

きれいで豊かな海を目指して
地域が主体となる閉鎖性海域の環境改善の手引き

資料編②

英虞湾を対象とした予測・評価について

1. シミュレーションの目的	1
2. 適用するシミュレーションモデルの概要	2
3. 計算条件	4
4. シミュレーションモデルの再現性	12
5. 干潟再生効果の定量化	22

英虞湾を対象とした予測・評価について

1. シミュレーションの目的

シミュレーションの実施にあたり、海水交換性の向上、貧酸素化の解消ならび栄養塩の循環促進に対して、干潟再生効果を定量化することを目的とした。

本検討は、約 2ha の未利用の調整池と海域を分断していた水門を開放し、海水導入が行われた石淵地区の再生干潟（図 1、図 2）をケーススタディとして、再生による干潟・枝湾スケールでの改善効果を明らかとしたものである。

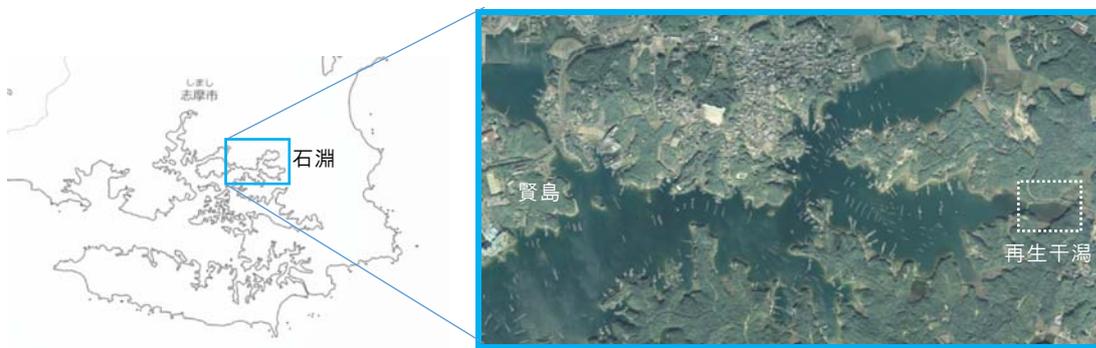


図 1 石淵地区の再生干潟の位置



図 2 石淵地区の再生干潟および潮受け堤防の外観

2. 適用するシミュレーションモデルの概要

適用するシミュレーションモデルは、図 3 に示すように流動モデルと水質モデルから構成される。この 2 つのモデルは、それぞれに独立したモデル（非結合モデル）であり、流動モデルで計算される移流・拡散量、水温、塩分、水位を入力条件として水質計算を行うものである。

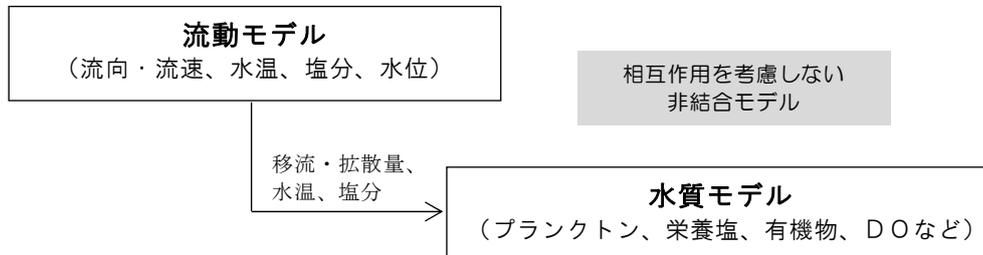


図 3 シミュレーションモデルの構成

2.1 流動モデルの概要

流動モデルが解析する主な現象と出力項目を図 4 に示す。用いる流動モデルは、一般鉛直座標系を用いた σ 座標モデルである。一般鉛直座標モデルでは、鉛直分割率を変化させ、水平方向に層数を変化させるなど、自由度に富んだ鉛直格子の設定が可能である。モデルの基礎方程式は、連続の式、静水圧近似およびブシネスク近似が施された運動方程式、水温・塩分の保存式、乱流統計量の保存式である¹。

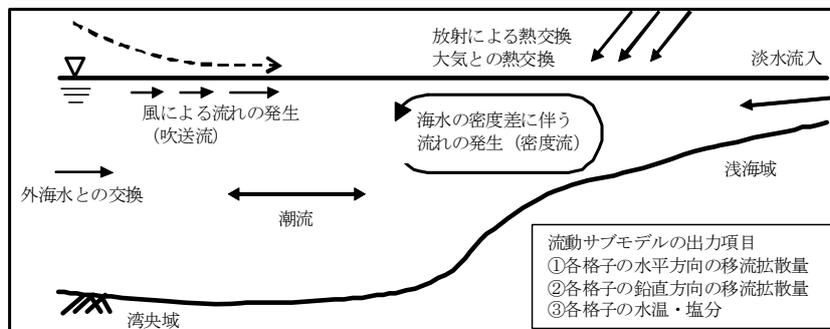


図 4 流動モデルが解析する主な現象と出力項目

¹ 参考図書：甦る有明海—再生への道程、楠田哲也 編著、恒星社厚生閣

2.2 水質モデルの概要

水質モデルは、C・N・P・Oを指標元素とした物質循環モデルであり、低次生態系における物質循環を考慮した水質変化を予測するものである。ここで流動モデルによって計算された物質の交換量および水温・塩分を境界条件として水質計算を行う。

底泥による酸素消費、栄養塩の溶出、還元物質（酸素消費物質：ODU）の溶出については、底泥への有機物の沈降量に応じて計算される比較的簡易な手法²を採用した。

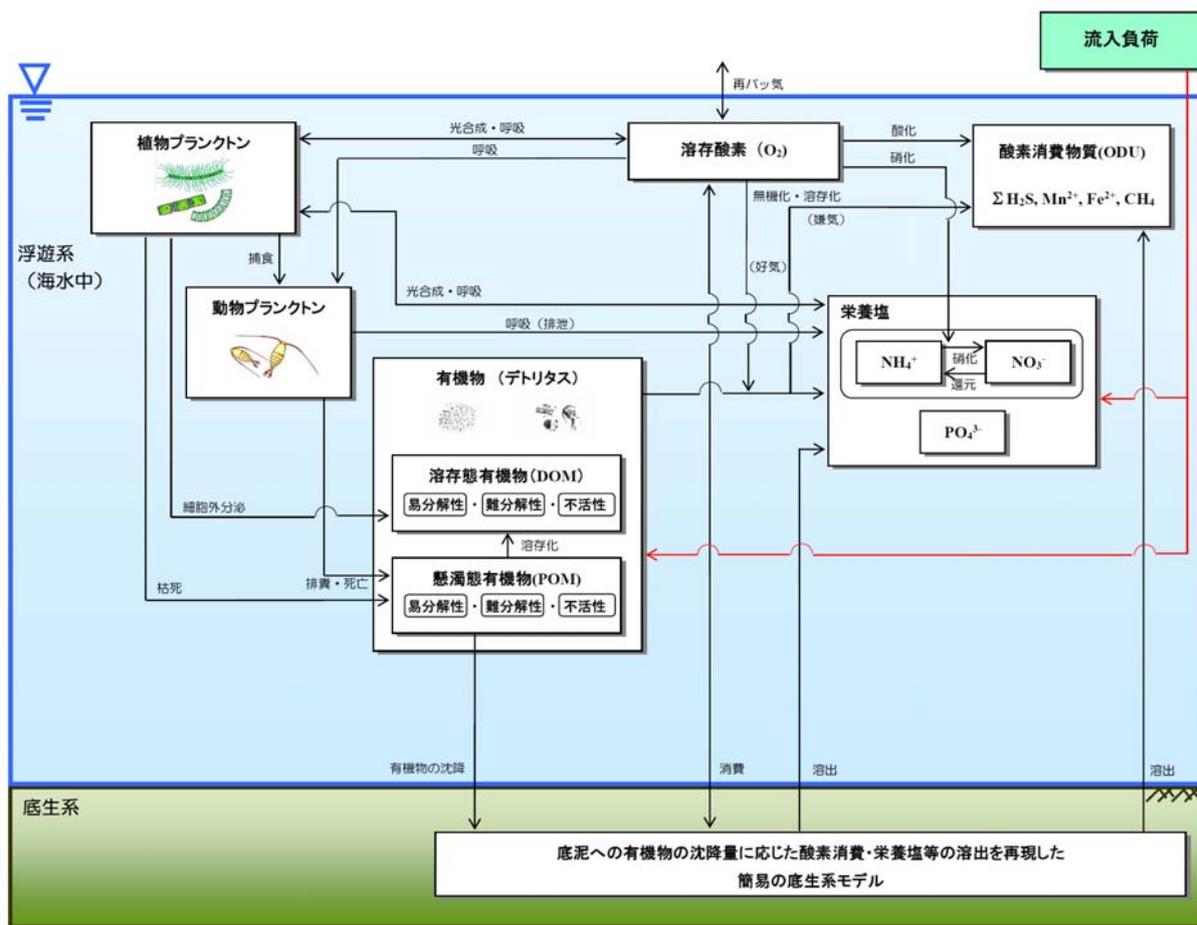


図 5 水質モデルが解析する現象

² 田中陽二・中村由行・鈴木高二朗・井上徹教・西村洋子 (2011) : 微生物ループを考慮した浮遊生態系モデルの構築、港湾空港技術研究所報告、第 50 巻 第 2 号

3. 計算条件

3.1 計算範囲・格子サイズと水深

シミュレーションにあたっては図 6、表 1 に示すように、①英虞湾全域と、②石淵地区周辺の枝湾スケールを対象とした2つの計算格子を作成した。評価にあたっては、主として②枝湾スケールの計算格子を用いるが、この格子において外側境界の潮位・水温・塩分の入力条件を得るために、①英虞湾全域の計算を実施した。

