

調査課題名

## 漁港水域における水質・底質改善技術の開発

実施機関及び担当者名

水産工学研究所 水産土木工学部 開発システム研究室 山本潤，大村智宏  
水理研究室 中山哲巖

調査実施年度

平成13～17年度

緒言

漁港内の泊地や比較的小規模な内湾等の閉鎖性水域は、漁港内で利用される各種洗浄水の取水源や活魚の蓄養水面として、また、漁港の周辺水域においては養殖漁場として高密度に利用されている。しかし、汚濁負荷の増大や海水交換の不足により、水質悪化、底質悪化、これに伴う魚介類の斃死が深刻な問題となっている。このため、著者らは漁港泊地や海面養殖場等の比較閉鎖性の強い水域を対象とした流動・水質変動機構の解明、海水交流等の環境改善・保全工法について検討を行っている。

一方、近年では漁港の情報化施設整備の一環として、水質モニタリングシステムが導入されはじめている。当施設が配信するデータを水産試験場や市町村水産関係担当が監視し、漁業関係者に水域利用について指導している。さらに、漁業者自らが水質データを閲覧し、養殖業等に活用している例も見られる。これと連動して、湾全体の水質変動を精度良く計算するために、著者らは当施設が配信するデータを境界条件としてプログラムに組み込む方法を用いている。このように、閉鎖性水域の水質対策として、ソフト的な取り組みを支える施設整備も導入されている。

閉鎖性の内湾では、一般的に、夏期には水温上昇により有機物が腐敗しやすく、水質が悪化する例が多い。また、表層と底層との温度差から形成される躍層により、上下層の混合が阻害され、底層で貧酸素水塊が発生する。やがて秋期になると密度成層が破壊され上下層の混合が促進されると言われている。しかしその一方で、夏期には内部潮汐によって表面潮汐の数倍の海水交換があるが、秋期になるとその内部潮汐が起きなくなり、「水止まり」と呼ばれる現象によって水質が悪化する事態も懸念されている。また、初夏に発生する渦鞭毛藻類やラフィド藻類による赤潮は毒性も強く、養殖魚に多大な影響を及ぼすため、古くから調査研究が進められている。このように、一つの水域において、夏期の密度成層、秋期の躍層破壊、初夏の赤潮発生等、季節毎に様々な現象が生じている。

本調査は、漁港内の泊地や比較的小規模な内湾といった閉鎖性の強い水域を対象として、現地観測と数値計算によって流動・水質変動機構を解明し、水質改善のための施設の配置・規模等の現場での展開方法、さらにその効果の予測、評価手法を含めた総合的な技術を提案するものである。

平成13～15年度調査では、養殖業を主体とした漁港及びその周辺海域において、夏の内部潮汐と秋の「水止まり」現象を観測した。数値計算による検討から、夏には内部潮汐が海水交換量を増大させ、湾内水質の維持に寄与しているが、秋には水止まりが生じて貧酸素水塊が発生するメカニズムを解明してきた<sup>1)</sup>。また、初夏の赤潮を対象に同様の観測<sup>2)</sup>を行い、赤潮の発生を捉えると共に、発生から消滅までの各種水質データを取得するなど、現況の把握と対策案検討の準備を行ってきた。さらに、当地域に整備された水質モニタリングシステムが水質悪化時の餌止め、生け簀の湾外避難等、漁場管理に有効に活用されるよう当システムを用いた湾内水質の再現・予測計算を可能<sup>3)</sup>としてきた。

16年度からは、補足調査と並行して、こうした水質悪化の状況を踏まえた対策案の検討を開始した。野見湾の秋の貧酸素水塊発生に対し、数種類の環境改善策の効果予測を数値計算により試行的に行い、事業採択や工法の選択時における検討方法の一例として提案した。

17年度には、対象となる水域の水質改善対策を想定し、これまでに作成してきた水質変動の予測シミュレーションによりその効果評価と比較を行った。水質改善対策の一つとして、近年、注目されてきたマイクロバブル（微細気泡）を例に挙げ、漁港泊地の浄化や海面養殖漁場の貧酸素対策としてどの程度有効であるか、当装置が補助事業の対象として適切であるかを検証するため、閉鎖度の高い内湾に実際に装置を一定期間設置して、その効果と範囲、悪影響等の把握を行った。これにより、マイクロバブル発生装置に関する現場での効果実証試験に基づいた正確な数値モデルを作成し、効果予測計算に適用した。以上により、水質改善効果の予測、評価手法を提案した。

### 調査方法

#### 1) 流動と水質変動を捉える現地観測

図-1 に示す野見湾の湾口部、湾中央部、湾奥部等に連続観測用の係留系（図-2）を設置した。それぞれの地点において鉛直方向に 1m 間隔で水温計、概ね 3m 間隔で塩分計を配置した。この他、2004 年の観測では、生物付着対策を施したワイパー式 DO 計 11 台、蛍光光度式 DO 計 2 台、水中照度計 5 台、クロロフィル・濁度計 11 台を適宜配置した。2001 年は 7 月 12 日、2002 年は 9 月 25 日、2003 年は 5 月 27 日、2004 年は 3 月 16 日に観測を開始し、それぞれ約 40 日間、10 分間隔で連続観測を行った。湾口部及び湾中央部、湾奥部には超音波ドップラー流速計（ADCP）を設置し、流速分布を同様に計測した。同時に採水・採泥、垂下式水質計による水温、塩分、DO、クロロフィル、濁度の鉛直分布の多点観測を行った。水質分析は、COD、全窒素、全燐、クロロフィル等、底質分析は、強熱減量、COD、硫化物、全燐、全窒素等を行った。分析は(財)茨城県薬剤師会公衆衛生検査センターに委託した。水質変動の経年変動等のデータ全般にたる検証には、2002 年に当地域に設置された水質自動モニタリング装置である野見湾漁場環境情報システム<sup>4)</sup>が配信しているデータを用いた。なお、塩分の観測値については、特に表層付近において生物付着による出力低下が著しく、設置及び中間メンテナンス直後の数日間のデータしか使用出来なかった。



図-1 観測地点

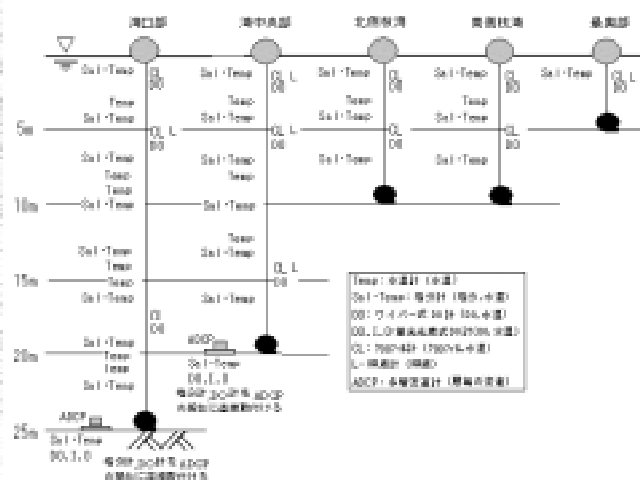


図-2 計測機器の配置例(2004年観測時)

