

北海道水産試験場研究報告

第 95 号

SCIENTIFIC REPORTS OF HOKKAIDO FISHERIES RESEARCH INSTITUTES No.95

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（1）

With special papers for the 50th anniversary of the "Hokkaido Suketoudara Kenkyu Group" (Hokkaido Walleye Pollock Research Group) Part 1

北海道立総合研究機構水産研究本部

北海道余市町

2019年3月

Hokkaido Research Organization
Fisheries Research Department

Yoichi, Hokkaido, Japan

March, 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)

北海道水産試験場研究報告

第95号

目 次

田中伊織

定期海洋観測に使用するクロロフィルaおよびフェオ色素を計算する一般方程式の導出と その解の数値計算法について.....	1
--	---

夏池真史, 金森 誠, 嶋田 宏

2018年の函館湾における有害ラフィド藻 <i>Heterosigma akashiwo</i> の季節変動および赤潮発生状況について	11
--	----

浅見大樹, 隼野寛史, 真野修一, 永田光博

北海道えりも沿岸域におけるサクラマス幼魚への二生類 <i>Brachyphallus crenatus</i> （吸虫綱, 扁形動物門） の寄生状況	19
---	----

城 幹昌

フリーウェアを用いた耳石日周輪解析手法の検討（技術報告）	25
------------------------------------	----

高谷義幸, 合田浩朗

リアルタイムPCR法で推定した北海道東部海域におけるアナメ, スジメ, アイヌワカメの 遊走子放出時期（資料）	33
--	----

北海道スケトウダラ研究グループ会議50周年記念論文（1）

志田 修

北海道水産試験場における計量魚群探知機を用いたスケトウダラ音響資源調査の発展について（総説） －スケトウダラ研究グループ会議発足50周年に向けて－	41
--	----

美坂 正, 星野 昇, 渡野邊雅道, 本間隆之, 志田 修, 三原行雄, 板谷和彦, 三宅博哉 北海道日本海海域におけるスケトウダラ産卵群の分布変化	55
--	----

渡野邊雅道, 本間隆之, 武藤卓志

北海道檜山海域における産卵前期のスケトウダラ分布の経年変化.....	69
------------------------------------	----

(2019年3月)

SCIENTIFIC REPORTS
OF
HOKKAIDO FISHERIES RESEARCH INSTITUTES
No.95

CONTENTS

IORI TANAKA

- Derivation of a general equation and numerical solution method for calculating chlorophyll *a* and pheopigments in serial oceanographic observations 1

MASAFUMI NATSUIKE, MAKOTO KANAMORI and HIROSHI SHIMADA

- Red tide and seasonal occurrence of the harmful raphidophyte *Heterosigma akashiwo* in Hakodate Bay, Hokkaido 11

HIROKI ASAMI, HIROFUMI HAYANO, SHUICHI MANO and MITSUHIRO NAGATA

- Prevalence of the hemiurid trematode *Brachyphallus crenatus* in the stomach of juvenile masu salmon *Oncorhynchus masou* in the coastal waters near Cape Erimo, Hokkaido, Japan 19

MIKIMASA JOH

- Methods of otolith microstructure analysis using free software (Technical report) 25

YOSHIYUKI TAKAYA and HIROO GODA

- The release period of zoospores of three species of Laminariales *Agarum clathratum*, *Costaria costata* and *Alaria praelonga* off the coast of eastern Hokkaido by real-time PCR (Note) 33

Special papers for the 50th anniversary of the “Hokkaido Suketoudara
Kenkyu Group”(Hokkaido Walleye Pollock Research Group) Part 1

OSAMU SHIDA

- Acoustic surveys of walleye pollock by Hokkaido Research Organization using the quantitative echo sounder (Review) 41

**TADASHI MISAKA, NOBORU HOSHINO, MASAMICHI WATANOBE, TAKAYUKI HONMA,
OSAMU SHIDA, YUKIO MIHARA, KAZUHIRO ITAYA and HIROYA MIYAKE**

- Distributional changes in the spawning population of walleye pollock *Gadus chalcogrammus* in the northern Japan Sea off Hokkaido, Japan 55

MASAMICHI WATANOBE, TAKAYUKI HONMA and TAKASHI MUTO

- Annual change of walleye pollock *Gadus chalcogrammus* distribution during the pre-spawning season off Hiyama, Hokkaido 69

(March, 2019)

定期海洋観測に使用するクロロフィルaおよびフェオ色素を計算する一般方程式の導出とその解の数値計算法について

田中伊織*

元北海道立総合研究機構中央水産試験場

Derivation of a general equation and numerical solution method for calculating chlorophyll *a* and pheopigments in serial oceanographic observations

IORI TANAKA*

Formerly: Central Fisheries Institute, Hokkaido Research Organization, Yoichi, Hokkaido 046-8555, Japan

When we analyze a sample containing mixed solution of chlorophyll *a* and pheopigments by fluorometric methods, dilution is needed for the sample containing high pigment concentration in which nonlinear relationship between fluorescence intensity and pigment concentration appears. In this study, a general equation, which can calculate the pigment concentration in the nonlinear region, was derived in order to avoid this dilution procedure. General solution of the equation through a numerical calculation method is also shown for chlorophyll *a* and pheopigments. Results of the calculation by general solution were verified by comparing the results to that obtained by the dilution procedure for total pigment concentrations up to 520 $\mu\text{g L}^{-1}$ using the same sample from in situ sea water collected during a spring phytoplankton bloom on the coast of the Sea of Japan.

キーワード：一般解、一般方程式、キャリブレーション、クロロフィル*a*、蛍光光度計、春季大増殖、定期海洋観測、フェオ色素

漁業生物を含め、海洋生物の生産は海洋の一次生産者である植物プランクトンの生産力に依存する。この植物プランクトンの生産力は、主要な光合成色素であるクロロフィル*a*が担っている。そこで、古くからクロロフィル*a*を定量することにより、海洋の生産力の一つの指標としている。

北海道立総合研究機構水産研究本部中央水産試験場(以下、道総研中央水試)では、海洋環境モニタリングの一項目として、1970年代からクロロフィル*a*を定量している。クロロフィル*a*の定量方法には比色法(Richards with Thompson, 1952; Parsons and Strickland, 1963; Lorenzen, 1967)と蛍光法(Yentsch and Menzel, 1963; Holm-Hansen et al., 1965)がある。道総研中央水試では、少ない試水量で分析できる蛍光法を採用している。試水量が少なくてすむという特性は、サンプル操作の簡便性を高めるため、現在も、同法を継続して採用している理由である。

機器分析の教科書では、蛍光法は、「蛍光強度が、目的物質の濃度に対し直線関係にあると見なせるごく低濃度領域で定量可能である。」と説明される。北海道南部の噴火湾において、春季植物プランクトン大増殖期(以下、大増殖期)におけるクロロフィル*a*の最大濃度は、 $10 \mu\text{g L}^{-1}$ 以上になる(中田, 1982)ことが知られている。クロロフィル*a*が、このような高濃度を示す大増殖期では、分析作業時に、低濃度領域を超える範囲にある試料について、定量可能な濃度領域まで希釈する作業がしばしば必要となる。これが、測定作業の労力や時間を増やす原因となっている。大増殖期に、多数の試料の分析を行なう研究課題で、この希釈作業を減らすことができれば、作業効率の大幅な向上が期待できる。

道総研中央水試では、ターナーデザイン社の蛍光光度計Turner Design Model 10の購入を契機に、この蛍光光度計の機械校正(キャリブレーション)を1985年3月19日に行った。この時の目的は、キャリブレーションと同

報文番号A565 (2019年1月10日受理)

*Tel: 0135-23-7451. Fax: 0135-23-3141. E-mail: tanaka-iori@hro.or.jp

時に、高濃度領域の試料の分析結果が、低濃度領域まで希釈する従来法の結果と一致する「一般方程式」の導出と、その解法を検討することであった。本稿では、その課題解決に至ったので以下に報告する。

材料及び方法

蛍光測定理論 強度 I_o の入射光が溶液を透過して強度 I_t の透過光になるとき、 T を透過率とすると、この溶液による光の吸収の強さは、

$$T = I_t/I_o \quad (1)$$

である。また、吸光度 A は

$$A = -\log T \quad (2)$$

のように定義されている。したがって

$$10^{-A} = I_t/I_o \quad (3)$$

から

$$I_t = I_o \cdot 10^{-A} \quad (4)$$

である。

C を溶液の濃度、 ε を吸光係数、 l を測定セルの光路長とすると、ランベルト-ペールの法則により、

$$A = \varepsilon Cl \quad (5)$$

と表される。

蛍光物質が発する蛍光強度 F は、吸収された光の強さ I_a と、吸収された光子が蛍光へ変換する変換効率 Φ_f （量子収率）との積で以下のように表される。

$$F = I_a \Phi_f \quad (6)$$

また、

$$I_a = I_o - I_t \quad (7)$$

$$= I_o (1 - 10^{-\varepsilon Cl}) \quad (8)$$

である。ここで、蛍光強度 $F(C)$ を溶液濃度 C の関数とすると、式(6)および式(8)から

$$F(C) = I_o (1 - 10^{-\varepsilon Cl}) \Phi_f \quad (9)$$

と表現される。ここで指数関数の底を常用対数の10から自然対数の e に変換すると

$$F(C) = I_o (1 - e^{-2.303\varepsilon Cl}) \Phi_f \quad (10)$$

という蛍光強度の理論式が求まる(Fig.1)。

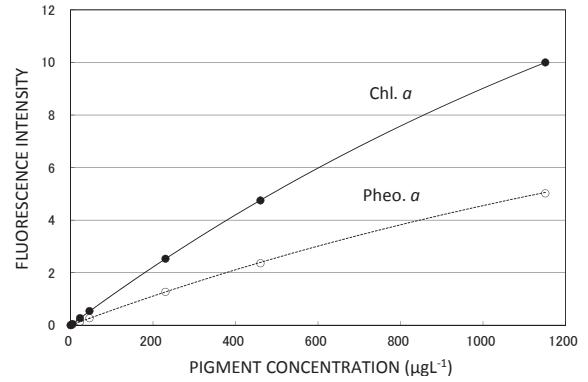


Fig.1 Fluorescence intensity (arbitrary unit) for theoretical curve of chlorophyll *a* (solid line) and pheophytin *a* (dashed line) against pigment concentration. Calibration data is shown for chlorophyll *a* (solid circle) and pheophytin *a* (open circle).

この理論式は非線形なので、線形化のため、指数関数部分を濃度ゼロ近傍でテイラー展開すると

$$F(C) = I_o (1 - (1 - 2.303\varepsilon Cl + (1/2!) (-2.303\varepsilon Cl)^2 + (1/3!) (-2.303\varepsilon Cl)^3 + \dots)) \Phi_f \quad (11)$$

$$= I_o (2.303\varepsilon Cl - (1/2!) (-2.303\varepsilon Cl)^2 - (1/3!) (-2.303\varepsilon Cl)^3 - \dots) \Phi_f \quad (12)$$

となる。ここで $2.303\varepsilon Cl$ が十分小さい低濃度領域では、2乗以上の項を無視できるため

$$F(C) = 2.303 I_o \Phi_f \varepsilon Cl \quad (13)$$

と、直線近似が可能となる。この直線近似式は、機器分析の教科書では蛍光分析の基本式として記載され、蛍光強度と濃度の関係を評価するために広く一般に用いられている。これは完成された常法である。これを「線型モデル」とする。

ここでは、式(13)は非線形の理論式の直線近似であって、理論式に直線区間があるわけではないことに注意しなければならない。

本節では、教科書（井村・樋上, 2016）の表記方法を参照した。

「線形独立蛍光モデル」によるクロロフィル*a*とフェオフイチン*a*の濃度計算式 蛍光物質が希薄な溶液中で、すなわち低濃度領域では、それぞれの蛍光物質は独立に蛍光を発すると仮定する。ここではこの仮定に基づく理論を「独立蛍光モデル」と呼ぶ。ここで、試料の酸化前の蛍光値は、クロロフィル*a*の蛍光とフェオフイチン*a*の蛍光が加わったものになり、酸化後の蛍光値は、酸化前のフェオフイチン*a*の蛍光に、クロロフィル*a*が酸化されてフェオフイチン*a*になった蛍光が加わったものになる。そこで、

クロロフィルaとフェオフィチンaが発する蛍光強度について、「線型モデル」と「独立蛍光モデル」を組み合わせて、次の関係が成り立つ。

$$F_o = F_{ch} \cdot C_h + F_{ph} \cdot P_h \quad (14)$$

$$F_a = F_{ph} \cdot C_h + F_{ph} \cdot P_h \quad (15)$$

ここで、 F_o は酸添加前の試料の蛍光値、 F_a は酸添加後の試料の蛍光値、 C_h はクロロフィルa濃度、 P_h はフェオフィチンa濃度、 F_{ch} は単位クロロフィルa濃度当たりの蛍光強度で定数、そして F_{ph} は単位フェオフィチンa濃度当たりの蛍光強度で定数とする。

ここでは、式(14)と式(15)を「線形方程式」と呼ぶ。この C_h と P_h の連立方程式は以下のように解ける。式(14)から式(15)を差し引くと

$$F_o - F_a = C_h \cdot (F_{ch} - F_{ph}) \quad (16)$$

となり、これから

$$C_h = (F_o - F_a) / (F_{ch} - F_{ph}) \quad (17)$$

というクロロフィルa濃度を求める解が得られる。また、式(15)に F_{ch} を乗じたものから、式(14)に F_{ph} を乗じたものを差し引くと

$$F_a \cdot F_{ch} - F_o \cdot F_{ph} = F_{ph} \cdot (F_{ch} - F_{ph}) \cdot P_h \quad (18)$$

となるので

$$P_h = (F_a \cdot F_{ch} - F_o \cdot F_{ph}) / (F_{ph} \cdot (F_{ch} - F_{ph})) \quad (19)$$

というフェオフィチンa濃度を求める解が得られる。

ここで、式(18)、式(19)に酸係数(R)

$$R = F_{ch} / F_{ph} \quad (20)$$

を用いて変形すると、

$$C_h = (F_o - F_a) / (F_{ph} \cdot (R - 1)) \quad (21)$$

$$P_h = (R \cdot F_a - F_o) / (F_{ph} \cdot (R - 1)) \quad (22)$$

となる。これに濃縮倍率を乗じて濃度とする。気象庁海

洋観測指針(1970)では、この表記の解である。ここでは、式(21)と式(22)を「線形解」と呼ぶ。式(21)と式(22)に式(14)と式(15)も含めて、本稿では「線形独立蛍光モデル」と呼ぶ。

キャリブレーション クロロフィルaの測定に用いる試水を250mLの褐色ポリビンに採水し、測定は90%アセトン10mLの抽出液で行うため、濃縮倍率は25倍である。大増殖期のクロロフィルaの最大濃度を40μgL⁻¹と仮定すると、濃縮倍率から換算して、最大1,000μgL⁻¹までの濃度範囲でキャリブレーションを行った。

クロロフィルaの結晶（和光純薬社製50mg入り）を、ほぼ全量90%アセトン溶液で2Lまでメスアップし、標準原液とした。これを順次希釈してキャリブレーション用の標準液とした。標準原液の濃度は吸光法(Lorenzen, 1967)により決定した。標準原液を10倍、20倍および50倍に希釈した標準液を、ダブルビーム分光光度計(Shimazu UV-2000)で5cmセルを用いて、酸添加前後に665nm、750nmで吸光度を読み取った。酸化には1Nの塩酸を10滴滴下し、5分間静置した。

標準液の測定から得られたクロロフィルaおよびフェオフィチンaの計算式(Lorenzen, 1967)は以下の通りである。

$$C_h = 26.7 \cdot (665o - 665a) \cdot v / (V_f \cdot l) \quad (23)$$

$$P_h = 26.7 \cdot (1.7 \cdot 665a - 665o) \cdot v / (V_f \cdot l) \quad (24)$$

ここで、665oは酸化前の665nmの吸光値、665aは酸化後の665nmの吸光値で、lはセルの長さ、vは抽出液の容量、 V_f は試水の濾水量である。標準液の場合、 $v/V_f=1$ である。665nmの吸光値は、750nmの吸光値で補正した。

吸光光度計の分析結果をTable 1に示した。665o/665aの値は1.69で、Lorenzen (1967)による、クロマトグラフィーにより分離されて得られた、クロロフィルaの結晶を用いた値1.7と一致した。式(23)から、標準原液の濃度は、23.02mgL⁻¹であった。

キャリブレーションを行うTurner Design Model 10は、感度を8段階変更でき、その中から読み取りに最適な感

Table 1 Absorbance and undiluted chlorophyll a concentration

chlorophyll a		before acidification			after acidification			undiluted	
standard		wave length	corrected	wave length	corrected	acid ratio	cell length	chlorophyll a ^{*1}	
dilution rate		665o	750	665o	750	665a	665o/665a	cm	mgL ⁻¹
10		1.055	-0.006	1.061	0.627	-0.006	0.633	1.676	5
20		0.524	-0.005	0.529	0.307	-0.005	0.312	1.696	5
50		0.209	0.000	0.209	0.123	0.000	0.123	1.699	5
average							1.690		23.02

*1: Undiluted chlorophyll a concentration is calculated from Lorenzen (1967).

度を選び、酸添加前後に小数点以下2桁まで数値を読み取った。キューベットに入れた標準液の酸化には1Nの塩酸を4滴滴下し、5分間静置した。

$1,151\mu\text{g L}^{-1}$ の濃度の標準液を、蛍光光度計の最低感度 ($1 \times \text{MS}$) で 10.00 に合わせた。90% アセトン溶液で原点合わせを行ったが、最高感度 (100×31.6) では読み取り指針の動きが大きく原点あわせができなかつたため、次の感度 (100×10) において 0.00 と原点合わせを行った。

蛍光光度計のキャリブレーション結果を Table 2 に示す。

結果及び考察

理論式の係数決定 本研究で用いた理論式の係数決定方法を説明する。理論式をテイラー展開した式(12)で C を x に置き換え、右辺第2項まで近似する。

$$F(x) = I_o(2.303\epsilon lx - (1/2)(-2.303\epsilon lx)^2 \Phi_f) \quad (25)$$

この式から単位濃度当たりの蛍光強度を

$$F(x)/x = I_o\Phi_f \cdot 2.303\epsilon l - I_o\Phi_f (1/2)(2.303\epsilon l)^2 \cdot x \quad (26)$$

と表し、最小二乗法によりキャリブレーションデータへ回帰直線を当てはめた (Fig. 2)。そうすると y 切片から

$$I_o\Phi_f \cdot 2.303\epsilon l$$

という近似値が得られる。傾きの近似値は

$$-I_o\Phi_f \cdot (1/2)(2.303\epsilon l)^2$$

となることから、傾きを2倍して y 切片の値で除することにより、

$$2 \cdot (-I_o\Phi_f \cdot (1/2)(2.303\epsilon l)^2) / I_o\Phi_f \cdot 2.303\epsilon l = -2.303\epsilon l \quad (27)$$

として、指数関数の指数部の係数 $-2.303\epsilon l$ の近似値が得られる。

この近似値から、さらに非線形最小二乗法により正確

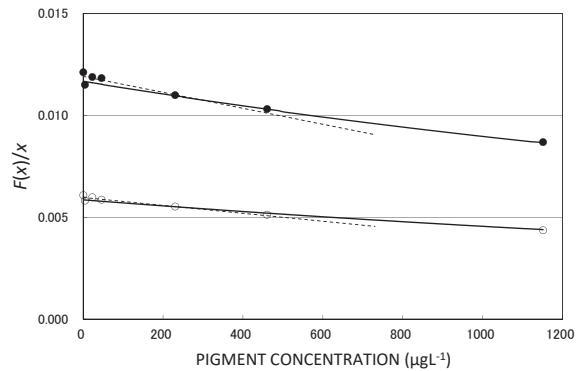


Fig.2 Fluorescence intensity per unit concentration. They are shown as solid curved lines for chlorophyll a and pheophytin a against pigment concentration. Calibration data is shown for chlorophyll a (solid circle) and pheophytin a (open circle). Dashed lines are linear regression lines drawn from calibration data using concentrations of $230.2 \mu\text{g L}^{-1}$ and lower.

に係数を求める。ここで、

$$I_o\Phi_f = D \quad (28)$$

$$2.303\epsilon l = E \quad (29)$$

とおいて、蛍光強度の理論式を

$$F(x) = D (1 - e^{-Ex}) \quad (30)$$

と表記し直す。 F_i をキャリブレーションで得られた蛍光値、 $S(x)$ を残差平方和とすると、

$$S(x) = \sum_{i=1}^n (F_i - F(x))^2 \quad (31)$$

が最小となるときの D より E の数値の組み合わせを求め、正確な値とする (Fig. 3)。

ここで採用した計算方法は、近似値として求めた上記 D 、 E を初期値として、最初に D を固定して E に ΔE ずつ加算しながら計算し、最小値を探した。次に D に ΔD を加えて同様の計算を継続して最小値をさがす手順をとった。

Table 2 Calibration result for Turner Design Model 10

chlorophyll a standard dilution rate	chlorophyll a ($\mu\text{g L}^{-1}$)	before acidification			after acidification			corrected reading	
		range 1	range 2	F_o	range 1	range 2	F_a	F_o	F_a
20	1,151	1	MS	10.00	1	MS	5.02	10.00	5.02
50	460.5	1	MS	4.75	1	MS	2.36	4.75	2.36
100	230.2	1	3.16	8.00	1	3.16	4.02	2.53	1.27
500	46.05	1	10	5.45	1	10	2.70	0.545	0.270
1,000	23.02	1	31.6	8.65	1	31.6	4.35	0.274	0.138
5,000	4.605	100	MS	5.30	100	MS	2.68	0.0530	0.0280
50,000	0.4605	100	10	5.60	100	10	2.80	0.00560	0.00280

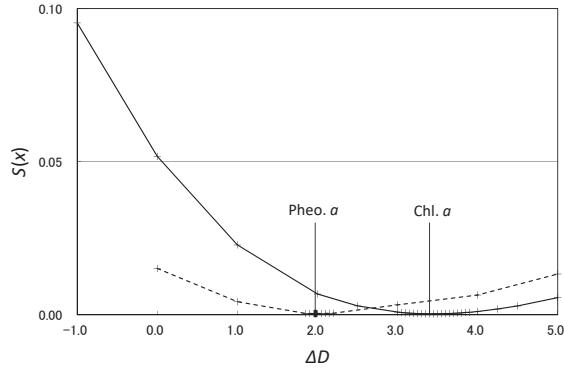


Fig. 3 Distribution of $S(x)$ for chlorophyll a (solid line) and pheophytin a (dashed line) against ΔD . Initial value of D is set to zero. Places of $S(x)$ minimums are shown by the vertical lines. Calculated points are shown by crosses.

ΔD や ΔE は、 $S(x)$ が最小値近くで分解能を上げて極値を探した。最後に、全体の最小値となる $S(x)$ を求め、それに対応する D と E の値を真の値として採用し、理論式を確定した。

ここでは、クロロフィルaの蛍光強度の理論式は $F_c(x)$ 、フェオフィチンaの蛍光強度の理論式を $F_p(x)$ と表記する。

キャリブレーション結果 (Table 2) から、非線形最小二乗法により以下の理論式を得た。

$$F_c(x) = 21.51(1 - e^{-5.4277 \cdot 10^4 \cdot x}) \quad (32)$$

$$F_p(x) = 11.13(1 - e^{-5.2580 \cdot 10^4 \cdot x}) \quad (33)$$

キャリブレーションデータおよび式(32)、式(33)の理論式をFig.1に示した。

非線形領域における「一般方程式」の導出 蛍光分析は線形近似が可能である低濃度領域の分析に優れているために、主に低濃度領域の特性に対する解説が主である。ここでは、非線形性が顕著となる、高濃度領域における分析結果を用いて、クロロフィルaとフェオフィチンaの濃度の計算式を導出する。

この高濃度領域における蛍光強度も、低濃度領域における線形の場合と同様に考えるが、係数は定数ではなく、濃度に依存する蛍光強度の理論式の関数として仮定する。ここで、単位クロロフィルa濃度当たりの蛍光強度を $F_{ch}(x)$ ($=F_c(x)/x$)、単位フェオフィチンa濃度当たりの蛍光強度を $F_{ph}(x)$ ($=F_p(x)/x$)、 α 、 β 、および γ は濃度とする。すると、蛍光強度の方程式は

$$F_o = F_{ch}(\alpha) \cdot C_h + F_{ph}(\beta) \cdot P_h \quad (34)$$

$$F_a = F_{ph}(\gamma) \cdot C_h + F_{ph}(\beta) \cdot P_h \quad (35)$$

となる。

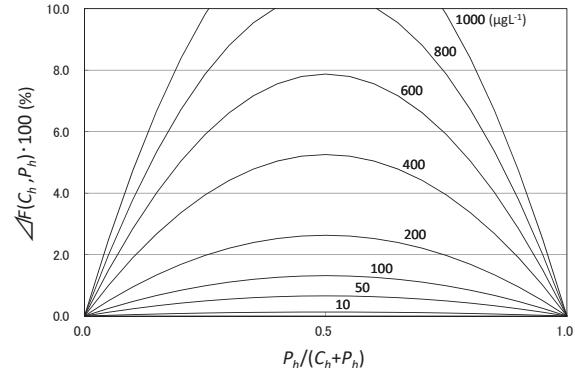


Fig. 4 $\Delta F(C_h, P_h) \cdot 100(\%)$ for various total pigment concentrations plotted against $P_h/(C_h+P_h)$. Total pigment concentration is drawn above each curve.

また、 F_a はすべてがフェオフィチンaであるから

$$F_a = F_{ph}(C_h+P_h) \cdot (C_h+P_h) \quad (36)$$

である。この式(36)は、 F_a から合計色素濃度を求めるために使用する基本式である。

ここで、初めに線形方程式で仮定したように、式(35)の右辺の、クロロフィルa由来のフェオフィチンa(第1項)と、元々あったもの(第2項)が、それぞれ独立に蛍光を発する「独立蛍光モデル」($\gamma=C_h$, $\beta=P_h$)を考える。

式(35)の右辺の蛍光強度と、式(36)の右辺の蛍光強度の差を式(36)の右辺で正規化した、以下の $\Delta F(C_h, P_h)$ という関数を導入する。

$$\Delta F(C_h, P_h) = ((F_{ph}(C_h) \cdot C_h + F_{ph}(P_h) \cdot P_h) - (F_{ph}(C_h+P_h) \cdot (C_h+P_h))) / (F_{ph}(C_h+P_h) \cdot (C_h+P_h)) \quad (37)$$

ここで、 $\Delta F(C_h, P_h)$ を任意の合計色素濃度について計算し、 $P_h/(C_h+P_h)$ をパラメーターとしてFig.4に示した。ただし、図中では $\Delta F(C_h, P_h)$ を100倍して%表示している。

$\Delta F(C_h, P_h)$ は、合計色素濃度が $50\mu\text{g L}^{-1}$ では最大0.6%程度だが、 $600\mu\text{g L}^{-1}$ では8%近くまでになる。「独立蛍光モデル」の仮定は、 $50\mu\text{g L}^{-1}$ 程度では許容されるが、より高濃度では成り立たない。それぞれが独立に蛍光を発するとした場合、式(35)の右辺の値が式(36)の右辺の値より大きくなり、唯一等号が成り立つ場合は、クロロフィルaとフェオフィチンaのどちらかの濃度がゼロの場合だけである。すなわち、「独立蛍光モデル」では、非線形領域において両色素が共存する場合、蛍光強度の収支が合わないために、式(35)は等号が成立しない。

以上から、蛍光強度の収支が合って等号が成り立つことを説明するためには、式(35)における単位濃度当たり

の蛍光強度が、そこに存在する濃度に対応する値よりも小さくならなければならない。これは、濃度が高いほど単位濃度当たりの蛍光強度が低くなる(Fig.2)ことから、「単位濃度当たりの蛍光強度が、実際に蛍光を発する濃度よりも、見かけ上高い濃度で存在している場合の値を示す。」と考えられる。すなわち、どちらか一方の色素側から放射される光子が、自己吸収だけではなく、共存する他方の色素にも吸収されて消光するという「非線形効果」によるものと考えられる。

ここで、式(35)の右辺が式(36)の右辺と等号が成り立つ場合を考えてみる。式(36)の右辺を変形すると

$$F_a = F_{ph}(C_h + P_h) \cdot C_h + F_{ph}(C_h + P_h) \cdot P_h \quad (38)$$

となる。そこで、式(35)の右辺は、式(38)の右辺との比較から、 $\beta = \gamma = C_h + P_h$ の場合に等号が成り立つことが分かる。また、式(34)の右辺第1項の $F_{ch}(\alpha)$ は、クロロフィル a が酸化されると、式(35)の右辺第1項の $F_{ph}(\gamma)$ になることから、 $\alpha = \gamma = C_h + P_h$ でなければならない。そして、見かけ上の濃度は $C_h + P_h$ で、合計色素濃度に対応していることを示している。

以上から、非線形領域における蛍光強度の方程式が以下のように導かれる。

$$F_o = F_{ch}(C_h + P_h) \cdot C_h + F_{ph}(C_h + P_h) \cdot P_h \quad (39)$$

$$F_a = F_{ph}(C_h + P_h) \cdot C_h + F_{ph}(C_h + P_h) \cdot P_h \quad (40)$$

ここでは、式(39)と式(40)を蛍光強度の「一般方程式」とする。これは線形方程式と類似しているが、係数がすべて非線形の関数に置き換わっている点が異なる。

「一般方程式」の解と数値計算法 次に「一般方程式」の解を求める。ここで

$$C_h + P_h = T_p \quad (41)$$

と置いて、 C_h および P_h について、「線形解」を求めた時と同様の演算により連立方程式を解くと、

$$C_h = (F_o - F_a) / (F_{ch}(T_p) - F_{ph}(T_p)) \quad (42)$$

$$P_h = (F_{ch}(T_p) \cdot F_a - F_{ph}(T_p) \cdot F_o) / (F_{ph}(T_p)(F_{ch}(T_p) - F_{ph}(T_p))) \quad (43)$$

という解が得られる。ここでさらに

$$R(T_p) = F_{ch}(T_p) / F_{ph}(T_p) \quad (44)$$

という、酸係数 $R(T_p)$ を導入して表記すると

$$C_h = (F_o - F_a) / (F_{ph}(T_p)(R(T_p) - 1)) \quad (45)$$

$$P_h = (R(T_p) \cdot F_a - F_o) / (F_{ph}(T_p)(R(T_p) - 1)) \quad (46)$$

という解が得られる。ここでは、式(45)および式(46)を、本稿では「一般解」と呼ぶ。また、「一般方程式」と「一般解」を併せて「非線形色素共存モデル」とする。

しかし、この「一般解」には未知数 T_p が含まれている。したがって、この「一般解」を計算するためには、 T_p を別途求める必要がある。

合計色素濃度 T_p は F_a からニュートン法を用いて計算する。 $T_p = x$ とおいて、

$$F_{ph}(x) \cdot x = F_p(x) \quad (47)$$

の関係及び式(36)から、

$$G(x) = F_p(x) - F_a = 0 \quad (48)$$

という関数 $G(x)$ を導入する。ニュートン法の公式に、式(33)を代入すると以下になる。

$$x_2 = x_1 - G(x_1) / (dG(x_1) / dx) \quad (49)$$

$$= x_1 - ((D(1 - e^{-Ex_1}) - F_a) / (DE \cdot e^{-Ex_1})) \quad (50)$$

この式(50)に、最初は適当な初期値 x_1 （本稿では10）を代入してから x_2 を計算する。次に、得られた x_2 を x_1 に代入し、 x_2 を求めるという計算を繰り返した。収束条件を

$$|(x_2 - x_1)| < 1 \cdot 10^{-5} \quad (51)$$

とし、これを満たした時に計算を打ち切り、 x_2 の値を T_p の解とした。繰り返し計算の回数は、4~5回であった。現場海水を用いた「一般解」の有効性に関する検証 計算式の適用が妥当か検討するために、色素共存状態にある試水として、現場海水を使用した。3月下旬は北海道西岸では大増殖期にあたるので、試水量が多ければきわめて高濃度の試料が容易に得られる。1985年3月20日、道総研中央水試前浜において、大型バケツに表面海水を採取した。

実験室内で、大型バケツ内の海水をよく攪拌しながら分取し、容量100mL、200mL、500mL、1,000mLの試水を、容量順に濾過(47mm、ワットマンGF/C)し、試料を2セット作成した。遠沈管に試料を入れ、90%アセトン10.0mLを加えて室温、暗所で1時間色素抽出した。その後、震蕩、遠心分離し、上澄液についてキャリブレーションと同様の分析操作を行った。分析結果を「一般解」で計算しTable 3に示した。

測定された蛍光値を、試水量の関数としてFig.5に示した。図中の直線は、試水量100mLと200mLのデータを使った、原点を通る回帰直線である。試水量500mLと1,000mLの試料の蛍光値は、回帰直線から下方にずれて、非線形領域にある。

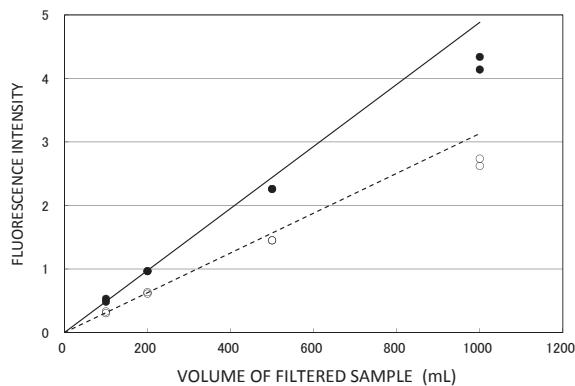


Fig. 5 Fluorescence intensity (arbitrary unit) of in situ samples before (solid circle) and after (open circle) acidification shown against the volume of filtered sample. Linear regression lines from origin are drawn using data for 100 mL and 200 mL of sample before (solid line) and after (dashed line) acidification.

次に、「一般解」で計算した色素濃度を、試水量の関数としてFig.6に示した。図中に、クロロフィルa、フェオ色素、および合計色素濃度について、それぞれ原点を通る回帰直線を記入した。

なお、Lorenzen and Jeffrey (1980)によると、クロロフィルaの分解色素では、フェオフォービドaが海水中では最も多く存在するという。そこで、本報告では海水中におけるクロロフィルaの酸化分解色素の呼称を、存在量の少ないフェオフィチンaではなく、フェオ色素とした。

「一般解」の計算値は、それぞれ試水量に正比例し、決定係数(R^2)がすべて0.99以上あり、直線性が良い。

Fig.6のデータについて、回帰直線からの偏差をFig.7に%表示した。試水量が少ない100mLと200mLのデータには、高い値が含まれている。100mLでは、試料の1つで合計色素濃度が高かった。これは、攪拌がまだ十分でない状態のバケツから海水を分取したために生じたものと考えられる。200mLでは、試料の1つでフェオ色素が特に高い値である。合計色素濃度が高いわけではなく、

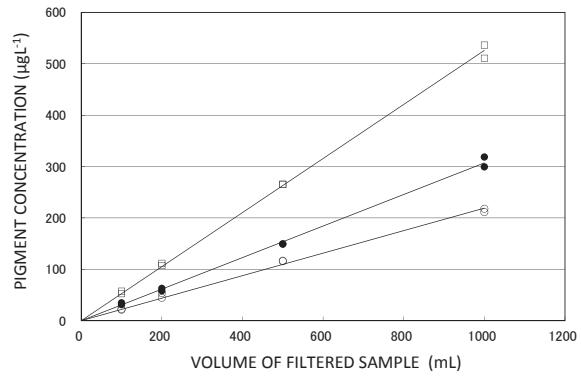


Fig. 6 Pigment concentration of in situ samples calculated by general solution, shown for total pigment (open square), chlorophyll a (solid circle), and pheopigments (open circle) against the volume of filtered sample. Linear regression lines from origin are drawn.

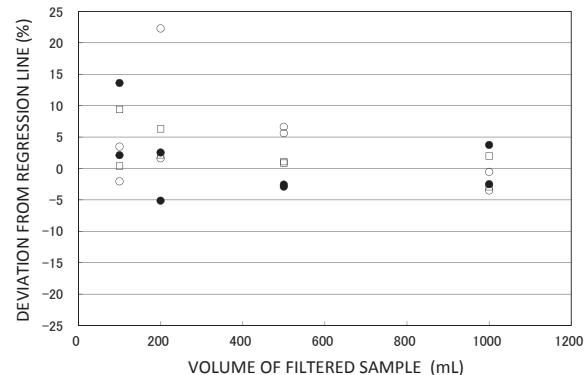


Fig. 7 Deviation (%) of pigment concentration of in situ samples calculated from regression lines by general solution. They are plotted for total pigment (open square), chlorophyll a (solid circle), and pheopigments (open circle) against the volume of filtered sample.

クロロフィルaが逆に最も低い値 (Table 3)であることから、この試水を濾過するまでの間の動物プランクトンによる摂食か、あるいは、測定前の試料（抽出液）の酸汚染、いずれかの可能性が高いと考えられる。

Table 3 Results of calculation by general solution for in situ sea water samples

volume of filtered sample (mL)	in situ concentration				deviation from regression line						
	corrected reading F_o	C_h ($\mu\text{g L}^{-1}$)	P_h ($\mu\text{g L}^{-1}$)	$C_h + P_h$ ($\mu\text{g L}^{-1}$)	C_h (%)	P_h (%)	$C_h + P_h$ (%)				
100	0.532	0.332	34.9	22.7	57.6	3.49	2.27	5.76	13.6	3.5	9.4
100	0.485	0.305	31.3	21.5	52.8	3.13	2.15	5.28	2.1	-2.0	0.4
200	0.968	0.612	63.0	44.5	107.5	3.15	2.23	5.38	2.5	1.6	2.2
200	0.965	0.636	58.3	53.6	111.9	2.91	2.68	5.59	-5.1	22.3	6.3
500	2.26	1.450	149.6	115.7	265.3	3.00	2.31	5.31	-2.6	5.6	0.9
500	2.26	1.453	149.1	116.8	265.9	2.98	2.34	5.32	-2.9	6.6	1.1
1,000	4.14	2.623	299.4	211.4	510.8	3.00	2.11	5.11	-2.5	-3.5	-2.9
1,000	4.34	2.737	318.6	217.9	536.5	3.19	2.18	5.37	3.8	-0.5	2.0
r.m.s						5.7	8.7	4.3			

ここで重要なのは、合計色素濃度の偏差であり、これが「一般解」の有効性を示す指標となる。合計色素濃度の平均二乗偏差は、全体で4.3% (Table 3) であり、100mLの特に高い値を除くと、2.9%である。濃縮倍率で標準化して現場濃度を計算すると、試水量100mLの試料から試水量1,000mLの試料まで、ほぼ同じ数値が得られる (Table 3)。

「線形解」による計算値との比較 「一般解」で得られた試水量100mLの試料の合計色素濃度 (T_p) は $55\mu\text{g L}^{-1}$ (平均値) であり、「線形独立蛍光モデル」が適用できる濃度領域にある。

そこで、 $46\mu\text{g L}^{-1}$ 以下の濃度のキャリブレーションデータから、回帰直線を作成し、「線形解」から得られた数値と、「一般解」から得られた数値を比較すると、その差は最大で4%程度である (Table 4)。

回帰直線を計算したキャリブレーションデータは $46\mu\text{g L}^{-1}$ までなので、「一般解」で得られた $55\mu\text{g L}^{-1}$ は、それを上回る濃度であり、比較の正確性が少し欠けるため、回帰直線による別の評価方法を採用した。

本来、回帰直線で近似する対象は、理論式そのものである。測定誤差がなければ、キャリブレーションデータは理論式の上に乗る。ここでは理論式が得られているので、この理論式の任意の濃度まで回帰直線が作成できる。そこで、理論式を用いて $55\mu\text{g L}^{-1}$ までダミーデータを作成し、ダミーデータから回帰直線を計算して正確な回帰直線を得た。その結果、「一般解」から得られた数値と、回帰直線から得られた数値は0.6%以内の差で一致した (Table 4)。

以上から、「線形独立蛍光モデル」が適用可能な濃度領域では、「線形解」と「一般解」は一致することが示された。これは同時に、「一般解」で計算された濃度は、従来法では本来10倍希釈しなければならない、非線形領域にある試料についても、正しいことを示している。

現場海水による「一般解」の検証では、理論式の線形化可能領域から非線形領域の合計色素濃度で $500\mu\text{g L}^{-1}$ 程度までの範囲で検証ができた。キャリブレーションデータから理論式は $1,000\mu\text{g L}^{-1}$ 超まで適用できているので、「一般解」の計算もこの濃度まで適用できる。したがって、「一般解」により、北海道周辺の大増殖期のクロロフィル

a の最大濃度まで、正しい濃度が計算できることが明らかになった。

おわりに 現場海水による「一般解」の検証で得られたフェオ色素の濃度は、クロロフィル a 濃度の70%以上もある。春季植物プランクトン大増殖期であるにもかかわらず、フェオ色素の濃度が高すぎるようと思われる。

Lorenzen (1967)によると、植食性甲殻類の糞粒中には、フェオフィチン a よりもフェオフォービド a が含まれていたという。沿岸域では、波浪の影響で海底からこのようなクロロフィル a 分解色素の再懸濁があり、フェオ色素が多くなったと考えられる。また、蛍光法では、クロロフィル b は酸化前に比べ、酸化後の蛍光強度が強くなるという光学特性を持つ (Lorenzen, 1967) ために、クロロフィル a はやや過小に、フェオ色素は極めて過大に計算結果が出ることが知られている (Gibbs, 1979; Jeffrey, 1997)。これらの理由が、フェオ色素の濃度が高すぎるよう思われるなどを説明すると考えられる。

過去からのデータの数値に関する継続性を無視して、単にクロロフィル a だけを蛍光法により正確に求めるならば、Welschmeyer (1994) の方法が優れている。

従来の「線形独立蛍光モデル」は、「線形解」の計算が容易な点にメリットがある。本研究で得られた「非線形色素共存モデル」では、蛍光測定値から濃度を求める「一般解」の計算過程に、繰り返し計算が必要な、ニュートン法を用いなければならない。この点は、分析作業の軽減というメリットに対するデメリットである。

回帰直線について。通常、クロロフィル a の標準原液を希釈して濃度別の標準液を作成し、線形化可能領域内でキャリブレーションを行い、回帰直線（検量線）を得る。この際、高濃度領域の標準液も利用して、理論式を求めておくと、理論式から任意の濃度までの回帰直線が作成できる。この方法は、正確な検量線を作成する良い方法と考える。本研究から、当時使用していた、キャリブレーションデータから得られた検量線は、理論式から得られたものと若干ずれていて、単位濃度当たりの蛍光強度が、 F_{ch} で2.5%、 F_{ph} で1.6%大きかったことが分かった。この原因は、計算の該当区間に含まれるキャリブレーションデータの数が少なく、小数標本から現れる、分析誤差の偏り拾って回帰直線が計算されていることにある。

Table 4 Comparison of results of calculation for chlorophyll a and pheopigments obtained using the general equation, normal regression line using calibration data ($-46.05\mu\text{g L}^{-1}$), and exact regression line ($-55.00\mu\text{g L}^{-1}$)

corrected reading	general equation (ge)		calibration data (cd)		exact regression (er)		100·(ge-cd)/cd		100·(ge-er)/er		
	C_h	P_h	C_h	P_h	C_h	P_h	C_h	P_h	C_h	P_h	
F_o	F_a	($\mu\text{g L}^{-1}$)	(%)	(%)	(%)	(%)					
0.532	0.332	3.49	2.27	3.36	2.28	3.47	2.26	3.87	-0.44	0.58	0.44
0.485	0.305	3.13	2.15	3.02	2.16	3.12	2.14	3.64	-0.46	0.32	0.47

と考える。

「線形独立蛍光モデル」が適用されるような低濃度領域では、Fig.2に端的に見られるように、単位濃度当たりの蛍光強度が定数に見える。これは、理論式から減少関数であるはずのものが、測定誤差が大きいために、この領域では定数に見えてしまうためである。 F_{ch} と F_{ph} が定数ということは、検量線が直線であることを意味し、キャリブレーションデータを回帰直線に当てはめる、線型モデルしか適用できない。これが従来から行っている方法である。

今後、蛍光光度計による測定誤差が、桁違いに小さくなるような技術革新が進んだ場合、キャリブレーションの測定値は、低濃度領域でも、線形化された回帰直線上に乗るのでなく、究極的には、理論式の上に乗ってくるようになるはずである。その時に、本研究結果が広く活用されることになるであろう。

謝 辞

本研究の始まりとなる蛍光光度計のキャリブレーションでは、標準原液の作成および標準液の調整は鹿又一良氏（故人、当時北海道立中央水産試験場漁業部海洋科）が行ったものである。本来であれば共著者とすべきところであるが、ここに記して感謝の意を表する。

引用文献

- Gibbs CF. Chlorophyll b interference in the fluorometric determination of chlorophyll a and "phaeo-pigments". *Aust. J. Mar. Freshw. Res.* 1979 ; 30 : 597-606.
- Holm-Hansen O, Lorenzen CJ, Holmes RW, Strickland JDH. Fluorometric determination of chlorophyll. *J. Cons. Perm. Int. Explor. Mer.* 1965 ; 30 : 3-15.
- 井村久則, 横上照男. 「基礎から学ぶ機器分析化学」(株) 化学同人, 京都市. 2016.
- Jeffrey SW. Application of pigment methods to oceanography. In: Jeffrey SW, Mantoura RFC, Wright SW (eds). *Application of pigment methods to oceanography: guidelines to modern methods*. UNESCO Publishing, France. 1997 ; 127-166.
- Lorenzen CJ. Determination of chlorophyll and pheopigments: Spectrophotometric equations. *Limnol. Oceanogr.* 1967 ; 12 : 343-346.
- 気象庁. 植物色素の測定. 「海洋観測指針」気象庁編 日本海洋学会, 東京, 1970 ; 250-254.
- Lorenzen CJ, Jeffrey SW. Determination of chlorophyll in sea water: report of intercalibration tests. *UNESCO technical papers in marine science* 1980 ; 35 : 1-21pp.
- Mantoura RFC, Jeffrey SW, Llewellyn CA, Claustre H, Morales CE. Comparison between spectrophotometric, fluorometric and HPLC methods for chlorophyll analysis. In: Jeffrey SW, Mantoura RFC, Wright SW (eds). *Phytoplankton pigments in oceanography: guidelines to modern methods* UNESCO Publishing, France. 1997 ; 361-382.
- 中田 薫. 北海道噴火湾の1981年春季増殖期における植物プランクトンの組成. *水産海洋研究会報* 1982 ; 41 : 27-32.
- Parsons TR, Strickland JDH. Discussion of spectrophotometric determination of marine-plant pigments, with revised equations for ascertaining chlorophylls and carotenoids. *J. Mar. Res.* 1963 ; 21 : 155-163.
- Richards FA, Thompson TG. The estimation and characterization of plankton population by pigment analysis II. A spectrophotometric method for the estimation of plankton pigments. *J. Marine Res.* 1952 ; 1 : 156-172.
- Welschmeyer NA. Fluorometric analysis of chlorophyll a in the presence of chlorophyll b and pheo-pigments. *Limnol. Oceanogr.* 1994 ; 39 : 1985-1992.
- Yentsch CS, Menzel DW. A method for the determination of phytoplankton chlorophyll and phaeophytin by fluorescence. *Deep-Sea Res.* 1963 ; 10 : 221-231.

