

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

Delay - Difference

Modelを用いたマアジ対馬暖流系群の資源評価に関する統計的研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2021-06-21 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 田村, 蓮 メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/2155

修士学位論文

Delay-Difference Model を用いた
マアジ対馬暖流系群の資源評価に関する統計的研究

2020 年度

(2021 年 3 月)

東京海洋大学大学院

海洋科学技術研究科

海洋管理政策学専攻

田村 蓮

修士学位論文

Delay-Difference Model を用いた
マアジ対馬暖流系群の資源評価に関する統計的研究

2020 年度

(2021 年 3 月)

東京海洋大学大学院

海洋科学技術研究科

海洋管理政策学専攻

田村 蓮

目次

第1章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	目的	1
1.3	対象種の生物学的性質	1
第2章	資料	3
2.1	生物学的情報	3
2.1.1	自然死亡係数	3
2.1.2	成熟率	3
2.1.3	平均体重	4
2.2	漁獲量	8
2.3	資源量指標値	11
第3章	方法	14
3.1	Yearly Delay-Difference Model	14
3.1.1	個体群動態	14
3.1.2	再生産	15
3.1.3	初期状態	16
3.1.4	観測方程式	17
3.1.5	解析方法	17
3.1.6	将来予測	19
3.1.7	最大持続生産量	20
3.2	Monthly Delay-Difference Model	22
3.2.1	個体群動態	22
3.2.2	再生産	23
3.2.3	初期状態	25
3.2.4	観測方程式	26
3.2.5	解析方法	27
3.2.6	将来予測	28
3.2.7	最大持続生産量	29
3.3	チューニング VPA	33
3.3.1	個体群動態	33
3.3.2	観測方程式	34
3.3.3	解析方法	34
3.3.4	将来予測と再生産	35
3.3.5	最大持続生産量	36

3.4	モデル評価	39
3.4.1	レトロスペクティブ	39
3.4.2	ハインドキャストイング	40
3.5	モデルの一覧	41
第4章	結果	42
4.1	資源評価	42
4.2	モデル評価	51
4.2.1	レトロスペクティブ	51
4.2.2	ハインドキャストイング	54
第5章	考察と今後の課題	55
5.1	資源評価	55
5.2	モデル評価	56
	謝辞	57
	参考文献	58
	付録	60
	YDDM_BH	60
	YDDM_HS	65
	MDDM_BH	70
	MDDM_HS	75
	チューニング VPA	80
	ハインドキャストイング	81

第1章 序論

1.1 背景

対馬暖流系群のマアジ *Trachurus japonicus* は、まき網漁業をはじめとする様々な漁業の対象種で、国内では TAC(Total Allowable Catch, 漁獲可能量)制度による資源管理が実施されている。これまで、対馬暖流系群のマアジに対する資源評価の主な手法として、チューニング VPA(Virtual Population Analysis)が用いられてきた。TAC の基礎となる ABC(Allowable Biological Catch, 生物学的漁獲許容量)の算出は、チューニング VPA による資源評価結果をもとにした将来予測から行われている。

チューニング VPA の特徴として、年齢別漁獲尾数を使用する点や、年齢別漁獲尾数に誤差がないと仮定している点、年齢別漁獲選択性を推定する点、再生産関係に関するパラメータをモデル外で推定する点があげられる。既存のチューニング VPA と多くの仕様が異なる資源評価手法として、Yearly Delay-Difference Model(以下、YDDM とする)がある。YDDM の特徴として漁獲量を使用する点や、漁獲量に誤差を仮定する点、年齢別漁獲選択性を等しいと仮定する点、再生産関係に関するパラメータをモデル内で推定する点があげられる。また、月別漁獲量データを使用することで、月単位のモデルである Monthly Delay-Difference Model(以下、MDDM とする)へ拡張できる。MDDM では、資源量指標値の実施時期や産卵期、体重の月単位の成長を考慮することで、資源量指標値とのフィッティングの改善が期待できる。

1.2 目的

本研究では、YDDM と MDDM を用いて資源評価を行い、チューニング VPA での資源評価結果との比較を行う。さらに、使用するデータが異なる場合でも比較可能なハインドキャストを用いて、将来予測能力の観点からモデルを評価する。本研究の目的は、YDDM と MDDM、チューニング VPA における異なる仕様が資源評価結果に与える影響を検証することである。

1.3 対象種の生物学的性質

スズキ目アジ科マアジ属に属する対馬暖流系群のマアジ(*Trachurus japonicus*)である。東シナ海南部から九州、日本海沿岸域の広域に分布し、春夏に索餌のため北上回遊を秋冬に越冬・産卵のため南下回遊をする。産卵は、東シナ海南部、九州・山陰沿岸から日本海北部沿岸の広い海域で行われる。産卵期は南部で 1-3 月、北部で 5-6 月、盛期は 3-5 月である。オキアミ類、アミ類、カイアシ類などの動物プランクトンや小型魚類を主に餌として捕食する。

幼稚魚はブリなどの魚食性魚類に捕食される。

対馬暖流域で漁獲されるマアジの約 80%は、大中型まき網漁業及び中小型まき網漁業で漁獲される。主に漁獲されるマアジの年齢は 0 歳と 1 歳である。日本に加えて、韓国や中国に漁獲されている。



図 1.3-1. マアジ(*Trachurus japonicus*)の生物写真。

出典： http://www.abchan.fra.go.jp/digests2019/fig/2019_04.jpg, アクセス日 2021 年 2 月 1 日。

第2章 資料

2.1 生物学的情報

本節では、自然死亡係数と成熟、平均体重について述べる。解析に使用した自然死亡係数と成熟率を表 2.1-1、平均体重に関するパラメータを表 2.1-2 に示す。自然死亡係数と成熟率は、各モデルで同じ値を使用するが、平均体重に関するパラメータは異なった値を使用する。

2.1.1 自然死亡係数

自然死亡係数 M は寿命の逆数に比例するという考えの下で求められた田内・田中の式(田中, 1960)により、マアジ対馬暖流系群の最高年齢を5歳と仮定し(依田 他, 2020),

$$M = \frac{2.5}{5} = 0.5 \quad (2.1-1)$$

を使用した。解析期間中に自然死亡率は変化しないとした。

2.1.2 成熟率

マアジ対馬暖流系群では、1歳で約50%、2歳でほぼすべての個体が成熟するとされている(依田 他, 2020)。成熟率 f_a は、

$$f_a = \begin{cases} 0 & (a = 0) \\ 0.5 & (a = 1) \\ 1 & (a \geq 2) \end{cases} \quad (2.1-2)$$

を使用した。 a は年齢を表す添え字である。解析期間中に成熟率は変化しないとした。

表 2.1-1. 解析に使用した自然死亡係数と成熟率。

	0歳	1歳	2歳	3+歳
自然死亡係数 M	0.5	0.5	0.5	0.5
成熟率 f_a	0	0.5	1	1

2.1.3 平均体重

マアジ対馬暖流系群の平均体重の情報として、中島(1982)で求められた九州北部群(S型)の von Bertalanffy 成長曲線(図 2.1-1)と、令和 2 (2020) 年度マアジ対馬暖流系群の資源評価(西海区水産研究所, 未発表)より漁獲物から算出された 1 個体あたりの年別年齢別平均体重(図 2.1-2)を用いた。YDDM と MDDM では、中島(1982)で求められた von Bertalanffy 成長曲線からパラメータ ω と ρ , w_0 をそれぞれのモデルで求めて使用した。チューニング VPA では、漁獲物から算出された 1 個体あたりの年別年齢別平均体重を年別年齢別平均体重 $w_{a,y}$ として使用した。

YDDM と MDDM で使用したパラメータ ω と ρ , w_0 とは、マアジの成長に関するパラメータと加入魚の平均体重を表す。Delay-Difference Model で仮定される平均体重 w_a , $w_{a'}$ に関する以下の漸化式のパラメータである。

$$w_a = \omega + \rho w_{a-1} \quad a = 1, \dots, 5 \quad (2.1-3)$$

$$w_{a'} = \omega + \rho w_{a'-1} \quad a = 1, \dots, 71 \quad (2.1-4)$$

YDDM と MDDM の ω と ρ , w_0 をそれぞれで次のように求めた。

YDDM :

中島(1982)で求められた von-Bertalanffy の成長曲線より、年齢 a 歳魚の平均体重の情報として \tilde{w}_a を以下の式のように求めた。

$$\tilde{w}_a = \int_a^{a+1} 0.0117 \times 38.6^3 \{1 - e^{-0.35(x+0.6)}\}^3 dx \quad (2.1-5)$$

自然死亡係数の項(サブセクション 2.1.1)で最高年齢を 5 歳と仮定したことから、0 歳から 5 歳までの年齢で対数をとった最小二乗法を用いて、以下の式を最小化することで ω と ρ , w_0 を求めた。

$$\sum_{a=0}^5 (\log \tilde{w}_a - \log w_a)^2 \quad (2.1-6)$$

$\omega = 92.3$, $\rho = 0.99$, $w_0 = 16.3$ となった。

MDDM :

中島(1982)で求められた von-Bertalanffy の成長曲線より、月齢 a' ヶ月魚の平均体重の情報として $\tilde{w}_{a'}$ を以下の式のように求めた。

$$\tilde{w}_{a'} = \int_a^{a'+\frac{1}{12}} 0.0117 \times 38.6^3 \{1 - e^{-0.35(x+0.6)}\}^3 dx \quad (2.1-7)$$

自然死亡係数の項(サブセクション 2.1.1)で最高年齢を 5 歳と仮定したことから, 月齢 0 ヲ月から月齢 71 ヲ月まで(満 0 歳初めの生後 0 ヲ月から, 満 5 歳終わりの生後 5 年 11 ヲ月まで)の月齢で対数をとった最小二乗法を用いて, 以下の式を最小化することで ω と ρ , w_0 を求めた.

$$\sum_{a'=0}^{71} (\log \tilde{w}_{a'} - \log w_{a'})^2 \quad (2.1-8)$$

$\omega = 6.09$, $\rho = 1$, $w_0 = 3.29$ となった.

YDDM で求めた w_a と \tilde{w}_a , 平均体重の漸化式(式 2.1-3)を図 2.1-3, MDDM で求めた $w_{a'}$ と $\tilde{w}_{a'}$, 平均体重の漸化式(式 2.1-4)を図 2.1-4 に示す.

表 2.1-2. 解析に使用した平均体重に関するパラメータ.

	YDDM	MDDM	チューニング VPA
パラメータ	$\omega = 92.3$ $\rho = 0.99$ $w_0 = 16.3$	$\omega = 6.09$ $\rho = 1$ $w_0 = 3.29$	漁獲物から算出された 1 個体あたりの年別年齢別平均体重 $w_{a,y}$ (図 2.1-2)

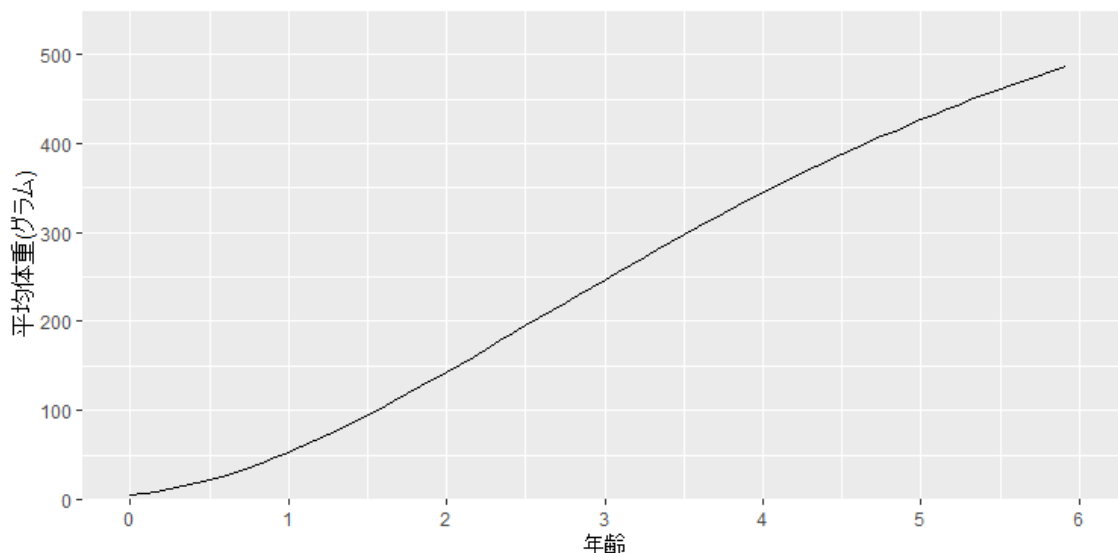


図 2.1-1. 中島(1982)で求められたマアジ対馬暖流系群の九州北部群(S 型)の体重に関する von Bertalanffy 成長曲線 $0.0117 \times 38.6^3 \{1 - e^{-0.35(x+0.6)}\}^3$. 満 0 歳から満 5 歳(生後 0 ヲ月から生後 5 年 11 ヲ月)までを示す.

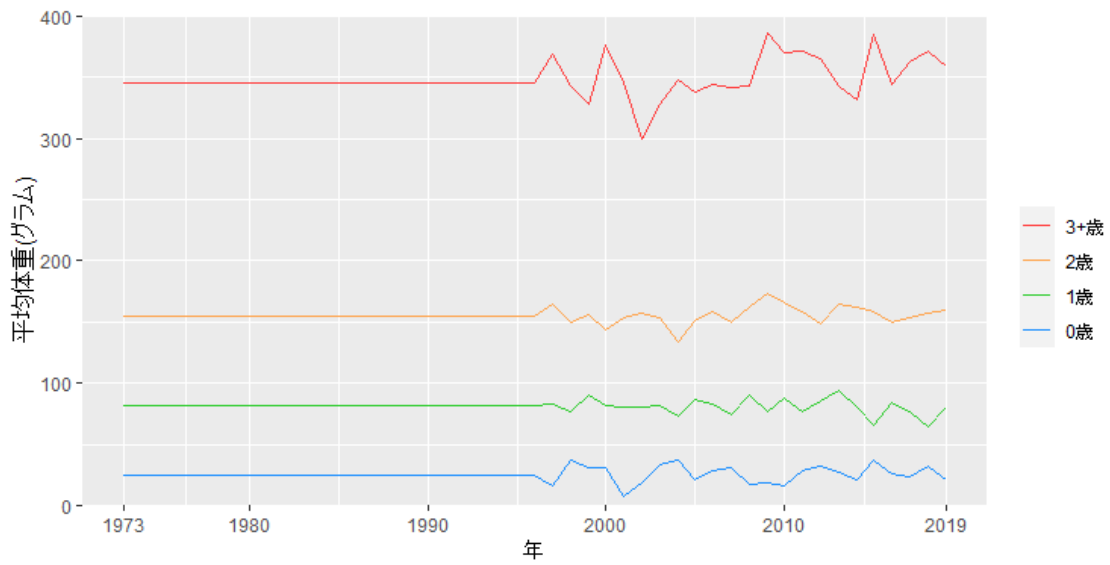


図 2.1-2. 漁獲物から算出された 1 個体あたりの年別年齢別平均体重 $w_{a,y}$.

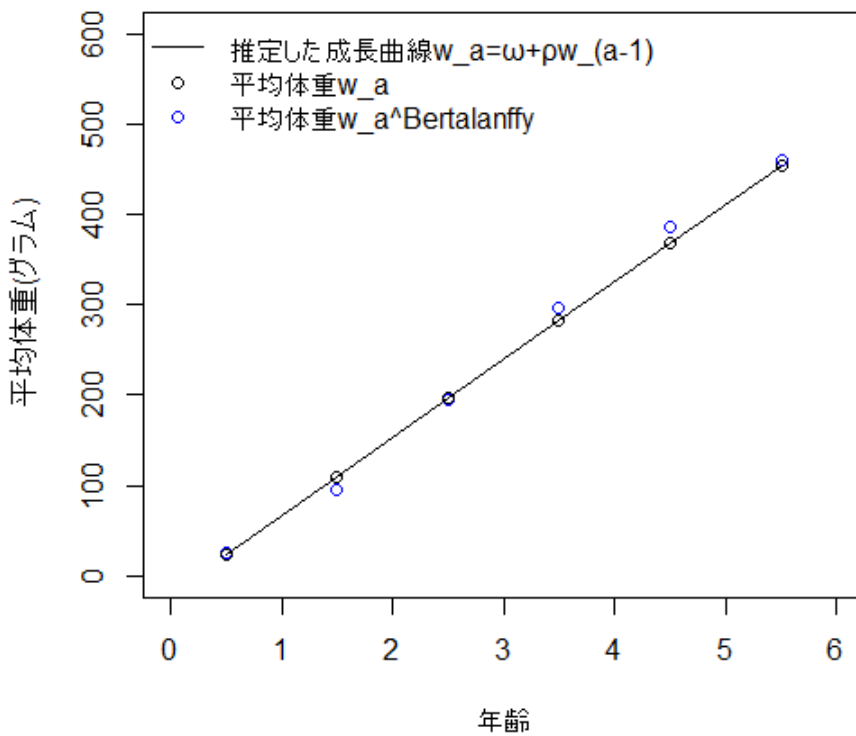


図 2.1-3. YDDM で求めた平均体重 w_a と \tilde{w}_a , 漸化式 $w_a = \omega + \rho w_{a-1}$.

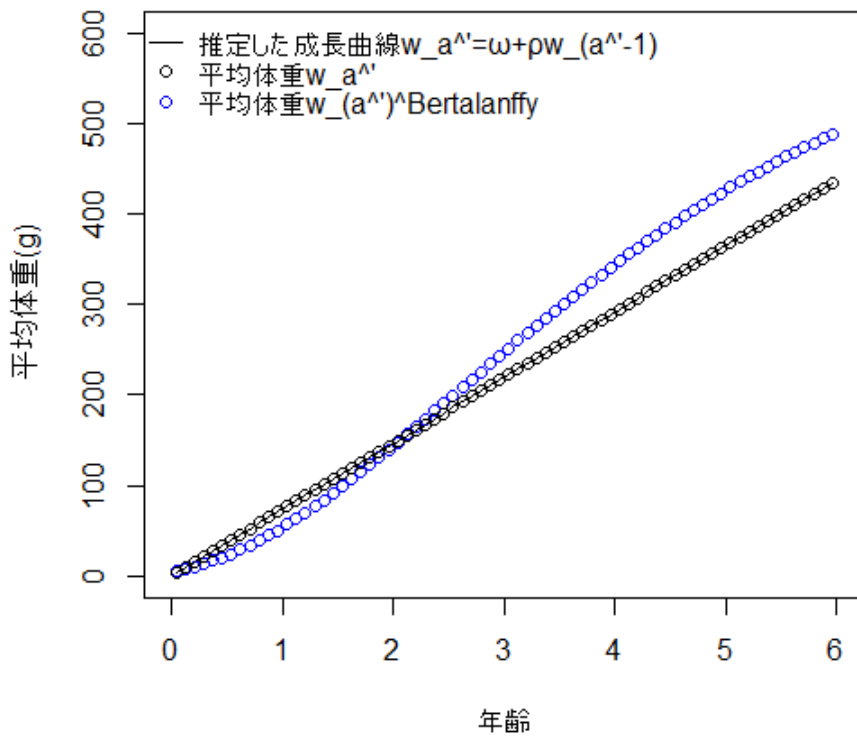


図 2.1-4. MDDM で求めた平均体重 w_{a^a} と \tilde{w}_{a^a} , 漸化式 $w_{a^a} = \omega + \rho w_{a^a-1}$.

2.2 漁獲量

令和 2 (2020) 年度マアジ対馬暖流系群の資源評価(西海区水産研究所, 未発表)より 1973 年から 2019 年までの対馬暖流域におけるマアジの年別漁獲量 C_y (図 2.2-1)と年別年齢別漁獲尾数 $C_{a,y}$ (図 2.2-2), 及び西海区水産研究所より提供して頂いた 2002 年から 2019 年までの対馬暖流域におけるマアジの月別漁獲量 $C_{y,m}^{recent}$ (図 2.2-3)を使用した. これらの漁獲は, 韓国のアジ類漁獲をすべてマアジとした韓国と日本の合計である. 中国の漁獲は考慮していない. 約 80%が, 大中型まき網漁業及び中小型まき網漁業で漁獲され, 主漁場は東シナ海から九州北～西岸・日本海西部である.

YDDM で年別漁獲量 C_y , チューニング VPA で年別年齢別漁獲尾数 $C_{a,y}$ を使用した. MDDM では月別漁獲量 $C_{y,m}^{recent}$ (2002-2019年)と年別漁獲量から算出した月別漁獲量(1973-2001年)を使用した. MDDM で使用した月別漁獲量 $C_{y,m}$ を図 2.2-4 に示す. 月別漁獲量 $C_{y,m}$ は次のように算出した.

$$C_{y,m} = \begin{cases} C_y \times rate_m & (y = 1, \dots, 29) \\ C_{y,m}^{recent} & (y = 30, \dots, 47) \end{cases} \quad (2.2-1)$$

$$rate_m = \frac{1}{18} \sum_{y=30}^{47} \frac{C_{y,m}^{recent}}{C_y} \quad (2.2-2)$$

$rate_m$ は, 近年 m 月の平均漁獲割合を表す. y は, 資源評価開始年を 1 年目, 資源評価最終年を T 年目をとって, 資源評価開始から何年目かを表す添え字である. 本研究では 1973 年を 1 年目とし, 2019 年が 47 年目である. m は, 月を表す添え字で, $m = 1, \dots, 12$ である.

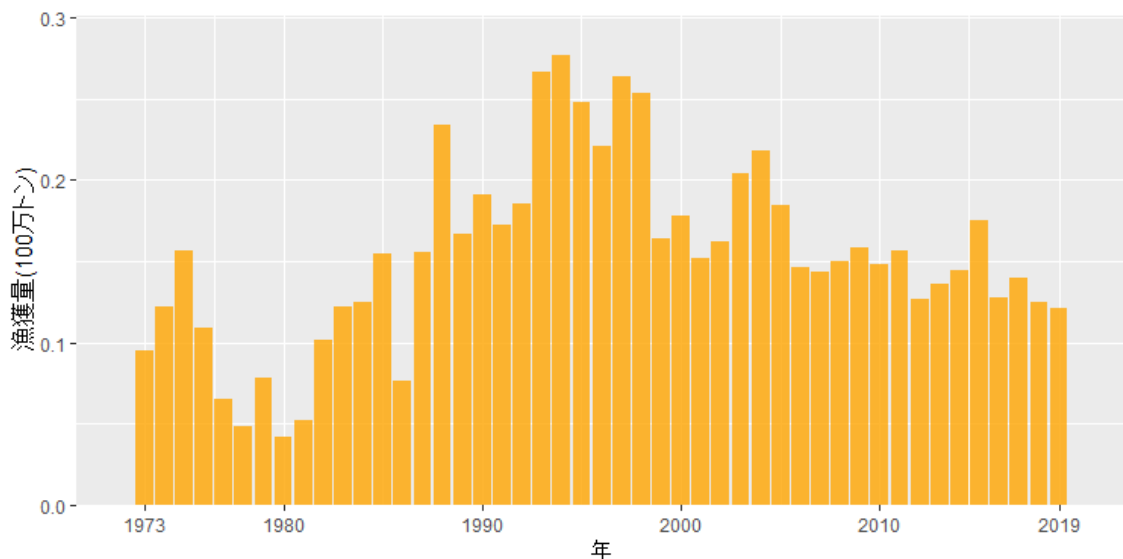


図 2.2-1. 1973 年から 2019 年までの対馬暖流域におけるマアジの年別漁獲量 C_y . YDDM で使用した.

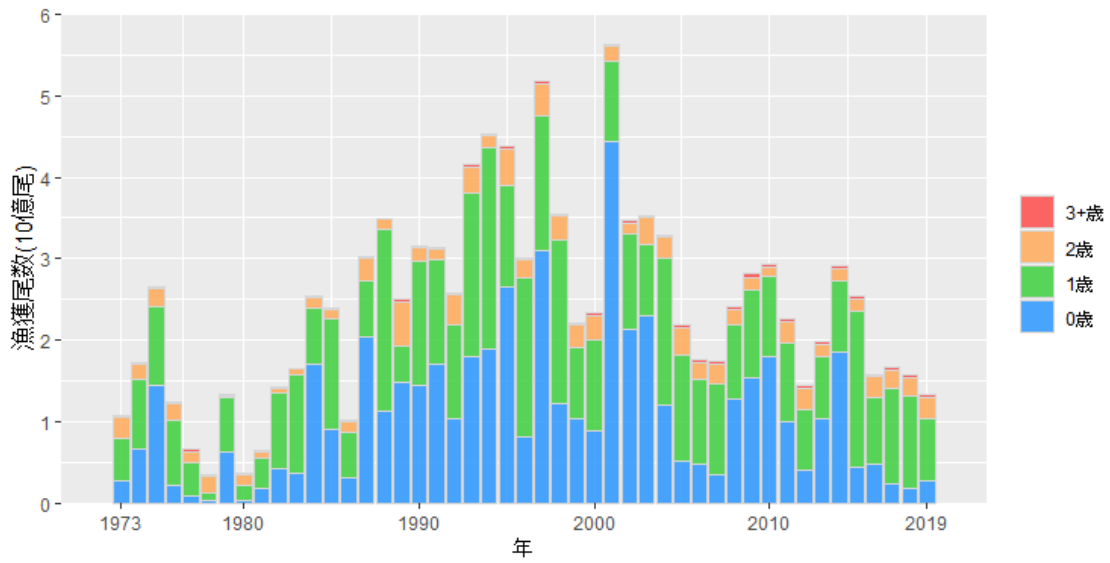


図 2.2-2. 1973 年から 2019 年までの対馬暖流域におけるマアジの年別年齢別漁獲尾数 $C_{a,y}$.
チューニング VPA で使用した.

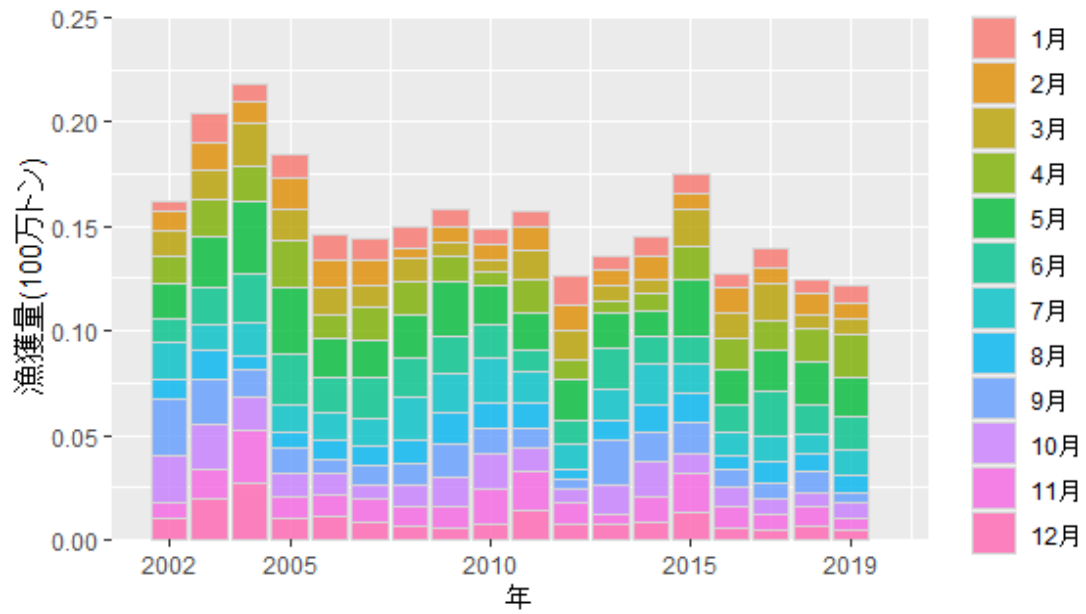


図 2.2-3. 2002 年から 2019 年までの対馬暖流域におけるマアジの月別漁獲量 $C_{y,m}^{recent}$.

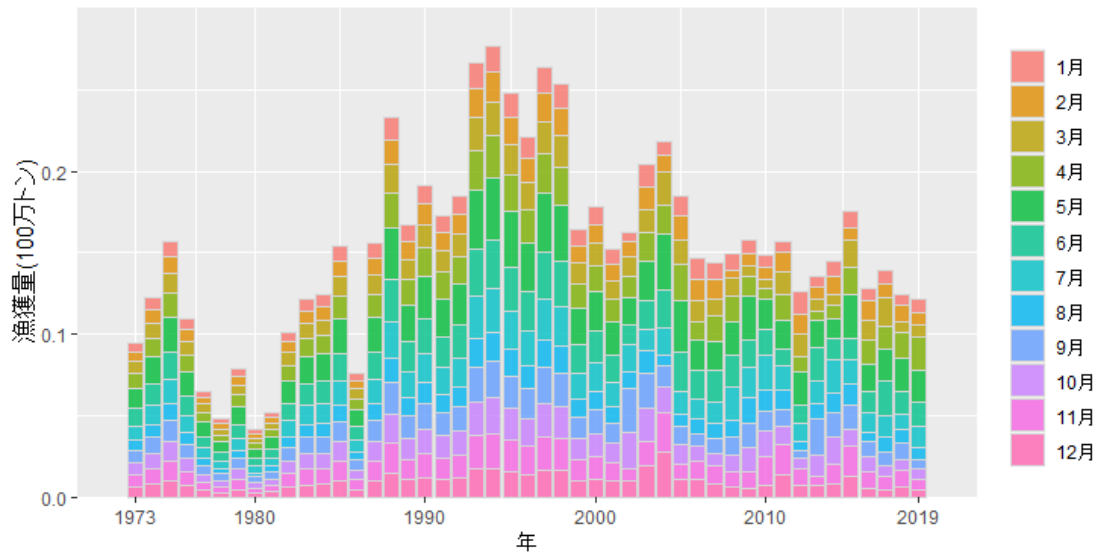


図 2.2-4. 年別漁獲量 C_y (1973-2019 年)と月別漁獲量 $C_{y,m}^{recent}$ (2002-2019 年)から算出された月別漁獲量 $C_{y,m}$. MDDM で使用した.

2.3 資源量指標値

令和2(2020)年度マアジ対馬暖流系群の資源評価(西海区水産研究所, 未発表)より, 2003年から2019年までの合計11種類の資源指標値 I_k (表2.3-1)を使用した。kは, 資源量指標値の種類を表す添え字である。4種類の調査指標値と7種類のCPUEである。年齢別内訳では, 0歳魚に対して6種類(図2.3-2), 1歳魚に対して3種類(図2.3-3), 2歳魚と3+歳魚に対してそれぞれ1種類(図2.3-4)である。資源量指標値の実施時期の模式図を示す。

YDDMとMDDM, チューニングVPAで同一の資源指標値を使用した。資源量指標値ごとの比較やパラメータの推定を容易にするために, すべての資源量指標値で平均値が1になるようにスケーリングを行った。

表 2.3-1. マアジ対馬暖流系群の資源量指標値一覧。

指標値	年齢	期間	略称
長崎魚市豆銘柄 1 入港隻当り水揚量	0 歳	9~1 月	n0
島根県中型まき網一網当り豆銘柄漁獲量	0 歳	8~1 月	s0
着底トロール調査現存量指標値	0 歳	5~6 月	t0
計量魚探調査現存量指標値	0 歳	8~9 月	g0
幼魚分布量調査現存量指標値	0 歳	5~6 月	y0
島根県中型まき網一網当り豆銘柄漁獲量	1 歳	3~5 月	s1
着底トロール調査	1 歳	5~6 月	t1
大中型まき網漁業マメ・ゼンゴ銘柄資源密度指数	0 歳	9~12 月	d0
大中型まき網漁業小銘柄資源密度指数	1 歳	9~12 月	d1
大中型まき網漁業中銘柄資源密度指数	2 歳	9~12 月	d2
大中型まき網漁業大銘柄資源密度指数	3 歳以上	9~12 月	d3p

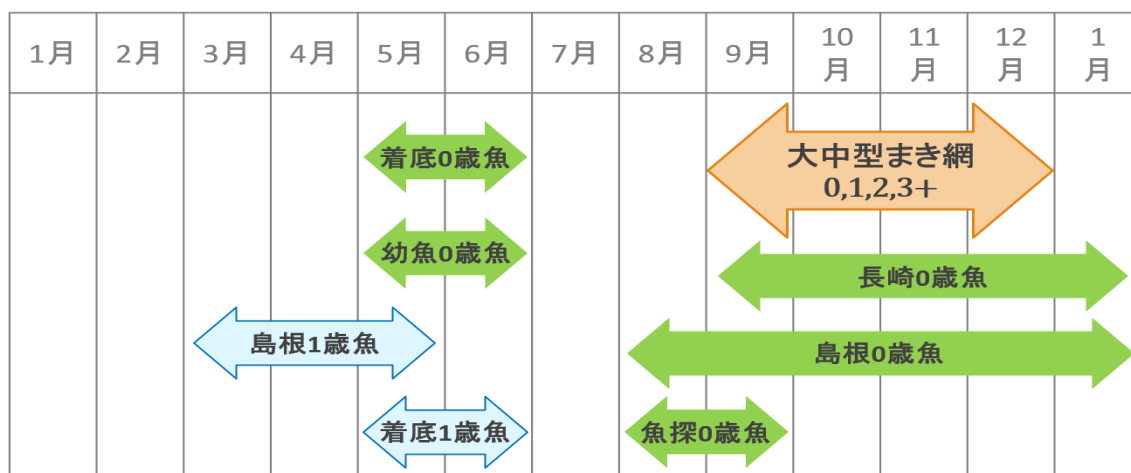


図 2.3-1. 資源量指標値の実施時期の模式図。

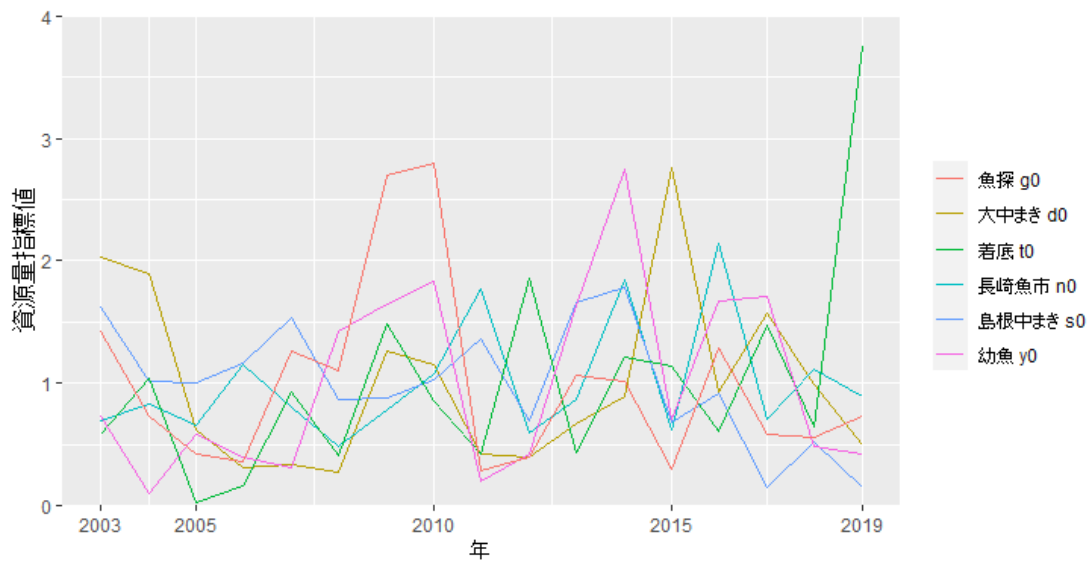


図 2.3-2. マアジ対馬暖流系群の 0 歳魚に対する資源量指標値.

