

付録. 再生産関係の決定に関するガイドライン

再生産関係は将来予測や管理基準値の推定に影響する最も重要な要因である。再生産関係は利用可能なデータと既存の科学的知見を最大限活用して最善のものを選択することとし、想定外のデータの更新や持続性を脅かすほどの極端な加入が起こった場合（付録. 管理期間内に管理基準値や漁獲制御ルールを変更するためのガイドライン）以外には、原則的に5年間の管理期間内で同じものを用いることとする。ここでは、再生産関係を決定する際の基本的な手続きについて述べる。

1. 用いるデータ範囲

- a. 基本的には、過去に推定された加入尾数と親魚量の利用可能な時系列データを全て用いる。
- b. ただし、レジームシフトなど明らかな根拠がある場合は、再生産関係の推定に用いるデータを特定の期間のみのものであるような方法も考えられる。その場合は、抽出した期間に明確な科学的根拠があること、それを報告書に詳述するか適切な引用を明記すること、関係科学機関や有識者間で合意することが必要である。さらに、不確実性に留意し、簡易的なシミュレーション、感度試験などで不確実性に対する頑健性を調べることが推奨される。
- c. 資源評価最終年またはそれに準じる年の加入尾数については、統計解析によって不確実性が非常に高いことが明らかになっている場合、再生産関係の推定から除くことも考えられる。その場合、シミュレーションや感度試験により、除いた場合と除かない場合のリスクの評価を行うことが推奨される。

2. 候補となる再生産関係式

- a. ホッカー・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), リッカー型再生産関係 (RI, Ricker 1954) など、適切な引用がある再生産関係式を候補とする。
- b. 基本的には、密度効果が見られない資源や、極端な密度効果がある資源においても現実的な再生産関係が得られる **HS** の利用を推奨する (Ichinokawa et al. 2017)。しかし、「3 再生産関係を選択するときの基準」で解説する基準に照らしたときに、使用の利点が明らかである場合にはその他の再生産関係式やそれらのモデル平均も使用できる。
- c. 加入変動に影響を及ぼす環境変数やその他の要因の導入によって管理上の利点が大きい場合には、適切な科学的根拠・引用とともに、再生産関係モデルにこれらの要因も導入する。
- d. 再生産関係のパラメータ推定の際には <https://ichimomo.github.io/future-rvpa/SRR-guideline.html> を参考に、一連のモデル診断手法をあてはめ、パラメータ推定が適切かどうかを確認する (図 1)。

3. 再生産関係を選択するときの基準

仮定する再生産関係は、過去に見られた再生産関係を記述するためのものであると同時に、将来の親魚量の変化に対して加入尾数がどのように変化するかを予測するために用いられ、管理基準値に大きな影響を与えることになる。そこで、再生産関係の決定は、予測力に加えて、他のさまざまな要因も勘案した

上で行うことが望ましい。

a. 予測力

- ・ 赤池情報量規準 (AIC), または, 小標本サイズによるバイアスを補正した bias corrected AIC (AICc)などをモデルの予測力を測る規準として用いる. たとえば AICc または AIC を使う場合では, おおまかに, AIC 最小モデルに対して候補モデルの AIC の差 (ΔAIC) が 4 以上であれば, 候補モデルの確からしさは小さいと言われている (Burnham and Anderson 2002).
- ・ 事例: H31 年度研究機関会議ホッケ道北系群

b. 生物学的妥当性 or 便宜的仮定

- ・ RI は, 親魚が多すぎる場合に加入尾数が極端に減少するという, 強い密度効果を持つ再生産関係を表現できる. このような推定が得られた場合には, 対象種の生活史を考慮して, 推定されたような強い密度効果が起こりうるかを検討することが重要である.
- ・ 一方で, HS では, 加入尾数と親魚量が直線関係の場合には, 最大親魚量よりも大きい親魚量の範囲において加入を一定と仮定する, あるいは加入尾数と親魚量が無相関の場合に最小親魚量よりも小さい親魚量の範囲において直線的な加入の減少を仮定することが可能である (Ichinokawa et al. 2017). これらの仮定には生物学的な背景がなく便宜的仮定である (Walters and Martel 2004) ことに注意する必要がある.
- ・ 事例: H31 年度研究機関会議スケトウダラ太平洋系群

