

令和 5（2023）年度マガレイ北海道北部系群の 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 4 年度の本資源の資源評価データを用いて、目標管理基準値案、限界管理基準値案、禁漁水準案、および漁獲管理規則案を検討した。資源評価に使用した余剰生産モデルで推定された最大持続生産量を実現する資源量 B_{msy} （5.3 千トン、90%信頼区間は 3.5 千～8.1 千トン）を目標管理基準値として提案する。限界管理基準値には資源評価において推定された過去の資源量の最低値 B_{min} （3.8 千トン、90%信頼区間は 2.3 千～6.1 千トン）、禁漁水準には 0 トンを提案する。目標管理基準値案を達成する漁獲圧は、現状（2021 年漁期）の漁獲圧の 2.8 倍（90%信頼区間は 1.9～4.4 倍）である。シミュレーションに基づく検討（管理戦略評価 MSE）では、管理開始 10 年後に目標管理基準値案を上回る確率に加えて限界管理基準値案を下回るリスクを十分に考慮することが必要とされ、上記の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では、2023 年漁期から漁獲管理規則案に基づく漁獲を開始する場合、漁獲管理規則に用いる調整係数 β を 0.7 以下とした場合に管理開始から 10 年後の 2033 年漁期に 77%以上の確率で目標管理基準値案を上回り、91%以上の確率で限界管理基準値を上回ると予測された。また、10 年間に一度でも限界管理基準値を下回る確率は 28%以下と予測された。以上のことから、目標達成に加え、資源量が過去最低資源量を下回るリスクを一定以下に抑えるための β として 0.7 以下を推奨する。

資源量 (千トン)	現状の資源量 に対する比*1	環境収容力 に対する比	対応する 漁獲圧	期待できる 漁獲量(千トン)	現状の漁獲圧 に対する比*2
目標管理基準値案：最大持続生産量 MSY を実現する資源量(Bmsy)					
5.3 (3.5～8.1)	0.77 (0.56～1.00)	0.49 (0.35～0.65)	0.51 (0.33～0.79)	2.7 (2.2～3.3)	2.8 (1.9～4.4)
限界管理基準値案：資源評価期間の過去最低資源量(Bmin)					
3.8 (2.3～6.1)	0.55 (0.43～0.69)	0.35 (0.24～0.47)	0.64 (0.40～0.98)	2.5 (1.7～3.2)	3.6 (2.4～5.0)
禁漁水準案：0 トン					
0	0	0	—	0	—
2021 年漁期の値					
6.9 (4.3～11)	1.00	0.63 (0.43～0.88)	0.18 (0.11～0.29)	1.2 *3	1.0

表に示した値と括弧内の数値（2021 年漁期の漁獲量を除く）は、3 つの基本モデル（千葉ほか 2023）による推定結果から 30,000 回の繰り返し計算数分だけパラメータセットを再生成して算出した値の中央値を代表値として、5 パーセンタイル値と 95 パーセンタイル値を 90%信頼区間として示した。以降、本資料で 3 つのモデルの結果を要約する際は、上記の算出方法を用いた（詳細は補足資料 2 を参照）。

*1 現状の資源量に対する比とは、各管理基準値案を達成する資源量が現状（2021 年漁期）の資源量に対して何倍に相当するかを示す係数である。

*2 現状の漁獲圧に対する比とは、各管理基準値案を実現する漁獲圧が現状（2021 年漁期）の漁獲圧に対して何倍に相当するかを示す係数である。

*3 2021 年漁期の漁獲量（漁期は 7 月～翌年 6 月）。

1. まえがき

マガレイは、樺太・千島以南の日本各地の沿岸から朝鮮半島、中国にかけて広く分布している（水産庁研究部 1986）。本資料では、北海道日本海からオホーツク海沿岸に分布するマガレイを評価単位として扱い、「マガレイ北海道北部系群」と呼称する。漁獲量の集計範囲は沖合底びき網漁業の中海区北海道日本海およびオコック沿岸ならびに沿岸漁業の積丹からウトロまでとした。本資源には、日本海北部で産卵されたものが、そこで着底し一生を過ごす群（日本海育ち群）と、オホーツク海へ運ばれて着底し、そこで未成魚期を過ごした後、成熟の進行に伴い日本海北部へ産卵回遊する群（オホーツク海育ち群）が存在する（加賀・菅間 1965、菅間 1967、下田ほか 2006）。

本資源では、これまで資源量指標値や漁獲量を用いて資源の水準と動向を判断し、その水準に基づいて経験的な漁獲管理規則が提案されてきた（千葉ほか 2022a）。一方、北海道立総合研究機構（以下、道総研）は、本資源に対して VPA によって資源量を推定している（中央水産試験場・稚内水産試験場・網走水産試験場 2022）。令和 4 年度の資源評価報告書では、道総研の VPA の結果を資源量絶対値の事前情報として用いることで、余剰生産モデルによる資源量絶対値を用いた資源評価が行われた（千葉ほか 2023）。また、令和 4 年 12 月には本資源の管理基準値等に関する研究機関会議が開催され、目標管理基準値として余剰生産量が最大になる際の資源量 B_{msy} が提案されたが（千葉ほか 2022b）、その後の検討によって計算手法の改善があったため、本研究機関会議では改めて目標管理基準値を提案するとともに、限界管理基準値等の漁獲管理規則を提案する。

2. 使用するデータセットおよび計算方法

本資源の目標管理基準値等の検討には「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を使用して実施した。本資源では余剰生産モデルによる資源評価が行われているため、同指針の 1C 資源での解析方法に従い、余剰生産量曲線から最大持続生産量（MSY）を実現する資源量（ B_{msy} ）を推定し目標管理基準値案とした。また、限界管理基準値案は資源評価期間における過去の最低資源量（ B_{min} ）、禁漁水準案は資源量 0 トンとした。これらの管理基準値案を提案する理由は後述する。1C 資源では基本指針に明確な漁獲管理規則が定義されておらず、管理戦略評価（MSE）によって不確実性に対して頑健性が確かめられた漁獲管理規則を提案すべきとされている。そのため、将来予測シミュレーションを用いて漁獲管理規則案を検討するにあたり、対象とする資源の資源量推定の不確実性やデータ取得から資源評価・ABC 計算に至るプロセスの不確実性等を再現した MSE の枠組みを採用することで、本資源で想定される様々な不確実性に対する漁獲管理規則の頑健性を検討した。

余剰生産モデルには R パッケージ SPiCT（コミット番号 cdf3f5c）を、管理基準値案の計算および将来予測には R パッケージ frapmr（コミット番号 9a14e86）を用いた。本資源の資源評価では、プロダクションモデルガイドライン（FRA-SA2022-ABCWG02-07）に基づき、余剰生産曲線の形を定める形状パラメータと内的自然増加率に事前情報を与えない Model0、標準偏差 1 で広い事前分布を与えた Model1 および標準偏差 0.5 で狭い事前分布

を与えた Model2 を基本モデルとして採用している（千葉ほか 2023）。本資料では各種数値の代表値および信頼区間を示しているが、これらは3つのモデルの結果を統合して算出したものである。具体的には、3つのモデルごとに推定パラメータの精度を示す分散共分散行列（精度行列）を分散成分とした多変量正規分布から複数のパラメータセットをランダムに生成し、中央値、5パーセンタイル値、および95パーセンタイル値を3つのモデルを合わせて算出した。中央値は資源を代表する値として代表値、また、5パーセンタイル値、および95パーセンタイル値は資源評価の不確実性の程度を表す数値として、ここでは90%信頼区間（将来予測期間では90%予測区間）と呼ぶ。管理基準値の計算での繰り返し計算数（パラメータセット数）は、3つのモデルで10,000回ずつの合計30,000回とした。将来予測でも資源評価の推定パラメータの不確実性を反映させるため、管理基準値の計算と同様に繰り返し計算分だけ生成したパラメータセットに基づき将来（15年）の資源動態をシミュレートした。その際、過去の資源動態もパラメータセットごとに個々に再現することで、将来予測開始時点（直近年2021年漁期）の資源量にも不確実性の範囲内のばらつきを与えた。将来予測での繰り返し計算数は3つのモデルで1,000回ずつの合計3,000回とした。将来の漁獲は、2022年漁期は現状の漁獲圧（F2021）で仮定した。2023年以降は繰り返し計算ごとに毎年余剰生産モデルに基づく資源量・管理基準値の再計算を行い、漁獲管理規則案に当てはめて算出される漁獲量で漁獲を行った。MSEの計算方法の概要は補足資料1および2に、またMSEの枠組みの詳細や、いくつかの設定に關する感度分析の結果をFRA-SA2023-BRP03-101に示した。

データセット	基礎情報、関係調査等
漁獲量、資源量、漁獲圧等の推定パラメータとその精度行列	令和4(2022)年度 マガレイ北海道北部系群の資源評価(水産庁・水産機構)

3. 管理基準値案と漁獲管理規則案

3-1) 余剰生産モデルでの資源評価結果の概要

本資源では状態空間余剰生産モデル（SPiCT）を用いた資源評価を行っている（千葉ほか 2023）。資源評価の3つの基本モデルを統合した代表値によると、資源量は2007年漁期に11千トンのピークを記録した後、2014年漁期には3.9千トンまで減少した。その後は増加の傾向が見られて2018年漁期には8.7千トンまで増加し、直近年（2021年漁期）は6.9千トン（90%信頼区間は4.3千～11千トン、以下同様）となった。モデル毎の結果によると、2007年漁期の資源量はModel0で10千トン、Model1およびModel2で11千トン、2014年漁期はModel0で3.8千トン、Model1で3.9千トン、Model2で4.0千トン、2018年漁期にはModel0で8.6千トン、Model1で8.7千トン、Model2で8.9千トン、直近年（2021年漁期）の資源量はModel0で6.8千トン（4.2千～11千トン）、Model1で6.9千トン（4.2千～11千トン）、Model2で7.0千トン（4.3千～11千トン）となった。

3-2) 最大持続生産量を実現する資源量および環境収容力

本資源の資源評価にて推定された余剰生産モデルのパラメータ値をモデル毎に表 1 に示す。推定された内的自然増加率 r は Model0 で 1.6 (0.72~3.8)、Model1 で 1.15 (0.53~3.0)、Model2 で 0.86 (0.48~1.6) である。環境収容力 K は Model0 で 10 千トン (6.9 千~15 千トン)、Model1 で 11 千トン (7.4 千~16 千トン)、Model2 で 12 千トン (8.4 千~18 千トン) である。余剰生産曲線の形を定める形状パラメータ n は Model0 で 3.1 (1.2~7.6)、Model1 で 2.1 (0.81~5.8)、Model2 で 1.6 (0.86~3.1) である。余剰生産量が最大になる際の資源量 (最大持続生産量 MSY を実現する資源量 B_{msy}) は Model0 で 5.4 千トン (3.5 千~8.4 千トン)、Model1 で 5.2 千トン (3.3 千~7.9 千トン)、Model2 で 5.3 千トン (3.5 千~7.9 千トン) と推定される (図 1)。

