

令和 4（2022）年度サワラ瀬戸内海系群の 管理基準値等に関する研究機関会議資料

水産研究・教育機構 水産資源研究所 水産資源研究センター

要 約

令和 4 年度の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の候補として、資源評価により推定された 1987～2020 年の親魚量と加入量の情報に対し、加入の残差の自己相関を考慮しないホッケー・スティック型再生産関係（HS）の適用を提案する。HS 再生産関係のパラメータ推定方法には最小二乗法の使用を提案する。再生産関係に基づき算出される SBmsy（12.9 千トン）を目標管理基準値として、SB0.6msy（5.7 千トン）を限界管理基準値として、SB0.1msy（0.9 千トン）を禁漁水準としてそれぞれ提案する。目標管理基準値案（SBmsy）を達成する漁獲圧（Fmsy）は、現状（2018～2020 年の漁獲係数から算出した Fcurrent）の 0.99 倍である。

親魚量 (千トン)	現状の親魚量*1 に対する比	初期親魚量 に対する比	期待できる 平均漁獲量 (千トン)	現状の漁獲圧 に対する比*2	説 明
目標管理基準値案					
12.9	2.01	0.30	5.6	0.99	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					
5.7	0.91	0.13	3.4	1.69	MSY の 60%の漁獲 が得られる親魚量 （SB0.6msy）
禁漁水準案					
0.9	0.14	0.02	0.6	2.06	MSY の 10%の漁獲 が得られる親魚量 （SB0.1msy）
2021 年					
6.3	1.00	0.15	2.8	—	2021 年の値

*1 現状の親魚量とは 2021 年の親魚量（6.3 千トン）である。

*2 現状の漁獲圧とは令和 4 年度の資源評価における Fcurrent に相当する漁獲圧である。

1. 再生産関係

1-1) 使用するデータセット

本資源の再生産関係式の設定は「令和 4（2022）年度漁獲管理規則および ABC 算定のための基本指針（FRA-SA2022-ABCWG02-01）」に従い、以下のデータセットを使用して実施した。直近の 2021 年の加入量は、当該年の推定親魚量と過去（1987～2020 年）の再生産成功率の中央値による計算値であることから使用しなかった。解析には R パッケージ `frasyr`（2.2.0.3）を用いた。`frasyr` で用いた式の詳細は「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 4 年度研究機関会議版）（FRA2022-ABCWG02-04）」を参照のこと。

データセット	基礎情報、関係調査等
加入量・親魚量	令和 4 年度サワラ瀬戸内海系群の資源評価(水産庁・水産機構)

1-2) 再生産関係の検討

本資源の管理基準値案の算出と将来予測に使用する再生産関係として、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）型再生産関係を候補とした（補足資料 1）。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。また、加入量の残差に対する自己相関を考慮すべきか検討した。自己相関パラメータの推定方法について、最適化方法に最小二乗法を用いた際は再生産関係式のパラメータを推定した後に自己相関係数を推定する手法（二段階推定法）または再生産関係式のパラメータと同時に推定する手法（同時推定法）を用いた。最適化方法に最小絶対値法を用いた際は二段階推定法を使って自己相関パラメータを推定した。

本資源で推定された親魚量と加入量に対して各再生産関係の候補を適用して得られた結果から、RI 型と BH 型を仮定した場合には親魚量が増加するほど加入は増え続けるといった右肩上がりの曲線が描かれ、明確な密度効果が認められないことが分かった（補足資料 2）。これらの再生産関係を本資源に適用すると加入量や MSY を実現する親魚量など管理基準値の過大な外挿に繋がるおそれがあるため、以降の検討では候補から除外した。一方、HS 型を当てはめた場合には密度効果が認められたため候補に残した。再生産関係の検討候補を表 1a に示す。

HS 型を当てはめた場合において補正赤池情報量規準（AICc）を比較すると、最小二乗法を用いた場合に AICc が最も低くなった（表 1a）。しかし、AICc の差を示す $\Delta AICc$ の値は小さく、候補間で予測力の違いは小さいと考えられた。パラメータ推定値についても候補間で比較したところ大きな違いはみられなかった（補足表 1-1、補足図 1-1）。従って、これら再生産関係の候補は同等の性能を持つと考えられた。そのため、AICc が低かった最小二乗法を用いた HS 型再生産関係の妥当性について以後から検討することとした。

本資源に HS 型再生産関係モデルを当てはめた場合、加入残差の自己相関係数が低く（表 1a）、自己相関プロットからも明確な自己相関の存在は認められなかった（補足図 1-2）。こ

のことから、本資源においては加入残差の自己相関を考慮する必要はないと判断した。最適化手法について、最小二乗法を用いて最適化する場合には残差の頻度分布が正規分布に従っている必要がある。そこで本資源のデータに対して正規性テストを行った結果、正規分布を仮定して問題ないと考えられた（補足図 1-3）。次に、特定のデータがパラメータ推定値に影響を及ぼしていないか調べるために、パラメータ推定値を初期値としたジャックナイフ解析を行った。その結果、特定年のデータが推定値に及ぼす影響は小さいと考えられた（補足図 1-4、1-5）。一方で、ブートストラップ解析を行って各パラメータの推定精度を調べた結果、再生産関係の折れ点の親魚量であるパラメータ b の信頼区間が広いことが示された（補足図 1-6、1-7）。そのため、利用データ数がパラメータ推定値や管理基準値案にどの程度影響を及ぼすのか感度試験を実施した（補足資料 3）。この感度試験では初期値の扱い方が先述したジャックナイフ解析と異なっており、それらの結果は補足資料 3 と後述するまとめに示した。最後に、尤度プロファイルを用いてパラメータ推定における初期値依存の局所解が存在するか調べたところ、尤度の差が 0.001 よりも小さい範囲で HS 型再生産関係の折れ点であるパラメータ b が複数推定されることが確認された（補足図 1-8）。そのため、初期値を変えた 300 回の繰り返し計算で得られた中央値とすることで推定値を得た。

1-3) 再生産関係の候補

上述の通り、本系群の再生産関係の候補としては、「再生産関係の決定に関するガイドライン（FRA-SA2022-ABCWG02-05）」の a （予測力）および b （生物学的妥当性）の基準に従い、最小二乗法で最適化した自己相関を用いない HS 型再生産関係式を候補として提案する（図 1）。この再生産関係のパラメータ推定値を表 1b に示した。

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）に対応する管理基準値案等の算出、および将来予測は、「令和 4（2022）年度漁獲管理規則および ABC 算定のための基本指針（FRA-SA2022-ABCWG02-01）」の 1 系資源の管理規則に従い、1-3) で候補とした再生産関係と、令和 4 年度の資源評価における各種設定（自然死亡係数、成熟率、年齢別平均体重、選択率）を使用して実施した（表 2）。選択率は令和 4 年度の資源評価における現状の漁獲圧（ $F_{current}$ ）の選択率と同値とした。本系群では、平均世代時間（4.3 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、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。各値を推定するための計算回数は 5,000 回とした。

2-2) 管理基準値案と禁漁水準案

目標管理基準値（ SB_{target} ）として MSY 水準における親魚量（ SB_{msy} : 12.9 千トン）、限界管理基準値（ SB_{limit} ）として MSY の 60%の漁獲が得られる親魚量（ $SB_{0.6msy}$: 5.7 千ト

ン)、禁漁水準 (SBban) として MSY の 10% の漁獲が得られる親魚量 (SB0.1msy : 0.9 千トン) を用いることを提案する。これらの基準値案について、漁業がなかった場合を仮定した初期親魚量 (SB0) 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、対応する漁獲圧の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 SBmsy は SB0 の 30% 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 5.6 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 : Fmsy) の、現状の漁獲圧に対する比 (Fmsy/Fcurrent) は 0.99 で、その時の漁獲割合 (Umsy) は 29% である。限界管理基準値として提案する SB0.6msy は SB0 の 13%、禁漁水準として提案する SB0.1msy は SB0 の 2% である。

様々な F 値における平衡状態となる親魚量、および各親魚量に対する年齢別漁獲量の平均値との関係を示した図 (漁獲量曲線) を図 3 に示す。親魚量が SBlimit 以下では 1 歳および 2 歳魚が殆どを占め、SBmsy 達成時においても多くを占めている。しかし、親魚量がさらに増加するにつれて高齢魚の比率が高くなる傾向がみられる。

2-3) 神戸プロット

目標管理基準値案である SBmsy と、その時の漁獲圧 Fmsy を基準にした神戸プロットを図 4 に示す。本系群における漁獲係数 (F 値) は 1987~2020 年では Fmsy 以上と判断される。しかし、F 値は 2010 年から減少しており、2021 年には Fmsy より低くなったと判断される。現状の親魚量 (2021 年の親魚量 : 6.3 千トン) は限界管理基準値案を上回っているが、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、限界管理基準値案、および禁漁水準案の比は、それぞれ 2.01、0.91 および 0.14 である。

2-4) 漁獲管理規則案

本資料で提案する漁獲管理規則は、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) を変えるルールであり、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。F 値の上限は Fmsy に調整係数 β を乗じたものである。限界管理基準値案および禁漁水準案に標準値 (SBlimit に SB0.6msy、SBban に SB0.1msy) を用いた場合の漁獲管理規則案における親魚量と漁獲係数の関係を図 5a に、漁獲管理規則案で漁獲した場合に期待できる平均的な漁獲量との関係を図 5b に示す。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 を用いた。また、漁獲管理規則案による管理の挙動を示すために、漁獲管理規則案に基づく漁獲係数 F を用いた場合の SPR (F) と再生産関係との関係を補足資料 4 に示した。

2-5) 漁獲管理規則案に基づく資源の将来予測

(1) 調整係数 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て、 β を 0.8 とした漁獲管理規則案 (図 5a) 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。なお今回の将来予測では、漁獲管理規則案による漁獲制御は 2023 年から開始

し、2022 年の漁獲量は予測資源量と現状の漁獲圧 ($F_{current}$) から計算した。予測される 2023 年の親魚量は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ものとした。 $\beta=0.8$ の場合、 βF_{msy} での漁獲圧は、現在の漁獲努力量の約 0.8 倍の漁獲圧に相当する。中長期的には、 βF_{msy} での漁獲の継続により漁獲量および親魚量は平均的には MSY 水準へ向かって推移していくと予測される。

本資源では近年 0 歳魚が主な漁獲対象になっていないことが加入量の推定を難しくさせている（安田ほか、印刷中）。そのため、令和 4 年度資源評価の最新年にあたる 2021 年の加入量推定値は当該年の推定親魚量と過去（1987～2020 年）の再生産成功率の中央値から求められている（安田ほか、印刷中）。2021 年の再生産成功率の仮定が将来予測に与える影響を調べるための感度試験を行った（補足資料 5）。その結果、2021 年の再生産成功率が過去最低値であった場合、2022～2023 年の平均親魚量は横ばい傾向になると予測された。漁獲管理規則による管理開始後は、再生産成功率の仮定によらず、平衡状態となる親魚量に到達するまで平均親魚量は増加する予測となった。

（2）調整係数 β を変えた場合

漁獲管理規則案を用いた将来予測について、調整係数 β を 0.5～1.0 の間で変えた場合の親魚量が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、禁漁水準案を上回る確率、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。それぞれの表には、現状の漁獲圧 ($F_{current}$: $\beta=1.01$ に相当) で漁獲を継続した場合の結果も比較のため示した。本資源の親魚量は 2023 年時点で目標管理基準値案を下回っているが、 β が標準値の 0.8 であれば漁獲管理規則案での漁獲開始から 10 年後の 2033 年には 66%の確率で目標管理基準値案を上回ると予測された（表 4）。 β が 0.9 以下であれば、2033 年には 50%以上の確率で目標管理基準値案以上に親魚量を維持できると予測されたが、 β が 1 の場合には親魚量が目標管理基準値案を上回る確率が 50%を下回った。なお、 β が 1 であっても限界管理基準値案以上に親魚量を維持できることが示された（表 5）。なお、2021 年の再生産成功率が過去最低値であった場合でも、 β が 0.9 以下であれば 2033 年には 50%以上の確率で目標管理基準値案以上に親魚量を維持できると予測された（補足資料 5）。2023 年以降の平均親魚量は β が低いほど多くなった（表 7）。2023 年以降の平均漁獲量は β が 0.7 以上であれば現状（2021 年：2.7 千トン）より多くなった（表 8）。表 9 に、上述の結果の要約と、親魚量や漁獲量に係るリスク評価の結果を示した。親魚量が限界管理基準値案を下回るリスクや漁獲量が半減するリスクは漁獲管理規則案に沿った漁獲を継続した場合は低いと予測された。

3. まとめ

本資源では、資源評価で推定された 1987～2020 年の加入量および親魚量に基づき、再生産関係モデルとして自己相関を考慮しない HS 型再生産関係式を適用し、そのパラメータを最小二乗法により推定することを提案する。

目標管理基準値案は MSY を実現する資源水準と定められていることから、上記の再生産関係から推定される SB_{msy} （12.9 千トン）とすることを提案する。限界管理基準値案およ

び禁漁水準案にはそれぞれ標準値である SB0.6msy (5.7 千トン) および SB0.1msy (0.9 千トン) を提案する。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。 β が 0.9 以下であれば、管理開始から 10 年後となる 2033 年の平均親魚量が 50%以上の確率で MSY を実現する水準を上回ると予測される。

本資源では、親魚量が多い期間のデータが不足していることから、HS 型再生産関係の推定パラメータ b の不確実性が高いと考えられた。一方で、MSY を実現する漁獲圧の値は頑健であるため、 b の不確実性は管理開始時の予測平均親魚量や予測平均漁獲量に及ぼす影響は小さいと考えられた (補足資料 3)。漁獲管理規則案に基づく漁獲を続けて親魚量を現状の水準以上に維持することが、再生産関係の頑健な推定値を将来的に得るために必要と考えられる。

本資源では、将来予測で設定した年齢別の選択率や体重が保たれ、再生産関係から期待される平均的な加入が得られれば、漁獲管理規則案に基づく漁獲を続けていくことにより、目標管理基準値案へ到達できると予測された。その一方で、加入量が再生産関係の 90%予測区間の下限付近まで低くなる等、期待通りの加入が得られない場合には漁獲管理規則案による漁獲を行っても資源が減少する場合もみられることも示された (補足資料 4)。また、本資料の将来予測は 2021 年の再生産成功率が過去の中央値であるという仮定に基づいている (補足資料 5)。以上のことから、2021 年の再生産成功率の下方修正や将来の加入状況の悪化に備えた予防的な管理方策の検討も重要と考えられる。

4. 今後の検討事項

本資源の資源評価結果に不確実性をもたらす要因として、資源密度が個体体重に与える影響や環境変化が回遊範囲に与える影響等が考えられる。これらの要因解明に向けた資源生態学・水産海洋学的な研究が必要である。

5. 引用文献

- ABCWG (2022) 令和 4 (2022) 年度漁獲管理規則および ABC 算定のための基本指針. FRA-SA2022-ABCWG02-01
- ABCWG (2022) 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 4 年度研究機関会議版). FRA-SA2022-ABCWG02-04.
- ABCWG (2022) 再生産関係の決定に関するガイドライン. FRA-SA2022-ABCWG02-05.
- 安田十也、片町太輔、河野悌昌、高橋正知、渡邊千夏子、渡井幹雄、木下順二、井元順一 (印刷中) 令和 4 (2022) 年度サワラ瀬戸内海系群の資源評価. FRA-SA2022-RC03-03.