c. 外れ値に対する頑健性

- ・ 最小二乗法 (正規分布を仮定した最尤法に対応, L2) を用いたパラメータ推定は外れ値の影響を受けやすいことが知られている. 外れ値がパラメータ推定に大きな影響を与えていると考えられるケース等, 特に管理基準値の頑健性を重視するような場合は, 外れ値の影響を受けにくい最小絶対値法 (ラプラス分布を仮定した最尤法に対応, L1) によるパラメータ推定を利用したほうが良い.
- ・ 事例: H31 年度研究機関会議ホッケ道北系群

d. 観察された最大親魚量以上で, 加入尾数が過去に観察された最大尾数以上の極端な外挿値になるような場合の回避

- ・ 親魚量の観察範囲内で密度効果が認められない場合には, 再生産関係が直線に近い形になる. そのため, BH や RI では最大親魚量以上の範囲で, 加入尾数の期待値が過去に観察された最大加入尾数よりも極端に大きくなるような再生産関係が推定されることがある (図 2). それにより MSY 管理基準値も非現実的に過大な値になってしまうため, このような場合には, BH や RI の使用は避け, 加入尾数の期待値を過去最大加入以上に外挿しない性質を持つ HS を選ぶことが望ましい.
- ・ 事例: H31 年度研究機関会議スケトウダラ日本海系群

e. 観察された最低親魚量以下で加入尾数が保守的でない外挿値になるような場合の回避

- ・ 観察された範囲内で親魚量と加入尾数のあいだに明瞭な正の相関関係が見られない場合、または、負の相関関係が見られるような場合には、過去最低親魚量以下の範囲において、親が減っても加入が減らないような予測値が得られる場合がある（図 3）。過去に経験したことがないくらい低い親魚量において、加入尾数が保守的でない外挿値になる場合にはリスクが高いため、予防的な観点から、このような再生産関係の使用は避けるほうが望ましい。
- ・ 事例：H31 年度研究機関会議スケトウダラ太平洋系群・マサバ対馬暖流系群・ゴマサバ太平洋系群

f. 推定された管理基準値の頑健性

- ・ 複数の再生産式、最適化手法を用いた再生産関係を比較する際には、あわせて MSY 管理基準値の計算もおこない、MSY 管理基準値の再生産関係式の選択に対する頑健性（どの再生産関係を選んでも比較的同程度の MSY 管理基準値が得られる）を確認することが望ましい。
- ・ 事例：H31 年度研究機関会議ゴマサバ東シナ海系群・スケトウダラ太平洋系群

g. 異なる再生産関係を用いた場合のリスクの非対称性

- ・ 予測力やその他の点で同等と考えられる再生産関係が複数ある場合には、異なる再生産関係を用いて計算した管理基準値・漁獲管理方策をもとに管理を実施した場合のリスクに非対称性（A、B がどちらも確からしい場合、誤って A を使った場合と誤って B を使った場合で、将来予測におけるリスクに大きな違いがある、など）があるかどうかを検討することで、再生産関係を選択する方法も考えられる。
- ・ 事例：H31 年度研究機関会議ゴマサバ東シナ海系群・ゴマサバ太平洋系群

h. 自己相関

- ・ 選択した再生産関係からの予測値と観測値との残差において、有意な自己相関関係が認められるかどうかを検討する。自己相関が有意である場合には、管理基準値計算や ABC 計算における将来予測において、加入プロセスに自己相関を考慮することが望ましい。これは、自己相関が有意である場合、悪い加入が続けて発生するような事態がより高い確率で発生するため、基準値以下に資源が下がるリスクがそれだけ高くなり、より保守的な管理が必要になる場合が想定されるためである。
- ・ 自己相関を考慮しない場合には AR 0、過去 1 年の残差のみを考慮する場合には AR1 と表記する（AR は auto-regression の頭文字）。
- ・ 再生産関係パラメータと自己相関係数は時系列解析の方法（正確尤度など）を使って同時推定することも可能であるが、計算の安定性を考慮し、外部で自己相関係数を推定する方法を基本的に用いることとする。
- ・ 最近年の加入尾数が再生産関係の予測値と傾向を持って外れている、また、残差の自己相関係数が高い場合には、近年の残差傾向を自己相関によって説明し、将来予測においても過去年の残差を引き継ぐような加入尾数を推定することで、傾向を持った残差が将来も起こりうる状況を表

現することもできる。実際の数式については「付録. 再生産関係の推定・将来予測シミュレーション・管理基準値計算の手順」を参照のこと。

- ・ 事例：H31 年度研究機関会議マサバ太平洋系群

i. 管理方策の頑健性 (MSE による評価)

