

北海道開発局管内の漁場整備に資する 物理環境調査と再現計算 — 沖合漁場における物理環境把握の試み（中間報告） —

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 水産土木チーム ○河合 浩
大橋 正臣
三上 信雄

日本海北部海域では、水産資源の回復のため漁獲規制による資源管理に加えて国直轄での漁場整備が望まれている。著者らは事業化に先立ち、漁場整備のための検討に必要な知見の収集を目的に、本海域において四季の環境調査を行うとともに、取得したパラメータを用いて数値計算による物理環境の再現を試みた。本報告では、対象海域の流況、水温・塩分等の水塊構造の特徴と数値計算の再現結果について考察する。

キーワード：自然環境、再生・回復、基礎技術

1. はじめに

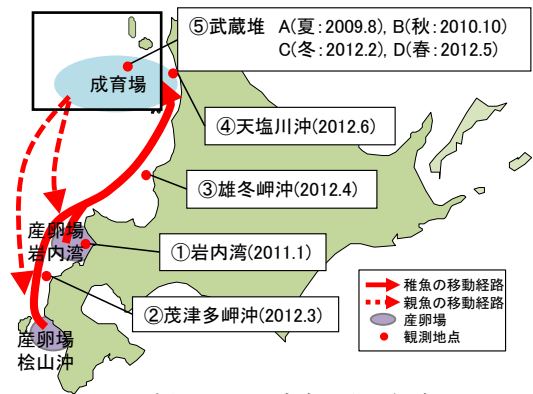
スケトウダラは国際的な資源管理対象種に指定されている。中でも日本海北部系群は1990年頃をピークに資源の減少が著しく、漁獲量の制限(TAC)が行われている。これに加え、直轄事業での漁場整備による資源回復も検討されている。

対象魚の生活史については、武蔵堆周辺を成育場とし、冬季に成熟した親魚は岩内湾や桧山沖に移動して産卵する。また、受精卵や仔魚は表層に浮上して春季に対馬暖流に乗って北上し、その多くは夏季に武蔵堆周辺で表層から中底層に生活の場を移す¹⁾ことが知られている(図-1)。これらを考慮した場合、漁場整備の検討は親魚の分布域のみならず、減耗率の高い産卵から仔稚魚期の移動経路を包括した広い海域が対象となる。

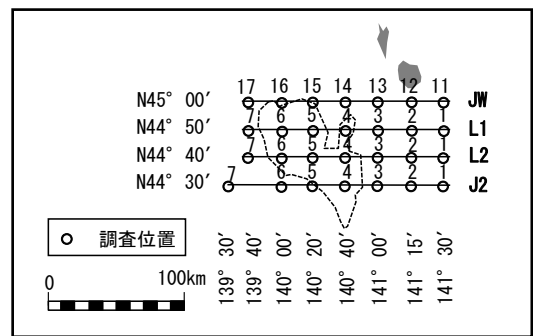
この広い海域において対象魚の生息環境を理解するためには、周年の栄養塩の分布、水域の密度分布や流れ場など物理環境を把握する必要がある。このため本研究では、現地調査による周年の特徴を抽出すると共に海洋モデルを用いた数値計算を行い物理環境の再現結果について考察を行う。

2. 対象海域の栄養塩と基礎生産の周年の傾向

現地観測は、産卵場から北上して成育場に至るまでの成長段階における生息場としての物理環境を評価するため、移動経路上(図-1)で実施した。



調査位置図と対象魚の移動経路



武蔵堆周辺の観測地点拡大図

図-1 調査位置図

また、成育場の武蔵堆周辺では周年の傾向を把握するため四季の観測²⁾を行った。観測項目は水温、塩分、栄養塩（硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素、リン酸態リン）、流速である。

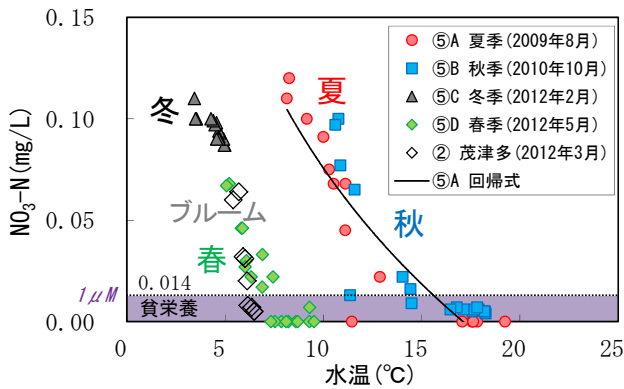


図-2 栄養塩と水温 (硝酸塩の周年の充足状況)

