

2012–2017年秋季の北日本近海における サンマ大型魚の可食部の粗脂肪含量と来遊量の経年変動

谷津明彦^{1†}・高橋清孝¹・渡邊一功¹・本田 修¹

Inter-annual variability in crude fat content in flesh of large-sized Pacific saury *Cololabis saira* and estimated biomass of Pacific saury in the waters off northern Japan in the falls of 2012–2017

Akihiko YATSU^{1†}, Kiyotaka TAKAHASHI¹, Kazuyoshi WATANABE¹ and Osamu HONDA¹

近年減少している北日本近海へのサンマ来遊量の経年変動機構検討のため、2012–2017年9–12月に北日本近海で漁獲されたサンマ大型魚（1歳魚）796個体の可食部の粗脂肪含量（以下、脂肪量）、肉体長、体重を測定した。漁獲日（各年1月1日からの経過日数）と脂肪量の関係は有意な負相関、体長と脂肪量の間には有意な正相関がみられた。脂肪量を応答変数とし、漁獲日、体長および漁獲年を説明変数とした重回帰分析の結果、切片、漁獲日、体長、年、漁獲日と年の交互作用から成るモデルがAICにより選択された。各年の切片（脂肪量を代表）は日本のサンマ漁獲量および標準化CPUEと有意な正相関を示した。その原因として、6–7月の資源量、道東沖の海況、1歳魚の割合などを検討し、8月の脂肪量の多寡が南下回遊の開始時期や経路に影響するという仮説を提唱した。また、北上期（5–8月）に脂肪が蓄積される海域についても検討した。

キーワード：サンマ、粗脂肪含量、重回帰分析、来遊量、経年変動

In order to examine mechanisms of inter-annual variability in age-aggregated biomass of Pacific saury *Cololabis saira* in the waters off northern Japan, which has been declining in recent years, we measured crude fat content in flesh (Fc), body (knob) length (Bl) and body weight of 796 individuals of large-sized (age-1) Pacific saury captured from the waters off northern Japan from September to December during 2012–2017. Statistically significant negative and positive correlations were detected between capture date (Cd, number of days elapsed from January 1st in each year) and Fc, and between Bl and Fc, respectively. The best multiple regression model in terms of AIC, with Fc as a response variable and Cd, Bl, and year as explanatory variables, indicated that effects of year-specific intercept, Cd, Bl and an interaction between Cd and year were statistically significant. Year-specific intercept, representing Fc level, indicated statistically significant positive correlations with Japanese annual catch and standardized CPUE of Pacific saury. The cause(s) of this phenomena were explored mainly by using survey-derived biomass in the high seas during June–July and age-1 fish ratio in estimated stock abundance, and oceanographic conditions off the southeastern coast of Hokkaido Island. As a result, we proposed a hypothesis that Fc level in August affects timing and location of the start of southward migration and subsequent migration routes of age-1 Pacific saury. We also discussed potential areas where fat is accumulated during the northward migration from May to August.

Key words: Pacific saury, crude fat content, multiple regression analysis, biomass, inter-annual variability

はじめに

サンマ *Cololabis saira* は北太平洋の広範囲に分布し、摂餌のために春季から夏季にかけて北上、産卵のために秋季に南下回遊を行うほか東西方向にも回遊する (Fig. 1; http://kokushi.fra.go.jp/H29/H29_75.pdf, 2018年10月2日)。サンマ資源は0歳魚と1歳魚で構成され、産卵は0歳魚の一部と1歳魚の全てにより秋季から春季にかけて北太平洋の亜熱

2018年4月3日受付、2019年1月21日受理

¹ 漁業情報サービスセンター、〒104-0055 東京都中央区豊海町4-5
Japan Fisheries Information Service Center, 4-5, Toyomi-cho, Chuo-ku,
Tokyo 104-0055, Japan

† yatsu@jafic.or.jp

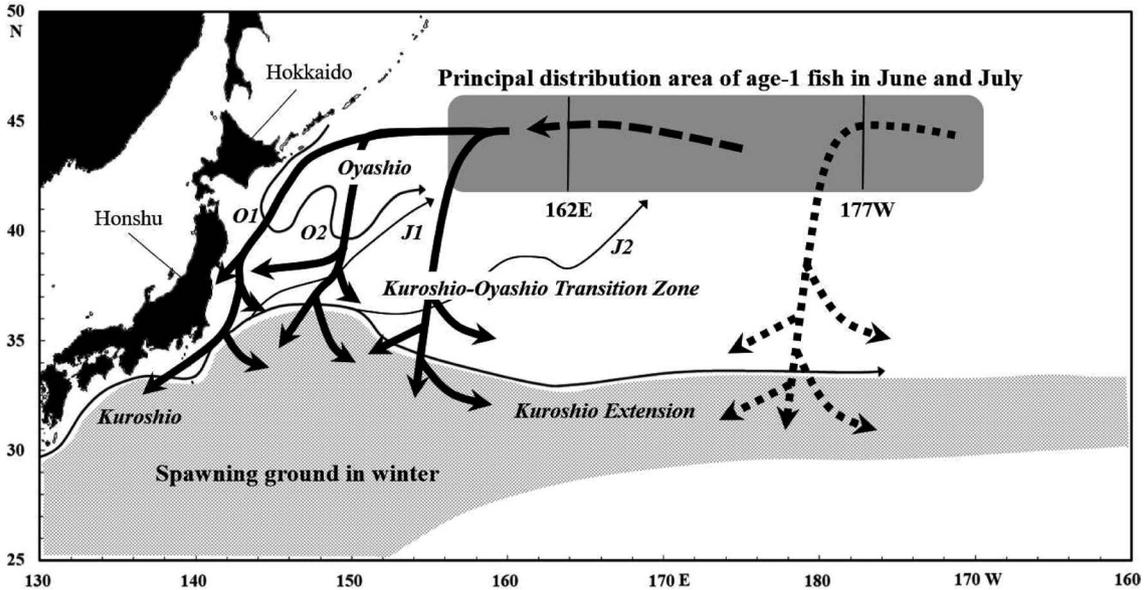


Figure 1. Schematic views of the Kuroshio–Oyashio Current system and southwestward spawning migration routes of age-1 Pacific saury from summer to winter based on available information (http://kokushi.fra.go.jp/H29/H29_75.pdf, 2 October 2018). The Oyashio first and second branches are indicated by *O1* and *O2*, respectively. Quasi-stationary jets transporting surface warm waters are indicated by *J1* and *J2* (Isoguchi et al., 2006). Heavily shaded area indicates approximate principal distribution area of age-1 Pacific saury during June–July, 2008–2017, based on pre-fishing-season surface-trawl surveys. Lightly shaded area represents primary spawning ground in winter. Thick arrows indicate principal migration routes: solid, broken and dotted arrows represent migration routes from ca. 155–162°E, 162°E–177°W, and ca. 168–177°W, respectively. Migration routes from 162°E–177°W presumably follow those from ca. 155–162°E with a lag of a few months. Those from 168–177°W are quite uncertain, but age-1 fish in this region are unlikely to migrate toward northern Japan.

帯域（黒潮・黒潮続流以南）と黒潮親潮移行域で広く行われ、特に冬季の亜熱帯域での産卵が多いと考えられている（Watanabe and Lo, 1989; 巢山ほか, 2016）。また、産卵量は亜熱帯域の中でも日本近海ほど多いと推定され、冬季（1–3月）における仔魚の分布密度は146°E以西で特に高い海域がみられ、黒潮と黒潮続流付近で生まれた卵や仔魚は、これら海流や黒潮親潮移行域における準定常流（Fig. 1の*J1*, *J2*）により主に東方向に移送される（小坂, 2000; Isoguchi et al., 2006; Iwahashi et al., 2006; Kurita, 2006）。そのため、サンマが分布域を維持するには、産卵回遊を主に南西方向に行い、可能な限り黒潮域までさかのぼることが必要である。このことは、漁獲物における大型魚（1歳魚）の割合が高いほど初期漁場が南西寄りに形成される傾向（Yasuda and Kitagawa, 1996）と整合している。

三陸沖から太平洋中央部におけるサンマの分布、年齢別資源量、体長組成などを把握するため、水産研究・教育機構東北区水産研究所は2003年から毎年6–7月に表層トロール調査（以下、漁期前調査という）を、1区（143–162°E）、2区（162°E–177°W）、3区（177–165°W）ごとに行ってきた（http://kokushi.fra.go.jp/H29/H29_75.pdf, 2018年10月2日）。その結果、本研究で対象とした2012–2017年における1歳

