

## 栄養塩類循環バランス向上対策の検討結果

播磨灘北東部地域検討委員会ではシミュレーション計算の対象として「加古川下流浄化センターの窒素排出量増加運転」と「河川等を利用した港湾内と沿岸～沖合域の海水交換の促進」を抽出し計算を実施した。また、現地実証試験としては「加古川下流浄化センターの窒素排出量増加運転」を対象とした。

ここではそれらの対策について、期待される効果や対策を講じた結果として物質循環の健全化にどのように貢献するかを検討する。また、「河川等を利用した港湾内と沿岸～沖合域の海水交換の促進」対策についてのシミュレーション計算結果を示す。

### 1 物質循環の健全化の目的等

#### 1.1 播磨灘北東部地域の物質循環

播磨灘北東部海域においては加古川等の河川や事業場（下水処理場を含む）から栄養塩類が流入する一方で、漁業生産により窒素・りんとして取り上げられている。また、隣接する湾灘との間では潮流等による栄養塩類の流入や流出がある。

高度経済成長期頃においては海域への栄養塩類等の負荷が過大になり、赤潮の発生等の様々な環境問題が発生した。その後、水質総量削減制度の導入等種々の規制の成果により、海域の栄養塩類濃度が低下し水質は改善されてきた。しかしながら、依然として赤潮が発生している状況や、ノリの色落ちの問題、海面漁業の漁獲量が減少している状況等、栄養塩類の循環バランスが崩れたことが要因で生じていると考えられるような事象が顕在化している。

本事業における平成 22 年度と平成 23 年度に実施した情報収集や現地調査、シミュレーション計算等の検討から、港湾内において沿岸～沖合域との海水交換が円滑に行われていないことにより栄養塩類濃度が高くなり、一方で沿岸～沖合域においては陸域や港湾内からの栄養塩類の供給が減少したため栄養塩類濃度が低くなっていると考えられた。そのため、当地域において検討を進めるに当たっては、図 1 に示すように陸域、港湾内、沿岸～沖合域の三つの領域に分けて検討を進めてきた。

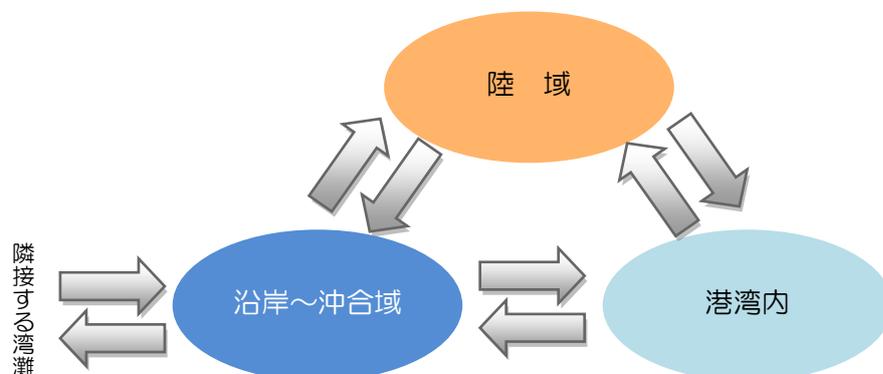


図 1 播磨灘北東部海域の物質循環イメージ

播磨灘北東部地域における三つの領域の中と各領域間の栄養塩類（窒素）の流れについて、簡略的に示した図を図 2 に示す。

当地域の特徴としては陸域から河川を通じて、あるいは直接的に港湾内に流入するフローの他に、加古川のように陸域から港湾を経ずに沿岸～沖合域に流入する形のフローがある。港湾内の栄養塩類濃度は沿岸～沖合域と陸域からの流入の影響を受けており、沿岸～沖合域からは潮汐作用による海水交換により低濃度の栄養塩類が流入し、陸域からは沿岸～沖合域と比較して高濃度の栄養塩類が流入している。一方で沿岸～沖合域の栄養塩類濃度は河川や港湾内からの比較的濃度の高い栄養塩類の流入の影響を受けているが、隣接する湾灘からの濃度の低い栄養塩類の流入の影響が大きいとみられる。

沿岸～沖合域の栄養塩類については隣接する湾灘に流出するとともに、漁業活動による漁獲で取り上げられることにより陸域に循環している。なお、当海域はノリ養殖が盛んであり、平成 21 年度（ノリ年度）には窒素換算で 235 トンが取り上げられた。

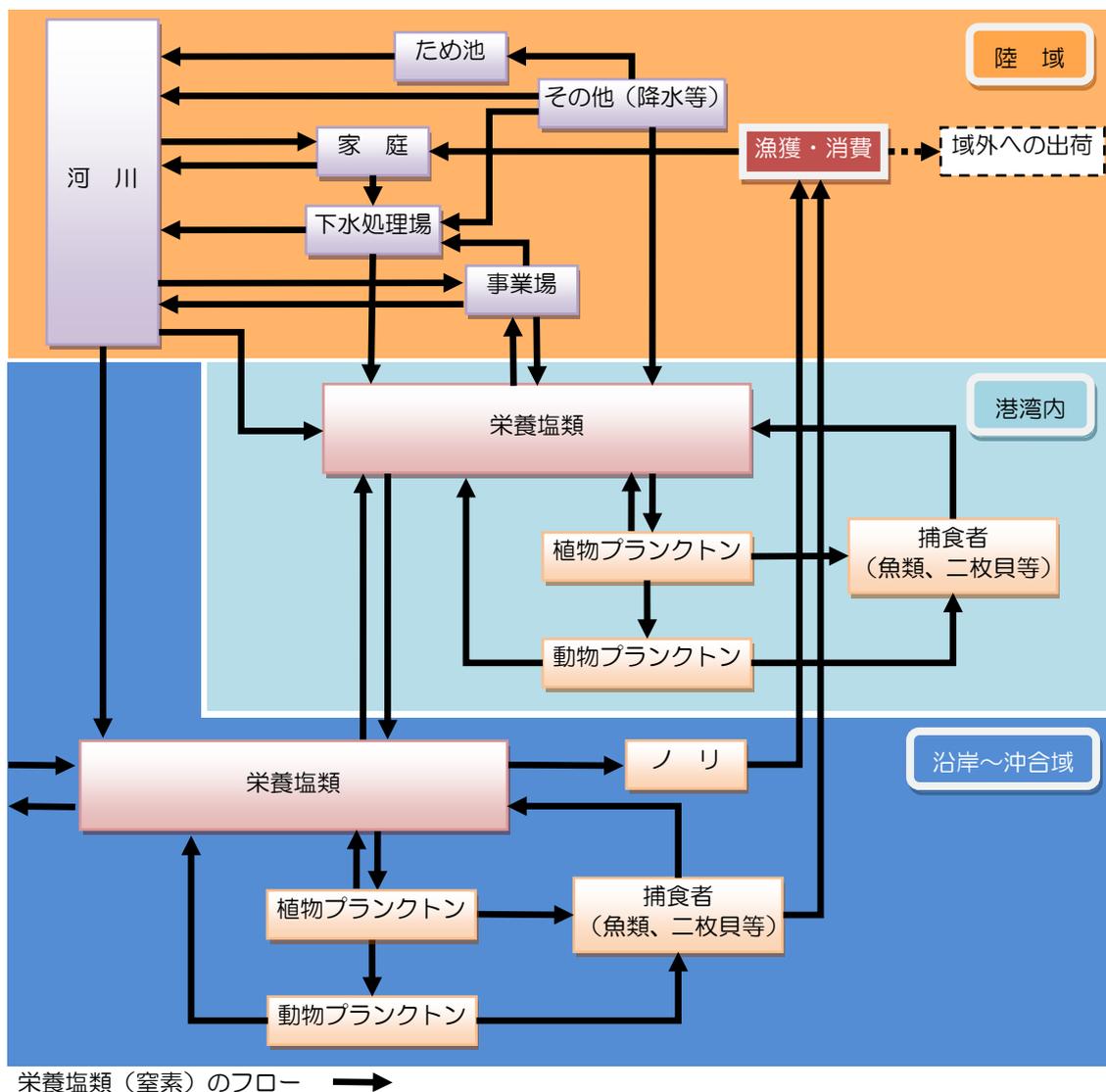


図 2 播磨灘北東部地域の栄養塩類（窒素）フロー

図 2 に示したフローの中で、港湾内と沿岸～沖合域の栄養塩類濃度に人為的に影響を与える可能性のあるフローに色を付けたものを図 3 に示す。なお、本業務で検討対象としている加古川下流浄化センターの窒素排出量増加運転と河川等を利用した港湾内と沿岸～沖合域の海水交換の促進対策については赤色で表示した。

播磨灘北東部地域の検討においては、陸域と海域の境界付近における窒素・リンの挙動を科学的に明らかにし、その結果を基に物質循環の健全化に資するための方策を検討することとしている。なお、下水処理場の試行（加古川下流浄化センターの窒素増加運転）は陸域からの負荷量を変えた場合に海域でどのような応答が起こっているかを明らかにするために実施している。