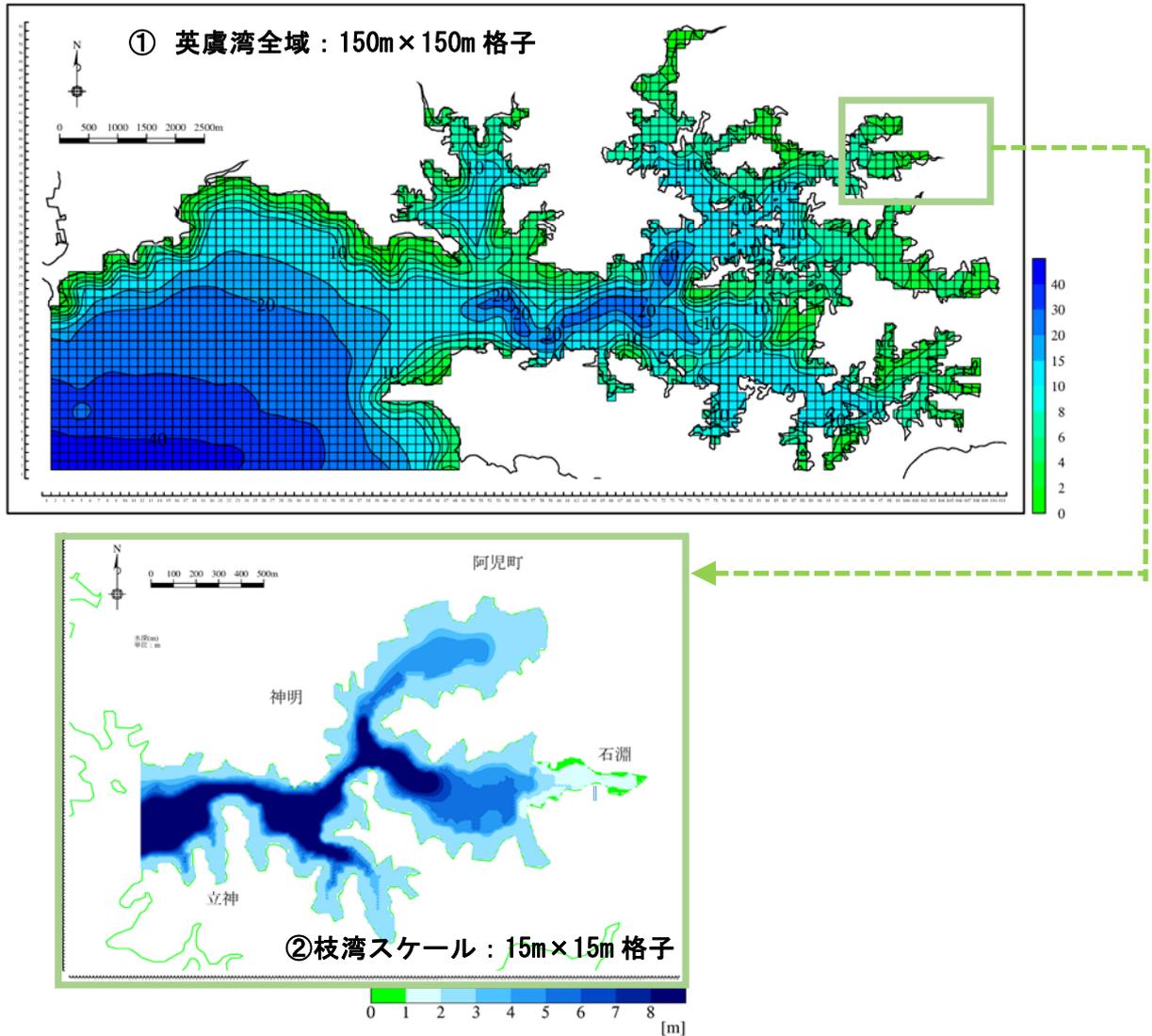


図 6 計算範囲・格子サイズと水深

表 1 計算範囲・格子サイズの異なる2つの入力条件の使い分け

	水平格子サイズ	主な用途
① 英虞湾全域	150m×150m	<ul style="list-style-type: none"> 流動モデルの検証 枝湾スケールでの計算にあたっての潮位・水温・塩分の境界条件の作成
② 枝湾スケール	15m×15m	<ul style="list-style-type: none"> 水質モデルの検証 水門開放前後の環境変化の予測

3.2 鉛直層分割の設定

鉛直方向の層分割は、図 7 に示すように最大 10 層に分割した。5m 以浅の地点では計 5 層に等分割し、それ以深の地点はさらに 5 層を σ 座標系にて追加して計 10 層とした。

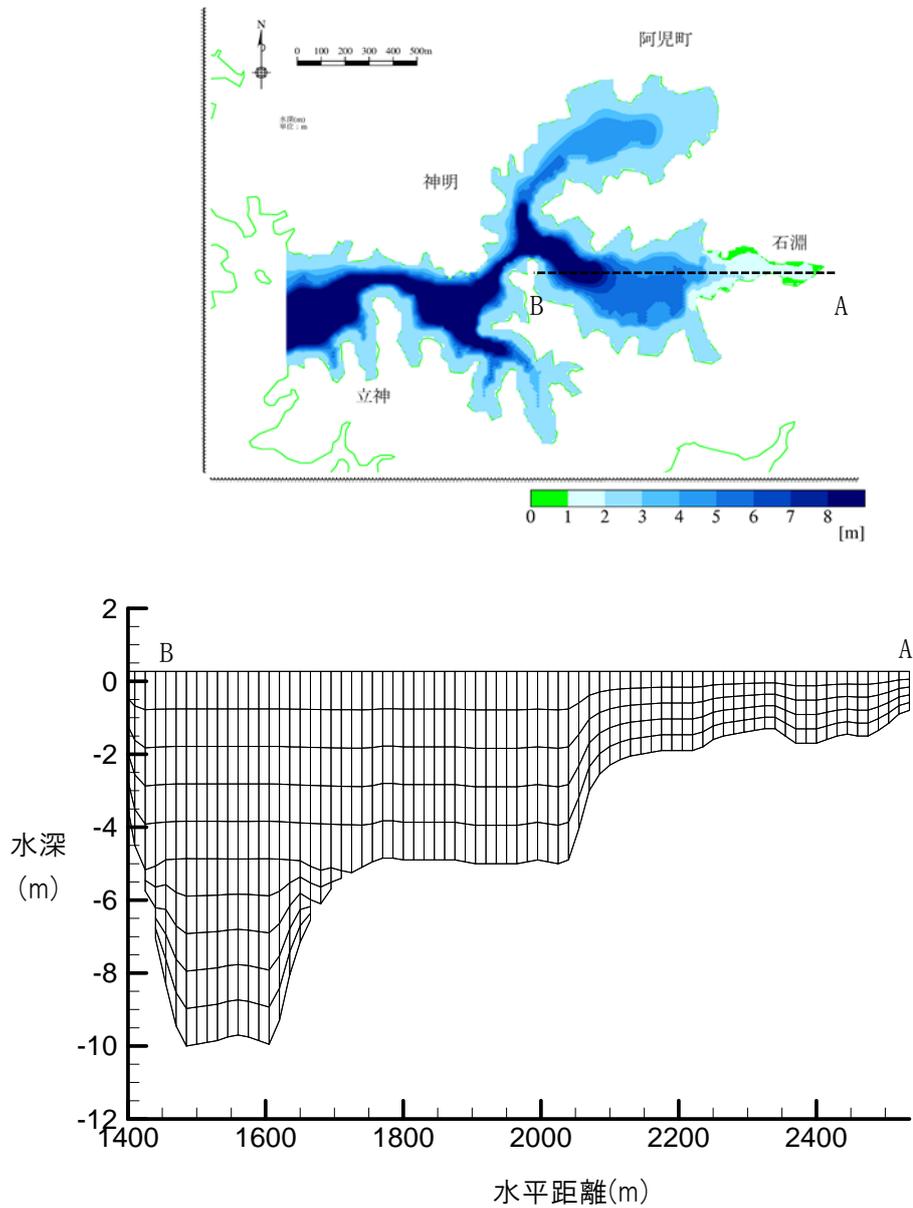


図 7 鉛直方向の層分割

3.3 計算期間

国分ら(2013)³、高山ら(2013)⁴による石淵地区での観測結果との比較ができるように、計算期間は2011年通年を選定した。

図8は2011年から2016年間の英虞湾周辺の年降水量、夏季降水量、夏季平均気温、8月の底層溶存酸素を比較したものであるが、2011年は6年間の中では平均的な結果であった。

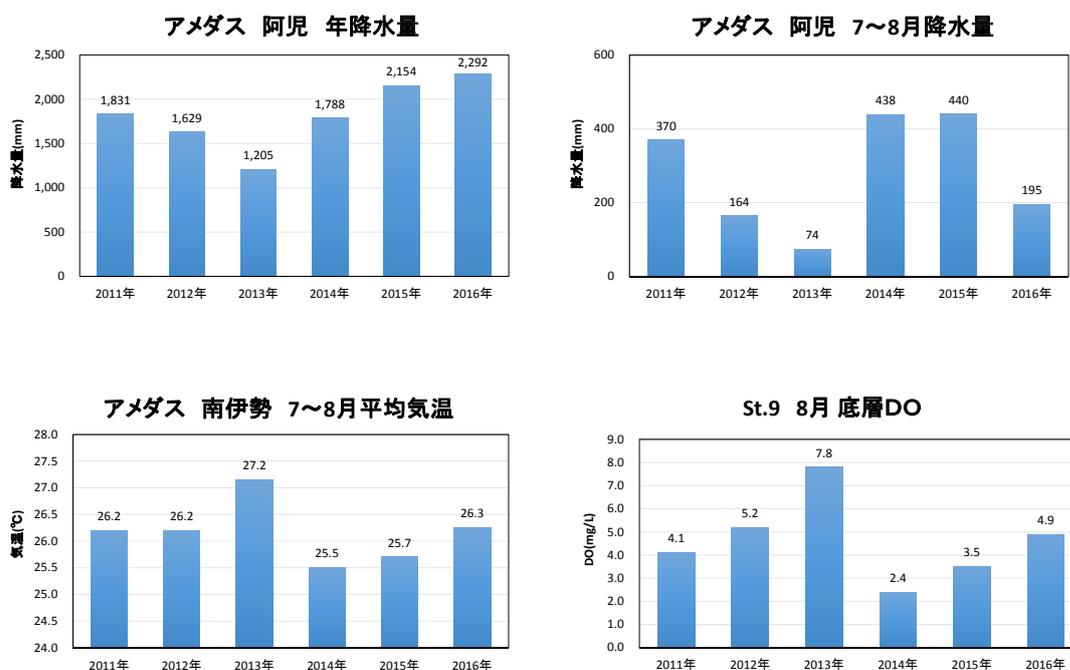
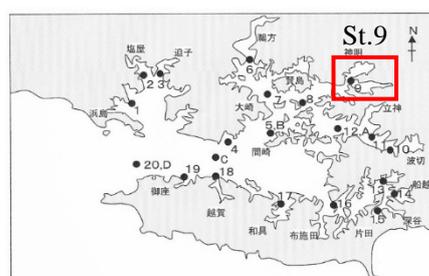


図8 近年の年降水量、夏季降水量・気温および石淵地区周辺の底層DOの変化

【データの出典】
 ・気象庁
 ・志摩市水産課



³ 国分秀樹・高山百合子・山田浩且(2013)：海水交換率の異なる沿岸遊休地における干潟再生効果の検討、海岸工学論文集 B2 (海岸工学)、Vol. 69、No. 2、2013、I_1166-I_1170

⁴ 高山百合子・伊藤一教・国分秀樹(2013)：英虞湾沿岸遊休地を利用した海水導入による水質改善効果の検討、海岸工学論文集 B2 (海岸工学)、Vol. 69、No. 2、2013、I_1171-I_1175

3.4 境界条件の設定

英虞湾全域の計算に用いた境界条件については割愛し、ここでは枝湾スケールの計算に用いた条件のみを記した。

3.4.1 河川流量の設定

英虞湾に流入する河川流量は、流域面積と降水量を基に簡易に推定した。

流域面積は高橋ら(2008)⁵によると図9に示すように70km²であり、さらに枝湾スケールの計算範囲を集計すると英虞湾全体の流域面積の約6.3%であった。

この流域面積にアメダス阿児と南伊勢の年間降水量を乗じ、さらに流出係数(0.5と仮定)を加味して、計算範囲への年間総流入流量を算定した。2011年の総流入流量は約470万m³と試算された。

上記の総流入流量の2割を基底流量として毎日の流量に割振り、残りの8割を毎日の降水量に応じて重みを付けて割り振って日毎の流入流量を算定した。図10には算定した計算範囲への総流入流量を示す。

