

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

水上卓哉<sup>\*1</sup>, 板谷和彦<sup>2</sup>, 向井 徹<sup>3</sup>, 飯田浩二<sup>3</sup>

<sup>1</sup>北海道釧路総合振興局産業振興部 釧路地区水産技術普及指導所,

<sup>2</sup>北海道立総合研究機構中央水産試験場,

<sup>3</sup>北海道大学大学院水産科学研究院

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

TAKUYA MIZUKAMI<sup>\*1</sup>, KAZUHIKO ITAYA<sup>2</sup>, TOHRU MUKAI<sup>3</sup> and KOHJI IIDA<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Central Fisheries Institute, Hokkaido Research Organization, Yoichi, Hokkaido 046-8555,

<sup>3</sup> Faculty of Fisheries Science, Hokkaido University, Hakodate, Hokkaido, 041-8611, Japan

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

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

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

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

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

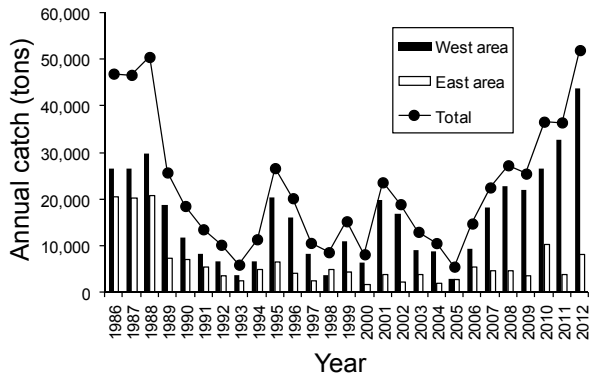


Fig.1 The annual catch of walleye pollock in southern Okhotsk Sea, off the coast of Hokkaido, Japan from 1986 to 2012. Black and white bars indicate the annual catch (tons) from the west area and east area of southern Okhotsk Sea, respectively. Solid circles are total catch from the west and east areas.

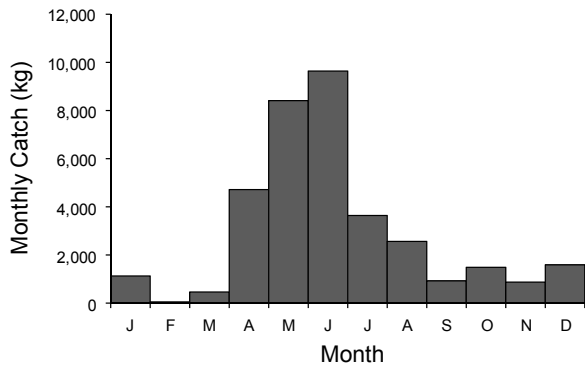


Fig.2 The average monthly catch of walleye pollock on the continental shelf of southern Okhotsk Sea, off the coast of Hokkaido, Japan for the years 2008 to 2012.

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

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

([http://www.corporateservices.noaa.gov/nbo/fy12\\_bluebook/chapter7\\_2012\\_RandD.pdf](http://www.corporateservices.noaa.gov/nbo/fy12_bluebook/chapter7_2012_RandD.pdf) 2019.6.23), 本海域において中冷水がスケトウダラの分布の制限要因となる可能

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

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

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

## 試料及び方法

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

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

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

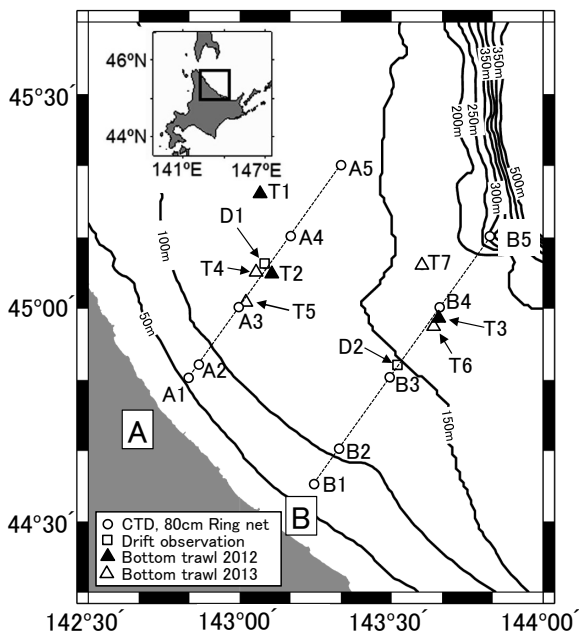


Fig. 3 Maps of the study area of the continental shelf of southern Okhotsk sea, off the coast of Hokkaido, Japan.

