

5. 管理方策策定のプロセス

5.1 健全化基本方針の決定

三津湾地域における健全化基本方針

三津湾の海域利用と連携した底質環境の改善と基礎生産力の向上による物質循環健全化

三津湾における健全化基本方針は

『三津湾の海域利用と連携した底質環境の改善と基礎生産力の向上による物質循環健全化』

とし、現在の比較的良好な環境を維持するために、「底質改善対策」と基本として、「栄養塩不足対策」を併用することとした。なお、栄養塩不足対策では、増加した栄養塩が三津湾の富栄養化をもたらしたり、湾外に流出して周辺海域に影響が及ぼしたりしないように、慎重な検討が必要となる。

5.2 管理方策のリストアップ

底質改善対策及び栄養塩不足対策として、全国では様々な取り組みが実施されている。ここでは、論文及び報告書などから情報を収集し、三津湾の物質循環健全化に活用できる可能性がある方策を、表 5.2-1 に示す。

表 5.2-1 管理方策（案）リスト（1）

【底質改善対策】

方策	目的	方策の概要	メリット	デメリット	主な事例・論文
【覆砂】	覆砂によって新たな底質を創造し、底質からの栄養塩の溶出及び酸素消費を抑制する	<p>【主な改善対象】底質</p> <p>【主な指標項目】底質の成分、DO、栄養塩、底生生物</p> <p>【効果】</p> <ul style="list-style-type: none"> • 貧酸素水塊の発生の抑制 • 底質からの栄養塩供給の抑制 • 生物生息状況の変化 	<ul style="list-style-type: none"> • 覆砂材として、カキ殻や鉄鋼スラグも利用可能 • 短期的に効果が得られる 	<ul style="list-style-type: none"> • 事業規模が大きく、多大な経費を必要とする • 覆砂材が底質に埋没して効果が減衰する可能性がある • 覆砂材の下の底質環境が悪化する可能性がある 	<p>長谷川清治（2009）東京湾における覆砂効果のモニタリング評価について. ヘドロ, 104, pp. 18-22.</p> <p>泉田典彦・中泉昌光・三上信雄・米山正樹・若松純子・菊池有（2004）水産系副産物（貝殻）の覆砂代替材としての有効活用に関する実験的研究. 海洋開発論文集, 20, pp. 1043-1048.</p>
【耕耘】	還元状態の底質に酸素を供給することで、底質を改善する	<p>【主な改善対象】底質</p> <p>【主な指標項目】底質の成分（AVS（酸揮発性硫化物）、有機物など）</p> <p>【効果】</p> <ul style="list-style-type: none"> • AVS や有機物量の減少（低水温期を除く） 	<ul style="list-style-type: none"> • 経費が安い • 漁業者が実施可能な簡便な方法 	<ul style="list-style-type: none"> • 効果が一時的である • 一時的に海底直上水のDOが下がる 	<p>江崎恭志・松井繁明（2009）福岡湾における海底耕耘による底質改善効果. 福岡県水産海洋技術センター研究報告, 19, pp. 41-50.</p>
【底質改善剤】 （熱風乾燥カキ殻）	底質の硫化物イオンを吸着し、底質を改善する	<p>【主な改善対象】底質</p> <p>【主な指標項目】底質の成分（AVS や有機物など）や底質間隙水の成分（硫化水素など）</p> <p>【効果】</p> <ul style="list-style-type: none"> • AVS や間隙水中の硫化水素の減少 	<ul style="list-style-type: none"> • 熱風乾燥したカキ殻を使用するため、三津湾で発生するカキ殻の有効利用（地産地消）が可能 • 方法によっては、漁業者でも実施可能になる 	<ul style="list-style-type: none"> • カキ養殖筏などの直下で実施する場合は、工法に工夫が必要 	<p>T. Yamamoto, S. Kondo, K. H. Kim, S. Asaoka, H. Yamamoto, M. Tokuda and T. Hibino (2012) Remediation of muddy tidal flat sediments using hot air-dried crushed oyster shells. <i>Marine Pollution Bulletin</i>, 64, pp. 2428-2434.</p> <p>藤澤真也・近藤正美・岩本俊樹・鳥井正也・穴口裕司・片山真基・田原実（2011）カキ殻など二枚貝の貝殻を利用した閉鎖性海域における底質改良技術の開発. 土木学会論文集 B3（海洋開発）, 67(2), pp. 370-375.</p> <p>岡山県（2013）カキ殻を利用した総合的な底質改良技術ガイドライン.</p>
【人工中層海底】	カキ養殖筏直下に沈降有機物をトラップするための構造物を設置する	<p>【主な改善対象】底質への負荷の軽減</p> <p>【主な指標項目】底質の成分（有機物、T-N、T-P など）</p> <p>【効果】</p> <ul style="list-style-type: none"> • 沈降物を水中で回収するため、海底への有機物負荷が減少する • 中層水中の好氣的環境下における有機物の分解を促進する • 生物生息環境の創造 	<ul style="list-style-type: none"> • 方法によっては、漁業者でも実施可能 	<ul style="list-style-type: none"> • 設置場所の制限（水深や構造物など） 	<p>山本民次・笹田尚平・原口浩一（2009）人工中層海底によるカキ養殖場沈降物量の軽減能評価—設置後半年間の調査から—. 日本水産学会誌, 75(5), pp. 834-843.</p> <p>加村聡・大原啓史・片山貴之・片山真基（2012）人工中層海底による閉鎖性海域における生物生息環境の改善技術. 第15回日本水環境学会シンポジウム講演集, pp. 22-23.</p>

表 5.2-1 管理方策（案）リスト（2）

【底質改善対策】

方策の概要	目的	方策の概要	メリット	デメリット	主な事例・論文
【底生生物（ナマコなど）を用いた底質浄化】	底生生物の底質浄化機能を利用して、有機物を減少させる	<p>【主な改善対象】底質、底生生物</p> <p>【主な指標項目】底質の成分（有機物など）、底生生物</p> <p>【効果】</p> <ul style="list-style-type: none"> • 底質の有機物を減少させて底生生物を増やす • 漁獲対象種（ナマコなど）の成長を促す 	<ul style="list-style-type: none"> • ナマコの場合、夏眠する場所として、カキ殻を利用できる • ナマコの場合、漁獲することで栄養塩類を系外除去が可能になる 	<ul style="list-style-type: none"> • 成長や生存などをコントロールできない • 貧酸素水塊などが発生する劣悪環境には適用できない • 移植した生物が死亡すると、その遺骸が有機物の負荷源になる 	岡本健太郎・山本潤・上平大介（2009）底質が汚濁した港内でのナマコの摂餌行動について．第52回北海道開発技術研究会，環-32.

表 5.2-1 管理方策（案）リスト（3）

【栄養塩不足対策】

方策の概要	目的	方策の概要	メリット	デメリット	主な事例・論文
【湾口部への構造物設置】	湾外との海水交換を抑制するために、堤防、潜堤もしくは洋上風力発電施設を設置する	<p>【主な改善対象】 栄養塩</p> <p>【主な指標項目】 水質（有機物、栄養塩類及びプランクトンなど）、流況</p> <p>【効果】</p> <ul style="list-style-type: none"> •流況変化に伴う栄養塩の増加 •栄養塩の増加に伴うプランクトンの増加 	<ul style="list-style-type: none"> •湾内の物質の滞留時間を長くする •自然エネルギー（洋上発電）の地産地消 •カキの大粒化に期待 	<ul style="list-style-type: none"> •多大なコストがかかる •海域の富栄養化を適正にコントロールするのが難しい •貧酸素水塊が発生する可能性が高まる •他の水面利用との調整が難しい 	海域の物質循環健全化計画播磨灘北東部地域検討委員会・環境省（2013）播磨灘北東部地域ヘルシープラン（案）
【カキ養殖量の調整】	カキ養殖筏の配置を変更、または養殖量を調整することで、物質循環を改善する	<p>【主な改善対象】 カキ</p> <p>【主な指標項目】 水質（栄養塩類及びプランクトンなど）、カキの成長</p> <p>【効果】</p> <ul style="list-style-type: none"> •養殖期間（イキス、ヨクセイ、ノコシ）毎の筏の配置を環境に合わせて変更する •カキ養殖量を三津湾の環境収容力に合わせて調整(多くの場合削減)する 	<ul style="list-style-type: none"> •カキによる湾内の物質の利用効率を最大にする •養殖量の削減に伴うカキの大粒化に期待 	<ul style="list-style-type: none"> •地元産業との兼ね合い •海面利用上の調整が必要 •三津湾の環境収容力の精査が必要 	
【施肥】	カキの付着物または枯れたアマモを水中に係留し、それらを分解させることによって、栄養塩濃度を上昇させる	<p>【主な改善対象】 栄養塩の添加</p> <p>【主な指標項目】 水質（栄養塩類、植物プランクトンなど）</p> <p>【効果】</p> <ul style="list-style-type: none"> •有機物が分解され無機物化することで、栄養塩が増える •栄養塩濃度の上昇によって、植物プランクトンが増える 	<ul style="list-style-type: none"> •カキ殻の付着物を活用する。 	<ul style="list-style-type: none"> •地元住民、関係者の理解が必要 •三津湾では栄養塩を供給しても流れによって湾外へ流出する可能性がある •湾外へ栄養塩類が流出した際、近隣海域への考慮が必要 	
【下水処理水の放流調整】	浄化センターからの栄養塩濃度の高い（排水基準上限）下水処理水を湾内に放流し、栄養塩濃度を上昇させる。	<p>【主な改善対象】 栄養塩の添加</p> <p>【主な指標項目】 栄養塩類、植物プランクトンなど</p> <p>【効果】</p> <ul style="list-style-type: none"> •栄養塩濃度の上昇によって、植物プランクトンが増える •植物プランクトンの増加によって、カキの餌環境が好転する 	<ul style="list-style-type: none"> •既存施設の活用 	<ul style="list-style-type: none"> •地元住民、関係機関の了解及び調整が困難 •湾外へ流出した際、近隣海域への考慮が必要 	海域の物質循環健全化計画播磨灘北東部地域検討委員会・環境省（2013）播磨灘北東部地域ヘルシープラン（案）

5.3 管理方策の絞り込み

- ✓ 数多くの方策の中から、三津湾に適合すると考えられる管理方策を絞り込んだ結果、以下の5つの方策に関して効果検証を行うこととなった。

【実証試験+シミュレーションによる検証を行う方策】

- 底質改善剤の鋤き込み（底質改善剤+耕耘）

【シミュレーションによる検証を行う方策】

- 人工中層海底
- カキ養殖量の調整
- 下水処理水の放流調整
- 施肥（感度実験）

表 5.2-1 に挙げた方策のうち、実際に三津湾地域で実施可能であり、さらに効果が期待できる方策を絞り込むために、本プランでは下記の項目について検討した。

✓ 対象となる場所の特徴による制限

底質改善対策では、対象海域が湾奥のカキ養殖筏直下となる。対象海域の水深は6～7m程度であるが、養殖カキのレンガ、潮汐によって海底近くまで達することがあると考えられる。そのことを踏まえて底質改善対策を絞り込む必要がある。

