

12.2 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：山本潤、岡元節雄、佐藤仁、河合浩、須藤賢哉、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。

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²⁾、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 T A C 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、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。これまでに、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、その取り組み状況と

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、海域の肥沃化や資源の減耗原因の解消がそれぞれの直接の目的となる。前者は、夏季の密度成層によって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、対象魚の増肉と減耗率の低下を図るものである。湧昇流発生の外力が存在し、栄養塩枯渇が広範囲で一定の期間継続していれば、この工法が選択される価値がある。この条件が満たされない場合には、後者の工法により、対象魚が生息する海底微地形の回復を図るとともに、親魚や未成魚等の適正な資源管理を促すことが考えられる。その場合、漁場周辺に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。これらを満たす適地の選定と工法選択等を行い事業の基本方針を決定するためには、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、海底の微地形の状況等の判断材料が必要である。これらの主要な項目を今後数年間の調査で補完・追加するため、著者らの研究チームは調査を開始した。

3. 調査方法

3.1 調査位置

調査位置を図-3.1に示す。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)を追加した地点と、底泥採取のため JW-13' と L1-4' を追加した計 30 点で計画した。冬季の観測は波浪のため、主要漁場となっている L1-4 を中心に JW-12~15、L1-4~5、L2-4~5、J2-4~5、JW-13' の 11 地点で観測を行った。

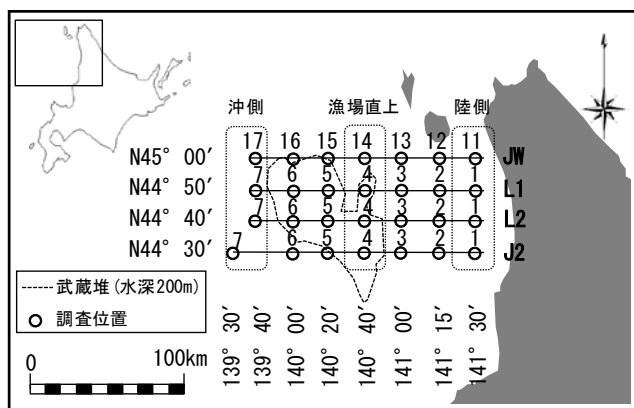


図-3.1 調査位置(日本海北部海域)

3.2 調査時期と方法

調査は、夏季(平成21年8月)、秋季(平成22年10月)、冬季(平成24年2月)に、道総研が保有する海洋観測船によって実施した。主な調査項目として、船舶に搭載されたCTDによる水温・塩分観測、バンドーン型採水器による採水と栄養塩等の水質分析を行った。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。現地観測方法の詳細は山本ら²⁾³⁾を参照されたい。

4. 観測結果

4.1 栄養塩

栄養塩分析の結果を図-4.1に示す。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、珪酸塩を 0.056mg/Lとする⁴⁾と、夏季と秋季の密度成層期では、表層から水深50m付近までの水温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。当海域の基礎生産は、表層での硝酸塩不足が制限要因となっており、硝酸塩の分布が基礎生産に影響を与えて

いると考えられる。一方、冬季は、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栄養塩の枯渇が回復していることが確認された。

