

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
日本海南西部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	沖底 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。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 (75～200 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 tidyverse (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 (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 (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	海区は東経 129 度 30 分の東西で 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 5 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 年以降に各海区で沖底 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（期間の平均値で規格化した値）は、2017 年以降低下し、2019、2020 年は概ね横ばいであった。2021 年にやや上昇したが、2022 年はわずかに低下した（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、日本海南西部海域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 つである浜田以西の 2 そうびき沖合底びき網漁業（沖底 2 そう）のデータを用いた。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

2013～2022 年の 1～12 月における沖底 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。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 99%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、沖底 2 所の主漁場の変遷を考慮して、東経 129 度 30 分（対馬東岸付近）の東西で 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：

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

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

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：

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

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

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 年以降に各海区で沖底 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=0.74; 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、2016 年以降低下し、2019、2020 年は概ね横ばいであった。2021 年にやや上昇したが、2022 年はわずかに低下した（図 5、表 3）。

引用文献

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.

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

年	東経129度30分以西（海区1）				東経129度30分以东（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	653	373	34.65	134.21	2,368	1,697	47.27	120.69
2014	647	301	42.35	135.31	2,059	1,288	44.21	121.10
2015	701	270	22.83	134.61	2,105	1,311	33.08	120.29
2016	714	208	25.26	140.93	1,973	1,281	50.54	120.74
2017	792	242	10.45	134.02	1,870	1,245	47.06	121.68
2018	715	201	8.31	136.45	1,862	1,257	13.42	122.41
2019	649	166	5.80	133.11	1,821	1,057	14.20	122.37
2020	494	66	5.23	135.97	1,658	905	14.39	122.76
2021	645	55	1.36	137.49	1,232	750	12.90	120.26
2022	657	50	1.36	129.96	1,211	689	11.82	122.00

表 2. モデル選択の結果 (BIC による上位 10 モデル)

・有漁確率モデル

	Intercept	factor.area	factor.depthc	factor.qt	factor.year.	df	logLik	BIC	delta
16	0.905063	+	+	+	+	18	-14816.3	29814.7	0.0
12	0.663007	+	+		+	15	-14996	30143.8	329.2
8	0.312583	+	+	+		9	-15091.7	30274.5	459.9
4	0.075735	+	+			6	-15271.2	30603.2	788.6
14	-0.05974	+		+	+	14	-15462.5	31066.6	1252.0
10	-0.29824	+			+	11	-15677.5	31466.2	1651.6
6	-0.6606	+		+		5	-15742.5	31535.6	1720.9
15	2.322428		+	+	+	17	-15780.1	31732.3	1917.6
2	-0.89643	+				2	-15957.9	31935.9	2121.3
11	2.04376		+		+	14	-15900.8	31943.3	2128.6

・有漁 CPUE モデル

	Intercept	factor.area	factor.depthc	factor.qt	factor.year.	df	logLik	BIC	delta
16	3.786818	+	+	+	+	19	-23789.8	47760.14	0
15	3.673353		+	+	+	18	-23794.8	47760.58	0.44357
8	3.535609	+	+	+		10	-24043.5	48181.99	421.8528
7	3.353889		+	+		9	-24054.8	48195.2	435.0659
12	3.887598	+	+		+	16	-24083	48318.1	557.9638
11	3.698478		+		+	15	-24096.2	48334.88	574.7442
4	3.644945	+	+			7	-24324	48714.59	954.4514
3	3.385175		+			6	-24346.2	48749.37	989.2312
13	2.882821			+	+	14	-24473.8	49080.65	1320.513
14	2.963028	+		+	+	15	-24470.2	49082.96	1322.82

表 3. ノミナル・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	1.77	1.67	3.23	1.57	1.78
2014	1.74	1.32	3.88	1.23	1.42
2015	1.21	1.35	3.84	1.25	1.45
2016	1.74	1.39	4.02	1.28	1.50
2017	1.43	1.06	4.28	0.98	1.16
2018	0.48	0.73	3.80	0.68	0.78
2019	0.48	0.61	4.22	0.56	0.66
2020	0.49	0.60	4.65	0.55	0.66
2021	0.35	0.66	4.64	0.60	0.72
2022	0.32	0.60	4.84	0.54	0.66