3-3) 管理基準値案と禁漁水準案

限界管理基準値案は、資源評価にコホート解析を用いている 1A 資源に準ずると MSY の 60%を実現する資源量 ($B_{0.6msy}$) が候補となり得るが、本資源における $B_{0.6msy}$ は資源評価期間に推定されたことのある過去の最低資源量 (B_{min}) を大きく下回る外挿値となるため (補足図 2)、資源量が $B_{0.6msy}$ を下回った場合に漁獲圧を引き下げても十分な資源回復が望めない可能性がある。限界管理基準値を B_{min} とすることで、資源量が過去最低値を下回った場合には、漁獲圧を引き下げて迅速に資源回復を促すことが期待できる。同様に禁漁水準案は、1A 資源に準ずると MSY の 10%を実現する資源量 ($B_{0.1msy}$) が候補となり得るが、 $B_{0.1msy}$ の B_{msy} に対する比は 0.05 と非常に小さく、提案する漁獲管理規則の下では将来にわたり資源量が $B_{0.1msy}$ を下回る確率が非常に低いと予測されているため、禁漁水準を 0 トンとした。

以上を踏まえ、目標管理基準値には令和 4 年度研究機関会議 (千葉ほか 2022b) で提案したものと同様に、 MSY を実現するときの資源量 (B_{msy}) を提案する。また、限界管理基準値には資源評価期間における過去最低の資源量 (B_{min})、禁漁水準には 0 トンを提案する。これらの水準に対応する資源量は、令和 4 年度の資源評価で得られた 3 つの余剰生産モデル (Model0、Model1 および Model2) の推定結果に基づく統合した代表値 (詳細は 2 節または補足資料) であり、毎年資源評価によって更新される。令和 4 年度の資源評価から得られた代表値は、目標管理基準値案である B_{msy} は 5.3 千トン (90%信頼区間は 3.5 千~8.1 千トン)、限界管理基準値案である B_{min} は 3.8 千トン (2.3 千~6.1 千トン) である。これらの基準値案について、環境収容力 (K) に対する比、対応する漁獲圧、その漁獲圧の下で期待される漁獲量、その漁獲圧の現状の漁獲圧に対する比などを表 2 に示した。目標管理基準値として提案する B_{msy} は環境収容力の 49%に相当し、その資源量において期待できる漁獲量 (MSY) は 2.7 千トン (2.2 千~3.3 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_{2021}) は 2.8 (1.9~4.4) である。限界管理基準値として提案する B_{min} は環境収容力の 35%である。

3-4) 神戸プロット

目標管理基準値案である B_{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 2 に示す。3 つの基本モデルを統合した結果によると、現状の資源量（2021 年漁期の資源量）は目標管理基準値案 B_{msy} を上回っているが、90%信頼区間の一部で B_{msy} を下回った。一方で、現状の漁獲圧（2021 年漁期の漁獲圧）は 90%信頼区間を含めて F_{msy} を下回っていると判断される。近年 5 年間（2017～2021 年漁期）の資源量は横ばいである。

現状の資源量に対する管理基準値案の比は、目標管理基準値案である B_{msy} で 0.77（90%信頼区間は 0.56～1.0）、限界管理基準値案である B_{min} で 0.55（0.43～0.69）であり、現状の資源量はいずれの管理基準値案も上回っている。

3-5) 漁獲管理規則案

本資料で提案する漁獲管理規則は、「令和 4（2022）年度 漁獲管理規則および ABC 算出のための基本指針（FRA-SA2022-ABCWG02-01）」の 1A 資源の漁獲管理規則に準じ、限界管理基準値案および禁漁水準案となる資源量を閾値として漁獲管理の基礎となる漁獲圧（ F ）を変えるルールであり、資源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。 F 値の上限は F_{msy} に調整係数 β を乗じたものである。限界管理基準値案に B_{min} 、禁漁水準案に 0 トンを用いた場合の漁獲管理規則案における資源量と漁獲圧の関係を図 3 に示す。次節の 3-6) で後述する理由から β には 0.7 を用いた。

この漁獲管理規則を、対象とする資源管理年の予測資源量に適用することで資源管理年の ABC が算出される。本資源では、ABC を算出する際の予測資源量は資源評価にてデータがある年から 2 年後まで前進計算して求めた資源量になる。ABC の算出のための前進計算は、資源評価で用いた Model0、Model1 および Model2 の 3 つのモデルのそれぞれについて行う。その際、資源量の自然変動の不確実性は考慮せず（決定論的前進計算）、予測年の前年の漁獲は現状の漁獲圧（前々年の F ）で仮定する。本計算プロセスは後述する将来予測と併せて実施するため、前々年の F の不確実性は繰り返し計算により考慮する。それぞれの繰り返し計算において、Model0、Model1 および Model2 の 3 つのモデルで漁獲管理規則から算出した ABC の平均値を算出し、その代表値を資源管理年の ABC として扱う。

3-6) 漁獲管理規則案に基づく資源の将来予測

本資料の将来予測では、過去に推定された資源動態やパラメータの不確実性を考慮するため、繰り返し計算毎に再生成したパラメータセットごとに異なる資源動態をシミュレートしている（補足資料 2）。また、将来においても余剰生産モデルを毎年データにあてはめて資源評価を更新するプロセスを再現するため、将来予測では年ごと・繰り返し計算ごとに 3-5) で記述した漁獲管理規則に基づく ABC 計算を模したプロセスを実行して、将来予測における漁獲量を算出している。すなわち将来予測でも資源評価と同様に、前々年までにデータとして得られた漁獲量および資源量指標値を用いて余剰生産モデル（SPiCT）での資源計算と 2 年分の前進計算を行っている。この ABC 計算を模したプロセスでは、漁獲管理規則案で用いられる限界管理基準値や MSY に相当する漁獲圧（ F_{msy} ）も資源計算

の結果に基づき更新する。2 年分の前進計算では資源量の自然変動に誤差を与えず、漁獲量は ABC 数量に相当する漁獲圧で仮定している。このプロセスで算出された漁獲量を年ごと・繰り返し計算ごとに与えたときの将来予測を、漁獲管理規則案に基づき漁獲した場合の将来予測としている。2021 年漁期の漁獲圧は資源評価で推定された漁獲圧、2022 年漁期の漁獲量は 2021 年漁期の漁獲圧を仮定し、漁獲管理規則による管理は 2023 年漁期から開始するとした。なお、将来予測では、この ABC 計算を模したプロセスでの前進計算と異なり、繰り返し計算毎に過程誤差に基づき資源量に自然変動を与えた。また、比較のため、将来予測を現状の漁獲圧（2021 年漁期）で漁獲した場合の結果も合わせて示した。このときの漁獲圧は上記のような SPiCT による繰り返し計算は実施していない。

漁獲管理規則案（図 3）の調整係数 β を 0.7 とした場合および現状の漁獲圧（2021 年漁期）で漁獲した場合の将来の資源量（B）、漁獲圧（F）および漁獲量（C）の推移を予測した結果を図 4 に示す。漁獲管理規則案で漁獲した場合、漁獲量については管理開始年の資源量が B_{msy} を上回る水準にあった上で漁獲圧が βF_{msy} まで大きく増加するため、管理開始年の 1 年だけ急激に増加した。しかしその翌年以降、管理開始年の漁獲によって資源量が B_{msy} 付近まで減少したため、漁獲量の中央値は MSY 水準付近まで減少して推移した。漁獲量の 90% 予測区間は管理開始の 2023 年漁期から 2030 年漁期にかけて下側に大きく広がり、その後は狭まる傾向で推移した。資源量は管理開始の翌年（2024 年漁期）に大きく減少するが予測値の中央値は目標管理基準値を上回る水準で推移した。資源量の 90% 予測区間の一部は、目標管理基準値および限界管理基準値を下回ると予測された。漁獲圧（F）は管理開始年に βF_{msy} まで大きく上昇するが、将来予測における ABC 計算を模したプロセスでおこる誤差（SPiCT による資源量等の推定誤差、資源量の前進計算の誤差）のため F は一定ではなく変動が生じている。特に 2030 年漁期頃までの管理開始直後は変動が比較的大きく 90% 予測区間も上側に広がる傾向があった。

漁獲管理規則案（図 3）の調整係数 β を 0.5 から 1 まで 0.1 刻みで変えた場合の将来予測について、資源量が目標管理基準値案を上回る確率を表 3 に、限界管理基準値案を上回る確率を表 4 に示した。また、1A 資源での標準的な限界管理基準値に相当する $B_{0.6msy}$ を上回る確率を表 5 に示した。資源量および漁獲量の中央値の年推移は表 6～7 に示した。それぞれの図表には、現状の漁獲圧（F2021）で漁獲を継続した場合の結果も比較のため示した。また、 MSY の 10～90% を実現する資源量および B_{min} の各水準について、資源量が漁獲管理規則案での漁獲開始から 10 年間（2023～2033 年漁期）で一度でも下回る確率を表 8 に示した。

本資源の資源量は 2021 年漁期時点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 年漁期には、 β が 1.0 であっても 53% の確率で目標管理基準値案以上に資源量を維持できると予測された（表 3）。ただし、資源量の予測区間が非常に広いため、 β が 1.0 の場合でも 2033 年漁期に資源量が限界管理基準値案を上回る確率は 73%、つまり限界管理基準値案を下回る確率が 27%（表 4）となり、10 年間で一度でも限界管理基準値案を下回る確率も 64% となることから（表 8）、 β を 1.0 とした場合に資

