

## 栄養塩類の循環状況と循環バランス向上対策の検討

播磨灘北東部海域における栄養塩類の循環状況については、平成 22、23 年度に現地調査やシミュレーションモデルによる計算により明らかになってきたが、平成 24 年度はシミュレーションモデルの計算精度をさらに向上させて滞りの要因を解析するとともに、対策を実施した際の効果を検証する。

シミュレーション計算を実施する対策は「下水処理場の窒素排出量増加運転」や「河川水を利用した港湾内外の海水交換の促進対策」、他に地域の物質循環の健全化に貢献可能な対策とし、効果や有効性について検討を行う。

### 1 地域の栄養塩類循環状況

#### 1.1 情報収集結果

##### 1.1.1 陸域

播磨灘北東部地域の陸域における地域の栄養塩類循環に関する情報を表 1 に示す。

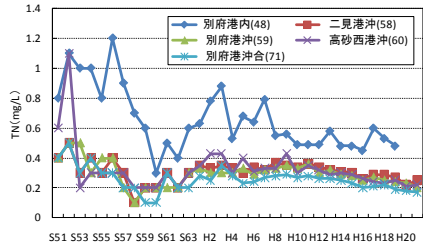
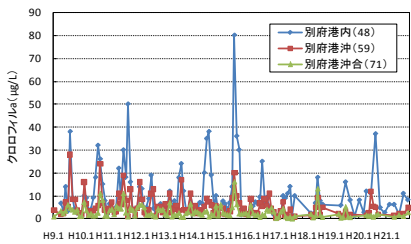
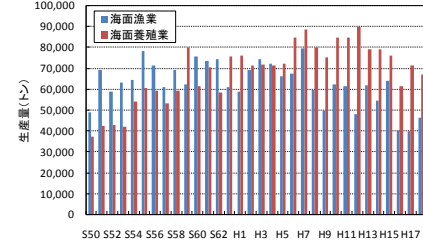
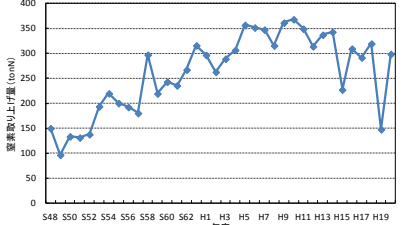
表 1 陸域における栄養塩類の循環に関する情報

循環に係る要素	概況と栄養塩類循環に係る情報
加古川	<p>【概況】 加古川は幹線流路延長 96km、流域面積 1,730km<sup>2</sup> の一級河川である。加古川河口から 12km 地点には加古川大堰が設置されている。</p> <p>【栄養塩類循環に係る事項】 全窒素濃度については昭和 50 年代後半の半分程度まで減少しており、平成 4 年度における 1 日当たりの播磨灘への全窒素負荷量は <u>6.1 トン</u>であった。</p>
ダム、ため池	<p>【概況】 播磨灘北東部地域は瀬戸内型気候に属するため雨量が少ないため、昭和 20 年代以降灌漑用水や水道用水等の確保のために大規模利水事業としてダムが建設されてきた。また、播磨地域には 1 万を超えるため池が存在し、利水や治水、生物生息の場等多面的な価値を有してきたが、農業従事者の減少等の理由で数が減っている。</p> <p>【栄養塩類循環に係る事項】 平成 20、21 年度には平荘ダム等で海域への栄養塩類の供給を目的とした試験放流が実施されたが、水利権等への対応から継続的な試験放流の実施は困難であるとみられている。 ため池においては、施設の保全やダムと同様の目的で池干しが実施されている。規模の関係から海域への栄養塩類の供給量は少ないが社会的な意義は大きいと考えられている。</p>
下水道整備	<p>【栄養塩類循環に係る事項】 平成 23 年 3 月現在での加古川流域の下水道整備率は 92.9%である。下水道整備率の上昇や高度処理の導入等により、上記に示したように河川の栄養塩類濃度はかつてより大幅に減少した。なお、平成 21 年度における対象地域で窒素排出量の最も多い下水処理場は中部析水苑で 1 日当たり 2.5 トンであり、加古川下流浄化センターは <u>0.7 トン</u>であった。</p>
事業場	<p>【概況】 播磨灘周辺の臨海部には排水量の多い事業場が集中しており、許可申請排水量の上位 20 事業場で播磨灘周辺の全事業場のその約 98%を占めている。</p> <p>【栄養塩類循環に係る事項】 平成 21 年度の全窒素排出量が最も多い事業場では 1 日当たり <u>5.0 トン</u>排出しており、加古川と同程度の量であった。なお、当該事業場においては冷却水に大量の海水を使用しており、それと特定排水を混合して排出しているため、全窒素濃度としては加古川下流浄化センターの濃度より低くなっている。</p>

## 1.1.2 海域

播磨灘北東部海域における栄養塩類循環に関する情報を表 2 に示す。

表 2 海域における栄養塩類の循環に関する情報

循環に係る要素	概況と栄養塩類循環に係る情報
<p>港湾整備（埋立）</p>	<p><b>【概況】</b> 播磨灘北部沿岸域には姫路港や東播磨港があり播磨工業地帯として開発されている。加古川の河口の付近は大部分が人工海岸である。</p> <p><b>【栄養塩類循環に係る事項】</b> 加古川河口周辺においては昭和 40 年頃から昭和 60 年頃にかけて港湾整備により大規模な埋立が実施された<sup>※1</sup>。それにより港湾内に滞留域が生じている。</p>  <p>港湾内外の栄養塩類濃度について、内外ともに全窒素濃度は半分程度に減少したが、港湾内の濃度が高く港湾外（沿岸～沖合域）の濃度が低い状態となっている。なお、港湾内の形態別窒素についてはアンモニア態窒素の割合が高くなっている。また、夏季には港湾内でクロロフィル a 濃度が高くなり、底層において貧酸素化が生じている。</p>  <p>播磨灘海域の全窒素濃度の推移<sup>※2</sup></p>  <p>表層クロロフィル a の推移<sup>※2</sup></p>
<p>漁業生産（ノリの生産）</p>	<p><b>【概況】</b> 海面漁業生産量は減少傾向にある。また、ノリについても平成 11 年以降毎年色落ちが生じており、生産量が急激に落ちてきている。</p> <p><b>【栄養塩類循環に係る事項】</b> 平成 18 年の海面漁業による窒素取り上げ量は 1 日当たり約 3.9 トンと計算された。一方、ノリの生産の窒素取り上げ量は減少傾向にあり年間 300 トン前後である。</p>  <p>兵庫県（瀬戸内海区）の漁業生産量の推移<sup>※3</sup></p>  <p>ノリ養殖による窒素取り上げ量<sup>※4</sup></p>

※1：兵庫県県土整備部土木局港湾課資料

※2：公共用水域水質測定結果より作成

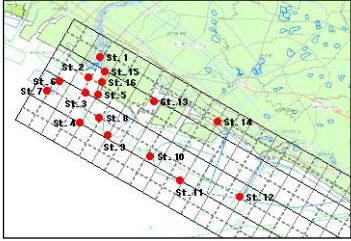
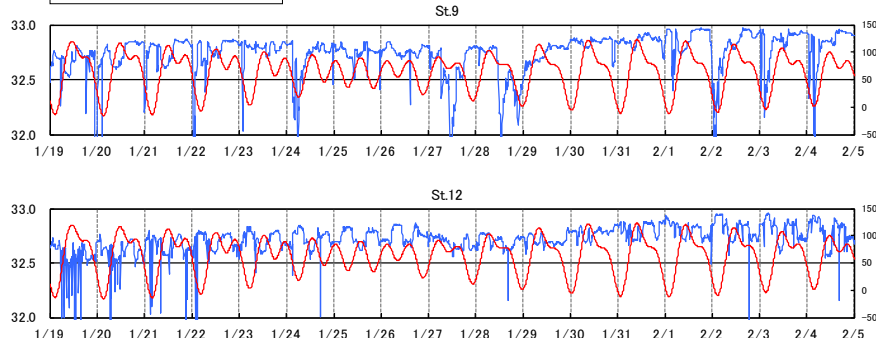
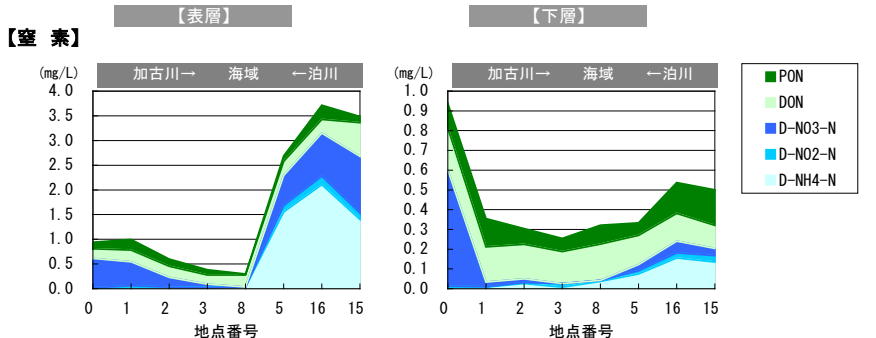
※3：兵庫県農林水産統計年報より作成

※4：兵庫県のり共販資料より作成（ノリの重さを 3.3gdry/枚、窒素含有量を 6%（乾燥時）として算出）

## 1.2 現地調査結果

平成 23、24 年度に実施した現地調査により明らかになった海域の栄養塩類循環に関する結果を表 3 に示す。

表 3 現地調査結果に基づく栄養塩類の循環に関する情報

循環に係る要素	概況と栄養塩類循環に係る情報
<p>加古川の影響</p>	<p><b>【概況】</b> 加古川から栄養塩類濃度の高い淡水が流入しており、播磨灘北東部海域における重要な栄養塩類の供給源になっている。</p> <p><b>【栄養塩類循環に係る事項】</b> 海域に流入した加古川河川水は潮汐による影響を受け、下げ潮時に南東方向に流れ、上げ潮時に水塊が北西に移動する。平水時における濃度への影響については、海域に流入後、河口からの距離に比例して減少していき、東播磨港 2,000m 沖 (St.9) 付近までとみられた。</p>   <p style="text-align: center;">塩分と潮位の経時変化</p>
<p>港湾内の栄養塩類濃度組成</p>	<p><b>【栄養塩類循環に係る事項】</b> 全窒素濃度は年間を通じて港湾内が沖合域より高かった。無機態窒素は春季以外全窒素と同じ傾向であった。泊川河口沖水路や東播磨港内では年間を通じてアンモニア性窒素濃度が高いという特徴がみられた。</p>  <p style="text-align: center;">泊川河口沖水路と周辺の窒素濃度の比較</p>
<p>水温塩分の鉛直プロフィール</p>	<p><b>【概況】</b> 泊川河口沖水路には加古川下流浄化センターの排水(淡水)と民間事業場の排水(海水の冷却水と淡水の混合水)が流入しており特徴的な濃度分布を示している。</p> <p><b>【栄養塩類循環に係る事項】</b> 水温、塩分の鉛直分布から、泊川河口沖水路では水深 2m 程度を境として表層と下層で水塊が異なっていた。また、形態別の分析結果から、表層には無機態の窒素、りんが加古川より高い濃度で存在していることが確認された。</p>

### 1.3 シミュレーションモデルによる計算結果

#### 1.3.1 流動モデル

##### (1) 計算条件

対策ケースの効果の検討について、加古川河口周辺海域を対象に詳細な計算を行うこととした。900m-300m 格子による広域（大阪湾、紀伊水道を含む瀬戸内海東部）の計算結果を用いて、流動モデルおよび水質モデルの境界条件、初期条件を作成し、加古川河口周辺海域を切り出して100m 格子に細格子化（図 1）し、シミュレーションモデルによる計算を実施した。

さらに、細格子化については、泊川河口沖水路内に見られる表層から水深 1m 付近までの薄い水温・塩分躍層を精緻に表現するため、図 2 に示すような鉛直方向の格子分割には  $\sigma$  座標系を用いた。また、対策の効果検討シミュレーションの計算条件を表 4 に示す。

