

平成30年6月7日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04541

研究課題名(和文) 耳石安定同位体比分析と海洋データ同化モデルによるマイワシの環境履歴推定手法の開発

研究課題名(英文) Development of a scheme to reproduce a migration history of Japanese sardine using otolith $\delta^{18}O$ and a data assimilation model

研究代表者

小松 幸生 (Komatsu, Kosei)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：30371834

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：日本の水産重要魚種マイワシの資源変動要因の解明に向けて、マイワシの回遊履歴を推定する手法を開発した。まず、水温を制御した水槽で飼育したマイワシ稚魚の耳石中の酸素安定同位体比($\delta^{18}O$)を超微量炭酸塩分析システムMICAL3cで分析し、マイワシ耳石 $\delta^{18}O$ と経験水温との関係式を世界で初めて提示した。次に、マイワシの生息海域における海水中の $\delta^{18}O$ と塩分との関係式を決定した。以上の関係式を海洋データ同化モデルFRA-ROMS上でランダムに遊泳する個体ベースモデルに導入することで、加入に重要な発生後半年間のマイワシの回遊履歴を実測データを基盤として10日の時間解像度で推定する手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：A scheme reproducing a migration history of Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) was developed using the stable oxygen isotope ($\delta^{18}O$) in the otolith and a data assimilation model for contributing to clarification of the fluctuation mechanism of the stock-biomass. Juveniles were reared in three different water temperatures over the course of a month. Analysis of otolith $\delta^{18}O$ was conducted by extracting the portions formed during the rearing period using a micromill, and it derived a linear relationship between otolith $\delta^{18}O$ and ambient water temperature. Coupling of the relationship and a data-assimilative model enabled to reproduce a detailed movement of Japanese sardine with a temporal resolution of 10 days from their spawned region around the Kuroshio to the feeding ground in the subarctic area.

研究分野：海洋生態学

キーワード：マイワシ 耳石 酸素安定同位体比 経験水温 回遊履歴

1. 研究開始当初の背景

イワシ類やサバ類、サケ類を始めとする水産資源の多くは、大洋規模の数10年スケールの気候変動と強い相関関係を示しながら変動していることがよく知られている。日本で漁獲される重要水産資源の中でも、マイワシは特に漁獲量の変動が大きく、最盛期の450万トンから近年の数万トンの水準まで激しく変動している。しかも、日本周辺域のマイワシとカタクチイワシの漁獲量は数10年の時間スケールでほぼ逆位相で大きく変動していることも知られているが (Mantua et al., 1997)、そのメカニズムは解明されていない。水産資源の消費が増大し、その枯渇が国際問題となっている中、資源変動のメカニズムの解明は、水産資源を持続的かつ安定的に利用するための資源管理を適切に行う上で喫緊の課題となっている。

水産資源の変動に影響を与える海洋環境要因の影響を解明するために、これまで主に、以下の2つの方法を用いて研究が進められてきた。いずれの手法も、作業仮説として、発生後の初期段階で成長の速い個体が生残して新規加入するという「growth-mortality仮説 (Anderson, 1988)」を基盤としており、対象とする魚類の個体群の成長速度と海洋環境との関連性を調べるものである。第1の方法は、現場で採集したサンプルの耳石輪紋間隔の変化を読み取り、各個体群の成長速度の履歴と海洋環境データを照合して、成長速度に与える環境要因を推定する方法である。マイワシについては、仔魚期の水温が成長に重要とする説 (Takasuka et al., 2007) や前期稚魚期の餌料濃度が重要とする説 (Takahashi et al., 2008) が提案されているが、いずれもマイワシの年ごとの資源変動の解明には至っていない。第2の方法は、近年進展が著しい数値シミュレーションを利用して、モデル推定した輸送・回遊経路上の海洋環境因子 (水温、クロロフィル濃度、動物プランクトン現存量等) と成長速度や生残率との関係を調べる方法である。マイワシについては、黒潮・黒潮統流北縁の混合層深度がマイワシ仔魚の生残と強い相関関係にあることが示されている (Nishikawa et al., 2013)。また、成長速度が最適な方向に向けて遊泳する従来のアルゴリズムを改良して、成長速度が悪い場合に遊泳方向をランダムに決めるアルゴリズム (Kinesis) を導入することで、回遊分布の再現性を向上させたモデルも開発されている (Okunishi et al., 2013)。しかし、数値シミュレーションだけでは、モデルの計算誤差やモデルパラメータの不確定性のために、マイワシの輸送・回遊経路やその経路上の成長速度が不明であり、また、モデルの出力を検証する現場データが不足しているため、モデルの妥当性を十分検証することができない状況にある。