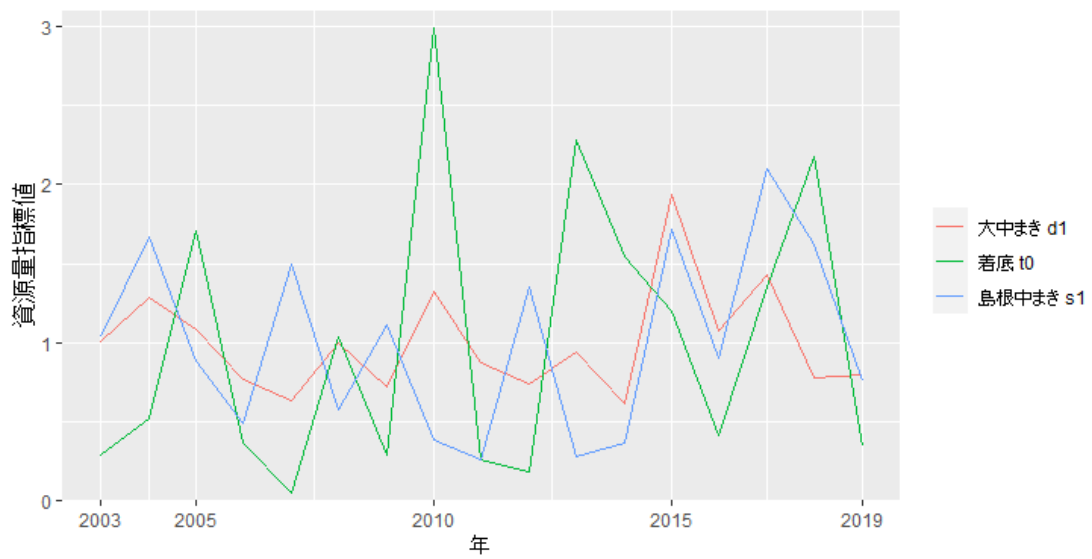


図 2.3-3. マアジ対馬暖流系群の 1 歳魚に対する資源量指標値.

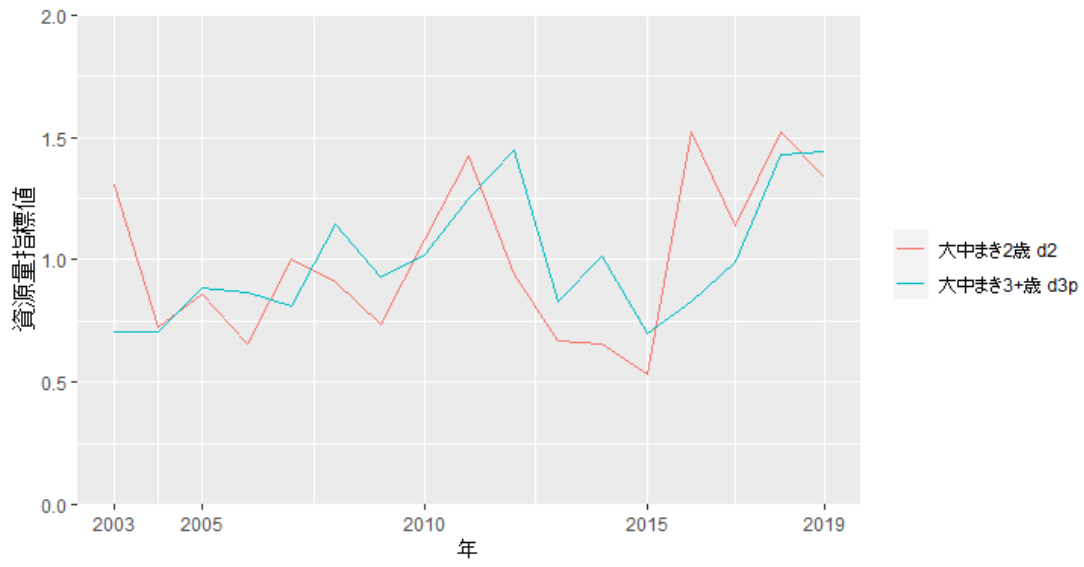


図 2.3-4. マアジ対馬暖流系群の2歳魚と3+歳魚に対する資源量指標値.

第3章 方法

3.1 Yearly Delay-Difference Model

本節では、YDDM の個体群動態についての詳細を述べる。また、パラメータの推定方法や、MSY や将来予測の算出方法についても併せて説明する。

3.1.1 個体群動態

Yearly Delay-Difference Model では、次の2つの仮定をおく。

(1) 平均体重 w_a に対して、以下の漸化式が成り立つ。

$$w_a = \omega + \rho w_{a-1} \quad a = 1, \dots, 5 \quad (3.1-1)$$

(2) すべての年齢で漁獲選択性は等しい。したがって、年別の生存率 s_y は、自然死亡係数 M と年別漁獲係数 F_y を用いて次のように表すことができる。

$$s_y = e^{-(M+F_y)} \quad (3.1-2)$$

生物学的情報の節(セクション 2.1)で述べたように、 $\omega = 92.3$, $\rho = 0.99$, $w_0 = 16.3$, $M = 0.5$ を用いた。

成長に関するパラメータ ω と ρ 、0歳魚の平均体重 w_0 、生存率 s_y を用いて、以下の2つの式を変形することで、

$$B_y = \sum_a w_a N_{a,y} \quad (3.1-3)$$

$$N_{a,y} = s_{y-1} N_{a-1,y-1} \quad (3.1-4)$$

Yearly Delay-Difference Model の個体群動態を次のように定義した。

$$B_y = s_{y-1} B_{y-1} + \rho s_{y-1} B_{y-1} - \rho s_{y-1} s_{y-2} B_{y-2} - (w_0 - \omega) s_{y-1} R_{y-1} + w_0 R_y \quad y = 3, \dots, T \quad (3.1-5)$$

ここで、 B_y は y 年目の資源量、 R_y は y 年目の加入尾数、 T は資源評価最終年を表す。

3.1.2 再生産

産卵親魚量 SSB_y と加入尾数 R_y の関係として、以下の式を仮定した。

$$R_y = g(SSB_y)e^{\eta_y} \quad y = 2, \dots, T \quad (3.1-6)$$

ここで、 $SSB_y = \sum_a f_a B_{a,y}$ である。 f_a は a 歳魚の成熟率、 $B_{a,y}$ は年齢別の資源量を表す。 $B_{a,y}$ は次のように求めた。

$$B_{a,y} = \begin{cases} w_0 R_y & (a = 0) \\ w_1 s_{y-1} R_{y-1} & (a = 1) \\ w_2 s_{y-1} s_{y-2} R_{y-2} & (a = 2) \\ B_y - B_{0,y} - B_{1,y} - B_{2,y} & (a = 3 +) \end{cases} \quad (3.1-7)$$

また、 η_y は再生産の確率的変動を表す誤差項であり、 $E[R_y] = g(SSB_y)$ となるように $\eta_y \sim N(-0.5\sigma_R^2, \sigma_R^2)$ と仮定した。すなわち、

$$\begin{aligned} E[R_y] &= \exp\{\log g(SSB_y) - 0.5\sigma_R^2 + 0.5\sigma_R^2\} \\ &= g(SSB_y) \end{aligned} \quad (3.1-8)$$

となる。

再生産式 $g(SSB_y)$ には Beverton-Holt 型と Hockey-Stick 型の 2 つのモデルを用いた。

Beverton-Holt 型：

$$g(SSB_y) = \frac{\alpha SSB_y}{\beta + SSB_y} \quad (3.1-9)$$

Hockey-Stick 型：

$$g(SSB_y) = \begin{cases} \alpha SSB_y & (SSB_y < \beta) \\ \alpha \beta & (SSB_y \geq \beta) \end{cases} \quad (3.1-10)$$

ここで、 α と β はそれぞれ再生産に関するパラメータである。再生産に関するパラメータ α と β はテーパーネス h を用いて表した。テーパーネス h とは親子関係の強さを表し、産卵親魚量 SSB_y が未開発時産卵親魚量 SSB_0 の 20%の時の未開発時加入尾数 R_0 に対する加入尾数 R_y の割合である。

Beverton-Holt 型：

$$\alpha = \frac{4hR_0}{5h-1} \quad (3.1-11)$$

$$\beta = \frac{SSB_0(1-h)}{5h-1} \quad (3.1-12)$$

Hockey-Stick 型 :

$$\alpha = \frac{R_0}{\beta} \quad (3.1-13)$$

$$h = \begin{cases} \frac{0.2\alpha SSB_0}{R_0} & (0.2SSB_0 < \beta) \\ 1 & (0.2SSB_0 \geq \beta) \end{cases} \quad (3.1-14)$$

なお、未開発時の加入尾数 R_0 と産卵親魚量 SSB_0 の関係を $R_0 = g(SSB_0)$ と仮定し、式 3.1-5 を用いて未開発時の個体群動態を変形することで、未開発時加入尾数 R_0 は、

$$R_0 = SSB_0 \left(\frac{1-s_0-\rho s_0+\rho s_0^2}{\omega s_0+\rho s_0 w_0-\rho s_0^2 w_0-0.5w_1 s_0(1-s_0-\rho s_0+\rho s_0^2)} \right) \quad (3.1-15)$$

として解析的に求めることができる。 $s_0 = e^{-M}$ である。

3.1.3 初期状態

解析開始以前は毎年の加入尾数が R_1 、漁獲係数が φ の平衡状態であったと仮定した。枯渇率 θ を用いて、1年目の産卵親魚量 SSB_1 を表した。

$$SSB_1 = \theta SSB_0 \quad (3.1-16)$$

1年目の産卵親魚量 SSB_1 と加入尾数 R_1 の関係には、誤差項を仮定しなかった。

$$R_1 = g(SSB_1) \quad (3.1-17)$$

漁獲係数 φ は、式 3.1-5 を用いて平衡状態の個体群動態を変形した以下の式を解くことで求めた。

$$R_1 = SSB_1 \times \left\{ \frac{1-e^{-(M+\varphi)}-\rho e^{-(M+\varphi)}+\rho e^{-2(M+\varphi)}}{\omega e^{-(M+\varphi)}+\rho e^{-(M+\varphi)}w_0-\rho e^{-2(M+\varphi)}w_0-0.5w_1 e^{-(M+\varphi)}(1-e^{-(M+\varphi)}-\rho e^{-(M+\varphi)}+\rho e^{-2(M+\varphi)})} \right\} \quad (3.1-18)$$

資源評価開始年の資源量 B_1 と2年目の資源量 B_2 は次のように求めた。

$$B_1 = \frac{R_1(w_0-(w_0-\omega)e^{-(M+\varphi)})}{1-(1+\rho)e^{-(M+\varphi)}+\rho e^{-2(M+\varphi)}} \quad (3.1-19)$$

$$B_2 = s_1 B_1 + \rho s_1 B_1 - \rho s_1 e^{-(M+\varphi)} B_1 - (w_0 - \omega) s_1 R_1 + w_0 R_2 \quad (3.1-20)$$

3.1.4 観測方程式

資源評価に使用するデータとして、1973年から2019年までの対馬暖流域におけるマアジの年別漁獲量(図 2.2-1)と、2003年から2019年までの合計11種類の資源量指標値(図 2.3-2と図 2.3-3, 図 2.3-4)を使用した。

漁獲に対する観測誤差モデルとして、ここでは以下の対数正規分布誤差モデルを用いた。

$$C_y = \frac{F_y}{M+F_y} (1 - e^{-(M+F_y)}) B_y e^{\tau_y} \quad (3.1-21)$$

漁獲係数 F_y には、対数正規分布に従うランダムウォークを仮定した。

$$F_y = F_{y-1} e^{\xi_{y-1}} \quad y = 2, \dots, T \quad (3.1-22)$$

ここで、 $\tau_y \sim N(0, \sigma_C^2)$, $\xi_y \sim N(0, \sigma_F^2)$ である。

資源量指標値に対する観測誤差モデルとして、次のような対数正規分布に従う観測誤差構造を仮定した。

$$I_{k,y} = \hat{I}_{k,y} e^{\varepsilon_{k,y}} \quad (3.1-23)$$

$$\hat{I}_{k,y} = q_k B_{a,y} \quad (3.1-24)$$

ただし、 $\varepsilon_{k,y} \sim N(0, \sigma_{I,k}^2)$ である。 $I_{k,y}$ は y 年目の資源量指標値 k 、 q_k は資源量指標値 k の漁具能率を表す。1歳魚と2歳魚の大中型まき網漁業では、漁具能率が変化していると考えられる(依田 他, 2019)ことから、2003~2007年と2008~2018年において異なる漁具能率を仮定した。他の漁具能率は、変化せず一定であると仮定した。

3.1.5 解析方法

パラメータの推定方法には、ベイズ法を用いた。パラメータの事後分布の作成には、マルコフ連鎖モンテカルロ(Markov chain Monte Carlo, MCMC)法を用いた。制限のないパラメータの事前分布はすべて無情報事前分布として一様分布とし、推定値にはMCMCサンプル

の中央値を用いた。なお、実際の計算には、統計解析フリーソフト R(version 3.6.3, <https://cran.r-project.org/>, アクセス日 2021 年 2 月 11 日)の rstan パッケージ(version 2.21.2, <https://mc-stan.org/users/interfaces/rstan>, 2021 年 2 月 11 日)を用いて、確率的プログラミング言語である stan でパラメータ推定を行った。ここでは、chain=4, iteration=18000, warmup=3000, thinning=5 とした。また、収束の判定には、すべてのパラメータにおいて $R_{hat} < 1.1$ となることを基準とした。

推定したパラメータと事前分布の範囲を表 3.1-1 に示す。再生産関係のパラメータとして、Beverton-Holt 型ではステープネス h を、Hockey-Stick 型では再生産式におけるパラメータ β を推定した。他のすべてのパラメータは Beverton-Holt 型と Hockey-Stick 型で同様に推定した。

表 3.1-1. Yearly Delay-Difference Model で推定したパラメータ。

数学記号	定義	事前分布の範囲	備考
SSB_0	未開発時の産卵親魚量	$U(0.1,10)$	
θ	1 年目の 産卵親魚量枯渇率	$U(0.01,0.99)$	
h	ステープネス	$U(0.201,1)$	Beverton-Holt 型では、 推定したパラメータ
β	再生産に関する パラメータ	$U(0.01,10)$	Hockey-Stick 型では 推定したパラメータ
σ_R	加入誤差の変動係数	$U(0.01,1)$	
σ_C	漁獲量の観測誤差の 変動係数	$U(0.01,1)$	
σ_F	漁獲係数の変動係数	$U(0.01,0.3)$	
$\sigma_{I,k}$	資源量指標値 k の 観測誤差の変動係数	$U(0.01,2)$	
q_k	資源指標値 k の 漁具能率	$U(10^{-5}, 10^5)$	1, 2 歳魚の大中まき網漁業 CPUE 以外の資源量指標 値
$q_{k,1}, q_{k,2}$	2003~2007 年と 2008 ~20019 年の漁具能率	$U(10^{-5}, 10^5)$	1, 2 歳魚の大中まき網漁業 CPUE
R_y	y 年目の加入尾数	$U(10^{-2}, 10^5)$	解析 1 年目のみ $R_1 = g(SSB_1)$
F_y	y 年目の漁獲係数	$U(0.1,2)$	

3.1.6 将来予測

ハインドキャストイングを行うために、1年先の将来予測を行った。ここでは、Beverton-Holt 型と Hockey-Stick 型のそれぞれのモデルを仮定した場合の将来予測の方法を述べる。

まず、推定結果より、再生産に関するパラメータ $\hat{\alpha}'$ と $\hat{\beta}'$ を算出した。 $\hat{\alpha}'$ と $\hat{\beta}'$ は、 $\hat{\alpha}$ と $\hat{\beta}$ とは異なる値である。これは、推定値に MCMC サンプルの中央値を用いており、 \widehat{SSB}_0 や $\hat{\alpha}$ 、 $\hat{\beta}$ は同じ順番の MCMC サンプルではために、 $\hat{\alpha}$ と $\hat{\beta}$ から SSB_0 を算出すると \widehat{SSB}_0 とは異なった値になってしまう。 \widehat{SSB}_0 の方が重要なパラメータであると考え、 \widehat{SSB}_0 と Beverton-Holt 型では \hat{h} 、Hockey-Stick 型では $\hat{\beta}$ から、 $\hat{\alpha}'$ と $\hat{\beta}'$ を算出した。 $\hat{\alpha}'$ と $\hat{\beta}'$ は将来予測と最大持続生産量の算出に用いた。

Beverton-Holt 型：

$$\hat{\alpha}' = \frac{4\hat{h}\hat{R}_0}{5\hat{h}-1} \quad (3.1-25)$$

$$\hat{\beta}' = \frac{\widehat{SSB}_0(1-\hat{h})}{5\hat{h}-1} \quad (3.1-26)$$

Hockey-Stick 型：

$$\hat{\alpha}' = \frac{\hat{R}_0}{\hat{\beta}} \quad (3.1-27)$$

$$\hat{\beta}' = \hat{\beta} \quad (3.1-28)$$

資源評価最終年を T 、将来予測 1 年目を $T+1$ として、予測される加入尾数の中央値 \tilde{R}_{T+1} を次のように求めた。

$$\tilde{R}_{T+1} = g(SSB_{T+1})e^{-0.5\sigma_R^2} \quad (3.1-29)$$

ここで、 SSB_{T+1} は以下の式から算出した。

$$SSB_{T+1} = s_T B_T + \rho s_T B_T - \rho s_T s_{T-1} B_{T-1} - (w_0 - \omega) s_T R_T - 0.5 w_1 s_T R_T \quad (3.1-30)$$

ただし、 B_T と s_T 、 R_T は、資源評価最終年の資源量と生存率、加入尾数である。

推定結果である \hat{B}_T と \hat{B}_{T-1} 、 \hat{s}_T 、 \hat{s}_{T-1} 、 \hat{R}_T 、算出した $\hat{\alpha}'$ と $\hat{\beta}'$ 、 \tilde{R}_{T+1} を用いて、1年先の資源量 \hat{B}_{T+1} を予測した。

$$\begin{aligned}\hat{B}_{T+1} &= \hat{s}_T \hat{B}_T + \rho \hat{s}_T \hat{B}_T \\ &\quad - \rho \hat{s}_T \hat{s}_{T-1} \hat{B}_{T-1} - (w_0 - \omega) \hat{s}_T \hat{R}_T + w_0 \hat{R}_{T+1}\end{aligned}\quad (3.1-31)$$

3.1.7 最大持続生産量

ここでは、Beverton-Holt 型と Hockey-Stick 型のそれぞれのモデルを仮定した場合の最大持続生産量(Maximum Sustainable Yield, MSY)の算出法について述べる。

式 3.1-5 より、持続生産量を達成する個体群動態は、持続生産量を達成する生存率 s_e を用いて、以下の式のように表せる。

$$B_e = s_e B_e + \rho s_e B_e - \rho s_e s_e B_e - (w_0 - \omega) s_e R_e + w_0 R_e \quad (3.1-32)$$

ここで、 B_e は持続生産量を達成する資源量である。 R_e は持続生産量を達成する加入尾数であり、再生産に関するパラメータ $\hat{\alpha}'$ と $\hat{\beta}'$ を用いて、

Beverton-Holt 型：

$$R_e = \frac{\hat{\alpha}' SSB_e}{\hat{\beta}' + SSB_e} \quad (3.1-33)$$

Hockey-Stick 型：

$$R_e = \hat{\alpha}' \hat{\beta}' \quad (SSB_e \geq \beta) \quad (3.1-34)$$

と表せる。持続生産量を達成する産卵親魚量 SSB_e は、 $SSB_e = \sum_a f_a B_{a,e}$ である。年齢別資源量 $B_{a,e}$ は、以下のようになる。

$$B_{a,e} = \begin{cases} w_0 R_e & (a = 0) \\ w_1 s_e R_e & (a = 1) \\ w_2 s_e^2 R_e & (a = 2) \\ B_e - B_{0,e} - B_{1,e} - B_{2,e} & (a = 3 +) \end{cases} \quad (3.1-35)$$

式 3.1-32 に式 3.1-33 を代入して、Beverton-Holt 型の持続生産量を達成する資源量 B_e を求めた。

Beverton-Holt 型；

$$B_e = \hat{\alpha}' \frac{w_0 - w_0 s_e + \omega s_e}{1 - s_e - \rho s_e + \rho s_e^2} - \hat{\beta}' \frac{w_0 - w_0 s_e + \omega s_e}{w_0 - (w_0 - \omega) s_e - (w_0 + 0.5 w_1 s_e) (1 - s_e - \rho s_e + \rho s_e^2)} \quad (3.1-36)$$

式 3.1-32 に式 3.1-34 を代入して、Hockey-Stick 型の持続生産量を達成する資源量 B_e を求めた。

Hockey-Stick 型：

$$B_e = \hat{\alpha}' \hat{\beta}' \frac{w_0 - w_0 s_e + \omega s_e}{1 - s_e - \rho s_e + \rho s_e^2} \quad (3.1-37)$$

持続生産量(Sustainable Yield, SY)は、持続生産量を達成する漁獲係数 F_e を用いて、次のように算出できる。

$$SY(F_e) = \frac{F_e}{M + F_e} (1 - e^{-(M + F_e)}) B_e \quad (3.1-38)$$

持続生産量の最大値が最大持続生産量であり、その時の資源量が B_{MSY} 、漁獲係数が F_{MSY} となる。式 3.1-38 を最大にするような漁獲係数 F_{MSY} について、ニュートン法で解いた。

また、環境収容力 K は、

$$K = \widehat{S} \widehat{B}_0 + w_0 \widehat{R}_0 + 0.5 w_1 \widehat{s}_0 \widehat{R}_0 \quad (3.1-39)$$

と算出した。

3.2 Monthly Delay-Difference Model

本節では、MDDMの個体群動態についての詳細を述べる。また、パラメータの推定方法や、MSYや将来予測の算出方法についても併せて説明する。

3.2.1 個体群動態

Monthly Delay-Difference Modelでは、次の2つの仮定をおく。

(1) 月齢 a' ヶ月の平均体重 $w_{a'}$ に対して、以下の漸化式が成り立つ。

$$w_{a'} = \omega + \rho w_{a'-1} \quad a = 1, \dots, 71 \quad (3.2-1)$$

(2) すべての年齢で漁獲選択性は等しい。したがって、月別の生存率 $s_{y,m}$ は、1年間の自然死亡係数 M と月別漁獲係数 $F_{y,m}$ を用いて次のように表すことができる。

$$s_{y,m} = e^{-\left(\frac{M}{12} + F_{y,m}\right)} \quad (3.2-2)$$

生物学的情報の節(セクション 2.1)で述べたように、 $\omega = 6.09$, $\rho = 1$, $w_0 = 3.29$, $M = 0.5$ を用いた。

成長に関するパラメータ ω と ρ 、月齢0月の平均体重 w_0 、生存率 $s_{y,m}$ を用いて、以下の2つの式を変形することで、

$$B_{y,m} = \sum_{a'} w_{a'} N_{a',y,m} \quad (3.2-3)$$

$$N_{a',y,m} = s_{y,m-1} N_{a'-1,y,m-1} \quad (3.2-4)$$

Monthly Delay-Difference Modelの個体群動態を次のように定義した。

$$B_{y,m} = s_{y,m-1} B_{y,m-1} + \rho s_{y,m-1} B_{y,m-1} - \rho s_{y,m-1} s_{y,m-2} B_{y,m-2} - (w_0 - \omega) s_{y,m-1} R_{y,m-1} + w_0 R_{y,m} \quad (3.2-5)$$

ここで、 $B_{y,m}$ は y 年目 m 月の資源量、 $R_{y,m}$ は y 年目 m 月の加入尾数を表す。

3.2.2 再生産

再生産は4月に起こると仮定した。産卵親魚量 SSB_y と加入尾数 $R_{y,m}$ の関係として、以下の式を仮定した。

$$R_{y,m} = \begin{cases} g(SSB_y)e^{\eta_y} & (m = 4) \\ 0 & (m \neq 4) \end{cases} \quad y = 1, \dots, T \quad (3.2-6)$$

ここで、 T は資源評価最終年を表す。 $SSB_y = \sum_a f_a B_{a,y,4}$ であり、 f_a は a 歳魚の成熟率、 $B_{a,y,4}$ は y 年目4月の年齢別資源量を表す。また、 η_y は再生産の確率的変動を表す誤差項であり、 $E[R_{y,4}] = g(SSB_y)$ となるように $\eta_y \sim N(-0.5\sigma_R^2, \sigma_R^2)$ と仮定した。すなわち、

$$\begin{aligned} E[R_{y,4}] &= \exp\{\log g(SSB_y) - 0.5\sigma_R^2 + 0.5\sigma_R^2\} \\ &= g(SSB_y) \end{aligned} \quad (3.2-7)$$

となる。加入と年齢別資源量の模式図を図 3.2-1 に示す。

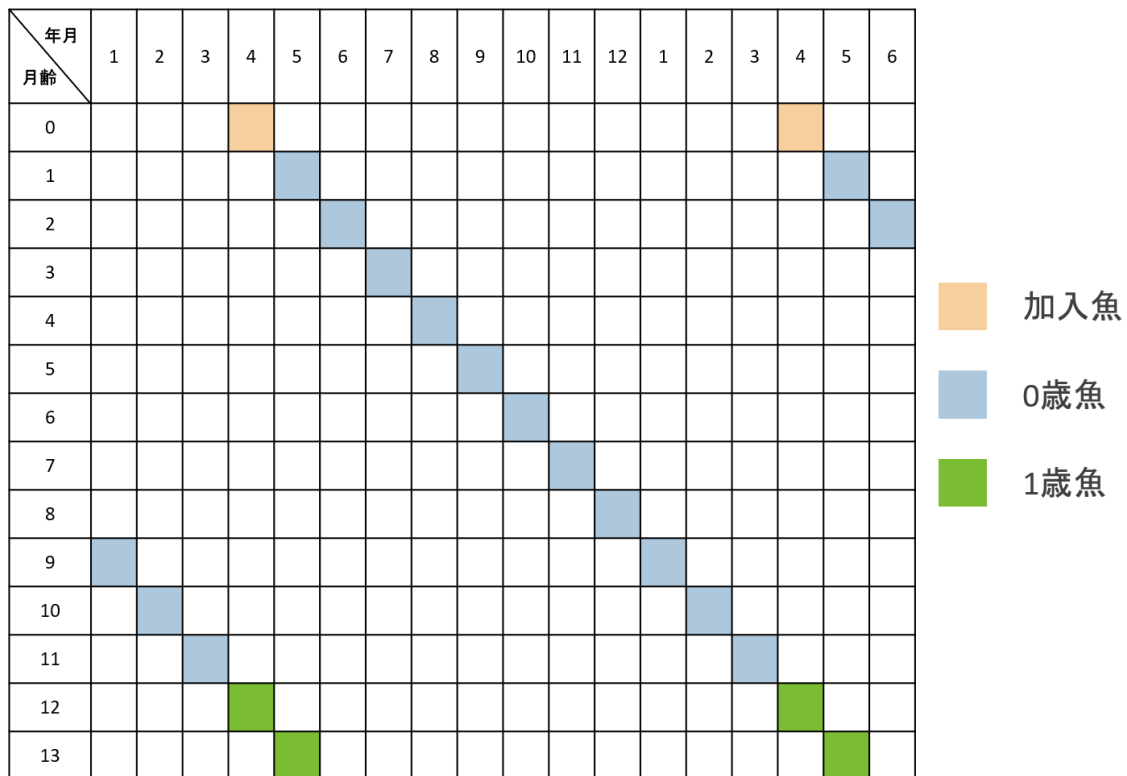


図 3.2-1. MDDM の加入と年齢別資源量の模式図。行が月年齢 0 ヲ月から月年齢 13 ヲ月まで、列がある年の 1 月から翌年 6 月までを表す。

再生産式 $g(SSB_y)$ には Beverton-Holt 型と Hockey-Stick 型の 2 つのモデルを用いた。

Beverton-Holt 型 :

$$g(SSB_y) = \frac{\alpha SSB_y}{\beta + SSB_y} \quad (3.2-8)$$

Hockey-Stick 型

$$g(SSB_y) = \begin{cases} \alpha SSB_y & (SSB_y < \beta) \\ \alpha \beta & (SSB_y \geq \beta) \end{cases} \quad (3.2-9)$$

ここで、 α と β はそれぞれ再生産に関するパラメータである。再生産に関するパラメータ α と β はティープネス h を用いて表した。ティープネス h とは親子関係の強さを表し、産卵親魚量 SSB_y が未開発時産卵親魚量 SSB_0 の 20%の時の未開発時加入尾数 R_0 に対する加入尾数 R_y の割合である。

Beverton-Holt 型 :

$$\alpha = \frac{4hR_0}{5h-1} \quad (3.2-10)$$

$$\beta = \frac{SSB_0(1-h)}{5h-1} \quad (3.2-11)$$

Hockey-Stick 型

$$\alpha = \frac{R_0}{\beta} \quad (3.2-12)$$

$$h = \begin{cases} \frac{0.2\alpha SSB_0}{R_0} & (0.2SSB_0 < \beta) \\ 1 & (0.2SSB_0 \geq \beta) \end{cases} \quad (3.2-13)$$

なお、未開発時加入尾数 R_0 を解析的に求めるために、 y 年目の 4 月の資源量 $B_{y,4}$ は、

$$B_{y,4} = \sum_{a'=0}^{\infty} [w_{a'} N_{a',y,4}] \quad (3.2-14)$$

を以下の二つの式を用いて、

$$N_{a',y,4} = N_{a'-12,y-1,4} e^{-\left(\frac{3}{12}M + \sum_{m=1}^3 F_{y,m}\right)} e^{-\left(\frac{9}{12}M + \sum_{m=4}^{12} F_{y-1,m}\right)} \quad (3.2-15)$$

$$w_{a'} = \omega(1 + \rho + \rho^2 + \rho^3 + \rho^4 + \rho^5 + \rho^6 + \rho^7 + \rho^8 + \rho^9 + \rho^{10} + \rho^{11}) + \rho^{12} w_{a'-12} \quad (3.2-16)$$

変形することで、以下のようなになる。

$$B_{y,4} = \left\{ \omega(1 + \rho + \dots + \rho^{11})N_{y-1,4} + \rho^{12}B_{y-1,4} \right\} \times e^{-\left(\frac{3}{12}M + \sum_{m=1}^3 F_{y,m}\right)} e^{-\left(\frac{9}{12}M + \sum_{m=4}^{12} F_{y-1,m}\right)} + w_0 R_{y,4} \quad (3.2-17)$$

未開発時の加入尾数 R_0 と産卵親魚量 SSB_0 の関係を $R_0 = g(SSB_0)$ と仮定し、式 3.2-17 を用いて未開発時の個体群動態を変形することで、

$$R_0 = SSB_0 \left\{ \frac{1 - s_0 - \rho^{12}s_0 + \rho^{12}s_0^2}{\omega s_0(1 + \rho + \dots + \rho^{11}) + \rho^{12}s_0 w_0 - \rho^{12}s_0^2 w_0 - 0.5w_{12}s_0(1 - s_0 - \rho^{12}s_0 + \rho^{12}s_0^2)} \right\} \quad (3.2-18)$$

として求めることができる。 $s_0 = e^{-M}$ である。

3.2.3 初期状態

解析開始以前は毎年の加入尾数が R_{-1} 、漁獲係数が φ の平衡状態であったと仮定した。 R_{-1} は資源評価開始 1 年前の加入尾数を表す。枯渇率 θ を用いて、資源評価開始 1 年前の SSB_{-1} を表した。

$$SSB_{-1} = \theta SSB_0 \quad (3.2-19)$$

資源評価開始 1 年前の産卵親魚量 SSB_{-1} と加入尾数 R_{-1} の関係には、誤差項を仮定しなかった。

$$R_{-1} = g(SSB_{-1}) \quad (3.2-20)$$

漁獲係数 φ は、式 3.2-17 を用いて平衡状態の個体群動態を変形した以下の式を解くことで求めた。

$$R_{-1} = SSB_{-1} \times \left\{ \frac{1 - e^{-(M+\varphi)} - \rho e^{-(M+\varphi)} + \rho e^{-2(M+\varphi)}}{\omega e^{-(M+\varphi)} + \rho e^{-(M+\varphi)} w_0 - \rho e^{-2(M+\varphi)} w_0 - 0.5w_1 e^{-(M+\varphi)} (1 - e^{-(M+\varphi)} - \rho e^{-(M+\varphi)} + \rho e^{-2(M+\varphi)})} \right\} \quad (3.2-21)$$

資源評価開始年の 1 月の資源量 $B_{1,1}$ と 2 月の資源量 $B_{1,2}$ は次のように求めた。

$$B_{1,1} = \frac{R_{-1,4} e^{-\frac{9}{12}(M+\varphi)}}{1 - \rho^{12} e^{-(M+\varphi)}} \left\{ \frac{\omega(1 + \rho + \dots + \rho^{11})}{1 - e^{-(M+\varphi)}} e^{-(M+\varphi)} + w_9 \right\} \quad (3.2-22)$$

$$B_{1,2} = s_{1,1} \left\{ \omega \frac{R_{-1,4} e^{-\frac{9}{12}(M+\varphi)}}{1 - e^{-(M+\varphi)}} + \rho B_{1,1} \right\} \quad (3.2-23)$$

3.2.4 観測方程式

資源評価に使用するデータとして、1973年から2019年までの対馬暖流域におけるマアジの月別漁獲量(図 2.2-4)と、2003年から2019年までの合計11種類の資源量指標値(図 2.3-2と図 2.3-3, 図 2.3-4)を使用した。

漁獲に対する観測誤差モデルとして、ここでは以下の対数正規分布誤差モデルを用いた。

$$C_{y,m} = \frac{F_{y,m}}{\frac{1}{12}M + F_{y,m}} \left(1 - e^{-\left(\frac{1}{12}M + F_{y,m}\right)} \right) B_{y,m} e^{\tau_{y,m}} \quad (3.2-24)$$

ただし、 $\tau_{y,m} \sim N(0, \sigma_C^2)$ である。月別の漁獲係数 $F_{y,m}$ はトレンド項 $\mu_{y,m}$ と季節調整項 $month_{y,m}$ に分けた。

$$F_{y,m} = \mu_{y,m} \times month_{y,m} \quad (3.2-25)$$

トレンド項 $\mu_{y,m}$ は対数正規分布に従う2階差のランダムウォークを仮定した。

$$\mu_{y,m} = \frac{\mu_{y,m-1}^2}{\mu_{y,m-2}} e^{\xi_{y,m-2}^\mu} \quad y = 3, \dots, T \quad (3.2-26)$$

季節調整項 $month_{y,m}$ は周期性を持ち、任意の12ヵ月間の積は常に1に近い値 $\prod_{l=0}^{11} month_{y,m-l} = e^{\xi_{y,m-11}^{month}}$ であると考えた。季節調整項の誤差項は、1973年から2001年までの年別総漁獲量に近年各月の平均漁獲割合算出した期間では仮定せず、2002年から2019年までの正確な月別漁獲量の期間では仮定した。

$$month_{y,m} = \begin{cases} month_m & (y = 1, \dots, 29) \\ \frac{1}{\prod_{l=1}^{11} month_{y,m-l}} e^{\xi_{y,m-11}^{month}} & (y = 30, \dots, T) \end{cases} \quad (3.2-27)$$

ここで、 $\xi_{y,m}^\mu \sim N(0, \sigma_\mu^2)$, $\xi_{y,m}^{month} \sim N(0, \sigma_{mount}^2)$ である。

資源量指標値に対する観測誤差モデルとして、次のような対数正規分布に従う観測誤差構造を仮定した。

$$I_{k,y} = \hat{I}_{k,y} e^{\varepsilon_{k,y}} \quad (3.2-28)$$

$$\hat{I}_{k,y} = q_k \left(\frac{1}{m_k^{last} - m_k^{start} + 1} \sum_{m=m_k^{start}}^{m_k^{last}} B_{a,y,m} \right) \quad (3.2-29)$$

ただし, $\varepsilon_{k,y} \sim N(0, \sigma_{I,k}^2)$ である. $I_{k,y}$ は y 年目の資源量指標値 k , q_k は資源量指標値 k の漁具能率, m_k^{start} と m_k^{last} は資源量指標値 k の始まりの月と終わりの月を表す. 1歳魚と2歳魚の大中型まき網漁業では, 漁具能率が変化していると考えられる(依田 他, 2019)ことから, 2003~2007年と2008~2018年において異なる漁具能率を仮定した. 他の漁具能率は, 変化せず一定であると仮定した.

