

## 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<sup>\*1</sup>, 星野 昇<sup>1</sup>, 渡野邊雅道<sup>2</sup>, 本間隆之<sup>3</sup>, 志田 修<sup>4</sup>, 三原行雄<sup>5</sup>, 板谷和彦<sup>6</sup>, 三宅博哉<sup>4</sup>

<sup>1</sup>北海道立総合研究機構稚内水産試験場, <sup>2</sup>北海道立総合研究機構函館水産試験場,  
<sup>3</sup>北海道立総合研究機構釧路水産試験場, <sup>4</sup>北海道立総合研究機構水産研究本部,  
<sup>5</sup>北海道立総合研究機構栽培水産試験場, <sup>6</sup>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<sup>\*1</sup>, NOBORU HOSHINO<sup>1</sup>, MASAMICHI WATANOBE<sup>2</sup>, TAKAYUKI HONMA<sup>3</sup>, OSAMU SHIDA<sup>4</sup>,  
YUKIO MIHARA<sup>5</sup>, KAZUHIRO ITAYA<sup>6</sup> and HIROYA MIYAKE<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Wakkanai Fisheries Institute, Hokkaido Research Organization, *Wakkanai, Hokkaido 097-0001*,

<sup>2</sup> Hakodate Fisheries Institute, Hokkaido Research Organization, *Hakodate Hokkaido 040-0051*,

<sup>3</sup> Kushiro Fisheries Institute, Hokkaido Research Organization, *Kushiro, Hokkaido 085-0027*,

<sup>4</sup> Fisheries Research Department, Hokkaido Research Organization, *Yoichi, Hokkaido 046-8555*,

<sup>5</sup> Mariculture Fisheries Institute, Hokkaido Research Organization, *Muroran, Hokkaido 051-0013*,

<sup>6</sup> 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（呉ら、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ったため、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った。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、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って

も直近の漁獲実績を下回るTACが設定されることはなかった。2008年度以降は漁獲実績に見合った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ったが、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従漁業では、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った（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

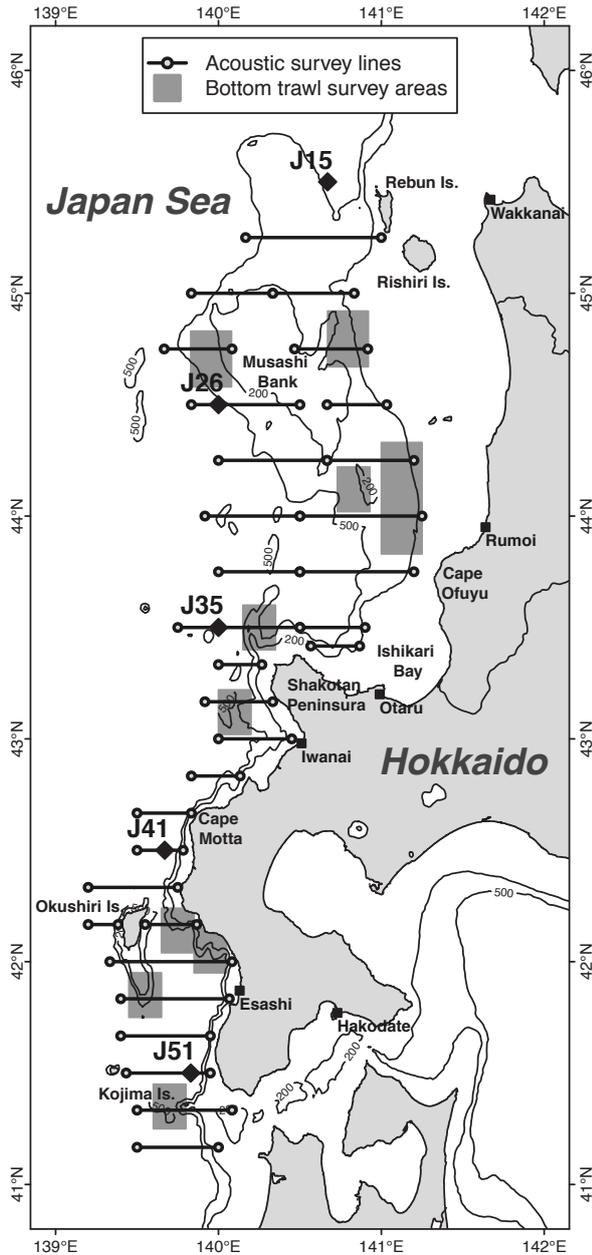


Fig. 1 Map showing the survey area in October 2017. Solid diamonds indicate the ocean observation stations.