源量が限界管理基準値案である過去最低資源量を下回る可能性が高い。さらに、1A 資源で標準的に使用されている限界管理基準値に相当する $B_{0.6msy}$ を一度でも下回る確率も 25% と高く、資源の持続性へのリスクが大きいことも示された。そのため、本資源については、2033 年漁期の目標達成確率を 50%以上とする基準だけではなく、資源の持続性という観点から限界管理基準値案を下回るリスクをできるだけ小さくするための基準も考慮した漁獲管理規則の選択が望ましい。本資源の直近の資源状態は良好と評価されるが、上記のリスクを抑えるための閾値として、研究機関会議では 2033 年漁期に限界管理基準値案を上回る確率を 90%以上、10 年に一度でも限界管理基準値案を下回る確率を 30%未満にすることを漁獲管理規則として推奨する基準とした。 β を 0.7 とした場合、2033 年漁期に限界管理基準値案を上回る確率は 91%、10 年に一度でも限界管理基準値案を下回る確率は 28%となり、 $B_{0.6msy}$ を一度でも下回る確率も 7%と低い。以上のことから、目標達成に加え、資源量が過去最低資源量を一定以下に抑えるための β として 0.7 以下を推奨する。また、短期的な漁獲量は β を小さくすると少なくなるが、中長期的な漁獲量（2028～2032 年漁期の予測漁獲量）は β が 0.7 であれば 1.0～0.8 の場合との差は 1 割（200～300 トン）程度であると予測された（表 7）。

なお、1A 資源で標準的に使用されている禁漁水準に相当する $B_{0.1msy}$ を一度でも下回る確率は、 β が 0.6 から 1.0 の場合に 1%であった。また、現状の漁獲圧で漁獲を継続した場合には、2033 年漁期の資源量が目標管理基準値案を上回る確率は 95%であった。ただし、現状の漁獲圧のもとでの漁獲シナリオでは将来の漁獲圧を一定と仮定しているため、予測区間の広さは過小評価されている点に注意が必要である。

4. まとめ

本資源では、資源評価で使用した余剰生産モデルの推定結果に基づき、余剰生産量が最大になる資源量を最大持続生産量が実現される資源量として目標管理基準値とすることを提案する。限界管理基準値案には過去最低資源量を提案する。禁漁水準案は 0 トンとする。目標管理基準値案および限界管理基準値案の水準に相当する資源量は最新の資源評価の結果から、目標管理基準値である B_{msy} は 5.3 千トン（90%信頼区間は 3.5 千～8.1 千トン）、限界管理基準値である B_{min} は 3.8 千トン（90%信頼区間は 2.3 千～6.1 千トン）と推定されている。

管理基準値や資源量推定の不確実性を考慮した将来予測においては、漁獲管理規則の調整係数 β が 1 であっても 2033 年漁期に 50%以上の確率で資源量が B_{msy} を上回ることが示された。しかし、将来予測における資源量の予測区間は非常に広いため、50%以上の確率で B_{msy} を上回ったとしても、2033 年漁期に限界管理基準値案を上回る確率は 73%に留まり、今後 10 年の間に一度でも限界管理基準値案を下回る確率が 64%にもなることも示された。本資源では、資源の持続性という観点から資源量が限界管理基準値を下回るリスクを十分に考慮した漁獲管理規則の選択が望まれるため、漁獲管理規則に適用する β には 0.7 以下を推奨する。例えば $\beta=0.7$ であれば、2033 年漁期に限界管理基準値を上回る確率は 91%にまで到達し、10 年の間に一度でも限界管理基準値案を下回る確率は 28%となる。

5. 今後の検討事項

本資源の資源評価は商業漁業の情報に大きく依存しているが、本資源を対象とした漁業は長期的に漁獲努力量が減少している。その一方で、市場の需要に合わせて本資源を狙った操業も行われており、商業漁業による情報から資源状態を推定することが困難な状況にある。今後も商業漁業の情報収集に努めることに加えて、商業漁業とは独立した調査船等による情報収集をすすめることが重要になると考えられる。余剰生産モデルを用いた資源量推定は令和4年度からの試みとなり、その結果をもとにした将来予測は本年度からの初の試みとなる。事前分布の仮定や推定パラメータ、各種設定の妥当性の検討、基本モデルの絞り込みなど、今後、余剰生産モデルと将来予測の手法の改善と結果の精査を継続的に行っていく必要がある。特に、資源量の絶対値の規模については道総研の資源量推定結果を事前分布として用いていることから、この事前分布の仮定の精度の向上と今後の継続的な利用が必要である。

6. 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.
- 千葉 悟・石野光弘・境 磨・濱津友紀 (2022) 令和3(2021)年度マガレイ北海道北部系群の資源評価. 令和3年度我が国周辺の漁業資源評価, 水産庁, 水産研究・教育機構, 22 pp. FRA-SA2021-RC09-11. <https://abchan.fra.go.jp/digests2021/details/202170.pdf> (last accessed 2022/11/24)
- 千葉 悟・佐藤隆太・森田晶子・境 磨・濱津友紀 (2022b) 令和4(2022)年度マガレイ北海道北部系群の管理基準値等に関する研究機関会議資料. 令和4年度我が国周辺の漁業資源評価, 水産庁, 水産研究・教育機構, 7 pp. FRA-SA2022-BRP10-02. https://www.fra.affrc.go.jp/shigen_hyoka/SCmeeting/2019-1/20221128/FRA-SA2022-BRP10-02.pdf(last accessed 2023/5/17)
- 千葉 悟・佐藤隆太・森田晶子・境 磨・濱津友紀 (2023) 令和4(2022)年度マガレイ北海道北部系群の資源評価. 令和4年度我が国周辺の漁業資源評価, 水産庁, 水産研究・教育機構, 37 pp. FFRA-SA2022-SC08-02. https://abchan.fra.go.jp/wpt/wp-content/uploads/2022/details_2022_70-Magarei-HN.pdf (last accessed 2023/4/30)
- 中央水産試験場・稚内水産試験場・網走水産試験場 (2022) マガレイ (石狩湾以北日本海～オホーツク海海域). 2022年度北海道周辺海域における主要魚種の資源評価書, 北海道立総合研究機構水産研究本部, 1-12.
- 市野川桃子・宮川光代・濱邊昂平・平尾 章 (2022) 状態空間プロダクションモデルの我が国資源への適用のためのガイドライン. FRA-SA2022-ABCWG02-07.
- 加賀吉栄・菅間慧一 (1965) 石狩湾におけるマガレイの生活とその資源. 北水試月報, 22, 50-57.
- 下田和孝・板谷和彦・室岡瑞恵 (2006) 北海道北部産マガレイ耳石輪紋径に基づく「育ち群」判別, 第1報 漁獲物の1～3歳における「育ち群」. 北水試研報, 71, 55-62.
- 菅間慧一 (1967) 北部日本海のマガレイの生活について. 北水試月報, 24, 57-78.

水産庁研究部 (1986) 底びき網漁業資源. ブループリント, 234 pp.

(執筆者：千葉 悟、佐藤隆太、森田晶子、境 磨、市野川桃子、濱津友紀)

