

## 令和 4（2022）年度アカガレイ日本海系群の 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 年度の本資源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。本資源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 2000～2019 年の親魚量と翌々年（2002～2021 年）の加入量の情報に対し、加入の残差の自己相関を考慮したホッカー・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を使用した。目標管理基準値として、再生産関係に基づき算出される SBmsy（234 百トン）を提案する。また、限界管理基準値として SB0.6msy（100 百トン）、禁漁水準として SB0.1msy（15 百トン）を提案する。目標管理基準値案（SBmsy）を達成する漁獲圧（Fmsy）は、現状（2019～2021 年の漁獲係数）の 2.21 倍である。

親魚量 (百トン)	現状の親魚量 (2021 年) 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 (百トン)	現状の漁獲圧 (2019～2021 年) に対する比*1	説 明
目標管理基準値案					
234	0.69	0.21	59	2.21	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					
100	0.30	0.09	36	2.99	MSY の 60% の漁 獲が得られる親魚 量 (SB0.6msy)
禁漁水準案					
15	0.04	0.01	6	3.33	MSY の 10% の漁 獲が得られる親魚 量 (SB0.1msy)
2021 年					
338	1.00	0.30	36*2	—	2021 年の値

\*1 各管理基準値案および水準案を達成する漁獲圧が現状の漁獲圧に対して何倍に相当するかを示す係数である。なお、年齢別選択率は現状の漁獲圧における年齢別選択率に基づく。

\*2 2021 年の実際の漁獲量（暫定値）を示す。

## 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および補足資料 1 のデータセットを使用して実施した。解析には統計ソフトウェア (R version 4.2.1) および計算パッケージ frasyr (コミット番号 1c8799a) 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 (FRA-SA2022-ABCWG02-04)」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 4 (2022) 年度アカガレイ日本海系群の資源評価 (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および将来予測計算に使用する再生産関係 (補足資料 2、3) 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。再生産関係の検討は、資源評価で推定された 2000～2019 年の親魚量と翌々年 (2002～2021 年) の加入量に基づき行った。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。自己相関パラメータを推定する際は、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、この場合、残差の正規性を仮定した方が妥当と考え、最適化法には最小二乗法を用いた。

候補とした再生産関係を表 1、補足表 2-1 に示す。AICc は再生産モデルに関わらず、最小二乗法かつ自己相関を考慮しつつ、再生産関係式のパラメータを同時に推定するモデルの AICc が低い傾向にあった。このため、本資源については最小二乗法を用いることとした。次に加入の時系列トレンドを調べるため、最小二乗法で当てはめた場合の再生産関係との逸脱度 (deviance) および自己相関を考慮した場合の残差 (residual) について、トレンドと自己相関プロットを求めた (補足図 2-1)。その結果、いずれの再生産関係を仮定した場合でも、自己相関は有意であったため、本資源については自己相関を考慮することとした。残った 3 つの再生産関係を補足図 2-2 に示す。HS 型と RI 型では比較的よくフィットしていたが、BH 型では変曲点が一意にも止まっていなかったため、候補から除外した。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、正規性からの有意な逸脱は検出されなかった (補足図 2-3)。ジャックナイフ法により、個々のデータを取り除いた際の推定パラメータへの影響を調べた。その結果、いずれの再生産関係式においても影響は小さく、とくに HS 型と RI 型で頑健であることが示された (補足図 2-4、2-5)。また、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結果、パラメータ  $a$  および  $b$  について、いずれの再生産関係式においても推定値の中央値と点推定値はほぼ一致した (補足図 2-6、2-7)。各再生産関係モデルのプロファイル尤度を補足図 2-8 に示す。この結果、HS 型と RI 型ではパラメータが収束することが示された。

AICc を比較したところ、最小二乗法により最適化した RI 型 (AICc = -4.79) と HS 型 (-3.04) の差は 1.75 であり、モデルの説明力の差の境界である 2 より低い値であった。AICc の予測力やその他の点で HS 型と RI 型に大差がなかったことから、異なる再生産関係を用いた場合のリスクの非対称性の評価を行った。真は HS 型であったが選択を間違えて RI 型で管理した場合と、真は RI 型であったが HS 型で管理した場合において将来予測をしたところ、いずれの場合でも SBmsy の達成確率は 50% を超えており、将来予測におけるリスクに大きな違いは見られなかった (補足表 2-2)。また、HS 型と RI 型の Fmsy に相当する %SPR を見てみると、HS 型で 21、RI 型では F20%SPR や Fmax を下回る 16 であった (補足図 2-9)。以上の %SPR を考慮すると、HS 型の方がより現実的な目標と考えられる。令和 3 (2021) 年度の資源評価報告書 (白川ほか 2021) から、Fcurrent に相当する %SPR は雌で 55、雄で 49 であった。このため、雌雄での %SPR に違いが少ないこと、雌雄の近年の F は Fmsy と比べて十分に小さいと考えられる。

以上の検討から、本資源の再生産関係の候補としては、最小二乗法で最適化し、同時推定法により自己相関を考慮した HS 型再生産関係式を用いた (表 1、補足資料 2)。

### 1-3) 再生産関係の候補

上述の通り、本資源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 (令和 4 年度) (FRA-SA2022-ABCWG02-05)」の 3.a (予測力)、3.b (生物学的妥当性 or 便宜的仮定) および 3.h (自己相関) の基準に従い、最適化法を最小二乗法とし、同時推定法により自己相関を考慮した HS 型再生産関係を提案する (図 1)。

## 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、表 2 に示した令和 4 年度の資源評価に基づいた各種設定 (自然死亡係数、成熟率、現状の漁獲圧) を使用して実施した。また、本資源においては現状の漁獲圧 (Fcurrent) として 2019~2021 年の漁獲係数を用いており (図 2)、管理基準値案の算出と将来予測における選択率には現状の漁獲圧に基づく選択率を用いた。平均世代時間 (11.6 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、平衡状態における平均漁獲量の最大値を最大持続生産量 (MSY)、MSY が達成される際の親魚量を SBmsy、MSY が得られる F 値を Fmsy とした。

### 2-2) 管理基準値案と禁漁水準案

本資源の目標管理基準値案 (SBtarget) として MSY 水準における親魚量 (SBmsy : 234 百トン)、限界管理基準値案 (SBlimit) として MSY の 60% の漁獲が得られる親魚量 (SB0.6msy : 100 百トン)、禁漁水準案 (SBban) として MSY の 10% の漁獲が得られる親魚量 (SB0.1msy : 15 百トン) 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、基準値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および現状の漁獲圧に対する比などを表 3 に示す。目標管理基準値案として提案する

SBmsy は SB0 の 21%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 59 百トンである。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 2.21 で、その時の漁獲割合 (Umsy) は 17%である。限界管理基準値として提案する SB0.6msy は SB0 の 9%、禁漁水準として提案する SB0.1msy は SB0 の 1%である。

様々に F 値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 SBlimit 以下では 5~8 歳魚が多くを占めるが、SBmsy 達成時以降においては 11 歳以上の高齢魚の比率が高くなる傾向が見られた。

### 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。本資源における漁獲係数 (F 値) はすべての年で MSY を実現する水準を下回っており、親魚量は 2007 年以降で目標管理基準値案を上回っていた。現状の親魚量 (2021 年の親魚量: 338 百トン) 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 0.69、0.29 および 0.04 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ことを定めている。F 値の上限は Fmsy に調整係数  $\beta$  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を用いた場合 (すなわち、SBlimit は SB0.6msy、SBban は SB0.1msy の場合) 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  $\beta$  に標準値である 0.8 を用いた。

### 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 $\beta$ 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、調整係数の  $\beta$  も標準値の 0.8 とした漁獲管理規則案 (図 5a) で将来予測した資源量、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。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 年の漁獲量は予測される資源量と現状の漁獲圧から仮定した。

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、まず  $\beta$ Fmsy での漁獲が行われる。中長期的にも、親魚量は限界管理基準値案を超えるため、 $\beta$ Fmsy での漁獲となる。 $\beta$ Fmsy での漁獲の継続により漁獲量は MSY 水準付近で、親魚量は SBmsy よりも高めに推移していくと予測される。

#### (2) 調整係数 $\beta$ 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  $\beta$  を 0.0~1.0 の間で、0.1 間隔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 4～9 に示す。表 4～8 には、現状の漁獲圧 (F2019～F2021) で漁獲を継続した場合の結果も比較のため示した。ここで、現状の漁獲圧は  $\beta=0.45$  に相当する。

本資源の親魚量は多くの年で目標管理基準値案を上回っており、漁獲管理規則案での漁獲開始から 10 年後の 2033 年では、 $\beta$  が 0.8 であれば 83%、 $\beta$  が 1 の場合は 64% の確率で目標管理基準値案を上回ると予測された (表 4)。一方、20 年後の 2043 年では  $\beta$  が 0.9 の場合は 70% の確率で目標管理基準値案を上回ると予測されたが、 $\beta$  が 1 の場合は目標管理基準値案を上回る確率は 49% だった (表 4)。 $\beta=1$  であっても 10 年後の親魚量が目標管理基準値案を 50% の確率で上回った。この予測結果に同時推定の自己相関が影響しているかを検討した。将来予測に用いる自己相関係数  $\rho$  を 0 にした場合でも、10 年後の親魚量が目標管理基準値案を上回った。このため、現状の親魚量が SBmsy を大きく上回っていることや本種が長寿命であることで、Fmsy での漁獲を行ったとしても資源全体の親魚量を減らすのに 10 年以上の時間がかかると考えられた。

なお、限界管理基準値案となる親魚量については、 $\beta$  が 0.8 あるいは 1.0 であっても、100% の確率で維持できることが示された (表 5)。また、いずれの  $\beta$  を用いた場合でも親魚量は禁漁水準案を下回らないと予測された (表 6)。2024 年以降の親魚量は  $\beta$  が低い程多くなった (表 7)。2023 年の漁獲量は  $\beta$  が 0.5 以上になった際、現状の漁獲量 (2021 年 : 36 百トン) を上回った (表 8)。

### 3. まとめ

本資源では、資源評価で推定された 2000～2019 年における親魚量と翌々年 (2002～2021 年) の 2 歳魚の加入尾数に基づき、再生産関係モデルに自己相関を考慮した 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 SBmsy (234 百トン) とすることを提案する。限界管理基準値、禁漁水準については、標準値である SB0.6msy (100 百トン)、SB0.1msy (15 百トン) をそれぞれ提案する。

現在の本資源の親魚量は目標管理基準値案を上回っていると推定される。MSY を実現する漁獲割合は 17%、漁獲圧は Fcurrent の 2.21 倍である (表 3)。漁獲管理規則案で用いる  $\beta$  はどの値であっても 10 年後には親魚量が 50% 以上の確率で MSY を実現する水準 (SBmsy) に維持されると予測された。

### 4. 今後の検討事項

令和 4 年度までの本資源の資源評価では、雌雄別に年別・年齢別の平均体重を用い、VPA を行ってきた。再生産関係および管理基準値案等の検討においては、年齢別資源尾数の雌雄比に基づいて雌雄の年齢別漁獲尾数、成熟率、平均体重、年齢別 M を合算し、それらを元に Pope の近似式から年齢別 F を計算した。これら雌雄込に変更したことによる雌雄比の年変化や平均体重への影響については、今後検討していく必要がある。

また日本海北部においては age-length Key や精密測定データがなく漁獲量のみ情報となることから、西部の年齢別漁獲量から各年各齢の比率を用いて日本海北部の年齢別漁獲

重量を引き伸ばした。海域毎の詳細な情報に基づく年齢別漁獲尾数の算出のため、調査体制を強化することが重要である。

## 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). FRA-SA-2022-ABCWG02-04.

ABCWG (2022) 再生産関係の決定に関するガイドライン (令和 4 年度). FRA-SA2022-ABCWG02-05.

白川北斗, 藤原邦浩, 佐久間啓, 内藤大河, 八木佑太, 吉川 茜 (2021) 令和 3 (2021) 年度アカガレイ日本海系群の資源評価

(執筆者: 白川 北斗、内藤 大河、八木 佑太、吉川 茜、佐久間 啓、藤原 邦浩)

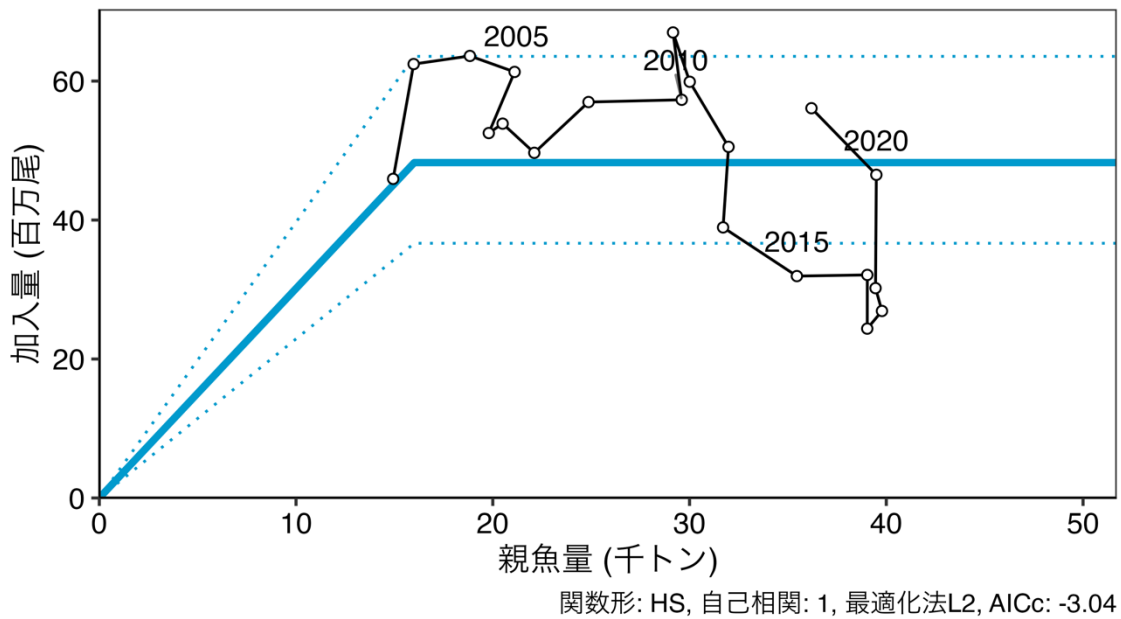


図 1. 再生産関係

2000～2019年における親魚資源量と翌々年（2002～2021年）の2歳魚の加入尾数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考慮したホッカー・ステイック型（HS）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。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。

