

令和4(2022)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・八丈島地区)

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、亘 真吾、青木一弘、竹村紫苑、竹茂愛吾、半沢祐大

概要

データ	東京都八丈島地区における立て縄漁業の月別の漁獲量と操業回数データ。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 操業あたり漁獲量 (kg/操業回数)
データの利用可能な期間	2006～2021 年
標準化に使用した期間	2006～2021 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. 4.1.1 にて、“glm” 関数 (GLM 計算)、MuMIn パッケージ (モデル選択)、readxl パッケージ (Excel ファイル読み込み)、tidyverse パッケージ群 (モデル診断結果を含む作図およびデータ処理)、GGally、gridExtra パッケージ (作図)、lubridate パッケージ (時系列データの取り扱い)、ggeffects パッケージ (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ていないモデルを選択
選択された説明変数	年、季節、400 m 層水温、100 m 層流向
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	年効果を含むモデルのうち、上記の基準によって選ばれたベストモデルにより計算された標準化 CPUE は 2008 年から 2010 年にかけて増加した。その後は小さな増減はあるものの、横ば

	<p>い傾向である。ノミナル CPUE の長期的なトレンドは標準化 CPUE と異なり、2017 年まで変動しながらも横ばい傾向にあったが、それ以降若干の減少がみられた。2009、2010 年および 2018 年以降は標準化 CPUE のほうが高い結果となっている。ただし、モデル選択や、データ解像度による問題から適切な標準化 CPUE が得られていなかった可能性がある。</p>
--	--

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昨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、静岡県各地区における CPUE について標準化を試みた。昨年度の標準化モデルでは、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）を導入した（巨・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、昨年度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。今年度は、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。

東京都八丈島地区のデータを用いてモデル選択を行った結果、赤池情報量規準（AIC）上位モデルにおいて年効果が選ばれなかったため、年効果を含むモデルからベストモデルを選択した。ベストモデルから得られた年トレンドでは、漁場内の水温と流向の影響による 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。ただし、資源評価参画機関との協議の結果、八丈島地区では、上述のように AIC 上位モデルが年効果を含まないこと、現時点におけるデータ解像度の限界により適切なモデリングができていない可能性があると考えられたから、今年度は当該地区の標準化 CPUE を VPA のチューニング指数として導入しないこととした。ここでは、今年度検討したモデルと標準化 CPUE の詳細について、参考までに記述する。

2. 方法

2.1 データ

解析には東京都の八丈島地区における立て縄月別操業記録を用いた。標準化の期間は、2006～2021年であり、全レコードを解析に使用した。

2.2 フルモデル

今年度導入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、モデルにはスケールの異なる海洋環境変数をフルモデルに導入した。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度ごとに抽出した(Lat_138、Lat_139、Lat_140、Lat_141)。まず、地先での黒潮位置を考慮するため、東経140度における黒潮北縁緯度(Lat_140)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_141、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に与える影響の考慮を試みた。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：2022年1月4日)における深度帯別(0m層、100m層、200m層、400m層、底層)の水温(Temperature)、流向(Direction)、流速(Speed)の再解析値を使用した。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、八丈島地区では図1の40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。

$$\begin{aligned} & \log(\text{CPUE}) \sim \text{Year} + \text{Quarter} + \\ & \text{Temperature}_0 + \text{Temperature}_{100} + \text{Temperature}_{200} + \text{Temperature}_{400} + \\ & \text{Temperature}_{\text{Bottom}} + \\ & \text{Speed}_0 + \text{Speed}_{100} + \text{Speed}_{200} + \text{Speed}_{400} + \text{Speed}_{\text{Bottom}} + \\ & \text{Direcft}_0 + \text{Direcft}_{100} + \text{Direcft}_{200} + \text{Direcft}_{400} + \text{Direcft}_{\text{Bottom}} + \\ & \text{Lat}_{140} + \\ & \text{Lat138}_{139} + \text{Lat139}_{140} + \text{Lat140}_{141} \end{aligned}$$

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こととした。今後は、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、説明変数の数が最小のモデルを選択、さらに環境・漁業面での説明力を加味して決定した。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、複数の深度層が選択された場合 (例えば、0 m 層水温と 100 m 層水温が同時に選択された場合)、解釈の簡便さや過適合の影響を加味して、1 層のみを選択して、ベストモデルに使用することとした。