- ・ 自己相関の考慮だけでは加入の予測値からのずれに対処できず、また、その問題が短期的な将来予測や ABC 推定に影響を与えることが懸念される場合には、再生産関係に複数のシナリオをあてはめ、どのシナリオが真だったとしても頑健な管理方策・管理基準値を選択する方法をとる。これによって、再生産関係には不確実性があるものの、管理方策においては頑健なものを選択することができる。
- ・ 事例：H31 年度研究機関会議ホッケ道北系群

4. 適用事例集

平成 31 年 4 月研究機関会議 (7 系群)

系群	再生産関係	選択基準	説明
スケトウダラ 太平洋系群	HS, L2, AR0	3e	HS は AICc 最小モデル (RI, $\Delta AICc=8.1$) よりも予測力が低い、親魚が少ない範囲で RI が加入を過大評価するリスクを避けた
		3b, 3f	RI の場合 2010~2014 年の 5 年間のデータのみが曲線の形を決めるため、生物学的背景の吟味および関係式間での MSY 管理基準値算出値の比較の上で RI の使用を避けた
スケトウダラ 日本海系群	HS, L2, AR0	3d	HS, RI, BH とともに直線的な再生産関係になり AICc はほぼ変わらないため、観察された最大親魚量以上で極端な加入の外挿を避ける HS を選択
ホッケ道北系 群	HS, L1, AR0	3a, 3c	AICc が最小のモデルを選択。結果として、L1 が選択されたため、外れ値に対しても頑健なモデルとなった。
		3i	簡易的な MSE を行い、近年の低い加入を想定した場合のリスクを漁獲制御ルールにおいて考慮した (図 4)。
マサバ太平洋 系群	HS, L2, AR1	3h	残差の自己相関が有意だったため、将来予測では加入の自己相関構造も考慮した。これにより加入の自己相関から生じる潜在的なリスクを管理基準値に取り入れることができた (図 5)。また、近年の残差は正であったため、直近年の将来予測は加入が通常よりも良い状況となることが仮定された。
マサバ対馬暖 流系群	HS, L2, AR0	3e	HS は AICc 最小モデル (RI, $\Delta AICc=5.9$) よりも予測力が低い、親魚が少ない範囲で RI が加入を過大評価するリスクを避けた (図 6)
ゴマサバ太平	HS, L1,	3e, 3g	RI は AICc 最小モデル (BH or HS, $\Delta AICc=6.4$ or 6.5)

洋系群	ARO		よりも予測力が低いが、親魚が少ない範囲で RI が加入を 過大評価するリスクを避けた
ゴマサバ東シ ナ海系群	HS, L1, ARO	3f 3g	図 7 の解説を参照 図 8 の解説を参照

(注) 先行 7 魚種における管理基準値計算のための将来予測の加入の残差分布としては、すべての系群に対して対数正規分布が仮定された。

引用文献

- Beverton, R.J.H. and Holt, S.J. (1957) On the Dynamics of Exploited Fish Populations. Her Majesty's Stationary Office, London.
- Burnham, K.P. and R., A.D. (2002) Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach. Springer, New York, New York, USA.
- Clark, C.W., Charles, A.T., Beddington, J.R. and Mangel, M. (1985) Optimal capacity decisions in a developing fishery. *Marine Resource Economics* 2, 25–53.
- 平成 31 (2019) 年度ゴマサバ太平洋系群の管理基準値等に関する研究機関会議報告
https://www.fra.affrc.go.jp/shigen_hyoka/SCmeeting/2019-1/detail_gomasaba_p.pdf
- 平成 31 (2019) 年度ゴマサバ東シナ海系群の管理基準値等に関する研究機関会議報告
https://www.fra.affrc.go.jp/shigen_hyoka/SCmeeting/2019-1/detail_gomasaba_e.pdf
- 平成 31 (2019) 年度スケトウダラ太平洋系群の管理基準値等に関する研究機関会議報告
https://www.fra.affrc.go.jp/shigen_hyoka/SCmeeting/2019-1/detail_suketou_p.pdf
- 平成 31 (2019) 年度スケトウダラ日本海系群の管理基準値等に関する研究機関会議報告
https://www.fra.affrc.go.jp/shigen_hyoka/SCmeeting/2019-1/detail_suketou_n.pdf
- 平成 31 (2019) 年度ホッケ道北系群の管理基準値等に関する研究機関会議報告
https://www.fra.affrc.go.jp/shigen_hyoka/SCmeeting/2019-1/detail_hokke_h.pdf
- 平成 31 (2019) 年度マサバ太平洋系群の管理基準値等に関する研究機関会議報告
https://www.fra.affrc.go.jp/shigen_hyoka/SCmeeting/2019-1/detail_masaba_p.pdf
- 平成 31 (2019) 年度マサバ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
https://www.fra.affrc.go.jp/shigen_hyoka/SCmeeting/2019-1/detail_masaba_t.pdf
- Ichinokawa, M., Okamura, H. and Kurota, H. (2017) The status of Japanese fisheries relative to fisheries around the world. *ICES Journal of Marine Science* 74, 1277–1287.
- Ricker, W.E. (1954) Stock and recruitment. *Journal of Fisheries Research Board of Canada* 11, 559–623.
- Walters, C.J. and Martell, S.J.D. (2004) *Fisheries Ecology and Management*. Princeton University Press, Princeton (New Jersey).

