

# 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 —

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

日本海北部海域では海水温の上昇といった環境変動などの影響により、水産資源量が減少している。この対策として資源管理計画の実施に加えて国直轄での施設整備が検討されており、水産土木チームではこの検討に用いる基礎的な知見を得るため、季節毎の現地調査を行っている。本報告では、現地調査結果に基づいて水温塩分の各季節の水塊構造や栄養塩の枯渇状況、基礎生産性の変動要因などについて考察すると共に、今後の整備に必要な検討事項について論じる。

キーワード：自然環境、再生・回復、基礎技術

## 1. はじめに

日本海北部海域の水産物資源量は、地球規模の温暖化による海水温の上昇などの環境変動、それに加え外国船による過剰な漁獲などにより、減少傾向となっている。特にスケトウダラ日本海北部系群は 1990 年頃をピークに漁獲量が減少し、現在、漁獲可能量を設定して漁獲規制を主体とする資源保護の取り組みがなされている。

一方、水産資源の生産力向上を目的として、直轄による施設整備が 2007 年から開始されており、北海道周辺においても検討が進められている。この中で、「海域の基本情報の整理」を行い、「水産生物の動態」や「生活史を踏まえた生息環境」を考慮し、著しい整備効果が得られることを示すよう求められている。

主な対象種であるスケトウダラ日本海北部系群の生活史を概説すると、親魚は冬季(12 月から翌年 3 月)に岩内湾や檜山沖に移動して産卵し、孵化した仔魚は、北上する対馬暖流に乗って 8 月頃に武蔵堆周辺に着底する<sup>1)</sup>。このように成長段階によって生息域が異なるため、沿岸と沖合の両方の水域を包括した広範な海域環境の解明が不可欠である。しかし、当海域においては食物連鎖の基となる基礎生産構造等を研究した例は無く、特に減耗率の高い仔魚期から未成魚期、沖合の育成時期の餌料環境も未解明である。

本稿では、この海域の「栄養塩と基礎生産量の変動要因」と「スケトウダラ的生活史を考慮した餌料環境」について現地観測結果を基に考察すると共に、今後の整備に必要な検討事項について幅広く論じる。

## 2. 漁場整備の実現に向けた検討事項

### (1) 漁場整備の趣旨

漁場整備は自然環境に直接手を加えるハード対策で、構造物を設置して「物理的に栄養塩を補給することで生態系全体の生産力の底上げ」、「漁獲負荷の低減」、「海底微地形の復旧による水産有用種の隠れ家の創出」や「餌料培養」など、生息環境空間の包括的な改善、修復、創出を図るものである。

直轄漁場整備の要件は、①排他的経済水域(EEZ)で、②TAC法により漁獲規制が行われ、③資源回復計画が策定されていて、④整備効果が著しいことである(漁港漁場整備法)。

②、③については、一般的に資源量が減少している水産有用種に対するソフト対策である。これらは漁業者間による協定や資源回復計画に沿って遂行されるもので、当海域では資源水準の低迷が著しく国際的に保護が必要なスケトウダラに漁獲可能量(TAC)を設定して資源管理がなされている。

これら漁獲規制と漁場整備を一体的に推進することで、より効果的な資源回復が図られるとされている。

### (2) 主な整備施設

これまでに全国で整備実績のある施設として湧昇マウンドと保護育成礁がある。湧昇マウンドは、人工海底山脈などを造成し、底層から上昇する流れによって栄養塩を有光層内に揚げ、海域を肥沃化する。これにより対象魚の餌料環境が改善され、生物生産性の向上を図るもの

である。計画立案の際は、「成層化の壁を打破する外力の存在」、「海域の基礎生産のポテンシャル」、「栄養塩の枯渇状況とその期間」を把握して、効果的な整備とすることが必要である。保護育成礁はブロック魚礁等の設置によって、親魚または幼稚仔魚を保護して、次の世代へ繋ぎ生物生産の持続性を確保するものである。これについても「保護すべき親魚資源や幼稚仔魚の生活史を考慮した分布域」、「人工的に造成した保護区域に滞留する資源量と期間」を把握して、効果が得られる整備とすることが必要である。