(執筆者：安田十也、片町太輔、河野悌昌、高橋正知、渡邊千夏子、渡井幹雄、
木下順二、井元順一)

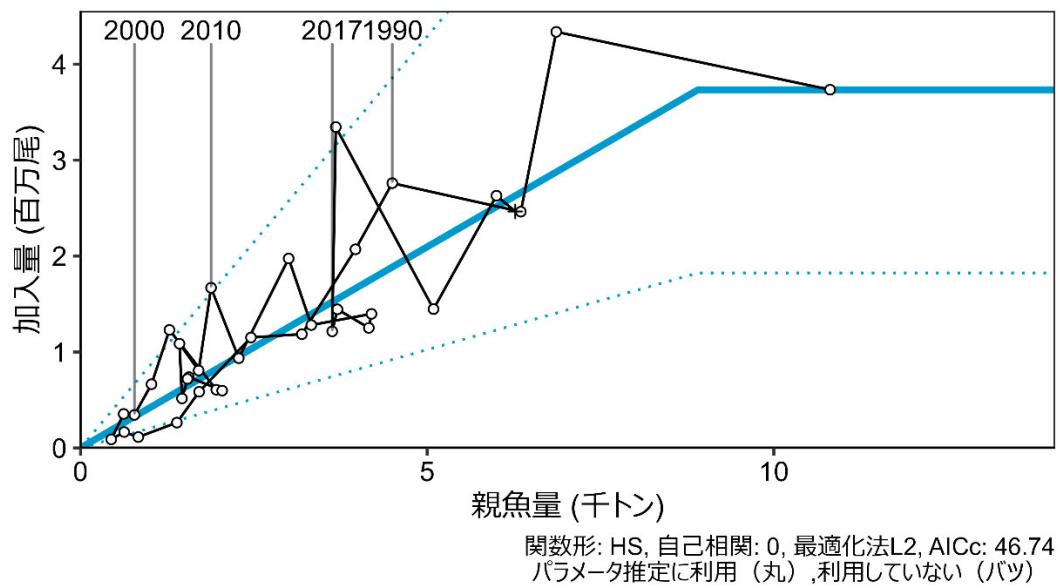


図 1. 再生産関係

再生産関係には自己相関を考慮しないホッカー・スティック (HS) 型再生産関係式を用い、最小二乗法によりパラメータ推定を行った。丸印は分析に使用した 1987～2020 年の親魚量と加入量を示す。図中の数字は加入群の年級 (生まれ年) を示す。パラメータ推定の際は加入尾数の推定値に不確実性の高い直近年 (2021 年) のデータを除いた。図中の再生産関係式 (青実線) の上下の点線は、仮定されている再生産関係において観察データの 90% が含まれると推定される範囲である。

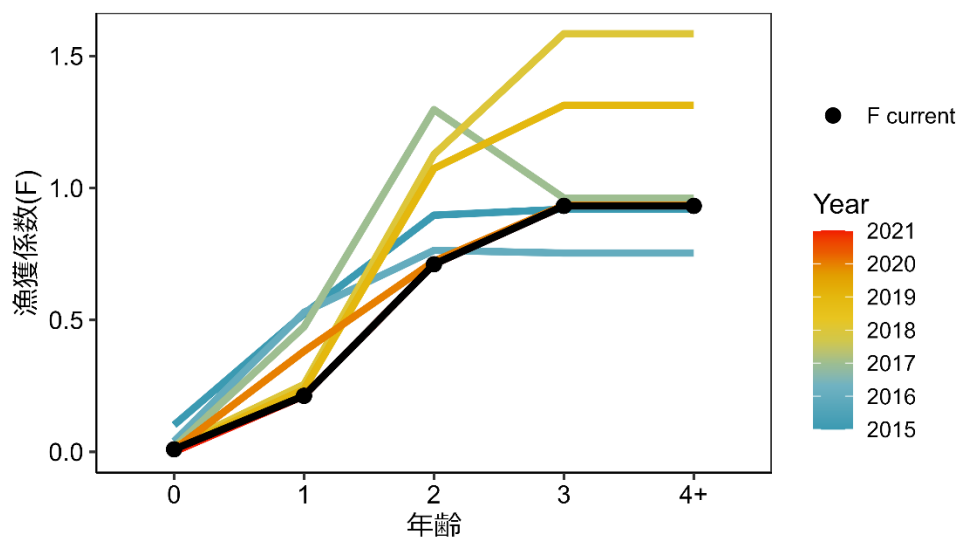


図 2. 年齢別の漁獲係数 (F 値)

2015 年以降の各年の年齢別 F 値を示す。黒線は現状の漁獲圧 (Fcurrent) である。

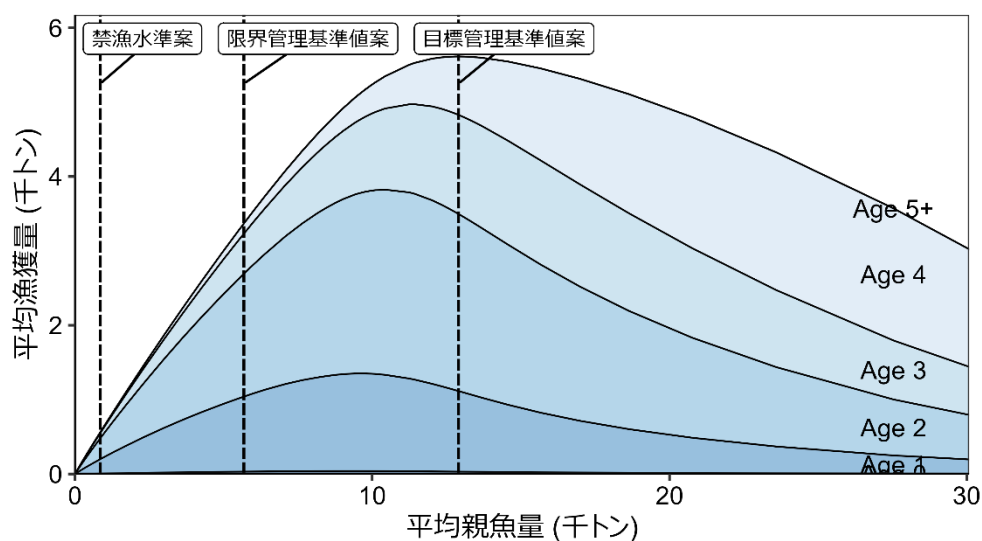


図 3. 管理基準値案および禁漁水準案と年齢別漁獲量曲線の関係

将来予測シミュレーションにおける平衡状態での、親魚量に対する年齢別漁獲量の平均値と、それぞれの管理基準値案の位置関係を示す。なお、漁業がなかった場合を仮定した初期親魚量 (SB0) は 43 千トンである。

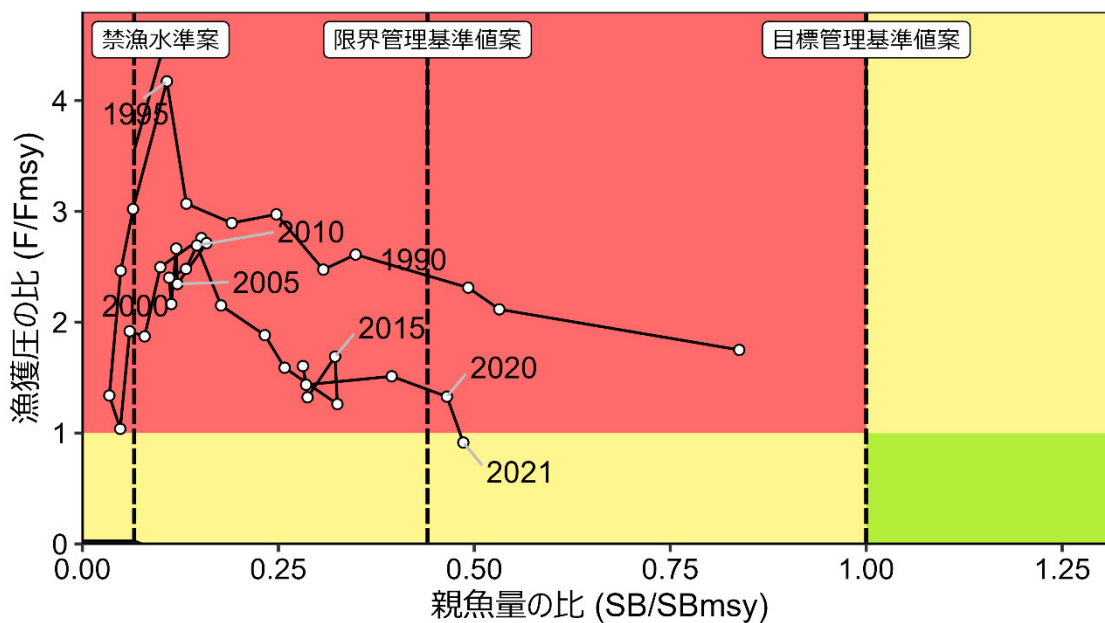
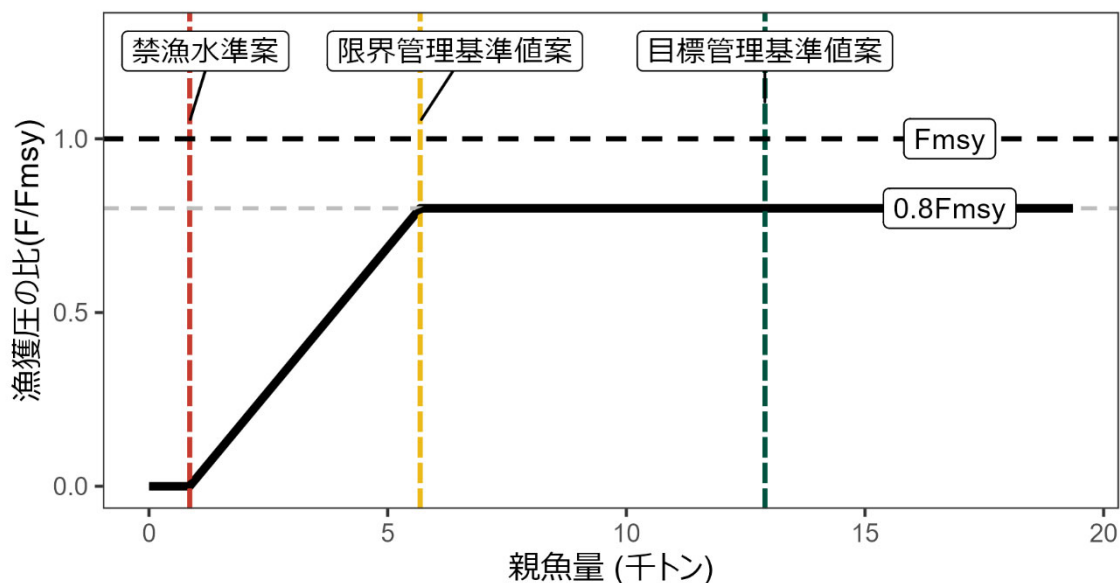


図 4. 神戸プロット

縦軸は各年の漁獲圧 F の F_{msy} との比である。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} 、 $SB_{0.6msy}$ 、 $SB_{0.1msy}$ 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

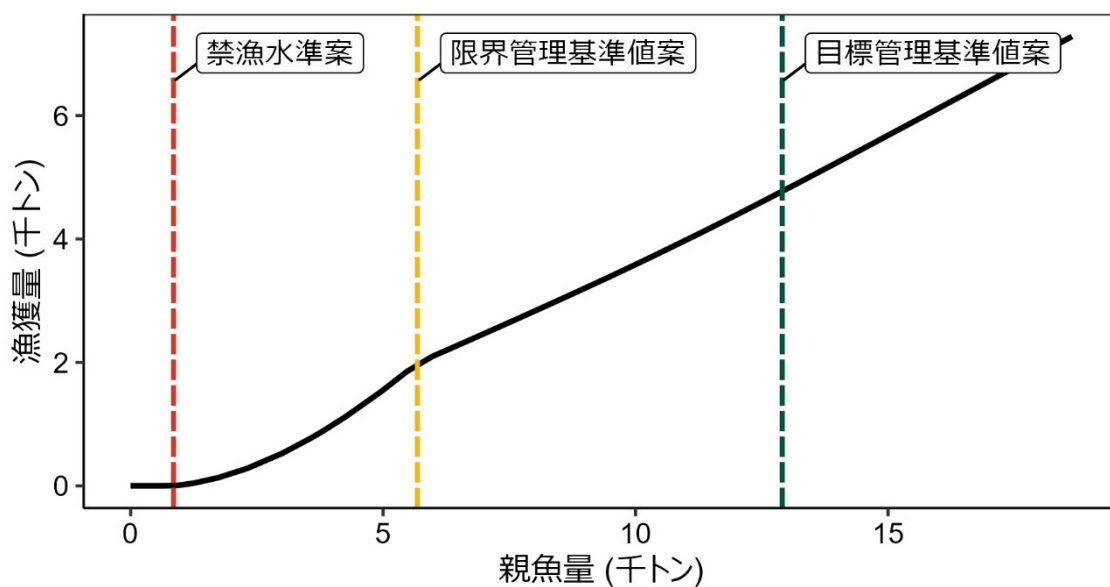
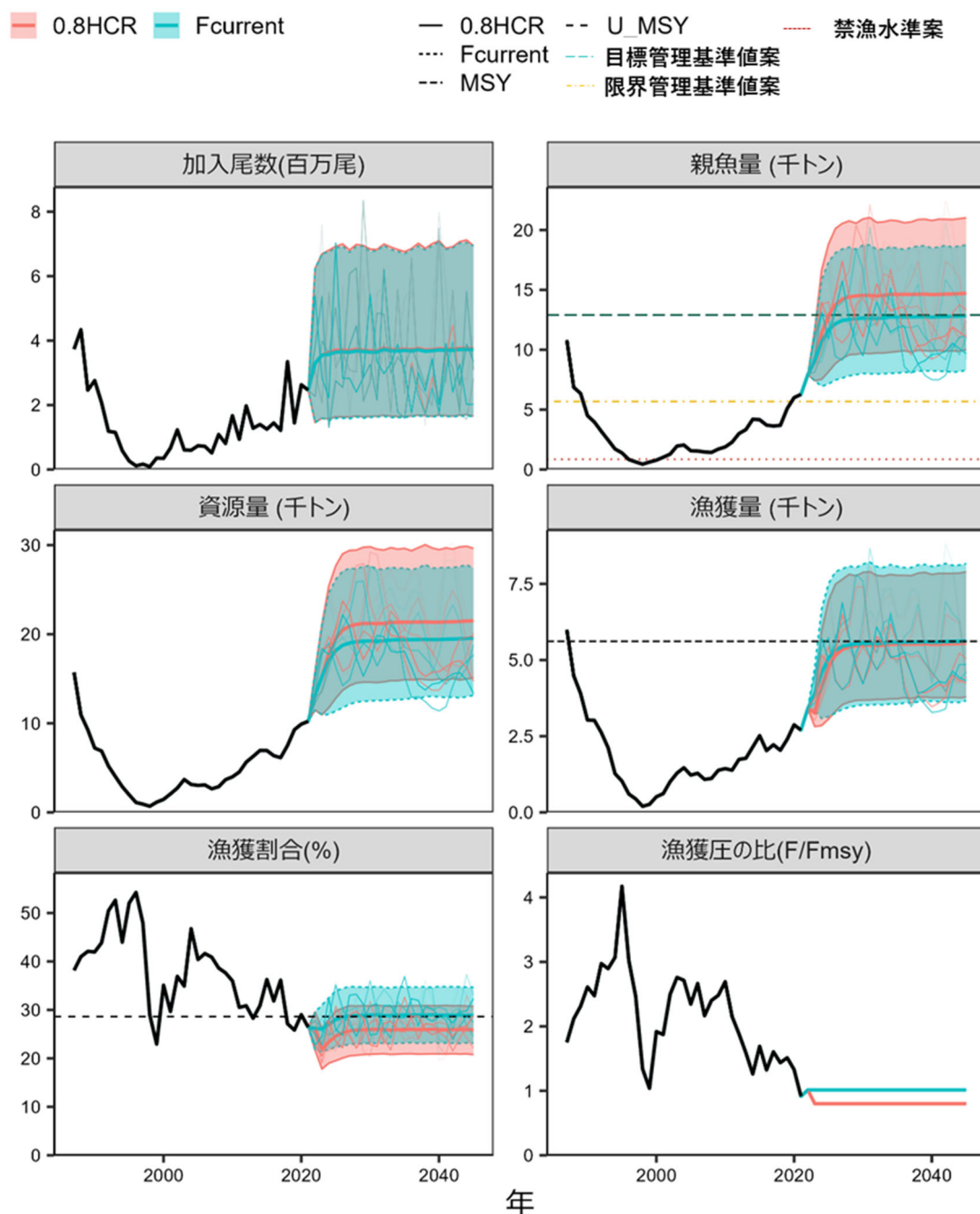


