

# 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

(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

水産利用している沿岸漁場や漁港水面で水域環境の改善を図る場合、対象水域の水質悪化メカニズムを把握し、物理特性・水質特性を定量的に評価する必要がある。この評価の手法は、詳細な現地観測を行った上で、数値シミュレーションを用いて時間的・空間的な水質変動予測を行うものである。これにより水質改善目標及び対策の設定と対策後の予測評価が可能となる。

本報告は、水産水域環境の悪化が懸念される海域（閉鎖性海域、河川流入負荷のある海域）における水質変動予測手法について、現地観測と数値シミュレーションの両面から検討した結果を述べるものである。

キーワード：水産水域環境、水質変動予測、密度流計算、生態系モデル

## 1. はじめに

近年我が国では、磯焼け等による藻場喪失や内湾域の水質悪化、海水温の上昇など海域環境の変化に伴い、漁業生産量がピーク時の半分程度に減少しており、水産資源の回復が大きな課題となっている。そのような情勢の中で、北海道は漁業生産量が国内の約1/4を占め<sup>1)</sup>、漁業生産拠点として水産物の安定供給に大きく貢献している。北海道において将来にわたり安定的な漁業生産を維持するためには、沿岸漁場の豊かな水域環境に配慮しつつも、内湾や漁港を活用した蓄養、中間育成、養殖など水面の高度利用をより一層推進していくことが必要である<sup>2)</sup>。これらの整備は、施設周辺の水域環境の維持・保全と一体で進める必要があり、そのためには適切な水質特性の評価が不可欠である。

一方で、漁業生産拠点となる内湾や漁港では、外海との海水交換が不足して水域内に汚濁原因物質が滞留しやすく、水質悪化に伴う水産有用種の生育不良や大量斃死等の生産性低下に繋がる問題が見られる。加えて、河川流入負荷の大きい水域では、都市由来の生活雑排水、農業由来の肥料・糞尿、河岸・森林由来の土砂などが上流から海域に流れ込み、河口周辺海域の水質が大きな影響を受ける。将来にわたって良好な水産水域環境を保全し、生産性の維持・向上を図っていくためには、各水域における流動機構・水質変動機構を解明した上で、将来の事業効果を事前に予測し、評価しておくことが必要となる。

このような水産水域環境の諸問題を解決するために、我々は閉鎖性海域や河川流入負荷のある海域を対象として、水域の水質特性の解明と水質変動予測について研究

を進めてきた<sup>3)4)5)</sup>。本報告は、閉鎖性海域、河川流入負荷のある海域など水産水域環境の悪化が懸念される水域における水質変動予測手法について、現地への適用事例とその結果を併せて総体的に説明するものである。

## 2. 水産水域環境における問題点

漁業生産拠点となる内湾や漁港などの閉鎖性水域では海水の交換・循環が少ないため、水質・底質の悪化が生じやすい。閉鎖性の水産水域環境における問題点は、水域内への汚濁原因物質の蓄積と、それに伴う溶存酸素(DO)の消費に着目することで説明できる。図-1に水質・底質悪化のしくみの概略を示す。閉鎖性水域に河川水や養殖等に由来する汚濁負荷があると(図中①②、以下同様)、海水中の窒素・リン等の栄養塩の濃度が高まるとともに底質中に有機物が蓄積する。これは富栄養