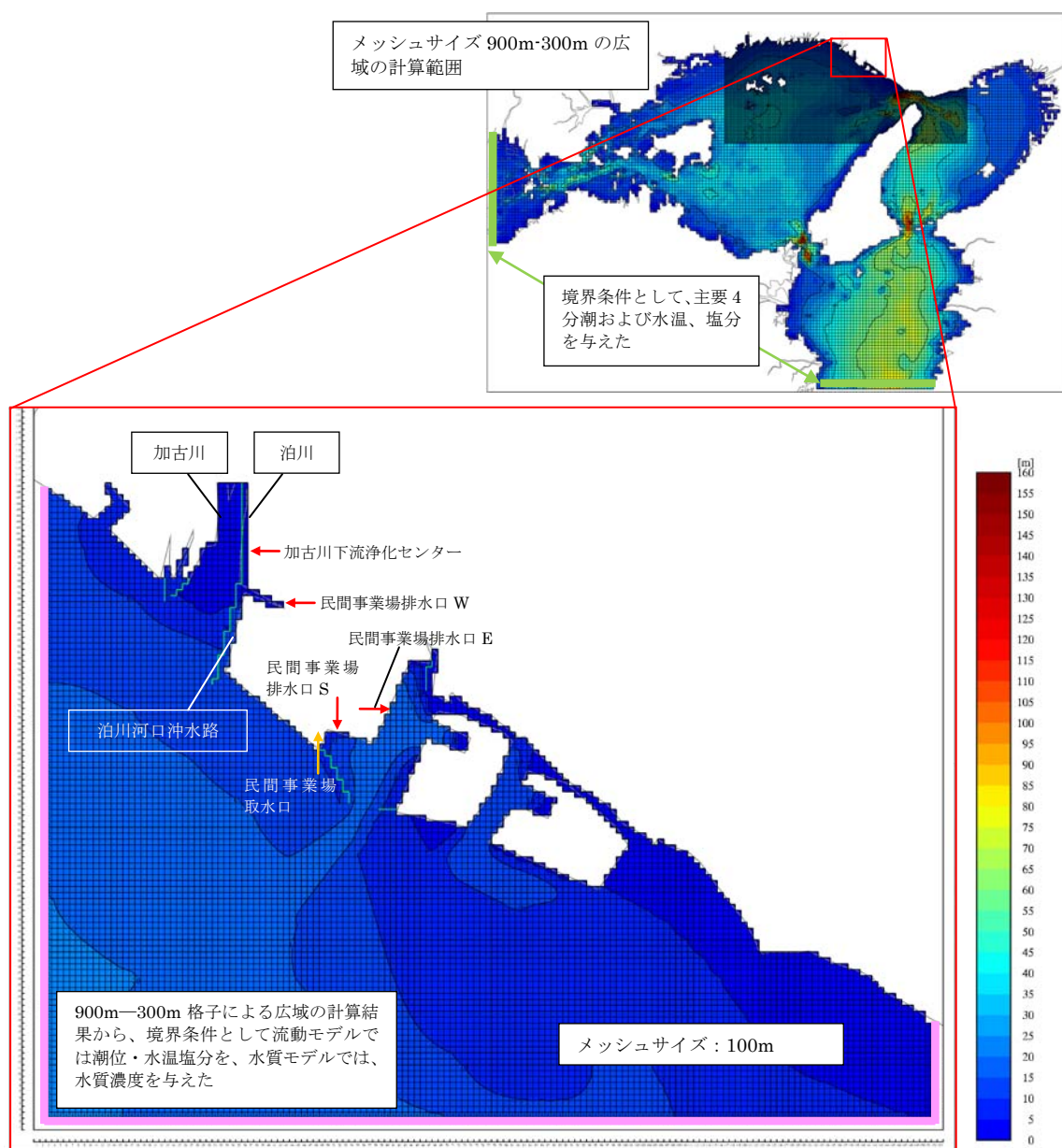


図 1 加古川河口周辺海域を対象としたシミュレーションの計算範囲および水深

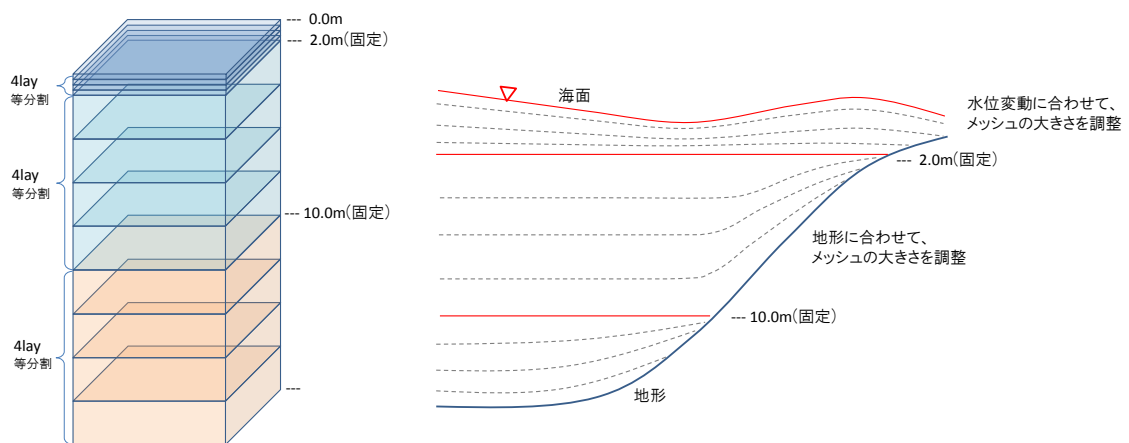


図 2 鉛直方向の格子分割の設定方法

表 4 計算条件

項目		設定内容
気象条件		風向風速は「明石」の風向風速を、計算範囲の全域に同じ値を与えた
流入条件	河川	領域内の 1 級・2 級・主要河川流量と負荷量(COD、TN、TP)を与えた。
	事業場	排水量上位 20 位の事業場と周辺の下処理場の流入量と負荷量(COD、TN、TP)を与えた
湾口境界条件	潮位振幅	大・中領域計算の計算結果を与えた
	水温・塩分	大・中領域計算の計算結果を与えた
	水質	大・中領域計算の計算結果を与えた
初期条件	水温・塩分	大・中領域計算の計算結果を与えた
	水質	大・中領域計算の計算結果を与えた

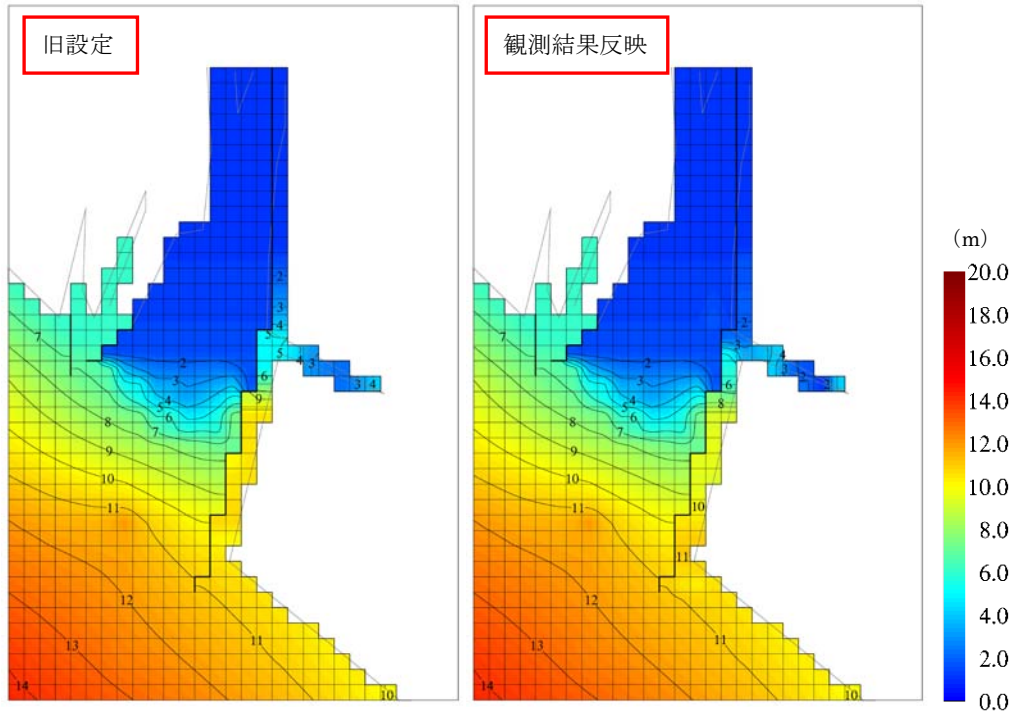
## (2) 流動計算への地形の調査結果の反映

シミュレーションモデルにおける現況再現精度を向上するために必要となる泊川河口沖水路の地形を把握することを目的として、泊川河口沖水路において簡易的な深浅測量調査を実施（平成 24 年 7 月 30 日）した。

調査結果を反映した水深図を図 3 に示す。また、深浅測量結果を使用して再設定した計算メッシュの水深を図 4 に示す。

泊川河口沖水路の奥部にある東西方向の水路においては、当初想定していたより実際的水深が浅いことが明らかになり、計算メッシュについても修正を行った。





※ 最低水面を基準面としている

図 3 詳細計算を実施する海域の水深図

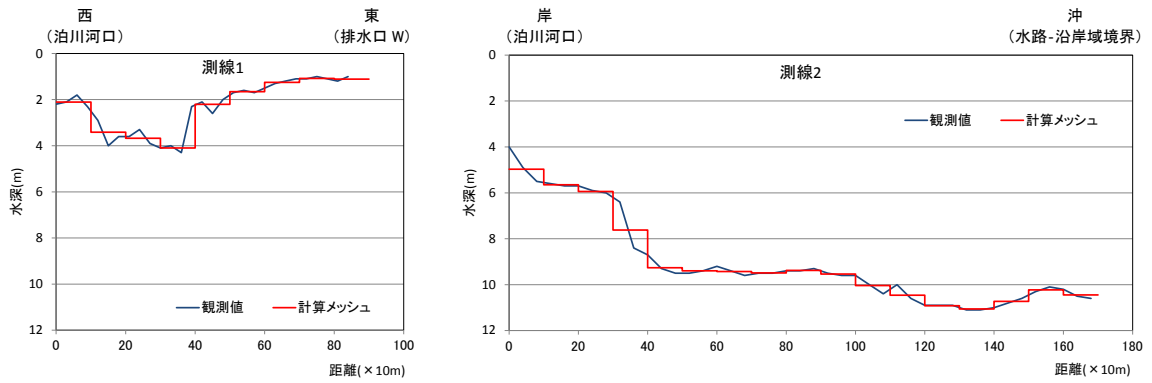


図 4 泊川河口沖水路内の水深の調査結果と再設定した計算メッシュ

### (3) 計算結果

鉛直方向の格子分割と地形について改良した流動モデルによる計算結果について、大潮期の例を図 6 に示す。

泊川河口沖水路表層では、低塩分・高水温の水塊が覆っており、水路内の断面図を見ると、下げ潮期・上げ潮期ともに表層の低塩分・高水温の水塊が水路から沿岸域に流出し、水路南端部の深い水深帯からは、沿岸域の水が水路奥深くまで流入する傾向にあることが確認できる。