図 5. 漁獲管理規則案

目標管理基準値 (SBtarget) 案は HS 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。調整係数 β には標準値である 0.8 を用いた。黒破線は F_{msy} 、灰色破線は $0.8F_{msy}$ 、黒太線は HCR、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) は縦軸を漁獲圧にした場合、b) は縦軸を漁獲量で表した場合である。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%予測区間, 太い実線: 平均値, 細い実線: シミュレーションの1例)

図 6. 管理基準値案に基づく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 (青色) 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、赤点線は禁漁水準案を示す。漁獲量および漁獲割合の図の破線はそれぞれ MSY および U_{msy} を示す。2022 年の漁獲は予測される資源量と現状の漁獲圧 ($F_{current}$) により仮定し、2023 年以降の漁獲は漁獲管理規則案 (図 5) に従うものとした。調整係数 β には 0.8 を用いた。

表 1. 再生産関係式の検討候補と選択した再生産関係のパラメータ推定値

a) 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	自己相関係数	ΔAIC	AICc	$\Delta AICc$	順位
ホッケー・スティック	最小二乗法	無			46.735		1
ホッケー・スティック	最小二乗法	二段階	0.23	0.099	46.735		2
ホッケー・スティック	最小二乗法	同時	0.23		47.409	0.674	3
ホッケー・スティック	最小絶対値法	無			47.598		4
ホッケー・スティック	最小絶対値法	二段階	0.23	0.093	47.598	0.863	5

推奨する再生産関係式を太字とした。順位は AIC および AICc の値に基づくものであり、最終的に推奨する再生産関係の順位を示したものではない。二段階推定法を用いて自己相関を考慮したモデルの ΔAIC は再生産関係式のパラメータを推定した後に自己相関を考慮した場合に変化する AIC の値を示し、AICc は自己相関を考慮しない段階の値を示す。

b) 選択した再生産関係のパラメータ推定値

再生産関係式	最適化法	自己相関	a	b	S.D.	ρ
ホッケー・スティック	最小二乗法	無	0.419	8,907	0.435	-

a は原点から折れ点までの傾き（千尾/トン）、b は折れ点での親魚量（トン）、S.D. は加入のばらつきの大きさをあらわす指標（対数残差の標準偏差）、 ρ は自己相関係数である。

表 2. MSY 管理基準値等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)*1	選択率	現状の漁獲圧 (Fcurrent)
0	0.1	0.0	909	0.01	0.01
1	0.3	0.5	1,999	0.23	0.21
2	0.3	1.0	2,743	0.76	0.71
3	0.3	1.0	3,539	1.00	0.93
4+	0.3	1.0	4,925	1.00	0.93

*1 2017～2021 年の平均体重

表 3. 各種管理基準値案における平衡状態のときの平均親魚量、漁業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)

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 (%SPR)	漁獲割合	努力量 の比
目標管理基準値案	SBmsy	12.9	0.30	5.6	30.3	0.29	0.99
限界管理基準値案	SB0.6msy	5.7	0.13	3.4	22.7	0.35	1.69
禁漁水準案	SB0.1msy	0.9	0.02	0.7	20.4	0.38	2.06
MSY を実現する 漁獲圧	Fmsy	(0 歳, 1 歳, 2 歳, 3 歳, 4 + 歳) =(0.01, 0.21, 0.70, 0.92, 0.92)					

表 4. 将来の親魚量が目標管理基準値案を上回る確率 (%)

β	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2043	2053
1	0	0	2	19	32	38	41	42	43	43	43	42	44	45	45
0.9	0	0	2	22	38	46	50	53	53	54	53	52	54	56	55
0.8	0	0	2	25	45	56	61	63	64	65	65	65	66	66	66
0.7	0	0	2	29	53	66	73	76	77	77	77	76	78	79	78
0.6	0	0	2	34	61	76	83	86	87	88	88	88	88	89	89
0.5	0	0	2	39	71	85	91	94	95	95	95	95	95	96	96
Fcurrent	0	0	2	19	31	37	40	41	42	42	42	41	43	44	43

漁獲管理規則案での調整係数 β を 0.5~1.0 にて 0.1 刻みで変更した場合の将来予測。2022 年は現状の漁獲圧 (Fcurrent) で漁獲し、2023 年から漁獲管理規則案による漁獲とした。比較のため Fcurrent ($\beta = 1.01$ に相当) で漁獲を続けた場合の結果も示した。太字は漁獲管理規則案による管理開始から 10 年後を示す。

表 5. 将来の親魚量が限界管理基準値案を上回る確率 (%)

β	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2043	2053
1	100	100	100	100	99	99	99	99	99	99	100	100	100	100	100
0.9	100	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	100
0.7	100	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	100
0.5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Fcurrent	100	100	100	100	99	99	99	99	99	99	99	100	100	100	100

漁獲管理規則案での調整係数 β を 0.5~1.0 にて 0.1 刻みで変更した場合の将来予測。2022 年は現状の漁獲圧 (Fcurrent) で漁獲し、2023 年から漁獲管理規則案による漁獲とした。比較のため Fcurrent ($\beta = 1.01$ に相当) で漁獲を続けた場合の結果も示した。太字は漁獲管理規則案による管理開始から 10 年後を示す。

表 6. 将来の親魚量が禁漁水準案を上回る確率 (%)

β	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2043	2053
1	100	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	100
0.8	100	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	100
0.6	100	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	100
Fcurrent	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

漁獲管理規則案での調整係数 β を 0.5～1.0 にて 0.1 刻みで変更した場合の将来予測。2022 年は現状の漁獲圧 (Fcurrent) で漁獲し、2023 年から漁獲管理規則案による漁獲とした。比較のため Fcurrent ($\beta = 1.01$ に相当) で漁獲を続けた場合の結果も示した。太字は漁獲管理規則案による管理開始から 10 年後を示す。

表 7. 将来の平均親魚量の推移 (千トン)

β	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2043	2053
1	6.3	7.9	9.1	10.7	11.7	12.3	12.5	12.6	12.7	12.8	12.7	12.7	12.8	12.9	12.8
0.9	6.3	7.9	9.1	11.0	12.3	13.0	13.3	13.5	13.5	13.6	13.6	13.6	13.6	13.7	13.7
0.8	6.3	7.9	9.1	11.4	12.9	13.8	14.2	14.4	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.7	14.6
0.7	6.3	7.9	9.1	11.7	13.5	14.7	15.2	15.5	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	15.8	15.7
0.6	6.3	7.9	9.1	12.1	14.3	15.7	16.4	16.7	16.9	17.0	16.9	16.9	17.0	17.1	17.0
0.5	6.3	7.9	9.1	12.5	15.1	16.8	17.8	18.2	18.5	18.6	18.6	18.6	18.6	18.7	18.7
Fcurrent	6.3	7.9	9.1	10.7	11.7	12.2	12.4	12.5	12.6	12.6	12.6	12.6	12.7	12.8	12.7

漁獲管理規則案での調整係数 β を 0.5～1.0 にて 0.1 刻みで変更した場合の将来予測。2022 年は現状の漁獲圧 (Fcurrent) で漁獲し、2023 年から漁獲管理規則案による漁獲とした。比較のため Fcurrent ($\beta = 1.01$ に相当) で漁獲を続けた場合の結果も示した。太字は漁獲管理規則案による管理開始から 10 年後を示す。

表 8. 将来の平均漁獲量の推移 (千トン)

β	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2043	2053
1	2.7	3.4	3.8	4.6	5.1	5.3	5.4	5.5	5.5	5.6	5.5	5.5	5.6	5.6	5.6
0.9	2.7	3.4	3.6	4.4	4.9	5.3	5.4	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.6	5.6
0.8	2.7	3.4	3.3	4.1	4.8	5.2	5.3	5.4	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
0.7	2.7	3.4	2.9	3.9	4.6	5.0	5.2	5.3	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4
0.6	2.7	3.4	2.6	3.6	4.3	4.8	5.1	5.2	5.2	5.3	5.3	5.2	5.3	5.3	5.3
0.5	2.7	3.4	2.2	3.2	4.0	4.5	4.8	4.9	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.1	5.1
Fcurrent	2.7	3.4	3.9	4.6	5.1	5.3	5.4	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.6	5.6

漁獲管理規則案での調整係数 β を 0.5～1.0 にて 0.1 刻みで変更した場合の将来予測。2022 年は現状の漁獲圧 (Fcurrent) で漁獲し、2023 年から漁獲管理規則案による漁獲とした。比較のため Fcurrent ($\beta = 1.01$ に相当) で漁獲を続けた場合の結果も示した。太字は漁獲管理規則案による管理開始から 10 年後を示す。

表 9. 管理方策案のパフォーマンス評価の概要

カテゴリー	漁獲管理方策案	β	管理目標	予測平均親魚量		予測平均漁獲量			
				(トン)		(千トン)			
				10 年後に目標 管理基準値案 を上回る確率	5 年後	10 年後	1 年目	6 年目	11 年目
				2028 年	2033 年	2023 年	2028 年	2033 年	
3	β=0	0.0	100%	33.7	40.7	0.0	0.0	0.0	
3	β=0.1	0.1	100%	28.9	32.6	0.5	1.9	2.2	
3	β=0.2	0.2	100%	25.2	27.3	1.0	3.2	3.5	
3	β=0.3	0.3	100%	22.3	23.5	1.4	4.0	4.3	
3	β=0.4	0.4	99%	20.1	20.7	1.8	4.6	4.7	
3	β=0.5	0.5	95%	18.2	18.6	2.2	4.9	5.0	
3	β=0.6	0.6	88%	16.7	17.0	2.6	5.2	5.3	
3	β=0.7	0.7	78%	15.5	15.6	2.9	5.3	5.4	
3	β=0.8	0.8	66%	14.4	14.5	3.3	5.4	5.5	
2	β=0.9	0.9	54%	13.5	13.6	3.6	5.5	5.5	
0	β=1.0	1.0	1%	12.6	12.8	3.8	5.5	5.6	

カテゴリーは、 $\beta=0.8$ の管理方策と同程度以上のものをカテゴリー 3、10 年後に 50%の確率で目標管理基準値案を上回る漁獲シナリオとなる $\beta=0.92$ の管理方策と同程度以上のものをカテゴリー 2 とした。また、カテゴリー 1 は 3、2 には分類されないが、10 年後に目標管理基準値案を上回る確率が 50%以上を満たすものとし、カテゴリー 0 は上記の基準がすべて満たされないものとした。

表 9. 管理方策案のパフォーマンス評価の概要（つづき）

カテゴリ	漁獲管理規則案	β	リスク(10 年間に 1 度でも起きる確率)				管理期間 10 年間で予測される漁獲量の変動			
			親魚量が現在 水準を下回る	親魚量が限界 管理基準値案 を下回る	親魚量が禁漁 水準を下回る	漁獲量が半減 する	平均	平均	最大	最低漁獲
							年変動 AAV*1	減少率 ADR*1	減少率 MDR*1	量(トン) MinC*1
3	$\beta=0$	0.0	0%	0%	0%	0%	-	-	-	-
3	$\beta=0.1$	0.1	0%	0%	0%	0%	-	-	-	-
3	$\beta=0.2$	0.2	0%	0%	0%	0%	-	-	-	-
3	$\beta=0.3$	0.3	0%	0%	0%	0%	-	-	-	-
3	$\beta=0.4$	0.4	0%	0%	0%	0%	-	-	-	-
3	$\beta=0.5$	0.5	0.02%	0%	0%	0%	-	-	-	-
3	$\beta=0.6$	0.6	0.12%	0.02%	0%	0%	-	-	-	-
3	$\beta=0.7$	0.7	0.22%	0.1%	0%	0%	-	-	-	-
3	$\beta=0.8$	0.8	1%	0.26%	0%	0%	-	-	-	-
2	$\beta=0.9$	0.9	2.46%	0.82%	0%	0%	-	-	-	-
0	$\beta=1.0$	1.0	5.52%	2.3%	0%	0%	-	-	-	-

*2 AAV (annual average variation) は漁獲量の増減を考慮した変動の大きさを表す指標。ADR (average depletion ratio) と MDR (maximum depletion ratio) は前年と比べて漁獲量が減少した場合のみに注目した指標であり、管理期間中に漁獲量が減少した場合、その減少率の平均をとったものが ADR、最大値をとったものが MDR である。MinC は期間中の最低漁獲量である。本資源では漁獲量の変動を緩和する代替管理方策を提案しないため、これらの値は計算しなかった。