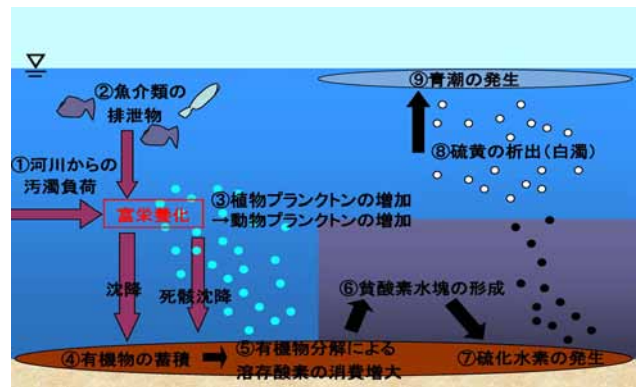


図-1 水質・底質悪化のしくみの概略

化と呼ばれ、過密養殖あるいは上流域に都市や農業地帯がある河川の流入により生じやすい。例えば後述の風連湖の事例<sup>3)</sup>では河川からの汚濁負荷によりCOD（化学的酸素要求量）が環境基準を超えている<sup>6)</sup>。富栄養化が進むと、植物プランクトンとそれを捕食する動物プランクトンが大量発生する（③）。それらの死骸が有機物として底質中に蓄積し（④）、それが好気性細菌により酸化分解される過程で溶存酸素が大量に消費される（⑤）。溶存酸素は動物プランクトンや魚介類によっても消費される。すると溶存酸素が極端に少なくなり、貧酸素水塊が形成される（⑥）。この貧酸素化による魚介類の窒息が、内湾での養殖や漁港水面での蓄養における大量斃死の直接的な原因である。例えば後述の能取湖<sup>5)</sup>では貧酸素水塊によるホタテ稚貝の大量斃死が生じている。貧酸素化が進んだ底質においては、蓄積された有機物が嫌気性細菌（硫酸還元菌）により分解される過程で硫化水素が発生する（⑦）。硫化水素が溶存酸素により酸化されて硫黄となり、海面付近で白濁して析出するのが青潮である（⑧⑨）。長年にわたって養殖・蓄養を行っている内湾や漁港では底質悪化が常態化しており、青潮が発生しやすい状況にある。青潮は全国各地の内湾で見られ、例えば近年の東京湾では年3回程度発生している<sup>7)</sup>。また、後述の能取湖<sup>5)</sup>でも養殖による底質悪化が進んでおり、2007年9月に初めての青潮が確認されている。

以上のように、水質・底質の悪化は様々な要因が相互に関連して生じる。水産水域環境を改善するためには、水域における栄養塩等の汚濁原因物質の挙動を把握した上で、COD・DO等の指標に着目することで適切に水質特性を評価する必要がある。

### 3. 水産水域環境改善と水質変動予測の考え方

水産水域環境の改善を図ろうとする場合、対象とする水域の水質悪化の特性とその要因を把握し、物理特性・水質特性を定量的に評価する必要がある。その上で水質改善目標を定めたり、必要に応じて水質改善対策や水域の利用調整を行ったりする。

水産庁による「自然調和型漁港づくり技術マニュアル」<sup>8)</sup>に基づいて、水域の水質悪化状況の把握から水質改善に向けての手順を示すと概ね以下のとおりとなる。

- ①対象水域の自然条件、水質悪化状況を把握する。
- ②対象水域に求められる水質環境を環境基準<sup>9)</sup>・水産用水基準<sup>10)</sup>に基づき設定する。
- ③①で得られたデータに基づき数値シミュレーションを用いて水質変動予測を行う。
- ④③で得られた結果が②の基準を達成しているか否かを判定する。
- ⑤以上①～④で得られた成果を水産水域環境改善の対策に反映させる。

水質変動予測手法は上記の①③の部分に相当し、水産

水域環境改善の対策を行う上では必要不可欠な手法と位置づけることができる。

水質変動予測では、現地観測により個々の海域の水質特性を明らかにした上で、数値シミュレーションにより物理特性、栄養塩やDO等の水質を計算するという手順をとる。計算の再現性を高めるためには、海域特性の正確な把握が不可欠であるため、流況・水質等に関する詳細な現地調査を行う。

水質変動予測手法の手順は以下のとおりである。

#### (1) 手順1：現地調査による海域特性の把握

- ①連続観測：定点設置型の観測機器により流速・波高・水温・塩分・DO・クロロフィル等を計測する。
- ②多点観測：垂下式機器により水温・塩分・クロロフィル等の鉛直分布を計測する。
- ③試料採取：採水・採泥により栄養塩・COD等に関して水質・底質を分析する。
- ④気象データ収集：気温・風速・日射量等を把握する。

#### (2) 手順2：密度流計算による物理特性の再現

密度流計算は、海洋モデルを用いている。これは一般に「プリミティブモデル」と呼ばれ、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、POMやMECなど様々なモデルが公開されている。このモデルを用いれば、流速、水位、水温、塩分について空間（3次元）的、時間的な変化の解析が可能となる。