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

上記の基準に基づきモデル選択を実施したが、最小 AIC+2 の範囲のモデルには年効果が含まれておいなかったため（表 1）、年効果を含むモデルに絞り、そこから基準に従って以下のベストモデルを選択した（表 2）。

$$\log(\text{CPUE}) \sim \text{Year} + \text{Quarter} + \text{Temperature}_{400} + \text{Direcft}_{100}$$

八丈島地区では、年効果を含むモデルに絞って AIC 総当りによる選択を行った結果、最小 AIC+2 の範囲に 25 モデルが該当した。そのうち、FRA-ROMS II から得られた特定の説明変数で 2 深度層以上が選ばれておらず、さらに最も説明変数の数が少な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、多くのモデルで経度間の黒潮北縁の緯度差（東経 138° - 139°）や 100m 層流速も選ばれる傾向にあり、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、水温や流向による 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 および年ごとの漁獲量および網数から得たノミナル CPUE の変化を図 7 に示す。標準化 CPUE は 2008 年から 2010 年にかけて増加した。その後は小さな増減はあるものの、横ばい傾向である。ノミナル CPUE の長期的なトレンドは標準化 CPUE と異なり、2017 年まで変動しながらも横ばい傾向にあったが、それ以降若干の減少がみられている。2009、2010 年および 2018 年以降は標準化 CPUE、2007～2009 年、2013 年、2015～2017 年はノミナル CPUE のほうが高い結果となった。

ただし、上記のとおり、八丈島地区では AIC 上位モデルに年効果が含まれず、年効果を含むモデルの中からベストモデルを選択した。一方、本報において八丈島の代表的な漁場として図 1 の 40 番グリッドを選択し、当該地点における海洋環境データを使用した。当該地区の立て縄漁業は年に 35～46 番グリッドまでの広い範囲で操業が行われるため、年により漁場が大きく異なっている可能性がある。現時点で得ることができる八丈島地区のデータは月別データであり、空間情報を含まない。したがって、時間的な漁場の変化、ひいては漁場ごとの海洋環境の違いを考慮できておらず、適切なモデリングが実施できていなかった可能性がある。以上のことを資源評価参画機関と協議した結果、今年度推定した標準化 CPUE を現段階でキンメダイ太平洋系群における VPA のチューニング指数として用いることは適切ではないと判断した。今後は、漁場位置情報や、時空間構造を持った長期データ（例えば、操業記録）等の収集を行い、時空間バイアスを除去したモデルを構築することが重要である。

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・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/digests2021/details/202137.pdf>

表1 モデル選択結果 AIC 最小+2 の範囲のモデルを表示。

切片	流向					東経140度			経度間の黒潮北縁の緯度差			流速					水温					季節	年	月	logLH	AIC	delta	
	0	100	200	400	底	黒潮北縁緯度	138-139	139-140	140-141	0	100	200	400	底	0	100	200	400	底									
4.700192	+						1.28346																+		13	-106	238.5	0
4.70506	+						1.2928																+		14	-106	239.9	1.4
4.700316	+						1.12874																+		14	-106	240.3	1.7
4.704066	+						1.25534																+		14	-106	240.3	1.7
4.694288	+						1.28743	0.25227															+		14	-106	240.3	1.8
4.663065	+						1.22709																+		14	-106	240.3	1.8
4.702053	+					-0.207507066	1.14462																+		14	-106	240.4	1.9
4.704989	+						1.21643																+		14	-106	240.5	1.9
4.704666	+						1.1882																+		14	-106	240.5	2
4.704362	+						1.22287																+		14	-106	240.5	2
4.701006	+						1.2893																+		14	-106	240.5	2
4.698816	+						1.32078															0.053	+		14	-106	240.5	2
4.700463	+						1.29279																+		14	-106	240.5	2
4.700213	+						1.29275																+		14	-106	240.5	2

