

令和 5（2023）年度ウマヅラハギ日本海・東シナ海系群の資源評価

東シナ海に分布するウマヅラハギの CPUE 標準化

水産研究・教育機構 水産資源研究所 水産資源研究センター

五味伸太郎・酒井 猛

概略

データ	以西 2 そうびき漁獲成績報告書における日別・漁船別・農林漁区別漁獲量と網数、資源量直接推定調査（春季トロール調査）と東シナ海底魚類資源分布生態調査（冬季トロール調査）の曳網別漁獲量。水深は ETOPO1 global relief model から取得。
標準化の対象	1 網あたりの漁獲重量 (kg/網)
データが利用可能な期間	2013～2022 年 1～12 月
標準化に使用した期間	2013～2022 年 1～12 月
データのフィルタリング	ウマヅラハギが主に分布する水深帯（75～225 m）を対象とし、入力ミスと見られる緯度経度のデータを削除（全体の 99 %を使用）。
統計ソフト・パッケージ	R (4.3.0) および Tidverse（データ処理）、Stats（モデル作成）、MuMIn（モデル選択）、car（多重共線性確認）、PresenceAbsence（AUC の計算）、ggplot2（図示）を使用
統計モデル	デルタ型一般化線形モデル。0/1 データに対しては二項分布を適用して有漁確率を計算し（有漁確率モデル）、有漁データに対しては対数正規分布を仮定した CPUE を計算する（有漁 CPUE モデル）。
フルモデルで導入した説明変数	有漁確率モデル： 年・季節・海区・水深、漁法（固定効果、すべてカテゴリ） 年：海区（交互作用） 有漁 CPUE モデル： 年・季節・海区・水深、漁法（固定効果、すべてカテゴリ） 年：海区（交互作用）
説明変数に関する補足	海区は北緯 31 度の南北で 2 つに分割（図 1）。 季節は 1～12 月を 4 等分、水深は 25 m ごとに 6 区分することでカテゴリー化。 GVIF により年×海区の交互作用をフルモデルから除去。
ベストモデルの選択方法	dredge による総当たり法。情報量規準は BIC を使用。
年トレンドの抽出方法	有漁確率モデルの予測値×有漁 CPUE モデルの予測値。それぞれベストモデルのものを使用。 ベストモデルから各年・各季節・各海区・各水深・各漁法の予測 CPUE を算出し、年ごと、海区ごとに平均する。その後、2013 年以降に各海区で以西 2 そうびきが操業に利用した漁区数により年ごとに重み付け平均することで標準化 CPUE を算出。

信頼区間の計算方法	ブートストラップサンプリングされたデータとベストモデルから標準化 CPUE の計算を 1,000 回繰り返し、95%信頼区間を計算。
ベストモデル	有漁確率モデル：フルモデルから年×海区の交互作用を除いたモデル（表 2） 有漁 CPUE モデル：フルモデルから年×海区の交互作用を除いたモデル（表 2）
モデル診断の結果	有漁確率モデルにおける有漁か否かの判別性能、有漁 CPUE モデルにおける残差の正規性・等分散性に問題なし（図 2、3、4）。
年トレンドの予測結果	標準化 CPUE（2013～2022 年の平均値で規格化した値）の年トレンドは、2014～2016 年にかけて上昇した後、2017～2019 年にかけて低下した。2020～2021 年は上昇したが、2022 年は低下に転じた（図 5）。

1. 背景

長期間、連続的に収集された漁業データにおける単位努力量あたり漁獲量（CPUE）は、資源量の相対的な指標値として重要である。しかし、漁業は規格化された調査計画に基づいて実施されているわけではないため、ノミナル CPUE は季節、漁場、海洋環境の変化といった漁獲効率に影響を及ぼす要因の影響を強く受けている。したがって、適切な統計モデルによりそれらの影響を除去する CPUE 標準化が必要とされる。

本稿は、東シナ海におけるウマヅラハギの CPUE 標準化についての概要を示したものである。ウマヅラハギを対象とする重要な漁業の 1 つである 2 そうびき以西底びき網漁業（以西 2 そう）のデータに着底トロール調査のデータをプールしたデータセットを用いた。本データの CPUE は各年で 30～60%の漁獲なし（ゼロキャッチ）を含む連続値のため、デルタ型一般化線形モデル（Lo et al. 1992）を用いて年トレンドを抽出し、資源量指標値の 1 つとした。

2. データと方法

2.1. 使用データ

漁業データには、2013～2022 年の 1～12 月における以西 2 そうびき漁獲成績報告書の日別・漁船別・農林漁区（緯度経度 10 分グリッド）別のウマヅラハギ漁獲量と網数を用いた。また、調査船データには資源量直接推定調査（トロール調査、2013～2022 年 5～6 月）および東シナ海底魚資源分布生態調査（トロール調査、2013～2017、2019 年 11～12 月、2020 年 9 月、2021 年 9～10 月、2022 年 11～12 月）の曳網別漁獲量を用いた。本データにおける標準化の対象は 1 網あたりの漁獲重量（kg/網）とした。

