

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、三森繁昭、
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、これまでに春のブルーミング、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、基礎生産構造や生物生息環境などの現地観測や整備効果を算出するための数値モデルの検討を行ってきた。平成 26 年度には保護育成礁による資源保護効果を検討するため、武蔵堆周辺海域で当歳魚が多く分布するエリアを推定し、保護エリアを設けて当歳魚を保護した場合に回復する資源量の試算を行った。また、湧昇マウンド礁のような急激な水深変化を伴う局所的な流れを精度良く評価するための数値モデルの構築を行った。

キーワード：基礎生産量、漁場肥沃化、湧昇マウンド、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⁾、続いて長崎県五島西方沖においてマアジ・マサバ・マイワシを対象に、鳥取・島根県沖の隠岐海峡地区においてもマアジ・マサバ・マイワシを対象に事業が開始されており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（ピーク時の 1/7 程度）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. 調査概要及び結果

3.1 調査概要

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海域において四季の調査、産卵場所と移動経路上の調査を行った。調査位置を図-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-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

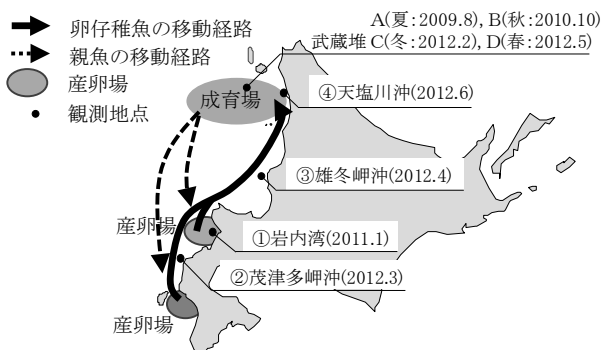


図-1 スケトウダラの移動経路と調査位置図

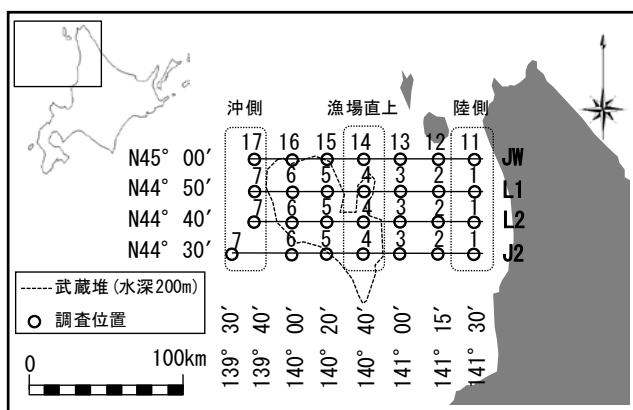


図-2 調査位置(日本海北部海域)

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、基礎生産量算出に必要な光-光合成曲線のパラメータを求め、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⁾⁴⁾を参照されたい。

3.2 光量子量の観測結果

光量子量観測結果と補償深度を図-3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(ブルーム)による自己遮蔽の影響が見られた。

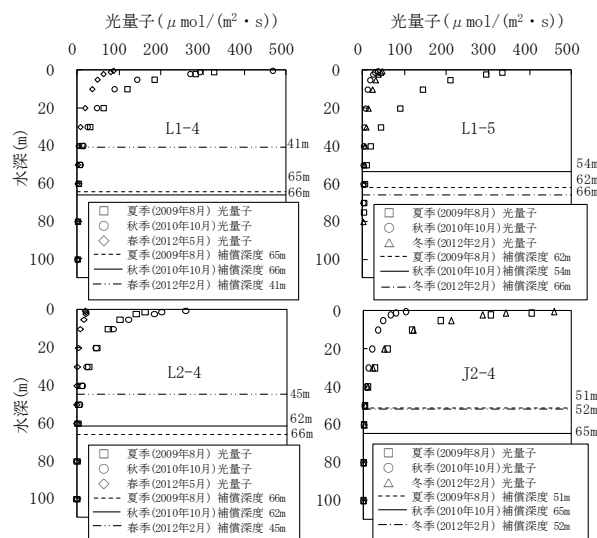


図-3 光量子量観測結果と補償深度

3.3 栄養塩と水温の関係

栄養塩分析の結果を図-4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量として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⁵⁾、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。

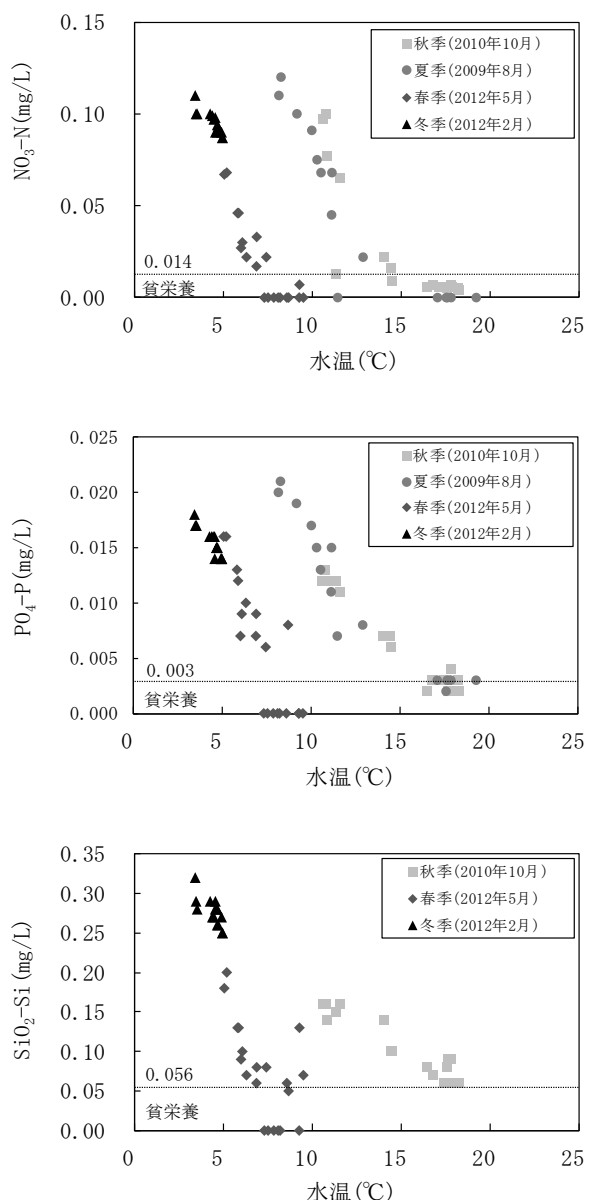


図-4 栄養塩と水温の関係

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。

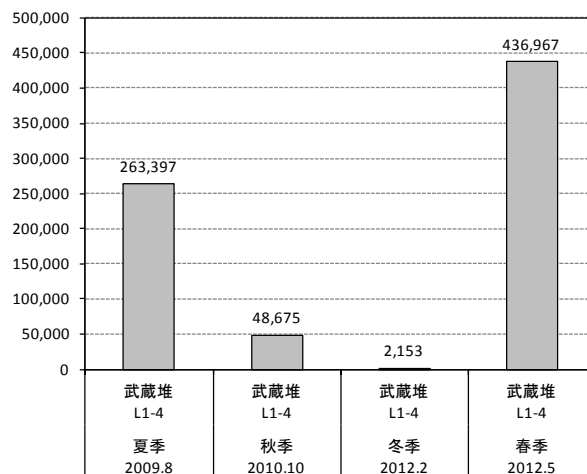
3.4 植物プランクトンの出現結果

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-5 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

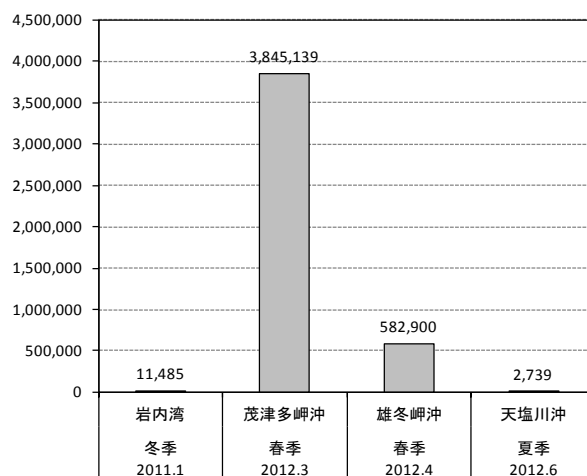
最も少なかった。移動経路上では3月の茂津多沖で最も多く徐々に減少していた。

種組成を図-6、図-7 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)、*Bacteriastrum 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



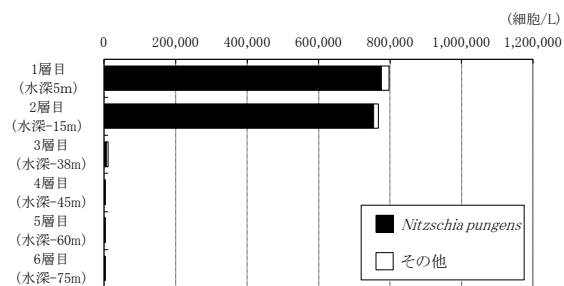
(1) 植物プランクトン細胞数 (成育場：武蔵堆)



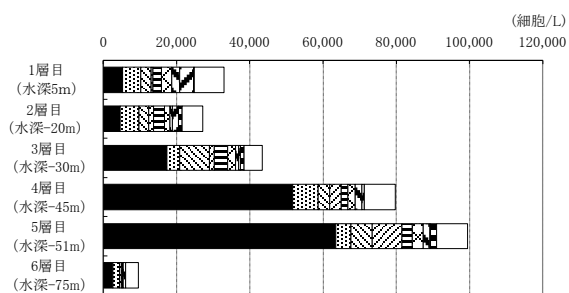
(2) 植物プランクトン細胞数 (移動経路)

