

論文の内容の要旨

水圏生物科学専攻

平成 29 年度博士課程進学

氏名 八木 達紀

指導教員 山川 卓

論文題目：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

本研究は、異なる大きさの不確実性のもとでの水産資源管理において複数の管理目的を効果的に達成する最適な漁獲制御ルール (harvest control rule: HCR) の形を明らかにするとともに、最適な HCR を再現する関数式を提示することを目的とする。HCR は水産資源の管理において世界的に採用されている管理戦略ツールであり、適切な HCR の設定が水産資源の持続的な利用の達成度を大きく左右する。本研究ではまず、(1) 様々な大きさの観測誤差のもとで、3つの異なる管理目的 (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) を効果的に達成する最適な HCR の形について、仮想的な資源動態モデル (operating model: OM) を用いた管理戦略評価 (management strategy evaluation: MSE) によって明らかにした。そして、従来型 HCR の形および管理効果 (パフォーマンス) との比較を通して最適な HCR の特徴を明らかにした。次に、(2) 最適な HCR をコンピュータによる複雑な数値シミュレーションによらずに簡便に求められるよう、3つのパラメータを調節するだけで最適な HCR を再現できる関数式を作成した。さらに、(3) 求めた関数式をよりシンプルな形で表すために、相対的リスク回避度一定 (constant relative risk aversion: CRRA) 型効用関数を導入した場合の最適な HCR の形を明らかにし、その結果を基に、先に作成した最適な HCR を表す関数式に改良を加えた。最後に、本研究によって得られた結果を総観し、現実の資源管理にどのように最適 HCR を適用すべきかや、最適 HCR を資源管理で使用することによって期待される効果などについて議論した。

1. 最適な HCR の形とパフォーマンス

HCR の基本概念は、資源量の水準に応じて適切な漁獲係数または漁獲量を設定するというものである。生物学的管理基準点 (biological reference point: BRP) はこのような管理行動を決定するための基準として使われる。従来、多くの HCR が漁獲率一定方策 (constant harvest rate strategy: CHR) を基本とする 3 つの BRP (F_{tar} , B_{tar} , B_{lim}) から構成され、現実の資源管理に適用されてきた。一般には、資源量が一定水準 (B_{tar}) を下回ると漁獲係数を F_{tar} から引き下げ、資源量が B_{lim} を下回ると漁獲係数を 0 に設定するといった HCR が用いられている。

本研究では、一般的な資源管理目的 (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) を達成し、異なる大きさの観測誤差に対して頑健な最適 HCR の形を調べるために、従来の 3 点の BRP で構成される漁獲係数ベースの HCR (以下、 F_3 -HCR) の代わりに、21 点の BRP で構成される漁獲量ベースの HCR (以下、 C_{21} -HCR) を導入し、最適な HCR の形を詳細に検討した。管理パフォーマンスの評価には、3 つの管理目的を表す指標を導入し、それらに重みづけを行って合成した目的関数を作成して用いた。そして、この目的関数を最大化する BRP の組み合わせを、遅延差分 (delay-difference) 型 OM を使った MSE による非線形最適化シミュレーションで探索的に求めて最適な HCR とした。

その結果、観測誤差がゼロのときに漁獲量を最大化する C_{21} -HCR は、 x 切片が $B_{MSY} - MSY$ に等しい傾き 1 の直線、すなわち、取り残し資源量一定方策 (constant escapement strategy: CES) を実現する HCR であった (MSY は最大持続生産量、 B_{MSY} は MSY を与える資源量)。一方、観測誤差の増大に伴い、漁獲量を最大化する C_{21} -HCR は、点 (B_{MSY} , MSY) を中心に全体の傾きを小さくするものとなった。さらに、漁獲量変動を抑制する C_{21} -HCR は y 軸に沿って圧縮されたものとなり、高い資源量では漁獲量一定方策 (constant catch strategy: CCS) に近づいた。最低資源量を確保する C_{21} -HCR は、全体を右方向に移動させることで得られることが判明した。

2. 最適な HCR の関数化

現実の資源管理では、以上のような数値最適化シミュレーションによって最適 C_{21} -HCR を対象資源ごとに求めるのは時間がかかりすぎるという問題がある。そこで、少数のパラメータを使って最適 C_{21} -HCR を再現できる関数式を作成し、簡便な適用を可能にすることをめざした。

Tsallis statistics の q -logarithm 型関数を基にして、各管理目的と、異なる観測誤差の大きさに対応した最適 C_{21} -HCR を再現する関数式をそれぞれ作成し、まとめると以下の式が得られた。

$$(\tilde{C}_t - \tilde{B}_t)^\alpha \left(\frac{\tilde{C}_t}{\tilde{C}_\infty} - 1 \right) = \left(\frac{1}{k\tilde{B}_{MSY}} \right)^{\frac{1}{\tilde{C}_\infty}} [(k\tilde{B}_{MSY})^\alpha - 1]$$

