

北海道沿岸における漁場環境の 変動機構解明の試み

— 鵜川出水前後の水質変化に関する観測・解析手法 —

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 水産土木チーム

○ 須藤 賢哉
大橋 正臣
山本 潤

河川流入がある沿岸漁場は漁業資源が豊富であるが、台風等による河川出水があった場合には水産生物の生息環境や餌料環境に大きな影響を及ぼすことがある。出水前後の状況を正確に把握するため、適切な観測・解析手法を用いた沿岸漁場環境の変動機構の解明が求められる。本稿は鵜川海域において台風1112号による河川出水を対象に現地観測と数値解析を組み合わせ、漁場環境の変動機構の解明を試みた。特に生態系モデルによる現況再現と予測計算を行い、出水による影響について、基礎生産量を指標として考察を行った。

キーワード：沿岸漁場環境、河川出水、基礎生産量

1. はじめに

沿岸漁業の生産量は 1985 年前後に 220 万トンを上回っていたが、漁場環境の悪化や資源の低迷等により減少傾向となり、現在は約 130 万トン(2010 年)となっている¹⁾。現在でも海面漁業生産量の約 3 割を占め、我が国の水産物供給に大きく貢献している。沿岸漁場は水産生物の生息場や育成場として重要であると共に、漁業・海運等の利用、港湾・漁港建設等の開発、陸域からの負荷の影響を受けやすい水域環境でもある。中でも河川が流入する水域は、陸域からの栄養塩供給(図-1)により漁業資源が豊富な沿岸漁場といわれている²⁾。今後も漁業生産の維持には、河口周辺の水域環境に配慮する必要がある。

この河口周辺の水域環境を理解するためには、土砂や栄養塩に着目して、物理場・水質・生物等の基礎データを取得し解析することが基本となる。しかし、現地観測は費用や観測期間の制約から実施規模には限界があるため、適切な現地観測計画を立案するとともに

に、数値解析を導入し、現地観測結果を補う必要がある。前報で須藤ら³⁾は閉鎖性海域を対象に貧酸素化や富栄養化の問題に対する適用事例を示しているが、本報では開放性海域における河川出水前後の水域環境変化についての検討手法を示すものである。対象としたフィールドは鵜川海域として、台風 1112 号による鵜川の河川出水について現地観測と数値解析により沿岸漁場環境の変動機構の解明を試みたものである。

2. 水域環境把握のための現地観測と数値解析

水域環境を把握するためには、現地観測と数値解析を組み合わせることが有効である。特に数値解析を導入するメリットは、現地観測だけでは網羅できない範囲・時刻の水域環境の再現・試算ができることである。よって、現地観測で数値解析の初期条件や境界条件の取得を目的とした観測計画の立案が必要である。

現地観測と数値解析の基本的項目を以下に示す。

(1) 項目 1：現地観測による水域環境の把握

- ①連続観測・移動観測：流速・波高の定点観測および流速の移動観測により波浪・流況を把握する。
- ②多点観測：垂下式観測(CTD)により水温・塩分・濁度・クロロフィル a の鉛直分布を把握する。採水・水質分析により SS・栄養塩・クロロフィル a 等の水質を把握する。採水の深度は躍層位置に留意して設定する。
- ③その他：河川流量・SS等のL-Q式・気象データ(気温・風速・日射量等)を把握する。

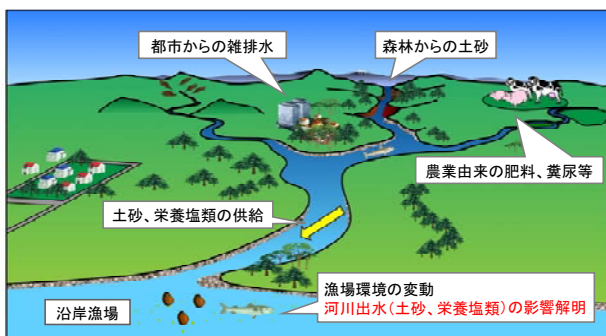


図-1 河川が流入する開放性海域の水域環境変化

(2) 項目 2 : 数値解析による水域環境の再現・予測

- ①海洋モデル⁴⁾ : 現地観測により得られた水温・塩分等に基づいて3次元的・時系列的な解析により物理特性を再現する。このモデルは、非圧縮粘性流体・ブシネスク近似・静水圧近似を基礎としたモデルであり、マルチレベルモデル・POM等が一般に使われている。
- ②低次生態系モデル⁵⁾ : このモデルは、生態系を構成する生物(動植物プランクトン等)と非生物(栄養塩等)を構成要素とし、主に食物連鎖に基づいてこれらの相互作用を計算するものである。これにより栄養塩、クロロフィル a 等の3次元分布とその時間変化を求める。