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) ( $\text{m}^2/\text{nmi}^2$ ) 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、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よ丸 (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ジス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、 $\sigma = 4\pi r_0^2 10^{\frac{TS}{10}}$  (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) の結果は経年的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年の数値データを入手し、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はイルタークと根室の気圧差（ $y$ 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年度まで、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。

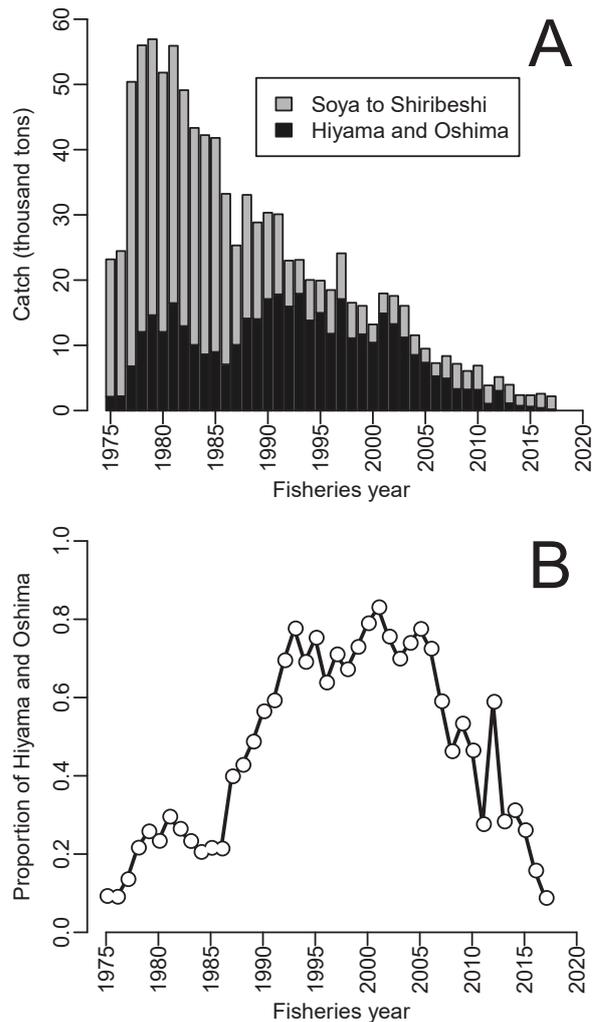


Fig. 2 Annual catches of coastal fisheries in the northern Japan Sea off Hokkaido. (A) Catches in the Soya to Shiribeshi regions and those in the Hiyama and Oshima regions. (B) Proportion of catches in the Hiyama and Oshima regions to the total catches.

