



Title	北海道西岸沖のホタテ貝種苗生産を支える産卵及び浮遊幼生の輸送過程
Author(s)	磯貝, 安洋; Isogai, Yasuhiro; 磯田, 豊 他
Citation	北海道大学水産科学研究彙報, 60(2/3), 23-37
Issue Date	2010-12
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/44758
Type	departmental bulletin paper
File Information	23-27.pdf



北海道西岸沖のホタテ貝種苗生産を支える産卵及び浮遊幼生の輸送過程

磯貝 安洋¹⁾・磯田 豊¹⁾・下野 学²⁾・小林 直人³⁾・工藤 勲⁴⁾・干場 康博⁴⁾

(2010年1月25日受付, 2010年2月23日受理)

Spawning and Transport Process of Scallop Larvae Maintaining Seedling Production of Scallop off the West Coast of Hokkaido

Yasuhiro ISOGAI¹⁾, Yutaka ISODA¹⁾, Manabu SHIMONO²⁾, Naoto KOBAYASHI³⁾,
Isao KUDO⁴⁾ and Yasuhiro HOSHIBA⁴⁾

Abstract

Shelf area off the west coast of Hokkaido (Ishikari bay, Rumoi shelf and Teshio shelf) is one of the major seedling productions of scallop. However, since there have been no surveys of wild scallop, natural spawning ground maintaining the seedling production has not been resolved still now. To improve our understanding of immature scallop, a large number of larvae collected in the seedling production area were numerically backtracked to take into account the advection, which was roughly inferred from the analysis for mooring current, ADCP, GEK and hydrographic data. Northward flow mainly affected by the Tsushima Warm Current and estuarine flow from Ishikari River is characterized by intense shelf-edge flow and weak flow with a large periodical variation on the shelf. The model result suggested, at least, two major spawning grounds. One is somewhere about southern area outside of the shelf (south of Syakotan peninsula), and another is the southern end of Rumoi shelf where there may be spawning from scallop of the aquaculture.

Key words : west coast of Hokkaido, scallop, seedling production, ADCP, CTD, backtrack calculation

はじめに

北海道はホタテ貝の全国水揚げ量の約8割を占めている。その北海道における平成18年度のホタテ貝海面漁業・養殖業の支庁別生産量を Fig. 1 に示す(北海道農林水産統計年報(水産編)平成18年から引用)。相対的な生産量を丸印の大ききで表示し、漁業生産量(fishery)を黒丸と数字、養殖生産量(aquaculture)を灰色丸と括弧内の数字で示した。漁業生産量が高い支庁はオホーツク海側の宗谷・網走・根室支庁であり、その合計は20万トンを超える。噴火湾に面した胆振・渡島支庁では養殖生産量が高く、オホーツク海側の約半分の生産量を保っている。オホーツク海と噴火湾の生産量に対し、北海道西岸沖(日本海側)の生産量(養殖)は2オーダーも小さい(2千トン程度)ものの、北

海道のホタテ漁業生産を支える種苗(稚貝)生産(Seedling production)が非常に盛んな海域となっている。種苗生産とは、母貝から産卵された浮遊幼生を海中に垂下した採苗器(ネットロンネットを重ねたもの)に付着させて採集し、ホタテ貝の天敵であるヒトデ等からの食害を防ぐために育成籠の中で翌年の春まで育成した後、稚貝として出荷されることをいう(林, 2006; 日本水産学会, 1980)。オホーツク海側のホタテ生産は、この北海道西岸沖の種苗による稚貝を計画的に地撒きし、高い漁業生産量を維持しているのが現状である。噴火湾の場合は、湾内の養殖母貝からの産卵が種苗生産を支え、湾内で閉じたホタテ生産の維持をめざしているが、数年毎に発生する種苗不漁年にはオホーツク海や日本海からの稚貝買い付けが行われている。また、近年では三陸沿岸域(東北地方)のホタテ養殖も盛ん

¹⁾ 北海道大学大学院水産科学研究院海洋生物資源科学部門海洋環境学分野
(e-mail: isoda@fish.hokudai.ac.jp)

(Laboratory of Marine Environmental Science, Division of Marine Bio-resource and Environmental Science, Graduate School of Fisheries, Hokkaido University)

²⁾ 北海道渡島北部水産技術普及指導所
(Hokkaido Oshima-Hokubu Fisheries Technical Guidance Office)

³⁾ 北海道大学水産学部附属練習船うしお丸
(Training Ship Ushio-Maru, Faculty of Fisheries, Hokkaido University)

⁴⁾ 北海道大学大学院地球環境科学院
(Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University)

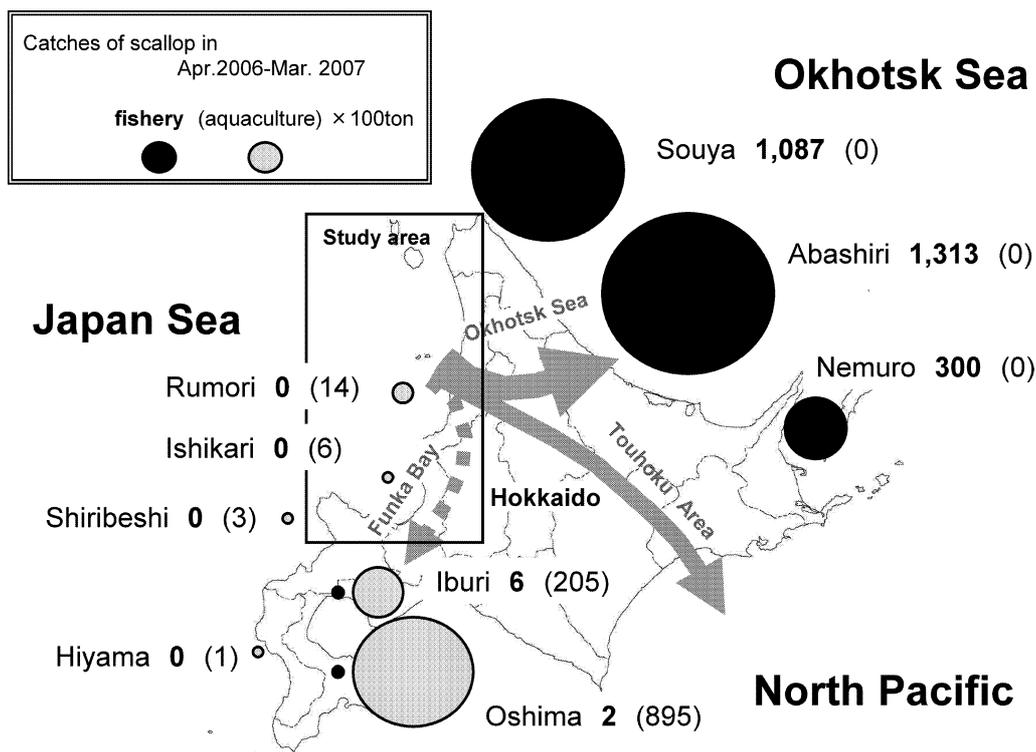


Fig. 1. Catches of scallop in the Hokkaido from April 2006 to March 2007. Size of black and gray circles shows the catches by fishery and aquaculture, respectively.

になり、その稚貝も北海道西岸沖の種苗生産が担っている。

豊富な種苗生産を誇る北海道西岸沖海域であるが、この海域でなぜ安定した種苗生産が維持されているのか、また、そもそも種苗生産を支えている母貝がどこに生息しているか、種苗漁業従事者にもまだよくわかっていない。一般に、産卵後の浮遊幼生が採苗器に付着するサイズまで成長するには約一ヶ月を要する。北海道西岸沖は北上する対馬暖流域にあると考えられているが、種苗生産が行われている陸棚上の流動場が実際にどのようなになっているかの研究報告はこれまでにない。仮に、陸棚上に 10 cm s^{-1} の一方向への移流があった場合、ある場所に固定された母貝から浮遊して付着幼生になるまでの約一ヶ月移動距離は 300 km 近くにもなる。すなわち、大きな移流が存在すれば当然、母貝と種苗場所の位置のずれは大きくなる。そこで、本研究ではホタテ貝種苗最盛期である 5 月に北海道西岸沖の陸棚域においてホタテ貝浮遊幼生の採集及び海洋観測を実施し、陸棚上の流動構造とサイズ別の浮遊幼生分布をもとに、付着サイズ (270 μm 以上で産卵後約一ヶ月) に達するまでの浮遊幼生輸送過程を明らかにすることを目的とした。

2007 年のホタテ貝浮遊幼生調査

海洋観測の概要と解析資料及び解析方法

ホタテガイの産卵期は一般的には 3 月下旬から 7 月と言われている (林, 2006)。その期間内で過去のホタテ貝浮遊幼生調査結果をもとに、本研究海域において産卵最盛期となる確率が最も高いと推測した 2007 年 5 月 9 日から 11 日の 3 日間、北海道大学水産学部附属練習船うしお丸を用いた海洋調査を石狩湾以北の北海道西岸沖陸棚域 (Fig. 2(a)) で実施した。調査項目は、海洋構造を把握するための ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler: RD 社製 150 kHz の船底設置型) による流速流向観測と CTD (Conductivity Temperature Depth) による水温塩分観測、そしてホタテ貝浮遊幼生分布を把握するためのプランクトンネット採集である。Fig. 2(a) に示した北海道西岸沖の海底地形の特徴から、本研究では調査海域を三つの海域に分類した。まず、積丹半島以北の海域では水深 100 m 以浅の陸棚が発達していることが特徴であるが、雄冬岬が西側に張り出しているため、この陸棚域は南側の「石狩湾」と北側の陸棚域に大きく二分される。北側の陸棚域はさらに二分され、天売・焼尻島付近を境界として、南側の水深 60 m 程度の平らな陸棚域 (以後、「留萌陸棚」域と呼ぶ) と北側の緩やかな地形勾配を有する幅広い陸棚域 (以後、「天塩陸棚」域と呼ぶ) に分けることができる。そして天塩陸棚の沖合には、水深 100 m 以浅の浅瀬を有する武蔵堆が存在している。

