

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)

三宅博哉

北海道立総合研究機構釧路水産試験場

Acoustic technique-facilitated research on the evaluation of the population dynamics and formation of spawning ground for northern Japan Sea walleye pollock stock (Doctoral thesis)

HIROYA MIYAKE

Hokkaido Research Organization, Kushiro Fisheries Research Institute, *Kushiro, Hokkaido, 085-0024, Japan*

Summary of the thesis

Objectives

Walleye pollock, *Theragra chalcogramma* is an important fishery resource and was specified as a target species by the total allowable catch (TAC) system when the system was implemented in 1996. Since the system conducts quantitative management, acoustic resource assessment: a resource estimation method independent of fishery, gained significant importance.

The walleye pollock around Japan is divided into four stocks. The northern Japan Sea stock, the subject of this research, is caught mainly by the offshore trawl fishery, the gill net and longline fishing in the Japan Sea, Hokkaido. In the gill net and longline fishing, adult walleye pollock approaching shore for spawning are caught between November and March. The catch in this sea area declined from 120,000 t in 1991 to 25,000 t in 2005, with the resource status and recruitment per spawning biomass (RPS) at the lowest level ever.

In recent years, influence of environmental change on fisheries resources has caught attention. There have also been reports that describe negative correlation between surface water temperature in winter and recruitment of the northern Japan Sea walleye pollock stock. However, except for information on spawning season, there is little ecological information available on how walleye pollock is responding to the environmental change.

An environmental change observed in the Japan Sea is an increase in the number of years in which there have been strong Tsushima Warm Currents, whose surface layer flow to the north, since 1988. It is now clear that the coastal water of Hokkaido

has a warming trend according to the data over 100 years.

On the other hand, the distribution of walleye pollock with water temperature shows that walleye pollock are sometimes caught in the water at 12°C when they are feeding, while they are distributed in water with temperature as low as 0.5°C in their spawning season. The optimum water temperature for the eggs to hatch is 2 - 7°C. The hatchability decreases at water temperature higher than 10°C.

In order to properly manage the stock of walleye pollock, which is declining significantly, it is necessary to accurately evaluate the resource volume and to immediately clarify the influence of environmental change on the resource. Therefore, this research aimed to compare the virtual population analysis (VPA) estimates of walleye pollock with its biomass obtained in the acoustic resource survey, and to clarify the influence of water temperature on the spawning ground formation, which is the first step in the reproduction process of walleye pollock, by analyzing the distribution and the water temperature information obtained from the acoustic resource survey.

Materials and Methods

Acoustic resource surveys were conducted in the Japan Sea, Hokkaido during September - October period between 1996 and 2007. The survey used the research vessel Hokuyo Maru (237t) throughout the survey period, with Kinsei Maru (151t) accompanying as well from 2001 onward. An echosounder EK500 or EK60 (Simrad) was used for recording acoustic data. The frequency and pulse duration used in the echosounders

were 38 kHz and 1 ms, respectively. Before starting the survey, the echosounders were calibrated as much as possible using a calibration sphere (60 mm diameter, copper sphere).

To examine the reliability of the recorded acoustic data, calibration records of the echosounders were analyzed and inter-vessel calibration was performed between Hokuyo Maru and Kinsei Maru. Also, the effects of three types of removal processing for background noise using EchoView were evaluated. Afterward, biomass of spawning adult walleye pollock calculated by applying the correction factor from this study was compared with resources estimate calculated by VPA.

Also the vertical distribution of water temperature at the two fixed points (Iwanai Bay and off Hiyama) was compared with the depth distribution of walleye pollock obtained from the acoustic resource survey. To verify the obtained relationships, correlation between the catch of coastal fisheries since 1935 and the normalized water temperature calculated from the coastal water temperature data of the Japan Sea, Hokkaido was analyzed. Furthermore, the correlation between the new recruitment since 1981 obtained by VPA and to RPS was analyzed similarly.

Lastly, to confirm the location where the current spawning ground is formed, egg distribution survey was conducted using three research vessels in the coastal Japan Sea in February 2006 and 2007. Eggs were collected by vertical haul with NORPAC or 80R net from 150 m in depth. The Assessment Reports of the Tomari Nuclear Power Plant (Hokkaido, 2006 and 2007) were used to obtain the data of the coastal water in Iwanai Bay.

Results and Discussion

1. Evaluation of acoustic resource survey using echosounder (Chapter 2, 3)

The calibrated values of echosounders in Hokuyo Maru showed an annually declining trend. Of these, the value 25.34 dB in 1998 was found to be abnormally low compared with the values in the years of order. Although the data collected by the echosounders in Kinsei Maru was 0.66 - 1.10 higher than that of Hokuyo Maru, in recent years a high concordance of 0.95-fold or higher has been seen. Background noise removal using the three processing methods gave good concordance (0.8 - 1.2-fold) with the results obtained by manual processing.

The biomass estimated by the acoustic resource survey decreased from 254,000 t in 1999 to 88,000 t in 2007. The biomass had a declining trend throughout the survey period and gave a significant correlation coefficient of $r = 0.886$ when compared with the VPA (except 1996, 1997 and 2002). When the absolute values were compared with the VPA values,

it was in the range of 0.9 - 1.5-fold concordance with a mean value of 1.3-fold, and variation coefficient of the difference was approximately 80%. This research indicated that there is a possibility that the VPA underestimated the fluctuation range of resources due to the error of age determination. However, the highly correlated estimates obtained from two completely different estimation methods indicate the reliability of each method. Reliable resource evaluation was considered possible by complementing the disadvantage of one method with the advantage of the other.

2. Distribution of walleye pollock in spawning migration season and water temperature (Chapter 4)

The center of depth distribution of walleye pollock between 1996 and 2006 was in the range of 385 - 485 m in Iwanai Bay and 375 - 445 m off Hiyama in 1996 - 2006. Diurnal vertical migration of a shoal of walleye pollock was also observed. The water temperature at the center of the distribution was between 0.53 and 0.98°C, with 2005 being the only year in which the temperature exceeded 0.8°C. Furthermore, depth distribution of walleye pollock showed a high correlation of $r^2 = 0.656$, with the water temperature in the layer of 100 m in depth (except 2005). The reason as to why the fish swam in such a low water temperature layer is to reduce the energy loss before spawning.

3. Catches of spawning walleye pollock and coastal water temperature (Chapter 5)

The catches in Shiribeshi Sub-prefecture showed a significantly negative correlation with the normalized water temperature between January - March period and October - December period. Conversely, in Hiyama Sub-prefecture, the catches showed a significantly positive correlation with the water temperature in January and December. The reason as to why the catches declined in Shiribeshi Sub-prefecture, which has high water temperature and located in northern part, is assumed to be because the depth distribution of walleye pollock becomes deeper during the high water temperature years, which causes the spawning shoal going to the spawning ground in Shikotan Peninsula and northward that have relatively shallower sea floor depth to decrease; instead, the spawning shoal went to the ground off Hiyama.

The recruitment per spawning (RPS) of walleye pollock showed significantly negative correlation with water temperature in winter (December to March). Furthermore, the relationship between RPS and water temperature appeared to be divided into two phases: low water temperature-high RPS years and high

water temperature-low RPS years.

4. Change in location of the spawning ground for the northern Japan Sea stock (Chapter 6)

There is indication that the spawning ground of walleye pollock off western Hokkaido in the northern part of the Sea of Japan has disappeared. This is inferred from recent reduction in the fish catch by the coastal fisheries, which capture spawning adults. In the present research, the distribution of the walleye pollock eggs was investigated over the western Hokkaido, Sea of Japan in February 2006 and 2007. In Ishikari Bay, Stage1 eggs' maximum density was actually small: 4 individuals/m², and the eggs were not collected in Soya and Rumoi region. However, in the southward from Shakotan Peninsula, Stage1 eggs' maximum density was 19,350 individuals/m² in Iwanai Bay, and 1,574 individuals/m² in Hiyama region. These suggest that Iwanai Bay and Hiyama region (off Otobe) was the major spawning ground, and Ishikari Bay was a minor one. However, there was no spawning ground in Soya and Rumoi region recently. Ishikari Bay has many eggs transported but has few eggs produced. We assume that some eggs spawned off Otobe, Hiyama region, would be transported northward, and only a small amount southward, and that the location of the main spawning ground changed after 1980s by comparison with this result and past

knowledge. As a result, the distance between main spawning grounds and nursery area became larger in recent years. Consequently, the eggs could encounter more often high water temperature, which is fatal to the development. It was thought that these didn't allow successful transport of the eggs to the nursery area.

5. Influence of water temperature on the spawning ground formation and the survival in the egg stage (Chapter 7)

The results above indicate that the spawning ground in the area in Ishikari Bay and northward is currently decaying due to the high water temperature in the season of spawning migration (October). The current climate regime is causing the low RPS, and the high and low RPS within this condition could be explained by the water temperature in the spawning season (February) in the area from Iwanai Bay to the coast off Hiyama and by the transport of eggs and larvae. The hatchability is reduced when the surface water temperature increases to 7 to 8°C and higher. The survivability is reduced when the eggs and larvae are not transported to the northern coastal area. In conclusion, in order for eggs to survive successfully, eggs and larvae have to be transported to the wide nursery ground located in Ishikari Bay and northward, while maintaining high hatchability at the same time.

キーワード：温暖化，計量魚群探知機，再生産，産卵場，資源評価，スケトウダラ，直接法，日本海

目次

第1章 序論

- 1.1 緒言
- 1.2 スケトウダラの分布と系群
- 1.3 日本海におけるスケトウダラ漁業
- 1.4 漁獲量と資源動向
- 1.5 資源変動要因
- 1.6 日本海の特徴
 - 1.6.1 海底地形
 - 1.6.2 対馬暖流
- 1.7 スケトウダラ的生活史と生息水温
- 1.8 本研究の目的
- 1.9 論文の構成

第2章 計量魚群探知機を用いた魚類資源量の直接推定

- 2.1 緒言
- 2.2 原理と理論
- 2.3 北洋丸の計量魚探機の TSgain 経年変化
 - 2.3.1 材料と方法
 - 2.3.2 結果と考察

2.4 船間較正

- 2.4.1 材料と方法
- 2.4.2 結果と考察

2.5 ノイズの除去

- 2.5.1 材料と方法
- 2.5.2 結果と考察

第3章 北部日本海におけるスケトウダラ産卵群の音響資源調査

- 3.1 緒言
- 3.2 材料と方法
 - 3.2.1 音響資源調査設計
 - 3.2.2 現存量推定
- 3.3 結果

- 3.3.1 スケトウダラ魚群のトロール調査
- 3.3.2 音響散乱強度 (NASC) の分布
- 3.3.3 音響資源調査によるスケトウダラ産卵群の現存量推定

3.4 考察

第4章 スケトウダラ北部日本海系群の産卵回遊期の分布

と水温	4π : 球の立体角 (ステラジアン)
4.1 緒言	ABC : 生物学的漁獲許容量
4.2 材料と方法	BW : 体重
4.3 結果	\overline{BW}_k : k 番目の調査線に用いる平均体重
4.3.1 鉛直分布の日周変化 3	$C_{a,y}$: a 歳, y 年度の漁獲尾数
4.3.2 水温	E_{jk} : k 番目の調査線の j 番目の 1nmi ごとに計算した NASC
4.3.3 分布深度とスケトウダラの分布水温	F : 漁獲死亡係数
4.3.3.1 岩内海域	$F_{a,y}$: a 歳, y 年度の漁獲死亡係数
4.3.3.2 桧山海域	F_t : ターミナル F , 最高齢の漁獲死亡係数
4.3.3.3 スケトウダラの分布水温	$F_{t,y}$: y 年度の F_t
4.3.4 水温と分布深度の相関分析	FL : 尾叉長
4.3.5 水温の水平分布	M : 自然死亡係数
4.4 考察	$N_{a,y}$: a 歳, y 年度の資源尾数
第 5 章 スケトウダラ北部日本海系群の漁獲量と標準化水温	NASC (s_A) : 面積散乱係数, $\text{NASC}=4\pi \times 1852^2 \times sa$
5.1 緒言	nmi : 海里の単位 (1nmi=1852m)
5.2 材料と方法	ping : 超音波信号 (を送ること)
5.2.1 標準化水温	r_0 : 基準距離, 通常は 1m
5.2.2 スケトウダラ漁獲量と加入量, 並びに再生産成功率 (RPS)	RMS : 二乗平均平方根
5.3 結果	RPS : Recruit Per Spawning, 再生産成功率
5.3.1 水温と漁獲量	ρ_A : 積分範囲面積 A の分布密度
5.3.2 水温と加入量, および RPS の関係	ρ_V : 積分範囲体積 V の分布密度
5.4 考察	SA : 面積後方散乱強度, $SA=10\log sa$
5.4.1 標準化水温の変化とレジームシフト	sa : 面積後方散乱係数, $sa=10^{\frac{SV}{10}} \times T$
5.4.2 産卵場形成に与える水温環境と海底地形の影響	Sk : k 番目の調査線と隣の調査線との平均間隔
第 6 章 スケトウダラ北部日本海系群の産卵場の変化	SSB : Spawning Stock Biomass, 産卵親魚重量
6.1 緒言	SSL : Sound Scattering Layer, 音響散乱層
6.2 材料と方法	SST : Sea Surface Temperature, 表面海水温
6.3 結果	SV : 体積後方散乱強度, $SV=10\log sv=10\log(\rho_V \sigma_{bs})$
6.3.1 2006 年のスケトウダラ卵分布	sv : 体積後方散乱係数
6.3.2 2007 年のスケトウダラ卵分布	SVgain : 計量魚群探知機 Simrad EK500 で SV を計算するための補正值
6.3.3 2006 年と 2007 年の水温	σ : 散乱断面積, $\sigma=4\pi\sigma_{bs}$
6.4 考察	σ_{bs} : 後方散乱断面積, $\sigma_{bs}=\sigma/4\pi=10^{\frac{TS}{10}}$
第 7 章 総合考察	$\bar{\sigma}_k$: k 番目の調査線に用いる平均散乱断面積
7.1 音響で推定された現存量の信頼性	T : 積分層の平均厚さ
7.2 産卵場形成の条件	TAC : Total Allowable Catch, 総漁獲可能量
謝辞	TS : ターゲットストレンジス, $TS=10\log \frac{\sigma_{bs}}{r_0^2}$
参考文献	TScm : 全長を 1cm で標準化した TS
記号一覧	TSgain : 計量魚群探知機 Simrad EK500 および EK60 で TS を計算するための補正值, EK60 では SV の計算にも用いる
	TVG : Time Varied Gain
	VPA : Virtual Population Analysis

本論文に用いた記号の一覧を示す。対数は全て常用対数、生物学的パラメタは断り無き場合はスケトウダラに関する値を表す。

第1章 序論

1. 緒言

スケトウダラ *Theragra chalcogramma* の漁獲量は全世界で680万t (1986年) に達し, 国内でも年間50万t (1970～1980年代) を超える非常に重要な漁業対象資源である (西村2006)。しかし, その漁業の歴史はサケ・マス *Oncorhynchus* 属やマダラ *Gadus macrocephalus*, ニシン *Clupea pallasii* などに比べて新しく (前田ほか, 1993), 北海道では岩内や松山海域で1901年頃から始められた (辻, 1978)。スケトウダラの国内での研究の歴史はさらに新しく, 本格的な調査研究は1950年以降になってからであった (前田ほか, 1993)。その後, 1960年に完成された冷凍すり身技術 (西谷ほか, 1960) によってスケトウダラの産業的価値も高まり, 漁獲量の増加とともに1970～1980年代には年齢と成長 (Nishimura and Yamada, 1984), 系群構造 (辻, 1978), 時空間的分布 (田中, 1970), 漁場形成 (前田ほか, 1976) や繁殖生態 (桜井, 1993) など多くの成果が報告された。

一方, 1980年代にはベーリング海のスケトウダラ資源評価に音響手法が導入されたが (Traynor and Nelson, 1985), 国内においては漁獲統計が整備されていたことから, CPUEによる分析やVPA (Virtual Population Analysis) が主流であった (Tsuji, 1990)。

1996年に日本も国連海洋法条約を批准し, 我が国の排他的経済水域内の水産資源について適正に管理する法的な根拠が示された。現在, 重要水産資源についてはすでに漁獲可能量 (TAC: Total Allowable Catch) による管理が実施され (浅野, 2000), スケトウダラ太平洋系群ではVPAの手法的な限界, 例えば最近年の推定値は不確定であることや加入量を予測できないことなど, を補う形で音響資源調査が導入されている (本田, 2004)。このように近年, 音響手法の重要性が再認識されるとともに, 国内研究機関にもスプリットビーム方式の高性能な計量魚群探知機 (以下, 計量魚探機と記す) が普及して詳細な魚群分布データが得られるようになった。これらの成果には資源評価に関する研究 (高尾, 1994, 三宅ほか, 2001, 本田, 2004など) の他, 分布などに関する研究 (飯田ほか, 1995; Ohshimo and Hamatsu, 1996; 志田ほか, 1999; 2008, Miyashita *et al.*, 2004) など多数の報告がある。

1.1 スケトウダラの分布と系群

本種は北太平洋に広く分布するタラ科の1種であり, スケトウダラ同様に産業的に重要なマダラ *Gadus macrocephalus* やコマイ *Eleginus gracilis* の他, ホッキョクダラ *Boreogadus saida*, パシフィックトムコッド

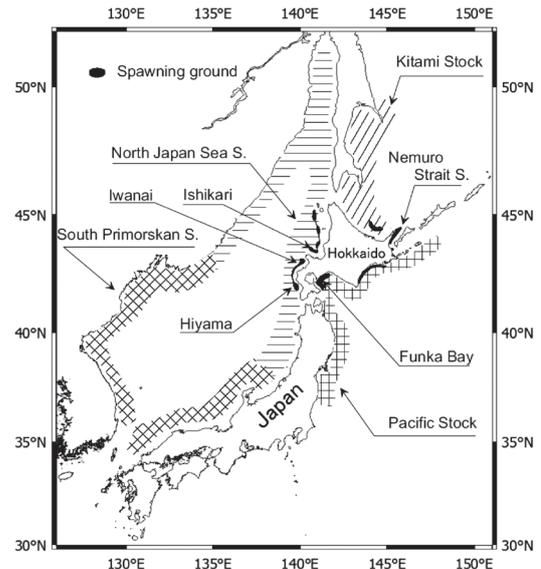


Fig. 1 Walleye pollock stocks around Japan and spawning grounds around Hokkaido (Tanaka, 1970; Tsuji, 1989; 1990). Shaded area indicates each stock, and black filled patches show the main spawning grounds around Hokkaido.

Microgadus proximus, およびスケトウダラの計5種が分布する (針生1993)。いずれも太平洋の北部に分布する冷水性魚類である。

我が国周辺のスケトウダラは北部日本海系群, 北見沖合系群, 根室系群および太平洋系群の4つの系群に分けられている (Fig.1, Tsuji, 1989)。近年, ミトコンドリアDNAやマイクロサテライトDNAでの遺伝的検討がなされたが (Mizuno *et al.*, 2000; Canino *et al.*, 2005), 北海道周辺海域での資源構造の識別は可能とはなっていない (西村, 2006)。

本研究の対象となる北部日本海系群の分布域はアジア大陸からサハリン, 北海道西側を経て本州新潟沖に達するが, 近年の日本海での漁獲はほとんどが日本によるもので北海道近海からの水揚げが主体となっている (西村, 2006)。

1.2 日本海におけるスケトウダラ漁業

北海道日本海海域のスケトウダラ漁業は1901～1903年頃に岩内や松山海域ではえ縄を用いて始められた (辻, 1978)。近年は主に沖合底びき網漁業と刺し網, はえ縄漁業で漁獲される。沖合底びき網漁業は6月16日から9月15日の禁漁期間を除く期間に北緯43°30'以北で操業する。刺し網, はえ縄漁業は11月から翌年3月, 産卵のために沿岸域に來遊する親魚を漁獲する。刺し網漁業は沿岸各地で行われ, 石狩湾に面する後志支庁沿岸から寿都湾にかけて漁獲量が多い。はえ縄漁業は岩内湾と松山沿

岸域のみで行われている。

1.3 漁獲量と資源動向

北海道立水産試験場の評価によると、4つの系群の中で太平洋系群を除く3つの系群の資源状態は低水準にあると診断されている（北海道立中央水産試験場資源管理部，2007）。北海道日本海におけるスケトウダラ漁獲量は、1991年の12万tを最高に2005年には2万5千tまで減少している（本間ほか，2007）。VPAの結果でも、産卵親魚の減少とともに再生産成功率（RPS: Recruit Per Spawning）が低下し、資源回復のためには5～6割の漁獲努力量削減が必要と報告されている（Yamaguchi and Matsuiishi, 2008；本田・八吹，2008）。

1.4 資源変動要因

これまで、水産資源減少の原因には乱獲を指摘する報告が多かったが、レジームシフトが広く認知されて環境変動による影響が注目されるようになった（川崎，2008）。ベーリング海ではボトムアップコントロール、トップダウンコントロールなどの概念で資源動態が整理されており（*Hunt and McKinnell, 2006* など）、我が国でも環境変動に応答するスケトウダラ太平洋系群の概念モデルが提案されている（*Shida et al., 2007*）。日本海スケトウダラにおいても、環境変化、特に表面水温との相関関係が幾つか報告されているが（*呉ほか, 2002*；*三宅・田中, 2006*；*Funamoto, 2007* など）、水温がどのようにスケトウダラに作用し、スケトウダラがどのように応答するのか、卵期（*Hamai et al., 1971*；*中谷・前田, 1984*）を除けば生態的な報告は少ない。

次節では北部日本海系群の器である日本海の特徴について概観し、その後、スケトウダラ的生活史を述べる。

1.5 日本海の特徴

1.5.1 海底地形

我が国では、16道府県が接している日本海は面積101万km²で、オホーツク海や東シナ海に比べて少し小さいが、それらに比べて非常に深く、平均深度は135m、最大深度は3,796mである（*Fig. 2*）。しかし、日本海と隣接する海洋をつなぐ4つの海峡（間宮海峡、宗谷海峡、津軽海峡および対馬海峡）は狭くて浅いため、日本海はお椀のような閉鎖性の強い海となっている。間宮海峡は最狭部の幅8km、最深部の水深12mで、宗谷海峡の最深部は55m、津軽海峡、対馬海峡の最深部は140mしかない（*田中, 1996*）。

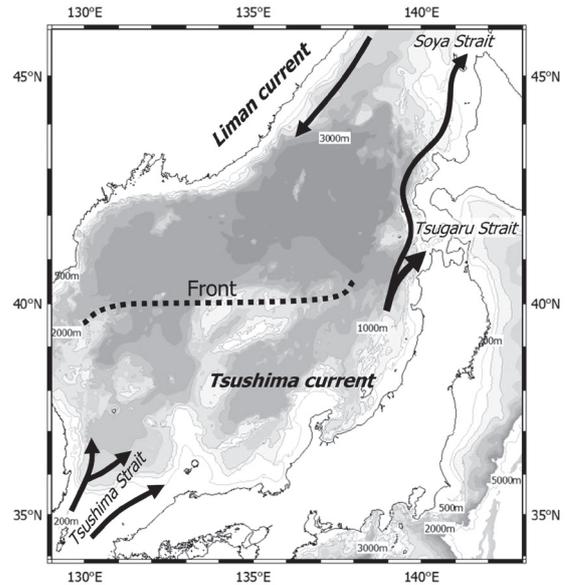


Fig. 2 Bathymetry and ocean currents in the Sea of Japan. Gray shaded area shows the bathymetry, defined with 200, 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000m isobath; darker color indicates deeper sea bottom depth. Black arrows are the major ocean currents. Dotted line indicates approximate location of front where these currents meet.

1.5.2 対馬暖流

日本海を南から北へ流れる対馬暖流は、東シナ海で形成された黒潮水と沿岸水の混合水が対馬海峡を通過して日本海に流入する。その後、日本海南部の表層200～300m以浅に広がり、津軽海峡および宗谷海峡から流出する。南部海域に広がった対馬暖流域内には5～7個の暖水渦が移動・停滞を繰り返す複雑な流路パターンを示すが、津軽海峡南西では安定した北上流がある（*磯田ほか, 1998, Fig. 2*）。

この表層の下には日本海固有水という冷たい水が存在している。1℃以下の低温水は太平洋では水深5000～6000mでなければ存在しないのに対し、日本海では水深200mで普通に見られる（*田中, 1996*）。

北海道南西岸の傾圧流は8月に最も強く、10月には流量低下し、水深300～600mでは10月と12月は僅かに南下流となる。流量の経年変動は5～6年周期で長期的には減少傾向にあるが（*中多・田中, 2002*）、沿岸水温の100年以上におよぶ時系列によると明瞭な温暖化傾向が認められる（*田中, 2002*）。

また、気象庁は水深100mの水温が10℃以上の海域の面積を対馬暖流勢力の指標として用いている。それによると、近年では1984年が非常に弱い年であったが、1988年以降、平年より勢力の強い年が多くなっている（*気象庁, 2008*）。そうした傾向の中で、2005、2006年と2年

続けて弱い年となっている点が注目される。

1.6 スケトウダラの生活史と生息水温

スケトウダラの北太平洋での分布適水温は2～5℃と言われているが（バックラほか，1990），生活段階で適応する水温は大きく異なる。日本海では10月（産卵回遊期）には水温0.5℃に分布する（Maeda *et al.*, 1989）。北部日本海系群の産卵期は12月から3月であり（田中，1970；前田ほか，1988），産卵期のスケトウダラ分布水温は日本海松山沖では2～5℃，噴火湾2.5～4℃，根室海峡2～5℃，アリューシャン海盆域では3.5～4℃，ベーリング海で-1.8～6.0℃と同じような水温帯に分布することが知られている（志田，2001）。しかし，索餌期には日本海で12℃での漁獲記録もあり（石垣，1960），また，秋期の当歳魚は太平洋道東沿岸では6～16℃と広い水温範囲に分布する（Miyake *et al.*, 1996）。

ところが稚魚や成魚と異なり，スケトウダラ卵のふ化適水温は2～7℃であり，10℃以上になるとふ化率は大きく低下することから（中谷・前田，1984），産卵期の水温は，再生産に重大な影響を与えていることが想定される。

現在，日本海北海道西岸で確認されている産卵場は石狩湾，岩内湾，松山沖の3カ所だけである（三宅ほか，2008）。ここで産出された卵は対馬暖流により大部分は北の方へ輸送されながらふ化し，仔稚魚は石狩湾からオホーツク海沿岸に至る広い海域の表層に分布する（金丸，1989；夏目・佐々木，1995；板谷ほか，2008）。日本海に留まった稚魚は雄冬岬沖から礼文島周辺海域に至る大陸棚上の海域で底層生活に移行すると考えられている（佐々木・夏目，1990）。

底層生活に移行した後は，季節・日周的な鉛直移動を繰り返しながら武蔵堆海域にも分布を広げて成長する（佐々木・夏目，1990）。3～5歳になり性成熟した個体は9～11月に産卵場へと移動回遊する。産卵後の成魚は岩内湾では北上するが（田中，1970），松山海域では沖合や南へ移動する（前田ほか，1989）。産卵後の4～6月には，表層の12℃近くまで分布範囲を広げる（石垣，1960）。

これらの報告から，日本海のスケトウダラはベーリング海や道東太平洋に比較して，産卵回遊期には低水温，索餌期には高水温にも適応していると推察される。

1.7 本研究の目的

資源低下の著しいスケトウダラ北部日本海系群を適切に管理するためには，資源量を正確に評価し，環境変動が資源変動に与える影響を早急に明らかにする必要がある。従って，本研究では音響資源調査による産卵親魚の

現存量を推定し，VPA推定値との比較を行う。また，音響資源調査で得られたスケトウダラ分布情報と水温情報を分析して，再生産過程の最初の段階である産卵場形成に係わる水温の影響を解明する。

1.8 論文の構成

本章では，これまでスケトウダラ漁業と研究の背景，および生息環境としての日本海の特徴を述べ，次にスケトウダラの一般的な生息条件と日本海北部系群の生活史をレビューした。第2章では，本研究で用いた計量魚探機の計測器としての特性と音響資源調査の理論について述べ，3章では音響資源調査によりスケトウダラの現存量を推定し，その信頼性を論議する。第4章では，音響資源調査とCTD観測で得られたスケトウダラ分布深度と水温の関係について詳細な分析を行い，第5章では漁獲量と水温の関係を50年スケールで検討する。第6章では，スケトウダラ卵の分布状況から現状の産卵場の形成場所を考察する。第7章では音響調査で得られた知見を基に，日本海スケトウダラの産卵場形成と卵から仔魚の生き残りについて考察し，この間の生残概念モデルを提案する。

第2章 計量魚群探知機を用いた魚類資源量の直接推定

2.1 緒言

TAC制度が施行されて以来，直接法による資源量推定の必要性が高まったことは第1章で述べた。直接法には，調査船調査を基にした解析手法と，目視観察による方法などがあり（原，2000），漁業情報を利用しない推定法の総称である。それらの直接法の中でも音響資源調査は，その迅速性とデータ密度の高さから近年急速に普及してきた。特に計量魚探機はノルウェーのニシン *Clupea pallasii*，やベーリング海のスケトウダラなどのように単一魚種として中底層に均一に分布する魚群に適した方法である（宮野鼻，2000）。

我が国における計量魚探機を用いた資源調査の先駆的な例として，1980年にサンマ *Cololabis saira* など浮魚類のクイックアセスメント事業が実施されている。当時は科学魚探と呼ばれ，資源評価担当者はサンマの餌となるプランクトンの鉛直移動の様子を報告している（谷野，1981）。

また，周波数特性の違いを利用した動物プランクトンの現存量推定（飯田ほか，1999；Miyashita *et al.*, 2004）や，漁獲対象種ではないキュウリエソ現存量を推定し，レジームシフトのモニタリングに応用した例もある（藤野，2006）。

ただし，計量魚探機の課題として海面や海底によるマ

スキング現象が上げられる。これらは海面や海底付近(音波パルス長の1/2以内)にあるものは海面や海底と分離できない現象であり、この範囲を音響的なデッドゾーンと呼ぶ (Johannesson and Mitson, 1983)。現在ではこの問題を解決するため計量スキニングソナーの実用化が進められている (飯田, 2007)。スケトウダラの資源量調査においても魚群分布が海底に接する場合には現存量の過小推定となる可能性がある (安部ほか, 1999)。

2.2 原理と理論

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して可視化する装置である。音の強さは水中で波面拡散 (拡散減衰) や吸収損失 (吸収減衰) により減衰するので, 音の強さを定量化するためには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する必要がある。この補正をTVG (Time Varied Gain) と言い, 計量魚探機には必要不可欠なものである。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, エコー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の間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。この比例定数を求めるには, 対象魚 1 個体当たりの標的強度ならびに計量魚探機の音響的特性などの総合的な較正が必要である。この較正法として, 送信系, 受信系を総合的に較正できることから, 銅球などの標準球を用いた較正法が一般的となっている (Foote, 1983)。受波器の感度などを調査前に較正することで, 計量魚探機の精度を保持することが可能である。

較正された計量魚探機から出力される面積後散乱係数 sa は, 単位面積当たりの魚群密度 ρ_A に比例する。

$$sa = \bar{\sigma}_{bs} \rho_A \dots \dots \dots (2.1)$$

ここで, $\bar{\sigma}_{bs}$ は魚 1 個体の平均後散乱断面積を表す。ところで σ_{bs} はデシベル表現のターゲットストレングス (TS) と以下の関係がある。

$$TS = 10 \log \sigma_{bs} \dots \dots \dots (2.2)$$

よって,

$$\sigma_{bs} = 10^{\frac{TS}{10}} \dots \dots \dots (2.3)$$

後散乱断面積 σ_{bs} は次元を考慮すると体長の 2 乗に比例する。従って, 比例定数を b とすると,

$$\sigma_{bs} = bFL^2 \dots \dots \dots (2.4)$$

となり, 両辺を対数変換し (2.3) 式を代入すると,

$$TS = 20 \log FL + b \dots \dots \dots (2.5)$$

となる。この式の b を TS_{cm} に書き換えると次式になる。

$$TS = 20 \log FL + TS_{cm} \dots \dots \dots (2.6)$$

ここで, FL は魚の尾叉長 (cm), TS_{cm} は基準化TSを示す。この TS_{cm} は有鰈魚では一般に -66dB を用いる (Foote and Traynor, 1988)。

したがって, FL の平均値が求められれば $\bar{\sigma}_{bs}$ が分かるので魚群密度 ρ_A が求められる。よって海域内の魚群量 B は, 平均体重 \bar{W} , 海域面積 A および ρ_A の積で表される。

$$B = A \bar{W} \rho_A \dots \dots \dots (2.7)$$

このように, 正確に較正された計量魚探機で測定した面積後散乱係数から魚群量を求めることができるが, 平均尾叉長, 平均体重および TS_{cm} によってそこから計算される現存量推定値は大きく偏る可能性がある。それを避けるためには, 十分な回数のトロール調査を行い, 偏りのない平均尾叉長, 平均体重を求める必要がある。また, TS_{cm} はスケトウダラ調査では一般に -66dB を用いているが, 有鰈魚のTSは深度の増加に伴って小さくなることが知られている (Mukai and Foote, 1997)。また, スケトウダラ若齢魚では TS_{cm} が上記の値よりも数dB 小さいことが報告されている (Sadayasu et al., 2006)。尾叉長40cm のスケトウダラ成魚の場合, TS が 1dB 大きくなると分布密度は26%も少なくなることから, より正確な現存量推定のためにはさらに詳細なTSの検討が必要である。