表2 モデル選択結果 年効果を含むモデルのうち 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					東経140度			経度間の黒潮北縁の緯度差			流速					水温					季節	年	月	logLH	AIC	delta	
	0	100	200	400	底	黒潮北縁緯度	138-139	139-140	140-141	0	100	200	400	底	0	100	200	400	底									
5.36	+						0.13																+	+	29	-97.3	252.7	0.0
5.19	+																						+	+	28	-98.5	252.9	0.2
5.01	+						0.11																+	+	29	-97.5	253.0	0.3
4.64	+						0.18																+	+	28	-98.6	253.2	0.5
5.11	+						0.12																+	+	29	-97.8	253.6	0.9
7.16	+					-0.07	0.13																+	+	29	-97.8	253.6	0.9
4.87	+						0.12																+	+	29	-97.9	253.9	1.2
4.80	+						0.17																+	+	29	-98.0	254.0	1.3
5.69	+																						+	+	28	-99.0	254.0	1.3
4.68	+						0.18	0.07															+	+	29	-98.0	254.0	1.3
5.41	+																						+	+	28	-99.1	254.2	1.5
4.76	+						0.17																+	+	29	-98.1	254.2	1.5
5.04	+																						+	+	28	-99.2	254.4	1.7
5.46	+						0.14		0.03														+	+	30	-97.2	254.5	1.8
5.38	+						0.12			0.07													+	+	30	-97.3	254.5	1.8
5.40	+						0.12				0.09												+	+	30	-97.3	254.5	1.8
5.35	+						0.12			0.06													+	+	30	-97.3	254.5	1.9
5.28	+						0.14	0.03															+	+	30	-97.3	254.5	1.9
6.13	+					-0.03	0.12																+	+	30	-97.3	254.6	1.9
5.32	+						0.13																+	+	30	-97.3	254.6	1.9
5.04	+						0.12																+	+	30	-97.3	254.6	1.9
5.03	+						0.11																+	+	30	-97.3	254.6	1.9
5.09	+						0.12		0.03														+	+	30	-97.3	254.7	2.0
5.34	+						0.13																+	+	30	-97.3	254.7	2.0
5.21	+																						+	+	29	-98.3	254.7	2.0