従来の研究の難点は、2つの方法を統合する情報が欠けていることにある。つまり、耳

石の解析では、個体群の各日齢の成長速度がどの場所の海洋環境を反映したものが不明であり、数値シミュレーションでは、推定された輸送・回遊経路上の個体群の成長速度が不明である。そこで、この難点を打開する方法として、本研究課題では、耳石の酸素安定同位体比 $\delta^{18}O$ に着目する。最近の研究で、魚類の耳石中の各成長段階における $\delta^{18}O$ を測定することにより、各成長段階で魚類が経験した水温をある程度推定することが分かってきた (e.g., Elsdon et al., 2008)。実際、国外での先端研究の事例として、東部北太平洋のカリフォルニアマイワシの耳石中の $\delta^{18}O$ から経験水温の推定を試みた例がある (Dorval et al., 2011; Javor et al., 2014)。しかし、この手法により推定された各個体群の輸送・回遊経路上で経験した水温と個体群の成長速度との関係を解明するには至っていない。まして、水温以外の環境因子と成長速度との関係は不明のままである。国内では、この方法をマイワシ等の小型浮魚類に適用した研究自体が未だ存在しない。この方法をマイワシのような小型浮魚類に適用する際の不可避の難点は、耳石が小さいために、成長履歴が追跡できる程度の細かい時間分解能で高精度に経験水温を推定できない点にある。

しかしながら、最近の分析技術の進展により、耳石中の $\delta^{18}O$ が従来に比べて1オーダー少ないサンプル量で分析できるようになり、マイワシの経験水温を $1^{\circ}C/10$ 日の解像度で追跡することが、もはや夢ではなくなりつつある。この方法が本研究課題で確立されれば、従来の耳石解析手法と数値シミュレーションを連携させることが可能となり、マイワシの資源変動をもたらす環境要因の解明に大きく資することが期待される。

2. 研究の目的

マイワシ太平洋系群に着目し、加入成功に関わる初期生残過程の解明に貢献するため、黒潮域の産卵場から北海道東方沖合の索餌場に至る、発生後半年間の輸送・回遊経路を10日単位で推定する手法の開発を目指す。



図1. マイワシ太平洋系群の分布模式図

3. 研究の方法

飼育実験

2015年4月に高知県宿毛湾で採集したマイワシ稚魚約200尾を国立水産研究・教育機構瀬戸内海区水産研究所伯方島庁舎の水槽で飼育した。照明は14時間の明期と10時間の暗期のサイクルとし、体重の3%のドライペレットを1日に1回給餌した。200尾からランダム抽出した59尾について、水温を18~19℃および22℃に設定した2トン水温でそれぞれ20尾、19尾の稚魚を35日間飼育し、水温を14~15℃に設定した1トン水槽で20尾の稚魚を28日間飼育した。各標本は標準体長計測後に冷凍保存した。また、各飼育海水はろ過後、2mLのガラスバイアルビンに採取して冷蔵保存した。

標本耳石と飼育海水の $\delta^{18}\text{O}$ 分析

各標本個体の耳石中の $\delta^{18}\text{O}$ は以下のように計測した。まず、耳石日輪計測システム (Ratoc System Engineering Co. Ltd., Tokyo, Japan) で耳石縁辺より28日間分の読み取りを行い、高精度マイクロミル (Geomill 326, Izumo-web, Japan) で削り出した。そして、削出した試料を国立茨城工業高等専門学校の微量炭酸塩分析システム MICAL3c (Ishimura et al., 2004) を用いて $\delta^{18}\text{O}$ を分析した。

