

令和 5（2023）年度マダラ北海道太平洋の 状態空間余剰生産モデルによる資源解析に関する資料

1. 背景

2021 年度評価までは、1985 年漁期以降の沖底 CPUE、100 トン以上の沖底かけまわし船におけるマダラの有漁操業の 1 網当たり漁獲量に基づき、資源の水準や動向を判断してきた。2022 年度、本資源の評価・管理が改正された漁業法に基づくものへの移行が始まり、本資源では Pella-Tomlinson 型余剰生産モデル（プロダクションモデル）である SPiCT（連続時間における確率的な状態空間余剰生産モデル：Pedersen and Berg 2017）による資源解析が行われ、SPiCT より推定された相対資源量に基づいて資源状態の評価が行われた。本年度資源評価においても、資源状態の評価に用いるために SPiCT による資源解析を実施した。

2. 状態空間余剰生産モデル

状態モデル

SPiCT では、直接的には観察されない資源量の時間変化（状態モデル）は以下のように表される。

$$dB_t = \frac{r}{n-1} B_t \left(1 - \left[\frac{B_t}{K} \right]^{n-1} \right) dt - F_t B_t dt + \sigma_B B_t dW_t \quad (1)$$

ここで B_t は時間 t での資源量、 F_t は時間 t での漁獲係数、 r は内的自然増加率、 K は環境収容力である。 $\sigma_B B_t dW_t$ は過程誤差（プロセス誤差）であり、 σ_B はプロセス誤差の標準偏差、 W_t はブラウン運動である。 n は形状パラメータであり、 n が 1 であれば Fox 型の余剰生産モデル、2 であれば Schaefer 型プロダクションモデルとなり、その値が大きいくほど環境収容力に対する B_{msy} （最大持続生産量を実現する資源量）の相対的な位置が大きくなる。一般的に r と K には強い相関があることから、Fletcher（1978）による（2）式への変形により、より安定した推定を実現している。

$$dB_t = \left(\gamma m \frac{B_t}{K} - \gamma m \left[\frac{B_t}{K} \right]^n - F_t B_t \right) dt + \sigma_B B_t dW_t \quad (2)$$

ここで γ は（3）式、 m は（4）式の通りである。

$$\gamma = n^{n/(n-1)} / (n-1) \quad (3)$$

$$m = \frac{rK}{n^{n/(n-1)}} \quad (4)$$

資源評価期間の最初の年の資源量に関するパラメータとして、初期資源量の環境収容力に対する比 b/k も求められる。SPiCT では、季節的な漁獲のプロセスを以下の（5）～（6）式でモデル化できるが、本資源のモデルでは漁獲の季節変化は仮定せず年に 1 回漁獲が発生するものとした（ $S_t=1$ ）。

$$F_t = S_t G_t \quad (5)$$

$$d \log G_t = \sigma_F dV_t \quad (6)$$

ここで漁獲係数 F_t は漁獲の季節変化 S_t とランダムな効果 G_t から構成される。 σ_F は漁獲係数のノイズに関する標準偏差、 V_t はブラウン運動である。漁獲の季節変化をモデル化する場合は

S_t に周期的な B スプライン曲線を仮定する等の方法がある。SPiCT ではモデル内での 1 年間に細かく区切って計算を行うことが出来るため、季節的な情報・データの取得時期の違いを踏まえた計算が可能であるが、今回の解析では 1 年に 1 つの漁獲量・指標値のデータを用いたため、モデルでの時間刻みも一般的な離散型の余剰生産モデルと同様に 1 年刻みの個体群動態になるように設定した。

観測モデル

パラメータの推定に用いる指標値は以下の観測モデルで取り扱われる。

$$\log(I_{t,i}) = \log(q_i B_t) + e_{t,i} \quad (7)$$

$$e_{t,i} \sim N(0, \sigma_{I,i}^2) \quad (8)$$

SPiCT では複数の指標値を使用できる。 $I_{t,i}$ は*i*番目の指標値の時間*t*における値である。 q_i は*i*番目の指標値における漁獲効率パラメータである。 $e_{t,i}$ は*i*番目の指標値の観測誤差であり、 $\sigma_{I,i}$ はその標準偏差である。なお、本資源で使用する指標値は北海道根拠の沖合底びき網漁業の標準化 CPUE が一種類のみである。そのため*i*は 1 のみであることから、 q_i と $\sigma_{I,i}^2$ の添え字*i*は省略し、それぞれ q 、 σ_I^2 と表記した。

SPiCT では、漁獲量統計値の誤差に対応して、漁獲量も直接的に観察されない値として以下の (9) ～ (10) 式で推定できる。

$$\log(C_t) = \log\left(\int_t^{t+\Delta} F_s B_s ds\right) + \epsilon_t \quad (9)$$

$$\epsilon_t \sim N(0, \sigma_C^2) \quad (10)$$

ここで ϵ_t は漁獲量の観測誤差であり、 σ_C はその標準偏差である。ただし本資源のモデルでは観察された漁獲量に誤差はないものとした ($\epsilon_t=0$)