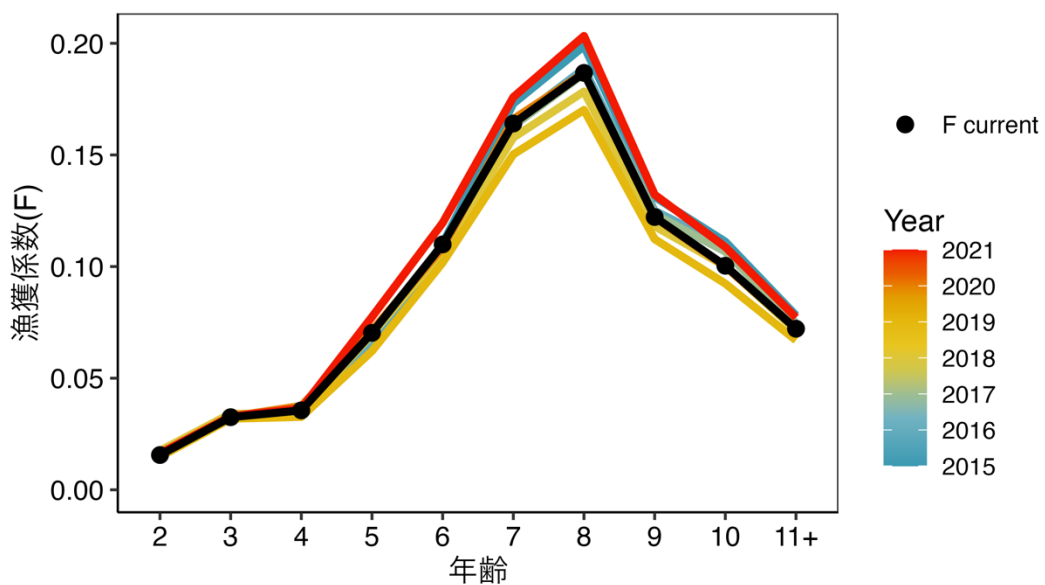


図 2. 年齢別の漁獲係数（F 値）

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（2019～2021年の F 値）である。

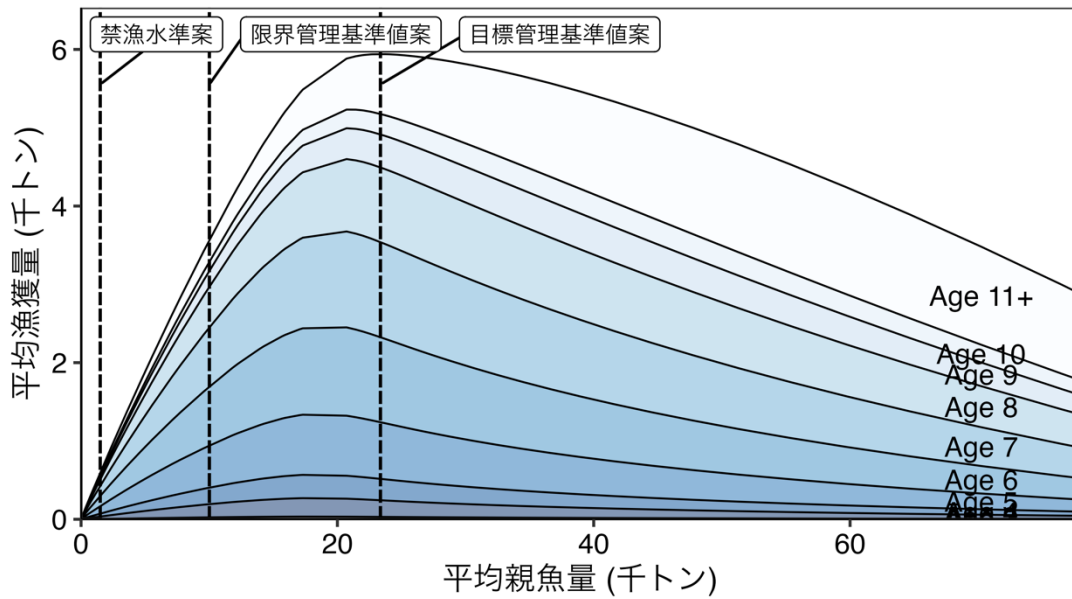


図3. 管理基準値案および禁漁水準案と年齢別漁獲量曲線の関係

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 111,269 トンである。

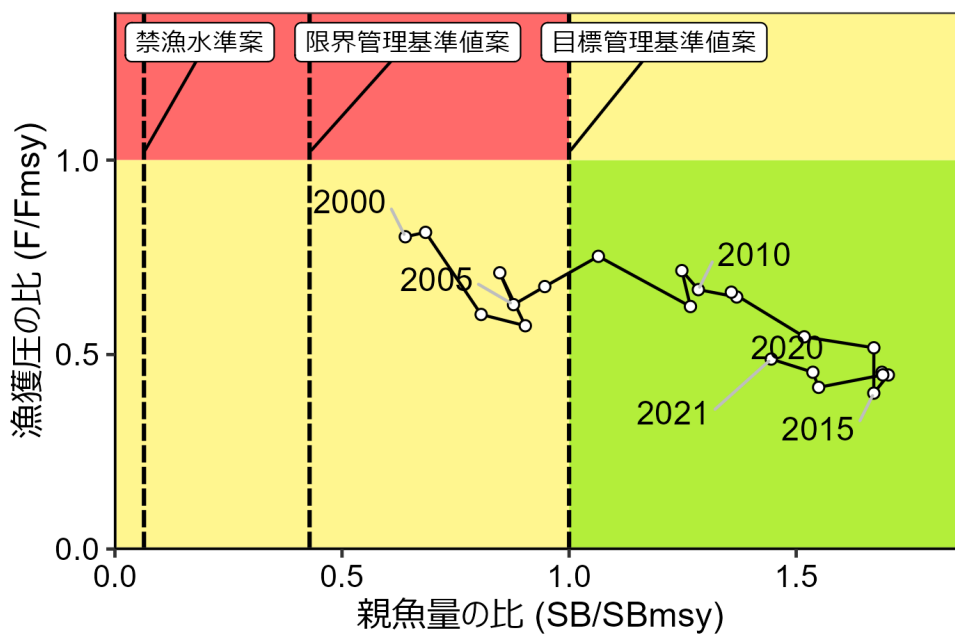
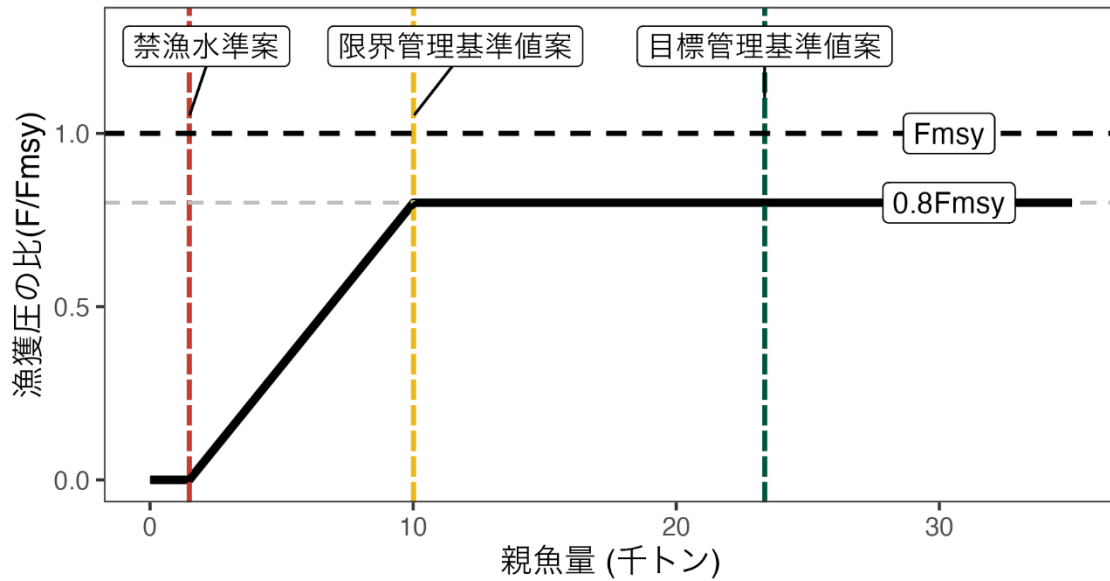


図4. 神戸プロット

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

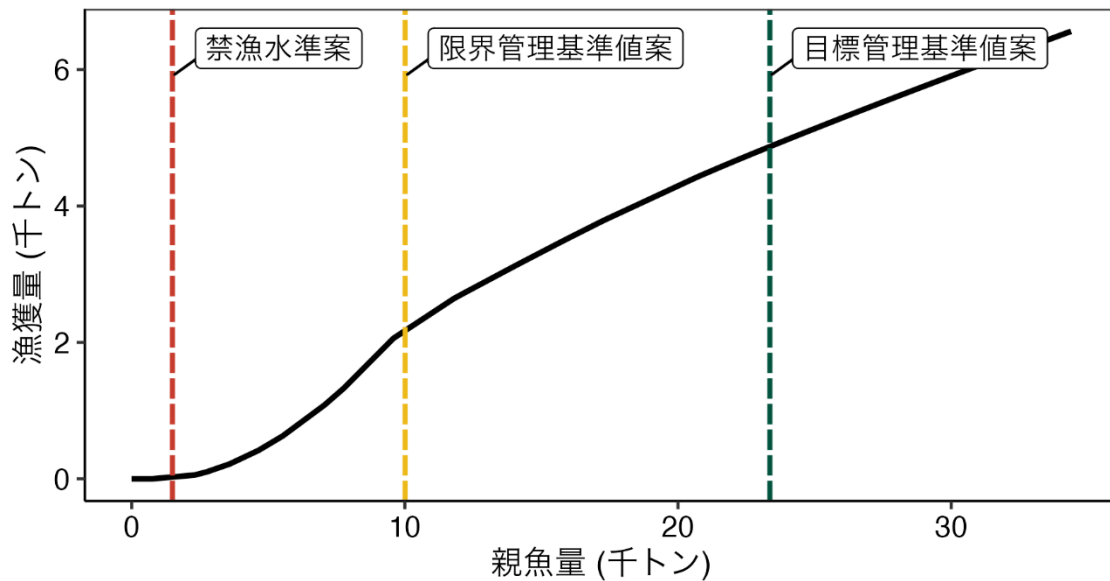
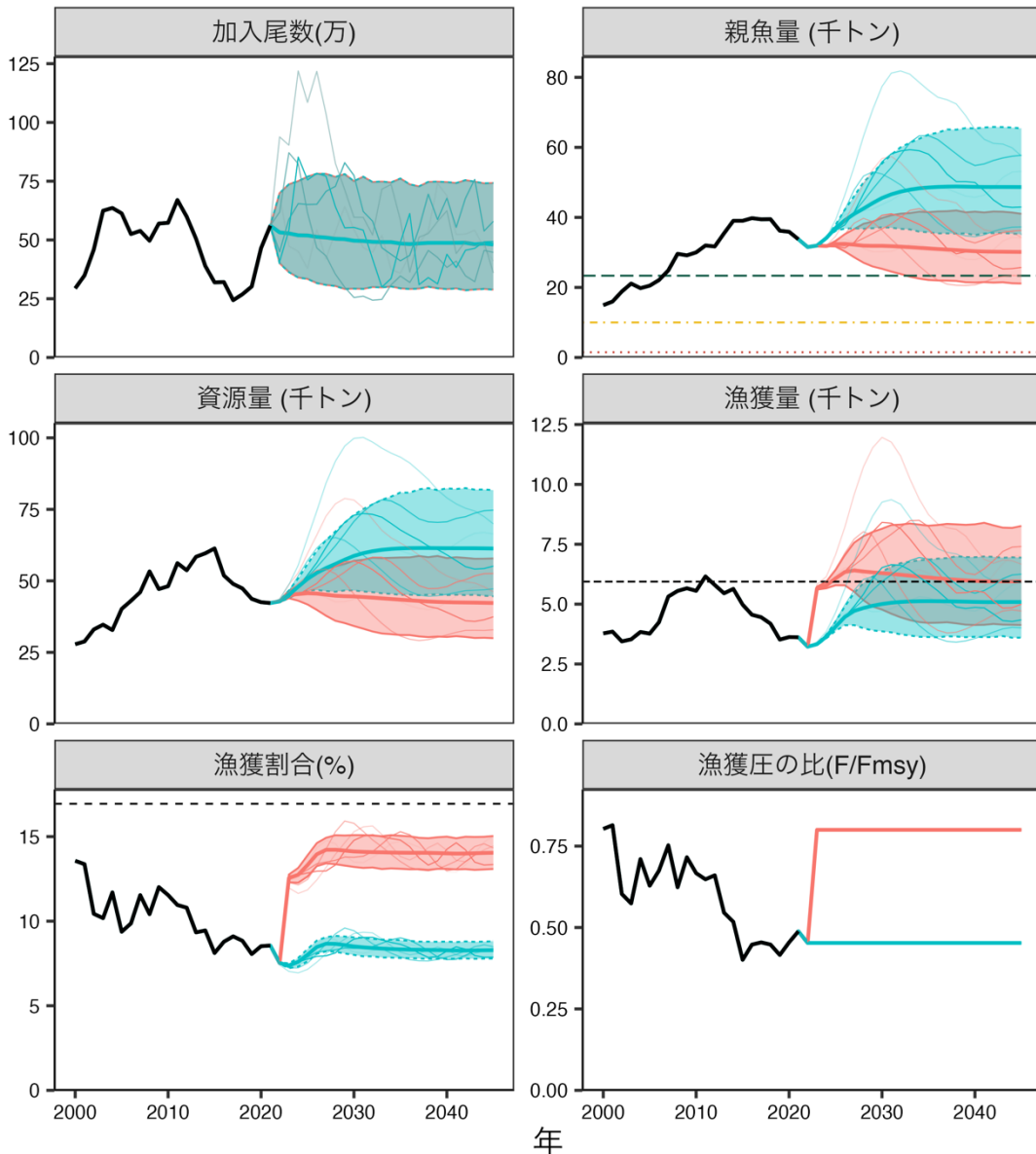


図 5. 漁獲管理規則案

目標管理基準値案 (SBtarget) は HS 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) には、それぞれ標準値を用いている。調整係数  $\beta$  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。

— 0.8HCR    -- U\_MSY                      -- 目標管理基準値案    ■ 0.8HCR    ■ Fcurrent  
 ..... Fcurrent    ..... 禁漁水準案  
 --- MSY        --- 限界管理基準値案



