

令和 3（2021）年度マダラ本州太平洋北部系群の 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 2 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の候補として、資源評価により推定された 1996～2018 年の親魚量と加入量の情報に対し、残差の自己相関も同時推定したリッカー（RI）型再生産関係の適用を提案する。再生産関係のパラメータ推定方法には最小二乗法を使用した。ただし、近近年の加入量は推定された再生産関係よりも少ない傾向があったことから、近年の再生産関係からの残差を考慮して将来予測を行った。目標管理基準値案として、再生産関係に基づき算出される SB_{msy} （1.09 万トン）を、限界管理基準値案として、 $SB_{0.6msy}$ （3,200 トン）を提案する。禁漁水準として、 $SB_{0.1msy}$ （400 トン）を提案する。目標管理基準値案（ SB_{msy} ）を達成する漁獲圧（ F_{msy} ）は、現状（2017～2019 年の平均の漁獲係数）の 0.78 倍である。

（本資料における、再生産関係および MSY や F_{msy} 、 SB_{msy} については、令和 2 年度の資源評価結果に基づき、令和 3 年 3 月 11 日に開催されたマダラ本州太平洋北部系群の新たな資源管理に関する研究機関会議で議論され、令和 3 年 3 月 26 日にマダラ本州太平洋北部系群の簡易版として公表されている。本資料における当該部分については、前記会議において検討に用いられた資料からの転記となっている。一方、将来予測および漁獲管理規則については、令和 3 年度資源評価により更新されたデータを元に作成されている。）

親魚量 (千トン)	現状の親魚量 (2020年漁期) 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(2017～ 2019年漁 期)に対する 比*	説 明
目標管理基準値案					
10.9	3.41	0.17	20.2	0.78	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					
3.2	1.01	0.05	12.1	1.29	MSYの60%の漁獲が得 られる親魚量(SB0.6msy)
禁漁水準案					
0.4	0.12	0.01	2.0	1.56	MSYの10%の漁獲が得 られる親魚量(SB0.1msy)
2020年漁期					
3.2	1.00	0.05	6.8**	-	2020年漁期の値

* 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水準案を計算する際の、現状の年齢別漁獲係数に乗じる係数を示す。

** 2020年の実際の漁獲量(暫定値)を示す(漁期は4月～翌年3月)。

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(コミット番号6c12565)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)(FRA2020-ABCWG01-02)」を参照のこと。

データセット	基礎情報、関係調査等
再生産関係・神戸チャート	令和2(2020)年度 マダラ太平洋北部系群の資源評価(水産庁・水産機構)
資源量・親魚量・漁獲係数	令和3(2021)年度 マダラ本州太平洋北部系群の資源評価(水産庁・水産機構)

1-2) 再生産関係の検討

本系群の管理基準値案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、ホッケー・スティック型（HS）再生産関係、リッカー型（RI）再生産関係、およびベバートン・ホルト型（BH）再生産関係を仮定した場合について検討した。再生産関係データとしては令和 2（2020）年度の資源評価で推定された 1996～2018 年漁期の親魚量と翌年（1997～2019 年漁期）の 1 歳時点の加入量の推定値を使用した。

再生産関係式のパラメータ推定のための最適化方法には、最小二乗法および最小絶対値法を検討した。残差に自己相関を考慮したモデルと考慮しないモデルを検討し、さらに自己相関を考慮したモデルでは、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）の両方を検討した（補足資料 2）。

検討した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、いずれの再生産関係式を用いた場合でも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ることとした（補足資料 1）。いずれの再生産関係式でも残差の自己相関は有意であり、自己相関を考慮する必要性が認められた（補足資料 1）。同時推定と二段階推定の自己相関係数は HS 型では近い値を示していた一方で、RI 型および BH 型ではやや差が大きかった。補正赤池情報量規準（AICc）は、自己相関を考慮しなかった場合には HS 型で最も低く、次いで RI 型、BH 型となっていたが、自己相関を同時推定場合には、RI 型で最も低く、次いで BH 型、HS 型の順となっていた（表 1）。年別のデータを除くことによるパラメータへの影響をジャックナイフ法で調べたところ、BH 型の自己相関同時推定、二段階推定および HS 型の同時推定で影響が大きかった一方で、HS 型の二段階推定および RI 型の同時推定では影響が小さく、安定していることが示された（補足資料 1）。

1-3) 再生産関係の候補

「再生産関係ガイドライン（FRA-SA2020-ABCWG01-03）」の 3.a（予測力）、3.b（生物学的妥当性）および 3.h（自己相関）基準に従い、本系群の再生産関係の候補として、最適化法を最小二乗法とし、自己相関を同時推定した RI 型再生産関係を提案する（図 1）。

これは、上述の検討の結果に加え、本海域では大型のマダラによる小型のマダラの捕食が確認されていること（橋本 1974）、魚食性は 2 歳以上から高まること（Narimatsu et al. 2015）、資源が高水準期になると 2 歳以上の個体が 0 歳魚の分布域に進出し、分布の重複が起こるようになることから（三澤ほか 2020）、親魚を含む 2 歳以上の個体の増大は、加入の減少につながると考えられるためである。

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には、「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）」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 2 年度の資源評価で用いた各種設定および生物パラメータ（自然死亡係数、年齢別平均体重および年齢別成熟率）を使用した（表 2）。

本系群は年代によって成熟率が変化することが知られており、資源状態と関係が指摘されている（Narimatsu et al. 2010）。近年のデータでも年齢別資源尾数と成熟率には負の相関が認められており（補足資料 3）、将来予測には資源尾数の増減による年齢別成熟率の変化を考慮して親魚量を計算した。ただし、年齢別成熟率の最大値、最小値はそれぞれ過去に観測された値の範囲内にあると仮定した。

管理基準値等を達成する漁獲圧と現状の漁獲圧の比は、令和 3 年度資源評価における現状の漁獲圧の%SPR を基準に計算した。なお、現状の漁獲圧（F2017-2019、図 2、表 2）は、管理基準値案の算出に用いた選択率（表 2）の下で、令和 3 年度資源評価における近年 3 年（2017～2019 年漁期）の平均漁獲圧に相当する%SPR と等しくなるように F 値を調整した値である。漁獲管理規則案に基づく将来予測においても、この F2017-2019 を現状の漁獲圧として使用した。本系群では、平均世代時間（6 年）の 20 倍の年数（120 年）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。

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案（ SB_{target} ）として MSY 水準における親魚量（ SB_{msy} ：1.09 万トン）、限界管理基準値案（ SB_{limit} ）として MSY の 60%の漁獲が得られる親魚量（ $SB_{0.6msy}$ ：3,200 トン）、禁漁水準案（ SB_{ban} ）として MSY の 10%の漁獲が得られる親魚量（ $SB_{0.1msy}$ ：400 トン）を用いることを提案する。これらはいずれも ABC 算定のための基本指針における標準値である。

各基準値案について、漁業がなかった場合を仮定した初期親魚量（ SB_0 ）に対する比、平衡状態の時の平均漁獲量、%SPR 換算した漁獲圧、漁獲割合、現状の漁獲圧に対する比、および MSY を実現する漁獲圧における年齢別漁獲係数（ F_{msy} ）を表 3 に示す。目標管理基準値として提案する SB_{msy} は SB_0 の 17%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 2.02 万トンである。また、目標管理基準値案に対応する漁獲圧（MSY を与える漁獲圧）の、現状の漁獲圧に対する比（ $F_{msy}/F_{2017-2019}$ ）は 0.78 で、その時の漁獲割合（ U_{msy} ）は、42%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 5%、禁漁水準として提案する $SB_{0.1msy}$ は SB_0 の 1%である。

F を変えた場合の平衡状態における親魚量およびこれに対する年齢別漁獲量の平均値を図 3 に示す。親魚量が限界管理基準値案以下では、期待できる漁獲は 3 歳以下の個体がほとんどを占める。目標管理基準値案である SB_{msy} 以上の親魚量では、漁獲に占める 2 歳魚の割合が最も多いものの、高齢魚の占める比率が高くなる。

2-3) 神戸プロット

目標管理基準値案である SB_{msy} と、その時の漁獲圧 F_{msy} を基準にした神戸プロットを図 4 に示す。各年の親魚量および漁獲係数（F 値）は、令和 3 年度の資源評価で推定された値である。データがある 1996～2020 年のうち、親魚量は合計 14 年で、F 値は合計 15 年で MSY 水準を下回っていた。2007～2015 年漁期にかけて親魚量は SB_{msy} を上回っていたが、2016 年漁期以降は大きく下回り、現状の親魚量（2020 年漁期の親魚量：3,200 トン）は限界管理基準値案をわずかに下回った。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 3.41、1.01 および 0.12 である。

2-4) 漁獲管理規則案

漁獲管理規則 (HCR) は、限界管理基準値、および禁漁水準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を下回ると禁漁水準まで直線的に漁獲圧を下げることを定めている。F 値の上限となる F_{msy} には調整係数 β を乗じる。限界管理基準値案および禁漁水準案に本資料で提示した値を用いた場合 (すなわち、 $SB_{limit}=SB0.6msy$ 、 $SB_{ban}=SB0.1msy$ 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、この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。

2-5) 加入量の設定

本報告で提案した再生産関係は、全年の再生産データをもとに最小二乗法で最適化した自己相関を考慮した RI 型の再生産関係を用いて算出した。しかし、この再生産関係における 2015～2019 年の観測値の残差は、推定値よりも低い傾向があった (図 6a)。この要因は明らかになっていないが、これまでも 5～10 年程度は正の残差や負の残差が続く傾向があること、直近の新規加入量調査でも若齢魚が少ないこと (成松ほか 2021) から、今後数年間は近年と同様に RI 型再生産関係から予測されるよりも低い加入量が高い頻度で起こることが想定される。そこで、近年観測された RI 型再生産関係からの負の残差傾向を考慮した加入シナリオを以下のように設定し、将来予測に用いた。

(1) 残差の傾向

再生産関係からの残差は、1996～2002 年および 2015～2019 年で負に偏り、2003～2014 年で正に偏っていた (図 6a)。一方、親魚量と残差の間には明瞭な関係は認められなかった (図 6b)。そのため、ここでは残差の傾向が 5～10 年程度の環境変化に影響を受けることを想定して、将来の加入量を設定した。

(2) 将来の加入量の設定

将来の加入量は、再生産関係からの予測値に過去の観測値の残差のランダムなリサンプリングによって与えた。リサンプリングするデータは 5 年単位に区切り、年を遡るように以下のように実施した (バックワードリサンプリング、図 7)。

- ・将来予測の 1～5 年目：過去 5 年分 (2016～2020 年) の残差を重複を許してリサンプリングした。
- ・将来予測の 6～10 年目：過去 5 年分 (2016～2020 年) の残差、または 6～10 年前 (2011～2015 年) の残差のどちらかをランダムに選び、選んだ方の 5 年分の残差の重複を許してリサンプリングした。
- ・将来予測の 11 年目以降：上記の手順で 5 年ごとに残差をリサンプリングする範囲を追加した。2041 年以降の予測は全残差データのリサンプリングとなる。

図 6a では、5 年ずつに区切ったりサンプリング単位を灰色の破線で示した。このようなサンプリングのやり方により、短期的には直近の環境条件を反映するような加入を想定し、中長期的にはそれ以前の過去の条件を反映するような加入を想定した。

2-6) 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

近年の傾向を考慮した加入シナリオで限界管理基準値案・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 5a）で将来予測した場合の、加入尾数、親魚量、資源量、漁獲量、漁獲割合および漁獲圧の比（ F/F_{msy} ）推移を図 8 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 2022 年漁期から開始し、2022 年漁期の親魚量には、2020 年漁期の資源量から現状の漁獲圧（ $F_{2017-2019}$ ）で漁獲した場合に予測される値（4,200 トン）を用いた。

予測される 2022 年漁期の親魚量は限界管理基準値案である $SB_{0.6msy}$ を上回っているため、漁獲管理規則案に従い、まず βF_{msy} での漁獲が行われる。中長期的には、親魚量は限界管理基準値案を超えるため、 βF_{msy} での漁獲となる。 $\beta=0.8$ では、漁獲管理規則案での漁獲開始から 7 年後の 2029 年に親魚量が目標管理基準値案を 47%の確率で上回り、翌 2030 年には 56%、10 年後の 2032 年漁期においても 56%の確率で目標管理基準値案を上回ると予測された（表 4）。 βF_{msy} 漁獲の継続により漁獲量は MSY 水準よりやや少なく、親魚量は SB_{msy} よりもやや高めに推移していくと予測される。

(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 0.0～1.0 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およびそのまとめを表 4～9 に示した。それぞれの表には、 $F_{2017-2019}$ で漁獲を継続した場合の結果も比較のため示した。 $\beta=0.8$ では、漁獲管理規則案での漁獲開始から 10 年後の 2032 年漁期では、56%の確率で目標管理基準値案を上回ると予測されたのに対し、 β が 0.9 以上では、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（表 4）。限界管理基準値については、 β が 1 であっても 2022 年漁期以外の年で 95%以上の確率で限界管理基準値案となる親魚量を維持できることが示された（表 5）。2022 年漁期以降の親魚量は β が低い程多くなり（表 7）、2022 年漁期の漁獲量は β が 1 の場合のみ現状（2020 年漁期：6,800 トン）より多くなった（表 8）。

3. まとめ

本系群の再生産関係のモデルには、資源評価で推定された 1996～2018 年漁期の親魚量と翌年（1997～2019 年漁期）の 1 歳時点の加入量に基づき、自己相関を考慮した（同時推定）RI 型再生産関係を適用し、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 を達成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} （1.09 万トン）とすることを提案する。限界管理基準値案、

禁漁水準案には、標準値である SB0.6msy (3,200 トン)、SB0.1msy (400 トン) をそれぞれ提案する。なお、近年は再生産関係における観測地の残差が推定値よりも低い傾向があったため、近年の傾向を考慮した加入シナリオを将来予測に用いることを提案する。

現在の本系群の親魚量は限界管理基準値案を若干下回っていると推定されるものの、現状の漁獲圧でも 2022 年漁期には限界管理基準値案を上回ると予測される。MSY を実現する漁獲割合は 42% であり、MSY を実現する漁獲圧は現状の漁獲圧 (2017～2019 年漁期の平均) の 0.78 倍である (表 3)。

4. 今後の検討事項

再生産関係では自己相関が有意であり、年代による傾向が認められている。しかし、データのある年数が比較的短いため、将来予測においては不確実性が高い。また、近年の傾向考慮した加入シナリオを将来予測に充てたが、今後の動向を注視し、それに応じて対応する必要がある。

5. 引用文献

- ABCWG (2020) 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-ABCWG02-01.
- ABCWG (2020) 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.
- ABCWG (2020) 再生産関係の決定に関するガイドライン. FRA-SA2020-ABCWG01-03.
- 橋本良平 (1974) 東北海区漁場におけるマダラの食性と生息水深の変動に関する研究. 東北水研研報, **33**, 51-67.
- 三澤 遼・成松庸二・鈴木勇人・森川英祐・時岡 駿・永尾次郎 (2020) 2019 年底魚類現存量調査結果. 東北底魚研究, **40**, 30-52.
- Narimatsu, Y., T. Sohtome, M. Yamada, Y. Shigenobu, Y. Kurita, T. Hattori and R. Inagawa (2015) Why do the radionuclide concentrations of Pacific cod depend on the body size? In: Impact of the Fukushima nuclear accident on fish and fishing grounds, ed. K. Nakata and H. Sugisaki, Springer Japan, Tokyo, pp. 123-138.
- 成松庸二・鈴木勇人・森川英祐・時岡 駿・三澤 遼・金森由妃・森 友彦・雁部総明・安倍裕喜・飯田隼人 (2021) 東北海域におけるマダラ・スケトウダラ新規加入量調査. 東北底魚研究 **41**, 149-161..
- Narimatsu, Y., Y. Ueda, T. Okuda, T. Hattori, K. Fujiwara and M. Ito (2010) The effect of temporal changes in life-history traits on reproductive potential in an exploited population of Pacific cod, *Gadus macrocephalus*. ICES J. Mar. Sci., **67**, 1659-1666.

(執筆者：成松庸二・鈴木勇人・森川英祐・時岡 駿・三澤 遼・金森由妃・
富樫博幸・柴田泰宙)

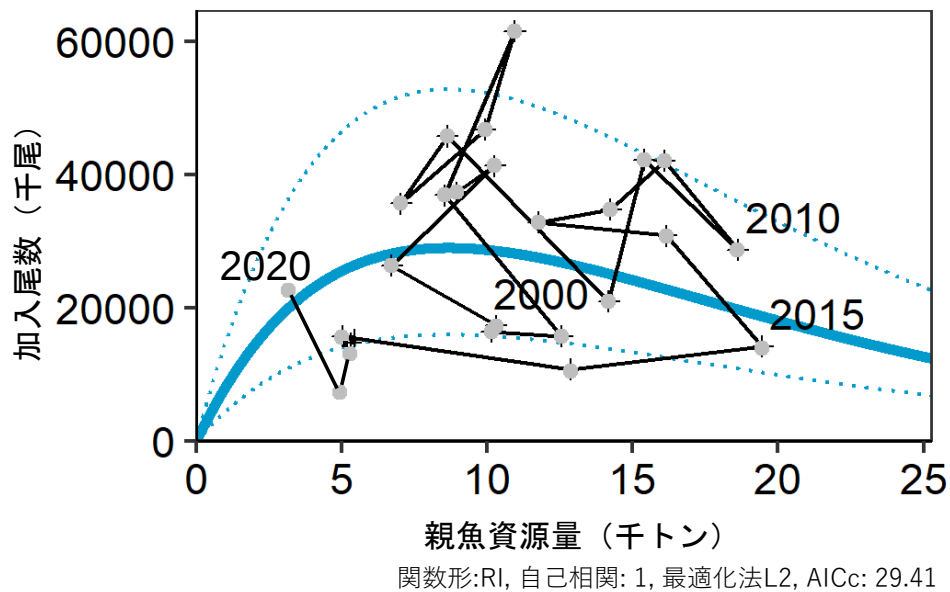


図 1. 再生産関係

1996～2018 年における親魚資源量と翌年（1997～2019 年）の 1 歳の加入量から求めた再生産関係。プロットは最新の資源評価結果から求めたものである。図中の数字は 1 歳魚が加入した年を示す。再生産関係には自己相関を同時推定したリッカー型 (RI) 再生産式を用い、最小二乗法によりパラメータを推定した。破線は仮定される再生産関係において観測データの 90%が含まれると推定される範囲である。

