

# 資源評価レビュー報告書

(マダラ本州太平洋北部系群, ソウハチ北海道北部系群)

山川 卓 (東京大学大学院農学生命科学研究科)

2024年11月13日(水), 11月14日(木)に国立研究開発法人水産研究・教育機構の水産資源研究所(横浜市)において, 以下の資源(2魚種2系群)の資源評価に係るピア・レビュー委員会が開催された

- 1) マダラ本州太平洋北部系群
- 2) ソウハチ北海道北部系群

レビューパネルは, 米国海洋大気庁(NOAA)の海外査読者2名と日本の査読者1名(山川)で構成された。委員会では, 各資源評価担当者によるプレゼンテーションが行われるとともに, 事前に各査読者から提出された質問書に対する回答・説明がなされた。加えて, 以上を踏まえた質疑応答が実施された。

以下, これら2系群の資源評価に関するレビュー結果を報告する。

## 【マダラ本州太平洋北部系群】

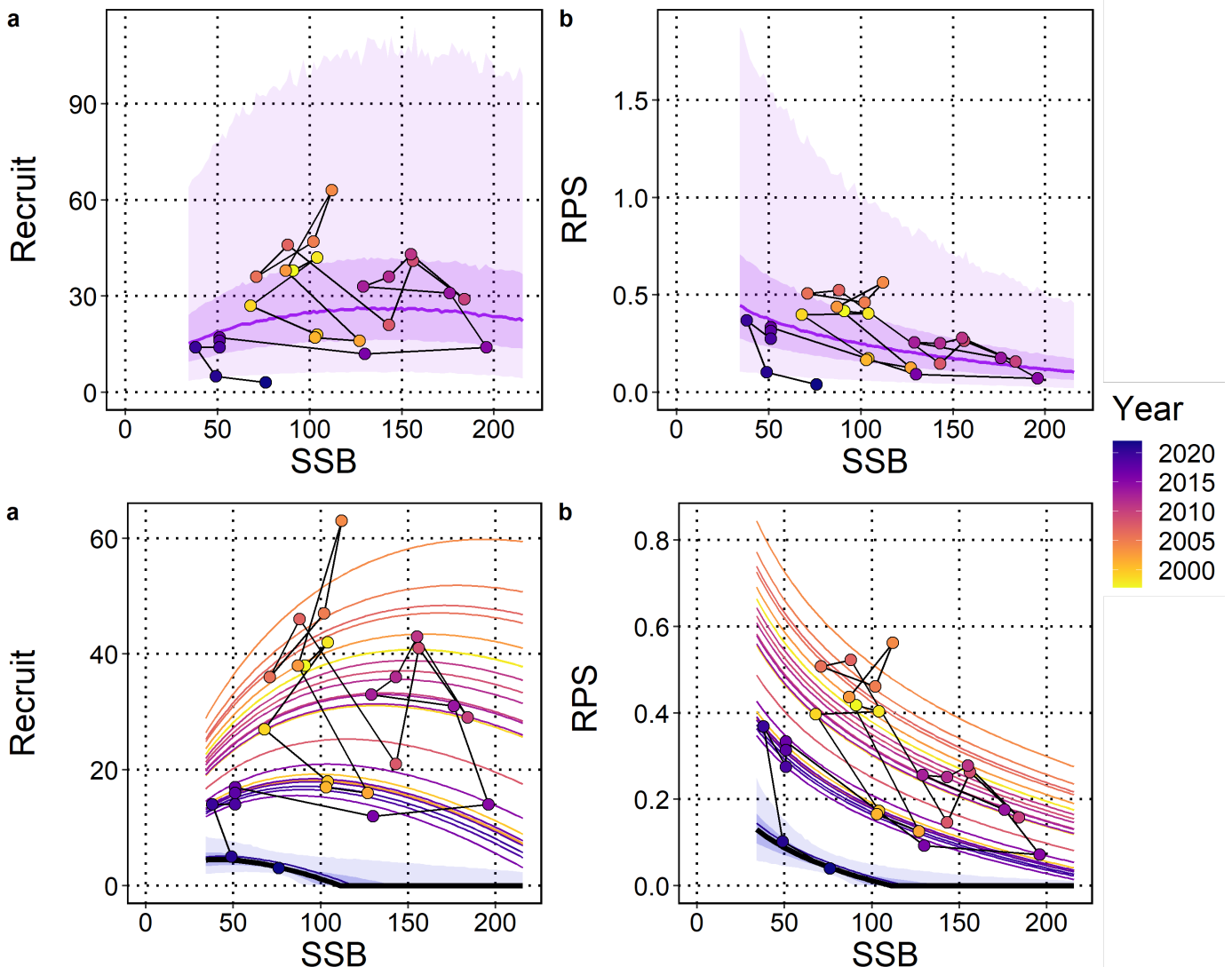
本系群の資源量は2013年をピークとして急激に減少した。本系群の効果的な資源管理を実施していくためには, その原因に関する調査, 解析, 考察を行っていくとともに, 資源の生産力の変化に対応した適切な資源評価の実施および柔軟な資源管理方策の提案を行っていく必要があると考える。本レビューでは主にその点に関連したコメントを記す。

