

博士論文(要約)

複数の管理目的に対応した
最適漁獲制御ルールに関する研究

八木 達紀

第1章 緒言

1.1 水産資源の現況と資源管理

世界全体における漁業資源の漁獲量は、近年、9,000万トン前後で横ばいの傾向を示す一方、持続可能な水準にある漁業資源の割合は1974年から2017年の間に世界全体で90.0%から65.8%まで減少し、生物学的に持続可能でない水準にある漁業資源の割合は同じ期間に10.0%から34.2%まで増加した(FAO, 2020).

一方、我が国周辺の漁業資源に関する近年の傾向としては、全体的に漁獲圧が低下して資源量が増加しつつある資源が増えている(Ichinokawa *et al.*, 2017). しかし、2019年の資源評価によると、資源の水準と動向を評価した48魚種80系群のうち、資源水準が高位にあるものが19系群(24%)、中位にあるものが26系群(32%)、低位にあるものが35系群(44%)とされているように、依然として低水準の資源も多い(水産庁, 2020).

減少した資源の回復および将来の資源崩壊の防止には、適切な漁獲水準に関する明確なガイドラインが必要であり(Deroba and Bence, 2008), そのための適切な管理戦略を定めることが漁業資源の保護と持続的な利用において不可欠であると考えられる. しかし、資源評価には大きな不確実性が伴うため、適切と考えられる管理戦略であっても実際に期待されたほどの効果を得られるかどうか不明という問題がある. このような問題の解決に近年注目されている手法が管理戦略評価(management strategy evaluation: MSE)である(Smith, 1994).

1.2 管理戦略評価(MSE)

MSEは、対象となる資源の動態モデルをコンピュータ上に再現することで仮想的な漁獲データや調査データを作成し、さらにそのデータを基に漁獲可能量を決定し、仮想的な漁獲を行う. この繰り返しによって管理戦略の効果(以下、パフォーマンス)を評価し、不確実性に頑健な管理戦略や、管理目的間のトレードオフなどを評価する(Punt *et al.*, 2016).

これらの手順は、以下のステップで表される.

- 1) 管理目的とその達成度を定量的に表す指標(パフォーマンス指標)の決定

- 2) 考慮すべき不確実性の選択
- 3) 管理対象の動態を数理的に再現するモデルの作成
- 4) OMと不確実性に関するパラメータ値の設定
- 5) 候補となる管理戦略の決定
- 6) 各OMに対して候補となる管理戦略を適用したシミュレーションの実行
- 7) 管理指標を検討し、最適な管理戦略を選択

MSEの大きな特徴として、コンピュータ上でのシミュレーションであるため、設定した真の値が既知であり、この値に照らして資源評価法や管理戦略の優劣が判定できるという点と、パラメータや管理戦略を変更して何度でも実験を繰り返すことが可能であるという点があげられる。MSEと同様の手法と理論は1980年代後半の国際捕鯨委員会(International Whaling Commission: IWC)にまでさかのぼり(Kirkwood, 1997)、その後も南アフリカ(Butterworth and Bergh, 1993; De Oliveira *et al.*, 1998)やオーストラリアの資源管理(Punt *et al.*, 2002)で導入されてきた。我が国では、平松(2004)がMSEを用いて従来よりも効果の高い管理戦略を漁獲制御ルール(harvest control rule: HCR)の形で提案し、実際の資源管理に導入された。

1.3 漁獲制御ルール(HCR)

HCRは世界中の多くの漁業における資源管理において採用されている意思決定の主要なツールであり(FAO, 1996; Punt, 2006; Deroba and Bence, 2008; Kvamsdal *et al.*, 2016)、現在の資源状態に応じて、漁獲係数や漁獲量の設定などに関する管理戦略が、HCRに基づいて決定される(Butterworth and Best, 1994; Baldursson *et al.*, 1996; Serchuk *et al.*, 1999; Szuwalski and Punt, 2013)。

伝統的なHCRは通常、2つか3つの生物学的管理基準点 (biological reference points: BRPs)という、管理行動を実行する基準としての資源量水準や漁獲係数で構成され(Restrepo and Powers, 1999)、南オーストラリアの漁業管理で適用されているように、3つのBRP(F_{tar} , B_{tar} , B_{lim})で構成されるHCRが一般的である。目標管理基準点(target reference points: TRPs)は、長期的に持続的かつ効果的に資源が利用できる資源量(B_{tar})または漁獲係数(F_{tar})の目標水準を指す。限界管理基準点

