

令和 6(2024)年度キンメダイ太平洋系群の資源評価
キンメダイ CPUE の標準化(東京都・神津島地区)

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
川内陽平、竹茂愛吾、亘 真吾、竹村紫苑、青木一弘、小柳津瞳

概要

データ	キンメダイの漁獲がある東京都神津島地区の立て縄漁業の月別漁獲量と水揚げ回数(日・隻)データ。操業位置情報は含まない。漁場における水温、流向、流速は FRA-ROMS II から取得、黒潮流路情報は海上保安庁の海洋速報から抽出
対象	1 日 1 隻あたり漁獲量 (kg/日・隻)
データの利用可能な期間	2005～2023 年
標準化に使用した期間	2005～2023 年
データの抽出	全レコードを使用
使用した統計ソフト・パッケージ	R ver. 4.4.0 にて、stats-ver. 4.4.0 (GLM 計算)、MuMIn-ver. 1.47.5 (モデル選択)、readxl-ver. 1.4.3 (Excel ファイル読み込み)、tidyverse-ver. 2.0.0 (モデル診断結果を含む作図およびデータ処理)、GGally-ver. 2.2.1 (作図)、gridExtra-ver. 2.3 (作図)、lubridate-ver. 1.9.3 (時系列データの取り扱い)、ggeffects-ver. 1.5.2 (説明変数に対する lsmean 計算)を使用
統計モデル	一般化線形モデル(誤差分布: 対数正規分布)
フルモデルの説明変数	年、季節、8 方位流向(カテゴリ・固定効果)水温、流速、地先における黒潮北縁の緯度、経度間の黒潮北縁の緯度差(連続・1 次固定効果)
最終モデルの選択方法	AIC 総当たり法ののち、最小 AIC+2 の範囲のモデルについて、説明変数の数が最小かつ環境・漁業面での説明力が高いモデルを選択。ただし、FRA-ROMS II から取得した同一の説明変数において、複数深度層が選択されるモデルは予め総当たり法における計算から除外。
選択された説明変数	年、季節、100 m 層水温、経度間の黒潮北縁の緯度差(東経 140 度-141 度)
年トレンドの抽出方法	年固定効果の係数を抽出
信頼区間の計算方法	重複を許したデータのブートストラップサンプリング、ベストモデルの更新、年トレンドの抽出を 1,000 回繰り返した。
標準化の結果	標準化 CPUE は 2008 年以降、2013 年にかけて減少した。その後は 2020 年まで増加傾向にあり、2021 年以降わずかに減少に転じたものの、2023 年も 2020 年と概ね同水準にある。ノミナル CPUE の長期的なトレンドは標準化 CPUE と類似した一方、2018 年以降は標準化 CPUE のほうが高い値となった。

1. 背景

漁業から得られる情報は、一般に調査船調査と比較して資源の分布を時空間的に広く網羅していることから、資源状態の評価に利用されてきた。一方、漁業から得られる単位努力量当たり漁獲量（以下、CPUE）には努力量の時空間的な偏りがあることに加え、海洋環境が漁具の挙動等に影響を与え、漁獲効率に影響を与える可能性もある。資源状態を正確にとらえるためには、統計的手法によりバイアスを取り除く CPUE の標準化が重要である。

キンメダイ太平洋系群では令和 3 年度資源評価において、より精度の高いチューニング指数を作成すべく、一般化線形モデル（GLM）により、千葉県、東京都、神奈川県、静岡県の各地区における CPUE について標準化を試みた。検討した標準化モデルでは、一都三県のデータをプールした上で、年、季節、地区に加え、海上保安庁海洋情報部が提供している海洋速報に掲載されている主要地点から黒潮流軸までの距離をカテゴリカル変数（近：0～50海里、中：50～100海里、遠：100海里以遠）として導入した（亘・半沢 2022）。黒潮流軸までの距離を考慮した理由は、黒潮やそれに関連する潮流が漁獲効率に影響し、CPUE 低下を招くといった現場で懸念されている影響を取り除くことにある。しかし、検討したモデルでは黒潮接近による影響を十分に取り除けていないこと、地区ごとに使用漁具の制限等の操業形態や漁獲している資源の年齢構造に違いがあること、さらにはモデル診断の結果も良くなかったことから、資源計算への導入には至らなかった。令和 4 年度は、これらの経緯を踏まえ、地区ごとに別々の CPUE 標準化モデルを構築することとし、海洋環境に関する説明変数については、スケール（漁場、分布域全体）に合わせて複数の変数を導入することを試みた（亘ほか 2023）。東京都の神津島地区のデータを用いて推定を行った結果、黒潮や漁場内の水温の影響による CPUE の低下が補正され、モデル診断結果も概ね良好であったことから、このモデルから得られた年トレンドを、キンメダイ太平洋系群の VPA のチューニング指数の 1 つとして利用することとなった。

今年度も昨年度までに引き続き、最新年のデータを追加した上で東京都神津島地区の標準化モデルを更新した。

2. 方法

2.1 データ

解析にはキンメダイの漁獲がある東京都の神津島地区の立て縄月別操業記録を用いた。データには月別漁獲量と水揚げ回数（日・隻）が含まれ、操業位置情報は含まれない。標準化の期間は、2005～2023 年であり、全レコードを解析に使用した。

2.2 フルモデル

作成した標準化モデルは誤差分布を対数正規分布とした GLM（log-normal GLM）である。上述のとおり、フルモデルにはスケールの異なる海洋環境変数を導入した。分布域全体に

