

令和2年度
根岸湾における貧酸素水塊対策の評価に係る業務

業務報告書

令和3年3月

神奈川県水産技術センター
株式会社 日本海洋生物研究所

目次

1. 業務の目的.....	1
2. 履行期間.....	1
3. 業務内容.....	1
3.1 根岸湾の貧酸素水塊の現状分析.....	1
3.2 改善効果の評価.....	1
3.3 プレゼン資料の作成.....	1
4. 実施結果.....	2
4.1 根岸湾の貧酸素水塊の現状分析.....	2
4.1.1 湾内の貧酸素水塊の分布の特徴及び発生機構.....	2
4.1.2 湾内の貧酸素水塊が発生・滞留しやすい環境の特定と悪化要因.....	5
4.1.3 貧酸素水塊が発生・滞留しやすい環境が底質や底生生物に与える影響.....	6
4.2 改善効果の評価.....	10
4.2.1 数値モデルの構築.....	10
4.2.2 対策案の選定.....	20
4.2.3 対策案のシミュレーション結果に基づく貧酸素水塊緩和効果.....	24
4.2.4 緩和効果が底質および底生生物に及ぼす影響.....	41
4.3 プレゼン資料の作成.....	43

【参考文献】

1. 業務の目的

令和2年度根岸湾における貧酸素水塊対策の評価に係る業務（以下「本業務」という。）は、平成29年度から令和元年度にかけて実施した「東京湾貧酸素水塊対策のための数値モデル開発業務」で作成した根岸湾内の流動に係る数値モデルを用いて、シミュレーションにより根岸湾における具体的な貧酸素緩和策の有効性について評価することを目的とする。

2. 履行期間

自 令和2年7月14日
 至 令和3年3月24日
 全体工程の実績を表3-1に示した。

3. 業務内容

3.1 根岸湾の貧酸素水塊の現状分析

過去に実施された「東京湾貧酸素水塊対策のための数値モデル開発業務（平成29年度～令和元年度）」（以下、「数値モデル開発業務」）および「根岸湾における底層環境実態解析業務（平成30年度～令和元年度）」（以下、「底層環境実態解析業務」）の成果を整理し、次の事項について解析した。

- ① 湾内の貧酸素水塊の分布の特徴及び発生機構
- ② 湾内の貧酸素水塊が発生・滞留しやすい環境の特定と悪化要因
- ③ ②で特定した環境が底質や底生生物に与える影響

3.2 改善効果の評価

覆砂、マウンド造成、作濇などの貧酸素化の緩和策のうち、根岸湾において効果が見込める複数（6ケース）の対策案を選定し、各案のシミュレーションの結果に基づいて貧酸素水塊の緩和効果の評価するとともに、その効果が底質及び底生生物に及ぼす影響を考察した。

3.3 プレゼン資料の作成

とりまとめ結果を簡潔に示すプレゼン用パワーポイントを作成した。

表 3-1 全体工程（実績）

項目 \ 月	7	8	9	10	11	12	1	2	3	備考
(1) 貧酸素水塊の現状分析		←→								
(2) 改善効果の評価										
①対策案の選定		←→								
②現況計算		←→								
③予測シミュレーション					←→					
④効果の評価・考察					←→					
(3) プレゼン資料の作成					←→				○	必要に応じ随時資料提供
(4) 報告書作成							←→			
(5) 打ち合わせ		○7			○6		○21		○4 ○23	3/23業務完了

4. 実施結果

4.1 根岸湾の貧酸素水塊の現状分析

4.1.1 湾内の貧酸素水塊の分布の特徴及び発生機構

神奈川県が実施した 2017 年から 2019 年の定点観測結果では、根岸湾内で底層に貧酸素水塊（溶存酸素量 $\leq 2.5\text{ml/L}$ ）が確認されたのは 2017 年 5 月～10 月、2018 年 7～9 月および 2019 年 5 月～11 月であり、同様に観測が行われた横浜港内や京浜運河といった北側のごく沿岸域や東京湾中部に比べて貧酸素水塊の存在する期間は短い傾向があった（図 4-1）。

「数値モデル開発業務」では、根岸湾内の定点観測結果に加え、長期間の連続観測、酸素消費速度等に関する室内実験およびシミュレーションモデルの構築が行われ、これらの解析結果から、根岸湾の三酸素水塊の発生機構について、以下のとおり整理されている。

(1) 湾内の貧酸素水塊の分布の特徴及び発生機構

根岸湾における貧酸素水塊は次のパターンにより発生すると考えられた（図 4-2）。

①根岸湾内で進行する貧酸素化

- ・気温上昇や降水量増加に伴う成層化で鉛直混合が阻害され、底層への酸素供給量が減少する。
- ・湾内では流動性が低下する小潮期に酸素供給量の減少により底層の D0 が徐々に低下することにより、貧酸素化が進行する（図 4-3）。
- ・湾奥の入江部や窪地には底質に有機物が集積しており、酸素消費速度が相対的に高い。
- ・さらに、湾奥の入江部や窪地は海水交換が制限されているため、酸素消費量が酸素供給量より過多となり、貧酸素水塊が発生、滞留しやすい。

②根岸湾の外から進入する貧酸素水塊

- ・根岸湾外（東京湾）の底層に外洋系の低温・高塩分で比較的 D0 の高い水塊が分布する時は、根岸湾外からの底層水流入（西向きの流れ）は湾内の底層 D0 を上昇させる傾向がある。
- ・根岸湾口に東京湾奥部等で形成された大規模な貧酸素水塊が拡大もしくは南下している場合には、潮流や外洋系水の動きに伴って湾内に貧酸素水塊が進入する。この時の根岸湾内の D0 低下は短時間で進行し、大規模に生じることがある。
- ・侵入した貧酸素水塊が湾内に停滞する場合があります、特に、湾奥の入江部や窪地は貧酸素水塊の解消が遅れる傾向がある（③）。

(2) 発生頻度

上記①、②について、その年の気象や外海系水の流入等の条件により発生頻度は異なるが、平成 H29 年度から R1 年度の 3 ヶ年の定期観測および連続観測データから推測すると、根岸湾では①の発生メカニズムによる貧酸素水塊発生は湾奥の入江部や窪地を中心に常態化しており、長期化する傾向がある。一方、②の発生メカニズムによる貧酸素水塊は、東京湾奥部等で形成された大規模な貧酸素水塊が拡大もしくは南下、その湧昇もしくは中層化、根岸湾底層に流入する流れの形成などの条件が揃った時にイベント的に発生し、根岸湾口部の水塊構造の変化により比較的短期間で変動する。

(3) 貧酸素水塊の影響緩和策

①の発生メカニズムに対しては、根岸湾内における底層の酸素消費速度の抑制や海水交換の促進を目的とした覆砂、マウンド造成等の漁場改良によって改善される可能性がある。その改善効果については、幾つかの改善方法と改善面積について生態系モデルを用いてシミュレーションを行い評価する必要がある。

②の発生メカニズムに対しては、東京湾全域の貧酸素水塊の発生と移動に対処するため、根岸湾内の局所的な漁場改良等では直接的な改善効果は見込めないと予想される。

このため、本業務では①の根岸湾内で発生する貧酸素水塊の改善を目的とした対策を検討し、その有効性について評価する。

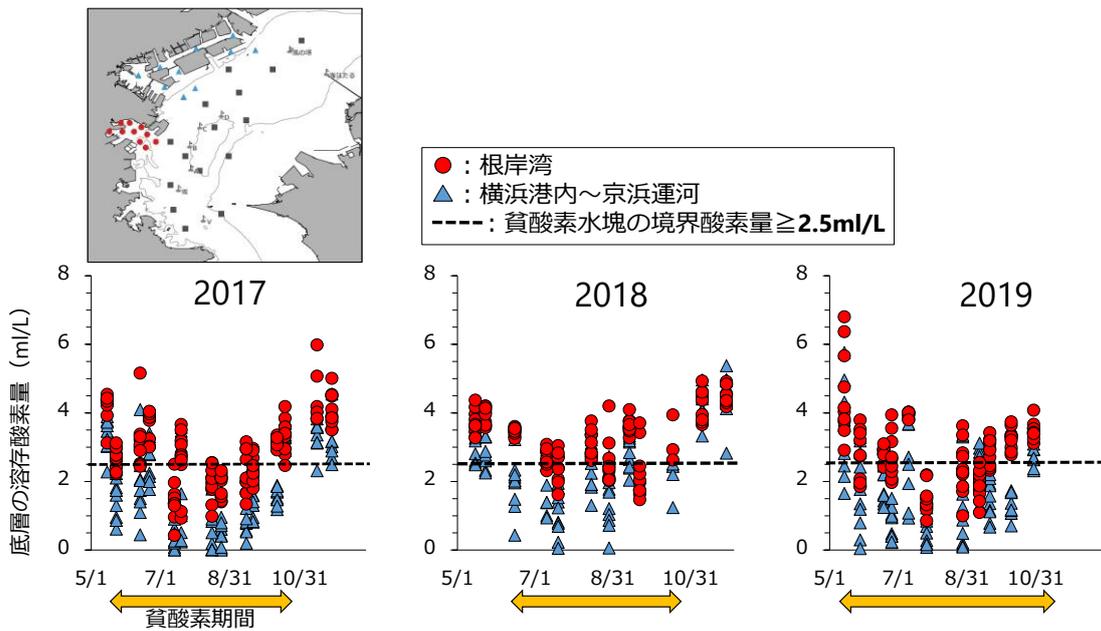


図 4-1 神奈川県定点観測結果に基づく貧酸素水塊の発生時期

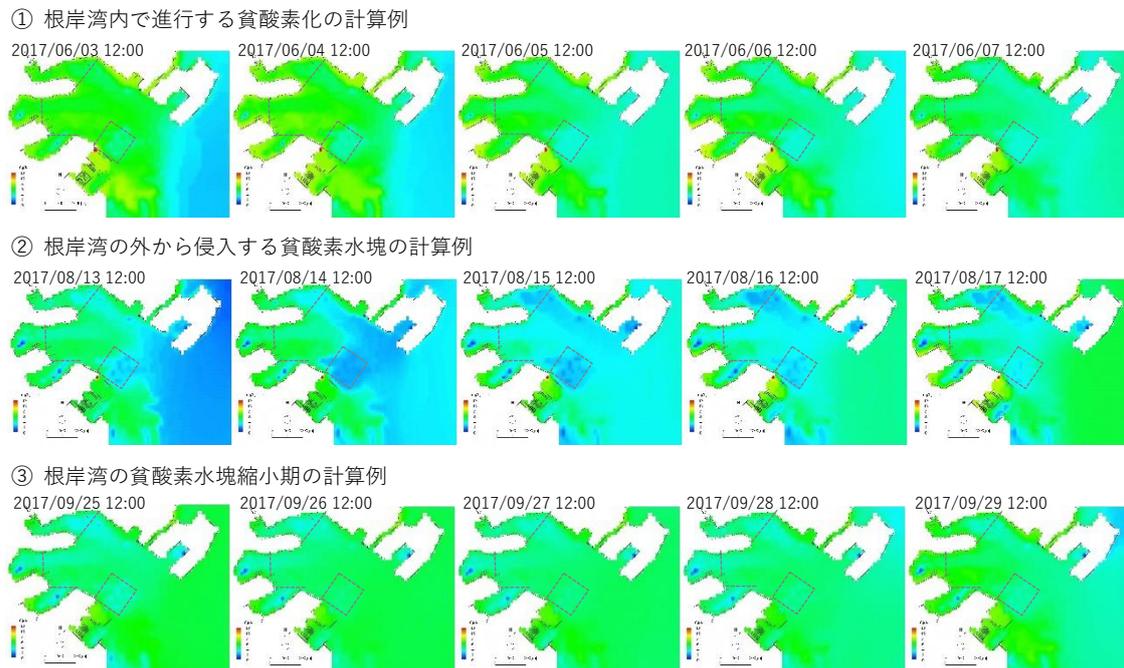


図 4-2 底層 DO (数値シミュレーション結果、B+1m 層) の分布と変化
 (令和元年度東京湾貧酸素水塊対策のための数値モデル開発業務報告書より作成)

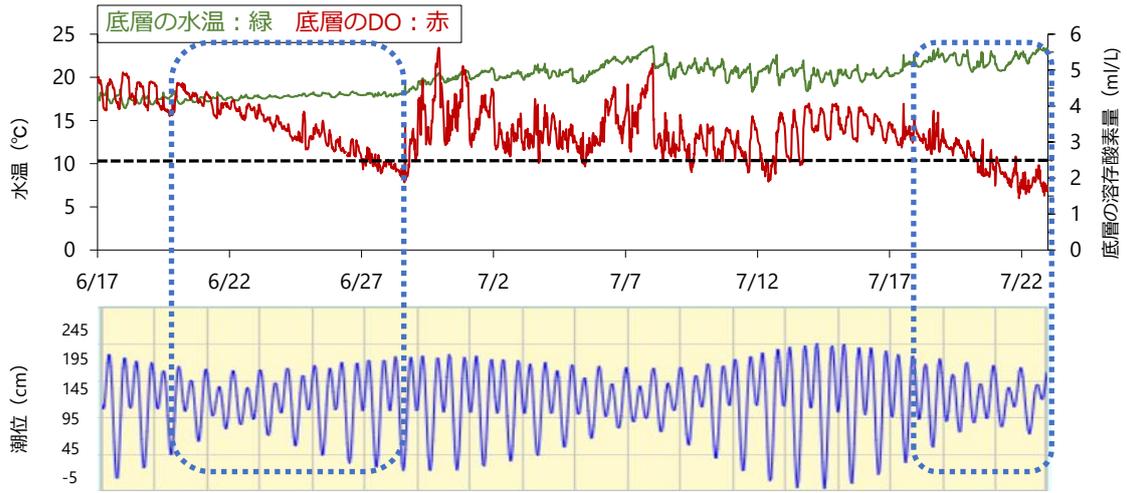


図 4-3 2018 年 6~7 月の根岸湾底層の水溫・DO と潮位 (横浜・本牧) の変化

4.1.2 湾内の貧酸素水塊が発生・滞留しやすい環境の特定と悪化要因

「底層環境実態解析業務」の調査結果から根岸湾の底質の水平分布をみると（図 4-4）、湾中央部と湾北東部に強熱減量が 5%以下、シルト・粘土分が 50%以下と比較的底層環境が良好な底質が分布し、湾奥部および湾口南側に強熱減量 7%以上、シルト・粘土分が 80%以上と底層環境の悪化した底質が分布する傾向があった。また、T-N、T-P の水平分布も底質 3 項目と同様に湾中央と湾北東部にかけて含有量が低く、湾奥および湾口南側で含有量が高くなっており、有機物量に対応した分布が認められた。一般に、有機物の堆積や再懸濁には流れや波浪などの外力が作用する（中川, 2002）。根岸湾では、湾中央部の水深がやや浅い場所と湾北東部では潮汐流などの影響により流動性が比較的高く堆積物が堆積しにくい、閉鎖的な湾奥部と湾口南側の浚渫窪地内では流動性が低くなるため有機物が堆積しやすいと推察される。

底泥の有機物は分解に伴い栄養塩を水柱に回帰させるとともに、溶存酸素を消費して水域の貧酸素化の要因となる。また、嫌気的環境になると無機態の窒素、リンの溶出が促進され、より多くの栄養塩が底泥から水柱に回帰する。信澤ら（2005）、小川ら（2008）は、横浜港および東京港野鳥公園で採取した強熱減量が 2.31～11.12%の範囲の底泥を用いて室内実験を行い、強熱減量が高くなるほど酸素消費速度が高くなることを報告するとともに、過去の覆砂により強熱減量、COD、T-N、T-P が低い底泥はこれらの値が高い地点と比べて栄養塩溶出速度も小さいことを示した。根岸湾の底質の測点間の差は、既往の実験結果と比べて同程度に大きいと、強熱減量や T-N、T-P 含有量の低い湾中央から北東部の海域では酸素消費速度、栄養塩溶出速度が低く、その周辺部である湾奥や湾口南側の海域では酸素消費速度、栄養塩溶出速度が高いと考えられる。このため、根岸湾における酸素消費速度、栄養塩溶出速度を評価し対策を検討するにあたっては、底質の水平分布を考慮する必要がある。

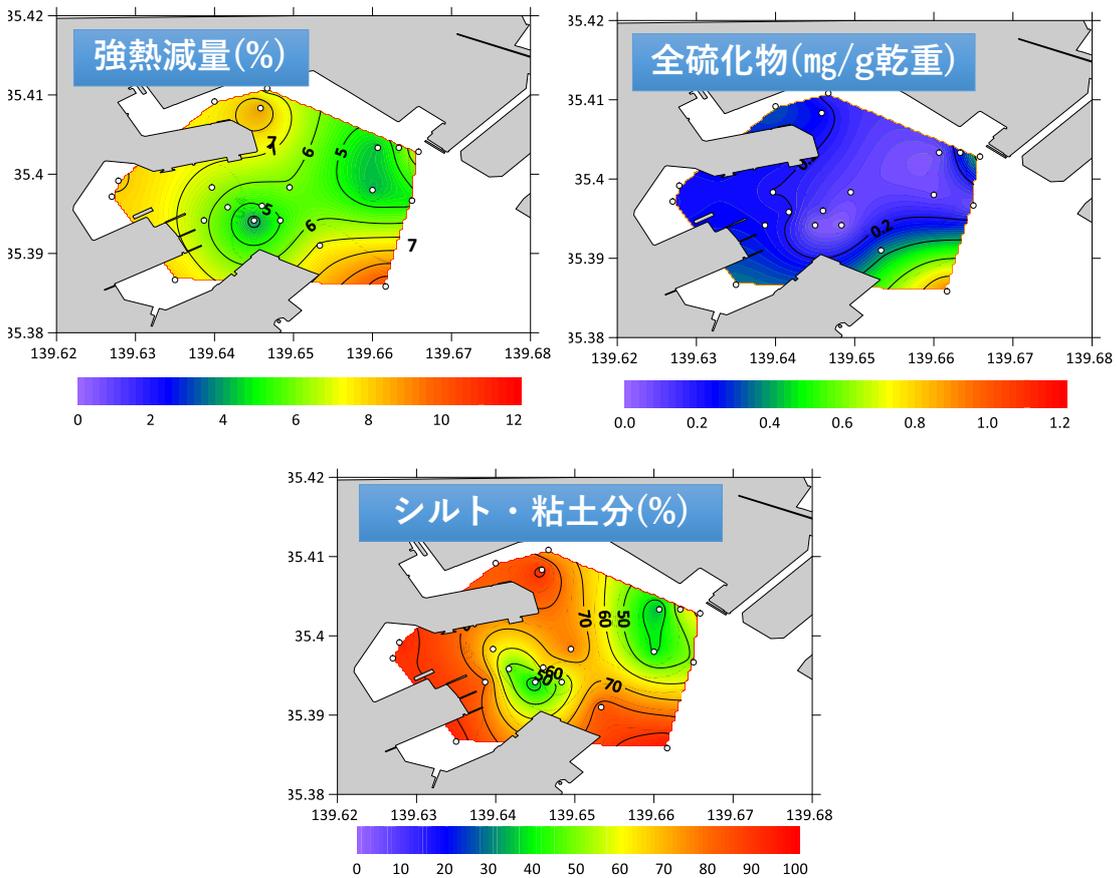


図 4-4 底質 3 項目（強熱減量、全硫化物、シルト・粘土分）の年平均値の水平分布

4.1.3 貧酸素水塊が発生・滞留しやすい環境が底質や底生生物に与える影響

底層の貧酸素化が生物に与える影響について、柳（1989）は、底生生物が正常に分布するために2.5ml/L以上の溶存酸素量が必要であるとしている。また、(社)日本水産資源保護協会(2018)によれば、溶存酸素量3.0ml/Lは魚類・甲殻類に生理的変化を引き起こす臨界濃度、神奈川県が貧酸素水塊の境界としている溶存酸素量2.5ml/Lは貝類に生理的変化を引き起こす臨機濃度であるとともに甲殻類の致死濃度、溶存酸素量1.5ml/Lは底生生物の致死濃度とされる。さらに、貧酸素化がさらに進行して無酸素状態となった水塊には硫化水素が蓄積し、湧昇して東京湾奥などでしばしば漁業被害や異臭をもたらす青潮現象の原因となるほか、硫化水素による酸素消費が加わることにより貧酸素化を促進あるいは長期化させる（宮氏ら, 2017、宗景ら, 1992）。

(1) 「東京湾における底生生物等による底質評価方法」

「底層環境実態解析業務」では、2 ヶ年の夏季の底質分析結果と底生生物の出現状況を用い、七都県市首脳会議環境問題対策委員会水質改善専門部会が平成11年に策定した「東京湾における底生生物等による底質評価方法」に基づく底層環境の評価を試み、その結果を図4-5に示した。この評価方法では、①底生生物の総出現数、②①に占める甲殻類の比率、③底質の強熱減量および④優占種上位3種における指標種の出現状況により各々0～4点の評点を与え、合計点に応じて底質を5区分に分類する(表4-1)。湾奥の入江(St.5～St.8およびSt.14)や窪地(St.20)では、一時的に無酸素状態の水域となり底生生物が乏しいとされる「環境保全度Ⅰ」もしくは溶存酸素がほとんど無く生物は生息していない「環境保全度0」との評価結果であった。この結果から、根岸湾内でも強熱減量とシルト・粘土分が高い傾向にあり、酸素消費速度、栄養塩溶出速度が高い湾奥部および窪地では、貧酸素水塊が発生・滞留しやすく、底生生物分布に悪影響を与えていると推察された。

その他、「底層環境実態解析業務」で実施した底曳網の試験操業では、スナヒトデやモミジガイは比較的出現数が多く、泥底で卓越して出現することが知られているスナヒトデ(栗原, 1996)の出現量は強熱減量、シルト・粘土分の高い窪地内で最も多かった。また、底質の影響を受けやすいと考えられるヒラメやマコガレイは、餌となる多毛類が多数出現したシルト・粘土分の少ない地点で冬季に漁獲量が増加した。その他にはシログチも底層D0の影響が顕著で、夏季～秋季には出現数が減少した。

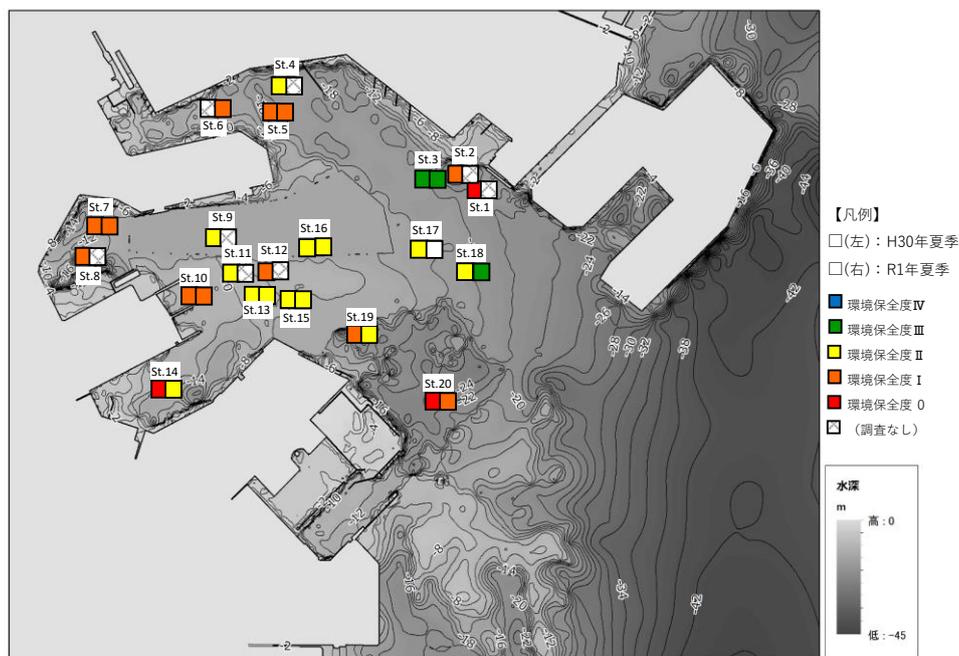


図 4-5 「東京湾における底生生物等による底質評価方法」に基づく夏季底質環境評価結果 (令和元年度根岸湾における底層環境実態解析業務報告書より作成)