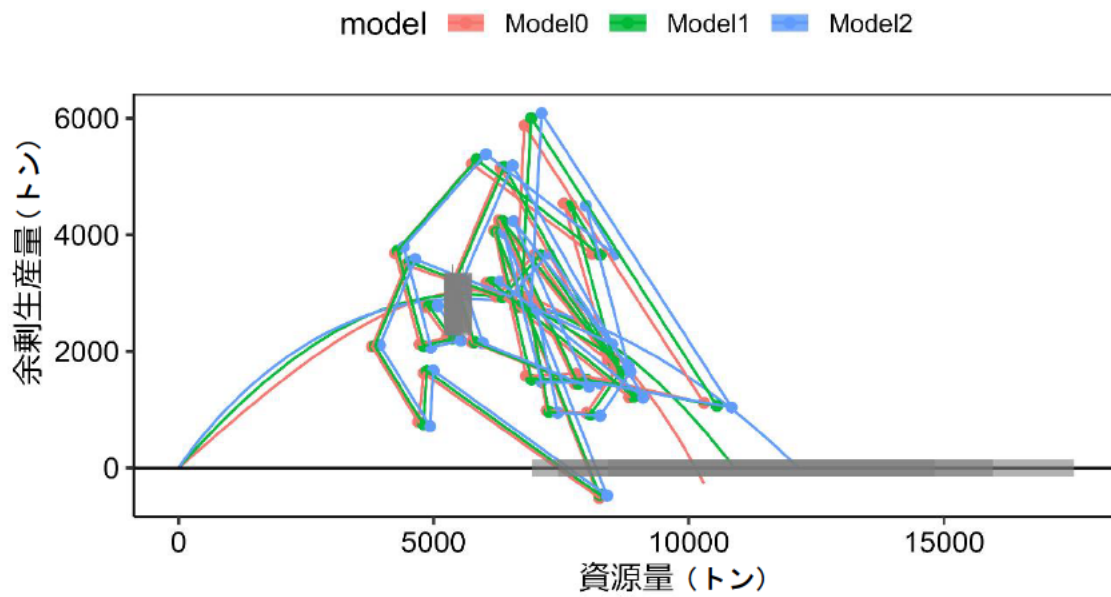


図 1. 資源量に対する余剰生産量の関係（余剰生産量曲線）

灰色の網掛けは環境収容力（K）の Model0、Model1、Model2 からの推定値の 90%信頼区間。余剰生産量曲線にも信頼区間があるがここでは省略した。

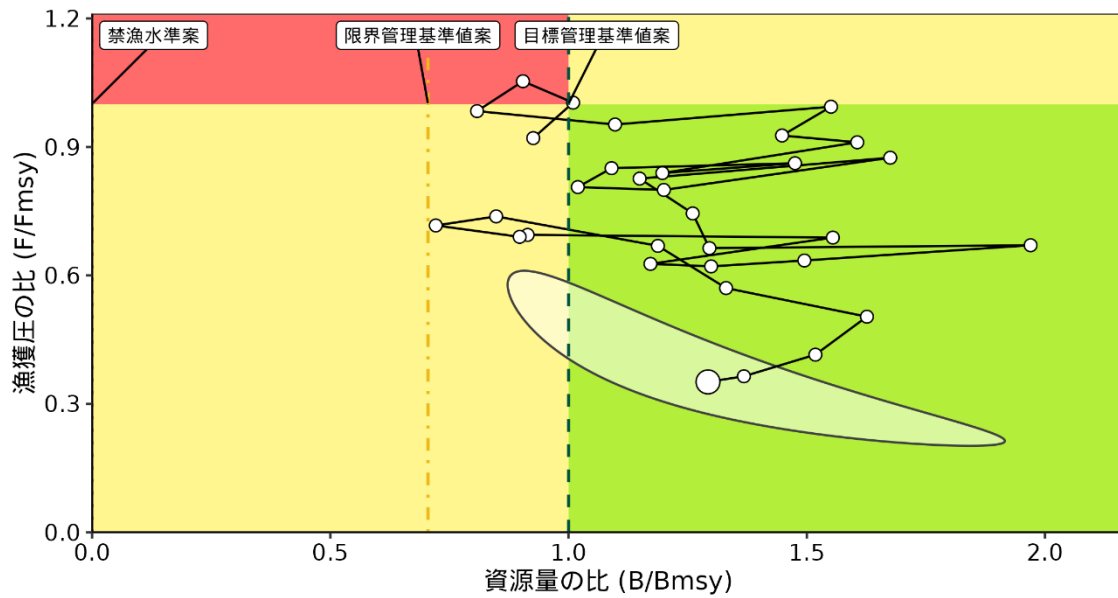
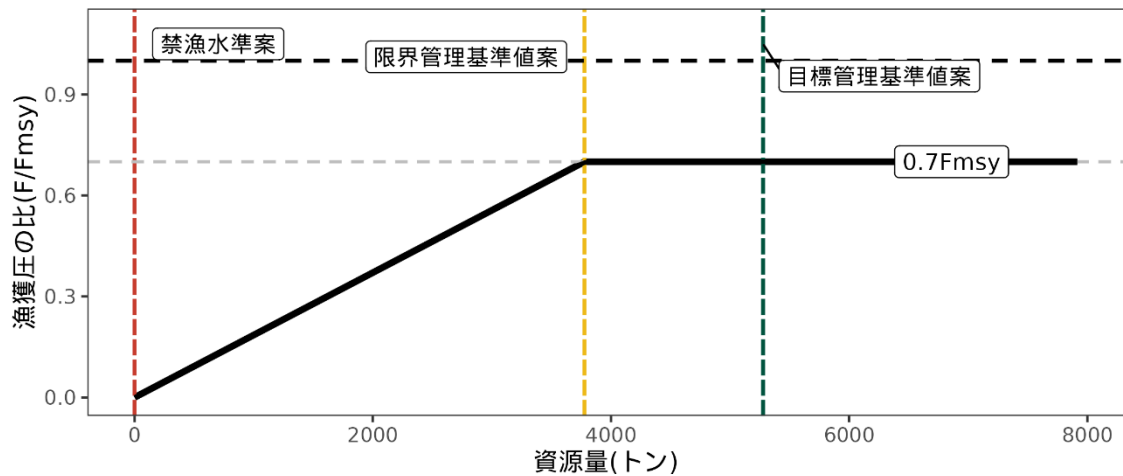


図 2. 神戸プロット

余剰生産モデルにおいて、3つの基本モデルを統合した結果を示した。全てのモデルで q_1 に平均値 1、標準偏差 0.4 の事前分布を設定した。図中の大きな丸印が直近年（2021 年漁期）の資源状態を示す。網掛けの楕円は 2021 年漁期の資源状態の 90%信頼区間を示す。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 B_{msy} 、 B_{min} 、資源量 0 トンを用いた。本図における B_{min} の位置は代表値を示したものである。

a) 縦軸を漁獲圧にした場合



b) 縦軸を漁獲量にした場合

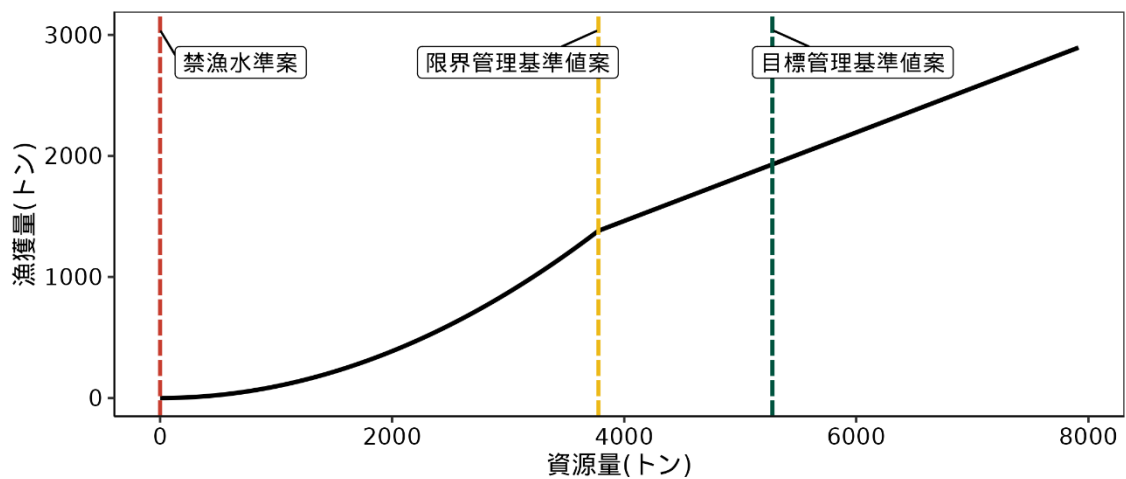


図 3. 漁獲管理規則案

目標管理基準値案は余剰生産モデルに基づき算出した B_{msy} である。限界管理基準値案および禁漁水準案には、提案する値（すなわち、限界管理基準値は資源評価期間の過去資源量の最低値 (B_{min})、禁漁水準には資源量 0 トン）を用いている。調整係数 β には 0.7 を用いた。黒破線は F_{msy} 、灰色破線は $0.7F_{msy}$ 、黒太線は漁獲管理規則、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。

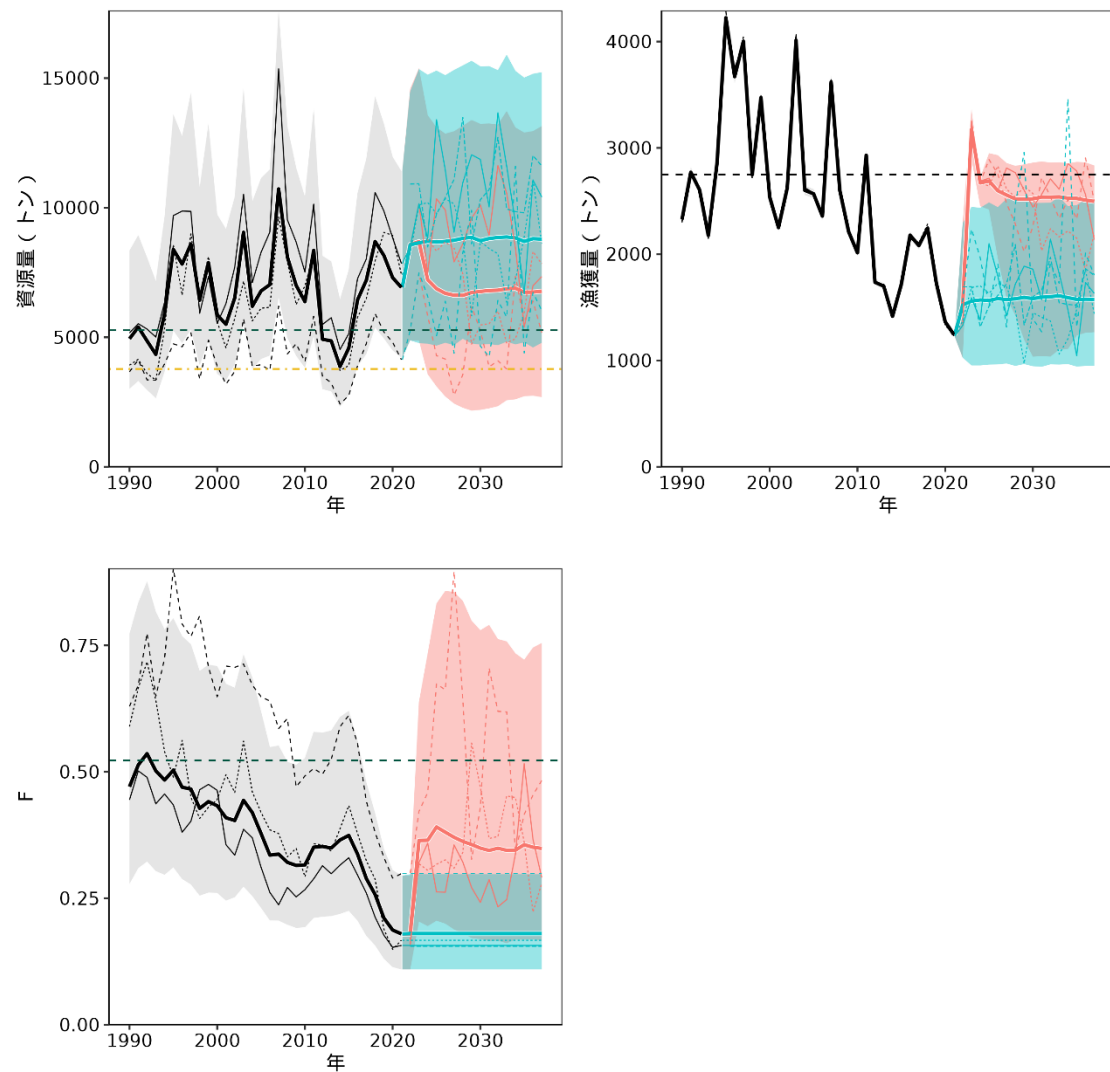


図 4. 余剰生産モデルで推定されたパラメータと漁獲管理規則案に基づいて予測された将来の資源量、漁獲圧および漁獲量
 青色の太い実線と網掛けは現状の漁獲圧 (F_{2021}) で、赤色の太い実線と網掛けは調整係数 $\beta=0.7$ の漁獲管理規則案で漁獲した場合の予測された値の中央値と 90% 予測区間、黒の太い実線と灰色の網掛けは 2021 年漁期以前の推定された値の中央値と 90% 信頼区間、各色の細い線は反復計算の結果の例示である。緑色の破線は目標管理基準値案を達成する水準、黄色の一点鎖線は限界管理基準値案の水準、漁獲量のパネルに示された黒色の破線は MSY 水準を示す。