(limit reference points: LRP)は、資源を確実に保護するために下回ってはならない資源量の最小閾値 (B_{lim})を指す。現行のHCRの基本的な仕様では、資源サイズが B_{tar} を下回るときは漁獲係数を F_{tar} から引き下げ、資源サイズが B_{lim} を下回るときには漁獲係数をゼロまたはそれに準じたものに設定する (Caddy and Mahon, 1995; Cadima, 2003)。

3つのBRPで構成されるHCRは、ほかの国や地域の漁業でも世界的にみられるが、BRPの定義はHCRごとに若干異なる。北東大西洋のタラ漁(Eikeset *et al.*, 2013)、東ベーリング海のズワイガニ漁(Szuwalski and Punt, 2013)、そして我が国周辺海域における1系資源(漁獲量や努力量の情報を基本として個体群動態モデルによる資源量推定がなされており、再生産関係に仮定を置くことにより管理基準値と将来の絶対資源量や漁獲率の推定値がすべて利用可能な資源)に適用されるHCR(水産研究教育機構, 2019)においてBRPの種類や値はそれぞれ異なるが、いずれも2つか3つのBRPから成り立つという点で南オーストラリアのHCRと同様である。以上のように、HCRの基本的な形状と概要は世界的に共通である。

このように世界的に適用されているHCRであるが、本研究では現行のHCRに対して以下の3つの疑問点を挙げる：

I. 3つのBRPによるルールは最適か？

過去の研究(Irwin *et al.*, 2008; Little *et al.*, 2011; Szuwalski and Punt, 2013; Forrest *et al.*, 2018)では、あらかじめ設定した3つのBRPで構成されるHCRの候補の中から最もパフォーマンスの高いHCRを選び出すという手法を採用しており、管理目的に応じたHCRの最適な形を明示的に考慮することはなかった。BRPの数が3つではないHCRを考察した研究(4つのBRPを持つ階段型HCRなど: Hjerne and Hansson, 2001; Walsh *et al.*, 2018)も存在したが、HCRの形の最適さに関して直接、検討を行った研究はこれまでなかった。

II. 複数の管理目的

資源管理を効果的に行うには、最初にステークホルダー間の議論や合意を通じて管理目的を明確にすることが望ましい。一般的な漁業管理の目的には、漁獲量の最大化、資源リスクの最小化、産業的な安定の最大化が含まれる(Butterworth and Punt, 1999)。しかし、いくつかの管理

目的は互いにトレードオフの関係にあると考えられ(Cochrane, 2000; Hilborn, 2007), 具体例として, 資源リスクと漁業利益, および平均漁獲量と漁獲量変動の間にはトレードオフがみられる(Hilborn and Walters, 1992; Punt *et al.*, 2016). 最適なHCRの形はパフォーマンス指標の重要性に応じて変わると考えられるが, 複数の管理目的に対する現行のHCRは経験的に作られたものであるため, 異なる管理目的に対して最適なHCRの形を明確にすることは重要であると考えられる.

III. 不確実性への対処

現実の資源管理において, 様々な不確実性の影響は避けることができない (Patterson *et al.*, 2001; Fulton *et al.*, 2011). 不確実性へ対処する手法として予防的管理基準点の導入などが取り入れられたほか, 過去の研究では, 不確実性に頑健な効果的管理方法がMSEによる検討結果を通じて提案された(Smith, 1994; Punt *et al.*, 2014; Dankel *et al.*, 2016). しかし, 不確実性の大きさに応じてHCRの形をどのように修正すべきなのかに関して, 必ずしも明確にされているわけではない. 特に, 資源量の推定値は真の資源量と大きく異なる可能性がある. 例えば, 推定資源量の信頼区間が推定資源量の値そのものと同程度の幅を持つという可能性が指摘されたケースもある(Cooke, 1999; Hiramatsu, 2009; Nakayama and Hiramatsu, 2010). したがって, 不確実性に頑健なHCRを開発することは重要な課題と考えられる.