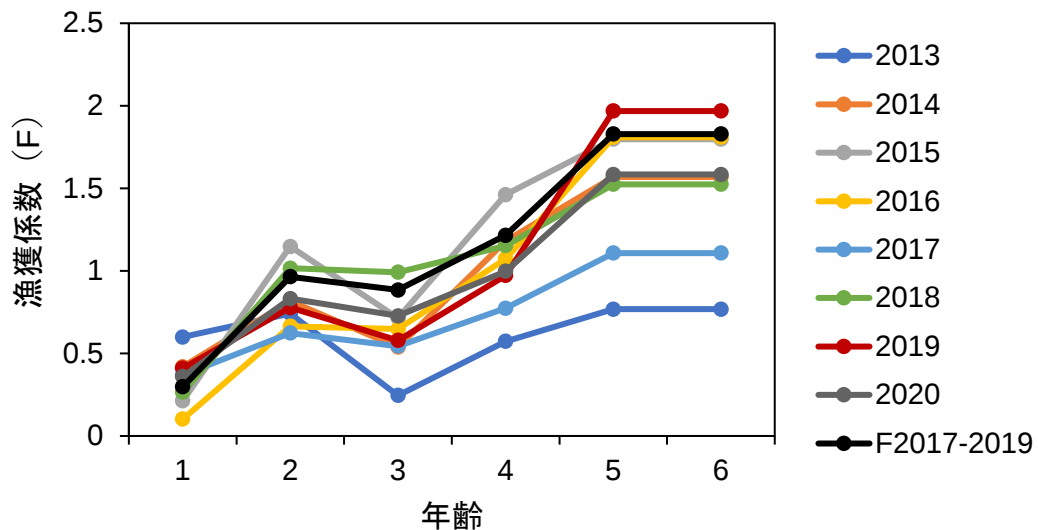


図 2. 年齢別の漁獲係数 (F 値)

2013 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であり、2017～2019 年の F 値の平均である。

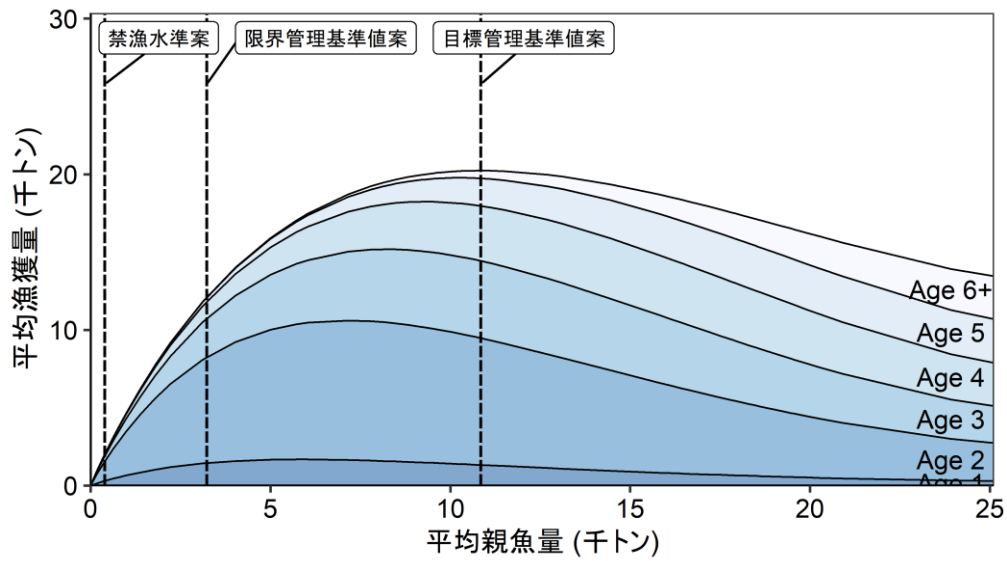


図3. 管理基準値案および禁漁水準案と年齢別漁獲量曲線の関係

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。

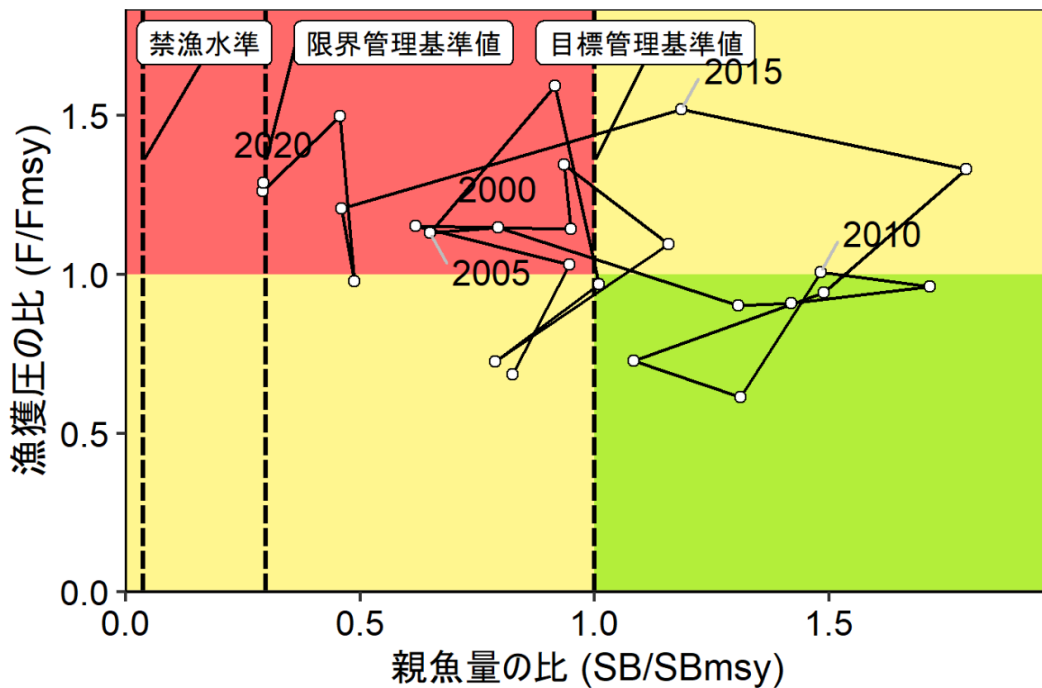
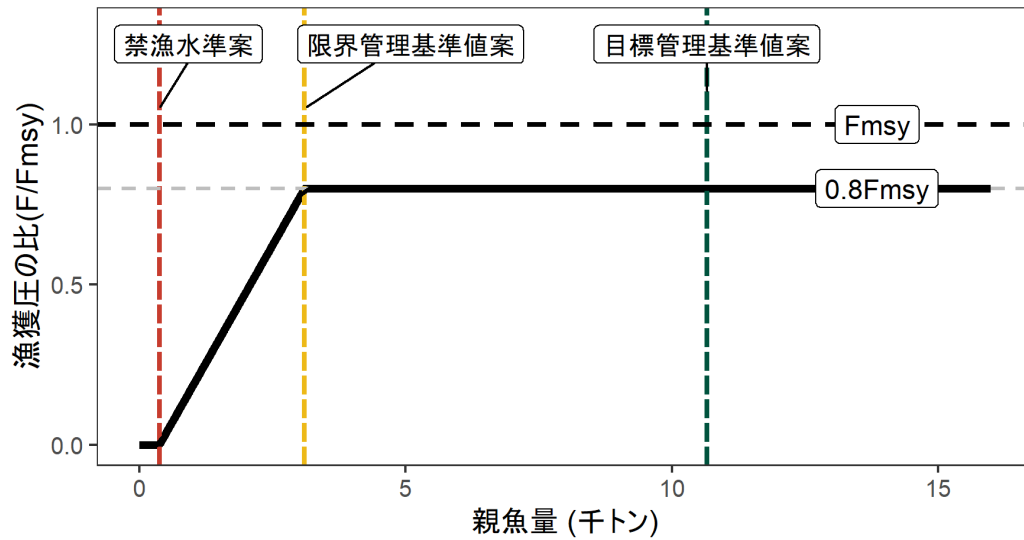


図4. 神戸プロット

縦軸は漁獲圧 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。プロットは令和3年度の資源評価で推定された値である。

a) 縦軸を漁獲圧にした場合



b) 縦軸を漁獲量にした場合

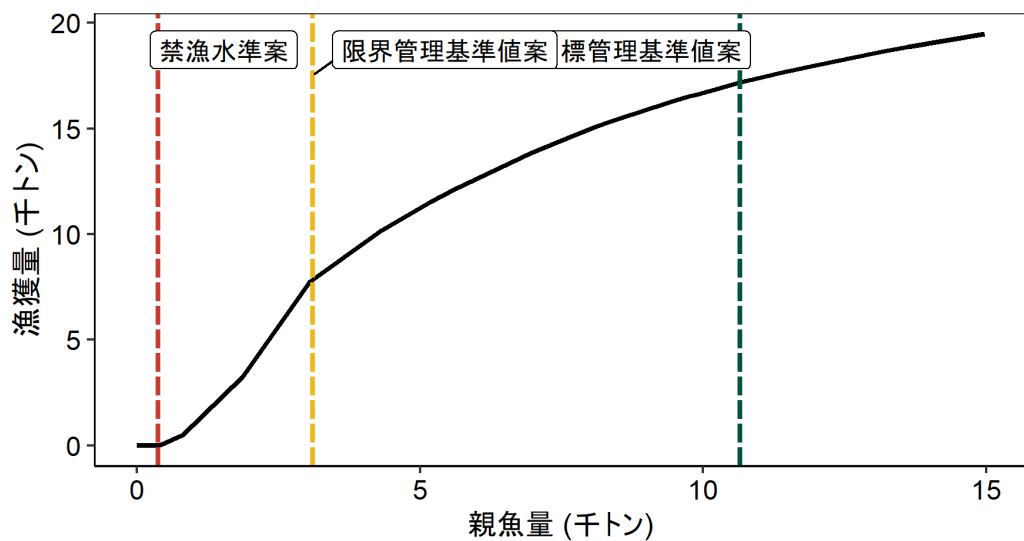


図 5. 漁獲管理規則 (HCR) 案

目標管理基準値案 (SBtarget) は RI 型再生産関係に基づき算出した SB_{msy} である。限界管理基準値案 (SBlimit) および禁漁水準案 (SBban) に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: F_{msy} 、灰色破線: $0.8F_{msy}$ 、黒太線: HCR、赤破線: 禁漁水準案、黄色破線: 限界管理基準値案、緑色破線: 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。

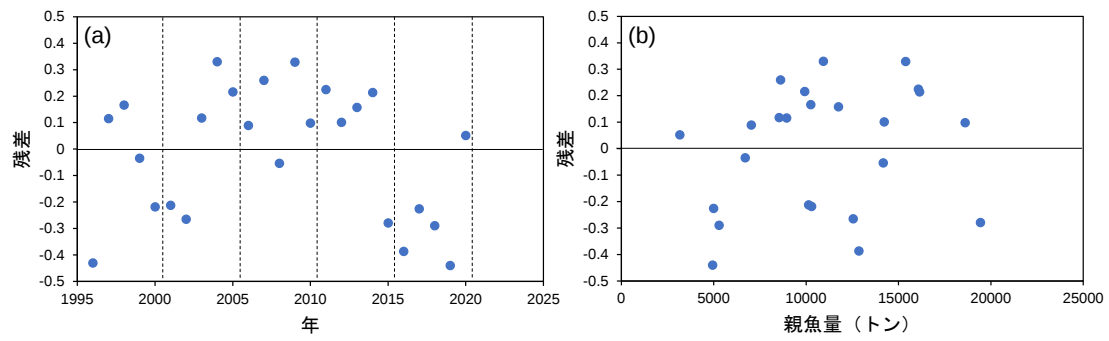


図 6. 標準再生産関係からの残差 ($\log(\text{予測値}/\text{観測値})$) 左図 (a) は横軸を年とし、右図 (b) は横軸を親魚量とした。左図の縦の破線は直近年から 5 年毎の区切りを示す。

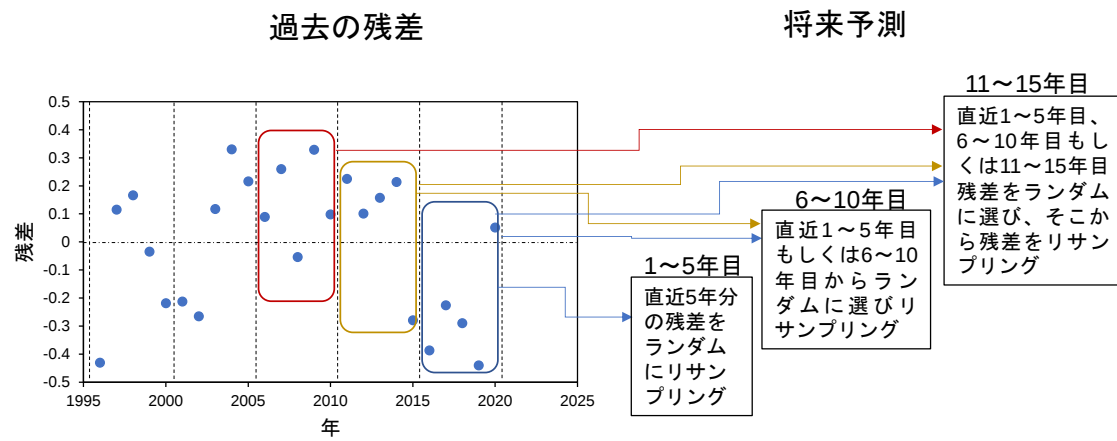


図 7. 近年の加入に準じたシナリオにおけるバックワードリサンプリングの概念図

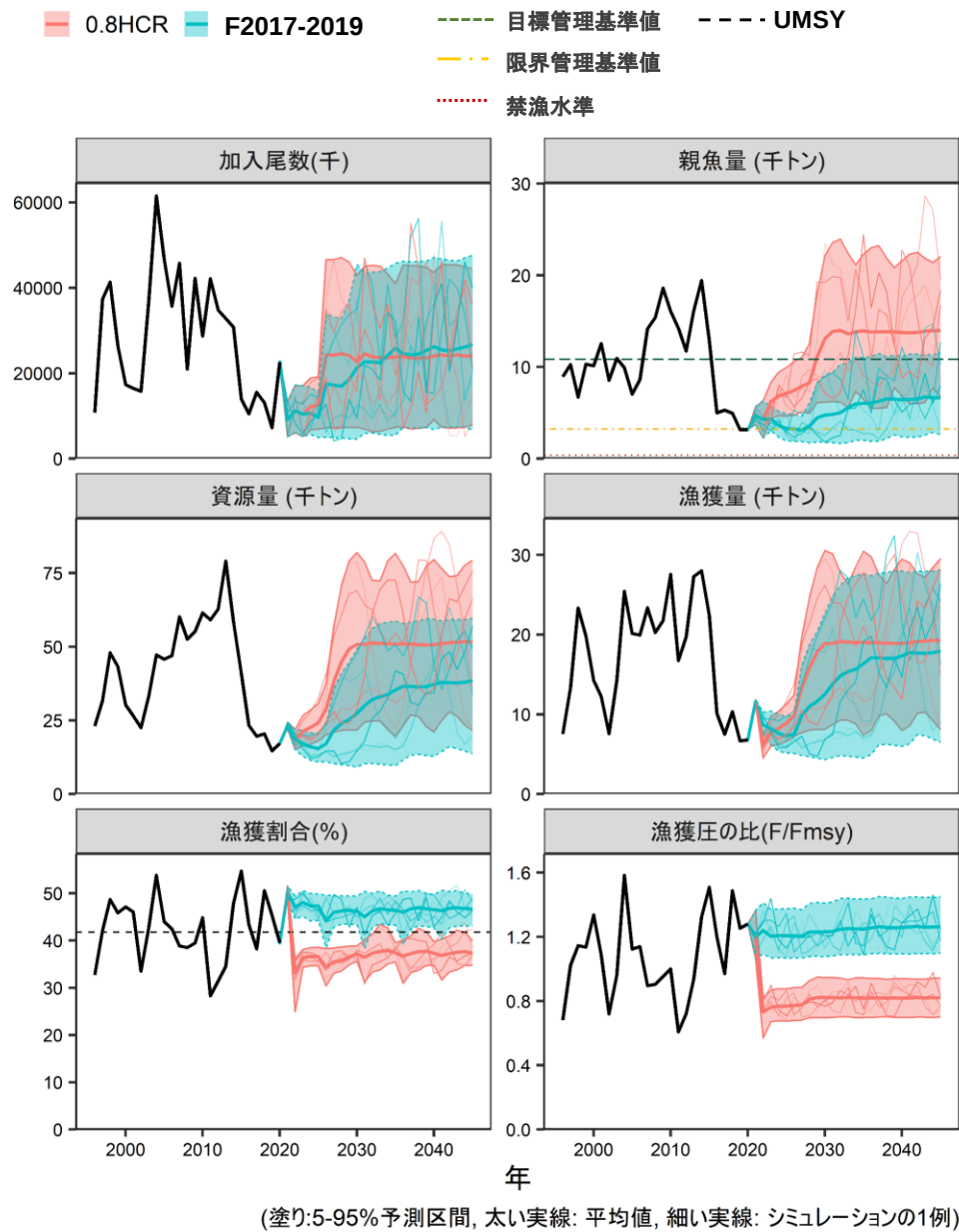


図8. 管理基準値案に基づく漁獲管理規則案を用いた将来予測と現状の漁獲圧で漁獲を続けた場合の将来予測の比較

水色は現状の漁獲圧（F2017-2019）で漁獲を続けた場合、オレンジは漁獲管理規則案（F の上限は $0.8F_{msy}$ ）に基づく漁獲を行った場合を示す。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、黄点破線は限界管理基準値案、赤点線は禁漁水準案を示す。漁獲割合の図の破線は U_{msy} を示す。2021 年漁期の漁獲量は予測される資源量と F2017-2019 により仮定した。漁獲管理規則案（2022 年漁期以降）は標準の管理基準値案に基づく（図 5）。調整係数 β には 0.8 を用いた。

表 1. 候補となる再生産関係式

再生産関係式	最適化法	自己相関	AICc
リッカー型	最小二乗法	同時	29.4
ベバートン・ホルト型	最小二乗法	同時	30.9
ホッケー・スティック型	最小二乗法	同時	31.0
ホッケー・スティック型	最小二乗法	なし	34.4
リッカー型	最小二乗法	なし	35.8
ベバートン・ホルト型	最小二乗法	なし	37.4

提案する再生産関係式を太字とした。

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)	選択率	現状の漁獲圧 (F2017-2019)
1	0.357	0	285	0.16	0.30
2	0.357	0	1,239	0.53	0.96
3	0.357	0.02~0.72	2,402	0.48	0.88
4	0.357	0.34~0.96	3,999	0.66	1.22
5	0.357	1	5,788	1.00	1.81
6 歳以上	0.357	1	8,065	1.00	1.81

将来予測における 3、4 歳の成熟率 (Maa) はそれぞれ以下の式による。

3 歳 : $Maa = -5.24 \times 10^{(-8)} N_{age3} + 0.48$ ($0.72 \geq Maa \geq 0.02$)

4 歳 : $Maa = -5.67 \times 10^{(-8)} N_{age4} + 0.87$ ($0.96 \geq Maa \geq 0.34$)

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 (F2017-2019) に対する努力量の比 MSY を実現する漁獲圧における年齢別漁獲係数 (Fmsy) も下段に示した。

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(%)	漁獲圧の 比
目標管理基準値案	SBmsy	10.9	0.17	20.2	11.9	41.7	0.78
限界管理基準値案	SB0.6msy	3.2	0.05	12.1	4.2	52.1	1.29
禁漁水準案	SB0.1msy	0.4	0.01	2.0	2.6	56.1	1.56
MSY を実現する漁獲 圧	Fmsy	(1 歳, 2 歳, 3 歳, 4 歳, 5 歳, 6 歳以上) = (0.23, 0.75, 0.69, 0.95, 1.42, 1.42)					

表 4. 将来の親魚量が目標管理基準値案を上回る確率 (%)