音響資源調査による現存量推定法の誤差は系統誤差と確率誤差に分けられ, 上に述べた誤差は系統誤差に分類される。系統誤差は測定および推定の過程をたどって補正することができる (Johannesson and Mitson, 1983)。一方, 確率誤差は再現性がないが, 統計的誤差理論で理解される。調査線密度の検討や空間統計学を応用することにより, 精度を評価できる。系統誤差と確率誤差はそれぞれ正確度と精度に影響を与える。

本研究の調査に用いた試験調査船北洋丸 (237t) は, 1995年の新造時にシムラッド社のEK500が装備され,

2007年まで12年間にわたり標準球較正を行ってきた。送受波器（トランスデューサー）の利得（gain）の経年変化を明らかにすることで、蓄積されたデータの評価と補正が可能になる。

また、2001年には金星丸（151t）が代船建造されたのに伴い、調査期間をより短縮するために2隻の試験調査船を用いて海域を分担して調査に当たることとした。調査前には各船で標準球較正を行っているが、較正実施地点や2隻の船型も異なることから、船間差や各調査船の特徴を明らかにする必要がある（本田，2004）。そのため本研究では船間較正を行った。しかし、毎回実施することは困難であったことから、重複した調査線を設定し、簡易的な比較も行った。

一方、200t前後の小型試験調査船による音響資源調査では如何に注意深く調査を計画しても、気象などの影響で雑音や泡切れ（気泡）は避けられない。気泡減衰はトランスデューサーの深度が大きく影響し、トランスデューサー深度が深いほど影響を受けにくい（Johannesson and Mitson, 1983）。北洋丸のトランスデューサー深度はおおよそ3.5mであり、経験的に風速10m/s以上になると泡切れが頻繁に出現するようになり、音響資源調査は困難となる。気泡減衰や泡切れは資源の過小評価の原因となるが、泡切れは下方には縦線状の音響ノイズを伴うことも多く、この様なノイズは過大評価の原因となる。しかし、こうした雑音の混入したデータであっても、本研究のような広域資源調査では二度と入手不能で貴重なデータであるから、可能な限り活用すべきである。本章の三番目として、そのような音響データから後処理ソフトウェアによってノイズを取り除く方法を検討した。

なお、本研究では面積散乱係数としてNASC（Nautical Area Scattering Coefficient：m²/nmi²）を用いた。これはシムラッドのS₄と等価であり、下記のように定義される。

$$NASC=4 \pi \times 1852^2 \times sa \dots \dots \dots (2.8)$$

$$sa=10^{\frac{SV}{10}} \times T \dots \dots \dots (2.9)$$

ここで、

- 4π = 球の立体角（ステラジアン）
- 1852 = 1nmi のメートル数（m/nmi）
- SV = 体積後方散乱強度（dB re 1 m²/m³）
- T = 積分層の平均厚さ
- sa = 面積後方散乱係数；Area Backscattering Coefficient（m²/m²）

2.3 北洋丸の計量魚探機の TSgain 経年変化

2.3.1 材料と方法

音響調査の前に原則として標準球（直径60mm銅球）による較正（Simrad, 1993, 飯田ほか, 1997）を利尻島 鷺泊港、宗谷湾および函館港の水深40～50m地点で実施した。なお、1998年以降は全て鷺泊港で実施した。北洋丸の計量魚探機は周波数38kHzと120kHzを装備しているが、本研究では第3章の現存量推定に用いた38kHzのデータのみを扱った。このトランスデューサーのビーム幅は6.8°であり、パルス長は1msとした。また、北洋丸の送受信機および積分装置は1995年から2003年まではEK500を、2004年から2007年まではEK60を使用した。EK500ではTSおよびSVを計算するために、TSgainとSVgainをそれぞれ求める必要がある。SVgainの較正には100ping程度の安定した標準球エコーが必要である。その点、EK60の場合はTSgainを用いてSVを計算するため、較正にSVgainは不要となった。このことから、12年間を通してのトランスデューサー利得（感度）の経年変化を調べるに当たりTSgainを指標として用いた。

2.3.2 結果と考察

Fig. 3に北洋丸のTSgainとSVgainを示した。較正で得られた値（Calibrated）と実際に調査に用いた値（New）を示した。TSgainの変化を見ると、全体的に低下傾向を示し、1995年には27.30dBであったのが2002年に26.4dB前後となり、さらに2004年には25.7dBまで落ちて、その後は25.7dB前後で安定していた。このように北洋丸に装備されているトランスデューサーはこれまでに2回のTSgainの低下が認められた。1997年はその後の調査によりミネフジツボ *Balanus rostratus* がgain低下とノイズの原因であることが判明した（三宅，2002）。

較正值（Calibrated）と採用値（New）が一致しない場合があるが、これはそのときの較正值の二乗平均平方根（以下、RMSと記す）が0.4を超えて信頼性が低い場合であり、そうしたときには直近の較正值を用いたためである。なお、ここに示したのは本研究が実施された各年9～10月調査の較正結果のみである。

北洋丸では2003年まではEK500を使用しており、この機種では魚群積分にはSVgainを補正值として用いる。そこで、積分値の信頼性を評価するために北洋丸のSVgainの変化を見ると、1997年にSVgainが25.80dBと低い値となっていたが、較正值は不採用とされた。ところが、1998年はSVgainが25.34dBと非常に低い値であったが、その値が採用されて調査が実施された。

次に、2001年から調査を行った金星丸のTSgainを合わせてFig. 4に示した。金星丸は26.00～26.50dBで推移し

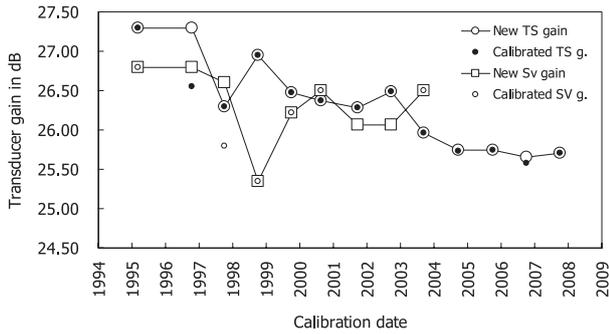


Fig. 3 Change of the transducer gains of EK500 from 1995 to 2003, and EK60 from 2004 to 2007 on R/V Hokuyo Maru. The “new” values were used in our surveys.

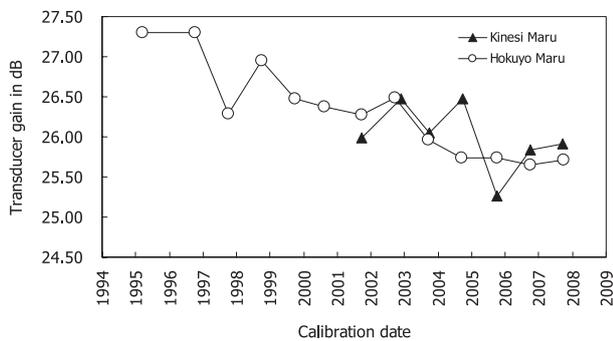


Fig. 4 Change of the transducer gains (TSgain) in the surveys with EK60 / EK500 on R/V Kinsei Maru (black filled triangles) and R/V Hokuyo Maru (blank circles).

ていたが、2005年のみ25.25dBまで低下していた。この年は調査終了後ダイバーによる観察により、トランスデューサーにミネフジツボが付着していたことが確認された。

以上の標準球較正値の経年変化から、北洋丸のトランスデューサーの感度レベルが1.6dB低下していることが明らかになった。2004年にはトランスデューサー以外の船上部分の解析装置をEK500からEK60に変更したので、こうした工事が原因となっている可能性も否定できない。

しかし、2004年以降は積分装置がEK60になったためSVgainの較正が不要になり、利得の較正はTSgainのみとなったことから、較正作業が容易になった。2004年以降は低いながらも較正値が安定しているのは、その様なことも一因であろう。今後、北洋丸を用いた調査で、天候等の理由で事前に較正ができない場合はTSgainを25.7dBに設定すれば大きな誤差にはならないと考えられる。

また、1998年のSVgain (25.34dB) は全体的な変化傾向から外れており、異常に低いことが判明した。このときのTSgain較正値は26.95dBと高い値を保っており、トラ

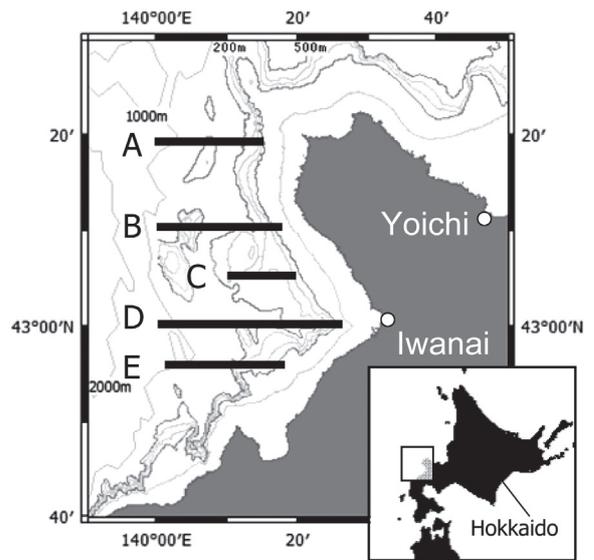


Fig. 5 Transects for intership calibrations between R/V Hokuyo Maru and Kinsei Maru (A,B,D,E) and all R/Vs including R/V Oyashio Maru (C).

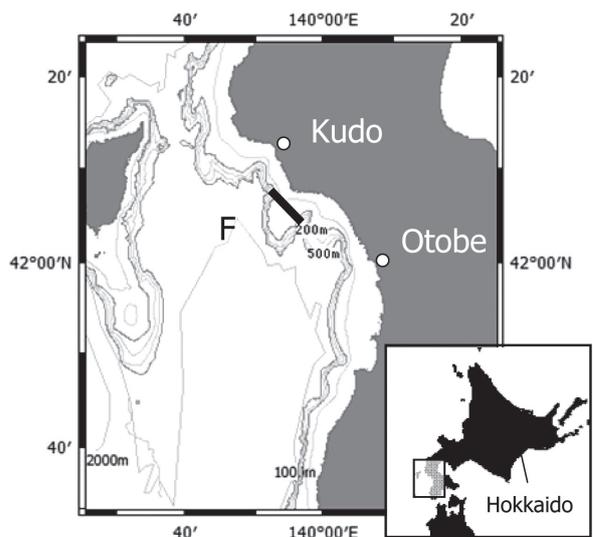


Fig. 6 Location of sea bottom backscattering measurements for analyses with 2001 data.

ンスデューサーの感度低下は認められない。前後の年のSVgainの値から判断して、1998年の適正値は26.5dB前後であったと推定される。当時の判断としては、その直近の8月24日に行った標準球較正でも同様に低い値となっていたことから、25.34dBを採用した。しかし、正確なSVgainの較正には一定時間、標準球の位置を正確にトランスデューサーの真下に置く必要があるため、海況条件により正確な較正は困難になる。また、調査船の排水なども気泡減衰の原因になるので注意しなければならない

い。調査員にそのような経験が不足していた事も較正ミスの一因であろう。したがって、当時の速報に掲載した

積分値は過大推定されていたと考えられることから、第3章では訂正されたSVgainを用いて1998年の積分値を再計算した。

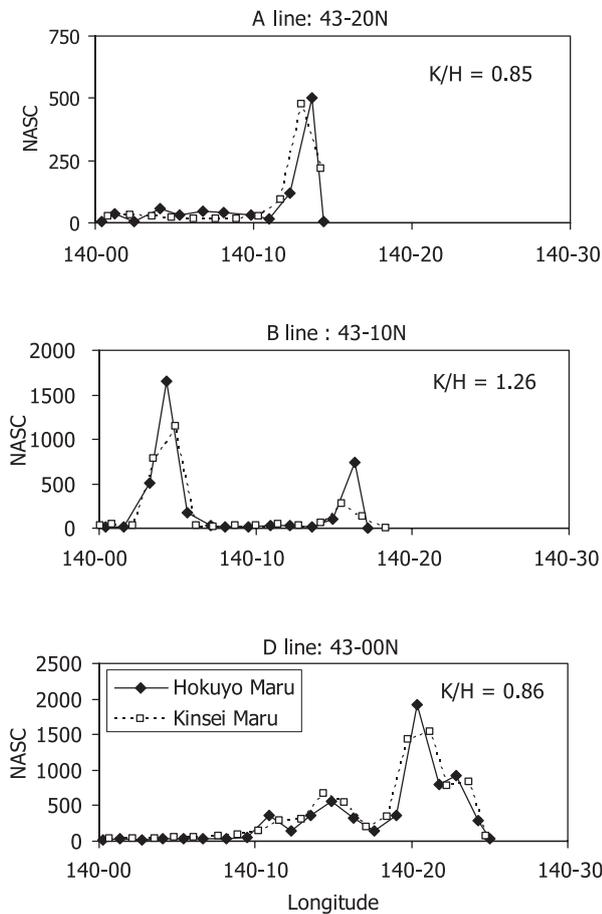


Fig. 7 Comparison of NASC (m^2/nmi^2) recorded for every 1 nmi between on R/V Kinsei Maru and R/V Hokuyo Maru using EK60 in 2007. Black filled squares indicate NASC from Hokuyo Maru, and blank squares indicate it from Kinsei Maru.

2.4 船間較正

2.4.1 材料と方法

試験調査船北洋丸と金星丸の簡易的な船間較正(以後、船間比較)として、2001年以降、毎年2船が重複して調査する調査線 (Fig. 5 - A, B, D) を設定して、スケトウダラ魚群もしくは海底のNASCの総計を比較した。原則として魚群を利用したが、調査日時が離れた場合や、魚群密度の濃淡が激しく同一の魚群を捉えられていないと判断した場合には海底反射を利用した(青山ほか, 1999)。2001年は同一調査線をまったく航走できなかったため、2001年の金星丸で収録した海底データと2000年の北洋丸の同地点のデータを比較した。これには松山海域の久遠と乙部の間にある比較的平坦な海底の反射を用いた (Fig. 6)。

それとは別に、試験調査船おやしお丸 (179t) を含めた3船の船間較正を、2003年5月7日に北海道日本海の岩内沖においてスケトウダラ魚群を対象として実施した (Fig. 5 のC線)。各調査船で用いた周波数は、北洋丸 (EK500) と金星丸 (EK60) が38kHz、おやしお丸のFQ-70は50kHzとした。調査線は等深線と直角をなすよう東西方向に設定した。音響データ収録時の航走方法は、3船が同一調査線上を1マイル間隔で縦に並んで航走した。航走速度は8ktとし、調査船の順を入れ替えて3往復、計6回の実験を実施した。調査船の航走順は、1往復目(1,2回目)は、おやしお丸、金星丸、北洋丸の順。2往復目(3,4回目)は、金星丸、北洋丸、おやしお丸の順。3往復目(5,6回目)は、北洋丸、おやしお丸、金星丸

Table 1 Comparison between R/V Hokuyo Maru and R/V Kinsei Maru measurements. The survey lines are shown in Fig.5 and Fig.6

Year	Mesaured NASC (m^2/nmi^2)		K/H	Survey Line	Target
	Hokuyo Maru	Kinsei Maru			
2001	* 5.32×10^6	4.08×10^6	0.77	F	Seabed
2002	1.96×10^3	1.65×10^3	0.84	E	walleye pollock
2003	1.24×10^3	9.97×10^2	0.81	D	walleye pollock
2004	3.68×10^2	2.69×10^2	0.73	B	walleye pollock
2005	2.76×10^6	3.03×10^6	1.10	D	Seabed
2006	1.91×10^2	1.90×10^2	0.99	D	Seabed
2007	3.72×10^3	3.54×10^3	0.95	A, B, D	walleye pollock
Average			0.88		

*NASC in 2000 survey by Hokuyo Maru was used for comparison in 2001.

の順とした。

北洋丸と金星丸は船間較正の前に標準球較正を実施したが、荒天の影響で観測値のRMSが0.4dB以上になったため、それぞれ直近の較正結果を用いた（北洋丸は2003年4月、金星丸は2003年2月の較正值）。おやしお丸は機器不調のため、日を改め2003年8月に標準球較正を実施した。

得られた各試験調査船の音響データから、スケトウダラの反応を抽出して実験ごとの平均NASCを求めて比較した。

2.4.2 結果と考察

北洋丸と金星丸の2001～2007年までの船間比較結果を、Table 1に示した。金星丸の北洋丸に対する比率は、2005年を除いて0.73～0.99と北洋丸をやや下回った。2005年は、唯一金星丸の方が大きく、1.10となった。各年の値を平均すると0.88とほぼ9割りの一致率であった。2006、2007年は5%以内の差であり誤差の範囲であった。

船間比較の例として、2007年に岩内沖の3調査線で行った結果をFig. 7に示した。各線ともにNASCの変化傾向や高さも良く一致しており、各調査線におけるNASC総計値の金星丸／北洋丸の比はA, B, Dそれぞれ0.85, 1.26, 0.86となった。3線の総計値の船間比は0.95であった。

次に船間較正の結果をFig. 8とTable 2に示した。1回目では魚群範囲をカバーできていなかったことから解析には用いなかった。0.1nmiごとのNASCの変化傾向は3船とも良く一致しているが、絶対値には差が見られた。特に、おやしお丸では金星丸の2倍以上を示すこともあった。このことは、おやしお丸の周波数が唯一50kHzであり、この周波数特性の差が原因となった可能性もある。1回目を除く全実験の平均NASCで比較すると、おやしお丸：金星丸：北洋丸=1.52：0.66：1となった。

積分値が大きな変動幅を持っている場合は、単純な算術平均を用いるよりも回帰分析によって求めるべきである（Johannesson and Mitson, 1983）。しかし、本研究の海底を対象とした船間比較では、積分値の変動範囲が小さかったこと、また魚群を対象とした場合は、魚群分布が一樣でなく分布密度の低い範囲が多かったことから、積分値の算術平均の比を求め船間較正に用いた。ちなみに、2007年の船間比較を実施したD線を回帰分析すると、決定係数 $R^2=0.967$ 、傾きは0.831となり、本研究での採用値とほぼ等しい値となった（Fig. 9）。しかし、NASCで1,000 (m^2/nmi^2)以上のデータが2点しか無いため、95%信頼区間は広く現存量推定に用いるには誤差が大きくなると考えられる。

北洋丸と金星丸の結果についてまとめると、金星丸は北洋丸の0.66～1.10倍であり、金星丸の計測値が北洋丸よりも概して小さい傾向を示していた。これらの比率の変動係数を求めると16%であったが、金星丸のトランスデューサーにミネフジツボが付着していた2005年を除くと、変動係数は13%となった。これらのことから、金星丸の方がやや小さめの計算値となるが、両船に装備された計量魚探機の算出する音響散乱強度は充分高い推定精度を備えていると考えられる。

全体を通して、金星丸の推定値に小さい傾向が見られた原因は、一般的には標準球較正不良、航走減衰や気泡減衰などが考えられる。しかし、2006、2007年に実施した船間比較では0.95～0.99という高い一致率が得られたことから、正確な標準球較正を行い航走減衰や気泡減衰の低減に努めることで、2隻の試験調査船は高い精度を保つ調査が可能と考えられる。

また、2003年5月7日に岩内沖で実施した船間較正では金星丸が0.66と、今回解析したデータの中で最も小さい値となった。この船間較正では魚群を音響調査対象として実施しており、スケトウダラ魚群の分布は海底地形や深度に強い影響を受けることから（三宅ほか, 2001）、魚群密度に差があった可能性もある。しかし、6回の繰り返し実験でいずれも金星丸は0.6程度で安定していたこと、2006、2007年の船間比較では0.95～0.99と高い一致度が得られたことから、各船ともに実験前に標準球較正が実施できなかったことに原因があったと考えられる。

2.5 ノイズの除去

2.5.1 材料と方法

ノイズの除去に関して、EchoView4.30.55のバーチャルエコーグラム機能を利用して3つの処理を実施した。第1処理は表層に見られる泡切れの除去である。泡切れは現存量の過小評価の原因となる。これは20～100m層をpingごとに積分して、ある閾値以下のpingを異常と見なし、元のエコーからそれら異常pingを削除する。第2処理は、過大評価の原因になる縦線上のノイズの除去であり、実際の積分範囲のpingごとの積分値から異常に大きい値のpingを削除する。第3処理は、やはり縦線ノイズの除去が目的で、1～2個前のpingと比較し、ある閾値以上差がある場合にそのpingを削除する。

これらの処理は、Fig. 10に示したフローチャートで設定する。各処理の閾値はエコーを確認しながら変更して適当な値を求める。ノイズの除去状況を確認し、過大な削除を行わないように注意した。第1処理（level 1）の泡切れを削除する場合、閾値を下げすぎると、反応が小さいpingが削除されて、積分値は過大評価になるおそれ

がある。第2処理 (level 2) では、異常な範囲を下げすぎると過小評価につながる。第3処理 (level 3) も同様である。

全調査を通じて、特にノイズの多かった2005年の金星

丸データに第1~3処理を適用してその効果を検証した。また、一部にノイズを含む2007年の金星丸のデータにも第1, 2処理を適用し、全体的な変化傾向を調べた。

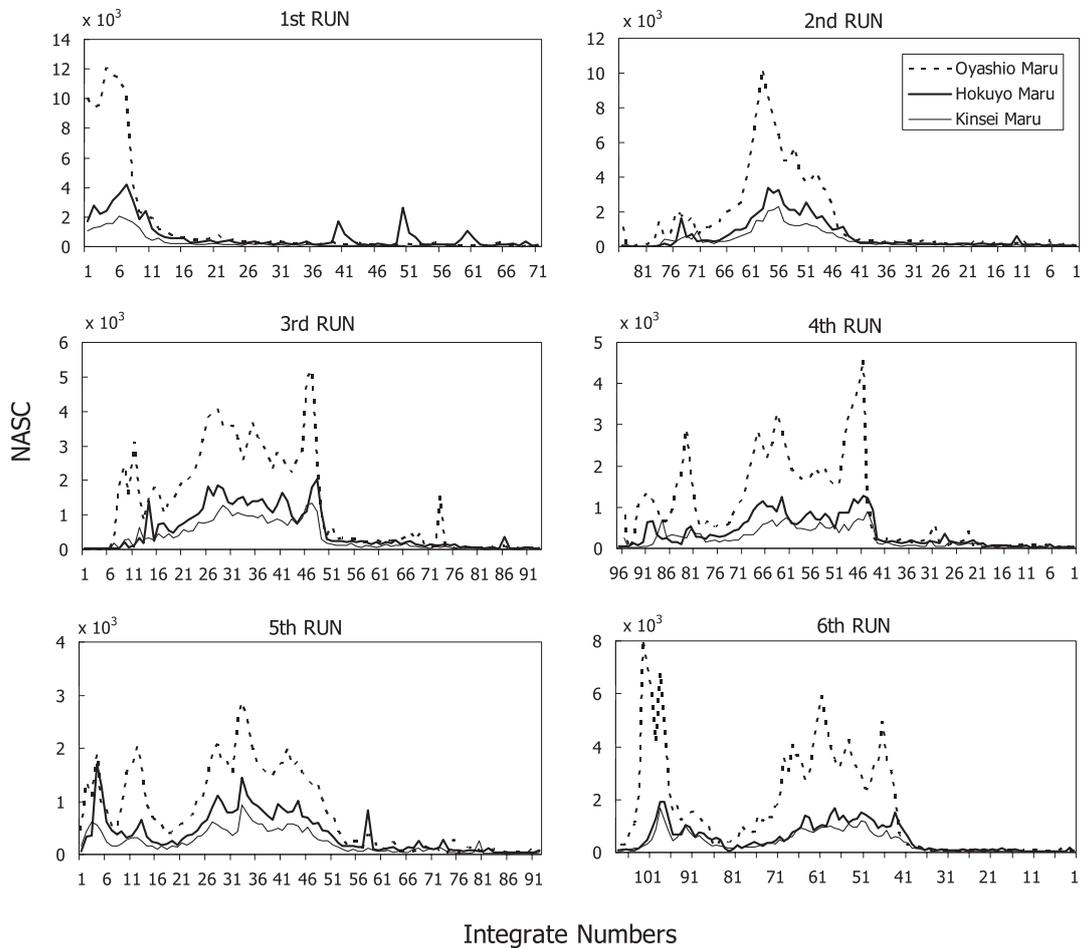


Fig. 8 NASC (m^2/nmi^2) for every 0.1 nmi from 3 research vessels intership calibration on 7 May 2003. Three research vessels, Oyashio Maru, Hokuyo Maru, and Kinsei Maru had different echosounders: Furuno FQ70 (50kHz), Simrad EK500 (38kHz), Simrad EK60 (38kHz), respectively.

Table 2 Mean NASC (m^2/nmi^2) for each runs by 3 research vessels at intership calibration.

RUN	Mean NASC (m^2/nmi^2)			Ratio		
	Oyashio Maru	Kinsei Maru	Hokuyo Maru	Oyashio Maru	Kinsei Maru	Hokuyo Maru
1st	870	294	712	1.22	0.41	1
2nd	935	407	634	1.47	0.64	1
3rd	783	360	545	1.44	0.66	1
4th	597	250	384	1.55	0.65	1
5th	478	235	402	1.19	0.58	1
6th	990	387	528	1.88	0.73	1
Ave. 2-6	757	328	499	1.52	0.66	1

2.5.2 結果と考察

ノイズの除去処理を2005年金星丸データに適用した。Fig. 11 (A)に処理前のエコーグラムを、Fig. 11 (B)に処理後のエコーグラムを示した。図中の右肩上がりの階段状の斜線は単位積分値 (ping, 距離もしくは時間) の累積

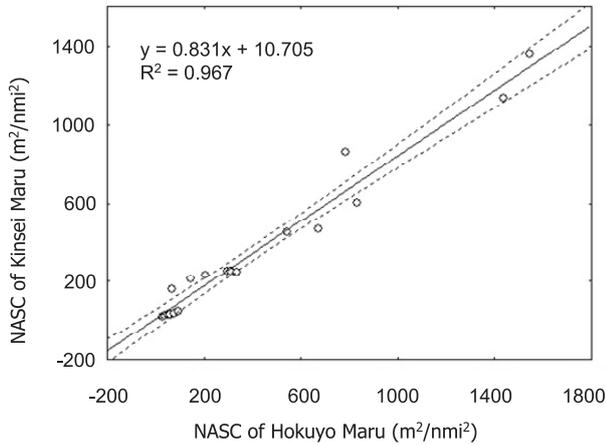


Fig. 9 Linear regression of integrator values (NASC) of Hokuyo Maru and Kinsei Maru of D line in 2007 survey. Dotted lines show the 95% of confidence interval.

値を示している。ノイズが少ない場合は段差の少ないなめらかな曲線になるが、図のようにノイズが多いと累積値がジャンプして積分線は階段状になる。Fig. 11 (A)の音響散乱層 (SSL) には泡切れ (白い縦線) が多数見られ、また泡切れの下には縦線状の音響ノイズも現れている。一方、泡切れ除去後の下図 (B) では泡切れが減少し段差も少なくなっていることが分かる。

次に、第1～3処理の結果を順にFig. 12 (B～D) に示した。最上段 A 図は処理無し、最下段の E 図は手作業でノイズを除去したエコーグラムである。この図の積分ラインを見ると、上段から順に縦線ノイズが減少し、積分ラインの段が少なくなっていた。

この結果を積分値で示すと、未処理のエコーグラムに比べてNASCは第1処理で1/2、第2処理では全く変化が無く、第3処理で1/3程度まで減少した。この第3処理の計算値は、マニュアル処理の結果に比べて0.8～1.2倍とほぼ等しい積分値が得られた (Table 3)。

次に、2007年金星丸データに適用してその効果を調べた。ただし、当該年のデータはそれほど縦線ノイズが強くないことから、第2処理までとした。

適用前と後の1 nmi当たりのNASCを積分ごとにブ

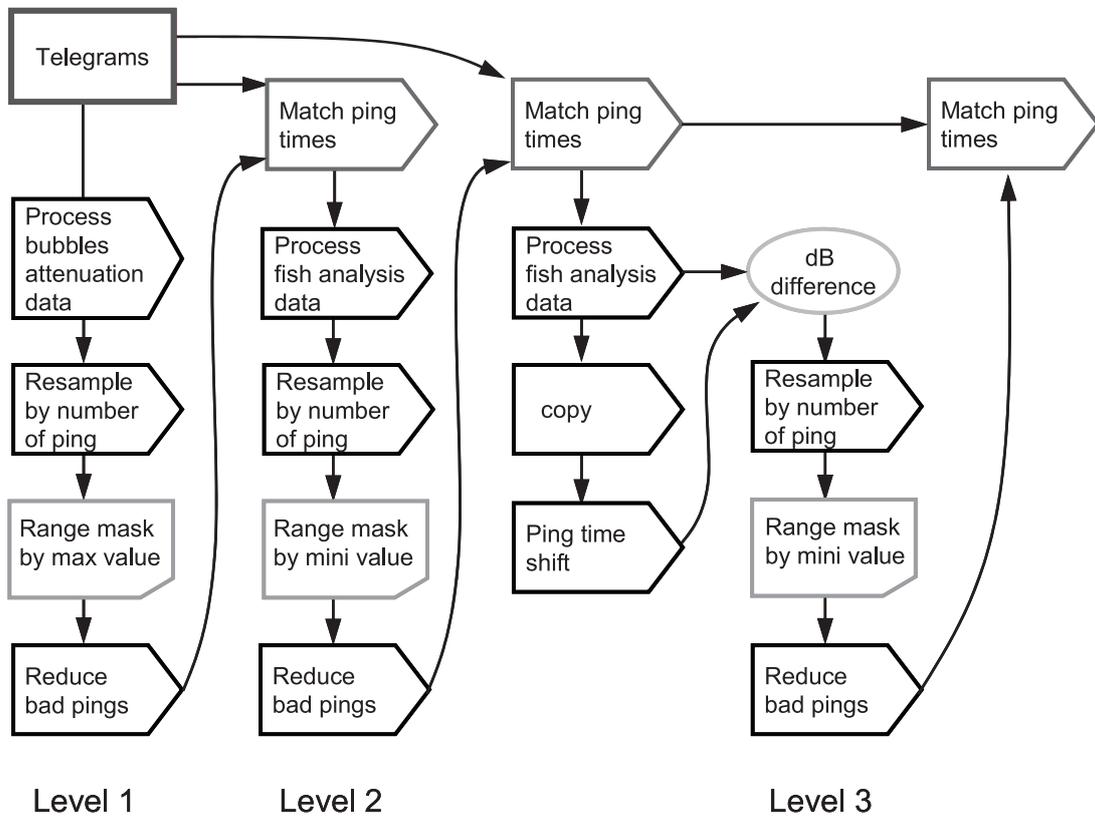


Fig. 10 Flow chart of noise reduction processes from Level 1 to 3 using EchoView.

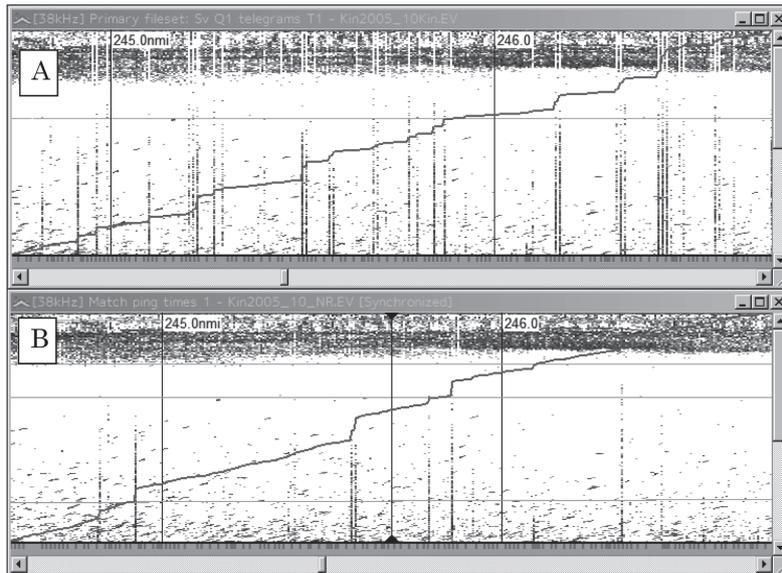


Fig. 11 Echograms before (A) and after (B) the Level 1 noise reduction process. Acoustic data was obtained at N42° 00.096', E139° 43.848' at 09:25 on 15 October 2005 using EK60 on Kinsei-Marui. Stepped and diagonal lines on the each panels show the value of integrated echo.

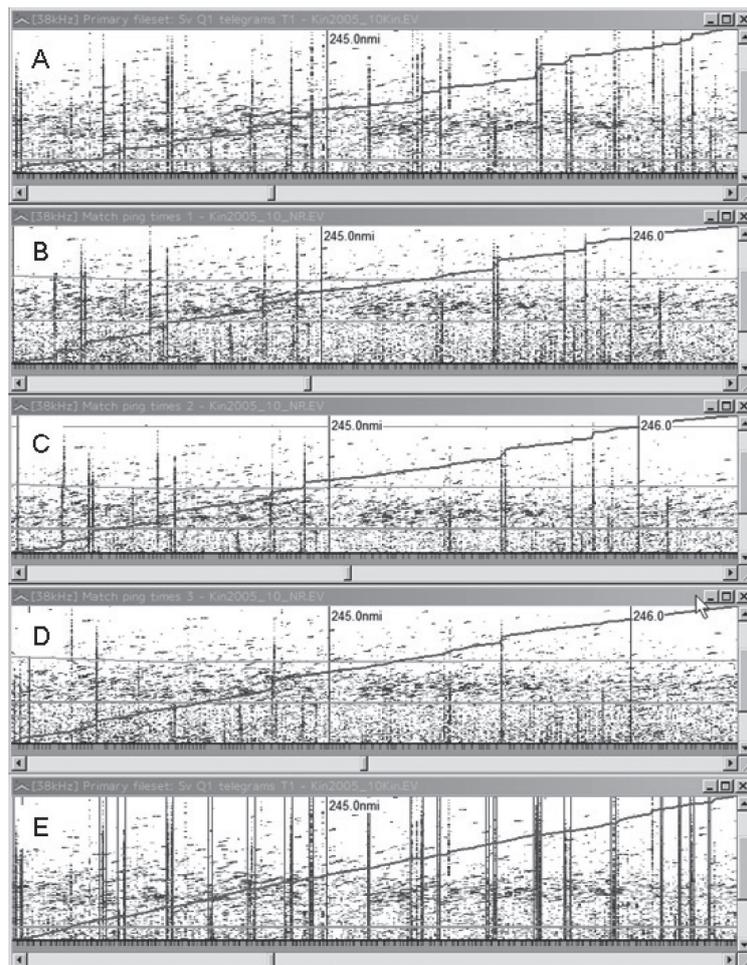


Fig. 12 Performance of noise reduction. A: before processing, B: level 1 processing, C: level 1 and 2 processing, D: level 1, 2 and 3 processing, E: manual processing. Stepped and diagonal lines showed the value of integrated echo. Echograms were obtained on R/V Kinsei Maru on Oct. 2005.