影響を及ぼす要因として、昨年度から引き続き黒潮流軸の位置情報を用いた。黒潮の位置情報は、海上保安庁の海洋速報 (<https://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/KAIYO/qboc/>) から取得し、黒潮北縁（流軸から 13 海里）の緯度を、東経 138、139、140、141 度で抽出した（Lat_138、Lat_139、Lat_140、Lat_141）。神津島地区では、地先での黒潮位置を考慮するため、東経 139 度における黒潮北縁緯度（Lat_139）を説明変数として用いた。また、経度間の黒潮北縁の緯度差（すなわち黒潮の傾き。東経 138 度-東経 139 度、東経 139 度-東経 140 度、東経 140 度-東経 141 度の 3 つを計算。それぞれ Lat138_139、Lat139_140、Lat140_141）を「黒潮入込」の指標として導入することで、大蛇行に代表されるような黒潮の流型が CPUE に与える影響を検討した。以上の黒潮に関連する変数については、1 次の連続変数としてモデルに組み込んだ。

また、各漁場におけるローカルな海洋環境の影響を考慮するため、FRA-ROMS II（Kuroda et al., 2017, データアクセス日：2024 年 4 月 4 日）における深度帯別（0 m 層、100 m 層、200 m 層、400 m 層、底層）の水温（Temperature）、流向（Direction）、流速（Speed）の再解析値を使用することとした。漁場は、緯度経度 0.1 度グリッド単位で、地区ごとの代表的な漁場範囲を資源評価参画機関と協議の上で決定し、その範囲で切り出した再解析値をその漁場を代表する海洋環境の値として用いた。その結果、神津島地区では図 1 の 23 番のグリッドが解析に使用する漁場として選択された。FRA-ROMS II 再解析値は、グリッドごとに日別に切り出し、月別に平均して用いた。水温、流速については平均したものを 1 次の連続変数として、流向については、平均した後に 8 方位のカテゴリカル変数（Direcfct）に変換して用いた。流向・流速については、それぞれの日別データを用いて 2 次元ベクトルに変換し、それを平均し、再び流向・流速に変換するというプロセスを実行した。

なお、上記において、連続変数を 1 次の効果として扱った理由は、環境変数とノミナル CPUE との関係性をプロットしたときに、非線形性が確認されなかったこと（図 2）、解釈が簡便であること、が挙げられる。

年効果（Year）、季節効果（Quarter: 12 ヶ月を 1～3 月、4～6 月、7～9 月、10～12 月に 4 等分）については、それぞれカテゴリカル効果として扱い、各変数を固定効果として導入したフルモデルを構築した。フルモデルは以下のとおりである。

$$\begin{aligned} \log(\text{CPUE}) \sim & \text{Year} + \text{Quarter} + \\ & \text{Temperature_0} + \text{Temperature_100} + \text{Temperature_200} + \text{Temperature_400} + \text{Temperature_Bottom} \\ & + \\ & \text{Speed_0} + \text{Speed_100} + \text{Speed_200} + \text{Speed_400} + \text{Speed_Bottom} + \\ & \text{Direcfct_0} + \text{Direcfct_100} + \text{Direcfct_200} + \text{Direcfct_400} + \text{Direcfct_Bottom} + \\ & \text{Lat_139} + \\ & \text{Lat138_139} + \text{Lat139_140} + \text{Lat140_141} \end{aligned}$$

各海洋環境変数間の相関関係を図 3 に示す。なお、現在利用可能なデータは月別 CPUE であり、様々な変数間の交互作用を考慮すると、推定パラメータ数がデータ数を上回ってしまうこと、また解釈が煩雑になる恐れもあることから、本資源の標準化モデルでは主効果のみを考慮するモデルを導入する。今後、日別や操業別のより詳細なデータを収集・整備していくことが望まれる。

2.3 モデル選択

ベストモデルは、上記のフルモデルについて、説明変数総当りの赤池情報量規準（AIC）によるモデル選択を実施したのち、最小 AIC + 2 の範囲にあるモデルのうち、パラメータ自由度が最小のモデルを選択、さらに環境・漁業面での説明力を考慮して決定した。ただし、一段階目の AIC による変数選択において、FRA-ROMS II から得られた特定の説明変数で、複数の深度層を含むモデル（例えば、0 m 層水温と 100 m 層水温を同時に含むもの）は、解釈の簡便さや過適合の影響を加味して予めモデル候補から除外し、1 層のみを含むモデル候補の中からベストモデルを選択することとした。

2.4 モデル診断

本資源の標準化モデルは log-normal GLM であることから、ベストモデルについて、QQ プロット、残差のヒストグラム、説明変数ごとの層別逸脱残差から、残差の正規性や等分散性を検証した。

2.5 年トレンドの抽出

ベストモデルから切片の値と年効果の係数を抽出し、解析期間初年の標準化 CPUE は切片の値、次年以降は切片に年効果の係数を足し合わせた値とした。

2.6 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により、上記で推定したベストモデルのパラメータを更新、年トレンドを計算する、というプロセスを 1,000 回繰り返し、各計算結果から 95% 信頼区間を推定した。

3 結果と考察

3.1 今年度の解析結果

上記のモデル選択の基準に基づき、以下のモデルがベストモデルに選択された（表 1）。

$$\log(\text{CPUE}) \sim \text{Year} + \text{Quarter} + \text{Temperature}_{100} + \text{Lat}_{140_141}$$