また、海洋環境情報として、漁業データの漁区中央に最近傍の水深データを ETOPO1

global relief model (<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>) から切り出して用いた。

2.2. データのフィルタリング

ウマヅラハギが主に分布する水深帯（75～200 m）を対象とし、入力ミスとみられる緯度・経度のデータを省いた。その結果、全体の 98%が残ったため、これらを CPUE 標準化に供した（表 1）。

2.3. 統計モデル

本解析に使用したデータは、各年で 30～60%のゼロキャッチを含む連続値のため、デルタ型一般化線形モデルによる解析を行った。0/1 データに対して二項分布の誤差構造を適用して有漁確率を計算し（有漁確率モデル）、有漁データに対しては対数正規分布を適用して CPUE を計算した（有漁 CPUE モデル）。説明変数には、年、季節、海区、水深、漁法（漁業もしくは調査トロール）を固定効果として設定し、年と海区の 2 次の交互作用も導入した。海区は、日本と周辺国の漁場の違いや、近年東シナ海の南北で資源の動向が異なると考えられること（Zhu et al. 2018、Kawauchi et al. 2020）を考慮して、北緯 31 度の南北で 2 つに分割した（図 1）。説明変数はすべてカテゴリカル変数であり、季節は 1～12 月を 4 等分し、水深は 25 m ごとに区分することでカテゴリー化した。なお、上記の説明変数間の多重共線性について、一般化分散拡大係数（GVIF）を指標として確認し、多重共線性の高い説明変数（両モデルとも年と海区の交互作用）を取り除いたうえで、次のように各モデルにおける最も複雑なモデルを作成した。

有漁確率モデル：

$$r \sim \text{Bin}(1, p)$$

$$\text{logit}(p) = \alpha + \text{factor}(\text{year}) + \text{factor}(\text{Quarter}) + \text{factor}(\text{Area}) + \text{factor}(\text{Depth}) + \text{factor}(\text{Fishing method})$$

ここで、 r は応答変数、 p は有漁確率、Bin は二項分布、 α は切片を示す。

有漁 CPUE モデル：

$$\ln(\text{CPUE}) \sim N(\mu, \sigma^2)$$

$$\mu = \alpha + \text{factor}(\text{year}) + \text{factor}(\text{Quarter}) + \text{factor}(\text{Area}) + \text{factor}(\text{Depth}) + \text{factor}(\text{Fishing method})$$

ここで、CPUE は有漁時の CPUE、 μ と σ^2 は自然対数変換した有漁 CPUE の平均と分散、 N は正規分布、 α は切片を示す。

2.4. モデル選択

ベイズ情報量規準（BIC）を用いた総当たり法により、モデル選択を行った。BICが最小となるモデル候補をベストモデルとして CPUE 標準化に供した。

2.5. モデル診断

有漁確率モデルでは receiver operating characteristic (ROC) 曲線下面積（AUC）により有漁か否かの判別性能を、有漁 CPUE モデルでは QQ プロットおよび説明変数に対する残差プロットから残差の正規性・等分散性を評価した。

2.6. 年トレンドの計算

有漁確率モデルおよび有漁 CPUE モデルのベストモデルから各年・各季節・各海区・各水深・各漁法の予測値を計算し、年・海区ごとに平均した。次に、有漁確率モデルの予測値に有漁 CPUE モデルの予測値をかけ合わせ、それを 2013 年以降に各海区で以西 2 そうびきが操業に利用した漁区数によって年ごとに重み付け平均することで、標準化 CPUE の年トレンドを算出した。

2.7. 信頼区間の計算

重複を許してブートストラップサンプリングされたデータとベストモデルから標準化 CPUE の計算を 1,000 回繰り返し、各計算結果から 95 %信頼区間を推定した。

以上の解析は、すべて R ver. 4.3.0 上で行い、モデルパラメータの計算では glm、多重共線性のチェックでは car パッケージの vif、モデル選択では MuMIn パッケージの dredge、AUC の計算では PresenceAbsence パッケージを用いた。

3. 結果

多重共線性の高い説明変数（年と海区の交互作用）を予め取り除いた上で、BIC の総当たり法によるモデル選択を行い、有漁確率モデル、有漁 CPUE モデルともに、最も複雑なモデルがベストモデルに選ばれた（表 2）。それぞれのモデルにおけるパラメータ推定結果は付表 1 に示したとおりである。モデル診断の結果、有漁確率モデルでは有漁・不漁の判別性能に問題はなく（AUC=0.80; 図 2）、有漁 CPUE モデルでは残差の正規性・等分散性に大きな問題はみられなかった（図 3、4）。