- (1) 資源が急激に減少している原因として, 東日本大震災をきっかけとして資源の生産力に影響を与える各種要因に変化があったことが想定される。補足資料8「震災以降の成長の鈍化と成熟割合の変化」に関連の説明があり, その点については評価できる。そこで考察されているように, 2011年の震災以降に一時的に生じた資源量の急激な増加による密度効果のために成長が鈍化したと考えるのはおそらく妥当であろう。しかし, 補足資料8にも記されているように, マダラの資源水準が低下した以降の近年においても低成長傾向が継続していること, また, それとともに成熟開始年齢に関する晩熟化傾向が続いていることを勘案すると, 他種も含めた生態系全体の変化や環境水準の変化を想定しないと, この現象は説明し難いのではないかと思われるが, いかがであろうか。(ちなみに, 補足資料8の説明文中にある「補足図4-1」「補足図4-2」という表記は, それぞれ, 「補足図8-1」「補足図8-2」の誤植であると思われる。)
- (2) 近年における成長の鈍化および晩熟化に伴って, 再生産曲線から計算される期待値よりも低い加入が2015年以降, 続いている。もし仮に, 成長の鈍化や晩熟化の原因が他種も含めた生態系全体の変化や環境水準の変化だとすると, 今後もそのような傾向が続く可

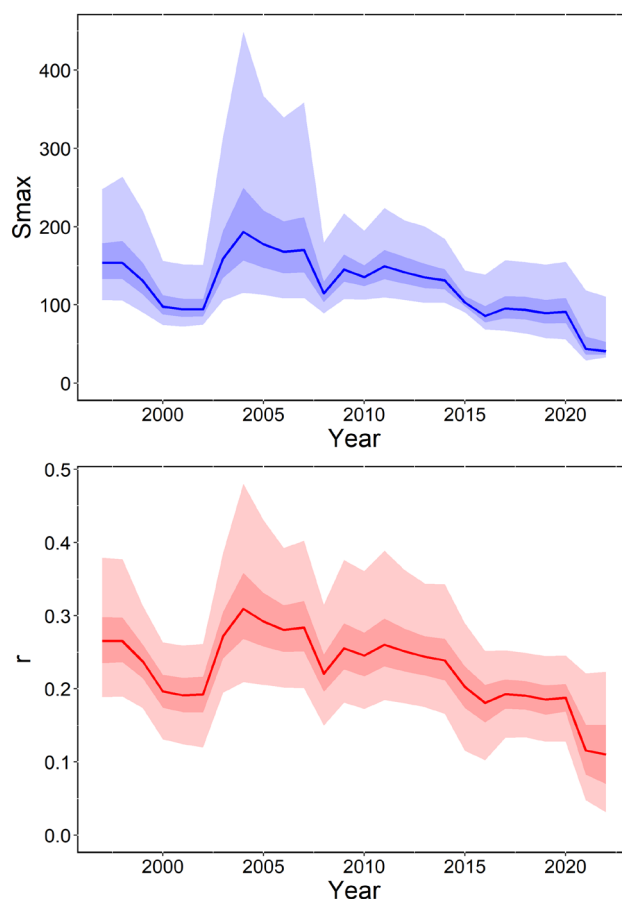
可能性があるかも知れない。その点を勘案すれば、資源評価や今後の資源管理において、再生産関係自体の経年変化や、レジームシフトのような現象を導入したモデルを使用して、管理基準値もそれに合わせて変化するという前提での管理を行うのが妥当ではなかろうか？