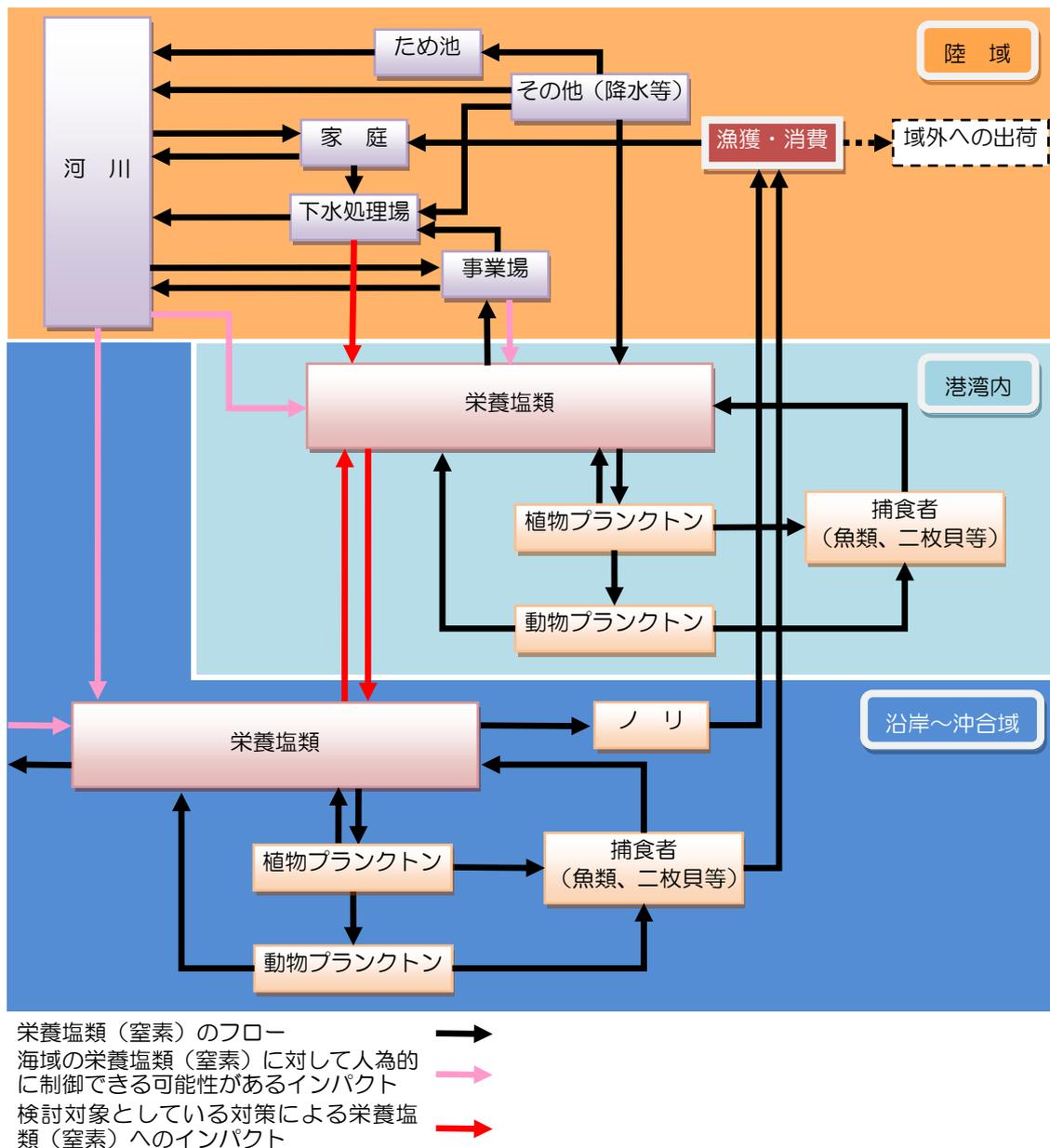


図 3 播磨灘北東部地域の栄養塩類（窒素）フロー（対象対策を明示）

## 1.2 播磨灘北東部地域のインパクトレスポンスフロー

播磨灘北東部地域で生じている問題について、図 2 に示した栄養塩類の流れと事象がどのように関連しているかを明確化するために 3 領域におけるインパクトレスポンスフローを作成し図 4 に示した。

沿岸～沖合域においては以前より栄養塩類濃度が低下し、ノリの色落ちが生じるまでになっている。一方、港湾内においては以前より栄養塩類濃度が低くなってきたものの、沿岸～沖合域と比較すると依然として高い状態が続いている。このように、播磨灘北東部海域においては栄養塩類が偏在化していることから、偏在化を解消し「物質循環の円滑さ」や「生態系の安定性」の実現に向けた方策を検討した。なお、陸域から流入した栄養塩類は海域に入ってからすぐに生化学的に変化するため、陸域と海域の境界部における現象を確実に解明することが必要不可欠であり、その部分を明らかにすることにより、海域での効果が効率的に発揮される方策を陸域で講じることが可能になると考えられる。

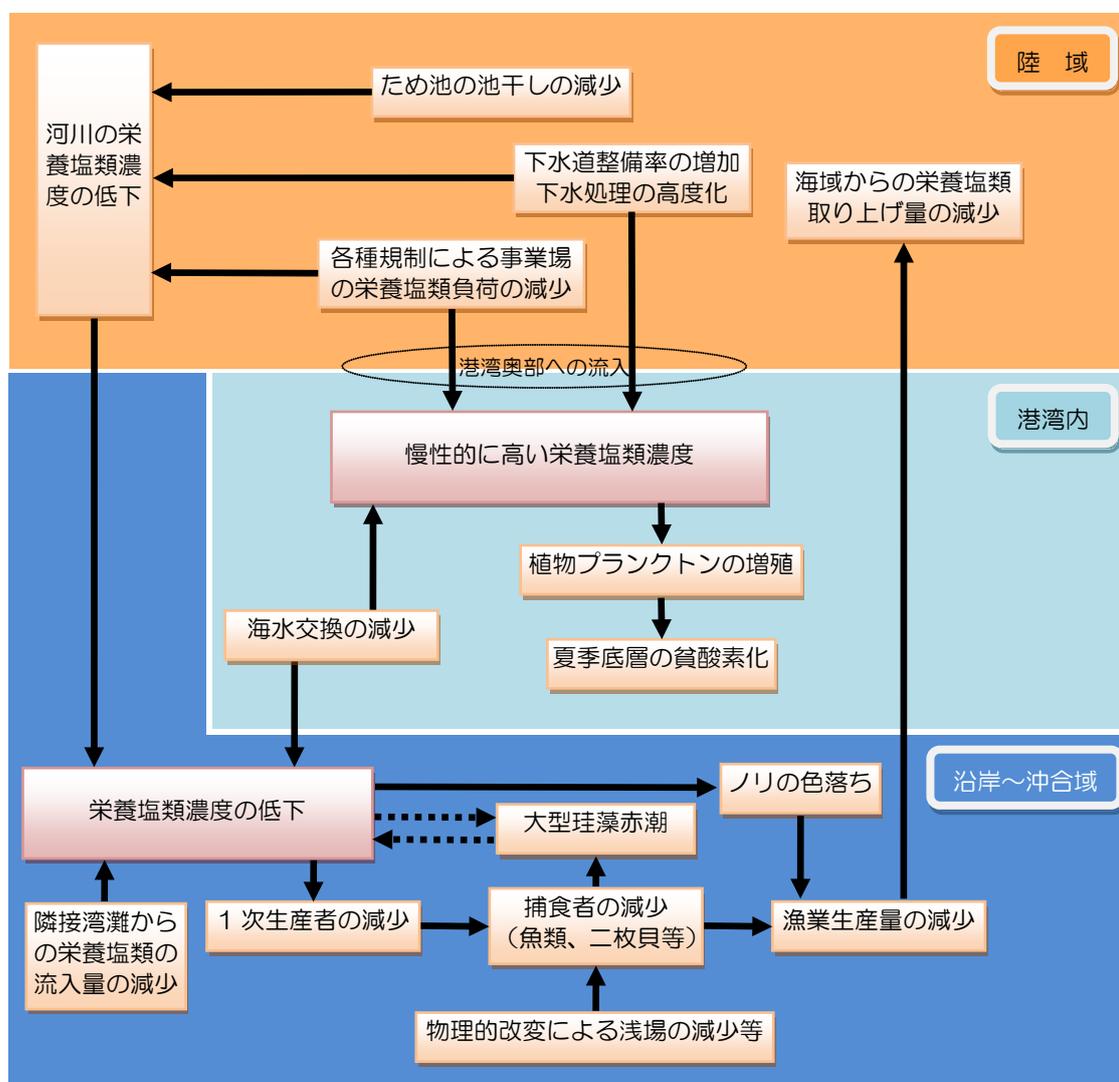
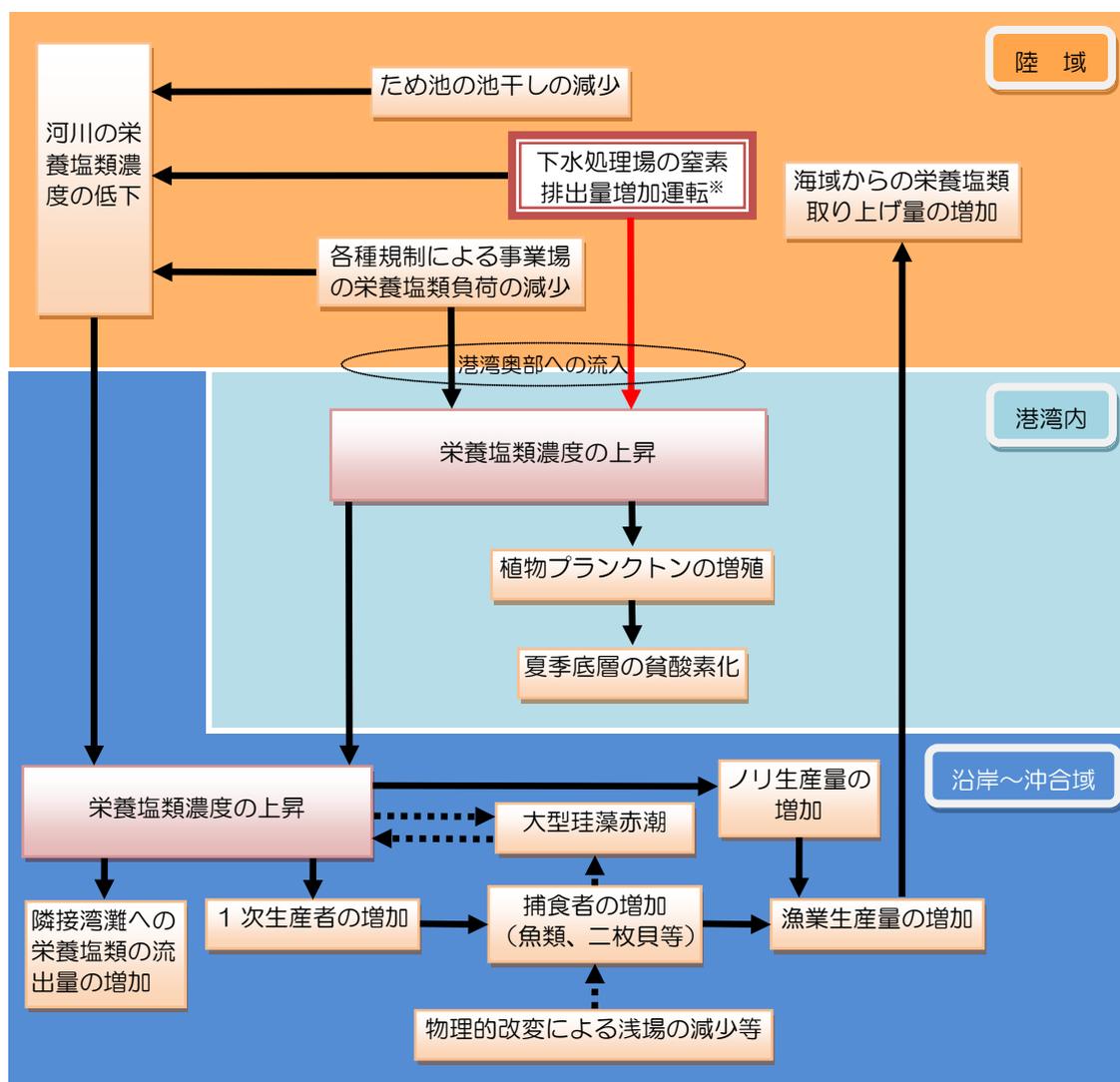