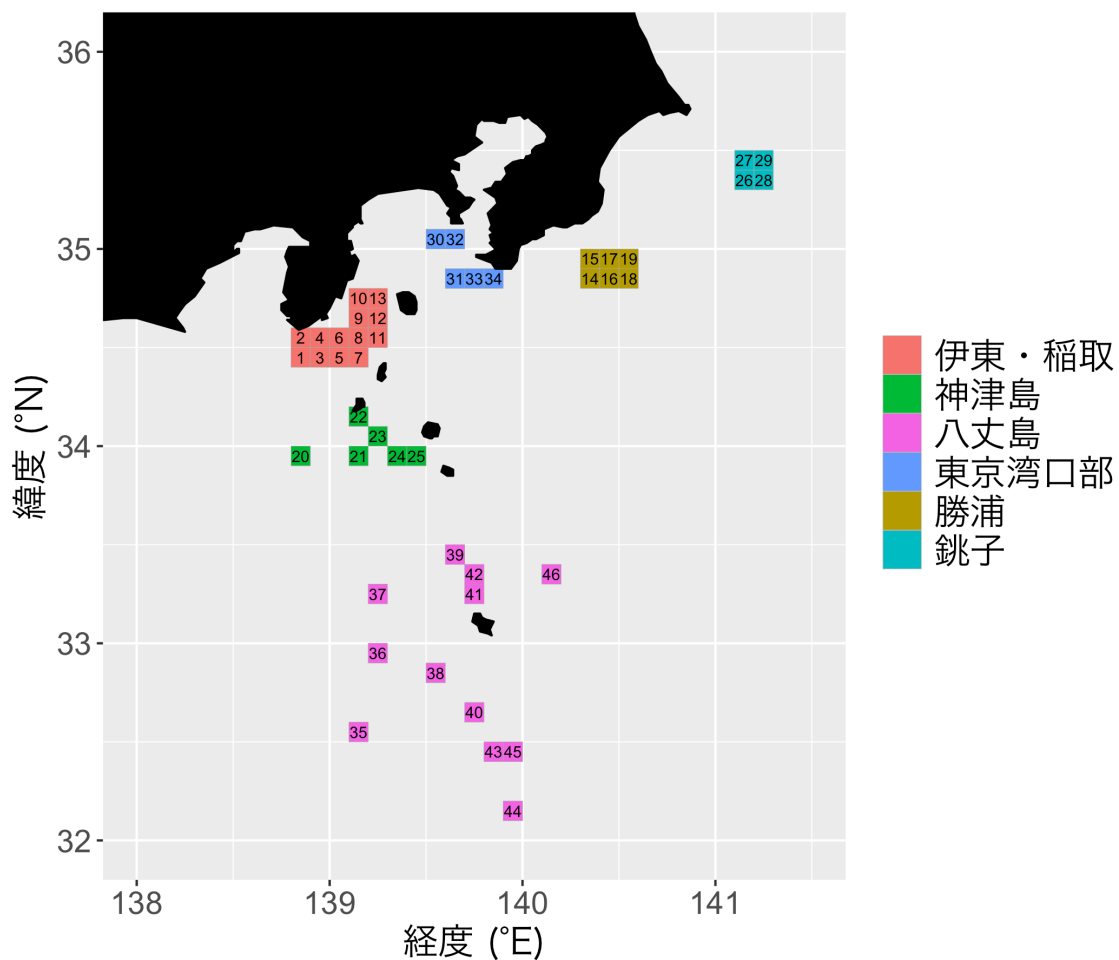


図1. FRA-ROMS II再解析値の抽出に用いた各地区の漁場範囲 緯度経度0.1°グリッドごとにデータを抽出。八丈島地区は40番のグリッドを使用。

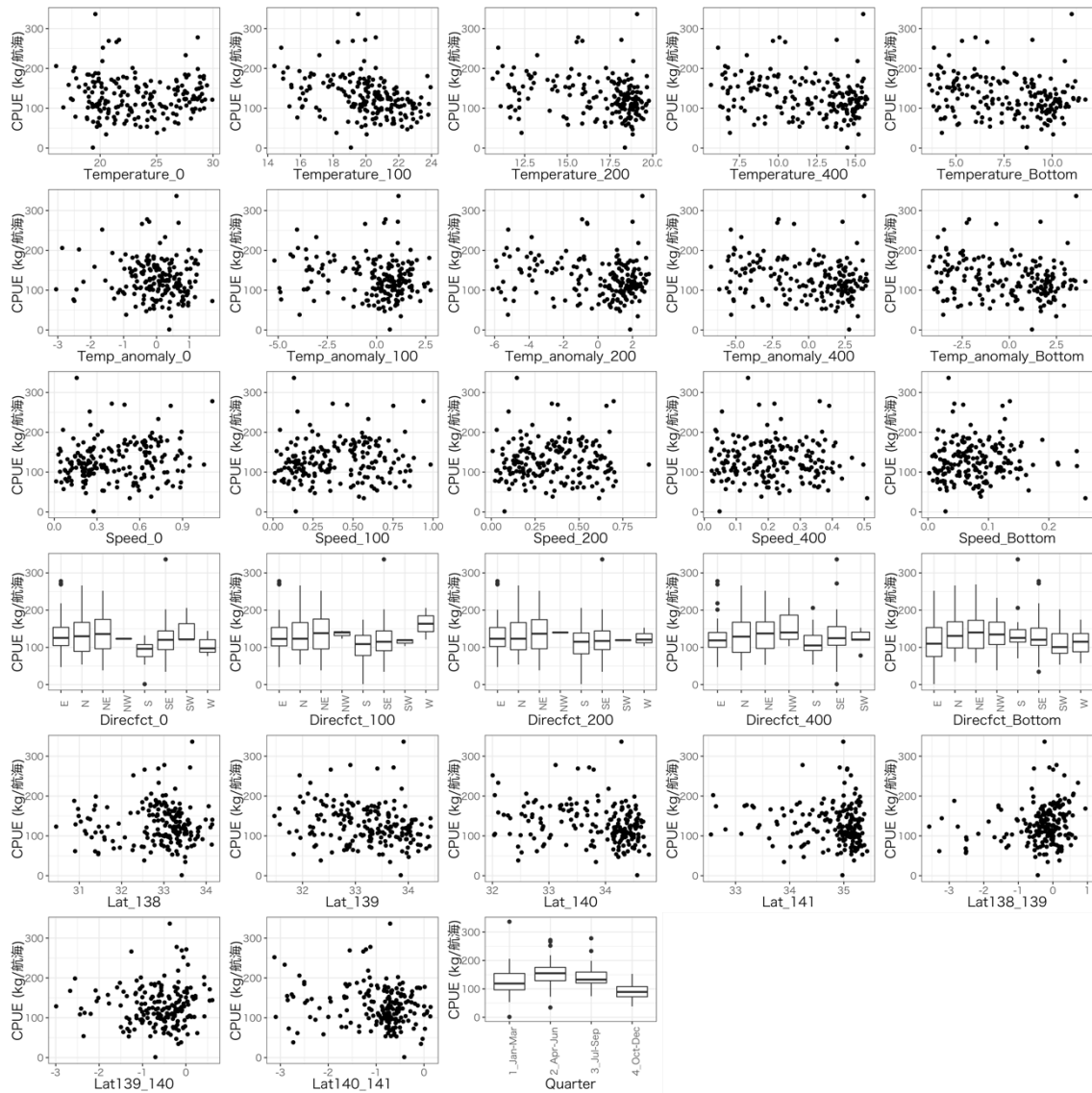