表 1. 余剰生産モデルから推定されたパラメータ

モデル	Model 0			Model 1			Model 2		
事前分布 の設定	・形状パラメータおよび内的自然増加率に 事前分布を仮定しない ・ q_1 の平均値に 1 を狭い事前分布 (SD=0.2)で仮定した			・形状パラメータの平均値に $n=2$ 、内的自然 増加率の平均値に $r=0.593$ をそれぞれ広 い事前分布 (SD=1) で仮定した ・ q_1 の平均値に 1 を狭い事前分布 (SD=0.2)で仮定した			・形状パラメータの平均値に $n=2$ 、内的自然 増加率の平均値に $r=0.593$ をそれぞれ狭 い事前分布 (SD=0.5) で仮定した ・ q_1 の平均値に 1 を狭い事前分布 (SD=0.2)で仮定した		
	下限 5%	推定値	上限 5%	下限 5%	推定値	上限 5%	下限 5%	推定値	上限 5%
r	0.72	1.6	3.8	0.53	1.2	3.0	0.48	0.86	1.6
K	6900	10000	15000	7400	11000	16000	8400	12000	18000
$\ln(q_1)$	-1.1	-0.65	-0.19	-1.1	-0.66	-0.20	-1.2	-0.69	-0.23
$\ln(q_2)$	-9.3	-8.8	-8.4	-9.3	-8.9	-8.4	-9.3	-8.9	-8.4
n	1.2	3.1	7.6	0.81	2.1	5.8	0.86	1.6	3.1
σ_B	0.17	0.22	0.28	0.17	0.22	0.28	0.17	0.22	0.28
σ_F	0.080	0.12	0.17	0.080	0.12	0.17	0.081	0.12	0.17
σ_{I1}	0.18	0.24	0.32	0.18	0.24	0.32	0.18	0.24	0.32
σ_{I2}	0.12	0.17	0.23	0.12	0.16	0.23	0.12	0.16	0.23
B_{msy}	3500	5400	8400	3300	5200	7900	3500	5300	7900
B_{2021}	4200	6800	11000	4200	6900	11000	4300	7000	11000
B_{2021}/B_{msy}	0.98	1.3	1.7	0.99	1.3	1.8	0.94	1.3	1.9
F_{msy}	0.32	0.50	0.77	0.34	0.53	0.82	0.34	0.52	0.78
F_{2021}	0.11	0.18	0.29	0.11	0.18	0.29	0.11	0.18	0.29
F_{2021}/F_{msy}	0.25	0.37	0.53	0.23	0.34	0.52	0.22	0.34	0.54
MSY	2200	2700	3300	2200	2700	3300	2200	2700	3300

全てのモデルで q_1 に平均値 1、標準偏差 0.3 の事前分布を設定した。

本資源では、基本モデルとした 3 つのモデルで n が 1 を上回ったため、 B_{msy} 、 F_{msy} および MSY について資源動態の過程誤差を考慮する確率論的な計算によって算出した。

各数値は有効数字 2 桁として四捨五入した。

表 2. 目標管理基準値案、限界管理基準値案、および禁漁水準案

管理基準値案	資源量 (千トン)	環境収容力 に対する比	漁獲圧	期待できる 漁獲量(千トン)	現状の漁獲圧 に対する比
目標管理基準値案 (Bmsy)	5.3 (3.5～8.1)	0.49 (0.35～0.65)	0.51 (0.33～0.79)	2.7 (2.2～3.3)	2.8 (1.9～4.4)
限界管理基準値案 (Bmin)	3.8 (2.3～6.1)	0.35 (0.24～0.47)	0.64 (0.40～0.98)	2.5 (1.7～3.2)	3.6 (2.4～5.0)
禁漁水準案	0	0	—	0	—

余剰生産モデルの結果に基づき、各管理基準値案における、対応する資源量（Bmsy）、環境収容力（K）に対する比、対応する漁獲圧（Fmsy）、対応する漁獲圧の下で期待される漁獲量（MSY）、対応する漁獲圧の現状の漁獲圧に対する比（Fmsy/F2021）を示す。表に示した値は、3つの基本モデルによる推定結果から 30,000 回の繰り返し計算数分だけパラメータセットを再生成して算出した値の中央値を代表値として、5 パーセンタイル値と 95 パーセンタイル値を 90%信頼区間として示した。

表 3. 将来の資源量が目標管理基準値案を上回る確率 (%)

β	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
1.0	96	96	68	57	47	45	47	49	51	52	52	53	52	50	49
0.9	96	96	74	64	56	54	55	57	58	60	60	61	60	59	58
0.8	96	96	80	72	66	63	64	65	66	67	68	69	67	68	67
0.7	96	96	85	80	75	73	74	74	75	75	76	77	76	76	76
0.6	96	96	88	86	84	82	82	83	83	82	84	84	83	83	83
0.5	96	96	92	91	90	89	89	90	89	89	90	90	89	90	89
現状のF	96	95	96	95	95	95	96	95	94	95	95	95	95	95	95

表 4. 将来の資源量が限界管理基準値案を上回る確率 (%)

β	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
1.0	100	99	92	81	70	67	66	68	70	71	72	73	73	71	71
0.9	100	99	94	86	78	74	74	75	77	77	78	80	79	79	79
0.8	100	99	95	91	86	83	82	83	84	84	85	86	86	85	86
0.7	100	99	97	94	92	90	89	89	89	89	90	91	91	91	91
0.6	100	99	98	97	96	95	94	94	94	93	94	95	94	95	95
0.5	100	99	98	98	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97
現状のF	100	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99

表 5. 将来の資源量が B0.6msy を上回る確率 (%)

β	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
1.0	100	100	99	97	93	89	88	87	87	89	90	91	90	90	91
0.9	100	100	99	98	96	92	91	91	91	92	93	93	93	93	93
0.8	100	100	99	99	97	96	94	94	94	94	94	95	95	95	95
0.7	100	100	99	99	98	98	97	96	96	96	96	97	97	97	98
0.6	100	100	99	99	99	99	98	98	98	98	98	98	98	98	98
0.5	100	100	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99
現状のF	100	100	99	100	99	100	100	100	99	99	100	99	100	100	100

表 6. 将来の資源量中央値の推移 (千トン)

β	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
1.0	8.6	8.7	6.2	5.6	5.1	4.9	5.0	5.2	5.2	5.3	5.2	5.3	5.3	5.1	5.1
0.9	8.6	8.7	6.5	6.0	5.6	5.4	5.5	5.7	5.7	5.8	5.8	5.9	5.8	5.7	5.6
0.8	8.6	8.7	6.8	6.4	6.1	6.0	6.1	6.2	6.2	6.3	6.3	6.4	6.4	6.2	6.2
0.7	8.6	8.7	7.2	6.9	6.7	6.6	6.6	6.7	6.8	6.8	6.8	6.9	6.9	6.7	6.7
0.6	8.6	8.7	7.6	7.4	7.2	7.2	7.2	7.3	7.3	7.3	7.4	7.4	7.4	7.3	7.3
0.5	8.6	8.7	8.0	7.9	7.8	7.8	7.9	7.9	7.8	7.9	7.9	8.0	7.9	7.8	7.9
現状のF	8.6	8.6	8.7	8.7	8.7	8.7	8.8	8.9	8.7	8.8	8.9	8.9	8.8	8.7	8.8

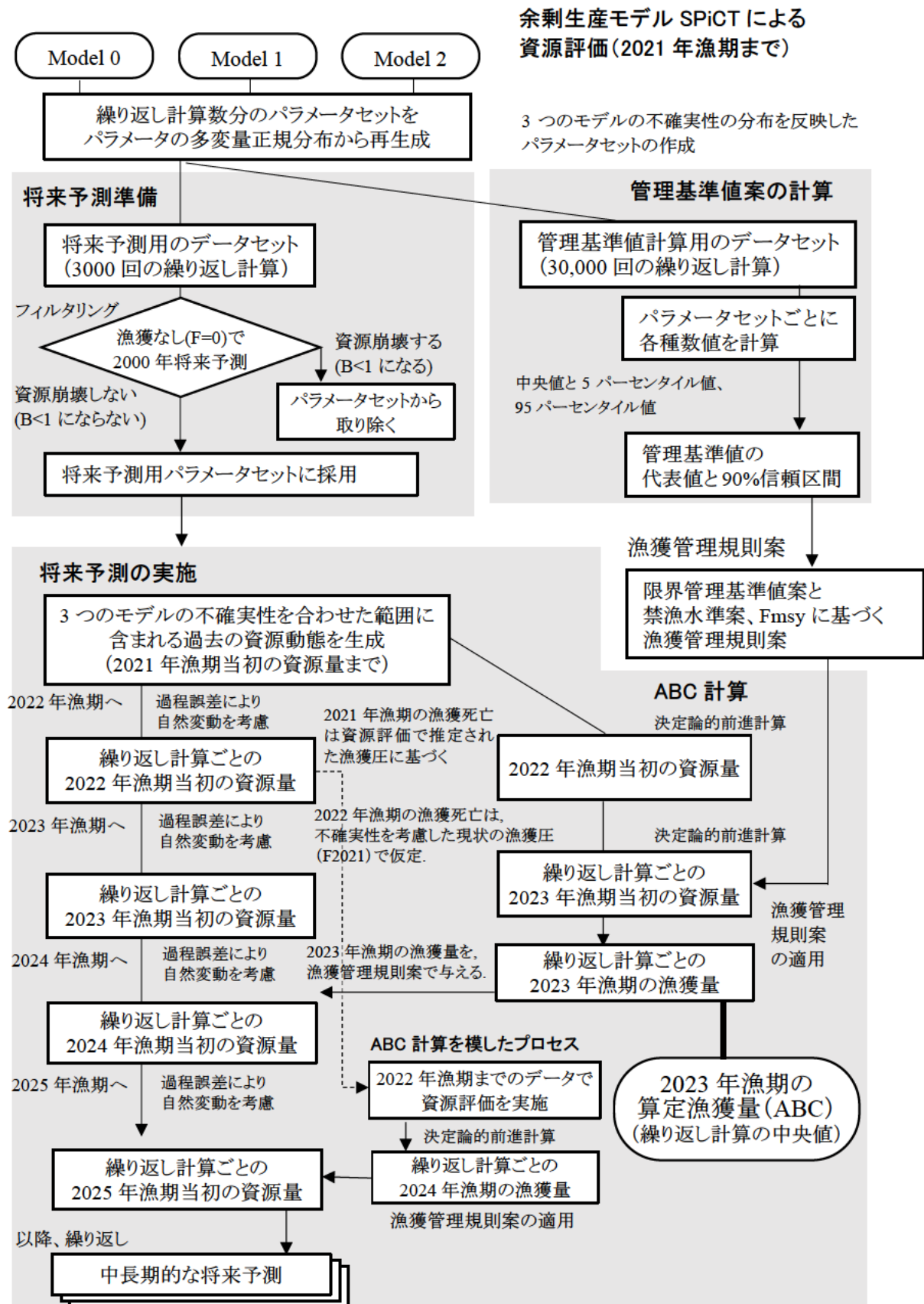
表 7. 将来の漁獲量中央値の推移 (千トン)

β	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
1.0	1.5	4.5	3.3	3.3	2.9	2.8	2.6	2.6	2.7	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.7
0.9	1.5	4.1	3.1	3.1	2.9	2.8	2.6	2.7	2.7	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.7
0.8	1.5	3.6	2.9	2.9	2.8	2.7	2.6	2.6	2.6	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.6
0.7	1.5	3.2	2.7	2.7	2.6	2.6	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
0.6	1.5	2.7	2.4	2.4	2.4	2.4	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
0.5	1.5	2.3	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
現状のF	1.5	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6

