

令和 2（2020）年度マアジ対馬暖流系群の 管理基準値等に関する研究機関会議報告書

担当水研： 西海区水産研究所

要 約

令和元年度本系群の資源評価データを用いて、再生産関係および管理基準値案等を検討した。本系群の再生産関係式として、資源評価により推定された 1973～2017 年の親魚量と加入量の情報に対し、残差の自己相関を考慮しないホッケ－・スティック（HS）型の再生産関係を適用する。HS 型再生産関係のパラメータ推定方法には最小絶対値法を使用する。目標管理基準値として、再生産関係に基づき算出される最大持続生産量（MSY）を実現する親魚量である SBmsy（254 千トン）を、限界管理基準値として、MSY の 60%の漁獲が得られる親魚量である SB0.6msy（107 千トン）を提案する。禁漁水準として、MSY の 10%の漁獲が得られる親魚量である SB0.1msy（16 千トン）を提案する。MSY を実現する漁獲圧（Fmsy）は、現状（2016～2018 年の平均の漁獲係数）の 1.2 倍である。

親魚量 (千トン)	現状の 親魚量 (2018 年) に対する比	初期親魚量 (1,269 千 トン) に対する比	期待できる 平均漁獲量 (千トン)	現状（2016 ～2018 年）の 漁獲圧 に対する比 *	説 明
目標管理基準値案					
254	0.88	0.20	158	1.25	最大持続生産量を実現する親魚量（SBmsy）
限界管理基準値案					
107	0.37	0.08	95	1.64	MSY の 60%の漁獲が得られる親魚量（SB0.6msy）
禁漁水準案					
16	0.05	0.01	16	1.85	MSY の 10%の漁獲が得られる親魚量（SB0.1msy）
2018 年					
289	1.00	0.23	124**	-	2018 年の値

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

** 2018 年の実際の漁獲量を示す。

1. 再生産関係

1-1) 使用するデータセット

本系群の再生産関係式の設定は「令和 2（2020）年度漁獲管理規則および ABC 算定のための基本指針」（FRA-SA2020-ABCWG01-01）に従い、以下のデータセットを使用して実施した。解析には R パッケージ frasyr（v2.01）を用いた。frasyr で用いている式の詳細は「再生産関係の推定・管理基準値計算・将来予測シミュレーションに関する技術ノート（令和 2 年度研究機関会議版）（FRA2020-ABCWG01-02）」を参照のこと。

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

1-2) 再生産関係の検討

本系群の最大持続生産量（MSY）を実現する親魚量の算出および将来予測計算に使用する再生産関係（補足資料 1）として、ホッケー・スティック（HS）型再生産関係、リッカー（RI）型再生産関係、およびベバートン・ホルト（BH）型再生産関係を仮定した場合について検討した。最適化方法として、最小二乗法および最小絶対値法を用いた。データとしては資源評価で推定された 1973～2018 年の加入量および親魚量のうち、不確実性の高い直近年（2018 年）を除いた 1973～2017 年の推定値を使用した。再生産関係の検討候補を表 1 に示す。

補正赤池情報量規準（AICc）を比較すると、HS 型を当てはめた場合のほうが RI 型および BH 型を当てはめた場合よりも低く、また、最小絶対値法を用いた場合の方が最小二乗法を用いた場合よりも低くなる。残差の自己相関に関しては、HS 型を用いて最小二乗法および最小絶対値法により最適化した場合の自己相関係数は有意でなかったため（補足資料 1）、本系群においては自己相関を反映させないこととした。

1-3) 再生産関係

上述の検討の上、「再生産関係ガイドライン（FRA-SA2020-ABCWG01-03）」の 3.a（予測力）および 3.h（自己相関）の基準に従い、本系群の再生産関係としては、最小絶対値法で最適化した自己相関を用いない HS 型再生産関係式を適用し、MSY を実現する親魚量（SBmsy）の計算および将来予測に用いる。

再生産関係式の各パラメータの推定値を補足資料 1（補足表 1-1）に、過去の親魚量および加入量の観測値との関係を図 1 に示す。加入量の誤差の分布は対数正規分布を仮定した。対数残差の標準偏差としては、再生産関係の予測値と観測値の対数残差の標準偏差（S.D., 表 1）を用いた（再生産関係の推定・管理基準値計算・将来予測シミュレーションに関する技術ノート FRA-SA-2020-ABCWG01-02）。

2. 管理基準値

2-1) データセットおよび計算方法

最大持続生産量 (MSY) を実現する親魚量の算出、および将来予測は、「令和 2 (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 系資源の規則に従い、1-3) で示した再生産関係と、令和元年度我が国周辺水域の漁業資源評価 (水産庁・水産機構) での将来予測計算に用いた各種設定 (自然死亡係数、成熟率、年齢別平均体重など) を使用して実施した。本年度の資源評価では $F_{current}$ を「2016～2018 年平均の年齢別選択率の下で、平均値が 2018 年の F となる F 値」として将来予測を行ったが、解析に用いたプログラムのデフォルトの設定に合わせ、ここでは現状の漁獲圧 ($F_{current}$ 、図 2) は 2016～2018 年の漁獲係数 (F 値) の平均値とした (表 2)。本系群では、平均世代時間 (2.9 年) の 20 倍の年数 (58 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

目標管理基準値 (SB_{target}) 案として MSY を実現する親魚量 (SB_{msy} : 254 千トン)、限界管理基準値 (SB_{limit}) 案として MSY の 60% の漁獲が得られる親魚量 ($SB_{0.6msy}$: 107 千トン)、禁漁水準 (SB_{ban}) 案として MSY の 10% の漁獲が得られる親魚量 ($SB_{0.1msy}$: 16 千トン) を提示する。これら管理基準値案および禁漁水準案について、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、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 SB_{msy} は SB_0 の 20% 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 158 千トンである。また、目標管理基準値案に対応する漁獲圧 (MSY を実現する漁獲圧 : F_{msy}) の、現状の漁獲圧に対する比 ($F_{msy}/F_{current}$) は 1.25 で、その時の漁獲割合 (U_{msy}) は、34% である。なお、限界管理基準値として提案する $SB_{0.6msy}$ は SB_0 の 8%、禁漁水準として提案する $SB_{0.1msy}$ は SB_0 の 1% である。また、本年度の資源評価で将来予測に使用した $F_{current}$ (0 歳 = 0.09、1 歳 = 0.83、2 歳 = 0.67、3 歳以上 = 0.20) で漁獲した場合の平衡状態での平均親魚量と SB_{msy} の差は、1% 程度と小さかった。

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平均漁獲量を図 3 に示す。親魚量が SB_{limit} 案以下では 0 歳および 1 歳魚が殆どを占め、 SB_{msy} 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) 目標管理基準値案と漁獲割合

目標管理基準値 (SB_{target}) 案と、その時の漁獲圧 (F_{msy}) もしくは漁獲割合 (U_{msy}) を基準にした神戸プロットをそれぞれ図 4 に示す。本系群における漁獲係数 (F 値) は、1973 年以降、ほとんどが MSY 水準を上回っていたが、直近年は MSY 水準を下回ったと

判断される。また、漁獲割合（U 値）を基準にしても同様の傾向がみられた。現状の親魚量（2018 年の親魚量：289 千トン）は目標管理基準値案を上回っている。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 0.88、0.37 および 0.05 である。

2-4) 漁獲管理規則案

漁獲管理規則（HCR）案は、限界管理基準値案および禁漁水準案となる親魚量を閾値として、漁獲管理の基礎となる漁獲係数（F 値）を変える規則であり、親魚量が限界管理基準値案を下回ると禁漁水準案まで直線的に漁獲圧を下げるものとなっている。F 値の上限は F_{msy} に安全係数 β を乗じたものである。限界管理基準値案と禁漁水準案に標準値を用いた場合（すなわち、SBlimit 案=SB0.6msy、SBban 案=SB0.1msy の場合）の漁獲管理規則案における親魚量と漁獲圧の関係を図 a5 に、親魚量と期待できる平均的な漁獲量との関係を図 5b に示す。図に例示した漁獲管理規則案は、いずれも β に標準値である 0.8 を用いている。

2-5) 漁獲管理規則案に基づく将来予測

(1) 安全係数 β に標準値を用いた場合

限界管理基準値案と禁漁水準案に標準値を用い、 β を 0.8 とした漁獲管理規則案（図 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は 2021 年から開始し、2019 年および 2020 年の漁獲量は予測される資源量と現状の漁獲圧（ $F_{current}$ ）から仮定した。

予測される 2021 年の親魚量は目標管理基準値案を上回っているため、漁獲管理規則案に従い、まず βF_{msy} での漁獲が行われる。 $\beta=0.8$ の場合、 $0.8F_{msy}$ での漁獲圧は、現在の漁獲努力量と同程度の漁獲圧に相当する。中長期的には、 $0.8F_{msy}$ での漁獲の継続により漁獲量および親魚量は MSY 水準で推移すると予測される。

(2) 安全係数 β を変えた場合

限界管理基準値案と禁漁水準案として標準値を用いた漁獲管理規則案での将来予測について、 β を 0.0～1.0 の間で変えたそれぞれの場合の、親魚量が目標管理基準値案を上回る確率、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。本系群は 2018 年時点で目標管理基準値案を超えていることから、標準値である 0.8 を用いた場合でも、漁獲管理規則案による漁獲開始から 10 年後の 2031 年には 85%の確率で目標管理基準値案を上回ると予測された（表 4）。また、 β が 0.9 以下であれば、2031 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。一方、 β が 1 の場合は 2031 年に親魚量が目標管理基準値案を上回る確率は 50%を下回ったが、限界管理基準値案を上回る確率は 100%であった（表 5）。2021 年から漁獲管理規則案による漁獲が行われた場合、2022 年以降の将来親魚量は β が低い程多くなり（表 7）、 β が 0.8 以上であれば 2021 年の漁獲量は 2019 年より多くなった（表 8）。