パラメータの推定

SPiCT では余剰生産モデルのパラメータはベイズ推定的一种である罰則付き最尤法で推定する。本資源で推定するパラメータは、 n 、 m 、 K 、 q 、 B_t 、 F_t 、 σ_B 、 σ_I 、 σ_F である。内的自然増加率 r は m と K が推定されることで得られる。それぞれのパラメータには推定を行う前に既知の情報として事前分布を置くことが可能となっている。なお、プロセス誤差の大きさ σ_B 、観測誤差の大きさ σ_I 、漁獲係数のノイズの大きさ σ_F 、初期資源量の環境収容力に対する比 $bkfrac$ にも同様に事前分布を与えることができるが、今回の解析では事前分布を与えずにこれらのパラメータを推定した。パラメータの信頼区間は、デルタ法で近似された標準誤差を用いて、対数正規型を仮定して求めた。

3. 計算方法

使用するデータセット

余剰生産モデルには、1985～2022 漁期年の漁獲量（本資料 FRA-SA2023-SC09-07）と、指標値として 1985～2022 漁期年の標準化した 100 トン以上のかけまわし船におけるマダラの 1 網当たり漁獲量 (CPUE) を用いた（本資料およびドキュメント FRA-SA2023-SC09-701）。

パラメータの事前分布

プロダクションモデルガイドライン (FRA-SA2023-ABCWG02-07) に則り、すべてのパラメータに事前分布を仮定しないモデル (M0) から検討を開始し、形状パラメータ n および内的自然増加率 r へ事前分布を与えるモデルの構築を進めた。初めに形状パラメータ n については、Schaefer 型モデルに相当する $n=2$ 、内的自然増加率 r は FishLife (Thorson 2020) からの予測値 0.32 を用いて検討した。事前分布の平均値にこれらの値を用い、緩い事前分布を与える際には標準偏差を 1 に、狭い事前分布を与える際には標準偏差に 0.5 を用いた対数正規分布を仮定した (モデル M1~M3)。形状パラメータ n をメタ解析結果 (Thorson et al. 2012) におけるタラ目の値 1.46 を与えた場合についても同じ手順で検討した (モデル M4~M6)。感度試験として、 n の事前分布の標準偏差を 0.001 として実質的にパラメータを事前分布として与えた値で固定した場合 (S1、S2) について検討した。 n を 1.46 にした場合、 r は FishLife からの予測値を n で調整した値 0.15 を与えた。検討したモデルの事前分布の組み合わせを表 1 に示す。

4. 推定結果

推定値の妥当性の判断

事前分布なしで全てのパラメータ推定を試みたモデル M0 はモデルが収束せず、現在のデータセットから全てのパラメータを推定することは困難であることが確認された。それぞれのモデルの各パラメータの推定値と信頼区間を表 2 にまとめた。

形状パラメータ n の事前分布の平均値を 2 とした場合、 n と内的自然増加率 r に緩い事前分布を与えたモデル M1、より事前分布の制約条件を強くしたモデル M2、M3 および感度試験 S1 では、いずれもモデルが収束しパラメータの推定値および信頼区間が得られた。M2 は K の 90%信頼区間の上下限の差が 10 倍を超え、 n の信頼区間の上限が 14.07 と現実的でない値となった。M1 と M3 は信頼区間の上下限の差がおおよそ 10 倍以内に留まっていることから妥当なモデルと判断できる。M3 は M1 と比べて、 r と n の推定値が事前分布で与えた値と比較的近くなったが、推定されたパラメータの信頼区間は M1 の方が狭くなった。

次に、 n の事前分布の平均値を 1.46 とした場合、モデル M4~M6 および感度試験 S2 のすべてでモデルが収束しパラメータの推定値および信頼区間が得られた。モデル M4 と M5 では n の信頼区間の下限値は 0.16、0.18 と現実的ではない値となった。モデル M6 では r と n の推定値が事前分布で与えた値と比較的近く、環境収容力の信頼区間の上下限の差も 10 倍ほどとなった。ここでは、昨年度評価に倣い形状パラメータの標準偏差を 0.5 とした、M3 と M6 をベースケースとして以後のモデル診断を行った。

感度試験 S1 と S2 において実質的にパラメータ n を 2 と 1.46 に固定した場合もパラメータの推定値はベースケースと大きく変化せず、パラメータの信頼区間の広さもベースケース程度に収まっていた。

形状パラメータ n を与えた際の内的自然増加率 r についての尤度プロファイルの結果を図 1 に示した。全体として負の対数尤度が低くなった r の範囲は 0.2~0.5 であった。ベースモデル M3 と感度試験 S1 で推定された r は 0.21 と 0.25 と近い値となった。M6 と感度試験 S2 は r の事前分布の平均を 0.15 としたこともあって、これらの範囲から若干低い推定値であった。また内的自然増加率が小さくなるほど、あるいは形状パラメータが大きくなるほど、環境収容力は高く推定される傾向にあることも確認された (図 1 右)。

モデル診断

初めにベースケースモデルについて、パラメータ推定時の初期値の影響を確認するため、それぞれのモデルで推定されたパラメータから振らした値を初期値として 50 回の再推定を行った。その結果、パラメータ推定が収束しなかった事例は確認されなかったものの、M3 で 4 回、M6 で 3 回の試行でモデルの推定値が発散する事例が確認された。初期値に対して若干の依存性があることが確認された。

