミュレーションを行い、平均漁獲量が最大となるFmsyを探索的に求める。このシミュレーションを10000回行うところ、重み付き平均モデルではAkaike weightの比率（RI型：BH型＝0.71：0.29）に従いシミュレーション回数をRI型で7100回、BH型で2900回と振り分けて行った（FRA-SA2020-BRP01-8）。関係式のパラメータの推定値を補足資料1（補足表1-1）に、親魚量・加入量の観測値との関係を図1に示す。加入量の誤差の分布は対数正規分布を仮定した。対数残差の標準偏差は、再生産関係の予測値と観測値の対数残差の標準偏差（S.D., 表1）を用いた（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FRA-SA-2020-ABCWG01-02）。

2. 管理基準値

2-1) データセットおよび計算方法

最大持続生産量（MSY）を実現する親魚量の算出、および将来予測は、「令和2年度（2020）年度漁獲管理規則およびABC算定のための基本指針」の1系資源の規則に従い、1-3)で示した再生産関係と、令和元年度我が国周辺水域の漁業資源評価（水産庁・水産機構）での将来予測計算に用いた各種設定（自然死亡係数、成熟率、年齢別平均体重など）を使用して実施した。再生産関係については、1-3)で提案したRI型・BH型再生産関係の重み付き平均モデルを用いた。ここで現状の漁獲圧（Fcurrent、図2）は2016～2018年の漁獲

係数（F 値）の平均値である（表 2）。本系群では、平均世代時間（2.92 年）の 20 倍の年数のシミュレーション期間（45.8 年）後を平衡状態と仮定し、その際の平均漁獲量が最大化される F 値を F_{msy} 、その F_{msy} で漁獲した場合の平衡状態での平均親魚量を SB_{msy} とした。解析には R パッケージ `frasyr` (v1.20) を用いた。

2-2) 管理基準値案と禁漁水準案

本系群の目標管理基準値（ SB_{target} ）案には MSY を実現する親魚量（ SB_{msy} : 60 千トン）、限界管理基準値（ SB_{limit} ）案として MSY の 60%の漁獲が得られる親魚量（ $SB_{0.6msy}$: 15 千トン）、禁漁水準（ SB_{ban} ）案として MSY の 10%の漁獲が得られる親魚量（ $SB_{0.1msy}$: 1.7 千トン）を提示する。

これらの管理基準値案および禁漁水準案について、漁獲がなかった場合を仮定した初期親魚量（ SB_0 ）に対する比、対応する漁獲圧の下での平衡状態における平均漁獲量、%SPR 換算した漁獲圧、漁獲割合、現状の漁獲圧に対する比などを表 3 に示す。目標管理基準値として提案する SB_{msy} （60 千トン）は SB_0 の 29%に相当し、その親魚量において期待できる漁獲量の平均値（ MSY ）は 38 千トンである。また、目標管理基準値案に対応する漁獲圧（ MSY を実現する漁獲圧 : F_{msy} ）の、現状（2016～2018 年）の漁獲圧に対する比（ $F_{msy}/F_{current}$ ）は 0.73 で、その時の漁獲割合（ U_{msy} ）は、35%である。なお、限界管理基準値として提案する $SB_{0.6msy}$ は SB_0 の 8%に相当する。 $SB_{0.6msy}$ に対応する漁獲圧の現状の漁獲圧に対する比は 1.50 で、その時の漁獲割合は 50%である。 $SB_{0.6msy}$ にて期待できる漁獲量の平均値は 23 千トンである。禁漁水準として提案する $SB_{0.1msy}$ は SB_0 の 1%に相当し、期待できる漁獲量の平均値は 3.8 千トンである。様々に F 値を変えた場合の平衡状態における平均親魚量、およびこれに対する年齢別平均漁獲量を図 3 に示す。親魚量の水準が高いほど、平均的に漁獲される高齢魚の比率が高くなる傾向がみられる。

ただし、ドキュメント（FRA-SA2020-BRP01-8）により示されたとおり、データのとりかたによっては、 SB_{msy} は 49 千トン～76 千トン、 MSY を実現する漁獲圧は現状の漁獲圧（ $F_{current}$ ）の 0.64～0.80 と変わりうることは留意する必要がある。

2-3) 目標管理基準値案と漁獲割合

目標管理基準値（ SB_{target} ）案と、その時の漁獲圧（ F_{msy} ）もしくは漁獲割合（ U_{msy} ）を基準にした神戸プロットをそれぞれ図 4 に示す。本系群における漁獲圧は、2012 年を除き MSY 水準を上回っていたと判断される。また、漁獲割合を基準にしても 2012 年、2016 年を除き MSY 水準を上回っていたと判断される。現状の親魚量（2018 年の親魚量 : 23 千トン）は目標管理基準値案を下回っている。現状の親魚量に対する目標管理基準値案、限界管理基準案および禁漁水準案の比は、それぞれ 2.61、0.65 および 0.07 である。

2-4) 漁獲管理規則案

漁獲管理規則（HCR）案は、限界管理基準値案および禁漁水準案となる親魚量を閾値と

して、漁獲管理の基礎となる漁獲係数（F 値）を変える規則であり、親魚量が限界管理基準値案を下回ると禁漁水準案まで直線的に漁獲圧を下げるものとなっている。F 値の上限は F_{msy} に漁獲管理規則で提案した β を乗じたものである。漁獲管理規則案における親魚量と漁獲圧の関係を図 5 a に、親魚量と期待できる平均的な漁獲量との関係を図 5b に示す。なお、図に例示した漁獲管理規則案は、いずれも β に標準値である 0.8 を用いている。

2-5) 漁獲管理規則案に基づく将来予測

(1) 安全係数 β に標準値を用いた場合

限界管理基準値案と禁漁水準案に標準値を用い、 β を 0.8 とした漁獲管理規則案（図 5）で将来予測した場合の、資源量、親魚量、漁獲量、加入量および努力量の増減率の推移を図 6 に示す。なお、重みづけ平均モデルによる将来予測は、シミュレーションを 10000 回行うところ、Akaike weight の比率（RI 型：BH 型＝0.71：0.29）によりシミュレーション回数を RI 型で 7100 回、BH 型で 2900 回と振り分けて行った（FRA-SA2020-BRP01-8）。漁獲管理規則案による漁獲は 2021 年から開始し、2019 年および 2020 年の漁獲量は予測される資源量と現状の漁獲圧（ $F_{current}$ ）から仮定した。

予測される 2021 年の親魚量は目標管理基準値案を下回り、限界管理基準値案を上回っているため、漁獲管理規則案に従い、 βF_{msy} での漁獲が行われる。 $\beta = 0.8$ の場合、 $0.8F_{msy}$ での漁獲圧は、現在の漁獲努力量を 42%減少させる漁獲圧に相当するため、漁獲管理規則案導入初年には漁獲量は $F_{current}$ で漁獲した場合の漁獲量を下回る。親魚量は、目標管理基準値案を上回る確率が 2027 年に 51%となり、その後も増加すると推測される。

(2) 安全係数 β を変えた場合

限界管理基準値案と禁漁水準案として標準値を用いた漁獲管理規則案での将来予測について、 β を 0.0～1.0 の間で変えたそれぞれの場合の、親魚量が目標管理基準値案、限界管理基準値案、禁漁水準案のそれぞれを上回る確率、親魚量平均値の推移および漁獲量平均値の推移を表 4～8 に示した。いずれの β でも、本系群における親魚量は 2021 年以降増加すると推定される。 β が 0.8 以下の場合、目標管理基準値案への回復確率は 2027 年には 50%を超える。 β を 0.9 とする場合は、漁獲管理規則案による漁獲開始から 10 年後の 2031 年に目標管理基準値案への回復確率が 48%、2041 年に 52%となる。一方、限界管理基準値案以上を維持する確率は、すべての β において 2023 年以降に 95%を超える。

本系群の再生産関係には、1-3) において自己相関同時推定の BH 型と RI 型の重み付き平均モデルを適用しているが、これは、実際の再生産関係は BH 型または RI 型のどちらかであることを前提としている。そこで、真の再生産関係が重み付き平均モデルと異なった場合の影響を見るため、 β を変えた簡易 MSE を実施した（補足資料 4）。その結果、重み付き平均モデルの再生産関係をもとにした管理基準値計算およびそれに基づく漁獲管理規則案で漁獲量を算定し、その漁獲量どおりに漁獲し続けた場合、10 年後に真の目標管理基準値案を 50%以上の確率で達成しようとする、真の再生産関係が BH 型では $\beta=0.6$ に下げ

る必要があると考えられた。一方、真の再生産関係が RI 型であった場合は、真の目標管理基準値を $\beta=0.9$ で達成することができると考えられた。ただし、RI が 0.7、BH が 0.3 で重み付け平均した MSE の結果からは $\beta=0.8$ 以下であれば 10 年後に目標管理基準値案を 50% 以上の確率で達成する。

3. まとめ

本系群の再生産関係には、最適化法に最小二乗法を用いた自己相関同時推定の RI 型と BH 型について Akaike weight により重み付け平均した再生産関係を適用する。再生産関係のパラメータは、資源評価で推定された 1982～2017 年の加入量および親魚量に基づき推定した。

目標管理基準値には、上記の再生産関係から推定される SBmsy、限界管理基準値には SB0.6msy、禁漁水準には SB0.1msy を提案する。なお、MSY を実現する漁獲圧は、Fcurrent の 0.73 倍である。ただし、管理基準値の不確実性は大きい。

現在の本系群の親魚量は目標管理基準値案以下にあると考えられる。この目標管理基準値案をもとにした将来予測においては、 β が 0.8 以下であれば、漁獲管理規則案を適用してから 10 年後に目標管理基準値案を上回る確率は 50% 以上となると予測された。

なお後述するように、本系群は東シナ海からの移入群によっても構成されると想定されるが、従来から対馬暖流系群と分けて親魚量や加入量の推定を行っていることから、本資料の検討も同様に実施した。

4. 今後の検討事項

本系群には、東シナ海で生まれて輸送されてくる移入群が、年変動を伴って添加されていると考えられている。しかし、現段階では東シナ海からの移入群の定量的評価が困難なことから、本資料で適用する本系群の再生産関係では、太平洋系群内での再生産を想定し、移入については、再生産関係の推定において自己相関（再生産関係から予測されるよりも良い・悪い加入が一定期間続く効果）を考慮することにより、加入量の年変動の一部として取り扱った。ただし、自己相関は移入の影響を明示的に考慮しているわけではないため、移入群の定量的評価の課題には今後も継続して取り組む必要がある。また当面は本資料で適用した再生産関係をもとに本系群の資源管理を実施しつつ、資源動向を注視していくことが重要である。

一方、近年は加入量が極端に低い水準で推移している。重み付き平均モデルの将来予測では、高い自己相関係数により加入量の残差の中央値は 2023 年頃まで負の値となっているが、年々 0 付近に近づく（補足資料 5）。このため 2021 年漁獲量の算定にあたっては、近年の低い加入量が考慮されていると言える。それ以降の加入量も低水準で推移する可能性を予測することは困難であるが、低水準の加入量がさらに継続する場合には親魚量が MSY を実現する親魚量に回復するまでに長い年数がかかり、漁獲量も低調に推移する期間が長い（補足資料 6）ことから、加入量の水準についても継続的な把握が必要である。

5. 引用文献

Burnham K P., and Anderson D R (2002). Model Selection and Multimodel Inference. Springer,75p

(執筆者：井須小羊子、由上龍嗣、中神正康、渡邊千夏子、高橋紀夫、上村泰洋、
古市 生、渡部亮介)

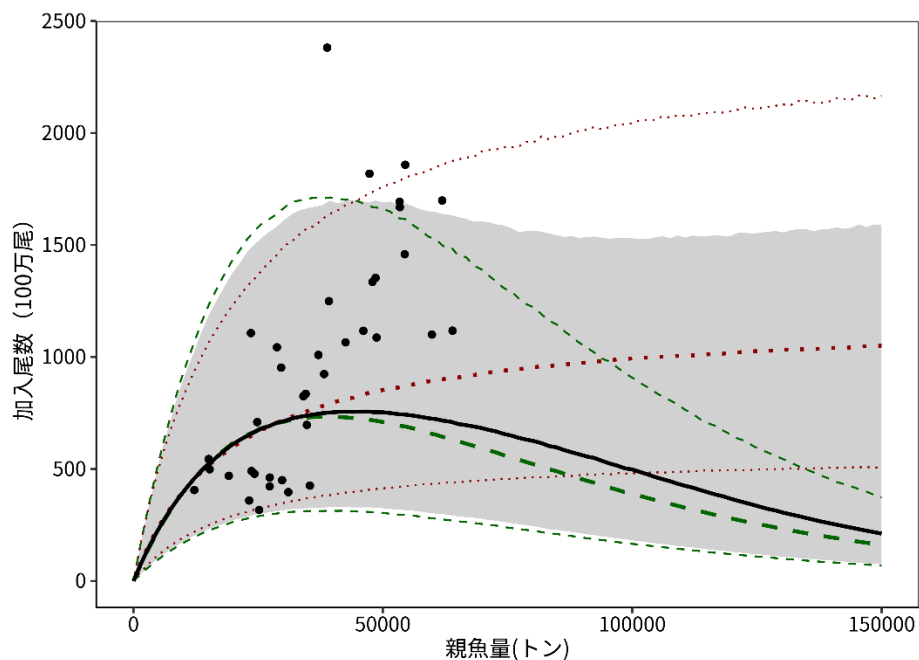


図 1. 平均した再生産関係の中央値（黒実線）と 90%信頼区間（灰色の領域）
 平均した再生産関係の信頼区間は、リッカー(RI, 緑太線：中央値、緑細線：90%信頼区間) 型とベバートン・ホルト(BH, 赤太線：中央値、赤細線：90%信頼区間) 型の期待値からランダムな誤差で加入を発生させ、Akaike weight に基づいて加入尾数をサンプリングしたときの 5~95 パーセンタイルに入る範囲。（FRA-SA2020-BRP01-8）。

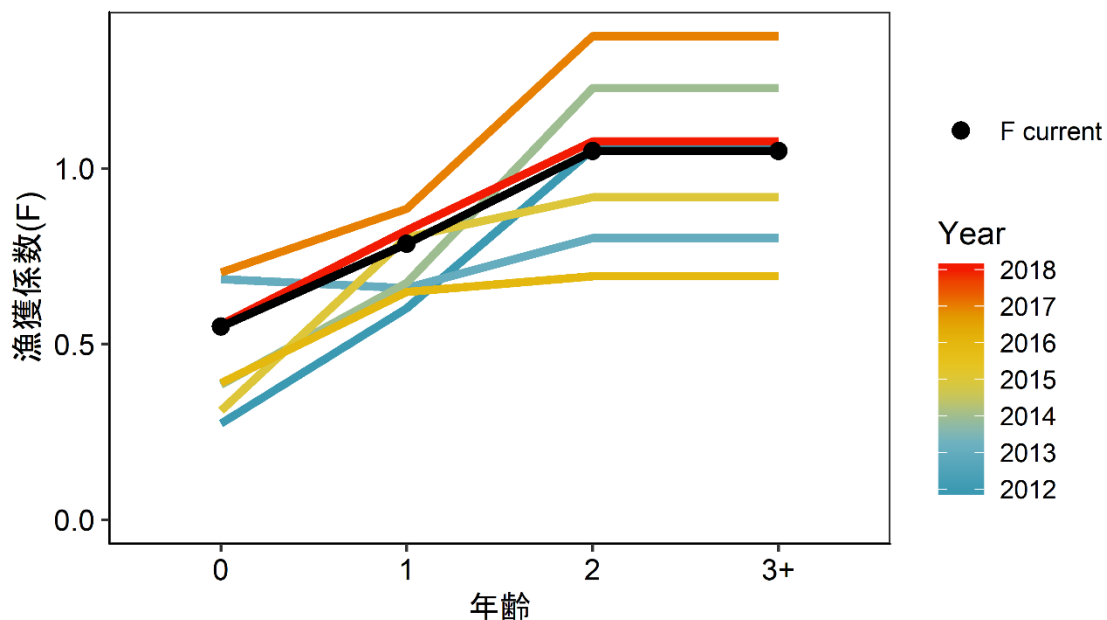


図 2. 年齢別の漁獲係数 (F 値)
 2012 年以降の各年の年齢別 F 値を色分けして示す。黒線は現状の漁獲圧 (Fcurrent) であり、2016~2018 年の F 値の平均である。