3. まとめ

本系群の再生産関係のモデルには、AICcに基づき、資源評価で推定された1973～2017年の加入量および親魚量に当てはめた、自己相関を考慮しないHS型再生産関係を適用し、そのパラメータは最小絶対値法により推定した。

目標管理基準値には、上記の再生産関係から推定されるSB_{msy}(254千トン)を提案する。限界管理基準値および禁漁水準には、標準値であるSB_{0.6msy}(107千トン)およびSB_{0.1msy}(16千トン)をそれぞれ提案する。

現在の本系群の親魚量は目標管理基準値案以上にあると考えられるが、MSYを実現する漁獲割合は34%、MSYを実現する漁獲圧はF_{current}の1.25倍である(表3)。βが0.9以下であれば今後も50%以上の確率で親魚量が目標管理基準値案以上に維持されると予測された。

4. 今後の検討事項

本資源の資源評価結果に大きな不確実性をもたらす要因として、中国漁船による漁獲の影響を考慮できていない点が挙げられる。中国漁船によるマアジの漁獲量は日本の漁獲量に比べると少ないと考えられるが、中国漁船による本系群の漁獲は再生産関係、MSYを実現する親魚量、管理目標の達成確率などに影響をもたらす可能性がある。

5. 引用文献

なし

(執筆者：依田真里、黒田啓行、高橋素光)

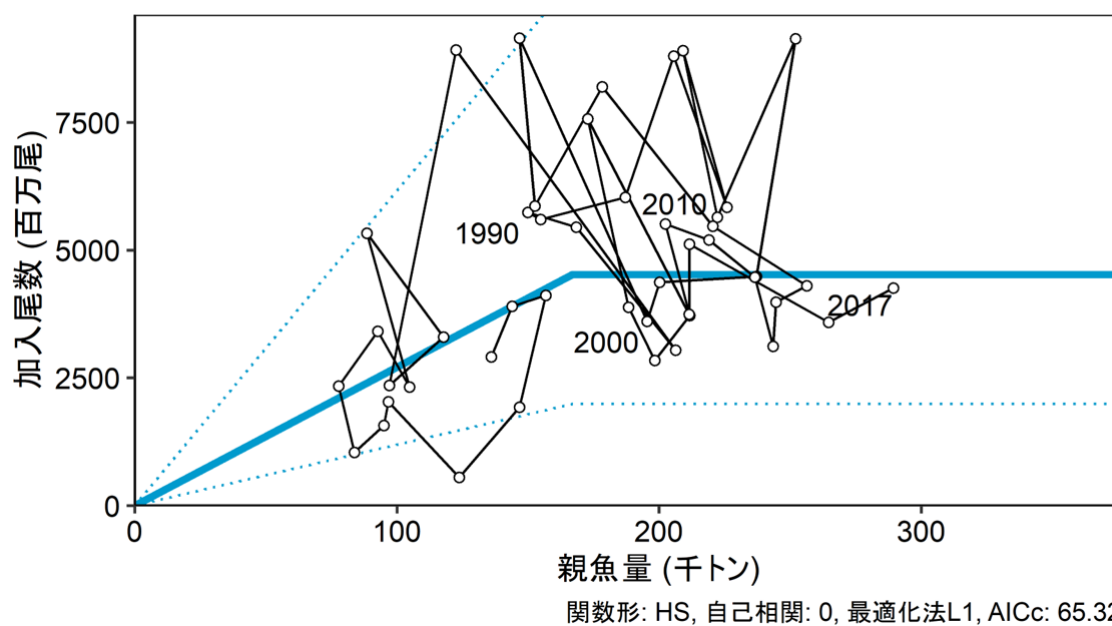


図 1. 再生産関係

1973～2018 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。再生産関係には自己相関を考慮しないホッケー・スティック（HS）型再生産関係式を用い、最小絶対値法によりパラメータ推定を行った。パラメータ推定の際は加入量の推定値に不確実性の高い 2018 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、適用した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。

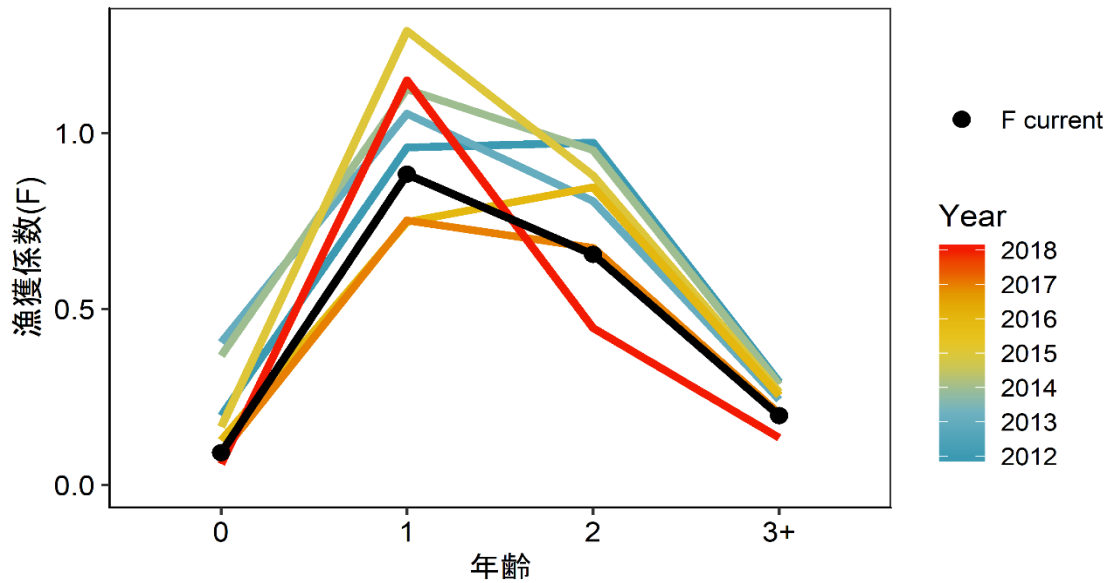


図 2. 年齢別の漁獲係数 (F 値)

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

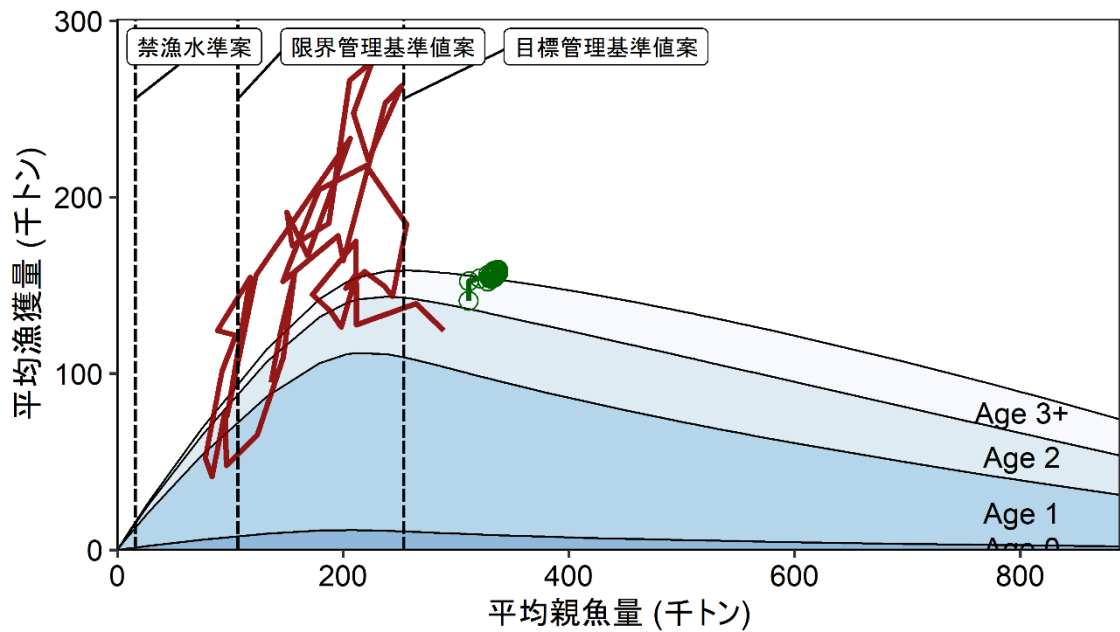
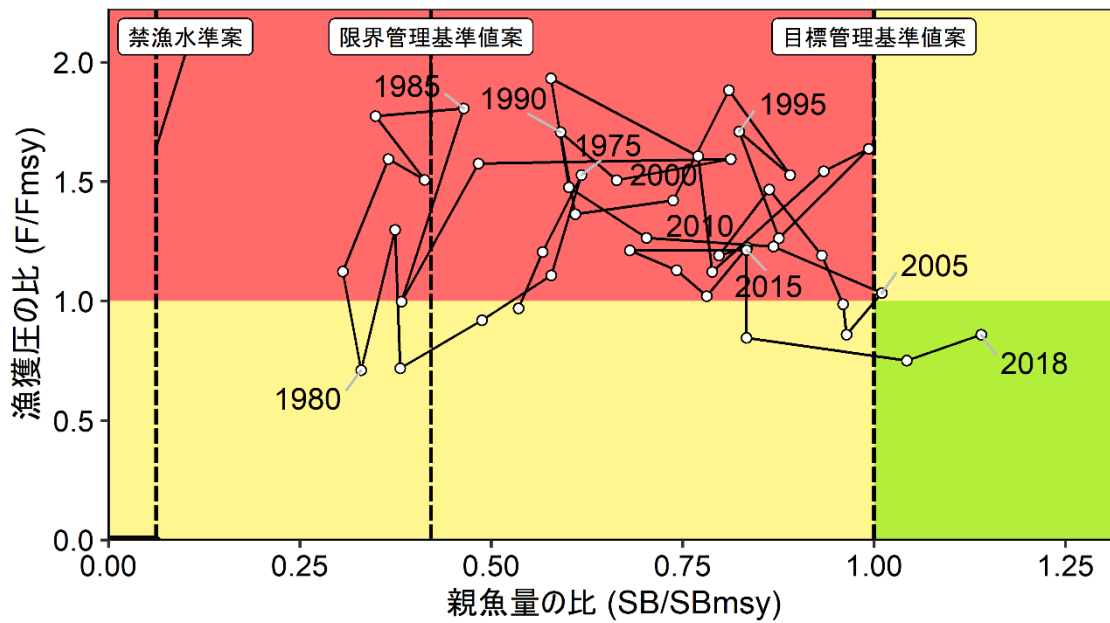