(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（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。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  $\beta$  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	順位
<b>ホッケー・スティック (HS)</b>	<b>最小二乗法</b>	<b>同時</b>	<b>-3.04</b>	<b>2</b>
リッカー (RI)	最小二乗法	同時	-4.79	1
ベバートン・ホルト (BH)	最小二乗法	同時	-2.00	3
ホッケー・スティック (HS)	最小二乗法	無	16.54	6
リッカー (RI)	最小二乗法	無	0.88	4
ベバートン・ホルト (BH)	最小二乗法	無	16.54	7
ホッケー・スティック (HS)	最小絶対値法	無	17.43	8
リッカー (RI)	最小絶対値法	無	4.43	5
ベバートン・ホルト (BH)	最小絶対値法	無	18.00	9

推奨する再生産関係式を太字とした。順位は 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。自己相関パラメータの推定には、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。この場合、残差の正規性を仮定した方が妥当と考え、最適化法には最小二乗法を用いた。

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 (Fcurrent)
2	0.14	0	20	0.216	0.016
3	0.14	0	81	0.451	0.033
4	0.14	0.04	118	0.493	0.036
5	0.14	0.43	204	0.974	0.070
6	0.14	0.89	273	1.524	0.110
7	0.14	0.98	317	2.274	0.164
8	0.14	1	367	2.588	0.187
9	0.14	1	400	1.694	0.122
10	0.14	1	445	1.391	0.100
11+	0.14	1	639	1.000	0.072

現状の漁獲圧 (Fcurrent) は 2019～2021 年の F 値である。自然死亡係数、平均重量は 2017～2021 年の平均である。平均前の自然死亡係数、成熟率、平均重量の計算については補足資料 1 を参照のこと。

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 (百トン)	SB0 に 対する比	漁獲量 (百トン)	漁獲圧 (%SPR)	漁獲 割合	努力量 の比
目標管理基準値案	SBmsy	234	0.21	59	21.0	0.17	2.21
限界管理基準値案	SB0.6msy	100	0.09	36	15.0	0.21	2.99
禁漁水準案	SB0.1msy	15	0.01	6	13.2	0.23	3.33
MSY を実現する 漁獲圧	Fmsy	(0 歳, 1 歳, 2 歳, 3 歳, 4 歳, 5 歳, 6 歳, 7 歳, 8 歳, 9 歳以上) = (0.03, 0.07, 0.08, 0.16, 0.24, 0.36, 0.41, 0.27, 0.22, 0.16)					

表 4. 将来の親魚量が目標管理基準値案を上回る確率 (%)

$\beta$	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2043	2053
1.0	100	100	100	100	100	100	100	92	83	76	70	66	64	49	47
0.9	100	100	100	100	100	100	100	99	96	93	88	85	83	70	68
0.8	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99	98	96	94	88	85
0.7	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99	96	96
0.6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99	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
0.0	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  $\beta$  を 0.0~1.0 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 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 (%)

$\beta$	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2043	2053
1.0	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
0.0	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  $\beta$  を 0.0~1.0 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 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案を上回る確率 (%)

$\beta$	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2043	2053
1.0	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
0.0	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  $\beta$  を 0.0~1.0 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 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（百トン）

$\beta$	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2043	2053
1.0	338	315	320	306	301	292	282	273	268	264	260	257	254	240	235
0.9	338	315	320	312	312	308	301	295	292	290	287	285	282	268	264
0.8	338	315	320	318	324	325	322	319	319	319	318	316	315	302	297
0.7	338	315	320	325	336	342	345	346	349	352	353	353	353	343	338
0.6	338	315	320	331	349	361	369	375	383	390	394	397	398	392	387
0.5	338	315	320	338	363	382	396	408	421	433	441	447	451	453	448
0.4	338	315	320	345	377	403	426	445	464	482	496	506	513	528	524
0.3	338	315	320	352	392	427	458	485	513	539	559	575	587	622	620
0.2	338	315	320	359	407	451	492	530	569	604	633	657	675	740	743
0.1	338	315	320	366	423	478	531	580	631	679	719	753	780	888	902
0.0	338	315	320	374	440	506	572	636	703	766	820	866	906	1,078	1,110
Fcurrent	338	315	320	341	369	392	410	425	441	455	466	474	479	487	482

漁獲管理規則案での調整係数  $\beta$  を 0.0～1.0 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 で漁獲を続けた場合の結果も示した。

表 8. 将来の平均漁獲量の推移（百トン）

$\beta$	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2043	2053
1.0	36	32	69	68	69	70	69	68	67	66	65	64	64	61	60
0.9	36	32	63	63	65	67	67	66	65	65	64	64	63	60	59
0.8	36	32	57	58	61	63	64	64	63	63	63	62	62	60	59
0.7	36	32	50	52	56	59	60	60	61	61	60	60	60	58	57
0.6	36	32	43	46	50	54	56	56	57	57	57	57	57	56	55
0.5	36	32	37	40	44	48	50	51	52	53	53	53	53	53	52
0.4	36	32	30	33	37	41	43	45	46	47	47	48	48	48	48
0.3	36	32	22	25	29	33	35	37	38	39	40	40	41	42	41
0.2	36	32	15	17	20	23	25	27	28	29	30	30	31	32	32
0.1	36	32	8	9	11	12	14	15	16	16	17	17	18	19	19
0.0	36	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fcurrent	36	32	33	36	41	45	47	48	49	50	51	51	51	51	50

漁獲管理規則案での調整係数  $\beta$  を 0.0～1.0 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 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

$\beta$	10年後の 目標達成 確率	予測平均親魚量 (百トン)		予測平均漁獲量 (百トン)			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 が限界 管理基 準値案 を下回 る	漁獲量 が半減 する
		2028 年	2033 年	2023 年	2028 年	2033 年			
1	64%	273	254	69	68	64	0%	0%	0%
0.9	83%	295	282	63	66	63	0%	0%	0%
0.8	94%	319	315	57	64	62	0%	0%	0%
0.7	99%	346	353	50	61	60	0%	0%	0%
0.6	100%	375	398	43	56	57	0%	0%	0%
0.5	100%	408	450	37	51	54	0%	0%	0%
0.4	100%	445	513	30	45	48	0%	0%	0%
0.3	100%	485	587	22	37	41	0%	0%	0%
0.2	100%	530	675	15	27	31	0%	0%	0%
0.1	100%	580	780	8	15	18	0%	0%	0%
0	100%	636	906	0	0	0	0%	0%	0%

漁獲管理規則案での調整係数  $\beta$  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 2023 年の値と、5年および 10年管理を行った後の値（2028年および 2033年）を示した。

## 補足資料 1 用いたデータセットについて

本系群では日本海西部海域（石川県以西）におけるトロール調査結果に基づき、雌雄別にコホート解析を行い、資源量や親魚量を計算してきた（白川ほか 印刷中）。しかしながら再生産関係の検討においては、特に雄のみの再生産関係を議論することに生物学的な妥当性がないため、雌雄別のデータを雌雄込みに合算する必要があった。加えて資源解析の結果は日本海西部海域のデータに基づき算出された値であり、これまでは得られた資源量等は、日本海西部海域と系群漁獲量との関係を用いて日本海系群全体の数値に換算してきた。この換算の根拠として、本系群における日本海西部海域の漁獲量が全体の 94～96%（2011～2021 年）を占めていること、かつ主たる漁業種類が日本海西部海域と北部海域で同一であることなどが挙げられる。しかしながら管理基準値の推定や将来予測にあたっては、日本海系群としての雌雄込みの年齢別漁獲尾数や年齢別資源尾数の情報が必要となる。これらの算出方法を以下に記す。

### ・日本海系群の雌雄別年齢別漁獲尾数

日本海西部海域の雌雄別年齢別漁獲量に基づき、各年の漁獲量における雌雄の割合を求めた。この雌雄割合を用いて日本海北部海域の年別漁獲量を雌雄別年齢別漁獲量に分解し、これを日本海西部海域の雌雄別年齢別漁獲量の年齢別の割合を乗算することで、日本海北部海域の雌雄別年齢別漁獲尾数を算出した。得られた日本海北部海域の値を日本海西部海域の雌雄別年齢別漁獲尾数と合算し、これを系群全体の雌雄別年齢別漁獲尾数とした。

### ・雌雄別データの合算方法

日本海西部海域の資源尾数における年齢別雌雄割合（雌/（雌+雄））（補足表 1）をもとに、加重平均で日本海系群全体の年齢別漁獲尾数の雌雄合算値を求めた。日本海西部海域の年齢別平均重量、成熟率、年齢別 M においても、同様の方法で加重平均したものを本系群の値とした（補足表 1）。

### ・日本海系群の年齢別資源尾数、親魚量および年齢別漁獲尾数 F

日本海北部海域の年別資源量を日本海西部海域の年齢別資源量の年齢別の割合を用いて日本海北部海域の資源量を年齢別に分解した。得られた北部の年齢別資源量に雌雄合算の年齢別平均重量を除算することで、日本海北部海域の年齢別資源尾数を求めた。これら日本海北部海域と日本海西部海域の年齢別資源尾数を合算し、日本海系群の年齢別資源尾数とした。これらの資源尾数、平均重量および成熟率から親魚量を算出した。（補足表 1）。最後に、上記より算出された年齢別漁獲尾数、年齢別資源尾数、年齢別 M をもとに、Pope の式から日本海系群全体の年別年齢別 F を求めた。

## 引用文献

白川北斗・内藤大河・八木佑太・吉川 茜・佐久間啓・藤原邦浩（印刷中）令和 4 年度アカガレイ日本海系群の資源評価. 水産庁・水産研究・教育機構.

補足表 1. 雌雄の合算に用いた年齢別雌雄割合とデータセットとして用いた年齢別漁獲尾数、年齢別平均重量、年齢別資源尾数、年齢別 F、親魚量、資源量、漁獲量 その 1 (2000～2010 年)

日本海西部海域の年齢別資源尾数の年齢別雌雄割合 (雌の割合)											
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
2歳	0.67	0.67	0.65	0.65	0.63	0.61	0.59	0.60	0.59	0.63	0.66
3歳	0.73	0.68	0.69	0.67	0.67	0.65	0.62	0.61	0.62	0.61	0.64
4歳	0.76	0.74	0.70	0.71	0.69	0.69	0.67	0.64	0.63	0.64	0.63
5歳	0.77	0.78	0.76	0.72	0.73	0.71	0.71	0.69	0.67	0.65	0.66
6歳	0.80	0.80	0.80	0.78	0.75	0.75	0.73	0.73	0.71	0.69	0.68
7歳	0.83	0.82	0.82	0.82	0.81	0.77	0.78	0.76	0.76	0.74	0.72
8歳	0.82	0.85	0.84	0.83	0.84	0.82	0.79	0.79	0.78	0.78	0.76
9歳	0.79	0.83	0.86	0.85	0.85	0.85	0.84	0.81	0.81	0.79	0.80
10歳	0.75	0.80	0.84	0.86	0.86	0.85	0.86	0.84	0.81	0.82	0.80
11歳以上	0.81	0.81	0.83	0.86	0.88	0.89	0.89	0.90	0.90	0.90	0.89

日本海系群における雌雄合算の年齢別漁獲尾数(千尾)											
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
2歳	862	990	1,042	1,378	1,610	1,379	1,195	1,391	1,080	1,355	1,183
3歳	1,399	1,396	1,329	1,677	2,495	2,307	2,255	2,244	1,934	2,048	1,934
4歳	1,142	1,191	984	1,112	1,583	1,871	1,975	2,205	1,629	1,903	1,511
5歳	1,860	1,867	1,577	1,499	1,960	2,211	3,057	3,598	2,994	2,902	2,654
6歳	2,240	2,247	1,854	1,824	2,032	2,117	2,757	4,187	3,772	3,981	3,147
7歳	2,704	2,489	2,043	1,951	2,321	2,004	2,453	3,396	4,058	4,432	3,998
8歳	1,721	2,070	1,567	1,482	1,758	1,638	1,631	2,107	2,319	3,325	3,262
9歳	615	805	789	680	808	754	816	847	872	1,134	1,489
10歳	307	374	385	431	467	428	458	525	439	549	646
11歳以上	479	530	497	562	792	799	922	1,101	1,021	1,099	1,132

日本海系群の年齢別平均重量(kg)											
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
2歳	0.09	0.08	0.06	0.04	0.04	0.07	0.07	0.07	0.10	0.05	0.06
3歳	0.15	0.15	0.15	0.12	0.09	0.13	0.13	0.14	0.16	0.13	0.13
4歳	0.18	0.17	0.18	0.14	0.10	0.13	0.15	0.16	0.18	0.15	0.15
5歳	0.24	0.22	0.24	0.23	0.19	0.19	0.19	0.21	0.23	0.20	0.20
6歳	0.29	0.27	0.30	0.31	0.27	0.26	0.24	0.25	0.27	0.24	0.25
7歳	0.34	0.32	0.34	0.37	0.33	0.31	0.29	0.28	0.31	0.28	0.29
8歳	0.36	0.36	0.37	0.41	0.38	0.36	0.33	0.32	0.34	0.31	0.33
9歳	0.40	0.40	0.42	0.45	0.42	0.41	0.39	0.36	0.38	0.36	0.37
10歳	0.43	0.44	0.47	0.51	0.47	0.46	0.44	0.41	0.42	0.40	0.42
11歳以上	0.57	0.60	0.60	0.63	0.61	0.58	0.58	0.55	0.56	0.58	0.58

日本海系群の年齢別資源尾数(千尾)											
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
2歳	29,405	34,909	45,925	62,445	63,617	61,315	52,517	53,873	49,675	56,982	57,305
3歳	25,745	25,142	30,656	38,597	51,463	53,345	50,712	43,810	45,460	42,023	46,387
4歳	20,729	21,649	21,630	25,281	31,149	42,322	43,254	41,415	36,135	37,643	33,370
5歳	16,765	17,447	18,675	17,812	20,417	25,581	34,340	35,355	34,148	29,857	29,879
6歳	13,109	13,495	14,431	14,771	13,752	16,066	19,840	26,887	27,923	26,985	22,621
7歳	10,600	10,027	10,590	10,862	10,874	10,262	11,847	14,728	20,185	20,973	19,397
8歳	6,000	7,483	7,263	7,348	7,392	7,529	6,999	8,157	10,237	14,077	14,019
9歳	3,025	4,098	5,263	4,890	4,848	4,973	4,995	4,671	5,506	6,921	9,137
10歳	1,701	2,242	3,125	3,851	3,507	3,542	3,589	3,637	3,435	4,062	4,898
11歳以上	3,594	4,130	5,116	6,365	7,765	8,759	9,457	10,137	10,824	11,238	11,560