図 5 縦断面図に示された地点位置

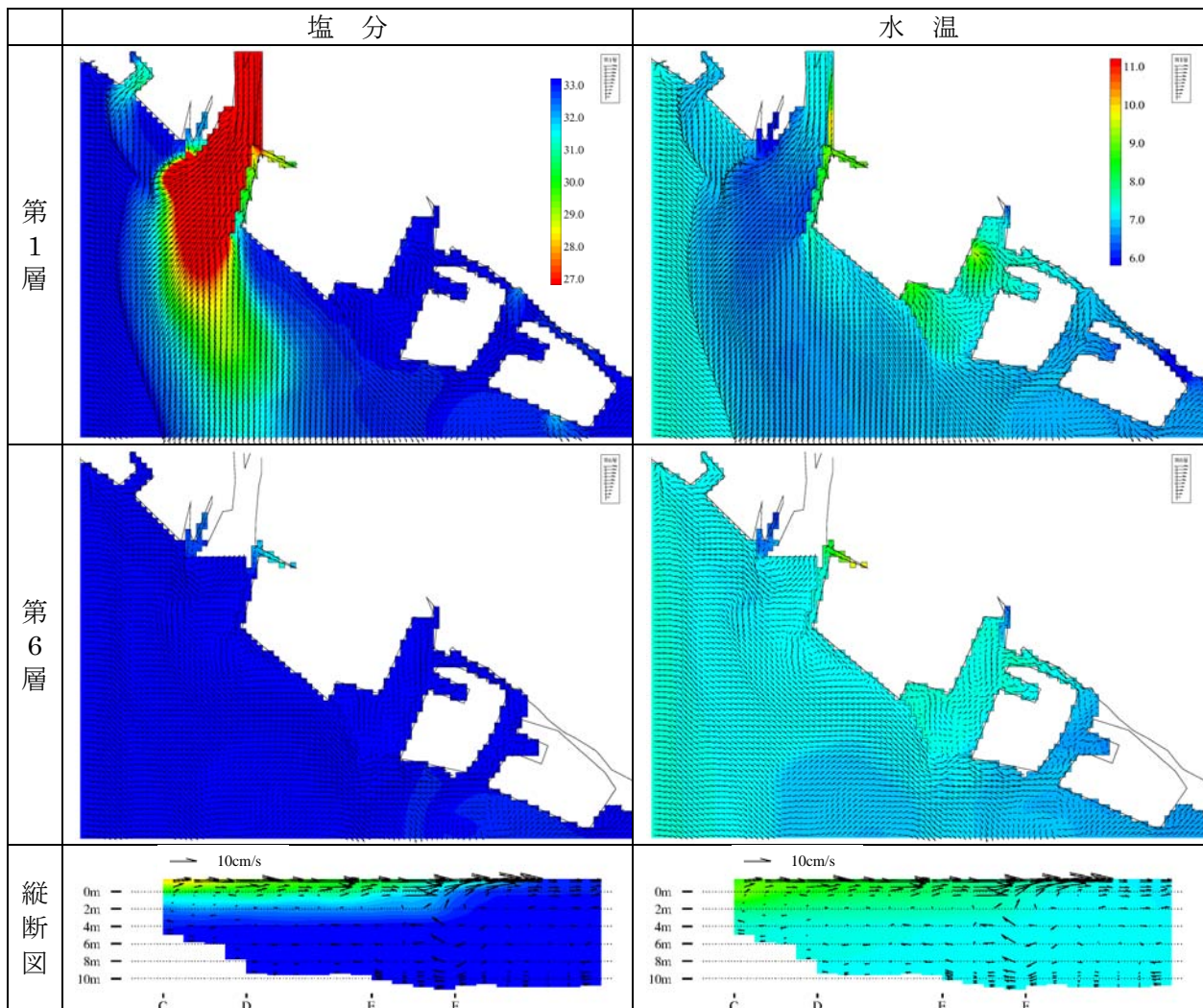


図 6 (1) 上げ潮時の水温・塩分の水平・鉛直分布(2005年12月15日08時)

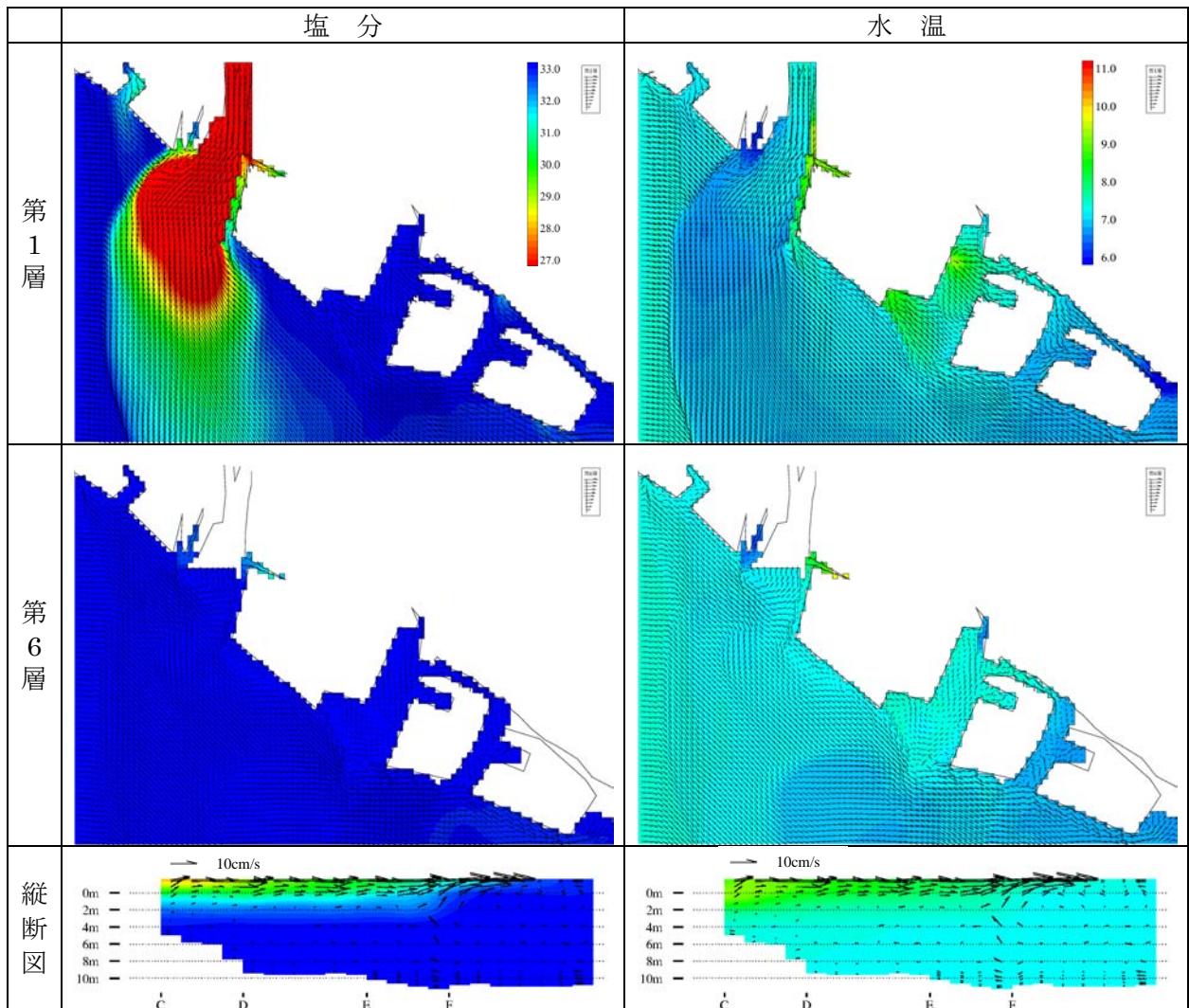


図 6 (2) 満潮時の水温・塩分の水平・鉛直分布 (2005 年 12 月 15 日 10 時)



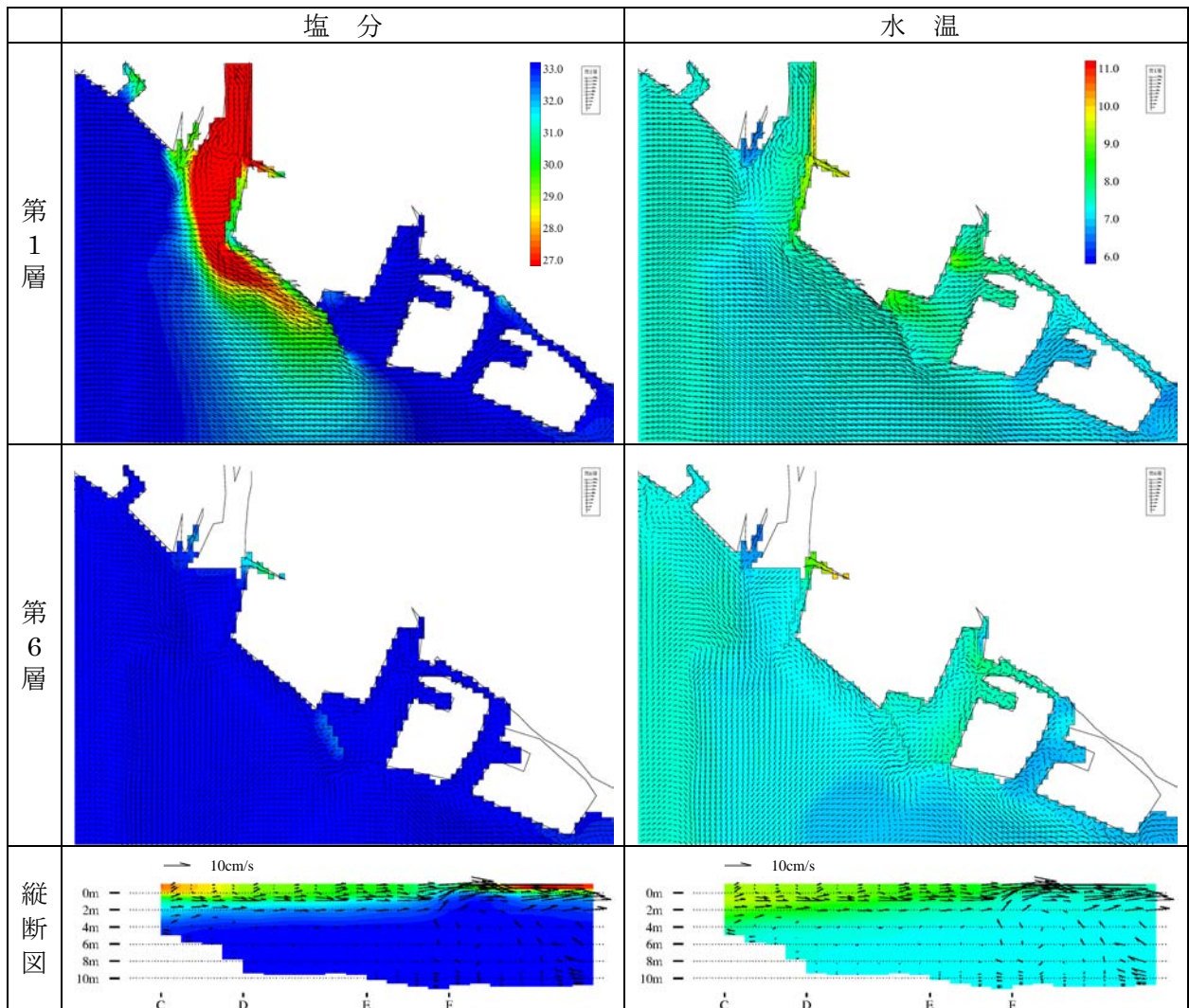


図 6 (3) 下げ潮時の水温・塩分の水平・鉛直分布(2005年12月15日14時)