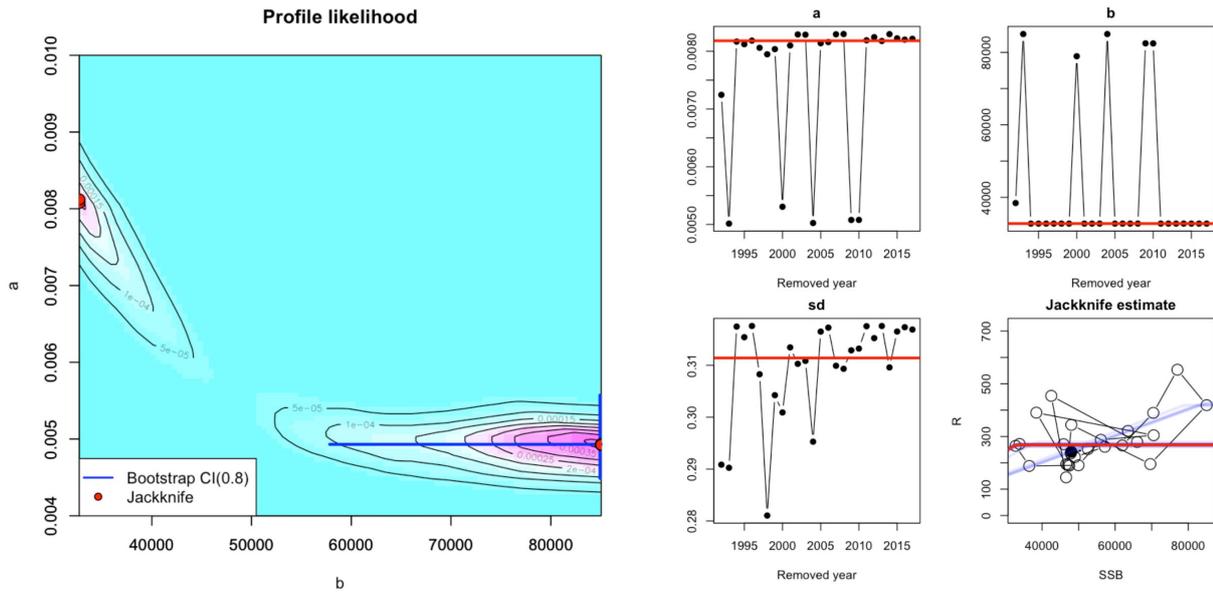


図 1. モデル診断により推定パラメータの不確実性が明らかになった例（「平成 31 (2019) 年度ゴマサバ東シナ海系群の管理基準値等に関する研究機関会議報告」より）. 再生産関係を HS とし，最適化手法に最小絶対値法を用いた時の尤度プロファイル（左）とジャックナイフ解析の結果（右）. 尤度プロファイルでは 2 つの局所解があることが確認でき，ジャックナイフ解析の結果からはデータの取り除きによって推定パラメータが大きく変化することが示されている.

