

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：82708

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15905

研究課題名（和文）レジームシフト資源の評価モデルの開発と管理戦略評価

研究課題名（英文）Assessment model development and management strategy evaluation for fisheries stocks under regime shifts

研究代表者

西嶋 翔太（Nishijima, Shota）

国立研究開発法人水産研究・教育機構・水産資源研究所（横浜）・研究員

研究者番号：50805116

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,000,000円

研究成果の概要（和文）：生産性のレジームシフトを示しうる水産資源の資源評価の改良と管理戦略の検討を行った。マサバ太平洋系群を対象にしたシミュレーションモデルを開発し、現在使用されている資源評価モデルよりも、状態空間資源評価モデルの方がパラメータの推定精度が高いことが明らかになった。次に、マサバ太平洋系群を対象に、加入後の密度効果を組み込んだ管理基準値を検討し、これにより効率的な漁獲が可能になることが示唆された。また、スルメイカを対象にした状態空間資源評価モデルを開発し、再生産関係のレジームシフトの検出に取り組んだ。さらに、我が国の32魚種系群の水産資源を対象に、隠れマルコフモデルによるレジームシフトの検出に取り組んだ。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水産資源評価モデルの改良のため、状態空間資源評価モデルの開発や改善に取り組み、信頼性の高い生物学的許容漁獲量の算出が可能になった。状態空間モデルや隠れマルコフモデルといった高度な統計モデルによるレジームシフトの検出に取り組む、我が国資源の加入量変動メカニズムの理解の一助となった。加入後の成長や成熟率の密度効果を管理基準値の計算に含めるという考えは国際的に見ても新しい取り組みであり、これにより効率的な漁獲が可能になることが示唆された。本課題で開発した加入後の密度効果を管理基準値計算に組み込む手法は、資源評価のデータと結果に基づいており、水産業の持続性と水産資源の持続的利用に貢献しうる成果である。

研究成果の概要（英文）：I addressed the improvement of stock assessment and the evaluation of management strategies for fishery resources that may exhibit regime shifts. By developing a simulation model for the Pacific stock of chub mackerel, I found that a state-space stock assessment model estimated parameters more accurately than the stock assessment model used currently in Japan. I then developed a framework that included a post-recruitment density dependence in individual growth and maturation in biological reference points and found that including the post-recruitment density dependence enabled an efficient exploitation of the Pacific stock of chub mackerel. I also developed a state-space stock assessment model for Japanese flying squid, finding that recruitment regime shifts occurred in this species. In addition, I worked on the detection of regime shifts using a hidden Markov model for 32 fish stocks in Japan.

研究分野：水産資源学

キーワード：レジームシフト 水産資源 状態空間モデル 隠れマルコフモデル 生物学的管理戦略評価 最大持続可能生産量 管理基準値 密度効果

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

マイワシ、カタクチイワシ、マサバ、スルメイカ、これらは我々の食卓に欠かせない水産資源であると同時に、環境影響によって資源量や漁獲量が大きく変動するレジームシフト資源である。水産資源の変動にレジームが存在することを示唆する研究は数多くあるものの、レジームシフトを事前に予測することは困難であり、効果的な管理戦略を構築することは重要である。本研究ではレジームシフト資源の評価手法の開発と管理手法の探索を行う。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、生産性や加入量のレジームシフトが生じている可能性がある水産資源を対象に、資源評価モデルの開発と効果的な管理手法を探索することである。具体的には、まず、加入量の変動が大きい資源であるマサバ太平洋系群を対象に、シミュレーションモデルを用いた複数の資源評価モデルのパフォーマンス評価を行う。具体的な資源評価モデルとして、これまで日本で用いられてきた **virtual population analysis (VPA)** と近年開発された状態空間資源評価モデル **state-space stock assessment model (SAM)** の性能を比較する。**VPA** は年齢別漁獲量の観測誤差がないと仮定するモデルであるのに対し、**SAM** は、年齢別漁獲量の観測誤差と漁獲物の各年齢に対する選択性（選択率）の年変動の両方を推定できるという特徴がある。