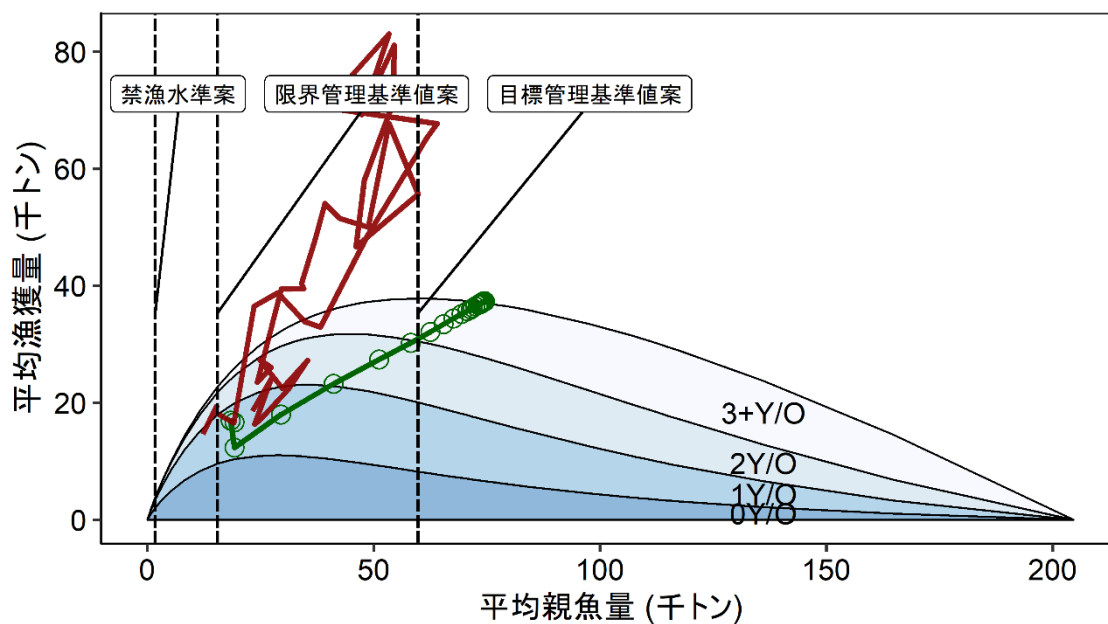
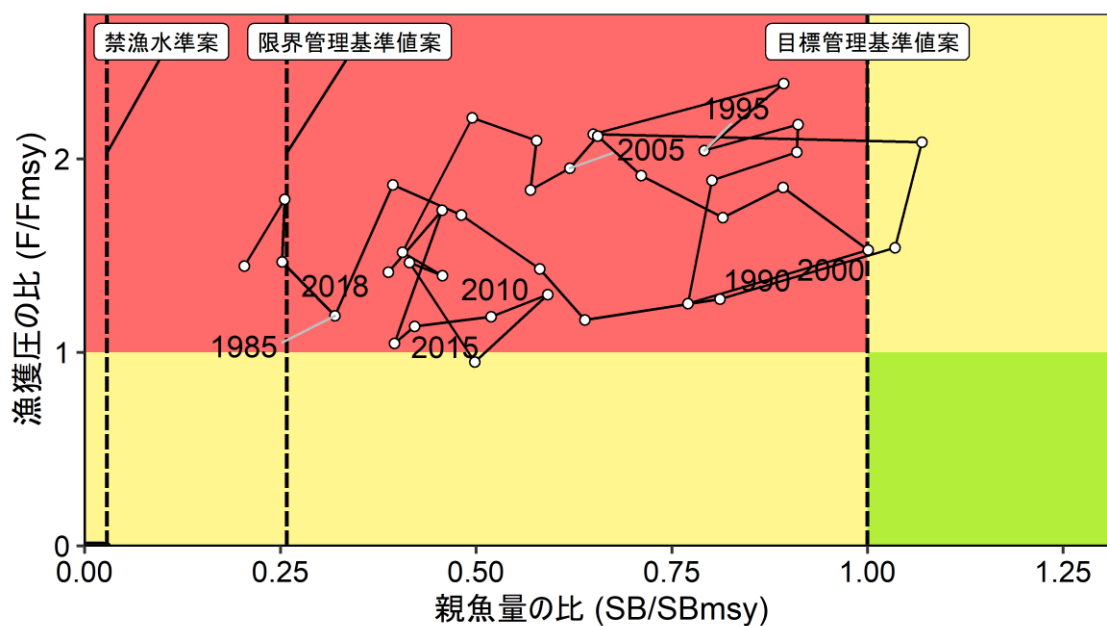


図 3. 管理基準値案および禁漁水準案と年齢別漁獲量曲線の関係

将来予測シミュレーションにおける平衡状態での、平均親魚量に対する年齢別平均漁獲量と、管理基準値案および禁漁水準案の位置関係を示す。赤線は資源評価により推定された親魚量と漁獲量との推移を、緑線は提示する漁獲管理規則（HCR）案で漁獲を行った場合の将来予測での平均親魚量と平均漁獲量の推移を示す。HCR 案で使用した安全係数 β は 0.8 である。なお、漁獲がなかった場合を仮定した初期親魚量（SB0）は 204 千トンである。過去の親魚量と漁獲量の一部は範囲外である（最高値：親魚量 64 千トン、漁獲量 83 千トン）。

a) 縦軸を漁獲圧の比 (F/F_{msy}) で示した場合



b) 縦軸を漁獲割合の比 (U/U_{msy}) で示した場合

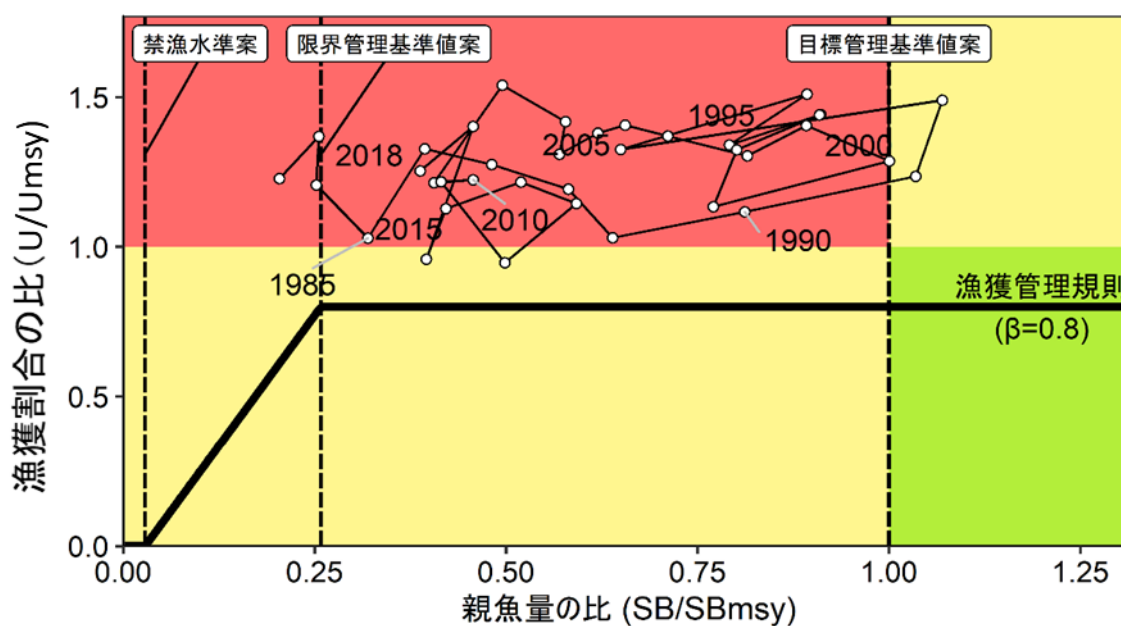
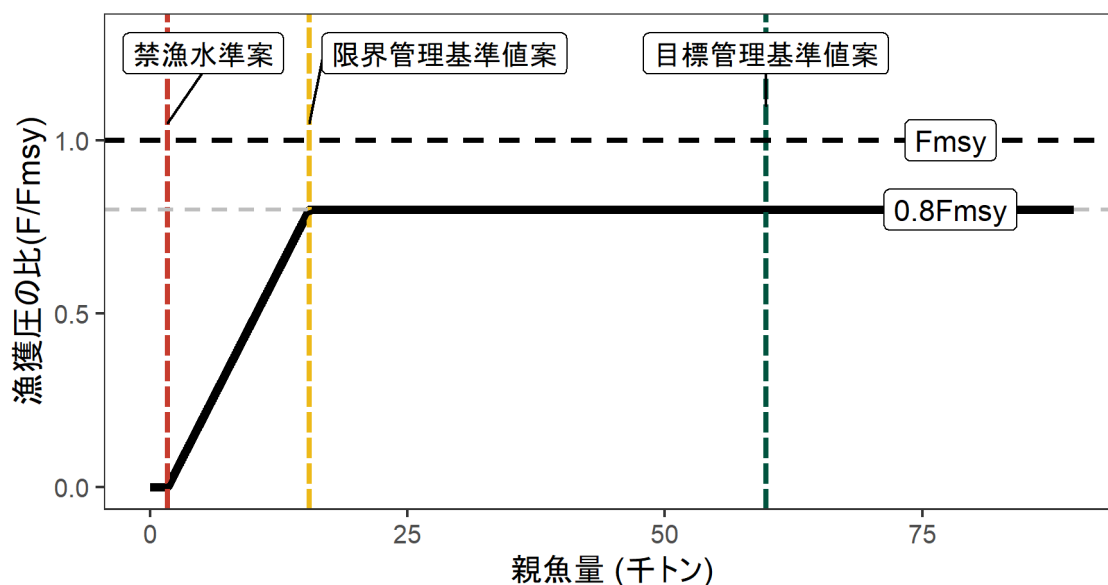


図 4. 神戸プロット (4 区分)

縦軸に漁獲圧の比を用いた場合 (上図) および漁獲割合の比を用いた場合 (下図) を示す。図中の目標管理基準値案、限界管理基準値案、および禁漁水準案には、それぞれ SB_{msy} 、 $SB_{0.6msy}$ および $SB_{0.1msy}$ を用いた。

a) 縦軸を漁獲圧にした場合



b) 縦軸を漁獲量にした場合

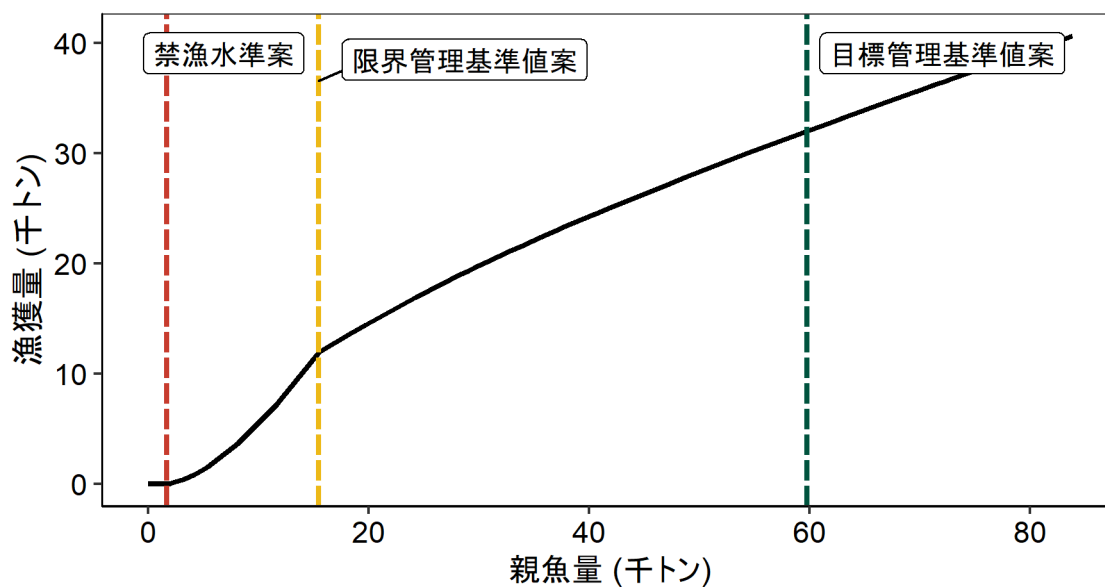
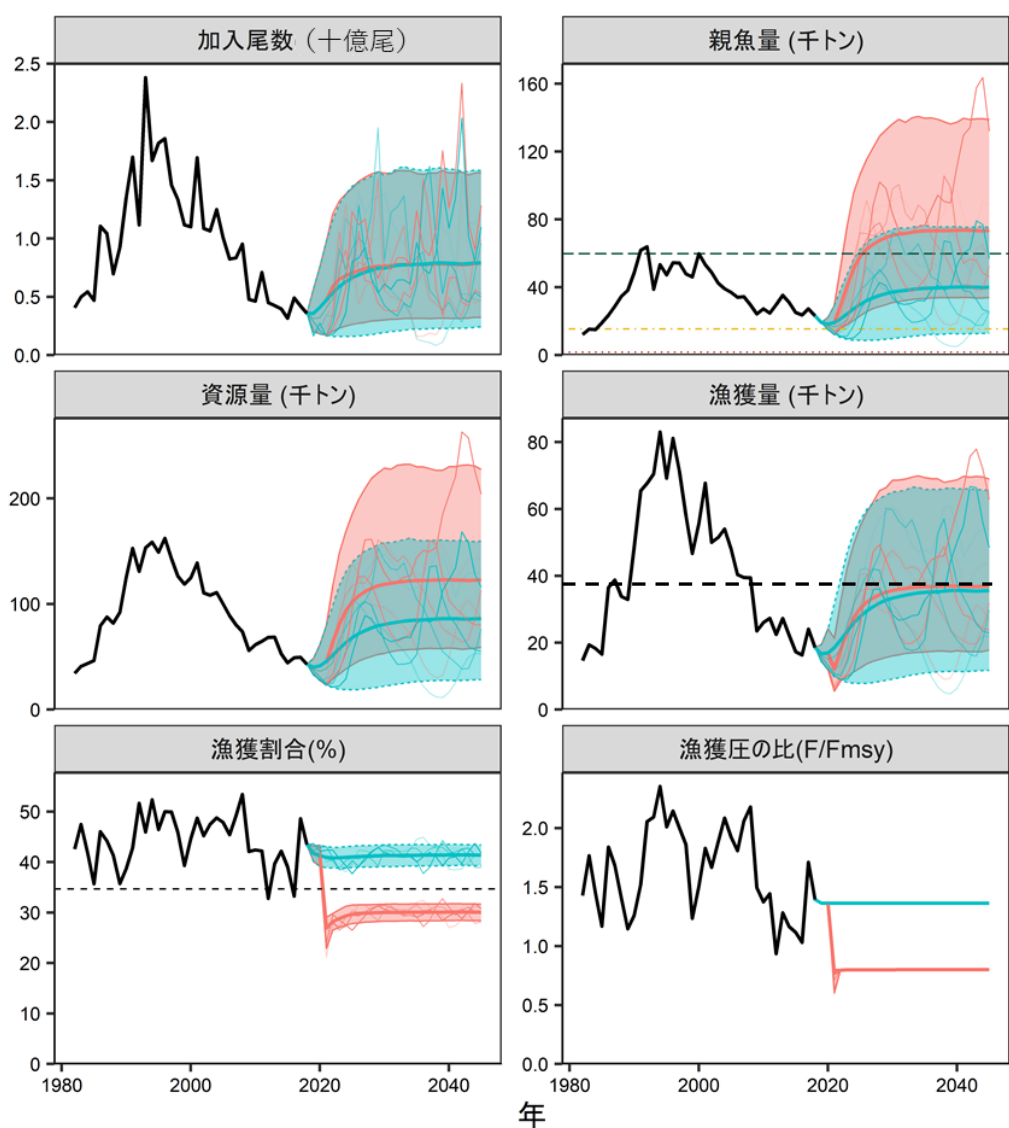


図 5. 漁獲管理規則案

目標管理基準値（SBtarget）案は本系群に適用した再生産関係に基づき算出した SBmsy である。限界管理基準値（SBlimit）案および禁漁水準（SBban）案には、それぞれ標準値を用いている。安全係数 β には標準値である 0.8 を用いた。黒破線は Fmsy、灰色破線は 0.8Fmsy、黒太線は HCR 案、赤破線は禁漁水準案、黄破線は限界管理基準値案、緑破線は目標管理基準値案を示す。a) は縦軸を漁獲圧の比にした場合、b) は縦軸を漁獲量にした場合である。b) については、漁獲する年の年齢組成によって漁獲量は若干異なるが、ここでは平衡状態における平均的な年齢組成の場合の漁獲量を示した。



(塗り:5-95%信頼区間, 太い実線: 平均値, 細い実線: シミュレーションの1例)

図 6. 漁獲管理規則案を用いた将来予測（赤色）と現状の漁獲圧で漁獲を続けた場合の将来予測（緑色）の比較

太実線は平均値、網掛けはシミュレーション結果の 90%が含まれる 90%予測区間、細線は 3 通りの将来予測の例示である。親魚量の図の緑破線は目標管理基準値案、黄破線は限界管理基準値案、赤線は禁漁水準案を示す。漁獲量の図の破線は MSY を、漁獲割合の図の破線は U_{msy} を示す。2019 年と 2020 年の漁獲量は予測される資源量と $F_{current}$ により仮定し、2021 年以降の漁獲は漁獲管理規則案に基づく（図 5）。安全係数 β には 0.8 を用いた。

表 1. 再生産関係式の検討候補

再生産関係式	最適化法	自己 相関	AICc	$\Delta AICc$	$\Delta AICc$ の 順位	S.D.	データ数
リッカー型	最小二乗法	同時	27.2	NA	1	0.306	36
ホッケー・スティック 型	最小二乗法	同時	27.4	NA	2	0.309	36
ベバートン・ホルト型	最小二乗法	同時	29.0	NA	3	0.315	36

適用する再生産関係式を太字とした。また、S.D.は加入のばらつきの大きさをあらわす指標で、対数残差の標準偏差（Standard Deviation、平均二乗誤差の平方根）である。

表 2. MSY を実現する親魚量の算出および将来予測計算に用いた各種設定

年齢	自然死亡 係数	成熟率	平均重量 (g)	選択率	現状の漁獲圧 (Fcurrent)
0	0.5	0.0	40	0.524	0.549
1	0.5	0.5	106	0.749	0.785
2	0.5	1	224	1.000	1.049
3 歳以上	0.5	1	404	1.000	1.049