ロットした (Fig. 13)。図中の斜線は、「処理前:処理後 = 1:1」を示す。処理後NASCは $10^2 \sim 10$ の範囲では一樣に値が大きくなっていったが、NASCが10以上では小さくなる例も見られた。NASCが103以上では、ほぼ1:1の線上にあり、処理前と処理後で大きな変化は見られなかった。

この結果を含めて、4つの手順で求めたNASCを調査線ごとに比較した (Table 4)。Iは魚群を広くカバーするように積分範囲を設定した場合で、ノイズも相当含まれる。IIは、そのエコーグラムに対してノイズ除去として第1, 2処理を適用した場合である。IIIは、Iの積分範囲をノイズを避けるように魚群を最小限の範囲に設定した場合 (Fig. 14)。IVは、そのエコーグラムに対して

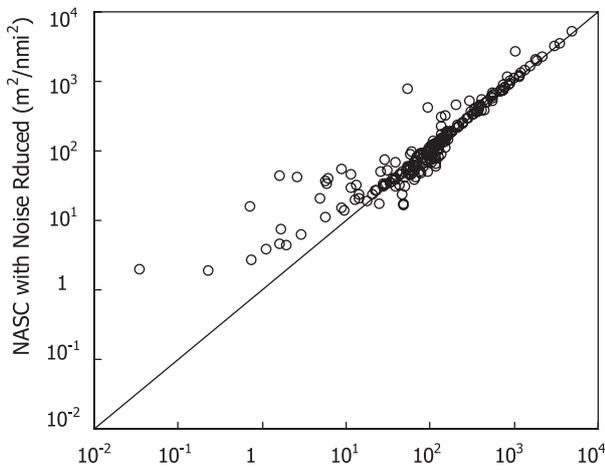


Fig. 13 Comparison between the original NASC and noise reduced NASC obtained in 2007 survey.

IIと同様なノイズ処理を行った場合である。併せてシムラッド社BI500による解析結果もVに示した。このVは通常のBI500による解析手法を適用したもので、BI500のスクルーティナイズ画面で可能な限りノイズを手作業で除く方法であり、Fig. 12(E)に示したエコーグラムに相当する。しかし、手作業であるため、処理結果に個人差が出やすい。例えば、2003年の音響データを複数の研究者で分析、比較したところ、得られたNASC総計値は5%程度の個人差が見られた (三宅, 未発表)。

北緯41°40′以北の調査線で、EchoViewとBI500の結果を比較するとノイズ処理のみ (II) が0.97倍、積分線の加工とノイズ処理 (IV) は0.91倍となり、魚群を絞り込まずにノイズ処理のみを行った場合には、EchoViewの結果がBI500とほぼ等しい計算値となった。ノイズ処理を行わずに、積分範囲を狭くした場合 (III) は0.88倍とやや小さな推定値となった。したがって、BI500の結果を基準とする場合は、魚群の囲み加工は最小限としてノ

Table 3 NASC (m^2/nmi^2) of echograms applied each level of noise reduction. Acoustic data was obtained at N42°00.096', E139°43.848', at 09:25 on 15 October 2005, using EK60 on R/V Kinsei Maru.

Interval miles No.	245 nmi	246nmi	247nmi
Before	1170	1124	1134
Level 1	605	455	359
Level 1+2	605	455	359
Level 1+2+3 (A)	418	338	239
Manual (B)	356	362	294
A / B	1.2	0.9	0.8

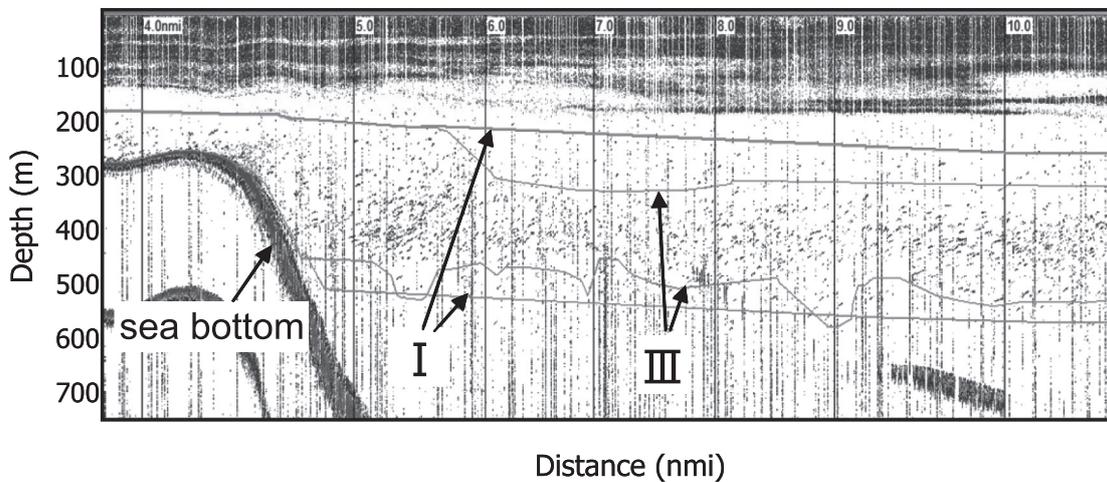


Fig. 14 The example of the lines defining the analysis range with method I and III.

イズ処理のみを行う方が良い結果が得られた。

このように、ノイズ除去についてはBI500やEchoViewでの手作業によるノイズ除去に匹敵する好結果が得られた。手作業によるノイズ除去は非常に多くの時間を要し、またその結果は個人差によるバラツキも大きい。本研究で用いたEchoViewでのノイズ除去は、閾値の設定により常に同一の処理が可能である点が、手作業よりも優れ、加えて作業時間も大幅に短縮される。

しかし、無反応域を泡切れと誤認することによる過大評価や、高密度の反応をノイズとして除去してしまう過小評価に留意する必要がある。さらに、圧縮されていない生の音響データ (RAW データ) を用いると、処理時間が長くなることに注意が必要である。一度に多くのファイルを読み込むと、画面スクロールにも時間が掛かり処理が先に進まなくなる。特に、第3処理はpingを直接処理するので、RAWデータを扱うことが望ましい。第1、第2処理では、圧縮されたファイル容量の小さいekdataファイルを利用して問題ないだろう。

2007年のノイズ処理結果の傾向から、低密度域での影響が大きいこと、また、泡切れの少ないエコーグラムでは影響は少ないことが確認できた。これらのことから、沖合の魚群が低密度の海域では通常で速度で調査し、沿岸の高密度域では船速を落とすことで、航走減衰や気泡減衰の影響を低減でき、ノイズ除去処理による誤差の影響も

最小化することが可能と考えられる。

第3章 北部日本海におけるスケトウダラ産卵群の音響資源調査

3.1 緒言

適切な資源管理を行うために、これまでに北海道周辺海域のスケトウダラ資源について年齢・成長や系群構造など多くの知見が報告され (Tsuji, 1989, 1990), これらに基づき商業漁獲物の漁獲量とその年齢組成を用いて資源評価が行われてきた (Yamaguchi and Matsuishi, 2007)。そうした中で、1996年6月に我が国でも「海洋生物資源の保存および管理に関する法律」(TAC法)が批准され、1997年1月から漁獲可能量制度(TAC制度)が実施された。TAC制度下では魚種ごとに総漁獲量を制限するため、これまでの商業漁獲量や年齢組成などから資源量を推定する方法(間接法)では推定精度が大きく低下する懸念がある。そのため、従来のVPAなど漁業情報を利用する間接的な資源評価法とは別に、漁業情報に依存しない直接法による資源評価が必要となる(原, 2000)。

直接法として代表的な音響手法による資源評価は、理論的、実践的に1970~1980年代に集中して研究され (Johannesson and Mitson, 1983), また、高性能な計量魚探機が開発されて以来、欧米ではベーリング海のスケト

Table 4 NASC (m²/nmi²) calculated by four methods with EchoView and BI500 from EK60 acoustic data on R/V Kinsei Maru in 2007 survey. Greek numbers denote the methods (I = no noise reduction, II = applied NR Level 1, III = manual noise reduction using noise ranges, IV = manual noise reduction with NR Level 1, V = excluded noise with noise ranges and manual bubble noise removing.

Line Lat.	Org	NR	LM	LM-NR	BI500	EV/BI		not/NR		not/LM
	I	II	III	IV	V	II/V	IV/V	I/II	III/IV	II/IV
43-20	660	889	660	668	732	1.2	0.9	0.7	1.0	1.3
43-10	2,984	3,338	2,984	3,039	2,655	1.3	1.1	0.9	1.0	1.1
43-00	6,391	6,512	6,384	6,469	7,594	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0
42-50	2,191	2,318	2,157	2,234	2,078	1.1	1.1	0.9	1.0	1.0
42-40	274	423	274	305	174	2.4	1.8	0.6	0.9	1.4
42-30	292	397	292	248	251	1.6	1.0	0.7	1.2	1.6
42-20	712	1,432	712	1,207	925	1.5	1.3	0.5	0.6	1.2
42-10	16,187	16,581	16,187	16,225	18,447	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0
42-00	5,342	5,828	5,327	5,874	6,878	0.8	0.9	0.9	0.9	1.0
41-50	9,608	10,246	9,281	9,917	11,717	0.9	0.8	0.9	0.9	1.0
41-40	1,864	3,368	1,770	1,788	1,442	2.3	1.2	0.6	1.0	1.9
41-30	3,391	3,491	2,864	2,937				1.0	1.0	1.2
41-20	9,513	9,820	9,473	9,693				1.0	1.0	1.0
41-10	2,913	2,652	2,450	2,253				1.1	1.1	1.2
sub Total	46,505	51,332	46,028	47,974	52,893	0.97	0.91			
Total	62,323	67,296	60,815	62,857				0.9	1.0	1.1

ウダラやノルウェーのニシンなどを対象にして用いられている。我が国でもTAC制度が開始されて10年以上が経過し、音響資源調査の導入が進んでいる(本田, 2004)。

北海道西岸の日本海海域に分布するスケトウダラについても既に幾つか報告がある(安部ほか, 1999; 三宅ほか, 2001)。本章では、日本海北部海域の音響資源調査で推定されたスケトウダラ現存量を示し、その結果を間接法であるVPAの推定値と比較し、両者の信頼性を検討する。

3.2 材料と方法

3.2.1 音響資源調査設計

スケトウダラは索餌期(4~10月)には分布範囲を広げ、産卵期(11月~翌年3月)には産卵場付近に集群する。分布範囲の広い索餌期に調査した場合、調査範囲を広くする必要があるので索餌期の音響資源調査は効率的ではない。本調査は漁業者に対する産卵来遊量の予測も目的の一つであったため、各年9月下旬から10月に音響調査を実施した。この時期は産卵場へ移動回遊している期間に相当し、スケトウダラは大陸棚斜面から深度400m前後の中層に分布するようになる(前田ほか, 1989)。水平的にも海底深度1000mより浅い沿岸域に93%が分布する(三宅ほか, 2001)。また、分布範囲が水平的に狭くなっていること、海底から離れて分布していることから、音響資源調査に適した生活史段階といえる。したがって、原則的に本調査は10月上~中旬にFig. 15に示した海域で実施した。近年の産卵場は石狩湾以南にのみ形成されていることから(第6章)、北緯43°30'で北部海域と南部海域を分けそれぞれ現存量を算出した。

調査線配置は基本的に東西方向に設定し、魚群密度の低い北緯43°30'以北の海域は10~15nmi間隔、魚群密度の高い43°30'以南の海域では10nmi間隔で配置した。ただし、調査開始当初の1996年と1997年は、スケトウダラの分布を確認するために広い範囲に調査線をジグザグに配置し、昼夜を通して音響調査を行った。この2年の調査は予備調査と位置づけた。これらの調査から、海底深度1000m以深の沖合海域での分布量は調査海域全体の7%であることが明らかになり(三宅ほか, 2001)、1998年以降は沖合域の調査範囲を縮小した。また、1998年の昼夜別調査により昼夜間でスケトウダラの音響散乱強度が異なることが判明し(安部ほか, 1999; 三宅ほか, 2001)、1999年以降は原則として夜間(18時から06時)に音響調査を実施した。

3.2.2 現存量推定

1996年から2000年までは北洋丸(237t)で調査を行い、2001年からは金星丸(151t)を加えて2隻で調査を

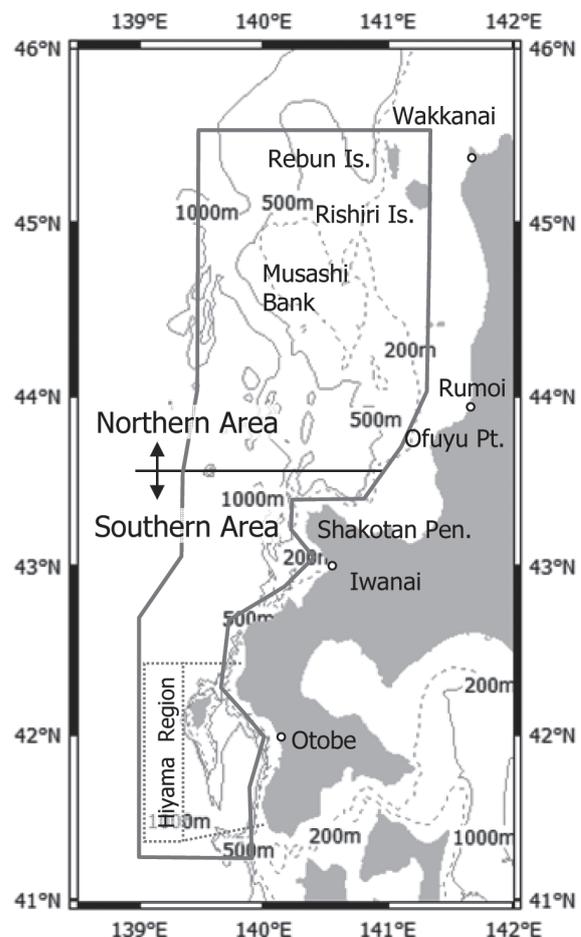


Fig. 15 Survey area in autumn from 1996 to 2007. Arrows indicate the border of northern and southern domain of the area.

実施した。用いた計量魚探機は、北洋丸では1996年から2003年まではEK500、2004年以降2007年まではEK60であった。金星丸では、2001年以降2007年までEK60を用いた。使用周波数は38kHz、パルス長は1.0msとした。音響調査中の航行速度は原則的に10ktとしたが、航走ノイズや荒天の影響を可能な限り避けるため6ktまで減速することもあった。第2章で述べたとおり、各調査開始前に標準球(銅球、直径60mm)を用いてTSgainとSVgain(EK500のみ)のキャリブレーションを行った。

2船間の船間補正についても、第2章で得られた各年の補正係数を金星丸のデータに適用して現存量を推定した。また、原則として現存量推定には夜間のデータを用いたが、昼間のデータしか得られなかったときは、昼夜補正を適用して用いた。北緯43°30'以北の場合には、昼間のNASCに3倍(安部ほか, 1999)の補正を行った。同緯度以南では、昼夜間に一定の傾向が見られなかったことから、Table 5に示した調査線緯度ごとのNASCの昼

夜比（三宅ほか，2001）を補正係数として用いた。

EK500およびEK60で収録されたデータを，水産音響データ解析ソフトウェアであるEchoView 4.30.55で解析しスケトウダラのNASCを1 nmiごとに算出した。ノイズの状況に応じて1996，1997，2002，2004，2005，2006および2007年のデータに第2章で示したノイズ除去を適用した（Table 6）。その他の年については，弱小反応カットによる過大評価のおそれがあるため，ノイズ処理は施さなかった。また，1998年の北洋丸の積分値は標準球校正値が異常であったと結論されたことから，EchoViewにてSVgainに26.4dBを適用して再計算した。

音響調査と併せて適宜トロール調査を行い，魚種を確認した。1996～2002年は，北洋丸で中層トロールを行った。2003～2007年は，北洋丸で着底トロール，金星丸で中層トロールを行った。また2001年には，北海道大

学水産学部付属練習船おしよる丸（1,396t）で中層トロール調査を実施した。トロール網採集物は船内で冷凍し，後日研究室で尾叉長（mm），体重（g），内臓除去重量（g），生殖巣重量（g）を測定し，生殖巣の成熟度を肉眼で観察した。これらより，成魚と未成魚別に $\bar{\sigma}$ （平均散乱断面積）と平均体重（g）を求めた。 $\bar{\sigma}$ は，尾叉長（cm）から σ （散乱断面積）を下記の式から求め，それらを平均して計算した。

$$TS=20\log FL - 66 \text{ (Foote and Traynor, 1988) } \dots\dots\dots(3.1)$$

$$\sigma = 4\pi r_0^2 10^{\frac{TS}{10}} \dots\dots\dots(3.2)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_i}{N} \dots\dots\dots(3.3)$$

ここで， N ：標本個体数， FL ：尾叉長（cm）， $r_0=1$ （m）である。

現存量の推定にはトランゼクト法を用いた。ただし，1996，1997，および2002年は矩形層化法（三宅ほか，2001）で算出した。2001年以降は，算出されたNASCを船間補正して用いた。

まず，各調査線のNASC総計を求め，それに平均調査線間（nmi）を乗じる。これにトロール調査から求めた成魚の σ 比率を乗じて，さらに成魚の $\bar{\sigma}$ で除することで各調査線区間の現存尾数を計算し，これに成魚の平均体重を乗じて調査線区間の現存量（t）を求める。こうして求めた全調査線区間の現存量を合計して海域の現存量とした。適用したと平均体重は，最寄りの調査船のトロール調査結果を用いた。なお，南部海域で行った中層トロールでの採集物は，ほとんど全てがスケトウダラ成魚（三宅ほか，2001）であったことから，この海域で算出されたNASCは全てを成魚とみなして産卵群現存量を求めた。

Table 5 Nighttime to daytime ratio (N/D) of NASC (m^2/nmi^2) due to diurnal change of fish aggregation, quoted from Miyake *et al.*(2001)

Latitude	Daytime	Nighttime	$\times 10^3$	
			N/D	
43-30	55	170	3.1	
43-20	62	110	1.8	
43-10	202	374	1.9	
43-00	229	290	1.3	
42-50	417	538	1.3	
42-40	356	247	0.7	
42-30	159	181	1.1	
42-20	168	177	1.0	
42-10	133	438	3.3	
42-00	885	743	0.8	
41-50	353	1,125	3.2	
41-40	136	198	1.5	
41-30	76	183	2.4	
Total	3,232	4,774	1.5	

Table 6 Acoustically estimated abundance ($\times 10^3 t$) of adult walleye pollock in the Sea of Japan, from 1996 to 2007.

Year	South. A.	North. A.	Total	Noise Reduction method	Survey line
1996	159	63	222	NRL1	Zigzag
1997	126	55	181	NRL2	Zigzag
1998	230	13	244	No	Palallel
1999	234	21	254	No	Palallel
2000	213	27	239	No	Palallel
2001	129	9	138	No	Palallel
2002	77	19	96	NRL1	Zigzag
2003	137	27	164	No	Palallel
2004	135	10	145	NRL1	Palallel
2005	119	13	132	North A: NRL1 South A: NRL3	Palallel
2006	72	14	86	NRL1	Palallel
2007	70	6	77	South A: NRL1	Palallel

$$B = \sum S_k \cdot \overline{BW}_k \frac{\sum_j E_{kj}}{\bar{\sigma}_k} \dots\dots\dots(3.4)$$

B ：現存量

\overline{BW}_k ： k 番目の調査線に用いるスケトウダラ成魚の平均体重

E_{kj} ： k 番目の調査線の j 番目の1 nmiごとのNASC

S_k ： k 番目の調査線と隣の調査線との平均間隔

$\bar{\sigma}_k$ ： k 番目の調査線に用いるスケトウダラ成魚の平均 σ

また，現存量推定値の比較に用いたVPAの推定値は下

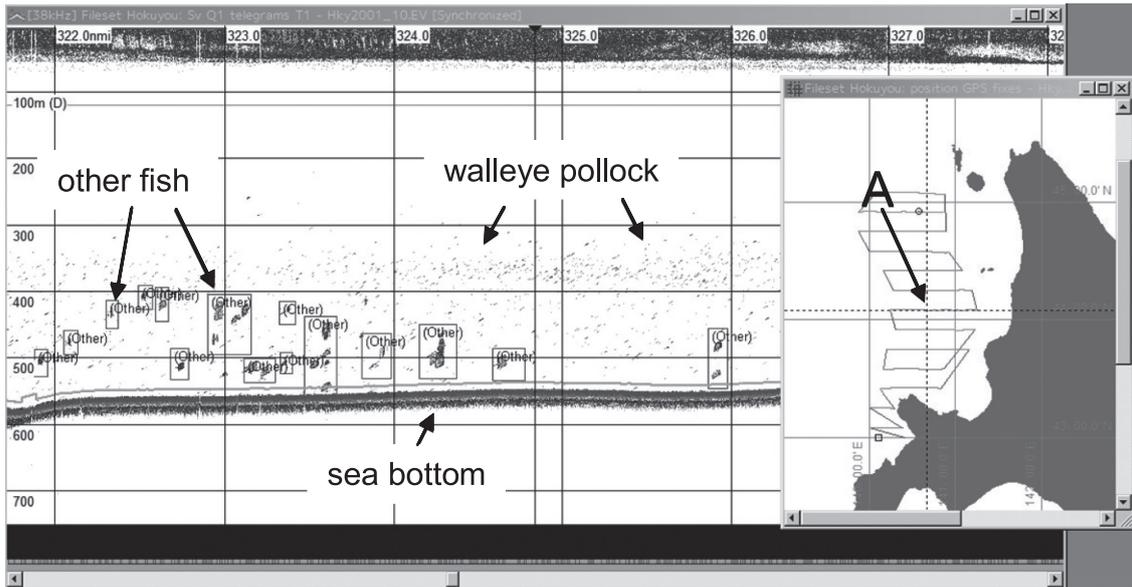


Fig. 16 An example of exclusion of non-target fishes from mixture of echoes in the 2001 survey. The echogram was obtained at point A on the right hand panel.

記の手順で計算し、計算に必要な年齢別漁獲尾数および成熟率などのパラメータは、本間ほか（2008）を利用した。まず、漁期開始時点（4月）の年齢別資源尾数をVPA（Pope, 1972）の式を用いて算出した。3歳以上の自然死亡係数Mは、田中（1960）から0.25と推定した（ $M=2.5/\text{最高年齢}$ 、最高年齢を10歳としている）。9歳以下の資源尾数を（3.5）式から、最高齢（10歳以上のプラスグループ）と最近年の資源尾数を（3.6）式から計算し、漁獲死亡係数を（3.7）式から求めた。10歳の資源尾数を（3.8）式で算出し9歳以下の計算に用いた。

$$N_{a,y} = N_{a+1,y+1} \cdot e^{Ma} + C_{a,y} \cdot e^{Ma/2} \quad \dots \dots \dots (3.5)$$

$$N_{a,y} = \frac{C_{a,y}}{1 - e^{-Fa,y}} \cdot e^{Ma/2} \quad \dots \dots \dots (3.6)$$

$$F_{a,y} = \ln \left(\frac{N_{a,y}}{N_{a+1,y+1}} \right) - M_a \quad \dots \dots \dots (3.7)$$

$$N_{a,y} = \frac{1 - e^{-(F_{10,y} + M_{10,y})}}{1 - e^{-F_{10,y}}} \cdot C_{10,y} \cdot e^{M_{10,y}/2} \quad \dots \dots \dots (3.8)$$

ここで、 a は年齢階級、 y は年度をあらわす。 $N_{a,y}$ は資源尾数、 $C_{a,y}$ は漁獲尾数、 M は自然死亡係数、 $F_{a,y}$ は漁獲死亡係数をあらわす。最高齢の漁獲死亡係数 $F_{10,y}$ と最高齢-1歳（9歳）の漁獲死亡係数 $F_{9,y}$ を一致させ、最近年の $F_{10,y}$ と $F_{9,y}$ との差の平方が最小となるようにMS-

EXCELのソルバー機能を用いて資源尾数を求めた（平松, 2001）。なお、最近年の8歳以下の $F_{a,y}$ は過去5年の平均を用いた。

得られた4月時点の資源尾数に6ヵ月分の全減少係数を掛けて10月の資源尾数を求め、成熟率と翌年4月時点の年齢別平均体重を乗じて10月時点の親魚現存量とした。

3.3 結果

3.3.1 スケトウダラ魚群のトロール調査

1996～2007年でスケトウダラ総計71標本を採集した。1996～1998年に行った中層トロールでは、18回の調査で利尻島沖の1回を除き、計17回でスケトウダラ個体数が90%以上を占めていた（三宅ほか, 2001）。このことから、本海域で中層から底層に見られる層状反応はスケトウダラと判断した。なお、200m以浅の海底付近や500m以深の海底付近に非常に強いパッチ状反応が見られたが、これらはスケトウダラ以外の魚種と判断して、解析から除いた（Fig. 16）。

1996～2007年の解析に用いたスケトウダラ体長組成をFig. 17に示した。北緯43°30'以南のトロール漁獲物はほとんど30～50cmの範囲にあり、それらの99%以上が成熟魚であった。北から南へ行くほど大型になる傾向があり、岩内湾では40cm、松山海域では42～43cmにモードが見られることが多かった。こうした傾向は毎年同様であった。一方、雄冬岬沖から武蔵堆東側にかけての海域

(Fig. 17 の E, F, G 海域) では、30cm以下の未成魚の比率が高かった。しかし、音響散乱強度における成魚と未成魚の比率は σ の比率で計算するので、例えば2001年B海域 (Fig. 17) では、個体数比では成魚は15.6%であったが、 σ 比では44.5%が成魚となった。

3.3.2 音響散乱強度 (NASC) の分布

エコーグラムの解析により計算された1996~2007年のスケトウダラNASCの分布を、Fig. 18に示した。トロール調査で未成魚が漁獲された海域でのNASCは何れの年も比較的小さいため、これらの図は殆ど成魚の分布と見なすことができる。

スケトウダラ成魚のNASCは、いずれの年にも北緯43°30'以北では非常に小さく、それより南側の沿岸域に大きな反応が見られた。特に、岩内湾や奥尻島周辺、および乙部沿岸で見られることが多かった。また、1996年の調査開始当時には積丹半島から石狩湾にも5000m²/nmi²以上の大きな反応が見られたが、1997年以降はそのような反応は見られなくなり、雄冬岬沖から武蔵堆西側にかけて500 m²/nmi²程度の反応が見られたに過ぎなかった。

1998~2000年には、乙部沿岸を中心とした桧山海域に非常に大きな反応が見られた。2001年以降はそのような大きな反応は見られなくなり、2006、2007年には全体的に反応は小さく、岩内湾や乙部沿岸にも大きな反応は見られなくなった。

以上のように、各年ともほぼスケトウダラ成魚の分布をカバーしていたが、1996年は乙部沿岸の高密度分布をカバーできておらず、また、1997年は悪天候の影響で、桧山海域で調査線の数が少なくなってしまった。2002年は調査期間を通じて天候が悪かったため、欠測海域が多かった。

3.3.3 音響資源調査によるスケトウダラ産卵群の現存量推定

音響資源調査で得られたNASCに昼夜および船間補正を加え、また、トロール調査で得られたスケトウダラ成魚の尾叉長と体重を利用して計算した現存量推定結果を、Fig. 19 および Table 6 に示した。

本海域のスケトウダラ現存量は1999年の254千tが最大で、その後減少を続け、2007年には88千tまで減少していた。調査期間を通じて減少傾向にあるが、1999年と2003年に2つの山が認められた。ただし、荒天のため調査範囲の狭かった2002年の推定値は96千トンで、前後の年の6割程度であった。

北部海域では、1996、1997年にそれぞれ63千t、55千t

の分布が見られたが、1998年以降減少し、2007年には18千tとなっていた。南部海域では、1999年に234千tと最も多く計測され、その後減少し2007年には70千tとなった。2007年の現存量は1998~1999年の約30%にまで減少していた。

次に、Fig. 20に音響資源調査とVPA推定値の経年変化を示した。VPAでは1996年の297千tが調査期間中で最大であり、その後なだらかに単純な減少傾向を示し、2006年には74千tとなった。両者の絶対値比較では、音響推定現存量はVPAの0.6~1.5倍の範囲で平均1.1倍であった。前述のように分布範囲をカバーできていなかった1996、1997、および2002年を除くと、0.9~1.5倍、平均1.3倍となった。相関分析では11年間全ての推定値を用いた場合、 $r_{11}=0.647$ 、1996、1997、および2002年の3年分を除いた場合には、 $r_8=0.886$ と非常に高い正の相関が見られた (Fig. 21)。相関係数 r_{11} 、 r_8 の有意性を検定すると、それぞれ $p=0.031$ 、 $p=0.003$ となり、危険率5%で有意であった。次に、1996、1997および2002年を除く8年分について音響推定現存量とVPA推定値の差をとり、その変動係数を求めると80%となった。さらに、音響推定現存量がVPA推定値を下回った2001年を除くと、変動係数は42%まで小さくなった。

3.4 考察

日本海で計量魚探機による音響資源調査が開始されてから11年間の音響データが蓄積され、これを後処理ソフトウェアEchoViewを用いて解析して親魚の現存量を求めた。間接法であるVPA推定値との比較では、絶対量が平均1.3倍程度の差であり、また全体的な変化傾向にも強い正の相関が見られた。それぞれ全く別な方法で推定した産卵親魚量推定値としては良く一致していたと言えるだろう。したがって、今後は原理的に誤差の大きい最近年のVPA推定値を補正するのに、音響推定値を用いることも可能である。

一方、2つの推定値の差の変動係数が80%と高くなったのは、VPAの変動傾向が単調減少であるのに対して、音響資源調査の現存量では1999、2003年に2つの山が見られ、2001年が低くなったことに起因している。これはVPAでは検出できない変動幅を音響資源調査では捉えていた可能性がある。なぜなら、北部日本海系群では1998年級群が最後の高豊度年級群と考えられているが (本田・八吹, 2008)、VPAでは産卵群として加入した様子は見られない。しかし、音響資源推定では2003年に現存量が増加しており、1998年級群が加入した様子が伺える。

VPAが変動幅を過小評価する原因として、計算に用いる年齢別漁獲尾数の推定誤差 (Yamaguchi and Matsuishi,

a.

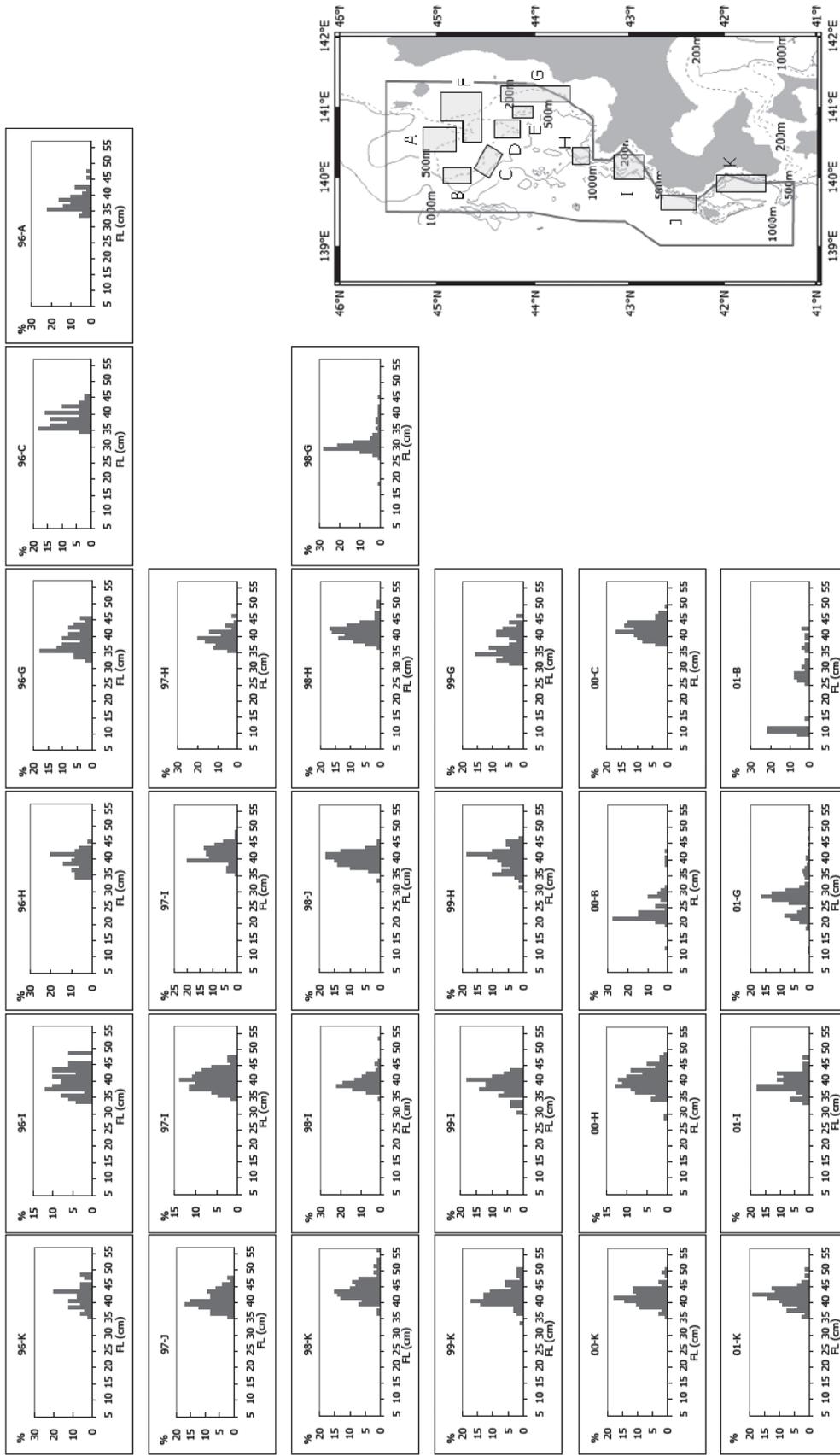


Fig. 17a Fork length distributions of walleye pollock caught by mid-water or bottom trawl. Each title show survey year and trawl area. Trawl areas are shown in the right map.

b.

