

北水試研報
Sci. Rep.
Hokkaido Fish. Res. Inst.

CODEN : HSSKAJ
ISSN : 2185-3290

北海道水産試験場研究報告

第 96 号

SCIENTIFIC REPORTS OF HOKKAIDO FISHERIES RESEARCH INSTITUTES No.96

併載 北海道スケトウダラ研究グループ会議50周年記念論文（2）

With special papers for the 50th anniversary of the "Hokkaido Suketoudara Kenkyu Group" (Hokkaido Walleye Pollock Research Group) Part 2

北海道立総合研究機構水産研究本部

北海道余市町

2019年9月

Hokkaido Research Organization
Fisheries Research Department

Yoichi, Hokkaido, Japan

September, 2019

北海道水産試験場研究報告

第96号

目 次

金田友紀

方向分散法を用いた波変形アプリケーションの波高推定精度 1

春日井 潔

北海道沿岸で漁獲されたサケの年齢と成熟度の季節変化 9

下田和孝, 渡辺智治, 安藤大成

サケ稚魚の初生鱗形成における河川間の違いと採卵時期による影響 17

北海道スケトウダラ研究グループ会議50周年記念論文（2）

志田 修, 石田良太郎, 石田宏一, 坂口健司

秋季の道東太平洋海域におけるスケトウダラ *Gadus chalcogrammus* 0歳魚の分布水深の長期変動 ... 29

水上卓哉, 板谷和彦, 向井 徹, 飯田浩二

計量魚群探知機を用いた北海道オホーツク海におけるスケトウダラ *Gadus chalcogrammus* の
春季来遊群とオキアミ類の鉛直分布特性 41

訂正 53

**SCIENTIFIC REPORTS
OF
HOKKAIDO FISHERIES RESEARCH INSTITUTES**

No.96

CONTENTS

TOMONORI KANETA

Accuracy of estimating wave height based on the wave transform application with angular spreading method	1
--	---

KIYOSHI KASUGAI

Seasonal changes in age and maturity of chum salmon <i>Oncorhynchus keta</i> landed on fishermen's cooperative associations in Hokkaido	9
---	---

KAZUTAKA SHIMODA, TOMOHARU WATANABE and DAISEI ANDO

Differences in early squamation of chum salmon <i>Oncorhynchus keta</i> juveniles among river populations in seasonally spawning stocks	17
---	----

Special papers for the 50th anniversary of the "Hokkaido Suketoudara Kenkyu Group" (Hokkaido Walleye Pollock Research Group) Part 2

OSAMU SHIDA, RYOTARO ISHIDA, KOICHI ISHIDA and KENJI SAKAGUCHI

Inter-annual fluctuation in distribution of age-0 walleye pollock <i>Gadus chalcogrammus</i> in the southeastern Pacific coast of Hokkaido	29
--	----

TAKUYA MIZUKAMI, KAZUHIKO ITAYA, TOHRU MUKAI and KOHJI IIDA

Vertical distributions of walleye pollock <i>Gadus chalcogrammus</i> and euphausiids on the continental shelf of southern Okhotsk Sea, off the coast of Hokkaido, by using a quantitative echosounder	41
---	----

Erratum	53
----------------------	----

(September, 2019)

方向分散法を用いた波変形アプリケーションの波高推定精度

金田友紀*

北海道立総合研究機構栽培水産試験場

Accuracy of estimating wave height based on the wave transform application with angular spreading method

TOMONORI KANETA*

Mariculture Fisheries Research Institute, Hokkaido Research Organization, Muroran, Hokkaido, 051-0013, Japan

A Windows PC application that estimates wave height transformation with the angular spreading method and can read values from existing cumulated energy curve graphs and the distances between wave rays from a refraction diagram was developed. The application automatically calculates the values, searching for energy cut areas by land boundary, executes the calculations of multiple data sets (i.e., wave height, wave period, and wave direction), and saves the results, which makes estimating operations easy to perform. Estimating wave height transformation of actual measured wave heights at an offshore observation point with the application showed that there is a correlation between the estimated wave heights and actual measured wave heights from a shore observation point. According to the results, setting the wave ray intervals to 5 times greater than the width of the designing facility, but shorter than the distance between the calculation point and land boundary, is appropriate.

キーワード：エネルギー分散法，屈折，波変形，波向線，方向分散法

現在、日本中の沿岸において大型海藻が衰退する磯焼けが進行しており（藤田ら, 2008；水産庁, 2015），藻場を利用する有用な水産資源の低迷が懸念されている。北海道の水産試験場では、北海道南西部沿岸において磯焼けが持続する要因をキタムラサキウニによる大型海藻への過剰な摂食であるとまとめた（吾妻, 1995）。そのため、ウニ類を対象とした増殖礁において、不足する餌料海藻を継続的に生育させるには、ウニ類の個体数を低減させるか、またはウニ1個体当たりの摂餌量を低減させる必要がある（川俣, 1994；川井ら, 2002）。このような状況のもと、波による振動流速が増大するとウニの摂餌圧が低下する現象（川俣, 1994）を利用して、磯焼けへの影響の大きい冬から春にかけてのウニ類の摂餌圧を低減させる嵩上げ礁の設置（または既存施設の嵩上げ）が北海道の「藻場・干潟ビジョン」において事業レベルで検討されている（<http://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/ssk/mobahigatavision.htm> 2019.5.31）。施設の設計にあたっては、ウニ類摂餌圧低減の効果を十分に検討しなければな

らず、そのためには施設に作用する波の諸元（波高、周期および波向）を推算する必要がある（桑原ら, 2000；桑原ら, 2004）。波の推算には、地形による波エネルギーカットを考慮した方向分散法（エネルギー分散法）による波変形計算（水産庁, 2003）を行うとされているが、その過程で波のエネルギー累加量および屈折図による波向線間隔を図面上から読み取る必要があり、施設設置箇所や沖波の諸元を変更するたびに屈折図を作図しながら手間がかかっていた。

そこで、波のエネルギー累加量および屈折図による波向線間隔を数値として算出し、波の変形をパソコン上で簡易に推算できるアプリケーション（以下、波変形アプリと称する）を開発した。また、波変形アプリによる推算結果を実海域での波浪観測結果と比較し、有用性を検討した。さらに、適切な波向線の間隔についても検討した。なお、波変形アプリの開発は、北海道留萌振興局による平成26年度留萌地区増毛津田屋生物調査委託業務および平成27年度留萌地区増毛古茶内増殖場技術資料作成

報文番号A573 (2019年7月31日受理)

*Tel: 0143-22-2320, FAX: 0143-22-7605, E-mail: kaneta-tomonori@hro.or.jp

委託業務の一環として行った。

材料と方法

方向分散法による波変形過程（合田, 1998; 水産庁, 2003）をFig.1に示す。海底の影響を受けない深海域の波（沖波）の波高 H_0 が、陸地によるエネルギーの減少および海底地形による屈折の影響により変化した仮想の沖波の波高を換算沖波波高 H'_0 といい、次のとおり求める。

$$H'_0 = \sqrt{\sum_{i=1}^n D_i (K_{ri} \cdot K_{di})} \cdot H_0$$

ここに D はエネルギー分担率、 K_r は屈折係数、 K_d は回折係数、 n はエネルギーの分割数で、後述する計算点の前面に島や岬がないことから原則に従って3分割とした。

任意の計算点から沖波の入射方向に対し左右それぞれ 90° の範囲内にある陸地点のうち、沖波の入射方向から最も角度が小さくなる点をエネルギーカット領域と定める（Fig.2-A）。Fig.3はエネルギー累加曲線で、波浪のエネルギーが波の主方向の回りに分布している状況を、波の総エネルギーに対する累加百分率で表したものである。Fig.3中のSmaxは方向集中度パラメータで、値が大きいほど波のエネルギーの方向的な集中度が高く、沖波の波形勾配（ H_0/L_0 ）によって次の値を与える。

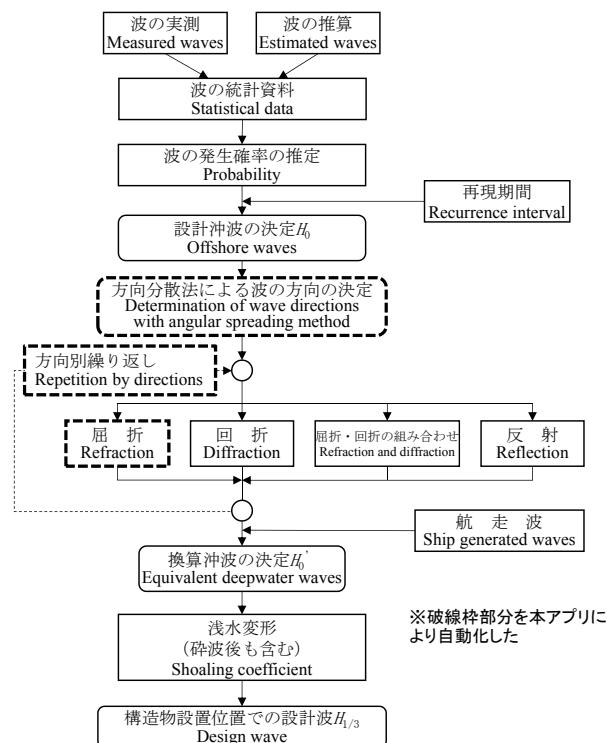


Fig.1 Calculation procedure for design wave.

$$H_0/L_0 > 0.03, S_{\text{max}} = 10$$

$$0.03 \geq H_0/L_0 > 0.015, S_{\text{max}} = 25$$

$$0.015 \geq H_0/L_0, S_{\text{max}} = 75$$

波高計算を実行する地点（以下、計算点と称する）にエネルギーカット領域を除いたエネルギー量が作用するとして、このエネルギー量を n 等分し、それぞれのエネルギー量をエネルギー分担率とする。分割したそれぞれのエネルギーの中間値に相当する入射角度を新たな3方向からの沖波の入射角度として、3方向それぞれについて

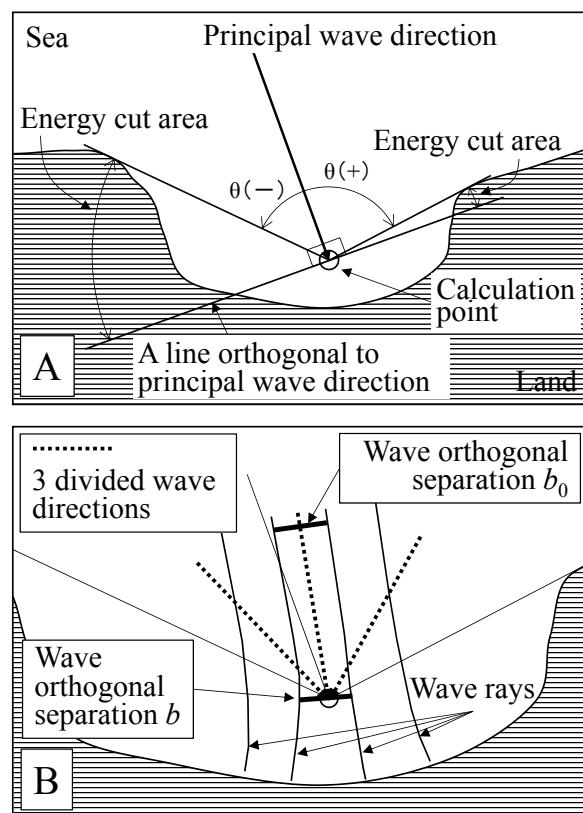


Fig.2 A: Energy cut area by land. B: Determination of wave orthogonal separation b_0 , b .

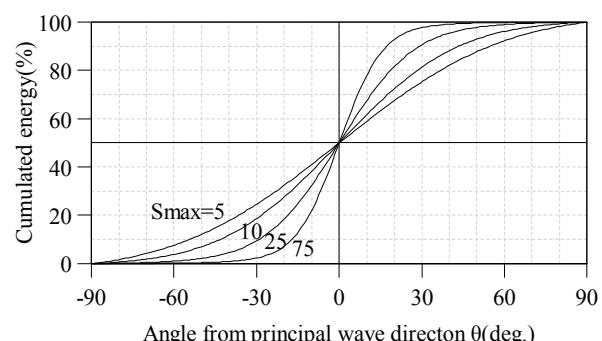


Fig.3 Cumulated energy curve. Smax is spreading parameter.

て波向線を描画する（例えば、Smax=25で、エネルギーカット領域が-30°以下、40°以上だとすると、エネルギー量は10%～95%の85%で、これを3分割するとエネルギー一分担率は、それぞれ28.3%となる。これら分割したエネルギーの中間値は24.2%（10%～38.3%）、52.5%（38.3%～66.6%）および80.8%（66.6%～95%）で、新たな波の3方向は、-16°、2°および19°となる）。Fig.2-Bに計算点を挟む2本の波向線と波向線間隔 b_0 、 b の概要を示す。波向線はスネルの法則に従って水深の変化にともない屈折し、水深の浅い方へ向きを変える。波変形アプリでは、この法則に則って微少な距離ごとに新たな波向を計算するが、計算点の近傍における波向のベクトルと、そのベクトルの基点から計算点までのベクトルとのクロス積を計算し、計算点が波向線の進行方向に対し左右どちらに位置するかを逐次把握しておく。また、合わせて波向線と計算点との距離を計算することで、計算点との距離が最短となる、計算点を挟む2本の波向線が選定できる。さらに、波向が屈折しても計算点を挟む2本の波向線を得られるよう、一方向につき複数本の波向線を描画する。得られた2本の波向線について、沖側（深海領域）における間隔 b_0 と計算点における間隔 b を用いて屈折係数Krを次のように定める。

$$Kr = \sqrt{\frac{b_0}{b}}$$

計算点における波向線間隔 b は、計算点を挟む2本の波向線と、計算点を通る直線との2つの交点間の最短距離とした。計算点を通る直線は、傾きを変化させ、交点間が最短となるよう決定した。波向線間隔 b_0 は深海領域における2本の波向線の法線方向の距離とした。なお、計算点は施設を設置する前の沖に向かって開けた自然海岸であるため、波が島や防波堤の背後に回り込む回折現象は無視できるので、回折係数Kd=1として波高変形には影響を及ぼさないとした。また、反射および航走波は条件外として無視した。

H'_0 は波が水深の浅い領域に侵入することで地形の影響を受ける。これを浅水変形とよび、計算点の波高 $H_{1/3}$ は浅水係数Ksを用いて次式で表される。

$$H_{1/3} = Ks H'_0$$

$$Ks = 1 / \sqrt{\left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh}\right) \tanh kh}$$

ここに、 k は波数で $k=2\pi/L$ 、 h は水深、 L は波長である。さらに波の高さや周期、海底勾配等の諸条件によっては碎波する場合があり、上述のKsとともに、水深 h と冲波

波長 L_0 の関係から次の式により H'_0 に各係数を乗じて計算点の有義波波高 $H_{1/3}$ を求める。

$$H_{1/3} = \begin{cases} Ks H'_0 & : h/L_0 \geq 0.2 \\ \min\{\beta_0 H'_0 + \beta_1 h, \beta_{\max} H'_0, Ks H'_0\} & : h/L_0 < 0.2 \end{cases}$$

ここに $\min(a,b,c)$ は a,b,c のうちの最小値とする。各 β の値はそれぞれ次式より求める。

$$\beta_0 = 0.028(H'_0/L_0) - 0.38 \exp(20 \tan 1.5\phi)$$

$$\beta_1 = 0.52 \exp(4.2 \tan \phi)$$

$$\beta_{\max} = \max\{0.92, 0.32(H'_0/L_0) - 0.29 \exp(2.4 \tan \phi)\}$$

ここに $\max(a,b)$ は a,b のうち最大値とする。 ϕ は海底の傾斜角である。

開発した波変形アプリは、これら一連の手順を計算するものである。開発言語にはEmbacadero社のDelphi10.2を用い、作成したアプリケーションはWindows上で作動する。波変形アプリでは、計算点を含む周辺海域の水深データ（海底地形図）および計算点より沖側の地点における波（冲波）の諸元（波高、周期および波向）を用いる。

波変形アプリの有効性の検証のため、実測した冲波を基に波変形アプリで波高を推算し、計算点における波高の実測値との比較を行った。海底地形図として、増毛町古茶内海域の漁場図（平成6年旧留萌支庁作成）から読み取った、格子状（20 m間隔）の水深データを用いた。このうち同海域内の既存ウニ増殖礁近辺については、留萌振興局から詳細な水深測量データの提供を受け、これを格子状（20 m間隔）の水深データに変換して用いた。水深データを基に作図した等水深線図をFig.4に示す。波高・波向・流速計（アイオーテクニック社製WaveHunter 04および08）をFig.4中の沖側観測点（a点、水深25 m）および陸側観測点（b点、水深5 m）に設置して、2015年6月11日から2015年7月20日までの期間、

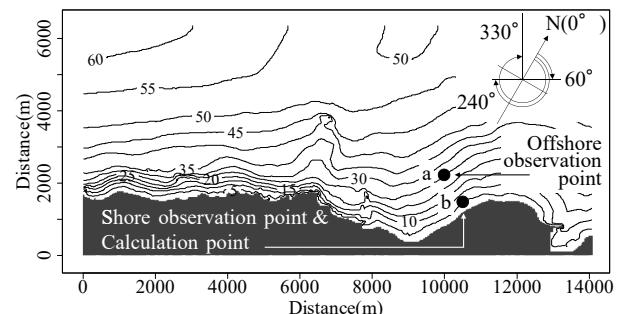


Fig.4 Bottom contour map surrounding Kochanai district, Mashike. a) offshore observation point. b) shore observation and calculation point.

1 hごとに10 min, 0.5 sのサンプリング間隔で波高, 周期および波向を観測した。1 hごとの観測値を1つのデータセットとし, このデータセットごとに統計処理により有義波の波高, 周期および主波向を得た。沖における波向線の間隔 b_0 は, 小さすぎると計算点において想定している施設の幅を捉えられず, 大きすぎると波向線が陸地境界よって途切れる可能性がある。そこで, 最適な波向線間隔を検討するため, 波変形アプリの画面上で10, 25, 40および55 pixels (pixelは波変形アプリの画面上における描画の最小単位。それぞれ実距離55, 138, 220および303 m相当) と設定し, それぞれについて計算を実行した。また, 計算点(陸側観測点)における波向についても検討するため, 分割した3方向の波向線それぞれについて波向線間隔を求めた直線の傾きを算出し, 3つの傾きの平均を計算点における波向とした。

北を 0° として時計回りに角度をとると, 今回用いた海底地形図の上方は 330° にあたり, 主波向および分割後の新たな波向が $60^\circ \sim 240^\circ$ にある場合, 理論上計算ができない(Fig.4)。そのため, 全934個の沖波データのうち波向が上記の範囲にある151個のデータを除いた783個のデータで比較を行った。

なお, 波速 C , 波長 L および周期 T の間には次の関係がある。

$$C = L/T$$

また, 波長 L は, $L=2\pi/k=gT^2/2\pi \cdot \tanh(2\pi/L \cdot h)$ で表され, 数値計算により求められる。今回得られた沖波の平均周期は4.7 sで, これを沖波の周期 T とみなし, 沖側観測点の水深 h を25 mとすると, 上式より波速は約7.3 m/sとなる。この場合, 沖側観測点と陸側観測点の間は約930 mであったので, 波が沖側観測点を通過してから陸側観測点に到達するまで約2 minかかることになる。このため, 沖と陸の観測点で同じ波を観測した場合, 2 minのずれが生じていることになるが, 観測時間を10 minとしていること, 2 minで波浪の状況が大きく変化することはないことから, 沖・陸側観測点での同時刻のデータを比較することとした。

結果

沖側観測点および陸側観測点における波浪観測結果のうち, 波高の分布をFig.5に, 周期の分布をFig.6に示す。波高, 周期とも, 沖と陸の観測結果はほぼ同様な変動を示したが, スパイク状の荒天時を除く静穏な期間では, 波高, 周期とも沖側観測点での値が陸側観測点のものより大きかった。観測期間中の荒天時には波高および周期

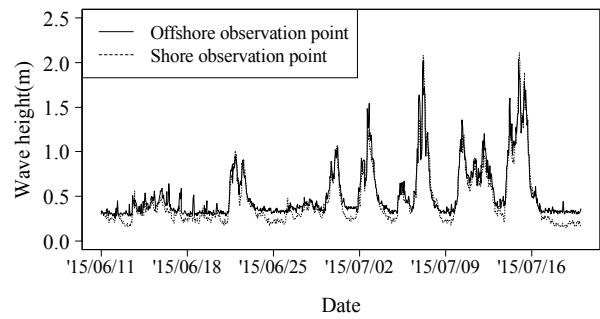


Fig.5 Significant wave height at offshore and shore observation points from June 11 to July 20, 2015.

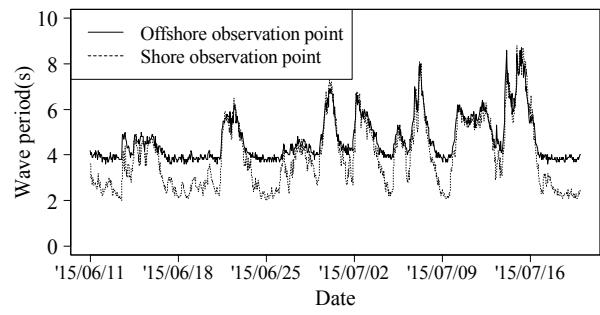


Fig.6 Significant wave period at offshore and shore observation points from June 11 to July 20, 2015.

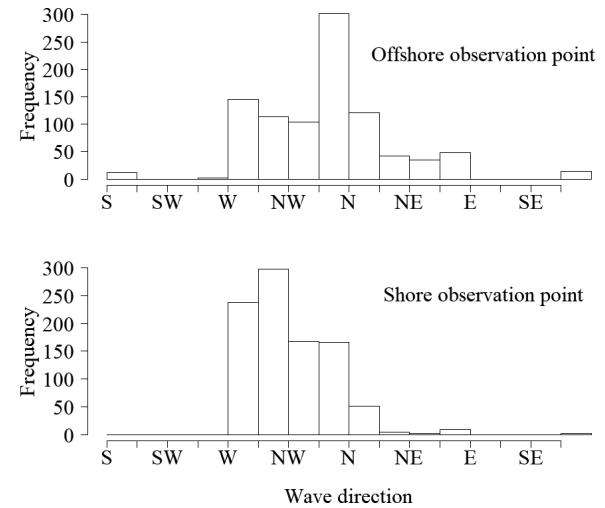


Fig.7 Frequency of significant wave direction at offshore and shore observation points from June 11 to July 20, 2015.

Table 1 The mean wave height and the mean wave period at offshore and shore observation points from June 11 to July 20, 2015.

	Wave height	Wave period
	Mean±S.D.(m)	Mean±S.D.(s)
Offshore observation point	0.53 ± 0.31	4.7 ± 1.00
Shore observation point	0.46 ± 0.33	3.9 ± 1.52

は沖・陸側観測点でほぼ同程度の値を記録し、波高2 m、周期8 sを超える、やや大きめの時化が記録された。またFig. 7に沖および陸側観測点における波向の頻度分布を16方位で示す。波向の最頻値は沖側観測点で北北西、

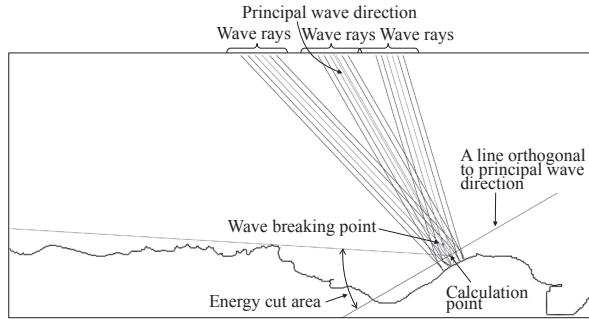


Fig. 8 A screenshot example of wave height calculation results with the wave height deform application.

陸側観測点で西北西であった。また、沖側観測点では北から東にかけての波の分布が、陸側観測点より多かった。

沖側観測点および陸側観測点における毎時間ごとの有義波の波高および周期について、観測期間を通じた平均値を比較した (Table 1)。その結果、平均波高および平均周期とも、陸側観測点の方が沖側観測点より有意に小さかった (ともに $p < 0.01$, Welch's t -test)。

沖側観測点における有義波を冲波として、波変形アプリにより陸側観測点における波高を推算した。計算結果の画面の一例をFig. 8に示す。計算結果画面ではエネルギー切割の範囲、分割した新たな波向、碎波した場合は碎波地点が表示される。また、波高、屈折係数などの計算結果はcsvファイルに自動保存される。

波高の推算値と、その沖波データに対応する陸側観測点における実測値との関係を、沖側（深海領域）における

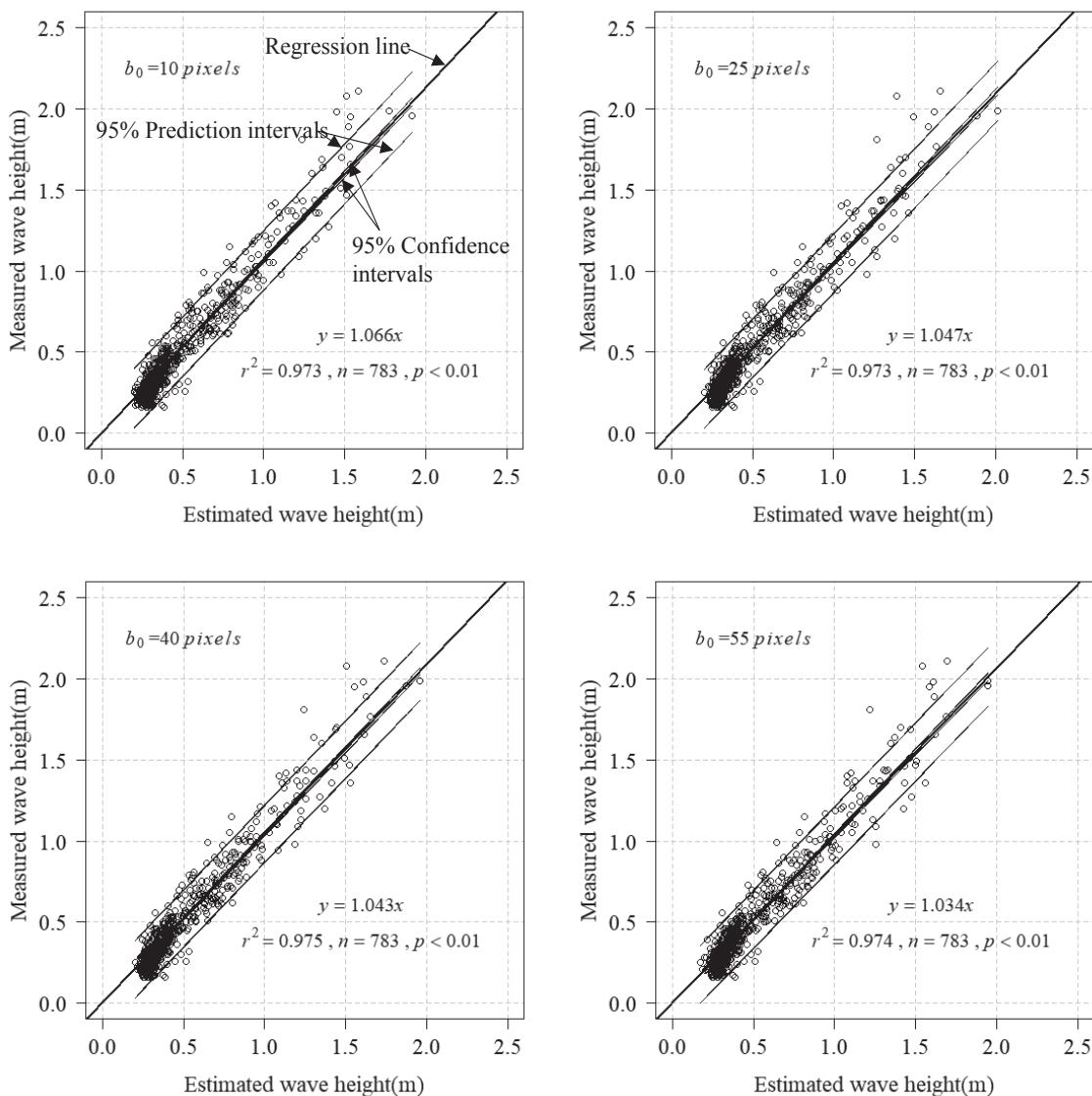


Fig. 9 Relationship between estimated wave height and measured wave height.

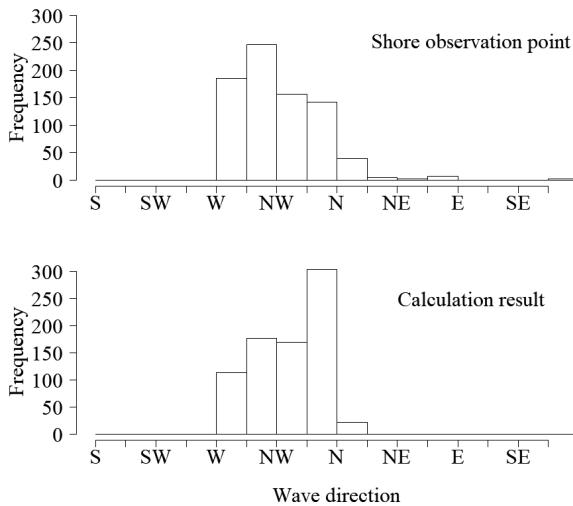


Fig. 10 Frequency of significant wave direction at shore observation point based on calculated results.