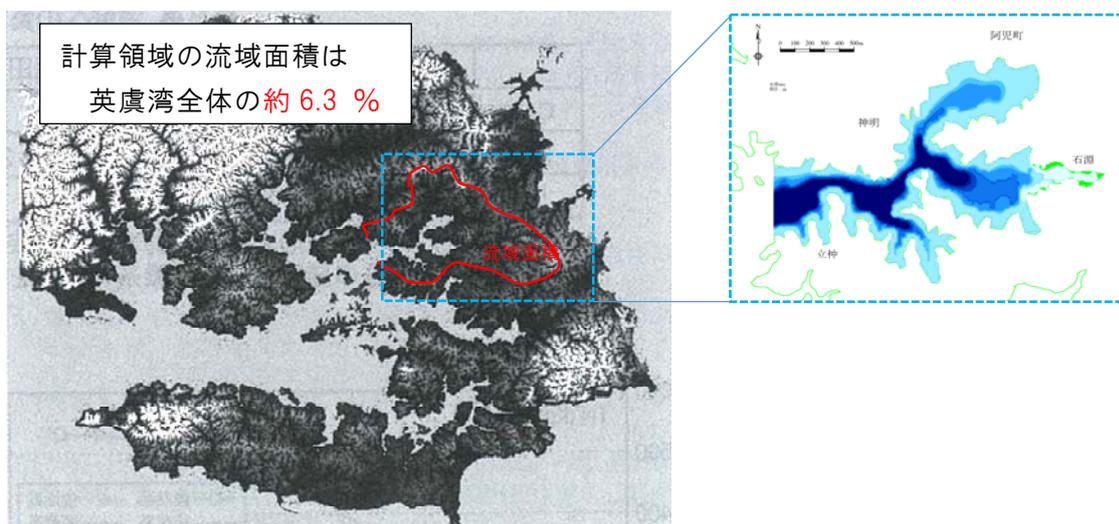


図9 英虞湾の落水線と枝湾スケールの計算範囲の流域面積

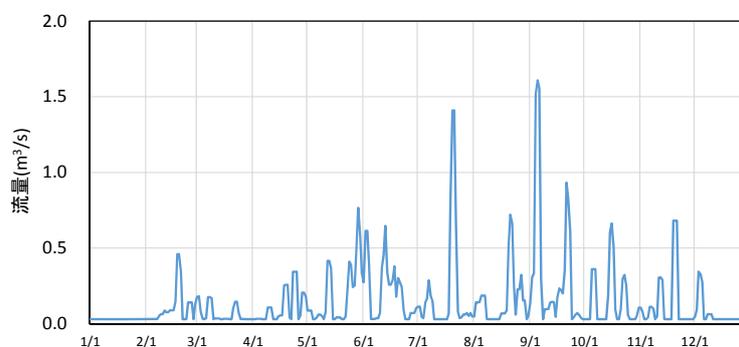


図10 算定した枝湾への総流入流量

⁵ 高橋正昭・飯岡幹博・千葉賢・篠田成郎(2008): 集水域における土地利用と海域への負荷、海洋と生物、176、Vol.30、no.3

計算範囲への総流入流量は、航空写真などを参考に図 11 に示す計 22 か所から流入すると仮定し、図 10 に示した流量を 22 等分し図 11 の→の各地点に入力した。

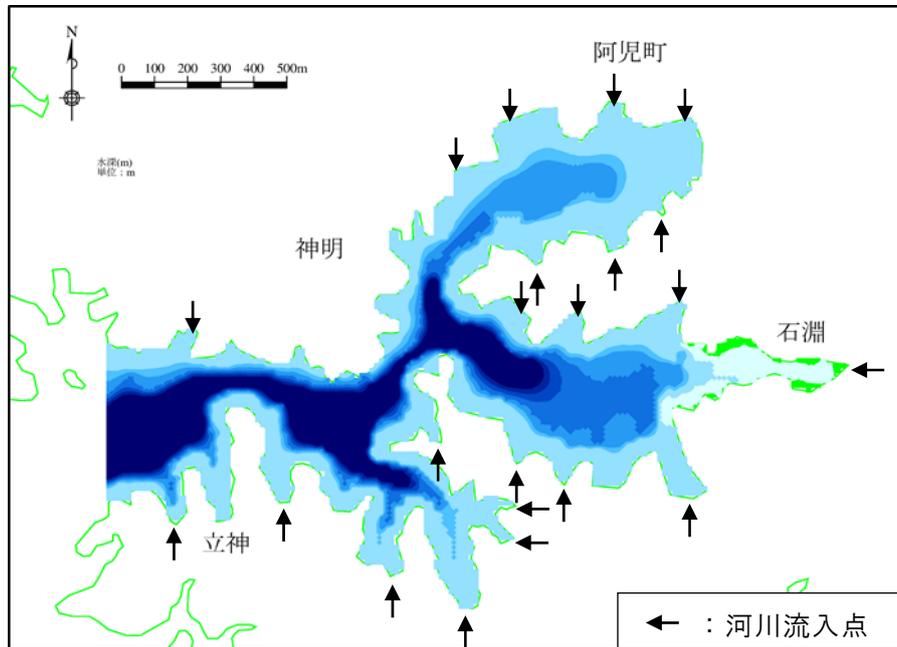


図 11 河川の流入地点

3.4.2 河川負荷（水質濃度）の設定

高橋ら(2008)⁶は物質流下モデルを用いて英虞湾への排出負荷量を表 2 のとおり求めている。枝湾スケールの計算範囲が英虞湾全域の約 6.3%の流域面積であることを踏まえ、ここでは単純に表 2 の負荷量に 6.3%を乗じた値を図 11 に示した流入点に入力した。なお、表 2 の年間流入負荷量を入力条件である日量に配分する際には、負荷量が図 10 に示した流量と 1 対 1 に対応すると仮定した。

表 2 英虞湾への流入負荷量

	COD	窒素	リン
詳細原単位法 (tn / year)	441	209	29

⁶高橋正昭・飯岡幹博・千葉賢・篠田成郎(2008)：集水域における土地利用と海域への負荷、海洋と生物、176、Vol.30、no.3

なお COD・T-N・T-P の流入負荷量は、伊勢湾での事例等を参考に表 3 に示す一定の比率を乗じて各態の有機物・栄養塩に配分した上で、シミュレーションの入力値とした。

表 3 流入負荷 (C・N・P) の各態への分画比率

分画比率	値
DIP/T-P	0.51
POP/TOP	0.68
PON/TON	0.26
DIN/T-N	0.73
NH4/DIN	0.42
NO3/(NO2+NO3)	0.97
PCOD/COD	0.23
POC/PCOD	0.86
DOC/DCOD	0.93
有機物中の易分解性割合	0.1
有機物中の準易分解性割合	0.5
有機物中の難易分解性割合	0.4

3.4.3 枝湾口境界での潮位の設定

枝湾スケールの計算において、湾口境界での潮位の入力値は英虞湾全域における該当メッシュの計算結果を用いた。与えた潮位変化の一例を図 12 に示す。

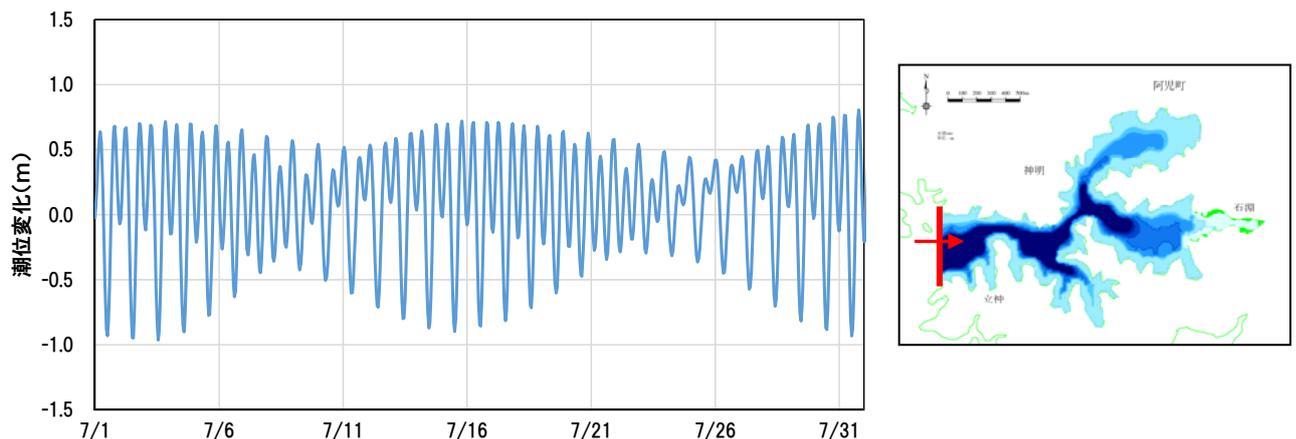


図 12 枝湾口境界での潮位の入力値 (7月を例示)

3.4.4 枝湾口境界での水質濃度の設定

枝湾スケールの計算において、湾口境界での水温・塩分の入力値は、潮位と同様に英虞湾全域における該当メッシュの計算結果を用いた。与えた水温・塩分を図 13 に示す。

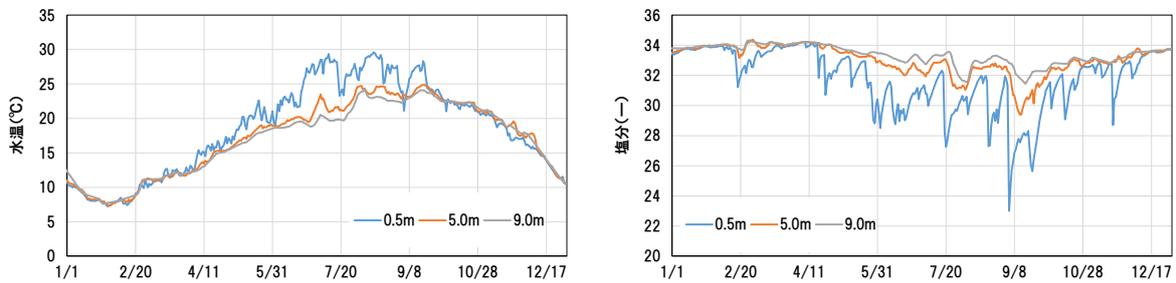


図 13 枝湾口境界での水温・塩分の入力値

その他、窒素・リン等の水質については、英虞湾全域での計算結果を枝湾口での境界条件として利用するよりも、測定頻度は少ないとはいえ観測データを入力値としたほうが、枝湾内の水質の再現が高いと考え、図 14 に示す St.B での観測データを線形に補間して日データを入力値とした。

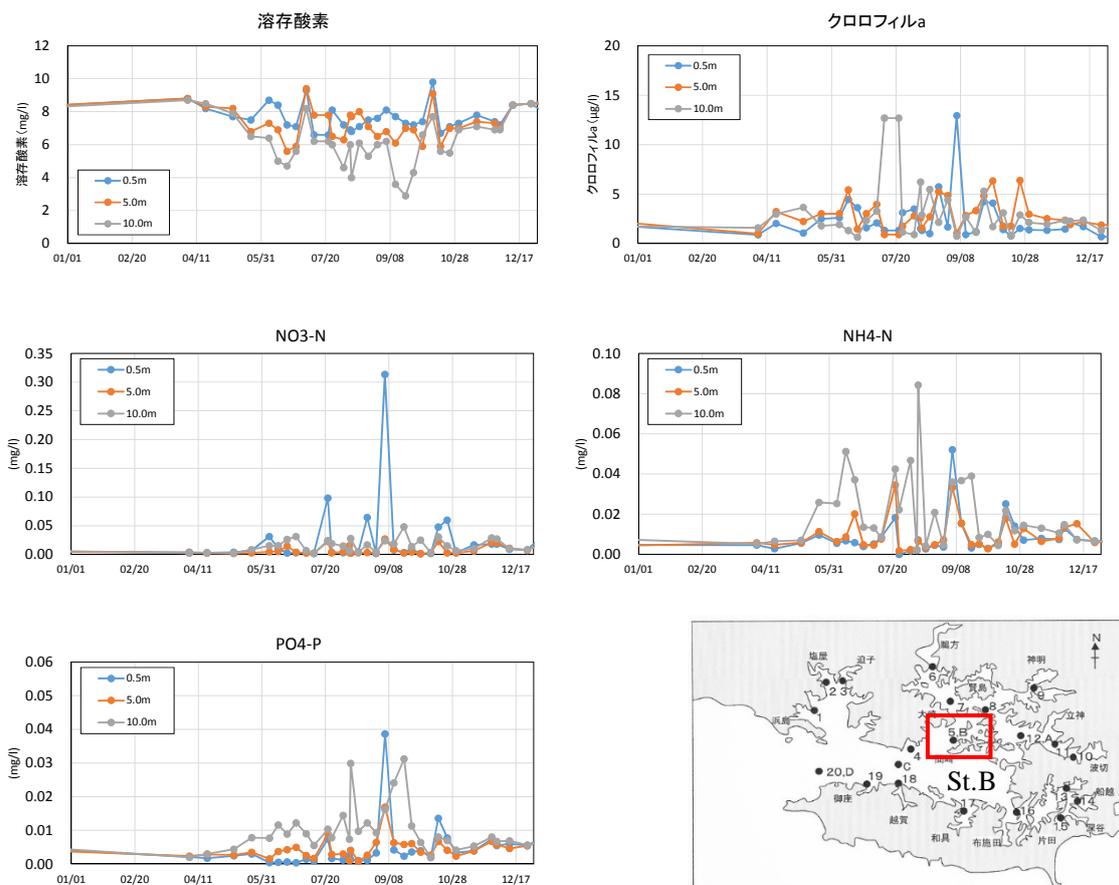


図 14 枝湾口境界での水質濃度の入力値

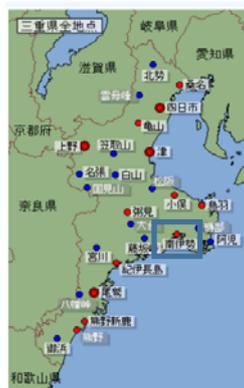
【データの出典】
・志摩市水産課

3.4.5 気象条件の設定

気象データの入力値は表 4 に示す気象庁による観測データを引用した。

表 4 入力する気象データの出典

項目	データの出典
降水量	アメダス南伊勢
風向・風速	
気温	
全天日射量	名古屋地方気象台
相対湿度	
雲量	



3.4.6 底泥境界の処理

底泥内での物質循環と水-底泥間のフラックスを計算するため、図 15 に示す簡易な底生系モデルを用いた。有機物の沈降フラックスに対応して水-底泥間のフラックスが計算されるシステムである。