### (3) 効果的な施設整備に向けた課題

スケトウダラの分布域が成長段階によって異なるため、これに対応するものとして水産環境整備の概念(図-1)が必要である。幼稚魚の餌料環境、成魚になるまでの保育場、親魚となってからの滞留場をネットワーク化して整備するなど、生息環境空間全体を見据えることが重要である。効果的な資源回復の手法の例として、まず、漁場内の未成魚の混獲を防止するために保護育成礁を活用するとともに、減耗が激しい幼稚仔魚の移送経路上の餌料環境の改善や増肉による資源量の増大を狙って湧昇マウンドの整備を行うこと等が考えられる。これは対象とする成長段階によって整備すべき場所や手法が異なることを意味しており、空間的、時間的な連続性も重要となる。

また、当海域の生物環境をトータルで考えた場合、スケトウダラ資源の極端な減少は食物連鎖をベースとした生物学的な循環に支障を来していることに起因しているといえる。生態学的同位種やキーストーン種の存在に注意し、生態系を正常化させるとともに、対象種以外の餌料生物も含めて好適生息条件を解明して、海域全体の資源量を増加させて豊かな生態系の維持回復を目指す必要がある。

本海域には、スケトウダラの他に様々な有用種が存在し、これらの中(例えばハタハタやニシン等)には沿岸で産卵し沖合で成育するものもいる。つまり、スケトウダラと成育場が同じ魚種が存在する。これらの魚種の多くも資源量が減少傾向にあることから、食物連鎖の最初

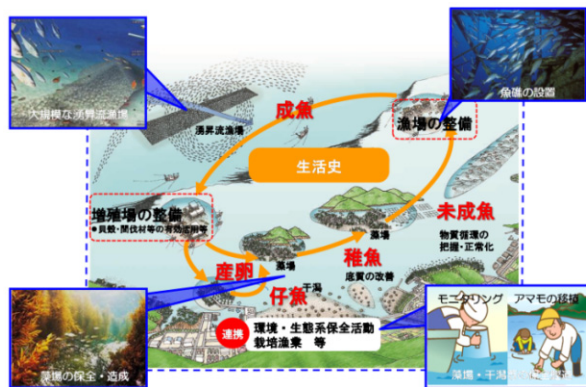


図-1 水産環境整備のイメージ図<sup>2)</sup>

の段階である基礎生産を改善させるとともに、生息場と共にする多様な種についても保護育成・餌料培養効果を連携して複合的な生息環境を整備することで、生態系全体の生産力がバランス良く底上げされることが望ましい。一方で、関係する漁業組合(漁業者)が増加し、地方公共団体や許認可機関との手続きも複雑化するため、これらの調整作業も重要になる。

### 3. 水域環境の調査を行う上で重要な視点

当海域において上記の検討を行うためには、当海域の環境や資源量の現状といった基本的なデータの収集が必要である。その際に重要な視点として、「食物連鎖」、「物理環境」、「対象魚の個体群動態」があり、これらを踏まえた水域環境のバックグラウンド調査を実施することが望まれる。各視点について以下に述べる。

#### (1) 食物連鎖

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。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がある<sup>3)</sup>(図-2)。一般的に「捕食-被捕食」関係を通して栄養段階が上昇すると、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ が1.0‰、3.4‰上昇するとされ<sup>4)</sup>、 $\delta^{15}\text{N}$ 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。

