

12.5 北方海域の物理環境改変による生物生産性の向上に関する研究

研究予算：運営費交付金(一般勘定)

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：水産土木チーム

研究担当者：三上信雄、岡元節雄、佐藤仁、河合浩、大井啓司、
大橋正臣

【要旨】

本研究は、北方海域の生物生産性の向上を図るための漁場整備に必要な技術開発を行うものであり、当海域における基礎生産構造を解明し、適切な工法等の効果的な事業推進に向けた技術提案を行い、効果の評価手法を開発することとしている。これらの検討には、対象魚の資源状況に加えて、漁場周辺の物理環境、生物生息状況と餌料環境、基礎生産の周年の傾向等を把握する必要がある。春のブルーミング、夏の密度成層、秋の表層冷却、冬の完全混合といった各季節の代表的な現象を対象として現地観測を行う予定である。平成 23 年度には対象種の産卵・仔魚期である冬季の物理環境や生物量等を把握する現地観測を行い、海域の冬季の基礎生産構造や生物生息環境の評価を行った。平成 24 年度には対象種の幼魚期である春季に同様の現地観測を行い、幼魚の餌料環境としての視点から基礎生産構造の評価を行った。平成 25 年度には生物生産性向上に関する現地観測を行い、整備効果を算出するための数値モデルの検討を行った。

キーワード：基礎生産量、漁場肥沃化、保護育成、生態系モデル、栄養塩枯渇、個体群動態モデル

1. はじめに

排他的経済水域における水産資源の生産力を向上させ、水産物の安定供給の確保を図ることを目的に平成 19 年より直轄漁場整備事業(フロンティア漁場整備事業)が開始された。まず、鳥取・島根県沖において、アカガレイ・ズワイガニを対象に保護育成礁の設置が行われ¹⁾、また、長崎県五島西方沖においてもマアジ・マサバ・マイワシを対象に事業が開始され¹⁾、さらに北海道周辺における実施の可能性についても検討されている。

北海道の主要な水産有用種の 1 つにスケトウダラがあるが、その漁獲量は著しく減少しており、平成 9 年に TAC 対象種に指定され、漁獲が数量的に管理されている。北海道日本海北部沖はその優良な漁場として知られており、この魚種を対象とした直轄漁場整備事業の候補地として有望視されている。水産土木チームでは、当該海域周辺において、主にスケトウダラを対象とした事業実施に資する技術開発を行うことを目的に調査を開始した。

平成 21～22 年度には、一般研究として基礎的な知見の収集を行った。この結果として夏季の密度成層に伴う表層の栄養塩枯渇と基礎生産量の抑制、秋季の表層冷却過程における暖流の影響といった物理環境や基礎生産の概況を把握した。平成 23 年度からは

プロジェクト研究として基礎生産構造に関する周年の傾向をより詳しく解明し、技術開発に向けた実践的な研究を開始した。本稿では、この取り組み状況と現時点までに得られた成果を報告する。

2. 生物生産性の向上のための技術開発に関する議論のポイント

当海域の漁場整備として考えられる工法に、湧昇流発生マウンドと保護育成礁があり、目的は海域の肥沃化や資源の減耗原因の解消である。前者は、夏季の密度成層によって混合層(有光層内)の栄養塩が枯渇して基礎生産が抑制されている場合に、底層の栄養塩を供給して基礎生産量を増大させることで、餌料が増大し、対象魚の増肉と減耗率の低下を図るものである。これには栄養塩が枯渇する時期があり、この時期に湧昇流を発生の外力が必要である。

一方、後者の工法は対象魚が生息する海底微地形の回復を図り、減耗率の大きな稚魚や幼魚を保護し、生息環境を整えることで初期減耗を低下させるものである。これは保護すべき対象魚が分布し、補食生物や違法操業等からの保護効果が期待できることが条件である。

これらの適地の選定や工法選択等を行い事業の基本方針を決めるにあたっては、対象魚の資源状況に

加えて、漁場周辺の物理環境、生物生息状況と餌料環境、基礎生産の周年の傾向、海底の微地形の状況等の判断材料が必要である。

3. 調査方法

基本的な海域環境を把握するため、スケトウダラの成育場となっている周辺の四季の調査、産卵場所と移動経路上の調査を行った。調査位置を図-3.1に示す。成育場となる武蔵堆周辺の調査は、四季の変動を調査するため、夏季(2009年8月)、秋季(2010年10月)、冬季(2012年2月)、春季(2012年5月)に地方独立行政法人北海道立総合研究機構水産研究本部(以降、「道総研」と称する)が定期的に行っている調査箇所(JW, J2)に測線(L1, L2)を追加した地点(図-3.2)で実施した。また、スケトウダラの産卵場から成育場までの移動経路と移動時期に合わせて、産卵場である岩内湾(2011年1月)、移動経路上の茂津多岬沖(2012年3月)、雄冬岬沖(2012年4月)、稚魚が到達する天塩川沖(2012年6月)で実施した。

主な調査項目は、水温・塩分(密度成層の状況)やChl.a、流況等の観測、栄養塩、植物プランクトン、動物プランクトンの分析を行った。また、基礎生

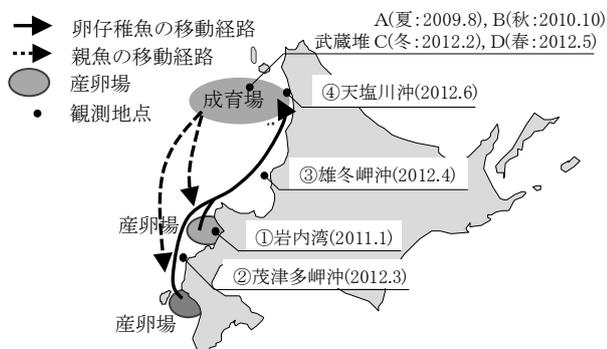


図-3.1 スケトウダラの移動経路と調査位置図

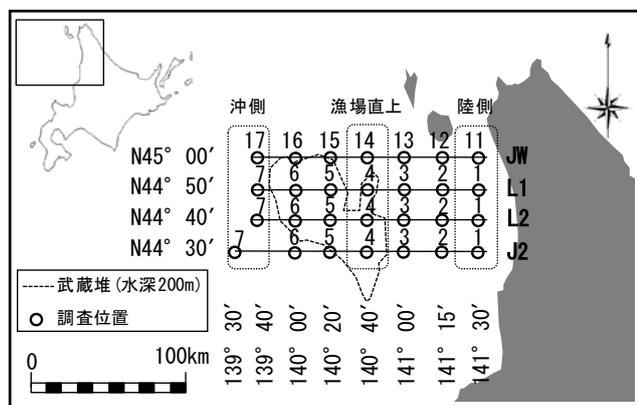


図-3.2 調査位置(日本海北部海域)

産量算出に必要な光-光合成曲線のパラメータを求めるため、植物プランクトンの現地培養試験を行った。現地観測の詳細は山本ら²⁾³⁾¹⁶⁾を参照されたい。

4. 観測結果

4.1 光量子量

光量子量観測結果と補償深度を図-4.1に示す。補償深度を表層の1%光量とすると、消散係数から、夏季と秋季では51m~66mであり、冬季は54m~66m、春季は35m~64mであった。夏季から冬季にかけては大きな違いは見られなかったが、春季は植物プランクトンの大增殖による自己遮蔽の影響が見られた。

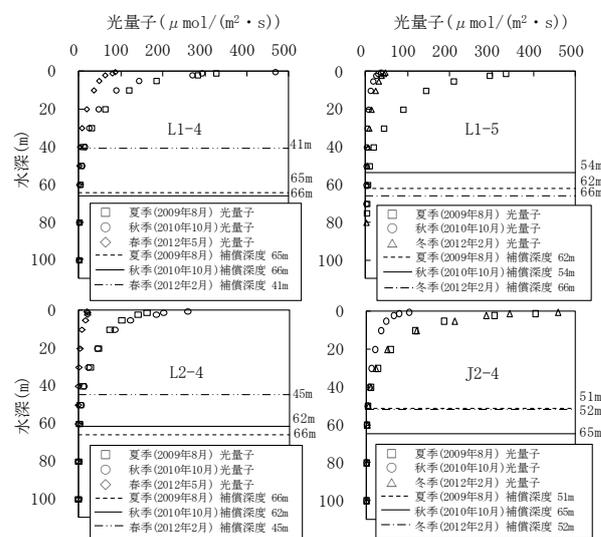


図-4.1 光量子量観測結果と補償深度

4.2 栄養塩

栄養塩分析の結果を図-4.2に示す。これは四季に観測された全測点のデータをプロットしたものである。ここで植物プランクトンが光合成に必要な一般的な硝酸塩濃度を0.014mg/L、リン酸塩濃度を0.003mg/L、ケイ酸塩濃度を0.056mg/Lとし⁴⁾、これ以下を貧栄養とした。

夏季と秋季の密度成層期では、水温15.5℃以上となる水域で硝酸塩が不足する状況が確認された。これは表層から水深50m付近までの水温に相当し、この時期の基礎生産は、表層での硝酸塩不足が制限要因となっていると考えられる。一方、冬季は表層冷却に伴う鉛直混合により栄養塩の枯渇が回復していることが確認された。春季では増加した植物プランクトンにより消費され、表層から補償深度まで硝酸塩とリン酸塩が枯渇したと考えられる。

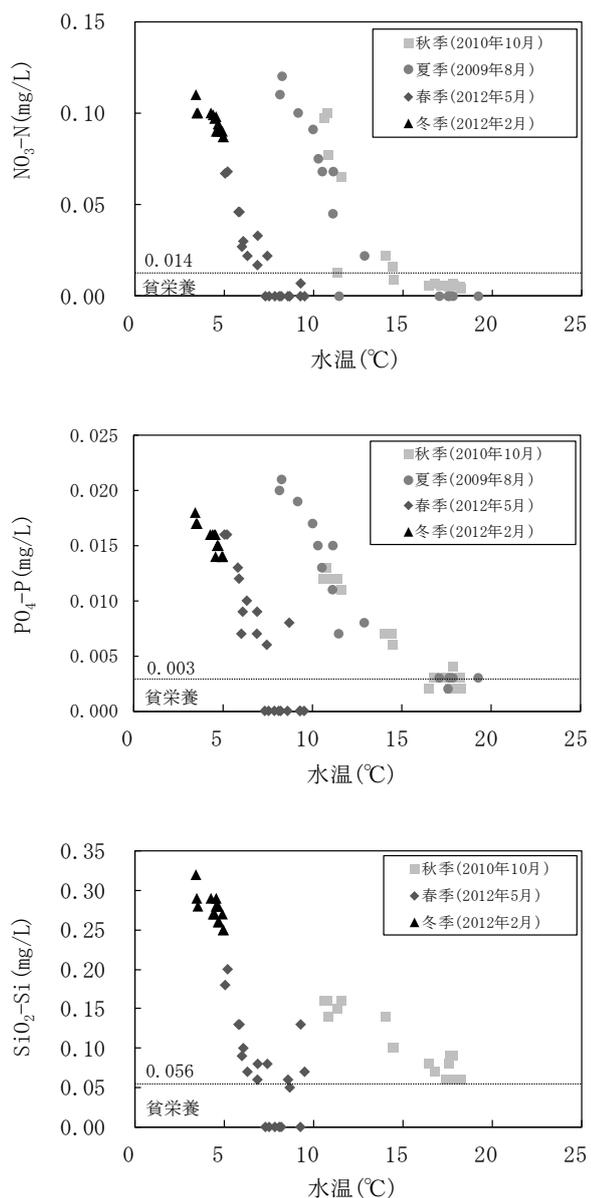


図-4.2 栄養塩と水温の関係

4.3 生物量

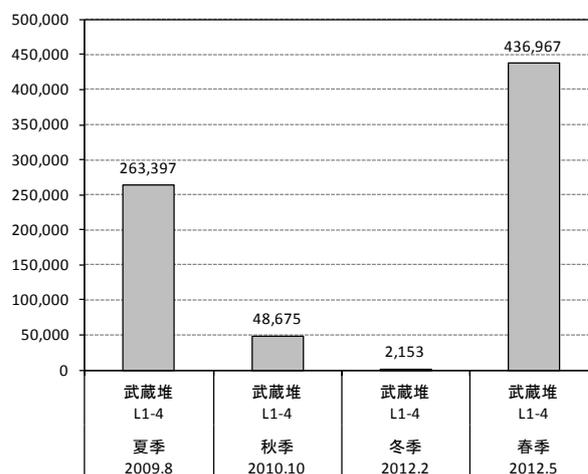
(1) 植物プランクトン

武蔵堆の主要な漁場、成育場となっている L1-4 と移動経路上において、植物プランクトンの出現量を図-4.3.1 に示す。植物プランクトン量は、武蔵堆においては春季に最も多く、以降は徐々に減少して冬季に最も少なかった。移動経路上では3月の茂津多沖で最も多く徐々に減少していた。