図 4 播磨灘北東部地域のインパクトレスポンスフロー

### 1.3 対策の実施による物質循環の円滑さの向上

当地域の栄養塩類循環に影響する対策を実施した場合のインパクトレスポンスフローについて、下水処理場の窒素排出量増加運転を図 5 に、海水交換の促進対策を図 6 に示す。対策を実施することにより、変化する直接的なインパクトを赤色の矢印で示している。

下水処理場（加古川下流浄化センター）の窒素排出量増加運転については、増加運転の実施により港湾内の栄養塩類濃度が上昇し、沿岸～沖合域との海水交換や拡散により沿岸～沖合域の濃度上昇に寄与するとみられる。しかし、港湾内においては現状で相対的に高い栄養塩類濃度であるため、さらに濃度が上昇することによる問題の発生等に留意しなければならない。また、播磨灘北東部の沿岸～沖合域においては流れが速い海域であり、効果の検証が難しいと考えられることから、現地調査による海域の濃度分布の把握とともにシミュレーション計算により窒素排出量増加運転の影響の程度を求めることが重要である。



※加古川下流浄化センターをイメージしているため河川（加古川）への影響がないものとしている

図 5 インパクトレスポンスフロー（下水処理場の窒素排出量増加運転）

海水交換の促進対策については、対策の実施により沿岸～沖合域の低い栄養塩類濃度の海水が港湾内に流入し、逆に港湾内の高い栄養塩類濃度の海水が沿岸～沖合域に広がるため、沿岸～沖合域の濃度が上昇すると考えられる。下水処理場の窒素排出量増加運転では港湾内の栄養塩類濃度が上昇することに注意する必要があるが、海水交換の促進対策については港湾内と沿岸～沖合域の両方において利点のある方法であると言える。

前頁でも記載したように当海域は流れが速いという特徴を有していることから、対策の効果をより明確に把握するためには、下水処理場の窒素排出量増加運転と海水交換の促進対策のそれぞれの効果検証が終了した後に、それらを組み合わせた対策についても検討を実施する必要があると考えられる。

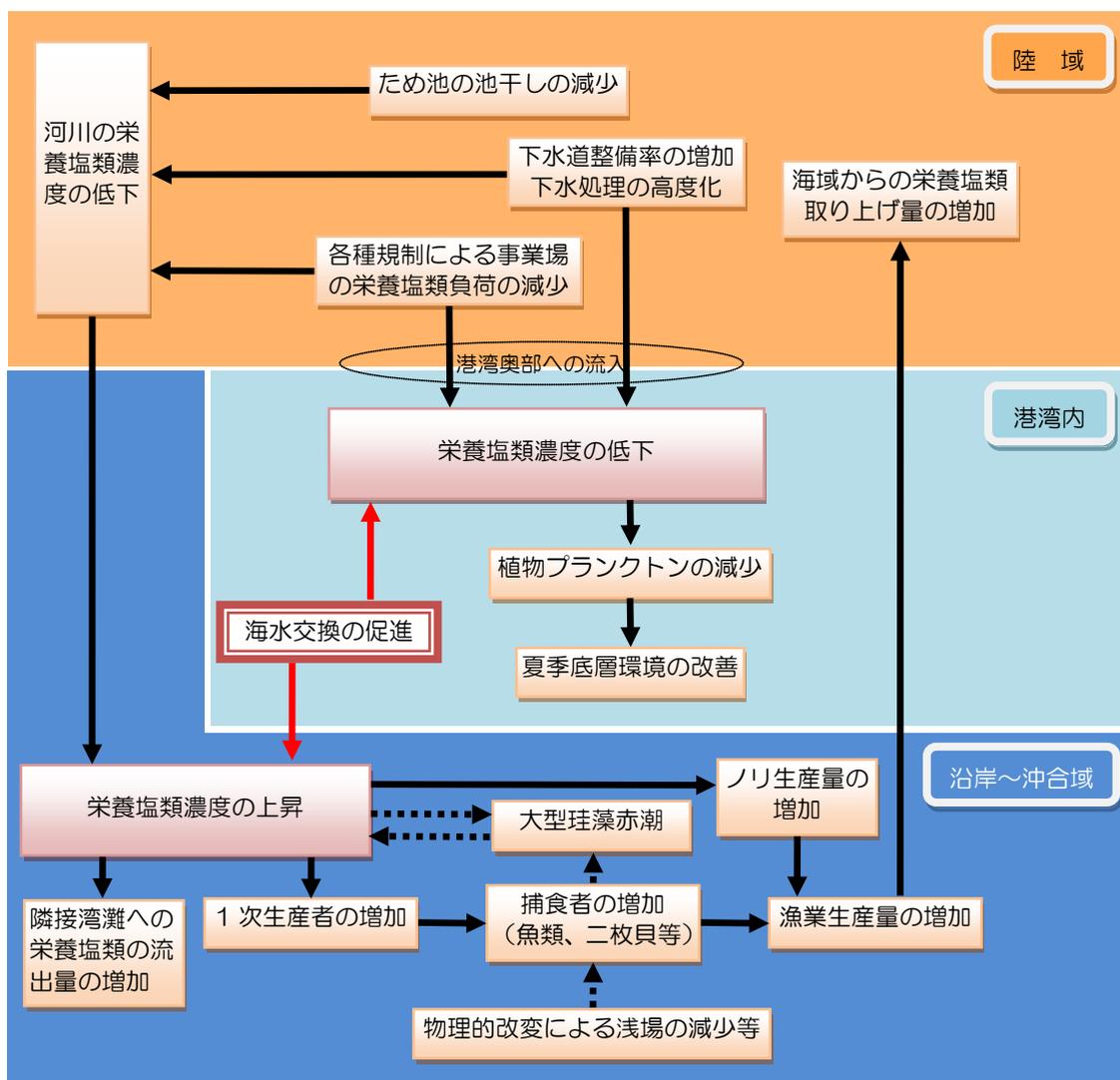


図 6 インパクトレスポンスフロー（海水交換の促進対策）

#### 1.4 対策の実施による生態系の安定性の向上

1.3 に挙げた対策の実施により播磨灘北東部海域（港湾内と沿岸～沖合域）においては物質循環の円滑さの向上が期待される。その他、対策の効果としては栄養塩類濃度が上昇することにより一次生産力が上昇し、生態系の安定性の向上にも寄与すると考えられる。

栄養塩類濃度が上昇し植物プランクトンが増加することにより植物プランクトンを餌とする動物プランクトンや魚介類等が豊かになるとともに、ノリ養殖においては生産量が増加しノリ養殖が安定すると以下に示すような生態系への好影響があるとみられる。

##### ① ノリ養殖施設による魚類等水産資源の保護効果

ノリ漁期中の10月から5月の間は、海面にノリ網や漁具を固定するためのロープ、アンカー等の養殖施設が設置されるため、その直下及び周囲では漁業操業ができなくなる。このため、海域、特に沿岸域に禁漁区が設定された状態となる。

##### ② 魚類の餌料の培養効果

ノリ養殖施設（ロープ、ブイ、アンカー）やノリの葉体は、様々な生物の生息環境を提供している。ロープには、ノリ以外の海藻やフジツボ、コケムシ、ホヤなどの生物付着し、稚魚の隠れ家やゴカイ、ヨコエビなどの餌生物が繁殖する良好な環境が創出されている。これら餌生物は、表中層で群れるメバル稚魚によって摂餌されるとともに、海底に落下してカレイ類にも摂餌されている。

##### ③ 漁獲圧力の分散効果

ノリ養殖漁場自体が水産資源の保護区域となることに加え、漁期中はノリ養殖業者が漁船による操業を行わないため、水産資源に対する漁獲圧力が大幅に減少している。これにより水産資源の保護が図られている。

##### ④ 二酸化炭素吸収効果

ノリは水中の二酸化炭素を吸収して光合成を行うため、二酸化炭素の吸収効果及び海中への酸素の供給作用を持っている。

### 1.5 物質循環健全化の定義

物質循環の健全化について、環境省が本業務の中で定義している“ヘルシー”は「再生産可能な生物資源を生み出す海の仕組みが健全であること」としている。“再生産可能な生物資源”や“海の仕組み”については、播磨灘北東部地域において独自に定義付けが必要であり、各主体の意見を収集し検討を進めていくことが求められる。

播磨灘北東部地域 WG の基本方針は「陸域・海域の栄養塩類の偏在化の改善等によって、海域の基礎生産力をベースとした生態系の安定性によるたく滑らかな物質循環の健全化」としていることから、人手を加えることで栄養塩類の偏在化を改善し海域の基礎生産を適正な状態にすることが、“海の仕組みが健全=ヘルシー”であるとする。

なお、兵庫県の第3次兵庫県環境基本計画における環境施策の展開方向として、瀬戸内海を「適切に人の手が加えられ続けることによって高いレベルの生物多様性と生物生産性が維持された豊かで美しい海域」である「里海」として再生する取組を推進するとしており、人為的な栄養塩類の管理を実施することは兵庫県の施策と合致している。

物質循環健全化の定義の検討後について、地域として取り組む対策の方針案の決定までの検討手順を図7に示す。

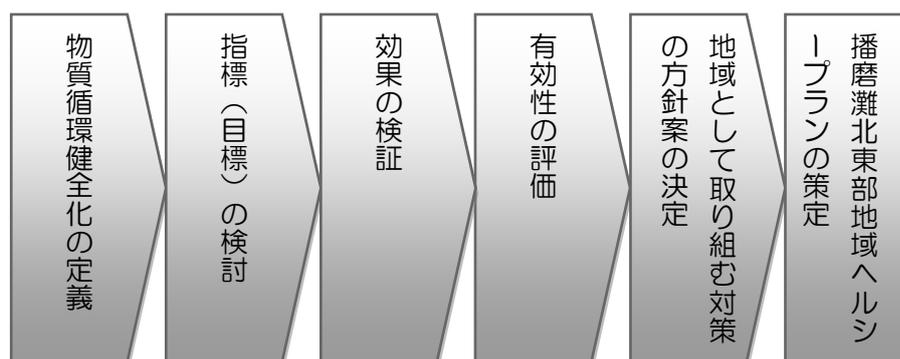


図7 対策の方針案の決定までの手順

### 1.6 指標、目標の検討

基礎生産の適正な状態を設定する場合や評価する場合には、評価するための指標を栄養塩類（濃度、濃度差、各態窒素の割合、変化量等）や基礎生産者（濃度、種類、変化量）に設定する。播磨灘北東部海域においてはノリも一つの指標として設定可能であると考えられ、理由としてノリ養殖は区画漁業権により養殖の区域が設定されており、ノリが生産される場所が一定であることや、海域の栄養塩類濃度の状況が生産量や色落ち状態に直接反映され栄養塩類との関係が分かりやすいこと、生産量のデータが蓄積されていること等が挙げられる。