1.4 本研究の目的

本研究の目的は, 水産資源管理において重要な役割を果たしているHCRについて, 前節で述べたI~IIIまでの問題点を解決していくことである. IIの管理目的を, 長期的な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(資源崩壊の回避)の3つとし, これらに対して最適なHCRを求めていく. IIIの資源管理における不確実性には様々な種類があるが, 本研究では観測誤差に適切に対応できる最適HCRを求めていくことにする. 過去の研究のようにあらかじめ用意したHCRの候補の中から最も管理効果の高いHCRを選ぶのではなく, 本研究では3つの問題点に対して最適なHCRの形そのものを明確にするとともに, それを再現できる関数式を導

出する。以上の検討を行うことによって、現実の資源管理での管理目的に応じた高い管理効果を達成できるHCRを提示することを目的とする。

1.5 論文の構成

本章以降における各章の内容は、以下のとおりである。第2章では、前述の3つの問題点を解決する最適なHCRの形を、数値シミュレーションにもとづく非線形最適化手法によって明らかにするとともに、従来の3点のBRPで構成されるHCRとのパフォーマンスの比較を行う。第3章では、最適なHCRを実際の資源管理にも適用できるよう、第2章で求めたHCRの形を再現できる関数式を導出する。第4章では、リスク回避型効用関数を用いて、第3章で求めた関数式よりもさらに簡便な最適HCRの関数式を導出して提示する。第5章では、得られた知見を総括して、資源管理における適切なHCRの作成及び適用について提言する。

第2章 最適なHCRの形とパフォーマンス

2.1 緒言

前章で述べたとおり、水産資源の管理において世界的に、2つか3つのBRPから構成されるHCRを用いるのが一般的である。しかし、例えば、本来の適切なHCRがなめらかな曲線であった場合、2つか3つのBRPのみによってその形を表すことは困難である。また、従来型HCRにおいて、異なる管理目的や異なる大きさの不確実性に対してどのような調節を行えばよいのかは、必ずしも明らかでない。これらの問題に対して本研究では、BRPの数を増やすことで詳細な形を表せるようにし、そして、異なる管理目的や異なる大きさの不確実性に対して最適なHCRを直接求めることで解決する。

本章では、まず、前章で述べた3つの管理目的(長期的な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)と、異なる大きさの観測誤差に対応可能な最適なHCRの形を明らかにする。次に、最適HCRの形とパフォーマンスを、3つのBRPから構成される従来型HCRと比較することで、各管理目的や異なる大きさの観測誤差に対する最適HCRの特徴を明らかにする。

2.2 方法

2.2.1 新たな代替HCRの設定

HCRの最適な形を求めるために、前章で述べた3つの問題を解決できるよう、以下のように代替HCRを設定した。

I. HCRを構成するBRPの数の変更

HCRの最適な形を明らかにするために、BRPの数を従来の3点から21点まで増やし、HCRの形を柔軟に調節できるようにした。BRPの数が多いHCRの数値最適化は計算に時間がかかるが、なめらかな曲線によるHCRも表すことができるように、21点のBRPを採用した。

21点のBRPは、20通りの資源量($B_i: i = 1, \dots, 20$)に対する最適な漁獲量($C_i: i = 1, \dots, 20$)を設定する点と、それを下回ると漁獲を停止する1つの点(B_{lim})から構成される。 B_i の値は以下のように設定した：

$$B_i = B_{lim} \left(\frac{B_{max}}{B_{lim}} \right)^{\frac{i}{20}} \quad (i = 1, \dots, 20) \quad (1)$$

ここで、 $B_{max}(= B_{20})$ は、シミュレーション中のすべての資源量をカバーするように設定した最大基準点である。予備的なシミュレーションを繰り返した結果、後に述べるパラメータ値を使用した場合には、 B_{max} の値を900に設定すれば、プロセス誤差 ε_t と観測誤差 μ_t に関する乱数値が例外的に大きい稀な場合を除いて、資源量は B_{max} 以下であった。 B_i は等比級数で設定されているため、隣り合う B_i 間の間隔は、資源量が小さい領域よりも資源量大きい領域のほうが広くなる。

21個のBRPで構成されるHCRによって、毎年の漁獲量を以下のように設定した：

$$\begin{cases} C_t = 0 & (\text{if } \hat{B}_t < B_{lim}) \\ C_t = \frac{B_i - \hat{B}_t}{B_i - B_{i-1}} C_{i-1} + \frac{\hat{B}_t - B_{i-1}}{B_i - B_{i-1}} C_i & (\text{if } B_{i-1} \leq \hat{B}_t < B_i; i = 1, \dots, 20) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 C_t と \hat{B}_t はそれぞれ、 t 年における漁獲量と推定資源量である。 \hat{B}_t の値がプロセス誤差(ε_t)や観測誤差(μ_t)の例外的に大きな乱数値のために B_{max} を超えた場合、 C_t は (B_{19}, C_{19}) と (B_{max}, C_{max}) を結ぶ直線の延長線によって、以下のように設定した：

$$C_t = C_{max} + (\hat{B}_t - B_{max}) \frac{C_{max} - C_{19}}{B_{max} - B_{19}} \quad (\text{if } B_{max} \leq \hat{B}_t) \quad (3)$$