標準化 CPUE（2013～2021 年の平均値で規格化した値）の年トレンドは、2014～2016 年にかけて上昇した後、2017～2019 年にかけて低下した。2020～2021 年は上昇したが、2022

年は低下に転じた（図 5、表 3）。

引用文献

- Kawauchi, Y., S. Ohsimo, T. Sakai, M. Yoda, Y. Aonuma (2020) Spatiotemporal changes in demersal fish habitats suggest potential impacts of fishing pressure: A case study of yellow seabream *Dentex hypselosomus* in the East China Sea. *Reg. Stud. Mar. Sci.*, **40**, 101491
- Lo, N. C. H., L. D. Jacobson and J. L. Squire (1992) Indices of relative abundance from fish spotter data based on Delta-lognominal models. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **49**, 2515-2526.
- Zhu, M., T. Yamakawa and T. Sakai (2018) Combined use of trawl fishery and research vessel survey data in a multivariate autoregressive state-space (MARSS) model to improve the accuracy of abundance index estimates. *Fish. Sci.*, **84**, 437-451.

表 1. 年・海区ごとのデータ数・ノミナル CPUE・有漁時の平均水深

・以西 2 そう

年	北緯31度以南（海区1）				北緯31度以北（海区2）			
	データ数	有漁 データ数	ノミナル CPUE (kg/網)	有漁時の 平均水深 (m)	データ数	有漁 データ数	ノミナル CPUE (kg/網)	有漁時の 平均水深 (m)
2013	28	5	0.30	189.0	895	623	7.09	149.8
2014	43	4	0.10	148.3	736	373	2.38	155.3
2015	28	10	0.25	131.2	876	592	5.50	153.8
2016	32	2	0.05	139.0	849	481	9.39	153.8
2017	31	3	0.06	143.3	922	472	11.91	153.8
2018	25	1	0.02	134.0	911	456	14.88	154.3
2019	25	2	0.02	162.0	920	456	3.05	154.1
2020	16	1	0.02	134.0	714	274	2.10	154.1
2021	12	3	0.18	153.0	643	290	7.67	154.9
2022	11	4	0.76	181.0	629	254	3.90	153.2

・トロール調査

年	北緯31度以南（海区1）				北緯31度以北（海区2）			
	データ数	有漁 データ数	ノミナル CPUE (kg/網)	有漁時の 平均水深 (m)	データ数	有漁 データ数	ノミナル CPUE (kg/網)	有漁時の 平均水深 (m)
2013	134	14	0.04	120.9	37	6	0.12	146.0
2014	135	6	0.02	122.5	35	6	0.29	148.2
2015	142	13	0.05	123.4	35	12	0.39	141.8
2016	145	14	0.01	139.6	48	5	0.04	142.8
2017	148	9	0.02	151.3	45	6	0.08	147.8
2018	84	3	0.02	127.0	20	2	0.14	139.0
2019	114	1	0.00	108.0	41	1	0.03	131.0
2020	21	1	0.04	135.0	5	0	0.00	NA
2021	104	4	0.01	122.0	34	11	0.24	136.5
2022	131	7	0.02	127.6	35	5	0.09	137.8

表 2. デル選択の結果 (BIC による上位 10 モデル)

・有漁確率モデル

	Intercept	factor.area	factor.depthc	factor.method	factor.qt	factor.year	df	logLik	BIC	delta
32	-0.91693	+	+	+	+	+	20	-5302.9	10789.7	0.0
31	0.606239	+	+	+	+		19	-5411.4	10997.5	207.9
16	-1.33544	+	+	+	+		11	-5450.1	11001.4	211.8
28	-3.44531	+		+	+		19	-5507.6	11189.9	400.2
15	0.147863	+	+	+			10	-5556.3	11204.5	414.9
24	-1.12137	+	+			+	17	-5529.8	11215.9	426.2
12	-3.89048	+			+		10	-5655.7	11403.4	613.8
23	0.263458	+	+			+	16	-5640.5	11428.2	638.5
8	-1.54471	+	+				8	-5685.0	11443.6	654.0
20	-3.33462	+				+	16	-5669.7	11486.5	696.9

・有漁 CPUE モデル

	Intercept	factor.area	factor.depthc	factor.method	factor.qt	factor.year	df	logLik	BIC	delta
32	1.248775	+	+	+	+	+	21	-7343.2	14862.7	0.0
31	2.258505	+	+	+	+		20	-7384.0	14936.0	73.3
16	0.925803	+	+	+	+		12	-7468.1	15037.1	174.4
15	1.942723	+	+	+			11	-7507.6	15107.5	244.8
28	-0.565	+		+	+		20	-7470.5	15109.0	246.3
12	-0.88248	+		+			11	-7586.7	15265.7	403.0
30	0.711097		+	+	+		16	-7588.8	15312.0	449.3
29	1.962804		+	+	+		15	-7617.5	15361.0	498.3
24	0.504568	+	+			+	18	-7655.7	15462.5	599.8
14	0.246812	+	+	+			7	-7717.8	15494.4	631.7