図2. 標準化モデルに導入した説明変数とノミナル CPUE との関係

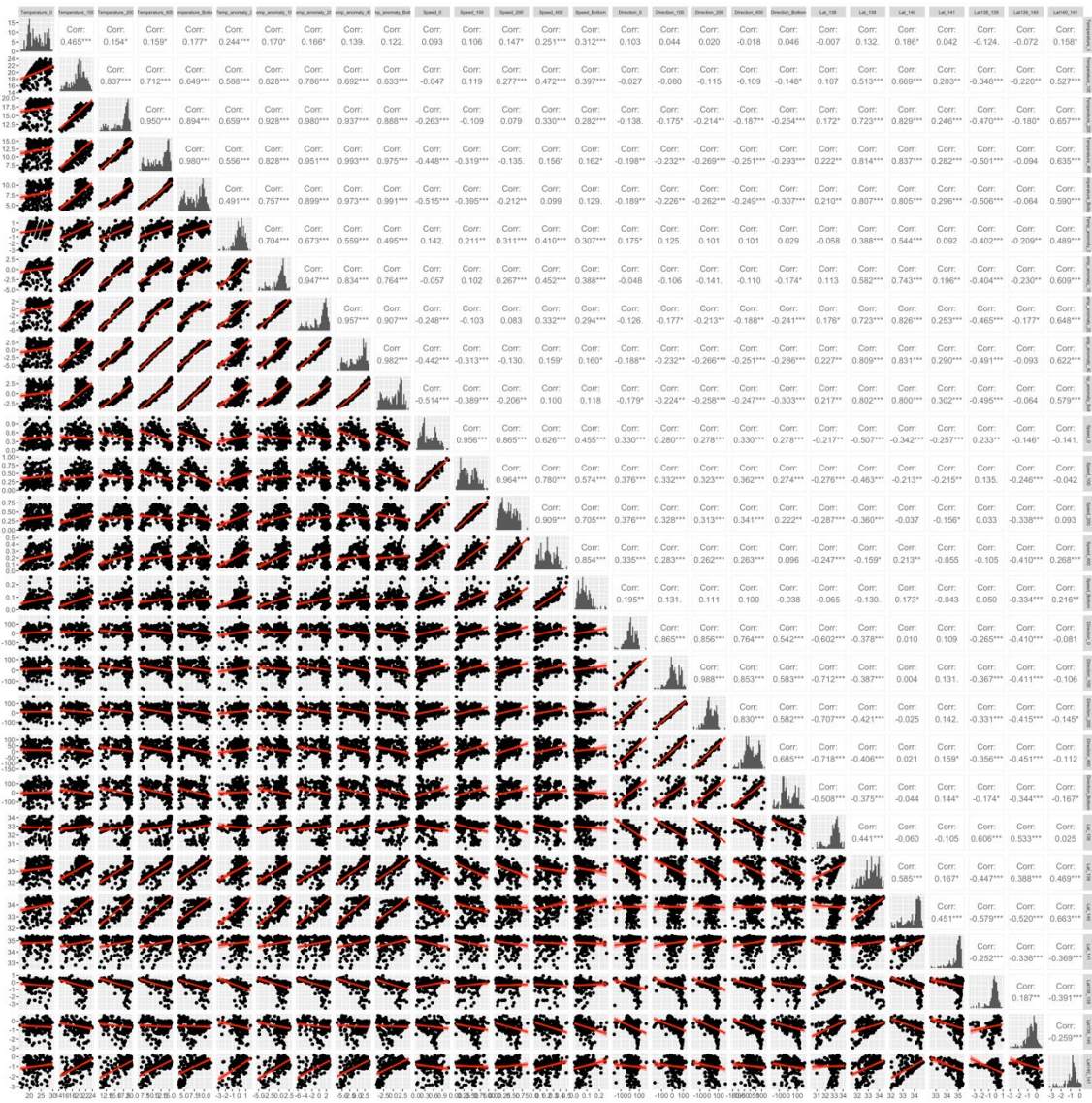


図3. 標準化モデルに使用した海洋環境データ間の相関関係

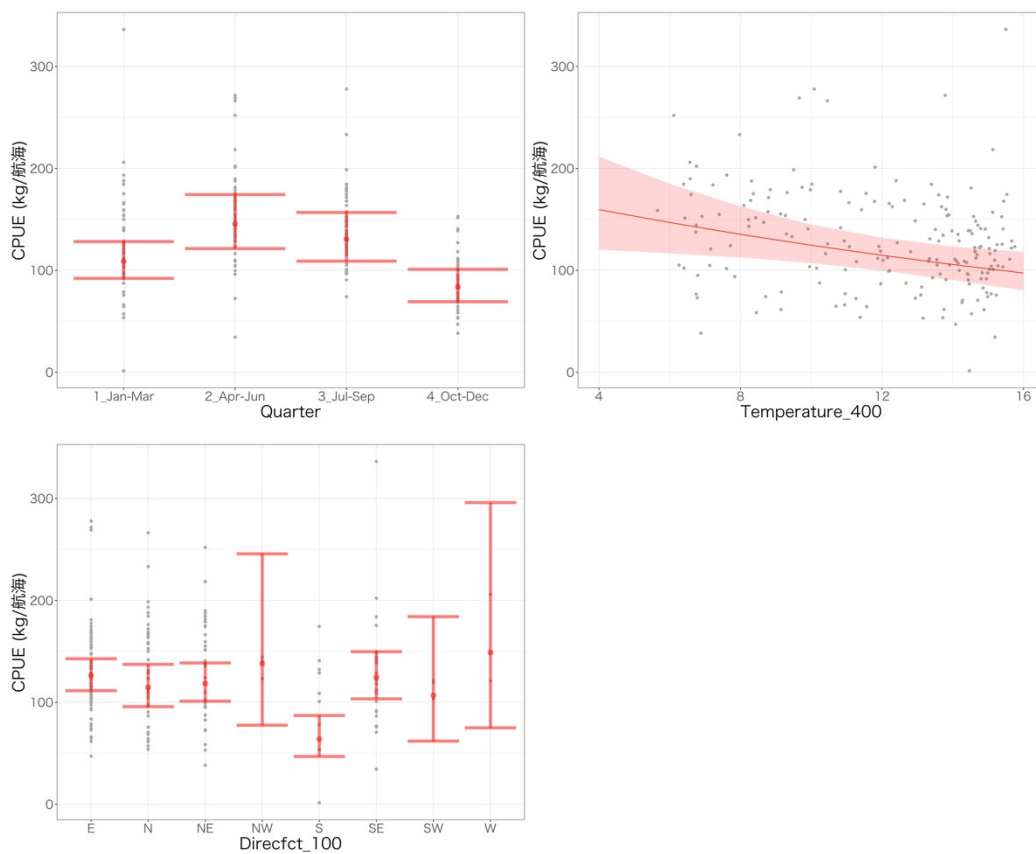