ここで、 $C_{max}(=C_{20})$ は、 B_{max} に対する漁獲量を定義するBRPである。

以降、漁獲量をベースにした、21個のBRPで定義されるHCRを“catch-based HCR with 21 BRPs”(C₂₁-HCR)と呼ぶ。一方、漁獲係数 F をベースにした3つの基準点($B_{lim}, B_{tar}, F_{tar}$)で構成される従来型HCRを“ F -based HCR with three BRPs”(F₃-HCR)と呼ぶ。

II. 複数の管理目的

本研究では、HCRのパフォーマンスを評価するための指標において、以下の3つの管理目的を導入した：

- 1) 長期的な平均漁獲量の最大化
- 2) 漁獲量変動の抑制
- 3) 資源崩壊を避けるための最低資源量の確保

後述のように、各管理目的に対応したパフォーマンス指標を設定したうえで、それぞれに対する重みづけ係数をかけ合わせて全体の目的関数へ組み込んだ。この目的関数を最大化することで、各重みづけ係数の組み合わせに対してパレート最適な（最低でもほかの目的のパフォーマンスを一つも低下させることのない）漁獲戦略(Walters, 1975; Tezer *et al*, 2017)を求めることができる。

III. 不確実性への対処

不確実性は管理プロセスにおいて避けることのできない要素であり、生物学的側面から、環境変動、評価にかかわる誤差、漁業管理システムに関するものまでの広範囲にわたる。Punt *et al*, (2016)は、漁業管理における不確実性（誤差）を5種類に定義した（プロセス誤差、パラメータ誤差、モデル誤差、観測誤差、実行誤差）が、それぞれの不確実性の重要度は事例ごとに異なるとも述べている。本研究では、異なる大きさのランダムなプロセス誤差と観測誤差をシミュレーションに組み込み、最適なHCRの形への影響を調べた。

2.2.2 オペレーティングモデル

オペレーティングモデル(operating model: OM)は、管理対象資源の個体群動態を再現する仮想的なモデルである。本研究では、年齢構成を考慮せずに成長、生残、加入プロセスの影響を内包して表すことのできる遅延差分モデル (delay-difference model) (Hilborn and Walters, 1992; Meyer and Millar, 1999)を利用した。ここでは、以下のようなベバートンホルト型の再生産関数 $R(x)$ を用いて、翌年の資源量を計算した：

$$B_{t+1} = gS_t + R(S_t) \quad (4)$$

$$R(S_t) = r \frac{S_t}{1 + \frac{S_t}{K}} \exp\left(\varepsilon_t - \frac{1}{2}\sigma_R^2\right) \quad (5)$$

ここで、 B_t は t 年の真の資源量、 g は年間の死亡率と体重増による効果を組みこんだ資源量の変化率、 S_t は取り残し資源量($S_t = B_t - C_t$)である。再生産関数 $R(x)$ において、 r は内的自然増加率、 K は密度効果を表す係数、 ε_t は正規分布 $N(0, \sigma_R^2)$ に従うプロセス誤差である。 $g = 0.6$, $r = 1.35$ とし、これは、既往研究(Walters and Parma, 1996; Katsukawa, 2004)において大西洋ニシンの動態を表すために設定されたパラメータである。また、漁獲がないときの資源量がほぼ200になるように、 $K = 84.4$ (Katsukawa, 2004) と設定した。さらに、一般的な加入量変動を表す値として、 $\sigma_R = 0.6$ (Punt *et al*, 2018)とした。

2.2.3 観測モデル

推定資源量 \hat{B}_t は、正規分布 $N(0, \sigma_E^2)$ に従う観測誤差 μ_t を用いて、以下の通り真の資源量 B_t から計算した。

$$\hat{B}_t = B_t \exp\left(\mu_t - \frac{1}{2}\sigma_E^2\right) \quad (6)$$

2.2.4 パフォーマンス指標

各管理目的に対するパフォーマンス指標は、以下のように定義した：

- i) Y_{ave} (平均漁獲量) : 異なる初期資源量を仮定した全てのシナリオ(=300通り)についての長期的 (全管理期間: $t = 1 \sim 100$) な漁獲量の平均値.
- ii) Y_{sd} (漁獲量標準偏差) : 全シナリオ, 全管理期間についての漁獲量標準偏差の値.

iii) B_{min} (最低資源量) : 異なる初期資源量を仮定した300通りの全てのシナリオについて, 初年の資源量(B_1)を除く全管理期間の, 下から10番目まで (管理期間の10%) の資源量を平均した値.

