

### 3.2.2 河川を利用した海水交換促進対策（導水対策）

泊川河口の南側に位置する泊川河口沖水路内においては、加古川下流浄化センターや民間事業場 a からの排水の影響で溶存無機態窒素（DIN）濃度が周辺よりも高い状態となっている。DIN が高いと貧酸素水塊の発生や底質の悪化等の問題が発生する恐れがある。そのため、水路内の DIN 濃度を下げるために、加古川の河川水を泊川河口沖水路奥部へ導水することにより、エスチュアリー循環流を促進させ、水路奥部の高い DIN 濃度の水塊と沿岸～沖合域の低い DIN 濃度の水塊の海水交換量を増加させることを目的とした対策について計算を実施した。ここでは加古川の河川水を図 3.2-3 に示す排水地点の下層から  $1\text{m}^3/\text{s}$  で放水した結果を示す。

計算の結果、導水なしと比較すると導水を実施することにより泊川河口沖水路内においてエスチュアリー循環流が促進され、下層と表層の水塊が混合されることにより水路内の全窒素濃度が減少することが明らかになった。一方で、水路内の流れが増加し表層水を押し出す力が増加したことで、沿岸～沖合域において全窒素濃度が増加している状況も確認された（図 3.2-4～図 3.2-6）。

これらのことから、導水実施の目的であった港湾奥部の DIN 濃度を下げ、沿岸～沖合域の DIN 濃度を上昇させることで DIN の偏在化を軽減させることについて、一定の効果があると考えられた。