日本海系群の年齢別F											
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
2歳	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02
3歳	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05
4歳	0.06	0.06	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.06	0.05	0.06	0.05
5歳	0.13	0.12	0.09	0.09	0.11	0.10	0.10	0.12	0.10	0.11	0.10
6歳	0.20	0.20	0.15	0.14	0.17	0.15	0.16	0.18	0.16	0.17	0.16
7歳	0.32	0.31	0.23	0.21	0.26	0.23	0.25	0.28	0.24	0.26	0.25
8歳	0.37	0.35	0.26	0.24	0.29	0.27	0.29	0.32	0.28	0.29	0.29
9歳	0.25	0.24	0.17	0.16	0.20	0.18	0.19	0.22	0.19	0.19	0.19
10歳	0.21	0.20	0.14	0.13	0.15	0.14	0.15	0.17	0.15	0.16	0.15
11歳以上	0.15	0.15	0.11	0.10	0.12	0.10	0.11	0.12	0.11	0.11	0.11

日本海系群の親魚量、資源量、漁獲量(百トン)											
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
親魚量	149	160	188	211	198	205	221	249	296	292	300
資源量	278	288	330	347	328	402	430	461	533	471	481
漁獲量	38	39	34	35	38	38	42	53	56	57	56

補足表 1. 雌雄の合算に用いた年齢別雌雄割合とデータセットとして用いた年齢別漁獲尾数、年齢別平均重量、年齢別資源尾数、年齢別 F、親魚量、資源量、漁獲量 その 2 (2011～2021 年)

日本海西部海域の年齢別資源尾数の年齢別雌雄割合(雌の割合)											
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
2歳	0.68	0.70	0.68	0.66	0.63	0.67	0.64	0.62	0.69	0.73	0.74
3歳	0.68	0.70	0.71	0.70	0.68	0.65	0.69	0.65	0.64	0.70	0.74
4歳	0.66	0.70	0.72	0.73	0.72	0.70	0.67	0.71	0.67	0.66	0.72
5歳	0.65	0.69	0.72	0.74	0.75	0.74	0.72	0.69	0.73	0.70	0.68
6歳	0.69	0.68	0.71	0.74	0.76	0.77	0.76	0.74	0.71	0.75	0.72
7歳	0.71	0.72	0.71	0.74	0.77	0.79	0.80	0.78	0.77	0.74	0.78
8歳	0.74	0.73	0.74	0.73	0.76	0.79	0.80	0.81	0.80	0.78	0.76
9歳	0.78	0.76	0.75	0.76	0.75	0.78	0.80	0.82	0.83	0.82	0.80
10歳	0.80	0.79	0.77	0.76	0.77	0.76	0.79	0.81	0.82	0.83	0.82
11歳以上	0.88	0.88	0.87	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.87	0.87	0.88

日本海系群における雌雄合算の年齢別漁獲尾数(千尾)											
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
2歳	1,435	1,237	896	691	500	478	390	435	414	675	849
3歳	2,205	2,280	1,749	1,470	999	837	827	652	670	780	1,195
4歳	1,893	1,835	1,693	1,500	1,109	867	756	716	521	658	719
5歳	2,733	2,971	2,632	2,797	2,194	1,822	1,447	1,189	1,077	931	1,095
6歳	3,602	3,207	3,154	3,189	3,034	2,680	2,291	1,748	1,353	1,473	1,203
7歳	3,782	3,827	3,042	3,405	3,140	3,342	3,047	2,494	1,825	1,617	1,736
8歳	3,393	2,869	2,597	2,292	2,327	2,378	2,621	2,331	1,874	1,565	1,346
9歳	1,655	1,541	1,153	1,149	911	1,026	1,088	1,171	1,031	939	765
10歳	967	979	817	692	625	565	652	663	686	686	618
11歳以上	1,368	1,595	1,562	1,611	1,423	1,404	1,405	1,415	1,402	1,621	1,770

日本海系群の年齢別平均重量(kg)											
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
2歳	0.07	0.05	0.06	0.05	0.08	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
3歳	0.15	0.13	0.14	0.13	0.18	0.11	0.09	0.08	0.09	0.07	0.07
4歳	0.18	0.16	0.17	0.17	0.21	0.13	0.13	0.12	0.13	0.10	0.11
5歳	0.22	0.21	0.23	0.24	0.27	0.21	0.21	0.21	0.21	0.19	0.20
6歳	0.26	0.25	0.27	0.29	0.30	0.26	0.26	0.27	0.26	0.28	0.28
7歳	0.29	0.28	0.30	0.32	0.32	0.30	0.30	0.31	0.31	0.33	0.33
8歳	0.32	0.30	0.33	0.35	0.34	0.34	0.34	0.36	0.36	0.39	0.38
9歳	0.35	0.34	0.37	0.40	0.36	0.37	0.37	0.40	0.39	0.42	0.41
10歳	0.39	0.39	0.41	0.44	0.39	0.41	0.42	0.44	0.43	0.47	0.46
11歳以上	0.52	0.54	0.56	0.58	0.49	0.60	0.61	0.65	0.62	0.64	0.67

日本海系群の年齢別資源尾数(千尾)											
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
2歳	66,996	59,897	50,533	38,938	31,933	32,102	24,372	26,910	30,199	46,510	56,091
3歳	51,694	55,819	51,005	42,986	33,302	27,148	27,336	20,815	22,872	25,868	39,464
4歳	40,863	42,145	46,549	42,582	36,082	27,788	22,567	22,928	17,341	19,094	21,458
5歳	29,253	33,163	35,045	38,770	35,751	30,128	23,133	18,831	19,140	14,482	15,726
6歳	25,048	22,593	26,265	27,861	31,093	28,596	24,034	18,509	14,963	15,335	11,420
7歳	17,949	18,352	16,878	19,715	21,151	23,562	21,683	18,285	13,995	11,312	11,515
8歳	14,308	12,202	12,747	11,712	13,813	14,798	16,490	15,268	12,816	9,830	7,832
9歳	10,043	9,436	8,209	8,580	7,929	9,343	10,028	11,249	10,389	8,742	6,614
10歳	7,150	7,244	6,945	6,039	6,356	5,847	6,892	7,444	8,325	7,721	6,415
11歳以上	13,714	15,994	18,187	19,666	20,269	20,904	20,990	21,985	23,150	24,873	25,502

日本海系群の年齢別F											
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
2歳	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02
3歳	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
4歳	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04
5歳	0.11	0.10	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.07	0.08
6歳	0.17	0.16	0.14	0.13	0.11	0.11	0.11	0.11	0.10	0.11	0.12
7歳	0.26	0.25	0.21	0.20	0.17	0.16	0.16	0.16	0.15	0.17	0.18
8歳	0.29	0.29	0.25	0.23	0.20	0.19	0.19	0.18	0.17	0.19	0.20
9歳	0.19	0.19	0.16	0.15	0.13	0.12	0.12	0.12	0.11	0.12	0.13
10歳	0.16	0.16	0.13	0.13	0.11	0.11	0.11	0.10	0.09	0.10	0.11
11歳以上	0.11	0.11	0.10	0.09	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08

日本海系群の親魚量、資源量、漁獲量(百トン)											
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
親魚量	320	317	355	390	390	398	395	395	362	359	338
資源量	562	537	584	596	613	519	489	473	437	425	423
漁獲量	62	58	55	56	50	46	45	42	35	36	36

## 補足資料 2 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<sub>y</sub> を y 年の加入量、B<sub>y</sub> を y 年当初の親魚量、A<sub>min</sub> を加入年齢 (本資源の場合は A<sub>min</sub>=2) 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 (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.) および h (スティーブネス) も併せて算出した。h は密度補償効果 (資源量が少なくなると親魚量あたりの加入尾数が多くなる) を示す指標であり、各再生産関係は、最適化法や推定法による違いは少なく、HS 型と BH 型では総じて 1 あるいは 1 を下回った。一方、RI 型は 2 を超え、生活史内において強い密度効果があると推定された。

候補とした再生産関係を表 1、補足表 2-1 に示す。AICc は再生産モデルに関わらず、最小二乗法かつ自己相関を考慮しつつ、再生産関係式のパラメータを同時に推定するモデルの AICc が低い傾向にあった。このため、本資源については最小二乗法を用いることとした。次に加入の時系列トレンドを調べるため、最小二乗法で当てはめた場合の再生産関係との逸脱度 (deviance) および自己相関を考慮した場合の残差 (residual) について、トレンドと自己相関プロットを求めた (補足図 2-1)。その結果、いずれの再生産関係を仮定した場合でも、自己相関は有意であったため、本資源については自己相関を考慮することとした。残った 3 つの再生産関係を補足図 2-2 に示す。HS 型と RI 型では比較的良好にフィットしていたが、BH 型では変曲点が一意にも止まっていなかったため、候補から除外した。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、正規性からの有意な逸脱は検出されなかった (補足図 2-3)。ジャックナイフ法により、個々のデータを取り除いた際の推定パラメータへの影響を調べた。その結果、いずれの再生産関係式においても影響は小さく、とくに HS 型と RI 型で頑健であることが示された (補足図 2-4、2-5)。また、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結果、パラメータ a および b について、いずれの再生産関係式においても推定値の中央値と点推定値はほぼ一致した (補足図 2-6、2-7)。各再生産関係モデルのプロファイル尤度を補足図 2-8 に示す。この結果、HS 型と RI 型ではパラメータが収束することが示された。

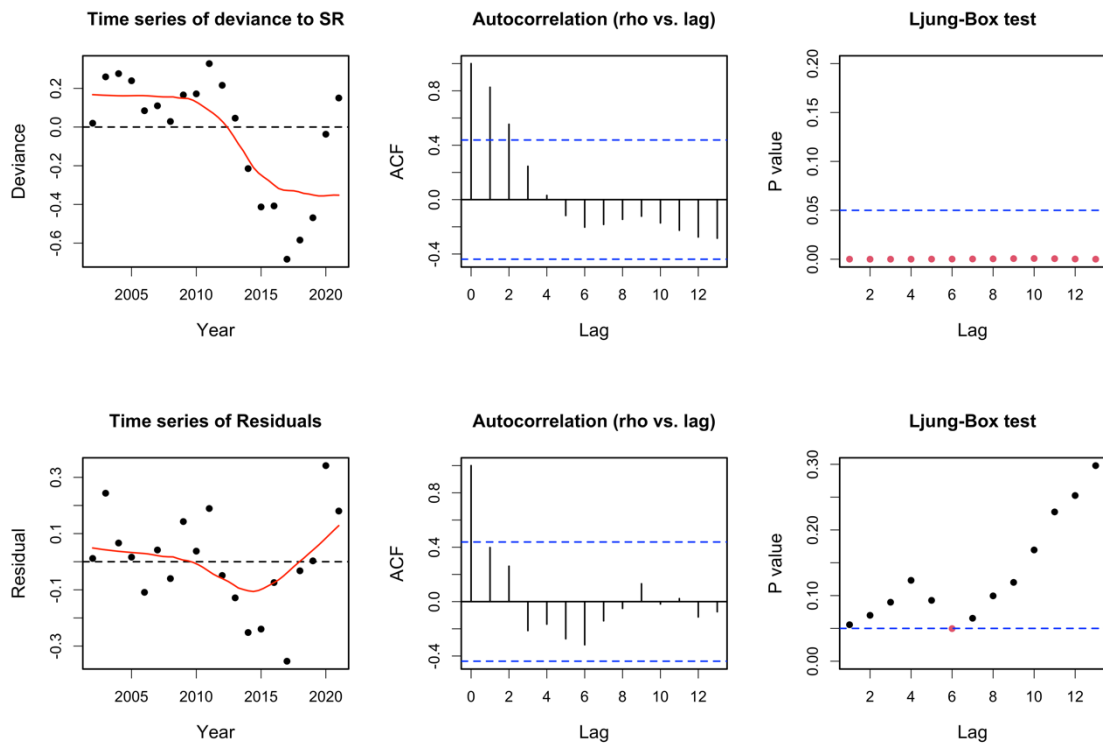
AICc を比較したところ、最小二乗法により最適化した RI 型 (AICc = -4.79) と HS 型 (-

3.04) の差は 1.75 であり、モデルの説明力の差の境界である 2 より低い値であった。AICc の予測力やその他の点で HS 型と RI 型に大差がなかったことから、異なる再生産関係を用いた場合のリスクの非対称性の評価を行った。真は HS 型であったが選択を間違えて RI 型で管理した場合と、真は RI 型であったが HS 型で管理した場合において将来予測をしたところ、いずれの場合でも SBmsy の達成確率は 50%を超えており、将来予測におけるリスクに大きな違いは見られなかった(補足表 2-2)。また、HS 型と RI 型の Fmsy に相当する %SPR を見てみると、HS 型で 21、RI 型では F20%SPR や Fmax を下回る 16 であった(補足図 2-9)。以上の %SPR を考慮すると、HS 型の方がより現実的な目標と考えられる。令和 3(2021) 年度の資源評価報告書(白川ほか 2021) から、Fcurrent に相当する %SPR は雌で 55、雄で 49 であった。このため、雌雄での %SPR に違いが少ないこと、雌雄の近年の F は Fmsy と比べて十分に小さいと考えられる。

従って、本資源の再生産関係の候補としては、自己相関を考慮する最小二乗法で最適化した HS 型再生産関係式が最も適していると判断した。なお、モデル診断の詳細は「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(FRA-SA2022-ABCWG02-04)」を参照のこと。