これらのパフォーマンス指標を以下の複合パフォーマンス指標 (目的関数) SS に組み込み, これを最大化する21個のBRPの組み合わせを数値的に求めることで最適なHCRを求めた.

$$SS = Y_{ave} - w_{sd}Y_{sd} + w_{min}B_{min} \quad (7)$$

ここで, w_{sd} と w_{min} はそれぞれ, パフォーマンス指標 Y_{sd} と B_{min} に対する, Y_{ave} との相対的な重みづけ係数である. Y_{ave} と B_{min} の値が大きく Y_{sd} の値が小さいほど, 重みづけ係数 w_{sd} と w_{min} の値に応じて SS の値は大きくなる.

2.2.5. C_{21} -HCRと F_3 -HCRの数値最適化と比較

様々な大きさの σ_E, w_{sd} ,および w_{min} に対して最適なHCRを求めるために, 1から900($= B_{max}$)までの幅広い範囲をとる300通り (300シナリオ)の初期資源量を持つ仮想個体群に対して100年間のシミュレーションを実行した.

非線形最適化処理に統計解析言語R 3.5.3 (R Development Core Team, 2018) のパッケージ“Rsolnp” (Ye, 1987; Ghalanos and Theussl, 2015)を用いることによって, 目的関数 SS を最大化する B_{lim} 及び $C_1 \sim C_{20}$ の値の最適な組み合わせを推定した.

また, 同様の初期資源量と管理期間を用いた同様のシミュレーションを F_3 -HCRに対しても行い, $B_{lim}, B_{tar}, F_{tar}$ の値の最適な組み合わせを推定した. F_{tar} の値については実際の漁業管理と同様に, F_{MSY} を超えないように制限を加えた. オペレーティングモデル, 観測モデル, パフォーマンス指標は C_{21} -HCRに対するシミュレーション (式(4)~(7))で使用したものと同一であり, 漁獲量の計算は以下のようにした,

$$C_t = B_t(1 - \exp(-F_t)) \quad (8)$$

ここで, F_t は t 年の漁獲係数である.

さらに, 一種の感度解析として, 最適な C_{21} -HCRと最適な F_3 -HCRのパフォーマンスを比較した. 後述のように, ほとんどのシミュレーションにおいて, 管理対象資源の資源量は管理開始

後から数年～10年程度の間に B_{MSY} の周辺に収束し、残りの管理期間中は B_{MSY} 近辺の狭い範囲で変動していたため、パフォーマンスを求めるためのシミュレーション中での管理期間については、広範囲の初期資源量からのパフォーマンスを正確に評価するために50年間に制限した。

さらに、最大持続生産量 (maximum sustainable yield: MSY) (Russell, 1931; Hjort *et al.*, 1933; Graham, 1935)を与える一定の漁獲係数(F_{MSY})と資源量(B_{MSY})を求めるためのシミュレーションを行った。1から900 (= B_{max})までの広範囲に等間隔で分布する300通りの初期資源量に対して、先ほどと同じOM(式(4), (5), (8))を用いて一定値に固定した F の値に基づいて100年間の漁獲シミュレーションを行った。平均漁獲量を最大化する F の値を F_{MSY} と定義し、 F_{MSY} での漁獲を続けたときの平均漁獲量と平均資源量をそれぞれMSY及び B_{MSY} と定義した。シミュレーションの結果から、 $MSY = 22.9$, $B_{MSY} = 94.9$, $F_{MSY} = 0.277$ となった。

2.3 結果

2.3.1 最適なHCRの形

$w_{sd} = 0$, $w_{min} = 0$, $\sigma_E = 0$ における最適なHCRは、観測誤差がないときの平均漁獲量を最大化するHCRを表し、 x 切片が $B_{MSY} - MSY$ にほぼ等しい傾き1の直線となった。漁獲されなかった(取り残し)資源量が一定に保たれるため、最適なHCRは、取り残し資源量が $B_{MSY} - MSY$ の、取り残し資源量一定方策(constant escapement strategy: CES)に等しい。

様々な大きさの観測誤差($\sigma_E = 0 \sim 0.8$)に対して平均漁獲量を最大化する($w_{sd} = 0$, $w_{min} = 0$)最適 C_{21} -HCRは、観測誤差が大きくなるほど全体の傾きが小さくなった。各最適 C_{21} -HCRの曲線は点(B_{MSY} , MSY)を通るので、曲線の傾きが小さくなるに従って x 切片の値が小さくなった。