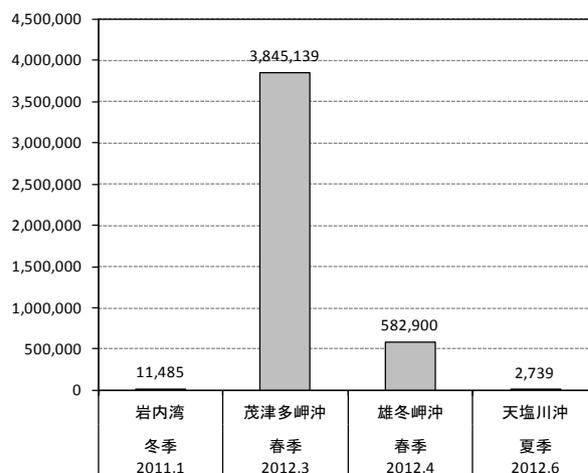
種組成を図-4.3.2, 図-4.3.3 に示す。武蔵堆において夏季の主な出現種は、*Nitzschia pungens* (珪藻綱) が第1層(組成比率 97.2%)と第2層(組成比率 98.3%)で優占していた。これを除く主な出現種としては *Nephroselmis* sp. (ユーグレナ珪藻綱)、*Prorocentrum*

balticum (渦鞭毛藻綱) となっていた。秋季は *Hemiaulus hauckii* (珪藻綱) が第4層(組成比率 64.8%)と第5層(組成比率 63.7%)で優占していた。続いて *Chaetoceros compressum* (珪藻綱)、*Bacteriastrium hyalinum* (珪藻綱)、*Chaetoceros curvisetum* (珪藻綱) が主に出現していた。

冬季は *Thalassionema nitzschioides* (珪藻綱)、*Thalassiosira* sp. (珪藻綱)、*Distephanus speculum* (黄金色藻綱) が主に出現していた。冬季の出現種は、各層の最大となる組成比率でも 31.2%以下であり、優占種は見られなかった。また、第1層から第6層までに出現した種は、各層での種組成にあまり変化がないものとなっていた。このことは鉛直混合が全層に渡り行われている考察を裏付けているものと考えられる。



植物プランクトン細胞数 (成育場：武蔵堆)



植物プランクトン細胞数 (移動経路)

図-4.3.1 植物プランクトンの出現量

12.5 北方海域の物理環境変化による生物生産性の向上に関する研究

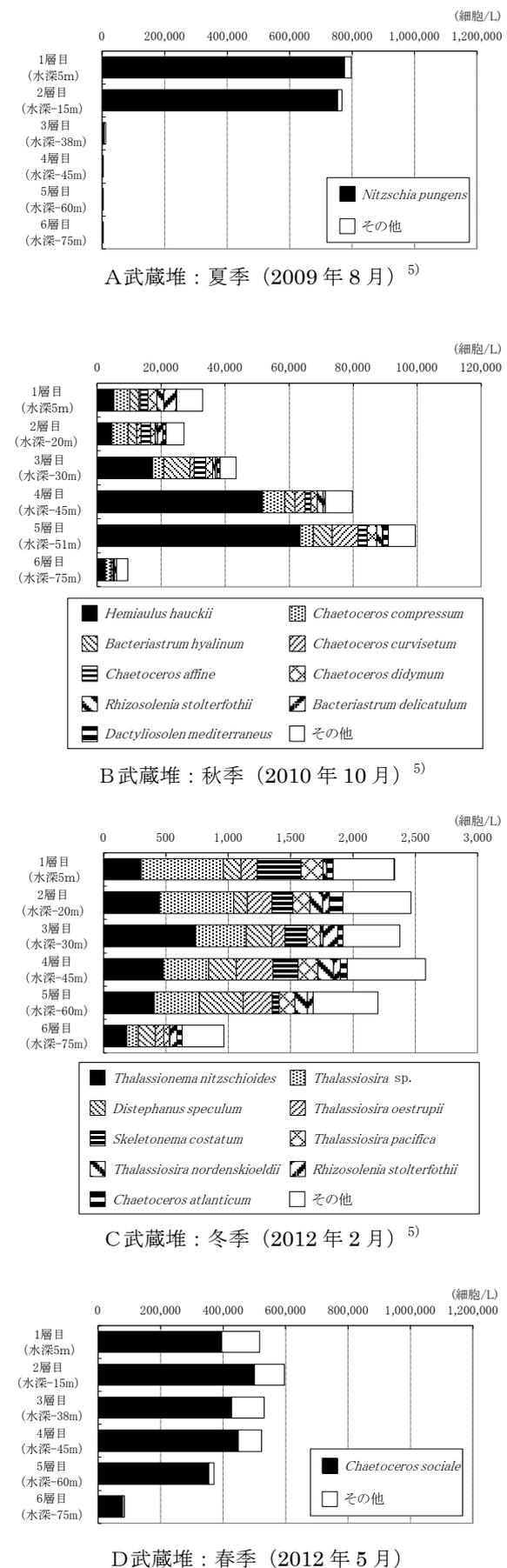


図-4.3.2 植物プランクトンの種組成 (武蔵堆:L1-4)

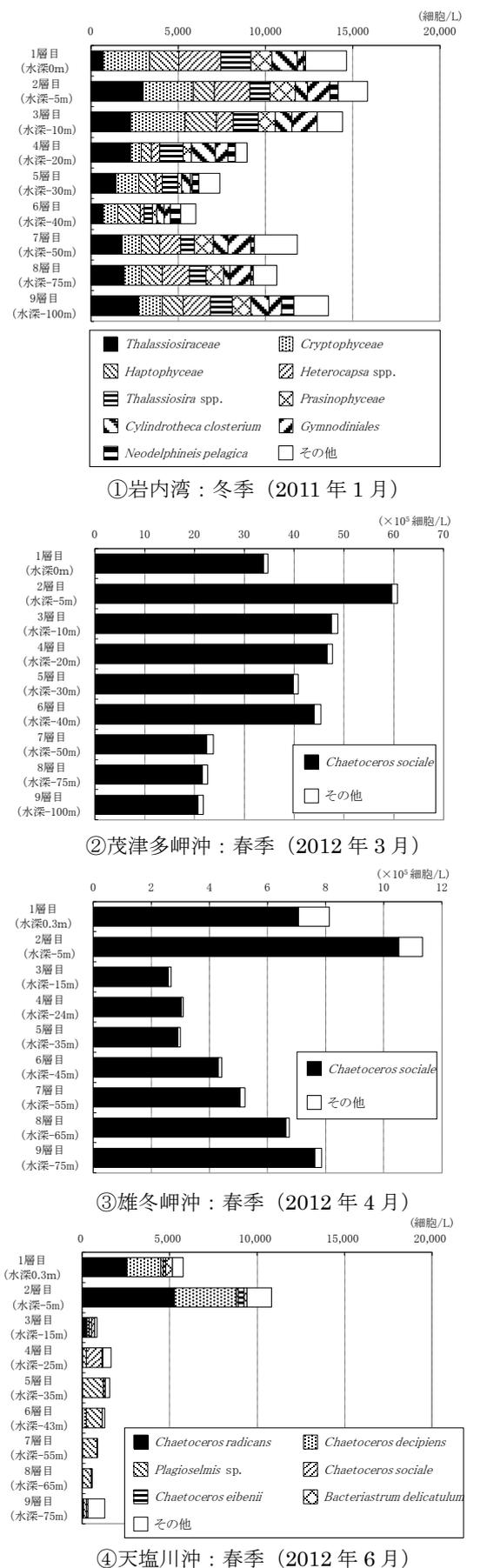


図-4.3.3 植物プランクトンの種組成 (移動経路)

春季は、春の代表種と言われている *Chaetoceros sociale* (珪藻綱) が 76.5~95.8% で最も組成比率が高かった。

移動経路上については、1月の岩内湾は武蔵堆の冬季(2月)ように各層とも種類数に大きな違いはなく珪藻類が50%以上を占めていた。春季ブルーム期である3月の茂津多岬沖では *Chaetoceros sociale* (珪藻綱) が90%以上を占め、4月の雄冬岬沖においても80%以上を占めていた。

6月の天塩川沖では、第1~2層で *Chaetoceros radicans* (珪藻綱) と *Chaetoceros decipiens* (珪藻綱) が多く出現し、合わせて70%以上を占めた。3層では *Chaetoceros radicans* (珪藻綱)、4層では *Chaetoceros sociale* (珪藻綱)、5~8層では *Plagioselmis* sp. (クリプト藻綱)、9層では *Skeletonema costatum* (珪藻綱) が多く出現し、各水深帯で優占種がことなる傾向が見られた。

これらの調査結果では、季節変化に伴い種組成や細胞数が異なり、特に春季ブルーム(3月~5月)は *Chaetoceros sociale* (珪藻綱) が9割方を優先していたことから、本種を含む珪藻類が当海域の基礎生産を支えていると考えられる。

(2) 動物プランクトン

北原式ネットで採取した動物プランクトンの出現量を図-4.3.4に示す。

季節別の動物プランクトン量は、植物プランクトンと同様に、春季に多く、冬季に最も少ない傾向であった。移動経路上においては、植物プランクトンは3月の茂津多岬沖が最も多かったのに対し、動物プランクトンは4月の雄冬岬沖で最も多かった。

動物プランクトン種組成を図-4.3.5、図-4.3.6に示す。夏季は *Paracalanus parvus* (節足動物甲殻綱)、*Oikopleura longicauda* (脊索動物尾虫綱)、*Nauplius of COPEPODA* (節足動物幼生)、*Oithona similis* (節足動物甲殻綱) が主に出現していた。個体数は第1層で最も多く第2層も多かった。

秋季は *Nauplius of COPEPODA* (節足動物幼生)、*Paracalanus parvus* (節足動物甲殻綱)、*Oithona similis* (節足動物甲殻綱)、*Oncaea media* (節足動物甲殻綱)、*Oikopleura longicauda* (脊索動物尾虫綱) が主に出現し、個体数は第1層で最も多かった。

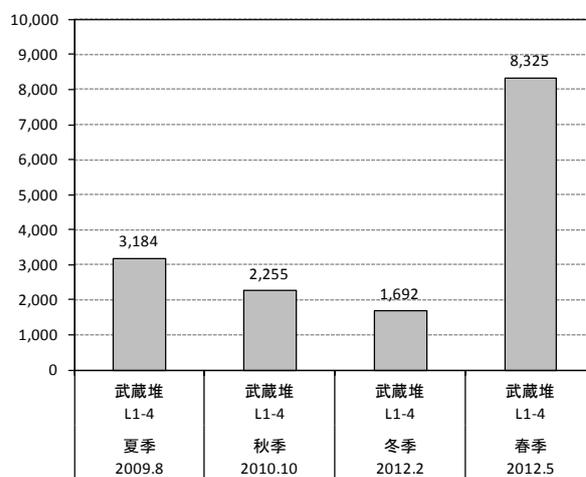
冬季は、*Nauplius of COPEPODA* (節足動物幼生)、*Triconia borealis* (節足動物甲殻綱)、*Oithona similis* (節足動物甲殻綱) が主に出現し、個体数は第1層で