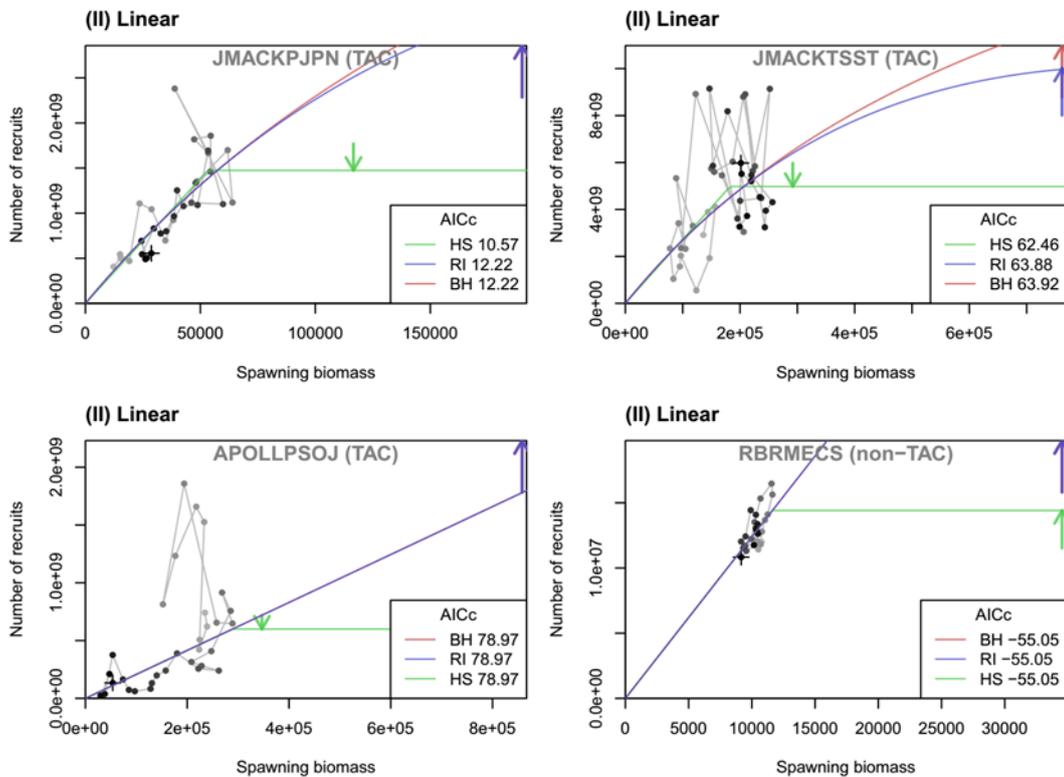


図 2. 加入尾数の期待値が過去最大加入尾数以上の極端な外挿値になるために BH や RI の使用は勧められないケース (Ichinokawa et al. 2017, Figure S3)

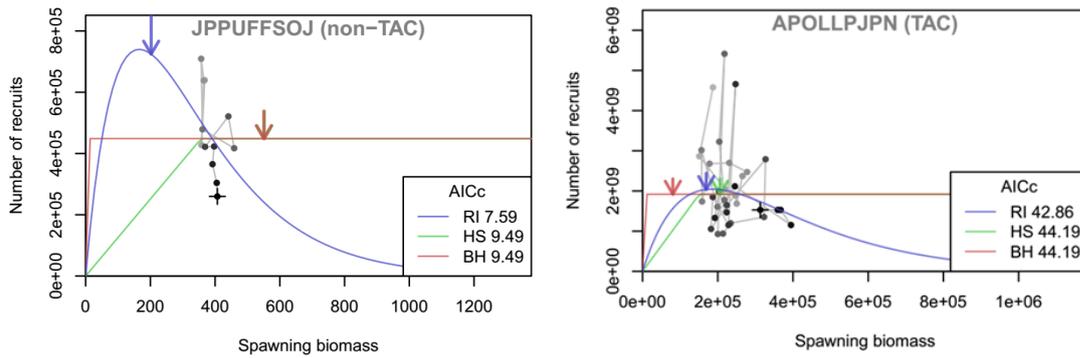


図 3. 極端な外挿がおこるために RI (左), BH (右) の使用は勧められないケース (Ichinokawa et al. 2017, Figure S3)