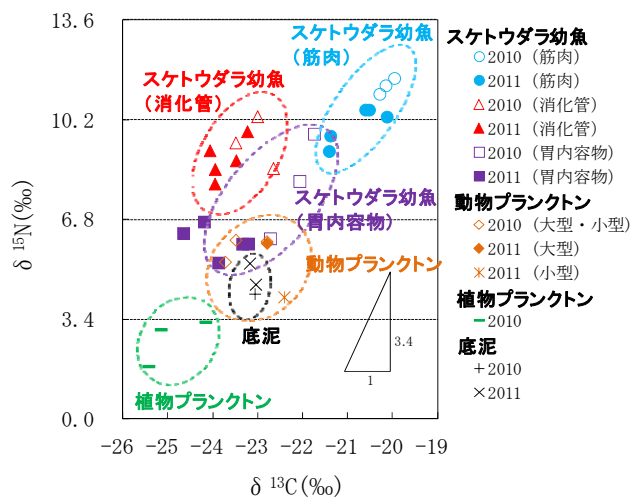


図-2 安定同位体比分析結果<sup>3)</sup>

## (2) 物理環境

施設整備にあたっては、対象海域の水塊構造や栄養塩の枯渇状況、海流、日射量、風況などの基本的なデータが必要である。これは現地観測が主体となり、気象庁のデータ収集などで補間する。これらのデータをもとに物理場の再現計算を行って海域全体の地点、時期ごとの水塊構造を予測する。計算には海洋モデルと生態系モデルが一般的に用いられ、これを活用することで整備適地や施設規模を検討することができる。また、季節的な変動や対象魚の分布域の移動を考慮する必要があるため、再現計算によって対象魚の産卵場から成育場へ移動する経路上の水質環境を明らかにし、保護育成礁の整備場所の検討に活用できる。湧昇マウンド整備については、人工山脈などの細部の流れ構造についての計算を実施して湧昇効果を予測することとなる。

## (3) 対象魚の個体群動態

資源量の変動を予測するためには、対象魚の個体成長を定式化する必要がある。魚類の体成長は、摂餌から代謝、排糞、排泄、生殖巣を差し引く湿重量収支式で求められる。これは生理活動を定式化しているため、使用する各パラメータは水温に依存するものが多い。このため対象魚の移動経路や生息場所の水温を特定する必要があり、前述した海洋モデルの活用が有効となる。

湧昇流発生マウンドの効果を求める場合、餌料環境と摂餌量（成長率）の関係を明らかにする必要があるが、日本海北部系群スケトウダラに関してはこの知見が無い。このため、資源管理分野での研究の進展が望まれる。

また、各年級群の資源の増減を基に群体として資源量が予測できる。個体群動態の定式化には一般的にコホート解析が用いられ、新規加入量を親魚と再生産成功率から求め、さらに個々の年齢での個体数に加入する資源量を漁獲と自然死亡による減耗分を考慮して求められる<sup>5)</sup>。一般に幼魚期の減耗が多く、この時期の資源を保護育成礁で保護することにより効率的に資源回復できる。しかし、0~2歳の生残率に関する知見がなく、海域の資源量は漁獲量から推定することが多い。そもそもの資源状況が不明なため、対象海域の初期条件設定が困難である。資源管理分野の研究ではトロール調査や計量魚探により当歳魚を含む資源量の分布を大規模に調査している。これらの詳細な情報があれば生残率を逆算することも可能になる。なお、保護育成礁を整備する場合は、対象魚の蟻集状況が不明であり、その他の競合する生物や捕食関係にあるものも蟻集する場合があるため、実証実験等による解明が必要と考えられる。

## 4. 現地調査方法

上述した視点を踏まえて事業実施前の基本的な海域環境を把握するため、成育場周辺の四季の調査、産卵場所

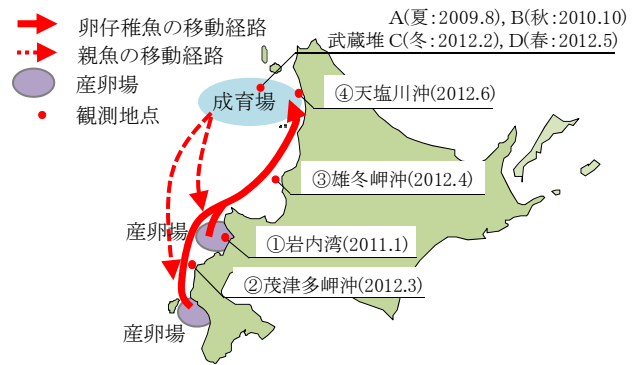


図-3 スケトウダラの移動経路と調査位置図

と移動経路上の調査を行った。調査位置を図-3に示す。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。

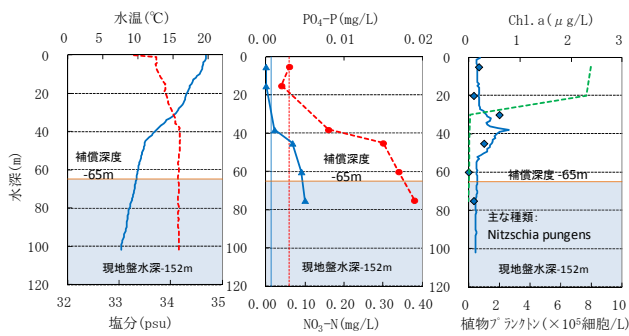
主な調査項目は、密度成層の状況や Chl. a、流況等の観測、採水を行って栄養塩等の観測と植物プランクトンの採取、ネットにより動物プランクトンを採取して分析を行った。また、基礎生産量算出に必要な光-光合成曲線のパラメータを求めるため、植物プランクトンの現地培養試験を行った。現地観測の詳細は山本ら<sup>6)</sup>を参照されたい。本稿では、水温、塩分、栄養塩、Chl. a、現地培養試験等の結果を報告する。