3. 鵠川海域における河川出水の影響

鵠川海域は一級河川である鵠川・沙流川が流入する海域で、ウバガイ(ホッキガイ)やシシヤモの漁獲量が北海道で上位に位置し豊かな漁場が形成されている。一方、台風等による出水時には多量の浮遊土砂を含む濁水が周辺海域に流れ込み、台風0115号に伴う鵠川・沙流川の出水では、当時行われていたホタテ養殖事業が被害を受け⁶⁾、それ以後は養殖事業が中止された。この原因はホタテガイが濁水を吸い込み擬糞として排出することで体力を消耗し、死に至ったと考えられている⁷⁾。これはホタテガイと摂餌機構が同じ二枚貝(当海域の代表種であるウバガイ)においても同様の懸念がある。

この他にも出水の影響は、濁水・淡水・栄養塩の移流・拡散によって基礎生産や餌料環境に影響を及ぼし、メリットとデメリットの両面があると考えらる。当海域の既往研究としては、山下ら⁸⁾が濁水の挙動を検討した例はあるが、基礎生産やそれに基づく水産生物の餌料環境に着目した研究は少ない。よって、出水による漁場環境の変動機構を解明するためには、基礎生産量の変化について検討する必要がある。

4. 現地観測方法

現地観測計画は以下の通りとした。観測時期は台風の発生時期である夏季から秋季とし、平水時(8月)、台風通過後(出水時)を対象とした。実際には2011年9月の台風12号に伴う鵠川の出水を捉えることが出来た。

測点の配置については、既往知見として当海域の漂砂機構として沿岸漂砂が西向き(襟裳岬から苫小牧に向かう流れ)であり、なおかつ夏季出水時の衛星写真から濁水が西寄りに広がっていることを考慮し、鵠川河口より西側を観測箇所とした。また、ウバガイの生息水深と過去の近隣海域における同様の調査事例⁹⁾より水深15m以浅に測点を配置した(以上図-2)。観測項目(表-1)は波浪・流況・水質(栄養塩など)・植物プランクトン・透明度とした。波浪・流況観測では、水深30m付近までは等深線が汀線にほぼ平行で沿岸方向の変化は小さいため、

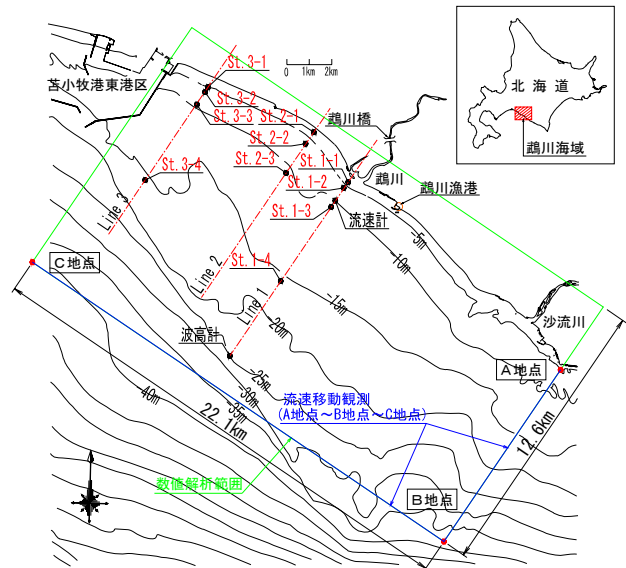


図-2 現地観測位置と数値解析範囲

表-1 現地観測内容

調査項目	方法	観測内容
波浪・流況観測	波高計, 流速計ADCP	連続観測(8/5~9/15) 流速移動観測(7/29)
水質(11 測点)	CID 垂下	水温, 塩分, 濁度, chl-a
	採水, 各測点2~4層	SS, COD, NH ₄ -N, NO ₂ -N, NO ₃ -N, PO ₄ -P, SiO ₂ -Si, T-Fe, chl-a
植物プランクトン	採水(水質と同)	細胞数
透明度	透明度板	透明度