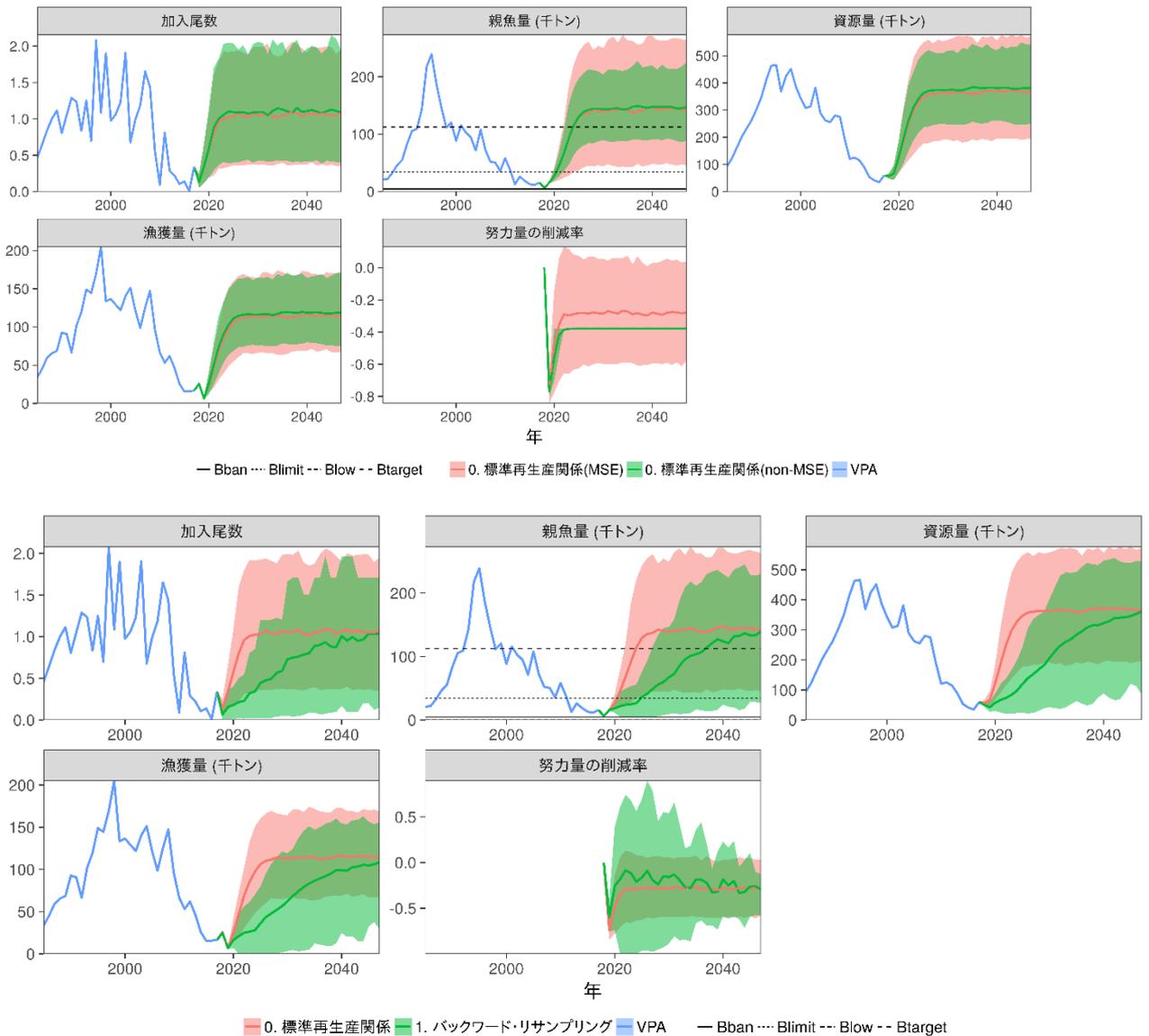


図 4. ホッケ道北系群で実施した簡易的な MSE の例. 上図：真の再生産関係と ABC 算定に用いる再生

産関係が同じ（再生産関係の間違いなし）だが、赤（0. 標準再生産関係(MSE)）のケースでは、ABC 算定年までに加入が確率的に変動するとしたもとで、ABC 算定年の漁獲量は ABC どおりに漁獲すると仮定している。緑（0. 標準再生産関係(non-MSE)）は通常の将来予測の結果。下図：真の再生産関係が ABC 算定に用いる再生産関係とは異なっていた場合の MSE の結果。赤：再生産関係の間違いなし，緑：より悲観的な再生産関係が真だった場合の MSE の結果。