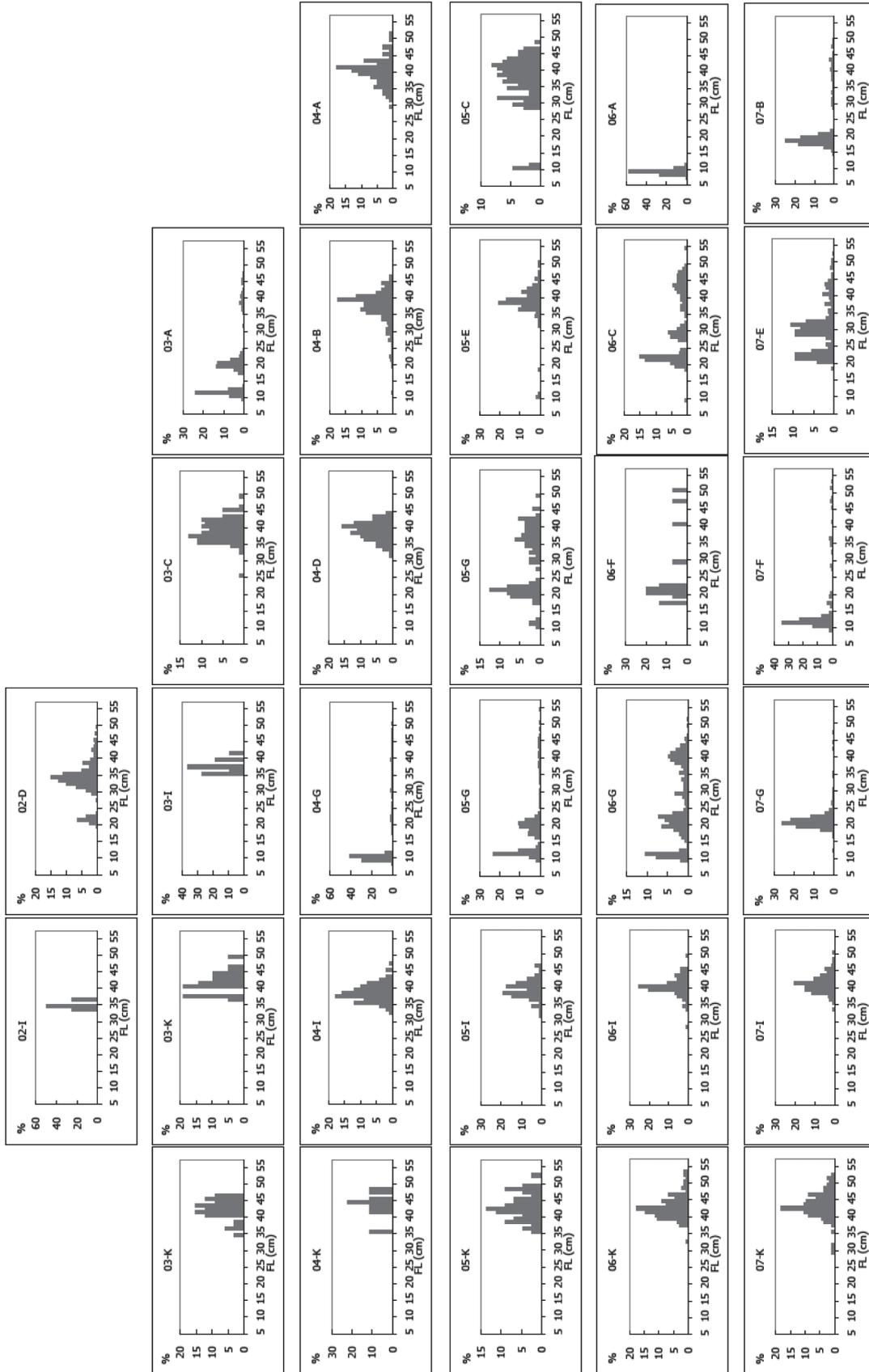


Fig. 17b continued.

a.

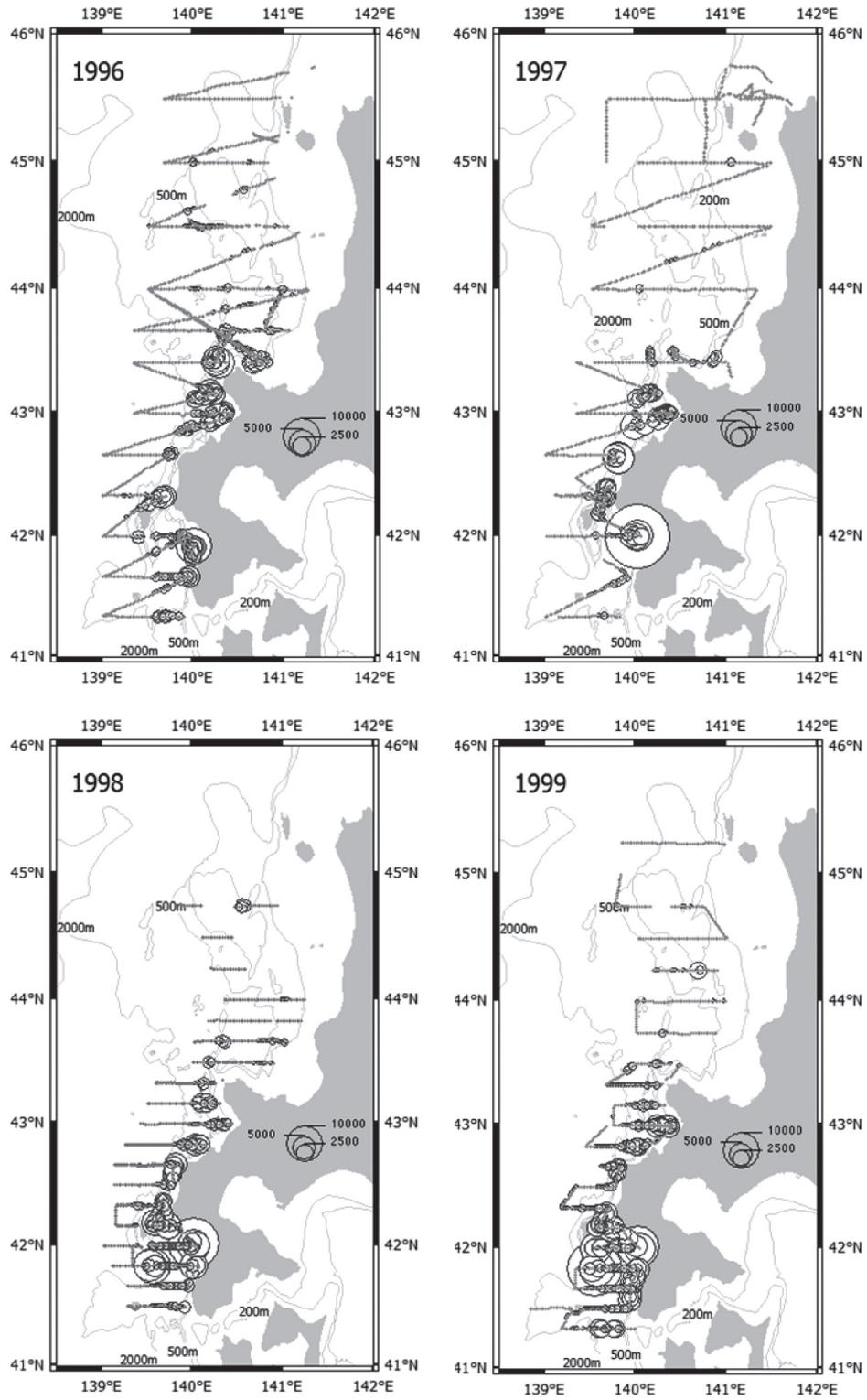


Fig. 18a Acoustic survey transects and NASC maps of walleye pollock (mostly adults) from 1996 to 1999 (a) and from 2000 to 2003 (b), from 2004 to 2007 (c). NASC were shown as bubbles.

b.

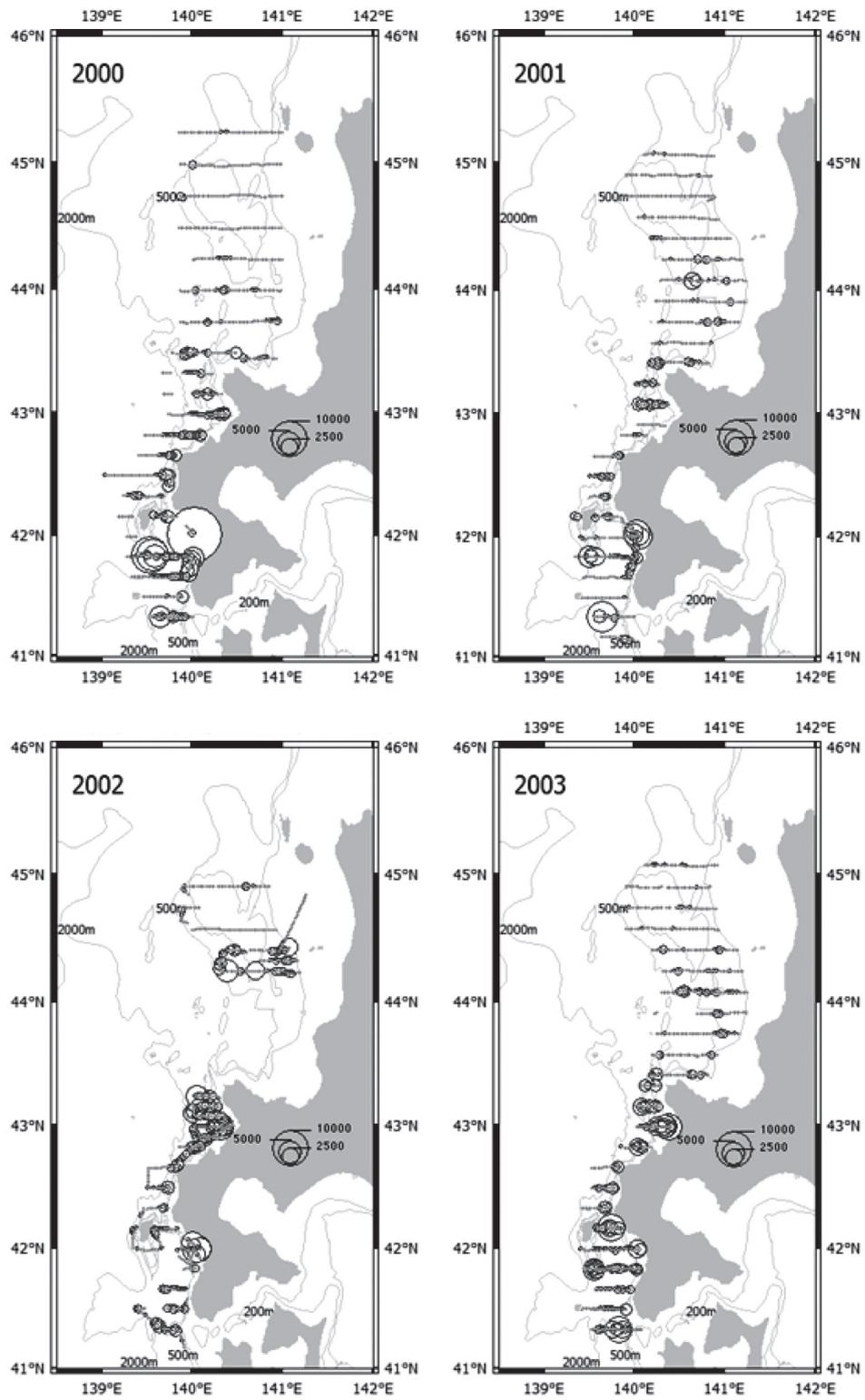


Fig. 18b continued.

C.

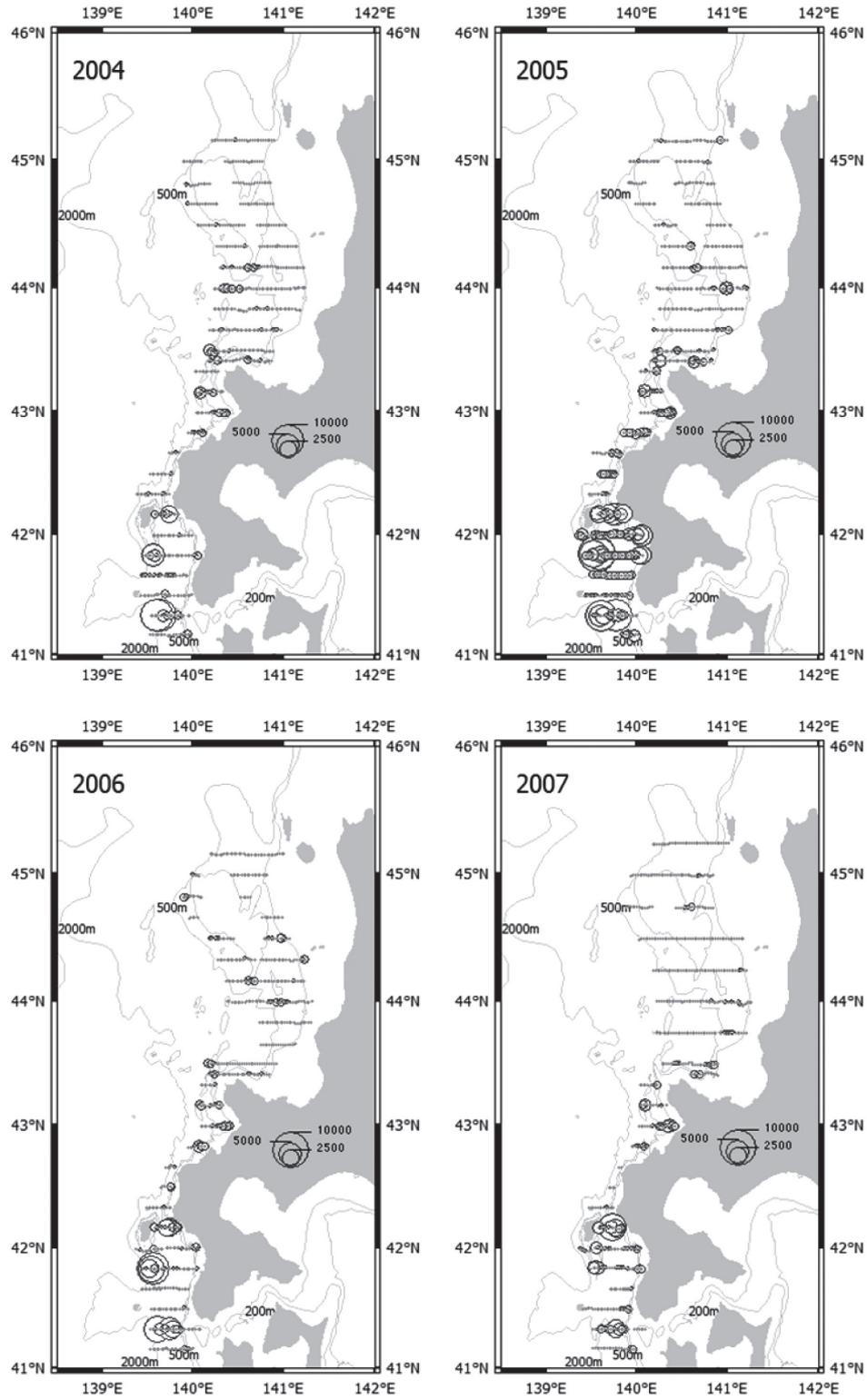


Fig. 18c continued.

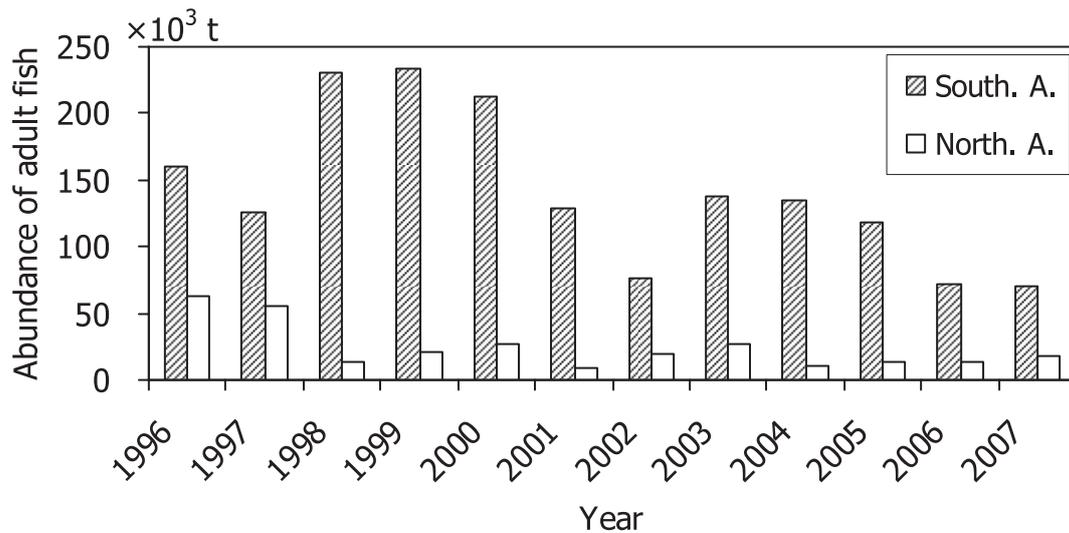


Fig. 19 Acoustically estimated abundance of adult walleye pollock in autumn in the Sea of Japan, from 1996 to 2007.

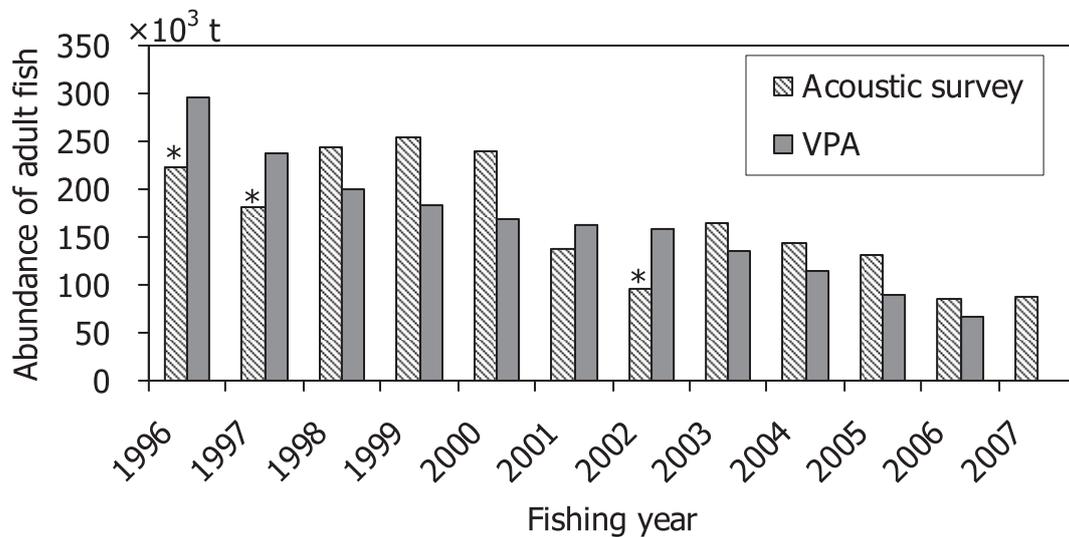


Fig. 20 Comparison of abundance of adult walleye pollock in the Sea of Japan between estimations using acoustic survey and VPA from 1996 to 2007. The surveys in 1996, 1997, and 2002 did not cover full extent of the survey area due to bad sea conditions (*). VPA estimation in 2007 has not been calculated yet.

2007) が考えられる。特に、北部日本海系群の年齢査定は太平洋系群などと比べ難しいことから (小岡, 1999), 高齢魚の年齢別漁獲尾数が平均化され、資源量推定値の変動幅が過小に推定される可能性がある。

一方、音響資源調査の課題としては魚群の捕捉、分布域のカバーが最も重要であると結論できる。本研究において、桧山海域の沿岸寄りをスケトウダラ分布の端までカバーできなかった1996年や、悪天候のため調査範囲が狭くなった1997年や2002年を除くと、相当ノイズの多い2005年のデータでもVPA結果と最大5割程度の差で現存量を推定できた。このように、較正不良や泡切れなどのノイズは後処理での補正が可能である。このことから、

第2章でも述べたように、分布密度の低い沖合域と高密度な沿岸域との間で航走速度など調査努力に濃淡を付けることで、荒天の多い秋期日本海においても高い精度を保ちつつ効率的な音響資源調査が実施可能と考える。

これまでは、エコーグラム上のノイズを除くのにコンピュータのマウスを用いて一つずつノイズ部分を選択し処理していたが、その作業結果には5%程度の個人差が見られることもあった (三宅, 未発表)。これを誰が行っても同じ計算値が得られるように処理できれば、音響資源調査の利用範囲はさらに広がるだろう。ただし、ノイズの除去は常に過大評価や過小評価の危険性があり、境界値の設定は慎重に適用する必要がある。また、本研

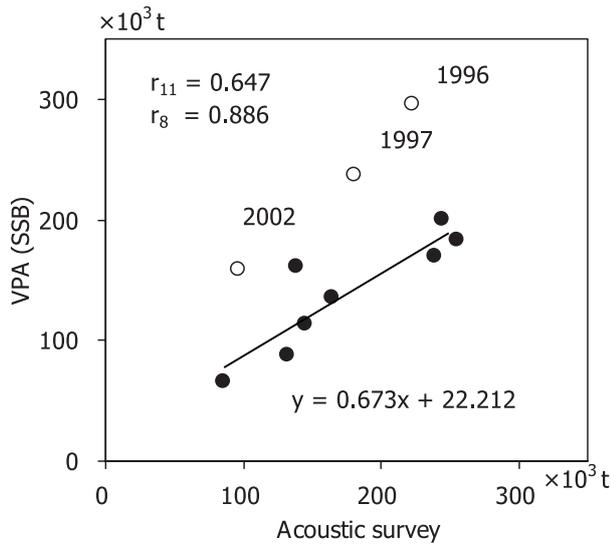


Fig. 21 Statistical relationship between abundance of adult walleye pollock estimated using presented acoustic techniques and VPA from 1996 to 2006. Correlation coefficients and regression lines were calculated for all data set (r_{11}), and for 8 years data set (r_8 , solid line), excluded 1996, 1997, and 2002.

究では扱わなかったバックグラウンドノイズの除去に関する報告例は未だ少なく (Robertis and Higginbottom, 2007), さらなる研究が期待される。

昼夜間の反応量の違いについては, 海底深度の深い海域では海底エコーによるマスキングでは説明できず, ヒメマス *Oncorhynchus nerka f. adonis* で見られたようなTSの日周変化 (向井ほか, 1991) や分布深度による違い (Mukai and Foote, 1997) も認められなかった。これらのことから, プランクトンの加入や魚群の水平移動などの可能性について論議されているが, 結論は出されていない (安部ほか, 1999)。より正確な昼夜補正を行うためには, この点を明らかにする必要がある。ただし, 本研究の1998年以降の音響調査は北部海域の一部を除き, 夜間に統一されて実施されていることから, 現存量推定値に対する影響は小さいと考えられる。

本章の最後に, 音響調査および本研究のトロール調査で得られたスケトウダラの分布図を示した (Fig. 22)。これには未成魚も含まれており, それらはFig. 17のA, B, FおよびG海域で採集されたことから, 既往の知見 (佐々木・夏目, 1990) のとおり雄冬沖から利尻礼文島までの海域と武蔵堆海域が, スケトウダラ未成魚 (0~3歳魚) の成育場となっていると考えられた。

第4章 スケトウダラ北部日本海系群の産卵回遊期の分布と水温

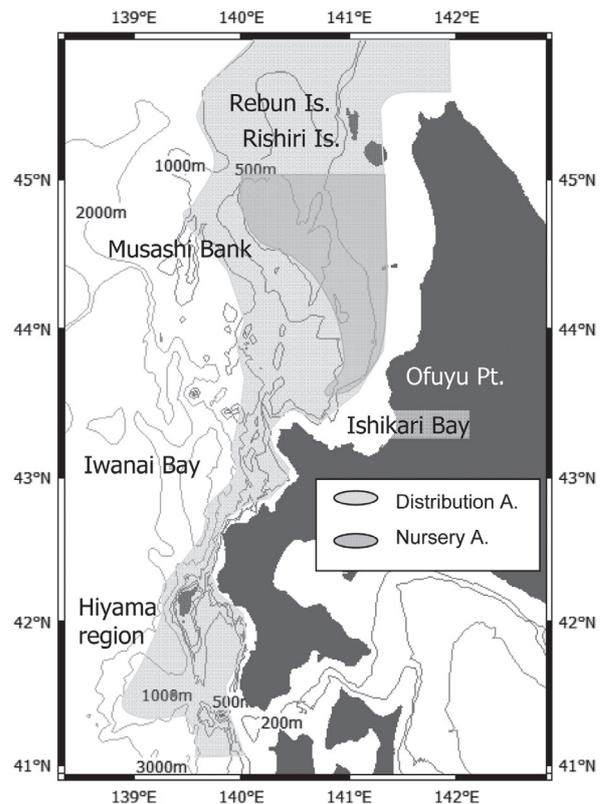


Fig. 22 Distributions of mature and immature walleye pollock off Hokkaido in the Sea of Japan.

4.1 緒言

刺し網やえ縄漁法を用いる沿岸漁業では, 冬季産卵のために来遊するスケトウダラを漁獲することから産卵場付近が主な漁場となる。第3章では1996年から2007年までの11年間におよぶ産卵回遊期のスケトウダラの分布状況を示した。本章では水温がどのようにスケトウダラの分布に係わっているのか, 詳細なデータが利用可能な鉛直方向についてスケトウダラの分布と水温の関係を分析する。そして, その抽出された水温条件を水平的に拡大し, 水温がスケトウダラ産卵場の形成に与える影響を考察する。

4.2 材料と方法

音響データおよび水温データは, 第3章で報告したスケトウダラ産卵群の音響資源調査のデータセットから1996~2006年調査分のデータを用いた。その中から, 岩内沖の北緯43°00'と, 桧山沖の北緯42°00'の音響資源調査の調査線上にそれぞれ設定された海洋観測点JC11, およびSt.5の2地点 (Fig. 23) の音響データを分析に用いた。JC11は, 調査期間を通じて全て北洋丸が調査し, St.5は2000年までは北洋丸, 2001年以降は金星丸で調査を行っ

た。原則として昼間のデータを用いたが、昼間のデータが無い場合は夜間のデータを用いた。

さらに、昼夜の反応差を調べるために1998年には同一調査線を昼夜それぞれ1回ずつ航走して反応を記録した。加えて、2001年には鉛直分布の日周変化を調べるために、北緯43°00′の岩内沖のJC11を含む調査線 (Fig. 23) を、午前7時から翌日午前2時までの19時間の間にほぼ1～3時間に1回、計8回航走して音響データを収録した。

送受波器 (トランスデューサー) のビーム幅は6.8°、パルス長は1 msとした。SVgainおよびTSgainは、調査開始前に直径60mmの銅球を標準球として較正を行い設定した。調査開始前に較正できなかった場合は、調査終了後できるだけ早い機会に較正した。

得られた各年の音響データから、EchoViewを用いて、海洋観測点JC11: 北緯43°00′, 東経140°20′ (岩内湾) と St.5: 北緯42°00′, 東経140°00′ (桧山沖) に最も近い0.5マイル範囲を水深10mごとに計算範囲を設定し、各層ごとにスケトウダラのNASCを計算した。そして、得られた水深層別NASCから最大NASCの水深層をスケトウダラ分布の中心深度とした。また、スケトウダラ分布層の上限下限はNASC=10m²/nmi²の深度とした。これはSVで-76dBに相当し、尾叉長32cmのスケトウダラが海水100m³中に1個体分布する密度に相当する。

海洋観測は各調査船に装備してあるSBE製のCTDを用いて行った。ただし、JC11の水温データは北海道立水産試験場マリネット北海道 (以下、マリネットと記す) の水温データベースから検索した。したがって、音響調査とCTD観測はかならずしも同一日に実施したのではなく、JC11の両者の間隔は最大で21日間あった。また、水温水平分布の作成にもマリネットの水温データベースから検索した水温データを用いた。

4.3 結果

Fig. 24とFig. 25に、1996年から2006年までの岩内湾と桧山沖のエコーグラムを示した。Fig. 24の岩内湾のJC11地点では年ごとの海底の形が一樣でなく、海底深度も浅いうえに460～600mと変化が大きかった。そのため、スケトウダラ分布が海底と接している年も見られた。一方、桧山海域のSt.5のエコーグラムでは (Fig. 25)、1996年を除き全ての年で600mより深く、スケトウダラ分布と海底が重なることはなかった。また、1997、2003、2005、および2006年は夜間のエコーグラムであり、昼間に比べて上下に広がって分布していた。

これらの音響データから、10m深度ごとにスケトウダラの分布量 (音響散乱強度, NASC) を求めた。このよ

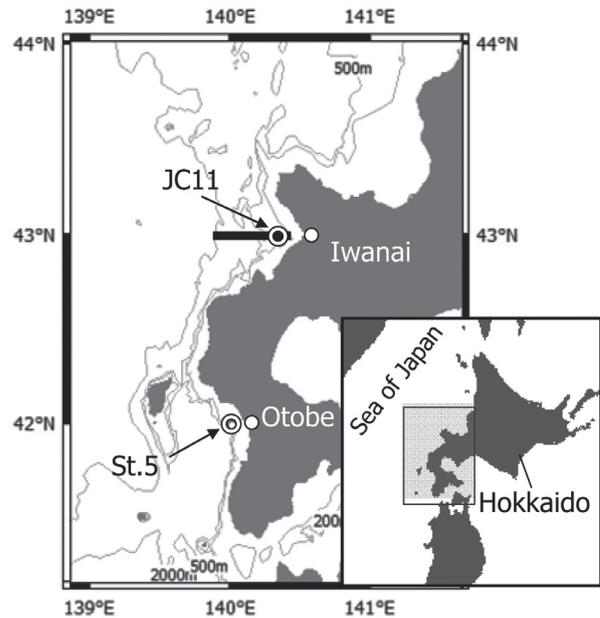


Fig. 23 Study site and survey transect for daily vertical migration. Lower panel shows location of the site and spatial extent (gray rectangular area).