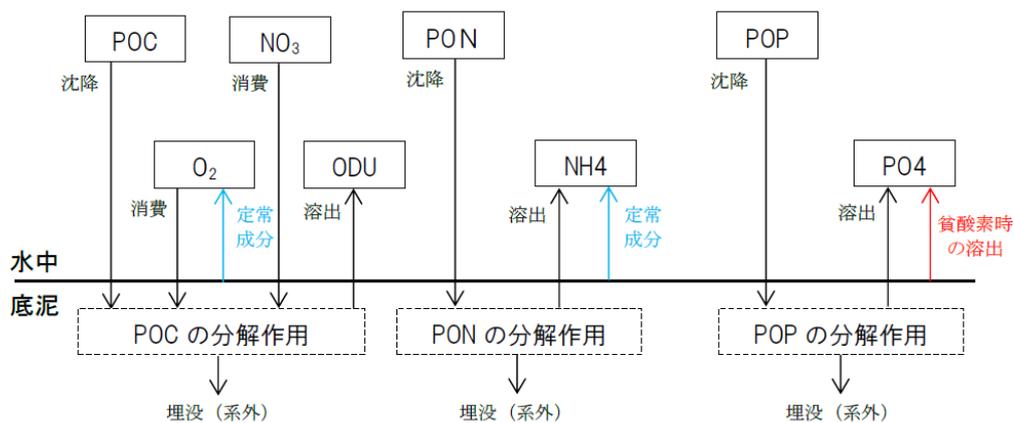
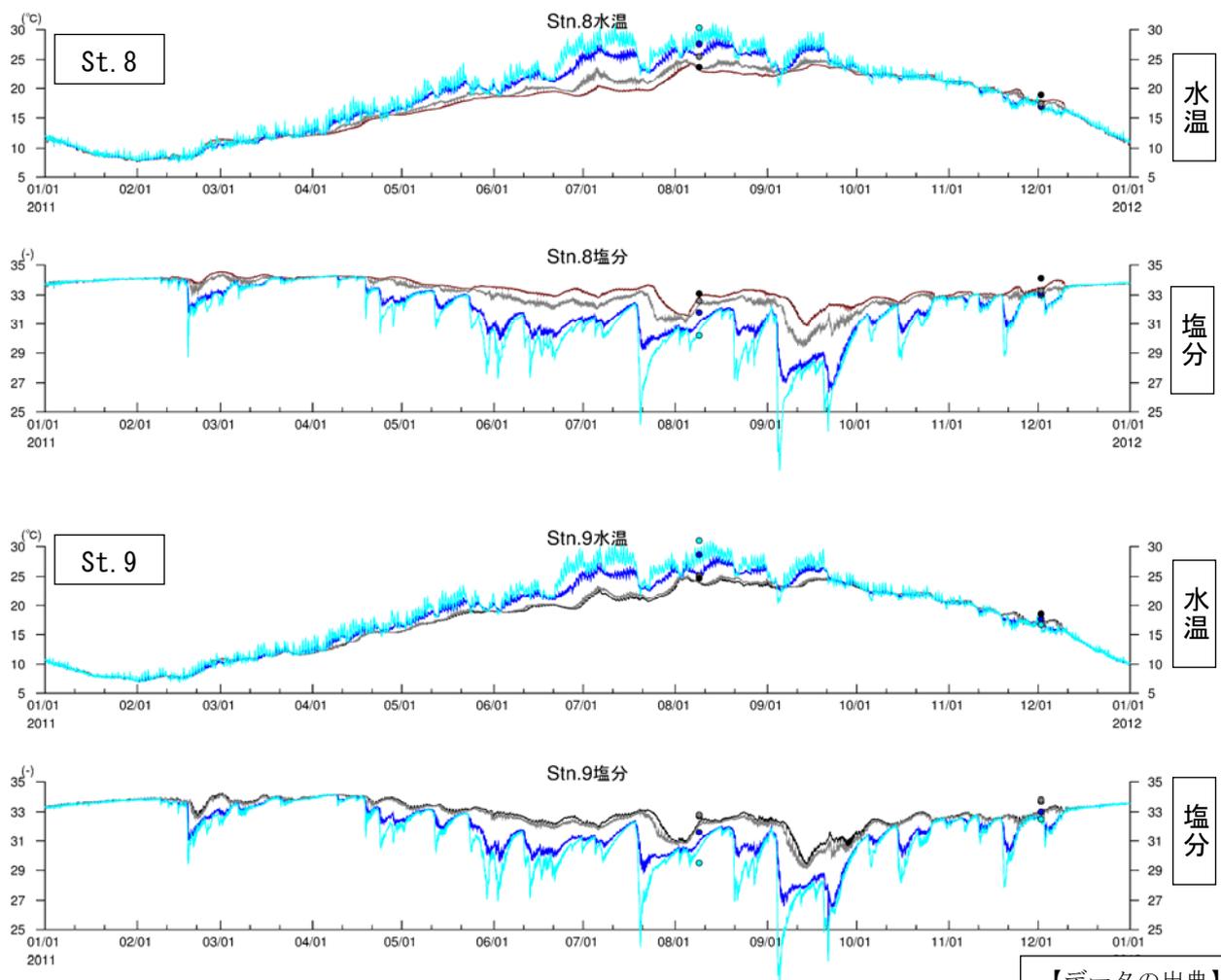
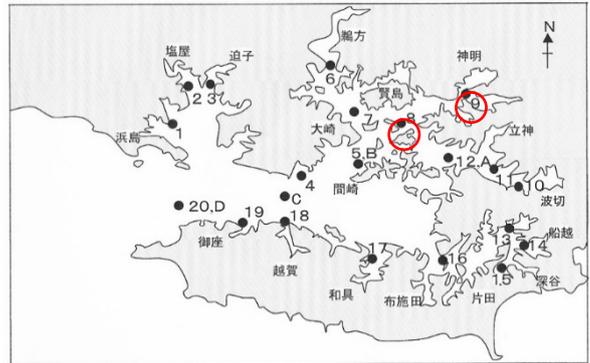


図 15 底泥境界の扱い

4. シミュレーションモデルの再現性

4.1 英虞湾全域の水温・塩分の再現性

- ・ 流れの予測にあたり、水温・塩分の観測データと計算データの比較を通じて、モデルの再現性を確認した。
- ・ 水温・塩分の季節変化、地点間での違いなど概ね特徴を再現した。とくに夏季の成層状況をよく再現している。

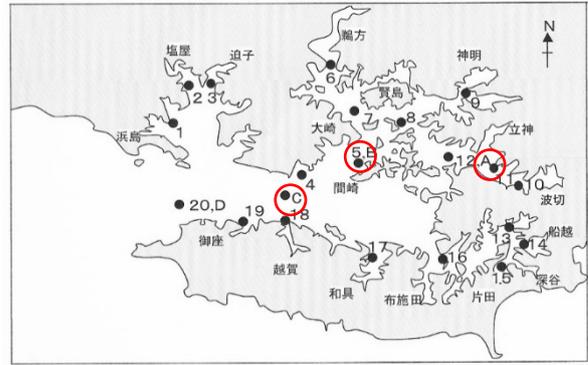


【データの出典】
・ 志摩市水産課

図 16(1) 水温・塩分の再現性
(英虞湾全域メッシュでの計算結果、図示地点：Stn. A、Stn. B)

【計算値】		
—：海面下 0.5m	—：海面下 2.0m	—：海面下 5.0m
—：海面下 10.0m	—：海底直上	
【観測値】		
●：海面下 0.5m	●：海面下 2.0m	●：海面下 5.0m
●：海面下 10.0m	●：海底直上	

【データの出典】
・志摩市水産課



【計算値】

— : 海面下 0.5m — : 海面下 2.0m — : 海面下 5.0m
— : 海面下 10.0m — : 海底直上

【観測値】

● : 海面下 0.5m ● : 海面下 2.0m ● : 海面下 5.0m
● : 海面下 10.0m ● : 海底直上

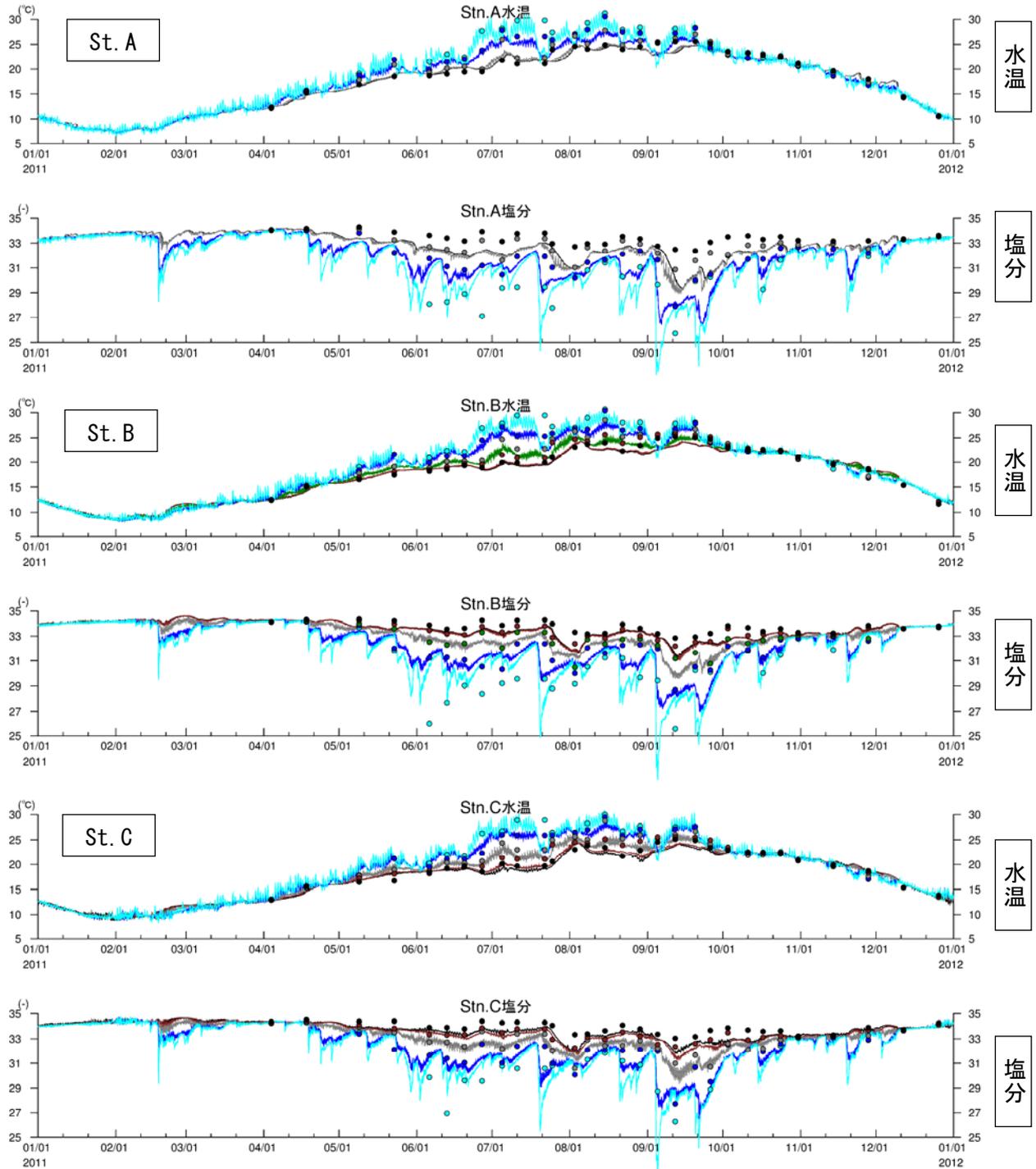


図 16(2) 水温・塩分の再現性
(英虞湾全域メッシュでの計算結果、図示地点：Stn. A、Stn. B、Stn. C)

