

令和 8 (2026) 年度カタクチイワシ太平洋系群の資源評価
北上期調査 0 歳魚 CPUE の標準化およびモデル診断結果

2026 年 8 月 6 日

水産資源研究センター浮魚資源部浮魚第 2 グループ

木下順二・安田十也・渡井幹雄・日野晴彦・木皿祐雅・塚田秋葉・河野悌昌・高橋正知

データ	北西太平洋北上期浮魚類資源調査による中層トロール CPUE
対象	0 歳魚 CPUE (尾/網・時)
データが利用可能な期間	2001 年～2025 年の 6 月～7 月
標準化に使用した期間	2002 年～2025 年
標準化のためのデータ抽出	環境情報として調査点の表面水温 (SST) と 50 m 深水温 (T50) が揃っているデータを使用
使用した統計ソフト・パッケージ	ソフト : R (4.5.2) for Windows パッケージ : [データ操作] tidyverse (v.2.0.0) [モデル推定・診断] VAST (v.4.0.0)、FishStatsUtils (v.2.13.2)、ThorsonUtilities (v.1.0)、DHARMA (v.0.4.6) [モデル選択] MuMIn (v.1.48.11) [計算高速化] TMB (v.1.9.21)、INLAspacetime (v.0.1.14)
統計モデル	時空間統計モデル (Vector Autoregressive Spatio-Temporal model)
フルモデルで導入した説明変数	調査年 (時間の効果。遭遇確率ではランダムウォーク、有漁密度では一定)、場所 (空間) のランダム効果、調査年と場所 (時空間) のランダム効果、および漁獲効率に関する 5 つの共変量 (固定効果) : SST、 SST^2 、T50、 $T50^2$ 、 $SST \times T50$ の交互作用
最終モデルの選択方法	AICc を基準とした総当たり法 (共変量) VAST の <code>check_fit</code> 関数
最終モデルで選択された説明変数	遭遇確率モデル : 時間、空間、時空間、 $SST \cdot SST^2$ 有漁密度モデル : 時間、時空間、 $SST \cdot SST^2 \cdot T50 \cdot T50^2$
年トレンドの抽出方法	推定された密度分布を空間的に加重平均し、総面積で除することで各年の値を算出
推定誤差や信頼区間の計算方法	TMB による Laplace 近似を用いた分散推定に基づいて計算
結果	標準化 CPUE は、ノミナル CPUE と比較して変動幅 (最大値と最小値の差) が縮小したが、2015 年以降はノミナル CPUE と概ね同様に年々変動した。

1. 背景

北上期調査（サンマ資源量直接推定調査および北上期浮魚類資源調査を併せたもの）として、水産研究・教育機構は2001年以降、主に6～7月に黒潮親潮移行域から親潮域において、中層トロール（網口30 m、コード目合17 mm）による漁獲調査を実施している。本調査では、カタクチイワシを含む小型浮魚類の分布量を調査、推定している。

北上期調査の調査海域や調査点数は、年や月によって異なる。また、カタクチイワシ0歳魚の分布域も年によって変動する。このため、CPUEには空間的・時間的な偏りが生じる可能性がある。そこで、本報告では、これらの調査条件や0歳魚分布の変動を考慮するため、時空間モデル（VAST）を用いて0歳魚CPUEを標準化し、その結果をチューニング指数として使用した。

2. 方法

1) 使用したデータ

本報告では、北上期調査による中層トロールの0歳魚CPUE（尾/網・時）データを使用した。ただし、調査によって採集された個体の年齢データが現状利用できないため、被鱗体長10 cm未満の個体を0歳魚とみなしてCPUEを算出した。当該調査は2001年から実施されているが、本解析では、調査範囲および観測項目が概ね一致している2002～2025年の全観測点データを標準化対象とした。

2) モデルの構造

標準化には、昨年度評価と同様に、Vector Autoregressive Spatio-Temporal（VAST）モデルを適用した（Thorson and Barnett 2017、Thorson 2019）。VASTは、空間自己相関を考慮して、相対密度の時空間変動を柔軟に推定できる統計的手法である。VASTでは生データを用いた解析が推奨されている（Thorson 2019）。また、シミュレーションによる比較研究では、VASTは一般化線形モデルや一般化加法モデルを含む従来のCPUE標準化手法と比較して、総合的に高い推定性能を示すことが報告されている（Grüss et al. 2019）。