三津湾では、湾外水の影響が大きく、流速が速いことが特徴である。よって、栄養塩不足対策、特に栄養塩類を新たに添加するような対策では、どこに添加するか、また近隣海域への影響を検討することが重要になる。

✓ 効果が現れるまでの期間

方策の効果が現れるまでの期間は、方策によって異なる。特に緊急性の高い不健全な事象（例：貧酸素水塊への対策）では、方策効果が比較的早く発揮されるものが望ましい。しかし、三津湾では、一部で底質悪化が確認されているものの、環境は全体的に良好であり、貧酸素水塊の発生は確認されていない。そのため、本プランにおける本項目の検討は、他項目の検討より優先順位が低いと考え、今後の本プランの見直しで参考にするための資料として検討した。

✓ 効果の持続性

方策の効果は、課題に対して持続的かつ自律的に将来に及ぶことが望ましい。そのために、リストアップした方策に関して、それらの効果の持続性についても検討し、絞り込むこととした。

✓ 簡便性

方策を実施する場合、実施主体が誰であるかで制約になることがある。実施主体が誰であろうとも実施可能な方策であることが望ましい。特に、漁業者はほぼ毎日、海で作業をしており、三津湾を熟知しているため、漁業者が実施できる簡便性を備えていることはとりわけ重要である。

✓ コスト

方策を実施する場合、必ずコストが掛かる。特に大規模な工事を必要とする方策では、膨大な経費が必要となり、実施に困難が生じる。そこで、参考程度ではあるが、できる範囲内で各方策のコストを評価することとした。

上記の検討項目につき、表 5.2-1 で挙げた方策を三津湾地域の現状に即して、表 5.3-1 のように評価した。

表 5.3-1 管理方策（案）の評価（1）

【底質改善対策】

方策	対象海域の制限	効果を現れるまで期間	効果の持続性	簡便性	コスト（金額は参考値）
【覆砂】	× 対象海域の水深が浅いため、実施した場合、海域利用ができなくなり、カキ養殖場への影響が懸念される	○ 覆砂材及び覆砂厚によるが、栄養塩の溶出などの水質、底質への効果はすぐに現れると考えられるが、生態系への効果は長期的な視点が必要	？ 水産庁のマニュアルでは10年と記載しているが、関東経済産業局では1.5年（新生堆積物が多い海域）	× 事業規模が大きく、作業も大規模である	× 関東経済産業局では、覆砂材として鉄鋼スラグを想定した場合、覆砂実施の単価は3,000円/m ³
【耕耘】	△ 養殖筏を動かす際に、漁船による実施が可能である	○ AVS（酸揮発性硫化物）は、1日後には効果が現れる	× 有機汚濁を軽減する効果は1～2週間程度	○ 地元住民（漁業者など）で実施可能	○ 耕耘器具及びポンプなどで20～30万円程度
【底質改善剤】 （熱風乾燥カキ殻）	○ 流れが緩やかであり、再懸濁しにくい場所、かつ水深が浅くても施工可能	○ 硫化水素の低減効果は、10日目には現れる	○ 持続性は、本モデルのシミュレーションの結果によると、10年	○ 地元住民（漁業者など）で実施可能	○ 熱風乾燥カキ殻の単価は、600～700円/20kg
【人工中層海底】	△ 水深が浅い海域では、養殖カキのレンと衝突する可能性がある	× 効果が現れるまで、長時間を要すると考えられる	△ 持続的な効果を得るには、設置場所の流速、人工中層海底の形状を勘案する必要があり、さらにメンテナンス（人工中層海底に溜まった物質の除去）が必要	△ 地元住民でも可能であるが、筏に設置するには大きな人工物の設置が必要	○ 人工中層海底の材質によっては、安価にできる可能性がある
【底生生物（ナマコなど）を用いた底質浄化】	○ 底生生物の生息水深及び生息環境の条件を満たせば可能であると考えられる	△ ナマコの摂餌試験では、4週間後には、底質の窒素、炭素除去が確認されている	？ 底生生物の生息状況によって変化すると考えられる	？ 継続的に稚ナマコを供給する必要があり、それを人工的に実施するには専門家及び専門施設が必要となる	？ ナマコの生活史が、海域内で完結すれば、安価になる可能性がある

表 5.3-1 管理方策（案）の評価（2）

【栄養塩不足対策】

方策	対象海域の制限	効果が現れるまでの期間	効果の持続性	簡便性	コスト（金額は参考値）
【湾口部への構造物設置】	△ フェリー航路などを考慮する必要がある	？ 構造物の種類（防波堤の種類）によって異なる	？ 海水交換が低下すれば、方策の効果が持続する可能性はあるが、湾内流況の変化に伴い、他の環境項目の悪化（貧酸素水塊の発生など）を招く可能性がある	× 大規模な工事が必要	× テトラポットの20トンクラス（高さ3m）の製作費用：20～30万/個+工事費用など
【カキ養殖量の調整】	○ 現状と変わらない	？ 底質への負荷の減少を把握するには長い年月がかかるので、現時点では不明	○ カキ養殖量を減らして底質改善がみられた場合、その養殖量を維持すれば、改善効果が持続する可能性がある	○ 養殖量削減は、方法として容易であり、地元住民（漁業者）で決定できる	× コスト自体はあまり掛からないと思われるが、養殖量減少と品質向上（大型化）とのバランスに不確実性がある
【施肥】	？ 施肥の原材料及び必要量によって、制限される可能性がある	？ 海水交換が良い三津湾で即効的な効果を得るためには、相当量の施肥が必要になると考えられる	△ 効果を持続させるには、継続的な施肥が必要となる	？ 施肥に用いる資材の種類、量及び方法によって、簡便性が異なる	△ カキの付着物を用いる場合、低コストであるが、養殖棚につける場合は、重量の制限がある
【下水処理水の放流調整】	○ 現在の下水处理場から栄養塩が供給されるので海域選択の検討は不要	△ 排出口付近では即効的な効果が得られるが、海水交換が良い三津湾では、湾全体への効果は不明	△ 排出口付近では、放流調整中は効果が継続するが、三津湾では海水交換が良いので、放流を停止すると効果がなくなる可能性がある	△ 地元住民の理解や関係機関の調整が必要	△ 大規模な新規設備は必要なく、コストもかからないが継続的なモニタリングと放流調整との間でフィードバックが必要

表 5.3-1 の評価結果を受けて、以下のように、さらに 5 つの方策に絞った。

【底質改善対策】

“底質改善剤+耕耘(方策名：底質改善剤の鋤き込み)”及び“人工中層海底”

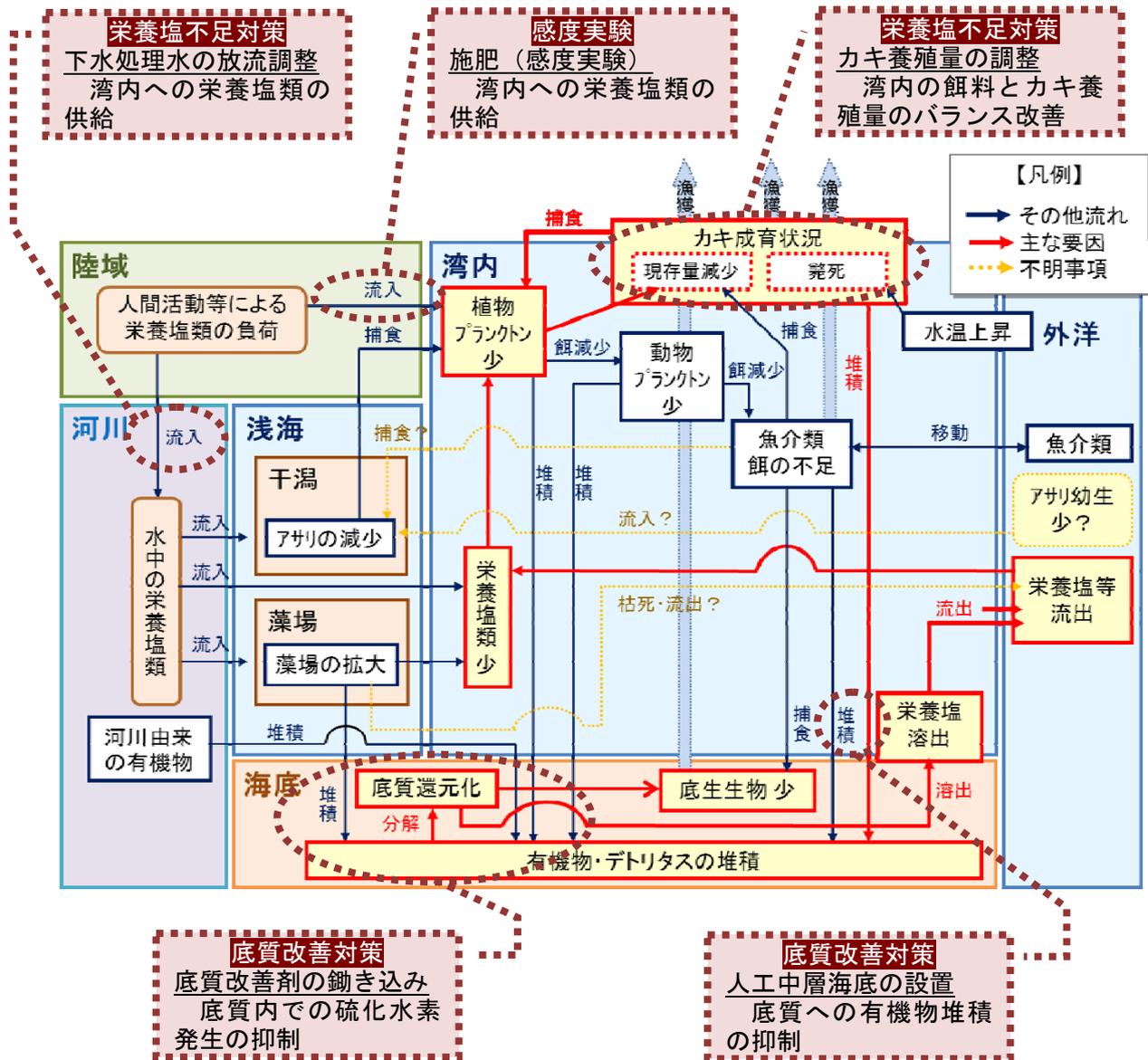
【栄養塩不足対策】

“カキ養殖量の調整”及び“下水処理水の放流調整”

【感度実験】

“施肥”

上記の方策と不健全な事象との関連を図 5.3-1 に図示した。これらのうち、現在の三津湾で比較的容易に実施できる「耕耘」と「底質改善剤」については、実海域における実証試験を実施することとした。他の 4 方策に関しては、物質収支モデルによるシミュレーションで評価することとした(表 5.3-2)。また、「施肥」に関しては、今後、三津湾において本プランを見直しする際に参考となるよう、シミュレーションによる感度実験を行った。