飼育海水は、メンブレンフィルター (0.45 μm) でろ過後、東京大学大気海洋研究所の安定同位体比分析装置 (Picarro L2120-i) で $\delta^{18}\text{O}$ を分析した。

現場海水の塩分と $\delta^{18}\text{O}$ の関係解析

マイワシの産卵場である本州南方の黒潮域から索餌場である北海道東方沖の亜寒帯海域までの116点で表層海水を採取し、安定同位体比分析装置 (上記) で $\delta^{18}\text{O}$ を分析し、CTDにより測定した塩分値と比較して、両者の関係式を求めた。

回遊経路推定モデルの構築

以下の手順で回遊経路の推定モデルを構築した。

(1) モデルの推定精度検証のため、国立研究開発法人水産研究・教育機構中央水産研究所 (以下、中央水産研究所) が北海道東方沖で採集したマイワシ標本の内、2010年9月と2014年9月の標本を各3個体ずつランダム抽出し、各個体の耳石の $\delta^{18}\text{O}$ の履歴をの方法で10日間の解像度で分析した。

(2) の分析で明らかになった、耳石 $\delta^{18}\text{O}$ -海水 $\delta^{18}\text{O}$ と経験水温との関係式、及び の分析で明らかになった海水 $\delta^{18}\text{O}$ と塩分との関係式を用いて、海洋データ同化モデル FRA-ROMS (Kuroda et al., 2017) の再解析データの表面水温と塩分から計算される各データ格子点 (解像度: $0.1^\circ \times 0.1^\circ$) 上の耳石 $\delta^{18}\text{O}$ のマップを1日毎に作成した。

(3) (1) のマイワシ標本の耳石輪紋解析を実

施して孵化日を推定し、疑似粒子を投入した。なお、粒子の投入場所は、中央水産研究所で収集・整理した産卵場データ (解像度: $0.25^\circ \times 0.25^\circ$; Ozeki et al., 2007) をもとに、産卵のあった各格子点上に 120×120 個の粒子を投入した。

(4) 粒子は上記再解析データの表面流速で水平方向に移流させ、Smagorinsky (1963) の方法でランダムな方向に水平拡散させた。また、日齢から推定した体長の3倍/秒の速度で1日毎にランダムに方向を変えながら遊泳する効果を導入した。

(5) モデル上で疑似粒子が経験する耳石 $\delta^{18}\text{O}$ の履歴と各標本個体の耳石 $\delta^{18}\text{O}$ を比較し、各標本の採集場所へ、採集日に到達する粒子の回遊経路の頻度分布を求めた。

4. 研究成果

4.1 耳石 $\delta^{18}\text{O}$ と経験水温との関係

マイワシの耳石 $\delta^{18}\text{O}$ と経験水温との間の関係式として初めて、次式を提示した (Sakamoto et al., 2017) :

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{耳石}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{海水}} = -0.18 \times \text{水温} + 2.69. \\ (r^2 = 0.91, p < 0.01)$$

ここで、標準誤差は $\pm 0.18\text{‰}$ であった。この関係式は、無機炭酸塩に対する Kim et al. (2007) の関係式と切片は異なるものの傾きがほぼ等しく、一方、カリフォルニアマイワシに対する Dorval et al. (2011) とは、切片も傾きも異なることが分かった。なお、この関係式は飼育水槽での実験から求めたものであるが、Oda et al. (2016) が野外で採集したマイワシの耳石縁辺部の $\delta^{18}\text{O}$ と採集時の水温との間の関係を説明できるため、野外採集個体に対しても適用可能であると判断できた。