2018年の函館湾における有害ラフィド藻*Heterosigma akashiwo*の季節変動および赤潮発生状況について

夏池真史¹, 金森 誠¹, 嶋田 宏²

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中央水産試験場

Red tide and seasonal occurrence of the harmful raphidophyte *Heterosigma akashiwo* in Hakodate Bay, Hokkaido

MASAFUMI NATSUIKE¹, MAKOTO KANAMORI¹ and HIROSHI SHIMADA²

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

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

Seasonal sampling at the Hakodate Bay, Hokkaido, from April to November 2018 revealed the occurrence of the harmful raphidophyte, *Heterosigma akashiwo*, detected first in early July at a density of 5 cells mL⁻¹, which subsequently increased rapidly until mid-July, with the maximum density reaching 6,000 cells mL⁻¹. *H. akashiwo* was observed until August at low densities (< 1 cells mL⁻¹) and not detected from September to November. When *H. akashiwo* occurred in high density, surface water temperature ranged from 14.8°C to 18.1°C, which was reported to be the optimal growth temperature for *H. akashiwo* in culture experiments. Lower salinity (< 30) at the surface layer, caused by precipitation, was observed in Hakodate Port when the density of *H. akashiwo* increased rapidly. A red tide of *H. akashiwo* was observed in Hakodate Bay in mid-July 2018. Fish mortality was not reported during the occurrence of the red tide, even at the maximum cell density (113,000 cells mL⁻¹) in the bay. Some other red tide-causing species that are lethal for fishes, such as *Fibrocapsa japonica*, were detected from July to November. Thus, continuous monitoring of harmful flagellates is important in the Hakodate Bay, to detect the occurrences of harmful red tides.

キーワード : *Heterosigma akashiwo*, 赤潮, 函館湾, 有害プランクトン

ラフィド藻綱 (Class Raphidophyceae) の1種である *Heterosigma akashiwo* は、2本の亜等長の鞭毛を有する細胞長8~25 μm, 幅6~15 μm程度のやや扁平な橢円形状の植物プランクトンである (原, 1990; Fig. 1A)。本種は、世界中の熱帯~亜寒帯域に分布し、国内では内湾などの静穏な海域において春から秋にかけて頻繁に赤潮を形成する (今井, 2013a)。*H. akashiwo*は活性酸素種を產生し、活性酸素が鰓組織を損傷することによって魚毒性を有すると考えられている (Oda *et al.*, 1997; Nakamura *et al.*, 1998; 山崎・小田, 2003)。そのため本種の濃密な赤潮は、瀬戸内海や九州沿岸域において主に養殖ブリ類やマダイ、シマアジ等の大量へい死を引き起こすことが知られている (Table 1)。特に、1995年に鹿児島湾における*H.*

*akashiwo*赤潮による養殖ハマチ、シマアジ等の大量へい死では、漁業被害が10億円に達した (折田, 1995; Table 1)。また、世界的にはイギリスやカナダ、ニュージーランド等において、本種の赤潮による養殖サケ類のへい死が報告されている (Chang *et al.*, 1990; Taylor, 1990)。このように、*H. akashiwo*による赤潮は、世界的に水産上の懸念となっている。

北海道において*H. akashiwo*は、函館湾、小樽港、噴火湾、十勝沿岸などで出現が知られ (原, 1990; 本城, 1997; 角田, 2001; 夏池ら, 2015), 北海道の日本海から太平洋沿岸に広く分布していると考えられる。また、十勝沿岸で1986年9月に、函館湾で2016年7月に最大10,800 cells mL⁻¹の密度の*H. akashiwo*赤潮発生が報告さ

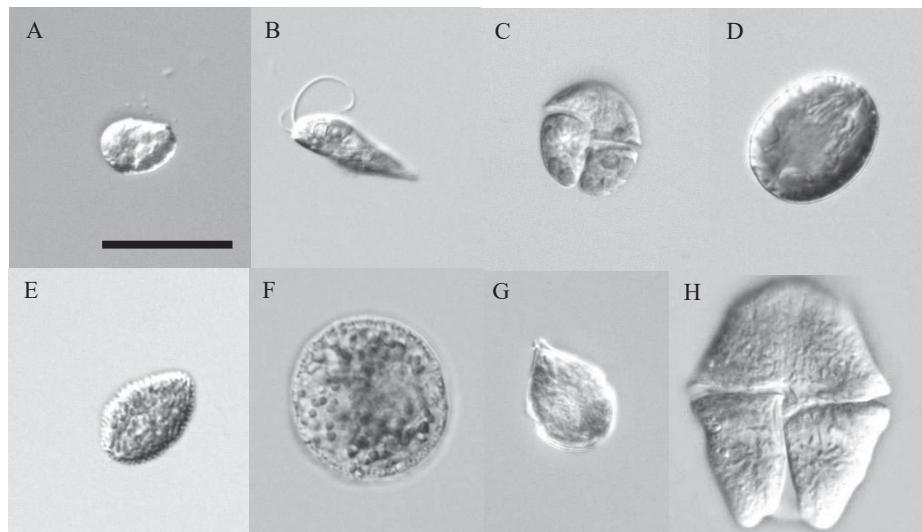


Fig. 1 Microphotographs of (A) *Heterosigma akashiwo*, (B) *Eutreptiella* sp., (C) *Karenia mikimotoi*, (D) *Fibrocapsa japonica*, (E) *Pseudochatttonella verruculosa*, (F) *Dictyocha* sp., (G) *Scrippsiella* sp., and (H) *Akashiwo sanguinea* observed during the red tide in Hakodate Bay in July 2018. All microphotographs were taken with an inverted, differential interference contrast microscope. The scale bar (black line) indicates 20 μm .

Table 1 Fishery damages, worth over 20 million yen, caused by the *Heterosigma akashiwo* red tide in western Japan.

Year	Sea areas	Fisheires style	Mortality species	Amount of damage (10,000 individuals)	Amount of damage (million yen)
1974	Bungo Channel	aquaculture	Yellowfish	7	70
1975	Harima-Nada	aquaculture	Yellowfish	3	88
1988	Tosa Bay	aquaculture	Amberjack etc.	0.15	28
1995	Kagoshima Bay	aquaculture	Yellowfish etc.	71	1,000
1997	Tosa Bay	aquaculture	Amberjack etc.	11	258
2001	Tosa Bay	aquaculture	Sea bream juvenile etc.	260	64
2001	Kagoshima Bay	aquaculture	Amberjack etc.	7.8	135
2010	Kitaura Bay (Miyazaki Pref.)	aquaculture	Amberjack etc.	1.0	30

「九州海域の赤潮」(九州漁業調整事務所) (http://www.jfa.maff.go.jp/kyusyu/sigen/akashio_kyusyu.html, 2018年12月7日) および「瀬戸内海の赤潮」(瀬戸内海漁業調整事務所) (<http://www.jfa.maff.go.jp/setouti/akashio/gepou/index.html>, 2018年12月7日) をもとに著者らが作成

れている(角田, 2001; 東北区水産研究所, 2017)。

函館湾では、2015年秋季に有害渦鞭毛藻*Karenia mikimotoi*の赤潮が発生した。この時、函館港内で畜養していたスルメイカやエゾアワビが*K. mikimotoi*によってつい死したと特定され、湾内(上磯沖)の定置網内のサケのつい死の原因となった可能性が高いことが指摘されている(嶋田ら, 2016)。そのため、函館湾において、有害プランクトンの出現を早期に把握し、水産生物への影響を最小限にすることが望まれている。本研究では、2018年の函館港における*H. akashiwo*の季節変動ならびに函館湾内における赤潮の発生状況について報告し、今後の漁業被害発生の可能性について検討した。

試料及び方法

調査海域 函館湾は渡島半島南部に位置し、東西北方向を函館平野を中心とする陸地に囲まれ、南側に津軽海峡と接続する開口部を持つ面積65 km²、最大水深約60 mの湾である(Fig. 2)。東部に重要港湾である函館港を有し、北部は砂浜海岸が続き、久根別川、大野川、戸切地川などの主要な流入河川の河口が集中し、南西部に主要な河川の一つである茂辺地川が注ぐ(Fig. 2)。

定期観測 函館市国際水産・海洋センター前の函館港内の水深約8 mの岸壁(St. A, Fig. 2)から2018年4月より11月まで、月に1回の頻度で定期観測を実施した。多項

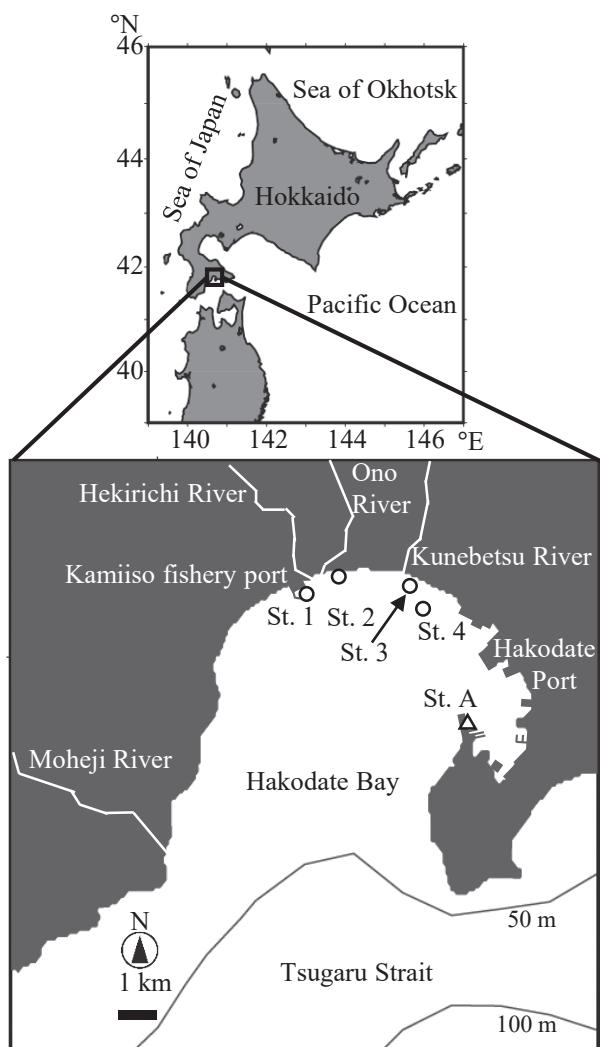


Fig. 2 Location of the sampling sites. Open triangle shows the sampling site (St. A) for regularly sampling, and open triangles show the sampling site for the extraordinary sampling.

日本水質計（AST-1000、またはRINKO-Profiler ASTD102、JFEアドバンテック）によって水温および塩分の鉛直分布を測定するとともに、Van-Dorn採水器を用いて0、5 m層の海水を1 L容の遮光ポリビンに採集した。採集した海水は直ちに実験室に持ち帰った。*H. akashiwo*の出現が確認された7月3日から本種の出現が確認されなくなった8月27日まで概ね1~2週間に1回の頻度で同様の観測を実施した（計9回）。観測期間中の函館の気象データを、気象庁ホームページ（<http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obssl/index.php>、2018年12月7日）より入手した。

赤潮発生状況調査 函館湾奥の北岸で海水の着色が確認された2018年7月19日に、上磯郡漁業協同組合の組合員ならびに北斗市職員が海水の着色状況の目視観測を実施するとともに、着色海域内の4点（St. 1~4、Fig. 2）においてガラス瓶ないしプラスチックボトルを用いて0 m

層の海水500 mL程度を採取した。採取した海水は、試料処理まで暗所冷蔵で保存した。

試料処理および検鏡 *H. akashiwo*を含む一部の有害赤潮藻類は、ホルマリンやグルタルアルデヒドの固定によって容易に細胞が破壊される。そのため、実験室に持ち帰った海水試料を、嶋田ら（2016）の方法に準じて、無固定で顕微鏡観察に供した。すなわち、生鮮海水試料0.4 mLを1.8 cm×2.3 cmの型枠を施したチャンバー型スライドガラスに滴下して倒立顕微鏡（IX71、オリンパス）を用いて100~600倍で検鏡し、出現する*H. akashiwo*を含む有害微細藻類の同定および計数を行った。鞭毛等のコントラストの低い微細構造の観察には、適宜、微分干渉装置を用いた。*H. akashiwo*が高密度（100 cells mL⁻¹以上）に出現した試料では、生鮮試料を10~1,000倍程度希釈して同定および計数を行った。生鮮海水を直接検鏡しても有害微細藻類が検出されない場合、孔径3 μmのポリカーボネート製フィルター（Nuclepore, Whatman）を用いて500 mLの生鮮海水試料をろ過して10 mL程度に濃縮した。加圧等による細胞の変形を防ぐため、自然圧力、常温下でろ過した。濃縮試料を、生鮮海水試料と同様の方法で検鏡した。

結果

***H. akashiwo*細胞密度の季節変動** 定期観測において、*H. akashiwo*は7月3日に初めて検出された（5 cells mL⁻¹、Fig. 3）。その後、7月13日まで*H. akashiwo*細胞密度は増加し、最大6,000 cells mL⁻¹に達した（Fig. 3）。このときの透明度は3.7 mであり、海水はやや黄色に呈色していた。その後、本種は減少し、8月23日に0.05 cells mL⁻¹が検出された後、調査を終了した11月まで検出されなかった。*H. akashiwo*は0 m層よりも5 m層で密度が高くなつ

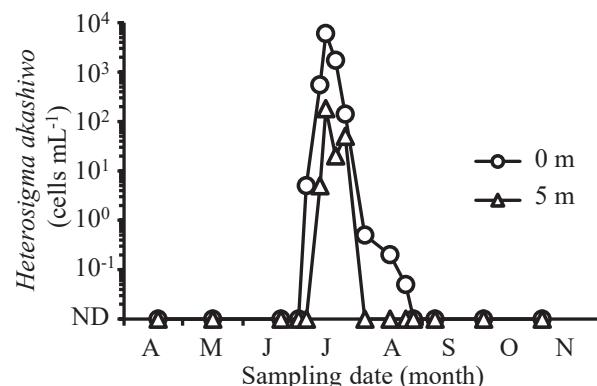


Fig. 3 Seasonal change in *Heterosigma akashiwo* cell density at depths of 0 and 5 m in St. A from April to November 2018.

た。St. Aにおいて*H. akashiwo*が最も高密度に出現した7月13日に、最も細胞密度が多かった植物プランクトンは、0 m層で*H. akashiwo* ($6,000 \text{ cells mL}^{-1}$) であり、次いでユーチューバル藻類の*Eutreptiella* sp. ($400 \text{ cells mL}^{-1}$, Fig. 1B) であった (Table 2)。

調査期間中にその他の魚類へのへい死を引き起こす可能性のある有害赤潮鞭毛藻類として、渦鞭毛藻の*K. mikimotoi* (Fig. 1C) が11月1日に最大 $0.4 \text{ cells mL}^{-1}$ 、ラフィド藻の*Fibrocapsa japonica* (Fig. 1D) が8月15日に最大 3 cells mL^{-1} 、ディクティオカ藻の*Pseudochattonella verruculosa* (Fig. 1E) および*Dictyocha* spp. (Fig. 1F) の球形細胞が、7月23日にそれぞれ 40 cells mL^{-1} および 3 cells mL^{-1} 検出された。

調査期間中、0~7 m層の水温は $8.5\sim23.8^\circ\text{C}$ の範囲で変動した (Fig. 4A)。*H. akashiwo*が出現した期間 (7月3

日~8月27日) の水温は、0 m層で $14.8\sim23.8^\circ\text{C}$ 、5 m層で $13.1\sim21.0^\circ\text{C}$ であり、本種細胞密度が増加した期間 (7月3日~7月13日) の水温は、0 m層で $14.8\sim18.6^\circ\text{C}$ 、5 m層で $13.1\sim15.9^\circ\text{C}$ であった。調査期間中の0~7 m層の塩分は、27.2~34.0の範囲であった (Fig. 4B)。*H. akashiwo*が出現した期間 (7月3日~8月27日)、塩分は0 m層で27.2~33.0、5 m層で31.6~33.9であった、本種細胞密度が増加した期間 (7月3日~7月13日) の塩分は、0 m層で27.2~31.3、5 m層で31.6~33.5の範囲であった。*H. akashiwo*が増加した7月前半にまとまった降水があり、総雨量は157.5 mmに達した。

赤潮の発生状況 函館湾奥のSt. 2~St. 4の間の長さ約3 km、幅が岸から約0.75 km沖合の範囲で海水の着色（にぶい黄）が見られた。St. 1~4の全ての海水試料から*H. akashiwo*が検出され、その密度は、最大 113,000 cells

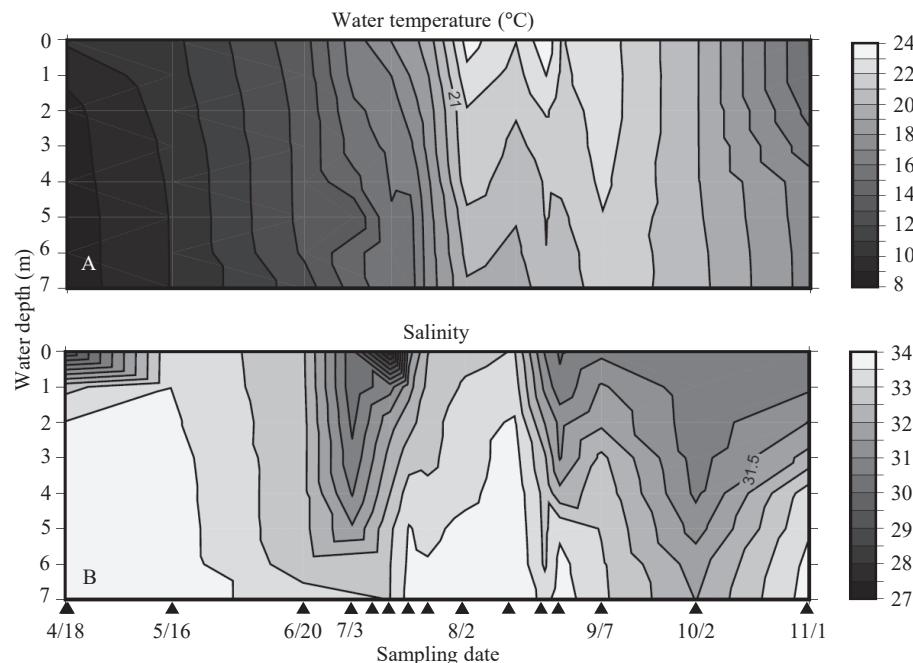


Fig. 4 Seasonal changes of (A) water temperature ($^\circ\text{C}$), and (B) salinity at depths of 0 and 5 m in St. A from April to November 2018.

Table 2 Dominant phytoplankton species and their densities (figure in parenthesis) recorded during the red tide in Hakodate Bay in mid-July 2018.

Date	Station	First dominant species (cells mL^{-1})	Second dominant species (cells mL^{-1})
July 13	St. A	<i>Heterosigma akashiwo</i> (6,000)	<i>Eutreptiella</i> sp. (400)
	St. 1	<i>H. akashiwo</i> (4,700)	<i>Scrippsiella</i> spp. (40)
	St. 2	<i>H. akashiwo</i> (38,000)	<i>Eutreptiella</i> sp. (2,000)
	St. 3	<i>H. akashiwo</i> (113,000)	<i>Scrippsiella</i> spp. (60)
	St. 4	<i>H. akashiwo</i> (86,000)	<i>Akashiwo sanguinea</i> (330)

mL^{-1} に達した (Table 2)。*H. akashiwo*に次いで細胞密度が多かった植物プランクトンは、St. 1およびSt. 3で渦鞭毛藻の *Scrippsiella* sp. (それぞれ40, 60 cells mL^{-1} , Fig. 1G) で、St. 2でユーグレナ藻の *Eutreptiella* sp. (2,000 cells mL^{-1} , Fig. 1B), St. 4で渦鞭毛藻の *Akashiwo sanguinea* (330 cells mL^{-1} , Fig. 1H) であった (Table 2)。St. 1~3では、ほとんど *H. akashiwo* が単独の優占種であったが、St. 4では、大型の植物プランクトンである *A. sanguinea* が比較的高密度に出現しており、混合赤潮に近い状態であった。

考 察

St. Aにおいて、*H. akashiwo* が初めて確認された7月3日から最高密度に達した7月13日までの10日間で、本種の細胞密度は1,200倍、すなわち2の10乗 (1,024) 倍を超える値に増加した (Fig. 3)。この本種の細胞密度の増加を、海水交換や風波による集積等を考慮せずに増殖のみによって説明するには、1日に1回以上の細胞分裂が必要であることになる。培養条件下における *H. akashiwo* の最大分裂回数は、1日当たり0.9~1.9回程度であることが報告されており (Tomas, 1978; Watanabe, 1982)、1日に1回以上の2分裂は、本種の至的増殖に近い。このことから、7月前半の函館港の環境条件は、本種の増殖に非常に好適であった可能性がある。このときの表層水温は、14.8~18.1°Cであり、培養条件下における本種の至適増殖水温帯である15~25°C (Tomas, 1978; Watanabe, 1982) に近い値であった。季節的な水温の上昇によって、本種の増殖に好適な水温帯に達したことが、本種細胞密度が増加した要因であったと考えられる。

本種は広範囲の塩分 (10~35) で良好に増殖し、やや低塩分な条件 (10~20) で至適な増殖を得ることが報告されている (Tomas, 1978; Watanabe, 1982)。2018年7月前半は前線が北海道付近に停滞し、函館における7月前半の降水量は近10年で最も多かった。この期間、St. A の0 m層の塩分は、7月10日に27.2まで減少し、0~1 m層で顕著な塩分躍層が発達するとともに (Fig. 4B)、*H. akashiwo* の細胞密度は急激に増加した。さらに、函館湾において本種の濃密な赤潮は、主要な河川の河口が集中する湾奥部で形成された。本種の赤潮は、塩分の変動が大きいと考えられる河口域で頻発することはよく知られており (今井, 2013b)，本湾においても同様の傾向が認められた。多雨によって河口部を中心に塩分躍層が強まることによって、低塩分における増殖適応の高い *H. akashiwo* が塩分躍層の上層で優占的に増殖できたと考えられる。

本研究において、*H. akashiwo* の赤潮は7月13~19日の間に確認された。本種が2016年に上磯漁港内において最大10,800 cells mL^{-1} の密度で赤潮を形成したのも7月13日であった (東北区水産研究所, 2017)。本種の赤潮は、毎年ほぼ同じ時期に発生することが他海域においても報告されており (Imai and Itakura, 1999; Li and Smayda, 2000)，函館湾においても本種は今後も7月に湾奥部で高密度に出現する可能性がある。今後、継続した降雨による塩分躍層の発達や水温の上昇に着目して本種の出現調査を実施することによって、本種の出現規模や有害赤潮発生リスクを予測できるかもしれない。

H. akashiwo は、1 mLあたり10万細胞レベルの濃密な赤潮を形成した場合に被害をもたらすものの (折田, 1995)，1 mLあたり数千細胞レベルで被害が発生する *K. mikimotoi* と比較して有害性が低い。7月19日に確認された赤潮発生時、本種は最大113,000 cells mL^{-1} に達していたが、漁業被害の報告はなかった。本種の濃密な赤潮が確認された湾奥部の浅瀬で、養殖や畜養は行われていなかったため、漁業被害が発生しなかったと考えられる。しかしながら本州においては、本種の赤潮による畜養イカのへい死や底建て網内の魚類のへい死が報告されているため (九州漁業調整事務所ホームページ (http://www.jfa.maff.go.jp/kyusyu/sigen/akashio_kyusyu.html, 2018年12月7日)；瀬戸内海漁業調整事務所Webサイト (<http://www.jfa.maff.go.jp/setouti/akasio/gepou/index.html>, 2018年12月7日))、函館湾においても本種赤潮発生時には、湾奥部における定置網や底建て網等による漁具で捕獲される水産生物のへい死に注意が必要と考えられる。また、函館港内で行われる生け簀イカ等の畜養に用いる海水にも注意が必要であると考えられる。さらに、本種が10,000 cells mL^{-1} 程度存在する海水中にマガキを暴露すると、マガキは濾水活動を停止することが報告されており (川口ら, 2008)，アメリカでは本種赤潮による養殖カキ類への亜致死作用が報告されている (Keppler et al., 2005)。函館湾においてもマガキの養殖が行われているため、本種赤潮発生時には注意が必要と考えられる。

H. akashiwo は、シストと呼ばれる耐久細胞を形成して増殖に不適な期間、海底堆積物中で休眠することが知られている (Imai et al., 1993)。定期観測において本種が確認された7, 8月以外、本種はシストを形成して海底堆積物中で分布していた可能性がある。函館湾では、2016年に *H. akashiwo* の赤潮が発生しており (東北区水産研究所, 2017)，2018年に本種が出現する以前から、シストが函館湾中に分布していた可能性が高い。*H. akashiwo* のシストは、水温が10°C以上になると発芽可能になり、15°C以上で活発に発芽することが報告されている (Imai

and Itakura, 1999)。St. Aでは、5月16日の調査で海底直上の水温が10°Cを超えると、*H. akashiwo*の出現が確認される直前の6月下旬には12°Cを超えた。底層水温の上昇とともに本種シストの発芽が活発になることによって、栄養細胞が水中に供給された可能性がある。さらに、2018年の赤潮によって、海底堆積物中に*H. akashiwo*シストが新たに供給された可能性が高い。このシストは、翌年以降の本種の発生源となる可能性が高いため、今後も赤潮発生に注意すべきである。他方、Konovalov (1995) は、カムチャツカ半島において、水温1~3°Cで*H. akashiwo*栄養細胞が水中に出現したことを報告している。函館湾の最低水温は、6°C程度であることが報告されており(嶋田ら, 2016), 秋~春にかけて低密度ながら本種栄養細胞が水中に存在し、個体群を維持している可能性がある。

*H. akashiwo*赤潮発生期間中、水産生物のへい死を引き起こすその他の有害プランクトン種は、ほとんど検出されなかつたが、定期観測において*K. mikimotoi*を含む数種の有害鞭毛藻類が夏から秋にかけて低密度で出現した。有害渦鞭毛藻*K. mikimotoi*は、2015年10~11月に漁業被害を伴う赤潮が報告されており(嶋田ら, 2016), *H. akashiwo*以外の有害鞭毛藻類による赤潮発生にも注意する必要がある。

まとめ 函館湾の湾奥部において2018年7月19日に最大113,000 cells mL⁻¹の*H. akashiwo*による赤潮が確認された。同時期に函館港内においても本種が最大6,000 cells mL⁻¹の密度で出現しており、湾奥部の広範囲で本種が比較的高密度に出現していたと考えられる。*H. akashiwo*が増加した7月前半、本種の増殖に好適な水温とともに降雨による低塩分が確認され、本種の増殖に適した環境であったと推察された。当該海域は定置網や底建て網漁、生簀イカと呼ばれるスルメイカの一時畜養などで利用されている。今回は、本種赤潮による漁業被害は確認されなかつたが、本種は同じ海域で毎年のように赤潮を形成することが知られているため (Imai and Itakura, 1999; Li and Smayda, 2000), 今後も赤潮発生に注意すべきである。

謝 辞

上磯郡漁業協同組合ならびに北斗市に、赤潮発生時の調査にご協力いただいたこと厚く御礼申し上げます。本研究の一部は、道総研経常研究「北海道周辺における有害赤潮生物カレニア・ミキモトイの分布実態の解明」によって実施されました。

引用文献

- Chang FH, Anderson C, Bousted NC. First record of a *Heterosigma* (Raphidophyceae) bloom with associated mortality of cage-reared salmon in Big Glory Bay, New Zealand. *New Zeal. J. Mar. Freshw. Res.* 1990; 24: 461-469.
- 原 慶明. ラフィド藻 (緑色鞭毛藻) 綱ラフィドモナス目ヴァキオラリア科 *Heterosigma akashiwo* (HADA) HADA「日本の赤潮生物 - 写真と解説 (福代康夫, 高野秀昭, 千原光雄, 松岡數充編)」. 日本水産資源保護協会. 東京. 1990: 346-347.
- 本城凡夫. ヘテロシグマ. 「赤潮の科学 (第2版) (岡市友利編)」恒星社厚生閣, 東京. 1997: 255-264.
- 今井一郎. 有害有毒赤潮の生物学 (28) 有害赤潮ラフィド藻ヘテロシグマ (1). 海洋と生物 2013a; 35: 387-394.
- 今井一郎. 有害有毒赤潮の生物学 (29) 有害赤潮ラフィド藻ヘテロシグマ (2). 海洋と生物 2013b; 35: 510-515.
- Imai I, Itakura S. Importance of cysts in the population dynamics of the red tide flagellate *Heterosigma akashiwo* (Raphidophyceae). *Mar. Biol.* 1999; 133: 755-762.
- Imai I, Itakura S, Ito K. Cysts of the red tide flagellate *Heterosigma akashiwo*, Raphidophyceae, found in bottom sediments of northern Hiroshima Bay, Japan. *Bull. Japanese Soc. Sci. Fish. Suisan Gakkaishi* 1993; 59: 1669-1674.
- 角田富男. 十勝沿岸の赤潮発生期の気象・海況と水質. 鋸路水試だより 2001: 83; 12-18.
- 川口 修, 高辻英之, 田村義信. マガキのろ水活動に与える*Heterosigma akashiwo* の影響. 広総合研水セ研報 2008; 3: 7-9.
- Keppler CJ, Hoguet J, Smith K, Ringwood AH, Lewitus AJ. Sublethal effects of the toxic alga *Heterosigma akashiwo* on the southeastern oyster (*Crassostrea virginica*). *Harmful Algae* 2005; 4: 275-285.
- Konovalova GV. The dominant and potentially dangerous species of phytoplankton in the coastal waters of east Kamchatka. In: Lassus P, Arzul G, Erard-Le Denn E, Gentien P, Marcaillou-Le Boat C (eds). *Harmful marine algal blooms*, Lavoisier, Paris, France. 1995: 169-174.
- Li Y, Smayda TJ. *Heterosigma akashiwo* (Raphidophyceae): On prediction of the week of bloom initiation and maximum during the initial pulse of its bimodal bloom cy-

- cle in Narragansett Bay. *Plankt. Biol. Ecol.* 2000; 47 : 80-84.
- Nakamura A, Okamoto T, Komatsu N, Ooka S, Oda T, Ishimatsu A, Muramatsu T. fish mucus stimulates the generation of superoxide anion by *Chattonella marina* and *Heterosigma akashiwo*. *Fish. Sci.* 1998; 64 : 866-869.
- 夏池真史, 金森 誠, 馬場勝寿, 山口 篤, 今井一郎. 北海道噴火湾における有害赤潮形成ラフィド藻 *Heterosigma akashiwo* の季節変動. 日本プランクトン学会報 2015; 62 : 1-7.
- Oda T, Nakamura A, Shikayama M, Kawano I, Ishimatsu A, Muramatsu T. Generation of reactive oxygen species by raphidophycean phytoplankton. *Biosci. Biotechnol. Biochem.* 1997; 61 : 1658-1662.
- 折田和三. 続々・新顔の赤潮プランクトン. うしお 1995; 265 : 1-2.
- 嶋田 宏, 金森 誠, 吉田秀嗣, 今井一郎. 2015年秋季 北海道函館湾における渦鞭毛藻 *Karenia mikimotoi*による有害赤潮の初記録. 日水誌 2016; 82 : 934-938.
- Taylor FJR. Red tides, brown tides and other harmful algal blooms: The view into the 1990's. In: In Granelli E, Sundstroem L, Edler B, Anderson DM (eds). *Toxic Marine Phytoplankton*, Elsevier, New York, USA. 1990; 527-533.
- 東北区水産研究所. 資源生産部会貝毒研究分科会（赤潮・貝毒部会 東日本ブロック）分科会議事録「平成28年度東北ブロック水産業関係研究開発推進会議資源生産部会・分科会報告書」, 塩竈. 2017 : 12.
- Tomas CR., 1978. *Olisthodiscus luteus* (Chrysophyceae). I. Effects of salinity and temperature on growth, motility and survival. *J. Phycol.* 1978; 14 : 309-313.
- Watanabe MM, Nakanura Y, Mori S, Yamochi S. Effects of physico-chemical factors and nutrients on the growth of *Heterosigma akashiwo* Hada from Osaka Bay, Japan. *Jpn. J. Phycol.* 1982; 30 : 279-288.
- 山崎康裕, 小田達也. 諫早湾で発生した赤潮原因プランクトン, ヘテロシグマ・アカシオ (*Heterosigma akashiwo*) の活性酸素産生能に関する研究. 長崎大学水産学部研究報告 2003; 84 : 65-71.

北海道えりも沿岸域におけるサクラマス幼魚への二生類*Brachyphallus crenatus* (吸虫綱, 扁形動物門) の寄生状況

浅見大樹¹, 隼野寛史², 真野修一², 永田光博³

¹北海道立総合研究機構さけます・内水面水産試験場,

²北海道立総合研究機構さけます・内水面水産試験場道東センター,

³元北海道立総合研究機構さけます・内水面水産試験場

Prevalence of the hemiurid trematode *Brachyphallus crenatus* in the stomach of juvenile masu salmon *Oncorhynchus masou* in the coastal waters near Cape Erimo, Hokkaido, Japan

HIROKI ASAMI¹, HIROFUMI HAYANO², SHUICHI MANO² and MITSUHIRO NAGATA³

¹ Salmon and Freshwater Fisheries Research Institute, Hokkaido Research Organization, Eniwa, Hokkaido 061-1433

² Doto Research Branch, Salmon and Freshwater Fisheries Research Institute, Hokkaido Research Organization, Nakashibetsu, Hokkaido, 086-1164

³ Formerly: Salmon and Freshwater Fisheries Research Institute, Hokkaido Research Organization, Eniwa, Hokkaido 061-1433, Japan

Prevalence of the hemiurid trematode *Brachyphallus crenatus* in the stomach of the juvenile masu salmon *Oncorhynchus masou* collected in the coastal waters near Cape Erimo off the Pacific coast of Hokkaido was investigated. Juvenile salmon were sampled at two different times of the day (early morning, 5:00, and day-time, 13:00) on June 10, 1994, using set nets extending, from the shore to offshore areas at three stations. A total of 127 juveniles were collected (41 individuals in the early morning and 86 individuals during the day). Most of the juveniles were captured at the shore stations. Five tagged juveniles were also found at the shore stations during the day. The fork lengths of the juveniles collected at shore were smaller than those of the juveniles caught offshore. The ratio of small juveniles (<20 cm) caught was about 50 % during the day, and about 29% in the early morning. *B. crenatus* was present in over 95% of the total juvenile salmon collected during the early morning and day. Mean intensity of occurrence was higher in the early morning than during the day for both the males and females. A positive correlation was found between the fork length and intensity of *B. crenatus*. Differences in the prevalence incidence during the two periods of the day might relate to the differences in sea entry sites or in the time spent at sea. The effectiveness of *B. crenatus* as biological tags of juvenile salmons is discussed.

キーワード：寄生状況, サクラマス降海幼魚, 生物標識, 二生類

サクラマスには吸虫, 条虫, 線虫および鉤頭虫など多くの分類群に属する寄生虫が報告されている(栗倉, 1984)。寄生虫は病害性を及ぼしたり食品衛生上問題となることがあるが, 一方では, 魚類の回遊経路や系群を知るための指標となる寄生虫もいることが知られている(Margolis, 1965; 1982; MacKenzie, 1983; 浦和, 1989)。サクラマスの生態学的知見を提供する指標として利用でき

る種もあり, 本研究で扱う吸虫綱の二生類もその一種である(栗倉, 1984)。本報告では, 太平洋沿岸域でのサクラマス幼魚の消化管(胃内)から観察された吸虫類に属する二生類の寄生状況を調べた。そして, これらから幼魚の起源や回遊などの生活履歴の若干の推定を試みた。

試料と方法

サクラマス降海幼魚は1994年6月10日に北海道太平洋のえりも沿岸に設置した定置網1か統を用いて採捕した(Fig.1: 隼野, 1995)。定置網は、距岸300 mから沖合に

向けて設置される垣網部とその線上に固定設置された3か所の身網部から構成されている。垣網部に直面したサクラマス幼魚はそれぞれの回遊水域に従って進路を遮断され、集群した後に漁獲される。本研究では各身網部を調査定点とし、St.1は距岸1.3 km, St.2は2.0 kmおよび

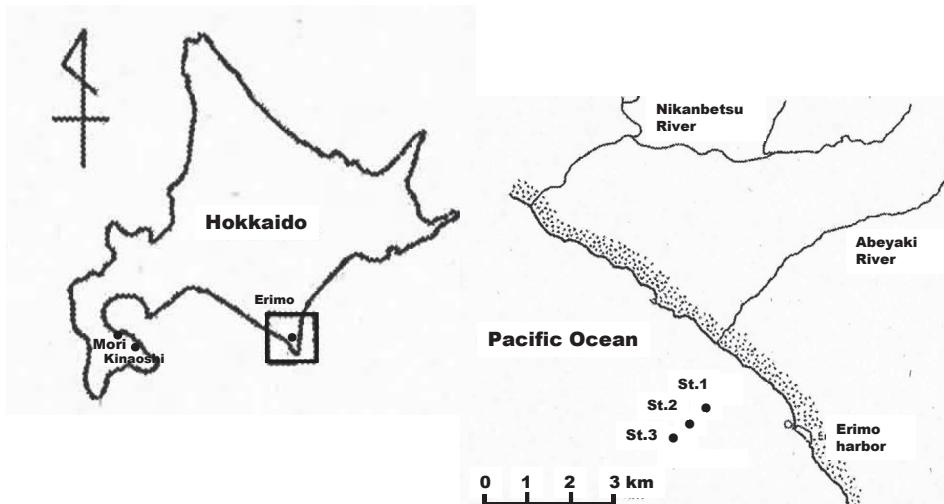


Fig.1 Study area off the Pacific coast of Hokkaido near Cape Erimo.