魚は主に42–46°N, 155°E–168°W付近に分布することが明らかとなった（Fig. 1の濃灰色部；http://kokushi.fra.go.jp/H29/H29_75.pdf, 2018年10月2日）。8月には、主群は西方向に移動して北日本近海に来遊し、9–12月に親潮第1分枝と第2分枝を中心に南下しつつ漁獲されるが、公海域を南下する群れもいると考えられている（http://kokushi.fra.go.jp/H29/H29_75.pdf, 2018年10月2日）。さらに、漁期前調査における1区に分布する群は2区の群より早期に北日本近海へ来遊するが、3区からは当年には日本近海に来遊しないと推測されている（http://kokushi.fra.go.jp/H29/H29_75.pdf, 2018年10月2日）。

サンマは春季から夏季に黒潮親潮移行域と親潮域においてオキアミ類とカイアシ類を多食し、獲得したエネルギーを主に脂肪として蓄え、南下回遊と成熟に使用する（Kurita, 2003; Sugisaki and Kurita, 2004; 大島, 2016）。そのため、サンマ可食部の粗脂肪含量（%；以下、脂肪量という）は初漁期である8月に最も高く、産卵盛期である冬季に向けて低下する（秦・田代, 1953; 土屋ほか, 1953; Kurita, 2003; 小山, 2012）。また、サンマの脂肪量は体長と正の相関関係があることは明らかにされているが、食用となる大型魚の脂肪量の経年変動は断片的にしか知られておらず、経年

変動の解析も行われていない(秦・田代, 1953; 土屋ほか, 1953; <https://www.hro.or.jp/list/fisheries/marine/o7u1kr0000067pk.html>, 2018年9月7日)。一方, 1970年代から2001年において大型魚の肥満度は日本の漁獲量と有意な正相関あるいは大型魚の漁獲尾数と類似した経年変動を示した(原, 1986; 渡野邊, 2002)。

日本のサンマ漁獲量, 日本のさんま棒受網漁業の標準化CPUE(以下, CPUEという)および漁期前調査により推定された資源量は2010年頃から減少し, 特に2017年の漁獲量は1970年以降最低, 2017年の資源量も2003年以降最低であった(http://kokushi.fra.go.jp/H29/H29_75.pdf, 2018年10月2日; http://www.samma.jp/tokei/catch_yoy/geppou29_12.pdf, 2018年9月7日)。また, 漁期前調査による1区の推定資源量も2010年から著しく減少し, 分布が155°E以東に限られる沖合化現象がみられている(<http://tnfri.fra.affrc.go.jp/press/h29/20170804/20170804sanmayohou.pdf>, 2017年8月28日)。このように, 日本の漁獲量の多寡は主に漁期前調査における1区と2区の資源量と来遊条件に左右される。これまで指摘されてきた来遊条件は, ①親潮第1・第2分枝や釧路沖暖水塊の位置などの海況, ②肥満度, ③年齢(体長)組成である(福島, 1958; 原, 1986; Yasuda and Kitagawa, 1996; 渡野邊, 2002; Kuroda and Yokouchi, 2017; <http://tnfri.fra.affrc.go.jp/press/h29/20170804/20170804sanmayohou.pdf>, 2017年8月28日)。

以上を踏まえ, 本研究は①2012–2017年秋季の北日本近海におけるサンマ大型魚の脂肪量について体長と漁獲日および漁獲年との関係を調べ, ②脂肪量と肥満度を栄養条件の指標として北日本近海への来遊量と栄養条件の経年変動の関係を検討することを主目的とした。また, 索餌北上期(5–8月)に脂肪が蓄積される海域と月を検討するため, 使用した試料の脂肪量の代表値の経年データと月別緯度経度1度目別の表面水温と基礎生産量の経年データ間の相関マップを作製し, 水温と摂餌に関する知見と合わせて考察した。

材料と方法

測定に供した試料は, 36–48°N, 141–154°Eでさんま棒受網漁船または定置網により2012–2017年9–12月に漁獲され, 女川魚市場に水揚げされたサンマである。1回の測定には大型魚を平均25個体, 合計796個体(肉体長29.0–34.4 cm, 体重95–215 g)を抽出した。なお, 肉体長は下顎先端から尾鰭肉質部末端までの長さである(以下, 体長という)。大型魚は漁期中の体長が29.0 cm以上と定義され, 1歳魚に相当する(http://kokushi.fra.go.jp/H29/H29_75.pdf, 2018年10月2日)。試料は漁獲後数日以内に水揚げされ, 漁獲後は水氷等によりほぼ一定温度に保たれていたと考えられる。脂肪量の測定はポータブル型近赤外分光分析装置(FQA-NIRGUN, シブヤ精機(株)製)を用いて行い, 測定部位(可

食部全体の平均値と相関が強い背側正中線上の中央部), 校正方法などは本装置のユーザーズ・マニュアルに従った。近赤外分光法は, 測定対象に近赤外線を照射し, 吸光度の変化により脂肪量を迅速に測定する方法である(矢口, 2016)。使用した波長は748, 808, 892, 924, 948 nm, 測定時間は200 msで, 検量線はシブヤ精機(株)から提供されたサンマ用のものを適用した。1個体に対する測定回数は測定部位内で位置を若干ずらしつつ原則的に3回とし, 外れ値があった場合は値が安定するまで測定を繰り返した。なお, 本装置による測定値は, 体表面から皮下5 mmまでの脂肪量を代表するとされており, 小型魚では測定誤差が大きいことが懸念されている(清川・井岡, 2007)。また, 肥満度に関する先行研究(原, 1986; 渡野邊, 2002)は大型魚のみを対象とした。そのため, 本研究では解析対象を大型魚に限ることとした。各個体の肥満度は $1000 \times \text{体重 (g)} / \text{体長 (cm)}^3$ として算出し, 各年の肥満度は原(1986)に従い当該年における大型魚全個体の平均値を用いた。

はじめに, 既往の報告(秦・田代, 1953; 土屋ほか, 1953)による体長と脂肪量の正相関および9月以降脂肪量が減少することを今回の試料で再確認した。なお, 相関係数は, 比較する2つのデータ間に直線関係が認められ, かつ両データとも正規分布とみなせる場合には, Pearsonの相関係数, それ以外の場合はSpearmanの順位相関係数を用いるとされているが(市原, 1990), 本研究では標本数が少なく($N=6$)正規性が不明な場合も遠藤(1992)に従いSpearmanの順位相関係数を用いた。なお, 正規性の検定には検出力の面からShapiro–Wilk検定が推奨されているため, これを用いた(Razali and Wah, 2011)。次に, その結果を踏まえて脂肪量の経年変動を明らかにするため, 体長と漁獲日(各年の1月1日からの経過日数)および漁獲年(カテゴリカル変数)を説明変数とする重回帰分析を行った。統計的分析にはフリーソフトウェアR(ver. 3.3.1)を用いた。Rによる交互作用を含む重回帰分析の定式化とAICによる変数選択は金(2017)に従った。交互作用を含む重回帰分析において多重共線性の問題を回避するため, 連続変数である体長と漁獲日について, あらかじめ各試料の観測値からそれぞれの全試料の平均値を差し引いて中心化した(前田, 2008)。また, 多重共線性の判断はVIF(variance inflation factor)により行った(大垣, 2010)。なお, カテゴリカル変数と連続変数を含むRによる重回帰分析においては, 初年(2012年)の係数が切片の値に相当するため, 各年の切片はTable 1の係数に2012年の切片を加算した値となる。

2012–2017年における公海域を除く日本のさんま棒受網漁船の操業位置は, 漁業情報サービスセンターによる漁船からの聞き取り調査から得た。漁獲量とCPUEは巢山ほか(2016), http://kokushi.fra.go.jp/H29/H29_75.pdf (2018年10月2日), http://www.samma.jp/tokei/catch_yoy/geppou29_12

Table 1. Parameters and their statistical evaluations of the best multiple regression model for crude fat content. Capture date and knob (body) length (continuous variable) were centralized (Cd2 and Bl2). Year is a categorical variable, and a colon indicates interaction between variables.