図-5 植物プランクトンの出現量

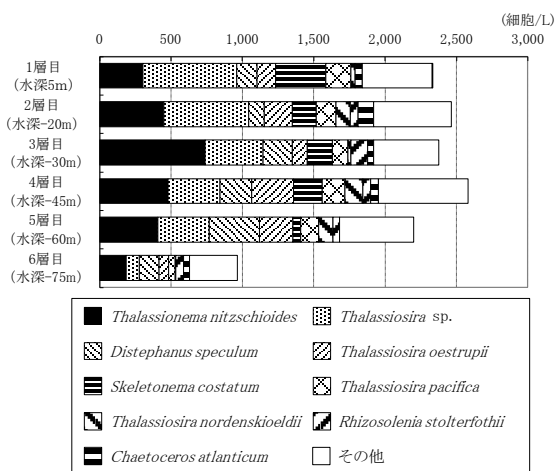
12.5 北方海域の物理環境変化による生物生産性の向上に関する研究



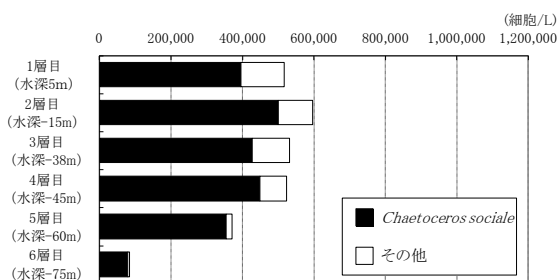
A 武蔵堆：夏季（2009年8月）⁶⁾



B 武蔵堆：秋季（2010年10月）⁶⁾

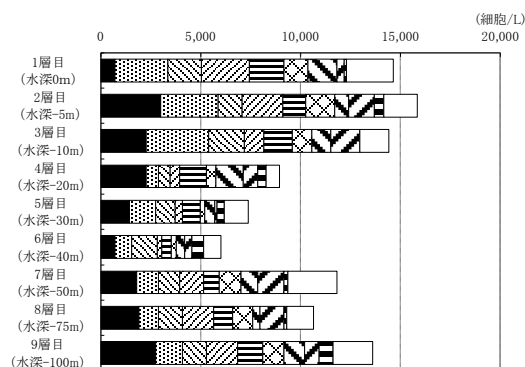


C 武蔵堆：冬季（2012年2月）⁶⁾

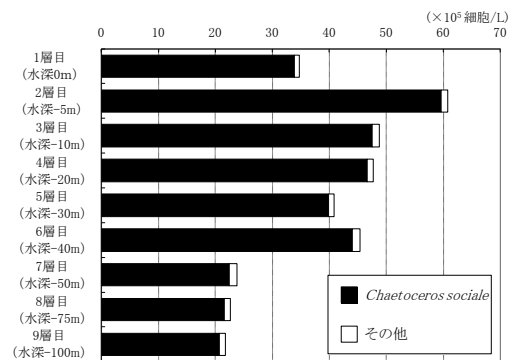


D 武蔵堆：春季（2012年5月）

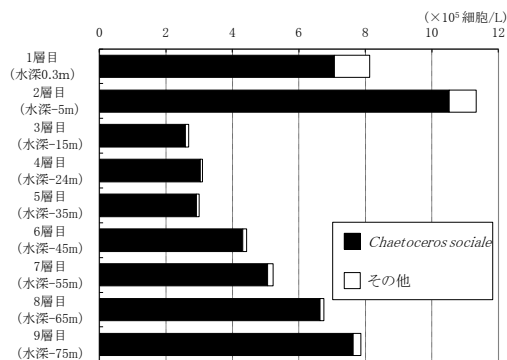
図-6 植物プランクトンの種組成（武蔵堆：L1-4）



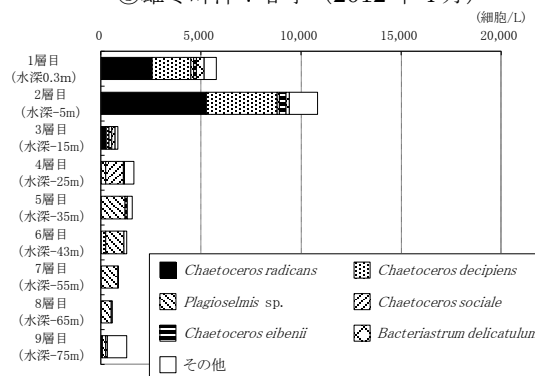
①岩内湾：冬季（2011年1月）



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-7 植物プランクトンの種組成（移動経路）

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。

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異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。

3.5 動物プランクトンの出現結果

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-8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-9、図-10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*

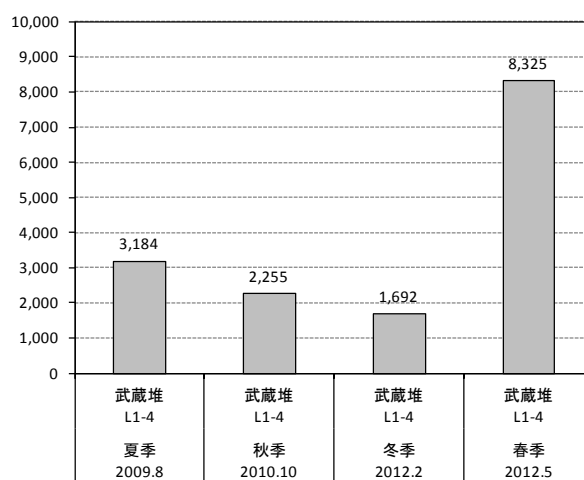
(節足動物甲殻綱)、*Oncaea media* (節足動物甲殻綱)、*Oikopleura longicauda* (脊索動物尾虫綱) が主に出現し、個体数は第1層で最も多かった。

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。

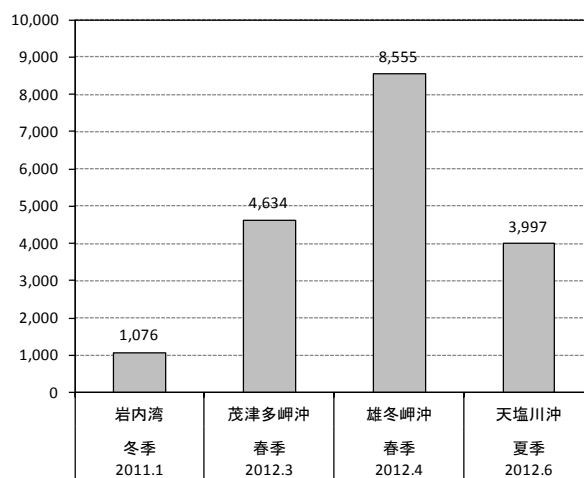
春季は全ての層で Nauplius of COPEPODA (節足動物幼生) が組成率44.2~75.3% で多かった。

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



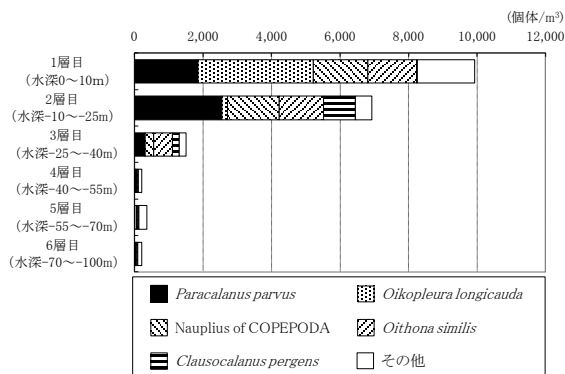
(1) 動物プランクトン細胞数 (成育場：武蔵堆)



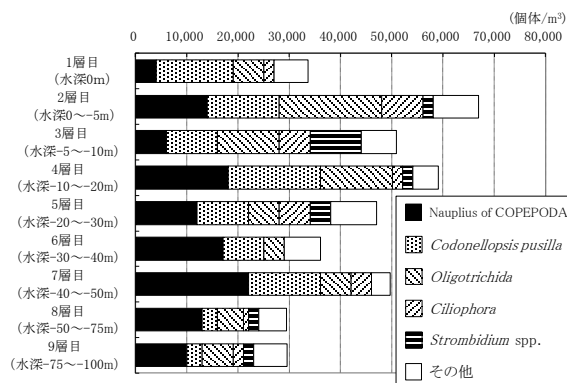
(2) 動物プランクトン細胞数 (移動経路)