Table 1 Numbers and fork lengths of juvenile masu salmon collected in the coastal waters near Cape Erimo off the Pacific coast of Hokkaido.

Sampling time		St.1	St.2	St.3
5:00	No. of samples	40	0	1
	Average fork length (cm)	21.3	-	30
	S. D. (cm)	2.4	-	-
	Min—Max (cm)	17.4-26.5	-	-
13:00	No. of samples	81	4	1
	Average fork length (cm)	20.1	27.9	27.8
	S. D. (cm)	2.7	1.9	-
	Min—Max (cm)	16.1-27.1	25.5-30.2	-

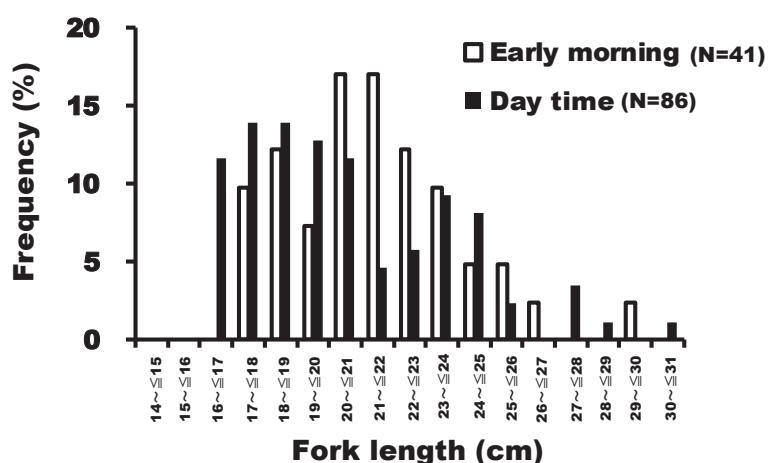


Fig.2 Frequency distributions of the fork lengths of juvenile masu salmon collected during the early morning (5:00) and day time (13:00)

Table 2 Sex, fork length and release sites of ribbon-tagged juvenile masu salmons collected in the coastal waters near Cape Erimo off the Pacific coast of Hokkaido.

Sex	Fork length (cm)	Release sites
♂	16.8	Kinaoshi
♀	16.6	Kinaoshi
♀	17.9	Kinaoshi
♀	19.3	Kinaoshi
♀	19.2	Mori

St.3は2.5 kmに位置する定置網の身網部である。揚網は早朝（5時）と昼間（13時）の2度行った。採捕されたすべての幼魚は船上で直ちにホルマリンで固定した。そして実験室を持ち帰り、体長（尾叉長）の測定と雌雄の判別を行った後、胃を取り出し、胃壁に寄生していた二生類を実体顕微鏡下で計数しながら抽出した。抽出した二生類は実体顕微鏡および生物顕微鏡で種の同定を行った。そして、二生類の寄生状況を調べるために Margolis *et al.* (1982) に従い、寄生率（prevalence, %）を被寄生個体数／調査個体数×100で算出した。また、被寄生魚の寄生数の平均値を求めて平均寄生数（mean intensity）として算出した。なお、本研究で行ったサクラマス降海幼魚の採集方法は隼野（1995）に詳しく述べられている。

結果

採捕魚の体サイズおよび標識魚 採捕されたサクラマス幼魚は両時間帯ともに陸寄りが圧倒的に多く、早朝にはSt.1で40個体、St.3で1個体の合計41個体、昼間にはSt.1で81個体、St.2で4個体、St.3で1個体の合計86個体だった（Table 1）。各地点での平均尾叉長は早朝にはSt.1で21.3 cm（標準偏差2.4 cm、最小17.4 cm～最大26.5 cm）、St.3で30.0 cmと、より沖側で大きかった。昼間にはSt.1で20.1 cm（標準偏差2.7 cm、最小16.1 cm～最大27.1 cm）、St.2で



Fig.3 Hemiurid trematode *Brachyphallus crenatus* found in the stomachs of juvenile masu salmon. Samples were preserved with formalin.

27.9 cm（標準偏差1.9 cm、最小25.5 cm～最大30.2 cm）、St.3で27.8 cmと早朝同様、沖側で採捕された個体はより大きかった。採捕された幼魚の体長範囲は両時刻で大きく異なるものではなかったが、早朝には最頻値は20～22 cmにあり、全体の34%を占めた。一方、昼間には最頻値が17～19 cmにあり、全体の28%を占めた。20 cm以下の個体の割合は早朝の29%に対し、昼間には52%と小型の個体が多く（Fig.2）、幼魚の体長頻度分布型は両時刻で統計的に有意に異なっていた（コルモゴロフスミルノフ検定、 $p < 0.01$ ）。

昼間にSt.1で採捕された5個体（雄1個体、雌4個体）にはリボンタグ標識個体も認められ、これらの尾叉長は16.6～19.3 cmであった（Table 2）。これらはすべて道南

Table 3 Prevalence and mean intensity of the hemiurid trematode *Brachyphallus crenatus* found in the stomachs of the juvenile masu salmon collected on June 10, 1994.

Sex	No. of individuals	Hemiurid infected(inds.)	Prevalence (%)	Intensity (range)
♂+♀	127	122	96.1	10.5±9.0 (0-41)
♂	29	28	96.6	12.7±8.8 (0-33)
♀	98	94	95.9	9.9±9.0 (0-41)

Table 4 Prevalence and mean intensity of the hemiurid trematode *Brachyphallus crenatus* at two different sampling times on June 10, 1994.

Time	Sex	No. of individuals	Hemiurid	Prevalence (%)	Intensity (inds.) (range)
			infected(inds.)		
5:00	♂	6	6	100	19.7±8.6 (7-33)
	♀	35	34	97.1	12.6±9.7 (0-41)
13:00	♂	23	22	95.7	10.9±8.00 (0-26)
	♀	63	60	95.2	8.4±8.3 (0-40)

太平洋にある南茅部郡木直（現在函館市木直町）と森町から放流された幼魚であった（Fig. 1）。

二生類の寄生状況 幼魚の胃壁には両時刻ともに二生類（吸虫綱）の一種である*Brachyphallus crenatus*が観察された（Fig. 3）。本研究で得られた標本のいくつかは目黒寄生虫館に寄託されている（Shimazu, 2018）。*B. crenatus*は調べた127個体の内、122個体の幼魚に寄生し、寄生率は96%に達した（Table 3）。また、平均寄生数は10.5個体（最小0個体～最大41個体）であった。雌雄別では、寄生率は雄が96.6%、雌が95.9%であった。平均寄生数は雄が12.7個体（最小0個体～最大33個体）、雌が9.9個体（最小0個体～最大41個体）であり、両者には有意な違いが認められなかった（U検定, $p > 0.05$ ）。さらに、採捕時刻別および雌雄別に寄生率と平均寄生数を調べた（Table 4）。ここでは、沿岸（St.1）で採捕された個体が全個体のほとんどを占めたため（早朝で98%，昼間で94%），地点を区別せず全地点をまとめて調べた。雌雄および両採捕時刻ともに*B. crenatus*の寄生率は95%以上で、なかでも早朝に採捕された雄の個体は全数が寄生されていた。平均寄生数は早朝には雄で19.7個体、昼間には10.9個体であった。一方、雌については早朝には12.6

個体、昼間には8.4個体であり、雌雄ともに早朝に採捕された個体で*B. crenatus*の寄生数は有意に多かった（U検定, $p < 0.05$ ）。

両時刻を含めた幼魚の体長と*B. crenatus*の寄生数との関係には有意な正の相関が認められた（Fig. 4, スピアマンの順位相関, $p < 0.05$ ）。昼間に採捕されたリボンタグ標識魚は尾叉長は20 cm以下であり、いずれも*B. crenatus*の寄生数は約5個体以下と少なかった。

考 察

本研究ではえりも沿岸で採捕された海洋生活初期のサクラマス幼魚に二生類の*B. crenatus*が高率に寄生していた。栗倉・野村（1983）は、北海道および新潟県に回帰したサクラマス成魚の消化管に4種の二生類を観察しており、*B. crenatus*の寄生が最も多かったことを報告している。また、*B. crenatus*は淡水生活期のサクラマス幼魚には寄生しないが、降海した幼魚には寄生が認められていることから海産種とされている（栗倉, 1984; Dick and Belosevic, 1981）。一般に、吸虫の卵は第1中間宿主である貝類に寄生し、幾つかの発育段階（スポロシスト, レジ

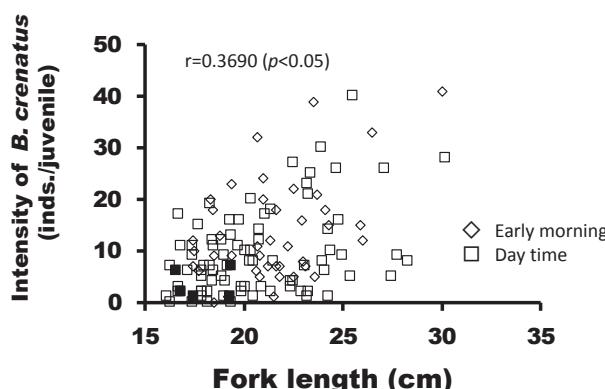


Fig. 4 Relationship between the intensity of *Brachyphallus crenatus* and fork length of juvenile masu salmon collected during the early morning and day time. Five closed rectangles show the ribbon-tagged juveniles.

ア) を経てセルカリ亞となる。セルカリ亞は第1中間宿主から出て、第2中間宿主の無脊椎動物や魚類等に寄生してメタセルカリ亞になる。そして、第2中間宿主が終宿主に食べられて、その体内で成虫となる。魚類は第2中間宿主になるほかにも終宿主ともなる。成虫は魚類の胃や腸などに寄生する(長澤, 1992)。ところで、*B. crenatus*はプランクトン食の表層魚に特有の寄生虫であるとされ(浦和, 1989), 実際に*B. crenatus*のメタセルカリ亞が沿岸性カイアシ類の*Pseudocalanus newmani*や*Acartia longiremis*を中間宿主として寄生していることが確認されている(Sokolov et al., 2016)。浅見・隼野(1994)はえりも沿岸で採捕したサクラマス幼魚の胃内容物を調査し、カイアシ類、端脚類、オキアミ類、メガロパ幼生などの甲殻類プランクトンを観察している。本研究で採捕された幼魚の胃内容物中にも、*P. newmani*, *Neocalanus spp.*, *A. longiremis*, *Eucalanus bungii*などのカイアシ類やメガロパ幼生が観察され(浅見未発表資料), *B. crenatus*はカイアシ類等の甲殻類プランクトンを第2中間宿主として幼魚の胃内に寄生したと推察される。さらに、*B. crenatus*の第一中間宿主は貝類とされていること、本調査では約90%以上の幼魚はより沿岸寄りの定点(St.1)で採捕されていることなどから、幼魚への*B. crenatus*の高率な寄生はより沿岸に沿った回遊途上に起きたものと考えられる。

えりも沿岸で採捕された幼魚の体長はより沿岸寄りでは小型で、沖側では大型だった。このことは隼野(1995)および真野(1996)が既に報告している。隼野(1995)および真野(1996)は沿岸と沖合での幼魚の体サイズの違いを成長に伴う沿岸から沖合への移動や、降海した場所による回遊水域の違いと推察している。本研究では、採捕された時間帯によっても、体長頻度分布に違いがあることを観察した。過去の幾つかの知見によれば放流するサクラマスにリボンタグで標識を施し、その再捕報告の結果から、北海道太平洋えりも沿岸域は多くのサクラマス降海幼魚の回遊経路になっていることが明らかになっている(真山ら, 2005)。さらに、北海道以外にも、本州日本海、太平洋のサクラマス幼魚もえりも沿岸域を回遊し、その出現盛期は5月下旬~6月上旬の水温が8~12°Cの期間であることが知られている(待鳥・加藤, 1985; 真山ら, 2005)。本研究でも、放流域の起源が明らかになっているリボンタグを付けた幼魚が昼間に5個体採捕された。昼間に採捕された幼魚は小型の個体の割合が多くのことや*B. crenatus*の寄生数が少なかったことなどから、降海後間もないか、より近海から回遊した幼魚が多くを占めていたことを示唆するのかもしれない。また、本研究では大型魚ほど*B. crenatus*の寄生数が有意

に多いことを示した。大型魚の割合は早朝に採捕された個体で多かったことから、これらの個体はより海洋生活期間が長いとすれば、このことが寄生数の多さと関係したのかもしれない。*B. crenatus*の寄生状況からホッキョクイワナ*Salvelinus alpinus*の降海型と残留型を識別した例(Dick and Belosevic, 1981), 北海道と本州日本海新潟県に回帰したサクラマス成魚の回遊域と成長の関係を推定した例(栗倉・野村, 1983), 網走湖産ワカサギ*Hypomesus nipponensis*で沿岸から湖内に遡上した群れ(遡上群)に本種の寄生を観察した例(Shimazu, 2018)など、*B. crenatus*の寄生状況を調べることは魚類の資源生態の理解に繋がる可能性がある。加えて、青森県日本海で、サクラマスの1+幼魚に超音波発信器を取り付け、ごく沿岸域から放流して超音波を受信してその後の移動を観察した研究によれば(伊藤, 1997), 幼魚は表層を潮流と同じ方向に極く沿岸を遊泳していたことが報告されている。今後はこのようなバイオロギング技術と寄生虫の寄生状況などを併用することによって、寄生虫の生物標識としての役割を検討する必要がある。

謝 辞

本研究を行うにあたり、貴重な御助言・文献等を頂きました嶋津 武博士(前長野県短期大学、現在長野県安曇野市在住)、浦和茂彦博士(北海道区水産研究所)の御二人に深く感謝いたします。

引用文献

- 浅見大樹、隼野寛史. 北海道沿岸域におけるサクラマス
降海幼魚の摂餌生態. 魚と水 1994; 31: 253-359.
栗倉輝彦、野村哲一. サクラマスの寄生虫に関する研究
- VI 消化管に寄生するヘミウルス類について.
水産孵化場研究報告 1983; 38: 39-46.
栗倉輝彦. 第9章 魚病対策と寄生虫. 「サクラマスの増
養殖(北海道立水産孵化場)」, 1984; 81-107.
Dick TA, Belosevic M. Parasites of arctic charr *Salvelinus*
alpinus (Linnaeus) and their use in separating sea-run
and non-migrating charr. J Fish Biol 1981; 18: 339-
347.
隼野寛史. サクラマスの海洋生活初期における生態研究
1. えりも沿岸における回遊時期と体長組成から見
た分布特性. 北海道立水産孵化場研究報告 1995;
49: 9-16.
伊藤欣吾. バイオテlemetryシステムによるサクラ
マスの遊泳行動. 日本海区水産試験研究 連絡ニュ

- －ス1997；380：4–6.
- 待鳥精治, 加藤史彦. サクラマス (*Oncorhynchus masou*) の産卵群と海洋生活. 太平洋国際委員会研究報告 1985；43：1–112.
- MacKenzie K. Parasites as biological tags in fish population studies. *Advances in Applied Biology* 1983；7：251–331.
- 真野修一. 襟裳岬周辺海域に出現するサクラマス幼魚の回遊生態. 北海道立水産孵化場研究報告 1996；50：17–28.
- Margolis L. Parasites as an auxiliary source of information about the biology of Pacific salmons (genus *Oncorhynchus*). *J. Fish. Res. Board Can* 1965；22：1387–1395.
- Margolis L. Parasitology of Pacific salmon – an overview. In: E. Meerovitch ed. *Aspects of Parasitology*, McGill University, Montreal, Quebec, 1982；135–226.
- Margolis L, Esch GW, Holmes JC, Kurtis AM, Schad GA. The use of ecological terms in parasitology. *J. Parasitol* 1982；68：131–133.
- 真山 紘, 小野郁夫, 平澤勝秋. 北海道の河川に放流された標識サクラマスの海洋における回遊生態. さけ・ます資源管理センターニュース 2005；14：1–9.
- 長澤和也. 「魚介類に寄生する生物」. ベルソーブックス 009 (社) 日本水産学会 監修, 成山堂書店, 東京. 1992.
- Shimazu T. Adult digeneans (Trematoda) parasitic in *Hypomesus nippensis* (Osteichthyes, Osmeridae) from brackish-water lakes of Japan. *Bull. Natl. Mus. Nat. Sci* 2018；Ser. A, 44(2) : 57–68.
- Sokolov SG, Frenkel SE, Gordeev II. Metacercariae of *Brachyphallus crenatus* Rudolphi, 1802 (Trematoda: Hemiuridae) in plankton crustaceans from the Prostor Gulf (Iturup Island, Russia). *Parazitologiya* 2016；50：150–155 (in Russian with English summary).
- 浦和茂彦. サケ科魚類研究のための生物指標としての寄生虫. さけ・ます孵化場研究報告 1989；43：53–74.

フリーウェアを用いた耳石日周輪解析手法の検討（技術報告）

城 幹昌*

北海道立総合研究機構栽培水産試験場

Methods of otolith microstructure analysis using free software (Technical report)

MIKIMASA JOH*

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

キーワード：digiCamControl, Image J, 耳石日周輪解析, デジタル一眼レフカメラ, フリーウェア

魚類の初期生活史研究は、魚類の生物学的・生態学的知見の獲得のために重要である。また、一般的に、初期生活中の生残の良し悪しが魚類の年級群豊度を決定すると考えられているため、資源の将来予測などに関し、水産学上も不可欠な研究となっている（Anderson, 1988; Leggett and Deblois, 1994）。魚類の耳石の日周輪には孵化後1年も経過していない仔稚魚の孵化日や成長履歴といった貴重な生態情報が記録されていることから、耳石日周輪解析はその初期生活研究において非常に強力な手法となっており、様々な魚種で仔稚魚の孵化日や成長履歴が調査されてきた（Yoklavich and Bailey, 1990; Campana, 1996; Takahashi and Watanabe, 2004; Takasuka and Aoki, 2006; Joh et al., 2013; Joh and Wada, 2018）。

著者が魚類の初期生活史研究を開始した1990年台末までは、耳石日周輪解析は顕微鏡に接続したフィルムカメラやデジタルコンパクトカメラで画像を撮影し、それを印画紙やプリンター用紙上にプリントした後に手作業で日周輪の輪紋数の計数や幅の計測を行っていた。その後、顕微鏡に専用のCCDカメラを接続し、それから得られる画像をパソコンに直接取り込むことのできる装置や、デジタル画像をパソコンモニター上で解析するソフトウェアが登場し、顕微鏡画像の撮影、処理、解析が飛躍的に簡便になった。さらに、顕微鏡とCCDカメラとパソコンを接続した装置に加え、パソコンモニター上で専用ソフトウェアを用いて顕微鏡画像の撮影、画質の調整、日周輪の計数・計測を行う軸の設定、日周輪の計数・計測が一度に行えるシステムも現れ、現在ではこれが日周輪解析の最も強力な解析手法となっている（例えば、ラ

トックシステムエンジニアリング社のAPR）。

特定の解析を行う専用のシステムやソフトウェアは、もちろんその解析を行う上では最も便利であるが高価であり、そういったシステムが利用できない研究現場ではより安価なシステムで同様の解析ができるようになれば、これまであまり研究されてこなかった沿岸性魚類の初期生態の解明に寄与することが可能と思われる。現在、統計処理を行うためにはRと呼ばれるフリーウェアがあり、拡張性が高く、様々な解析を行うことができるところから、広く用いられるようになっている。画像解析においても、Image Jというフリーウェアが存在し、距離や面積の測定など多くの解析ができるため、広く用いられている。こういった背景から、耳石日周輪解析もフリーウェアや一般的に市販されている汎用機器を組み合わせることでより安価で簡便に行うことが可能なのではないかと考え、今回はこの方法の検討、一連の作業の整理と記述を行うこととした。

試料（材料）と方法

使用した機器

- 生物顕微鏡：Nikon製 Eclipse 80i（20～40倍の通常の対物レンズ、および100倍の油浸対物レンズ、TV直筒、Cマウントダイレクトアダプター付属）
- 顕微鏡に接続するデジタル一眼レフカメラ：Canon製 EOS 80D
- 顕微鏡およびカメラと接続するパソコン：Panasonic 製 CF-SZ5

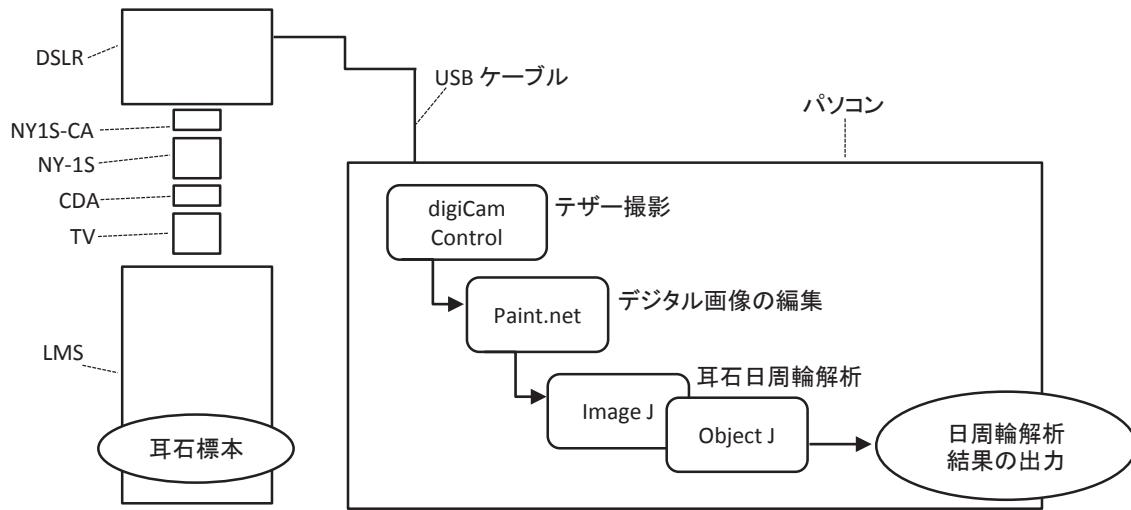


図1 本研究で用いた機器とソフトウェアのシステムダイヤグラム

CDA, TV：光学顕微鏡（LMS）に接続したcマウントダイレクトアダプターとTV鏡筒
NY-1S, NY1S-CA：cマウントダイレクトアダプターとデジタル一眼レフカメラ（DSLR）を接続するアダプターとキヤノンeマウント用のアタッチメント
パソコン内の長方形：テザー撮影、画像調整、耳石日周輪解析に用いるフリーウェアおよびそのプラグイン

4. カメラを顕微鏡に接続するマウントアダプター：美館イメージング製一眼レフ用アダプター（NY-1S）、およびEOS用アタッチメント（NY1S-CA）
5. カメラとパソコンの接続：A-mini BタイプUSBケーブル

使用したフリーウェア

1. digiCam Control（テザー撮影用ソフトウェア）：パソコンモニター上でデジタル一眼レフカメラのライブビューの観察、カメラの各種設定の変更、パソコン内への直接の画像保存ができるソフトウェア。本ソフトはCanonおよびNikon社製の多くのデジタル一眼レフカメラに対応しているため用いた。なお、本報告作成時に使用したのは、バージョン2.0.49.0である。
2. Paint.Net（画像編集用ソフトウェア）：撮影された画像のコントラストや明るさの調整、複数の画像の同じ位置に同じ角度の直線（後に、輪紋幅の計測軸として利用する）を描画するために用いた。なお、本報告作成時に使用したのは、バージョン4.0.17である。
3. Image J（画像解析用ソフトウェア）：Object J（Image J用プラグイン）を追加した状態で使用して、耳石日周輪解析を行った。Object Jを導入することで、Image J上で樹木の年輪のような連続した計数形質の計数や幅の計測を行うことができるようになる。なお、本報告作成時に使用したのは、バージョン1.48である。

なお、今回使用するこれらフリーウェアのダウンロードできるサイトやインストール方法については、Google等インターネット上で容易に検索できるため本稿では省略する。以上の機器・フリーウェアのシス

テムダイヤグラムを図1に示す。

結 果

顕微鏡画像撮影以前のdigiCamControlの設定 すべての機器を接続し、パソコン上でフリーウェアdigiCamControlを起動すると、Facebook等のSNS（social networking service）で本ソフトウェアをシェアするための小さいウィンドウが表示される。これを閉じると各種操作が可能となる。耳石日周輪解析では、1個体の耳石の観察に複数枚の画像を撮影する場合があるが、こういった際の画像ファイルの名称は、採集年や地点、個体番号は同じでシリアル番号のみ異なるような名称にしておくと、後々要らぬ混乱を避けることができる。例えば、2011年にW14地点で採集されたホッケ稚魚の耳石日周輪画像を保存する場合に、「2011_W14_ホッケ」という文字列は各耳石画像ファイルに共通に持たせ、その末尾に撮影順に番号を与えるとする。この場合は、本ソフトの左上にある「Session」メニューで設定が可能である。新たに、設定を行う場合は「Session」→「add new session」を選択する。すると、ファイル名設定を行う「SESSION [ADD/EDIT]」ウィンドウが表示される（図2a）。一番上の「Session name」には調査年や魚種といった個体間で変化しない文字列を入力する（例えば、「2011_ホッケ」など）（図2a-①）。上から2番目の「Folder」の右の「…」をクリックして（図2a-②）、画像を保存するフォルダを指定する。フォルダは個体ごとに作成すると良い。次に、上から5番目の項目「File Name Template」の右端にある

「…」をクリックし（図2a-③）、「FILE NAME TEMPLATE EDITOR」ウインドウを立ち上げて（図2b），ここで撮影する画像ファイル名の設定を行う。「File Name Template:」の入力枠（図2b-①）にすでに文字列が入っているが，これは一旦削除し，その下に並ぶテンプレートの中から，「Session Name」をクリックする（図2b-②）。次に，この入力枠内に「地点名」や「個体番号」を直接入力し，最後に，テンプレートの中から，「Counter 3 digit」をクリックする（図2b-③）。こうすることによって，「年_魚種名_地点_個体番号_3桁の連番」というファイル名を撮影する画像に自動的に付与できるようになる。「FILE NAME TEMPLATE EDITOR」ウインドウの下の「OK」を選択して（図2b-④），「SESSION [ADD/EDIT]」ウインドウ（図2a）に戻り，上から6つ目

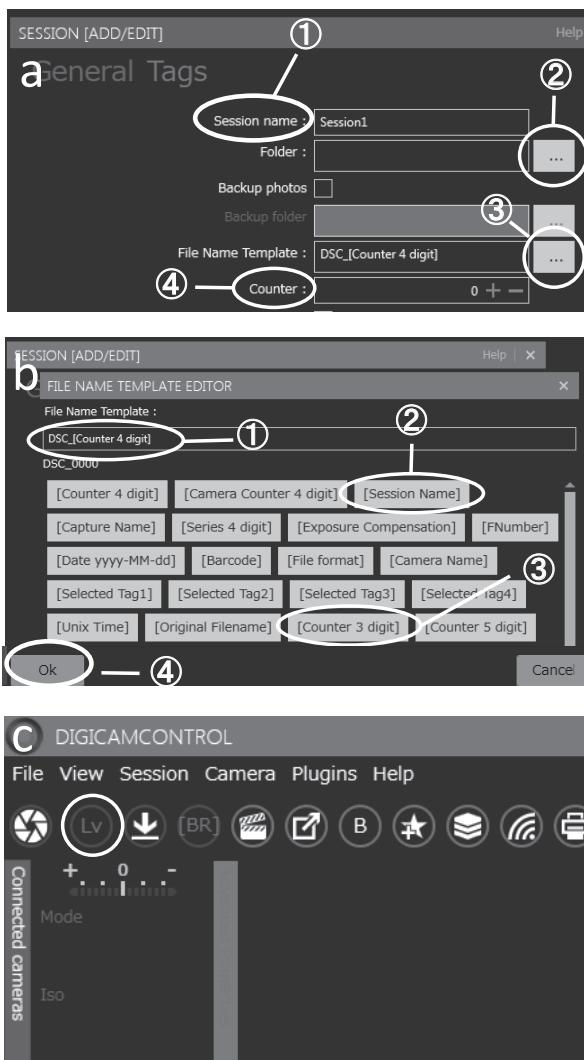


図2 テザー撮影ソフトウェア（digiCamControl）の操作画面
 (a)は「SESSION [ADD/EDIT]」
 (b)は「FILE NAME TEMPLATE EDITOR」
 (c)はメインウィンドウである。

の「Counter:」の数値を0にする（図2a-④）。これによって，画像ファイル名に1から始まる連番を付与できる。digiCamControlによる顕微鏡画像の撮影 digiCamControlを起動した後，カメラの電源を入れると，本ソフトの左上のライブビューアイコン（Lv: 図2c）がアクティブになるので，これをクリックする。すると，ライブビューの新しいウインドウが表示され，その時カメラが得ている顕微鏡のライブビューがパソコンモニター上で観察できる。ソフト本体の左端には，接続されているカメラの情報や設定が表示され，ここでカメラに触れずともカメラのISO感度や露出補正を変更でき，変更結果はライブビューにすぐさま反映される。実際に多く使用するのは，露出補正機能であろう。ライブビューを見ながら，顕微鏡を操作して視野やピントの調整を行った後に，「ライブビュー」ウインドウの「Capture」アイコンをクリックすれば，カメラによる画像の撮影とパソコン内への画像ファイルの直接保存が行われる。

なお，次項の計測軸の設定や，複数の画像を利用して1つの耳石を解析する場合を考えると，1枚目の画像を撮影する段階で，耳石の核付近から耳石外縁（もしくは，核からある程度離れた位置にある特徴的な輪紋や，ひび割れ模様）までが1つの視野に収まった状態にしておくと，後の作業を迅速に行うことができる。また，観察されたデジタル画像上で計測した耳石日周輪の輪紋間の幅をμm単位などで計測するためには，各倍率において撮影された顕微鏡画像の1ピクセルが何μmなのかを調べておく必要がある（距離補正值の算出）。このために，耳石の観察が終わったら，使用した倍率で対物ミクロメーターの画像も撮影しておく必要がある。

Paint.Netを用いた画像の前処理 上述の手順で撮影された顕微鏡画像は画像編集ソフトウェアで画質を調整したほうが，日周輪が観察しやすいことが多い。特に，コントラストを適度に強調することが有効である。また，1つの耳石について，核付近から耳石外縁に向けて，少しづつピントを変えて画像を複数撮影することもあるが，観察している耳石断面が円形では無い場合，輪紋幅は測定部位によって個体内でも異なってくるため，輪紋幅の測定は画像間で共通した位置・角度に設定された单一の計測軸上で行う必要がある。

これらの作業はフリーウェアPaint.Netで行った。日本語のソフトであり，一般的に行う画像の調整はすべて行うことができ便利である。「調整（A）」メニュー（図3-a）を選択して「明るさ/コントラスト」で，画像の明るさやコントラストの調整が可能である。つぎに，複数の画像に单一の計測軸を設定する。この作業は，1つの画像上に計測軸となる直線のレイヤーを追加し，このレイヤ

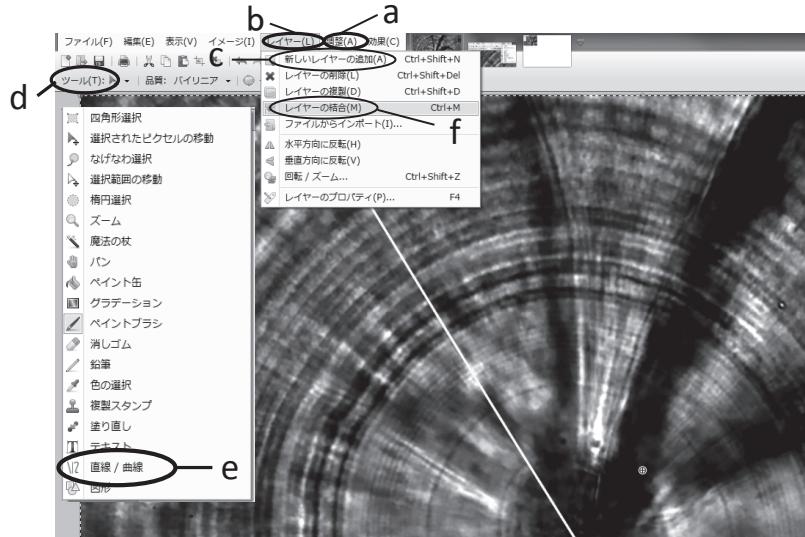


図3 画像編集ソフトウェア（Paint.NET）上での新しいレイヤーの追加およびそのレイヤーとデジタル画像を結合する作業イメージ
背景の耳石画像はスケトウダラ稚魚の扁平石の中心部

ーを他の画像に貼り付けるという手順で行った。まず、耳石の中心から外縁まで連続して観察できる画像を1枚、本ソフトウェアで開く。そして、「レイヤー（L）」メニューから（図3-b）、「新しいレイヤーの追加（A）」（図3-c）を選択すると、画像上に透明のシートが重ねられたような状態になる。この後に、「ツール（T）」（図3-d）を選択して、ツールメニューの「直線/曲線」（図3-e）から、計測軸を設定したい位置に直線を引く。そして、この直線が書かれたレイヤーをコピーし（キーボードショートカット：Ctrl+C），次の画像をアクティブにする。次の画像でも、メニューの「レイヤー（L）」→「新しいレイヤーの追加（A）」（図3-c）とし、先程コピーしたレイヤーを貼り付ける（キーボードショートカット：Ctrl+V）。この作業をすべての画像で行った後に、「レイヤー（L）」→「レイヤーの結合（M）」（図3-f）という処理をすべての画像について行い、上書き保存する。これによって1つの耳石について撮影された複数の画像に同じ位置・同じ角度の計測軸を設定することができる。2枚目以降の画像に追加したレイヤーは移動可能であるので、画像間で耳石の位置が異なる場合は、耳石の中心や耳石上の特徴的な構造（目立つ輪紋やひび割れなど）といった目印になる物をいずれの画像にも入れておくようにして、それを目印にレイヤーを移動すれば、結果として複数の画像間で同じ位置に計測軸を設定可能である。ただし、耳石の位置が複数の画像間で変わらなければ、沢山の画像を撮影してもレイヤーのコピーと貼り付けの作業の繰り返しのみで、速やかに計測軸がすべての画像で設定できるので、撮影前からライブビュー内の耳石の

位置を調整して耳石の画像上の位置の変更が最少になるよう工夫する必要がある。

Image Jを用いた耳石日周輪解析

1. 計測に必要なファイルの準備および設定 まずは、撮影された画像上で、 μm 単位で距離が計測できるようにする。撮影しておいた対物ミクロメーターの画像をImage Jで開き、上から2段目にならぶアイコンの左から5つ目の「直線」アイコンをクリックして（図4-a）、任意の距離の直線を引く。その後、メニューの「Analyze」（図4-b）→「Set Scale」とすると、「Set Scale」ウインドウ（図4-c）が表示され、「Distance in pixels:」（図4-d）には描画した直線のピクセル単位での距離が表示されているので、「Known distance:」（図4-e）に既知の μm 単位の距離を入力する。すると、「OK」の上に「Scale: pixels/unit」と距離補正值が表示されるので（図4-f）、ここに数値を撮影した倍率ごとに記録する。

Image Jを用いて、耳石日周輪解析を行うには、Web上から「Object J」というプラグインをダウンロードする必要がある（<https://sils.fnwi.uva.nl/bcb/objectj/index.html>）。ダウンロードした「objectj.jar」というファイルは、パソコンのプログラムファイル内のImage Jフォルダの中の「plugins」というフォルダに追加するだけで良い。あとは、Image Jを起動して、メニューの「Plugins」から「Object J」を選択すれば、このプラグインが使用可能となる。

このプラグインは、1つの耳石や樹木の切り株に対し、1つのプロジェクトファイル（拡張子「.ojj」のファイル、以降「ojjファイル」と呼ぶ）を作成し、これによって

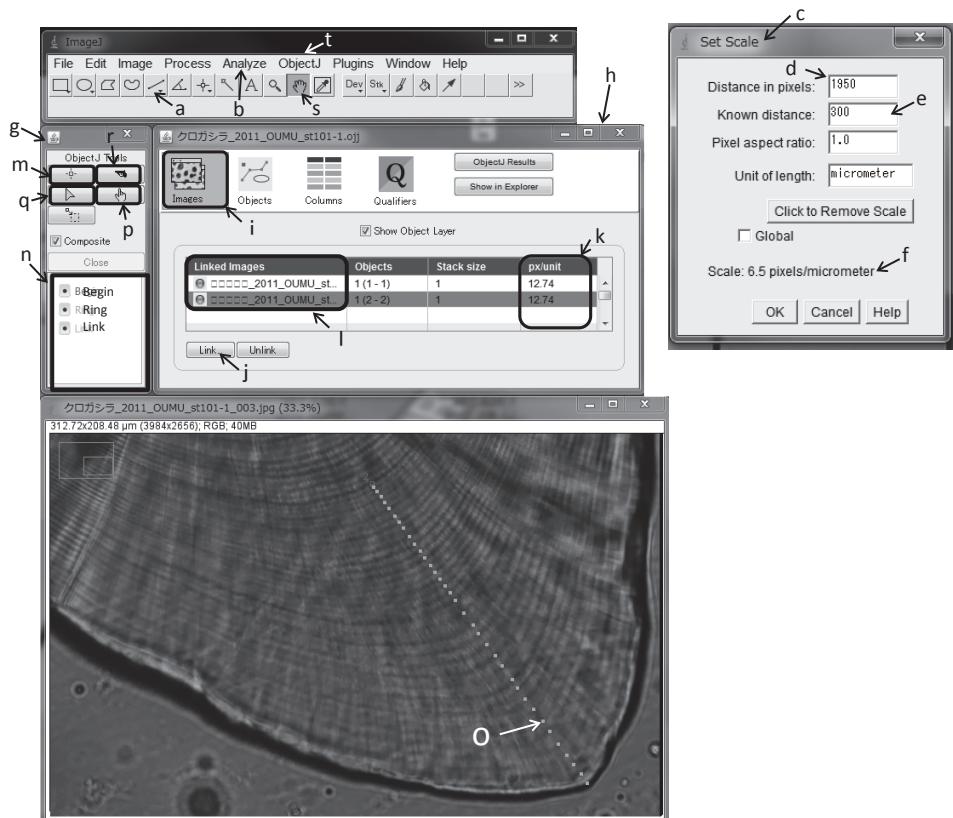


図4 画像解析ソフトウェア (Image J) にプラグイン (Object J) を組み合わせて耳石日周輪解析を行う作業イメージ
図中の(a)から(t)：それぞれ「結果」中に記述される (a) から (t)
背景の耳石画像はクロガシラガレイ稚魚の礫石の外縁部

使用した画像や輪紋の計数・計測履歴や結果をフォルダ単位で管理する。そのため、ojjファイルと耳石の画像の収められたフォルダは個体ごとに用意するほうが良い。上述のサイトの「Examples」タブをクリックすると、様々な解析への本プラグインの使用例が掲載されている。今回はここの「Otoliths and tree rings」から、樹木の年輪の解析例を1つダウンロードし、そこに含まれる既成のojjファイルを利用するにした。まず、これをコピーし、日周輪解析を行う個体の画像が保存されているフォルダ内に貼り付け、適宜ファイル名を変更した。これ以降の個体では、このojjファイルを個体ごとに次々とコピー・貼り付けし、名前を変えて使用すれば良い。

フォルダ内に作成したojjファイルをImage Jソフト上にクリック＆ドラッグすると、「Object J Tools」ウインドウ（図4-g）と、開いたプロジェクト名の書かれたウインドウ（図4-h）が表示される。まずは、プロジェクト名ウインドウの「Images」タブ（図4-i）をクリックする。そこには、コピー元のプロジェクトファイルにリンクされていた古い画像名が表示され（図4-l），同じフォルダにその画像が無いため左端にリンク切れを示す赤い丸印が表示される。これらは必要ないため、選択した

後に「Unlink」をクリックし削除する。その後、「Link」（図4-j）をクリックすると、このojjファイルが存在するフォルダ内の画像の一覧が表示されるので、使用したい画像ファイルを1つずつ追加していく。使用する画像がすべて同じ倍率で撮影されたものであれば、右端の「px/unit」（図4-k）で右クリックすると、「Scale All Linked Images」というウィンドウが表れ、ここにその倍率での距離補正值を入れ、「Propagate Scale」をクリックすると、全画像に同じ距離補正值を一度に適用できる。もし、100倍と40倍といった異なる倍率で撮影した画像を混用する場合は画像ごとに補正值を入力する必要があるため、次にその方法を説明する。

異なる倍率の対物レンズで撮影された画像を混用する場合、「Linked Images」列のそれぞれの画像ファイル名（図4-l）をクリックして、ファイルを開いた後、Image Jのメニュー「Analyze」（図4-b）→「Set Scale」（図4-c）とし、「Distance in pixels」欄（図4-d）にそれぞれの画像を撮影した倍率における距離補正值を入力し、「Known distance:」（図4-e）に1を入力し「OK」とすれば良い。

2.日周輪解析に関する作業 ここで準備が整ったので、Object Jを用いて耳石日周輪解析を行っていく。まずは、

「Linked Images」列で最初に解析したい画像ファイル名をダブルクリックして開く。Object Jは一つの起点「Begin」とそれに連なる輪紋「Ring」で構成される「object」が基本となっており、objectは1つの画像内で完結する必要がある。そのため、1つの耳石について撮影された複数の画像で1つのobjectを共有するようなことはできない。このような場合は、画像ごとにobjectを作成し、計数・計測結果は後ほど表計算ソフト等を利用して手動で統合する必要がある。まず、起点（Begin）となる点を設定するため、「Object J Tools」（図4-g）ウインドウの左上の赤色の照準のようなアイコン（図4-m）をクリックする。すると、同じウインドウの下から3つ目の「Begin」（図4-n）がアクティブになり、起点となる輪紋を計測軸上でクリックしマークする。すると、自動的に「Object J Tools」ウインドウ（図4-g）では「Ring」（図4-n）がアクティブになり、連続して輪紋をクリックしていくば、輪紋が水色の四角でマークされていく（図4-o）。複数の画像にまたがって1つの耳石を解析する場合は、次に解析したい画像をプロジェクトファイル」ウインドウ（図4-h）の「Linked Images」（図4-l）から開き、上述の手順で再度起点を設定し、同様に輪紋をマークして次のobjectを作っていく。