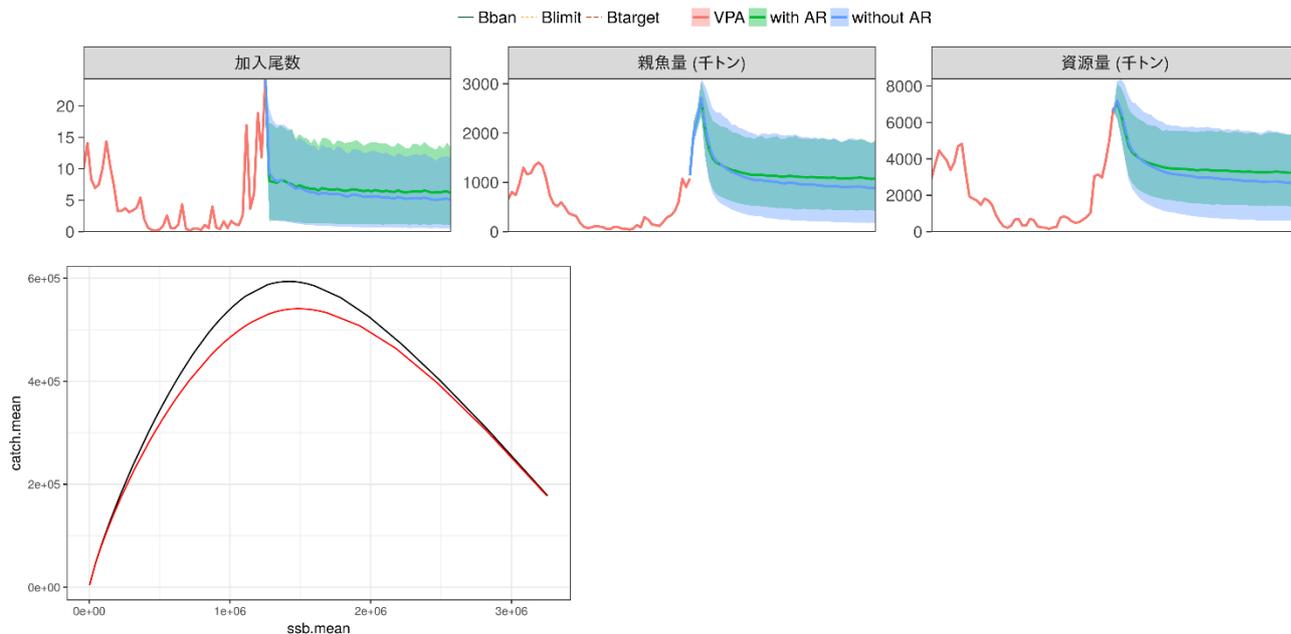


図 5. 将来予測（上）と漁獲量曲線（下）で自己相関を考慮する場合と考慮しない場合の比較。マサバ太平洋系群の時系列データを例として用いた。同じ漁獲圧で漁獲しても，自己相関がある場合には将来の親魚量の信頼区間が広く（上），漁獲量曲線（横軸：平衡状態における親魚量の平均値，縦軸：平衡状態における漁獲量の平均値）は全体的に小さくなり，管理基準値が若干保守的になる。

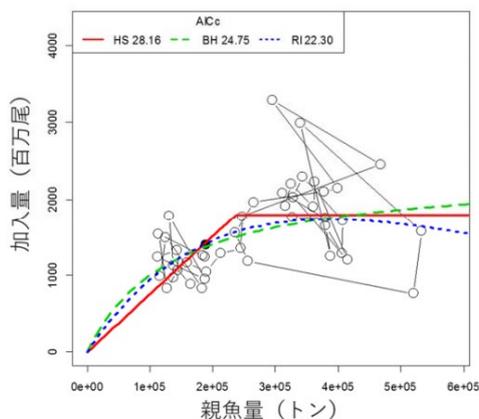


図 6. 過去最低親魚量付近での加入尾数の予測値が楽観的になるという理由で BH, RI の使用は避け，HS を選択したマサバ対馬暖流系群の例（「平成 31 (2019) 年度マサバ対馬暖流系群の管理基準値等に関する研究機関会議報告」より）。（このケースでは，HS の AICc の値は最適モデルよりも 5.9 大きかったが，HS が選択された。予測力を犠牲にしてこの程度の外挿を避けるべきかは，判断が難しい。なお，この系群では RI や BH だと限界管理基準値が過去最低親魚量以下になること等も考慮している。）