図-8 動物プランクトンの季節別出現量

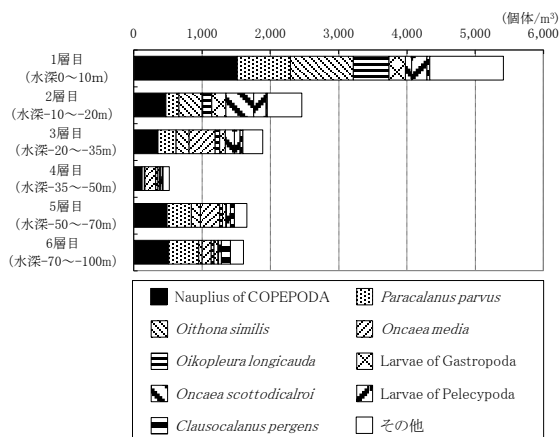
12.5 北方海域の物理環境変化による生物生産性の向上に関する研究



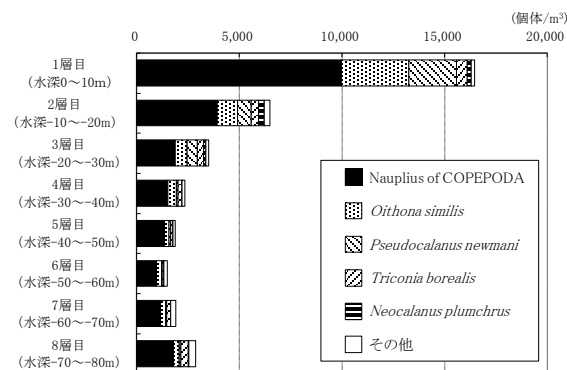
A 武蔵堆：夏季（2009年8月）⁶⁾



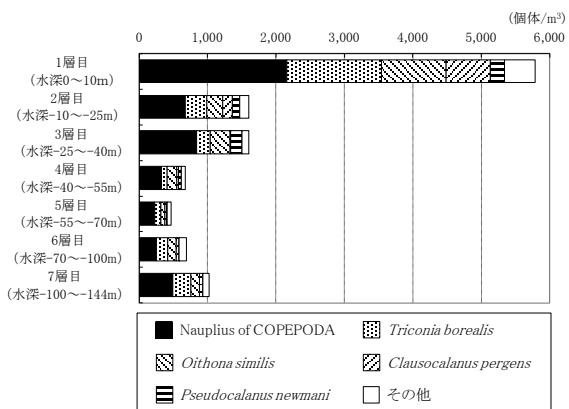
①岩内湾：冬季（2011年1月）



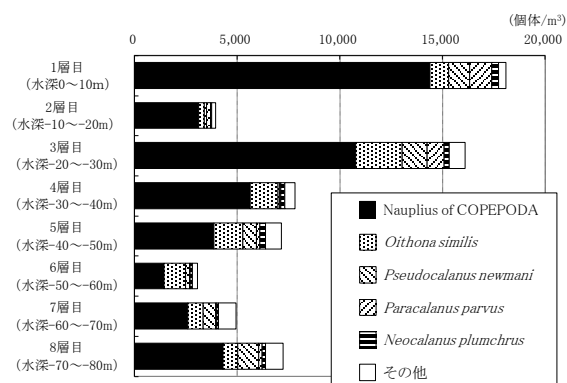
B 武蔵堆：秋季（2010年10月）⁶⁾



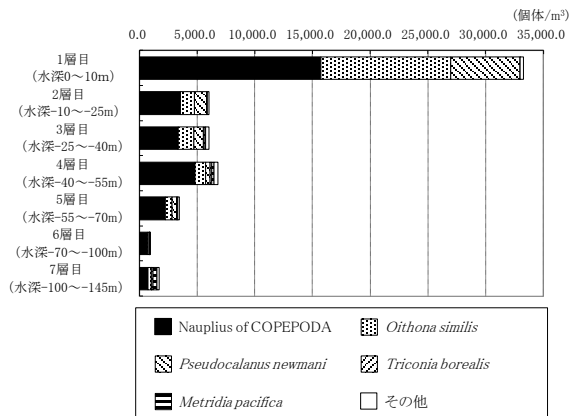
②茂津多岬沖：春季（2012年3月）



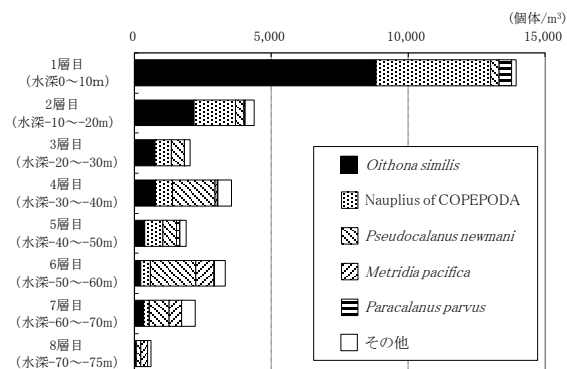
C 武蔵堆：冬季（2012年2月）⁶⁾



③雄冬岬沖：春季（2012年4月）



D 武蔵堆：春季（2012年5月）



④天塩川沖：春季（2012年6月）

図-9 動物プランクトンの種組成（武蔵堆:L1-4）

図-10 動物プランクトンの種組成（移動経路）

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。

3.6 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-11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^{7) 8)}、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-12、図-13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

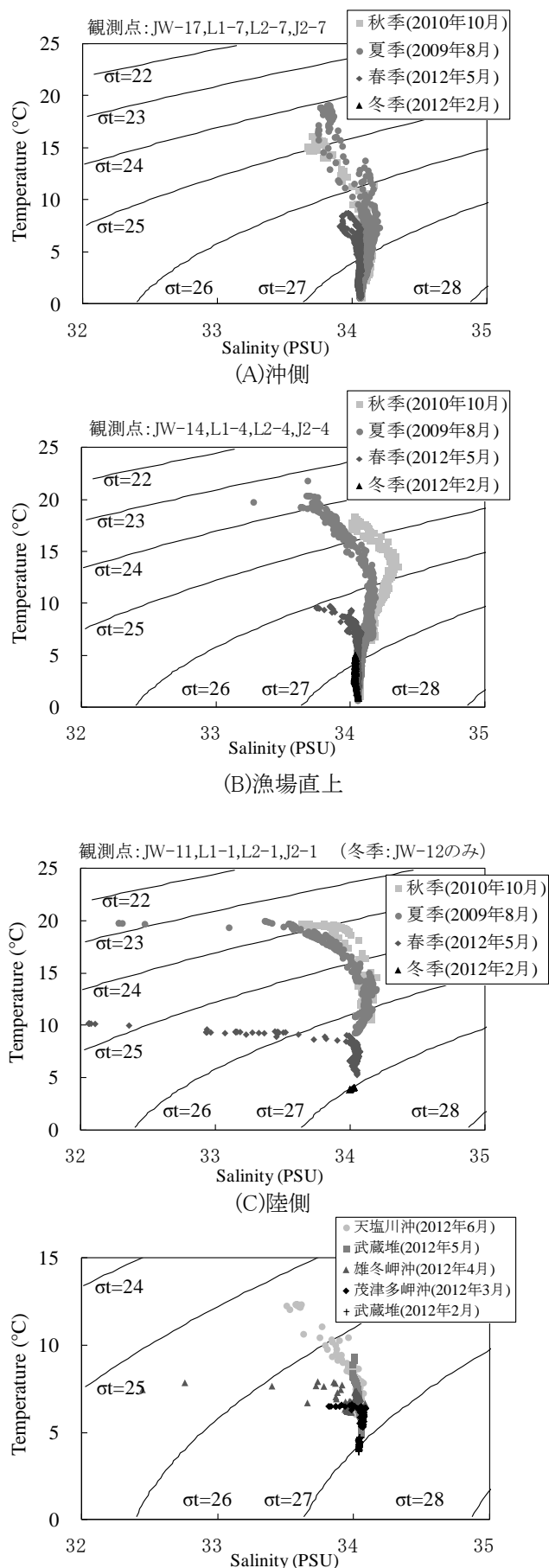
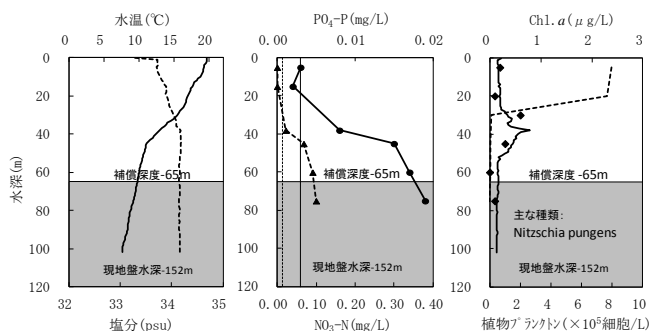
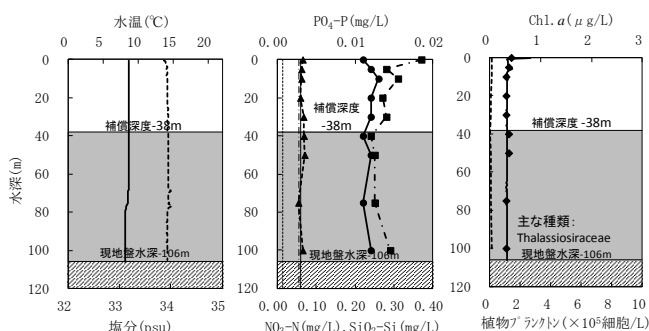