補足資料 1 再生産関係式のモデル診断結果について

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として、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。R_y を y 年の加入量、B_y を y 年当初の親魚量、A_{min} を加入年齢（本系群の場合は A_{min} は 0 歳）としたときのそれぞれの再生産関係式の数式は以下の通りである；

$$R_y = \begin{cases} ab & \text{if } B_{y-A_{min}} > b \\ aB_{y-A_{min}} & \text{if } B_{y-A_{min}} \leq b \end{cases} \quad (\text{Hockey stick, HS})$$

$$R_y = \frac{aB_{y-A_{min}}}{(1 + bB_{y-A_{min}})} \quad (\text{Beverton Holt, BH})$$

$$R_y = aB_{y-A_{min}} \exp(-bB_{y-A_{min}}) \quad (\text{Ricker, RI})$$

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（千尾/トン）、**b** は折れ点となる親魚量（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。RI 型および BH 型を仮定した場合は MSY を実現する親魚量などが非現実的な外挿値となったため検討候補から予め除外した（補足資料 2）。

本資源の再生産関係として、HS 型を最小二乗法および最小絶対値法により 1987～2020 年の加入量・親魚量のデータに当てはめた。推定された再生産関係式のパラメータを補足表 1-1 に示す。残差の自己相関（AR）については、パラメータ推定を行った後に自己相関パラメータを推定する“2 段階法” および自己相関パラメータ ρ もモデルに組み込んで再生産関係式のパラメータと同時に推定する“同時推定法”を用いた（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（FRA-SA2022-ABCWG02-04）を参照）。“同時推定法”を用いる場合、残差の正規性を仮定したほうが妥当であるため、最適化法には最小二乗法を用いた。

HS 型再生産関係式を最小二乗法により当てはめた場合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。HS 型再生産関係を仮定した場合、自己相関プロットの信頼区間に概ね収まっており、本資源については自己相関を考慮する必要はないと考えられた。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 検定および Kolmogorov-Smirnov 検定により検討したが有意な逸脱は検出されなかった（表 1、補足図 1-3）。

自己相関を考慮しないモデルについて、HS 型再生産関係式を最小二乗法により当てはめる上での個々のデータの影響をジャックナイフ法により検討したところ、推定の頑健性に大きな問題はみられなかった（補足図 1-4 および 1-5）。パラメータ推定の信頼区間は残差ブートストラップにより検討した（補足図 1-6 および 1-7）。また、プロファイル尤度を補

足図 1-8 に示した。これらの結果からは、パラメータ推定において特段の問題は認められず、最適解として推定されていると考えられた。しかし、ブートストラップ解析よりパラメータ b の信頼区間は広いことが示されたので、再生産関係のパラメータ推定値と管理基準値案の感度分析を実施した（補足資料 3）。

HS 型再生産関係式を最小絶対値法により当てはめた場合のモデル診断結果を補足図 1-9 ～1-15 に示した。パラメータ推定値と同様に、モデル診断の結果も最小二乗法を当てはめた場合の結果と大きな違いはみられなかった。

引用文献

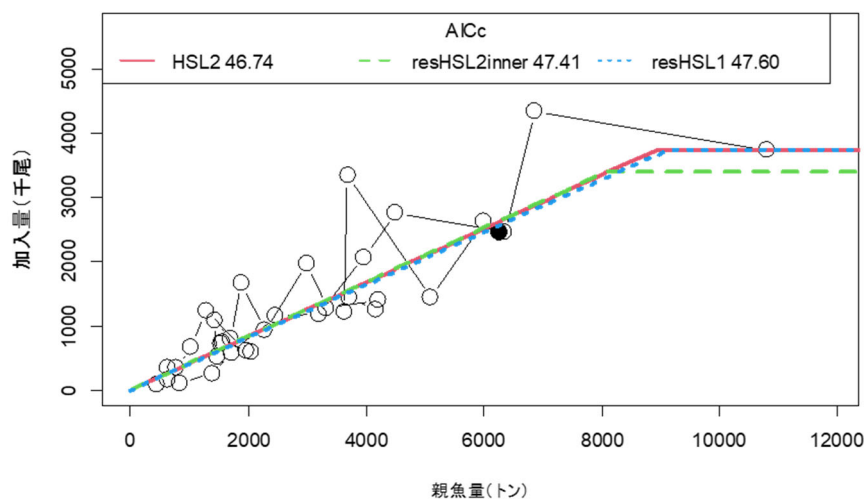
- ABCWG (2022) 再生産関係の推定・管理基準値計算・将来予測シミュレーションに関する技術ノート(令和 4 年度研究機関会議版). FRA-SA2022-ABCWG02-04.
- Beverton R. J. H., and S. J. Holt (1957). On the dynamics of exploited fish populations. Her Majesty's Stationary Office, London.
- Clark C. W., A. T. Charles, J. R. Beddington, and M. Mangel (1985). Optimal capacity decisions in a developing fishery. Mar. Resour. Econ., 2, 25-53.
- Ricker W. E. (1954). Stock and recruitment. J. Fish. Res. Board Can., **11**, 559–623.

補足表 1-1. MSY 管理基準値算出の候補にした再生産関係式における各パラメータ推定値

再生産関係式	最適 化法	自己 相関	推定法	a	b	S.D.	ρ	R0	h	データ 数
ホッケー・ スティック	L2*1	無	-	0.419	8907	0.435	0	3734	0.792	34
ホッケー・ スティック	L2	有	2段階	0.419	8907	0.417	0.23	3734	0.793	34
ホッケー・ スティック	L2	有	同時	0.421	8071	0.423	0.23	3397	0.793	34
ホッケー・ スティック	L1*2	無	-	0.410	9112	0.436	0	3734	0.788	34
ホッケー・ スティック	L1	有	2段階	0.410	9112	0.436	0.23	3734	0.788	34

*1 最小二乗法、*2 最小絶対値法

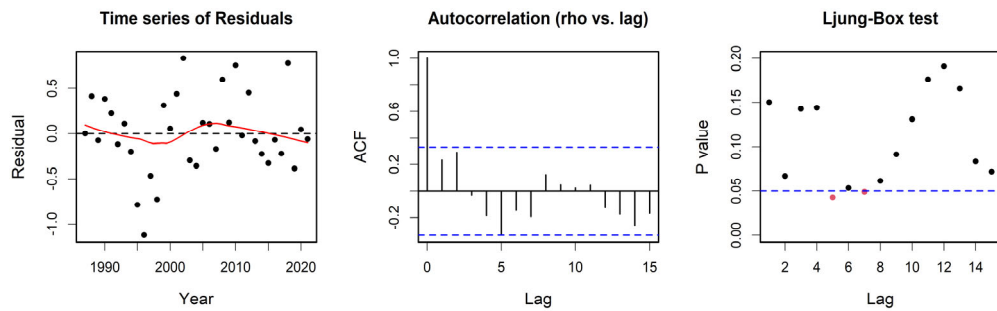
推奨する再生産関係式を太字とした。S.D.は加入のばらつきの大きさをあらわす指標で、対数残差の標準偏差（Standard Deviation、平均二乗誤差の平方根）である。加入残差の自己相関を考慮した場合は、自己相関パラメータ ρ についても示した。R0 はSB0 のときの平均加入尾数である。h（スティーブネス）は再生産関係の密度補償効果の程度を示す指標であり、HS 型の場合は $1-SBhs/SB0$ （SBhs はHS の折れ点）となる値である。



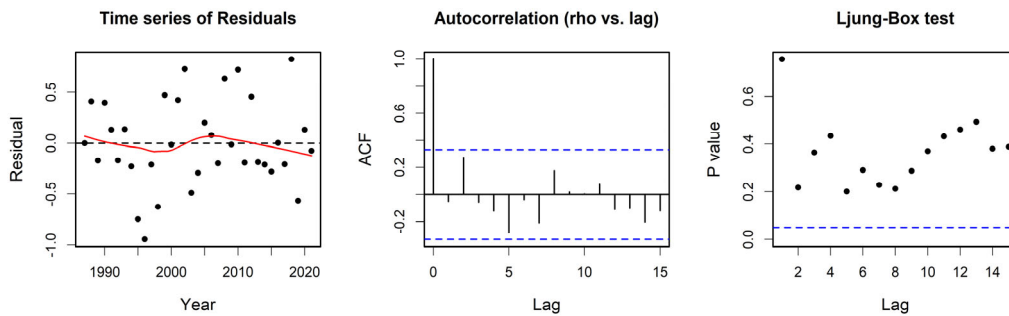
補足図 1-1. 各モデルにおける再生産関係式の比較

ホッケー・スティック型（HS）の再生産関係式を最小二乗法（L2）および最小絶対値法（L1）により当てはめた結果。L2 を用いて当てはめた際に加入残差の自己相関を同時に推定した場合（L2inner）の結果も示した。黒丸は最新（2021）年のデータであり、分析には使用していない。

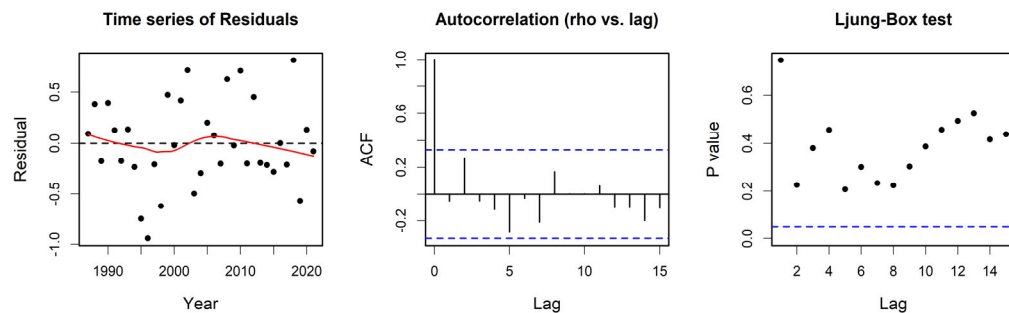
a) 自己相関なし（最小二乗法）



b) 二段階推定（最小二乗法）



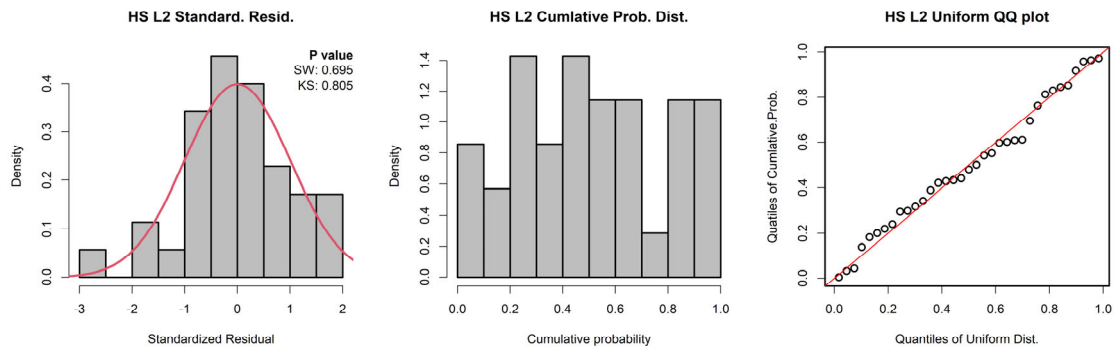
c) 同時推定（最小二乗法）



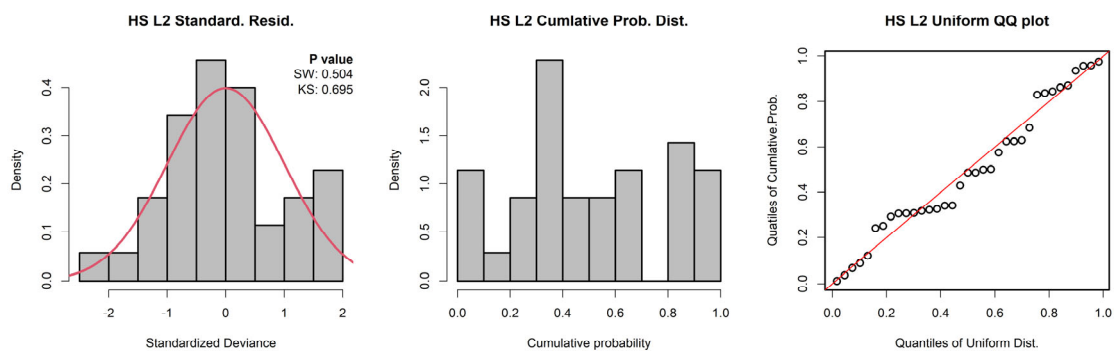
補足図 1-2. ホッカー・スティック型再生産関係式を最小二乗法で当てはめた場合の残差トレンド（左図）、自己相関プロット（中央図）、および Ljung-Box 検定における P 値（右図）

上段は自己相関無し、中段と下段はそれぞれ二段階推定法と同時推定法を用いて自己相関を求めた結果である。残差時系列の図中の赤線は平滑化された曲線を示す。自己相関プロットの青色の点線は 95%信頼区間を示す。Ljung-Box 検定における P 値（縦軸）の青色の点線は 5%水準を表す。

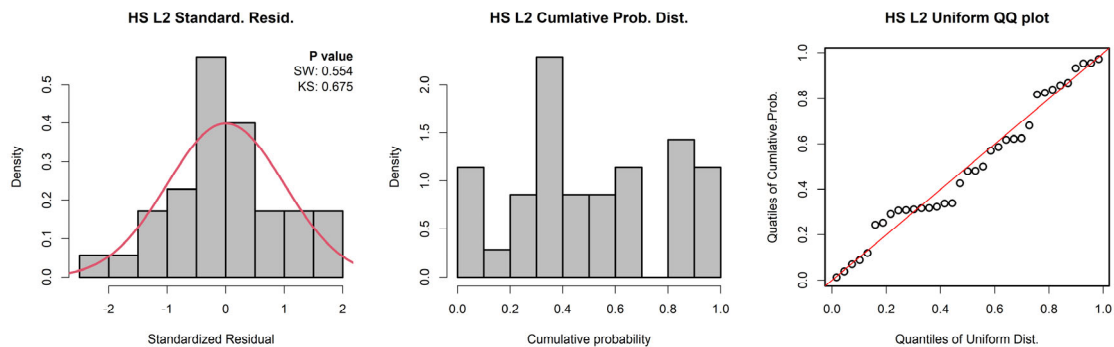
a) 自己相関なし（最小二乗法）



b) 二段階推定（最小二乗法）



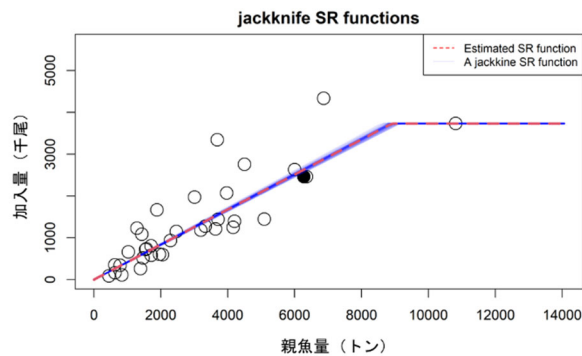
c) 同時推定（最小二乗法）



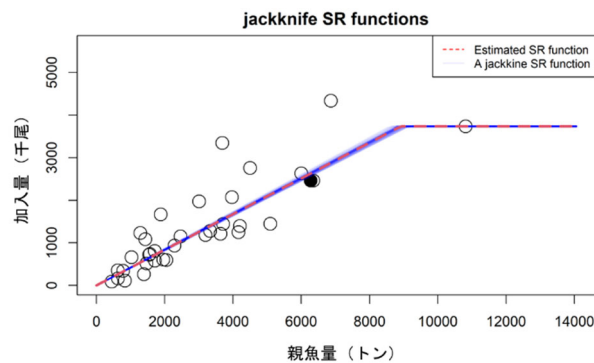
補足図 1-3. ホッケー・スティック型再生産関係式を最小二乗法で当てはめた場合の標準化残差のヒストグラムと正規性テスト結果（左図）、残差の累積確率密度のヒストグラム（中央図）、および一様分布を仮定した QQ プロット（右図）