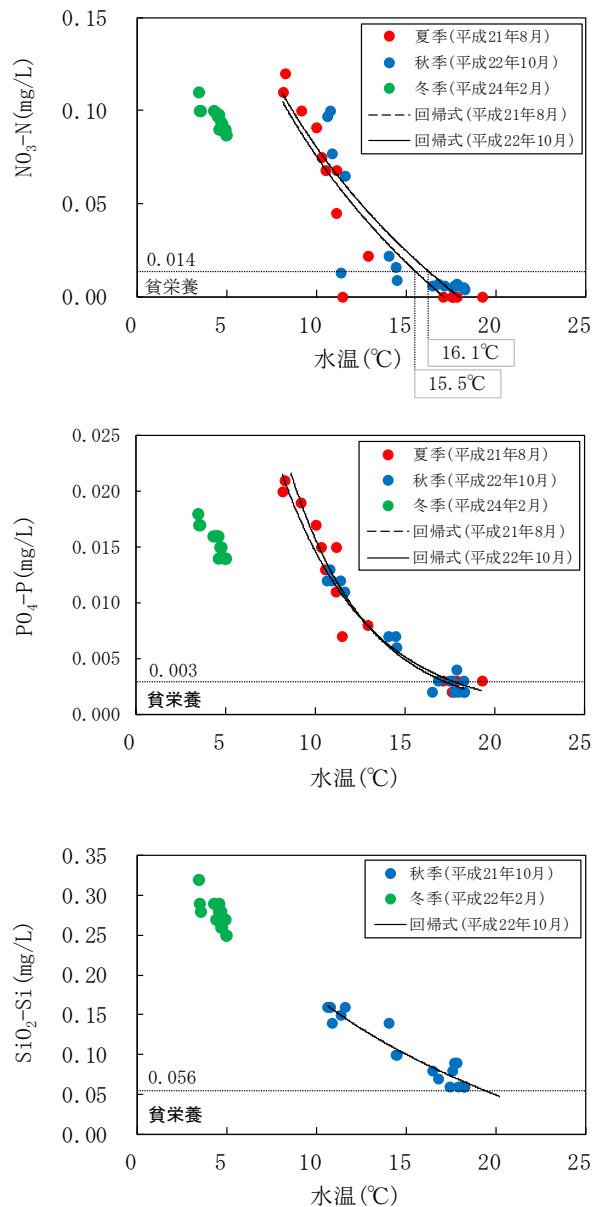


図-4.1 栄養塩と水温の関係

4.2 光量子量

光量子量観測結果と補償深度を図-4.2に示す。表層の光量子量について、夏季は 162.7~403.0 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、秋季は 35.0~466.5 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、冬季は 45.1~457.0 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ であった。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であったことから、大きな違いは見られなかった。

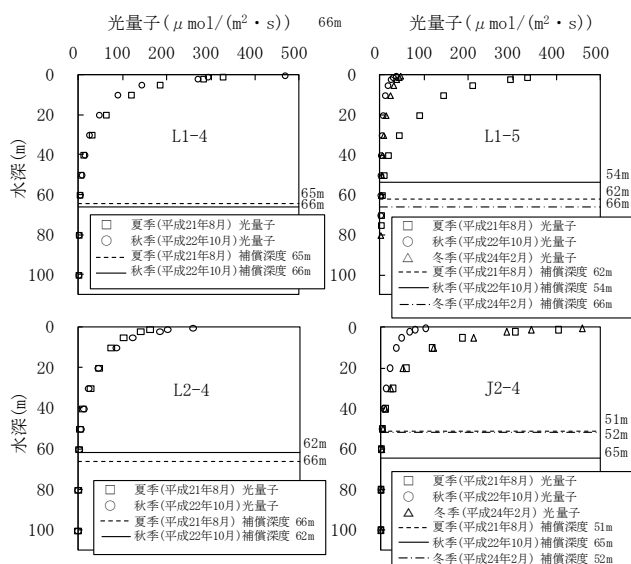


図-4.2 光子量子観測結果と補償深度

表-4.3.1 植物プランクトン主な出現種 (冬季)