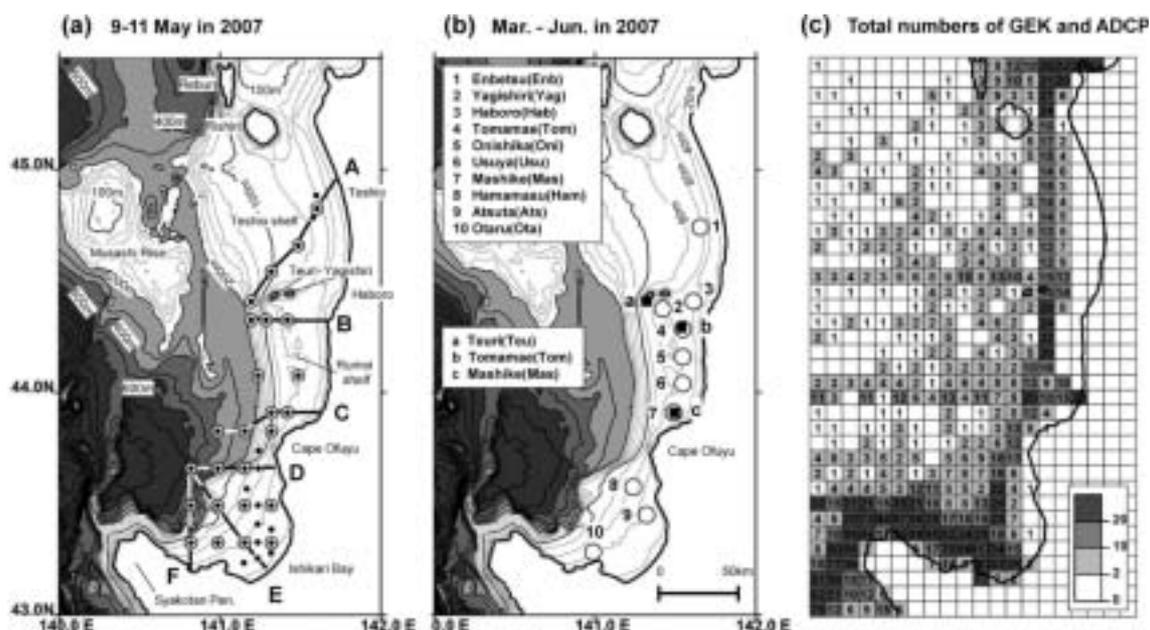


Fig. 2. (a) Bottom topography off the west coast of Hokkaido (i.e., enclosed area shown in Fig. 1). Isobath lines are drawn every 20 m (100 m) shallower (deeper) than 200 m depth. Closed and open circles indicate the locations for CTD and scallop-larvae sampling, which were observed by Ushio-Maru during 9–11 May in 2007. Solid straight lines named from A to F are the across-shelf lines contracted by a few CTD stations. (b) Open circles numbered from 1 to 10 indicate the ordinal monitoring stations for scallop larvae by the Hokkaido Rumoi-Hokubu Fisheries Technical Guidance Office on March–June in 2007. Three closed squares indicate the locations of current mooring sites from a to c. (c) Horizontal distributions of the total numbers of GEK and ADCP on $4' \times 6'$ grid.

うしお丸の調査地点は Fig. 2(a) に ● 印で示した CTD 観測 37 点、○ 印で示したホタテ貝浮遊幼生採集 25 点であり、ほぼ陸棚域全体をカバーしている。CTD で測定された水温・塩分データから鉛直スケール 5 m 以内の微細な変化を除去するために、鉛直方向に 5 m の移動平均を行い、これを本解析の基本データとした。ADCP 観測は函館から小樽を経由し、稚内へ至る航路上で継続して行い、海面下 8 m から 4 m 間隔の測定水深に設定した。本研究では表層を浮遊するホタテ貝幼生を研究対象としているため、水深 8 m の表層流のみを解析に使用した。ADCP データの前処理は小林ら (2004) に従い、緯度×経度が $4' \times 6'$ の水平格子で海域全体を区分し、この格子内で 2σ (σ は標準偏差) を越えるノイズデータを削除した後、格子内平均の流速流向データを作成した。

しかしながら、ADCP 観測から得られる流れは瞬間値であるため、観測時によって大きく左右される潮流や吹送流などの時間変動する現象が卓越していれば、密度場に対応した平均流を正しく表現することはできない。このような時間変化する流れ場の大きさを把握することを目的に、Fig. 2(b) の ■ 印で示した留萌陸棚上の 3 点、天売 (a)・苫前 (b)・増毛 (c) において係留流速観測 (アレック電子株式会社製の電磁流速計: COMPACT-EM) を実施した。係留期間はうしお丸観測時期を挟む 2007 年 3 月から 6 月であり、係留水深は海面下 10 m である。加えて、苫前では底

層流を捉えることを目的に、水深 40 m にも同流速計を係留した。係留流速データの解析結果として、平均流に重なって振幅の大きな流速変動が存在していることが明らかとなり、ADCP データの瞬間値を平均流として扱うことは危険であると判断された。そこで、ホタテ貝浮遊幼生の採捕期前後の平均流場を知ることを目的に、上記のうしお丸による ADCP データに加えて、1956 年から 2002 年の期間、3 月から 6 月の時期における表層流の流速流向データを日本海洋データセンター (JODC: Japan Oceanographic Data Center) のホームページ (http://www.jodc.go.jp/index_j.html) から入手した。この入手データは GEK (Geomagnetic Electro-Kinetograph) を用いた観測期間が 1956 年から 1995 年の 39 年間、ADCP を用いた観測期間が 1985 年から 2002 年の 17 年間であり、Fig. 2(c) にその解析領域内のデータ数の分布を示す。以下の解析において、平均流場を求める際には、本観測により得られた ADCP データと JODC による GEK・ADCP のデータを区別せずに格子内でベクトル平均を行った。

北海道水産技術普及指導所は同海域におけるホタテ貝養殖施設内でホタテ貝浮遊幼生を採集し、その出現状況の調査を行っている。調査地点は Fig. 2(b) に ○ 印で示した 10 点であり、北から順に、遠別 (1)・尻尻 (2)・羽幌 (3)・苫前 (4)・鬼鹿 (5)・臼谷 (6)・増毛 (7)・浜益 (8)・厚田 (9)・小樽 (10) である。この調査は、各地点により観測日と観測

回数 (5~10回) は異なるものの、2007年4月17日から6月15日の間に継続して行われた。本研究では、産卵時期の推定のために、この水産技術普及指導所による調査データを使用した。

うしお丸と水産技術普及指導所のホタテ貝幼生採集方法・分析方法は、以下に示すように全く同じとした。まず、ホタテ貝浮遊幼生の採集には北原式表面プランクトンネット (94 μm の網目サイズ) を用いて、海面から水深 20 m までの鉛直曳きを 2 回行った。採集後のサンプルを固定するために 60~70% に希釈した中性のホルマリンを 0.5 cc 程度滴下し、研究室へ持ち帰った後、細かなゴミ等を取り除きながら浮遊幼生の検鏡を行った。浮遊幼生にはホタテ貝幼生だけでなく、その他の二枚貝やヒトデなどの幼生も含まれるため、ホタテ貝幼生のみを注意深く識別し、130 μm から 10 μm 間隔のサイズ毎に数量を計測した。なお、本研究では、海水 1 トンあたりの個体数に換算した幼生固体数密度 (ind./ton) を用いる。

産卵時期の推定

例えば、ある○地点、ある×日におけるホタテ貝浮遊幼生のサイズ別 (130 μm 以上、10 μm 間隔で区分) の幼生固体数密度 (ind./ton) は模式的に Fig. 3(a) のように描ける (矢幅ら, 2009)。水産技術普及指導所は、ホタテ貝浮遊幼生の産卵後の経過日数と殻長 (サイズ) の関係を示したグラフを作成している。このグラフを参考にすると、今回使用したプランクトンネットで採集された最小幼生サイズ 130 μm は生後約 10 日、150 μm で生後約 15 日、そして浮遊幼生が足糸を出して岩礁や海藻などに付着するには 270 μm 程度 (本研究では、付着サイズ (Adherence size) と呼ぶ) まで成長する必要がある、150 μm から 270 μm まで成長するには約 15 日を有することがわかる。厳密には、幼生が実際に生息した水温環境により、上記のサイズと経過日数の関係には数日程度の誤差は十分生じると考えられる。それ

ゆえ、本解析では上記の 130~270 μm の幼生サイズを 5 日区分の経過日数として扱い、大まかな産卵時期の推定を行うことにした。

そこで、図の表示形式としては Fig. 3(b) の模式図に示すように、横軸に採集日の×日から過去に遡る時間軸を設定し、縦軸に浮遊幼生密度を 5 日区分毎の合計値で表現した。よって、浮遊幼生は産卵後 5 日区分で 35 日までの 7 つのグループ (S1~S7 と呼ぶ) に分類される。すなわち、産卵後 0~5 日と 5~10 日の区分の幼生は採集されないが S1・S2 に分類し、採集最小サイズである S3 は 10~15 日前に産卵された幼生、同様に、S4 は 15~20 日前、S5 は 20~25 日前、S6 は 25~30 日前、S7 は 30 日以前に産卵された幼生と推定できる。なお、サイズ別の幼生個体数密度の違いを表現するために、サイズ毎の棒グラフを濃淡で表すことにした。

この Fig. 3(b) の表示形式を用いて、水産技術普及指導所が 2007 年に実施した全てのホタテ貝浮遊幼生調査データをまとめて Fig. 4 に示した。左上から下へ、右上から下の順序で北側に位置する遠別 (1) から、焼尻 (2)・羽幌 (3)・苫前 (4)・鬼鹿 (5)・白谷 (6)・増毛 (7)・浜益 (8)・厚田 (9)・小樽 (10) を示し、横軸に 3 月から 6 月までの時間軸とした。図に示した二重線の間の期間がうしお丸調査の 5 月 9 日から 11 日の 3 日間である。産卵の最盛期は大雑把にみて 3 回程度あるが、その産卵には地域性をみることができる。まず、最も早い産卵最盛期は石狩湾を主体とした小樽 (10)・厚田 (9)・浜益 (8) の 4 月上旬から中旬頃にある。雄冬岬以北の留萌・天塩陸棚域 (遠別 (1) から増毛 (7) まで) 一帯では、半月遅れの 4 月下旬ころに産卵最盛期がみられる。そして両海域の境界域である浜益 (8) では 4 月上旬と下旬の産卵が混在しているようもみえる。3 回目の産卵は、5 月下旬の留萌陸棚の羽幌 (3) と苫前 (4) の局所的な場所にみることができる。以上の産卵時期の推定から、うしお丸による調査は本海域における産卵最盛期後の

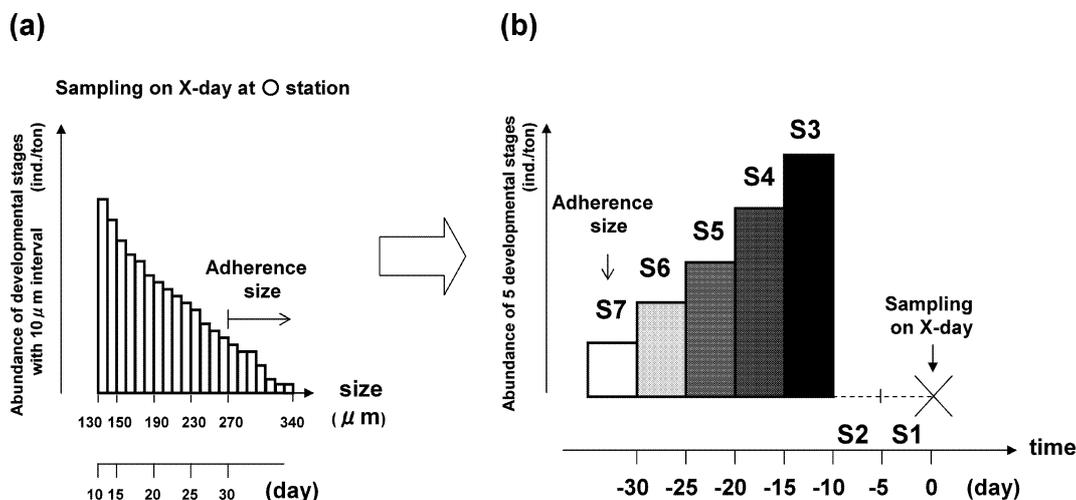


Fig. 3. (a) Schematic frequency distribution for the densities of scallop larvae in each developmental stage. (b) Same as Fig. 3(a), but the densities are roughly divided by seven developmental stages (S1-S7) after a spawning date.