※水質・植物プランクトン・透明度は平水時 8/3 出水時 9/10 観測

観測点は場を代表する 1 地点とした。数値解析の境界条件として調査船にADCPを装着し、図-2に示す数値解析の地形図範囲(12.6×22.1km)を操行しながら流速を観測した。

5. 現地観測結果

(1) 河川出水に伴う濁水の挙動

図-3 には 2011 年 9 月 1 日~15 日の鵠川の河川流量(鵠川橋)とともに、沖合で観測された有義波高および流速の時系列変化を示す。降水は 9 月 2 日頃から始まり河川流量は 3 日頃から急増し、4 日に時間最大流量 642m³/s を記録した。台風の接近に伴い 3 日から有義波高・流速が増加し、8 日頃には比較的静穏となっている。表層流速は東西成分(東を正)と南北成分(北を正)を示している。出水前後での流速は西と北の成分が卓越している。

図-4 には 2011 年 7 月 29 日の流速移動観測による沿岸流速ベクトルを示す。流速ベクトル値は水深 2~5m の平均値で示している。A 地点~B 地点(岸沖方向)の流速は、海岸線に沿った北西方向のベクトルが卓越しており、約 0.2m/s である。これに基づき数値解析では境界条件の

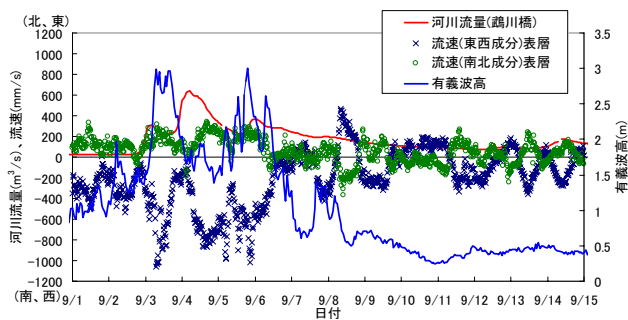


図-3 鶴川の河川流量と沖合の波高・流速

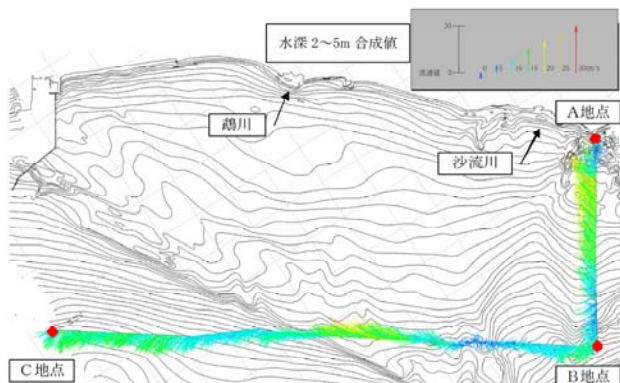


図-4 流速移動観測による表層付近の沿岸流速ベクトル

恒流成分は0.2m/sとした。

写真-1には9月14日に撮影された鶴川・沙流川の出水時における濁水の流出状況を示す。濁水は沿岸流に影響されて北西(写真下方向)に偏向して広がっており、その範囲は数kmに及んでいる。河川流量のピークから10日以上が経過しても海域に濁りが広がっており、多量の土砂が陸域から供給されていることが分かる。このように当海域では長期間の濁水の流入があることが分かる。

図-5には表層(水深1m)における測点毎の浮遊物質(SS)の濃度を示す。ここで平水時は8月3日、出水時は9月10日のデータを示している。全体的に出水時が大きく、最大値は河口に近いSt.1-1・St.1-2の37mg/Lで、河口から離れるほどSS濃度が小さい。また、河口から離れるほど出水前後の差異が小さくなる傾向にある。

(2)河川出水が栄養塩と基礎生産に及ぼす影響
図-6には、St.1-2・St.2-3・St.3-4の3点における河川出水前後の水温・塩分・濁度・クロロフィルa(以上はCTD計測による、図中の実線)および窒素・リン・ケイ素・鉄・クロロフィルa・SS(以上は水質分析による、図中のプロット)の鉛直分布を示す。ここで窒素については、植物プランクトンが栄養塩として利用可能な硝酸態窒素・亜硝酸態窒素・アンモニア態窒素の合計である溶存態無機窒素をDINとして示している。リンについては溶存態無機リンとしてPO₄-Pを示している。濁りの目安としては濁度とSSを示している。植物プランクトンの増殖に必要な光量が確保できる水深である補償深度は、