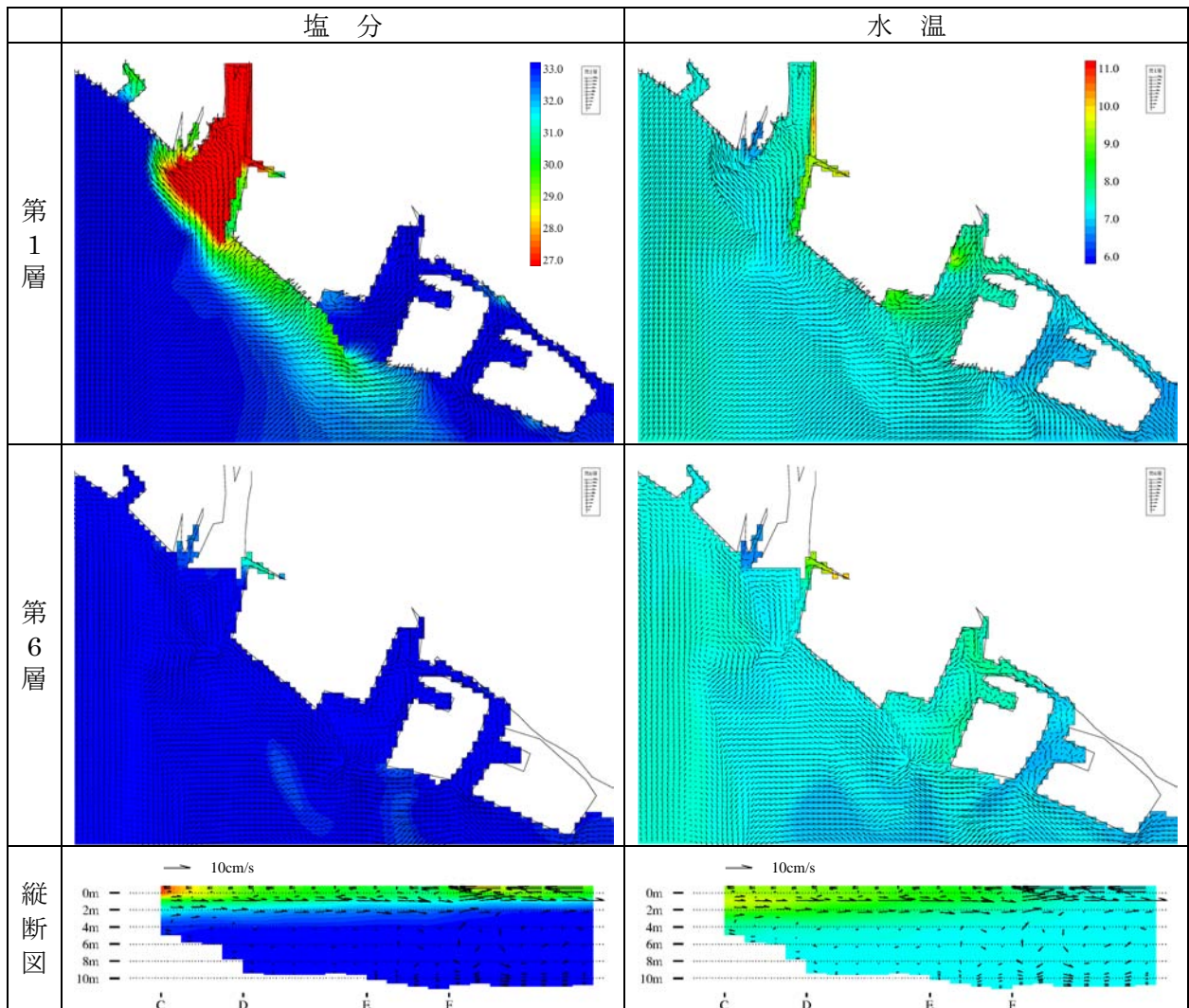


図 6 (4) 干潮時の水温・塩分の水平・鉛直分布 (2005 年 12 月 15 日 16 時)

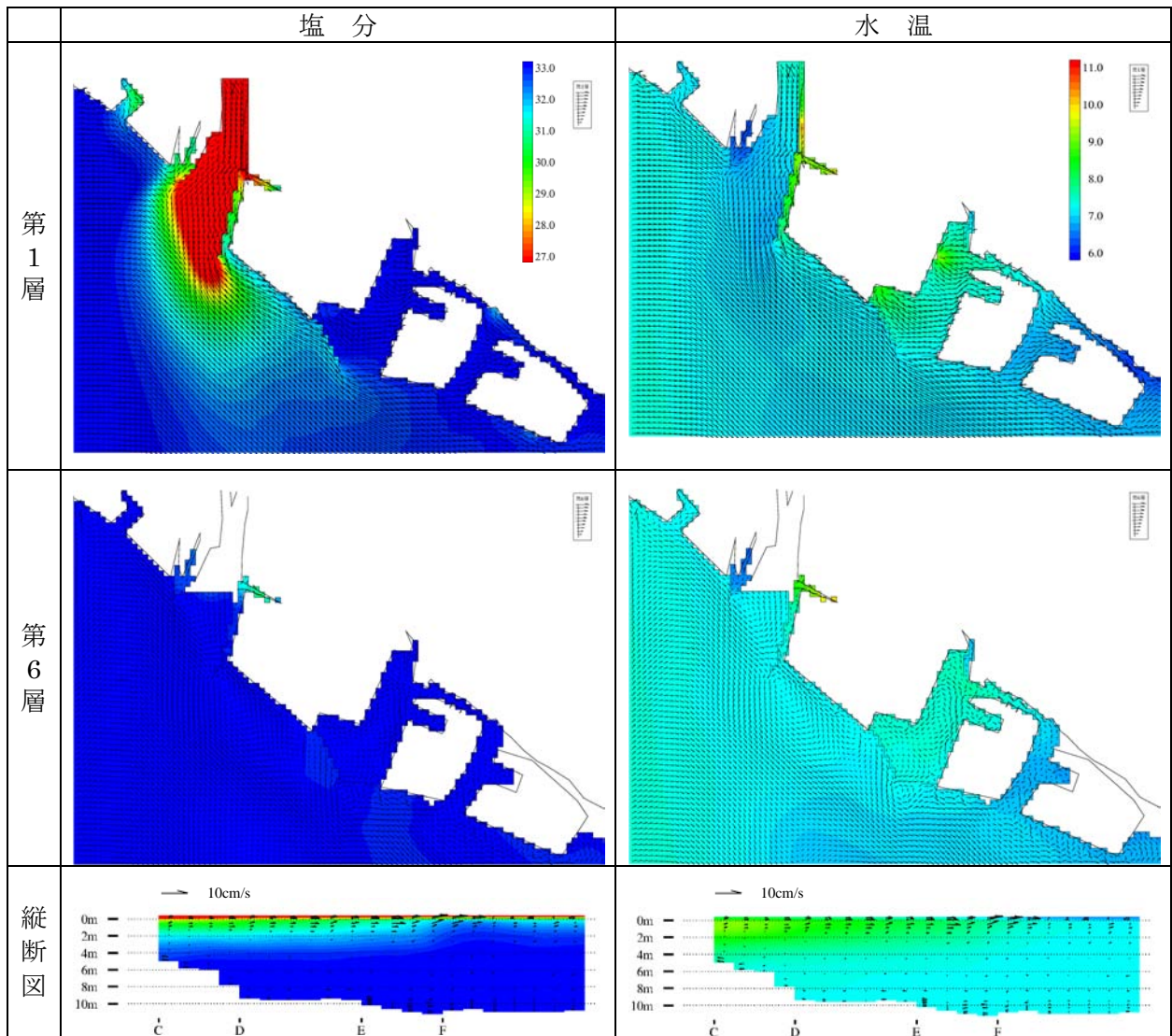


図 6 (5) 日平均の水温・塩分の水平・鉛直分布(2005年12月15日16時)

#### (4) 再現性の確認

##### 1) 泊川河口沖水路内の水温・塩分構造の再現性の確認

数値シミュレーションで栄養塩類の循環を検討するうえで、泊川河口沖水路内の流れ場の再現性の把握は最も重要な項目の一つであるが、現場の制約等の理由で水路における流速の測定が困難であったことから、本検討においては詳細な観測が実施されている水路内の水温・塩分の分布状況の再現性を確認することで、泊川河口沖水路内の流れ場が再現されているかどうかを確認することとした。

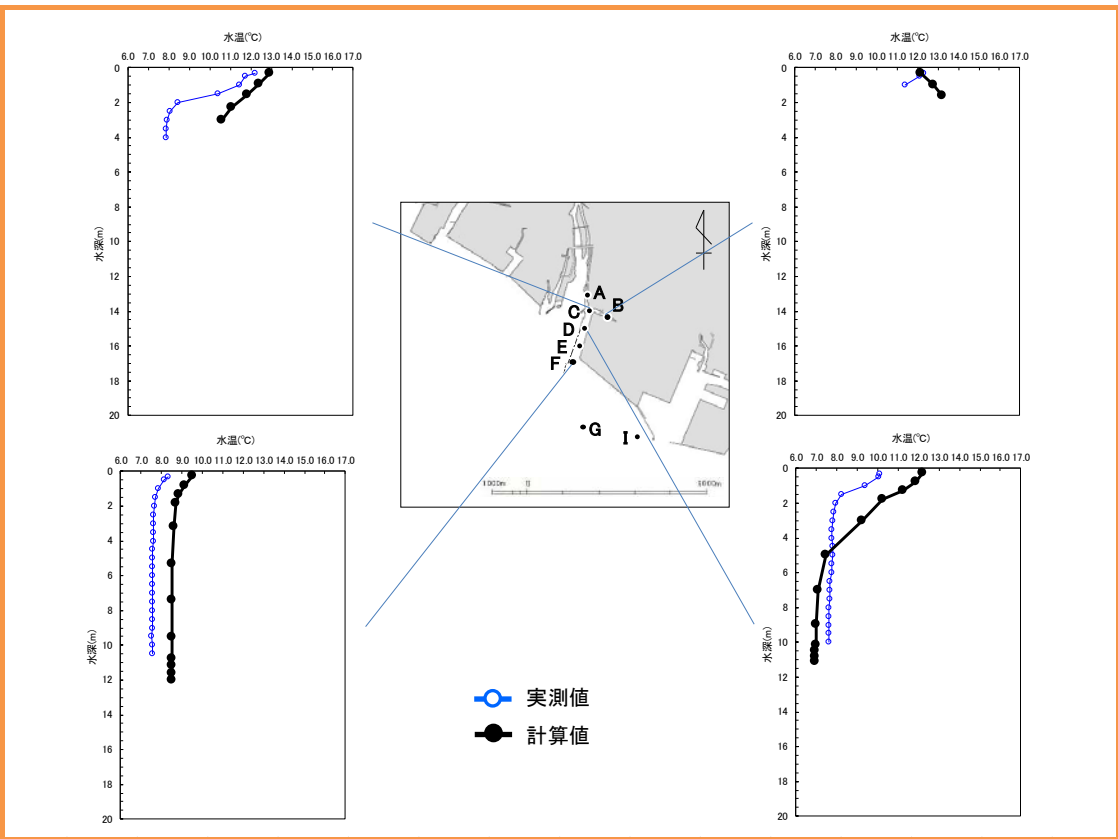
泊川河口沖水路内の水温・塩分構造の特徴としては、表層から水深 2m 程度までの薄い水深帯に、低塩分・高水温の水塊が覆っており、水温・塩分躍層（水温・塩分が急激に変化する層）が形成されていることが挙げられる。このような水温・塩分躍層は、水路内の流動に大きな影響を与えていると考えられたため、この躍層の形状の再現性を重点的に検討することとした。

泊川河口沖水路の水温・塩分の実測値と計算値を比較した結果を図 7 に示した。ただし、実測値は 2011 年 2 月 11 日に観測されたデータを示した。

計算は 2006 年冬季(1 月～3 月)を対象に実施しており、現地観測が行われた年次とは時期が異なっているため、観測結果と計算結果を直接比較することはできないが、泊川河口沖水路の表層数  $m$  の水深に薄く形成される高温・低塩分の密度躍層を表現できていることが確認できる。また、全体的な水温の値が違っているように見えるが、図 8 に示すとおり年次を合わせた水温・塩分データに対する再現性については概ね良いことが確認できる。ただし、実測値は兵庫県浅海定線調査及び重要水族調査の H2 地点のデータであり、計算値は同地点付近の計算格子の結果を示している。