る2本の波向線の間隔別にFig. 9に示す。推算値と実測値を2群の独立した変数、切片を0として回帰分析を行った。その結果、回帰係数は1.066 ($r^2=0.973$; $b_0=10$ pixels), 1.047 ($r^2=0.973$; $b_0=25$ pixels), 1.043 ($r^2=0.975$; $b_0=40$ pixels) および1.034 ($r^2=0.974$; $b_0=55$ pixels) であった。

計算点における波向の頻度分布を、陸側観測点における計算条件外の波向を除外した実測値とともにFig. 10に示す。計算結果では、計算条件のため東～南よりの波は出現しなかったが、実測では東北東や南南西の波向が観測された。また、Fig. 7の沖波の実測値と比較すると最頻値は北北西で同じであったが、北および西の頻度が低下し、西北西および北西の頻度が高まった。

考 察

今回の結果では、 $b_0=10$ pixelsの場合で推算値と実測値との関係における回帰係数が1.066であり、回帰係数1.000が最も推算精度が高いとすると5%以上の誤差となつた。一方で $b_0=25\sim55$ pixelsでは回帰係数は1.034～1.047であり、誤差は5%以下といずれの場合でも本波変形アプリの推算精度は高いと考える。ただし、これ以上 b_0 を大きくすると、沖波の波向によっては波向線が計算点付近に到達する前に陸地の境界に接してしまい、正しく波向線間隔 b を捉えられない場合があった。これは、エネルギー切割に伴うエネルギー分担率に従った新たな波向に対し、その垂線方向における計算点と陸地境界との距離を、沖の波向線間隔 b が超えた場合に顕著であった。また、計算点は一つの点であるが、既存の囲い礁は、1基の幅が浜なりに30 m程度の設計であることが多い。 $b_0=25$ pixelsは、実距離で138 mに相当するので、波向線

間隔 b_0 は想定している施設の5倍程度以上、かつ、より広い範囲の波向の情報を取り入れるために、計算点と陸地境界との距離以下とすることで精度の高い推算結果が得られるものと思われる。

すべての b_0 の場合において、回帰係数は1以上で、推算値は実測値よりも過小に推定された。その理由の一つとして、実海域には海底地形図では捉えきれない微少な地形変化があり、これが屈折率、浅水係数および碎波の有無に影響を及ぼしていたことが考えられる。そのため、より詳細な海底地形図を用いれば推定精度の向上が期待できるが、それに伴いデータ量は増大して、その準備が煩雑になることが予想される。一方で、格子間隔が大きすぎると推定精度の低下が懸念されるため、作業量と推定精度を勘案すると少なくとも設計を想定している施設の大きさよりも小さな格子間隔であることが望ましい。

波向線はスネルの法則に従って水深の変化にともない屈折し、海岸線に垂直な方向にその向きを近づけて進行する。陸側観測点付近の海岸線は約29°で、これに垂直な方向は299°（西北西～北西）となる。Fig. 7の沖波の波向に比べFig. 10の計算結果において西北西および北西の頻度が高まったのは、この現象によるものと思われる。

陸側観測点における波向の実測と計算による波向で頻度分布が異なっていた（Fig. 10）。また、Table 1に示したとおり、沖側観測点と陸側観測点における周期の実測値が異なっていた。本波変形推定手法は單一波が沖から陸に来襲するときの波高、波向の変形を推定する手法であり、基本的に周期は変化しないものと仮定している。しかし、実海域では、波は不規則波であり、様々な波高、周期、波向の波が合成されているものであり、沖側観測点と陸側観測点での周期の観測値の違いからも明らかだとおり、本手法で扱った單一波の変形過程とは異なる変形作用があったと考えられる。このような不規則波を解析の対象とし、今回、考慮しなかった屈折現象を取り入れる場合、エネルギー平衡方程式、非定常緩勾配不規則波動方程式、ブシネスク方程式などによる数値計算を行うことによって、詳細に精度よく推算することは可能である（海岸工学委員会、1994）。しかし、これらの数値計算を実行するには専用のアプリケーションが必要である上、専門的な知識をもって諸条件を設定する必要がある。本波変形アプリは、不規則波も考慮した数値計算ほど精度は高くないものの、これまで手作業により設計図面を作成していたものが、簡易で、早く結果が得られ、かつ、計算点を自由に設定できるなど有益なものであると考える。

通常の施設設計においては、主波向が岸から沖へ向かう波は評価対象外となるため問題なく本波変形アプリを

運用できる。しかし、波変形過程においてエネルギー分担率に従って分割した後の波向が、波変形アプリ画面上において下方から上方へ向かう波向は計算ができない。その場合には、水深データの上方の向きを回転させるなど工夫が必要となる。

なお、漁港・漁場の施設の設計参考図書2015年版（水産庁、2016）では波向を分割する分担率 D が無くなっている。方向分散という考え方には回折係数 K_d を求めるのに使っている。また、屈折係数 K_r は沖波の波向1方向のみで描画し、 K_d および K_r を掛け合わせて波高変形を求めている。今後は本波変形アプリの計算プログラムを改変、バージョンアップし、新しい計算方法との整合性の検証を行い、さらなる推定精度向上に努めたい。

謝 辞

増毛漁業協同組合の職員諸氏には、観測機の設置、用船の手配、漁業との調整等を行っていただいた。ここに記してお礼申し上げる。

引用文献

吾妻行雄. 北海道日本海南西部沿岸の磯焼け. 北水試だより 1995；31：3-9.
藤田大介, 町口裕二, 桑原久実. 「磯焼けを起こすウニ」.

- 成山堂書店, 東京. 2008.
- 海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会. 「海岸波動【波・構造物・地盤の相互作用の解析法】」. 土木学会, 東京. 1994.
- 川井唯史, 金田友紀, 新井章吾, 桑原久実. 磯焼け地帯におけるウニ侵入防止フェンスによるホソメコンブ群落の造成とキタムラサキウニ生殖巣の発達. 水産工学 2002；39(1)：15-20.
- 川俣 茂. 磯根漁場造成における物理的擾乱の重要性. 水産工学 1994；31(2)：103-110.
- 桑原久実, 金田友紀, 川井唯史. 北海道南西部磯焼け地帯の囲い礁によるホソメコンブ群落の形成条件. 海岸工学論文集 2000；47：1181-1185.
- 桑原久実, 寺井 稔, 畑谷 勇, 酒向 章. ウニ漁場造成に係る事前評価手法の開発とその運用. 海岸工学論文集 2004；51：1091-1095.
- 合田良實. 「わかり易い土木講座17 二訂版 海岸・港湾」. 彰国社, 東京. 1998.
- 水産庁. 「改訂磯焼け対策ガイドライン」. 全国漁港漁場協会, 東京. 2015.
- 水産庁. 「漁港・漁場の施設の設計の手引き 2003年版」. 全国漁港漁場協会, 東京. 2003.
- 水産庁. 「漁港・漁場の施設の設計参考図書2015年版」. 全国漁港漁場協会, 東京. 2016.

北海道沿岸で漁獲されたサケの年齢と成熟度の季節変化

春日井 潔*

北海道立総合研究機構さけます・内水面水産試験場道東センター

Seasonal changes in age and maturity of chum salmon *Oncorhynchus keta* landed on fishermen's cooperative associations in Hokkaido

KIYOSHI KASUGAI*

Doto Research Center, Salmon and Freshwater Fisheries Research Institute, Hokkaido Research Organization,
Nakashibetsu, Hokkaido 086-1164, Japan

The age and maturity of chum salmon *Oncorhynchus keta*, which landed on 17 fishermen's cooperative associations in Hokkaido were surveyed between 2004 and 2014. Sexual maturity based on body color of each fish was recorded, and the scales were removed from 50 females and 50 males from each survey site once a month between September and November each year. Age and proportion of mature fish were analyzed for all specimens grouped by sex, catch date (ten days interval), and survey site throughout the duration of the survey. With the change of seasons, the mean ages of the fish decreased in eastern Hokkaido, and the number of mature fish increased at the many survey sites in the Nemuro region and the Pacific Ocean coast, for both sexes.

キーワード：沿岸漁獲物，季節変化，サケ，成熟度，年齢

北海道においてサケ *Oncorhynchus keta* は、おもに9～12月にかけて各地の沿岸で漁獲されるとともに、河川に遡上し、ふ化放流事業を行うために捕獲されている。北海道においてサケは地域によって漁獲・遡上時期や形態が異なることが古くから知られている（佐野・久保、1946；渡辺、1955）。漁獲・遡上時期や形態のような生物学的特徴は各地域の気候や河川・海洋環境において生残を高めるために適応して形成されてきたと考えられる。このため、各地域のサケの生物学的特性を把握することは地域に合った増殖事業や資源管理を行う上で重要である。

北海道の河川に回帰遡上するサケについては、2000年以降、全道の主要な河川で捕獲期間を通して定期的に体サイズや年齢組成が調べられており、近年では、本州を含めた日本のサケについて地域毎にまとめられて解析され、地域間で体サイズ、成熟年齢、繁殖形質などに差異があることが示されている（斎藤ら、2015）。また、集団遺伝学的な分析から北海道のサケは5地域個体群に分け

られ、それらは北海道沿岸における漁業の資源管理を行う5つの海区、すなわちオホツク海区、日本海区、えりも以西太平洋海区、えりも以東太平洋海区、根室海区におおよそ対応している（Beacham et al., 2008；佐藤・浦和、2015）。

一方、来遊資源の約9割を占める沿岸漁獲物については、2004～2014年にかけて全道の主な漁業協同組合の市場で年齢組成、体サイズ（体長および体重）、成熟度が調べられている以外に長期間にわたる調査は行われていない（宮腰ら、2015）。この調査の結果からは、沿岸漁獲物においても海区の間で年齢組成や体サイズに違いがあることが示唆されている（宮腰ら、2015）。また、根室海区の標準で行っている年齢組成のみの調査の結果からは、沿岸漁獲物の年齢組成が季節の進行にともない変化することが報告されているが（春日井ら、2015），他の地域では十分に明らかになっていない。サケは性成熟の進行にともない、銀白色を呈するギンケ（銀毛）から、黒色を帯び赤色や黄色の縞模様が現れる婚姻色を呈するブナ

(ブナケ, ブナ毛)に変化する。沿岸で漁獲されるサケは、漁期早期にはギンケが多く、盛期以降にはブナが多くなることや(西野, 1981), ギンケが出現する割合は地域による違いがあることが知られている(広井, 1985; 中居, 1985)。このように北海道の沿岸域で漁獲されるサケは年齢組成や成熟度が季節や地域によって異なっていると思われる。各海区や地区の沿岸漁獲物の年齢組成については宮腰ら(2015)が、成熟度については広井(1985)が地域間に違いがあることを報告しているが、年齢組成や成熟度の季節変化については十分に報告されていない。沿岸漁獲物と近隣の河川捕獲物の年齢組成の季節変化を比較検討することにより、沿岸漁獲物と河川捕獲物の関係を明らかにする一助になると思われる。また、沿岸漁獲物の成熟度が一定の傾向を持って季節変化するのであれば、成熟度を調べることにより漁期の進行度合の推測に活用できるものと思われる。

本研究では宮腰ら(2015)が用いた沿岸漁獲物のデータを分析し、調査場所ごとに年齢組成と成熟度の季節変化を把握することを目的とした。サケの來遊尾数の季節変化が年によって異なるのと同様に、沿岸漁獲物の年齢組成や成熟度の季節変化にも年変動があることが予想される。そこで本研究では、2004~2014年の11年間のデータを束ねることにより年変動の影響を小さくし、季節変化の傾向を把握することを目指した。

材料と方法

調査場所および調査内容 2004~2014年にかけて(調査場所によっては2005年もしくは2006年に開始), 北海道沿岸の各海区、すなわち、オホーツク海区、日本海区、根室海区、えりも以東太平洋海区(以降、えりも以東)、えりも以西太平洋海区(以降、えりも以西)の各地区において1~2か所、計17か所において年齢組成と成熟度を把握する調査を行った(Fig. 1; Table 1)。各調査場所においては、9~11月に原則として毎月1回調査を行い、各調査日に水揚げされたサケのうち雌雄各50個体から鱗の採取および成熟度の記録を行った。ただし、漁獲数が少ない場合は計画された個体数に満たない場合があった。

採取した鱗からは定法(宮腰, 2014)に従って年齢査定を行った。成熟度は羽田野(1985)に従い、体色に基づいて判断し、ギンケをS、うっすらと婚姻色が現ってきたものをAブナ、完全な婚姻色を呈しているものをCブナとし、AブナとCブナの中間をBブナとした(以降、「ブナ」は省略)。

データ解析 本研究では地区毎の沿岸漁獲物の年齢や成熟度の大まかな傾向を把握するため、各調査場所のデータを用いて雌雄別、漁獲旬別に群をつくり解析を行った。年齢は群毎に平均値を算出し、これらを各群の平均年齢とした。また、群毎に成熟魚比率を算出して、成熟度の指標とした。成熟魚比率は、中居(1985)を参考に成熟

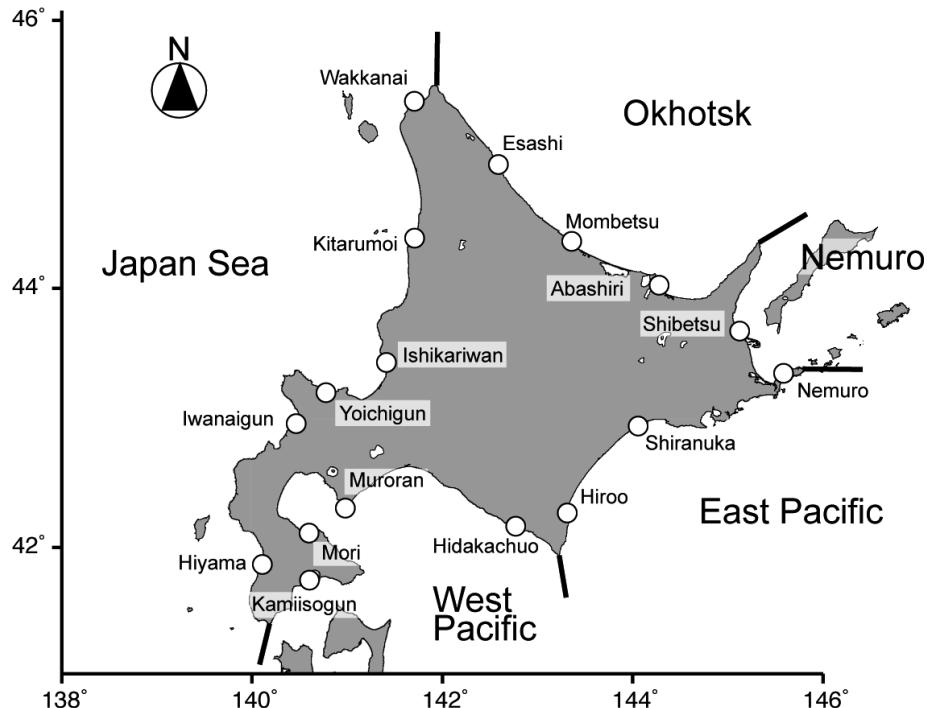


Fig.1 Regions for fishery management in Hokkaido waters and fishermen's cooperative associations where landed chum salmon were examined for age and maturity in this study.

Table 1 Number of chum salmon examined for age and maturity in this study, which were caught between 2004 and 2014 in Hokkaido. Each cell indicates the number of female/number of male, respectively.

Region	Survey site	Season			September			October			November			Total
		early	mid-	late	early	mid-	late	early	mid-	late	early	mid-	late	
Japan Sea	Hiyama		400/400	50/50	400/400	150/150								2,000
	Iwanaigun	50/50	500/499		550/549									2,199
	Yoichigun	416/400	200/198	298/282	299/299									2,394
	Ishikariwan	205/245	397/454	747/743	697/693	196/204								4,581
	Kitarumoi	150/150	600/600	600/600	150/150									3,000
	Wakkanai	467/507	162/159	271/294	302/217									2,379
Okhotsk	Esashi	100/100	791/765		394/406	250/250	199/201	449/450						4,355
	Mombetsu		551/550			450/450	100/100	548/540						3,289
	Abashiri	650/650		101/96	600/600	50/50	550/549							3,896
Nemuro	Shibetsu	350/350	300/300	149/150	300/300	450/446	496/504	100/100						4,295
	Nemuro	380/397	126/150		552/547		486/493							3,131
East Pacific	Shiranuka	200/200	349/347		350/350	200/200	190/163	299/271						3,119
	Hiroo	450/450	350/350		650/649	100/100	549/551	200/200						4,599
West Pacific	Hidakachuo	349/349	150/148	100/100	649/650	150/150	200/200	522/508						4,225
	Muroran	99/100	650/650	50/50	254/346	349/349	341/350	389/385						4,362
	Mori		541/532		286/299	240/249	350/350	100/100	100/100					3,247
	Kamiisogun		547/550		483/500	50/50	50/50	450/450	50/50					3,280

の進んだBおよびCを成熟魚と定義し、下式により求めた。

$$\text{成熟魚比率} = (\text{Bの個体数} + \text{Cの個体数}) / \text{全個体数}$$

さらに、平均年齢および成熟魚比率について、それぞれ漁獲旬別に調査実施年全体（2004～2014年）の平均値を算出して、これらを旬平均年齢および旬成熟魚比率とした。

各調査場所における旬平均年齢および旬成熟魚比率の季節変化を検討するため、それぞれの漁獲旬に対する相関係数を算出した。漁獲旬は9月上旬から11月下旬までを旬毎に早い時期から順に1から9で割り当ててコード化し、解析に供した。相関係数としてSpearmanの順位相関係数（ ρ ）を用い、有意水準は0.05とした。統計解析にはR ver 3.0.2を用いた（R Core Team, 2013）。

結果

平均年齢 旬平均年齢は、多くの調査場所において季節の進行とともに低下した（Fig.2）。一方、えりも以西海区の日高中央や室蘭では雌雄ともに漁獲期間を通じて旬平均年齢は大きく変化しなかった。

漁獲旬と旬平均年齢の間の相関係数（ ρ ）は、えりも以西海区の日高中央、室蘭、上磯郡の雌を除いてすべて負の値を示した（Table 2）。中でも、日本海区の檜山、余市、および北るもいの雌、岩内郡および稚内の雄、オホーツク海区、根室海区、およびえりも以東海区の雌雄

において有意な関係を示し、季節の進行とともに旬平均年齢が低下した（Table 2）。

成熟魚比率 旬成熟魚比率は、根室海区の標津、えりも以東海区、えりも以西海区の森および上磯郡では、雌雄ともにおおむね季節の進行とともに高くなった（Fig.3）。しかし、日本海区の石狩湾では雌雄ともに季節の進行とともに減少し、オホーツク海区の枝幸では低い値のまま推移するという特徴が見られた。一方、上記以外の場所では旬成熟魚比率は大きく増減し一定の傾向を見出せなかつた。

漁獲旬と旬成熟魚比率の間の相関係数をみると、日本海区の石狩湾、北るもい、および稚内の雌、檜山、岩内郡、および石狩湾の雄では負の値を示したが、それら以外の場所ではすべて正の値を示した（Table 2）。中でも、根室海区、えりも以東海区、およびえりも以西海区では、根室の雄と日高中央の雌を除きすべてにおいて有意な相関関係が得られ、季節が進むほど旬成熟魚比率が上昇した（Table 2）。

考察

河川で捕獲されるサケは遡上初期に高齢魚が多く、徐々に若齢魚が増える（小林, 1961；帰山, 1977；Salo, 1991；Quinn, 2005；Molyneaux *et al.*, 2009；春日井ら, 2015）。根室海区の標津沿岸では近隣の標津川と同様に

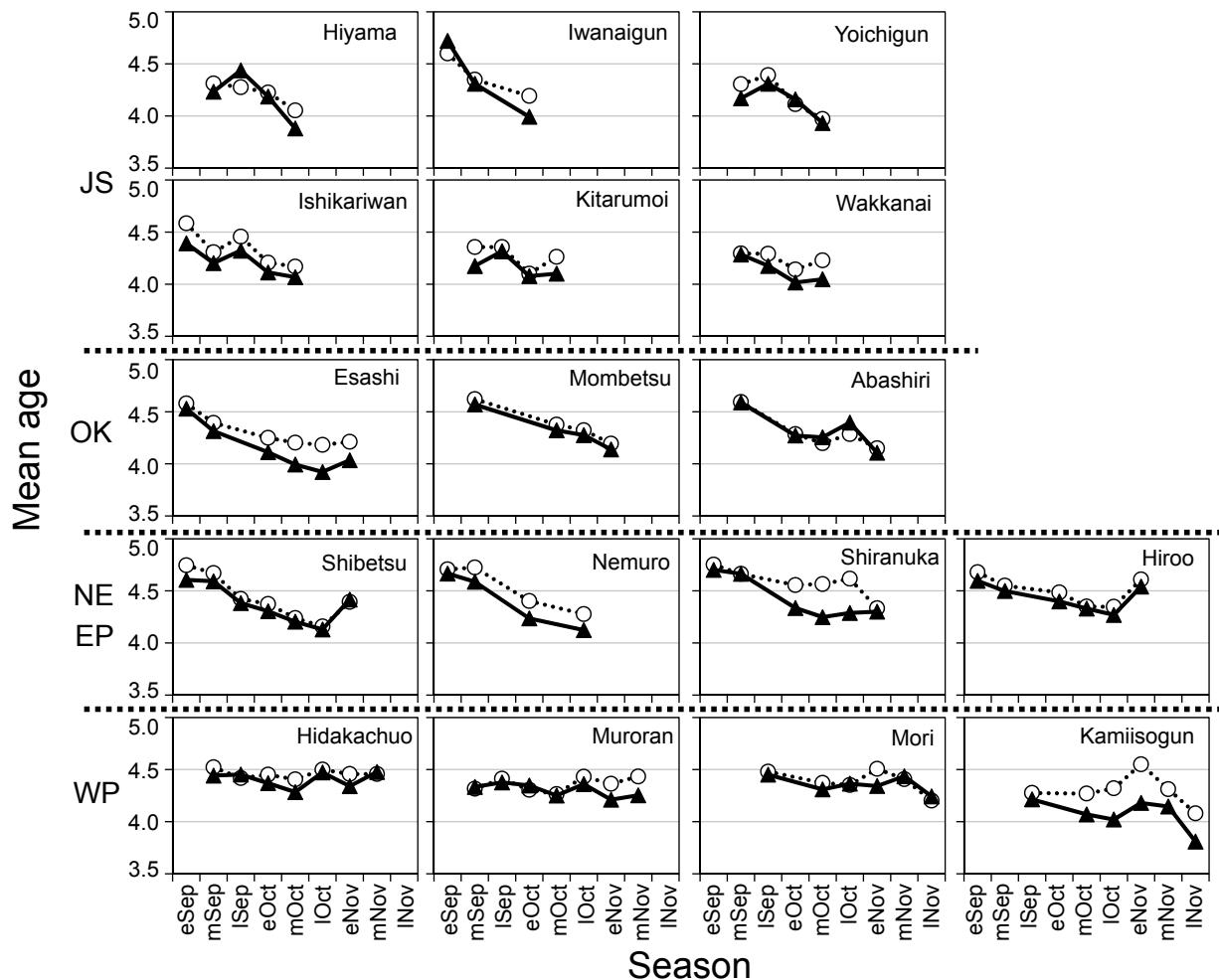


Fig. 2 Seasonal changes in the mean age of female and male chum salmon landed on each fishermen's cooperative associations of Hokkaido. Open circles and closed triangles indicate female and male, respectively. JS: Japan Sea Region; OK: Okhotsk Region; NE: Nemuro Region; EP: Eastern Pacific Region.

季節の進行とともに平均年齢が低下することが報告されている（春日井ら, 2015）。本研究では北海道東部の3海区においても季節の進行とともに平均年齢が低下することが確認された。一方で、えりも以西海区や日本海区の一部の場所では平均年齢の低下が見られなかった（Fig.2）。えりも以西海区や日本海区では11月以降に高齢魚の比率が高くなる河川があることから（北海道立水産孵化場, 2005～2011；北海道立総合研究機構さけます・内水面水産試験場, 2012～2015），これらの河川に遡上するサケの年齢組成を反映しているものと考えられた。

河川で捕獲されるサケの雌では、捕獲時に卵が受精可能な排卵状態になっていない場合には蓄養池に収容して排卵を待つ（野川, 2010）。北海道では蓄養池に収容する期間は早い時期に遡上する魚ほど長く、遡上時期が遅くなるほど短くなる傾向がある（帰山, 1977；奈良, 1997）。このことは、河川の捕獲場においても早い時期には成熟が進んでいないのに対し、季節が進むほど成熟が進んで

いることを示しており、季節の進行とともに成熟魚比率が高くなるという本研究の結果に対応している。季節の進行とともに成熟魚比率が高くなる地域では、漁獲量との関係を見出すことで、成熟魚比率の変化から漁獲終了時期の見通しを推測することができるかもしれない。また、近年の研究から、遅い時期に遡上する魚が早い時期に接岸し漁獲されている例も明らかにされている（森田, 2017；Morita, 2019）。根室海区や太平洋側のえりも以東海区およびえりも以西海区の多くの場所において、漁期早期に漁獲物の成熟魚比率が低いのは、成熟の進んでいない遡上時期の遅い魚が多く含まれていることに起因する可能性がある。

本研究で得られた漁獲旬毎の平均年齢や成熟魚比率を基準として、それらからの偏差を調べることにより、年齢組成や成熟魚比率の年変動を検討することが可能かもしれない。ただし、より詳細な解析には漁期全体にわたる連続したデータが必要であるので、沿岸漁獲物の漁期

Table 2 Spearman's correlation coefficients between season code and mean age or proportion of mature fish for each sex of chum salmon caught at each survey site between 2004 and 2014 in Hokkaido. Shaded values are statistically significant.

Region	Survey site	Mean age				Proportion of mature fish			
		Female		Male		Female		Male	
		ρ	p value	ρ	p value	ρ	p value	ρ	p value
Japan Sea	Hiyama	-0.543	0.030	-0.460	0.073	0.160	0.569	-0.229	0.411
	Iwanaigun	-0.294	0.237	-0.583	0.011	0.124	0.624	-0.113	0.654
	Yoichigun	-0.509	0.031	-0.291	0.242	0.043	0.866	0.295	0.234
	Ishikariwan	-0.357	0.073	-0.324	0.107	-0.281	0.174	-0.099	0.638
	Kitarumoi	-0.509	0.016	-0.406	0.061	-0.056	0.804	0.437	0.042
	Wakkanai	-0.150	0.540	-0.509	0.026	-0.124	0.614	0.259	0.284
Okhotsk	Esashi	-0.455	0.011	-0.636	< 0.001	0.240	0.202	0.235	0.211
	Mombetsu	-0.858	< 0.001	-0.761	< 0.001	0.235	0.237	0.184	0.358
	Abashiri	-0.748	< 0.001	-0.748	< 0.001	0.347	0.060	0.314	0.091
Nemuro	Shibetsu	-0.798	< 0.001	-0.691	< 0.001	0.565	< 0.001	0.647	< 0.001
	Nemuro	-0.788	< 0.001	-0.859	< 0.001	0.613	< 0.001	0.258	0.194
East Pacific	Shiranuka	-0.510	0.008	-0.669	< 0.001	0.811	< 0.001	0.699	< 0.001
	Hiroo	-0.407	0.032	-0.394	0.039	0.644	< 0.001	0.388	0.042
West Pacific	Hidakachuo	0.006	0.973	-0.010	0.955	0.345	0.062	0.502	0.006
	Muroran	0.115	0.553	-0.282	0.138	0.591	< 0.001	0.512	0.005
	Mori	-0.117	0.561	-0.133	0.508	0.427	0.026	0.581	0.001
	Kamiisogun	0.100	0.620	-0.250	0.208	0.691	< 0.001	0.676	< 0.001

全体にわたる連続的なデータを蓄積してゆくことが望まれる。

謝 辞

本調査は北海道庁によるサケマス増殖事業の統括管理の一環として、水産技術普及指導所、北海道水産林務部、各（総合）振興局産業振興部水産課、さけます・内水面水産試験場（旧 北海道立水産孵化場）が共同で行いました。各機関において調査に携わった方々に深く感謝いたします。また、調査に協力していただいた各漁業協同組合、市町村役場、各管内さけ・ます増殖事業協会、北海道区水産研究所などの方々にこの場を借りて深く感謝いたします。

引用文献

Beacham, TD, Sato S, Urawa S, Khai DL, Wetklo M. Population structure and stock identification of chum salmon *Oncorhynchus keta* from Japan determined by microsatellite DNA variation. *Fish. Sci.* 2008 ; 74 : 983-994.
羽田野六男. ブナ化と成分変化.「秋サケの資源と利用」(座

間宏一・高橋裕哉編)」恒星社厚生閣、東京、1985；68-83.

広井 修. 性成熟.「秋サケの資源と利用 (座間宏一・高橋 裕哉編)」恒星社厚生閣、東京、1985；38-52.

北海道立水産孵化場. サケ資源動態・生物統計調査、「平成6~21年度事業成績書」, 恵庭市, 2005~2011.
北海道立総合研究機構さけます・内水面水産試験場. サケ資源動態・生物統計調査、「平成22~26年度事業報告書」, 恵庭市, 2012~2015.

帰山雅秀. 十勝川水系におけるサケ・マスの人工再生産効率向上に関する研究-II. 1976年, 十勝川におけるサケ親魚溯上動向とその捕獲・採卵方法について. 北海道さけ・ますふ化場研究報告 1977 ; 31 : 55-70.
春日井 潔, 安藤大成, 宮腰靖之, 虎尾 充. 標津沿岸および標津川におけるサケの年齢組成変化. 北海道水産試験場研究報告 2015 ; 88 : 55-58.