観測結果の内、栄養塩の代表値として硝酸塩の周年の充足状況を図-2 に示す。ここで硝酸塩濃度の $1 \mu\text{M}$ (0.014mg/L) は植物プランクトンが光合成に必要とされる閾値を示している。この結果と既往研究を基に基礎生産構造の概説を以下に示す。

冬季は表層冷却による鉛直混合で水温 5°C 、硝酸塩 0.9mg/L 付近で一定となっている。その後、全天日射量の増加とともに春季ブルームが発生し栄養塩が消費されるが、表層冷却による鉛直混合がある時期は底層からの栄養塩供給によってブルームが継続される。やがて水温上昇とともに成層化し、鉛直混合が阻害され下層から栄養塩供給が減少する。夏季には成層化が進み、躍層が浅(且つ補償深度も浅)では硝酸塩は閾値を下回り栄養塩が枯渇する。秋季は対馬暖流の影響によりさらに栄養塩が枯渇するが、終盤には再び表層冷却による鉛直混合が発生して冬季へ移行する。

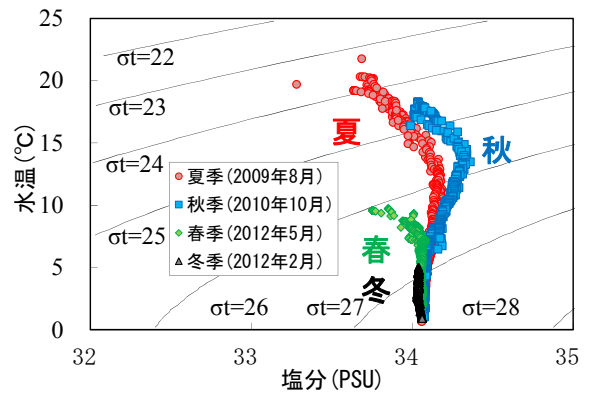
これら栄養塩のデータに加えて山本ら³⁾⁴⁾⁵⁾と林田ら⁶⁾は安定同位体 ^{13}C を用いた植物プランクトンの現地培養試験を実施し、低次生態系計算に用いる光合成パラメーターを取得して、季節毎及び各地点での基礎生産量の算出を行ってきた。

この結果から冬季は水温が低く、日射量が乏しいため栄養塩は十分であるが基礎生産は低位である。春季にはブルームが発生し四季の内、最も基礎生産が高くなる。成層化する夏季から秋季は生産量が低く、対馬暖流の影響でさらに低下する。

以上から、水塊の密度成層の形成状況や対馬暖流の影響によって栄養塩が枯渇する状況が見られ、これが生態系を下支えする基礎生産量へ影響するため、基礎生産が低迷する時期の対策の検討には、対象となる海域全体の物理場の把握が求められる。

3. 対象海域における物理場の特徴

海水密度は、水温が高い場合、もしくは塩分が低い場合に密度は小さい。対象海域における周年の水塊構造の



T-S ダイアグラム (J14, L1-4, L2-4, J2-4)