3.2.5 解析方法

パラメータの推定方法には, ベイズ法を用いた. パラメータの事後分布の作成には, マルコフ連鎖モンテカルロ(Markov chain Monte Carlo, MCMC)法を用いた. 制限のないパラメータの事前分布はすべて無情報事前分布として一様分布とし, 推定値にはMCMCサンプルの中央値を用いた. なお, 実際の計算には, 統計解析フリーソフト R(version 3.6.3, <https://cran.r-project.org/>, アクセス日2021年2月11日)のrstanパッケージ(version 2.21.2, <https://mc-stan.org/users/interfaces/rstan>, 2021年2月11日)を用いて, 確率的プログラミング言語である stan でパラメータ推定を行った. ここでは, chain=4, iteration=4000, warmup=1000, thinning=1とした. また, 収束の判定には, すべてのパラメータにおいて $Rhat < 1.1$ となることを基準とした.

推定したパラメータと事前分布の範囲を表 3.2-1 表 3.1-1 に示す. 再生産関係のパラメータとして, Beverton-Holt 型ではステープネス h を, Hockey-Stick 型では再生産式におけるパラメータ β を推定した. 他のすべてのパラメータは Beverton-Holt 型と Hockey-Stick 型で同様に推定した. また, MDDM では月別資源量 $B_{y,m}$ が推定される. 他のモデルで推定される年別資源量 B_y の比較ために, MDDM の年別資源量として, 1年間の月別資源量の平均値を算出した.

$$B_y = \frac{\sum_m B_{y,m}}{12} \quad (3.2-30)$$

表 3.2-1. Monthly Delay-Difference Model で推定したパラメータ.

パラメータ	定義	事前分布の範囲	備考
SSB_0	未開発時の産卵親魚量	$U(0.1,10)$	
θ	資源評価開始 1 年前の 産卵親魚量枯渇率	$U(0.01,0.99)$	
h	ステープネス	$U(0.201,1)$	Beverton-Holt 型
β	再生産に関する パラメータ	$U(0.01,10)$	Hockey-Stick 型
σ_R	加入誤差の変動係数	$U(0.01,1)$	
σ_C	漁獲量の観測誤差の 変動係数	$U(0.01,1)$	
σ_μ	漁獲係数のトレンド項 の変動係数	$U(0.01,0.5)$	
σ_{month}	漁獲係数の季節調整項 の変動係数	$U(0.01,0.5)$	
$\sigma_{I,k}$	資源量指標値 k の 観測誤差の変動係数	$U(0.01,2)$	
q_k	資源指標値 k の 漁具能率	$U(10^{-5}, 10^5)$	1, 2 歳魚の大中まき網漁業 CPUE 以外の資源量指標 値
$q_{k,1}, q_{k,2}$	2003~2007 年と 2008 ~20019 年の漁具能率	$U(10^{-5}, 10^5)$	1, 2 歳魚の大中まき網漁業 CPUE
$R_{y,4}$	y 年目の 4 月の加入尾数	$U(10^{-2}, 10^5)$	
$F_{y,m}$	y 年目の m 月の漁獲係数	$U(0.01,0.5)$	

3.2.6 将来予測

ハインドキャストイングを行うために、1 年先の将来予測を行った。ここでは、Beverton-Holt 型と Hockey-Stick 型のそれぞれのモデルを仮定した場合の将来予測の方法を述べる。

まず、推定結果より、再生産に関するパラメータ $\hat{\alpha}'$ と $\hat{\beta}'$ を算出した。 $\hat{\alpha}'$ と $\hat{\beta}'$ は、 $\hat{\alpha}$ と $\hat{\beta}$ とは異なる値である。これは、推定値に MCMC サンプルの中央値を用いており、 \widehat{SSB}_0 や $\hat{\alpha}$ 、 $\hat{\beta}$ は同じ順番の MCMC サンプルではために、 $\hat{\alpha}$ と $\hat{\beta}$ から SSB_0 を算出すると \widehat{SSB}_0 とは異なった値になってしまう。 \widehat{SSB}_0 の方が重要なパラメータであると考え、 \widehat{SSB}_0 と Beverton-Holt 型では \hat{h} 、 Hockey-Stick 型では $\hat{\beta}$ から、 $\hat{\alpha}'$ と $\hat{\beta}'$ を算出した。 $\hat{\alpha}'$ と $\hat{\beta}'$ は将来予測と最大持続生産量の算出に用いた。

Beverton-Holt 型 :

$$\hat{\alpha}' = \frac{4\hat{h}\hat{R}_0}{5\hat{h}-1} \quad (3.2-31)$$

$$\hat{\beta}' = \frac{SSB_0(1-\hat{h})}{5\hat{h}-1} \quad (3.2-32)$$

Hockey-Stick 型 :

$$\hat{\alpha}' = \frac{\hat{R}_0}{\hat{\beta}} \quad (3.2-33)$$

$$\hat{\beta}' = \hat{\beta} \quad (3.2-34)$$

資源評価最終年を T , 将来予測 1 年目を $T+1$ として, 予測される加入尾数の中央値 $\tilde{R}_{T+1,4}$ を次のように求めた.

$$\tilde{R}_{T+1,4} = g(SSB_{T+1})e^{-0.5\sigma_R^2} \quad (3.2-35)$$

ここで, SSB_{T+1} は以下の式から算出した.

$$SSB_{T+1} = s_{T+1,3}B_{T+1,3} + \rho s_{T+1,3}B_{T+1,3} - \rho s_{T+1,3}s_{T+1,2}B_{T+1,2} - 0.5w_1R_{T,4} \prod_{m=4}^{12} s_{T,m} \prod_{m=1}^3 s_{T+1,m} \quad (3.2-36)$$

ただし, $B_{T+1,m}$ と $s_{T+1,m}$ は将来予測 1 年目の資源量と生存率, $R_{T,m}$ と $s_{T,m}$ は資源評価最終年の加入尾数と生存率である. $s_{T+1,m}$ は, 以下の式を漁獲係数 $F_{T+1,m}$ について解いて求めた.

$$C_{T+1,m} = \frac{F_{T+1,m}}{M+F_{T+1,m}}(1 - e^{-(M+F_{T+1,m})})B_{T+1,m} \quad (3.2-37)$$

推定結果である $\hat{B}_{T,12}$ と $\hat{B}_{T,11}$, $\hat{s}_{T,12}$, $\hat{s}_{T,11}$, $\hat{R}_{T,4}$, 算出した $\hat{\alpha}'$, $\hat{\beta}'$ を用いて, 式 3.2-5 と式 3.2-35, 式 3.2-37 より資源量 $\hat{B}_{T+1,m}$ を予測した.

3.2.7 最大持続生産量

ここでは, Beverton-Holt 型と Hockey-Stick 型のそれぞれのモデルを仮定した場合の最大持続生産量(Maximum Sustainable Yield, MSY)の算出法について述べる.

式 3.2-17 より, 持続生産量を達成する 4 月の資源量 $B_{e,4}$ の個体群動態は, 持続生産量を

達成する月別生存率 $s_{e,m}$ を用いて、以下の式のように表せる。

$$B_{e,4} = \left\{ \omega(1 + \rho + \dots + \rho^{11}) \frac{R_{e,4}}{1-s_e} + \rho^{12} B_{e,4} \right\} s_e + w_0 R_{e,4} \quad (3.2-38)$$

同様に、持続生産量を達成する5月の資源量 $B_{e,5}$ の個体群動態は、以下の式のように表せる。

$$B_{e,5} = \left\{ \omega(1 + \rho + \dots + \rho^{11}) \frac{s_{e,4} R_{e,4}}{1-s_e} + \rho^{12} B_{e,5} \right\} s_e + w_1 s_{e,4} R_{e,4} \quad (3.2-39)$$

ここで、 $s_e = \prod_{m=1}^{12} s_{e,m}$ 、 R_e は持続生産量を達成する加入尾数である。 R_e は、再生産に関するパラメータ $\hat{\alpha}'$ と $\hat{\beta}'$ を用いて、

Beverton-Holt 型：

$$R_e = \frac{\hat{\alpha}' SSB_e}{\hat{\beta}' + SSB_e} \quad (3.2-40)$$

Hockey-Stick 型

$$R_e = \hat{\alpha}' \hat{\beta}' \quad (SSB_e \geq \beta) \quad (3.2-41)$$

と表せる。持続生産量を達成する産卵親魚量 SSB_e は、 $SSB_e = \sum_a f_a B_{a,e}$ である。式 3.2-38 と式 3.2-39 に式 3.2-40 を代入して、Beverton-Holt 型の持続生産量を達成する4月と5月の資源量 $B_{e,4}$ 、 $B_{e,5}$ は次のように求めた。

Beverton-Holt 型：

$$B_{e,4} = \hat{\alpha}' \frac{w_0 - w_0 s_e + \omega s_e (1 + \rho + \dots + \rho^{11})}{1 - s_e - \rho^{12} s_e + \rho^{12} s_e^2} - \hat{\beta}' \frac{w_0 - w_0 s_e + \omega s_e (1 + \rho + \dots + \rho^{11})}{w_0 - w_0 s_e + \omega s_e (1 + \rho + \dots + \rho^{11}) s_e - (w_0 + 0.5 w_{12} s_e) (1 - s_e - \rho^{12} s_e + \rho^{12} s_e^2)} \quad (3.2-42)$$

$$B_{e,5} = \hat{\alpha}' \frac{w_1 s_{e,4} - w_1 s_{e,4} s_e + \omega s_{e,4} s_e (1 + \rho + \dots + \rho^{11})}{1 - s_e - \rho^{12} s_e + \rho^{12} s_e^2} - \hat{\beta}' \frac{w_1 s_{e,4} - w_1 s_{e,4} s_e + \omega s_{e,4} s_e (1 + \rho + \dots + \rho^{11})}{w_0 - w_0 s_e + \omega s_e (1 + \rho + \dots + \rho^{11}) s_e - (w_0 + 0.5 w_{12} s_e) (1 - s_e - \rho^{12} s_e + \rho^{12} s_e^2)} \quad (3.2-43)$$

式 3.2-38 と式 3.2-39 に式 3.2-41 を代入して、Hockey-Stick 型の持続生産量を達成する4月と5月の資源量 $B_{e,4}$ 、 $B_{e,5}$ は次のように求めた。

Hockey-Stick 型：

$$B_{e,4} = \hat{\alpha}' \hat{\beta}' \frac{w_0 - w_0 s_e + \omega s_e (1 + \rho + \dots + \rho^{11})}{1 - s_e - \rho^{12} s_e + \rho^{12} s_e^2} \quad (3.2-44)$$

$$B_{e,5} = \hat{\alpha}' \hat{\beta}' \frac{w_1 s_{e,4} - w_1 s_{e,4} s_e + \omega s_{e,4} s_e (1 + \rho + \dots + \rho^{11})}{1 - s_e - \rho^{12} s_e + \rho^{12} s_e^2} \quad (3.2-45)$$

さらに、 $B_{e,4}, B_{e,5}$ を用いて、その他の月の資源量 $B_{e,m}$ は以下の持続生産量を達成する個体群動態の式から求められる。

$$B_{e,m} = s_{e,m-1}B_{e,m-1} + \rho s_{e,m-1}B_{e,m-1} - \rho s_{e,m-1}s_{e,m-2}B_{e,m-2} - (w_0 - \omega)s_{e,m-1}R_{e,m-1} + w_0R_{e,m} \quad (3.2-46)$$

持続生産量を達成する月別漁獲係数 $F_{e,m}$ は、2017-2019年の月別漁獲係数 $\hat{F}_{y,m}$ の平均値を用いて以下の式のようにした。

$$F_{e,m} = \delta_e \frac{\sum_{y=T-2}^T \hat{F}_{y,m}}{3} \quad (3.2-47)$$

ここで、 δ_e は $F_{e,m}$ に対する近年の漁獲係数の割合を表す。

持続生産量(Sustainable Yield, SY)は次のように算出できる。

$$SY(F_{e,m}) = \sum_m \frac{F_{e,m}}{\frac{M}{12} + F_{e,m}} \left(1 - e^{-\left(\frac{M}{12} + F_{e,m}\right)} \right) B_{e,m} \quad (3.2-48)$$

持続生産量の最大値が最大持続生産量であり、その時の資源量が B_{MSY} 、漁獲係数が F_{MSY} 、漁獲係数の割合が δ_{MSY} となる。式 3.2-48 を最大にするような漁獲係数の割合 δ_{MSY} について解いた。

なお、最大持続生産量を達成する漁獲係数 F_{MSY} は月別漁獲係数のベクトルであり、特定の月別漁獲割合を前提とする。神戸プロットに用いる F_{ratio} の算出には、年ごとの月別漁獲割合の違いを考慮する必要がある。そのため、 y 年目の月別漁獲割合の時の最大持続生産量を達成する漁獲係数 $F_{MSY,y}$ を用いて、 F_{ratio} を算出した。

$$F_{MSY,y} = \delta_{MSY,y} \hat{F}_{y,m} \quad (3.2-49)$$

$$F_{ratio} = \frac{\hat{F}_{y,m}}{F_{MSY,y}} = \frac{1}{\delta_{MSY,y}} \quad (3.2-50)$$

ここで、 $\delta_{MSY,y}$ は $F_{MSY,y}$ に対する y 年目の漁獲係数 $\hat{F}_{y,m}$ の割合である。式 3.2-48 を最大にするような漁獲係数の割合 $\delta_{MSY,y}$ について解いた。また、 B_{ratio} も同様に $F_{MSY,y}$ の時の資源量が $B_{MSY,y}$ を算出し求めた。

$$B_{ratio} = \frac{\hat{B}_y}{B_{MSY,y}} \quad (3.2-51)$$

環境収容力 K は,

$$K = \widehat{SB}_0 + w_0\widehat{R}_0 + 0.5w_{12}\widehat{s}_0\widehat{R}_0 \quad (3.2-52)$$

と算出した.

3.3 チューニング VPA

本節では、チューニング VPA の個体群動態についての詳細を述べる。また、パラメータの推定方法や、MSY や将来予測の算出方法についても併せて説明する。

3.3.1 個体群動態

チューニング VPA の個体群動態を次のように定義した。

$$B_{a,y} = w_{a,y}N_{a,y} \quad (3.3-1)$$

$$N_{a,y} = N_{a+1,y+1}e^{(M+F_{a,y})} \quad y = 1, \dots, T-1 \quad (3.3-2)$$

$$C_{a,y} = \frac{F_{a,y}}{M+F_{a,y}}N_{a+1,y+1}(e^{M+F_{a,y}} - 1) \quad y = 1, \dots, T-1 \quad (3.3-3)$$

3+歳魚と 2 歳魚の漁獲係数には以下の式のような比例関係があるとした(依田 他, 2020)。

$$F_{3+,y} = 0.3F_{2,y} \quad (3.3-4)$$

ここで、 $B_{a,y}$ は y 年目の a 歳魚の資源量、 $N_{a,y}$ は y 年目の a 歳魚の資源尾数、 $F_{a,y}$ は y 年目の a 歳魚の漁獲係数、 $C_{a,y}$ は y 年目の a 歳魚の漁獲尾数、 T は資源評価最終年を表す。生物学的情報の節(セクション 2.1)で述べたように、 $w_{a,y}$ は年別年齢別平均体重(図 2.1-2)、 $M = 0.5$ を用いた。

資源評価最終年の 0 歳魚と 1 歳魚、2 歳魚の漁獲係数 $F_{a,T}^{terminal}$ をターミナル F と呼ぶ。ターミナル F をある値に決定すると、最近年から過去に遡るようにして資源尾数 $N_{a,y}$ を求めることができる。式 3.3-3 を漁獲係数 $F_{a,y}$ について解く。計算には次の反復式を用いた(依田 他, 2007)。

$$F_{a,y}^{new} = \log \left\{ 1 + \frac{C_{a,y}}{N_{a+1,y+1}} \exp(-M) \frac{M+F_{a,y}}{F_{a,y}} \frac{1-\exp(-F_{a,y})e^{-F_{a,y}}}{1-\exp(-M-F_{a,y})} \right\} \quad (3.3-5)$$

$$F_2^{new} = \log \left[1 + \frac{1-\exp(-F_{2,y})}{N_{3+,y+1}F_{2,y}} \exp(-M) \times \left\{ \frac{C_{3+,y}(M+0.3F_{2,y})}{0.3-0.3\exp(-M-0.3F_{2,y})} \exp(0.7F_{2,y}) + \frac{C_{2,t}(M+F_{2,y}+M)}{1-\exp(-M-F_{2,y})} \right\} \right] \quad (3.3-6)$$

$F_{a,y}$ から $F_{a,y}^{new}$ を算出する。算出された $F_{a,y}^{new}$ を再度 $F_{a,y}$ に代入し、新たな $F_{a,y}^{new}$ を求める。すべ

ての $F_{a,y}$ で初期値を1として、算出と代入を4回繰り返した。

3.3.2 観測方程式

資源評価に使用するデータとして、1973年から2019年までの対馬暖流域におけるマアジの年別年齢別漁獲尾数(図 2.2-2)と、2003年から2019年までの合計11種類の資源量指標値(図 2.3-2と図 2.3-3, 図 2.3-4), 漁獲物から算出された1個体あたりの年齢別平均体重 $w_{a,y}$ (図 2.1-2)を使用した。

資源量指標値に対する観測誤差モデルとして、次のような対数正規分布に従う観測誤差構造を仮定した。

$$I_{k,y} = \hat{I}_{k,y} e^{\varepsilon_{k,y}} \quad (3.3-7)$$

$$\hat{I}_{k,y} = \begin{cases} q_k N_{0,y} & (a = 0) \\ q_k B_{a,y} & (a = 1, 2, 3 +) \end{cases} \quad (3.3-8)$$

ただし、0歳魚は資源尾数、1歳魚以上は資源量とフィッティングさせた。 $\varepsilon_{k,y} \sim N(0, \sigma_k^2)$ である。 $I_{k,y}$ は y 年目の資源量指標値 k 、 q_k は資源量指標値 k の漁具能率、 $B_{a,y}$ は a 歳魚の資源量を表す。年齢別の資源量 $B_{a,y}$ は次のように求めた。

$$B_{a,y} = w_{a,y} N_{a,y} \quad (3.3-9)$$

1歳魚と2歳魚の大中型まき網漁業では、漁具能率が変化していると考えられる(依田 他, 2019)ことから、2003~2007年と2008~2018年において異なる漁具能率を仮定した。他の漁具能率は、変化せず一定であると仮定した。

3.3.3 解析方法

パラメータの推定方法には、最尤法を用いた。推定値には最尤推定値を用いた。なお、実際の計算には、統計解析フリーソフト R(version 3.6.3, <https://cran.r-project.org/>, アクセス日 2021年2月11日)の汎用最適化関数である `optim()` を用いて、準ニュートン法(BFGS法)でパラメータ推定を行った。以下の負の対数尤度を最小化させた。

$$-\log LL = \sum_k \sum_y \left[\frac{1}{2\sigma_{I,k}^2} (\log I_{k,y} - \log \hat{I}_{k,y})^2 - \log \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{I,k}} \right] \quad (3.3-10)$$

推定したパラメータを

表 3.3-1 に示す. 漁具能率 q_k と観測誤差の変動係数 $\sigma_{I,k}$ は, 推定したパラメータではなく最尤推定量として扱った.

$$q_k = \exp\left(\frac{1}{n} \sum_y \log \frac{I_{k,y}}{B_{a,y}}\right) \quad (3.3-11)$$

$$\sigma_{I,k} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_y (\log I_{k,y} - \log q_k B_{a,y})^2} \quad (3.3-12)$$

表 3.3-1. チューニング VPA で推定したパラメータ.

パラメータ	定義	備考
$F_{a,T}^{terminal}$	資源評価最終年の 0 歳魚と 1 歳魚, 2 歳魚の漁獲係数	ターミナル F と呼ぶ

3.3.4 将来予測と再生産

ハインドキャストイングを行うために, 1 年先の将来予測を行った. ここでは, Beverton-Holt 型と Hockey-Stick 型のそれぞれのモデルを仮定した場合の将来予測の方法を述べる.

産卵親魚量 SSB_y と加入尾数 R_y の関係として, 以下の式を仮定した.

$$R_y = g(SSB_y)e^{\eta_y} \quad (3.3-13)$$

ここで, $SSB_y = \sum_a f_a B_{a,y}$ である. f_a は a 歳魚の成熟率である. また, η_y は再生産の確率的変動を表す誤差項であり, $E[R_y] = g(SSB_y)$ となるように $\eta_y \sim N(-0.5\sigma_R^2, \sigma_R^2)$ と仮定した. すなわち,

$$\begin{aligned} E[R_y] &= \exp\{\log g(SSB_y) - 0.5\sigma_R^2 + 0.5\sigma_R^2\} \\ &= g(SSB_y) \end{aligned} \quad (3.3-14)$$

となる. 再生産式 $g(SSB_y)$ には Beverton-Holt 型と Hockey-Stick 型を 2 つのモデルを用いた.

Beverton-Holt 型 :

$$g(SSB_y) = \frac{\alpha SSB_y}{\beta + SSB_y} \quad (3.3-15)$$

Hockey-Stick 型 :

$$g(SSB_y) = \begin{cases} \alpha SSB_y & (SSB_y < \beta) \\ \alpha\beta & (SSB_y \geq \beta) \end{cases} \quad (3.3-16)$$

ここで、 α と β はそれぞれ再生産に関するパラメータである。 $\hat{\alpha}$ と $\hat{\beta}$ は、チューニング VPA で推定した 0 歳魚資源尾数 $\hat{N}_{0,y}$ と再生産式から求まる加入尾数 R'_y を用いて最小絶対値法で、以下の式を最小化させて推定した。

$$\sum_y |\log \hat{N}_{0,y} - \log R'_y| \quad (3.3-17)$$

$$R'_y = g(\widehat{SSB}_y) \quad (3.3-18)$$

ただし、 $\hat{\sigma}_R$ は以下の式で算出した。

$$\hat{\sigma}_R = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_y (\log \hat{N}_{0,y} - \log R'_y)^2} \quad (3.3-19)$$

資源評価最終年を T 、将来予測 1 年目を $T+1$ として、推定した $\hat{\alpha}$ と $\hat{\beta}$ を用いて将来予測における加入尾数 \hat{R}_T を求めた。

$$\hat{R}_T = g(\widehat{SSB}_T) \quad (3.3-20)$$

将来予測には前進法を用いた。

$$N_{a+1,T+1} = N_{a,T} e^{-(M+F_{a,T})} \quad (3.3-21)$$

$$N_{3+,T+1} = N_{3+,T} e^{-(M+F_{3+,T})} + N_{2,T} e^{-(M+F_{2,T})} \quad (3.3-22)$$

$$C_{a,T} = \frac{F_{a,T}}{M+F_{a,T}} N_{a,T} (1 - e^{-(M+F_{a,T})}) \quad (3.3-23)$$

3.3.5 最大持続生産量

ここでは、Beverton-Holt 型と Hockey-Stick 型のそれぞれのモデルを仮定した場合の最大持続生産量(Maximum Sustainable Yield, MSY)の算出法について述べる。

持続生産量を達成する時の持続生産量を達成する資源量 B_e は、以下の式のように表せる。

$$B_{a,e} = N_{a,e} w_{a,e} \quad (3.3-24)$$

$$N_{a,e} = \begin{cases} R_e & (a = 0) \\ R_e e^{-(M+F_{0,e})} & (a = 1) \\ R_e e^{-(M+F_{0,e})} e^{-(M+F_{1,e})} & (a = 2) \\ \frac{R_e e^{-(M+F_{0,e})} e^{-(M+F_{1,e})} e^{-(M+F_{2,e})}}{\{1 - e^{-(M+F_{3+,e})}\}} & (a = 3+) \end{cases} \quad (3.3-25)$$

ここで、 B_e は持続生産量を達成する資源量である。 R_e は持続生産量を達成する加入尾数であり、再生産に関するパラメータ $\hat{\alpha}$ と $\hat{\beta}$ を用いて、

Beverton-Holt 型：

$$R_e = \frac{\hat{\alpha} \times SPR(F_{a,e}) - \hat{\beta}}{SPR(F_{a,e})} \quad (3.3-26)$$

$$SPR(F_{a,e}) = 0.5w_{1,e} e^{-(M+F_{0,e})} + w_{2,e} e^{-(M+F_{0,e})} e^{-(M+F_{1,e})} + w_{3+,e} \frac{e^{-(M+F_{0,e})} e^{-(M+F_{1,e})} e^{-(M+F_{2,e})}}{\{1 - e^{-(M+F_{3+,e})}\}} \quad (3.3-27)$$

Hockey-Stick 型：

$$R_e = \hat{\alpha} \hat{\beta} \quad (SSB_e \geq \beta) \quad (3.3-28)$$

と表せる。持続生産量を達成する産卵親魚量 SSB_e は、 $SSB_e = \sum_a f_a B_{a,e}$ である。年齢別漁獲係数 $F_{a,e}$ と平均体重 $w_{a,e}$ は、2017-2019年の年齢別漁獲係数 $\hat{F}_{a,y}$ と漁獲魚の平均体重 $w_{a,y}$ の平均値を用いて次のようにした。

$$F_{a,e} = \delta_e \frac{\sum_{y=T-2}^T \hat{F}_{a,y}}{3} \quad (3.3-29)$$

$$w_{a,e} = \frac{\sum_{y=T-2}^T w_{a,y}}{3} \quad (3.3-30)$$

ここで、 δ_e は $F_{a,e}$ に対する近年の漁獲係数の割合を表す。

持続生産量(Sustainable Yield, SY)は次のように算出できる。

$$SY(F_{a,e}) = \sum_a \frac{F_{a,e}}{M+F_{a,e}} (1 - e^{-(M+F_{a,e})}) B_{a,e} \quad (3.3-31)$$

持続生産量の最大値が最大持続生産量であり、その時の資源量が B_{MSY} 、漁獲係数が F_{MSY} 、漁獲係数の割合が δ_{MSY} となる。式 3.3-31 を最大にするような漁獲係数の割合 δ_{MSY} について解いた。

なお、最大持続生産量を達成する漁獲係数 F_{MSY} は年齢別漁獲係数のベクトルであり、特定の選択率を前提とする。神戸プロットに用いる F_{ratio} の算出には、年ごとの選択率の違いを考慮する必要がある。そのため、 y 年目の選択率の時の最大持続生産量を達成する漁獲係数 $F_{MSY,y}$ を用いて、 F_{ratio} を算出した。

$$F_{MSY,y} = \delta_{MSY,y} \hat{F}_{a,y} \quad (3.3-32)$$

$$F_{ratio} = \frac{\hat{F}_{a,y}}{F_{MSY,y}} = \frac{1}{\delta_{MSY,y}} \quad (3.3-33)$$

ここで、 $\delta_{MSY,y}$ は $F_{MSY,y}$ に対する y 年目の漁獲係数 $\hat{F}_{a,y}$ の割合である。式 3.3-31 を最大にするような漁獲係数の割合 $\delta_{MSY,y}$ について解いた。た、 B_{ratio} も同様に $F_{MSY,y}$ の時の資源量 $B_{MSY,y}$ を算出し求めた。

$$B_{ratio} = \frac{\hat{B}_y}{B_{MSY,y}} \quad (3.3-34)$$

環境収容力 K は、つぎのように算出した。

$$K = SSB_0 + w_{0,e}R_0 + 0.5w_{1,e}R_0e^{-M} \quad (3.3-35)$$

ここで、 $F_{a,e} = 0$ の時に環境収容力に達する。未開発時の産卵親魚量 SSB_0 と加入尾数 R_0 は次の式から求められる。

$$SSB_0 = R_0 \times SPR(F_{a,e} = 0) \quad (3.3-36)$$

Beverton-Holt 型：

$$R_0 = \frac{\hat{\alpha} \times SPR(F_{a,e}=0) - \hat{\beta}}{SPR(F_{a,e}=0)} \quad (3.3-37)$$

Hockey-Stick 型：

$$R_0 = \hat{\alpha} \hat{\beta} \quad (3.3-38)$$

3.4 モデル評価

本節では、モデル評価の方法として、レトロスペクティブとハインドキャストイングについての詳細を述べる。

3.4.1 レトロスペクティブ

データの開始年を1年目、最終年の L 年目とする。本研究では、1973年が1年目、1973年が47年目であり、 $L = 47$ である。2019年から t 年間のデータを取り除き、1年目から $L - t$ 年目のデータを使用して資源量 $B_y^{(1:L-t)}$ を推定した。 $t = 1, \dots, 5$ とした。

推定資源量 $\hat{B}_y^{(1:L-t)}$ を用いて、レトロバイアスのロー ρ_r の算出をした。

$$\rho_r = \frac{1}{5} \sum_{t=1}^5 \frac{\hat{B}_{L-t}^{(1:L-t)} - \hat{B}_{L-t}^{full}}{\hat{B}_{L-t}^{full}} \quad t = 1, \dots, 5 \quad (3.4-1)$$