本系群は資源量の水準が低水準から高水準期に移行すると、体重の増加率や成熟率が低下する「密度効果」を示すことがあるが、資源管理において加入後の密度効果の影響は無視されてきた。そこで本課題では、加入後の個体レベルに生じる密度効果を管理基準値に組み込むための枠組みを構築し、マサバ太平洋系群に応用することで、加入後の密度効果の重要性を明らかにする。

これまでの状態空間資源評価モデルは年齢構造のある資源のみを対象としたものであったため、一年生のスルメイカには適用不可能であった。そこで本課題では、スルメイカに適用可能な状態空間資源評価モデル **SAMUIKA (SAM Used for IKA)** を開発し、スルメイカ資源の加入量のレジームシフトの検出に取り組んだ。

最近開発された隠れマルコフモデルを使用し、我が国の水産資源 32 魚種系群の再生産関係データからレジームシフトの検出を試みた。隠れマルコフモデルはレジーム間の遷移確率と各年の各年のレジームを直接推定するため、将来予測や管理基準値の計算にレジームシフトを考慮することを可能にするモデルである。

## 3. 研究の方法

(1) マサバ太平洋系群を対象にした資源評価モデルのパフォーマンス性能評価では、それぞれの資源評価モデルを真としたシミュレーションモデルを開発した。まず、本系群の資源評価で使用したデータに対して、**VPA** と **SAM** を適用した。次にそれぞれのパラメータの推定結果から、資源量指標値と年齢別漁獲量の疑似データを 500 セット生成した。各疑似データセットに対して、**VPA** と **SAM** それぞれのモデルを当てはめ、最近年の資源量や漁獲係数といったパラメータの推定精度を評価した。

(2) 加入後の密度効果を管理基準値の計算に考慮するため、マサバ太平洋系群の資源評価で使用している年齢別体重と年齢別成熟率のデータを使用し、各年級群（コホート）の平均体重と成熟割合のマルコフプロセスのモデリングを行った。具体的には、初期状態（0 歳魚）の平均体重、ある年から翌年への平均体重の変化、ある年から翌年への成熟割合の変化、それぞれについて個体数の影響（密度効果）が検出されるかどうかを検証した。その後、この密度効果を含めたシナリオと含めていないシナリオで、個体あたりの個体群成長率 (**spawners per spawner: SPS**) の密度依存性や、最大持続可能生産量 (**maximum sustainable yield: MSY**) を実現する親魚量 (**SSB<sub>msy</sub>**) と漁獲係数 (**F<sub>msy</sub>**) がどのように変化するかを解析した。

(3) スルメイカの状態空間資源モデルを開発するにあたって、複数の系群（冬季発生系群・秋季発生系群）を同時にモデリングした。これにより、系群間の加入量の残差の相関の推定や、再生産関係パラメータを共通とすることが可能となり、年齢構造のないスルメイカ資源においても、少ない情報から漁獲量の観測誤差や再生産関係の推定が可能になると考えた。このモデル (**SAMUIKA**) を使用し、再生産関係のレジームシフトが生じる場合と生じない場合で小サンプルサイズ用 **AIC (AICc)** を比較した。

(4) 再生産関係におけるレジームシフトを隠れマルコフプロセスとして推定するための手法を十分な量のデータが利用可能な 32 魚種・系群の我が国資源に適用し、**AICc** を基にレジームの有無についてのモデル選択を行い、レジームシフトが生じている資源を明らかにした。

## 4. 研究成果

(1) **SAM** がシミュレーションモデルであった場合、資源評価モデルが **SAM** である場合の方が、**VPA** である場合に比べて、資源量や親魚量の推定精度が高かった（図 1）。一方、**VPA** がシミュレーションモデルであった場合には、漁獲量以外は **VPA** でも **SAM** と同程度の推定バイアスが生じることが明らかになった（図 2）。総合すると、**VPA** に比べて **SAM** の方が、パラメー