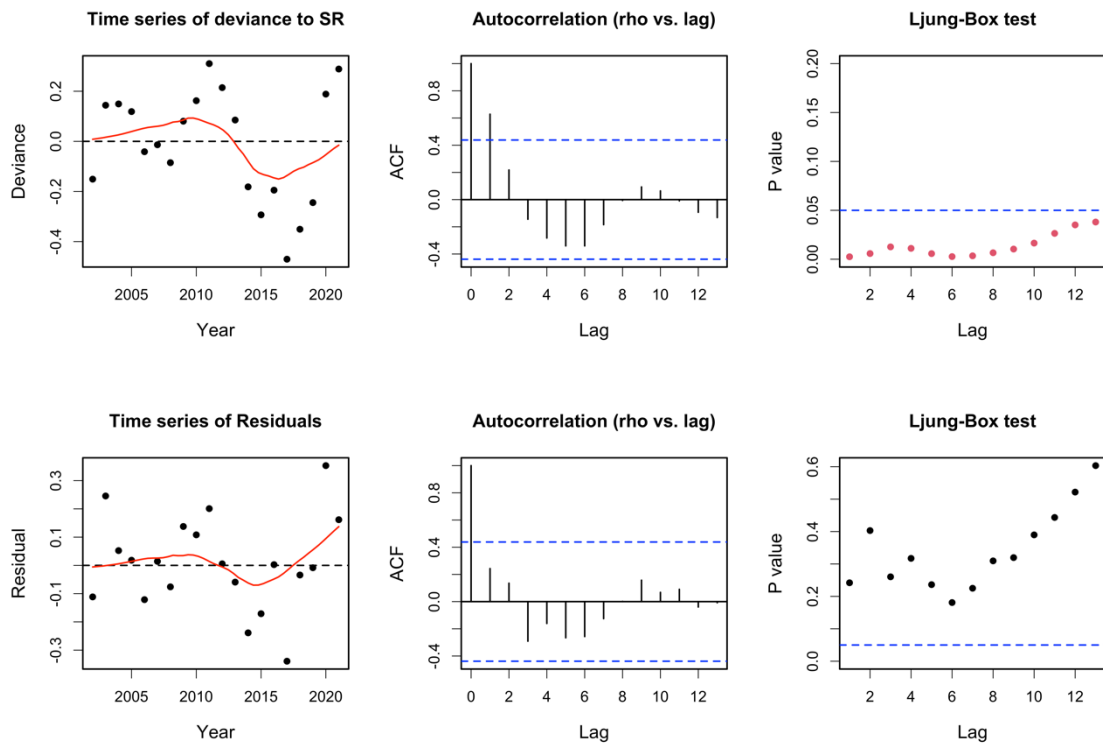
#### 引用文献

- 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). FRA-SA-2022-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.
- 白川北斗, 藤原邦浩, 佐久間啓, 内藤大河, 八木佑太, 吉川 茜 (2021) 令和 3(2021) 年度アカガレイ日本海系群の資源評価



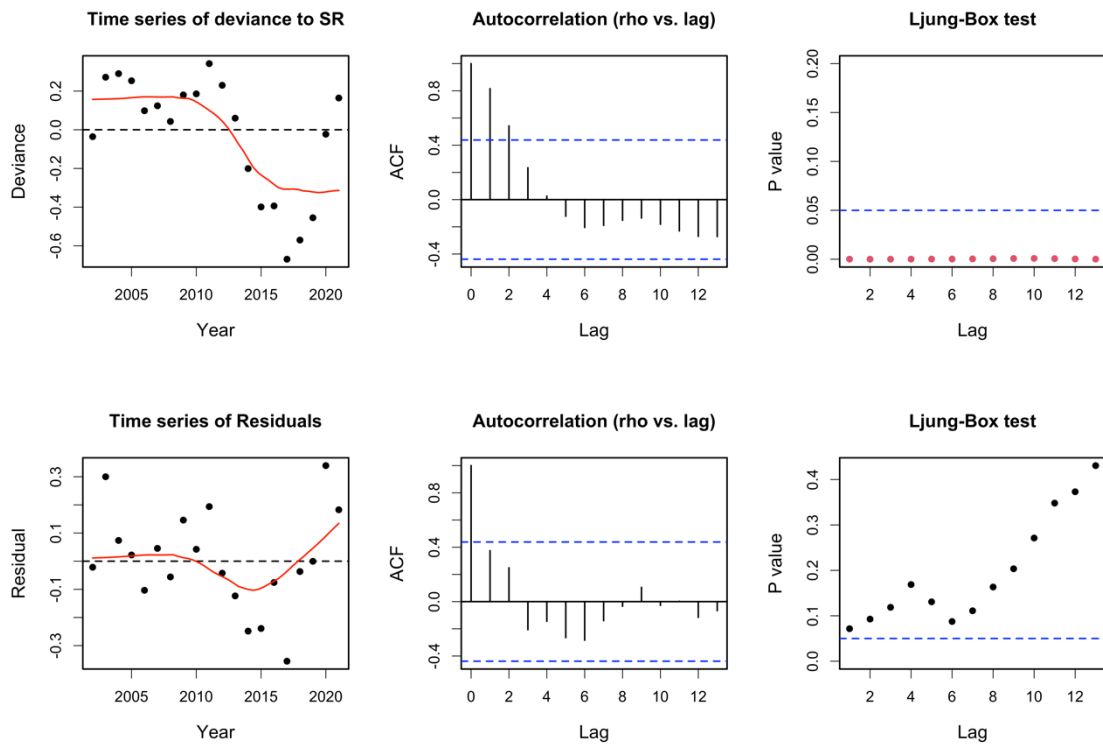
補足図 2-1a. ホッケー・スティック型再生産関係式を最小二乗法で当てはめた場合の、再生産関係との逸脱度 (deviance) および自己相関を同時推定法により考慮した場合の残差 (residual) の時系列トレンド (左図)、自己相関プロット (中央図)、および Ljung-Box 検定における P 値 (右図)

残差の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。



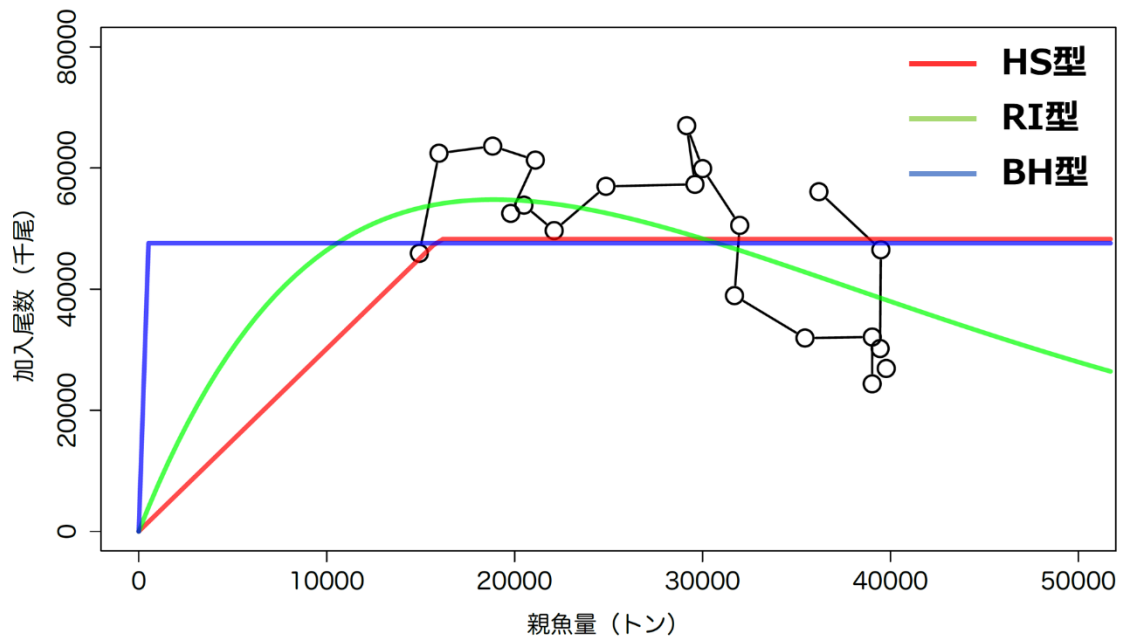
補足図 2-1b. リッカー型再生産関係式を最小二乗法で当てはめた場合の、再生産関係との逸脱度 (deviance) および自己相関を同時推定法により考慮した場合の残差 (residual) の時系列トレンド (左図)、自己相関プロット (中央図)、および Ljung-Box 検定における P 値 (右図)

残差の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。



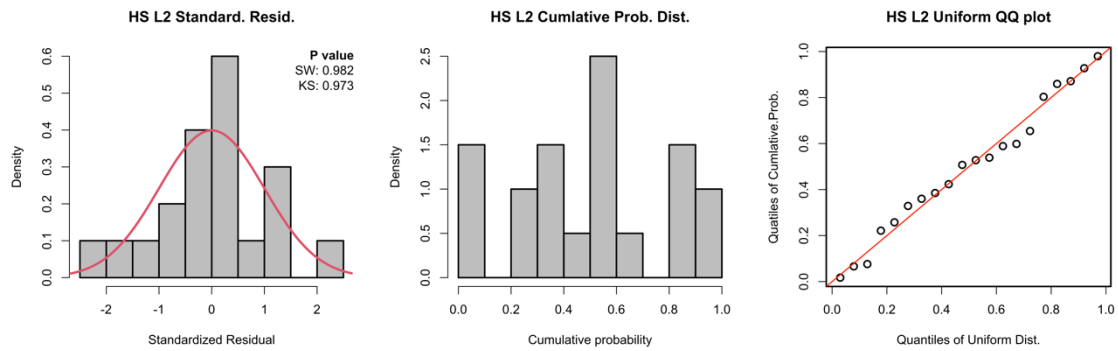
補足図 2-1c. ベバートン・ホルト型再生産関係式を最小二乗法で当てはめた場合の、再生産関係との逸脱度 (deviance) および自己相関を同時推定法により考慮した場合の残差 (residual) の時系列トレンド (左図)、自己相関プロット (中央図)、および Ljung-Box 検定における P 値 (右図)

残差の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。

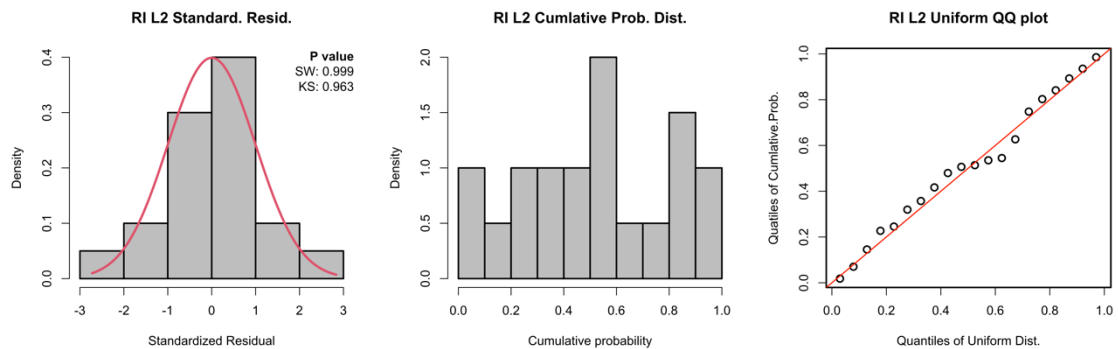


補足図 2-2. 各モデルにおける再生産関係式

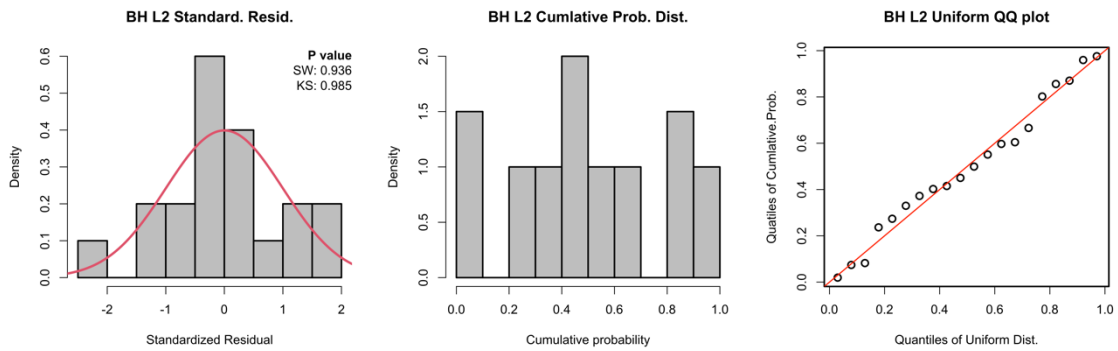
ホッケー・スティック型 (HS)、リッカー型 (RI)、ベバートン・ホルト型 (BH) の再生産関係式を、最小二乗法により当てはめ、自己相関を同時推定法により考慮した。図中の白丸は分析に使用した 2000～2019 年における親魚資源量と翌々年(2002～2021 年)の 2 歳魚の加入尾数の実測値である。



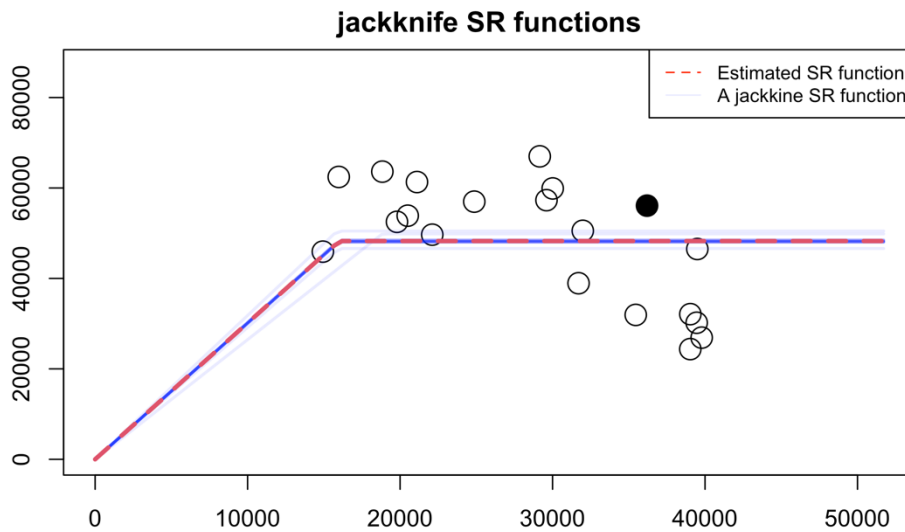
補足図 2-3a. ホッケー・スティック型再生産関係式を最小二乗法で当てはめた場合の標準化残差のヒストグラムと正規性テスト結果（左図）、残差の累積確率密度のヒストグラム（中央図）、および一様分布を仮定した QQ プロット（右図）  
残差のヒストグラムの右上の数値は Shapiro-Wilk 検定（SW）と Kolmogorov-Smirnov 検定（KS）の結果である。どちらも、帰無仮説は「正規分布に従っている」である。QQ プロットの赤線は理論値を示している。