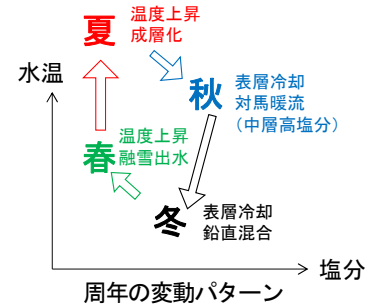


図-3 T-S ダイアグラムと水塊構造の周年の変化

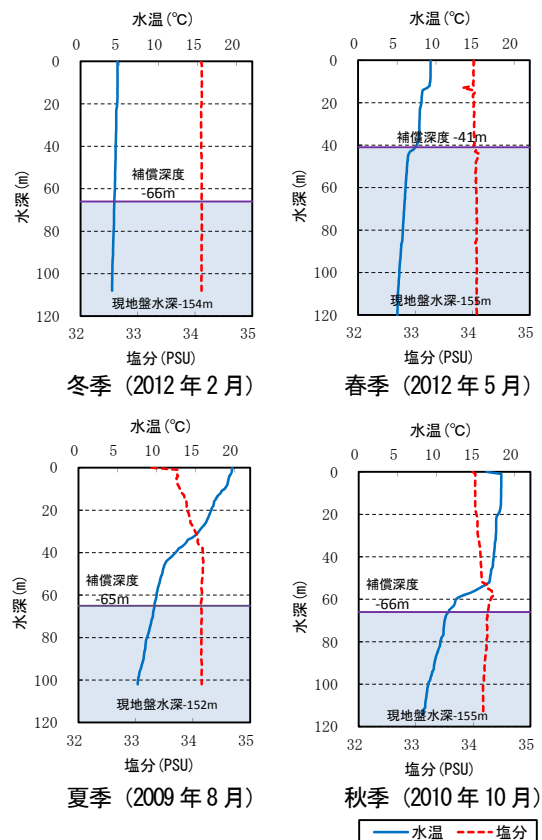


図-4 水温・塩分の鉛直分布 (L1-4)

変動パターンをT-Sダイアグラム(図-3)に示す。また、L1-4の季節毎の水温・塩分の鉛直分布を図-4に示す。冬季は水温が低く、表層冷却によって鉛直混合が生じてい

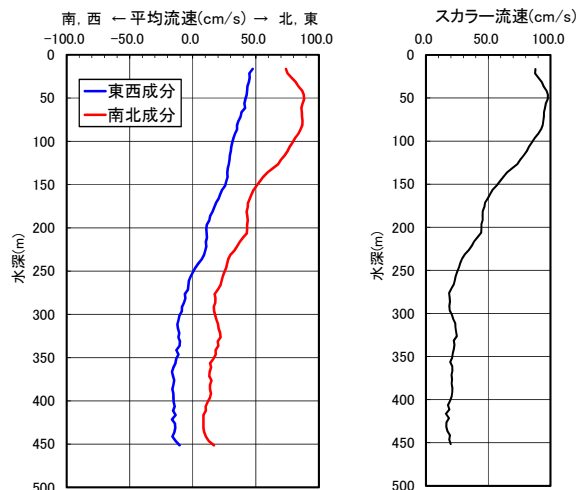


図-5 茂津多岬沖の流況の鉛直分布：春季（2012年3月）

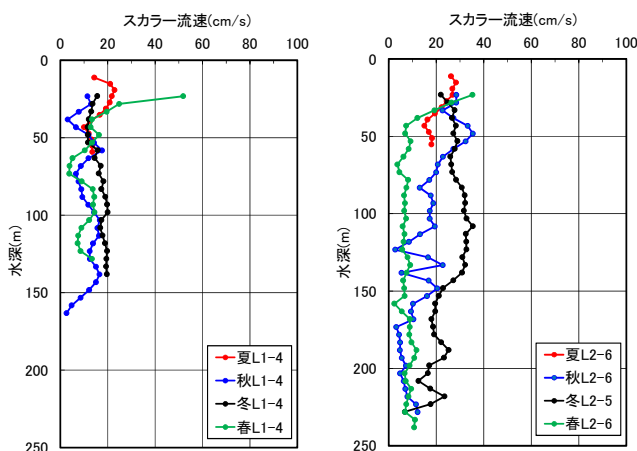


図-6 武蔵堆周辺の流況の鉛直分布：四季（L1-4, L2-6, L2-5）

るため、水温(約5℃)と塩分(約34PSU)は水深方向に一定で、他の季節の底層の値に等しい。密度は $\sigma_t=27$ 付近に分布している。春季になると表層の水温が徐々に上昇し、沿岸では融雪出水の影響もあって塩分が低い。夏季は成層化した表層部で水温が高く、塩分も低い。これにより密度は表層で $\sigma_t=23$ 付近まで小さくなる。秋季は表層冷却が始まって表層での水温低下がみられるが、対馬暖流の特徴である中層高塩分が見られる。躍層の位置は夏季より深くなり表層の混合層が深くなっている。やがて表層冷却が進むにつれ、冬季へと移行する。