β	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2042	2052
1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	18	34	37	37	46	47
0.9	0	0	0	0	0	0	0	1	5	30	46	49	49	59	59
0.8	0	0	0	0	1	2	4	6	14	47	56	56	56	67	68
0.7	0	0	0	0	4	10	17	27	33	67	71	71	70	73	75
0.6	0	0	0	1	13	34	47	62	64	88	88	87	85	79	81
0.5	0	0	0	2	32	65	79	90	90	98	97	96	94	82	83
0.4	0	0	0	4	57	90	96	99	100	100	100	99	98	81	82
0.3	0	0	0	8	81	99	100	100	100	100	100	100	99	80	85
0.2	0	0	0	16	95	100	100	100	100	100	100	100	99	94	98
0.1	0	0	0	27	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0	0	0	0	41	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
F2017-2019	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	3	7	8

漁獲管理規則案での調整係数 β を 0.0～1.0 にて 0.1 刻みで変更した場合の将来予測。2021 年漁期は F2017-2019 で漁獲し、2022 年漁期から漁獲管理規則案による漁獲とした。比較のため、F2017-2019 で漁獲を続けた場合の結果も示した。

表 5. 将来の親魚量が限界管理基準値案を上回る確率 (%)

β	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2042	2052
1	0	99	78	99	98	95	95	97	95	98	99	99	99	100	100
0.9	0	99	78	100	100	99	99	99	99	100	100	100	100	100	100
0.8	0	99	78	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.7	0	99	78	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.6	0	99	78	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.5	0	99	78	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.4	0	99	78	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.3	0	99	78	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.2	0	99	78	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.1	0	99	78	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0	0	99	78	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
F2017-2019	0	99	78	92	65	50	47	43	53	64	63	62	60	87	88

漁獲管理規則案での調整係数 β を 0.0～1.0 にて 0.1 刻みで変更した場合の将来予測。2021 年漁期は F2017-2019 で漁獲し、2022 年漁期から漁獲管理規則案による漁獲とした。比較のため、F2017-2019 で漁獲を続けた場合の結果も示した。

表 6. 将来の親魚量が禁漁水準を上回る確率 (%)

β	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2042	2052
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
0.4	100	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	100
0.2	100	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	100
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
F2017-2019	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 0.0～1.0 にて 0.1 刻みで変更した場合の将来予測。2021 年漁期は F2017-2019 で漁獲し、2022 年漁期から漁獲管理規則案による漁獲とした。比較のため、F2017-2019 で漁獲を続けた場合の結果も示した。

表 7. 将来の平均親魚量の推移 (千トン)

β	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2042	2052
1	3.2	4.7	4.2	5.5	5.3	5.2	5.3	5.5	5.9	7.9	8.9	9.2	9.3	10.4	10.5
0.9	3.2	4.7	4.2	5.8	6.0	6.1	6.2	6.6	7.0	9.3	10.8	11.3	11.4	12.0	12.1
0.8	3.2	4.7	4.2	6.2	6.8	7.1	7.4	7.9	8.3	11.1	13.1	13.9	14.0	13.8	13.9
0.7	3.2	4.7	4.2	6.7	7.8	8.4	8.9	9.6	9.9	13.2	15.8	16.8	17.1	15.9	15.8
0.6	3.2	4.7	4.2	7.1	8.8	10.0	10.8	11.7	12.1	15.7	19.0	20.2	20.6	18.5	18.2
0.5	3.2	4.7	4.2	7.6	10.0	11.9	13.2	14.4	14.9	18.7	22.5	23.8	24.1	21.8	21.2
0.4	3.2	4.7	4.2	8.1	11.4	14.3	16.3	18.1	18.7	22.4	26.4	27.4	27.1	25.9	25.1
0.3	3.2	4.7	4.2	8.6	13.0	17.2	20.3	23.0	24.1	27.3	30.7	30.5	28.7	30.9	31.0
0.2	3.2	4.7	4.2	9.2	14.8	20.8	25.7	29.8	31.6	34.0	35.3	32.8	28.5	37.1	41.7
0.1	3.2	4.7	4.2	9.8	16.8	25.3	32.9	39.4	42.8	43.8	41.6	35.4	28.0	48.8	64.2
0	3.2	4.7	4.2	10.5	19.2	30.9	42.8	53.5	59.8	59.7	53.4	43.3	33.0	76.3	74.2
F2017-2019	3.2	4.7	4.2	4.3	3.6	3.3	3.2	3.1	3.5	4.5	4.8	4.8	5.0	6.5	6.7

漁獲管理規則案での調整係数 β を 0.0～1.0 にて 0.1 刻みで変更した場合の将来予測。2021 年漁期は F2017-2019 で漁獲し、2022 年漁期から漁獲管理規則案による漁獲とした。比較のため、F2017-2019 で漁獲を続けた場合の結果も示した。

※ 黄色網掛けは目標管理基準値案を下回ることを示す。

表 8. 将来の平均漁獲量の推移（千トン）

β	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2042	2052
1	6.8	11.6	7.2	8.3	8.1	8.4	9.1	12.4	14.3	16.0	16.8	17.5	18.5	19.8	20.1
0.9	6.8	11.6	6.6	8.1	8.3	8.7	9.5	13.0	15.2	17.0	17.9	18.3	19.0	19.7	19.9
0.8	6.8	11.6	6.1	7.8	8.3	8.9	9.8	13.4	15.8	17.8	18.9	18.9	19.2	19.1	19.3
0.7	6.8	11.6	5.5	7.4	8.2	9.0	10.1	13.5	16.0	18.2	19.4	19.1	18.8	18.3	18.4
0.6	6.8	11.6	4.9	7.0	8.0	9.1	10.2	13.3	15.7	17.8	19.1	18.6	18.0	17.2	17.2
0.5	6.8	11.6	4.2	6.3	7.7	8.9	10.1	12.8	14.8	16.7	17.9	17.3	16.4	15.8	15.8
0.4	6.8	11.6	3.5	5.6	7.1	8.5	9.7	11.9	13.4	14.7	15.5	14.9	14.0	14.1	14.2
0.3	6.8	11.6	2.7	4.6	6.2	7.7	8.9	10.5	11.4	12.0	12.3	11.6	10.7	11.9	12.5
0.2	6.8	11.6	1.9	3.4	4.8	6.3	7.4	8.5	8.9	8.9	8.6	7.8	7.0	8.9	10.6
0.1	6.8	11.6	1.0	1.9	2.8	3.9	4.7	5.4	5.6	5.3	4.8	4.1	3.4	5.7	8.1
0	6.8	11.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
F2017-2019	6.8	11.6	8.7	8.2	7.6	7.3	7.5	9.9	11.0	11.7	12.5	13.8	14.9	17.7	18.2

漁獲管理規則案での調整係数 β を 0.0～1.0 にて 0.1 刻みで変更した場合の将来予測。2021 年漁期は F2017-2019 で漁獲し、2022 年漁期から漁獲管理規則案による漁獲とした。比較のため、F2017-2019 で漁獲を続けた場合の結果も示した。

表 9. 予測される親魚量・漁獲量と親魚量が管理基準値案を上回る確率のまとめ

β	10 年後 の目標 達成確 率	予測平均親魚量 (千トン)		予測平均漁獲量 (千トン)			リスク (10 年間に 1 度で も起きる確率)		
	親魚資 源量が 目標管 理基準 値案を 上回る	5 年後	10 年 後	0 年後	5 年後	10 年 後	親魚量 が現在 の水準 を下回 る	親魚量 が禁漁 水準を 下回る	漁獲量 が半減 する
		2027 年 漁期	2032 年 漁期	2022 年 漁期	2027 年 漁期	2032 年 漁期			
1	37%	5.5	9.3	7.2	12.4	18.5	0%	0%	0%
0.9	49%	6.6	11.4	6.6	13.0	19.0	0%	0%	0%
0.8	56%	7.9	14.0	6.1	13.4	19.2	0%	0%	0%
0.7	70%	9.6	17.1	5.5	13.5	18.8	0%	0%	0%
0.6	85%	11.7	20.6	4.9	13.3	18.0	0%	0%	0%
0.5	94%	14.4	24.1	4.2	12.8	16.4	0%	0%	0%
0.4	98%	18.1	27.1	3.5	11.9	14.0	0%	0%	0%
0.3	99%	23.0	28.7	2.7	10.5	10.7	0%	0%	10%
0.2	99%	29.8	28.5	1.9	8.5	7.0	0%	0%	20%
0.1	100%	39.4	28.0	1.0	5.4	3.4	0%	0%	30%
0	100%	53.5	33.0	0.0	0.0	0.0	0%	0%	100%

漁獲管理規則案での調整係数 β を 0.0～1.0 にて 0.1 刻みで変更した結果をまとめた。

漁獲管理規則案での漁獲管理を開始する初年度（0 年後）の 2022 年漁期の値と、5 年および 10 年管理を行った後の値（2027 年漁期および 2032 年漁期）を示した。

補足資料 1 再生産関係式のモデル診断について

管理基準値案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・スティック型再生産関係 (HS; Clark et. al. 1985)、ベバートン・ホルト型再生産関係 (BH; Beverton and Holt 1957) およびリッカー型再生産関係 (RI; Ricker 1954) を検討候補とした。R_y を y 年当初の加入量、B_y を y 年当初の親魚量、A_{min} を加入年齢（本資源の場合には A_{min}=0）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。

$$R_{y+1} = \begin{cases} ab & \text{if } B_{y-A_{\min}} > b \\ aB_{y-A_{\min}} & \text{if } B_{y-A_{\min}} \leq b \end{cases} \quad (\text{Hockey stick, HS})$$

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

$$R_{y+1} = aB_{y-A_{\min}} \exp(-bB_{y-A_{\min}}) \quad (\text{Ricker, RI})$$

親魚量、加入量ともに漁期年初めの値を用いた。いずれの再生産形式でも、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/g）、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、再生産曲線からの加入量の残差を考慮し、その残差の標準偏差（S. D.）も併せて算出した。

各再生産関係モデルについて Shapiro-Wilk 検定および Kolmogorov-Smirnov 検定により残差の正規性を調べたところ、いずれのモデルでも正規性からの有意な逸脱は検出されなかったことから、最適化法として最小二乗法を用いる妥当性が確認された（補足図 1-1a、b、c）。候補とした再生産関係を補足図 1-2 に示した。次に加入の残差の時系列トレンドを調べるため、最小二乗法を当てはめた際の残差トレンドと自己相関プロットを求めた（補足図 1-3a、b、c）。その結果、いずれの再生産関係を仮定した場合でも、残差には時系列トレンドが見られ、自己相関係数も有意となっていたことから、本系群については自己相関を考慮する必要があると考えられた。自己相関を同時推定した場合と二段階推定した場合では推定される自己相関係数に差が見られた（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-SA2020-ABCWG01-02)」を参照）。AICc は自己相関を考慮しない場合には HS 型で最も低く、次いで RI 型、BH 型となっていたが、自己相関を同時推定すると、RI 型で最も低く、次いで BH 型、HS 型の順であった（補足表 1-1）。

ジャックナイフ法により、1 年分ずつデータを取り除き、各年のデータのパラメータ推定への影響を調べた。その結果、BH 型の自己相関同時推定、二段階推定および HS 型の同時推定で影響が大きかった一方で、HS 型の二段階推定および RI 型の同時推定では影響が小さく、安定していることが示された（補足図 1-4a、b、c、補足図 1-5a、b、c）。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 1-6a、b、c、1-7 a、b、c）。また、各再生産関係モデルについてプロファイル尤度を調べたところ、BH 型の同時推定ではパラメータが収束しないことが示された（補足図 1-8a、b、c）。

引用文献

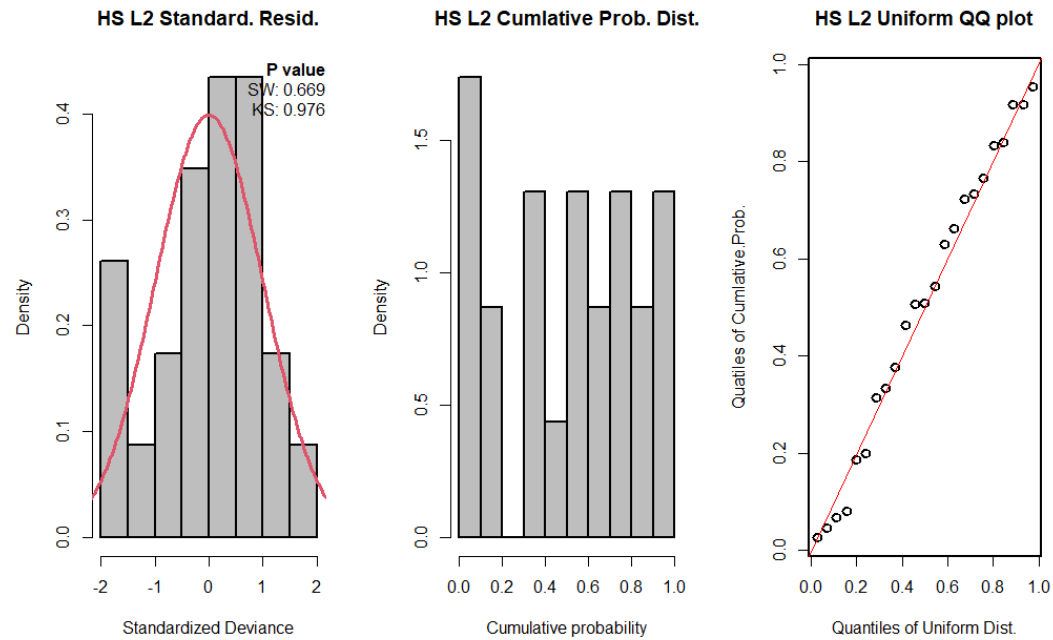
ABCWG (2020) 再生産関係の推定・管理基準値計算・将来予測シミュレーションに関する技術ノート (令和 2 年度研究機関会議版). FRA-SA2020-ABCWG01-02.

Beverton R. J. H., and S. J. Holt (1957) On the dynamics of exploited fish populations. Her Majesty's Stationary Office , London.

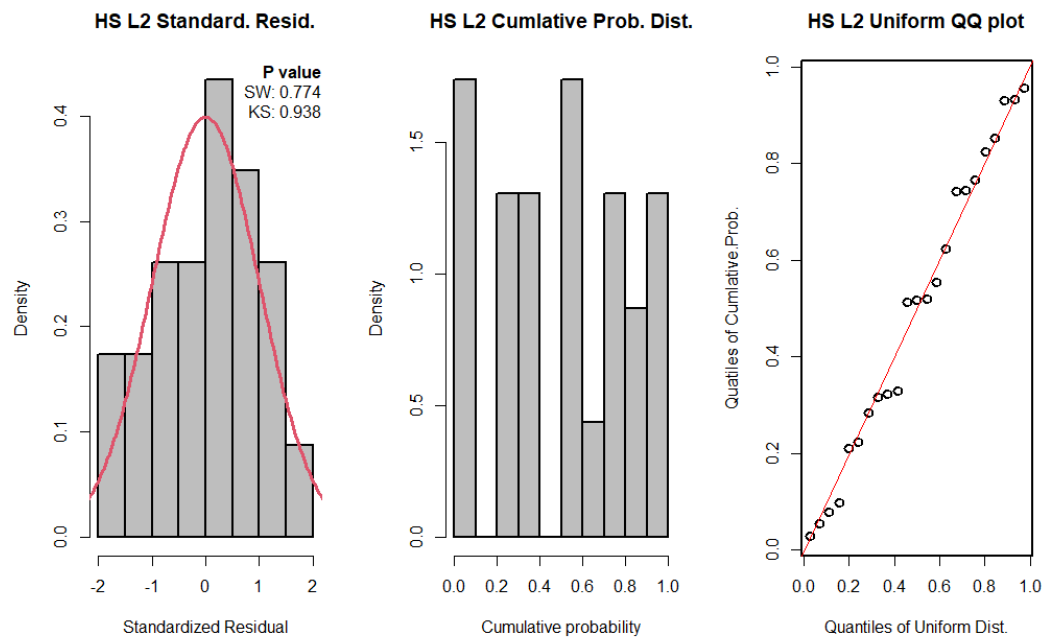
Clark C. W., Charles A. T., Beddington J. R. and M. Mangel (1985) Optimal capacity decisions in a developing fishery. Mar. Res. Econo., **2**, 25-53.

Ricker W. E. (1954) Stock and recruitment. J. Fish. Res. Bd. Can., **11**, 559-623.

HS 型最小二乗法で自己相関を二段階推定した場合



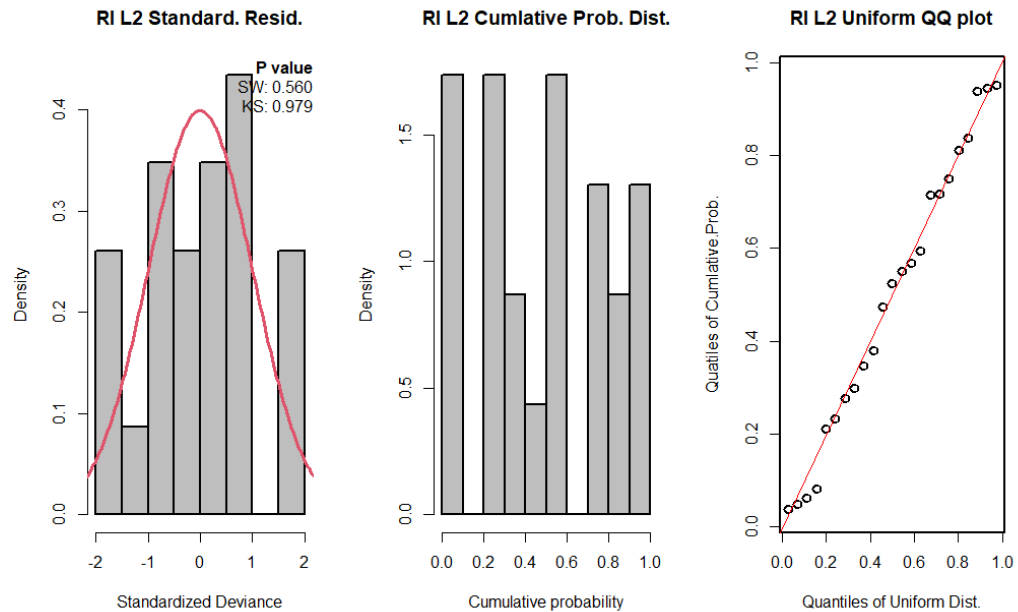
HS 型最小二乗法で自己相関を同時推定した場合



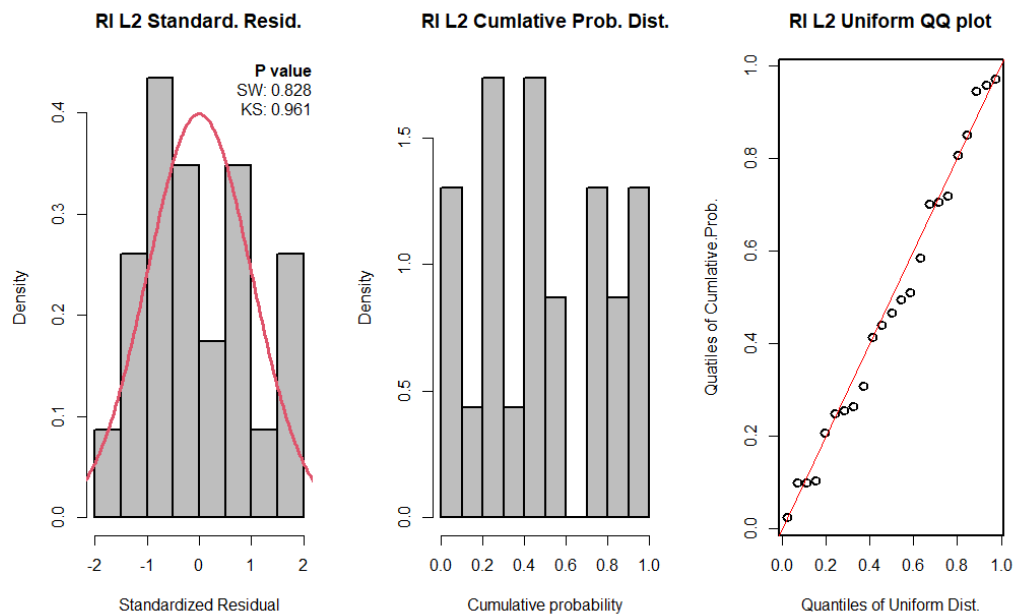
補足図 1-1a. HS 型再生産関係における標準化残差のヒストグラムと正規性テスト結果（左）、残差の累積確率密度のヒストグラム（中央）、一様分布を仮定した QQ プロット（右）