表 3. ミナル・標準化 CPUE とその CV・95 %信頼区間

year	ノミナル CPUE	標準化 CPUE	CV(%)	2.5%	97.5%
2013	1.04	2.05	5.42	1.85	2.27
2014	0.33	0.72	7.96	0.61	0.83
2015	0.80	1.23	6.38	1.09	1.39
2016	1.33	1.46	7.08	1.26	1.67
2017	1.71	1.27	7.33	1.09	1.47
2018	2.33	0.90	8.36	0.76	1.06
2019	0.46	0.45	8.24	0.38	0.53
2020	0.35	0.51	10.37	0.42	0.62
2021	1.11	0.90	9.66	0.74	1.08
2022	0.55	0.50	9.86	0.41	0.60

CPUE は、各年の値を 2013～2022 年の平均で規格化した値。

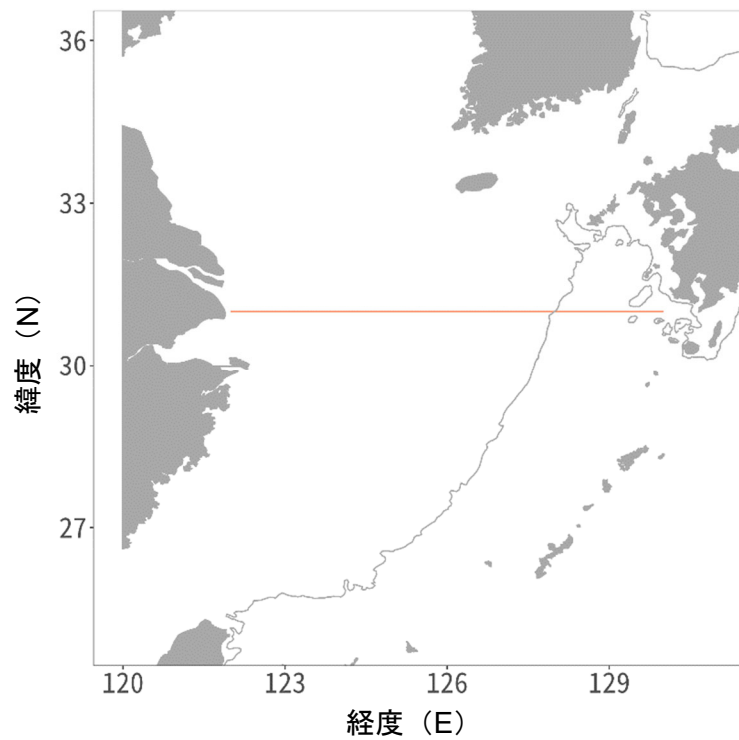


図 1. 海区分け

北緯 31 度以南を海区 1、以北を海区 2 とした。

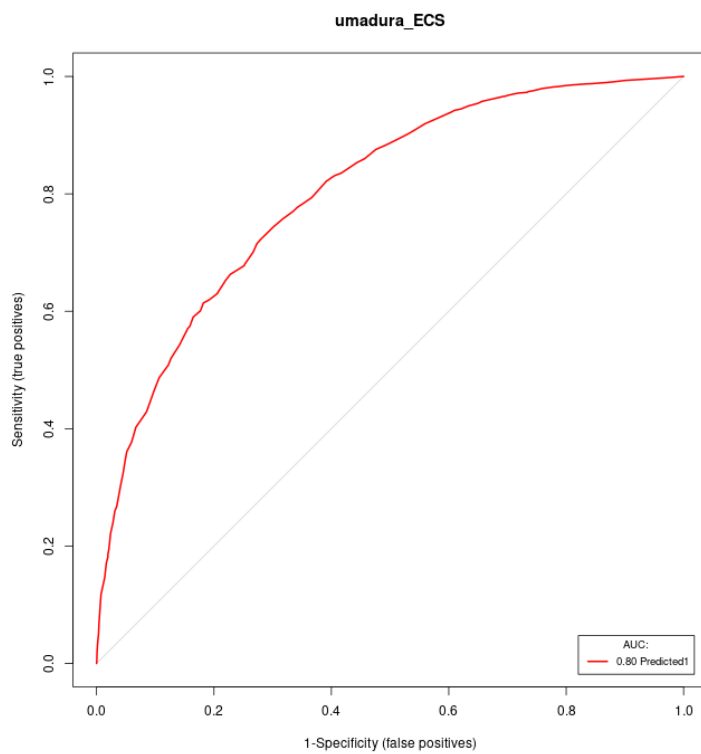


図 2. 有漁確率モデルの ROC 曲線下面積 (AUC)