調査地点	採水層	順位	種類名	細胞数 (細胞/L)	組成比率 (%)
L1-4	1層	1	珪藻綱 <i>Thalassiosira sp.</i>	655	28.1
		2	珪藻綱 <i>Thalassiosira sp.</i>	595	24.1
	2層	1	珪藻綱 <i>Thalassionema nitzschioides</i>	450	18.3
		2	珪藻綱 <i>Thalassionema nitzschioides</i>	740	31.2
	3層	1	珪藻綱 <i>Thalassiosira sp.</i>	405	17.1
		2	珪藻綱 <i>Thalassiosira sp.</i>	480	18.6
4層	1	珪藻綱 <i>Thalassionema nitzschioides</i>	410	18.6	
	2	珪藻綱 <i>Thalassiosira sp.</i>	360	16.4	
5層	1	珪藻綱 <i>Thalassionema nitzschioides</i>	185	19.2	
	2	珪藻綱 <i>Thalassionema nitzschioides</i>	870	40.8	
L1-5	上層	1	珪藻綱 <i>Thalassionema nitzschioides</i>	1,020	48.5
	下層	1	珪藻綱 <i>Thalassionema nitzschioides</i>	1,475	39.3
J2-4	上層	1	珪藻綱 <i>Thalassionema nitzschioides</i>	485	28.2
		2	珪藻綱 <i>Thalassiosira sp.</i>	325	18.9
	中層	1	珪藻綱 <i>Thalassiosira sp.</i>	450	19.4
		2	珪藻綱 <i>Thalassionema nitzschioides</i>	380	16.4
	下層	1	珪藻綱 <i>Skeletonema costatum</i>	330	19.6
		2	珪藻綱 <i>Thalassionema nitzschioides</i>	320	19.0
JW-13'	上層	1	珪藻綱 <i>Chaetoceros sociale</i>	2,005	28.1
		2	珪藻綱 <i>Thalassiosira sp.</i>	1,670	26.4
	中層	1	珪藻綱 <i>Thalassionema nitzschioides</i>	1,440	22.8
		2	珪藻綱 <i>Thalassiosira sp.</i>	1,365	22.4
下層	1	珪藻綱 <i>Thalassiosira sp.</i>	1,295	21.3	
	2	珪藻綱 <i>Thalassionema nitzschioides</i>			

4.3 生物量

(1) 植物プランクトン

冬季の植物プランクトンの地点別出現量を図-4.3.1、主な出現種を表-4.3.1に示す。ここでは、細胞数で組成比率 16%以上の種類を主な出現種とした。出現種類数は、25~42種類の範囲にあり、L1-5の中層で最も少なく、JW-13'の下層で最も多かった。細胞数は、965~7,135細胞/Lの範囲にあり、L1-4の6層で最も少なく、JW-13'の上層で最も多かった。全地点において、出現種類数、細胞数とも鉛直的な差は小さかった。

種組成は、*Thalassiosira sp.*、*Thalassionema nitzschioides* がほとんど全ての地点で出現しており、組成比率が高かった。夏季や秋季と比べて上下層による種組成の変化がないのは、冬季鉛直混合により水塊が上下層で混合しているためと推測された。また、冬季としては出現種類数が多く、多様性が伺える結果であった。

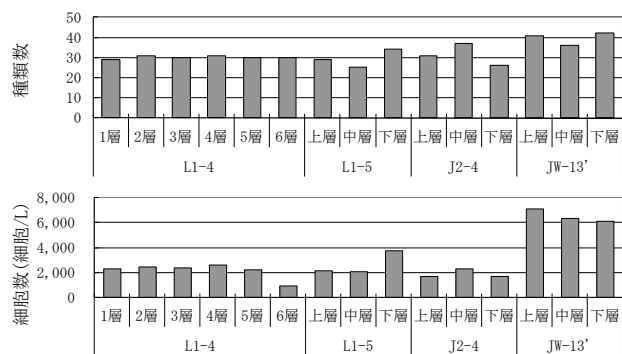


図-4.3.1 植物プランクトン地点別出現量 (冬季)

(2) 動物プランクトン

冬季の北原式ネットで採取した動物プランクトンの地点別出現量を図-4.3.2、主な出現種を表-4.3.2に示す。ここでは、個体数で組成比率 15%以上の種類を主な出現種とした。種類数は、11~26種類の範囲にあり、L1-5の下層で最も少なく、JW-13'の1層で最も多かった。地点内では、L1-4が7層、L1-5が上層、J2-4が1層と2層、JW-13'が1層で最も多かった。個体数は、308.3~5,782.8個体/m³の範囲にあり、L1-5の下層で最も少なく、JW-13'の1層で最も多かった。全ての地点で1層または上層で最も多かった。

種組成は、地点や層によって若干異なっているが、節足動物の*Nauplius of COPEPODA*(カイアシ亜綱のノープリウス幼生)、*Triconia borealis*、*Oithona similis*がほとんど全ての地点で出現しており、組成比率が高かった。今回から行っている100m以深の採取では、種類数は、18~25種類の範囲にあり、個体数は、308.8~2,291.9個体/m³の範囲で*Nauplius of COPEPODA*が最も多く採取された。