CPUE は、各年の値を 2013～2022 年の平均で規格化した値。

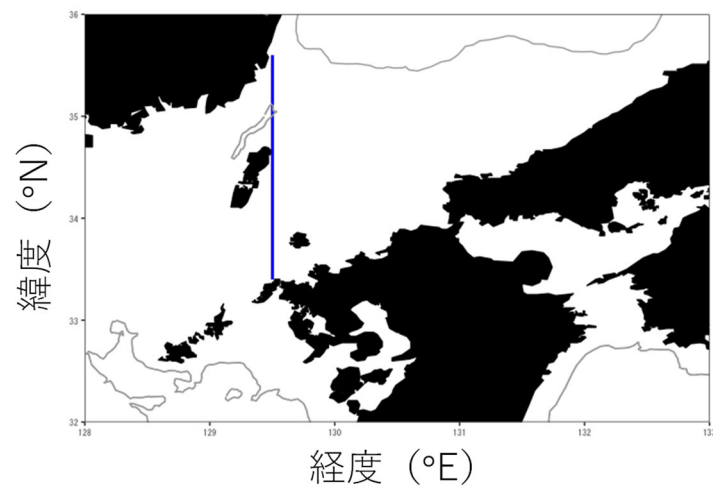


図 1. 海区分け

東経 129 度 30 分以西を海区 1、以東を海区 2 とした。

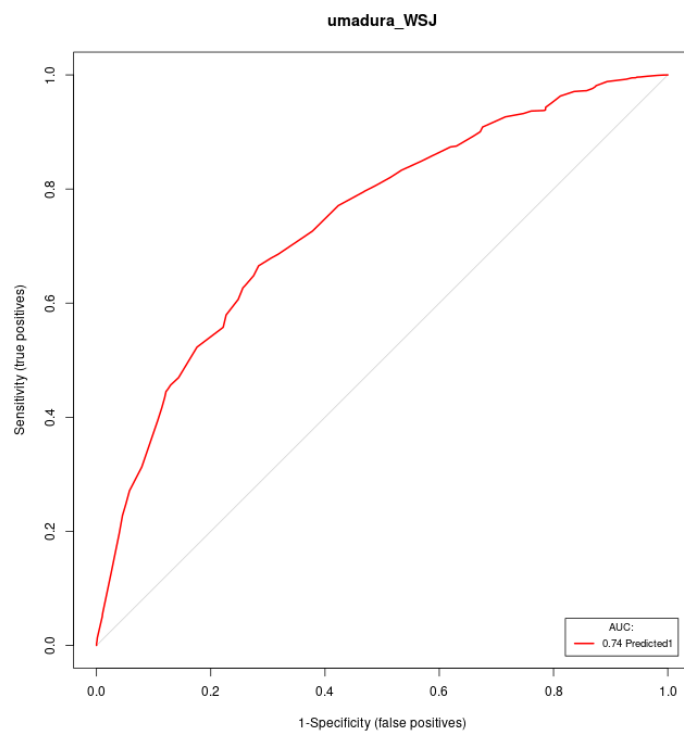


図 2. 有漁確率モデルの ROC 曲線下面積 (AUC)