VASTによる0歳魚CPUEの標準化では、各データ*i*の遭遇確率の線形予測子 $p_1(i)$ と、遭遇した場合のCPUEの線形予測子 $p_2(i)$ に分けて、以下の式で表す。

$$p_1(i) = \beta_1(t_i) + \omega_1(s_i) + \varepsilon_1(s_i, t_i) + \sum_{k_1}^{n_{k1}} \lambda_1(k_1) Q_i(i, k_1) \quad (1)$$

$$p_2(i) = \beta_2(t_i) + \omega_2(s_i) + \varepsilon_2(s_i, t_i) + \sum_{k_2}^{n_{k2}} \lambda_2(k_2) Q_i(i, k_2) \quad (2)$$

式(1)(2)の右辺の第1項の $\beta(t_i)$ は調査年*t*の効果を表す係数であり、第2項の $\omega(s_i)$ は調査年*t*における空間のランダム効果、第3項の $\varepsilon(s_i, t_i)$ は調査年*t*と場所*s*における時空間のランダム効果を表している。第4項は漁獲効率に影響する固定効果で共変量*Q*と係数 λ （固定効果）で表される。共変量*Q*として、海表面水温、海表面水温の2乗項（ドーム型の影響を想定したため）、水深50 m水温、水深50

m 水温の 2 乗項、海表面水温と水深 50 m 水温の交互作用を使用した。海表面水温や水深 50 m 水温の変数は平均と標本標準偏差で規格化したものを使用した。 k は共変量の分類番号 (1~5) を表す。

VAST におけるデルタ型モデルの構造は二項分布の部分とガンマ分布の部分でほぼ独立と考えられるため、それぞれの確率分布に対して、R パッケージの MuMIn (Barto'n 2023) を使用し、AICc 基準で総当たりのモデル選択を行った。この際、変数選択をしない確率分布のモデルの共変量は使用しなかった。各解析の上位モデルを表 1 に示す。各分布について AICc 最小の変数を選択したモデルを使用し、資源量指標値を算出した。本年度評価では、二項分布モデルとガンマ分布ともに SST と SST2 が共変量として選択された。

3) パラメータの推定

初めに、空間情報から、クラスタリングの一種である k -平均法により空間分布を近似するノットを決め、ノットにおける相対密度の時空間変化をモデル化する。先行研究ではノット数は 100 以上とすることが推奨されているため (Thorson 2019)、これに倣ってノット数を 100 とした。空間効果の確率密度関数は多変量正規分布 (MVN) を使って、

$$\omega_1(\cdot, f) \sim MVN(0, \mathbf{R}_1), \quad \omega_2(\cdot, f) \sim MVN(0, \mathbf{R}_2) \quad (3)$$

と表す。ここで、 $\mathbf{R}_1$ 、 $\mathbf{R}_2$ は Matérn 相関関数であり、

$$\mathbf{R}_1(s_n, s_m) = \frac{1}{2^{\varphi-1}\Gamma(\varphi)} \times (\kappa_1 |d(s_n, s_m)\mathbf{H}|)^{\varphi} \times K_{\varphi}(\kappa_1 |d(s_n, s_m)\mathbf{H}|) \quad (4)$$

$$\mathbf{R}_2(s_n, s_m) = \frac{1}{2^{\varphi-1}\Gamma(\varphi)} \times (\kappa_2 |d(s_n, s_m)\mathbf{H}|)^{\varphi} \times K_{\varphi}(\kappa_2 |d(s_n, s_m)\mathbf{H}|) \quad (5)$$