神津島地区では、AIC 総当りによるモデル選択の結果、FRA-ROMS IIによる複数層の同一説明変数が含まれるモデルを除いたモデル候補のうち、最小 AIC+2 の範囲に 10 モデルが該当した。そのうち、最もパラメータ自由度が小さいモデルをベストモデルに選択した。最小 AIC+2 の範囲の他のモデルをみると、ベストモデルの説明変数に加え、流速が選ばれているモデルが多く、黒潮の影響や漁場内の流れ・水温に関連する説明変数が選ばれやすい傾向にあった。ベストモデルで選択された各説明変数への CPUE の応答（図 4）からも、黒潮入込の強弱や水温による CPUE の変化が検出された。

ベストモデルにおける QQ プロットをみると、逸脱残差とその期待値が大きく異ならず、残差の正規性に関しても大きな問題が見られなかった（図 5）。また、いずれのモデルについても変数階層ごとの逸脱残差に著しい偏りは見られなかった（図 6）。

ベストモデルにより推定した標準化 CPUE および各年・各月の漁獲量および網数から得たノミナル CPUE の変化を図 7 および表 2 に示す。標準化 CPUE は 2007 年に増加したものの、2008 年以降、2013 年にかけて減少した。その後は 2020 年まで増加傾向にあり、2021 年以降わずかに減少したものの、2023 年も 2020 年と概ね同水準にある。ノミナル CPUE の長期的なトレンドは標準化 CPUE と類似した一方、2018 年以降は標準化 CPUE のほうが高い値となった。それ以外はノミナル CPUE のほうが高い、もしくは指標間での値の違いは小さかった。

3.2 昨年度結果との比較

今年度のベストモデルで選択された説明変数は、昨年度のものと同様であり、ベストモデルから得られた標準化 CPUE とのトレンドに昨年度との大きな違いはなかった。

引用文献

- Kuroda, H., Setou, T., Kakehi, S., Ito, S., Taneda, T., Azumaya, T., Inagake, D., Hiroe, Y., Morinaga, K., Okazaki, M., Yokota, T., Okunishi, T., Aoki, K., Shimizu, Y., Hasegawa, D., Watanabe, T. (2017) Recent advances in Japanese fisheries science in the Kuroshio-Oyashio region through development of the FRA-ROMS ocean forecast system: Overview of the reproducibility of reanalysis products. *Open Journal of Marine Science*, 7, 62–90.
- 亘 真吾・川内陽平・青木一弘・竹村紫苑・竹茂愛吾・半沢祐大 (2023) 令和 4 (2022) 年度キンメダイ太平洋系群の資源評価. FRA-SA2022-AC-37, 令和 4 年度我が国周辺水域の漁業資源評価, 水産庁・水産研究・教育機構, 東京, 50pp. https://abchan.fra.go.jp/wpt/wp-content/uploads/2023/06/details_2022_37.pdf
- 亘 真吾・半沢祐大 (2022) 令和 3 (2021) 年度キンメダイ太平洋系群の資源評価. 令和 3 年度我が国周辺水域の漁業資源評価, 水産庁・水産研究・教育機構. FRA-SA2021-RC02-2. https://abchan.fra.go.jp/wpt/wp-content/uploads/2021/details_2021_37.pdf

表 1. モデル選択結果 FRA-ROMS IIによる複数層の説明変数を含むモデルを除いたもののうち、AIC 最小+2 の範囲のモデルを表示。黄色塗りつぶしがベストモデル。

切片	流向					黒潮北緯緯度	経度間の黒潮北緯の緯度差				流速					水温					季節	年	df	logLik	AIC	delta
	0	100	200	400	底	東経139度	138-139	139-140	140-141	0	100	200	400	底	0	100	200	400	底							
4.62									-0.06							-0.02					+	+	25	76.2	-102.3	0.0
4.64				+					-0.06							-0.02					+	+	32	82.7	-101.4	0.9
4.66									-0.06				0.13			-0.03					+	+	26	76.4	-100.9	1.4
4.61							0.01		-0.06							-0.02					+	+	26	76.4	-100.8	1.5
5.05						-0.01			-0.06							-0.02					+	+	26	76.3	-100.6	1.7
4.64									-0.06					0.12		-0.02					+	+	26	76.3	-100.5	1.8
4.60									-0.06	-0.03						-0.02					+	+	26	76.2	-100.4	1.9
4.64									-0.06			0.03				-0.02					+	+	26	76.2	-100.4	1.9
4.62									-0.06	0						-0.02					+	+	26	76.2	-100.3	2.0
4.62								0	-0.06							-0.02					+	+	26	76.2	-100.3	2.0

表 2. 標準化 CPUE およびノミナル CPUE CPUE の値は、解析期間の平均値で規格化した値。

Year	ノミナル CPUE (規格化)	標準化 CPUE (規格化)	CI_下限	CI_上限	CV
2005	0.99	0.98	0.87	1.09	0.06
2006	0.96	0.93	0.84	1.05	0.06
2007	1.34	1.29	1.16	1.43	0.05
2008	1.15	1.12	1.03	1.21	0.04
2009	1.29	1.18	1.08	1.29	0.04
2010	1.05	1.06	0.98	1.14	0.04
2011	0.93	0.90	0.72	1.05	0.10
2012	0.81	0.80	0.73	0.88	0.05
2013	0.83	0.79	0.70	0.89	0.06
2014	0.83	0.79	0.71	0.87	0.06
2015	0.93	0.91	0.82	1.00	0.05
2016	0.89	0.86	0.79	0.93	0.04
2017	1.03	1.04	0.96	1.12	0.04
2018	1.00	1.05	0.95	1.16	0.05
2019	1.01	1.09	1.01	1.20	0.04
2020	1.05	1.11	1.01	1.22	0.05
2021	0.99	1.05	0.93	1.20	0.07
2022	0.96	1.02	0.94	1.10	0.04
2023	0.96	1.02	0.92	1.14	0.06