表 3. 各種管理基準値案および禁漁水準案に対応する漁獲量や漁獲圧など

管理基準値案又 は禁漁水準案	説明	親魚量 (千トン)	SB0 に 対する 比 ※	漁獲量 ※※ (千トン)	漁獲圧 ※※※	漁獲 割合※ ※※※	現状の漁獲 圧に対する 比※※※※ ※
目標管理基準値 案	SBmsy	60	0.29	38	0.22	0.34	0.73
限界管理基準値 案	SB0.6msy	15	0.08	23	0.08	0.50	1.50
禁漁水準案	SB0.1msy	1.7	0.01	3.8	0.05	0.57	2.00
MSY を実現する 漁獲圧	Fmsy	(0 歳, 1 歳, 2 歳, 3 歳以上) = (0.40, 0.57, 0.76, 0.76)					

※漁獲がなかった場合を仮定した初期親魚量（SB0）に対する管理基準値案や禁漁水準案の比

※※管理基準値案や禁漁水準案に対応する漁獲圧の下での平衡状態における平均漁獲量

※※※管理基準値案や禁漁水準案に対応する漁獲圧を%SPR に換算した値

※※※※管理基準値案や禁漁水準案に対応する漁獲割合

※※※※※管理基準値案や禁漁水準案に対応する漁獲圧の現状の漁獲圧に対する比

表 4. 将来の親魚量が目標管理基準値案を上回る確率

安全係数 β を 0.0~1.0 で 0.1 刻みで変更した場合の、漁獲管理規則案（図 5）での将来予測結果。2019、2020 年は F_{current} で漁獲し、2021 年から漁獲管理規則案による漁獲とした。

(%)

β	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2041	2051
1.0	0	0	0	1	8	17	24	28	32	34	36	38	39	42	43
0.9	0	0	0	1	11	23	32	37	41	43	46	47	48	52	52
0.8	0	0	0	2	15	30	41	47	51	53	56	57	57	62	62
0.7	0	0	0	3	21	39	51	57	61	63	65	66	67	71	71
0.6	0	0	0	4	27	49	62	68	70	72	74	75	76	79	79
0.5	0	0	0	6	34	59	72	78	79	80	82	83	84	86	86
0.4	0	0	0	8	42	68	82	86	86	87	88	89	90	91	92
0.3	0	0	0	10	50	77	88	92	92	92	93	94	94	96	95
0.2	0	0	0	12	58	85	94	96	96	96	96	97	97	98	98
0.1	0	0	0	15	66	91	97	99	99	98	98	99	99	99	99
0.0	0	0	0	19	74	95	99	100	100	100	99	100	100	100	100

表 5. 将来の親魚量が限界管理基準値案を上回る確率

安全係数 β を 0.0~1.0 で 0.1 刻みで変更した場合の、漁獲管理規則案（図 5）での将来予測結果。2019、2020 年は F_{current} で漁獲し、2021 年から漁獲管理規則案による漁獲とした。

(%)

β	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2041	2051
1.0	100	95	74	91	95	96	97	98	98	98	99	99	99	99	99
0.9	100	95	74	94	97	98	99	99	99	99	99	99	99	100	100
0.8	100	95	74	96	98	99	99	100	100	100	100	100	100	100	100
0.7	100	95	74	97	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.6	100	95	74	98	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.5	100	95	74	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.4	100	95	74	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.3	100	95	74	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.2	100	95	74	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.1	100	95	74	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.0	100	95	74	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

表 6. 将来の親魚量が禁漁水準を上回る確率

安全係数 β を 0.0～1.0 で 0.1 刻みで変更した場合の、漁獲管理規則案（図 5）での将来予測結果。2019、2020 年は F_{current} で漁獲し、2021 年から漁獲管理規則案による漁獲とした。

(%)

β	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2041
1.0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.9	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.8	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.7	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.4	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

表 7. 将来の親魚量の平均値の推移

安全係数 β を 0.0～1.0 で 0.1 刻みで変更した場合の、漁獲管理規則案（図 5）での将来予測の結果を示す。2019、2020 年は F_{current} で漁獲し、2021 年から漁獲管理規則案による漁獲とした。

(千トン)

β	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2041	2051
1.0	19	18	19	27	34	41	46	50	52	54	56	57	57	60	60
0.9	19	18	19	28	38	46	52	56	59	61	62	63	64	66	67
0.8	19	18	19	30	41	51	58	63	65	68	69	71	71	74	74
0.7	19	18	19	31	45	57	65	70	73	75	77	79	80	82	82
0.6	19	18	19	33	49	64	73	78	82	84	87	88	89	92	92
0.5	19	18	19	35	54	71	82	88	91	94	97	99	100	103	103
0.4	19	18	19	37	59	80	93	98	102	106	109	112	113	116	116
0.3	19	18	19	39	65	90	105	111	114	119	123	127	128	131	132
0.2	19	18	19	41	72	101	119	125	129	134	140	145	147	150	151
0.1	19	18	19	43	79	114	135	143	146	152	160	167	170	173	174
0	19	18	19	46	87	129	155	164	168	174	184	194	199	204	205

表 8. 将来の漁獲量の平均値の推移

安全係数 β を 0.0~1.0 で 0.1 刻みで変更した場合の、漁獲管理規則案（図 5）での将来予測の結果を示す。2019、2020 年は F_{current} で漁獲し、2021 年から漁獲管理規則案による漁獲とした。

(千トン)

β	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2041	2051
1.0	17	17	15	20	24	28	31	32	34	35	36	36	36	38	38
0.9	17	17	14	19	24	28	31	32	34	35	36	36	36	38	38
0.8	17	17	12	18	23	27	30	32	33	34	35	36	36	37	37
0.7	17	17	11	17	22	27	30	31	33	34	34	35	35	36	36
0.6	17	17	10	15	21	26	28	30	31	32	33	33	34	34	35
0.5	17	17	8	14	19	24	27	28	29	30	31	31	32	32	32
0.4	17	17	7	12	17	21	24	25	26	27	28	28	29	29	29
0.3	17	17	5	10	14	18	20	22	22	23	24	24	25	25	25
0.2	17	17	4	7	10	14	16	16	17	18	18	19	19	19	19
0.1	17	17	2	4	6	8	9	9	10	10	11	11	11	11	11
0	17	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 9. 予測される親魚量、漁獲量、親魚量が管理基準値案を上回る確率のまとめ
安全係数 β を 0.0~1.0 で 0.1 刻みで変更した結果を示す。

β	10 年後 (2031 年) の平均親魚量	10 年後 (2031 年) に親魚量が 目標管理基準値案を上 回る確率	0 年後 (2021 年) の予測漁獲 量 (千ト ン)	5 年後 (2026 年) の予測漁獲 量 (千ト ン)	10 年後 (2031 年) の予測漁獲 量 (千ト ン)	10 年後 (2031 年) に親魚量が 限界管理基準値案を上 回る確率
1	57	39%	15	32	36	99%
0.9	64	48%	14	32	36	99%
0.8	71	57%	12	32	36	100%
0.7	80	67%	11	31	35	100%
0.6	89	76%	10	30	34	100%
0.5	100	84%	8	28	32	100%
0.4	113	90%	7	25	29	100%
0.3	128	94%	5	22	25	100%
0.2	147	97%	4	16	19	100%
0.1	170	99%	2	9	11	100%
0	199	100%	0	0	0	100%

補足資料 1 再生産関係式のモデル診断結果について

マアジ太平洋系群の再生産関係として、最大持続生産量（MSY）を実現する親魚量の算出および将来予測計算に使用する再生産関係に、ホッケー・スティック（HS ; Clark et al., 1985）型、ベバートン・ホルト（BH ; Beverton and Holt 1957）型およびリッカー（RI ; Ricker 1954）型の再生産関係式を検討候補とした。それぞれの再生産関係式の数式は以下の通りである；

$$R_y = \begin{cases} ab & \text{if } B_y > b \\ aB_y & \text{if } B_y \leq b \end{cases} \quad (\text{Hockey stick, HS})$$

$$R_y = \frac{aB_y}{(1 + bB_y)} \quad (\text{Beverton Holt, BH})$$

$$R_y = aB_y \exp(-bB_y) \quad (\text{Ricker, RI})$$

ここで R_y は y 年の加入量、 B_y は y 年の親魚量である。いずれの再生産関係式でも、推定するパラメータは a および b の 2 つである。HS 型の場合、 a は折れ点までの再生産曲線の傾き（尾/トン）、 b は折れ点となる親魚量（千トン）を示す。再生産関係の検討の際には、推定された再生産曲線からの加入量の残差標準偏差（s.d.）も併せて算出した。

最適化方法として、最小二乗法および最小絶対値法を候補とし、再生産関係モデルに対する残差の正規性については、Shapiro-Wilk 検定により検討した。その結果いずれの再生産関係でも、有意な逸脱は検出されなかったことから、最適化法には最小二乗法を用いた（補足図 1-1a、b、c）。再生産関係を最小二乗法により当てはめた際の残差トレンドと自己相関プロットを補足図 1-2 に示す。いずれの再生産関係を仮定した場合でも、残差の時系列にトレンドが見られ、3~5 年のラグまでは自己相関係数が 95%信頼区間に収まらず有意となり、本系群については自己相関を考慮する必要があると認められた。自己相関の同時推定とした場合と、二段階推定した場合とでは、推定される自己相関係数に大きな違いが見られた（たとえば RI 内側で同時推定の場合の ρ は 0.81 だが、二段階推定の場合は 0.43 だった。補足表 1-1）。二段階推定と同時推定で ρ の差が特に大きい場合には、推定パラメータの安定性を確認した上で同時推定による結果を用いたほうが良いとされている（FRA-SA2020-BRP01-6）。そのため、本系群では自己相関係数を同時推定により求めた。ただし、HS 型ではパラメータ推定値は大きく異なるが、尤度が同程度の局所解が複数確認されたため（補足資料 2）、RI 型および BH 型を再生産関係の候補モデルとした。

同時推定の再生産関係のうち、補正赤池情報量規準（AICc）を比較すると RI 型と BH 型でその差は有意ではない（表 1）。RI 型では親魚量が多い場合に強い密度効果が仮定された形となり、BH 型とは傾向が大きく異なる（補足図 1-3a,b）。また、それぞれの再生産関係に基づき算出される MSY を実現する親魚量の差は大きい（補足資料 3）。

自己相関を同時推定した RI 型、BH 型の再生産関係における個々のデータの影響をジャックナイフ法で検討した結果、両モデルとも最も加入量の高い 1993 年のデータを除いた

場合に再生産関係の形が変わりやすいと判断された（補足図 1-4 および 1-5）。加えて残差ブートストラップを行い、RI 型では a と b の点推定値はブートストラップ中央値と一致したが、 sd と自己相関係数 ρ は信頼区間がやや広くブートストラップ中央値は点推定値よりやや低くなった（補足図 1-6）。また、極端に形の異なる曲線は見られなかった（補足図 1-7）。一方 BH 型では、点推定値から大きく異なる a と b が推定されることもあり（補足図 1-6）、加入一定になるものや親魚量に対して加入量が比例関係になるといった極端な形が見られた（補足図 1-7）。プロファイル尤度を計算した結果、RI 型の信頼区間は狭かったのに対し、BH 型ではパラメータの信頼区間は広がった（補足図 1-8）。

補足表 1-1 MSY を実現する親魚量の算出に使用した再生産関係式におけるパラメータの推定値

再生産関係式	最適化 法	自己 相関	推定法	a	b	S.D.	Rho	AICc
リッカー (RI)	最小 二乗法	有	同時	0.0588	2.58×10^{-5}	0.306	0.805	27.2
ベバートン・ホルト (BH)	最小 二乗法	有	同時	0.0667	5.11×10^{-5}	0.315	0.698	29.0
ホッケイ・ステイック (HS)	最小 二乗法	有	同時	0.0273	39200	0.309	0.635	27.4
リッカー (RI)	最小 二乗法	有	二段階	0.0251	3.67×10^{-5}	0.329	0.429	30.2
ベバートン・ホルト (BH)	最小 二乗法	有	二段階	0.0251	5.16×10^{-11}	0.329	0.429	30.2
ホッケイ・ステイック (HS)	最小 二乗法	有	二段階	0.0253	54500	0.318	0.474	27.6

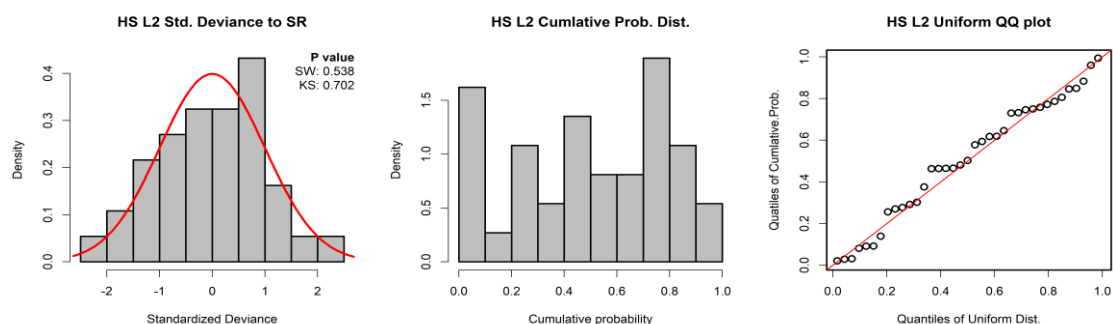
適用する再生産関係式を太字で示す。また、S.D.は加入のばらつきの大きさをあらわす指標で、対数残差の標準偏差 (Standard Deviation、平均二乗誤差の平方根) である。

引用文献

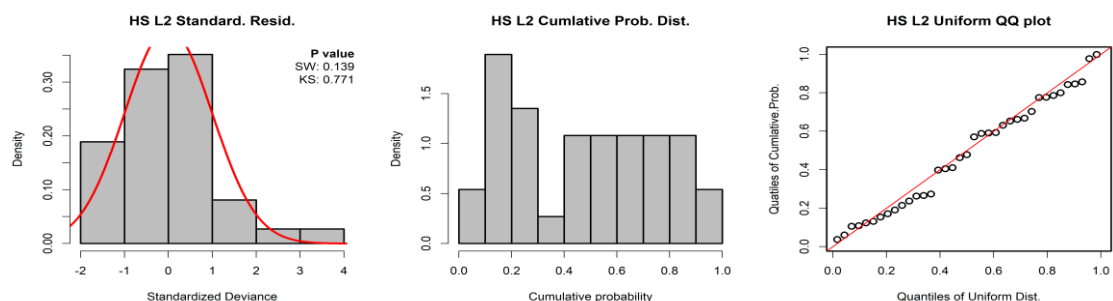
- Clark C. W., A. T. Charles, J. R. Beddington, and M. Mangel (1985). Optimal capacity decisions in a developing fishery. *Marine Resource Economics*, 2: 25-53.
- Beverton R. J. H., and S. J. Holt (1957). On the dynamics of exploited fish populations. Her Majesty's Stationary Office, London.
- Ricker W. E. (1954). Stock and recruitment. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 11: 559-623.