Object Jはクリックした順番に輪紋を認識するため注意が必要である。例えば、起点を設定してから、5~10本目の輪紋を先にマークして、その後、起点と5本目までの間を埋めていくようなことは単純にはできない。単純にこのような操作をすると、第1輪紋幅は起点から5本目の輪紋までの幅となり、2本目の輪紋は8本目と認識されてしまう。もし、後から輪紋を補完したい場合は、Object J Toolsウインドウ（図4-g）の上から2行目・右の「手」のアイコン（図4-p）をクリックする。そして、耳石画像上で輪紋を補充したいObjectをクリックして、そのObjectをアクティブにする。その後、輪紋を補完したい位置にカーソルを移動して、「F7」キーを押すことで、輪紋の補完が可能である。補完していく際は輪紋の並ぶ順序を考慮せずランダムに「F7」キーを押していくても入力順序は問題にならず、画像上の輪紋の並びどおりに記録されていく。

打ち込んだ輪紋のマーク位置を修正したい場合は、Object J Toolsウインドウ（図4-g）の上から2行目・左の黄色い「楔形」アイコン（図4-q）を選択し、Shiftキーを押しながら移動したい輪紋をドラッグすれば移動できる。なお、shiftキーを押さずにドラッグするとobjectごと移動することができる。

輪紋のマークを消去したい時は、Object J Toolsウインドウ（図4-g）の一番上・右の「拳銃」アイコン（図4-r）

をクリックし、shiftキーを押しながら消去したい輪紋をクリックすると消去できる。なお、objectごと消去する時はshiftキーを押さずにクリックすれば良い。

耳石の成長に伴い、途中から輪紋幅を計測する軸を変更することも考えられるが、この場合は上述の方法で起点から輪紋をマークしていく、計測軸を変更したい輪紋までマークした後に、「Object J Tools」ウインドウの「Link」（図4-n、図4-jのLinkとは異なる）を選択する。次に、新しく計測軸を設定したい部位において先ほど最後にマークした輪紋を特定し、それを「Link」（図4-n）でマークする。その後、再度「Object J Tools」ウインドウ（図4-g）の「Ring」（団4-n）を選択してから、新しい部位で輪紋をマークしていけば1つのobjectで連続して複数の部位における解析結果を管理できる。

耳石輪紋が高いコントラストで明瞭に観察できる部位では、自動で輪紋をマークすることが可能である。起点から輪紋をマークしていく、自動入力をしたい部位まで到達したら、カーソルを自動入力を終えたい部位周辺へ移動させ、その後「F2」キーを押す。すると、最後にマークした輪紋からカーソルまで自動的に輪紋が認識される。何度かカーソルを微妙に移動させつつ、「F2」キーを押すと自動入力結果が変わるので、最適な結果が得られるまで繰り返せば良い。結果を確定したい場合は「F3」キーを押すと、結果が確定される。

すべての輪紋をマークし終えたら、すべてのobjectについて以下の作業が必要になる。まず、「手」アイコン（図4-s）を選択し、任意のobjectをアクティブにし、「F4」キーを押す。すると、「Enter year」というウインドウが表示され、-2009などの値が入力された状態になっている。ここに、0以上の値を入力すると、そのobjectの起点から外に向かって、各輪紋が何本目かという情報が付与される。Object Jは、樹木の年輪を解析するものであり、この機能は本来であれば切り株の中心の年輪の形成年（正の値：例えば「1833」）、もしくは最外の年輪の形成年を指定した場合に（負の値：例えば「-1833」）、その他の各年輪が何年に形成されたかを記録するツールである。日周輪解析では特に必要な作業であるが、0や1と入力しておけばそのobjectに含まれる輪紋数が把握できるので値を入力し、その後「OK」とする。この作業をすべてのobjectで行う。その後、Image Jメニュー「Object J」（図4-t）→「Output (List)」とすると、入力したすべてのobjectについて1本ごとの輪紋幅の計測値が別ウインドウで表示される。結果を保存する場合は、このウインドウのメニュー「File」→「Save as」とすれば、「Save as text」ウインドウが開き、計測結果をテキストファイルで保存できるので、保存先フォルダを確認して保存す

る。あとは、表計算ソフトなどを用いて、輪紋数や輪紋幅を解析すれば良い（図5）。なお、objectはプロジェクト名ウインドウでlinkした画像の順に番号が付与される。したがって、最初にobjectを作成したい画像は最初にlink（図4-j）しておく必要がある。

考 察

ラトックシステムエンジニアリング社が提供するAPRという耳石日周輪解析専用のシステムがあり、これは顕微鏡像のライブビューの観察、画像の撮影、計測軸の設定、輪紋のマークといったすべての作業が一度に可能である。また、今回の手法では、画像ごとにobjectを生成し、最後に表計算ソフトなどを用いてすべてのobjectの計測

	A	B	C
1			
2	201502JW14047_01.tif	--- Object 1	
3	Year	Width	
4	1	7.9412	
5	2	0.4902	
6	3	0.5982	
7	4	0.6863	
8	5	0.4902	
9	6	0.5795	
10	7	0.7353	
11	8	0.5007	
12	9	0.6887	
13	10	0.7859	
14	11	0.7575	
15	12	0.804	
16	13	0.804	
17	14	0.7776	
18	15	0.8031	
19	16	0.9804	
20	17	0.8434	
21	18	0.6723	
22	19	0.9804	
23	20	0.9314	
24	21	1.0294	
25	22	0.9829	
26	23	0.9039	
27	24	0.9118	
28	25	1.1486	
29	26	0.9118	
30	27	1.265	
31	28	1.045	
32			
33	201502JW14047_01.tif	--- Object 2	
34	Year	Width	
35	1	0.5441	
36	2	0.5923	
37	3	0.5984	
38	4	0.4217	
39	5	0.4625	
40	6	0.5315	
41	7	0.5971	
42	8	0.5352	
43	9	0.6507	
44	10	0.5047	
45	11	0.4217	
46	12	0.4217	
47	13	0.5481	
48	14	0.3829	
49	15	0.6345	
50			
51			
52			
	201502JW14047		

図5 Image Jを用いて行った日周輪解析結果の出力例
ObjectごとにA列に日周輪数と各輪紋幅が記録されている
ここではMicrosoft Excel を用いている

値を手動で合算しなければならないが、APRでは一つの計測軸を複数の画像間で共有することができ、対物レンズの倍率を変更しても、計測軸の縮尺をそれに応じて変更する機能もあり、耳石日周輪解析を行う上では非常に便利なツールである（もちろん、最初に距離補正值の入力といった作業は必要）。さらに最近では、ライブビューのまま輪紋を打ち込んでいくことが可能になっており、大型の耳石でピントを徐々に変更しながら日周輪解析を行う場合でも、その都度画像を撮影する必要がなく、利便性がさらに高まっている。今回用いた手法は、こういった専用のシステムと比較すれば、1) 画像間でobjectを共有できない点、2) objectごとに出力される解析結果を手動で合算する必要がある点で作業性は低い。また、専用システムでは設定した計測軸上でしか輪紋のクリックはできず、軸上にきれいに輪紋がマークされていくが、今回のシステムでは基本的に画像上のどこにでもマーク可能であるので、描画した計測軸上からはずれないようにクリックしていかなければならず、専用システムより注意力が必要である。こういった難点もあるものの、市販の汎用デジタル一眼レフカメラ、マウントアダプターやパソコン、フリーウェアによって耳石日周輪解析ができる点は、規模の小さい研究現場では価格面で非常に魅力的であろう。また、Image JとObject Jをインストールしたパソコンであれば、場所・時間を選ばず気軽に解析ができる点はメリットであろう。

本稿では、複数のフリーウェアを用いた。使用したフリーウェアが突然利用できなくなり、今回整理した手法でフリーウェアによる日周輪解析ができなくなる可能性は否定できない。しかし、こういったソフトウェアの公開や保守の打ち切り、大幅な仕様変更などは、有償のソフトウェアや機器でも起きうるし、そうした場合には代わりとなる利便性がさらに向上したソフトや機器が出現しているはずであるので、より良いソフトウェアや機器の情報に注意を払っておけば、さほど問題とはならないと考えている。

本稿では、digiCamControlを用いて一度パソコン内に画像を保存した後に、Image Jでその画像ファイルを開き解析を行った。専用のシステムでは、ライブビューの観察から日周輪解析まで1つのソフトウェア上で可能である。Image Jについても、ライブビューの画像を直接キャプチャーしてImage J上に表示させ、そのまま解析を行っていくことは不可能ではない。Micro managerという画像解析のフリーウェアが存在するが、このソフトはImage Jのプラグインとしての機能も持っており、これを仲介させることで、これが可能となる。ただし、Windows OSのパソコンと、市販のデジタル一眼レフカ

メラを用いる場合には、現時点ではさらに有償のテザー撮影ソフトウェアを介する必要があり現実的ではない。

著者が日周輪解析を始めた頃の耳石日周輪の解析環境と比較すれば、カメラやパソコン、ソフトウェアに飛躍的な向上がみられ、現在は日周輪解析が非常に手軽に感じられる環境になったといえる。一方で、撮影および解析を行う機器の性能が向上しても、耳石の包埋、顕微鏡の光源や絞りの調整、耳石の研磨といった最良の耳石画像を撮影するまでのプロセスの重要性は現在も過去も変わらない、この部分をおざなりにしていては良い機器を使用しても良い解析結果は得られない。画像の撮影や解析の作業が手軽になった分、こういったプロセスの重要性が相対的に増しているように感じられる。今回は、耳石画像の撮影から日周輪解析までを市販の機器やフリーウェアを用いて安価で簡便に行う手順について整理・記載したが、今後は標本の保存から耳石標本を顕微鏡で観察するまでのプロセスについて整理・記載していく予定である。

謝 辞

本報告は、北海道立総合研究機構の平成28年度職員研究奨励事業（シーズ探索型）課題「従来法では年齢査定が不正確な魚種への新年齢査定方法の開発と安価な顕微鏡画像解析システムの構築」の成果の一部である。

引用文献

Anderson JT. A review of size dependent survival during

- pre-recruit stages of fishes in relation to recruitment. *J. Northw. Atl. Fish. Sci.* 1988 ; 8 : 55–66.
- Campana SE. Year-class strength and growth rate in young Atlantic cod *Gadus morhua*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1996 ; 135 : 21–26.
- Joh M, Nakaya M, Yoshida N, Takatsu T. Interannual growth differences and growth-selective survival in larvae and juveniles of marbled sole *Pseudopleuronectes yokohamae*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2013 ; 494 : 267–279.
- Joh M, Wada A. Inter-annual and spatial difference in hatch date and settlement date distribution and planktonic larval duration in yellow striped flounder *Pseudopleuronectes herzensteini*. *J Sea Res.* 2018 ; 137 : 26–34.
- Leggett WC, Deblois E. Recruitment in marine fishes: is it regulated by starvation and predation in the egg and larval stages? *Neth. J. Sea Res.* 1994 ; 32 : 119–134.
- Takahashi M, Watanabe Y. Growth rate-dependent recruitment of Japanese anchovy *Engraulis japonicus* in the Kuroshio–Oyashio transitional waters. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2004 ; 266 : 227–238.
- Takasuka A, Aoki I. Environmental determinants of growth rates for larval Japanese anchovy *Engraulis japonicus* in different waters. *Fish. Oceanogr.* 2006 ; 15 : 139–149.
- Yoklavich MM, Bailey KM. Hatching period, growth and survival of young walleye pollock *Theragra chalcogramma* as determined from otolith analysis. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1990 ; 64 : 13–23.

リアルタイムPCR法で推定した北海道東部海域におけるアナメ, スジメ, アイヌワカメの遊走子放出時期（資料）

高谷義幸¹, 合田浩朗²

¹北海道立総合研究機構中央水産試験場,

²北海道立総合研究機構釧路水産試験場

The release period of zoospores of three species of Laminariales *Agarum clathratum*, *Costaria costata* and *Alaria paelonga* off the coast of eastern Hokkaido by real-time PCR (Note)

YOSHIYUKI TAKAYA¹ and HIROO GODA²

¹ Central Fisheries Institute, Hokkaido Research Organization, Yoichi, Hokkaido 046-8555,

² Kushiro Fisheries Institute, Hokkaido Research Organization, Kushiro, Hokkaido 085-0027, Japan

キーワード：アイヌワカメ, アナメ, スジメ, 遊走子

北海道東部のコンブ漁場では、雑海藻の繁茂によって漁場が狭小化するのを防ぐため、これらを駆除している。雑海藻駆除は、コンブの遊走子が着生できるように基質面を更新するのが目的であるため、有用なコンブ類が遊走子を放出する時期に合わせて行われると効果的である（桐原ら, 2002）が、海況や現地の都合によって、必ずしも適切な時期に実施されてはいない。また、駆除の際に、雑海藻が胞子を放出していると、駆除によって更新された基質面にこれらが着生してしまい、駆除効果が低減する。コンブ漁場に生育する主要な雑海藻類の胞子放出時期を調べることで、より効果の高い駆除時期を選定することが可能である。しかし、当該海域における有用海藻類以外の生態については知見が少ない。いくつかの海藻類については、藻体表面に出現する子囊斑の形成状況からおおよその成熟時期わかっている（名畠, 1995）が、海中に胞子が実際に放出されているかを調べた事例はほとんどない。そこで、リアルタイムPCR法を用いて、北海道東部の3海域において、今回プライマーの設計ができたアナメ *Agarum clathratum*, スジメ *Costaria costata* およびアイヌワカメ *Alaria paelonga* の3種類について海水中の遊走子密度の季節変動を調べ、これらの放出時期を推定した。

材料と方法

採水と濾過 遊走子定量用の採水は北海道東部の根室管内根室市落石沖（以下、落石）、釧路管内浜中町嶮暮帰沖（以下、浜中）および十勝管内広尾町女子別沖（以下、広尾）の3海域で行った（図1）。落石では2017年6月～2017年10月にかけてSt.AとSt.Bの海面付近と水深3m、St.Cの海面付近と海底付近（水深2.5～3m）、浜中では、2015年8月～2016年11月にかけて海面付近（以下、表層）と海底付近（水深およそ3m、以下底層）、広尾では2015年8月～2017年9月にかけて海面付近からそれぞれ海水を採取した（表1）。濾過水量が30, 40, 50mLの場合は、採水後速やかにシリングを用いて直径13mm, 孔径0.8μmのセルロース混合エスチルメンブレンフィルター（ADVANTEC社製）で試水を濾過し、冷蔵して実験室に持ち帰った。一方、濾過水量が200mLの場合は、試水を全量持ち帰り、そのうちの200mLを直径47mm, 孔径0.8μmのポリカーボネートメンブレンフィルター（ADVANTEC社製）で濾過した。これらのフィルターは、分析まで-30℃で冷凍保存した。

DNA抽出 釧路水産試験場に保管されていたアナメ（2014年3月26日浜中町嶮暮帰で採集）およびアイヌワカメ（2016年2月2日釧路市桂恋で採集）の乾燥標本、また、2015年1月22日に小樽市忍路で採集したスジメから葉片

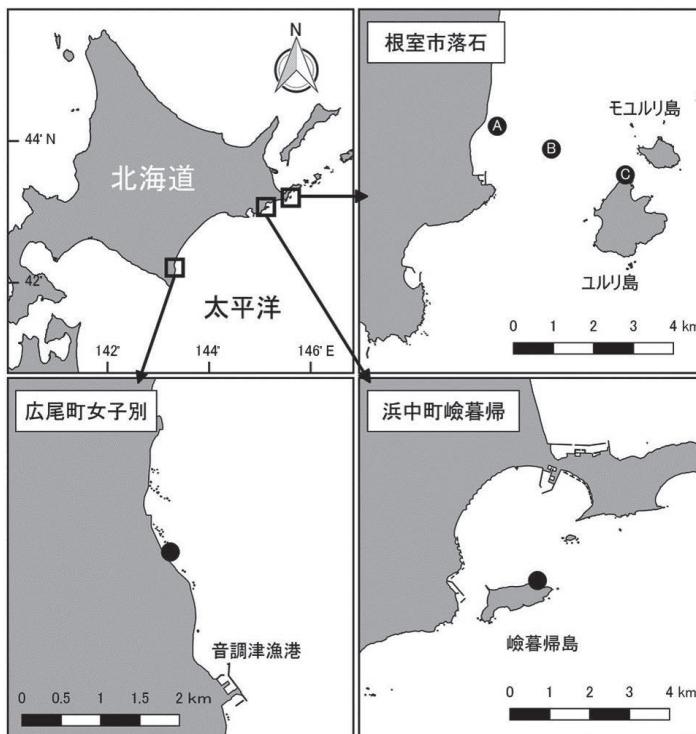


図1 調査地点

表1 採集状況

場所	採水日	水深	濾過水量(ml)
根室市落石 St.A,B,C	2017/6/14	0m, 3m	50
	2017/7/13	0m, 3m	50
	2017/8/17	0m, 3m	50
	2017/9/22	0m, 3m	50
	2017/10/16	0m, 3m	50
浜中町嶮暮帰	2015/8/6	0m, 3m	200
	2015/9/25	0m, 3m	200
	2015/11/6	0m, 3m	200
	2015/12/9	0m, 3m	200
	2016/2/1	0m, 3m	200
	2016/6/4	0m, 3m	200
	2016/7/27	0m, 3m	200
	2016/8/4	0m, 3m	200
	2016/9/13	0m, 3m	200
	2016/11/1	0m, 3m	200
	2015/8/28	0m	200
	2015/9/24	0m	200
広尾町女子別	2015/10/27	0m	200
	2016/1/7	0m	200
	2016/3/11	0m	200
	2016/4/25	0m	200
	2016/5/26	0m	200
	2016/6/23	0m	200
	2016/7/19	0m	200
	2016/9/16	0m	200
	2016/10/14	0m	200
	2016/10/31	0m	40
	2016/11/17	0m	40
	2016/12/1	0m	40
	2017/3/1	0m	40
	2017/4/26	0m	30
	2017/5/24	0m	30
	2017/6/26	0m	50
	2017/7/24	0m	40
	2017/8/22	0m	50
	2017/9/21	0m	30

アナメ用プライマー

Forward primer (agarum-ITS2-1F) 5'-TTCCGGAGTCCCCATGCT-3'
Reverse primer (agarum-ITS2-1R) 5'-ACGGTTCCAAAAGGTCTCG-3'

スジメ用プライマー

Forward primer (costa-ITS2-F) 5'-CTCCGAGTGCACCTAATCTCG-3'
Reverse primer (costa-ITS2-R) 5'-GAAAGTGGTACGGTTCCATCA-3'

アイヌワカメ用プライマー

Forward primer (ala-a2F) 5'-CGTTTGATACGGCGGTCTTGTA-3'
Reverse Primer (ala-a2R) 5'-GCGCTTTGATTGAGGGTTA-3'

図2 リアルタイムPCRに用いたプライマー

を切り出し、GM quicker2（ニッポン・ジーン社製）とアルギン酸分解酵素（ニッポン・ジーン社製）を用い、同社が作成したコンブ用のプロトコルに従ってDNAを抽出した（<http://www.nippongene.com/siyaku/product/extraction/alginate-lyase/hulk-alginate-lyase.html#example>, 2017年6月7日）。これらのDNA抽出液をリアルタイムPCRのスタンダードサンプルとして用いた。

試水を濾過したフィルターに付着した生物からのDNA抽出は、既知の方法に従った（高谷ら, 2016）。これらのDNA抽出液をテンプレートとしアナメ、スジメおよびアイヌワカメに種特異的なリアルタイムPCR用プライマーセットを用い（図2）、Thermal Cycler Dice Real Time System Lite（タカラバイオ社製）を用いてこれら3種のDNA量を定量した。なお、PCRの反応液はアイヌ

ワカメおよびスジメの場合とアナメの場合で異なっており、前者ではSYBR Premix DimerEraser（タカラバイオ社製）、後者ではGeneAce SYBR qPCR Mix α （ニッポン・ジーン社製）を用い、前述のプライマーのアニーリング温度と使用するポリメラーゼの特性を考慮して反応条件を設定した（図3）。

アナメの反応液の調整	アイヌワカメ、スジメの反応液の調整
GeneAce SYBR qPCR Mix α 12.5 μ L	TB Green Premix DimerEraser 12.5 μ L
Forward primer (10 μ M) 0.5 μ L	Forward primer (10 μ M) 0.75 μ L
Reverse primer (10 μ M) 0.5 μ L	Reverse primer (10 μ M) 0.75 μ L
滅菌蒸留水 9.5 μ L	滅菌蒸留水 9.0 μ L
Template 2.0 μ L	Template 2.0 μ L

アナメのPCRプロトコル	アイヌワカメ、スジメのPCRプロトコル
95°C 10分 ↓ 95°C 30秒 ← ↓ 59°C 1分 → 40cycle ↓ 融解曲線分析	95°C 30秒 ↓ 95°C 5秒 ← ↓ 60°C 30秒 → 40cycle ↓ 72°C 1分 ↓ 融解曲線分析

図3 反応液の組成とPCRプロトコル

遊走子量の推定 スタンダード用のDNA抽出液とこれをEASY Dilution（タカラバイオ社製）で2倍、4倍、8倍に希釈して希釈系列を調整した。これらを用いて検量線を作成し、各試料に含まれるDNA量を相対定量し、海水中に存在する遊走子の多寡を推定した。図4から図6では、PCRで增幅の見られた試料のうち、種類別、地点別に最もCt値が小さかった試料のDNA量を100とし、これに対する相対値をそれぞれの試料中に含まれる遊走子数として示した。

また、スタンダードサンプルと増幅の見られた試料については、PCR後に融解曲線分析を行い、Tm値に差違がないことを確認した。さらに、一部の試料については、キャピラリーシーケンサー ABI PRISM310ジェネティックアライザ（Applied Biosystems 社製）を用いて、PCR産物の塩基配列を遺伝子データベース（アナメ FJ042762、スジメ AB087246、アイヌワカメEF218905またはAF319004）と比較し、シークエンス結果が不明瞭

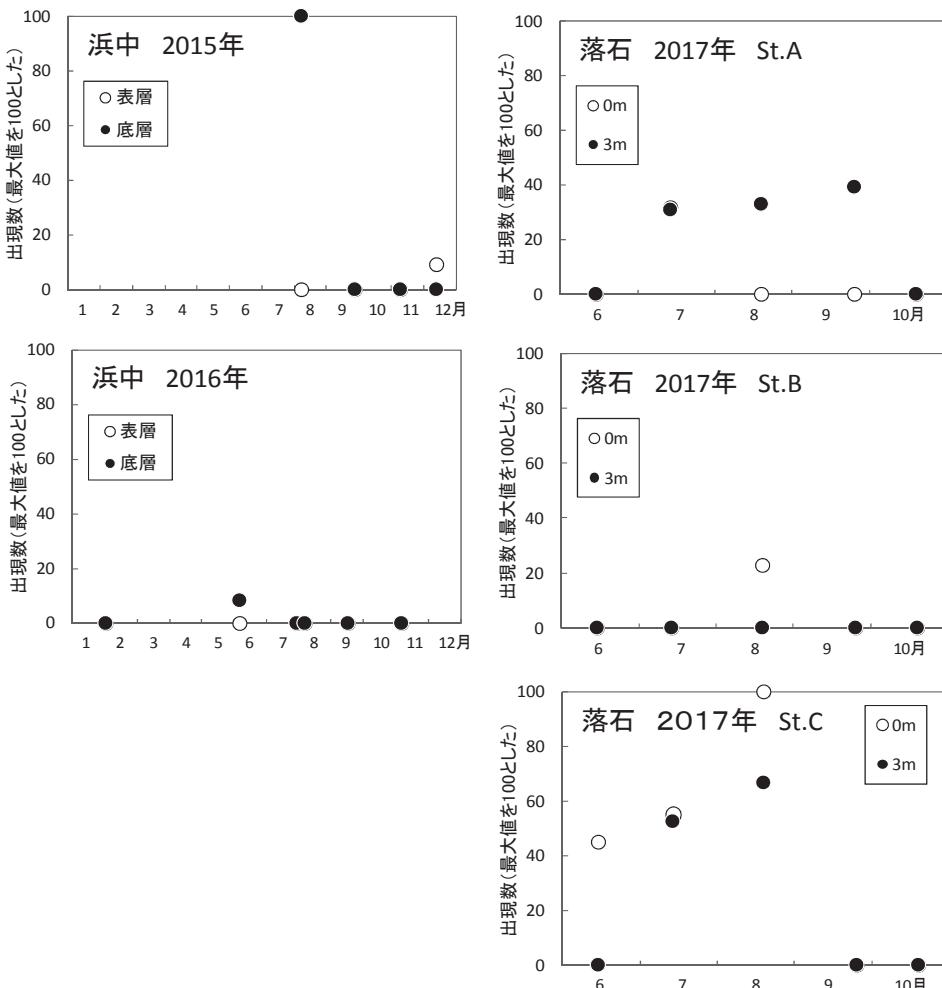


図4 浜中と落石におけるアナメの遊走子出現状況

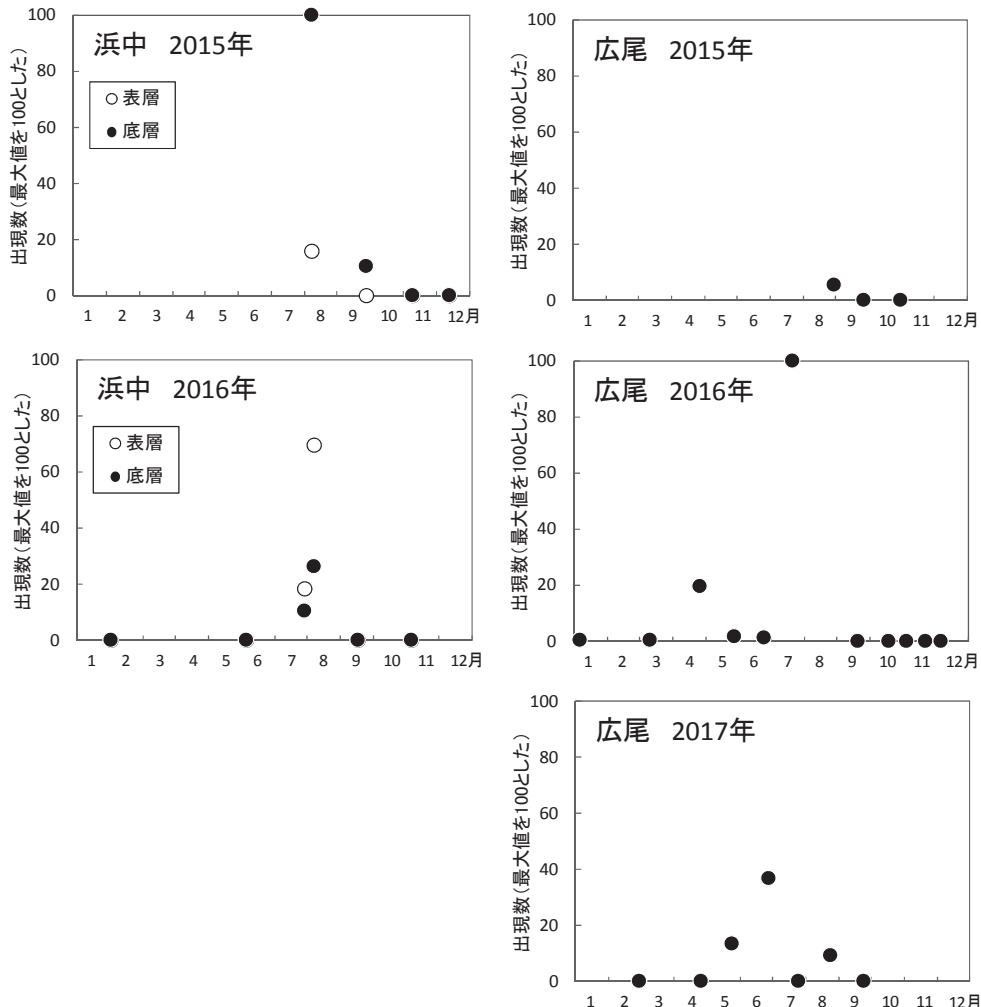


図5 浜中と広尾におけるスジメの遊走子出現状況

で判別できなかった部分を除いて両者が一致している事を確認した。

結果と考察

アナメ アナメの遊走子検出は、浜中と落石の標本について行った。浜中においては遊走子の出現が全体に少なかったが、2015年の調査では8月にピークが見られた(図4左)。2017年の落石の調査では、St.Aで7月から9月に、St.Cでは6月から8月に遊走子が出現した(図4右)。St.Aでは7月に0m層で検出された以外は3m層からの検出であった。St.Cでは6月には3m層で未検出だったが、7、8月は0m層、3m層とも検出された。最も遊走子数が多かったのは、St.Cにおける8月の0m層サンプルからであった。なお、St.Bでは8月の0m層でわずかに遊走子が検出されたのみであった。

アナメの成熟時期は北海道南部海域において夏季であるとされている(藤原ら, 1998)。今回、6月から9月に

遊走子が検出されたことから、北海道東部海域においても主に夏季に成熟し、遊走子が放出されていると考えられる。なお、2015年12月に浜中でわずかながら遊走子の出現が認められた。高橋ら(2000)は12月に、Nakahara and Yamada(1974)は、道内各地で11月～2月の冬期に成熟個体を採集して遊走子を放出させている。また、Kanda(1941)は、室蘭においてアナメの子囊斑は晩冬から早春に形成されると報告している。これらのことから、本種の成熟盛期は夏季であるが、夏季以外にも成熟している個体が存在するものと推察される。本種については、標本採集と遊走子検出を組み合わせてさらに調査を進めていく必要がある。

スジメ スジメの遊走子検出は、浜中と広尾の標本について行った。浜中においては調査を行った2年間とも7月下旬から8月上旬にピークが見られた(図5左)。広尾においては、4月から遊走子の出現が見られ8月まで継続し、2016年と2017年のいずれも6月から7月末にピークが見られた(図5右)。

佐々木（1978）は羅臼のスジメについて、子囊斑形成状況と海底に設置したブロックへの胞子体着生状況から、遊走子放出時期が7月から9月であることを明らかにしている。今回の結果から、浜中では羅臼と同様の時期に遊走子を放出していると考えられた。また、広尾ではこれらより少し早い4月下旬から遊走子の放出が始まっていた。スジメの成熟は水温の影響を受け、暖海域である利尻島においては、羅臼よりも約1か月早く成熟する（名畠ら、1984）。広尾でも水温の影響で羅臼や浜中よりも少し早くから成熟する個体があるものと推察される。スジメの遊走子放出時期は、その場に生育する藻体の子囊斑の形成状況などと合わせて対象海域ごとに確認していく必要がある。

アイヌワカメ アイヌワカメの遊走子検出は、浜中の標本について行った。遊走子は、2015年は8月から12月まで見られ、出現のピークは9月下旬であった（図6上）。2016年は6月から8月に比較的多くの遊走子が検出され、6月上旬に出現のピークが見られたが、前年ピークとなった9月にはほとんど出現しなかった（図6下）。

名畠（1993）は胞子葉と子囊斑の形成状況から本種の遊走子放出時期は5月から10月と推定している。今回の結果でも6月から11月の間に多くの遊走子が検出されたことから、本種は春から秋までの比較的長期間にわたつ

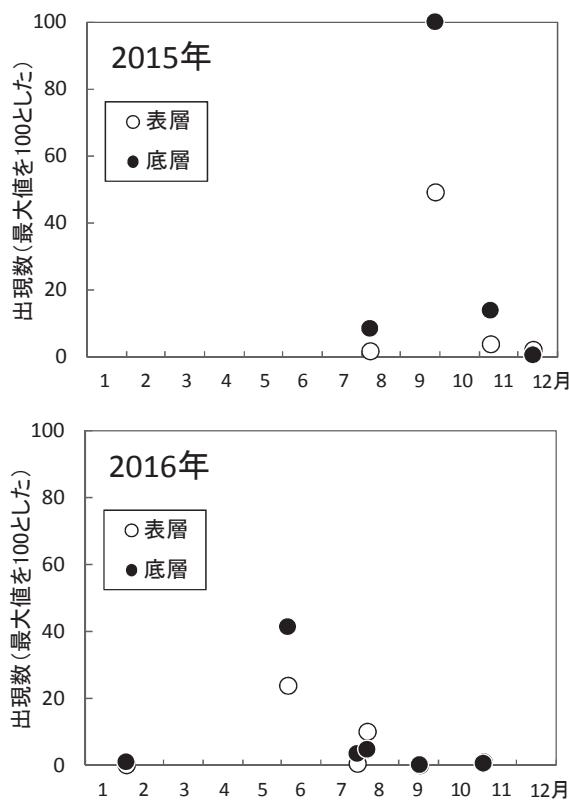


図6 浜中におけるアイヌワカメの遊走子出現状況

て成熟していることが確認された。ただし、遊走子の放出ピークは年、場所などで異なる可能性が考えられ、今後も調査を継続していく必要がある。

まとめ

以上の通り、北海道東部海域においてコンブ目3種の遊走子放出時期を明らかにした。今後はこれらの遊走子放出盛期を避ける時期に雑海藻駆除を行うことで、駆除効果が高まると考えられる。リアルタイムPCR法で遊走子のDNAを検出する手法は、アナメのように生育場所の水深が深く、標本調査が難しい種類であっても、海水中の遊走子量をDNA量から直接推定できるメリットがある。今後、リアルタイムPCRの技術をさらに向上させ、今回報告した3種以外の雑海藻の胞子放出期を明らかにするとともに、遊走子の絶対数を定量することで、より効果的な雑海藻駆除の時期を提案できると考える。

謝 辞

現場での採水、濾過にご協力をいただいた、根室地区、釧路地区、十勝地区の水産技術普及指導所ならびに落石漁業協同組合、浜中漁業協同組合、広尾漁業協同組合の関係諸氏に深謝します。また、本稿の作成にあたり、丁寧な査読と貴重なご意見をいただいた匿名の査読者の方々に謝意を表します。

引用文献

- 藤原孝行、花田利香子、高橋和寛、鳥居茂樹、山本弘敏、安井 肇、北海道尾札部海域における褐藻アナメの生育、平成10年度日本水産学会秋季大会 講演要旨集 1998；457：71.
- Kanda T. On the Gametophytes of Some Japanese Species of Laminariales IV. Scientific papers of the Institute of Algological Research, Faculty of Science, Hokkaido Imperial University 1941；2(2) : 293-308.
- 桐原慎二、藤川義一、吉田雅範、能登谷正浩、大間地先の海藻除去後の植相、2002年度日本水産学会大会講演要旨集 2002 : 234.
- 名畠進一、コンブ漁場の雑海藻 一、アイヌワカメ、釧路水試だより 1993；69 : 11-13.
- 名畠進一、北海道東部沿岸のコンブ類、日水誌 1995；61(1) : 101-102.
- 名畠進一、松田 洋、利尻島におけるスジメの成長と成熟、北水試月報 1984；41 : 183-191.

Nakahara H, Yamada I. Crossong experiments between four local forms of *Agarum cibrosum* Bory (Phaeophyta) from Hokkaido, northen Japan. Jorn. Fac. Sci., Hokkaido Univ. Ser. V(Botany) 1974 ; 10(1) : 49-54.

佐々木茂. 羅臼産スジメの生活様式. 北水試月報 1978 ; 35 : 1-10.

高橋和寛, 西田芳則, 鳥居茂樹, 宮本建樹, 金子 孝, 秋野秀樹, 草刈宗晴. 第Ⅰ章 津軽海峡北海道沿岸

のコンブ藻場 (北海道) 4. 室内実験 (マコンブ, ガゴメ, アナメの配偶体の成熟と幼孢子体の成長に及ぼす光量の影響). 水産業関係特定研究開発促進事業藻場の変動要因の解明に関する研究 総括報告書 平成7~11年度. 2000 : 北海道・30-北海道・34.

高谷義幸, 秋野秀樹, 四ツ倉典滋. リアルタイムPCRを用いたホソメコンブ遊走子の定量法 (技術報告). 北水試研報 2016 ; 90 : 13-16.

北海道スケトウダラ研究グループ会議50周年記念論文（1）

Special papers for the 50th anniversary of the “Hokkaido Suketoudara Kenkyu Group”(Hokkaido Walleye Pollock Research Group) Part 1

北海道水産試験場における計量魚群探知機を用いたスケトウダラ音響資源調査の発展について（総説） —スケトウダラ研究グループ会議発足50周年に向けて—

志田 修*

北海道立総合研究機構水産研究本部

Acoustic surveys of walleye pollock by Hokkaido Research Organization using the quantitative echo sounder (Review)

OSAMU SHIDA*

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

Walleye pollock is one of the most important resources of commercial fisheries in Hokkaido. Annual landings of this species are controlled by the Total Allowable Catch system in Japan. Because the annual landings have decreased since the late 1980's, more intensive studies for stock assessment, forecast of fishing conditions and developing a proposal for sustainable resource management are required for the stake-holders. In this review, I describe the history and results of acoustic surveys using a quantitative echo sounder for walleye pollock conducted by Hokkaido Research Organization to respond to such needs.