なお、密度流計算の概念とその計算方法の詳細については文献<sup>11)</sup>を参照されたい。

#### (3) 手順3：低次生態系モデルによる栄養塩等の再現

低次生態系モデルは、生態系を構成している生物（植物プランクトンや動物プランクトンなど）と非生物（無機態栄養塩や有機物など）を構成要素とし、主に食物連鎖等に基づいて、これらの構成要素間の相互作用を計算するものである。これにより栄養塩、DO、COD等の3次元分布とその時空間変化を求めることが出来る。

なお、低次生態系モデルの概念とその計算方法の詳細については文献<sup>11)</sup>を参照されたい。

現地調査に数値シミュレーションを組み合わせた水質変動予測手法のメリットは、ある特定の日時・海域条件のもとでの数値計算結果が現地調査結果を整合性良く再現できた場合、調査地点以外の任意点（例えば現地計測不可能な場所など）での値や海水交換率等の現地計測不可能な項目を再現できることである。また、調査対象の水域において構築された数値計算モデルは、同様の水質悪化問題を抱える別の現場に応用することが可能である。

## 4. 風連湖における水質変動予測の事例

### (1) 概要

調査対象は、図-2に示す北海道東部の根室湾に位置する風連湖である。風連湖は、国内第14位の湖水面積

(57.5km<sup>2</sup>)を持つ汽水湖であり、主な流入河川は、風蓮川・別当賀川・ヤウシュベツ川である。流域は大規模な酪農地帯であり、農業由来の汚濁負荷が流入し、水質及び底質の悪化が懸念されている<sup>6)12)</sup>。風蓮湖は環境基準<sup>9)</sup>の類型指定水域でありCOD=5.0mg/Lと設定されているが、この基準値を超過して問題となっている<sup>6)</sup>。このような問題を受けて、良好な河川・沿岸環境の保持・再生と農業の持続的な発展の両立が重要な課題となっている。

風蓮川流域では酪農由来の汚濁負荷を抑制する対策(沈砂池、緩衝林帯)が検討されている。その施策を推進するためには、対象とする水域において現地観測を行い、流動・水質変動機構を解明した上で、将来の事業効果を事前に予測し、評価しておく必要がある。水産土木チームでは2006年より風蓮湖において流動・水質特性等の詳細な現地観測を行い、水質変動予測が可能な数値計算モデルを構築した。これによる陸域からの汚濁負荷の流出抑制対策の前後における水質変動予測の結果を以下に示す。

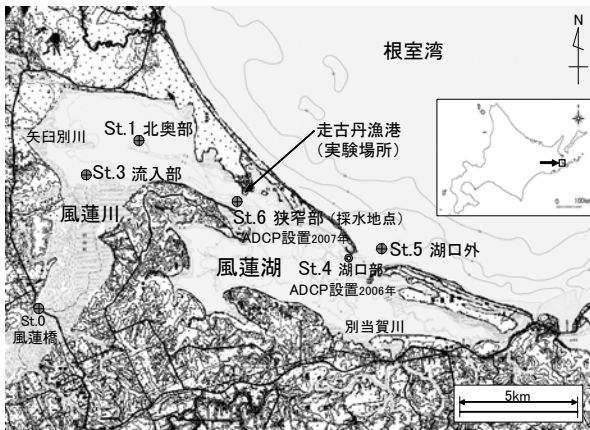


図-2 調査位置図(風蓮湖)

(2) 現地調査

現地観測は、降雨による河川出水期を捕捉するため2006、2007年の夏から秋にかけて風蓮湖において実施した。図-2に示す風蓮湖において、流況、水質、底質、プランクトン、光合成速度について現地調査を行った。風蓮川からの汚濁負荷を確実に捉え、かつ河川水が風蓮湖を経由して根室湾に出る経路を網羅する形でSt.0～St.6の観測地点を設定した。

観測結果では、風蓮湖の湖口付近は清浄な外海水との海水交換によって水質が良好に保たれるが、湖奥部では外海水の影響が届かず、河川水による汚濁負荷によって水質悪化を引き起こしていることが分かった。図-3には2006年におけるCODと塩分濃度の関係を示す。ほぼ淡水のSt.3流入部(左上点線囲い)では降雨後の11月に顕著に増加しているが、他のSt.1・5・6(右下点線囲い)では塩分濃度と負の相関が高い。つまり、風蓮湖に