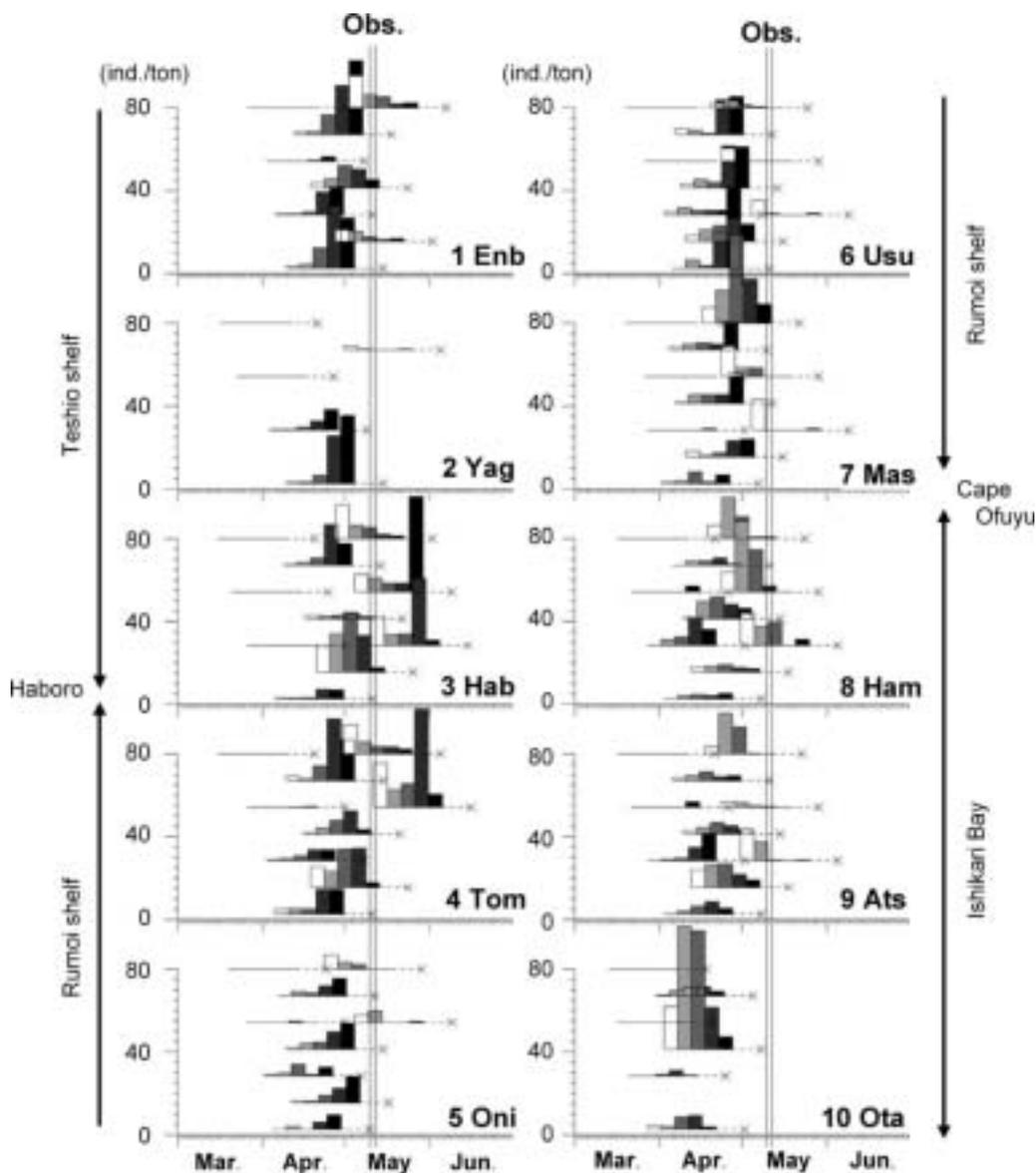


Fig. 4. The frequency distributions for the density of scallop larvae in the range of five developmental stages (S3-S7) at the monitoring ten-stations (Stns. 1-10 shown in Fig. 2(b)). Two vertical lines indicate the start and end dates of Ushio-Maru observation.

10日から20日程度経過した時期であったと判断される。

浮遊幼生の水平分布

うしお丸と水産技術普及指導所により採集された幼生を先に区分した考え方と同様のS3からS7に分類した幼生個体数密度の水平分布図をFig. 5に示す。なお、水産技術普及指導所によるデータは、うしお丸調査期間に行われた地点だけを使用した。すなわち、遠別(1)・羽幌(3)・苫前(4)・浜益(8)・厚田(9)は5月10日、鬼鹿(5)・白谷(6)・増毛(7)は5月11日の調査データである。幼生個体数密度の大きさは円の面積で表示し、うしお丸データは黒丸、水産技術普及指導所データは灰色丸とし、幼生が採集されなかった地点は×印とした。

全体的な採集量に関しては、サイズの小さなS3・S4の採集量が多く、サイズが大きくなるほど採集量が減少し、付着サイズのS7の採集量が最も少ないことがわかる。サイズが大きくなるにつれて採集量が減少する傾向は、一般的には産卵後の自然死亡(初期減耗)で説明されるが、前述の産卵時期の推定によれば、産卵10-20日後のS3・S4が多いのは産卵最盛期に産卵されたグループであるためとも解釈される。逆に、付着サイズであるS7の採集量が少ないのは、産卵初期の少ない産卵量であったためとも考えられる。そこで、これらの分布図を用いての定量的な記述は避け、ここでは各サイズの空間分布に関する定性的な特徴を記述するにとどめる。

産卵10-20日後のS3・S4の比較的高い幼生個体数密度

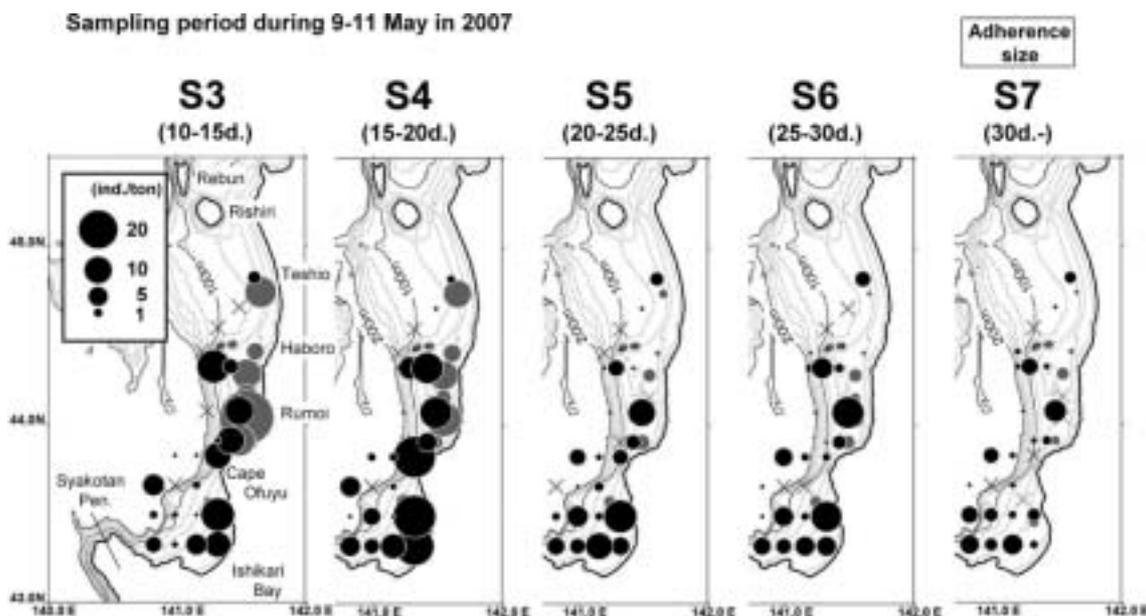


Fig. 5. Spatial distributions of the relative magnitude for scallop larvae at seven developmental stages (S3-S7). Black and gray colors of circle indicate the difference of sample data by Ushio-Marui and Hokkaido Rumoi-Hokubu Fisheries Technical Guidance Office. Symbol of cross is the location without the sample data.