キーワード：音響資源調査、計量魚群探知機、スケトウダラ、スケトウダラ研究グループ会議、北海道周辺海域

スケトウダラ *Gadus chalcogrammus* は、北太平洋に広く分布する中底層性の回遊魚であり (Bakkala *et al.*, 1986), 2016年の全世界における漁獲量は348万トンと世界第一位を占めている (FAO, 2018)。本種は、北海道において最も重要な水産資源の一つであり、本道周辺に分布する4つの資源評価群（日本海北部系群、太平洋系群、オホーツク海南部、根室海峡；濱津ほか, 2018）を対象に資源の評価と管理に関する多くの研究が行われてきた。北海道におけるスケトウダラ漁獲量は1985年度（4月～翌年3月）に51万トンを記録したが、1980年代後半から1990年代前半にかけて太平洋を除く3つの海域で漁獲量が減少し、2000年度には25万トンと半減した（図1）。2013年度以降は太平洋海域の漁獲量も減少し、さらに2015年度以降はTAC (Total Allowable Catch:漁獲可能量) がABC (Allowable Biological Catch:生物学的許容漁獲量) を上回らないことが原則化されたことに伴い、TACがABCの水準まで引き下げられたこと等から12万トンま

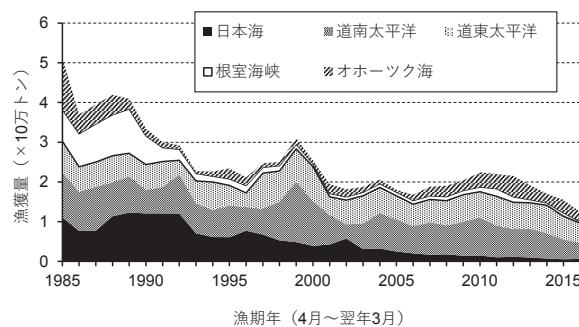


図1 北海道におけるスケトウダラ漁獲量の推移（漁期年集計：4月～翌年3月）

で大きく減少した。このような背景から、研究機関に対して調査研究のさらなる充実と精度の高い資源評価に基づいた適切な資源管理対策の提案が一層求められている。

北海道スケトウダラ研究グループ会議は北海道立水産試験場（2010年4月から地方独立行政法人北海道立総合

研究機構水産試験場。以降、両者を道水試と略す）全体で共通した研究テーマに取り組むことを目的として1968年に発足し、以来、スケトウダラやタラ科魚類の資源評価や管理、これらの基礎的知見となる資源生態学的研究、関連する調査・分析技術の開発などの課題について活発な議論を行ってきた。1992年にはグループ25周年記念シンポジウムが開催され、翌1993年に「北海道周辺海域におけるスケトウダラ並びにタラ科魚類の資源・生態研究の現状と展望－北海道スケトウダラ研究グループ25周年記念論文集－」（北海道立水産試験場、1993）が刊行された。グループ会議発足25周年以降、スケトウダラ研究グループ会議が最も力を注いできた研究課題が計量魚群探知機（以降、計量魚探機と略す）を用いた音響資源調査技術のスケトウダラ資源研究への導入・展開であった。今年、2018年にグループ会議発足50周年を迎えるにあたり、本号と次号にわたって関連研究の論文を掲載することとした。本稿では、道水試が進めてきたスケトウダラを対象とした音響資源調査と、その成果の概要をレビューする。巻末には25周年以後に道水試の職員を著者として発表されたスケトウダラに関する研究論文のリストを掲載した。

音響資源調査 我が国は1996年に国連海洋法条約に批准し、これに伴って「海洋生物資源の保存及び管理に関する法律（TAC法）」が施行された。1997年にはスケトウダラを含む6魚種、1998年からは7魚種に対してTACによる資源管理が開始された。資源の持続的利用を図るために的確な資源評価に基づいて算定されるABCによる資源管理が有効な手法の一つであり、TACはABCをもとに社会・経済的要因を加味して設定される。

スケトウダラの日本海北部系群と太平洋系群では、商業漁獲データを用いたVirtual Population Analysis（VPA）による資源量推定値がABC算定に用いられている。しかし、漁獲制限下で漁業情報から推定される資源量には、ある種の偏りが含まれる可能性が指摘されており、漁業と独立して資源量を推定することの意義が再認識されるようになった（原、2000）。魚群量または魚群の密度を推定する方法には様々あるが、その中でも計量魚探機を用いた音響資源調査は機器の発達に伴って特に注目される調査手法である。計量魚探機は短時間に広範囲な調査が可能であること、海底付近～船底直下までの鉛直方向にも広い範囲を観察可能であることから、調査対象の魚種組成が単調で、対象海域の中層に均一に分布している場合に有効であるとされている（宮野鼻、2000）。北海道周辺海域に分布するスケトウダラは、これらの条件を満たしており、計量魚探機を用いた音響資源調査は本種にうってつけの調査手法である。魚群探知機は超音波を

水中にパルス波（例えば1 ms：千分の1秒、パルス長は約1.5m）として発射し、魚群から戻る音の強さを電気信号に変換する計測装置である。音の強さは水中で波面拡散や吸収損失により減衰するので、計量魚探機では音の強さを量化するために発射してから戻るまでの時間に応じて受信した音の強さを補正している。この補正を加えた後の受波音響エネルギーは魚群密度に比例することから、魚群から戻ってきた音の強さを積算することで魚群の音響散乱強度が得られる。魚群量と音響散乱強度との比例定数を求めることにより、音響散乱強度から魚群量を計算することができる（三宅、2012）。魚群を構成する魚種の判別には、トロール網などのサイズ選択性の鈍い漁具によって漁獲試験を行う方法が一般的である。また、魚群の形状や分布深度、分布水温、さらには周波数特性の違いなども利用されている（例えば、志田、2002；志田2011；板谷ら、2014）。次節以降では、道水試がこれまで実施してきた音響資源調査の概要について海域ごとに記述する。

日本海における音響資源調査

1. 成魚を対象とした調査（図2） 日本海における道水試で最初の音響資源調査は、1986年の10月下旬に石狩湾および積丹半島北側の海域において中央水産試験場（以降、中央水試と略す）所属試験調査船金星丸（2代目68トン）の魚群探知機により魚群観察を行い、釣獲調査によって魚種を確認するというものであった。この調査は、1988年から調査船を中央水試所属のおやしお丸（178トン）に変更して1989年まで実施された。計量魚探機を使用した調査は、その翌年の1990年から開始された。使用した計量魚探機は当時最新鋭であった古野電機のFQ-70（50kHz）であったが、この調査も魚群の観察が中心の調査であり、計量魚探機の特徴を活かした魚群の分布量を推定する調査ではなかった。1993年からはFQ-70の代わりにカラー魚群探知機を使用した調査となり、1996年からは後述する道西日本海における音響資源調査の一部として1998年まで継続された。道水試で計量魚探機を使用した本格的な音響資源調査が開始されたのは、1995年に新造された稚内水産試験場（以降、稚内水試と略す）所属2代目北洋丸（237トン）に搭載されたEK500と専用の解析アプリケーションであるBI500（いずれもSimrad社）の導入からであった。国内でのEK500の導入は、水産研究・教育機構西海区水産研究所の陽光丸に次いで2例目であった。

計量魚探機を使用した音響資源調査は機器の使用方法、音響理論、調査設計（航走ラインの配置、調査時間など）、音響データの解析とトロール調査結果との組み合わせ方

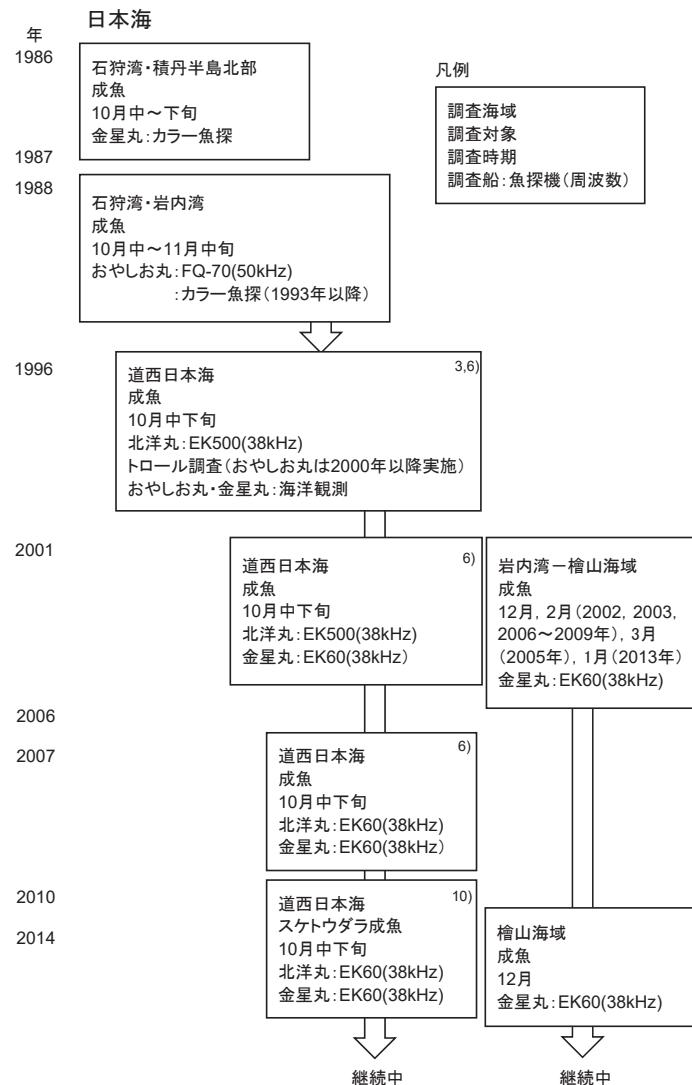


図2 道水試における音響資源調査年表（日本海における成魚調査）
図中の右方に記載している数字は末尾の引用文献の番号を表す

法、およびそれらのデータを用いた現存量推定方法など、道水試にとってまだハードルの高いものであった。そこで、1996年から3年間、稚内水試、中央水試および函館水産試験場（以降、函館水試と略す）と北海道大学の飯田浩二教授らのグループとの共同研究「計量魚群探知機を用いた道西日本海におけるスケトウダラ産卵群の来遊資源量予測基礎調査」が行われ、1999年からさらに3年間「TAC制度下における直接法による資源量推定技術高度化試験」が実施された。この共同研究の中で水産音響学を専門とする大学の研究者から音響理論の基礎を学ぶとともに、各種の技術的指導を受けることができ、道水試で実施する音響資源調査の基本デザインや解析手順が確立された。共同研究の成果として、まず、安部ら（1999）によるスケトウダラの日周鉛直移動の観察結果が報告された。すなわち、昼間は海底付近に分布するスケトウダラ

ラ魚群が夜間になると海底から離れて中層域に浮上し、濃密な魚群として計量魚探機とらえられるようになると、そのため、トランセクトにおける魚群分布層の平均面積後方散乱係数 S_A (m^2/nmi^2) を昼夜で比較すると、夜間が昼間の1.4（積丹沖）ないし3倍（武蔵堆海域）高くなることを明らかにした。この S_A の昼夜差は、昼間はスケトウダラ魚群が魚探機の探知範囲外となる海底付近（海底デッドゾーン）に分布するためであると考えられたことから（安部ら、1999），この結果に基づいて、日本海のスケトウダラ親魚を対象とした音響データの収集は、魚群が海底付近のデッドゾーンから浮上する夜間にを行うことが1999年以降、標準的な調査手法として採用されることとなった。さらに、日本海の産卵期前における親魚の分布量（以降、親魚現存量と記述する）推定には平行トランセクトが適しており、1998年の調査において

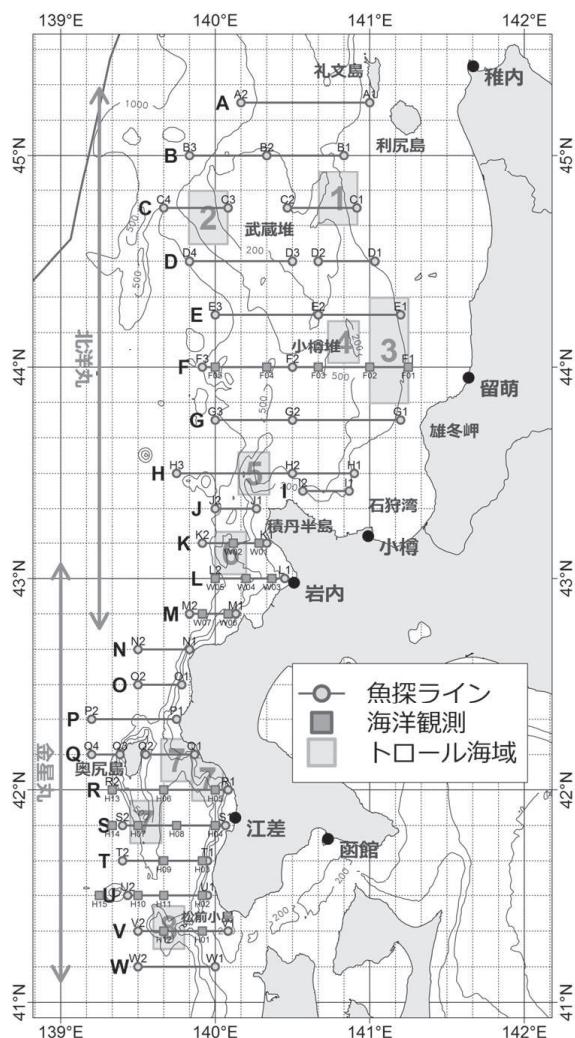


図3 日本海におけるスケトウダラ成魚を対象とした音響資源調査（10月）海域図

10マイル間隔の設定で計算した場合の誤差は28%程度であることが示された（三宅ら, 2001）。また、海底深度1,000m以深の沖合海域における分布量は、調査海域全体の7%に過ぎないことから（三宅ら, 2001），調査の効率化を図るために、1998年以降は沖合域の調査範囲が縮小され、日本海スケトウダラ資源調査の骨格が完成された。音響資源調査の最も重要な目的である親魚現存量推定に関しては、調査で収集された音響データとトロール調査で得られたスケトウダラ成魚の尾叉長組成および体重を利用して推定する手法が確立され（三宅, 2012）、1998年以降（海況が悪く十分なデータ収集ができなかつた2002年と2012年を除く）の親魚現存量推定値が得られている。

この音響資源調査は、共同研究終了後も毎年10月に日本海の産卵親魚量をモニタリングするための調査として継続され、2001年以降は函館水試所属試験調査船金星丸

（3代目151トン）と北洋丸の2隻で音響データの収集、トロール調査は2000年におやしお丸、2001年に金星丸を加えた3隻で実施する体制（おやしお丸は2009年に用途廃止となり、以降は2隻体制）で実施されている（図3）。

調査データが蓄積されてきた2000年代後半には、音響資源調査によって推定された親魚現存量とVPAによる資源量計算値の差が平均1.3倍程度であり、年変化の傾向に強い正の相関がみられることが示されたことから（後年、この結果は三宅（2012）にとりまとめられた）、VPAにおいて計算の仕組み上、不確実性が高くなる近年の推定値を親魚現存量推定値により補正することが検討された。その結果、親魚現存量はスケトウダラ日本海北部系群のVPAチューニング指数として2005年度から資源評価に用いられることになり（例えば美坂ら：<http://www.fishexp.hro.or.jp/exp/central/kanri/SigenHyoka/Kokai/>（2018）、以降、URL省略）、2008年度からはTAC設定の根拠となるABCの算定にも活用されるようになった（本田ら, 2009）。資源評価への利用以外にも、日本海における各種漁業の営漁支援を目的として、調査結果が公表されている（稚内水試ほか：<http://www.hro.or.jp/list/fisheries/research/wakkanai/section/zoushoku/att/sukesosokuhou201810.pdf>（2018年11月4日）、函館水試：http://www.hro.or.jp/list/fisheries/research/hakodate/section/zoushoku/att/201810japansea_sukeso.pdf（2018年11月4日））。また、調査を通じて分布などの生態学的知見も多く得られ、産卵回遊期のスケトウダラ分布に好適な水温は0.5~0.8°Cで、分布の中心はほぼ0.7°Cであること、その分布深度は水温の変化に応じて年変動することが明らかにされた（三宅, 2012）。さらに、これらの研究結果から、海洋環境の変化により1990年代に入って海底深度の浅い北部の産卵場が衰退し、500mより深い檜山などの南部海域の産卵場が残ったとの仮説が提唱された（三宅・田中, 2006；三宅, 2012）。

日本海におけるスケトウダラの産卵場であり、はえなわ漁業の主要な漁場である檜山海域（夏目, 1988）では、2001年から毎年12月（2002, 2003, 2006~2009年は2月、2005年は3月、2013年は1月にも実施）に金星丸のEK60を用いた音響資源調査が函館水試により実施され（図2）、その結果（魚群の水平および鉛直分布状況、サイズ組成および漁場内の水温鉛直分布）は漁海況情報として公表されている（函館水試：http://www.hro.or.jp/list/fisheries/research/hakodate/section/zoushoku/att/201712japansea_sukeso.pdf（2017））（2018年11月4日）。

2. 稚魚・未成魚を対象とした調査 日本海海域における稚魚調査は、初期生活史の解明と年級豊度の早期把握を目的として、2004年から中央水試および稚内水試に

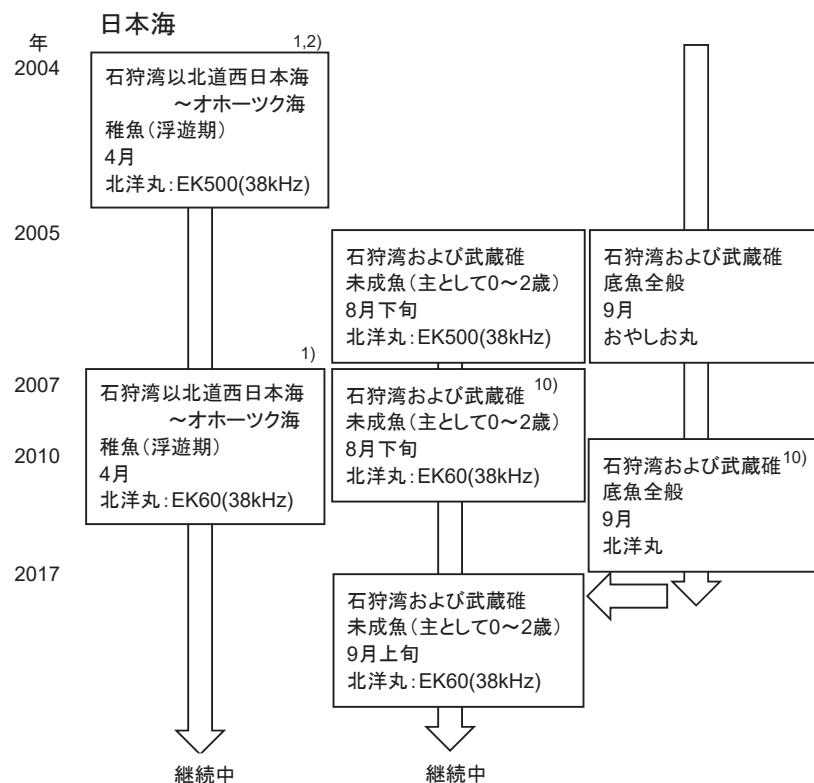


図4 道水試における音響資源調査年表（日本海における氏稚魚および未成魚調査
図中の右方に記載している数字は末尾の引用文献の番号を表す

より、石狩湾以北の日本海およびオホーツク海域において毎年4月に実施されている（図4, 5）。調査には北洋丸のEK500（2007年からSimradEK60（Simrad社、現Kongsberg Maritime社））と2m×2mのFramed Midwater Trawl（以降、FMTと略す）が使用されている。また、音響データを解析する際にスケトウダラ仔稚魚以外の反応、特に仔稚魚の現存量推定に影響を与えると推測される動物プランクトンのオキアミを解析から除外するため、スケトウダラ仔稚魚とオキアミの低周波（38kHz）と高周波（120kHz）に対する音響散乱の強さの差を利用する手法（SV difference method, Miyashita *et al.*, 2004）が用いられている。この調査により、仔稚魚とオキアミの日周鉛直移動パターンが明らかとなり、仔稚魚の現存量推定には昼間の調査が適していることが示された（板谷ら, 2014）。また、FMTによる採集結果から、仔稚魚の分布域が石狩湾以北の日本海とオホーツク海の沿岸域であることが明らかとなり、主要な産卵場である岩内湾、檜山海域で生み出された卵や仔稚魚の大部分は対馬暖流によってこれらの分布域まで輸送されたと考えられた（板谷ら, 2009）。この調査から推定された仔稚魚の現存量とVPAで推定された同一年級の2歳資源尾数（加入量）は非常に良く対応しており、先に述べた親魚現存量推定値とともに資源評価におけるVPAのチューニングに用いられている（美

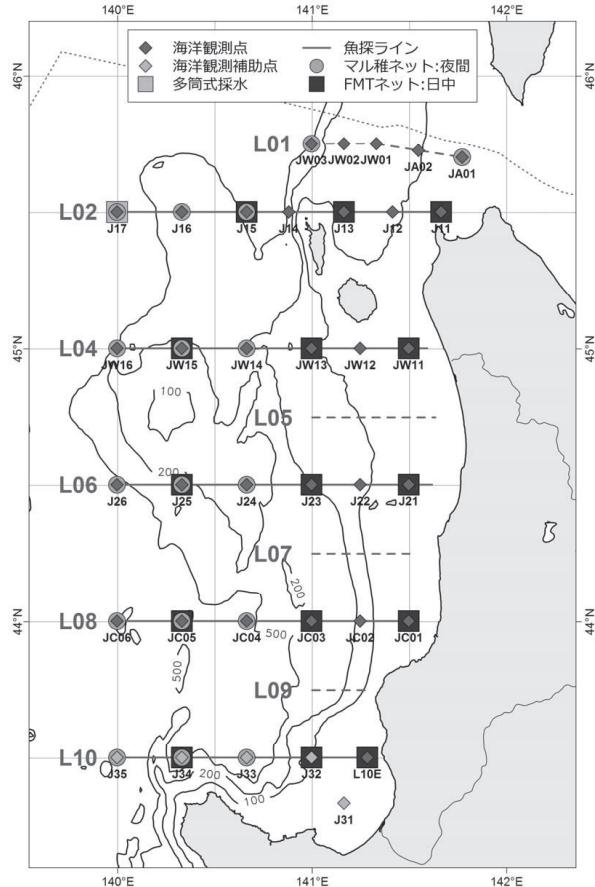


図5 日本海におけるスケトウダラ仔稚魚を対象とした音響資源調査（4月）海域図

坂ら；山下ら，2018)。

仔稚魚期の後、底層生活に移行したスケトウダラ未成魚（0～2歳）の現存量推定を目的とした音響資源調査が、中央水試および稚内水試により2005年から8月下旬を調査時期として開始された（図4）。2017年からは、調査の効率化を図るために、9月に実施していたハタハタ、ニシンなどの底魚も主対象としたトロール調査と統合し、調査期間を拡大して継続されている。

仔稚魚および1歳魚の現存量推定値とVPAで推定された加入量とは、年変動のパターンが相似的であることから、この値も資源評価におけるVPAのチューニングに用

いられている（美坂ら；山下ら，2018）。

太平洋における音響資源調査

1. 成魚を対象とした調査 太平洋系群の主産卵場である日高湾および噴火湾（Wakabayashi *et al.*, 1990）が位置する北海道南部太平洋海域（以降、道南海域と略す）では、産卵のため来遊するスケトウダラを対象とした刺し網漁業が10月から開始される。また、沖合底曳網漁業や定置網漁業も来遊したスケトウダラを漁獲する。この海域における1985～2016年度のスケトウダラ漁獲量の平均は8万トン、最も漁獲が多かった1999年度には15万ト

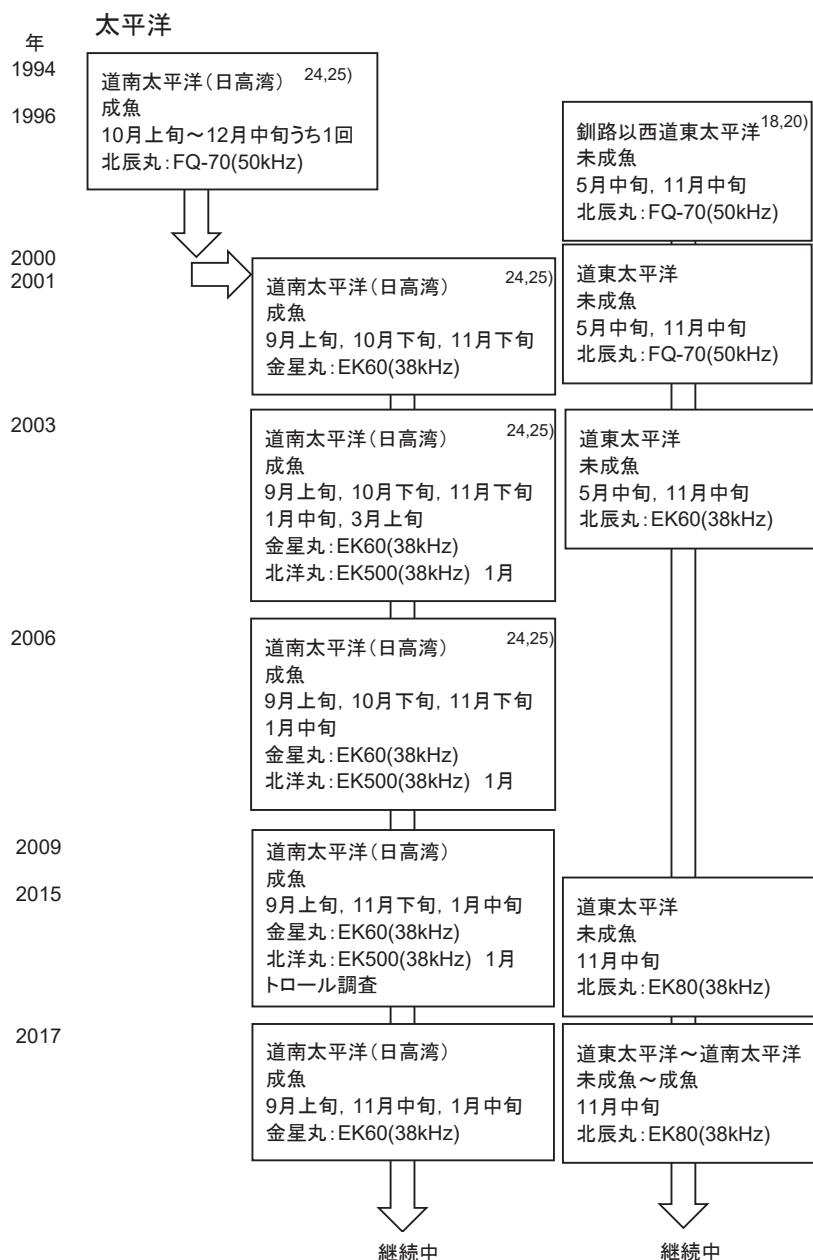


図6 道水試における音響資源調査年表（太平洋における成魚調査）
図中の右方に記載している数字は末尾の引用文献の番号を表す

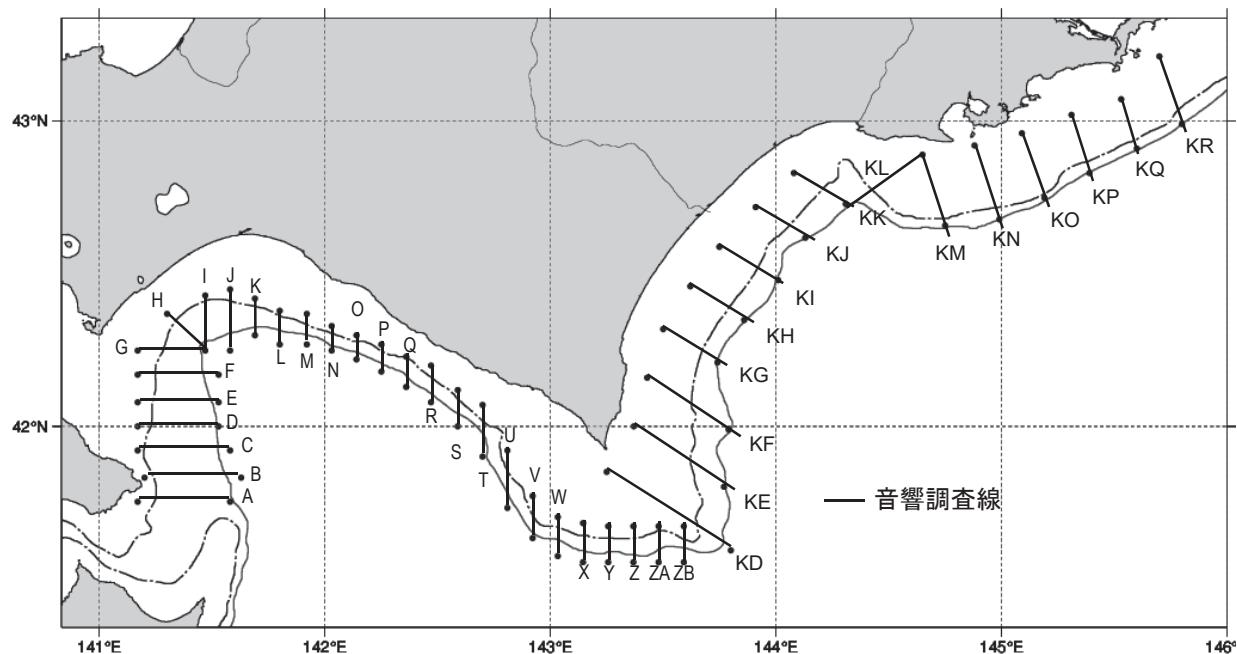


図7 太平洋におけるスケトウダラ成魚を対象とした音響資源調査（11月）海域図

ンを超える漁獲を記録した（図1）。音響資源調査は、これらの漁業の営漁支援を目的とする漁況予測に加えて、日本海と同様に太平洋系群の資源評価における産卵親魚の現存量推定を目的として函館水試室蘭支場によって開始され、開始当初の1994年から2000年までは釧路水産試験場（以降、釧路水試と略す）所属試験調査船北辰丸（2代目216t）およびおやしお丸に搭載されたFQ-70が使用された（図6）。1998年からは現在と同様、漁期前の9月下旬または漁期初めの10月上旬と、漁期中の12月中旬の年2回、スケトウダラ刺し網漁場となる日高湾において、等深線に垂直に、等間隔、平行の航走ラインを設定してデータの収集が行われた。さらに、2001年からは新造された金星丸（3代目）のEK60を用いて調査が継続され、2000年まで刺し網による漁獲調査に基づいて実施していた漁期前の漁況予測を音響資源調査による方法に変更して、今日まで継続している（函館水試：<http://www.hro.or.jp/list/fisheries/research/hakodate/section/zoushoku/att/2018News1.pdf> (2018)) (2018年11月4日)。なお、調査は2006年から栽培水産試験場（以降、栽培水試と略す）、2014年から函館水試、2015年から函館水試および栽培水試により実施されている。スケトウダラ成魚が北海道東部太平洋海域（以降、道東海域と略す）などの索餌場から低温底層水に沿って日高湾に来遊して、大陸棚上の主として親潮水または親潮表層水中で産卵することを計量魚探機による魚群分布の直接観察により確認できた（志田、2011）。また、日高湾への来遊時期が10年スケールの周期で変動しており、索餌期の環境（餌の量や

水温など）や成魚のサイズ（年齢構成）がこの変動に影響を与えていることが示唆された（Shida *et al.*, 2014）。このため、漁期前の日高湾におけるスケトウダラ成魚の分布量は、そのシーズンを通じた漁獲量との相関が弱く、9月の漁期前調査に推定された分布量または魚群反応の強さは、その後の10~11月の漁獲量、漁期中の11月の調査結果は、その後の12~1月の漁獲量と正の相関があることが示された（志田、2011）。また、9月と11月の魚群反応の強さは、道南海域へのスケトウダラ来遊量の指標として資源評価に用いられている（武藤・城：<http://www.fishexp.hro.or.jp/exp/central/kanri/SigenHyoka/Kokai/> (2018年11月4日)）。一方、産卵のため日高湾に来遊した成魚は、産卵終了後、湾内にとどまらず、湾外へ移動すると考えられるため（志田、2011），調査海域を日高湾に限定した音響資源調査では太平洋系群全体の親魚量を把握することは難しいと考えられた。そこで、成魚の分布域を広くカバーするため、2015年より金星丸と北辰丸（3代目255トン）の2隻の調査船により、日高湾から道東海域までを調査エリアとする漁期中（11月下旬）調査を開始し、データを蓄積している。（図7）。

2. 稚魚・未成魚を対象とした調査

太平洋海域における調査は、初期生活史と並んでスケトウダラの加入量変動機構の解明に重要と考えられている底層生活移行後の生活史（Brodeur *et al.*, 1996）の解明と年級豊度の早期把握を目的として釧路水試により開始された（図8）。この調査は、稚魚および未成魚の重要な分布域と考えられている道東海域（Honda *et al.*, 2004；志田・西村、

2002; 濱津ら, 2018) を調査海域とし、北辰丸(2代目)に搭載したFQ-70(50kHz)を使用して実施された。1990年代後半に行われた調査結果から、スケトウダラ未成魚の日周鉛直移動の季節変化(Shida, 2001), 分布深度の年齢/サイズ依存および分布と海洋環境の関係(志田, 2002)が明らかにされ、その後、これらの知見に基づいて0~2歳魚の年級豊度把握を目的とした音響資源調査が5月と11月の年2回実施された。5月の調査結果は2歳の資源尾数(加入量)の指標値として用いられていたが、音響資源調査によって推定された1歳および2歳の現存量とVPAにより推定された加入量の関係が明瞭ではなく、目標としていた年級豊度の早期把握が困難と判断されたことから、2014年に調査を終了した。11月調査について

は、トロール調査で得られる0歳魚のCPUEが加入量指標値の一つとして資源評価に用いられている(濱津ら, 2018)。

1998年2月には韓国漁船による道東海域の大陸棚上での漁獲の影響を調べるために、北辰丸と北洋丸の2隻によるスケトウダラの分布状況に関する調査が釧路水試と稚内水試により実施された(図8)。その調査結果に基づいて、冬季のスケトウダラ未成魚が水深150~400m、水温2~4°Cの大陸棚外縁部および大陸斜面上において、等深線に沿って帶状に連続した魚群を形成していることが報告された(志田ら, 2008)。スケトウダラ未成魚の秋季における主分布域であった大陸棚上は、冬季には寒冷(水温2°C未満)な沿岸親潮水に広く覆われており、この

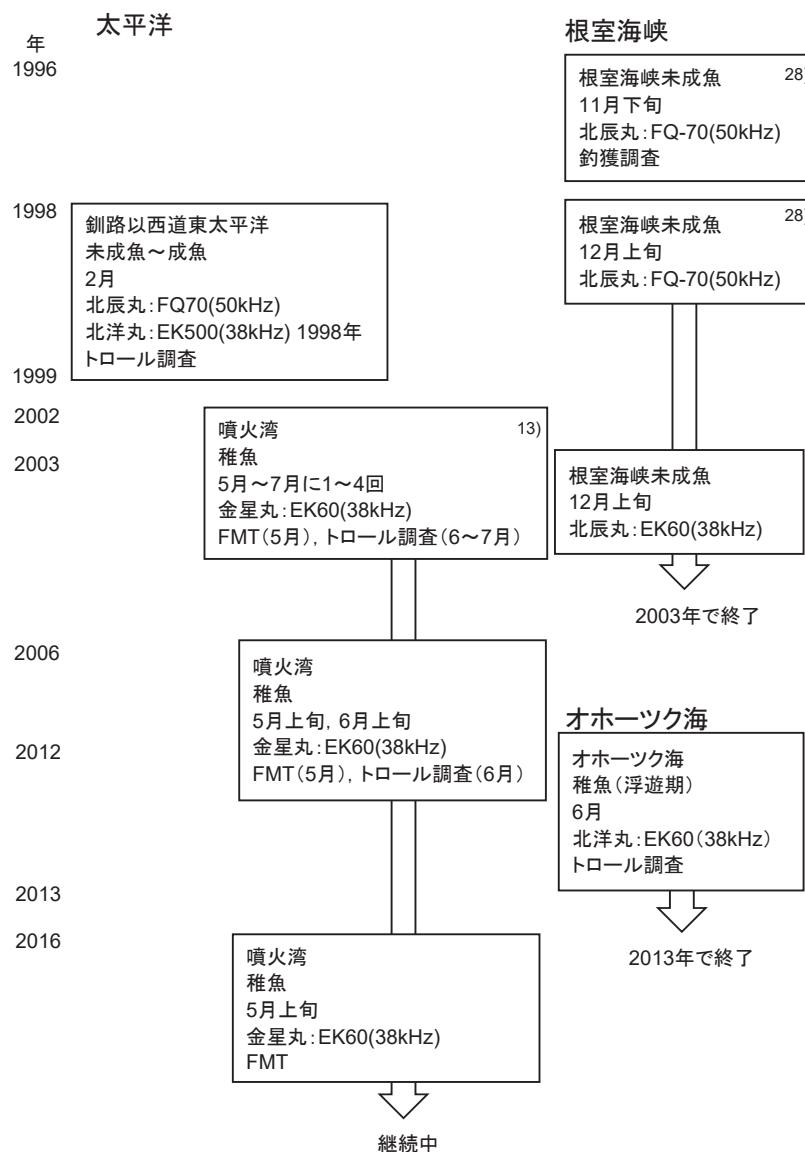


図8 道水試における音響資源調査年表(太平洋における稚魚・未成魚調査, 根室海峡およびオホーツク海の調査)

図中の右方に記載している数字は末尾の引用文献の番号を表す

水温低下などの環境変化が未成魚の分布域のシフトを引き起こす要因と考えられた（志田ら, 2008）。

太平洋海域では、底層生活移行期以後の魚を対象とした調査が先に開始されたが、2002年から稚魚を対象とした音響資源調査が函館水試室蘭支場により開始された。調査は、仔稚魚の主たる分布域である噴火湾周辺海域において金星丸を使用して実施され（図8）、2006年からは5月上旬と6月上旬の年2回、2015年までデータの収集が行われた。この調査結果から、仔稚魚期の生態について新たな知見が得られ、その一部は研究論文としてとりまとめられた（例えばKawauchi *et al.*, 2011, 2014）。

根室海峡における音響資源調査

根室海峡では釧路水試により1989年および1990年に北辰丸のFQ-70（50kHz）を使用したスケトウダラ分布調査が最初に試みられた。この海域における本格的な音響資源調査は1996年に開始され、1997年には知床半島の斜里町側まで調査海域を拡大して実施された（図8, 9）。調査結果から、産卵前（11月下旬）のスケトウダラ成魚は根室海峡に分布し、知床半島の斜里町側には魚群が観察されないこと、魚群は水深180~400m、水温2~5°Cの混合水中に分布し、その分布上限水温は宗谷暖流水下の水温4~5°Cの等温線と一致していることがわかった（志田, 2001）。根室海峡における調査は、産卵親魚の現存量把握を目的に2003年まで続けられたが、調査可能海域が分布域の半分に限定されていること、スケトウダラの移動が予想以上に大きく、調査時間によって分布および推定される現存量が大きく変わることが明らかとなったため、この調査によって根室海峡へ来遊する産卵親魚全体の量またはそれと関連する指標値を得ることは困難と判断し（石田, 未発表）、調査を終了することになった。

オホーツク海における音響資源調査

オホーツク海では、4月に日本海と連続して計量魚探機とFMTによる仔稚魚調査が稚内水試により実施されている（図8）。この調査は仔稚魚の日本海からの移送（夏目・佐々木, 1995）状況のモニタリングと漁獲対象となる魚群の分布把握を目的としており、2013年以降、沖底漁業向けに情報提供を行っている（稚内水試：http://www.hro.or.jp/list/fisheries/research/wakkai/section/zoushoku/att/okh_gyotantyousa201704.pdf (2017) (2018年11月4日)）。また、2012年と2013年には6月に計量魚探機による音響資源調査が実施され、オホーツク海におけるスケトウダラの漁場形成に関する研究が進められた。

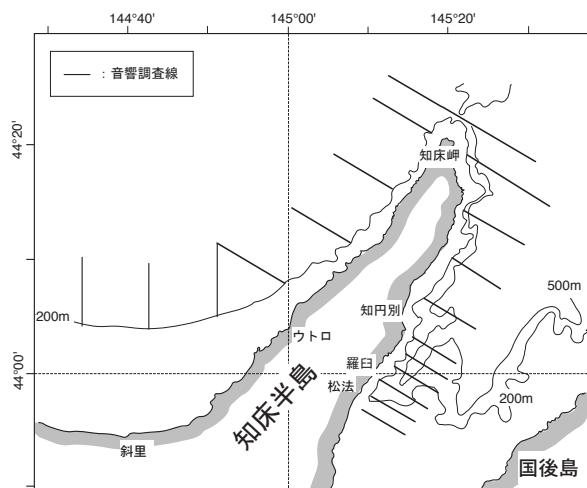


図9 根室海峡におけるスケトウダラ成魚を対象とした音響資源調査（11月ないし12月）海域図

北海道音響資源調査研究情報交換会

道水試における音響資源調査の発展には北海道音響資源調査研究情報交換会も重要な役割を果たしている。会議の第1回目は、日本海海域において実施された北海道大学との共同研究「計量魚群探知機を用いた道西日本海におけるスケトウダラ産卵群の来遊資源量予測基礎調査」2年目の1997年に、共同研究の成果報告会として稚内水試が事務局となって開催された。この会議には日本海以外のスケトウダラ研究グループ会議メンバーも参加し、他の海域で行われた音響資源調査の結果についても報告と意見交換が行われ、研究上の課題点の解決や北水試担当者の研究能力向上がはかられてきた。共同研究終了後は道水試、大学、北海道以外の水産試験場、水産研究・教育機構および民間企業の研究員等を参加者とする幅広い研究情報の交換会として継続し、道外の音響資源調査や計量魚探機以外の超音波を利用した調査機器の紹介なども行われて、更なる研究・技術レベルの向上に貢献している。本研究会は2018年3月までのべ21回の開催をかさね、研究発表報告は237題（うち学位取得の報告8題）、参加者のべ782名、参加機関のべ23機関（道水試除く）と日本における音響資源調査の重要な研究会議となっている（高柳, 2017）。

本報では、これまで実施してきたスケトウダラを対象とした音響資源調査とその成果の概要を記述した。これらの調査によって非常に多くの貴重なデータが得られたが、いまだ研究論文としてとりまとめられていないものが多く残されていることから、スケトウダラ研究グループ50周年を記念して本号で一部を論文として発表した。今後も引き続き研究論文としてとりまとめて資源評価や資源管理方策に反映していくことが急務である。

今後検討すべき課題として、時化等で生ずる泡切れ等による現存量推定値への影響（例えば三宅, 2012）評価、計量魚探機の精度を維持するための船間較正（例えば三宅, 2012）の定期的な実施などがあげられる。

海域別に見ると、日本海海域では、10月の成魚を対象とした調査における航走ラインの配置方法の検討があげられる。現在の航走ライン間隔は分布量の少ない北部では広く、産卵場のある南部の海域で狭くなっている。しかし、近年、魚群の分布に変化が生じ、北部海域の分布割合が増加しており（美坂ら, 2018）、航走ライン間隔の見直しが必要と考えられる。一方で、この時期のスケトウダラは索餌場から産卵場への移動途上にあると推測されるため、航走ラインを密にすることに伴う調査時間の増加が魚群の移動に起因する推定誤差を大きくする可能性がある。従って、航走ライン配置の見直しに際しては、この点も考慮する必要があろう。太平洋海域では、産卵親魚の現存量推定を目的とした広域調査が開始された。今後、調査を継続してデータを蓄積していく必要がある。また、道南海域の調査では、水深400m以深に分布する魚群についてトロール調査による魚種確認を十分に行うことができなかつたが、2015年に竣工した北辰丸（3代目）のトロール装備ではこの深度の調査も可能であることから、今後の調査の進展が望まれる。また、この海域は設置漁具が多いため400mより浅い海域でも魚種確認のためのトロール調査を実施することが難しく、この点が問題点として上げられてきた。この解決策としては調査船のオッタートロールよりも狭い範囲で操業できるかけまわし船などの漁船を活用したデータ収集なども検討していくことが必要であろう。近年、魚群の魚種判別やサイズを推定する手法として広域の計量魚探機の利用が注目されている（例えはBasset *et al.*, 2018）。北辰丸（3代目）に搭載されているEK80は広域に対応した仕様となっていることから、その活用方法も他の研究機関と連携をとりながら進めていく必要があろう。

謝 辞

道水試における音響資源調査の発展には、共同研究機関であった北海道大学水産科学研究院の飯田浩二名誉教授、向井徹教授、水産研究・教育機構水産工学研究所の安部幸樹博士のご指導、研究室の大学院生、学生諸氏の助言と協力が不可欠であった。ここに厚く感謝の意を表す。北海道大学環境科学研究院の宮下和士教授には多くの貴重なご指導と助言をいただいた。厚く御礼申し上げる。また、北海道音資研を通じて多くの研究者の方々に貴重な情報提供とアドバイスをいただいた。音響資源

調査の実施に際しては試験調査船北洋丸、金星丸、北辰丸およびおやしお丸の船長ならびに乗組員諸氏の多大な協力と貴重な助言をいただいた。本稿の執筆にあたっては、元釧路水産試験場長高柳志朗氏から貴重な資料を提供いただいた。また、本稿をまとめるにあたり、スケトウダラ研究グループの所属メンバーと編集者および査読者には有意義なアドバイスをいただいた。以上の方々に深く感謝の意を表する。なお、本稿に記載した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

- 安部幸樹、飯田浩二、向井 徹. スケトウダラの音響資源調査における面積後方散乱係数の昼夜変動. 日本国水産学会誌 1999; 65: 252-259.
- Bakkala R, Maeda,T, Macfarlane,G. Distribution and stock structure of pollock (*Theragra chalcogramma*) in the North Pacific Ocean. International North Pacific Fisheries Commission Bulletin 1986; 45: 3-20.
- Bassett C, Robertis AD, Wilson CD. Broadband echosounder of frequency response of fishes and euphausiids in the Gulf of Alaska. ICES Journal of Marine Science 2018; 75: 1131-1142.
- Brodeur RD, Wilson MT. 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
- FAO. The state of world fisheries and aquaculture 2018. Rome, FAO Fisheries and Aquaculture Department, 2018, p210.
- 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（2017）年度スケトウダラ太平洋系群の資源評価. 平成29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. 2018; 408-453.
- 原一郎. 直接推定法の今日的意義. 「TAC管理下における直接推定法－その意義と課題（浅野謙治編）」恒星社厚生閣、東京 2000: 9-18.
- 北海道立水産試験場. 北海道周辺海域におけるスケトウダラ並びにタラ科魚類の資源・生態研究の現状と展望－北海道スケトウダラ研究グループ25周年記念論文集－、北海道立水産試験場研究報告 1993; 42: p301.
- 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.
- 本田聰, 千村昌之. 平成20年度(2008)年度スケトウダラ日本海北部系群の資源評価. 平成20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. 独立行政法人水産総合研究センター, 東京. 2009; 293–354.
- 板谷和彦, 三宅博哉, 和田昭彦, 宮下和士. 北海道日本海・オホーツク海沿岸域におけるスケトウダラ仔稚魚の分布. 水産海洋研究 2009; 73 : 80–89.
- 板谷和彦, 三宅博哉, 貞安一廣, 宮下和士. 計量魚群探知機により観察された北海道日本海におけるスケトウダラ仔稚魚の日周鉛直移動と昼夜間の音響的特徴. 水産海洋研究 2014; 78 : 97–103.
- Kawauchi Y, Shida O, Okumura H, Tojo N, Yasuma H, Miyashita K. Vertical distribution of walleye pollock juveniles before and after the period of transition for feeding in FB, Hokkaido, Japan. *Journal of Marine Science and Technology* 2011; 16 : 279–286.
- Kawauchi Y, Chimura M, Muto T, Watanobe M, Shirakawa H, Miyashita K. Effect of environmental factors and prey species on daytime and nighttime vertical distribution of juvenile walleye pollock in and around Funka Bay. *Fisheries Science* 2014; 80 : 139–149.
- 三宅博哉. 音響学的手法を用いたスケトウダラ北部日本海系群の資源動態評価と産卵場形成に関する研究(学位論文). 北海道水産試験場研究報告 2012; 81 : 1–56.
- 三宅博哉, 石田良太郎, 武藤卓志, 安部幸樹, 向井徹, 飯田浩二. 音響資源調査で得られた北海道西岸日本海のスケトウダラ産卵群の分布特性と現存量. 北海道水産試験場研究報告 2001; 59 : 11–24.
- 三宅博哉, 田中伊織. 北海道日本海のスケトウダラ資源の変動. 月刊海洋 2006; 59 : 11–24.
- 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 (浅野謙治編)」恒星社厚生閣, 東京 2000 : 19–27.
- Miyashita K, Tetsumura K, Honde 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 back scattering strength (SV) difference method. *Fisheries Oceanography* 2004; 13 (suppl. 1) : 99–110.
- 夏目雅史. 北海道桧山海域スケトウダラ延縄漁業の漁獲深度と水温. 北海道水産試験場研究報告 1998; 53 : 1–8.
- Shida O. Seasonal difference in the diel vertical migration patterns of young walleye pollock, *Theragra chalcogramma*, and their impact on acoustic biomass estimation. *Proceeding of ACOUSTIC GEAR 2000 2001* : 172–179.
- 志田修. 根室海峡におけるスケトウダラ魚群の分布と海況 – I 産卵前の水平および垂直分布. 北海道水産試験場研究報告 2001; 59 : 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.
- 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.
- 志田修, 三宅博哉, 金田友紀, 石田良太郎, 宮下和士. 計量魚群探知機による冬季の北海道東部太平洋海域におけるスケトウダラ *Theragra chalcogramma* 未成魚の分布. 日本水産学会誌 2008; 74 : 152–160.
- 志田修. スケトウダラ太平洋系群の資源変動における成魚期の海洋環境の影響に関する研究(学位論文). 北海道水産試験場研究報告 2011; 79 : 1–75.
- 志田修. 根室海峡におけるスケトウダラ魚群の分布と海況 – II 1990年代後半の産卵期における分布と海況. 北海道水産試験場研究報告 2014; 86 : 125–135.
- Shida O, Miura Y, Muto T, Miyashita K. Interannual changes in the timing of walleye pollock spawning migration and their impacts on the gillnet fishery in the southwestern Pacific coast of Hokkaido, Donan area, Japan. *Fisheries Science* 2014; 80 : 173–179.
- 高柳志朗. 北海道の音響資源研究のさらなる発展を期して～音資研と共に歩む北水試の計量魚探調査・研究～. 第21回北海道音響資源調査研究情報交換会口頭発表. 2017.
- Traynor JJ. Midwater abundance of walleye pollock in the eastern Bering sea, 1979 and 1982. *International North Pacific Fisheries Commission Bulletin* 1986; 45 : 121–135.
- Wakabayashi K, Watanabe K, Watanabe Y. Assessments of walleye pollock abundance of the southwest Pacific coast of Hokkaido, based on catch statistics and survey data. *International North Pacific Fisheries Commission Bulletin* 1990; 50 : 101–120.
- 山下夕帆, 千村昌之, 石野光弘, 田中寛繁, 山下紀生,

濱津友紀. 平成29年度（2017）年度スケトウダラ日本海北部系群の資源評価. 平成29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. 2018 : 303-363.