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（帰無仮説は「正規分布に従っている」）。QQ プロットの赤線は理論値を示す。

RI 型最小二乗法で自己相関を二段階推定した場合



RI 型最小二乗法で自己相関を同時推定した場合

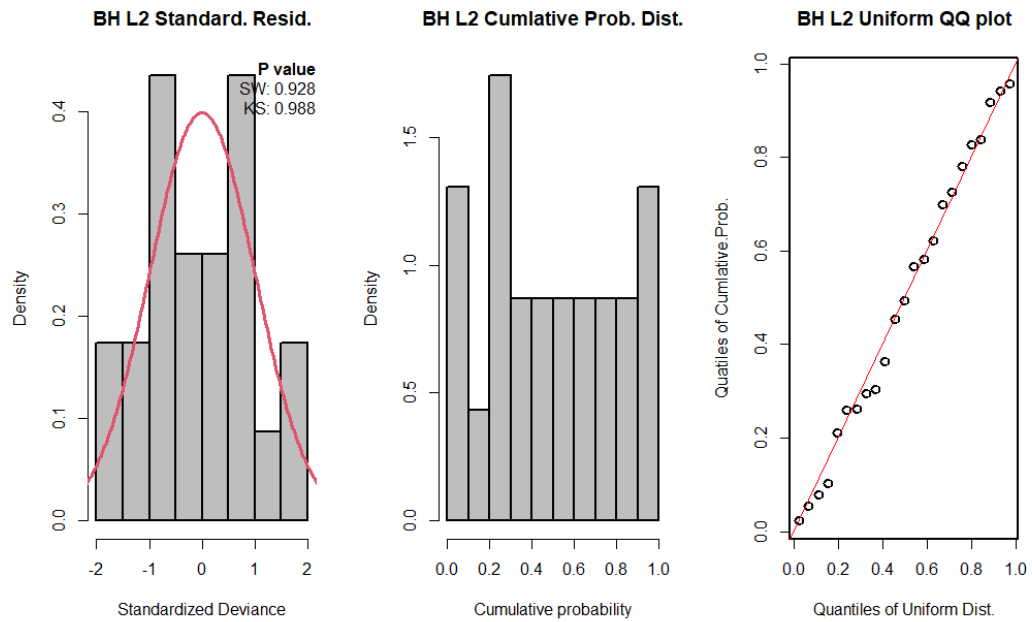


補足図 1-1b. RI 型再生産関係における標準化残差のヒストグラムと正規性テスト結果

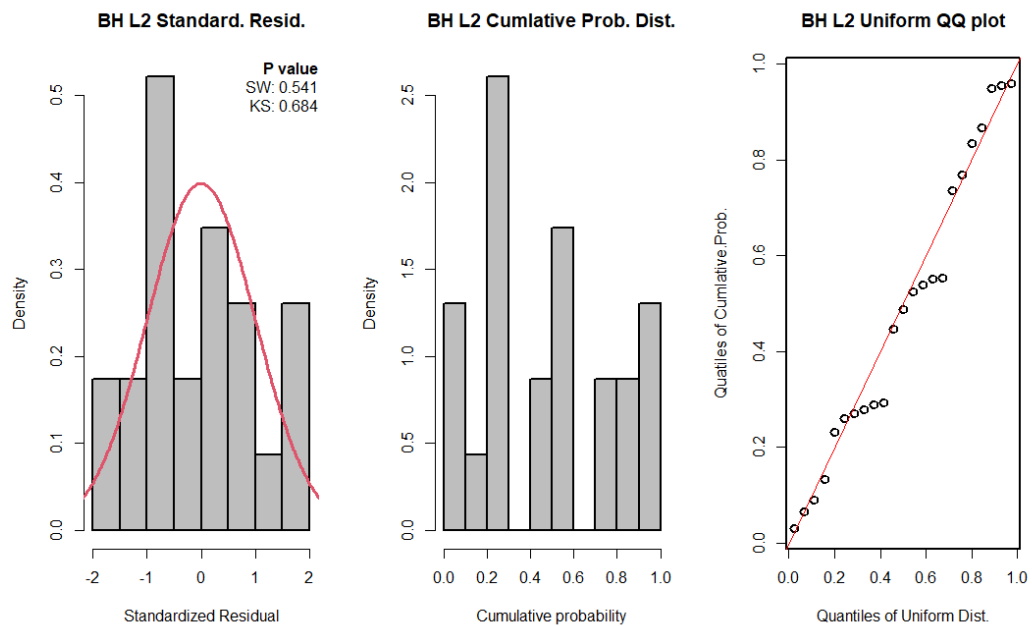
(左)、残差の累積確率密度のヒストグラム (中央)、一様分布を仮定した QQ プロット (右)

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 (帰無仮説は「正規分布に従っている」)。QQ プロットの赤線は理論値を示す。

BH 型最小二乗法で自己相関を二段階推定した場合

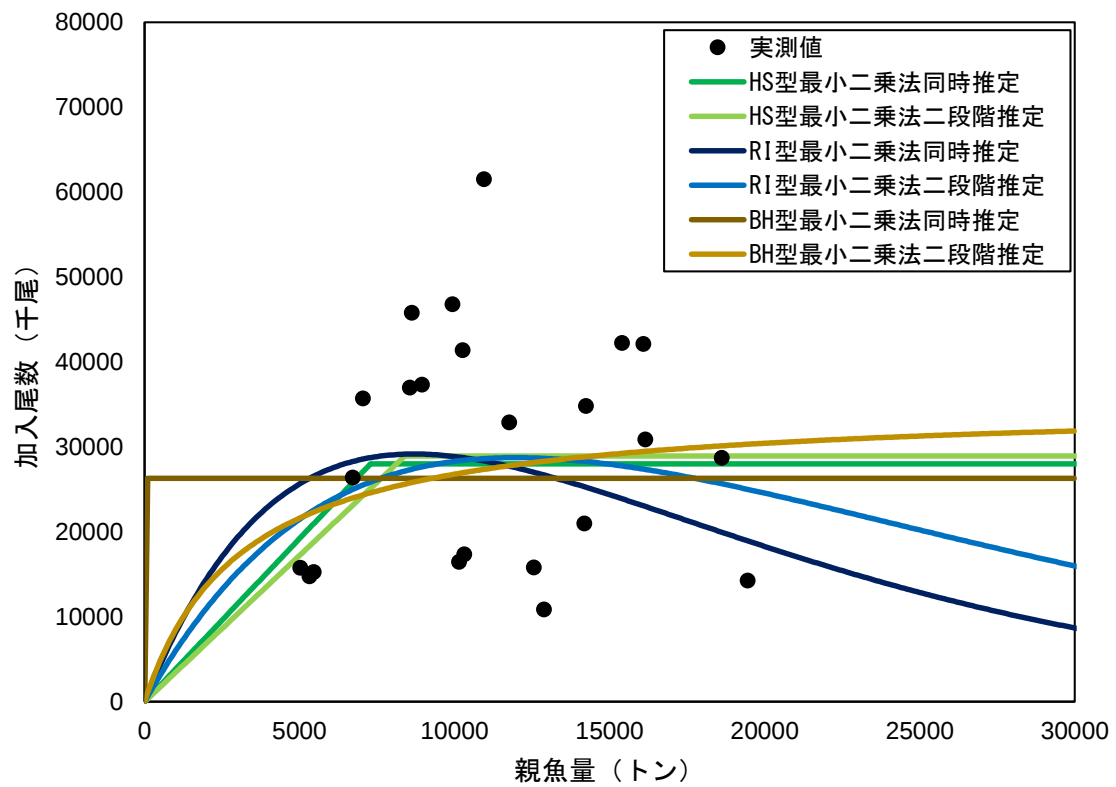


BH 型最小二乗法で自己相関を同時推定した場合



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

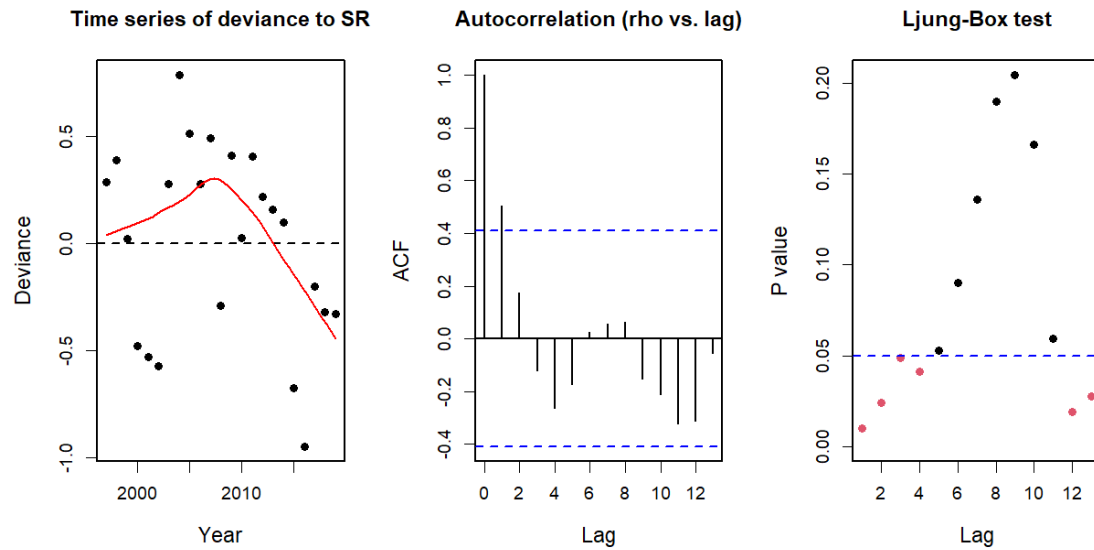
残差分布図の右上の数値は Shapiro-Wilk 検定（SW）と Kolmogorov-Smirnov 検定（KS）の結果である（帰無仮説は「正規分布に従っている」）。QQ プロットの赤線は理論値を示す。



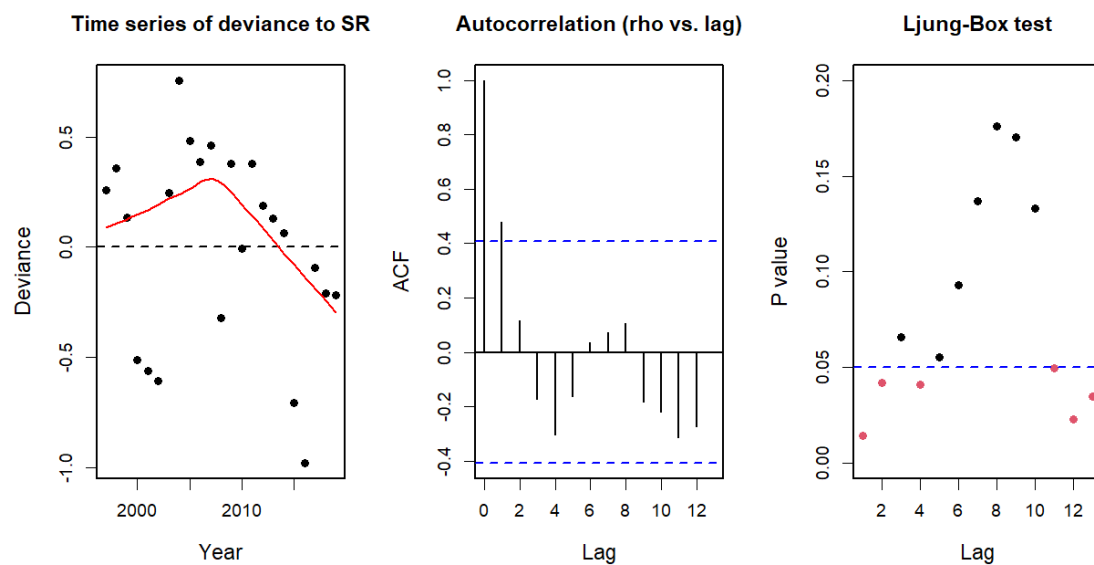
補足図 1-2. 各モデルにおける再生産関係

HS 型、RI 型、BH 型の再生産関係式を最小二乗法により残差に自己相関を二段階推定したモデルおよび同時推定したモデル。実測値は分析に使用した親魚量（1996～2018 年）と翌年の 1 歳時点の加入量（1997～2019 年）である。

HS 型最小二乗法で自己相関を二段階推定する場合

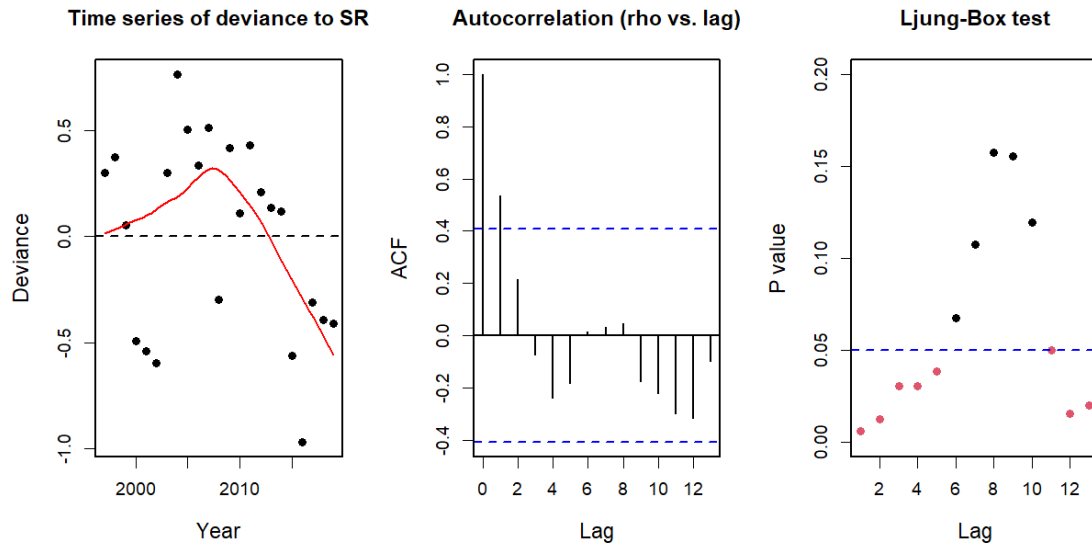


HS 型最小二乗法で自己相関を同時推定する場合

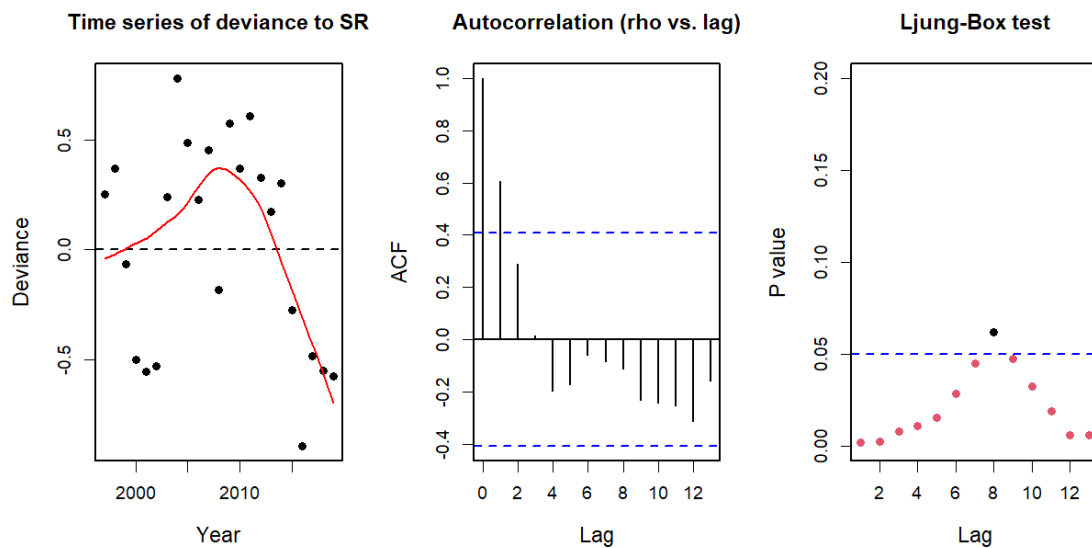


補足図 1-3a. HS 型再生産関係における再生産関係との残差の時系列トレンド（左）、コレログラム（中央）および Ljung-Box 検定における P 値（右）
 残差の時系列の図中の赤線は平滑化された曲線を表している。コレログラムの図中の青色の点線は 95%信頼区間を、Ljung-Box 検定における P 値の図中の青色の点線は 5%水準を表している。