水温



塩分

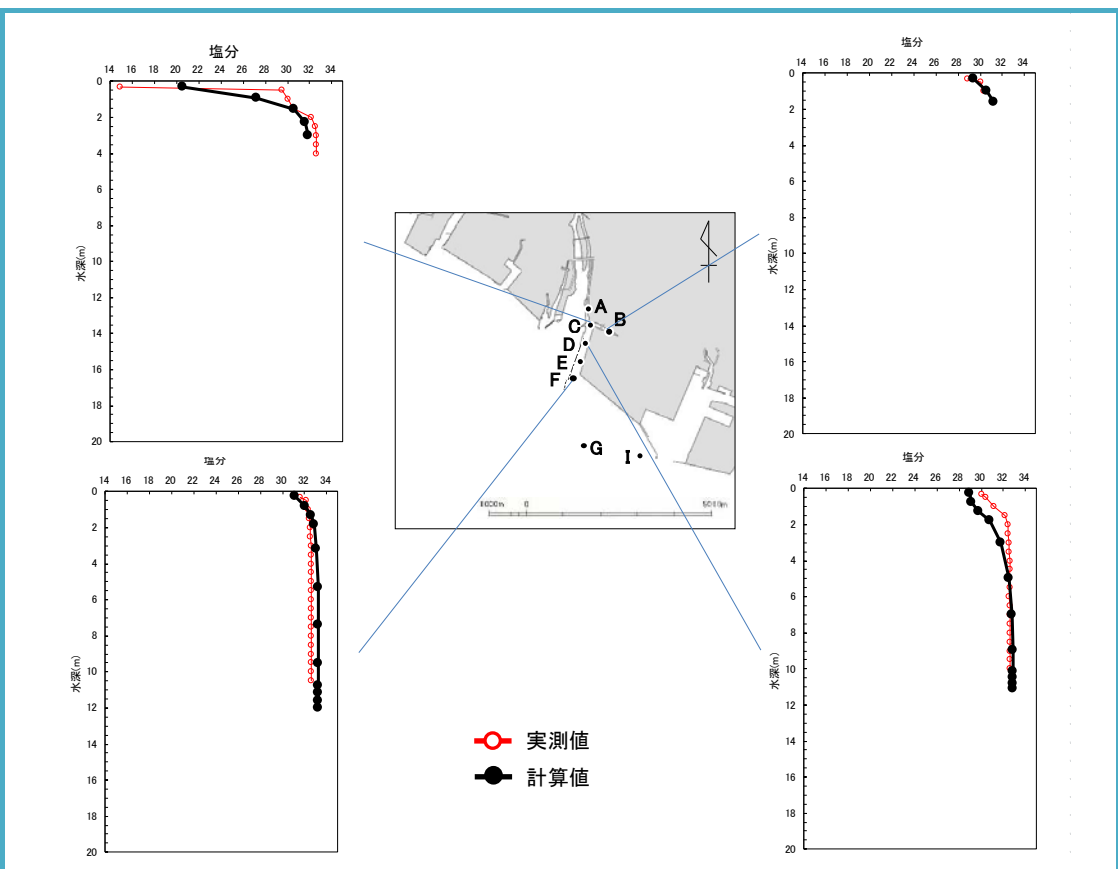


図 7 泊川河口沖水路内の水温・塩分分布 [実測値:2011年2月12日、計算値:12月15日10時]

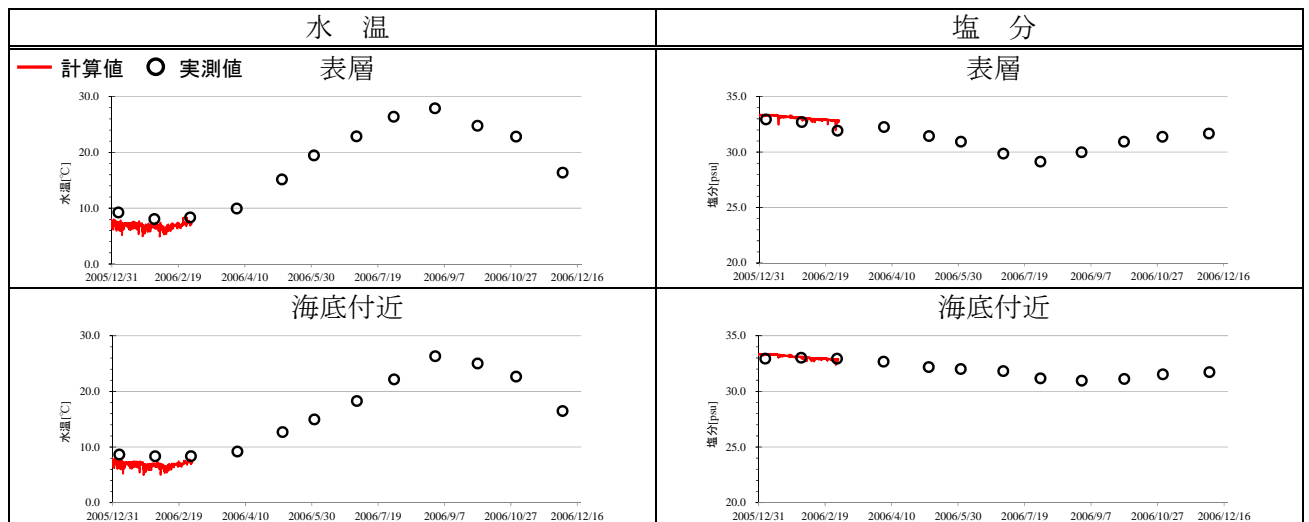


図 8 水温・塩分の計算値と実測値 (H2) の比較

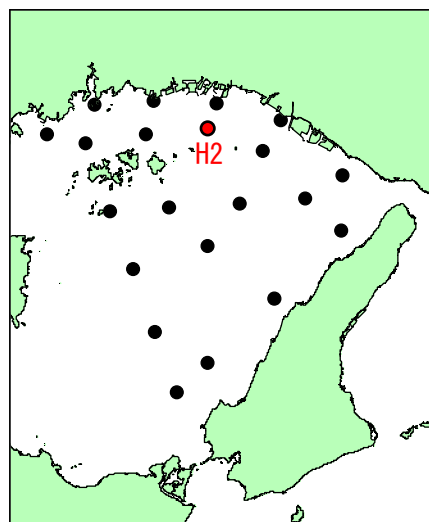


図 9 実測値の調査点 H2 の位置

## 2) 河川水の沿岸域への拡散状況に関する再現性の検討

対策ケースでは、泊川河口沖水路内に滞る栄養塩類を沿岸～沖合域に放出した場合、どの程度の栄養塩類が生物（植物プランクトン、ノリ等）に利用されるかを検証する。そのため、河川から沿岸～沖合域へ流出する水塊がどの程度の濃度でどの程度の範囲まで輸送されるかを正しく予測する必要がある。

ここでは、連続観測が実施された河川部および沿岸部の水温・塩分の時間的な変動特性の再現性を確認することで、海域に流入後の河川水の挙動を確認する。

泊川河口沖水路の水温・塩分状況の再現性の把握と同様、観測結果と計算結果は年次が異なるため、直接の比較はできないが、場所ごとの塩分の変動の特徴を定性的に比較することで、おおよその再現性の把握は可能と考えられる。

### ① 河川からの拡散

加古川から海域への河川水の拡散状況の再現性を把握するため、加古川内の St.1 と河口付近の St.3 における塩分と潮位（二見）の観測値と計算値の経時変化を図 10 に示した。

観測結果によると、河川水は主に下げ潮期に海域に流出する傾向であり、計算結果でも同様の傾向が確認された。また、両地点の塩分も観測値と計算値で概ね同程度の範囲で変動していた。

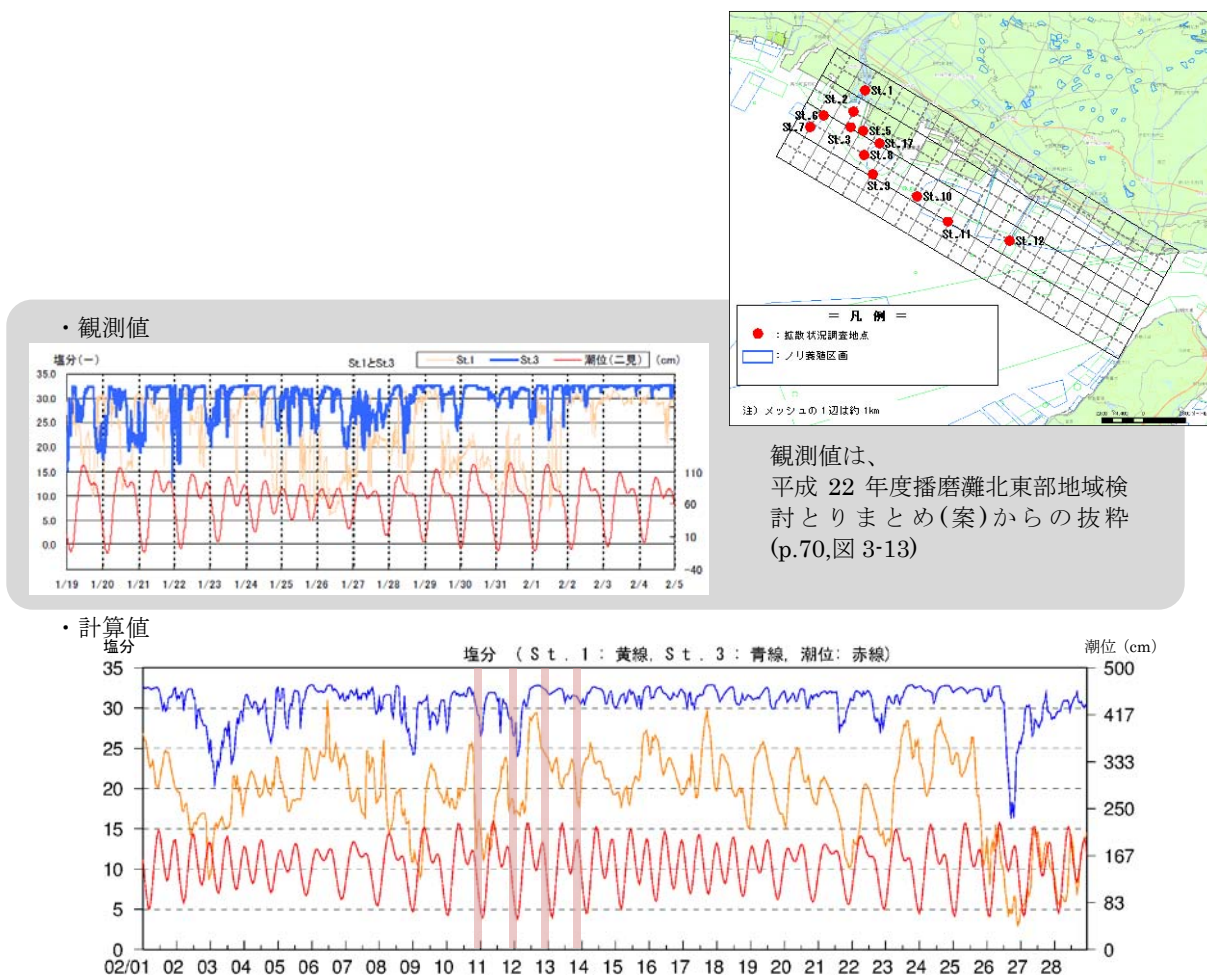


図 10 加古川河口付近の塩分の変化

## ② 海岸からの距離と河川水の影響

海岸からの距離による河川水の影響の違いについての再現性を把握するため、海岸からの距離が異なる 3 地点 (St.17、8、9) における塩分と潮位 (二見) について、観測値と計算値の経時変化を図 11 に示した。

観測値について、海岸からの距離が一番遠い St.9 は他の 2 地点に比べ高い塩分を示したが、最も近い St.17 と次に近い St.8 とは同程度の値であったことから、河川水の影響について St.17 と 8 は同程度で、St.9 はこの 2 地点に比べ影響が少ないと考えられた。また、計算結果においても同様の傾向が見られた。