上段は自己相関無し、中段と下段はそれぞれ二段階推定法と同時推定法を用いて自己相関を求めた結果である。残差のヒストグラムの右上の数値は 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示している。

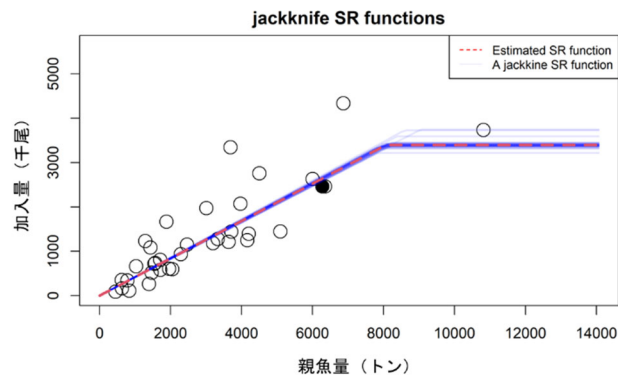
a) 自己相関なし（最小二乗法）



b) 二段階推定（最小二乗法）



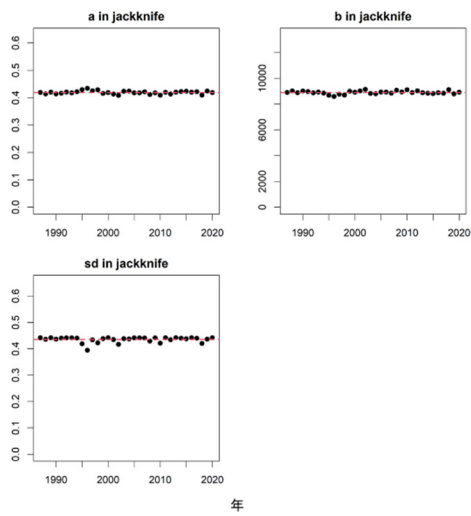
c) 同時推定（最小二乗法）



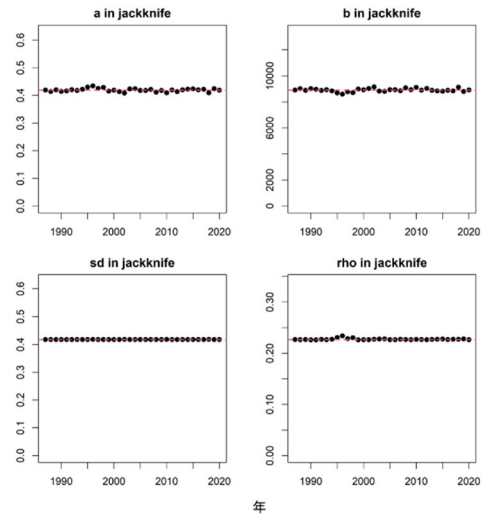
補足図 1-4. ホッケー・スティック型再生産関係式を最小二乗法で当てはめた場合のジャックナイフ解析での推定結果

上段は自己相関無し、中段と下段はそれぞれ二段階推定法と同時推定法を用いて自己相関を求めた結果である。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。横軸は親魚量（トン）、縦軸は加入量（千尾）である。丸印は分析に使用した親魚量・加入尾数であり、黒丸は最新（2021）年のデータで分析には使用していない。

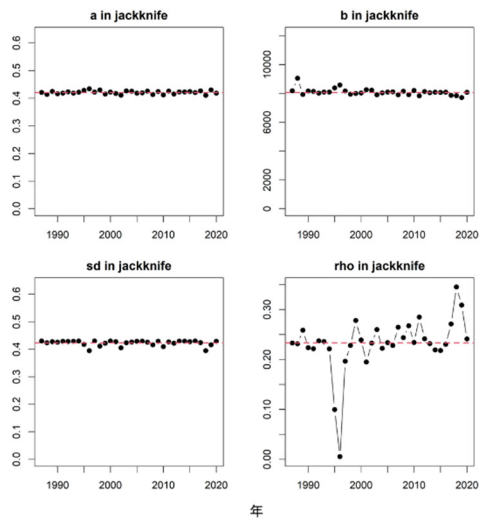
a) 自己相関なし（最小二乗法）



b) 二段階推定（最小二乗法）



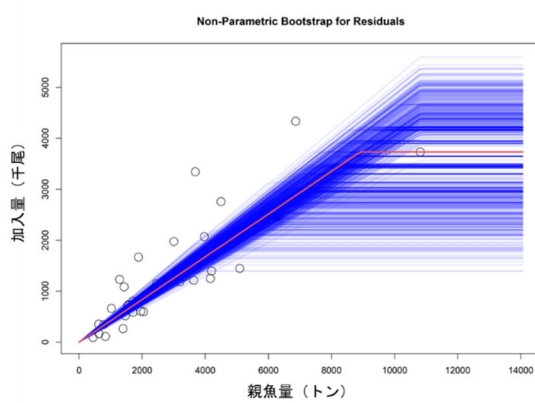
c) 同時推定（最小二乗法）



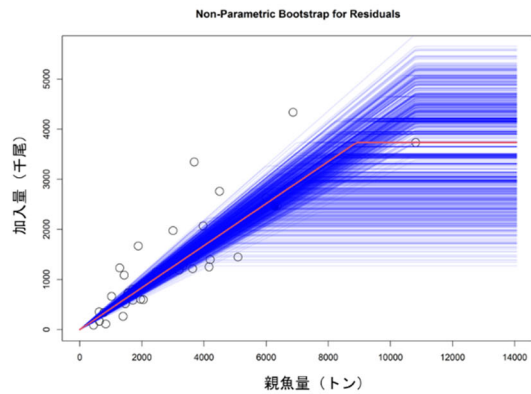
補足図 1-5. ホッケー・スティック型再生産関係式を最小二乗法で当てはめた場合のジャックナイフ解析でのパラメータ別の影響

上段左は自己相関無し、上段右と下段はそれぞれ二段階推定法と同時推定法を用いて自己相関を求めた結果である。

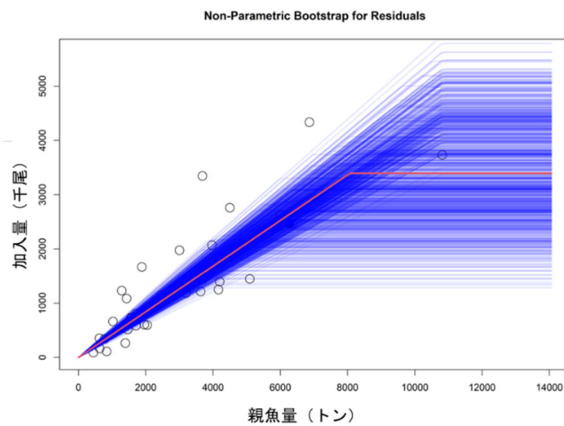
a) 自己相関なし（最小二乗法）



b) 二段階推定（最小二乗法）



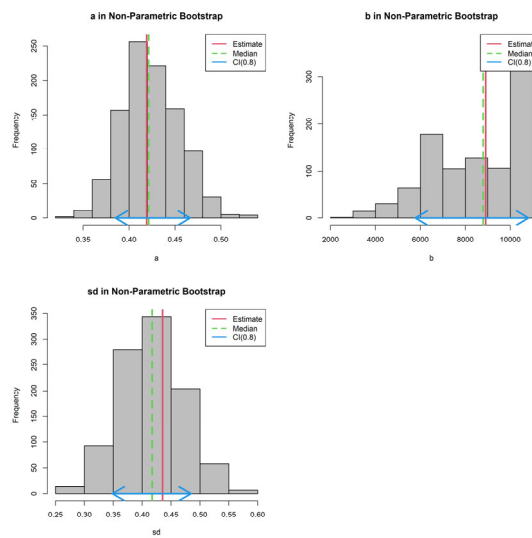
c) 同時推定（最小二乗法）



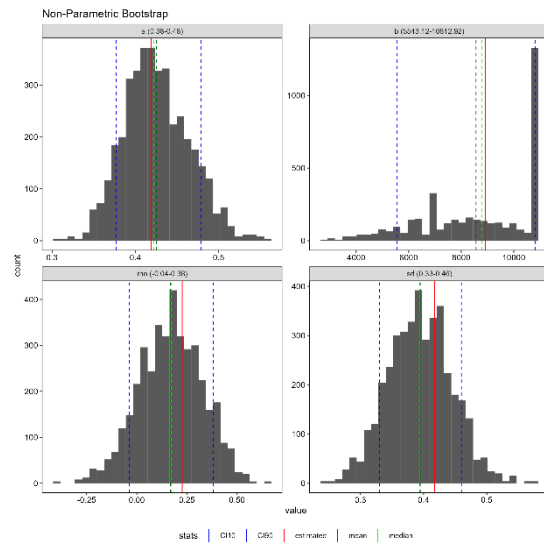
補足図 1-6. ホッケー・スティック型再生産関係式を最小二乗法で当てはめた場合の残差ブートストラップ解析の結果

上段左は自己相関無し、上段右と下段はそれぞれ二段階推定法と同時推定法を用いて自己相関を求めた結果である。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。横軸は親魚量（トン）、縦軸は加入量（千尾）である。丸印は分析に使用した親魚量・加入量を示す。

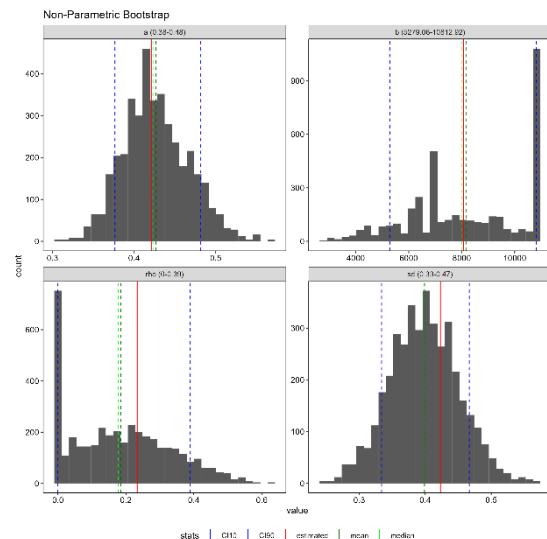
a) 自己相関なし（最小二乗法）



b) 二段階推定（最小二乗法）

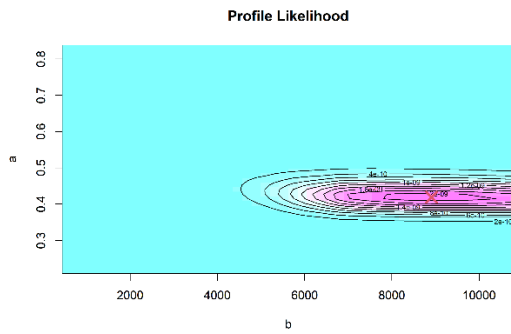


c) 同時推定（最小二乗法）

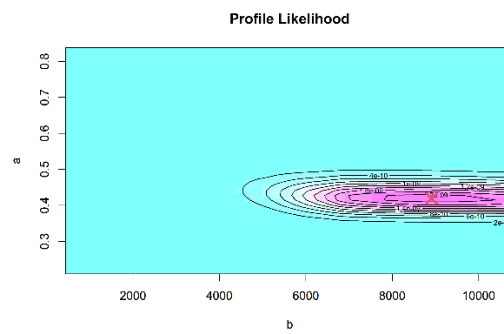


補足図 1-7. ホッケー・スティック型再生産関係式を最小二乗法で当てはめた場合の残差ブートストラップ解析での中央値（緑点線）と 80%信頼区間（青線）
 上段左は自己相関無し、上段右と下段はそれぞれ二段階推定法と同時推定法を用いて自己相関を求めた結果である。赤線はパラメータの点推定値である。

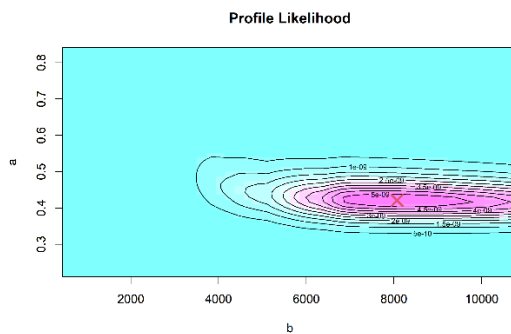
a) 自己相関なし（最小二乗法）



b) 二段階推定（最小二乗法）



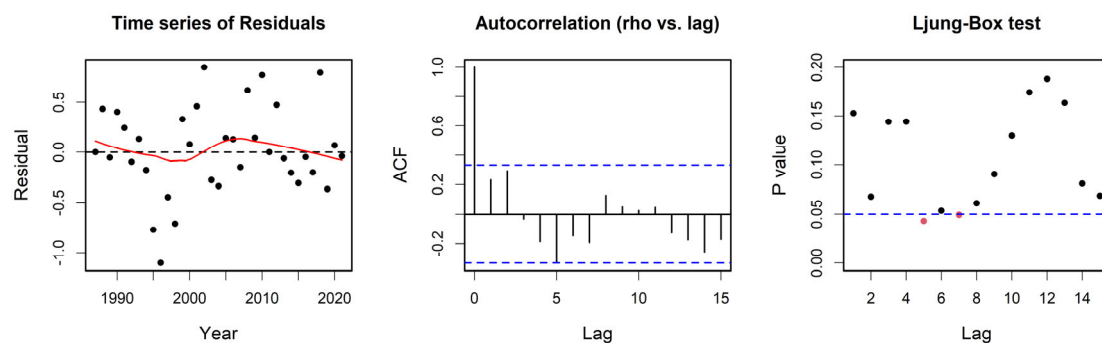
c) 同時推定（最小二乗法）



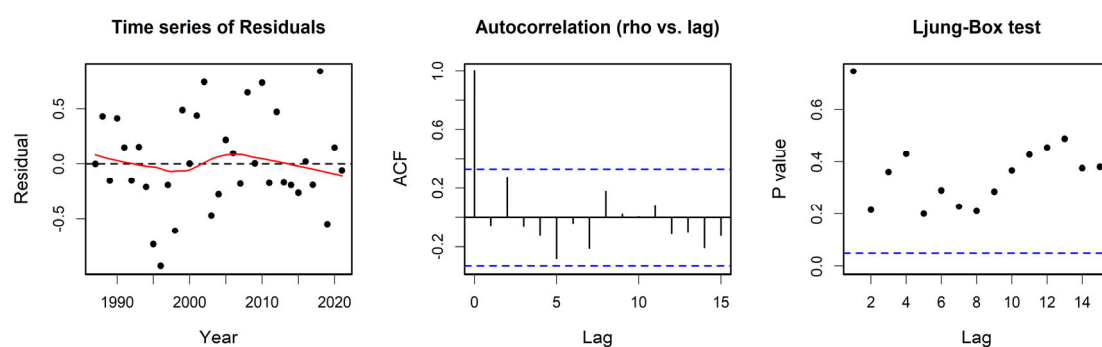
補足図 1-8. ホッケー・スティック型再生産関係式を最小二乗法で当てはめた場合の推定パラメータのプロファイル尤度