漁獲量変動に対する様々な大きさの重みづけ係数に対して最適な C_{21} -HCR ($w_{sd} = 0 \sim 2$; $w_{min} = 0$, $\sigma_E = 0$, $\sigma_E = 0.4$)は y 軸に沿って上から圧縮されたものとなり、 w_{sd} が大きくなるにしたがって、高い資源量の領域において漁獲量一定方策 (constant catch strategy: CCS) に近づいた。 w_{sd} の値が小さいとき($w_{sd} \leq 0.3$)には各最適 C_{21} -HCR曲線が点 (B_{MSY} , MSY)を通る一方で、 w_{sd} が

大きいとき(e.g., $w_{sd} = 1, 2$)には $B = B_{MSY}$ において MSY よりも下を通る。これらの結果は、漁獲量変動の抑制は平均漁獲量の低下と引き換えに得られることを示している。

最低資源量 B_{min} の水準を維持するための異なる大きさの重みづけ係数 ($w_{min} = 0 \sim 0.6$; $w_{sd} = 0, \sigma_E = 0, \sigma_E = 0.4$) に対応した最適 C_{21} -HCR の曲線は、全体を x 軸に沿って右方向に移動させることで x 切片の値を大きくしていた。

最小値 ($B_1 = 1$) と最大値 ($B_1 = 900$) を含む異なる初期資源量から始まるシナリオの資源量の100年間の変化を、平均漁獲量の最大化 ($w_{sd} = 0, w_{min} = 0, \sigma_E = 0$)、異なる大きさの観測誤差への対応 ($\sigma_E = 0.4; w_{sd} = 0, w_{min} = 0$)、漁獲量変動の抑制 ($w_{sd} = 2; w_{min} = 0, \sigma_E = 0.4$)、最低資源量の確保 ($w_{min} = 0.6; w_{sd} = 0, \sigma_E = 0.4$) のそれぞれに対応した最適 C_{21} -HCR について、10通りずつ表示した。各シミュレーションにおいて、管理対象資源は管理開始から数年~10年程度で B_{MSY} 周辺に収束し、管理期間の残りの間は B_{MSY} の近辺もしくはわずかに超える水準を中心に変動していた。

2.3.2 パラメータ値及び再生産関数を変更した場合の最適 C_{21} -HCR の形

これまでに求めた最適 C_{21} -HCR の傾向が一般性を有するかを確認するために、パラメータの値 (r, g, K, σ_R) と再生産関数を変更 (i.e., ベバートンホルト型再生産関数の代わりにリッカー型再生産関数を使用) し、前節と同様のシミュレーションによって最適化を実行した。これらを変更した場合でも前節の結果と定性的な違いはなく、最適 C_{21} -HCR の形はパラメータ値と再生産関数の種類に関係なく普遍的であることが示された。

2.3.3 C_{21} -HCR と F_3 -HCR のパフォーマンスと形の比較

様々な設定に対する最適な F_3 -HCR を求め、最適 C_{21} -HCR と最適 F_3 -HCR のパフォーマンスを比較した。また、最適な HCR の形の特徴を明らかにするために、長期的な平均漁獲量を最大化する最適な HCR ($w_{sd} = 0, w_{min} = 0, \sigma_E = 0$)、中程度及び大きな観測誤差に対して最適な HCR ($\sigma_E = 0.5, 1; w_{sd} = 0, w_{min} = 0$)、漁獲量変動を大きく抑制する最適な HCR ($w_{sd} = 1; w_{min} = 0$,

$\sigma_E = 0$), 最低資源量を多く確保する最適なHCR($w_{min} = 0.6; w_{sd} = 0, \sigma_E = 0$)のそれぞれに関して、最適C₂₁-HCRと最適F₃-HCRの形の違いを比較した。

異なる大きさの観測誤差($\sigma_E = 0 \sim 1$)に対して平均漁獲量を最大化する最適F₃-HCRのパフォーマンスは、観測誤差が中間の範囲(*e.g.*, $\sigma_E = 0.4 \sim 0.6$)を除いて全体的に最適C₂₁-HCRよりも低かった。観測誤差が小さいとき (*e.g.*, $\sigma_E = 0$)は、最適F₃-HCRは漁獲係数を一定にする制約のために、 B_{MSY} を超える資源量に対して最適C₂₁-HCRよりも低い漁獲係数を設定せざるをえない。また、観測誤差が大きいとき (*e.g.*, $\sigma_E = 1$)は、最適F₃-HCRは大きな資源量に対して最適C₂₁-HCRよりも大きな漁獲係数の固定値を設定することになる。観測誤差が中程度のとき (*e.g.*, $\sigma_E = 0.4 \sim 0.6$)は、漁獲係数の値の差は、資源量の大きさにかかわらず、最適F₃-HCRと最適C₂₁-HCRの間で小さく、このため平均漁獲量の差は小さい。最適C₂₁-HCRの形が、特に $\sigma_E = 0.5$ のときに、資源量が B_{MSY} 以上の範囲において漁獲率一定方策(constant harvest rate strategy: CHR)に近づくことがその原因であると考えられる。