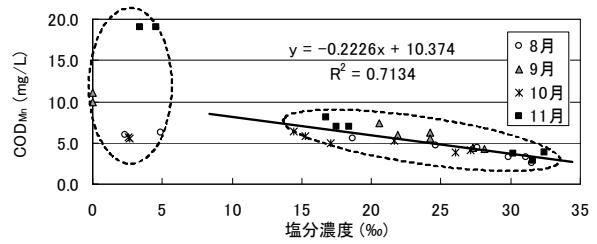


図-3 CODと塩分濃度の関係

おける汚濁負荷の高い河川水と清浄な外海水との混合割合は、塩分濃度を用いることで概ね説明できることが分かった。

(3) 水質変動予測結果

現地観測結果及び光合成速度現地試験結果に基づく数値シミュレーションによりCOD収支計算を実施した。計算手法に関する詳細は文献<sup>1)</sup>を参照されたい。

数値シミュレーションのケースは、表-1のように①平水時の現況を現地観測結果に基づいて再現したもの(平水時現況再現)、②平水時の現況において流量を出水時のものに変更したもの(出水時対策なし)、③出水時において栄養塩類等の負荷量を低減する対策を行ったもの(出水時対策あり)の3ケース行うこととした。対象期間は表中のとおりとし、最大流量は対象期間の観測値である。河川からの流入負荷量は、寒地土木研究所水環境保全チームが作成した全窒素・全リン・SSのL-Q式<sup>13)</sup>にこれらの流量を代入して算出し、L-Q式の無い水質項目については、今回の観測結果の統計量から得られる比率を用いて配分し、それぞれの値を上流側の境界条件として与えた。ケース③では、出水時の河川流量のまま、負荷量低減率を前述の文献<sup>13)</sup>のL-Q式に基づき0.5とした。

図-4は表層のCODの平面分布を示す。縦軸・横軸は距離(単位:m)である。①と②を比較すると、CODの濃度は河川流入部付近で高く、対策前の②では当水域の環境基準値5mg/Lを大幅に上回っていることがわかる。対策後の③では流入部のCODが低下しており、流出抑制対策の効果が現れている。

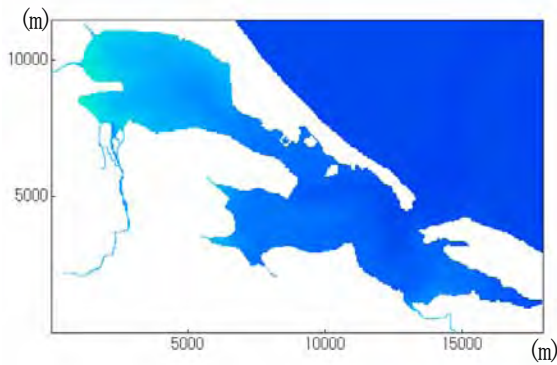
図-5は湖内各地点におけるCODの経時変化を示す。①の平水時では、河口付近のSt.3の経時変化の傾向は、河川流量の経時変化との相関が見られた。その他の地点は時間的に一定周期の変動を示し、河川流よりも潮流の影響が強いことが伺われた。出水時における②対策なし

表-1 数値シミュレーションの計算ケース

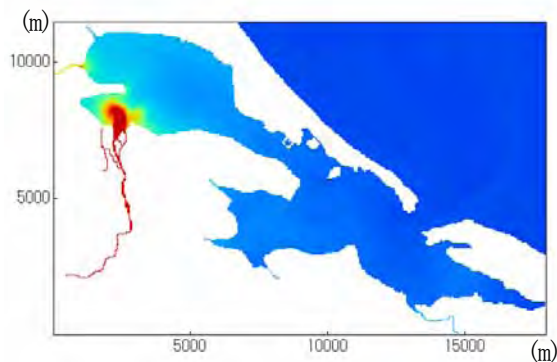
計算ケース	対象期間	最大流量	負荷量低減率
①平水時現況再現	2007.09.18 ～09.22	32.41m <sup>3</sup> /s	1.0
②出水時対策なし	2007.09.07 ～09.15	132.91m <sup>3</sup> /s	1.0
③出水時対策あり			0.5