と表される。VAST では、 $\varphi = 1$ として推定しない。 Γ はガンマ関数、 K_{φ} は第 2 種の変形ベッセル関数、 κ_1 と κ_2 は非相関率、 $d(s_n, s_m)$ はノット間の距離、 $\mathbf{H}$ は地理的な異方性 (東西方向と南北方向で相関の距離減衰度が異なること) を表す行列である。同様に、時空間の確率密度関数は

$$\varepsilon_1(\cdot, f, t) \sim \begin{cases} MVN(0, \mathbf{R}_1) & \text{if } t = 1 \\ MVN(\rho_{\varepsilon 1} \varepsilon_1(\cdot, f, t-1), \mathbf{R}_1) & \text{if } t > 1 \end{cases} \quad (6)$$

$$\varepsilon_2(\cdot, f, t) \sim \begin{cases} MVN(0, \mathbf{R}_2) & \text{if } t = 1 \\ MVN(\rho_{\varepsilon 2} \varepsilon_2(\cdot, f, t-1), \mathbf{R}_2) & \text{if } t > 1 \end{cases} \quad (7)$$

で与えられる。本報告では、各年の効果 (β) については、当初は時間的な自己相関構造を仮定した設定 (RhoConfig["Beta1", "Beta2"] = 4) で推定を試みたが、エラーメッセージが表示されたため、check_fit 関数の診断結果および推奨設定に従って、出現確率についてはランダムウォークを仮定した設定 (Beta1 = 2)、有漁密度については年ごとの変動を仮定しない設定 (Beta2 = 3) とした。時空間効果 (ε) についても同様の手順としたが、エラーメッセージが表示されなかったため、1 次の自己回帰構造を仮定した

設定 (RhoConfig["Epsilon1", "Epsilon2"] = 4) を用いた。なお、有漁密度を予測するモデルにおける空間ランダム効果 (ω_2) は、VAST の `check_fit` 関数により CPUE の変動への寄与が小さいと判断されたため、除外する設定 (FieldConfig["Omega2"] = 0) を採用した。

本データを使用した解析では二項分布とガンマ分布を使用したデルタ型のモデルを使用し、予測遭遇率 $r_1(i)$ と遭遇時の予測 CPUE $r_2(i)$ を以下の式で表した (Thorson 2017)。

$$r_1(i) = \text{logit}^{-1} p_1(i) \quad (8)$$

$$r_2(i) = a_i \times \log^{-1} p_2(i) \quad (9)$$

a_i はオフセット項であるが、CPUE を目的変数としたため 1 とした。CPUE が観測される確率は以下で表され、周辺尤度が最大となるパラメータを推定した。

$$\Pr(b_i = B) = \begin{cases} 1 - r_1(i) & \text{if } B = 0 \\ r_1(i) \times g\{B|r_2(i), \sigma_m^2(c)\} & \text{if } B > 0 \end{cases} \quad (10)$$

上記モデルのパラメータは、最尤法によって推定されるが、多くのランダム効果を伴うため、高速な計算が必要であり、Template Model Builder (Kristensen et al. 2016) と呼ばれる高速最適化ソフトが使用される。モデルの収束判断には VAST の `check_fit` 関数を用いた。

推定されたパラメータから、各年における各位置の予測 CPUE を

$$d^*(s, t) = r_1^*(s, t) \times r_2^*(s, t) \quad (11)$$

で計算した。 r^* は式 (1) (2) における漁獲効率に関する項 (第 4 項) の係数 λ を 0 に固定して、式 (8) (9) により計算される。

最後に、予測 CPUE と各ノットの面積を掛け合わせた値の総和を求め、面積の合計値で割った値を標準化 CPUE として以下の式により算出した。各ノットの面積の合計値は年によって変わらないため、この処理によって標準化指標値の相対的なトレンドは変わらない。

$$I(t) = \frac{\sum_{s=1}^{n_s} (a(s) \times d^*(s, t))}{\sum_{s=1}^{n_s} a(s)} \quad (12)$$

この際、ランダム効果の平均補正を行った (Thorson and Kristensen 2016)。なお、VAST のモデル構造の詳細については、Thorson (2019) や GitHub (<https://github.com/James-Thorson-NOAA/VAST>) に詳しく記載されている。

3. 結果

VAST で推定された各年の局所密度分布を図 1 に示す。資源水準の高かった 2000 年代～2010 年代初頭には、黒潮続流域から黒潮親潮移行域、および親潮域にかけて広く高密度に分布していた。分布重心は年