上段左は自己相関無し、上段右と下段はそれぞれ二段階推定法と同時推定法を用いて自己相関を求めた結果である。×印は推定されたパラメータ値における尤度に相当する。

a) 自己相関なし（最小絶対値法）



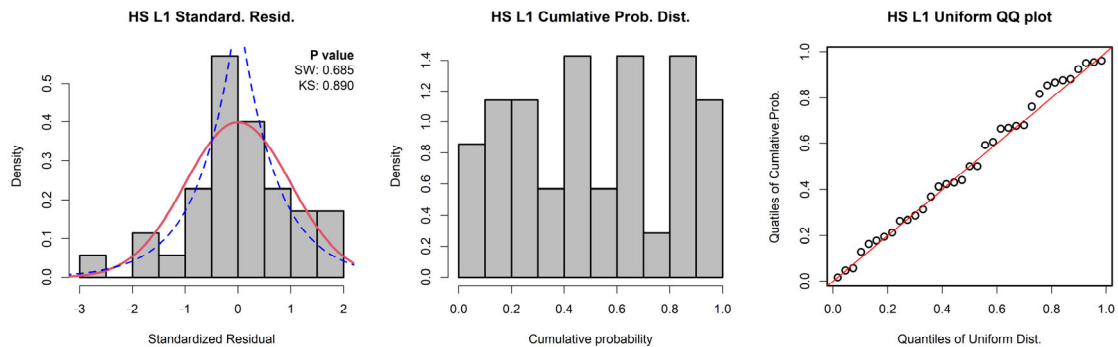
b) 二段階推定（最小絶対値法）



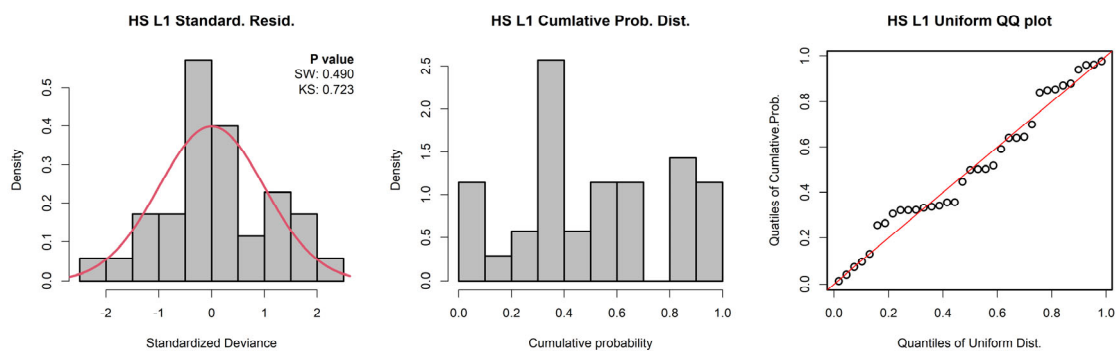
補足図 1-9. ホッケー・スティック型再生産関係式を最小絶対値法で当てはめた場合の残差トレンド（左図）、自己相関プロット（中央図）、および Ljung-Box 検定における P 値（右図）

自己相関を考慮しない結果（上段）および二段階推定法を用いて自己相関を求めた結果（下段）を示した。残差時系列の図中の赤線は平滑化された曲線を示す。自己相関プロットの青色の点線は 95%信頼区間を示す。Ljung-Box 検定における P 値（縦軸）の青色の点線は 5%水準を表す。

a) 自己相関なし（最小絶対値法）



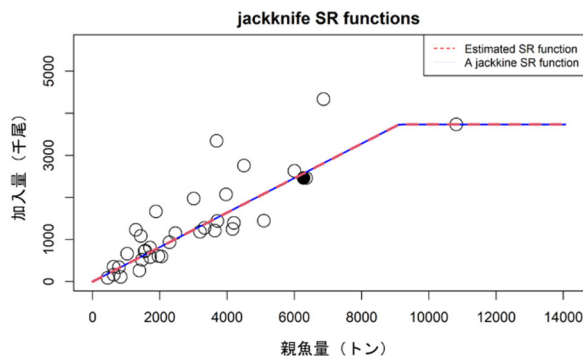
b) 二段階推定（最小絶対値法）



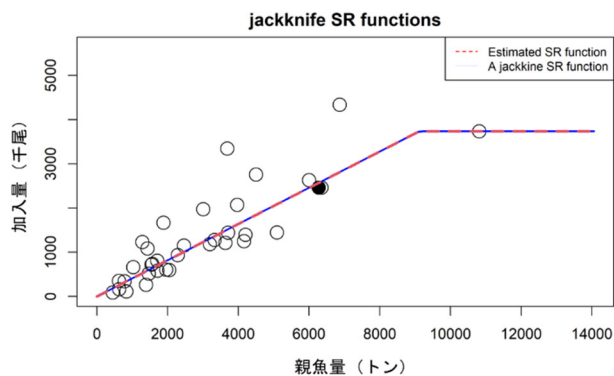
補足図 1-10. ホッケー・スティック型再生産関係式を最小絶対値法で当てはめた場合の標準化残差のヒストグラムと正規性テスト結果（左図）、残差の累積確率密度のヒストグラム（中央図）、および一様分布を仮定した QQ プロット（右図）

自己相関を考慮しない結果（上段）および二段階推定法を用いて自己相関を求めた結果（下段）を示した。残差のヒストグラムの右上の数値は 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示している。

a) 自己相関なし（最小絶対値法）



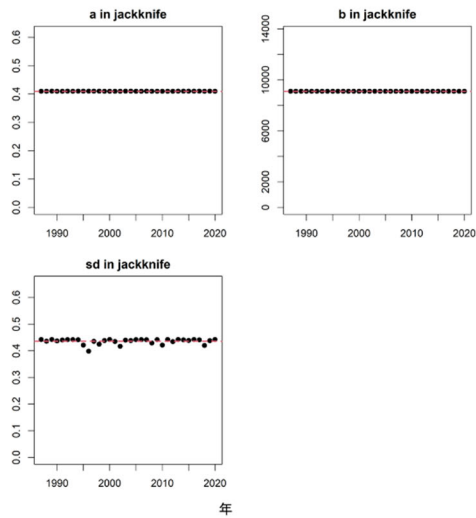
b) 二段階推定（最小絶対値法）



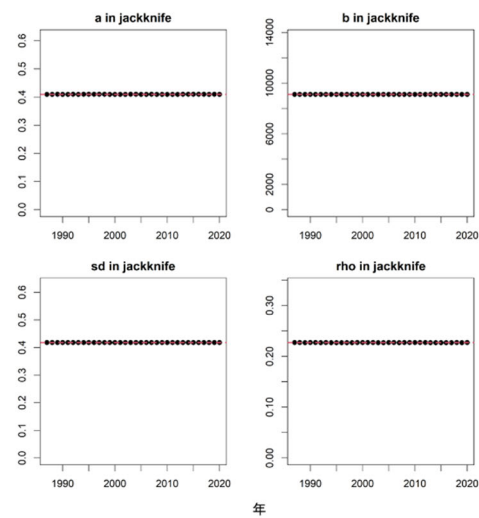
補足図 1-11. ホッケー・スティック型再生産関係式を最小絶対値法で当てはめた場合のジャックナイフ解析での推定結果

自己相関を考慮しない結果（上段）および二段階推定法を用いて自己相関を求めた結果（下段）を示した。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。横軸は親魚量（トン）、縦軸は加入量（千尾）である。丸印は分析に使用した親魚量・加入量であり、黒丸は最新（2021）年のデータで分析には使用していない。

a) 自己相関なし（最小絶対値法）

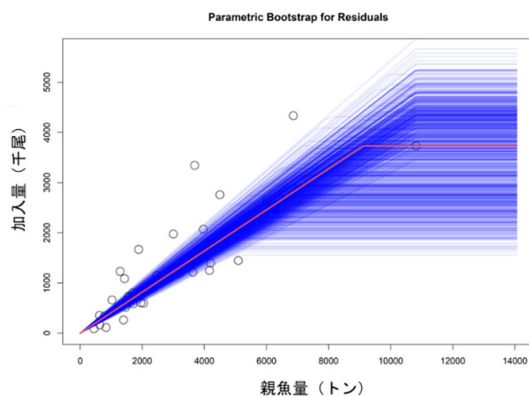


b) 二段階推定（最小絶対値法）

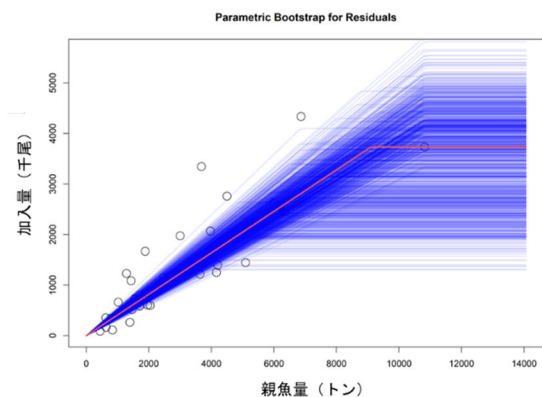


補足図 1-12. ホッケー・スティック型再生産関係式を最小絶対値法で当てはめた場合のジャックナイフ解析でのパラメータ別の影響
自己相関を考慮しない結果（左）および二段階推定法を用いて自己相関を求めた結果（右）を示した。

a) 自己相関なし（最小絶対値法）

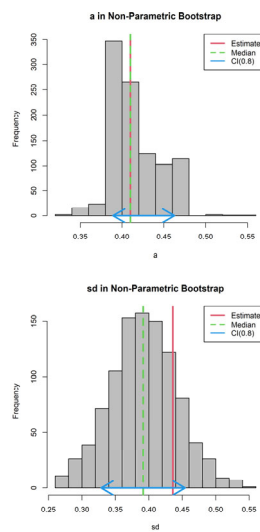


b) 二段階推定（最小絶対値法）

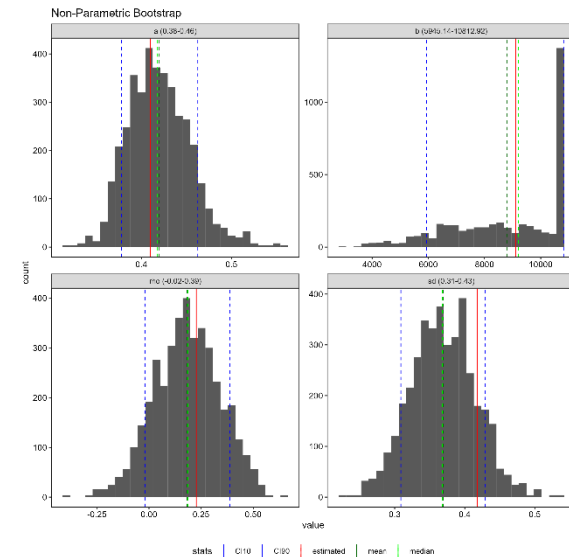


補足図 1-13. ホッケー・スティック型再生産関係式を最小絶対値法で当てはめた場合の残差ブートストラップ解析の結果
自己相関を考慮しない結果（左）および二段階推定法を用いて自己相関を求めた結果（右）を示した。赤線は元データでの推定値、青線はノンパラメトリックブートストラップでの推定値である。横軸は親魚量（トン）、縦軸は加入量（千尾）である。丸印は分析に使用した親魚量・加入量を示す。

a) 自己相関なし（最小絶対値法）



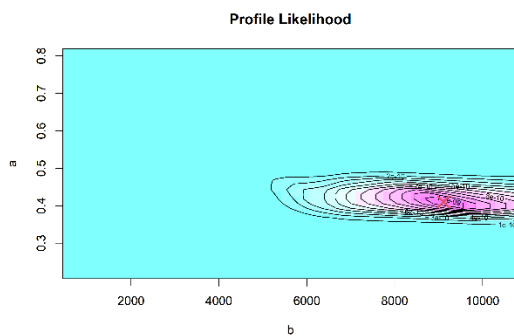
b) 二段階推定（最小絶対値法）



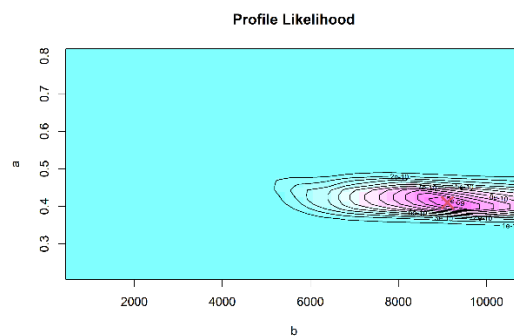
補足図 1-14. ホッケー・スティック型再生産関係式を最小絶対値法で当てはめた場合の残差ブートストラップ解析での中央値（緑点線）と 80%信頼区間（青線）