最も多かった。

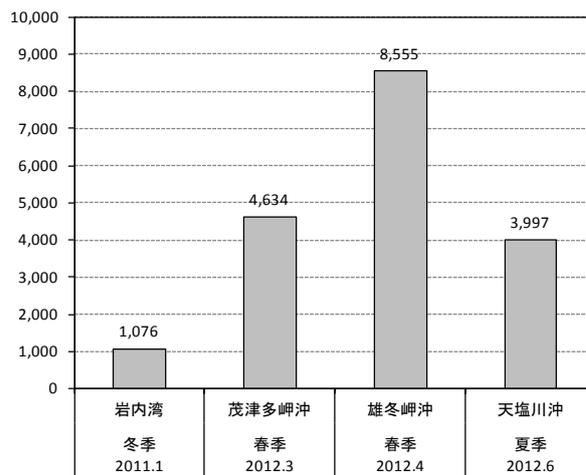
春季は全ての層で *Nauplius of COPEPODA* (節足動物幼生) が組成率44.2~75.3% で多かった。

その他としては *Oithona similis* (節足動物甲殻綱)、*Pseudocalanus newmani* (節足動物甲殻綱)、*Metridia pacifica* (節足動物甲殻綱) が出現した。

動物プランクトンの個体数は上層ほど多い傾向であったが、餌となる植物プランクトンは夏季で上層、秋季で中層に多く、冬季は鉛直的にほぼ一様の分布となっていたことから、餌生物以外の要因でこの鉛直分布が形成されていると推察され、その要因としては動物プランクトンの日周鉛直運動や水温などが考えられる。



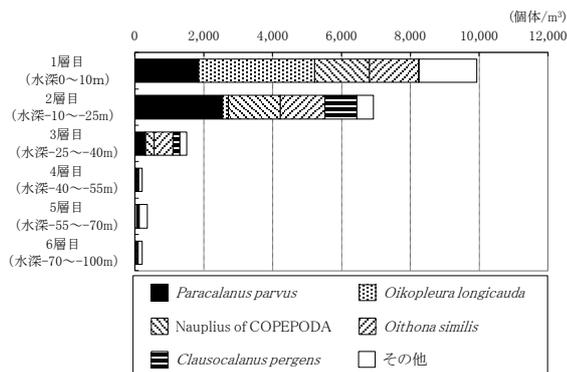
動物プランクトン細胞数 (成育場: 武蔵堆)



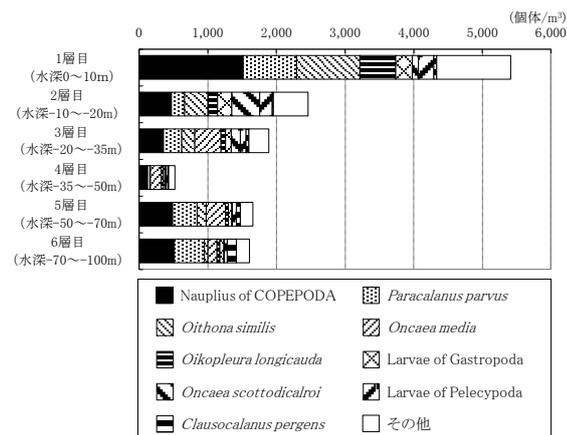
動物プランクトン細胞数 (移動経路)

図-4.3.4 動物プランクトンの季節別出現量

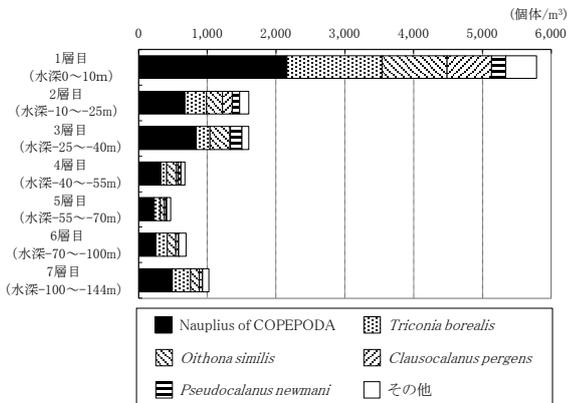
12.5 北方海域の物理環境変化による生物生産性の向上に関する研究



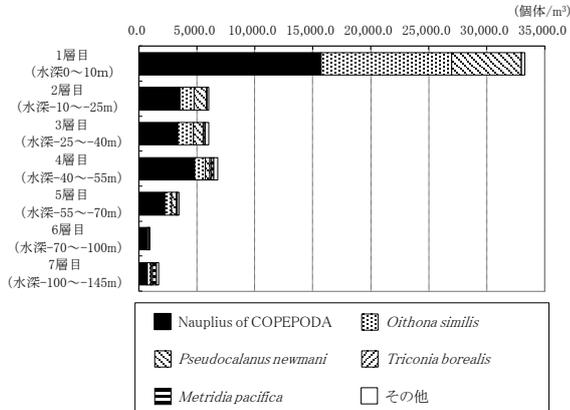
A 武蔵堆：夏季（2009年8月）⁵⁾



B 武蔵堆：秋季（2010年10月）⁵⁾

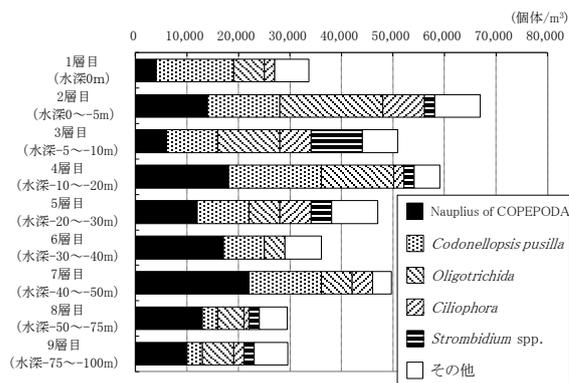


C 武蔵堆：冬季（2012年2月）⁵⁾

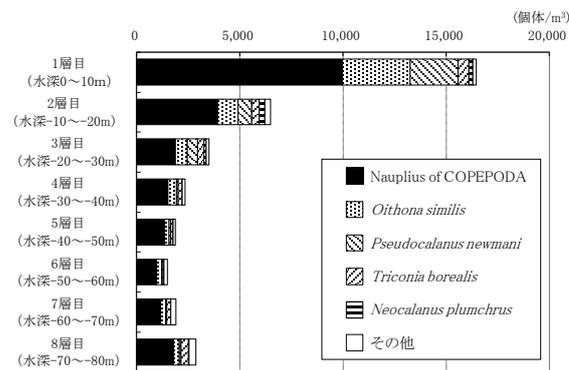


D 武蔵堆：春季（2012年5月）

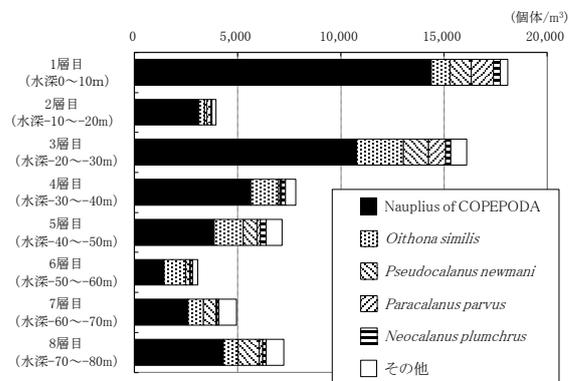
図-4.3.5 動物プランクトンの種組成（武蔵堆：L1-4）



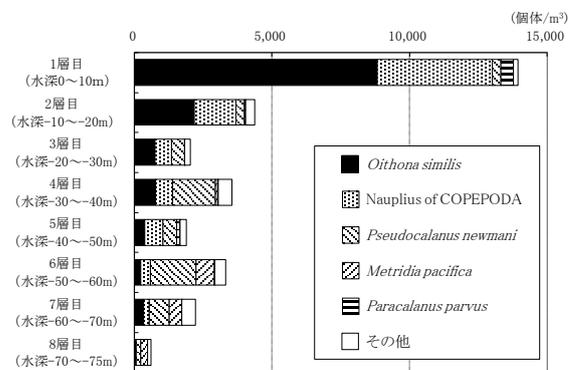
①岩内湾：冬季（2011年1月）



②茂津多岬沖：春季（2012年3月）



③雄冬岬沖：春季（2012年4月）



④天塩川沖：春季（2012年6月）

図-4.3.6 動物プランクトンの種組成（移動経路）

4.4 水温・塩分・Chl.a の鉛直分布

T-S ダイアグラムについて、観測結果を沖側、漁場直上、陸側に分けて図-4.4.1に示す。

(A) 沖側では夏季に比べて秋季では表層冷却の初期の状況が見られる。一方、(C) 陸側の夏季では降水による表層の塩分低下と対馬暖流の特徴である中層高塩分の傾向が見られ^{6) 7)}、秋季では対馬暖流の影響がより顕著に現れて水温が上昇している。その中間の(B) 漁場直上付近では沖側の表層冷却の影響と陸側の対馬暖流の影響の両方の特徴が伺える。

冬季の観測では、表層から水深約 100m まで水温、塩分ともほぼ同値を示し、その値は夏季と秋季の底層部にほぼ等しい。

春季は冬季から夏季への移行する途中の過程が観測されている。特に(C) 陸側では天塩川からの融雪出水と思われる塩分の低下が観測された。表層に陸域からの栄養塩が供給され、植物プランクトンの増殖に融雪出水も貢献していると考えられる。

水温・塩分・栄養塩・Chl.a の鉛直分布を図-4.4.2、図-4.4.3に示す。夏季の武蔵堆(8月)は水深 40m 付近に躍層があるが、秋季には水深 60m 付近に躍層が低下していた。これは対馬暖流の影響で水温が上昇したと考えられる。補償深度は、夏季と秋季ともに水深 60m 程度であった。夏季の Chl.a のピークは表層混合層直下にあり、その位置において基礎生産が集中していた。秋季の武蔵堆(10月)は沿岸で対馬暖流によって水温が上昇し、表層冷却が阻害されている状況が見られた。

冬季の武蔵堆(2月)や岩内湾(1月)は、表層冷却による鉛直混合によって観測した深度までほぼ一定の水温を示し、夏季と秋季の下層部にほぼ等しい値であった。これは対馬暖流が弱まり、表層冷却により夏に形成された密度成層を崩壊し、鉛直混合することで、下層の水塊を表層へ汲み上げる原動力となっていると考えられる。これは春季の茂津多岬沖(3月)や 雄冬岬沖(4月)でも継続されていた。