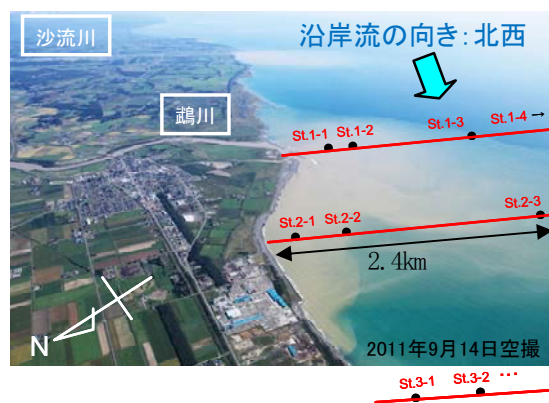


写真-1 濁水の流出状況(2011年9月14日13:15撮影)

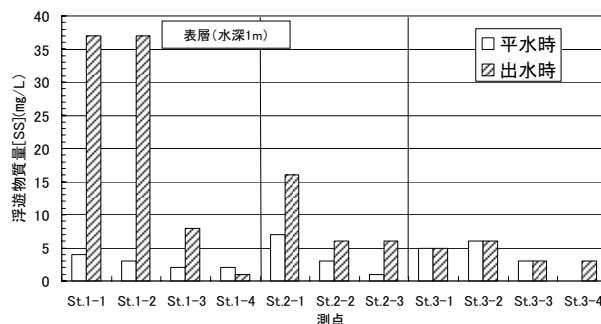


図-5 SSの分布(平水時・出水時)

透明度板により目視観測した透明度の3倍として示している。また、植物プランクトンの増殖に必要なとされる栄養塩の閾値は窒素で0.014mg/L、リンで0.003mg/Lとし(例えば高橋ら¹⁰)、それ未満は栄養塩枯渇と考える。

平水時(図-6(1a)(1b)(1c))では、水温・塩分の躍層については、St1-2では水深4m付近、St.2-3では水深5m付近、St.3-4では水深7m付近にあり、躍層の上下で水塊構造が異なっている。また、補償深度は海底面より下であり光量の不足は無い。次に栄養塩のうちリンについては、上述した閾値を全測点・全層で上回っており枯渇は無い。一方、窒素についてはDINとして見た場合にSt.1-2では全層で閾値を上回っているが、St.2-3・St.3-4では躍層の上部水塊で枯渇し、これによりクロロフィルaが低い。躍層の下部水塊では、DINの枯渇が無いことからクロロフィルaが上部水塊よりも高い。よって、平水時では躍層を境に上部水塊で窒素枯渇となり基礎生産の制限要素となっている。

一方、出水時(図-6(2a)(2b)(2c))は、河川出水の影響により表層の塩分の低下が見られる。また栄養塩の供給があり、窒素・リンともに全測点・全層で閾値を上回り窒素では枯渇が解消されている。しかし、SSの供給があることから、平水時に比べて濁度が増加し、特に表層で顕著である。これにより補償深度はSt.1-2で0.6m、St.2-3で4.5m、St.3-4で6.0mとなり、底層では十分な光量が確保されていない。このため、クロロフィルaは表