小林哲夫. サケ *Oncorhynchus keta* (Walbaum) の年齢、成長並びに系統に関する研究. 北海道さけ・ますふ化場研究報告 1961; 16 : 1-102.

宮腰靖之. 北海道東部沿岸で漁獲された9歳魚のサケ. 北海道水産試験場研究報告 2014 ; 85 : 33-35.
宮腰靖之, 春日井 潔, 青山智哉, 安藤大成, 飯嶋亜内, 卜部 浩一, 大森 始, 小山達也, 楠田 聰, 佐々木義隆, 實吉

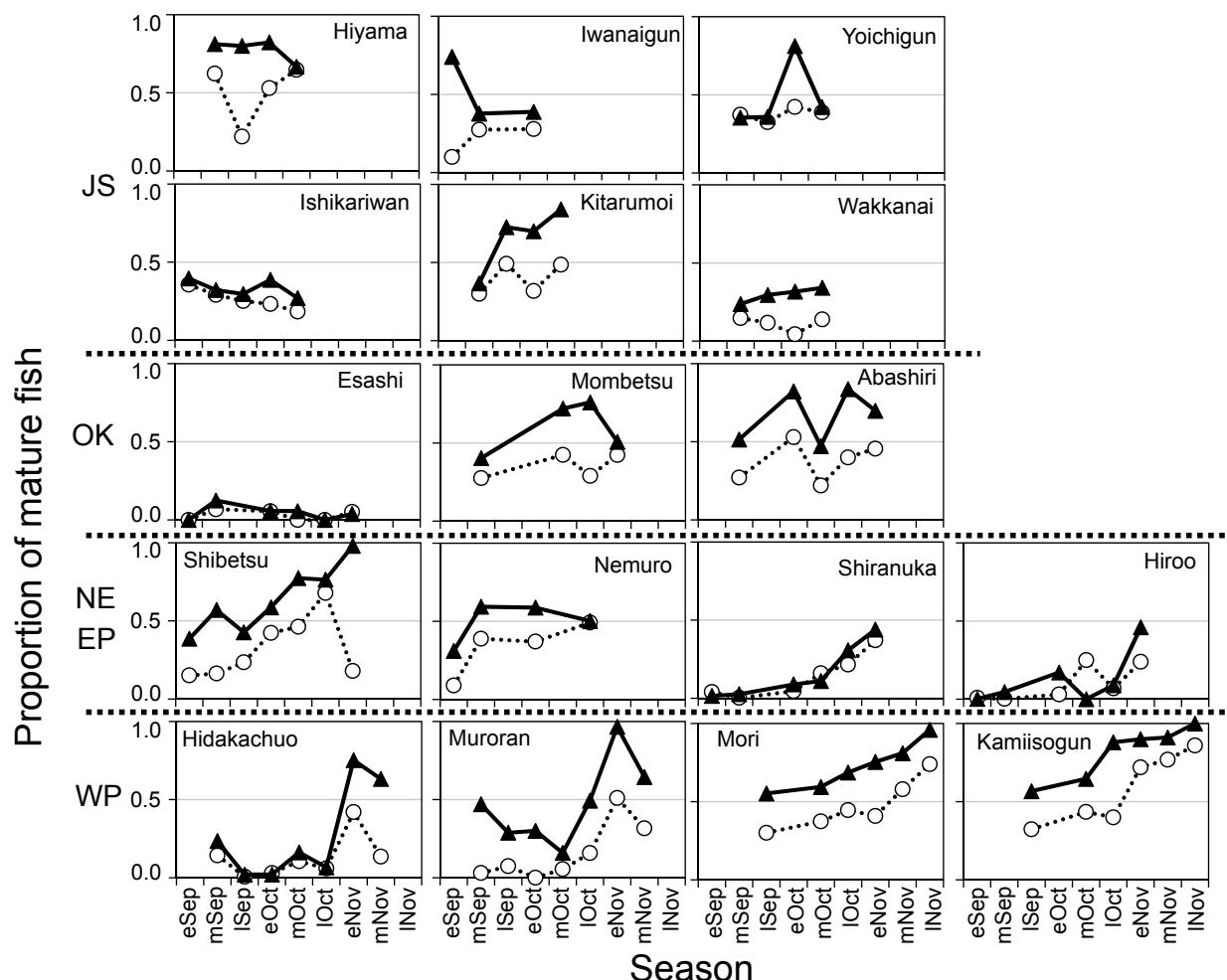


Fig. 3 Seasonal changes in the proportion of mature female and male chum salmon that landed on each fishermen's cooperative associations of Hokkaido. Symbols and abbreviations are the same as in Fig.2.

隼人, 下田和孝, 神力義仁, 竹内勝巳, 虎尾 充, 畑山 誠, 隼野寛史, 藤原 真, 宮本真人, 安富亮平, 星野 昇. 北海道沿岸で漁獲されたサケの年齢組成と魚体サイズ. 北海道水産試験場研究報告 2015 ; 88 : 81-106.

Molyneaux DB, Brodersen AR, Shelden CA. Salmon age, sex, and length catalog for the Kuskokwim Area, 2008. Regional Information Report No. 09-06, Alaska Department of Fish and Game, Anchorage. 2009 ; 77pp.

森田健太郎. サケ沿岸漁獲物の耳石温度標識魚調査. SALMON情報 2017 ; 11 : 33-35.

Morita, K. Earlier migration timing of salmonids: an adaptation to climate change or maladaptation to the fishery? *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 2019 ; 76 : 475-479.

中居 裕. 秋サケの市場・流通. 「秋サケの資源と利用（座間宏一・高橋裕哉編）」恒星社厚生閣, 東京. 1985 ; 125-136.

奈良和俊. サケ・マス類の親魚の捕獲時期別の蓄養日数調査. 魚と卵 1997 ; 166 : 13-27.

西野一彦. ブナ毛対策について. 魚と卵 1981 ; 151 : 44-51.

野川秀樹. さけます類の人工ふ化放流に関する技術小史（序説）. 水産技術 2010 ; 3 : 1-8.

Quinn, TP. *The Behavior and Ecology of Pacific Salmon and Trout*. University of Washington Press, Seattle. 2005.

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2013. URL <http://www.R-project.org/>.

斎藤寿彦, 岡本康孝, 佐々木 系. 日本系サケの生物学的特性. 水産総合研究センター研究報告 2015 ; 39 : 85-120.

Salo EO. Life history of chum salmon (*Oncorhynchus keta*). In: Groot C, Margolis L (eds). *Pacific Salmon Life Histories*. UBC Press, Vancouver. 1991 ; 231 – 309.

佐野誠三, 久保達郎. 北海道各河川遡上鮭 (*O. keta*) の生態調査 1. 北海道さけ・ますふ化場研究報告 1946 ; 1 : 1-11.

佐藤俊平, 浦和茂彦. 日本系サケの遺伝的個体群構造. 水産総合研究センター研究報告 2015; 39: 21-47.
渡辺宗重. 北海道産鮭の卵に関する二・三の観察. 特に卵

の大きいさより見たる鮭の系統について. 北海道さけ
・ますふ化場研究報告 1955; 10: 7-20.

サケ稚魚の初生鱗形成における河川間の違いと採卵時期による影響

下田和孝¹, 渡辺智治², 安藤大成³

¹北海道立総合研究機構函館水産試験場, ²北海道立総合研究機構さけます・内水面水産試験場,

³北海道立総合研究機構水産研究本部

Differences in early squamation of chum salmon *Oncorhynchus keta* juveniles among river populations in seasonally spawning stocks

KAZUTAKA SHIMODA¹, TOMOHARU WATANABE² and DAISEI ANDO³

¹ Hakodate Fisheries Research Institute, Hokkaido Research Organization, *Hakodate, Hokkaido, 040-0051*,

² Salmon and Freshwater Fisheries Research Institute, Hokkaido Research Organization,
Eniwa, Hokkaido, 061-1433,

³ Fisheries Research Department, Hokkaido Research Organization, *Yoichi, Hokkaido 046-8555, Japan*

Body size and period of early squamation in chum salmon juveniles *Oncorhynchus keta* were examined. The difference in squamation process between early- and late-run stocks (fertilized from late September to early October and from middle November to early December, respectively) were compared with juvenile fish from six rivers (Abashiri R., Shibetsu R., Tokachi R., Chitose R., Shizunai R. and Torisaki R.) in Hokkaido, Japan. The delay of early squamation was observed in the rivers where emerging juveniles were shown to have short fork length. The early squamation of late-run stocks was faster than that of early-run stocks in three rivers based on results comparing the period of fertilization. The fork length of juveniles at the first squamation day were observed to be significantly by the analysis of two-way ANOVA depending on the period of fertilization and populations in the rivers. These results suggest that the period of early squamation in chum salmon juveniles could be determined based on the body size at emergence and at the first squamation day. Body sizes can explain the differences in early squamation period between juveniles from the six rivers and during the fertilization period.

キーワード：回帰河川, サケ稚魚, 採卵時期, 初生鱗

魚類の鱗の多くは真皮から生じ、その構造から楯鱗、コズミン鱗、硬鱗、円鱗および櫛鱗に大別される。これらのうち楯鱗は軟骨魚類に、コズミン鱗は化石魚類に、硬鱗はチョウザメ類に特有で、円鱗と櫛鱗は硬骨魚類にふつうにみられる鱗である（松原ほか, 1979）。円鱗と櫛鱗の大きな特徴は鱗の表面に種々の鱗紋（以下、隆起線：circuli）が現れることであり、これらは魚類の分類や年齢査定に広く用いられている（松原ほか, 1979）。

北海道の主要な漁業資源のひとつであるサケ *Oncorhynchus keta* は円鱗を有し、これまでに、その発生に関する組織学的研究や初期発生の様相、隆起線の形成過程や年齢査定手法に関する研究が行われてきた（例え

ば、久保, 1947; 久保, 1949; 小林, 1961; Yamada, 1971）。これらの研究成果はサケの資源増殖事業において回帰親魚の年齢を査定する際に活用され、数十年間にわたって蓄積された年齢データは資源構造の長期的变化の把握や来遊資源量の予測に不可欠なものとなっている。また近年、鱗を用いたバックカリキュレーション法により成長履歴の推定が行われるようになり、個体レベルでの成長速度の解析手法や、稚魚の初期成長と親魚の成長履歴や回帰年齢との関連性について研究が進められている（福若・帰山, 1994; 安藤ほか, 2016）。

一般にほとんどの魚類では卵黄吸収の終了時点で鱗は形成されておらず、その後の成長に伴って鱗の発生が進

行するが、鱗が最初に発生する時期や発生時の体サイズ、発生部位は魚種によって様々である（松原ほか、1979）。サケに関しても卵黄吸収が終了した時点で鱗は未形成で、浮上後に最初の鱗（以下、初生鱗）が尾柄部前方の側線の上下部分に発生し、成長に伴って体の前方や上下方向に鱗形成が進行する（久保、1949；小林、1961）。初生鱗の発生する体サイズについてはいくつかの報告があり、久保（1949）は被鱗体長で35 mm前後、小林（1961）は被鱗体長で32~38 mm、帰山（1986）は尾叉長で37~50 mmと記載している。また、初生鱗の発生する最小体サイズには時期的な違いがあり、採卵時期が遅い種苗ほど初生鱗の発生する体サイズが小さいことが報告されている（小林、1961）。さらに、初生鱗形成時点の最小体サイズが河川によって異なることや、飼育水温が高いと小型の体サイズで早期に初生鱗が形成される傾向があることも報告されている（帰山、1986）。

これらの知見から、サケの初生鱗が形成される体サイズや時期は、回帰河川や採卵時期、発生水温によって異なることが考えられるが、これらを包括的に扱った研究はこれまで行われていない。本報告ではこのうち回帰河川と採卵時期による初生鱗形成の違いについて明らかにするために、北海道の6河川を対象に採卵時期の異なる2群を用いて一定の水温条件下で飼育実験を行い、初生鱗の形成時期とその体サイズについて比較検討を行った。

材料および方法

サケの採卵は、前期（10月20日以前）、中期（10月21日から11月10日）および後期（11月11日以降）の3期に分けて行われている（社団法人北海道さけ・ます増殖事業協会、2007）。このうち本研究では前期群と後期群を飼育実験の対象とし、網走川、標津川、十勝川、千歳川（石狩川支流）、静内川および鳥崎川で資源増殖用に採卵された受精卵から、それぞれ約2,000粒の供与を受け実験に用いた（Fig.1）。これらの卵のうち各群60個をホルマリンで固定し、後日卵の重量を0.001 g単位で測定し、前期群と後期群の間で平均卵重の差の有無をt検定で判定した。

受精卵の飼育は北海道立総合研究機構さけます・内水面水産試験場で行った。河川・採卵時期毎に縦600 mm横300 mm深さ350 mmのアクリル製水槽に卵を収容し、全ての群の水温条件を加温装置により一定（平均水温10.2~10.4°C、標準偏差0.2~0.4°C）に保った。浮上後は、600個体を無作為に抽出して前述のアクリル製水槽中で一定の水温条件（平均水温10.2~10.5°C、標準偏差0.1~0.3°C）および光周期条件（飼育室の蛍光灯をタイマー

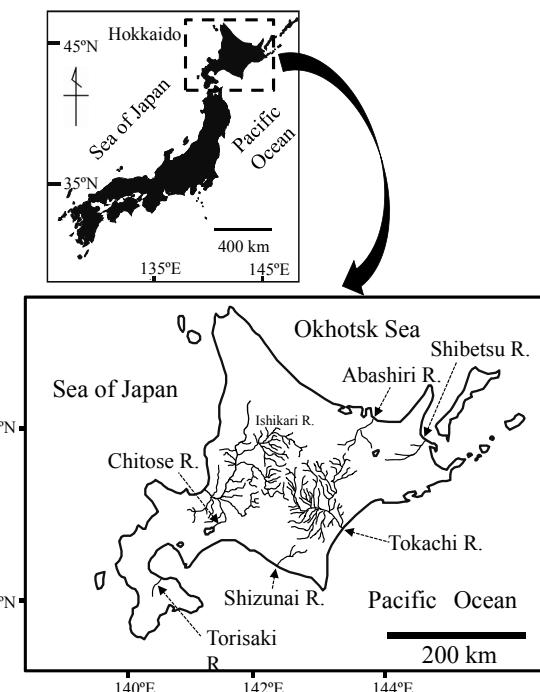


Fig.1 Map of the study area.

により毎日8:00に点灯し17:30に消灯）で飼育した。最も早期に浮上した千歳川の前期群の稚魚では魚体重の5%に相当する量の乾燥飼料（日清丸紅飼料社、ニューアルテックK-2、K-3、K-4）を毎日給餌した。この群と同じ給餌量を全ての群に適用することで、群間での給餌量を一定とした。

浮上当日から毎日10個体を無作為にサンプリングして70%エタノールで固定し、後日、鱗の観察と尾叉長の測定を行った。河川毎に各測定日の平均尾叉長を前期群と後期群との間でt検定により比較した。サケやカラフトマス*Oncorhynchus gorbuscha*の稚魚を用いた実験によると、エタノールで固定する前の尾叉長と比較して固定後に最大で3.2%の収縮や1.8%の伸張が認められるものの、いずれも有意な差ではなかったと報告されていることから（安藤・宮腰、2004）、本研究ではエタノール固定による尾叉長の変化を考慮しなかった。

サケの鱗の形成は尾柄部前方の側線の上下の部位から始まることから（小林、1961）、各個体の尾柄部前方の表皮を切り取ってアリザリンレッドS溶液（0.1 gのアリザリンレッドSと10 g のKOHを蒸留水1000 gで溶解したもの）を用いて30分間染色し、実体顕微鏡下で鱗の有無を判別した（Fig.2）。鱗を確認できた場合には脂鰓直下の側線上方鱗数を数え、さらに側線の直上または直下の鱗5枚について隆起線の数を計数し、鱗長（長径）および第一隆起線の長径を測定した（Fig.2）。隆起線数、鱗長および第一隆起線の長径については、鱗5枚の測定値

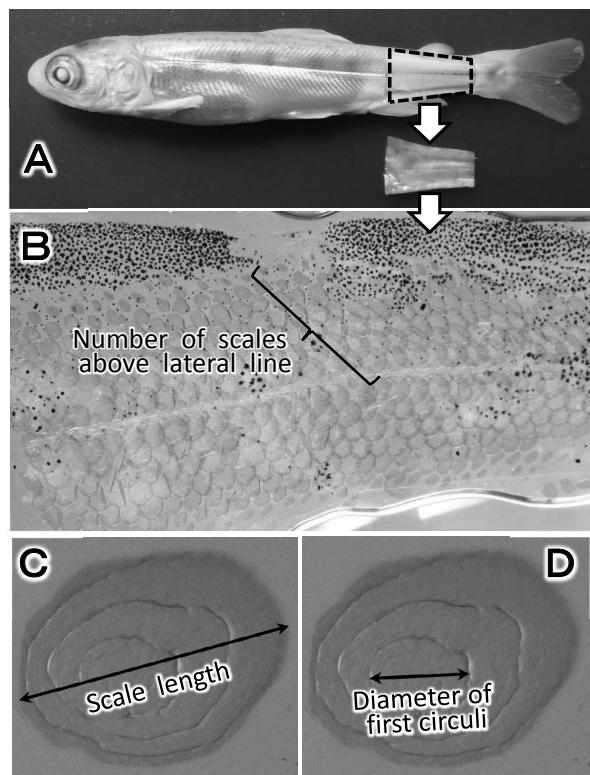


Fig. 2 Scale observation position (A), scale counting position (B), scale length measurement position (C) and diameter of first circuli measurement position (D) of chum salmon juveniles respectively.

の平均値を各個体の値として採用した。これらの測定に併せて各個体の尾叉長を測定し、尾叉長を共変量とした共分散分析により前期群と後期群の間で河川毎に鱗長を比較した。供試魚のサンプリングは浮上日を含め30日間実施したが、鱗の観察と測定は原則として浮上日から19日後までの20日間分をその対象とした。ただし、千歳川では浮上日の19日後においても鱗の形成が確認できない

個体がいたことから、さらに4日間分のサンプルを観察・測定の対象とした。

側線上方鱗数と尾叉長との関係について採卵時期による違いを検討するために、同一の側線上方鱗数を持つ個体の平均尾叉長を前期群と後期群の間で河川毎にt検定で比較した。側線上方鱗を1枚のみ持つ個体は初生鱗が形成された直後であると推測されることから、本研究ではこれらの個体の体サイズを初生鱗形成時点の体サイズとみなし、その尾叉長について河川差および採卵時期による差の有無を二元配置分散分析で検討した。

鱗の隆起線数と尾叉長との関係について採卵時期による違いを検討するために、同一の隆起線数を持つ個体の平均尾叉長を前期群と後期群の間で河川毎にt検定により比較した。また、第一隆起線の平均直径について河川差および採卵時期による違いの有無を二元配置分散分析で検討するとともに、河川毎に前期群と後期群との間でt検定により比較した。

結 果

体サイズの変化 実験に使用した卵の平均重量は、最も小さい千歳川の前期群で0.215 g、最も大きい十勝川の後期群で0.319 gであった（Table 1）。卵の平均重量は、網走川と十勝川では後期群の方が有意に重かったが、その他の河川では群間で違いは認められなかった（Table 1）。

各測定日における平均尾叉長の推移をFig. 3に示した。浮上時の平均尾叉長は前期群、後期群とともに千歳川で最も小さかった（前期群：36.1 mm、後期群：35.9 mm）。浮上時の尾叉長が最も大きいのは鳥崎川の後期群（39.8 mm）で、次いで静内川の両群（前期群：39.4 mm、後期群：39.1 mm）と十勝川の両群（前期群：38.6 mm、

Table 1 Size of chum salmon egg used in the study from six local stocks in Hokkaido, Japan

River	Stock	Egg weight (g)			t-test	
		Mean	SD	N	t	p
Abashiri R.	Early	0.252	0.026	60	-5.979	<0.001
	Late	0.284	0.032	60		
Shibetsu R.	Early	0.268	0.037	60	0.038	0.969
	Late	0.267	0.034	60		
Tokachi R.	Early	0.284	0.033	60	-5.363	<0.001
	Late	0.319	0.039	60		
Chitose R.	Early	0.215	0.033	60	-1.870	0.064
	Late	0.226	0.034	60		
Shizunai R.	Early	0.255	0.029	60	1.166	0.246
	Late	0.249	0.033	60		
Torisaki R.	Early	0.245	0.032	60	-1.943	0.054
	Late	0.257	0.034	60		

後期群:38.8 mm) で大きく、その他の河川は37.0 mm (網走川前期群) から38.3 mm (鳥崎川前期群) の範囲にあった。平均尾叉長は、網走川では浮上後5日目、8日目、10日目および14日目において後期群の方が大きかった。標津川では浮上後9日目、13日目および16日目において前期群が大きかった。十勝川では浮上後1日目、3日目、

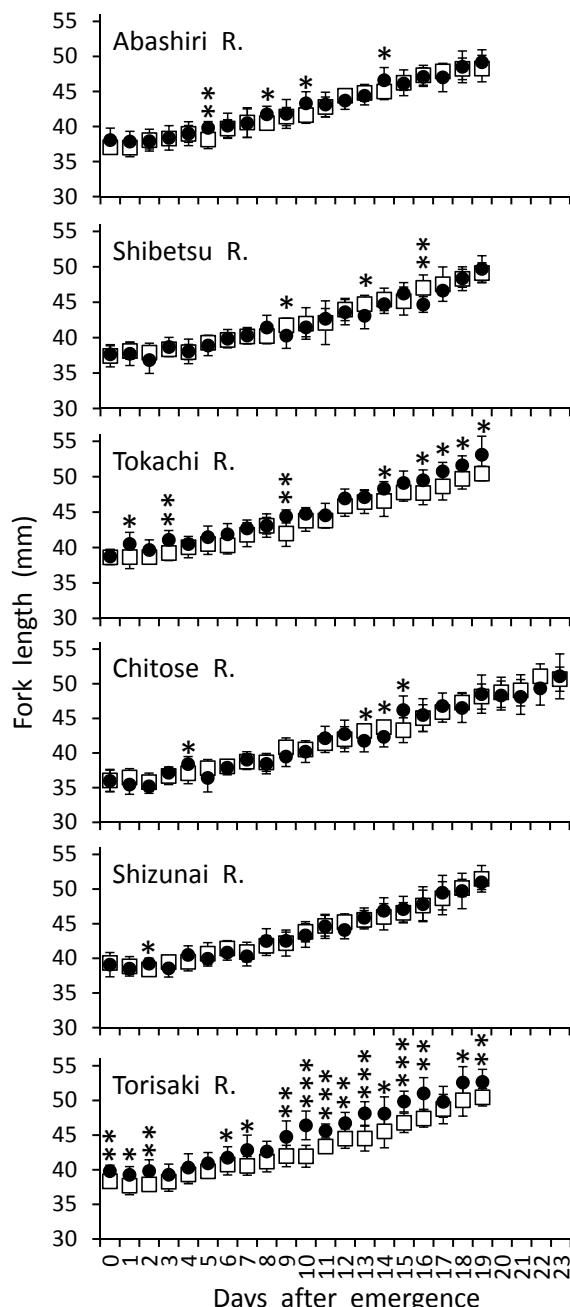


Fig. 3 Daily change of mean fork length (with SD) of chum salmon juveniles. Open squares and closed circles indicate early- and late-run stocks, respectively. Asterisks show significant difference between early- and late-run stocks by t-test ($*p<0.05$, $**p<0.01$, $***p<0.001$).

9日目、14日目および16~19日目で後期群が大きかった。千歳川では浮上後4日目と15日目は後期群で大きかったが、13日目と14日目では前期群で大きかった。静内川では浮上後2日目のみ後期群で大きかった。鳥崎川では浮上後3~5日目、8日目および17日目を除き後期群で大きかった。

初生鱗の形成時期 鱗の発生が確認できる個体の割合(以下、鱗保有率)の変化をFig.4に示した。

網走川では前期群、後期群ともに浮上後6日目から鱗を確認できる個体が現れた。鱗保有率は、浮上後10日目から15日目にかけて後期群で高かった。鱗保有率が50%に達したのは前期群では浮上から12日目、後期群では10日目であった。鱗保有率が100%に達したのは前期群では浮上から16日目、後期群では15日目であった。

標津川では前期群は浮上後7日目から、後期群は浮上後6日目から鱗を確認できる個体が現れた。鱗保有率は、

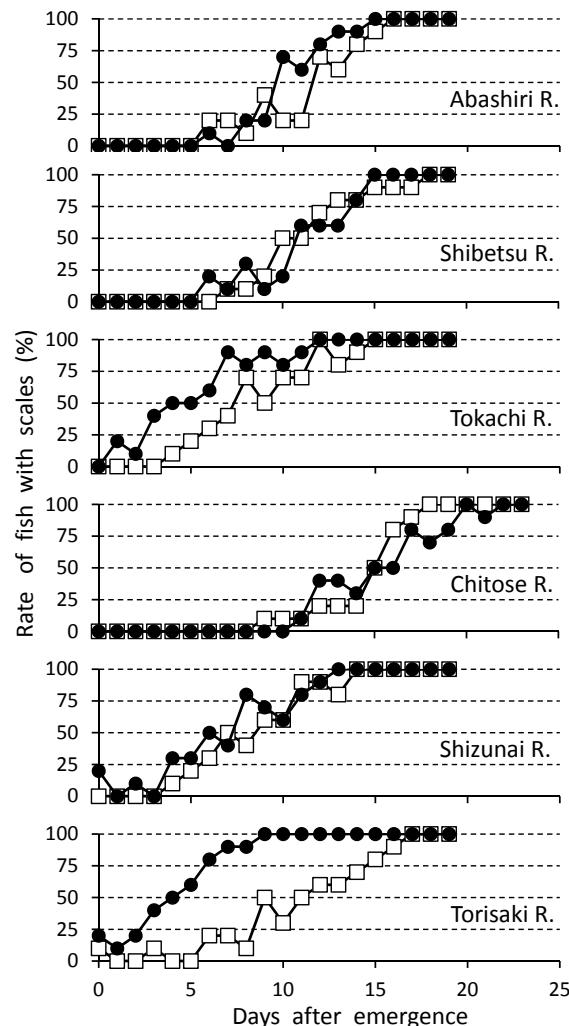


Fig. 4 Daily change of the rate of fish with scales. Open squares and closed circles indicate early- and late-run stocks, respectively.

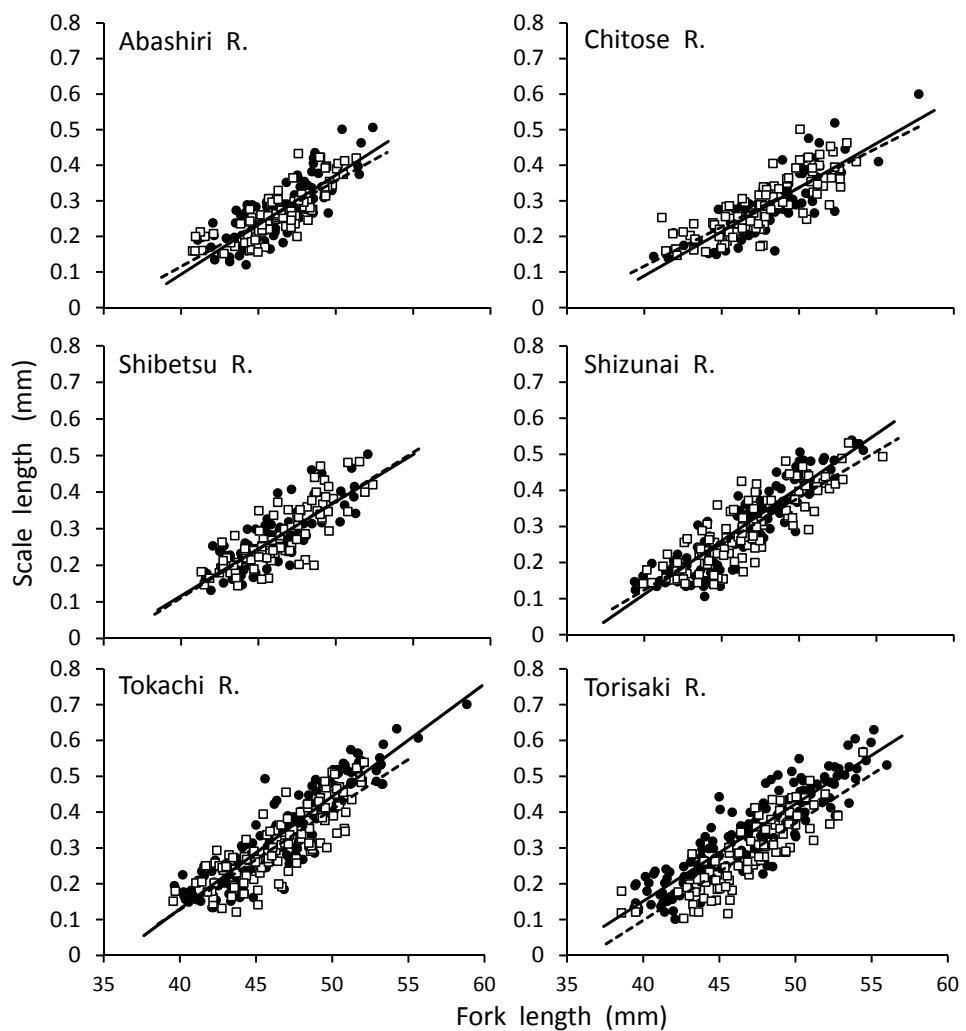


Fig.5 Relationship between fork length and scale length of chum salmon juveniles. Open squares and closed circles indicate early- and late-run stocks, respectively. Dotted lines and solid lines indicate regression line of the early- and late-run stocks, respectively.