ホッケー・スティック型（最小二乗法）で自己相関を二段階推定した場合

- ・再生産関係の残差

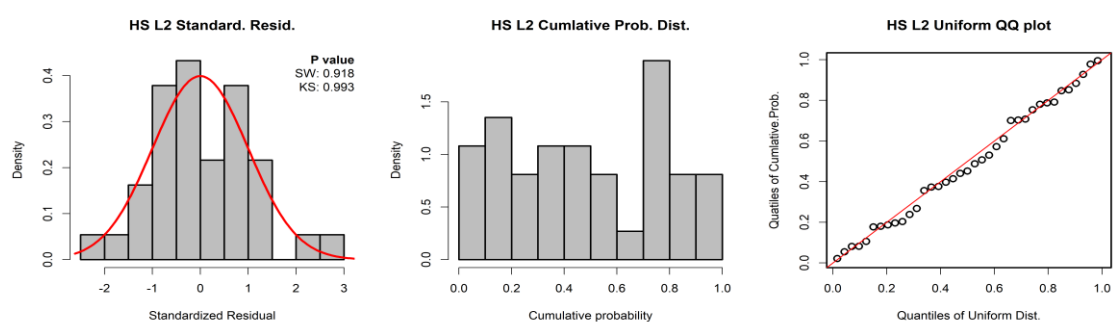


- ・自己相関の推定における残差



ホッケー・スティック型（最小二乗法）で自己相関を同時推定した場合

- ・自己相関を除いた再生産関係の残差

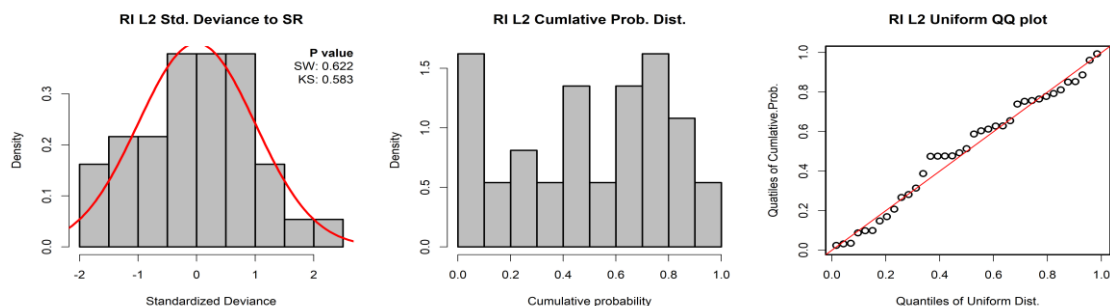


補足図 1-1a. HS 型再生産関係における（左）標準化残差のヒストグラムと正規性テスト結果、（中央）残差の累積確率密度のヒストグラム、（右）一様分布を仮定した QQ プロット

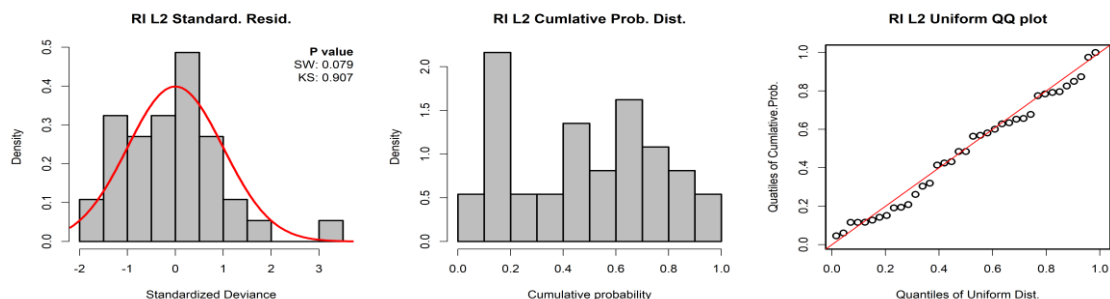
自己相関を二段階推定した場合は、再生産関係の残差分布および自己相関の推定における残差、自己相関を同時推定した場合は、自己相関を除いた再生産関係の残差分布を示す。残差分布図の右上の数値は Shapiro-Wilk 検定 (SW) と Kolmogorov-Smirnov 検定 (KS) の結果である（どちらも、帰無仮説は「正規分布に従っている」である）。QQ プロットの赤線は理論値を表している。

リッカー型（最小二乗法）で自己相関を二段階推定した場合

- ・再生産関係の残差

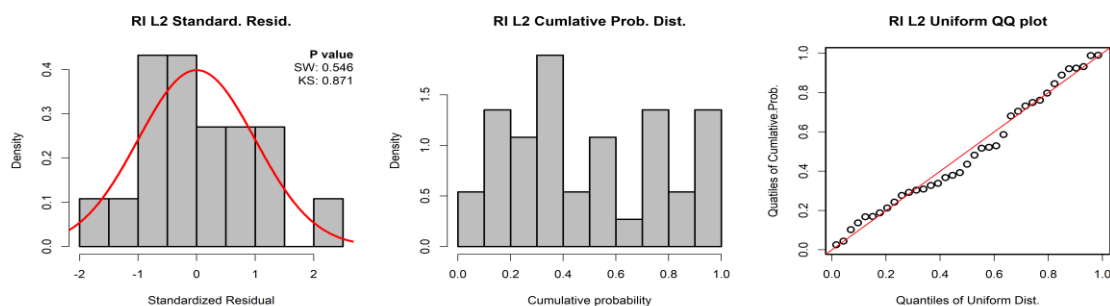


- ・自己相関の推定における残差



リッカー型（最小二乗法）で自己相関を同時推定した場合

- ・自己相関を除いた再生産関係の残差

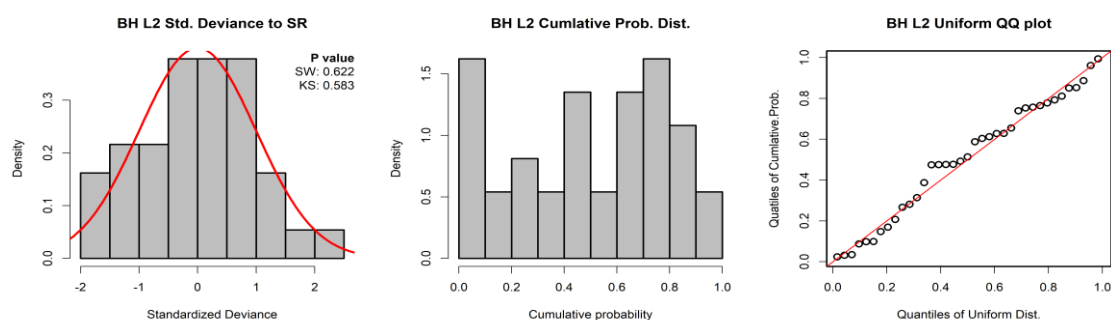


補足図 1-1b. RI 型再生産関係における（左）標準化残差のヒストグラムと正規性テスト結果、（中央）残差の累積確率密度のヒストグラム、（右）一様分布を仮定した QQ プロット

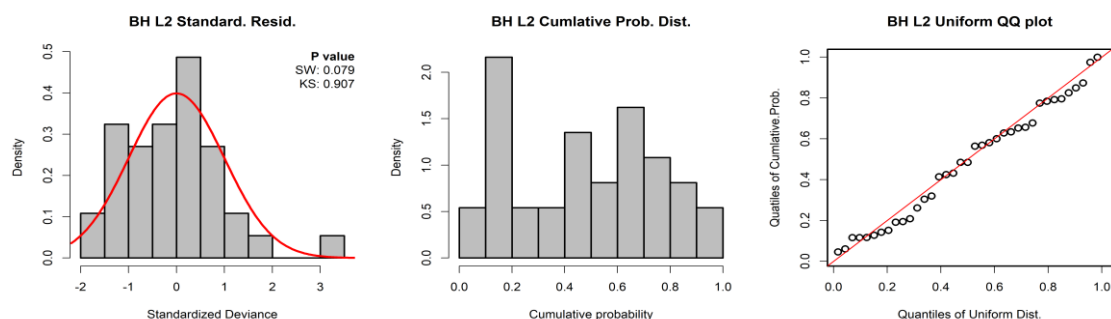
自己相関を二段階推定した場合は、再生産関係の残差分布および自己相関の推定における残差、自己相関を同時推定した場合は、自己相関を除いた再生産関係の残差分布を示す。残差分布図の右上の数値は Shapiro-Wilk 検定 (SW) と Kolmogorov-Smirnov 検定 (KS) の結果である（どちらも、帰無仮説は「正規分布に従っている」である）。QQ プロットの赤線は理論値を表している。

ベバートン・ホルト型（最小二乗法）で自己相関を二段階推定した場合

- ・再生産関係の残差

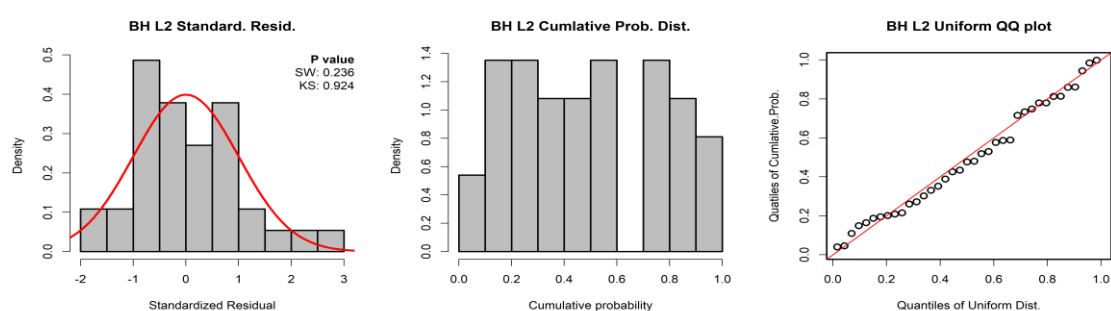


- ・自己相関の推定における残差



ベバートン・ホルト型（最小二乗法）で自己相関を同時推定した場合

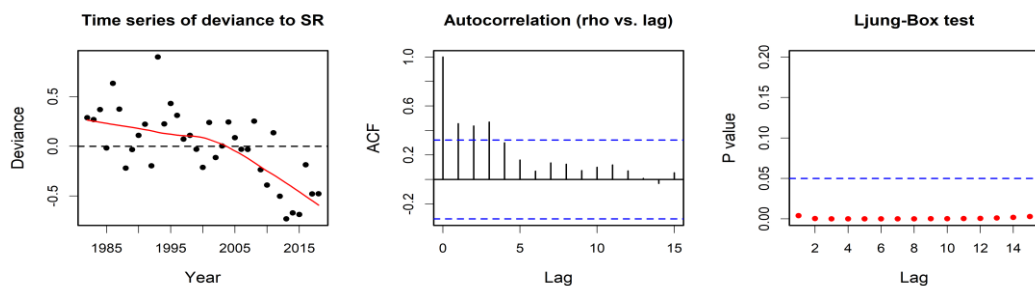
- ・自己相関を除いた再生産関係の残差



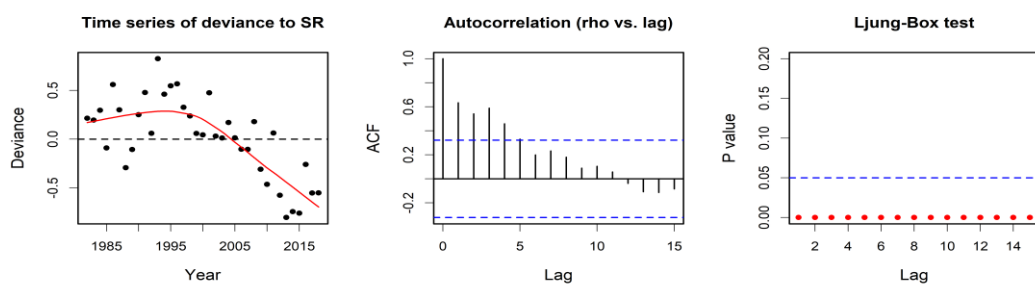
補足図 1-1c. BH 型再生産関係における（左）標準化残差のヒストグラムと正規性テスト結果、（中央）残差の累積確率密度のヒストグラム、（右）一様分布を仮定した QQ プロット

自己相関を二段階推定した場合は、再生産関係の残差分布および自己相関の推定における残差、自己相関を同時推定した場合は、自己相関を除いた再生産関係の残差分布を示す。残差分布図の左上の数値は Shapiro-Wilk 検定 (SW) と Kolmogorov-Smirnov 検定 (KS) の結果である（どちらも、帰無仮説は「正規分布に従っている」である）。QQ プロットの赤線は理論値を表している。

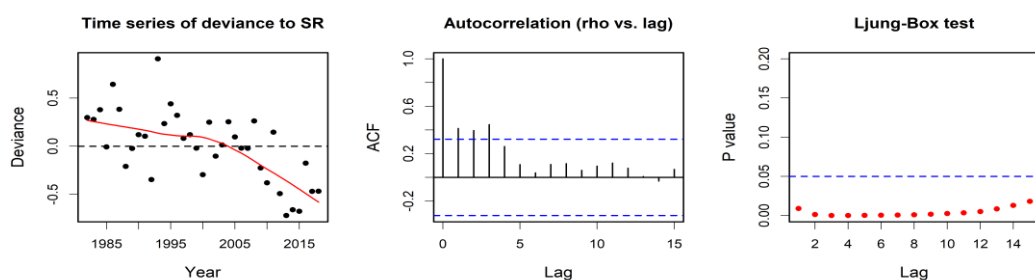
ホッケー・スティック型（最小二乗法）で自己相関を二段階推定した場合



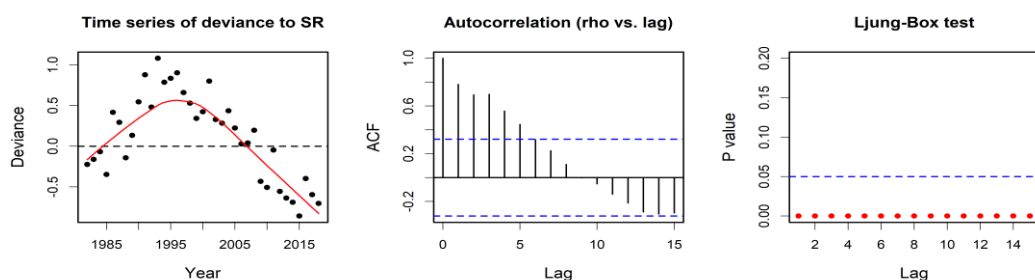
ホッケー・スティック型（最小二乗法）で自己相関を同時推定した場合



リッカー型（最小二乗法）で自己相関を二段階推定した場合



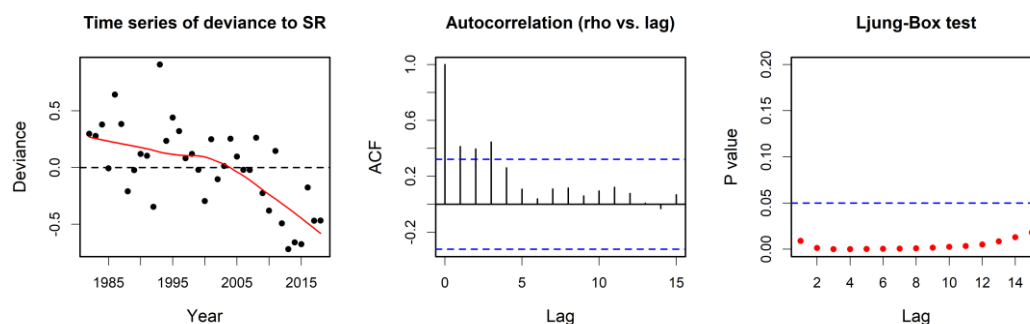
リッカー型（最小二乗法）で自己相関を同時推定した場合



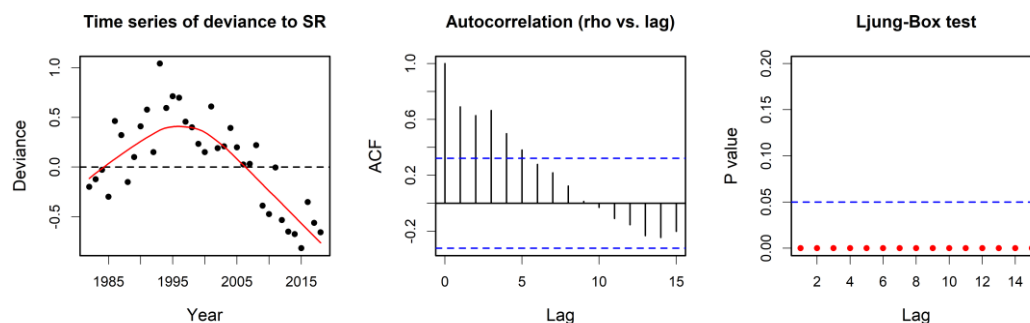
補足図 1-2. HS 型および RI 型再生産関係における（左）標準化残差の時系列トレンド、（中央）コレログラム、（右）Ljung-Box 検定における P 値

標準化残差の時系列の図中の赤線は平滑化された曲線、垂直方向の青色の点線は再生産関係が切り替わる時点を表している。コレログラムの図中の青色の点線は 95%信頼区間を、Ljung-Box 検定における P 値の図中の青色の点線は 5%水準を表している。

ベバートン・ホルト型（最小二乗法）で自己相関を二段階推定した場合

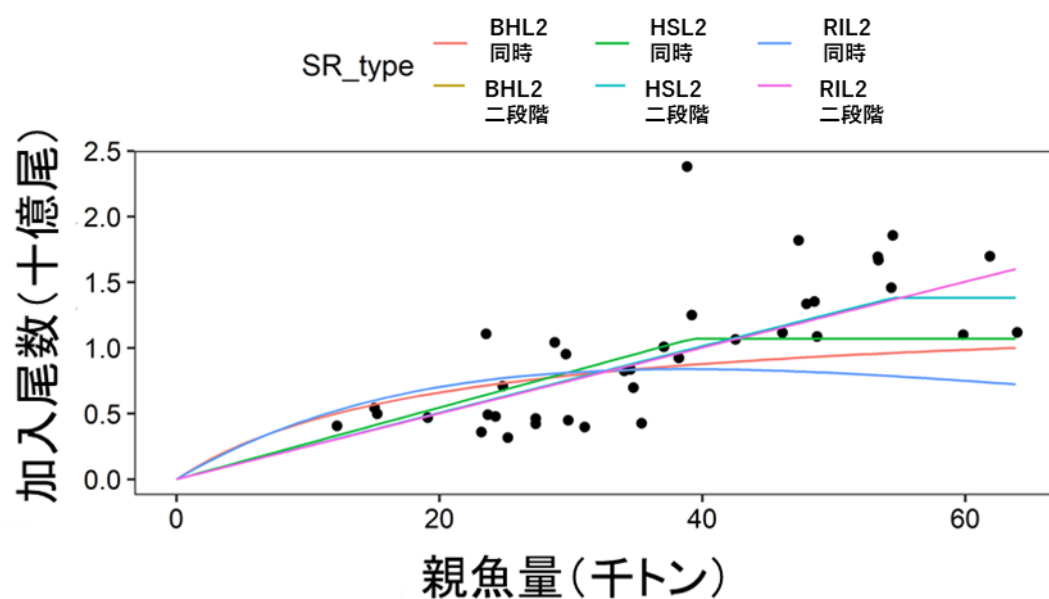


ベバートン・ホルト型（最小二乗法）で自己相関を同時推定した場合



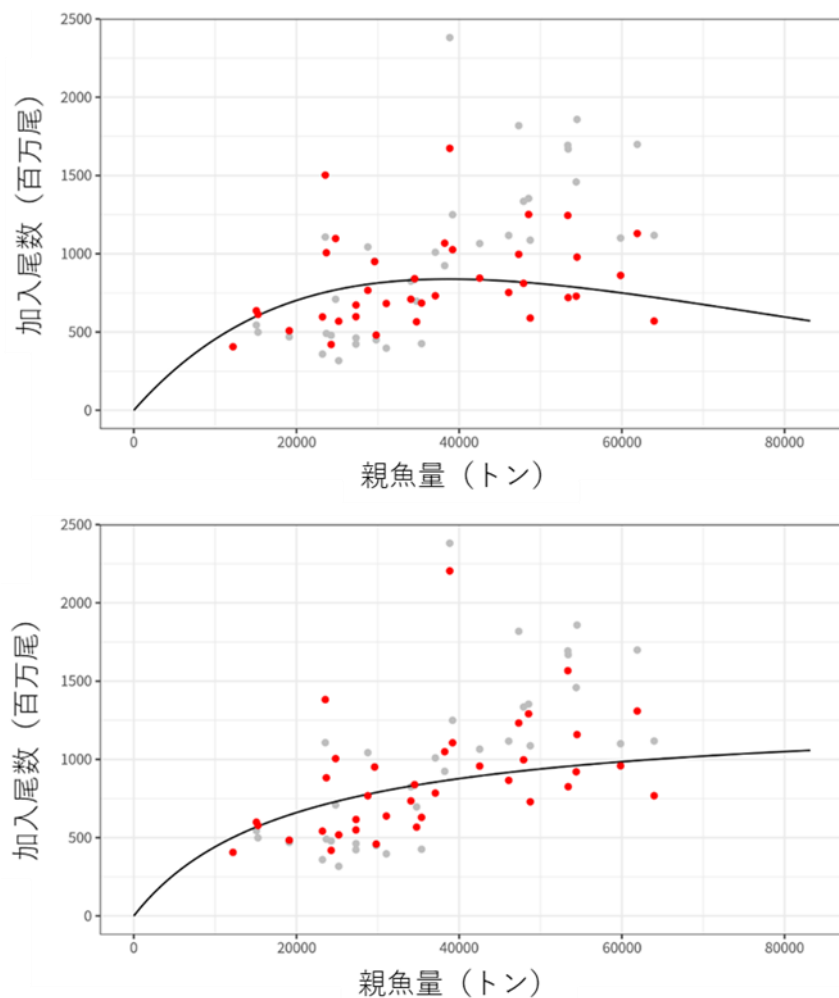
補足図 1-2（続き）． BH 型再生産関係における（左）標準化残差の時系列トレンド、（中央）コレログラム、（右）Ljung-Box 検定における P 値