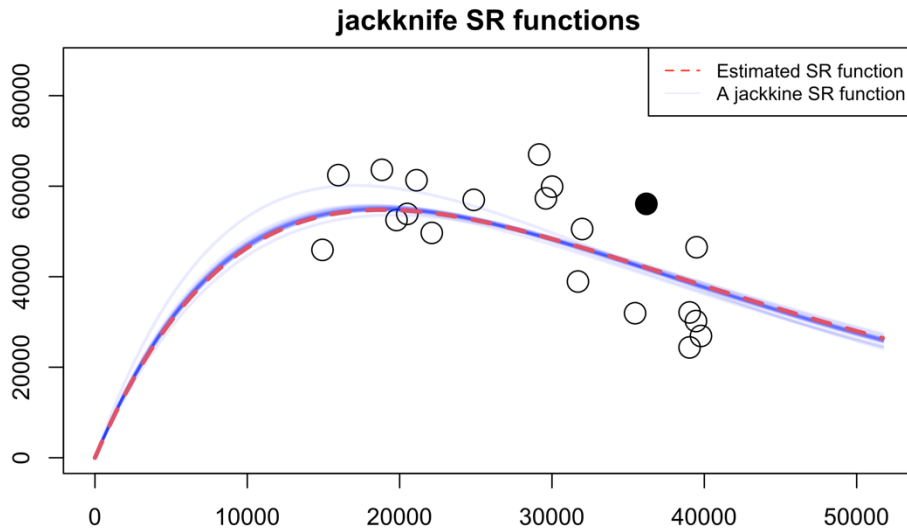
補足図 2-3b. リッカー型再生産関係式を最小二乗法で当てはめた場合の標準化残差のヒストグラムと正規性テスト結果（左図）、残差の累積確率密度のヒストグラム（中央図）、および一様分布を仮定した QQ プロット（右図）  
残差のヒストグラムの右上の数値は Shapiro-Wilk 検定（SW）と Kolmogorov-Smirnov 検定（KS）の結果である。どちらも、帰無仮説は「正規分布に従っている」である。QQ プロットの赤線は理論値を示している。



補足図 2-3c. ベバートン・ホルト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）  
 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。

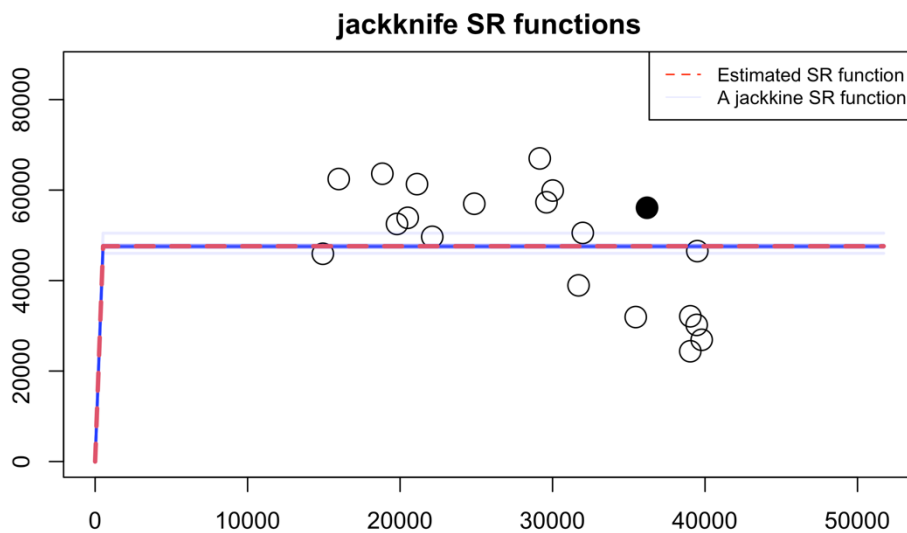


補足図 2-4a. ホッケー・スティック型再生産関係式を最小二乗法で当てはめた場合のジャックナイフ解析での推定結果  
 赤線は全データでの推定値、青線は各年のデータを除去した場合の推定値である。横軸は親魚量（トン）、縦軸は加入尾数（千尾）である。丸印は分析に使用した親魚量・加入尾数であり、黒丸は使用したデータ期間の最終年（2021 年）を示す。



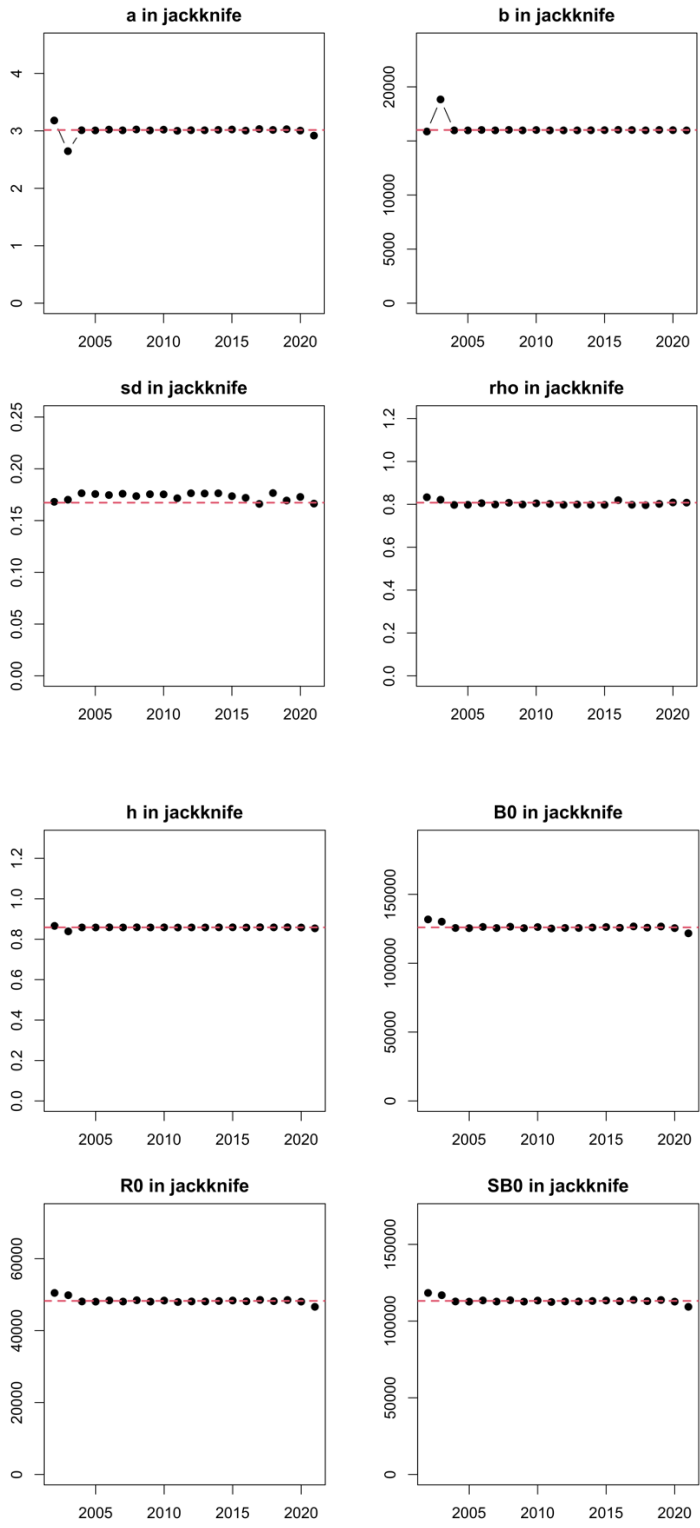
補足図 2-4b. リッカー型再生産関係式を最小二乗法で当てはめた場合のジャックナイフ解析での推定結果

赤線は全データでの推定値、青線は各年のデータを除去した場合の推定値である。横軸は親魚量（トン）、縦軸は加入尾数（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、黒丸は使用したデータ期間の最終年（2021年）を示す。

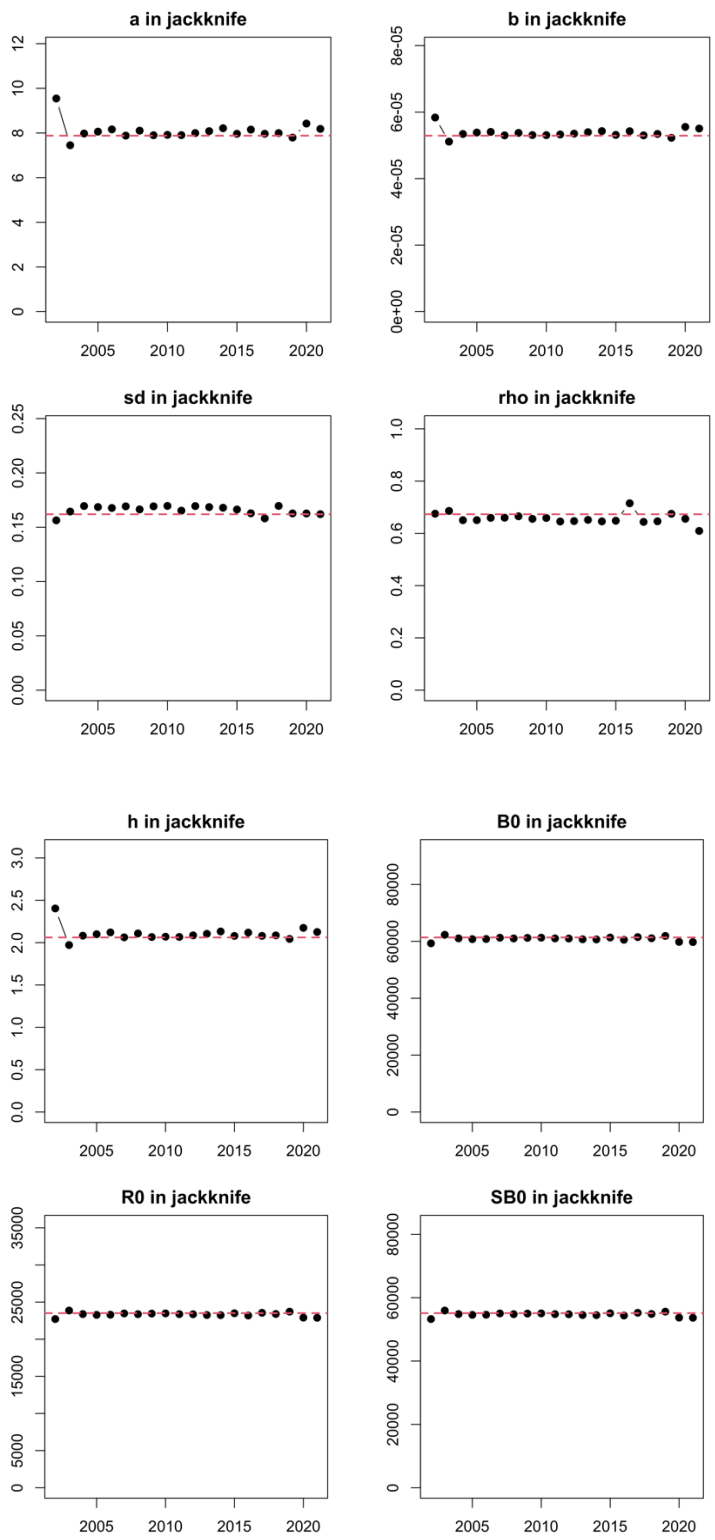


補足図 2-4c. ベバートン・ホルト型再生産関係式を最小二乗法で当てはめた場合のジャックナイフ解析での推定結果

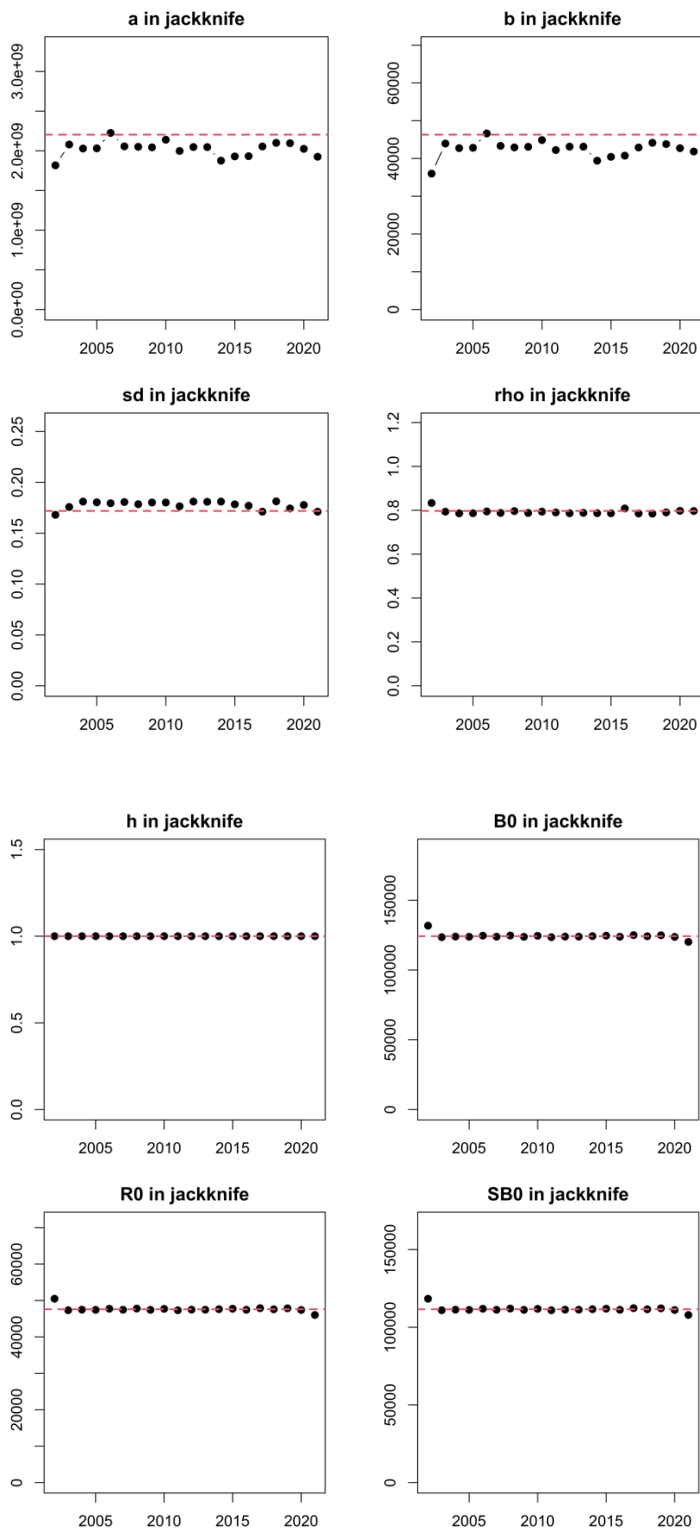
赤線は全データでの推定値、青線は各年のデータを除去した場合の推定値である。横軸は親魚量（トン）、縦軸は加入尾数（千尾）である。丸印は分析に使用した親魚量・加入尾数であり、黒丸は使用したデータ期間の最終年（2021年）を示す。