4.2 枝湾スケールの計算における貧酸素化の再現性

枝湾スケールの計算での貧酸素化の再現状況を確認するため、図 17 に示す志摩市水産課が実施している水質調査結果との比較を行った。

計算範囲内には St. 9 が存在しており、この地点において計算結果と観測結果(図中の○)の比較を行った。しかしながら観測頻度が年 2 回と限りがあるため、併せて隣接する枝湾である立神地区の St. A での観測結果(図中の○)と St. 9 における計算結果も比較した。

比較結果を図 18 に示す。計算結果は枝湾内の貧酸素化の状況を概ね再現していると考えられる。

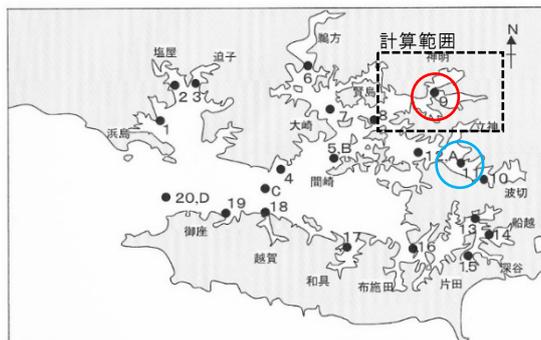


図 17 志摩市水産課による水質観測地点
(○、○：計算結果との比較地点)

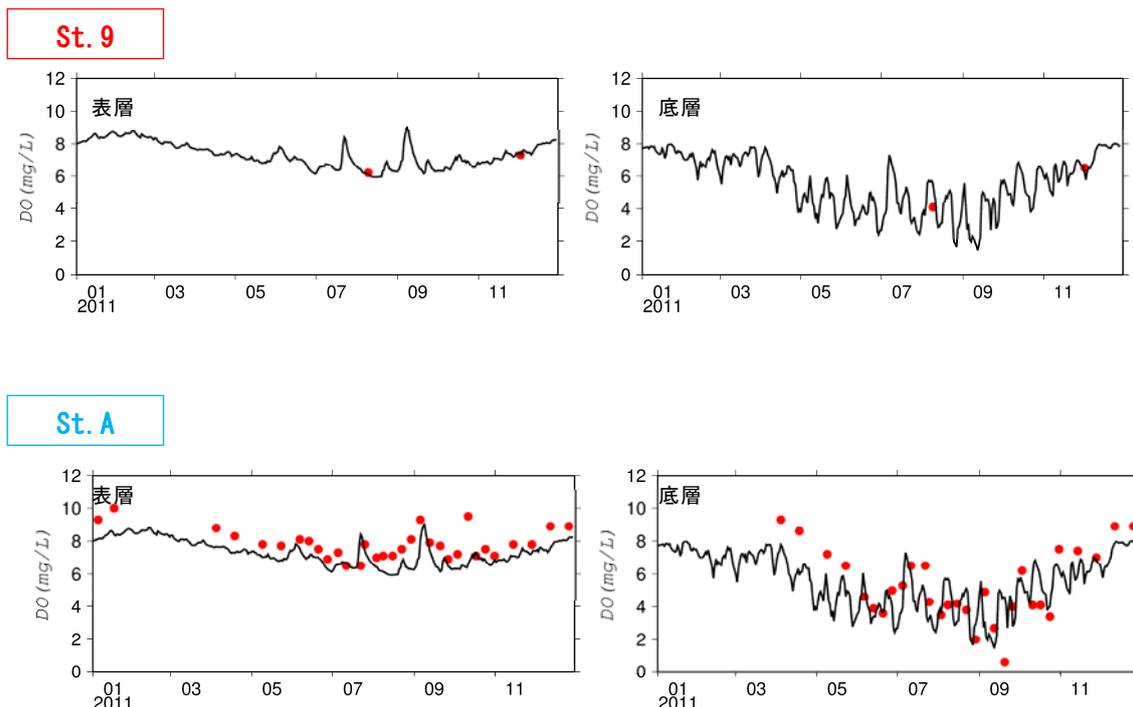


図 18 溶存酸素の再現性 (●：観測結果、—：計算結果)

【上段：St. 9 での再現状況、下段：計算範囲外の St. A の観測結果と St. 9 の計算結果の比較】

【データの出典】
・志摩市水産課

再現された底層の溶存酸素の状況として、もっとも貧酸素化が顕著であった9月上旬の底層溶存酸素の平面分布を図 19 に示す。

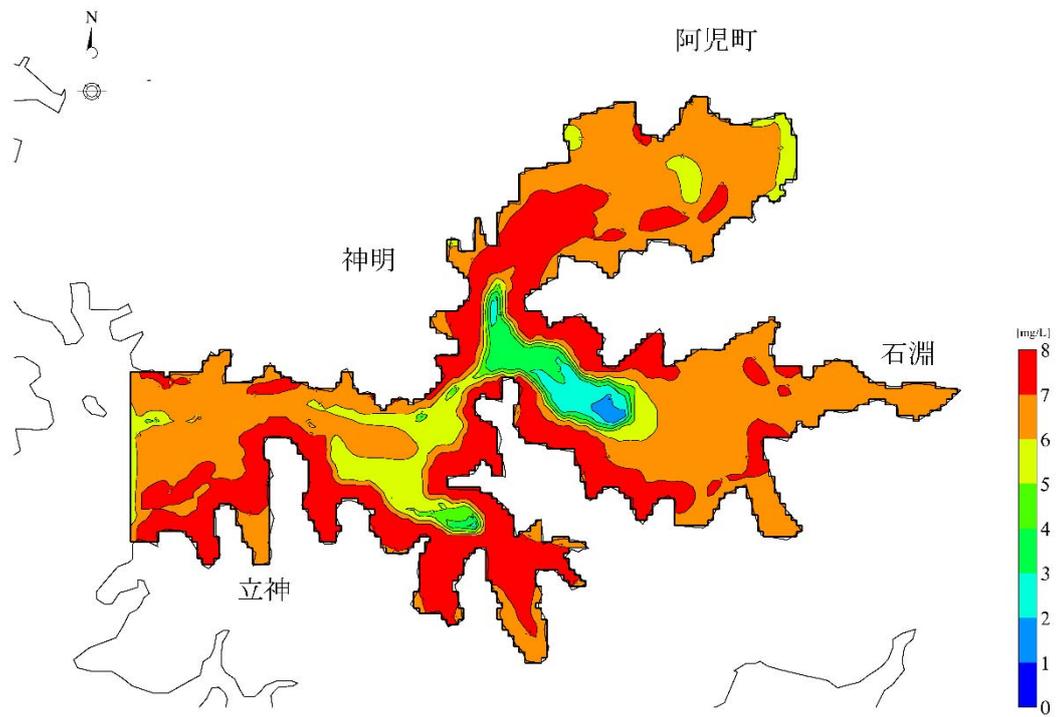


図 19 2011年9月12日の底層の貧酸素化の状況

4.3 枝湾スケールの計算における窒素・リンの再現性

英虞湾における公共用水域水質調査地点 St.1 での表層 T-N、T-P の観測結果と計算結果の比較を図 21 に示す。計算結果は観測結果をよく再現していると考えられる。

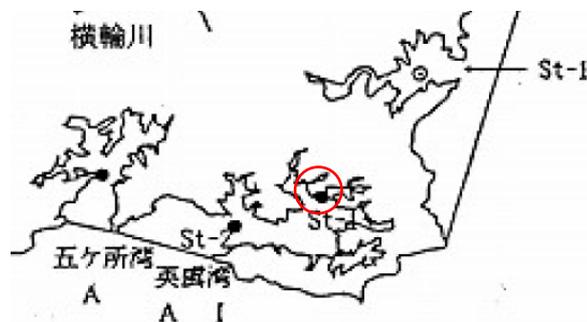


図 20 英虞湾内の公共用水域水質調査地点

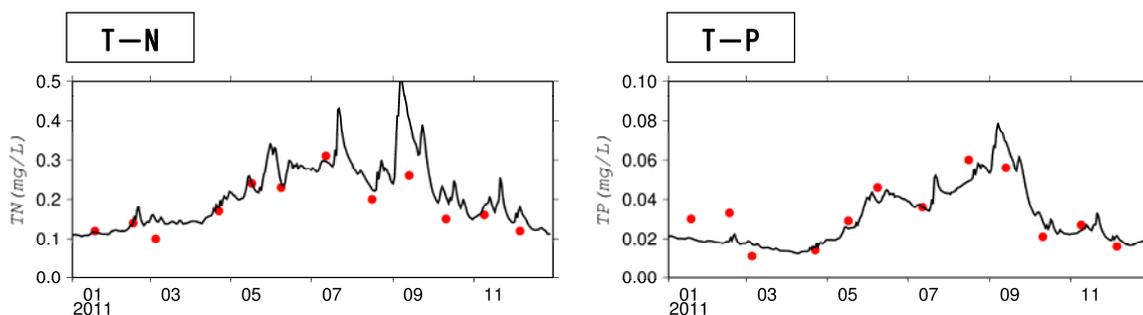
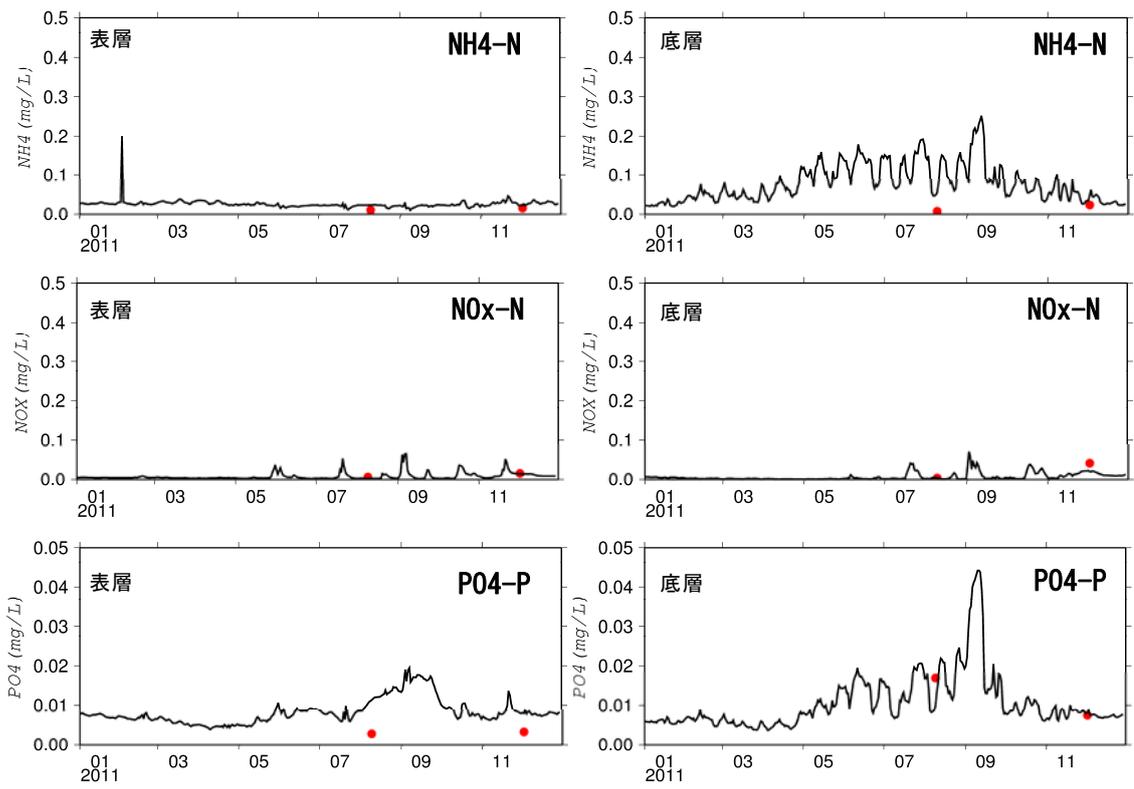