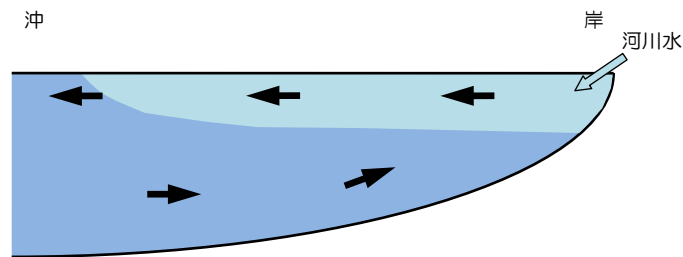


図 3.2-2 エスチュアリー循環流

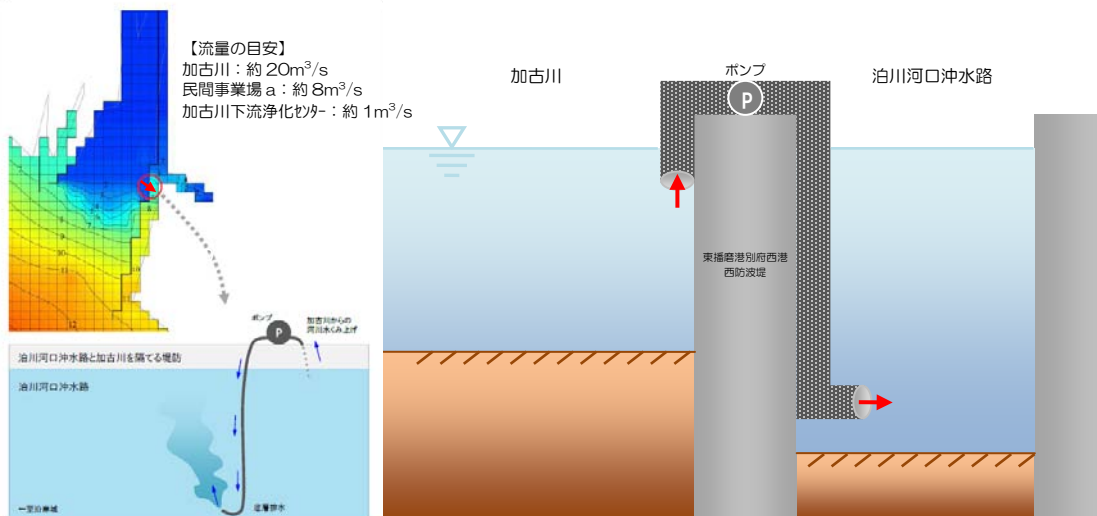


図 3.2-3 河川を利用した海水交換の促進対策のイメージ

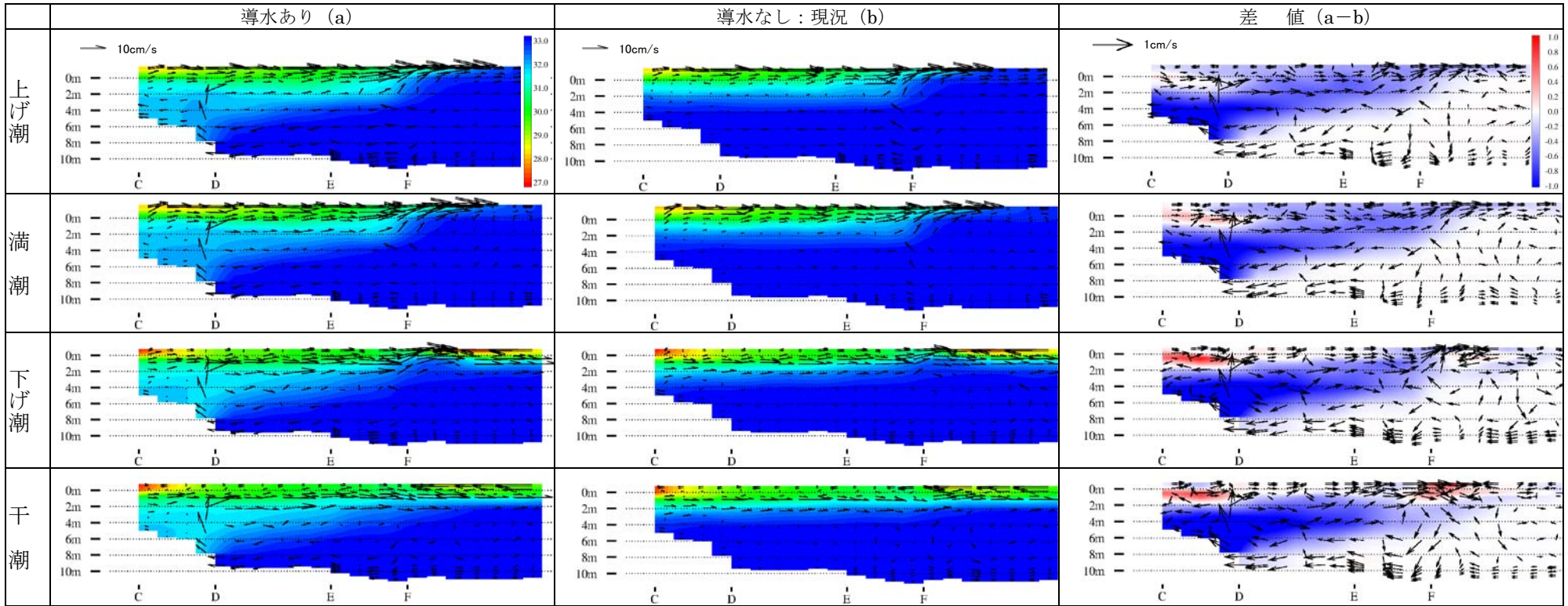


図 3.2-4 加古川から泊川河口沖水路に導水した際の流況と塩分の影響[平成 17 年 12 月 15 日]