と③対策ありを比較すると、いずれも河口付近のSt.3でCODが高い。③対策ありではCODの大幅な低下が見られ、かつ出水の最大流量時にその差が最大となっており、汚濁負荷流出抑制対策の効果が顕著に現れていることがわかる。

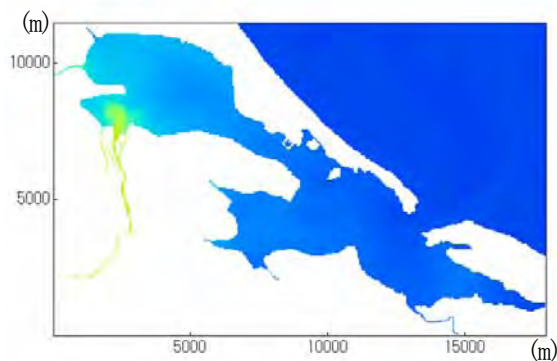
以上の結果より、現地観測により水質等の現況を把握し、河川流量データを条件として与えて計算することで、水質汚濁負荷物質の挙動の再現・予測を行った事例を示した。



① 平水時：計算開始24時間後9月19日11:00



② 出水時対策なし：計算開始84時間後9月10日23:00



③ 出水時対策あり：計算開始84時間後9月10日23:00



図-4 COD平面分布の計算結果

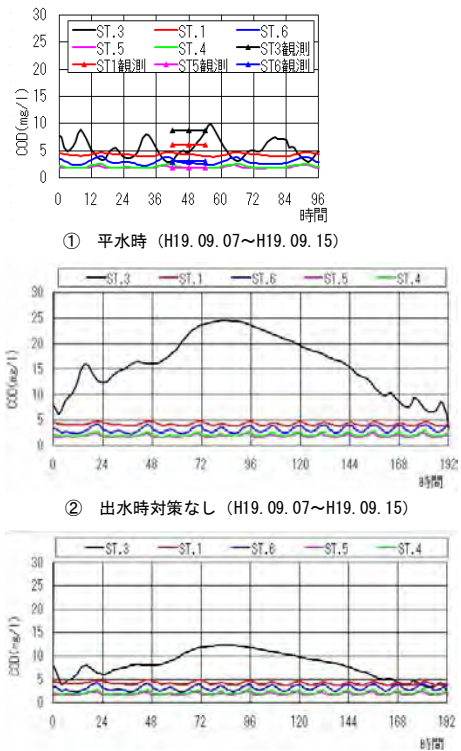


図-5 各測点におけるCODの経時変化

## 5. 能取湖における水質変動予測の事例

### (1) 概要

調査対象の能取湖は、図-6に示すように北海道北部のオホーツク海に位置する国内第13位の湖水面積(58.5km<sup>2</sup>)を持つ海跡湖である。湖口の幅・水深が非常に小さくて静穏度が高いため、水域ではホタテ稚貝の養殖が盛んに行われ、種苗として全道に供給されている。しかし、長年の養殖による底質悪化と閉鎖性の高さから、夏季に溶存酸素(DO)が不足して貧酸素水塊が発生しやすい状況である。2007年9月19日には、能取湖では初めての青潮が湖内南岸の卯原内地区で発生し、中間育成

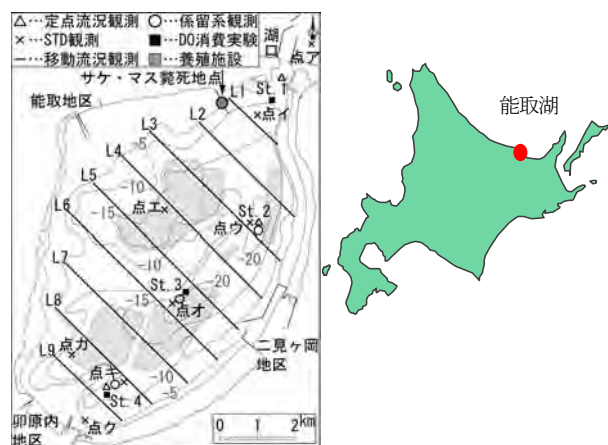


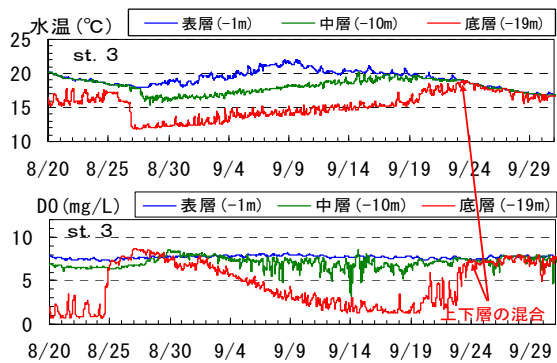
図-6 調査位置図(能取湖)