は、石狩湾の湾奥、雄冬岬から留萌陸棚、天塩陸棚の沿岸側に偏って多くみられる。ところが、一調査地点ではあるものの、石狩湾の水深 200 m 以上の沖合にも高い幼生個体数密度が現れている。サイズが大きくなる (S5 から S7)、または産卵後の経過日数がたつにつれて、石狩湾と留萌陸棚の境界である雄冬岬沖の幼生個体数密度が減少、もしくは採集されなくなる。そして、石狩湾の高い幼生個体数密度は湾奥から湾西部へ移動し、留萌陸棚の高い幼生個体数密度は陸棚の中央部だけに残る傾向がみられる。また、S3・S4 でみられた沖合の高い幼生個体数密度の地点は、S5~S7 では少し北側に移動する傾向を示しながらも、その存在を認めることができる。

うしお丸調査時期における陸棚上の流動構造と海洋構造

浮遊幼生の水平分布は、幼生サイズが大きくなるにつれて、または産卵後の経過日数がたつにつれて、高い幼生個体数密度が石狩湾では湾奥から湾西部へ、留萌陸棚や沖合では北側へ移動する傾向を示した。ホタテ貝の浮遊幼生は遊泳能力が低いので、このような移動を示す原因として、海域による初期減耗率の違い (例えば、水温環境の極端な違いなど) もしくは移流の影響が考えられる。前者に関しては生物学的な知見がないため、手持ちの資料では判断できない。本研究では、後者の移流場の影響についての考察となる。

Fig. 6(a) はうしお丸 ADCP 観測による水深 8 m の流速ベクトル水平分布図である。瞬間値であるために流速ベクトルが示す細かな議論にはあまり意味がないが、陸棚斜面上の流速が大きく (25 cms^{-1} 以上)、陸棚上 (石狩湾と留萌

陸棚) の流速が小さい (10 cms^{-1} 以下) 傾向は明瞭にみることができる。陸棚斜面上の強い流れは基本的に北上流の傾向を示している。積丹半島の西側では強い北流、半島の東側では弱い西流、雄冬岬沖では沖合から沿岸へ向かう流れがみられ、その流れの一部は留萌陸棚へ侵入しているが、強い流れは留萌陸棚沖の陸棚斜面を北上し、天売・焼尻島を迂回して天塩陸棚へ入っているようにみえる。弱い流れである石狩湾や留萌陸棚では流向も地点によればばらであり、特徴的な移流場としての記述はできない。

次に、陸棚上の海洋構造を記述するために、うしお丸による CTD 観測点を用いて Fig. 2(a) に示す A~F の 6 本の観測線を設定し、各観測線における (a) 水温、(b) 塩分、(c) 密度の鉛直断面分布図を Fig. 7 に示した。陸棚斜面上に強い北上流がみられたため、陸棚縁である水深 100 m の位置 (縦破線的位置) を各断面で一致させて表示した。よって、この縦破線付近またはその沖合側に強い北上流が位置していることになる。水温の鉛直断面分布 (Fig. 7(a)) は強い北上流が位置している場所において $9\sim 10^\circ\text{C}$ の暖かい水が下に凸状に分布する特徴的な構造を示し、暖水の移流が示唆される。一方、浅い陸棚上は沖合よりも冷たい 9°C 以下の低温水が分布している。塩分の鉛直断面分布 (Fig. 7(b)) にみられる下に凸状の構造は多少不明瞭であるが、 9°C 以上の暖水は 33.9 以下の低塩分水に対応し、水塊の特性をほぼ保っていることがわかる。塩分分布の大きな特徴は極表層付近にみられ、水深 10 m 以浅に河川水起源と思われる 33.5 以下の低塩分水が沿岸側から沖合へ広がっている。密度の鉛直断面分布 (Fig. 7(c)) の表層の低密度水は主に低塩分水、下に凸状の密度構造は主に水温場に支配されている。

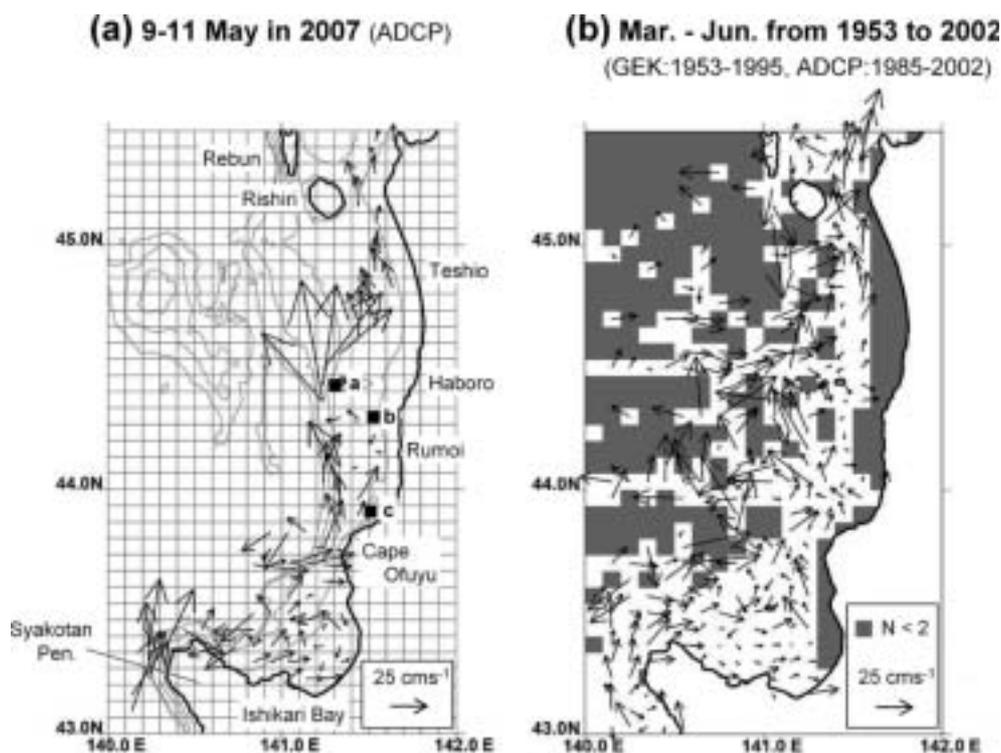


Fig. 6. (a) Spatial distribution of ADCP current vectors at the depth of 8 m, observed by Ushio-Maru during 9-11 May in 2007. Closed squares indicate the three current mooring sites of Teuri(a), Tomamae(b) and Mashike(c). (b) Spatial distribution of the current vectors for GEK and ADCP data on 4'×6' grid during March-June from 1953 to 2002.

表層の低塩分水が河川水起源であれば、その水平分布は河口を連続点源とした過去の移流場の積算結果を反映しているとみることができる。Fig. 8(a) は水深 5 m における塩分水平分布図である。天塩川と石狩川の河口近傍の沿岸側 2ヶ所に極小塩分を示す観測点があり、表層低塩分水の起源がこれらの河川にあることが示唆される。低塩分水の拡がりを移流の結果として記述すると、石狩川の河川水は石狩湾の沿岸側半分に滞留し、その一部が雄冬岬から留萌陸棚へ流出した後、留萌陸棚の中央付近で沖合側へ出ている様子が推測される。水温場が示す下に凸状の構造は強い北上流にほぼ対応していることから、この構造の水平分布を調べれば観測時の暖水流路を知ることができる。Fig. 8(b) は水深 50 m における水温水平分布図であり、下に凸状の構造である極大水温値を破線で表示している。極大水温を流路として記述すると、石狩湾沖の陸棚斜面上を北上した後、雄冬岬付近で陸棚上に流入し、低塩分水分布から推測した流れと同様に、再び沖合側へ流出している様子が推測される。このように表層低塩分の水平分布は石狩湾から留萌陸棚への沿岸に沿った移流の存在、極大水温の水平分布は石狩湾沖の陸棚斜面上の北上流から留萌陸棚への移流の存在を示唆している。

係留観測による留萌陸棚上の流速変動

うしお丸 ADCP 観測から示唆される留萌陸棚上の流れ場は、その沖合 (陸棚斜面上) の流速よりも小さいことを示した。Fig. 9 はその留萌陸棚上の天売 (a) の水深 10 m, 苫前 (b) の水深 10 m と 40 m, 増毛 (c) の水深 10 m における左側から順に、生の水温・生の流速ベクトル・15 日移動平均した流速ベクトルの各時系列 (3 月 1 日から 6 月 30 日を表示)・うしお丸観測日 (5 月 11 日) 以前一ヶ月間のデータを用いて作成した流速のスカッターリングプロット (矢印は一ヶ月平均の流速ベクトル) である。時系列図に示した薄い灰色領域は、うしお丸調査期間である。

3 地点の水深 10 m の水温時系列は、定性的によく似た変化を示す。3 月から 4 月中旬までの水温上昇は非常に小さく、5°C 前後の値を保っていた。苫前 (b) の上下層の水温差は 1°C 程度であり、水温成層はあまり発達していない。縦破線で示した 4 月 20 日、3 地点の水温はほとんど同時に 3~4°C も急上昇するイベントがあった。このとき、苫前の下層 (水深 40 m) もほぼ同時に、同程度の水温上昇を示している。その後、5 月下旬から 6 月中旬ころまで、3 地点の水深 10 m の水温は 10~13°C までゆっくりと上昇し、この期間の苫前 (b) の下層水温は 8~9°C の一定水温を保っている。下層の水温がほとんど上昇していないことより、この時期の上層の水温上昇は海面加熱を主な要因としている

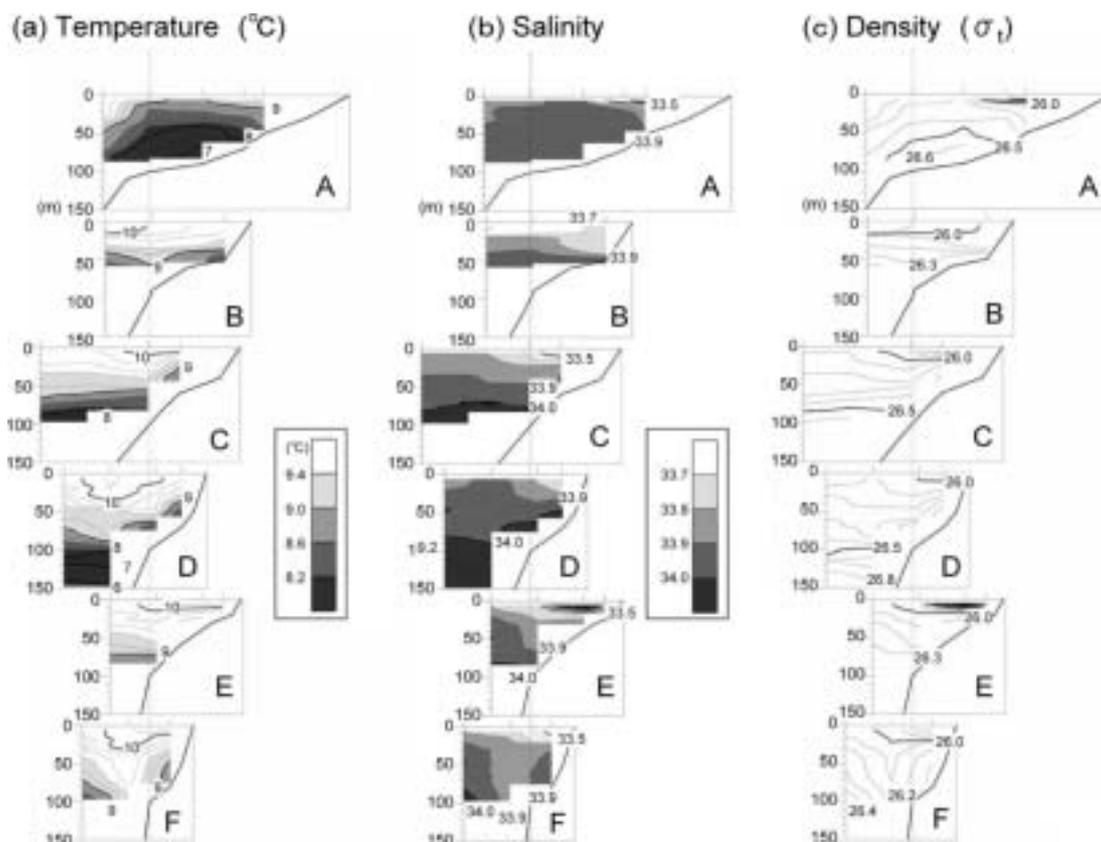


Fig. 7. The cross sections of (a) temperature, (b) salinity and (c) density of A-F lines shown in Fig. 2(a). The contour intervals are 0.2°C (thin lines) or 1°C (thick lines) for temperature, 0.1 (thin lines) or 0.5 (thick lines) for salinity and 0.1 σ_t (thin lines) or 0.5 σ_t (thick lines) for density. Vertical dashed lines indicate the locations of shelf edge (100 m depth).