## 5. 調査結果

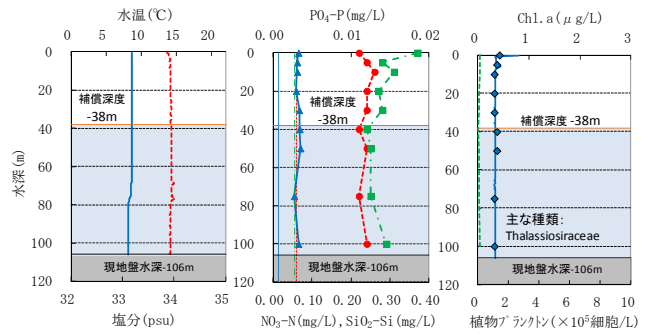
### (1) 水塊構造・栄養塩・Chl. a

水温・塩分・栄養塩・Chl. a の鉛直分布を図-4、図-5に示す。夏季の武蔵堆(8月)の水温・塩分から水深40m付近に躍層が見られ、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ことによると考えられる。また、有光層は補償深度を表層の1%光量とすると、夏季と秋季は水深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。

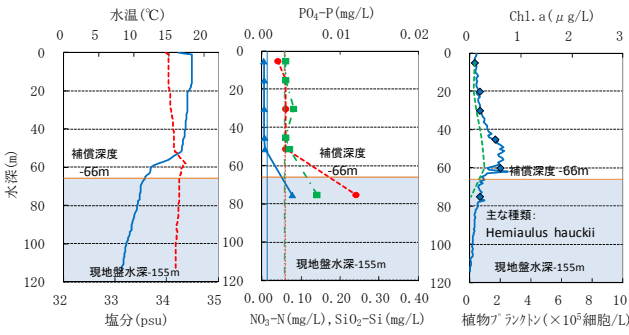
冬季の武蔵堆(2月)や岩内湾(1月)は、表層冷却による鉛直混合によって観測した深度までほぼ一定の水温を示し、夏季と秋季の下層部にほぼ等しい値であった。これは対馬暖流の勢力が弱まるとともに、表層冷却によって密度が増加した水塊が同じ密度となる水深帯までの水塊と混合したものである。この鉛直混合は夏に形成された密度成層を崩壊し、下層の水塊を表層へ汲み上げる原動力となっていると考えられる。この鉛直混合は春季の茂津多岬沖(3月)や雄冬岬沖(4月)でも継続されていた。