次に栄養塩について述べる。夏季・秋季の密度成層期の武蔵堆(8月、10月)では、躍層以浅で硝酸塩が不足する状況が確認された。

一方、冬季の武蔵堆(2月)と岩内湾(1月)は、水温と塩分が全層にわたりほぼ一定値となり、表層冷却に伴う鉛直混合により貧栄養が改善していることが確認された。

Chl.a については、冬季は栄養塩が十分あるにもかかわらず Chl.a が低位であった。これは水温が低く

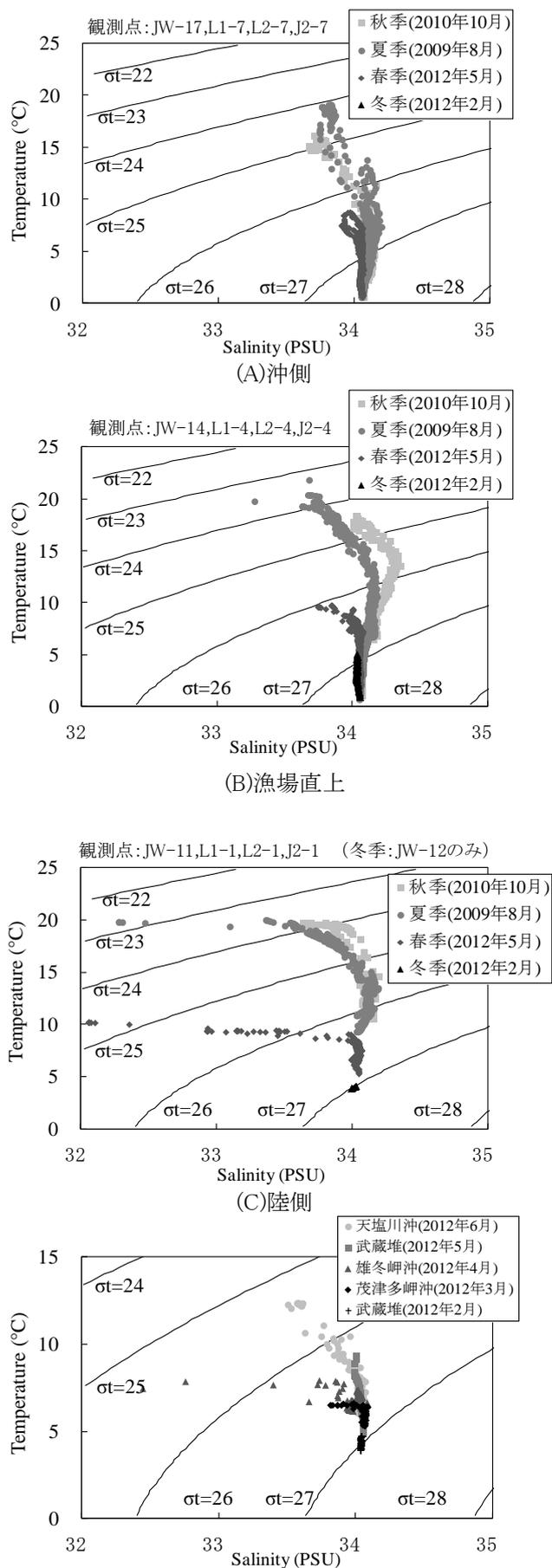
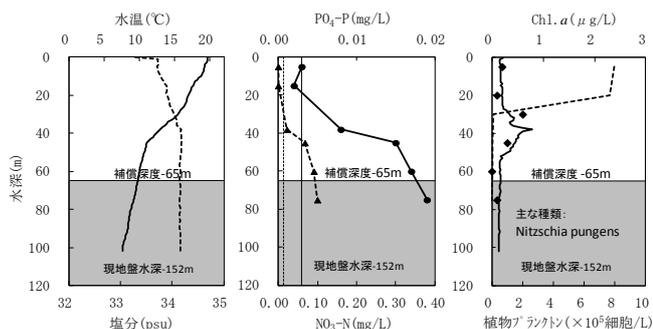
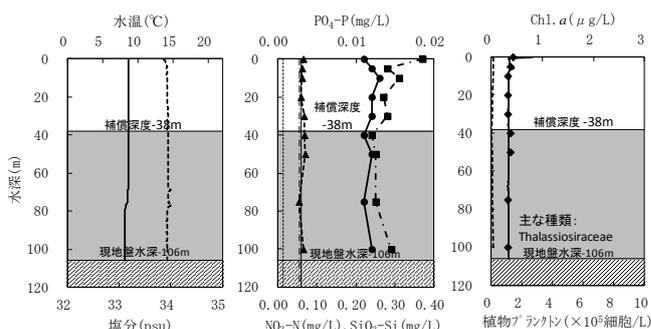


図-4.4.1 T-S ダイアグラム

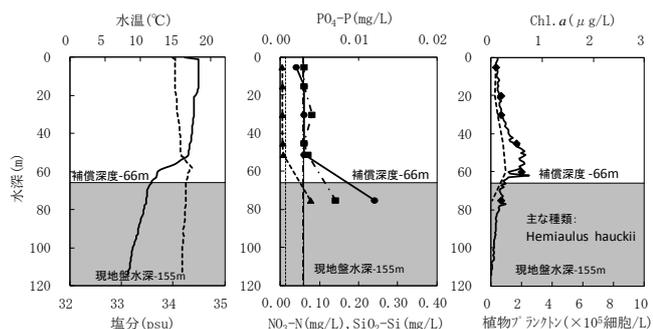
12.5 北方海域の物理環境変化による生物生産性の向上に関する研究



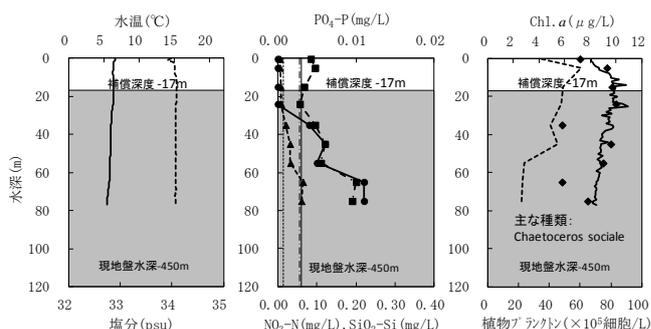
A 武蔵堆：夏季（2009年8月）⁵⁾



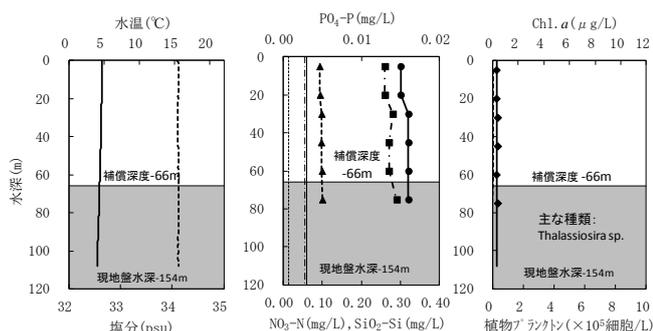
①岩内湾：冬季（2011年1月）⁹⁾



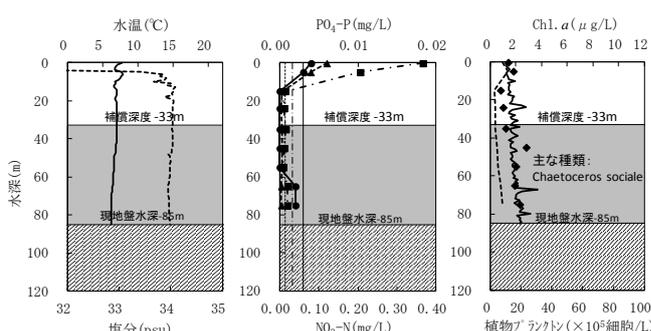
B 武蔵堆：秋季（2010年10月）⁵⁾



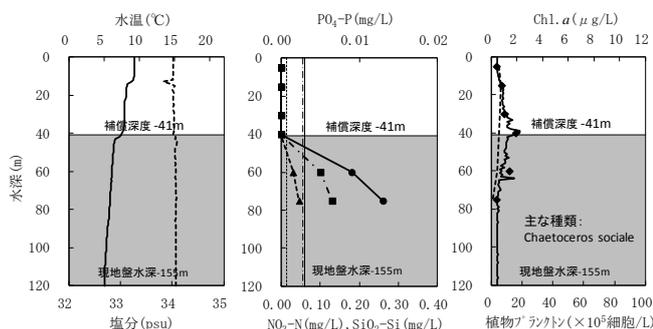
②茂津多岬沖：春季（2012年3月）⁹⁾



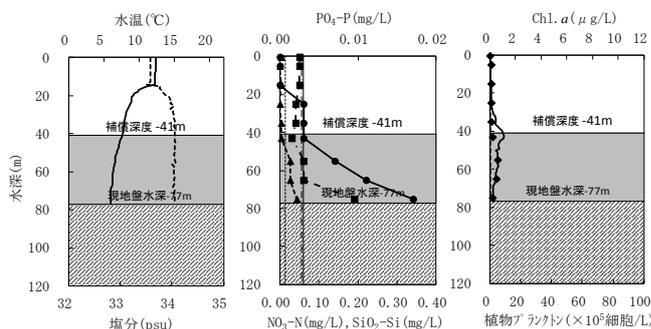
C 武蔵堆：冬季（2012年2月）⁵⁾



③雄冬岬沖：春季（2012年4月）⁹⁾



D 武蔵堆：春季（2012年5月）⁸⁾



④天塩川沖：春季（2012年6月）⁸⁾

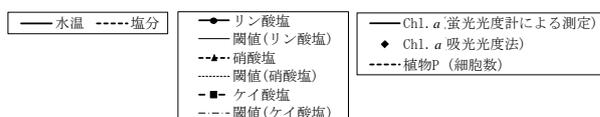
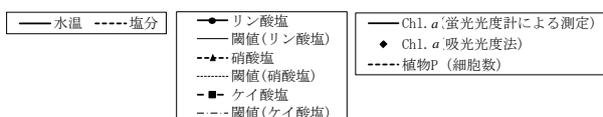


図- 4.4.2 武蔵堆の水質鉛直分布の周年変化(L1-4)

図- 4.4.3 対象魚の成長段階に応じた移動経路上の水質鉛直分布

日射量が少ないことが光合成の制限要因になっていると考えられる。岩内湾(1月)と茂津多岬沖(3月)で1オーダー違う数値となっており、茂津多岬沖でブルームが発生している状況が観測された。

補償深度は、武蔵堆海域の観測結果に比べ、沿岸域の観測地点ではこれより浅い。特に茂津多岬沖(3月)は、約40m浅くなっている。これはブルームによる自己遮蔽の影響と考えられる。

茂津多岬沖(3月)では増加した植物プランクトンにより栄養塩が消費され、表層から補償深度まで硝酸塩とリン酸塩が枯渇したと考えられる。雄冬岬沖(4月)の表層に塩分低下と融雪出水による陸域からの栄養塩の供給が見られ、それ以外は全ての栄養塩が海底まで枯渇する状況が見られた。

これは冬季の鉛直混合期から春季への移行過程で、ブルームが発生すると共に、同時に表層冷却に伴う鉛直混合が生じることで、栄養塩が下層から供給され、生産性が向上したためと示唆される。また、春季は陸域からの融雪出水により表層に栄養塩が供給され、植物プランクトンの増殖に貢献していると考えられる。雄冬岬沖(4月)以降は経過とともにChl.aは減少し、武蔵堆(5月)でブルーム末期であり、天塩川沖(6月)は密度成層の初期の段階となっていた。

4.5 窒素及び炭素の安定同位体比分析

当海域における食物連鎖の解明には、窒素及び炭素の安定同位体比分析が有効である。図-4.5.1はプランクトン(植物・動物)とスケトウダラ幼魚の筋肉・消化管・胃内容物で行った分析結果である¹⁰⁾。

一般的に「捕食-被捕食」関係で栄養段階が上昇すると、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ が1.0‰、3.4‰上昇する¹¹⁾。

$\delta^{15}\text{N}$ に着目すれば植物プランクトン、動物プランクトン、胃内容物、消化管、筋肉の順に高くなっており、定性的な関係が示されている。底泥の値は植物プランクトンと動物プランクトンの中間に位置していたため、その起源が両方であると考えられる。また、スケトウダラ幼魚が捕食した胃内容物は動物プランクトンだけでなく、動物プランクトンを捕食するオキアミなども見られたため一段階高い値も計測されている。

スケトウダラの生活史を勘案すれば、産卵場から成育場へ移動する経路上の基礎生産がスケトウダラの摂取するエネルギー源であり、資源の増減に大きく関わっていることがわかる。