によって東西方向に大きく変動した一方、南北方向では北緯 40 度付近で比較的安定していた。資源水準が低下した 2010 年代中盤以降は、全体的に密度が低下し、東経 170 度以東の海域では分布は限定的となった。

標準化した北上期調査 0 歳魚 CPUE とノミナル CPUE を比較すると、標準化 CPUE では年々の変動幅がノミナル CPUE に比べて小さくなった（図 2）。また、2016～2020 年および 2022 年では、標準化 CPUE がノミナル CPUE を上回った。

QQ プロットおよび予測値と残差の関係を図 3 に示す。高い予測値では正の残差傾向がみられたものの、QQ プロットでは予測線からの大きな逸脱は認められなかった。このため、モデルの仮定は概ね妥当であると考えられた。

引用文献

- Barto'n, K. (2023) MuMIn: Multi-Model Inference. R package version 1.47.5., <https://CRAN.R-project.org/package=MuMIn>.
- Grüss, A., J. F. Walter III, E. A. Babcock, F. C. Forrestal, J. T. Thorson, M. V. Laretta and M. J. Schirripac (2019) Evaluation of the impacts of different treatments of spatio-temporal variation in catch-per-unit-effort standardization models. *Fish. Res.*, **213**, 75-93.
- Kristensen, K., A. Nielsen, C. E. Berg, H. Skaug and B. M. Bell (2016) TMB: automatic differentiation and Laplace approximation. *J. Stat. Softw.*, **70**, 1-21.
- Thorson, J. T. (2017) Three problems with the conventional delta-model for biomass sampling data, and computationally efficient alternative. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **75**, 1369-1382.
- Thorson, J. T. (2019) Guidance for decisions using the Vector Autoregressive Spatio-Temporal (VAST) package in stock, ecosystem, habitat and climate assessments. *Fish. Res.*, **210**, 143-161.
- Thorson, J. T. and LAK. Barnett (2017) Comparing estimates of abundance trends and distribution shifts using single- and multispecies models of fishes and biogenic habitat. *ICES J. Mar. Sci.*, **74**, 1311-1321.
- Thorson, J. T. and K. Kristensen (2016) Implementing a generic method for bias correction in statistical models using random effects, with spatial and population dynamics examples. *Fish. Res.*, **175**, 66-74.

表 1. 北上期調査 0 歳魚 CPUE の二項分布モデルおよびガンマ分布モデルにおける変数選択の結果

	順位	SST	SST ²	T50	T50 ²	SST:T50	ΔAIC
二項分布	1	+	+	−	−	−	0
	2	+	+	+	−	−	1.508
	3	+	+	+	−	+	3.135
	4	+	+	+	+	−	3.501
	5	+	+	+	+	+	4.987
	6	+	−	+	−	+	21.359
ガンマ分布	1	+	+	+	+	−	0
	2	+	+	+	−	+	0.871
	3	+	+	−	−	−	1.436
	4	+	+	+	+	+	1.637
	5	+	+	+	−	−	2.164
	6	+	−	−	−	−	2.449

SST は海表面水温、T50 は水深 50 m の水温を表す。+印は変数が選択されたことを、−印は変数が選択されなかったことを表す。最小 AICc のモデルを太字で示した。