図 21 公共用水域水質調査 S t . 1 での表層 T - N、T - P の再現性
(● : 観測結果、- : 計算結果)

溶存酸素と同様の比較方法において、栄養塩の観測結果と計算結果の対比を図 22 に示す。表層のリン酸態リン濃度の計算結果が観測結果に比べて高い傾向にあるが、計算結果は、夏季の英虞湾では植物プランクトンの増殖に対して窒素が制限になっている点⁷をよく再現していると考えられる。

⁷ 谷村篤・向山礼美・石川輝・田口和典・今井直(2008) : 英虞湾におけるサイズ別クロロフィル a 濃度の季節分布、水産海洋研究、72(1)、1-13

St. 9



St. A

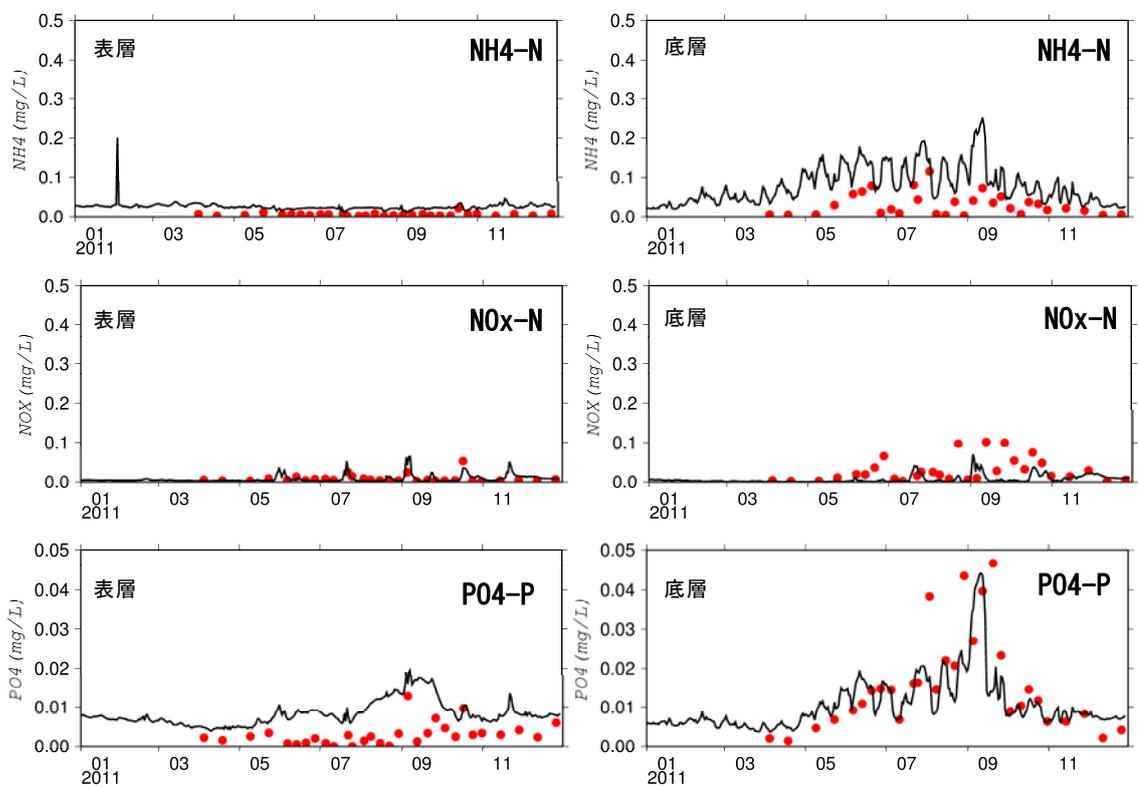


図 22 栄養塩の再現性 (●：観測結果、—：計算結果)

4.4 再生干潟内の潮位の再現性

国分ら(2013)⁸による再生干潟内外での潮位変動の観測結果(図 23)と、枝湾スケールの計算結果を比較した。

水門開放後に干潟内に進入する海水の状況の再現として、国分ら(2013)で観測された干潟内外の潮位差について、数値シミュレーションモデルで再現した(図 24)。

ここでは水門の抵抗を数値シミュレーションに反映できるように改良を行った。ゲートによる摩擦損失係数 f_w を次式であらわした。

$$f_w = f_b + \frac{1}{2} C_d \cdot h$$

ここで f_b は底面の粗度、 C_d は抵抗係数、 h は水深であり、 C_d は実測された潮位が再現できるように任意に調整した。

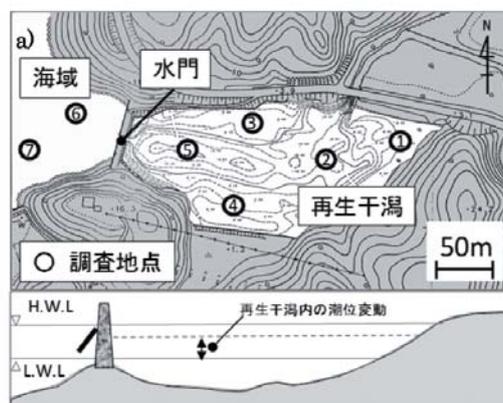
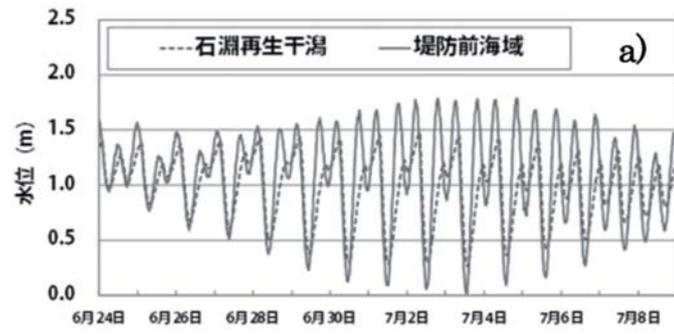


図 23 国分ら(2013)による再生干潟内外における潮位変動の観測

⁸ 国分秀樹・高山百合子・山田浩且(2013)：海水交換率の異なる沿岸遊休地における干潟再生効果の検討、土木学会論文集B 2 (海岸工学)、No. 2、2013、I_116_1176

国分ら
(2013)
観測結果



計算

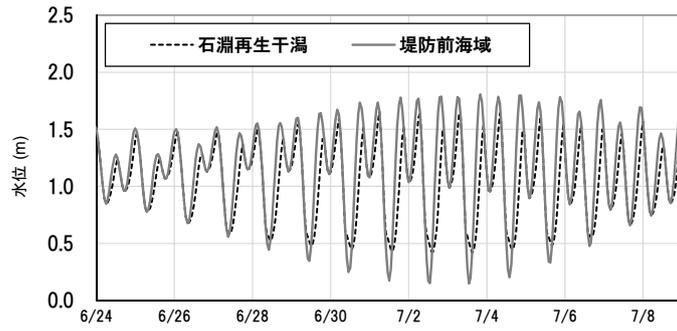


図 24 再生干潟内外の潮位の再現

4.5 再生干潟内のクロロフィル a・栄養塩の再現性

干潟に生息する生物がもつ水質浄化能力の再現として、国分ら(2012)⁹に示されている石淵再生干潟周辺の水質濃度と計算結果を比較し、図 25 に示す。ここで計算結果は、生物の浄化機能をシミュレーションモデルに考慮しない場合と考慮した場合の2つを示している。クロロフィル a や栄養塩濃度は、浄化機能を考慮した計算結果と観測結果の整合性が高いことがわかる。なおシミュレーションモデルでの浄化機能の考え方は次頁に示す。

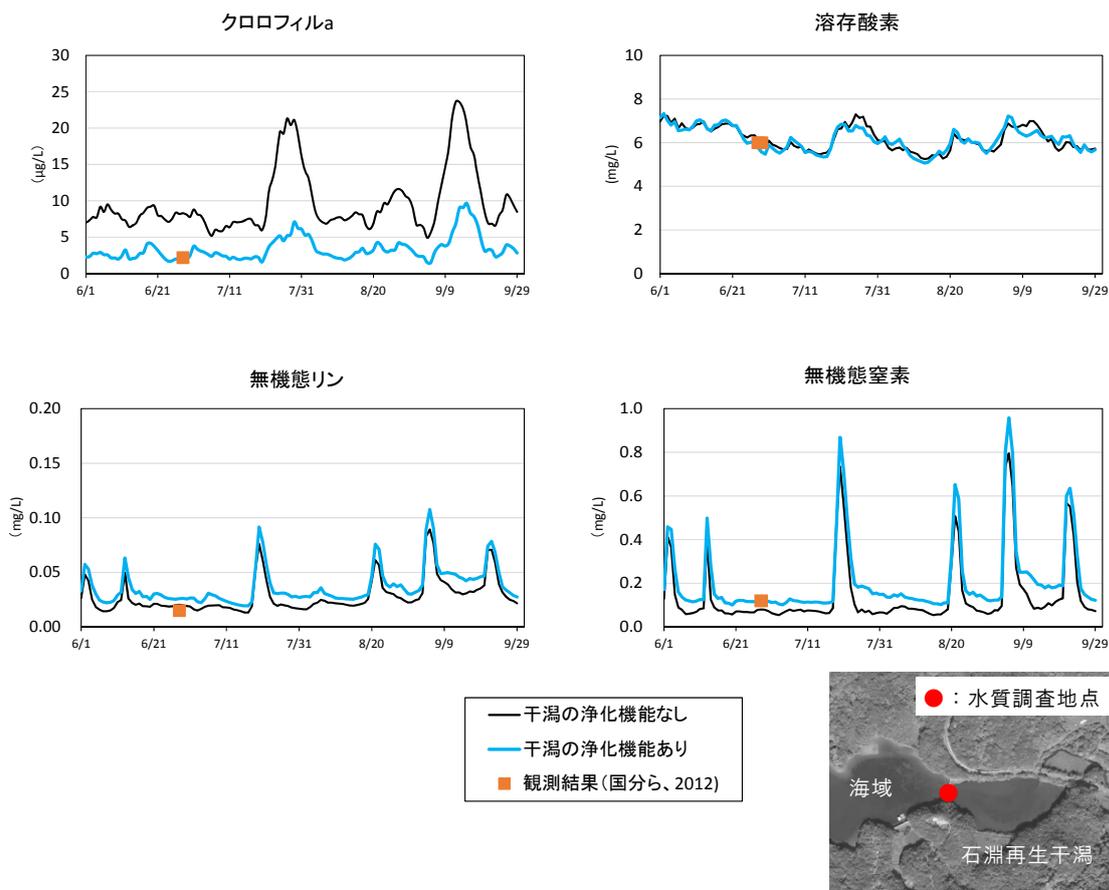


図 25 再生干潟周辺の水質濃度の比較

⁹ 国分ら(2012)：英虞湾沿岸休耕地における干潟再生効果の検討、土木学会論文集 B2(海岸工学)、Vol. 68、No. 2、I_1091-I_1095

干潟に生息する底生生物（主として二枚貝類）の水質浄化量を数値シミュレーションに組み入れた。具体的には底生生物による植物プランクトンの摂餌および活動に伴う栄養塩の排泄を下記の式で再現した。

$$\text{濾水量}(gC/m^2/s) = \alpha(1/s) \cdot f(T) \cdot f(F) \cdot SF(gC/m^2)$$

ここで α は最大濾速度で $1.2 \times 10^{-6} (1/s)$ 、 $f(T)$ は温度係数、 $f(F)$ は餌料係数、 SF は懸濁物食の底生物量で現地調査結果を踏まえ $3.3 gC/m^2$ とした。温度係数は下式の最適水温型温度係数を採用し、 T は水温、最適水温 T_{opt} は $22^\circ C$ 、活動限界水温 T_{max} は $32^\circ C$ 、 β は 0.20 とした。

$$f(T) = \exp\{\beta \cdot (T - T_{opt})\} \cdot \left\{ \max\left(0, \frac{T_{max} - T}{T_{max} - T_{opt}}\right) \right\}^{\beta \cdot (T - T_{opt})}$$