図-11 T-S ダイアグラム

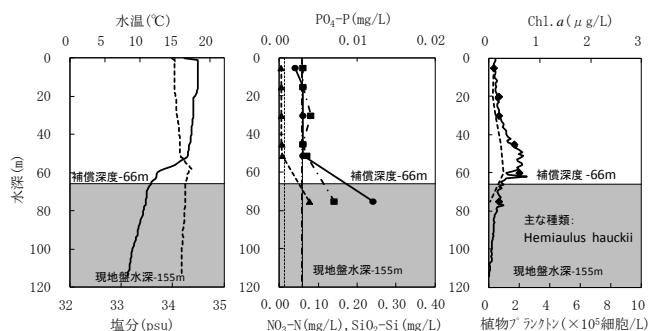
12.5 北方海域の物理環境変化による生物生産性の向上に関する研究



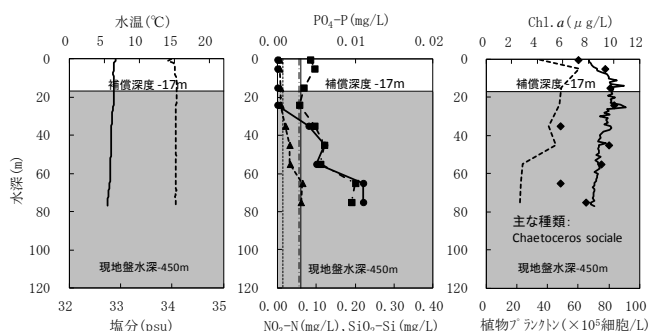
A 武蔵堆：夏季（2009年8月）⁶⁾



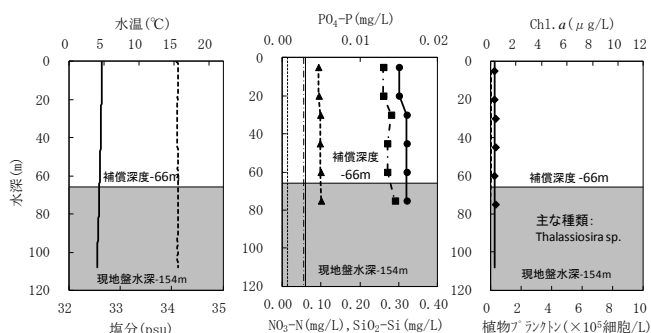
① 内湾：冬季（2011年1月）¹⁰⁾



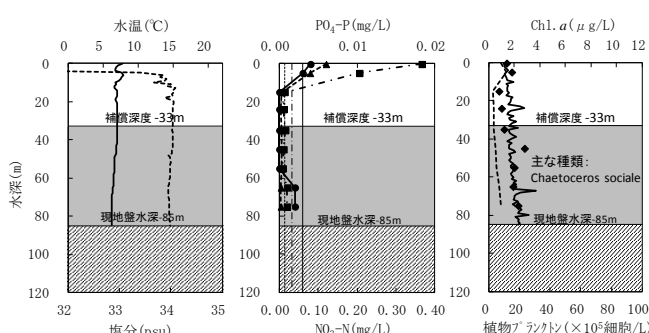
B 武蔵堆：秋季（2010年10月）⁶⁾



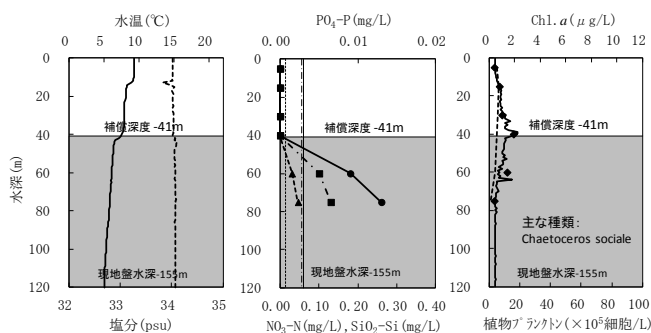
② 茂津多岬沖：春季（2012年3月）¹⁰⁾



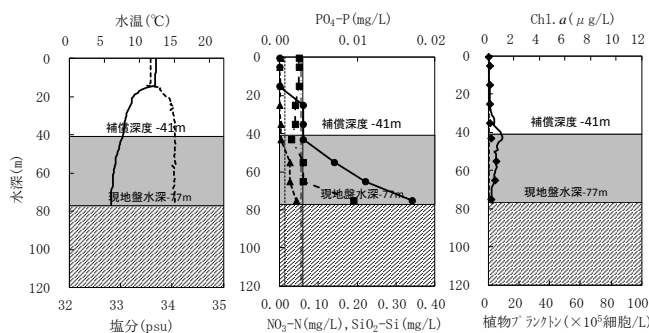
C 武蔵堆：冬季（2012年2月）⁶⁾



③ 雄冬岬沖：春季（2012年4月）¹⁰⁾



D 武蔵堆：春季（2012年5月）⁹⁾



④ 天塩川沖：春季（2012年6月）⁹⁾

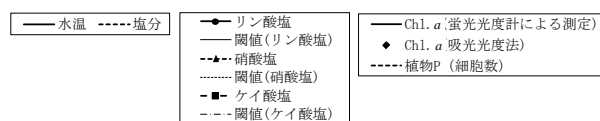
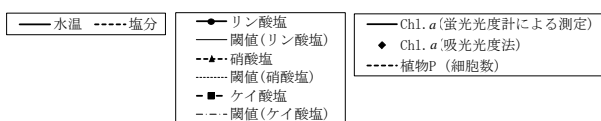


図-12 武蔵堆の水質鉛直分布の周年変化 (L1-4)

図-13 対象魚の成長段階に応じた移動経路上の水質鉛直分布

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。

3.7 窒素及び炭素の安定同位体比分析結果

安定同位体は生物が捕食や代謝、排泄など一連の行動過程の循環履歴を把握する上で、非常に重要な指標として利用されている。窒素・炭素・酸素・水素などの安定同位体を計測することにより、さまざまな生命活動や生物の履歴を解明することができる。

当海域における食物連鎖の解明には、窒素および炭素の安定同位体比分析が有効である。図-14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¹¹⁾。

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¹²⁾。

$\delta^{15}\text{N}$ 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

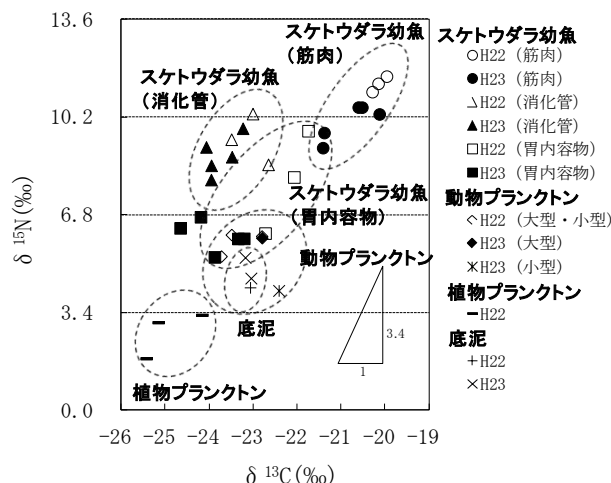


図-14 安定同位体比分析結果¹¹⁾

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。

前述のとおり、生態系における捕食-被捕食の関係から $\delta^{15}\text{N}$ が 3.4‰ 上昇することを考えると、産卵場から成育場に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、この基礎生産量がスケトウダラの増減に大きく関わっていると推測される。

3.8 基礎生産量の把握

3.8.1 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-15)。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。

実験模式図を図-16、培養水槽の設置状況を写真-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 $\text{NaH}^{13}\text{CO}_3$ 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 $0\sim 615\text{ W/m}^2$ の範囲の10条件とした。なお、光量子量($\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)はメタルハライドランプ用換算値¹³⁾である4.59で割り、太陽光の放射照度(W/m^2)に換算した。

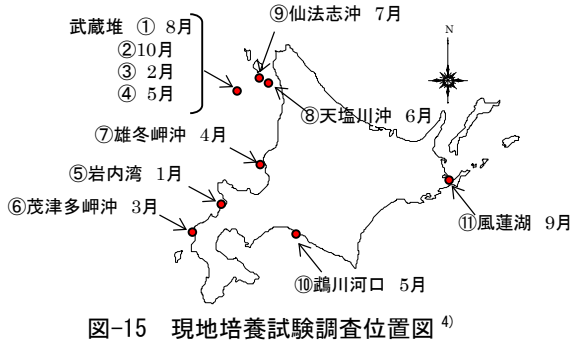


図-15 現地培養試験調査位置図⁴⁾

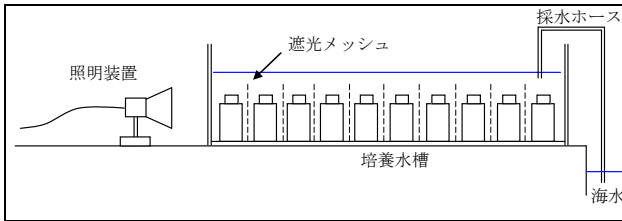


図-16 現地培養実験模式図⁴⁾

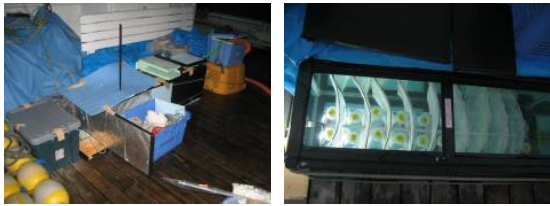


写真-1 培養水槽の設置状況 (武蔵堆, 船上)⁴⁾

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

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

- P : 光合成速度 $\text{mgC}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$
 a_{is} : 培養後の POC 中の ^{13}C 存在比 (%)
 a_{ns} : 培養前の POC 中の ^{13}C 存在比 (%)
 a_{ic} : 培養中 ($\text{NaH}^{13}\text{CO}_3$ 添加後) の全無機炭素 (培養海水) 中の ^{13}C 存在比 (%)
 C : 培養後の POC 濃度 ($\mu\text{gC}/\text{L}$)
 ΔC : 培養によって増加した POC 濃度 ($\mu\text{gC}/\text{L}$)
 t : 培養時間 (h)

(2) 光合成速度の推定

培養後、試料中の安定同位体 (^{13}C) 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、 ^{13}C 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 ^{13}C 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

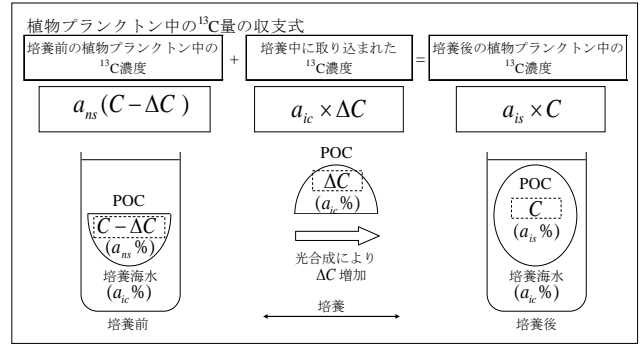


図-17 光合成速度推定の概念⁴⁾

ことができる。光合成速度推定の概念を図-17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 ^{13}C 量の収支は、(1)式¹⁴⁾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。

次に(2)式を $\text{Chl.}a$ 濃度で割り、比光合成速度 μ' ($\text{mgC}/((\text{mgChl.}a) \cdot \text{h})$)を推定し、1日当たり(24h)の換算と $C/\text{Chl.}a$ 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。 $C/\text{Chl.}a$ 比は一般値として50を採用した¹⁵⁾。

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

(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-18、表-1)。これらのパラメーター取得の詳細は林田ら⁴⁾¹⁶⁾の報告による。図-18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¹⁷⁾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。

(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-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 $\text{mgC}/((\text{mgChl.}a) \cdot \text{h})$ で示す ((3)式から換算)。

本実験値は $0.8 \sim 10.0 \text{ mgC}/((\text{mgChl.}a) \cdot \text{h})$ 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

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

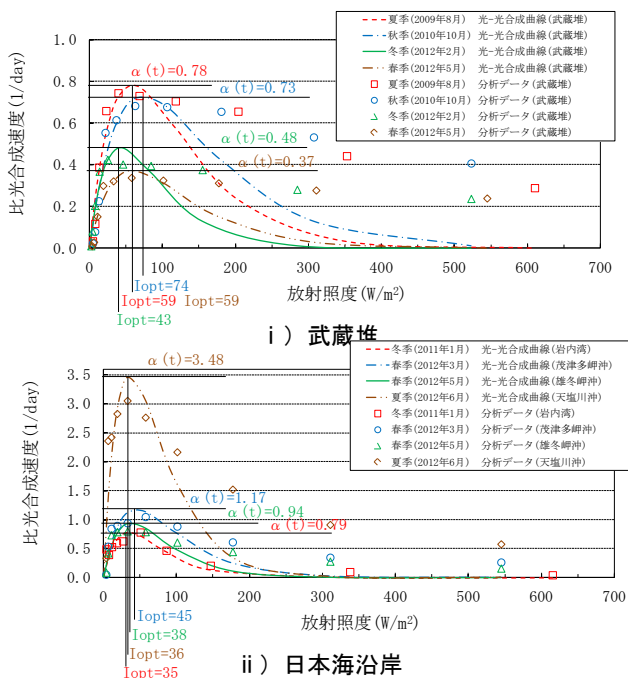


図-18 光-光合成曲線の推定結果

表-1 低次生態系計算用パラメーター(培養試験) 4)

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鶴川河口, 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

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) 18)19)の比較を行った(表-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。透明度が低い鶴川河口、風蓮湖などは、

表-2 文献値 20)との比較(最大可能成長速度) 4)

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鶴川河口, 5月(培養水温 10.3℃)
6.9	⑪風蓮湖, 9月(培養水温 17.8℃)

表-3 文献値 18) 19)との比較(最適光強度) 4)