推定された資源量について、過大推定や過少推定の傾向の有無を把握するため、5 年分までのデータを 1 年ずつ取り除き推定結果を比較するレトロスペクティブ解析を行った（図 2）。資源量の絶対値に注目すると、2020 年漁期までのレトロモデルと 2021 年漁期の漁獲量が増えた以降のレトロモデルで違いが確認された。資源量の相対値についても同様の傾向が確認されたが、SPiCT で計算された Mohn's ρ は、M3 と M6 でそれぞれ 0.138 と 0.156 となり、レトロスペクティブパターンとしてはそれほど大きいものではないことが示唆された。また、漁獲係数については、1990 年代前半の漁獲係数の絶対値および相対値に影響があることも確認された。

指標値のあてはまりを残差分析により検討したところ、ベースケースとした M3 と M6 の残差プロットは過去年と比べて、若干近年の分散が小さいように見られた。QQ プロットから、残差は正規分布の仮定に当てはまっていたものと推察できる。また、1 年ラグの有意な自己相関パターンも確認された（図 3）。

推定された資源量の変動が余剰生産・漁獲・プロセス誤差のいずれから影響されているかを要因分析として検討した。余剰生産、漁獲量、プロセス誤差が概ね同程度のスケールで推定され、妥当な推定がなされているものと考えられた（図 4）。2021 年漁期に資源量が大きく増加したと推定されたが、その増加の大半はプロセス誤差によって説明された。SPiCT の漁獲係数はランダムウォークのモデルを仮定しており、その標準偏差である σ_F の推定値が本資源では 0.15 と比較的小さかったため、漁獲係数は大幅に増減できない。資源動態モデルは、2021 年漁期の実際の漁獲量の大幅な増加のうち、モデル内の 2021 年漁期の漁獲量の増加では説明できない分を主に前年漁期のプロセス誤差による資源量の増加で説明したことになる。

推定結果の解釈

本資源の場合、レトロスペクティブ解析の結果から余剰生産モデルの推定資源量の絶対値は、データの追加によって大きく変わる可能性があるが、資源量の平均を 1 として基準化した相対値では比較的その影響が小さいと考えられた（図 5）。そのため、資源量の絶対値ではなく、相対値を資源量指標値として用いることが適切と判断した。ベースケースとした M3 と M6 の 2 つのモデルの資源量の相対値の推移はよく一致した（図 6）ことから、その平均値を資源量指標値とした（本資料 FRA-SA2023-SC09-07 の図 4-2）。資源量指標値は、1985～2003 年漁期は 0.37～0.77 でほぼ横ばいで推移したのち、2004 年漁期以降増加して、2012 年漁期には 1.70 となった。2013～2020 年漁期は 1.62～1.78 と平均を上回る値であった。2021 年漁期に相対値が 2.10 とさらに増加し、2022 年漁期の相対値は 2.11 と 1985 年漁期以降で最も高かった。

ベースケースの資源量推定値は 9.3 万トン～54.4 万トンであったのに対し、参考情報としたコホート解析の資源量（残存資源量として再計算）は 1.1 万トン～2.8 万トンと絶対数で大きな違いがあった（図 7）。2022 年漁期資源量はベースケースでそれぞれ 55.7 万トンと 47.2 万トンと推定され、2022 年漁期の実漁獲量 2.9 万トンと比較して、過大推定していると考えられる。ベースケースの環境収容力の信頼区間が広いことからプロダクションモデルの絶対値の推定不確実性が大きいことが示唆される。これは、本資源の漁獲効率 q や環境収容力 K について、十分な事前情報が得られておらず事前分布を与えていないことが要因の一つと考えられる。一方で、年齢別体重や自然死亡係数の精査が十分ではないことから、VPA の資源量の絶対値についても不確実性は高いものと考えられる（詳細は別ドキュメント FRA-SA2023-SC09-703 を参照）。

直近年（2022 年漁期）の資源量や漁獲圧が最大持続生産量（MSY）を実現する水準（ B_{msy} および F_{msy} ）を上回っているか否かについて、ベースケースとした 2 つのモデルの推定結果を図 8 に示した。 B/B_{msy} については、モデル M3 では信頼区間も含めて 1 を上回ったが、モデル M6 では推定値が 1 を上回ったものの、信頼区間の下限が 1 を下回った。 F/F_{msy} については、モデル M3、M6 の両方とも信頼区間を含めて 1 を下回ると推定された。

両モデルの余剰生産曲線のプロット（図 9）からも、環境収容力に対する相対資源量が 0.1 ～0.8 程までと大きく変動していることが確認できる。相対的な資源量が 0 に近い場合に比べて、環境収容力に近い方が相対的な余剰生産量が高くなっていた。これは形状パラメータが 2 以上（ B_{msy}/K が 0.5 以上）の時にフィットが良くなるものと考えられ、実際に各モデルで形状パラメータの信頼区間の上限は 2～4 程となっていた。一方で、Thorson et al. (2012) のメタ解析結果によると、 B_{msy}/K は魚類全体で 0.404、タラ目で 0.439（形状パラメータにすると 1.46）であり、本資源の形状パラメータの傾向は魚類の一般則と整合しない点があった（Thorson et al. (2012) の結果は厳密には産卵親魚量に対してである）。また、同じ内的自然増加率を与えたときに、形状パラメータが大きくなるほど環境収容力も大きく推定される傾向にあった（図 1 右側）ことから、環境収容力と形状パラメータが推定時に影響しあうことで、両推定値が大きめに推定された可能性が示唆される。本資源にプロダクションモデルを適用した際、そのパラメータの推定結果について、データや資源の特性、モデルの不確実性などの観点から引き続き注視する必要があると考える。