RI 型最小二乗法で自己相関を二段階推定する場合

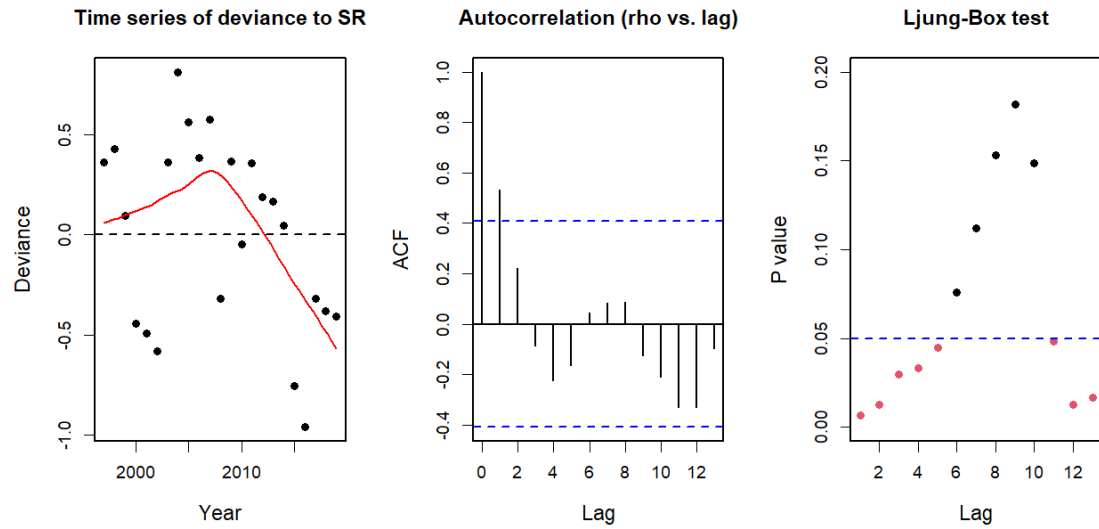


RI 型最小二乗法で自己相関を同時推定する場合

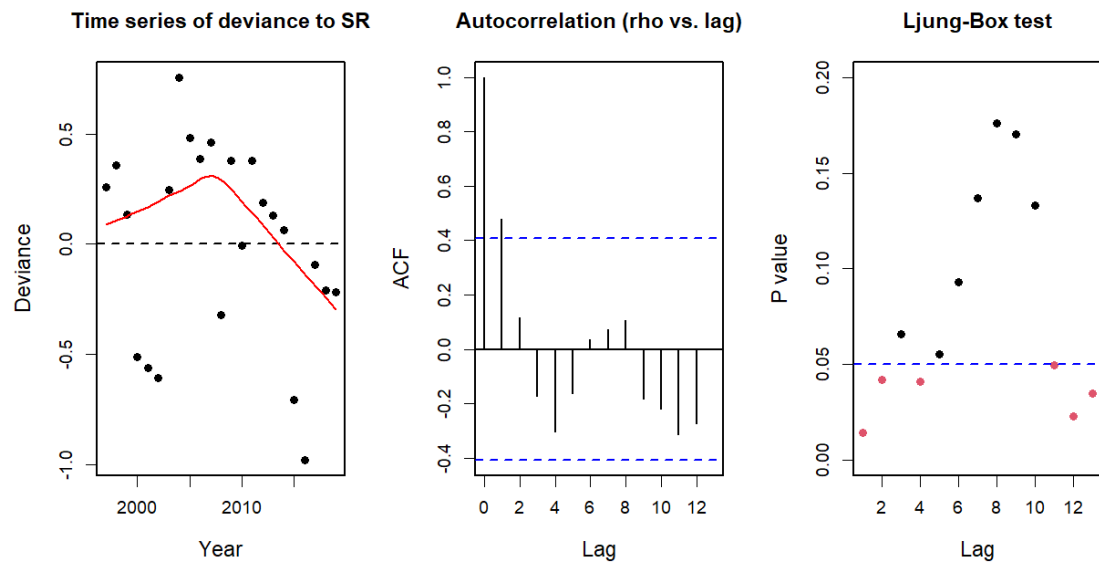


補足図 1-3b. RI 型再生産関係における再生産関係との残差の時系列トレンド（左）、コレログラム（中央）および Ljung-Box 検定における P 値（右）
 残差の時系列の図中の赤線は平滑化された曲線を表している。コレログラムの図中の青色の点線は 95%信頼区間を、Ljung-Box 検定における P 値の図中の青色の点線は 5%水準を表している。

BH 型最小二乗法で自己相関を二段階推定する場合



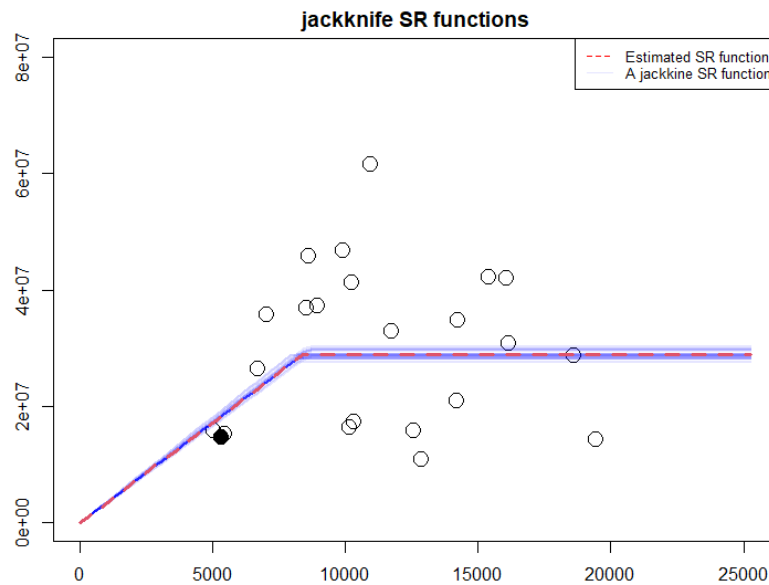
BH 型最小二乗法で自己相関を同時推定する場合



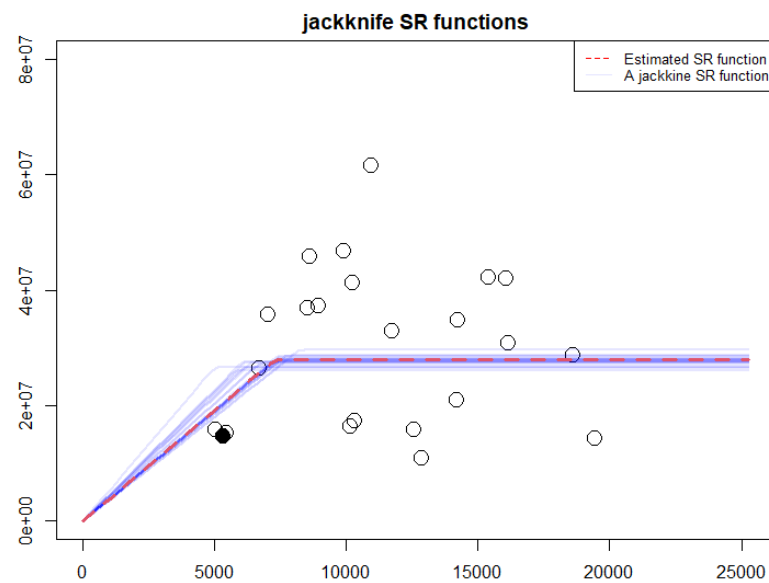
補足図 1-3c. BH 型再生産関係における再生産関係との残差の時系列トレンド（左）、コレログラム（中央）および Ljung-Box 検定における P 値（右）

残差の時系列の図中の赤線は平滑化された曲線を表している。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。

HS 型最小二乗法で自己相関を二段階推定した場合



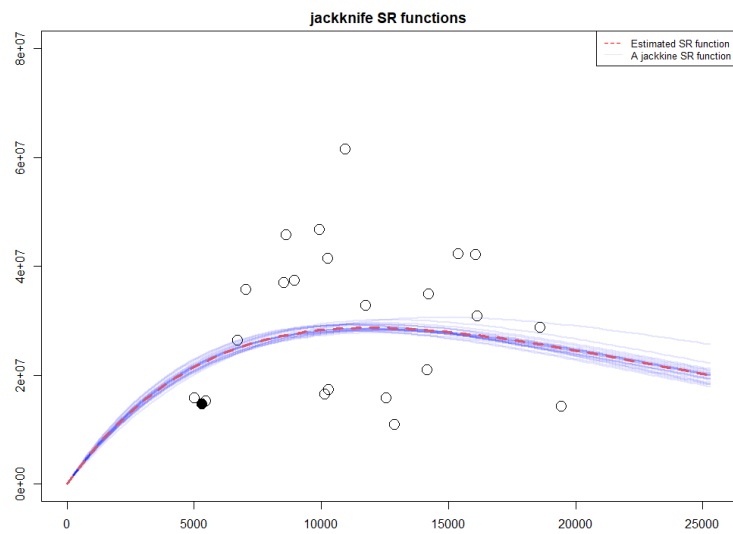
HS 型最小二乗法で自己相関を二段階推定した場合



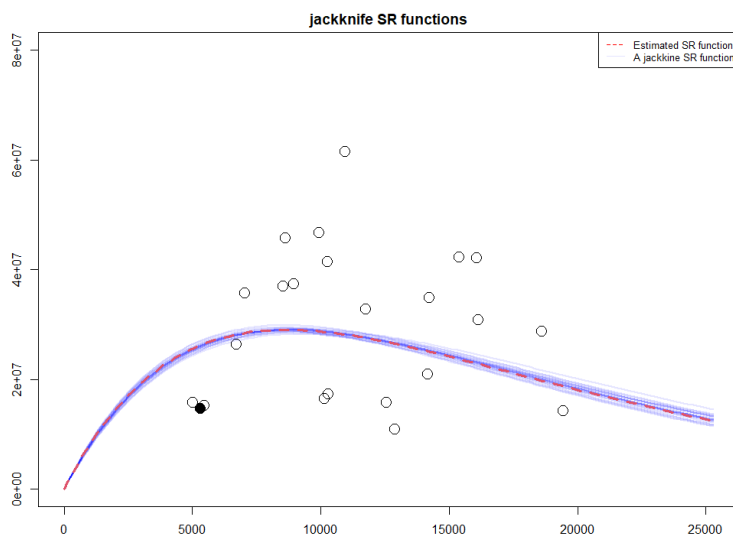
補足図 1-4a. HS 型再生産関係におけるジャックナイフ解析での推定結果

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。横軸は親魚量（トン）、縦軸は加入量（尾）である。丸印は分析に使用した令和 2 年度の資源評価に基づく親魚量・加入量であり、黒丸は使用したデータ期間の最終年（親魚量で 2018 年）を示す。

RI 型最小二乗法で自己相関を二段階推定した場合



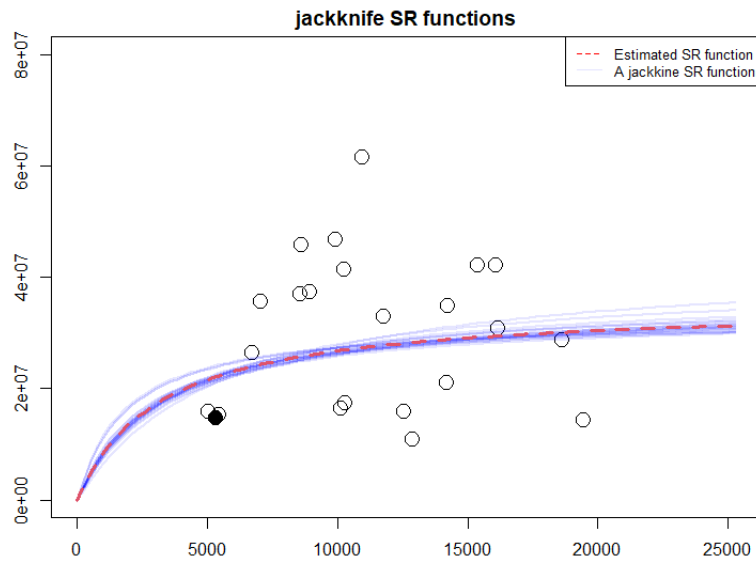
RI 型最小二乗法で自己相関を二段階推定した場合



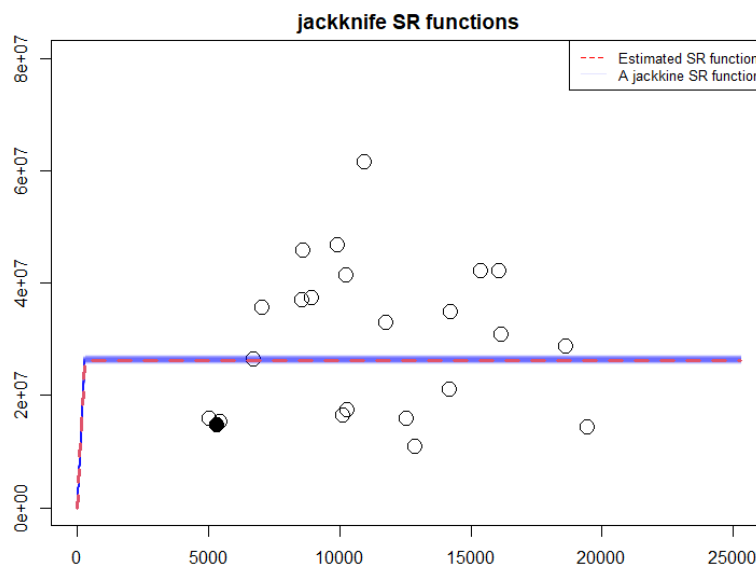
補足図 1-4b. RI 型再生産関係におけるジャックナイフ解析での推定結果

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。横軸は親魚量（トン）、縦軸は加入量（尾）である。丸印は分析に使用した令和 2 年度の資源評価に基づく親魚量・加入量であり、黒丸は使用したデータ期間の最終年（親魚量で 2018 年）を示す。

BH 型最小二乗法で自己相関を二段階推定した場合



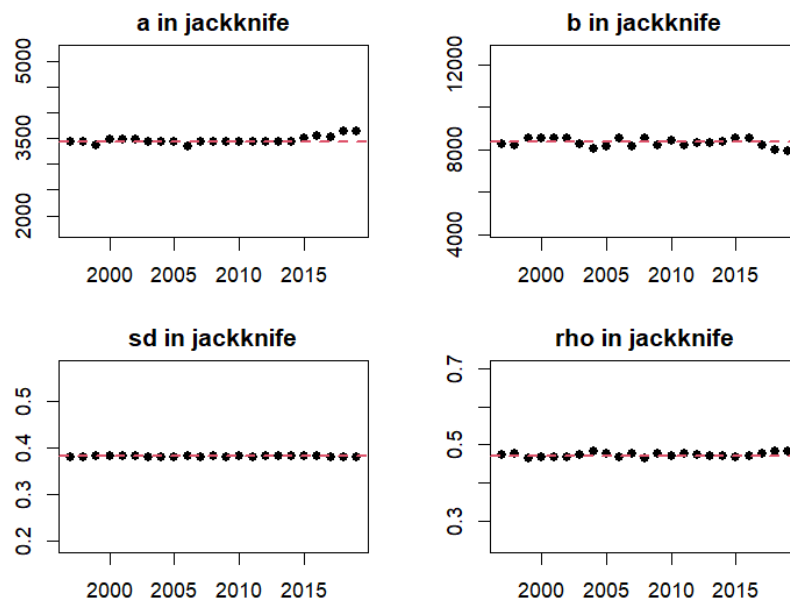
BH 型最小二乗法で自己相関を二段階推定した場合



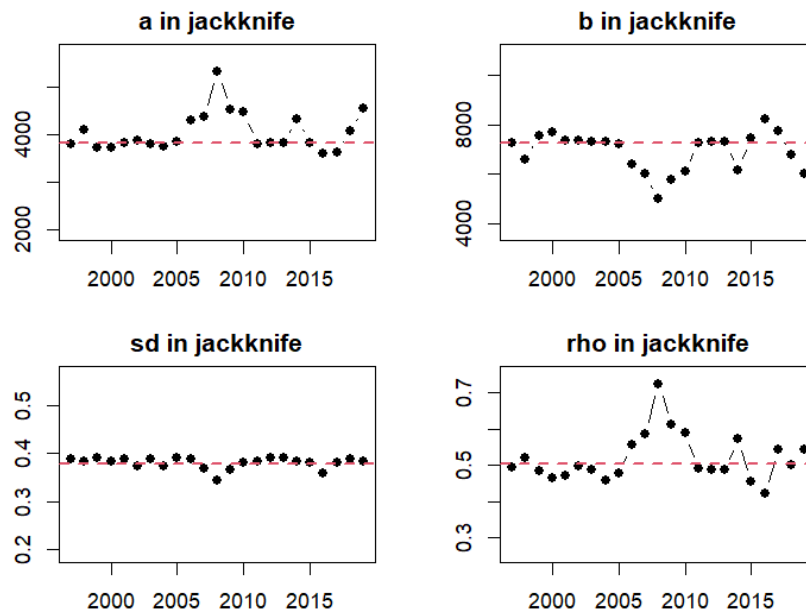
補足図 1-4c. BH 型再生産関係におけるジャックナイフ解析での推定結果

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。横軸は親魚量（トン）、縦軸は加入量（尾）である。丸印は分析に使用した令和 2 年度の資源評価に基づく親魚量・加入量であり、黒丸は使用したデータ期間の最終年（親魚量で 2018 年）を示す。