表 8. 予測される資源量・漁獲量と資源量が管理基準値案を上回る確率および 10 年間に一度でも起きる確率のまとめ

β	10年後の 目標達成 確率	予測資源量の中央値 (千トン)		予測漁獲量の中央値 (千トン)			資源量が水準を下回るリスク (10年間に1度でも起きる確率)						
	資源量が 目標管理 基準値案 を上回る	5年後	10年後	1年目	2～5年目 平均	6～10年目 平均	B0 1msy	B0 2msy	B0 6msy	B0 7msy	B0 8msy	B0 9msy	Bmin
		2028年 漁期	2033年 漁期	2023年 漁期	2024～ 2027年 漁期	2028～ 2032年 漁期							
1 0	53%	5 0	5 3	4 5	3 0	2 7	1%	4%	25%	33%	43%	56%	64%
0 9	61%	5 5	5 9	4 1	2 9	2 7	1%	3%	18%	24%	32%	44%	54%
0 8	69%	6 1	6 4	3 6	2 8	2 6	1%	2%	12%	17%	23%	33%	40%
0 7	77%	6 6	6 9	3 2	2 6	2 5	1%	1%	7%	10%	14%	22%	28%
0 6	84%	7 2	7 4	2 7	2 4	2 3	1%	1%	4%	5%	8%	14%	17%
0 5	90%	7 9	8 0	2 3	2 1	2 1	0%	1%	2%	3%	4%	8%	10%

補足資料 1. 解析の流れ



補足資料 2. 計算方法

本補足資料では、管理戦略評価・将来予測の方法およびモデル別の結果について紹介する。方法の詳細やいくつかの設定に対する感度分析の結果は別文書 FRA-SA2023-BR03-101 に示した。

(1) 管理基準値案算出および将来予測用のデータセットの準備

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）を用いた資源解析に基づき資源状態を評価している（千葉ほか 2023）。本資料で目標管理基準値として提案する最大持続生産量を実現する資源量（Bmsy）や、漁獲管理規則案での漁獲圧の上限となる Fmsy は、基本的には SPiCT での推定値に基づく。SPiCT の基本式およびパラメータを以下に示す。

状態モデル

SPiCT では、直接観察されない資源量の時間変化（状態モデル）を以下のように表している。

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

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。 $\sigma_B B_t dW_t$ は過程誤差であり、 σ_B は過程誤差の標準偏差、 W_t はブラウン運動である。 n は余剰生産曲線の形を規定する形状パラメータであり、その値が大きいくほど環境収容力に対する Bmsy（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 $bfrac$ も間接的に求められる。決定論的 ($\sigma_B=0$) な個体群動態のもとでは、(5) 式の通り m は最大持続生産量 MSY の値に相当する。また、決定論的な Bmsy および Fmsy はそれぞれ以下の (6) 式および (7) 式で表される。

$$MSY^d = m \quad (5)$$

$$B_{msy}^d = n^{1/(1-n)} K \quad (6)$$

$$F_{msy}^d = m / B_{msy} \quad (7)$$

一方、確率論的な MSY、Bmsy、および Fmsy はそれぞれ以下の (8) (9) (10) 式で表される。

$$MSY^s = MSY^d \left(1 - \frac{n/2}{1 - (1 - F_{msy}^d)^2 \sigma_B^2} \right) \quad (8)$$

$$B_{msy}^s = B_{msy}^d \left(1 - \frac{1 + F_{msy}^d(n-2)/2}{F_{msy}^d - (2 - F_{msy}^d)^2 \sigma_B^2} \right) \quad (9)$$

$$F_{msy}^s = F_{msy}^d - \frac{(n-1)(1 - F_{msy}^d)}{(2 - F_{msy}^d)^2} \sigma_B^2 \quad (10)$$

形状パラメータ n が 1 を下回る場合は確率論的な MSY 、 B_{msy} 、および F_{msy} の推定値は不安定になるとされているため、Pedersen and Berg (2017) に従い、 $n > 1$ の場合には確率論的な値を、 $0 < n \leq 1$ の場合には決定論的な値を用いている。

SPiCT では、季節的な漁獲のプロセスを以下の (11) (12) 式でモデル化しており、1 年を細かく区切った計算が可能であるが、本資源では 1 年に 1 つの漁獲・指標値のデータを用いており、季節的な情報をモデルに取り入れていない。

$$F_t = S_t G_t \quad (11)$$

$$d \log G_t = \sigma_F dV_t \quad (12)$$

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。本資源では $S_t = 1$ としており、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ている（千葉ほか 2023）。

観測モデル

SPiCT での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。

$$\log(I_{t,i}) = \log(q_i B_t) + e_{t,i} \quad (13)$$

$$e_{t,i} \sim N(0, \sigma_{I,i}^2) \quad (14)$$

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。本資源の資源評価では指標値 I_1 として北海道立総合研究機構による VPA での 1989～2020 年漁期の資源重量の推定結果（中央水産試験場・稚内水産試験場・網走水産試験場 2022）を補正した残存資源量を、指標値 I_2 として日本海およびオホーツク海における北海道根拠の沖合底びき網漁業（かけまわし漁法）の 2000～2021 年漁期の標準化 CPUE（FRA-SA2022-SC08-201）を用いている（千葉ほか 2023）。

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 (15) (16) 式で推定できる。

$$\log(C_t) = \log\left(\int_t^{t+\Delta} F_s B_s ds\right) + \epsilon_t \quad (15)$$

$$\epsilon_t \sim N(0, \sigma_C^2) \quad (16)$$

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の誤差は無視できるほど小さい（ $\sigma_C = 0.01$ で固定）としている。

資源評価での推定パラメータ

SPiCT では余剰生産モデルのパラメータはベイズ推定の一種である罰則付き最尤法で推定する。本資源では、 n 、 m 、 K 、 q_i 、 B_t 、 F_t 、 σ_B 、 $\sigma_{I,i}$ 、 σ_F を推定している。内的自然増加率 r は n 、 m 、および K が推定されることで下式 (17) により得られる。

$$r = m \left(\frac{K}{n/(n-1)} \right)^{-1} \quad (17)$$

資源評価では、パラメータ推定の事前情報として形状パラメータおよび内的自然増加率に事前分布を与えない Model0、形状パラメータで $n=2$ 、内的自然増加率で $r=0.593$ を、広い事前分布（標準偏差 1）として与えた Model 1 と、狭い事前分布（標準偏差 0.5）として与えた Model 2 を基本モデルとして、それらの解析結果に基づき資源状態を評価している。なお、VPA に基づく指標値 I_1 は資源量絶対値の情報を持つと考えられることから、漁獲効率 q_1 には平均値を 1、標準偏差を 0.4 とする事前分布をあたえている（千葉ほか 2023）。資源評価でのパラメータ推定の結果は表 1 に示した。

基本モデルの結果の統合

資源評価に採用した 3 つの基本モデルの結果を統合するため、それぞれのモデルで推定パラメータの分散共分散行列を作成し、パラメータ間の相関を考慮したパラメータセットの再生成を行った。具体的には、固定効果のパラメータである n 、 m 、 K 、 σ_B 、 σ_C 、 σ_F 、 $\sigma_{I,1}$ 、 $\sigma_{I,2}$ 、 q_1 、 q_2 と、ランダム効果のパラメータである 1990～2021 年漁期の B および F の対数値からなるパラメータの組み合わせについて、多変量正規分布から繰り返し計算分だけランダムに生成することで、それぞれのモデルでの推定の不確実性の範囲に含まれる資源動態とそのパラメータセットを得た。本資料では、3 つの基本モデルで生成した繰り返し計算数分のパラメータセットでの中央値、5 パーセンタイル値、および 95 パーセンタイル値から、代表値および 90% 区間を求めている。繰り返し計算数は、管理基準値案の計算には 30,000 回、将来予測には 3,000 回とした。また、図 2 に示した神戸プロットは、資源評価の 3 つの基本モデル (Model0、Model 1 および Model 2) の結果を合わせたものである。基本モデル毎に色分けした神戸プロットを補足図 1 に示す。

(2) 管理基準値案の算出

再生成したパラメータセットのうち n 、 m 、 K と、これらから (17) 式で算出される r 、および σ_B により、 F_{msy} 、 B_{msy} および MSY を繰り返し計算分だけ (5) ～ (10) 式に基づき求めた。比較のため、 MSY の 10～90% を実現する資源量 ($B_{0.1msy}$ 、 $B_{0.2msy}$ 、 $B_{0.3msy}$ 、 $B_{0.4msy}$ 、 $B_{0.5msy}$ 、 $B_{0.6msy}$ 、 $B_{0.7msy}$ 、 $B_{0.8msy}$ 、 $B_{0.9msy}$) についても繰り返し計算毎に求めた。これらの資源量は、それぞれ一定の F_t および B_t の下では平衡状態の資源量 ($E(B_\infty|F_t)$) が以下の (18) 式で近似できること (Pedersen and Berg 2017)、および (19) 式に示される漁獲量と資源量および漁獲圧の一般的な関係に基づき、 C_t が MSY の $X\%$ となる漁獲量の場合の漁獲圧 F_t および平衡状態の資源量 ($E(B_\infty|F_t)$) として探索的に求めた。

$$E(B_\infty|F_t) = K \left(1 - \frac{(n-1)}{n} \left(\frac{F_t}{F_{msy}^d} \right) \right)^{1/(n-1)} \cdot \left(1 - \frac{n/2}{1 - (1 - n \cdot F_{msy}^d + (n-1)F_t)^2} \sigma_B^2 \right) \quad (18)$$

$$C_t = B_t \cdot F_t \quad (19)$$

ただし、 $n < 1$ の場合には $\sigma_B = 0$ としたときの式を用いた。また、資源評価期間の最低資源量 (B_{min}) についても、繰り返し計算毎に求めた。これらの数値について、繰り返し計算の中央値を代表値として、5 パーセンタイル値、および 95 パーセンタイル値から求めた 90%信頼区間と合わせて資料中および補足図 2 に示した。

(3) 将来予測

繰り返し計算毎に、多変量正規分布から再生成したパラメータセットに基づく資源動態を用いて将来予測を行った。将来予測での前進計算では、余剰生産や漁獲死亡は Pedersen and Berg (2017) に従い Lamperti 変換した (20) 式を用いて考慮した。

$$dZ_t = \left(\gamma \frac{m}{K} - \gamma \frac{m}{K} \left[\frac{\exp(Z_t)}{K} \right]^{n-1} - F_t \right) dt \quad (20)$$