タの推定精度が高いことが示唆された。

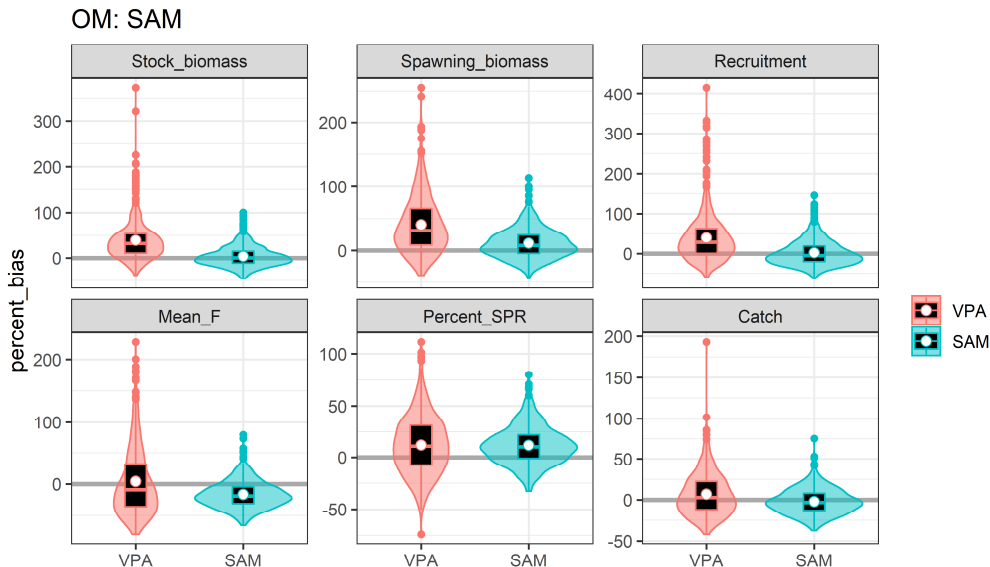


図 1. SAM をシミュレーションモデルとしたときの最終年の資源量 (左上)・親魚量 (中央上)・加入量 (右上)・平均漁獲係数 (左下)・加入量当たり親魚量 (**%SPR**; 中央下)・漁獲量 (右下)の相対バイアス。

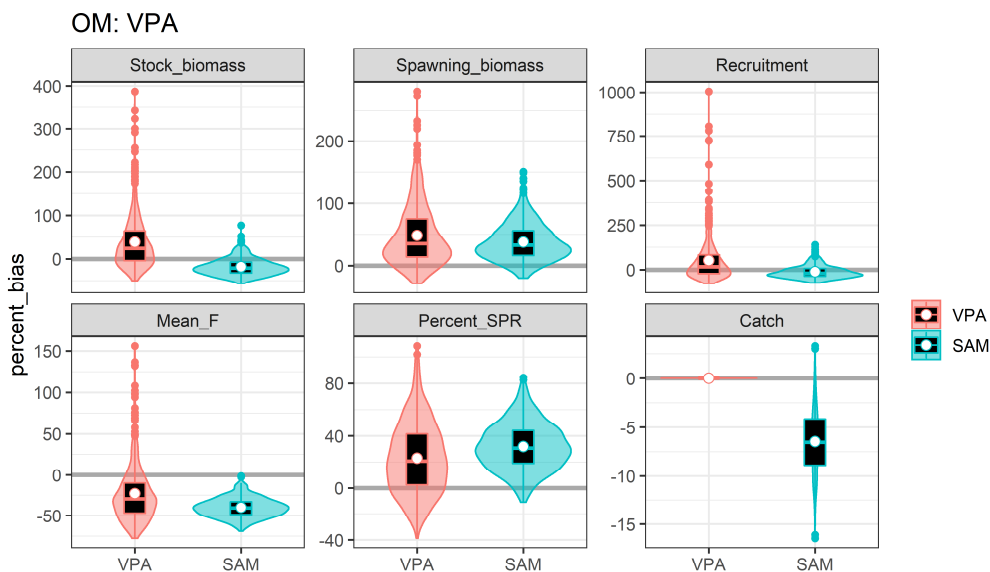


図 2. VPA をシミュレーションモデルとしたときの最終年の資源量 (左上)・親魚量 (中央上)・加入量 (右上)・平均漁獲係数 (左下)・加入量当たり親魚量 (**%SPR**; 中央下)・漁獲量 (右下)の相対バイアス。