図 3. 管理基準値案および禁漁水準案と年齢別漁獲量曲線の関係

将来予測シミュレーションにおける平衡状態での、平均親魚量に対する年齢別平均漁獲量と、管理基準値案および禁漁水準案の位置関係を示す。赤線は資源評価により推定された親魚量と漁獲量との推移を、緑線は提示する漁獲管理規則 (HCR) 案で漁獲を行った場合の将来予測での平均親魚量と平均漁獲量の推移を示す。HCR 案で使用した安全係数 β は 0.8 である。なお、漁獲がなかった場合を仮定した初期親魚量 (SB0) は 1,269 千トンである。

a) 縦軸を漁獲圧の比 (F/F_{msy}) で示した場合



b) 縦軸を漁獲割合の比 (U/U_{msy}) で示した場合

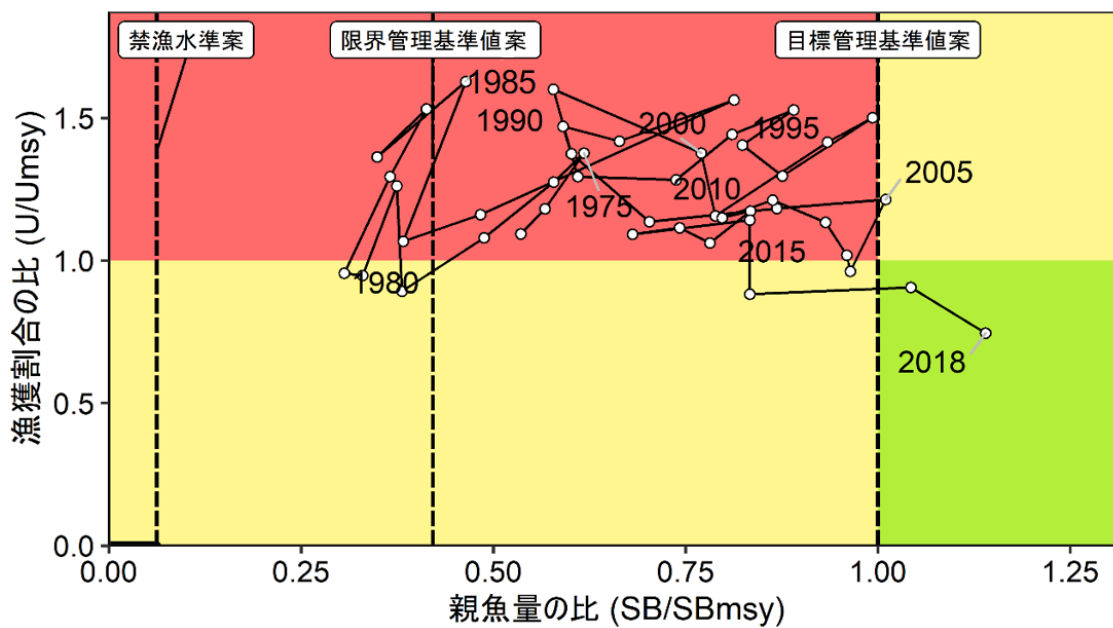


図4. 神戸プロット (4 区分)

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

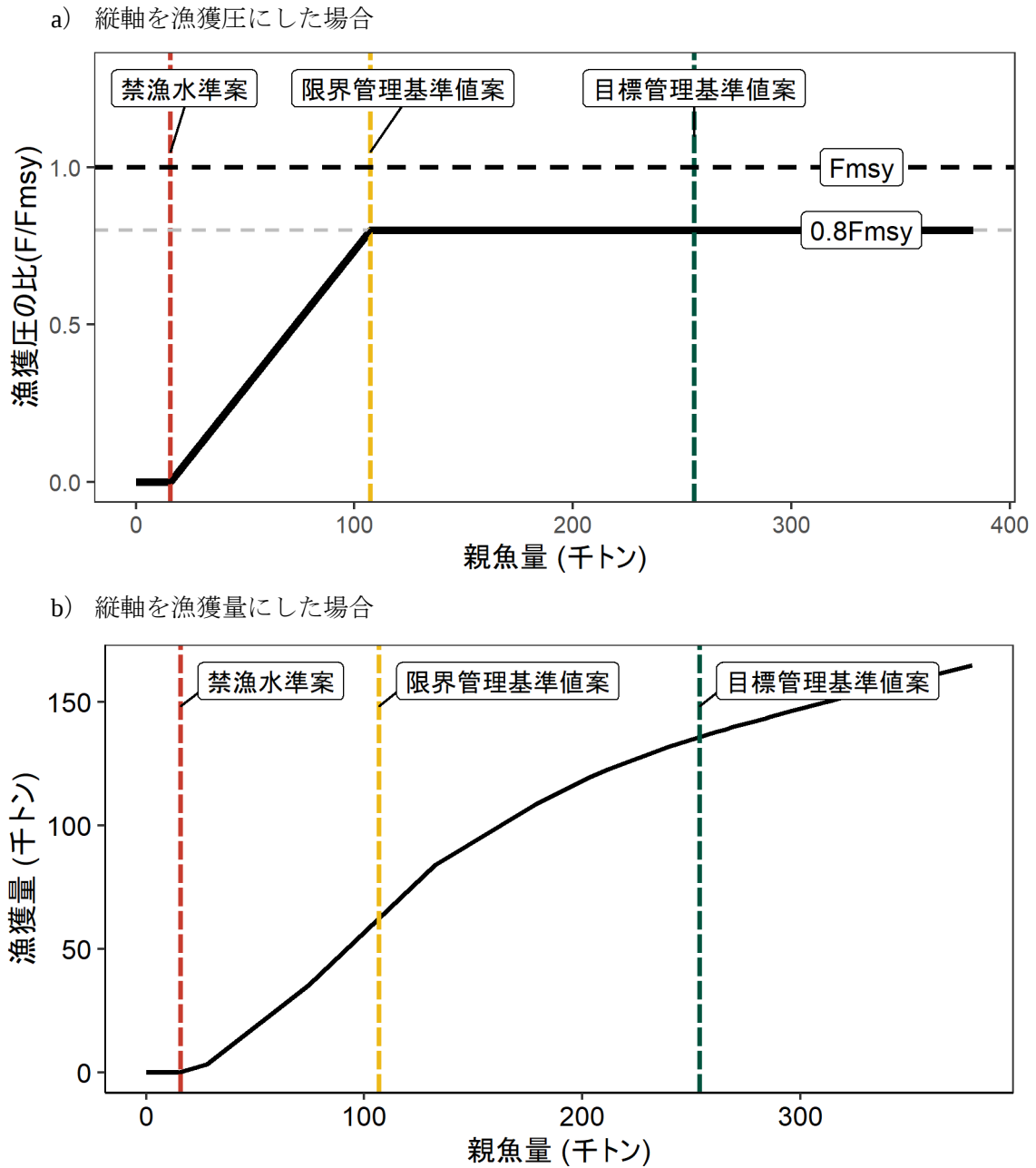
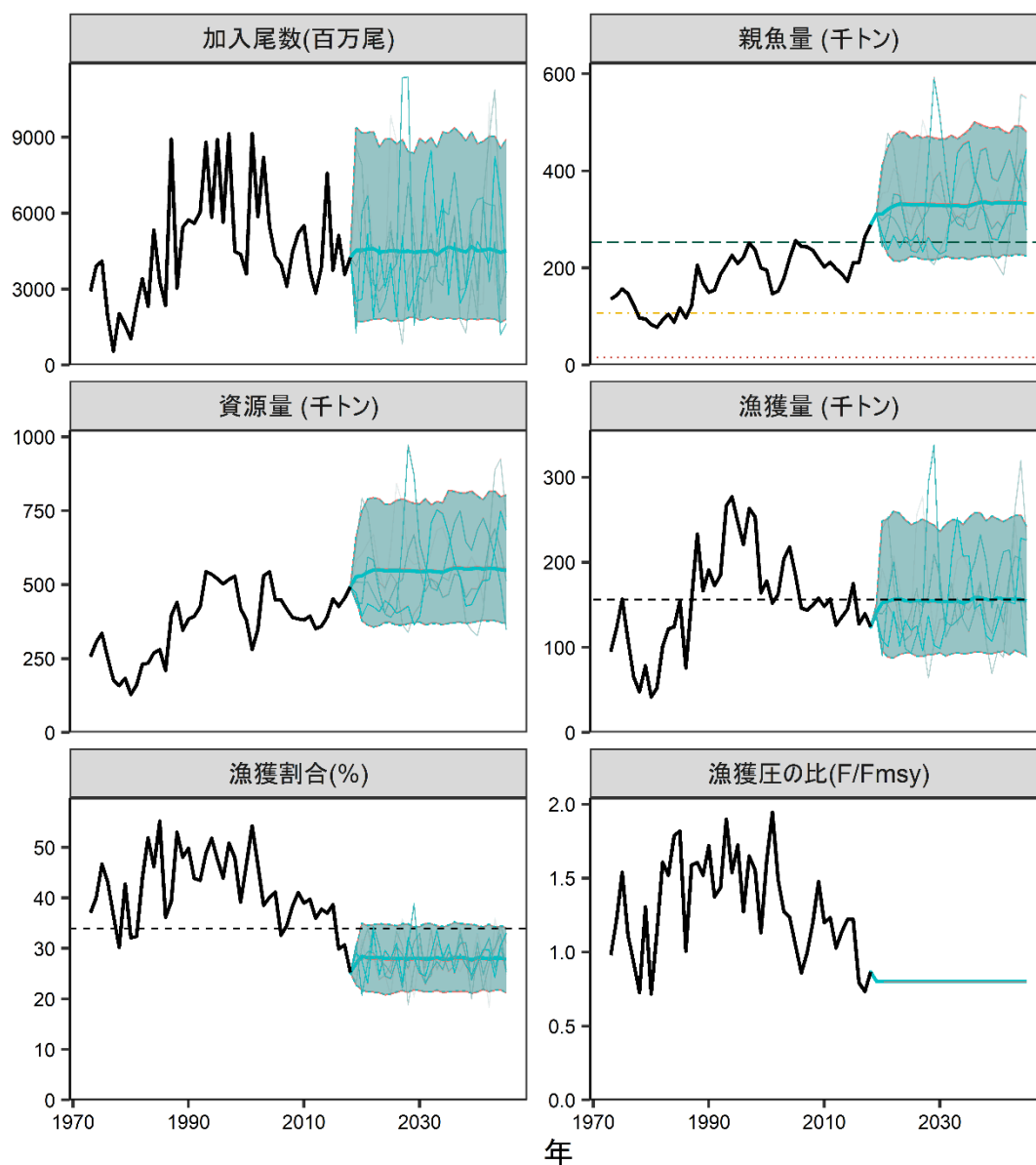