北上する対馬暖流の勢力を把握するため、春季に茂津多岬沖で観測した流況の鉛直分布を図-5に示す。これはドップラー流速計(ADCP75kHz)を小型漁船に固定し、船上から3~4時間の定点観測したものである。東西成分と南北成分に分解した図から、表面から水深250m付近までは南東からの向きの流れになっており、それ以深は南西からの向きになっている。スカラー流速から水深50m付近で最も早く、表面から水深160mまでに50~100cm/s程度の流速が見られる。水深とともに流速が小さくなり、水深260m以深では20cm/s程度となっている。

Hiroshi Kawai, Masami Ohashi, Nobuo Mikami

さらにL1-4と武蔵堆の西側にあるL2-6、L2-5について、各々四季の流況を図-6に示す。これは観測船(北海道立稚内水産試験場保有)で計測した瞬間値(10分間平均)である。春の表層付近で一部50cm/sを超える流速が観測されたが、概ね5~30cm/sの流速が観測された。

これらの物理場の特徴を基に数値計算を実施し、後述する既存知見と合わせて再現性を検証する。

4. 数値計算の結果

(1) 計算方法

数値計算は米国のプリンストン大学で開発された海洋循環モデル(POM-08)⁷⁾を使用した。このモデルは σ 座標系で、広域な海洋循環や沿岸域の海流及び潮流の計算に適している。現在、一般に公開されて多くの研究者が使用しているものである。

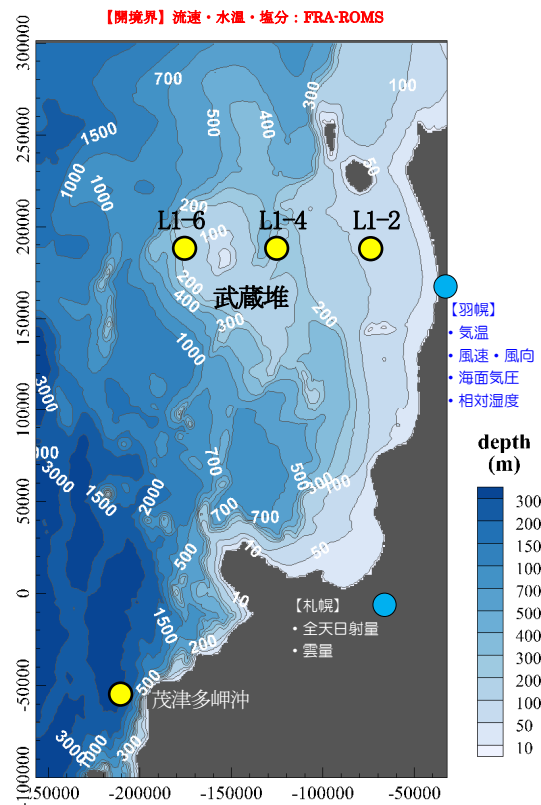


図-7 計算の領域

表-1 計算条件の一覧

項目	条件
格子間隔	1,000m(正方格子)
鉛直層分割	σ 座標20層
時間ステップ	外部モード:2.0秒, 内部モード:30.0秒
境界条件	放射境界条件を設定 流速, 水温, 塩分: FRA-ROMS, 現地観測値(流速:茂津多岬沖) 水位: 変動なし
初期条件	水温, 塩分: FRA-ROMS, 現地観測値
再現時期	夏季: 2009年8月1日~2009年8月4日 秋季: 2010年10月4日~2010年10月7日 冬季: 2012年2月13日~2012年2月16日 春季: 2012年5月8日~2012年5月11日