図 4. ベストモデルにおける各説明変数の部分効果 図中の赤帯と赤髭は 95%信頼区間を示す。

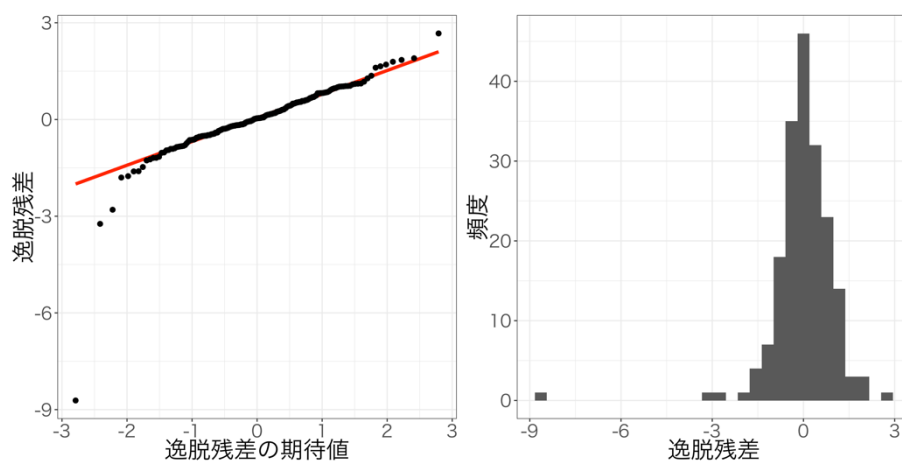


図 5. ベストモデルにおける QQ プロット (左) および残差の頻度分布 (右)