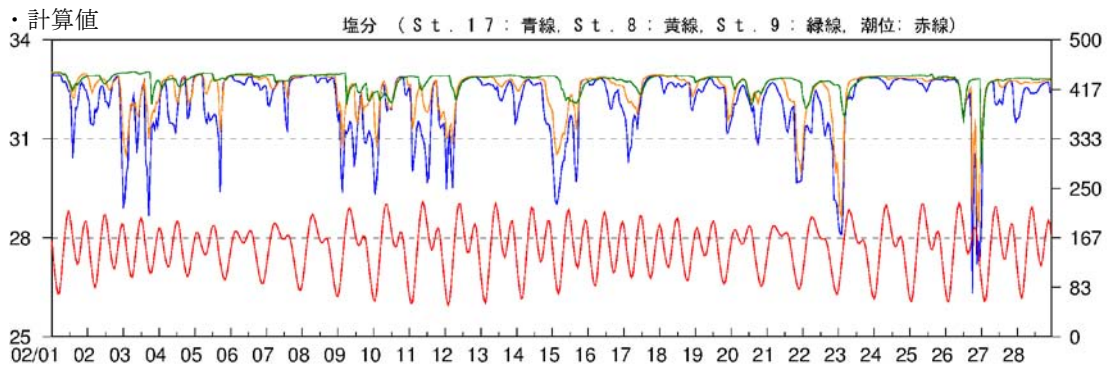
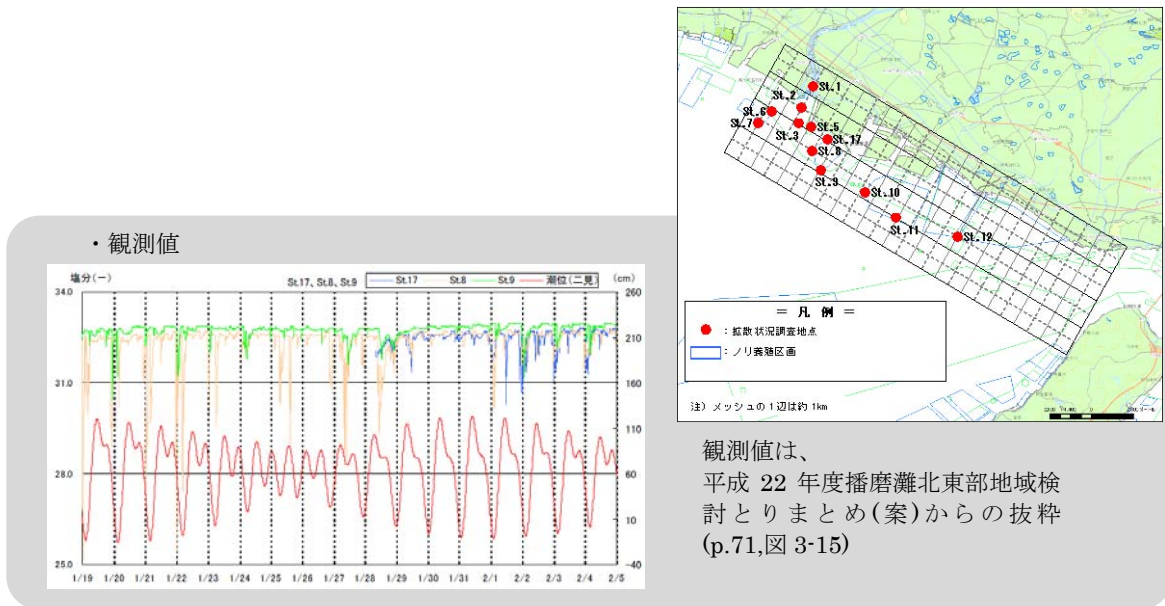


図 11 海岸からの距離の違いによる塩分変化の比較



### 1.3.2 水質モデル

#### (1) 計算結果

改良したシミュレーションモデルによる水質の計算結果を図 12 に示す。泊川河口沖水路の表層の栄養塩類が高濃度になっており、水路から沿岸域に流出している様子が確認できる。なお、水路内の鉛直分布については、水深 2m までの表層に高栄養塩類濃度の水塊が見られた。また、東播磨港内において栄養塩類濃度が高く滞留している様子がうかがえた。

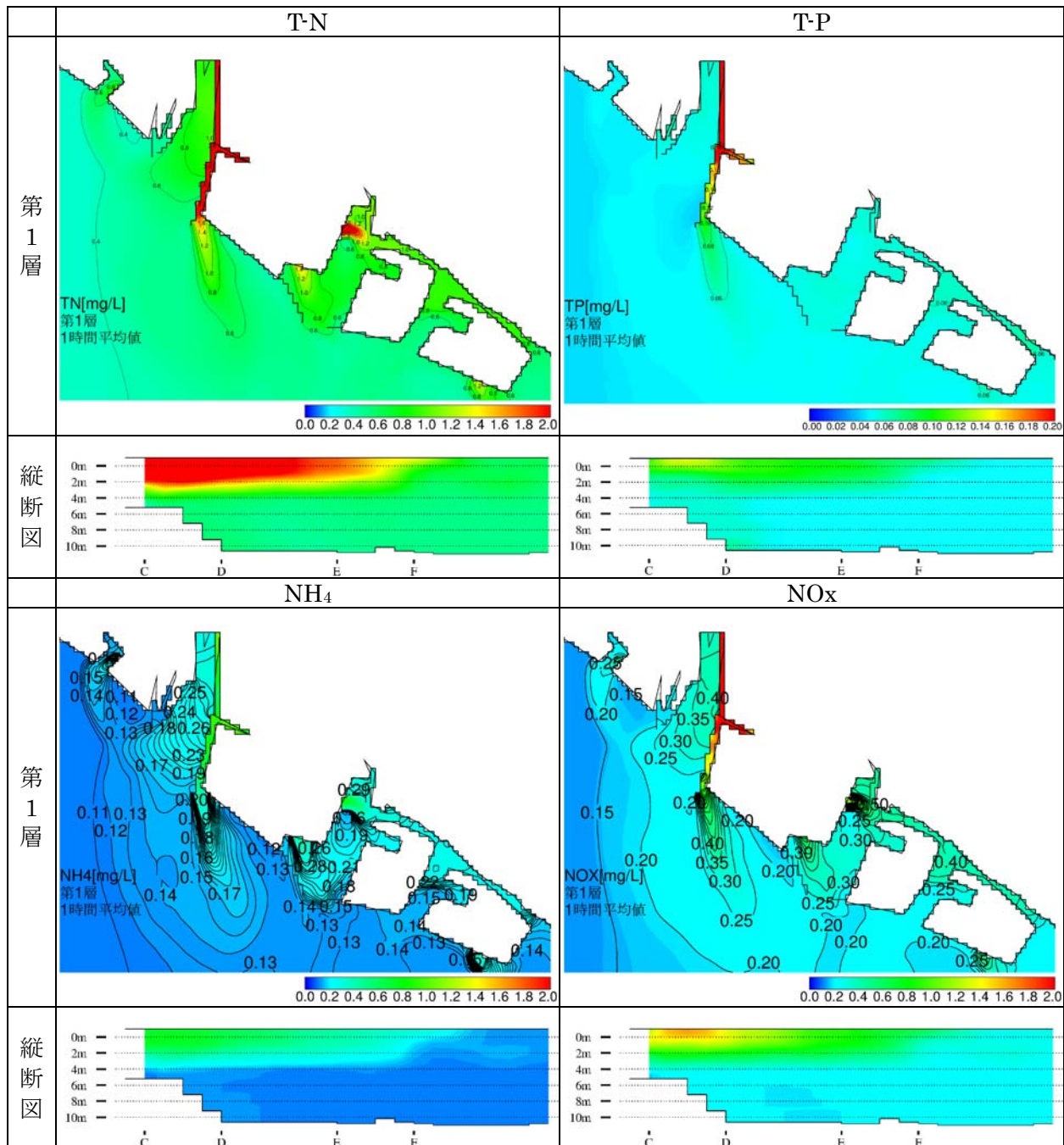


図 12 (1) 上げ潮時の T-N・T-P・NH<sub>4</sub>-N・NO<sub>x</sub>-N の水平・鉛直分布(2005 年 12 月 15 日 8 時)

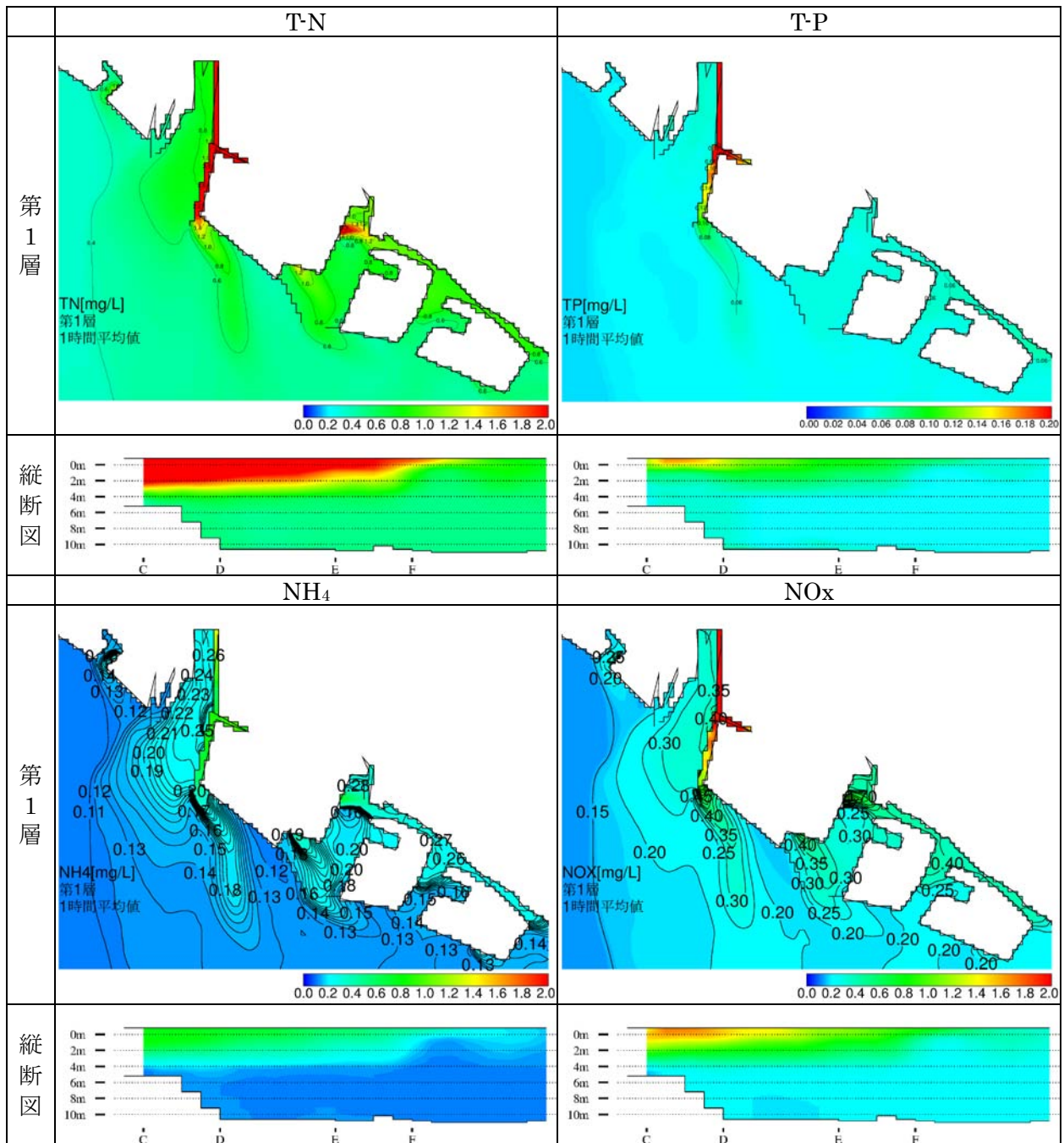


図 12 (2) 満潮時の T-N・T-P・NH<sub>4</sub>-N・NO<sub>x</sub>-N の水平・鉛直分布 (2005 年 12 月 15 日 10 時)