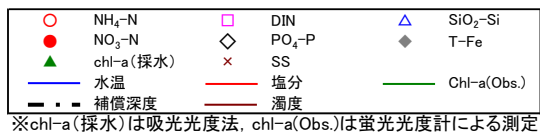
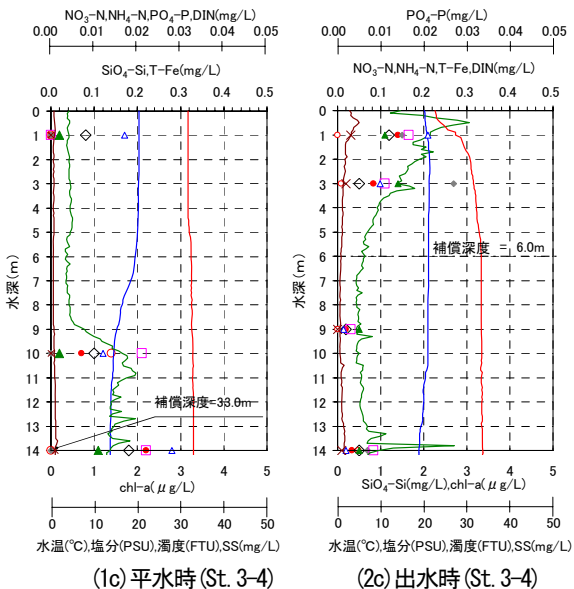
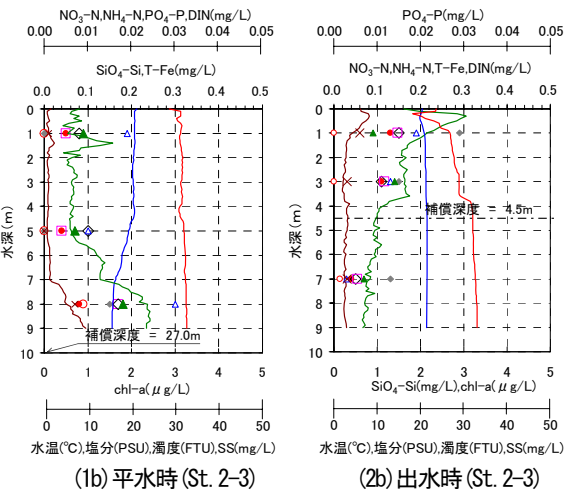
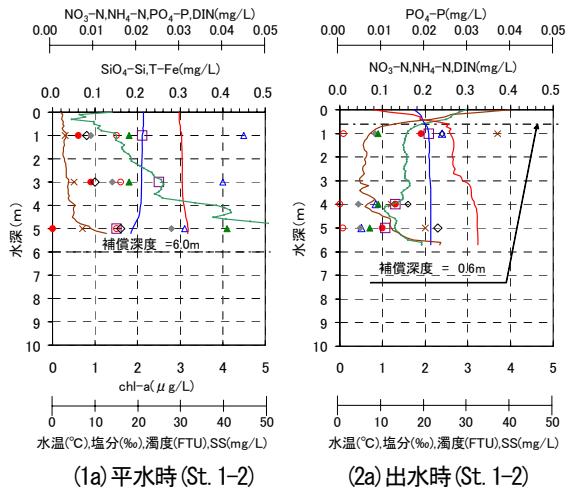


図-6 水温・塩分・栄養塩・クロロフィルaの鉛直分布

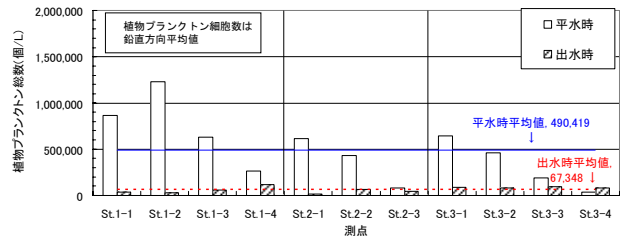


図-7 測点毎の植物プランクトン細胞数の分布

層で大きく、底層では小さい。よって、出水時には栄養塩は充分足りているが、SSの影響により底層で光量不足となり基礎生産の制限要素となっている。

図-7には測点毎の植物プランクトン細胞数（鉛直方向平均値）を示している。全体的には平水時が出水時より細胞数が多く、全測点の平均値で比較すると平水時（490千個/L）が出水時（67千個/L）の7.3倍である。また、河口からの距離が大きいほど平水時と出水時のプランクトン細胞数の差の割合が小さい傾向がある。これは河口から離れるほど濁水の影響が小さくなるためと思われる。

(3) 漁場環境の変動機構

以上の現地観測結果に基づき、漁場環境の変動機構の概要をまとめると図-8のとおりとなる。

河川流量が少ない（＝栄養塩類供給が少ない）平水時には、植物プランクトンが栄養塩（窒素・リン等）を摂取して光合成することで増殖し、基礎生産量の指標であり光合成色素であるクロロフィルaが増える（図中①、以下同様）。栄養塩が豊富な下部水塊では基礎生産が維持されるが、上部水塊では植物プランクトンの消費により枯渇する（②）。植物プランクトンは、底生生物である二枚貝の主要な餌料として摂餌される（③）。

次に、河川流量が増える出水時には、栄養塩とともに多量の土砂が海域に流れ込む。粒径の小さい浮遊土砂は濁水となって浮遊物質濃度（SS）を高め（④）、太陽光を遮断して光環境が悪化する（⑤）。これが進むと植物プランクトンの光合成が阻害されて基礎生産量が低下して二枚貝の餌料環境が悪化する（⑥）。また、濁水は二枚貝の体力を消耗させて斃死に至る場合があるなど生息環境を悪化させる（⑦）。