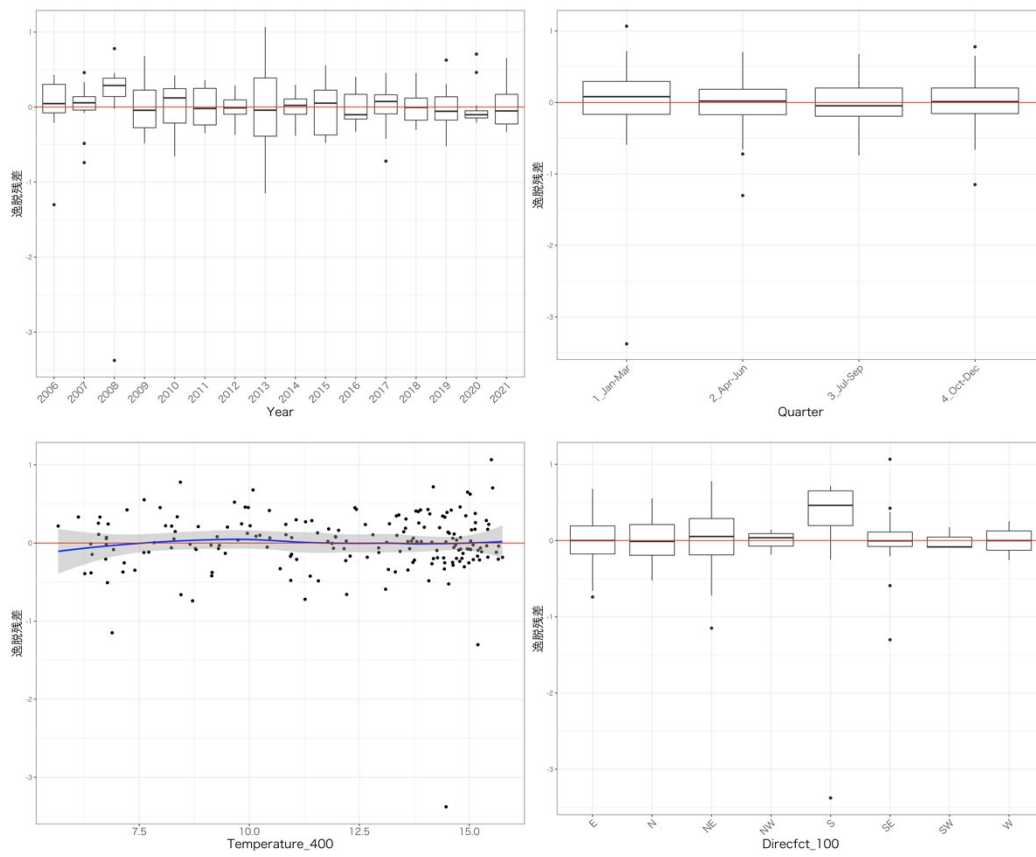


図6. ベストモデルの層別逸脱残差 Temperature_400に関する残差図の青線と灰帯は、残差にフィッティングさせた平滑化曲線 (loess) と、その95%信頼区間を示す。