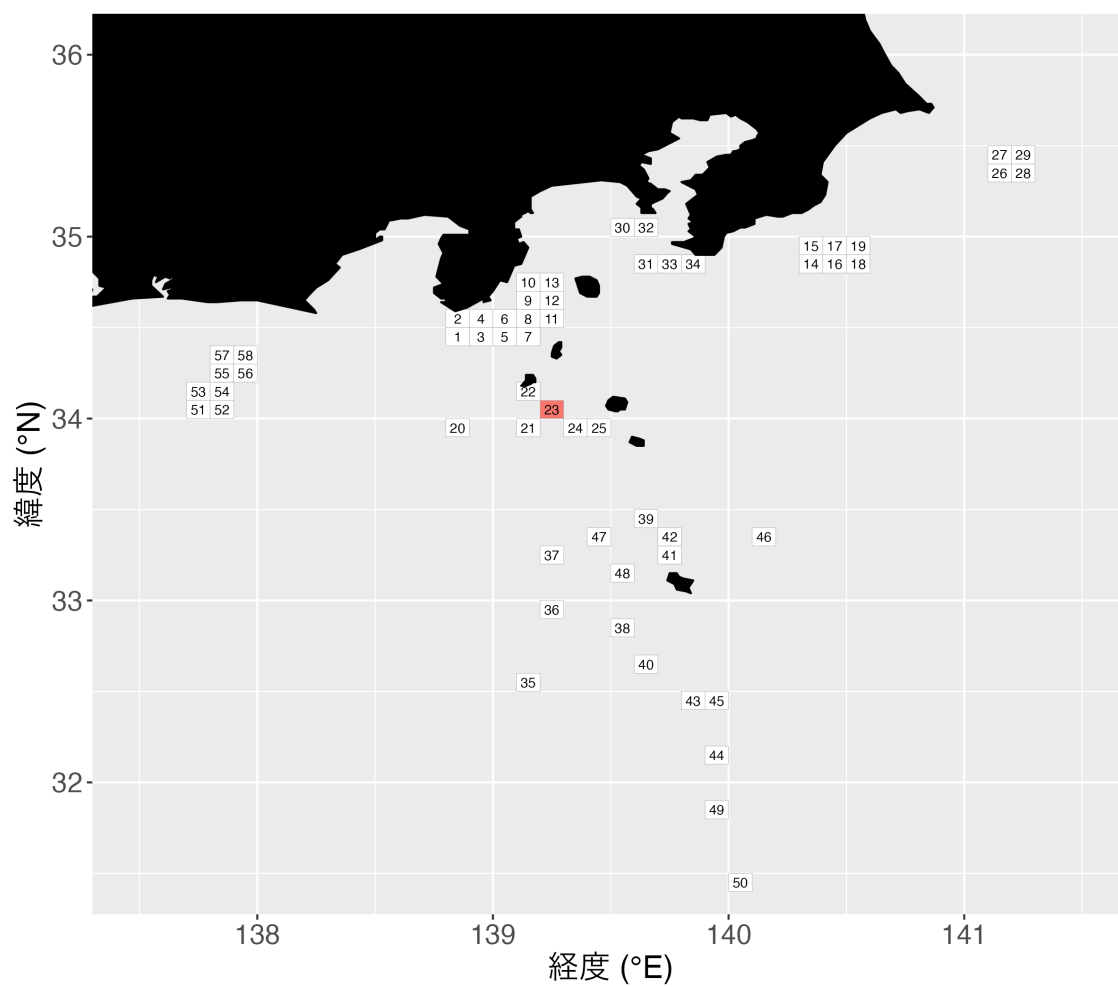


図 1. FRA-ROMS II再解析値の抽出に用いた各地区の漁場範囲 緯度経度 0.1°グリッドごとにデータを抽出。神津島地区は23番のグリッドを使用。

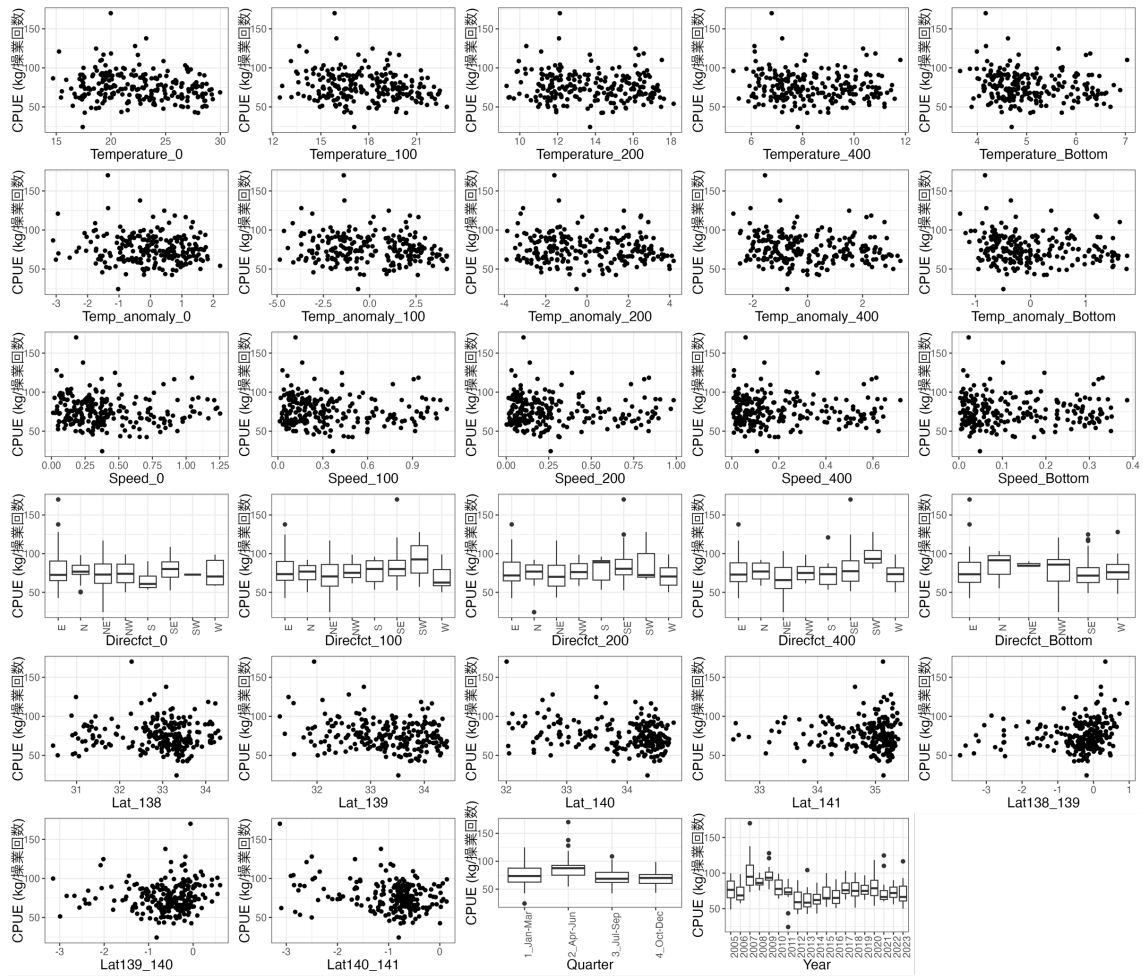