資料：1994年以降に発行されたスケトウダラ関係論文（水産試験場職員が著者となっているもの）。太字が道水試職員を表す。

海域：日本海

- 1) 板谷和彦, 三宅博哉, 和田昭彦, 宮下和士. 北海道日本海・オホーツク海沿岸域におけるスケトウダラ仔稚魚の分布. 水産海洋研究 2009 ; 73 : 80-89.
- 2) 板谷和彦, 三宅博哉, 貞安一廣, 宮下和士. 計量魚群探知機により観察された北海道日本海におけるスケトウダラ仔稚魚の日周鉛直移動と昼夜間の音響的特徴. 水産海洋研究 2014 ; 78 : 97-103.
- 3) 三宅博哉, 石田良太郎, 武藤卓志, 安部幸樹, 向井徹, 飯田浩二. 音響資源調査で得られた北海道西岸日本海のスケトウダラ産卵群の分布特性と現存量. 北海道水産試験場研究報告 2001 ; 59 ; 11-24.
- 4) 三宅博哉, 田中伊織. 北海道日本海のスケトウダラ資源の変動. 月刊海洋 2006 ; 59 ; 11-24.
- 5) 三宅博哉, 板谷和彦, 浅見大樹, 嶋田宏, 渡野邊雅道, 武藤卓志, 中谷敏邦. 卵分布からみた北海道西部日本海におけるスケトウダラ産卵場形成の現状. 水産海洋研究 2008 ; 72 : 265-272.
- 6) 三宅博哉. 音響学的手法を用いたスケトウダラ北部日本海系群の資源動態評価と産卵場形成に関する研究（学位論文）. 北海道水産試験場研究報告 2012 ; 81 : 1-56.
- 7) Mizuno M, Kobayashi T, Matsuishi T, Maeda K, Saito K. Stock structure of walleye pollock, *Theragra chalcogramma*, around Hokkaido and Sakhalin in the term of mitochondrial DNA RFLP. 北海道水産試験場研究報告 2000 ; 57 ; 1-8.
- 8) 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.
- 9) 夏目雅史. 北海道桧山海域スケトウダラ延縄漁業の漁獲深度と水温. 北海道水産試験場研究報告 1998 ; 53 : 1-8.
- 10) 野村 溫, 久保徹郎, 志田 修, 板谷和彦, 伊藤 靖, 桜井泰憲. 2011年8月と10月の北海道西部日本海において観察されたスケトウダラ幼魚の食性. 北海道水産試験場研究報告 2014 ; 85 : 13-19.

- 11) Yamaguchi H, Matsuishi T. Evaluation of the stock management procedures for the walleye pollock in the northern waters of the Sea of Japan using a simulation. *Fisheries Science* 1997 ; 74 : 955-969.

海域：太平洋

- 12) Funamoto T, Yamamura, 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.
- 13) Kawauchi Y, Shida O, Okumura H, Tojo N, Yasuma H, Miyashita K. Vertical distribution of walleye pollock juveniles before and after the period of transition for feeding in FB, Hokkaido, Japan. *Journal of Marine Science and Technology* 2011 ; 16 : 279-286.
- 14) Kawauchi Y, Chimura M, Muto T, Watanobe M, Shirakawa H, Miyashita K. Effect of environmental factors and prey species on daytime and nighttime vertical distribution of juvenile walleye pollock in and around Funka Bay. *Fisheries Science* 2014 ; 80 : 139-149.
- 15) Miyake H, Yoshida H, Ueda Y. Distribution and abundance of age-0 juvenile walleye pollock, *Theragra chalcogramma*, along the Pacific coast of southeastern Hokkaido, Japan. *NOAA Technical Report NMFS* 1996 ; 126 : 3-10.
- 16) Nishimura A, Hamatsu T, Yabuki K, Shida O. Recruitment fluctuations and biological response of walleye pollock in the Pacific coast of Hokkaido. *Fisheries Science* 2002 ; 68 (Suppl. 1) : 206-209.
- 17) 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.
- 18) Shida O. Seasonal difference in the diel vertical migration patterns of young walleye pollock, *Theragra chalcogramma*, and their impact on acoustic biomass estimation. *Proceeding of ACOUSTIC GEAR 2000* 2001 : 172-179.
- 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.
- 20) 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.

- 21) 志田 修. 資源評価担当者から見た漁業資源の管理 – II. スケトウダラ資源評価の現状と今後の課題. 日本水産学会誌 2005 ; 71 : 1022–1026.
- 22) Shida O, Hamatsu T, Nishimura A, Suzaki A, Yamamoto J, Miyashita K, Sakurai Y. Interannual fluctuations in recruitment of walleye Pollock in the Oyashio region related to environmental changes. *Deep Sea Research II* 2007 ; 54 : 2822–2831.
- 23) 志田 修, 三宅博哉, 金田友紀, 石田良太郎, 宮下和士. 計量魚群探知機による冬季の北海道東部太平洋海域におけるスケトウダラ *Theragra chalcogramma* 未成魚の分布. 日本水産学会誌 2008 ; 74 : 152–160.
- 24) 志田 修. スケトウダラ太平洋系群の資源変動における成魚期の海洋環境の影響に関する研究（学位論文）. 北海道水産試験場研究報告 2011 ; 79 : 1–75.
- 25) Shida O, Mihara Y, Muto T, Miyashita K. Interannual changes in the timing of walleye pollock spawning migration and their impacts on the gillnet fishery in the southwestern Pacific coast of Hokkaido, Donan area, Japan. *Fisheries Science* 2014 ; 80 : 173–179.
- 26) Yamamura O, Yabuki K, Shida O, Watanabe K, Honda S. Spring cannibalism on 1 year walleye pollock in the Doto area, northern Japan: is it density dependent? *Journal of Fish Biology* 2001 ; 59 : 645–656.
- 27) Yamamura O, Honda S, Shida O, Hamatsu T. Diets of walleye pollock *Theragra chalcogramma* in the Doto area, northern Japan: Ontogenetic and seasonal variations. *Marine Ecology Progress Series* 2002 ; 238 : 187–198.
- 海域：根室海峡
- 28) 志田 修. 根室海峡におけるスケトウダラ魚群の分布と海況—I 産卵前の水平および垂直分布. 北海道水産試験場研究報告 2001 ; 59 : 1–10.
- 29) 石田良太郎, 鳥澤 雅, 志田 修. 水産資源の持続的利用－知床半島周辺海域の漁業と水産資源(陸棚)－. 月刊海洋 2006 ; 38 : 626–631.
- 30) 志田 修. 根室海峡におけるスケトウダラ魚群の分布と海況—II 1990年代後半の産卵期における分布と海況. 北海道水産試験場研究報告 2014 ; 86 : 125–135.

北海道日本海海域におけるスケトウダラ産卵群の分布変化

美坂 正^{*1}, 星野 昇¹, 渡野邊雅道², 本間隆之³, 志田 修⁴, 三原行雄⁵, 板谷和彦⁶, 三宅博哉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函館水産試験場,

³北海道立総合研究機構釧路水産試験場, ⁴北海道立総合研究機構水産研究本部,

⁵北海道立総合研究機構栽培水産試験場, ⁶北海道立総合研究機構中央水産試験場

Distributional changes in the spawning population of walleye pollock *Gadus chalcogrammus* in the northern Japan Sea off Hokkaido, Japan

TADASHI MISAKA^{*1}, NOBORU HOSHINO¹, MASAMICHI WATANOBE², TAKAYUKI HONMA³, OSAMU SHIDA⁴, YUKIO MIHARA⁵, KAZUHIRO ITAYA⁶ and HIROYA MIYAKE⁴

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

² Hakodate Fisheries Institute, Hokkaido Research Organization, Hakodate Hokkaido 040-0051,

³ Kushiro Fisheries Institute, Hokkaido Research Organization, Kushiro, Hokkaido 085-0027,

⁴ Fisheries Research Department, Hokkaido Research Organization, Yoichi, Hokkaido 046-8555,

⁵ Mariculture Fisheries Institute, Hokkaido Research Organization, Muroran, Hokkaido 051-0013,

⁶ Central Fisheries Institute, Hokkaido Research Organization, Yoichi, Hokkaido 046-8555, Japan

Analysis of annual catches in coastal fisheries and results of acoustic surveys revealed that the distribution of the walleye pollock *Gadus chalcogrammus* spawning population in the northern Japan Sea off Hokkaido shifted southward after the early 1990s and then returned northward after the late 2000s. We presumed that the distributional changes in the spawning population after 1980s have been affected by temperature changes from winter cooling, inferred from the Asian winter monsoon indices, and by temperature increases in the Japan Sea Proper Water, in addition to the increase or decrease in population abundance. The distributional changes, varying the distance between the spawning grounds and the nursery area, seemed to exchange the major factors affecting recruitment fluctuation, as proposed in the previous studies.

キーワード：計量魚群探知機，再生産関係，産卵場，スケトウダラ，日本海

スケトウダラ *Gadus chalcogrammus* は北太平洋の冷水域に広く分布するタラ科魚類であり、北海道における重要な水産資源の一つである。我が国では、日本海北部系群、太平洋系群、オホーツク海南部海域、根室海峡海域の4つの評価単位に分けて資源管理が行われており、1997年からTAC制度（漁獲可能量制度）の対象種となっているため、精度の高い資源評価とそれに基づく適切な資源管理方策が求められている。北海道立総合研究機構水産研究本部に属する各水産試験場（以下、道水試と略す）では、継続的な漁獲統計調査や漁獲物調査、試験調査船調査によるデータを用いて資源評価を行なっている。

日本海北部系群の主漁場である北海道日本海海域では、1996～1998年度に実施した道水試と北海道大学との共同研究による成果（安部ら, 1999；三宅ら, 2001）をベースとして、調査船に搭載された計量魚群探知機を用いた音響資源調査により産卵親魚現存量をモニタリングしている。この親魚現存量に関する情報は、漁業から独立した直接法による重要な資源量指標値として、2008年度からTACを決定するための生物学的漁獲可能量（ABC）の算定に活用されている（本田・千村, 2009）。

一方、北海道日本海海域における漁獲量は1992年度（漁期年度：4月から翌年3月）に13.9万トンが記録されたの

ち減少傾向が続き、2013年度は1万トンを下回った（北海道立総合研究機構水産研究本部 2018年度資源評価書スケトウダラ（日本海海域），中央水産試験場 <http://www.fishexp.hro.or.jp/exp/central/kanri/SigenHyoka/Kokai/>，2018年12月14日閲覧，以下の引用では2018年度資源評価書とする）。近年の調査研究では、日本海北部海域における本種の資源変動に海洋環境の変動が影響していることが示されている（吳ら，2002；三宅・田中，2006；Funamoto, 2007, 2011；三宅ら, 2008）。三宅ら(2008)は1980年代以降に産卵場形成場所が変化した結果、産卵場と成育場との距離が離れ、卵期に致命的な高水温に遭遇する可能性が大きくなつたため、卵の生残率が低下したと推察した。しかし、音響資源調査の結果は、調査データの蓄積が少なかったこともあり、これまで産卵群分布の検討には使用されてこなかつた。そこで、本研究では、海域別の漁獲動向を改めて整理するとともに、1998～2017年度の20年間に実施された音響資源調査における海域別産卵親魚現存量の変化、すなわち産卵群の分布変化を明らかにし、分布変化が生じた要因を検討した。また、VPAから推定された加入量とRPSを用いて、その分布変化が再生産関係へ与えた影響を考察した。

試料及び方法

沿岸漁業漁獲量 沖合底びき網漁業による漁獲量は1977年の200海里漁業専管水域の設定など、社会情勢の変化による影響が大きいが、12月～翌2月の産卵期に接岸する群れを主な漁獲対象としている沿岸漁業の漁獲量は海域別の産卵親魚分布量を概ね適正に反映していると考えられる（三宅・田中，2006）。このため、海域別の産卵親魚分布量の長期的な推移を反映する指標として、沿岸漁業による漁獲量を漁期年度別（4月から翌年3月）、北海道の総合振興局・振興局（2010年3月までは支庁）別に集計した。集計範囲は日本海側だけに限定し、宗谷総合振興局管内稚内市～渡島総合振興局管内福島町とした。ただし、日本海に面する渡島総合振興局管内八雲町熊石地区（2005年9月まで檜山支庁熊石町）は檜山振興局管内の漁獲量に含めた。また、主要な産卵場とされる石狩湾と岩内湾を含む旧後志支庁管内については、石狩湾に面した北後志海域（小樽市～積丹町）と岩内湾に面した南後志海域（神恵内村～島牧村）に区分した。漁獲統計資料には、1975～1984年度は北海道水産現勢、1985～2017年度は北海道漁業生産高報告を用いた（2017年1月～2018年3月は水試集計速報値）。

なお、本種は1997年度以降TAC魚種として漁獲量が管理されているが、2007年度まで資源が減少傾向であつて

も直近の漁獲実績を下回るTACが設定されることはなかつた。2008年度以降は漁獲実績に見合つたTACが設定されるようになり、さらに2015年度以降は資源評価に基づくABCをTACが上回らないことが原則化された。これらのことから、2007年度以前の海域別漁獲量は各産卵場に来遊した産卵親魚重量の指標として扱つたが、2008年度以降の海域別漁獲量は産卵群分布を反映しない可能性があることに注意し、漁業から独立した調査結果と併せて、産卵群の分布変化を推定した。また、後志、檜山海域の沿岸域における主要なスケトウダラ専獲漁業では、1980年代以降、資源減少とともに漁獲努力量の指標となる操業隻数が減少しているが、漁獲割合（2歳以上資源重量に対する漁獲量の割合）は2007年度まで低下していなかつた（2018年度資源評価書）ことから、操業隻数の減少による漁獲強度の変化はTACの影響に比べて小さいと判断し、考慮から外した。

音響資源調査 北海道日本海海域に分布するスケトウダラ産卵親魚を対象とした音響資源調査は、1995年2月に竣工した稚内水産試験場所属試験調査船北洋丸（237トン）にSimrad社製計量魚群探知機EK500が装備されたことを契機として、1996年度に稚内・中央・函館水産試験場と北海道大学水産学部の共同研究として開始された。1996～1998年度の共同研究による成果（安部ら，1999；三宅ら，2001）をベースとして、1998年度以降はスケトウダラが産卵場へ移動回遊する時期である10月に毎年ほぼ同じ調査内容により実施している（三宅，2012）。本研究ではこれら先例研究で整理した1998～2007年度の調査結果、および同じ手法により継続した2008～2017年度の調査結果を用いた。ただし、2000～2004年度および2007年度は運航スケジュールの都合により9月下旬に調査を開始した。また、2015年度は11月に荒天欠測分の補完調査を実施した。

音響資源調査は、1996年度から2000年度までは北洋丸で実施し、2001年度からは函館水産試験場所属試験調査船金星丸（151トン）を加えて2隻で実施した。北洋丸で用いた計量魚群探知機はSimrad EK500（1996～2003年度）およびSimrad EK60（2004～2017年度），金星丸ではSimrad EK60（2001～2017年度）であり、それぞれ周波数は38 kHzを使用した。調査開始前には各船において標準球による計量魚群探知機の較正を行い、比較的スケトウダラ分布の集中度が低く、海底デッドゾーンの影響が少ないと考えられる夜間（三宅ら，2001）に原則10ノットで音響調査ライン（以下、調査ラインと略す）を航走することにより音響データを収録した。調査ラインは東西方向に設定し、北緯43度30分以北の海域は10～15 nmi（nautical mile：海里）間隔、北緯43度30分以南の海域で

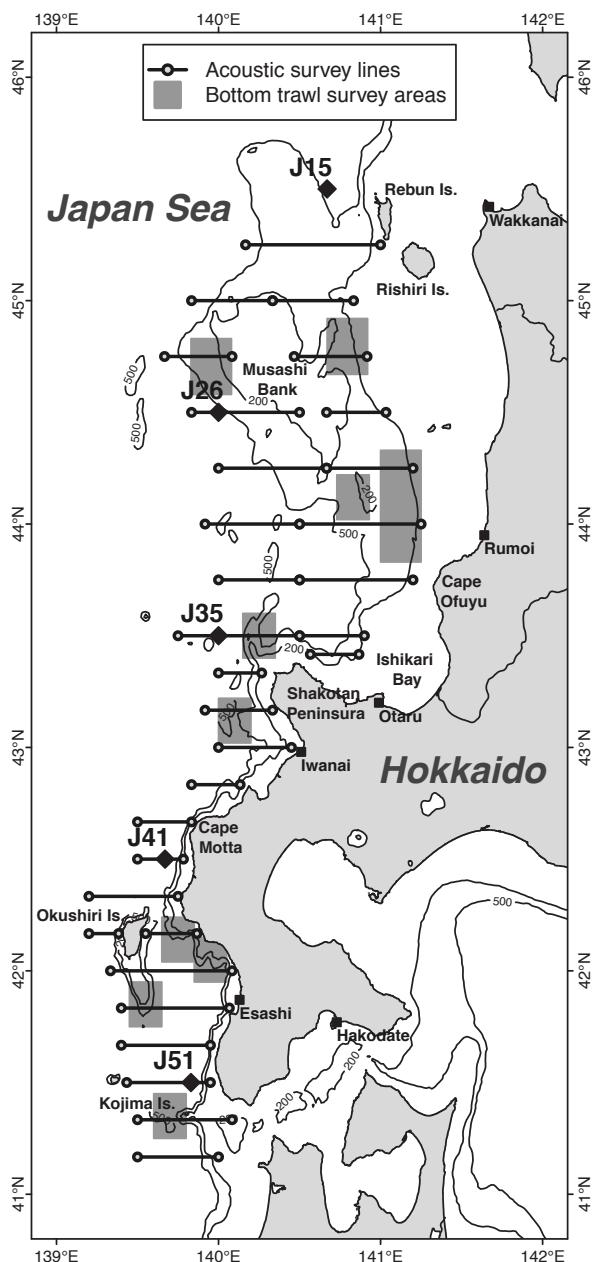


Fig. 1 Map showing the survey area in October 2017. Solid diamonds indicate the ocean observation stations.

は5~10 nmi間隔とした。2017年10月調査における調査ラインの位置をFig.1に示した。収録した音響データは三宅(2012)の方法により、必要に応じて海底処理、ノイズ処理、昼夜補正、船間補正を行い、各調査ラインにおける音響反応量の積分値であるNASC(Nautical Area Scattering Coefficient) (m^2/nmi^2) を出力した。

音響資源調査の際は産卵親魚現存量の推定に必要なパラメータを得るために、日中にトロール調査を実施した。1996~2000年度は北洋丸の中層トロール、2001年度は北洋丸の着底トロールと北海道大学練習船おしょろ丸(1,396トン)の中層トロール、2002, 2003年度は中央水

産試験場所属試験調査船おやしお丸(178トン、2009年度用途廃止)の着底トロールと北洋丸・金星丸の中層トロール、2004~2009年度は北洋丸・おやしお丸の着底トロールと金星丸の中層トロール、2010~2017年度は北洋丸・金星丸の着底トロールによる調査を実施した。2017年度10月調査におけるトロール調査海域の位置をFig.1に示した。トロール調査で採集したスケトウダラは船内で冷凍して持ち帰り、後日研究室で解凍し、尾叉長、体重、内臓除去重量、生殖巣重量を測定し、成熟度を記録した。成熟度は、北水試魚介類測定・海洋観測マニュアル(吉田, 1996)に従い、生殖腺の肉眼観察により判別した。雌雄ともに成熟度10の個体を未成魚、雄は成熟度20、雌は成熟度21以降の個体を成魚とした。これらの生物測定結果からトロール調査点別に平均散乱断面積 $\bar{\sigma}$ 、平均体重、成魚の出現頻度を求め、近傍トロール調査点における $\bar{\sigma}$ 、平均体重、成魚割合を用いて、NASCから各調査ラインの産卵親魚現存量(トン)を計算した。 $\bar{\sigma}$ は、魚1個体あたりの後方散乱強度であるターゲットストレングスTS(dB)と尾叉長FL(cm)の関係を $TS = 20 \log FL - 66$ (Foote and Traynor, 1988)として、尾叉長組成からTSを計算し、 $\bar{\sigma} = 4\pi r_0^2 10^{\frac{TS}{10}}$ (基準距離 $r_0 = 1$)を平均して求めた。ここで求めた各調査ラインの産卵親魚現存量は幅1 nmiあたりとなることから、調査ライン間は近い方の調査ラインの値を用いた。

海洋環境 北海道日本海海域における産卵群分布に与えた海洋環境の影響を検討するため、道水試所属の試験調査船北洋丸、おやしお丸、金星丸により実施された定期海洋観測の結果から、1989~2017年度の水温および塩分を使用した。なお、定期海洋観測による塩分は航海ごとに採水した海水を実験室の塩分計で測定した結果により補正されている。北海道日本海海域の定期海洋観測では東西方向の主要観測線としてJ1線(北緯45度30分)~J5線(北緯41度30分)の5測線が緯度1度間隔で設定されている。これらの測線上においてスケトウダラが多く分布する大陸棚斜面域(三宅ら, 2001)に近い5定点(J15, J26, J35, J41, J51)、4層(深度200 m, 300 m, 400 m, 500 m)の水温および塩分を抽出した。J15は礼文島北西沖、J26は武蔵堆西方沖、J35は積丹半島北西沖、J41は茂津多岬南西沖、J51は渡島小島北方沖に位置する(Fig.1)。10月音響資源調査に近い時期に実施された10月定期海洋観測(9月中旬~10月下旬に実施)の結果は経年に欠測値が多かったため、10月音響資源調査の後に実施された12月定期海洋観測(11月下旬~12月上旬に実施)の結果を合わせた2回の平均値(1回欠測のときはもう1回の値のみ使用)により秋季における水温および塩分の経年変化を表した。

Table 1 Annual catch of coastal fisheries in the northern Japan Sea off Hokkaido, Japan

Fisheries year	Catches in coastal fisheries (tons)							Total
	Soya	Rumoi	Ishikari	North Shiribeshi	South Shiribeshi	Hiyama	Oshima	
1975	1,344	302	0	9,121	10,292	2,127	0	23,186
1976	646	295	0	11,094	10,229	2,194	0	24,458
1977	6,337	340	0	18,090	18,844	6,764	28	50,402
1978	7,732	174	0	20,545	15,494	12,031	26	56,001
1979	2,944	372	0	20,710	18,277	14,602	23	56,928
1980	1,908	467	0	18,187	19,202	12,035	15	51,813
1981	1,629	103	0	19,178	18,543	16,444	28	55,925
1982	1,540	158	0	15,576	18,904	12,820	125	49,123
1983	1,215	132	0	14,147	17,778	9,961	102	43,335
1984	888	200	0	16,004	16,511	7,908	720	42,232
1985	632	196	1	15,641	16,355	8,615	362	41,802
1986	550	88	4	13,688	11,817	6,534	543	33,224
1987	521	144	1	6,946	7,641	9,765	301	25,318
1988	307	224	0	8,349	10,073	13,730	386	33,069
1989	1,346	143	0	5,304	8,020	13,838	187	28,838
1990	919	232	0	6,163	5,919	16,820	280	30,333
1991	1,643	206	0	6,266	4,179	17,179	630	30,103
1992	382	648	0	3,616	2,385	15,482	471	22,984
1993	231	288	0	3,329	1,338	17,770	146	23,102
1994	401	212	1	4,490	1,106	13,686	130	20,027
1995	888	89	1	3,102	863	14,910	65	19,917
1996	229	183	0	5,086	1,207	11,578	199	18,482
1997	858	195	0	4,418	1,537	16,754	344	24,107
1998	747	35	0	3,372	1,282	10,808	283	16,527
1999	335	101	0	2,333	1,593	11,374	317	16,053
2000	173	28	0	1,613	975	9,934	481	13,204
2001	230	65	0	901	1,864	13,707	1,190	17,957
2002	446	105	0	1,239	2,523	11,587	1,676	17,576
2003	378	85	0	2,056	2,327	9,838	1,374	16,058
2004	109	42	0	1,349	1,519	8,129	400	11,549
2005	70	68	0	612	1,392	7,310	38	9,490
2006	50	169	0	356	1,434	5,267	1	7,278
2007	160	87	0	501	2,686	4,928	2	8,364
2008	295	174	0	832	2,557	3,306	3	7,167
2009	269	436	0	704	1,432	3,230	5	6,075
2010	353	763	0	617	1,963	3,189	8	6,894
2011	223	186	0	1,137	1,246	1,058	2	3,853
2012	176	167	0	765	1,013	3,018	11	5,150
2013	93	149	0	1,235	1,363	1,114	3	3,957
2014	131	134	0	132	1,239	720	18	2,374
2015	99	71	0	770	868	611	1	2,420
2016	128	61	0	880	1,106	400	4	2,579
2017	213	97	0	566	1,122	186	4	2,187

北海道日本海海域における対馬暖流の北上流量を検討するため、1989～2017年度に実施された年6回の定期海洋観測データを用いて、中多・田中（2002）の方法により中央水産試験場で計算されたJ4線（北緯42度30分）の傾圧流量を使用した。中多・田中（2002）と同様に、短周期変動成分を取り除き、傾圧流量の長期的な傾向を見るため、7回分（1年2か月分）の移動平均を求めた（欠測回の流量は前後の平均値で補間）。

また、Funamoto（2011）が加入量変動との関連を指摘したモンスーンインデックスMOI（Hanawa *et al.*, 1988）について、気象庁（<https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/obs/knowledge/stmw/moi.html>, 2018年11月19日閲覧）から1971～2018年の数値データ入手し、産卵群分布および海洋観測データとの関係を検討した。MOIはイルクーツクと根室の気圧差（y年MOIはy-1年12月からy年2月の平均値）で表される季節風の強さの指標であり、

冬季にシベリア高気圧が優勢のとき、モンスーンインデックスが大きな値をとり、日本付近では北西季節風が強い状態となる。

再生産関係 北海道日本海海域における産卵群の分布状況が再生産関係に与えた影響を検討するため、2018年度資源評価書においてPope (1972) の近似式を用いたVPA (Virtual Population Analysis) により推定された1981～2015年級の産卵親魚重量SSB、加入尾数R (2歳時資源尾数) および再生産成功指数RPS (R / SSB) を使用した。

結果

沿岸漁業漁獲量 沿岸漁業による海域別漁獲量は、宗谷海域（稚内市以西）では1978年度に7.7千トンの漁獲があったがその後減少し、1984年度以降概ね1.0千トン未満で推移した（Table 1）。留萌海域では1975年度以降28～763トンと低い水準で推移した。石狩海域は本種を主対象とした漁業が営まれておらず漁獲量は4トン以下とわずかであった。石狩湾に面した北後志海域では1986年度まで、岩内湾に面した南後志海域では1988年まで、それぞれ1万トンを上回る漁獲量が記録されたが、その後は減少傾向となり、北後志海域では1999年度以降3千トン未満、南後志海域ではそれより早く1992年度以降に3千トン未満となった。南北の後志海域では1990年代以降2010年代まで、増減傾向は若干異なっていたが、いずれも漁獲量は過去に比べて低い水準で推移した。檜山海域では1970年代から増加し1981年度に16.4千トンを記録した後、いったん減少したが、1987年度以降増加傾向に転じて1993年度には17.8千トンとなった。その後2006年度までは5千トン以上を維持したが、2010年代に激減し、2017年度には186トンまで減少した。渡島海域では1981年度まで100トン未満であったが、1982～2000年度に65～720トンで推移した後、2001～2003年度は1.2千～1.7千トンに増加した。しかし、2004～2006年度に激減し、2006年度以降は18トン未満と少なくなった。

北海道日本海海域において、1970年代には漁獲が多かったが1980年代以降減少傾向が続いた宗谷～後志海域と、1970年代には漁獲が少なかったが1980年代と1990年代に増加、2000年代以降に減少した檜山・渡島海域では、漁獲量の増減傾向が明瞭に異なっていた（Fig.2A）。檜山・渡島海域が北海道日本海の沿岸漁業全体に占める割合は1975～1986年度には30%未満であったが（Fig.2B）、後志海域以北の沿岸漁業漁獲量の急減により1988年度に40%を超え、1992～2006年度は64～83%で推移、2007年度以降は低下傾向となり2017年度には1975、1976年度と同程度の9%となった。

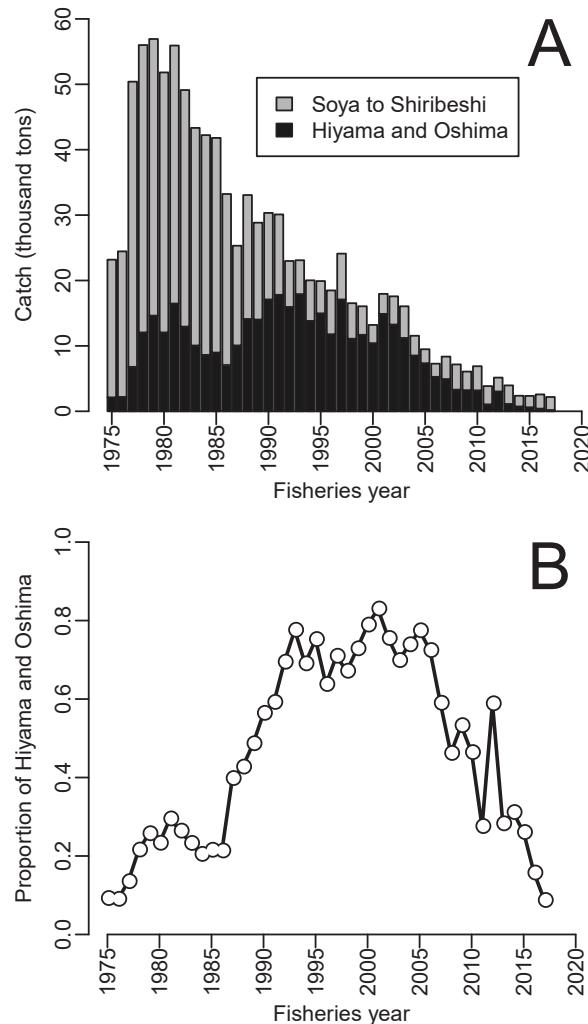


Fig.2 Annual catches of coastal fisheries in the northern Japan Sea off Hokkaido. (A) Catches in the Soya to Shiribeshi regions and those in the Hiyama and Oshima regions. (B) Proportion of catches in the Hiyama and Oshima regions to the total catches.

音響資源調査 音響調査ラインは5～15 nmi間隔で東西方向に設定されているが、調査ラインの配置が若干異なる年があるため、1998～2017年度の音響資源調査により推定した産卵親魚現存量は平均値補間により5 nmi（緯度5分）間隔に整理した上で図示した（Fig.3）。荒天によって未航走の調査ラインが多かった2002年度と2012年度は欠測とした。

調査年別、緯度別の産卵親魚現存量から産卵群の分布状況を分析したところ、後志海域と檜山海域の境界である茂津多岬沖（北緯42度38分付近）には各調査年とも産卵親魚現存量が少なく、現存量分布は石狩・後志海域（北緯43度40分～42度50分付近）と檜山・渡島海域（北緯42度10分～41度20分付近）に大きく分かれていた。石狩・後志海域では積丹半島より北の石狩湾側と南の岩内湾側

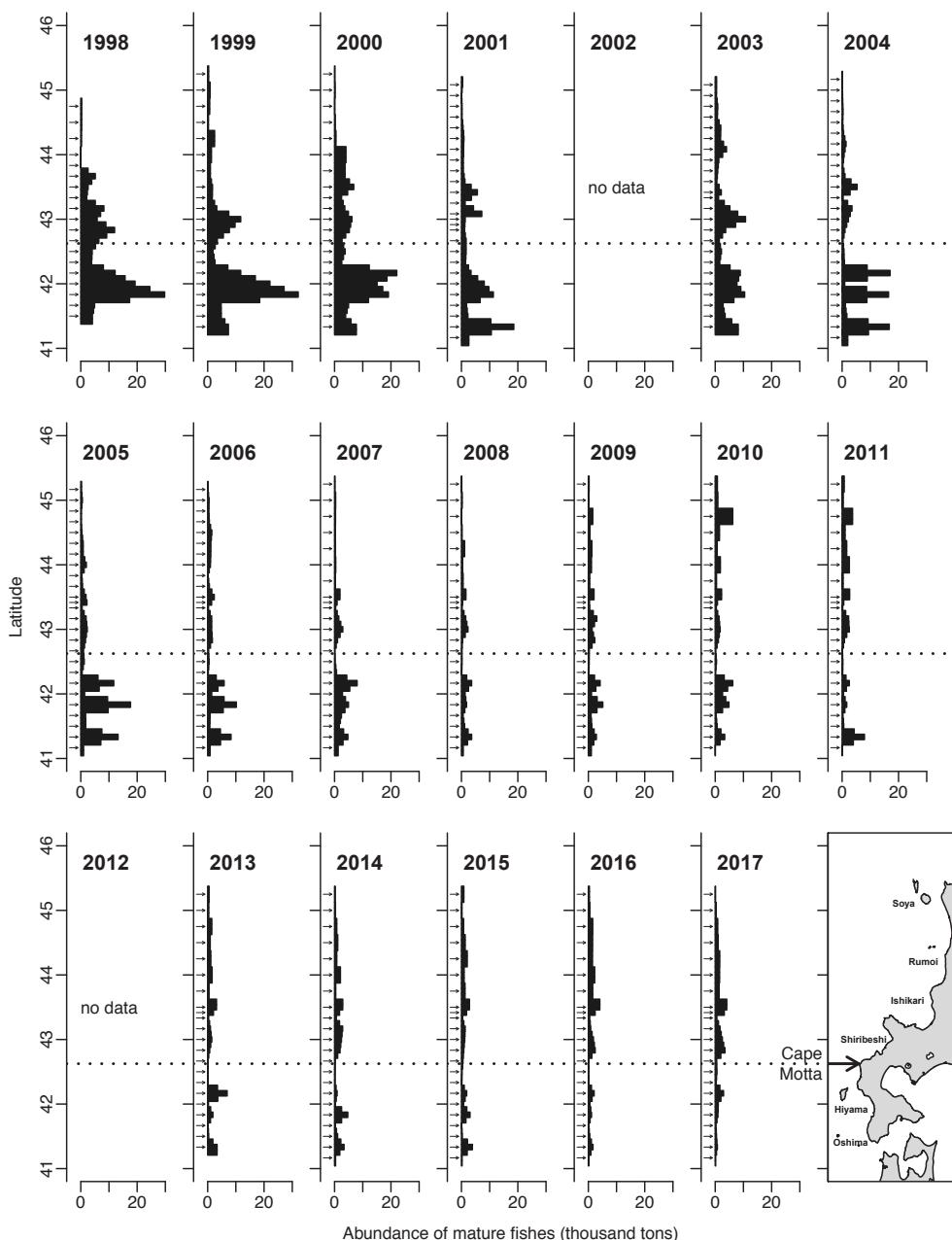


Fig. 3 Abundance of adult walleye pollock per 5° of latitude in autumn from 1998 to 2017, estimated by acoustic survey. Dashed lines indicate the boundaries between the Shiribeshi and Hiyama regions. Small arrows indicate the locations of acoustic survey lines.

に現存量分布のモードがあり、檜山・渡島海域では2~3つのモードがあった。また、2010年、2011年度については留萌海域沖合の北緯44度45分付近(沖合の武蔵堆周辺)にもモードがあった。

北海道日本海海域全体の産卵親魚現存量は2008年度まで減少傾向で推移した(Fig. 4A)。産卵親魚現存量を茂津多岬の南北で宗谷~後志海域と檜山・渡島海域に分けると、檜山・渡島海域は2017年度まで一貫して減少傾向にあったが、宗谷~後志海域では2008年度まで急激に減少した後、2009年度以降増加もしくは横ばい傾向となっ

ていた。海域全体の産卵親魚現存量に対して檜山・渡島海域の現存量が占める割合は、1998~2008年度には全体の56~77%であったが、2009年度以降、全体の50%未満に低下し、2016年度は21%，2017年度は24%であった(Fig. 4B)。

海洋環境 産卵親魚の分布に影響を与えた可能性がある環境指標として、1989~2017年度9月中旬~12月上旬に各2回実施された定期海洋観測の水温および塩分を5定点4層について抽出し、各年度の定点別深度別平均値を図示した(Fig. 5, 6)。

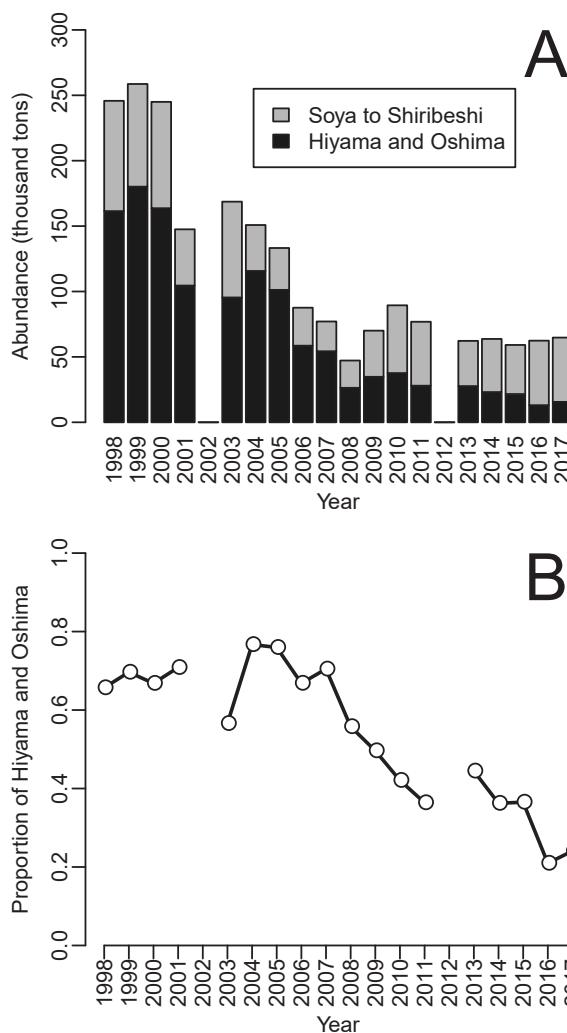


Fig. 4 Abundance of adult walleye pollock estimated by acoustic survey. (A) Abundances in the Soya to Shiribeshi regions and those in the Hiyama and Oshima regions. (B) Proportion of abundance in the Hiyama and Oshima regions to total abundance.