ここで、 $\hat{B}_{L-t}^{(1:L-t)}$ は1年目から $L - t$ 年目のデータを使用した時の資源評価最終年の推定資源量、 \hat{B}_{L-t}^{full} はすべてのデータを使用した時の $L - t$ 年目の推定資源量を表す。レトロバイアスのロー ρ_r の模式図を図 3.4-1 に示す。

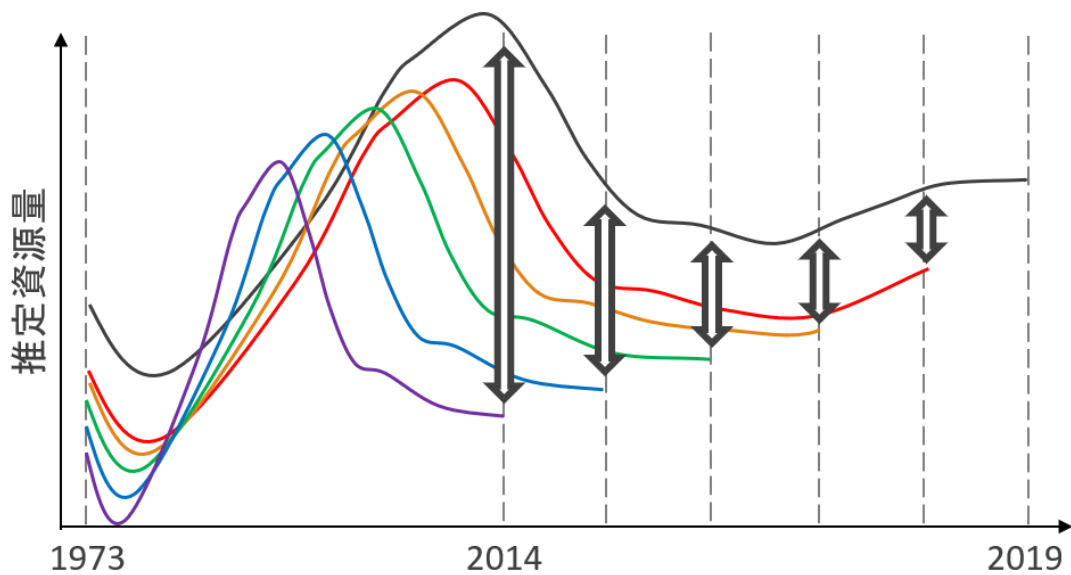


図 3.4-1. レトロバイアスのロー ρ_r の模式図。黒線が \hat{B}_y^{full} ，赤橙緑青紫線が $\hat{B}_y^{(1:L-t)}$ ，矢印が

$\frac{\hat{B}_{L-t}^{(1:L-t)} - \hat{B}_{L-t}^{full}}{\hat{B}_{L-t}^{full}}$ を表す。

3.4.2 ハイノドキャストイング

資源評価最終年の推定資源量 $\hat{B}_{L-t}^{(1:L-t)}$ から、取り除いた漁獲量を使用して1年先の資源量 $\hat{B}_{L-t+1}^{(1:L-t)}$ を予測した。L-t+1年目の取り除いた指標値 $I_{k,L-t+1}$ と予測値 $\hat{q}_k^{(1:L-t)} \hat{B}_{L-t+1}^{(1:L-t)}$ を比較して将来予測能力を検証した。比較には平均二乗誤差MSEを用いた。

$$MSE = \frac{1}{11} \sum_k \frac{1}{5} \sum_t \left\{ \frac{\log I_{k,L-t+1} \log \hat{q}_k^{(1:L-t)} \hat{B}_{L-t+1}^{(1:L-t)}}{\hat{\sigma}_{k,\varepsilon}^{(1:L-t)}} \right\}^2 \quad (3.4-2)$$

ここで、 $\hat{q}_k^{(1:L-t)}$ と $\hat{\sigma}_{k,\varepsilon}^{(1:L-t)}$ は1年目からL-t年目のデータを使用した時の指標値kの漁具能率と観測誤差の変動係数の推定値である。平均二乗誤差の模式図を図3.4-2に示す。

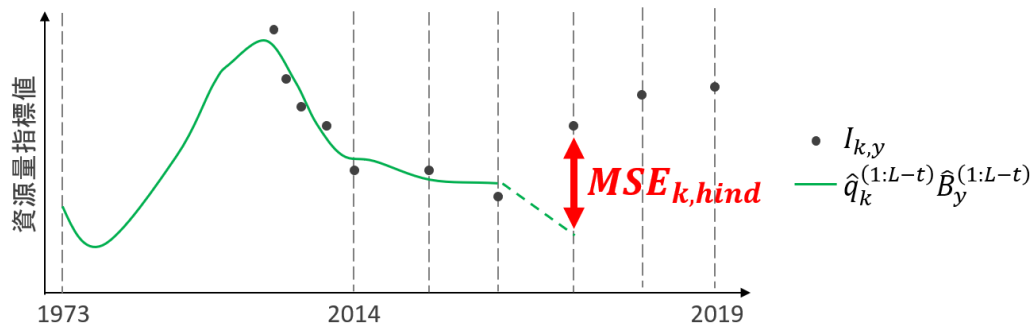


図 3.4-2. 平均二乗誤差 $MSE_{k,t}$ の模式図。緑点線が予測値 $\hat{q}_k^{(1:L-t)} \hat{B}_{L-t+1}^{(1:L-t)}$ を表す。

3.5 モデルの一覧

資源評価は、YDDM_BH と YDDM_HS, MDDM_BH と MDDM_HS, チューニング VPA の合計 5 つのモデルで行った。ハインドキャストは、チューニング VPA が VPA_BH と VPA_HS に別れて、合計 6 つのモデルで行った。モデルの一覧を表 3.5-1 に示す。

表 3.5-1 モデルの一覧.

略称	個体群動態	再生産式
YDDM_BH	Yearly Delay-Difference Model	Beverton-Holt 型
YDDM_HS	Yearly Delay-Difference Model	Hockey-Stick 型
MDDM_BH	Monthly Delay-Difference Model	Beverton-Holt 型
MDDM_HS	Monthly Delay-Difference Model	Hockey-Stick 型
VPA_BH	チューニング VPA	Beverton-Holt 型
VPA_HS	チューニング VPA	Hockey-Stick 型

第4章 結果

4.1 資源評価

YDDM と MDDM, チューニング VPA での資源評価結果を示す. 推定された資源量を図 4.1-1, 漁獲係数を図 4.1-2, 産卵資源量を図 4.1-3, 加入尾数を図 4.1-4, 再生産曲線を図 4.1-5, 神戸プロットを図 4.1-8, 近年 3 年間の Bratio と Fratio の平均値を表 4.1-1, パラメータを表 4.1-2, 資源量指標値とのフィッティングを図 4.1-9 に示す.

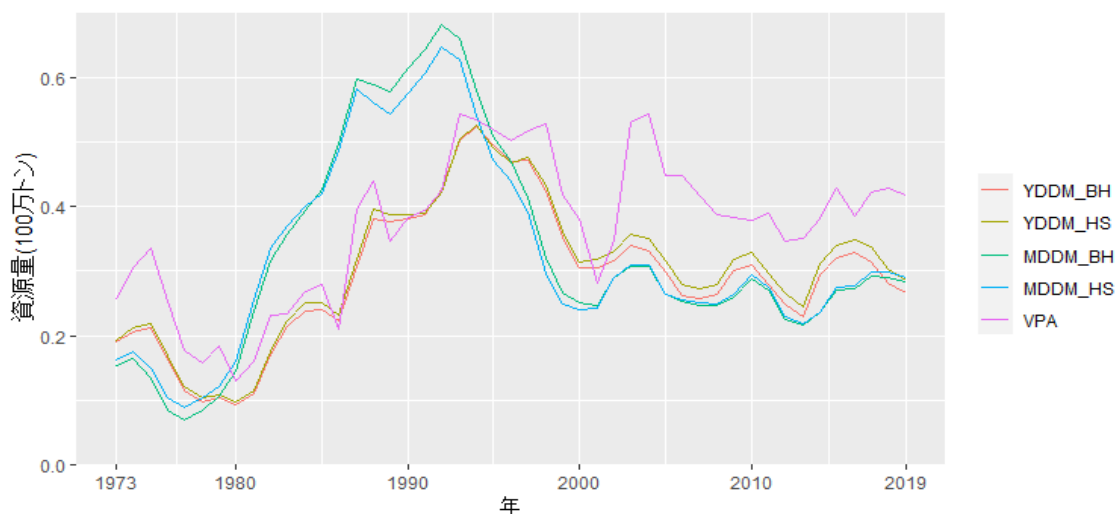


図 4.1-1. 各モデルの推定資源量. MDDM は月別資源量の 1 年間平均値を示す.

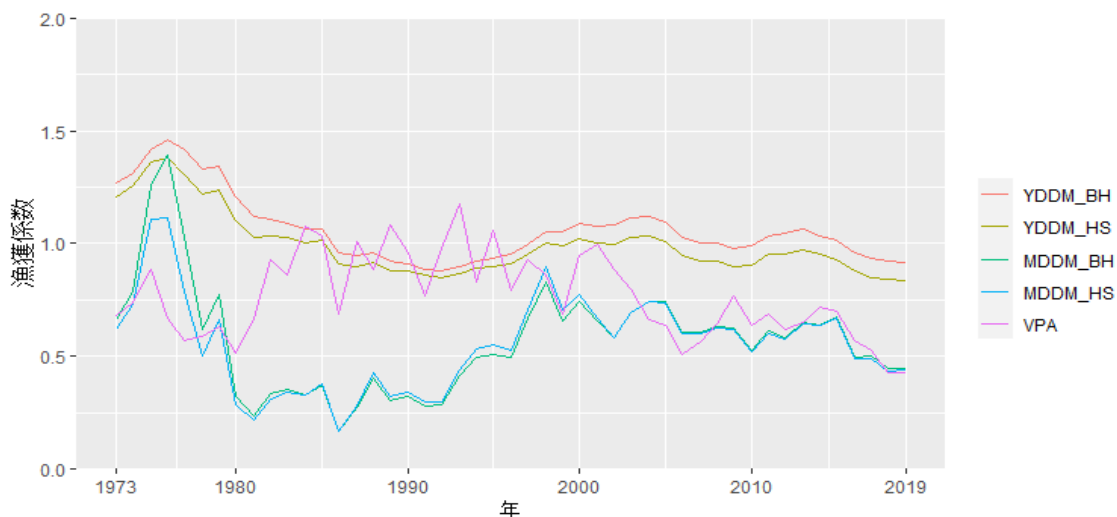


図 4.1-2. 各モデルの推定漁獲係数. YDDM では年別漁獲係数, MDDM では月別漁獲係数の 1 年間の平均値, VPA では年齢別漁獲係数の平均値を示す.

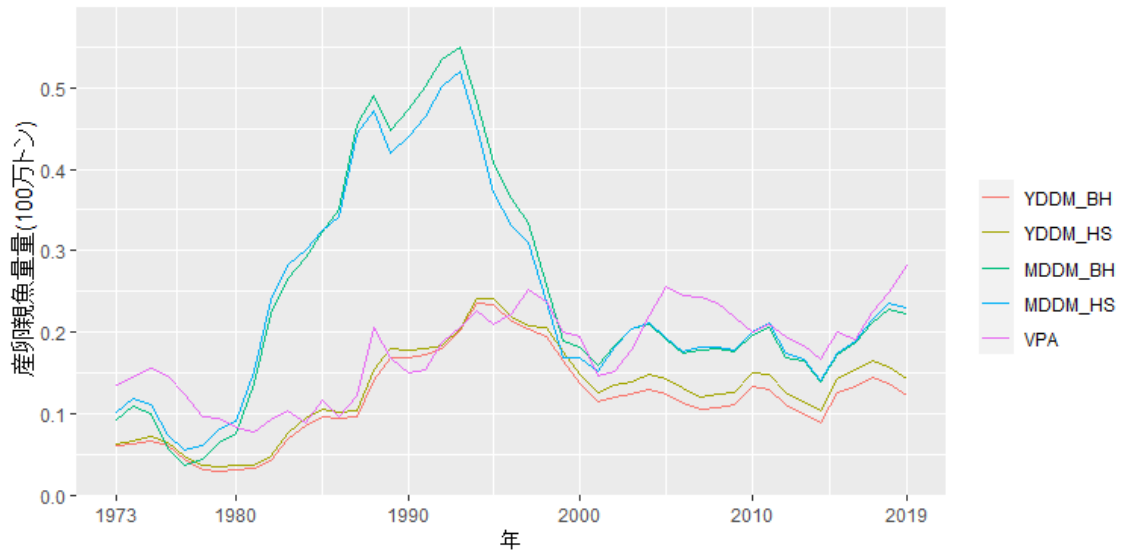


図 4.1-3. 各モデルの推定産卵親魚量.

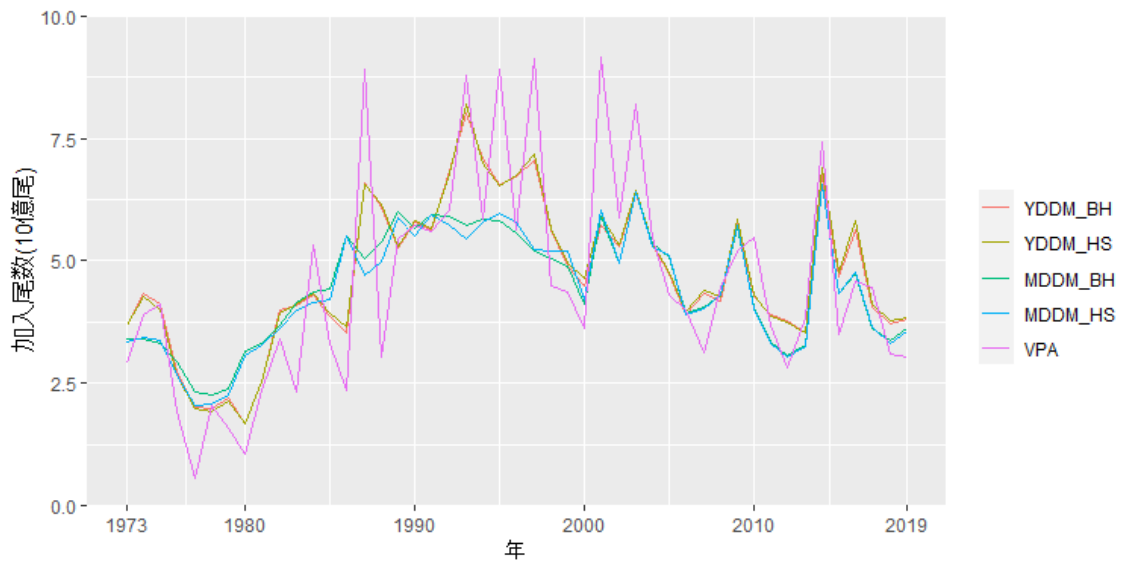


図 4.1-4. 各モデルの推定加入尾数.

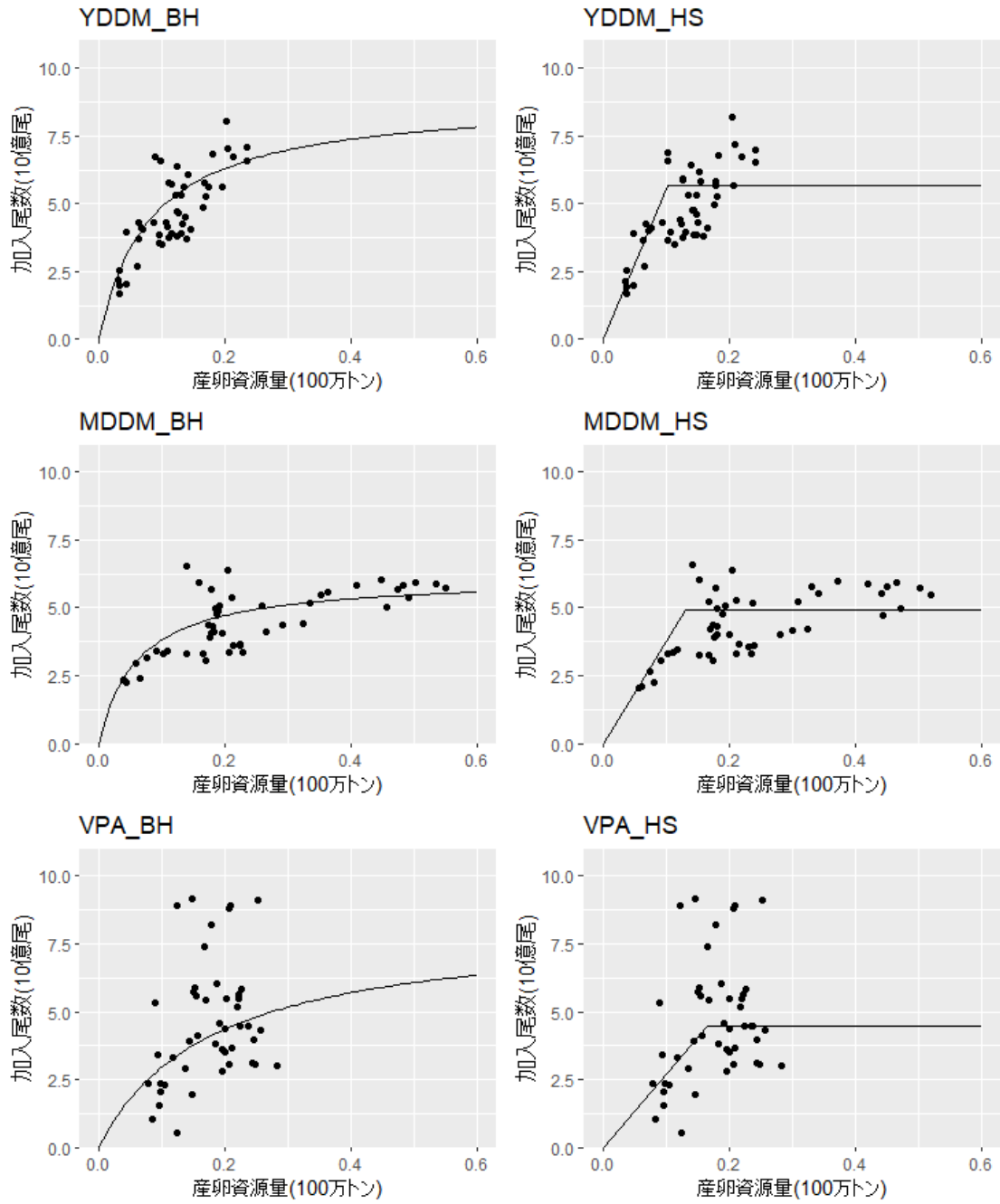


図 4.1-5. 各モデルの推定再生産曲線と推定産卵親魚量，推定加入尾数.

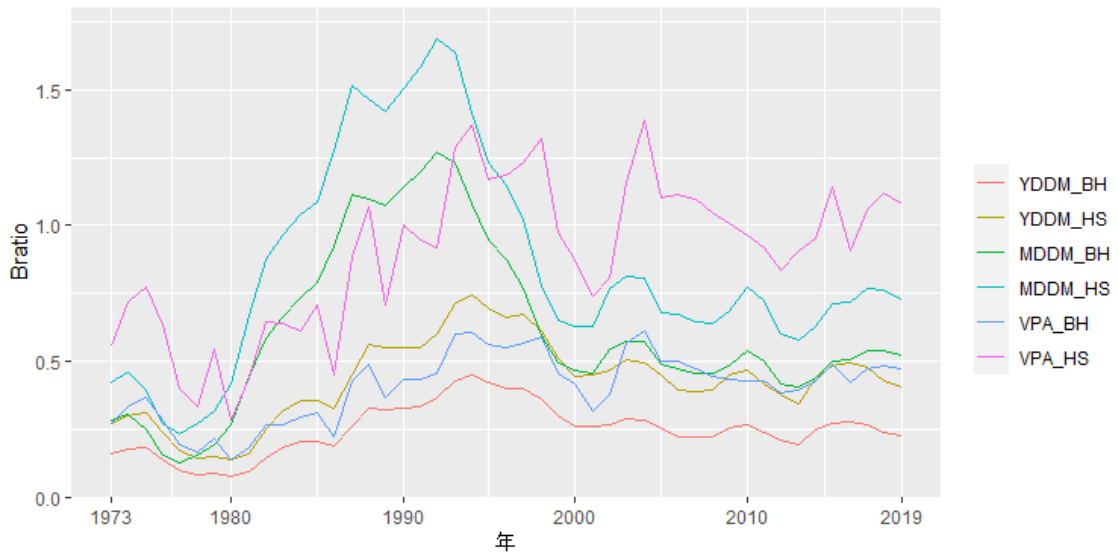


図 4.1-6. 各モデルの推定 Bratio.

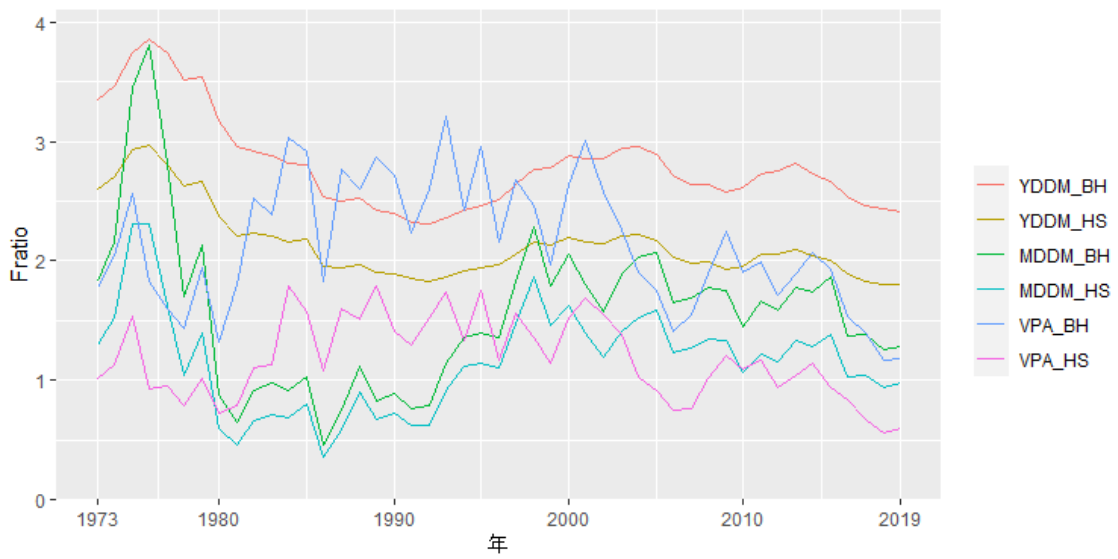


図 4.1-7. 各モデルの推定 Fratio.

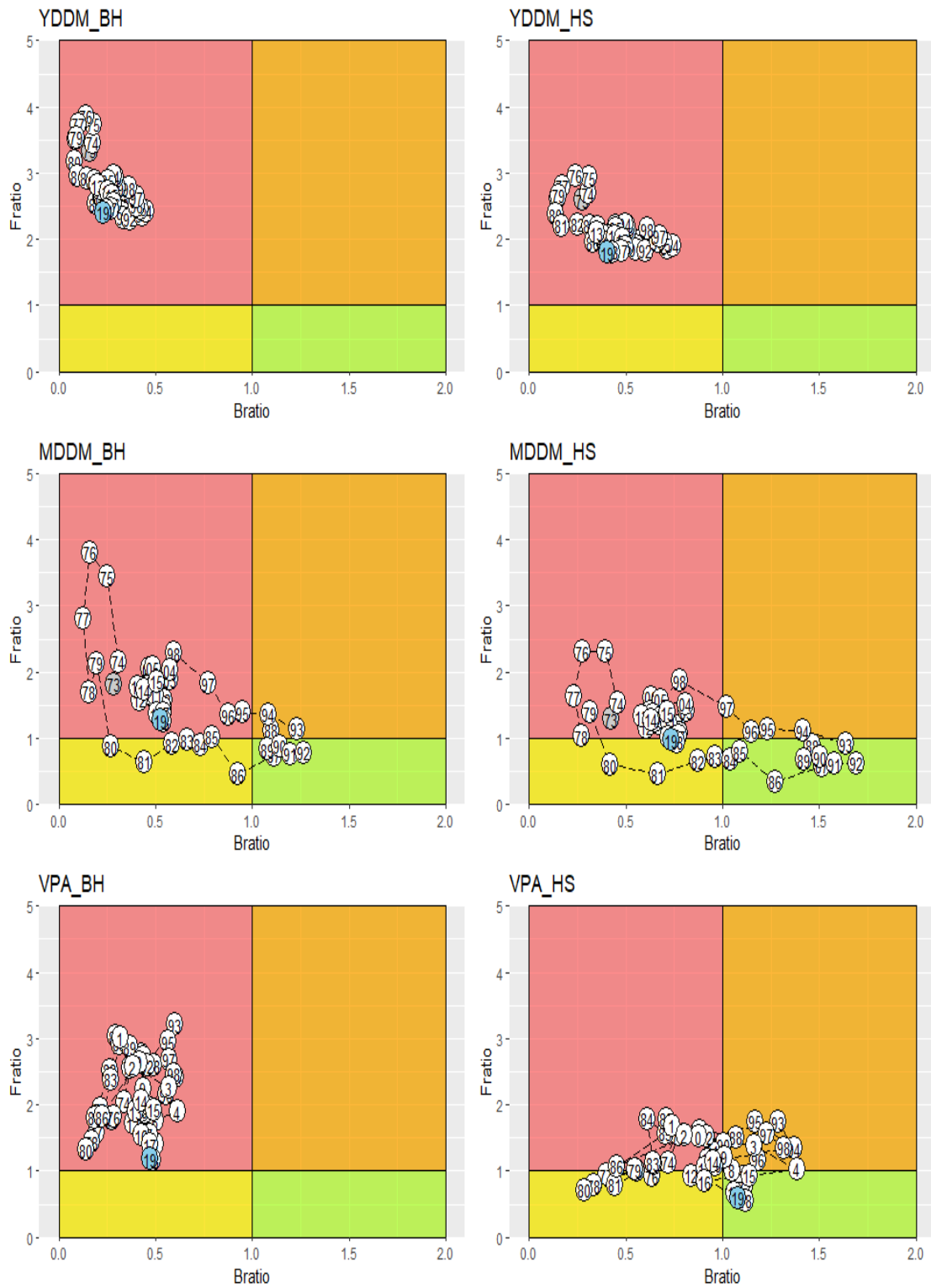


図 4.1-8. 各モデルの神戸プロット.

表 4.1-1. 近年 3 年間の Bratio と Fratio の平均値.

	YDDM_BH	YDDM_HS	MDDM_BH	BDDM_HS	VPA_BH	VPA_HS
Bratio ₂₀₁₇₋₂₀₁₉	0.246	0.438	0.535	0.755	0.476	1.085
Fratio ₂₀₁₇₋₂₀₁₉	2.438	1.811	1.304	0.984	1.246	0.611

表 4.1-2. 各モデルのパラメータの推定値.

	YDDM_BH	YDDM_HS	MDDM_BH	MDDM_HS	VPA_BH	VPA_HS
SSB_0	2.943	1.937	1.585	1.321	2.181	1.282
R_0	8.641	5.688	5.912	4.925	7.613	4.475
K	3.436	2.262	1.742	1.451	2.194	1.457
φ	1.284	1.273	0.884	0.821		
α	8.947	60.319	6.149	37.132	8.230	27.092
β	0.084	0.102	0.060	0.132	0.177	0.165
h	0.903	1.000	0.872	1.000	0.769	1.000
σ_R	0.308	0.322	0.292	0.327	0.500	0.482
$C\sigma_C$	0.172	0.174	0.066	0.066		
σ_F	0.077	0.071				
σ_μ			0.045	0.046		
σ_{month}			0.283	0.282		
MSY	0.295	0.210	0.185	0.172	0.209	0.162
B_{MSY}	1.169	0.706	0.542	0.392	0.891	0.392
F_{MSY}	0.379	0.465				
δ			0.767	1.016	0.802	1.626
$\sigma_{I,n0}$	0.472	0.470	0.470	0.471	0.463	0.463
$\sigma_{I,s0}$	0.747	0.748	0.749	0.754	0.666	0.666
$\sigma_{I,t0}$	1.221	1.228	1.248	1.253	1.165	1.165
$\sigma_{I,y0}$	0.945	0.939	0.940	0.934	0.821	0.821
$\sigma_{I,g0}$	0.699	0.696	0.680	0.681	0.591	0.591
$\sigma_{I,t1}$	1.133	1.130	1.138	1.135	0.607	0.607
$\sigma_{I,s1}$	0.666	0.665	0.667	0.662	1.044	1.044
$\sigma_{I,d0}$	0.678	0.678	0.680	0.684	0.605	0.605
$\sigma_{I,d1}$	0.204	0.203	0.232	0.235	0.201	0.201
$\sigma_{I,d2}$	0.239	0.241	0.180	0.175	0.238	0.238
$\sigma_{I,d3p}$	0.209	0.208	0.210	0.205	0.316	0.316

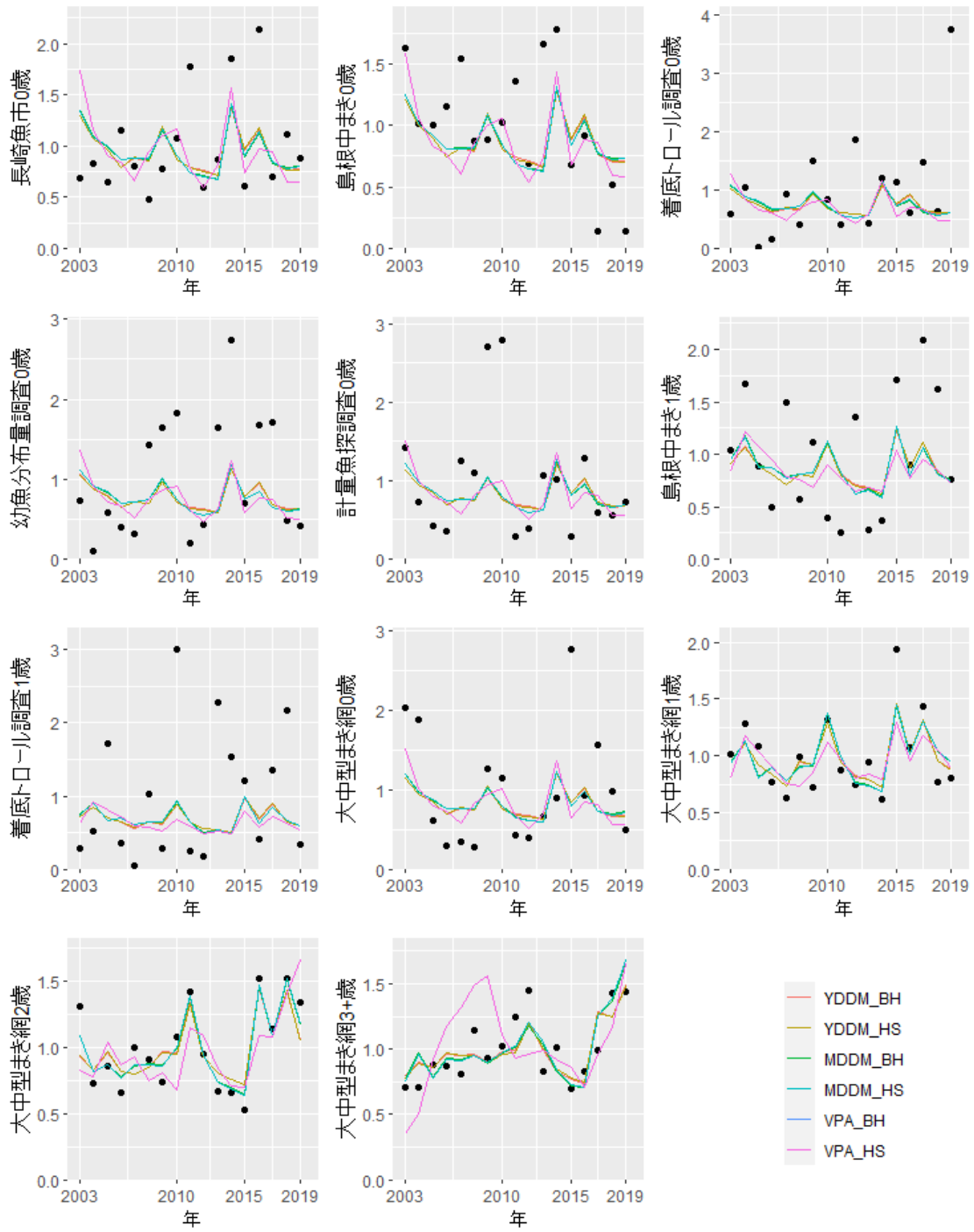


図 4.1-9. 各モデルでの資源量指標値とのフィッティング.