図 5. 漁獲管理規則案

目標管理基準値 (SB_{target}) 案は HS 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 (SB_{limit}) 案および禁漁水準 (SB_{ban}) 案にはそれぞれ標準値を用いている。安全係数 β には標準値である 0.8 を用いた。黒破線は F_{msy} 、灰色破線は $0.8F_{msy}$ 、黒太線は HCR 案、赤破線は禁漁水準案、黄色破線は限界管理基準値案、緑色破線は目標管理基準値案を示す。a) は縦軸を漁獲圧の比にした場合、b) は縦軸を漁獲量にした場合である。b) については、漁獲する年の年齢組成によって漁獲量は若干異なるが、ここでは平衡状態における平均的な年齢組成の場合の漁獲量を示した。



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

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

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

表 1. 再生産関係式の検討候補

再生産関係式	最適化法	自己 相関	AICc	$\Delta AICc$	$\Delta AICc$ の 順位	S.D.	データ数
ホッケー・スティック型	最小絶対値法	無	65.32	0	1	0.486	45
リッカー型	最小絶対値法	無	69.58	4.26	3	0.496	45
ベバートン・ホルト型	最小絶対値法	無	69.88	4.55	4	0.498	45
ホッケー・スティック型	最小二乗法	無	68.72	3.40	2	0.483	45
リッカー型	最小二乗法	無	71.03	5.71	5	0.496	45
ベバートン・ホルト型	最小二乗法	無	71.17	5.84	6	0.495	45

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

表 2. MSY を実現する親魚量の算出および将来予測計算に用いた各種設定

年齢	自然死亡 係数	成熟率	平均重量 (g)	選択率	現状の漁獲圧 (Fcurrent)
0	0.50	0.0	28	0.104	0.091
1	0.50	0.5	75	1.000	0.883
2	0.50	1.0	154	0.742	0.655
3 歳以上	0.50	1.0	359	0.223	0.197

表 3. 管理基準値案および禁漁水準案に対応する漁獲量や漁獲圧など

管理基準値案又は禁漁水準案	説明	親魚量 (千トン)	SB0 に 対する比 ※	漁獲量※ ※ (千トン)	漁獲圧 ※※※	漁獲 割合※ ※※※	現状の 漁獲圧 に対する比※ ※※※ ※
目標管理基準値案	SBmsy	254	0.20	158	20.2	0.34	1.25
限界管理基準値案	SB0.6msy	107	0.08	95	14.4	0.42	1.64
禁漁水準案	SB0.1msy	16	0.01	16	12.5	0.45	1.85
MSY を実現する漁獲圧	Fmsy	(0 歳, 1 歳, 2 歳, 3 歳以上) = (0.11, 1.10, 0.82, 0.24)					

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

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

※※※管理基準値案や禁漁水準案に対応する漁獲圧を%SPR に換算した値

※※※※管理基準値案や禁漁水準案に対応する漁獲割合

※※※※※管理基準値案や禁漁水準案に対応する漁獲圧の現状の漁獲圧に対する比

表 4. 将来の親魚量が目標管理基準値案を上回る確率 (%)

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

β	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2041	2051
1.0	100	95	85	68	59	53	50	46	48	47	48	47	45	48	48
0.9	100	95	85	76	72	70	68	68	67	67	67	69	68	68	70
0.8	100	95	85	83	82	85	85	84	85	85	86	85	85	88	86
0.7	100	95	85	87	90	94	96	95	95	95	95	95	96	97	97
0.6	100	95	85	92	96	98	99	100	99	99	99	99	99	100	99
0.5	100	95	85	95	98	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.4	100	95	85	97	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.3	100	95	85	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.2	100	95	85	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.1	100	95	85	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.0	100	95	85	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

表 5. 将来の親魚量が限界管理基準値案を上回る確率 (%)

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

β	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2041	2051
1.0	100	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

表 6. 将来の親魚量が禁漁水準案を上回る確率 (%)

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

β	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2041	2051
1.0	100	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

表 7. 将来の平均親魚量（千トン）の推移

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

β	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2041	2051
1.0	311	311	321	293	277	266	260	258	257	256	255	254	254	259	261
0.9	311	311	321	310	303	297	293	292	291	290	290	289	289	294	296
0.8	311	311	321	328	333	333	332	332	332	331	331	330	330	336	337
0.7	311	311	321	348	367	375	378	379	381	381	381	380	380	386	388
0.6	311	311	321	370	407	425	433	437	440	441	441	441	440	448	449
0.5	311	311	321	394	453	485	500	507	512	514	516	515	515	524	525
0.4	311	311	321	421	507	556	580	593	601	605	607	607	607	618	618
0.3	311	311	321	449	569	641	678	697	710	716	720	721	721	734	734
0.2	311	311	321	481	642	742	796	825	843	854	860	862	863	878	878
0.1	311	311	321	516	726	863	940	982	1,009	1,025	1,034	1,038	1,040	1,059	1,059
0	311	311	321	554	826	1,008	1,114	1,174	1,213	1,237	1,251	1,257	1,261	1,287	1,286

表 8. 将来の平均漁獲量（千トン）の推移

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

β	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2041	2051
1.0	141	152	180	169	166	161	160	161	160	159	159	158	158	161	164
0.9	141	152	168	163	162	159	158	159	158	158	158	157	157	160	162
0.8	141	152	154	156	157	155	154	155	155	154	155	154	154	157	159
0.7	141	152	140	147	150	149	149	150	150	150	150	149	149	152	154
0.6	141	152	124	136	141	141	142	143	143	143	143	143	142	145	147
0.5	141	152	107	123	130	131	132	133	134	133	134	133	133	136	137
0.4	141	152	89	107	115	117	118	120	120	120	121	120	120	123	124
0.3	141	152	69	87	96	98	100	102	102	102	103	103	102	105	106
0.2	141	152	48	64	71	74	76	77	78	78	78	78	78	80	80
0.1	141	152	25	35	40	42	43	44	45	45	45	45	45	46	46
0	141	152	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

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

β	10 年後 (2031 年) の平均親魚量	10 年後 (2031 年) に親魚量が 目標管理基準値案を上 回る確率	0 年後 (2021 年) の予測漁獲 量 (千ト ン)	5 年後 (2026 年) の予測漁獲 量 (千ト ン)	10 年後 (2031 年) の予測漁獲 量 (千ト ン)	10 年後 (2031 年) に親魚量が 限界管理基準値案を上 回る確率
1	254	45%	180	161	158	100%
0.9	289	68%	168	159	157	100%
0.8	330	85%	154	155	154	100%
0.7	380	96%	140	150	149	100%
0.6	440	99%	124	143	142	100%
0.5	515	100%	107	133	133	100%
0.4	607	100%	89	120	120	100%
0.3	721	100%	69	102	102	100%
0.2	863	100%	48	77	78	100%
0.1	1,040	100%	25	44	45	100%
0	1,261	100%	0	0	0	100%

補足資料 1 再生産関係式のモデル診断結果について

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）型再生産関係、ベバートン・ホルト（BH；Beverton and Holt 1957）型再生産関係およびリッカー（RI；Ricker 1954）型再生産関係を検討候補とした。それぞれの再生産関係式の数式は以下の通りである；

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

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

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

ここで R_y は y 年の加入量、 B_y は y 年の親魚量である。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。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。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。

マアジ対馬暖流系群の再生産関係として、ホッケー・スティック（HS）型、リッカー（RI）型、ベバートン・ホルト（BH）型の再生産関係式を、最小二乗法・最小絶対値法により、残差に自己相関（AR）を考慮しないモデルのそれぞれについて、1973～2017 年の加入量と親魚量のデータに当てはめた（補足図 1-1）。その結果、RI 型および BH 型再生産関係では、観測データのある期間でみるとほぼ直線的な関係が得られた。

