

## CCSBT 管理方式の仕様書

### 3. MP で使用される個体群動態モデル及びハーベスト・コントロール・ルール (HCR) の仕様

#### 概要

ケーブタウン方式 (MP) では、ハーベスト・コントロール・ルール (HCR) の 3つのコンポーネントとして CPUE、遺伝子標識放流及び CKMR (POP 及び HSP) データを使用する。CKMR コンポーネントでは、CKMR データに簡素化した成魚個体群動態モデル (資源量及び総死亡量) を当てはめる。その上で、HCR には TRO の対数線形トレンドを用いる。HCR における遺伝子標識放流及び CPUE コンポーネントでは、TAC 勧告に変更が生じない範囲を形成する上限及び下限を定め、これらの限界値を上回る又は下回る場合に TAC を直線的に増加又は減少させる形に変更する。

#### 成魚個体群動態モデル

成魚個体群動態モデルは以下のとおり定義される。

$$\begin{aligned} N_{y_{\min}, a_{\min}} &= \bar{R} \exp(\xi_{y_{\min}} - \sigma_R^2/2), \\ N_{y, a_{\min}} &= \bar{R} \exp(\epsilon_y - \sigma_R^2/2), \\ \epsilon_y &= \rho\epsilon_{y-1} + \sqrt{1 - \rho^2}\xi_y, \\ \xi_y &\sim N(0, \sigma_R^2), \\ N_{y+1, a+1} &= N_{y, a} \exp(-Z_{y, a}) \quad a \in (a_{\min}, a_{\max}), \\ N_{y+1, a_{\max}} &= N_{y, a_{\max}-1} \exp(-Z_{y, a_{\max}-1}) + N_{y, a_{\max}} \exp(-Z_{y, a_{\max}}), \\ Z_{y, a} &= Z_y \quad a \leq 25, \\ Z_{y, a} &= Z_y + \frac{a - 25}{a_{\max} - 25} (Z_{a_{\max}} - Z_y) \quad a \in [26, a_{\max}], \\ Z_y &= \frac{Z_{\max} e^{\chi_y} + Z_{\min}}{1 + e^{\chi_y}}, \\ \chi_{\text{init}} &\sim N(\mu_{\chi_{\text{init}}}, \sigma_{\chi_{\text{init}}}^2), \\ \chi_{y+1} &= \chi_y + \zeta_y, \\ \zeta_y &\sim N(0, \sigma_{\chi}^2), \\ TRO_y &= \sum_a N_{y, a} \varphi_a \end{aligned}$$

本モデルにおける固定パラメータ及びセッティングは下表のとおりである。

Parameter	Value
$a_{\min}$	6
$a_{\max}$	30
$\sigma_r$	0.25
$\rho$	0.5
$\sigma_\chi$	0.15
$Z_{\min}$	0.05
$Z_{\max}$	0.4
$Z_{a_{\max}}$	0.5
$\mu_{\chi_{\text{init}}}$	-1.38
$\sigma_{\chi_{\text{init}}}$	0.2
$q_{\text{hsp}}$	1

本モデルにおける推定パラメータは以下のとおりである。

1. 平均成魚加入量  $R$
2. 成魚加入量の偏差  $\epsilon_y$
3.  $Z_y$  (及び正規事前平均及びSD) のランダムウォークを「開始」する初期値  $\chi_{\text{init}}$  (正規事前平均及びSDを含む)
4. ランダムウォークの偏差  $\zeta_y$

POPデータの尤度はOMで使用しているものと類似している。総再生産出力は以下により計算される。

$$TRO_y = \sum_{a=a_{\min}}^{a_{\max}} N_{y,a} \varphi_a$$

及び若齢魚-成魚ペア  $\{i, j\}$  を考慮する。ここで、それぞれ  $z_i = \{c\}$  は若齢魚の共変量、 $c$  は該当するコホート (生年)、 $z_j = \{y, a\}$  は成魚の共変量、 $y$  及び  $a$  はサンプリングの年及び年齢である。ペアがPOPである確率は以下により表される。

$$\mathbb{P}(K_{ij} = \text{POP} | z_i, z_j) = \mathbb{I}(c < y < c + a) \frac{2\varphi_{a-(y-c)}}{TRO_c}$$