表 4-1 「東京湾における底生生物等による底質評価方法」に基づく評価区分

底質環境区分	概要
環境保全度Ⅳ	環境が良好に保全されている。多様な底生生物が生息しており、底質は砂質で好氣的である。
環境保全度Ⅲ	環境はおおむね良好に保全されているが、夏季に底層水の溶存酸素が減少するなど、生息環境が一時的に悪化する場合もある。
環境保全度Ⅱ	底質の有機汚濁が進んでおり、貧酸素水域になる場合がある。底生生物は汚濁に耐える種が優占する。
環境保全度Ⅰ	一次的に無酸素状態水域になり、底質の多くは黒色のヘドロ状である。底生生物は汚濁に耐える種が中心で種類、個体数ともに少ない。
環境保全度Ⅰ	溶存酸素はほとんどなく、生物は生息していない。底質は黒色でヘドロ場である。

(2) 水産用水基準に基づく評価

(社)日本水産資源保護協会(2018)は、海水の交換が制限され、有機物の負荷量が多く、夏季に成層が発達しやすい閉鎖性海域の有機汚染の程度を評価するための合成指標値を提案している。そこで、「底層環境実態解析業務」で2カ年の調査が行われた12測点について、強熱減量(IL)、全硫化物(TS)およびシルト・粘土分(MC)から求める合成指標を算出し、底生生物の出現状況との関係を再解析した。

ここで、合成指標は次式で計算される。計算に用いた底質には2カ年の分析値の平均値を用いた。

$$\text{合成指標} = 0.588(\text{IL}-7.99)/4.52 + 0.559(\text{TS}-0.51)/0.60 + 0.584(\text{MC}-64.9)/30.5$$

各測点の合成指標を図4-6に示した。合成指標は値が大きいかほど貧酸素水塊が発生・滞留しやすい有機汚濁の進んだ環境であることを表し、負の値であれば正常な底質、正の値であれば汚染された底質と判断される。解析対象とした12地点では、St.3、St.13、St.15、St.18、St.16、St.6の6地点が正常な底質、St.10、St.14、St.19、St.7、St.5、St.20の6地点が汚染された底質に区分された。また、合成指標の正・負の別に底生生物の個体数密度と出現種数の季節変化を図4-7に示した。

合成指標が負の値となり正常な底質に区分された測点では、貧酸素耐性の低い甲殻類や移動性が乏しい二枚貝類の出現がみられた。このうち、比較的水深が浅い湾中央部のSt.13、St.15は個体数、種類数が他の測点に比べ多かった。これに対し、湾口部に位置しており水深が深いSt.3、St.18では、カタマガリギボシイソメやその他の多毛類が大部分を占めており、種類数はやや少なかった。このことから、水深の深い湾口部では流動性が高く良好な底質が維持される一方で、移動してくる水塊による一時的な貧酸素化の影響で種類数が減少した可能性が考えられた。また、合成指標が負値ではあるが-0.5以上とやや高い値を示したSt.6やSt.16では、貧酸素耐性を有するシズクガイやシノブハネエラスピオなどの消長により個体数が大きく増減した。この2地点は湾奥部で水深が浅く変化する場所と航路内に位置する測点であり、貧酸素水塊の変動により底生生物の出現状況が変化しやすい測点であると考えられた。

合成指標が正の値となり汚染された底質に区分された測点のうち、合成指標が0.01で水深が最も浅いSt.10では、個体数は多くないものの、令和元年には甲殻類や二枚貝類も出現した。それ以外の5測点は、貧酸素水塊が解消する秋・冬季にシノブハネエラスピオの増加により一時的に個体数が増加したが、甲殻類や二枚貝類の出現はほとんどみられず、調査期間を通して底生生物の個体数・種類数が少ないことから、貧酸素化により底生生物が生息しにくい環境であったと考えられた。特に、水深が最も深い浚渫窪地内のSt.20は、底質の悪化が著しく、底生生物が最も乏しい測点であり、貧酸素水塊の影響を強く受ける測点であることが示唆された。

二枚貝類について、令和元年度の春季と夏季には、合成指標が負の値となった測点を中心に過栄養海域の指標となるチヨノハナガイ、シズクガイが出現したが、秋季と冬季にはこれら二枚貝類はほとんど確認されなくなった。シズクガイは、春季に浮遊幼生の出現ピークを持っており、堆積的な泥底域や、富栄養化の進行した閉鎖湾や河口域などで春から初夏にかけて集中的に出現する傾向がある（斉藤，2006）。また、二枚貝類の中でも貧酸素耐性を有する種であることが知られているが、貧酸素化が強い場合は死滅する（玉井，1993）。根岸湾においても、春～夏季はシズクガイなどの二枚貝類が比較的底質の良好な場所に出現したが、8月以降、根岸湾全域に東京湾から進入する貧酸素の影響が強くなったことで死滅した可能性がある。

一方、令和元年度の秋季および冬季には、シノブハネエラスピオが多く の地点で優占し、特に合成指標が正值の測点でその傾向が強くと見られた。シノブハネエラスピオの出現には夏季の貧酸素化が重要な影響を与えているとされ、貧酸素化によりマクロベントスが衰退する初夏から秋にかけて浮遊幼生が多く、底層の溶存酸素量が回復する時期と浮遊幼生着底の盛期が一致することにより10～11月に優占的に高密度に出現することが知られている（玉井，1982、横山，1982）。根岸湾でも貧酸素からの回復に伴い、死滅した底生生物に代わり貧酸素耐性を有するシノブハネエラスピオ等の多毛類が一早く加入して優占したと考えられる。

以上の結果から、根岸湾内では、良好な底質が維持されている水深の浅い場所や湾口部の流動性の高い場所では、一時的な貧酸素化による影響を受けるものの、貧酸素耐性を有する種を中心に底生生物が維持されるが、水深の深い浚渫窪地内や流動性の低い湾奥部では、底質の悪化により貧酸素水塊が発生・滞留しやすいため、頻繁に底生生物が死滅すると推察された。

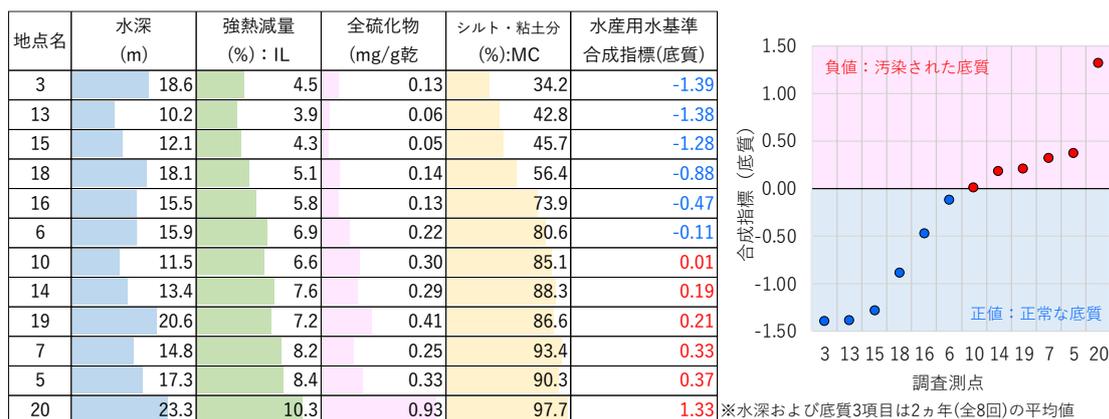


図 4-6 各測点の合成指標

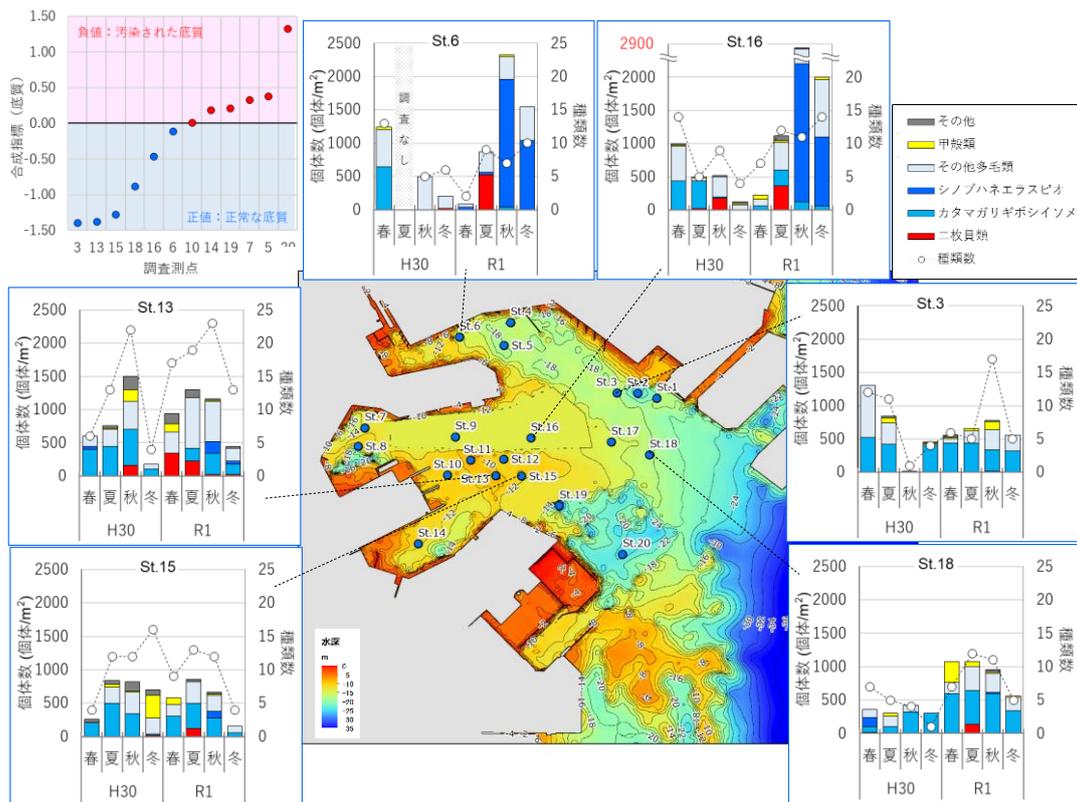


図 4-7(1) 底生生物の個体数密度と出現種数の季節変化（合成指標が負の値の測点）

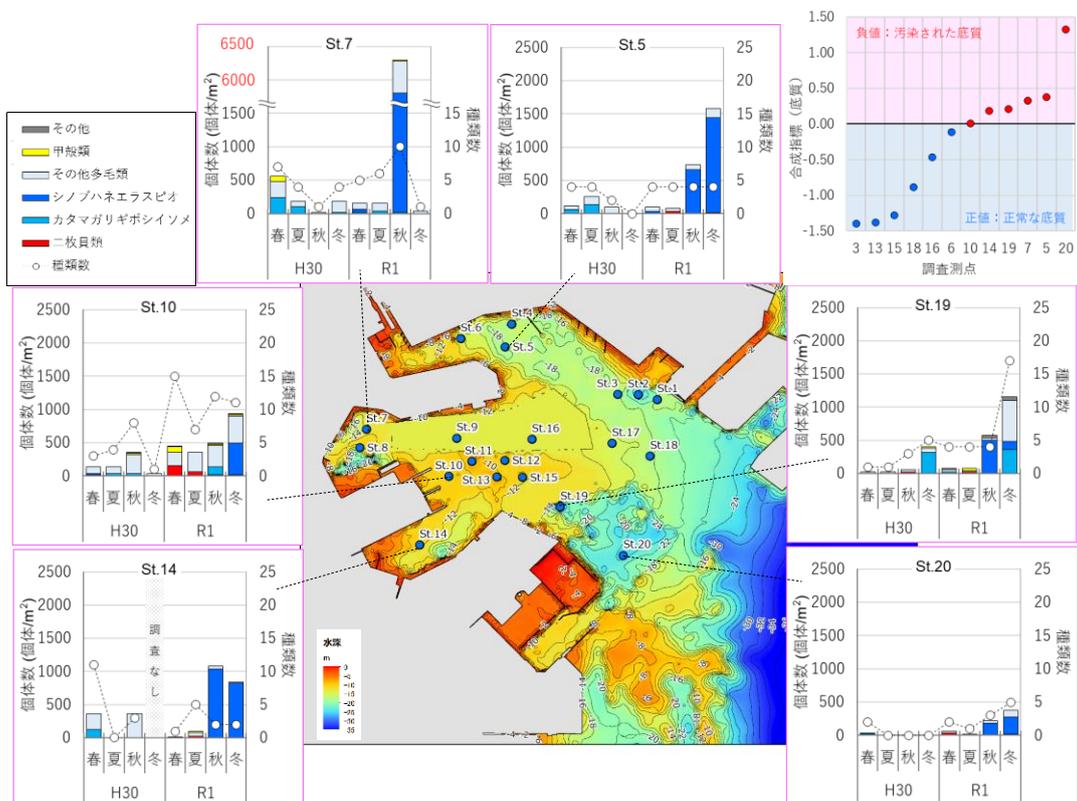


図 4-7(2) 底生生物の個体数密度と出現種数の季節変化（合成指標が正の値の測点）

4.2 改善効果の評価

4.2.1 数値モデルの構築

「数値モデル開発業務」において、根岸湾（狭域）を対象に貧酸素水塊の発生、発達、解消過程を再現でき、且つ影響緩和策による改善効果を予測できる数値モデルが構築され、2017 年および 2018 年を計算対象期間として、既存データを用いた現況の再現計算と観測値との検証結果により、モデルを改良して再現性を向上させるための調整が行われた。

本業務では、この数値モデルを基本としたが、覆砂などの緩和策に伴う底質改善効果を評価するため、「底層環境実態解析業務」で得られた調査結果および既往知見から得られた情報を追加し、底泥による酸素消費速度、栄養塩溶出速度を決定する強熱減量の空間分布と関係式の見直しを行った。

(1) 数値モデルの概要

数値モデルでは、東京湾全域を対象とした広域モデルによるシミュレーション結果を基に、根岸湾を対象とした狭域モデルに境界条件を引き継ぎ、根岸湾におけるシミュレーションを行う。モデルの概要は以下のとおりである。

①東京湾を対象とした広域モデル

流動モデルは、沿岸域に適用される一般的な 3 次元非定常傾圧流動モデル（マルチレベルモデル）を用い、静水圧近似した流れの運動方程式、流量連続式、熱・塩分保存式および状態方程式に基づいて、流速、潮位、水温・塩分の時空間分布を予測するものである（中田，1993）。

広域の流動モデルにおける設定条件を表 4-2 に示した。気温上昇や降水量増加に伴う成層化で鉛直混合が阻害され、底層への酸素供給量が減少する。

生態系モデルは、内湾や湖沼の富栄養化を表現する生態系物質循環モデル（図 4-9）を用い、植物プランクトン、動物プランクトン、懸濁態有機物（デトリタス）、溶存態有機物、無機態リン（リン酸態リン）、無機態窒素（アンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸態窒素）および溶存酸素で構成される低次生態系の物質循環を計算するものである（中田，1993）。

広域の生態系モデルにおける設定条件を表 4-3 に、設定したパラメータの一覧を表 4-4 に示した。なお、表中の T は水温（℃）、Chla はクロロフィル a 濃度（ $\mu\text{g/L}$ ）を表す。

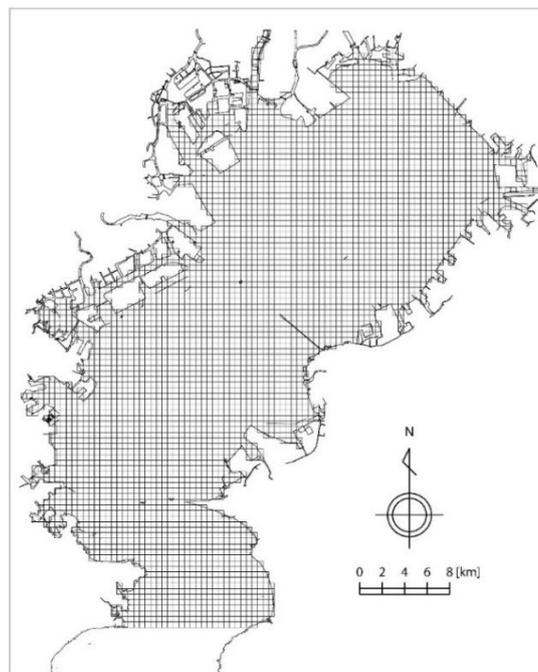


図 4-8 広域モデルの計算範囲と水平方向の計算格子

表 4-2 広域の流動モデルにおける設定条件

条件項目	設定条件																		
計算期間	2017年1月1日0時～2017年12月31日24時																		
対象範囲	東京湾全域																		
水平格子	500 m 等間隔 (図 4-8)																		
水深 (海底地形)	海図、海底地形デジタルデータ (日本水路協会) より設定.																		
直層区分	<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%;">第 1 層: 海面～-02m</td> <td style="width: 50%;">第 11 層: -18m～-20m</td> </tr> <tr> <td>第 2 層: -02m～-04m</td> <td>第 12 層: -20m～-22m</td> </tr> <tr> <td>第 3 層: -04m～-06m</td> <td>第 13 層: -22m～-24m</td> </tr> <tr> <td>第 4 層: -06m～-08m</td> <td>第 14 層: -24m～-27m</td> </tr> <tr> <td>第 5 層: -08m～-10m</td> <td>第 15 層: -27m～-30m</td> </tr> <tr> <td>第 6 層: -10m～-12m</td> <td>第 16 層: -30m～-35m</td> </tr> <tr> <td>第 7 層: -12m～-14m</td> <td>第 17 層: -35m～-40m</td> </tr> <tr> <td>第 8 層: -14m～-16m</td> <td>第 18 層: -40m～-50m</td> </tr> <tr> <td>第 9 層: -16m～-18m</td> <td>第 19 層: -50m～ 海底</td> </tr> </table>	第 1 層: 海面～-02m	第 11 層: -18m～-20m	第 2 層: -02m～-04m	第 12 層: -20m～-22m	第 3 層: -04m～-06m	第 13 層: -22m～-24m	第 4 層: -06m～-08m	第 14 層: -24m～-27m	第 5 層: -08m～-10m	第 15 層: -27m～-30m	第 6 層: -10m～-12m	第 16 層: -30m～-35m	第 7 層: -12m～-14m	第 17 層: -35m～-40m	第 8 層: -14m～-16m	第 18 層: -40m～-50m	第 9 層: -16m～-18m	第 19 層: -50m～ 海底
第 1 層: 海面～-02m	第 11 層: -18m～-20m																		
第 2 層: -02m～-04m	第 12 層: -20m～-22m																		
第 3 層: -04m～-06m	第 13 層: -22m～-24m																		
第 4 層: -06m～-08m	第 14 層: -24m～-27m																		
第 5 層: -08m～-10m	第 15 層: -27m～-30m																		
第 6 層: -10m～-12m	第 16 層: -30m～-35m																		
第 7 層: -12m～-14m	第 17 層: -35m～-40m																		
第 8 層: -14m～-16m	第 18 層: -40m～-50m																		
第 9 層: -16m～-18m	第 19 層: -50m～ 海底																		
湾口潮位条件	神奈川県久里浜と千葉県竹岡における毎時の潮位変動を与えた. 主要 16 分潮 (M2, S2, N2, K2, 2N2, $\mu 2$, $\nu 2$, L2, T2, K1, O1, P1, Q1, M1, O01, J1) から生成した計算潮位で近似し設定.																		
湾口水温・塩分条件	神奈川県が実施した漁場環境調査および浅海定線調査のうち、27d および 27 の調査地点における月 1～2 回の測定値を使用し、時間内挿により時間毎の値を設定.																		
河川流量	東京湾に流入する河川のうち国土交通省により測定されている旧江戸川、中川、荒川、鶴見川、多摩川については、国土交通省 水文水質データベースより設定. 流量が測定されていないその他の河川 (宮川、侍従川、入江川、海老川、印旛放水路、葭川、都川、村田川、養老川、小櫃川、矢那川、小糸川、染川、湊川) については荒川・鶴見川との流量比より設定.																		
海上風	AMeDAS (東京、横浜、三浦、船橋、千葉、木更津)、東京都港湾局 (中央防波堤外側埋立地)、東京湾水質連続観測 (浦安沖、千葉港波浪観測塔、川崎人工島、千葉港口第一号灯標) の毎時の風向・風速データを空間補間した海上風を設定.																		
気象要素	AMeDAS (東京、横浜、三浦、船橋、千葉、木更津) の気温、湿度、日射量、雲量、降水量データを空間補間した気象要素を設定.																		
コリオリ係数	$8.6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$																		
海面摩擦係数	風速の関数																		
海底摩擦係数	0.0026																		
水平渦粘性係数 渦拡散係数	Smagorinsky の経験式により算出.																		
鉛直渦粘性係数 渦拡散係数	乱流モデルにより算出.																		