HS 型再生産関係を、最小二乗法・最小絶対値法により当てはめた際の残差トレンドと自己相関プロットを補足図 1-2 に示す。HS 型再生産関係を仮定した場合に、自己相関は有意ではなかった。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 検定により検討した。その結果、最小二乗法を当てはめた場合には 5%水準で優位な逸脱がみられたことから、最小絶対値法により当てはめた再生産関係を採用した。また、最小二乗法で得られた再生産関係よりも最小絶対値法で得られた再生産関係の方が AICc も低かった。（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 型再生産関係を最小二乗法および最小絶対値法により当てはめる上での個々のデータの影響を、ジャックナイフ法で検討した。その結果、最小二乗法と最小絶対値法とで、推定の頑健性に大きな違いはみられなかった（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）。プロファイル尤度を補足図 1-8 に示した。最小絶対値法で推定した場合には、パラメータ b が 2%程度（166～168 千トン）の範囲で同じ最大尤度をもつことが判明したので、初期値を変えて網羅的な検討を行い、 b が中央値に最も近い再生産関係を選択した。これにより、最大でも 1%のバイアスに抑えることができた。

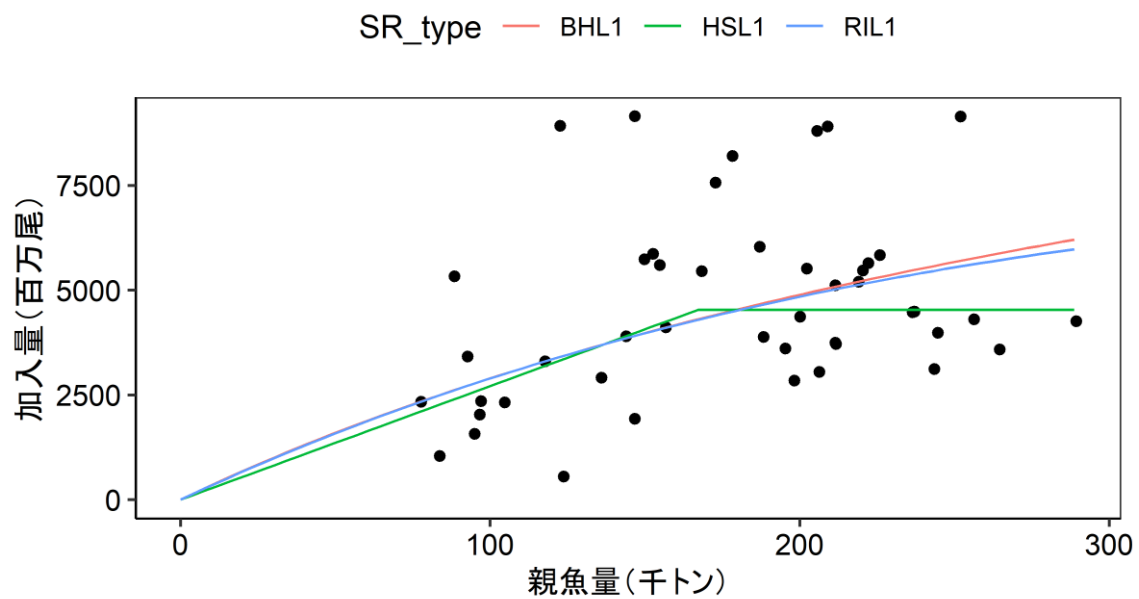
補足表 1-1. MSY を実現する親魚量の算出に使用した再生産関係式における各パラメータの推定値

再生産関係式	最適化法	自己 相関	a	b	S.D.	Rho	AICc
ホッケー・ スティック (HS)	最小 二乗法	無	0.0272	1.78e+05	0.483	0	68.7
ベバートン・ ホルト (BH)	最小 二乗法	無	0.0329	2.00e-06	0.496	0	71.2
リッカー (RI)	最小 二乗法	無	0.0327	1.66e-06	0.495	0	71.0
ホッケー・ スティック (HS)	最小 絶対値法	無	0.0271	1.67e+05	0.486	0	65.3
ベバートン・ ホルト (BH)	最小 絶対値法	無	0.0354	2.25e-06	0.498	0	69.9
リッカー (RI)	最小 絶対値法	無	0.0345	1.77e-06	0.496	0	69.6

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

引用文献

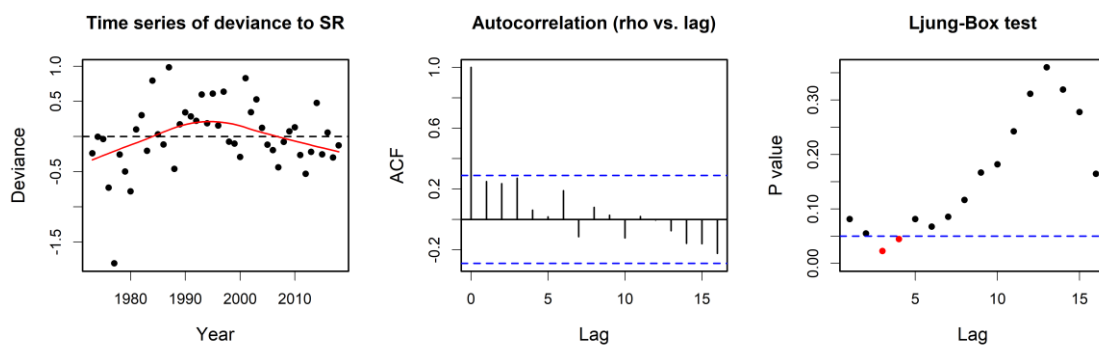
- Clark C. W., Charles A. T., Beddington J. R. and M. Mangel (1985). Optimal capacity decisions in a developing fishery. *Marine Resource Economics*, 2: 25–53.
- Beverton R. J. H., and S. J. Holt (1957). On the dynamics of exploited fish populations. Her Majesty's Stationary Office, London.
- Ricker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



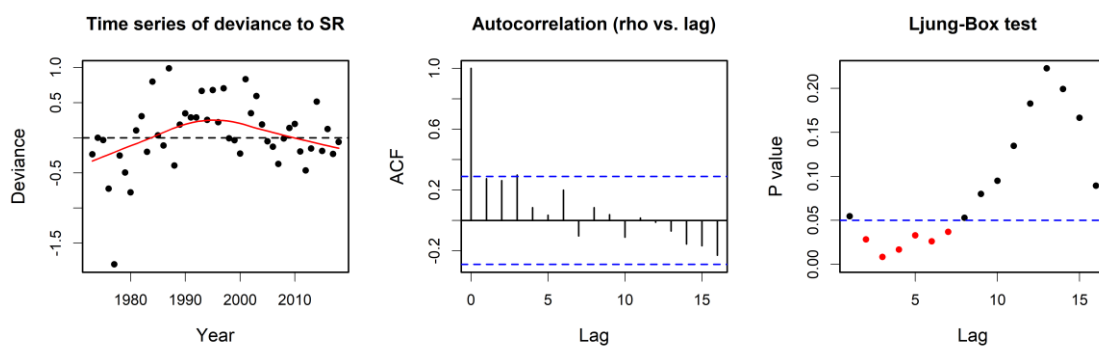
補足図 1-1. 各モデルにおける再生産関係式

ホッケー・スティック (HS) 型、リッカー (RI) 型、ベバートン・ホルト (BH) 型の再生産関係式を、最小絶対値法により当てはめた。黒丸は分析に使用した親魚量と加入量（1973～2017 年）である。

ホッケー・スティック型（最小二乗法）の場合



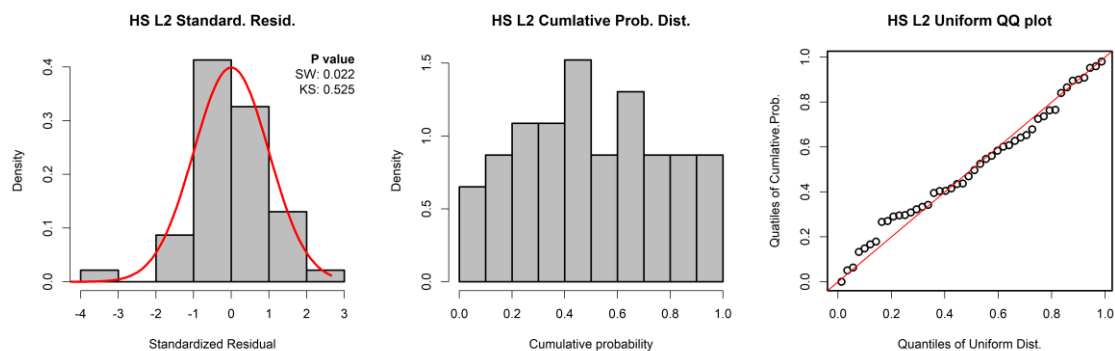
ホッケー・スティック型（最小絶対値法）の場合



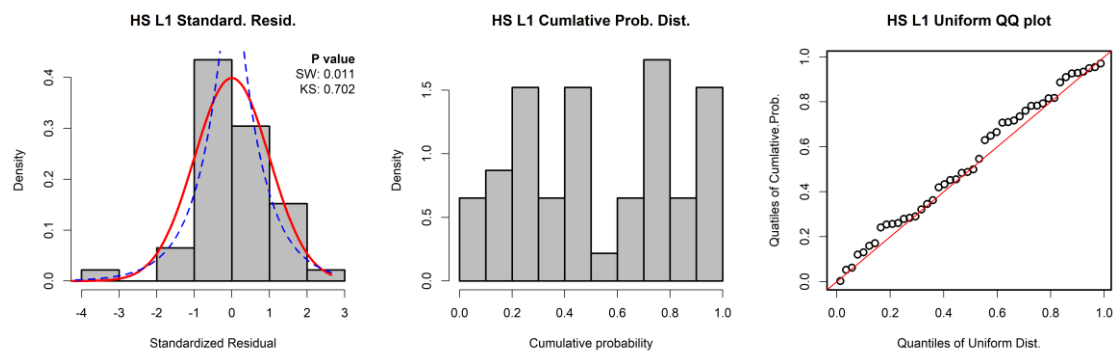
補足図 1-2. HS 型再生産関係における（左）標準化残差の時系列トレンド、（中央）コレログラム、（右）Ljung-Box 検定における P 値