ここで、 Z_t は $\ln(B_t)$ である。また、 F_t は将来予測において漁獲管理規則案等で定められる漁獲量 C_t とその時の資源量 B_t により求められる。前進計算では資源量の自然変動も過程誤差 σ_B により与えられるため、翌年漁期の資源量 B_{t+1} は (21) 式となる。

$$B_{t+1} = \exp(Z_t + dZ_t) \exp(\varepsilon_t) \quad (21)$$

なお、 $\varepsilon_t \sim N(-0.5\sigma_B^2, \sigma_B^2)$ である。繰り返し計算毎に再生成した r 、 K 、 n 、 σ_B と、これらにより (3) (4) 式で算出した γ と m により、上記の資源動態が定まる。

将来予測に資源評価の不確実性を考慮するため、将来予測の開始時点の資源状態（資源量や漁獲圧）についても、繰り返し計算毎に再生成した値を用いた。多変量正規分布から生成されるパラメータセットには極端な資源動態を示すものもある。そのため、まず繰り返し計算毎に漁獲が無い場合 ($F=0$) の将来予測を 2000 年間行い、漁獲が無いにもかかわらず資源が崩壊する ($B < 1$) 資源動態を示したパラメータの組み合わせを、将来予測での繰り返し計算で使用するパラメータセットから除外した。将来予測用に再生成したパラメータセットの分布を補足図 3 に示す。将来予測で使用するパラメータセットから除外された組み合わせでは、 r と n がいずれも高い傾向がある（補足図 4）。

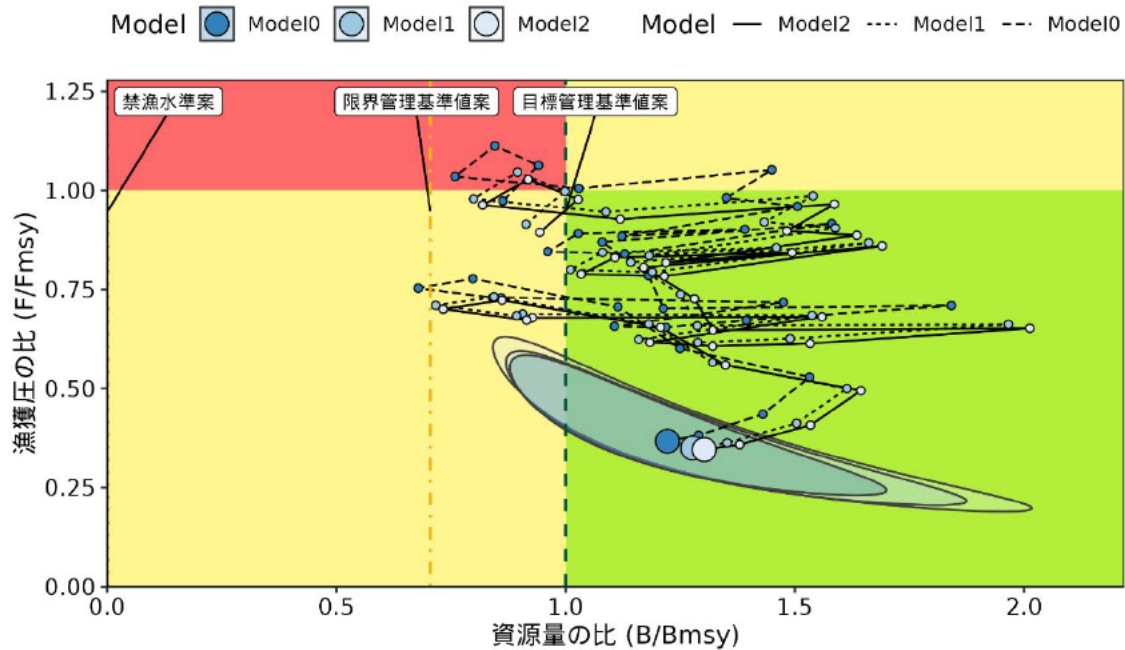
将来的に漁獲管理規則に基づき漁獲量 (ABC) が定められる場合、その漁獲量となる年 (ABC 年) の前々年までの漁獲量および資源量指標値を用いて資源評価を行い、さらに 2 年分の前進計算により得た ABC 年の資源量を漁獲管理規則に当てはめることで漁獲量 (ABC) が算定される。本資料では、この ABC 計算を模したプロセスも将来予測の中に組み込むことで、将来の資源評価の不確実性も考慮した。すなわち、将来予測の各年において、繰り返し計算毎に、前々年までの漁獲量と資源量指標値を入力データとした SPiCT の資源量推定 ((1) ~ (14) 式を使用) と、2 年間の前進計算 ((20) (21) 式を使用、ただし過程誤差は仮定しない) を行い、得られた資源量を漁獲管理規則に当てはめて将来予測における漁獲量を定めた。このとき使用する資源評価期間 (1990~2021 年漁期) の漁獲量については観測誤差が極めて小さいため ($\sigma_c=0.01$) 繰り返し計算ごとにほぼ変わらない。資源評価期間の資源量指標値については観測値を用いた。将来予測期間の漁獲量および資源量指標値はともに繰り返し計算毎に異なる予測値となる。漁獲量は ABC 計算を模したプロセスで算出された値を使用し、資源量指標値は (13) (14) 式に基づき、予測される各年の資源量 (B_i) と漁獲効率 q_i およびランダムな観測誤差 $e_{t,i}$ (標準偏差は $\sigma_{t,i}$) により求めた。この ABC 計算を模したプロセスでは、前進計算では過程誤差による資源量の自然変

動は与えていない ($\sigma_B=0$)。また、初回の漁獲管理規則での漁獲量の算定時（すなわち 2023 年漁期の漁獲量算定時）を除き、前進計算時に与える漁獲死亡はそれぞれの繰り返し計算毎に漁獲管理規則で算出された各年の漁獲量とした。初回の漁獲管理規則での漁獲量の算定時は、2021 年漁期の漁獲死亡は実際の漁獲量から与えた。2022 年漁期の漁獲死亡は 2021 年漁期の漁獲圧 (F2021) で仮定した。なお前述の通り、F2021 は繰り返し計算毎に再生成した値である。

将来予測における各年の資源量は、上記の ABC 計算を模したプロセスで予測された漁獲量から (20) (21) 式に基づき繰り返し計算毎に算出した。その際、算出される漁獲圧 F が非現実的に大きくなるように、各年の F の上限を F_{msy} の 2 倍とする制約を与えた。また、将来において状態空間モデルを繰り返しあてはめて推定を行う際、モデルが収束せずに ABC 計算ができない場合には前年に計算された ABC と同じ値をその年の ABC として用いるとした。本資料の表 6~7 に示した将来の資源量および漁獲量の代表値は、この将来予測の繰り返し計算で得られた値の中央値である。また、図 4 に示した将来予測の各種数値の 90% 予測区間は、繰り返し計算で得られた値の 5 パーセンタイル値および 95 パーセンタイル値から求めた。これらは資源評価の 3 つの基本モデル (Model0、Model 1 および Model 2) から推定されたパラメータに基づいて生成された OM タイプ 1、OM タイプ 2 および OM タイプ 3 の結果を合わせたものである。OM タイプ毎に色分けした将来予測結果を補足図 5 に示す。これによると OM タイプの違いによる資源量や漁獲圧、漁獲量および過程誤差に対する違いは中央値および 90% 区間ともに大きくないが、OM タイプ 1 では漁獲圧で 90% 信頼区間が上側に、漁獲量では下側に広い傾向が見られた。

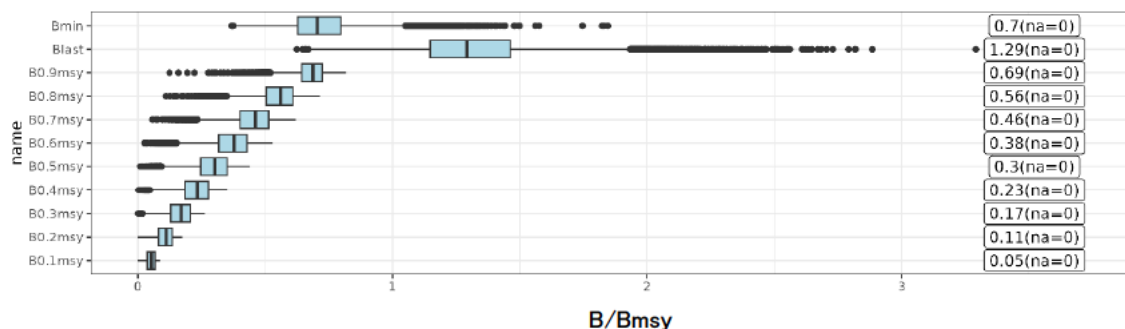
引用文献

- 千葉 悟・佐藤隆太・森田晶子・境 磨・濱津友紀 (2023) 令和 4 (2022) 年度マガレイ北海道北部系群の資源評価. 令和 4 年度我が国周辺の漁業資源評価, 水産庁, 水産研究・教育機構, 37 pp. FRA-SA2022-SC08-01. https://abchan.fra.go.jp/wpt/wp-content/uploads/2022/details_2022_70-Magarei-HN.pdf (last accessed 2023/4/30)
- Pedersen, M. W., & Berg, C. W. (2017) A stochastic surplus production model in continuous time. *Fish and Fisheries*, 18, 226-243.