将来予測シミュレーションにおいて、再生産関係における加入量の自己相関を前提としたバックワードリサンプリングが行われている点は評価できる。しかし、この手法は、資源の生産力が低下しても環境収容力（および管理基準値）には変化がない、すなわち、再生産関係の縦軸方向の変化（自己相関）はあるが横軸方向（ピークを与える親魚量水準など）には変化がないことを前提としている。このため、資源の生産力が低下した後でも以前と同じ高い管理目標を掲げた管理を目指すこととなり、結果的に、漁業者に過大な漁獲量削減を提案してしまうことになる可能性がある点に注意する必要があるだろう。

例えば、試しに再生産関係モデルのパラメータが経年的に変化すると仮定した「時変パラメータ再生産関係モデル」によって解析を行ってみると、以下のようなになる。この図において、上段が固定パラメータモデル、下段が時変パラメータモデルで、それぞれ、横軸の親魚量（百トン）に対して縦軸に、左図：加入量（千万尾）、右図：親魚あたり加入量（RPS、十万尾/トン）をプロットしてある。



このモデルは、Yang and Yamakawa (2022)による世界の92資源に関するメタ解析の結果、最も妥当性が高いとされたPella-Tomlinson型再生産関係のパラメータを1つ削減したモデル（Gompertz式に基づくFox型余剰生産量モデルと同一の式）を採用している（ただし、本系群ではRicker型再生産関係でもほぼ同様の解析結果が得られる）。時変モデルには、最大加入量を与える親魚量 $S_{max}$ （横軸方向のスケールを調節）の対数値と、資源の生産力にかかるパラメータ $r$ （縦軸方向のスケールを調節）が一定の比率のステップ幅を保ちながらランダムウォークすることで、値が経年変化していくモデルを仮定した。なお、レジームシフトのような急激な変化にも対応できるように、ステップ幅の分布が、裾の重い分布のコーシー分布に従うとした。次の図に、パラメータ $S_{max}$ と $r$ の経年変化を示した。近年における加入の低下傾向が捉えられていることに加えて、2000年前後にも短期間ではあるが加入の低調な年代があったことが伺える。



時変モデルにおいて、最近年の $S_{max}$ におけるRPSは、それ以前の加入が高かった年代の $S_{max}$ におけるRPSよりも低い値である。したがって、最近年の $F_{MSY}$ はそれ以前の $F_{MSY}$ よりもおそらく低い値になると考えられ、漁獲率を引き下げるべきであるという点では固定モデルと同様である。しかし、近年の $S_{max}$ の値の低下にとまって目標管理基

準値を引き下げることになるため、10年後に目標管理基準値を上回る確率は固定モデルよりも高まると考えられる。このため、固定モデルのように安全係数 $\beta$ の値を極端に小さく設定して急激な漁獲量削減を行う必要性が低下し、管理の激変緩和に結び付く可能性があるだろう。