ただし、指標の設定に当たっては播磨灘北東部の海域の特性に留意して検討する必要がある。播磨灘北東部海域における検討対象となる沿岸～沖合域については、開放的で閉鎖度が低く、流れが速いという特徴がある。そのため、栄養塩類の目標値や対象地点の位置等の設定によっては、効果を適切に評価できない可能性があるため、それらの設定を実施する際は現地調査結果やシミュレーション計算結果を用いて、十分に検討する必要があると考えられる。また、対

策の目標期間（短期的な目標、中長期的な目標）や季節によっても、指標や目標が変わってくる可能性があると考えられる。

### 1.7 効果の検証方法の検討

本業務における対策の効果の検証については短期的な効果を検証することから、栄養塩類濃度を指標とすることが適していると考えられる。

加古川下流浄化センターの窒素排出量増加運転では港湾内と沿岸～沖合域における栄養塩類濃度がともに上昇するとみられることから、港湾内と沿岸～沖合域の両方の地点における栄養塩類濃度の上昇分を検証する。河川等を利用した港湾内と沿岸～沖合域の海水交換の促進対策では、港湾内の栄養塩類濃度が低下し、沿岸～沖合域の栄養塩類濃度が上昇するとみられることから、それぞれの領域の地点の濃度変化量とともに港湾内と沿岸～沖合域の濃度差の減少量を検証する。この対策は港湾内の栄養塩類濃度の減少による環境改善を目的としているため、特に港湾内の濃度減少に着目する。

### 1.8 有効性の評価方法の検討

効果が認められた対策については有効性の評価を実施する。有効性の評価については、事業の実現可能性（実施主体の状況、実施費用、合意形成）、周辺への悪影響（指標以外の項目の変化）を考慮する。

加古川下流浄化センターの窒素排出量増加運転については、過去に同様の増加運転の実施によりスカム（処理施設の槽の水面に浮上した固形物や油脂分の集まったもの）の増加が報告されており、スカム除去や DO のコントロールによる現場作業量の増加や、ブロー電力の増加、薬品注入率の増加により運転管理費が通常時より高くなる可能性がある。また、下水道の設置目的は公衆衛生の向上への寄与や公共用水域の水質の保全に資することであるため、窒素排出量増加運転を継続していくためには、コンセンサスを得る必要があると考えられる。これらのことから有効性を評価する際には科学的に実証されたデータを基に慎重な判断が求められる。

河川等を利用した港湾内と沿岸～沖合域の海水交換の促進対策については、ポンプを利用して実施するとした場合に設置費用や運転費用の算出が課題になるとともに、流速の変化や水位の変化による航行船舶への影響に留意する必要がある。また、水利権や防災面についても関係してくるとみられるため、国や地方自治体からの情報収集や関係者との調整も必要であると考えられる。

## 2 シミュレーション計算結果

### 2.1 計算条件

播磨灘における流動と水質の計算を平成 18 年 1 月 1 日から平成 19 年 1 月 1 日の期間で行った。ここでは播磨灘北東部海域の冬季（平成 18 年 2 月 1 日から 2 月 28 日まで）の結果についてまとめた。計算対象海域の地形、水深については図 8 に示す。また、計算条件等について表 1～表 3 に示す。また、図 11 には泊川河口沖水路と加古川の流軸断面の設定位置について示す。

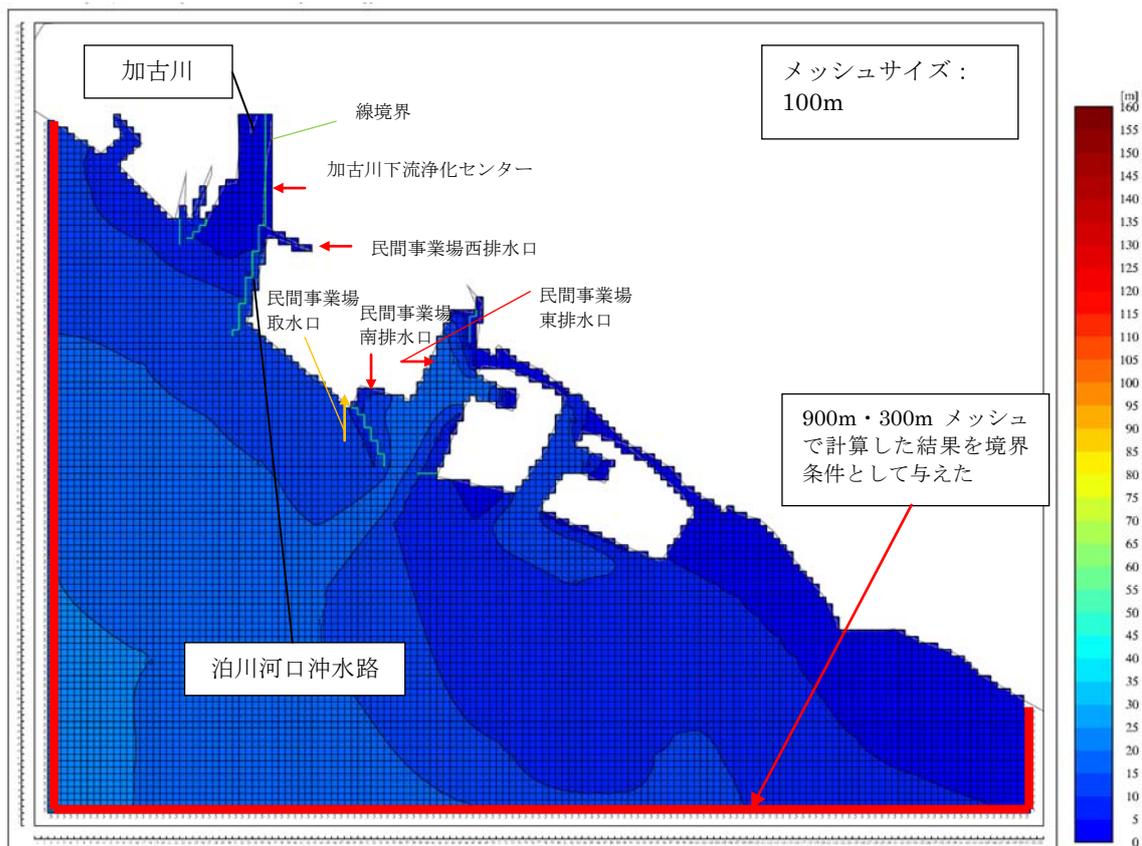


図 8 地形・水深図

表 1 事業場の排水の設定

加古川下流 浄化センター	排水口は「第一排水口」と「第二排水口」の 2 か所あるが、今回の計算では図中の 1 か所のみからの排水が行われるものとして計算を行っている
民間事業場	取水口から取水した海水を冷却水等に利用し排水と混合された状態で 3 つの排水口(東排水口・南排水口・西排水口)より排出しており、『特定排水』と『冷却水』が排出されている 『特定排水(総量規制に係る排水)』 毎日測定されている流量と負荷量を東排水口・南排水口・西排水口それぞれ(0.30 : 0.45 : 0.25)の割合で分配している 『冷却水(冷却にのみ使用される海水)』 月 3 回測定されている取排水量を時間方向に線形補間している。水質は一定値を与えている

表 2 その他の計算条件

項目	入力条件	
淡水流入条件	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水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	紀伊水道：東端（白浜）、西端（橘）の主要4分潮の調和定数を与えた 瀬戸内海の西端：北端（水島）、南端（栗島）の主要4分潮の調和定数を与えた
	水温・塩分	既往の観測結果をもとに与えた

表 3 結果を例示する時期

結果を例示する時期		計算中の日付時刻 (平成18年)
大潮期	下げ潮最強時	2月24日21時
	干潮時	2月25日01時
	上げ潮最強時	2月25日04時
	満潮時	2月25日09時
小潮期	下げ潮最強時	2月20日05時
	干潮時	2月20日08時
	上げ潮最強時	2月20日10時
	満潮時	2月20日12時