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>Proocentrum 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>Proocentrum 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鶴川河口 (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 stollerfothii</i> (珪藻) <i>Cryptomonas acuta</i> (クリプト藻) <i>Chaetoceros affine</i> (珪藻) 種群

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。

3.8.2 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¹⁸⁾を各海域に適用して単位水柱 (m²) 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-19、鉛直方向の一日当たりの基礎生産量(mgC/(m³・day))を図-20、この値の鉛直積分値を表-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は現象を再現していると考えられる(図-19)。

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)。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)²¹⁾や夏季の噴火湾や伊勢湾の値300~1400(mg-C/m²/day)²²⁾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ている。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)

表-4 基礎生産量の算定結果⁴⁾

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

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

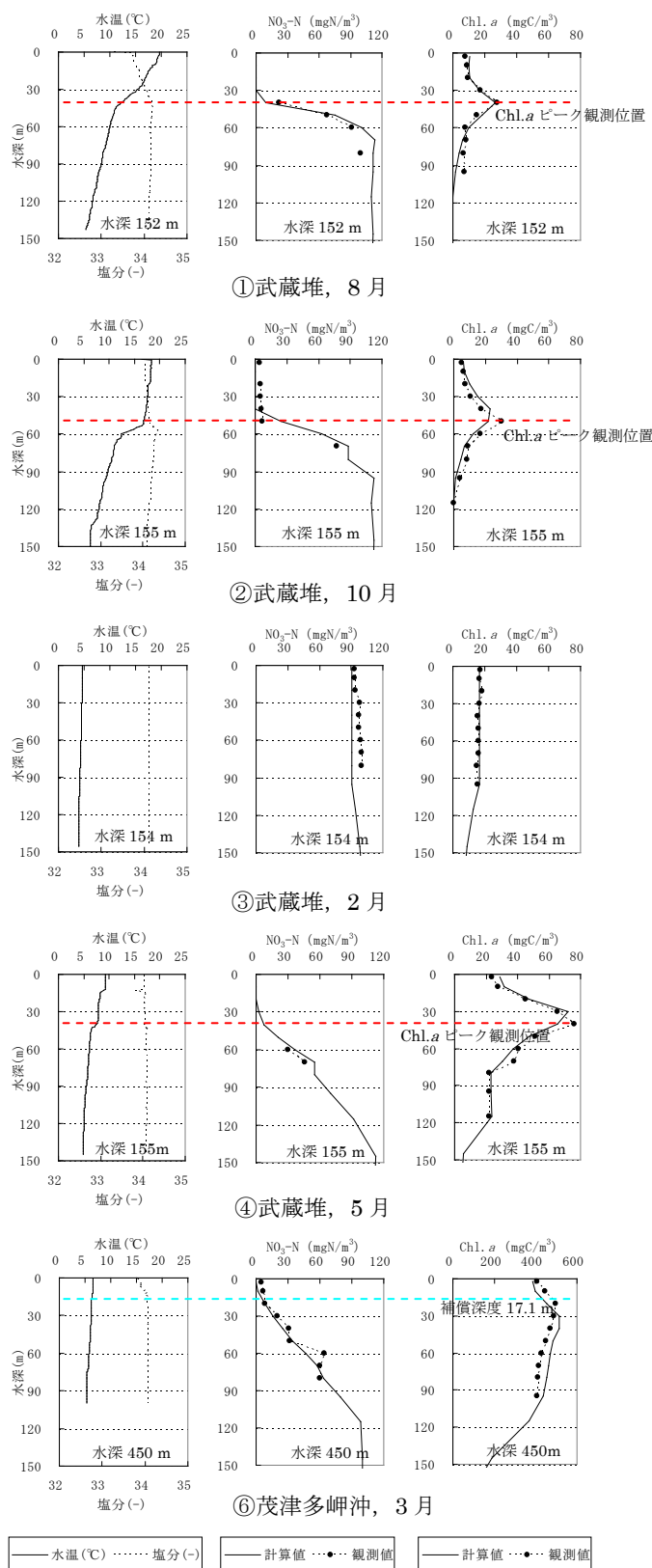


図-19 水温・塩分, 硝酸塩, Chl.a の鉛直分布⁴⁾

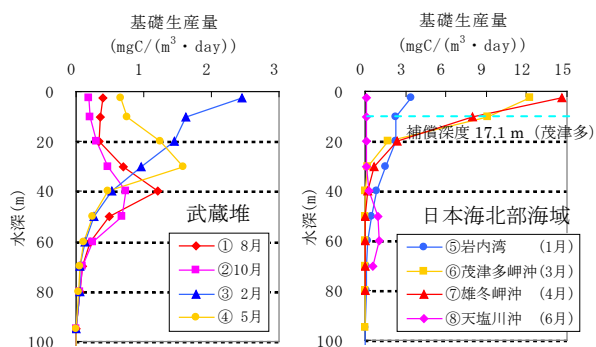


図-20 基礎生産量の鉛直分布⁴⁾

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。

(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-5に示す5ケースであり、①と②は、上述した茂津多岬沖（3月）と雄冬岬沖（4月）の再現結果である。①'は①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。②'は「融雪出水の影響が全く無い場合」の試算である。また、①''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。

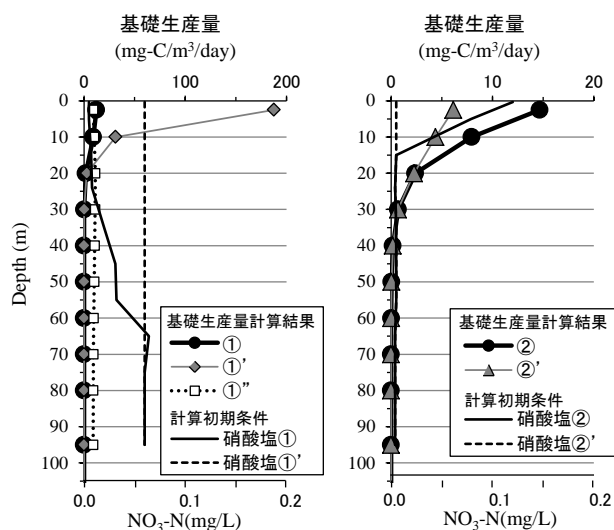
試算結果²³⁾は図-21、表-6に示す。①'は十分な栄養塩と豊富な植物プランクトン量により表層で高い基礎生産量を示し、基礎生産量は1278mg-C/m²/dayと試算された。これは春期の北海道南東親潮域観測点の値（990～1970mg-C/m²/day）の範囲内²¹⁾にある。一方、①''は1038mg-C/m²/dayとなった。①''は冬季から茂津多岬沖の観測までの43日間の平均値として算出しているため、ブルーム期間の前後を含めて過小に見積もった可能性がある。これらより①'で試算され

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①'から①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②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②'は、

表-5 基礎生産量の計算条件²³⁾

計算ケース・名称	計算条件	
	水温・塩分	表層の栄養塩濃度
① 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。		
①' 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。		
② 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。		
②' 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 ①''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月観測時までに増大した生物量の1日平均値。		



(a) 茂津多岬沖 ①, ①', ①'' (b) 雄冬岬沖 ②, ②'
図-21 基礎生産量の鉛直分布²³⁾

表-6 単位面積あたり基礎生産量²³⁾

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
① 茂津多岬沖貧栄養		170.32	1.73	0.00
①' 茂津多岬沖混合		1275.80	2.26	0.00
①'' ブルーム期平均		256.78	317.81	463.68
② 雄冬岬沖現況		176.63	9.11	0.12
②' 雄冬岬沖陸水無し		97.24	8.96	0.13

表層の基礎生産がほぼ半減している。②と②'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。

(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、対馬暖流による基礎生産への影響の程度を確認することを目的として秋季から冬季の表層冷却のみの影響を把握するための仮想計算を実施した。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-22、表-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、硝酸塩のみを冬季（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。

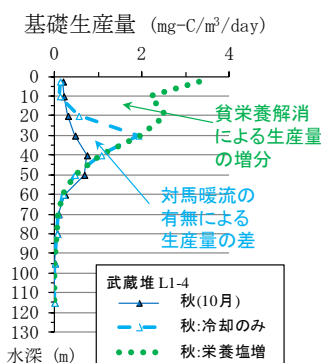


図-22 秋季における基礎生産量の数値実験²⁾

表-7 基礎生産量算出結果(仮想計算)²⁾

地点, 時期	基礎生産量(mg-C/m ² /day)			
	水深(m)	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

4. 物理環境の再現

4.1 広域の物理環境

スケトウダラ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松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)。つまり、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生息空間となっており、特に遊泳力の小さい仔稚魚期までは表層の流れに依存している。これに加え生息環境を理解するためには、周年の栄養塩の分布、水域の密度分布など物理環境を把握する必要がある。このことから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。

4.1.1 広域の流れ場の計算方法

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座表系で、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。

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

$$\begin{aligned} & \frac{\partial uD}{\partial t} + \frac{\partial uuD}{\partial x} + \frac{\partial uvD}{\partial y} + \frac{\partial u\omega}{\partial \sigma} - f_vD \\ &= -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^{\sigma_0} \left[\frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right] d\sigma \quad (5) \\ &+ \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_M}{D} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D \left(2A_M \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D \left(A_M \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial vD}{\partial t} + \frac{\partial uvD}{\partial x} + \frac{\partial vvD}{\partial y} + \frac{\partial v\omega}{\partial \sigma} + fuD \\ &= -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^{\sigma_0} \left[\frac{\partial \rho}{\partial y} - \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right] d\sigma \quad (6) \\ &+ \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_M}{D} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D \left(A_M \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D \left(2A_M \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right\} \end{aligned}$$

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-23、表-8に示す。地形は日本海洋データセンター(JODC)による500m