## 2) マイクロバブル発生装置の効果実証試験

調査対象地域の一区画内において、最も水質の悪くなる時期に仮設用のマイクロバブル発生装置を一定期間設置し、その効果を定量的に把握する調査を実施する。予め周囲に水質計を多数設置し、数日間にわたって水質変動を観測し、その後、当装置を稼働させ、その効果、影響範囲等を約2週間～1ヶ月間程度連続観測するものである。

これらの結果は、数値計算で再現、評価し、効果予測の数値モデルに取り込んだ。さらに、当装置を稼働した状況以外に、他の水質改善工法、ソフト的な対策等による水質変化を予測し、それぞれの効果を評価、比較する。効果の評価手法として、溶存酸素収支についての数値計算では、佐々木ら<sup>5)</sup>と同様にマイクロバブル発生地点に溶存酸素のソースを加え、マイクロバブルによるDOの変動を再現した。

## 3) 数値計算の方法

対象とする水域の流況や水質変動、内部潮汐の役割、環境対策の事業の影響等を明らかにすることを目的に、数値計算による検討を行った。野見湾については後述の図-14のとおり50m×50m、鉛直2mの格子に切り、マルチレベルモデルで現象を再現した。平均海水面をx-y平面として、南北方向にx軸、東西方向にy軸、鉛直方向にz軸をとり、それぞれ北向き、西向き、上向きを正とした。図中の縦・横軸にはメッシュ数を示した。計算プログラムは日本造船学会のMECモデル<sup>6)</sup>の一部を引用して次の通り作成した。N.S.の運動方程式は水平方向のみを陽解法で解き、鉛直方向は静水圧近似とし、鉛直流速は連続式より求めた。時間ステップはC.F.L.条件を満たすように1.5秒とした。潮汐は観測値を各時間ステップ毎に沖側の開境界に入力した。水温、塩分、DOは、それぞれ移流拡散式で解き、DOについては生成項を付加した。内部潮汐を再現するため、湾口部で観測した水温と塩分濃度の鉛直分布の時系列値を鉛直及び時間的に補間し、境界条件として開境界へ逐次入力する武内<sup>7)</sup>や上野<sup>8)</sup>らの手法とした。さらに、貧酸素水塊の発生を再現するために、DOについても同様に入力するとともに、全体の初期条件としても使用した。

### 調査結果

1) 図-3(a)に2001年夏の観測期間中の潮位を示す。横軸の一日盛りが1日である。潮汐差は小潮で約1m、大潮で約2m程度である。(b)～(d)に夏の水温鉛直分布の経時変化を示す。縦軸は水深で一日盛りが5mである。この図で水温20～30を濃淡で表記して、内部潮汐の発生状況を表現した。図中の濃淡の境界線即ち等温線の上下変化を見ることにより、躍層の上下運動が確認できる。躍層の動きと横軸の一日盛りとの関係から、内部潮汐の周期は約1日と半日程度の二成分と見られる。その潮位差は縦軸の一日盛りから概ね5～10m程度、湾口部で頻繁にそれを上回り、表面潮汐と比較し内部潮汐の潮位差が格段に大きいことがわかる。このことは、後述する内部潮汐による海水交換量が表面潮汐によるものと比較し、大きいことを示唆している。また、(a)潮位変動との関係から、内部潮汐と表面潮汐の位相は合っておらず、内部潮汐の振幅の大小と表面潮汐の大潮・小潮は無関係である。故に、この内部潮汐は湾内の表面潮汐によって生じたものでなく、他所で生じて湾内に影響していることがわかる。

夏と秋の水温鉛直分布の経時変化の一例を図-4に示す。(a)は夏、(b)は秋の観測値である。横軸は日付で(a)は2001年7月12日から、(b)は2002年9月25日からそれぞれ10日分表示した。縦軸は一日盛りを水深5mとし、水温20～30を濃淡で表示した。(a)では、前述のとおり、大規模な内部潮汐の存在を確認できたが、(b)に示すように、秋になるとすべてが同一色となって、表層から底層まで水温差が無く、時間的にも約26程度で一定であることが明らかである。このことは、躍層が完全に消滅し、夏に見られた大

規模な内部潮汐が秋には存在しないことを意味する。流速については後節で述べる。なお、底層の水温のみに着目すると、夏よりも秋の方が水温が高いことが判明した。このことは、夏よりも秋の方が底質の酸素消費速度が大きく、秋の方が底層の貧酸素化が起きやすい状況にあることを意味する。

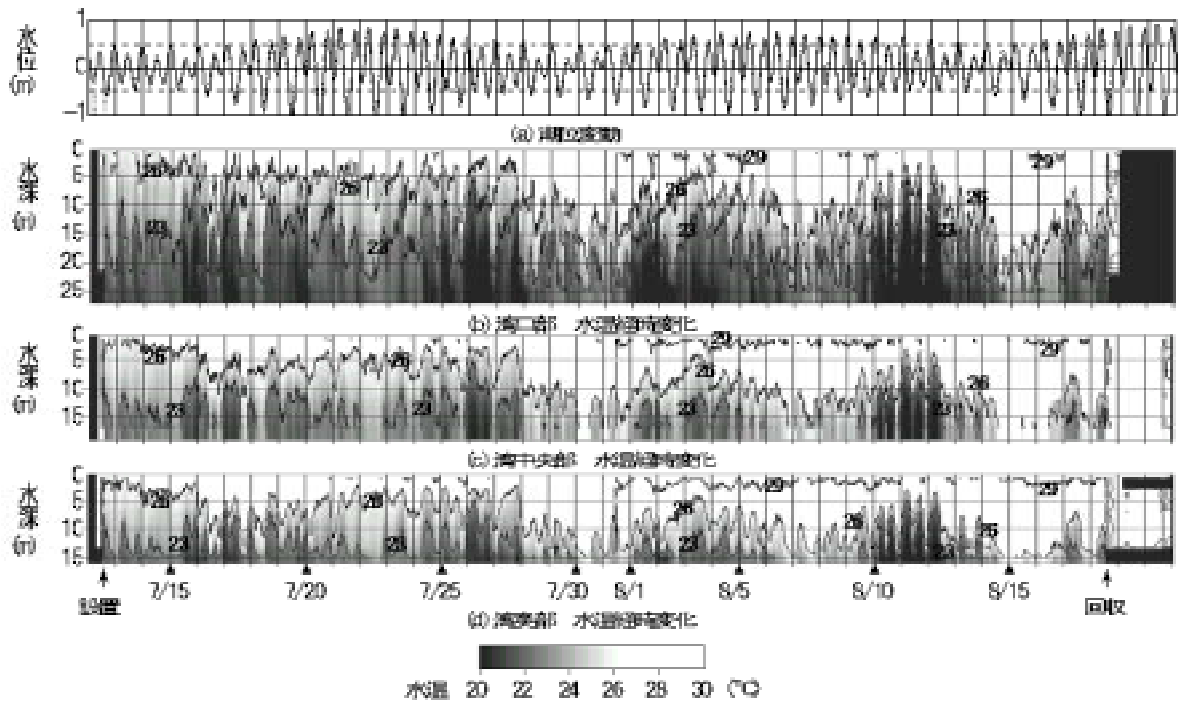


図-3 水温鉛直分布の経時変化(2001年)