POMは σ 座標系で静水圧近似、Boussinesq近似された3次元Navier-Stokes方程式が基礎式であり、以下に連続式(式-1)と運動方程式(式-2、3)を示す。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Du}{\partial x} + \frac{\partial Dv}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0 \quad (\text{式-1})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial uD}{\partial t} + \frac{\partial uuD}{\partial x} + \frac{\partial uvD}{\partial y} + \frac{\partial u\omega}{\partial \sigma} - fvD \\ = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left[\frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right] d\sigma \\ + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_M}{D} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D \left(2A_M \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D \left(A_M \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \right\} \end{aligned} \quad (\text{式-2})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial vD}{\partial t} + \frac{\partial uvD}{\partial x} + \frac{\partial vvD}{\partial y} + \frac{\partial v\omega}{\partial \sigma} + fuD \\ = -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left[\frac{\partial \rho}{\partial y} - \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right] d\sigma \\ + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_M}{D} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D \left(A_M \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D \left(2A_M \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right\} \end{aligned} \quad (\text{式-3})$$

ここに変数(u, v)は水平速度成分、 ω は σ 面上の法線方向の速度成分、 D は全水深、 f はコリオリ係数、 g は重力加速度、 A_M 、 K_M は水平、鉛直渦動粘性係数である。

計算領域及び計算条件を図-7、表-1に示す。地形は日本海洋データセンター(JODC)による500mメッシュ水深データ(J-EGG500)を利用した。気象データは気象庁による札幌及び羽幌の気象台観測値を利用した。なお、水平の格子間隔は1000mメッシュとし、鉛直方向は20層とした。境界条件は、北海道と奥尻島間には茂津多岬沖の観測値(流速)を与え、その他の境界は(独)水産総合研究センターが配布するFRA-ROMSの流速とした。境界近傍にはFlow Relaxation Scheme(FRS)を適応して流れの安定化を図った。これに初期条件としてFRA-ROMSと現地観測の水温塩分を与えて助走させて初期値とした。再現時期は現地観測期間に合わせて四季の再現を行った。

(2) 計算結果 (水温・塩分)

水温の数値解析結果を図-8に示す。これは夏季から秋季にかけて密度成層が形成される境目付近として水深50mの結果を示した。冬季、春季ともに5°C程度を示し、図-4(L1-4)のデータと比較しても現地観測結果に等しい。鉛直混合が行われているこの時期では、水深0m及び水深100m付近も同程度の水温で再現された。秋季は対馬暖流の影響で夏季に比べてこの水深帯で水温の上昇が見られ現地観測値と一致する。

秋季の水温と塩分の鉛直分布について現地観測値と数値解析値を図-9に示す。現地観測値は、密度成層が形成されておりL1-6、L1-4とL1-2では、躍層の深さが異なる。数値計算値においても良好に再現されている。図-8の秋季のデータからも概ねこの傾向がわかる。