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

ホッケー・スティック型（最小二乗法）の場合



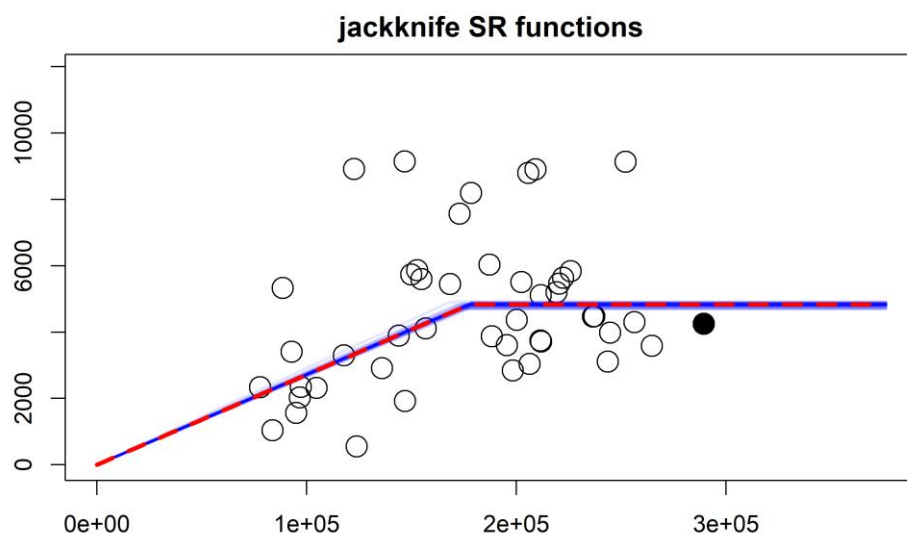
ホッケー・スティック型（最小絶対値法）の場合



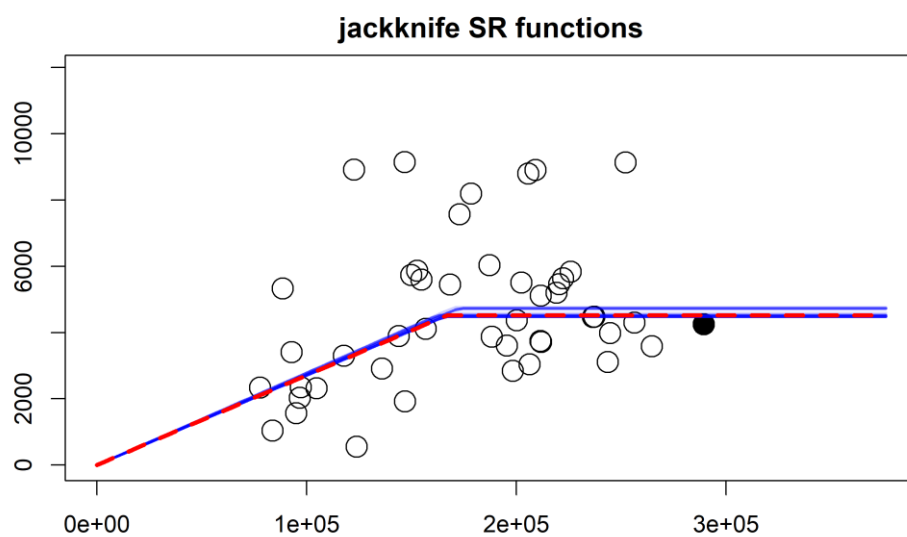
補足図 1-3. HS 型再生産関係における（左）標準化残差のヒストグラムと正規性テスト結果、（中央）残差の累積確率密度のヒストグラム、（右）一様分布を仮定した QQ プロット

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

ホッケー・スティック型（最小二乗法）の場合



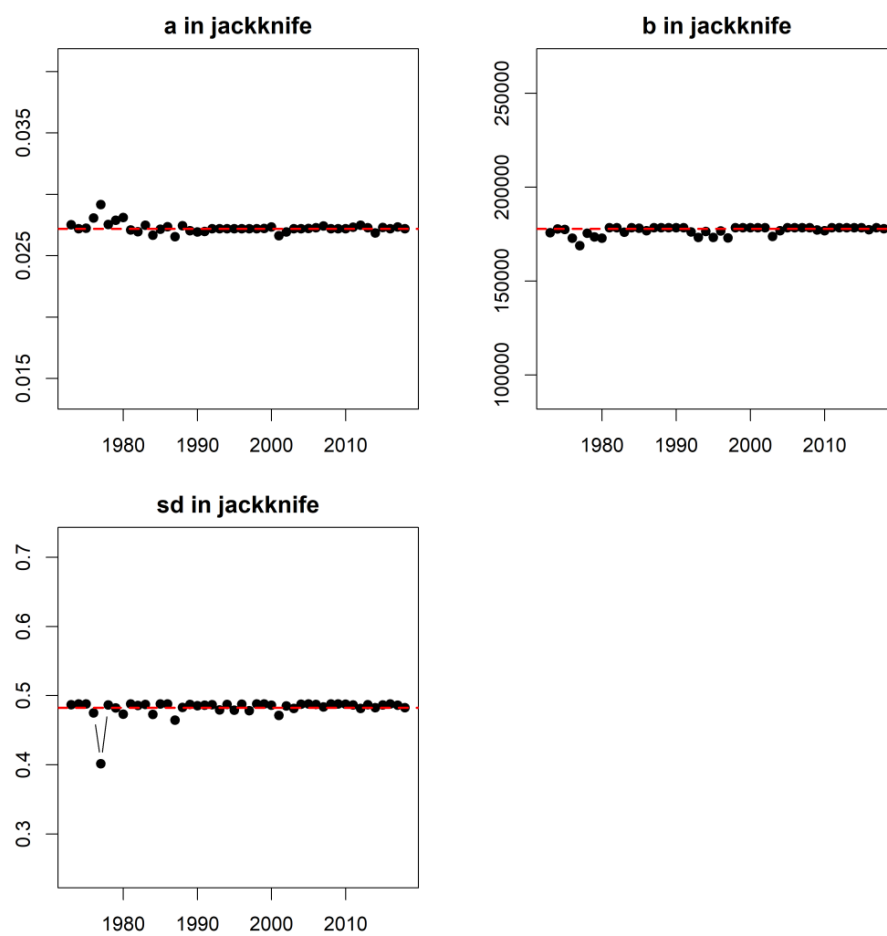
ホッケー・スティック型（最小絶対値法）の場合



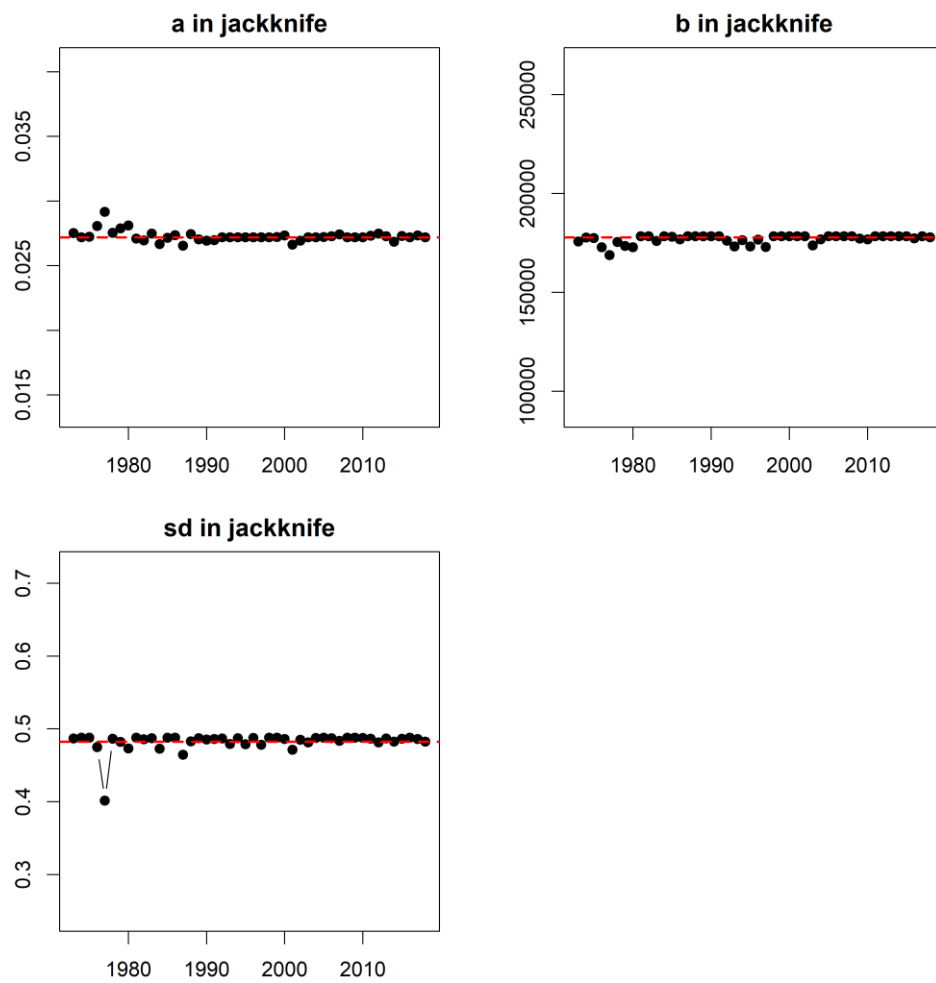
補足図 1-4. HS 型再生産関係におけるジャックナイフ解析での推定結果

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（百万尾）である。丸印は分析に使用した親魚量と加入量のプロットであり、黒丸は使用したデータ期間の最終年（2017 年）を示す。