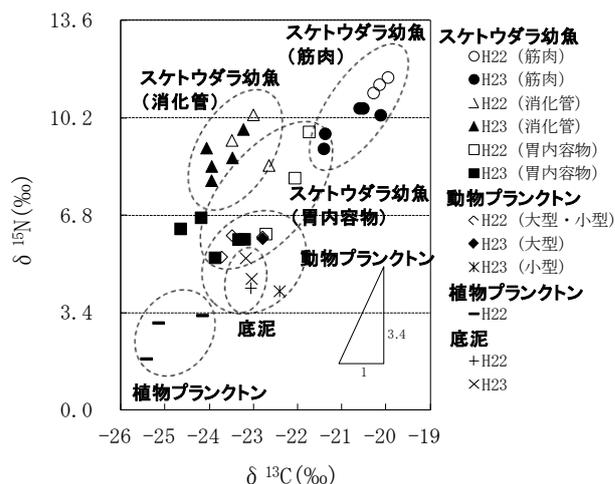


図- 4.5.1 安定同位体比分析結果¹⁰⁾

4.6 基礎生産量の把握

4.6.1 成長速度と光強度

(1) 培養実験

調査は武蔵堆を中心に北海道周辺海域の沿岸を対象とした(図-4.6.1)。各地点で採水を行い、培養実験により光-光合成曲線を推定した。これと共に、植物プランクトンの種組成を把握した。

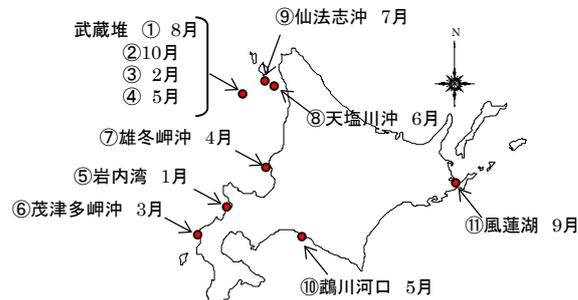


図- 4.6.1 現地培養試験調査位置図¹⁶⁾

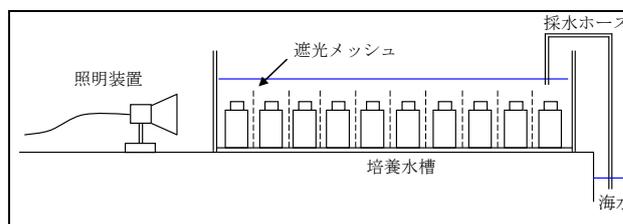


図- 4.6.2 現地培養実験模式図¹⁶⁾



写真- 4.6.1 培養水槽の設置状況(武蔵堆, 船上)¹⁶⁾

実験模式図を図-4.6.2、培養水槽の設置状況を写真-4.6.1に示す。試料の採取水深は、事前に行ったChl.aの鉛直分布の計測より、最も高い値の水深とした。実験方法は試料にNaH¹³CO₃を添加し、その後、植物プランクトンを4または6時間培養した。培養中は天然光を遮断し、照明装置（メタルハライドランプ）を用い、光条件として0~615 W/m²の範囲の10条件とした。なお、光量子量(μmol/(m²・s))はメタルハライドランプ用換算値¹⁹⁾である4.59で割り、太陽光の放射照度(W/m²)に換算した。

(2) 光合成速度の推定

培養後、試料中の安定同位体(¹³C)をGF/Fフィルターを用いて濾過捕集した後、凍結保存して、元素分析計(EA1112)、質量分析計(DELTA V Plus)を用いて、¹³CおよびPOCの分析を行い、分析結果より光合成速度の推定を行った。

添加した¹³Cは光合成により植物プランクトン体内に取り込まれ、培養実験前後で安定同位体比は変化する。この安定同位体比と培養後のPOC(植物プランクトン炭素量)により、光合成速度を推定することができる。光合成速度推定の概念を図-4.6.3に、計算式を(1)~(3)式に示す。培養前後での植物プランクトン中の¹³C量の収支は、(1)式²⁰⁾で与えられ、整理すると、(2)式から光合成速度Pが得られる。

$$a_{is} \times C = a_{ns} \times (C - \Delta C) + a_{ic} \times \Delta C \quad (1)$$

$$P = \frac{\Delta C}{t} = \frac{C \times (a_{is} - a_{ns})}{t \times (a_{ic} - a_{ns})} \quad (2)$$

- P : 光合成速度 mgC/(m³・h)
- a_{is} : 培養後のPOC中の¹³C存在比 (%)
- a_{ns} : 培養前のPOC中の¹³C存在比 (%)
- a_{ic} : 培養中(NaH¹³CO₃添加後)の全無機炭素(培養海水)中の¹³C存在比 (%)
- C : 培養後のPOC濃度 (μgC/L)
- ΔC : 培養によって増加したPOC濃度 (μgC/L)
- t : 培養時間 (h)

次に(2)式をChl.a濃度で割り、比光合成速度μ'(mgC/((mgChl.a)・h))を推定し、1日当たり(24h)の換算とC/Chl.a比を用いると、μ(1/day)となる(3)式)。この式は自然環境下での1日あたりの成長速度とは異なることに留意が必要である。C/Chl.a比は一般値として50を採用した¹⁵⁾。

$$\mu (1/day) = \mu'(\text{mgC}/((\text{mgChl.a}) \cdot \text{h})) \times 24(\text{h/day}) \times 1/50(\text{mgChl.a}/\text{mgC}) \quad (3)$$

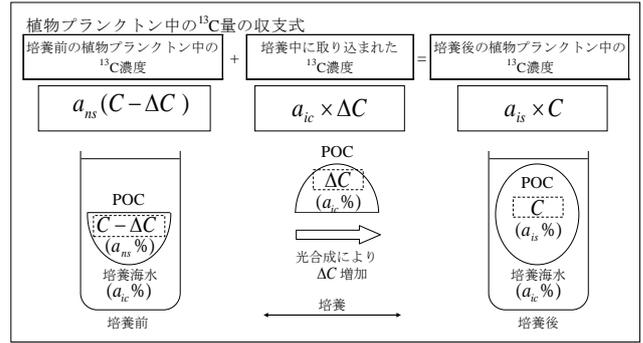


図-4.6.3 光合成速度推定の概念¹⁶⁾

(3) 生物パラメーター取得

上記で得られた光量子量に対する成長速度から光-光合成曲線の推定をした。これにより水質予測モデルで使用する生物パラメーター(最大可能成長速度(μ_{max})、最適光強度(I_{opt}))を取得した(図-4.6.4、表-4.6.1)。これらのパラメーター取得の詳細は林田ら¹²⁾¹⁶⁾の報告による。図-4.6.4の曲線は、生態系モデルで用いられている一般的なSteeleの光-光合成曲線関数²²⁾である。これは本試験結果に最小二乗法により係数を決定したものである。

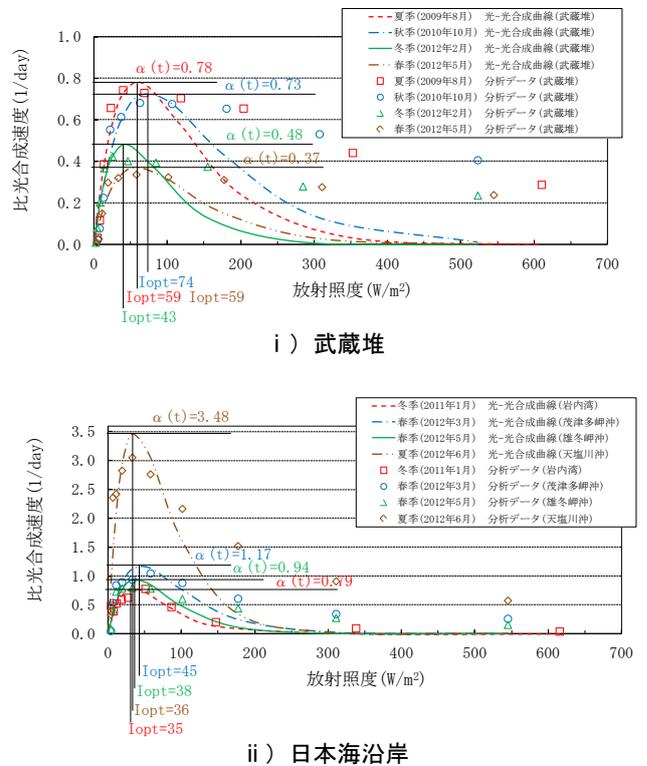


図-4.6.4 光-光合成曲線の推定結果

(4) 最大可能成長速度の比較

最大可能成長速度と文献値（水温、栄養塩環境）²¹⁾の比較を行った（表-4.6.2）。ここではモデル用単位でなく、光合成速度の一般的な単位である mgC/((mgChl.a)・h) で示す（(3)式から換算）。

本実験値は 0.8~10.0 mgC/((mgChl.a)・h) の範囲で、文献値の低栄養塩、低温、高温海域の値の範囲であり、北方海域の値は文献値と比較して大きく変わらないと考える。また、四季調査を実施した武蔵堆に着目すると、2月は5月よりも高く、この海域は低水温でも最大可能成長速度が高いと考える。

(5) 最適光強度の比較

最適光強度と室内試験などの文献値（三河湾、サロマ湖）¹³⁾²³⁾の比較を行った（表-4.6.3）。比較のため文献値は放射照度(W/m²)に換算した。本実験値は 16~74 W/m² の範囲で、本州や北海道の文献値と近い値であった。透明度が低い鵜川河口、風蓮湖などは、少ない光で光合成ができるよう順応したと考える。武蔵堆や仙法志沖は三河湾と同等程度であった。

最適光強度は、種組成や水温、生息域（透明度、水深など）で異なると考えられる。本実験のように自然下の海水を試料とした場合、複数の種が混在した試料全体の値として得られ、種組成の異なる結果と単純に比較できないことに注意する必要がある。

表-4.6.1 低次生態系計算用パラメーター(培養試験)¹⁶⁾

地点, 採取時期 (採取水深, 採取水温, 培養水温)	培養水温 での最大 可能成長 速度 (1/day)	0℃に換 算した最 大可能成 長速度 (1/day)	最適光 強度 (W/m ²)
①武蔵堆, 2009年8月3日 (38 m, 12.9℃, 20.5℃)	0.78	0.21	59
②武蔵堆, 2010年10月5日 (51 m, 16.5℃, 16.8℃)	0.73	0.25	74
③武蔵堆, 2012年2月14日 (20 m, 4.7℃, 2.2℃)	0.48	0.42	43
④武蔵堆, 2012年5月9日 (40 m, 7.5℃, 10.0℃)	0.37	0.20	59
⑤岩内湾, 2011年1月26日 (5 m, 8.6℃, 8.0℃)	0.79	0.48	35
⑥茂津多岬沖, 2012年3月28日 (24 m, 6.2℃, 6.4℃)	1.17	0.78	45
⑦雄冬岬沖, 2012年4月21日 (24 m, 7.0℃, 9.7℃)	0.94	0.51	38
⑧天塩川沖, 2012年6月13日 (43 m, 7.4℃, 13.8℃)	3.48	1.45	36
⑨仙法志沖, 2009年7月21日 (4 m, 16.2℃, 16.4℃)	4.80	1.70	56
⑩鵜川河口, 2012年5月10日 (1 m, 7.3℃, 10.3℃)	1.38	0.72	16
⑪風蓮湖, 2007年9月20日 (5 m, 17.7℃, 17.8℃)	3.30	1.07	34

表-4.6.2 文献値²¹⁾との比較(最大可能成長速度)¹⁶⁾

最大可能成長速度 (mgC/((mgChl.a)・h))	備考
2~3.5	低温(2~4℃) ²¹⁾
6~10	高温(8~18℃) ²¹⁾
0.2~1.0	低栄養塩海域 ²¹⁾
9~17	高栄養塩・高温海域 ²¹⁾
1.6	①武蔵堆, 8月(培養水温 20.5℃)
1.5	②武蔵堆, 10月(培養水温 16.8℃)
1.0	③武蔵堆, 2月(培養水温 2.2℃)
0.8	④武蔵堆, 5月(培養水温 10.0℃)
1.7	⑤岩内湾, 1月(培養水温 8.0℃)
2.4	⑥茂津多岬沖, 3月(培養水温 6.4℃)
2.0	⑦雄冬岬沖, 4月(培養水温 9.7℃)
7.3	⑧天塩川沖, 6月(培養水温 13.8℃)
10.0	⑨仙法志沖, 7月(培養水温 16.4℃)
2.9	⑩鵜川河口, 5月(培養水温 10.3℃)
6.9	⑪風蓮湖, 9月(培養水温 17.8℃)