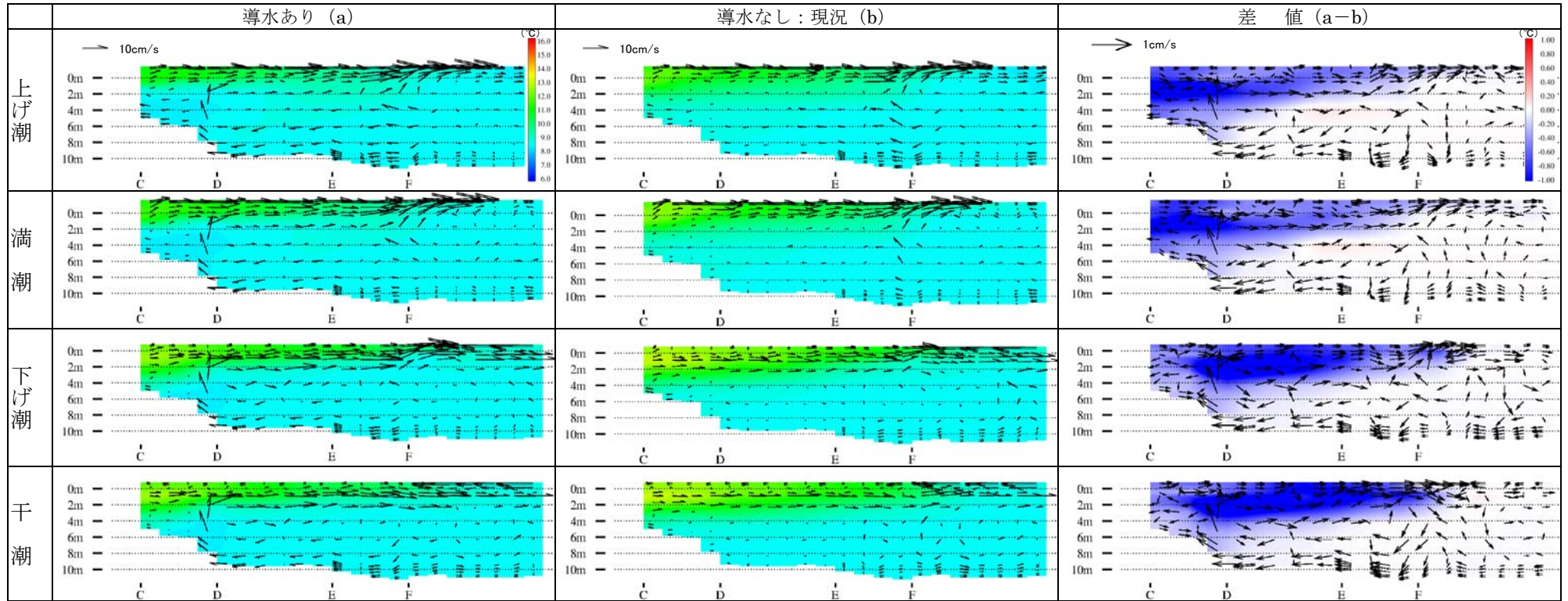


図 3.2-5 加古川から泊川河口沖水路に導水した際の流況と水温の影響[平成 17 年 12 月 15 日]

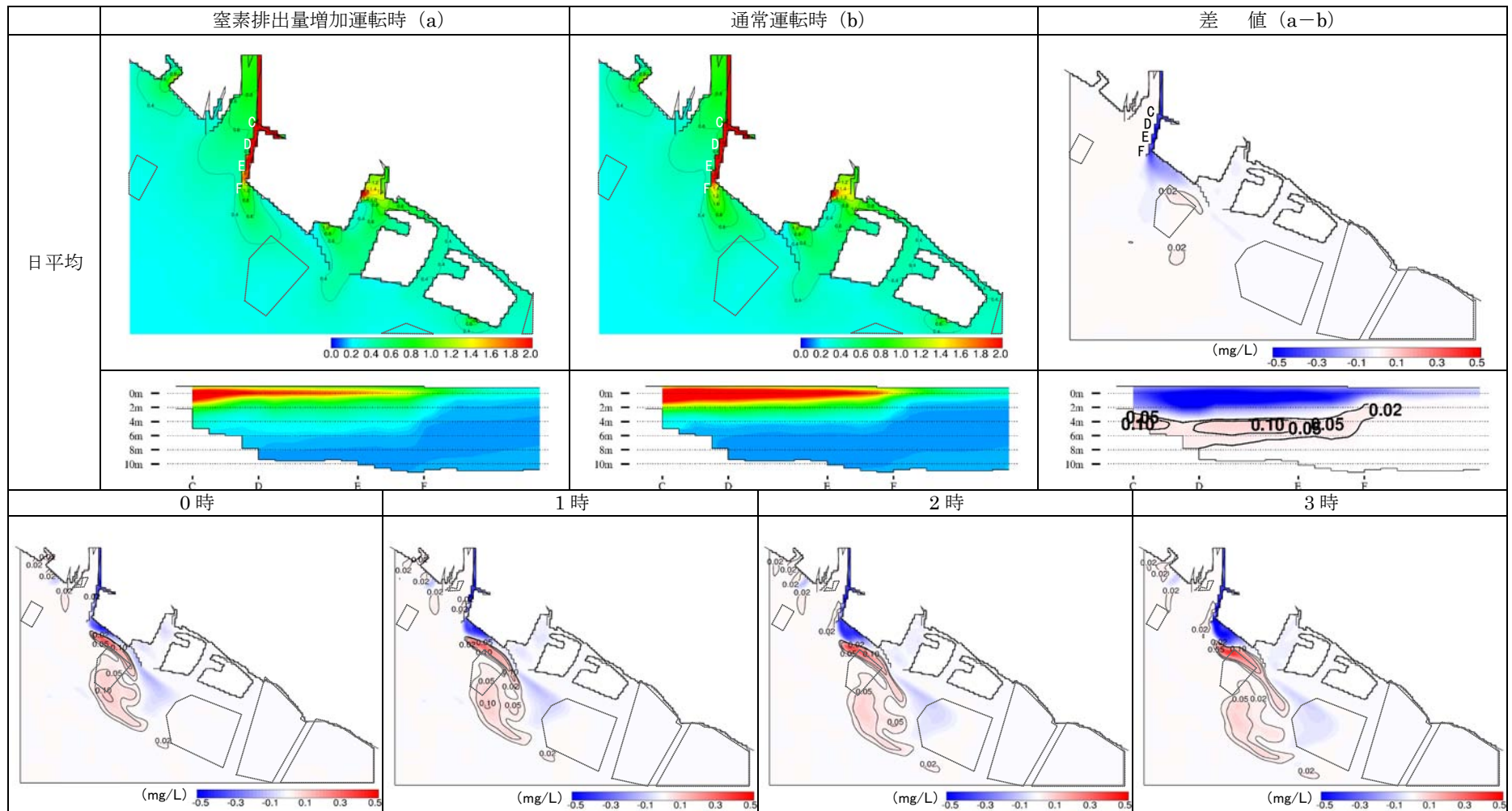


図 3.2-6 (1) 加古川から泊川河口沖水路に導水した際の全窒素の影響 (毎時結果は差値) [平成 18 年 2 月 15 日]