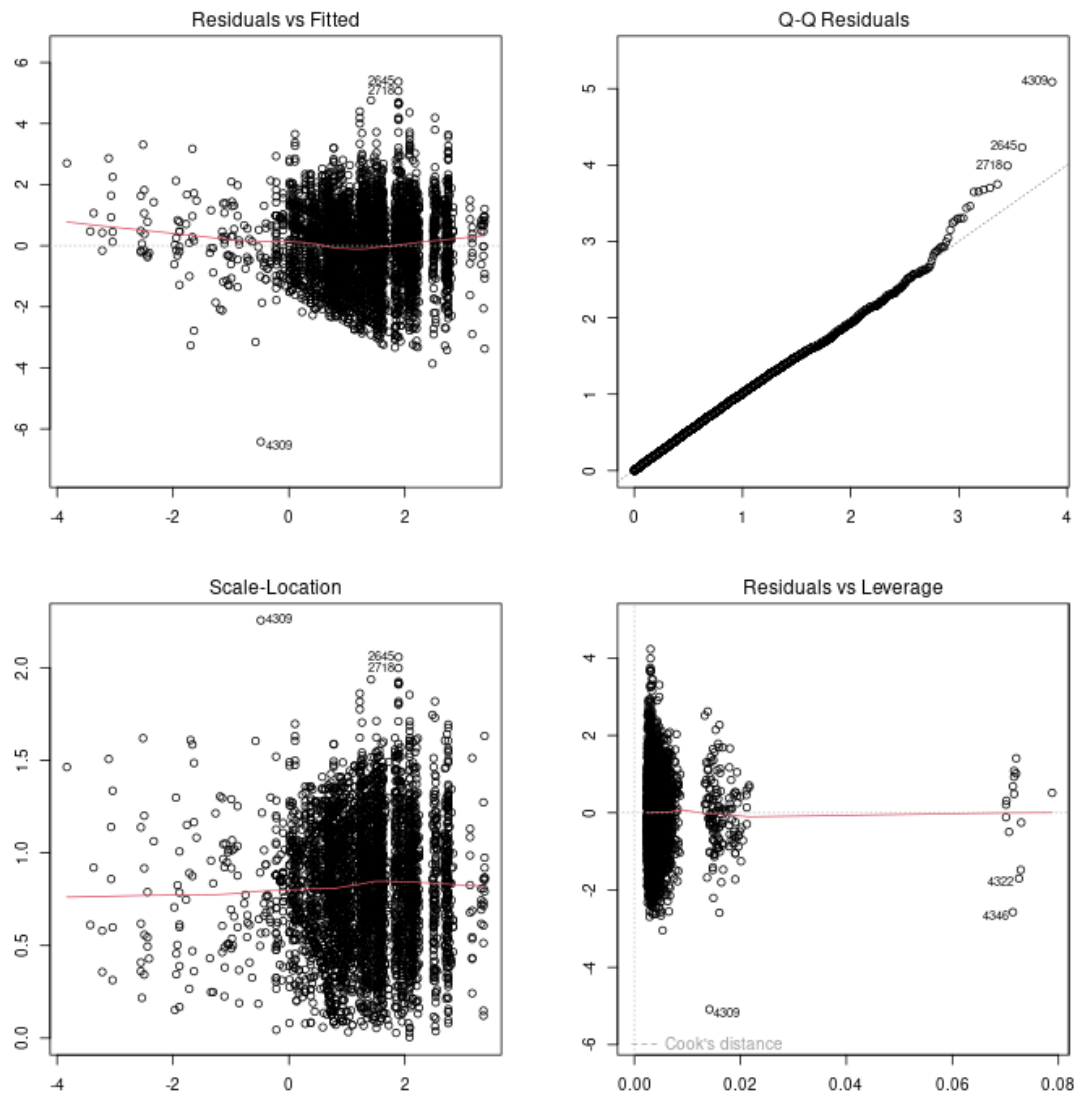


図 3. モデル診断（有漁 CPUE モデル）の要約図

左上：推定値に対する残差の分布、右上：Q-Q プロット、左下：推定値に対する標準化残差の分布、右下：てこ比に対する標準化残差とクックの距離。