これまでの夏季と秋季の観測と同様に、ほとんどの地点で個体数は上層ほど多い傾向にあった。一方、餌となる植物プランクトンは観測結果から上~下層でほぼ一定の値であるため、日周運動や水温・塩分条件などの餌以外の他の要因によってこの鉛直分布が形成されていると考えられた。冬季で水温が全層的に低かったため、いずれの地点と層においても冷水性の割合が高く、夏季・秋季に見られた暖水性の種はほとんど見られなかった。

12.2 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

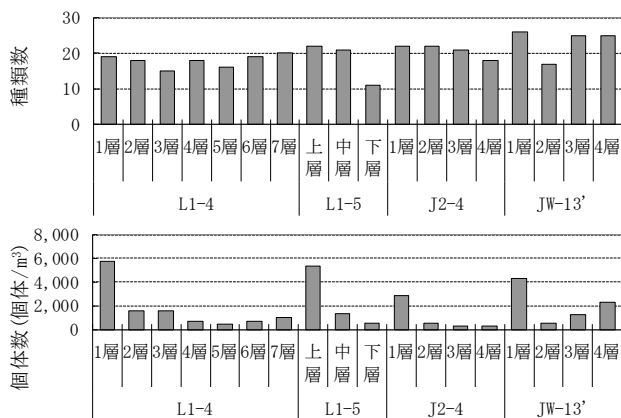


図-4.3.2 動物プランクトン地点別出現量 (冬季)

表-4.3.2 動物プランクトン主な出現種 (冬季)

調査地点	採水層	順位	種類名	個体数 (個体数/m ³)	組成比率 (%)	
L1-4	1層	1	節足動物 <i>Nauplius of COPEPODA</i>	2,155.2	37.3	
		2	節足動物 <i>Triconia borealis</i>	1,386.0	24.0	
		3	節足動物 <i>Oithona similis</i>	941.7	16.3	
	2層	1	節足動物 <i>Nauplius of COPEPODA</i>	677.9	42.3	
		2	節足動物 <i>Triconia borealis</i>	307.9	19.2	
	3層	1	節足動物 <i>Nauplius of COPEPODA</i>	840.0	52.4	
		2	節足動物 <i>Oithona similis</i>	287.3	17.9	
	4層	1	節足動物 <i>Nauplius of COPEPODA</i>	324.2	48.2	
		2	節足動物 <i>Oithona similis</i>	135.6	20.2	
	5層	1	節足動物 <i>Nauplius of COPEPODA</i>	228.4	48.6	
		2	節足動物 <i>Triconia borealis</i>	89.9	19.1	
		3	節足動物 <i>Oithona similis</i>	124.6	18.1	
	7層	1	節足動物 <i>Nauplius of COPEPODA</i>	490.3	47.8	
		2	節足動物 <i>Triconia borealis</i>	269.3	26.2	
L1-5	上層	1	節足動物 <i>Nauplius of COPEPODA</i>	288.9	51.4	
		2	節足動物 <i>Triconia borealis</i>	168.9	30.0	
	中層	1	節足動物 <i>Nauplius of COPEPODA</i>	2,623.1	49.3	
		2	節足動物 <i>Oithona similis</i>	1,506.1	28.3	
		3	節足動物 <i>Triconia borealis</i>	921.8	17.3	
	下層	1	節足動物 <i>Nauplius of COPEPODA</i>	766.3	55.9	
2		節足動物 <i>Triconia borealis</i>	254.9	18.6		
J2-4	1層	1	節足動物 <i>Nauplius of COPEPODA</i>	1,503.1	52.5	
		2	節足動物 <i>Oithona similis</i>	826.0	28.8	
	2層	1	節足動物 <i>Nauplius of COPEPODA</i>	197.5	36.9	
		2	節足動物 <i>Oithona similis</i>	95.8	17.9	
		3	節足動物 <i>Triconia borealis</i>	89.2	16.7	
	3層	1	節足動物 <i>Nauplius of COPEPODA</i>	152.0	48.1	
		2	節足動物 <i>Oithona similis</i>	50.8	16.1	
	4層	1	節足動物 <i>Nauplius of COPEPODA</i>	164.1	53.1	
		2	節足動物 <i>Oithona similis</i>	49.6	16.1	
	JW-13'	1層	1	節足動物 <i>Nauplius of COPEPODA</i>	1,651.2	38.1
			2	節足動物 <i>Oithona similis</i>	1,257.7	29.0
			3	節足動物 <i>Triconia borealis</i>	835.6	19.3
2層		1	節足動物 <i>Nauplius of COPEPODA</i>	300.6	57.4	
		2	節足動物 <i>Triconia borealis</i>	106.8	20.4	
3層		1	節足動物 <i>Nauplius of COPEPODA</i>	663.7	53.0	
		2	節足動物 <i>Oithona similis</i>	221.1	17.7	
4層		1	節足動物 <i>Nauplius of COPEPODA</i>	1,060.0	46.2	
		2	節足動物 <i>Triconia borealis</i>	510.5	22.3	
	3	節足動物 <i>Oithona similis</i>	424.2	18.5		