Table 2 Results of correlation analysis (between fork length and scale length) and results of ANCOVA (covariate: fork length) between scale length of early- and late run stocks

River	Stock	Correlation analysis			ANCOVA			
		Fork length—Scale length			Test of homogeneity of slopes		Difference between stock	
		<i>r</i>	<i>p</i>	<i>n</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
Abashiri R.	Early	0.810	0.001<	83	1.88	0.172	0.04	0.837
	Late	0.825	0.001<	94				
Shibetsu R.	Early	0.851	0.001<	84	0.06	0.809	0.01	0.941
	Late	0.905	0.001<	85				
Tokachi R.	Early	0.804	0.001<	113	2.75	0.098	12.51	0.001<
	Late	0.803	0.001<	146				
Chitose R.	Early	0.806	0.001<	91	1.21	0.274	0.64	0.424
	Late	0.836	0.001<	84				
Shizunai R.	Early	0.837	0.001<	113	4.39	0.037	3.59	0.059
	Late	0.913	0.001<	126				
Torisaki R.	Early	0.909	0.001<	86	0.00	0.993	54.97	0.001<
	Late	0.850	0.001<	156				

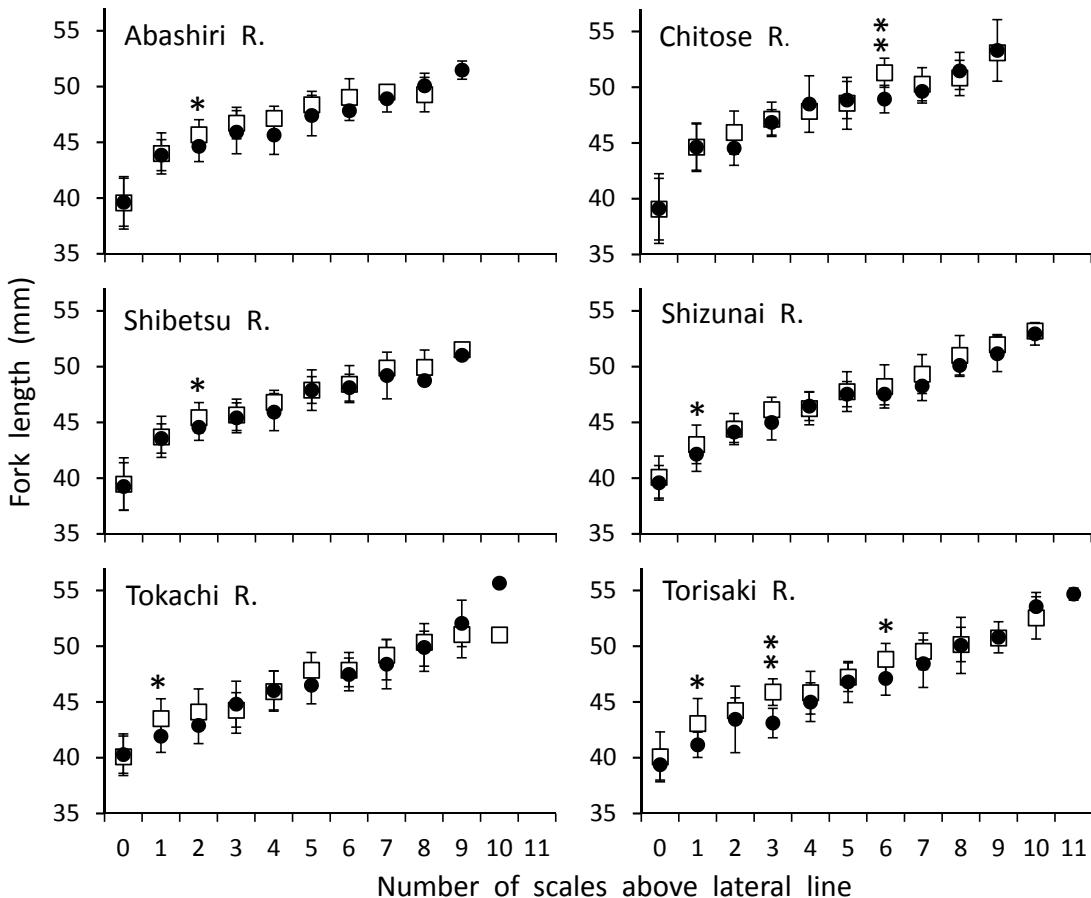


Fig.6 Relationship between the number of scales above the lateral line and mean fork length (with SD) of chum salmon juveniles. Open squares and closed circles indicate early- and late-run stocks, respectively. Asterisks show significant difference between early- and late-run stocks by t-test (* $p<0.05$, ** $p<0.01$).

浮上後9日目から15日目にかけて群間に明確な違いはみられず、鱗保有率が50%に達したのは前期群では浮上から10日目、後期群では11日目であった。前期群は浮上後18日目に、後期群は15日に鱗保有率100%となった。

十勝川では前期群は浮上後4日目から、後期群は浮上の翌日から鱗を確認できる個体が現れた。鱗保有率は、浮上後14日目まで後期群で高く推移し、鱗保有率が50%に達したのは前期群では浮上から8日目、後期群では4日目であった。両群ともに浮上から12日目に鱗保有率が100%に達した。ただし、前期群の鱗保有率は13日目と14日にそれぞれ80%と90%に低下した後、15日に再び100%となった。

千歳川では前期群は浮上後9日目から、後期群は浮上後11日目から鱗を確認できる個体が現れた。鱗保有率は、浮上後11日目から17日目にかけて群間に明確な違いはみられず、鱗保有率が50%に達したのは両群ともに浮上から15日目であった。前期群は浮上後18日目に、後期群は20日目に鱗保有率が100%となった。

静内川では前期群は浮上後4日目から、後期群は浮上

当日に鱗を確認できる個体が現れた。鱗保有率は、浮上後6日目までは後期群でやや高く推移したものの、7日目から12日目にかけて群間に明確な違いはみられず、鱗保有率が50%に達したのは前期群では浮上から7日目、後期群では6日目であった。前期群は浮上後14日目に、後期群は13日に鱗保有率が100%となった。

鳥崎川では両群ともに浮上当日に鱗を持つ個体が確認された。鱗保有率は、浮上後15日目まで後期群で高く、鱗保有率が50%に達したのは前期群では浮上から9日目、後期群では4日目であった。前期群は浮上後17日に、後期群は9日に鱗保有率が100%となった。

このように、標津川、千歳川および静内川では前期群と後期群の間で鱗保有率の推移に大きな違いは認められなかったが、網走川、十勝川および鳥崎川では鱗保有率が後期群で高く推移する傾向が見られた。また、千歳川は他の河川と比べて鱗形成の開始時期が遅いという特徴があった。

尾叉長と鱗長との関係 各河川における尾叉長と鱗長との関係をFig.5に示した。共分散分析によると、静内川

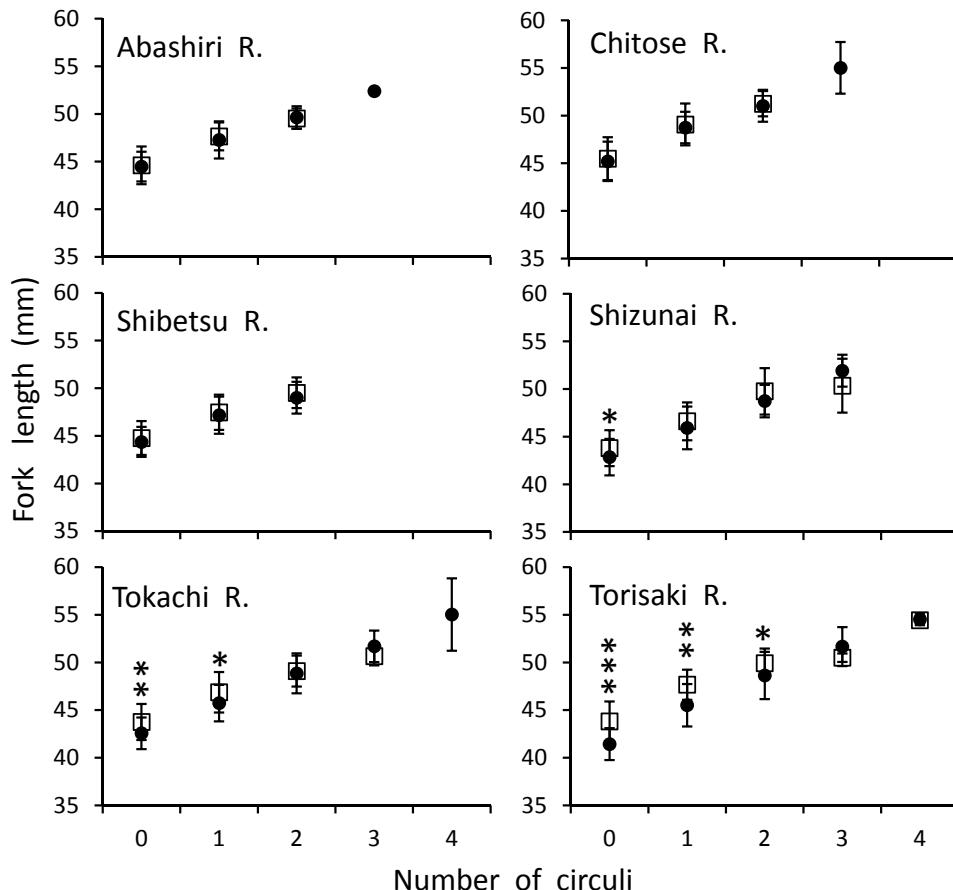


Fig. 7 Relationship between the number of scale circuli and mean fork length (with SD) of chum salmon juvenile. Open squares and closed circles indicate early- and late-run stocks, respectively. Asterisks show significant difference between early- and late-run stocks by t-test (* $p<0.05$, ** $p<0.01$, *** $p<0.001$).

では平行性の検定が有意であり、後期群の方が回帰直線の傾きが急であると判定された (Table 2)。十勝川と鳥崎川では群間での差の検定が有意であり、尾叉長が同じ場合には後期群の方が大きな鱗を持つものと判定された (Table 2)。

側線上方鱗数と尾叉長との関係 各河川における側線上方鱗数と尾叉長との関係をFig. 6に示した。側線上方鱗数は最も多い個体で11枚であった。側線上方鱗数毎の平均尾叉長はいずれの河川においても前期群の方がわずかに大きい傾向が見られ、網走川の鱗数2枚、標津川の鱗数2枚、十勝川の鱗数1枚、千歳川の鱗数6枚、静内川の鱗数1枚、鳥崎川の鱗数1枚、3枚および6枚において有意差が認められた。

側線上方鱗を1枚のみ持つ個体の平均尾叉長は、河川差と採卵時期による差は有意であったが交互作用は認められなかった (二元配置分散分析、河川差 : $F=12.00$, $p<0.001$, 回帰時期差 : $F=12.28$, $p<0.001$, 交互作用 : $F=2.11$, $p=0.064$)。側線上方鱗を1枚のみ持つ個体の平均尾叉長は、前期群では千歳川が最も大きく (44.6 mm),

続いて網走川 (44.0 mm), 標津川 (43.7 mm), 十勝川 (43.5 mm), 鳥崎川 (43.1 mm), 静内川 (43.0 mm) の順に大きかった。後期群も同様に千歳川が最も大きく (44.6 mm), 続いて網走川 (43.8 mm), 標津川 (43.6 mm), 静内川 (42.2 mm), 十勝川 (41.9 mm), 鳥崎川 (41.2 mm) の順に大きかった。

隆起線の数と尾叉長との関係 鱗の隆起線数と尾叉長との関係をFig. 7に示した。隆起線数は最も多い個体で4本であった。隆起線数毎に平均尾叉長を比較すると後期群の方が小さい傾向が見られ、十勝川では隆起線数0本および1本において、静内川では隆起線数0本において、鳥崎川では隆起線数0本、1本および2本において有意差が認められた。

第一隆起線の直径 二元配置分散分析によると第一隆起線の平均直径 (Fig. 8) は、採卵時期による差と河川差の双方が有意であった (回帰時期差 : $F=55.89$, $p<0.001$, 河川差 : $F=32.56$, $p<0.001$)。交互作用も有意であったが、そのF値は河川差や採卵時期による差と比べて低かった ($F=2.45$, $p=0.033$)。採卵時間間の比較では、標津川,

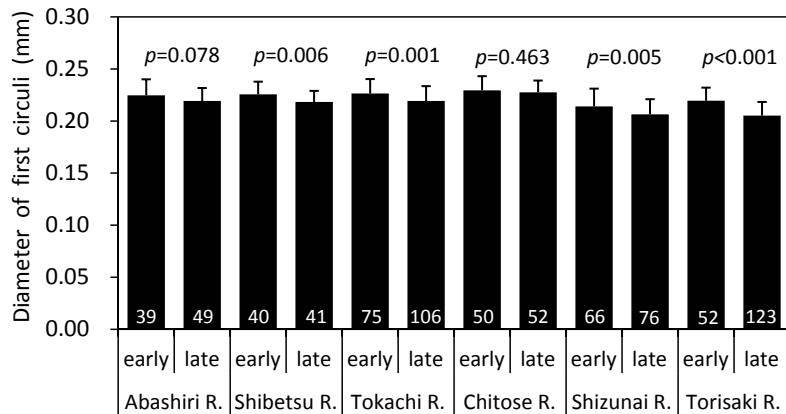


Fig. 8 Mean diameter of first circulus (with SD) of chum salmon juvenile scales. Values above the bars show p-values of t-test between early- and late-run stocks. Values in bars are sample size.

十勝川、静内川および鳥崎川で後期群が前期群よりも有意に小さかった (Fig. 8)。河川間の比較では、前期群では千歳川が0.229 mmで最も大きく、続いて十勝川 (0.227 mm)、標津川 (0.226 mm)、網走川 (0.225 mm)、鳥崎川 (0.220 mm)、静内川 (0.214 mm) の順に大きかった。後期群も同様に千歳川が0.228 mmで最も大きく、続いて網走川と十勝川 (ともに0.219 mm)、標津川 (0.218 mm)、静内川 (0.206 mm)、鳥崎川 (0.205 mm) の順に大きかった。

考 察

本研究の結果によると浮上から初生鱗形成までの経過日数には河川による違いが認められ、初生鱗を確認できる個体が現れたのは、千歳川では浮上から9~11日目であったのに対し、網走川と標津川では浮上から6~7日目、十勝川、静内川および鳥崎川では浮上から4日目よりも前であった (Fig. 4)。浮上時の尾叉長は、初生鱗の形成が最も遅い千歳川で最も小さく、次いで網走川と標津川で小さく、十勝川、静内川および鳥崎川はいずれも大型であった (Fig. 3)。これらのこととは、浮上時の体サイズが小さいほど初生鱗形成までの所要日数が長くなることを示し、浮上時の体サイズの違いが初生鱗形成時期の河川差を生み出す一因であると考えられる。

本研究では初生鱗形成時点の体サイズを直接測定することはできなかったが、側線上方鱗を1枚のみ持つ個体は初生鱗が形成された直後であると推測されることから、これらの個体の体サイズを初生鱗形成時点の体サイズ(以下、初生鱗形成体サイズ)とみなした。側線上方鱗を1枚のみ持つ個体の平均尾叉長に河川差が認められたことから (Fig. 6)、初生鱗形成体サイズが異なることも

また初生鱗形成時期の河川差を生み出す一因であると考えられる。

すなわち、初生鱗の形成時期は浮上時の体サイズと初生鱗形成体サイズとの差の大小によって決まり、この差が大きいほど浮上から初生鱗形成までの間の所要日数が長くなると考えられる。例えば、初生鱗の形成時期が最も遅い千歳川は浮上時の体サイズが最も小さいが、同時に初生鱗形成体サイズは他の河川よりも大きいため、浮上時の体サイズと初生鱗形成体サイズとの差が大きい。このように千歳川では浮上時の体サイズが小さいことに加えて初生鱗形成体サイズが大きいことで、初生鱗の形成時期がよりいっそう遅くなっていると考えられる。

初生鱗の形成時期は同一河川の前期群と後期群との間でも違いが認められる場合があった。十勝川と鳥崎川では浮上から15日目にかけての鱗保有率が後期群で高い傾向が認められた (Fig. 4)。両河川では初生鱗形成体サイズが後期群で小さい傾向が認められるとともに (Fig. 6, 十勝川前期群: 43.5 mm, 十勝川後期群: 41.9 mm, 鳥崎川前期群: 43.1 mm, 鳥崎川後期群: 41.2 mm), 鳥崎川では浮上時の尾叉長が後期群で大きい傾向が認められた (Fig. 3, 前期群: 38.3 mm, 後期群: 39.8 mm)。これらの河川では、浮上時の体サイズと初生鱗形成体サイズとの差が後期群において小さいことで、後期群の初生鱗の形成時期が前期群よりも早くなっていると考えられる。

側線上方鱗を1枚のみ持つ個体の体サイズが後期群で小さい傾向は静内川においても認められた。静内川、十勝川および鳥崎川では第一隆起線の直径が後期群で小さく (Fig. 8), 鱗の隆起線数と尾叉長との関係においては、隆起線数0本または1本の個体の平均尾叉長が後期群で小さい傾向が認められた (Fig. 7)。鱗の隆起線は鱗の形成過程で生じる骨基質の部分的な肥厚であり (Yamada,

1971), その形成は体成長と関係していることから (Fukuwaka and Kaeriyama, 1997), これら3河川の後期群では前期群よりも小さな体サイズで隆起線の形成が始まると推察される。また, 十勝川と鳥崎川では尾叉長が同じ場合には後期群は前期群よりも大きな鱗を持つ傾向が認められ, 静内川では鱗長と尾叉長との回帰直線の傾きが後期群で急であった (Fig.5)。これら3河川においては鱗の微細構造の発達や鱗全体の発達が後期群で早く進行すると考えられる。

本研究と同一の実験群を用いてサケ稚魚の成長に伴う体色の変化を調べた報告では, 静内川を除く5河川においては成長に伴う体色の銀白化の進行が後期群で早いことが示されている (下田ほか, 2018)。一方, 今回の結果は, 十勝川と鳥崎川の鱗の発達が後期群で早い点では下田ほか (2018) と同様であったが, 静内川に関しては前期群の方が体色の銀白化が早いことをこの報告では示しており本研究の結果とは矛盾する。ただし, 双方の結果を詳しく対比すると, 静内川においても浮上時点の体色は後期群の方が白色度を示すL値が高く, その1週間後には両者の違いは認められなくなり, さらに1週間後には前期群のL値が高くなっている (下田ほか, 2018)。また, 今回の結果では浮上後1週間までの鱗保有率は後期群の方がやや高く推移し, その後両者の違いは認められなくなった (Fig.4)。つまり, 浮上から1週間以内に関しては静内川においても鱗形成と体色変化に同調性が見られ, いずれも後期群で早く進行するものと推察される。

他の3河川 (千歳川, 標津川および網走川) については, 各河川につき一部の測定項目に関して後期群の方が前期群よりも鱗の形成や微細構造の発達が早いことを示す結果が得られた。例えば, 鱗保有率の変化に関しては網走川において浮上後10日目から15日目にかけて後期群で高く推移していた (Fig.4)。側線上方鱗数と尾叉長との関係においては, 網走川と標津川では鱗数2枚において, 千歳川では鱗数6枚において後期群の方が尾叉長が小さく (Fig.6), また, 第一隆起線の直径は標津川において後期群で小さい傾向が認められた (Fig.8)。体色の銀白化に関してはこれら3河川においても後期群で早く進行すると報告されている (下田ほか, 2018)。

以上の結果および考察は, 6河川ともに鱗の形成と体色の銀白化との間には概ね同調性があり, 両者はいずれも後期群で早く進行する傾向があることを示唆している。北海道におけるサケの孵化放流事業では, 沿岸水温が5°Cから13°Cとなる時期が高い初期生残を期待できるとされるが, その期間は1か月~2か月間程度であり親魚が河川回帰する期間が3か月以上 (9月上旬~11月以降) に

及ぶのと比べて短い (社団法人北海道さけ・ます増殖事業協会, 2007)。このため, 後期群は前期群と比べて飼育に充てられる期間が短く, 放流時の体サイズが小さくなりやすいと考えられる。また, 野生魚に関しては, 産卵河川の冬期間の水温が地下水や湧水を使用する孵化場の飼育水温よりも通常低いため, 後期群の浮上時期はさらに遅くなり, 降海時の体サイズは後期群の放流魚よりも小さいことが推察される。後期群の小型の稚魚が外敵の多い海洋で生活するうえで, 発達した鱗による防御や銀白の保護色が生残率を高めるのに役立つものと推測され, そうした特性を備えた個体が自然選択を受けた結果, 後期群の鱗形成や体色の銀白化が前期群よりも早く進行するようになったのかもしれない。

本研究の結果および考察は, サケの初生鱗の形成時期が浮上時の体サイズと初生鱗形成体サイズによって決まり, 両者が河川や採卵時期により異なることが初生鱗形成時期の河川差や採卵時期による違いを生み出すと要約できる。このうち浮上時の体サイズについては, 卵サイズや卵発生時の水温や流速などによって変化する可塑的な形質であると推測される。一方, 初生鱗形成体サイズに関しては, 本研究では一定の飼育条件で実験を行ったにも関わらず, 側線上方鱗を1枚のみ持つ個体, すなわち初生鱗形成直後に相当する個体の体サイズが河川や採卵時期によって異なっていた。このことは初生鱗形成体サイズが遺伝性を有する可能性を示唆している。ただし, 帰山 (1986) は飼育水温が高いと小型の体サイズで早期に初生鱗が形成される傾向があることを報告しており, 初生鱗形成体サイズが水温条件によって変化するという可塑性を有する可能性も考えられる。これらの可能性を実験的に検証することで, 初生鱗形成の時期や初生鱗形成体サイズの多様性が生じるメカニズムを明らかにできると期待される。

謝 辞

本研究の実施にあたり, 一般社団法人十勝釧路管内さけ・ます増殖事業協会, 一般社団法人日本海さけ・ます増殖事業協会, 一般社団法人根室管内さけ・ます増殖事業協会, 一般社団法人日高管内さけ・ます増殖事業協会, 一般社団法人北見管内さけ・ます増殖事業協会および一般社団法人渡島管内さけ・ます増殖事業協会の職員の皆様に多大なご協力を頂きました。卵や仔稚魚の飼育管理にあたっては, さけます・内水面水産試験場の櫻井陽介氏にご尽力頂きました。ここに記して厚くお礼申し上げます。

引用文献

- 安藤大成, 宮腰靖之. 固定方法の違いによるサケ・マス稚幼魚の体サイズ変化. 北海道立水産孵化場研究報告 2004 ; 58 : 17-32.
- 安藤大成, 下田和孝, 隼野寛史, 宮腰靖之. サケ雄親の回帰年齢が稚魚の初期成長に影響する可能性. 日本水産学会誌2016 ; 82 : 298-305.
- 福若雅章, 帰山雅秀. 鱗解析によるサケ幼魚の成長速度の計算法. 北海道さけ・ますふ化場研究報告1994 ; 48 : 1-9.
- Fukuwaka M, Kaeriyama M. Scale analysis to estimate somatic growth in sockeye salmon, *Oncorhynchus nerka*. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1997 ; 54 : 631-636.
- 小林哲夫. サケ *Oncorhynchus keta* (Walbaum) の年齢, 成長並びに系統に関する研究. 北海道さけ・ますふ化場研究報告1961 ; 16 : 1-102.
- 久保達郎. 鱗相より見た鮭の生態 (I). 北海道さけ・ますふ化場研究報告1947 ; 2 : 16-25.
- 久保達郎. 鱗相より見た鮭の生態 (II) 網走川, 常呂川の鮭の成長. 北海道さけ・ますふ化場研究報告1949 ; 4 : 79-94.
- 帰山雅秀. サケ *Oncorhynchus keta* (Walbaum) の初期生活に関する生態学的研究. 北海道さけ・ますふ化場研究報告1986 ; 40 : 31-92.
- 松原喜代松, 落合 明, 岩井 保. 「魚類学 (上)」恒星社厚生閣, 東京. 1979.
- 下田和孝, 渡辺智治, 安藤大成. サケ親魚の回帰時期による稚魚の体色の銀白化の違い. 北海道水産試験場研究報告2018 ; 94 : 41-46.
- 社団法人北海道さけ・ます増殖事業協会. 「さけ・ますふ化放流事業実施マニュアル」社団法人北海道さけ・ます増殖事業協会, 札幌. 2007.
- Yamada J. A fine structural aspect of development of scales in the chum salmon fly. *Bull. Jap. Soc. Fish.* 1971 ; 37 : 18-29.

北海道スケトウダラ研究グループ会議50周年記念論文（2）

Special papers for the 50th anniversary of the “Hokkaido Suketoudara Kenkyu Group”(Hokkaido Walleye Pollock Research Group) Part 2

秋季の道東太平洋海域におけるスケトウダラ *Gadus chalcogrammus* 0歳魚の分布水深の長期変動

志田 修¹, 石田良太郎², 石田宏一³, 坂口健司⁴

¹北海道立総合研究機構稚内水産試験場,

²北海道立総合研究機構さけます・内水面水産試験場,

³北海道立総合研究機構水産研究本部（北海道原子力環境センター駐在）,

⁴北海道立総合研究機構釧路水産試験場

Inter-annual fluctuation in distribution of age-0 walleye pollock *Gadus chalcogrammus* in the southeastern Pacific coast of Hokkaido

OSAMU SHIDA^{*1}, RYOTARO ISHIDA², KOICHI ISHIDA³ and KENJI SAKAGUCHI⁴

¹ Wakkai Fisheries Institute, Hokkaido Research Organization, Wakkai, Hokkaido 097-0001,

² Salmon and Freshwater Fisheries Research Institute, Hokkaido Research Organization,
Eniwa, Hokkaido 061-1433,

³ Hokkaido Nuclear Energy Environmental Research Center Office, Fisheries Research Department,
Hokkaido Research Organization, Kyowa, Hokkaido 045-0123,

⁴ Kushiro Fisheries Institute, Hokkaido Research Organization, nakahama-cho, Kushiro, Hokkaido 085-0027, Japan

Inter-annual fluctuation in the distribution of age-0 walleye pollock *Gadus chalcogrammus* in the southeastern Pacific coast of Hokkaido was examined by acoustic surveys conducted in autumn from 1997 to 2013. As a result, age-0 juveniles were widely distributed through the continental shelf to the continental slope region, where, inter-annual changes in the distribution of age-0 fish were found. A major change observed was that their distribution shifted from the continental shelf to the slope region in 1999, 2000, 2003 and 2005. It seems that age-0 pollock distribution is regulated by the size of the fish and environmental factors such as food availability and water temperature, but not by the distribution of adult pollock that are a major predator of the juveniles.

キーワード：0歳魚, 秋季, スケトウダラ, 長期変動, 道東太平洋, 分布

北方四島周辺から房総半島までの太平洋沿岸を分布域とするスケトウダラ *Gadus chalcogrammus* 太平洋系群 (Tsugi, 1989) は、その資源量が100万トンに達する (境ら, 2019) 日本最大のスケトウダラ資源である。本系群の主たる産卵場は噴火湾および噴火湾口部を含む日高湾と考えられている (Wakabayashi *et al.*, 1990)。この海域で発生した卵のうち、噴火湾内へ輸送された個体は湾内で仔稚魚期を過ごす。全長7 cm程度まで成長した稚魚の大部分は、海底付近に生活の場を移しながら噴火湾外に出て (中谷・前田, 1987), 8月頃までに沿岸域を通ってえ

りも岬以東の北海道東部太平洋海域（以後道東海域と略す）へ移動する (志田・西村, 2002; Honda *et al.*, 2004)。その後は、初回成熟に達する3~4歳まで道東海域および北方四島水域に分布すると考えられている (境ら, 2019)。

Virtual population analysisによって推定された本系群の資源量は、1981年度以降90~145万トンの範囲で変動しており (1981~2014年度; 境ら, 2019)，その変動は加入量の多寡に依存することが知られている (例えば Shida *et al.*, 2007)。これまで本系群の加入量変動機構に

ついて多くの議論が積み重ねられてきたが、近年、生活史初期の減耗だけではなく、海底付近に生活の場を移して以降の生活期（0歳魚期）におけるスケトウダラ、マダラ *Gadus macrocephalus* やアブラガレイ *Atheresthes evermanni* などによる被食減耗が加入量決定に重要な役割を果たしている可能性が示唆されている（例えば Funamoto *et al.*, 2014）。特にスケトウダラは、その資源量の多さから見て最も重要な捕食者であると推測される（Yamamura *et al.*, 2001）。被食減耗が起こるためには、捕食者と被食者の分布オーバーラップが必要であることから、両者の分布を把握することは、加入量変動に及ぼす被食減耗の影響度を明らかにするうえで重要である。これまでの研究によると、スケトウダラ0歳魚の分布は、水温（中谷・前田, 1987；志田2002）、成長に伴う変化（ontogenetic movement to deeper water; Brodeur *et al.*, 1996）、餌生物の利用しやすさ（food availability: Wilson *et al.*, 2013；Ciannelli *et al.*, 2002）、捕食者の分布（Bailey, 1989；Ciannelli *et al.*, 2002）およびこれらの組み合わせの影響を受けることが指摘されている。道東海域においても、秋季に0歳魚が大陸棚に分布すること（志田, 2002）、0歳魚の分布水深と体長に正の相関関係があることが報告されている（志田ら, 1999）。しかし、これらはいずれも1990年代後半に実施された研究であり、年変動の有無など、その後の長期的な観察結果は報告されていない。また、捕食者の分布や餌生物との関係についても、明らかにされていない。

計量魚群探知機（以降計量魚探機と略す）による資源調査は、ベーリング海のスケトウダラのように単一魚種として中底層に均一に分布する魚群に適した方法であり（宮野鼻, 2000），これまで本系群のスケトウダラの分布や移動を明らかにすることを目的とした調査研究にも用いられてきた（例えばHonda *et al.*, 2004）。そこで本研究は、1997年から2013年に道東太平洋海域の十勝（大津）沖で実施された計量魚探機による音響データ収集とトロール網によるサンプリングを組み合わせた音響資源調査のデータを用いて、秋季のスケトウダラ0歳魚と捕食者であるスケトウダラ成魚の分布水深の長期変動を明らかにすることを目的として実施した。また、0歳魚の分布に影響を与えると考えられる体サイズや水温、餌生物の利用のしやすさなどの環境要因について検討した。

試料（材料）と方法

音響資源調査およびトロールサンプリング 音響資源調査は、道東海域において1997年、1999～2001年、2003～2007年、2009～2011年および2013年11月に釧路水試所属

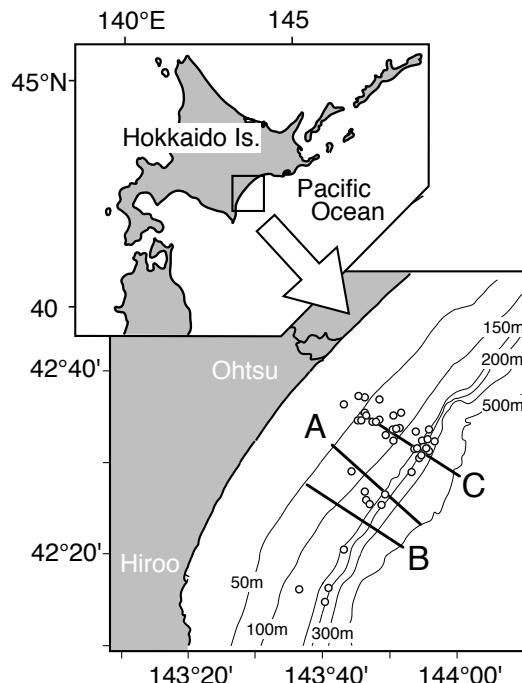


Fig.1 Map of study area showing acoustic survey lines (bold lines, A-C) and trawl sampling stations (circles)

Table 1 Summary of the acoustic surveys.