(2) マサバ太平洋系群において、0歳魚の平均体重、ある年から翌年への平均体重の変化、ある年から翌年への成熟割合の変化、のいずれにおいても密度効果が検出された (図 3)。さらに、加入後の密度効果を含めることによって、MSY 管理基準値である **SSB<sub>msy</sub>** が低下することで過去の親魚量推定値の範囲内に収まるようになり (図 4a) **F<sub>msy</sub>** は上昇することが明らかになった (図 4b)。これにより、加入後の密度効果を考慮しない場合は、必要以上に漁獲圧を下げるというアンダーユースが生じるリスクが明らかになり、加入後の密度効果を含めることにより効率的な漁獲が可能となることが示唆された。

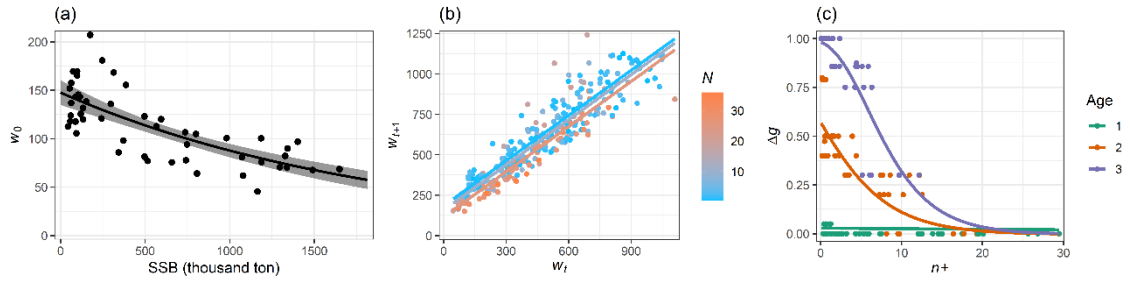


図 3. (a) 0 歳魚の平均体重 ( $w_0$ ) と産卵親魚量 (SSB) の関係、(b) ある年の平均体重 ( $w_t$ ) と翌年の体重 ( $w_{t+1}$ ) の関係に対する総個体数 ( $N$ ) の影響、(c) ある年から翌年への成熟割合の変化率 ( $\Delta g$ ) と当該年齢とその 1 歳上の合計個体数 ( $n+$ ) の関係。

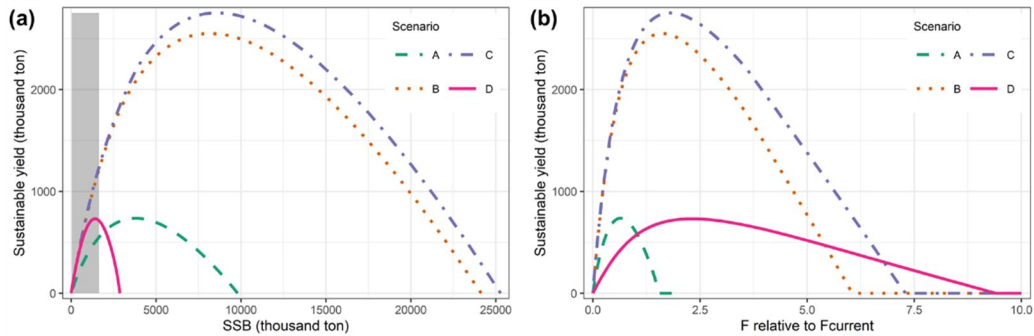


図 4. 加入後の密度効果を含めないシナリオ (A, B, C) と含めるシナリオ (D) における (a) 持続可能漁獲量と SSB の関係 (モードの位置が  $SB_{msy}$  を、灰色部分が過去の親魚量の範囲を表す)、(b) 持続可能漁獲量と  $F$  (現状の  $F$  との相対値) の関係 (モードの位置が  $F_{msy}$  を表す)。