※図中の引き出し枠(点線)は施すべき対策を示す。

図 5.3-1 三津湾の物質循環と管理方策(案)との関係

表 5.3-2 管理方策（案）リスト

方策	選定理由	効果の把握方法
耕耘	底質改善剤の鋤き込みの対照実験として実施できる（底質改善剤のみの効果の把握）	実証試験結果及び シミュレーション （方策名：底質改善剤の鋤き込み）
底質改善剤	底質改善剤の効果の即効性及び持続性、特に硫化水素の減少が期待でき、本事業内で実施が可能である	
人工中層海底	底質改善の候補地における水深が浅いため、実証試験としては見送った	シミュレーション
カキの養殖量の調整	実際に養殖量を調整するには討議と時間が必要であり、効果が発現するまでに長期間を要するため、実証試験としては見送った	シミュレーション
下水処理水の放流調整	地元住民の理解、行政的な手続き及び効果的な放流プログラム策定に長時間を有するため、実証試験としては見送った	シミュレーション
施肥（感度実験）	シミュレーションの結果、海水交換が良い三津湾では膨大な量の栄養塩負荷が必要であり、今年度の実施は不可能と判断 （ただし、今後の参考資料として、近隣海域に影響を及ぼさない範囲で、どの程度の栄養塩負荷が可能かを算出）	シミュレーション

5.4 管理方策の効果の検証結果

以下に上記の方策毎に、効果の検証結果をまとめた。

5.4.1 底質改善剤の鋤き込み（実証試験及びシミュレーション）

【底質改善剤の鋤き込み（底質改善剤+耕耘）】

- ✓ 実証試験の結果、硫化物や硫化水素の発生が低減されたので、三津湾の局所的な底質の悪化を改善する方策として有効であると考えられた。
- ✓ シミュレーションの結果にも同様な効果がみられ、約 10 年間は効果が持続すると試算された。

(1) 方策の目的

三津湾では、カキ養殖筏付近の St. 5 において底質の T-N、T-P、TOC 及び硫化物が他地点よりも高くなっている。特に硫化物は毒性の強い硫化水素の発生源となりやすいため、硫化水素を吸着することが知られている熱風乾燥カキ殻^{*}を底質改善剤として鋤き込み、硫化水素の発生を低減させることを目的とした。

(2) 効果の検証方法

1) 実証試験による検証

底質改善剤である熱風乾燥カキ殻を鋤き込む際、底質は耕耘される。そこで、底質改善剤の効果と耕耘の効果を識別するために、実証試験では、“試験区（底質改善剤あり）：以後‘改善区’と記載”、“試験区(底質改善剤なし)：以後‘耕耘区’と記載”及び“対照区”の3区（5m×5m）を設けることとした（図 5.4-1）。また、底質改善剤は、耕耘深度 10cm に、改善剤：底質量=1：2 となるように鋤き込んだ。

実証試験による効果検証のために実施した内容及び現地調査項目を、表 5.4-1 にまとめた。

※熱風乾燥カキ殻とは・・・

400℃で熱風乾燥させた後、大きさ 4～7mm 程度に粉碎したカキ殻のこと

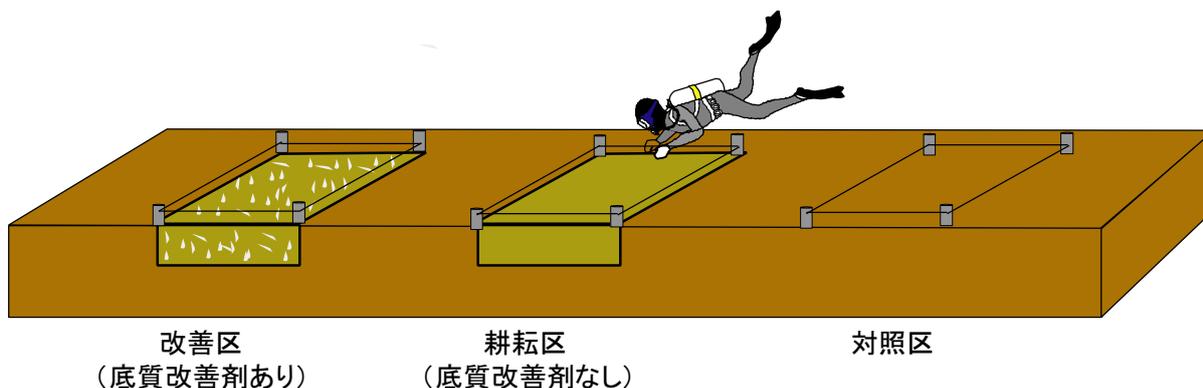


図 5.4-1 実証試験のイメージ

表 5.4-1 実証試験の内容及び調査項目

項目	施工内容	備考
施工時期	平成 25 年 7 月 24 日	
施工規模	5m×5m/区画、底層 (0~10cm)	
施工方法	底質改善剤と堆積物の比率を 1:2 になるようにし、ダイバーで鋤き込んだ	
調査項目	調査目的 (調査実施時期)	調査項目
水塊構造の把握	調査背景として、水塊構造を観測する (平成 25 年 7 月 (施工前)、8 月、10 月の計 3 回)	水温、塩分、Chl. a、溶存酸素量、濁度の鉛直分布
底質改善効果の把握	底質の成分への効果を把握する (平成 25 年 7 月 (施工前)、8 月、10 月の計 3 回)	底質 (0~10cm 層) の AVS (酸揮発性硫化物)、T-N、T-P、Chl. a
底質間隙水効果の把握	底質間隙水中の成分への効果を把握する (平成 25 年 7 月 (施工前)、8 月、10 月の計 3 回)	底質間隙水中 (0~10cm 層) の硫化水素、窒素 (D-T-N、NO ₂ -N、NO ₃ -N、NH ₄ -N) 及びりん (D-T-P、PO ₄ -P)
栄養塩の溶出速度及び酸素消費速度	底質の栄養塩溶出速度及び酸素消費速度の変化に対する効果を把握する (平成 25 年 8 月の計 1 回)	底質 (0~30cm 層) から溶出する栄養塩 (T-N、T-P) 及び底質が消費する酸素量
底生生物調査	底生生物に与える効果を把握する (平成 25 年 7 月 (施工前)、8 月、10 月の計 3 回)	底生生物の出現種及び現存量

2) モデルによる検証方法

効果を検証するためのシミュレーションの設定条件は、以下のようにした（表 5.4-3）。

表 5.4-3 底質改善剤の鋤き込みによるシミュレーションの設定条件

方策	底質改善剤の鋤き込み	
条件	底質間隙水中の硫化水素の吸着	
設定方法	Yamamoto et al. (2012)及び Asaoka et al. (2009)に基づいて、底質間隙水中の硫化水素が底質改善剤（熱風乾燥カキ殻）によって毎日、75.3%吸着（モデル系外に排出）し、吸着量が 12 mgS/g に達したときに吸着効果がなくなるものとした。	
計算ケース	計算 BOX（図 5.4-2 参照）	
	ケース①	BOX7~9 （モデル上で硫化物の上位 3BOX）
	ケース②	BOX3~12 （モデル上でカキ養殖筏として設定している全 BOX）
期間	7月1日に施工（効果開始）	
設定根拠	Yamamoto et al. (2012)、Asaoka et al. (2009)	

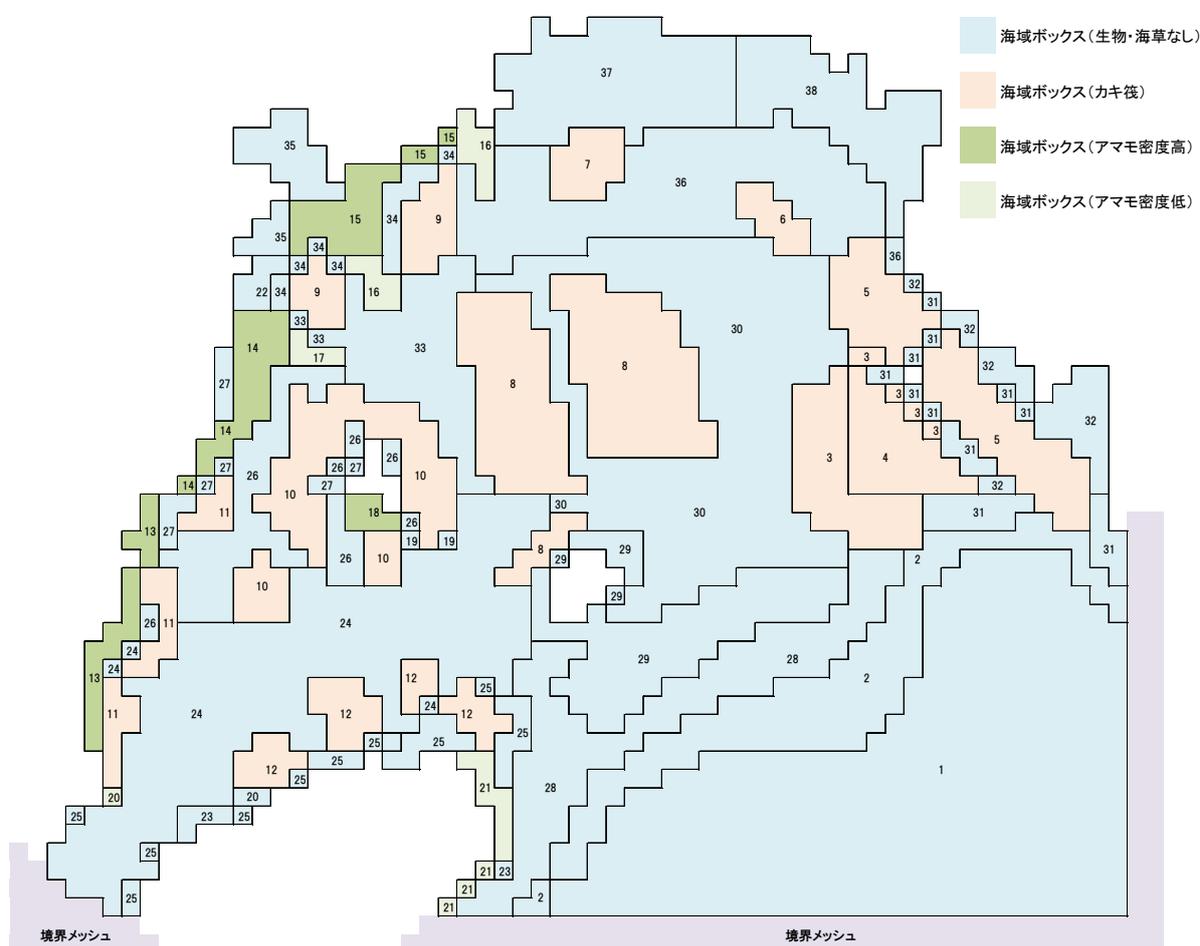


図 5.4-2 モデル上の BOX の位置

(3) 実証試験及びシミュレーションの結果

1) 実証試験の結果

① 水塊構造の把握 (図 5. 4-3)