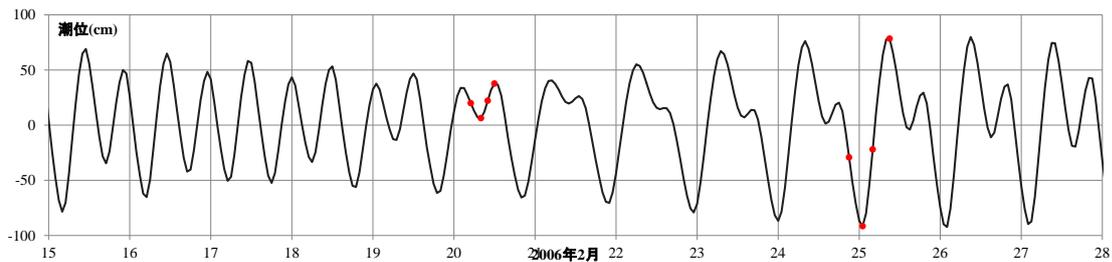


図 9 結果を例示する時期

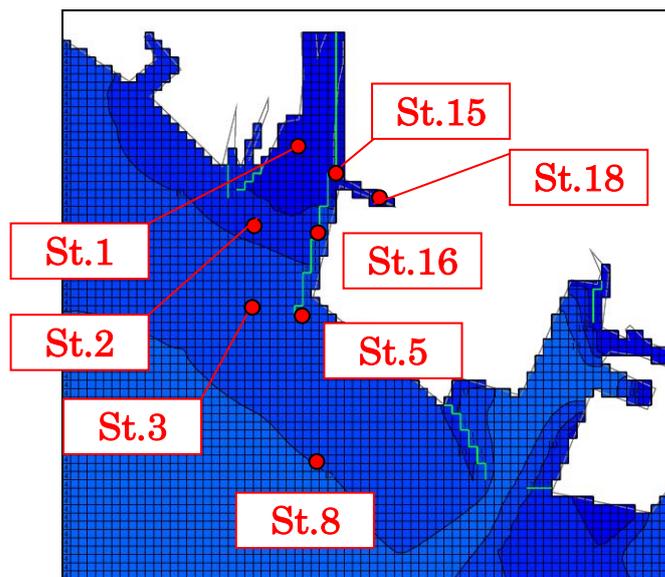
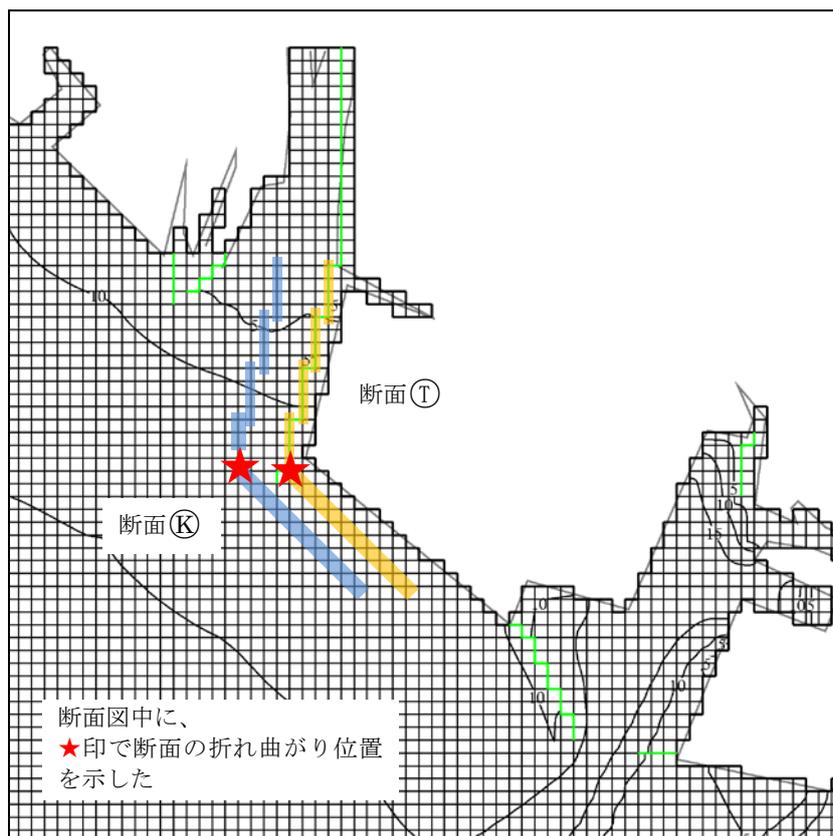


図 10 計算結果の出力地点の略称の位置関係



断面位置は、下げ潮期の河川水の張り出しの状況を可視化することを目的とし、下げ潮期の流れ（図 12 など）の方向に沿った流軸を選定し、泊川河口沖水路に沿った流れを「断面⑩」、加古川に沿った流軸を「断面㊿」とした。

図 11 計算結果の出力断面の位置関係

## 2.2 現況再現計算

### (1) 潮流と塩分の結果

潮流と塩分について大潮期と小潮期の潮時毎の水平的な流況について図 12 と図 13 に、断面⑩と断面㊿における大潮期と小潮期の潮時毎の鉛直的な流況を図 14～図 17 に示す。また、図 18 に平均流の水平・鉛直分布を示す。

#### 【水平的な流れ】

- ・ 加古川等から流入する塩分の低い水塊について、下げ潮期には東側に流され、干潮から上げ潮にかけて西に流されている。

#### 【鉛直的な流れ】

- ・ 断面⑩では、断面㊿に比べて表層水の塩分が高く、断面の流速も断面㊿と比較して小さくなる傾向である。
- ・ 断面㊿では表層の塩分が低く、鉛直的な循環流が形成されている。泊川河口沖水路の奥側では鉛直的な循環流の駆動状況が断面㊿に比べて小さい。

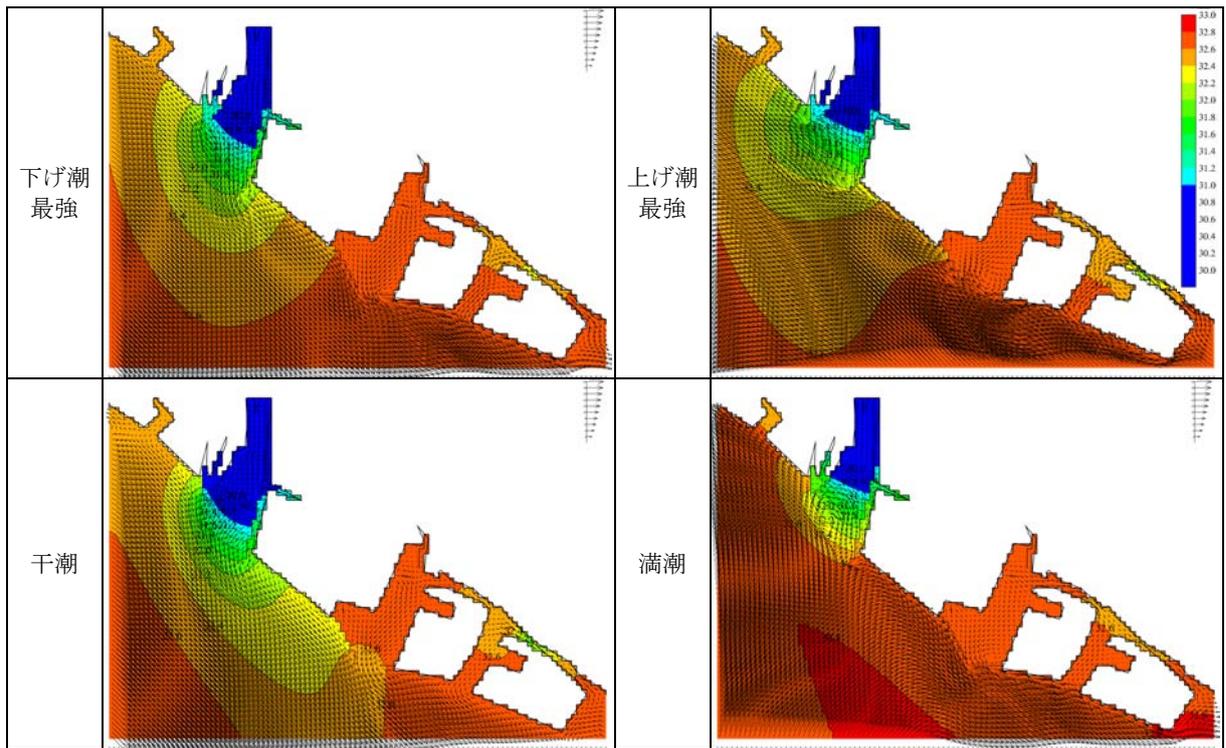


図 12 水平的な流況と塩分（大潮期）[第 1 層（0～3m 平均）]