	Adjusted R ² =0.3715		AIC=4240.6	
	Estimate	Std. Error	t value	p
Intercept	20.548	0.345	59.502	0.0000 ***
Capture date (Cd2)	-0.134	0.012	-10.724	0.0000 ***
Knob length (Bl2)	0.393	0.141	2.787	0.0054 **
Year (2013)	-2.565	0.425	-6.034	0.0000 ***
Year (2014)	0.981	0.429	2.285	0.0226 *
Year (2015)	-2.667	0.583	-4.571	0.0000 ***
Year (2016)	-2.482	0.466	-5.326	0.0000 ***
Year (2017)	-3.547	0.504	-7.043	0.0000 ***
Cd2: year (2013)	0.104	0.020	5.138	0.0000 ***
Cd2: year (2014)	0.079	0.015	5.093	0.0000 ***
Cd2: year (2015)	0.094	0.025	3.696	0.0002 ***
Cd2: year (2016)	0.072	0.017	4.262	0.0000 ***
Cd2: year (2017)	0.131	0.019	6.821	0.0000 ***

Significance codes: ***<0.001, **<0.01, *<0.05

pdf (2018年9月7日) および <http://tnfri.fra.affrc.go.jp/press/h29/20170804/20170804sanmayohou.pdf> (2017年8月28日) から引用した。なお、CPUEは0歳魚と1歳魚を合わせたさんま棒受網の操業あたり漁獲量(トン)で、2017年の値は未公表である。漁期前調査による推定資源量(その年に北日本近海に來遊すると想定されるおおむね42–46°Nにおける1区と2区のもの、以下同様)および1歳魚の割合(1–3区の総資源尾数に対するもの)はhttp://kokushi.fra.go.jp/H29/H29_75.pdf (2018年10月2日) および東北水産研究所資源管理部浮魚・いか資源グループ(2018)から引用した。また、水深100mの水温5°Cを指標とする親潮南限(<http://abchan.fra.go.jp/gk29/20170728.pdf>, 2018年1月31日)と釧路沖暖水塊の位置は各年8–10月の中旬におけるFRA-ROMSの再解析値から読み取った(<http://fm.dc.affrc.go.jp/fra-roms/index.html>, 2018年3月8日)。8–9月のサンマ主漁場の南限を指標する表面水温18°C等温線は、気象庁が作成した過去30年の平均的水温分布図から読み取った(https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/data/db/kaikyoclim/norsst_wnp_mon.html, 2018年9月10日)。

サンマは夜間には表面付近に分布するが、8–9月の親潮域では昼間は水深10–15mに分布するため(栗田・杉崎, 2004), サンマの脂肪蓄積は北上期の表面水温と餌環境の影響を受けると考えられる(秦・田代, 1953; Ito et al., 2004, 2013)。そこで、特定の時期と場所の表面水温と餌環境が秋季のサンマの脂肪量に影響を及ぼしていると仮定し、以

下の解析を行った。すなわち、上記重回帰分析における最適モデルの切片(以下、切片という)の経年データと、これに対応する年における5–8月の北西太平洋の表面水温(°C)と純一次生産量(mg C·m⁻²·日⁻¹; 以下、基礎生産量という)の月別・緯度経度1度升目別データの順位相関係数をマップ化した。これらに使用した表面水温は気象庁のCOBE-SST (http://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/el_nino/cobesst_doc.html, 2018年1月22日), 基礎生産量はBehrenfeld and Falkowski (1997)の方法に基づき推定された結果をオレゴン州立大学が公開している月別Standard VGPM (<http://orca.science.oregonstate.edu/1080.by.2160.monthly.xyz.vgpm.m.chl.m.sst.php>, 2018年1月22日)から得た。

結果

脂肪量と漁獲日および体長との関係とそれらの経年変動

脂肪量、漁獲日、体長および肥満度データは正規分布に従うとはみなされなかったため(Shapiro–Wilk検定), 漁獲日に対する体長および脂肪量の関係を年別に、また全年を込みにした順位相関係数とその統計学的有意性をFig. 2に示した。相関はいずれも弱く、漁獲日と脂肪量の間には有意な負相関が認められたが、漁獲日と体長の相関は有意ではなかった。一方、体長と脂肪量の関係は年により異なるが、全年を込みにした場合には有意な弱い正相関が認められた(Fig. 3)。さらに、全年を込みにした肥満度と脂肪量の間には有意な強い正相関がみられた(Fig. 4)。

AICにより最適とされた重回帰モデルの推定パラメータとそれらの統計学的評価(Table 1)によると、切片、体長、漁獲日、年、年と漁獲日の交互作用がすべて $p < 0.05$ の水準で有意な説明変数として選択された。なお、体長と漁獲日の中心化により、この重回帰モデルにおける各年の切片の値は、サンマ全試料の体長と漁獲日の平均値における各年の脂肪量を表す。体長については正の偏回帰係数、漁獲日では負の偏回帰係数が推定され、Figs. 2, 3の傾向と整合していた。また、これら交互作用を含む説明変数には多重共線性の問題はないと判断された(VIF<10)。漁獲日と年の交互作用が認められたことから、9月から12月にかけての脂肪量の減少率は年により異なると解釈される。モデルの適切性について、残差のQ–Qプロットと外れ値の影響をCook distance(金, 2017)により検討したところ、特に問題は認められなかった。

各年の切片、肥満度、漁獲量およびCPUEは相互に類似した経年変動を示した(Fig. 5)。これらの中で、①切片と漁獲量およびCPUEとの間、②肥満度と漁獲量との間に有意な強い正相関がみられた(Fig. 6)。

漁期前資源量、道東・三陸海域への來遊および漁場形成

漁期前調査による推定資源量は2012–2014年において比較的安定していたが、2015年以降減少し、特に2017年は前年の半分以下となった(Fig. 5)。また、漁期前調査における

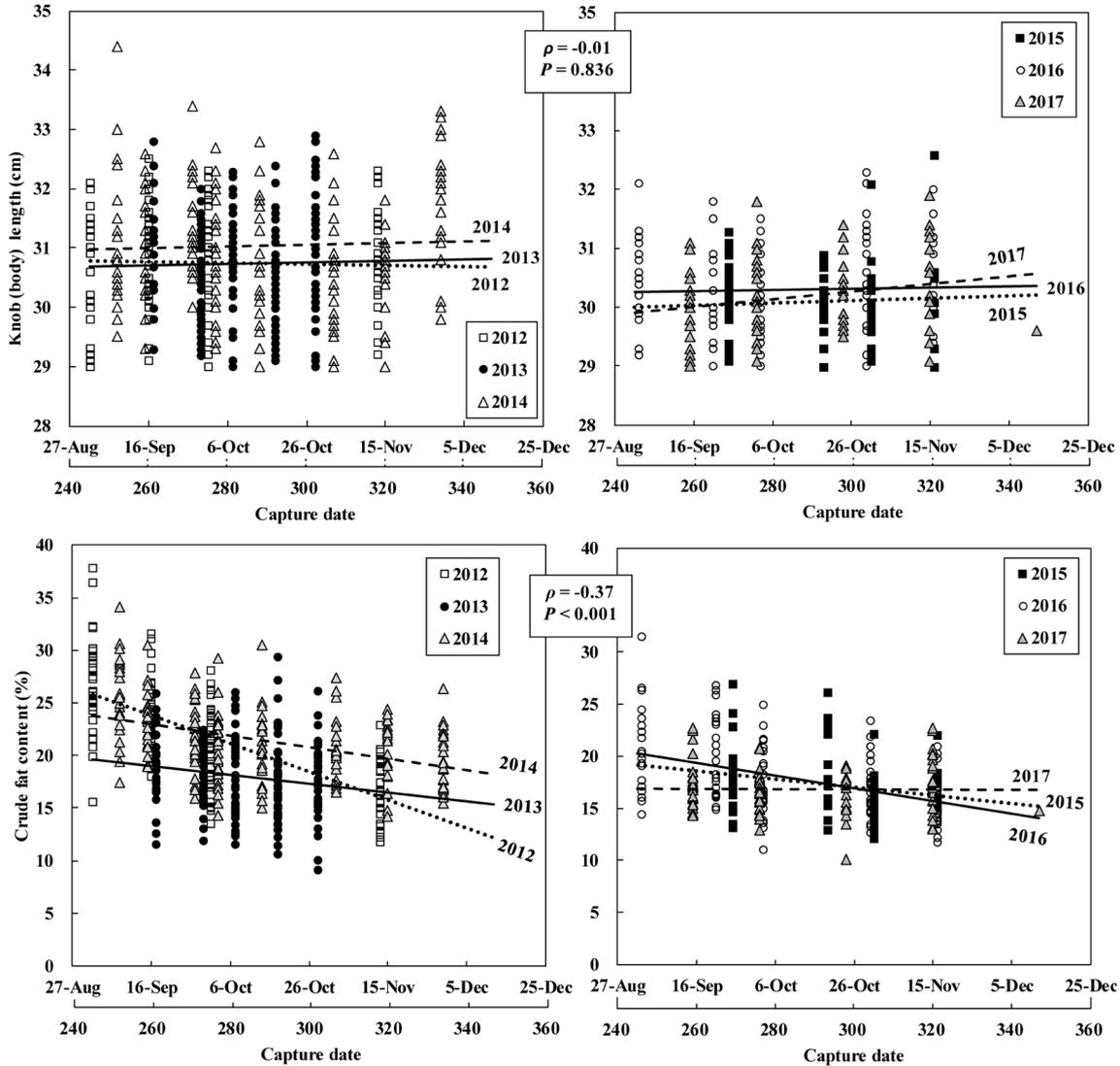


Figure 2. Relationships between capture date and knob (body) length (top panels) and crude fat content (bottom panels) during 2012–2017. Each year is represented by a combination of a specific symbol and a regression line. Spearman’s rank correlation coefficient and its statistical significance are shown for the pooled data of 2012–2017.