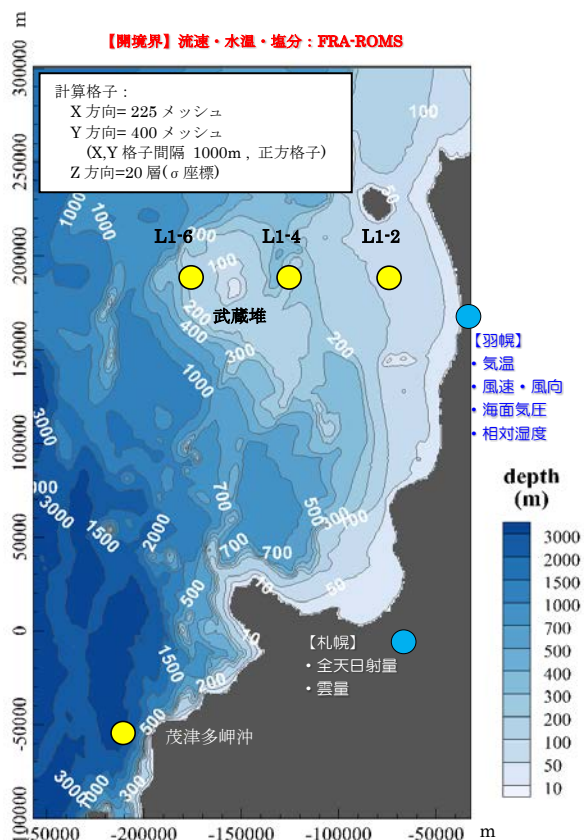


図-23 計算の領域

表-8 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

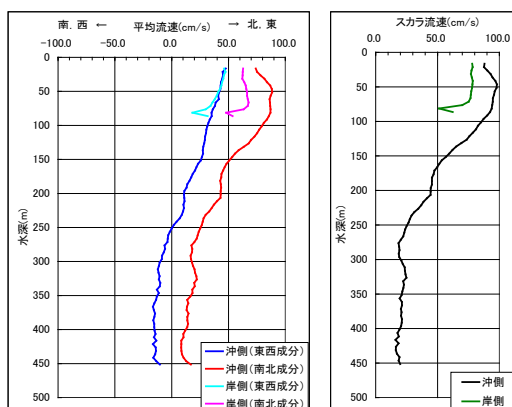


図-24 流況の現地観測値 (茂津多岬沖)

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-24)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。

4.1.2 広域の水温・塩分分布

水温の計算結果を図-25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°C程度を示し、図-12(L1-4)のデータと比較しても現地観測結果に等しい。鉛直

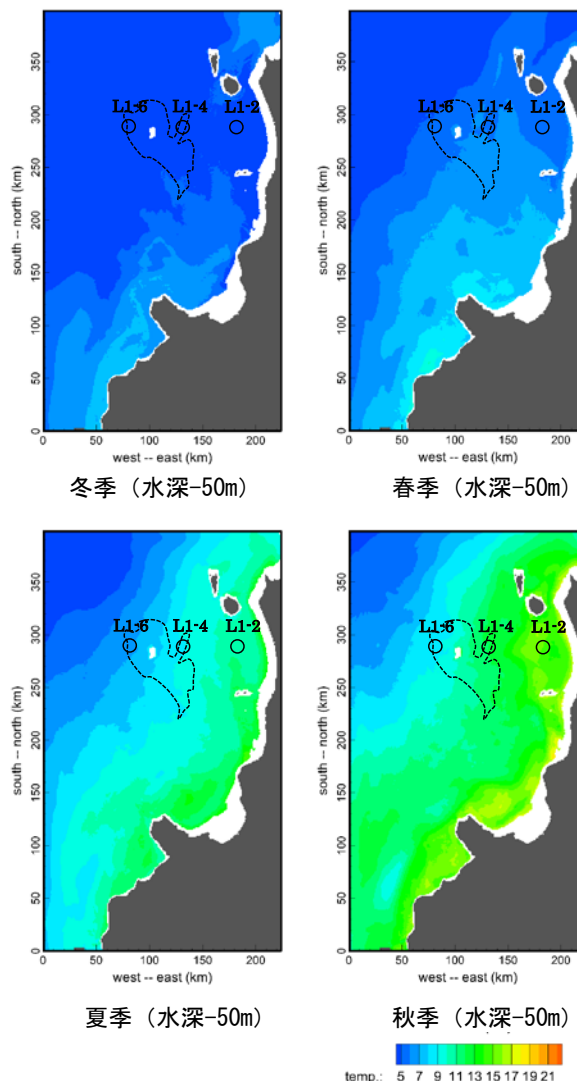


図-25 水温の数値解析

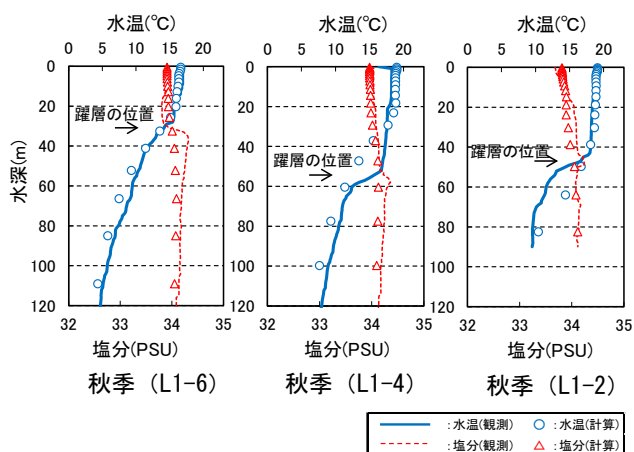


図-26 現地観測値と数値解析値
(水温・塩分の鉛直分布)

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-26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-25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。

4.1.3 広域の流況

四季の流向・流速の計算結果を図-27に示す。これは水深2m (①、②、③、④-1)の四季の再現および対馬暖流の勢力が増す秋季を水深別(④-1 2m、④-2 50m、④-3 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

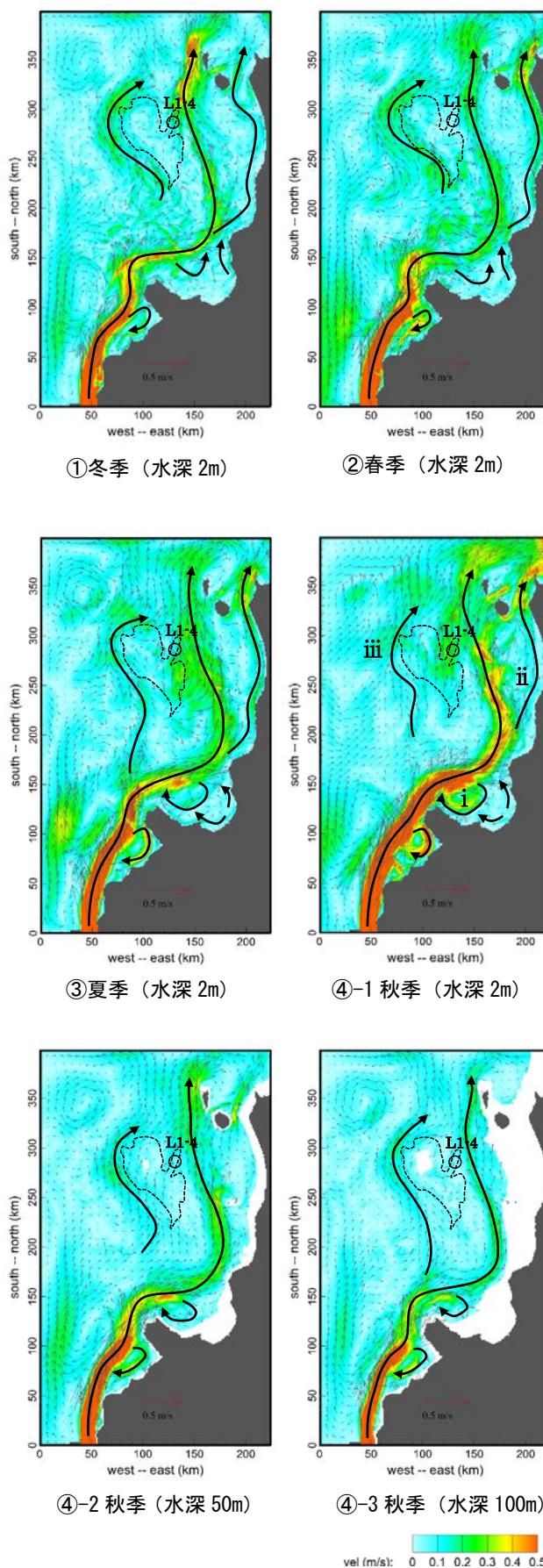


図-27 流況の数値解析

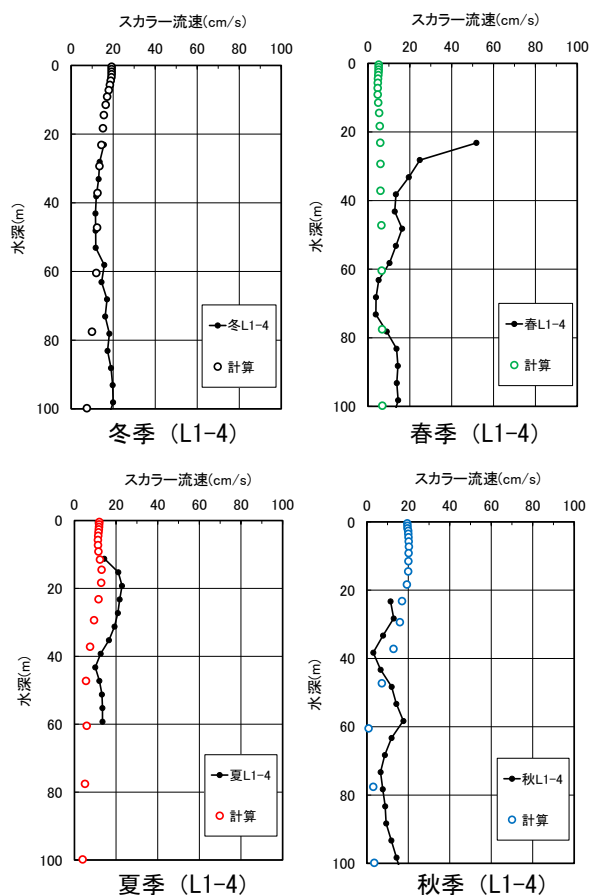


図-28 流況の現地観測値と数値解析値
(四季の鉛直分布：L1-4)

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-28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。

4.2 局所的な流れ場の再現

前述のとおり、夏季や秋季は密度成層が発達し、表層の栄養塩が枯渇していることから、基礎生産が低位となっている。一方、生態系モデルを用いた仮想的な実験として、秋季の表層において硝酸塩の制限がかからない状態の場合、基礎生産を増大させる