**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

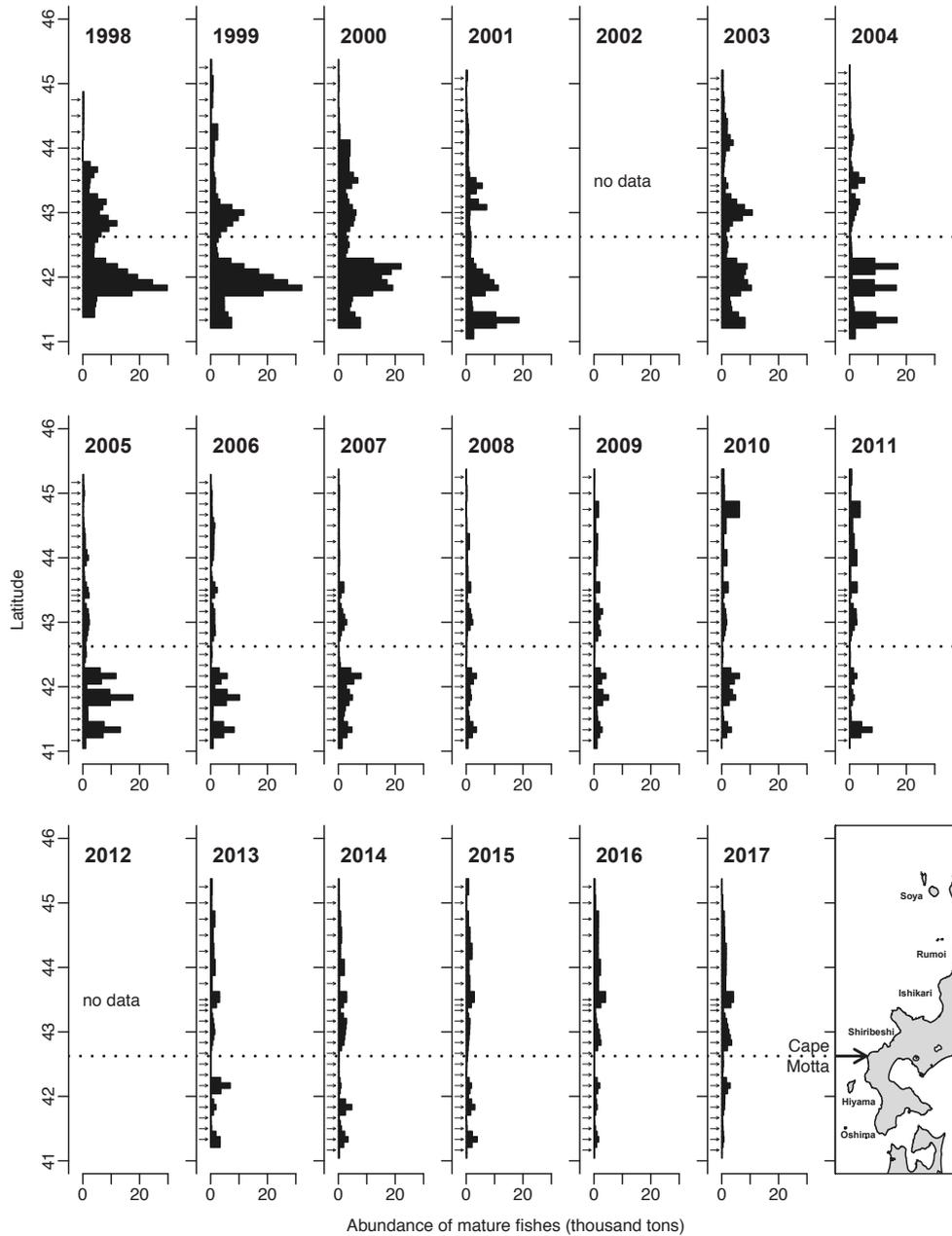


Fig. 3 Abundance of adult walleye pollock per 5' of latitude in autumn from 1998 to 2017, estimated by acoustic survey. Dashed lines indicate the boundaries between the Shiribeshi and Hiyama regions. Small arrows indicate the locations of acoustic survey lines.