ここで、 t 年における漁獲量を C_t 、資源量を B_t とするとき、 $\tilde{C}_t, \tilde{B}_t, \tilde{B}_{MSY}, \tilde{C}_\infty$ はそれぞれ、 $\frac{C_t}{MSY}, \frac{B_t}{MSY}, \frac{B_{MSY}}{MSY}, \frac{C_\infty}{MSY}$ で与えられる。 α, k, C_∞ は、観測誤差の大きさに対応した曲線全体の傾き、最低資源量の水準、漁獲量変動の大きさをそれぞれ調節するパラメータである。この式は \tilde{C}_t に関する 2 次方程式であり、 \tilde{C}_t の解が最適 HCR を与える。なお、解が負となる領域では $\tilde{C}_t = 0$ とする。この式は一見複雑だが、 B_{MSY} と MSY は資源動態モデルから推定される定数なので、各管理目的に 1 個のパラメータが対応したシンプルな最適 HCR の近似式といえる。この関数式で再現した HCR と前章で求めた最適 C_{21} -HCR の形とパフォーマンスを比較した結果、最適な HCR をこの式によって再現できることが確認された。

3. リスク回避型効用関数に基づく HCR の最適化

以上によって求めた最適 HCR のパフォーマンス指標を様々な条件下で調べたところ、観測誤差が大きくなるにしたがって漁獲量変動が小さくなることが判明した。その理由として、観測誤差の増大に対応した最適 HCR の調節法と、漁獲量変動の抑制に対応した最適 HCR の調節法はそれぞれ、 (B_{MSY}, MSY) を中心に HCR の傾きを小さくすることと、 y 軸に沿って全体を圧縮することであり、これらは部分的に共通の調節方向であるからと考えられた。

そこで、漁獲量変動の抑制に対応した、上述とは異なるパフォーマンス指標の一つとして、CRRA 型効用関数を目的関数に導入し、これを最大化する最適 HCR を上述と同様のシミュレーションによって求めた。

CRRA 効用関数 $u(x)$ を用いて漁獲量 x の効用を表すと、以下のようになる。

$$u(x) = \begin{cases} \frac{(x+1)^{1-q} - 1}{1-q} & (q \neq 1) \\ \log(x+1) & (q = 1) \end{cases}$$

ここで q は、相対的なリスク回避度を表し、 q の値が大きいほど漁獲量変動をより抑制することが選好される。よって、 q の値を大きくしたときの最適 HCR は漁獲量変動をより抑制する HCR となる。 q の値の大きさに対応した調節パラメータ β を導入して検討を行った結果、以下の最適 HCR の式が得られた。

$$\begin{cases} \max[0, \tilde{C}_t = \beta(\tilde{B}_t^\alpha - (k\tilde{B}_{MSY})^\alpha) + 1] & (\text{if } \beta(k\tilde{B}_{MSY})^\alpha \geq 1) \\ \tilde{C}_t = \beta\tilde{B}_t^\alpha & (\text{if } \beta(k\tilde{B}_{MSY})^\alpha < 1) \end{cases}$$

ここで、 $\max[a, b]$ は、 a 、 b のうちの大きな数を返す関数である。この HCR は先に作成した HCR よりもさらにシンプルな式となっており、現実の資源管理により適用しやすく、パフォーマンスにも問題ないものであることが結論された。

本研究により、水産資源管理で一般的な管理目的（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できる最適 HCR の形を明らかにし、さらに、その HCR を再現できる関数式を作成することができた。最適 C_{21} -HCR と最適 F_3 -HCR の形とパフォーマンスを比較した結果、最適 C_{21} -HCR は基礎的な漁獲戦略（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））の部分的な組み合わせで成り立つことが明らかになった。しかし、現行の F_3 -HCR は必ずしもこの組み合わせが可能なわけではなく、資源量が低い場合を除いて戦略は基本的に CHR に限定されるため、最適 C_{21} -HCR よりも低いパフォーマンスしか達成することができなかった。

水産資源管理には様々な立場にあるステークホルダーが参加し、それぞれが望ましいと考える管理目的が必ずしも同一でない状況下で関係者間の合意を得る必要がある。本研究で得られた最適 HCR の関数式は、採用候補となる HCR の作成を容易にするだけでなく、ステークホルダーたちに対してそれぞれが重視する管理目的をどれほど達成できるかを示しやすくすることで、合意へ向けた協議をより円滑かつ容易にすることが期待できる。