標準化残差の時系列の図中の赤線は平滑化された曲線、垂直方向の青色の点線は再生産関係が切り替わる時点を表している。コレログラムの図中の青色の点線は 95%信頼区間を、Ljung-Box 検定における P 値の図中の青色の点線は 5%水準を表している。



補足図 1-3a. 各モデルにおける再生産関係式

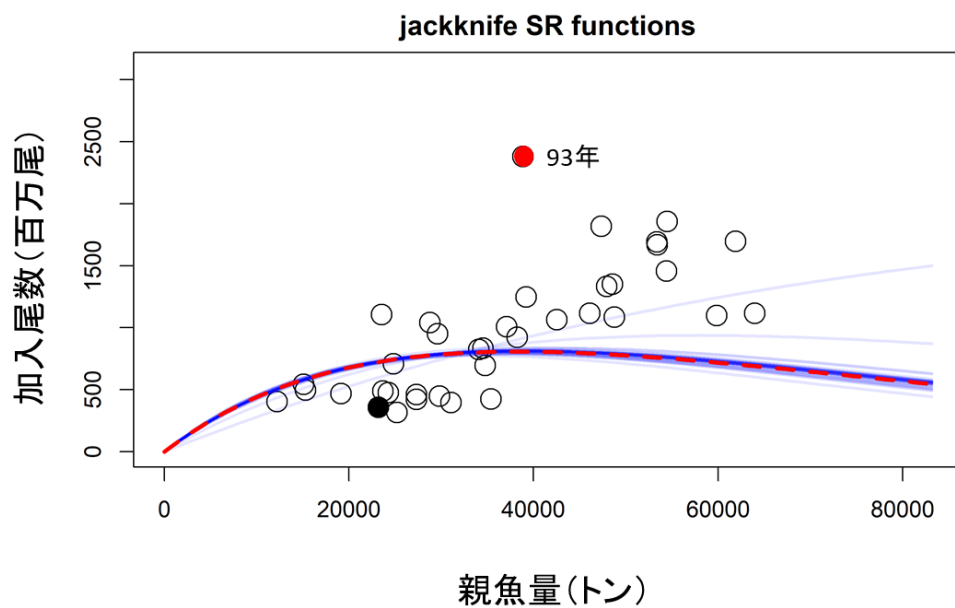
ホッケー・スティック (HS) 型、リッカー (RI) 型、ベバートン・ホルト (BH) 型の再生産関係式を最小二乗法 (L2) により、残差に自己相関を二段階推定したモデル (考慮しないモデルと同じ形) および同時推定したモデルに当てはめた。BH 型と RI 型の自己相関を二段階推定した再生産関係は直線関係を示し、重なっている。黒丸は分析に使用した親魚量と加入尾数 (1982～2017 年) である。



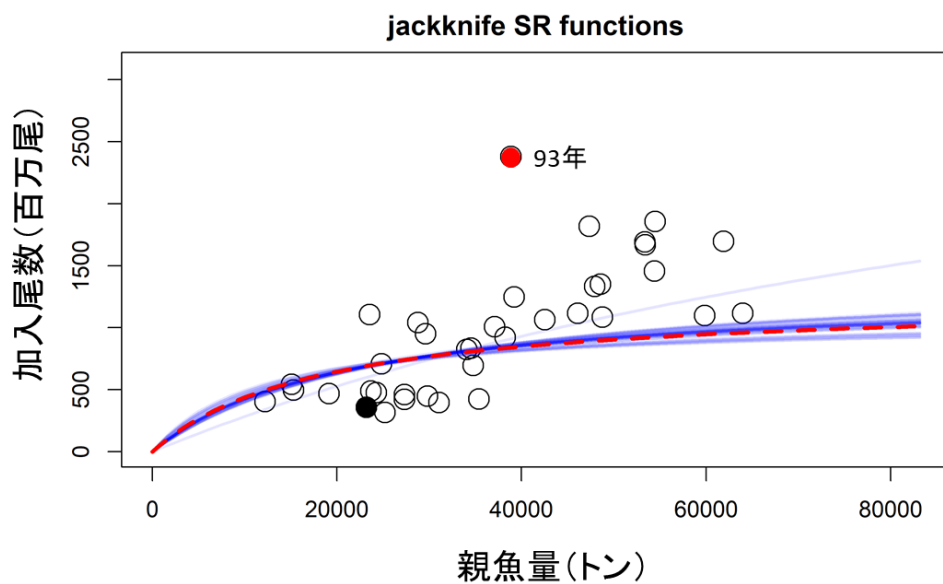
補足図 1-3b. RI 型（上図）、BH 型（下図）の再生産曲線と観測された加入尾数（灰色）から、再生産関係で予測された自己相関分を引いたときの加入尾数（赤）

自己相関を同時推定した場合、観測データへのあてはまりが非常に悪く見えるが、これは高親魚量・高加入の観測データを高い自己相関で説明しているためである。たとえば観測された加入尾数から、モデルで予測された自己相関分を引くと、図のようになり、自己相関分を引いた観測データは再生産関係によくフィットしている。

リッカー型（最小二乗法）で自己相関を同時推定した場合



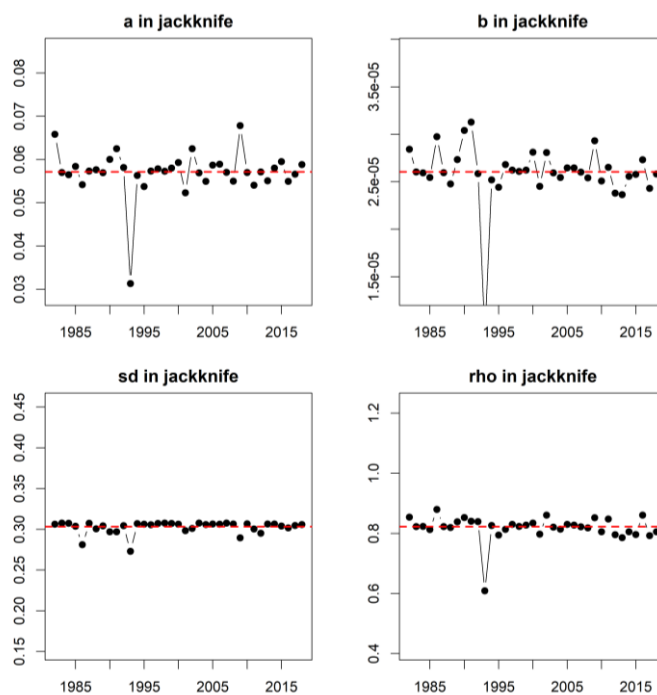
ベバートン・ホルト型（最小二乗法）で自己相関を同時推定した場合



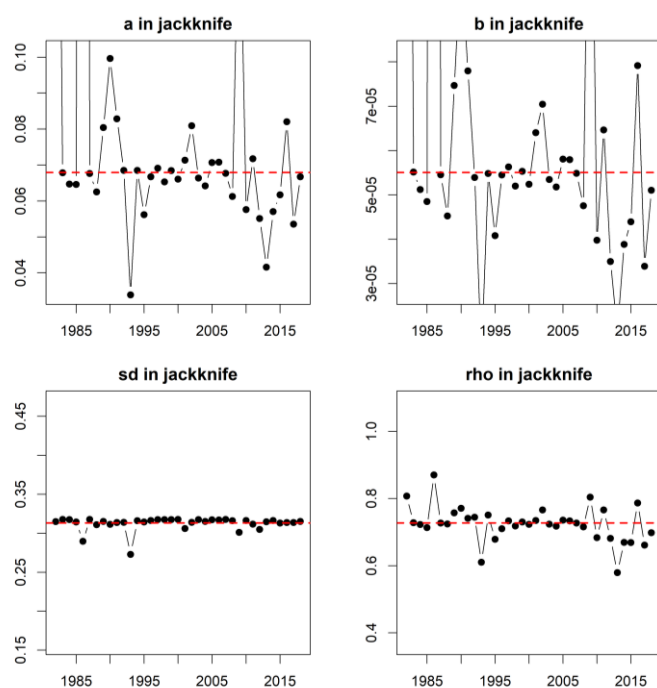
補足図 1-4. RI 型および BH 型の再生産関係で自己相関を同時推定した場合のジャックナイフ解析での推定結果

赤線は全データでの推定値、青線は各年のデータを除外した場合の推定値である。分析に使用した親魚量と加入尾数を丸印で示す。黒丸は使用したデータ期間の最終年（2017 年）、赤丸は除いた影響が大きかった 1993 年を示す。

リッカー型（最小二乗法）で自己相関を同時推定した場合

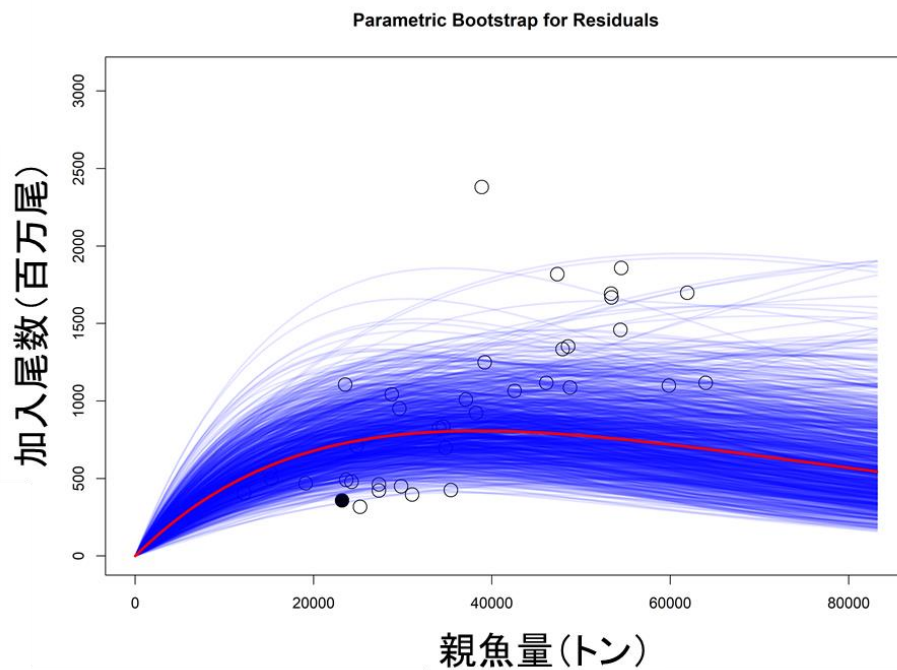


ベバートン・ホルト型（最小二乗法）で自己相関を同時推定した場合

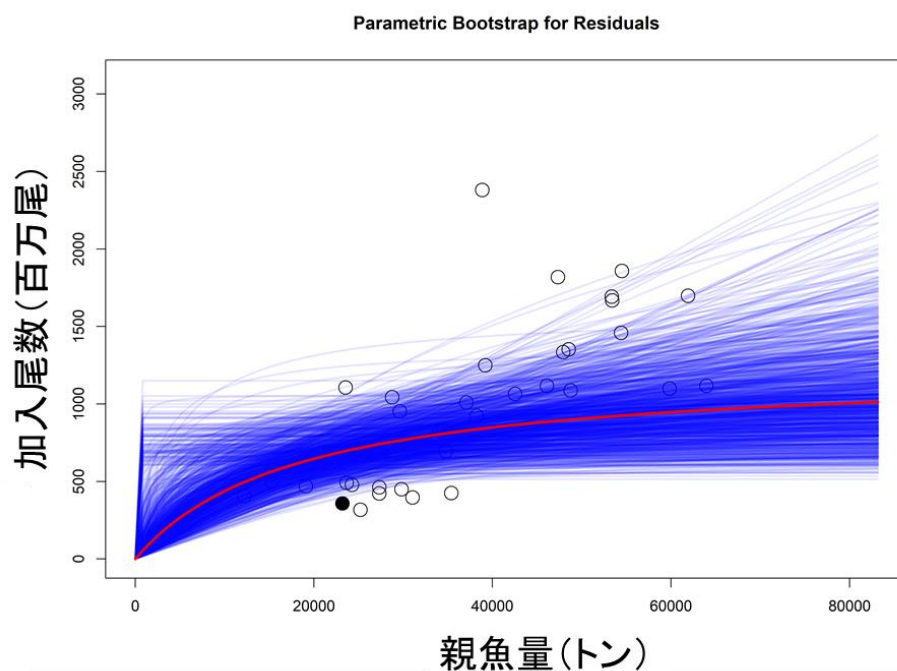


補足図 1-5. RI 型および BH 型の再生産関係で自己相関を同時推定した場合のジャックナイフ解析でのパラメータ別の影響

リッカー型（最小二乗法）で自己相関を同時推定した場合



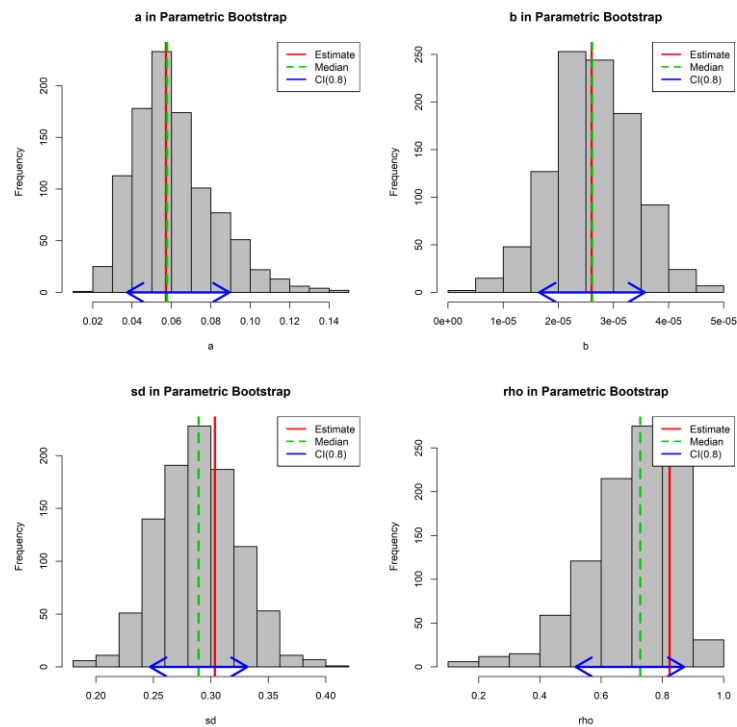
ベバートン・ホルト型（最小二乗法）で自己相関を同時推定した場合



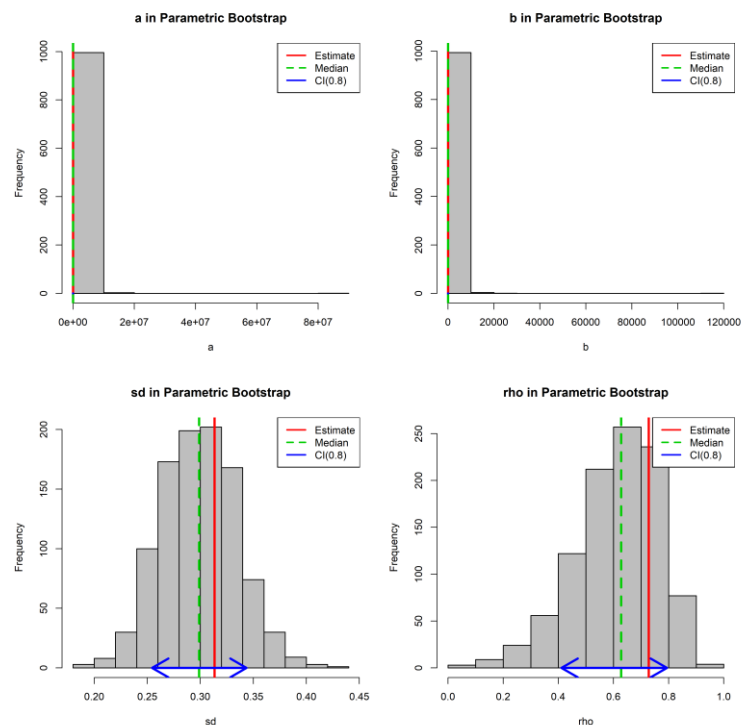
補足図 1-6. RI 型および BH 型の再生産関係で自己相関を同時推定した場合の残差ブートストラップ解析の結果