図 2. 標準化モデルに導入した説明変数とノミナル CPUE との関係

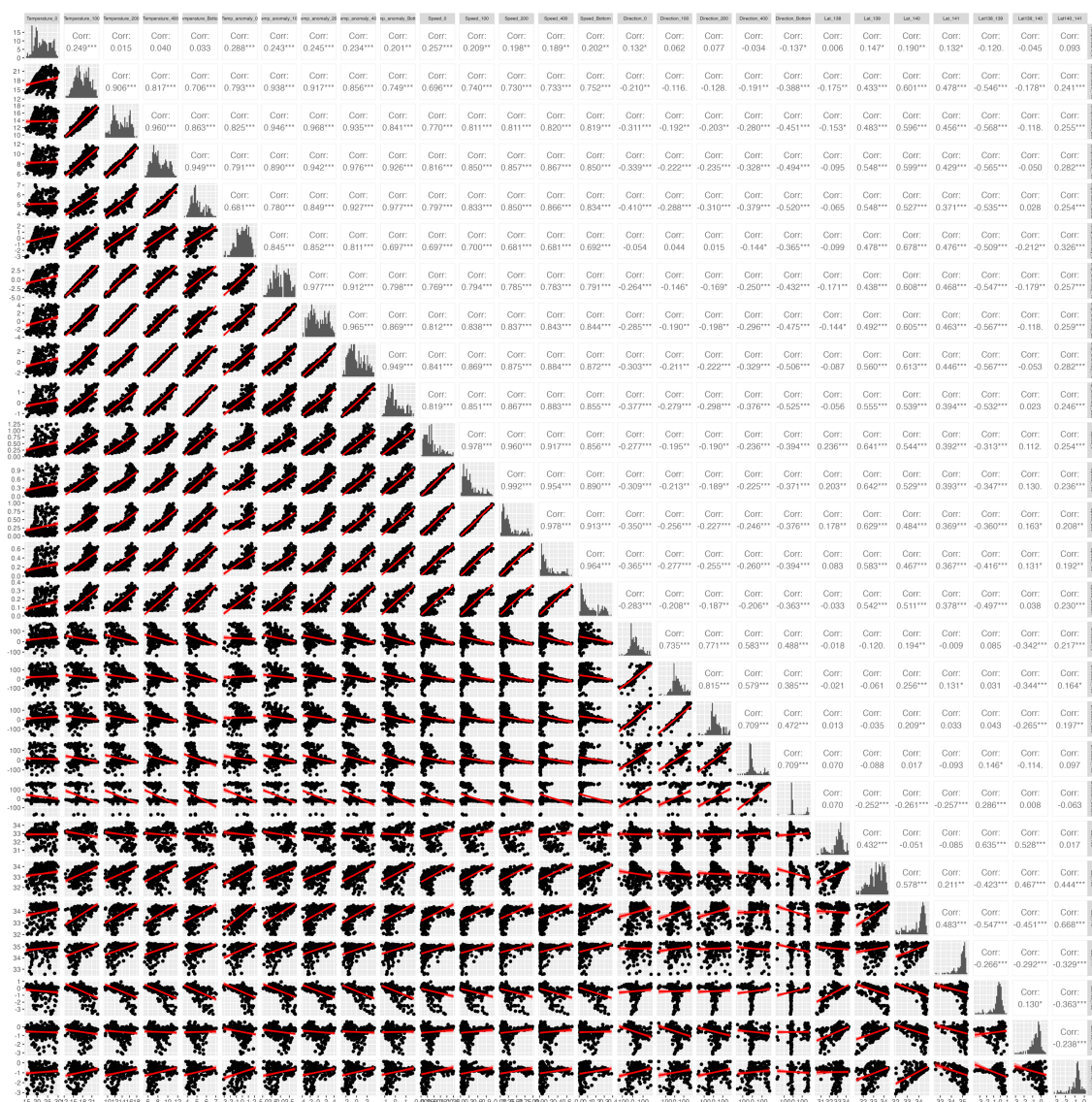


図 3. 標準化モデルに使用した海洋環境データ間の相関関係

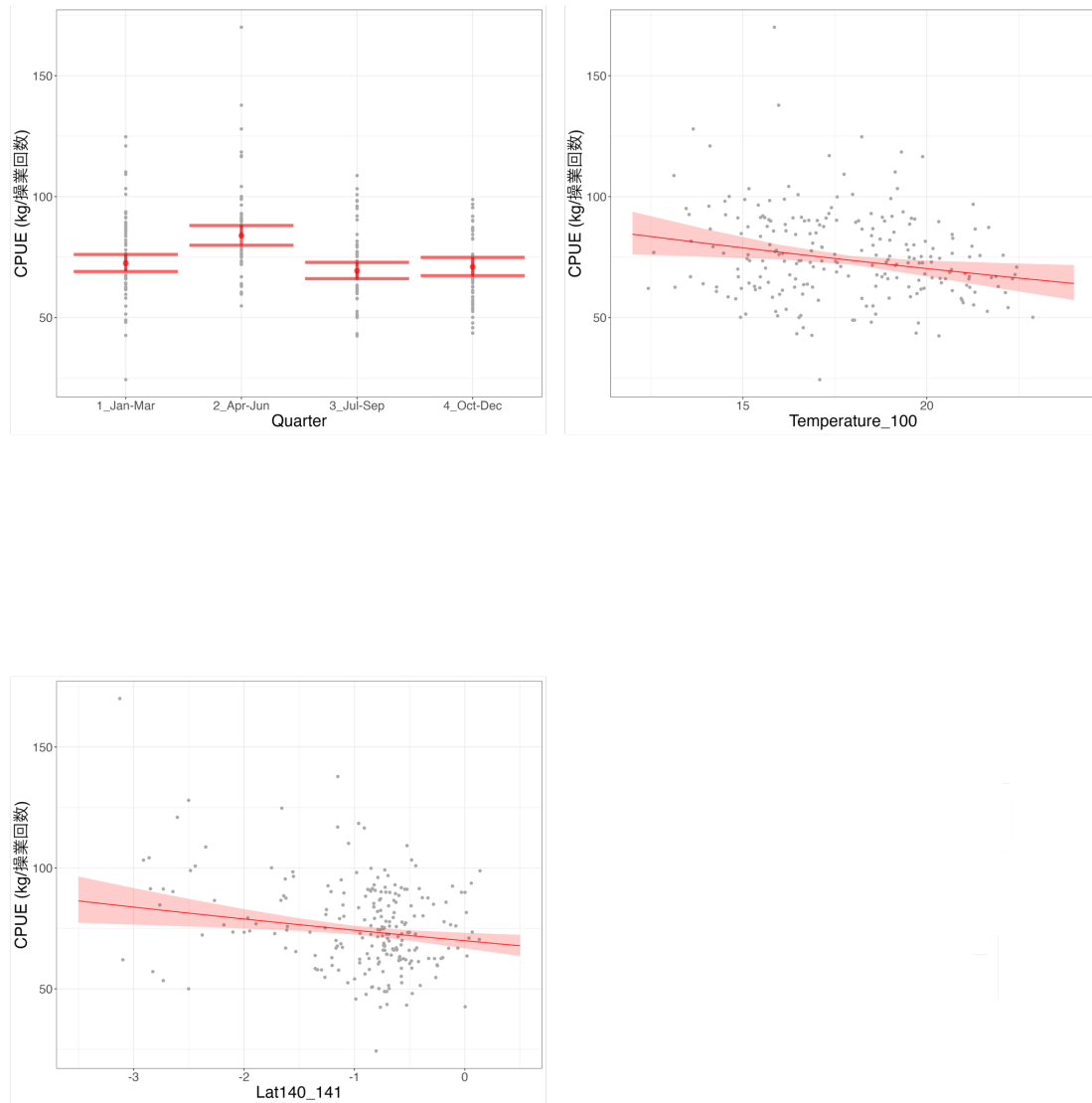