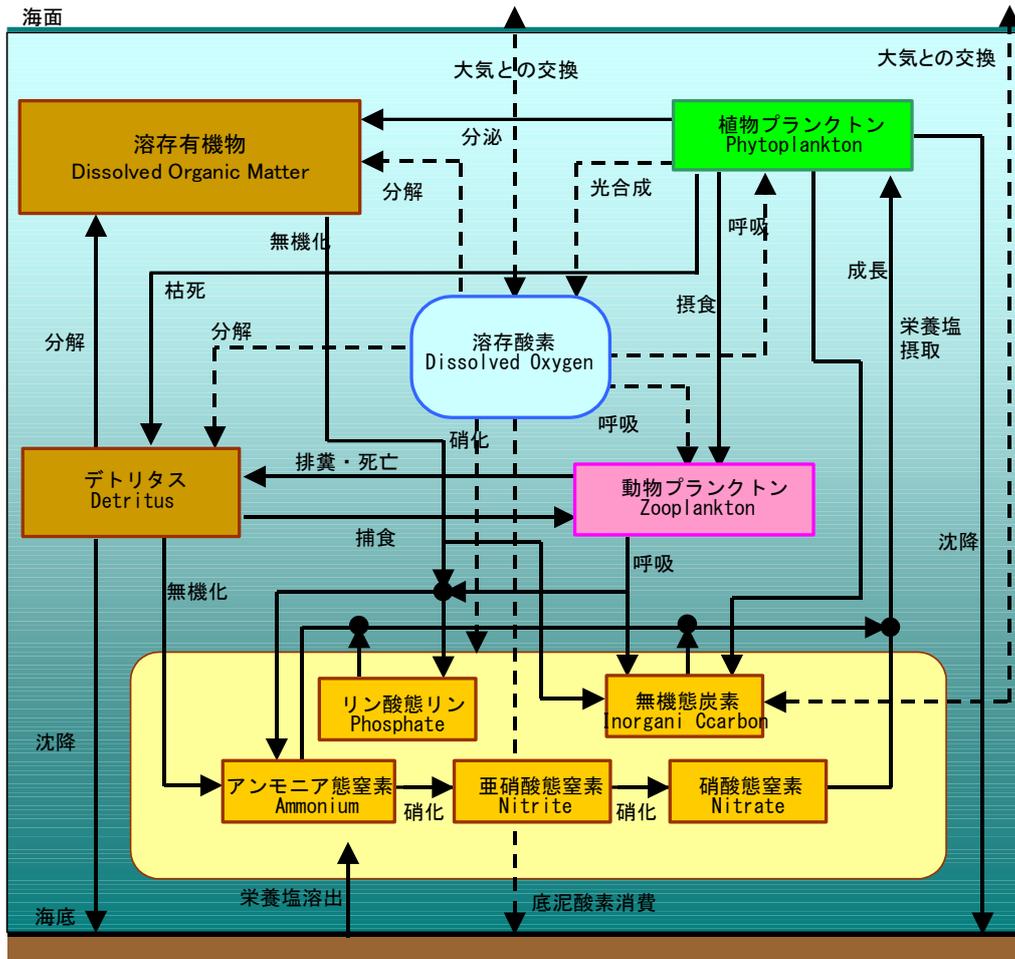


図 4-9 生態系物質循環モデルの概念図

表 4-3 広域の生態系モデルにおける設定条件

条件項目	設定条件
計算期間	流動モデルと同様
対象範囲	
水平格子	
鉛直層区分	
湾口条件	
河川負荷量	各河川の負荷量は、東京都、神奈川県および千葉県公共用水域水質測定結果の流量と栄養塩類より、河川毎の負荷量 (L) と流量 (Q) の関係式 (L-Q 曲線) より設定。
日射量	AMeDAS (東京) の日射量を設定。
底泥酸素消費速度	底質と水温に応じた関数を設定。
底泥栄養塩溶出速度	底質と水温に応じた関数を設定。 リンについては、溶存酸素濃度も考慮した関数を設定。

表 4-4 生態系モデルのパラメータ

(植物プランクトン)

パラメータ	単位	設定値
成長速度	1/day	$0.59 \cdot \exp(0.0633 \cdot T)$
呼吸速度	1/day	$0.02 \cdot \exp(0.0524 \cdot T)$
リンの最大吸収速度	1/day	6.0
窒素の最大吸収速度	1/day	4.0
PO ₄ 摂取の半飽和値	$\mu\text{mol/L}$	1.0
NH ₄ 摂取の半飽和値	$\mu\text{mol/L}$	1.0
NO ₃ 摂取の半飽和値	$\mu\text{mol/L}$	2.0
N 選択摂取のパラメータ	L/ μmol	1.4
P クォータの最大比収量	—	6.0
N クォータの最大比収量	—	3.0
沈降速度	cm/s	1.0×10^{-4}
枯死速度	(mgC/m ³)/day	$5.0 \times 10^{-5} \cdot \exp(0.0693 \cdot T)$
光合成の最適光強度	cal/cm ² /day	150
C/Chla 比	重量比	48.53
C/P 比	重量比	161.3
C/N 比	重量比	15.9
TOD/C 比	重量比	3.6
COD/C 比	重量比	1.372

(動物プランクトン)

パラメータ	単位	設定値
最大摂食速度	1/day	$0.18 \cdot \exp(0.0588 \cdot T)$
飼料制限係数 (Ivlev 指数)	m ³ /mgC	0.007
捕食の閾値	mgC/m ³	0.0
消化効率	%	70.0
総成長効率	%	30.0
基礎代謝速度	1/day	$0.0214 \cdot \exp(0.0637 \cdot T)$
死亡速度	1/day	$6.0 \times 10^{-4} \cdot \exp(0.0693 \cdot T)$
C/P 比	重量比	50.0
C/N 比	重量比	6.0
TOD/C 比	重量比	3.31
COD/C 比	重量比	1.46

(その他)

パラメータ	単位	設定値
光消散係数	1/m	透明度から近似. $0.3373 + 0.0014 \cdot \text{Chla} + 0.0489 \cdot \text{Chla}^{2/3}$
デトリタスの無機化速度	1/day	$0.01 \cdot \exp(0.0693 \cdot T)$
デトリタスの沈降速度	cm/s	5.787×10^{-4}
溶存態有機物の無機化速度	1/day	$0.005 \cdot \exp(0.0693 \cdot T)$
分解余剰物の生成割合	%	25.0
デトリタス中の C/P 比	重量比	63.9
C/N 比	重量比	7.2
TOD/C 比	重量比	3.01
COD/C 比	重量比	1.33
溶存態有機物中の C/P 比	重量比	124.98
C/N 比	重量比	10.0
TOD/C 比	重量比	2.82
COD/C 比	重量比	1.25
硝化速度 (NH ₄ → NO ₂)	1/day	$0.002 \cdot \exp(0.0693 \cdot T)$
硝化速度 (NO ₂ → NO ₃)	1/day	$0.025 \cdot \exp(0.0693 \cdot T)$

②根岸湾を対象とした狭域モデル

狭域の流動モデルにおける設定条件を表 4-5 に示した。鉛直方向は広域モデルよりも層の厚さを細かくし、最小 1m ピッチの 27 層区分とした。また、狭域モデルでは、根岸湾内にある電源開発株式会社における取放水も考慮し、ご提供頂いたデータを基に取放水量と放水温度を 1 時間ごとに設定した。

狭域の生態系モデルにおける設定条件を表 4-6 に示した。対象海域をはじめ格子分割、海底地形、鉛直層区分、計算期間など基本条件は、狭域の流動モデルの設定と同じとした。海域の流れ場（水平、鉛直流速）は、狭域の流動モデルにより計算された 1 時間ごとの流れ場の結果を利用した。

表 4-5 狭域の流動モデルにおける設定条件

条件項目	設定条件	
計算期間	2017 年 1 月 1 日 0 時～2017 年 12 月 31 日 24 時	
対象範囲	根岸湾を含む海域（東西 11.5km×南北 21km）（図 4-10）	
水平格子	水平方向は最小 100m～最大 250m の不等間隔格子（図 4-11） 根岸湾内は 100m 格子で分割。	
水深（海底地形）	海図、海底地形デジタルデータ（日本水路協会）より設定。（図 4-11）	
直層区分	第 1 層：海面～-02m (1m) 第 2 層：-02m～-03m (1m) 第 3 層：-03m～-04m (1m) 第 4 層：-04m～-05m (1m) 第 5 層：-05m～-06m (1m) 第 6 層：-06m～-07m (1m) 第 7 層：-07m～-08m (1m) 第 8 層：-08m～-09m (1m) 第 9 層：-09m～-10m (1m) 第 10 層：-10m～-11m (1m) 第 11 層：-11m～-12m (1m) 第 12 層：-12m～-13m (1m) 第 13 層：-13m～-14m (1m) 第 14 層：-14m～-15m (1m)	第 15 層：-15m～-16m (1m) 第 16 層：-16m～-17m (1m) 第 17 層：-17m～-18m (1m) 第 18 層：-18m～-19m (1m) 第 19 層：-19m～-20m (1m) 第 20 層：-20m～-22m (2m) 第 21 層：-22m～-24m (2m) 第 22 層：-24m～-27m (3m) 第 23 層：-27m～-30m (3m) 第 24 層：-35m～-40m (5m) 第 25 層：-40m～-45m (5m) 第 26 層：-45m～-50m (10m) 第 27 層：-50m～海底(B-50m)
境界条件	広域モデルの計算結果から、狭域境界上の潮位、水温・塩分条件を抽出して 1 時間ごとの値を設定。	
河川流量	広域モデルで設定した河川の中で、狭域モデルの計算範囲内に流入する宮川と侍従川を考慮。	
取放水	電源開発株式会社における取放水量と放水温度を 1 時間ごとに設定。	
海上風 気象要素	広域モデルで設定した気象要素および海上風について、狭域モデルの計算格子に補間して 1 時間ごとの値を設定。	
物理パラメータ	コリオリ係数、海面摩擦係数、海底摩擦係数、水平渦粘性・拡散係数および鉛直渦粘性・拡散係数については、広域モデルと同様に設定。	

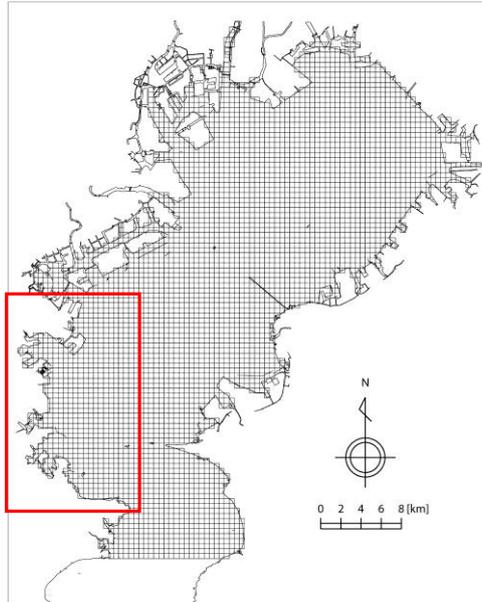


図 4-10 狭域モデルの計算範囲（赤枠）

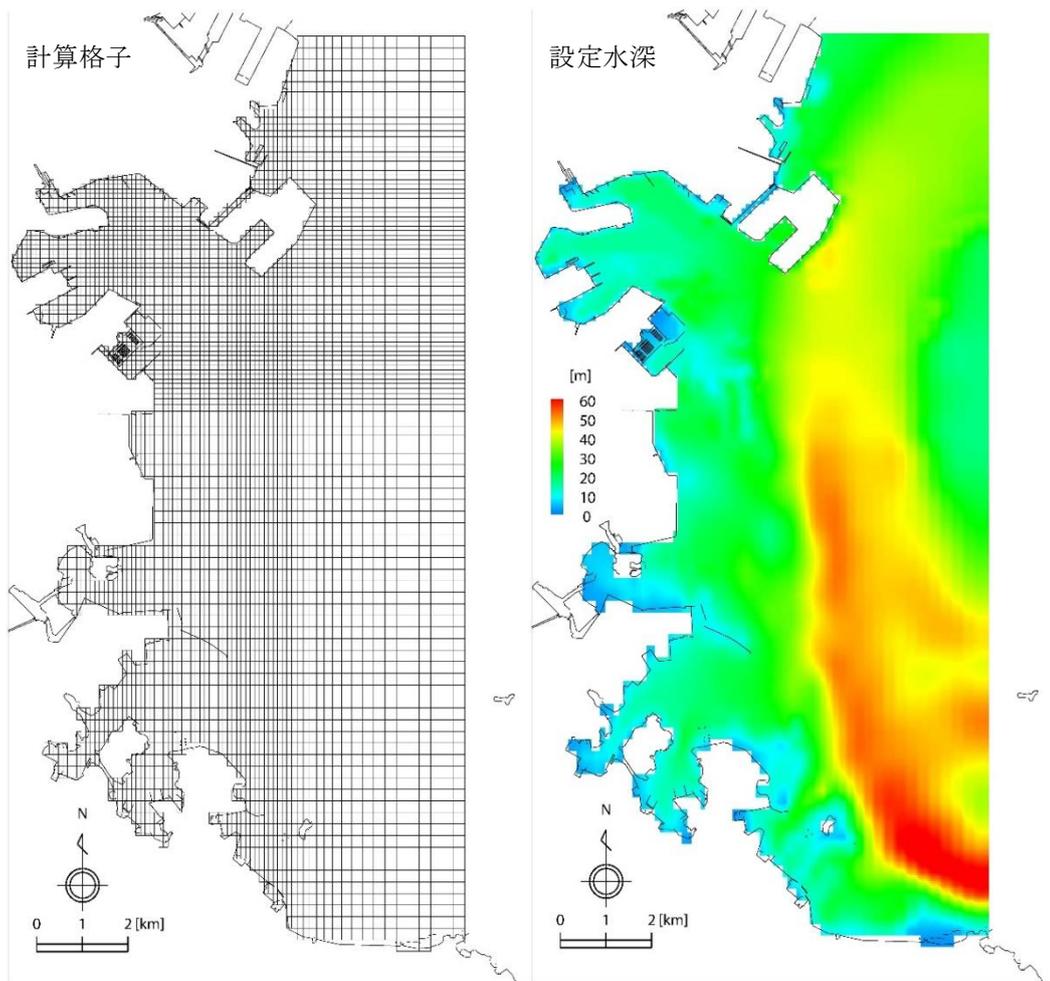


図 4-11 狭域モデルの計算格子と設定水深

表 4-6 狭域の生態系モデルにおける設定条件

条件項目	設定条件
計算期間	狭域の流動モデルと同様
対象範囲	
水平格子	
鉛直層区分	
境界条件	
河川流量	広域モデルで設定した河川の中で、狭域モデルの計算範囲内に流入する宮川と侍従川を考慮。
取放水	電源開発株式会社における取放水を考慮。放水口地点における各水質濃度は、取水口地点の濃度を設定。
底泥酸素消費速度	底質と水温に応じた関数を設定。
底泥栄養塩溶出速度	底質と水温に応じた関数を設定。 リンについては、溶存酸素濃度も考慮した関数を設定。
その他パラメータ	広域モデルと同じ値を設定 (図 4-10)

(2) 底泥による酸素消費速度、栄養塩溶出速度

海域の物質循環に影響する重要な要因に、底泥堆積物による酸素消費および底泥からの栄養塩溶出がある。ここでは、「数値モデル開発業務」で実施された実験結果を参考に、以下に示す指数関数式で表した。

- ・ 酸素消費速度 (mg/m²/day) = $\alpha_O \times \exp(\beta_O \times T)$
- ・ PO₄-P 溶出速度 (mg/m²/day) = $\alpha_P \times \exp(\beta_P \times T - \gamma \times DO)$
- ・ NH₄-N 溶出速度 (mg/m²/day) = $\alpha_N \times \exp(\beta_N \times T)$

ここで、 α_O は0℃での酸素消費速度 (mg/m²/day)、 α_P は0℃でのリン溶出速度 (mg/m²/day)、 α_N は0℃での窒素溶出速度 (mg/m²/day)、 β_O は酸素温度係数 (1/℃)、 β_P はリン温度係数 (1/℃)、 β_N は窒素温度係数 (1/℃)、 T は水温 (℃)、 DO は底層の酸素濃度 (mg/L)、 γ は酸素の存在によるリン回帰の抑制効果を表わすパラメータ (L/mg) である。ここでは、ILの段階ごと (IL<5: 平均値 3.845、5<IL<7: 平均値 5.741、7<IL: 平均値 7.96) における水温と速度との相関式から α と β を算出し、それら各値 (α , β) と実験結果から求めた強熱減量 (IL (%)) との関係式を算出した (図 4-12)。これにより、ILが3.845~7.96以外の値を示す底泥においても、ILに応じた底泥パラメータを当てはめることが可能になった。

東京湾のIL分布には、九都県市首脳会議 環境問題対策委員会水質改善専門部会による「東京湾の底質調査結果 (平成 26 年度)」より、平成 21~26 年の平均値を使用した。狭域におけるIL分布には、「数値モデル開発業務」のIL分布に「底層環境実態解析業務」の調査結果および横浜市環境科学研究所の調査結果 (小市ら, 2008、小市ら, 2009、小市ら, 2010、小市ら, 2011、小市ら, 2012、小市ら, 2013、小市ら, 2015) を追加した。狭域モデルに設定したIL分布を図 4-13 に示した。

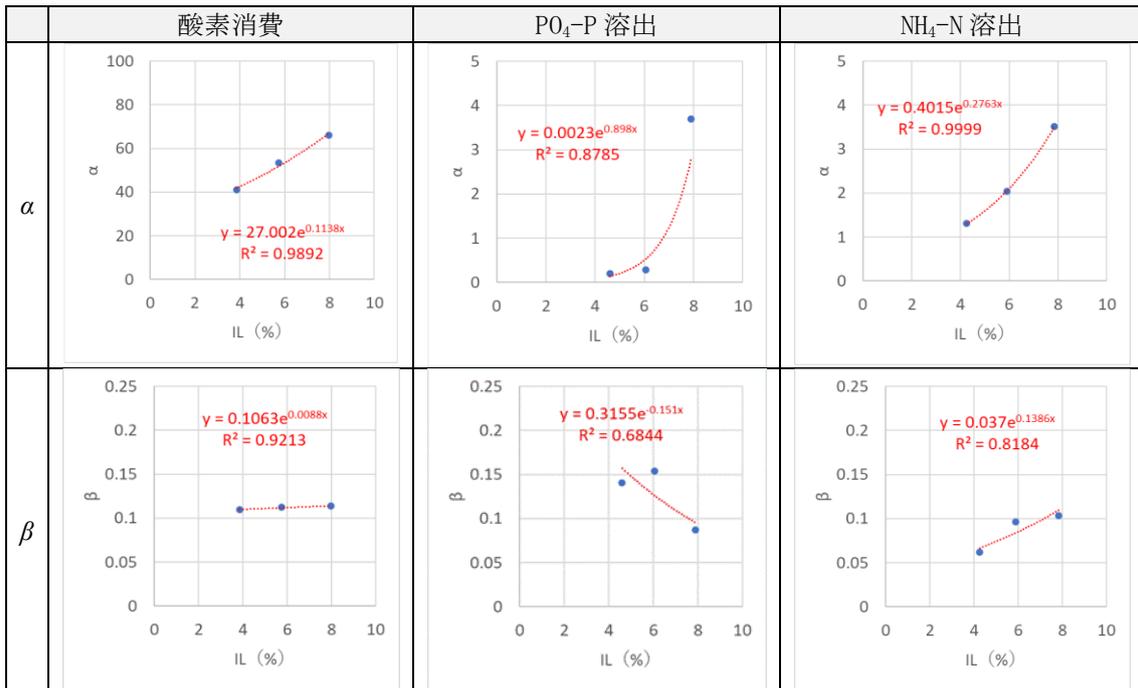


図 4-12 狭底泥パラメータの関係式

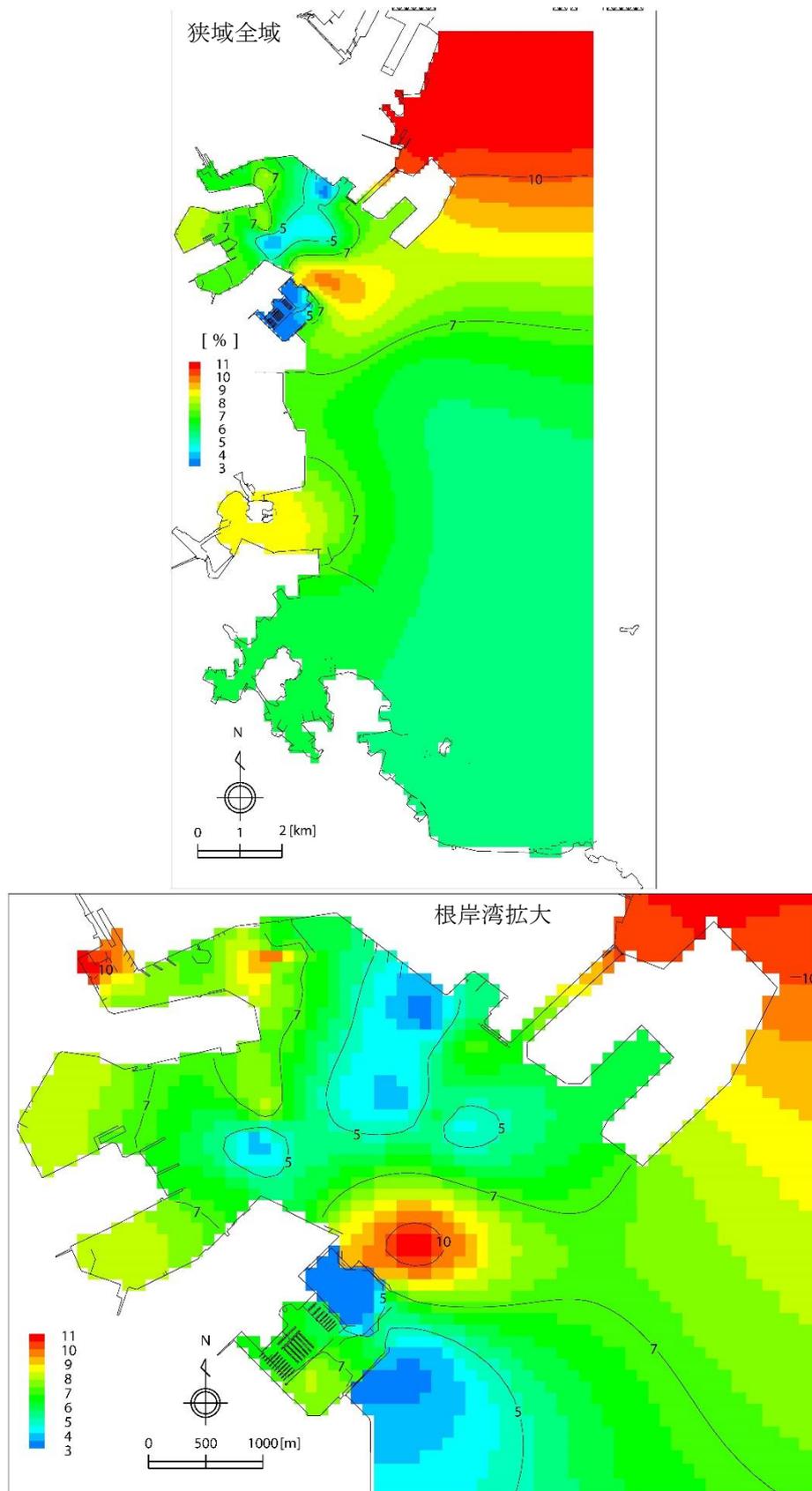


図 4-13 狭域モデルに設定したIL分布

(3) 底泥による酸素消費速度、栄養塩溶出速度

新たに設定した底泥パラメータを与えて現況計算を行った時の DO の観測値と狭域計算値との比較結果を図 4-14 に示した。計算値は根岸湾の底層 DO の変動を再現できていることから、本モデルを用いて貧酸素水塊の緩和対策の評価を行った。

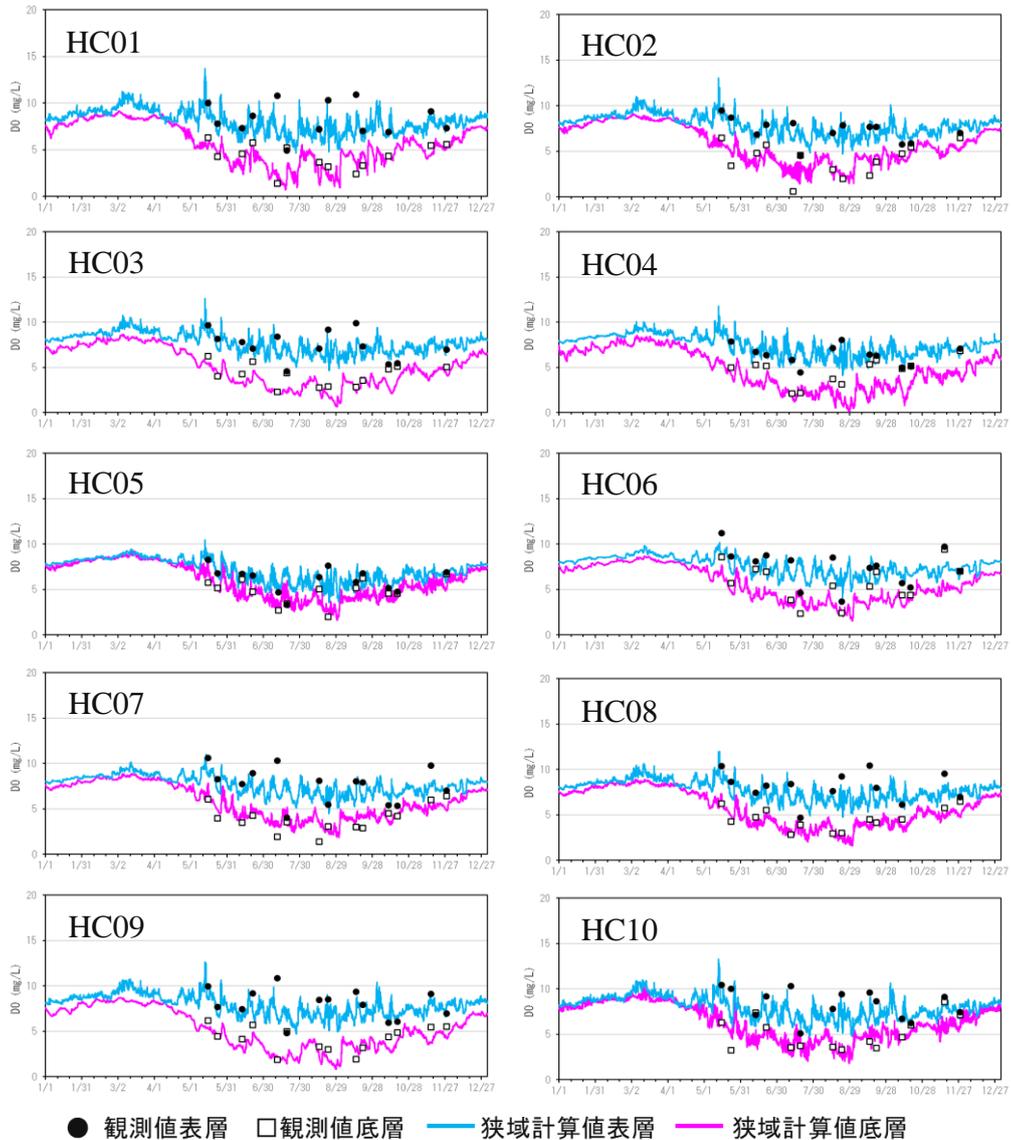


図 4-14 根岸湾調査地点における DO の観測値と狭域計算値との比較 (2017 年)