4.4 水温・塩分・クロロフィルの鉛直分布

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。(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⁵⁾、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

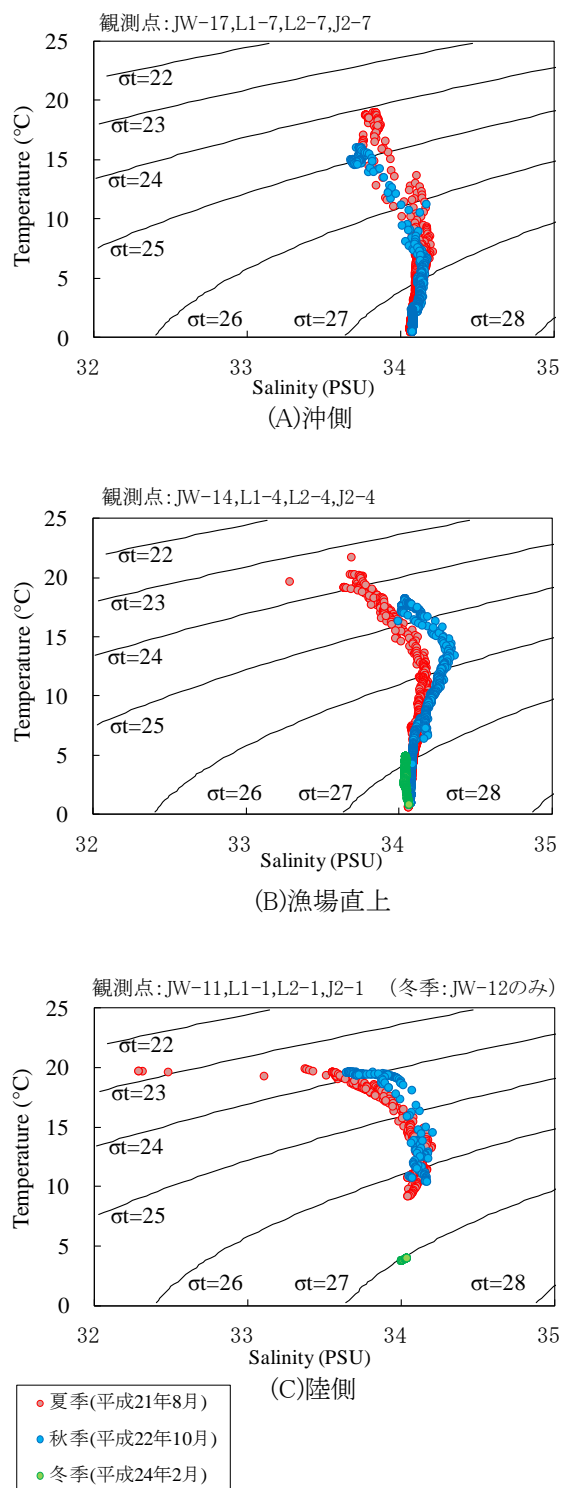


図-4.4.1 T-Sダイアグラム

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。

冬季の水温・塩分・クロロフィル a を図-4.4.2 に示す。水温・塩分のデータに関しては、中央水産試験場から提供を受けたデータも記載した。また、躍層と Chl. a のピーク位置の季節変化を図-4.4.3 に示す。夏季のクロロフィル a のピークは表層混合層直下であり、その位置において基礎生産が集中している。沖側において夏季には、表層の水温が約 20°C 程度であったが、秋季は沖側の表層水温が 4°C 程度低下しており、表層冷却に伴い徐々に鉛直混合が進んでいる。