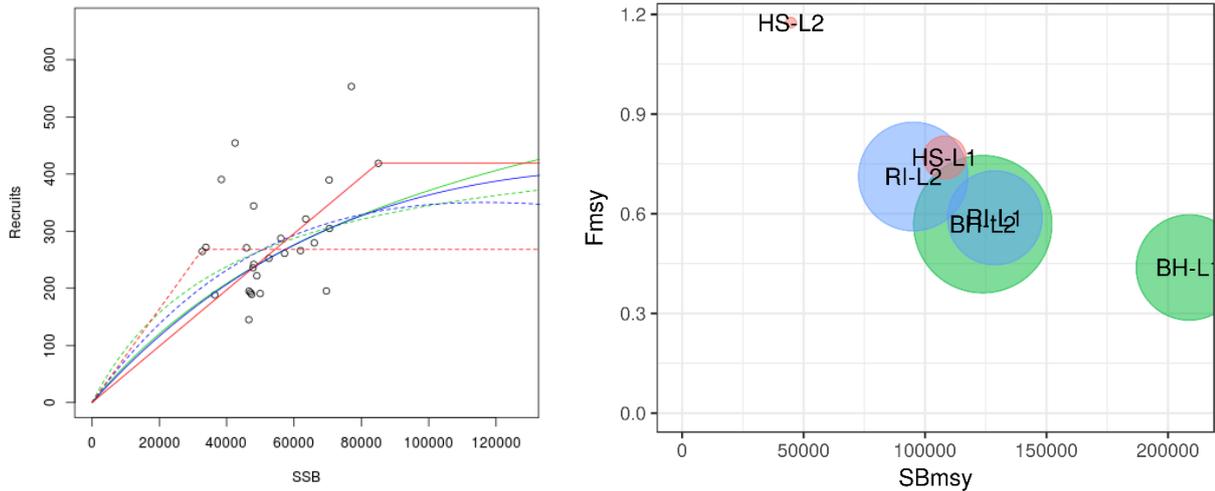


図 7. ゴマサバ東シナ海系群における 6 つの再生産関係のあてはめの結果 (左) と、推定された管理基準値 (右). 右図では、再生産関係式・最適化法ごとに推定された管理基準値の値をプロットし、丸の大きさは Akaike Weight に比例させた (最大の Akaike Weight は BH-L2 で 0.289, 最小は HS-L2 で 0.07). HS の L1 と L2 間での AICc の差は大きくないが、HS-L1 から推定される管理基準値は、より AICc が小さい他の再生産モデルから推定される管理基準値に近く、再生産曲線の選択に対して管理基準値が頑健と考えられる.

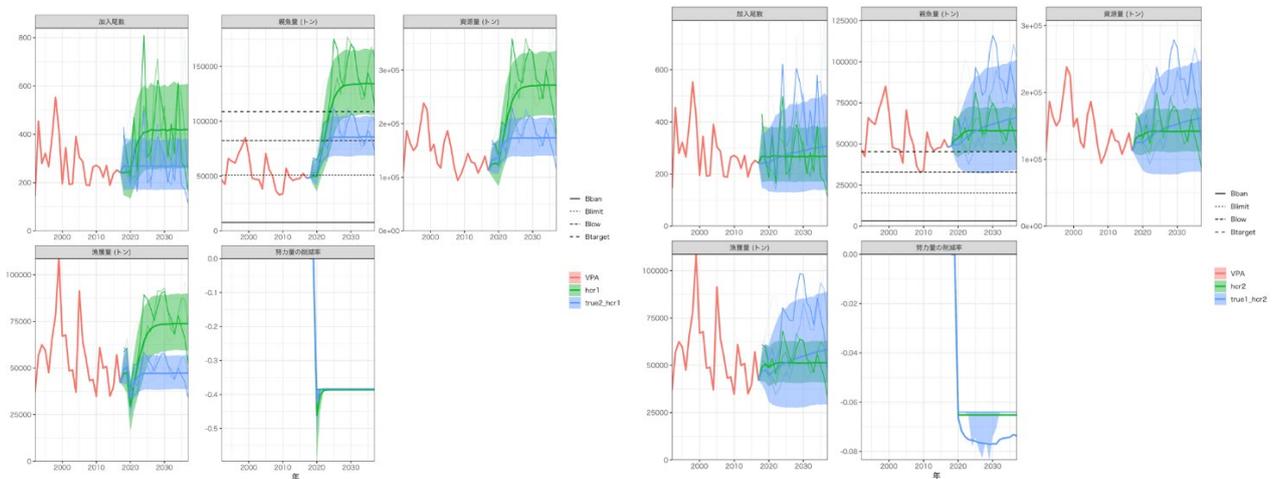


図 8. ゴマサバ東シナ海系群における感度分析結果. (左) 真の再生産関係が HS-L1 (緑), HS-L2 (青) であったときに HS-L1 から計算された管理基準値 (hcr1) を使って管理したときの将来予測. (右) 真の再生産関係が HS-L1 (緑), HS-L2 (青) であったときに HS-L2 から計算された管理基準値 (hcr2) を使って管理したときの将来予測. HS-L1 だと思って管理したが本当は HS-L2 だった場合 (左図, 青) よりも、HS-L2 だと思って管理したが本当は HS-L1 だった場合 (右図, 青) の方が、親魚量が過去最低親魚量を下回るリスクが高い.