HS 型（最小二乗法）で自己相関を二段階推定した場合

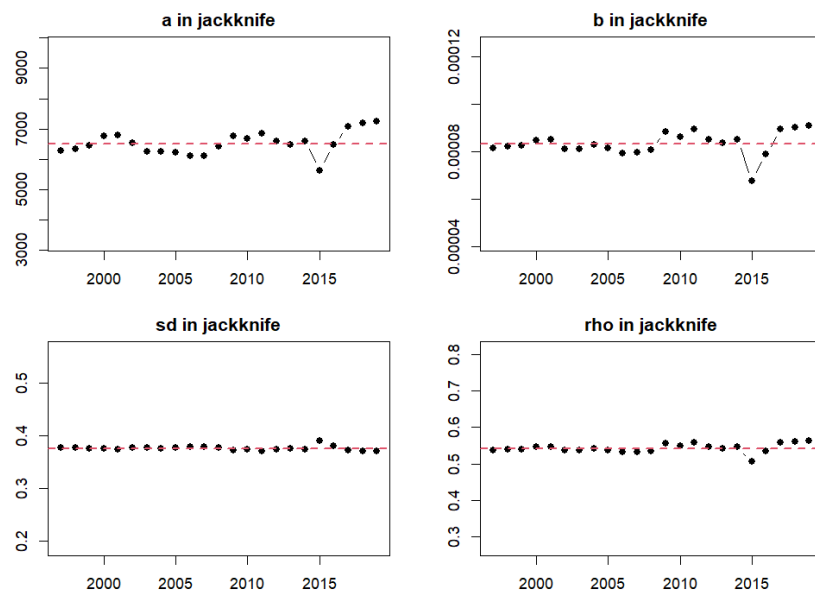


HS 型（最小二乗法）で自己相関を同時推定した場合

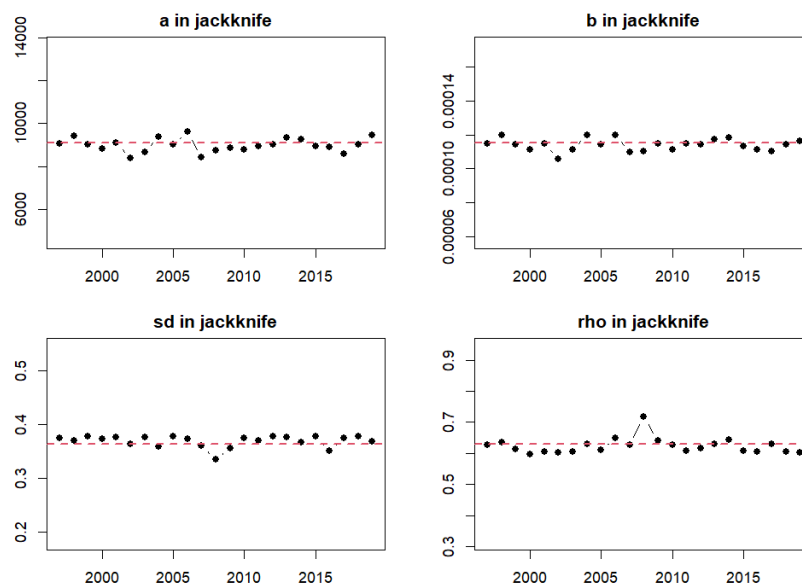


補足図 1-5a. HS 型の再生産関係でジャックナイフ解析でのパラメータ別の影響

RI 型（最小二乗法）で自己相関を二段階推定した場合

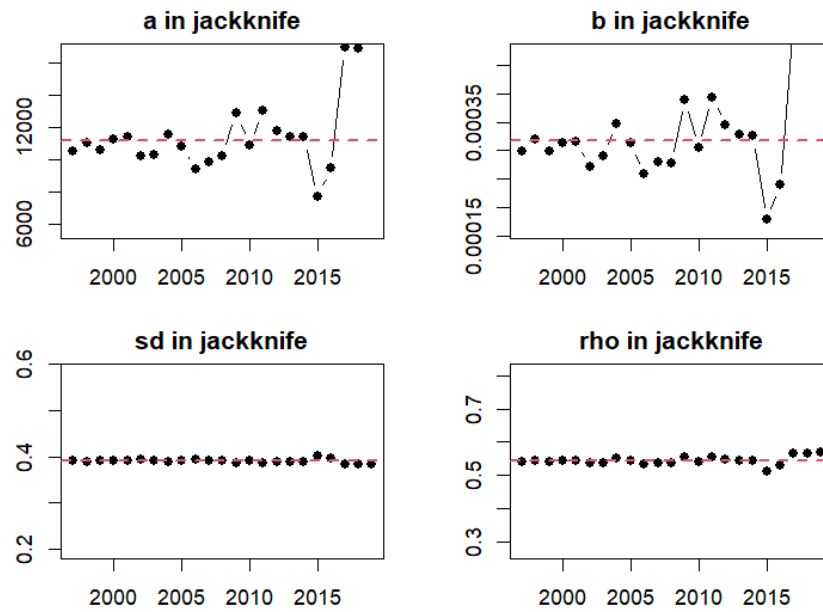


RI 型（最小二乗法）で自己相関を同時推定した場合

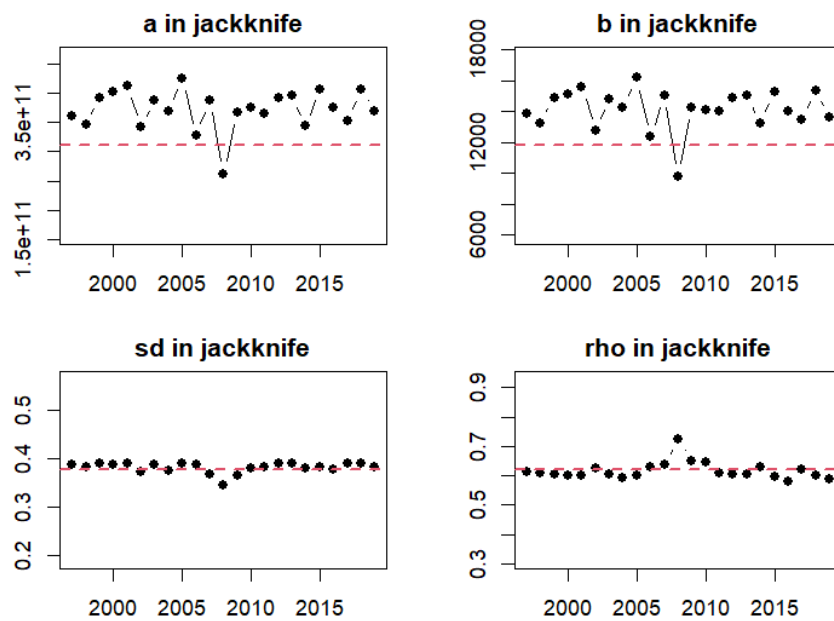


補足図 1-5b. RI 型の再生産関係でジャックナイフ解析でのパラメータ別の影響

BH 型（最小二乗法）で自己相関を二段階推定した場合

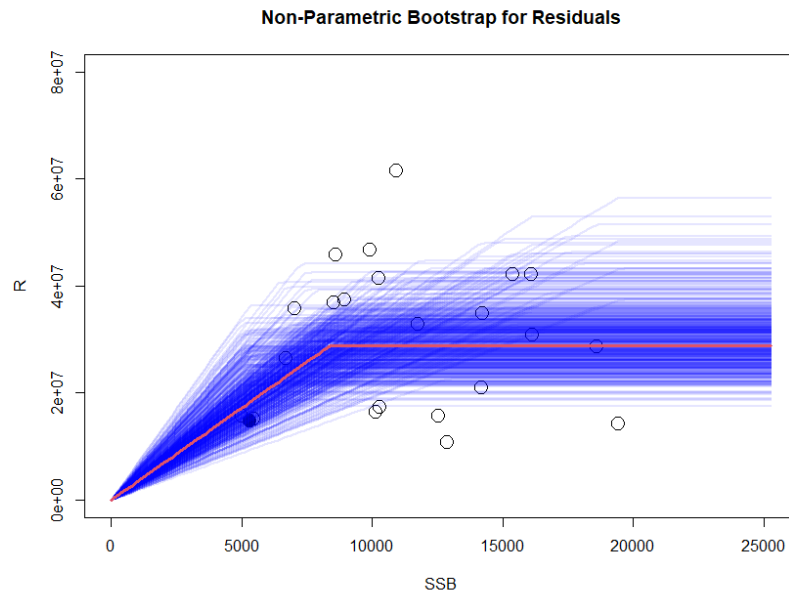


BH 型（最小二乗法）で自己相関を同時推定した場合

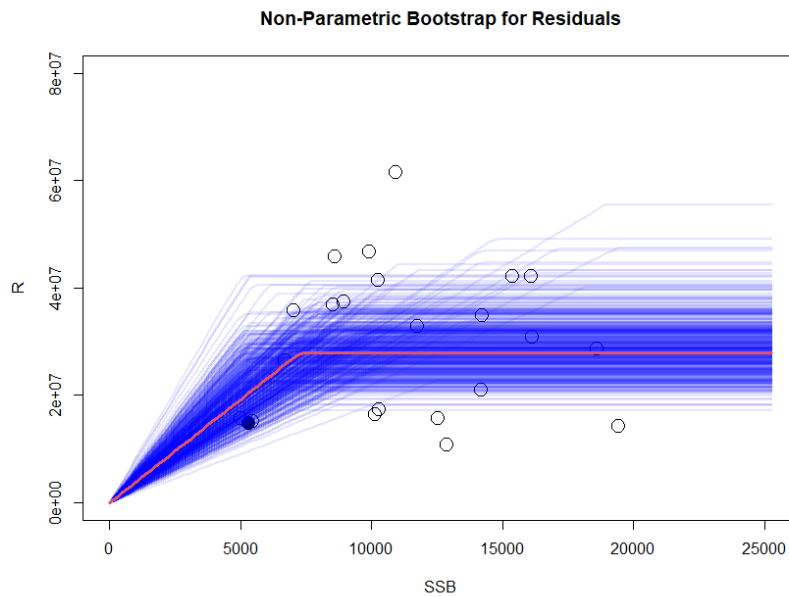


補足図 1-5c. BH 型の再生産関係でジャックナイフ解析でのパラメータ別の影響

HS 型（最小二乗法）で自己相関を二段階推定した場合



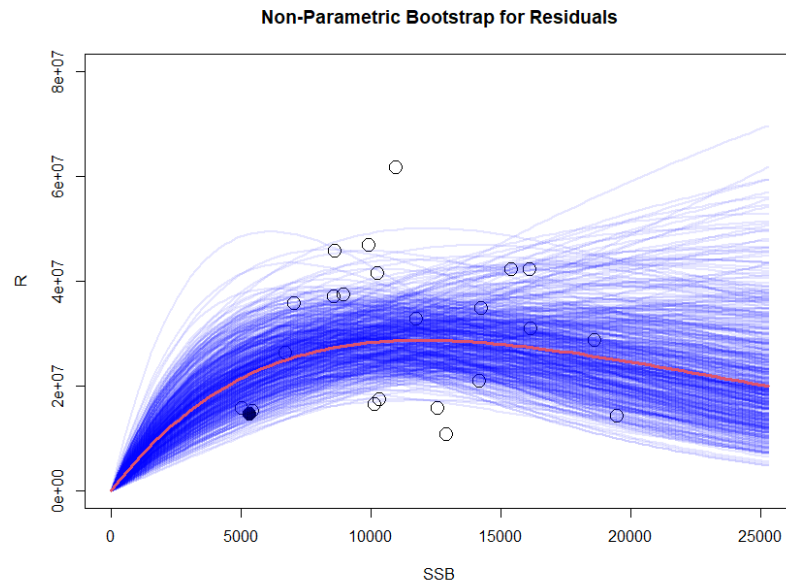
HS 型（最小二乗法）で自己相関を同時推定した場合



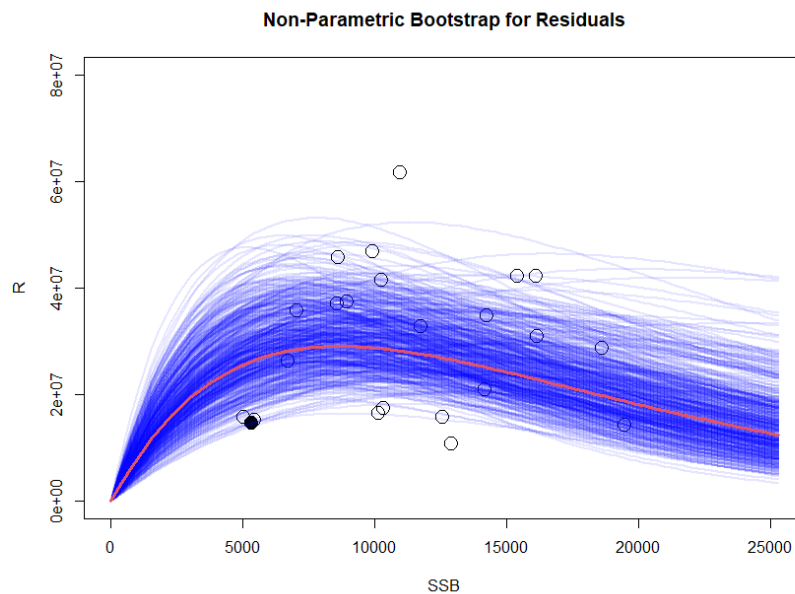
補足図 1-6a. HS 型再生産関係における残差ブートストラップ解析の結果

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。横軸は親魚量（トン）、縦軸は加入量（尾）である。丸印は分析に使用した令和 2 年度の資源評価に基づく親魚量・加入量であり、黒丸は使用したデータ期間の最終年（親魚量で 2018 年）を示す。

RI 型（最小二乗法）で自己相関を二段階推定した場合



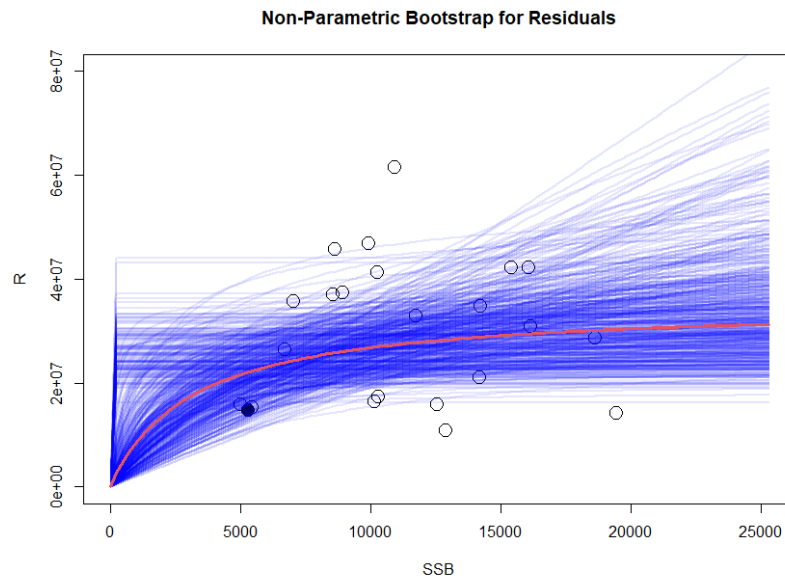
RI 型（最小二乗法）で自己相関を同時推定した場合



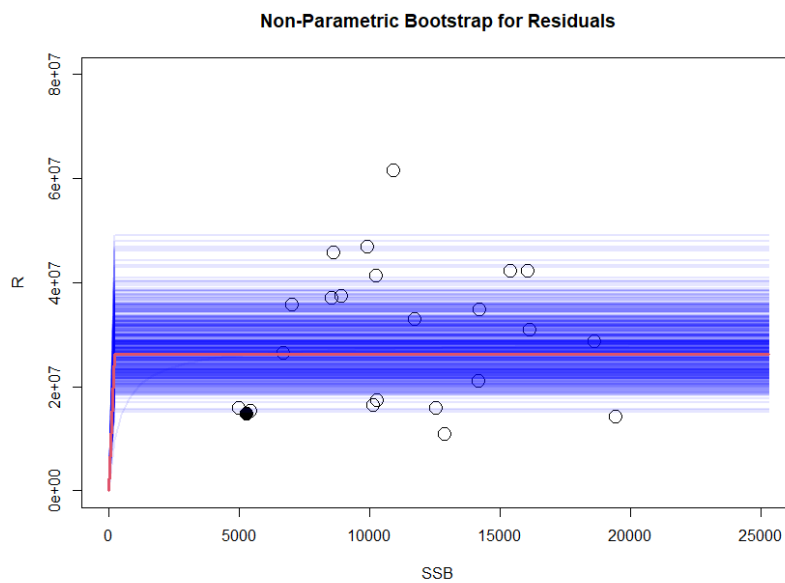
補足図 1-6b. RI 型再生産関係における残差ブートストラップ解析の結果

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。横軸は親魚量（トン）、縦軸は加入量（尾）である。丸印は分析に使用した令和 2 年度の資源評価に基づく親魚量・加入量であり、黒丸は使用したデータ期間の最終年（親魚量で 2018 年）を示す。

BH 型（最小二乗法）で自己相関を二段階推定した場合



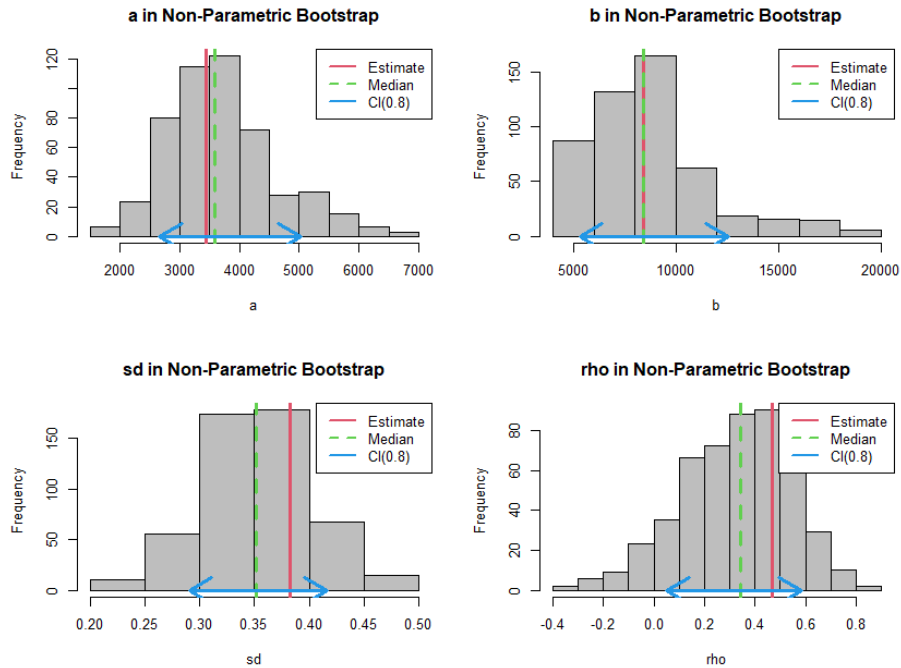
BH 型（最小二乗法）で自己相関を同時推定した場合



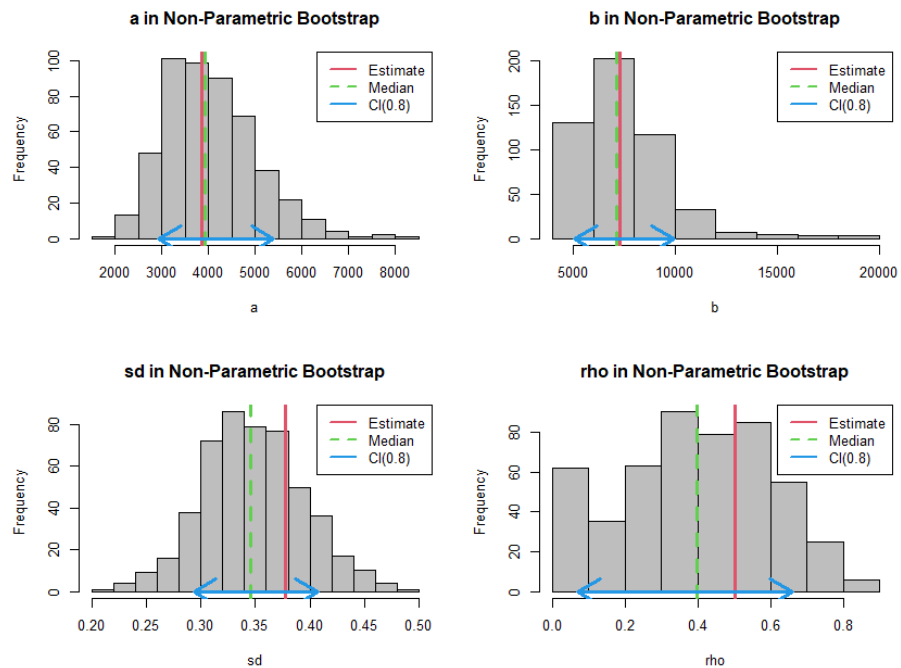
補足図 1-6c. BH 型再生産関係における残差ブートストラップ解析の結果

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。横軸は親魚量（トン）、縦軸は加入量（尾）である。丸印は分析に使用した令和 2 年度の資源評価に基づく親魚量・加入量であり、黒丸は使用したデータ期間の最終年（親魚量で 2018 年）を示す。