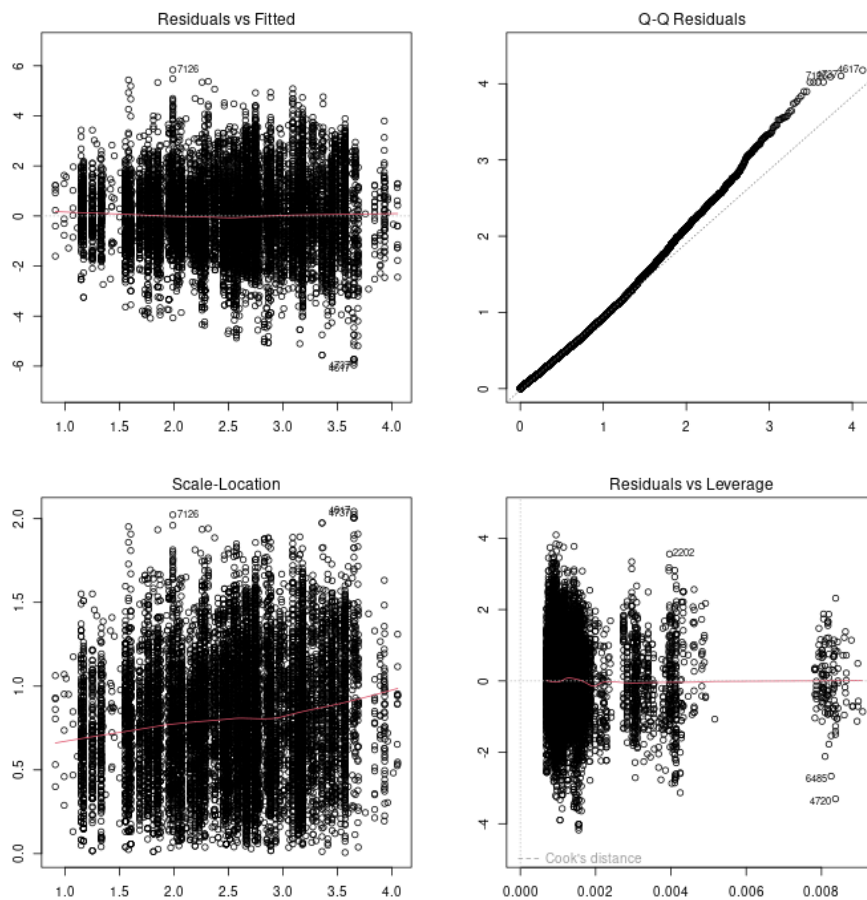


図3. モデル診断（有漁 CPUE モデル）の要約図

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。

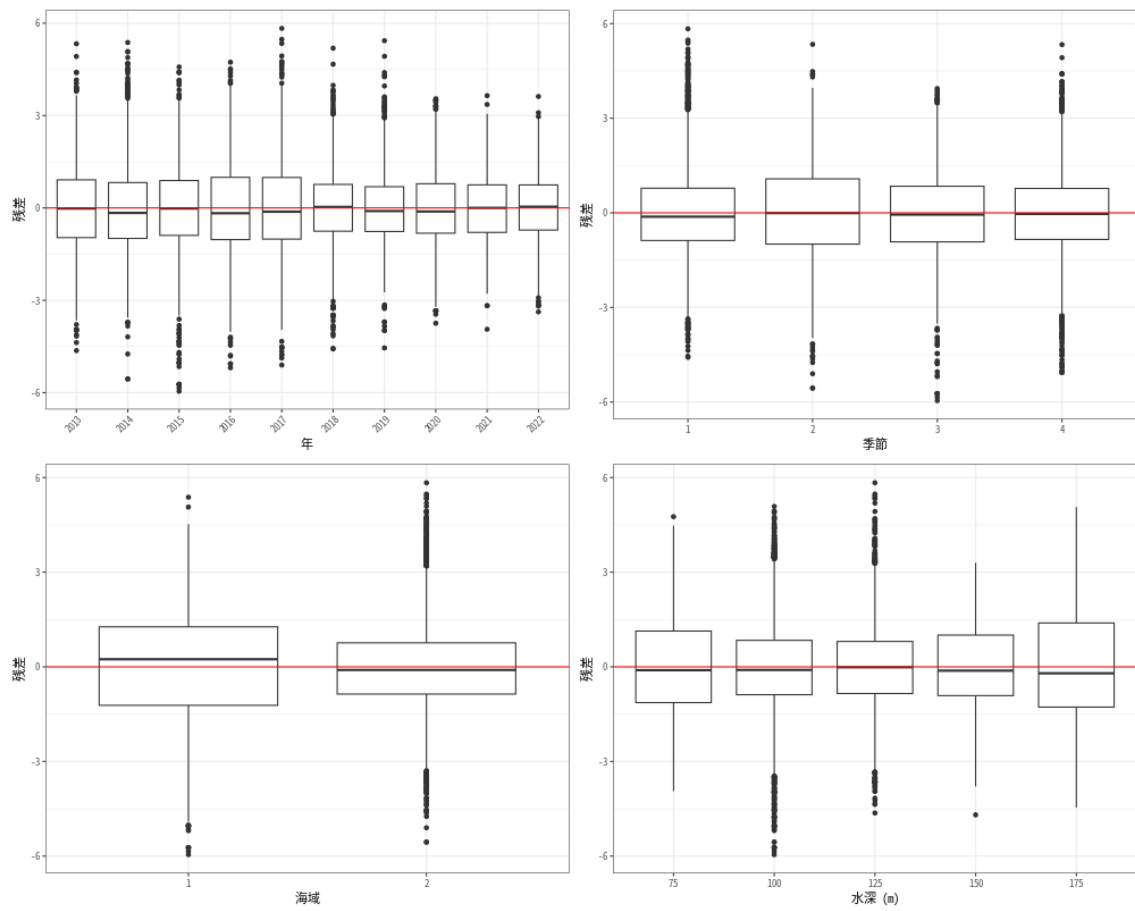


図4. 各説明変数に対する残差（有漁 CPUE モデル）

季節は、1：1～3月、2：4～6月、3：7～9月、4：10～12月、海区は、1：東経129度30分以西、2：東経129度30分以東。

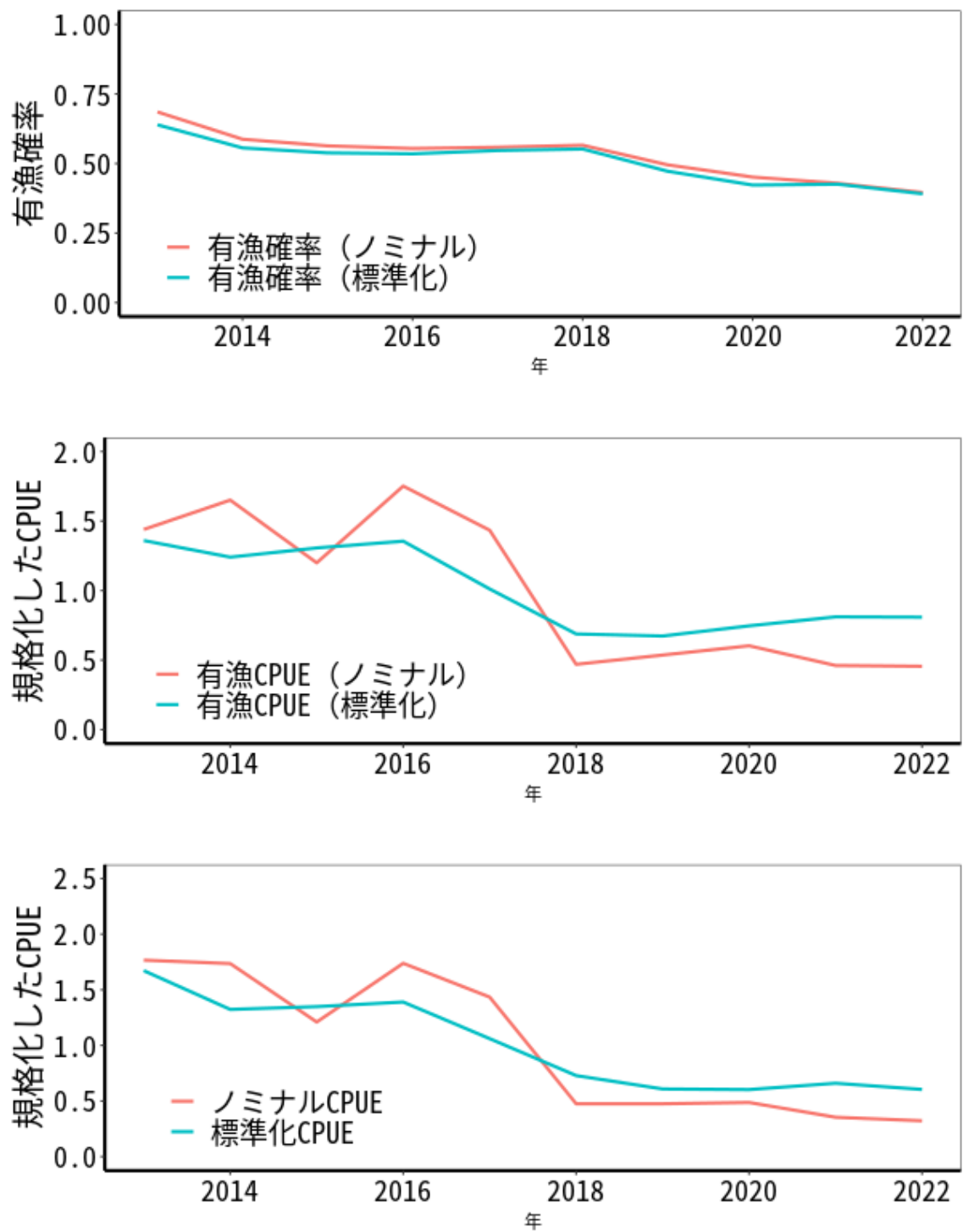


図 5. 標準化した有漁確率（上段）、有漁 CPUE（中段）、CPUE（下段）の年トレンド

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(qt) +
    factor(year) + 1, family = binomial, data = data2)
```

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	0.90506	0.12779	7.083	1.42e-12 ***
factor(area)2	1.66475	0.03961	42.023	< 2e-16 ***
factor(depthc)100	-0.60348	0.11751	-5.136	2.81e-07 ***
factor(depthc)125	-1.53680	0.11700	-13.135	< 2e-16 ***
factor(depthc)150	-2.12306	0.15362	-13.821	< 2e-16 ***