4.2 回遊経路の推定

開発したモデルは、回遊推定分布域を経度方向に5度~10度の範囲に絞り込むことができた。この手法の適用により、秋季の北海道東方沖で採集された幼魚の各標本個体に対して、採集場所に応じて経路が有意に異なることが分かった。この手法は、個体群ごとのマイワシの回遊経路を現実の経験水温をベースとして実証的に初めて推定するものであり、発生後約半年間の回遊経路を10日の時間解像度で推定することができる (Sakamoto et al., submitted)。現在、推定された各経路上の水温や動物プランクトン現存量等の環境因子のうち、各成長段階で成長速度に影響を与える可能性の高い環境因子の推定解析を実施しており、マイワシ加入量変動の要因特定に不可欠な生残過程の解明にブレークスルーをもたらすことが期待される。

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計8件)

Sakamoto T., Komatsu K., Yoneda M., Ishimura I., Higuchi T., Shirai K., Kamimura Y., Watanabe C., Kawabata A., Temperature dependence of 180 in otolith of juvenile Japanese sardine: Laboratory rearing experiment with micro-scale analysis. Fisheries Research, 査読有, 194, 2017, 55-59. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.fishres.2017.05.004

Komatsu K., Tanaka K., Swell-dominant surface waves observed by a moored buoy with a GPS wave sensor in Otsuchi Bay, a ria in Sanriku, Japan. J. Oceanogr. 査読有, 73, 2017, 87-101. doi: 10.1007/s10872-016-0362-4

Ishizu M., Itoh S., Tanaka K., Komatsu K., Influence of the Oyashio Current and Tsugaru Warm Current on the circulation and water properties of Otsuchi Bay, Japan. J. Oceanogr. 73, 査読有, 2017, 115-131. doi:10.1007/s10872-016-0383-z

Watanabe S., Hagihara S., Miller M.J., Machida M., Komatsu K., Nishida S. and Tsukamoto K., Collection of spawning-condition eels of *Ariosoma meeki* in the Kuroshio Current in the East China Sea. Journal of the Marine Biological Association of the UK, 査読有, 96, 2016, 1701-1707. doi: 10.1017/S002531541500209

Saito R., Yasuda I., Komatsu K., Ishiyama H., Ueno H., Onishi H., Setou T., Shimizu M., Subsurface hydrographic structures and the temporal variations of Aleutian eddies. Ocean Dynamics, 査読有, 66, 2016, 605-621. doi: 10.1007/s10236-016-0936-0

Tanaka K., Komatsu K., Itoh S., Yanagimoto D., Ishizu M., Hasumi H., Sakamoto T., Urakawa S., Michida Y., Baroclinic circulation and its high frequency variability in Otsuchi Bay on the Sanriku ria coast, Japan. J. Oceanogr. 査読有, 73, 2015, 25-38. doi: 10.1007/s10872-015-0338-9

Itoh S., Yasuda I., Saito H., Tsuda A., Komatsu K., Mixed layer depth and

chlorophyll a: Profiling float observations in the Kuroshio-Oyashio Extension region, J. Mar. Sys., 査読有, 151, 2015, 1-14. doi: 10.1016/j.jmarsys.2015.06.004

Abe Y., Yamada Y., Saito R., Matsuno K., Yamaguchi A., Komatsu K., Imai I., Short-term changes in abundance and population structure of dominant pelagic amphipod species in the Oyashio region during the spring phytoplankton bloom. Regional Studies in Marine Science. 査読有, 3, 2015, 154-162. doi:10.1016/j.rsma.2015.07.05

[学会発表](計14件)

Sakamoto T., Komatsu K., Shirai K., Higuchi T., Ishimura T., Setou T., Kamimura Y., Watanabe C., Kawabata A., A scheme to reproduce migration history of the Japanese sardine: combination use of otolith d180 and an individual-based migration model, JPGU Meeting 2018, May 2018, Chiba, Japan

Sakamoto T., Komatsu K., Shirai K., Kamimura Y., Watanabe C., Kawabata A., Yoneda M., Ishimura T., Higuchi T., Setou T., Shimizu M., Reproducing migration history of Japanese sardine using otolith 180 and a data assimilation model, 2018 Pacific Transitional Area Symposium (PICES), April 2018, La Paz, Mexico

Sakamoto T., Komatsu K., Shirai K., Kamimura Y., Watanabe C., Kawabata A., Yoneda M., Ishimura T., Higuchi T., Setou T., Shimizu M., Reproducing migration history of Japanese sardine using otolith 180 and a data assimilation model, 6th International Otolith Symposium in Taiwan 2018, March 2018, Keelung, Taiwan