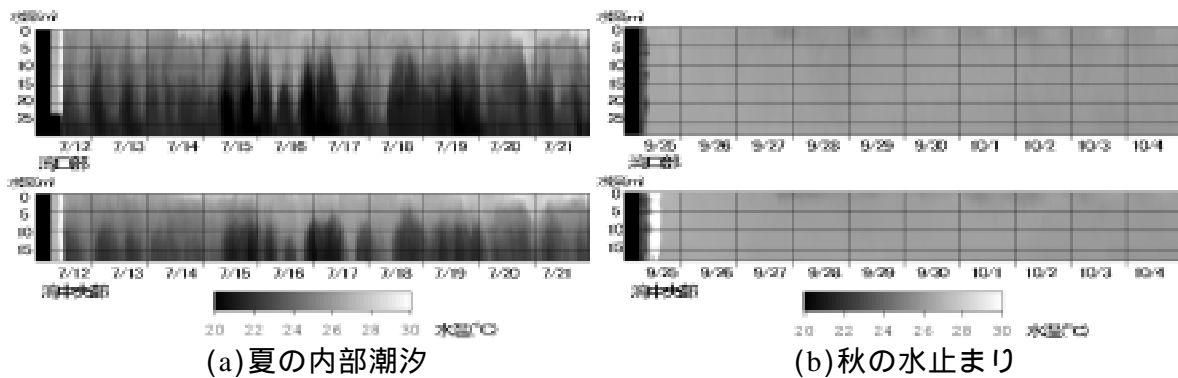


図-4 夏と秋の水温鉛直分布比較

図-5 に季節毎の湾口部における湾軸方向流速の経時変化を示す。左側が湾内方向を正にした湾軸方向流速の折線表示であり、右側がその鉛直分布であり、濃淡で $\pm 20\text{cm/s}$ を表示した。横軸は日付であり、一目盛りが1日である。(c)に示す夏には内部潮汐に伴う流れが顕著であり、前述の通り、二層流を形成している。また、それらは概ね半日程度の周期で交互に繰り返している。流速は $\pm 20 \sim 40\text{cm/s}$ 程度であることがわかる。一方、(d)の秋では流速が $\pm 5\text{cm/s}$ 程度以内に小さくなり、湾内水が停滞する「水止まり」と呼ばれる現象が生じていることが確認できる。なお、(a)に示す春でも流況は秋と同様であることがわかる。(b)の初夏では6月19日午後台風6号が来襲し、表層から $40\text{cm/s}$ 程度の流速で流入し、中・底層から流出する状態が継続し、形成されつつあった成層構造が崩れ混合状態となった。6月19日午後の流速値は、(c)に見られる通り、夏の内部潮汐1

周期分とほぼ同等であり、継続時間も同様であり、換言すれば、内部潮汐1回分が台風来襲時と同程度の流況をもたらすこととなる。内部潮汐が海水交換に及ぼす役割が台風に匹敵するほど大きいことが示唆される。なお、台風来襲時を除けば、初夏の水温は春と夏の間様の様相を呈し、僅かではあるが内部潮汐に伴う弱い二層流が見られはじめる。これらの流速の経時変化図からも、前節と同様に、内部潮汐は7月に明確となり始め8月に最大となって9月に終わることが確認された。