(3) スルメイカ資源に適用可能な SAMUIKA を使用し、レジームの有無に関するモデル選択を行った結果、1991 年と 2015 年付近でレジームシフトが生じていることが明らかになった (図 5)。このレジームシフトにより、 $MSY$  が 2~3 倍程度変化することが示された。一方で、このレジームシフトによって  $F_{msy}$  はほとんど変化しないことが示され、この  $F_{msy}$  基準に管理を行うことでレジームシフトの下での持続的な管理が行える可能性が示唆された。

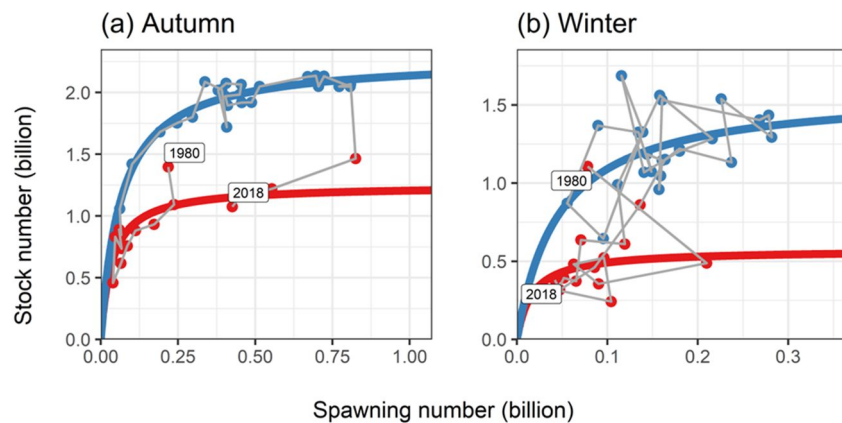


図 5. SAMUIKA で推定されたスルメイカ秋季発生系群 (a) とスルメイカ冬季発生系群 (b) の再生産関係におけるレジームシフト。点は観測値、線は予測値を表す。

(4) 隠れマルコフモデルを我が国資源に適用した結果、32 系群中 8 系群でレジームシフトが検出された (図 6)。マイワシ太平洋系群やカタクチイワシ太平洋系群といった従来からレジームシフトが生じると考えられている資源に加え、マアジ太平洋系群・ゴマサバ太平洋系群・ホッケ道北系群といった資源で 2011 年付近で高レジームから低レジームへのシフトが生じていたという結果になった。また、レジームシフトが生じている資源の割合は 25% であり、この割合は既存の関連した研究に比べて低かった。