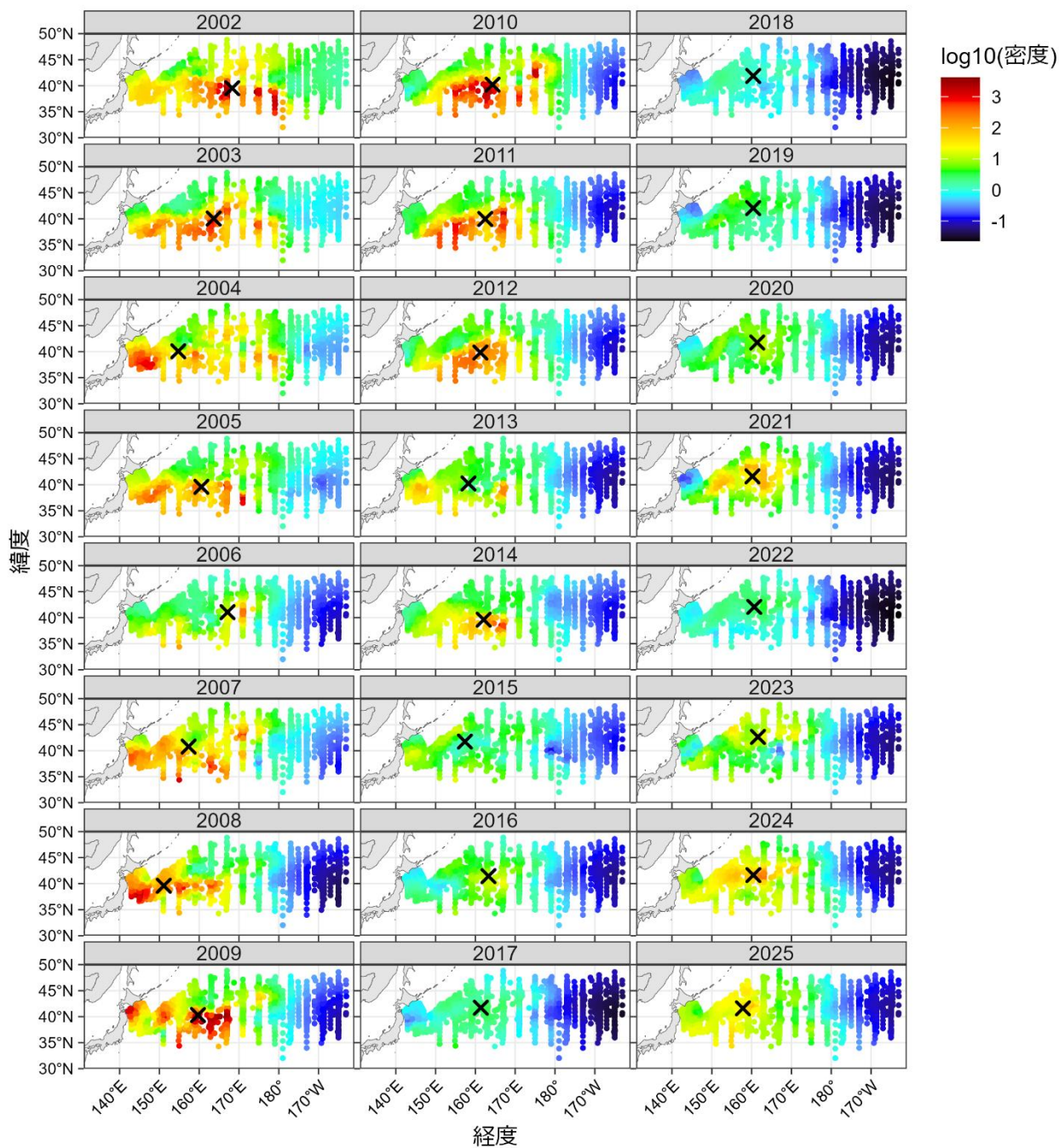


図 1. VAST により推定された北上期調査 0 歳魚の相対密度の空間分布
色は指標値の多寡を示す。黒い×印は分布重心を表す。

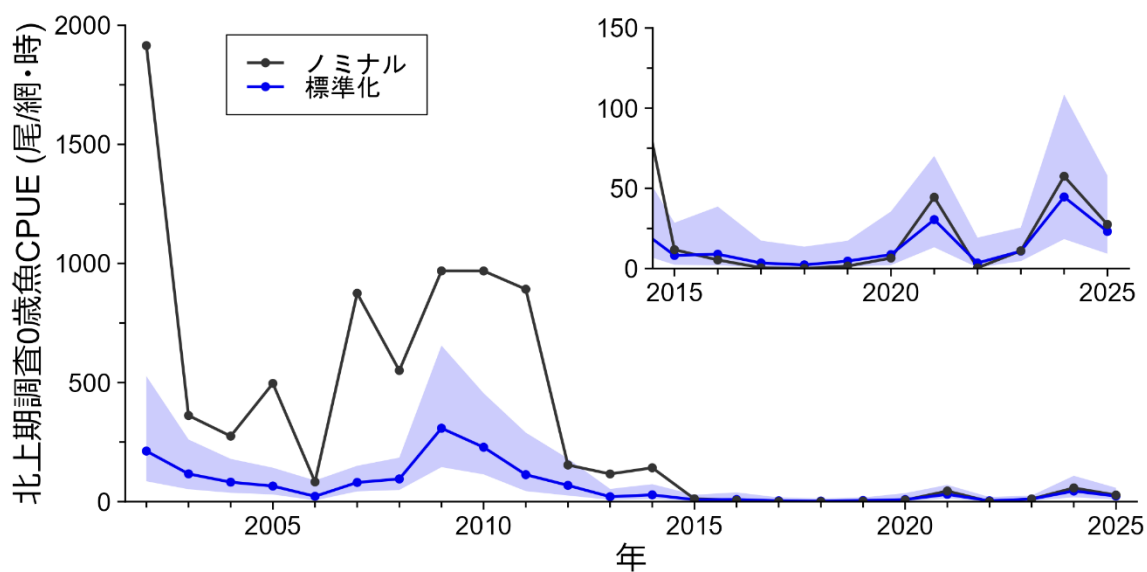


図2. 指標値の推移