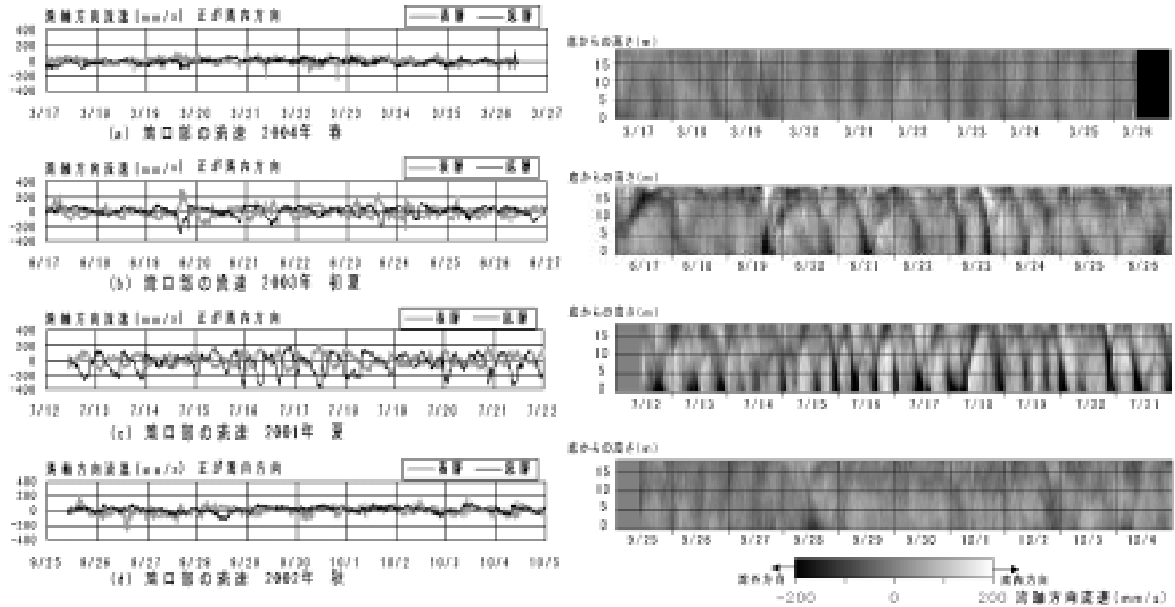


図-5 季節毎の流速の経時変化

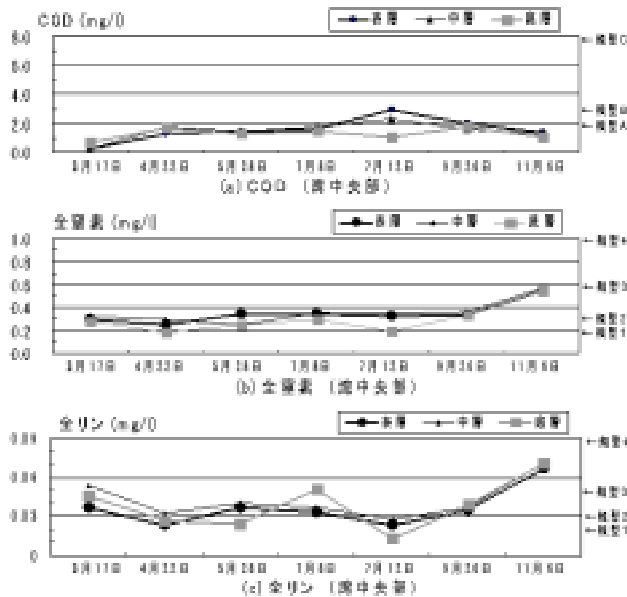


図-6 水質分析結果

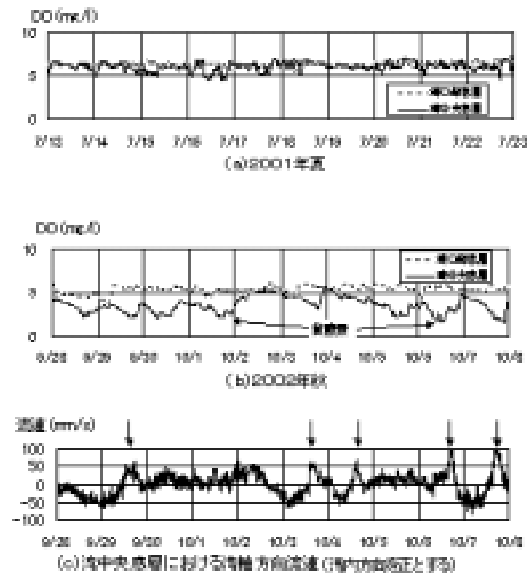


図-7 夏と秋のDOの違い

図-6 に水質分析結果を示す。COD、全窒素、全リンとともに、環境基準<sup>9)</sup>の類型C、類型4の値を縦軸の上限にとった。CODについては、夏に表層の一点で若干高めの値を示したが、底層の方が低く、一時的に給餌の影響を受けた可能性がある。それを含めても、CODは概ね環境基準の類型Aに属し、良好な状態を維持していると言える。全窒素と全

リンは同基準の類型3から4に属しており、富栄養状態の湾であることがわかる。(b)と(c)から、全窒素と全リンの年変動の傾向として、夏よりも秋に高くなる傾向が共通して見られる。

図-7に、溶存酸素濃度の時系列データを示す。横軸一目盛りは1日で、(a)は7月13日から、(b)は9月28日から10日間を表示した。縦軸はDOmg/lである。(c)には、参考までに同期間の湾中央部表層の流速を示す。(a)では湾内底層においても高い値を維持しており、夏の観測期間中に貧酸素水塊の発生は認められなかった。(b)では湾口部底層では高い値を維持していたが、湾中央部底層において貧酸素状態が度々認められた。(b)の湾中央底層では、日中に低下し夜間に回復する傾向が見られた。これは、給餌時刻や養殖魚の活性、表層水の冷却による鉛直混合等が影響した可能性がある。それならば、夏でも同様の傾向を示さなければならないが、その傾向は見られなかった。夏には内部潮汐による海水交換があるため、湾中央底層のDOは、常に外海と同様である湾口部底層のDOに極めて近くなるからであると思われる。その根拠は以下のことから示される。(b)の湾中央底層の貧酸素状態が外海水の流入によって急激に回復する現象が何度か発生した。それらは(c)の矢印で示したように、秋には概して流速が小さくなっているものの、僅かながら外海から湾奥方向への5~10cm/s程度の弱い流れが底層で認められており、貧酸素の回復がその時間帯の直後に見られる。このことから、外海水の若干の流入でも一時的に貧酸素の回復をもたらしたと言え、さらに、底層で20~40cm/s程度の湾内方向流速が生じている夏には、その流れが存在する限りDOの高い状態を維持できる可能性があることを示唆している。

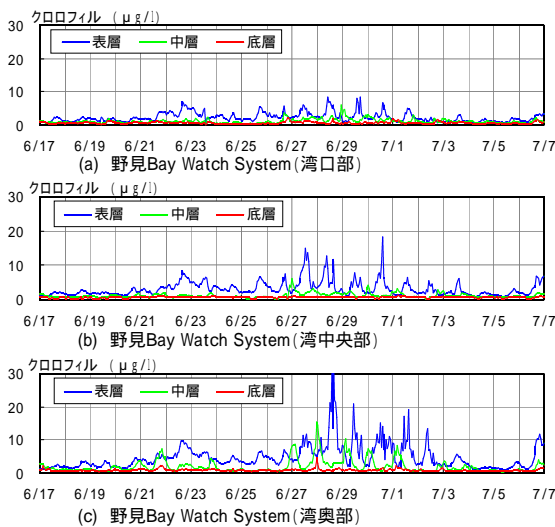


図-8 野見 Bay Watch のクロロフィル値

付表 赤潮発生時の天候(高知地方气象台)

	3:00	9:00	15:00	21:00
6月18日	雨	雨	雨	曇
6月19日	曇	曇	雨	曇
6月20日	晴	晴	晴	晴
6月21日	晴	薄曇	曇	曇
6月22日	曇	雨	雨	曇
6月23日	曇	曇	雨	雨
6月24日	曇	雨	曇	雨
6月25日	雨	薄曇	薄曇	晴
6月26日	晴	快晴	薄曇	晴
6月27日	晴	曇	曇	曇
6月28日	曇	曇	雨	曇
6月29日	晴	薄曇	薄曇	薄曇
6月30日	薄曇	曇	雨	雨
7月1日	雨	雨	雨	曇

野見湾において初夏に発生する主な赤潮プランクトンは、ギムノデニウム・ミキモトイ、アレキサンドリウム・カテナラ、ココロディニウム・ポリクリコイデス、プロロセントラム・デンタータム(以上渦鞭毛藻)、ヘテロシグマ・アカシオ、シャトネラ・マリナ(以上ラフィド藻)等がある。いずれも鞭毛を有し顕著な鉛直運動を行う(福代ら<sup>10)</sup>、本城ら<sup>11)</sup>)ことで知られている。それらの増殖には対数増殖型と急速増殖型があり、ヘテロシグマ・アカシオで1.35回/日の増殖速度を有する報告や室内培養でその数倍以上との岡市<sup>12)</sup>の報告事例がある。このことは、これらの種の赤潮が突然発生するのではなく、増殖を繰り返し徐々に増加する等の何らかの前兆が現れることを意味している。

また、降雨による塩分低下は、河川水による陸域の栄養塩類の供給を意味するが、同報告事例では塩分の低下自体が刺激となって植物プランクトンの増殖が促進されるとある。

いずれにしても、当地域では降雨後の晴天が続けば赤潮の危険性があると言われており、通常の天気予報で概ねの見当がつく。撮影にあたっては、撮影当日の天候が良好であることの他に、航空機の手配の都合上、数日前に撮影準備を申し込んでおき、撮影日の前日に撮影実施の最終確認を行う必要があった。