水塊構造を調べたところ、平成 23 年度及び平成 24 年度の現地調査と同様、全ての調査月 (7 月、8 月及び 10 月) に密度躍層は確認されなかった。また、下層の DO も上層と大きな差異はなく、貧酸素水塊 (水産用水基準: 4.3mg/L 未満) に至らなかった。

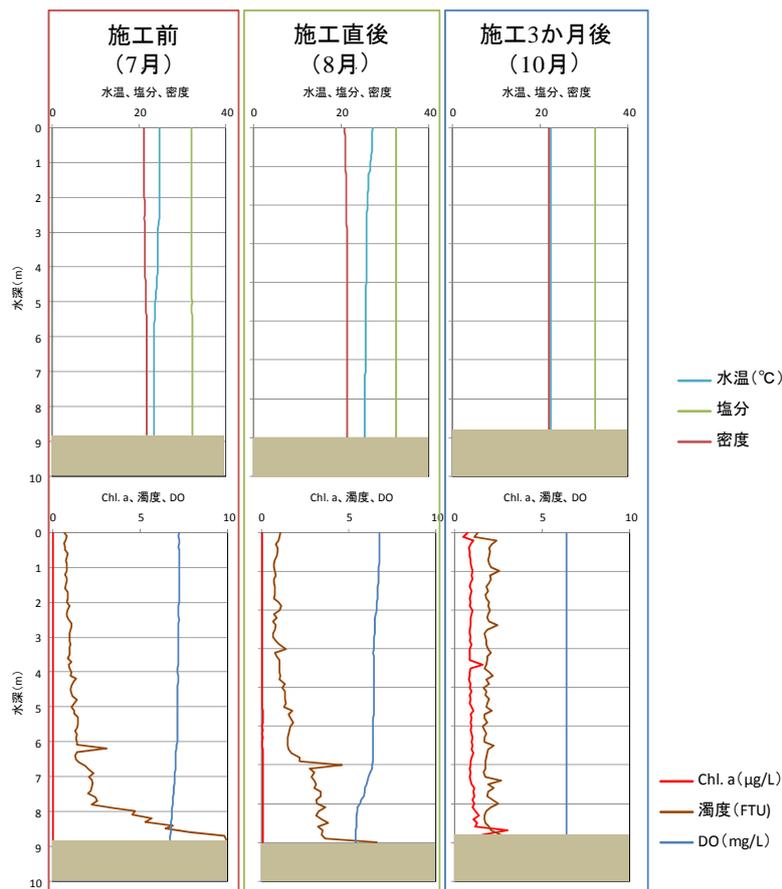


図 5. 4-3 実証試験時の水塊構造

② 底質改善効果の把握

(a) AVS (図 5. 4-4)

底質の AVS (酸揮発性硫化物) は、施工前である 7 月には全区画間で顕著な差はみられなかったが、施工後の 8 月及び 10 月には、耕耘区及び対照区では 7 月より高濃度になったのに対し、改善区では 7 月よりも低くなっていた。図中の 8 月の欄に、平成 24 年 8 月に近接する St. 5 で測定された AVS の値も参考に示した。その結果、平成 24 年の測定値は本実証試験 (平成 25 年) の対照区における値よりも低かったが、改善区における値はそれらよりも明らかに低かった。このことは、本方策によって年変動を超える程度に AVS が低下していると言える。一方、耕耘区の AVS は、8 月には平成 24 年 8 月の値よりも高く、かつ対照区と同様な経時変化を示した。

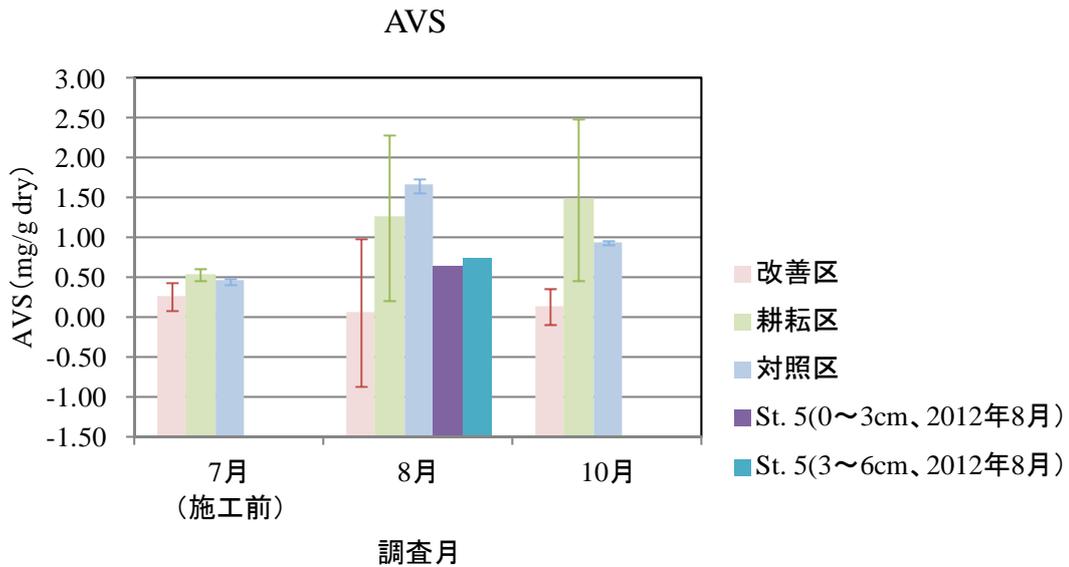


図 5. 4-4 実証試験による底質変化 (AVS)

(b) T-N 及び T-P (図 5. 4-5)

底質の T-N 濃度及び T-P 濃度は、改善区、耕耘区及び対照区において顕著な変化を示さなかった。また、それらの値は、平成 24 年 8 月調査時と同程度であった。以上のように、AVS は底質改善剤の鋤き込みによって低下したのに対し、T-N 及び T-P は変化しなかった。

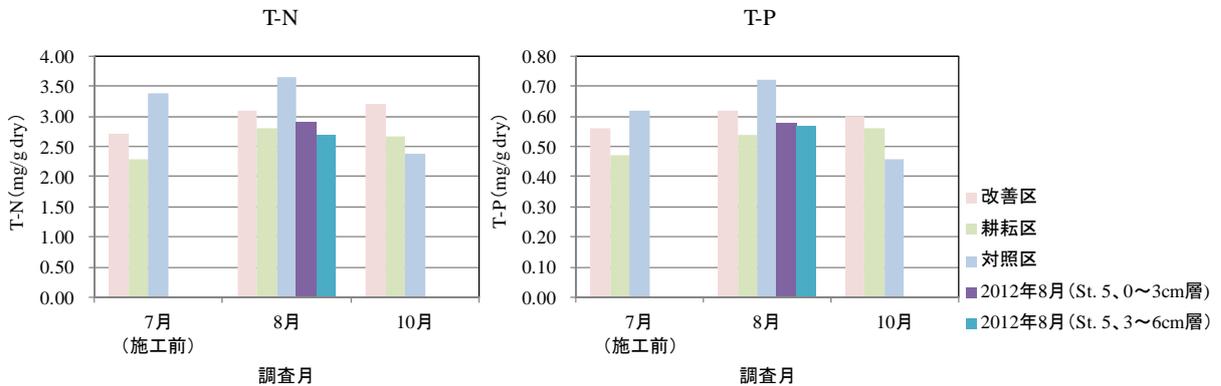


図 5. 4-5 実証試験による底質変化 (左 : T-N、右 : T-P)

(c) Chl. a (表層 1cm、図 5.4-6)

底質の Chl. a は、改善区及び耕耘区において大きな変動を示したが、一定の傾向はみられなかった。対照区における年変動も大きく、AVS、T-N 及び T-P はいずれも平成 24 年 8 月と同程度であったのに対し、Chl. a は平成 24 年 8 月の方が高かった。以上のように、底質の Chl. a は変動性に富んでいるため、その量の変化によって、底質改善剤の働き込みの効果を判定するに至らなかった。

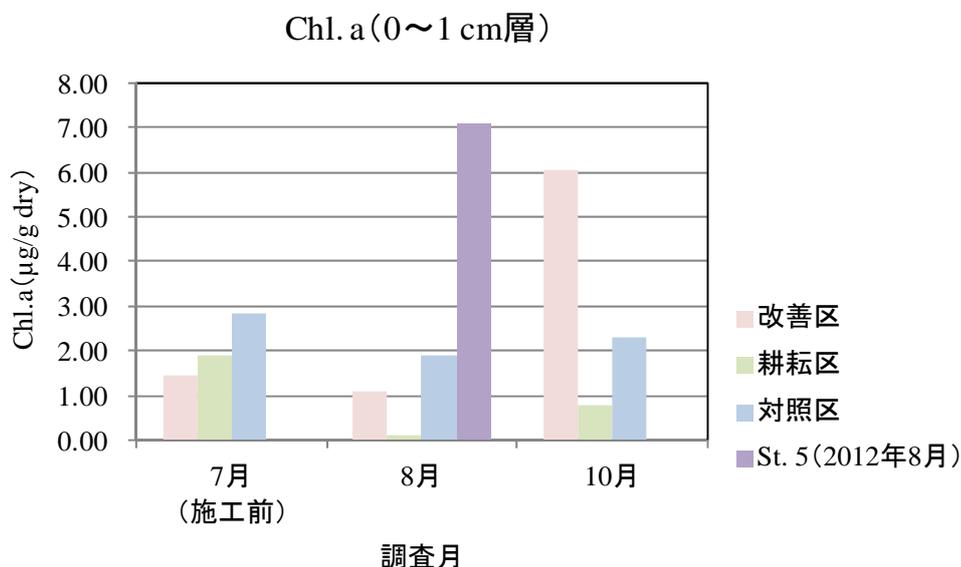


図 5.4-6 実証試験による底質変化 (Chl. a)

③ 底質間隙水効果の把握

(a) 硫化水素 (図 5.4-7)

底質間隙水中の硫化水素濃度は、改善区において 7 月に比べて施工直後の 8 月には顕著に低くなり、10 月にも継続して低かった。改善区における施工前(7 月)との比は、8 月には 17.7%、10 月には 15.6%であった。一方、耕耘区における変動は、対照区の変動と差異がなく、7 月から 8 月にかけてやや増加し、10 月には明らかに減少した。