図 4. ベストモデルにおける各説明変数の部分効果 図中の赤帯と赤髭は 95%信頼区間を示す。

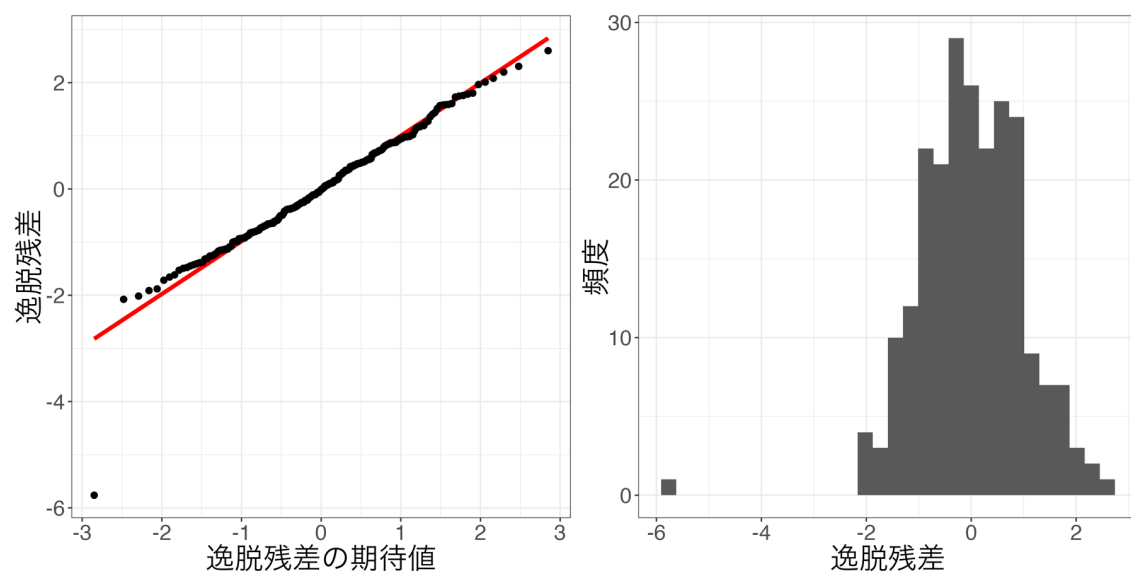


図 5. ベストモデルにおける QQ プロット (左) および残差の頻度分布 (右)