赤線は元データでの推定値、青線はノンパラメトリックブートストラップでの推定値である。分析に使用した親魚量と加入尾数を丸印で示す。黒丸は使用したデータ期間の最終年（2017 年）を示す。

リッカー型（最小二乗法）で自己相関を同時推定した場合

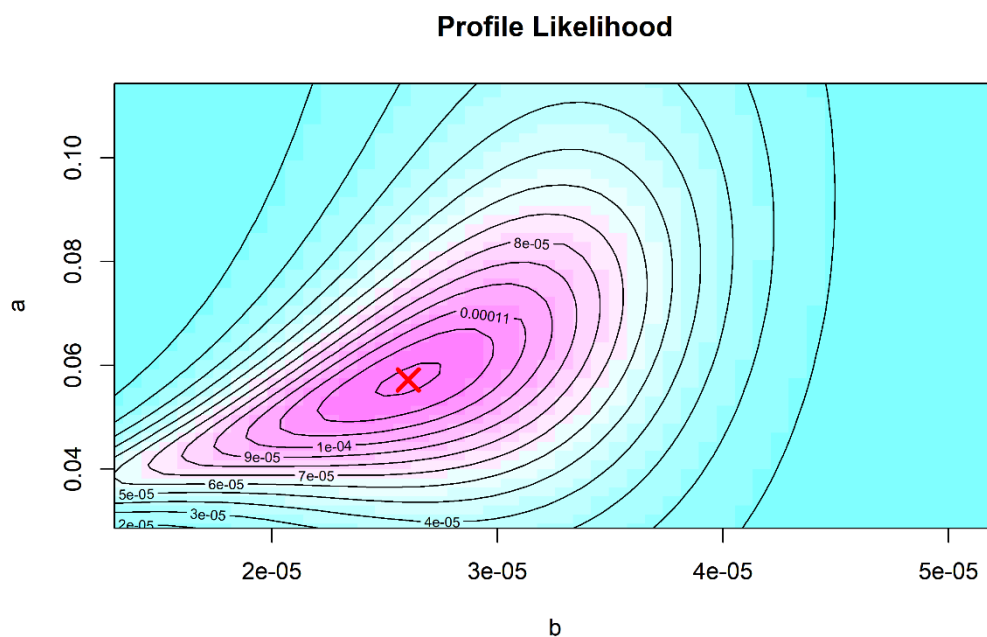


ベバートン・ホルト型（最小二乗法）で自己相関を同時推定した場合

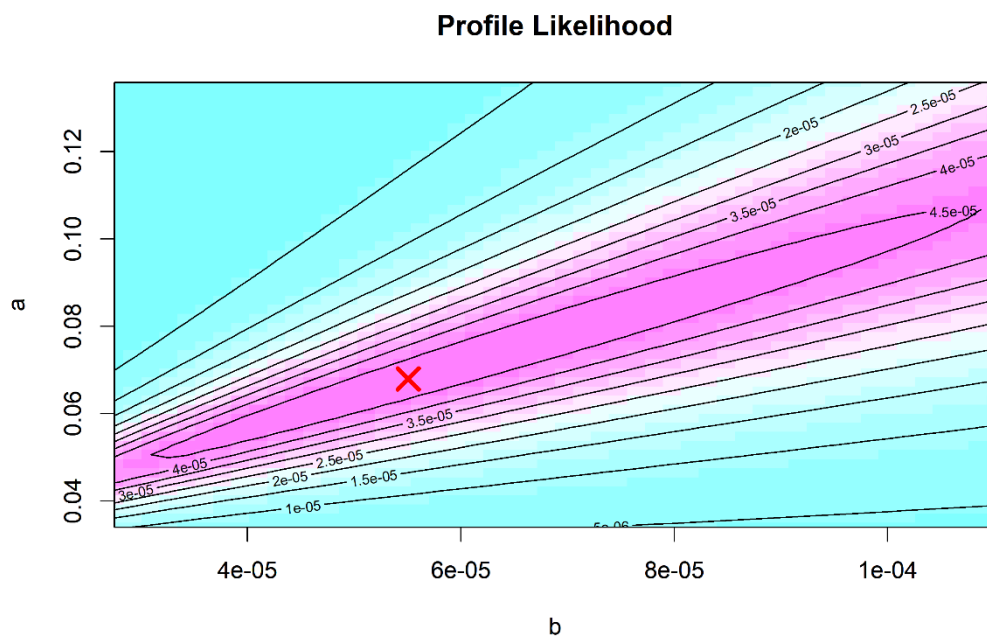


補足図 1-7. RI 型および BH 型の再生産関係における残差ブートストラップ解析での中央値（緑点線）と 80%信頼区間（青線）
赤線はパラメータの点推定値である。

リッカー型（最小二乗法）で自己相関を同時推定した場合



ベバートン・ホルト型（最小二乗法）で自己相関を同時推定した場合

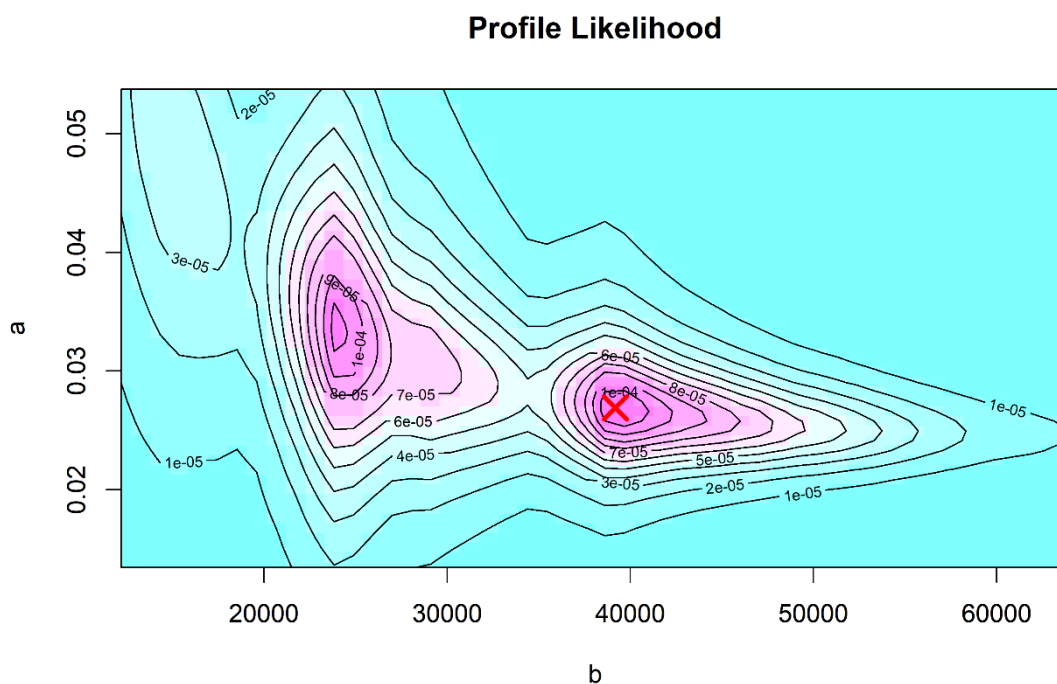


補足図 1-8. RI 型および BH 型の再生産関係で自己相関を同時推定した場合の推定パラメータのプロファイル尤度
×印は最尤推定されたパラメータ値。

補足資料 2 自己相関を同時推定した HS 型の不安定性

二段階推定と同時推定で自己相関係数の差が特に大きい場合には、推定パラメータの安定性を確認した上で同時推定による結果を用いたほうが良いとされている（FRA-SA2020-BRP01-6）。

補足図 1-8 から、自己相関同時推定の RI 型、BH 型では、再生産関係の推定パラメータのプロファイル尤度が一つの山になっていた。一方、自己相関同時推定の HS 型では同程度に尤度が高い山が二つ確認された（補足図 2-1）。



補足図 2-1. HS 型再生産関係で自己相関を同時推定した場合の推定パラメータのプロファイル尤度
 ×印は最尤法で推定されたパラメータ値

補足資料3 自己相関を同時推定した RI 型と BH 型の管理基準値案

それぞれの再生産関係に基づき算出される各種管理基準値案を用いて平衡状態までシミュレーションしたときの平均親魚量、漁獲がなかった場合を仮定した初期親魚量（SB0）に対する比、平均漁獲量、%SPR 換算した漁獲圧、漁獲割合、現状の漁獲圧（Fcurrent）に対する努力量の比の関係、および MSY を実現する漁獲圧における年齢別漁獲係数（Fmsy）を以下の表で示す。

補足表 3-1 RI 型（同時推定）の管理基準値案

管理基準値案	説明	親魚量 (千トン)	SB0 に 対する比 ※	漁獲量 ※※ (千トン)	漁獲圧※ ※※	漁獲 割合※ ※※※	現状の 漁獲圧に 対する比※ ※※※※ ※
目標管理基準値案	SBmsy	44	0.39	34	0.17	0.39	0.89
限界管理基準値案	SB0.6msy	13	0.12	21	0.08	0.51	1.54
禁漁水準案	SB0.1msy	1.5	0.01	3.4	0.05	0.57	2.00
MSY を実現する 漁獲圧	Fmsy	(0 歳, 1 歳, 2 歳, 3 歳以上) = (0.49, 0.70, 0.93, 0.93)					

補足表 3-2 BH 型（同時推定）の管理基準値案

管理基準値案	説明	親魚量 (千トン)	SB0 に 対する比 ※	漁獲量 ※※ (千トン)	漁獲圧※ ※※※	漁獲 割合※ ※※※	現状の 漁獲圧に 対する比※ ※※※※ ※
目標管理基準値案	SBmsy	132	0.31	53	0.34	0.26	0.46
限界管理基準値案	SB0.6msy	26	0.06	32	0.10	0.47	1.28
禁漁水準案	SB0.1msy	2.4	0.01	5.3	0.05	0.57	2.00
MSY を実現する 漁獲圧	Fmsy	(0 歳, 1 歳, 2 歳, 3 歳以上) = (0.26, 0.36, 0.49, 0.49)					

また、参考までに自己相関を二段階推定した場合の HS 型の結果についても以下の表で示す。（二段階法の RI 型、BH 型は直線関係となり、管理基準値案も非現実的な過大な値になるため示さない。）

補足表 3-3 HS 型（二段階推定）の管理基準値案

管理基準値案	説明	親魚量 (千トン)	SB0 に 対する比 ※	漁獲量 ※※ (千トン)	漁獲圧※ ※※※	漁獲 割合※ ※※※	現状の 漁獲圧 に対する比※ ※※※ ※
目標管理基準値案	SBmsy	124	0.26	65	0.26	0.31	0.62
限界管理基準値案	SB0.6msy	39	0.08	39	0.13	0.43	1.10
禁漁水準案	SB0.1msy	5.8	0.01	6.5	0.11	0.46	1.23
MSY を実現する 漁獲圧	Fmsy	(0 歳, 1 歳, 2 歳, 3 歳以上) = (0.34, 0.48, 0.65, 0.65)					

※漁獲がなかった場合を仮定した初期親魚量（SB0）に対する管理基準値案や禁漁水準案の比

※※管理基準値案や禁漁水準案に対応する漁獲圧の下での平衡状態における平均漁獲量

※※※管理基準値案や禁漁水準案に対応する漁獲圧を%SPR に換算した値

※※※※管理基準値案や禁漁水準案に対応する漁獲割合

※※※※※管理基準値案や禁漁水準案に対応する漁獲圧の現状の漁獲圧に対する比

補足資料 4 再生産関係の簡易的な MSE による評価

再生産関係の候補モデルとして考えられる 3 つの再生産関係（RI 型、BH 型、重み付き平均モデル）が、不確実性に対してどれだけ頑健か、また、それぞれの再生産関係を誤って選択した場合の影響（漁獲量や親魚量の減少リスク）を、簡易的な MSE（Management Strategy Evaluation、管理戦略評価、Punt 2001）により評価した。簡易 MSE の計算方法は「簡易的 MSE を用いた複数の管理基準値の頑健性の比較・HCR の検討（FRA-SA2020-BRP01-7）」を参照のこと。

MSE における漁獲量の計算手順は以下のとおりである。

- (1) 毎年資源評価を行う
- (2) MSY を実現する親魚量の計算用に選択した再生産関係をもとに漁獲管理規則（HCR）案の設定・将来予測を実施し、その漁獲管理規則（HCR）案で 2 年後の平均漁獲量を算出する
- (3) 真の再生産関係に基づく将来予測のなかで、(2)で算出された漁獲量で漁獲を行う

MSE を実施する再生産関係の組み合わせのシナリオは以下のとおりである。

- ① 真の再生産関係：RI 型、 漁獲量計算：BH 型
- ② 真の再生産関係：BH 型、 漁獲量計算：RI 型
- ③ 真の再生産関係：RI 型、 漁獲量計算：重み付き平均モデル
- ④ 真の再生産関係：BH 型、 漁獲量計算：重み付き平均モデル

漁獲量の算出に $\beta=0.8$ の HCR 案を用いた場合の結果は以下のとおりである。

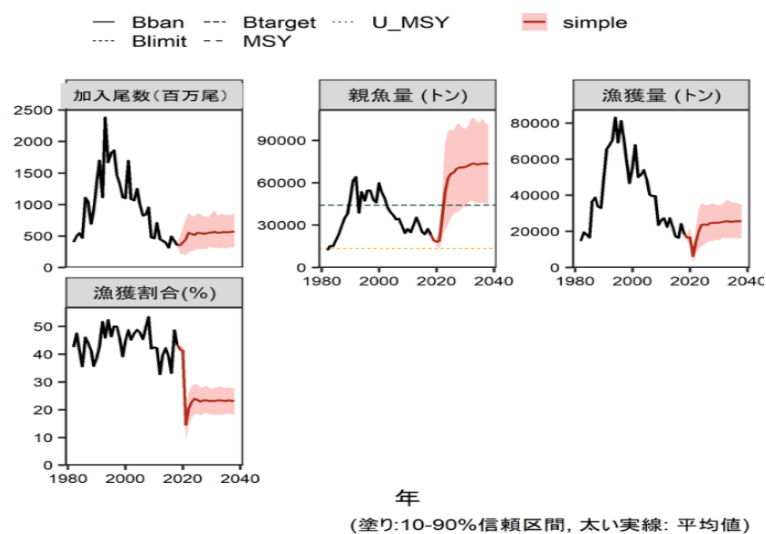
シナリオ①（真の再生産関係が RI 型で漁獲量計算が BH 型に基づく場合）では、10 年後に SBtarget 案を上回る確率は 92%、SBlimit 案を上回る確率は 100%、2021 年漁獲量は 6.3 千トンで、2018 年漁獲量（19 千トン）と比較すると大きく減少する（補足図 4-1）。シナリオ②（真の再生産関係が BH 型で漁獲量計算が RI 型に基づく場合）は、10 年後に SBtarget 案を上回る確率は 24%、SBlimit 案を上回る確率は 92%、2021 年漁獲量は 14 千トンである（補足図 4-2）。シナリオ③（真の再生産関係が RI 型で漁獲量計算が重み付き平均モデルの場合）では、10 年後に SBtarget 案を上回る確率は 70%、SBlimit 案を上回る確率は 99%、2021 年漁獲量は 11 千トンである（補足図 4-3）。シナリオ④（真の再生産関係が BH 型で漁獲量計算が重み付き平均モデルの場合）では、10 年後に SBtarget 案を上回る確率は 32%、SBlimit 案を上回る確率は 97%、2021 年漁獲量は 13 千トンである（補足図 4-4）。

以上から、重み付き平均モデルの再生産関係に基づいた漁獲管理規則案で漁獲管理した場合は、真の再生産関係が RI 型で漁獲量計算が BH 型の場合よりも 10 年後に SBtarget 案を上回る確率は 22% 小さく、SBlimit 案を上回る確率が 1% 小さいが、2021 年の漁獲量を大幅に削減するリスクは小さい（漁獲量計算が BH 型のほうが重み付き平均モデルよりも 4.7 千トン多く削減）。また、同様に真の再生産関係が BH 型で漁獲量計算が RI 型の場合と比較すると、10 年後に SBtarget を上回る確率は 8% 大きく、SBlimit を上回る確率が 5% 大きく、2021 年の漁獲量はほとんど変わらない（漁獲量計算が重み付き平均モデルのほうが RI 型の場合よりも 1 千トン多く削減）。そのため、本系群では、RI 型、BH 型再生産関係のどちらか一方を選択した場合と比較して、親魚量の減少リスクが中間的な値を示し、漁獲量の大幅な削減を行わない重み付き平均モデルの再生産関係を候補として提案する。