以上より、相対資源量とした時に複数モデル間で推定傾向が似ており、その傾向について頑健性が確認できたことから、本解析結果は直近年の資源状態の参考情報として用いることができる判断した。一方で、資源の絶対値に関する事前情報を与えることが難しいこと、余剰生産曲線の形状から形状パラメータについても推定不確実性が広いこと、等から資源の絶対量を把握するための情報としては利用が難しいものと考えられる。

5. その他

資源解析には SPiCT の R パッケージ `spict` (ver.1.3.7 <https://github.com/DTUAqua/spict/tree/master/spict>) を使用した。モデルの更なる詳細情報については Pedersen and Berg (2017) を参照されたい。作図には `frapmr` (<https://github.com/ichimomo/frapmr>, 非公開) を利用した。

6. 参考資料

- Fletcher, R. (1978). On the restructuring of the Pella-Tomlinson system. *Fishery Bulletin*, 76, 515–521.
- Froese, R., Demirel, N., Coro, G., & Kleisner, K. M. (2017). Estimating fisheries reference points from catch and resilience. *Fish and Fisheries*, 18, 506–52. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/faf.12190>
- Pedersen, M. W., & Berg, C. W. (2017). A stochastic surplus production model in continuous time. *Fish and Fisheries*, 18(2), 226–243. <https://doi.org/10.1111/faf.12174>
- Thorson, J. T. (2020). Predicting recruitment density dependence and intrinsic growth rate for all fishes worldwide using a data-integrated life-history model. *Fish and Fisheries*, 21(2), 237–251. <https://doi.org/10.1111/FAF.12427>
- Thorson, J. T., Cope, J. M., Branch, T. A., & Jensen, O. P. (2012). Spawning biomass reference points for exploited marine fishes, incorporating taxonomic and body size information. 1568, 1556–1568. <https://doi.org/10.1139/F2012-077>

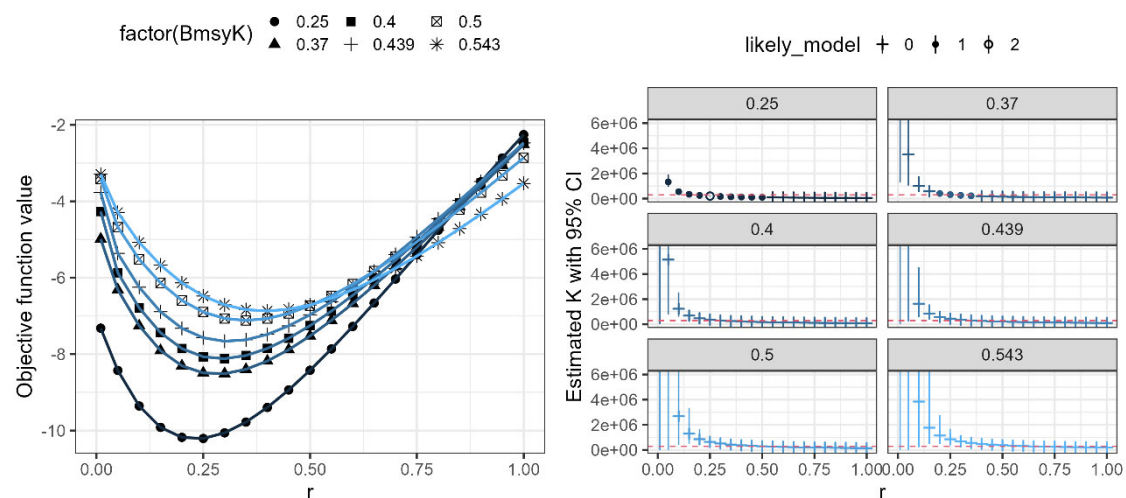
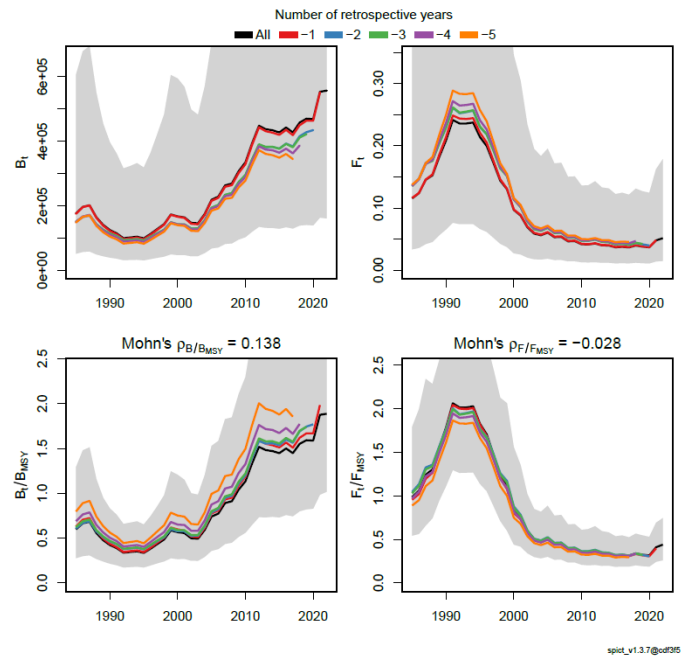