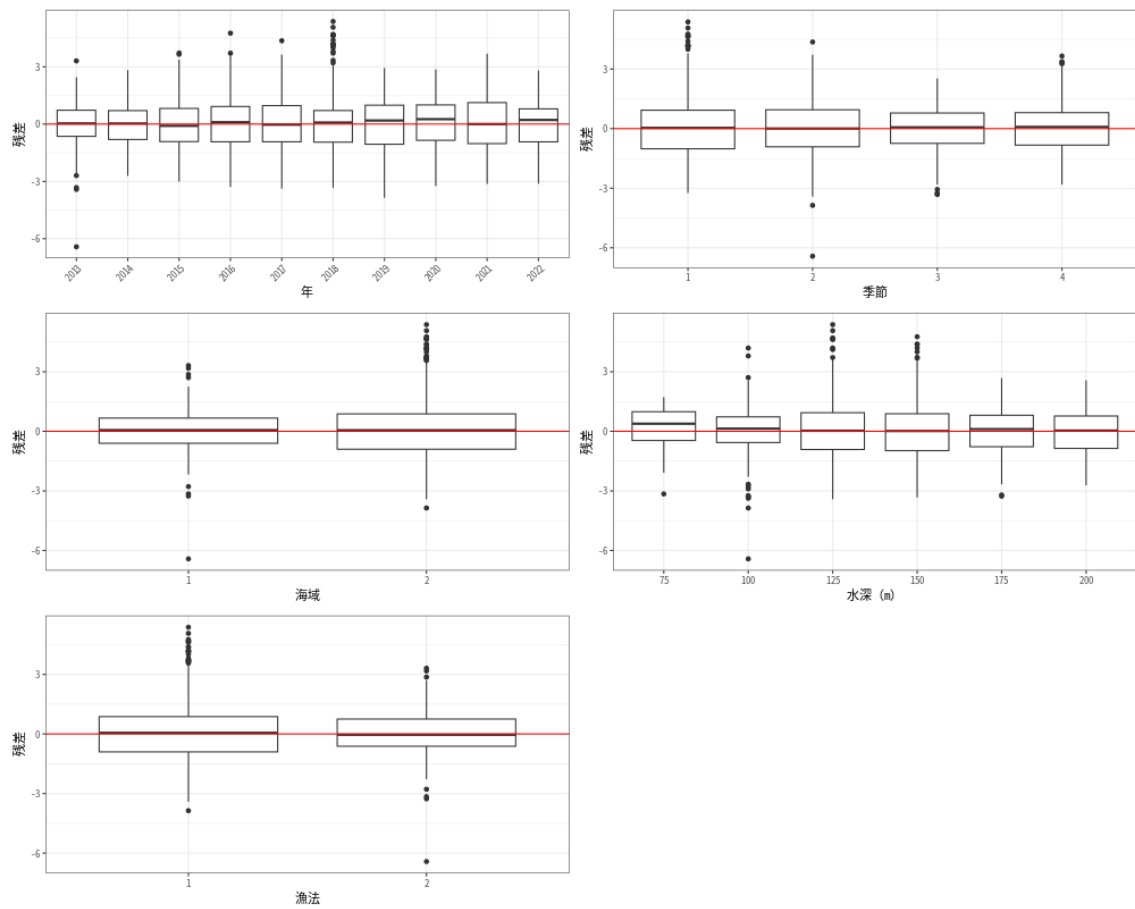


図4. 各説明変数に対する残差（有漁 CPUE モデル）

季節は、1：1～3 月、2：4～6 月、3：7～9 月、4：10～12 月、海区は、1：北緯 31 度以南、2：北緯 31 度以北、漁法は 1：以西 2 そう、2：トロール調査である。