水温の平均値（各年度平均値の29年平均値、Fig.5に点線で表示）を見ると、深度200 mでは2.26~3.34°Cの範囲にあり、J26が最も低く、J51が最も高かった（Fig.5）。深度300 mでは1.16~1.33°Cの範囲にあり、J26が最も低く、J51が最も高かった。深度400 mでは0.75~0.84°Cの範囲にあり、J15が最も低く、J35が最も高かった。深度500 mでは0.45~0.63°Cの範囲にあり、J15が最も低く、J35が最も高かった。全体として、水温は北で低く、また深いほど低い傾向があった。また、深度200 m水温の経年推移を見ると、各定点とも経年変動が比較的大きく、J35, J41, J51では経年的な傾向はなかったが、J15では2005年度以降、J26では2006年度以降、経年値の平均を下回る年度が多くなっていた。深度300 mでは各定点とも経年的な変化はなかった。深度400 mと500 mでは各

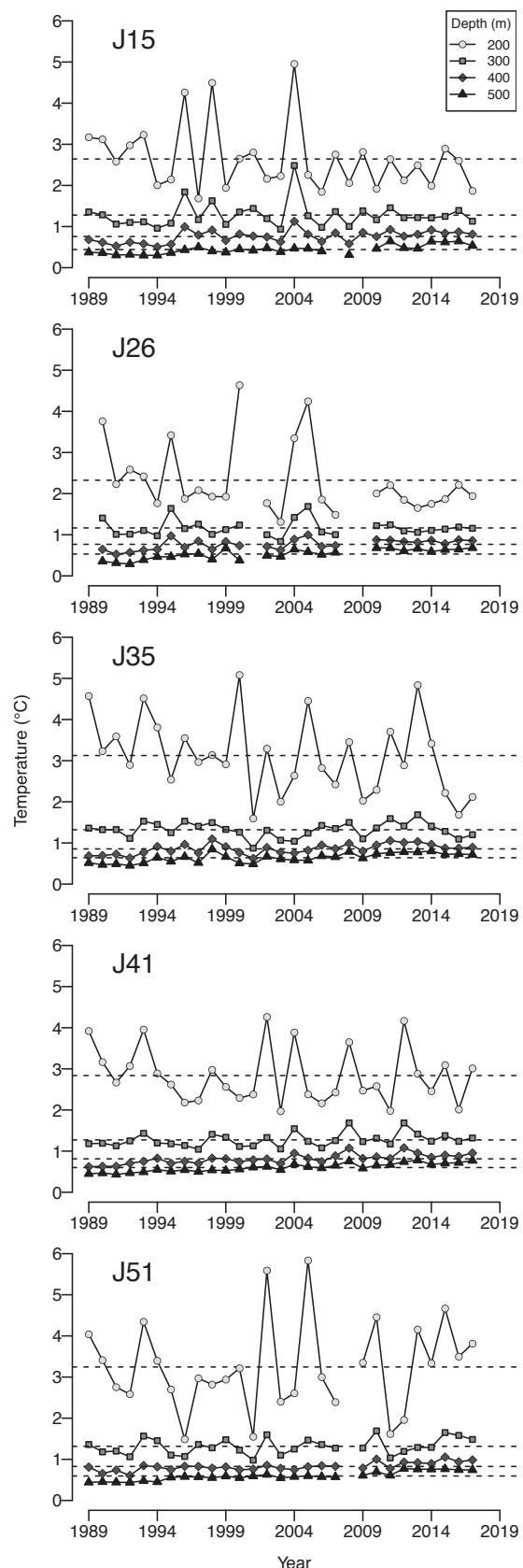


Fig. 5 Annual changes in mean water temperature from mid-September to early December at each depth at stations J15, J26, J35, J41, and J51. Dashed lines indicate mean temperature at each depth.

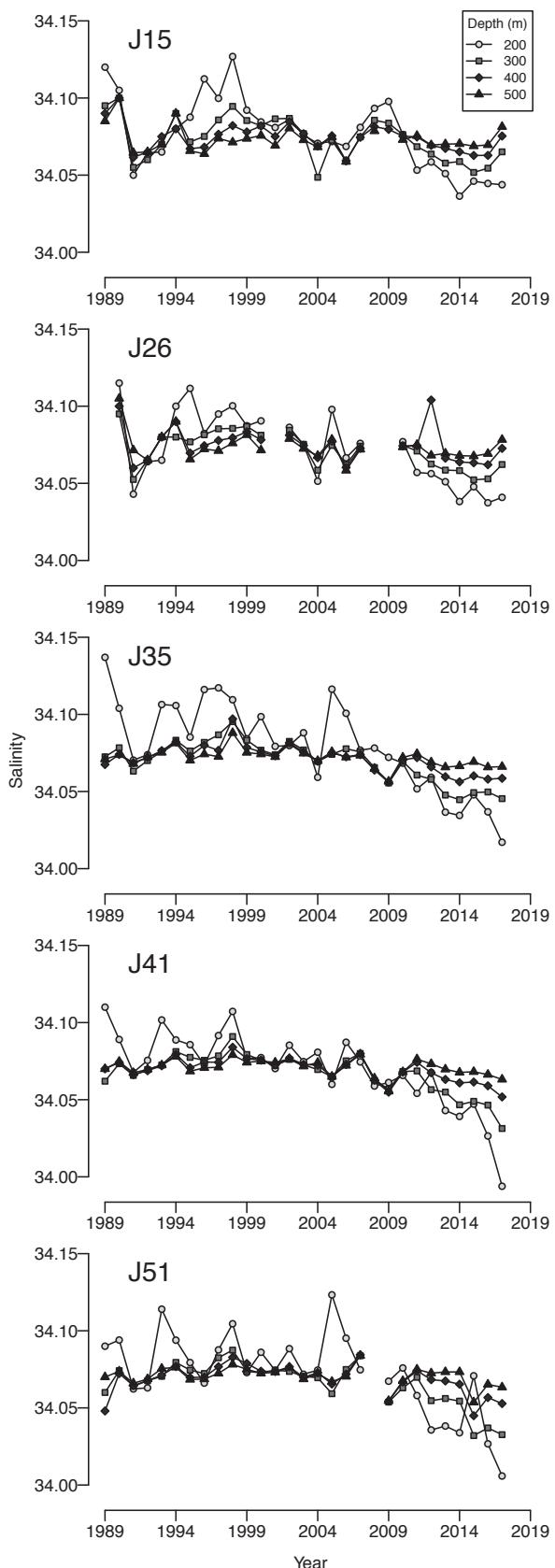


Fig. 6 Annual changes in mean salinity from mid-September to early December at each depth at stations J15, J26, J35, J41, and J51.

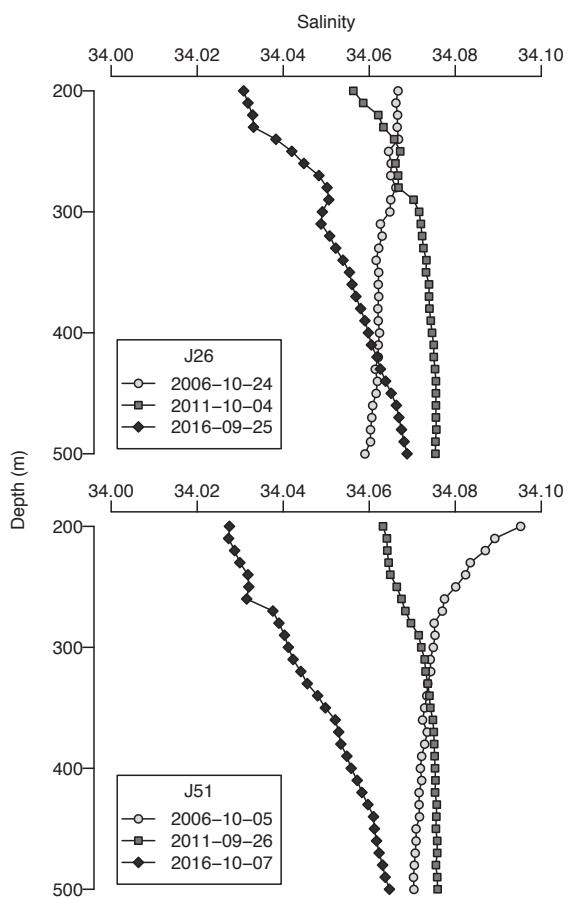


Fig. 7 Vertical profiles of salinity at stations J26 and J51.

定点とも緩やかに上昇しており、1989～1993年度と2013～2017年度の5年平均で比較すると、深度400 mでは0.23～0.25°C上昇、深度500 mでは0.25～0.31°C上昇していた。

塩分は、深度200～500 mの各層で経年的に低下傾向があり（Fig. 6）、この深度範囲においては2000年代前半頃まで浅い層ほど塩分が高い傾向があったが、2000年代後半頃から浅い層の塩分低下によって深度による塩分の差が小さくなり、さらに2010年代に入ってから浅い層の塩分がさらに低下した（Fig. 7）。

1989～2017年度のJ4線における対馬暖流北上流量は、1989年頃と1994年頃に比較的高い値を示した後、1997年にかけて減少した（Fig. 8）。その後は数年周期で増減を繰り返しており、長期的な増減傾向は見られなかったが、北上流量が0.5 Sv未満となった回数は1998～2007年度の2回に対して2008～2017年度は8回と多くなった。1971～1988年のMOIは1972, 1973, 1979年に14.9～16.8 hPaと低かったことを除き、18.9～25.2 hPaの範囲で高めに推移した（Fig. 9）。続く1989～2004年は1996年の24.9 hPaを除き、総じて低めの年が多かった。2005年、2006年は連続して高い値であったが、2007年は13.0 hPaと著しく低い値となった。2008～2018年は18.6～24.6 hPaの範囲

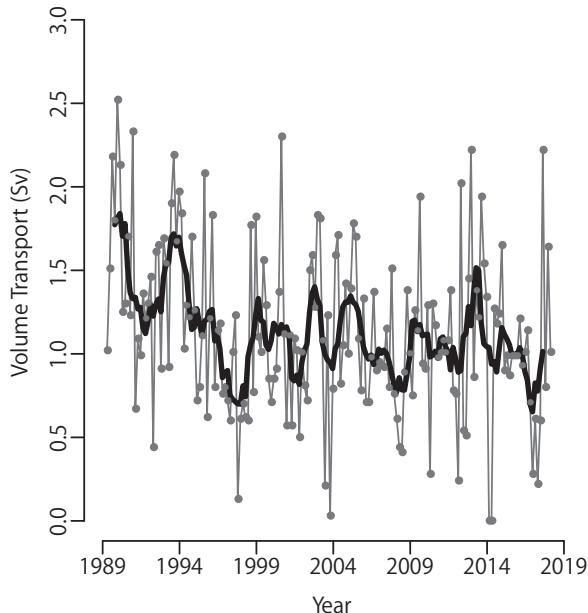


Fig. 8 Time series of northward volume transport of Tsushima Warm Current at J4-line in Sv (Sverdrup, 1 Sv = $10^6 \text{ m}^3/\text{s}$). Thick line indicates the 14-month moving average.

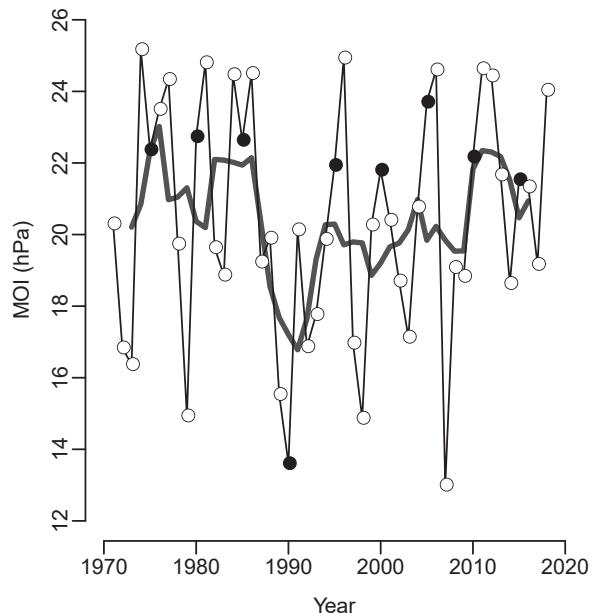


Fig. 9 Time series of the wintertime monsoon index (MOI): the sea level pressure difference between Nemuro, Japan, and Irkutsk, Russia. Thick line indicates 5-year moving average. Closed circles plot every 5 years.

で再び高めに推移した。MOIの5年移動平均では1971～1988年は高め、1989～2009年は低め、2010～2018年は高めであった。

考 察

産卵群の分布変化 沿岸漁業の海域別漁獲量の推移において、宗谷～後志海域と檜山・渡島海域では、漁獲量の増減傾向が異なっており、1992年度から2006年度には檜山・渡島海域の占める割合が6割以上となっていた(Fig. 2)。宇藤・夏目(1993)は延縄漁業の漁獲量と漁獲物組成から、漁獲量の経年変動には海域間、特に檜山海域と石狩湾・岩内湾との間に相違が見られることを示した。呉ら(2002)は1970～1999年度の日本海北部海域における漁獲量を解析し、宗谷～後志、檜山～青森、秋田～石川の3グループに分けられること、宗谷～後志と檜山～青森との間には高い負の相関があることを示した。三宅・田中(2006)は1935～2004年の70年間の漁獲量と水温の関係について検討し、後志海域では冬季水温と漁獲量に負の相関、檜山海域では冬季水温と漁獲量に正の相関があることを示した。本稿ではこれら従来の知見に加えて、2000年代後半以降の海域別漁獲量では檜山・渡島海域の占める割合が低下するという大きな変化があったことを確認した。また、1998年度以降の音響資源調査の結果からも2000年代後半以降、檜山・渡島海域における

る産卵親魚現存量の割合が低下し、産卵群分布が大きく変化したことを確認した(Fig. 3, 4)。

後志海域は1950年代以降1986年まで年間2万トン以上の漁獲があり、北海道日本海海域の沿岸漁業における最大の漁場であった(三宅・田中, 2006)。辻(1975)は海域別漁獲量の変化傾向から檜山への来遊が少なくなった1955年頃に分布の北偏傾向が生じたと推定したが、夏目(1998)は檜山海域で1960年代に極端な不漁が続いたことについて、対馬暖流が強く、産卵群分布深度が深かったため、当時の技術では漁獲できなかったためと推察した。2011～2017年度における檜山海域の不漁要因については、音響資源調査の結果から檜山・渡島海域の親魚分布量が少なくなったことが主因であったと考えられる。ただし、音響資源調査による産卵親魚現存量の分布割合に比べて、沿岸漁業漁獲量に占める割合の低下のほうが大きかったことから、分布深度が深くなつたことによる漁獲効率の低下や、資源保護のための漁獲努力量削減(2018年度資源評価書)なども漁獲量減少に影響した可能性がある。

既往の知見に加えて、本稿で示した沿岸漁業漁獲量の分析結果および音響資源調査結果から産卵群の分布変化を推定すると、1950年代以降においては1990年代～2000年前半を中心とした期間だけが産卵群分布の南偏傾向が顕著となり、檜山沖が最大規模の産卵場になっていたが、2000年代後半以降、産卵群分布の南偏傾向が解消されて

きたと考えられる。

産卵群分布と海洋環境との関係 北海道日本海海域における1989～2017年度の水温については、北側2定点J15, J26の深度200 mでは2000年代半ばから低めに推移していた (Fig.5)。檜垣ら (2009) は、強い冬季海面冷却による鉛直混合によって発達する武蔵堆周辺の冷水塊を“武蔵堆モード水”と呼び、2006年と2008年に特に厚い層を形成していたこと、および海面冷却の指標としてのMOIがその2年は大きかったことを示した。その後も深度200 mの低水温傾向は継続したが、これが武蔵堆モード水に相当するものかどうかを判断するには詳細な海洋学的検討が必要である。いずれにしても、2000年代半ば以降、MOIは比較的大きな値が多くなり (Fig.9)、冬季海面冷却が強めで推移していたと考えられることは、J15, J26の深度200 mにおける低水温傾向と整合する。海底深度200 m以浅の陸棚域や海堆が広がる積丹半島以北は熱容量が小さく、また北方ほど対馬暖流の影響が弱いことから、積丹半島以南よりも冬季海面冷却の影響が産卵群の分布する200 m以深まで到達しやすいのかもしれない。

利尻・礼文島周辺から雄冬岬沖にかけての宗谷・留萌海域（北緯43度40分以北）では、2004～2009年の音響資源調査で推定された産卵親魚現存量は0.6万～1.6万トンであったが、2010年に3.7万トンに増加し、2011～2017年は1.7万～3.1万トンと比較的多い値で推移した (Fig.3)。辻 (1975) は積丹半島以北の産卵場として、石狩湾、雄冬岬沖、天売・焼尻島周辺、利尻・礼文島周辺、礼文島の北部沖合海域、サハリン西岸を挙げ、その中心部分である雄冬、武蔵堆漁場では、秋季の遅くまで夏季の成層状態が維持される海況条件の年には漁況があまりよくない傾向があるとした。また、三宅・田中 (2006) は、1980年代以降、産卵回遊期の分布深度が表層の高水温の影響を受けて深くなることで、水深の浅い積丹半島以北の産卵場が衰退し、海底深度の深い檜山海域の産卵場が残ったとの仮説を示した。2000年代後半以降、武蔵堆周辺の深度200 mで低水温傾向が見られたこと、および産卵群の分布は高水温の制限を受ける (夏目, 1998; 三宅・田中, 2006) ことから、2000年代後半以降、雄冬岬以北では1990年代～2000年代前半よりも産卵群の分布に好適な海洋環境になった可能性を考えられる。宗谷・留萌海域では産卵群を主な漁獲対象とした漁業が行われていないため漁業から得られる情報は断片的であるが、資源量の増大や海洋環境の変化によって、かつての産卵場が復活する可能性もあるため、雄冬岬以北の宗谷・留萌海域でも各種漁業による漁獲状況に注目していく必要がある。

深度400～500 mの水温が5定点とも上昇傾向であった

ことについては日本海固有水の長期的な上昇傾向を捉えたものと考えられる。日本海固有水とは日本海の約300 m以深に存在する水温、塩分などがほぼ均質な水であり、1990年代以降の水温の上昇率は10年あたり深度800 mで0.06～0.09°C、2000 mで0.02°Cとされている (気象庁, 2013)。本稿で示した5定点の深度400 mにおける水温の上昇率は10年あたり0.1°C程度であり、長期的にはスケトウダラの分布にも影響する可能性が高い。三宅 (2012) は、10月の岩内湾と檜山海域における鉛直分布の中心深度はそれぞれ385～485 m、375～445 m、水温はそれぞれ0.53～0.80°C、0.57～0.98°Cと報告している。北海道日本海海域では北ほど、また深いほど水温が低い傾向があったことから、鉛直分布の中心である深度400～500 mの水温が上昇傾向であったことは、海域全体の水平分布が北へシフト (本研究) し、檜山海域では鉛直分布が深くなった要因の一つと考えられる。

塩分は、2000年代後半以降、北海道日本海海域全体で大きく低下していた (Fig.6, 7)。1988年度以前の塩分は未検討であるが、2000年代後半以降ではスケトウダラ産卵群の分布が大きく変化した時期と塩分低下が起こった時期は対応していたことから、スケトウダラの分布にも影響を与えるような海洋構造の大きな変化があったことが示唆される。比較的高塩分である対馬暖流の北上流量では2000年代から2010年代まで長期的な増減傾向が認められなかった (Fig.8) が、2008～2017年度に北上流量の低下回数が増加したことは深度200～500 mにおける塩分低下と関連している可能性があるため、さらに詳細な検討が必要である。

以上のことから、1980年代以降、産卵群の分布変化に影響した海洋環境としては、北海道日本海海域全体でスケトウダラ分布深度下部の水温が上昇した一方で、2000年代後半以降、積丹半島以北の分布深度上部では冬季海面冷却の強化により低水温傾向になったことが考えられる。

産卵群分布と資源状態との関係 産卵群分布が年代によって変化した要因を検討するためには、海洋環境のほか、資源状態や漁獲強度についても検討する必要がある。辻 (1975) はスケトウダラの数量増大には顕著な生活領域の拡大を伴うと述べ、1970年代に檜山海域に漁獲量増加をもたらした産卵群については北部日本海系群の南方へ張り出したものと推定した。三宅・田中 (2006) が分析していない2000年代後半以降の檜山・渡島海域における親魚分布量の減少については、海洋環境の影響に加えて、資源が低水準であることにより、分布変化が北側への拡大ではなく、シフトとして現れたものと考えられる。

年齢組成には海域間差があり (宇藤・夏目, 1993),

漁獲強度の変化は年齢組成を変化させると考えられるため、2014～2017年度に漁獲強度が大きく低下した（2018年度資源評価書）ことが産卵群分布に与える影響についてはさらに検討が必要である。宇藤・夏目（1993）は漁獲量変動や年齢組成の海域間差について、海域間での初産卵群と経産卵群の来遊率の差異によって説明できることを示し、それぞれの来遊率の変動は未成魚の成育場や成魚の索餌場の変化、それに伴う成育場および索餌場から産卵場への回遊経路の変化等に起因して生じていると推定した。未成魚期の主な成育場は積丹半島以北海域（佐々木・夏目、1990；夏目・佐々木、1995）とされており、この海域における0歳魚分布量（板谷ら、2009；板谷・三宅、2014；美坂・鈴木、2018）と1歳魚分布量（美坂・鈴木、2018）は調査船による稚魚ネットや着底トロールによる採集調査で明らかとなっているが、成魚の索餌場の経年変化については沖合域を含む広域的な情報が少なく、今後の検討課題である。

以上のことから、1980年代以降における産卵群の分布変化については、海洋環境の影響に加えて、資源量の増減に伴う分布域の拡大縮小の影響があったと考えられ、未成魚期や索餌期の分布状況や漁獲強度の変化による影響はさらに検討する必要がある。

産卵群の分布変化と再生産関係 産卵場の南偏により卵の生残率が低下した可能性（三宅ら、2008）が指摘されていることから、再生産に関連する産卵親魚重量SSB、加入尾数R（2歳時資源尾数）、RPS（再生産成功指数：R / SSB）を用いて、産卵群分布との関係を検討した。沿岸漁業漁獲量における檜山・渡島海域の割合が64～83%の高い水準を横ばい傾向で推移した1992～2006年度を産卵群南偏期として、産卵群南偏期の産卵親魚が生み出した子世代の1993～2007年級（以下、南偏期年級とする）と、産卵群南偏期ではない1981～1992、2008～2015年級（以下、非南偏期年級とする）に分けて、SSB、R、RPSの経年値および再生産関係（SSBとRの関係）を図示した（Fig. 10, 11）。1981～2000年級で比較すると、非南偏期の1981～1992年級は加入尾数4.0億～17.6億尾でRPSは1.8～9.7（平均4.3）、南偏期の1993～2000年級は加入尾数1.9億～3.9億尾でRPSは0.9～2.1（平均1.4）であり、南偏期には加入尾数が4億尾を超える年が見られなかった（Fig. 10, 11）。産卵親魚重量がBlimit（本田・八吹、2007）を下回った2001～2015年級で比較すると、南偏期の2001～2007年級は加入尾数253万～3.7億尾でRPSは0.6～7.0（平均1.9）、非南偏期の2008～2015年級は加入尾数196万～3.1億尾でRPSは0.5～11.9（平均2.9）であった。非南偏期のほうが平均RPSは高く、RPSの高い年級（2012、2015年級）が出現した一方で、RPSの極めて低

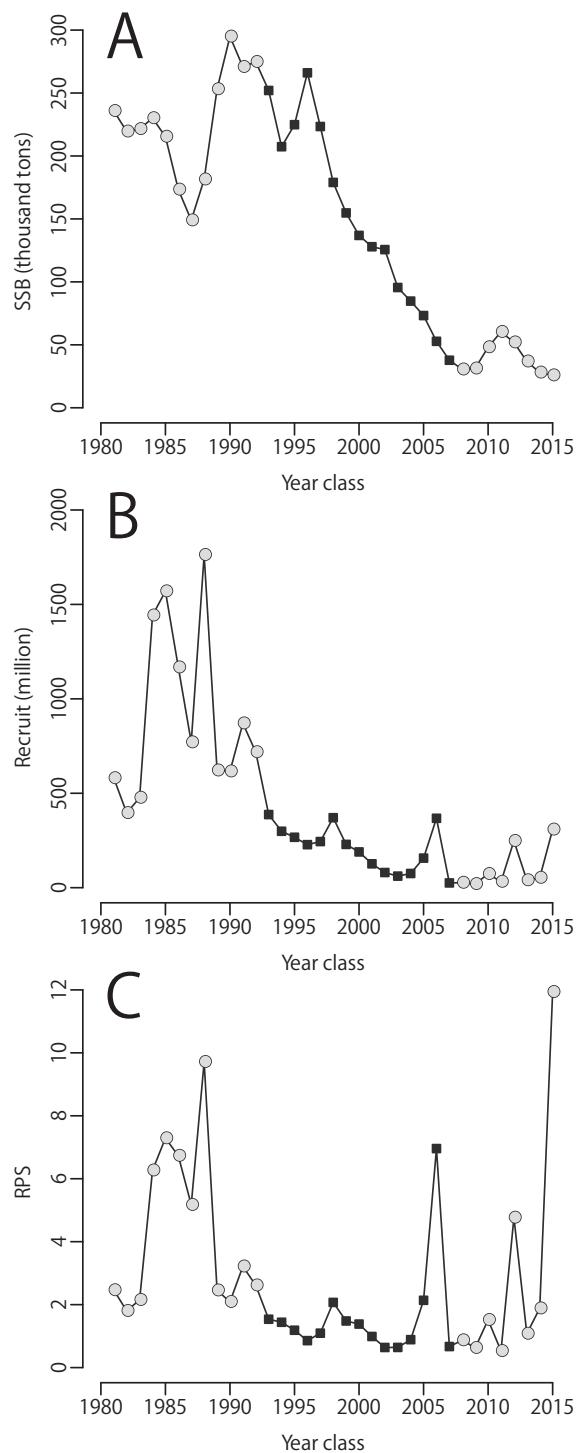


Fig. 10 Time series of (A) SSB (spawning stock biomass), (B) recruit (abundance at age-2), and (C) RPS (recruit per SSB). Closed squares show the year-class spawned during years when the proportion of catches in the Hiyama and Oshima regions to the total catches was high (>0.6).

い年級（2009、2011年級）も見られた（Fig. 10, 11）。このことについては、2008～2015年級を生み出したSSBが平均3.9万トンと低水準であり（Fig. 10A），宗谷～後志

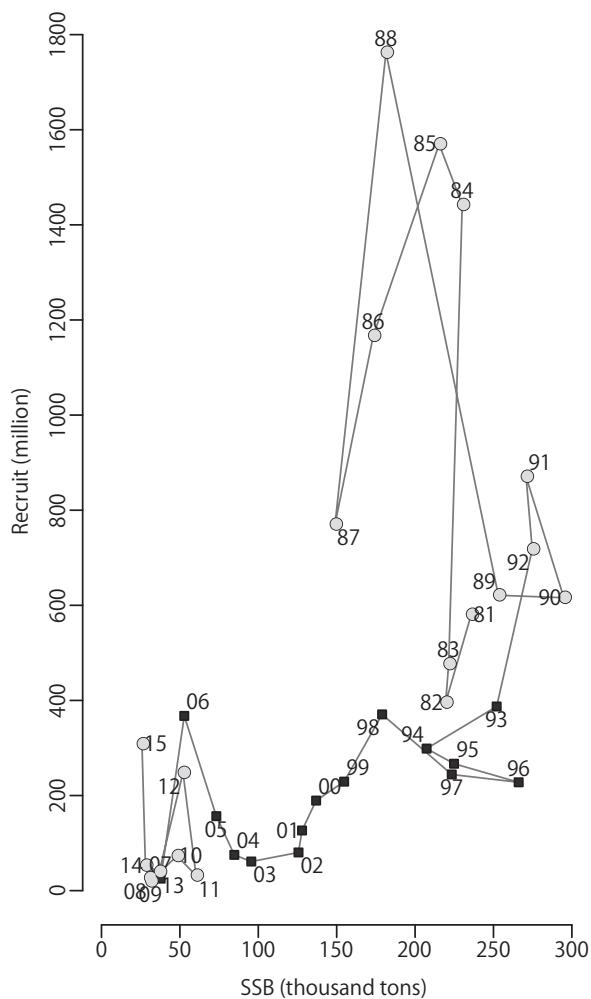


Fig. 11 Relationship between SSB (spawning stock biomass) and recruit (abundance at age-2). Closed squares show the year-class spawned during years when the proportion of catches in the Hiyama and Oshima regions to the total catches was high (>0.6). Two-digit number plots indicate the year-class.

海域における産卵親魚現存量は南偏期であった2000年前後より少ないこと (Fig. 3A) により、産卵場や産卵期の多様性が低いことがRPSの変動を大きくしているのかもしれない。

日本海スケトウダラの加入量変動要因としては、これまでいくつかの仮説が提示されている。夏目・佐々木 (1995) は日本海とオホーツク海における1986～1989年の仔稚魚調査結果から、オホーツク海へ移送される仔稚魚の多寡が日本海の資源量を左右する要因の一つになる可能性を示した。板谷ら (2009) は2005～2008年の調査結果から、低い資源水準下で産卵場が南偏している状況ではオホーツク海へ移送される仔稚魚の割合が年級豊度を決定する要因とは考えがたいとした。Funamoto (2011) は日本海北部系群の資源変動について、産卵親魚量

(SSB) のほか、冬季表面水温 (SST), 対馬暖流流量 (NVT), モンスーンインデックス (MOI) を説明変数とした数学的モデルにより加入量変動を説明し、主に卵・仔稚魚期の生残に着目して加入量変動要因を議論した。Funamoto (2011) が用いたこれらの環境指標はいずれも冬季海面冷却に関連する指標であり、Funamoto *et al.* (2014) は冬季水温と加入量に負の相関があった要因の一つとして、冬季水温が高い年には産卵場と成育場の距離が遠くなる可能性 (三宅ら, 2008) を挙げている。2010年度から成育場に近い後志海域以北の産卵親魚現存量が多くなった (Fig. 3) ことは2000年度以降としては豊度の高い2012, 2015, 2016年級 (美坂・鈴木, 2018) が高頻度で出現した要因の一つかもしれない。特に2015, 2016年級では卵・仔稚魚期の水温が高めであったが加入量は比較的多かった (美坂・鈴木, 2018) ことから、表層水温が比較的低い積丹半島以北海域もしくはその近辺で産卵された個体が多かった可能性が考えられる。

本研究の結果に基づいて従来の加入量変動仮説を整理すると、産卵群分布の非南偏期には成育場となる積丹半島以北もしくはその近辺での産卵が多く、オホーツク海など成育場外への仔稚魚の移送量が重要な変動要因となる可能性があり (夏目・佐々木, 1995), 南偏期には卵・仔稚魚が積丹半島以南の表層近くで致死的な高水温に遭遇しないことや積丹半島以北の成育場への移送の成否が生残を左右する重要な変動要因となる (三宅ら, 2008 ; Funamoto, 2011)。つまり、環境変動に応答した産卵群の分布変化に伴って、産卵場と成育場との距離が変化することにより、加入量変動の主な要因がスイッチすることが示唆される。

以上のことから、日本海スケトウダラの加入量は親魚量だけでは決まらず、マイワシやスルメイカなどのレジームシフト (Kawasaki, 1983) 資源と同様に、環境変動に応答した資源変動を示すことが示唆される。国連海洋法条約では、自国の排他的経済水域内の漁業資源について、MSY (最大持続生産量) を実現する資源水準を管理目標として資源管理を行うことが規定されている。しかし、レジームシフト資源においてはデータセットの得られている期間の再生産関係から単純に算定したMSY 管理基準値では現実的な管理目標にならないと考えられる。本研究の結果を踏まえれば、スケトウダラ日本海北部系群は、レジームシフト資源の一つとして、年代別の再生産関係や、海域別に親魚量を重み付けした再生産関係などを資源評価に利用することも検討する必要があるだろう。

謝 辞

本論文で使用した各種資料は道総研水産試験場が長期にわたって実施してきた漁獲統計調査、スケトウダラ資源調査、定期海洋観測によって得られたものである。これらの調査、観測に携わってきた稚内・中央・函館水産試験場の研究員各位と試験調査船北洋丸、おやしお丸、金星丸の各船長および船員各位に深く感謝する。また、海洋観測データのとりまとめや海洋環境に関する文献収集にご協力いただいた中央水産試験場の佐藤政俊博士に感謝の意を表する。

なお、本研究では漁業生物の資源・生態調査研究、我が国周辺水産資源調査・評価等推進委託事業、資源変動要因分析調査事業、資源量推定等高精度化推進事業によって得られたデータを使用した。

引用文献

- 安部幸樹、飯田浩二、向井徹. スケトウダラの音響資源調査における面積後方散乱係数の昼夜変動. 日本国水産学会誌 1999; 65: 252-259.
- Foote KG, Traynor JJ. Comparison of walleye pollock target strength estimates determined from in situ measurements and calculations based on swimbladder form. *J. Acoust. Soc. Am.* 1988; 83: 9-17.
- Funamoto T. Temperature-dependent stock-recruitment model for walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) around northern Japan. *Fish. Oceanogr.* 2007; 16: 515-525.
- Funamoto T. Causes of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) recruitment decline in the northern Sea of Japan: implications for stock management. *Fish. Oceanogr.* 2011; 20: 95-103.
- 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. *Fish. Sci.* 2014; 80: 117-126.
- Hanawa K, Watanabe T, Iwasaka N, Suga T, Toba Y. Surface Thermal Conditions in the Western North Pacific during the ENSO Events. *J. Meteor. Soc. Japan* 1988; 66: 445-456.
- 檜垣直幸、磯田豊、本田聰. 北海道西方の武藏堆周辺海域で観測されたモード水. 海の研究 2009; 18: 335-350.
- 本田聰、千村昌之. 平成20年度スケトウダラ日本海北部系群の資源評価. 平成20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・独立行政法人水産研究センター, 東京. 2009; 293-354.
- 本田聰、八吹圭三. 平成18年スケトウダラ日本海北部系群の資源評価. 平成18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・独立行政法人水産研究センター, 東京. 2007; 267-312.
- 板谷和彦、三宅博哉、和田昭彦、宮下和士. 北海道日本海・オホーツク海沿岸域におけるスケトウダラ仔稚魚の分布. 水産海洋研究 2009; 73: 80-89.
- 板谷和彦、三宅博哉. 日本海スケトウダラの加入量を早期に知る. 北水試だより 2014; 88: 1-4.
- Kawasaki T. Why do some pelagic fishes have wide fluctuations in their numbers? *FAO Fish. Rep.* 1983; 201: 1055-1080.
- 気象庁. 海洋の健康診断表 総合診断表 第2版. 2013; 242pp.
- 美坂正、鈴木祐太郎. 3.9スケトウダラ. 平成28年度道総研稚内水産試験場事業報告書 2018; 49-55.
- 三宅博哉、石田良太郎、武藤卓志、安部幸樹、向井徹、飯田浩二. 音響資源調査で得られた北海道西岸日本海のスケトウダラ産卵群の分布特性と現存量. 北水試研報 2001; 59: 11-24.
- 三宅博哉、田中伊織. 北海道日本海のスケトウダラ資源の変動. 月刊海洋 2006; 38: 187-191.
- 三宅博哉、板谷和彦、浅見大樹、嶋田宏、渡野邊雅道、武藤卓志、中谷邦敏. 卵分布からみた北海道西部日本海におけるスケトウダラ産卵場形成の現状. 水産海洋研究 2008; 72: 265-272.
- 三宅博哉. 音響学的手法を用いたスケトウダラ北部日本海系群の資源動態評価と産卵場形成に関する研究. 北水試研報 2012; 81: 1-56.
- 中多章文、田中伊織. 北海道西岸における対馬暖流傾斜圧流量の季節および経年変化. 北水試研報 2002; 63: 1-8.
- 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. 北水試研報 1995; 47: 38-40.
- 夏目雅史. 北海道桧山海域スケトウダラ延縄漁業の漁獲深度と水温. 北水試研報 1998; 53: 1-8.
- 呉泰棋、桜本和美、長谷川誠三. 日本海北部海域におけるスケトウダラの漁獲量変動と水温の関係. 日本国水産学会誌 2002; 68: 866-873.
- Pope, JG. An investigation of the accuracy of virtual population analysis using cohort analysis. *Int. Comm. Northwest Atl. Fish. Res. Bull.* 1972; 9: 65-74.

佐々木正義, 夏目雅史. 武藏堆およびその周辺水域におけるスケトウダラ若年魚の分布. 日本水産学会誌 1990; 56: 1063-1068.

辻 敏. 桧山支庁沿岸のスケトウダラ調査. 北水試月報

1975; 32: 1-20.
宇藤 均, 夏目雅史. 北海道日本海沿岸におけるスケトウダラの年齢組成の地域差とその原因に関する一考察. 北水試研報 1993; 42: 215-228.

北海道檜山海域における産卵前期のスケトウダラ分布の経年変化

渡野邊雅道¹, 本間隆之², 武藤卓志¹

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釧路水産試験場

Annual change of walleye pollock *Gadus chalcogrammus* distribution during the pre-spawning season off Hiyama, Hokkaido

MASAMICHI WATANOBE¹, TAKAYUKI HONMA² and TAKASHI MUTO¹

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

² Kushiro Fisheries Institute, Hokkaido Research Organization, Kushiro, Hokkaido 085-0027, Japan

Annual changes in abundance and distribution of walleye pollock *Gadus chalcogrammus* off Hiyama, Hokkaido was examined by acoustic surveys and hydrographic observations in December (pre-spawning season) between 2002 and 2016. In 2002, an estimated 30,000 tons of walleye pollock was extensively distributed in the coastal area of Hiyama. The abundance and distribution area reduced each year, and only about 4,000 tons of pollock were distributed off the coast of Ainuma in 2016. In addition, in recent years the time to leave to the spawning-layer is delayed due to delay in sexual maturation.

キーワード：計量魚群探知機，産卵前期，スケトウダラ，檜山海域，分布

北海道南西部に位置する檜山海域ではスケトウダラ *Gadus chalcogrammus* の産卵場が形成され（三宅ら, 2008），冬季に産卵のため来遊する成魚を対象とした漁業が営まれている（辻, 1975）。当海域のスケトウダラは、10月には沖合から沿岸にかけて深度400～450m層の水温0.5℃付近に広く分布しているが、産卵期にあたる1～2月には沿岸域の深度150～250m層の2～3.5℃の水温帯に浮上することが知られている（前田ら, 1988；夏目, 1998）。また、夏目（1998）は、延縄漁業によるスケトウダラの漁獲深度が11月上旬には350m前後であったが、11月下旬以降には230m前後まで浅くなり、この漁獲深度の上昇は魚群が来遊層の日本海固有水（https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/mar_env/knowledge/koyusui/koyusui.html, 2018年12月27日）中から産卵適水温である2～5℃の日本海固有水と対馬暖流の境界層にまで浮上したため、と報告している。

檜山海域におけるスケトウダラの漁獲量は1990年代前半から減少傾向が続いており、2015年漁期の漁獲量は612トンで、1990年以降では最も多かった1993年（17,770

トン）の約3%にまで減少した（渡野邊, 2018）。漁獲量の減少に伴い、スケトウダラ漁業の漁獲努力量（延縄漁の使用縄数）も大幅に減少しており、2015年の使用縄数は1998年の約8%であった（渡野邊, 2018）。

スケトウダラは1996年以降漁獲可能量（TAC）による管理が実施され、檜山海域のスケトウダラが属する日本海北部系群についても毎年資源評価が実施されている（山下ら, 2018）。しかし、前述のように近年は漁業形態が大きく変化しているため、漁業情報のみで資源評価を行うのは困難となっている。そこで近年はVPA等の資源評価を補う形で、資源量を直接推定する計量魚群探知機（以降、計量魚探機と略す）を用いた音響資源調査が導入されている（三宅, 2012）。これまでスケトウダラを対象とした音響資源調査は、北海道大学や北海道区水産研究所、北海道立水産試験場によって精力的に行われてきた（飯田ら, 1995；本田, 2004；三宅ら, 2001など）。檜山海域においても、すけとうだら延縄漁業の漁期前（10月）と漁期中（12月）に音響資源調査を実施し、得られた調査結果は資源評価に活用されている（<http://www>.