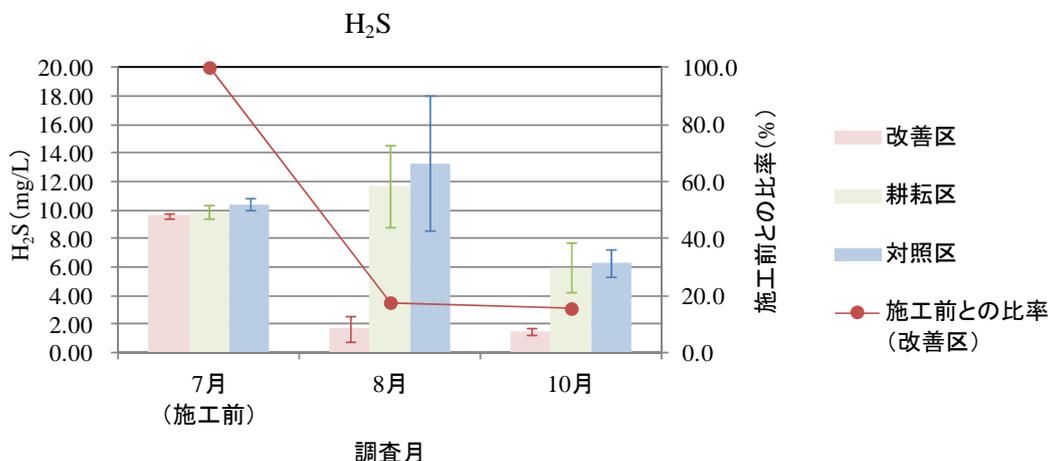


図 5.4-7 実証試験による底質間隙水の変化 (硫化水素)

(b) T-N 及び T-P (図 5.4-8)

底質間隙水中に溶存していた T-N の中で、NH₄-N (アンモニア態窒素) の割合が常に 50% を超えていた。一方で、NO₂-N (亜硝酸態窒素) 及び NO₃-N (硝酸態窒素) はほとんど検出されなかった。また、改善区の T-N 濃度に経時的な変化はなく、他区と比較しても、一定の傾向をもった変化を示さなかった。T-P に関しては、PO₄-P 濃度が主に高く、耕耘区及び対照区に比べて改善区で顕著に高かったが、経時的な変化はみられなかった。

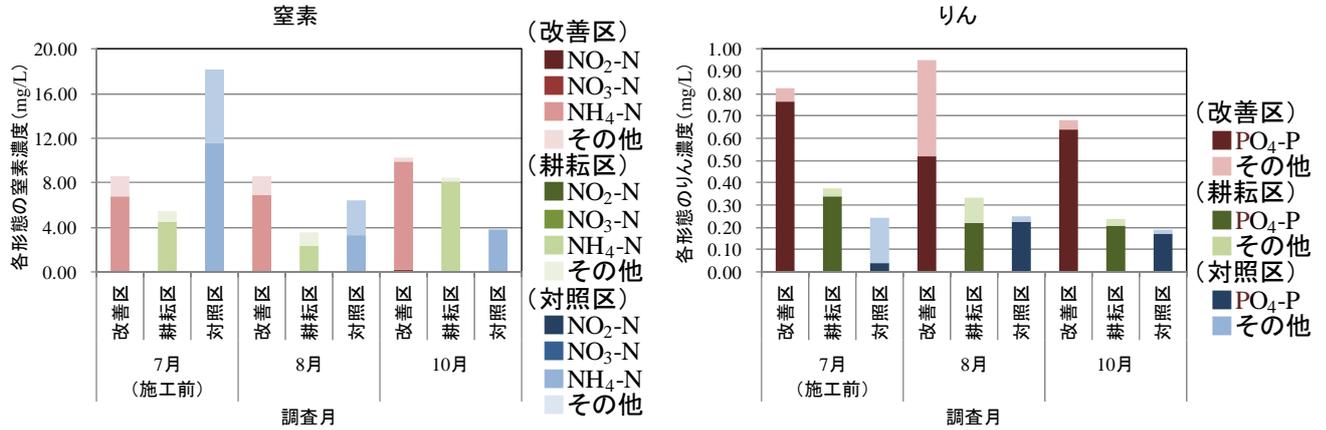


図 5.4-8 実証試験による底質間隙水の変化 (左：窒素、右：りん)

④ 栄養塩の溶出速度及び酸素消費速度

(a) 酸素消費速度 (図 5.4-9)

底質の酸素消費速度を測定した結果、改善区では 2.13mg/m²/day、対照区では 2.38mg/m²/day であり、両区間に差異はみられなかった。これらの値は、平成 24 年 8 月に St. 5 で測定した結果 (2.52 mg/m²/day) と比較しても差はなかった。

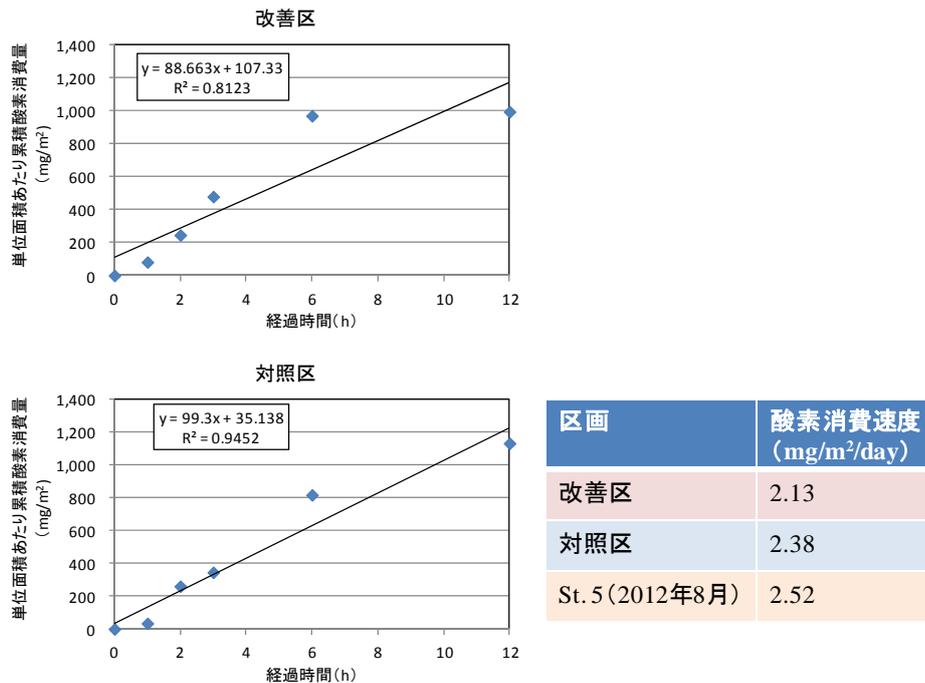


図 5.4-9 実証試験による底質の酸素消費速度の影響

(b) 栄養塩の溶出速度 (表 5.4-4)

底質からの栄養塩の溶出速度を測定 (N=2) した結果、T-N の溶出速度は、対照区 (144.5mg/m²/day) に比べて改善区 (48.2mg/m²/day) で低かった。

T-P の溶出速度も、対照区では 41.4mg/m²/day であったのに対し、改善区では低く、わずかに 0.1mg/m²/day にすぎなかった。

表 5.4-4 酸素消費速度と栄養塩の溶出速度の調査結果

	酸素消費速度 mg/m ² /day	T-N の溶出速度 mg/m ² /h	T-P の溶出速度 mg/m ² /h
改善区	2.13	48.2	0.1
対照区	2.38	144.5	41.4
St. 5 (2012年8月調査)	2.52	-10.1	23.4

⑤ 底生生物調査

底生生物の現存量及び種類数は、全区画ともに7月から10月にかけてほぼ定期的に減少していたが、改善区において10月(施工3か月後)に現存量がやや回復した(図5.4-10)。このとき、第1優占種はそれ以前のカタマガリギボシイソメからルドルフイソメへと変化していた(表5.4-5)。前者のカタマガリギボシイソメは強汚濁指標種として知られており、後者のルドルフイソメはそれに随伴する種といわれている(広島県環境保健協会、2004)。実証試験期間中、耕耘区では一貫してカタマガリギボシイソメが、対照区では8月及び10月になってカタマガリギボシイソメが第1優占種であった。

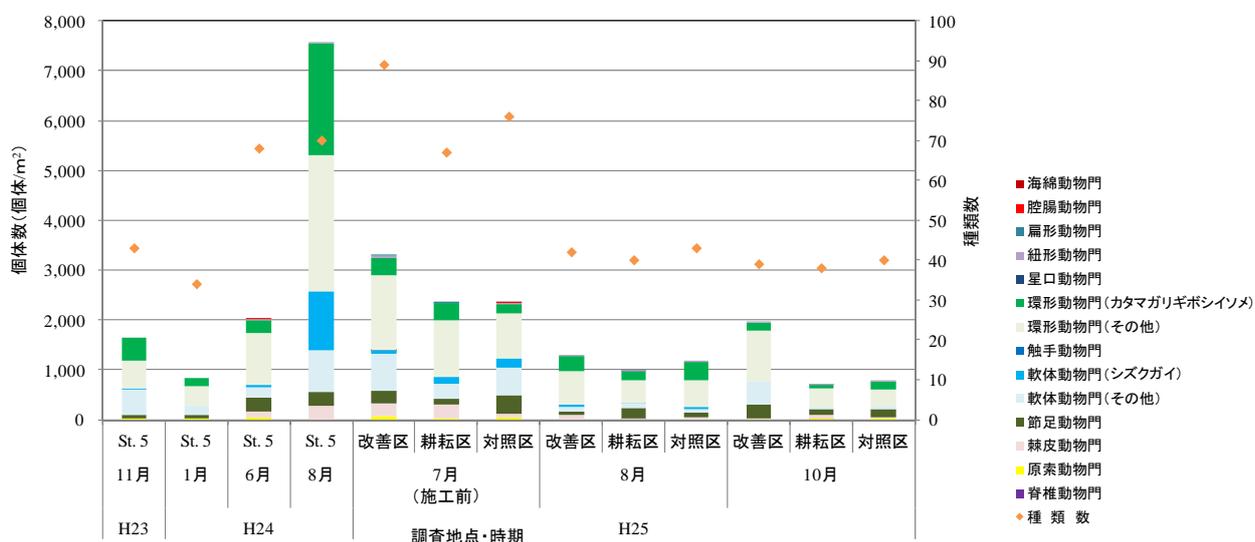


図 5.4-10 実証試験における底生生物調査の結果

表 5. 4-5 底生生物調査結果（優占種とその食性）

地点名 \ 調査時期		施工前(7月)	施工直後(8月)	施工3か月後(10月)
改善区	種類数	89	42	39
	現存量 (個体/m ²)	3,288	1,304	1,955
	優占種	カタマガリギボシイソメ (10.1) キヌマトイガイ (7.3) <i>Harmothoe</i> sp. (6.1)	カタマガリギボシイソメ (24.5) <i>Heteromastus</i> sp. (14.8) ニホンヒメエラゴカイ (10.2)	ルドルフイソメ (21.8) ニホンヒメエラゴカイ (11.9) オトヒメゴカイ科 (7.8)
耕耘区	種類数	67	40	38
	現存量 (個体/m ²)	2,357	986	717
	優占種	カタマガリギボシイソメ (14.1) ニホンヒメエラゴカイ (10.5) <i>Ophiopeltis</i> sp. (8.2)	カタマガリギボシイソメ (17.4) <i>Nebalia</i> sp. (10.8) ニホンドロソコエビ (8.8)	カタマガリギボシイソメ (8.4) <i>Heteromastus</i> sp. (8.4) フサゴカイ科 (6.6) <i>Nebalia</i> sp. (6.6)
対照区	種類数	76	43	40
	現存量 (個体/m ²)	2,364	1,167	770
	優占種	キヌマトイガイ (12.1) <i>Harmothoe</i> sp. (9.0) カタマガリギボシイソメ (7.9) シズクガイ (7.9)	カタマガリギボシイソメ (32.6) フサゴカイ科 (9.2) ニホンドロソコエビ (6.3) <i>Harmothoe</i> sp. (6.3)	カタマガリギボシイソメ (19.9) <i>Pista</i> sp. (6.1) <i>Amaeana</i> sp. (6.1)
St. 5 (昨年度)	種類数		70	
	現存量 (個体/m ²)		7,560	
	優占種		カタマガリギボシイソメ (29.8) シズクガイ (15.6) ニホンヒメエラゴカイ (6.6)	