そこで、赤潮発生時に合わせて航空写真撮影を行うため、当地域に整備された水質モニタリングシステム（野見 Bay Watch System）が地元ケーブルテレビやインターネット上に配信するデータ<sup>13)</sup>を注視し、中層のクロロフィルが夜間に増大し、翌日の日中に表層で増大する傾向が見られ始める状況において、降雨後に晴天が継続すれば赤潮発生の条件を満たし、赤潮が発生すると予想した。図-8の野見 Bay Watch Systemのデータを注意深く観察すると、(c)湾奥部において6月21日にその傾向が見られ、中層において、夜間にクロロフィルのピークが生じ、翌日の日中に表層のクロロフィルが上昇し、渦鞭毛藻やラフィド藻等による鉛直運動が示唆され、この直後に撮影準備を申し込んだ。なお、この時点で図-8の翌日以降のデータは未知である。付表に天気予報の代わりに地上観測日表の天気を示した。6月22～24日の降雨後に晴天が継続するとの予報から、6月26日以降の数日間が赤潮発生日の可能性が高まった。夜間にクロロフィルのピークが再び見られ始めた6月27、28日に、撮影当日の天候も考慮し、29日の撮影実施を決定した。撮影は赤潮着色域の時間変化を比較できるように、9時、12時、15時の3回行った。



写真-1 野見湾全体 6月29日9:00



写真-2 野見湾全体 6月29日15:00



写真-3 北側枝湾付近 6月29日15:00



写真-4 湾奥部 6月29日15:00

写真-1～4は平成15年6月29日赤潮発生時の状況の航空写真である。赤潮域がわかりやすくなるように色調を補正した。午前9時頃には写真-1のとおり湾奥部（写真-1中央下側）のみが着色域であったが、午後3時には写真-2のとおり着色域が北側枝湾（写真-2右手前側）を経由し湾外に広がっていることがわかる。着色部を拡大した写真-3、4から、

発生域は湾奥部と思われ、湾内の流れにより北部沿岸から湾外へ流出していることが明白である。この時発生した赤潮は高知水試らの調査で、ラフィド藻（緑色鞭毛藻）ヘテロシグマ・アカシオであり、最高細胞数が 113,000cells/ml であったと報告<sup>14)</sup>されている。以上より、内部潮汐がまだ弱く海水交換が不十分な時期において、水温が上昇し生産性が高まり、モニタリングシステムで夜間に中層でクロロフィルが増大し、翌日中に表層で上昇する傾向が見られ、かつ、降雨後の晴天という条件を満たせば、概ね予測どおりに赤潮が発生することを確認できた。

本現地観測の主要な結果をまとめると、以下の通りである。

- ・野見湾では、夏期には内部潮汐によって表面潮汐の数倍の海水交換があるが、秋期になるとその内部潮汐が起きなくなり、「水止まり」と呼ばれる現象によって水質が悪化することが確認された。
- ・夏期の高水温と密度成層、秋期の水止まりと貧酸素水塊の発生、初夏の赤潮発生等、野見湾では季節毎に異なる現象が生じ、湾内水質に影響を与えている。
- ・当地域に整備された水質モニタリングシステムは、水質悪化時の餌止め、生け簀の湾外避難等、漁場管理に極めて有効に活用されている。
- ・水質モニタリングシステムから得られるデータを用い、湾内水質の再現・予測計算が可能である。特に内部潮汐の再現には湾口部の水質の時系列データが必要不可欠である。
- ・気象予報と水質モニタリングシステムの監視により、赤潮発生の短期予測が概ね可能である。

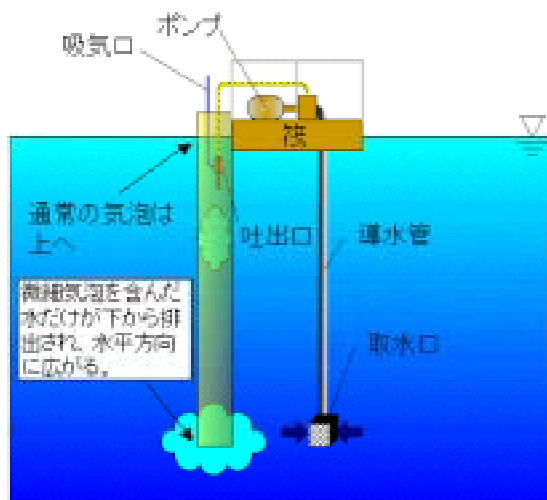


図-9 改良型マイクロバブル発生装置



写真-5 装置の設置状況

## 2) マイクロバブル発生装置の効果実証試験

従来型のマイクロバブル発生装置は気泡を直接水域に排出しているため、発生した気泡は全てがマイクロバブルではなく、通常のサイズの気泡も含まれており、それらが浮上する際に湧昇流を発生させる。それ自体は上下層の混合を促進するため好ましいものではあるが、浮上した分、設置水深での水平方向の広がりが小さく非効率となる。また、貧酸素状態が深刻である底層への酸素供給を目的に、装置を底面近傍に設置した場合には、強い水流がヘド口を巻き上げ周辺水域に濁りを発生させることが懸念される。さらに、強い成層状態下において、下層が無酸素状態でも過飽和となる上層で養殖を行う例が見られるが、当装置による下層への酸素供給が中間の貧酸素水塊の膨張をもたらして上層に影響を与え、かえって被害が増大する事態も懸念される。そこで、従来型のマイクロバブル発生装置に改良を加え、表層に影響を与えずに、主に底層付近の貧酸素水塊だけを狙って



マイクロバブルを送り込み、その貧酸素状態の改善を試みた。

当装置の仕組みを図-9 に示す。吐出口の回りを太いパイプで囲み、底層で取水してマイクロバブルを表層付近で下向きに排出する。すると、通常の気泡はパイプ内を上昇し、マイクロバブルのみを含んだ水がパイプの下から緩やかに排出される。ここで排出された水は、元々底層で取水したものであるから、浮上せず、ある一定の水深帯に水平に広がることになる。効果検証試験では、高知県浦ノ内湾の湾奥の須ノ浦地区に写真-5 のとおり仮設用の筏を設置し、2005 年 8 月 10 日から約 3 週間、当装置を稼働させた。ADCP、水温、塩分、DO、クロロフィル、濁度等の自記式の観測機器及び垂下式の水質計により、マイクロバブル発生装置稼働前後の水質変化を把握した。

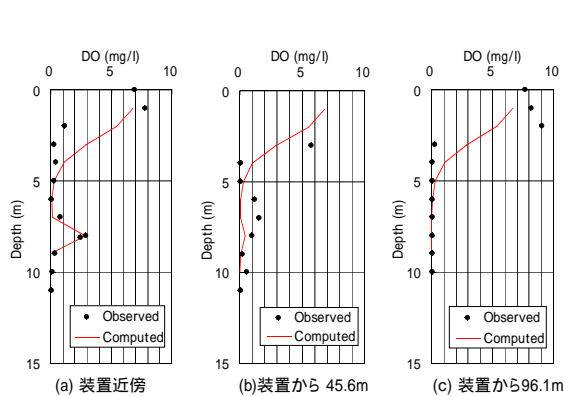


図-10 DO 鉛直分布 (稼働翌日)