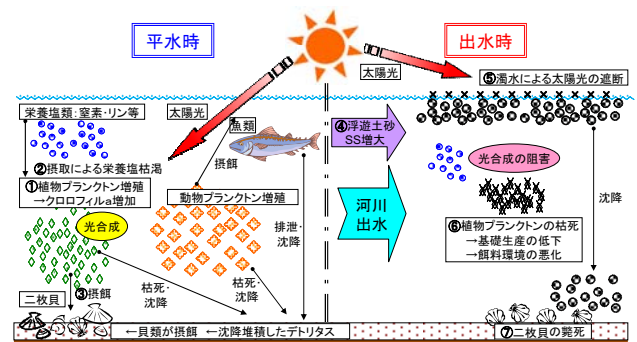


図-8 漁場環境の変動機構

6. 数値解析

(1) 物理特性の再現¹⁾

前述の現地観測結果に基づいて、数値解析により物理特性の再現を試みた。

鶴川海域の物理特性の再現には、マルチレベルモデル⁴⁾を用いた。計算は前述の図-2に示す12.6km×22.1kmの範囲で行い、水平方向を格子数221×126で100mメッシュ、鉛直方向を19層(可変)とした。計算期間は前述の図-3に示す2011年9月1日から9月15日までとし、台風12号による出水の影響を網羅した。開境界条件のうち、潮位は苦小牧港の推算潮位を用い、恒流成分は前述の図-4に示した流速移動観測結果に基づいて沿岸方向に0.2m/secの流れを与えた。陸側境界条件は河川流量の実測値を与えた。また、SSはL-Q式により与えた。

図-9には、前述の現地観測結果(図-6)と同様に河口から西に沖合に向かってSt. 1-2・St. 2-3・St. 3-4の3点における水温・塩分の計算値と観測値の比較結果を、出水時(9月10日)について示す。水温については計算値と観測値はほぼ一致している。塩分については河口に近いSt. 1-2では計算値と観測値の一致が見られる。しかし、St. 2-3とSt. 3-4の表層付近の塩分低下を計算が再現しきれていないと考えられ、今後の課題である。解析範囲全体の傾向としては、より河口に近い箇所について良好に再現していると考えられる。

図-10には、SSに基づいた濁水の挙動の数値解析による再現結果画像を示す。計算期間のうち、河川出水のピークである9月4日4:00および前述の写真-1の空撮を行った時刻に近い9月14日12:00の画像を示している。SSの最大値を70mg/Lとし、色彩が赤色に近いほどSSの値が高く、緑色から青色に近づくほどSSの値が低くなることを示している。9月4日では鶴川・沙流川の河口付近で高いSSの赤色を示し、沖合に向かって緑色から青色に変化してSSが低下しており、前述の現地観測結果(図-5)の傾向に合っている。また、沿岸流により濁水が北西方向に偏向して拡散の様子が再現されている。9月14日では9月4日に比べて河口付近のSSの値は低いが、9月4日と同様のSSの分布傾向を示している。前述の写真-1と同様に濁水の拡散範囲が数kmの沖合まで広がっており、広範囲に渡り二枚貝の生息環境に影響を及ぼしていることが示唆される。

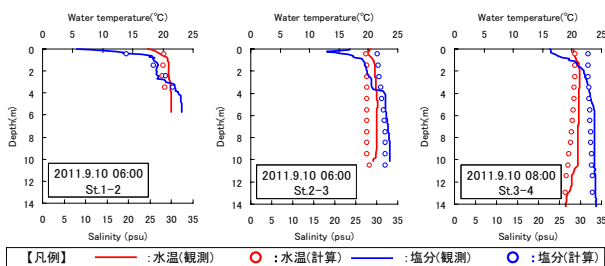


図-9 水温・塩分の現況再現結果(2011年9月10日)