1歳魚の割合は2013年が70%と最高であり、その後徐々に減少し、2017年は26%であった (Fig. 5)。漁期前調査による推定資源量と漁獲量との間には有意な強い正相関がみられたが、CPUEとの間の相関は有意ではなかった (Fig. 6)。また、漁期前調査における1歳魚の割合と漁獲量およびCPUE間の順位相関係数は、それぞれ0.30および0.06で、有意ではなかった ($p > 0.05$, 図は省略)。

漁期前調査における推定資源量が近年では高水準で安定していた2012–2014年において、2012年と2014年は漁期前調査における1歳魚の割合は比較的lowであったが、切片、肥満度、漁獲量およびCPUEが高水準であり (Fig. 5)、2013年よりも漁場の西進・南下が早かった (Fig. 7)。一方、2013年

の1歳魚の割合は2012–2017年において最高であったが、切片、肥満度、漁獲量およびCPUEは低水準であった (Fig. 5)。また、2013年は親潮第1分枝が2014年並みに発達しており、釧路沖暖水塊もサンマの西進を妨げるほど道東に接岸していなかったものの、漁場の西進は遅れ、主群は親潮第2分枝に沿って南下した (Fig. 7)。

一方、漁期前調査における資源量や1歳魚の割合が少なかった2015–2017年は、漁獲量、CPUE、切片、肥満度のいずれも低水準であり (Fig. 5)、8–9月における漁場の西進が遅く、2015年と2016年は釧路沖暖水塊が道東に接岸傾向にあったことも加わって、親潮第2分枝に沿って主群が南下した (Fig. 7)。特に不漁であった2017年は、2010

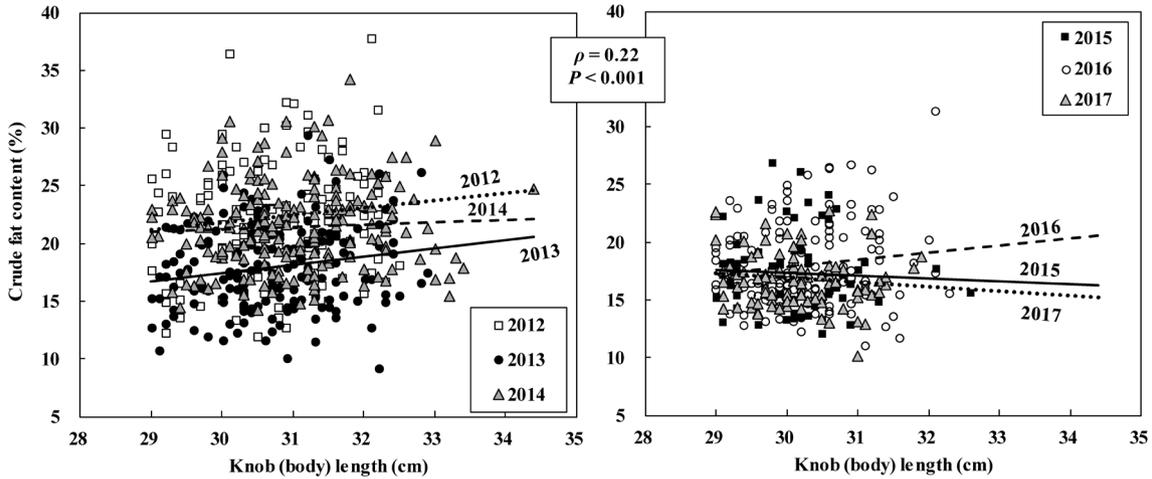


Figure 3. Relationships between knob (body) length and crude fat content during 2012–2017. For other legends, see Fig. 2.

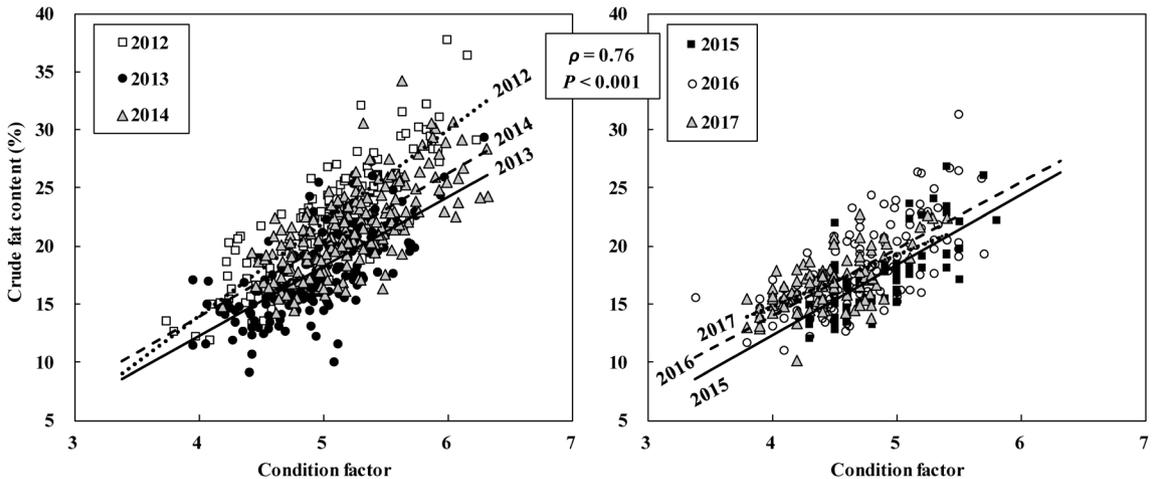


Figure 4. Relationships between condition factor and crude fat content during 2012–2017. For other legends, see Fig. 2.

年から継続的に存在していた釧路沖暖水塊が夏季に消滅し (Fig. 7), 漁期前調査による1区の推定資源量 (大部分が1歳魚) も前年の9.6万トンから23.4万トンへと増加したこと (Fig. 5; 東北区水産研究所資源管理部浮魚・いか資源グループ, 2018; http://kokushi.fra.go.jp/H29/H29_75.pdf, 2018年10月2日), 初漁期の道東海域への来遊は比較的良好と思われた (Kuroda and Yokouchi, 2017; <http://abchan.fra.go.jp/gk29/20170728.pdf>, 2018年1月31日). しかし, 実際には8–9月の漁場の西進が遅く, 主漁場は千島列島南部から北方四島の南側にかけてと親潮第2分枝に沿って形成された (Fig. 7).

相関マップ

脂肪量に関する2012–2017年の切片 (Table 1) と同期間の5–8月の北西太平洋における緯度経度1度昇目別表面水温

および基礎生産量の経年変動の相関マップを Fig. 8 に示した. なお, この図において6–7月の黒枠は Fig. 1 に示した主群の分布域, 8月の太い曲線は Fig. 7 から推定した8月のおおよその漁場位置であり, 5月における主群の分布域は, 6–7月の黒枠よりやや南側にあると考えられる. 5月の切片との相関マップにおけるこの海域では表面水温, 基礎生産量とも160°E 以東で正相関を示す昇目が多くみられた. 6–7月における主分布域では切片と水温の関係が正相関を示す昇目が多かったが, 切片と基礎生産量の相関マップでは6月は160°E 付近以東で正相関を示す昇目がやや多くみられたのに対し, 7月では主分布域の大部分で負相関を示した. 日本のサンマ棒受網漁業の初漁期である8月は, 漁場域および43°N 以北かつ163°E 以東の亜寒帯域において, 切片と表面水温および切片と基礎生産量の間で正相関を示