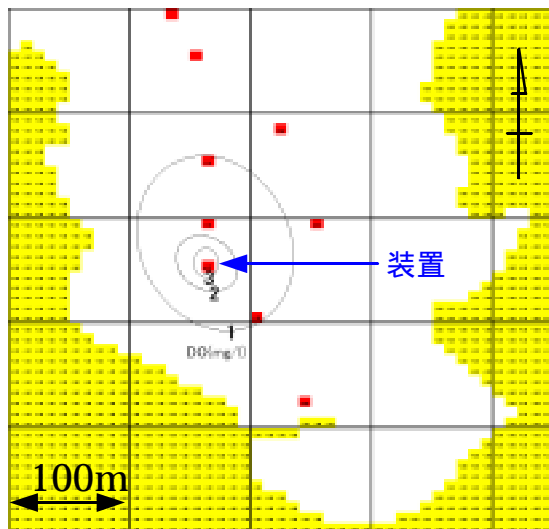


図-11 水深 8m での DO 平面分布 (稼働翌日)

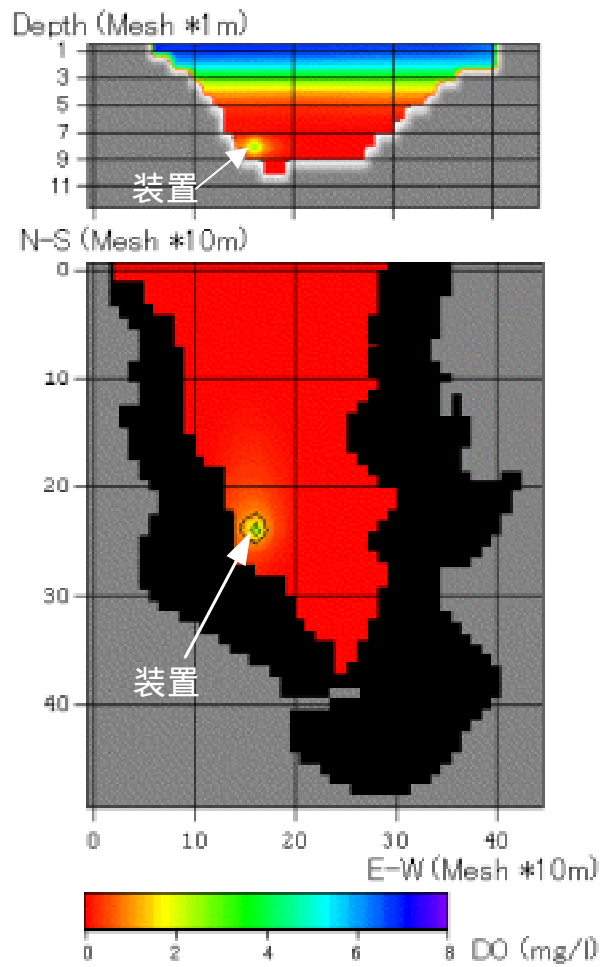


図-12 DO 分布計算結果

図-10 に DO の鉛直分布を示す。装置から十分離れたマイクロバブルの影響を受けない地点図-10(c)では、表層で過飽和、3m 以深が無酸素の状態であった。装置近傍の図-10(a)では、パイプ下端の水深(8m)で DO が上昇しているものの、他の水深帯にはあまり影響しておらず、当マイクロバブル発生装置によって、狙った水深帯への酸素供給が可能であり、最も有機汚濁の進行している底層の浄化に寄与できることがわかる。同時に、本装置による DO の変化が計算によって再現されていることがわかる。図-11 は水深 8m での DO 観測値の平面分布のコンター図である。比較的小規模の装置を用いているため、その影響範囲は限定されるが、無酸素状態であった水深帯にその効果が現れていることがわかる。それは図-12 の再現結果からも確認できる。一方、底面直上を狙ってその DO を上昇させ

た場合、底泥からの栄養塩溶出を抑制する効果が期待できる。細川ら<sup>15)</sup>が提案した栄養塩溶出と直上水の DO との関係式を用いて大阪湾泥のケースを適用すれば、栄養塩溶出速度が  $40\text{mg/m}^2/\text{d}$  ( $\text{DO}=0.0\text{mg/l}$ ) から  $22\text{mg/m}^2/\text{d}$  ( $\text{DO}=3.0\text{mg/l}$ ) へと 45% 低減できると算出された。その他、本研究を通じて明らかとなった問題点としては、(1)無酸素状態からの DO の上昇は装置近傍においても  $3\sim 5\text{mg/l}$  程度のため、極めて貧酸素の強い水域の漁場化には限界があること、(2)ある公共用水域全体を対象に浄化を図るには、当装置を相当な規模で展開しなければ広範な効果が得られにくいこと、(3)発生したスカムの除去・処理を行う必要があること、等が挙げられる。今後、水産関係事業で当施設を補助対象とするには、これらについて対策を講じる必要がある。

### 3) 水質改善対策の効果予測・評価

昨年度は野見湾を対象に、各種環境改善のための対策を仮想的に行い、その効果を予測した。海水導入施設を湾中奥部に整備した場合には、導入地点の水温、塩分、DO を湾外水の値に書き換え、流量を一致させるため計画導水量をメッシュ断面積で除して断面流速として与えた。これにより、海水導入施設の効果があまく再現することができた。計算結果から、導水施設周辺の DO は高い値を維持しているものの、湾全体ではほとんど現況との違いが見られないことが判明した。漁港泊地等の比較的小規模な水域であればその効果は十分得られることは実証済みであるが、湾の規模に対し導水工の設定が過小であったため、その効果は施設周辺のみに限られる。

マイクロバブル発生装置を湾の中央に設置した場合には、マイクロバブル発生地点に溶解酸素のソースを加え、メッシュ断面積で除した断面流速値を計算条件に与えることによってその効果を予測した。その結果、導水施設と同様に、影響範囲は施設周辺のみに限られた。

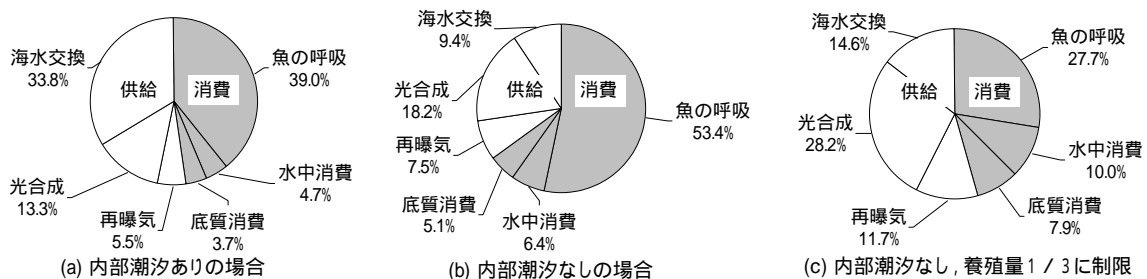


図-13 野見湾全体の酸素収支 (1時間あたり日平均値)