一方、対馬暖流の影響が強い陸側では、表層から水深 60m 付近にかけて水温が上昇し、躍層の位置が補償深度を下回ってクロロフィル a のピークが形成されなくなった。冬季の観測では、水温と塩分が水深 100m 付近までほぼ一定の値を示し、表層冷却に伴う鉛直混合が完全に行われたことがわかる。また、冬季では栄養塩が十分あるにもかかわらずクロロフィル a の値が低いのは、水温が低く日照時間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た。

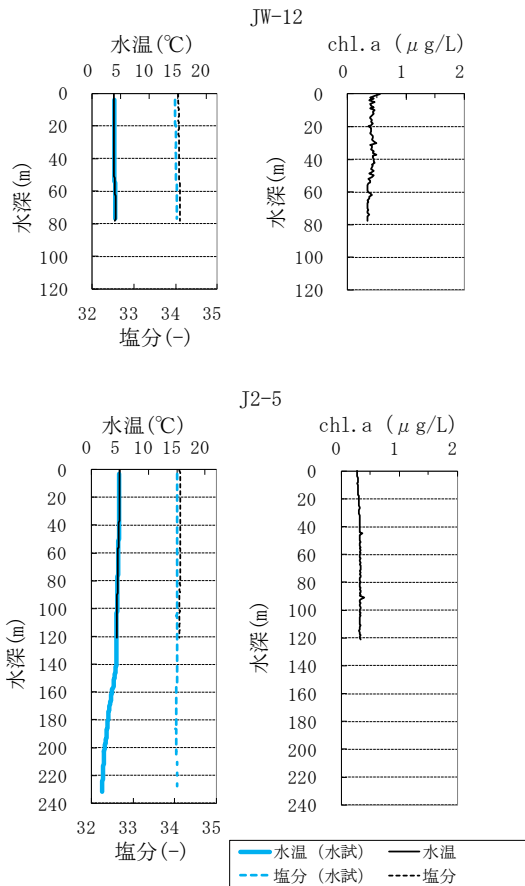


図-4.4.2 水温・塩分・Chl-a の鉛直分布 (冬季)

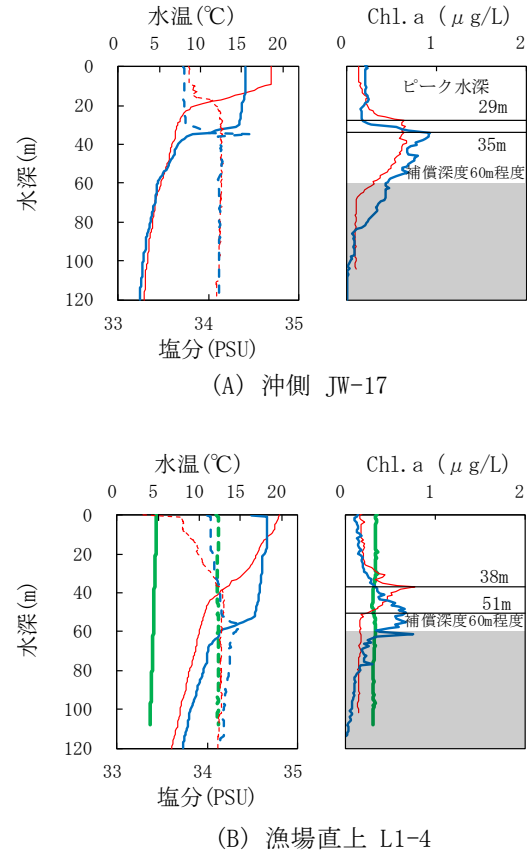


図- 4.4.3 躍層と Chl. a のピーク位置の季節変化

4.5 基礎生産量

培養試験によって得られた低次生態系計算用パラメータを表-4.5.1 に示す。パラメータ取得の詳細は林田ら⁷⁾の報告による。低次生態系モデル⁸⁾を用いて、本海域の基礎生産量を算出した結果を表-4.5.2 に