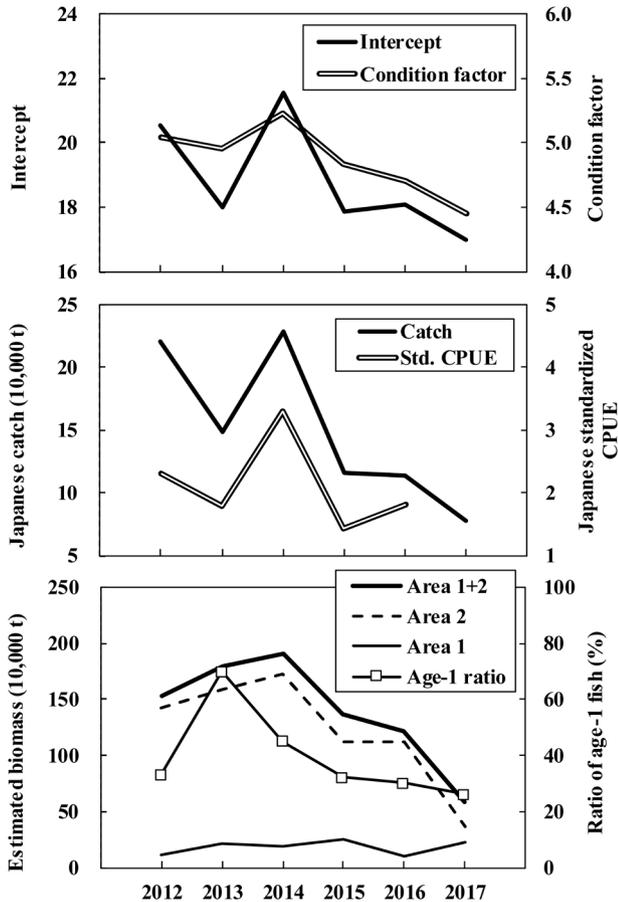


Figure 5. Year-to-year variability in the intercept of the best multiple regression model and annual mean of condition factor of age-1 Pacific saury (top panel), Japanese catch and standardized CPUE (ton per fishing operation) of Japanese stick-held dip net fishery (middle panel), and biomass by survey area and ratio of age-1 fish (% in stock numbers in Areas 1–3) estimated from pre-fishing-season surface-trawl surveys by the Tohoku National Fisheries Research Institute, Japan Fisheries Research and Education Agency in June and July (bottom panel) during 2012–2017. Standardized CPUE is unavailable for 2017.

す升目が多かった。

考 察

栄養状態などの来遊条件と資源量の経年変動

各年の切片と肥満度は漁獲量およびCPUEと強い正相関を示し (Fig. 6), 1970年代から2001年において大型魚の肥満度が漁獲量と正相関するという知見 (原, 1986; 渡野邊, 2002) と整合していた。従って, 来遊条件として肥満度や脂肪量に代表される栄養状態も重要であることが示唆された。また, 産卵や南下回遊に必要なエネルギーの大部分は索餌期に蓄積された脂肪が使用されること (Kurita, 2003;

大島, 2016) から, 来遊条件としては, 筋肉量や消化管内容物重量など複数の要因が関与する肥満度よりも, 上記特性を有する脂肪量がより直接的に寄与している可能性が高い。しかし, 肥満度と脂肪量は強い正相関を示したこと (Fig. 4) から, 特別な測定器を必要としない肥満度を来遊条件として用いることは実際的である。なお, サンマの Gompertz 成長式における極限体長は 30.6 cm であり (巢山ほか, 2016), 漁期中の 1 歳魚の最小体長 (29.0 cm) からほとんど増加しないため, 体長は 1 歳魚の栄養状態にはあまり影響しないと考えられる。

Yasuda and Kitagawa (1996) は漁獲物における大型魚 (1 歳魚) の割合が高いほど初期漁場が南西寄りに形成される傾向を指摘し, 大型魚が先行して西進・南下するという仮説を提示した。Yasuda and Kitagawa (1996) は, 大型魚が先行して回遊する理由を論じていないが, 1 歳魚がすべて成熟するのにに対し 0 歳魚は一部しか成熟しないこと (http://kokushi.fra.go.jp/H29/H29_75.pdf, 2018 年 10 月 2 日) が一因と考えられる。すなわち, サンマが分布域を維持するには, 黒潮付近において産卵する必要があるため, 成熟する個体の多くは南西方向に産卵回遊すると考えられる。しかし, 今回使用した 1 歳魚の割合は漁期前調査における 1–3 区の合計推定資源尾数に基づく値であり, 北日本近海に早く来遊するとされる 1 区における 1 歳魚の割合は公表されていない。また, 漁場の西進要因は 1 歳魚の割合だけでなく, 上記のように海況や栄養状態も関係するため, 本研究では Yasuda and Kitagawa (1996) の仮説を検証することはできなかった。しかし, 成熟率の年齢差と上記産卵回遊を考えると, この仮説は生物学的には妥当と思われる。今後, 漁期前調査の 1 区と漁場における 1 歳魚の割合の関係などを検討し, 資源量が減少した近年において, この仮説を検証する必要がある。

Kuroda and Yokouchi (2017) は, 1993–2014 年 8–9 月の道東沖周辺におけるサンマの漁場水温の高温化, 親潮流量の減少, 海面高度の増加, 時計回りの渦 (暖水塊) の増加, クロロフィル量の減少などからみて, 1990 年代から 10 年規模変動を伴いながら漁場環境が悪化傾向にあることを示した。このような状況は, 近年の漁期前調査による推定資源量と日本の漁獲量および CPUE の減少傾向と整合している。

漁期前調査による推定資源量が漁獲量とは正相関を示しながら, CPUE とは有意な相関関係を示さなかった原因として, 前述の来遊条件の他に次の 2 点が考えられる。第一は, 長期的には漁獲量と CPUE の間に類似した経年変動がみられたため (<http://tnfri.fra.affrc.go.jp/press/h29/20170804/20170804sanmayohou.pdf>, 2017 年 8 月 28 日), 今回使用した CPUE のデータ数が少なかった可能性である。第二に, 近年では 5 月から年末まで外国船による公海域でのサンマ漁獲量が増加していることから (<http://kokushi.fra.go.jp/H29/>

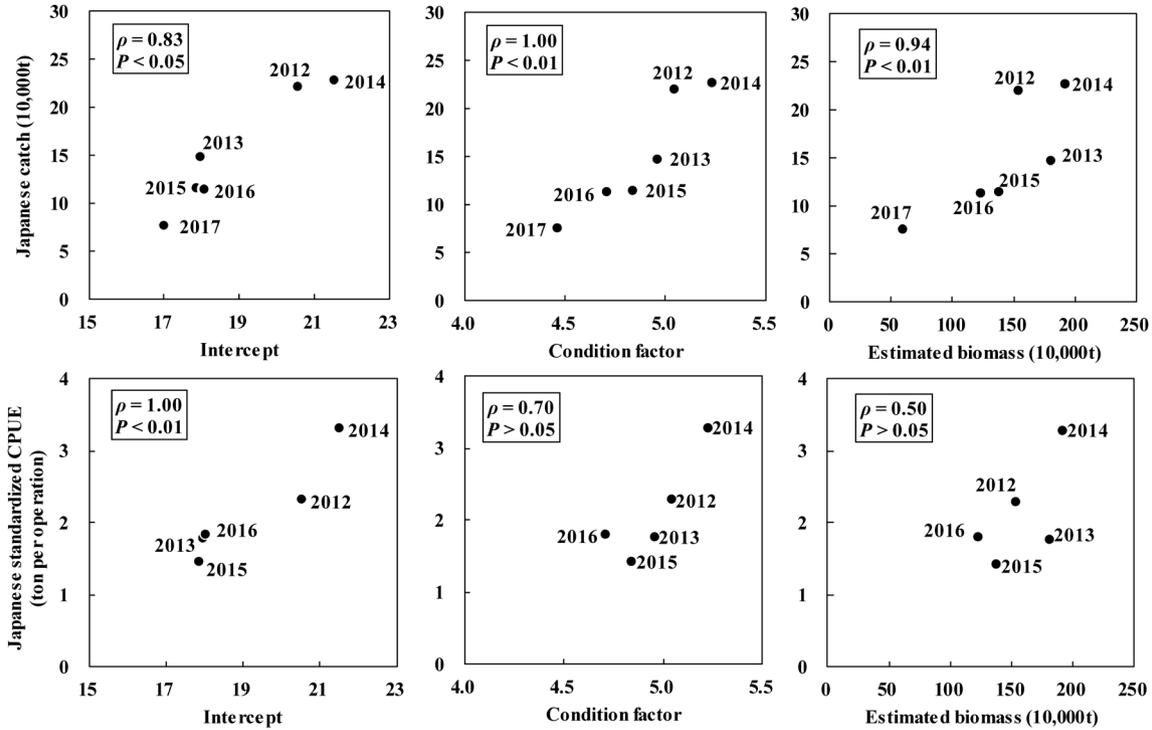


Figure 6. Japanese annual catch of Pacific saury (top) and standardized CPUE of Japanese stick-held dip net fishery (bottom) in relation to the intercept of the best multiple regression model, annual mean of condition factor, and age-aggregated biomass in the pre-fishing season in Areas 1 and 2, from where Pacific saury migrate to waters around northern Japan (see Fig. 1), during 2012–2017. Spearman’s rank correlation coefficient and its statistical significance are shown for each panel.