なお、レジームシフトに対する対応として、現状では通常レジームと好適レジームの2つの不連続な年代に分けて評価、管理を実施することが他種の資源で行われているが、再生産関係からは必ずしもそのような2つの不連続な年代に明確に区分できるケースのみではなく、往々にして中間的な加入量の年が現れたりするケースも見受けられる。また、二値的な年代区分法では、ある程度の年数が経過してデータの蓄積を待ってから過去に遡って「実は〇〇年前にレジームが変化していた」という判断にならざるを得ないので、管理との間にタイムラグが生じることで、管理パフォーマンスが低下してしまう懸念がある。それに対してここで提案した時変パラメータモデルでは、毎年、新たなデータの取得（情報更新）に併せてその都度、適応的にモデルを更新して管理に反映させていくため、タイムラグの小さい、柔軟な管理を行えることが期待される。そのような管理を実施するためには、現状のように管理基準値を5年間、固定するのではなく、毎年、更新していくことになるため、管理の枠組み自体を変更していく必要がある。この点については、漁業法にも最大持続生産量（MSY）の定義として、「現在及び合理的に予測される将来の自然的条件の下で持続的に採捕することが可能な水産資源の数量の最大値をいう」と規定されているように、「現在及び合理的に予測される将来の自然的条件」が変化すればMSYの値も変化すると考えることは、制度上、何ら支障がないであろう。

一方、将来予測に用いる3、4歳の成熟率について、資源尾数との負の関係（補足図5-2）が仮定されている。もし、このような関係が明確に得られているのであれば資源評価モデルにもこのような関係を導入すべきであると考えられるが、実際には近年は資源尾数が低下しているにもかかわらず成長の鈍化や晩熟化が生じていて、この関係からの逸脱が見られる。このような矛盾を解決して根本的な解決を図るためには、上述のように資源の生産力に関するパラメータに経年変化を導入し、管理基準値もそれにあわせて変化するスキームへと転換していく必要があるのではなかろうか？

### (3) その他のコメント

#### ・自然死亡係数 $M$ の値について

漁獲係数 $F$ は高齢の個体ほど高い傾向にあり、とくに5、6歳以上に対する $F$ が高くなっている（図4-7）が、その原因について、操業実態等で説明が可能か？あるいは、自然死亡係数 $M$ が年齢によって変化するモデルを考えれば解消するといったことがないか、検討してみられてはいかがか？

また、推定された%SPR の値が 10%前後であり (図 4-9), かなり低いように思われる。図 4-8 に  $M$  を変化させたときの資源量の変化が示されているが, それと同様に,  $M$  を変化させたときの%SPR の変化も示してはいかがか? また, 自然死亡係数  $M$  が年齢によって変化するモデルを考えれば%SPR の値が大きく異なるといったことがないか, 検討してみられてはいかがか?

- ・資源量指標値と資源量推定値の比較

補足図 2-1 の資源量指標値の残差プロットを見ると, 2010, 2011 年前後で傾向が大きく異なっているように見えるが如何か?

- ・年齢別漁獲尾数・漁獲量のグラフについて

補足表だけではなくグラフも示しておかれたい。

また, 年ごとのヒストグラムを縦に並べる等により, 漁獲物の年齢組成の経年変化 (あるいは体長組成の経年変化) を明瞭に見出すことができるような図も作成してみてもいかがか?

## 文献

Yang, Y. and T. Yamakawa (2022) Re-examination of stock–recruitment relationships: a meta-analysis. *ICES J. Mar. Sci.* 79: 1380–1393.

### 【ソウハチ北海道北部系群】

本系群は, 余剰生産量モデルによって資源評価が行われている。ここでは, 余剰生産量モデルを使用するにあたっての留意点を中心にコメントする。

#### (1) CPUE 標準化法について

余剰生産量モデルでの解析を行う前準備として CPUE の標準化を適切かつ効果的に行うことが, 全体の解析結果の妥当性を確保することに繋がるため, CPUE 標準化法の検討が重要であることは言うまでもない。