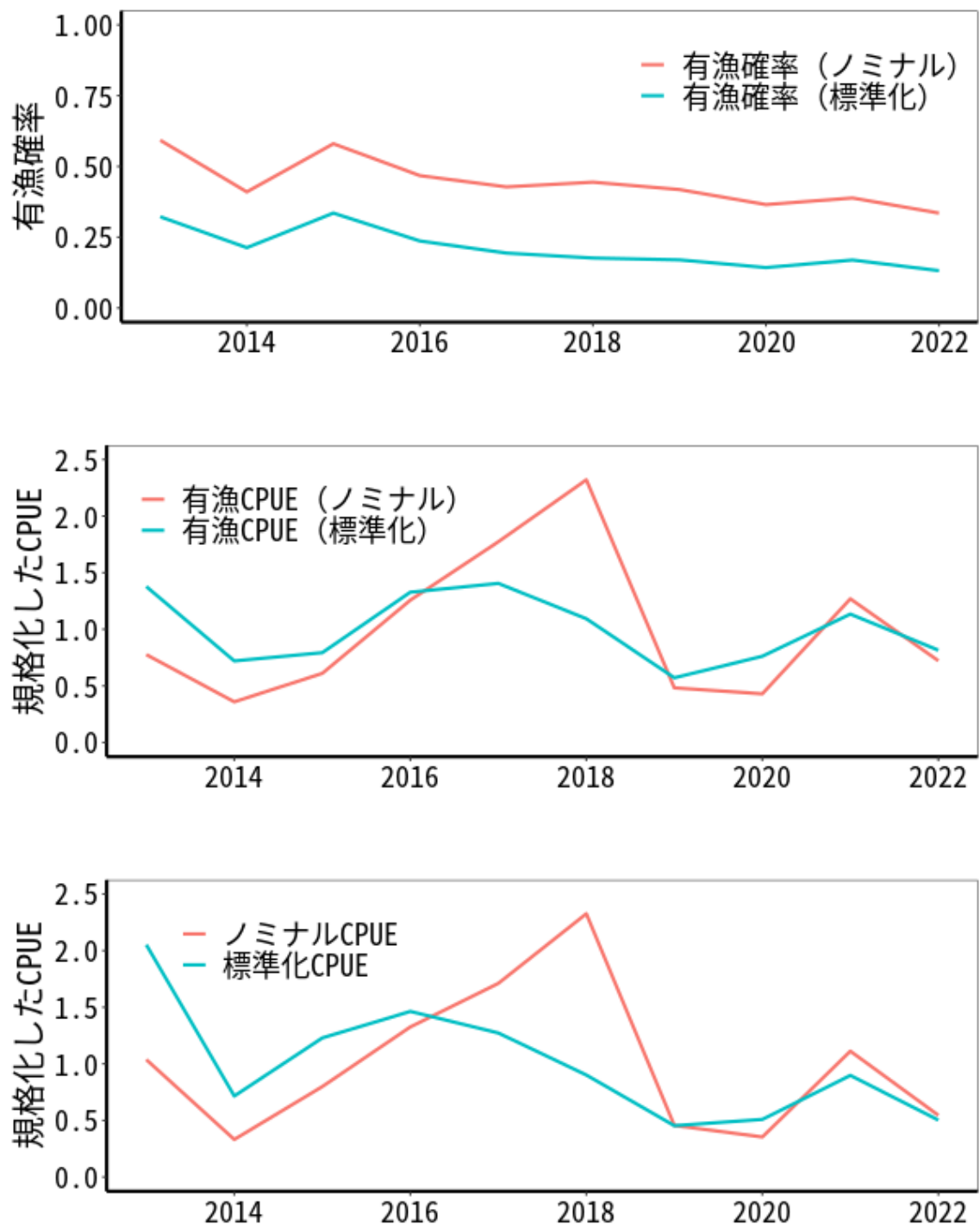


図 5. 標準化した有漁確率（上段）、有漁 CPUE（中段）、CPUE（下段）の年トレンド

付表 1. ベストモデルのパラメータ推定値

有漁確率モデル

```
glm(formula = umadura_pa ~ factor(area) + factor(depthc) + factor(method) +
    factor(qt) + factor(year) + 1, family = binomial, data = data2)
```

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	-0.91693	0.33765	-2.716	0.006615 **
factor(area)2	1.86923	0.13436	13.913	< 2e-16 ***
factor(depthc)100	0.92797	0.31504	2.946	0.003224 **
factor(depthc)125	0.62221	0.31303	1.988	0.046843 *
factor(depthc)150	-0.43569	0.31459	-1.385	0.166072
factor(depthc)175	-0.74270	0.31966	-2.323	0.020156 *
factor(depthc)200	-1.22583	0.32138	-3.814	0.000137 ***
factor(method)2	-2.61483	0.14029	-18.639	< 2e-16 ***
factor(qt)2	0.99543	0.08513	11.693	< 2e-16 ***
factor(qt)3	0.04104	0.06784	0.605	0.545226
factor(qt)4	-0.64393	0.05846	-11.015	< 2e-16 ***
factor(year)2014	-0.60316	0.10447	-5.774	7.76e-09 ***
factor(year)2015	0.06494	0.10289	0.631	0.527949
factor(year)2016	-0.45944	0.10209	-4.500	6.78e-06 ***
factor(year)2017	-0.72733	0.10061	-7.229	4.87e-13 ***
factor(year)2018	-0.84928	0.10150	-8.367	< 2e-16 ***
factor(year)2019	-0.89675	0.10133	-8.850	< 2e-16 ***
factor(year)2020	-1.11101	0.11040	-10.064	< 2e-16 ***
factor(year)2021	-0.90062	0.11162	-8.068	7.12e-16 ***
factor(year)2022	-1.20680	0.11331	-10.651	< 2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

(Dispersion parameter for binomial family taken to be 1)

Null deviance: 13543 on 9838 degrees of freedom

Residual deviance: 10606 on 9819 degrees of freedom

AIC: 10646

Number of Fisher Scoring iterations: 5

有漁 CPUE モデル

```
glm(formula = umadura_lcpue ~ factor(area) + factor(depthc) +
     factor(method) + factor(qt) + factor(year) + 1, family = gaussian,
     data = d.pos)
```