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

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

航走線上には観測定点を設け, 航走線Aでは沿岸側か

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

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

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

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

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

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

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

れたスケトウダラについては胃の内容物を調べた。

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

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

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

**胃内容物分析** 2012年6月に実施したトロール調査 (T2,

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

## 結果

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

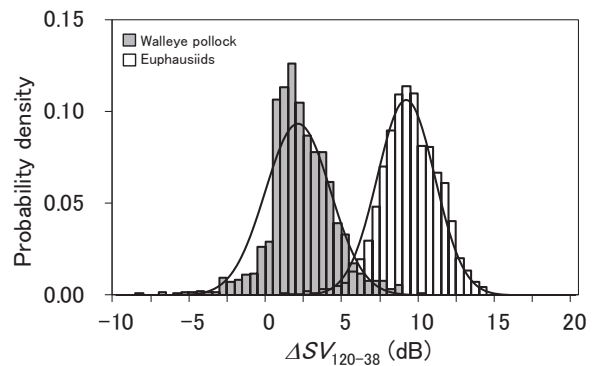


Fig. 4 Histograms of  $SV_{120-38}$  for 5 ping  $\times$  5 m analysis cells identified as euphausiids (white bar) and walleye pollock (gray bar). The corresponding probability density for normal distribution with the observed mean and variance is given by the solid line.