本系群では, 沖底の CPUE 標準化における説明変数に, 太平洋十年規模振動 (PDO) 指数を入れている。もし仮に, PDO 指数が資源量変動そのものに影響を与える場合, CPUE 標準化の説明変数に PDO 指数を入れることによって, 結果的に抽出された経年的な資源量変動傾向 (年効果) にバイアスをもたらす可能性がある点には注意が必要である。CPUE 標準化においては, 漁具能率 (漁獲効率) や資源の空間分布に影響を与える要因の影響を除去するのは妥当であるが, 資源量変動そのものに影響を与える可能性のある (あるいは相関のある) 要因の影響 (相関) を除去するにあたっては, 慎重な検討が必要であろう。もし, 本系群の資源変動に, PDO に代表されるような地球規模での気候変動が影響を与え, レジームシフト様の現象が本系群の資源変動にも現れるのだとしたら, 上述のマダラ本州太平洋北部系群でコメントしたような時変パラメータを余剰生産量モデルに導入して解析, 管理を行

うのが本筋ではなかろうか？

また、本系群では、狙い操業の効果を考慮するため、Direct Principal Component Model (Winker *et al.*, 2013)に基づいて、魚種組成の第1主成分スコア、第2主成分スコアを説明変数に入れてCPUE標準化を行っている。しかし、もし仮に、資源量変動傾向に関する魚種間の相関がある場合、魚種組成に関する主成分スコアを説明変数に入れることによって、標準化の結果として抽出された経年的な資源量変動傾向(年効果)にバイアスをもたらしてしまうことにならないか、慎重に検討する必要があると思われる。例えば、今回のCPUE標準化法と、Biseauの抽出法によるDirected CPUEを用いて計算する方法の、両手法による結果を比べてみるとどのようになるだろうか？

## (2) 余剰生産量モデルと年齢構成モデル (VPA)、雌雄別モデルの相互関係、比較

本系群に関する解析は余剰生産量モデルで行っているため、全体のバイオマスの変動が解析の焦点であり、バイオマスの内容としての年齢構成や雌雄比については本来的な注目点ではない。とはいえ、図3-3に雌雄別年齢別漁獲尾数(中央水産試験場・稚内水産試験場(2023)から引用)が掲載されており、また、資源量指標値として、沖底標準化CPUE(指標値 $I_2$ )に加えて、VPAで推定された雌資源量から換算した雌雄全体の残存資源量 $D$ (指標値 $I_1$ )が用いられているので、以下、それらに関連したコメントを記す。

図3-3を見ると、1990年代後半以降、2014年頃まで、雌の漁獲量に比べて雄の漁獲量が極端に少なくなった。一方、2015、2016年から雄の漁獲量が急激に増えている。さらに、2014年以降、沖底での漁獲量に比べて、沿岸での漁獲量が大きく低下した(図3-1)。これらの現象の原因は何であろうか？雌雄、年齢別の分布域の急激な変化や、操業する漁場の大幅な変化を想定しないと説明が困難ではないかとも思われるが、いかがであろうか？

本文中には「2016～2019年漁期は、小樽において海外向けの販路拡大で需要が高まったことから積極的にソウハチを狙う操業が行われた」とあり、確かに、雌の漁獲量の変化を見ると、図4-4で示された漁獲係数 $F$ の変化に相当するであろうと思われる程度の漁獲量変化があるように見えるが、雄についてはそれだけでは説明しきれないようにも思える。

一方、図4-1および補足図2-4に、沖底標準化CPUE(指標値 $I_2$ )とVPAで推定された雌資源量から換算した雌雄全体の残存資源量 $D$ (指標値 $I_1$ )の比較グラフが示されている。VPAの結果から指標値 $I_1$ を作成するにあたって、雌雄の個体数比を1:1、体重比を1:0.8と仮定したうえでの比較であるが、おおむね対応関係があるようにも見受けられる。ただし、2011年～2014年には両指標の間に少なからず相違が見られ、このことは前述のような、雌雄、年齢別の分布域の急激な変化や、操業する漁場の大幅な変化などの可能性が関連しているのではなかろうか？

## (3) パラメータ間の相関と信頼区間

神戸プロット(図4-5、補足図2-6、補足図4-1)における最近年の資源量と漁獲圧の90%信頼区間を見ると、いわゆる「バナナ shape」状の信頼区間プロファイルとなっており、資源量および漁獲圧の信頼区間はかなり広い。これは、両者の間に強い負の相関(相補性)が