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)。

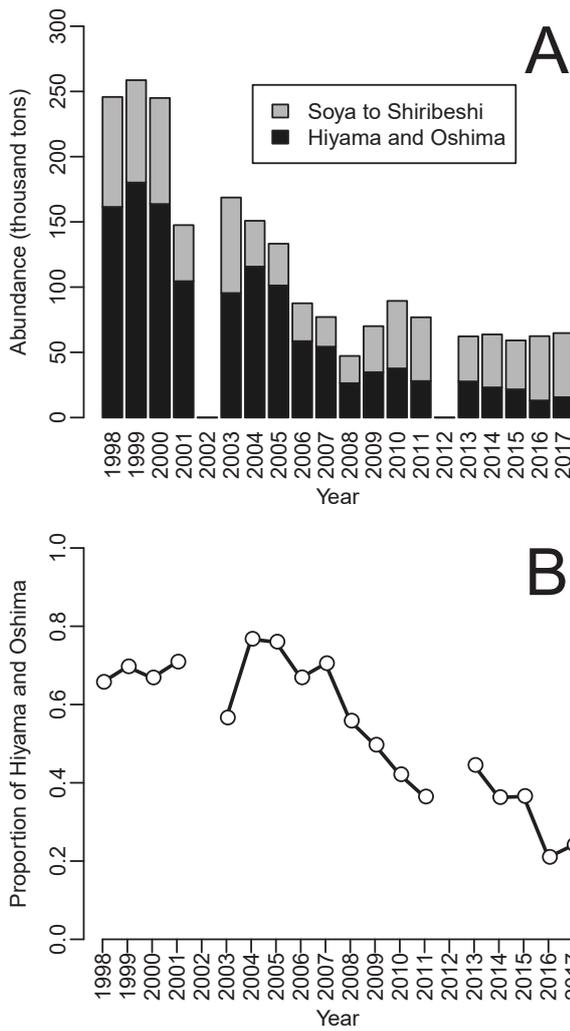


Fig.4 Abundance of adult walleye pollock estimated by acoustic survey. (A) Abundances in the Soya to Shiribeshi regions and those in the Hiyama and Oshima regions. (B) Proportion of abundance in the Hiyama and Oshima regions to total abundance.

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℃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℃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℃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℃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った。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

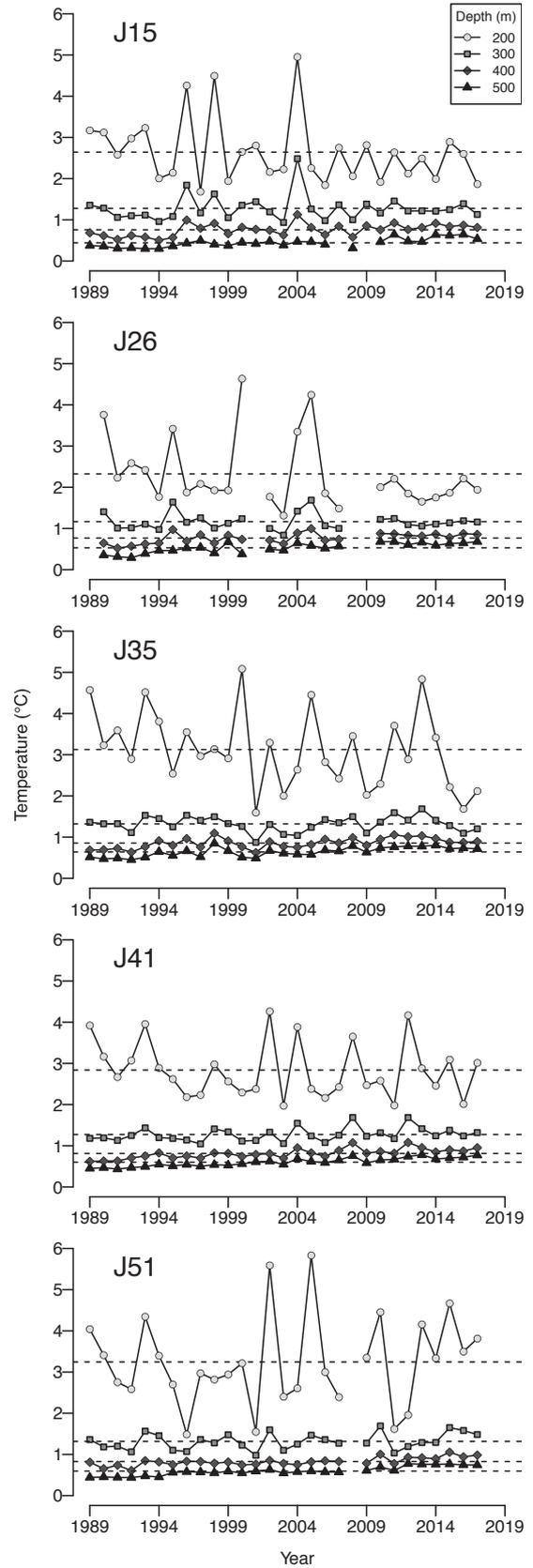


Fig.5 Annual changes in mean water temperature from mid-September to early December at each depth at stations J15, J26, J35, J41, and J51. Dashed lines indicate mean temperature at each depth.