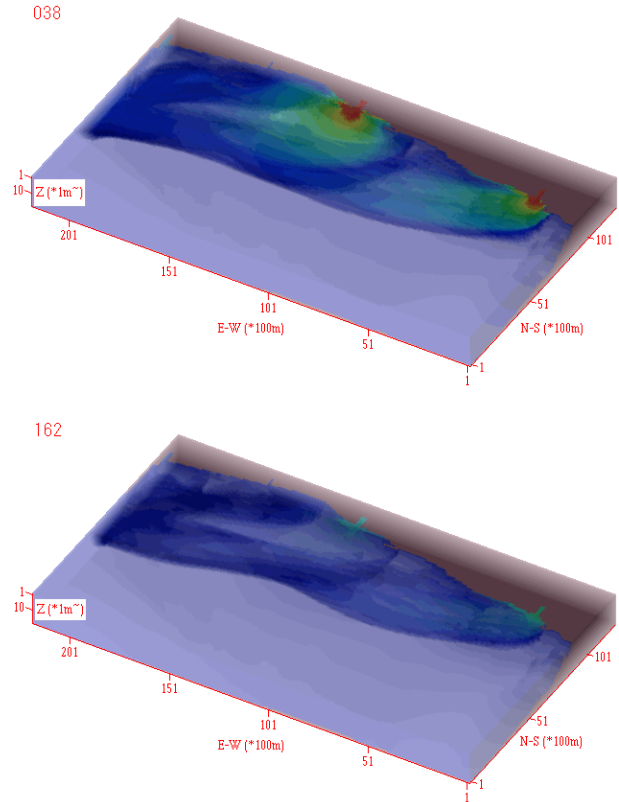


図-10 SSの再現結果画像

(上図:2011年9月4日4:00・下図:9月14日12:00)

(2) 基礎生産量の試算²⁾

前述の現地観測結果(図-6)に基づき、表-2に示す条件で低次生態系モデル⁵⁾を用いてクロロフィルaの現況再現および基礎生産量の試算を行った。測点はSt. 2-3とし、平水時から出水時に変化する過程の9月1日から10日の9日間(図-3参照)を計算期間とした。ここで9月1日の初期値として平水時(8月3日)に観測したクロロフィルaを用い、栄養塩および消散係数(透明度に基づく)は出水時(9月10日)の観測値を用いた。

はじめにクロロフィルaの再現計算結果を図-11に示す。躍層のある5~7m付近を境に、平水時に表層で窒素制限の影響を受けていたクロロフィルaが、出水時に底層で光制限を受けた状態へと変化する過程を計算値が良好に再現している。

次に、表-2に示す計算条件に基づいて基礎生産量を試算する。基礎生産量は、クロロフィルaを日当たり(/day)単位水塊当たり(/m³)の炭素量(mg-C)に変換して表示する。ここで変換式はC=50×chl-aを用いた。計算ケースは、(A1)現況再現、(A2)現況A1に対して濁水対策を行った場合、(B1)現況のまま濁水による光制限がさらに9日間継続した場合、(B2)出水時B1に対して濁水対策を行った場合の計4ケースである。ただし、B1・B2のクロロフィルaの初期値は9月10日とする。図-12(a)は計算ケースA1・A2の結果を示す。濁水の影響がある現況(A1)では、水深6m以深で基礎生産が負になっており、前述の

表-2 計算条件 (St. 2-3)

Case名	chl-aの初期値	栄養塩	濁水対策の有無	消散係数 ^{※1} ks	計算時間 ^{※2}
A1 (現況再現)	平時時 (8/3)	出水時(9/10)の栄養塩を供給	無し	1.133	9日(9/1~9/10)
A2	平時時 (8/3)		有り	0.189	9日(9/1~9/10)
B1	出水時 (9/10)	出水時 (9/10)	無し	1.133	9日
B2	出水時 (9/10)		有り	0.189	9日

※1 : 消散係数は透明度(Ds)を用いて算出した。ks=1.7/Ds
 ※2 : 9日間の計算を行い初期値からの1日あたりの変化量を基礎生産量として表示

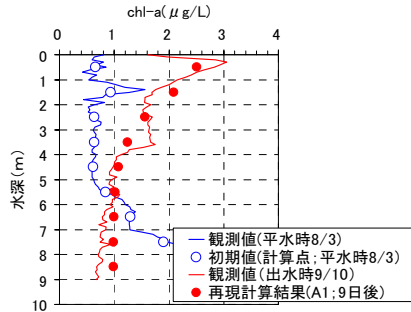
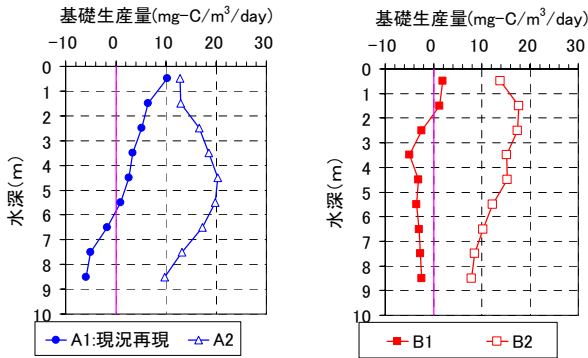