4.2.2 対策案の選定

(1) 緩和策の対象区域

根岸湾では、湾奥部や窪地には底質に有機物が集積しており、酸素消費速度が相対的に高いことに加え、海水交換が制限されているため、酸素消費量が酸素供給量より過多となり、湾内で発生する貧酸素水塊の発生源になるとともに、東京湾で形成された貧酸素水塊が根岸湾内に進入した場合には、貧酸素水塊が湾内の窪地等に滞留しやすい。このため、対策案により貧酸素水塊を緩和すべき海域として、湾奥入江部の3区画（湾奥1、湾奥2、湾奥3）と湾口南西側の浚渫窪地1区画（窪地）を対象とした（図4-15）。

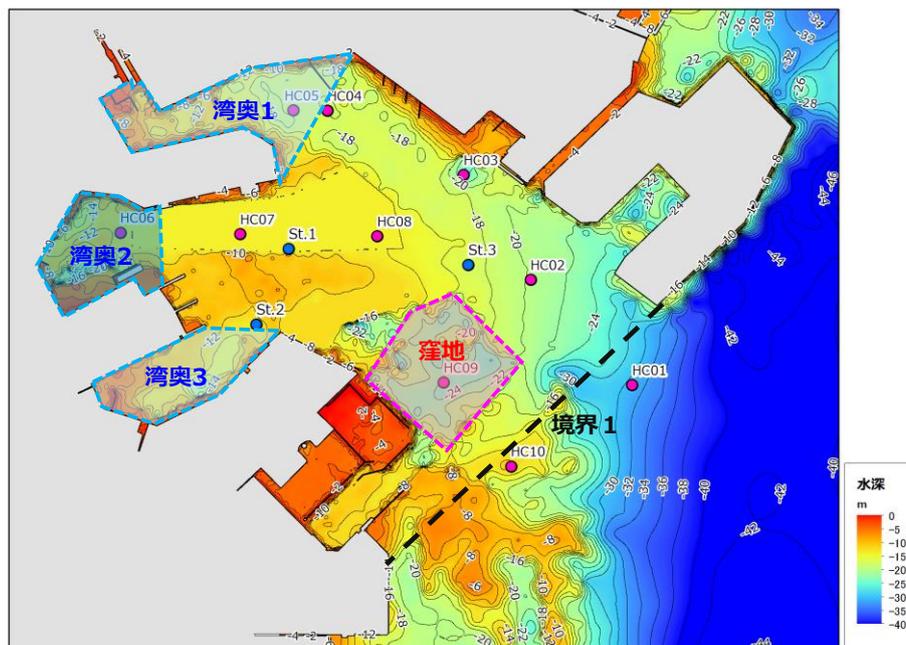


図 4-15 根岸湾の地形および緩和策の対象区域

(2) 対策案の検討

根岸湾内で想定される貧酸素化の緩和策として、覆砂などによる底質改善、浚渫・作滞による海水交換促進、深掘・窪地の埋め戻し、マウンド造成および海底構造物の設置を含む6ケースの対策案を神奈川県水産技術センターの協議のうえ選定し、表4-7に示した。

①湾奥部の底質改善 (Case1)

底泥中の有機汚濁物の影響による酸素消費や栄養塩溶出を抑制、遮断することを期待した対策として覆砂や石炭造粒物の海底被覆による底質改善が実施されている（信澤ら, 2005、井上ら, 2011）。根岸湾には航路・泊地が広がっているため、極端な地形変化を伴わない厚さ50cm以下の薄まき覆砂は現実的な対策の1つである。Case1では、湾奥1、湾奥2および湾奥3の区画内に砂による覆砂を実施することを想定した。対策後の底質の境界条件には、覆砂後10年以上経過しても $IL \leq 4$ 以下が維持された横浜港の調査事例（信澤ら, 2005）を参考に $IL=4$ を与え、地形データは現況計算と同じとした。

②窪地の底質改善 (Case2)

都市部に近接した沿岸部では、高度経済成長期に行われた大規模な海底土砂採取によって窪地が形成され、貧酸素水塊の発生・滞留につながっている。一方で窪地周辺の複雑な地形は漁業生物にとって有益であるとの漁業者の意見もある。Case2では、湾奥と同様に流動性が低いため

底質が悪化している窪地の対策案として、Case1と同様に地形改変を伴わずに底質改善が可能なIL=4の薄まき覆砂を設定した。

③湾奥部の浚渫・作濤と深掘修復 (Case3)

和久ら(2013a)は湾奥部の入江の開削、導水により貧酸素化が軽減され、二枚貝などの懸濁物食者の加入が期待できると指摘している。根岸湾の北東部から湾央にかけては潮汐に伴う底層流により流動性が高く、比較的良好な底層環境が維持されているため、湾奥部の貧酸素化の要因である流動性の低さを解消するためには、浚渫や作濤等により海水交換を促進することが効果的である可能性が考えられる。また、港内の航路・泊地では、その機能を維持するための浚渫や拡幅などの保全措置が必要となる場合がある。これらを踏まえ、Case3では実現可能性の高い対策案として、有機物を含む堆積物の除去と導流を目的とした湾奥部2の浚渫・作濤を選定した。ここでは、航路を拡張する形で湾奥2を航路と同じ水深14mまで掘り下げた。また、湾奥2には無酸素状態となりやすい深堀があることから、浚渫土砂を活用して同水深まで埋め戻して深堀を修復する設定とした。底層のILは湾奥部2の現在の底質とほぼ同じIL=6.5を与えた。対策後の地形データを図4-16に示した。

④窪地の埋め戻し (Case4)

浚渫窪地で形成される無酸素水が湧昇すると周辺の生態系への悪影響が大きいことから、三河湾などでは環境改善策として埋め戻しが実施されている(石田・鈴木,2006)。和久ら(2013b)は三河湾の浚渫窪地を周辺海域と同水深まで埋め立てた場合の改善効果を生態系モデルにより解析し、無酸素水の体積が削減されると予想した。そこでCase4は、根岸湾でも効果が見込める対策案として、漁業者意見を考慮して北西側からの傾斜を残しつつ、湾口側からの海水交換が行われる東側開口部の水深とほぼ同じ水深21mが最大水深となるようにIL=4の覆砂により窪地内を埋め戻す設定とした。対策後の地形データを図4-17に示した。

⑤窪地におけるマウンド造成 (Case5)

マウンド造成の基本的機能として、流速のある海底では湧昇による鉛直混合の発現があげられるが(渡邊ら,2008)、根岸湾で実施された「底層環境実態解析業務」では比較的水深の浅い地点で底質がよく、底生生物が多く出現する傾向があったことから、マウンド造成による浅場形成により底生生物の生息や貧酸素水塊からの逃避が可能な地形創出が期待される。Case5では、深堀となっている窪地内の一部をIL=4の覆砂材を使用して埋め立て、天端部の水深が12m、広さ300m×300m、法面勾配が概ね1:3となるようなマウンドを造成する設定とした。対策後の地形データを図4-18に示した。窪地内の海底起伏は残しつつ、窪地の容積は減少する設定になっている。

⑥湾奥部における海底構造物設置 (Case6)

根岸湾内の貧酸素化は夏季の密度成層の形成により鉛直混合が抑制されることが原因となっていることから、鉛直方向の流動操作により鉛直混合を促進する対策案が考えられる。Case6では、湾奥1の境界付近(図4-19、図中黒線部分)に海底から水深14mまでの高さで連続的にV字型の遮蔽物を設置する設定とした。なお、図中の北東側の岸壁に平行な両矢印は「数値モデル開発業務」で令和元年度に海底に設置されたADCPで観測された底層流の卓越流向であり、V字型構造物は流れに対して最も湧昇効果が期待される向きに配置される。

表 4-7 貧酸素化の緩和策

案	対策案	地形変化	評価ケース	概要
1	湾奥部の底質改善 (覆砂(薄まき)、底質改良剤散布)	—	Case1	地形改変せずに湾奥1~3の区画内全域に $IL \leq 4$ となる底質改善を実施。
2	窪地の底質改善 (覆砂(薄まき)、底質改良剤散布)	—	Case2	地形改変せずに窪地の区画内全域に $IL \leq 4$ となる底質改善を実施。
3	湾奥部の浚渫・作濇+深堀修復 (堆積物除去、導流)	○	Case3	湾奥2を水深14mまで掘り下げて航路拡張し海水交換を促進。深堀後は浚渫土で14mに修復。
4	窪地の埋め戻し (覆砂材による深堀修復)	○	Case4	窪地区画内を覆砂材($IL \leq 4$)で最大水深21mまで埋め戻し。
5	窪地のマウンド造成 (覆砂材による嵩上げ)	○	Case5	窪地区画内に覆砂材($IL \leq 4$)で天端部300m×300m,水深12mのマウンドを造成。
6	海底遮蔽物の設置 (湧昇流の形成、貧酸素水塊の進入抑制)	○	Case6	湾奥1の境界付近の海底から水面下12mまでV字型の遮蔽物を設置。

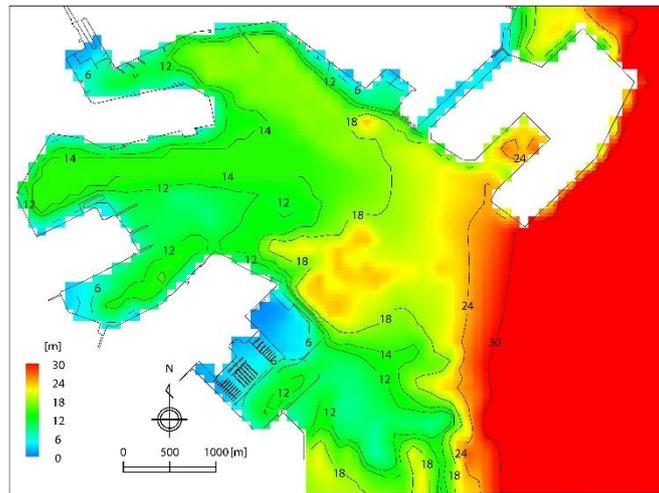


図 4-16 Case3 で設定した湾奥2の地形データ

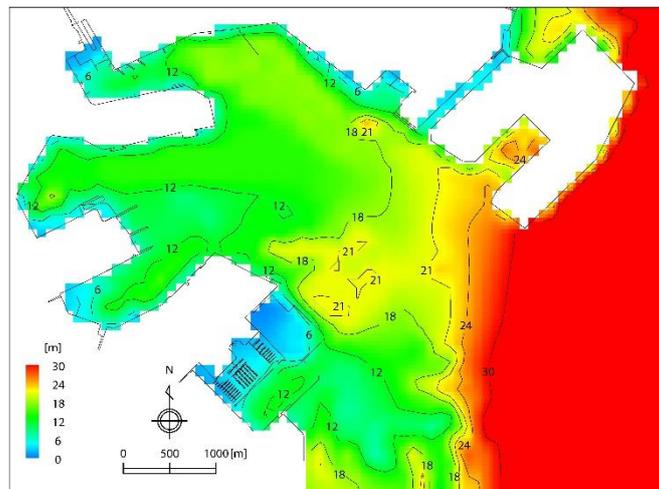


図 4-17 Case4 で設定した窪地の地形データ

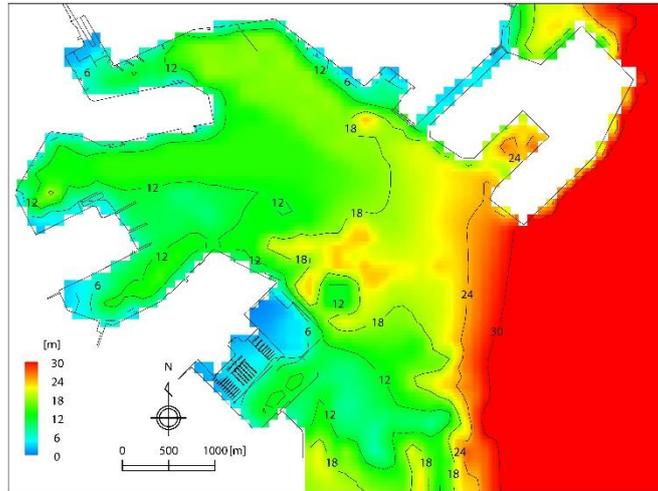


図 4-18 Case5 で設定した窪地の地形データ

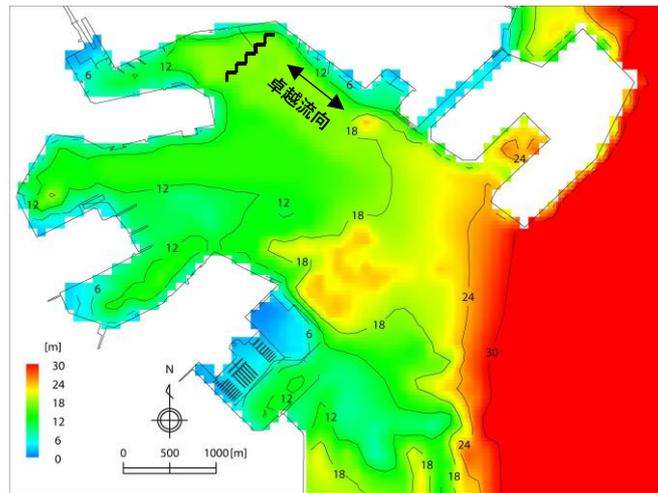


図 4-19 Case6 で設定した湾奥 1 の V 字型遮蔽物設置位置
(図中矢印は、底層流の卓越流向を示す。)

4.2.3 対策案のシミュレーション結果に基づく貧酸素水塊緩和効果

(1) シミュレーション結果

2017年6月から10月を解析対象期間として、現況と対策後について、数値シミュレーション結果から各対象区域内に存在する貧酸素水塊および無酸素水塊の面積および体積を集計し整理した。なお、ここでは東京湾における千葉県・神奈川県基準に従い溶存酸素量2.5ml/L以下の水塊を貧酸素水塊とし、0.5ml/L以下は無酸素水塊と定義した。また、東京湾から拡大・南下した貧酸素水塊が根岸湾から侵入する時期の目安として、現況計算結果で根岸湾湾口部に設定した境界の計算格子に溶存酸素量2.5ml/L以下の値がある時間帯を「湾口貧酸素時間」として図中に示した。

①湾奥部の底質改善 (Case1)

ア)湾奥1

Case1の湾奥1における貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の時間変化を図4-20に、対策による貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の増減を図4-21に、貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の月平均値を図4-22に示した。

湾奥部1では期間を通じて貧酸素水塊がみられるが、7月から8月にかけて貧酸素水塊が拡大し、特に8月の容積の増加が著しい。この貧酸素水塊の拡大時期は湾口貧酸素時間に対応しており、東京湾から大規模の貧酸素水塊が進入した影響を受けたと推察される。8月には無酸素水塊の規模の拡大も確認された。

全期間の緩和効果は貧酸素水塊の面積が現況の83%、容積が現況の86%に、無酸素水塊の面積が47%、容積が現況の40%に軽減された。月別にみると8月の無酸素水塊の減少が顕著であった。東京湾から進入する貧酸素水塊の規模が大きい時期には対策の効果は見えにくいだが、期間を通じて一定の緩和効果が得られており、特に無酸素水塊に対する効果が高いと予測された。

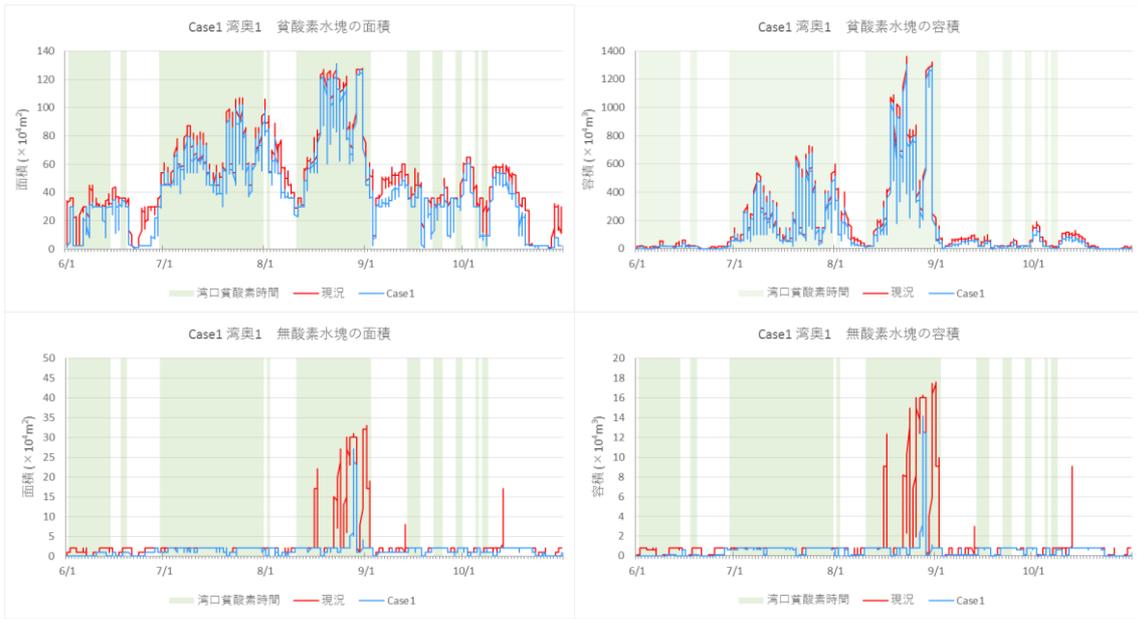


図 4-20 貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の時間変化 (Case1、湾奥 1)

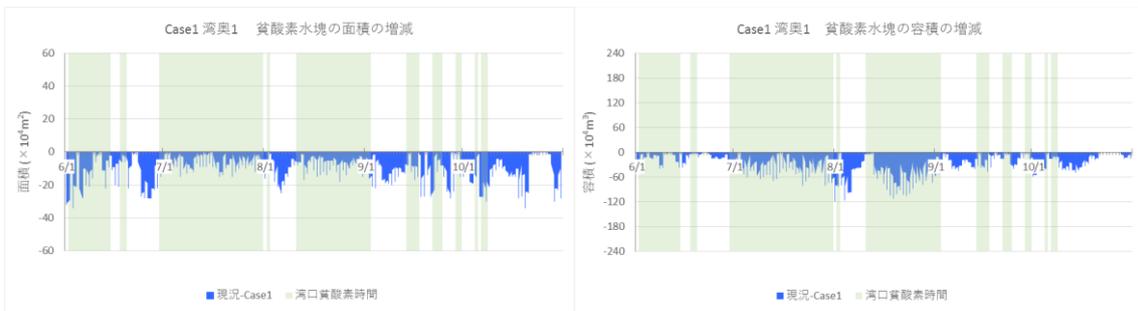


図 4-21 貧酸素水塊の面積および容積の増減 (Case1、湾奥 1)

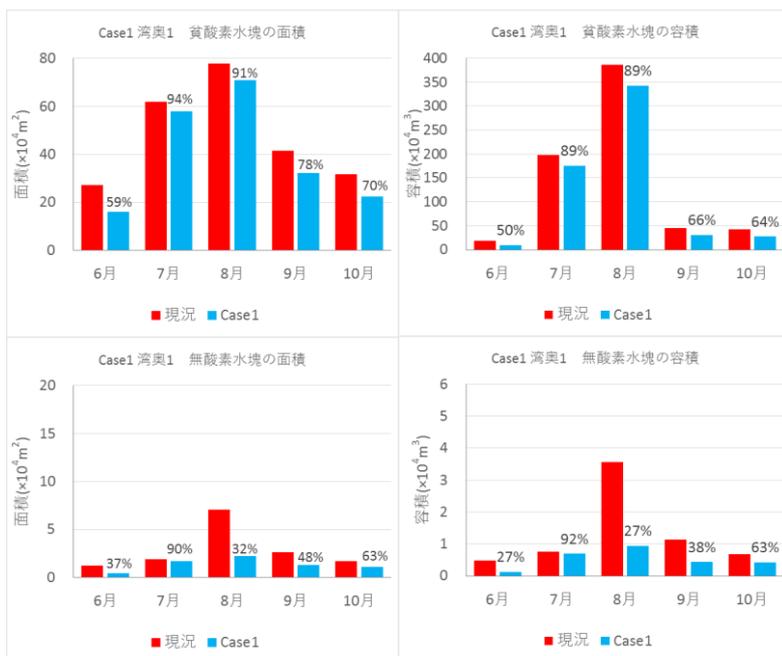


図 4-22 貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の月平均値 (Case1、湾奥 1)

イ) 湾奥 2

Case1 の湾奥 2 における貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の時間変化を図 4-23 に、対策による貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の増減を図 4-24 に、貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の月平均値を図 4-25 に示した。

湾奥部 2 では期間を通じて貧酸素水塊が存在し、7 月から 8 月にかけて貧酸素水塊が拡大するが、湾奥 1 に比べると大規模ではなかった。区画内には深掘が存在するため、7 月以降、無酸素水塊の容積が大きくなった。

全期間の緩和効果は貧酸素水塊の面積が現況の 79%、容積が現況の 78%に、無酸素水塊の面積が現況の 72%、容積が現況の 60%に軽減された。期間を通じて貧酸素水塊、無酸素水塊に対する一定の緩和効果が認められ、湾奥 1 に比べて東京湾から侵入する貧酸素水塊の影響を受けにくいため 7 月、8 月の貧酸素水塊の緩和効果はより明確であった。また、深掘りで形成される無酸素水塊に由来する緩和効果も比較的高かった。