追加解析

YDDM_BH を用いて、加入誤差の変動係数に VPA_BH の推定値と同じ値 $\sigma_R = 0.5$ を与えて推定を行った。YDDM_BH と VPA_BH, $\sigma_R = 0.5$ を与えた YDDM_BH で推定された資源量を図 4.1-10、漁獲係数を図 4.1-11、産卵親魚量を図 4.1-12、加入尾数を図 4.1-13 に示す。

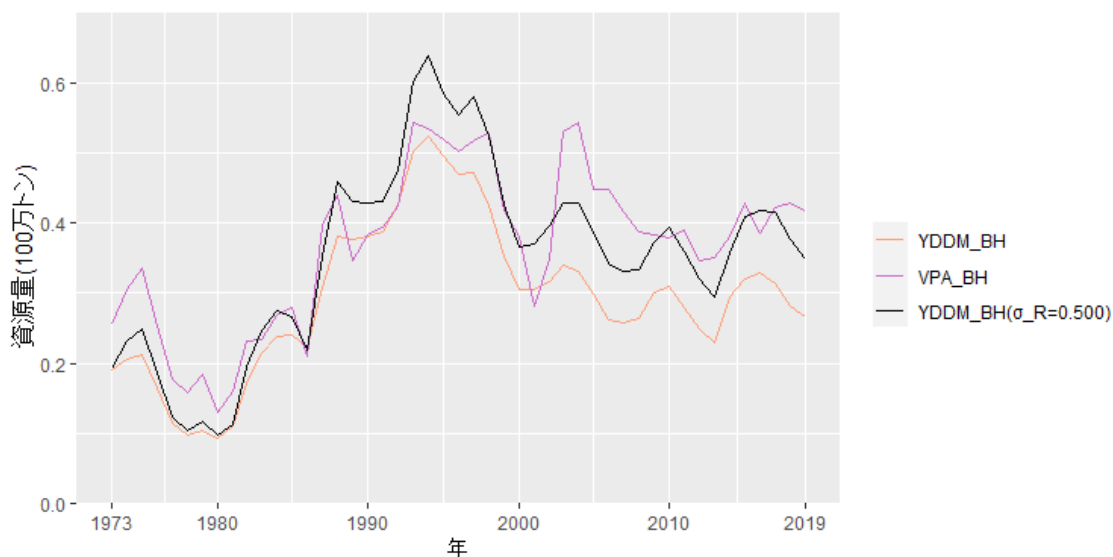


図 4.1-10. YDDM_BH と VPA_BH, $\sigma_R = 0.5$ を与えた YDDM_BH での推定資源量.

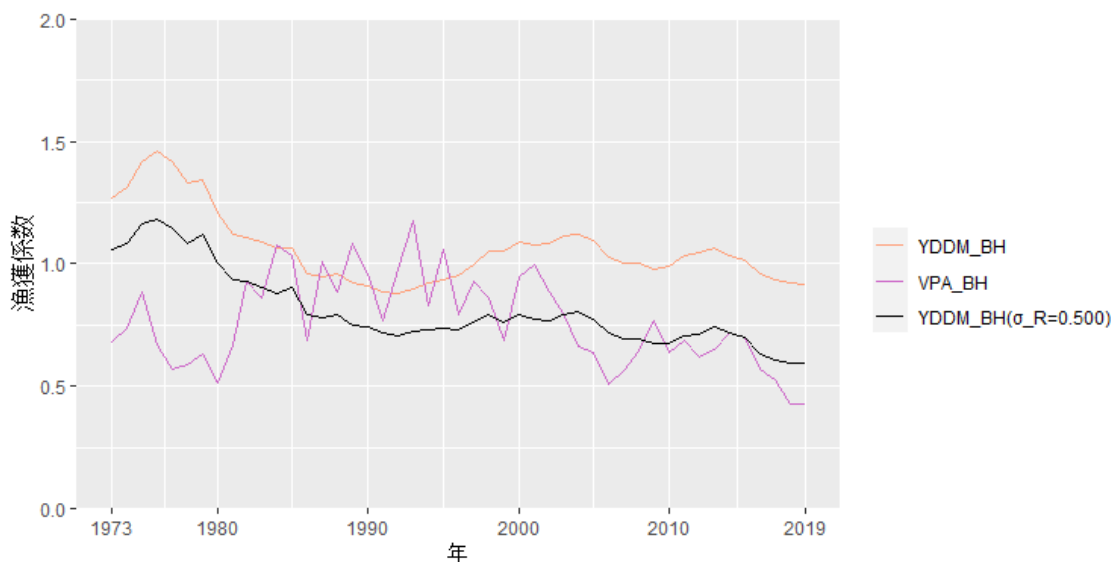


図 4.1-11. YDDM_BH と VPA_BH, $\sigma_R = 0.5$ を与えた YDDM_BH での推定漁獲係数.

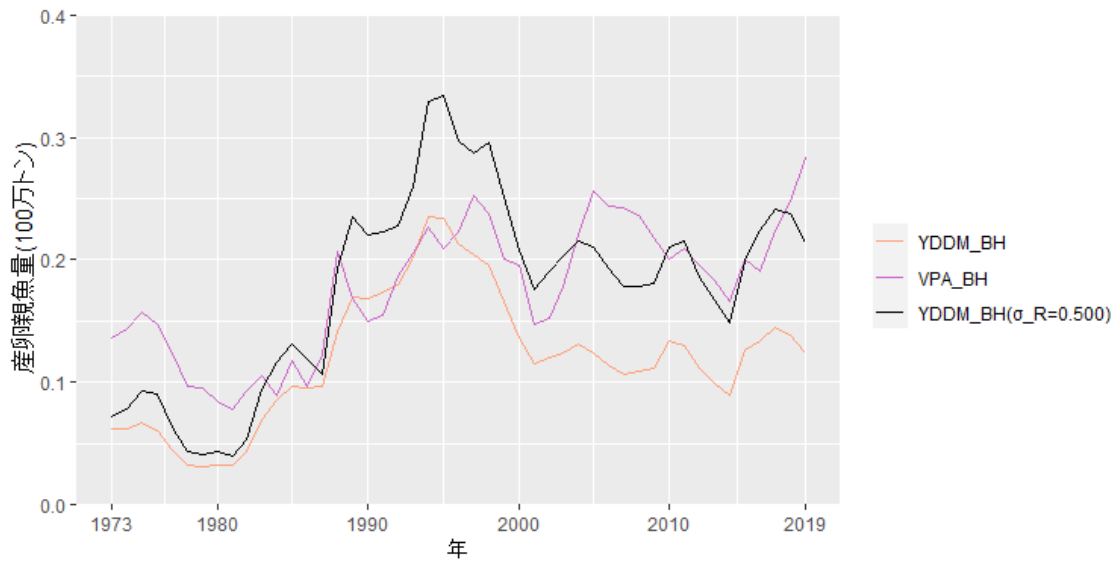


図 4.1-12. YDDM_BH と VPA_BH, $\sigma_R = 0.5$ を与えた YDDM_BH での推定産卵親魚量.

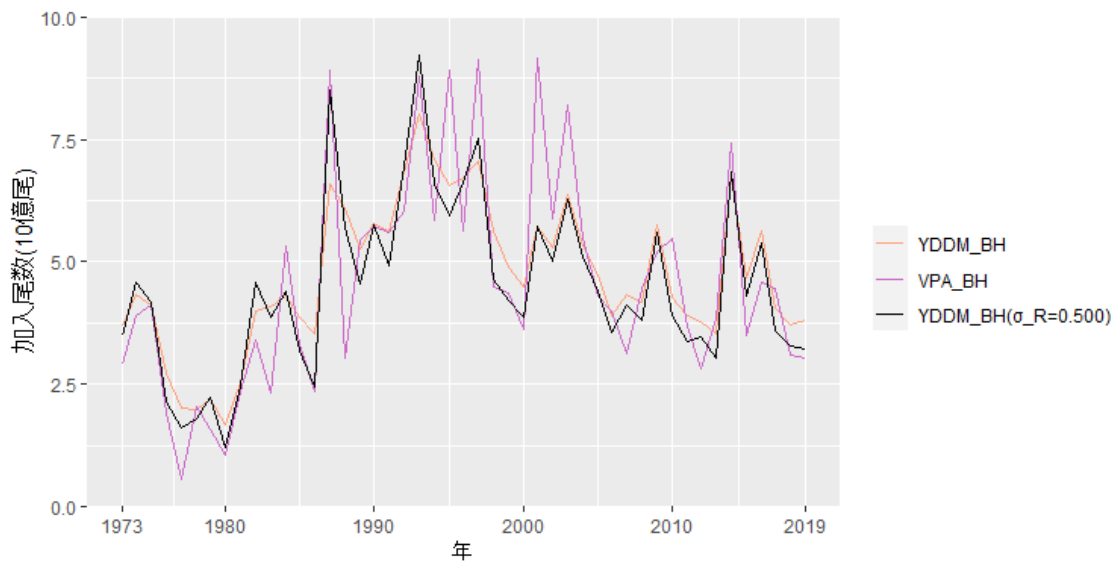


図 4.1-13. YDDM_BH と VPA_BH, $\sigma_R = 0.5$ を与えた YDDM_BH での推定加入尾数.

4.2 モデル評価

4.2.1 レトロスペクティブ

各モデルで算出されたレトロバイアスのローを表 4.2-1, 各モデルでデータを 0 年間から 5 年間取り除いた場合の推定資源量を図 4.2-1 と図 4.2-2, 図 4.2-3, 図 4.2-4, 図 4.2-5 に示す.

表 4.2-1. 各モデルで算出されたレトロバイアスのロー ρ_r .

	YDDM_BH	YDDM_HS	MDDM_BH	BDDM_HS	VPA
レトロバイアスのロー	-0.015	-0.109	-0.118	-0.066	0.126

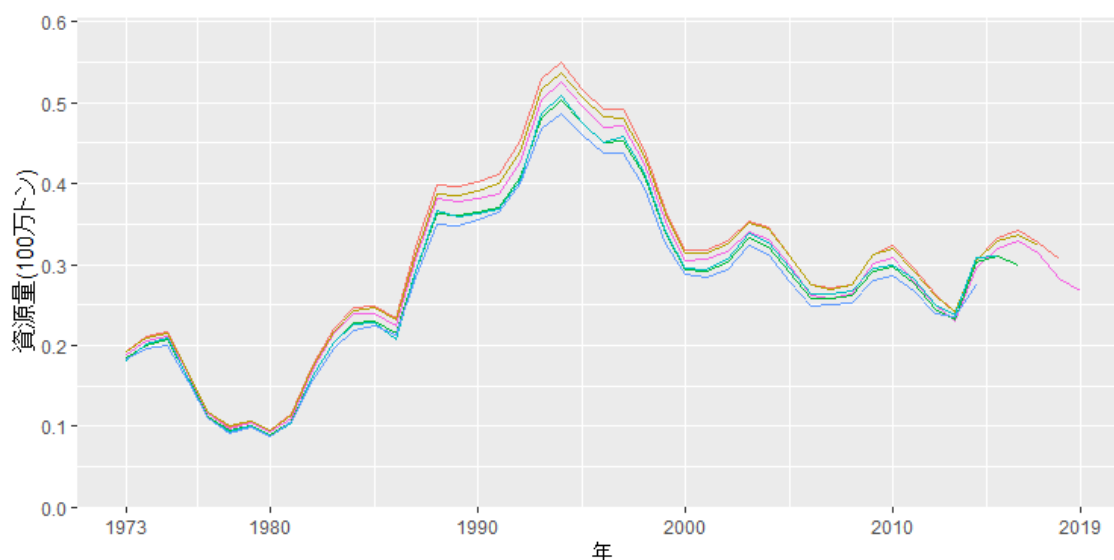


図 4.2-1. YDDM_BH でデータを 0 年間から 5 年間取り除いた場合の推定資源量.

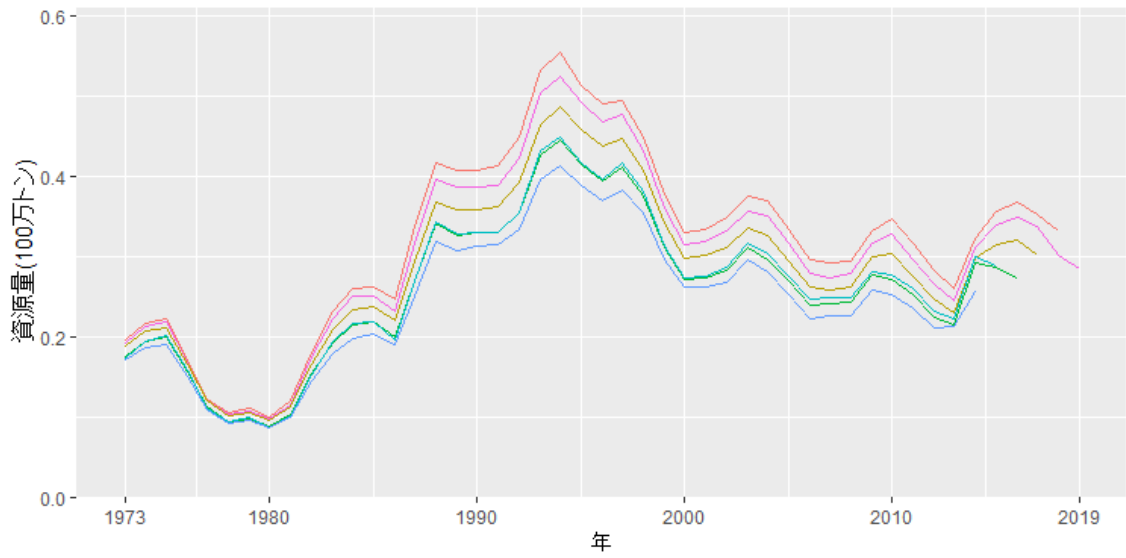


図 4.2-2. YDDM_HS でデータを 0 年間から 5 年間取り除いた場合の推定資源量.

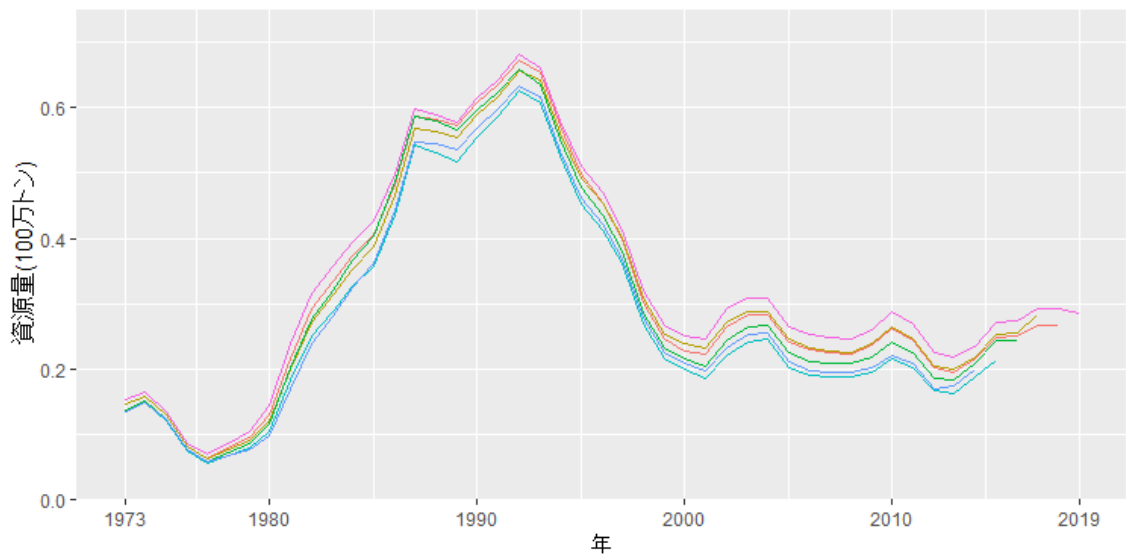


図 4.2-3. MDDM_BH でデータを 0 年間から 5 年間取り除いた場合の推定資源量.

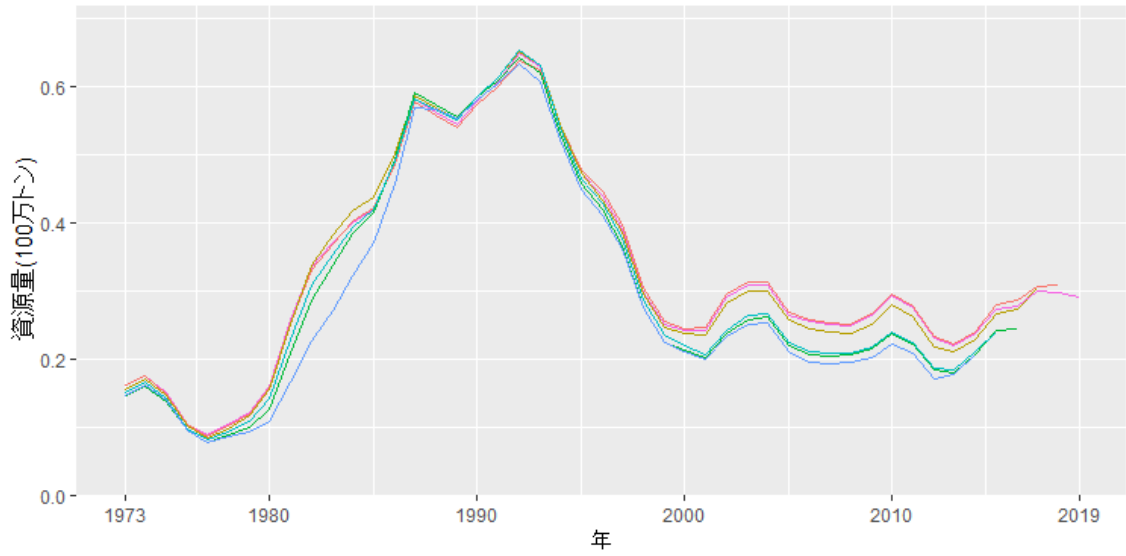


図 4.2-4. MDDM_HS でデータを 0 年間から 5 年間取り除いた場合の推定資源量.

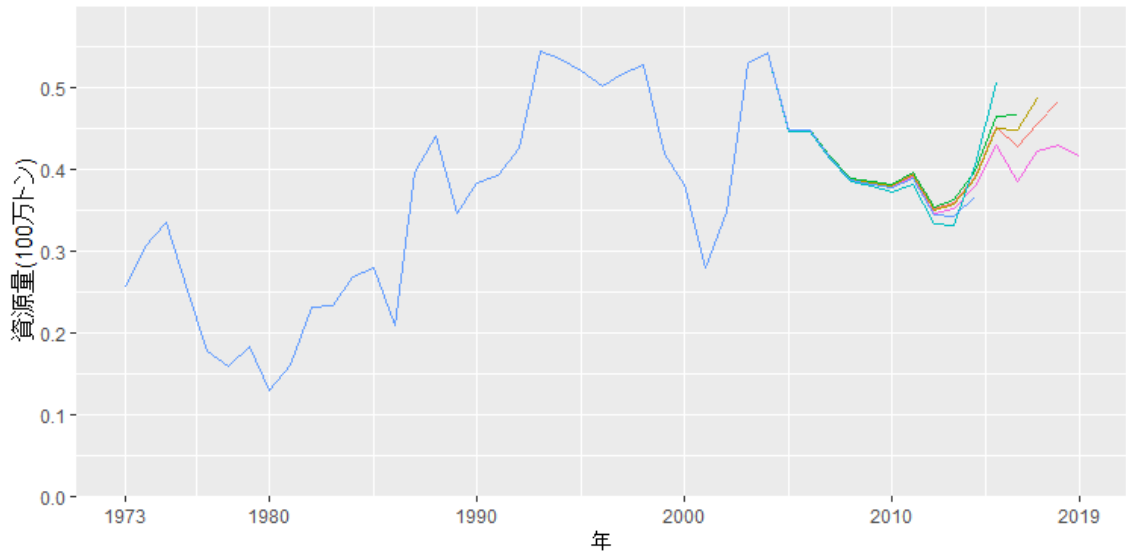


図 4.2-5. チューニング VPA でデータを 0 年間から 5 年間取り除いた場合の推定資源量.

4.2.2 ハインドキャストイング

各モデルで算出された平均二乗誤差を表 4.2-3, 平均二乗誤差の指標値別の内訳を表 4.2-3 に示す.

表 4.2-2. 各モデルで算出された平均二乗誤差.

	YDDM_BH	YDDM_HS	MDDM_BH	BDDM_HS	VPA_BH	VPA_HS
平均二乗誤差	1.958	2.260	2.302	2.455	2.529	2.221

表 4.2-3. 平均二乗誤差の指標値別の内訳. 行が各モデル, 列が指標値の種類を表す.

	YDDM_BH	YDDM_HS	MDDM_BH	MDDM_HS	VPA_BH	VPA_HS
長崎魚市 0 歳	0.995	1.092	0.832	0.939	0.944	1.181
島根中まき 0 歳	11.628	12.832	12.787	13.327	13.723	10.057
着底トロール調査 0 歳	0.51	0.481	0.506	0.482	0.649	0.825
幼魚分布量調査 0 歳	0.396	0.404	0.399	0.384	0.519	0.583
計量魚探調査 0 歳	0.771	0.966	0.881	1.016	1.177	0.803
島根中まき 1 歳	0.857	0.925	0.722	0.693	1.137	1.137
着底トロール調査 1 歳	0.434	0.454	0.397	0.398	0.685	0.685
大中型まき網 0 歳	1.046	0.834	1.172	0.97	1.972	2.152
大中型まき網 1 歳	2.154	2.226	2.05	1.95	2.256	2.256
大中型まき網 2 歳	1.128	1.348	1.908	2.261	3.497	3.497
大中型まき網 3+歳	1.623	3.303	3.667	4.586	1.260	1.260

第5章 考察と今後の課題

5.1 資源評価

すべての手法の資源評価結果で、最近年の資源量は減少傾向にあると推定されたが、最近15年間で大きな資源変動はみられなかった。このことから、資源状態は安定していると考えられる。

1980年から1995年までの期間に関して、MDDMの推定資源量がYDDMよりも大きく推定された。また、MDDMはYDDMに比べて推定 Fratio が小さく、YDDMとMDDMで推定加入尾数に大きな差は見られなかった。MDDMでは体重の月単位の成長が考慮されており、漁獲される月によって平均体重が異なる。YDDMより平均体重が重い月に多く漁獲され、推定 Fratio が小さくなり、資源量が大きく推定されたと考えられる。1980年から1995年までの期間のMDDMとYDDMの推定資源量に大きな差があったが、他の期間での推定資源量の差にも同様に漁獲時の平均体重が異なることが影響したと考えられる。潜在的には、体重の月単位の成長が考慮したMDDMが資源の変動を説明できていると言える。しかし、本研究では1973年から2001年までの期間で年別漁獲量から月別漁獲量を算出しており、月別漁獲量の正確さが分からないために、MDDMがYDDMよりも資源の変動をより説明できているとは言い切れない。

資源量指標値のある期間(2003-2019年)に関して、チューニング VPA の推定資源量はYDDMとMDDMよりも10万トンほど大きかった。また、観測誤差の変動係数の推定値はYDDMとMDDMよりもVPAで大きかった。さらに、加入誤差の変動係数にVPA_BHの推定値と同じ値 $\sigma_R = 0.5$ を与えて推定を行ったYDDM_BHの結果では、チューニング VPA との推定資源量の差が小さくなった。これらのことから、加入誤差の変動係数が近年の資源量のスケールに影響を与えていると考えられる。再生産関係に関するパラメータをモデル内またはモデル外で推定するかは、加入誤差の変動係数の推定に影響を及ぼす。この仕様に関して、さらなる検討が必要である。

資源評価の期間全体に関して、YDDMとチューニング VPA の推定資源量は資源量指標値のある期間(2003-2019年)で差が見られたが、全体では類似する変動も見られた。しかし、神戸プロットの比較では、推定された資源状態は全く異なった変動をしていた。特に、近年3年間の Bratio と Fratio の平均値を比較すると、YDDM_BHでは低い資源水準で高い漁獲圧であるのに対して、VPA_HSでは適切な資源水準で低い漁獲圧であった。これらのことから、YDDMとチューニング VPA における異なる仕様が与える影響は、資源量よりも資源状態に大きく表れることが分かる。

5.2 モデル評価

レトロスペクティブとハインドキャストリングにおいて、YDDM_BH がレトロバイアスのローが最も 0 に近く、平均二乗誤差も最も低かった。本研究では、YDDM_BH が選択される。しかし、平均二乗誤差が 2 番目に低かった VPA_HS と選択された YDDM_BH の資源評価結果を比較すると、近年 3 年間の Bratio と Fratio の平均値に大きな差があった。両方のモデルで、資源量指標値別の内訳では島根県中型まき網 0 歳魚と大中型まき網 1 歳魚と 2 歳魚、3+歳魚の資源量指標値の平均二乗誤差が大きかった。このことから、資源量指標値の変動が大きく、モデルごとの将来予測能力に大きな差がないことが考えられる。モデル評価を行うためには、変動の小さい資源量指標値のみを使用してハインドキャストリングを行うことが必要である。

島根県中型まき網 0 歳魚の資源量指標値に関して、すべてのモデルで平均二乗誤差は非常に大きかった。また、推定された資源量の変動と資源量指標値の変動が異なっていた。島根県中型まき網 0 歳魚の資源量指標値は、すべてのモデルでフィッティングが悪く将来予測能力も低かったことが分かった。このことから、島根県中型まき網 0 歳魚の資源量指標値に対して標準化や漁具能率の変化を考慮する必要があると考えられる。

大中型まき網 1 歳魚と 2 歳魚、3+歳魚の資源量指標値に関して、すべてのモデルでの平均二乗誤差も大きかった。また、観測誤差の変動係数は他の資源量指標値と比較しての小さく推定された。すべてのモデルで、推定された資源量は大中型まき網 1 歳魚と 2 歳魚、3+歳魚の資源量指標値に良くフィッティングしているにも関わらず、将来予測能力が低いことが分かった。これらのことから、大中型まき網 1 歳魚と 2 歳魚、3+歳魚の資源量指標値に過剰にフィッティングしていることが考えられる。さらに、調査による資源量指標値の変動に対して、推定された資源量の変動は小さかったことから、大中型まき網 1 歳魚と 2 歳魚、3+歳魚の資源量指標値には、Hyper-stability を考慮する必要があると考えられる。大中型まき網 1 歳魚と 2 歳魚、3+歳魚の資源量指標値に Hyper-stability を考慮することにより、調査による資源量指標値とのフィッティングの改善が期待できる。しかし、対馬暖流域で漁獲されるマアジの約 80%は大中型まき網漁業及び中小型まき網漁業で漁獲されており、漁獲量と大中型まき網の資源量指標値の変動は同様の傾向を示しやすい。また、大中型まき網以外の資源量指標値は変動係数が大きくなりやすい 0 歳魚の資源量指標値が多く、2 歳魚と 3+歳魚の資源量指標値は大中型まき網の資源量指標値だけである。これらのことから、Hyper-depletion/stability を考慮したとしても Hyper-depletion であると推定され、より大中型まき網の資源量指標値にフィッティングしてしまう。そのため、大中型まき網を統合して全年齢の資源量指標値として使用することや、海面水温などの環境要因の情報を取り入れて 0 歳魚の資源量指標値に対するフィッティングの改善を行うことで、大中型まき網に Hyper-stability を考慮したモデルの開発が今後の課題である。

謝辞

修士論文の研究にあたり、熱心なご指導を賜り、多くの知識と助言を下された、主指導教官である東京海洋大学資源解析学研究室北門利英教授に厚く御礼申し上げます。また、同研究室の田中栄次教授、岩田繁英助教授、本修士論文の審査を引き受けてくださいました鈴木直樹准教授に御礼申し上げます。本研究を行うにあたり、データの提供や研究に対する助言を賜りました、国立研究開発法人水産研究・教育機構西海区水産研究所の大下誠二様、依田真理様、黒田啓行様、高橋素光様ほか皆様に感謝申し上げます。日頃から意見を交わし合い切磋琢磨した、研究室の皆様に感謝致します。

参考文献

ABCWG(2020). 再生産関係の推定・管理基準値の計算・将来予測シミュレーションに関する技術ノート. 令和 2 年度研究機関会議版.

石岡清英, 岸田達(1985). コホート解析に用いる漁獲方程式の解法とその精度の検討. 南西水研研報(19), 111-120.

市野川桃子, 岡村寛(2014). VPA を用いた我が国水産資源評価の統計言語 R による統一的検討. 水産海洋研究, 78(2), 104-113.

国立研究開発法人水産研究・教育機構(2021). 令和 2 (2020) 年度漁獲管理規則および ABC 算定のための基本指針.

久保拓也(2012). データ解析のための統計モデリング入門 一般化線形モデル・階層ベイズモデル・MCMC. 岩波書店.

久保拓也(2015). 階層ベイズ最初の一步 JAGS を使って, 岩波データサイエンス Vol.1, 岩波書店, pp.19-38.

Malcolm Haddon(2001). Modelling and Quantitative Methods in Fisheries. Chapman and Hall.

松浦健太郎(2016). Stan と R でベイズ統計モデリング. 共立出版株式会社.

中嶋純子(1982). 西日本海域におけるマアジの成長と年齢について. 西海区水産研究所研究報告(57), 45-57.

Ray Hilborn, Carl J. Walters(2003). Quantitative Fisheries Stock Assessment. Springer.

西海区水産研究所(未発表). 令和 2 (2020) 年度マアジ対馬暖流系群の資源評価.

田中栄次(2012). 新訂水産資源解析学. 成山堂書店.

田中昌一(1960). 水産生物の Population Dynamics と漁業資源管理. 東海水研報(28), 1-200.

依田真里, 黒田啓行, 佐々千由紀, 高橋素光(2019). 平成 30 (2018) 年度マアジ対馬暖流系群の資源評価. 平成 30 年度我が国周辺水域の漁業資源評価 (第一分冊), 水産庁・水産総合研究センター, pp.131-162.

依田真里, 黒田啓行, 高橋素光(2020). 令和元 (2019) 年度マアジ対馬暖流系群の資源評価.

依田真里, 黒田啓行, 高橋素光(2020). 令和 2 (2020) 年度マアジ対馬暖流系群の管理基準値等に関する研究機関会議報告書.

依田真里, 檜山義明, 大下誠二, 由上龍嗣(2007). 平成 18 年度マアジ対馬暖流系群の資源評価. 平成 18 年度我が国周辺水域の漁業資源評価 (第一分冊), 水産庁・水産総合研究センター, pp.93-117.

付録

YDDM_BH

推定された資源量の中央値と 95%信頼区間, 漁獲係数の中央値と 95%信頼区間, 産卵親魚量の中央値と 95%信頼区間, 加入尾数の中央値と 95%信頼区間, 年齢別資源量, 漁獲量の中央値と 95%予測区間, パラメータの事後分布を示す.

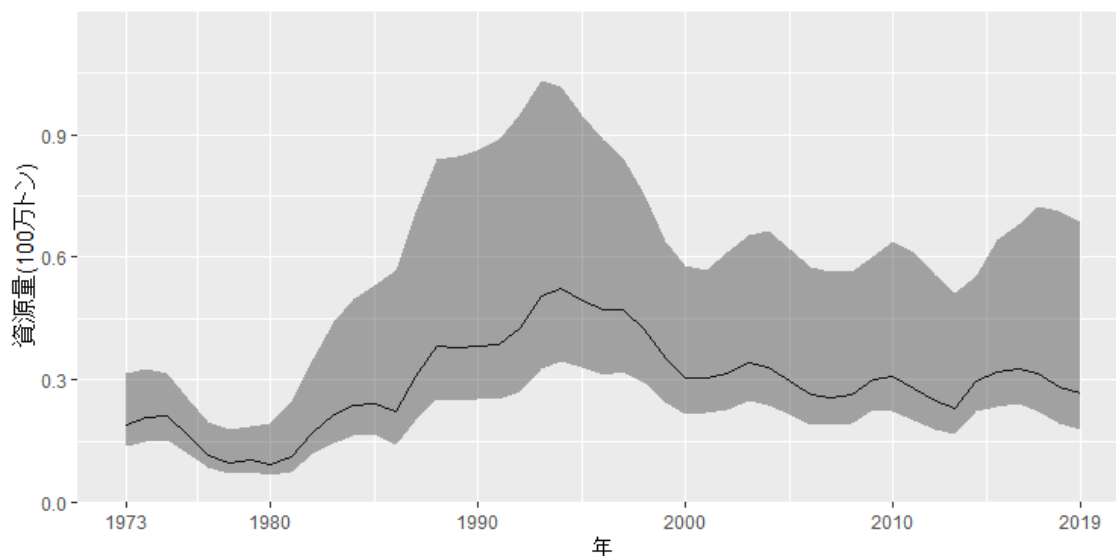


図 1. YDDM_BH の推定資源量の中央値と 95%信頼区間.

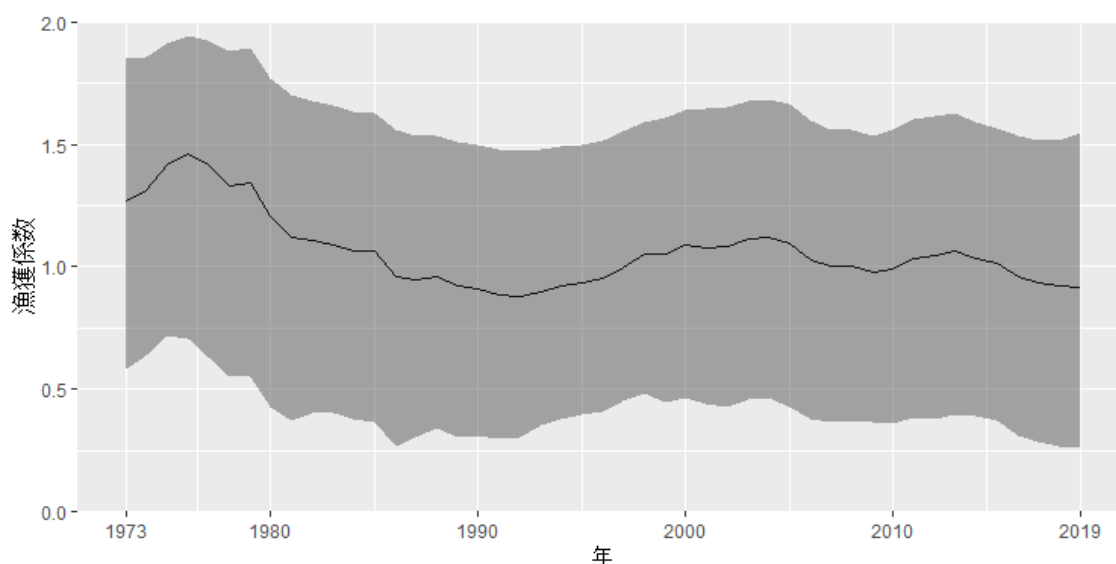


図 2. YDDM_BH の推定漁獲係数の中央値と 95%信頼区間.