この確率は、POPデータにおける二項分布の尤度を作成するために使用される。HSPデータに関しては、若齢魚-若齢魚ペア  $i$  と  $i'$  を比較する。ここで、重要な共変量はそれぞれの生年、コホート  $c$  である。HSPが確認される確率は以下のとおり定義される。

$$\mathbb{P}(K_{ii'} = HSP | z_i, z_{i'}) = \frac{4\pi^\eta q_{\text{hsp}}}{TRO_{c_{\text{max}}}} \left( \sum_a \gamma_{c_{\text{min}}, a} \left( \prod_{k=0}^{\delta-1} \exp(-Z_{c_{\text{min}}+k, a+k}) \right) \varphi_{a+\delta} \right),$$

$$\gamma_{y, a} = \frac{N_{y, a} \varphi_a}{TRO_y},$$

$$\{z_i, z_{i'}\} = \{c_i, c_{i'}\},$$

$$c_{\text{min}} = \min\{c_i, c_{i'}\},$$

$$c_{\text{max}} = \max\{c_i, c_{i'}\}$$

また、この確率は HSP データの二項分布の尤度の基礎となる。

### ハーベスト・コントロール・ルール

改訂された MP の全体的な構造は以下のとおりである。

$$TAC_{y+1} = TAC_y (1 + \Delta_y^{\text{cpue}} + \Delta_y^{\text{ck}}) \times \Delta_y^{\text{gt}}, \quad (1)$$

HCR の関数式の詳細に入る前に、いくつかの有益な変数について概括する。

- $I_y^{\text{ck}}$ : MP 個体群動態モデルから推定された TRO の (体長  $t^{\text{ck}}$  の) 移動平均 (必要な時にシグナルに引きずられ過ぎないように、モデルによる前方 4 年間の予測結果を用いて、現在年から予測されたもの)
- $\tilde{I}$ : 2003 年から 2014 年までの推定 TRO の平均値 (相対的再建基準に関する参照期間)
- $\gamma$ : 我々が達成したい TRO 再建水準に見合う数量
- $\eta = I_y^{\text{ck}} / (\gamma \tilde{I}) - 1$ : 負から正への移行、すなわち TRO の再建が達成され MP の反応性の遷移が起こるポイントを示す (すなわち CPUE と CKMR のシグナルのみが能動的反応から受動的に変化する) 変数

HCR における CPUE の部分については、密度依存ゲインパラメータを用いた。

$$k^{\text{cpue}}(\eta) = w_1^{\text{cpue}} \left( 1 - (1 + e^{-2\kappa\eta})^{-1} \right) + w_2^{\text{cpue}} (1 + e^{-2\kappa\eta})^{-1}$$

これは、ヘヴィサイドの階段関数のロジスティック関数近似  $\mathbf{H}[\eta]$  ( $\mathbf{H}[\eta < 0] = 0, \mathbf{H}[\eta \geq 0] = 1$ ) を利用している。  $\kappa = 20$  としているので、 $\eta$  を踏まえた 2 つのゲインパラメータの間の遷移は  $\delta = 1$  の  $\pm 5\%$  以内で発生する。したがって、CPUE 乗数は以下のとおり定義される。

$$\Delta_y^{\text{cpue}} = k^{\text{cpue}}(\eta) (\delta_y^{\text{cpue}} - 1)$$

また、 $\delta_y^{\text{cpue}}$  は、実際には HCR における遺伝子標識放流部分の数式と非常に類似している。

$$\begin{aligned}\delta_y^{\text{cpue}} &= \left( \frac{\bar{I}_{\text{cpue}}}{I_{\text{low}}} \right)^{\alpha_1} & \forall \bar{I}_{\text{cpue}} \leq I_{\text{low}}, \\ \delta_y^{\text{cpue}} &= 1 & \forall \bar{I}_{\text{cpue}} \in (I_{\text{low}}, I_{\text{high}}), \\ \delta_y^{\text{cpue}} &= \left( \frac{\bar{I}_{\text{cpue}}}{I_{\text{high}}} \right)^{\beta_1} & \forall \bar{I}_{\text{cpue}} \geq I_{\text{high}},\end{aligned}$$