自己相関を考慮しない結果（左）および二段階推定法を用いて自己相関を求めた結果（右）を示した。赤線はパラメータの点推定値である。

a) 自己相関なし（最小絶対値法）



b) 二段階推定（最小絶対値法）



補足図 1-15. ホッケー・スティック型再生産関係式を最小絶対値で当てはめた場合の推定パラメータのプロファイル尤度

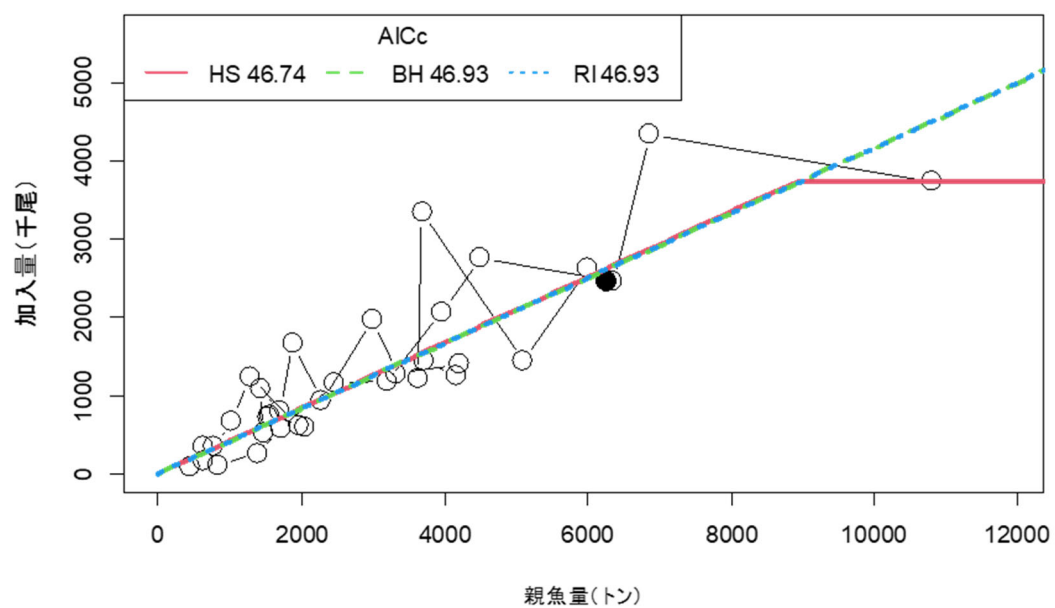
自己相関を考慮しない結果（左）および二段階推定法を用いて自己相関を求めた結果（右）を示した。×印は推定されたパラメータ値における尤度に相当する。

補足資料 2 再生産関係式と MSY 管理基準値案の推定結果の感度試験

仮定する再生産関係による MSY 管理基準値の違いを把握するため、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) 型の再生産関係を用いて MSY 管理基準値案を推定した。最適化方法には最小二乗法 (L2) および最小絶対値法 (L1) を用い、加入残差の自己相関は考慮しなかった。それぞれの再生産関係と最適化方法に基づき推定された MSY 管理基準値案を補足表 2-1 に、再生産関係を補足図 2-1 示す。RI 型や BH 型再生産関係を用いた場合の MSY 管理基準値案 (SBmsy、SB0.6msy、および SB0.1msy) は、HS 型を用いた場合に比べて、最適化手法に L1 を用いると 2 倍以上高い値となるとともに、最適化手法に L2 を用いると非現実的と考えられるほど高い値となった。一方、各再生産関係の傾きには大きな違いはみられなかった (補足図 2-1)。

補足表 2-1. 再生産関係 (1987～2020 年) と MSY 管理基準値案の推定結果

再生産関係 モデル	SBmsy (千トン)	SB0 (千トン)	SB0.6msy (千トン)	SB0.1msy (千トン)	MSY (千トン)	Umsy	%SPR
HS 型 L2 自己相関無	12.9	43.0	5.7	0.9	5.6	0.29	0.30
HS 型 L1 自己相関無	13.1	43.0	5.8	0.9	5.6	0.28	0.31
RI 型 L2 自己相関無	2448×10^4	5441×10^4	1032×10^4	1486×10^3	6726×10^4	0.20	0.43
RI 型 L1 自己相関無	29.5	66.3	10.2	1.3	8.7	0.21	0.41
BH 型 L2 自己相関無	9508×10^4	2573×10^5	3348×10^4	4671×10^3	2020×10^4	0.16	0.51
BH 型 L1 自己相関無	52.6	145.3	15.4	1.9	11.9	0.17	0.49



補足図 2-1. 各モデルにおける再生産関係の比較

各再生産関係式を最小二乗法（L2）により当てはめた結果。加入残差の自己相関は考慮していない。黒丸は最新（2021）年のデータで分析には使用していない。

補足資料 3 データの利用期間と MSY 管理基準値案の推定結果の感度試験

補足資料 1 で行われたブートストラップ解析の結果より HS 型再生産関係の推定パラメータのうち b の信頼区間が広いことが示された（補足図 1-6）。本系群で使用するデータにおいて、親魚量が 5 千トンを超えた期間のデータは、それ未満のデータに比べて少なく、1987～1989 年および 2019～2021 年の 6 年間のみである。親魚量の多い期間のデータの少なさがパラメータ b の推定が不安定になる原因のひとつと考えられる。そこでデータ利用期間の違いが MSY 管理基準値案の推定結果にどのように影響するか調べた。この解析は、尤度の差が 0.001 よりも小さい範囲で解が複数推定される場合に初期値を変えた 300 回の繰り返し計算で得られた中央値を推定値とした点で、補足資料 1 に示したジャックナイフ解析の結果（補足図 1-4、1-5）と異なる。

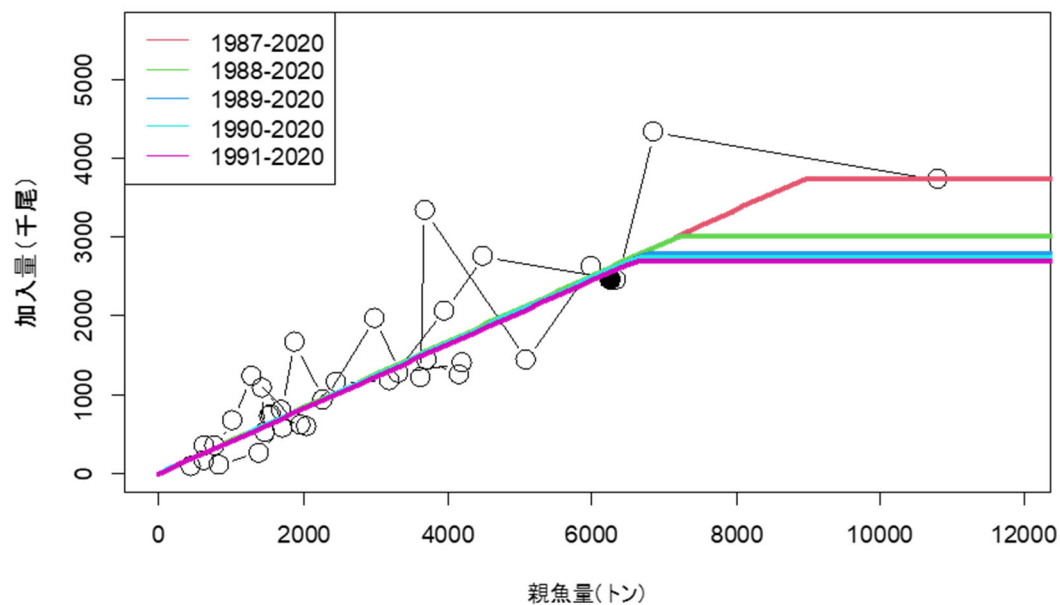
過去最大親魚量となった 1987 年の 1 年分のみのデータを使用しなかった場合でも、パラメータ b 、 $SBmsy$ 、 MSY の推定値は直近年を除く全期間（1987～2020 年）を使用した場合より 19%程度減少した（補足表 3-1、補足図 3-1）。1988 年、1989 年と親魚量の多い期間のデータの使用を減らすほどこれらの推定値は小さくなった。パラメータ b の値は $SBmsy$ の推定値と関係しており、神戸プロット上での親魚量と各管理基準値案との位置関係についても不確実性が高いと考えられた（補足図 3-2）。その一方で、HS 型の傾きを示すパラメータ a 、 $\%SPR$ 、 $Fmsy$ については、データ使用期間によらず概ね一定の値となっており、頑健と考えられた。

漁獲管理規則に基づく将来の漁獲圧は、評価最新年の親魚量と各管理基準値との関係から定まる。本資源では、パラメータ b や $SBmsy$ が最も大きくなった 1987～2020 年のデータを使用した場合でも 2021 年の親魚量は限界管理基準値案を上回っていた（図 4）。そのため、将来予測で仮定する漁獲圧は漁獲管理規則に従って $\beta Fmsy$ となる。本資源では検討したデータ利用期間に対して $Fmsy$ が頑健であり、パラメータ b や $SBmsy$ といった各推定値の違いは管理開始年（2023 年）の親魚量や漁獲量に及ぼす影響は小さいと考えられる（補足図 3-3）。なお、管理開始年の翌年以降の予測値の違いは、加入が一定となり始める親魚量と一定となった加入量の予測平均値の仮定（補足図 3-1）が異なるために生じるが、これらの値は毎年行われる資源評価結果にともなって更新されるものである。

以上より、データ利用期間の違いは $SBmsy$ や MSY の違いを生じさせるものの、管理開始年の親魚量や漁獲量に及ぼす影響は小さいと考えられた。本資源では、親魚量が多い期間のデータを増やし、再生産関係における頑健なパラメータ推定値を得ることが重要な課題のひとつと考えられる。漁獲管理規則案に基づく漁獲は、親魚量が現状の水準以上に維持されると期待されることから、資源の適切な利用だけでなくこの課題の解決にも有効と考えられる。

補足表 3-1. データの利用期間と MSY 管理基準値案の推定結果

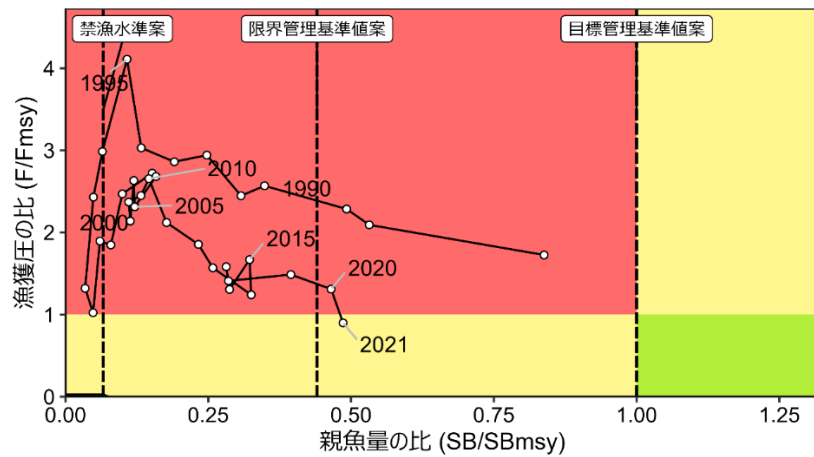
データ使用年	HS 型の推定パラメータ		SBmsy (千トン)	MSY (千トン)	%SPR	Fmsy
	a	b				
1987～2020 年	0.42	8,907	12.9	5.6	0.30	0.55
1988～2020 年	0.42	7,227	11.5	4.6	0.30	0.55
1989～2020 年	0.41	6,750	9.8	4.2	0.31	0.54
1990～2020 年	0.41	6,622	9.6	4.2	0.31	0.54
1991～2020 年	0.41	6,622	9.6	4.1	0.31	0.53



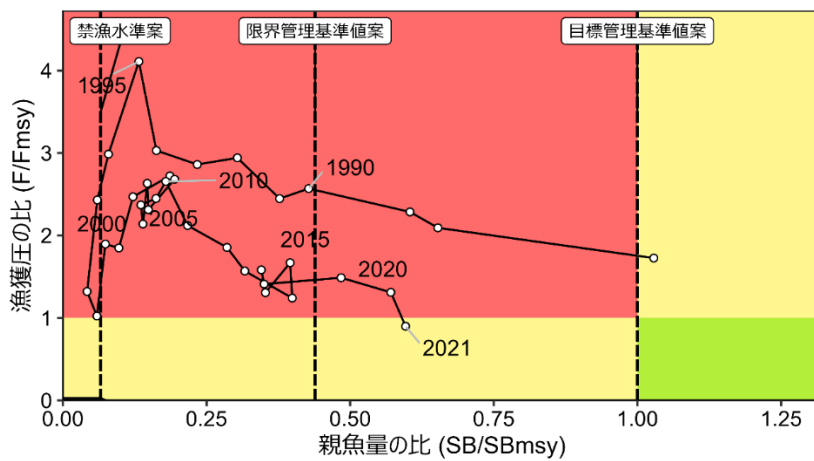
補足図 3-1. 異なるデータ使用期間における再生産関係の比較

HS 型再生産関係を最小二乗法 (L2) により当てはめた結果。加入残差の自己相関は考慮していない。黒丸は最新 (2021) 年のデータで分析には使用していない。

a) 1987～2020 年のデータを使用した場合

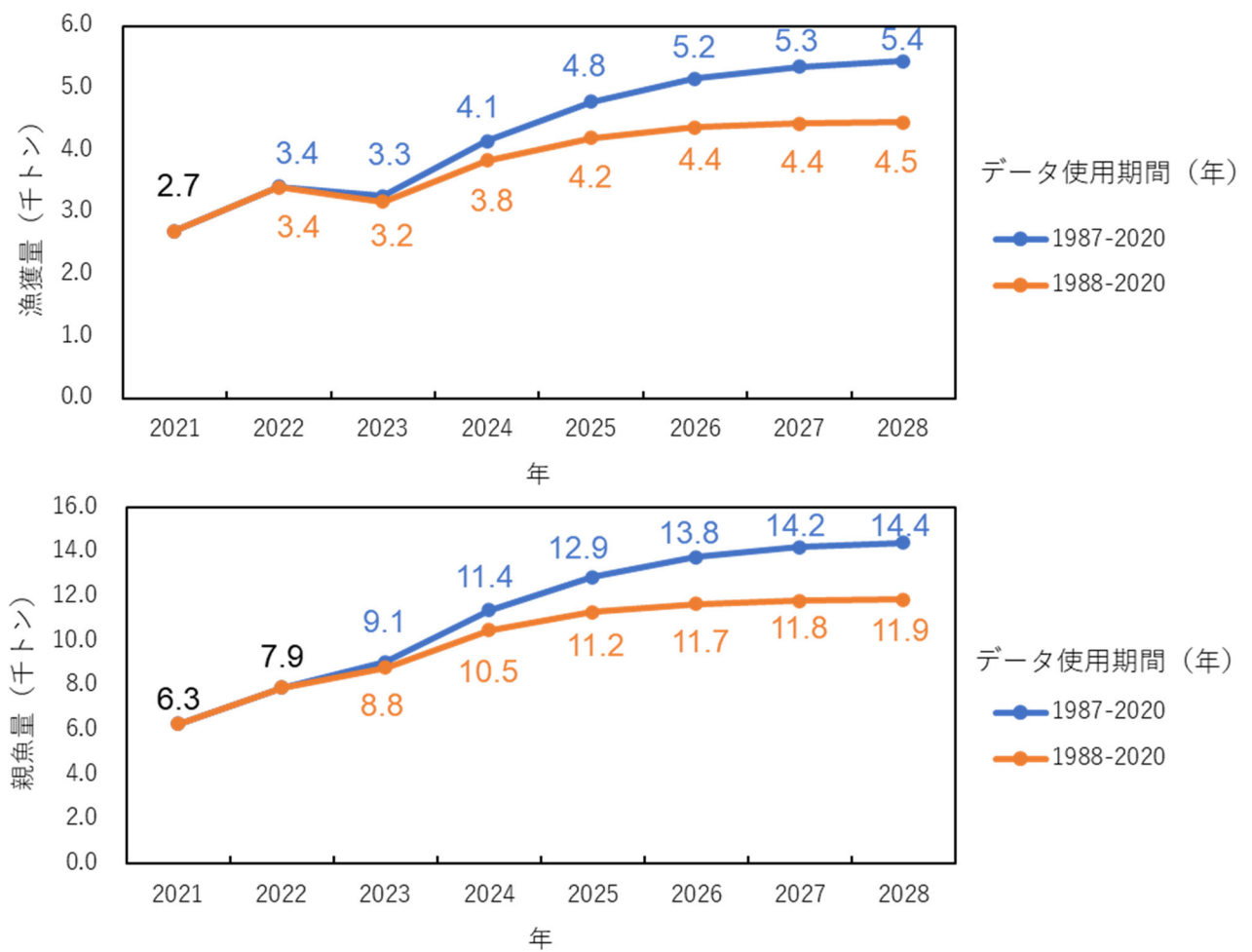


b) 1988～2020 年のデータを使用した場合



補足図 3-2. データ使用期間の違いによる神戸プロットの比較

縦軸は各年の漁獲圧 F の F_{msy} との比である。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} 、 $SB_{0.6msy}$ 、 $SB_{0.1msy}$ を用いた。