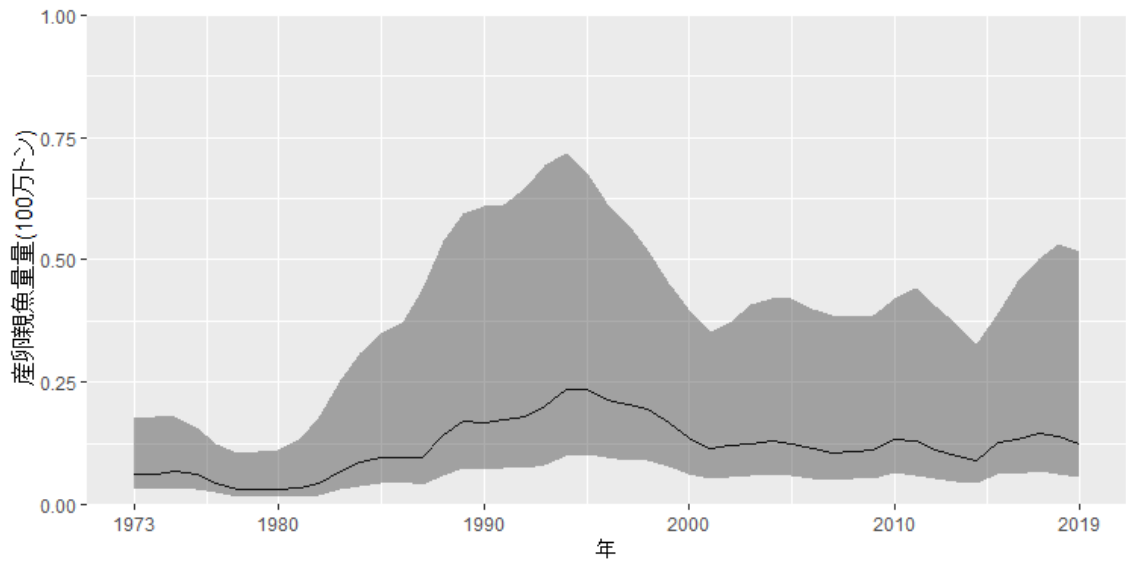


図 3. YDDM_BH の推定産卵親魚量の中央値と 95%信頼区間.

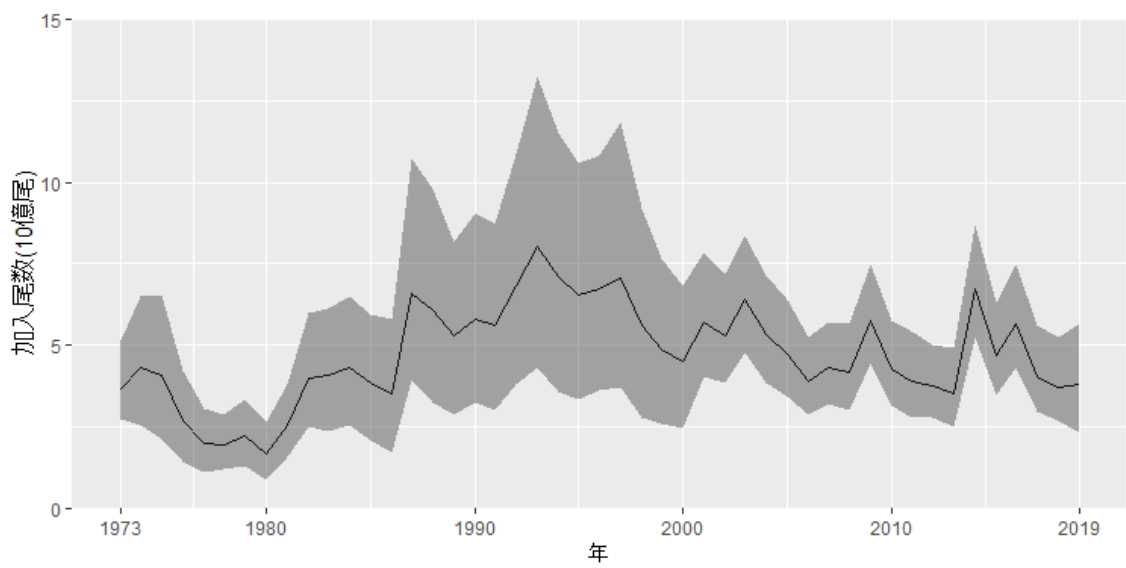


図 4. YDDM_BH の推定加入尾数の中央値と 95%信頼区間.

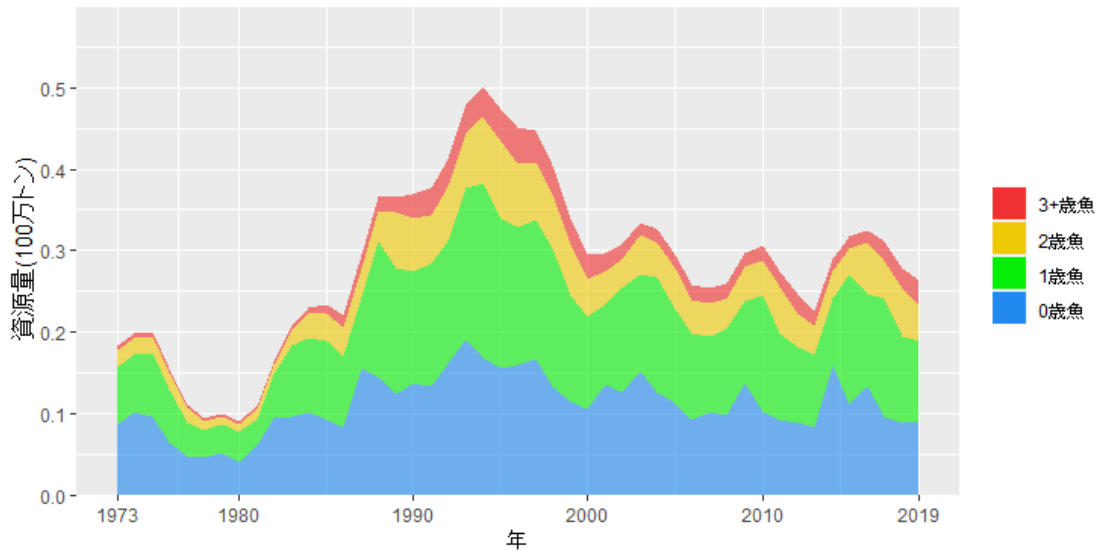


図 5. YDDM_BH の年齢別推定資源量.

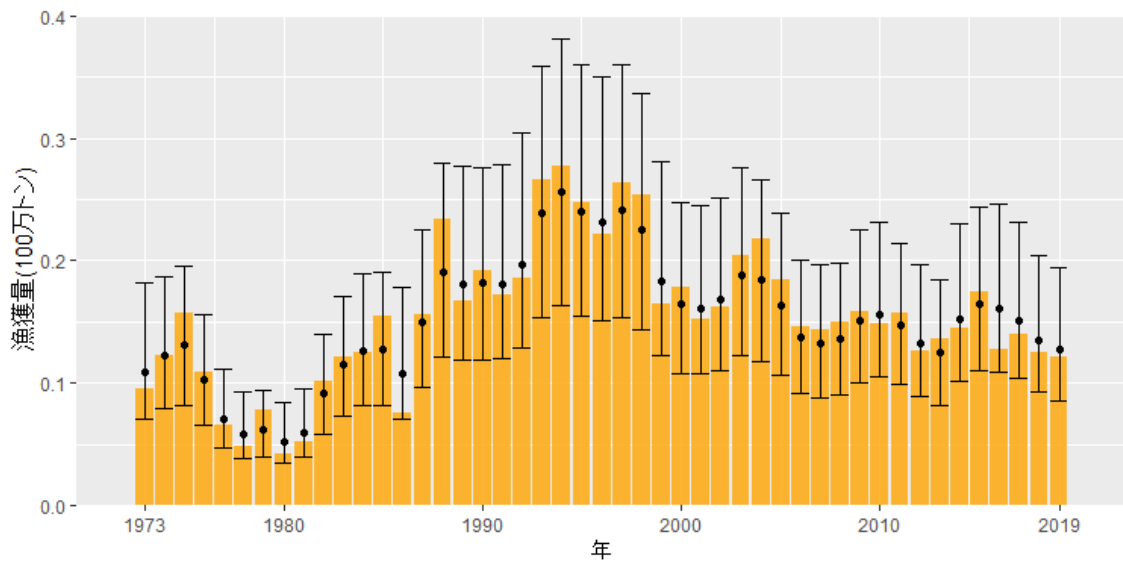


図 6. YDDM_BH の推定漁獲量の中央値と 95% 予測区間. 点が推定漁獲量の中央値, エラーバーが推定漁獲量の 95% 予測区間, 棒グラフがデータの漁獲量を表す.

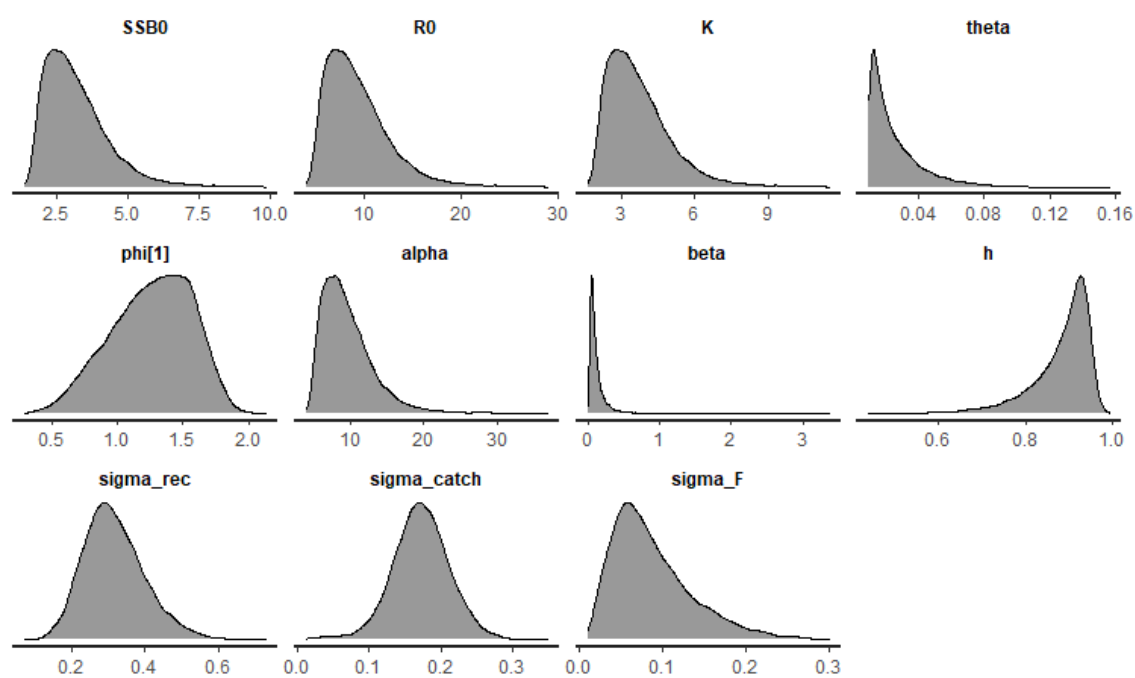


図 7. YDDM_BH のパラメータの事後分布(1 枚目).

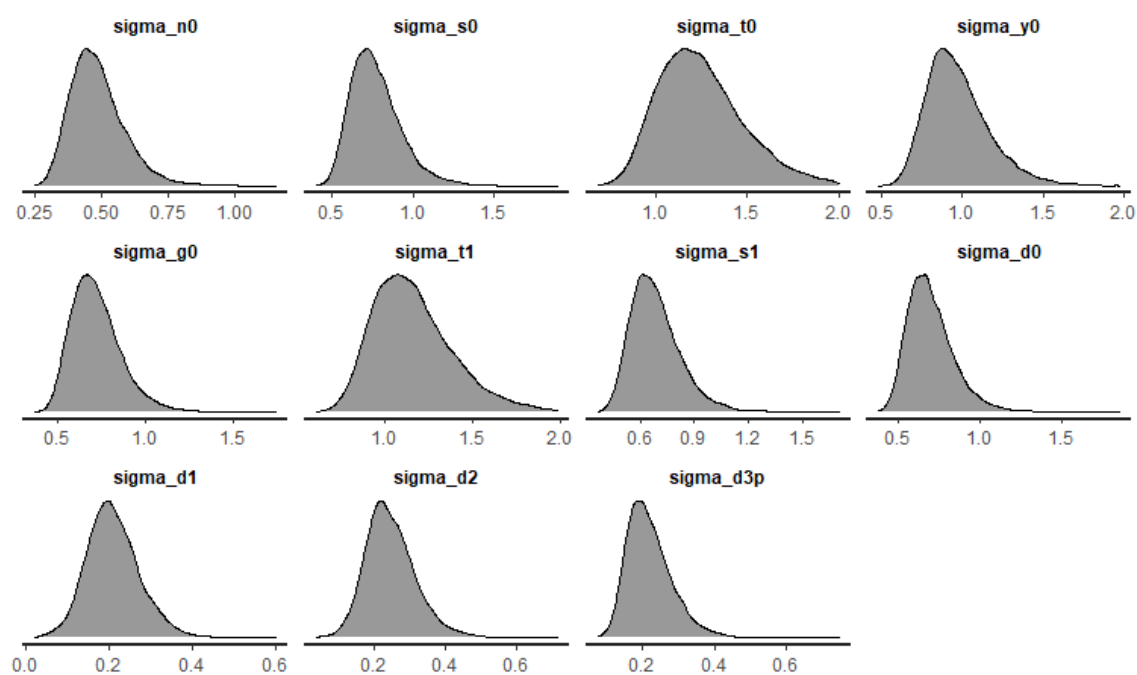


図 8. YDDM_BH のパラメータの事後分布(2 枚目).

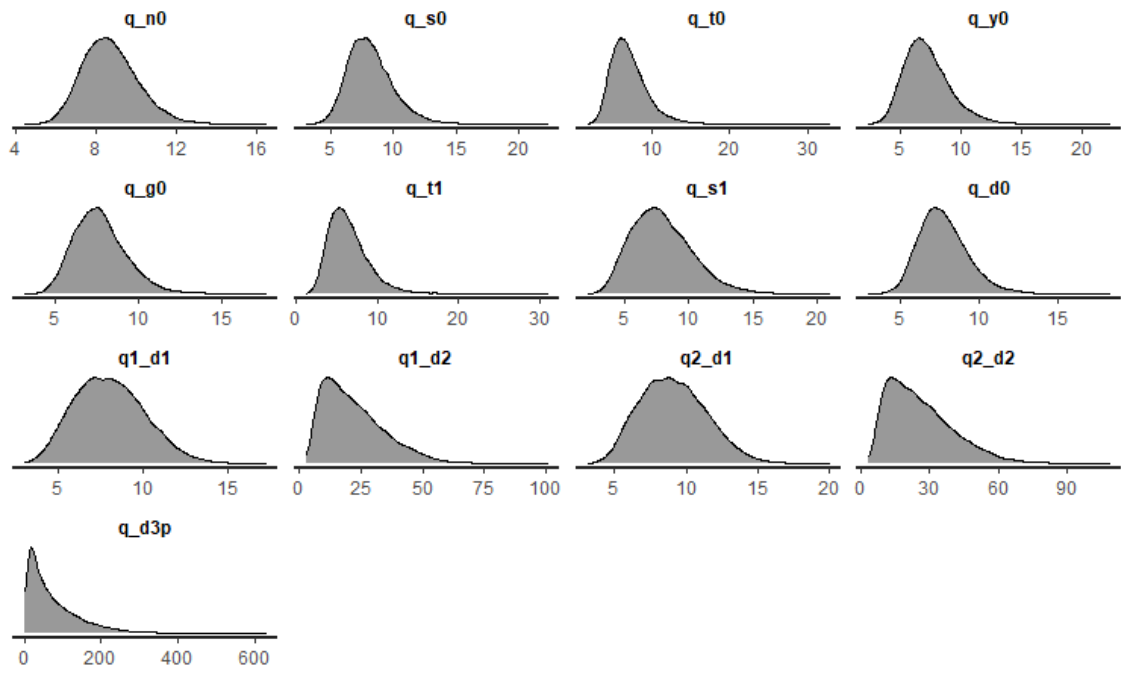


図 9. YDDM_BH のパラメータの事後分布(3 枚目).

YDDM_HS

推定された資源量の中央値と 95%信頼区間, 漁獲係数の中央値と 95%信頼区間, 産卵親魚量の中央値と 95%信頼区間, 加入尾数の中央値と 95%信頼区間, 年齢別資源量, 漁獲量の中央値と 95%予測区間, パラメータの事後分布を示す.

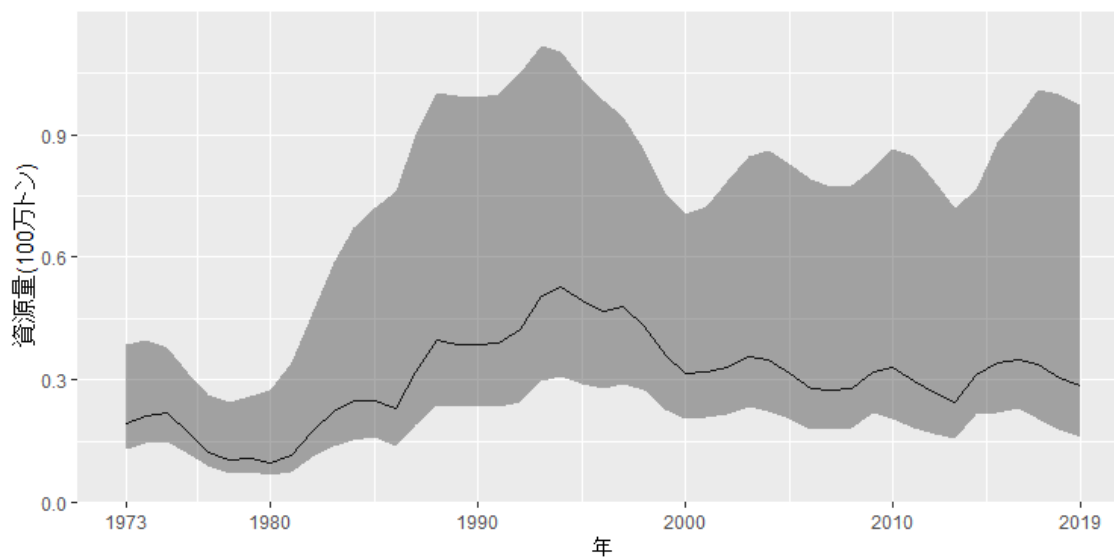


図 10. YDDM_HS の推定資源量の中央値と 95%信頼区間.

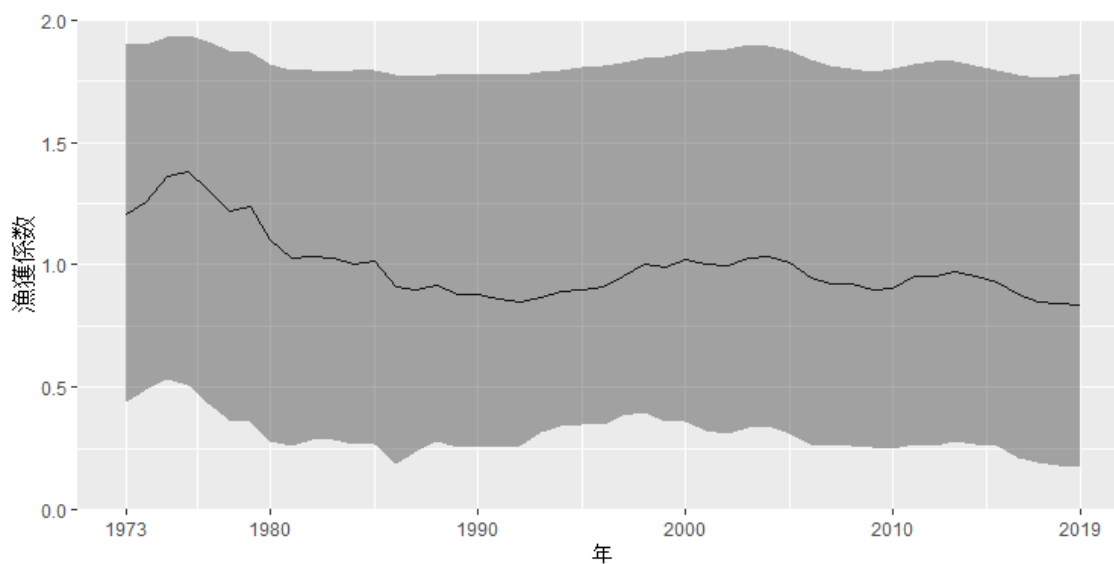


図 11. YDDM_HS の推定漁獲係数の中央値と 95%信頼区間.

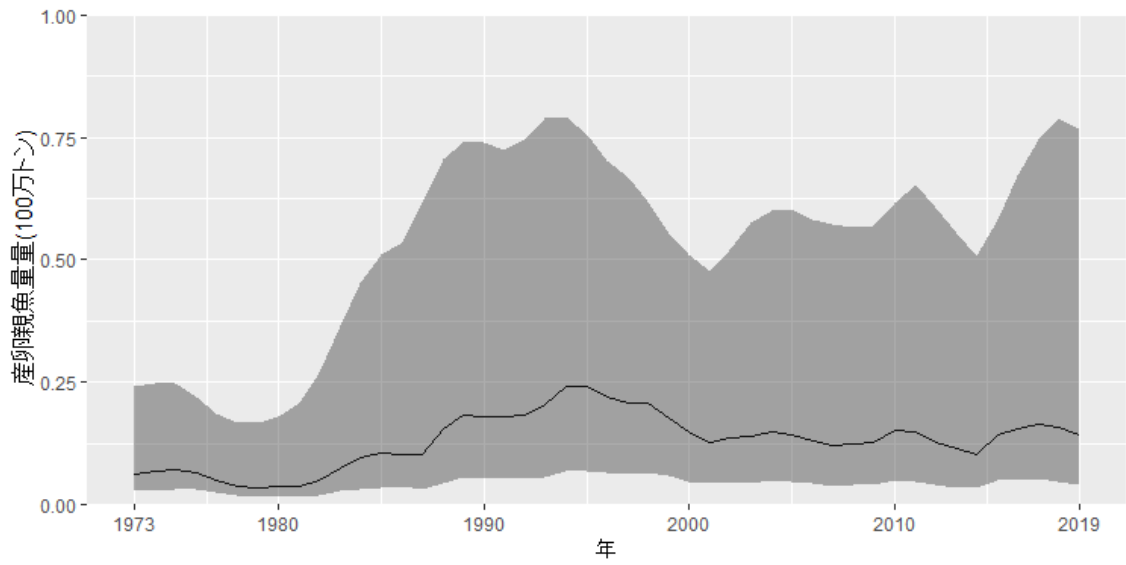


図 12. YDDM_HS の推定産卵親魚量の中央値と 95%信頼区間.

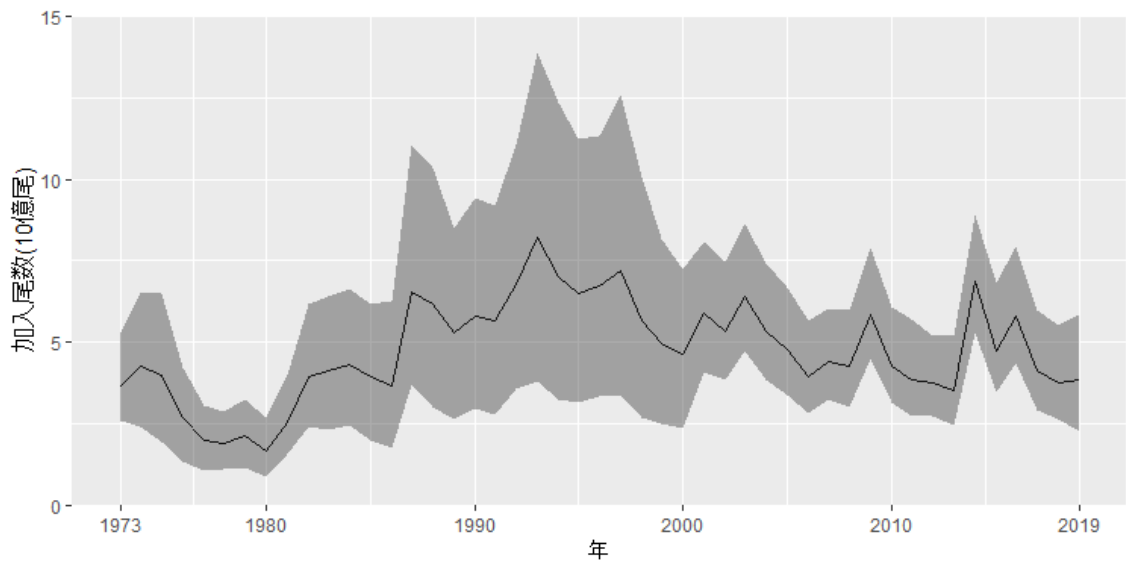


図 13. YDDM_HS の推定加入尾数の中央値と 95%信頼区間.

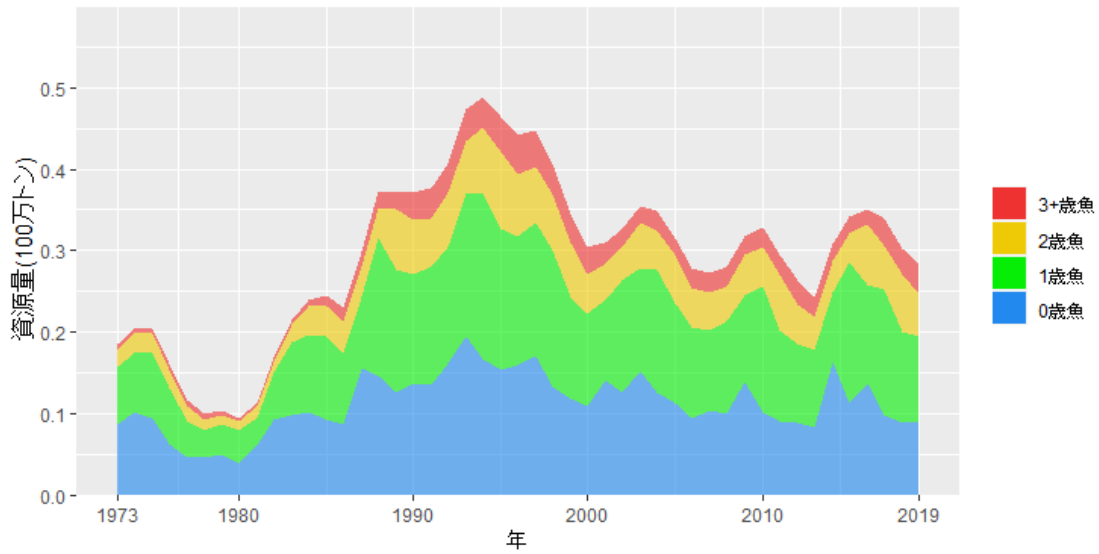


図 14. YDDM_HS の年齢別推定資源量.

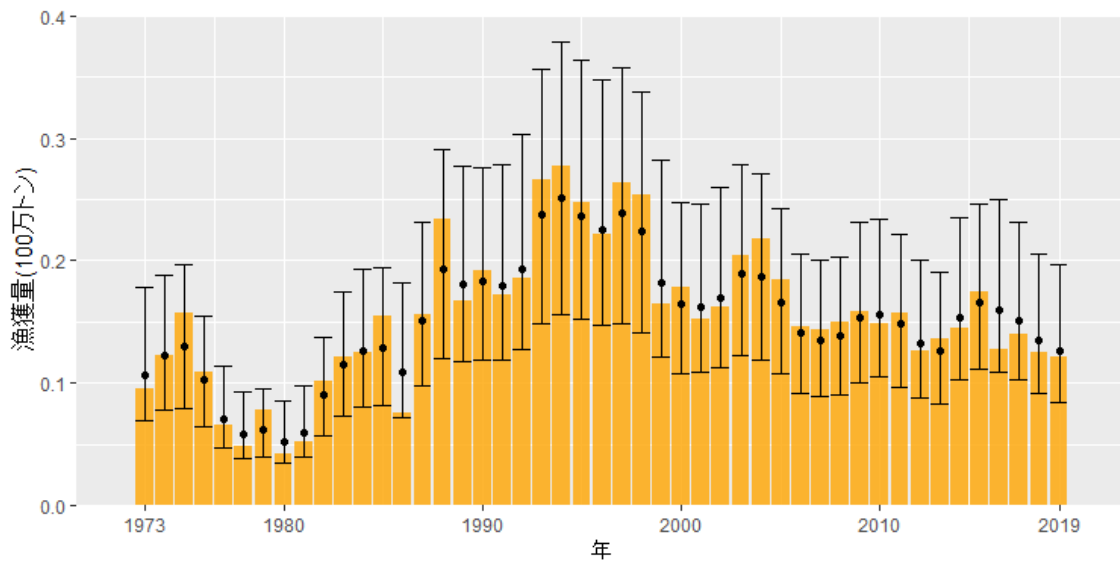


図 15. YDDM_HS の推定漁獲量の中央値と 95%予測区間. 点が推定漁獲量の中央値, エラーバーが推定漁獲量の 95%予測区間, 棒グラフがデータの漁獲量を表す.

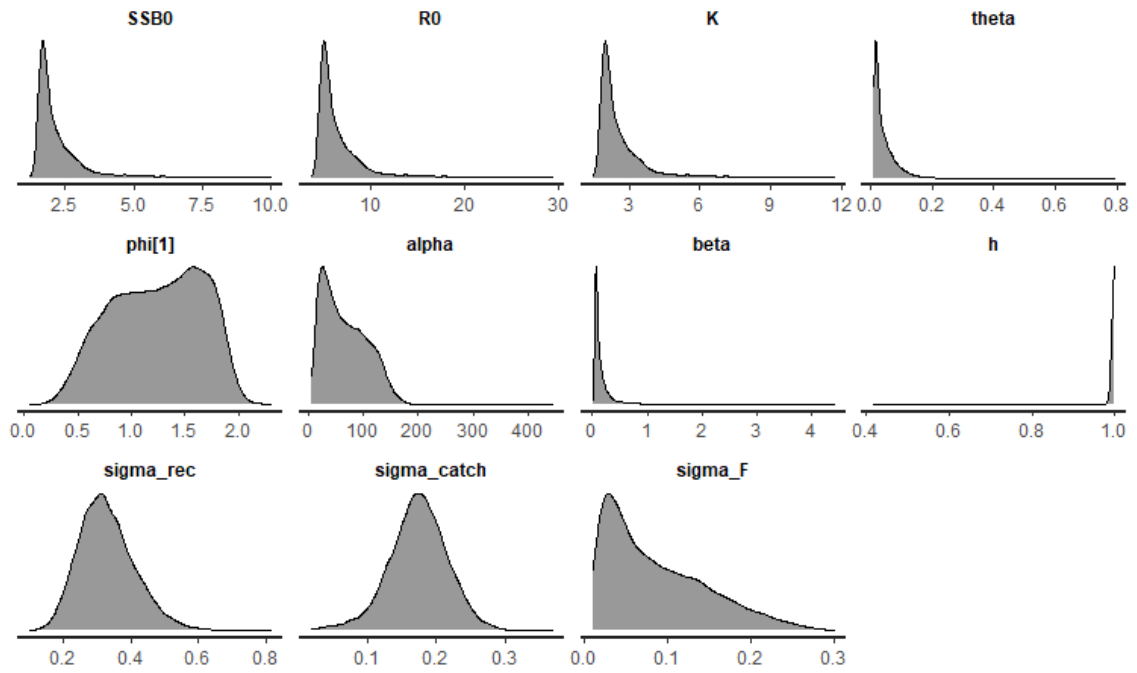


図 16. YDDM_HS のパラメータの事後分布(1 枚目).

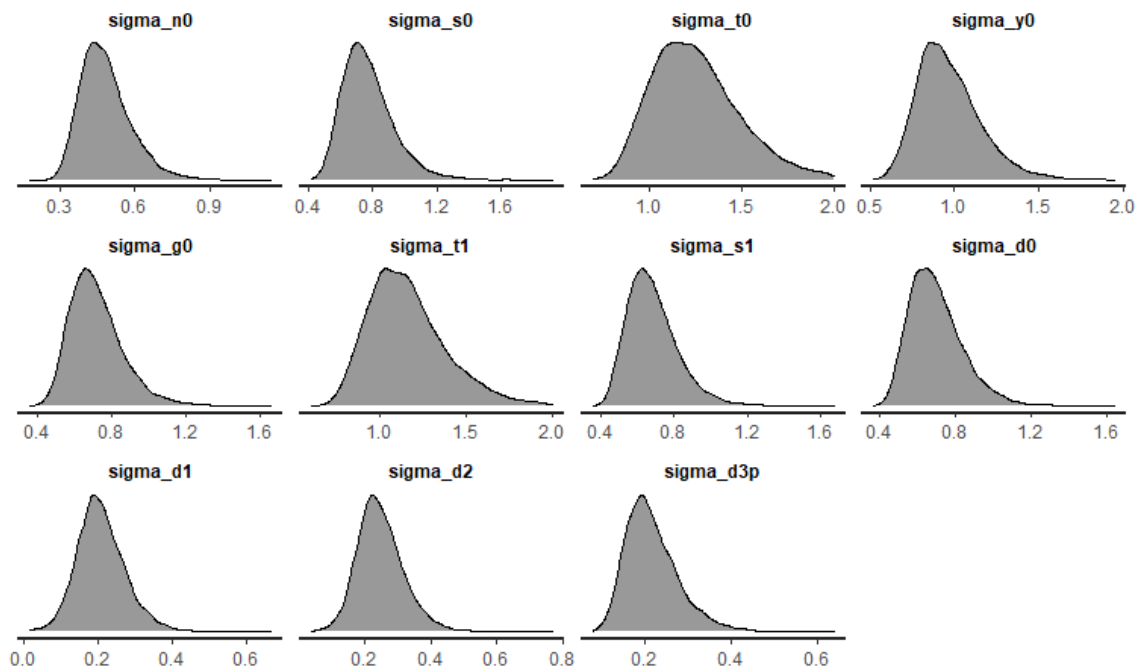


図 17. YDDM_HS のパラメータの事後分布(2 枚目).