H29_75.pdf, 2018年10月2日), 外国船による先獲りが影響した可能性である。そのため、外国船の漁獲状況を含む最新のデータに基づき、速やかに資源状態を再評価する必要があるとされている (<http://tnfri.fra.affrc.go.jp/press/h29/20170804/20170804sanmayohou.pdf>, 2017年8月28日)。

脂肪が蓄積・消費される時期と海域

秋季に三陸沖を南下するサンマでは生殖腺に変化がみられず(秦・田代, 1953), 肥満度, 生殖腺重量および6–10月の親潮域の動物プランクトン量の経年変動の間には明らかな関係は認められていない(原, 1986)。脂肪量の8月から12月にかけての減少は, 脂肪が南下回遊のためのエネルギーとして消費され, 産卵場に近づくにつれ生殖腺の発達に使用されるためと考えられている(Kurita, 2003)。肥満度と親潮域の動物プランクトン量に関係がみられなかった理由として, 以下の2点が考えられる。第一に, 8月以降に北日本近海に來遊するサンマは, 漁期前(6–7月)に主群が分布する親潮域より東方の155°E–170°W付近から西進して來ること(Fig. 1; http://kokushi.fra.go.jp/H29/H29_75.pdf, 2018年10月2日), 第二にサンマの索餌は主に薄暮時(日没から2時間まで)に行われるため(Sugisaki and Kurita, 2004), 薄暮時に海表面付近に分布する動物プランクトン量が適切に評価されなかったことである。

各年の脂肪量を代表する重回帰分析の切片は, 8月の親潮域とその沖合の亜寒帯域の基礎生産量と正相関を示した(Fig. 8)。基礎生産量を餌生物現存量とみなすことはできないが, これらの海域において摂餌するサンマは低水温により基礎代謝量が抑えられ, 脂肪蓄積が促進される可能性がある。一方, Sugisaki and Kurita (2004) はサンマの消化管充満度とサンマの生息水深付近における餌生物の現存量にもとづき, サンマの最も重要な摂餌海域として7–9月の親潮域, 次いで4–7月の黒潮親潮移行域を指摘している。また, 栗田・杉崎(2004) は体長30 cmに標準化した季節別・海域別のサンマの日間摂餌量を推定し, 夏季の親潮域(10.60 g), 春季の移行域(7.99 g), 夏季の移行域(7.35 g)の順に高いことを報告した。実際, 春季と夏季の多い摂餌量により, この時期のサンマの肥満度が非常に高く, 体長28–32 cmの個体が蓄積した脂肪量は7月には平均37.6 gに達した(栗田・上野, 2003)。これらと本研究の結果を考え合わせると, 漁期直前の親潮域での摂餌が漁期中の脂肪量に強い影響を及ぼしている可能性が高い。今後, サンマの栄養状態と環境条件の関係を詳しく解析するには, 春季から夏季のサンマ脂肪量や肥満度と環境中の基礎生産量や餌生物現存量の時系列データを蓄積することが望まれる。

切片と表面水温の間には5–8月におけるサンマ主群の分

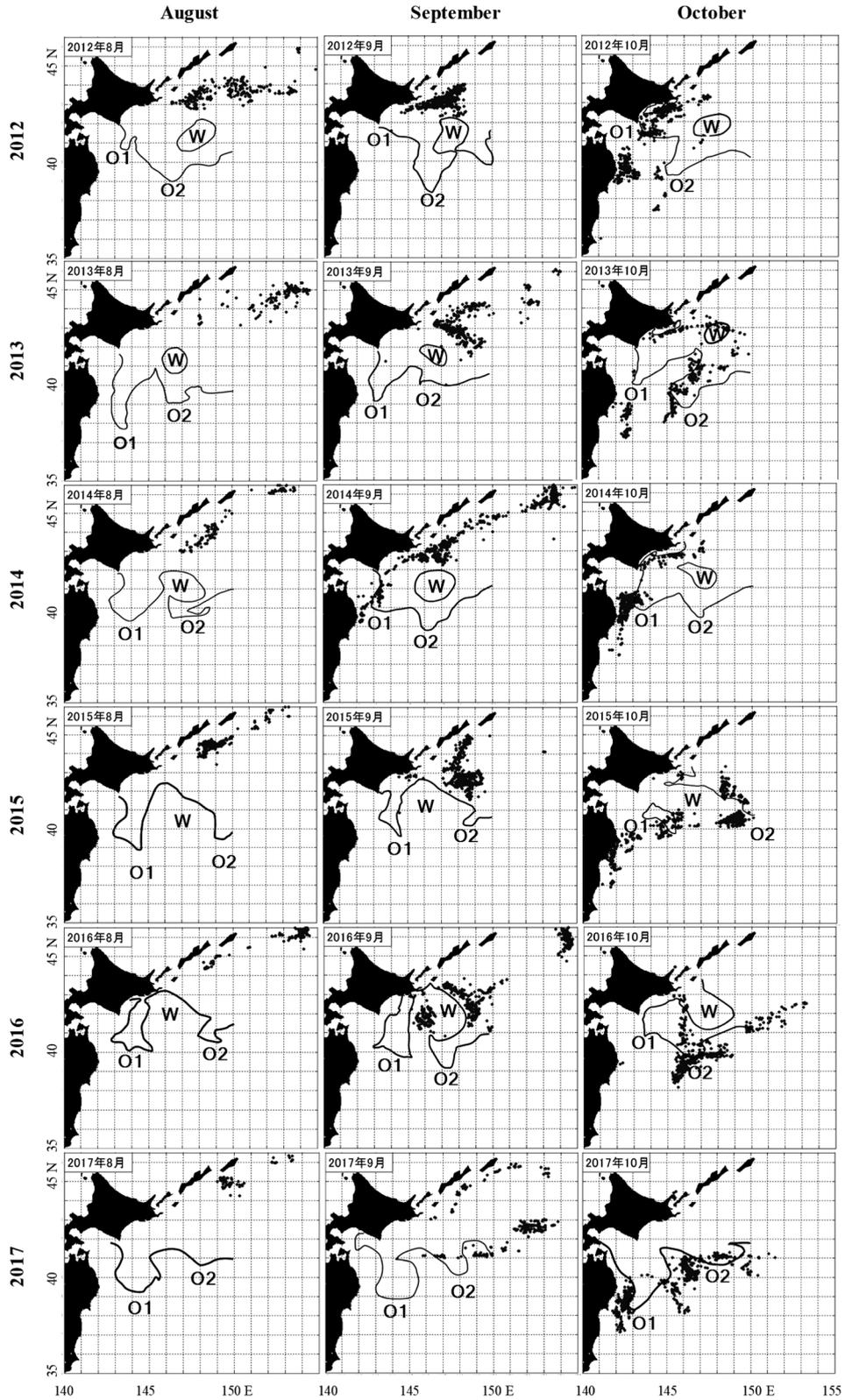


Figure 7. Year-to-year variability in locations of Japanese stick-held dip net saury fishing operations (black dots) in August, September and October, with 5°C isotherm at a depth of 100 m in the middle of each month during 2012–2017. The 5°C isotherm represent the Oyashio southern limit, i.e., the Oyashio first and second branches (*O1* and *O2*), and a warm core ring (*W*).