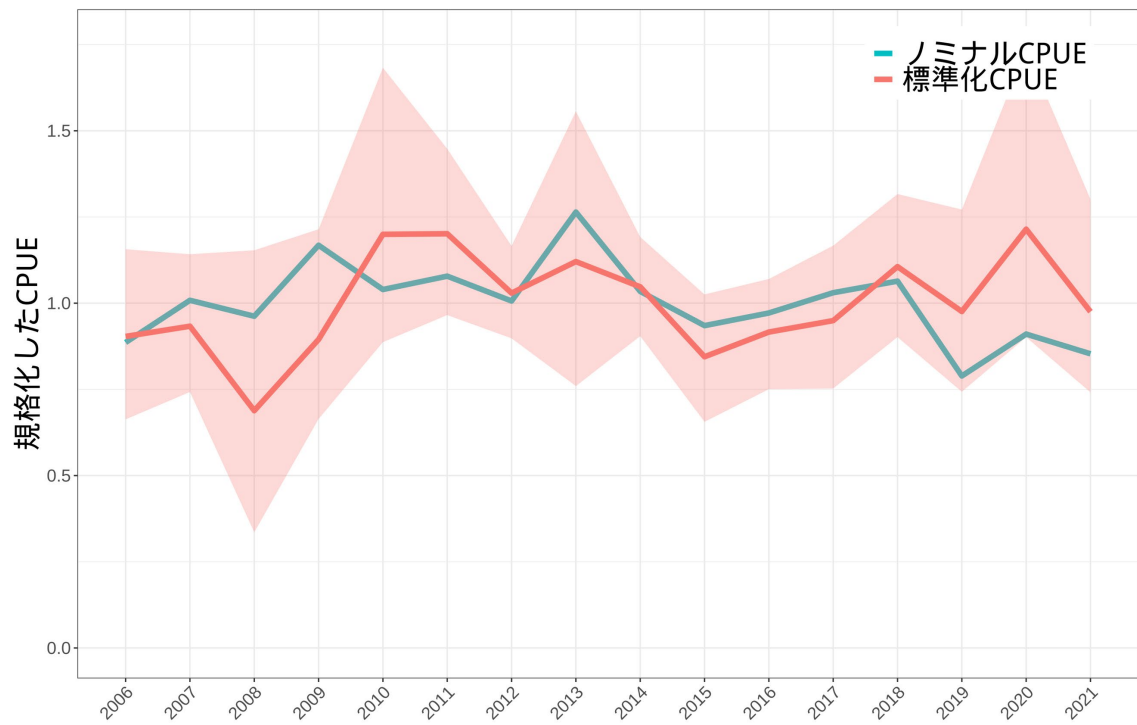


図7. 標準化 CPUE およびノミナル CPUE の推移 CPUE の値は、解析期間の平均値で規格化した値。赤帯は、データのブートストラップサンプリングとベストモデルによる年トレンド推定を 1000 回繰り返して求めた 95%信頼区間を示す。

ベストモデルの推定パラメタの要約

Call:

```
glm(formula = log(CPUE) ~ Year + Quarter + Temperature_400 +
     Direcft_100, family = gaussian, data = dat3)
```

Deviance Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-3.3772	-0.1813	0.0154	0.2217	1.0677

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	5.187637	0.261228	19.859	< 2e-16 ***
Year2007	0.032276	0.187958	0.172	0.863870
Year2008	-0.272163	0.195344	-1.393	0.165441
Year2009	-0.009641	0.198693	-0.049	0.961361
Year2010	0.283422	0.192699	1.471	0.143273
Year2011	0.284852	0.182113	1.564	0.119723
Year2012	0.130258	0.181734	0.717	0.474554
Year2013	0.215298	0.191830	1.122	0.263371
Year2014	0.147803	0.181695	0.813	0.417136
Year2015	-0.067425	0.188342	-0.358	0.720813
Year2016	0.013945	0.184485	0.076	0.939840
Year2017	0.049511	0.195641	0.253	0.800533
Year2018	0.202081	0.213613	0.946	0.345542
Year2019	0.077022	0.203683	0.378	0.705814
Year2020	0.295783	0.205502	1.439	0.151978
Year2021	0.076399	0.207025	0.369	0.712582
Quarter2_Apr-Jun	0.291578	0.093134	3.131	0.002067 **
Quarter3_Jul-Sep	0.184845	0.095004	1.946	0.053416 .
Quarter4_Oct-Dec	-0.262222	0.093460	-2.806	0.005632 **
Temperature_400	-0.041175	0.015883	-2.592	0.010396 *
Direcft_100N	-0.095614	0.123766	-0.773	0.440913
Direcft_100NE	-0.063200	0.105009	-0.602	0.548109
Direcft_100NW	0.089923	0.302849	0.297	0.766904
Direcft_100S	-0.679990	0.171094	-3.974	0.000106 ***
Direcft_100SE	-0.013843	0.114925	-0.120	0.904274

Direcft_100SW	-0.166966	0.288421	-0.579	0.563456
Direcft_100W	0.166588	0.354367	0.470	0.638912

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

(Dispersion parameter for gaussian family taken to be 0.1924134)

Null deviance: 47.463 on 189 degrees of freedom
Residual deviance: 31.363 on 163 degrees of freedom
AIC: 252.93

Number of Fisher Scoring iterations: 2

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