図-11 クロロフィル a の再現結果 (St. 2-3)



(a) 初期値：平時時8/3 (b) 初期値：出水時9/10

図-12 基礎生産量の試算結果 (St. 2-3)

図-6(2b)で示したような底層での光制限の影響を再現している。濁水対策を行った場合(A2)は基礎生産量が改善し全層で正となり、最大で約20mg-C/m³/dayとなって光環境の改善を示している。図-12(b)には計算ケースB1・B2の結果を示す。現況の濁水の影響が継続した場合(B1)では水深2m以深で基礎生産が負であるが、濁水対策を行った場合(B2)は全層で正となり、基礎生産量が改善している。

このことから河川出水が長期間続いた場合、中・底層で光環境が悪化し、沿岸漁場の基礎生産量を低下させていると考えられる。濁水対策を行うことで基礎生産が回復し、二枚貝の餌料環境が改善して生産性が向上する可能性があることが示された。

以上より、基礎生産量を指標とした出水前後の現地観測とこれを適切に再現する数値解析モデルにより、現況の基礎生産量を把握するとともに、現地における濁水対策の有効性について定量的に試算・検討することが可能であると考える。

7. おわりに

本報では、漁場環境の変動機構を現地観測で捉え、数値解析で再現・試算することで、陸域の影響を適切に評価することが可能となった。以下にまとめを示す。

- ①研究の目的と現地条件を考慮した適切な現地観測計画の立案により、河川出水時の沿岸漁場環境の変動機構を解明した。
 - ②現地観測結果を適切に再現する数値解析により、濁水対策を行った場合の基礎生産量の試算を行った。この結果、濁水対策が二枚貝の餌料環境を改善し、生産性を向上させる可能性があることが示された。
- 今後は、河川出水時における沿岸漁場環境の変動機構解明を継続するとともに、二枚貝等の個体群動態モデルを構築する予定である。将来的には本方法である現地観測や数値解析の手法を、問題を抱える他の沿岸漁場や港湾・漁港の現場へ適用し、解決に繋げたいと考える。

参考文献

- 1) 水産庁(2012)：平成23年度水産白書
- 2) 真岡東雄(1993)：鹿島灘砂浜域における漁業生産の特徴と問題点、水産海洋研究、第57巻 第2号、pp.32-38
- 3) 須藤賢哉・大橋正臣・山本潤(2012)：水産水域環境の諸問題に対応した水質変動予測手法について、北海道開発技術研究発表会論文、環 29
- 4) 平野敏行監修(1998)：沿岸の環境圏、フジ・テクノシステム、pp.674-697
- 5) 中田喜三郎(1993)：生態系モデル—定式化と未知パラメータの推定法—、Journal of Advanced Marine Technology Conference、Vol.8、pp.99-138
- 6) 北海道新聞社(2001)：9月18日付け北海道新聞朝刊苫小牧版、23面
- 7) 瀬戸雅文・服部志穂・新居久也(2005)：ホタテガイの濾水浄化能力に関する基礎的研究、海洋開発論文集、第21巻、pp.247-252
- 8) 山下俊彦・宮下将典・山崎真一・渡邊康玄(2000)：河川から供給される物質の河口沿岸域での挙動、海岸工学論文集、第47巻、pp.1026-1030
- 9) 北海道開発局室蘭開発建設部苫小牧港湾建設事務所(1997)：平成8年度苫小牧港海域調査検討業務報告書、118p.
- 10) 高橋正征・古谷 研・石丸 隆(1996)：生物海洋学2「粒状物質の一次生成」、東海大学出版会、174p.
- 11) Masami Ohashi, Jun Yamamoto, Kenya Sudo(2012)：A Numerical Study on Influence of Primary Productivity by River Flood in Coastal Region, Pacific Congress on Marine Science and Technology (投稿中)
- 12) 大橋正臣・山本潤・須藤賢哉・水垣滋・門谷茂・田中仁(2012)：鶴川沿岸の漁場環境に及ぼす河川出水の影響、土木学会論文集 B2(海岸工学)、Vol.68、No.2、pp.1121-1125