図 1. 尤度プロファイル

BmsyK は Bmsy が K に対してどの程度かを比で表しており、形状パラメータにするとそれぞれ 0.5、1.01、1.19、1.46、2.00、2.50 である。

(A)



(B)

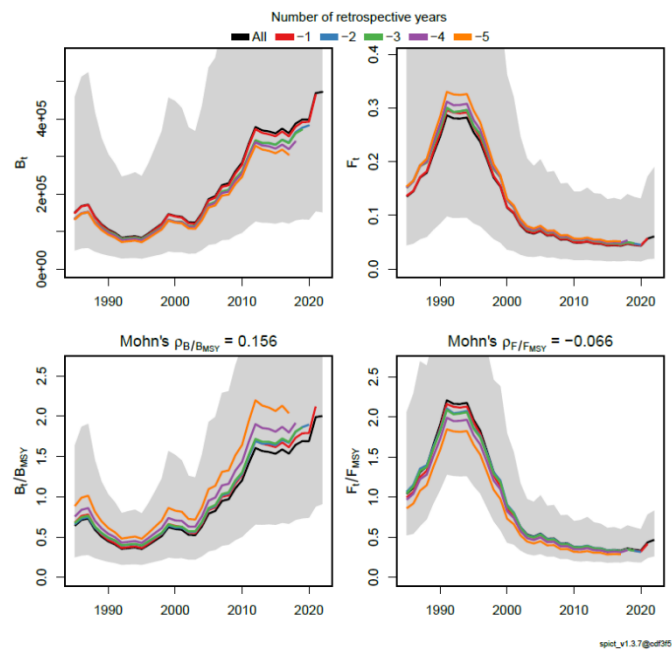


図2. ベースケースとした M3 (A)、M6 (B) のレトロスペクティブ解析結果
 それぞれ資源量の絶対値 (左上)、漁獲係数 (右上)、資源量の相対値 (左下)、漁獲係数の相対値 (右下) の図を表す。相対値については Mohn's ρ も図の上に併記されている。