ホッケー・スティック型（最小二乗法）の場合

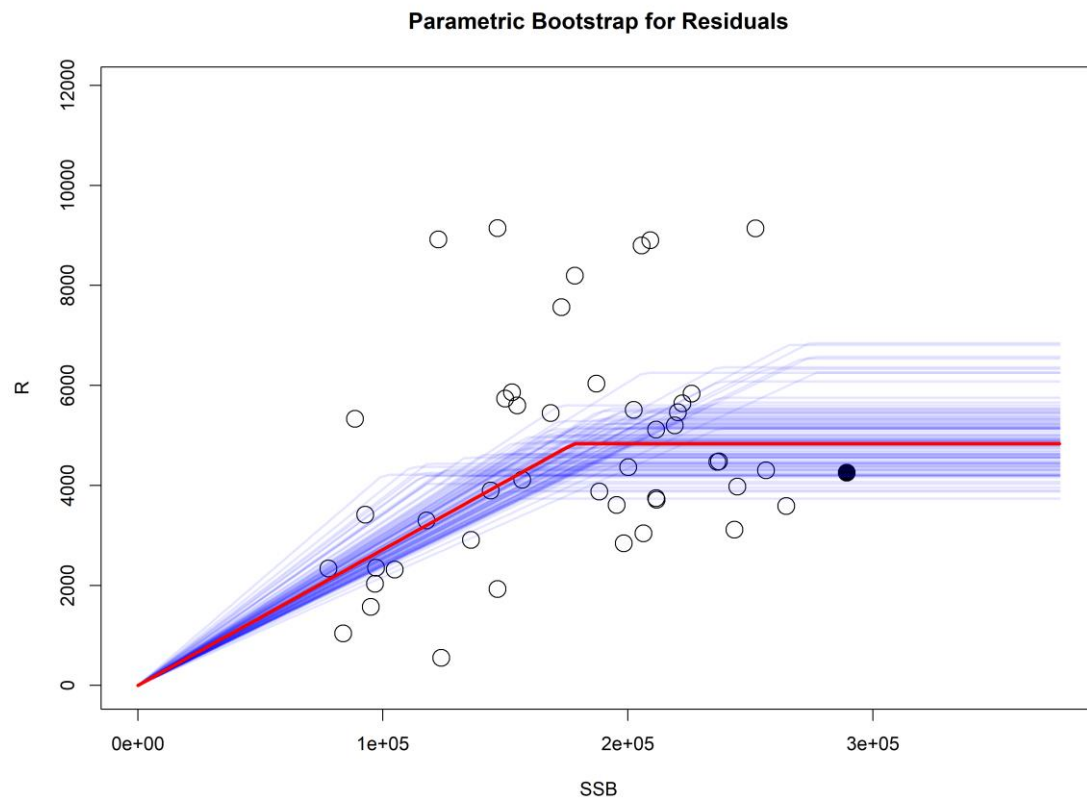


ホッケー・スティック型（最小絶対値法）の場合

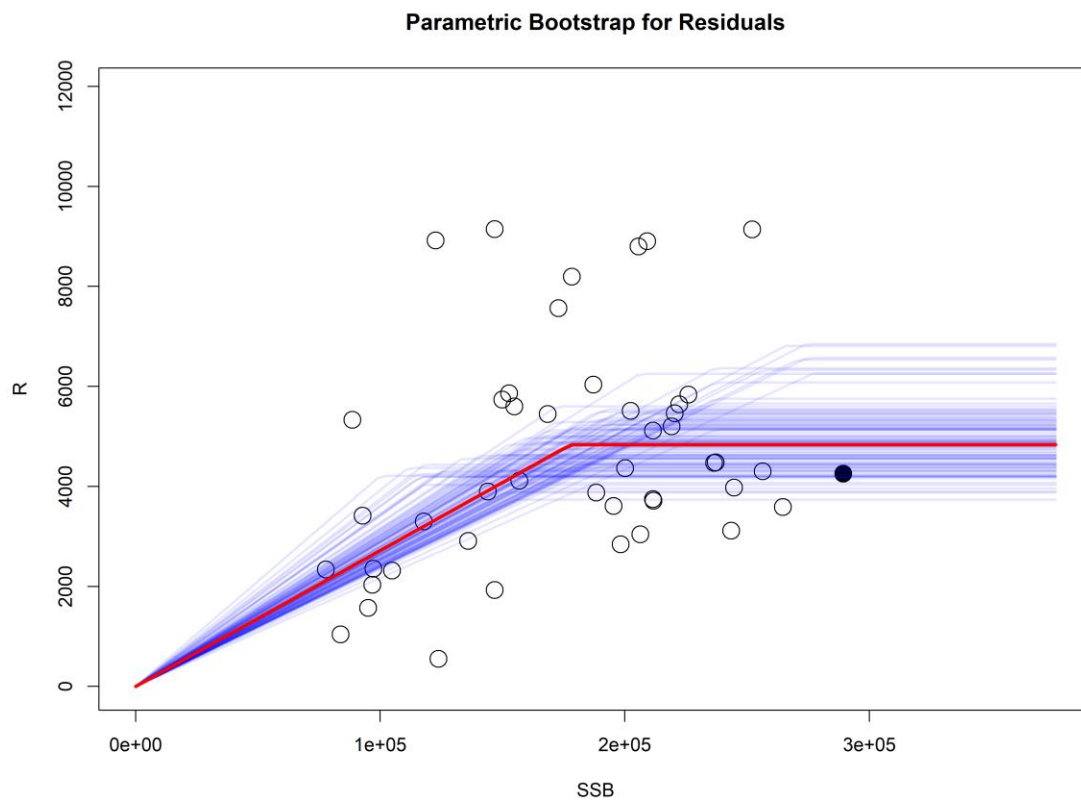


補足図 1-5. HS 型再生産関係におけるジャックナイフ解析でのパラメータ別の影響
最小二乗法と最小絶対値法とで比較しても、各パラメータの推定の頑健性に大きな違いが見られない。