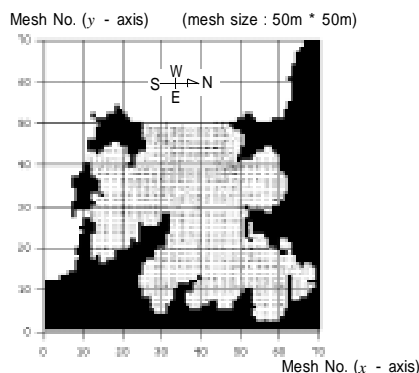


図-14 マーカー配置図

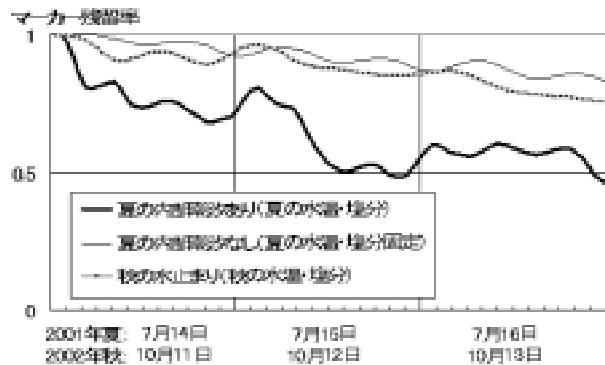


図-15 湾内水の残留率(内部潮汐の有無による差)

これらの効果を湾全体の酸素収支で検討する。図-13 には(a)内部潮汐がある場合と(b)無い場合、及び(c)後者において養殖量を現況の 1/3 に規制した場合の湾内の酸素収支を示す。数値は溶存酸素収支式で用いた酸素消費・生産速度<sup>16,17)</sup>の日平均値を用いている。養殖魚の呼吸量は日中に 4,802kg/h のピークとなる湾内の養殖魚類の総呼吸量推算値の一日平均の 2,401kg/h を用い、(c)はそれの 1/3 とした。水中の酸素消費・生産速度はそれぞれ単位体積あたりの係数 0.006mg/l/h と 0.017mg/l/h に湾内水の全容積  $4.8 \times 10^7 \text{m}^3$  を乗じた 288.0kg/h、816.0kg/h とし、全ケースで一定とした。同様に底質の酸素消費も全ケースで 229.6kg/h、表層での再曝気による酸素供給は 337.0kg/h とした。一方、外海の DO を水温 26、塩分 34psu での飽和状態である 6.53mg/l と想定し、呼吸によってプリの斃死限界である 2.80mg/l まで酸素を消費できる<sup>18)</sup>と考えた。海水交換に伴う外海からの酸素供給は、この差に別途図-14 に示すマーカー移動計算によって図-15 のとおり算定された湾内水の全容積に対する一日あたりの外海水との交換率 0.281 (内部潮汐あり) と 0.0570 (内部潮汐無し) の時間平均を乗じて、それぞれ 2079.4kg/h、421.8kg/h とした。

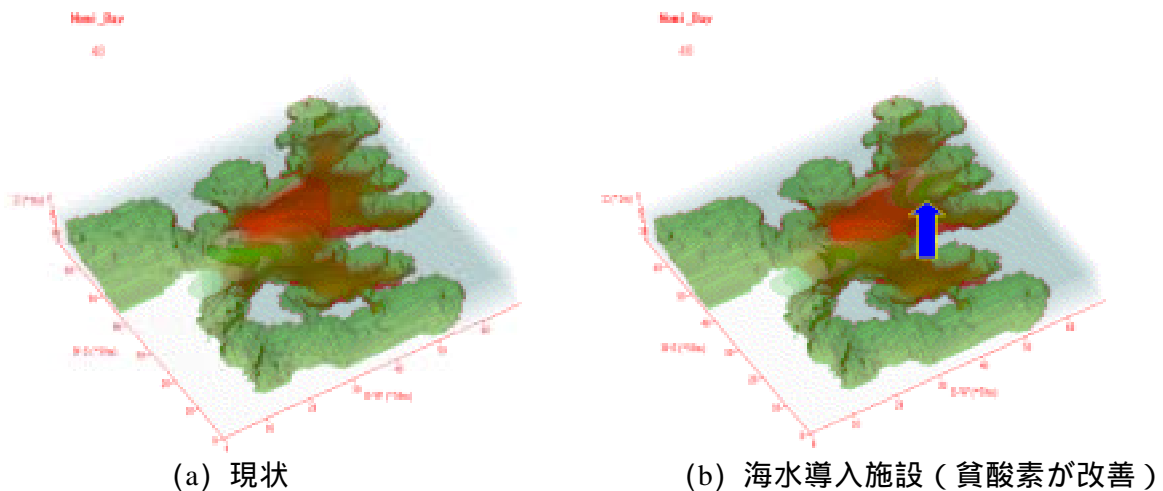


図-16 海水導入施設の有無による野見湾の貧酸素水塊の分布 (赤が貧酸素状態)

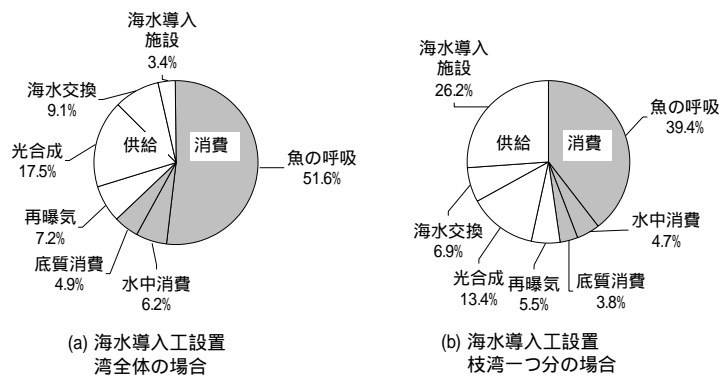


図-17 海水導入施設を設置した場合の酸素収支 (1時間あたり日平均値)

この図から、図-17(a)内部潮汐がある場合には養殖魚の呼吸による酸素消費が大きいものの、内部潮汐による外海からの酸素供給がそれを補い、全体として酸素供給が消費を上回るため養殖漁場は良好な状態を維持できる。ところが、(b)内部潮汐が無い場合には外海からの酸素供給が極端に減少するため、その他が同値でも全体の供給と消費のバランスが崩れ消費過多となり、貧酸素水塊発生に至る状況となったことが明らかである。このため、内部潮汐が無い状況で湾全体の酸素供給と消費が平衡するためには、試行の結果、(c)

養殖量を現況の 1/3 程度以下にしなければならないという計算結果が得られた。

海水導入施設（波高 0.6m で導水量 1.2t/s の志賀島漁港設置型の 10 倍の導水量を仮定）を設置した場合には、図-16 のとおり外海水の流入する導水施設周辺で貧酸素状態の改善効果が見られる。しかし、その効果は図-17(a)に示すように湾全体を対象とするには不足している。図-17(b)において、対象領域を野見湾の枝湾一つ分（容積約 1/10 程度）に限った場合には、良好な状態を維持できることになる。