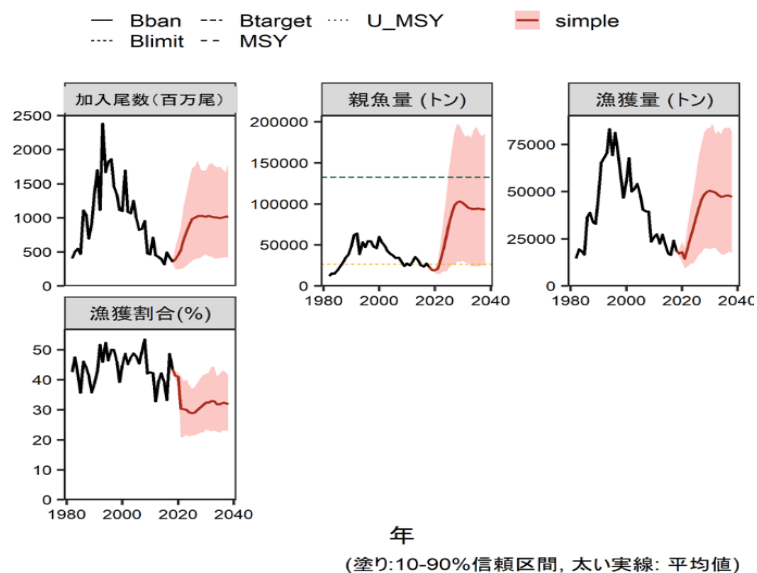
また、提案する重み付き平均モデルは、実際の再生産関係は BH 型または RI 型のどちらかであることを前提としている。そこで、真の再生産関係が重み付き平均モデルと異なった場合の影響を見るため、③④のシナリオについて β を変えた MSE を実施した。

漁獲量計算を重み付き平均モデルで行った場合の親魚量、漁獲量、目標管理基準値案を上回る確率、限界管理基準値案を上回る確率を補足表 4-1,4-2 で示す。真の目標管理基準値案まで 50% の確率で回復する年は、 β を 0.8 にした場合、真の再生産関係が RI 型では 2025 年（58%）、真の再生産関係が BH 型では 10 年以内には 50% に達しなかった（2031 年に 32%）。また、10 年間で真の目標管理基準値案まで回復する確率は 50% を超えるのは、真の再生産関係が RI 型では $\beta=0.9$ （63%）、真の再生産関係が BH 型では $\beta=0.6$ （54%）となった。その結果、ABC 計算に重み付き平均モデルを選択した場合、10 年後に（真の）目標管理基準値案を 50% 以上の確率で達成しようとする、真が BH 型では $\beta=0.6$ に下げる必要があるが、真が RI 型であった場合は $\beta=0.9$ で達成することができると考えられた。

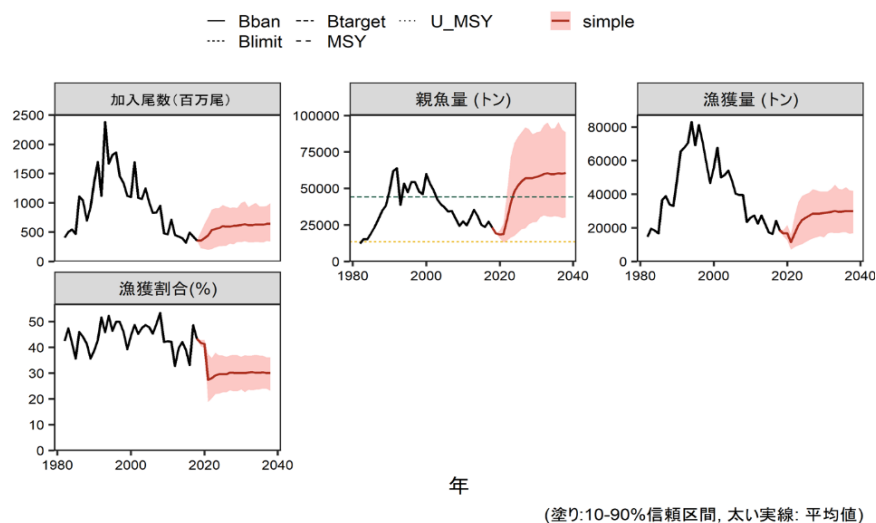
以上の結果から、真の再生産関係が BH 型である可能性を重視するのであれば、 β は 0.8 よりも小さい値をとることが望ましいと考えられる。



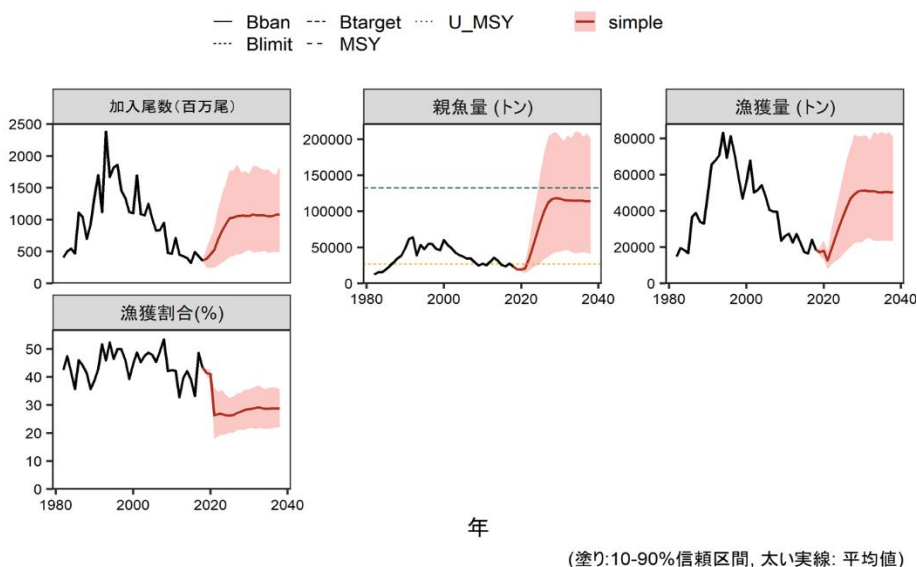
補足図 4-1. シナリオ①の MSE 将来予測（真の再生産関係が RI 型と仮定し、BH 型の漁獲管理規則案を用いた場合） 太実線は平均値、網掛けはシミュレーション結果の 80%が含まれる 80%予測区間。親魚量の図の破線は RI 型の管理基準値案（緑：目標管理基準値案、黄：限界管理基準値案）。2019 年と 2020 年の漁獲量は予測される資源量と F_{current} により仮定し、2021 年以降の漁獲は漁獲管理規則案に基づく（図 5）。安全係数 β には 0.8 を用いた。



補足図 4-2. シナリオ②の MSE 将来予測（真の再生産関係が BH 型と仮定し、RI 型の漁獲管理規則案を用いた場合） 太実線は平均値、網掛けはシミュレーション結果の 80%が含まれる 80%予測区間。親魚量の図の破線は BH 型の管理基準値案（緑：目標管理基準値案、黄：限界管理基準値案）。2019 年と 2020 年の漁獲量は予測される資源量と F_{current} により仮定し、2021 年以降の漁獲は漁獲管理規則案に基づく（図 5）。安全係数 β には 0.8 を用いた。



補足図 4-3. シナリオ③の MSE 将来予測（再生産関係が RI 型と仮定し、重み付き平均モデルの漁獲管理規則案を用いた場合） 太実線は平均値、網掛けはシミュレーション結果の 80%が含まれる 80%予測区間。親魚量の図の破線は RI 型の管理基準値案（緑：目標管理基準値案、黄：限界管理基準値案）。2019 年と 2020 年の漁獲量は予測される資源量と $F_{current}$ により仮定し、2021 年以降の漁獲は漁獲管理規則案に基づく（図 5）。安全係数 β には 0.8 を用いた。



補足図 4-4. シナリオ④の MSE 将来予測（真の再生産関係が BH 型と仮定し、重み付き平均モデルの漁獲管理規則案を用いた場合） 太実線は平均値、網掛けはシミュレーション結果の 80%が含まれる 80%予測区間。親魚量の図の破線は BH 型の管理基準値案（緑：目標管理基準値案、黄：限界管理基準値案）。2019 年・2020 年の漁獲量は予測される資源量と $F_{current}$ により仮定し、2021 年以降の漁獲は漁獲管理規則案に基づく（図 5）。安全係数 β には 0.8 を用いた。

補足表 4-1 シナリオ③の場合の β を変えた MSE の結果（真の再生産関係が RI 型、ABC 計算が重み付き平均モデル） 安全係数 β を 0.6～0.9 で 0.1 刻みで変更した場合の、漁獲管理規則案（図 5）での将来予測結果。2019 と 2020 年は F_{current} で漁獲し 2021 年から漁獲管理規則案による漁獲とした。

(a) 将来の親魚量が目標管理基準値案を上回る確率 (%)

β	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
0.9	0	0	0	11	30	41	49	56	59	60	61	64	63
0.8	0	0	0	13	33	49	58	63	68	68	70	70	70
0.7	0	0	0	16	37	56	66	71	74	76	77	78	77
0.6	0	0	0	17	45	67	75	79	82	85	86	87	87

(b) 将来の親魚量が限界管理基準値案を上回る確率 (%)

β	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
0.9	100	100	87	90	92	92	94	95	95	97	97	97	98
0.8	100	100	87	92	94	95	97	97	98	97	98	99	99
0.7	100	100	87	95	97	97	98	98	98	99	99	99	100
0.6	100	100	87	97	98	99	99	99	99	100	100	100	100

(c) 将来の親魚量 (千トン)

β	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
0.9	19	18	19	28	37	44	47	50	52	52	52	53	54
0.8	19	18	19	29	40	48	52	55	57	57	57	58	59
0.7	19	18	19	30	44	53	57	60	62	62	62	63	64
0.6	19	18	19	32	47	59	63	65	67	67	68	68	69

(d) 将来の漁獲量 (千トン)

β	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
0.9	17	17	13	17	22	25	26	28	29	29	29	30	30
0.8	17	17	11	16	21	24	26	27	28	28	28	29	29
0.7	17	17	10	15	21	24	25	26	27	27	27	28	28
0.6	17	17	9	14	19	23	24	25	25	25	26	26	26

補足表 4-2 シナリオ④の場合の β を変えた MSE の結果（真の再生産関係が BH 型、ABC 計算が重み付き平均モデル） 安全係数 β を 0.6～0.9 で 0.1 刻みで変更した場合の、漁獲管理規則案（図 5）での将来予測結果。2019 と 2020 年は F_{current} で漁獲し、2021 年から漁獲管理規則案による漁獲とした。

(a) 将来の親魚量が目標管理基準値案を上回る確率 (%)

β	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
0.9	0	0	0	0	2	7	12	20	24	25	25	26	24
0.8	0	0	0	0	2	7	15	24	29	33	33	31	32
0.7	0	0	0	0	2	9	20	30	37	41	41	40	42
0.6	0	0	0	0	4	13	26	39	49	50	52	54	54

(b) 将来の親魚量が限界管理基準値案を上回る確率 (%)

β	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
0.9	0	1	14	57	74	83	87	91	92	93	94	96	95
0.8	0	1	14	62	81	88	91	94	96	97	97	98	97
0.7	0	1	14	65	88	91	95	96	98	98	99	99	99
0.6	0	1	14	70	90	95	98	98	98	99	100	100	100

(c) 将来の親魚量 (千トン)

β	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
0.9	19	19	21	32	46	62	76	89	99	103	104	103	101
0.8	19	19	21	34	50	68	85	101	112	117	118	118	116
0.7	19	19	21	35	54	75	96	114	127	133	135	135	133
0.6	19	19	21	37	59	84	108	128	143	151	154	155	154

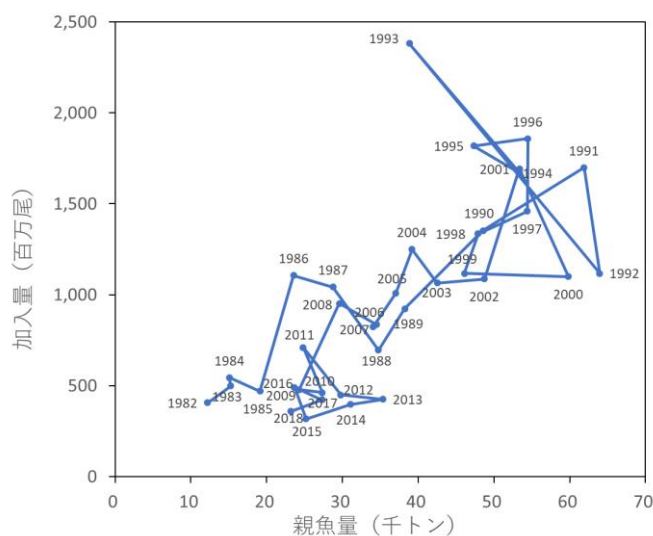
(d) 将来の漁獲量 (千トン)

β	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
0.9	17	18	14	20	26	31	37	42	47	49	50	50	50
0.8	17	18	13	19	25	31	37	42	47	49	51	51	51
0.7	17	18	11	18	24	30	36	42	47	49	51	51	51
0.6	17	18	10	16	22	29	35	40	45	48	50	51	51

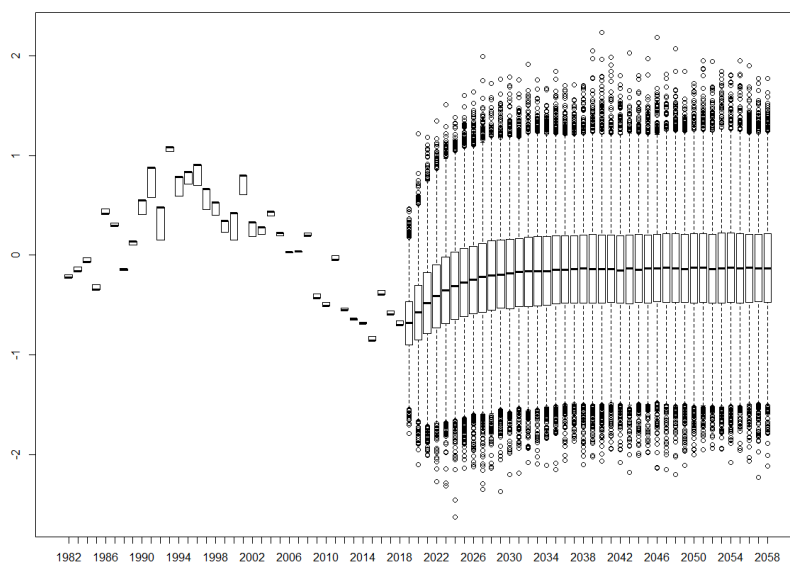
補足資料 5 将来予測における加入量の残差について

本系群では、2009 年以降、低豊度の加入が続いている（補足図 5-1）。再生産関係において、加入量の予測値に対する観測値（資源評価値）の残差が負に偏る傾向が見られ（図 1）、親魚量に対して低豊度の加入が続いているものと推測される。

重み付き平均モデルの将来予測における加入量の残差を補足図 5-2 に示す。この再生産関係式は自己相関係数の高い RI 型と BH 型を Akaike weight の比率により重み付き平均したものである。加入量の残差の傾向から、将来予測開始後の 3～4 年程度は加入の残差は負に偏る傾向が示された。このことから、将来予測開始後 3～4 年間程度においては、直近の低豊度の加入の状況を反映していると考えられた。



補足図 5-1. 令和元（2019）年度資源評価における親魚量と加入量の関係



補足図 5-2. 重み付き平均モデルの将来予測の場合の加入量の残差

補足資料 6 低加入シナリオの将来予測について

本系群の再生産関係においては、加入量の予測値に対する観測値の残差が近年では負に偏る傾向が見られ、親魚量に対して低水準の加入が続いているものと推測される。そこで将来も低水準の加入が続くことを仮定したシナリオを2つ検討し、将来予測を行った。将来予測の加入量は、令和元年度の資源評価で将来予測のシナリオに直近年を除く過去5年（2013～2017年）のRPSを用いたことを引き継ぎ、2013～2017年の加入の残差をリサンプリングするとし、以下のように仮定した。

【シナリオ①】低加入が5年間続いた後、徐々に加入量が増加する場合

【シナリオ②】低加入が将来にわたり続く場合

【シナリオ①】低加入が5年間続いた後、徐々に加入量が増加するシナリオ

将来予測の加入は、再生産関係からの予測値と過去の観測値の残差のランダムリサンプリングによって与える。この残差のランダムリサンプリングは、過去に遡って時代を区切って以下のように実施した（バックワードリサンプリング、補足図 6-1）