餌料係数は下式のカエリスーメンテン型を採用し、 CHL はクロロフィル a 濃度、 K は半飽和定数で $1 \mu g/L$ とした。

$$f(F) = \frac{CHL}{CHL + K}$$

また底生生物の活動（呼吸）に伴う栄養塩の排泄は濾水量に比例するとして、下式を採用した。

$$\text{呼吸量に伴うDINの排泄} = 0.4 \times \text{濾水量} / rCN$$

$$\text{呼吸量に伴うDIPの排泄} = 0.4 \times \text{濾水量} / rCP$$

ここで rCN は底生生物の C/N 比（重量）で 5.01 、 rCP は底生生物の C/P 比（重量）で 71.42 とした。

5. 干潟再生効果の定量化

前述の数値シミュレーションモデルを用いて、水門を開放した干潟再生効果を定量化した。2011年の気象・海象条件のもと干潟再生される前後の予測を行い、その差値を持って再生効果とした。

5.1 計算ケース

水門を開放することによる干潟再生効果を定量化するために実施した計算ケースを表 5 に示す。ここでは石淵地区の干潟再生(CASE01)の効果に加え、図 26 に示す遊休地となっているすべての場所を干潟再生したケース(CASE02)の定量化を行った。

表 5 計算ケース

CASE00	石淵再生前（過去）
CASE01	石淵再生後（現況） : 約 2ha 再生
CASE02	遊休地となっている場所をすべて干潟に再生した状況 : 約 14ha 再生 (1) 石淵と同様に水門による海水導入を想定した。 (2) 再生干潟の地盤高は前面の水域と同一水深とした。 (3) 再生干潟の水深が 2.0m（平均水面下）より浅くなる場合は 2.0m とした。 (4) いずれの再生干潟でも石淵地区と同様の水質浄化能を有すると仮定した。



出典) 地理院地図 (電子国土 Web)

図 26 干潟再生を仮定した遊休地

5.2 計算結果

5.2.1 流速の変化

枝湾内の代表地点における表層流速の計算結果を図 27 に示す。

表層流速が 2 倍以上増加する地点もあり、干潟再生による流速の変化は大きい。

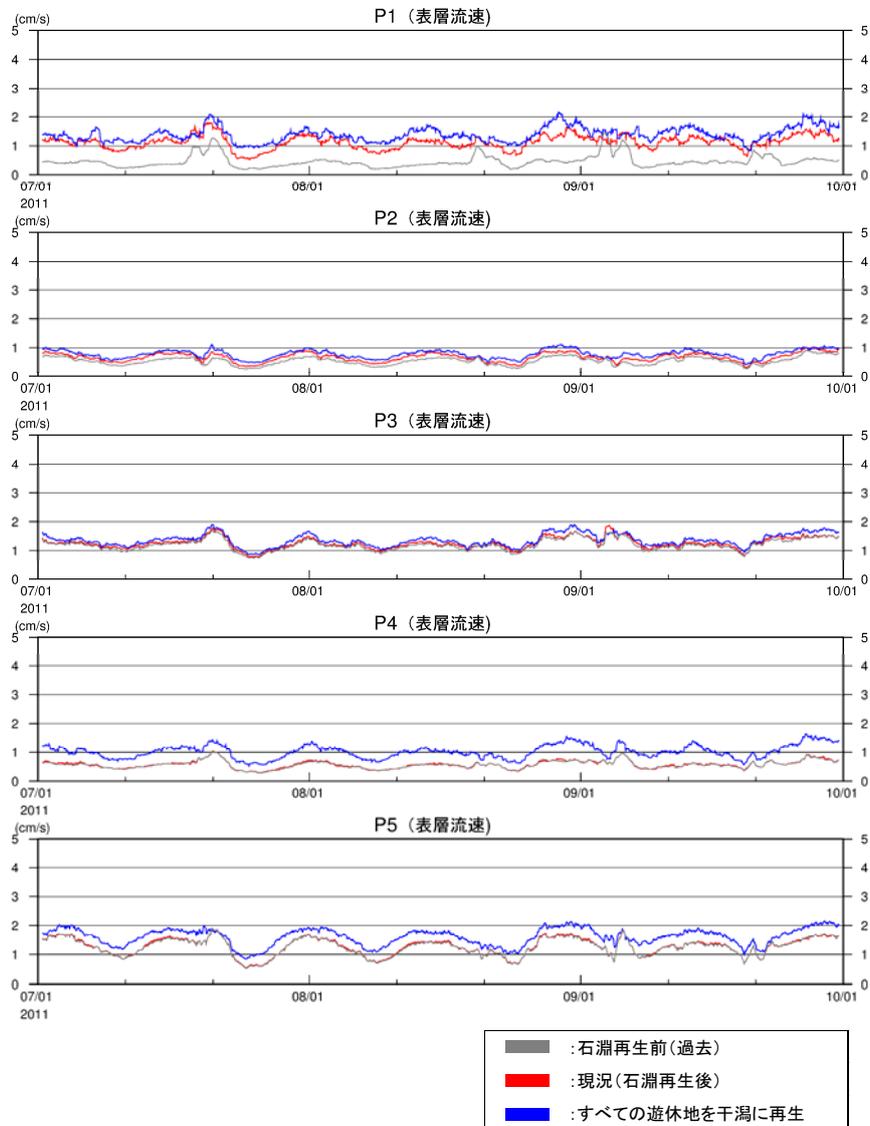
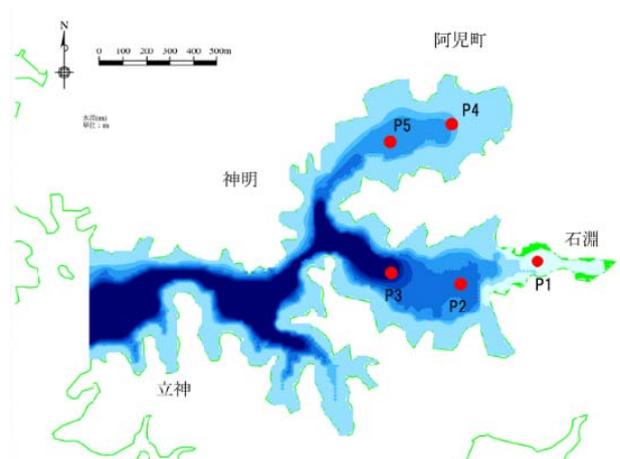


図 27 干潟再生による表層流速の変化 (25 時間移動平均流速)



5.2.2 断面通過流量の変化

図 28 に示す枝湾内の Line-A~C の断面において、枝湾内に流入してくる海水の通過流量の変化を整理した。この結果は 2011 年 6 月~11 月の平均値である。

石淵地区の干潟再生により海水の通過流量は、Line-A では 1.3%、Line-B では 3.1%増加したと推測される (Line-C では変化は小さい)。さらにすべての遊休地を再生した場合には、Line-A で 11.5% 増加、Line-B で 7.8% 増加、Line-C では 28.5% 増加と大きな変化が生じる。

干潟が再生されることにより、湾奥部まで海水が引き込まれやすくなり、海水の交換性が大幅に増加するものと予測された。

通過流量が増加する時期 (潮時) は概ね潮位差に比例していた。すなわち大潮でかつ、上げ潮最強時、下げ潮時最強時に通過流量の差は大きくなっていった。このときの潮位の変化は土約 1cm であった。

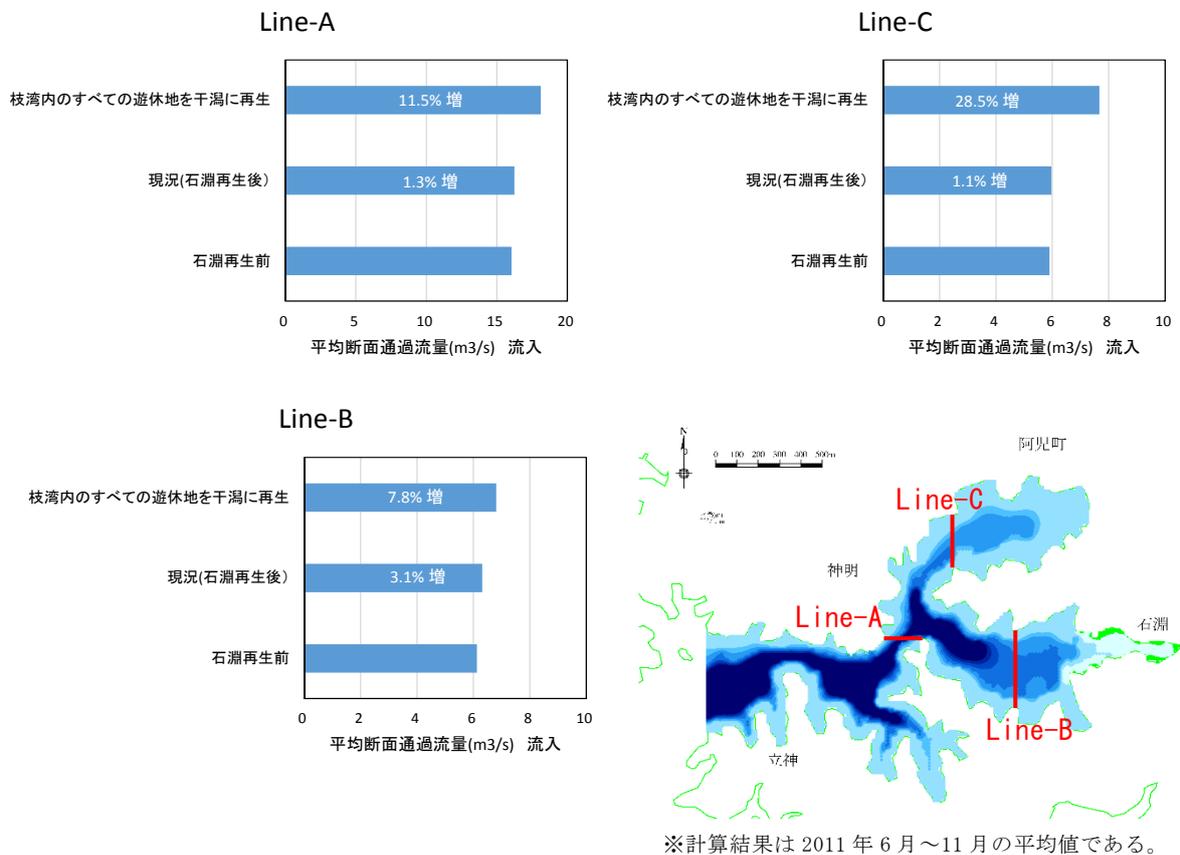
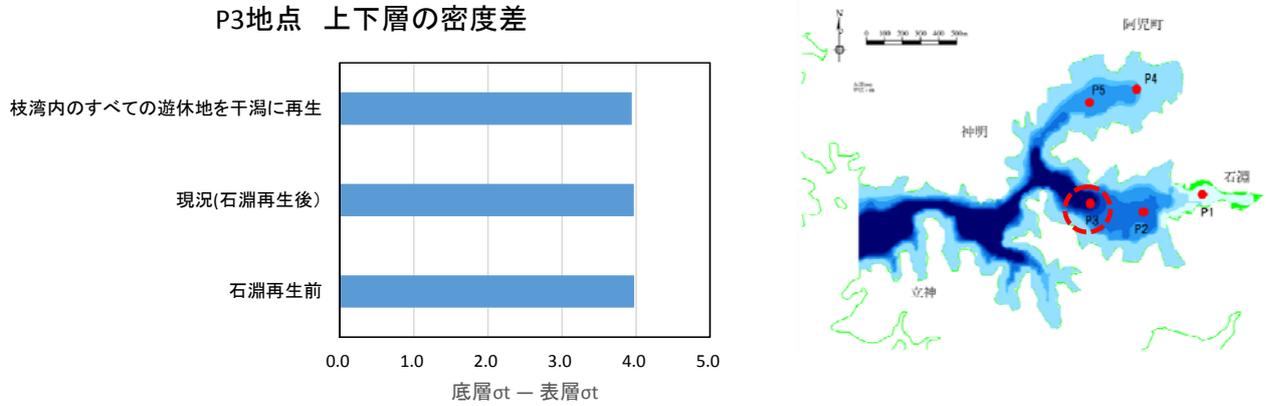