表-4.6.3 文献値^{13), 23)}との比較(最適光強度)¹⁶⁾

最適光 強度 (W/m ²)	地点(培養水温)	種類名
54~65	三河湾 ¹³⁾	<i>Skeletonema costatum</i> (珪藻)
54~65	三河湾 ¹³⁾	<i>Prorocentrum triestinum</i> (鞭毛藻)
22	サロマ湖 ²³⁾ (0~10℃)	<i>Thalassiosira nordenskiöldii</i> (珪藻)
44	サロマ湖 ²³⁾ (15℃)	
22~44	サロマ湖 ²³⁾ (0~10℃)	<i>Detonula confervacea</i> (珪藻)
59	①武蔵堆 (20.5℃)	<i>Nitzschia pungens</i> (珪藻) <i>Nephroselmis</i> sp. (ユーグレナ藻) <i>Prorocentrum balticum</i> (渦鞭毛藻)
74	②武蔵堆 (16.8℃)	<i>Hemiaulus hauckii</i> (珪藻)
43	③武蔵堆 (2.2℃)	<i>Thalassiosira</i> sp. (珪藻) <i>Thalassionema nitzschioides</i> (珪藻)
59	④武蔵堆 (10.0℃)	<i>Chaetoceros sociale</i> (珪藻)
35	⑤岩内湾 (8.0℃)	<i>Thalassiosira</i> spp. (珪藻) Cryptophyceae (クリプト藻) <i>Heterocapsa</i> spp. (渦鞭毛藻)
45	⑥茂津多岬沖 (6.4℃)	<i>Chaetoceros sociale</i> (珪藻)
38	⑦雄冬岬沖 (9.7℃)	<i>Chaetoceros sociale</i> (珪藻)
36	⑧天塩川沖 (13.8℃)	<i>Plagioselmis</i> sp. (クリプト藻)
56	⑨仙法志沖 (16.4℃)	<i>Heterocapsa</i> sp. (渦鞭毛藻) <i>Nephroselmis</i> sp. (ユーグレナ藻)
16	⑩鵜川河口 (10.3℃)	<i>Heterocapsa rotundata</i> (渦鞭毛藻) <i>Thalassionema nitzschioides</i> (珪藻)
34	⑪風蓮湖 (17.8℃)	<i>Skeletonema costatum</i> (珪藻) <i>Rhizosolenia stouterfothii</i> (珪藻) <i>Cryptomonas acuta</i> (クリプト藻) <i>Chaetoceros affine</i> (珪藻) 種群

4.6.2 基礎生産量

(1) 基礎生産量の算定結果

取得したパラメータを用いて低次生態系モデル¹³⁾を各海域に適用して単位水柱あたりの基礎生産量の算定を行った。物理条件(水温, 塩分)は観測値を一定条件とし、再現計算を行った。水温塩分の観測値と栄養塩、Chl.aの計算値を図-4.6.5、鉛直方向の一日当たりの基礎生産量(mgC/(m³・day))を図-4.6.6、この値の鉛直積分値を表-4.6.4に示す。

武蔵堆の特徴として、夏季・秋季の躍層直下でChl.aのピークや冬季の鉛直混合、春季のブルームについて計算値が現象を再現していると考えられる(図-4.6.5)。

本計算では武蔵堆の5月は、冬季2月よりも低い値であった(表-4.6.4)。これは5月が春季ブルーム後であり、Chl.aは冬季よりも増加しているが、栄養塩は表層で枯渇状態であった。この初期条件から基礎生産量を算出したため、5月は冬季2月よりも基礎生産量が低くなったと考えられる。

基礎生産量は武蔵堆で29.04~63.21 mgC/(m²・day)、日本海北部海域4地点で32.54~185.87 mgC/(m²・day)であり、北海道南東親潮域の文献値(450 mgC/(m²・day), 9月)¹⁸⁾や夏季の噴火湾や伊勢湾の値300~1400(mg-C/m²/day)¹⁴⁾と比較すると低く、より貧栄養な日本海北部海域の特徴を示したと考える。また、太平洋北東部亜寒帯域の観測地点(St. Papa)の冬季の観測値は100(mg-C/m²/day)程度であり¹⁵⁾、これに近い値となっている。

これらのように本計算結果は各海域や時期に応じたパラメータを用いたことからChl.a分布の特徴を再現することが可能となった。なお、この基礎生産の計算は準定常状態でありブルーム以前の栄養塩の状態(冬季の栄養塩状態)から爆発的に増殖して栄養塩が枯渇した状況を考慮すると、ブルーム時の基礎生産量はさらに高いものと推測された。

表-4.6.4 基礎生産量の算定結果¹⁶⁾

地点, 採取時期	基礎生産量 (mgC/(m ² ・day))
①武蔵堆, 8月	36.64
②武蔵堆, 10月	29.04
③武蔵堆, 2月	63.21
④武蔵堆, 5月	48.75
⑤岩内湾, 1月	95.04
⑥茂津多岬沖, 3月	172.05
⑦雄冬岬沖, 4月	185.87
⑧天塩川沖, 6月	32.54

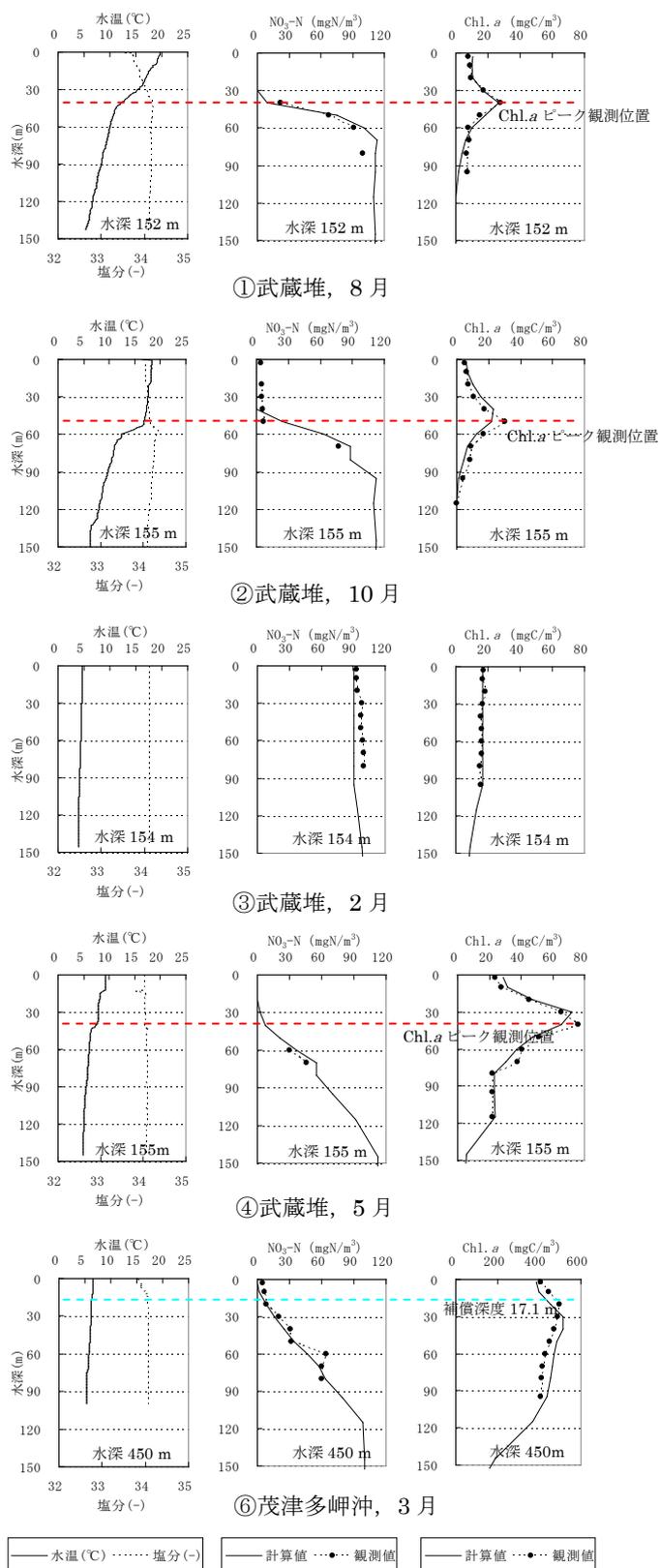


図-4.6.5 水温・塩分, 硝酸塩, Chl.aの鉛直分布¹⁶⁾

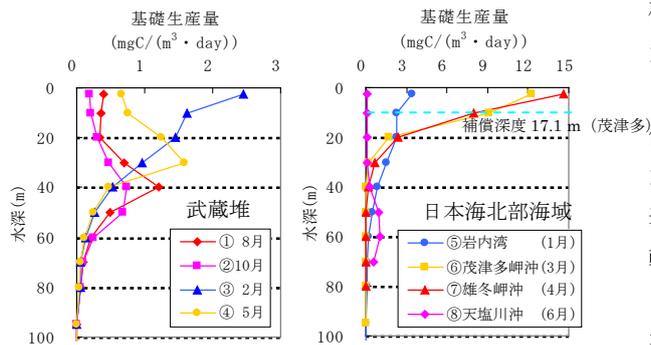


図-4.6.6 基礎生産量の鉛直分布¹⁶⁾

(2) 基礎生産量の試算 (春季ブルームと融雪出水)

上述したように観測値を初期条件とした場合、観測時の状態を再現するのみであり、春季ブルームや融雪出水などで基礎生産量を増大させるポテンシャルは不明である。このことから前述した基礎生産メカニズムを考慮した試算(春季ブルームと融雪出水)を実施した。この試算結果により、当海域の基礎生産に及ぼす諸現象(鉛直混合や融雪出水など)の効果について評価する。

計算条件は表-4.6.5に示す4ケースであり、②と③は、上述した茂津多岬沖(3月)と雄冬沖(4月)再現結果である。②'は②の条件を変えて「夜間に鉛直混合が生じて表層の栄養塩枯渇が一時的に解消した」と設定したものであり、水温や塩分は観測値のまま全層のNO₃-N、PO₄-P、SiO₂-Siを底層の観測値とした。③'は「融雪出水の影響が全く無い場合」の試算である。また、②''は春季ブルームの平均的な1日あたりの基礎生産量を求めた。

試算結果¹⁷⁾は図-4.6.7、表-4.6.6に示す。

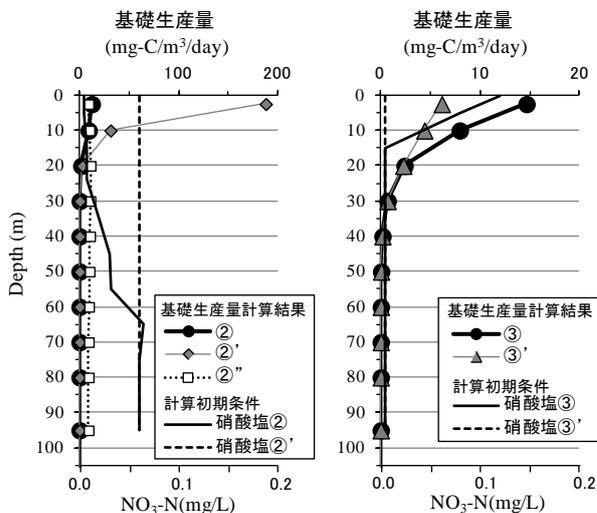
②'は十分な栄養塩と豊富な植物プランクトン量により表層で高い基礎生産量を示し、基礎生産量は1278mg-C/m²/dayと試算された。これは春期の北海道南東親潮域観測点の値(990~1970 mg-C/m²/day)の範囲内¹⁸⁾にある。一方、②''は1038mg-C/m²/dayとなった。②''は冬季から茂津多岬沖の観測までの43日間の平均値として算出しているため、ブルーム期間の前後を含めて過小に見積もった可能性がある。これらより②'で試算された結果(1278mg-C/m²/day)は、ブルーム期の基礎生産量として妥当であると考えられる。また、基礎生産構造として、「ブルーム期は、急激に栄養塩が消費されるが、成層化していないため、夜間などに容易に鉛直混合して、栄養塩制限を解消して増殖を継続している」と考えられる。また、表層冷却による鉛直混合が滞る(成層化する)と基