factor(depthc)175	-1.59480	0.13611	-11.717	< 2e-16 ***
factor(qt)2	-0.48445	0.04030	-12.021	< 2e-16 ***
factor(qt)3	-0.02067	0.04337	-0.476	0.634
factor(qt)4	-0.57375	0.03542	-16.197	< 2e-16 ***
factor(year)2014	-0.39961	0.05997	-6.663	2.68e-11 ***
factor(year)2015	-0.48271	0.05943	-8.122	4.59e-16 ***
factor(year)2016	-0.49828	0.06041	-8.248	< 2e-16 ***
factor(year)2017	-0.44323	0.06030	-7.351	1.97e-13 ***
factor(year)2018	-0.41812	0.06050	-6.911	4.80e-12 ***
factor(year)2019	-0.78487	0.06077	-12.916	< 2e-16 ***
factor(year)2020	-1.01135	0.06315	-16.015	< 2e-16 ***
factor(year)2021	-0.99723	0.06705	-14.872	< 2e-16 ***
factor(year)2022	-1.15699	0.06664	-17.361	< 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: 34255 on 24825 degrees of freedom

Residual deviance: 29633 on 24808 degrees of freedom

AIC: 29669

Number of Fisher Scoring iterations: 4

有漁 CPUE モデル

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

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	3.78682	0.08293	45.663	< 2e-16 ***
factor(area)2	-0.12112	0.03842	-3.152	0.00162 **
factor(depthc)100	-0.48247	0.07006	-6.887	5.97e-12 ***
factor(depthc)125	-1.37959	0.07060	-19.541	< 2e-16 ***
factor(depthc)150	-1.63821	0.13964	-11.732	< 2e-16 ***
factor(depthc)175	-1.32094	0.11258	-11.733	< 2e-16 ***
factor(qt)2	0.26877	0.03539	7.594	3.30e-14 ***
factor(qt)3	0.38794	0.03676	10.553	< 2e-16 ***
factor(qt)4	-0.43412	0.03106	-13.976	< 2e-16 ***
factor(year)2014	-0.09185	0.04765	-1.928	0.05390 .
factor(year)2015	-0.03982	0.04771	-0.834	0.40404
factor(year)2016	-0.00328	0.04858	-0.068	0.94618