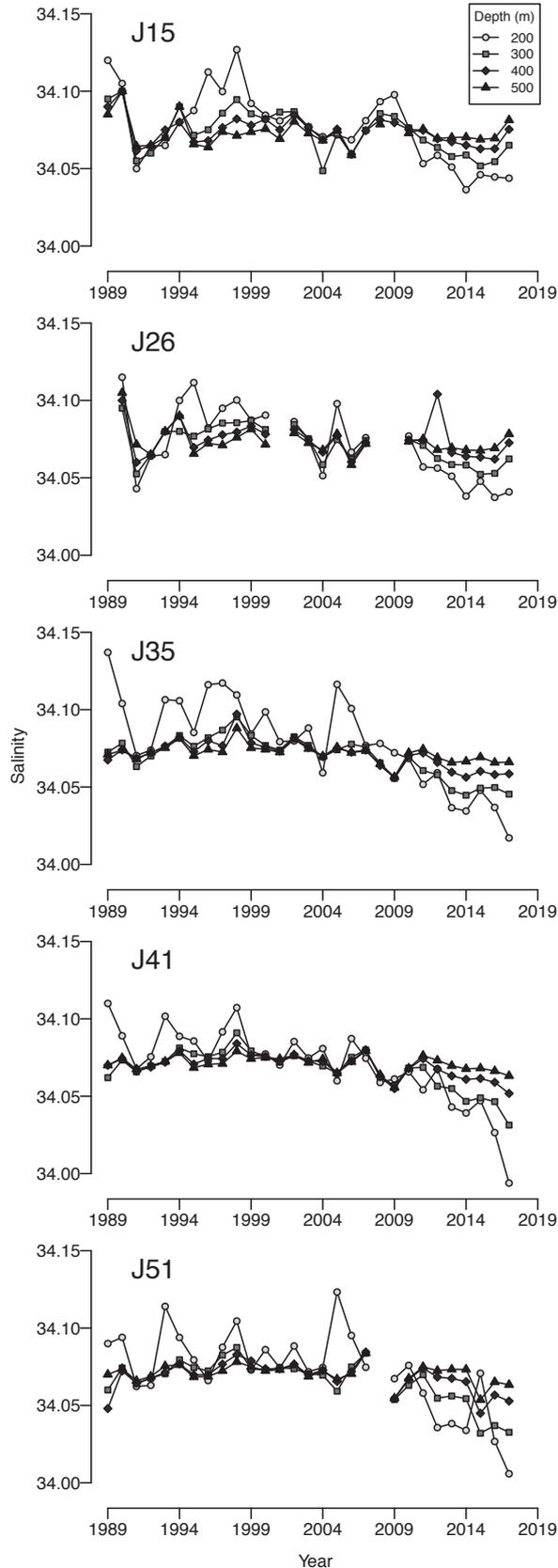


Fig.6 Annual changes in mean salinity from mid-September to early December at each depth at stations J15, J26, J35, J41, and J51.

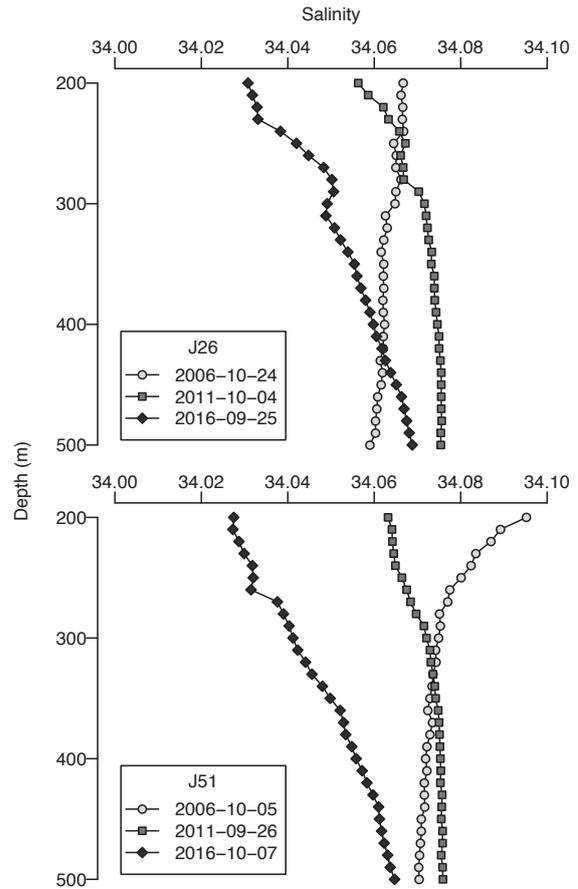


Fig.7 Vertical profiles of salinity at stations J26 and J51.