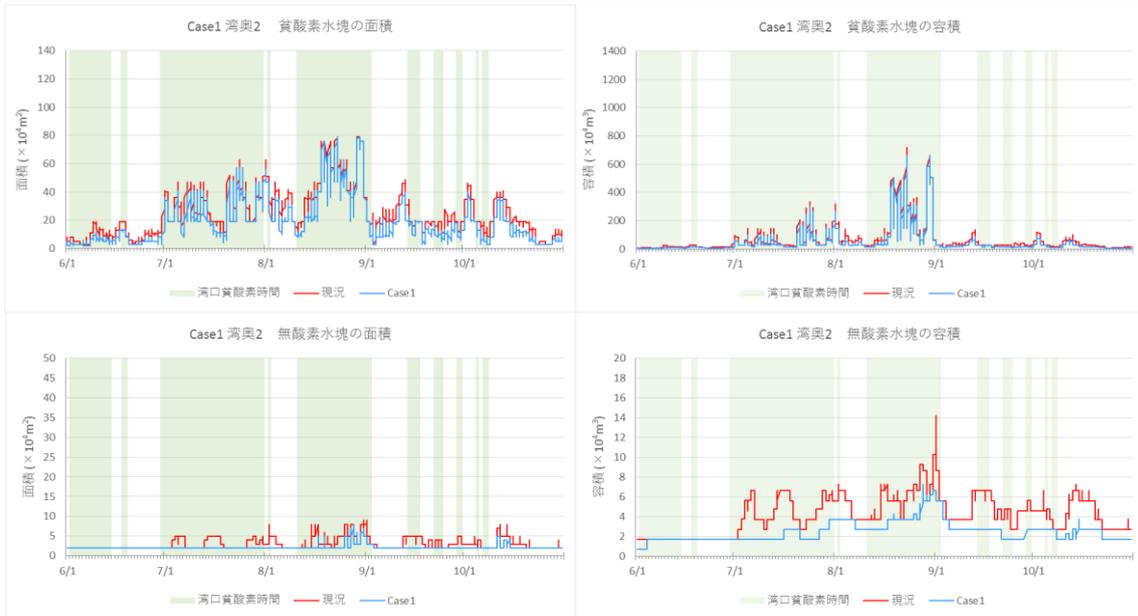


図 4-23 貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の時間変化 (Case1、湾奥 2)

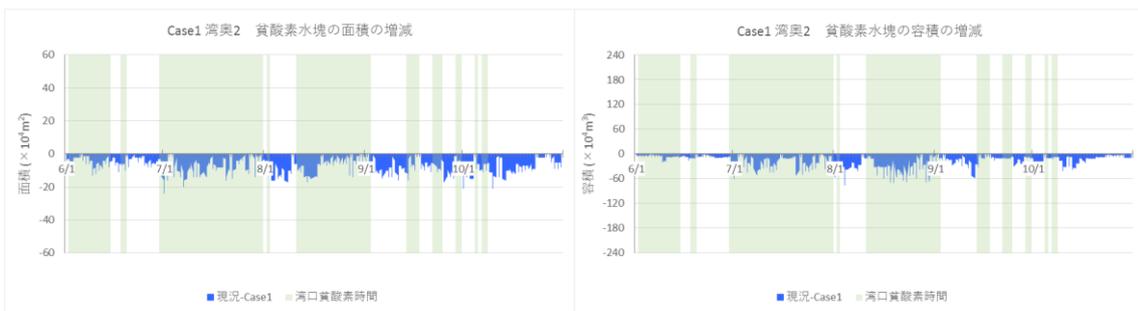


図 4-24 貧酸素水塊の面積および容積の増減 (Case1、湾奥 2)

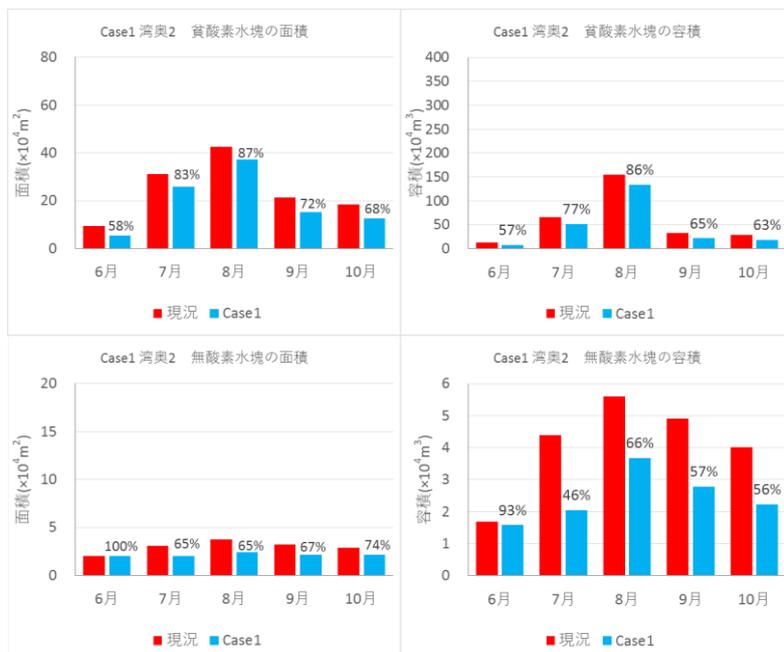


図 4-25 貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の月平均値 (Case1、湾奥 2)

ウ) 湾奥 3

Case1 の湾奥 3 における貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の時間変化を図 4-26 に、対策による貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の増減を図 4-27 に、貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の月平均値を図 4-28 に示した。

湾奥部 3 では期間を通じて貧酸素水塊が存在し、7 月から 8 月にかけて貧酸素水塊が拡大するが、湾奥 1 に比べると大規模ではなかった。区画内に小規模な深堀が存在するため、7 月以降、一次的な無酸素水塊の拡大が繰り返しみられた。

全期間の緩和効果は貧酸素水塊の面積が現況の 80%、容積が現況の 77%に、無酸素水塊の面積が現況の 72%、容積が現況の 58%に軽減された。湾奥 1、湾奥 2 と同様に期間を通じて貧酸素水塊、無酸素水塊に対する一定の緩和効果が認められた。

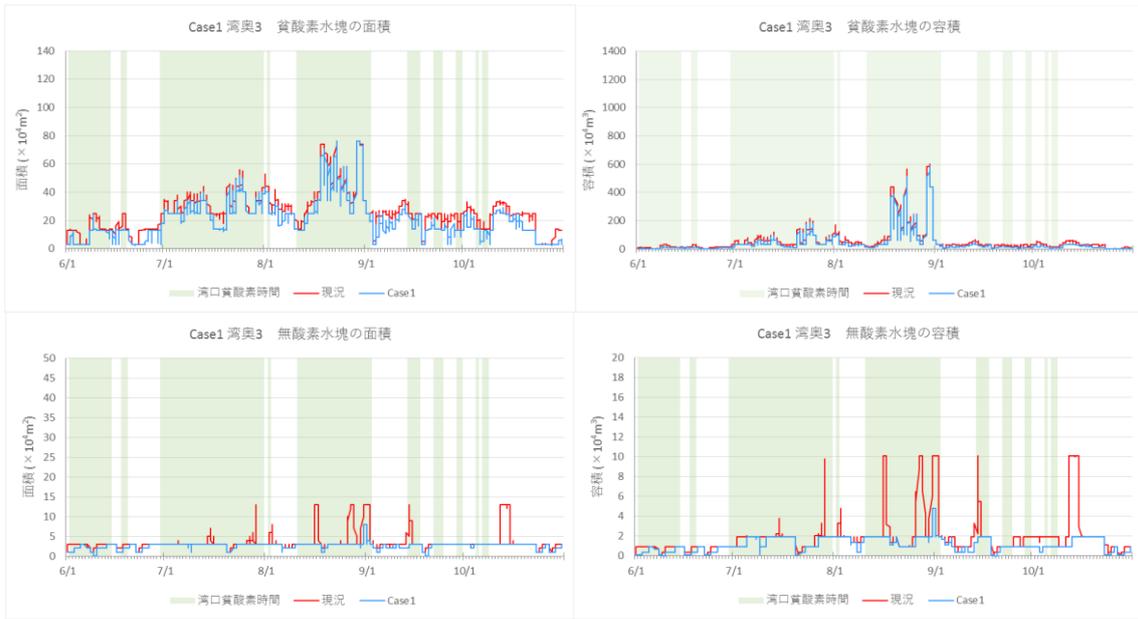


図 4-26 貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の時間変化 (Case1、湾奥 3)

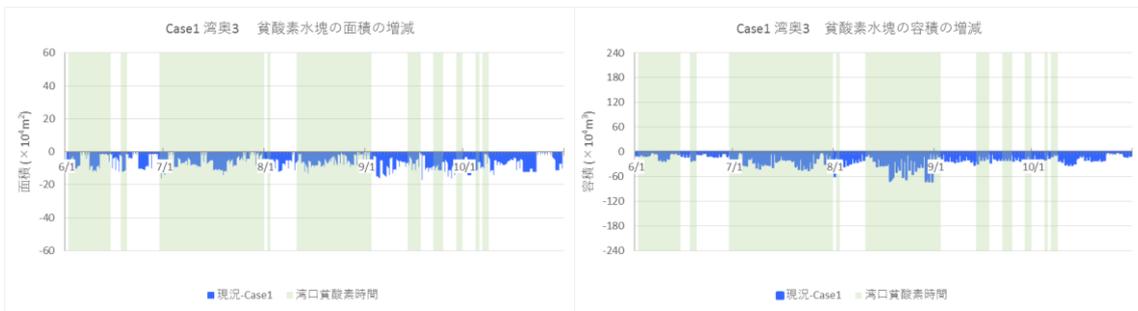


図 4-27 貧酸素水塊の面積および容積の増減 (Case1、湾奥 3)

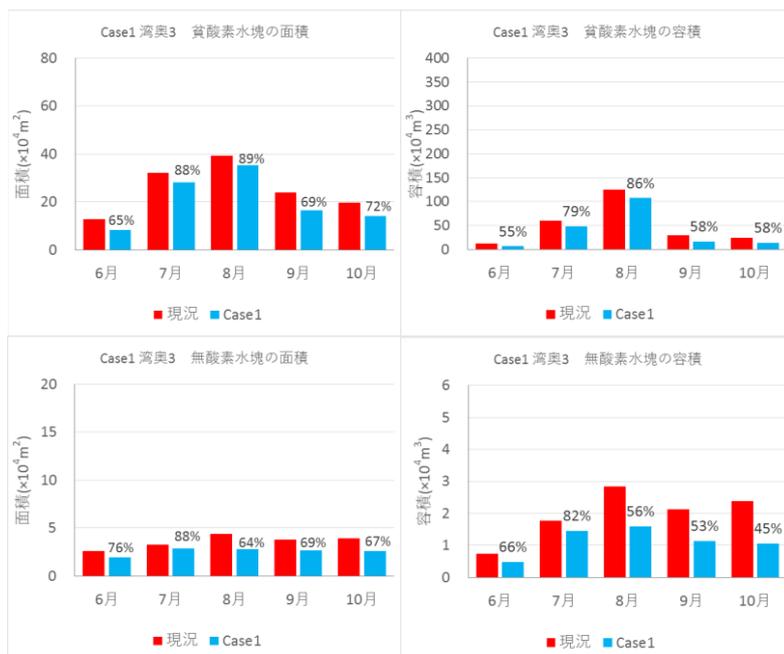


図 4-28 貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の月平均値 (Case1、湾奥 3)

②窪地の底質改善 (Case2)

Case2 の窪地における貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の時間変化を図 4-29 に、対策による貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の増減を図 4-30 に、貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の月平均値を図 4-31 に示した。

窪地では期間を通じて貧酸素水塊が存在し、7月から8月にかけて貧酸素水塊の拡大がみられるが、貧酸素水塊は窪地内部で発達するため面積は 120 万 m² 程度が上限となった。また、窪地内でも特に深くなった場所では頻繁に無酸素状態となった。

全期間の緩和効果は貧酸素水塊の面積が現況の 87%、容積が現況の 94%に、無酸素水塊の面積が現況の 53%、容積が現況の 54%に軽減された。

湾奥部で同じ対策を行う Case1 に比べ、7月から8月を中心とした湾口貧酸素時間に対応して対策の効果が小さくなったが (図 4-30)、これは、窪地が根岸湾湾口部に近く東側に開口しているため、東京湾から進入する貧酸素水塊の影響を湾奥部よりも強く受けているためと考えられる。一方、期間を通じて無酸素水塊の緩和効果は見られており、窪地内で発生もしくは東京湾から進入した貧酸素水塊の溶存酸素濃度がさらに減少して窪地内で無酸素化するのを軽減する効果は認められた。

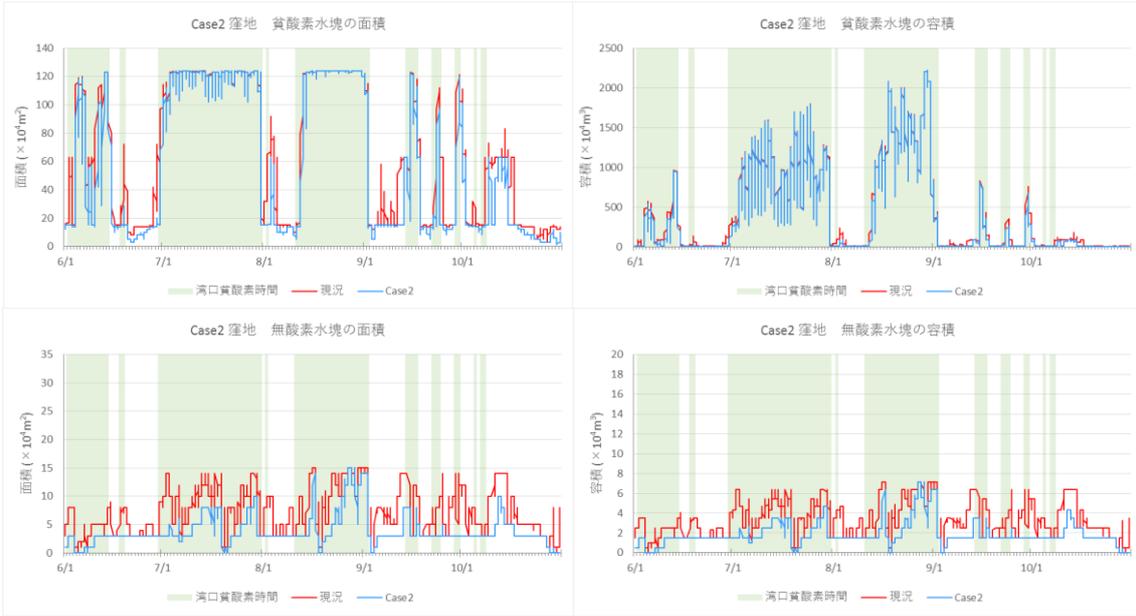


図 4-29 貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の時間変化 (Case2、窪地)

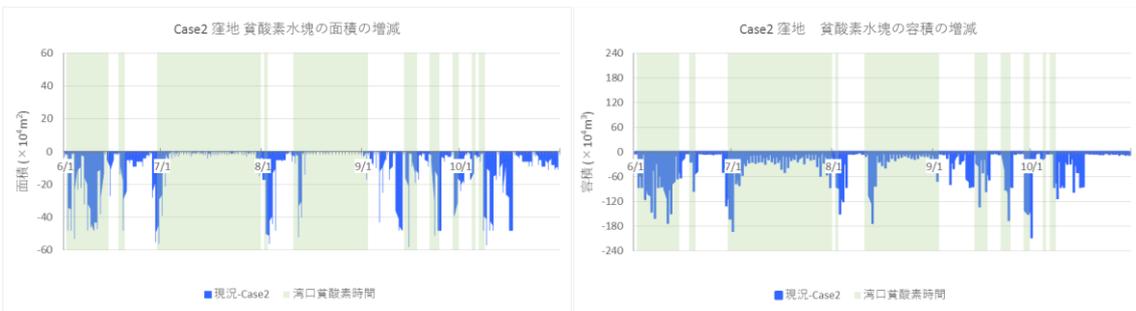


図 4-30 貧酸素水塊の面積および容積の増減 (Case2、窪地)

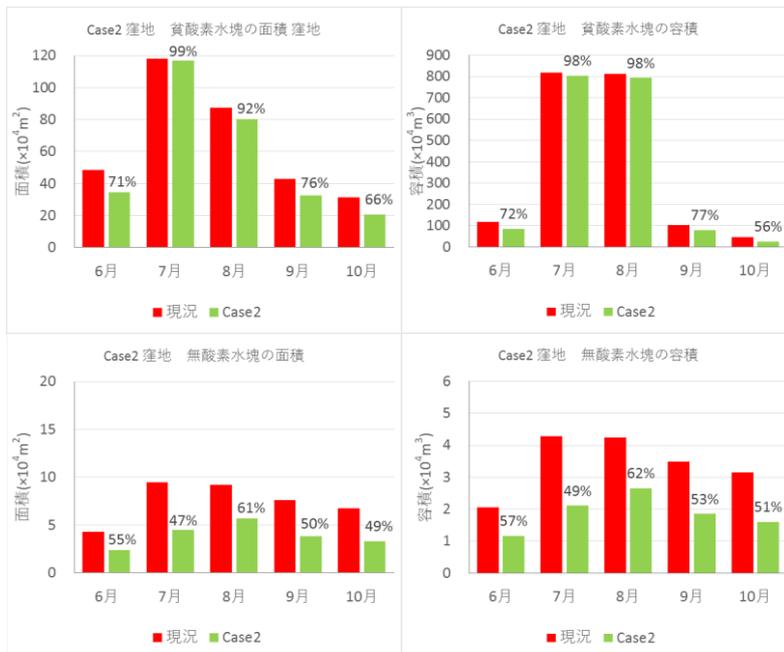


図 4-31 貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の月平均値 (Case2、窪地)

③湾奥部の浚渫・作濬と深掘りの埋め戻し (Case3)

Case3 の湾奥 2 における貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の時間変化を図 4-32 に、対策による貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の増減を図 4-33 に、貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の月平均値を図 4-34 に示した。

全期間の緩和効果は貧酸素水塊の容積が現況の 114%に増加したが、無酸素水塊の容積は現況の 49%に軽減された。貧酸素水塊の容積の増減をみると (図 4-33)、7 月から 8 月の湾口貧酸素時間に対応して貧酸素水塊の容積が拡大する傾向があり、航路からの海水交換を促進した結果、根岸湾内に東京湾からの貧酸素水塊が進入した場合には貧酸素水塊が湾奥 2 まで導水されてしまうものと推察された。一方、無酸素水塊は深掘りを埋め戻したことにより、緩和効果が得られた。

なお、面積では現況より貧酸素水塊や無酸素水塊が期間を通じ増加する結果となった。これは湾奥 2 を広範囲に一定水深まで掘り下げたことにより、計算上、湾奥 2 の大部分で最下層に相当する第 14 層の計算格子の層厚が平均 0.2m となったことで底泥酸素消費の影響が強く現れたことが要因である。層厚が確保される直上の B-1 層 (第 13 層) を考慮すると、容積と同様に貧酸素水塊の面積は拡大、無酸素水塊の面積は改善することを確認したが、ここでは面積割合は算定せず、効果評価の対象外とした。

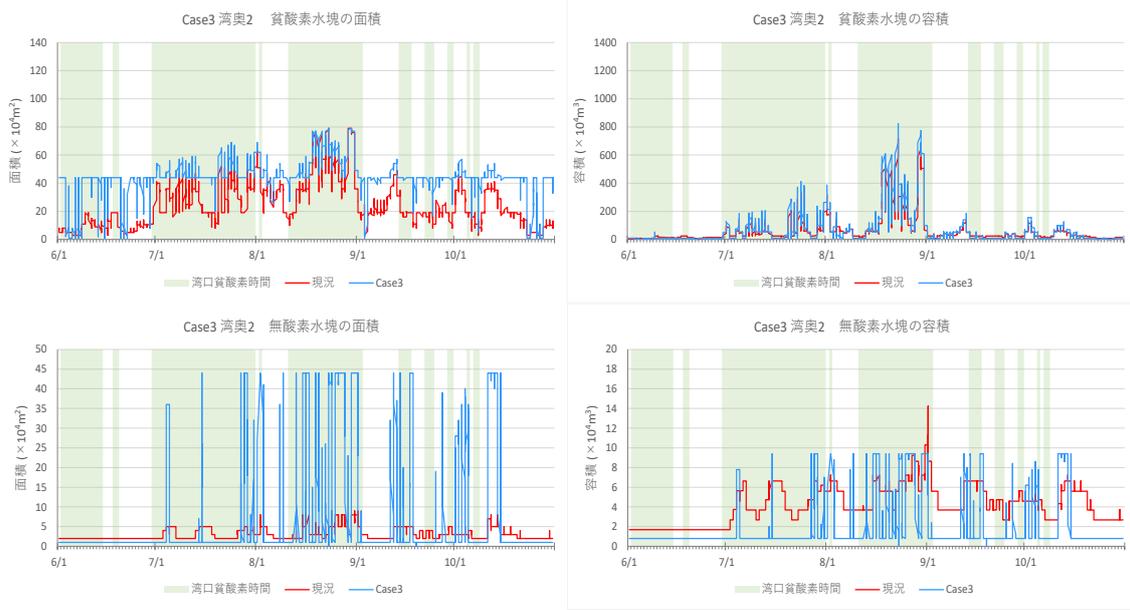


図 4-32 貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の時間変化 (Case3、湾奥 2)

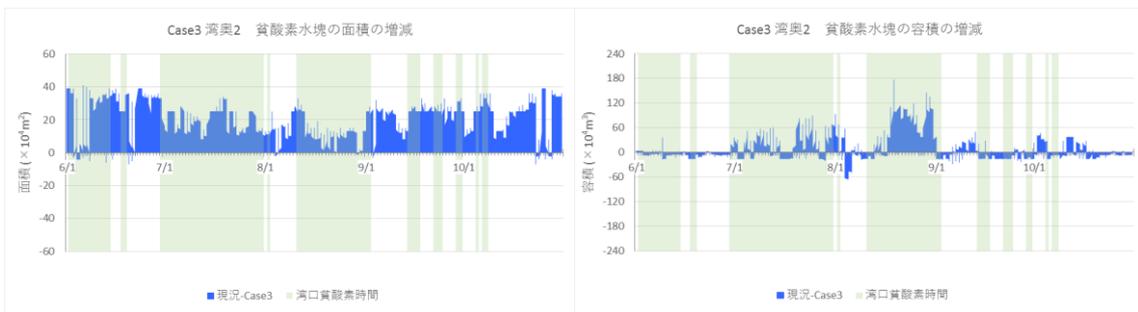


図 4-33 貧酸素水塊の面積および容積の増減 (Case3、湾奥 2)

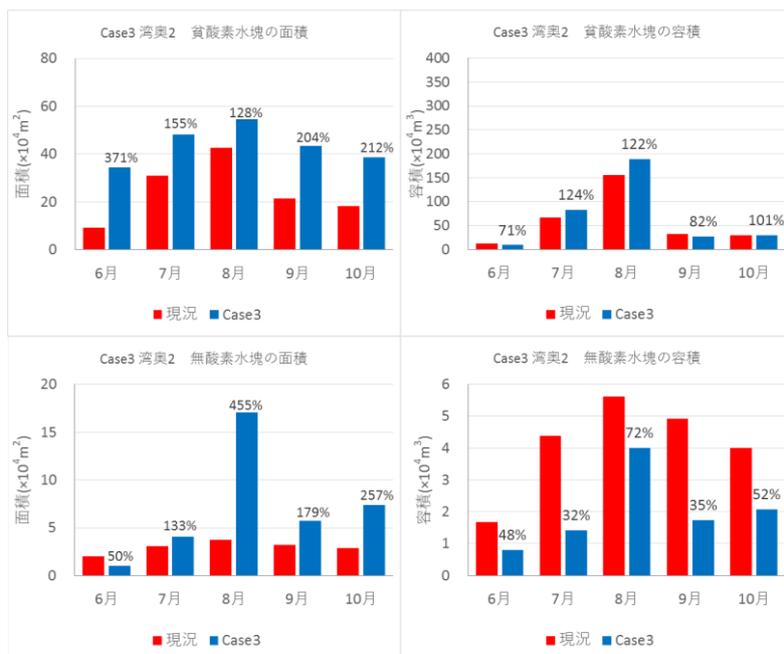


図 4-34 貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の月平均値 (Case3、湾奥 2)