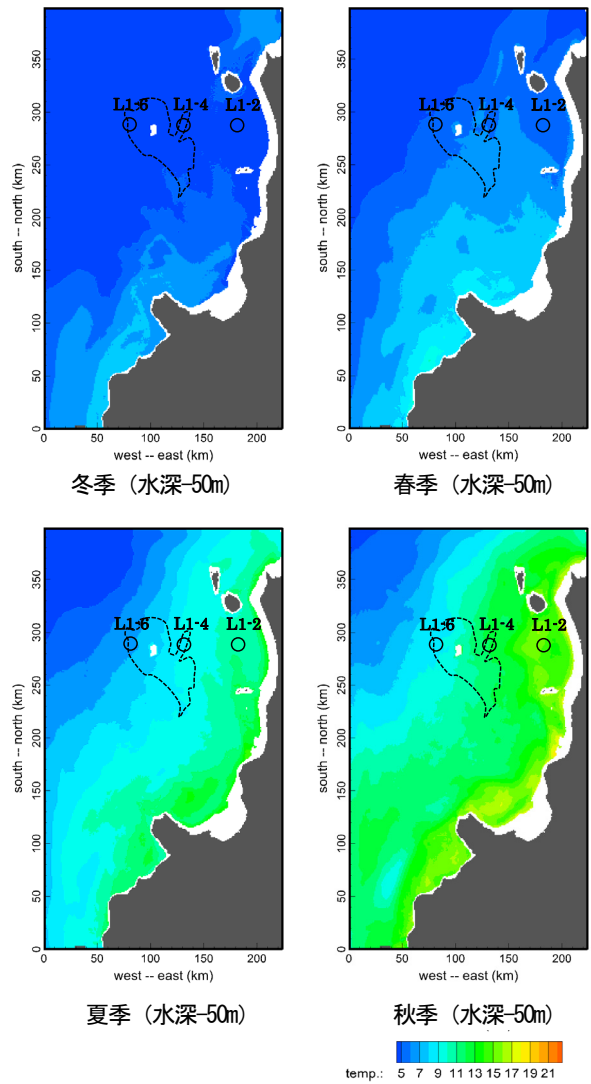


図-8 水温の数値解析

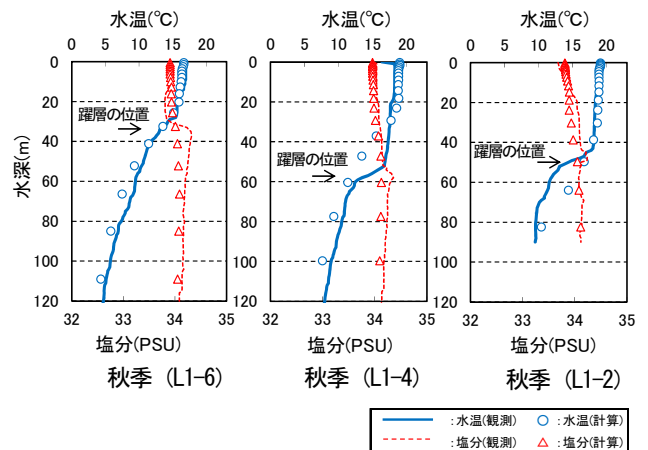


図-9 現地観測値と数値解析値(水温・塩分の鉛直分布)

このように四季の水温と塩分の変動パターンを数理計算により良好に再現することが可能となった。特に夏季や秋季の躍層位置の空間変化についても再現性が良いことが確認できた。

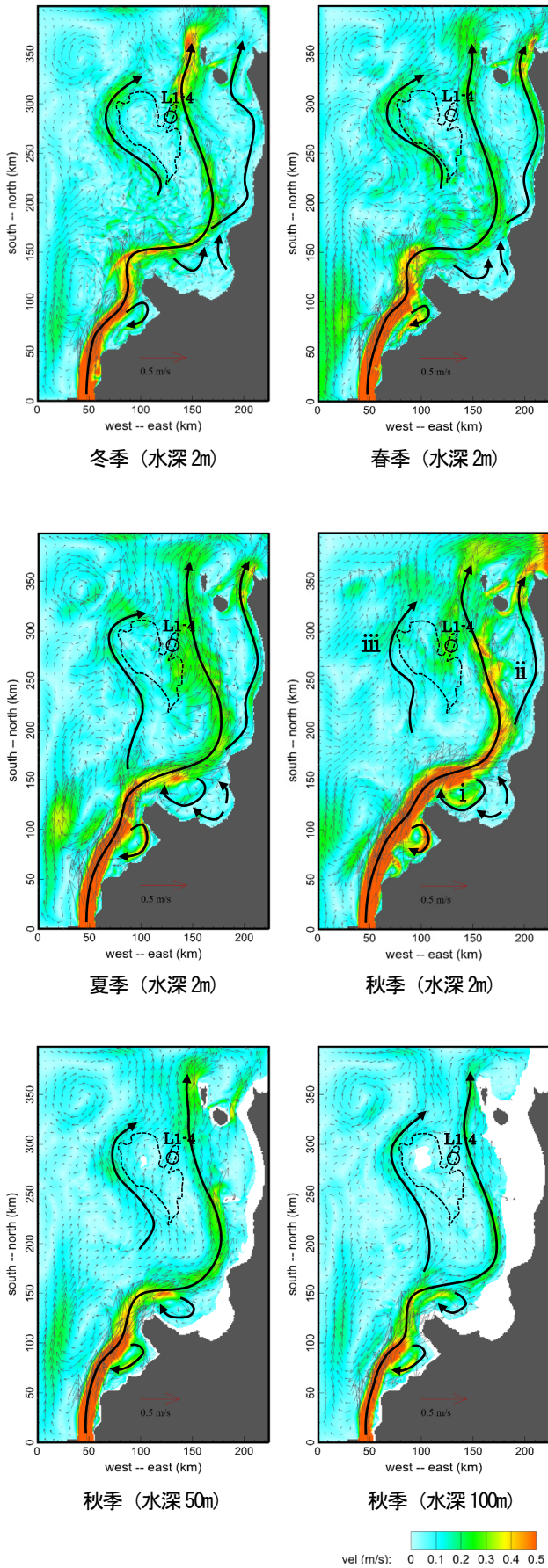


図-10 流況の数値解析

(3) 計算結果 (流向・流速)