Year	Month	Day	Time		Echo sounder	Survey Line
			Start	End		
1997	Nov.	21	11:35	12:06	FQ-70	A
1999	Nov.	9	17:57	19:58	FQ-70	B
2000	Nov.	7	17:53	19:26	FQ-70	B
2001	Nov.	8	17:02	19:22	FQ-70	C
2003	Nov.	11	18:09	19:11	EK60	C
2004	Nov.	8	17:59	18:59	EK60	C
2005	Nov.	11	19:51	21:05	EK60	C
2006	Nov.	10	19:26	20:26	EK60	C
2007	Nov.	7	18:43	19:43	EK60	C
2009	Nov.	10	0:14	1:18	EK60	C
2010	Nov.	11	16:49	18:21	EK60	C
2011	Nov.	8	18:36	20:04	EK60	C
2013	Nov.	11	17:56	19:27	EK60	B

試験調査船北辰丸（216トン）を用いて実施した（Fig.1 およびTable 1）。1998年はトロール調査による0歳魚の採集尾数が非常に少なかったこと、2008年は海況が悪く、泡切れによる計量魚探機データの航走減衰が非常に大きかったこと、2012年は音響調査を実施した海域におけるトロール調査が水深帯別に実施できなかったことから、いずれもその後の解析が困難と判断し、本研究から除外した。音響データの収録に使用した計量魚探機は1997から2001年まではFQ-70（古野電気）、2003年以降はEK60（Simrad社）であった。計量魚探機の較正は、調査開始前に1997年はハイドロフォン（FQ-70）、それ以外の年は標準球（FQ-70およびEK60）により実施した。使用した周波数は、FQ-70が50 kHz、EK60は38 kHzである。

Table 2 Summary of the acoustic parameters used in this study.

Parameter	Echo sounder	
	FQ-70	EK60
Frequency (kHz)	50	38
Pulse duration (ms)	1.8	1.0
Threshold (dB)	-70	-70
Integration interval (nm)	0.1	0.1
Attenuator (dB)	20	—

Table 2に計量魚探機の主要な設定値を示す。音響データ収録は、スケトウダラが年齢またはサイズごとに等深線に沿って連続した魚群を形成すること（志田, 2002）を考慮して100 m等深線に垂直に設定した航走ライン上においてShida (2001) に従い夜間に実施した。1997年はデータ収録を日中しか実施しなかったため昼間のデータを使用した。調査期間の日出および日没時刻は、調査時期が比較的遅かった1997年はそれぞれ6:21および15:57、それ以外の年は6:03～6:09および16:06～16:11の範囲にあった。データ収録中の船速は航走ノイズを考慮して、原則FQ-70では8ノット、EK60では9ノットとした。ただし、海況が悪い場合には減速した。データ収録範囲はスケトウダラ0歳魚の分布域をカバーするように2003～2009年は水深50～300 m、それ以外の年は水深50～500 mの範囲とした。

また、航走ラインの両端および中間の1～3点において、電気伝導度水温深度計 (Conductive Temperature meter) 以降CTDと略す、SeaBird社) により海面から海底直上までの水温および塩分を測定した。

観察された魚群反応の魚種判別と、魚群を構成するスケトウダラの尾叉長および0歳魚の割合を把握するため、音響データ収録後、日中に航走ライン付近において水深帯別にトロール網による標本採集を行った。音響調査時の観察結果から、魚群反応の大部分が日中は海底付近に分布していたことから、採集には着底トロール網（網口高さ2～3 m、コッド内張目合13 mm）を使用した。曳網は等深線に平行に行い、曳網時の速度は2～3ノット、曳網時間は15～20分としたが、魚群反応の非常に強い場合は最短3分、反応が微弱な場合は最長30分まで時間を調整した。また、1999年に大陸斜面域（水深 214 m）の表層（25–60 m）反応を対象とした離底曳網を行った際には曳網時間を69分とした。採集物は船上で種別に分けて重量を測定し、スケトウダラは網ごとにランダムにサンプルを抽出して-20°Cで凍結保存し持ち帰った。採集物にサイズのばらつきが大きい場合にはサイズ別に層化抽出を行った。

スケトウダラの生物測定および音響データの解析 持ち帰ったスケトウダラサンプルは陸上の研究室において解

凍後、ランダム抽出の場合には50ないし100尾（50尾未満の場合は全量）、層化抽出の場合は各サブサンプルについて30～100尾（30尾未満の場合は全量）の尾叉長（0.1 cm単位）および体重（0.1 g単位）を測定し、年齢査定のために耳石を採取した。各個体について採取した耳石の表面を肉眼または実体顕微鏡下で観察して透明帶の有無を基準に0歳魚（透明帶が観察されない）とそれ以外を判別した。本研究では、餌生物分布に関する観察データがないことから、0歳魚の肥満度を餌生物の利用しやすさを示す指標として利用することとし、(1)式により各個体の肥満度（Condition Factor）を計算した。

$$\text{Condition factor} = \text{BW}/\text{FL}^3 \times 10^3 \quad (1)$$

ここで、BWは体重 (g)、FLは尾叉長 (cm) を表す。

音響データ収録中に観察された魚群反応は、志田 (2002) に従って分布水深とその位置の海底水深によりタイプ分けし、トロール調査の結果に基づいてスケトウダラ魚群を判別した。FQ-70により収録されたデータは、専用の解析ソフトFQ-770を用いて水平方向に0.1マイル (185.2 m)、鉛直方向に複数の深度層で積分し、スケトウダラを含む各積分層の平均体積後方散乱強度SV(dB)を出力した。この値から(2)、(3)式により0.1マイル平均の面積後方散乱係数 S_A (m^2/nmi^2)を算出した。

$$S_A = 10^{\frac{SV}{10}} \quad (2)$$

$$S_A = 1852^2 \times 4\pi \int_{z=r_2}^{z=r_1} S v dz \quad (3)$$

ここで、zは深度、r1およびr2は積分層の上限および下限深度を表す。

EK60により収集されたデータは解析ソフトEchoview (ver.6. Myriax社) を用いてスケトウダラ魚群と判別された反応を抽出し、0.1マイル平均の S_A を出力した。

スケトウダラの年齢別分布密度 (D_i : 尾/m²) または尾叉長範囲別分布密度の推定は、0.1マイル平均のデータを用いて(4)式により行った。

$$D_i = \left(\frac{S_A}{\langle \sigma \rangle} \right) \times F_i \times \frac{1}{1852^2} \quad (4)$$

ここで、 F_i は魚群に対応するトロール調査の標本から得られたi歳魚（または尾叉長i cm以上の魚）の割合を表す。本研究では、スケトウダラの共食いが起こる最小の捕食者と被食者の体長比が1.7であること (Yamamura *et al.*, 2001)，後述するように調査時期のスケトウダラ0歳魚の尾叉長が最も大きかった年で平均15 cm程度であったことから、尾叉長30 cm以上のスケトウダラ（3歳以上；境ら, 2019）を潜在的捕食者とみなしてその分布密度についても推定した。スケトウダラ魚群の平均音響散乱断

面積 $\langle\sigma\rangle$ は、Simmonds *et al.* (1992) に従い、尾叉長組成を用いて (5) および (6) 式により計算した。

$$TS_j = 20 \log(FL_j) + TS_{cm} \quad (5)$$

$$\langle\sigma\rangle = 4\pi \sum_k f_j \times 10^{\frac{TS_j}{10}} \quad (6)$$

ここで、 FL_j は j 番目の体長階級の中間値、 f_j は j 番目の体長階級に属する個体の割合を示す。 TS_{cm} はFoot and Traynor (1988) に従い-66とした。本研究では、海域を水深に基づいて大陸棚内側 (Inner-continental shelf) : 50 m ≤ 水深 < 80 m, 大陸棚外側 (Outer-continental shelf) : 80 m ≤ 水深 < 130 m, 大陸斜面 (大陸棚の外縁部を含む, Continental slope) : 130 m ≤ 水深 < 30 m の3つの領域に区分して航走ライン上の各領域に分布するスケトウダラ0歳魚および0歳魚の捕食者となりうる尾叉長30 cm以上のスケトウダラの分布尾数を (7) 式により算出し、この値から各領域における分布割合を求めた。

$$\text{Abundance}_k = D_i \times L_k \quad (7)$$

ここで

Abundance_k は領域 k の分布尾数、 L_k は領域 k の航走ライン長(m)を表す。

結 果

スケトウダラの分布 航走ライン上において観察された魚群の例をFig.2に示した。調査海域は、沿岸から水深130 m前後まで緩やかに傾斜する大陸棚を有し、その後傾斜が急になり大陸斜面に接続する。魚群はいずれの調査年においても水深50~130 mの大陸棚上の海底付近 (Fig.2白矢印) およびそれより沖側の大陸斜面上の海底付近から中層域にかけて観察された。大陸斜面の魚群反応は薄い雲状で、高さは年によって100 m以上に達し、その分布深度は概ね150~300 mの範囲にあった (Fig.2 黒矢印)。これらの反応を対象として航走ラインの周辺

海域において、延べ40回の着底トロール曳網と3回の離底曳網を行った (Fig.1)。1999年に実施した海底水深200 mの海域の深度25~60 m層に分布した層状反応を対象とした離底曳網では魚類は採集されなかった。このような海面付近の反応は魚類ではなく、気泡を有するプランクトン等によるものと考えられた。また、水深200 mの海域において、海底から網をやや浮かせて操業した2005年および2007年の2回はいずれもスケトウダラのみが採集された。着底曳網時には、海底直上の魚探機の探知範囲外に分布するマダラ、カレイ類およびカジカ類等を除くと、採集尾数および重量の90%以上をスケトウダラが占めていたことから、これらの曳網結果に対応する魚群反応は全てスケトウダラ由来として取り扱った。一方、1999, 2000, 2004, 2005および2010年の水深100 m以浅海域における曳網では、スケトウダラの漁獲尾数が少なく、ホッケ *Pleurogrammus azonus*, ハタハタ *Arctoscopus japonicus*, シシャモ *Spirinchus lanceolatus*, キュウリウオ *Osmerus mordax dentex*およびソイ類が66~97%を占めていた。これらの年・海域におけるスケトウダラの分布尾数は便宜的にこれらの魚種とスケトウダラの重量比を乗じて推定した。

音響調査データとトロール調査結果から推定したスケトウダラ0歳魚の領域別（先に定義した、大陸棚内側、大陸棚外側および大陸斜面）分布割合の推移 (Fig.3) を見ると、調査年による大きな変動が認められた。調査した13年のうち、1997, 2001, 2004, 2006, 2007, 2009 ~ 2011および2013年の9年間は0歳魚の大陸棚の分布割合が76~100%を占めていた。2003年は大陸棚の分布割合が48%と斜面域と同程度であった。これらの年とは逆に2005年は69%, 1999および2000年は99%以上が大陸斜面に分布していた。また、大陸棚の分布割合が高かった9年の中では、大陸棚内側の分布割合が67~99%と高い年 (2006, 2009, 2011および2013年), 大陸棚内側と外側の分布割合が同程度の年 (1997, 2001, 2007年), 大陸棚外側の割合が76および81 %と高い年 (2004および2010

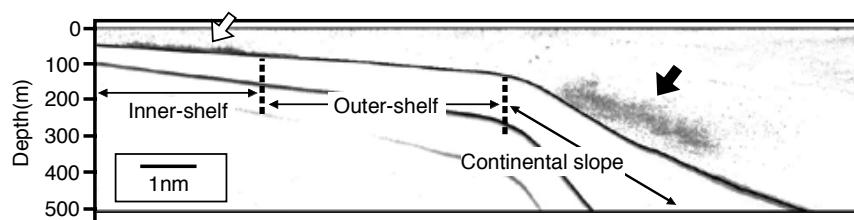


Fig.2 The typical echogram along the transect line obtained from the acoustic survey conducted in November 2011 in the southeastern Pacific coast of Hokkaido.

The white arrow shows the echosign from walleye pollock on the bottom in the continental shelf region. The black arrow shows the echosign from walleye pollock in the mid-water in the continental slope region.

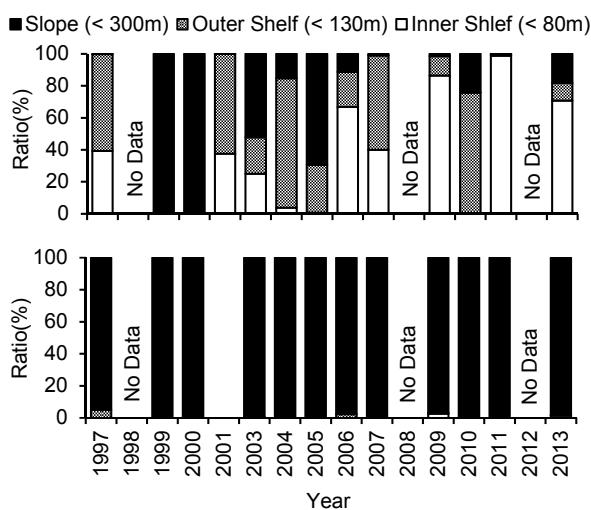


Fig. 3 Changes in distribution pattern of age-0 walleye pollock (upper panel) and adult pollock ($FL > 30$ cm; lower panel) in the southeastern Pacific coast of Hokkaido from 1997 to 2013.

年)とバリエーションがあった。

一方、スケトウダラ0歳魚の捕食者と考えられる尾叉長30 cm以上のスケトウダラは、いずれの年においてもその95%以上が大陸斜面に分布しており、年による分布割合の大きな変化は観察されなかった (Fig. 3)。

スケトウダラ0歳魚の尾叉長および肥満度 各調査年に採集されたスケトウダラ0歳魚の平均尾叉長をFig. 4に示した。トロール調査により採集されたスケトウダラ0歳魚の尾叉長は7.3~17.3 cm、曳網毎の平均値は10.2~15.0 cmの範囲にあった。調査年間で比較すると、1997年の平均値が15.0 cmと最も大きく、主分布域が大陸斜面にあった4年、すなわち2005年 (13.7 cm), 1999 (13.0, 13.4 cm) と2000 (12.9, 13.6 cm) および2003年 (12.5, 13.4 cm) の大陸斜面で採集された標本がこれに次いでいた。一方、2006年 (10.2~10.8 cm) および2004年 (10.5~11.0 cm) の大陸棚で採集された標本と2013年 (10.2~10.6 cm) の標本の値は小さかった。大陸斜面で採集さ

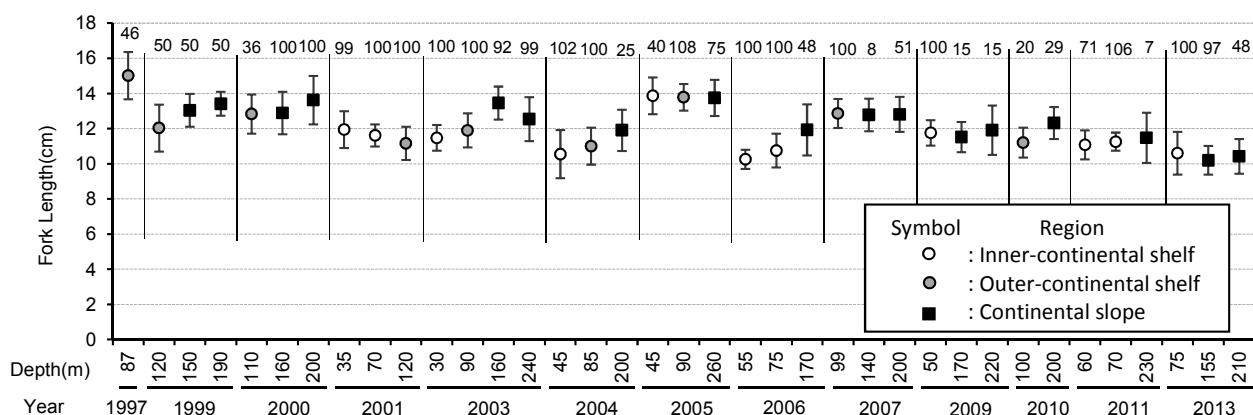


Fig. 4 Interannual and depth variations in the fork lengths of age-0 walleye pollock in the southeastern Pacific coast of Hokkaido from 1997 to 2013. Symbols and vertical bars represent mean \pm standard deviation. Numbers above symbols show the number of samples.

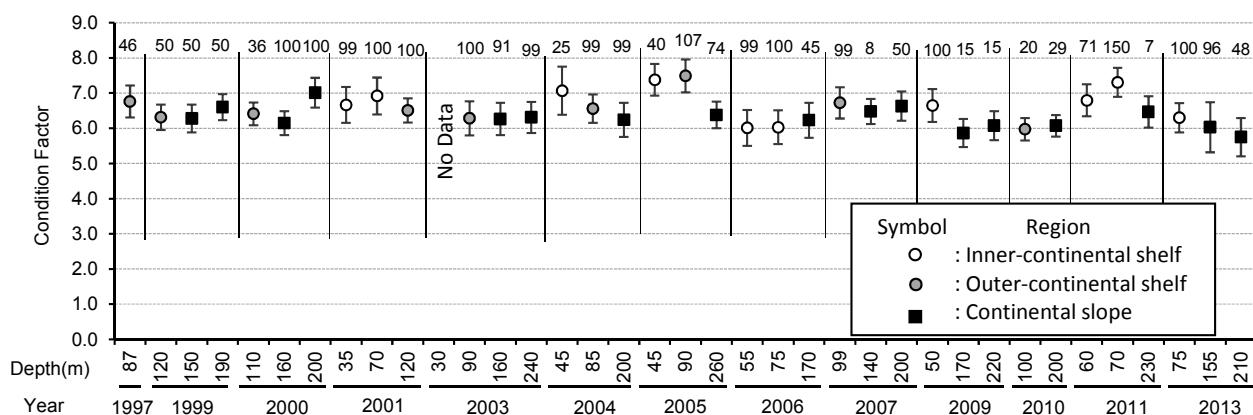


Fig. 5 Interannual and depth variations in the condition factors of age-0 walleye pollock in the southeastern Pacific coast of Hokkaido from 1997 to 2013. Symbols and vertical bars represent mean \pm standard deviation. Numbers above symbols show the number of samples.

れた標本間で比較した場合は、2005年が最も大きく、1999, 2000および2003年がこれに次いでおり、大陸斜面に主たる分布域があったこれら4年が上位を占めた。一方、最も小さかったのは2013年（10.2, 10.4 cm）で、2011（11.5 cm）、2009（11.5, 11.9 cm）および2004年（11.9 cm）が次いでおり、これらはいずれも大陸棚の分布割合の高い年であった。一方、大陸棚で採集された標本間

で比較すると、1997年が最も大きく、2005（13.8, 13.9 cm）、2007（12.9 cm）、2000（12.8 cm）、1999年（12.0 cm）がこれに次いでいた。これらのうち、1997および2007年は大陸棚に主分布域のある年であった。また、最も小さかった2006（10.2, 10.8 cm）、これに次ぐ2004（10.5, 11.0 cm）、2013（10.6 cm）、2011（11.1, 11.3 cm）、2010年（11.2 cm）はいずれも大陸棚の分布割合の高い

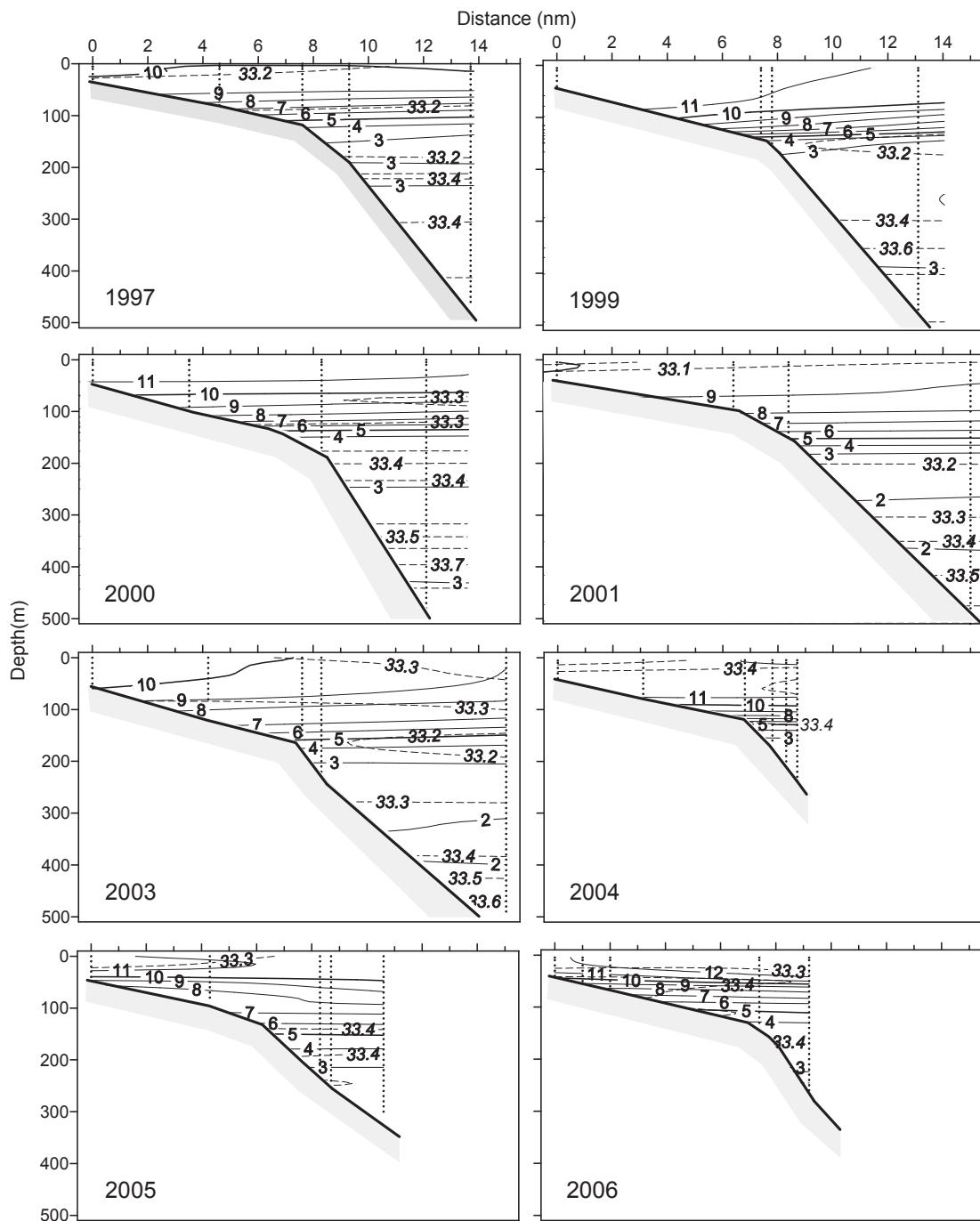


Fig. 6-1 Vertical water temperature (deg-C, solid lines) and salinity (dotted lines) profiles along transects in November in the southeastern Pacific coast of Hokkaido from 1997 to 2006
Bold vertical dotted lines indicate the CTD stations.

年であった。また、同一調査年の中で比較すると、採集水深の増加に伴って平均値の増加が見られる年（1999, 2000, 2003, 2004および2006年）と、変化がないか、水深との明瞭な関係が見られない年（2005, 2007～2010および2013年）、水深の増加に伴って平均値が小さくなる年（2001年）が観察された。

Fig.5にスケトウダラ0歳魚の肥満度を示した。肥満度の平均値は5.7～7.5の範囲にあった。調査年間で平均値を比較すると、2005年における大陸棚で採集された標本の値（7.4, 7.5）が最も高く、次いで2011年の水深70 m点の7.3, 2004年の水深45 mの7.1の順であった。尾叉長と異なり、大陸斜面に主分布域のあった年の標本の値が上位を占めることはなかった。一方、2013年の大陸斜面における水深210 m点の5.8が最も低く、2009年の170 m点の5.9がこれに次いでいた。大陸斜面の標本間で比較すると、2000年の水深200 m点における7.0が最も高く、

2007年の水深200 mおよび1999年の水深190 m点がこれに次いでいた。大陸棚で採集された標本で比較すると2005年が最も高く、2011年の水深70 m点、2004年の水深45 mがこれに次いでおり、2010年の水深100 m点、2006年の水深55 mおよび75 m点の6.0が最も低かった。同一調査年で見ると、2004年および2013年は水深の増加に伴って肥満度が低下したが、それ以外の年は変化がないか、水深との間に一定の傾向が認められなかった。

水温、塩分の分布 各調査年におけるトランセクト上の水温塩分鉛直分布をFig.6に示した。調査海域の表層（深度10 m）水温は8.4～13.2°C、塩分は32.69～33.50の範囲にあった。大陸棚の水深50 mにおける海底付近の水温は9～11°Cであり、水温は水深が増すごとに低下した。水温の鉛直変化は年により異なり、1997, 2000, 2001, 2003, 2005, 2007, 2009は大陸棚外縁部まで比較的緩やかに低下した。一方、1999および2004は水深130 m付近

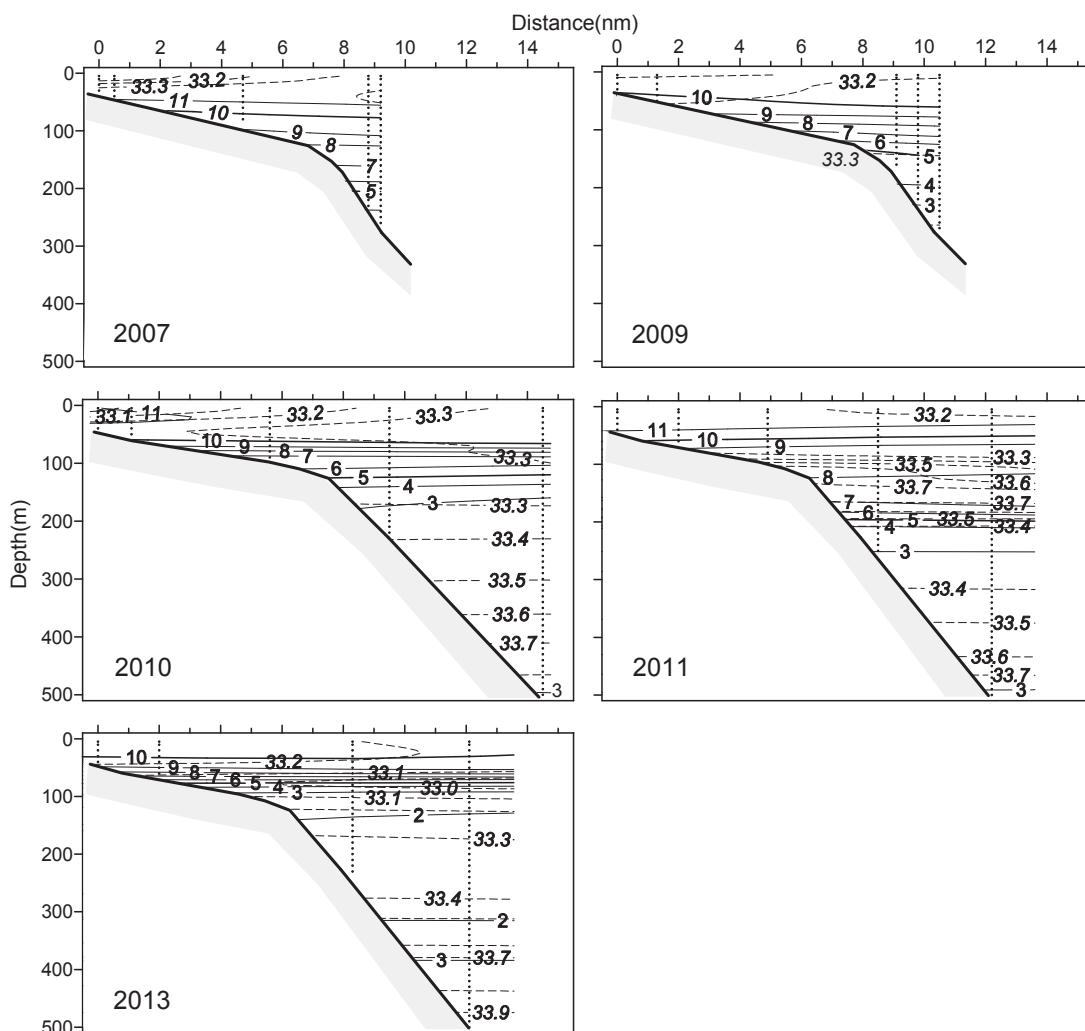


Fig.6-2 Vertical water temperature (deg-C, solid lines) and salinity (dotted lines) profiles along transects in November in the southeastern Pacific coast of Hokkaido from 2007 to 2013
Bold vertical dotted lines indicate the CTD stations.