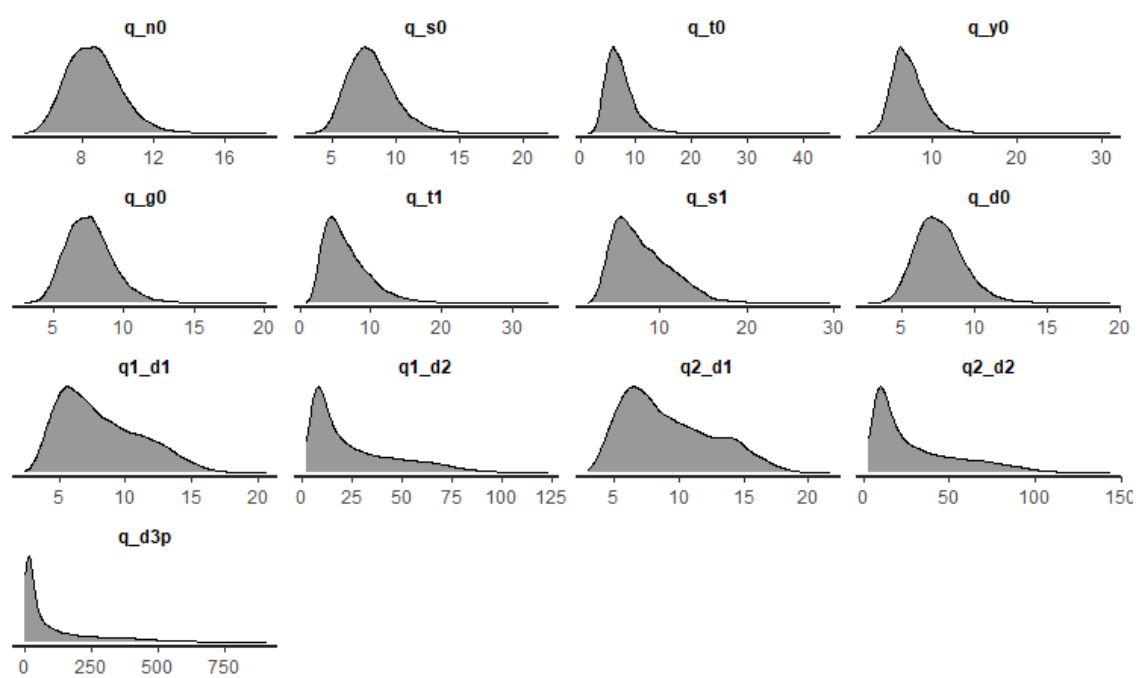


図 18. YDDM_HS のパラメータの事後分布(3 枚目).

MDDM_BH

推定された月別資源量，資源量の中央値と 95%信頼区間，漁獲係数の中央値と 95%信頼区間，産卵親魚量の中央値と 95%信頼区間，加入尾数の中央値と 95%信頼区間，年齢別月別資源量，パラメータの事後分布を示す。

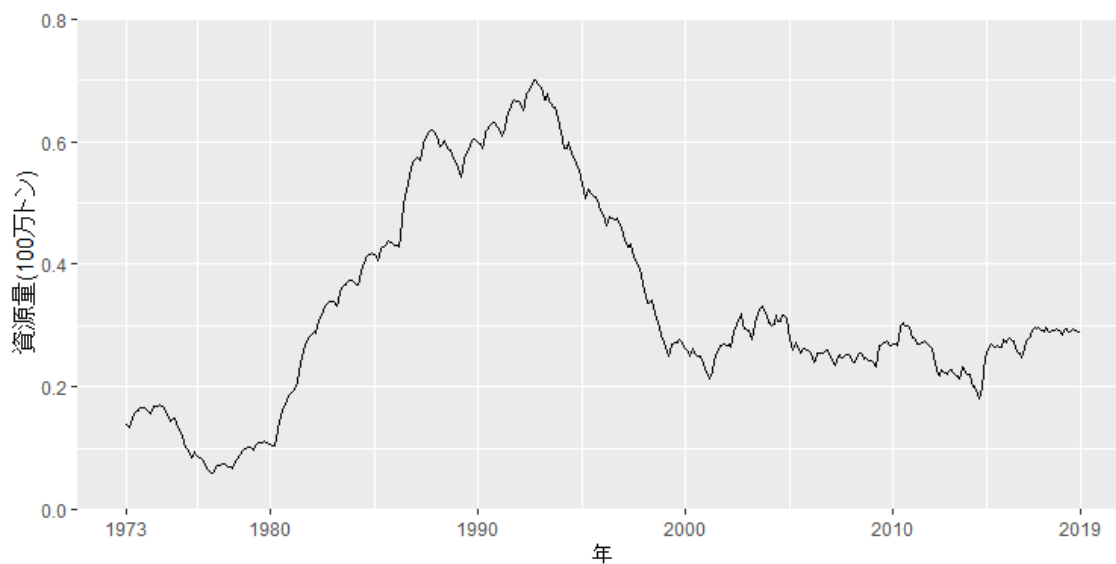


図 19. MDDM_BH の月別の推定資源量

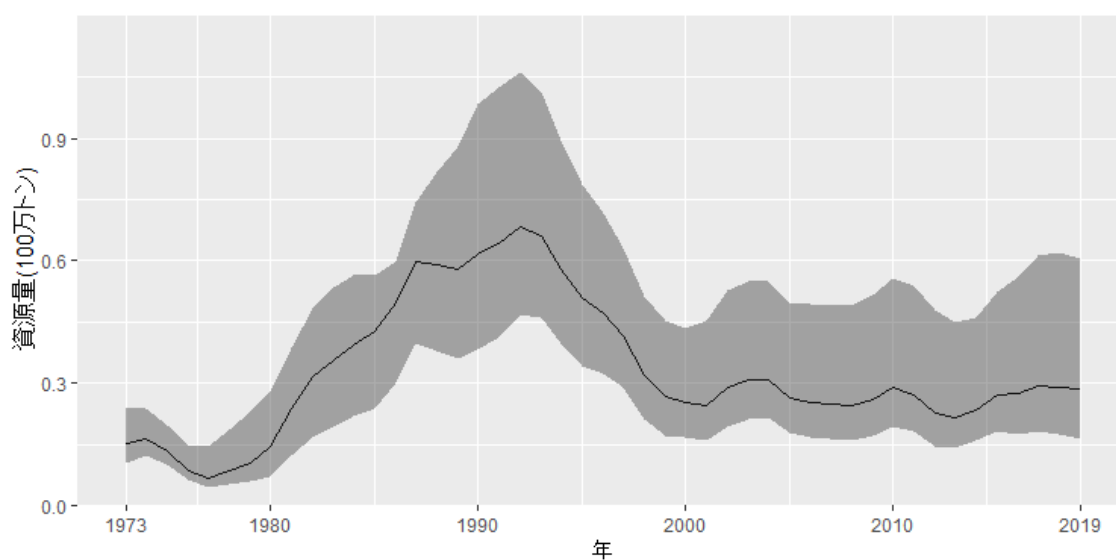


図 20. MDDM_BH の推定資源量の中央値と 95%信頼区間.

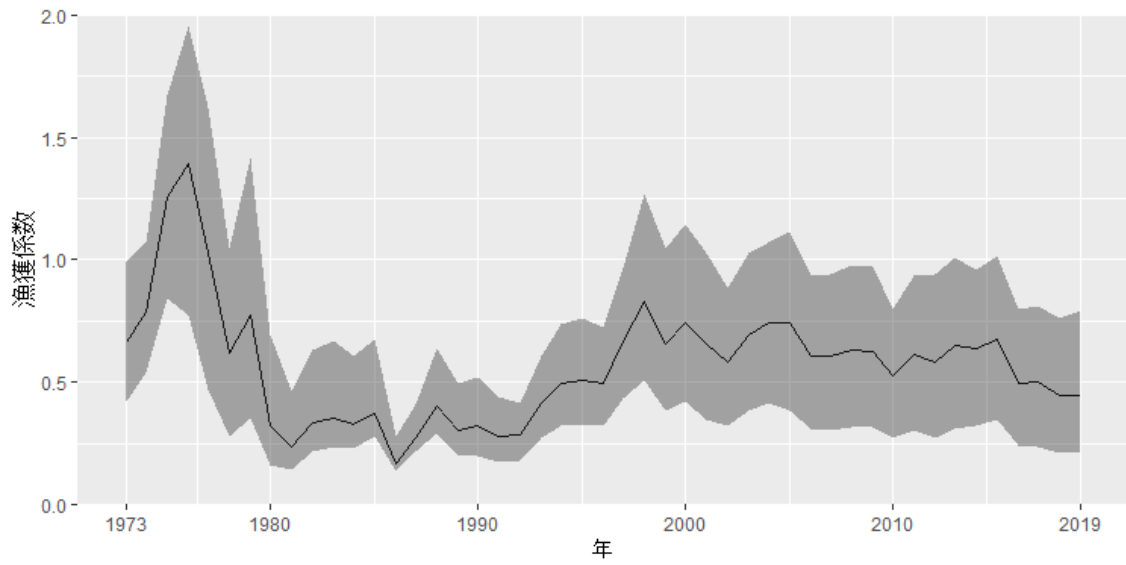


図 21. MDDM_BH の推定漁獲係数の中央値と 95%信頼区間.



図 22. MDDM_BH の推定産卵親魚量の中央値と 95%信頼区間.

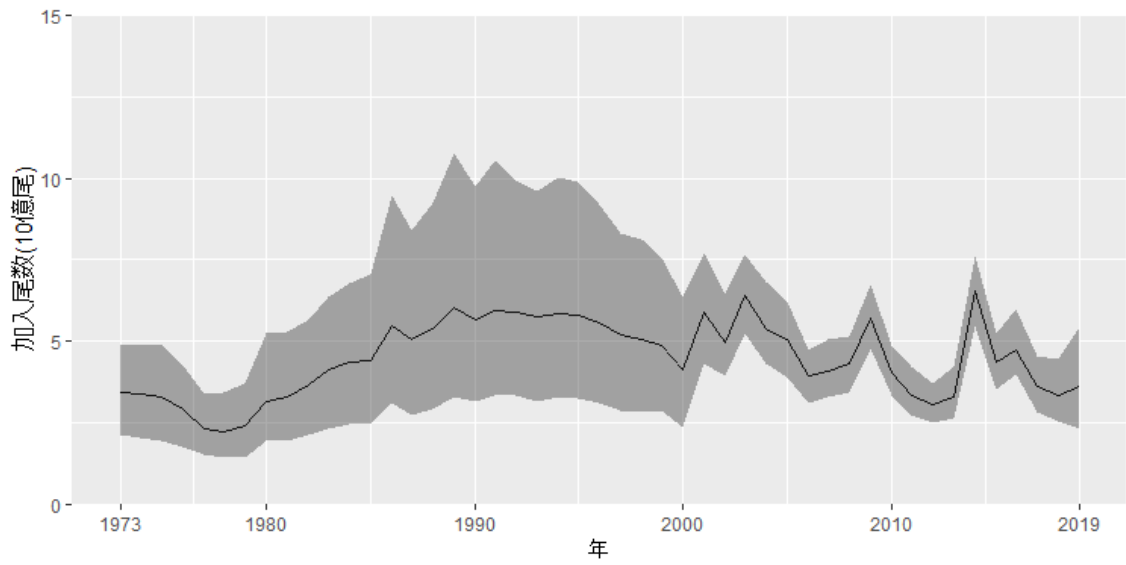


図 23. MDDM_BH の推定加入尾数の中央値と 95%信頼区間.

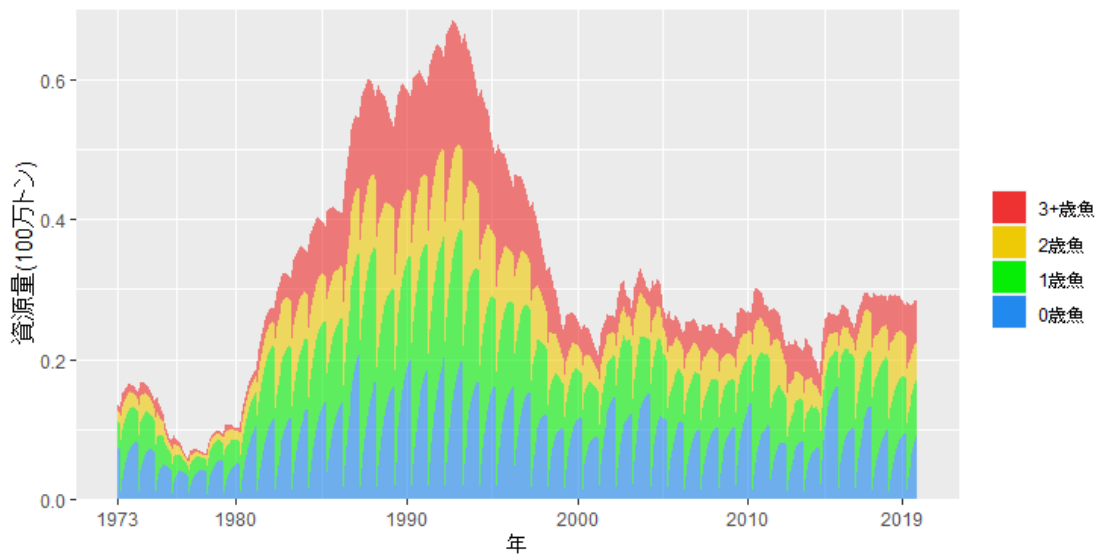


図 24. MDDM_BH の年齢別推定資源量.

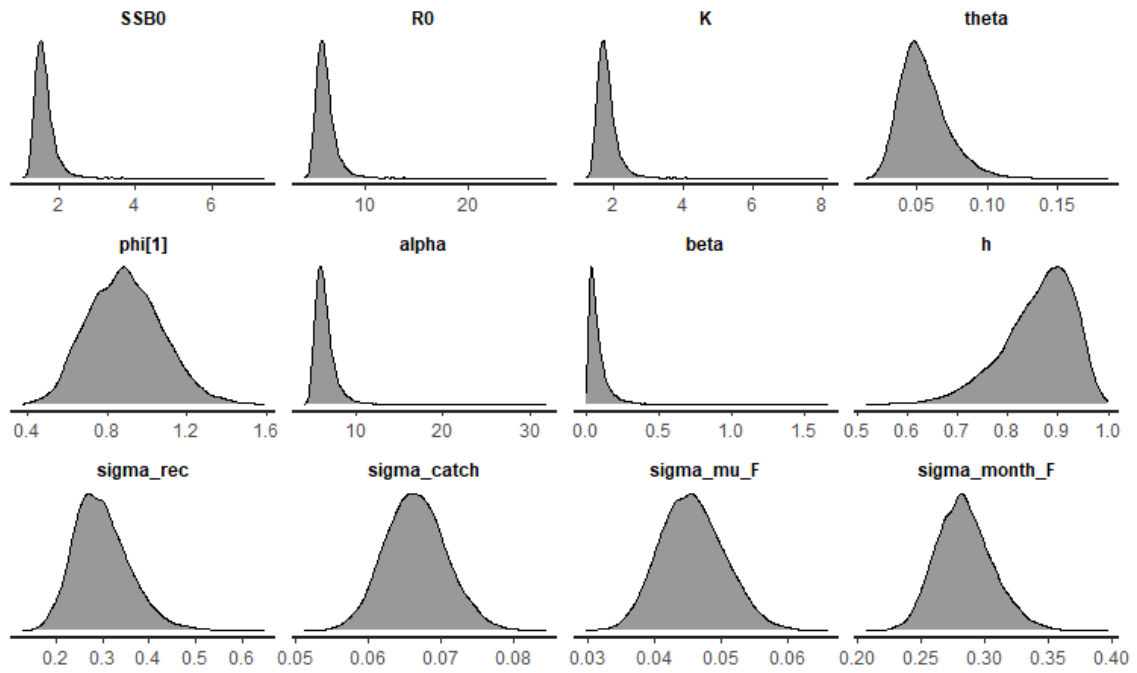


図 25. MDDM_BH のパラメータの事後分布(1 枚目).

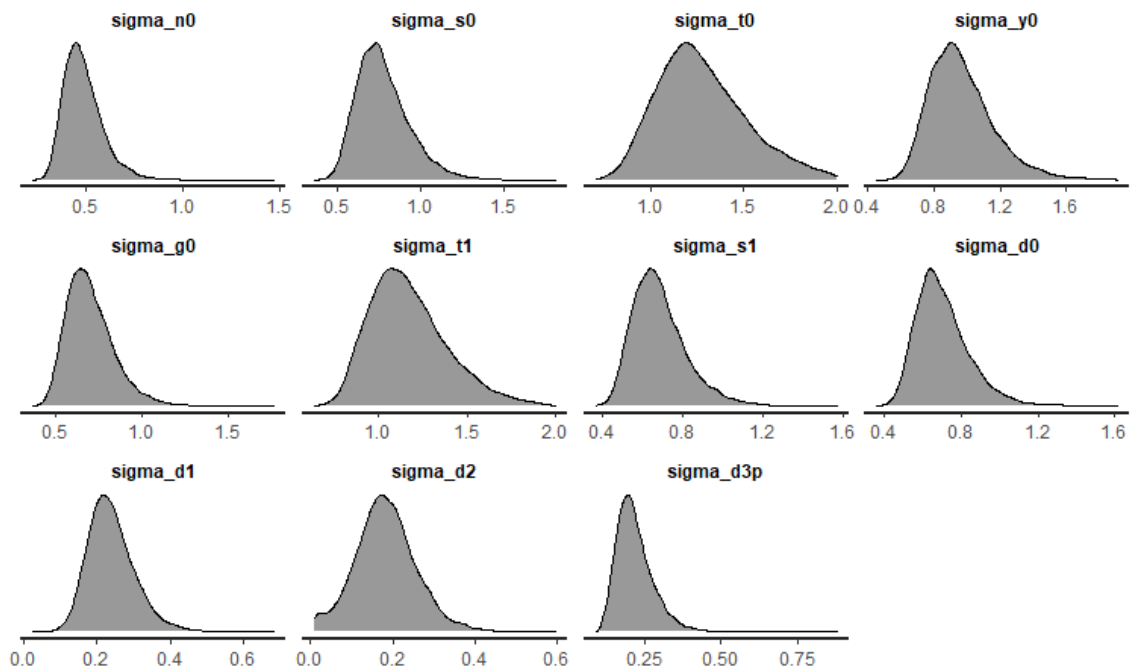


図 26. MDDM_BH のパラメータの事後分布(2 枚目).

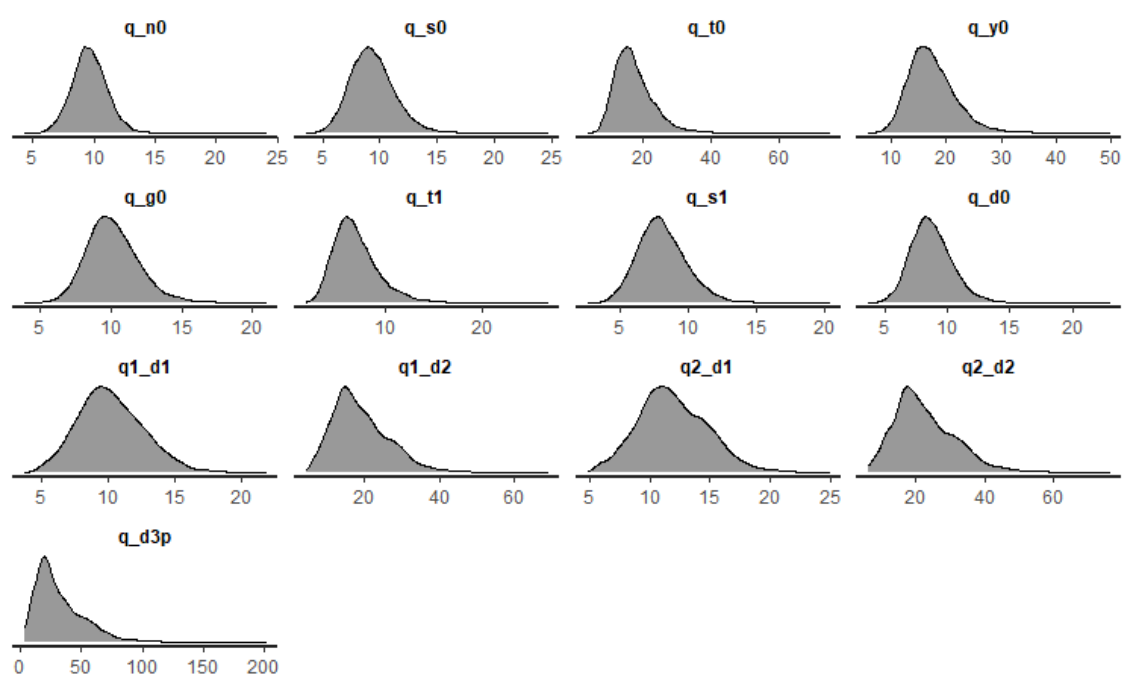


図 27. MDDM_BH のパラメータの事後分布(3 枚目).

MDDM_HS

推定された月別資源量，資源量の中央値と 95%信頼区間，漁獲係数の中央値と 95%信頼区間，産卵親魚量の中央値と 95%信頼区間，加入尾数の中央値と 95%信頼区間，年齢別月別資源量，パラメータの事後分布を示す。

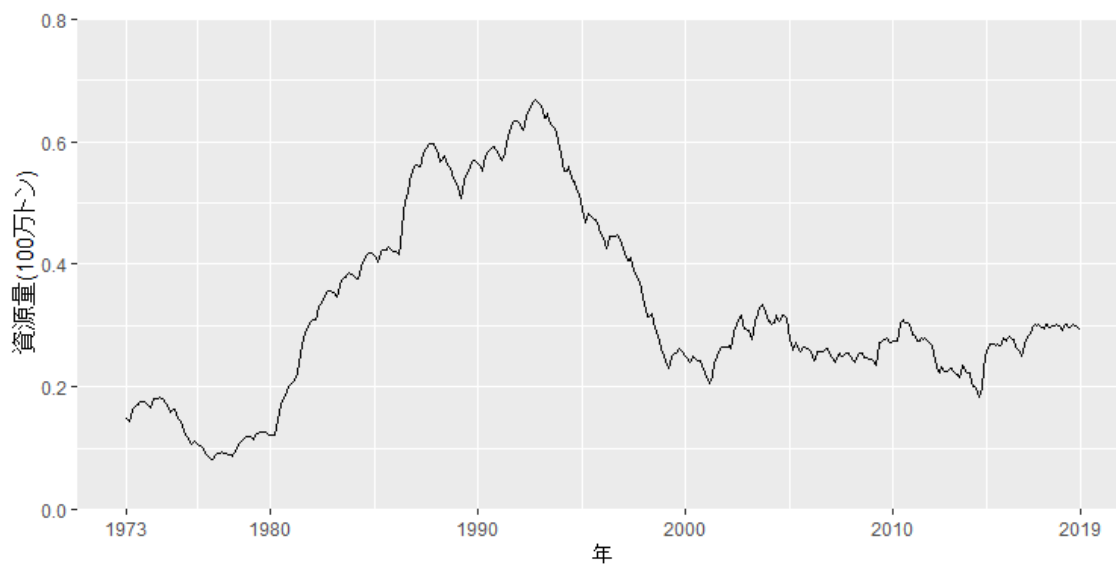


図 28. MDDM_HS の月別の推定資源量

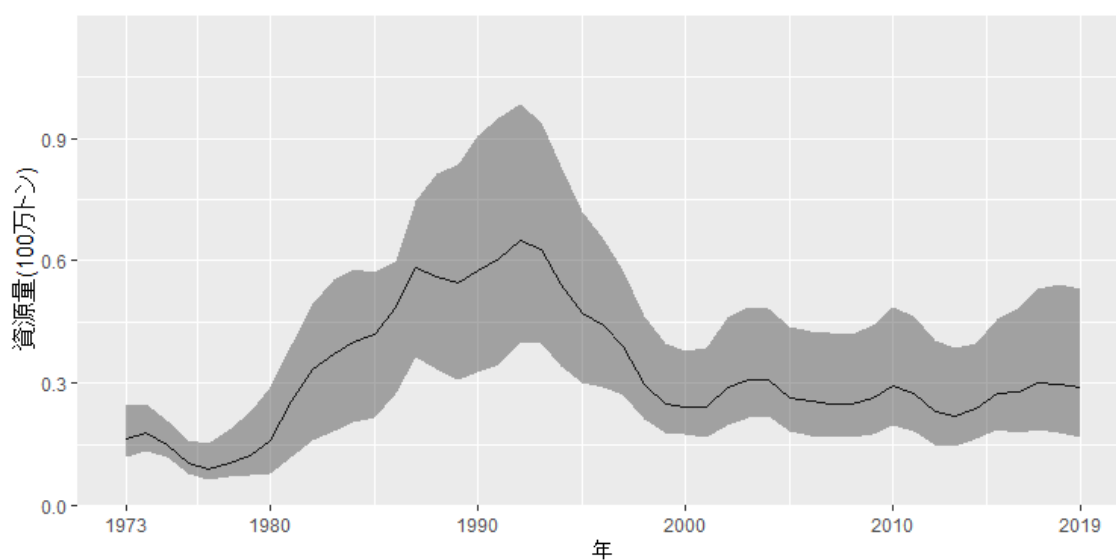


図 29. MDDM_HS の推定資源量の中央値と 95%信頼区間.

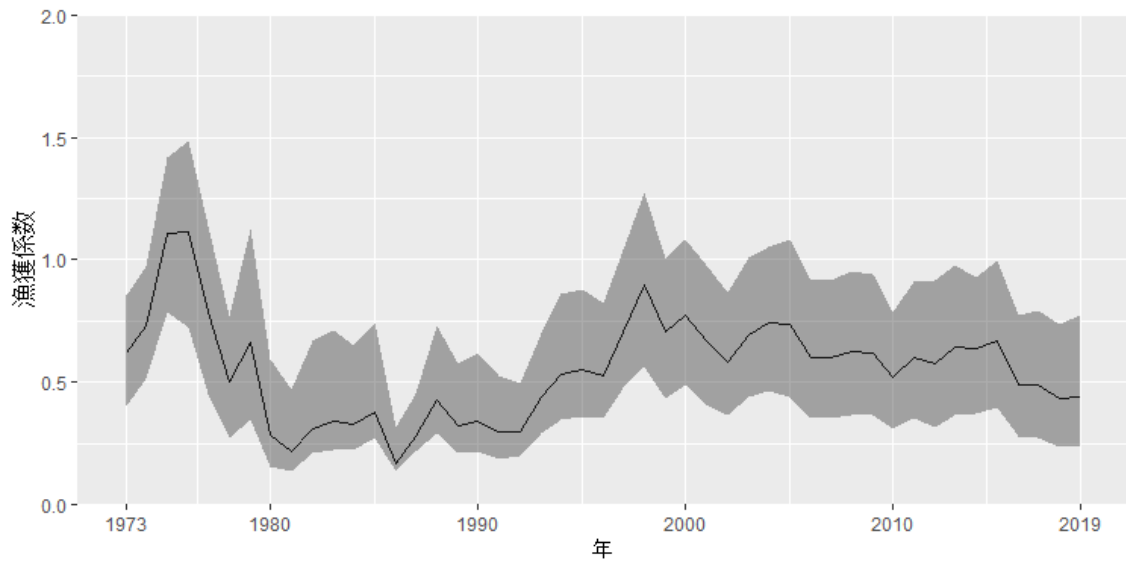


図 30. MDDM_HS の推定漁獲係数の中央値と 95%信頼区間.



図 31. MDDM_HS の推定産卵親魚量の中央値と 95%信頼区間.

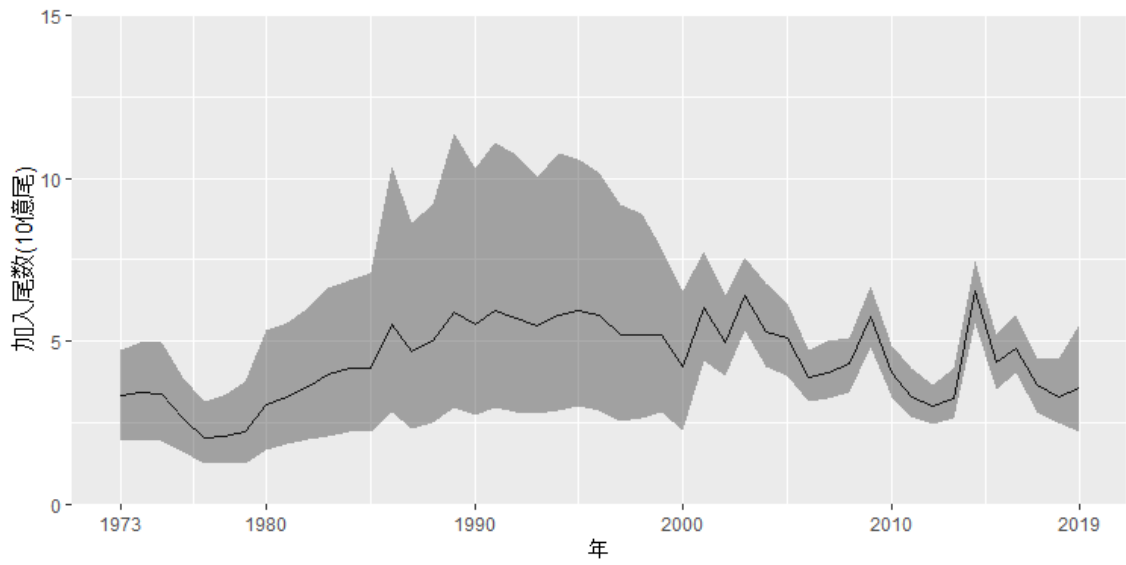


図 32. MDDM_HS の推定加入尾数の中央値と 95%信頼区間.

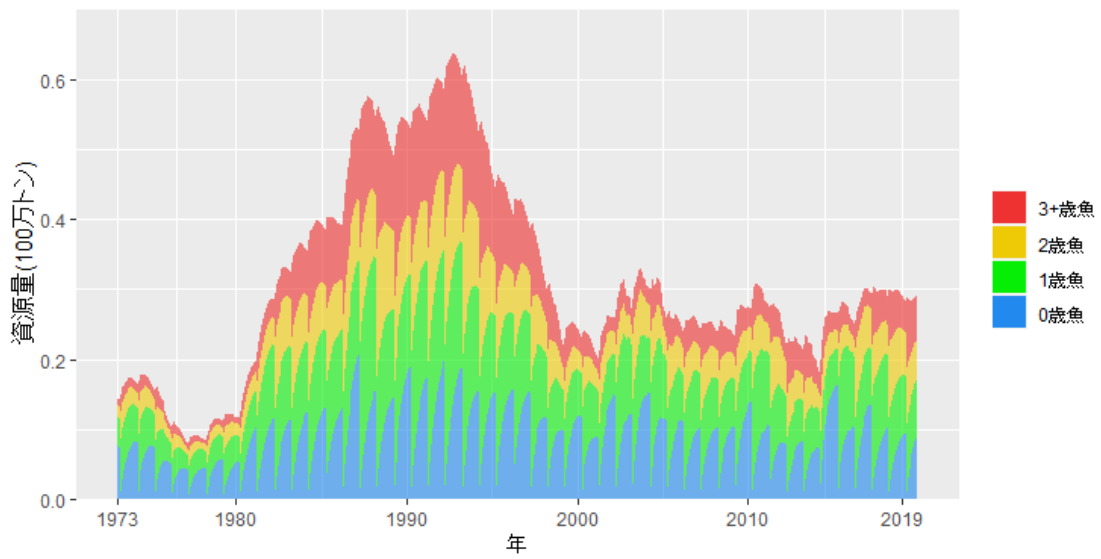


図 33. MDDM_HS の年齢別推定資源量.

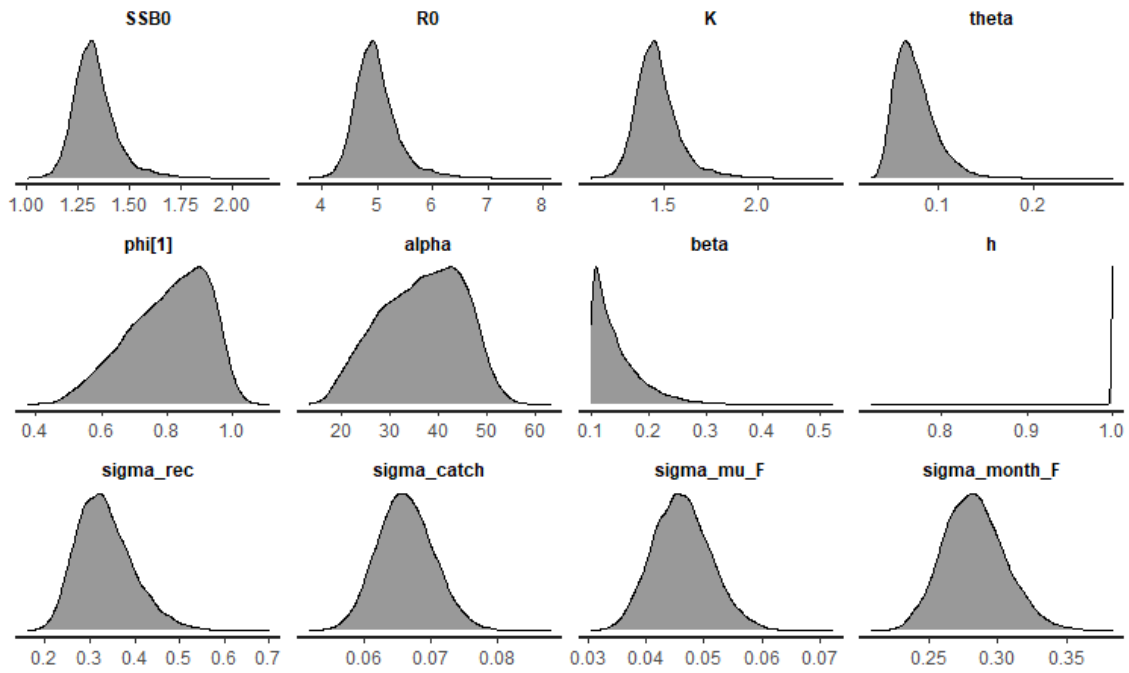


図 34. MDDM_HS のパラメータの事後分布(1 枚目).