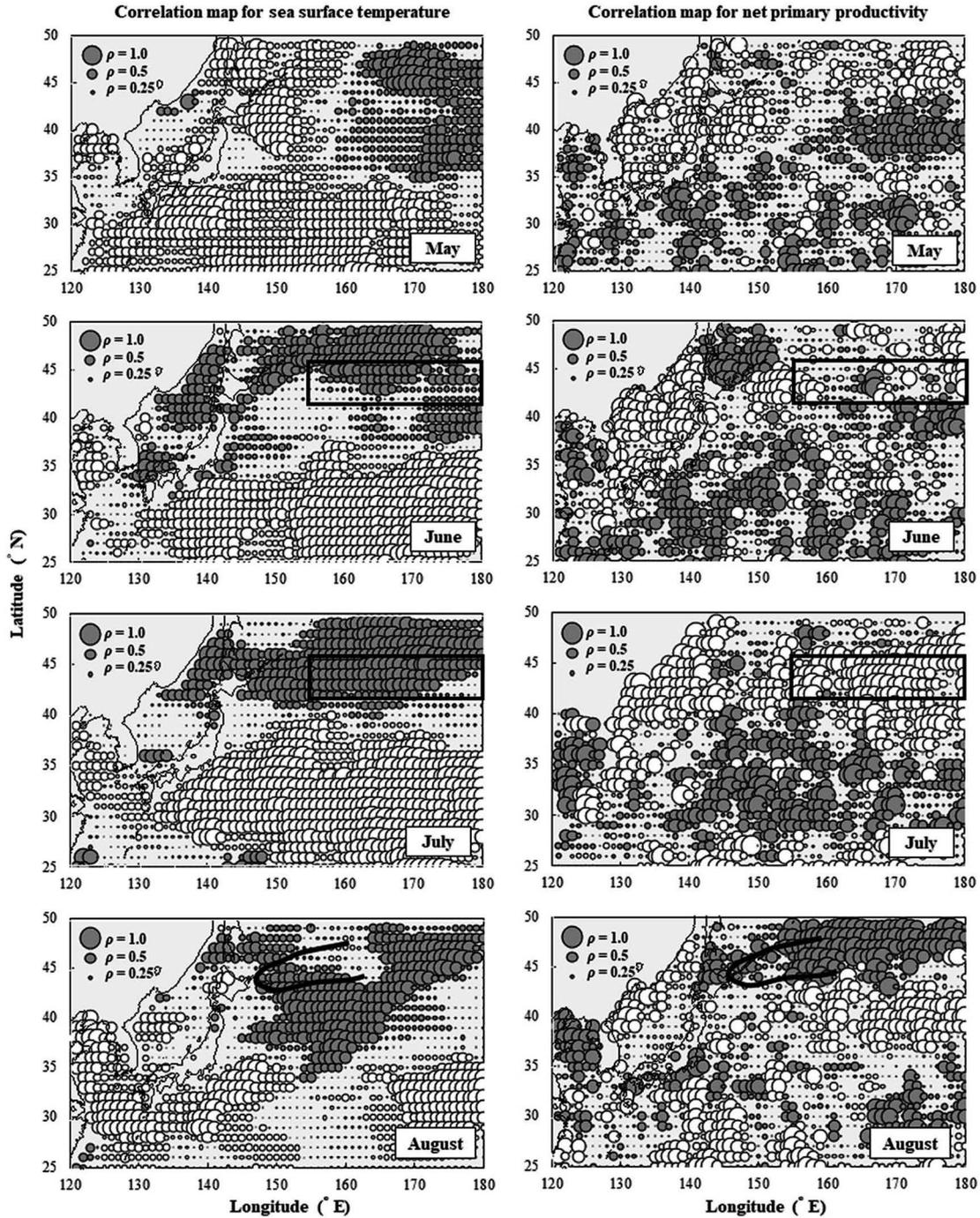


Figure 8. Correlation maps between the intercept of the best multiple regression model and mean monthly sea surface temperature ($^{\circ}\text{C}$) and net primary productivity ($\text{mg C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$) for each 1-degree-block (latitude and longitude) during May–August, 2012–2017. Grey and white circles indicate positive and negative correlations, respectively. Circle size is proportional to Spearman's rank correlation coefficient (see legends at top-left corner of each map). The boxes indicate principal distribution areas of saury during June and July (see Fig. 1). The bold curve in August represents an approximate area of fishing ground adopted from Fig. 7 (left panels).

布域の大部分で正相関がみられた (Fig. 8). この原因として、第一に、サンマは6–8月には主に表面水温 $10\text{--}18^{\circ}\text{C}$ に分布するため、親潮域内でも餌生物が最も多い春季には表

面水温が低くサンマが生息できないが (栗田・杉崎, 2004; Watanabe et al., 2006; 栗山ほか, 2016), 表面水温が高い年ほど親潮域に早く移動し、豊富な餌生物を利用できる可能

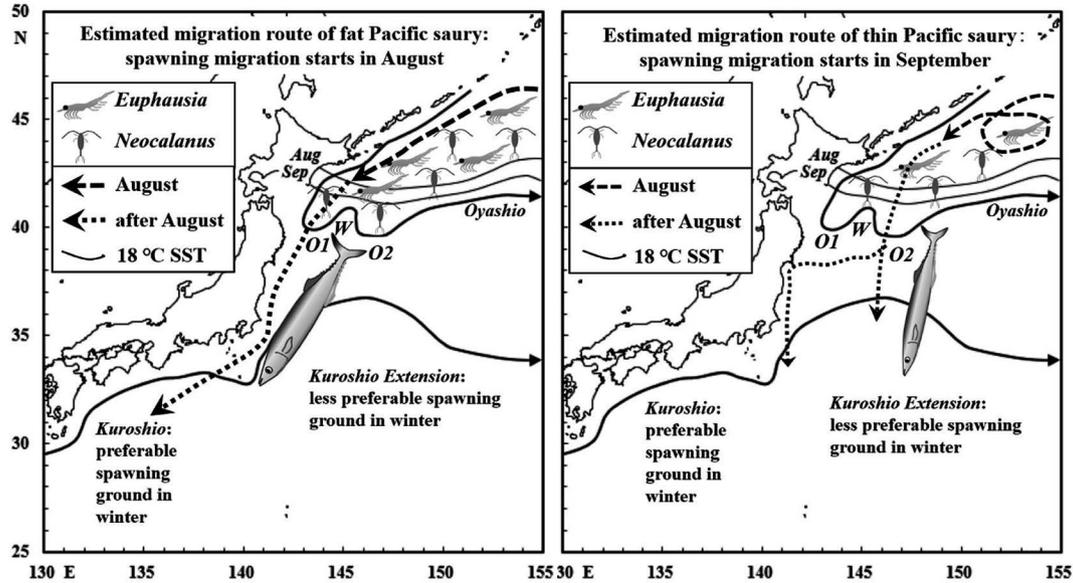


Figure 9. Schematic panels showing estimated migration routes of age-1 Pacific saury in August (broken arrow) and September onward (dotted arrow). The migration routes are estimated separately for fat (left) and thin (right) individuals. No warm core ring (*W*) is supposed to present near the southeastern coastal area off Hokkaido Island. Thin curves east of Hokkaido Island represent locations of the 30-yr mean 18°C sea surface isotherms in August and September, the approximate upper thermal limit for Pacific saury in these months. Schematic abundance of *Euphausia pacifica* and *Neocalanus* spp., the major prey in the Oyashio area is also shown. For other legends, see Fig. 1.

性がある。第二にサンマの飼育実験により、20°Cにおける飽食状態で天然個体と同等の成長が生後約半年まで得られたことなどから、サンマ成魚の摂餌活動は20°Cまでは高水温ほど活発になる可能性があること (Ito et al., 2004; 森岡, 2007; Nakaya et al., 2010; Suyama et al., 2016) が考えられる。しかし、飼育実験により高水温ほどサンマの代謝が大きいたことが示唆されているものの (森岡, 2007), サンマの体成長率に対する摂餌率と代謝と生息水温の関係の詳細が明らかではないことなどから、現状では切片と表面水温が各月で正相関を示した理由は断定できない。

来遊のメカニズムと仮説

北日本近海への来遊量は漁期直前の資源量と来遊条件により決定される。本研究と既往の知見に基づき、この来遊条件には海況や漁場における1歳魚の割合に加え、脂肪量や肥満度に代表される栄養状態も関与するという仮説を提唱する。すなわち、8月に栄養状態が良い個体は、わが国南岸を流れる黒潮周辺で産卵するために早期に西方向に回遊し、道東沖のサンマ漁場の大部分は表面水温10–18°C (モード15°C) に形成される (木村ほか, 2004; Watanabe et al., 2006)。そのため、各年の18°C等温線の位置にもよるが、8月は高水温に阻まれて親潮域に留まる年が多く、釧路沖暖水塊にさえぎられない限り、9月以降は親潮第1分枝に沿って道東から三陸に来遊する (Figs. 1, 7, 9)。また、8月に栄養状態が良い個体が親潮第2分枝を南下して黒潮域に

到達する可能性については、釧路沖暖水塊が道東に接岸している場合は高いが、そうでない場合は8月に既に北方四島付近にまで西進しているため低いと考えられる。一方、8月に栄養状態が悪い個体は、産卵と回遊に必要なエネルギー蓄積のため8月も遙か沖合の亜寒帯域や親潮域に留る。9月以降は産卵場の一部である黒潮続流域に近い回遊経路である親潮第2分枝に沿って南下するため、道東や三陸北部にはほとんど来遊しない (Figs. 7, 9)。なお、8月に栄養状態が悪かった個体の一部が10月に三陸南部へ来遊する年もある。今回提唱した仮説の妥当性を検証するためには、漁期直前の資源状態の再評価とともに、脂肪量や肥満度に代表される栄養状態に関するデータの蓄積が必要である。これらにより、サンマ漁況予報の精度向上が期待できる。