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℃上昇、深度500 mでは0.25～0.31℃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

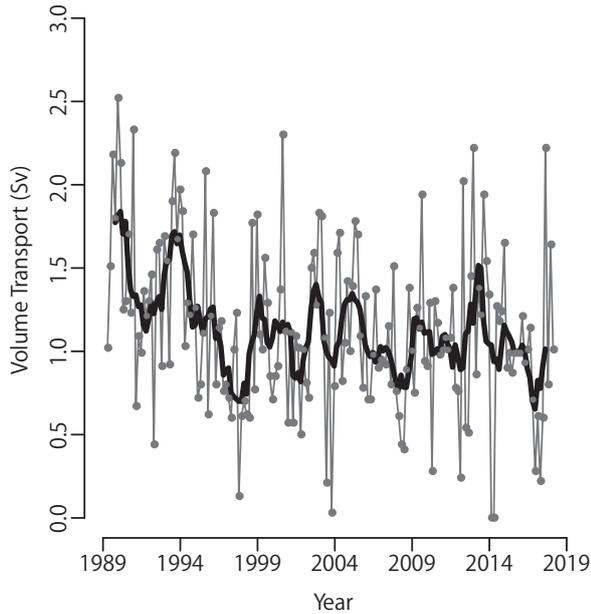


Fig.8 Time series of northward volume transport of Tsushima Warm Current at J4-line in Sv (Sverdrup, 1 Sv =  $10^6$  m<sup>3</sup>/s). Thick line indicates the 14-month moving average.

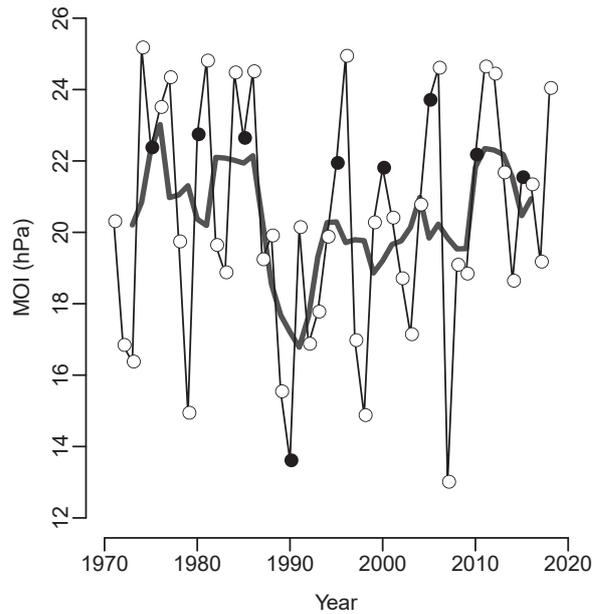


Fig.9 Time series of the wintertime monsoon index (MOI): the sea level pressure difference between Nemuro, Japan, and Irkutsk, Russia. Thick line indicates 5-year moving average. Closed circles plot every 5 years.

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、分布深度が深くなっ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示した。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が考えられる。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℃、2000 mで0.02℃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℃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℃, 0.57～0.98℃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