報文番号A572 (2019年1月10日受理)

*Tel: 0138-83-2892. Fax: 0138-83-2849. E-mail: masamiti-watanobe@hro.or.jp

fishexp.hro.or.jp/exp/central/kanri/SigenHyoka/Kokai/, 2018年12月27日)とともに、スケトウダラ調査速報 (<http://www.hro.or.jp/list/fisheries/research/hakodate/section/zoushoku/tpc0530000002md.html>, 2018年12月27日)として漁業関係者に情報提供されている。

三宅 (2012) は1996～2007年に檜山海域で得られた音響資源調査データを用いてスケトウダラの分布特性や生息環境について検討しているが、産卵回遊期の10月についての報告である。また、産卵期におけるスケトウダラの分布回遊や産卵場の形成、漁場環境については前田ら (1988) が、漁期中の延縄漁業による漁獲深度や漁獲水温、成熟度組成の変化については夏目 (1998) が報告しているが、調査海域は主に主産卵場周辺に限られており、いずれも数年間の調査結果にとどまった報告である。

そこで本研究では、漁獲量の減少が続いている2002年から2016年にかけて、産卵前期の12月にスケトウダラ漁場が形成される熊石沖から上ノ国沖までの広範囲において音響資源調査と海洋観測を実施し、スケトウダラの水平、鉛直分布やその生息環境が経年的にどのように変化していたかを明らかにすることを目的とした。

試料及び方法

音響資源調査と海洋環境調査 音響資源調査は、Fig. 1 に示した檜山海域の熊石沖から上ノ国沖にかけて、2002

～2016年までの14年間（2009年は荒天のため調査中止）、北海道立函館水産試験場試験調査船金星丸（151トン）と北海道立稚内水産試験場試験調査船北洋丸（237トン）を用いて実施した（Table 1）。音響資源調査の調査線は、すくどうだら延縄漁場が形成される熊石沖～上ノ国沖合に2.5nmi（nautical mile：海里）間隔で東西方向に設定した。調査線の海底深度は概ね100～1000mとした。檜山沖に分布するスケトウダラは日周鉛直移動を行い、夜間は鉛直方向に分散して比較的浅い深度にも分布するのに対し、昼間は深層で集群する傾向がある（三宅, 2012）。そこで、より精度の高い分布量推定を行うために比較的

Table 1 Summary table of the acoustic surveys

Year	Date	Transect lines	Research vessel
2002	December 9–10	A–H	Kinsei Maru
2003	December 1–3	A–J	Kinsei Maru
2004	December 14–15	A–H	Hokuyo Maru
2005	December 6–7	A–J	Kinsei Maru
2006	December 6–11	A–J	Kinsei Maru
2007	December 7–8	A–J	Kinsei Maru
2008	December 3–4	A–J	Kinsei Maru
2010	December 6–7	A–J	Kinsei Maru
2011	December 7–14	A–J	Kinsei Maru
2012	December 12–15	A–J	Kinsei Maru
2013	December 9–17	A–J	Kinsei Maru
2014	December 9–15	A–J	Kinsei Maru
2015	December 11–14	A–J	Kinsei Maru
2016	December 12–13	A–J	Kinsei Maru

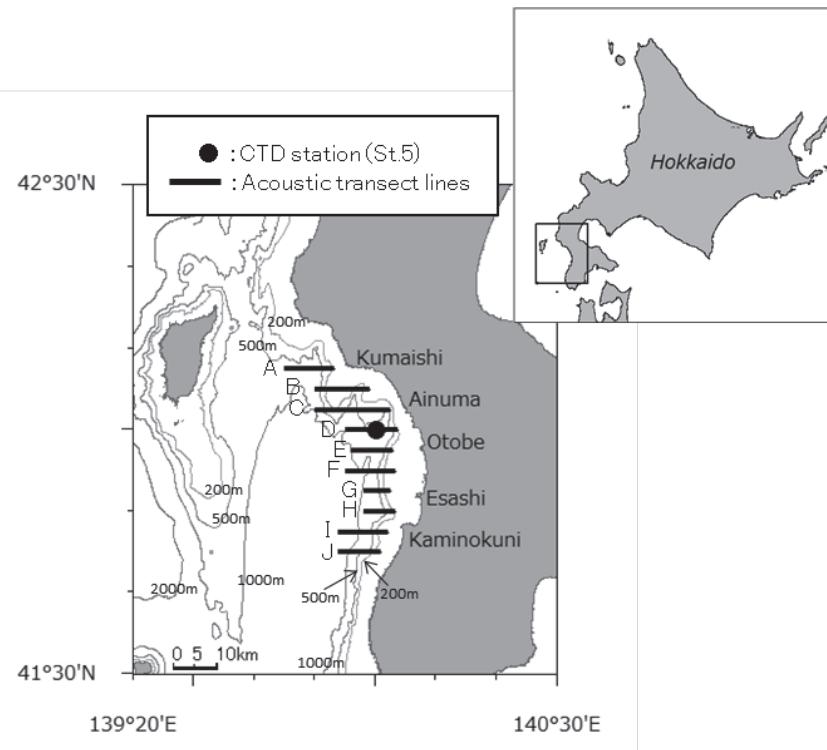


Fig. 1 Survey area: transect lines for the acoustic surveys, the CTD station(St.5) and bottom contour lines.

スケトウダラ分布の集中度が低く、海底デッドゾーンの影響が少ないと考えられる夜間（三宅ら、2001）に音響資源調査を実施した。

音響データの収集には、金星丸および北洋丸の船底に装備されている計量魚探機（Kongsberg社製、EK60）を用い、調査線上を10ノットで航走して収集した。荒天等で泡切れ等が生じた場合は適宜減速した。使用した周波数は38kHz、パルス幅は1.0msとした。調査開始前に直径60mmの銅球を標準球として計量魚探機の較正を行った。調査開始前に実施できなかった場合は、調査後に実施した。

海洋環境調査は、乙部沖のSt.5（Fig.1）において金星丸および北洋丸に装備されているCTD（Sea-bird社製、SBE-911plus）を用いて、表層から深度500mまでの水温と塩分を測定した。

トロール調査 魚種確認のため、計量魚探機で観察されたスケトウダラと思われる魚群反応を対象に、中層トロール網（網口高さ8m、コッド内網目合45×43mm）もしくは着底トロール網（網口高さ3m、コッド内網目合30×30mm）を用いてサンプルの採集を行った。得られたサンプルは船上で魚種毎に計数し、スケトウダラは冷凍して持ち帰った。持ち帰ったスケトウダラは、陸上の実験室で、尾叉長（mm）、体重（g）、性別、生殖腺重量（g）を測定した。また、生殖腺の発達程度を調べるため、各個体の生殖腺重量指数（GSI）を以下の（1）式で求めた。

$$GSI = GW / BW \times 100 \quad (1)$$

ここで、GWは生殖腺重量（g）、BWは体重（g）を示す。

音響データの解析 計量魚探機で得られた音響データの解析にはEchoview（Miriax社製、Ver.7）を用いた。音響データから得られたエコーグラムの特徴は、急峻な海底付近の深度200～500m層に強い反応が見られ、その反応は沖合方向に層状に続いている（Fig.2）。この反応を対象に2005～2008年に中層トロール調査を実施したところ、スケトウダラが全漁獲重量の90～100%を占めていた。このことから、深度200～500m層に層状に分布する反応をスケトウダラと判断し、以降、同様な特徴の反応をスケトウダラ魚群として抽出した。また、100m以浅にも層状の反応が見られたが（Fig.2）、三宅ら（2001）に従い、この表層の反応はスケトウダラではないと判断した。

スケトウダラの分布量は、三宅（2012）に従い以下のように求めた。抽出したスケトウダラの反応について、深度100～750mまで水平方向1nmi毎の平均NASC（面積散乱係数；Nautical Area Scattering Coefficient : m²/nmi²）を算出し、調査線毎にNASCの総計を求めた。この各調査線のNASCの総計に調査線間の距離（2.5nmi）を乗じ、

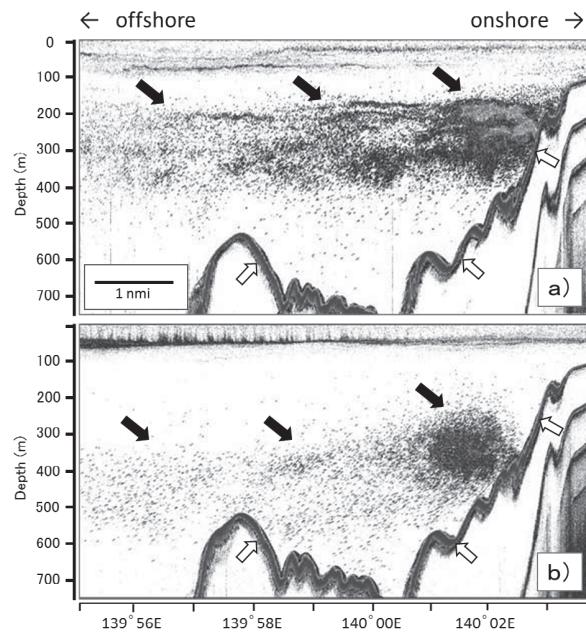


Fig.2 Typical echograms of walleye pollock observed along line D in (a) 2005 surveys and (b) 2015 surveys. Black arrows indicate walleye pollock. White arrows indicate the sea bottom.

これをトロール調査で採集したスケトウダラの測定結果から算出した平均散乱断面積（ $\bar{\sigma}$ ）で除することで分布尾数を計算した。これにスケトウダラの平均体重を乗じて各調査線区間の分布量を求めた。なお、2002～2004年、2014年、2016年は、トロール調査が実施できなかったため、調査日前後に調査海域内の乙部沖や江差沖において延縄で漁獲されたスケトウダラの測定結果を使用して分布量を推定した。

北緯42度のDラインについて、東経140度を中心として東西5nmiの範囲（Fig.2）について深度100～750mまで10m毎にNASC値を集計し、スケトウダラの鉛直分布の検討に用いた。深度層別NASCが最大となる深度層をスケトウダラの分布の中心深度（Center Depth）とした。また、スケトウダラの分布層の上限および下限（Upper, Lower）は、層別NASC値が $10\text{m}^2/\text{nmi}^2$ 以下となる深度とし、下限深度と上限深度の差を分布層の厚さとした。

漁獲物調査 檜山海域で漁獲されるスケトウダラの成熟状況を調べるために、2002～2016年（漁期年）の1月にスケトウダラの主要水揚げ港である乙部漁港に水揚げされたスケトウダラを標本採取し、雌の生殖腺を肉眼で観察し、成熟度を判別した。成熟度の区分は、北海道立水産試験場（1996）に従い、成熟状況を5段階（未熟:10, 真子:20～22, 水子:31～33, 放卵中:40, 放卵後:50）に分けた。なお、2008年、2010年、2015年、2016年は1月の水揚げがほとんど無く標本はない。

漁獲統計調査 檜山海域における地区別のスケトウダラ

水揚げ状況を調べるために、スケトウダラの主要水揚げ港である熊石、乙部（豊浜地区を含む）、江差、上ノ国（漁獲量データを収集し、漁期年度別（4月から翌年3月）に集計した。また、熊石と乙部は漁場輪番制（漁場を3区分し輪番で操業している）により漁場を共用しており、江差の漁業者は上ノ国海域で操業することがあるため、「熊石・乙部」と「江差・上ノ国」の2地区に分けて集計を行った。

結果

分布量 音響資源調査結果から推定されたスケトウダラ分布量の経年変化をFig.3に示す。調査海域の分布量は、

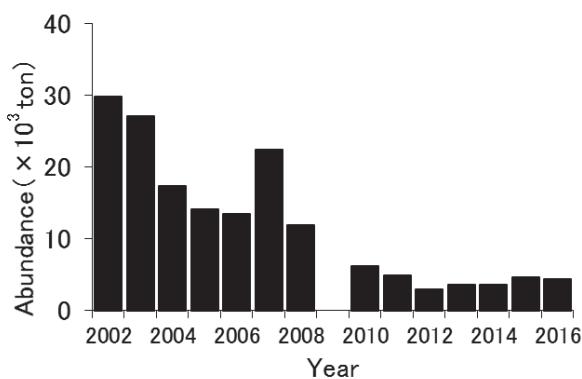


Fig.3 Acoustically estimated abundance of walleye pollock in December between 2002 and 2016.

調査を開始した2002年の約3万トンが最も多く、その後減少を続け2006年は1.3万トンとなった。2007年には2.2万トンに増加したが、2008年は再び減少し1.2万トンとなった。2010年以降はさらに減少し3千~6千トンで推移し、直近の2016年は約4千トンとなった。

水平分布 調査海域におけるスケトウダラの水平分布をFig.4に示す。調査年を通じて、12月にはスケトウダラは沿岸側に集中して分布し、沖合側では少なかった。この沿岸側にまとまって分布した地点を海底地形の特徴と照らし合わせると、水深200~500mの急峻な斜面において分布が多くなるといった特徴が見られた（Fig.1）。

等深線に沿った南北方向の分布を経年に見ると、2002~2005年はスケトウダラ漁場が形成される相沼沖から上ノ国沖（Fig.1のC~J）にかけて広範囲に分布していたが、2006~2008年は江差沖（F~H）での分布が少なくなり、北部の相沼沖から乙部沖（C~E）と南部の上ノ国沖（I~J）とに分かれて分布するようになった。2010~2013年は相沼沖（C）ではまとまった分布が見られたが、他の海域では2008年以前と比べて分布が少なくなった。2014~2016年は相沼沖の等深線が陸側に向かって入り込んだ、漁業者が言う「くぼみ」周辺に分布が集中し、他の海域ではほとんど分布が見られなくなった。

鉛直分布・分布水温 2002~2016年のDラインにおけるスケトウダラの鉛直分布をFig.5に、各年の分布深度範囲と分布水温範囲をTable 2に示す。分布の中心深度は175~385m（平均269m）の範囲にあり、2007年までは

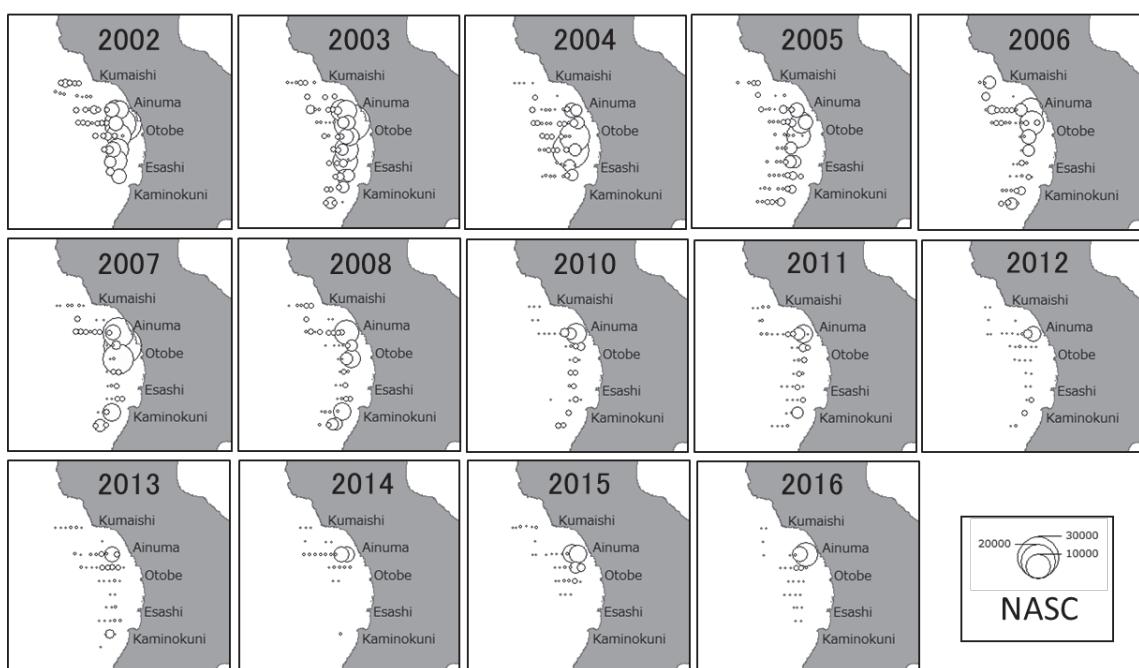


Fig.4 Horizontal distribution of walleye pollock observed in December between 2002 and 2016.
Size of circles are proportional to pollock density (NASC) calculated in 1 mile intervals.

Table 2 Summary of surveys at line D and St.5 in December

Year	pollock distribution depth (m)				Temperature (°C) at the depth			
	Upper	center	Lower	Range	Upper	center	Lower	Range
2002	105	205	485	380	10.26	5.56	0.65	9.61
2003	125	195	485	360	4.22	2.10	0.52	3.70
2004	135	265	435	300	4.34	1.28	0.56	3.78
2005	145	195	435	290	9.69	4.71	0.74	8.95
2006	125	185	425	300	5.46	2.49	0.59	4.87
2007	115	175	435	320	4.78	2.19	0.68	4.10
2008	145	255	485	340	10.86	4.41	0.60	10.26
2010	205	235	385	180	3.93	2.88	1.13	2.80
2011	225	265	445	220	2.90	1.78	0.81	2.09
2012	295	355	425	130	2.17	1.37	0.97	1.20
2013	215	325	505	290	2.46	1.21	<0.70	-
2014	285	365	525	240	1.50	1.03	<0.75	-
2015	215	355	565	350	7.55	1.48	<0.98	-
2016	315	385	585	270	0.89	0.78	<0.57	-
Max	315	385	585	380	10.86	5.56	1.13	10.26
Min	105	175	385	130	0.89	0.78	-	-
Mean	189	269	473	284	5.07	2.38	-	-

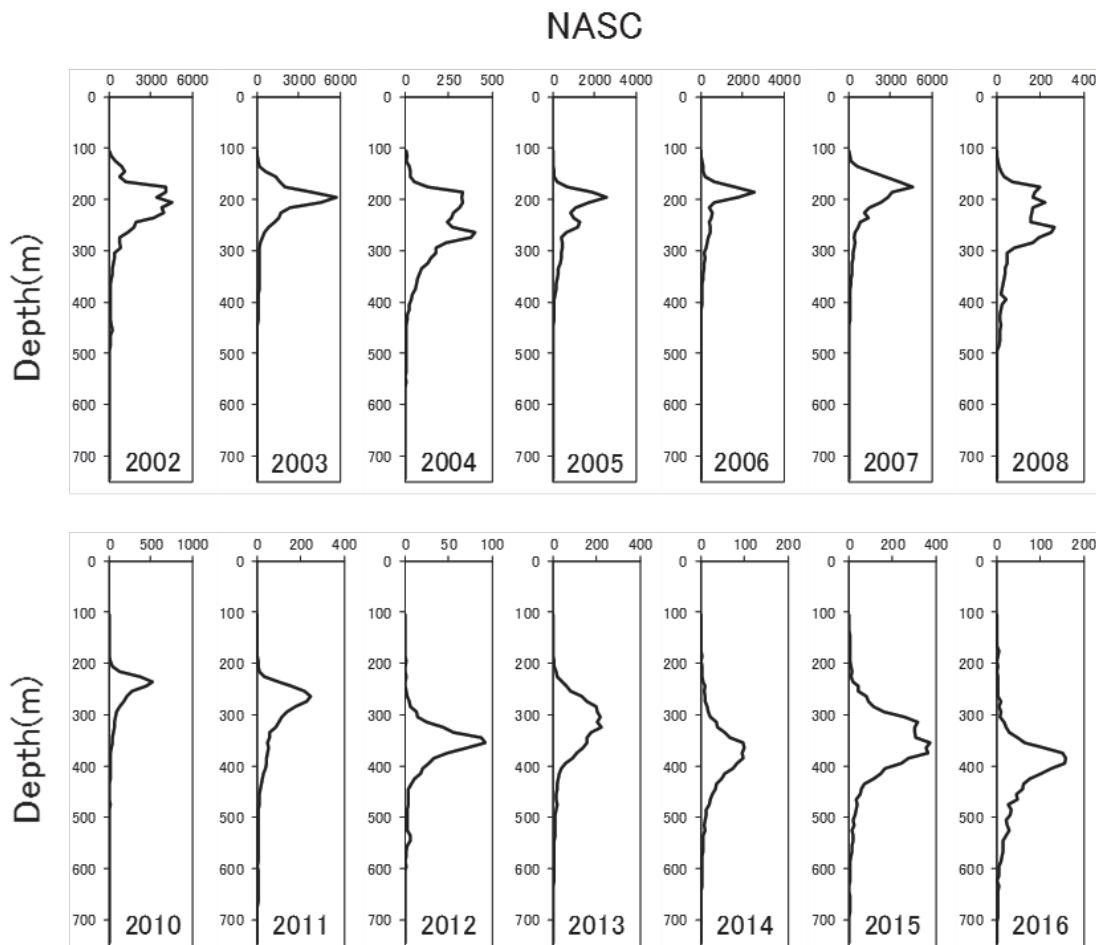


Fig. 5 Vertical distribution of walleye pollock observed during each acoustic survey at line D.

200m以浅となる年が見られたが、2008～2011年には235～265mの範囲とやや深くなり、2012年以降は300m以深と年々深くなる年が見られるようになった。上限深度は105～315m（平均189m）の範囲にあり、2008年までは150m以浅で推移したが、2010年以降は205～315mと深くなかった。下限深度は385～585m（平均473m）の範囲にあり、2012年までは500m以浅で推移したが、2013年以降はより深くなり500mを超えていた。このように、2008年前後を境に各深度ともに深くなっていた。分布層の厚さは2002～2008年は300m前後で推移したが、2010～2016年の分布層の厚さの範囲は130～350mと年変動はあるが、200m前後の年が複数年見られ2008年以前に比べ薄くなかった。

スケトウダラ分布の中心水温は0.78～5.56°C（平均2.38°C）の範囲にあり、2010年までは概ね2°C以上と比較的高温であったが、2011年以降は2°C以下であった。上限深度の水温の範囲は0.89～10.86°C（平均5.07°C）と幅が広く、中心水温と同様に2010年までは3.93～10.86°Cと比較的高かったが、2011年以降は3°C以下と低かった。下限深度の水温は2010年を除き1°C以下と低かった。

水温環境 海洋環境調査で得られたスケトウダラの産卵適水温帯（2～5°C）の深度範囲と、来遊層の日本海固有水の上限水温である1°Cの深度をFig. 6に示す。産卵適水温帯の深度は大きく年変動をしており、その厚みは最も薄かった2002年の38mに対し、最も厚かった2011年は164mと4倍以上の差が見られた。下限水温の2°Cに着目すると、2007年以前は概ね200m前後で推移したが、2008年以降は2016年を除けばおよそ250～300mで推移し2007年以前よりも深かった。

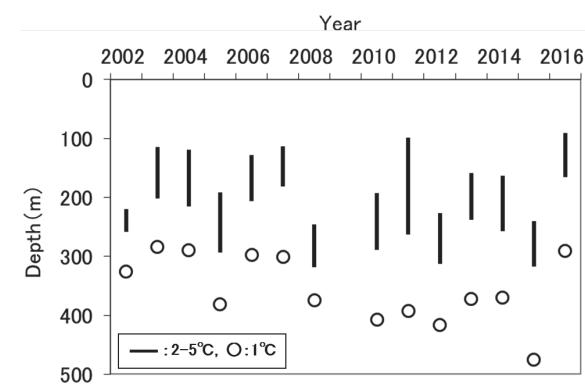


Fig. 6 Ranges of suitable temperature for spawning (2-5 °C) and the depth of 1°C.

日本海固有水の指標となる水温1°Cの深度は2003年の284mが最も浅く、2015年の475mが最も深かった。水温1°Cの深度は、年により大きく変動しながらも経年に

深くなる傾向が見られ、2007年以前は300m前後であったが、2008年以降は2016年を除けば400m前後と深かった。トロール調査で漁獲したスケトウダラのGSI トロール調査で漁獲した雌のスケトウダラの個体別GSIの分布をFig. 7に示す。ほとんどの個体は未成魚のGSI基準値（桜井、1993）である2.5を超えていたため、当該年に産卵する成魚と考えられる。2005～2008年度のGSIは、5前後から30前後と広い範囲にあった。一方、2010～2015年度のGSIは5前後から13前後の範囲にあり、2008年度以前と比べると下限値は5前後で同様であったが、上限値は低くなかった。このように2008年度以前では、成熟がより進んでいる個体が多かった。

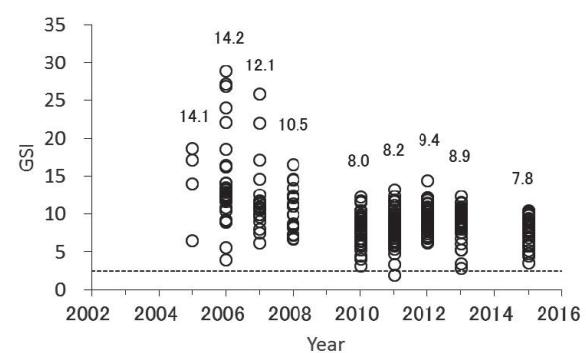


Fig. 7 GSI (Gonad-somatic index) of female walleye pollock. Numbers indicate average GSI. Dotted line indicates GSI=2.5.

延縄漁業で漁獲されたスケトウダラの成熟状況 1月にすけとうだら延縄漁業で漁獲された雌の成熟度は、2002～2007年度漁期では放卵中・放卵後の個体が全体の17～55%を占めていた。一方、2009年度漁期以降は0～8%と低く、2007年度以前の方が、2009年度以降よりも成熟が進んでいた（Fig. 8）。

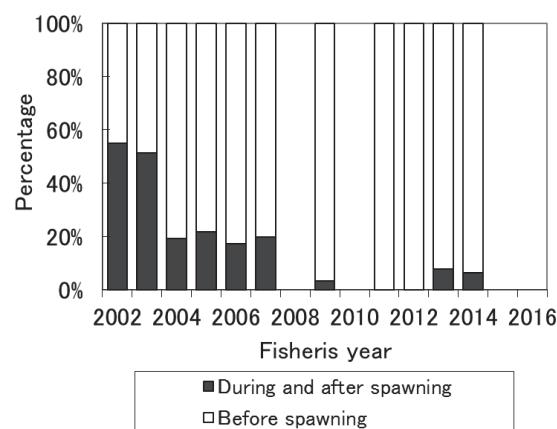


Fig. 8 Maturity rate of female walleye pollock by commercial longline fishery in January.

延縄漁業によるスケトウダラの漁獲状況 檜山海域では、水揚げされるスケトウダラのほとんどが延縄漁業で漁獲される（例えば、2015年度は99.7%）。この延縄漁業によるスケトウダラの漁獲量は、2002年度には1万トンを超えていたがその後減少傾向が続き、2007年度には約5千トンまで減少した（Fig. 9）。2008～2012年度は概ね3千トン前後で推移したが、2013年度以降大幅に減少し、2016年度の漁獲量は172トンであった。地区別に漁獲量の推移を見ると、各年度とも調査海域の北部に位置する熊石・乙部地区の方が江差・上ノ国地区に比べて漁獲量が多く、北部の漁獲割合は経年的に増加していた。

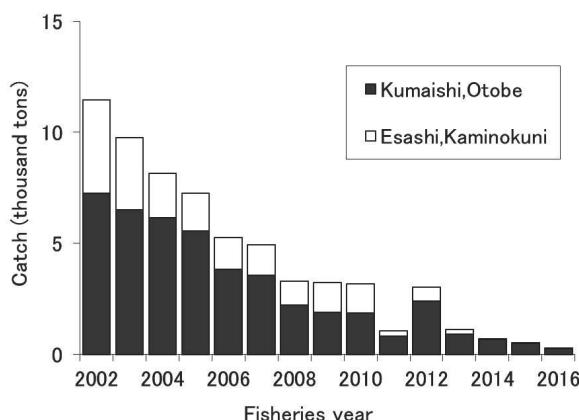


Fig.9 Annual catches by commercial longline fishery off Hiyama.

考 察

音響資源調査を開始した2002年には檜山海域の沿岸には推定3万トンのスケトウダラが広範囲に分布していたが、年を追うごとに分布域、分布量とともに縮小し、2016年には相沼沖の限られた範囲となり、その分布量も約4千トンと2002年の約15%に減少した（Fig.3, 4）。漁業においても、江差・上ノ国沖の漁獲量割合は、2002～2010年は海域全体の30%前後を占めていたが、2011年以降徐々に減少し、2015, 2016年には漁獲がなかった（Fig.9）。これは資源量の減少にともなって主産卵場である相沼沖（前田ほか、1993）以外の分布域が縮小したためと考えられる。分布域の縮小は調査海域の中間に位置する江差沖から始まり、その後、南部の上ノ国沖で分布が見られなくなった。現在でも分布が見られる相沼沖は、等深線が沿岸に向かって入り込んだ地形となっており（Fig.1），好漁場が形成される（辻、1975）。このような特徴的な地形は、主産卵場である相沼沖の他、上ノ国沖にも見られる。一方、江差沖では海底地形の変化が乏しく等深線が入り込んでないため、スケトウダラが集

群しづらく最初に分布が消えたと考えられた。

三宅（2012）によると、2002～2006年の10月における当海域のスケトウダラの分布深度の中心は375～445mで、その深度の水温は0.65～0.98℃であった。本研究で同年の12月に観測した分布の中心深度と水温は、それぞれ185～265m, 1.28～5.56℃で、10月に比べ深度は浅く水温は高かった。のことから、2002～2006年は10月には低温で深い日本海固有水中にスケトウダラが分布していたが、12月上旬には2～5℃の産卵適水温帯へと浮上、もしくは浮上する過程にあったと考えられた。一方、2011年以降の12月の分布の中心深度は265～385mで、2006年以前と比較して深くなかった。これは来遊層である日本海固有水や産卵適水温帯の下限である2℃の深度が最近では深くなっていること（Fig.6）を反映していると考えられる。一方で、この時のスケトウダラ分布の中心水温は0.78～1.78℃で産卵適水温帯の下限よりも低い。また、本調査で漁獲した雌個体のGSIの平均値は、2008年以前は10.5～14.2と比較的高かったのに対し、2010年以降は7.8～9.4と低かった（Fig.7）。さらに、調査の翌月の1月にすけとうだら延縄漁業で漁獲された雌の成熟度を見ると、成熟が進んだ放卵中・放卵後の個体は2002～2007年度漁期では約2～5割出現したが、2009年度漁期以降はほとんど見られなかった（Fig.8）。以上のことから、2010年前後以降は成熟の時期が遅れたことにより、12月時点では産卵適水温帯への浮上がまだ始まっていなかったと考えられた。

スケトウダラの分布層の厚みは、成熟状況と水温の鉛直分布によって決定されると考えられる。成熟が進み12月には産卵適水温帯への浮上が始まっていた2008年以前は、分布水温の幅が広いこともあり分布層が300m前後と比較的厚かった（Table 2）。一方、2010年以降は成熟の進行が遅く、スケトウダラ魚群のほとんどは1℃以下の水温帯に分布していたため、分布層の厚みが薄くなる年が多かったと考えられる。

産卵適水温帯は2～5℃とされるが、本研究においても分布の中心水温が2℃を境に成熟の進行度合いを分けることができた（Table 2, Fig.7, 8）。一方で、2002年のように分布の中心水温が5.56℃と産卵適水温帯の上限よりも高い年もあることから、分布の上限水温は必ずしも5℃を基準にすることはできないと考えられた。

檜山海域では、2006年度漁期から、日の出とともにスケトウダラ魚群が深く沈み込む現象が1月以降に観察され、その深度は延縄で漁獲できない（餌を食わなくなる）375mを超えるため、漁獲効率が極端に下がることが、漁業現場において大きな問題となっている（渡野邊、2009）。スケトウダラが昼間に沈降するのは一般的な現

象であるが (三宅, 2012), 1月以降は産卵期のため, 通常であれば産卵に適した2°C以上の中浅い深度までしか沈降しない。2006年度漁期以降は成熟が遅れたことで, 1°C以下の日本海固有水まで深く沈降したと考えられる。2006年度漁期の1月には産卵中の個体が一部ではあるが出現しているが, 産卵前の個体も多く見られることから (Fig.8), 以上のようなことが生じたと考えられる。また, 12月の水温1 °Cの深度は2008年以降では延縄漁具で漁獲不可能とされる400m前後にまで達しており, このような状況が年明けの1月以降も継続すれば漁獲が低迷する要因となるであろう。

本研究により, 産卵前期の12月に檜山海域に集団するスケトウダラについて, 資源の減少に伴い分布域が縮小していく様子を明らかにした。また, 近年は成熟の遅れにより産卵層への浮上時期が遅れていることも明らかとなった。三宅 (2012) は, 北海道西部日本海において水温環境の変化に伴いスケトウダラの産卵回遊期の分布深度および移動経路が変化することを報告している。本研究でも, 2008年前後を境にスケトウダラの分布深度に影響する日本海固有水や産卵適水温帯の深度が深くなる現象が見られ, ほぼ同じ年に成熟の遅延も始まっていた。産卵時期の遅延は, 卵の孵化率に悪影響を及ぼす高水温を回避する適応戦略の側面も指摘され (三宅, 2012), 2008年前後を境に本海域のスケトウダラの産卵生態に大きな変化が生じているのかもしれない。いずれにしても, このような生態変化は当業船の漁獲効率や漁場形成, 操業時期などにも影響すると考えられることから, 今後, 要因解明が必要である。加えて, 調査を行った檜山海域は北部日本海系群の主要な産卵場の一つであり, 分布深度の変化や成熟時期の変化が再生産に与える影響を明らかにしていくことは, 資源管理を進める上で重要な課題であると考える。

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函館水産試験場試験調査船金星丸, 稚内水産試験場試験調査船北洋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

北海道立水産試験場, スケトウダラ, 北水試魚介類測定

- ・海洋観測マニュアル 1996
- 本田 聰, 音響資源調査によるスケトウダラ (*Theragra chalcogramma*) 太平洋系群の若齢魚の年級豊度推定. 水研センター研報 2004 ; 12 : 25-126.
- 飯田浩二, 向井 徹, 黄 斗湊, 早川知子, 松山幸浩. 計量魚群探知機でみた噴火湾に来遊するスケトウダラ産卵群の分布と海洋環境. 日水誌 1995 ; 61 (1) : 27-34.
- 亀井佳彦, 高津哲也, 高木省吾, 中谷敏邦, 高橋豊美, 前田辰昭. 北海道南西部における秋季のスケトウダラの分布と成熟. 日水誌 1999 ; 65 (2) : 223-229.
- 前田辰昭, 中谷敏邦, 高橋豊美, 高木省吾, 梶原善之, 目黒敏美. 北海道南西部の日本海岸におけるスケトウダラの回遊について. 水産海洋研究 1989 ; 53 : 38-43.
- 前田辰昭, 高橋豊美, 中谷敏邦. 北海道桧山沖合におけるスケトウダラ成魚群の分布回遊と産卵場について. 北大水産彙報 1988 ; 39 (4) : 216-229.
- 前田辰昭, 高木省吾, 亀井佳彦, 梶原善之, 目黒敏美, 中谷敏邦. スケトウダラ調査研究の歴史と問題点. 北水試研報 1993 ; 42 : 1-14.
- 三宅博哉. 音響学的手法を用いたスケトウダラ北部日本海系群の資源動態評価と産卵場形成に関する研究. 北水試研報 2012 ; 81 : 1-58.
- 三宅博哉, 石田良太郎, 武藤卓志, 安部幸樹, 向井 徹, 飯田浩二. 音響資源調査で得られた北海道西岸日本海のスケトウダラ産卵群の分布特性と分布量. 北水試研報 2001 ; 59 : 11-24.
- 三宅博哉, 板谷和彦, 浅見大樹, 嶋田 宏, 渡野邊雅道, 武藤卓志, 中谷敏邦. 卵分布からみた北海道西部日本海におけるスケトウダラ産卵場形成の現状. 水産海洋研究 2008 ; 72 (4) : 265-272.
- 夏目雅史. 北海道桧山海域スケトウダラ延縄漁業の漁獲深度と水温. 北水試研報 1998 ; 53 : 1-8.
- 桜井泰憲. スケトウダラの繁殖特性と戦略. 北水試研報 1993 ; 42 : 51-68.
- 辻 敏. 桧山支庁沿岸のスケトウダラ調査. 北水試月報 1975 ; 32 (9) : 1-20.
- 稚内水産試験場・中央水産試験場・函館水産試験場. スケトウダラ (日本海). 2017 年度水産資源管理会議評価書. 北海道立総合研究機構水産研究本部.
- 渡野邊雅道. スケトウダラ. 平成27年度北海道立函館水産試験場事業報告書. 北海道立函館央水産試験場, 函館. 2018 ; 15-20.
- 渡野邊雅道. 日の出とともにスケトウダラが沈む!. 北水試だより 2009 ; 78 ; 21.

山下夕帆, 千村昌之, 石野光弘, 田中寛繁, 山下紀生,
濱津友紀. 平成29年度(2017)年度スケトウダラ太
平洋系群の資源評価. 平成29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. 2018; 303–
363.

定期海洋観測に使用するクロロフィル a およびフェオ色素を計算する一般方程式の導出とその解の数値計算法について

田中伊織

海水中のクロロフィル a 及びフェオ色素を蛍光法で分析する際に、蛍光強度が濃度に対して非線形性を示す、高濃度領域の試水については、通常、希釈する過程が伴う。本研究は、この希釈過程を経ずに済むように、非線形領域に適用できる蛍光強度の一般方程式を導出した。その一般解の数値計算方法も示した。日本海沿岸の植物プランクトン大増殖期における、現場海水を用いた検証で、試水中の合計色素濃度が約 $520\mu\text{g L}^{-1}$ に達するまでの範囲について、一般解の計算結果は、試水の希釈を伴う従来法と同一の計算結果を与えることが確認された。

A565 北水試研報 95, 1–9 (2019)

北海道えりも沿岸域におけるサクラマス幼魚への二生類 *Brachyphallus crenatus* (吸虫綱、扁形動物門) の寄生状況

浅見大樹、隼野寛史、真野修一、永田光博

北海道えりも海域で、サクラマス幼魚の胃内に寄生した二生類(吸虫綱)の一種、*Brachyphallus crenatus*の寄生状況を調べた。幼魚は1994年6月に定置網で、早朝と昼間に採捕した。昼間には道南太平洋から放流された標識魚5個体が採捕された。両時刻ともに幼魚の尾叉長は陸側でより小さかった。*B. crenatus*の寄生率は採捕時刻および雌雄ともに95%以上を占めた。平均寄生個体数は雌雄とも有意に早朝の方が多いかった。幼魚の尾叉長と*B. crenatus*の寄生数との関係には、正の相関関係が認められた。採捕時間帯による寄生状況の違いは、サクラマス幼魚の生活履歴の違いを示唆するのかもしれない。

A567 北水試研報 95, 19–24 (2019)

2018年の函館湾における有害ラフィド藻 *Heterosigma akashiwo* の季節変動および赤潮発生状況について

夏池真史、金森 誠、嶋田 宏

函館港内の2018年4月から11月までの定期調査で、7月に有害ラフィド藻 *Heterosigma akashiwo* が検出され、7月中旬に最高細胞密度 ($6,000 \text{ cells mL}^{-1}$) に達した。本種は8月まで低密度で出現したが、9月以降検出されなかった。本種の密度が急激に増加した期間の水温は $14.8\sim18.1^\circ\text{C}$ 、塩分は $27.2\sim33.5$ であり、0 mと1 m層の間で降雨による塩分躍層が見られた。これら好適な環境条件によって、本種が増殖したと考えられる。さらに、7月中旬に函館湾の湾奥部で最大 $113,000 \text{ cells mL}^{-1}$ に達する *H. akashiwo* の赤潮が確認されたが、これによる漁業被害は報告されなかった。他方、夏から秋にかけて *Fibrocapsa japonica* 等の有害赤潮鞭毛藻類が低密度ながら出現したため、定期的に有害鞭毛藻類の出現を監視して赤潮発生を警戒することが必要と考えられた。

A566 北水試研報 95, 11–17 (2019)

フリーウェアを用いた耳石日周輪解析手法の検討（技術報告）

城 幹昌

耳石日周輪解析を安価かつ簡便に行うために、一般的に市販されているデジタル一眼レフカメラ、パソコン、無償のソフトウェア(以下、フリーウェアと記載)を用いた解析手法を検討し、その手順を整理した。デジタルカメラを、市販されているマウントアダプター類を介して生物顕微鏡に装着し、カメラとパソコンはUSBケーブルで接続した。次に、フリーウェア *digiCamControl* を用いてパソコンからカメラを遠隔操作し、耳石の顕微鏡画像をパソコンに直接保存することができた。その後、*Object J*というプラグインを組み込んだ画像解析用フリーウェア *Image J* で耳石日周輪解析が可能であることを確認し、その手順や注意点を整理して記述することができた。

A568 北水試研報 95, 25–32 (2019)

リアルタイムPCR法で推定した北海道東部海域における
アナメ, スジメ, アイヌワカメの遊走子放出時期（資料）

高谷義幸, 合田浩朗

北海道東部の根室市落石沖, 浜中町嶮暮帰沖および広尾町女子別沖で海水を採取し, リアルタイムPCR法によって, 海水中に存在するコンブ目3種（アナメ, スジメ, アイヌワカメ）の遊走子放出時期を推定した。その結果, アナメは, 浜中では8月を中心に, また, 落石では7月から9月に遊走子を放出していた。スジメは, 浜中では7月から8月, 広尾では4月から7月にかけて遊走子を放出していた。アイヌワカメは浜中では, 6月から12月まで遊走子を放出していた。

A569 北水試研報 95, 33–38 (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（1）

北海道水産試験場における計量魚群探知機を用いたスケトウダラ音響資源調査の発展について（総説）
ースケトウダラ研究グループ会議発足50周年に向けて

志田 修

スケトウダラはTAC対象種に指定される北海道において最も重要な漁獲対象資源の一つである。1980年代後半から全道のスケトウダラ漁獲量は減少傾向にあり、研究機関に対し調査研究のさらなる充実による精度の高い資源評価や漁況予測、資源の持続的な利用方法の提案が求められている。本報告ではこのようなニーズに応えるべく、1990年代から道水試のスケトウダラ研究グループが最も力を注いで研究を進めてきた計量魚群探知機を用いた音響資源調査の内容とその成果の概要について海域毎にとりまとめた。

A570 北水試研報 95, 41–53 (2019)

北海道日本海海域におけるスケトウダラ産卵群の分布変化

美坂 正, 星野 昇, 渡野邊雅道, 本間隆之, 志田 修,
三原行雄, 板谷和彦, 三宅博哉

北海道日本海海域におけるスケトウダラ産卵群の分布は1990年代前半以降、檜山海域に南偏したが、2000年代後半以降、南偏が解消してきたことを沿岸漁業漁獲量の分析と音響資源調査結果によって明らかにした。1980年代以降における産卵群の分布変化は、資源量の増減に加えて、モンスーンインデックスを指標とした冬季海面冷却による水温変動や日本海固有水の水温上昇に影響されたと推定した。産卵場と成育場との距離を変化させる産卵群の分布変化は、過去の研究で提唱された加入量変動の主な要因を転換させると考えられる。

A571 北水試研報 95, 55–68 (2019)

北海道檜山海域における産卵前期のスケトウダラ分布の経年変化

渡野邊雅道, 本間隆之, 武藤卓志

産卵前期の12月に、スケトウダラ漁場が形成される檜山沖において計量魚群探知機を用いた音響資源調査と海洋観測を実施し、スケトウダラの分布や生息環境の経年変化を調べた。その結果、調査を開始した2002年には檜山海域の沿岸には推定3万トンのスケトウダラが広範囲に分布していたが、年を追うごとに分布域、分布量ともに縮小し、2016年の分布は相沼沖の限られた範囲となり、その量も約4千トンと2002年の約15%に減少した。また、近年は成熟の遅れにより産卵適水温帯への浮上時期が遅くなっていることが明らかとなった。

A572 北水試研報 95, 69–77 (2019)

水産研究本部図書出版委員会

委員長 木村 稔
委 員 三橋 正基 中多 章文 赤池 章一
星野 昇 三原 行雄 宮腰 靖之
事務局 志田 修 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 志田 修
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 宮腰 靖之 藤原 真
浅見 大樹 畑山 誠
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95号

2019年3月11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