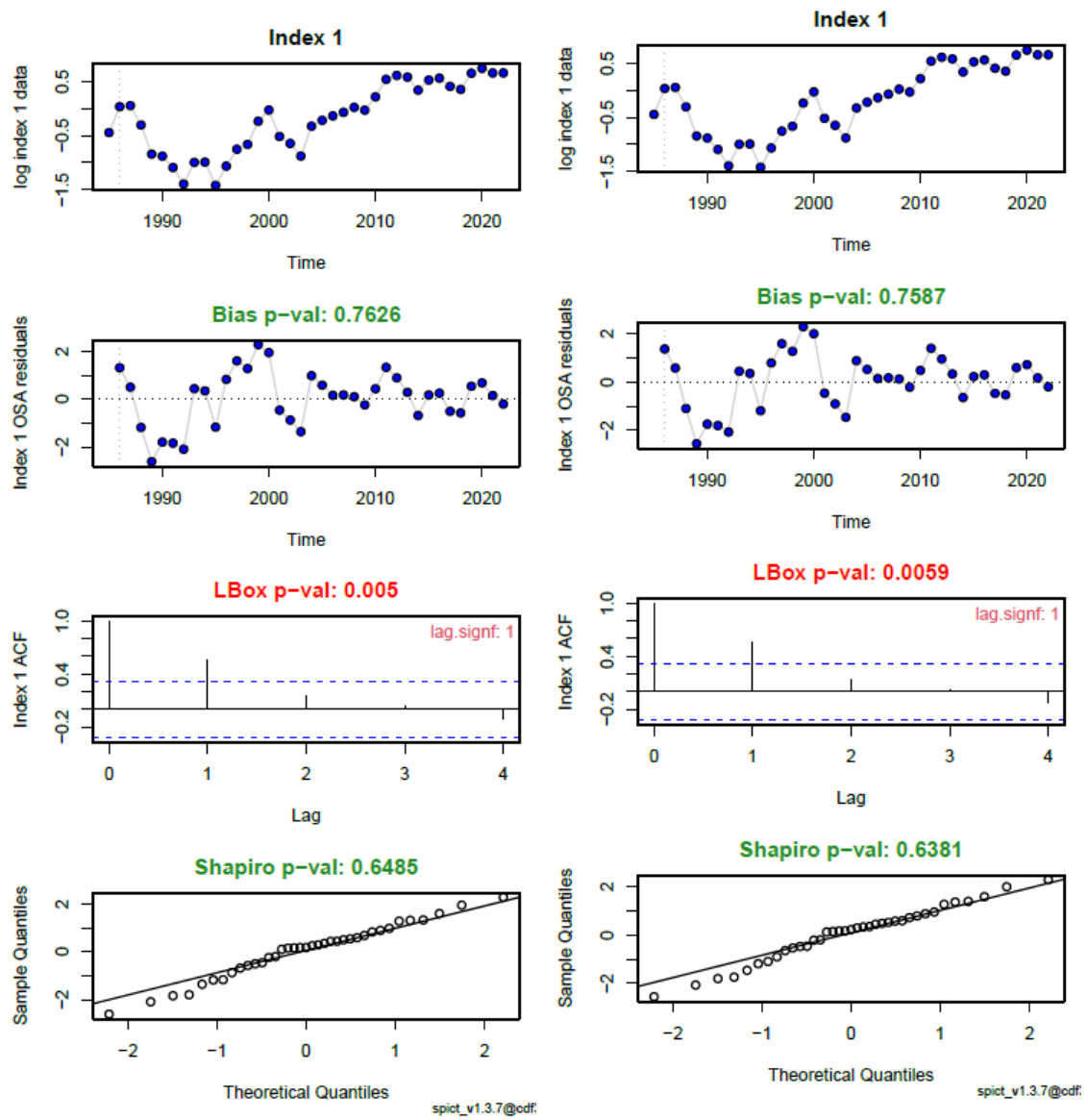


図3. ベースケースとした M3（左）と M6（右）の指標値の残差分析結果



図 4. ベースケースとした M3 と M6 で推定された資源変動の要因分解プロット

上図が M3、下図が M6 の要因分解プロットであり、赤矢印が余剰生産、緑矢印が漁獲、青矢印がプロセス誤差の大きさを示す。

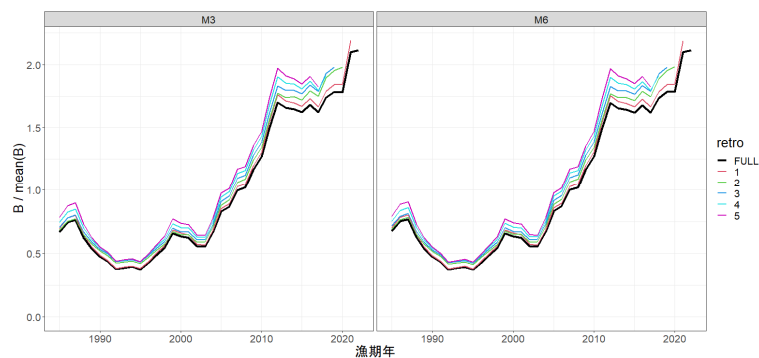


図 5. ベースケースとした M3 と M6 について、相対資源量のレトロスペクティブ解析

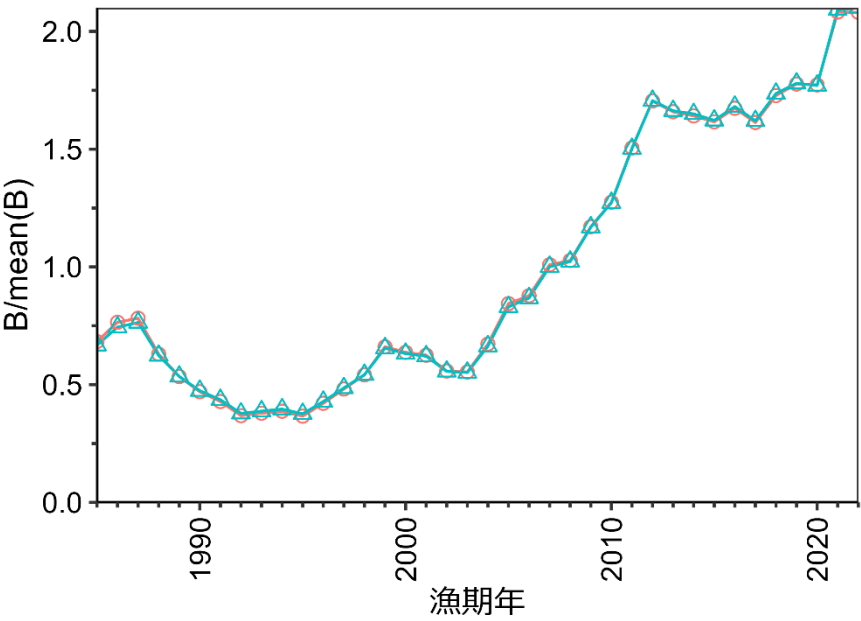


図 6. ベースケースとした M3（赤色）と M6（青色）で推定された資源量の相対値
資源量を平均値で割ることで 1 に規格化している。

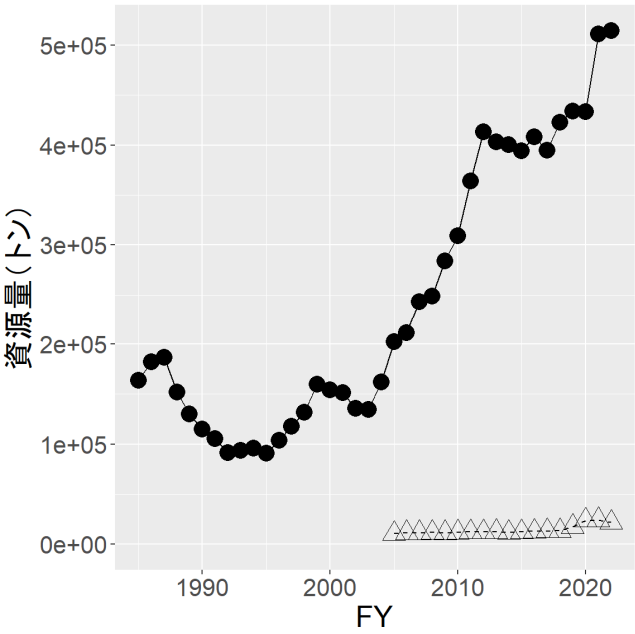


図 7. ベースケースとした M3 と M6 の資源量の平均値（黒丸実線）と VPA の試算結果から算出した残存資源量（三角破線）の時系列推移