ことが示唆される。そして2回目の水温上昇は水深 10 m の水温にみられ、天売 (a) と苫前 (b) は5月下旬ころ、増毛 (c) は遅れて6月中旬ころに起こっている。

このように留萌陸棚における水温上昇イベントは、4月20日と5月下旬以降の2回あった。前者の水温は細かい変動を伴わない3地点同時の急激な水温上昇である。青森県水産増養殖研究所では、陸奥湾におけるホタテ貝の産卵を促す引き金要因として、春先の水温急上昇に注目している。長年の観察によって、陸奥湾の水温が数度上昇するイベントが起こったあと、その後の水温が低下しない場合には大規模な産卵が始まることがすでに認知されている (私信)。本研究で推測した留萌陸棚の産卵最盛期は4月下旬ころであり、陸奥湾と同様に、4月20日の水温急上昇が本海域におけるホタテ貝産卵の引き金になっている可能性が示唆される。興味深いことに、3回目の産卵が苫前付近で局所的に起こっていることが推測されたが、このときにも確かに、苫前では表層水温の上昇が起こっている。

生の流速ベクトル時系列及びスキッターリングプロットは、15日移動平均時系列が示すような平均流に重なって、変動の振幅が非常に大きいことを示している。このことは、少なくとも留萌陸棚において、瞬間値である ADCP

の流速を平均流として扱うことは危険であることを意味する。係留流速データが示す15日移動平均流は、3地点ともに北東流であるが、その流速は 5 cm s^{-1} よりも小さい。なお、15日移動平均流をみると、3地点同時の水温急上昇が起こった4月20日 (縦破線) 前後の流速は一時的に大きくなり、その流向は岸向きである。このときの水温急上昇は苫前の下層も同時であったことから、留萌陸棚一帯に沖合側から沿岸へ、少なくとも40 mの厚みをもった暖水が一気に侵入する現象が起こっていたことが推測される。

留萌陸棚上の平均流は 5 cm s^{-1} 以下の弱い流れであるが、15日移動平均流の流向は比較的安定しているため、長期間の物質 (本研究では浮遊幼生) 輸送能力が必ずしも小さいとは言えない。Fig. 10は3地点の水深10 mの流速データ (4月1日から5月11日) を用いて作成した進行ベクトル図である。選んだ期間は、ホタテ貝が産卵して付着サイズまで成長するまでの約1ヶ月を想定している。黒丸が計算開始地点 (流速計設置地点) を示し、白丸は5日毎にプロットしている。なお、地図のスケールと進行ベクトルの移動距離のスケールは一致させてある。3地点ともに北東向きへの輸送を示し、あくまでも目安であるが、約1ヶ月間の輸送距離は150~200 kmにもなる。陸棚斜面上では

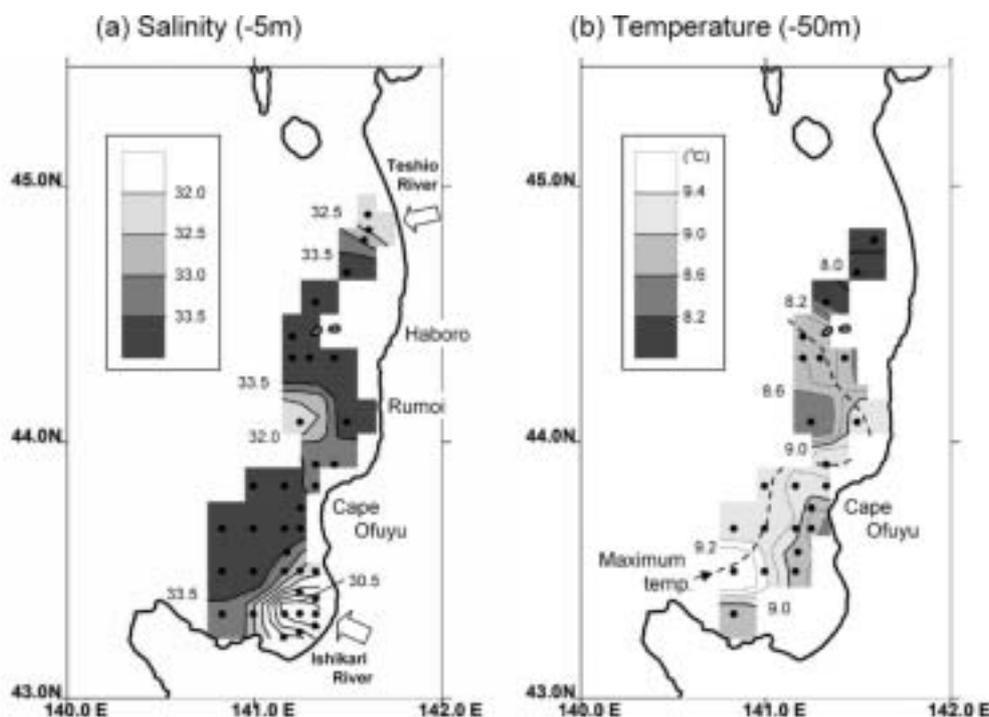


Fig. 8. Horizontal distributions of (a) salinity at the depth of 5 m and (b) temperature at the depth of 50 m. The contour intervals are 0.5 for salinity and 0.4°C for temperature. Solid circles indicate the observation locations of CTD. Dashed line in Fig. 8(b) suggests the path of flow with a local maximum temperature.

陸棚上よりもさらに大きな北上流が期待されるため、陸棚斜面に沿った一ヶ月間の輸送距離はその数倍程度になることも十分に考えられる。

ホタテ貝産卵時期の平均流動場の推定

係留流速観測の解析結果から、平均流速が比較的小さい留萌陸棚においても、産卵から付着サイズまで成長する約一ヶ月という時間は、付着サイズ S7 の浮遊幼生分布と実際の産卵場に大きな食違いを生じさせる。それゆえ、産卵場の推定を行うためには、できるだけ正しい流動場の把握が必要不可欠である。しかしながら、係留観測結果はうしお丸 ADCP 観測で得られた瞬時の流れ場を本海域の平均的な流動場として扱うことは危険であることを示していた。そこで、過去に蓄積された表層流データと今回のうしお丸 ADCP データを組み合わせることでデータ数を増やし、時空間的な平均操作によって変動成分をできるだけ除去した平均流動場を求めることを考えた。

Fig. 6(b) は JODC より入手した ADCP・GEK データ (3月～6月) だけを用いて作成した平均流速ベクトルの水平分布図である。平均化の方法は、うしお丸の ADCP データ解析と全く同じである。データ数が 2 個未満の格子は灰色で表示した欠測格子とした。過去に存在する表層流データを集めても、沿岸近くや沖合域はデータがほとんどない。それでも、うしお丸観測 (Fig. 6(a)) で捉えられた流れ場と同様に、陸棚斜面上から沖合域の比較的流速の大きな

北上流、石狩湾・留萌陸棚の流向がばらついた弱い流れ、天塩陸棚の北上流などが表現されている。そこで、これら二つの流れ場 (Fig. 6(a)(b)) を用いて、e-holding スケールを 25 km としたガウス補間法による空間平滑化を行った結果を Fig. 11(a) に示す。当然、e-holding スケールを大きくすれば沖合の強い北上流の影響が陸棚上まで広がり、小さくすれば陸棚上の流向のばらつきが大きくなる。ここでは、留萌陸棚上の係留流速データが示す弱いながらも北上流の存在が表現されることを基準に 25 km を選択した。

まず、データの少ない沖合域は、Fig. 6(b) に示したままらな流速値から空間補間されているので信頼できない流れ場と考える。ただし、この沖合の流れ場は、後述する移流拡散計算にはほとんど影響を与えない。陸棚上及びそのすぐ沖合における流れ場は大雑把には北上流を示し、石狩湾や留萌陸棚の流速は小さく、留萌沖陸棚斜面上の流速は大きい。空間平滑化という操作の影響が大きいものの、陸棚上における流向のばらつきは抑えられ、石狩湾は西側から北向きへの弱い流れ、留萌陸棚は雄冬岬で比較的強い北上流、その北側で沖合へ出る傾向を示す弱い北上流が表現されている。しかし、雄冬岬の北側で沿岸から湧き出すような流れの表現など、沿岸近傍の流向は主にデータ不足のために正しく表現されていないと思われる。また、留萌沖陸棚斜面の沖合では時計回りに蛇行する北上流となっている。この蛇行流は沖側から天塩陸棚へ侵入した後、陸棚に沿った北上流に繋がっている。