四季の流向・流速の計算結果を図-10に示す。これは水深2mの四季の再現、対馬暖流の勢力が増す秋季を水深別(2m, 50m, 100m)に再現したものである。

対象海域の流向については、既存知見として檜垣ら⁸⁾⁹⁾が武蔵堆周辺のモード水を以下のように報告している。北上する対馬暖流は分岐する流れがあり、**I**:沿岸側の分岐流は石狩湾沖で小さな暖流渦流を形成する。**II**:その後は北海道西岸沖の陸棚縁に沿って北上する。**III**:沖側の分岐流は武蔵堆の沖側端を時計回りに迂回して北上するとされている。

これらを踏まえ流況の再現性について考察すれば、北上する対馬暖流は概ね水深200mの等深浅沿いに武蔵堆と北海道沿岸の間にある谷を抜ける流れが主流になっている。**i**:石狩湾内では渦流が見られ、**ii**:その後は陸に沿って、北上する流れとなっている。なお、石狩湾に流入する河川水は沖(西側)への流出と沿岸を北上する2系統が再現されている。また、**iii**:沖側に分岐して武蔵堆の沖側を時計回りに迂回して流れる。これらは檜垣らが示す流れと一致するものである。(秋季(水深2m)参照)

武蔵堆(L1-4)における流速の鉛直分布について現地観測値と計算結果を図-11に示す。現地観測値は図-6にも示したが、数値解析値とともに概ね5~30cm/sのオーダーで大きな差は見られないと考えられる。

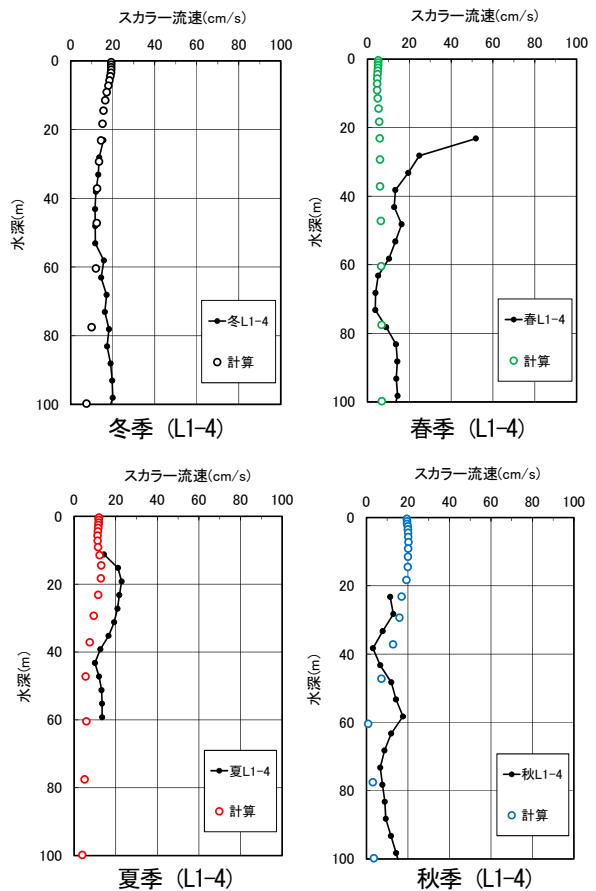


図-11 流況の現地観測値と数値解析値(四季の鉛直分布:L1-4)

5. おわりに

四季の現地観測結果から栄養塩や水塊構造の周年の変動やその特徴を基に数値計算による現況再現を行った。特に物理環境（水温・塩分や流況）について計算を実施し再現性を確認した。以下にまとめを示す。