factor(year)2017	-0.29601	0.04853	-6.100	1.09e-09 ***
factor(year)2018	-0.68125	0.04888	-13.938	< 2e-16 ***
factor(year)2019	-0.70282	0.05160	-13.620	< 2e-16 ***
factor(year)2020	-0.59961	0.05571	-10.764	< 2e-16 ***
factor(year)2021	-0.51680	0.05948	-8.689	< 2e-16 ***
factor(year)2022	-0.51936	0.06139	-8.460	< 2e-16 ***

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

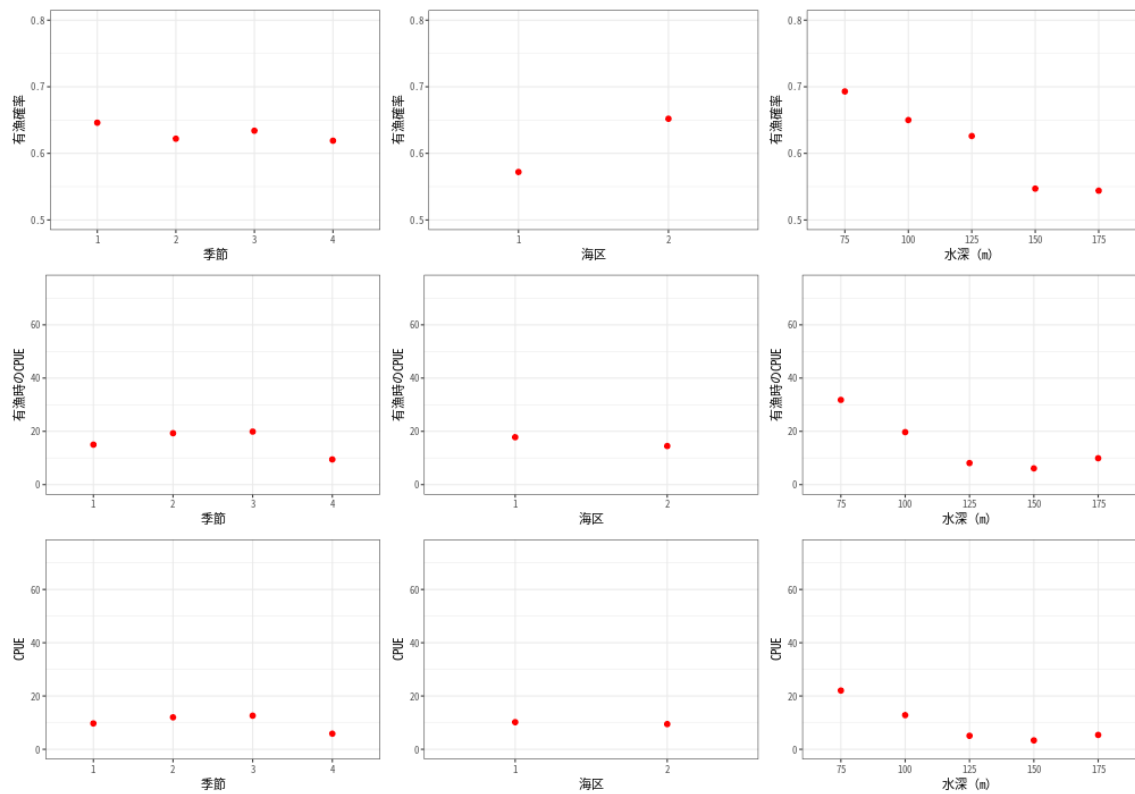
(Dispersion parameter for gaussian family taken to be 2.036032)

Null deviance: 32596 on 13411 degrees of freedom

Residual deviance: 27271 on 13394 degrees of freedom

AIC: 47618

Number of Fisher Scoring iterations: 2



付図 1. 季節、海区、水深と有漁確率（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 月であり、海区は、1：東経 129 度 30 分以西、2：東経 129 度 30 分以東である。