$w_{min} = 0, \sigma_E = 0$ または $\sigma_E = 0.4$ のときの、漁獲量変動の抑制に対する重みづけ係数の異なる値($w_{sd} = 0 \sim 2$)に対応した最適F₃-HCRのパフォーマンスは、資源量が B_{MSY} を超えるときに最適C₂₁-HCRがCHRに近くなる w_{sd} の中間的範囲($w_{sd} = 0.3, \sigma_E = 0$)または小さいとき($w_{sd} = 0.1, \sigma_E = 0.4$)を除いて、全体的に最適C₂₁-HCRよりも小さい。しかし、 $\sigma_E = 0$ かつ w_{sd} の値が小さいとき(*e.g.*, $w_{sd} = 0$)には、最適F₃-HCRは制約のために、資源量が B_{MSY} より大きい範囲において漁獲係数を最適C₂₁-HCRよりも小さく設定せざるをえない。対照的に、 w_{sd} の値が大きいとき(*e.g.*, $w_{sd} = 1$)には、最適F₃-HCRは最適C₂₁-HCRよりも漁獲係数を全体的にかなり低く設定することになる。

$w_{sd} = 0$ かつ $\sigma_E = 0$ のときの最低資源量(B_{min})を確保するための重みづけ係数の様々な値($w_{min} = 0 \sim 0.6$)に対して、最適C₂₁-HCRのパフォーマンスは w_{min} の大きさにかかわらず最適F₃-HCRよりも高かったが、 $\sigma_E = 0.4$ のときには2つのHCRの間のパフォーマンスの差は小さかった。その理由は、最適C₂₁-HCRは $\sigma_E = 0.4$ のときに、高い資源量の範囲においてCHR(*i.e.*, 最適F₃-HCR)に近くなるからであると考えられる。

また、 $\sigma_R = 0.3$ のときの最適 C_{21} -HCRと最適 F_3 -HCRのパフォーマンスを比較したところ、 $\sigma_R = 0.6$ のときと同様の傾向を示した。 $\sigma_R = 0.3$ のときと $\sigma_R = 0.6$ のときの最適 C_{21} -HCRの形は定性的に変わらなかったことから、2つのHCRのパフォーマンスの差の原因は、パラメータ値に依らない普遍的なものであると考えられる。

2.4 考察

様々なステークホルダーがかかわる漁業管理の意思決定を図るうえで、管理目的とパフォーマンス指標の選択が重要な課題となる(Walters, 1986)。ステークホルダーごとに重視する管理目的が異なるため、最も望ましいHCRはステークホルダーごとに異なる。この章で得られた重要な結果として、異なる管理目的(長期的な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)や異なる大きさの観測誤差に対応した最適HCRの形に関して、明確な見通しを提示したことが挙げられる。

適切なHCRの特徴を理解するために、以下の3つの基本的な資源管理戦略(取り残し資源量一定方策(CES)、漁獲率一定方策(CHR)、漁獲量一定方策(CCS)(Hilborn and Walters, 1992; Restrepo and Powers, 1999))をもとにして、最適なHCRの作成に必要な視点を考察する。CESは取り残し資源量を現在の資源量に関係なく毎年一定にし、CHRは資源量の一定割合を毎年漁獲し(Aron, 1979)、CCSは現在の資源状態と無関係に毎年一定の量を漁獲する。それぞれの戦略は1種類のパラメータ(CESは取り残し資源量、CHRは漁獲率、CCSは漁獲量)を変化させることで表すことができる。

CESは理想的かつ正確な資源評価のもとでは長期的な平均漁獲量を最大化することが理論的に示されている(Reed, 1974 and 1978; Hall *et al.*, 1988; Mace, 2001)が、パフォーマンスは資源評価誤差の影響を特に受けやすい。理想的な状況では、CHRにおける長期的な平均漁獲量はCESよりも多少低いが、一方で漁獲量変動はCESよりも小さい(Hall *et al.*, 1988; Hilborn and Walters, 1992)。一方、資源評価の精度が低いときには、最適なCHRはCESよりも高いパフォーマンスが期待できる(Frederick and Peterman, 1995; Walters and Parma, 1996; Vasconcellos, 2003)。CCSはそ

の定義から、漁獲量変動が小さいが、資源が低水準まで減少するときは資源崩壊を起こす大きなリスクを有する (Swartzman *et al.*, 1983).