④窪地の埋め戻し (Case4)

Case4 の窪地における貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の時間変化を図 4-35 に、対策による貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の増減を図 4-36 に、貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の月平均値を図 4-37 に示した。

全期間の緩和効果は貧酸素水塊の面積が現況の 96%、容積が現況の 82%に、無酸素水塊の面積が現況の 44%、容積が現況の 17%に軽減された。Case2 と同様に東京湾から進入する貧酸素水塊は窪地内に侵入しやすいため、貧酸素水塊の面積に対する緩和効果は十分ではない結果となったが (図 4-36)、窪地内の深堀を広範囲に埋め戻したことにより、貧酸素水塊の容積は減少したほか、無酸素水塊に対する緩和効果が特に大きくなった。

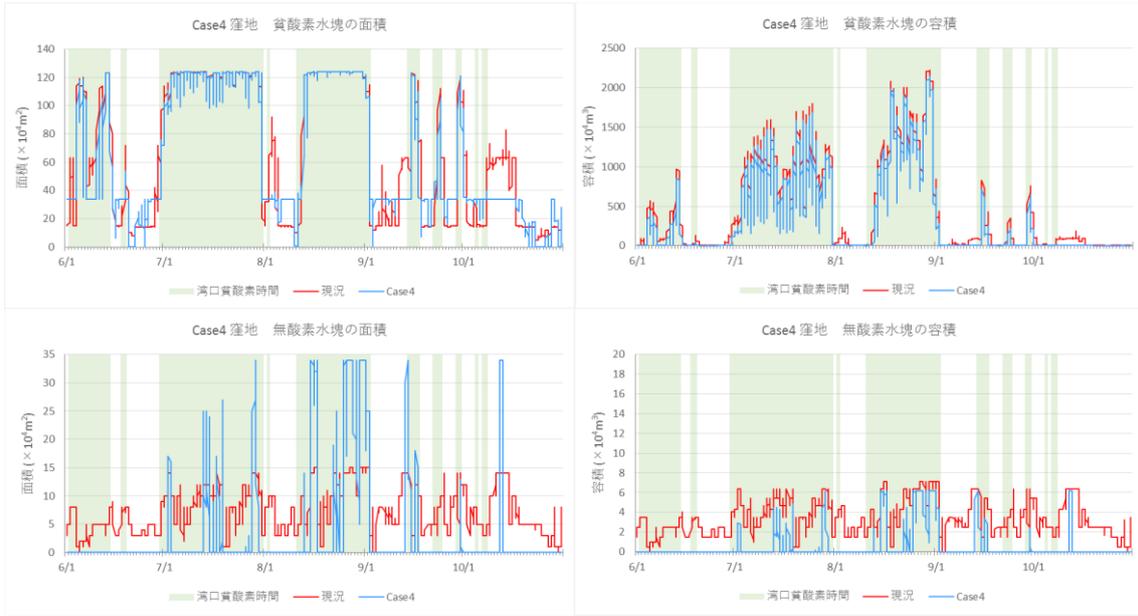


図 4-35 貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の時間変化 (Case4、窪地)

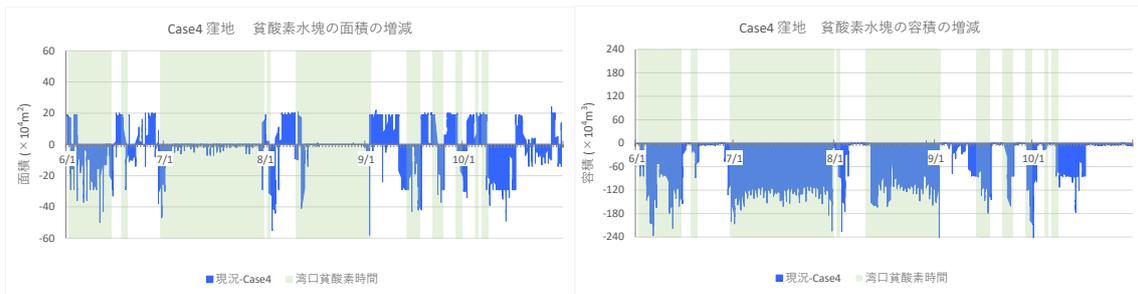


図 4-36 貧酸素水塊の面積および容積の増減 (Case4、窪地)

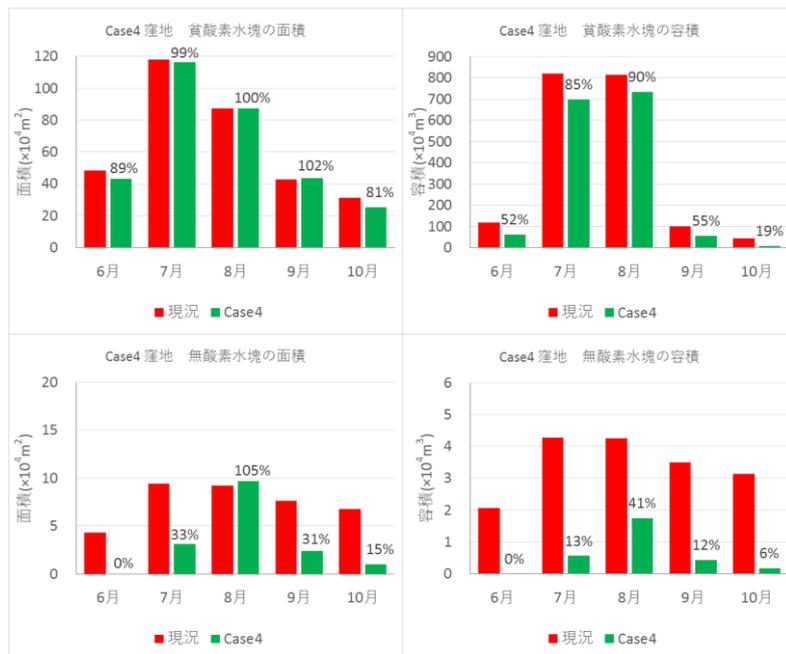


図 4-37 貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の月平均値 (Case4、窪地)

⑤窪地におけるマウンド造成 (Case5)

Case5 の窪地における貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の時間変化を図 4-38 に、対策による貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の増減を図 4-39 に、貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の月平均値を図 4-40 に示した。

全期間の緩和効果は貧酸素水塊の面積が現況の 84%、容積が現況の 83%に、無酸素水塊の面積が現況の 69%、容積が現況の 64%に軽減された。Case4 と比べると、窪地内に Case4 よりも浅い水域が形成されるため貧酸素水塊の面積に対する緩和効果はやや高くなる一方、マウンド造成されない場所では深堀が残存することにより、無酸素水塊の容積に対する緩和効果は小さくなった。



図 4-38 貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の時間変化 (Case5、窪地)

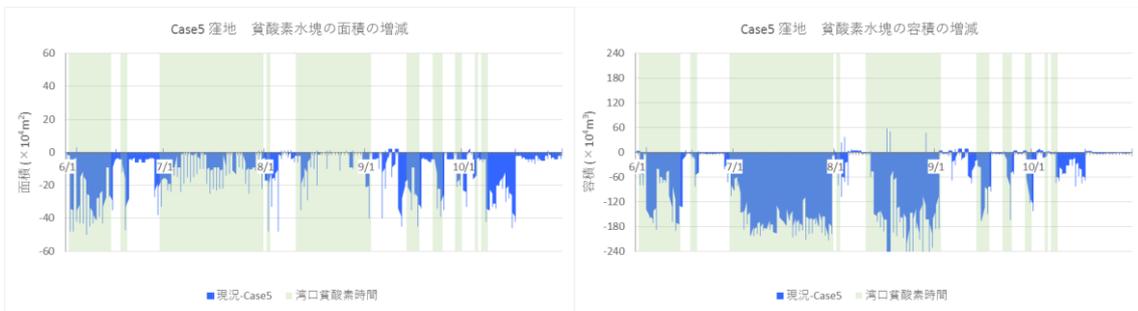


図 4-39 貧酸素水塊の面積および容積の増減 (Case5、窪地)

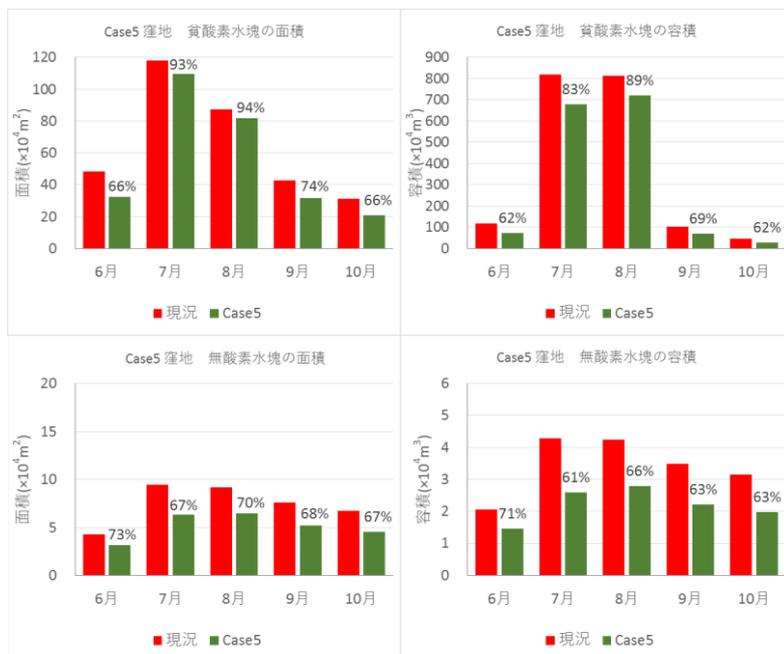


図 4-40 貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の月平均値 (Case5、窪地)

⑥湾奥部における海底構造物設置 (Case6)

Case6 の湾奥 1 における貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の時間変化を図 4-41 に、対策による貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の増減を図 4-42 に、貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の月平均値を図 4-43 に示した。

全期間の緩和効果は貧酸素水塊の面積が現況の 103%、容積が現況の 102%に、無酸素水塊の面積が現況の 138%、容積が現況の 144%といずれも現況に比べて増加した。図 4-42 をみると、湾口貧酸素時間でない時に現況よりも貧酸素水塊が増える傾向が見られることから、湾奥部の境界付近に設置した遮蔽物により、湾中央部が貧酸素状態でない場合には溶存酸素を供給する効果のある底層の海水交換が抑制されてしまうことにより、湾奥 1 の貧酸素化が解消されなくなるものと推察された。

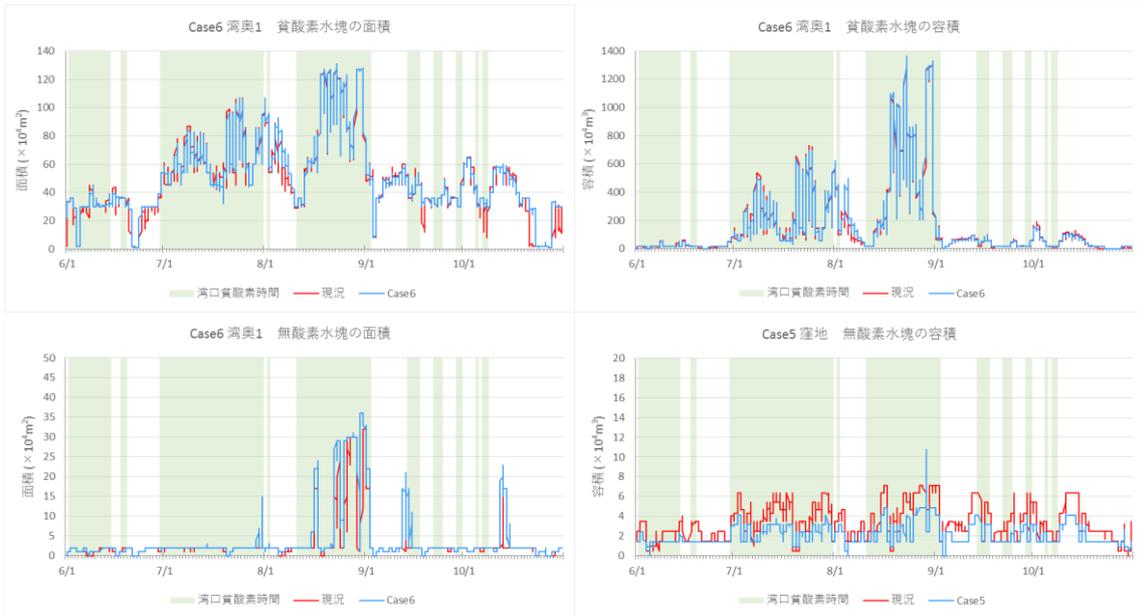


図 4-41 貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の時間変化 (Case6、湾奥 1)

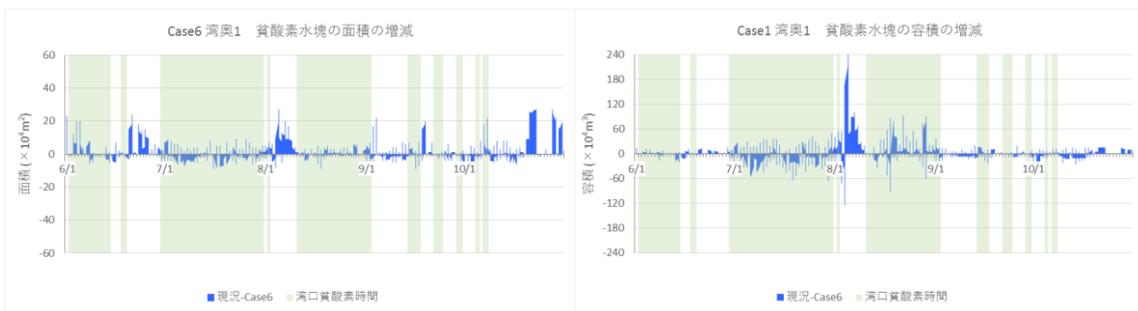


図 4-42 貧酸素水塊の面積および容積の増減 (Case6、湾奥 1)

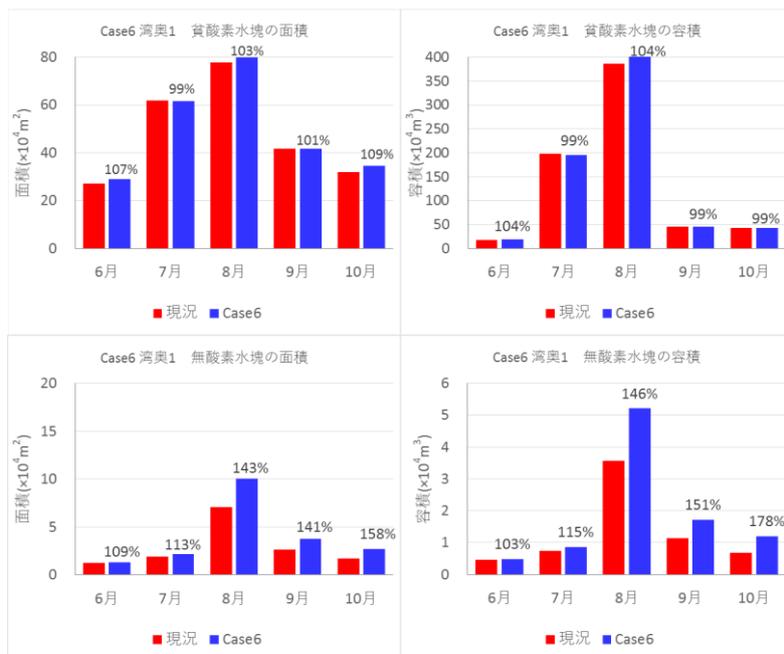


図 4-43 貧酸素水塊、無酸素水塊の面積および容積の月平均値 (Case6、湾奥 1)

(2) 貧酸素水塊の緩和効果の評価

選定された6ケースの対策案の数値シミュレーション結果に基づく貧酸素水塊の緩和効果を現況に対する対策後の面積割合および容積割合で表し、評価結果を表4-8に示した。

根岸湾における貧酸素水塊の緩和策として、底質改善および浚渫窪地の埋め戻しの効果が比較的高く、特に停滞水域で発生する無酸素水塊を抑制する効果が高かった。

浚渫や作濤などにより湾奥部への海水交換を促進する対策案は、東京湾から侵入する貧酸素水塊の影響が現況より大きくなる可能性があるため、東京湾の貧酸素化対策が実施されない限り効果が発揮されないと考えられた。

湧昇流による鉛直混合の促進は、鉛直混合による成層解消の効果は小さく、反対に、海底に設置された構造物で遮られた湾奥部底層と湾中央部の海水交換が阻害されることにより、湾奥部で貧酸素水塊が拡大する恐れがあると予想された。

これらの結果を踏まえ、根岸湾内で実施する貧酸素水塊対策としては、現況の強熱減量が高い海域を対象として、地形を改変せずに広域に実施する覆砂などの底質改善が有用であると考えられる。あわせて、深堀の埋戻しにより環境修復が実施されると改善効果は更に高くなると予想される。但し、根岸湾内における貧酸素水塊対策による改善効果は、東京湾から大規模な貧酸素水塊が侵入した場合に効果が限定されてしまうため、東京湾の湾中央部における貧酸素化の軽減も同時に取り組まれる必要がある。

表 4-8 貧酸素水塊の緩和効果の評価結果(現況に対する対策後の割合)

対策	評価 ケース	対象 区域	貧酸素水塊(≦2.5ml/L)		無酸素水塊(≦0.5ml/L)		備考
			面積割合(%)	容積割合(%)	面積割合(%)	容積割合(%)	
底質 改善	Case1	湾奥1	83% △	86% △	47% ◎	40% ◎	湾奥1、窪地で無酸素水塊の緩和効果が高い
		湾奥2	79% △	78% △	72% △	60% ○	
		湾奥3	80% △	77% △	72% △	58% ○	
		湾全域	93%	95%	89%	82%	
	Case2	窪地	87% △	94% △	53% ○	54% ○	
		湾全域	97%	98%	89%	91%	
浚渫・ 作濤	Case3	湾奥2	-	114% ×	-	49% ◎	湾口からの貧酸素水塊が導水される 無酸素水塊減少は深掘修復による (面積割合は計算対象外とした)
		湾全域	-	101%	-	90%	
埋め 戻し	Case4	窪地	96% △	82% △	44% ◎	17% ◎	無酸素水による周辺生態系へのリス クが軽減
		湾全域	99%	96%	88%	85%	
マウン ド造成	Case5	窪地	84% △	83% △	69% ○	64% ○	水深の浅い天端部が底生生物の生息 場・逃避場になる可能性がある
		湾全域	98%	97%	94%	94%	
湧昇	Case6	湾奥1	103% ×	102% ×	138% ×	144% ×	湾奥1と湾中央部の底層の海水交換 が阻害される
		湾全域	101%	101%	104%	105%	

◎：50%以上の緩和、○：30～50%の緩和、△：0～30%の緩和、×：緩和効果なし

4.2.4 緩和効果が底質および底生生物に及ぼす影響

覆砂などによる底質改善を実施する Case1 および Case2、窪地の埋め戻しやマウンド造成を行う Case4、Case5 では、強熱減量の少ない ($IL \leq 4$) 覆砂材・造成材の使用が想定される。図 4-44 に「底層環境実態解析業務」で得られた底生生物の出現状況（クラスター解析により分類されたグループの平均出現個体数および平均出現種数）と強熱減量、全硫化物およびシルト・粘土分との関係を示した。対策案の対象海域は強熱減量が 7%以上であるため底生生物の個体数、種数が極めて少ない現況であるが、底質改善により強熱減量が 4%以下の良好な生息環境が創出されることにより、底層の貧酸素水塊の面積の減少に応じて底生生物の個体数、種類数の増加が期待される。また、湾奥や窪地の水深は対策後も底生生物の増加により、二枚貝類などの懸濁物食者による水質浄化効果や餌料生物の増加に伴う漁業生物の増産効果が発揮されることにより、湾全体の物質循環機能が回復する可能性がある。但し、橋口ら（2012）は、貧酸素化に対する底生生物の応答（消長）に関して進行期に 23 種、解消期に 22 種について定式化し、シノブハネエラスピオを除く大部分の底生生物で貧酸素の解消期には進行期に比べて高い溶存酸素条件が必要なこと、現存量の回復に必要な酸素条件は種レベルで大きな差があることを示している。加えて、底質改善により底生生物が一時的に回復した場合でも、東京湾から進入する貧酸素水塊が波及した場合には、移動性がなく、貧酸素耐性も持たない底生生物は生残できない。このため、覆砂など底質改善の結果、どのような底生生物がどの程度回復するかの予測には、区域と対象生物ごとに行う必要があり、本業務の成果から具体的な評価は難しい。

深掘修復や浚渫窪地の埋め戻しでは、効果が発揮される面積は限定されるほか、埋め戻した後の水深によっては周辺の貧酸素化が解消せず、底生生物の速やかな回復が確認されなかった事例が報告されている（金子ら, 2011）。しかしながら、窪地内に存在した無酸素水塊の容積が減少することにより、硫化水素の発生による周辺の底生生物への潜在的な危険性が減少すると見込まれる。

マウンド造成の効果について、「底層環境実態解析業務」の調査結果では周囲に比べて水深の浅い地点では底生生物が多い傾向が確認されている。また、田島（2014）は、底生生物の多様度も加味した評価の結果は水深 15m 以浅で良好な底質環境を示している。本業務のシミュレーションにより予測される対象区域の貧酸素水塊の面積や体積の減少が十分ではない場合であっても、天端部（水深 12m）が底生生物の生息場・逃避場として機能する可能性がある。しかしながら、内湾において砂により造成したマウンド上の底生生物を調査した知見は見当たらないため、実証試験により効果が検証される必要がある。