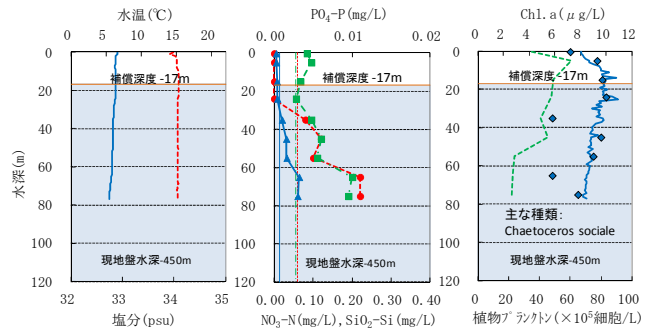
A 武蔵堆：夏季（2009年8月）<sup>8)</sup>



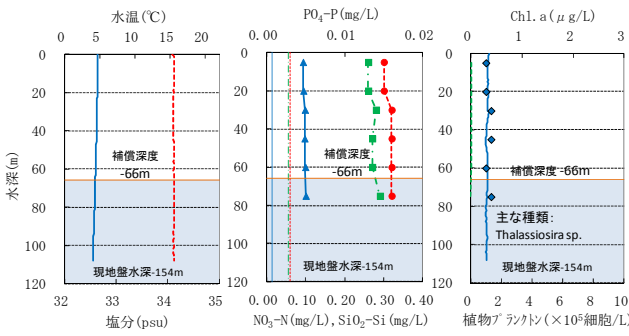
①岩内湾：冬季（2011年1月）<sup>9)</sup>



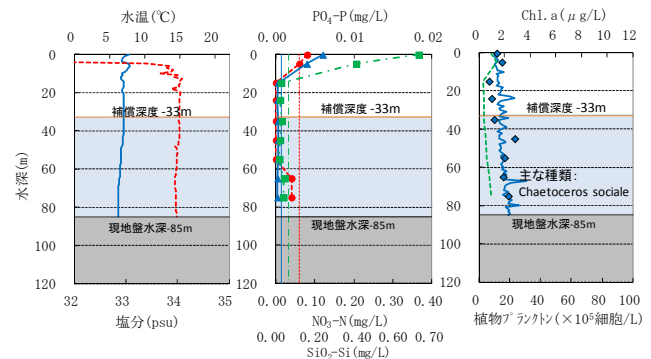
B 武蔵堆：秋季（2010年10月）<sup>8)</sup>



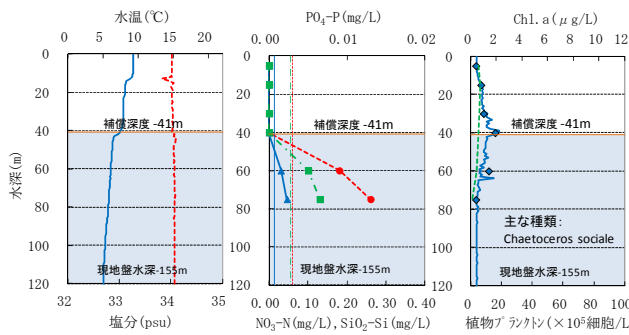
②茂津多岬沖：春季（2012年3月）<sup>9)</sup>



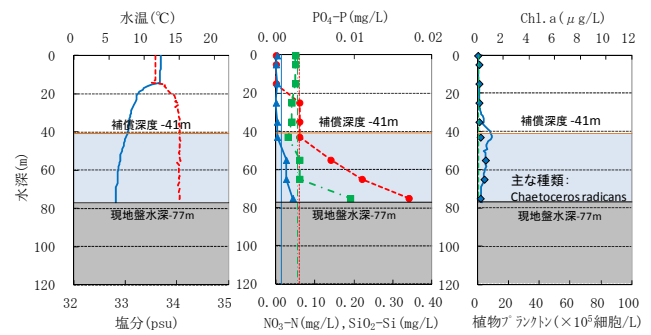
C 武蔵堆：冬季（2012年2月）<sup>8)</sup>



③雄冬岬沖：春季（2012年4月）<sup>9)</sup>



D 武蔵堆：春季（2012年5月）



④天塩川沖：春季（2012年6月）

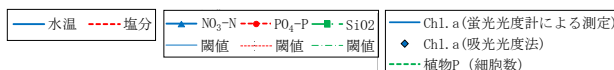


図-4 武蔵堆の水質鉛直分布の周年の変化

次に栄養塩について述べる。プランクトンの増殖に必要な栄養塩濃度の閾値は、一般値として硝酸塩濃度  $1 \mu\text{mol/L}$  ( $0.014\text{mg/L}$ )、リン酸塩濃度  $0.1 \mu\text{mol/L}$  ( $0.003\text{mg/L}$ )、ケイ酸態ケイ素濃度  $2 \mu\text{mol/L}$  ( $0.056\text{mg/L}$ )<sup>7)</sup> である。夏季・秋季の密度成層期の武蔵堆(8月、10月)では、躍層

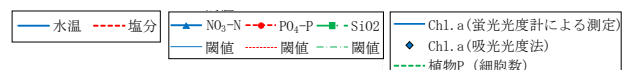


図-5 対象魚の成長段階に応じた移動経路上の水質鉛直分布

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。栄養塩が十分あるにもかかわらず Chl. 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る。

Chl. a については、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、それ以外で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。

## (2) ブルーム前後のプランクトン量

沿岸地点の植物プランクトンと動物プランクトンの量の推移を図-6に示す。茂津多岬沖(3月)でブルームが生じて植物プランクトンが急激に増加(ブルーム)している。これに伴い動物プランクトンは、スケトウダラが北上する経路上において移動の時期に合わせて徐々に個体数を増加させており、餌料となる動物プランクトンの増殖に春のブルームが貢献していると考えられる。なお、プランクトンの種構成等については河合ら<sup>8)</sup>を参照されたい。