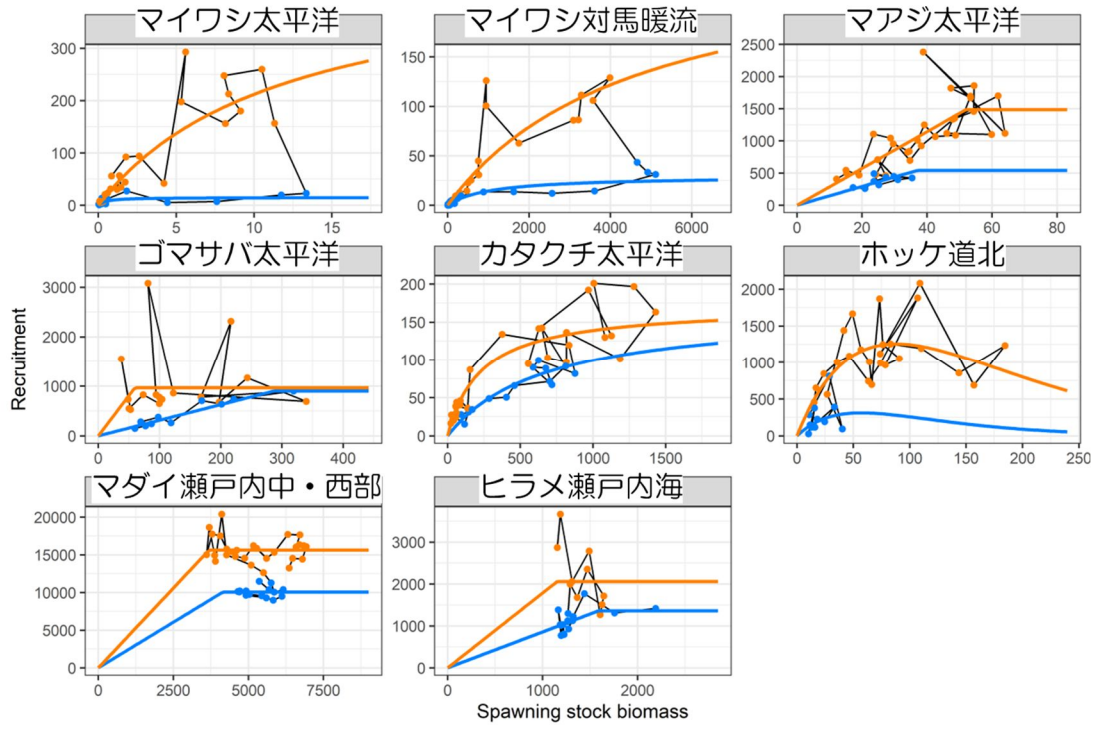


図 6. 隠れマルコフモデルによりレジームシフトが検出された 8 系群の再生産関係 .

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Kanamori Yuki, Nishijima Shota, Okamura Hiroshi, Yukami Ryuji, Watai Mikio, Takasuka Akinori	4. 巻 236
2. 論文標題 Spatio-temporal model reduces species misidentification bias of spawning eggs in stock assessment of spotted mackerel in the western North Pacific	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Fisheries Research	6. 最初と最後の頁 105825 ~ 105825
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fishres.2020.105825	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Nishijima Shota, Kubota Hiroshi, Kaga Toshiki, Okamoto Suguru, Miyahara Hisae, Okamura Hiroshi	4. 巻 63
2. 論文標題 State space modeling clarifies productivity regime shifts of Japanese flying squid	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Population Ecology	6. 最初と最後の頁 27 ~ 40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/1438-390X.12062	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Nishijima Shota, Belgrano Andrea	4. 巻 63
2. 論文標題 Towards ecological, socioeconomic and cultural sustainability of marine ecosystem services	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Population Ecology	6. 最初と最後の頁 14 ~ 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/1438-390X.12075	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Hashimoto Midori, Nishijima Shota, Yukami Ryuji, Watanabe Chikako, Kamimura Yasuhiro, Furuichi Sho, Ichinokawa Momoko, Okamura Hiroshi	4. 巻 219
2. 論文標題 Spatiotemporal dynamics of the Pacific chub mackerel revealed by standardized abundance indices	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Fisheries Research	6. 最初と最後の頁 105315 ~ 105315
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fishres.2019.105315	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kanamori Y, Takasuka A, Nishijima S, Okamura H	4. 巻 624
2. 論文標題 Climate change shifts the spawning ground northward and extends the spawning period of chub mackerel in the western North Pacific	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Marine Ecology Progress Series	6. 最初と最後の頁 155 ~ 166
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3354/meps13037	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nishijima Shota, Suzuki Shigenori, Fukuta Ryo, Okada Makoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Modeling pulse dynamics of juvenile fish enables the short-term forecasting of population dynamics in Japanese pufferfish: A latent variable approach	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 bioRxiv	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1101/2022.01.26.477932	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 市野川桃子, 西嶋翔太, 向草世香, 黒田啓行, 大下誠二	4. 巻 88
2. 論文標題 改正漁業法下での様々な代替漁獲管理規則の検討: マイワシ2系群を例に	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本水産学会誌	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2331/suisan.21-00041	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 西嶋翔太
2. 発表標題 オペレーティングモデルを用いた資源評価モデルのコンペ: マサバ太平洋系群への適用
3. 学会等名 水産海洋シンポジウム「北西太平洋に迫り来る国際漁業資源管理の波-NPFC (北太平洋漁業委員会) 対応の現状と課題-」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西嶋翔太、片町太輔、金森由妃、岡村寛
2. 発表標題 漁業データから見えてくる水産資源の時空間分布と個体群動態
3. 学会等名 日本生態学会関東地区会公開シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
カナダ	トロント大学	ニューファンドランドメモリアル大学	
中国	上海海洋大学		