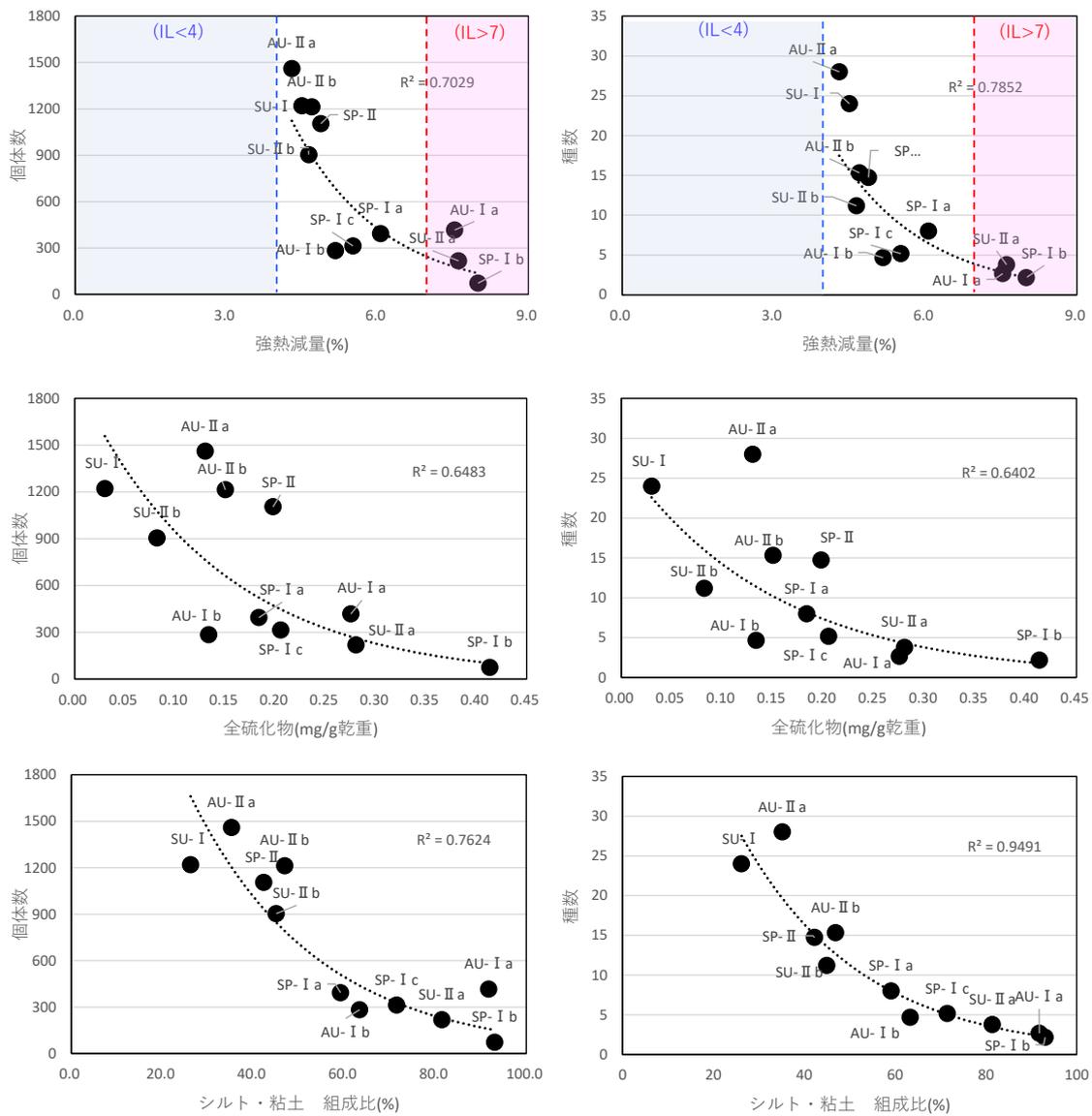


図 4-44 底生物の出現状況と強熱減量、全硫化物、シルト・粘土分との関係
(平成 30 年度根岸湾における底層環境実態解析業務報告書より作成)

4.3 プレゼン資料の作成

本業務の成果をとりまとめたプレゼン用資料を作成し、以下に示した。

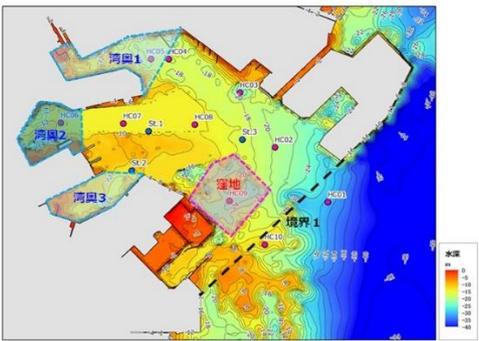
令和2年度根岸湾における貧酸素水塊対策 の評価に係る業務

令和3年3月

1

業務の目的

本業務は、平成29年度から令和元年度にかけて実施した「東京湾貧酸素水塊対策のための数値モデル開発業務」で作成した根岸湾内の流動に係る数値モデルを用いて、シミュレーションにより根岸湾における具体的な貧酸素緩和策の有効性について評価することを目的とする。



評価対象海域 (根岸湾)

2

貧酸素水塊の定義

神奈川県はDO 2.5ml/L以下を貧酸素と定義している。

柳 (1989)

- ・ 底生生物が正常に分布するためには2.5ml/L以上のDOが必要

水産資源保護協会 (2018)

- ・ 魚類・甲殻類に生理的变化を引き起こす臨界濃度のDO 3.0ml/L
- ・ 貝類に生理的变化を引き起こす臨界濃度であり、甲殻類の致死濃度のDO 2.5ml/L
- ・ 底生生物の致死濃度 1.5ml/L

なお、本業務では0.5ml/L以下を無酸素状態として扱う。
(底層水が0.5ml/L以下の場合には、海底境界面は0ml/Lになっていると見做す)

3

1. 根岸湾の貧酸素水塊の現状分析

(1)根岸湾の貧酸素水塊の分布の特徴及び発生機構

- 根岸湾では5月～11月（多くは6月～10月）に貧酸素化。
- 横浜港内や京浜運河や東京湾の湾奥部に比べて 貧酸素水塊の存在する期間が短く、DOの値も高い傾向。

● : 根岸湾
 ▲ : 横浜港内～京浜運河
 --- : 貧酸素水塊の境界
 酸素量 $\geq 2.5\text{ml/L}$

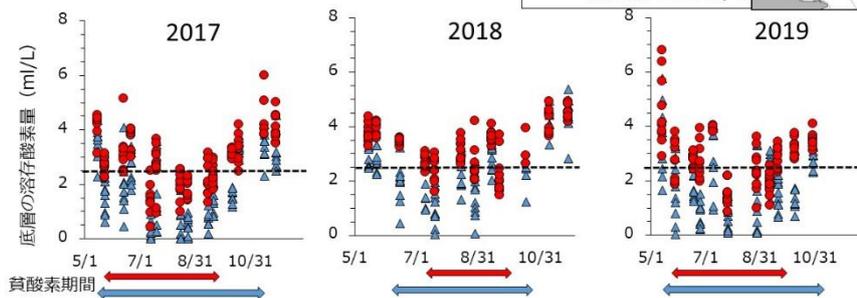
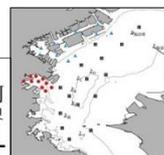


図 神奈川県定点観測結果に基づく貧酸素水塊の発生時期

(1)根岸湾の貧酸素水塊の分布の特徴及び発生機構

- 根岸湾の貧酸素水塊には2つの発生機構
 - ①流動性が低下する小潮期などに湾内で貧酸素化が進行 …海底から徐々に貧酸素化
 - ②潮流や外洋系水の動きに伴い根岸湾外(東京湾)の貧酸素水塊が進入 …短時間で進行し、大規模
 - ・東京湾の貧酸素水塊が拡大、南下して根岸湾付近に達した場合
 - ・東京湾の貧酸素水塊が中層化した場合に進入しやすい

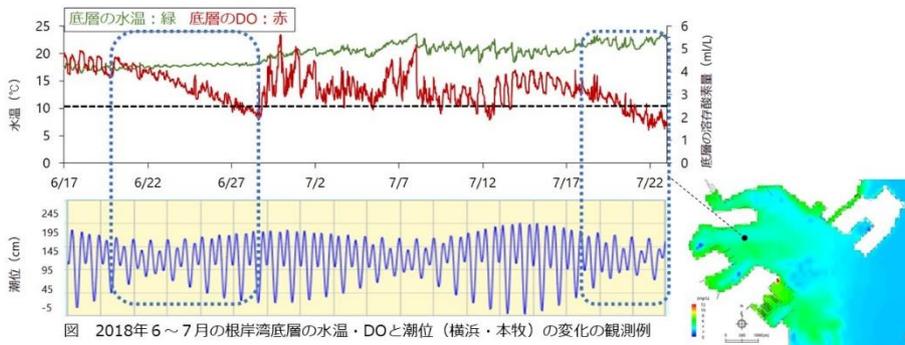


図 2018年6～7月の根岸湾底層の水温・DOと潮位（横浜・本牧）の変化の観測例

(1) 根岸湾の貧酸素水塊の分布の特徴及び発生機構



数値シミュレーションによる底層DO分布(海底直上層)の時間変化

7

(2) 湾内の貧酸素水塊が発生・滞留しやすい環境の特定と悪化要因

- ・ 閉鎖的な湾奥部、湾口部の浚渫地は流動性が低い(海水交換が少ない)ため有機物が堆積しやすい。
- ・ 有機物が多い(強熱減量が高い)ほど水温上昇に応じて酸素消費速度が高くなる。
 …湾奥部、浚渫地で貧酸素水塊が発生・滞留しやすい

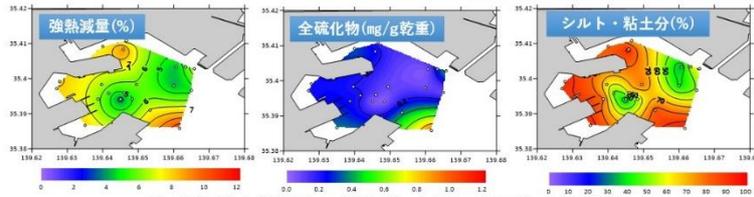


図 底質3項目(強熱減量、全硫化物、シルト・粘土分)の水平分布

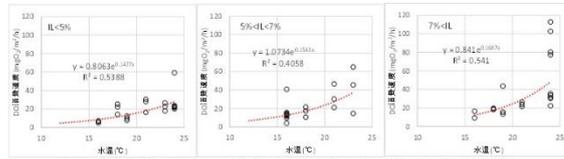


図 室内実験で求めた強熱減量別の酸素消費速度と水温の関係式

8

(3) 貧酸素水塊が発生・滞留しやすい環境が底質や底生生物に与える影響

合成指標 水産資源保護協会 水産用水基準(2018年度版)

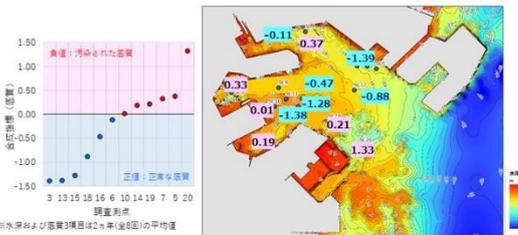
- ・ 海水の交換が制限され、有機物の負荷量が多く、夏季に成層が発達しやすい閉鎖性海域の有機汚染の程度を評価するための指標値
- ・ 合成指標は値が大きいほど貧酸素水塊が発生・滞留しやすい有機汚濁の進んだ環境であることを表し、負の値であれば正常な底質、正の値であれば汚染された底質と判断。

$$\text{合成指標} = 0.588(\text{IL}-7.99)/4.52 + 0.559(\text{TS}-0.51)/0.60 + 0.584(\text{MC}-64.9)/30.5$$

[IL:強熱減量(%), TS:全硫化物(mg/gDW), MC:シルト・粘土分(%)]

地点名	水深(m)	強熱減量(%)<IL	全硫化物(mg/g乾重)	シルト・粘土分(%)<MC	水産用水基準合成指標(点)
3	18.6	4.5	0.13	34.2	-1.39
13	10.2	3.9	0.04	42.6	-1.38
15	12.1	4.3	0.05	45.7	-1.29
18	18.1	5.1	0.14	56.4	-0.88
16	15.5	5.8	0.13	73.9	-0.47
6	15.9	6.9	0.22	80.6	-0.11
10	11.5	6.6	0.30	85.1	0.01
14	13.4	7.6	0.29	88.3	0.19
19	20.6	7.2	0.41	86.6	0.21
7	14.8	8.2	0.25	93.4	0.33
5	17.3	8.4	0.33	90.3	0.37
20	23.3	10.3	0.93	97.7	1.33

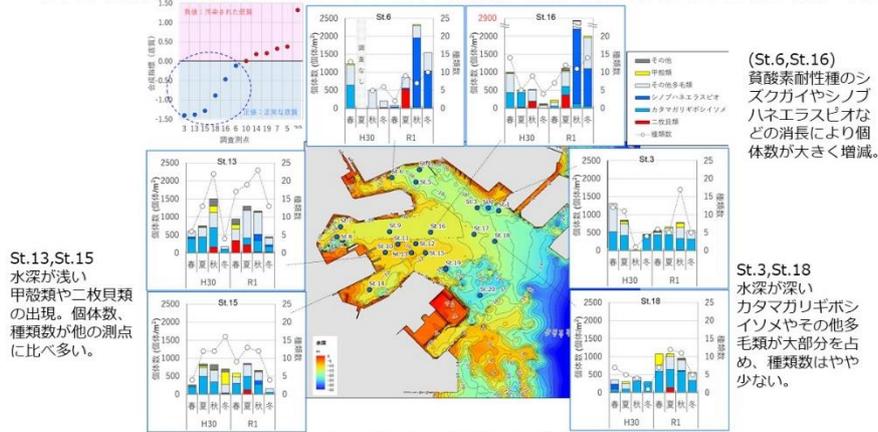
図 各測点の合成指標



9

(3) 貧酸素水塊が発生・滞留しやすい環境が底質や底生生物に与える影響

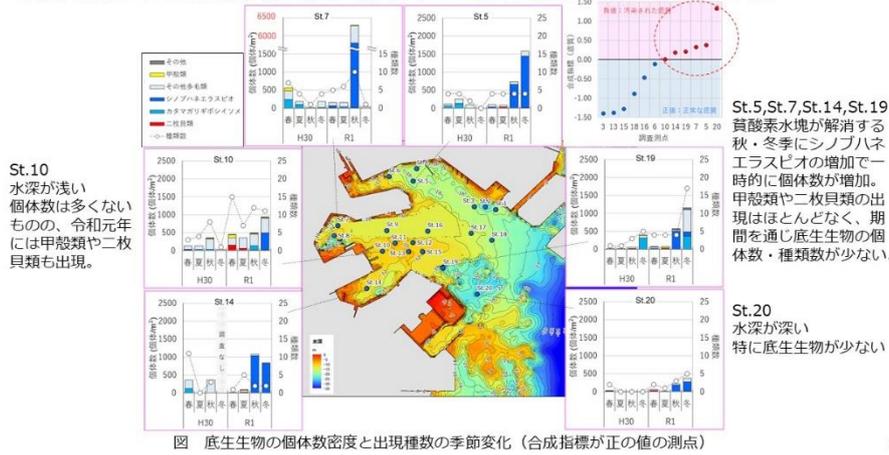
- ・ 一時的な貧酸素化による影響を受けるものの、貧酸素耐性を有する種を中心に底生生物が維持される。



10

(3) 貧酸素水塊が発生・滞留しやすい環境が底質や底生生物に与える影響

- ・ 底質の悪化により貧酸素水塊が発生・滞留しやすいため、頻繁に底生生物が死滅する。



11

2. 改善効果の評価

12

(1)対策案の選定

- ・根岸湾内で発生する貧酸素水塊に対しては、底層の酸素消費速度の抑制や海水交換の促進を目的とした対策によって改善される可能性がある。
- ・東京湾から進入する貧酸素水塊に対しては、東京湾全域の貧酸素水塊の発生と移動に対処する必要があるため、根岸湾内の局所的な漁場改良等では直接的な改善効果は見込めないと予想される。
- ・このため、根岸湾内で発生する貧酸素水塊の改善を目的とした対策を選定し、その改善効果について生態系モデルを用いてシミュレーションを行い評価する。

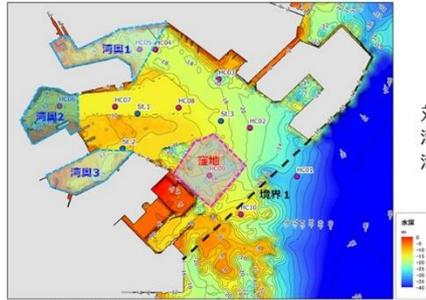


図 根岸湾の地形および緩和策の対象区域)

対策案により貧酸素水塊を緩和するべき海域として、湾奥入江部の3区画（湾奥1、湾奥2、湾奥3）と湾口南西側の浅深窪地1区画（窪地）を対象とする。

(1)対策案の選定

案	対策案	地形変化	評価ケース	概要
1	湾奥部の底質改善 (覆砂(薄まき)、底質改良剤散布)	—	Case1	地形改変せずに湾奥1~3の区画内全域にIL≦4となる底質改善を実施。
2	窪地の底質改善 (覆砂(薄まき)、底質改良剤散布)	—	Case2	地形改変せずに窪地の区画内全域にIL≦4となる底質改善を実施。
3	湾奥部の浅深・作滞+深堀修復 (堆積物除去、導流)	○	Case3	湾奥2を水深14mまで掘り下げて航路拡張し海水交換を促進。深堀後は浚渫土で14mに修復。
4	窪地の埋め戻し (覆砂材による深堀修復)	○	Case4	窪地区画内を覆砂材(IL≦4)で最大水深21mまで埋め戻し。
5	窪地におけるマウンド造成 (覆砂材による高上げ)	○	Case5	窪地区画内に覆砂材(IL≦4)で天端部300m×300m、水深12mのマウンドを造成。
6	海底構造物の設置 (湧昇流の形成、貧酸素水塊の進入抑制)	○	Case6	湾奥1の境界付近の海底から水面下12mまでV字型の遮蔽物を設置。

(2)シミュレーション結果に基づく貧酸素水塊緩和効果

対策	評価ケース	対象区域	貧酸素水塊(≧2.5m/L)		無酸素水塊(≧0.5m/L)		備考
			面積割合(%)	容積割合(%)	面積割合(%)	容積割合(%)	
底質改善	Case1	湾奥1	83% △	86% △	47% ⊙	40% ⊙	湾奥1、窪地で無酸素水塊の緩和効果が高い
		湾奥2	79% △	78% △	72% △	60% ○	
		湾奥3	80% △	77% △	72% △	58% ○	
		湾全域	93%	95%	89%	82%	
	Case2	窪地	87% △	94% △	53% ○	54% ○	
		湾全域	97%	98%	89%	91%	
浅深・作滞	Case3	湾奥2	—	114% ×	—	49% ⊙	湾口からの貧酸素水塊が導水される無酸素水塊減少は深堀修復による(面積割合は計算対象外とした)
		湾全域	—	101%	—	90%	
埋め戻し	Case4	窪地	96% △	82% △	44% ⊙	17% ⊙	無酸素水による周辺生態系へのリスクが軽減
		湾全域	99%	96%	88%	85%	
マウンド造成	Case5	窪地	84% △	83% △	69% ○	64% ○	水深の浅い天端部が底生生物の生息場・逃避場になる可能性がある
		湾全域	98%	97%	94%	94%	
湧昇	Case6	湾奥1	103% ×	102% ×	138% ×	144% ×	湾奥1と湾奥部との底層の海水交換が阻害される
		湾全域	101%	101%	104%	105%	

⊙: 50%以上の緩和、○: 30~50%の緩和、△: 0~30%の緩和、×: 緩和効果なし

(2)シミュレーション結果に基づく貧酸素水塊緩和効果

- 根岸湾における貧酸素水塊の緩和策として、底質改善(Case1、Case2)および浚渫地の埋め戻し(Case4)の効果が比較的高く、特に停滞水域で発生する無酸素水塊を抑制する効果が高かった。
- 浚渫や作濤(Case3)などにより湾奥部への海水交換を促進する対策案は、東京湾から侵入する貧酸素水塊の影響が現況より大きくなる可能性がある。
- 湧昇流(Case6)による鉛直混合の促進は、鉛直混合による成層解消の効果は小さく、反対に、海底に設置された構造物に湾奥部底層と湾中部との海水交換が阻害され、湾奥部で貧酸素水塊が拡大する恐れがある。
- 現況の強熱減量が高い海域を対象として、地形を改変せずに広域に実施する覆砂などの底質改善が有用。
- 深堀の埋戻しにより環境修復が実施されると改善効果は更に高くなる。
- 根岸湾内における貧酸素水塊対策の改善効果は、東京湾から大規模な貧酸素水塊が侵入した場合には効果が限定されてしまうため、東京湾の湾中央部における貧酸素化の軽減も同時に取り組まれる必要がある。

16

(2)シミュレーション結果に基づく貧酸素水塊緩和効果



数値シミュレーションによる底層DO分布(海底直上層)の緩和効果

17

(2)シミュレーション結果に基づく貧酸素水塊緩和効果



数値シミュレーションによる底層DO分布(海底直上層)の緩和効果

18

(3) 緩和効果が底質および底生生物に与える影響

- 覆砂などによる底質改善を実施するCase1およびCase2、窪地の埋め戻しやマウンド造成を行うCase4、Case5では、強熱減量の少ない($IL \leq 4$) 覆砂材・造成材の使用が想定され、底層の貧酸素水塊の面積の減少に応じて底生生物の個体数、種類数の増加が期待される。(右図)
- 深掘修復や浚渫窪地の埋め戻しでは、効果が発揮される面積は限定されるが、窪地内に存在した無酸素水塊の容積が減少することにより、硫化水素の発生による周辺の底生生物への潜在的な危険性が減少すると見込まれる。
- マウンド造成では、貧酸素水塊の緩和効果が不十分であっても、天端部(水深12m)が底生生物の生息場・逃避場として機能する可能性がある。但し、本業務では評価できない。

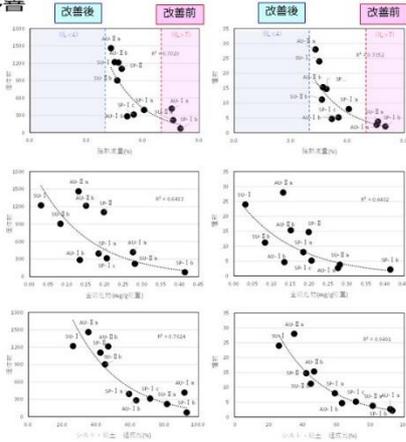


図 底生生物の出現状況と底質3項目との関係
(平成30年度根岸湾における底層環境実態解析業務報告書より作成)

19

成果の概要

- 根岸湾の貧酸素水塊には、①流動性が低下する小潮期などに湾内で徐々に貧酸素化が進行する、②根岸湾外(東京湾)から大規模な貧酸素水塊が進入する、2つの発生機構がある。
- 湾奥部、窪地は流動性が低い(海水交換が少ない)ため、有機物が堆積しやすく、底泥の酸素消費速度が高い。
- 水深が比較的浅い場所や流動性の高い湾口部には正常な底質が分布し、貧酸素耐性を有する種を中心に底生生物が維持される。有機汚染の進んだ湾奥部、窪地は貧酸素水塊が発生・滞留しやすいため、頻繁に底生生物が死滅し、底生生物の個体数・種類数が少ない。
- 根岸湾内で発生する貧酸素水塊の改善を目的とした実施可能な対策を6ケース選定し、その改善効果について生態系モデルを用いてシミュレーションを行い評価した。
- 根岸湾における貧酸素水塊の緩和策として、現況の強熱減量が高い海域を対象として、地形を改変せずに広域に実施する覆砂などの底質改善が有用。深掘の埋戻しにより環境修復が実施されると改善効果は更に高くなると考えられる。
- 底質改善により、貧酸素水塊の面積の減少に応じて底生生物の個体数、種類数の増加が期待される。
- 東京湾の湾奥部における貧酸素化の軽減も同時に取り組まれる必要がある。

20

[付属資料] 対策案の検討結果

21

Case1 湾奥部の底質改善

- ・ 酸素消費や栄養塩溶出を抑制、遮断することを期待した対策として覆砂や石炭造粒物の海底被覆による底質改善が実施されている（信澤ら,2005、井上ら,2011）。
- ・ 湾奥1、湾奥2および湾奥3の区画内に砂による覆砂を実施することを想定。
- ・ 根岸湾には航路・泊地が広がっているため、極端な地形変化を伴わない厚さ50cm以下の薄まき覆砂は現実的な対策の1つ。
- ・ 底質の境界条件には、覆砂後10年以上経過しても $IL \leq 4$ 以下が維持された横浜港の調査事例（信澤ら,2005）を参考に $IL=4$ を与え、地形データは現況計算と同じとした。

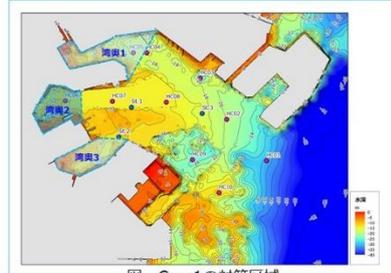


図 Case1の対策区域

22

Case2 窪地の底質改善

- ・ 都市部に近接した沿岸部では、高度経済成長期に行われた大規模な海底土砂採取によって窪地が形成され、貧酸素水塊の発生・滞留につながっている。
- ・ 一方で窪地周辺の複雑な地形は漁業生物にとって有益であるとして、地形を単純化する対策には否定的な漁業者意見もある。
- ・ 湾奥と同様に流動性が低いいため底質が悪化している窪地の対策案として、Case1と同様に地形改変を伴わずに底質改善が可能な $IL=4$ の薄まき覆砂を設定。