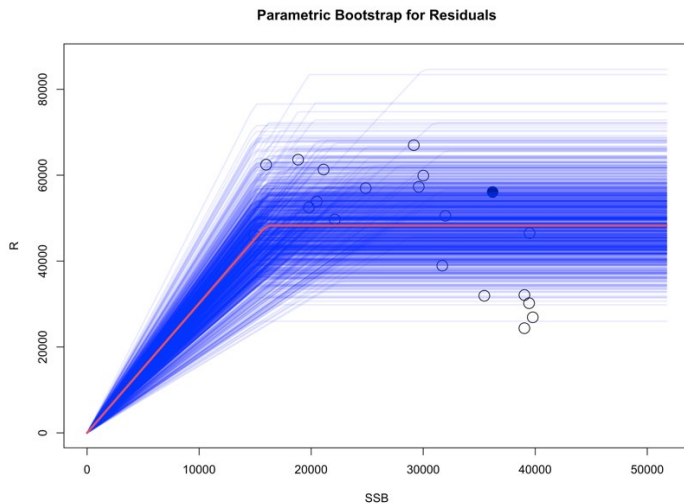
補足図 2-5a. ホッカー・スティック型再生産関係式を最小二乗法で当てはめた場合のジャックナイフ解析でのパラメータ別の影響



補足図 2-5b. リッカー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

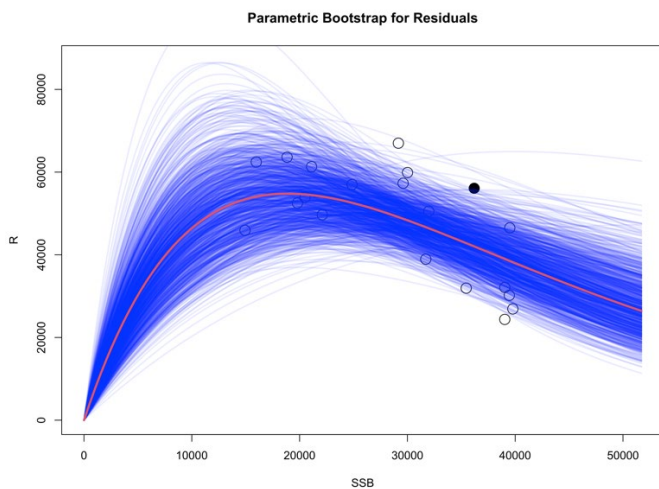


補足図 2-5c. ベバートン・ホルト型再生産関係式を最小二乗法で当てはめた場合のジャックナイフ解析でのパラメータ別の影響



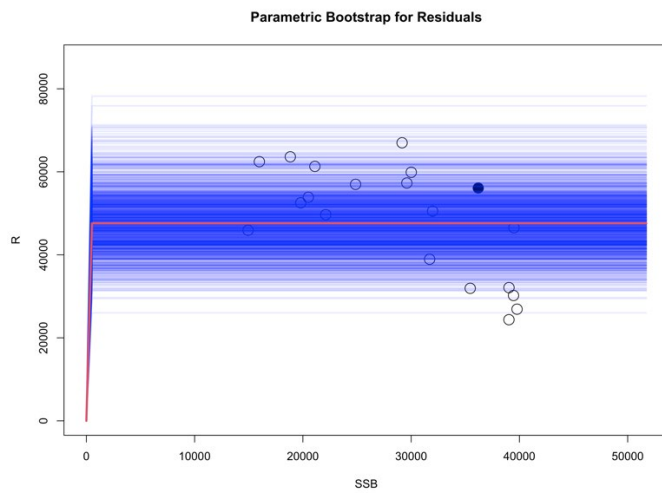
補足図 2-6a. ホッカー・スティック型再生産関係式を最小二乗法で当てはめた場合の残差ブートストラップ解析の結果

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）、縦軸は加入尾数（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、黒丸は使用したデータ期間の最終年（2021年）を示す。



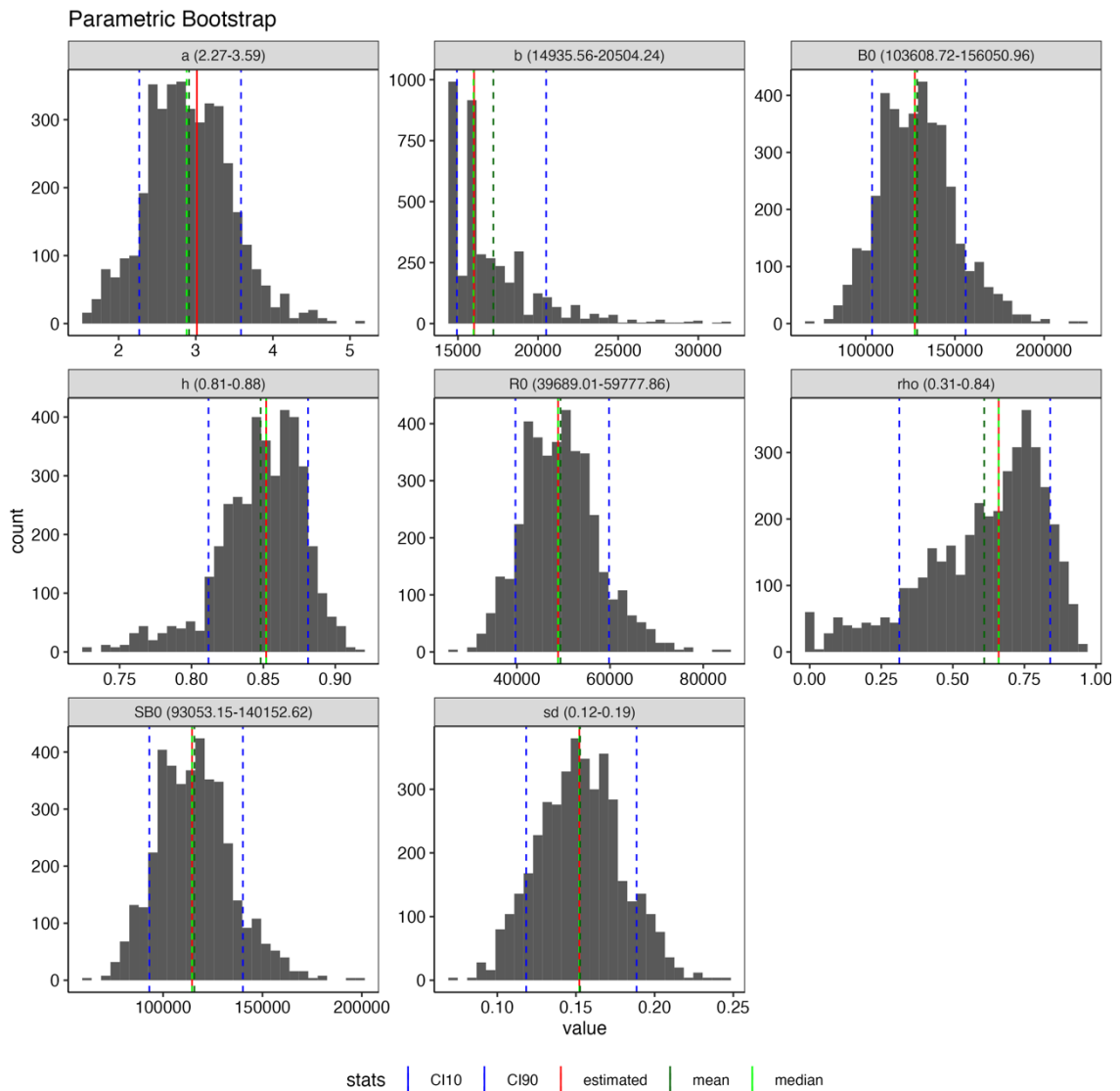
補足図 2-6b. リッカー型再生産関係式を最小二乗法で当てはめた場合の残差ブートストラップ解析の結果

赤線は元データでの推定値、青線は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）、縦軸は加入尾数（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、黒丸は使用したデータ期間の最終年（2021年）を示す。



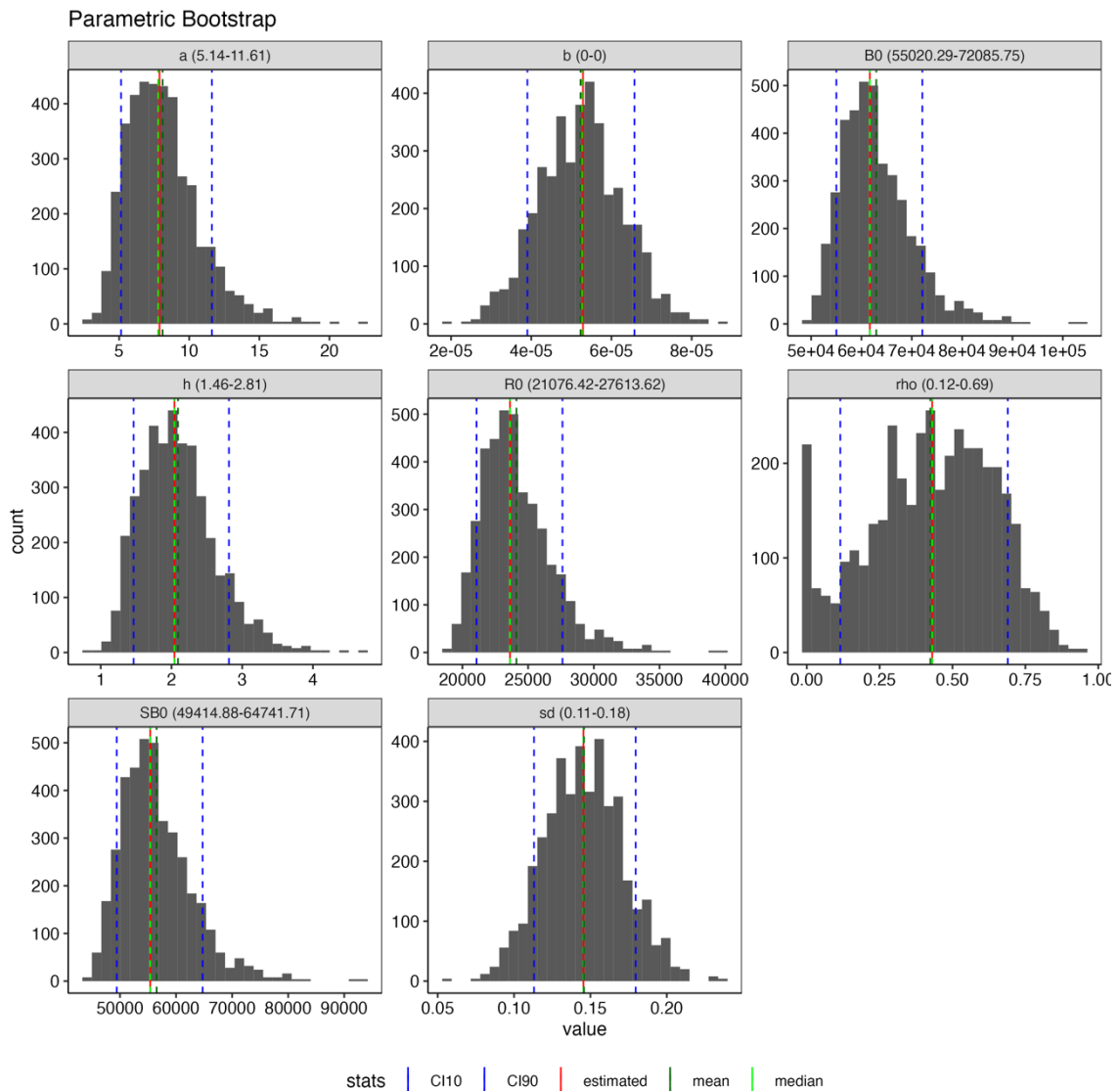
補足図 2-6c. ベバートン・ホルト型再生産関係式を最小二乗法で当てはめた場合の残差ブートストラップ解析の結果

赤線は元データでの推定値、青線は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）、縦軸は加入尾数（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、黒丸は使用したデータ期間の最終年（2021年）を示す。

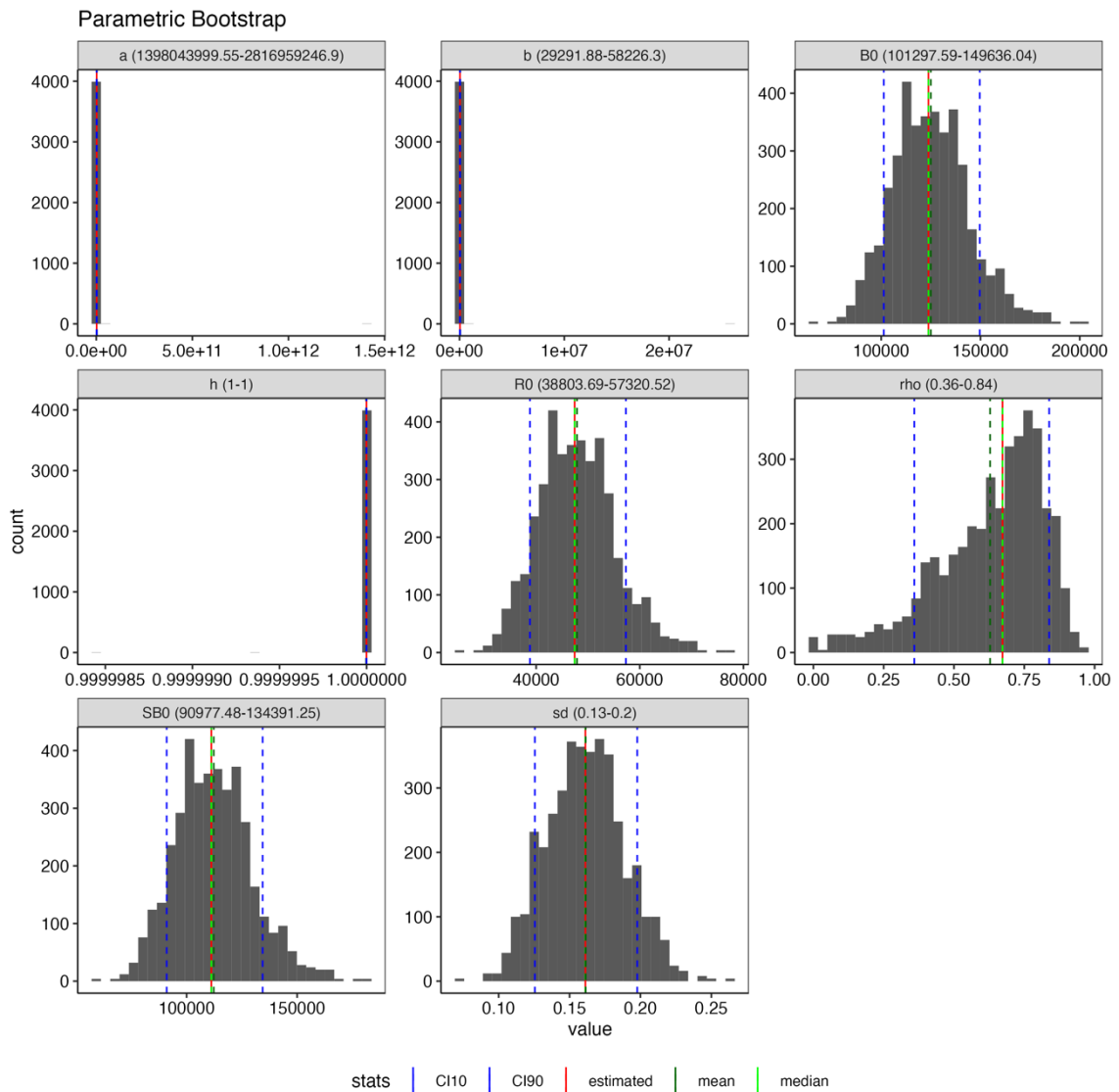


補足図 2-7a. ホッケー・スティック型再生産関係式を最小二乗法で当てはめた場合の残差ブートストラップ解析での平均値（緑点線）、中央値（黄緑点線）と 90%信頼区間（青点線）