Table 3 Water temperature and salinity near the bottom in each region.

Year	Inner-shelf (<80m)		Outer- shelf (<130m)		Continental Slope (<300m)	
	Temp(deg-C)	Salinity	Temp(deg-C)	Salinity	Temp(deg-C)	Salinity
1997	8 - 9	33.3	4 - 8	33.1 - 33.3	3 - 4	33.1 - 33.4
1999	11 - 12	33.4	9 - 11	33.3 - 33.4	2 - 9	33.2 - 33.4
2000	10 - 11	33.3 - 33.4	6 - 10	33.2 - 33.3	2 - 6	33.2 - 33.4
2001	8 - 9	33.2	7 - 8	33.2	2 - 7	33.1 - 33.2
2003	10	33.3	7 - 10	33.3	2 - 7	33.2 - 33.3
2004	11 - 12	33.4	5 - 12	33.4 - 33.5	2 - 5	33.3 - 33.5
2005	7 - 10	33.4	6 - 7	33.4	2 - 6	33.4 - 33.5
2006	7 - 10	33.4	4 - 7	33.4	3 - 4	33.4 - 33.5
2007	10 - 11	33.4	7 - 10	33.4	3 - 7	33.3 - 33.4
2009	8 - 10	33.2	4 - 8	33.2 - 33.3	3 - 4	33.3 - 33.4
2010	7 - 10	33.3	5 - 7	33.2 - 33.3	2 - 5	33.2 - 33.6
2011	9 - 11	33.3	8 - 9	33.3 - 33.8	3 - 8	33.4 - 33.9
2013	4 - 9	33.0 - 33.2	2 - 4	33.0 - 33.2	2	33.2 - 33.5

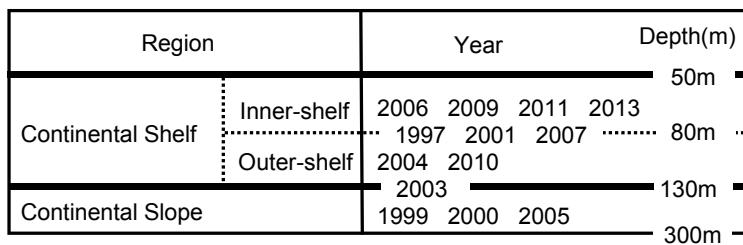


Fig. 7 The schematic diagram of the distribution of age-0 walleye pollock in autumn in the southeastern Pacific coast of Hokkaido

に水温躍層があり、大陸棚の比較的広い範囲が水温10°C以上の水に覆われていた。また、2013年は水深50~60m付近に強い躍層があり、大陸棚外側の水温が2~4°Cと低くなっていた。先に定義した各領域（大陸棚内側、大陸棚外側および大陸斜面）における海底付近の水温および塩分範囲をTable 3に示した。大陸棚内側の海底付近の水温は1999および2004年が11~12°Cと最も高く、最も低かったのは、2013年の4~9°Cであった。それ以外の年は7~10°Cの範囲にあった。大陸棚外側では、1999年の9~11°Cが最も高く、2013年が2~4°Cと最も低かった。また、2004年は躍層をはさんで5~12°Cまで大きく変化した。その他の年は4~10°Cの範囲にあった。大陸斜面は、大陸棚との境界部分（大陸棚外縁）の水温に4~9°Cと年による差があったが、水深に伴って低下し、最低水温はいずれの年も2~3°Cの範囲にあった。

2010年まで調査海域の塩分値に大きな年変動は見られなかったが、2011年は大陸棚外縁部の深度100 m前後附近に33.9と高い値が観察された。一方、2013年は大陸棚に塩分値33.0の低い値が観察された。

考 察

着底トロールによるサンプリングの結果、海底直上に分布するマダラなどの底魚類を除くと漁獲物の大部分を

スケトウダラが占めていたことから、大陸棚の海底付近および大陸斜面の海底付近から中層域にかけて連続する魚群反応は主にスケトウダラに起因すると考えられた。ただし、大陸棚で実施した一部の曳網では、スケトウダラの採集量が少なく、無鰾魚であるホッケ、ハタハタ、有鰾魚であるシシャモ、キュウリウオ等の採集量が上回っていた。これらの地点において、採集物の重量比を用いてスケトウダラの音響反射を算出した結果と、反応のすべてをスケトウダラとみなした結果とを比較すると、領域毎の分布割合に大きな差は生じないことから、これらに起因する推定誤差は本研究の考察に影響を与えない」と判断した。

本研究では、秋季のスケトウダラ0歳魚の十勝沖の航走ライン上における沖陸方向の分布変化について長期的な観察結果を報告した。本研究の期間中(1997~2013年)スケトウダラ0歳魚は水深50~300 mの大陸棚から大陸斜面に広く分布していた。その結果に基づいて、Fig. 7に各調査年のスケトウダラの主分布域を模式的に表した。特筆すべき変化は、1999、2000および2005年に0歳魚の主分布域が大陸斜面に形成（分布シフトと称す）されたことである。また、2003年も前述の3年に及ばないが、大陸斜面の分布割合が50%以上と高かった。これら以外の年では従来の報告（志田、2002）と同様に主分布域は大陸棚にあったが、その中でも大陸棚内側の割合が高い

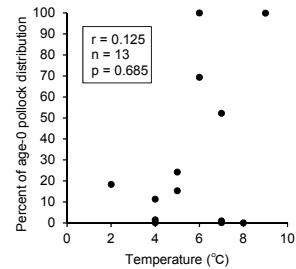


Fig.8 Relationship between percent of age-0 pollock in the slope region and bottom water temperature (°C) at the shelf edge (depth: 130m).

年と大陸棚外側の割合が高い年、両方の領域に分布の広がりが見られた年の3つのパターンがあった。

本研究において、分布シフトが観察された調査年における大陸棚の海底付近から中層にかけての水温は6~12°C、それ以外の年は2~12°Cの範囲にあった(Fig.6, Table 3)。中谷・前田(1987)は、噴火湾周辺海域におけるスケトウダラ稚魚の分布に影響を与える要因として水温をあげ、胚発生に対する限界水温である10°Cを超える環境は好適ではなく、稚魚は、このような水温を避けると考察している。一方、Kooka *et al.*(2007)は、本研究で観察された0歳魚とほぼ同一サイズのスケトウダラ0歳魚を用いた飼育実験により得られた摂餌量および成長率(Specific Growth Rate)の最適水温はいずれも12°C付近にあり、水温16°Cで急激に低下することを報告している。また、志田ら(1999)によると、9月の道東海域においてスケトウダラ0歳魚が最も多く漁獲された調査点の底層水温は8~13°Cの範囲にあったことが報告されている。これらのこと考慮すると、10°C以上の水温もスケトウダラ0歳魚にとって必ずしも不適ではなく、分布シフトが起こった年の大陸棚の水温が直接スケトウダラ0歳魚の分布を妨げたとは考えられない。また、各年の水温環境の指標値として大陸棚と大陸斜面の境界(大陸棚外縁、水深130 m)における海底付近の水温(Fig.7およびTable 3)を用い、0歳魚の大陸斜面の分布割合との関係を調べたが、0歳魚の分布割合が50%を超えた年の水温は比較的高かったものの、両者の間には一定の関係が認められなかった(Fig.8)。従って、水温が当海域における0歳魚の分布シフトを引き起こす直接の要因になったとは考えにくい。水温以外の海洋環境の特徴を見てみると、塩分値から沖合暖水の影響があったと考えられる2011年と、冬季に流入した低塩分(<33.0)の沿岸親潮水と思われる水が分布していた2013年に大きな水塊分布の変化は認められたが、両年とも大陸棚の0歳魚の分布割合が高かった。また、比較的強い水温躍層が観察された1999および2004年の分布は異なる結果とな

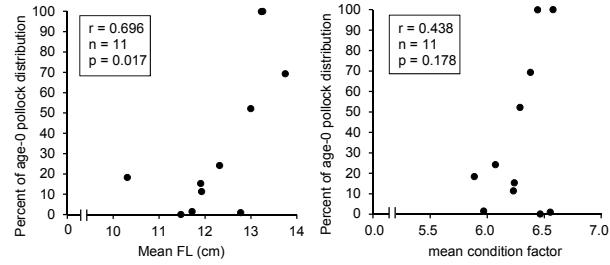


Fig.9 Relationship between percent of age-0 pollock in the slope region and mean fork length (FL in cm: left) and mean condition factor (right).

っており、分布シフトが観察された年に共通する水温、塩分などの環境の特徴は認められなかった。

前述のようにスケトウダラ0歳魚は、成長に伴って分布水深が変化することが知られている(Brodeur *et al.*, 1996)。本研究では、大陸斜面に主分布域があった年に共通する特徴として、尾叉長が調査年の中で比較的大きかったこと(12.5~13.7 cm: 大陸斜面で採集された標本の平均値)が観察された(Fig.4)。そこで、大陸斜面で採集された0歳魚の尾叉長平均値と大陸斜面の分布割合の関係を調べたところ、両者の間に有意な正の相関が認められた(Fig.9, r=0.696, p=0.017, n=11; 大陸斜面で標本が採集されていない1997および2001年を除く)。一般に、底魚類の分布水深はサイズ依存であると考えられている(例えば、Macpherson and Duarte, 1991)。志田ら(1999)も9月の道東海域で、水深の増加に伴って分布するスケトウダラ0歳魚の尾叉長が大きくなることを観察していることから、体サイズがこの海域における分布を決定する主たる要因の一つと考えられる。

一方、Kooka *et al.*(2007)は、体長と採集深度に関係が認められる年とそうでない年があることを報告しており、本研究でも一部の調査年で同様の結果が観察されたことから、サイズ以外にも道東海域のスケトウダラ0歳魚の分布に影響を与える要因があることが示唆される。本研究では、餌生物の利用のしやすさ(Wilson *et al.*, 2013; Ciannelli *et al.*, 2002)について、0歳魚の肥満度を指標として検討した(Fig.5)。その結果、分布シフトが観察された1999年と2000年に大陸斜面から採集された標本の肥満度の平均値は大陸棚のそれより高い値であった。従って、これらの2年は大陸斜面の方が大陸棚より餌が豊富であったことが示唆される。しかし、分布シフトが観察された年でも、2005年は大陸棚の標本の肥満度が高く、これとは逆の結果となっていた。また、2003年では採集場所による肥満度の違いは観察されなかつることに加え、大陸棚、斜面とも他の年と比較してその平均値はいずれも低い値となっていた。さらに、大陸斜面で採集

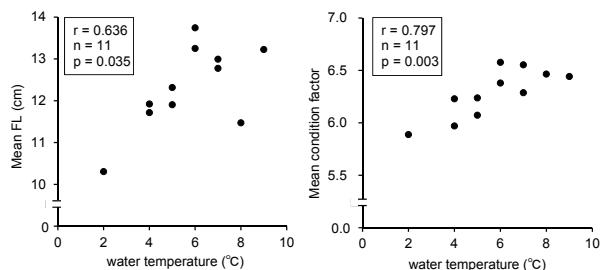


Fig. 10 Relationship between bottom water temperature (°C) at the shelf edge (depth: 130m) and mean fork length (left), and mean condition factor (right) of age-0 pollock in the continental slope region.

された標本の肥満度の平均値と大陸斜面の分布割合の間にも相関はみとめられなかった (Fig. 9, $r=0.438$, $p=0.178$, $n=11$; 大陸斜面で標本が採集されていない1997および2001年を除く)。これらのことから、餌生物の利用のしやすさは、分布シフトに直接影響を与える要因ではないと考えられる。ただし、餌と分布の関係を考えるときには、代謝をコントロールする水温の影響をあわせて考察する必要がある。そこで、大陸棚外縁における水温と、大陸斜面で採集された0歳魚の尾叉長および肥満度の平均値との関係を調べたところ、いずれも有意な正の相関が認められた (Fig. 10)。これらのことから、水温や餌の利用しやすさは、0歳魚の分布シフトを直接引き起こす要因ではないが、分布に直接関係する0歳魚の成長に影響を及ぼしていると推察される。

1997年は分布シフトが起こった年よりもさらに大型であったにもかかわらず、その主分布域は大陸棚上にあった。この年は1981年度以降で2番目に豊度が高かったと推定されている1995年級 (境ら, 2019) が2歳魚として0歳魚分布域の沖側 (水深75~150 m) に0歳魚の数倍の分布密度で分布していたことが報告されており (志田, 2002), 2歳魚の存在が0歳魚の沖合方向への移動を妨げた可能性がある。2歳魚はサイズから考えて0歳魚の捕食者ではないが (Yamamura et al., 2001), 餌やニッチを巡る競合者であることが想定される。0歳魚の分布については、他の年齢のスケトウダラの分布状況も合わせて検討を進める必要があろう。

本研究の結果では、もうひとつの重要な要因とされる捕食者であるスケトウダラ成魚の分布に大きな年変動は認められず、いずれの年においてもその分布は大陸斜面にあった (Fig. 3)。主産卵場である日高湾における11月のスケトウダラ成魚の分布水深も主として水深200~400 m, 水温2~3°Cの大陸斜面とされており (志田, 2011), このような低水温に分布することはスケトウダラ成魚にとってエネルギー効率を向上させる利点がある (吉田・

桜井, 1984) と考察されている。従って、当海域において観察された0歳魚の分布域の変化に捕食者の分布は大きな影響を与えていなかったと推察される。従来、スケトウダラ太平洋系群の共食いは主として春季に起こること、また、秋季におけるスケトウダラ0歳魚の分布域は大陸棚にあるが、捕食者であるスケトウダラ成魚は大陸棚の高水温を避けて分布する (志田, 2002) ため、両者の分布のオーバーラップが起こりにくく、その結果、この時期の共食いによる減耗は低く抑えられていると考えられていた (例えばYamamura et al., 2001)。しかしながら、本研究の結果から、0歳魚の分布が年によって変動することが明らかとなり、秋季でも強いオーバーラップが起こることが示された。さらに興味深いことは、主分布域が大陸斜面にシフトした年のうち、1999および2003年級はその資源尾数が平均値 (1981~2014年級) を下回る年級であったが、2000, 2005年は卓越年級かこれに準ずる豊度の高い年級であったことである (境ら, 2019)。Funamoto et al. (2014) は、太平洋系群の加入量が、捕食者であるスケトウダラ成魚を対象とする沖合底曳網漁業のCPUEと負の相関があることを明らかにしており、捕食者側の分布密度が重要であることが示唆される。例えば、1999年は卓越年級であった1995年級が4歳 (尾叉長約40 cm; 境ら, 2019) となって道東海域に分布しており、他の年と比較して被食量が多かった可能性がある。従って、今後、0歳魚期以降の被食減耗が年級豊度に与える影響を評価するためには、春季だけでなく、秋季の被食についても0歳魚の分布域の変化と捕食者であるスケトウダラ成魚の資源量または分布量を考慮して検討する必要があると考えられる。

謝 辞

本研究にあたり、データの収集および標本採集への多大な協力と船の運航並びにデータ収集方法に有益なアドバイスを賜った歴代の釧路水産試験場試験調査船北辰丸の船長ならびに乗組員諸氏に厚く御礼を申し上げる。本稿をまとめるにあたり、編集者および査読者には非常に有意義なアドバイスをいただいた。深く感謝の意を表する。本研究の一部は水産庁委託「我が国周辺水域資源評価等推進事業」の予算を使用して実施されたものである。

引用文献

- Bailey KM. Interaction between the vertical distribution of juvenile walleye pollock *Theragra chalcogramma* in the eastern Bering Sea, and cannibalism. *Marine Ecology Progress Series* 2001; 217: 271–282.

- Progress Series 1989 ; 53 : 205–213.
- Brodeur RD. A review of the distribution, ecology and population dynamics of age-0 walleye pollock in the Gulf of Alaska. *Fisheries Oceanography* 1996 ; 5 suppl. 1 : 148–166.
- Ciannelli L, Brodeur RD, Swartzman GL, Salo S. Physical and biological factors influencing the spatial distribution of age-0 walleye Pollock (*Theragra chalcogramma*) around the Pribilof Islands, Bering Sea. *Deep-Sea Research II* 2002 ; 49 : 6109–6126.
- Foot KG, Traynor JJ. Comparison of walleye pollock target strength estimates determined from in situ measurements and calculations based on swim bladder form. *The Journal of Acoustical Society of America* 1988 ; 82 : 9–17.
- Funamoto T, Yamamura O, Shida O, Itaya K, Mori K, Hiyama Y, Sakurai Y. Comparison of factors affecting recruitment variability of walleye pollock *Theragra chalcogramma* in the Pacific Ocean and the Sea of Japan off northern Japan. *Fisheries Science* 2014 ; 80 : 117–126.
- Honda S, Oshima T, Nishimura A, Hattori T. Movement of juvenile walleye pollock, *Theragra chalcogramma*, from a spawning ground to a nursery ground along the Pacific coast of Hokkaido, Japan. *Fisheries Oceanography* 2004 ; 13 (Suppl. 1) : 84–98.
- Kooka K, Yamamura O, Nishimura A, Hamatsu T, Yanagimoto Y. Optimum temperature for growth of juvenile walleye Pollock *Theragra chalcogramma*. *Journal of Experimental Marine Biology* 2007 ; 347 : 69–76.
- Macpherson E, Duarte CM. Bathymetric trends in demersal fish size: is there a general relationship? *Marine Ecology Progress Series* 1991 ; 71 : 103–112.
- 宮野鼻洋一. 音響手法. 「TAC管理下における直接推定法 – その意義と課題」恒星社厚生閣, 東京, 2000 ; 19–27.
- 中谷敏邦, 前田辰昭. 噴火湾およびその周辺海域におけるスケトウダラ稚魚の分布と移動. 日本水産学会誌 1987 ; 53 : 1585–1591.
- 境 磨, 山下夕帆, 石野光弘, 千村昌之, 山下紀生. 平成30年度(2018)年度スケトウダラ太平洋系群の資源評価. 平成30年度我が国周辺水域の漁業資源評価第1分冊. 水産庁増殖推進部. 国立研究開発法人水産研究・教育機構, 東京. 2019 ; 419–470.
- 志田 修, 山村織生, 三宅博哉. 道東太平洋沿岸におけるスケトウダラ0歳魚の分布と成長に伴う移動について. 北海道水産試験場研究報告1999 ; 54 : 1–7.
- Shida O. Seasonal differences in the diel vertical migration of young walleye pollock, *Theragra chalcogramma*, and their impact on acoustic biomass estimation. *International Symposium ACOUSTICGEAR2000* 2001 : 172–179
- 志田 修. 北海道東部太平洋海域におけるスケトウダラの年齢別分布水深. 北海道水産試験場研究報告2002 ; 63 : 9–19.
- 志田 修, 西村 明. 秋季の道東太平洋海域に分布するスケトウダラ0歳魚の孵化日組成と産卵群の関連. 水産海洋研究 2002 ; 66 : 232–238.
- Shida O, Hamatsu T, Nishimura A, Suzaki A, Yamamoto J, Miyashita K, Sakurai Y. International fluctuations in recruitment of walleye pollock in the Oyashio region related to environmental changes. *Deep-Sea Research II* 2007 ; 54 : 2822–2381.
- 志田 修. スケトウダラ太平洋系群の資源変動におよぼす成魚期の海洋環境の影響に関する研究. 北海道水産試験場研究報告2011 ; 79 : 1–75.
- Simmonds EJ, Williamson NJ, Gerlotto FG, Aglen A. Acoustic survey design and analysis procedure: A comprehensive review of current practice. *ICES Cooperative Research Report* 1992 ; 187, Demark, 131p.
- Tsuji S. Alaska pollack population, *Theragra chalcogramma*, in the North Pacific Ocean. *Marine Behavior Physiology* 1989 ; 15 : 147–205.
- Wakabayashi K, Watanabe K, Watanabe Y. Assessments of walleye pollock abundance of the southwest Pacific coast of Hokkaido, based on catch statistic and survey data. *International North Pacific Fisheries Commission Bulletin* 1990 ; 50 : 101–120.
- Wilson MT, Mier KL, Jump CM. Effect of region on the food-related benefits to age-0 walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) in association with midwater habitat characteristics in the Gulf of Alaska. *ICES Journal of Marine Science* 2013 ; 70 : 1396–1407.
- Yamamura O, Yabuki K, Shida O, Watanabe K, Honda S. Spring cannibalism on 1year walleye pollock in the Doto area Japan: is it density dependent? *Journal of fish biology* 2001 ; 59 : 645–656.
- 吉田英雄, 桜井泰憲. 飼育下におけるスケトウダラ成魚の摂食量と成長. 日本水産学会誌 1984 ; 50 : 763–769.

計量魚群探知機を用いた北海道オホーツク海におけるスケトウダラ *Gadus chalcogrammus*の春季来遊群とオキアミ類の鉛直分布特性

水上卓哉¹, 板谷和彦², 向井 徹³, 飯田浩二³

¹北海道釧路総合振興局産業振興部 釧路地区水産技術普及指導所,

²北海道立総合研究機構中央水産試験場,

³北海道大学大学院水産科学研究院

Vertical distributions of walleye pollock *Gadus chalcogrammus* and euphausiids on the continental shelf of southern Okhotsk Sea, off the coast of Hokkaido, by using a quantitative echosounder

TAKUYA MIZUKAMI¹, KAZUHIKO ITAYA², TOHRU MUKAI³ and KOHJI IIDA³

¹ Kushiro Fisheries Technical Guidance Office, Hokkaido Government Kushiro General Subprefectural Bureau,
Akkeshi, Hokkaido, 088-1118,

² Central Fisheries Institute, Hokkaido Research Organization, *Yoichi, Hokkaido 046-8555*,

³ Faculty of Fisheries Science, Hokkaido University, *Hakodate, Hokkaido, 041-8611, Japan*

To understand spring distribution patterns of walleye pollock *Gadus chalcogrammus* and euphausiids, we conducted an echo integration survey on the continental shelf region of the southern Okhotsk Sea at night in late April and June of 2012 and 2013. Walleye pollock aggregations were mainly distributed in the Soya warm current layer (SWC, >0 °C, >33.5), that has a subsurface current of intermediate cold water (ICW, <0 °C). In contrast, euphausiids were distributed at the surface layer of the ICW. In addition, we conducted a drift observation to observe diel vertical migration of euphausiids. Euphausiids were noted to descend to the lower layer of the SWC via the ICW before and after sunrise. Stomach contents of walleye pollock that were caught by bottom trawl consisted mainly of euphausiids, indicating that feeding occurs during euphausiids migration between the two current layers.

キーワード：オキアミ類, 計量魚群探知機, スケトウダラ, 摂餌, 宗谷暖流水, 中冷水, 分布, 北海道
オホーツク海

スケトウダラ *Gadus chalcogrammus*は、我が国のTAC 対象魚種であり、刺網漁業、延縄漁業、沖合底曳網漁業により漁獲される重要な底魚資源である。このうち、オホーツク海南部の北海道沖合海域（以下、北海道オホーツク海）における1986年以降のスケトウダラの漁獲量は、5.5千～52千トン前後と大きく変動してきた（Fig.1）。北海道オホーツク海におけるスケトウダラ漁場を、西部に位置する大陸棚上の水深の比較的浅い海域と、東部に位置する北見大和堆周辺の水深の深い海域に大別すると、全体の漁獲量変動は前者における増減による影響が大きい特徴がある（Fig.1）。また、2008～2012年における月

別平均漁獲量を見ると、4～6月の春期に年間漁獲量の約6割を漁獲していることがわかる（Fig.2）。

本海域では、4月に日本海から宗谷暖流によって稚仔魚が輸送され（夏目・佐々木, 1995），産卵後の索餌期には僅かながら日本海北部系群および根室海峡産卵群の一部が当海域に入り込むことが示唆されている（辻, 1979）。しかし、漁獲対象となるスケトウダラは、サハリン東岸に分布の中心を持つ資源が主体と考えられており（濱津ら, 2018），ここに来遊するスケトウダラは主にオキアミ類を摂餌し、未成魚個体が多いことから、若齢魚の索餌回遊群とみられている（飯塚ら, 1954）。

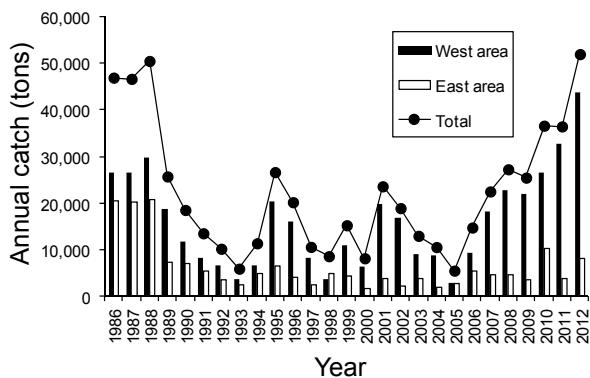


Fig. 1 The annual catch of walleye pollock in southern Okhotsk Sea, off the coast of Hokkaido, Japan from 1986 to 2012. Black and white bars indicate the annual catch (tons) from the west area and east area of southern Okhotsk Sea, respectively. Solid circles are total catch from the west and east areas.

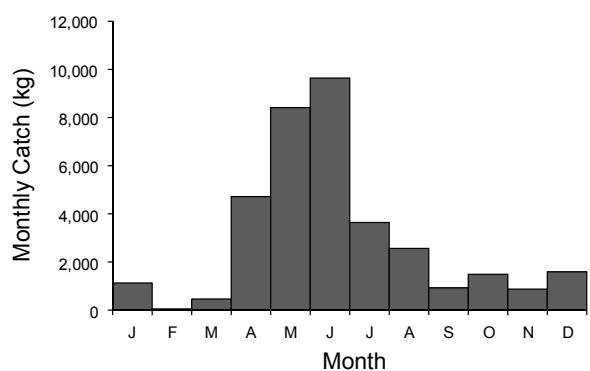


Fig. 2 The average monthly catch of walleye pollock on the continental shelf of southern Okhotsk Sea, off the coast of Hokkaido, Japan for the years 2008 to 2012.