うにして得られたSt.5のスケトウダラ鉛直分布を、Fig. 26に示した。同一年に複数の観測がある場合は、実線がFig. 25のエコーグラムに示した値とし、その他のデータは時刻とともに点線もしくは破線で示した。この図を見ると、昼間の分布 (1996～2002年の実線) では、スケトウダラ分布のピーク (中心) が明瞭であり、左側すそ野が急激に落ちていた。しかし、夜間 (1998年の点線および2004年を除く2003年以降) は、ピークが不明瞭で左側は大きく (上方) に広がっていた。また、2002年以降はピークの高さ自体が小さくなっており、例えば2004年は14時35分と15時30分のデータではどの深度のNASCも10m²/nmi²以下であった。このように、2002年以降は分布量自体が減少していた。この図からスケトウダラ分布の上限、中心、下限の深度を求め、水温観測データからその深度の水温を検索した。JC11におけるそれらの深度と水温を観測年月日と併せてTable 7に、St.5に関してTable 8に示した。

4.3.1 鉛直分布の日周変化

スケトウダラ分布深度の日周変化を見るために、全調査結果の時刻に対する分布深度の中心深度と上限深度を点描した。日周調査を行った岩内沖 (JC11) の2001年 (▲) の場合、中心深度は昼間8時から11時の間が445mと最も深く、深夜23時頃に最も浅くなっていた (Fig. 27-B)。また、2004年 (◆) と2006年 (△) は、夜間にもかか

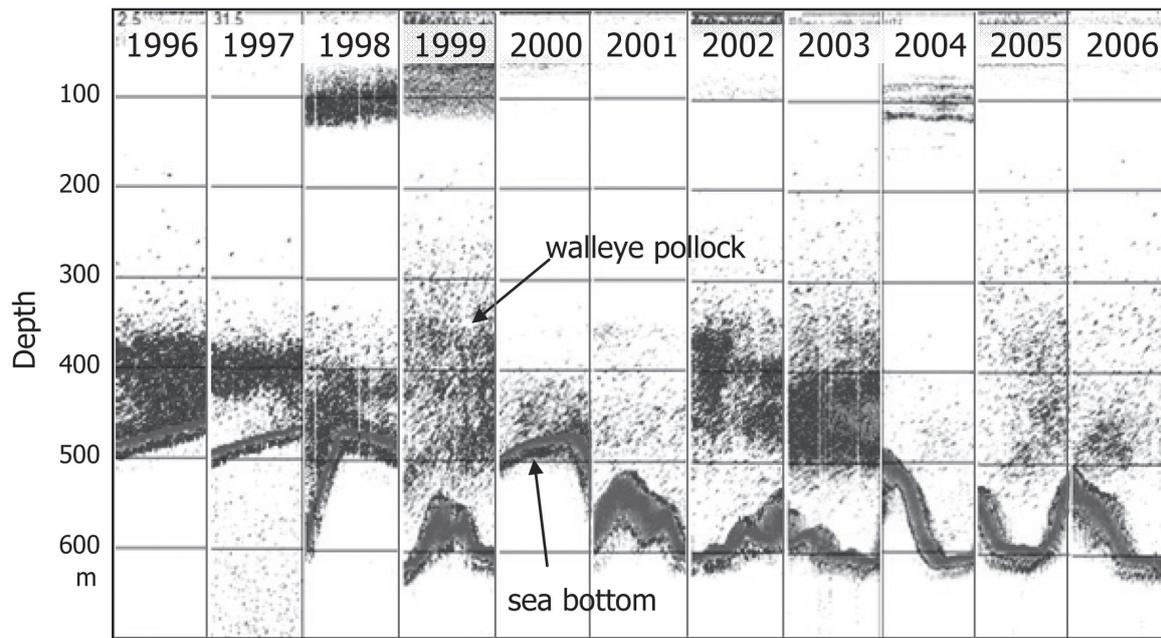


Fig. 24 Echograms at JC11 from 1996 to 2006. The interval is 0.5 mile.

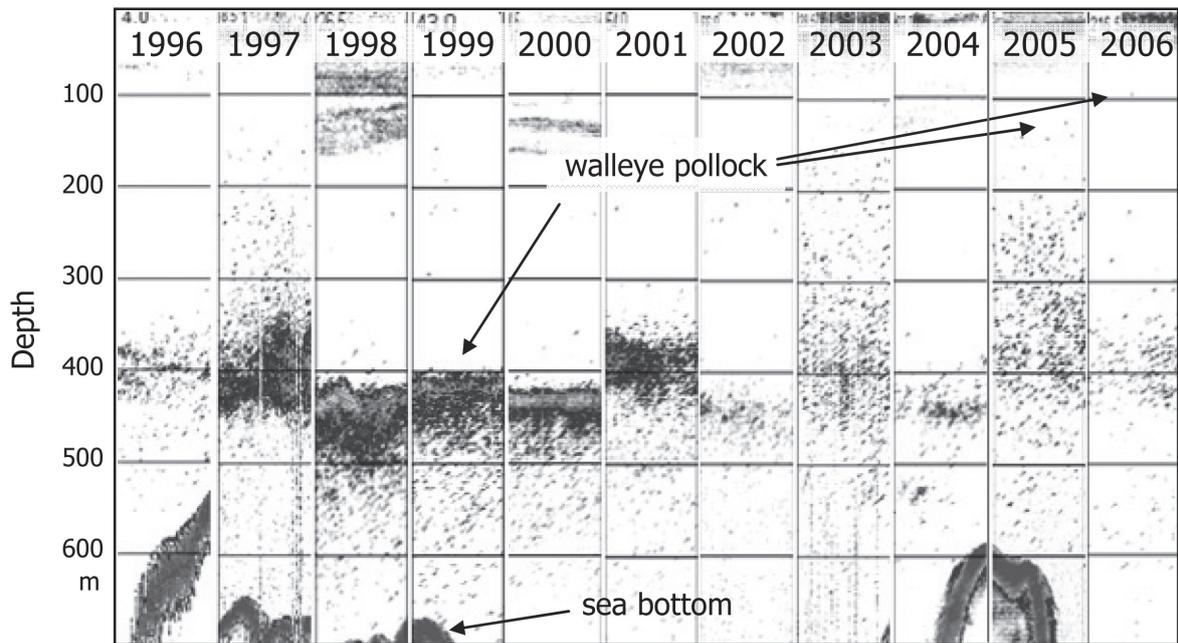


Fig. 25 Echograms at St.5 from 1996 to 2006. The interval is 0.5 mile.

ならず非常に深い深度に分布していたが、その他の年の時刻と分布深度の関係はほぼ2001年の傾向と一致した。分布深度上限では特徴的な日周鉛直移動が認められ、19時～翌日3時にかけてスケトウダラは最も浮上することが分かった (Fig. 27-A)。

桧山沖St.5では、全調査年を通じて9時から17時まで

の昼間に分布深度は深く、18時から翌日9時までの夜間に浅くなる周期的な傾向が認められた (Fig. 28-B)。分布の上限は、21時には185mまで上昇していた (Fig. 28-A)。

同一年における昼夜の分布中心深度の差は、桧山沖では最大で1998年 (Fig. 27-B◇) の10mと小さく、岩内

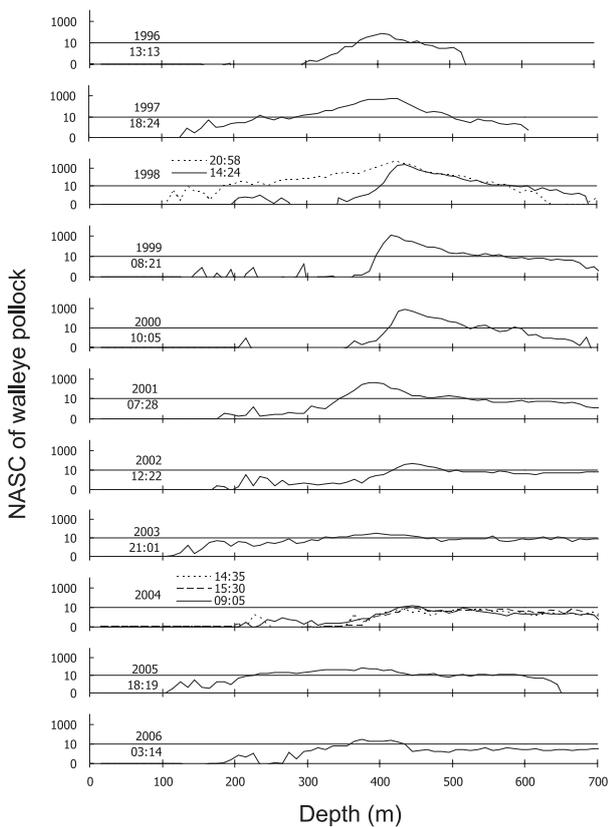


Fig. 26 Vertical distributions of walleye pollock at St.5 off Otohe in Hiyama region. Left-hand side numerals show survey year and local time.

沖では2001年 (Fig. 27-B ▲) の60mと、2つの海域間に大きな開きがあった。桜山沖St.5の場合、1998年には昼夜差は10m、1999年は0mであり、一方、岩内沖JC11では1997年昼夜差20m、1998年は10m、1999年20m、2001年60m、2004年は-10mであった。

このように、鉛直移動の周期には規則性が見られるものの、その変化度合いは調査地点によって異なることが明らかとなった。そこで、より昼夜変化の少ない桜山海域のデータを分析することで、水温の与える影響の抽出が容易になると考え、分布深度と水温の分析は桜山海域を中心に進めることとした。

4.3.2 水温

岩内海域JC11と桜山海域St.5での、1996~2006年10月の水温と塩分の鉛直分布をFig. 29に示した。上半分がJC11、下半分がSt.5の図である。JC11では50m深まで混合層が形成され、そこから下には躍層が見られ、100m深では5~10℃となっていた。また、表面から200m深まで水温年変動が大きく、150m深でも2~8℃の範囲

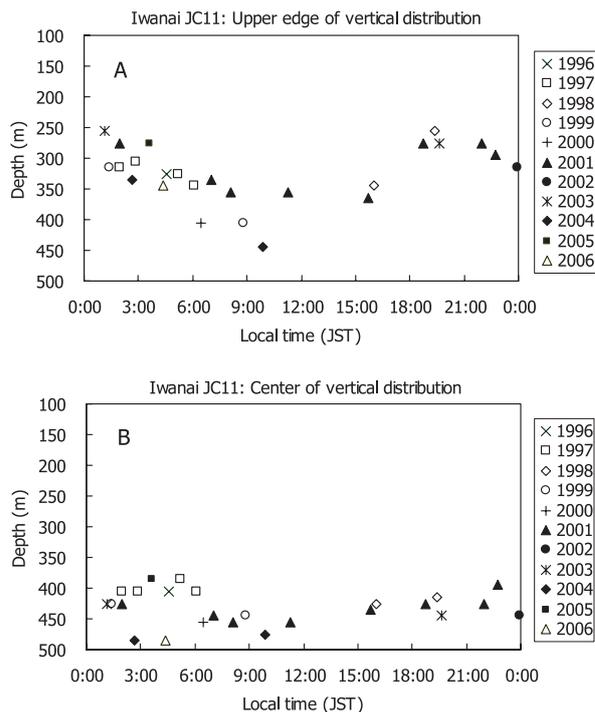


Fig. 27 Diurnal change of vertical distribution of walleye pollock at Iwanai JC11. Upper panel (A) is depth of upper edge of fish schools, and lower panel (B) is depth of center of schools.

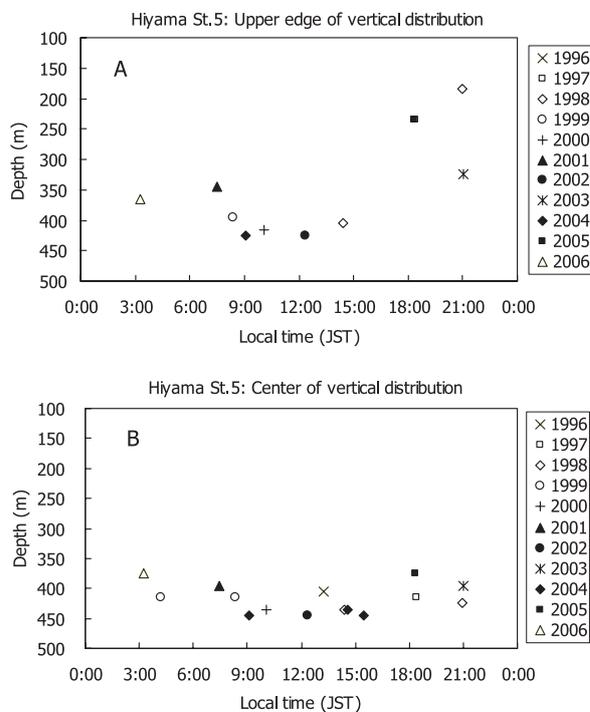


Fig. 28 Diurnal change of vertical distribution of walleye pollock at Hiyama St.5. Upper panel (A) is depth of upper edge of fish schools, and lower panel (B) is depth of center of schools.

で変動していた。200m深になると年変動幅は小さく水温は2～4℃となり、400m以深では0.5～0.9℃でほとんど年変化は見られなかった。塩分は表層で34.0psu以下であったが、50m深付近に最大値があり200m以深では34.07psu付近でほとんど変化はなかった。

St.5 では表面から30m深まで混合層が形成され、その下は躍層となり100m層の水温は4～10℃であった。200m深の年変動は2～5℃と岩内湾よりもやや大きかった。400m以深になると0.6～0.9℃で岩内湾と同様に安定していた。塩分は表層では34.0psu以下であったが、50m

Table 7 Summary of surveys at JC11 off Iwanai (N43° 00', E140° 20')

Acoustic survey				CTD Date	Distance of Date	pollock distribution depth				Temperature at the depth		
Year	Date	Local Time	Day/Night			Upper Edge	Center	Lower Edge	Range	Upper Edge	Center	Lower Edge
1996	25-Oct	4:32	N	4-Oct	21	325m	405m	-	-	1.06°C	0.72°C	-
1997	15-Oct	1:59	N	2-Oct	13	315m	405m	465m	150m	0.93°C	0.53°C	<0.48°C
1997	15-Oct	2:50	N			305m	405m	475m	170m	0.97°C	0.53°C	
1997	15-Oct	5:13	N			325m	385m	475m	150m	0.88°C	0.53°C	
1997	15-Oct	6:05	D			345m	405m	465m	120m	0.70°C	0.53°C	
1998	7-Oct	16:01	D	29-Sep	8	345m	425m	485m	140m	0.93°C	0.66°C	<0.59°C
1998	7-Oct	19:23	N			255m	415m	535m	280m	1.41°C	0.66°C	
1999	10-Oct	8:48	D	6-Oct	4	405m	445m	535m	130m	0.84°C	0.66°C	<0.62°C
1999	19-Oct	1:24	N			315m	425m	485m	170m	1.45°C	0.66°C	
2000	6-Oct	6:28	D	2-Oct	4	405m	455m	485m	80m	0.85°C	0.75°C	<0.75°C
2001	27-Sep	7:00	D	10-Oct	-12	335m	445m	475m	140m	1.07°C	0.61°C	<0.58°C
2001	27-Sep	8:07	D			355m	455m	465m	110m	0.96°C	0.59°C	
2001	27-Sep	11:16	D			355m	455m	505m	150m	0.96°C	0.59°C	
2001	27-Sep	15:42	D			365m	435m	465m	100m	0.91°C	0.62°C	
2001	27-Sep	18:45	N			275m	425m	-	-	1.32°C	0.66°C	
2001	27-Sep	21:58	N			275m	425m	475m	200m	1.32°C	0.66°C	
2001	27-Sep	22:45	N			295m	395m	475m	180m	1.24°C	0.80°C	
2001	28-Sep	1:57	N			275m	425m	475m	200m	1.32°C	0.66°C	
2002	30-Sep	23:57	N	9-Oct	-9	315m	445m	535m	220m	1.22°C	0.72°C	<0.70°C
2003	4-Oct	19:37	N	8-Oct	-4	275m	445m	545m	270m	1.16°C	0.62°C	<0.57°C
2003	5-Oct	1:09	N			255m	425m	535m	280m	1.27°C	0.62°C	
2004	4-Oct	2:39	N	9-Oct	-5	335m	485m	535m	200m	0.99°C	0.56°C	<0.52°C
2004	5-Oct	9:51	D			445m	475m	515m	70m	0.60°C	0.56°C	
2005	16-Oct	3:38	N	16-Oct	0	275m	385m	535m	260m	1.37°C	0.77°C	<0.60°C
2006	15-Oct	4:23	N	3-Oct	12	345m	485m	515m	170m	1.04°C	<0.58°C	<0.58°C
MAX						445m	485m	545m	280m	1.45°C	0.80°C	
MEAN						325m	431m	498m	171m	1.07°C	0.63°C	
MIN						255m	385m	465m	70m	0.60°C	0.53°C	

Table 8 Summary of surveys at St.5 off Otobe (N42° 00', E140° 00')

Acoustic survey				CTD Date	Distance of Date	pollock distribution depth				Temperature at the depth		
Year	Date	Local Time	Day/Night			Upper Edge	Center	Lower Edge	Range	Upper Edge	Center	Lower Edge
1996	25-Oct	13:13	D	22-Oct	3	365m	405m	485m	120m	0.82°C	0.71°C	0.56°C
1997	12-Oct	18:24	N	22-Oct	-10	235m	415m	495m	260m	1.70°C	0.69°C	0.55°C
1998	10-Oct	14:24	D	21-Oct	-11	405m	435m	605m	200m	0.83°C	0.71°C	<0.55°C
	11-Oct	20:58	N			185m	425m	575m	390m	4.06°C	0.73°C	
1999	10-Oct	8:21	D	19-Oct	-9	395m	415m	565m	170m	0.60°C	0.57°C	<0.43°C
2000	9-Oct	10:05	D	16-Oct	-7	415m	435m	545m	130m	0.59°C	0.57°C	<0.45°C
2001	30-Sep	7:28	D	3-Oct	-3	345m	395m	525m	180m	0.81°C	0.69°C	0.48°C
2002	6-Oct	12:22	D	8-Oct	-2	425m	445m	505m	80m	0.73°C	0.68°C	0.63°C
2003	7-Oct	21:01	N	7-Oct	0	325m	395m	475m	150m	0.81°C	0.65°C	0.50°C
2004	29-Sep	14:35	D	29-Sep	2	NASC<10	435m	NASC<10	-	-	-	0.70°C
	1-Oct	15:30	D				445m					0.68°C
6-Oct	9:05	D	7				425m					445m
2005	19-Oct	18:19	N	13-Oct	6	235m	375m	5m	-230m	2.74°C	0.98°C	<0.71°C
2006	15-Oct	3:15	N	5-Oct	10	365m	375m	425m	60m	0.79°C	0.77°C	0.60°C
MAX						425m	445m	605m	180m	4.06°C	0.98°C	
MEAN						343m	417m	472m	128m	1.27°C	0.70°C	
MIN						185m	375m	5m	-180m	0.59°C	0.57°C	

深付近に最大値があり、200m以深では34.0psu付近で一定となるが、岩内湾に比べ年変動が大きかった。

また、両海域とも300m以深では水温年変動が非常に小さかった。400m深では、0.56~0.88℃の範囲で平均0.73℃、450m深では0.51~0.75℃、平均0.61℃、また、深度による変化も小さくなり、深度400mと450mの間では平均0.126℃の変化であった。

4.3.3 分布深度とスケトウダラの分布水温

4.3.3.1 岩内海域

岩内海域のJC11におけるスケトウダラ分布深度は、中心深度で見ると385~485mの範囲にあり、その平均は43m、変動幅は100mであった。上限深度は255~445m、下限深度は465~545mであった。分布層の厚さは70~280mで、昼間に薄く夜間に厚い傾向が見られた。

分布の中心深度の水温は0.53~0.80℃の範囲にあり、平均0.63℃と非常に低かった (Table 7, Fig. 30)。岩内海域の最も高い分布水温は1.45℃と、下記の松山海域より2℃以上低かった。

4.3.3.2 松山海域

松山海域St.5におけるスケトウダラ分布の中心深度は375~445mの範囲にあり、その平均は417m、変動幅は70mであった。上限深度と下限深度は時間帯によって大きく変化し、上限は185~425m、下限は425~605mに達していた。分布層の厚さは30~390mと、昼間に薄く夜間に厚い傾向は岩内海域と同様であった。

分布の中心深度の水温は0.57~0.98℃の範囲にあり、平均0.70℃と低く、標準偏差も0.096でありバラツキも小さかった (Table 8, Fig. 30)。ただし、2005年の分布水温は0.98℃であり、他の年と比べて突出して高かった。また、本章で求めたスケトウダラ分布範囲の中で最も高い水温は、1998年のSt.5の深度185mにおける4.06℃であった。

4.3.3.3 スケトウダラの分布水温

分布水温をまとめると、スケトウダラの分布の中心は0.53~0.98℃であり、両海域を通じて分布の中心が0.8℃を上回ったのは2005年だけであった (Fig. 30)。また、分布の上限深度の水温は4.06℃であった。さらに、エコーグラム (Fig. 25) でスケトウダラと確認できた反応で、最も浅かった深度と水温は、松山海域2006年の水深95m (水温5.2℃)、最も高温だったのは同海域2005年125m (7.4℃) であった。

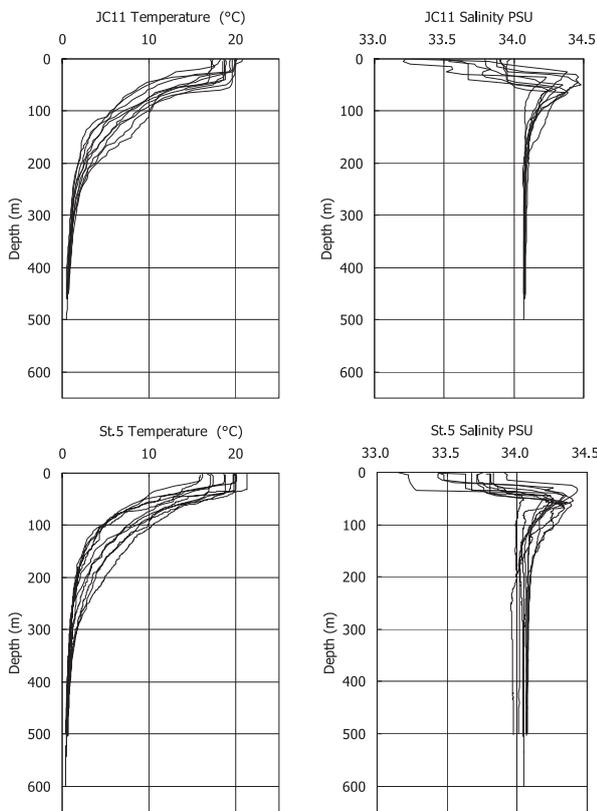


Fig. 29 Vertical profiles of temperature and salinity at JC11 (upper panels, Iwanai region) in 1996 and St.5 (lower panels, Hiyama region) in 2006.

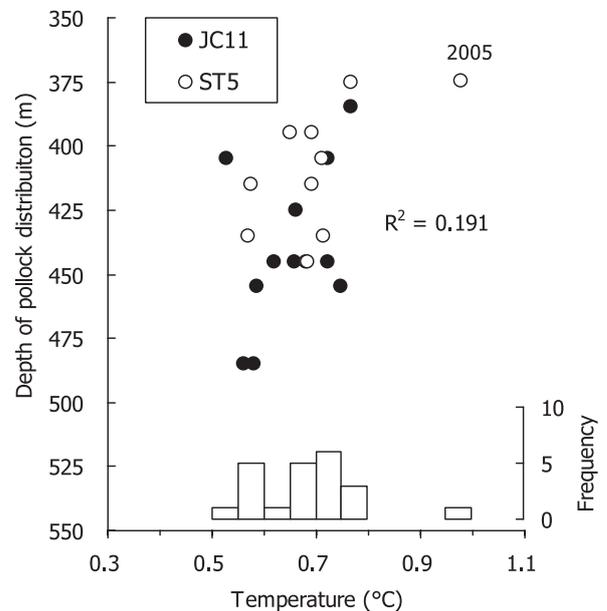


Fig. 30 Statistical relationship between temperatures and depths of the center of walleye pollock distributions, and the frequency distribution of the ambient temperatures. Black dots indicate data from JC11, and open circles indicate data from St.5. Coefficient of determination was calculated excluding the data in 2005 at St.5.

4.3.4 水温と分布深度の相関分析

スケトウダラの分布がどの深度の水温の影響を最も受けているのか、各基準層の水温とスケトウダラの分布深度を相関分析し、決定係数で比較した (Table 9, Fig. 31)。その結果、分布深度に近い400m層の水温との決定係数が0.122と最も小さく、100m層水温との間の決定係数が0.656となり、調べた各層水温の中で最も決定係数が高かった。ただし、2005年は飛び値であったので、いずれの計算からも除いた。

次に、岩内JC11と桧山沖 St.5 の100m層の水温とスケトウダラの分布中心深度の経年変化をFig. 32に示す。上がJC11で下がSt.5である。2005年を除き両地点ともに、分布深度と100m深水温の変化傾向は一致していることが明らかとなった。

4.3.5 水温の水平分布

以上の結果を基に、400m深の水温水平分布とスケトウダラ分布の関連を調べた (Fig. 33, 34)。この図から、1980年代には0.7°C以下の水温が広範囲に広がっていたが、1993年頃から0.7°C以上の水温帯が海域中央に広がり始め、音響資源調査が開始された1996年以降はほぼ海域全体が0.7°C以上となっていた。

4.4 考察

本研究により、1) 産卵回遊期のスケトウダラの分布深度は年変動すること、2) スケトウダラ鉛直分布の中心水温は0.7°C前後であり、ほとんど0.8°Cを上回ることがないこと、3) 分布深度の決定には、表層100m層の水温変化の影響が大きいことなどが明らかになった。

この海域の表層は対馬暖流が流れており、本研究の結果はスケトウダラ分布深度と対馬暖流の関係を示している可能性もある。そこで、気象庁 (2008) で発表してい

る100m層水温10°C以上の面積指数である対馬暖流勢力と、本海域での対馬暖流勢力の指標として10°C以上の厚み (深度) を調べ、それぞれスケトウダラの分布深度と比較した。得られた決定係数はそれぞれ、 $R^2=0.202$ および $R^2=0.432$ となり、100m層水温との $R^2=0.656$ よりも小さかった (全て2005年を除く)。このことから、スケトウダラの分布深度は対馬暖流勢力というよりも、物理的な水温そのものに反応していると考えられる。

太平洋やベーリング海など他の海域でのスケトウダラの分布水温は1.4°C以上の海域が多く、1.0°C以下の報告は東ベーリング海のみである (Kooka *et al.*, 1998)。日本海のスケトウダラがこのような低水温を選択する理由には、日本海中層域は動物プランクトンやマイクロネクトンなどの餌生物が少ない環境であることが考えられる (小岡, 1999)。ところで、スケトウダラの代謝の特徴は低水温では同化率は変化しないが、異化率が低下することにある (吉田・桜井, 1984)。したがって、餌の

Table 9 Coefficients of determination between the temperature at each depth layer and the depth of walleye pollock distribution. The 2005 data were excluded from analysis.

Depth (m)	Coefficient of determination	
	St.5	JC11
0	0.160	0.032
30	0.358	0.358
50	0.306	0.320
100	0.656	0.251
150	0.546	0.233
200	0.499	0.160
400	0.122	0.102

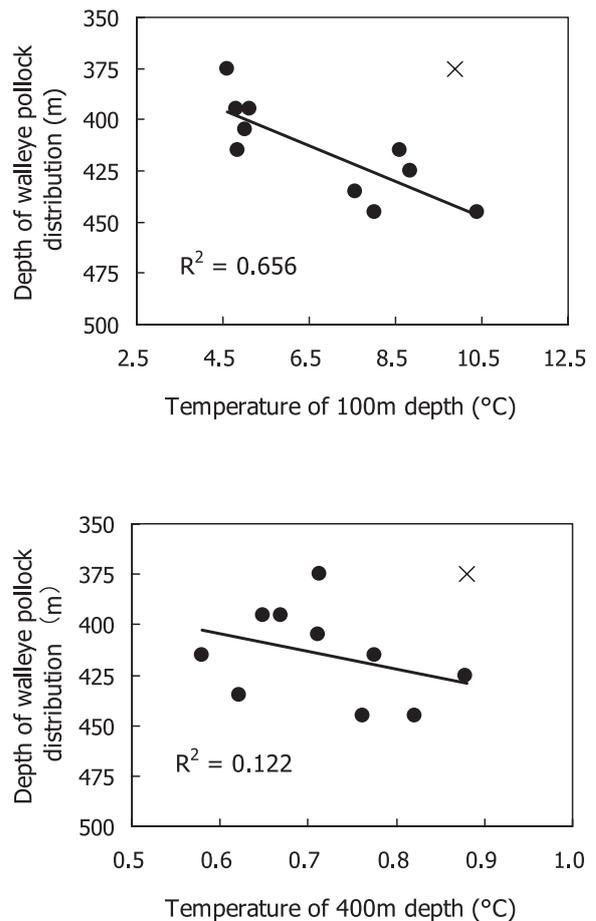


Fig. 31 Statistical relationships between temperature of 100m (upper) or 400m (lower) depth and the depth of walleye pollock at St.5. Coefficients of determinations were calculated excluding the data in 2005 showed by crosses.

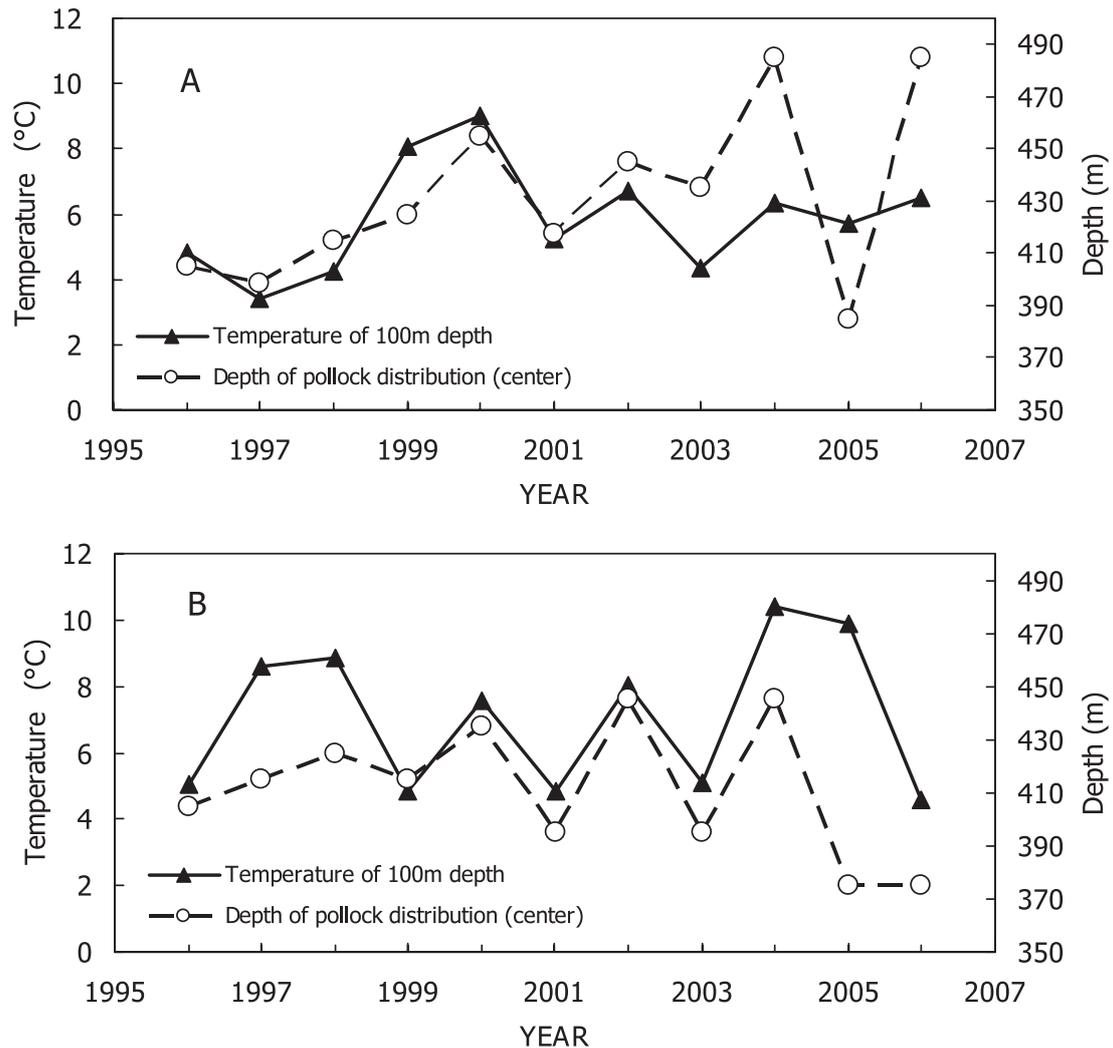


Fig. 32 Changes of temperature of 100m depth and the depth of walleye pollock vertical distribution (center of schools) at JC11 (A) and St.5 (B).