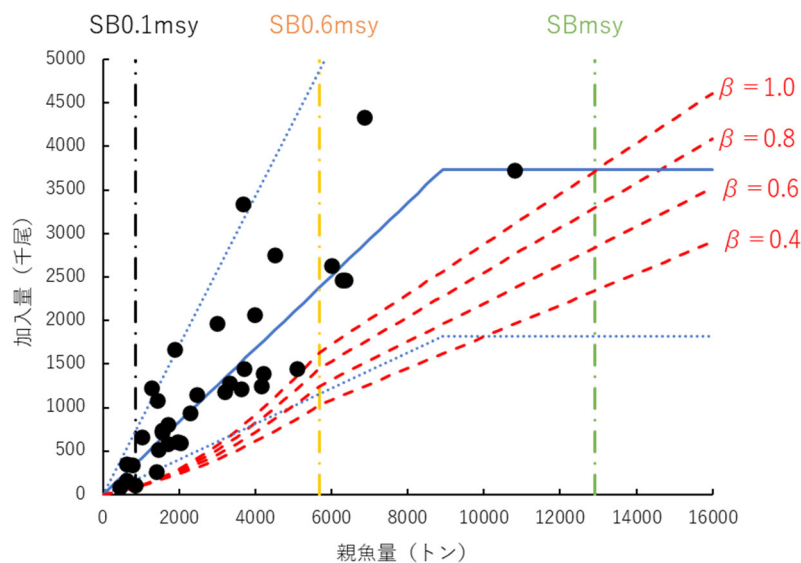
補足図 3-3. データ使用期間の違いによる将来予測平均値の比較

β を標準値である 0.8 とした時の将来予測漁獲量の平均値（上）と将来予測親魚量の平均値（下）の経年変化を示した。計算の試行回数は 5,000 回とした。2022 年は現状の漁獲圧 (F_{current}) で漁獲し、2023 年から漁獲管理規則案による漁獲とした。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} 、 $SB_{0.6\text{msy}}$ 、 $SB_{0.1\text{msy}}$ を用いた。青色は 1987～2020 年のデータを用いて再生産関係 (HS 型・最小二乗法・自己相関なし) のパラメータを推定して漁獲管理基準値案を定めた場合の結果であり、オレンジ色は 1988～2020 年のデータを用いて同様の作業を行った場合の結果である。図中の数値は実際の推定結果である。黒字で示した数値はデータ利用期間に関わらず同じ値となる。

補足資料 4 漁獲管理規則案に基づく SPR (F) と再生産関係

漁獲管理規則案による管理の挙動を示すために、漁獲管理規則案に基づく漁獲係数 F を用いた場合の SPR (F) を求め、再生産関係と合わせて図示した（補足図 4-1）。この図では、再生産関係を示す曲線（青実線）が、SPR（赤破線）の上にあれば親魚量は増加、下であれば減少することになる。すなわち、青実線と赤破線の交点は平衡状態になる親魚量である。

この図から、本漁獲管理規則案では、再生産曲線から予測される平均的な加入が得られれば、 βF_{msy} で漁獲することにより親魚量が平衡状態に達するまで増加する仕組みになっていることが分かる。しかし、実際には期待通りの加入が得られるとは限らず、再生産関係のプロットは再生産曲線周辺でばらつく。漁獲管理規則案では、親魚量が限界管理基準値案（SB0.6msy、黄色破線）以下になった場合には、漁獲圧を下げることで親魚量をより増加させる規則となっている。親魚量が限界管理基準値案を下回った時の赤破線をみると、下向きに湾曲しており、観測された値が期待値より少なかった場合でも親魚量を増加させやすくする仕組みになっている。実際に過去に観測されたプロットの多くも赤破線より上に位置している。しかし、加入量が 90% 予測区間の下限付近まで低くなった時など、漁獲管理規則案による漁獲を行っても親魚量が減少する場合もみられる。



補足図 4-1. 漁獲管理規則案に基づく漁獲係数 F を用いた場合の SPR (F) と再生産関係との関係

青実線は HS 型再生産関係の曲線、青破線は観測データの 90% が含まれると推定される範囲、赤破線は漁獲管理規則案に基づく SPR (F) を示す。 β は 1.0～0.4 までは 0.2 刻みで示した。黒点は観測された親魚量と加入量の散布図。なお、目標管理基準値案（SBmsy）、限界管理基準値案（SB0.6msy）、禁漁水準案（SB0.1msy）をそれぞれ緑破線、黄色破線、黒破線で示した。親魚量と加入量のプロットが赤破線より上（または下）にあれば親魚量は増加（または減少）する。

補足資料 5 2021 年の加入量の仮定に関する感度試験

令和 4 年度評価における 2021 年の 0 歳魚資源尾数は VPA から求めた 2021 年の親魚量と直近年を除く過去（1987～2020 年）の再生産成功率の中央値（0.39）から算出されている（安田ほか 印刷中）。この再生産成功率の仮定が将来予測結果に与える影響を調べるために、中央値以外の値（最小値 rps_low 、第一四分位数 rps_25 、第三四分位数 rps_75 、最大値 rps_high 、補足表 5-1）を用いた場合の将来予測結果を比較した。将来予測の漁獲圧の設定に変更はなく、2022 年は現状の漁獲圧（ $F_{current}$ ）で漁獲し、2023 年から漁獲管理規則案による漁獲とした。調整係数 β には標準値である 0.8 を用いた。

2021 年の再生産成功率が過去最低値の場合、2022～2023 年の平均親魚量は横ばい傾向で推移した（補足表 5-2）。減少傾向にならなかったのは、2018 年級群と 2020 年級群の加入が良好だったことと 2020～2021 年の 2 歳魚以上の漁獲圧が比較的低かったことで（安田ほか 印刷中）、2022 年以降も親魚が多く生き残ったためと考えられる。2022～2023 年の平均親魚量は限界管理基準値案（5.9 千トン）を上回ったが、90%予測区間は限界管理基準値案を下回る年がみられた（補足図 5-1）。限界管理基準値案を上回る確率は 2023 年が最も低く 59%であった（補足表 5-4）。漁獲管理規則による管理開始後となる 2024 年以降は、再生産成功率の仮定によらず、平衡となる親魚量に到達するまで平均親魚量は増加した（補足表 5-2、補足図 5-1）。2021 年の再生産成功率が過去最低値であった場合でも、調整係数 β が 0.9 以下であれば管理開始から 10 年後に目標管理基準値案を上回る確率が 50%を上回ると予測された（補足表 5-4）。

補足表 5-1. 各再生産成功率の参考値を用いた場合の 2021 年の推定加入尾数

	再生産成功率 (尾/kg)	加入尾数 (千尾)	親魚量 (千トン)
最高値(rps_high)	0.94	5905	6.3
第三四分位数(rps_75)	0.58	3641	6.3
中央値(original)	0.39	2465	6.3
第一四分位数(rps_25)	0.32	2008	6.3
最低値(rps_low)	0.14	854	6.3

補足表 5-2. 2021 年の再生産関係の仮定と将来の平均親魚量の推移（千トン）

再生産関係	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2043	2053
rps_high	6.3	11.0	14.5	15.0	14.9	14.7	14.7	14.6	14.6	14.6	14.6	14.5	14.6	14.7	14.6
rps_75	6.3	9.0	11.2	13.1	14.0	14.4	14.5	14.6	14.6	14.6	14.5	14.5	14.6	14.7	14.6
original	6.3	7.9	9.1	11.4	12.9	13.8	14.2	14.4	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.7	14.6
rps_25	6.3	7.5	8.2	10.5	12.1	13.3	13.9	14.3	14.4	14.5	14.5	14.5	14.5	14.7	14.6
rps_low	6.3	6.5	6.1	8.3	9.8	11.5	12.7	13.5	14.0	14.3	14.4	14.4	14.5	14.7	14.6

漁獲管理規則案での調整係数 β を 0.8 にした場合の将来予測。2022 年は現状の漁獲圧（ $F_{current}$ ）で漁獲し、2023 年から漁獲管理規則案による漁獲とした。

補足表 5-3. 2021 年の再生産成功率が過去最低値であった場合に将来の親魚量が限界管理基準値案を上回る確率 (%)

β	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2043	2053
1	100	100	59	85	89	94	96	97	98	99	99	100	99	100	100
0.9	100	100	59	88	93	96	98	99	99	99	100	100	100	100	100
0.8	100	100	59	91	95	98	99	99	100	100	100	100	100	100	100
0.7	100	100	59	94	97	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.6	100	100	59	96	98	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.5	100	100	59	97	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Fcurrent	100	100	59	81	87	91	94	96	97	98	98	99	99	100	100

漁獲管理規則案での調整係数 β を 0.5～1.0 にて 0.1 刻みで変更した場合の将来予測。2022 年は現状の漁獲圧 (Fcurrent) で漁獲し、2023 年から漁獲管理規則案による漁獲とした。比較のため Fcurrent ($\beta = 1.01$ に相当) で漁獲を続けた場合の結果も示した。太字は漁獲管理規則案による管理開始から 10 年後を示す。

補足表 5-4. 2021 年の再生産成功率が過去最低値であった場合に将来の親魚量が目標管理基準値案を上回る確率 (%)

β	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2043	2053
1	0	0	0	4	10	20	28	32	36	39	40	41	43	45	45
0.9	0	0	0	5	12	25	35	42	47	50	51	51	54	56	55
0.8	0	0	0	5	15	32	44	52	59	62	64	64	66	66	66
0.7	0	0	0	6	19	39	54	65	72	75	76	76	78	79	78
0.6	0	0	0	7	24	48	66	77	83	86	87	88	88	89	89
0.5	0	0	0	8	29	59	77	88	92	94	95	95	95	96	96
Fcurrent	0	0	0	4	10	19	26	30	35	37	38	39	41	44	43

漁獲管理規則案での調整係数 β を 0.5～1.0 にて 0.1 刻みで変更した場合の将来予測。2022 年は現状の漁獲圧 (Fcurrent) で漁獲し、2023 年から漁獲管理規則案による漁獲とした。比較のため Fcurrent ($\beta = 1.01$ に相当) で漁獲を続けた場合の結果も示した。太字は漁獲管理規則案による管理開始から 10 年後を示す。

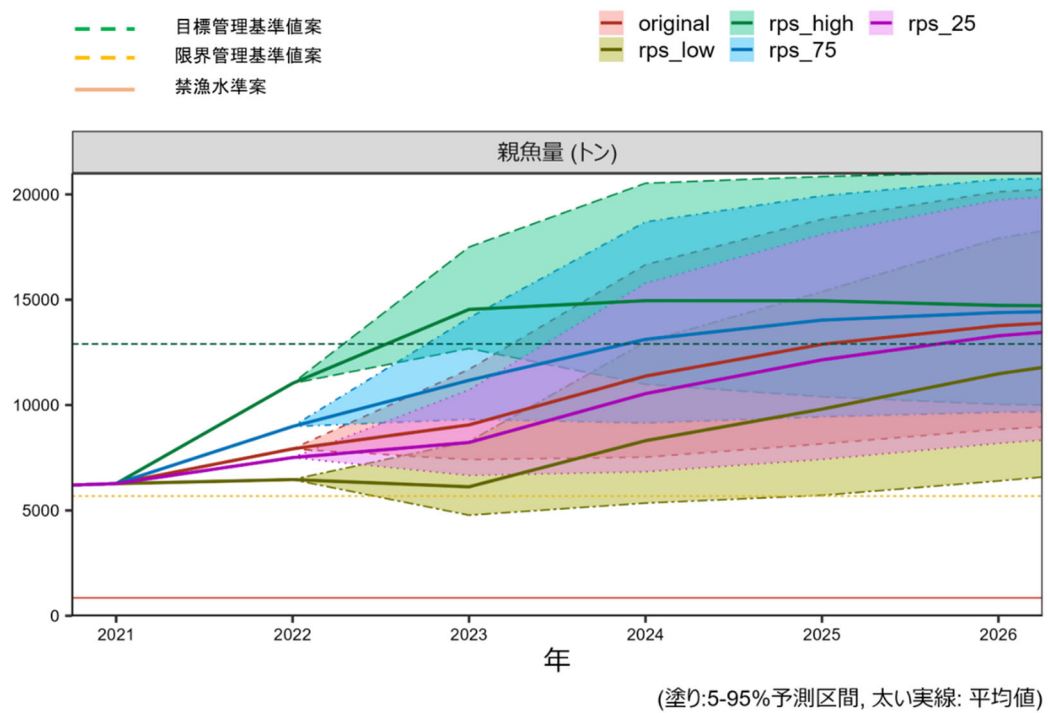


図 5-1. 2021 年の再生産関係の仮定による将来の平均親魚量の推移の違い

太実線は平均値、網掛けは加入残差を考慮した 5,000 回シミュレーション結果の 90%が含まれる 90%予測区間の例示である。図中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。色の違いは 2021 年の再生産関係の仮定を示す。調整係数 β には 0.8 を用いた。

参考文献

安田十也、片町太輔、河野悌昌、高橋正知、渡邊千夏子、渡井幹雄、木下順二、井元順一 (印刷中) 令和 4 (2022) 年度サワラ瀬戸内海系群の資源評価. FRA-SA2022-RC03-03.