中のホタテ稚貝のうち、約1,200万粒の斃死被害が報告されている。また、2008年の9月20日に能取湖北岸の定置網で漁獲されたサケ・マスに貧酸素水塊の影響と見られる斃死被害が生じた。

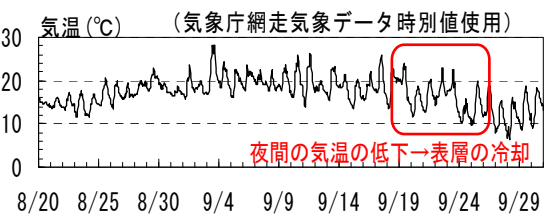
以下では、水質変動予測手法により能取湖における貧酸素水塊の挙動の解明を行った事例を示す。

## (2) 現地調査

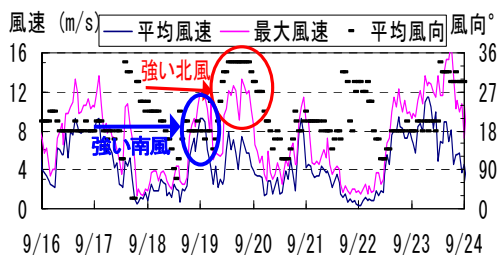
図-6に示す能取湖の各地点において、2008年8月から10月にかけての夏季の貧酸素化が生じやすい時期を狙って、流況、水質、底質等の観測を実施した。連続観測は、水温・塩分計、DO計、ADCPによって行い、調査地点は湖底の窪地深部における貧酸素水塊の発生とその挙動の全体像の捕捉を意図して、湖口付近(st.1)、湖口側深部(st.2)、湖央部(st.3)、湖奥部(st.4)に設定した。加えて、採水・採泥による分析、STD及びDO計による鉛直分布観測を地点ア〜クにおいて実施した。また、測線L1〜9ではADCPを取付けた調査船を走行させ、湖内流況の3次元分布を把握した。さらに、低次生態系モデル計算における生物パラメーターを取得するため、自記式DO計を入れた明暗筒により、現地における酸素消費速度の連続計測を8月、9月の各3日間実施した。



①湖央部 st.3 における水温(上)・DO(下)の経時変化



②気温の経時変化(気象庁のデータ)



③風速の経時変化(西網走漁協のデータ)

図-7 水温・DO・気温・風速の経時変化

図-7に湖央部(st.3)における水温・DOの経時変化、気温経時変化、風速経時変化(風向は360°を北、180°を南)を示す。水温(①上)については、8月26日以降に水温差が表層と中層で3°C程度、中層と底層で5°C程度となり、その状態が9月中旬まで続いた。9月19日頃より底層の水温が上昇し始め、一方で気温の低下により表層水温が低下したため、9月23日以降では各層の温度差がほぼ消滅した。DO(①下)については、8月下旬から水温の成層化に合わせて底層のDOが徐々に低下し、9月11日頃には2mg/L程度まで低下して貧酸素水塊の形成が認められた。底層のDOは9月19日頃から回復傾向を示し、気温の低下(②)及び9月19日頃に観測された北向き強風(③)により鉛直混合が促進したと推察される9月23日にはほぼ平常値の8mg/L程度まで回復した。

## (3) 水質変動予測結果

貧酸素水塊の挙動を検証・予測するため、現地観測結果に基づく数値シミュレーションによりDO収支計算を実施した。計算方法の詳細は山本らの事例<sup>14)</sup>に倣っているのでそちらを参照されたい。