注：1. () 内の数値は、現存量に対する出現比率 (%) を示す。

2. 優占種は、上位 3 種を示す。

3. 優占種の文字色は、**橙色**は堆積物摂食者、**緑色**は懸濁物摂食者、**青色**は肉食者を示す。

2) 実証試験のとりまとめ

耕耘区と対照区での結果を比較すると、底質の AVS 及び間隙水中の硫化水素にも、また、底質及び間隙水中の栄養塩類にも、ともに明瞭な差異はなかった。さらに、底生生物の現存量及び種類数にも差異はみられず、両区ともにカタマガリギボシイソメが最優占種となった。江崎・松井（2009）は、福岡湾の高水温期における耕耘による汚濁軽減効果は 1～2 週間程度しか持続しないと報告しており、本実証試験の調査頻度では、耕耘の効果を把握することができなかったと考えられる。

一方、改善区において底質の AVS と間隙水中の硫化水素は、耕耘区及び対照区に比べて、施工直後（8 月）だけでなく、施工 3 か月後（10 月）でも顕著に低かった。これらの結果は、耕耘だけの効果は限定的であるが、底質改善剤による硫化水素及び AVS の低減効果は、少なくとも 3 か月は持続することを示している。

江崎恭志・松井繁明（2009）福岡湾における海底耕耘による底質改善効果。福岡県水産海洋技術センター研究報告，19，pp. 41-50.

3) シミュレーションの結果

① 底質間隙水中の硫化水素

表 5.4-3 に示したケース①及びケース②について行ったシミュレーションの結果、両ケースにおいて底質間隙水中の硫化水素は、現況よりも減少することを示した (図 5.4-11)。特に硫化水素濃度が最も高いボックス 7 では、方策開始から計算終了時 (2.5 年後) まで、概ね 70% 以上の減少が持続した。ボックス 7 における硫化水素は、計算終了時までの累積で 3.15mgS/g 吸着されており、これは年平均約 1.17mgS/g 吸着されたことに相当する (図 5.4-12)。この吸着速度が継続すると仮定すると、方策開始から約 10 年後に本実証試験で用いた底質改善剤 (熱風乾燥カキ殻) 1g が持つ硫化水素最大吸着量 (12mgS/g) に達することになる。この最大吸着量に達する (飽和する) までを効果継続年数と考え、表 5.4-3 で設定した計算条件下においては、効果は約 10 年継続すると言える。しかし、底質間隙水中の硫化水素濃度は季節変化しており、元々濃度が低い場所 (例: ボックス 9) では一時的に発生率が吸着能 (硫化水素濃度の 75.3%/日) を超える場合が生じる。本シミュレーションの結果でも硫化水素が前日の濃度の 75.3% 以上増加する可能性があることが示された (図 5.4-13)。

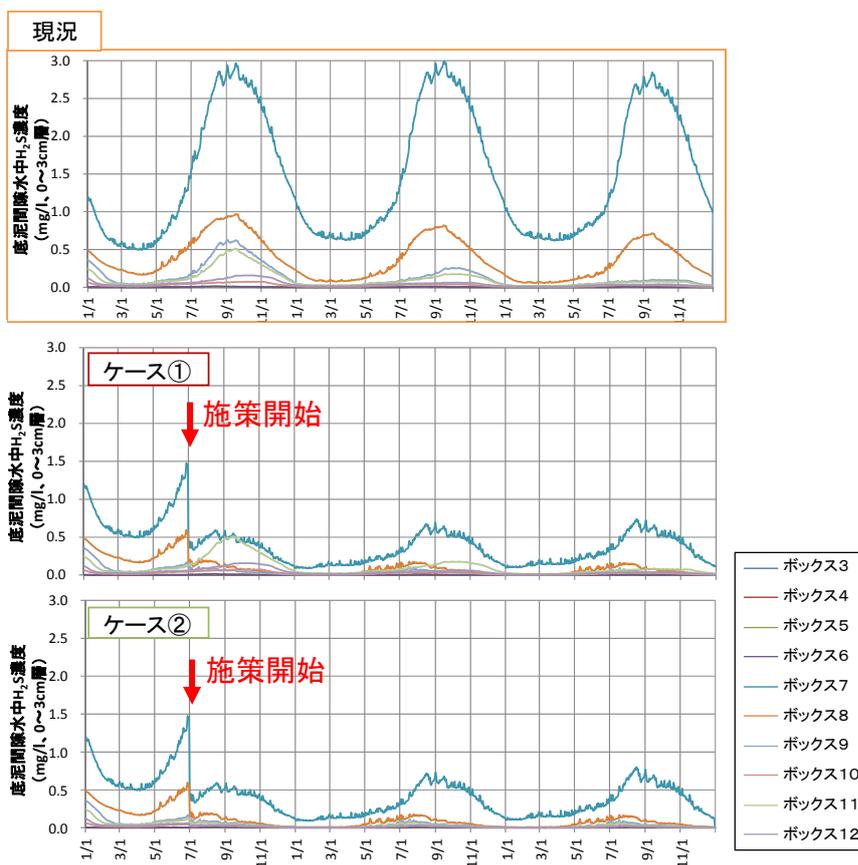


図 5.4-11 シミュレーションによる硫化水素濃度の予測

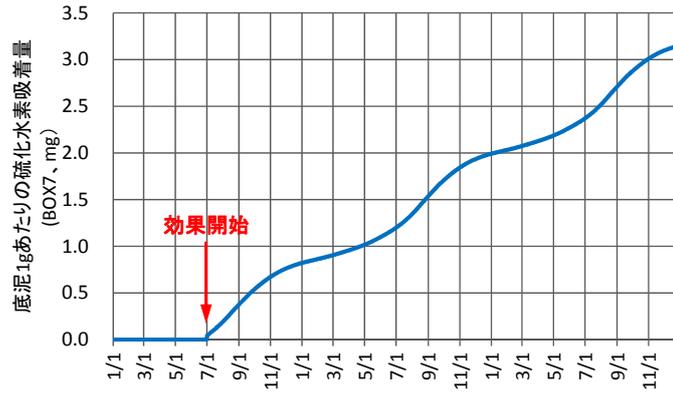


図 5.4-12 シミュレーションによる硫化水素の累積吸着量の予測

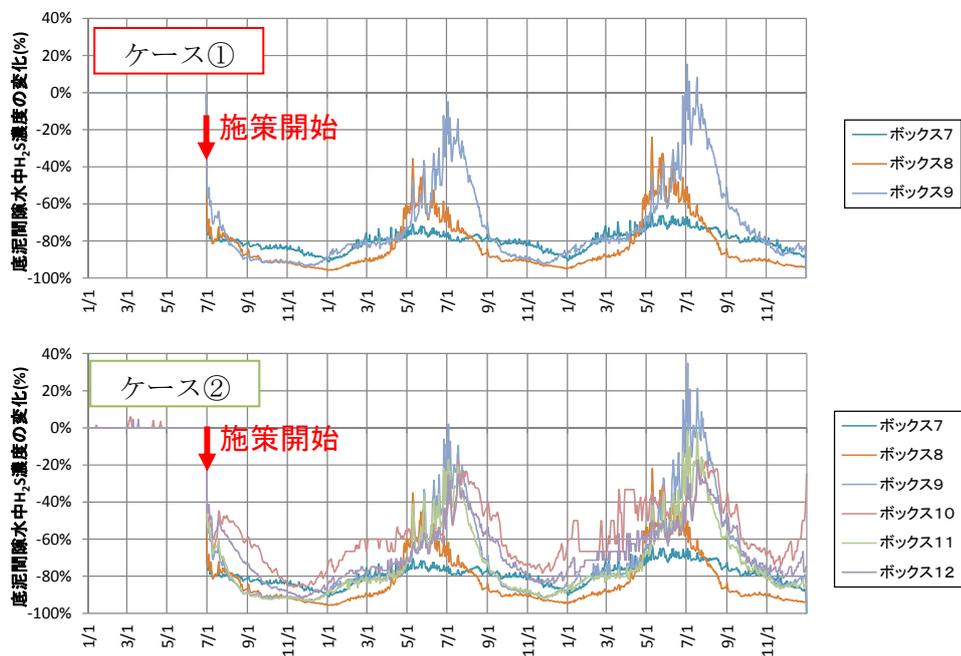


図 5.4-13 シミュレーションによる現況に対する硫化水素の変化率

② 底質の T-N 及び T-P

シミュレーションの結果では、底質の T-N 濃度はほとんど変化しないことを示し(図 5.4-14)、現況に対する変化率が、ケース①、②ともに 1%未満にすぎなかった(図 5.4-15)。また、底質の T-P 濃度もほとんど変化せずに微増するにとどまった(図 5.4-16)。また、現況に対する変化率は、最大増加率がみられたボックス 7 においても約 5%であった(図 5.4-17)。