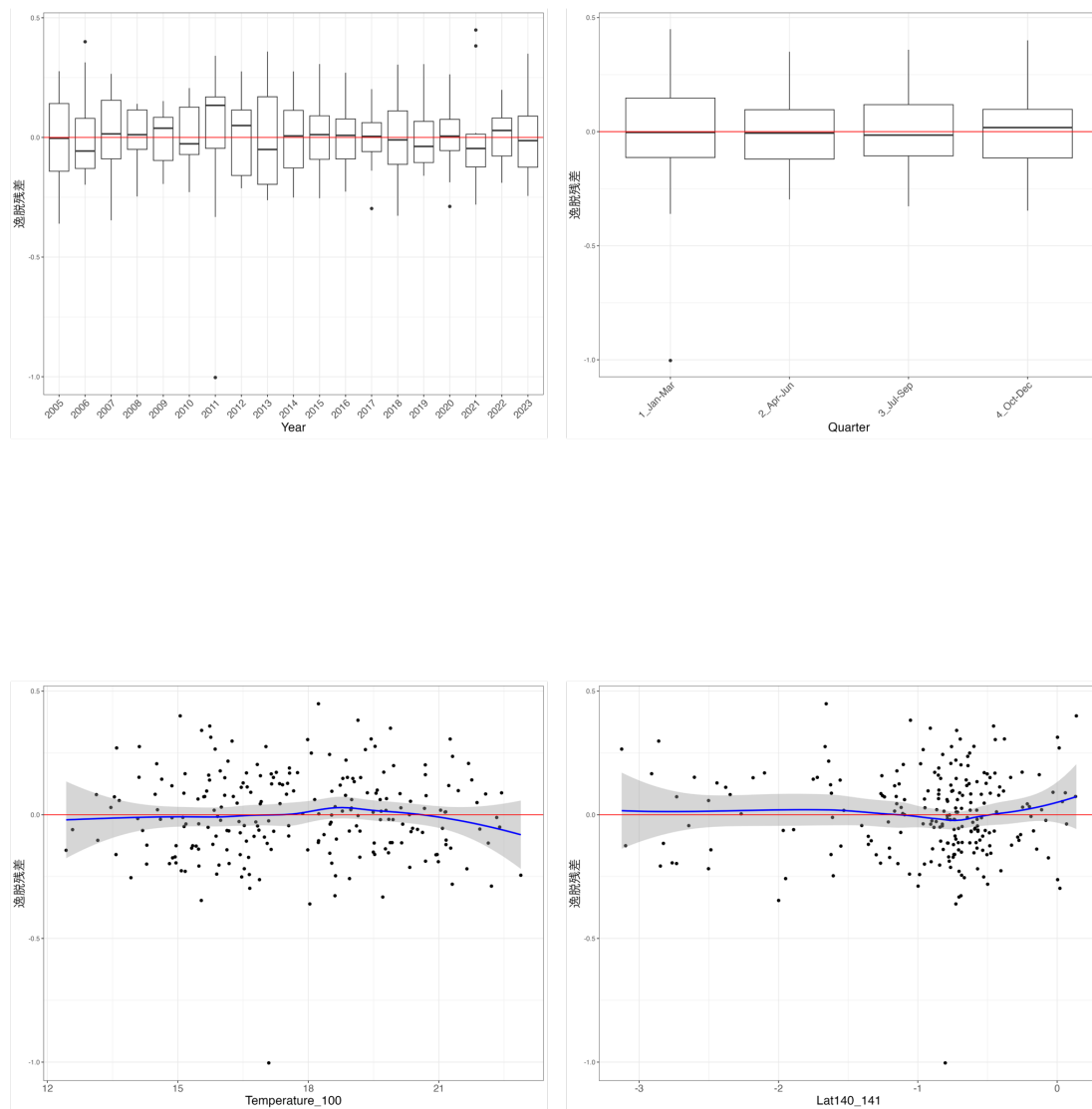


図 6. ベストモデルの層別逸脱残差 Temperature_100、Lat140_141 に関する残差図の青線と灰帯は、残差にフィッティングさせた平滑化曲線 (loess) と、その 95%信頼区間を示す。