本海域では国内の他の海域に比べて特徴的な海洋構造が形成されている。まず、日本海を北上した対馬暖流が宗谷海峡を抜けて北海道沿岸に沿って知床半島沖に向かう宗谷暖流がある。この宗谷暖流水の流量は夏季に最大となり、冬季に最小となる季節変動が知られている（青田, 1975; 松山ら, 1993）。次に、沖合には海水の融解による表層低温低塩分水が分布し、その下の中層には、冬季の海水の形成と共に生成される低温かつ高塩分のオホーツク中冷水（以下、中冷水）が分布する（青田, 1975; Takizawa, 1982）。宗谷暖流水は高塩分であるため、特に春季には、この中冷水の下層に潜り込み、海底付近に潜流として分布する（松山ら, 1993）。

スケトウダラは血液中に抗凍結物質を欠くために、マイナス水温を避けると考えられており

（http://www.corporateservices.noaa.gov/nbo/fy12_blue-book/chapter7_2012_RandD.pdf 2019.6.23），本海域において中冷水がスケトウダラの分布の制限要因となる可能

性がある。このことはスケトウダラの漁場の形成に影響を与えると考えられ、次の事例が挙げられる。1982年は日本側では不漁であったが、ロシア水域のサハリン東岸海域では豊漁であった。これは、中冷水が北海道沿岸部へ強く張り出したことで、サハリン東岸に分布していたスケトウダラの南下を阻害したためと考えられている（日本海洋学会沿岸海洋研究部会, 1985）。一方、餌生物のオキアミ類の分布については、稚魚ネットによる調査によって、表層に形成される冷水塊分布と対応することがわかっている（大槻, 1975）。しかしながら、本海域の特有の複雑な海洋構造とスケトウダラおよびその餌生物であるオキアミ類の両者の鉛直的分布関係を調べた研究事例はみあたらない。また、オキアミ類は日周鉛直移動（Diel Vertical Migration; 略号DVM）するので（Matsuura *et al.*, 2012），どの時間帯にどのような深度層でスケトウダラと遭遇し摂餌されるのか経時的かつ鉛直的にも調べる必要がある。こうした基礎的知見を得ることは、将来的に、海洋環境観測結果からその年が来遊し易い年なのか否かを判断する上で役立つと考えられる。

計量魚群探知機（以下、計量魚探機）は、超音波を用いることで海洋生物の分布の観察が可能である。北海道東部太平洋海域では、計量魚探機によるスケトウダラと動物プランクトンの昼夜間鉛直分布の変動の観察により、スケトウダラの摂餌生態に関して明らかにした研究事例がある（Miyashita *et al.*, 2004）。この研究では2つの周波数（38 kHz, 120 kHz）を用いて、種による音響散乱特性の違い（Kang *et al.*, 2002; Simmonds and MacLennan, 2005; De Robertis *et al.*, 2010）を利用して、スケトウダラと動物プランクトンのエコーを判別し、それぞれの分布を調査した。本海域において、スケトウダラとオキアミ類を経時的かつ鉛直的に把握するため、この手法を用いることが有効であると考えられた。

そこで本研究では、計量魚探機を用いて、北海道オホーツク海に春季に来遊するスケトウダラとオキアミ類の鉛直分布を調べ、それらと水塊構造を比較し、スケトウダラの分布特性を明らかにすること、そして、スケトウダラがどのようにしてオキアミ類と遭遇し、摂餌するのかを明らかにすることを目的とした。

試料及び方法

調査設計 音響調査は2012年、2013年のそれぞれの4月と6月に、北海道立総合研究機構稚内水産試験場試験調査船北洋丸（237トン）に搭載された計量魚探機（Kongsberg社製、EK60）を用いて行った。周波数38 kHz, 120 kHzのトランステューサは船底装備（水面下3.5

Table 1 Summary of specifications of the quantitative echo sounder, Kongsberg EK60

Parameters	2012				2013			
	April		June		April		June	
Frequency (kHz)	38	120	38	120	38	120	38	120
Pulse duration (ms)	1.024	1.024	1.024	1.024	1.024	1.024	1.024	1.024
Beam width								
alongship (°)	6.83	6.33	6.91	6.55	6.75	6.16	6.96	6.72
athwartship (°)	6.83	6.48	6.74	6.50	6.90	6.31	6.91	6.32
Absorption (dB/km)	10.16	29.25	9.80	34.14	10.10	30.72	9.79	37.40
Sound speed (m/s)	1465	1465	1482	1482	1470	1470	1494	1494
Transmitted power (W)	2000	500	2000	500	2000	500	2000	250
Transducer gain	25.11	26.57	24.91	26.22	25.18	25.18	25.09	26.43
Sa correction (dB)	-0.78	0.32	-0.67	-0.30	-0.86	-0.86	-0.77	-0.33

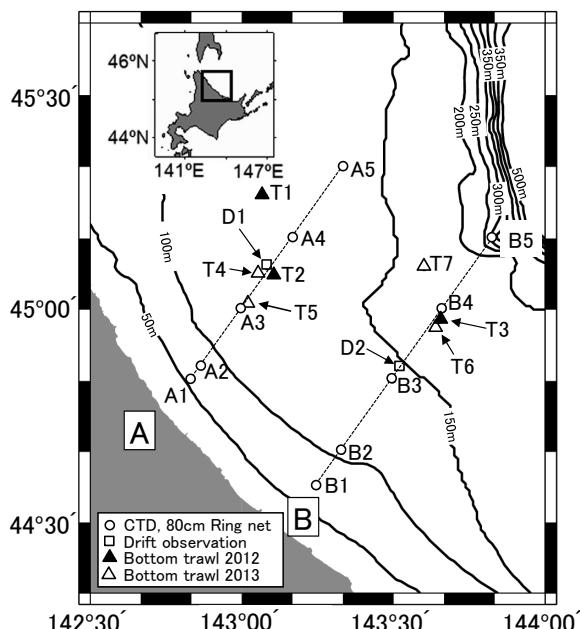


Fig.3 Maps of the study area of the continental shelf of southern Okhotsk sea, off the coast of Hokkaido, Japan.

m) のそれぞれES38B, ES120-7Cスプリットビーム式であり、調査前に銅球（38 kHzについては直径60 mm, 120 kHzについては直径23 mm）を用いて較正を行った（Table 1）。両トランステューサの中心距離は70 cmと十分に近く、ビーム幅は共に6 °台なので、両周波数による探知範囲は同一であると判断した（Korneliussen *et al.*, 2008）。2013年6月にEK60のオペレーティングシステムがER60に換装され、ES120-7Cの送信出力が500 Wから250 Wに変更された（Table 1）。

計量魚探機の音響データは、Fig.3に示す海域において、等深線にはほぼ垂直に設定した2つの航走線（A, B）を沿岸から沖合に向かって船速9~10 ktで航走しながら収録した。航走開始時刻は原則18:00とした。

航走線上には観測定点を設け、航走線Aでは沿岸側か

らA1~A5、航走線BではB1~B5とした。また、2012年6月には以下で述べる漂泊観測を行うため、航走線A, BにそれぞれD1, D2の定点を設定した。これらの観測定点においては、表層から海底直上までCTD（Sea-bird社製、SBE9plus）による水温と塩分の測定を行った（Table 2）。同時に2012年6月および2013年4月は、80 cmリングネット（口径80 cm、目合333 μm）を用いて海底直上から表層まで1 m/sで鉛直に曳網し、動物プランクトン採集を行った（Table 2）。なお、D2についてはB3に近かったころから、CTDによる水温と塩分の観測および動物プランクトン採集はいずれも省略した。80 cmリングネットには大型のオキアミ類の逃避を低減するために、網口に強力光ライト（Fisheye社製、FIXLED1000DX）を装着し、ネット前面に向かって点滅光を照射させた（藤森ら, 2010）。また、濾水計（離合社製）によって曳網時の濾水体積を推定した。採集標本は5~10 %中性ホルマリン溶液で固定し、研究室にて分類群ごとに湿重量を測定した。

6月の調査では、航走中に計量魚探機で観察された魚群の魚種確認のために着底トロール（網口高さ4.0 m、袖先間隔15 m、身網目合43 mm、コッドエンド内張り目合15 mm）による漁獲調査を実施した。漁獲調査は、2012年には3回（T1~T3）、2013年には4回（T4~T7）の計7回実施した（Table 3）。着底トロール網の曳網は日中に実施し、船速を3 ktとして30分曳網とした。採集されたスケトウダラを無選別で抽出して冷凍標本として研究室に持ち帰り精密測定を行った。

一方、中層に中冷水が分布する海域において、スケトウダラとオキアミ類の鉛直分布ならびに挙動を調べるために、2012年6月に宗谷暖流水と中冷水のフロント付近に観測点（D1, D2）を設け、日出前後に北洋丸を漂泊させた状態で計量魚探機によるオキアミ類のDVMの観察を行った（以下、漂泊観測）。また、これらの観測点の近くで実施した着底トロール（T2, T3）により採集さ

Table 2 Summary of the date and time of CTD cast and 80 cm ring net sampling.

year	month	Transect	day	St.	Depth (m)	CTD or Net	Towing Time (hh:mm)	Towing Depth (m)	Volume of Water filtered (m ³)	
2012	April	A	23	A1	58	CTD	19:56	51	-	
			23	A2	75	CTD	20:22	68	-	
			23	A3	128	CTD	21:34	123	-	
			23	A4	130	CTD	23:05	123	-	
			24	A5	140	CTD	0:29	133	-	
	B		24	B4	168	CTD	3:16	162	-	
			24	B3	147	CTD	5:00	144	-	
			24	B2	111	CTD	6:32	101	-	
			24	B1	72	CTD	7:21	61	-	
June	A	A	25	A2	75	CTD	18:07	64	-	
			25	A2	75	Net	18:20	63	159.7	
		A3	25	A3	128	CTD	19:21	122	-	
			25	A3	128	Net	19:24	97	335.2	
		A4	25	A4	131	CTD	20:44	123	-	
			25	A4	131	Net	20:46	114	277.7	
		A5	25	A5	139	CTD	22:05	133	-	
			25	A5	139	Net	22:14	129	283.6	
		D1	26	D1	132	CTD	0:04	129	-	
			26	D1	132	Net	0:07	121	241.6	
B	B	B1	26	B1	70	CTD	18:05	61	-	
			26	B1	70	Net	18:07	59	140.0	
		B2	26	B2	110	CTD	18:52	102	-	
			26	B2	110	Net	18:54	99	200.7	
		B3(D2)	26	B3(D2)	148	CTD	20:18	143	-	
			26	B3(D2)	148	Net	20:20	140	293.5	
		B4	26	B4	168	CTD	21:46	163	-	
			26	B4	168	Net	21:48	160	304.8	
		B5	26	B5	343	CTD	23:12	333	-	
			26	B5	343	Net	23:16	198	390.7	
2013	April	A	22	A1	55	CTD	18:27	51	-	
			22	A1	55	Net	18:28	50	196.4	
			22	A2	75	CTD	18:56	71	-	
			22	A2	75	Net	19:54	70	212.7	
			22	A3	128	CTD	20:08	125	-	
			22	A3	128	Net	20:15	91	483.7	
			22	A4	130	CTD	22:11	128	-	
			22	A4	130	Net	22:15	112	313.1	
	B	B4	23	B4	169	CTD	0:35	163	-	
			23	B4	169	Net	0:35	148	420.6	
		B3	23	B3	146	CTD	2:08	140	-	
			23	B3	146	Net	2:08	111	450.5	
		B2	23	B2	112	CTD	3:54	103	-	
			23	B2	112	Net	3:54	94	259.3	
		B1	23	B1	73	CTD	4:45	67	-	
			23	B1	73	Net	4:46	65	145.6	
	June	A	24	A5	142	CTD	18:02	137	-	
			24	A4	131	CTD	19:31	123	-	
			24	A3	129	CTD	20:55	123	-	
			24	A2	104	CTD	21:41	112	-	
		B	25	B1	70	CTD	18:03	61	-	
			25	B2	108	CTD	18:53	101	-	
			25	B3	142	CTD	20:18	132	-	
			25	B4	165	CTD	21:40	155	-	
			25	B5	336	CTD	23:05	324	-	

Table 3 Summary of walleye pollock in the bottom of the trawl samples.

St.	Sampling Date	Sampling Time (hh:mm)	Hauling time (min)	Average Depth (m)	Total Catch (kg)	Walleye pollock Catch (kg)	Ratio of Walleye pollock (%)	Mean FL (mm)
T1	Jun 26, 2012	7:30-8:02	32	123	60.0	29.0	48.3	425
T2	Jun 26, 2012	10:05-10:28	23	133	254.0	234.1	92.2	279
T3	Jun 28, 2012	13:35-14:08	33	164	565.1	402.0	71.1	287
T4	Jun 25, 2013	7:28-8:02	34	129	38.0	20.3	53.5	194
T5	Jun 25, 2013	9:25-9:58	33	126	186.8	176.0	94.2	173
T6	Jun 27, 2013	7:25-7:58	33	158	16.7	13.7	82.0	215
T7	Jun 27, 2013	9:41-10:21	40	164	149.8	116.0	77.4	464

れたスケトウダラについては胃の内容物を調べた。

音響データ解析 音響データの解析にはEchoview (SonarData社製, Ver.3) を用いた。解析に用いた深度は、近距離音場および海底を避けるため、トランステューサ下10 m (深度13.5 m) から海底直上の0.5 mまでに制限した。スケトウダラとオキアミ類のエコーの判別は、周波数38 kHz, 120 kHzにおける周波数毎の音響散乱強度の違いを利用して次のように行った (以下、2周波法)。

まず、水平方向に5 ping毎、鉛直方向に5 m毎に解析セルを平均化し (De Robertis *et al.*, 2010), 両周波数の音響ビームの探知範囲の重複を大きくし、かつ体積後方散乱強度 (以下, SV) のばらつきの抑制を行った (Korneliussen *et al.*, 2008) うえで、周波数120 kHzの SV から周波数38 kHzの SV を差し引いた (以下, ΔSV_{120-38}) を求めた。 ΔSV_{120-38} は、両種の周波数120 kHzのターゲットストレンジス (以下, TS) から38 kHzの TS を差し引いた値に等しい。ここで、 TS とはある生物1個体の後方散乱断面積 σ_b (m^2) のデシベル表現である。一般的に、有鱗魚の TS は周波数38 kHz, 120 kHzともに同程度であるのに対して、動物プランクトンなどの小型生物の TS は、周波数120 kHzのほうが周波数38 kHzよりも大きいことが知られている。よって、スケトウダラとオキアミ類の ΔSV_{120-38} の範囲が分かれれば、エコーグラム上で両種の識別が可能になると考えられた。

両種の ΔSV_{120-38} は、実際に収録した音響データの中で、スケトウダラとオキアミ類と考えられるエコーから直接抽出した。この時、オキアミ類では80 cmリングネットによる鉛直曳網で湿重量割合が8割以上となった定点付近において、スケトウダラでは着底トロール網調査により漁獲重量割合が8割以上となった定点から10 nmi以内の海域において、それぞれ収録された音響データに制限した。さらに、経験的に両種のエコーの形状や分布深度などを考慮し、両種と考えられるエコーを判別した。こうして識別したエコーから38 kHzと120 kHzの両周波数における SV を抽出し、これらを差分して両種の ΔSV_{120-38} を算出し、その範囲を求めた。

胃内容物分析 2012年6月に実施したトロール調査 (T2,

T3) で採集されたスケトウダラ34個体の胃内容物を調べ、種の同定、個体数の計数と重量を計測した。また、個体数組成 (観察した餌生物の全個体数に対する各餌生物の個体数の百分率; %N), 湿重量組成 (観察した餌生物の総湿重量に対する各餌生物の湿重量の百分率; %W), 出現頻度 (ある種が出現した胃の頻度の百分率; %F) を求め、主要餌生物を検討した (小岡ら, 1997)。

結 果

スケトウダラとオキアミ類の周波数特性 2012年6月のエコーグラム上でエコーの形状や分布深度などを考慮して、スケトウダラとオキアミ類を判別したエコーの ΔSV_{120-38} のヒストグラムをFig.4に示した。灰色はスケトウダラ、白抜きはオキアミ類と判別したエコーのものである。 ΔSV_{120-38} の平均値±標準偏差は、それぞれスケトウダラが 1.87 ± 2.13 dB, オキアミ類が 8.95 ± 1.88 dBであった。また、各々の分布に当てはめた確率密度関数の曲線は ΔSV_{120-38} が6 dB付近で交差していた。これらのことから、以降、 $-5 \leq \Delta SV_{120-38} < 6$ dBをスケトウダラの反応、 $6 \leq \Delta SV_{120-38} < 15$ dBをオキアミ類の反応と定義し、エコーグラム上における識別に用いた。

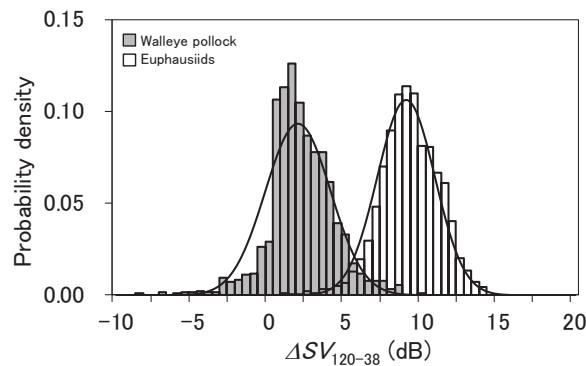


Fig.4 Histograms of SV_{120-38} for 5 ping × 5 m analysis cells identified as euphausiids (white bar) and walleye pollock (gray bar). The corresponding probability density for normal distribution with the observed mean and variance is given by the solid line.

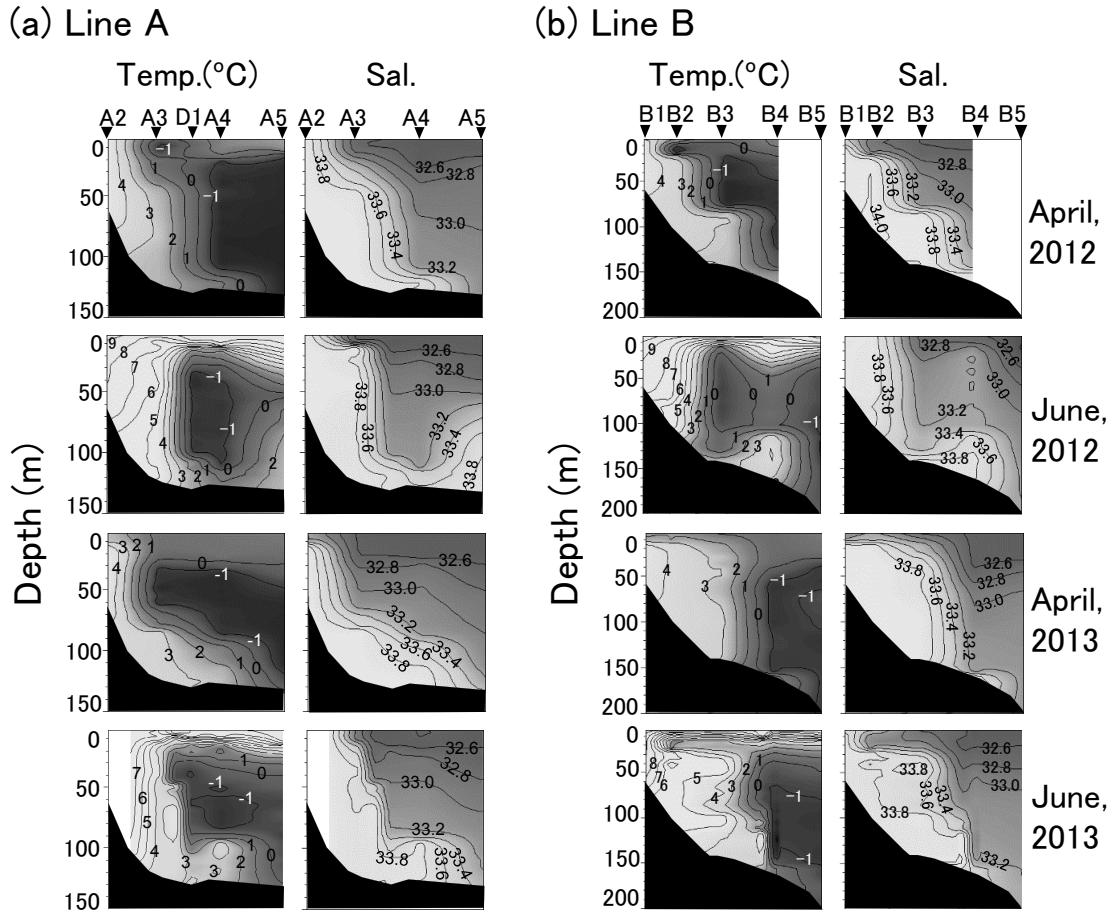


Fig.5 A transect distribution of temperature (left) and salinity (right) at each depth on Line A in 2012 or 2013 (a) and Line B in 2012 or 2013 (b). The top and lower rows show the results from April and June, respectively, at (a) and (b). The symbol ‘▼’ indicate CTD cast point.

水温・塩分の鉛直分布 航走線A, Bにおける2012年, 2013年のそれぞれ4月と6月における水温と塩分の鉛直断面図をFig.5に示した。両航走線ともに調査期間を通して、沿岸側には水温0 °C以上、塩分33.5以上の宗谷暖流水が分布し、沖合側には水温0 °C未満の中冷水が分布した。また、宗谷暖流水は潜流となって、沖合側の中冷水の下層にまで張り出していた。月別比較すると、両年の両航走線ともに沿岸側の表層～底層および沖合側の表層における水温は、4月は0～4 °C前後であり、6月になると昇温して5 °C以上の水塊が出現した。また、最も岸寄りの水温0 °Cを示す等温線の位置に着目すると、2013年の航走線Bを除いて4月から6月にかけて沖合側に移動した。次に、年別比較すると、航走線Bにおける宗谷暖流水の断面積は、両月ともに2013年が2012年を上回っており、さらに、水温0 °C未満の中冷水は、2012年は4月がB1とB2の中間付近、6月がB2とB3の中間付近まで張り出していたのに対して、2013年は両月ともにB3とB4の中間付近より沖合側に留まっていた。一方、航走線Aでは航走線Bのような年毎の差はみられなかった。

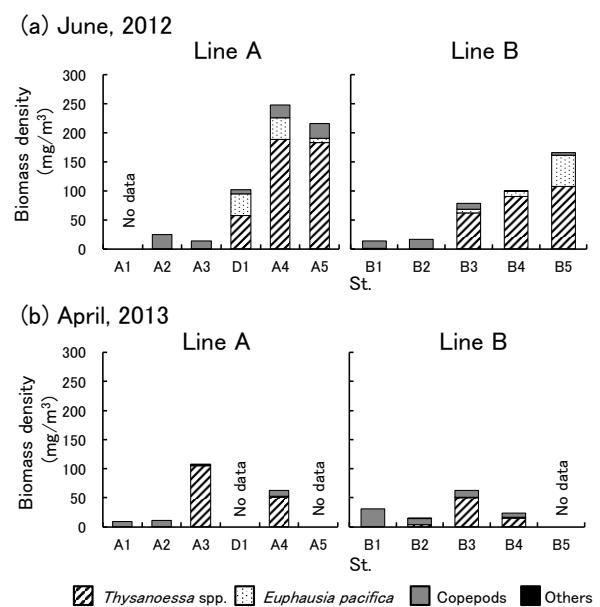


Fig.6 The biomass density and composition of zooplankton collected by 80 cm ring net at each station on Line A and Line B on June 2012 (a) and April 2013 (b).

動物プランクトンの種組成および湿重量組成 2012年6月および2013年4月の航走線A, Bの各定点における80 cmリングネットの採集条件をTable 2に、各定点における種別の湿重量密度をFig. 6に示した。採集された主な生物種は、オキアミ類の*Thysanoessa*属およびツノナシオキアミ*Euphausia pacifica*, カイアシ類であった。なお、*Thysanoessa*属はすべての個体について詳細な同定は行わなかったが、*T. inermis*および*T. raschii*, *T. longipes*が確認された。2012年6月の合計湿重量密度は、沿岸側（航走線A: A2, A3, 航走線B: B1, B2）では13.5～25.0 mg/m³（カイアシ類: 13.3～24.9 mg/m³, *Thysanoessa*属: 採集なし～0.2 mg/m³, *E. pacifica*: 採集なし）であったのに対して、沖合側（航走線A: D1, A4, A5, 航走線B: B3, B4, B5）では78.4～247.9 mg/m³（カイアシ類: 0.5～25.8 mg/m³, *Thysanoessa*属: 57.3～188.7 mg/m³, *E. pacifica*: 6.2～54.0 mg/m³）であり、沖合側が沿岸側を大きく上回り、オキアミ類は沖合側でのみ採集された（Fig. 6 (a)）。また、2013年4月の航走線Aの合計湿重量密度は、沿岸側（A1, A2）では9.1～11.0 mg/m³（カイアシ類: 9.1～11.0 mg/m³, *Thysanoessa*属: 採集なし, *E. pacifica*: 採集なし）であったのに対して、沖合側（A3, A4）では62.6～108.3 mg/m³（カイアシ類: 2.6～9.7 mg/m³, *Thysanoessa*属: 50.6～105.2 mg/m³, *E. pacifica*: 0.5～2.4 mg/m³）であり、沖合側が沿岸側を大きく上回り、2012年6月と同様にオキアミ類は沖合側のみで採集された（Fig. 6 (b)）。なお、2013年4月の航走線Bでは、沿岸側と沖合側で合計湿重量密度の顕著な差はなかった。ただし、オキアミ類はB1では採集されなかつたのに対して、これよりも沖合側のB2～B4では採集された。

スケトウダラの尾叉長および年齢組成 着底トロール調査の曳網条件と採集結果およびスケトウダラの平均尾叉長をTable 3に示した。2012年6月のT1を除いて、スケトウダラが総漁獲量の50 %以上を占めた。両年の航走線A, Bの近傍としてT2, T3, T5, T6で採集されたスケトウダラの尾叉長および年齢組成をFig. 7に示した。2012年6月は、T2, T3とともに尾叉長30 cm前後が主体で、年齢は3歳が約8割を占める組成であった。一方、2013年6月は、航走線A近傍のT5では尾叉長範囲が8～41 cmで、13.5 cmと22.0 cmに2つのモードを示す組成であり、年齢は1, 2歳主体の組成であった。また、航走線B近傍のT6では、尾叉長範囲が9～37 cmで22.5 cmにモードとなる2歳主体の組成であった。

スケトウダラとオキアミ類の鉛直分布と水塊構造との比較 2周波法で識別した結果のうち、スケトウダラとオキアミ類の分布が明瞭となった2012年6月について、これらの分布と水温および塩分との比較図をFig. 8に示し

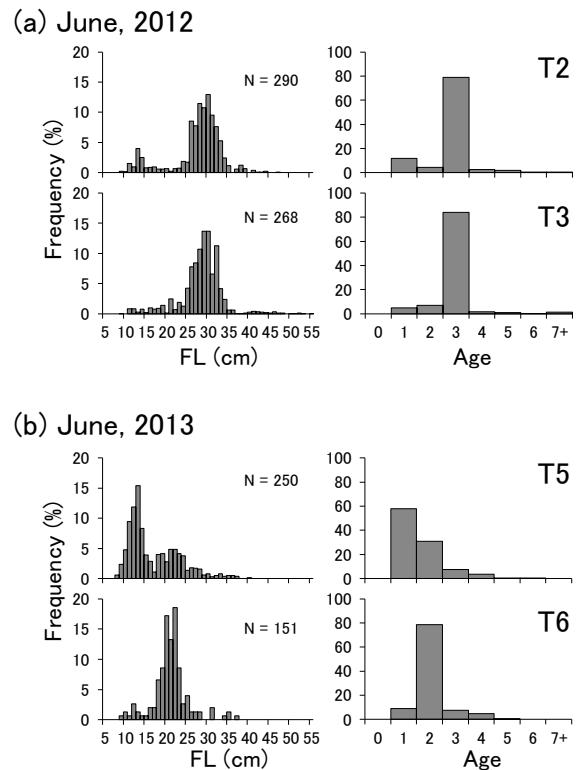


Fig. 7 Fork length and age frequencies of walleye pollock collected by bottom-trawl at T2, T3, T5 and T6 on June 2012 (a) and June 2013 (b).

た。スケトウダラおよびオキアミ類とともに、航走線A (Fig. 8 (a)) ではA3から沿岸側、航走線B (Fig. 8 (b)) ではB2とB3の間から沿岸側の水温が4 °C以上、塩分が33.8以上となる水塊には、ほとんど分布していなかった。オキアミ類は、航走線AではA3とD1の中間付近から沖合側にかけて、航走線BではB2とB3の中間付近から沖合側にかけての深度50 m以浅の表層側に分布し、その水温範囲は0～7 °Cであり、オキアミ類は、ちょうど中冷水の上層に位置していることがわかった。次に、スケトウダラは、中冷水の下層の潜流となった宗谷暖流水（水温1 °C以上、塩分33.5以上）となる海底付近の水塊に分布しており、その水温範囲は1～4 °Cであった。また、スケトウダラの主群が分布する海底深度は、航走線Aでは130 m付近、航走線Bでは160～180 m付近であった。

スケトウダラとオキアミ類の分布の季節・年変動 2012年、2013年のそれぞれ4月と6月におけるスケトウダラとオキアミ類の反応の分布をFig. 9に示した。なお、2012年4月の航走線BにおけるB1～B3の区間および2013年4月のB1付近は、日出を過ぎた時間帯であった (Table 2)。オキアミ類の反応は、調査期間を通して沿岸側から沖合側にかけて連続的に分布し、その沿岸側の分布境界の位置は、両年ともに4月から6月にかけて沖合側に後退した。

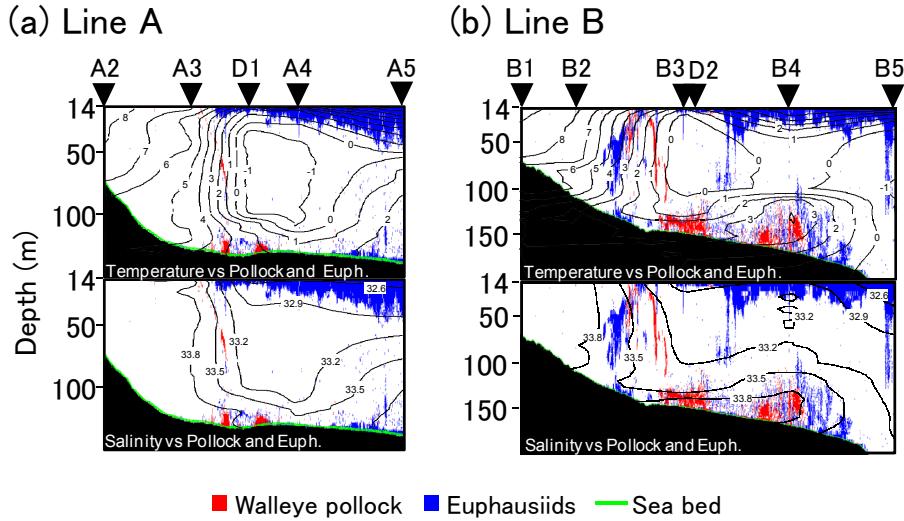


Fig.8 Echograms of distributions of walleye pollock (red) and euphausiids (blue) identified based on 2-frequency method on Line A (a) and Line B (b). Echoes of these figures did not take information on echo intensity into account. The symbol ‘▼’ indicate the 80 cm ring net and CTD cast point.