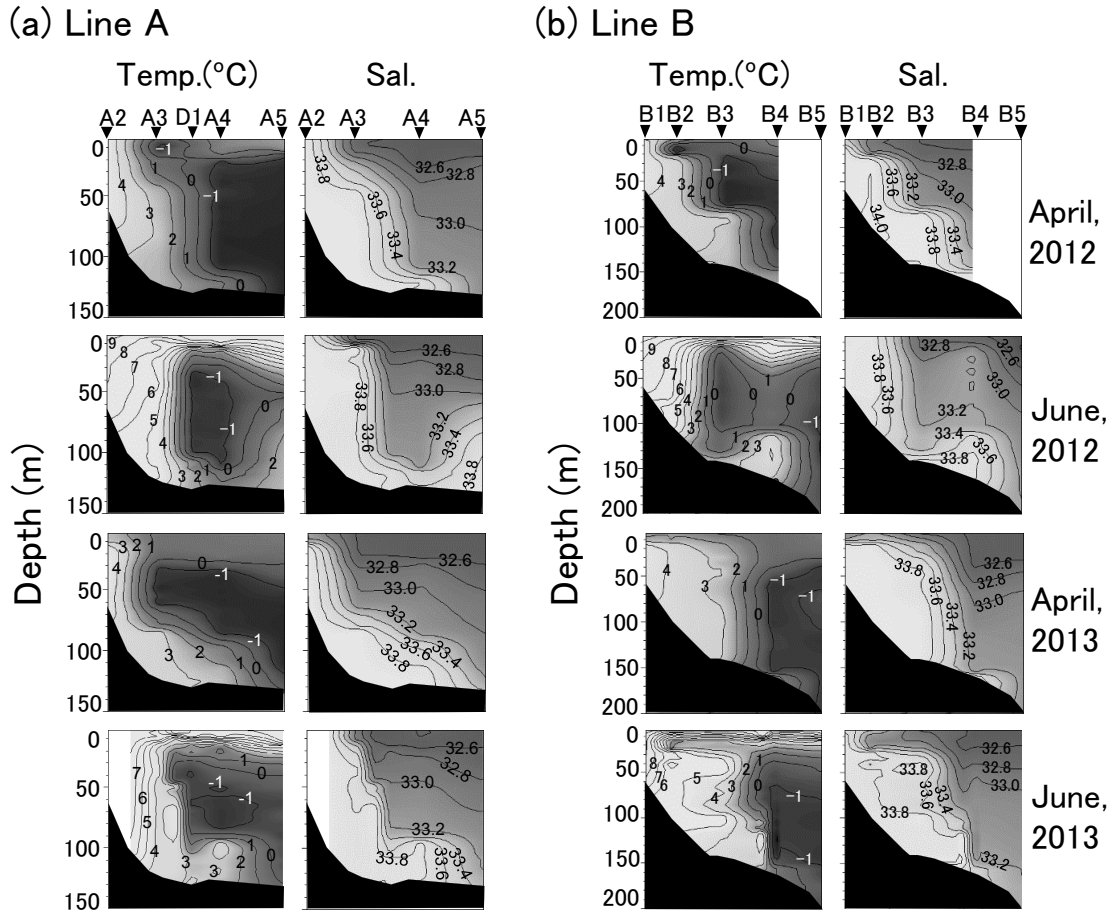


Fig. 5 A transect distribution of temperature (left) and salinity (right) at each depth on Line A in 2012 or 2013 (a) and Line B in 2012 or 2013 (b). The top and lower rows show the results from April and June, respectively, at (a) and (b). The symbol ‘▼’ indicate CTD cast point.

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

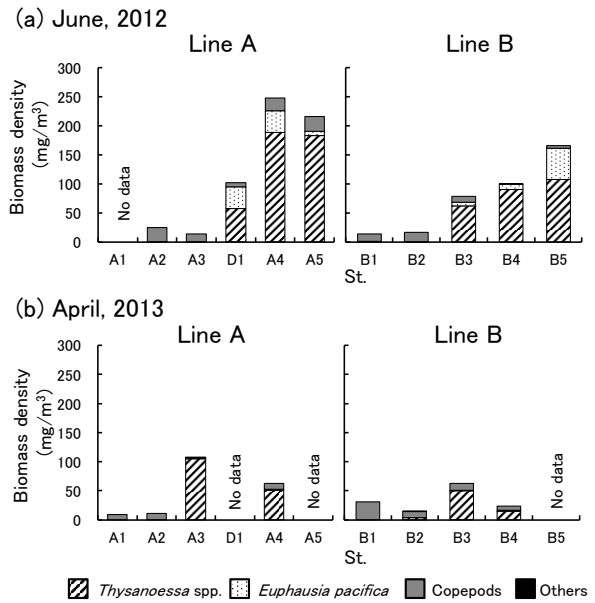


Fig. 6 The biomass density and composition of zooplankton collected by 80 cm ring net at each station on Line A and Line B on June 2012 (a) and April 2013 (b).

動物プランクトンの種組成および湿重量組成 2012年6月および2013年4月の航走線A, Bの各定点における80 cmリングネットの採集条件をTable 2に、各定点における種別の湿重量密度をFig. 6に示した。採集された主な生物種は、オキアミ類の*Thysanoessa*属およびツノナシオキアミ*Euphausia pacifica*、カイアシ類であった。なお、*Thysanoessa*属はすべての個体について詳細な同定は行わなかったが、*T. inermis*および*T. raschii*、*T. longipes*が確認された。2012年6月の合計湿重量密度は、沿岸側（航走線A：A2, A3, 航走線B：B1, B2）では13.5~25.0 mg/m<sup>3</sup>（カイアシ類：13.3~24.9 mg/m<sup>3</sup>, *Thysanoessa*属：採集なし~0.2 mg/m<sup>3</sup>, *E.pacifica*：採集なし）であったのに対して、沖合側（航走線A：D1, A4, A5, 航走線B：B3, B4, B5）では78.4~247.9 mg/m<sup>3</sup>（カイアシ類：0.5~25.8 mg/m<sup>3</sup>, *Thysanoessa*属：57.3~188.7 mg/m<sup>3</sup>, *E.pacifica*：6.2~54.0 mg/m<sup>3</sup>）であり、沖合側が沿岸側を大きく上回り、オキアミ類は沖合側でのみ採集された（Fig. 6 (a)）。また、2013年4月の航走線Aの合計湿重量密度は、沿岸側（A1, A2）では9.1~11.0 mg/m<sup>3</sup>（カイアシ類：9.1~11.0 mg/m<sup>3</sup>, *Thysanoessa*属：採集なし, *E.pacifica*：採集なし）であったのに対して、沖合側（A3, A4）では62.6~108.3 mg/m<sup>3</sup>（カイアシ類：2.6~9.7 mg/m<sup>3</sup>, *Thysanoessa*属：50.6~105.2 mg/m<sup>3</sup>, *E.pacifica*：0.5~2.4 mg/m<sup>3</sup>）であり、沖合側が沿岸側を大きく上回り、2012年6月と同様にオキアミ類は沖合側のみで採集された（Fig. 6 (b)）。なお、2013年4月の航走線Bでは、沿岸側と沖合側で合計湿重量密度の顕著な差はなかった。ただし、オキアミ類はB1では採集されなかったのに対して、これよりも沖合側のB2~B4では採集された