図 28 干潟再生による断面通過流量 (水平方向) の変化

5.2.3 成層状況の変化

図 29 に示すように、P3 地点における表層と底層の密度差を整理した。干潟再生によって成層状況には大きな変化は生じないと推測される。図 27 に示したように枝湾内は流速が数 cm/s と遅いため、成層を破壊するに至らないものと考えられる。



※計算結果は2011年6月～11月の平均値である。

図 29 P3 地点における表層・底層の海水の密度差の変化

5.2.4 貧酸素水塊の変化

干潟再生による貧酸素水塊の変化として、図 30 に貧酸素水塊が発達した代表的な日時における底層溶存酸素濃度の変化を示す。さらに同時期の P3 地点における溶存酸素の鉛直プロファイルを図 31 に示す。

干潟再生によって貧酸素水塊の面積が小さくなっている状況が確認できる。

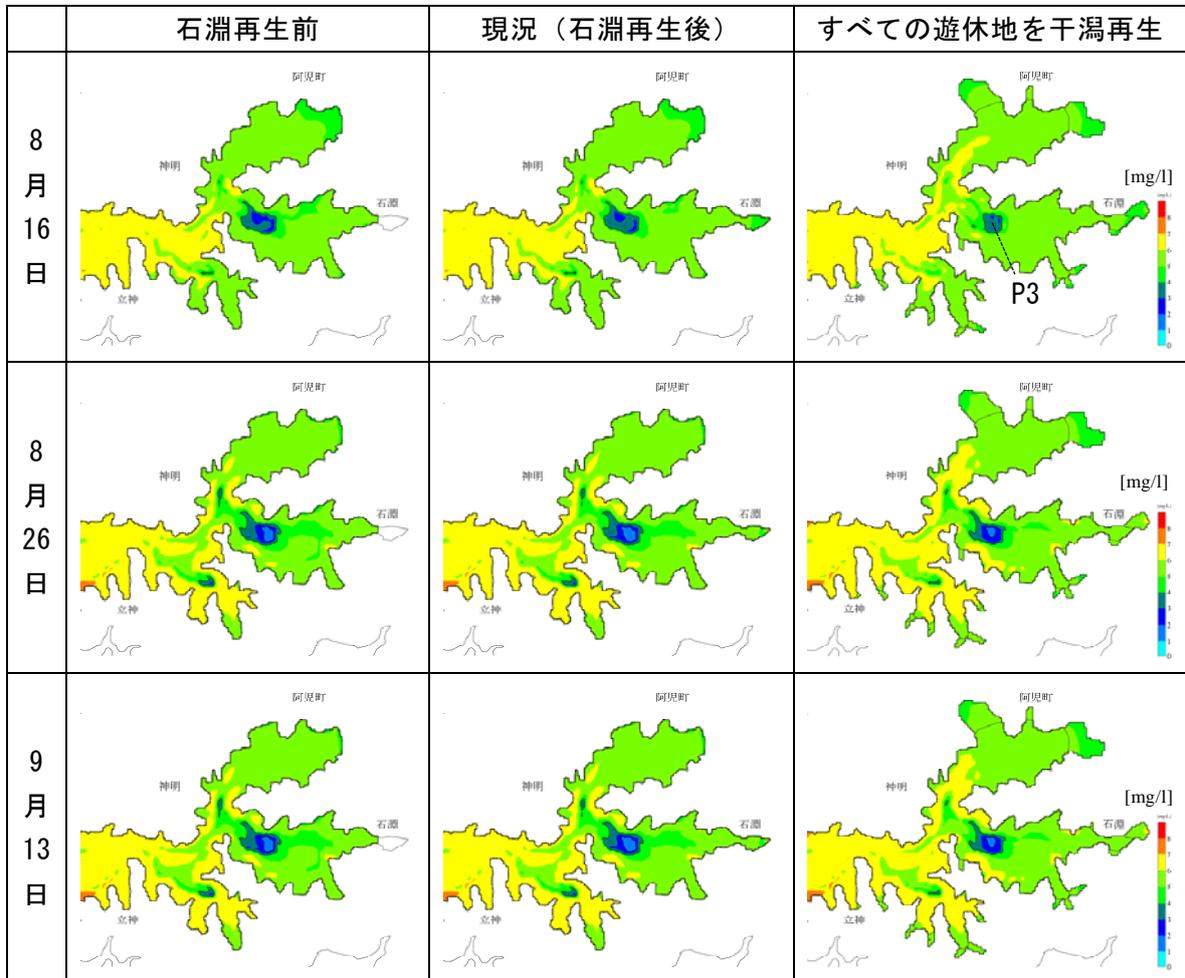


図 30 干潟再生による底層の溶存酸素濃度の変化

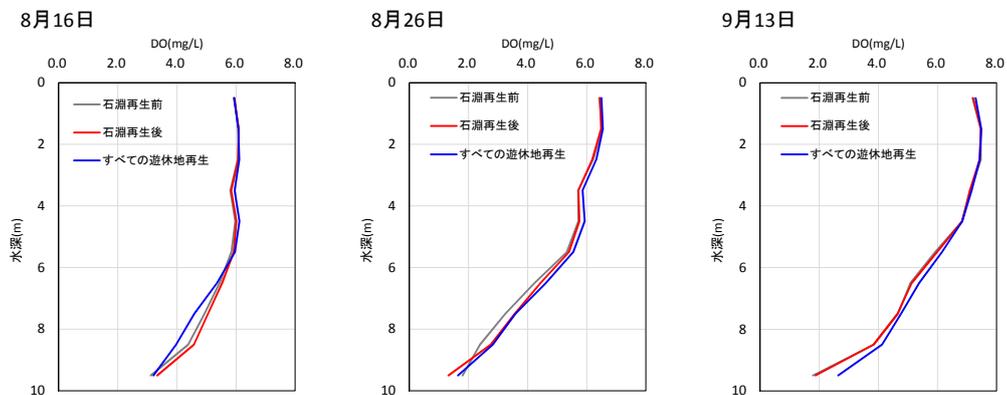


図 31 P3 地点における溶存酸素の鉛直プロファイルの変化

5.2.5 栄養塩の変化

干潟再生による栄養塩濃度の変化として、枝湾内の代表地点における季節別の表層無機態リンと窒素濃度の変化を図 32 に示す。

干潟再生によって栄養塩濃度には大きな変化は見られない。

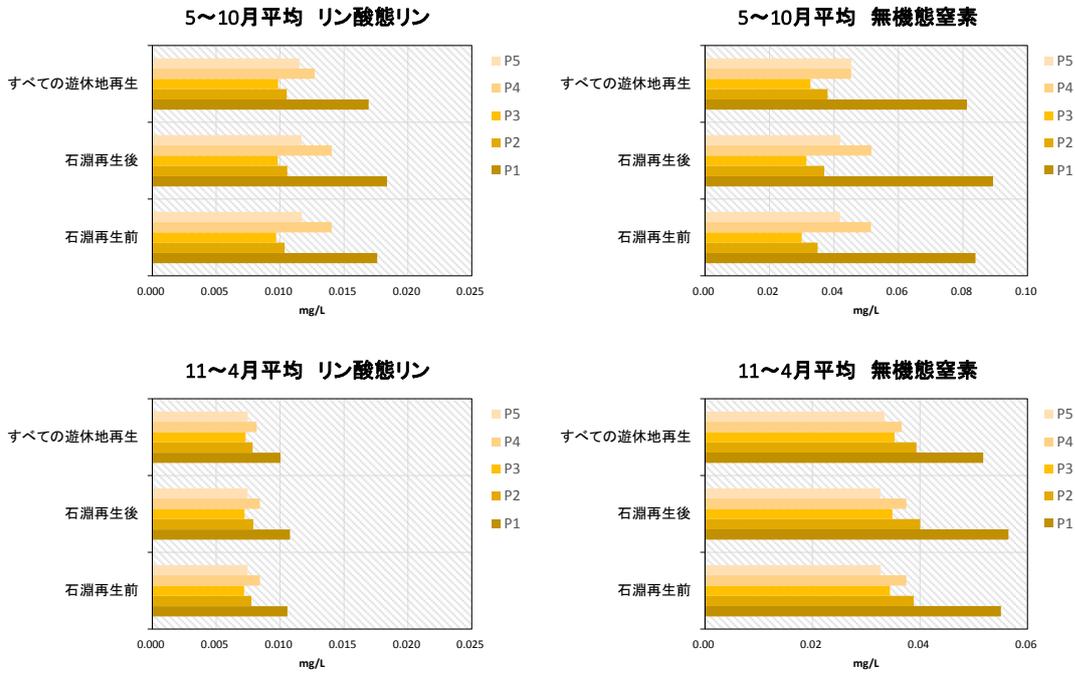
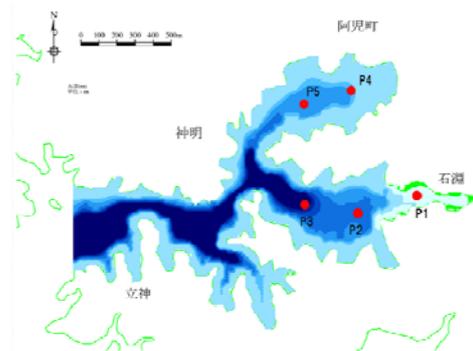


図 32 干潟再生による表層栄養塩濃度の変化



5.3 干潟再生効果のまとめ

英虞湾における干潟再生は、海水の交換性を向上させるとともに、干潟に生息する生物による浄化能力により、枝湾内の貧酸素水塊の解消に大きな効果を持つと予測された。とくに水門の開放によって、水平方向の海水の交換性が改善されることが貧酸素水塊の解消に大きく寄与していることがわかった。

一方で、枝湾に流入する海水が貧酸素化しているような状況においては、その海水を枝湾に引き入れることになるため、干潟再生効果は本予測結果に比べ低減する可能性がある。

また干潟再生によって枝湾内の栄養塩濃度には変化が見られなかった。なお水門の開放時には遊休地に堆積した有機物が海に流出するといったことが想定されるが、今回の予測ではその負荷は扱わなかった。