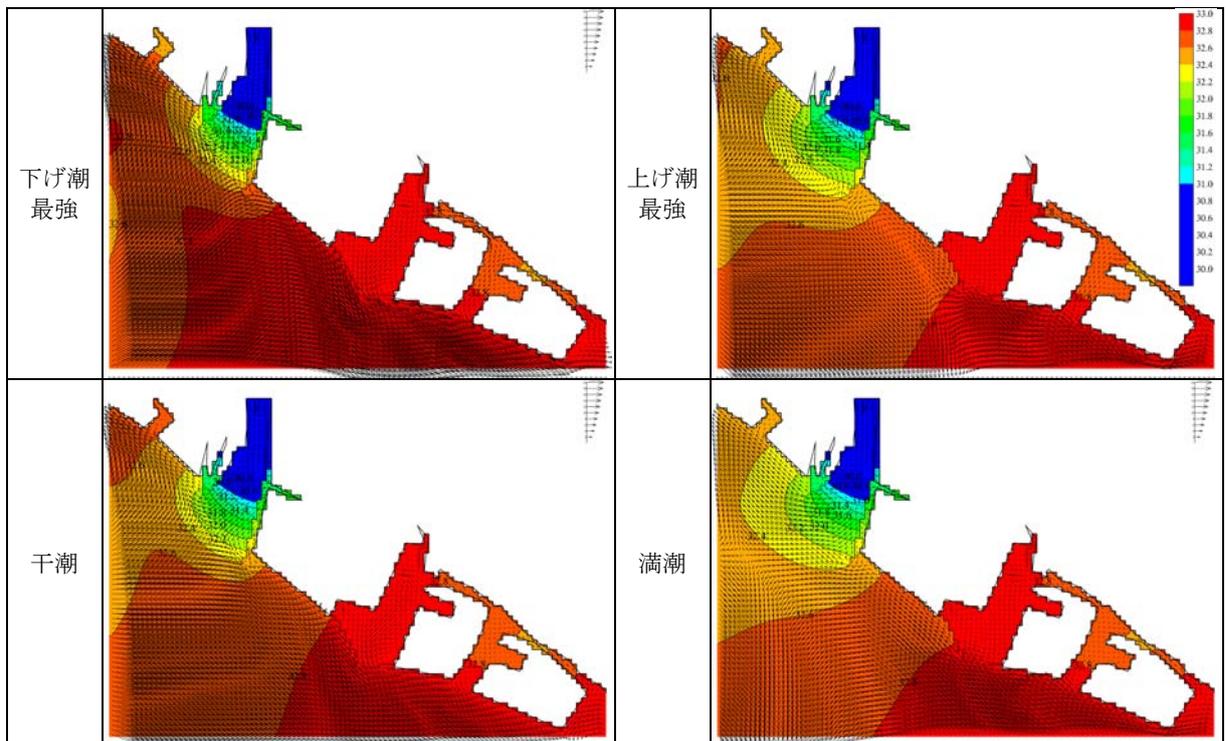
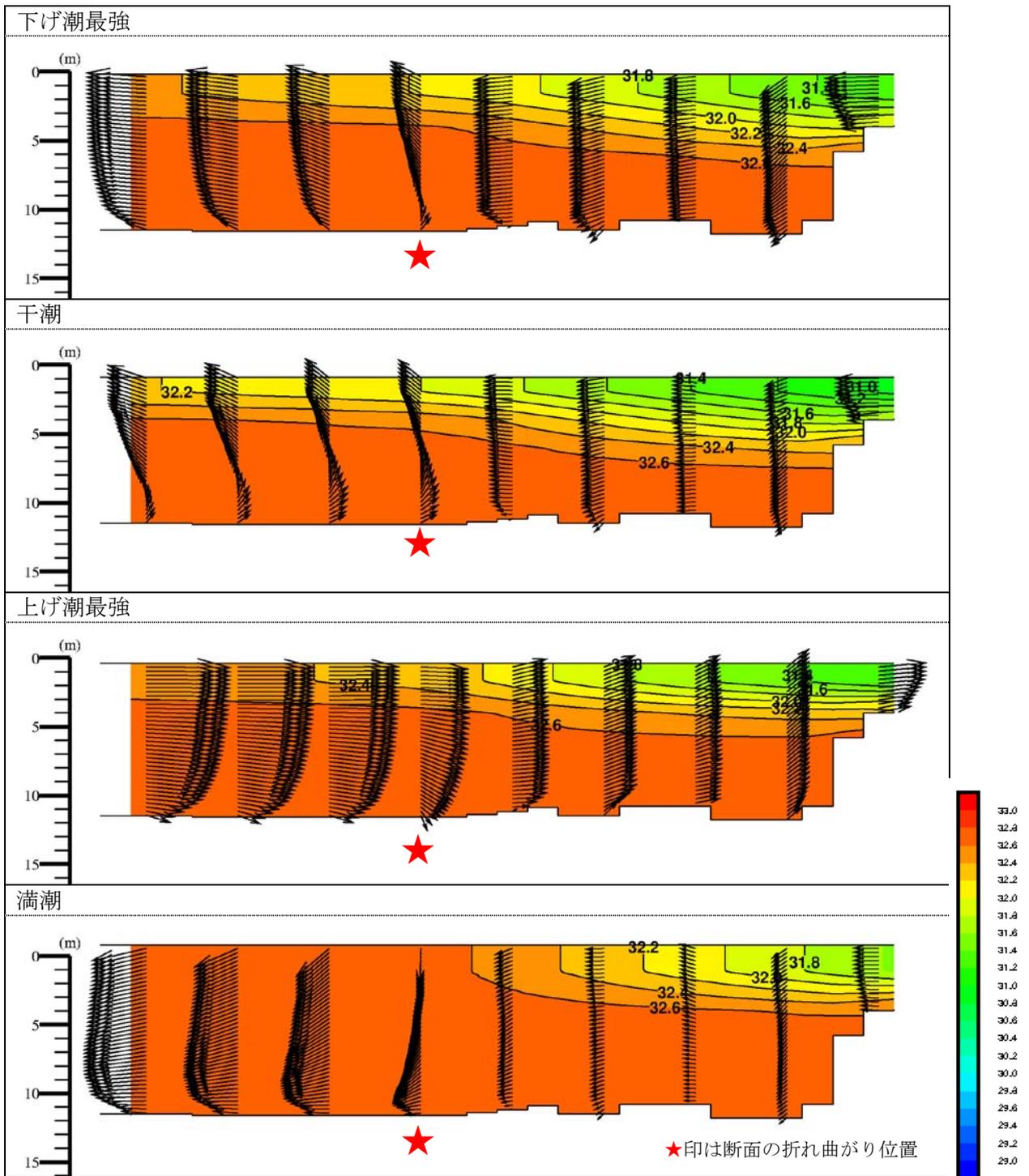
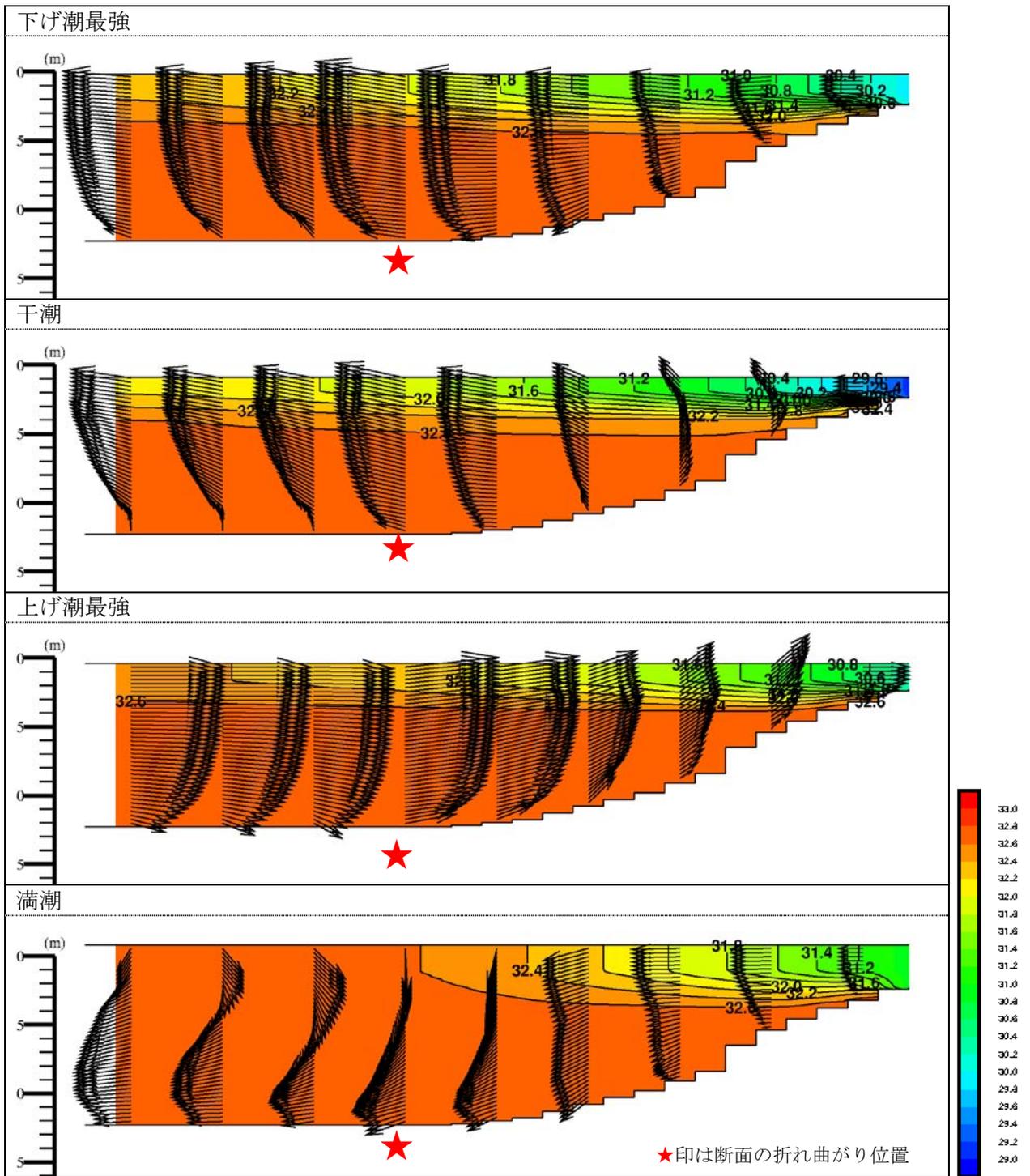


図 13 水平的な流況と塩分（小潮期）[第 1 層（0～3m 平均）]



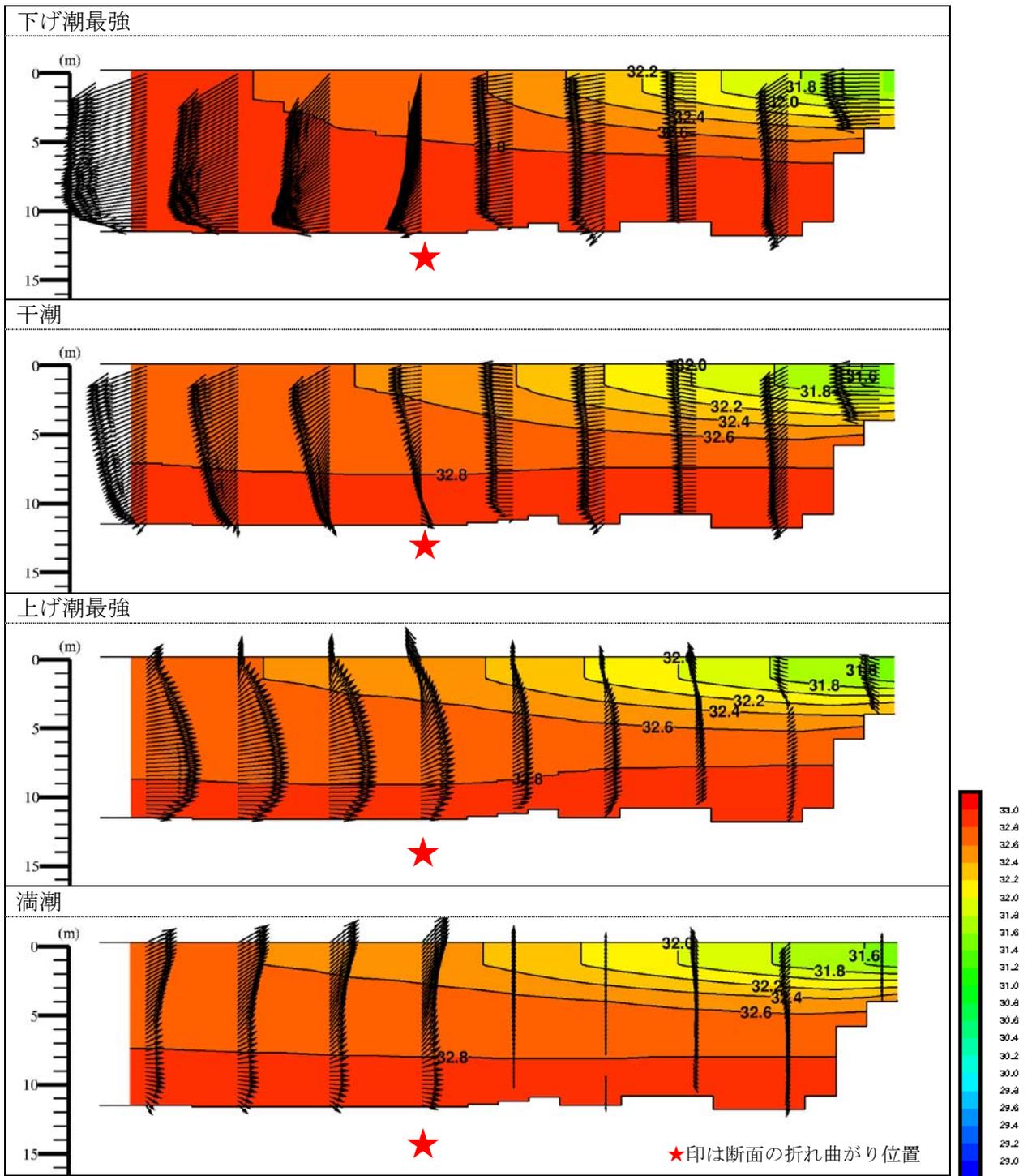
\* 出力データは鉛直方向ごとに線形補間し、第1層の中央位置以浅は第1層の計算結果を図化している(補間の外挿なし)