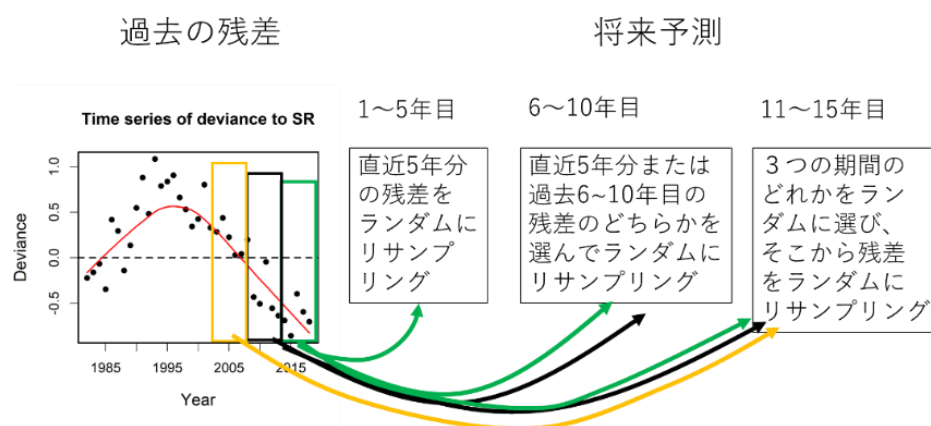
- (1) 将来予測の1～5年目；資源評価の最新5年分（2013～2017年）の残差から重複を許してリサンプリングする。
- (2) 将来予測の6～10年目；資源評価の最新5年分（2013～2017年）の残差、または、さらに過去に遡った5年分（2008～2012年）の残差のどちらかを選び、選んだほうの5年分の残差から重複を許してリサンプリングする。
- (3) 将来予測の11年目以降；上記の手順のように5年分ずつリサンプリングできる範囲を追加する。

シナリオ①で $\beta = 0.8$ とする場合の将来予測の結果は補足図 6-2 に示す。2031年に目標管理基準値案を上回る確率は22%、漁獲量は24トンとなった（補足表 6-1）。

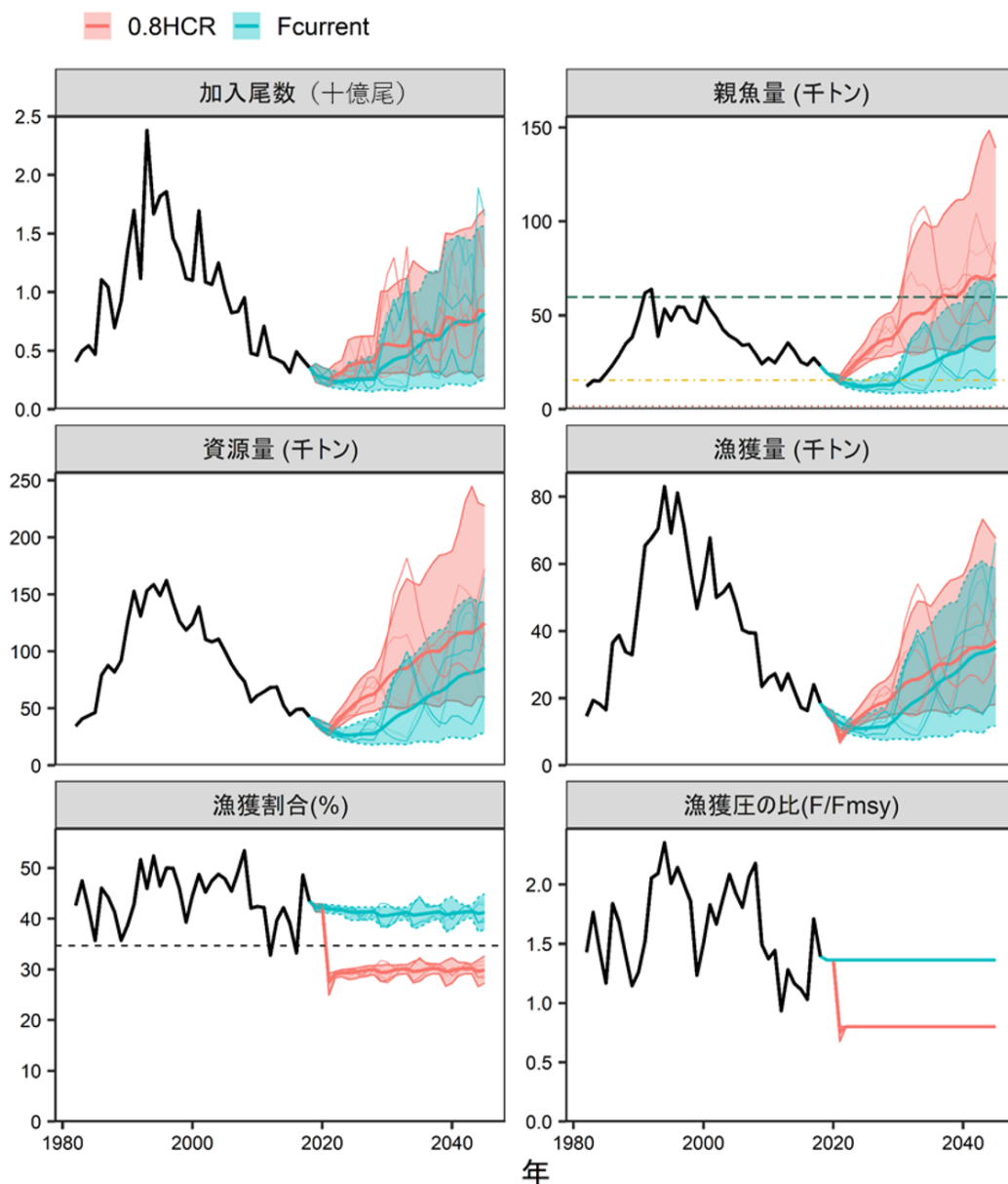
【シナリオ②】低加入が将来にわたり続く場合シナリオ

将来予測の加入は、2013～2017年の加入の残差をリサンプリングして与え続けた。シナリオ②で $\beta = 0.8$ とする場合の将来予測の結果は補足図 6-3 に示す。2031年の目標管理基準値案を上回る確率は0%、漁獲量は21トンとなった（補足表 6-2）。

一方、通常の将来予測（平均的な加入が続く場合、すなわちバックワードリサンプリングおよび残差リサンプリングは行わない）で $\beta = 0.8$ の場合、2031年に目標管理基準値案を上回る確率は57%、漁獲量は36千トンであった（図 6 および表 4、表 6）。以上の結果から、今後、上述の2つのシナリオのように低水準の加入が続く場合は、平均的な加入が続く場合に比べて、親魚量が目標管理基準値案に回復するまでに長い年数がかかり、漁獲量も低調に推移する期間が長いことが推察された。



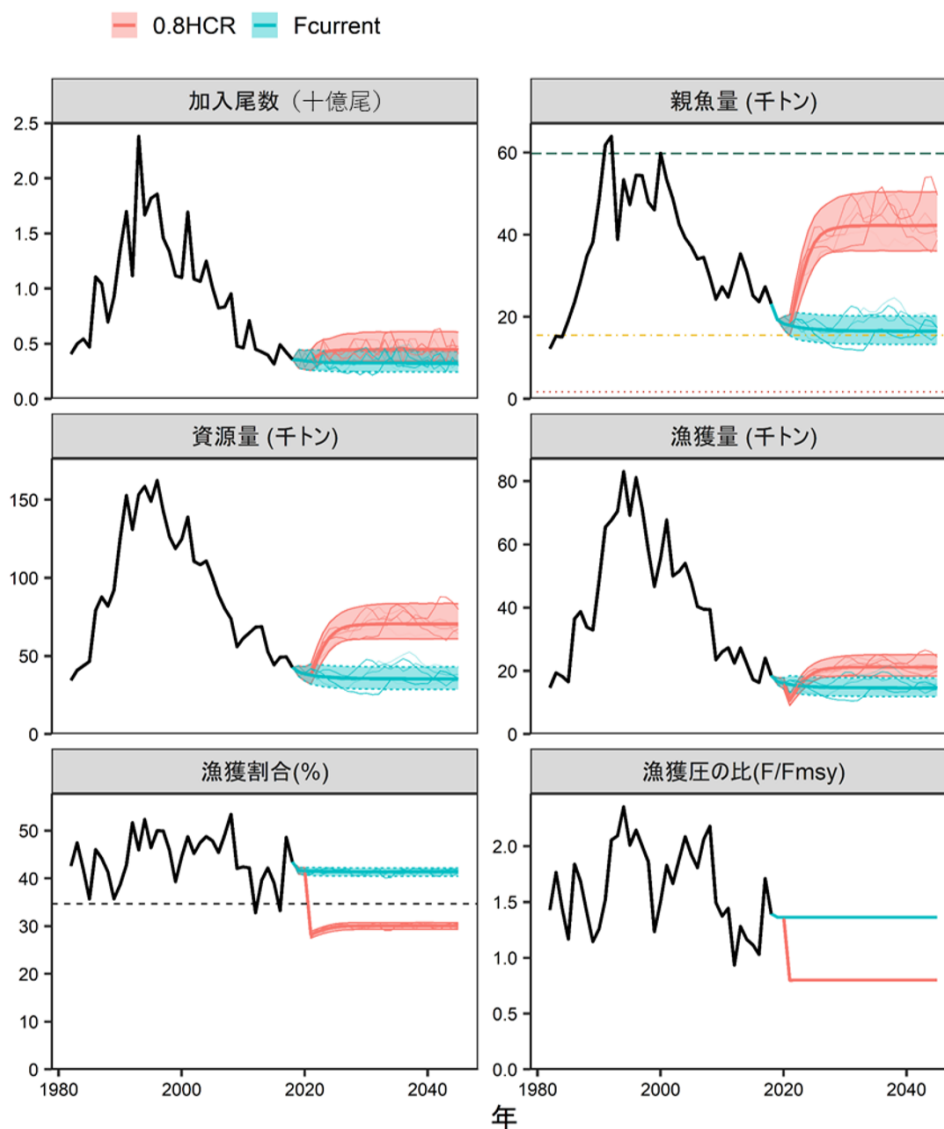
補足図 6-1. バックワードリサンプリングの概念図



(塗り:5-95%信頼区間, 太い実線: 平均値, 細い実線: シミュレーションの1例)

補足図 6-2. シナリオ①で漁獲管理規則案を用いた将来予測（赤色）と現状の漁獲圧で漁獲を続けた場合の将来予測（緑色）の比較

太実線は平均値、網掛けはシミュレーション結果の90%が含まれる90%予測区間、細線は3通りの将来予測の例示である。親魚量の図の緑破線は目標管理基準値案、黄破線は限界管理基準値案、赤破線は禁漁水準案を示す。漁獲割合の図の破線は U_{msy} を示す。2019年と2020年の漁獲量は予測される資源量と $F_{current}$ により仮定し、2021年以降の漁獲は漁獲管理規則案に基づく（図5）。安全係数 β には0.8を用いた。



(塗り:5-95%信頼区間, 太い実線: 平均値, 細い実線: シミュレーションの1例)

補足図 6-3. シナリオ②で漁獲管理規則案を用いた将来予測（赤色）と現状の漁獲圧で漁獲を続けた場合の将来予測（緑色）の比較

太実線は平均値、網掛けはシミュレーション結果の 90%が含まれる 90%予測区間、細線は 3 通りの将来予測の例示である。親魚量の図の緑破線は目標管理基準値案、黄破線は限界管理基準値案、赤破線は禁漁水準案を示す。漁獲割合の図の破線は U_{msy} を示す。2019 年と 2020 年の漁獲量は予測される資源量と $F_{current}$ により仮定し、2021 年以降の漁獲は漁獲管理規則案に基づく（図 5）。安全係数 β には 0.8 を用いた。

補足表 6-1 シナリオ①（低加入が 5 年間続いた後、徐々に加入量が増加する）の β を変えた将来予測の結果

安全係数 β を 0.5～1.0 で 0.1 刻みで変更した場合の、漁獲管理規則案（図 5）での将来予測結果。2019 年と 2020 年は F_{current} で漁獲し、2021 年から漁獲管理規則案による漁獲とした。

(a) 将来の親魚量が目標管理基準値案を上回る確率 (%)

β	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2041	2051
1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	38	46
0.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	10	51	57
0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	3	22	62	67
0.7	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4	6	12	36	67	73
0.6	0	0	0	0	0	0	0	4	10	13	16	27	46	72	80
0.5	0	0	0	0	0	0	2	17	31	35	35	48	58	78	87
0.4	0	0	0	0	0	0	16	43	54	54	51	65	67	86	94
0.3	0	0	0	0	0	7	54	83	86	83	81	88	88	96	98
0.2	0	0	0	0	0	35	94	100	100	99	99	100	100	100	100
0.1	0	0	0	0	2	81	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.0	0	0	0	0	11	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100

(b) 将来の親魚量が限界管理基準値案を上回る確率 (%)

β	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2041	2051
1.0	100	100	42	95	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.9	100	100	42	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.8	100	100	42	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.7	100	100	42	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.6	100	100	42	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.5	100	100	42	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.4	100	100	42	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.3	100	100	42	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.2	100	100	42	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.1	100	100	42	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.0	100	100	42	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

(c) 将来の親魚量 (千トン)

β	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2041	2051
1.0	19	17	15	18	19	20	22	24	26	27	27	30	35	55	61
0.9	19	17	15	19	21	23	26	28	30	32	32	36	41	62	68
0.8	19	17	15	20	23	26	30	33	36	37	38	42	47	69	75
0.7	19	17	15	21	26	30	35	39	42	43	44	48	54	77	84
0.6	19	17	15	22	28	34	40	45	49	50	51	55	61	86	94
0.5	19	17	15	23	31	39	46	52	56	58	58	62	70	96	106
0.4	19	17	15	24	35	45	53	61	65	66	67	71	79	108	119
0.3	19	17	15	26	38	51	62	70	74	76	76	81	90	122	134
0.2	19	17	15	27	43	58	71	80	85	87	87	92	102	138	153
0.1	19	17	15	29	47	66	82	93	98	100	100	106	117	157	176
0	19	17	15	31	52	76	95	107	113	115	116	122	135	182	207

(d) 将来の漁獲量 (千トン)

β	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2041	2051
1.0	16	14	10	12	13	14	15	16	17	17	19	21	23	35	38
0.9	16	14	9	11	13	14	15	17	18	18	20	22	24	35	38
0.8	16	14	8	11	13	14	16	17	18	19	20	22	24	35	38
0.7	16	14	8	10	12	14	16	18	19	19	20	22	24	34	37
0.6	16	14	7	9	12	14	16	18	19	19	20	22	24	33	35
0.5	16	14	6	9	11	13	15	17	18	18	19	21	22	30	33
0.4	16	14	5	7	10	12	14	16	16	17	18	19	20	27	30
0.3	16	14	4	6	8	11	12	14	14	15	15	16	17	23	26
0.2	16	14	2	4	6	8	10	11	11	11	12	12	13	18	20
0.1	16	14	1	2	3	5	6	6	6	7	7	7	8	10	12
0	16	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

補足表 6-2 シナリオ②（低加入が将来にわたって続く）の β を変えた将来予測の結果
 安全係数 β を 0.5～1.0 で 0.1 刻みで変更した場合の、漁獲管理規則案（図 5）
 での将来予測結果。2019 年と 2020 年は F_{current} で漁獲し、2021 年から漁獲
 管理規則案による漁獲とした。

(a) 将来の親魚量が目標管理基準値案を上回る確率 (%)

β	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2041	2051
1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	4	4	5	5
0.6	0	0	0	0	0	0	2	8	14	18	21	23	23	25	25
0.5	0	0	0	0	0	3	26	44	45	42	41	43	43	42	42
0.4	0	0	0	0	0	29	82	89	85	79	77	79	80	80	80
0.3	0	0	0	0	2	79	100	100	100	99	99	99	99	99	99
0.2	0	0	0	0	17	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.1	0	0	0	0	49	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.0	0	0	0	0	85	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

(b) 将来の親魚量が限界管理基準値案を上回る確率 (%)

β	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2041	2051
1.0	100	100	96	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.9	100	100	96	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.8	100	100	96	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.7	100	100	96	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.6	100	100	96	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.5	100	100	96	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.4	100	100	96	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.3	100	100	96	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.2	100	100	96	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.1	100	100	96	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.0	100	100	96	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

(c) 将来の親魚量 (千トン)

β	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2041	2051
1.0	19	18	18	22	25	27	29	30	31	31	31	31	32	32	32
0.9	19	18	18	23	27	31	33	35	36	36	36	36	37	37	37
0.8	19	18	18	24	30	35	38	40	41	41	42	42	42	42	42
0.7	19	18	18	25	33	39	44	46	47	47	48	48	48	48	48
0.6	19	18	18	27	36	44	50	52	54	54	54	55	55	55	55
0.5	19	18	18	29	40	50	57	60	61	61	62	62	63	63	63
0.4	19	18	18	30	44	57	65	68	69	70	70	71	71	72	72
0.3	19	18	18	32	49	65	74	78	79	79	80	81	82	82	82
0.2	19	18	18	34	54	73	85	89	89	90	91	93	94	94	94
0.1	19	18	18	36	60	83	98	102	102	102	104	107	109	109	110
0	19	18	18	38	67	95	113	118	117	117	120	124	127	128	129

(d) 将来の漁獲量 (千トン)

β	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2041	2051
1.0	17	16	13	15	16	18	19	19	19	20	20	20	20	20	20
0.9	17	16	12	14	16	18	19	20	20	20	21	21	21	21	21
0.8	17	16	11	14	16	18	20	20	21	21	21	21	21	21	21
0.7	17	16	10	13	16	18	20	20	21	21	21	21	21	21	21
0.6	17	16	8	12	15	18	19	20	20	20	21	21	21	21	21
0.5	17	16	7	11	14	17	18	19	19	19	20	20	20	20	20
0.4	17	16	6	9	13	15	17	17	18	18	18	18	18	18	18
0.3	17	16	5	7	10	13	14	15	15	15	15	16	16	16	16
0.2	17	16	3	5	8	10	11	11	12	12	12	12	12	12	12
0.1	17	16	2	3	4	6	6	7	7	7	7	7	7	7	7
0	17	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0