あることが原因である。このことを鑑みると、資源評価および資源管理に用いるパラメータの組み合わせを見直し、極力、相関の小さい組み合わせのパラメータを用いて精度高い資源評価、資源管理の実施を可能とするスキームに、全体を構築し直していく必要があるのではないかと考えるが、いかがであろうか？

例えば、資源評価モデルに Gompertz 増殖モデル (=Fox 余剰生産量モデル) を仮定する場合は、

$$\frac{dB}{dt} = rB(\ln K - \ln B) - C$$

(ここで  $B$  は資源量,  $C$  は漁獲量,  $K$  は環境収容力,  $r$  は内的自然増加率) であり、この式は、 $B_{MSY}$  および  $MSY$  をパラメータとして、以下のように変形できる。

$$\frac{dB}{dt} = MSY \frac{B}{B_{MSY}} \left( 1 - \ln \frac{B}{B_{MSY}} \right) - C$$

さらに、この式を離散型モデルとして書き直すと以下のようになる。

$$B_{t+1} = B_t + MSY \frac{B_t}{B_{MSY}} \left( 1 - \ln \frac{B_t}{B_{MSY}} \right) - C_t$$

この式は、パラメータ ( $B_{MSY}$ ,  $MSY$ ) に基づく式であり、一般的に強い相関が現れるパラメータ ( $r$ ,  $K$ ) の組み合わせよりもパラメータ間の相関を大きく軽減できる。また、管理基準値を直接のパラメータとしているため、SPiCT で用いられるパラメータ変換の過程を経るよりも、管理基準値の推定誤差を軽減できる可能性があり、結果の解釈も行いやすい。この式に基づく状態空間モデルは

【状態方程式】

$$\ln(B_{t+1}) = \ln \left( B_t + MSY \frac{B_t}{B_{MSY}} \left( 1 - \ln \frac{B_t}{B_{MSY}} \right) - C_t \right) + \varepsilon_{0,t}$$

【観測方程式】

$$\ln(I_{i,t}) = \ln(q_i B_t) + \varepsilon_{i,t}$$

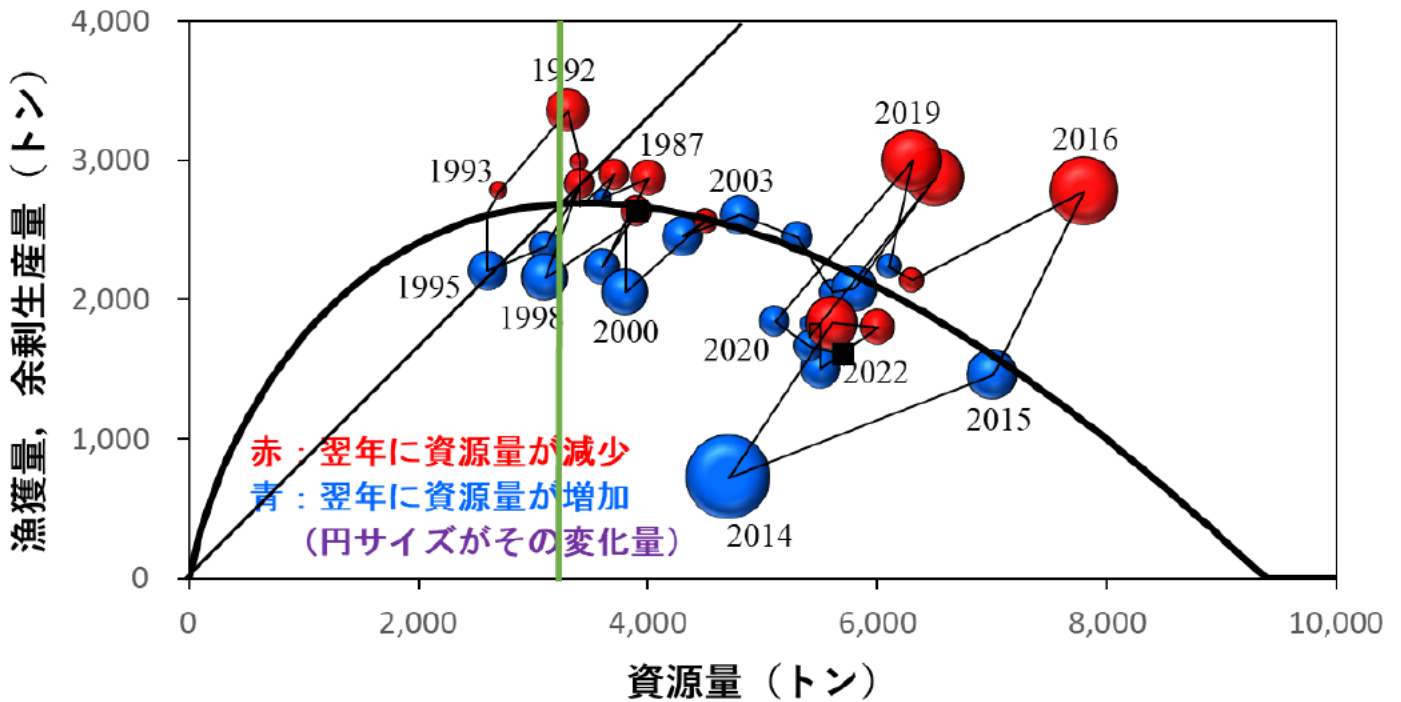
として運用することができる。また、漁獲量  $C$  に観測誤差がある場合は観測方程式に