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

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

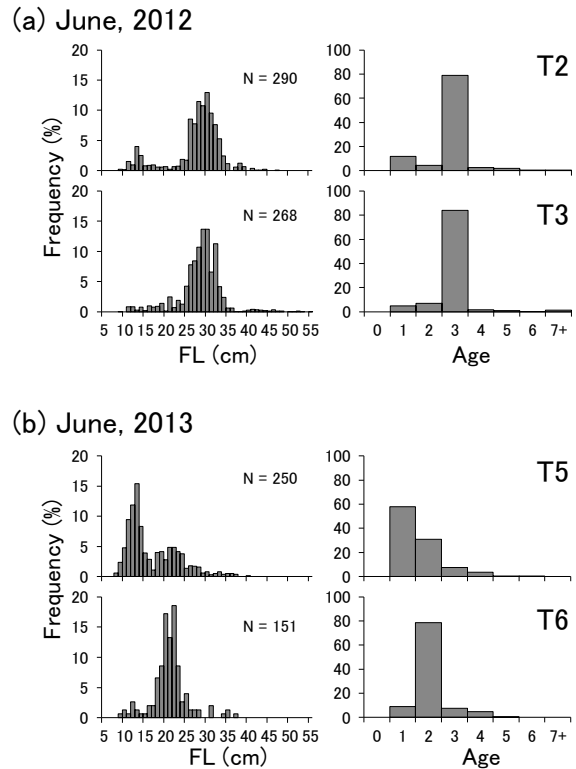


Fig. 7 Fork length and age frequencies of walleye pollock collected by bottom-trawl at T2, T3, T5 and T6 on June 2012 (a) and June 2013 (b).

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

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

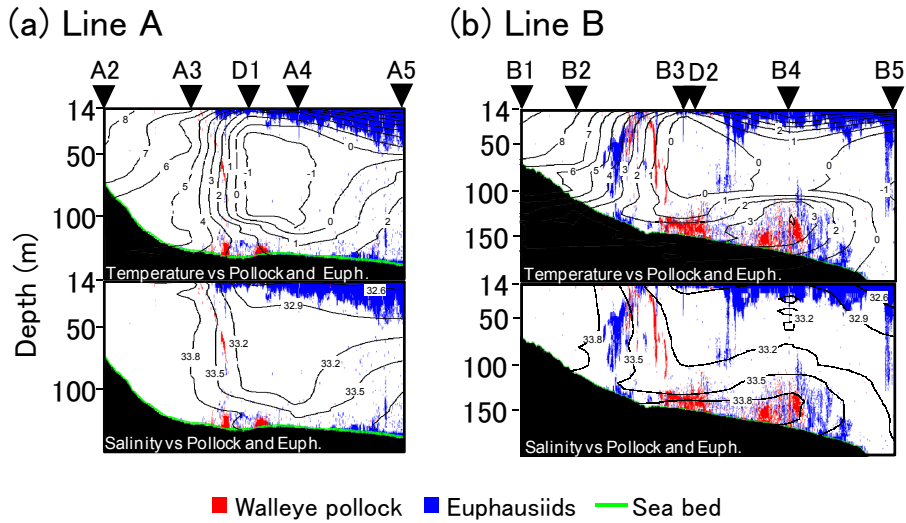


Fig.8 Echograms of distributions of walleye pollock (red) and euphausiids (blue) identified based on 2-frequency method on Line A (a) and Line B (b). Echoes of these figures did not take information on echo intensity into account. The symbol ‘▼’ indicate the 80 cm ring net and CTD cast point.