示す。また、硝酸塩濃度と基礎生産量の鉛直分布を図-4.5.1 に示す。夏季はクロロフィルaのピークのある水深 25~55mで基礎生産が集中的に行われ、硝酸塩の枯渇する水深 0~25mと有光層外の 55m以深では低い値を示し、全体の基礎生産量は 36.65 (mg-C/m²/day)であった。秋季は対馬暖流によって躍層以浅の水温が上昇した影響のため、水深 25~55mの基礎生産量が低下し、全体では 29.04 (mg-C/m²/day)まで低下した。日本全国沿岸海洋誌⁹⁾に記載されている夏季の噴火湾や伊勢湾の値 300~1400 (mg-C/m²/day)に比べるとその値は大幅に劣っている。冬季は鉛直混合によって表層付近の栄養塩が増加し、水深 0~25mの基礎生産量が増加して、全体で 63.21 (mg-C/m²/day)に回復した。太平洋北東部亜寒帯域の観測地点 (St. Papa) での冬季の光合成量観測値は 100 (mg-C/m²/day)程度であり¹⁰⁾、これに近い値となっている。0°Cに換算した最大成長速度は、夏季と秋季に比べて冬季では約 2 倍となっているが、基礎生産量の水準は低いものとなった。

表-4.5.1 低次生態系計算用パラメーター(培養試験)

採取時期 採取水深, 水温	培養水温での 最大成長速度	0°Cに換算した 最大成長速度	最適光強度
夏季(平成21年8月) (38m, 20.5°C)	0.78(1/day)	0.21(1/day)	59 (W/m ²)
秋季(平成22年10月) (51m, 16.8°C)	0.73(1/day)	0.25(1/day)	74 (W/m ²)
冬季(平成24年2月) (20m, 2.2°C)	0.48(1/day)	0.42(1/day)	43 (W/m ²)

表-4.5.2 基礎生産量算出結果

地点, 時期	基礎生産量 (mg-C/m ² /day)				
	水深 (m)	0~25	25~55	55~	全層
L1-4, 夏季(平成21年8月)		8.97	24.10	3.58	36.65
L1-4, 秋季(平成22年10月)		6.12	18.90	4.02	29.04
L1-4, 冬季(平成24年2月)		42.95	17.62	2.64	63.21

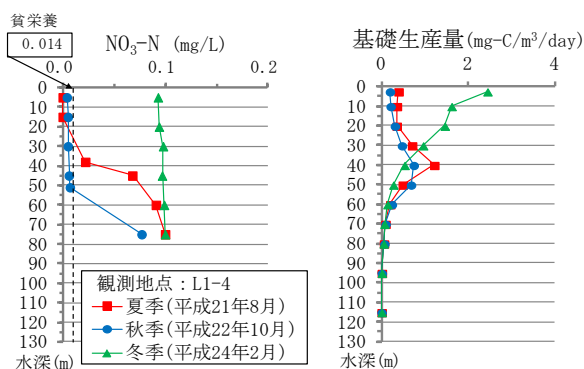


図-4.5.1 硝酸塩濃度と基礎生産量の鉛直分布

5. まとめ

平成23年度は、対象種の産卵・仔魚期である冬季の物理環境や水質、生物量等を対象に現地観測を行い、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、光合成が期待できなくなって、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が生じて貧栄養状態の解消が確認できた。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ことがわかった。

平成24年度は、基礎生産が回復する春季の物理環境や生物量等の調査を行って周年の基礎生産構造を解明する予定である。今後、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) 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.
- 6) 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.
- 7) 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

12.2 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

- 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.
- 8) 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 Tchnology Conference, Vol. 8, pp. 99-138.
- 9) 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.
- 10) Kawamiya, M. Kishi, M. Yamanaka, Y. and Sugihara, N. :An ecological-physical coupled model applied to Station Papa, J. Oceanogr. , Vol. 51, pp. 635-664, 1995.

RESEARCH ON DEVELOP 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 : YAMAMOTO Jun

OKAMOTO Setsuo

SATO Jin

KAWAI Hiroshi

SUDO Kenya

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 2011, field observations such as currents, water quality, plankton and the primary productivity have executed in the exclusive economic zone 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