$$\ln(C_{obs,t}) = \ln(C_t) + \varepsilon_{C,t}$$

を追加すれば良い。

このモデルのパラメータには漁獲係数  $F$  が含まれないため、資源量  $B$  と漁獲係数  $F$  の相関を回避できるという利点がある (ただし、 $B$  と  $q$  の間には負の相関がある。しかし、 $B/B_{MSY}$  と基準化すれば、その影響を消去できる)。そもそも、余剰生産量モデルの解析に用いるデータは、漁獲量および資源量指標値であり、 $MSY$  および  $B_{MSY}$  はそれらに一定の値を掛けたパラメータであることから、データに直接準拠したパラメータであると見なすことができ、 $F$  や  $r$  などの中間的なパラメータや、 $K$  のような外挿推定に基づくパラメータを介入させて解析を行うよりも、推定の頑健性が高いと期待できる。

さらに、資源の状態および漁獲圧の強さの変化の履歴を表す神戸プロットに代えて、以下のような図を表示するようにはいかがでしょうか？



この図は、毎年の資源量に対して漁獲量をプロットしたグラフで、その翌年に資源量が減少した場合を赤丸、増加した場合を青丸で表し、各丸のサイズが資源量の変化量に対応している。理論的には、余剰生産量よりも漁獲量が多いときに資源量は減少し、余剰生産量よりも漁獲量が少ないときに資源量は増加すると期待されることから、余剰生産量曲線（黒太実線）を求めることは、赤丸が多くなる領域と、青丸が多くなる領域の間の境界曲線を求めることに相当する。一方、原点から引いた黒の直線は、MSY を実現する漁獲率による漁獲率一定方策を表す（この直線の代わりに、報告書の補足図 5-1b の漁獲管理規則案（縦軸を漁獲量にした場合）を重ねて描画するのも一案である）。

この図によると、余剰生産量曲線、漁獲管理規則線、および  $B_{MSY}$  の資源量を表す直線（緑実線）で区分される 6 個の領域に関して、 $B_{MSY}$  に対する資源量水準、漁獲管理規則と比べたときの過大な漁獲圧の有無、資源の増減可能性、の組み合わせに基づく意味付けを行うことができ、実際のプロット（資源量水準と漁獲圧の強さ）がどの領域をどのように経過してきたかの履歴を概観することができる。このため、現状の神戸プロットの代わりとして利用することができる。漁獲量をどのくらいにしたときに資源量が増加（減少）したかの履歴も一目瞭然である。