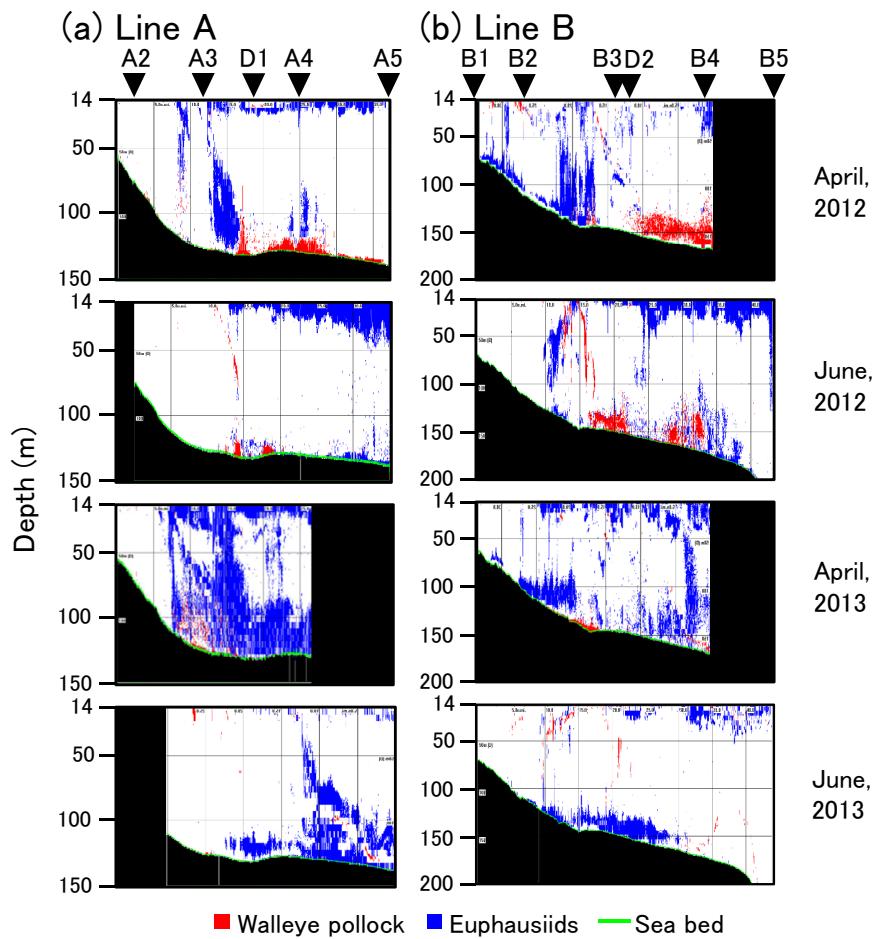


Fig.9 The series of echograms of the distributions of walleye pollock (red) and euphausiids (blue) on Line A (a) and Line B (b) from April 2012 to June 2013. The echoes in these figures did not take echo intensity information into account.

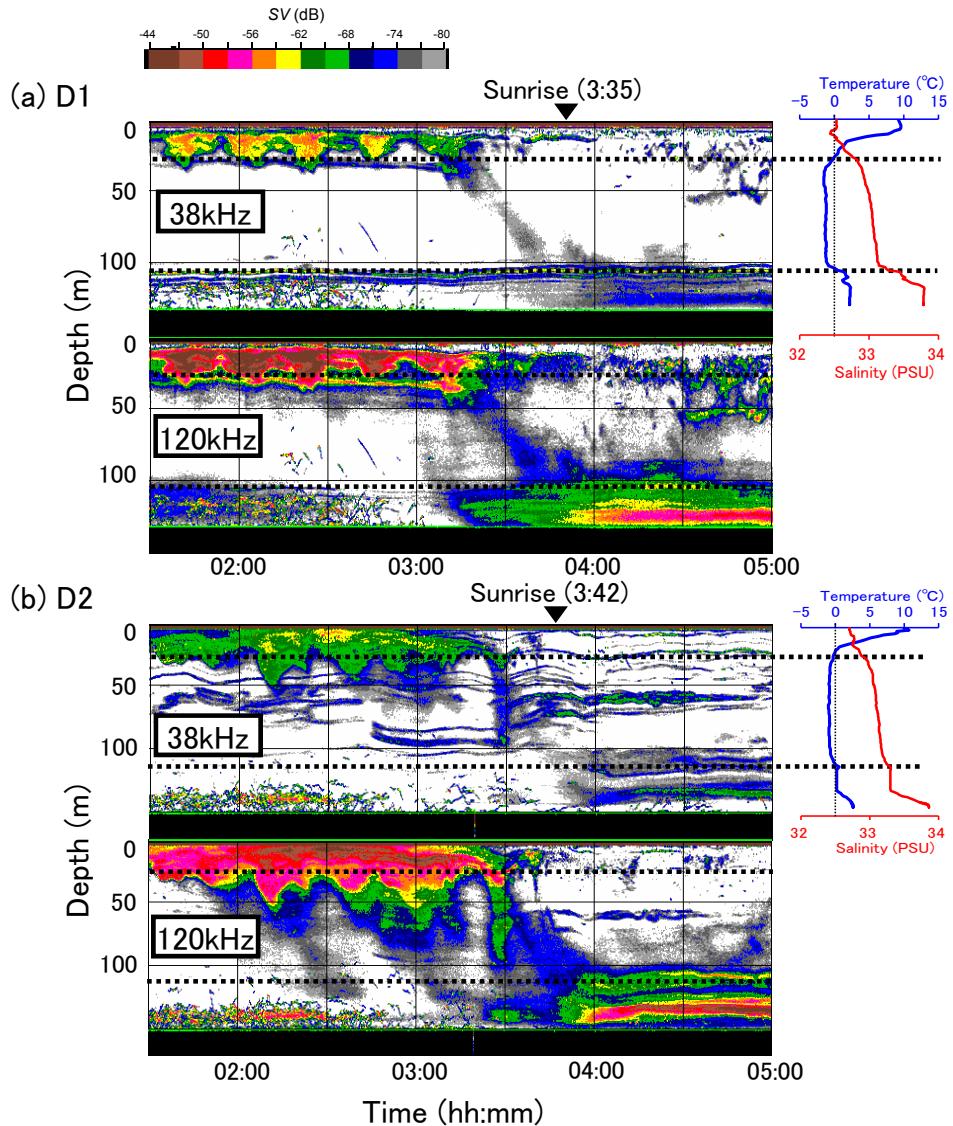


Fig. 10 The volume backscattering echograms at frequency of 38 kHz and 120 kHz during diel vertical migration of euphausiids from 1:30 to 5:00 a.m., and the vertical profile of temperature and salinity versus depth. The symbol ‘▼’ indicate the time of sunrise. The regions between two broken lines indicate the intermediate cold water layer (<0 °C).

また、6月は2012年では主に表層付近に分布したが、2013年では海底付近に分布した。スケトウダラの反応は、2012年では両月ともにA3とD1の中間地点（航走線A）およびB2とB3の中間地点（航走線B）よりも沿岸側にはほとんど分布せず、これらの位置よりも沖合側の海底付近に分布が観察された。また、4月の分布を2012年と2013年とで比較すると、2013年のほうがより沿岸側に分布した。

漂泊観測によるスケトウダラの観察 D1およびD2における38 kHz, 120 kHzの両周波数のエコーグラムの経時変化と水温および塩分の鉛直プロファイルをFig. 10に示した。D1では水深約30~100 mにかけて、D2では水深約20~110 mにかけて水温0 °C未満の中冷水が分布（図

中点線で表示した範囲）し、これらの下層には水温0 °Cよりも高く、塩分33.5を超える宗谷暖流水が分布した。

エコーグラムの経時変化をみると、両地点ともに、日出前は表層付近に38 kHzよりも120 kHzに強く写る帶状のエコーがみられた。これらは日出前に沈みはじめ、海底付近へと移動し、日出後は海底付近に留まっていた。日出後においても表中層付近には、パッチ状の反応がみられたが、日出前と比べて反応量は明らかに少なかった。海底付近では、日出前までは海底直上から深度100 m付近の水温躍層にかけての層に、両周波数とともに同程度の強度で映る反応が顕著にみられたが、日出後はあまりみられなくなった。なお、この反応は中冷水の内部でも一部確認できたが、大半は水温躍層より下層の宗谷暖流水

Table 4 Overall diets of walleye pollock caught by bottom trawl on June 2012. ‘% N’ means percentage of number. ‘% W’ means percentage by weight. ‘% F’ means frequency of occurrence.

Sampling st. Compositon ratio	T2			T3		
	%N	%W	%F	%N	%W	%F
<i>Thysanoessa</i> spp.	6.4	11.3	76.5	13.8	45.4	47.1
<i>Euphausia pacifica</i>	27.1	41.9	76.5	<0.1	1.3	23.5
unidentified euphausiids	38.6	44.2	82.4	44.7	50.3	100.0
Copepods	27.6	2.3	52.9	37.3	2.4	88.2
Sagittoidea	<0.1	<0.1	5.9	0.0	0.0	0.0
Amphipods	0.2	<0.1	5.9	3.1	0.6	41.2
Other	<0.1	0.3	5.9	<0.1	0.0	5.9

内に昼夜を問わず留まっていた。

この漂泊観測を行ったD1およびD2の近傍で実施した着底トロール調査 (T2, T3) で得られたスケトウダラの胃内容物の個体数組成 (%N), 湿重量組成 (%W), 出現頻度 (%F) をTable 4に示した。消化により種同定ができなかったオキアミ類はunidentified euphausiidsとした。T2, T3ともに, 種同定不能のオキアミ類, *Thysanoessa* 属, *E. pacifica*といったオキアミ類で胃内容物重量の約9割を占めていた。オキアミ類に次いで割合が高かったのはカイアシ類であったが, 全体の2%程度と低かった。その他にも毛顎類および端脚類が観察されたがその割合は小さかった。調査点別に比べると, T2で*E.pacifica*が重量比で41.9 %となつたが, T3では1.3 %と明らかに低かった。

考 察

エコーダム上でオキアミ類と判別された反応の分布とネット採集結果はよく一致し, いずれの結果からも沿岸側にはほとんど分布せず, 沖合側ほど多くなるという特徴がみられた (Fig.6, Fig.9)。また, 2012年6月のオキアミ類と沖合側の中冷水の分布は, おおむね一致していた (Fig.8)。また, エコーダム上でオキアミ類と判別された反応の分布は, 6月が4月に比べて沖合側へと後退したのが確認できた (Fig.9)。これと同じく, 中冷水の分布域は6月が4月よりも後退した (Fig.5)。和高ら (2009) は, 2003年8月に本研究における航走線Bの南側に, 等深線に対して垂直な調査ラインを設定し, クロロフィルaの鉛直分布を調べている。これによると, クロロフィルa濃度は宗谷暖流水域で低く, 中冷水域の表層で高いことを報告している。また, 中冷水域は春季から夏季にかけて宗谷暖流水の流量増加に伴って沖合側へと後退することが知られており (青田, 1975; 松山ら, 1993), 基礎生産が高い海域は冬季および春季が沿岸付近, 夏季が宗谷暖流水のフロント域であり, 春季から夏季にかけて沖合側へとシフトしていくとの報告もある (Mustapha et al., 2009)。以上のことから, 本海域における

オキアミ類の分布域は, 中冷水域の高い基礎生産による植物プランクトンなどの餌生物の多さが影響していることが示唆された。よって, 6月のオキアミ類の分布が4月よりも沖合側へと後退した理由としては, 宗谷暖流水の流量増加に伴う中冷水の分布域が沖合側へと変化したためと推察される。

本海域において6月に漁獲されたスケトウダラの胃内容物の観察結果から, 個体数組成, 湿重量組成, 出現頻度のいずれにおいても, オキアミ類 (*Thysanoessa*属, *E.pacifica*) が他種 (カイアシ類など) を大きく上回っていた (Table 4)。また, トロール調査点付近で実施した80 cmリングネットでもオキアミ類が優占していたことから, 6月のスケトウダラの主な餌料生物はオキアミ類であると考えられた。さらに, 夜間にはオキアミ類は中冷水 (<0 °C, 最低水温-1.5 °C) を挟んで表層に分布したが (Fig.8, Fig.9), 日出前後に中冷水を通り抜けて底層へと鉛直移動し, スケトウダラと分布深度が重なり合うことが観察された (Fig.10)。スケトウダラは視覚が発達しており (張ら, 1993), 道東太平洋や日本海では日中に摂餌していることから (小岡ら, 1997; Miyashita et al., 2004), 夜間表層に分布するオキアミ類は, 日出後の日中の時間帯に海底付近でスケトウダラによって捕食されていると考えられる。

本海域におけるスケトウダラの分布は, 中冷水の下層にある宗谷暖流水の潜流域であり, その分布水温範囲は1~4 °Cであった。ベーリング海では, 春季の海氷期と夏季の非海氷期とでスケトウダラとオキアミ類の分布を比較し, スケトウダラは暖かい水塊 (>0.5 °C) に分布し冷水塊を避けていること, 春季と夏季で分布水温範囲がほぼ同じであり, 周囲の水塊構造変化の影響によってその分布範囲が制限されていることが示されている (De Robertis and Cokelet, 2012)。このことから, 本海域のスケトウダラは水温0 °C未満を保つ中冷水域は適水温ではなく, 中冷水を避けて分布していると考えられる。また, 2012年に漁獲されたスケトウダラは3歳魚が主体の未成魚であるが, 道東太平洋においては未成魚の分布水温は0~9 °Cといった報告がある (志田, 2002) ことから, 沿岸側の高水温帶 (>4 °C) も生息可能な水温範囲と考えられる。しかし, 前述したように, スケトウダラは中冷水域に分布するオキアミ類を昼間に捕食することが可能であることから, オキアミ類がほとんど分布しない沿岸側の宗谷暖流域よりも, より多く分布する中冷水域側の下層で潜流となった宗谷暖流水に分布することで, 効率的に餌を確保できると考えられる。

スケトウダラの餌生物の分析から, 個体数および重量組成でいずれも高い割合を示したのはオキアミ類であつ

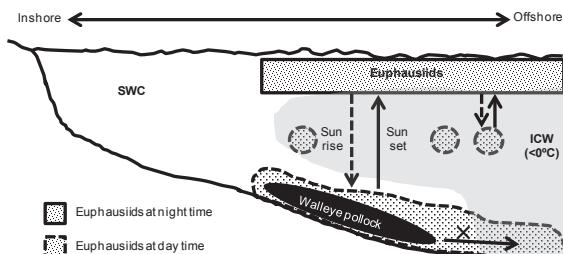


Fig. 11 The cross section diagram of the distribution of walleye pollock and euphausiids in southern Okhotsk Sea, off the coast of Hokkaido, Japan. 'SWC' means the Soya warm current. 'ICW' means intermediate cold water.

た。オキアミ類の種としては、T2では*E.pacifica*が多かったのに対して、T3では*Thysanoessa*属がより多かった。80 cmリングネットによる採集結果では、T2付近のD1ではT3付近のB4に比べて*E.pacifica*が多くなっており、これらの餌種の違いが海域によるオキアミ類の種の分布の違いを反映したと考えられる。T2はT3に比べて沿岸側であり宗谷暖流水に近いことも関係しているのかもしれない。スケトウダラの餌生物としては主にオキアミ類であり、次いでカイアシ類であった。オキアミ類はカイアシ類に比べて体サイズが大きく、視覚捕食者であるスケトウダラにとって発見しやすい餌生物である。さらに、オキアミ類の中でも*Thysanoessa*属は*E.pacifica*に比べて大型であり、スケトウダラにとって捕食に成功すれば、エネルギー獲得効率が高いため有利であると考えられる。

以上のこと総合して模式的に表すとFig. 11のようになり、スケトウダラは中冷水下層で潜流となった宗谷暖流水内に分布し、昼夜を問わず、中冷水内に分布しないことが観察された。また、オキアミ類は、夜間、中冷水上層部の表層域に分布し、日出前後に海底近くの下層へと移動し、スケトウダラと混在し捕食されていることが明らかとなった。こうした分布特性や摂餌生態は明らかになったものの、来遊時期や来遊量等の漁況予測に必要な情報は、まだ不十分である。本資源はサハリン東岸が分布の中心である（濱津ら、2018）ことから、来遊量はロシア水域内の資源量の増減とそれに伴う分布域の拡大と縮小などが大きく影響すると考えられる。さらに、日本側水域に来遊する経路も明らかとなっていない。今後、来遊量を予測するには、本資源全体の現存量に関する情報が最も必要であるが、本海域にスケトウダラが来遊しやすい条件を把握する必要がある。前述の日本海洋学会沿岸海洋研究部会（1985）が指摘しているように、中冷水の張り出しがサハリン東岸からのスケトウダラの来遊を阻害するといった可能性も考えられることから、スケトウダラの来遊量が多い年と少ない年の海洋環境の特徴

を把握する必要がある。加えて、本海域におけるスケトウダラは索餌回遊群と考えられている（飯塚ら、1954）ことから、餌生物であるオキアミ類の生物量や、スケトウダラが摂餌する昼間におけるオキアミ類との鉛直的な分布の重なり合いに関する知見も収集し、これらの情報とスケトウダラ来遊量との比較検証を行うことが望ましい。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、調査に携わっていただいた北海道立総合研究機構稚内水産試験場所属北洋丸の船長ならびに乗組員諸氏に厚く御礼申し上げます。また、貴重なご助言を賜りました北海道大学大学院水産科学院海洋計測学講座音響計測グループの学生、院生諸氏に感謝申し上げます。また、本研究は北海道大学と北海道立総合研究機構との共同研究によって行われた。

引用文献

- 青田昌秋. 宗谷暖流の研究. 低温科学(物理篇) 1975 ; 33 : 151-172.
- De Robertis A, McKelvey R D, Ressler H P. Development and application of an empirical multifrequency method for backscatter classification. *Can. J. Aquat. Sci.* 2010 ; 67 : 1459-1474.
- De Robertis A, Cokelet D E. Distribution of fish and macrozooplankton in ice-covered and open-water areas of the eastern Bering sea. *Deep-Sea Res. Pt II*. 2012 ; 65-70:217-229.
- 藤森康澄, 向井 徹, 山本 潤. プランクトンネットによるオキアミ採集における人口照明の効果. 日本水産学会誌 2010 ; 76(6) : 1080-1082.
- 濱津友紀, 千村昌之, 山下夕帆, 田中寛繁, 石野光弘, 山下紀生. 平成29年度スケトウダラオホーツク海南部の資源評価, 我が国周辺水域の漁業資源評価(平成29年度) 第1分冊. 東京, 水産庁増殖推進部・独立行政法人水産総合研究センター 2018 ; 383-407.
- 飯塚 篤, 黒萩 尚, 生田浩三, 今井辰一郎. 北海道近海産スケトウダラの天然飼料とその海域別特性について. 北海道水産試験場研究報告 1954 ; 11 : 7-20.
- Kang M, Furusawa M, Miyashita K. Effective and accurate use of difference in mean volume backscattering strength to identify fish and plankton. *ICES J. Mar. Sci.* 2002 ; 59 : 794-804.
- 小岡孝治, 高津哲也, 亀井佳彦, 中谷敏邦, 高橋豊美.

- 北部日本海中層に生息するスケトウダラの春季と秋季における食性. 日本水産学会誌 1997; 63(4) : 537-541.
- Korneliussen J R, Diner N, Ona E, Berger L, Fernandes G P. Proposals for the collection of multifrequency acoustic data. *ICES J. Mar. Sci.* 2008; 65 : 982-994.
- Matsuura T, Uchikawa K, Sawada K. Relationship between light and diel vertical migration of *Diaphus theta* and *Euphausia pacifica* off eastern Hokkaido. *Fisheries. Sci.* 2012; 78 : 503-513.
- 松山優治, 青田昌秋, 小笠原勇, 松山左和. 宗谷暖流の季節変動. 海の研究 1993; 8 : 333-338.
- Miyashita K, Tetsumura K, Honda S, Oshima T, Kawabe R, Sasaki K. Diel changes in vertical distribution patterns of zooplankton and walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) off the pacific coast of eastern Hokkaido, Japan, estimated by the volume back scattering strength (Sv) difference method. *Fish. Oceanogr.* 2004; 13(1) : 99-110.
- Mustapha A M, Saitoh S, Lihan T. Satellite-measured seasonal variations in primary production in the scallop-farming region of the Okhotsk Sea. *ICES J. Mar. Sci.* 2009 ; 66 : 1557-1569.
- 夏目雅史, 佐々木正義. 北海道北部海域のスケトウダラ仔稚魚の分布. 北海道水産試験場研究報告1995 ; 47 : 33-40.
- 日本海洋学会沿岸海洋研究部会. 「日本全国沿岸海洋誌」 東海大学出版, 東京. 1985.
- 大槻知寛. オホツク海南西域におけるオキアミ類の分布とその海域特性について. 北海道水産試験場研究報告 1975 ; 32(11) : 1-10.
- 志田 修. 北海道東部太平洋海域におけるスケトウダラの年齢別分布水深. 北海道水産試験場研究報告 2002 ; 63 : 9-19.
- Simmonds E J, MacLennan D N. *Fisheries Acoustics : Theory and Practice*, 2nd Edition. Wiley-Blackwell, UK. 2005.
- Takizawa T. Characteristics of the Soya Warm Current. *J. Oceanogr. Soc. Japan* 1982 ; 38 : 281-292.
- 辻 敏. 北海道周辺の系統群. ベーリング海及びカムチャツカ半島周辺海域のスケトウダラ資源の系統群の解明に関する研究成果報告書 農林水産技術会議事務局, 1979 ; 139-150.
- 和高牧子, 松山優治, 石津美穂, 北出裕二郎, 矢野泰隆. オホツク海の宗谷暖流沖の底層にみられる高濁度水. 沿岸海洋研究 2009 ; 46 : 175-183.
- 張 秀梅, 秋山清二, 有元貴文, 井上喜洋, 松下吉樹. 北転船で漁獲されたスケトウダラ網膜の明暗順応状態. 日本水産学会誌 1993 ; 59 : 481-485.

訂正 (Erratum)

北水試研報94号（清水洋平，高橋 洋，高柳志朗，堀井貴司，山口幹人，田中伸幸，田園大樹，瀧谷 明朗，川崎琢真，高畠信一，藤岡 崇，三宅博哉：北海道周辺沿岸海域において産卵するニシン (*Clupea pallasii*) の mtDNA情報を用いた集団構造の検討。北水試研報、94, 1-40 (2018) ; Population structure of the Pacific herring, *Clupea pallasii*, around Hokkaido Island inferred on the basis of mitochondrial DNA sequences. *Sci. Rep. Hokkaido Fish. Res. Inst.* 94, 1-40 (2018) (In Japanese)）に以下の誤植と文献の脱落がありましたので、お知らせいたします。

ページ	行	誤	正
4 Table 1	Sample No.40	Collection date 7 May 2017	Collection date 7 May <u>2014</u>

ページ	行	文献の追加
13	右段27行	高柳志朗. 苦小牧ニシンは固有群か?. 北水試だより 2001 ; 54 : 14-18.

方向分散法を用いた波変形アプリケーションの波高推定精度

金田友紀

既存グラフの値および波向線間隔の、図面からの読み取りなど煩雑な作業が必要だった方向分散法による波高変形推算をパソコン上で行えるアプリケーションを開発した。読み取りが必要だった値の算出、陸地境界によるエネルギークット領域の抽出、複数のデータセット（沖波波高、周期、波向）での計算の実行、計算結果の保存などを自動化し、作業の簡便化を図った。沖観測点における波高の実測値を、アプリケーションを用いて波高変形推算したところ、波高推算値と陸観測点における実測値との間で比較的良い相関が得られた。波向線間隔の適切な設定値について検討した結果、精度の高い推算結果が得られたことから、設計を想定している施設の幅の5倍以上、かつ計算点と陸地境界間の距離以下の波向線間隔が適切であることが示された。

A573 北水試研報 96, 1–7 (2019)

サケ稚魚の初生鱗形成における河川間の違いと採卵時期による影響

下田和孝、渡辺智治、安藤大成

サケの初生鱗が形成される体サイズや時期を明らかにするために、北海道の6河川を対象に各河川の前期群（9月下旬から10月上旬に採卵）と後期群（11月下旬から12月上旬に採卵）のサケ稚魚の初生鱗形成過程を比較した。初生鱗の形成時期は浮上時の尾叉長が小さい河川で遅かった。採卵時期による比較では3河川において後期群で初生鱗形成時期が早かった。初生鱗形成時点の尾叉長は河川や採卵時期によって異なっていた。これらの結果から、サケの初生鱗の形成時期は浮上時と初生鱗形成時の体サイズによって決まり、両者が河川や採卵時期により異なることが初生鱗形成時期の河川および採卵時期による違いをもたらすと考えられた。

A575 北水試研報 96, 17–26 (2019)

北海道沿岸で漁獲されたサケの年齢と成熟度の季節変化

春日井 潔

2004～2014年にかけて北海道沿岸の17か所で漁獲されたサケの年齢と成熟度を調べた。調査場所別に、雌雄それぞれですべての年のすべての個体を漁獲旬毎にまとめて解析した。季節の進行にともない、雌雄とともに、北海道東部では平均年齢が低下し、根室海区や太平洋側の多くの場所で成熟魚の比率が高くなった。

A574 北水試研報 96, 9–15 (2019)

北海道スケトウダラ研究グループ会議50周年記念論文（2）

秋季の道東太平洋海域におけるスケトウダラ *Gadus chalcogrammus* 0歳魚の分布水深の長期変動

志田 修, 石田良太郎, 石田宏一, 坂口健司

秋季の北海道東部太平洋海域におけるスケトウダラ0歳魚分布の長期年変動を1997～2013年に実施した音響資源調査データを用いて調べた。その結果、スケトウダラ0歳魚は水深50～300 mの大陸棚から大陸斜面海域までに広く分布したが、大陸棚内側（水深<80 m）、大陸棚外側（水深<130 m）および大陸斜面（<300 m）の分布割合は年変動が認められ、特に1999、2000、2003および2005年は大陸斜面域の分布割合が50%以上であった。このような分布域の変動はスケトウダラのサイズや環境の影響によると考えられたが、この時期に大陸斜面域に分布する捕食者であるスケトウダラ成魚の分布の影響は小さいと推測された。

A576 北水試研報 96, 29–39 (2019)

計量魚群探知機を用いた北海道オホーツク海におけるスケトウダラ *Gadus chalcogrammus* の春季来遊群とオキアミ類の鉛直分布特性

水上卓哉, 板谷和彦, 向井 徹, 飯田浩二

北海道オホーツク海大陸棚上で春季のスケトウダラとその餌生物であるオキアミ類の分布特性を解明するため、計量魚探を用いた夜間の音響調査を実施した。スケトウダラは中冷水（<0 °C）の下層で潜流となった宗谷暖流水内（> 0 °C, >33.5）に分布していた。一方、オキアミ類は中冷水の分布域の表層に分布していた。オキアミ類の日周鉛直移動を観測したところ、日出前後に中冷水を通り抜け、スケトウダラが分布する下層の宗谷暖流水内に移動した。翌朝の着底トロール網で漁獲されたスケトウダラの胃内容物はほぼオキアミ類で占められていた。

A577 北水試研報 96, 41–52 (2019)

北海道立総合研究機構水産研究本部は次の機関をもって構成されており、北海道水産試験場研究報告は、これらの機関における研究業績を登載したものです。

In addition, the Fisheries Research Department of the Hokkaido Research Organization will now comprise the following seven local Fisheries Research Institutes. The study achievements of these institutes will be published in the “Scientific reports of Hokkaido Fisheries Research Institutes”.

**地方独立行政法人
北海道立総合研究機構
水産研究本部**

(Local Independent Administrative Agency
Hokkaido Research Organization
Fisheries Research Department)

中央水産試験場

(Central Fisheries Research Institute)

046-8555

余市郡余市町浜中町238

(Hamanaka-cho, Yoichi, Hokkaido 046-8555, Japan)

函館水産試験場

(Hakodate Fisheries Research Institute)

040-0051

函館市弁天町20-5

函館市国際水産・海洋総合研究センター内

(Benten-cho, Hakodate, Hokkaido 040-0051, Japan)

釧路水産試験場

(Kushiro Fisheries Research Institute)

085-0027

釧路市仲浜町4-25

(Nakahama-cho,Kushiro,Hokkaido 085-0027, Japan)

網走水産試験場

(Abashiri Fisheries Research Institute)

099-3119

網走市鱒浦1-1-1

(Masuura, Abashiri, Hokkaido 099-3119, Japan)

稚内水産試験場

(Wakkanai Fisheries Research Institute)

097-0001

稚内市末広4-5-15

(Suehiro, Wakkanai, Hokkaido 097-0001, Japan)

栽培水産試験場

(Mariculture Fisheries Research Institute)

051-0013

室蘭市舟見町1-156-3

(Funami-cho, Muroran, Hokkaido 051-0013, Japan)

さけます・内水面水産試験場

(Salmon and Freshwater Fisheries
Research Institute)

061-1433

恵庭市北柏木町3-373

(Kitakashiwagi-cho, Eniwa, Hokkaido 061-1433,Japan)

水産研究本部図書出版委員会

委員長 木村 稔
委 員 萩場 隆昭 中多 章文 赤池 章一
星野 昇 三原 行雄 浅見 大樹
事務局 宮腰 靖之 富樫 佳弘 上田 吉幸

水産研究本部出版物編集委員会

委員長 宮腰 靖之
委 員 山口 幹人 板谷 和彦 馬場 勝寿 清水 洋平
辻 浩司 武田 忠明 隼野 寛史 畑山 誠
浅見 大樹 水野 伸也
事務局 富樫 佳弘 上田 吉幸 (作業補助:石川 さやみ)

北海道水産試験場研究報告 第96号

2019年9月27日発行 ISSN : 2185-3290

編集兼
発行者 北海道立総合研究機構水産研究本部
〒046-8555 北海道余市郡余市町浜中町238
電話 総合案内 0135(23)7451 (総務部総務課)
図書案内 0135(23)8705 (企画調整部企画課)
FAX 0135(23)3141
Hamanaka-cho 238, Yoichi-cho, Hokkaido 046-8555, Japan
印刷所 株式会社 総北海 札幌支社
〒065-0021 札幌市東区北21条東1丁目4番6号
電話 011(731)9500