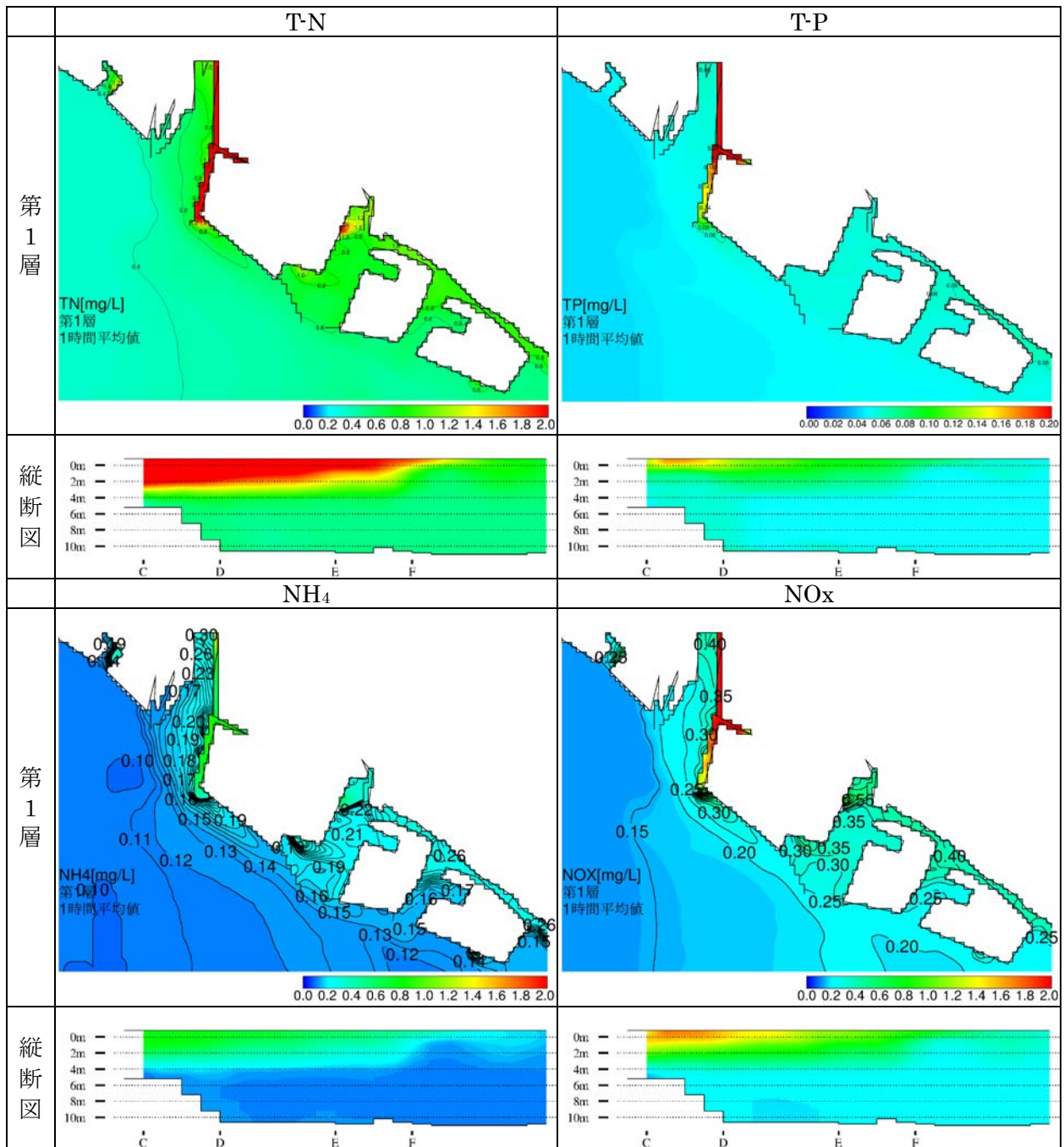


図 12 (3) 下げ潮時の T-N・T-P・NH<sub>4</sub>-N・NO<sub>x</sub>-N の水平・鉛直分布(2005年12月15日14時)



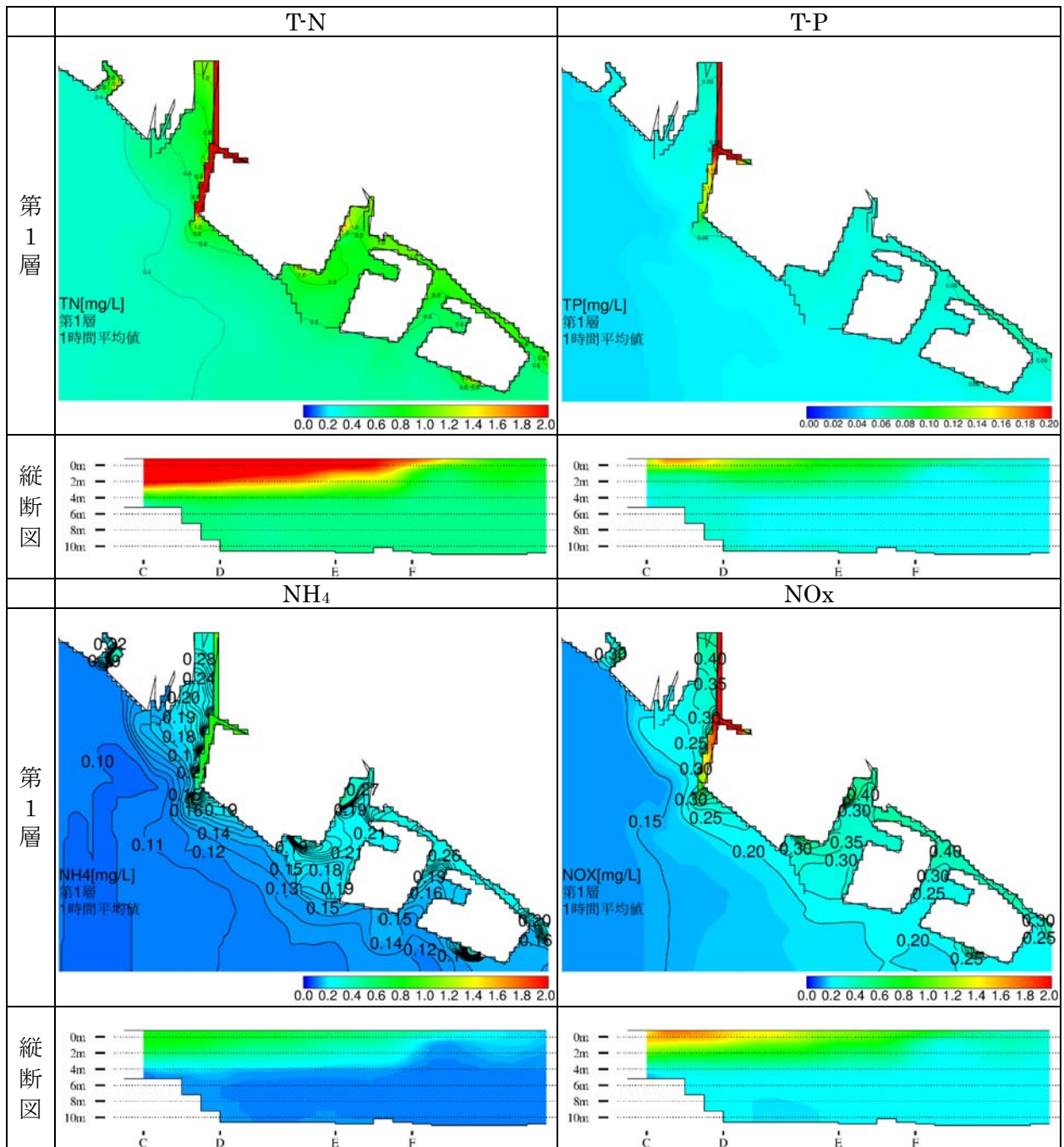


図 12 (4) 干潮時の T-N・T-P・NH<sub>4</sub>-N・NO<sub>x</sub>-N の水平・鉛直分布 (2005 年 12 月 15 日 16 時)



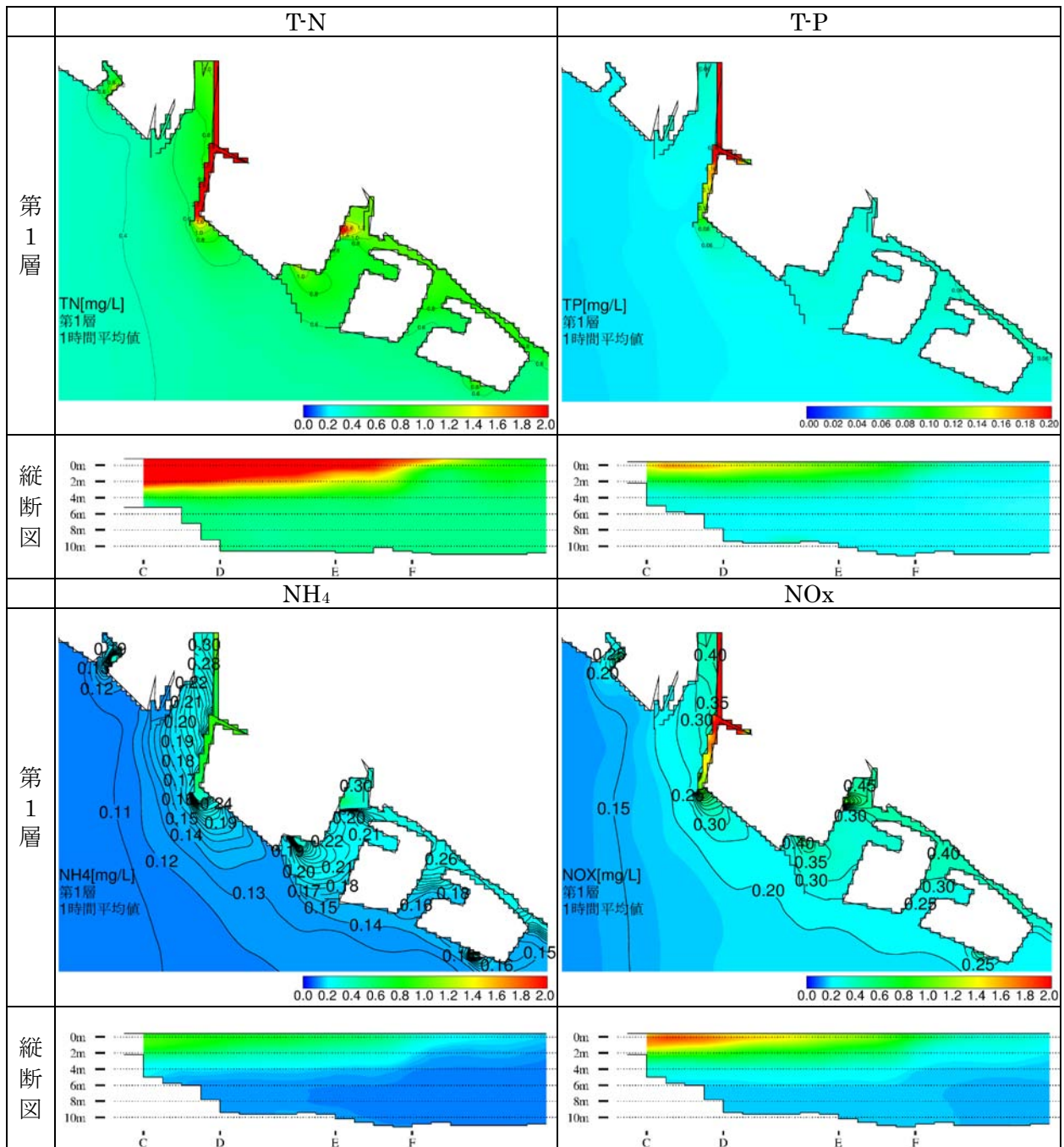


図 12 (5) 日平均の T-N・T-P・NH<sub>4</sub>-N・NO<sub>x</sub>-N の水平・鉛直分布(2005 年 12 月 15 日)

## (2) 再現性の確認

水質の計算結果についても流動計算と同様に再現性の確認を行った。図 13 に泊川河口沖水路内の水質の分布の比較結果を示す。また、図 14 には加古川下流浄化センターの窒素排出量増加運転時と通常時運転時の濃度の分布、濃度差の分布状況を示す。それぞれについて、濃度レベルと分布の傾向が精度よく再現できていた。なお、各態窒素の分布傾向の再現性についても概ね良好であった。