前述のように、現状の神戸プロットでは横軸（資源量）と縦軸（漁獲圧）の間に強い負の相関があるため不確実性が高いのに対して、この図の場合は縦軸が実漁獲量であるため、不確実性が低い。横軸を  $B_{MSY}$  で基準化した資源量とすれば、前述のように、漁具能率  $q$  の値の影響を排除し、不確実性をさらに低減することができる。加えて、縦軸が  $F$  ではなくて漁獲量であるため、神戸プロットよりも現場の漁業者にイメージしてもらいやすいという利点もあるだろう。一般に、鯨類資源の管理ルールを表示にも、横軸を資源個体数、縦軸を余剰生産量および（管理ルールにもとづく）捕獲数として示した図が用いられており、それと同様の表示方法でもある。また、Yagi and Yamakawa (2020, 2023)では縦軸を漁獲量として、複数の資源管理目的（平均漁獲量の最大化、漁獲量変動の抑制、最低資源量の確保）のさまざまな組み合わせによる目的関数の値を、さまざまな大きさの資源量評価誤差のもとで最大化する最適な Harvest control rule (HCR) の式を導出して提案しており (Yagi and Yamakawa (2023)の Fig.5, (19)式, (20)式を参照されたい)、この図の表示方法は、そのような HCR との親和性も高い。さらに、年齢構成モデルを用いた資源評価、資源管理を実施している魚種・系群についても、例えば、マダラ本州太平洋北部系群の補足図 3-2（平衡状態における平均親魚量と年齢別平均漁獲量との関係（漁獲量曲線））に重ねて実漁獲量をプロットすることにより、ここで提案した図と同様の図を作成して示すことが可能である。

#### (4) Model 1, Model 2 について

形状パラメータ  $n$  の値の推定結果は Model 1 で 0.65 (0.26~1.61)、Model 2 で 0.86 (0.49~1.50) とのことだが、だとすると、信頼区間も勘案するとほぼ 1 に近い値、つまり本系群の資源動態モデルはほぼ Gompertz 増殖曲線に従うとみなしても良いのではないかと考えられるが、いかがか？Pella-Tomlinson モデルよりもパラメータ数が 1 つ少ない節約的モデルとしての Gompertz 増殖モデル (=Fox 余剰生産量モデル) での当てはめも行って見て、モデル選択を行って見てはどうか？(自由度の 1 つ低い節約的モデルのほうが、頑健性の高い推定に結び付く可能性がある。) そもそも、資源量変動の大きさが資源水準に比例して変化する場合 (すなわち、資源量の分布が対数正規分布に従うと見なせる場合) は、資源量の増殖曲線は Gompertz 式 (=Fox 余剰生産量モデル) に従うと考えられる。これに対して、資源量変動の大きさが資源水準にかかわらず一定である場合 (すなわち、資源量の分布が標準偏差一定の正規分布に従う場合) は、資源量の増殖曲線は Schaefer 余剰生産量モデルに従うと考えられる。さらに、資源量変動の大きさと資源水準の関係が、これら以外で多様に変化する場合の増殖曲線を表すのが Pella-Tomlinson 余剰生産量モデルである。

なお、Model 1 と Model 2 の違いについて、資源評価報告書には「Model 1 では標準偏差 1 を与えた対数正規分布を仮定する緩い事前分布を使用し、Model 2 では標準偏差を 0.50 として狭い事前分布を使用してパラメータ推定を行った」とあるが、どのパラメータの事前分布なのかが書いてないので、追記が必要である。

## 文献

- Yagi, T. and T. Yamakawa (2020) Optimal shape of the harvest control rule for different fishery management objectives. *ICES J. Mar. Sci.* 77: 3083–3094. DOI.org/10.1093/icesjms/fsaa210
- Yagi, T. and T. Yamakawa (2023) A comprehensive functional form of the optimal harvest control rule for multiple fishery management objectives. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 80: 1519–1532. DOI.org/10.1139/cjfas-2022-0195