ここで、 $\bar{I}_{\text{cpue}}$  は LL1 CPUE の（4年間の）移動平均であり、 $I_{\text{low}}$  及び  $I_{\text{high}}$  は CPUE 値の上限及び下限のしきい値であり、 $\alpha_1$  及び  $\beta_1$  はしきい値の範囲の上又は下での非対称的な応答を可能にするものである。

HCR の CKMR 部分では、目標水準の下では TRO の増加率を最小化するように試みるとともに、これの達成後は TRO を同水準に維持しようとしている。また、HCR にこうした挙動を取り入れるため、HCR が TAC 増加から TAC 減少に移行する際の対数線形成長率にいくらかの密度依存性を取り込んでいる。

$$\begin{aligned}\Delta_y^{\text{ck}} &= k^{\text{ck}}(\eta) (\lambda^{\text{ck}} - \tilde{\lambda}(\eta)), \\ k^{\text{ck}}(\eta) &= k_1^{\text{ck}} \left( 1 - (1 + e^{-2\kappa\eta})^{-1} \right) + k_2^{\text{ck}} (1 + e^{-2\kappa\eta})^{-1}, \\ \tilde{\lambda}(\eta) &= \lambda_{\min} \left( 1 - (1 + e^{-2\kappa\eta})^{-1} \right)\end{aligned}$$

対数線形トレンド  $\lambda^{\text{ck}}$  が TAC 減少を支持する局面から TAC 増加に移行する際のしきい値の水準は、基本的に  $\lambda_{\min} > 0$  から始まり、推定 TRO が目標水準に近づくと連れて急速にゼロまで減少する（CPUE トレンドの項と類似）。これは、目標を下回る全ての軌道において再建を最低水準とすることを奨励し、目標を上回った場合は現状維持を選好するよう確保するためである。

遺伝子標識放流データから得られた直近の平均 2 歳魚資源量を計算するため、荷重移動平均手法を検討した。

$$\bar{N}_{y,2} = \sum_{i=y-1-\tau^{\text{gt}}}^{y-2} \omega_i \hat{N}_{i,2}$$

ここで、 $\omega_i$  は GT 推定値  $N_{i,2}$  を作成するために使用される一致件数に対する荷重比である（基本的に逆分散荷重である）。計算の際、推定値が利用可能になる年と計算と実際に参照している年との間の 2 年間のズレが考慮される。HCR における GT 部分の乗数は以下のとおりである。

$$\Delta_y^{\text{gt}} = \begin{cases} \left(\frac{\bar{N}_{y,2}}{N_{\text{low}}}\right)^\alpha & \text{if } \bar{N}_{y,2} \leq N_{\text{low}}, \\ 1 & \text{if } \bar{N}_{y,2} \in (N_{\text{low}}, N_{\text{high}}), \\ \left(\frac{\bar{N}_{y,2}}{N_{\text{high}}}\right)^\beta & \text{if } \bar{N}_{y,2} \geq N_{\text{high}} \end{cases}$$

制限水準  $N_{\text{low}}$  と上限  $N_{\text{high}}$  によって TAC 増加が許可されるかどうか決定される。採択された MP の HCR に関するパラメータ値の詳細は表 2 のとおりである。

Parameter	Value
$\tau^{\text{cpue}}$	4
$w_1^{\text{cpue}}$	0.9
$w_2^{\text{cpue}}$	0.005
$I_{\text{low}}$	0.45
$I_{\text{high}}$	1.42
$\alpha_1$	1
$\beta_1$	1
$\tau^{\text{gt}}$	5
$N_{\text{low}}$	1e+6
$N_{\text{high}}$	2.6e+6
$\alpha$	1.5
$\beta$	0.25
$\tau^{\text{ck}}$	3
$k_1^{\text{ck}}$	1.25
$k_2^{\text{ck}}$	0.05
$\gamma$	1.5
$\lambda_{\text{min}}$	0.001
$\kappa$	20

表 2 : CTP における HCR の固定パラメータ値