Fig. 11(a) に示された表層流は単純な空間平滑化を行っ

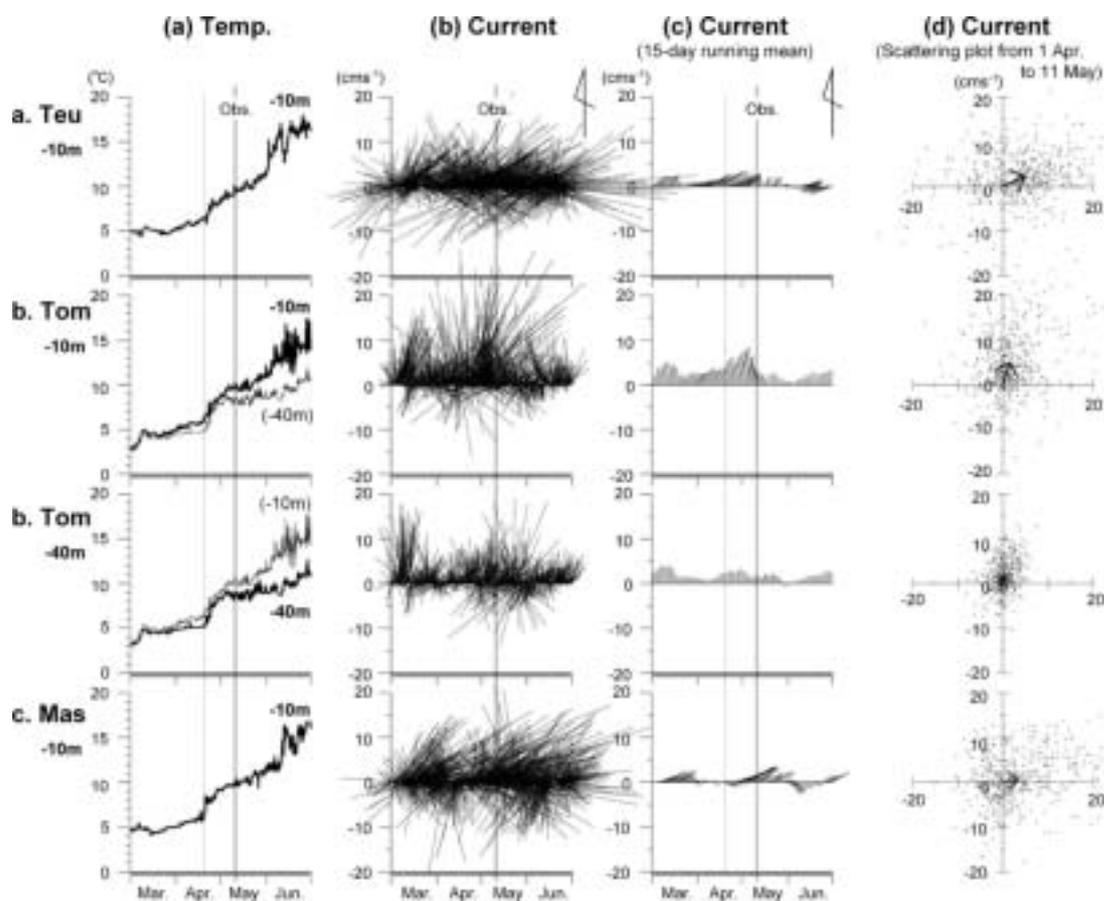


Fig. 9. Time series of (a) raw temperature, (b) raw current vectors and (c) 15-day running mean current vectors at three sites. Vertical gray lines indicate the observation period by Ushio-Maru. Vertical dashed lines in Fig. 9(a) and (c) indicate the event of temperature risen. (d) Scattering diagram for current velocity and mean current (arrow) by using data from 1 April to 11 May in 2007.

ただけなので、この流れ場には収束発散が生じている。その収束発散を計算した結果が Fig. 11(b) である。灰色領域が収束域、白抜き領域が発散域を示す。この図に示された収束発散域が物理的に意味あるものか否かの真偽の判断できないが、後述する移流拡散計算には影響を与える。すなわち、ある計算格子において、水平拡散による濃度低下よりも流れ場の収束による濃度増加が大きければ、その格子の濃度は次第に増加することになる。移流拡散計算では、このような濃度増加が起らない大きな拡散係数を与えているが、時間が経過しても比較的高い濃度が残存するのは収束域の海域である。ホタテ貝幼生の輸送に関する陸棚上の収束域は、石狩湾中央と留萌陸棚上にある。

種苗生産に寄与する幼生の輸送過程

逆追算による産卵場の推定

Fig. 11(b) に示した表層流がホタテ貝産卵時期の平均場をある程度表現しているという前提において、拡散場を考慮せずに、浮遊幼生を粒子として扱い、各採集点から移流場だけを用いた逆追算を行って産卵場を推定することを試

みた。しかしながら、先にも述べたように、肝心の陸棚上の特に沿岸近傍における平均流は信頼できない。そこで、逆追算の計算過程において、沿岸格子に達した計算粒子は強制的に半格子の距離だけ、常に沖合側に戻す人工的な条件を設定した。

まず、採集された浮遊幼生の中で産卵後の経過日数が最も短い S3 サイズ (産卵後 10~15 日で平均 12.5 日) の浮遊幼生を初期値とした逆追算を Fig. 12 に示す。このとき、Fig. 5 に示した S3 の幼生分布をもとに、個体数密度 2 ind./ton を基準にして、それよりも少ない採集地点は浮遊幼生がほとんどいないことを強調して×印の計算粒子、それよりも多い地点は浮遊幼生量に関係なく、幼生がいたという情報を○印の計算粒子で表現した。Fig. 12 の中央が○×で示した初期分布、右側が $t = -12.5$ 日まで逆追算した結果の○×分布であり、曲線が 12.5 日間の流跡線を示す。沖合ほど強い北上流があるため、沖合の計算粒子は 12.5 日間で 100 km 近くも南下している。興味深い点は、留萌陸棚の沖合を初期位置とする計算粒子の移動距離は大きいものの、その多くは雄冬岬から石狩湾内に至る流跡線を示していることである。一方、弱い流れの陸棚上の計算粒子は、数十

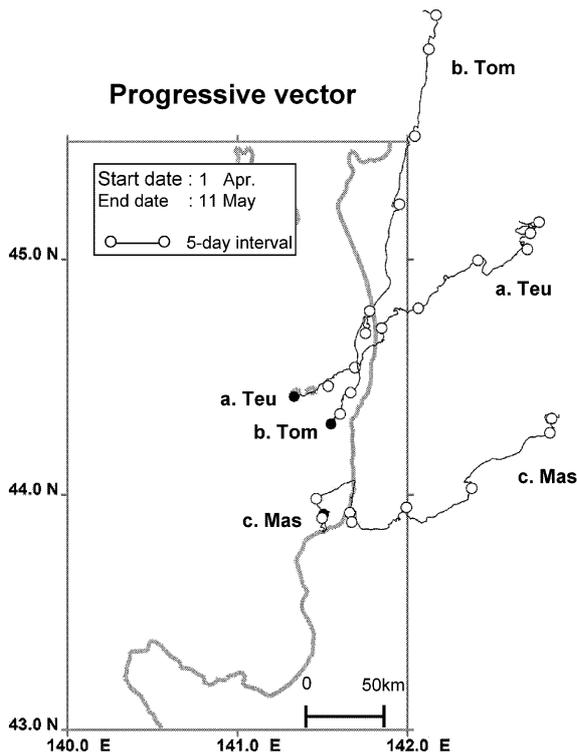


Fig. 10. Progressive vectors by using mooring current data from 1 April to 11 May in 2007. Closed circles are the initial locations (i.e., mooring sites), and open circles are drawn by every 5 day.

km 程度の移動距離である。その結果、多くの計算粒子は ○×印が混在して石狩湾内と留萌陸棚に存在している。この逆追算の結果は、現在陸棚上で行われているホタテ養殖場の養殖母貝からの一斉産卵（おそらく、4月20日ころ）がうしお丸調査時（5月9日～11日）の S3 サイズ幼生分布の主たる要因であることを示唆している。

しかし、我々が知りたいのは、種苗生産に寄与する S7 サイズ分布を説明できる産卵場である。逆追算の積分時間が長くなるほど、Fig. 11(b) の平均流が内在している誤差が積算されることや場の変動（拡散）を考慮しないことが逆追算の結果の信頼性を下げる。それゆえ、あくまでも目安として、ここでは Fig. 12 の計算と同様に、S7 サイズ（産卵後 30 日以上なので、 $t = -32.5$ 日まで積分）の浮遊幼生を ○×初期分布（個体数密度 1 ind./ton を基準）とした逆追算を行った。結果を Fig. 13 に示すが、図の表示は Fig. 12 と同じである。沿岸近傍の流れ場が正しく表現されていないという問題もあるが、結果が示唆する産卵場は雄冬岬北側沿岸域と積丹半島沿岸もしくはその南側の大きく二つに分かれている。なお、雄冬岬北側沿岸域は沿岸格子に達した計算粒子を沖合側に戻す計算が何度も繰り返されることによって、この海域に計算粒子が停滞したためである。約一ヶ月間に計算粒子が移流される距離は、流れの弱い陸棚上でも十分に大きく、石狩湾や留萌陸棚はほとんど流跡線の間（移動の間）となり、本計算結果から特定の産卵場を

提示することはできない。少なくとも、石狩湾内には付着サイズの幼生を供給する産卵場があるとは言えず、産卵場は積丹半島以南の海域のどこかにある。ただし、雄冬岬北側において流れの停滞域が現実にあるならば、雄冬岬の近くにあるホタテ貝養殖場（例えば、増毛など）が付着サイズの幼生を供給する産卵場の候補と言えるかもしれない。

推定産卵場からの浮遊幼生輸送過程

S3 サイズの逆追算結果は、このサイズの産卵は現在陸棚上で行われているホタテ貝養殖場に垂下されている養殖母貝が起源である可能性を示唆した。付着サイズである S7 サイズの逆追算結果からは、種苗生産に寄与する産卵場の特定はできなかったものの、積丹半島以南に産卵場がなければならないことが示唆された。これらの結果より、推定産卵場の候補として、陸棚上におけるホタテ貝養殖場に加えて、積丹半島以南を挙げることができる。

一般に、移流拡散に支配された物質輸送は不可逆過程であり、移流場だけを考慮した逆追算結果の信頼性は拡散（または場の変動）が十分に小さい場合に限られる。しかしながら、係留観測による流速変動が示すように、留萌陸棚上の流速変動の振幅は平均流よりも大きい。それゆえ、少なくとも留萌陸棚上におけるホタテ貝幼生の輸送過程を記述するためには、拡散過程も考慮した下記の移流拡散方程式を解かなければならない。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = K \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

ここで、 t は時間、 (x, y) は東西・南北座標系、 (u, v) は流速の $x \cdot y$ 成分、 K は水平拡散係数、 C は物質濃度である。ここでは、上記の推定産卵場を初期値とした移流拡散方程式を解き、各サイズの幼生分布（Fig. 5）の再現性を確認した後、種苗に寄与する幼生の輸送過程について考察する。

計算格子間隔は Fig. 11(a) の平均流場を作成したのと同じ、緯度×経度で $4' \times 6'$ 、距離で $7.5 \text{ km} \times 8.0 \text{ km}$ とした。推定産卵場の初期位置を Fig. 14 の左端図に示す。積丹半島以南の産卵場がどこにあるかは特定できないので、本計算では積丹半島北側の沿岸に 2 格子分の初期位置（白矢印の位置）と 10 地点のホタテ貝養殖場 10 格子の初期位置を設定した。また、各ホタテ貝養殖場におけるホタテ母貝の数量については残念ながら報告されていない。ここでは、各養殖場が同数の母貝であることを仮定して、全ての推定産卵場格子に単位濃度 $C=1$ を与えた。移流場 (u, v) は Fig. 11(a) の平均流を定数としてそのまま用い、水平拡散係数は平均流の収束域で濃度が増加し続けられない値を試行錯誤で求め、その中で最も小さな値であった $2.0 \times 10^6 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ を使用した。なお、この値よりも大きな係数値を用いても、定性的な濃度分布パターンには違いがみられなかった。沿岸格子における境界条件は、濃度勾配を零、格子に直交する流速を強制的に零とした。開境界では濃度勾配を零とする境界条件とした。