図 14 断面⑩における鉛直的な流況と塩分 (大潮期)



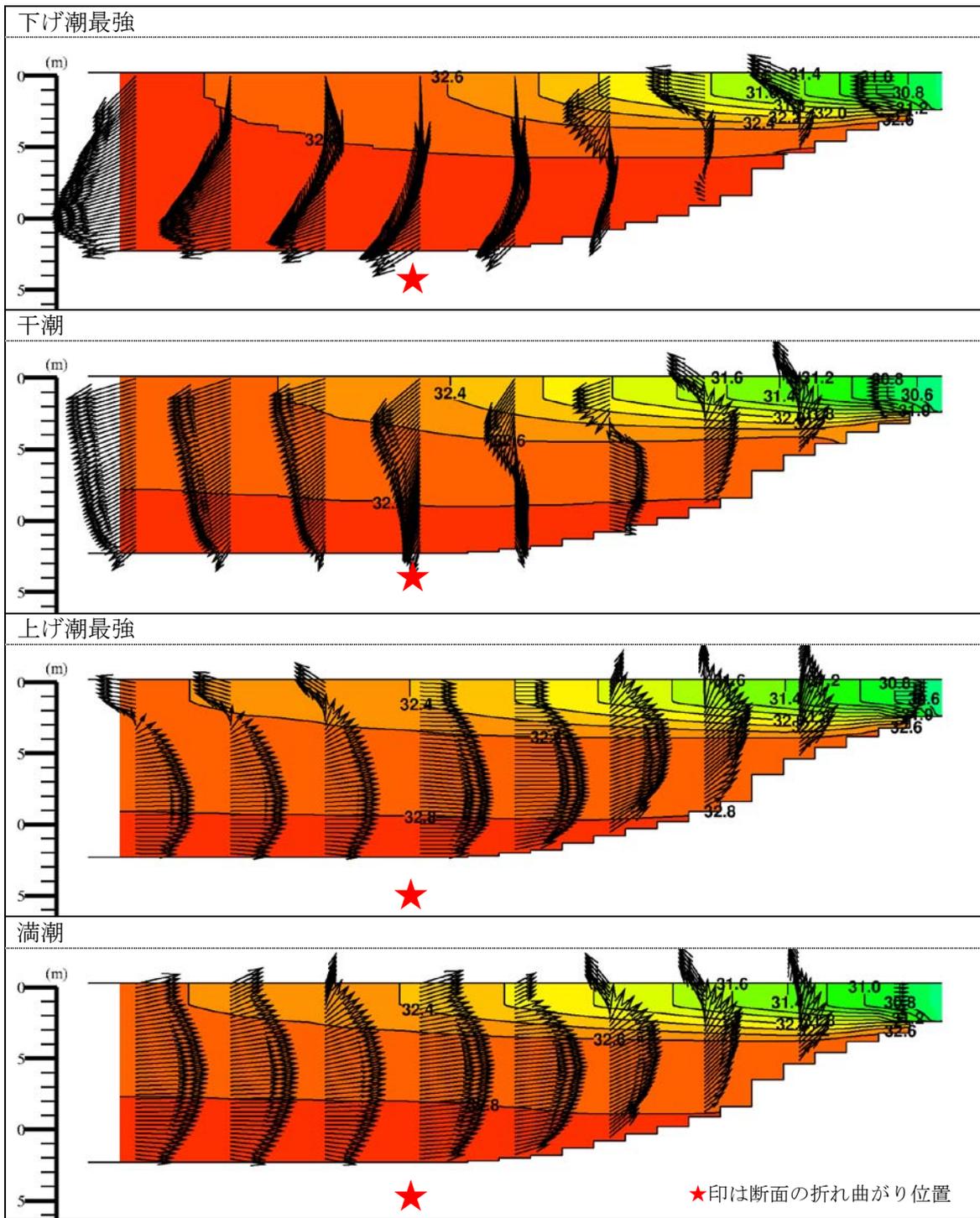
\* 出力データは鉛直方向ごとに線形補間し、第1層の中央位置以浅は第1層の計算結果を図化している(補間の外挿なし)

図 15 断面⑥における鉛直的な流況と塩分 (大潮期)



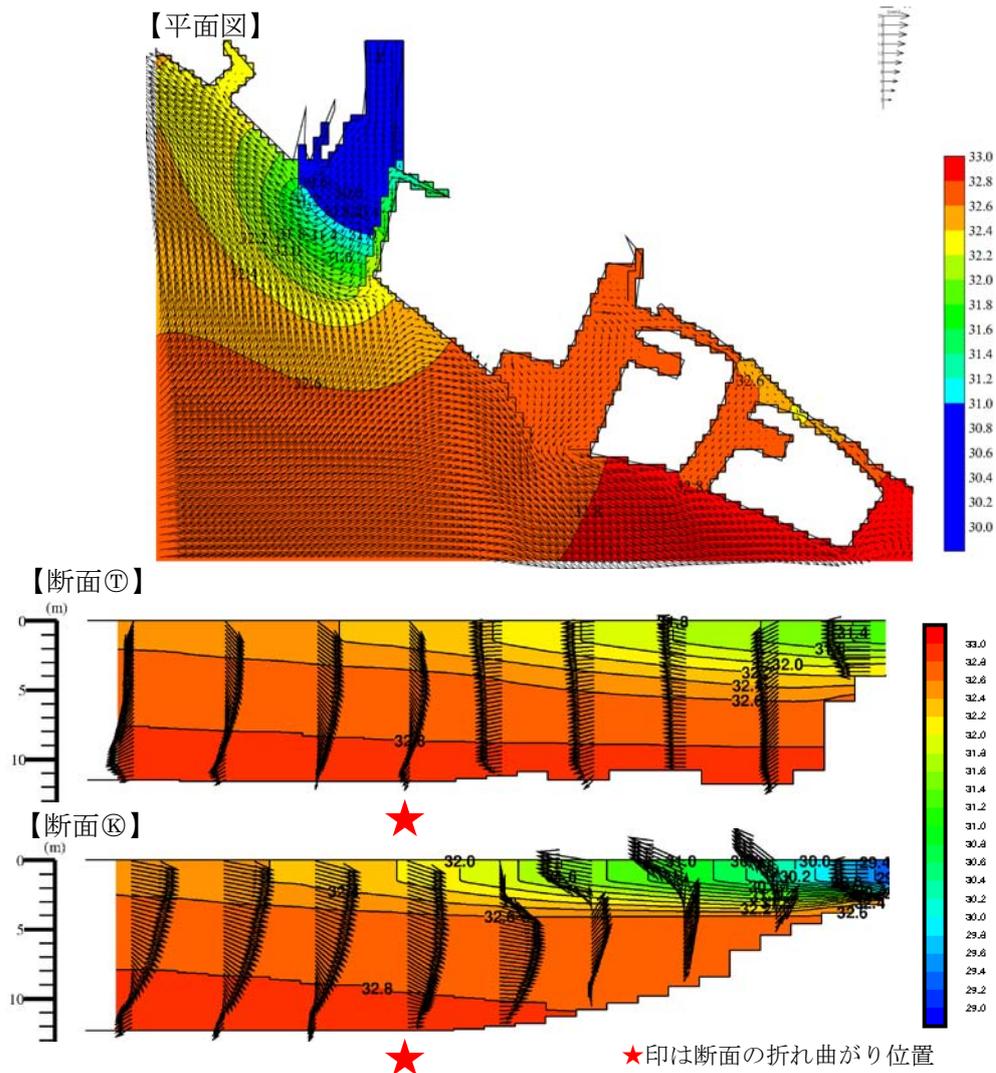
\* 出力データは鉛直方向ごとに線形補間し、第1層の中央位置以浅は第1層の計算結果を図化している(補間の外挿なし)

図 16 断面⑩における鉛直的な流況と塩分（小潮期）



\* 出力データは鉛直方向ごとに線形補間し、第1層の中央位置以浅は第1層の計算結果を図化している(補間の外挿なし)

図 17 断面⑥における鉛直的な流況と塩分 (小潮期)



- \* 出力データは鉛直方向ごとに線形補間し、第1層の中央位置以浅は第1層の計算結果を図化している(補間の外挿なし)
- \* 水平流速は南北方向の流速成分を図化している