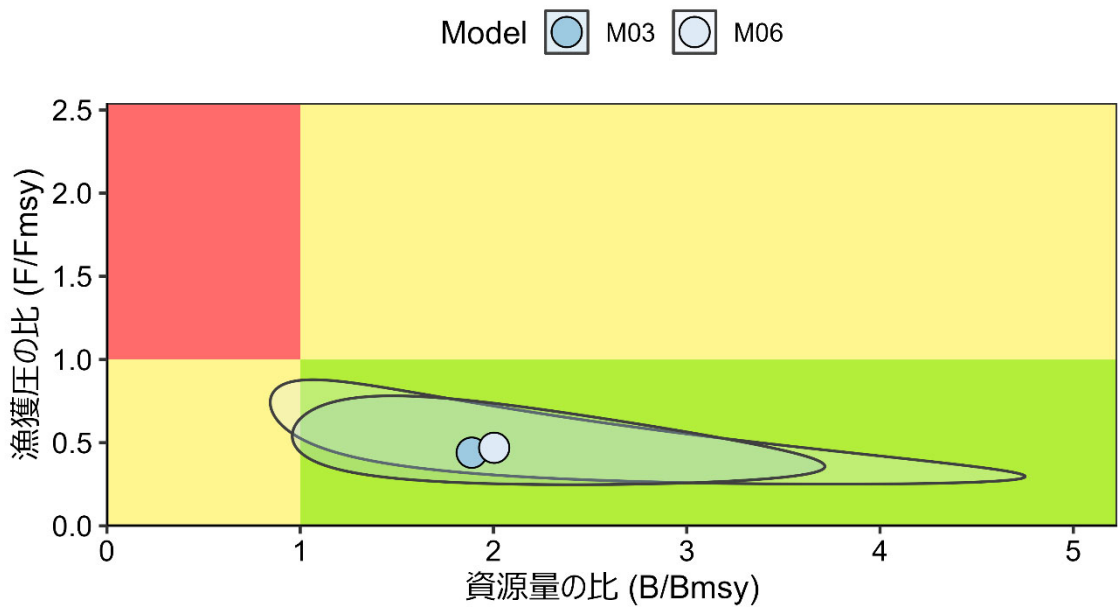


図 8. ベースケースとした M3 と M6 の神戸プロット
図中の丸印は直近年の資源状態を示し、線で囲まれた範囲が 90%信頼区間を示す。

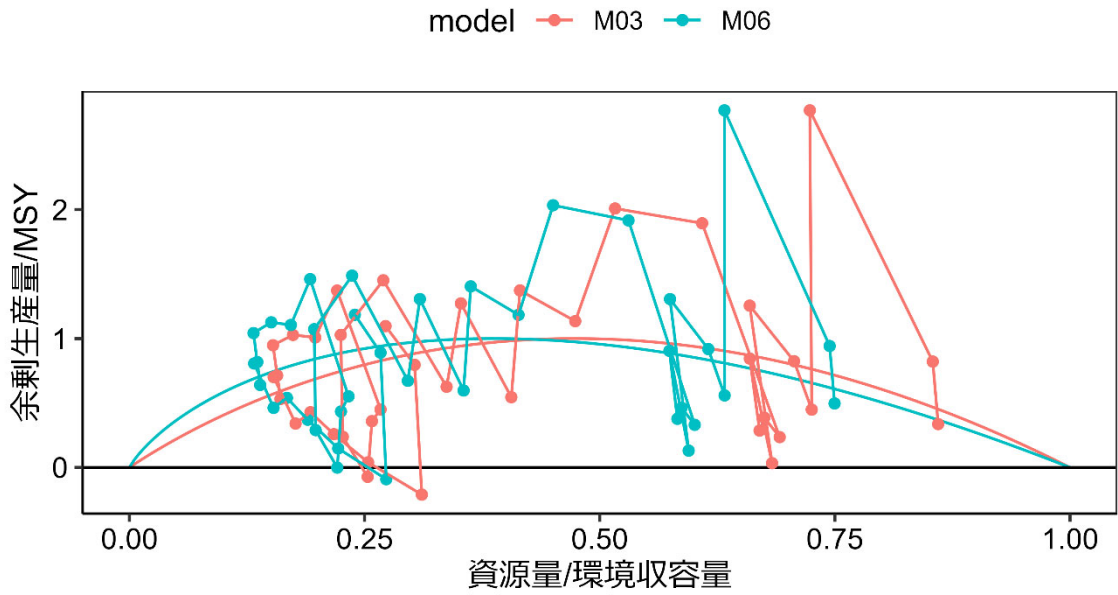


図 9. ベースケースとした M3 と M6 の余剰生産曲線

表 1. 各モデルにおける事前分布の設定

モデル 名	n		r		他パラメータ
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	
M0	事前分布なし				事前分布なし
M1	2	1	0.32	1	事前分布なし
M2	2	1	0.32	0.5	事前分布なし
M3	2	0.5	0.32	1	事前分布なし
M4	1.46	1	0.15	1	事前分布なし
M5	1.46	1	0.15	0.5	事前分布なし
M6	1.46	0.5	0.15	1	事前分布なし
S1	2	0.001	0.32	0.5	事前分布なし
S2	1.46	0.001	0.15	0.5	事前分布なし