礎生産量が②'から②へと大幅に減少することがわかった。

融雪出水の影響がある③は、有光層内に栄養塩が供給されるため、栄養塩枯渇による基礎生産の低下が緩和している。融雪出水が無いと仮定した③'は、表層の基礎生産がほぼ半減している。③と③'を比較すると、約80mgC/m²/dayの基礎生産量が補われたことになる。このことはブルームがほぼ終了した状況において生じる融雪出水が、稚魚の移動経路上の基礎生産を持続させる効果を発揮しているといえる。

表-4.6.5 基礎生産量の計算条件¹⁷⁾

計算ケース・名称	計算条件	
	水温・塩分	表層の栄養塩濃度
②茂津多岬沖貧栄養	観測値	観測値(表層枯渇)
ブルーム期で鉛直混合なし。ブルームに伴う栄養塩の枯渇状態は継続する。		
②'茂津多岬沖混合	観測値	底層の高い値を使用
ブルーム期で夜間に鉛直混合あり。栄養塩の表層枯渇状態は夜間に解消。		
③雄冬岬沖現況	観測値	観測値(陸から供給)
融雪出水あり。全層で栄養塩枯渇状態のところに、表層へ栄養塩が供給。		
③'雄冬岬沖陸水無し	中層の値を使用	中層の値(枯渇)を使用
融雪出水無しを仮定。表層の陸水の影響(低塩分・高栄養塩)を除去する。		
※その他 ②''ブルーム期43日間(2/14~3/28)の1日あたり平均値		
武蔵堆2月から茂津多岬沖3月観測時まで増大した生物量の1日平均値。		



(a) 茂津多岬沖 ②,②',②'' (b) 雄冬岬沖 ③,③'

図-4.6.7 基礎生産量の鉛直分布¹⁷⁾

表-4.6.6 単位面積あたり基礎生産量¹⁷⁾

計算ケース・名称	基礎生産量 (mg-C/m ² /day)				
	水深(m)	0-25	25-55	55- 全層	
②茂津多岬沖貧栄養		170.32	1.73	0.00	172.05
②'茂津多岬沖混合		1275.80	2.26	0.00	1278.05
②''ブルーム期平均		256.78	317.81	463.68	1038.27
③雄冬岬沖現況		176.63	9.11	0.12	185.87
③'雄冬岬沖陸水無し		97.24	8.96	0.13	106.33

(3) 基礎生産量の試算 (秋季の硝酸塩制限)

上述したように、武蔵堆の秋季の基礎生産が夏季よりも小さいのは、対馬暖流による影響がある。このため、秋季から冬季の表層冷却のみの影響を把握するために試算を実施した。これは対馬暖流を考慮せず、夏季の水温塩分を初期値として表層熱収支計算を実施し、算出された各層の水温に図-4.2の硝酸塩と水温の関係から得られた硝酸塩濃度の鉛直分布を求めて、この条件で基礎生産量を算出した (図-4.6.8、表-4.6.7)。

結果は、観測された秋季の値よりも水深20~30m付近の基礎生産が高い値となり対馬暖流の影響によって基礎生産量が低下したことが示された。

また、秋季に硝酸塩の制限がかからない仮想的な実験として、硝酸のみを冬季(1月の岩内湾)の観測値に置き換えて基礎生産を算出した。この結果、表層から水深30m付近までの基礎生産が増加し、秋季の現況よりも約3倍程度に増加させるポテンシャルがあることを示した。ただし、これは理想的な栄養塩の回復を前提にしたものである。

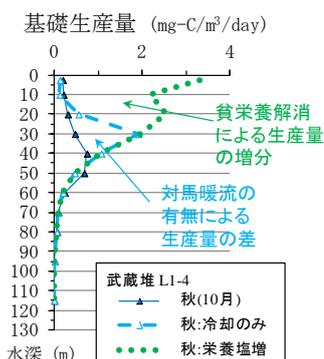


図-4.6.8 秋季における基礎生産量の数値実験²⁾

表-4.6.7 基礎生産量算出結果(仮想計算)²⁾

地点, 時期	水深(m)	基礎生産量(mg-C/m²/day)			
		0~25	25~55	55~	全層
秋: 表層冷却のみ仮定		7.36	34.47	3.50	45.33
秋: 貧栄養解消を仮定		63.81	34.99	3.49	102.29

5. 物理環境の再現

対象魚の生活史は、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。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ことが知られている(図-3.1)。これらを考慮した場合、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。

(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)²⁴⁾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。

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(4)と運動方程式(5)(6)を示す。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Du}{\partial x} + \frac{\partial Dv}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0 \tag{4}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial uD}{\partial t} + \frac{\partial uuD}{\partial x} + \frac{\partial uvD}{\partial y} + \frac{\partial u\omega}{\partial \sigma} - fvD \\ = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left[\frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right] d\sigma \\ + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_M}{D} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D \left(2A_M \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D \left(A_M \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \right\} \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial vD}{\partial t} + \frac{\partial uvD}{\partial x} + \frac{\partial vvD}{\partial y} + \frac{\partial v\omega}{\partial \sigma} + fuD \\ = -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left[\frac{\partial \rho}{\partial y} - \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right] d\sigma \\ + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_M}{D} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D \left(A_M \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D \left(2A_M \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right\} \end{aligned} \tag{6}$$

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-5.1、表-5.1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(図-5.2)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における流速値とした。境界近傍はFlow Relaxation Scheme(FRS)を適応して流れの安定化を図った。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。

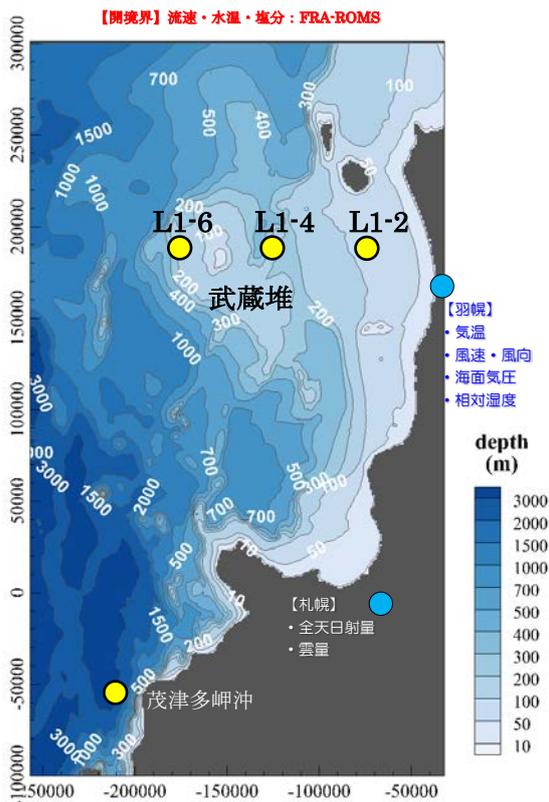


図-5.1 計算の領域

表-5.1 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

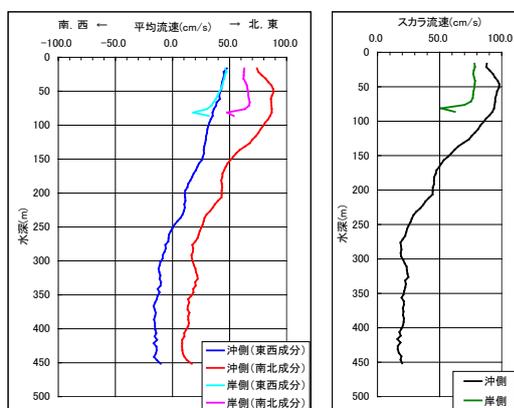


図-5.2 流況の現地観測値 (茂津多岬沖)

(2) 計算結果 (水温・塩分)

水温の計算結果を図-5.3に示す。これは夏季、秋季の密度成層付近である水深50mの結果である。

冬季, 春季はともに5℃程度を示し、図-4.4.2 (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、現地観測値と計算値を図-5.4に示す。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、躍層の位置が異なる。計算値においても良好に再現されている。図-5.3の秋季のデータからも概ねこの傾向がわかる。

このように四季の水温と塩分の変動パターンについて良好に再現可能となった。特に夏季、秋季の躍層位置の空間変化も再現性が良いことが確認できた。

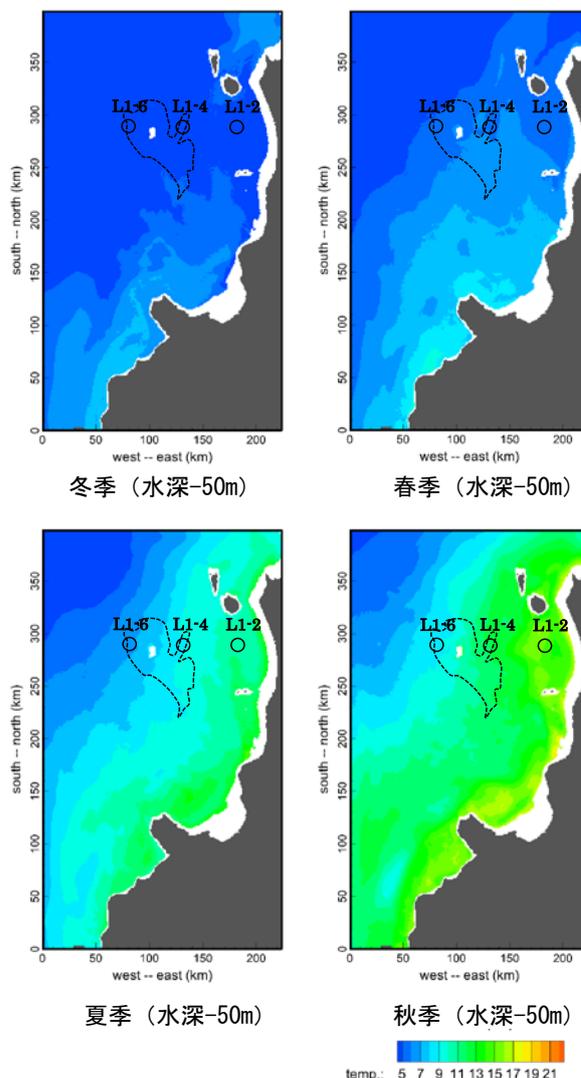


図-5.3 水温の数値解析

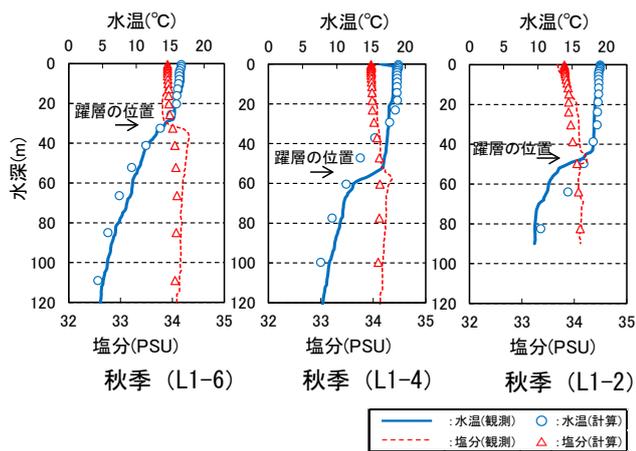
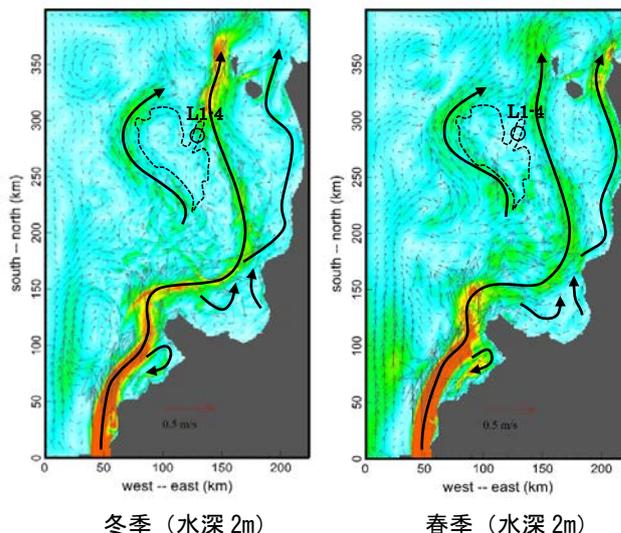