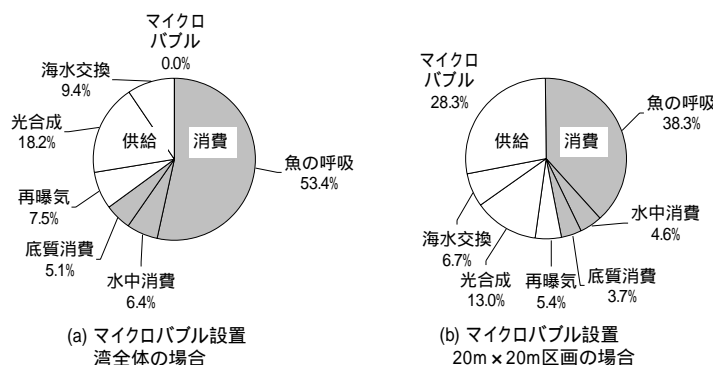


図-18 マイクロバブル発生装置を設置した場合の酸素収支（1時間あたり日平均値）

一方、マイクロバブル発生装置を設置した場合、本年度浦ノ内湾に設置したのと同じ装置を想定し、毎分 800L の溶存酸素飽和状態の水が供給され、前述の斃死限界 2.80mg/l まで酸素が消費されると考え、1 時間あたりの酸素供給量は 0.178kg/h と算定される。この値は湾全体の収支で見ると、図-18(a)のとおり湾全体に対しての酸素供給にはほとんど寄与していない。それは、本年度の浦ノ内湾で行ったマイクロバブル発生装置効果実証試験結果が示すように、効果が装置近傍に限られていることからわかる。試行の結果、図-18(b)のとおり 20m x 20m の区画に限定した場合に、良好な状態を維持できることになる。即ち、同規模の装置を用いるとすれば、それだけの間隔で設置する必要があるとの計算結果となった。

以上、閉鎖性の強い水域における様々な水理現象や水質変動の機構について、現地観測及び数値計算により解明し、海水導入施設やマイクロバブル発生装置の効果予測を行ってきた。マイクロバブル発生装置については、実証試験を行い、現地における様々な問題点等を明らかにするとともに、必要とされる施設規模、有効範囲について算出した。なお、これらの算出にあたって用いた酸素生産・消費等の諸係数は本文中に明記したので、他の条件で適用する際には、該当部分をそれぞれの水域にあった係数に修正する必要がある。

### 考察

本研究により対象水域の流動と水質変動機構が数値計算によりモデル化され、それを用いた事業効果の予測や代替施策の検討の過程が示された。これらは事業採択や工法の選択時における検討方法の一例として、今後の事業の推進に資するものである。

また、高知県野見湾（野見漁港）に整備された「野見湾漁場環境情報システム」は、湾口部等の水質を自動的に観測してケーブルテレビやインターネットで配信している。このデータを境界条件として本研究成果の一つである湾内の数値モデルに取り込むことにより、湾全域の水質変化を再現することが可能となる。水質予測手法の開発と合わせ、今後同システムを他地域に整備する際に、こうした研究成果をソフトとして事業に付加することによって、その整備効果を増大させることも可能である。

## 摘要

本研究では、対象となる水域の水質改善対策としてハード、ソフトを含めた複数のケースを想定し、これまでに作成してきた水質変動の予測シミュレーションによりその効果について評価を行った。さらに、環境改善対策の一つとしてマイクロバブル発生装置を例に挙げ、極めて有機汚濁の進行した内湾においてその効果の実証試験を行った。本研究は17年度で終了したが、比較的狭い領域かつ実際に蓄養を行う漁港においてもその効果の実証試験を行うことが望ましい。なお、本研究で得られた知見は「自然エネルギーを利用した水域環境改善事業」に引き続き反映された。

## 引用文献

- 1) 山本 潤・時吉 学・佐伯信哉・上野成三(2003)：閉鎖性内湾における秋期の水止まり現象に関する現地観測，海岸工学論文集，第 50 巻，pp.941-945．
- 2) 山本 潤・佐伯信哉(2004)：野見湾での初夏の流況と水質変動及び赤潮発生を捉える現地観測，海岸工学論文集，第 51 巻，pp. 951-955．
- 3) 上野成三・中山哲巖・山本 潤(2004)：野見湾における観測システムと数値モデルを統合した流動予報システムの開発，海岸工学論文集，第 51 巻，pp.326-330．
- 4) 嶋崎 昭・永田良助・橋田 茂(1999)：豊かな漁港集落を目指して - C A T V 回線による高度情報化について - ，第 44 回全国漁港建設技術研究発表会，pp.13-19．
- 5) 佐々木淳・小出摩耶子・長田正行・柴山知也・磯部雅彦(2003)：東京湾三番瀬における微細気泡発生装置を用いた青潮水改善効果の数値的検討，海岸工学論文集，第 50 巻，pp.981-985．
- 6) 日本造船学会(2000)：M E C モデルワークショップ(第 1 回)，日本造船学会海洋環境研究委員会海洋モデル検討専門委員会，107p．
- 7) 武内智行(1996)：内部潮汐を考慮した湾の流況予測シミュレーション，海岸工学論文集，第 43 巻，pp. 1141-1145．
- 8) 上野成三・灘岡和夫・高山百合子・勝井秀博(1999)：内部潮汐を考慮した英虞湾の流動シミュレーション，海岸工学論文集，第 46 巻，pp. 466-470．
- 9) 環境庁(現環境省)(2003)：水質汚濁に係る環境基準について，別表 2，生活環境の保全に関する環境基準，環境庁告示第 59 号，改正平 15 環告 123．
- 10) 福代康夫・高野秀昭・千原光雄・松岡敷充(1990)：日本の赤潮生物 - 写真と解説 - ，内田老鶴圃，pp.346-347．
- 11) 本城凡夫・松山幸彦(2000)：赤潮植物プランクトン，月刊海洋，号外 No.21，総特集 海洋植物プランクトン ，pp.76-84．
- 12) 岡市友利(1997)：赤潮の科学(第二版)，恒星社厚生閣，pp.255-264．
- 13) 上野成三・永田良助・山崎英活・中山哲巖(2002)：赤潮・貧酸素をリアルタイムに観測する野見湾漁場環境情報システム(nomi BAY WATCH STSTEM)の開発，海岸工学論文集，第 49 巻，pp.1531-1535．
- 14) 高知県水産試験場・高知県中央漁業指導所(2003)：6 月 27 日に行った野見湾プランクトン検鏡結果について，平成 15 年 6 月 27 日付け須崎市水産課宛事務連絡．
- 15) 細川恭史・三好英一・堀江毅(1981)：栄養塩溶出速度の温度・DO 依存性について，港湾技研資料，No.405，39p．
- 16) 高知県水産試験場(1977)：魚類養殖環境自家汚染防除技術開発試験 - ，昭和 51 年度指定調査研究総合助成事業研究報告書，48p．
- 17) 高知県水産試験場(1999)：平成 9 年度高知県水産試験場事業報告書，第 95 巻，333p．
- 18) 井上裕雄(1977)：養殖漁場環境の管理．浅海養殖と自家汚染(日本水産学会編)，pp.88-108，恒星社厚生閣．