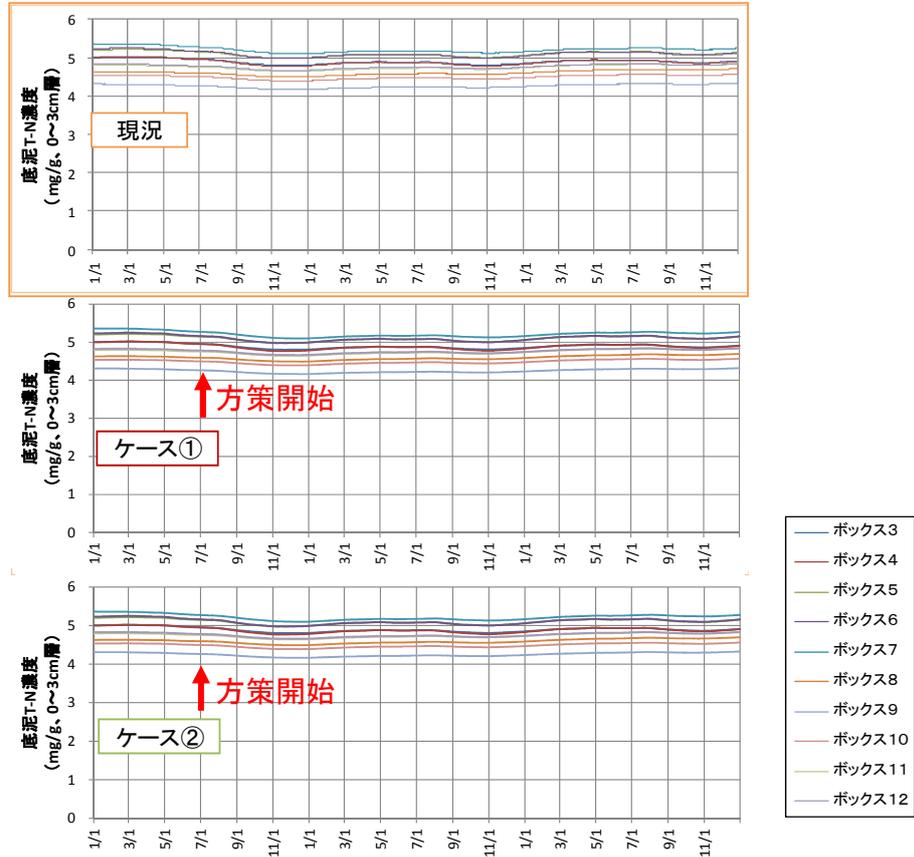


図 5.4-14 シミュレーションによる底質の T-N 濃度の予測

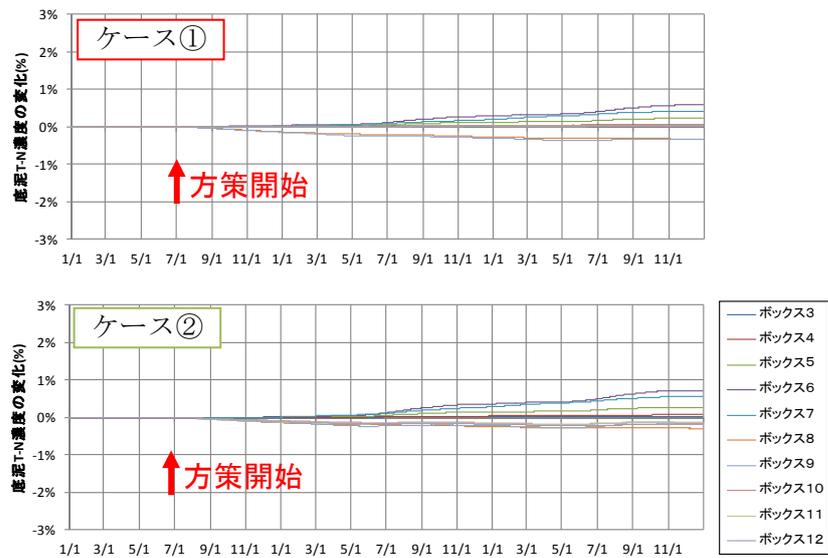


図 5.4-15 シミュレーションによる現況に対する底質の T-N 濃度の変化予測

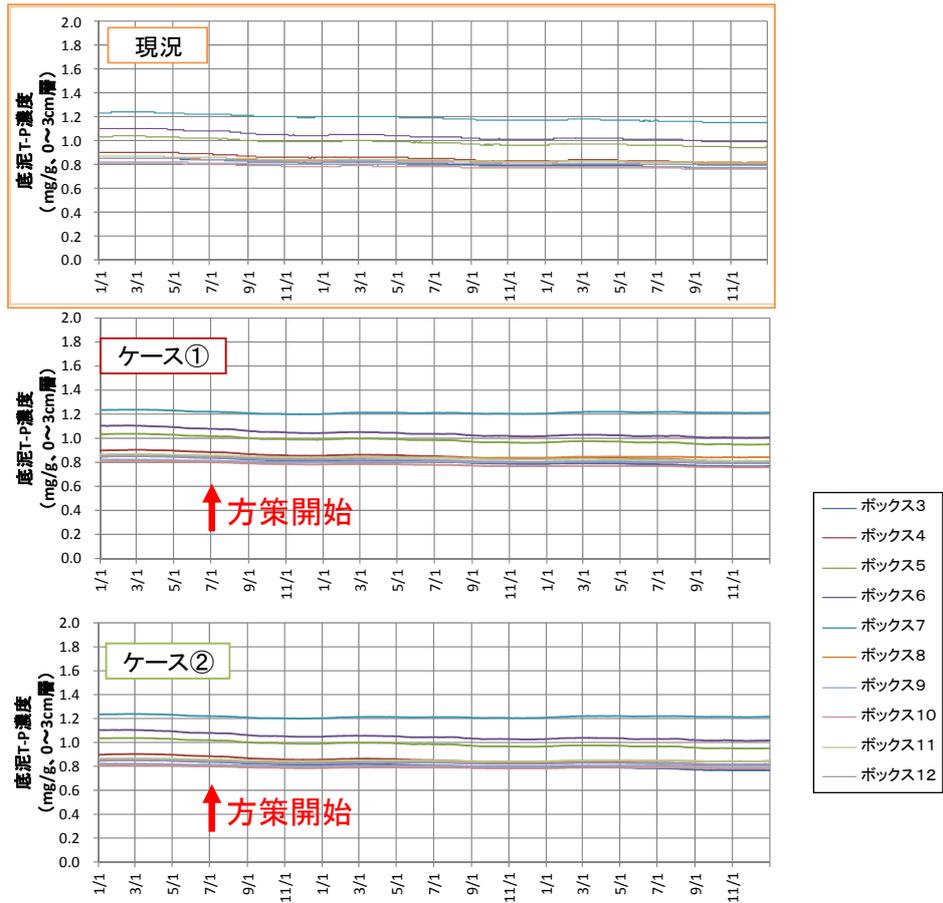


図 5.4-16 シミュレーションによる底質の T-P 濃度の予測

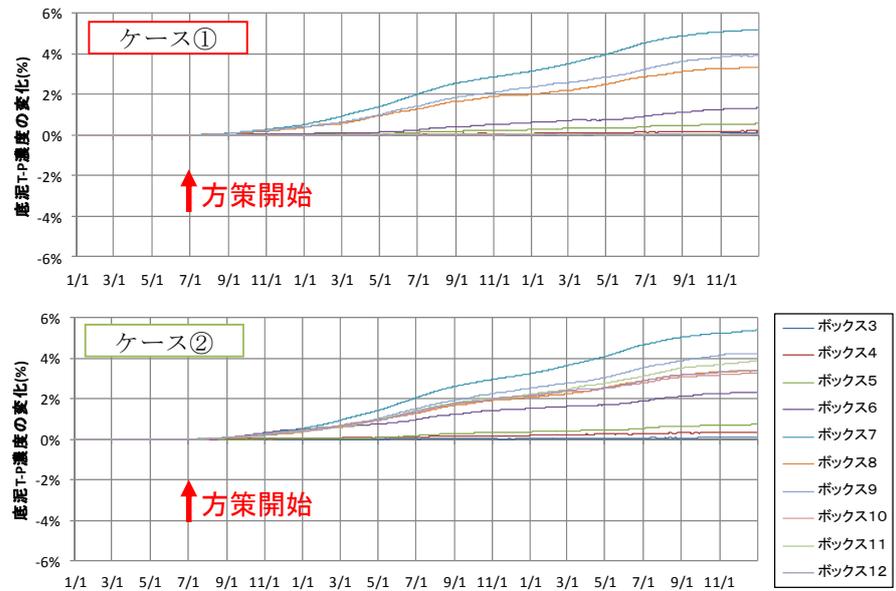


図 5.4-17 シミュレーションによる現況に対する底質の T-P 濃度の変化予測

③ 底生生物の現存量

シミュレーションによる結果では、底生生物の現存量はケース①及び②ともに増加する傾向がみられ（図 5.4-18）、方策を開始して1年9か月後には、最大で184%の増加が予測された（図 5.4-19）。これは、間隙水中の硫化水素が減少し、生息環境が改善された結果である。

また、底生生物から魚類への転換効率を10%と仮定すると、計算終了時（方策開始後2.5年）の魚類推定現存量は、ケース①で31.2%、ケース②で52.7%の増加が見込まれた（図 5.4-20）。