- ・四季の水温と塩分の変動パターンを数値計算により良好に再現することが可能となり、特に夏季や秋季の躍層位置の空間変化についても再現性が良いことが確認できた。
- ・流向の再現性は、武蔵堆周辺だけでなく石狩湾など計算領域の全体で既往知見（檜垣ら）と一致する結果が得られた。
- ・流速については現地観測値と比較して同オーダーであることを確認した。
- ・上述のように物理環境を再現することで現地観測によって得られた点のデータを空間的に捉えることが可能になったと考えられる。

課題としては、①初期条件に利用したFRA-ROMSデータは冬季から春季にかけてオホーツク海から日本海への大規模な海水流入が見られる場合がある。これには年変動などが考えられるため代表的な水分、塩分場としてどのように扱うか検討が必要である。②日本海では潮汐力が小さく流れ場として対馬暖流が支配的であるため、海流の現況把握が重要である。しかし、現地観測データが乏しいため、流況の連続観測データを取得するなど、恒流、往復流の影響を把握する必要がある。特に冬季には吹送流が卓越すると考えられ、これらを考慮することも重要である。

今後はさらなる詳細な計算（3Dモデルの活用等）で事業の検討に資するツールの開発を進めたい。また、この物理場モデルとこれまでに構築してきた生態系モデルのシミュレーションの活用により、生活史に対応した生息環境および餌料環境を把握し、その改善の検討に応用できる可能性がある。例えば、対象魚の卵から仔魚期の移動経路を予測し、その経路上の餌料改善（湧昇効果）または減耗低減（保護効果）など、発育段階ごとの連続性、ネットワーク化（幼稚子保育場、成魚生息場、親魚滞留礁）を踏まえて、生態系全体の生産力の底上げの検討に貢献したい。

謝辞

本研究は、寒地土木研究所と道総研中央水産試験場の共同研究「武蔵堆周辺の流況・水質観測、低次生態系の導体把握及びモデル化に関する研究」及び国立大学法人北海道大学低温科学研究所との共同研究「北方沖合海域における物理環境及び生物環境の再現に関する研究」の一環として実施された。御協力頂いた関係機関の皆様に厚く御礼申し上げます。

Hiroshi Kawai , Masami Ohashi , Nobuo Mikami

参考文献

- 1) 日本海洋学会沿岸海洋研究部会（1990）：続・日本全国沿岸海洋誌，東海大学出版会，pp. 265-269.
- 2) 河合浩・山本潤・大橋正臣（2012）：北海道開発局管内の漁場整備に資する水域環境のバックグラウンド調査，沖合漁場における物理環境や基礎生産の現状について，北海道開発局技術研究発表会.
- 3) 山本潤・渡辺光弘・林田健志・峰寛明・坂本和佳・西田芳則・田中仁（2010）：日本海北部海域での漁場整備の実現に向けた観測の試み，土木学会論文集 B2(海岸工学)，第66巻，pp. 1291-1295.
- 4) 山本潤・渡辺光弘・林田健志・峰寛明・坂本和佳・西田芳則・田中仁（2011）：日本海北部漁場における表層冷却期の基礎生産構造に関する現地観測，土木学会論文集 B2(海岸工学)，第67巻，pp. 1026-1030.
- 5) 山本潤・河合浩・大橋正臣・林田健志・西田芳則・田中仁（2013）：水産生物の生活史に対応した北方海域の基礎生産構造に関する Lagrange 的な現地観測，土木学会論文集 B2(海岸工学)，第69巻，pp. 1376-1380.
- 6) 林田健志・山本潤・大橋正臣・河合浩・坂本和佳・村上俊哉・工藤勲（2013）：北方海域に適用する低次生態系モデルのための生物パラメータの取得，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol. 69，No. 2
- 7) Mellor, G.L. (2004) : USERS GUIDE for A THREE-DIMENSIONAL, PRIMITIVE EQUATION, NUMERICAL OCEAN MODEL, <http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom>
- 8) 檜垣直幸・磯田豊・磯貝安洋・矢幅寛（2008）：北海道西岸沖における水系分布と流れパターンの季節変化，海の研究(Oceanography in Japan), 17(4), pp223-240.
- 9) 檜垣直幸・磯田豊・本田聡（2009）：北海道西方の武蔵堆周辺海域で観測されたモード水，海の研究(Oceanography in Japan), 18(6), pp335-350.