すべてのモデルにおいて漁獲量の誤差を 0 と仮定した
太字で示したモデル M3 と M6 をベースケースとした

表 2. 各モデルで得られたパラメータの推定値と 90%信頼区間

	M0			M1		
	下限 5%	推定値	上限 5%	下限 5%	推定値	上限 5%
r	0	1.00E-08	1.51E+306	0.05	0.16	0.47
K	NA	6011560663	NA	164357	472782	1359983
n	0.00E+00	0.02	Inf	0.18	0.90	4.41
σ_B	0.12	0.16	0.21	0.08	0.13	0.20
σ_F	0.12	0.16	0.20	0.11	0.15	0.19
q	NA	0	NA	1.66E-04	4.55E-04	1.25E-03
σ_I	0.13	0.18	0.25	0.13	0.20	0.30
bkfrac	NA	5.14E+03	NA	0.13	0.26	0.49
B/Bmsy	NA	NA	NA	1.07	2.31	4.97
F/Fmsy	0.00E+00	5.39E-08	1.51E+306	0.27	0.45	0.73
B2022	0	9.01E+13	1.51E+306	127368	370063	1075206

	M2			M3		
	下限 5%	推定値	上限 5%	下限 5%	推定値	上限 5%
r	0.08	0.25	0.77	0.08	0.21	0.58
K	106963	573188	3071566	209702	648003	2002402
n	0.25	1.88	14.07	0.70	1.74	4.32
σ_B	0.08	0.13	0.20	0.08	0.13	0.20
σ_F	0.11	0.15	0.19	0.11	0.15	0.19
q	6.01E-05	3.29E-04	1.80E-03	1.14E-04	3.07E-04	8.25E-04
σ_I	0.14	0.21	0.32	0.14	0.21	0.31
bkfrac	0.17	0.29	0.47	0.15	0.27	0.50
B/Bmsy	0.93	1.91	3.92	1.12	1.89	3.17
F/Fmsy	0.27	0.44	0.71	0.28	0.44	0.68
B2022	86824	515892	3065322	196280	557173	1581621

モデル M3 と M6 をベースケースとした

表 2. 各モデルで得られたパラメータの推定値と 90%信頼区間 (続き)

	M4			M5		
	下限 5%	推定値	上限 5%	下限 5%	推定値	上限 5%
r	0.04	0.11	0.35	0.06	0.13	0.28
K	178759	500926	1403716	187956	455707	1104882
n	0.16	0.58	2.16	0.18	0.64	2.30
σ_B	0.08	0.13	0.19	0.09	0.13	0.19
σ_F	0.11	0.15	0.19	0.11	0.15	0.19
q	2.28E-04	5.05E-04	1.12E-03	2.27E-04	5.12E-04	1.15E-03
σ_I	0.13	0.20	0.29	0.13	0.20	0.29
bkfrac	0.10	0.22	0.48	0.13	0.24	0.44
B/Bmsy	1.08	2.49	5.73	1.16	2.53	5.56
F/Fmsy	0.23	0.44	0.85	0.24	0.43	0.79
B2022	142269	334105	784611	138036	328426	781415

	M6			S1		
	下限 5%	推定値	上限 5%	下限 5%	推定値	上限 5%
r	0.05	0.14	0.42	0.14	0.25	0.47
K	196100	629290	2019403	276733	601331	1306670
n	0.48	1.11	2.54	2.00	2.00	2.00
σ_B	0.08	0.13	0.20	0.08	0.13	0.20
σ_F	0.11	0.15	0.19	0.11	0.15	0.19
q	1.48E-04	3.63E-04	8.92E-04	1.65E-04	3.13E-04	5.95E-04
σ_I	0.14	0.21	0.31	0.14	0.21	0.31
bkfrac	0.11	0.24	0.51	0.17	0.29	0.47
B/Bmsy	1.03	2.00	3.88	1.28	1.88	2.76
F/Fmsy	0.29	0.47	0.76	0.29	0.43	0.64
B2022	181698	471771	1224931	271734	543824	1088360

モデル M3 と M6 をベースケースとした

表 2. 各モデルで得られたパラメータの推定値と 90%信頼区間（続き）

	S2					
	下限 5%	推定値	上限 5%			
r	0.07	0.16	0.34			
K	290265	767194	2027755			
n	1.46	1.46	1.46			
σ_B	0.08	0.13	0.20			
σ_F	0.11	0.15	0.19			
q	1.43E-04	2.91E-04	5.93E-04			
σ_I	0.14	0.21	0.31			
bkfrac	0.12	0.24	0.49			
B/Bmsy	1.02	1.83	3.30			
F/Fmsy	0.29	0.46	0.73			
B2022	279871	592721	1255287			

モデル M3 と M6 をベースケースとした