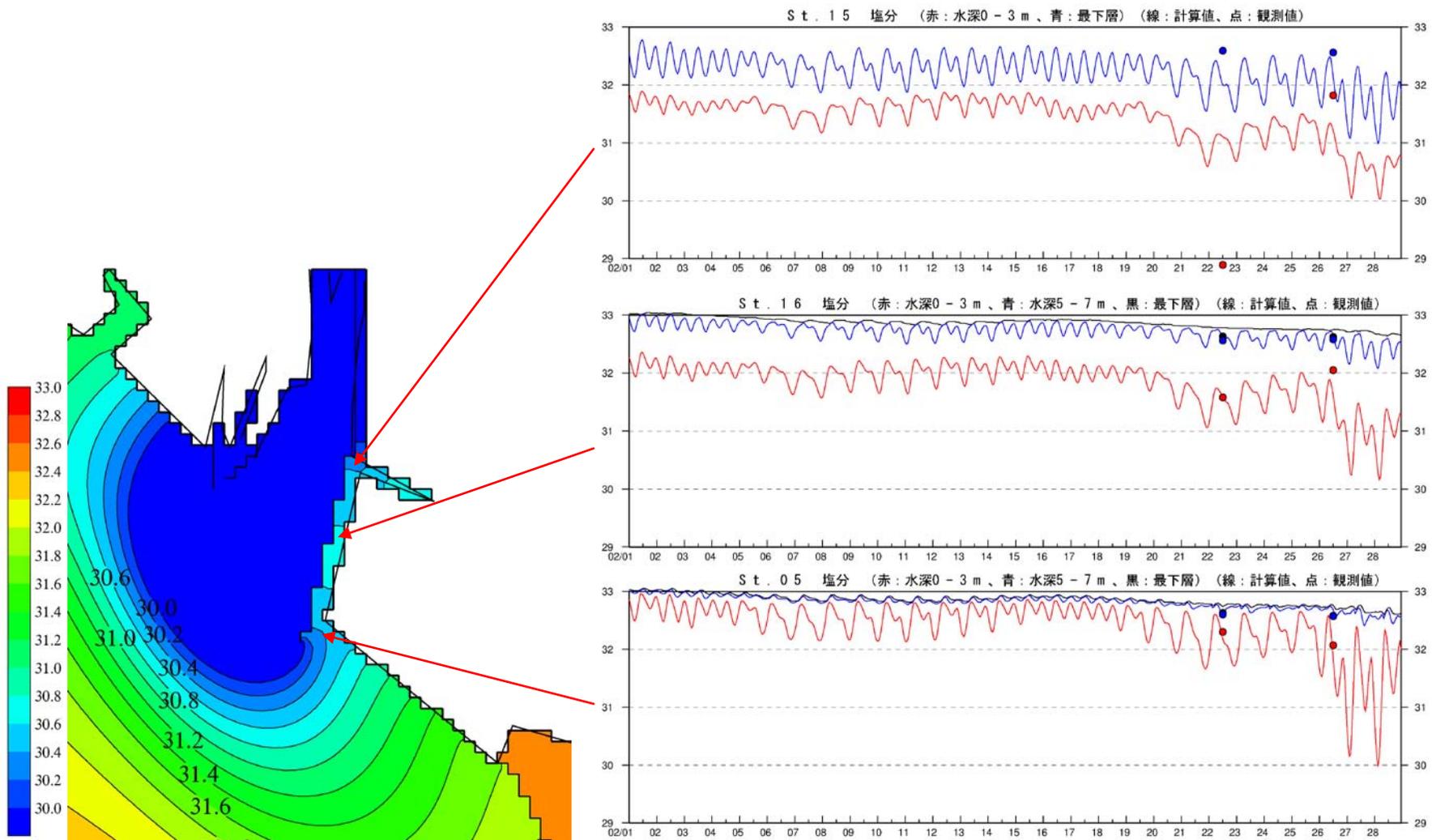
図 18 平均流と塩分の平均値の水平・鉛直分布

## (2) 潮流と塩分の再現性

塩分の観測結果と計算結果の比較を図 19 に示す。なお、観測結果 (0.3m) と計算結果 (0~3m 程度の平均値) は直接比較できないため、詳細に測定されている塩分の観測値を用いて観測結果の補正を行ったうえで比較検討している。

泊川河口沖水路の上流地点で表層の塩分が低く、水路出口に近付くにつれて鉛直的な塩分差が小さくなる様子を比較的よく捉えられているが、St.15 の表層 (0~3m) で差が大きくなっていた。また、計算結果は第1層が 0~3m 程度の平均値であり、実際より濃度が高くなることから、塩分が低い淡水の広がりについては実際より過小になっていると考えられる。

よって、泊川河口沖水路の奥部 (St.15 周辺) の地形 (水深、メッシュの設定) の再検討や現地の流速の測定、第1層の計算層厚を小さくする改良が必要であると考えられた。



\*観測結果と計算結果は年次が異なる 水平図は『2月第2回観測日』下げ潮最強時

図 19 泊川河口沖水路内における塩分の観測値と計算値の比較

### (3) 栄養塩類濃度の結果

全窒素、全りん、アンモニア態窒素について大潮期と小潮期、潮時毎の水平分布状況を図 20～図 25 に、鉛直分布状況を図 26～図 29 に示す。また、St.8（沖合域）と St.16（泊川河口沖水路内）における全窒素の変動と泊川河口沖水路からの表層水の張り出し状況を図 31 に示す。

なお、加古川からの負荷量については計算の設定（流量と栄養塩負荷量の補間方法の違い）で、流量が増大するタイミングで河川水の栄養塩類濃度が低くなるため、図 31 の 2 月 26 日の出水時の St.2 の濃度上昇が遅れている。

#### 【水平分布】

- ・ 泊川河口沖水路に対象海域内で最も高濃度の栄養塩類を含む水塊が滞留している。
- ・ 泊川河口沖水路内や東播磨港（別府港）の高い栄養塩類を含む水塊は、加古川の河川水と比較して潮汐による広がりが小さい。
- ・ 泊川河口沖水路内の St.16 では干潮時に栄養塩類濃度が高くなり、満潮時に栄養塩類濃度が低くなっている。St.2 や St.8 においても St.16 と同様に潮汐変動に伴って濃度変化しているが、St.16 より濃度変化が小さい。
- ・ 表層の高濃度の栄養塩類を含む水塊は潮汐に伴って張り出しが変動している。
- ・ 泊川河口沖水路の折れ曲がり位置（B）においては、干潮時前後に高い濃度の水塊が外海（沿岸～沖合域）に流出している。
- ・ 加古川や泊川河口沖水路の栄養塩類の水は下げ潮時に東側に向かって海域を広がり、上げ潮期に西側に広がる。

#### 【鉛直分布】

- ・ 高濃度の栄養塩類を含む水塊は表層に形成されている。
- ・ 泊川河口沖水路と比べて加古川の方が低塩分であるため、表層の広がりが大きくなっている。

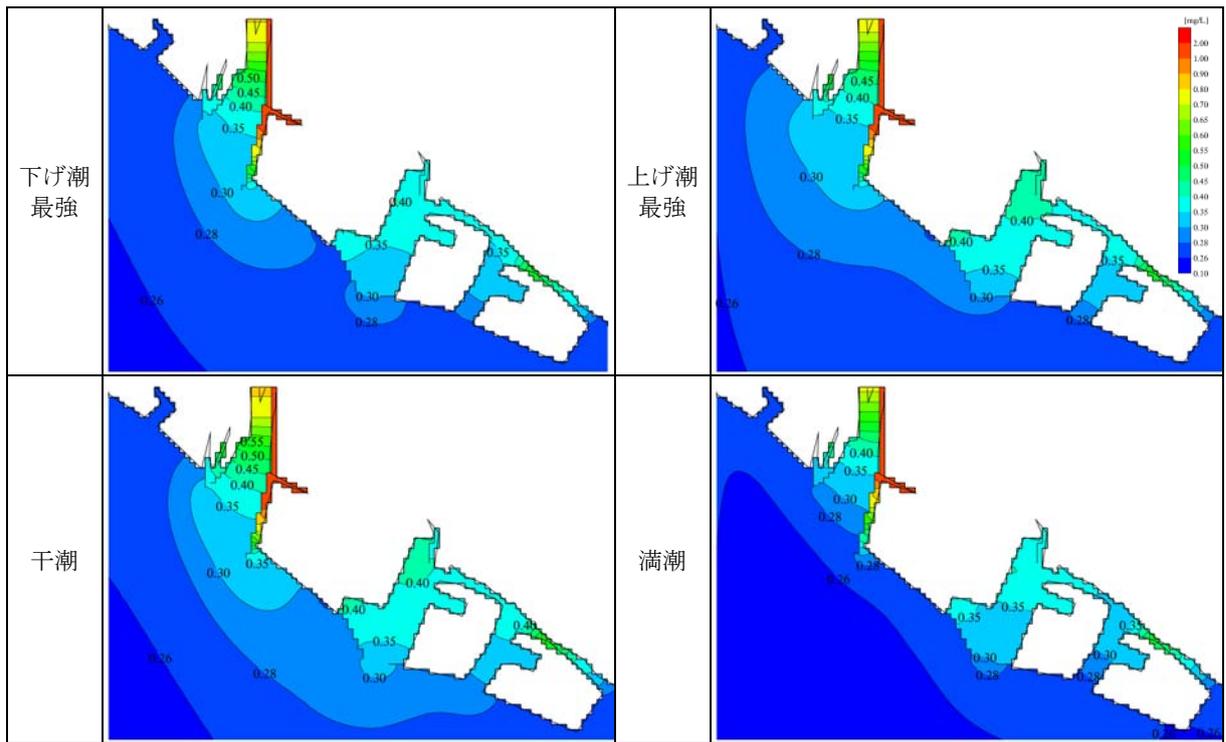


図 20 全窒素の水平的な分布状況（大潮期）

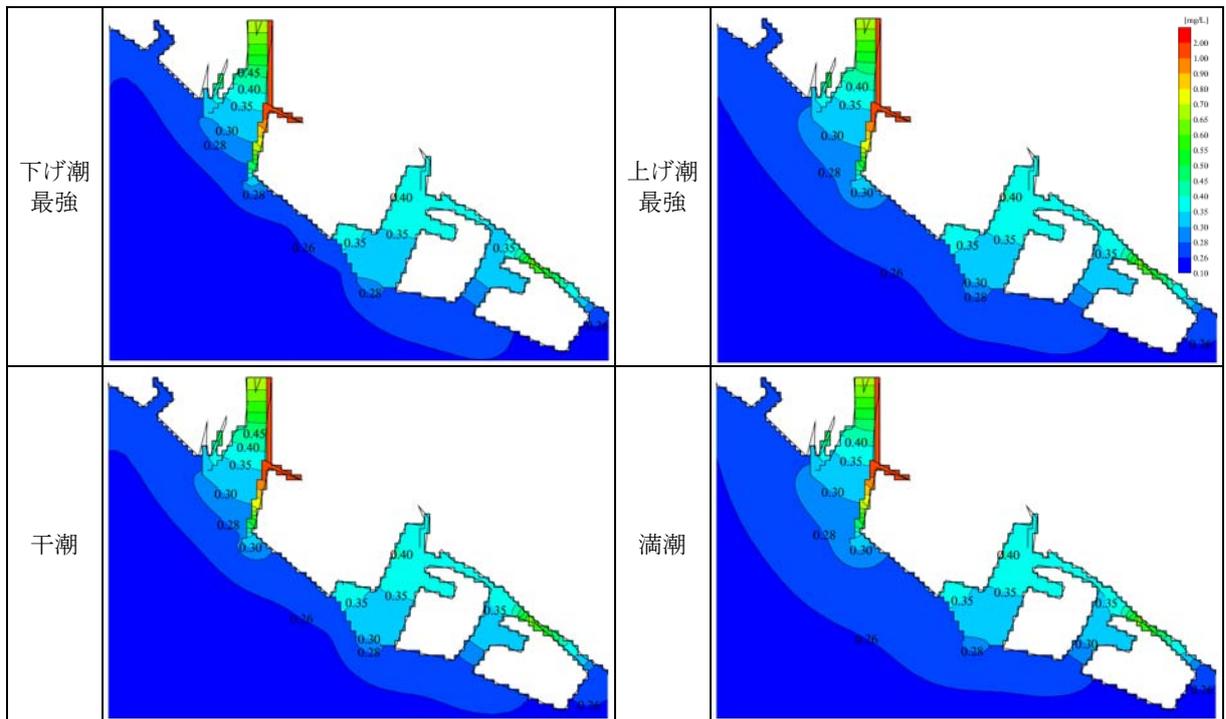


図 21 全窒素の水平的な分布状況（小潮期）