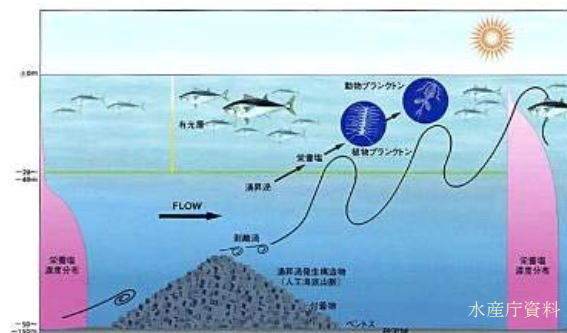


図-29 湧昇流発生マウンド概念図

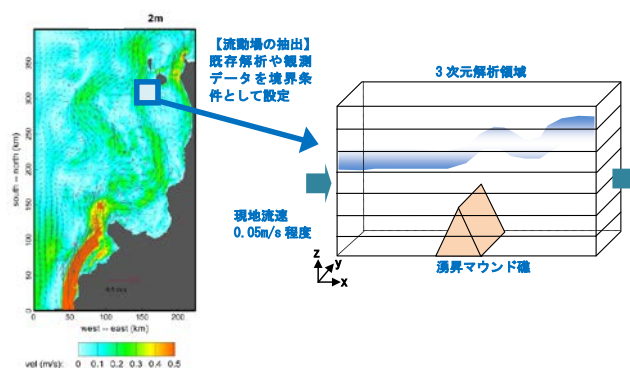


図-30 流れ場の再現計算概念図

ポテンシャルがあることが明らかになっている(図-22、表-7)。つまり、夏季、秋季の密度成層下であっても底層の栄養塩を有光層内へ供給できれば基礎生産は増大すると考えられる。

この現象を造り出す方法として湧昇マウンド礁が考えられる。これはマウンド状の人工礁を設置することによって周辺の流れに擾乱や湧昇流を生じさせ、密度成層を破壊、底層の栄養塩が表層に供給されるというメカニズムである(図-29)。また、流れ場の再現計算の概念を図-30に示す。このような急激な水深変化を伴う局所的な構造物を設置した場合の流れ場について、数値計算モデルを使用し物理環境の再現を行った。

4.2.1 狭領域の計算方法

上述したように湧昇マウンド礁による擾乱や湧昇流など鉛直方向の流れについて計算を実施するため、広域の物理場を計算した静水圧近似やBoussinesq近似されたモデル(プリミティブモデル)では、これらの鉛直方向の流れの再現に誤差が生ずる可能性が懸念された。このため日本造船学会海洋環境研究委員会が開発したMEC(Marina Environmental Committee)モデルにおけるFull-3Dのモデルを使

用した。

このモデルは非圧縮流れの3次元Navier-Stokes方程式をMAC法によって解くモデルであると共に、湧昇マウンド礁から離れた領域においてはプリミティブモデルと接合することにより、広域の環境計算が可能という特徴を持っている。このため広域の海洋循環から湧昇流発生マウンドや人工魚礁などの局所的な人工構造物周辺の流れ場を解析するのに適していると考えられる。以下にこのモデルで使用している基礎方程式(7)と移流拡散方程式(8)を示す。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla((u - W_{mv})u) = -\nabla\left(\frac{P}{\rho_0}\right) + (v + v_i)\nabla^2 u - \frac{\rho}{\rho_0} g \quad (7)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla((u - W_{mv})\phi) = a\nabla^2 \phi \quad (8)$$

ここに g は重力加速度、 W_{mv} は潮位が変化した時の格子移動速度、 a は拡散係数である。

計算領域、計算条件を図-31、表-9に示す。計算範囲は3600m(L)×600m(W)×100m(Z)とし、水平メッシュ幅は30m等間隔格子、鉛直層厚は1mとした。湧昇マウンドの天端高は全水深100mの1/2となる50mで計算を行った。

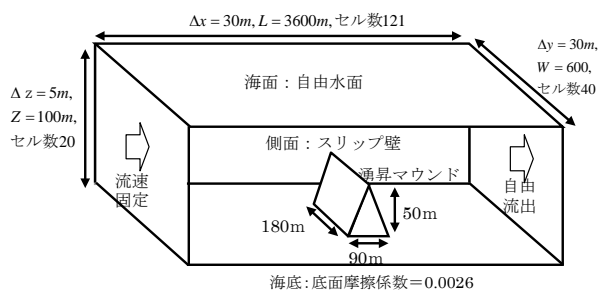


図-31 湧昇マウンド礁の設定概要

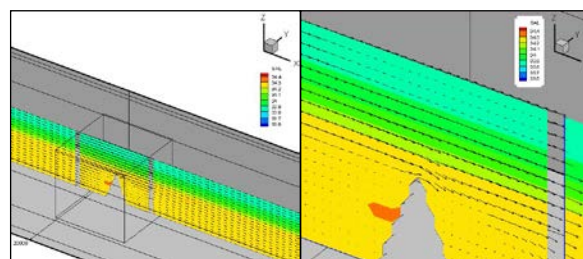
表-9 計算条件の一覧

項目	条件	
計算範囲	3600m(L)×600m(W)×100m(Z)	
格子間隔	30m (等間隔格子)	
鉛直層分割	層厚 1m、20 層	
時間ステップ	広域:1.5 秒, 狭域:0.5 秒	
境界条件	上流側流速固定	
	下流側自由流出	
諸係数	コリオリ係数	0.0s ⁻¹
	海面摩擦係数	0.0015
	海底摩擦係数	0.0026

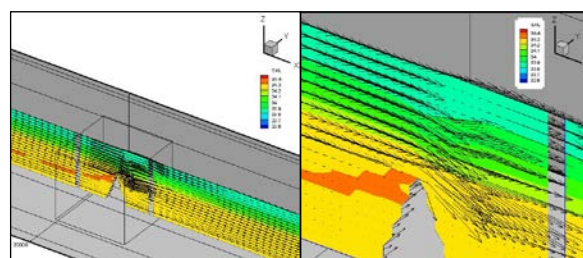
4.2.2 狭領域の計算結果

湧昇マウンド礁による擾乱効果の解析結果について図-32に示す。武蔵堆の底層付近の観測で良く見られる流速 0.05m/s、水深 120m と 80m 付近の平均流速である 0.2m/s、0.5m/s の 3 ケースを検討した。

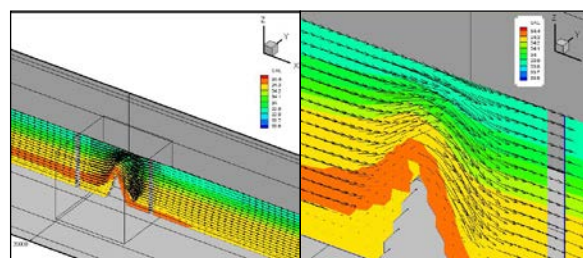
ケース 1 は擾乱が湧昇マウンド礁直上の極一部に限られている。秋季の現地観測より 60m 付近に躍層が形成されていることから、混合層へ影響を及ぼすほどの擾乱効果は見られないと推測される。ケース 2 は混合層まで擾乱が見受けられるが、影響範囲はマウンド礁直上のみであり擾乱効果は限定的なものと推測される。ケース 3 は湧昇マウンド礁に沿って湧昇流が見られ、躍層以浅の混合層内へ擾乱している状況を確認することができた。



ケース 1 : 流速 0.05m/s



ケース 2 : 流速 0.2m/s



ケース 3 : 流速 0.5m/s

図-32 湧昇マウンド礁攪乱効果解析

5. 資源保護効果の検討

沖合域における漁場整備の代表的な工法として、前述した湧昇流発生マウンドの他に、親魚の漁獲制限や稚仔魚の初期減耗を抑制することにより、資源の底上げを図ることを目的とした保護育成礁の設置が考えられる。ここでは、稚仔魚の初期減耗の抑制のための保護育成礁を設置した場合の資源保護効果について検討した。

5.1 資源分布状況の推定

資源保護効果算定フローを図-33 に示す。保護育成礁の設置箇所を選定するには当歳魚（0 歳魚）が多く分布する箇所を把握する必要があり、年齢別資源分布状況の推定が必要となる。

北海道日本海におけるスケトウダラの年度別資源量は、北海道区水産研究所が例年評価しているスケトウダラ日本海北部系群の漁獲量および資源量の変遷より算出した²⁷⁾。資源量分布については、北海道立水産試験場（現 北海道立総合研究機構）が実施するスケトウダラ計量魚探調査により把握されており、スケトウダラの分布量（トン）もしくは魚探反応の分布図が図示されているものより算出した²⁸⁾。これらの公開されているデータを基に、スケトウダラの分布状況について推定することを試みた。2001 年から 2009 年までの 9 年間におけるスケトウダラの体長（尾叉長）分布データを集計して地点別に整理した。年齢構成の推定に当たっては、スケトウダラ計量魚探調査結果²⁸⁾ から得られている体長組成分布を年齢別の正規分布に分解することで各年齢の個体数を

算出した。推定結果の代表例を図-34 に示す。

武蔵堆より東側においては、当歳魚の割合が高く、雄冬岬沖や武蔵堆の西側水域においては 1~2 歳魚の割合が高い地点が多いことがわかる。地点毎のばらつきはあるものの、大まかな水域の特徴が認められた。

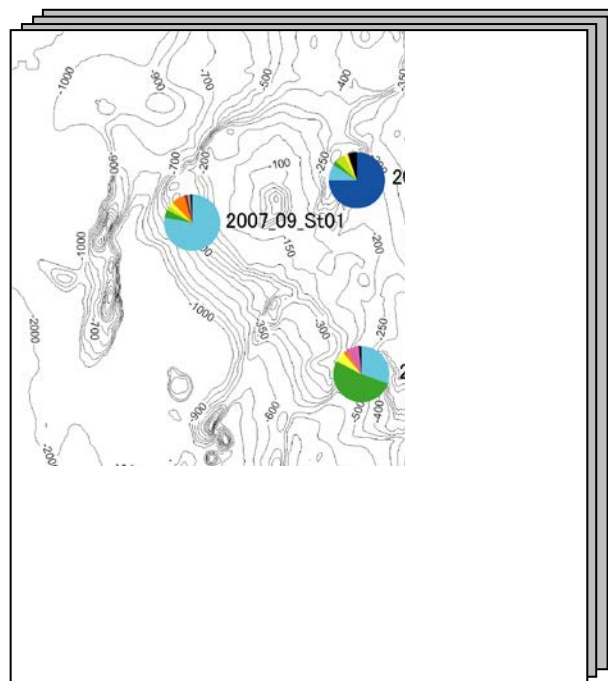


図-34 年齢組成図(尾数ベース：2007 年)