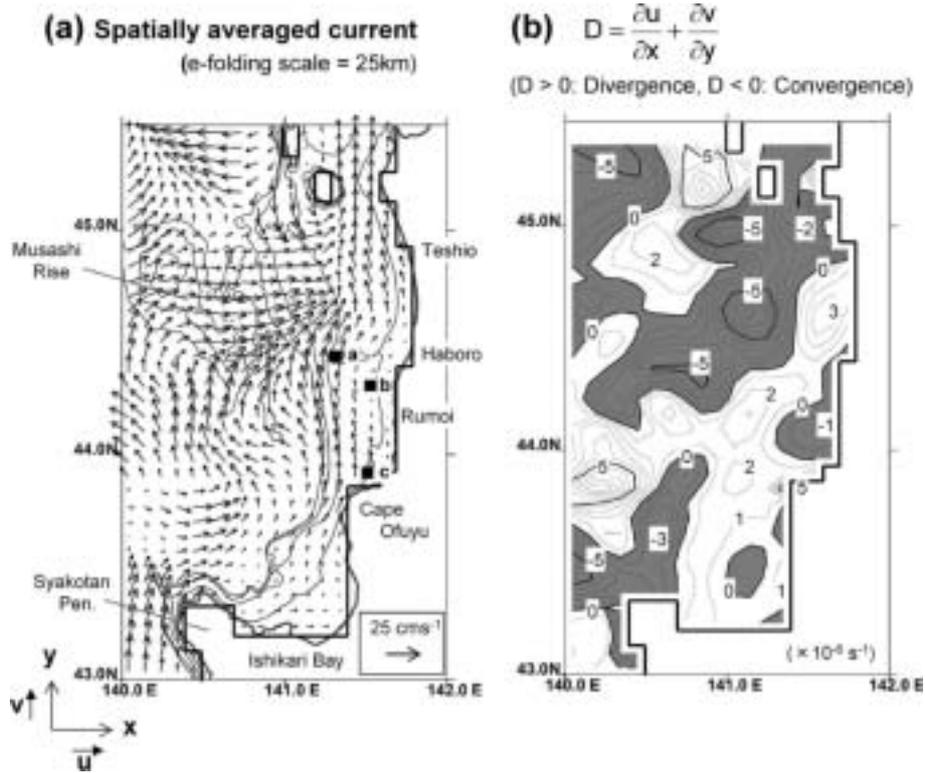


Fig. 11. (a) Horizontal distribution of spatially averaged current vectors, which are calculated from current data in Fig. 6 using Gaussian interpolation (e-folding scale is 25 km). Closed squares indicate three current mooring sites. (b) Horizontal distribution of divergence (white) and convergence (gray) areas, which are calculated using data shown in Fig. 11(a).

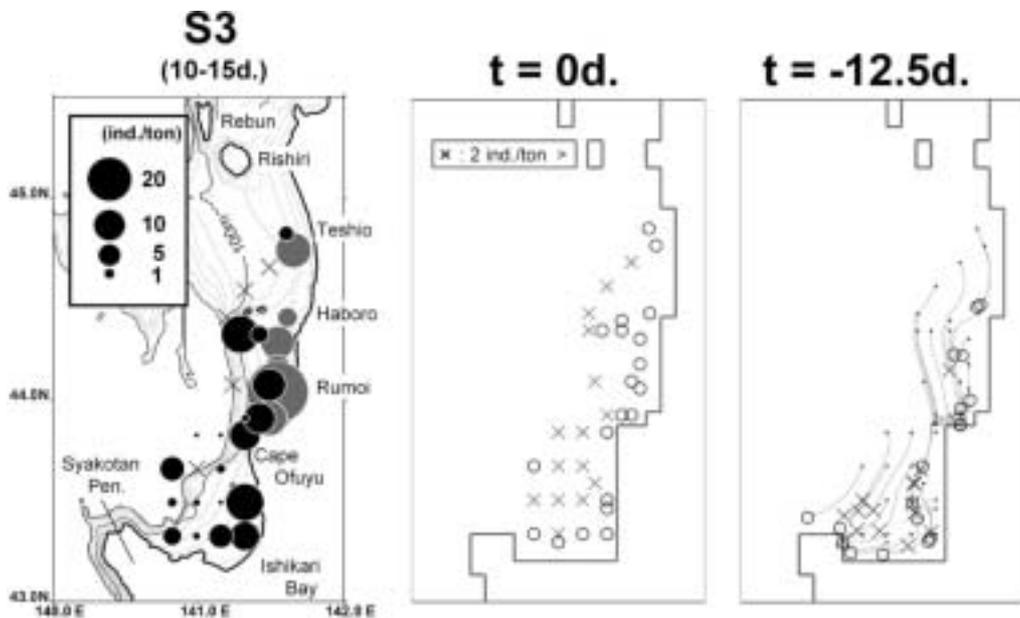


Fig. 12. Left hand side panel is the same as S3 map in Fig. 5. Center panel shows the initial locations of model particles. Crosses and open circles are the particles with the density below and above 2 ind./ton for scallop larvae, respectively. Right hand side panel shows the simulated back-trajectory of model particles during 12.5 days.

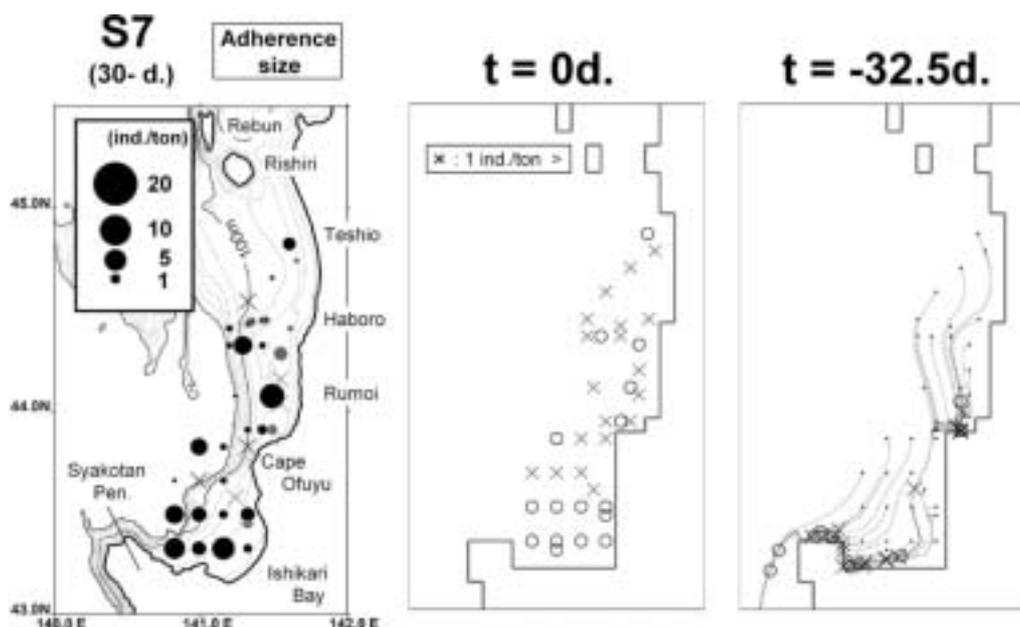


Fig. 13. Same as Fig. 12, but for the case of S7 size. In this case, crosses and open circles are the particles with the density below and above 1 ind./ton for scallop larvae, respectively. The simulated period for the back-trajectory is 32.5 days.

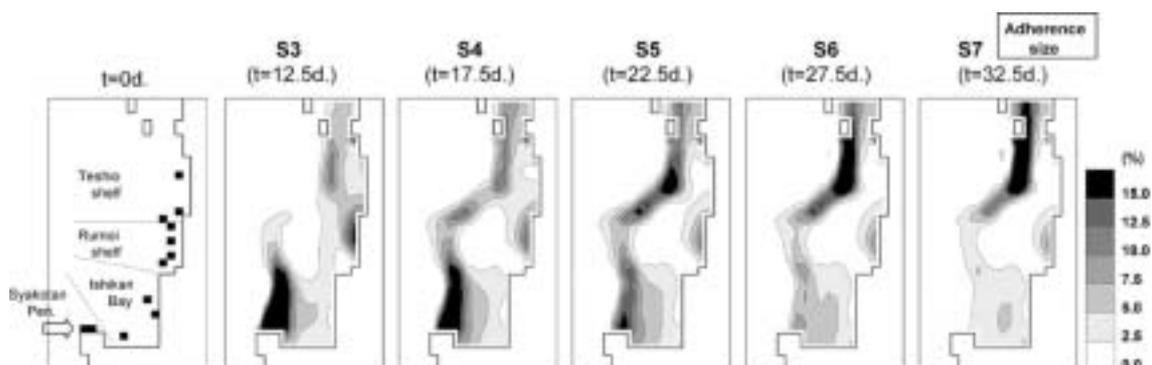


Fig. 14. Left hand side panel shows the initial source locations with unit concentration in the advection-diffusion problem ($t=0$ day). Right hand side five panels show the model results at $t=12.5$ (S3) to $t=32.5$ days (S7).