坂本達也、小松幸生、高橋素光、樋口富彦、白井厚太郎、石村豊穂、カリフォルニアマイワシの仔稚魚期の回遊と水温-成長関係、水産海洋学会2017年度研究発表大会、2017年11月、広島県広島市

峯俊介、小松幸生、黒潮による黒潮続流域表層への水塊輸送について、水産海洋学会2017年度研究発表大会、2017年11月、広島県広島市

峯俊介、小松幸生、黒潮・黒潮続流域に

おける表層への栄養塩輸送量の見積もり
(I)、日本海洋学会 2017 年度秋季大会、
2017 年 9 月、宮城県仙台市

小松幸生、廣江豊、黒潮域における水平
拡散係数のスケール依存性、日本海洋学
会 2017 年度秋季大会、2017 年 9 月、宮
城県仙台市

Komatsu K., Hiroe Y., Yasuda I.,
Biogeochemical impacts of isopycnal
nitrate transport along the Kuroshio.
JPGU-AGU Joint Meeting 2017, May 2017,
Chiba, Japan

Sakamoto T., Komatsu K., Shirai K.,
Kamimura Y., Watanabe C., Kawabata A.,
Yoneda M., Ishimura T., Higuchi T.,
Setou T., Shimizu M., Reproducing
migration history of Japanese sardine
using otolith 180 and a data
assimilation model. JPGU-AGU Joint
Meeting 2017, May 2017, Chiba, Japan

Sakamoto T., Komatsu K., Shirai K.,
Kamimura Y., Watanabe C., Kawabata A.,
Yoneda M., Ishimura T., Higuchi T.,
Setou T., Shimizu M., Reproducing
migration history of Japanese sardine
using otolith 180 and a data
assimilation model. ICES/PICES
Symposium of "Drivers of dynamics of
small pelagic fish resources. March
2017, Victoria, BC, Canada

小松幸生、廣江豊、安田一郎、黒潮
Nutrient Stream: 源流から続流域の構
造・硝酸塩輸送・変動と生物生産へのイ
ンパクト、東京大学大気海洋研究所共同
利用研究集会「黒潮域における混合と栄
養塩供給・生物生産へ与える影響」、2017
年 1 月、千葉県柏市（招待講演）

小松幸生、廣江豊、黒潮域における水平
拡散係数の実態について、水産海洋学会
2016 年度研究発表大会、2016 年 11 月、
東京都港区

坂本達也、小松幸生、白井厚太郎、上村
泰洋、渡邊千夏子、川端淳、瀬藤聡、清
水学、耳石の酸素安定同位体比と海洋同
化モデルを用いたマイワシの回遊履歴推
定、日本海洋学会 2016 年度春季大会、
2016 年 3 月、東京都文京区

坂本達也、小松幸生、白井厚太郎、上村
泰洋、渡邊千夏子、川端淳、瀬藤聡、清
水学、耳石の酸素安定同位体比を用いた
マイワシの稚魚期経験水温推定、水産海
洋学会 2015 年度研究発表大会、2015 年

10 月、北海道釧路市

〔その他〕

ホームページ等

<http://lmr.aori.u-tokyo.ac.jp/feog/kosei/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小松 幸生 (KOMATSU, Kosei)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・
准教授
研究者番号：30371834

(2) 研究分担者

瀬藤 聡 (SETOU, Takashi)
国立研究開発法人水産研究・教育機構・中
央水産研究所・グループ長
研究者番号：10463100

白井 厚太郎 (SHIRAI, Kotaro)
東京大学・大気海洋研究所・助教
研究者番号：70463908

渡邊 千夏子 (WATANABE, Chikako)
国立研究開発法人水産研究・教育機構・中
央水産研究所・グループ長
研究者番号：30371818

(3) 研究協力者

坂本 達也 (SAKAMOTO, Tatsuya)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・
日本学術振興会特別研究員 (DC2)