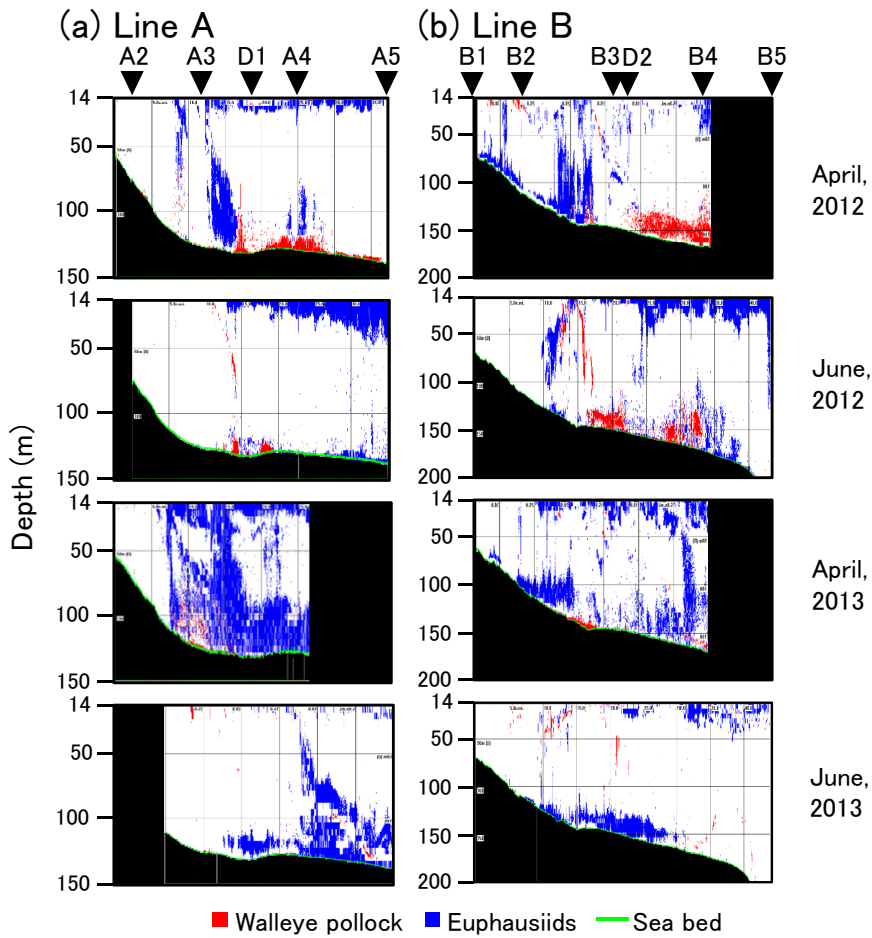


Fig.9 The series of echograms of the distributions of walleye pollock (red) and euphausiids (blue) on Line A (a) and Line B (b) from April 2012 to June 2013. The echoes in these figures did not take echo intensity information into account.