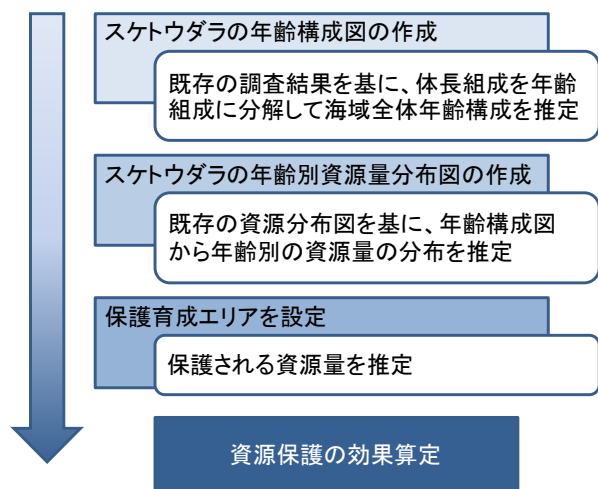


図-33 資源保護効果算定のフロー

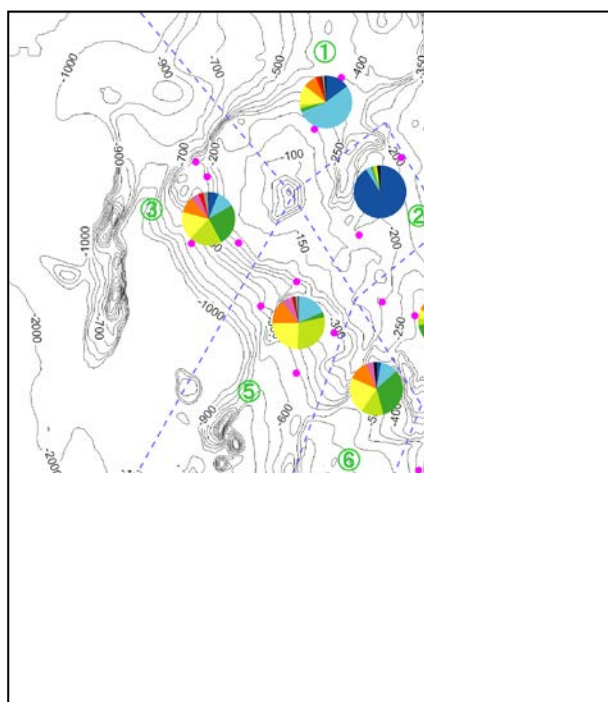


図-35 年齢組成の水域別平均値（尾数ベース）

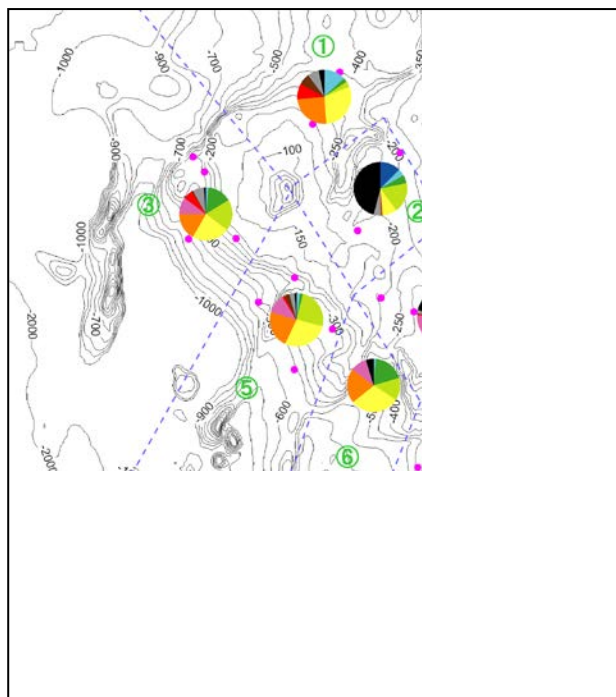


図-36 年齢組成の水域別平均値（重量ベース）

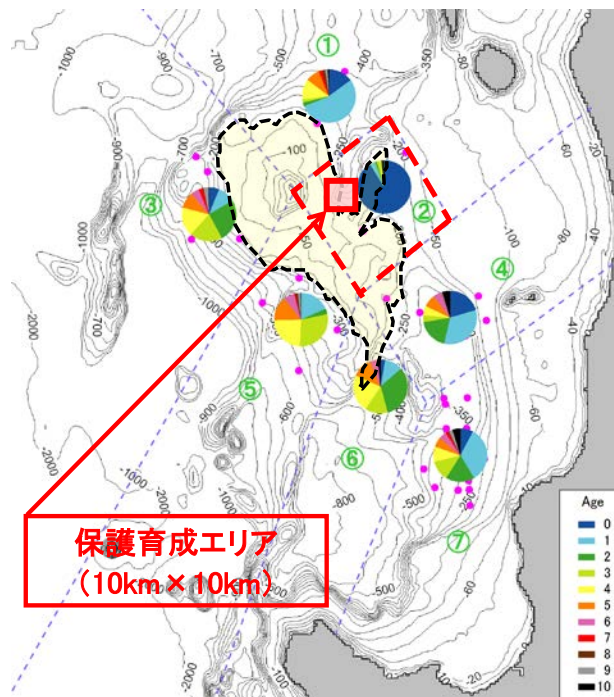


図-37 保護育成エリアの設定

以上より、これら年齢組成のデータについては、近傍の地点毎にデータをまとめて同一水域と考え、これら水域毎に年齢組成の平均値を算出した。図-35および図-36に設定した年齢組成の空間分布を尾数ベースと重量ベースで示す。武蔵堆および雄冬岬沖に存在する浅海域を特異点と考え、その特異点から各水域の中心座標間の線分を二等分する中間線（図-35、図-36の青点線）を引くことにより、代表する年齢組成の領域とした。

5.2 資源保護効果の算定

当歳魚の多い領域内において保護育成エリアを設定し、資源保護効果を試算する。エリアの設定にあたっては、鳥取・島根沖の日本海西部地区においてズワイガニ・アカガレイを対象として保護育成礁の設置事業が行われており、その規模と同規模を仮定して10km×10kmの保護育成エリアを設定した（図-37）。また、海域全体に対する加入資源量について図-38に示す。保護育成エリア内における当歳魚の資源量は、尾数換算で日本海北部海域全体の約3.4%に相当している。これは、このエリア内の当歳魚が漁獲から全て保護されると仮定して、10年後までの波及効果を検討したものである。検討においては、コホート解析²⁹⁾の前進法において自然死亡係数M及び漁獲係数Fを設定することにより、この当歳魚

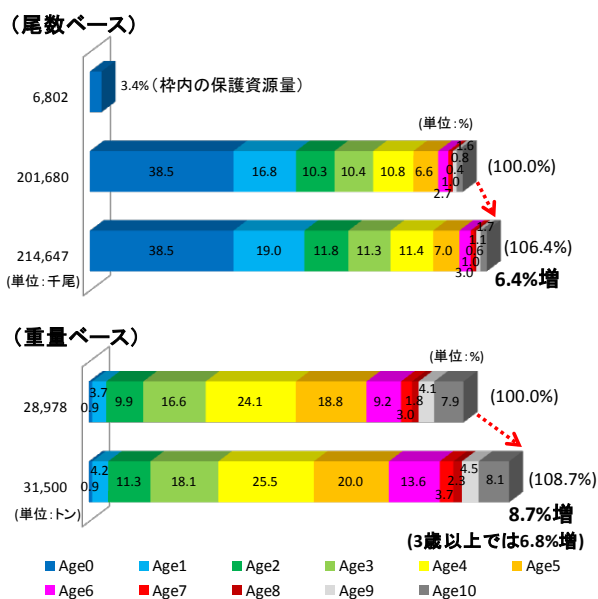


図-38 海域全体に対する加入資源量

の1歳魚以降における資源尾数を予測した。なお、自然死亡係数と漁獲係数は北海道区水産研究所の資源評価資料²⁷⁾に基づいて設定した。ただし、漁獲係数は2008年度の値を使用して1歳魚以上を0.15とした。

また、自然死亡係数は2歳魚以上しか明らかにされていないことから、ここでは当歳魚と1歳魚を2歳魚と同率とした。

$$N_{a+1,y+1} = N_{a,y} \exp(-F_{a,y} - M_a)$$

$N_{a,y}$: y 年における a 歳魚の資源尾数

F : 漁獲係数 (Age0=0.00, Age1~10=0.15)

M : 自然死亡係数

(Age0~2=0.30, Age3~10=0.25)

これより当歳魚を保護育成した場合の全体に対する効果は尾数換算で 6.4%増加し、重量に換算すると 8.7%、3 歳魚以上では 6.8%増加すると示唆された。

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は夏季よりも深くなっており、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、低温のため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、継続している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の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、基礎生産増大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。

⑧ 保護育成礁を設置した場合（10 km×10 kmの保護育成エリアを設定）の10年後のスケトウダラ資源量について試算した。その結果、日本海北部海域の当歳魚資源量（尾数）の3.4%が保護され、1歳魚以上の全資源量（尾数）が6.4%増加すると算定された。

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) 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
- 5) J. k. Egge, D. L. Aksnes: Silicate as regulating nutrient in phytoplankton competition, MARINE ECOLOGY PROGRESS SERIES, vol. 83, 1992.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.

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

- 9) 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
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 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，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.
- 17) Steele, J. H. : Environmental control of photosynthesis in the sea, Limnology and Oceanography, Vol.7, pp.137-150, 1962.
- 18) 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.
- 19) 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.
- 20) Carol M. LALLI. and Timothy R. PARSONS : 生物海洋学入門，講談社，1996.
- 21) 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.
- 22) 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.
- 23) 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.
- 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.
- 27) 北海道区水産研究所(2009)：平成21年度スケトウダラ日本海北部系群の資源評価，pp311-366.
- 28) 北海道立総合研究機構(2001-2009)：調査速報日本海スケトウダラ資源調査結果.
- 29) 田中栄次：水産資源解析学，成山堂書店，pp.93-103.

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

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : Fisheries Engineering
Research Team

Author : MIKAMI Nobuo

OKAMOTO Setsuo

SATO Jin

MIMORI Shigeaki

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. Between 2011 and 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. In 2014, the effect of the protection of resource was predicted. And the computing model of artificial upwelling producing structure was made, and a local flow was calculated.

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