HS 型（最小二乗法）で自己相関を二段階推定した場合

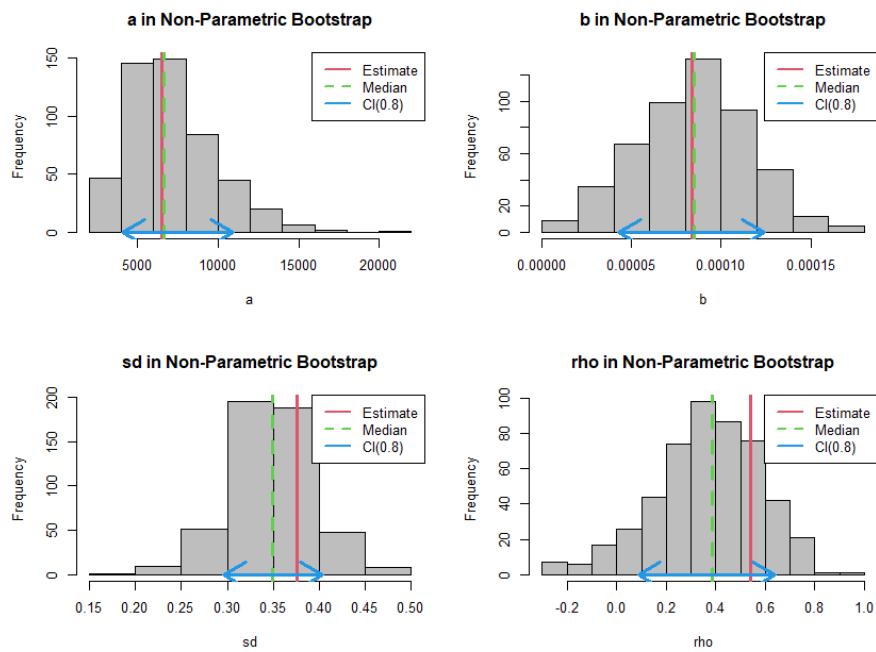


HS 型（最小二乗法）で自己相関を同時推定した場合

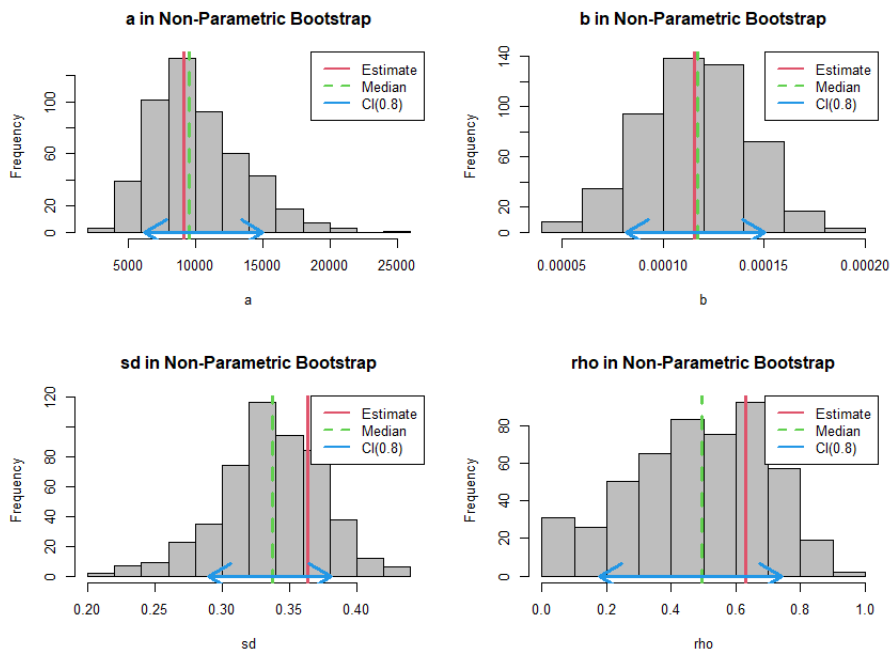


補足図 1-7a. HS 型再生産曲線における残差ブートストラップ解析での中央値（緑点線）と 80%信頼区間（青線）
赤線はパラメータの点推定値である。

RI 型（最小二乗法）で自己相関を二段階推定した場合

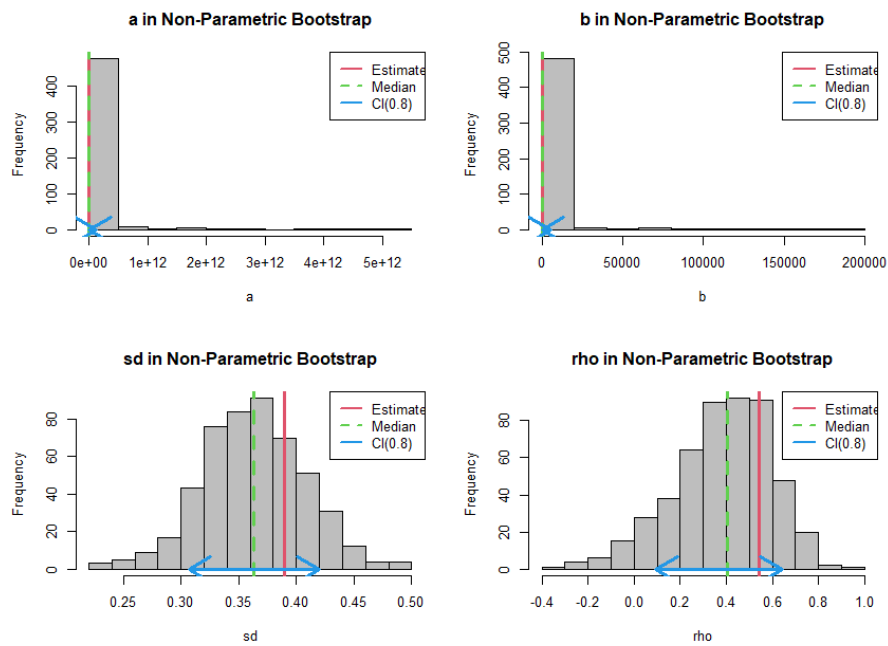


RI 型（最小二乗法）で自己相関を同時推定した場合

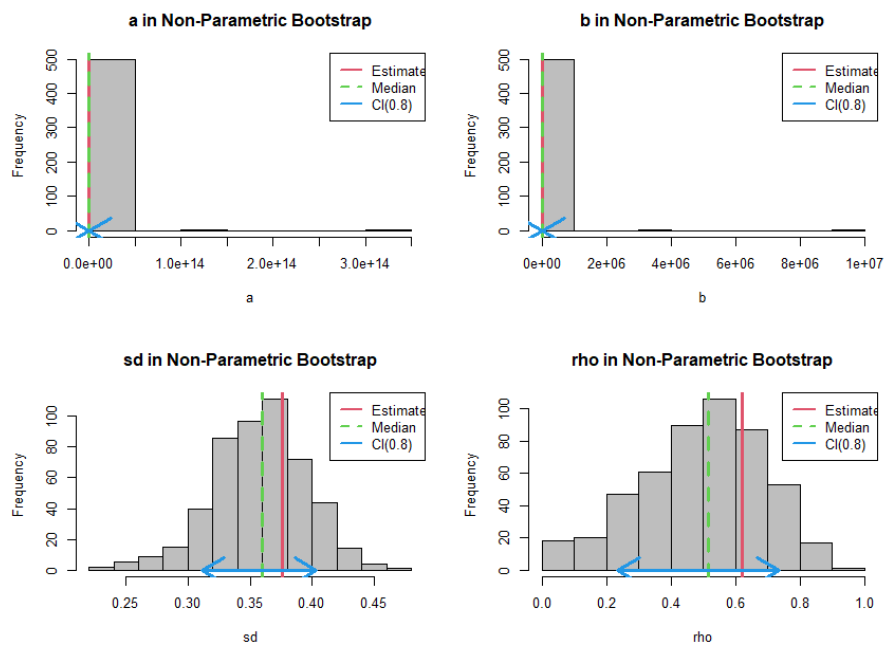


補足図 1-7b. RI 型再生産曲線における残差ブートストラップ解析での中央値（緑点線）と 80%信頼区間（青線）
赤線はパラメータの点推定値である。

BH 型（最小二乗法）で自己相関を二段階推定した場合

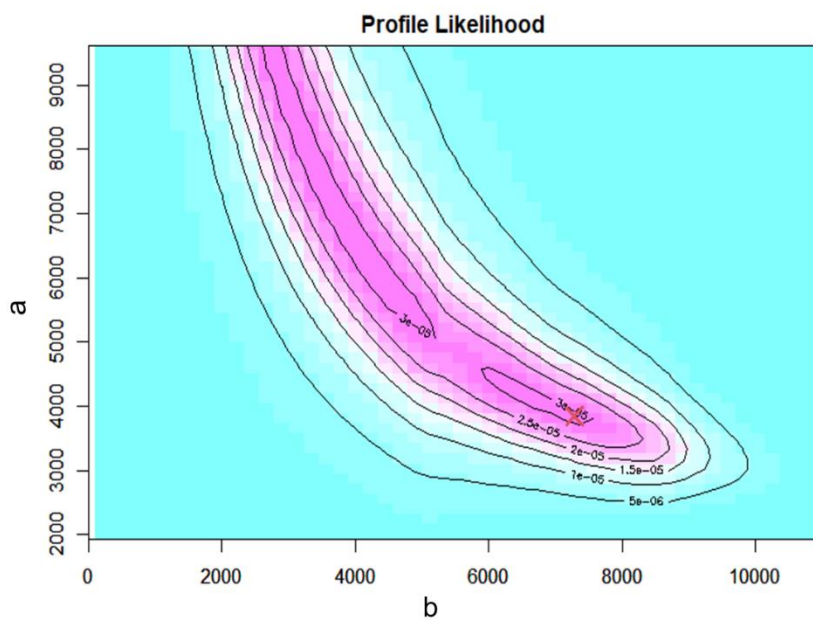


BH 型（最小二乗法）で自己相関を同時推定した場合



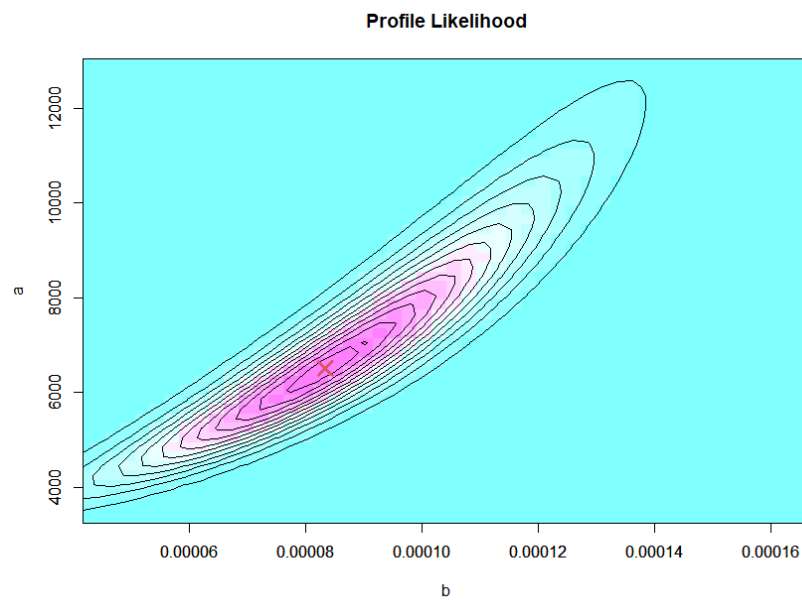
補足図 1-7c. BH 型再生産曲線における残差ブートストラップ解析での中央値（緑点線）と 80%信頼区間（青線）
赤線はパラメータの点推定値である。

HS 型（最小二乗法）で自己相関を同時推定した場合

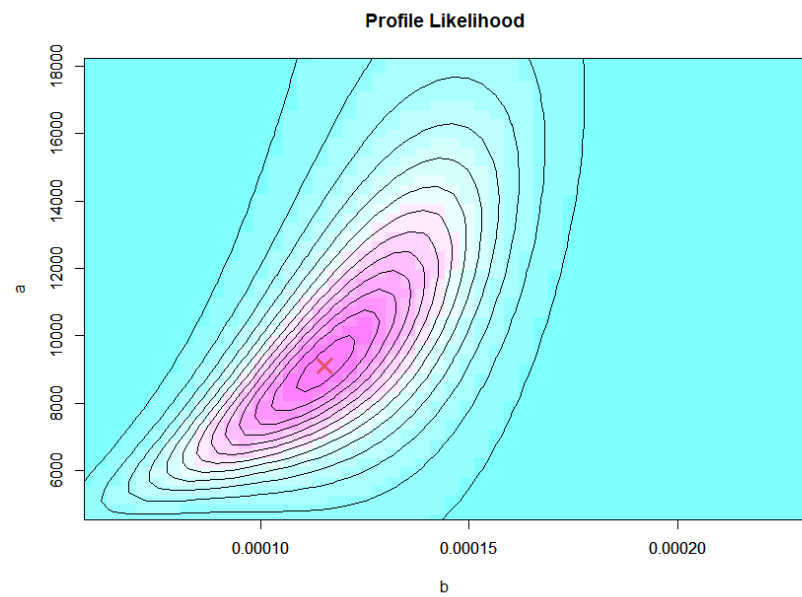


補足図 1-8a. HS 型再生産関係の推定パラメータに対するプロファイル対数尤度の等高線図
×印は最尤推定されたパラメータ値。

RI 型（最小二乗法）で自己相関を二段階推定した場合



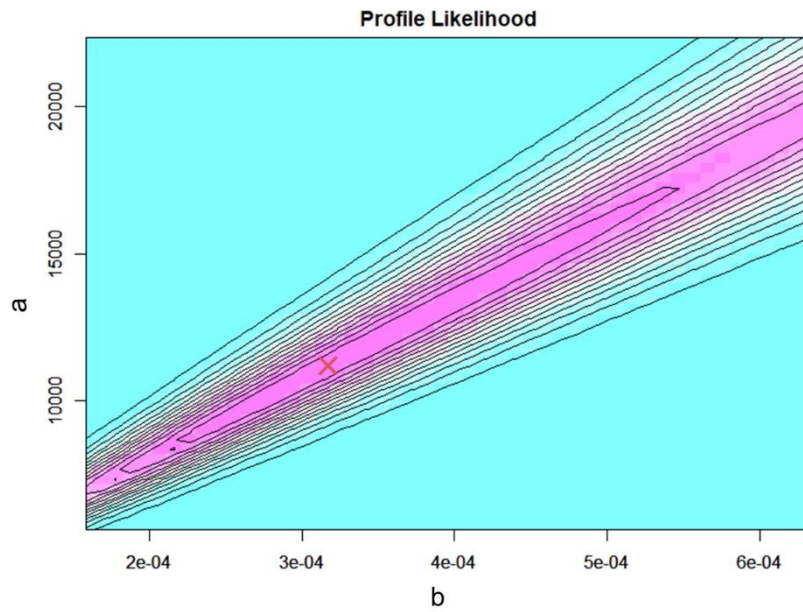
RI 型（最小二乗法）で自己相関を同時推定した場合



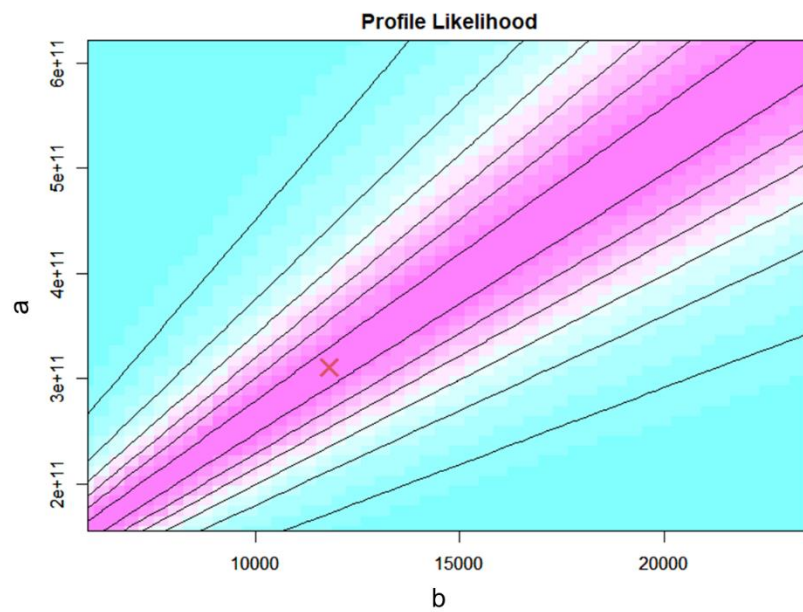
補足図 1-8b. RI 型再生産関係の推定パラメータに対するプロファイル対数尤度の等高線
図

×印は最尤推定されたパラメータ値。

BH 型（最小二乗法）で自己相関を二段階推定した場合



BH 型（最小二乗法）で自己相関を同時推定した場合



補足図 1-8c. BH 型再生産関係の推定パラメータに対するプロファイル対数尤度の等高線
図

×印は最尤推定されたパラメータ値。

補足表 1-1. MSY 管理基準値算出に使用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 (万尾)	h	デー タ数
ホッケー・ スティック (HS)	最小 二乗法	有	同時	3843	7284	0.38	0.50	2800	0.94	23
ホッケー・ スティック (HS)	最小 二乗法	有	二段階	3447	8389	0.38	0.47	2892	0.95	23
リッカー (RI)	最小 二乗法	有	同時	9116	1.15e-04	0.36	0.63	40	3.36	23
リッカー (RI)	最小 二乗法	有	二段階	6522	8.35e- 0.5	0.38	0.54	193	4.39	23
ベバートン・ ホルト (BH)	最小 二乗法	有	同時	3.73e+09	1419	0.38	0.62	2631	0.94	23
ベバートン・ ホルト (BH)	最小 二乗法	有	二段階	11198	3.18e-04	0.39	0.54	3476	1	23

提案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。R0 は SB0 のときの平均加入尾数、h は 0.2SB0 になったときの R0 に対する加入の比（スティープネス）で、再生産関係の密度補償効果の程度を示す。

補足資料 2 再生産関係による MSY 管理基準値案の違い

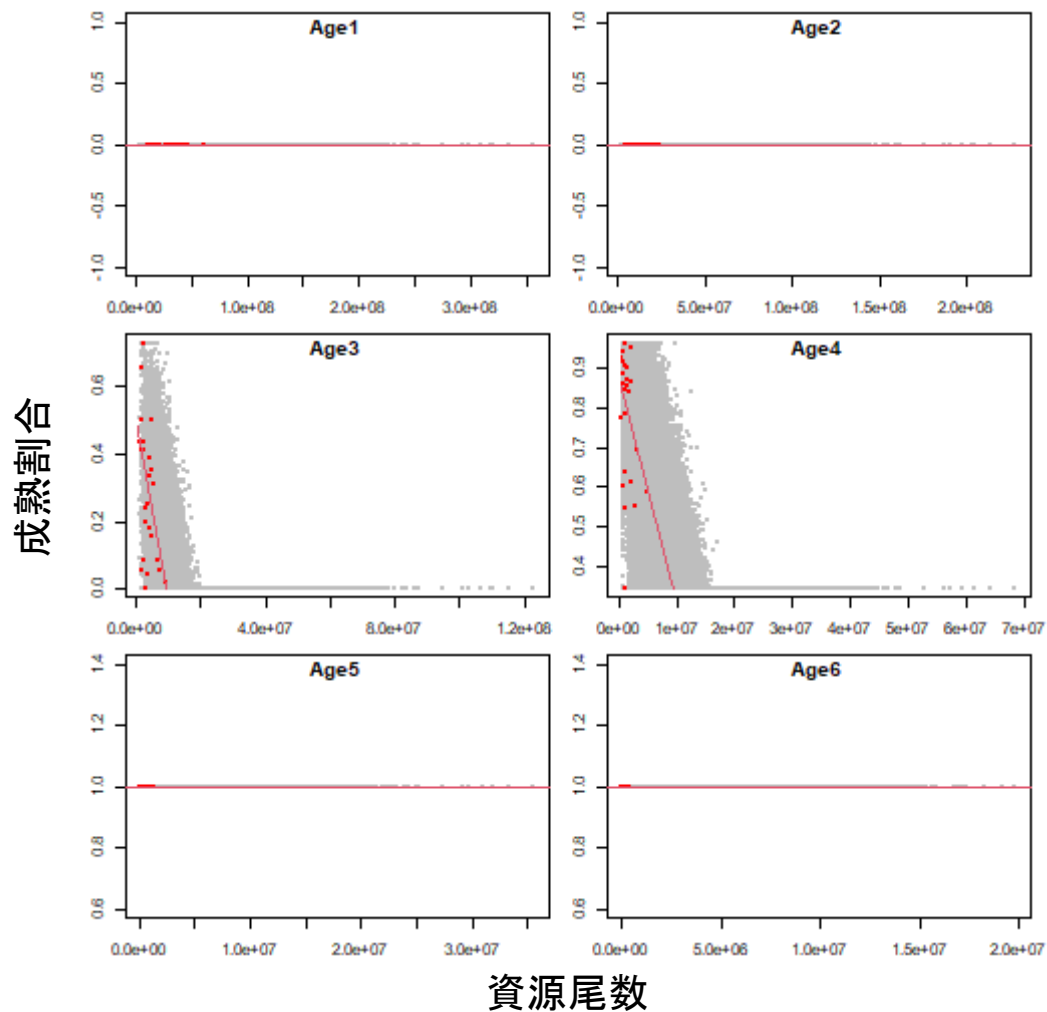
仮定する再生産関係による MSY 管理基準値案の違いを把握するため、AICc などに基づき当てはまりが良いと判断された 6 通りの再生産関係と最適化方法の組み合わせで、それぞれ MSY 管理基準値案を推定した。比較対象とした再生産関係と最適化方法の組み合わせは、すべての再生産関係において自己相関をそれぞれ二段階推定と同時推定したものである。いずれも最適化方法は最小二乗法とした。それぞれの再生産関係と自己相関推定方法に基づき推定された MSY 管理基準値案を下表に示す。