この章で行ったシミュレーションにおいても、観測誤差のない場合の長期的な平均漁獲量を最大化する最適HCRはCESであることが示され、これは先行研究(Reed, 1974 and 1978; Hall *et al.*, 1988; Mace, 2001)の知見と一致する。一方で、観測誤差 σ_E が大きくなるにつれ、 C_{21} -HCRの全体的な傾きを小さくする必要があった。すなわち、特に資源量が B_{MSY} を超えるときに最適 C_{21} -HCRがCHRに近くなる $\sigma_E = 0.4$ のときのように、適切なHCRは大きな σ_E に対して部分的にCHRに近くなるようにする必要がある。

漁獲量変動を抑制するために最適な C_{21} -HCRの形は、全体をy軸に沿って上から圧縮したものとなる。中間的な w_{sd} の値のとき(e.g., $w_{sd} = 0.1 \sim 0.3$)にCHRに近づき、最終的(e.g., $w_{sd} = 1 \sim 2$)に高い資源量の範囲ではほぼCCSとなる。しかし、前述のように本来の完全なCCSでは、資源量が低水準にまで減少したときに資源崩壊のリスクが高くなる。よって最適 C_{21} -HCRは、資源量が低いときは漁獲量の引き下げによる一定の取り残し資源量の確保(CES)を行いつつ、資源量が高いときはCCSを実行するという、両者がある程度取り混ぜた戦略の組み合わせが最適となる。

最低資源量を高い水準で維持するために最適な C_{21} -HCRは、目標とする最低資源量水準に応じて全体的に水平方向のスケールを大きくして曲線全体を右方向に移動させたものとなった。すなわち、最低資源量を高い水準で維持するために最適な C_{21} -HCRで重要なことはHCRの形そのものではなく、HCRを全体的に右方向に移動させることで十分な取り残し資源量を確保することであると示された。

以上により、最適なHCRは、異なる管理目的と不確実性の大きさの間のトレードオフに応じた長所と短所をそれぞれ有する基本的な戦略(CES, CHR, CCS)を効果的かつ連続的に組み合わせることで得られると言える。これに対して F_3 -HCRでは、低い資源量範囲を除けば基本的な戦略がCHRに限定され、 C_{21} -HCRのような柔軟な操作が不可能である。

不確実性に対処するために、実際の資源管理で使われる F_3 -HCRは通常、予防的に一定の安全係数を F_{MSY} にかける(e.g., 0.8倍に抑える)措置などによって漁獲圧を調節する(Eikeset *et al.*, 2013).

これに対して本研究では、最適な C_{21} -HCRは、観測誤差の増大に応じてHCRの全体の傾きを小さく調節すべきことを明示した。この結果は、 F_{tar} と B_{lim} の値を低くすることが、大きな観測誤差のもとでの F_3 -HCRに対して望ましいという先行研究の示唆 (Katsukawa, 2004) も支持している。しかしこの結果は、不確実性の大きな資源に対しては B_{lim} を高くすべきだという一般的な考えと一見、異なっている。この理由については必ずしも明らかでないが、 B_{MSY} を超える資源量に対して漁獲係数を低くすることの引き換えとして B_{lim} の値を低下させることが、全体的なパフォーマンスの向上にとって有利となる可能性がある。いずれにせよ、 B_{lim} の最適な値の決定に先立って、各不確実性の大きさを適切に評価しておくことが重要である。

本章の結果として、最適な C_{21} -HCRは最適な F_3 -HCRよりも一般的に高いパフォーマンスをとることが示された。そして、最適な C_{21} -HCRと最適な F_3 -HCRの形の比較によって、2つのHCRのパフォーマンスの差の原因を示すことができた。この結果は、幅広いステークホルダーが関与する、複数の管理目的を組み合わせた資源管理方策の検討の場において、パフォーマンスの高いHCRの設計に関する明確な見通しを与えることにつながると期待される。

第3章 最適なHCRの関数化

本章の内容は、学術雑誌論文として出版する計画があるため公表できない。

第4章 リスク回避型効用関数に基づくHCRの最適化

本章の内容は、学術雑誌論文として出版する計画があるため公表できない。

第5章 総合考察

本章の内容は、学術雑誌論文として出版する計画があるため公表できない。