計算開始後 ($t=0$ 日で産卵), S3~S7 の各サイズまで成長する時間 ($t=12.5\sim 32.5$ 日) まで積分した濃度分布の結果を Fig. 14 に示す。濃度はパーセントで示し、濃度が高いほど、濃い灰色で表示している。濃度分布の時間変化が示唆する幼生輸送は、移流場に支配された特徴的な2つの経路を示す。1つは積丹半島沖合を北上する蛇行流に輸送される経路、もう一つは留萌陸棚から天塩陸棚へ輸送される経路であり、両経路は天塩陸棚上で合体している。それゆえ、両経路の間にある石狩湾沖と留萌陸棚沖の陸棚斜面域における濃度は相対的に低くなっている。このような陸棚斜面域の低濃度分布は、Fig. 5 に示した石狩湾沖の陸棚斜面域の幼生個体数密度が局所的に低いことを再現している。また、この低濃度を示す陸棚斜面域は雄冬岬に接岸し

ているため、この海域ではどのサイズの濃度も相対的に低い値をとる。この傾向は幼生個体数密度の調査結果 (Fig. 5) が示した石狩湾と留萌陸棚の幼生分布が二分されることも一致する。モデルによる再現性が悪い海域は石狩湾内である。すなわち、調査結果の S3・S4 サイズの高い幼生個体数密度は石狩湾奥にあるのに対し (Fig. 5), モデル結果は積丹半島側の濃度に対して、石狩湾内は常に低い濃度のままである。これは、初期値として石狩湾に与えた3格子分の単位濃度の設定が低かったため (定量的には示すことはできないが、石狩湾内の産卵母貝数が他の海域に比べて多い可能性がある：水産技術普及指導所の私信) と用いた流れ場の石狩湾沿岸域が発散場になっているため (Fig. 11(b)) が考えられる。

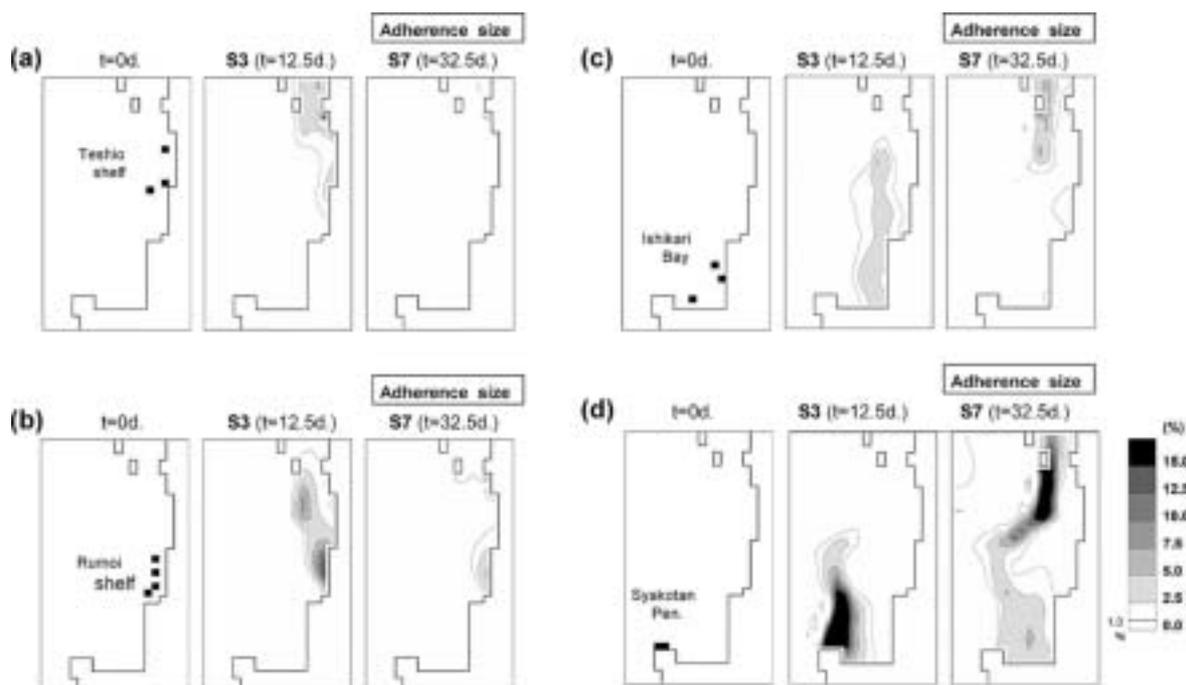


Fig. 15. The initial source locations (left), the model results at $t=12.5$ days (center) and $t=32.5$ days (right) in the cases for initial areas of (a) Teshio shelf, (b) Rumoi shelf, (c) Ishikari bay and (d) Syakotan peninsula

石狩湾内のモデル再現性 (主に、定量性の問題) が悪いことを念頭におき、本モデルを用いて、天塩陸棚・留萌陸棚・石狩湾・積丹半島北側の4つの推定産卵場が陸棚上の種苗生産にどのように寄与しているかを調べる。方法は簡単であり、上記の4推定産卵場毎に移流拡散計算を行い、Fig. 15に初期位置・ $t=12.5$ 日 (S3) と付着サイズの $t=32.5$ 日 (S7) の濃度分布を示した。濃度分布の表示は Fig. 14と同じであるが、非常に低い値である1.0%の濃度をコンターで示している。天塩陸棚を初期位置とした場合 (Fig. 15(a)), この海域は北向きの比較的強い移流場にあるため、ほとんどが北向きに移流され、S7サイズにおける天塩陸棚の濃度は1.0%以下となる。留萌陸棚を初期位置とした場合 (Fig. 15(b)), 北向きの弱い移流により輸送される部分と留萌陸棚上に残留する部分に二分される。留萌陸棚上に残留する主な原因は、この海域の北上流が弱いことと流れ場が収束域になっているためである。石狩湾を初期位置とした場合 (Fig. 15(c)), 先に議論したように濃度自体は低いものの、湾北側の陸棚斜面上にある強い北上流によって輸送される。そして、留萌陸棚沖を通過する際、その一部が拡散効果によって留萌陸棚上に輸送され、残留している。積丹半島北側を初期位置とした場合 (Fig. 15(d)), 主な輸送経路は沖合の北上する蛇行流にあるが、その一部が石狩湾内に輸送されている。この積丹半島側から石狩湾内への輸送は、調査結果が示すS6・S7サイズの高い幼生個体数密度が石狩湾西側にあること (Fig. 5) を定性的に説明できる。

以上の結果をもとに、石狩湾と留萌・天塩陸棚で行われている種苗生産に寄与する幼生輸送過程を推測すると次のようになる。石狩湾の種苗生産に寄与する幼生は、積丹半島以南の海域から湾西部を通して湾内へ輸送される。ただし、湾内の養殖母貝の数量が十分あれば、湾内で閉じた種苗生産も可能なのかもしれない (定量性の問題)。留萌陸棚の種苗生産には積丹半島以南の海域から輸送される幼生の寄与は小さく、石狩湾内及び同陸棚上の養殖母貝から産卵された幼生の寄与が大きい。ただし、石狩湾から留萌陸棚への幼生輸送過程において、モデル結果では沖合からの拡散効果が支配的であったが、うしお丸調査で示された海洋構造 (河川水分布や下に凸の水温分布) は雄冬岬を迂回して石狩湾から留萌陸棚へ直接流入する移流の存在を示唆している。それゆえ、留萌陸棚の種苗生産における石狩湾からの幼生輸送量の寄与は、モデル結果が示唆する以上に重要かもしれない。天塩陸棚の種苗生産には同海域の養殖母貝からの寄与は小さく、沖合を迂回して当海域へ輸送される積丹半島以南の海域の幼生もしくは留萌陸棚の養殖母貝からの幼生の寄与が大きい。

おわりに

北海道西岸沖のホタテ貝浮遊幼生が採苗器に付着するサイズに成長するまでの約一ヶ月という時間は、北上流の存在により、種苗生産に寄与する幼生の産卵場と種苗地点に大きな違いを生じさせる。本研究ではスナップショット

的な海洋観測・係留流速観測そして過去に蓄積された表層流データの解析から平均的な流動場の記述を行い、この流れ場をもとに、幼生を模した計算粒子の逆追算から産卵場を推定し、さらに、その推定産卵場を初期値とした移流拡散モデル計算を行うことによって、ホタテ貝種苗生産を支える浮遊幼生の輸送過程について考察した。

北海道西岸沖における流動場の大きな特徴は、陸棚斜面域から沖合側の北上流が強いのに対し、ホタテ貝養殖や採苗が行われている陸棚域の北上流が弱いことにある。そして、係留流速データは、陸棚域の平均流よりも変動流の振幅が大きいことを示す。移流拡散モデルでは、このような変動流は適当な水平拡散係数で表現される。種苗生産に寄与する幼生の産卵場は当然、種苗地点よりも上流（南）側にある。石狩湾の種苗生産には積丹半島以南（場所の特定はできない）からの幼生輸送の寄与が大きく、留萌・天塩陸棚の種苗生産には留萌以南の陸棚域（石狩湾を含む）からの幼生輸送が重要であることが示唆された。また、調査した2007年の留萌・天塩陸棚のホタテ貝養殖場では、4月20日ころの水温急上昇を引き金として一斉産卵が起こっていたことも示唆された。

以上の結果をもとに、北海道西岸沖の陸棚域が他の海域に比べて種苗生産に有利な環境条件を推測することができる。一般に、北海道周辺の陸棚・陸棚斜面域は対馬暖流・宗谷暖流・沿岸親潮が沿岸境界流として存在し、強い移流場の中にある。例えば、一方向への移流が存在する陸棚上で産卵された幼生をその下流側で採苗することを考える。宗谷暖流のように強い南下流がある場合、幼生は一ヶ月間に十分遠くまで移流分散させられてしまい（平均流速約 $30 \text{ cm s}^{-1} \times 1 \text{ ヶ月} \sim 780 \text{ km}$ ）、宗谷暖流域では産卵-採苗の閉じたサイクルは不可能となる。また、平均流が小さい海域でも、変動流が相対的に小さい場合には、採苗器を通過する幼生を捕らえる機会は限られた期間のみとなる。一方、北海道西岸沖の陸棚域では、沖合の強い北上流（対馬暖流の

主流域）が陸棚斜面を越えて浅い陸棚域へは直接侵入できず、陸棚上の変動流は平均流よりも卓越している。すなわち、北海道西岸沖陸棚上の平均流による幼生輸送が遅いことに加えて、養殖母貝からの産卵量が少なくても、変動流によって幼生は何度も採苗器を通過でき、採苗器に付着できる回数と期間が増加していると考えられる。

今後は、我々が種苗生産に有利な条件と考えた北海道西岸沖の流動構造、すなわち、沖合側の対馬暖流が陸棚斜面域を越えて陸棚域へ強く侵入できない理由と陸棚上で卓越している変動流の実態を調べてきたいと考えている。

謝 辞

今回の海洋調査を実施するにあたり、ADCP・CTD観測を快く行って頂いた北海道大学水産学部附属練習船うしお丸船長をはじめ、士官、乗組員の皆様、そして係留流速計の設置に協力して頂いた北留萌漁業協同組合の天塩支所森藤雄氏、天売支所吉田茂氏、苫支所横内淳氏そして増毛漁業協同組合石田和夫氏に心より感謝致します。

参 考 文 献

- 農林水産省北海道統計情報事務所 (2008): 北海道農林水産統計年報 (水産編) 平成18年. 188 pp.
- 林 勇夫 (2006): 水産無脊椎動物学入門. 294 pp.
- 日本水産学会 (1980): ホタテガイの増養殖と利用-増養殖の体系化に向けて. 126 pp.
- 小林直人・磯田 豊・高津哲也・山口秀一・木村 修 (2004): 練習船 ADCP を用いた迅速な海流情報提供に向けて-ADCP の品質管理処理プログラム-. 北大水産彙報, 55(2), 97-103.
- 矢幅 寛・磯田 豊・磯貝安洋・吉田 達・小坂善信・山内弘子 (2009): 非成層期における陸奥湾の吹送流. 北大水産彙報, 59(2), 47-57.