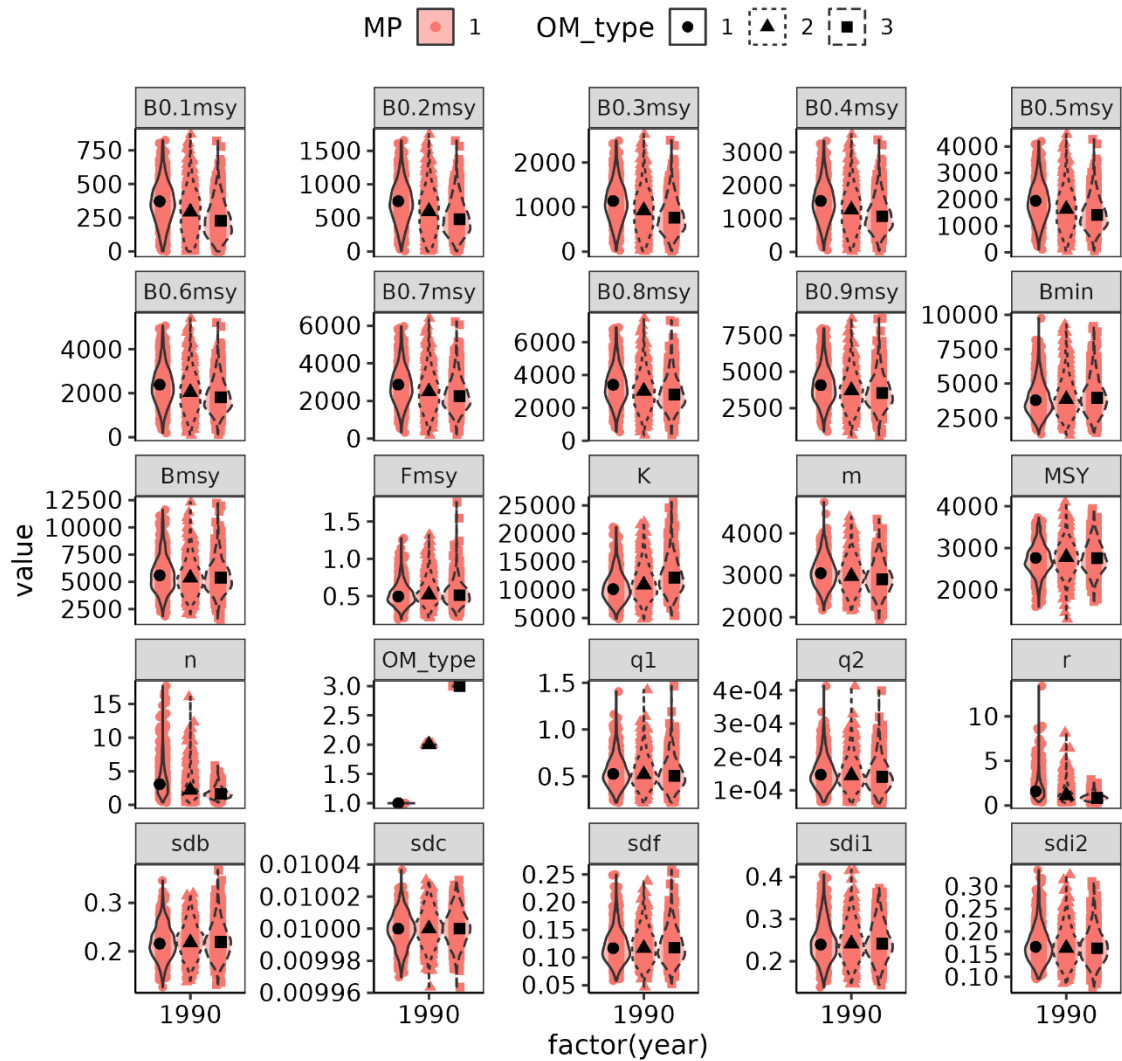
補足図1 3つの基本モデル別の神戸プロット

余剰生産モデルにおいて、形状パラメータと内的自然増加率に事前分布を仮定しない Model0、形状パラメータの事前分布の平均値に2、内的自然増加率の事前分布の平均値に0.593を、それぞれ標準偏差を0.1として与えた Model1 および同じ事前分布の平均値で標準偏差を0.5として与えた Model2 の結果を示した。全てのモデルで q_1 に平均値1、標準偏差0.4の事前分布を設定した。図中の大きな丸印が直近年（2021年漁期）の資源状態を示す。色の着いた楕円は2021年漁期の資源状態のモデル毎の90%信頼区間を示す。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Bmsy、Bmin、資源量0トンを用いた。本図におけるBminの位置は代表値を示したものである。



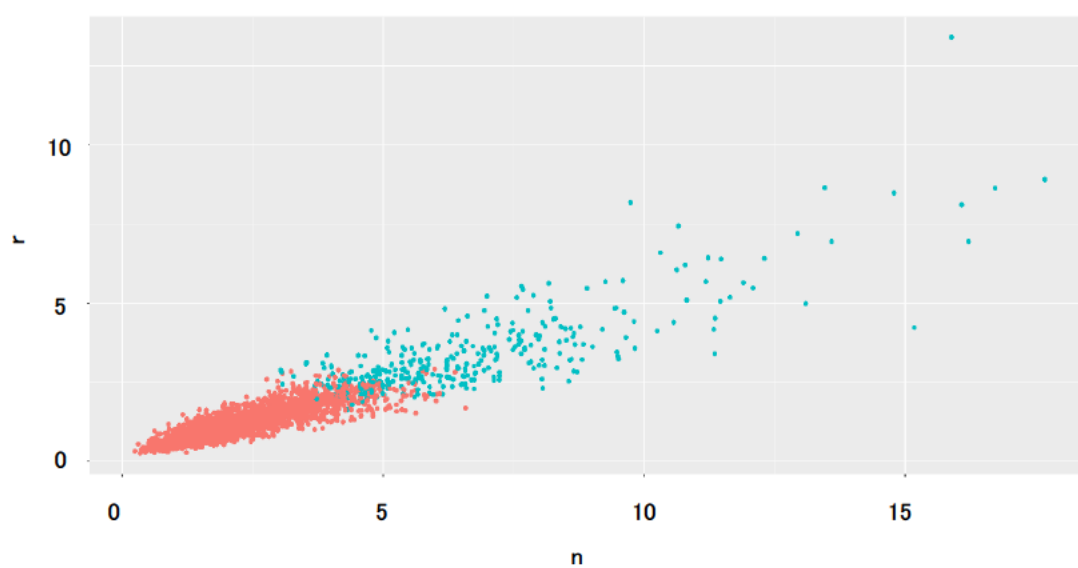
補足図2 管理基準値案の資源量水準

参照水準資源量とBmsyの比を30,000回の繰り返し計算によって算出した。右側のボックス内の数字は各水準のB/Bmsyの中央値、naは計算できなかった試行数を示した。

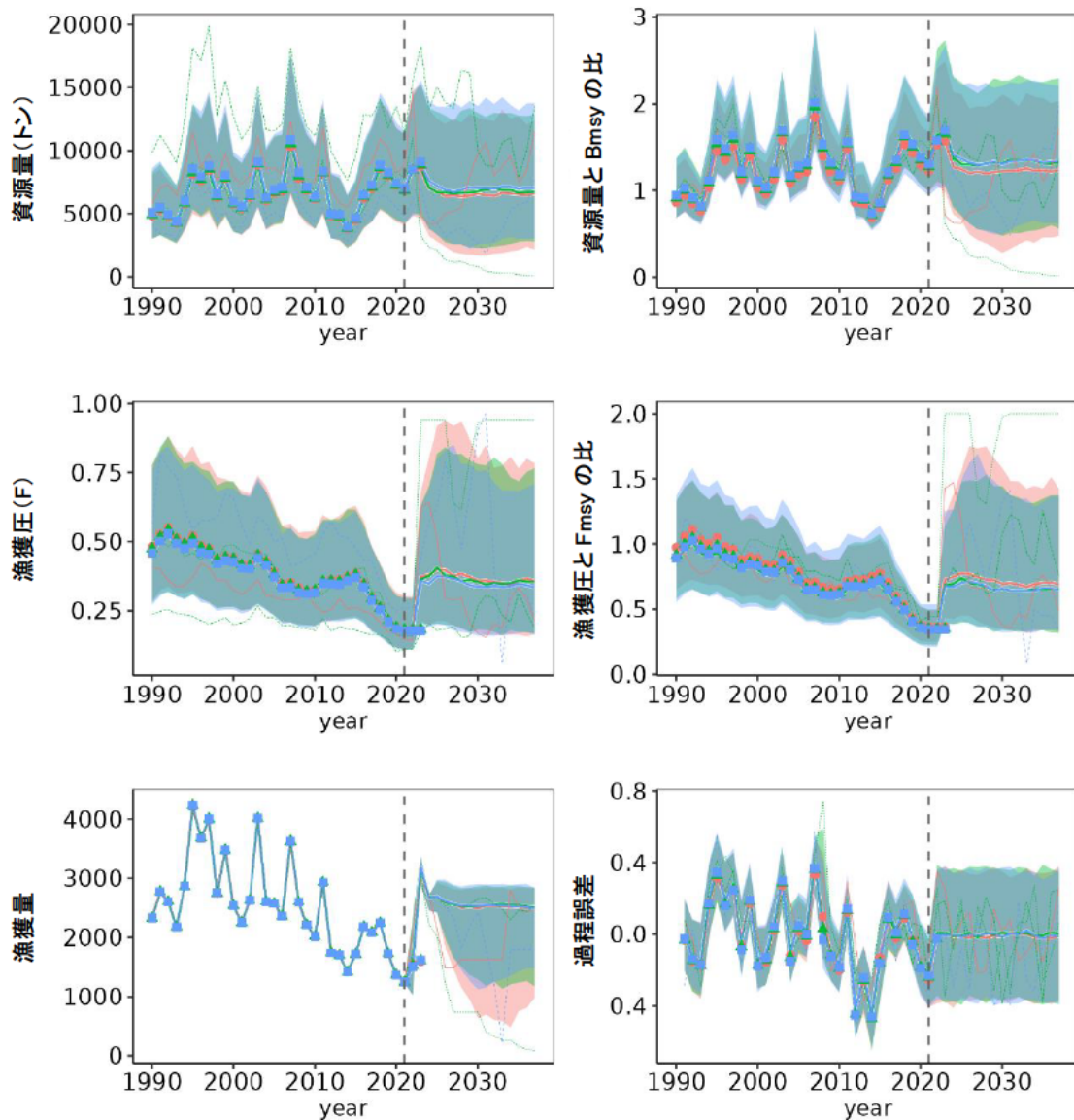


補足図3 将来予測用に再生成したパラメータセットの分布

基本モデルの Model0、Model1 および Model2 はそれぞれ OM_type1、OM_type 2 および OM_type 3 に対応する。



補足図4 将来予測に用いたパラメータセット（赤）とフィルタリングで除外されたパラメータセット（青）の形状パラメータ n と内的自然増加率 r の関係

調整係数 β が 0.7 の場合の結果

補足図 5 余剰生産モデルで推定されたパラメータと漁獲管理規則案に基づいて予測された将来の資源量、資源量と Bmsy の比、漁獲圧、漁獲圧と Fmsy の比、漁獲量および過程誤差

赤色の太い実線と網掛けは資源評価において Model0 で推定されたパラメータから再生成した OM_type1、青色の太い実線と網掛けは同様に Model1 で推定されたパラメータから再生成した OM_type2、緑色の太い実線と網掛けは同様に Model2 で推定されたパラメータから再生成した OM_type3 による、調整係数 $\beta=0.7$ の漁獲管理規則案で漁獲した場合の予測された値の中央値と 90% 区間。各色の細線は反復計算の結果の例示である。