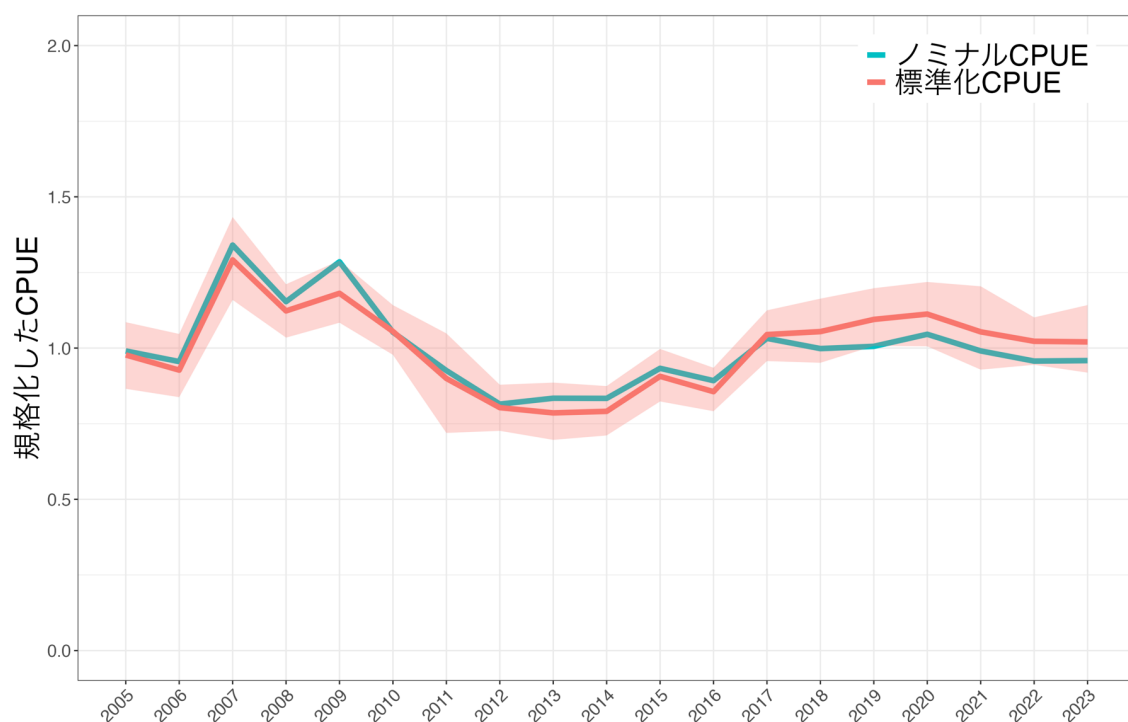


図7. 標準化CPUEおよびノミナルCPUEの推移 CPUEの値は、解析期間の平均値で規格化した値。赤帯は、データのブートストラップサンプリングとベストモデルによる年トレンド推定を1,000回繰り返して求めた95%信頼区間を示す。

ベストモデルの推定パラメタの要約

glm(formula = log(CPUE) ~ Lat140_141 + Quarter + Temperature_100 + Year + 1, family = gaussian, data = dat3)

	Estimate	Standard Error	z value	Pr(> z)	
(Intercept)	4.622	0.163	28.327	0.0000	***
Lat140_141	-0.060	0.021	-2.842	0.0049	**
Quarter2_Apr-Jun	0.146	0.035	4.228	0.0000	***
Quarter3_Jul-Sep	-0.044	0.034	-1.273	0.2045	
Quarter4_Oct-Dec	-0.021	0.038	-0.548	0.5846	
Temperature_100	-0.023	0.009	-2.572	0.0108	*
Year2006	-0.053	0.078	-0.673	0.5018	
Year2007	0.279	0.075	3.721	0.0003	***
Year2008	0.139	0.076	1.838	0.0675	.
Year2009	0.189	0.077	2.455	0.0149	*
Year2010	0.077	0.075	1.023	0.3073	
Year2011	-0.083	0.075	-1.105	0.2705	
Year2012	-0.196	0.075	-2.610	0.0097	**
Year2013	-0.218	0.076	-2.863	0.0046	**
Year2014	-0.212	0.075	-2.806	0.0055	**
Year2015	-0.075	0.075	-1.001	0.3180	
Year2016	-0.133	0.075	-1.765	0.0790	.
Year2017	0.067	0.075	0.891	0.3742	
Year2018	0.076	0.077	0.983	0.3269	
Year2019	0.114	0.080	1.413	0.1593	
Year2020	0.130	0.081	1.602	0.1108	
Year2021	0.075	0.081	0.932	0.3523	
Year2022	0.045	0.079	0.572	0.5678	
Year2023	0.043	0.081	0.534	0.5941	

Estimate	Standard Error	z value	Pr(> z)
<i>Signif. codes: 0 '***' < 0.001 < '**' < 0.01 < '*' < 0.05</i>			

(Dispersion parameter for gaussian family taken to be 0.03355132)

Null deviance: 13.11 on 227 degrees of freedom

Residual deviance: 6.844 on 204 degrees of freedom

AIC: -102.31

補足表. 説明変数名と略記の対応表

変数名		変数略記
年		Year
季節		Quarter
水温	0 m	Temperature_0
	100 m	Temperature_100
	200 m	Temperature_200
	400 m	Temperature_400
	底層	Temperature_Bottom
流速	0 m	Speed_0
	100 m	Speed_100
	200 m	Speed_200
	400 m	Speed_400
	底層	Speed_Bottom
流向 (連続)	0 m	Direction_0
	100 m	Direction_100
	200 m	Direction_200
	400 m	Direction_400
	底層	Direction_Bottom
流向 (カテゴリー)	0 m	Direcfct_0
	100 m	Direcfct_100
	200 m	Direcfct_200
	400 m	Direcfct_400
	底層	Direcfct_Bottom
地先の 黒潮北縁緯度	東経138度	Lat_138
	東経139度	Lat_139
	東経140度	Lat_140
	東経141度	Lat_141
経度間の 黒潮北縁の 緯度差	東経138度 - 東経139度	Lat138_139
	東経139度 - 東経140度	Lar139_140
	東経140度 - 東経141度	Lat140_141