ホッケー・スティック型（最小二乗法）の場合

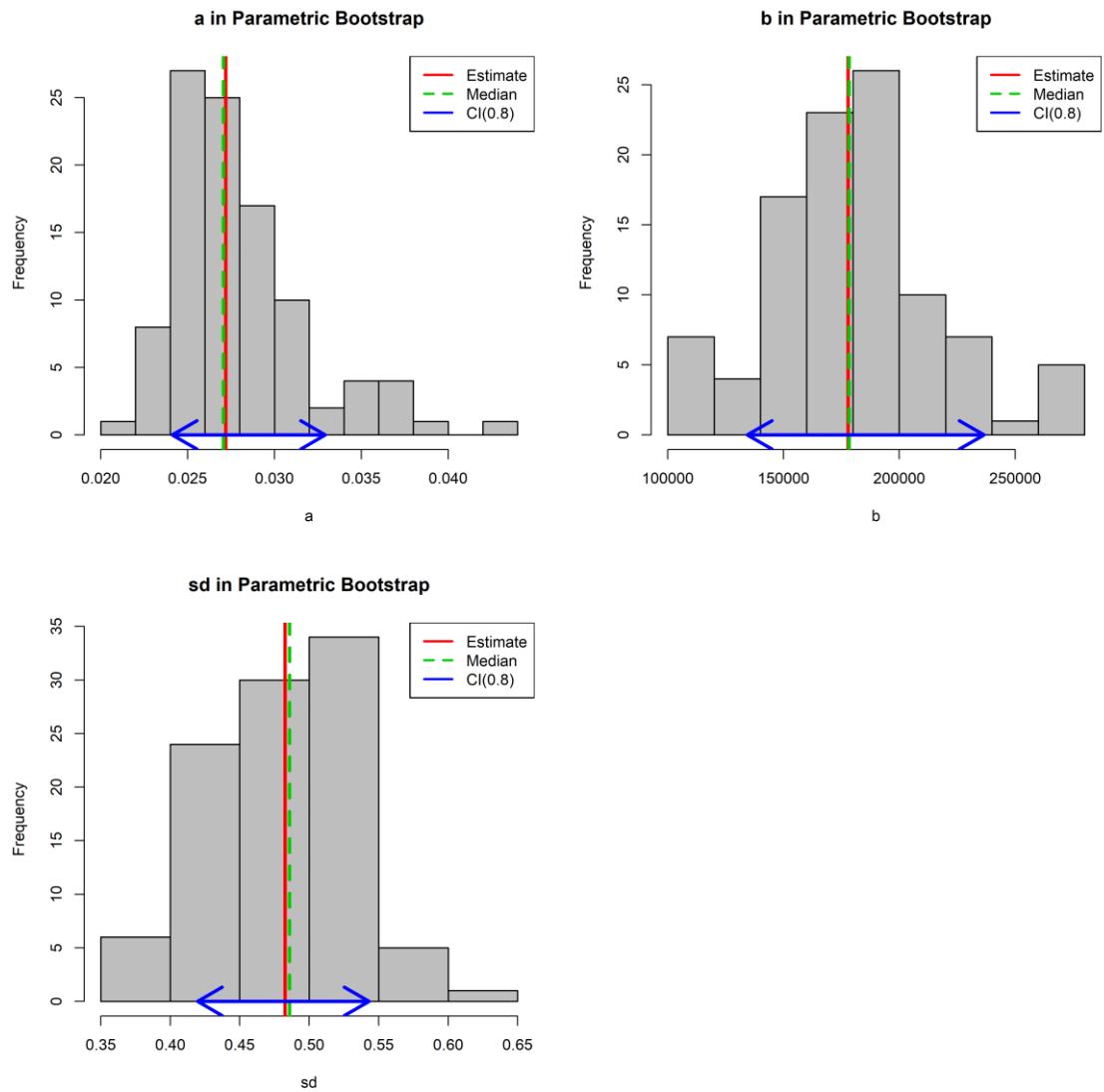


ホッケー・スティック型（最小絶対値法）の場合

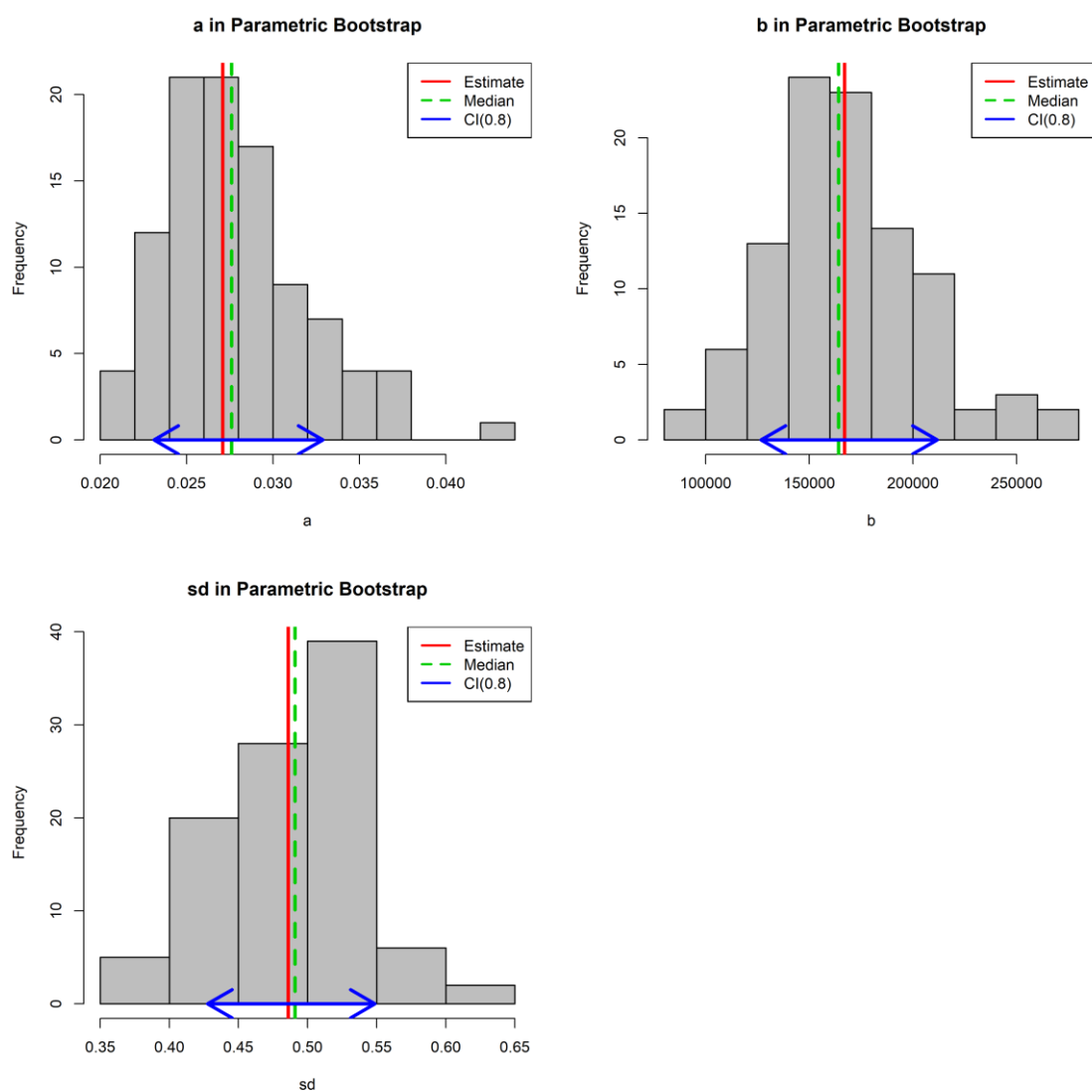


補足図 1-6. HS 型再生産関係における残差ブートストラップ解析の結果
赤線は元データでの推定値、青線はパラメトリックブートストラップでの推定値である。横軸は親魚量（トン）、縦軸は加入量（百万尾）である。丸印は分析に使用した親魚量と加入量のプロットであり、黒丸は使用したデータ期間の最終年（2017 年）を示す。

ホッケー・スティック型（最小二乗法）の場合



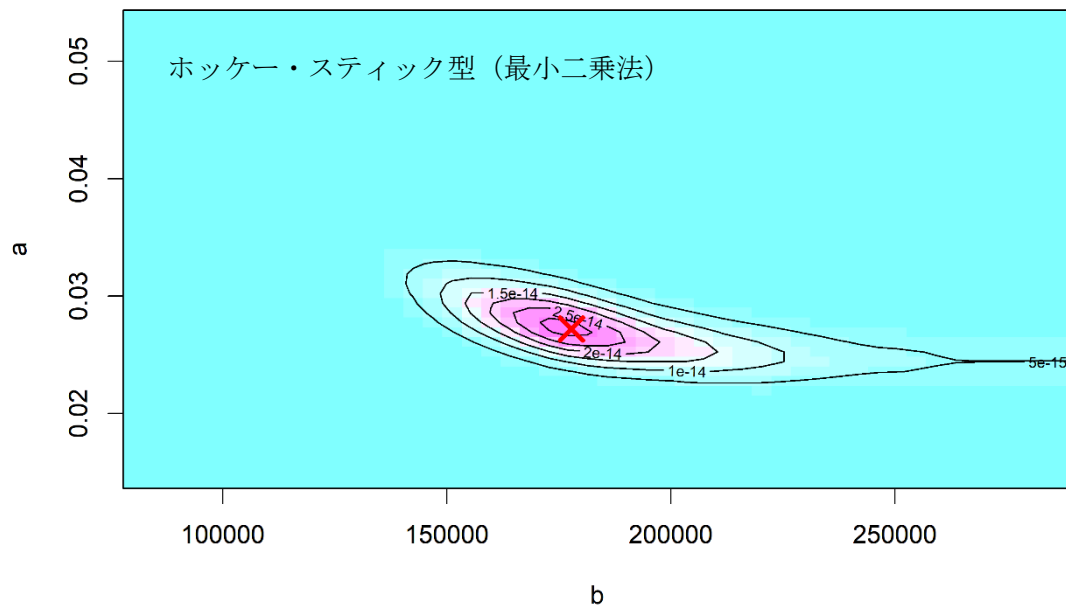
ホッケー・スティック型（最小絶対値法）の場合



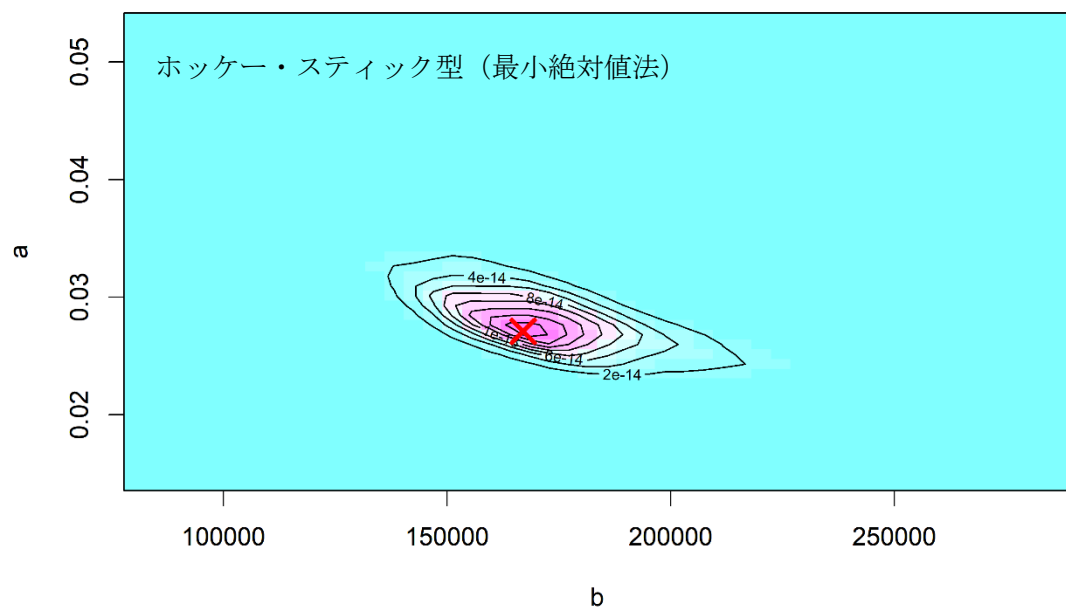
補足図 1-7. HS 型再生産関係における残差ブートストラップ解析での中央値（緑点線）と 80%信頼区間（青線）

赤線はパラメータの点推定値である。

Profile Likelihood



Profile Likelihood



補足図 1-8. HS 型再生産関係における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。

補足資料 2 再生産関係式による MSY を実現する親魚量推定の感度試験

1) 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 を実現する親魚量 (SBmsy) の違いを把握するため、AICc に基づき当てはまりが良いと判断された 3 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 SBmsy 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、HS 型再生産関係、RI 型再生産関係および BH 型再生産関係をそれぞれ最小絶対値法で当てはめた場合である。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 SBmsy、SB0.6msy および SB0.1msy を下表に示す。

	HS 型 (最小絶対値法)	RI 型 (最小絶対値法)	BH 型 (最小絶対値法)
SBmsy	253,764 t	493,384 t	1,154,906 t
SB0.6msy	106,938 t	159,839 t	276,903 t
SB0.1msy	15,795 t	20,405 t	30,599 t
MSY	158,448 t	234,888 t	346,189 t
Umsy	0.339	0.285	0.204
Fmsy/Fcurrent	1.25	1.01	0.702

RI 型や HS 型再生産関係を用いた場合、HS 型に比べて SBmsy、SB0.6msy および SB0.1msy は高い値となる。また、Fcurrent に対する Fmsy の比は小さくなり、期待できる MSY も高くなる。