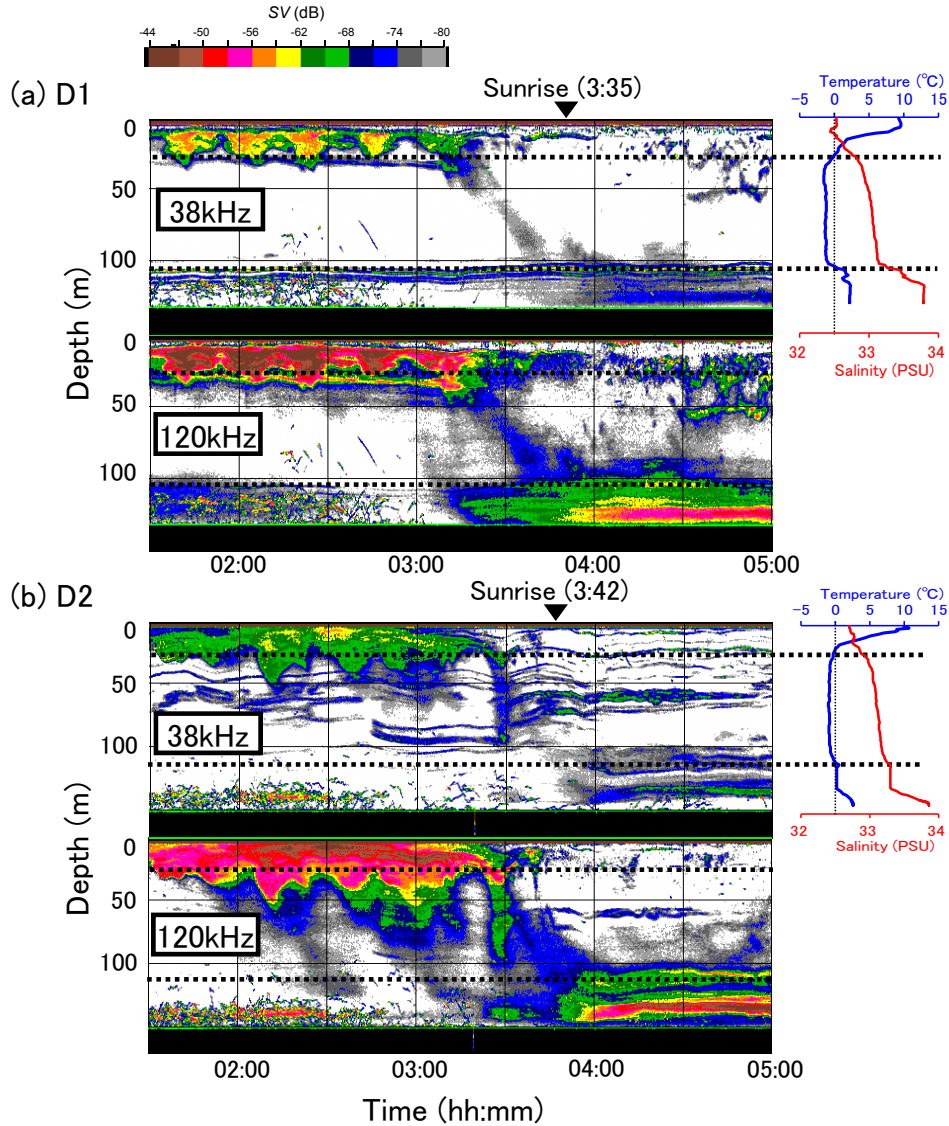


Fig. 10 The volume backscattering echograms at frequency of 38 kHz and 120 kHz during diel vertical migration of euphausiids from 1:30 to 5:00 a.m., and the vertical profile of temperature and salinity versus depth. The symbol ‘▼’ indicate the time of sunrise. The regions between two broken lines indicate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

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

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

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

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

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

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

内に昼夜を問わず留まっていた。

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

## 考 察

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

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

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

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

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

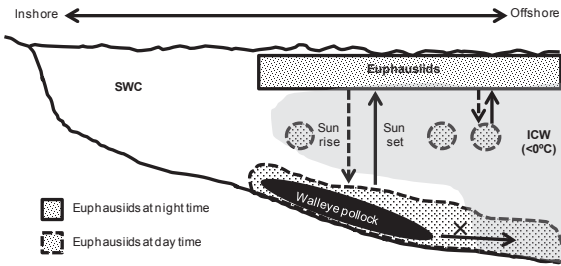


Fig. 11 The cross section diagram of the distribution of walleye pollock and euphausiids in southern Okhotsk Sea, off the coast of Hokkaido, Japan. 'SWC' means the Soya warm current. 'ICW' means intermediate cold water.

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

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

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

## 謝 辞

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

## 引用文献

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

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