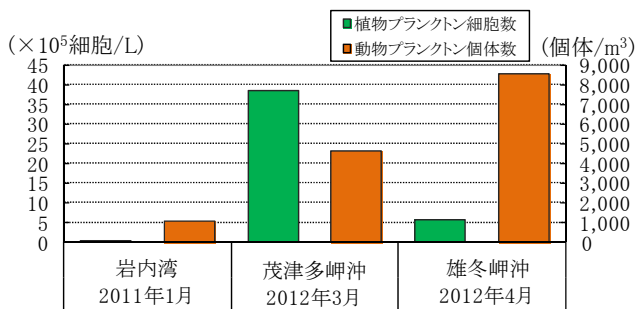


図-6 プランクトン量の推移<sup>8)</sup>

## (3) 基礎生産構造

### a) 現地培養試験

季節毎の基礎生産量を算出するため生態系モデルが用いられるが、その際に水域の栄養塩、水温、光環境が重要な条件となる。しかし、季節や場所によって植物プランクトンの量や種が異なることから、モデルに用いるパラ

表-1 低次生態系計算用パラメーター

地点, 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
A 武蔵堆, 8月 (38m, 20.5°C)	0.78(1/day)	0.21(1/day)	59 (W/m <sup>2</sup> )
B 武蔵堆, 10月 (51m, 16.8°C)	0.73(1/day)	0.25(1/day)	74 (W/m <sup>2</sup> )
C 武蔵堆, 2月 (20m, 2.2°C)	0.48(1/day)	0.42(1/day)	43 (W/m <sup>2</sup> )
D 武蔵堆, 5月 (40m, 10.0°C)	0.37(1/day)	0.77(1/day)	59 (W/m <sup>2</sup> )
①岩内湾, 1月 (5m, 8.0°C)	0.79(1/day)	0.48(1/day)	35 (W/m <sup>2</sup> )
②茂津多岬沖, 3月 (24m, 6.4°C)	1.17(1/day)	2.44(1/day)	45 (W/m <sup>2</sup> )
③雄冬岬沖, 4月 (24m, 9.7°C)	0.94(1/day)	1.96(1/day)	38 (W/m <sup>2</sup> )
④天塩川沖, 6月 (43m, 13.8°C)	3.48(1/day)	7.25(1/day)	36 (W/m <sup>2</sup> )

メーターを適切に設定する必要がある。このため現地でも採水した試料を用いて培養試験を行って、光強度と成長速度の関係を明らかにした。パラメーター取得についての詳細は林田ら<sup>10)</sup>の報告を参照されたい。

光-光合成曲線から取得した低次生態系計算用パラメーターを表-1に示す。光-光合成曲線の推定は、一般的に水質予測モデルで用いられている Steele<sup>11)</sup>の式を適用した。当式は200W/m<sup>2</sup>以下を用いて光合成速度のピーク周辺を詳細に再現したものである。これについては、他の関数の適用や実験値そのものを使用するなど検討の余地がある。

### b) 基礎生産量の算定

培養試験結果と水質、プランクトン量を用いて低次生態系モデルによる基礎生産量の算出結果を表-2に示す。夏季はChl. 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/m<sup>2</sup>/day)であった。

秋季は夏季に対して全体で29.04 (mg-C/m<sup>2</sup>/day)まで低下した。この原因は対馬暖流によって躍層が浅い水温が上昇したため、水深25~55mの基礎生産量が低下したことによる。これは、この時期の基礎生産も、表層での硝酸塩不足が制限要因になっていると考えられる。

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、63.21 (mg-C/m<sup>2</sup>/day)に回復した。現地観測結果でも述べたように、冬季では日射量不足から基礎生産量の水準は低い。