再生産関係式	最適化 法	自己 相関	推定 法	SBmsy (千トン)	SB0.6msy (千トン)	SB0.1msy (千トン)	MSY (千トン)	Fmsy/ Umsy	F2017- 2019
ホッケ－・ スティック (HS)	最小 二乗法	有	同時	39.8	6.2	0.9	24.1	0.25	0.28
ホッケ－・ スティック (HS)	最小 二乗法	有	二段 階	40.8	6.8	1.0	24.8	0.27	0.28
リッカー (RI)	最小 二乗法	有	同時	10.9	3.2	0.4	20.2	0.42	0.78
リッカー (RI)	最小 二乗法	有	二段 階	14.8	4.5	0.6	20.8	0.38	0.56
ベバートン・ ホルト (BH)	最小 二乗法	有	同時	37.9	1.6	0	22.7	0.25	0.24
ベバートン・ ホルト (BH)	最小 二乗法	有	二段 階	53.6	7.8	0.6	28.4	0.22	0.28

RI 型再生産関係を用いた場合、HS 型や BH 型に比べて MSY 管理基準値案 (SBmsy、SB0.6msy、および SB0.1msy) は低い値となる。

補足資料 3 将来予測における資源状態に応じた成熟率の変化

上述のように、1996～2019 年のマダラでは 3 歳から初回成熟が見られ、3 歳魚および 4 歳魚において年齢別資源尾数に応じて成熟率が変化することが認められた。そのため、将来予測においても資源ともに成熟率を変化させ（補足図 3-1）、親魚量や漁獲量予測に用いた。



補足図 3-1. 年齢別資源尾数と成熟率の関係

赤点は 1996～2019 年における実測値、赤線はその回帰、灰色点は将来予測における推定値である。

補足資料 4 近年の傾向を考慮しない加入シナリオにおける将来予測結果

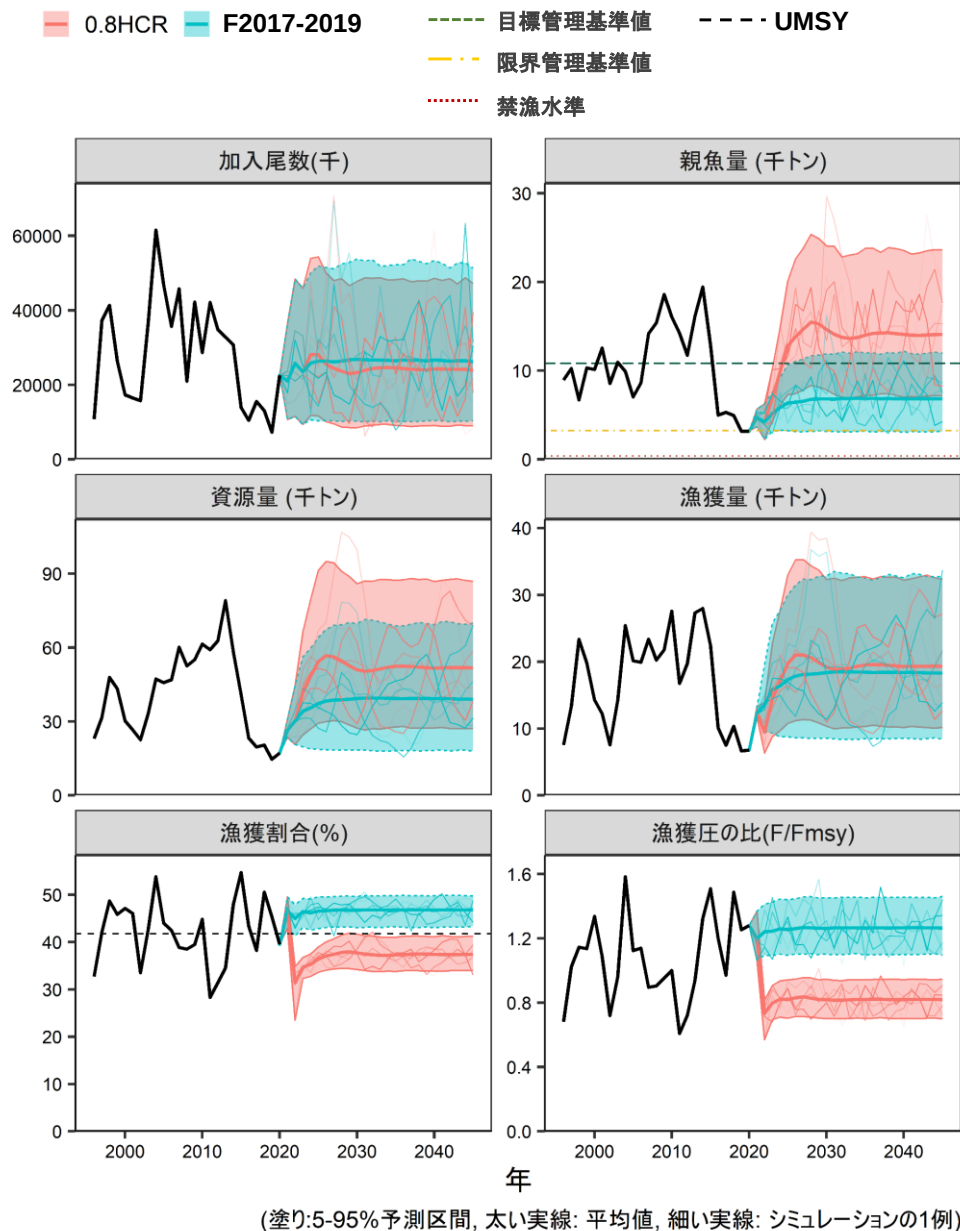
本報告では、再生産関係における近年の観測値の残差が推定値よりも低い傾向にあったことから、観測された近年の残差の傾向を考慮した加入シナリオで将来予測を行った。本補足資料では、全ての年のデータを使用して推定された RI 型再生産関係を用いた場合の将来予測結果を参考として示した。

(1) 調整係数 β に標準値を用いた場合

RI 型再生産関係による加入量と $\beta=0.8$ の HCR を用いた時の将来予測結果を補足図 4-1 に示した。予測される 2022 年の親魚量は限界管理基準値案である SB0.6msy 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。中長期的には、親魚量は限界管理基準値案を超えるため、 βF_{msy} での漁獲となる。RI 型再生産関係による加入量では、 $0.8F_{msy}$ で漁獲すると、2025 年には親魚量が目標管理基準値案を超える確率が 66%となり、その後も 69～81%の値で推移した。 $0.8F_{msy}$ 漁獲の継続により漁獲量は MSY 水準よりやや少なく、親魚量は SBmsy よりもやや高めに推移していくと予測される。

(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 0.0～1.0 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およびそのまとめを補足表 4-1～4-6 に示した。本資源の親魚量は 2020 年漁期時点で限界管理基準値案を下回っているが、将来予測開始時の 2022 年には限界管理基準値案を上回ると共に、 β が 0.8 であれば管理開始 3 年後の 2025 年以降には 50%以上の確率で目標管理基準値案を上回ると予測され、 β が 0.9 でも管理開始 4 年後の 2026 年以降、目標管理基準値案を上回る確率が 50%以上となった（補足表 4-1）。しかし、 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管理開始 10 年後の 2032 年においても 50%を下回った。限界管理基準値については、 β が 1 であっても 2022 年以外の年で 99%以上の確率で限界管理基準値案となる親魚量を維持できることが示された（補足表 4-2）。2022 年漁期以降の親魚量は β が低い程多くなり（補足表 4-4）、2022 年漁期の漁獲量は β が 0.6 以上で現状（2020 年漁期：6,800 トン）より多くなった（補足表 4-5）。



補足図 4-1. 加入量に RI 型再生産関係を用いた将来予測と現状の漁獲圧で漁獲を続けた場合の将来予測の比較

水色は現状の漁獲圧（F2017-2019）で漁獲を続けた場合、オレンジは漁獲管理規則案（F の上限は $0.8F_{msy}$ ）に基づく漁獲を行った場合を示す。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、黄点破線は限界管理基準値案、赤点線は禁漁水準案を示す。漁獲割合の図の破線は U_{msy} を示す。2021 年漁期の漁獲量は予測される資源量と F2017-2019 により仮定した。漁獲管理規則案（2022 年漁期以降）は標準の管理基準値案に基づく（図 5）。調整係数 β には 0.8 を用いた。

補足表 4-1. 加入量に RI 型再生産関係を用いた時の将来の親魚量が目標管理基準値案を上回る確率 (%)

β	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2042	2052
1	0	0	0	1	13	30	34	39	45	45	44	42	43	42	43
0.9	0	0	0	2	21	46	53	58	64	64	61	59	58	57	59
0.8	0	0	0	3	32	66	72	77	81	81	76	72	69	70	73
0.7	0	0	0	5	46	82	87	91	93	91	86	80	76	79	82
0.6	0	0	0	7	62	93	96	97	98	97	92	84	77	83	86
0.5	0	0	0	10	78	98	99	100	100	99	96	85	74	82	87
0.4	0	0	0	14	91	100	100	100	100	100	99	86	67	78	84
0.3	0	0	0	19	98	100	100	100	100	100	100	92	63	78	87
0.2	0	0	0	25	100	100	100	100	100	100	100	99	80	95	98
0.1	0	0	0	30	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0	0	0	0	35	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
F2017-2019	0	0	0	0	2	5	6	6	8	8	8	8	9	8	9

漁獲管理規則案での調整係数 β を 0.0～1.0 にて 0.1 刻みで変更した場合の将来予測。2021 年漁期は F2017-2019 で漁獲し、2022 年漁期から漁獲管理規則案による漁獲とした。比較のため、F2017-2019 で漁獲を続けた場合の結果も示した。

補足表 4-2. 加入量に RI 型再生産関係を用いた時の将来の親魚量が限界管理基準値案を上回る確率 (%)

β	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2042	2052
1	0	99	79	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.9	0	99	79	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.8	0	99	79	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.7	0	99	79	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.6	0	99	79	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.5	0	99	79	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.4	0	99	79	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.3	0	99	79	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.2	0	99	79	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.1	0	99	79	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0	0	99	79	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
F2017-2019	0	99	79	95	95	95	94	94	94	95	94	94	94	94	94

漁獲管理規則案での調整係数 β を 0.0～1.0 にて 0.1 刻みで変更した場合の将来予測。2021 年漁期は F2017-2019 で漁獲し、2022 年漁期から漁獲管理規則案による漁獲とした。比較のため、F2017-2019 で漁獲を続けた場合の結果も示した。

補足表 4-3. 加入量に RI 型再生産関係を用いた時の将来の親魚量が禁漁水準を上回る確率 (%)

β	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2042	2052
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
0.4	100	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	100
0.2	100	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	100
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
F2017-2019	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 0.0～1.0 にて 0.1 刻みで変更した場合の将来予測。2021 年漁期は F2017-2019 で漁獲し、2022 年漁期から漁獲管理規則案による漁獲とした。比較のため、F2017-2019 で漁獲を続けた場合の結果も示した。

補足表 4-4. 加入量に RI 型再生産関係を用いた時の将来の平均親魚量の推移 (千トン)
漁獲管理規則案での調整係数 β を 0.0～1.0 にて 0.1 刻みで変更した場合の将来予測。

β	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2042	2052
1	3.2	4.7	4.2	6.3	8.1	9.6	9.9	10.4	10.9	11.0	10.9	10.8	10.7	10.7	10.7
0.9	3.2	4.7	4.2	6.6	8.9	11.1	11.7	12.3	12.9	12.9	12.7	12.4	12.3	12.3	12.4
0.8	3.2	4.7	4.2	7.0	9.9	12.8	13.8	14.7	15.5	15.3	14.6	14.1	13.8	14.0	14.1
0.7	3.2	4.7	4.2	7.3	11.0	14.9	16.5	17.7	18.7	18.1	16.8	15.7	15.0	15.7	16.0
0.6	3.2	4.7	4.2	7.7	12.2	17.3	19.9	21.7	22.9	21.6	19.1	17.0	15.7	17.3	17.9
0.5	3.2	4.7	4.2	8.1	13.5	20.3	24.3	26.9	28.5	26.1	21.6	17.9	15.7	18.2	19.5
0.4	3.2	4.7	4.2	8.5	15.1	23.8	30.0	33.9	36.1	32.1	24.7	18.6	15.0	18.4	20.6
0.3	3.2	4.7	4.2	8.9	16.8	28.0	37.5	43.6	46.8	40.6	29.2	19.8	14.2	19.2	24.0
0.2	3.2	4.7	4.2	9.4	18.7	33.3	47.5	57.2	62.3	53.5	37.4	23.8	15.3	26.2	39.4
0.1	3.2	4.7	4.2	9.8	20.9	39.9	61.0	76.8	85.5	74.6	53.4	34.7	22.1	50.4	74.3
0	3.2	4.7	4.2	10.3	23.4	48.2	79.5	105.6	121.6	110.8	85.1	60.8	42.8	91.7	60.8
F2017-2019	3.2	4.7	4.2	5.2	5.8	6.4	6.5	6.6	6.8	6.8	6.8	6.8	6.9	6.8	6.9

2021 年漁期は F2017-2019 で漁獲し、2022 年漁期から漁獲管理規則案による漁獲とした。比較のため、F2017-2019 で漁獲を続けた場合の結果も示した。

※黄色網掛けは目標管理基準値案を下回ることを示す。

補足表 4-5. 加入量に RI 型再生産関係を用いた時の将来の平均漁獲量の推移（千トン）

β	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2042	2052
1	6.8	12.3	11.1	15.5	17.2	19.1	20.1	20.4	20.5	20.4	20.3	20.2	20.2	20.2	20.1
0.9	6.8	12.3	10.3	15.0	17.2	19.5	20.6	20.8	20.7	20.4	20.0	19.9	19.8	20.0	20.0
0.8	6.8	12.3	9.5	14.4	17.0	19.7	21.0	21.0	20.6	19.9	19.2	18.9	18.9	19.3	19.4
0.7	6.8	12.3	8.5	13.6	16.7	19.8	21.2	21.0	20.2	18.9	17.7	17.2	17.3	18.2	18.4
0.6	6.8	12.3	7.6	12.6	16.1	19.7	21.2	20.7	19.4	17.5	15.7	14.9	15.0	16.5	16.9
0.5	6.8	12.3	6.5	11.4	15.2	19.2	20.9	20.2	18.4	15.9	13.4	12.1	12.3	14.0	14.8
0.4	6.8	12.3	5.4	9.9	13.9	18.1	20.1	19.4	17.4	14.3	11.1	9.2	9.2	10.7	11.8
0.3	6.8	12.3	4.2	8.1	11.9	16.1	18.4	18.1	16.2	12.9	9.3	6.9	6.3	7.5	9.0
0.2	6.8	12.3	2.9	5.9	9.1	13.0	15.3	15.5	14.2	11.4	7.9	5.2	4.0	5.9	8.7
0.1	6.8	12.3	1.5	3.2	5.3	7.9	9.8	10.4	10.0	8.3	5.9	3.9	2.6	5.6	8.8
0	6.8	12.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
F2017-2019	6.8	12.3	13.5	15.9	16.4	17.3	17.9	18.1	18.2	18.2	18.4	18.5	18.5	18.4	18.3

漁獲管理規則案での調整係数 β を 0.0～1.0 にて 0.1 刻みで変更した場合の将来予測。2021 年漁期は F2017-2019 で漁獲し、2020 年漁期から漁獲管理規則による漁獲とした。比較のため、F2017-2019 で漁獲を続けた場合の結果も示した。

補足表 4-6. 加入量に RI 型再生産関係を用いた時の予測される親魚量・漁獲量と親魚量が管理基準値案を上回る確率のまとめ

漁獲管理規則案での調整係数 β を 0.0～1.0 にて 0.1 刻みで変更した結果をまとめた。
 漁獲管理規則案での漁獲管理を開始する初年度（0 年後）の 2022 年漁期の値と、5 年
 および 10 年管理を行った後の値（2027 年漁期および 2032 年漁期）を示した。

β	10 年後 の目標 達成確 率	予測平均親魚量 (千トン)		予測平均漁獲量 (千トン)			リスク（10 年間に 1 度で も起きる確率）		
	親魚量 が目標 管理基 準値案 を上回 る	5 年後	10 年 後	0 年後	5 年後	10 年 後	親魚量 が現在 の水準 を下回 る	親魚量 が禁漁 水準を 下回る	漁獲量 が半減 する
		2027 年 漁期	2032 年 漁期	2022 年 漁期	2027 年 漁期	2032 年 漁期			
1	43%	10.4	10.7	11.1	20.4	20.2	2%	0%	0%
0.9	58%	12.3	12.3	10.3	20.8	19.8	1%	0%	0%
0.8	69%	14.7	13.8	9.5	21.0	18.9	0%	0%	0%
0.7	76%	17.7	15.0	8.5	21.0	17.3	0%	0%	0%
0.6	77%	21.7	15.7	7.6	20.7	15.0	0%	0%	0%
0.5	74%	26.9	15.7	6.5	20.2	12.3	0%	0%	1%
0.4	67%	33.9	15.0	5.4	19.4	9.2	0%	0%	2%
0.3	63%	43.6	14.2	4.2	18.1	6.3	0%	0%	2%
0.2	80%	57.2	15.3	2.9	15.5	4.0	0%	0%	0%
0.1	100%	76.8	22.1	1.5	10.4	2.6	0%	0%	0%
0	100%	105.6	42.8	0.0	0.0	0.0	0%	0%	0%