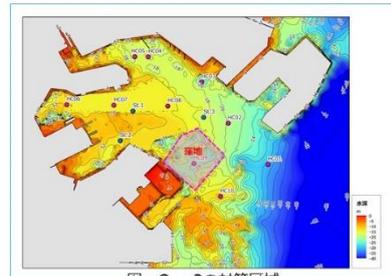


図 Case2の対策区域

23

Case3 湾奥部の浚渫・作濤と深掘修復

- ・ 和久ら(2013)は湾奥部の入江の開削、導水により貧酸素化が軽減され、二枚貝などの懸濁物食者の加入が期待できると指摘。
- ・ 湾奥部の貧酸素化の要因である流動性の低さを解消するため、浚渫や作濤等により海水交換を促進することを想定。
- ・ 港内の航路・泊地では、その機能を維持するための浚渫や拡幅などの保全措置が必要となる場合があり、浚渫・作濤は現実的な対策の1つ。
- ・ 航路を拡張する形で湾奥2を航路と同じ水深14mまで掘り下げ、同時に、浚渫土砂を活用して無酸素状態となりやすい深堀を同水深まで埋め戻して修復する設定。

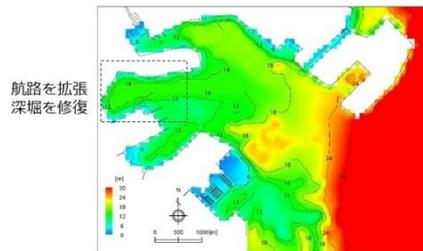


図 Case3の地形データ

24

Case4 窪地の埋め戻し

- ・ 浚渫窪地で形成される無酸素水が湧昇すると周辺の生態系への悪影響が大きいため、三河湾などでは環境改善策として埋め戻しを実施されている（石田・鈴木,2006）。
- ・ 和久ら(2013b)は三河湾の浚渫窪地を周辺海域と同水深まで埋め立てた場合の改善効果を生態系モデルにより解析し、無酸素水の体積が削減されると予想。
- ・ 根岸湾でも効果が見込める対策案として、漁業者意見を考慮して北西側からの傾斜を残しつつ、湾口側からの海水交換が行われる東側開口部の水深とほぼ同じ水深21mが最大水深となるようにIL=4の覆砂により窪地内を埋め戻す設定。

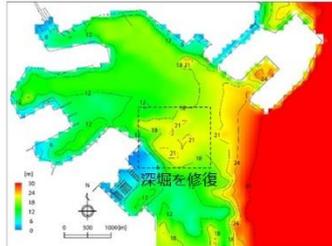


図 Case4の地形データ

25

Case5 窪地におけるマウンド造成

- ・ マウンド造成の基本的機能として、流速のある海底では湧昇による鉛直混合の発現があげられるが（渡邉ら,2008）、ここでは、浅場形成により底生生物の生息や貧酸素水塊からの逃避が可能な地形創出が期待される。
- ・ 窪地内の一部をIL=4の覆砂材を使用して埋め立て、天端部の水深が12m、広さ300m×300m、斜面勾配が概ね1:3となるようなマウンドを造成する設定。

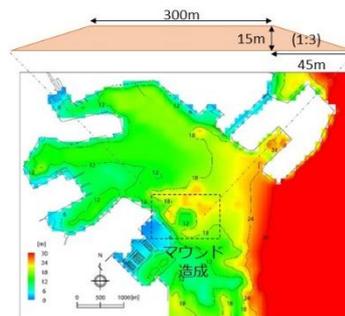


図 Case5の地形データ

26

Case6 奥部における海底構造物設置

- ・ 貧酸素化は夏季の密度成層の形成により鉛直混合が抑制されることが原因となるため、鉛直方向の流動操作により鉛直混合を促進する対策案が考えられる。
- ・ 根岸湾内では船舶の航行を妨げる大規模な構造物は設置し得ないが、池田ら(1992)は湧昇流の発生実験によりV字型構造物により構造物高さの数倍の湧昇効果が得られることを報告している。
- ・ 船舶の航行に必要な水深を確保するため、湾奥1の境界付近に海底から水深14mまでの高さで連続的にV字型の遮蔽物を設置する。
- ・ 図中矢印はADCPで観測された底層流の卓越流向であり、V字型構造物は流れに対して最も湧昇効果が期待される向きに配置される。

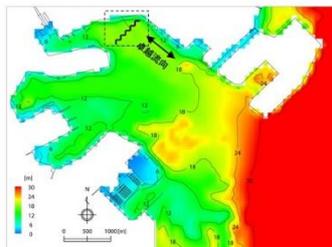
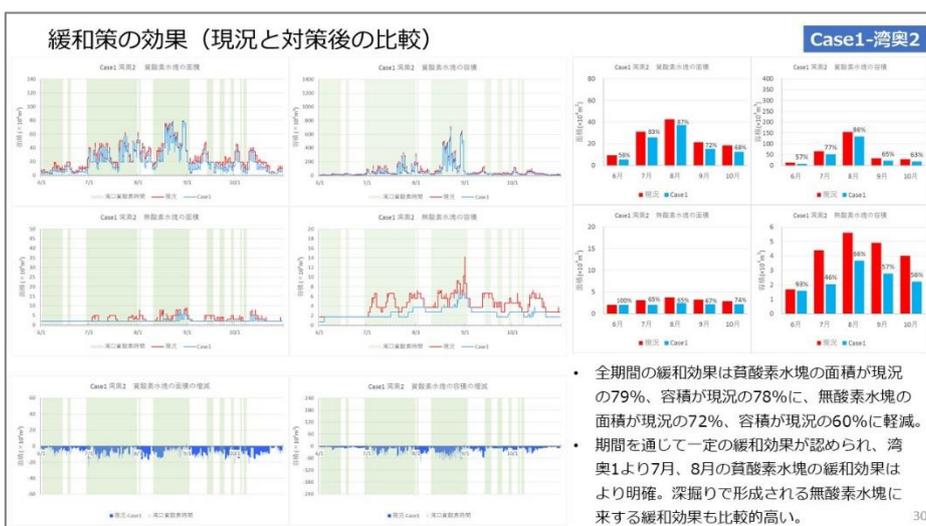
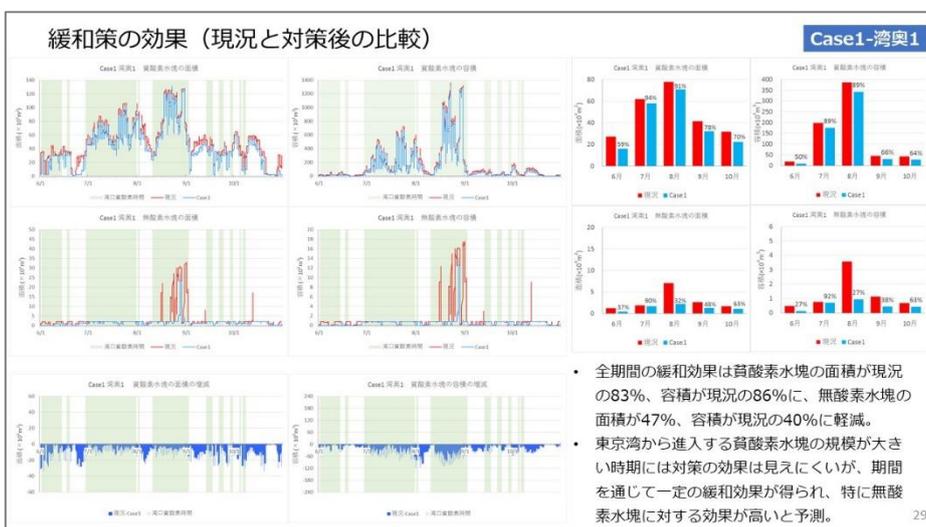


図 Case6のV字型遮蔽物設置位置

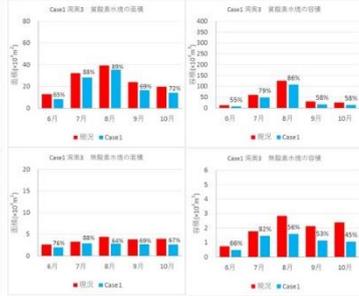
27

[付図] 緩和策の効果（現況と対策後の比較）



緩和策の効果（現況と対策後の比較）

Case1-湾奥3

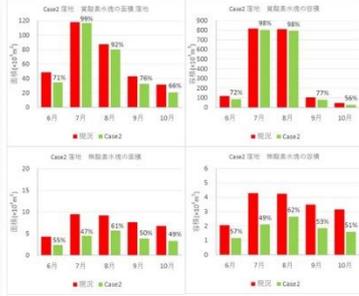
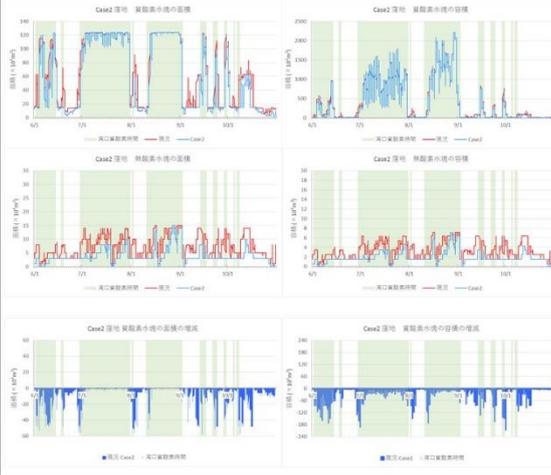


- 全期間の緩和効果は貧酸素水塊の面積が現況の80%、容積が現況の77%に、無酸素水塊の面積が現況の72%、容積が現況の58%に軽減。
- 湾奥1、湾奥2と同様に期間を通じて一定の緩和効果が認められた。

31

緩和策の効果（現況と対策後の比較）

Case2-窪地

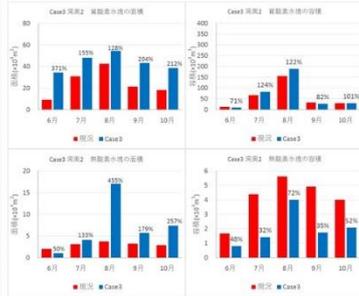
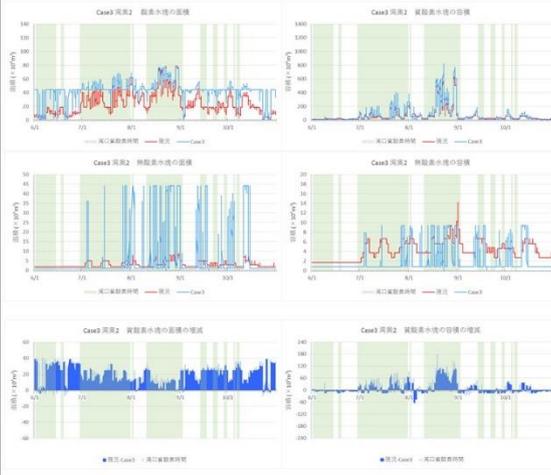


- 全期間の緩和効果は貧酸素水塊の面積が現況の87%、容積が現況の94%に、無酸素水塊の面積が現況の53%、容積が現況の54%に軽減。
- Case1に比べ、東京湾から進入する貧酸素水塊の影響を受ける期間の効果が小さい。
- 窪地内の無酸素化の軽減効果は認められた。

32

緩和策の効果（現況と対策後の比較）

Case3-湾奥2



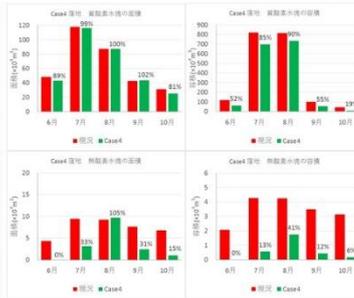
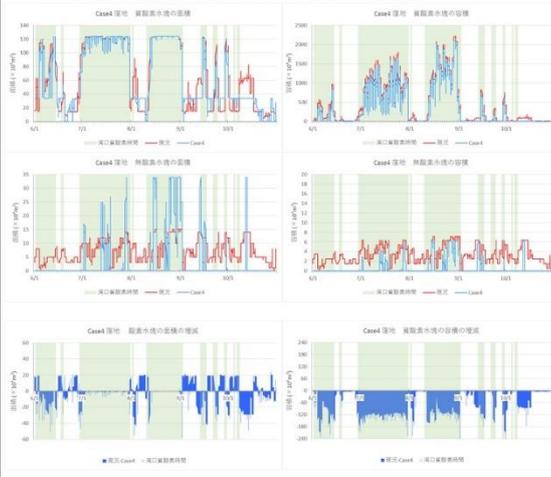
- 全期間の緩和効果は貧酸素水塊の容積が現況の114%に増加したが、無酸素水塊の容積は現況の49%に軽減。
- 7月から8月の貧酸素水塊の容積が拡大し、航路からの海水交換促進の結果、東京湾からの貧酸素水塊が導水されると推察。

※モデルの設定上、面積割合は評価対象外。

33

緩和策の効果（現況と対策後の比較）

Case4-窪地

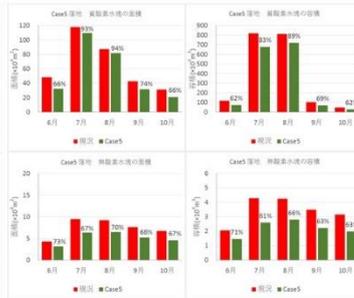
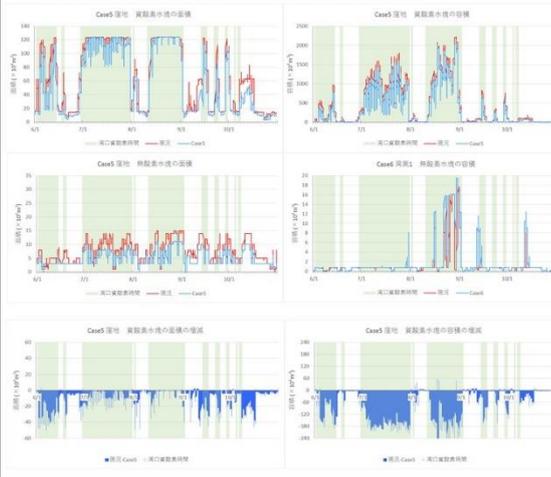


- 全期間の緩和効果は硝酸素水塊の面積が現況の96%、容積が現況の82%に、無酸素水塊の面積が現況の44%、容積が現況の17%に軽減。
- Case2同様に東京湾から進入する硝酸素水塊の影響で面積に対する緩和効果は不十分。
- 埋戻しにより硝酸素水塊の容積、窪地内の無酸素化の軽減効果は認められた。

34

緩和策の効果（現況と対策後の比較）

Case5-窪地

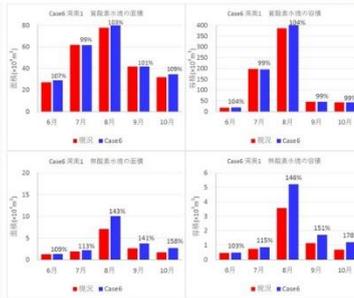
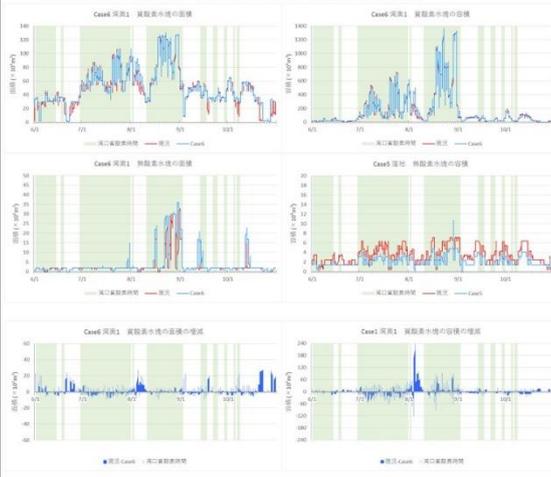


- 全期間の緩和効果は硝酸素水塊の面積が現況の84%、容積が現況の83%に、無酸素水塊の面積が現況の69%、容積が現況の64%に軽減。
- Case4と比べ、窪地内に浅い水域が形成され硝酸素水塊の面積に対する緩和効果はやや高くなるが、深堀が残存するため、無酸素水塊の容積に対する緩和効果は小さくなった。

35

緩和策の効果（現況と対策後の比較）

Case6-湾奥1



- 全期間の緩和効果は硝酸素水塊の面積が現況の103%、容積が現況の102%に、無酸素水塊の面積が現況の138%、容積が現況の144%と現況に比べて増加。
- 遮蔽物により、湾奥部が硝酸素状態でない場合には溶存酸素を供給する効果のある底層の海水交換が抑制されてしまう。

36

【参考文献】

- 神奈川県水産技術センター (2018) 平成 29 年度東京湾貧酸素水塊対策のための数値モデル開発業務報告書.
- 神奈川県水産技術センター (2019) 平成 30 年度東京湾貧酸素水塊対策のための数値モデル開発業務報告書.
- 神奈川県水産技術センター (2020) 令和元年度東京湾貧酸素水塊対策のための数値モデル開発業務報告書.
- 神奈川県水産技術センター (2019) 平成 30 年度根岸湾における底層環境実態解析業務報告書.
- 神奈川県水産技術センター (2020) 令和元年度根岸湾における底層環境実態解析業務報告書.
- 中川康之 (2002) 東京湾奥部での底泥巻き上げとその粒度分布特性について. 海岸工学論文集, 49, 1046-1050p.
- 信澤雄一郎・村上和男・北村友裕・小泉俊昌・亀山豊・小松勝久 (2005) 横浜港の底泥からの栄養塩の溶出と覆砂の効果に関する現地調査と室内実験. 海洋開発論文集, 21, 737-742p.
- 小川大介・村上和男・大宮将司・片倉徳男 (2008) 内湾域における底泥の栄養塩溶出および酸素消費に関する現地調査と室内実験. 海洋開発論文集, 24, 663-668p.
- 柳哲雄 (1989) 貧酸素水塊のまとめ. 沿岸海洋研究ノート. 26 (2), 141-145p.
- (社)日本水産資源保護協会 (2018) 水産用水基準第 8 版 (2018 年版).
- 宮下寿哉・中村由行・比嘉紘士・田中陽二・伊藤比伽留・池津拓哉・金谷一憲・鈴木崇之 (2017) 東京湾における湧昇イベントと青潮発生の有無について. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 73 (2), I_1213-I_1218p.
- 宗景志浩・家田智之 (1992) 浦の内湾における硫化水素の溶出が貧酸素化に及ぼす影響. 海岸工学論文集, 39, 981-985p.
- 齊藤肇 (2006) 富栄養化海域における汚染指標二枚貝のシズクガイの個体群動態に関する研究. 水産総合研究センター研究報告. 16, 29-95p.
- 玉井恭一 (1993) シズクガイの貧酸素耐性. 日本水産学会誌. 59, 615-620p.
- 玉井恭一 (1982) 大阪湾におけるスピオ科の多毛類 *Paraprinospio* sp. (A 型) 個体群の季節変動と成長. 日本水産学会誌. 48, 401-408p.
- 横山寿 (1982) 久美浜湾における *Paraprinospio* sp. の生活史 (予報). ベントス研会誌. 23, 56-59p.
- 栗原健夫 (1996) 若狭湾産ヒトデ類の底質と水深による種組成変化. 日本ベントス学会誌, 50, 1-10p.
- 中田喜三郎 (1993) 内湾環境のシミュレーション. 横山長之総合編集「海洋環境シミュレーション-水の流れと生物-」. 白亜書房. 85-169pp.
- 九都県市首脳会議 環境問題対策委員会水質改善専門部会, 平成 27 年 12 月. 東京湾の底質調査結果 (平成 26 年度), 1-46pp.
- 小市佳延・水尾寛己・下村光一郎・西栄二郎 (2008) 横浜市沿岸域における貧酸素化状況調査. 横浜市環境科学研究所報, 32, 46-55p.
- 小市佳延・水尾寛己・下村光一郎・高野善彦・西栄二郎・坂本昭夫 (2009) 浜港の底層環境調査-浚渫覆砂工区-. 横浜市環境科学研究所報, 33, 31-38p.
- 小市佳延・下村光一郎・犬飼まり子・水尾寛己・西栄二郎・坂本昭夫 (2010) 横浜港の底層環境調査-みなとみらい〜瑞穂地区-. 横浜市環境科学研究所報, 34, 16-23p.
- 小市佳延・二宮勝幸・阿久津卓・下村光一郎・犬飼まり子・西栄二郎・坂本昭夫・杉原奈央子・水尾寛己 (2011) 横浜港の底層環境調査-鶴見川河口周辺-. 横浜市環境科学研究所報, 35, 15-22p.
- 小市佳延・阿久津卓・村岡麻衣子・上原直子・二宮勝幸・西栄二郎・坂本昭夫・杉原奈央子 (2012) 横浜港の底層環境調査-山下ふ頭・本牧ふ頭周辺-. 横浜市環境科学研究所報, 36, 9-16p.
- 小市佳延・村岡麻衣子・上原直子・七里浩志・西栄二郎・松尾香菜子・若井美里・坂本昭夫・杉原奈央子 (2013) 横浜港の底層環境調査-根岸湾奥・堀割川河口-. 横浜市環境科学研究所報, 37, 49-55p.
- 小市佳延・村岡麻衣子・浦垣直子・山下理絵・市川竜也・竹田隆彦・西栄二郎・松尾香菜子・堀

- 江智子・坂本昭夫・杉原奈央子（2015）横浜港の底層環境調査-金沢木材港・富岡川河口周辺-。横浜市環境科学研究所報，39，21-26p.
- 井上省吾・西野博史・木村道夫・日比野忠史・首藤啓（2011）石炭造粒物の海底被覆による海域環境の改善効果。土木学会論文集 B3(海洋開発)，67(2)，I_511-I_516.
- 和久光靖・向井良吉・蒲原聡・本田是人・高部昭洋（2013a）三河湾のデッドゾーンにおける環境悪化機構。愛知県水産試験場研究報告，18，1-11p.
- 石田基雄・鈴木輝明（2006）三河湾における浚渫窪地修復事例と実現に至る経緯。海洋理工学会誌，12，65-71p.
- 和久光靖・畑恭子・金子健司・鈴木輝明・高部昭洋（2013b）極沿岸域のデッドゾーン化が内湾の物質循環に及ぼす影響とその改善対策-三河湾における生態系モデルによる解析-。海洋理工学会誌，19(!)，15-27p.
- 渡邊浩二・中川良文・武田真典（2008）湧昇マウンド礁の機能と効果について。海洋開発論文集，24，31-36.
- 池田駿介・武若聡・二瓶泰雄・秋山信義（1922）各種構造物による湧昇流の発生に関する実験的研究。海岸工学論文集，39，896-900p.
- 橋口晴穂・今尾和正・金子健司・宮向智興・森敦史・豊原哲彦・和久光靖・石田基雄・鈴木輝明（2012）浚渫窪地周辺海域における貧酸素化とマクロベントス群集の応答の定量化-三河湾を事例として-。水産工学，49(1)，1-12p.
- 金子健司・橋口晴穂・宮向智興・今尾和正・和久光靖・石田基雄・鈴木輝明（2011）。水環境学会誌，34(3)，47-55p.
- 田島良博（2014）東京内湾の底質と底生生物について，神奈川県水産技術センター研究報告，7，49-60.