謝辞

サンマの測定に便宜を図っていただいた女川魚市場関係者各位、FRA-ROMSの再解析値の使用を許可いただいた水産研究・教育機構中央水産研究所海洋・生態系研究センターのモニタリンググループ、同東北水産研究所資源管理部浮魚・いか資源グループ (2018; 原稿作成時には印刷中) の引用を許可していただいた同部長の岩崎俊秀博士、釧路沖暖水塊の情報提供をいただいた同北海道水産研究所の黒田 寛博士、統計学に関する助言を頂いた同中央水

産研究所の岡村 寛博士, サンマに関する文献をご教示いただいた同中央水産研究所の上野康弘博士と同東北水産研究所の巢山 哲博士, COBE-SSTの分析に関してご協力を頂いた漁業情報サービスセンターの謝 旭暉博士, 並びに初期の原稿に対して貴重なご意見をいただいた匿名の校閲者と担当編集委員各位に謝意を表す。本研究の予算の一部は, 水産庁補助事業「人工衛星・漁船活用型漁場形成情報等収集分析事業」を利用した。

引用文献

- Behrenfeld, M.J. and P.G. Falkowski (1997) Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnol. Oceanogr.*, **42**, 1–20.
- 遠藤和男 (1992) 医学における統計学の応用について 第3編 相関・回帰分析を中心として. *新潟医誌*, **106**, 851–857.
- 福島信一 (1958) 東北海区に於けるサンマ漁況と海況との関係に就いて. *東北水研報*, **12**, 1–27.
- 原 素之 (1986) 南下期サンマにおける肥満度の経年変化と漁獲量の関係. *東北水研報*, **48**, 1–12.
- 秦 満夫・田代昌男 (1953) サンマの生化学的研究-II. 水分及び粗脂肪含量. *日水誌*, **19**, 518–524.
- 市原清志 (1990) 「バイオサイエンスの統計学—正しく活用するための実践理論」. 南江堂, 東京, 378 pp.
- Isoguchi, O., H. Kawamura and E. Oka (2006) Quasi-stationary jets transporting surface warm waters across the transition zone between the subtropical and the subarctic gyres in the North Pacific. *J. Geophys. Res.*, **111**, C10003. doi:10.1029/2005JC003402.
- Ito, S., M. J. Kishi, Y. Kurita, Y. Oozeki, Y. Yamanaka, B. A. Megrey and F. E. Werner (2004) Initial design for a fish bioenergetics model of Pacific saury coupled to a lower trophic ecosystem model. *Fish. Oceanogr.*, **13** (Suppl. 1), 111–124.
- Ito, S., T. Okunishi, M. J. Kishi and M. Wang (2013) Modelling ecological responses of Pacific saury (*Cololabis saira*) to future climate change and its uncertainty. *ICES J. Mar. Sci.*, **70**, 980–990.
- Iwahashi, M., Y. Isoda, S. Ito, Y. Oozeki and S. Suyama (2006) Estimation of seasonal spawning ground locations and ambient sea surface temperatures for eggs and larvae of Pacific saury (*Cololabis saira*) in the western North Pacific. *Fish. Oceanogr.*, **15**, 125–138.
- 木村典嗣・岡田善裕・K. Mahapatra (2004) 本州東方海域におけるサンマ漁場と衛星データから得られる海況との関係. *東海大学紀要海洋学部*, **2** (2), 1–12.
- 金 明哲 (2017) 「Rによるデータサイエンス (第2版)」. 森北出版, 東京, 336 pp.
- 清川智之・井岡 久 (2007) ポータブル型近赤外分光分析装置によるマジ, アカムツ脂質含有量の非破壊測定とその活用事例. *島根水技七研報*, **1**, 11–17.
- 小坂 淳 (2000) 北西太平洋におけるサンマの生活史とそれにもとづく資源変動の考察. *東北水研報*, **63**, 1–95.
- 小山智之 (2012) 銚子漁港に水揚げされる多獲性魚類の脂肪量. *漁海況旬報ちば*, **24** (17), 1–2.
- Kurita, Y. (2003) Energetics of reproduction and spawning migration for Pacific saury (*Cololabis saira*). *Fish. Physiol. Biochem.*, **28**, 271–272.
- Kurita, Y. (2006) Regional and interannual variations in spawning activity of Pacific saury *Cololabis saira* during northward migration in spring in the north-western Pacific. *J. Fish. Biol.*, **69**, 846–859.
- 栗田 豊・杉崎宏哉 (2004) サンマ日間摂餌量の季節および体長による変化. *水産海洋研究*, **68**, 133–141.
- 栗田 豊・上野康弘 (2003) サンマの摂餌時期・量と産卵の関係. 第51回サンマ資源研究会議報告, 239–240.
- Kuroda, H. and K. Yokouchi (2017) Interdecadal decrease in potential fishing areas for Pacific saury off the southeastern coast of Hokkaido, Japan. *Fish. Oceanogr.*, **26**, 439–454.
- 前田和寛 (2008) 重回帰分析の応用的手法—交互作用項ならびに統制変数を含む分析—. *比治山大学短期大学部紀要*, **43**, 69–73.
- 森岡泰三 (2007) 飼育による資源生物学的パラメータの推定. 平成18年度資源動向要因分析調査報告書, 水産庁増殖推進部漁場資源課・水産総合研究センター, 24–25.
- Nakaya M, T. Morioka, K. Fukunaga, N. Murakami, T. Ichikawa, S. Sekiya and S. Suyama (2010) Growth and maturation of Pacific saury *Cololabis saira* under laboratory conditions. *Fish. Sci.*, **76**, 45–53.
- 大垣俊一 (2010) 重回帰と偏相関, その後. *Argonauta* (関西海洋生物談話会連絡誌), **18**, 17–30.
- 大島敏明 (2016) 脂質. 「水産海洋ハンドブック (第3版)」竹内俊郎ほか (編), 生物研究社, 東京, 422–429.
- Razali, N.R. and Y. B. Wah (2011) Power comparisons of Shapiro–Wilk, Kolmogorov–Smirnov, Lilliefors and Anderson–Darling tests. *J. Statistical Model. Anal.*, **2**, 21–33.
- Sugisaki H. and Y. Kurita (2004) Daily rhythm and seasonal variation of feeding habit of Pacific saury (*Cololabis saira*) in relation to their migration and oceanographic conditions off Japan. *Fish. Oceanogr.*, **13** (Suppl. 1), 63–73.
- 巢山 哲・中神正康・納谷美也子・加藤慶樹・柴田泰宙・酒井光夫・竹内幸夫 (2016) 平成27 (2015) 年度サンマ太平洋北西部系群の資源評価. 平成27年度我が国周辺水域の漁業資源評価 (第1分冊), 水産庁・水産総合研究センター, 283–336.
- Suyama, S., A. Shimizu, S. Isu, H. Ozawa, T. Morioka, M. Nakaya, T. Nakagawa, N. Murakami, T. Ichikawa and Y. Ueno (2016) Determination of the spawning history of Pacific saury *Cololabis saira* from rearing experiments: Identification of post-spawning fish from histological observations of ovarian arterioles. *Fish. Sci.*, **82**, 445–457.
- 東北水産研究所資源管理部浮魚・いか資源グループ (2018) 2017年の北西太平洋におけるサンマの資源状態. 平成29年度第2回サンマ資源・漁海況検討会議報告書, 166–174.
- 土屋靖彦・秦 満夫・浅野元一・高橋伊和夫・野村 正・鈴木芳夫 (1953) サンマの生化学的研究-I. 一般成分. *日水誌*, **19**, 513–517.
- Watanabe, K., E. Tanaka, S. Yamada and T. Kitakado (2006) Spatial and temporal migration modeling for stock of Pacific saury *Cololabis saira* (Brevoort), incorporating effect of sea surface temperature. *Fish. Sci.*, **72**, 1153–1165.
- Watanabe, Y. and N. C., Lo (1989) Larval production and mortality of Pacific saury, *Cololabis saira*, in the northwestern Pacific Ocean. *Fish. Bull.*, **87**, 601–613.
- 渡野邊雅道 (2002) 道東太平洋で漁獲されるサンマの肥満度～サンマが太ると豊漁になる?～. *北水試だより*, **57**, 1–4.
- 矢口登希子 (2016) 携帯型近赤外分光計によるマサバ脂肪量の非破壊測定の実用化. *茨城水試研報*, **46**, 16–17.
- Yasuda, I. and D. Kitagawa (1996) Locations of early fishing grounds of saury in the northwestern Pacific. *Fish. Oceanogr.*, **5**, 63–69.