青実線は標準化 CPUE、黒実線はノミナル CPUE、青影は 95%信頼区間を表す。

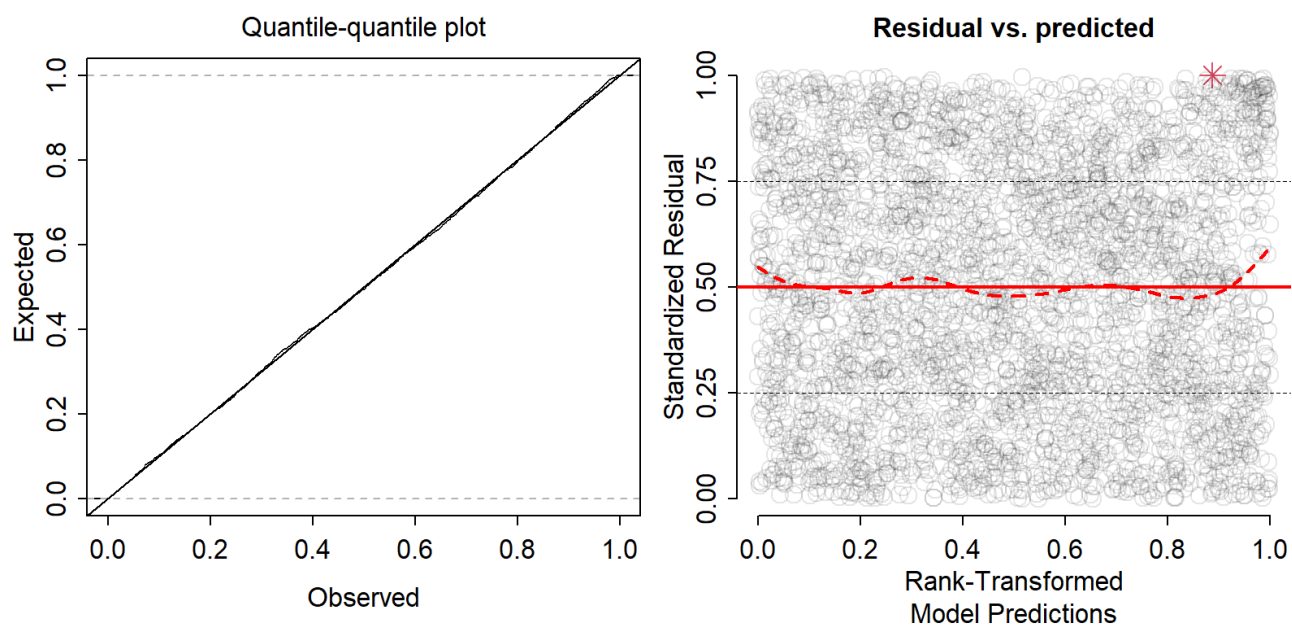


図3. 予測された北上期調査0歳魚 CPUE の QQ プロット (左) と予測値に対する残差の分布 (右)

右図の赤いアスタリスクは統計的に有意な外れ値を表す。