少ない環境でエネルギー収支を節約するのであれば、より低い水温帯に分布する選択もありうる (Macpherson and Duarte, 1991)。日本海のスケトウダラは産卵場まで移動するのに際して、積極的に摂餌するよりも、摂餌を抑えて深度400m前後の水温 0.7°C の低水温帯を通ることで、エネルギーを節約していると考えられる。10月の摂餌強度が低いことも (小岡ほか, 1997), この仮説を裏付けている。

しかし、一部のスケトウダラが摂餌していることは、小岡ほか (1997) が、この時期の主要な餌生物が *Themisto japonica* などの端脚類であることを示していることから明らかである。この海域の *T. japonica* は、夜間に浮上し深度150~200m層での密度が高くなる (Kooka et al., 1998)。また、この時期に限らず重要な餌生物であるオキアミ類の *Euphausia pacifica* も太平洋海域では夜間に浮上することが知られている (Miyashita et al.,

2004)。本研究では、詳細に日周鉛直移動を観察することで、一部のスケトウダラのみが鉛直移動していることを確認した。この点は、Kooka et al. (1998) の結果と一致する。それらのスケトウダラは上記の動物プランクトンを追って浮上し、日の入り、日の出の時間帯に摂餌している (Yoshida, 1994) と考えられる。

また、本研究の結果、表層水温でスケトウダラの分布深度の年変化は説明可能であり、表層水温が高くなると、スケトウダラの分布深度が深くなるのが明らかになった。このことは産出された卵のふ化に不適な高水温を避ける生態的行動と推察される。しかし、深度400mに分布するスケトウダラの主群が表層の水温を察知することはできないことから、摂餌のために夜間表層に浮上する一部のスケトウダラが卵のふ化に不適な水温を検知し、そのような高水温を避けて移動回遊するため分布深度も深くなるのではないだろうか。1996年以降、表層

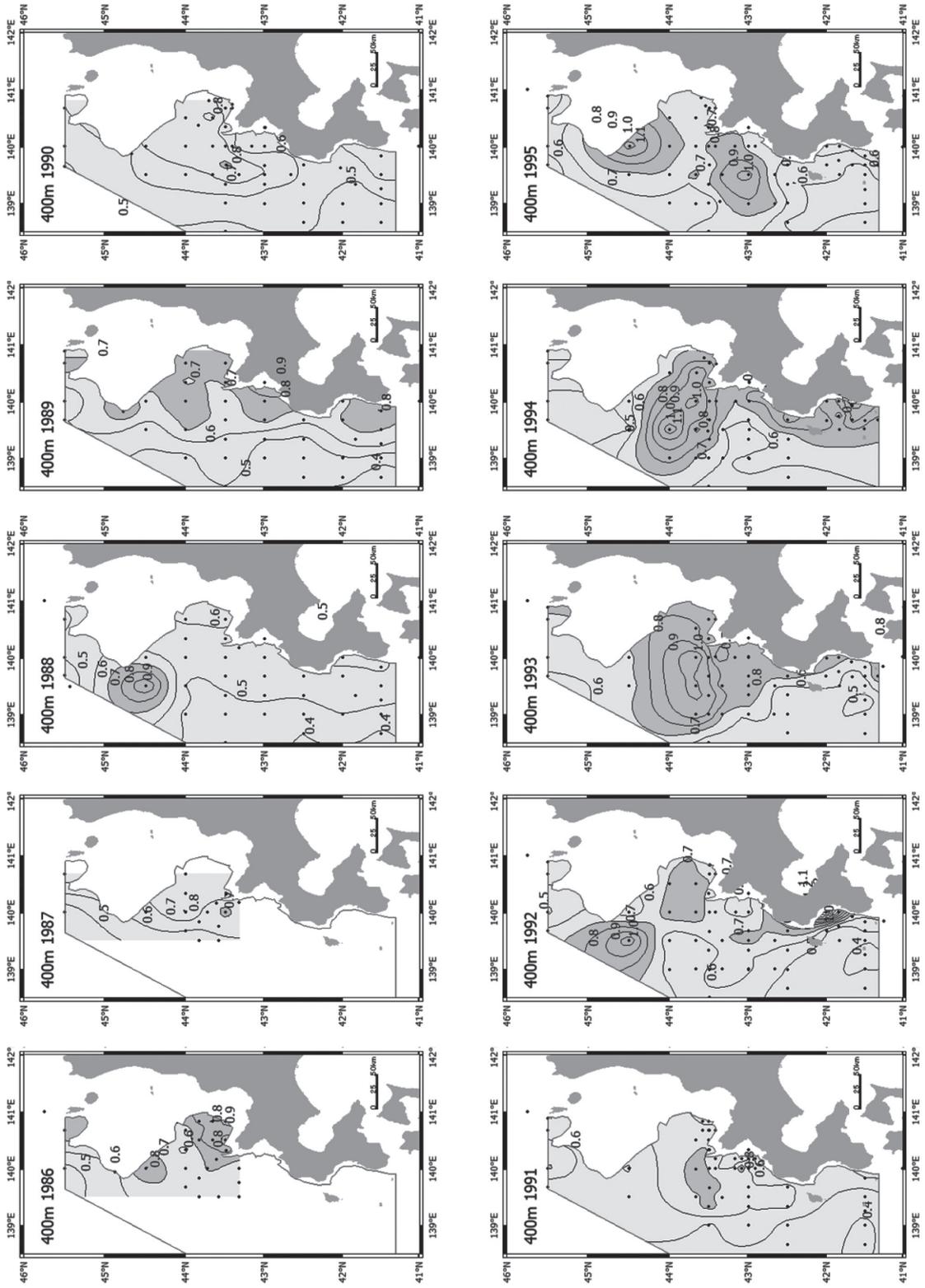


Fig. 33 Horizontal temperature profiles at 400m isobath in autumn from 1986 to 1995. Areas filled with dark gray are warmer than 0.7°C.

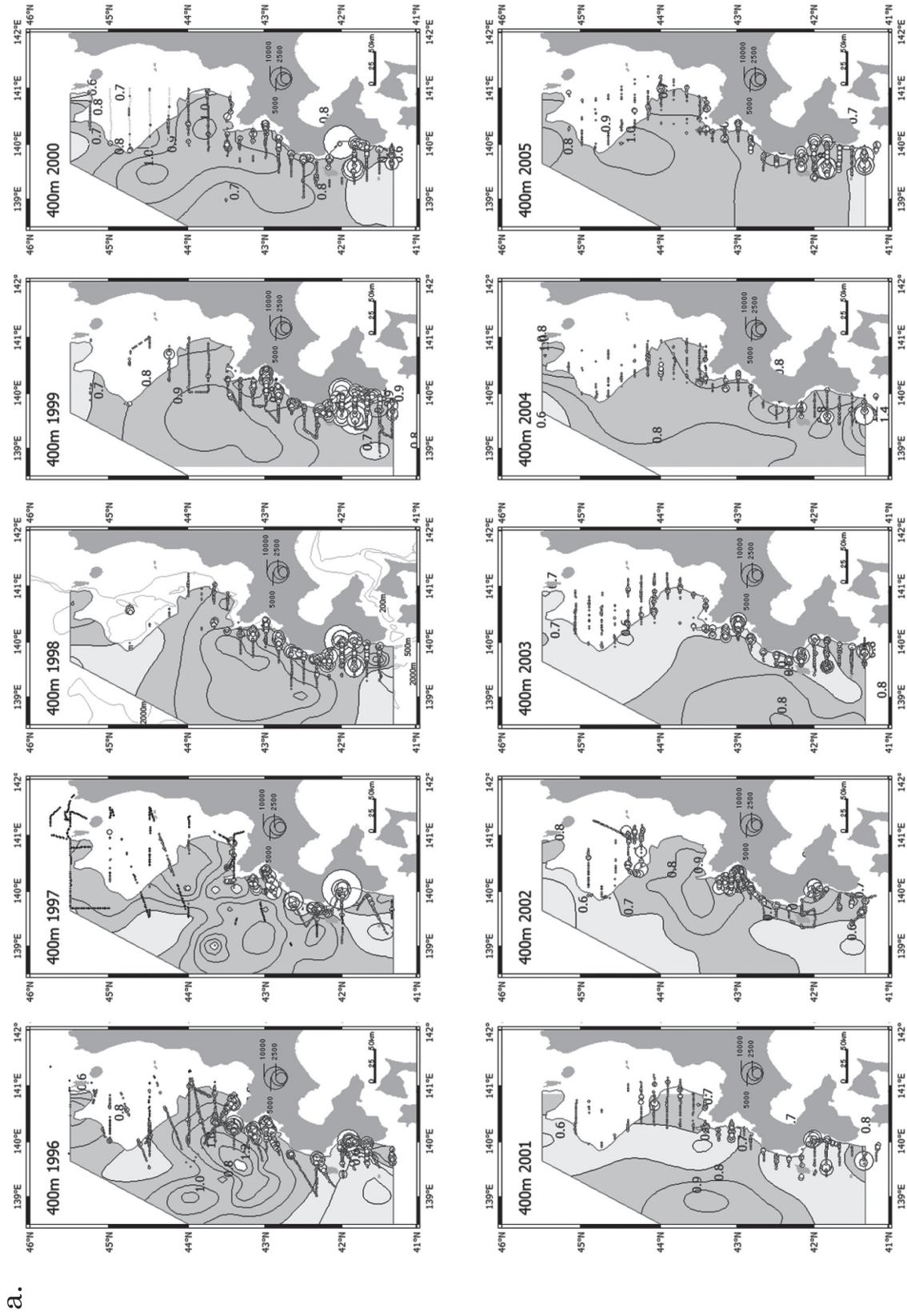


Fig. 34 Horizontal temperature profiles of 400m isobath temperature and NASC of walleye pollock in autumn from 1996 to 2007. Areas filled with dark gray are warmer than 0.7°C.

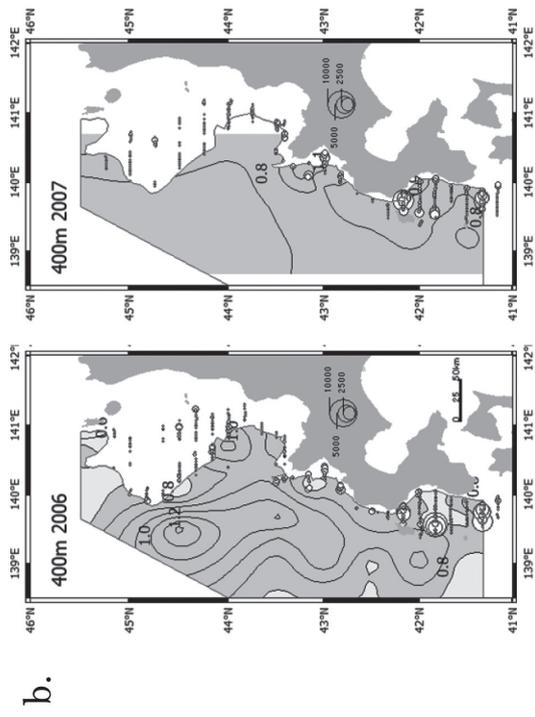


Fig. 34 continue.

100mの水温は4~10°Cの範囲にあった。10°Cではスケトウダラ成魚は分布可能であっても(石垣, 1960), 産出された卵ではふ化率の低下が起こる可能性が高いことから(中谷・前田, 1984), 対馬暖流勢力下に繁殖する冷水性魚類スケトウダラの適応戦略ではないだろう。

今回, 計量魚探機とCTDという観測機器を用いることによって, 詳細な水温変化に応答するスケトウダラの生態が明らかにできた。これまで, 秋期のスケトウダラ分布深度は水温には影響されないとの考え方が多かった(高倉, 1954; Kooka *et al.*, 1998)。しかし, 岩内湾海域でも桧山海域ほど明瞭ではなかったが, 表層水温と相関が見られたことは, 今回得られた水温と分布深度の関係が一般的なものであることを示している。

本章で得られた結果を基に, スケトウダラ産卵推定した回遊経路の2パターンをFig. 35に示した。地形データは日本海洋データセンターのJ-EGG500, 米国地質調査所のGTOPO30を用いた。Fig. 35 (A)は低水温期, (B)は高水温期の回遊経路である。10月の表層水温が低い時代には積丹半島以北に産卵場が形成されるが, 高い時代になると回遊経路の深度が深くなり(B)図のように, 同海域に産卵場は形成されにくくなる。

第5章 スケトウダラ北部日本海系群の漁獲量と標準化水温

5.1 緒言

スケトウダラ北部日本海系群は, 過去には沿海州や太平洋系群との交流を指摘されたこともあるが, 基本的には武蔵堆, 雄冬岬沖, 石狩湾, 岩内湾および桧山沖などで産卵し(Tsuji, 1990), 宗谷海峡周辺, 武蔵堆, 雄冬沖で成育, やがて成熟すると産卵場へ回遊すると推定されている。ところが, 1980年代以降, 漁獲量の減少や資源状態の低下とともに, 産卵場の縮小が指摘されている(北海道立中央水産試験場資源管理部, 2007)。

これまで, 本系群の資源変動に関連して, 三宅(1991)が漁獲量の地域差を, 呉ほか(2002)は漁獲量の変動に加え水温との関係を, Funamoto(2007)が表面水温と加入量との関係を報告しているが, いずれも分析期間が20~30年間であり数十年周期の環境変動と比較するには十分に長いとは言えない。そこで本章では, 55年間(1952~2006年)の沿岸水温指数の時系列変化を用いて, スケトウダラ産卵群漁獲量との相関関係を再検討し, 次いでVPAで得られたRPSとの関係も検討した。

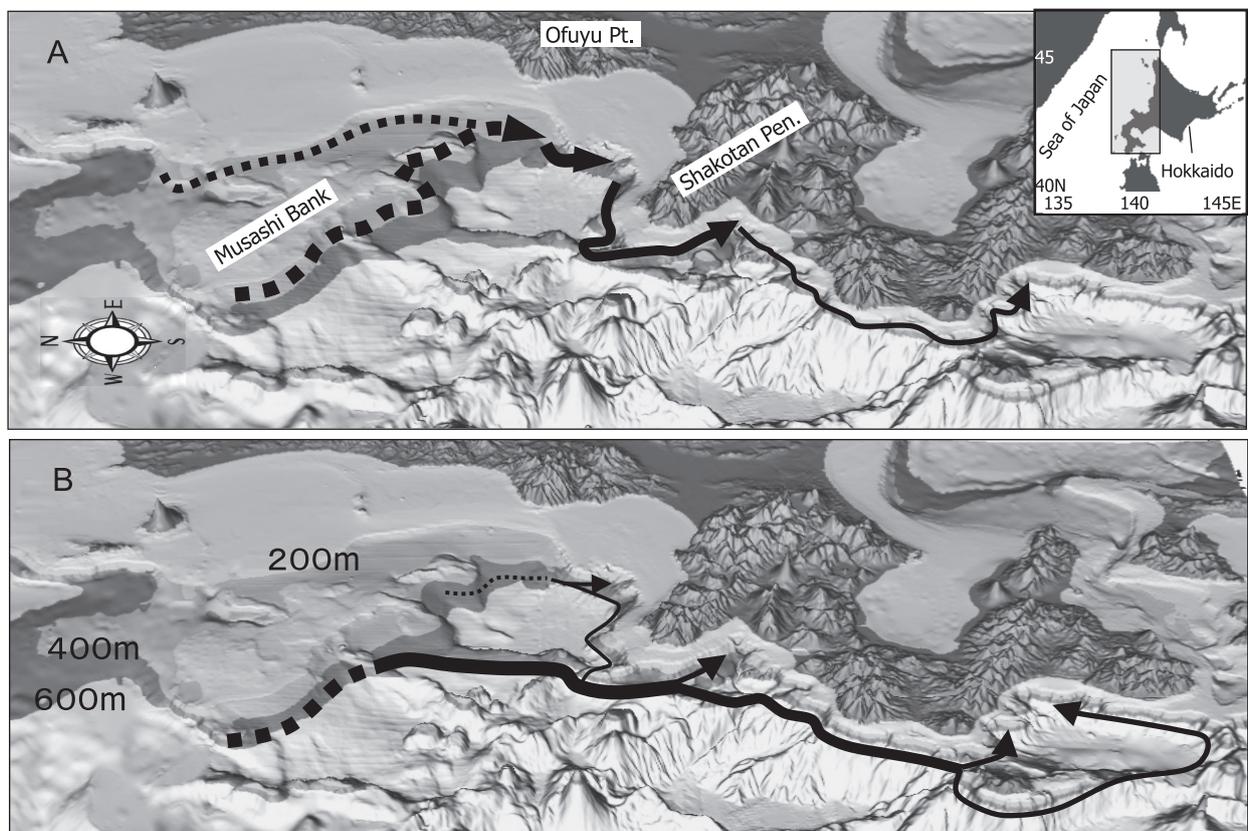


Fig. 35 Conceptual maps of walleye pollock spawning migration routes of in the periods of low (A) and high (B) sea surface temperature. Solid and dotted lines show the routes from feeding grounds to spawning grounds off Hokkaido in the Sea of Japan. The 3D topographic maps were developed using the numeric data sets J-EGG500 and GTOPO30.

5.2 材料と方法

5.2.1 標準化水温

長期間にわたる水温の指標として、田中（2002）が報告した北海道西岸海域の標準化水温を用いた。これに2006年6月までの計算値を加えてデータセットとした（田中、私信）。標準化水温とは、北海道西岸で最大9ヶ所の沿岸水温観測点について、観測期間が重複する1931～1960年の月平均値からの偏差をその標準偏差で標準化し、海域平均した指数である。1993年以降の観測点は最大4地点である。1897年から利用可能であるが、本章の分析では、比較する漁獲量との関係から1935年以降のデータを用いた。この水温指数は北海道西岸域全体の平均的な変動を良く表現できると考えられている（田中、2002）。

5.2.2 スケトウダラ漁獲量と加入量、並びに再生産成功率（RPS）

スケトウダラ漁獲量を分析する際には、漁業に関連した技術開発や社会情勢の変化に留意しなければならない。例えば、1960年に冷凍すり身技術が開発されてからスケトウダラ漁獲量が急増したり、逆に200海里施行の1977年以降には急激に減少したりしている。沖合底びき網漁業の漁獲量は、このような社会情勢の影響を受けて大きく変化しやすい。

それに対して、沿岸域で産卵群を対象としているすけとうだら刺し網漁業や同はえ縄漁業では、そのような技術開発や社会情勢の変化の影響は少なく、漁獲量は資源

状態を比較的素直に反映していると考えられる。そこで、漁獲量と水温の相関分析にはこれらの沿岸漁業による漁獲量を用いた。

漁獲統計は、原則として1935年以降の北海道漁業現勢または北海道水産現勢を用いた。これらの資料から、沿岸域で産卵群を漁獲対象とするすけとうだら刺し網漁業およびすけとうだらはえ縄漁業（一本釣り含む）で漁獲されたスケトウダラ生産高を支庁別に集計した。ただし、1975年以前については、漁業別魚種別の生産高が記載されていないため、漁業別生産高を用いた。近年の例では上記のようなスケトウダラ専獲漁業の場合、生産高の99%がスケトウダラで占められることから、全量をスケトウダラ漁獲量として扱った。

集計範囲は、日本海に面した宗谷、留萌、石狩、後志、桧山支庁と渡島支庁とした（Fig. 36）。宗谷支庁にはオホーツク海に面する地域も含まれるが、オホーツク海沿岸における沿岸漁業での漁獲量は少ないため、そのまま分析に用いた。一方、渡島支庁ではスケトウダラ漁獲量の大半が太平洋側海域で漁獲されており、また、石狩支庁は漁獲量が僅かであったことから、両支庁の漁獲量は分析には含めなかった。さらに、1941年、1944～1951年の漁業種別生産高は、第二次世界大戦などの影響で部分的に欠けていたため、分析には利用しなかった。

水温との比較に用いた加入量およびRPSは、本間ほか（2008）のVPA結果から引用した。

5.3 結果

5.3.1 水温と漁獲量

分析に用いた宗谷、留萌、後志、および桧山支庁の刺し網漁業とはえ縄漁業の漁獲量の経年変化を、Fig. 37. A に示した。また、同図のBおよびCに、それぞれ冬期間の標準化水温およびRPSの経年変化を示した。

宗谷、留萌支庁では、1955年頃から1975年までの間、多いときには1万tを超える漁獲が見られたが、1976年以降は1991年を除き1,000t以下で推移していた。

後志支庁では、戦前から1985年まで2～4万tの間で数年単位の増減を繰り返していたが、その後単調な減少傾向を示すようになり、1993年には5千t、そして2006年には2千tにまで減少した。

桧山支庁では、戦前の1937年に4.4万t、戦後の1952年には1.8万tの漁獲があったが、1954～1977年まで1万t以下で推移し、特に1958～1972年の漁獲量は1,000t以下と非常に少なくなっていた。その後、1978年から増加し2002年まで1～2万tの漁獲があったが、2006年には7千tとなった。

これらの支庁別漁獲量年計とその年の月平均標準化水

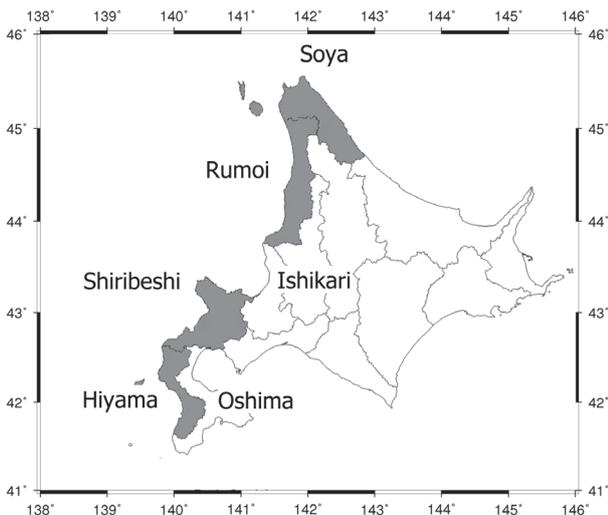


Fig. 36 Sub-prefectural areas in Hokkaido prefecture as of 2004. The catches of walleye pollock recorded by six branch offices in the areas facing the Sea of Japan were analyzed. Catches in four gray shaded areas were compared with sea temperature.

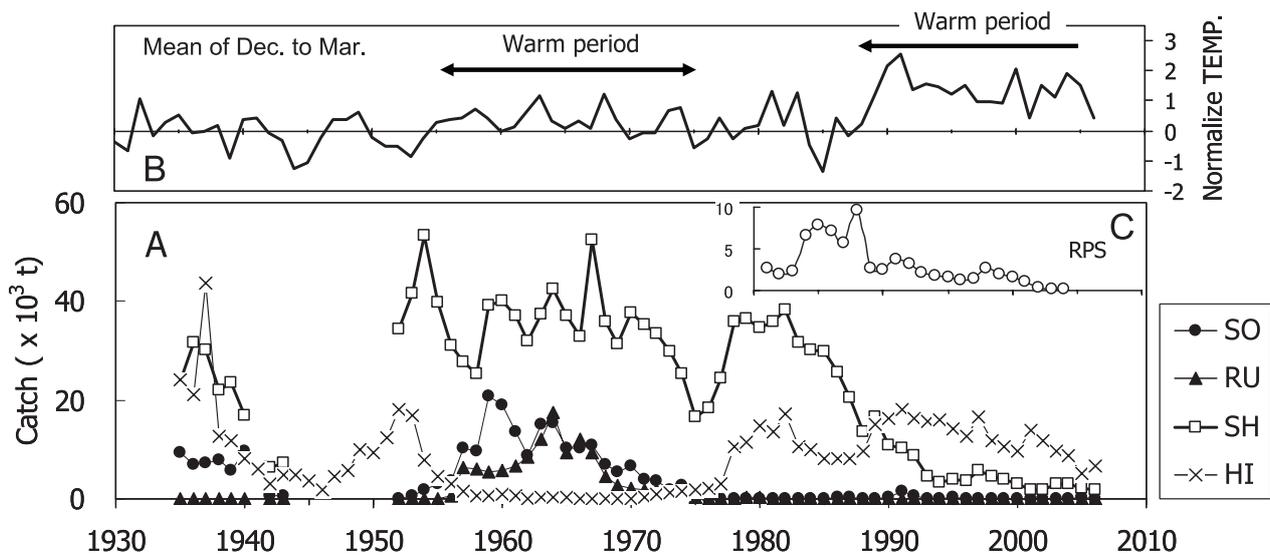


Fig. 37 Annual catches of walleye pollock in coastal fisheries in four sub-prefecture areas (A), normalized coastal sea temperature averaged for spawning season (B), and the RPS (individuals/kg) during 1981 to 2004 (C, Honma et al. 2008). Symbols in “A” indicate catches from each area; SO, RU, SH, and HI denote Soya, Rumoi, Shiribeshi, and Hiyama, respectively.

温の散布図行列を作成し、相関係数を求めた (Fig. 38, Table 10)。ただし、第二次世界大戦の前後は桧山支庁以外の漁獲統計が欠けており、また、この期間は4支庁ともに戦争の影響で漁獲量が低下していたと判断されるため、相関分析には1952年以降の漁獲統計を用いることとした。

宗谷、留萌支庁では漁獲量と標準化水温との間に強い相関関係は見られなかったが ($r = -0.26 \sim -0.27$)、5月の標準化水温との相関係数は有意であった。また、漁獲量の多い1960年代には、どの月の標準化水温も平均値に近い0.0 ~ 1.0であることが多かった。後志支庁では冬期1 ~ 3月、10 ~ 12月の標準化水温と有意な負の強い相関関係 ($r = -0.62 \sim -0.37$) が認められた。このことは、水温が高いほど漁獲量は少なくなる関係を示している。一方、桧山支庁では、逆に1月、12月の水温と有意な正の相関関係が認められた。ただし、相関係数は $r = 0.34 \sim 0.36$ と後志支庁ほど強い関係とはならなかった。

北海道西岸日本海海域のスケトウダラの産卵期は12 ~ 3月であり (田中1970, 前田ほか1988)、これらの相関係数から漁場=産卵場形成は沿岸水温と深い関わりを持っていることが伺われる。

5.3.2 水温と加入量、およびRPSの関係

まず、標準化水温と年級豊度の関係を分析するために、スケトウダラ北部日本海系群のVPA 資源量推定値の2歳加入尾数と比較した。比較した標準化水温は、スケト

ウダラ産卵期に合わせて前年10月からその年の9月までの月平均水温とした。すると、前年12 ~ 3月と5月の水温との間で有意な負の相関関係 ($r = -0.57 \sim -0.46$) が見られた (Table 11)。つまり水温が低いほど年級豊度が多く、高いと少ない関係が認められた (Fig. 39)。

しかし、同様な関係は後志の沿岸漁獲量でも見られていることから、産卵親魚が多ければ年級豊度も多いという再生産関係に起因する因果相関の可能性がある。そこで、産卵親魚の多寡の影響を除くために、RPSと水温の関係を分析した。この場合も、前年12 ~ 3月の水温との間に負の有意な相関 ($-0.64 \sim -0.48$) が見られたが (Table 11)、左上、右下の2群に分離される傾向が認められた (Fig. 39)。

次に、これら前年12 ~ 3月の標準化水温の平均値を求め、RPSに対し点描したのがFig. 40である。1984 ~ 1988年の低水温・高RPS期と、1981 ~ 1983年と1989年から2004年までの高水温・低RPS期の2つのグループが認められた。標準化水温0.0以下の年では、高いRPSのみが観察されており、0.0 ~ 0.5の範囲では1 : 1の比率で、0.5以上では全て低いRPSとなっていた。その中でも、1991年は最も高い標準化水温であったが、低RPS期のなかでは最も高いRPSを示していた。

5.4 考察

5.4.1 標準化水温の変化とレジームシフト

今回の分析から、冬期の沿岸水温とスケトウダラ漁獲

量(産卵群)との間には密接な関係があり、後志では負の、
 桧山では正の相関関係があることが示された。1989年以
 降の冬期間の標準化水温は、これまでにない高水温が続
 いており、後志支庁の漁獲量減少とその年代が一致して
 いることから、スケトウダラ産卵群は高水温を避けて産
 卵回避するという第4章で述べた推論と矛盾しない。

また、1970年代に宗谷、留萌支庁で産卵群が漁獲され
 なくなり、武蔵堆や雄冬岬沖などの産卵場が見られな
 くなったのも、1955~1975年頃の高水温期と一致し、さら
 に。これらの高水温期の始まりと終わりは、レジームシ
 フト 1956/57, 1976/77, 1988/89 (Yasunaka and Hanawa,
 2002) とほぼ同期していることは興味深い。辻 (1975)
 は、日本海沿岸での1974年漁期について、岩内、桧山、

稚内ノース場への来遊量は多く、雄冬、武蔵堆漁場へは
 少なかった、と報告している。また、秋期の遅くまで夏
 期の成層状態が維持される海況状況が2、3年続いてお
 り、このような海況条件の年には、分布の中心漁場であ
 る雄冬、武蔵堆漁場のスケトウダラ漁況はよくない傾向
 があるが、その原因については不明である、と述べてい
 る。この記述は、1970年代前半に水温環境の変化があっ
 たことを伺わせる。

5.4.2 産卵場形成に与える水温環境と海底地形の影響

後志支庁と異なり、桧山支庁では相関係数は小さいが、
 水温と有意な正の相関が見られたことは注目される。し
 かし、1954~1977年までの不漁期間は高水温期にあたり、

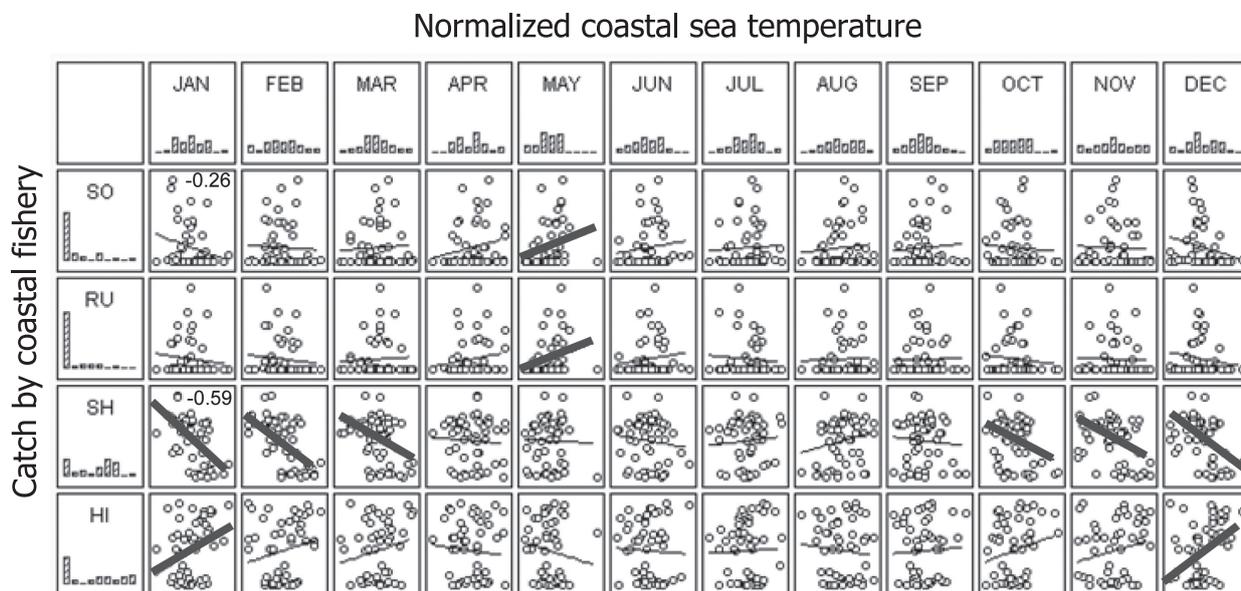


Fig. 38 Correlations between the normalized monthly mean coastal sea temperature and annual catches of walleye pollock in sub-prefecture areas of western Hokkaido, the Sea of Japan, from 1952 to 2006. Solid lines in these plots show regression lines, and thick lines indicate significant linear correlations at $\alpha = 0.05$. SO, RU, SH, and HI are the abbreviations of sub prefectures that is Soya, Rumoi, Shiribeshi, and Hiyama, respectively. The bar charts of the upper row and the left column show frequency distributions of sea temperature and catches of walleye pollock, respectively.

Table 10 Correlation coefficients (r) between the normalized monthly mean coastal sea temperature and annual catches of walleye pollock in sub-prefecture areas of western Hokkaido, the Sea of Japan, from 1952 to 2006. Asterisks show statistically significant r at $\alpha = 0.05$.

	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
SO	-0.26	-0.06	0.04	0.21	0.27 *	0.13	0.05	0.08	0.05	-0.08	-0.06	-0.24
RU	-0.13	-0.12	0.04	0.17	0.27 *	0.14	-0.07	0.03	0.00	-0.13	-0.04	-0.18
SH	-0.59 *	-0.62 *	-0.40 *	-0.05	0.02	-0.11	0.08	0.18	-0.11	-0.37 *	-0.46 *	-0.53 *
HI	0.34 *	0.19	0.18	-0.09	-0.13	-0.04	0.04	-0.09	0.04	0.18	0.18	0.36 *

Normalized coastal sea temperature

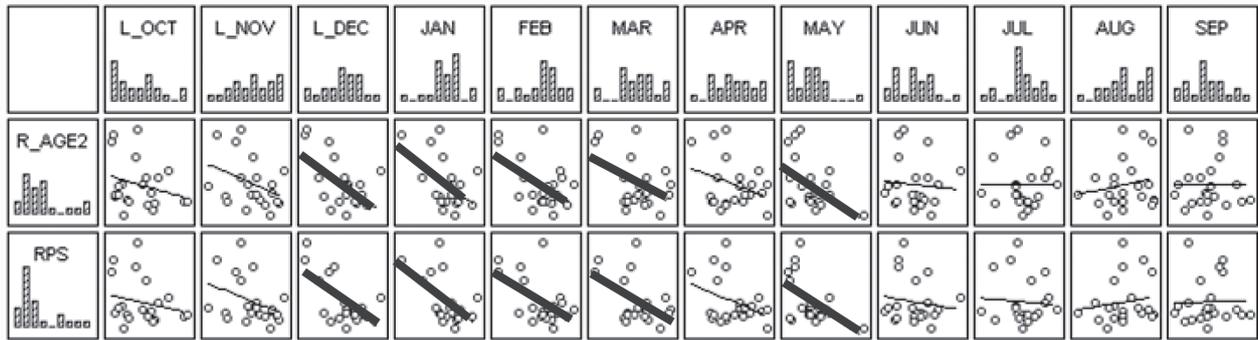


Fig. 39 Correlations between the monthly mean of normalize coastal sea temperature, recruits (age-2) and RPS of walleye pollock from 1981 to 2004. Solid lines in these plots show regression lines, and thick lines indicate significant linear correlations at $\alpha = 0.05$. The bar charts of the upper row show frequency distribution of sea temperature, and the charts of the left end show recruits and RPS of walleye pollock.

Table 11 Correlation coefficients (r) between the normalized monthly mean coastal sea temperature, recruits (age-2) and RPS of walleye pollock from 1981 to 2004. Asterisks show statistically significant r at $\alpha = 0.05$.