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	1.24878	0.35624	3.505	0.000460	***
factor(area)2	1.44611	0.15963	9.059	< 2e-16	***
factor(depthc)100	0.05371	0.34137	0.157	0.874991	
factor(depthc)125	-0.57475	0.33889	-1.696	0.089965	.
factor(depthc)150	-1.24176	0.34017	-3.650	0.000265	***
factor(depthc)175	-1.12036	0.34418	-3.255	0.001142	**
factor(depthc)200	-1.44792	0.34745	-4.167	3.14e-05	***
factor(method)2	-2.39430	0.14820	-16.155	< 2e-16	***
factor(qt)2	0.60623	0.05579	10.866	< 2e-16	***
factor(qt)3	-0.52511	0.05383	-9.756	< 2e-16	***
factor(qt)4	-0.79666	0.05134	-15.517	< 2e-16	***
factor(year)2014	-0.64809	0.08238	-7.867	4.53e-15	***
factor(year)2015	-0.55149	0.07154	-7.708	1.56e-14	***
factor(year)2016	-0.03675	0.07594	-0.484	0.628423	
factor(year)2017	0.02005	0.07658	0.262	0.793498	
factor(year)2018	-0.23108	0.07788	-2.967	0.003021	**
factor(year)2019	-0.87953	0.07860	-11.190	< 2e-16	***
factor(year)2020	-0.59224	0.09244	-6.407	1.64e-10	***
factor(year)2021	-0.19444	0.08875	-2.191	0.028524	*
factor(year)2022	-0.52450	0.09309	-5.634	1.87e-08	***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

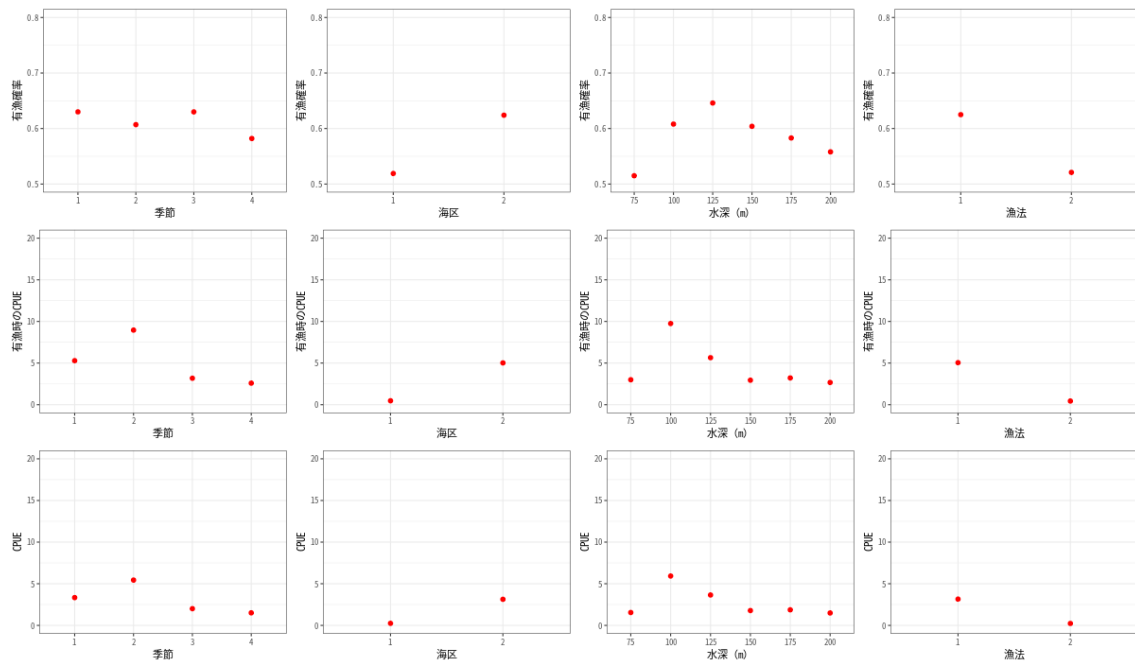
(Dispersion parameter for gaussian family taken to be 1.616654)

Null deviance: 10401.7 on 4431 degrees of freedom

Residual deviance: 7132.7 on 4412 degrees of freedom

AIC: 14728

Number of Fisher Scoring iterations: 2



付図 1. 季節、海区、水深、漁法と有漁確率（上段）、有漁時 CPUE（中段）、標準化 CPUE（下段）の関係

それぞれ、データにベストモデルを適用して予測値を計算し、説明変数のカテゴリーごとに平均値をとったものである。季節は、1：1～3月、2：4～6月、3：7～9月、4：10～12月、海区は、1：北緯 31 度以南、2：北緯 31 度以北、漁法は 1：以西 2 そう、2：トロール調査である。