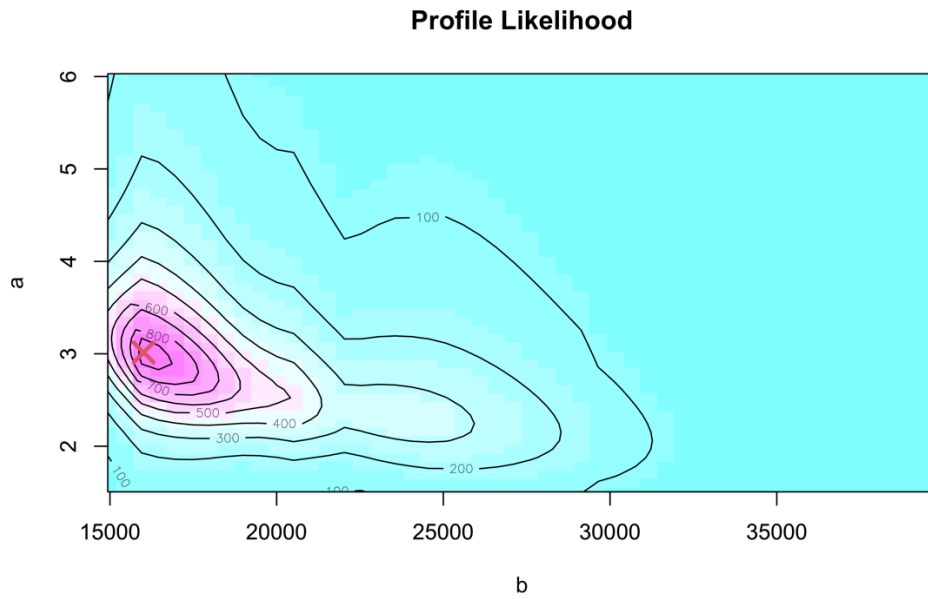
赤線はパラメータの点推定値である。



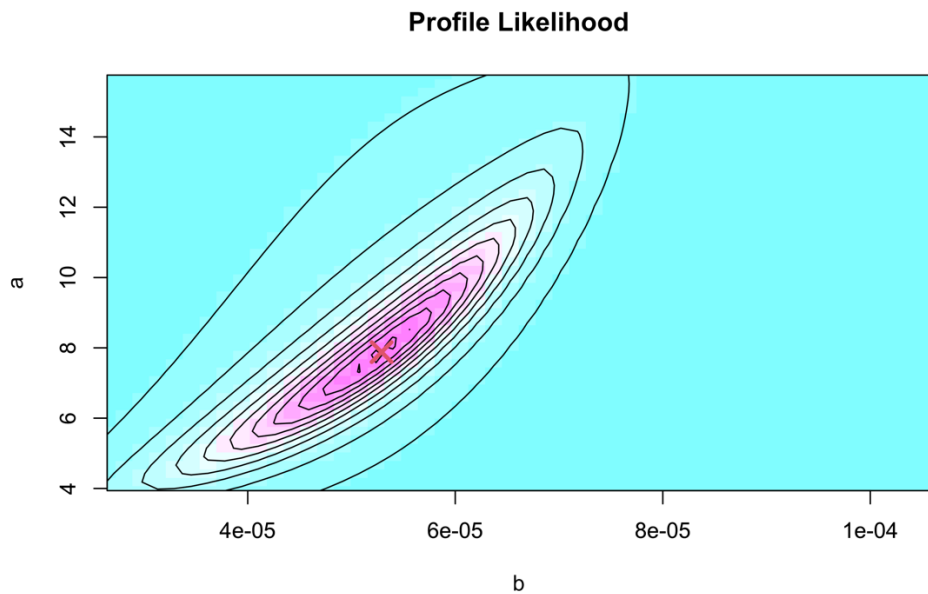
補足図 2-7b. リッカー型再生産関係式を最小二乗法で当てはめた場合の残差ブートストラップ解析での平均値（緑点線）、中央値（黄緑点線）と 90%信頼区間（青点線）赤線はパラメータの点推定値である。



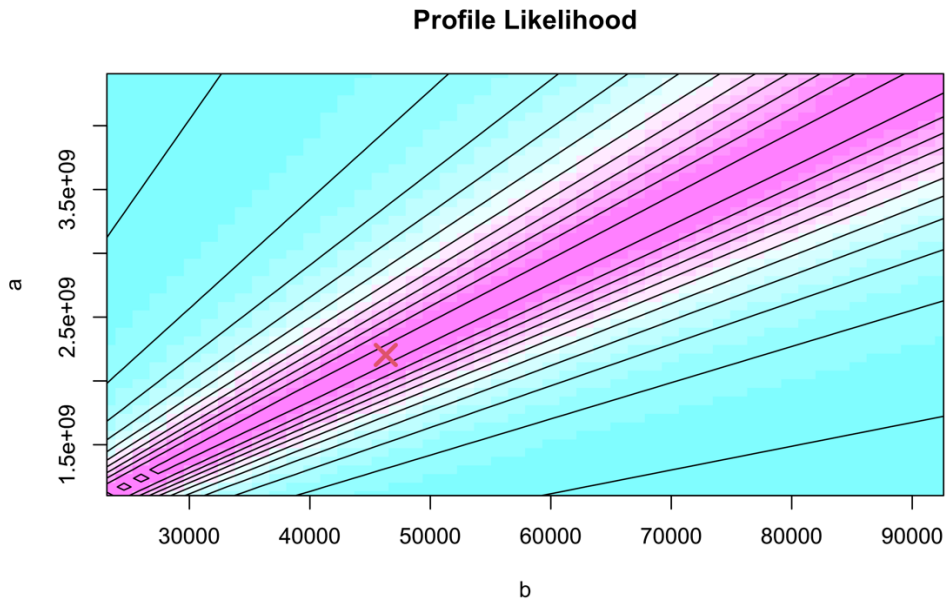
補足図 2-7c. ベバートン・ホルト型再生産関係式を最小二乗法で当てはめた場合の残差ブートストラップ解析での平均値（緑点線）、中央値（黄緑点線）と 90%信頼区間（青点線）  
赤線はパラメータの点推定値である。



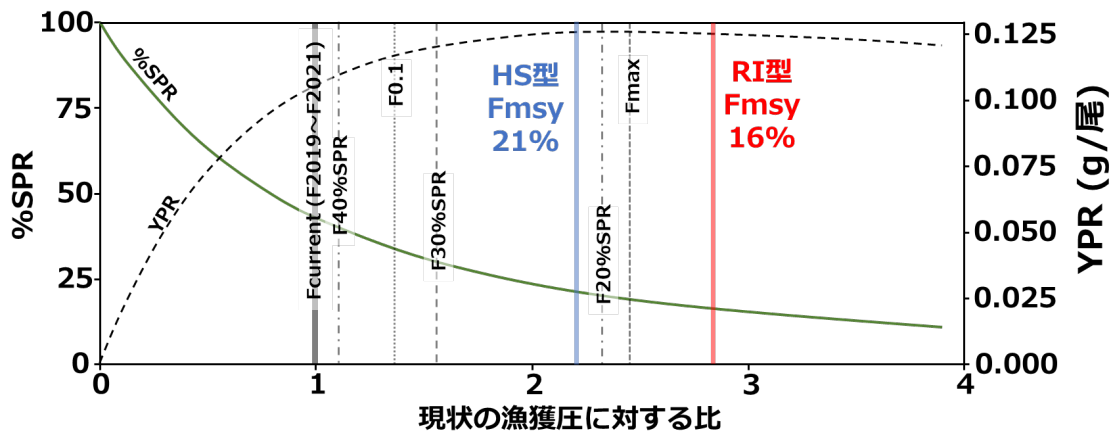
補足図 2-8a. 自己相関を考慮したホッカー・スティック型 (HS) 再生産関係式を最小二乗法で当てはめた場合の推定パラメータのプロファイル尤度  
×印は推定されたパラメータ値における尤度に相当する。



補足図 2-8b. リッカー型 (RI) 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  
×印は推定されたパラメータ値における尤度に相当する。



補足図 2-8c. ベバートン・ホルト型 (BH) 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  
 ×印は推定されたパラメータ値における尤度に相当する。



補足図 2-9. HS 型と RI 型の Fmsy に対応した %SPR

補足表 2-1. 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.	$\rho$	h	データ数
<b>ホッケー・ スティック</b>	<b>最小 二乗法</b>	<b>有</b>	<b>同時</b>	<b>3.015</b>	<b>16,010</b>	<b>0.167</b>	<b>0.808</b>	<b>0.857</b>	<b>20</b>
リッカー	最小 二乗法	有	同時	7.878	0.000053	0.162	0.673	2.043	20
ベバートン・ ホルト	最小 二乗法	有	同時	—*	—*	0.172	0.797	1.000	20
ホッケー・ スティック	最小 二乗法	無	-	3.075	15,100	0.303	0	0.860	20
リッカー	最小 二乗法	無	-	9.991	0.000062	0.205	0	2.471	20
ベバートン・ ホルト	最小 二乗法	無	-	—*	—*	0.303	0	1.000	20
ホッケー・ スティック	最小 絶対値 法	無	-	3.091	16,736	0.323	0	0.860	20
リッカー	最小 絶対値 法	無	-	11.509	0.000068	0.214	0	2.767	20
ベバートン・ ホルト	最小 絶対値 法	無	-	—*	—*	0.320	0	1.000	20

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  $\rho$  についても示した。h（ステイプネス）は再生産関係の密度補償効果の程度を示す指標であり、RI および BH の場合は  $0.2SB_0$  のときの平均加入尾数を  $R_0$  で割った値、HS の場合は  $1-SB_{hs}/SB_0$  ( $SB_{hs}$  は HS の折れ点) となる値である。

\*パラメータ a、b に高い相関があり、解が一意に求められなかったため「—」とした。

補足表 2-2a. 真の再生産関係が HS 型であったが RI 型で管理した場合、将来における親魚量が目標管理基準値案を上回る確率 (%)

$\beta$	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2043	2053
1.0	100	100	100	100	98	79	62	53	48	43	40	28	22
0.9	100	100	100	100	100	96	87	78	72	66	64	48	44
0.8	100	100	100	100	100	100	98	95	91	88	85	72	69
0.7	100	100	100	100	100	100	100	100	99	98	97	92	89
0.6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	98	98
0.5	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
0.3	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
0.1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

調整係数  $\beta$  を 0.0~1.0 にて 0.1 刻みで変更した場合の将来予測。RI 型での漁獲が開始される 2023 年以降を表記した。

補足表 2-2b. 真の再生産関係が RI 型であったが HS 型で管理した場合、将来における親魚量が目標管理基準値案を上回る確率 (%)

$\beta$	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2043	2053
1.0	100	100	100	100	100	94	85	79	74	72	72	72	68
0.9	100	100	100	100	100	100	98	96	93	91	89	89	90
0.8	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99	98	98	98
0.7	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
0.5	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
0.3	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
0.1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

## 補足資料3 再生産関係による MSY 管理基準値の違い

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、以下の 9 通りの再生産関係と最適化法および自己相関の考慮の組み合わせで、それぞれ MSY 管理基準値を推定した。比較対象とした組み合わせは、HS 型、RI 型、BH 型すべての再生産関係において最小二乗法または最小絶対値法を用いて最適化し、自己相関を考慮した場合と考慮せず当てはめた場合である。なお自己相関を考慮する場合には“同時推定法”を用い、最小二乗法にのみ適用した。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 管理基準値を下表に示す。

再生産関係式	最適化 法	自己 相関	推定法	SBmsy (百トン)	SB0.6msy (百トン)	SB0.1msy (百トン)	MSY (百トン)	Umsy	Fmsy/ Fcurrent
ホッケー・ スティック (HS)	最小 二乗法	有	同時	234	100	15	59	0.17	2.21
ホッケー・ スティック (HS)	最小 二乗法	無	—	200	91	14	58	0.18	2.47
ホッケー・ スティック (HS)	最小絶 対値法	無	—	224	101	16	64	0.18	2.46
リッカー (RI)	最小 二乗法	有	同時	199	63	8	67	0.21	2.84
リッカー (RI)	最小 二乗法	無	—	179	57	7	73	0.23	3.36
リッカー (RI)	最小絶 対値法	無	—	167	53	7	75	0.24	3.69
ベバートン・ ホルト (BH)	最小 二乗法	有	同時	202	34	34	59	0.19	2.50
ベバートン・ ホルト (BH)	最小 二乗法	無	—	197	33	33	58	0.19	2.50
ベバートン・ ホルト (BH)	最小絶 対値法	無	—	218	37	37	64	0.19	2.50

各管理基準値および MSY は、パラメータの最適化法ならびに推定法による違いは小さいものの、再生産関係式による違いは大きかった。SBmsy は HS 型>BH 型>RI 型の順で高い傾向にあったが、MSY では RI 型>HS 型>BH 型となった。また、いずれの再生産関係を用いた場合でも、Fmsy/Fcurrent は 1 よりも多かった。