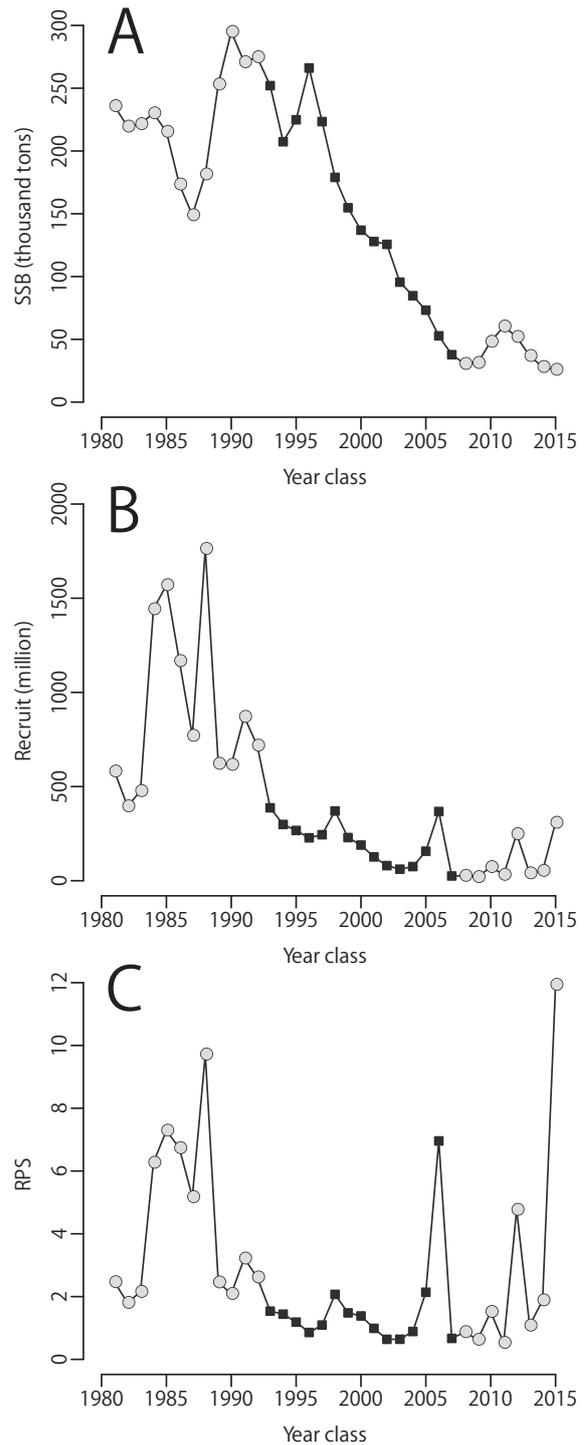


Fig. 10 Time series of (A) SSB (spawning stock biomass), (B) recruit (abundance at age-2), and (C) RPS (recruit per SSB). Closed squares show the year-class spawned during years when the proportion of catches in the Hiyama and Oshima regions to the total catches was high (>0.6).

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

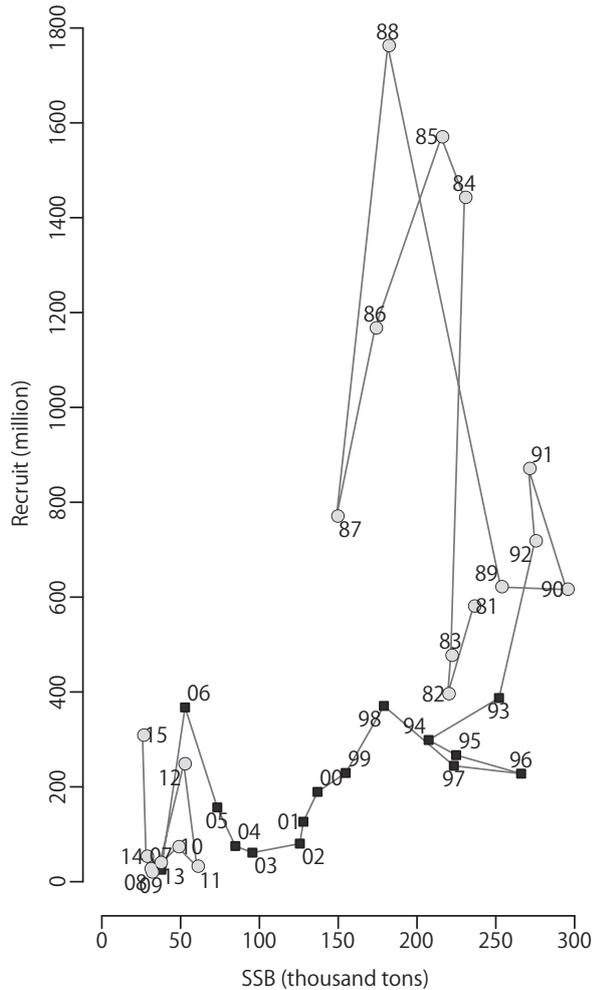


Fig. 11 Relationship between SSB (spawning stock biomass) and recruit (abundance at age-2). Closed squares show the year-class spawned during years when the proportion of catches in the Hiyama and Oshima regions to the total catches was high (>0.6). Two-digit number plots indicate the year-class.

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ตอบสนอง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ตอบสนอง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。

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 聡. 北海道西方の武蔵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 聡, 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 聡, 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ッ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ッ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ッ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. 武蔵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.