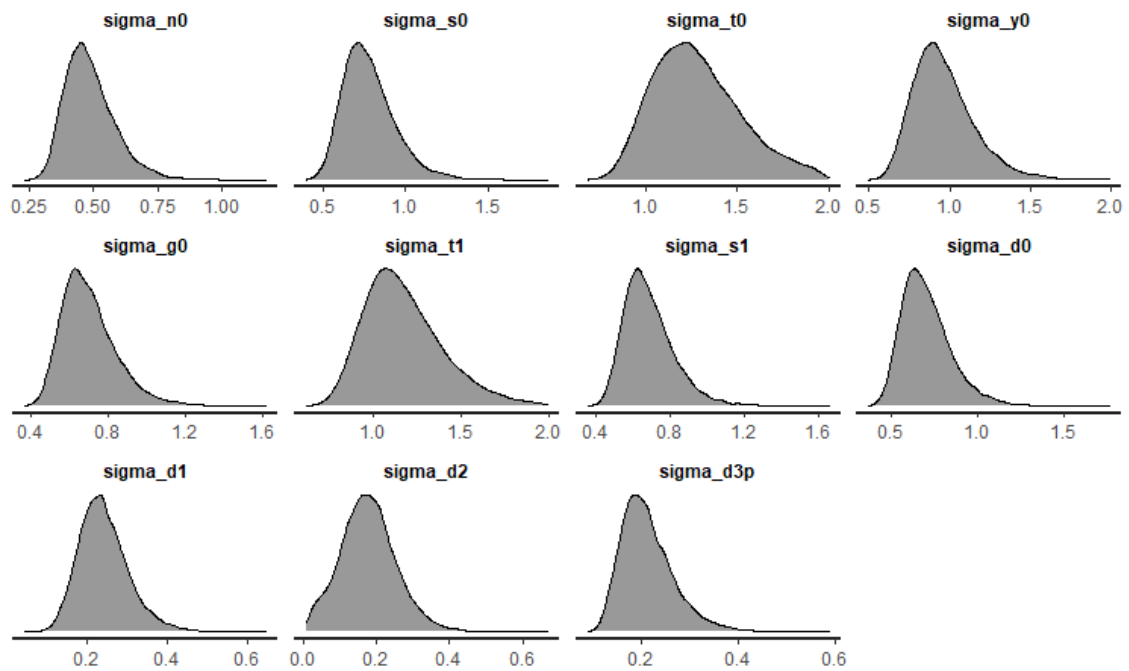


図 35. MDDM_HS のパラメータの事後分布(2 枚目).

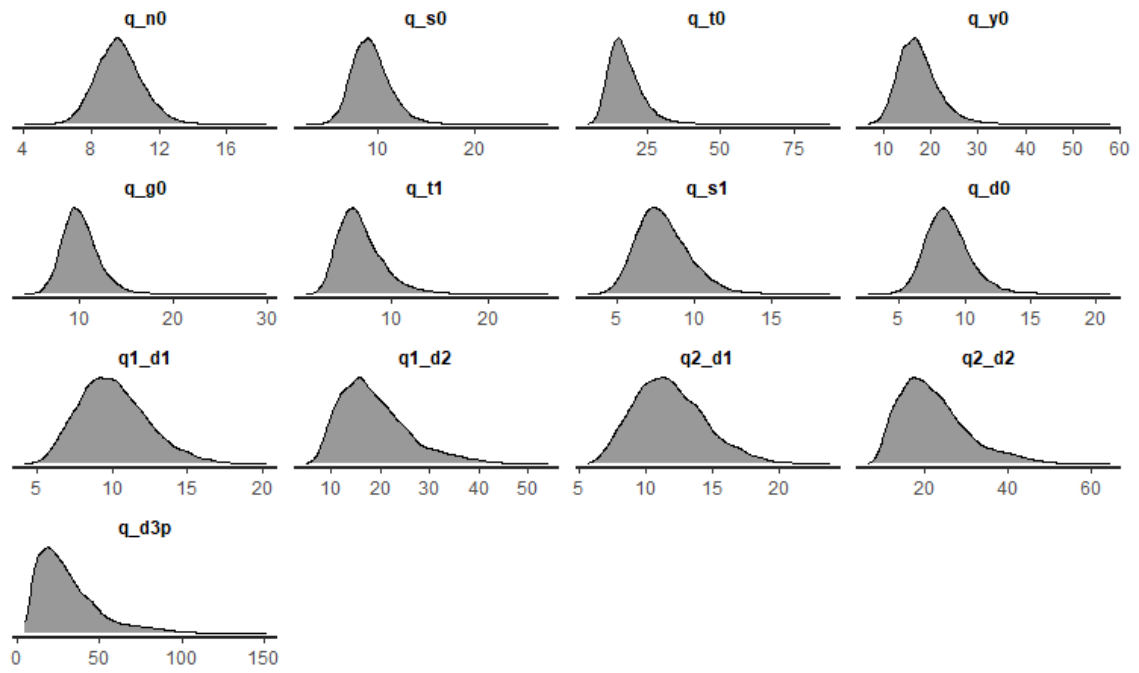


図 36. MDDM_HS のパラメータの事後分布(3 枚目).

チューニング VPA

推定された年齢別資源量を示す。

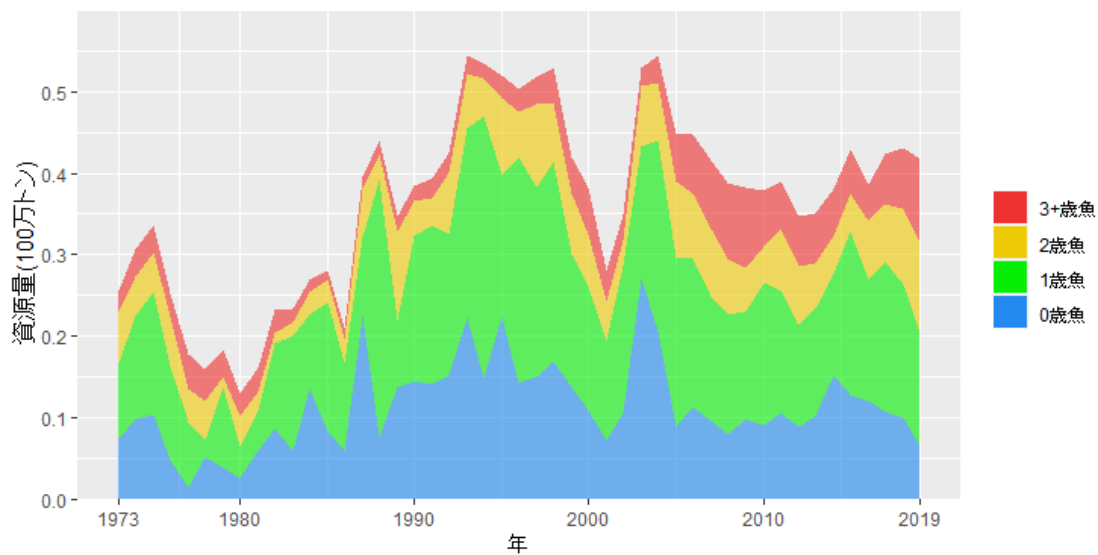


図 37. チューニング VPA の年齢別推定資源量.

ハインドキャストイング

データを1年間から5年間取り除いた場合の平均二乗誤差, 平均二乗誤差の指標値別の内訳, 資源量指標値と指標値のフィッティングを示す.

表 1. データを1年間から5年間取り除いた場合の平均二乗誤差.

取り除いた 年数	YDDM_BH	YDDM_HS	MDDM_BH	BDDM_HS	VPA_BH	VPA_HS
1年間	1.773	1.826	2.634	2.523	2.732	2.446
2年間	0.646	0.757	0.647	0.651	1.569	1.186
3年間	4.774	5.248	5.200	5.457	4.788	3.744
4年間	0.568	0.611	0.795	0.870	1.505	1.696
5年間	2.031	2.860	2.234	2.773	2.050	2.035

表 2. データを1年間取り除いた場合の平均二乗誤差の指標値別の内訳.

	YDDM_BH	YDDM_HS	MDDM_BH	MDDM_HS	VPA_BH	VPA_HS
長崎魚市0歳	0.163	0.161	0.502	0.469	0.240	0.006
島根中まき0歳	10.823	10.798	12.627	12.173	14.099	11.71
着底トロール調査0歳	1.964	1.952	1.895	1.873	2.344	2.890
幼魚分布量調査0歳	0.640	0.631	0.599	0.633	0.790	0.456
計量魚探調査0歳	0.136	0.133	0.267	0.266	0.201	0.021
島根中まき1歳	0.060	0.088	0.098	0.090	0.109	0.109
着底トロール調査1歳	0.412	0.461	0.541	0.527	0.472	0.472
大中型まき網0歳	0.911	0.909	1.414	1.354	1.205	0.646
大中型まき網1歳	2.084	2.467	6.756	6.166	4.584	4.584
大中型まき網2歳	1.989	2.334	0.137	0.289	3.308	3.308
大中型まき網3+歳	0.325	0.148	4.138	3.914	2.703	2.703

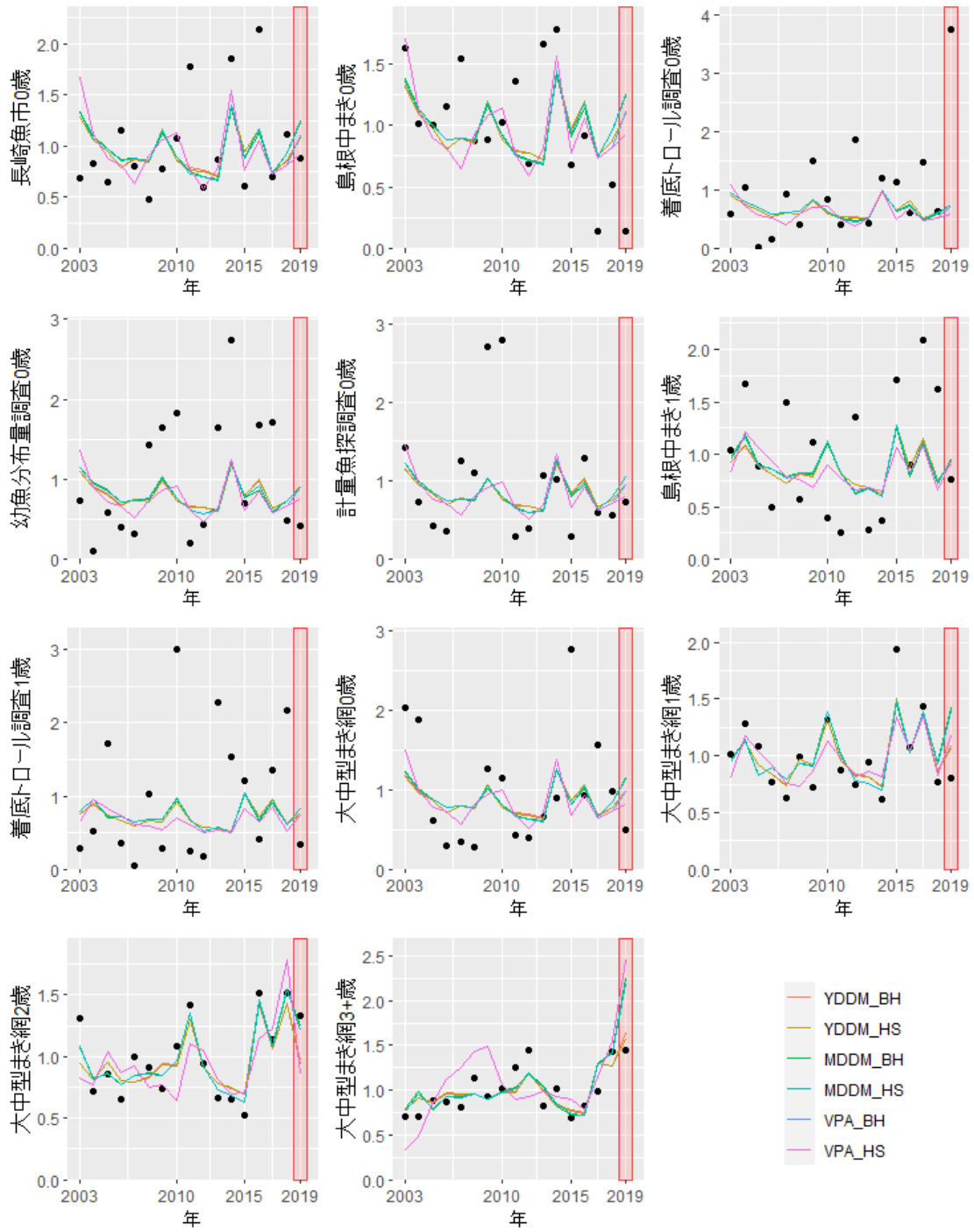


図 38. データを1年間取り除いた場合の資源量指標値とのフィッティング。

表 3. データを2年間取り除いた場合の平均二乗誤差の指標値別の内訳.

	YDDM_BH	YDDM_HS	MDDM_BH	MDDM_HS	VPA_BH	VPA_HS
長崎魚市0歳	0.006	0.016	0.001	0.000	0.203	0.243
島根中まき0歳	1.560	1.973	1.719	1.729	3.581	1.296
着底トロール調査0歳	0.021	0.053	0.016	0.017	0.085	0.005
幼魚分布量調査0歳	0.439	0.587	0.408	0.422	0.931	0.255
計量魚探調査0歳	0.571	0.767	0.701	0.709	1.564	0.351
島根中まき1歳	1.298	1.309	1.309	1.348	3.333	3.333
着底トロール調査1歳	1.262	1.281	1.178	1.205	2.529	2.529
大中型まき網0歳	0.000	0.011	0.000	0.000	0.094	0.102
大中型まき網1歳	0.873	0.715	1.784	1.723	0.085	0.085
大中型まき網2歳	0.333	0.511	0.001	0.012	4.833	4.833
大中型まき網3+歳	0.741	1.105	0.001	0.000	0.021	0.021

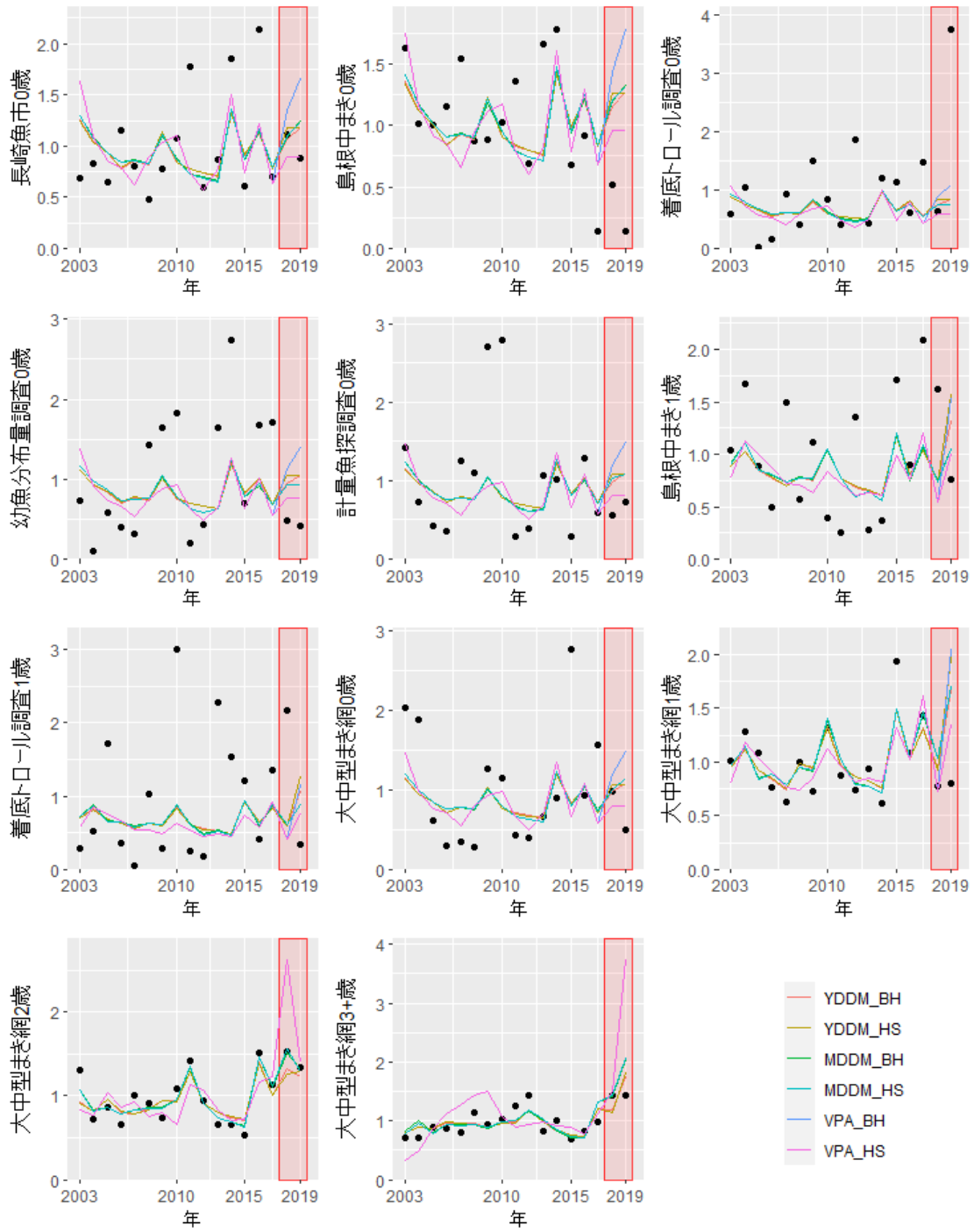


図 39. データを2年間取り除いた場合の資源量指標値とのフィッティング。

表 4. データを3年間取り除いた場合の平均二乗誤差の指標値別の内訳.

	YDDM_BH	YDDM_HS	MDDM_BH	MDDM_HS	VPA_BH	VPA_HS
長崎魚市0歳	0.702	0.940	1.144	1.295	1.731	0.378
島根中まき0歳	41.049	44.197	42.213	42.400	46.136	34.829
着底トロール調査0歳	0.369	0.281	0.383	0.347	0.345	0.754
幼魚分布量調査0歳	0.415	0.346	0.441	0.418	0.416	1.020
計量魚探調査0歳	0.460	0.610	0.635	0.701	1.080	0.307
島根中まき1歳	1.758	1.947	1.210	1.059	0.974	0.974
着底トロール調査1歳	0.305	0.325	0.128	0.107	0.154	0.154
大中型まき網0歳	0.544	0.383	0.374	0.333	0.427	1.362
大中型まき網1歳	0.972	1.131	0.341	0.713	0.472	0.472
大中型まき網2歳	0.453	0.551	0.230	0.465	0.342	0.342
大中型まき網3+歳	5.490	7.020	10.103	12.192	0.593	0.593

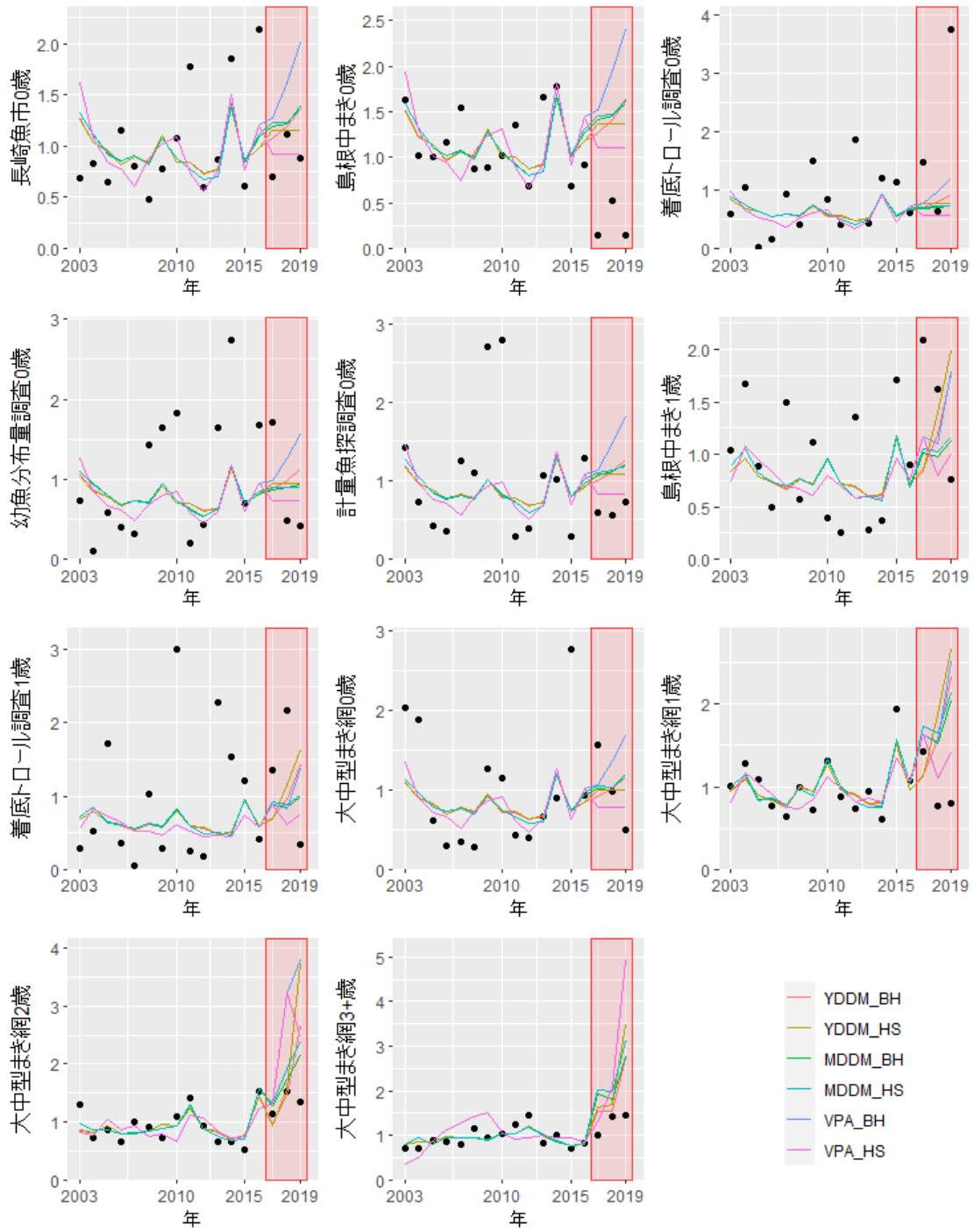


図 40. データを3年間取り除いた場合の資源量指標値とのフィッティング。

表 5. データを 4 年間取り除いた場合の平均二乗誤差の指標値別の内訳.

	YDDM_BH	YDDM_HS	MDDM_BH	MDDM_HS	VPA_BH	VPA_HS
長崎魚市 0 歳	3.109	2.577	1.326	1.018	1.805	4.671
島根中まき 0 歳	0.915	1.382	2.940	3.524	2.296	0.267
着底トロール調査 0 歳	0.013	0.030	0.007	0.023	0.045	0.009
幼魚分布量調査 0 歳	0.468	0.385	0.544	0.420	0.455	1.178
計量魚探調査 0 歳	0.152	0.082	0.046	0.015	0.043	0.534
島根中まき 1 歳	0.254	0.260	0.317	0.280	0.166	0.166
着底トロール調査 1 歳	0.056	0.049	0.064	0.072	0.080	0.080
大中型まき網 0 歳	0.004	0.002	0.066	0.115	0.039	0.121
大中型まき網 1 歳	1.108	1.070	0.107	0.100	0.187	0.187
大中型まき網 2 歳	0.166	0.136	1.142	1.130	8.713	8.713
大中型まき網 3+歳	0.002	0.750	2.183	2.875	2.731	2.731

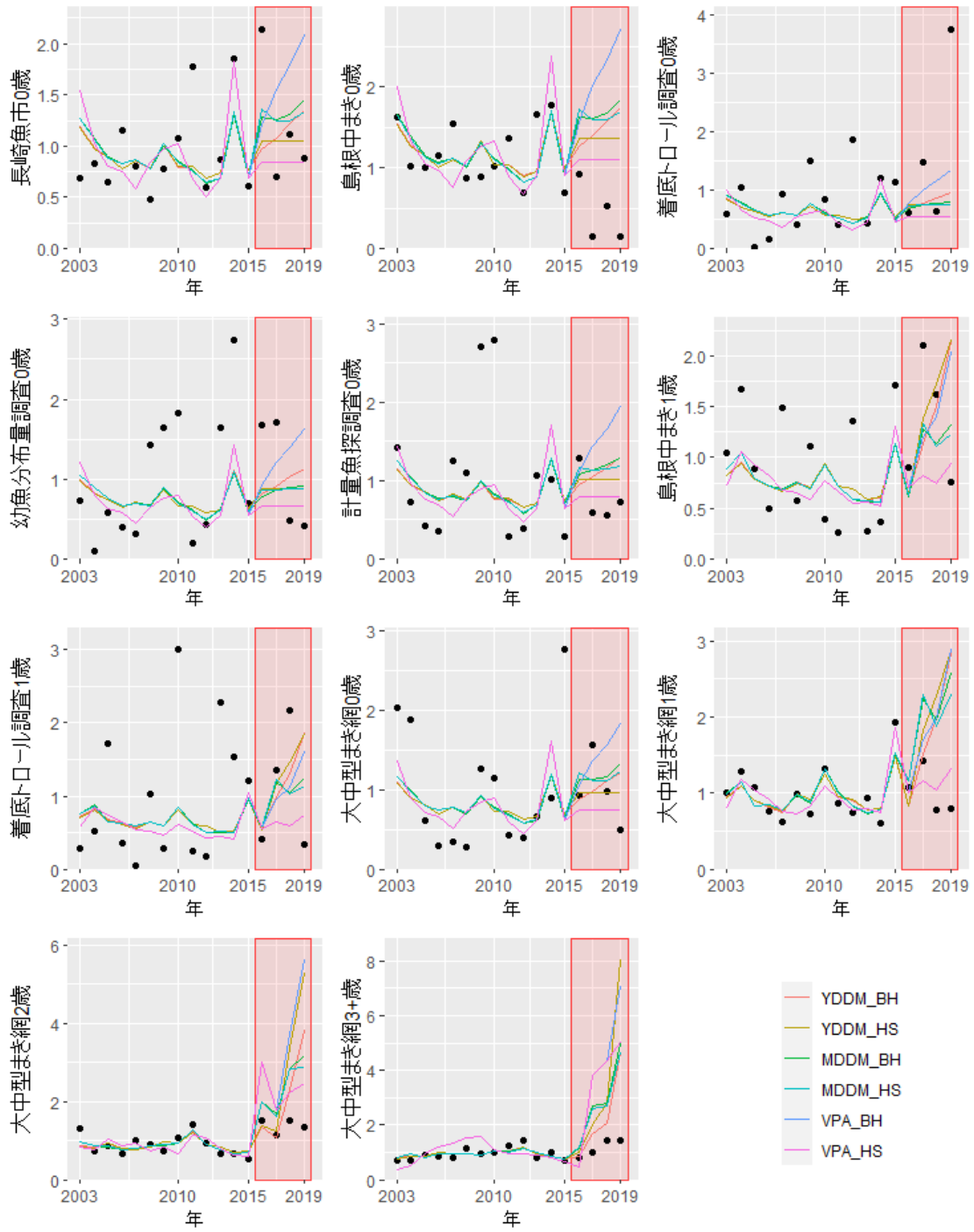


図 41. データを4年間取り除いた場合の資源量指標値とのフィッティング.

表 6. データを 5 年間取り除いた場合の平均二乗誤差の指標値別の内訳.

	YDDM_BH	YDDM_HS	MDDM_BH	MDDM_HS	VPA_BH	VPA_HS
長崎魚市 0 歳	0.994	1.764	1.185	1.914	0.741	0.607
島根中まき 0 歳	3.796	5.809	4.437	6.809	2.501	2.180
着底トロール調査 0 歳	0.186	0.087	0.231	0.150	0.425	0.467
幼魚分布量調査 0 歳	0.018	0.072	0.002	0.029	0.001	0.005
計量魚探調査 0 歳	2.535	3.238	2.755	3.389	2.998	2.804
島根中まき 1 歳	0.913	1.020	0.675	0.686	1.103	1.103
着底トロール調査 1 歳	0.134	0.154	0.076	0.079	0.189	0.189
大中型まき網 0 歳	3.773	2.865	4.005	3.048	8.093	8.531
大中型まき網 1 歳	5.733	5.749	1.262	1.047	5.954	5.954
大中型まき網 2 歳	2.700	3.210	8.030	9.407	0.289	0.289
大中型まき網 3+歳	1.555	7.490	1.912	3.949	0.255	0.255

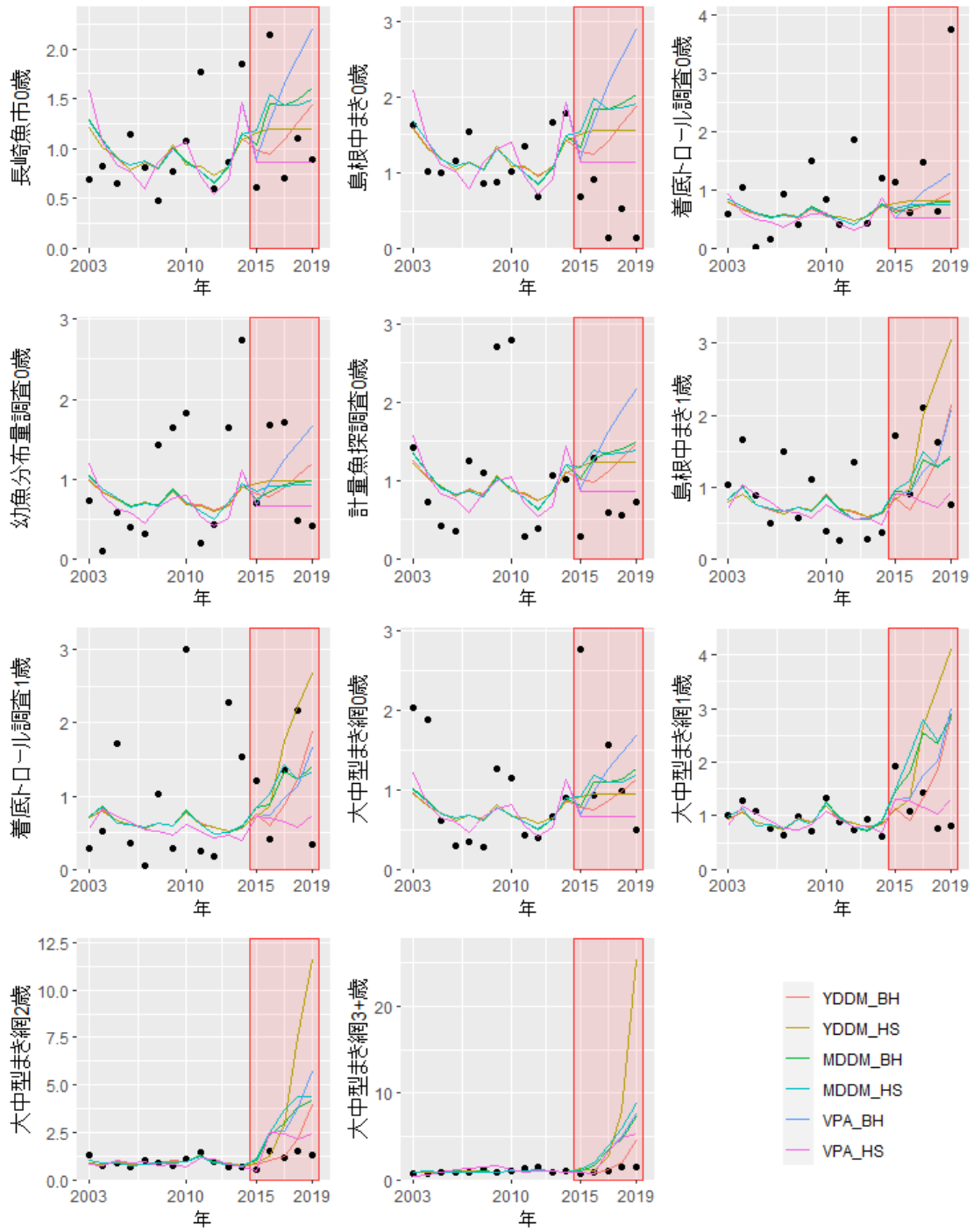


図 42. データを5年間取り除いた場合の資源量指標値とのフィッティング。