	L_OCT	L_NOV	L_DEC	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP
R_AGE2	-0.27	-0.40	-0.57 *	-0.52 *	-0.57 *	-0.46 *	-0.30	-0.46 *	-0.11	0.06	0.20	0.07
RPS	-0.23	-0.40	-0.64 *	-0.57 *	-0.59 *	-0.48 *	-0.35	-0.48 *	-0.16	-0.02	0.17	0.05

水温では説明できない年代である。1957年当時の北海道立水産試験場では、高温の影響で産卵場が北偏したと考えられていた。近年になって夏目（1998）は、産卵群は来遊していたが分布深度が深くなったため当時のえ縄漁業の技術では漁獲できなかつたと推察している。

この点は、前述の辻（1975）の疑問にも通じる。単純に考えると南ほど高水温の影響を受けやすい。しかし、第4章の結果から、表層の高水温はスケトウダラの分布深度を深くするように作用することが示された。したがって、北部海域の武蔵堆や雄冬岬沖など海底深度が比較的浅い海域には、スケトウダラの移動に必要な水温帯が存在しなくなったため、スケトウダラは武蔵堆から積丹半島に至る400~450m深の水深帯を大陸棚斜面に沿って南下し、桧山海域にたどり着く。そのため地理的には中心にあった雄冬沖の産卵場が、最初に消滅したと推察される。

本章では、長期間の水温データと支庁別漁獲量の関係を検討し、また期間は短いながらRPSとの関係も示すことができた。これらの結果から、スケトウダラ北部日本海系群の再生産は産卵場形成のみならず初期生残についても高水温の影響を大きく受けており、レジームシフトとの関係が注目される。

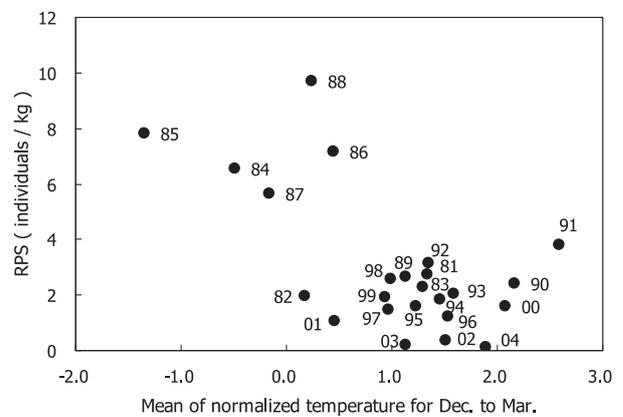


Fig. 40 Comparison between mean of normalized temperature from December to March and RPS of walleye pollock from 1981 to 2004.

第6章 スケトウダラ北部日本海系群の産卵場の変化

6.1 緒言

これまで本論文では、音響調査によるスケトウダラ分布と水温環境から産卵場形成過程を示し（第4章）、半世紀におよぶ漁獲量と沿岸水温の長期間データシリーズの比較により産卵場形成に対する高水温の影響を検証し

た（第5章）。本論文では、ここまで魚群の分布や漁獲量変動から産卵場を推定したが、実際にスケトウダラが何処で産卵しているのか明らかにしておく必要がある。

近年、地球温暖化やレジームシフトなどの環境の変化に応答する資源変動が注目され（桜井・岸，2005），スケトウダラについても水温と再生産との関係が幾つか報告されている。それらによると、北部日本海系群では冬期表面水温と漁獲量や年級豊度は負の相関関係にあり（呉ほか，2002；三宅・田中，2006；Funamoto，2007），水温と正の関係が見られる太平洋系群（Funamoto，2007）やアラスカ湾（Bailey，2000）などとは逆の関係がある。このようなことから、北海道西岸を北上する対馬暖流との関係が注目されている。

水温がどのようにスケトウダラの初期生残過程に影響しているのかを明らかにするためには、まず産卵場が何処に形成されているのかを確認し、従来の知見と異なるか否かを示す必要がある。

これまで、日本海での産卵場形成の根拠の一つとしてスケトウダラ産卵群の分布や漁獲状況が判断材料となっていた。高倉（1954）、石垣（1960）、田中（1970）、田中・及川（1971）、辻（1975）、前田ほか（1988）、夏目（1998）、亀井ほか（1999）、Kooka *et al.*,（2001）などの報告によると、日本海に分布するスケトウダラ北部日本系群の産卵場は北から利尻・礼文島周辺、雄冬沖から余市沖に至る石狩湾、岩内湾および松山沖に主要な産卵場が存在していたと考えられる。しかし、近年においては雄冬岬沖以北の海域で産卵場の形成は確認されていない。さらに、宗谷留萌海域では産卵群を対象とした沿岸漁業のスケトウダラ漁獲量が、1970年代以降減少していることから、雄冬岬以北において産卵場が形成されている可能性は低い（北海道立中央水産試験場資源管理部 2007）。

また、スケトウダラの卵は分離浮性卵で表層に浮遊することから、産卵場形成を確認する方法としてネット採集による卵の分布調査が行われている（Nakatani and Maeda, 1981）。日本海では、利尻・礼文島周辺海域から石狩湾以北の日本海、岩内湾、および松山海域でスケトウダラ卵の分布が報告されている（金丸ほか，1979；佐野，1980，1984，深滝，1983；前田ほか，1988；八木・武藤，1993など）。しかし、これまで道西日本海沿岸全域を網羅した卵分布に関する報告は見あたらない。

そこで、本研究ではスケトウダラ卵の分布調査を、産卵期間中の2月（田中，1970；八木・武藤，1993）に道西日本海沿岸域で広範囲に行うことにより、スケトウダラ北部日本海系群が何処で産卵しているかを確認し、また、水温環境の変化が卵の輸送に与える影響についても考察した。

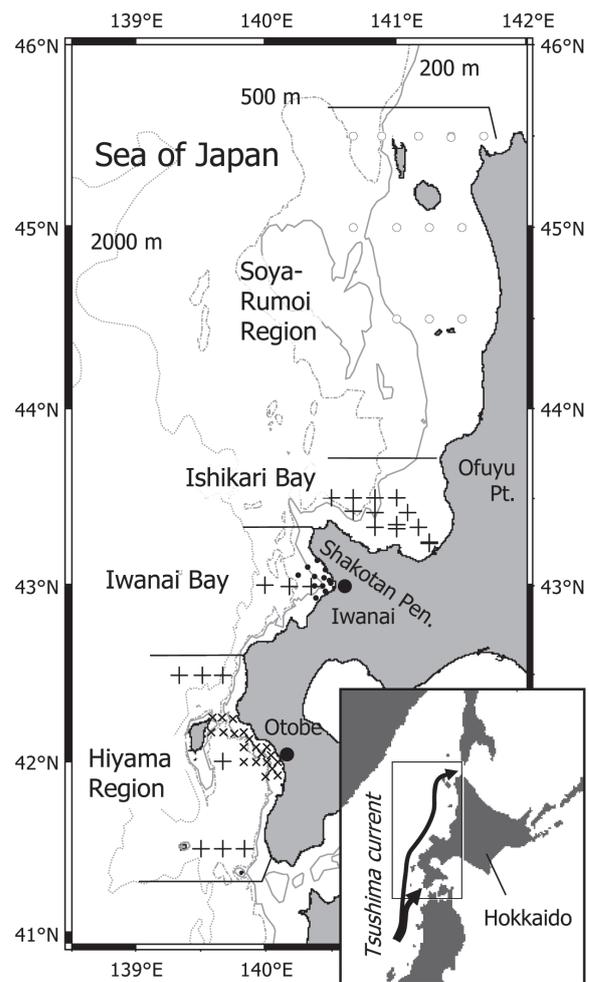


Fig. 41 Survey area. Symbols indicate net type and research vessel. Open circle (o): NORPAC net and Hokuyo Maru, dot (●): NORPAC net and quoted from Hokkaido (2006, 2007), cross (+): 80R net and Oyashio Maru, small symmetric cross (x): 80R net and Kinsei Maru.

6.2 材料と方法

2006年2月5～21日および2007年2月5～21日の間、Fig. 41に示す地点で、北海道立水産試験場所属の試験調査船おやしお丸、北洋丸、および金星丸を用いてCTDによる水温・塩分の測定と、80リングネット（口径80cm，目合0.33mm），もしくはNORPACネット（口径45cm，目合0.33mm）による鉛直曳き採集を実施した。スケトウダラの卵は、分離浮性卵で表層から150m層まで分布することから（金丸ほか，1979），150m深から表面までの鉛直曳きを行った。海底の深さが150mより浅い場合は海底直上からとした。ただし、金星丸では曳網距離が150mとなるようにワイヤー長を調節して表面までの鉛直曳きとした。

なお、岩内湾に関しては、北海道（2006, 2007）が報告している泊発電所周辺温排水影響調査結果報告書（以下、泊影響調査報告書と記す）に記載されているスケトウダラ卵調査の結果を利用した。調査は、2006年2月7日と2007年2月10日に温排水影響調査の一環として実施された。採集ネットは上記と同じNORPACネットを用い、150m深、もしくは海底直上からの鉛直曳きで採集した。以上の調査海域および調査分担などをTable 12にまとめて示した。

ネットで採集された標本は約5%の海水ホルマリンで固定し、後日実験室でスケトウダラ卵を同定して発生ステージごとに計数した。分類ステージは次のとおりとした（Nakatani and Maeda, 1981 ; 1989）。

- Stage 1: 受精から前期胞胚期
- Stage 2: 後期胞胚期から原口閉鎖直前
- Stage 3: 原口閉鎖から胚体は卵周の3/4以下
- Stage 4: 胚体は卵周の3/4以上

異なる採集ネットの採集量を比較するために、面積当たり卵密度（個/m²）を求めて比較した。また、泊影響調査報告書に記載されている卵分布密度の単位は、

個/100m³であり、これは100m曳網した場合の面積当たり密度に相当する。そこで、本論文では、単位を[個/m²]に置き換えて示した。

産卵場の推定には、受精してからほぼ1日以内（遊佐, 1954）と推定されるStage 1の卵を用いた。また、Nakatani and Maeda（1981）は、噴火湾において卵の発育ステージごとの分布密度を示して卵の輸送を推定したが、本研究では岩内湾の密度単位や海域による採集方法が統一されていないため、一律に比較することは困難である。従って、本研究では卵の輸送過程を推定するために、各調査点のステージ頻度組成をもって検討した。

6.3 結果

6.3.1 2006年のスケトウダラ卵分布

スケトウダラ卵は、宗谷・留萌海域ではまったく採集されなかったが、石狩湾、岩内湾、および桧山海域の広い範囲で卵が採集された（Fig. 42）。

主な産卵場別に見ると、石狩湾では分布密度は最大で738個/m²、岩内湾では19,550個/m²、桧山海域では3,322個/m²であった（Fig. 43 A~C）。石狩湾では、余市沖の海底深度100m付近で最も多く採集された。岩内湾では、海底深度200mの入り込んだ地点およびその南側の沿岸

Table 12 Summary table of the egg surveys with NORPAC and 80R net in the Sea of Japan off western Hokkaido.

Area	Year	Period	Net type	Number of station	Research vessel
Soya and Rumoi	2006	Feb. 5-6	NORPAC	8	Hokuyo Maru
Coastal part of Hiyama	2006	Feb. 6	80R	20	Kinsei Maru
Offshore part of Ishikari Bay to Hiyama	2006	Feb. 6-7	80R	10	Oyashio Maru
Coastal part of Iwanai Bay	2006	Feb. 7	NORPAC	12	quoted from Hokkaido (2006)
Ishikari Bay	2006	Feb. 20-21	80R	10	Oyashio Maru
Soya and Rumoi	2007	Feb. 5-6	NORPAC	10	Hokuyo Maru
Ishikari Bay	2007	Feb. 6	80R	3	Oyashio Maru
Coastal part of Hiyama	2007	Feb. 7	80R	6	Kinsei Maru
Coastal part of Iwanai Bay	2007	Feb. 10	NORPAC	12	quoted from Hokkaido (2007)
Ishikari Bay	2007	Feb. 20-21	80R	3	Oyashio Maru

寄りに多く、北側や沖合側には少なかった。また、少数であるが、岩内沖北緯43°00′、東経140°00′および140°10′の地点で、それぞれ42個/m²、20個/m²の分布が確認された。

松山海域においても、海底深度が200mより浅い乙部沖での採集数が多かったが、同海域の南端に位置する江良沖の北緯41°30′、東経139°50′の地点で38個/m²の卵が採集され、また、乙部の北側に位置する久遠と奥尻島との間の海底深度500m以深の地点でも38個/m²の分布が確認された。一方、奥尻島北側の北緯42°30′線の3地点では採集されなかった。

次に、産卵場所を推定するためにStage 1の分布を調べた (Fig. 44)。このStage 1の卵は沖合域にはほとんど認められず、岩内湾と松山の海底深度200m以浅の沿岸域に集中して分布していた。岩内湾での最大密度は19,350個/m²、松山海域では1,574個/m²であった。石狩湾では、2地点でそれぞれ2個/m²、4個/m²の分布が見られたに過ぎなかった。

続いて各発育ステージの占める比率を各ステージ別に示した (Fig. 45)。海域ごとに見ると、石狩湾ではStage 2～4が多く、Stage 1が全く採集されなかった。岩内湾では沿岸寄りの調査点ではStage 1～3の比率が高く、Stage 4はほとんど採集されなかった。しかし、沖合寄りの2地点では逆にStage 1、2は見られず、3、4のみで占められていた。松山海域の乙部沖ではStage 1、2の比率が高く、Stage 3とStage 4は少なかった。また、松山海域の南方に位置する江良沖ではStage 1の卵は見られず、Stage 2、3、4の比率がほぼ同程度見られた。

全体的な傾向として、Stage 1は前述の全ステージの分布と同じように沿岸域で高い比率を示すが、Stage 2、3と発育が進むにしたがって久遠と奥尻島との間や岩内湾の沖、積丹半島北側での比率が高くなっていった。さらにStage 4になると、岩内湾や松山海域の沿岸域での比率は0.1%以下と非常に小さく、北海道と奥尻島との間、岩内湾の沖、および石狩湾で高くなっていった。

6.3.2 2007年のスケトウダラ卵分布

2007年は天候が悪く十分な調査はできなかったが、天売・焼尻島以北から宗谷海峡、石狩湾、岩内湾および松山海域でネット調査を行った (Fig. 46)。2006年と同様に、宗谷・留萌海域でのスケトウダラ卵の採集は皆無であった。主要な産卵場である岩内湾、松山海域では、それぞれ最大で12,392個/m²、5,700個/m²と2006年と同程度の分布密度が見られたが、石狩湾では2006年の1/17と大幅に少ない42個/m²であった。

ステージ別の分布傾向も全体的には2006年と同様で

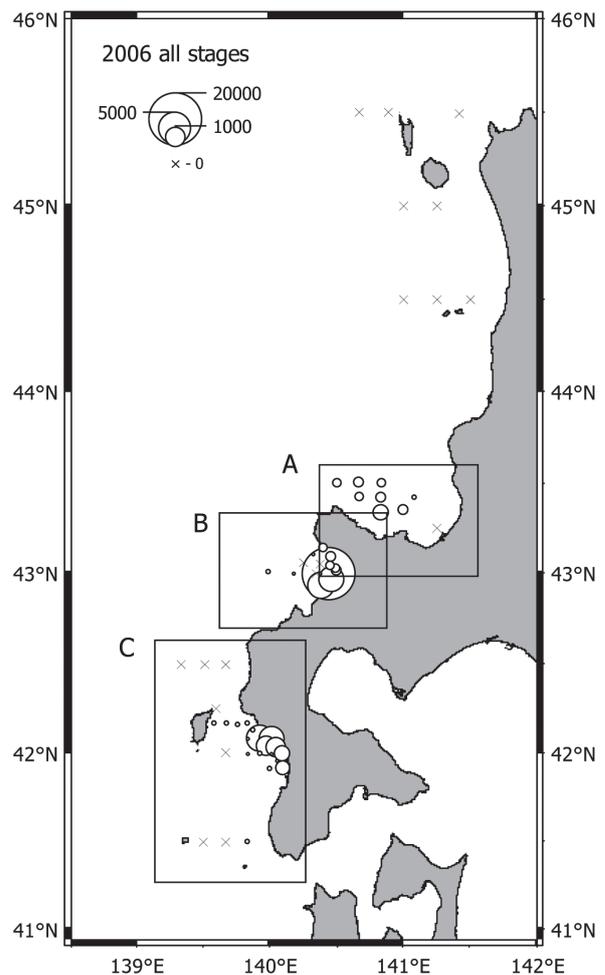


Fig. 42 Walleye pollock egg distribution in February 2006 (numbers/m²). Crosses show stations where no eggs were captured. Survey subsections based on fishing grounds were labeled with alphabets.

あり、Stage 1の卵は岩内湾や松山海域で見られ、Stage 4はほとんど採集されなかった。しかし、石狩湾でStage 1の卵が1地点で2個/m²採集されたこと、松山海域でStage 1の比率が少ないことなどは2006年と異なっていた。

6.3.3 2006年と2007年の水温

松山沿岸域の水温鉛直分布をFig.48に示す。これを見ると、2006年 (○) は表層で5～7℃の範囲にあり、深度200mまで水温は急激に低下するが、210～500mでは1.7～0.6℃となっており、どの深度でも7℃以上の水温は見られなかった。ところが、2007年 (●) の水温は全体的に2006年より高く、特に5～70m層の水温は9℃以上となっていた (Fig.48)。また、2007年は表面水温が7～9℃であっても、深度5mでは全点で9℃以上となっており、表面と表層70mでは最大1.5℃の水温差が見られた。

表面水温と深度50m層水温の水平分布を見ると (Fig.

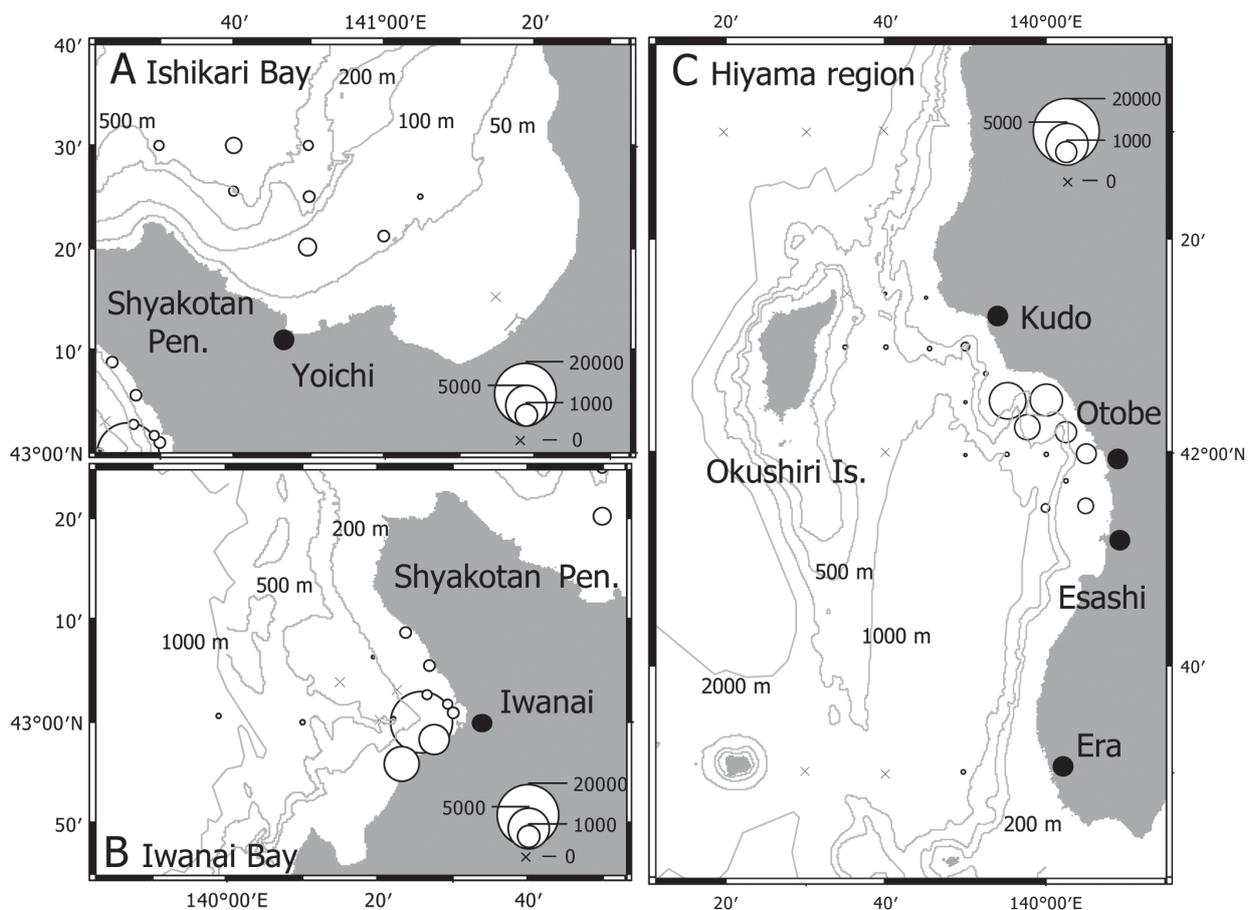


Fig. 43 Walleye pollock egg distributions in survey subsections off western Hokkaido.

49), 2006年はスケトウダラ卵が採集された石狩湾から桧山海域にかけては両深度とも4~7℃の範囲にあった。また、利尻・礼文島の東側で表面水温0~1℃の低水温域が見られたが、深度50mでは3~4℃となっていた。

一方、2007年は桧山海域を除いて表面と深度50m層はほぼ同じ水温分布を示し7℃等温線は積丹半島の北側まで達していた。ところが、桧山海域では9℃等温線の位置は表面と深度50m層で異なり、深度50m層では北緯42°以北に位置していた。

6.4 考察

本研究の結果、宗谷・留萌海域からは2006, 2007年ともにスケトウダラの卵は全く採集されず、岩内湾と桧山海域(乙部沖)でStage 1の卵が高密度で見られたが、石狩湾では非常に少なかった。このことから、近年の北海道日本海沿岸での主要なスケトウダラ産卵場は岩内湾と乙部沖にあり、宗谷・留萌海域では産卵場は形成されておらず、形成されていたとしても相当小規模であったと考えられる(Fig.50)。

スケトウダラ産卵群を漁獲対象とする沿岸漁業の2005年度(2005年4月から2006年3月)の漁獲量を見ると、宗谷・留萌海域では138 t, 石狩湾でも612 t, 岩内湾で1,392 t, 桧山海域では5,273 tとなっており(本間ほか, 2007), 石狩湾以北で少ないことが分かる。また、1996~1998年10月に北海道西岸日本海全域を対象にしたスケトウダラ産卵群の音響調査の結果でも、積丹半島以北で少なく(第3章), 積丹半島以南の沿岸寄りに多く分布することが報告されている(三宅ほか, 2001)。これらの産卵群の分布情報は、本章の結果と一致する。

産卵場に関する既往の報告を見ると、1979, 1980年2~3月には、積丹半島以北から利尻・礼文島周辺海域に至る広い海域で、少数ながらStage 1の卵を含むスケトウダラ卵が採集されている(佐野, 1980, 1984)。さらに、1955, 1956年には石狩湾でスケトウダラ卵の分布が報告されている(金丸ほか, 1979)。これらの卵分布情報に加えて、1959~1968年冬期には、雄冬岬沖で産卵中の親魚が漁獲されていた(田中, 1970)。このことから、1970年代以前には宗谷・留萌海域にも産卵場が形成されていたと考えられる。したがって、1980年代以降に産卵

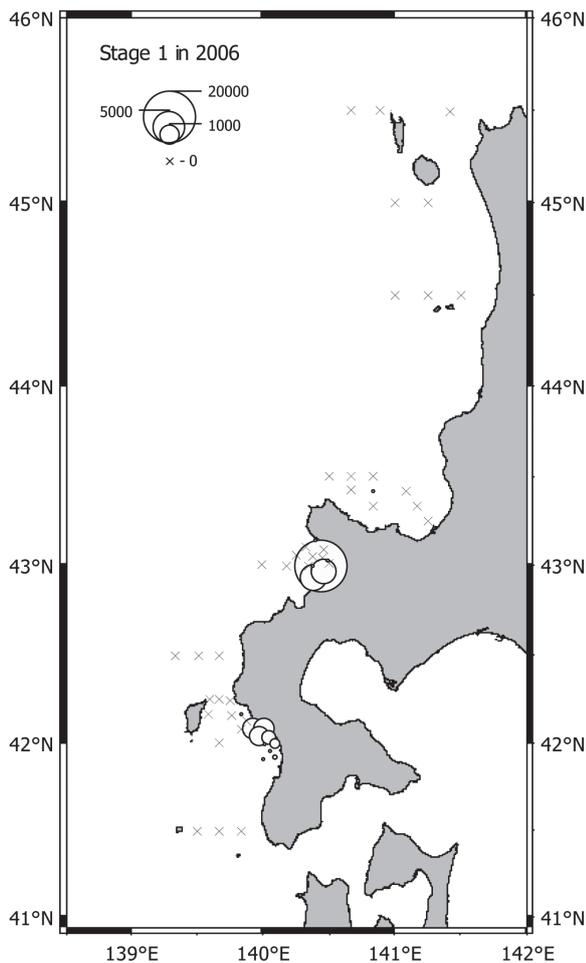


Fig. 44 Distribution of Stage 1 eggs of walleye pollock in February 2006 (numbers/m³).

場形成場所に変化が起っていたと推定される。

次に、卵の輸送について考察する。Stage 1 の卵は石狩湾、岩内湾、桧山海域で確認され、特に岩内湾と桧山海域の海底深度200m付近で多く見られた。これらの地点は既往の知見（八木・武藤，1993；夏目，1998）ともほぼ一致することから、実際の主たる産卵場所を示すと考えられる。さらに、ステージ組成比率から桧山海域乙部沖の産卵場から南北方向へ輸送されている様子が認められ、Stage 4 になると前述の産卵場付近ではほとんど採集されず、その南北に位置する周辺海域に分布していた（Fig. 45, 47）。このことは、従来の北へ流される説（前田ほか，1988）を裏付けるとともに、乙部沖で投入された漂流GPSブイ9個の内2個が南下して、津軽海峡を抜けて太平洋へ流出した結果と照らし合わせ（中多ほか，2006）、南方へ輸送される卵の存在を示すと考えられる。

岩内湾においては、Stage 1 の比率が高い地点で Stage 4 の比率が小さかった。このことから、発育の進んだ卵は岩内湾から流出している可能性が考えられる。ただし、

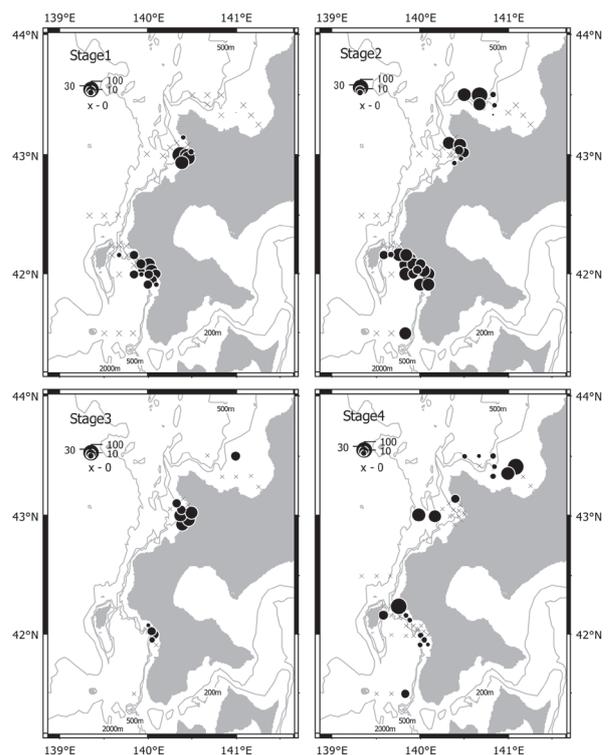


Fig. 45 Percentage of each egg development stage at each station in February 2006.

岩内湾の沖合で採集された卵は、前出の漂流ブイの結果や北上する対馬暖流の流れから判断して岩内起源ではなく桧山起源と考えるのが妥当であろう。

一方、石狩湾ではStage 1 の卵が少なく、発育の進んだ卵の比率が高かった。遊佐（1954）によると、水温6～7℃の場合、受精後9日12時間でStage 4 となる。また、前出の漂流ブイ調査で北上した漂流ブイの桧山海域から積丹半島西方沖までの所用時間は2週間であることから（中多ほか，2006）、石狩湾で採集された卵には、石狩湾内で産卵されたものよりも対馬暖流によって桧山海域や岩内湾から輸送されてきたものが多かったと推定できる。

このように、北部日本海系群の産卵場は岩内湾、桧山海域に形成され、産出された卵は一部南下するものを除き、大部分は北上し、石狩湾周辺海域に輸送されると推定される。その後の浮遊仔稚魚は、北海道沿岸日本海では石狩湾以北の海域のみで採集されている（板谷ほか，2008）。また、宗谷・留萌海域から武蔵堆海域に至る大陸棚と陸棚斜面で未成魚が多量に採集されていることから（本間ほか，2008）、この海域がスケトウダラ北部日本海系群の成育場であると考えられる。この点については、既往の知見と一致する（佐々木・夏目，1990；夏目・佐々木，1995）。

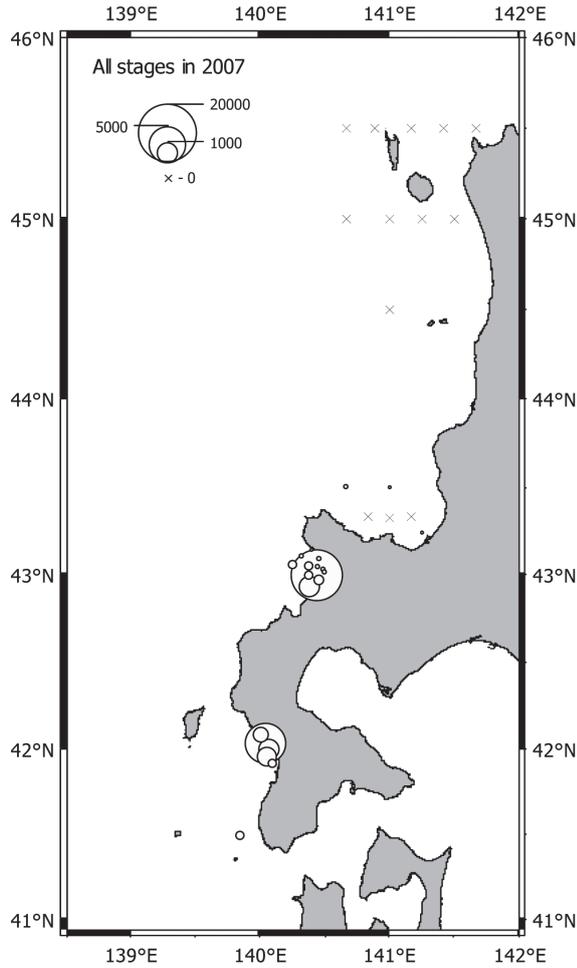


Fig. 46 Walleye pollock egg distribution in February 2007 (numbers/m²). Crosses show stations where no eggs were captured.

つまり、近年においても成育場の形成場所は変化していないが、産卵場が南偏することで、1980年代以前に比べて産卵場と成育場の距離が離れてしまったと考えることができる。産卵場形成場所と成育場の関係が生残率に重大な影響を与えることはアラスカ湾 (Hinckley *et al.*, 1991) や道東太平洋系群 (Hamatsu *et al.*, 2004) でも報告されている。その原因としては輸送の問題が上げられているが、本海域ではそれに加えて、卵発生期の高水温の影響を考慮する必要がある。

例えば、2007年は桜山海域から積丹半島に至る卵の輸送経路での水温が7℃以上、桜山海域に限ると9℃となっていたことから、卵のふ化率が低下し、石狩湾での卵分布密度が少なくなった可能性がある。Funamoto (2007) は、北部日本海系群の加入量が2月の石狩湾の表面水温と強い負の相関関係を持つことを報告しており、本研究の結果は、その因果関係の具体例を示すことができたと考える。また、桜山海域では表面水温と表層

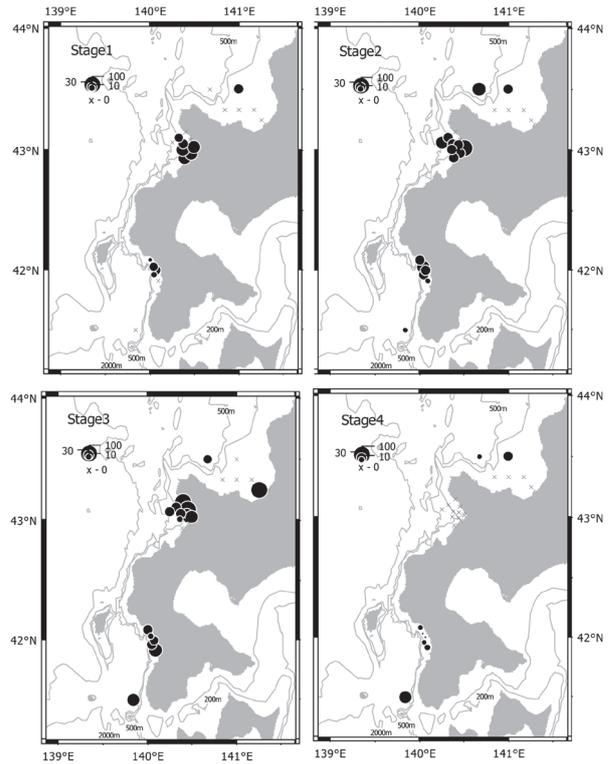


Fig. 47 Percentage of each egg development stage at each station in February 2007.

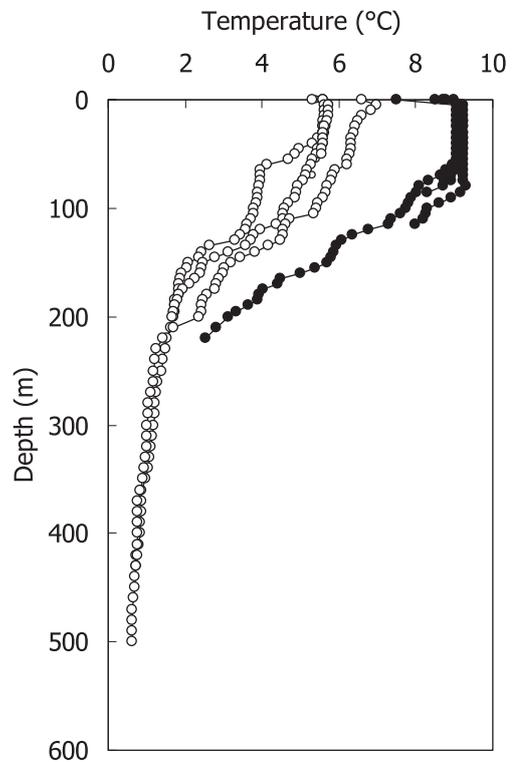


Fig. 48 Vertical temperature profiles at coastal stations off Otohe in Hiyama region in February 2006 and 2007. Open circles indicate temperature from 2006, and closed circles indicate temperature from 2007.