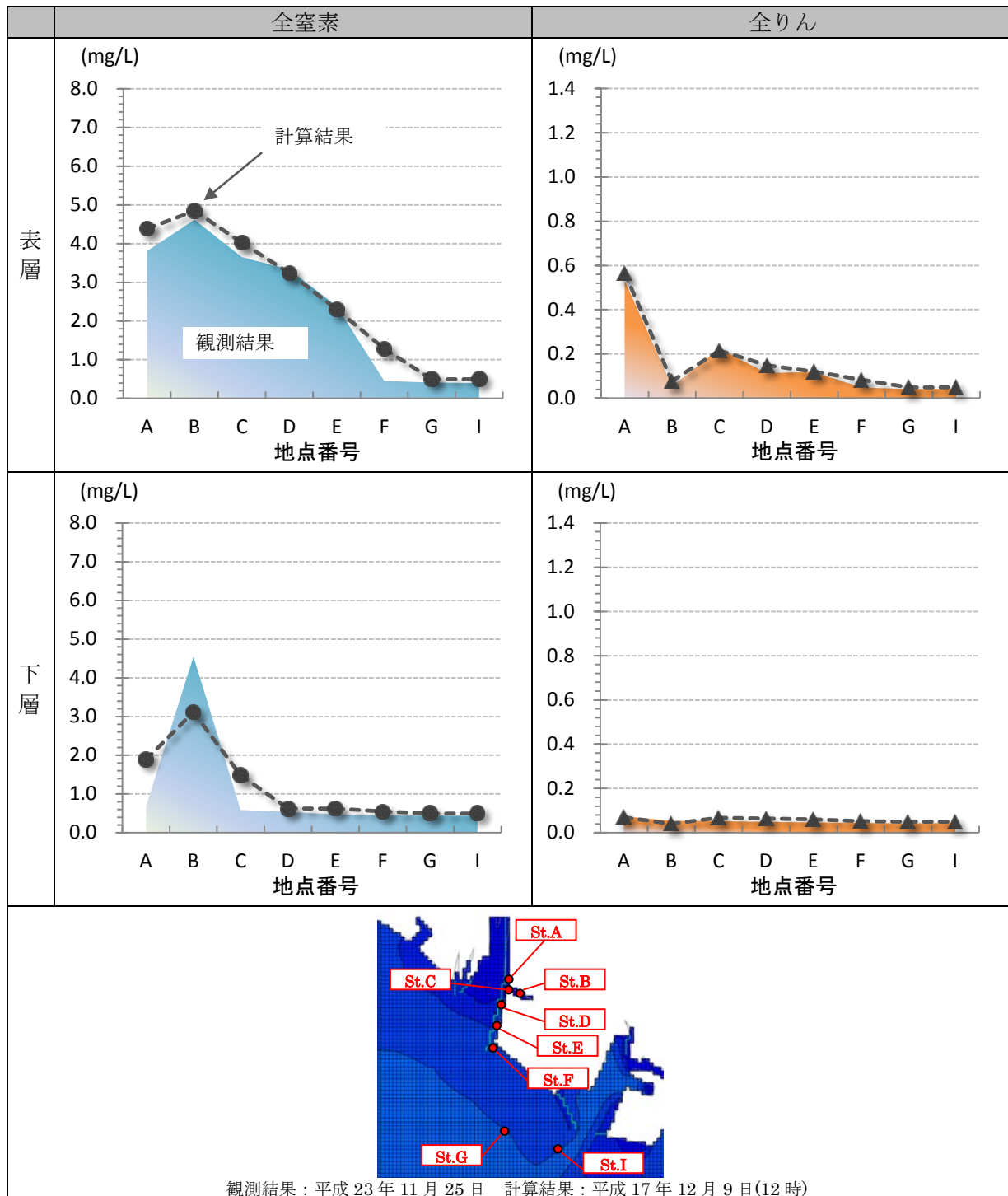


図 13 全窒素および全りんの計算値と観測値の比較

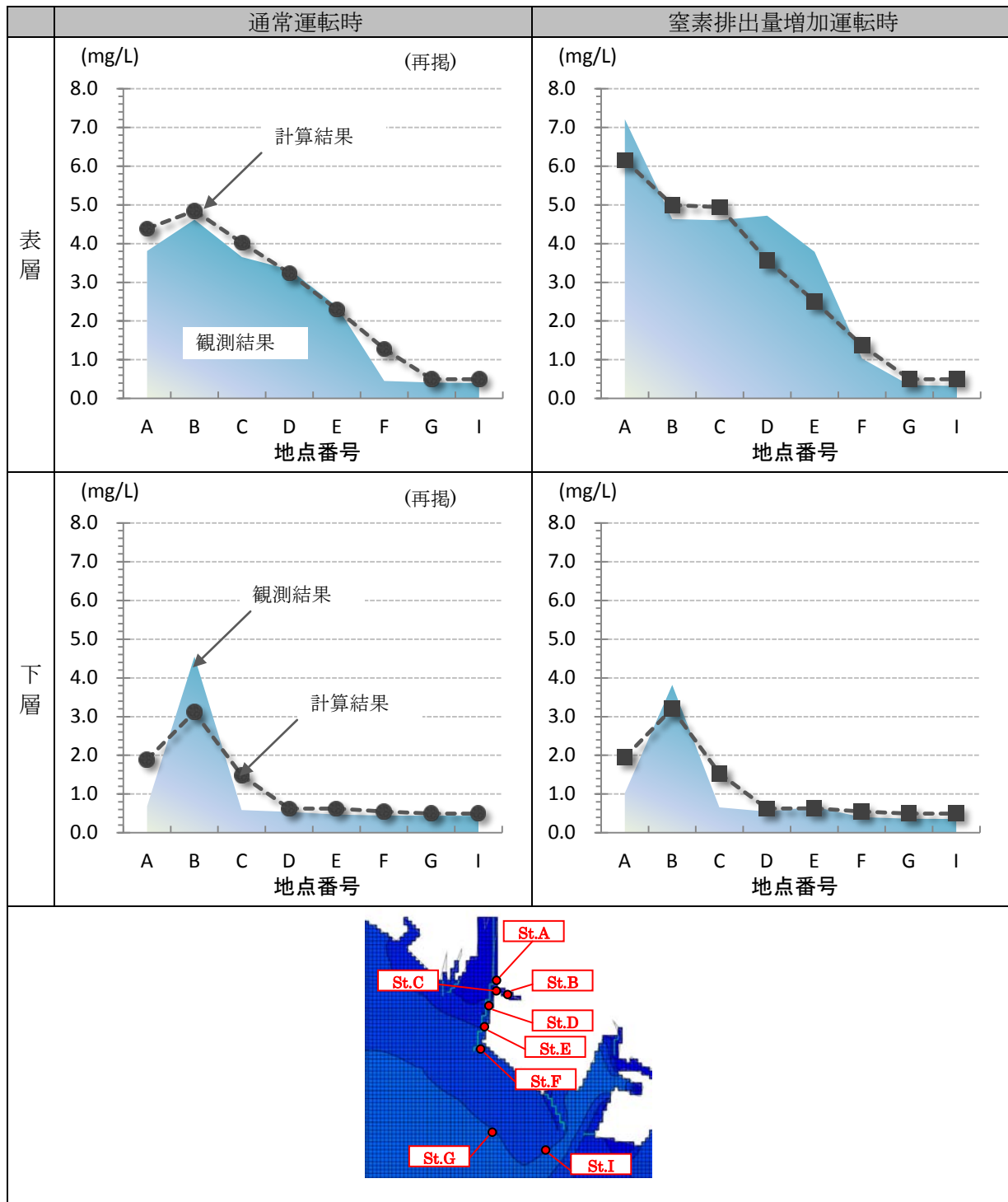


図 14 窒素増加運転時における全窒素の計算値と観測値の比較

### 1.3.3 地形データ反映による再現性の向上

平成 23 年度に用いたシミュレーションモデルについての課題として、泊川河口沖水路内の地形データの取得の必要性が挙がっていたことから、平成 24 年 7 月 30 日に現地で深淺測量を実施し、その結果をモデルの地形データに反映することにより再現性の向上を図った。

地形データの反映前後の計算結果を図 15 に示す。泊川河口沖水路奥部の東西方向の水路における水深が浅くなったことにより、民間事業場からの排水の流れが反映前より速くなり、その結果、加古川下流浄化センターからの排水の影響範囲が現況に近付いた。よって、現地の深淺測量結果を用いたことによりモデルの再現性が高まったと考えられる。

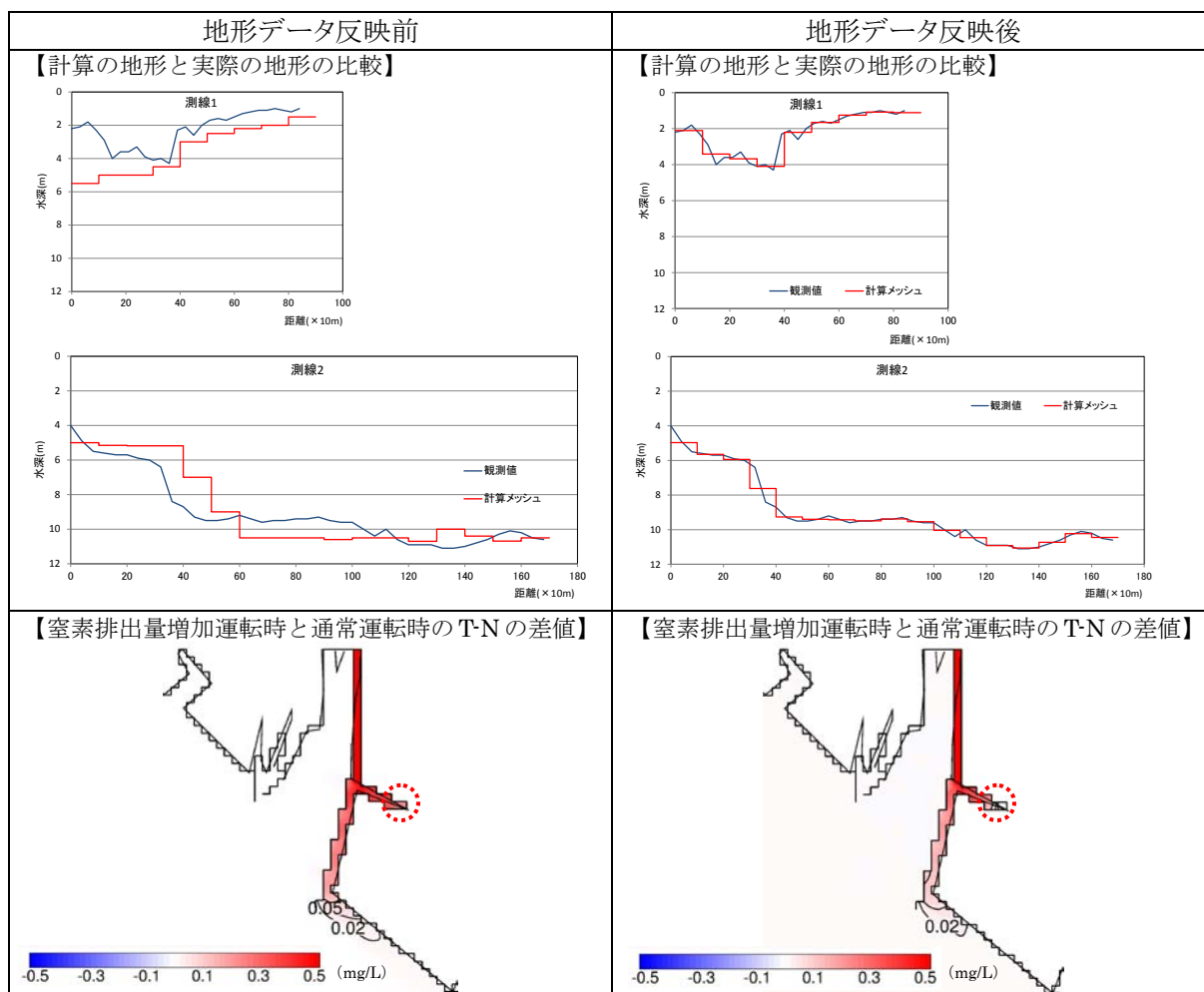


図 15 地形データ反映前後の計算結果の比較

### 1.3.4 まとめと課題

流動モデルと水質モデルによる再現性の確認の結果、ともに現況がよく再現されていたことから、当モデルを用いて予測計算等を実施して問題ないと考えられる。流動モデルによる結果からは加古川から海域に流入した河川水が潮汐変動に合わせて分布域が変化している様子が明らかになった。また、東播磨港内では沿岸～沖合域と比較して流速が小さくなっている様子が捉えられた。水質モデルでは泊川河口沖水路内の状況、加古川や水路からの栄養塩類の供給状況が確認された。