図-8には湖央部st.3の水温・DOの観測値と再現計算値の比較を示す。計算値はほぼ観測結果と同様の変動を示し、水温変化とDO収支が良好に再現されている。

図-9にはDOの計算結果の3次元分布を示す。図中の黒い部分が貧酸素水塊である。成層状態で底層が貧酸素化している9月16日0:00を計算開始時刻とした。9月19日未明に観測された強い南風(図-7③)により、図-9①では表層水が風下である北岸に移動し、その代わりに底層の貧酸素水塊が反対に風上である南岸の湖奥部付近に移動していることがわかる。その後、9月19日午後風速10m/sを超す強い北風が観測されており(図-7③)、図-9②ではこれに伴って南風時と逆向きの同様の現象が生じて貧酸素水塊が北岸に移動していることがわかる。この現象は、9月20日の6:00に北岸の定置網においてサケ・マス200~300kgが斃死したことと一致する。図-10はサケ定置網設置箇所のDOの計算値を示している。強い北風が観測された9月19日午後以降にDOが低下し、水産用水基準の6.0mg/L(海域)を下回っており、計算結果は貧酸素水塊による漁業被害の発生を裏付けている。

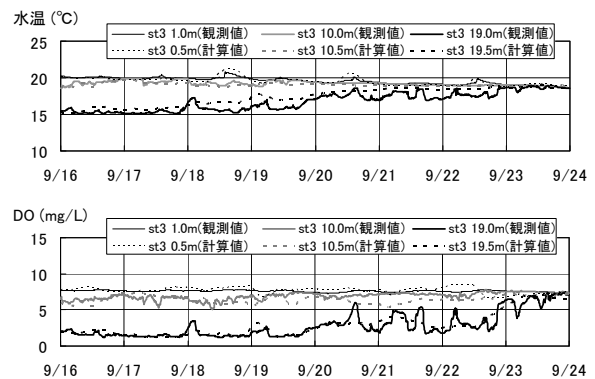
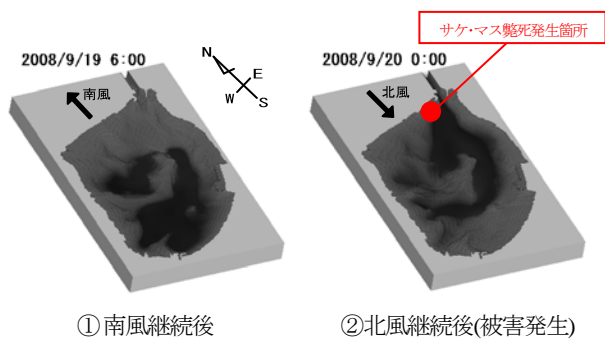


図-8 水温(上)・DO(下)の計算値と観測値の比較(st.3)



①南風継続後 ②北風継続後(被害発生)  
 図-9 貧酸素水塊 (図中の黒い部分) の3次元分布

これ以後は、図-7①下のとおりst. 3のDOが回復傾向となり、9月23日には平常値に回復していることも現地観測結果と一致する。

図-11はst. 3におけるWedderburn数 ( $W_e$  数) の経時変化を示す。 $W_e$  数は上下層の混合程度を表す指標でリチャードソン数/アスペクト比と定義され、抵抗係数  $C_D$  (通常  $1.3 \times 10^{-3}$ )、海域の長さ  $L$  (8km)、水深  $h$  (19m) 等により計算した。尹ら<sup>15)</sup>によれば、 $W_e$  数  $\leq 12$  が青潮発生の目安とされるが、9月19日に  $W_e$  数が10以下となり、DOが最低値となりサケ・マス斃死が発生した9月20日にほぼ一致する。このことは水域のモニタリングを行い、気象データを用いて被害発生を事前に予測できることを示唆している。

以上の結果より、水温・塩分・DOの観測により密度成層の状況を把握し、気象データを条件として与えて計算することによって、貧酸素水塊の挙動の再現・予測を行った事例を示した。