春季は茂津多岬沖(3月)で最も高い値であった。水深

表-2 層別の基礎生産量

地点, 時期	基礎生産量(mg-C/m <sup>2</sup> /day)				
	水深(m)	0~25	25~55	55~	全層
A 武蔵堆, 8月		8.97	24.10	3.58	36.65
B 武蔵堆, 10月		6.12	18.90	4.02	29.04
C 武蔵堆, 2月		42.95	17.62	2.64	63.21
D 武蔵堆, 5月		23.46	22.97	2.32	48.75
①岩内湾, 1月		62.52	28.74	4.21	95.47
②茂津多岬沖, 3月		125.36	0.08	0.00	125.43
③雄冬岬沖, 4月		105.35	12.31	0.28	117.94
④天塩川沖, 6月		2.50	13.43	16.61	32.54

0~25m に基礎生産が集中し、これ以深は低位であった。これは春に大增殖したプランクトンの自己遮蔽により有光層が浅くなり、下層は生産が行われない状況であったと考えられる。この状況は雄冬岬沖(4月)でも観測された。武蔵堆(5月)ではブルーミングの末期で徐々に基礎生産量が低下していた。これに伴い光環境が改善されて水深0~25m と水深25~55m は同程度の値となった。6月になると基礎生産が低下した。なお、今回行った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かったものと推測される。

#### (4) 結果のまとめ

調査結果から成育場および移動経路上の水温・塩分など水塊構造、栄養塩、基礎生産について種々の知見が得られた。特に密度成層、対馬暖流、冬季の鉛直混合、融雪出水による栄養塩供給、ブルームとその後の自己遮蔽などがキーワードとしてあげられる。また、ブルーム前後の植物プランクトン量と動物プランクトン量の推移には相関があり、当海域の基礎生産が魚類等の高次生態系を餌料環境の面から支えていることがわかった。

当海域における周年の基礎生産の変化は、冬季に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、春季にブルームが生ずる。夏季になると密度成層が発達し有光層の栄養塩が枯渇して基礎生産が抑制される。これは対馬暖流の影響で秋季となっても持続される。基礎生産が低位な時期(夏、秋、冬)は餌料となる動物プランクトン量も少ない。

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。夏季以降には表層の栄養塩の枯渇により餌料が少なくなるため、この時期の対策も重要であることが示唆される。

#### 6. 今後の課題

保護育成礁の設置を検討する際には、3-(3)で述べたとおり対象魚の資源分布状況の把握が必要となる。資源量に関して様々な機関が保有するデータが活用できれば、さらに検討を進めることが可能となる。

一方、湧昇マウンド設置の可否を検討するためには、基礎生産構造の解明に加えて、湧昇流を発生させるための外力をより詳細に調査する必要がある。これまでの観測は瞬間値のみのため、流速の経時変化が不明となっている。一定期間連続観測して潮位に連動した往復流や内部波、北上する対馬暖流の影響等を確認する予定である。

さらに、現地実証試験が可能であれば、それに連動した調査によって検討過程を検証することが望ましい。

#### 7. おわりに

本海域において2009年より現地観測を実施し、多くの貴重なデータを得た。それらを基に「栄養塩と基礎生産量の変動要因」および「スケトウダラ的生活史を考慮した餌料環境」について考察を行った。この結果は、実施前のベースとなる現況評価に用いられると共に、物理環境再現に必要な数値計算の条件設定に用いられ、スケトウダラ移動経路の水域環境の現状を把握して効果的な対策を検討する際に必要なものである。また、流況などの現地観測値は工事実施上の施工条件としても活用されることになる。今後は課題となっているその他の事項を解明し、漁場整備に必要な技術開発を進める予定である。

#### 参考文献

- 1) 水島敏博・鳥澤雅・上田吉幸・前田圭司・嶋田宏・鷹見達也：漁業生物図鑑新北のさかなたち，北海道新聞社，162p, 2003.
- 2) 水産庁、海洋・沿岸域における水産環境整備の技術検討会(2010)：水産環境整備の推進に向けて 抜粋.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 河合浩・山本潤・渡辺光弘：北海道開発局管内における保護育成を目的とした漁場整備の効果算定の一例，北海道開発局技術研究発表会，2011
- 6) 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：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, 2011.
- 7) J. k. Egge, D. L. Aksnes: Silicate as regulating nutrient in phytoplankton competition, MARINE ECOLOGY PROGRESS SERIES, vol. 83, 1992.
- 8) 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.
- 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) 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論文集，pp49-52, 2010.
- 11) Steele, J. H.: Environmental control of photosynthesis in the sea, limnology and Oceanography, Vol. 7, pp137-150, 1962.