図-5.4 現地観測値と数値解析値
(水温・塩分の鉛直分布)



(3) 計算結果 (流向・流速)

四季の流向・流速の計算結果を図-5.5 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²⁵⁾²⁶⁾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-5.6 に示す。春季の表層付近で一部 50cm/s を超える流速が観測されたが、概ね 5~30cm/s のオーダーであり、数値解析値と大きな差は見られないと考えられる。

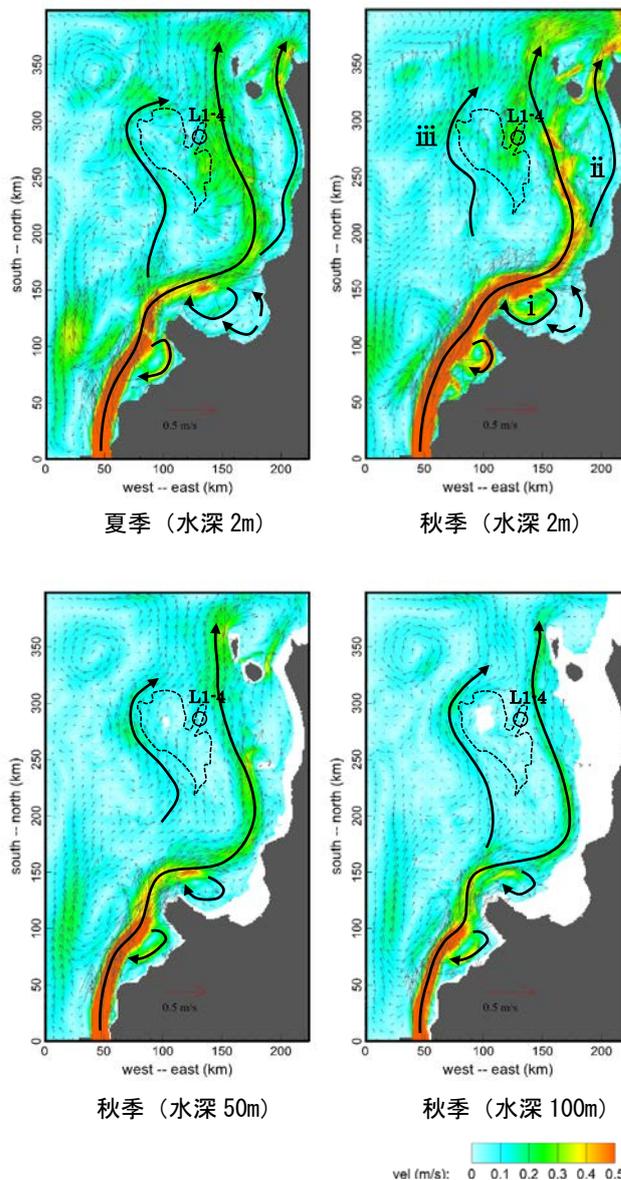


図-5.5 流況の数値解析

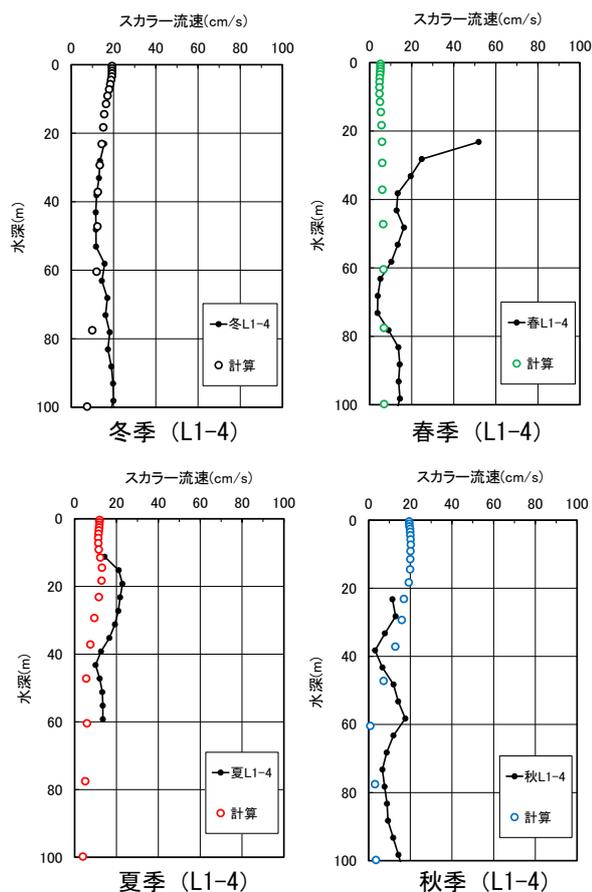


図-5.6 流況の現地観測値と数値解析値
(四季の鉛直分布：L1-4)

6. まとめ

対象種の産卵・仔魚期である冬季および春季の稚魚・幼魚期に物理環境や水質、生物量等に関する現地観測を行い、低次生態系モデルを用いた考察により基礎生産構造について明らかにした。

本研究により得られた知見をまとめると、以下の通りである。

- ①夏季は成層化して表層で栄養塩が枯渇し、表層混合層直下に基礎生産のピークが見られた。
- ②秋季では表層冷却による栄養塩の回復が期待されたが、対馬暖流による水温上昇により、表層混合層の水深が補償深度を下回り、基礎生産量は夏季以下となった。
- ③冬季には暖流の影響が弱まり、表層冷却による鉛直混合で貧栄養状態が解消された。しかし、植物プランクトンの光合成速度が小さく、細胞数の絶対量も少ないため、基礎生産は低位である。
- ④春季には日射量の増大に伴いブルームが発生し、表層冷却による循環によって底層からの栄養塩

が供給され基礎生産が持続する。表層冷却が弱まると表層の成層化と栄養塩の枯渇が進行し、夏季へと移行する。

- ⑤これにスケトウダラ的生活史を当てはめると、孵化後に春のブルームが生じ、対馬暖流に乗って移動する過程で稚魚期を迎え、その頃には餌料である動物プランクトンが増殖する。これが浮遊期の成長に大きく寄与していると考えられる。
- ⑥現地培養試験で低次生態系モデルに用いられる生物パラメーターを取得し、春期ブルームの夜間鉛直混合の効果、融雪出水の効果、栄養塩が枯渇する時期における硝酸塩の供給効果について試算し、基礎生産のポテンシャルを示すことができた。
- ⑦四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。

これらの知見は、対象魚種の生息環境の評価、工法選択や適地選定等の事業計画立案の上で重要である。今後は、漁場周辺の流動環境をより詳細に捉えるとともに、効果的な事業推進に向けた技術的提案を行い、北方海域の生物生産性の向上を図るための漁場整備に必要な技術開発を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 水産庁HP：国が施行する特定漁港漁場整備事業計画（漁場）
- 2) 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，海岸工学論文集，第66巻，pp1291-1295.
- 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（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，海岸工学論文集，第67巻，pp1026-1030.
- 4) J. k. Egge, D. L. Aksnes: Silicate as regulating nutrient in phytoplankton competition, MARINE ECOLOGY PROGRESS SERIES, vol. 83, 1992.
- 5) 河合浩・大橋正臣・岡元節雄・山本潤：北方海域における生物生産性の把握に向けた試み（第3報），寒地土木研究所月報，pp145-147，2013.
- 6) 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，18(6)，p. 335-350.

12.5 北方海域の物理環境変化による生物生産性の向上に関する研究

- 7) 檜垣直幸・磯田豊・磯貝安洋：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，17(4)，pp. 223-240，2008.
- 8) 河合浩・山本潤・大橋正臣：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況について－，北海道開発局技術研究発表会，2012
- 9) 河合浩・大橋正臣・山本潤・伊藤哲也・林田健志：スケトウダラ日本海北部系群の産卵期を対象とした水域環境に関する現地観測，第49回環境工学研究フォーラム講演集，pp145-147，2012.
- 10) 河合浩・大橋正臣・山本潤・林田健志・村上俊哉・西田芳則：武蔵堆周辺海域におけるスケトウダラ当歳魚の餌料環境に関する一考察，日本水産工学会学術講演論文集，pp217-220，2012.
- 11) 富永修，高井則之：安定同位体スコープで覗く海洋生物の生態，恒星社厚生閣，2008.
- 12) 林田健志，峰寛明，坂本和佳，山本潤，渡辺光弘，西田芳則，工藤勲：北方沖合海域における水質予測モデル構築のための生物パラメータ取得の一実験，日本水産工学会学術講演会講演論文集，22，pp. 49-52，2010.
- 13) 中田喜三郎(1993)：生態系モデル－定式化と未知のパラメータ推定法－，Journal of Advanced Marine Technology Conference, Vol. 8, pp. 99-138.
- 14) 海洋学会沿岸海洋部会（1985）：日本全国沿岸海洋誌，東海大学出版会，1106p.
- 15) Kawamiya, M., M. Kishi and N. Sugihara (1995) : An ecological - physical coupled model applied to Station Papa, Journal of Oceanography, Vol. 51, pp. 635-664.
- 16) 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
- 17) 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.
- 18) 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，pp. 265-269，東海大学出版会，pp. 265-266.
- 19) Thimijan, R. W. and Heins, R. D. : A review of conversion constants and procedures for photometric, radiometric, and quantum light units of measure, Hort. Science, Vol. 18, pp. 818-822, 1983.
- 20) Hama, T., Miyazaki, T., Ogawa, Y., Iwakuma, T., Takahashi, M., Otsuki, A. and Ichimura, S. : Measurement of photosynthetic production of a marine phytoplankton population using stable ^{13}C , Marine Biology., Vol. 73, pp. 31-36, 1983.
- 21) Carol M. LALLI. and Timothy R. PARSONS : 生物海洋学入門，講談社，1996.
- 22) Steele, J. H. : Environmental control of photosynthesis in the sea, Limnology and Oceanography, Vol. 7, pp. 137-150, 1962.
- 23) Suzuki, Y. and Takahashi, M. : Growth responses of several diatom species isolated from various environments to temperature, J. Phycol., Vol. 31, pp. 880-888, 1995.
- 24) Mellor, G. L. (2004) : USERS GUIDE for A THREE-DIMENSIONAL, PRIMITIVE EQUATION, NUMERICAL OCEAN MODEL, <http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom>
- 25) 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.
- 26) 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.

RESEARCH ON DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES FOR IMPROVED BIOLOGICAL PRODUCTIVITY BY PHYSICAL METHODS IN THE NORTHERN OCEAN AREA

Budget : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : Fisheries Engineering
Research Team

Author : MIKAMI Nobuo

OKAMOTO Setsuo

SATO Jin

KAWAI Hiroshi

OOI Keiji

OHASHI Masami

Abstract : This research tries to elucidate the primary productivity in the northern ocean area, to develop technologies for improved biological productivity such as fertilization of the ocean and protecting young fish. Ecosystem and population dynamics models will be developed to predict and evaluate effects. In 2013, field observations such as currents, water quality, plankton and the primary productivity have executed in the exclusive economic zone of the Sea of Japan around Hokkaido. As a result, the primary production rate of this sea area was estimated.

Key words : primary productivity, fertilization of the ocean, protection of resources, ecosystem model, lack of the nutrient salt, population dynamics model