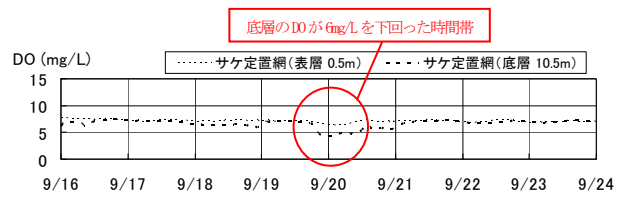


図-10 サケ定置網設置箇所のDO計算値

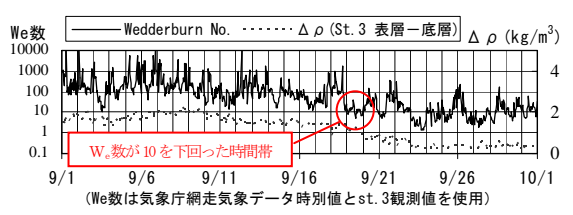


図-11 Wedderburn 数 ( $W_e$  数) の経時変化

## 6. おわりに

本稿では、河川流入負荷がある海域におけるCODの悪化事例や閉鎖性海域における貧酸素化の事例に対して水質変動予測手法を適用し、現地状況を良好に再現・予測できることを示した。湾内や漁港の閉鎖性水域において養殖等の漁業生産を行う場合には良好な水質の維持が不可欠であり、水質変動予測は水産水域環境の維持管理

等の施策を進める上で必要不可欠な手法であるといえる。

現在では、数値計算とその応用に関する研究開発が進んだため、様々な現場条件に対して水質変動予測が効果的に適用できるようになっている。しかし、その手法が完全に確立したとはいいがたく、現地観測を含めたさらなる研究を進める必要がある。

今後については、閉鎖性海域での研究を進めるとともに、開放性海域等においても水質変動機構の解明を試みる予定である。現在我々は開放性で河川流入負荷のある鶴川海域の事例に取り組んでおり、現地データの収集・解析と数値計算モデルの構築を進めている。将来的には、生態系モデルを確立し、水質変動予測と資源管理を結びつけた手法の確立、および他の海域への応用に結びつけたいと考えている。

## 参考文献

- 1) 北海道水産林務部総務課(2011)：平成 22 年北海道水産現勢、概要 pp. 1、北海道庁ホームページ-水産統計
- 2) 国土交通省北海道開発局(2011)：北海道の「みなと」と「技術開発」、北海道開発局ホームページ-農業・水産
- 3) 山本潤・牧田佳巳・山下彰司・田中仁(2007)：風蓮湖に陸域からの汚濁負荷が及ぼす影響に関する現地観測、海岸工学論文集、第54巻、pp. 1006-1010
- 4) 山本潤・林田健志・峰寛明・牧田佳巳・山下彰司・田中仁(2008)：北方の閉鎖性海域に適した低次生態系モデル構築に向けた現地実験、海岸工学論文集、第55巻、pp. 1196-1200
- 5) 山本潤・酒向章哲・渡辺光弘・牧田佳巳・田中仁(2009)：能取湖における密度成層崩壊時の貧酸素水塊の挙動に関する現地観測、海岸工学論文集、第56巻、pp. 1291-1295
- 6) 北海道環境生活部環境推進課(2011)：北海道環境白書' 11(2011年版)、pp. 129、北海道庁ホームページ
- 7) 国土交通省関東地方整備局港湾空港部(2011)：東京湾環境情報センターホームページ-東京湾を取り巻く環境(赤潮・青潮)
- 8) 水産庁漁港部(2000)：自然調和型漁港づくり技術マニュアル-水質浄化技術一、pp. 3-26
- 9) 環境省(2011)：環境省ホームページ、環境基準(水質)
- 10) (社)日本水産資源保護協会(2006)：水産用水基準(2005年版)
- 11) 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
- 12) 北海道環境科学研究センター(2005)：北海道の湖沼改訂版、pp. 46-51
- 13) 中村和正・山下彰司・山本潤・中山博敬・大久保天・鶴木啓二・多田大嗣・林田寿文・渡辺光弘・加藤道生・西山章彦・斉藤勉(2010)：大規模酪農地域における水質保全策が流域の水質に与える効果、寒地土木研究所月報、第686号、pp. 2-18
- 14) 山本潤・田中仁・佐伯信哉(2007)：野見湾の内部潮汐による海水交換と水止まりによる貧酸素水塊発生に関する研究、土木学会論文集B、第63巻、1号、pp. 39-50
- 15) 尹 鍾星・中辻啓二・村岡浩爾(1993)：開放性成層水域における吹送密度流に関する研究、海岸工学論文集、第40巻、pp. 241-245