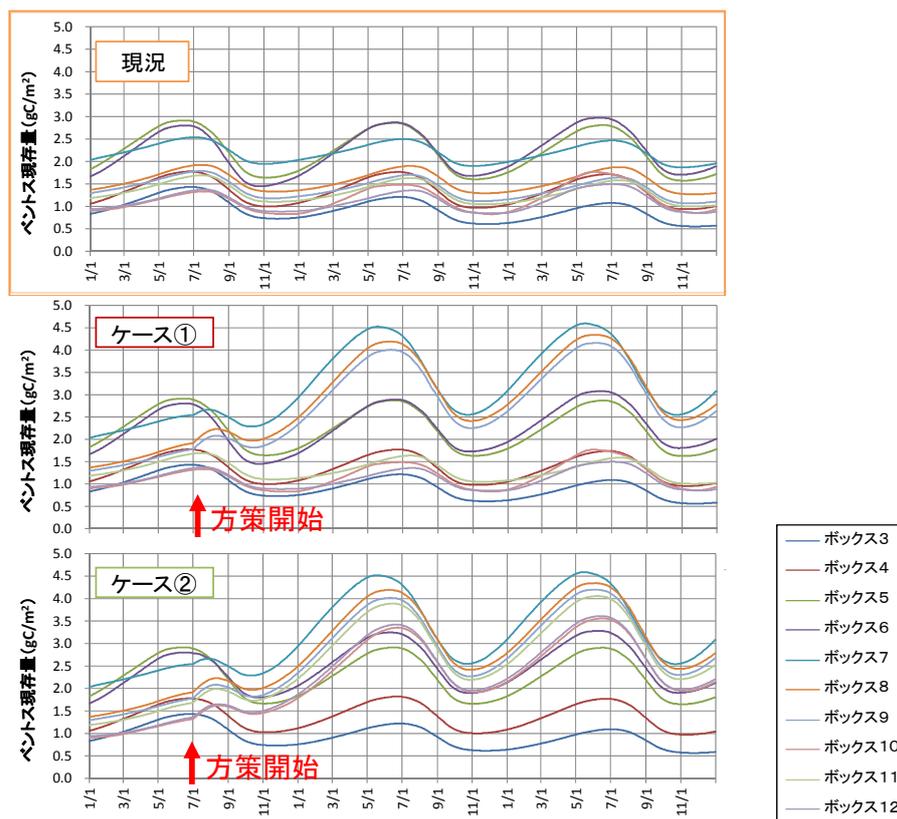


図 5.4-18 シミュレーションによる底生生物の現存量の予測

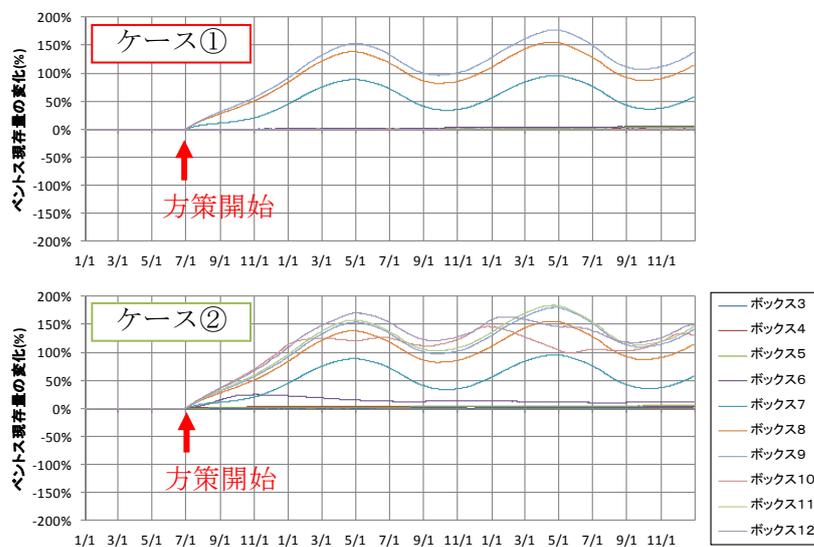


図 5.4-19 シミュレーションによる現況に対する底生生物の現存量の変化予測

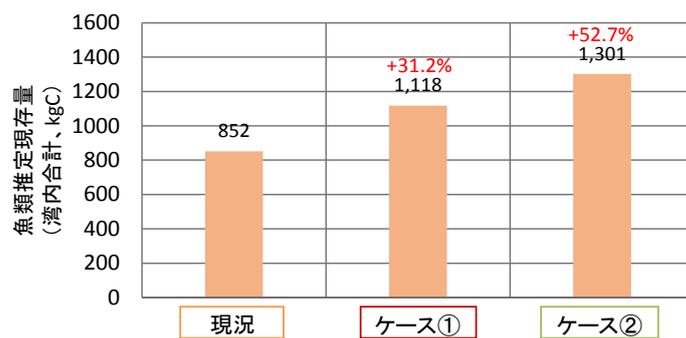


図 5.4-20 湾内合計の魚類推定現存量 (2.5年後)

④ カキの現存量

シミュレーションによる結果では、カキの現存量は、場所によっては徐々に増加し (図 5.4-21)、計算終了時 (方策開始 2.5 年後) にはケース①で最大約 9%、ケース②で最大約 13% の増加が見込まれた (図 5.4-22)。

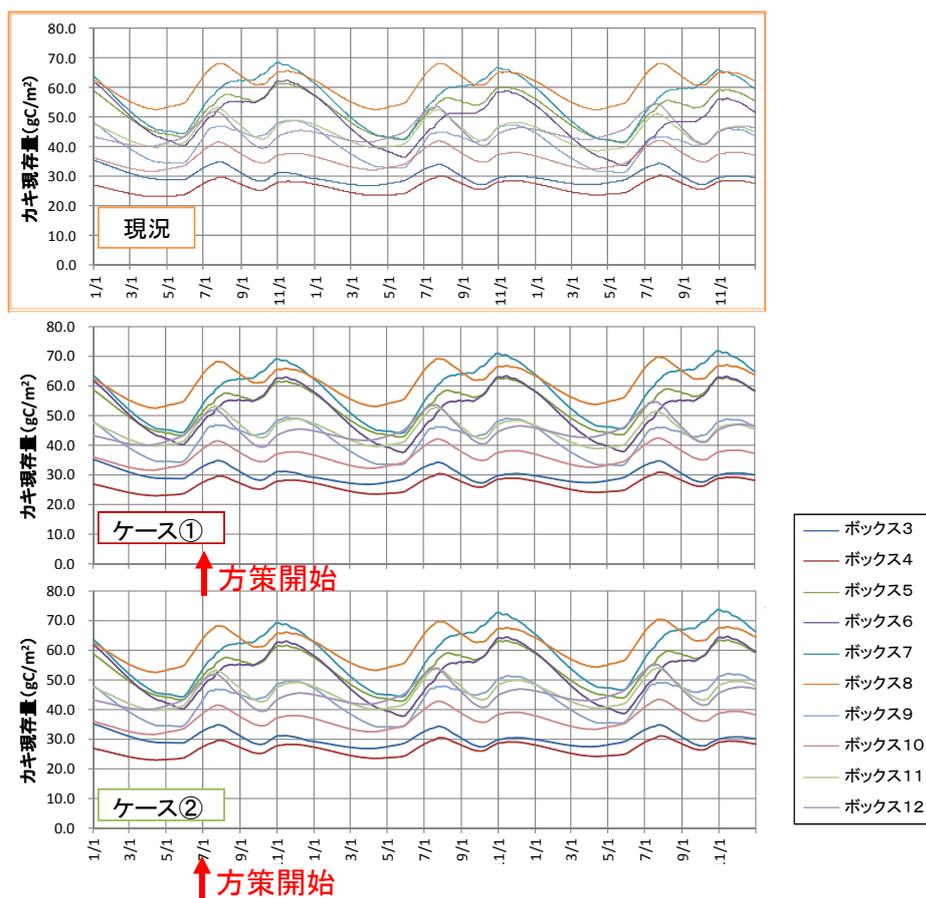


図 5.4-21 シミュレーションによるカキの現存量の予測

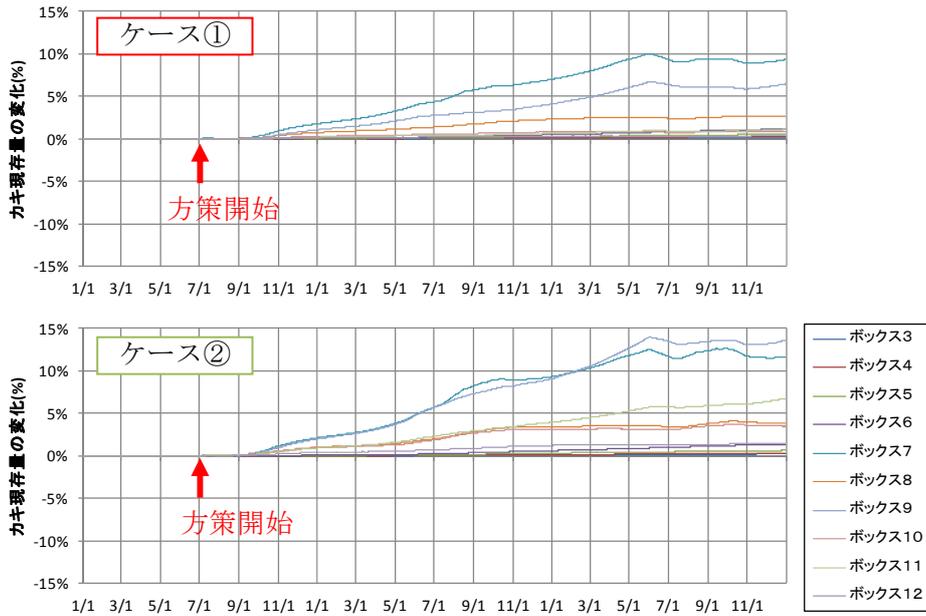


図 5.4-22 シミュレーションによる現況に対するカキの現存量の変化予測

【コラム】底質改善剤（熱風乾燥カキ殻）による硫化水素吸着のメカニズムについて

カキ殻は、炭酸カルシウム (CaCO_3) が主成分であり、それを約 400°C で熱風乾燥すると、一部が酸化カルシウム (CaO) になる。その酸化カルシウムが水 (H_2O) と反応し、水酸化イオン (OH^-) ができ、それが周囲環境を弱アルカリ性にする。

硫黄化合物の動態は、弱アルカリ性 (pH の上昇) になることによって、硫化水素 (H_2S) が硫化水素イオン (HS^-) に変化し、さらに酸素と反応して、化学平衡的に安定な硫酸イオン (SO_4^{2-}) になりやすくなる。それらが、カルシウムイオン (Ca^{2+}) と反応するため、カキ殻表面では硫酸カルシウム (CaSO_4) の形態として検出される。

底質改善剤（熱風乾燥カキ殻）を底質に鋤き込むことで、上記のような化学反応が起きて、硫酸イオン、すなわち硫化水素濃度が低下する。

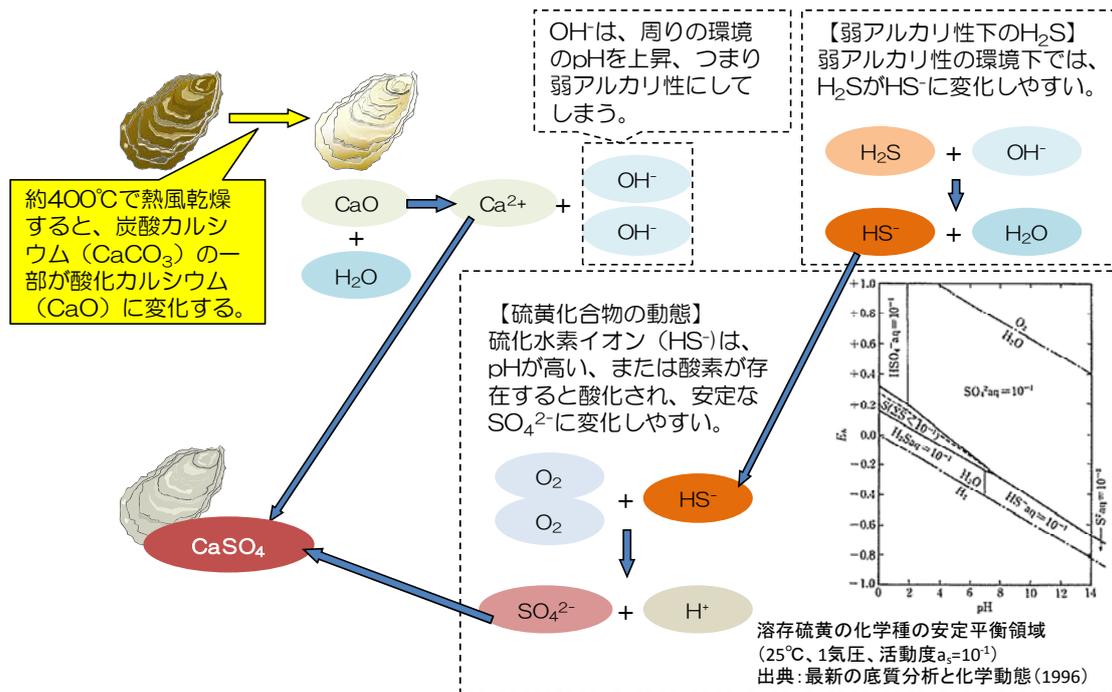


図 底質中の硫黄化合物の化学変化 (イメージ)