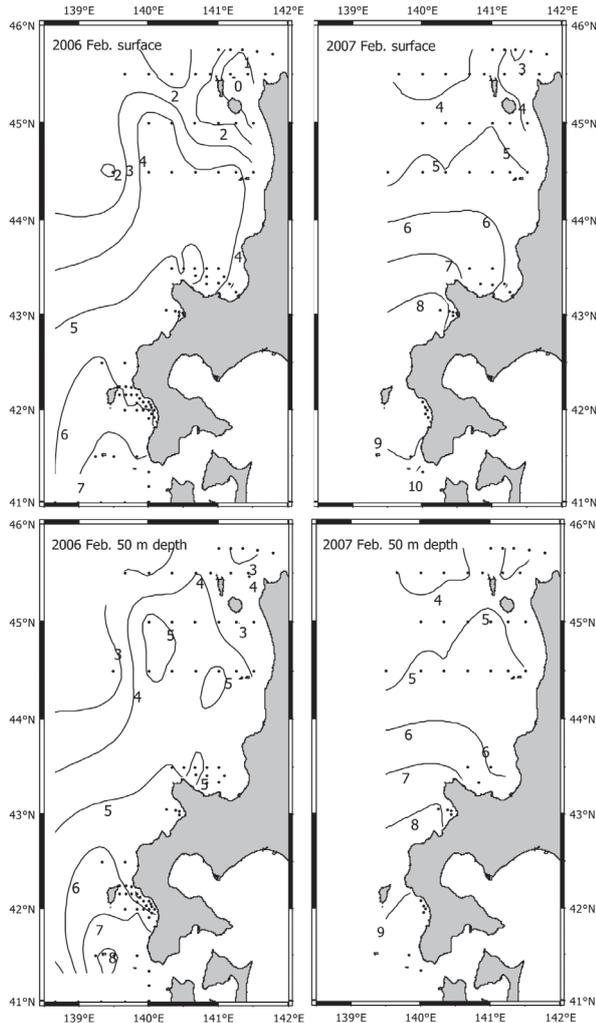


Fig. 49 Horizontal temperature profile of surface (upper) and 50 m depth (lower) in February 2006 and 2007 off the western Hokkaido. Dots show the locations of CTD casts. Numerals on contour lines show water temperature in degree Celsius.

水温には最大1.5°Cの差があることが、Funamoto (2007)の報告で桧山海域での相関係数が小さくなっていた原因かも知れない。

本研究の結果、近年は産卵場が主に積丹半島以南の岩内湾と桧山海域に形成されていることが明らかとなり、これは既往の知見と異なることから1980年以降に形成場所の変化が起こったと考えられた。このことにより、成育場との距離が離れるとともに、卵期に高水温に遭遇する確率が大きくなり、卵の生残率が低下したと推察した (Fig.50)。

第7章 総合考察

7.1 音響で推定された現存量の信頼性

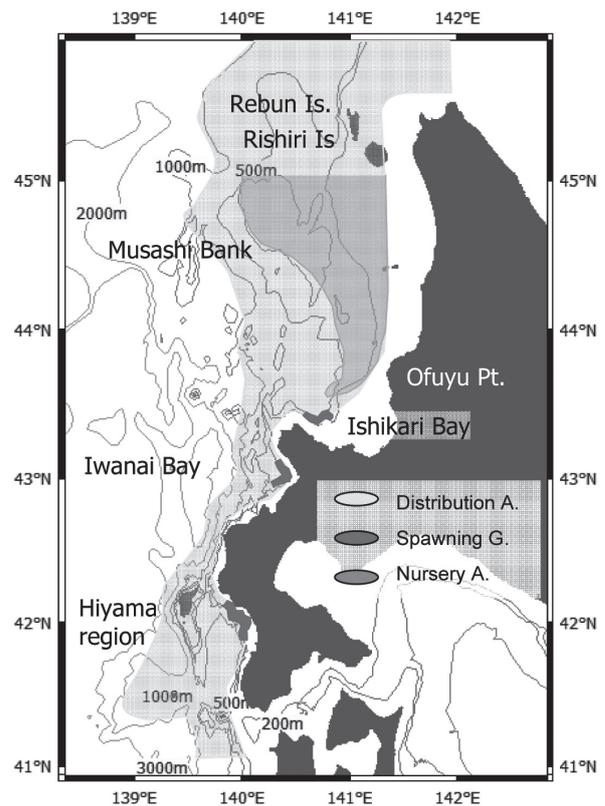


Fig. 50 Walleye pollock distributions, spawning grounds, and nursery ground in the Sea of Japan, in recent years. General distribution extent was shown as gray shaded area. Spawning grounds are indicated as black shaded areas. A nursery ground is filled with deep gray.

第2章では、標準球較正不良で1998年の現存量推定値が過大評価されていたことを示した。また、音響データに泡切れなどのノイズが含まれていても、ノイズ除去処理することでそれらのノイズを取り除き、スケトウダラの反応を実用的なレベルで抽出できることを示した。較正不良やノイズは系統誤差であるから、後処理で補正することが可能である。しかし、統計的な処理ではその正確度を評価することはできないため、標準球較正の場合にはTSgainの経年変化などが良い判断基準となる。

ノイズを除去する場合でも、可能な限りノイズの少ないデータを小区間でも取っておき、それを基準としてノイズ除去処理を適用することで、正確度の低下を避けられる。

しかし、第3章で現存量を推定した際に、調査範囲が狭くなった2002年の推定値は、前後の年の6割程度しかなく相当な過小評価と判断される。したがって、三大誤差要因である雑音、気泡、揺れの影響を低減させることは重要であるが、音響資源調査においては対象魚群の分布範囲を空間的に網羅することが最も重要である。

また、第3章では音響資源調査によって現存量を推定した。その推定値はVPA結果と絶対値が0.9~1.5倍の範囲にあり、平均は1.3倍、また変化の傾向も相関係数 $r=0.886$ と高い有意な正の相関関係が確認できた。なお、変動係数が80%となった原因として、音響調査ではVPAでは捉えきれない資源変動を捉えている可能性を指摘した。VPAは年齢別漁獲尾数から資源尾数を推定する方法であるが、ABC（生物学的漁獲許容量）を求めるには資源重量に変換しなければならない。この時、どのような平均体重を用いるかで、得られる資源重量推定値は変化する。特に、スケトウダラのように広範囲に分布し、様々な漁業で利用される資源では、どのような平均体重を用いるかが重要である。いずれにしても、VPA資源量推定値の系統誤差を評価する音響資源調査のような手段が別に必要である。

本研究の結果は、VPAにより推定されたスケトウダラ北部日本海系群の資源量が絶対量として信頼できることを支持するもので、すなわち加入量をSSB（産卵親魚重量）で除した値であるRPSも再生産成功指数として十分な信頼性を持つと結論できる。また、原理的に誤差の大きい最近年のVPA推定値を補正するために、VPAのチューニングにも利用することも検討したい。

VPAも音響資源調査も、それぞれ単独では系統誤差である正確度（偏り）の評価はできないが、全く別の2つの手法を比較することにより評価可能である。特に、最低水準の資源状態にあるスケトウダラ北部日本海系群の場合、最近年のVPAによる資源評価の検証として、今後も資源音響調査を継続する必要がある。

7.2 産卵場形成の条件

音響調査で得られたスケトウダラの分布情報とCTDで観測された水温を分析し、産卵回遊期のスケトウダラ分布の好適な水温が $0.5\sim 0.8^{\circ}\text{C}$ で、分布の中心はほぼ 0.7°C であることを明らかにした。さらに、表層水温の変化に応じて分布深度が変化することも明らかになった。その水温情報に基づき、1986年以降の400m深水温水平分布を見ると、1990年頃から水温が上昇して 0.7 以上の範囲が広がっていることが判明した。これらの結果から、1990年代に入りスケトウダラの産卵場は海底深度の浅い雄冬岬沖などの北部海域では衰退し、500mより深い南部海域が残ったと推定した。音響資源調査を開始したのは1996年であることから、既に北部海域には高水温が広がりつつあったことになる。

次に、55年間におよぶ長期的な標準化水温とスケトウダラ漁獲量の関係を分析すると、後志では負の相関関係を示したが、桧山では正の相関関係が認められた。これ

は、これまでの推論を裏づけるものであり、高水温によってスケトウダラ産卵場が南偏したことを示している。そこで、実際に産卵場の有無を確認するため、2006、2007年2月に北海道西岸日本海沿岸域にて、卵分布調査をおこなったが、雄冬岬以北ではまったく卵は採集されず、近年は岩内湾と桧山海域が主たる産卵場であることが確認された。

これまで、スケトウダラ産卵場が南偏する理由が明らかでなかったが（辻，1975）、高水温によってスケトウダラの産卵回遊時の分布深度が深くなり、雄冬沖や石狩湾など、以前には産卵場が形成されていた場所に移動できなくなった、もしくはそれらの場所の深い深度の海底地形は産卵場に適さなかったためであり、産卵回遊期にあたる秋期の水温構造が産卵場形成の障害となっていたと考えられる。さらに、実際に産卵盛期である2月（前田ほか，1988；夏目，1998）の表層水温とスケトウダラ卵の分布から、表層水温がふ化率の低下を招いていると考えた。

一方、4月に北海道西岸石狩湾以北の大陸棚上に集積した仔稚魚は（板谷ほか，2008）、その後同海域で着底生活に移行し、第3章で示したトロール調査結果からも、雄冬岬沖から武蔵堆に至る海域で成育すると推定される。成育場の場所については過去の知見から変化はない（佐々木・夏目，1990；夏目・佐々木，1995）。

アラスカ湾でも、産卵場から成育場への輸送の重要性が指摘されており（Hinckley *et al.*, 1991；2001）、太平洋においても環境変化で産卵場の寄与率が変化する（Hamatsu *et al.*, 2004）。これらのように、日本海においても産卵場と成育場が離れることにより、先に述べた高水温と遭遇する可能性も高くなることから、結果として輸送が失敗する可能性が増大し、それが低いRPSの要因と考えられた。

以上のことから、スケトウダラ北部日本海系群について以下の概念モデルを提案する。「現在、産卵回遊期（10月）の高水温によって石狩湾以北の産卵場が衰退し、低いRPSのレジームに入っている。そのレジームの中でのRPSの高低は、産卵期（2月）の水温と卵仔魚の輸送が関与する。表層水温が高温（ $7\sim 8^{\circ}\text{C}$ 以上）になるとふ化率が低下し、卵仔魚が北部沿岸域に輸送されない場合も生残率は低下する。生残が成功するためには高いふ化率を確保しつつ、卵仔魚が石狩湾以北に広がる成育場に輸送されなければならない。」つまり、卵仔魚の生残にとっては北部海域ほど適した水温環境にあるが、産卵場が南部海域に形成されていることが、現在の低いRPSレジームの原因と考えられる（Fig.51）。この海域の水温と輸送は対馬暖流の影響が大きく、結果的に2年連続し

て対馬暖流の勢力が弱い年には、高豊度な年級が生まれる可能性が高いと判断される。

ベーリング海、アラスカ湾 (Bailey *et al.*, 2005) および道東太平洋 (Shida *et al.*, 2007) では、日本海とは逆に低水温が制限要因となっている。また、トップダウンコントロールの重要性も指摘されているが、SSTと産卵親魚量で加入量がほぼ説明可能であり (Funamoto, 2007)、北部日本海系群では捕食者や仔魚期の餌が制限要因になっている可能性は小さい。また、この海域では共食いも認められていない (小岡, 1999)。

本研究では、先行研究で指摘されてきた水温と漁獲量や加入量の関係を、具体的にどのようにして水温がスケトウダラに作用しているのかを明らかにし、産卵場形成と卵の生残に関していくつかの知見が得られた。

こうした環境の変化が、産卵から加入に至る過程に与える影響をより深く理解するためには、今後産卵場から成育場までの卵仔魚の輸送、および仔稚魚期から加入 (2歳) までの生残を明らかにする必要がある。さらに、産卵親魚の栄養状態や餌環境の歴史的解析もスケトウダラ北部日本海系群の産卵回遊期の生態を理解する上で重要であろう。特に、第4章のスケトウダラ分布深度と表層

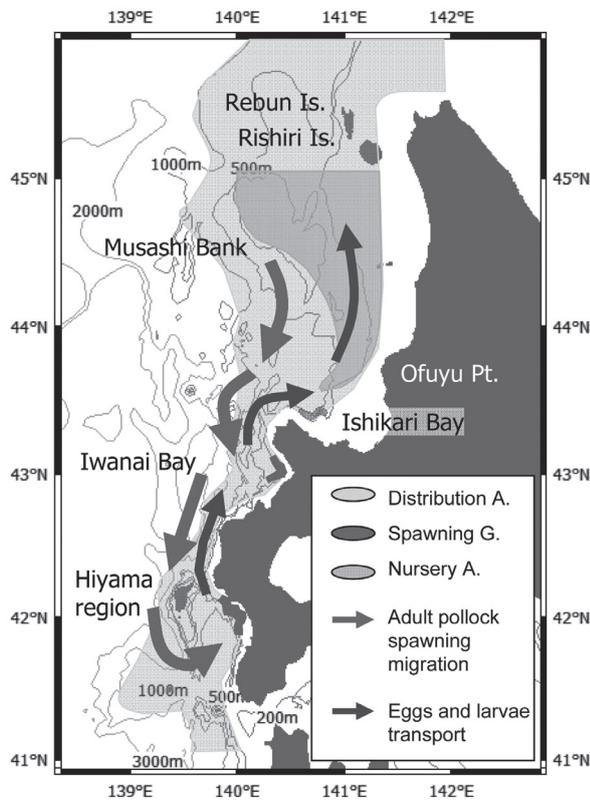


Fig. 51 Conceptual model of Hokkaido Sea of Japan walleye pollock distribution in three life stages, the migration routes, and transport vectors in recent years.

水温との関係で飛び値であった2005年は注目される。この年の親魚が生み出した2006年級群の豊度が高いことは、板谷ほか (2008) により明らかになっており、水温だけでは説明できない生物的な環境要因がスケトウダラの分布深度に表れていた可能性がある。

こうした調査・研究を通じて、RPS水準の現状を早期に検知し、速やかに漁獲圧を変更することが乱獲を回避する理想的な対応であり (星野, 2007)、現在、我々の目指しうるより高度な資源管理と言えらるだろう。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、北海道大学大学院水産科学研究院の飯田浩二教授、向井徹准教授には研究の当初からご指導を頂き、さらに主査・副査として論文のご校閲を頂いた。高橋豊美教授および桜井泰憲教授には副査として論文のご校閲を頂いた。また、北海道大学北方生物圏フィールド科学センターの宮下和士准教授には多くのご貴重なご助言を頂いた。同センターの東条斉興氏には英文のご校閲を頂いた。北海道立中央水産試験場の鳥澤雅博士、板谷和彦博士、同函館水産試験場の本間隆之氏、渡野邊雅道氏、同栽培水産試験場の志田修氏、北海道原子力環境センターの武藤卓志氏、北海道立稚内水産試験場の高柳志朗氏、和田昭彦氏、同釧路水産試験場の石田良太郎氏、並びに同網走水産試験場の田中伸幸氏には多くのご助言、ご協力を頂いた。心よりお礼申し上げます。

調査の実施にあたっては、北海道立稚内水産試験場所属試験調査船北洋丸、同中央水産試験場所属試験調査船おやしお丸、同函館水産試験場所属金星丸の船長ならびに乗組員の皆様には多大なご協力を頂いた。3船の協力がなければ、産卵回遊期で移動中のスケトウダラ分布を広範囲に押さえながら、かつ短期間に調査することは不可能であった。

なお、本研究は北海道の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予測基礎調査、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、地域性底魚類の資源・生態調査研究、漁業生物の資源・生態調査研究ならびに我が国周辺海域漁業資源調査によって得られたデータを使用した。

参考文献

- 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. 日水誌 1999 ; 65(2) : 252-259.
- 青山千春, 濱田悦之, 古澤昌彦. 海底反射を利用した計量魚群探知機の総合的検証. 日水誌 1999 ; 65(1) :

- 78-85.
- 浅野謙治. まえがき. 「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 ; 3.
- バックラ R, 前田辰昭, マクファーレン G.. 北太平洋におけるスケトウダラ (*Theragra chalcogramma*) の分布および資源構造. 北太平洋漁業国際委員会研究報告 1990 ; 45 : 3-13.
- Bailey KM. Shifting control of recruitment of walleye pollock *Theragra chalcogramma* after a major climatic and ecosystem change. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2000 ; 198 : 215-224.
- Bailey KM, Ciannelli L, Bond NA, Belgrano A, Stenseth NC. Recruitment of walleye pollock in a physically and biologically complex ecosystem: A new perspective. *Progress in Oceanography* 2005 ; 67 : 24-42.
- Canino MF, O'Reilly PT, Hauser L, Bentzen P. Genetic differentiation in walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) in response to selection at the pantophysin (PanI) locus. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 2005 ; 62(11) : 2519-2529.
- Foote KG. Maintaining precision calibrations with optimal copper spheres. *J. Acoust. Soc. Am.* 1983 ; 73(3) : 1054-1063.
- 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(1) : 9-17.
- 藤野忠敬. 音響的手法を用いたキュウリエソ資源の定量的モニタリングに関する研究. 博士論文, 北海道大学大学院水産科学研究科, 札幌. 2006.
- 深滝 弘. スケトウダラ資源に及ぼす発電所取放水影響の予測. 海洋生物環境研究所研究報告 1983 ; 83101 : 1-54.
- Funamoto T. Temperature-dependent stock-recruitment model for walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) around northern Japan. *Fish. Oceanogr.* 2007 ; 16(6) : 515-525.
- Hamai I, Kyushin K, Kinoshita T. Effect of temperature on the body form and mortality in the developmental and early larval stages of the alaska pollack, *Theragra chalcogramma* (PALLAS). *Bull. Fac. Fish. Hokkaido Univ.* 1971 ; 22(1) : 11-29.
- Hamatsu T, Yabuki K, Watanabe K. Decadal changes in reproduction of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) off the Pacific coast of northern Japan. *Fish. Oceanogr.* 2004 ; 13(1) : 74-83.
- 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.
- 針生 勤. タラ科魚類5種の仔稚魚の発育過程 (総説). 北水試研報. 1993 ; 42 : 23-26.
- Hinckley S, Bailey KM, Picquelle SJ, Schumacher JD, Stabeno PJ. Transport, distribution, and abundance of larval and juvenile walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) in the Western Gulf of Alaska. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1991 ; 48 : 91-98.
- Hinckley S, Hermann AJ, Mier KL, Megrey BA. Importance of spawning location and timing to successful transport to nursery areas: a simulation study of Gulf of Alaska walleye pollock. *ICES J. Mar. Sci.* 2001 ; 58(5) : 1042-1052.
- 平松一彦. VPA (Virtual Population Analysis). 「平成12年度資源評価体制確立推進事業報告書—資源解析手法教科書—」 日本水産資源保護協会. 東京. 2001 : 104-128.
- 北海道: 泊発電所周辺温排水影響調査結果報告書 (平成17年度第4四半期). 北海道, 札幌. 2006 ; 172-179.
- 北海道: 泊発電所周辺温排水影響調査結果報告書 (平成18年度第4四半期). 北海道, 札幌. 2007 ; 159-166.
- 北海道立水産試験場(1957)ニシン地域漁業振興対策調査. 昭和32年 (1957) 事業成績書 : 28-29.
- 北海道立中央水産試験場資源管理部: スケトウダラ 日本海海域 (北部日本海系群). 北海道水産資源管理マニュアル2006年度 (北海道水産林務部水産局漁業管理課編). 北海道, 札幌. 2007.
- 星野 昇. 資源評価のキーワード・RPSって何?. 北水試だより 2007 ; 75 : 18-21.
- 本田 聡. 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.
- 本田 聡, 八吹圭三. 平成19年スケトウダラ日本海北部系群の資源評価. 我が国周辺水域の漁業資源評価. 水産庁増殖推進部ほか, 東京. 2008 ; 266-317.
- 本間隆之, 三宅博哉, 板谷和彦. スケトウダラ. 平成17年度北海道立中央水産試験場事業報告書. 北海道立中央水産試験場, 余市. 2007 ; 6-19.
- 本間隆之, 三宅博哉, 板谷和彦. スケトウダラ. 平成18年度北海道立中央水産試験場事業報告書. 北海道立中央水産試験場, 余市. 2008 ; 6-19.

- Hunt GL Jr, McKinnell S. Interplay between top-down, bottom-up, and wasp-waist control in marine ecosystems. *Progress in Oceanography* 2006 ; 68 : 115-124.
- 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.
- 飯田浩二, 向井 徹, 三宅博哉, 三原行雄, 本間隆之, 高柳志朗. 較正球を用いた船底装備計量魚探機のキャリブレーションについて. *日本水産学会北海道支部例会講演要旨集*. 日本水産学会 1997.
- 飯田浩二, 向井 徹, 森 英樹. 音響散乱層の体積後方散乱強度の周波数特性と構成種のターゲットストレングスに関する考察. *日水誌* 1999 ; 65(1) : 66-72.
- 飯田浩二. スキャニングソナーの特徴と資源調査への応用. 「音響資源調査の新技術—計量ソナー研究の現状と展望 (飯田浩二, 古澤昌彦, 稲田博史編)」 恒星社厚生閣, 東京. 2007 : 9-21.
- 石田昭夫. 北海道西岸のスケトウダラ資源についての二, 三の知見. *北水試月報* 1963 ; 20(11) : 7-9.
- 石垣富夫. 産卵後のスケトウダラは何処へ (予報). *北水試月報* 1960 ; 17(9) : 351-363.
- 磯田 豊, 中山智治, 村上 敬, 金 相祐, 大谷清隆. 津軽海峡南西海域における対馬暖流の係留観測. *海の研究* 1998 ; 7(4) : 237. 244.
- 板谷和彦, 三宅博哉, 本間隆之. スケトウダラ春期仔稚魚分布調査. 平成 18 年度北海道立中央水産試験場事業報告書, 北海道立中央水産試験場, 余市. 2008 : 94-95.
- Johannesson KA, Mitson RB. 訳 : 柴田恵司, 見元孝一. 水産音響学 —水族資源量推定の理論と実際—. *FAO Fish. Tech. Paper No. 240*. Rome, FAO, 1983.
- 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.
- 金丸信一, 北野 裕, 吉田久春. カムチャッカ半島周辺海域のスケトウダラ (*Theragra chalcogramma*) の卵・稚魚の分布について. *北水研報告* 1979 ; 44 : 1-23.
- 金丸信一. スケトウダラの東北海区群と北海道近海群の関係. *漁業資源研究会議 北日本底魚部会報* 1989 ; 22 : 39-54.
- 川崎 健. 総論 レジーム・シフト —地球システム管理の新しい視点—. 「レジーム・シフト—気候変動と生物資源管理— (川崎 健, 花輪公雄, 谷口 旭, 二平 章編著)」 成山堂書店, 東京. 2008 ; 1-9.
- 気象庁. 海水温・海流の知識. 気象庁ホームページ. 2008.
(<http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/db/kaikyo/knowledge/index.html>)
- 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の食性. *日水誌* 1997 ; 63(4) : 537-541.
- Kooka K, Takatsu T, Kamei Y, Nakatani T, Takahashi T. Vertical distribution and prey of walleye pollock in the northern Japan Sea. *Fish. Sci.* 1998 ; 64(5) : 686-693.
- 小岡孝治. 北部日本海中層に生息するスケトウダラ成魚の成長停滞とその要因に関する研究. 博士論文, 北海道大学大学院水産科学研究科, 函館. 1999.
- Kooka K, Wada A, Ishida R, Mutoh T, Abe K, Miyake H. Summer and winter feeding habits of adult walleye pollock in the offshore waters of western Hokkaido, northern Japan Sea (Short Paper). *Sci. Rep. Hokkaido Fish. Exp. Stn.* 2001 ; 60 : 25-27.
- Macpherson E, Duarte CM. Bathymetric trends in demersal fish size: Is there a general relationship?. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1991 ; 71(2) : 103-112.
- 前田辰昭, 高橋豊美, 伊地知誠, 平川英人, 上野元一. 噴火湾周辺海域におけるスケトウダラの漁学的研究—II 産卵期. *日水誌* 1976 ; 42(11) : 1213-1221.
- 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.
- Maeda T, Nakatani T, Takahashi T, Takagi S. Distribution and migration of adult walleye pollock off Hiyama, southwestern Hokkaido. In: *Proceeding of the International Symposium on the Biology and Management of Walleye Pollock. Alaska Sea Grant Report 89-1*, University of Alaska, Fairbanks. 1989 ; 325-347.
- 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. 北海道西岸日本海におけるスケトウダラ漁獲量の多変量解析と系群構造. *日水誌* 1991 ; 57(11) : 1991-1995.
- 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 Tech. Rep. NMFS* 1996 ; 126 ; 3-10.
- 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. 計量魚探に現れた原因不明のノイズ. 試験研究は今 2002 ; 484.
- 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(3) : 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.
- Miyanohana Y, Ishii K, Furusawa M. Spheres to calibrate echo sounders at any frequency. *Nippon Suisan Gakkaishi* 1993 ; 59(6) : 933-942.
- 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)」恒星社厚生各閣, 東京. 2000 ; 19-27.
- 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.
- Mizuno M, Kobayashi T, Matsuishi T, Maeda K, Saitoh K. Stock structure of walleye pollock, *Theragra chalcogramma*, around Hokkaido and Sakhalin in the term of mitochondrial DNA RFLP. *Sci. Rep. Hokkaido Fish. Exp. Stn.* 2000 ; 57 : 1-8.
- 向井 徹, 飯田浩二, 佐野典達. ケージ内魚群からの魚群エコーの日変化について. 北大水産彙報 1991 ; 43(3) : 90-97.
- Mukai T, Foote KG. On the depth dependence of fish target strength. *ICES. C.M. FF:07* 1997 ; 1-15.
- 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.
- 中多章文, 澤田真由美, 田中伊織. 資源動向要因分析調査(漂流ブイ調査). 平成16年度北海道立中央水産試験場事業報告書, 北海道立中央水産試験場, 余市. 2006 ; 96-97.
- Nakatani T, Maeda T. Transport process of the Alaska pollack eggs in Funka Bay and the adjacent waters, Hokkaido. *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.* 1981 ; 47(9) : 1115-1118.
- 中谷敏邦, 前田辰昭. スケトウダラ卵の発生に対する水温の影響およびその浮上速度について. 日水誌 1984 ; 50(6) : 937-942.
- Nakatani T, Maeda T. Distribution of copepod nauplii during the early life stage of walleye pollock in Funka Bay and vicinity, Hokkaido. In: *Proceeding of the International Symposium on the Biology and Management of Walleye Pollock, Alaska Sea Grant Report 89-1*, University of Alaska, Fairbanks. 1989 ; 217-240.
- 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: 33 - 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.
- Nishimura A, Yamada J. Age and growth of larval and juvenile walleye pollock, *Theragra chalcogramma* (Pallas), as determined by otolith daily growth increments. *J. Exp. Mar. Bio. Eco.* 1984 ; 82(2-3) : 191-205.
- 西村 明. 59スケトウダラ総説. 水産庁HP平成18年度国際漁業資源の現況, 2006. (<http://kokushi.job.affrc.go.jp/H18/H18/H18%2059.htm>)
- 西谷喬助, 武田二美雄, 田中 修, 久保 正, 田元 馨. 摺身の凍結とその応用に関する研究(第1報)フィッシュ・ステック原料としてのスケトウダラ摺身の凍結貯蔵中の変化. 北水試月報 1960 ; 17(1) : 26-34.
- 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. 日水誌 2002 ; 68(6) : 866-873.
- Ohshimo S, Hamatsu T. Vertical distribution and acoustic estimation of biomass of walleye pollock *Theragra chalcogramma*, and anchovy *Engraulis japonicus* in the Pacific coast of eastern Hokkaido. *Bull. Hokkaido Natl. Fish. Res. Inst.* 1996 ; 60 : 225-237.
- Pope JG. An investigation of the accuracy of Virtual Population Analysis. International Commission for the Northwest Atlantic, *Fish. Res. Bull.* 1972 ; 9 : 65-74.
- Robertis AD, Higginbottom I. A post-processing technique to estimate the signal-to-noise ratio and remove echosounder background noise. *ICES J. Mar. Sci.* 2007 ; 64(6) : 1282-1291.
- Sadayasu K, Mukai T, Iida K. Comparing acoustic model estimations and in situ target strength measurements of juvenile walleye pollock (*Theragra chalcogramma*). *J. Acoust. Soc. Am.* 2006 ; 120(5) : 3060-3061.
- 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.
- 桜井泰憲, 岸 道郎. 地球規模海洋生態系変動研究 (GLOBEC) - 海洋生態系の総合診断と将来予測 - . 月刊海洋 2005 ; 37(8) : 539-544.
- 佐野満広. 利尻, 礼文島周辺水域におけるスケトウダラ卵稚仔の分布について. 昭和54年度 漁業資源研究会議 北日本底魚部会報 1980 ; 39-56.
- 佐野満広. 宗谷海峡周辺におけるスケトウダラおよびホッケの再生産. 沿岸海洋研究ノート 1984 ; 22(1) : 40-49.
- 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. 日水誌 1990 ; 56(7) : 1063-1068.
- 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. 北水試研報 1999 ; 54 : 1-7.
- 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. 北水試研報 2001 ; 59 : 1-10.
- 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.
- 志田 修, 三宅博哉, 金田友紀, 石田良太郎, 宮下和士. 計量魚群探知機で観察した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* の分布. 日水誌 2008 ; 74(2) : 152-160.
- Simrad Subsea A/S: *Simrad EK500 Scientific Echo Sounder Operator Manual P2170E. Aodrqew Version 4.01*, Simrad Subsea A/S, Horten. 1993, 202p.
- 高倉輝男. 魚群探知機によるスケトウダラ産卵群の生態について. 日水誌 1954 ; 20(1) : 10-12.
- 高尾芳三. スケトウダラ音響資源調査. 月刊海洋, 1994 ; 26 : 660-665.
- 田中伊織. 北海道西岸における20世紀の沿岸水温およびニシン漁獲量の変遷. 北水試研報 2002 ; 62 : 41-55.
- 田中昌一. 水産生物の population dynamics と漁業資源管理. 東海水研報 1960 ; 28 : 1-200.
- 田中茂信. 日本海がもたらすもの, けんせつ ほくりく 1996 ; 12 (<http://www2.hokurikutei.or.jp/backnum/96dec/Tokusyu/TPart1/TPart1.html>)
- 田中富重. 北部日本海海域におけるスケトウダラの漁業生物学的研究 1 集団行動と構造についての一考察. 北水試研報 1970 ; 12 : 1-11.
- 田中富重, 及川久一. 昭和45年度 岩内漁場のスケトウダラ調査について 産卵群の分布様式. 北水試月報 1971 ; 28(6) : 2-8.
- 谷野保夫. クイックアセスメント実測調査に参加して. 東北水研ニュース 1981 ; 22.
- Traynor JJ, Nelson MO. Results of the U.S. hydroacoustic survey of pollock on the continental shelf and slope. In: R.G. Bakkala and K. Wakabayashi (eds.), Results of cooperative U.S.-Japan groundfish investigations in the Bering Sea during May-August 1979. *INPFC Bull.* 1985 ; 44 : 192-199.
- 辻 敏. 松山支庁沿岸のスケトウダラ調査. 北水試月報 1975 ; 32(9) : 1-20.
- 辻 敏. 北海道周辺のスケトウダラの系統群について. 北水試月報 1978 ; 35(9) : 1-57.
- Tsuji S. Alaska pollack population, *Theragra chalcogramma*, of Japan and its adjacent waters, I: Japanese fisheries and population studies. *Mar. behav. physiol.* 1989 ; 15(3) : 147-205.
- Tsuji S. Alaska pollack population, *Theragra chalcogramma*, of Japan and its adjacent waters, II: Reproductive ecology and problems in population studies. *Mar. behav. physiol.* 1990 ; 16(2) : 61-107.
- 八木宏樹, 武藤卓志. 1990-91~91-92年の岩内湾におけるスケトウダラ *Theragra chalcogramma* (Pallas) 卵稚仔の分布動向と最近の特徴. 北水試研報 1993 ; 42 : 91-100.
- Yamaguchi H, Matsuishi T. Effects of sampling errors on abundance estimates from virtual population analysis for walleye pollock in northern waters of Sea of Japan. *Fish. Sci.* 2007 ; 73(5) : 1070-1077.
- 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. *Fish. Sci.* 2008 ; 74(5) : 955-969.
- Yasunaka S, Hanakawa K. Regime shifts found in the northern hemisphere SST field. *J. Meteor. Soc. Jap.* 2002 ; 80(1) : 119-135.
- 吉田英雄, 桜井泰憲. 飼育下におけるスケトウダラ成魚の摂餌量と成長. 日水誌 1984 ; 50(5) : 763-769.
- Yoshida H. Food and feeding habits of pelagic walleye pollock in the central Bering Sea in summer, 1976-1980. *Sci. Rep. Hokkaido Fish. Exp. Sta.* 1994 ; 45 : 1-35.
- 遊佐多津雄. スケトウダラ *Theragra chalcogramma* (Pallas) "Alaska Pollack" の正常発生に就いて. 北水研報告 1954 ; 10 : 1-22