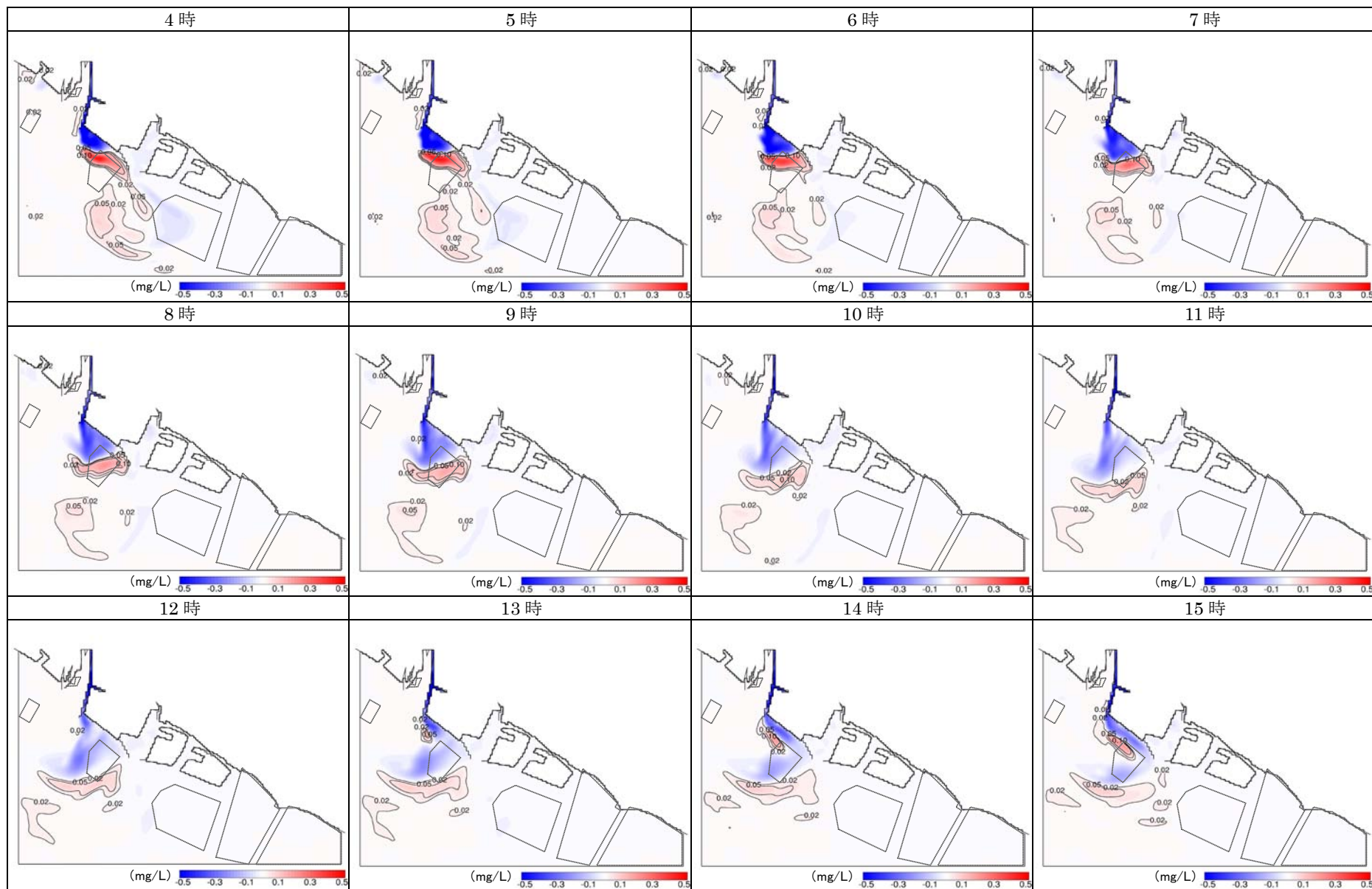


図 3.2-6 (2) 加古川から泊川河口沖水路に導水した際の全窒素の影響 (毎時結果は差値) [平成 18 年 2 月 15 日]

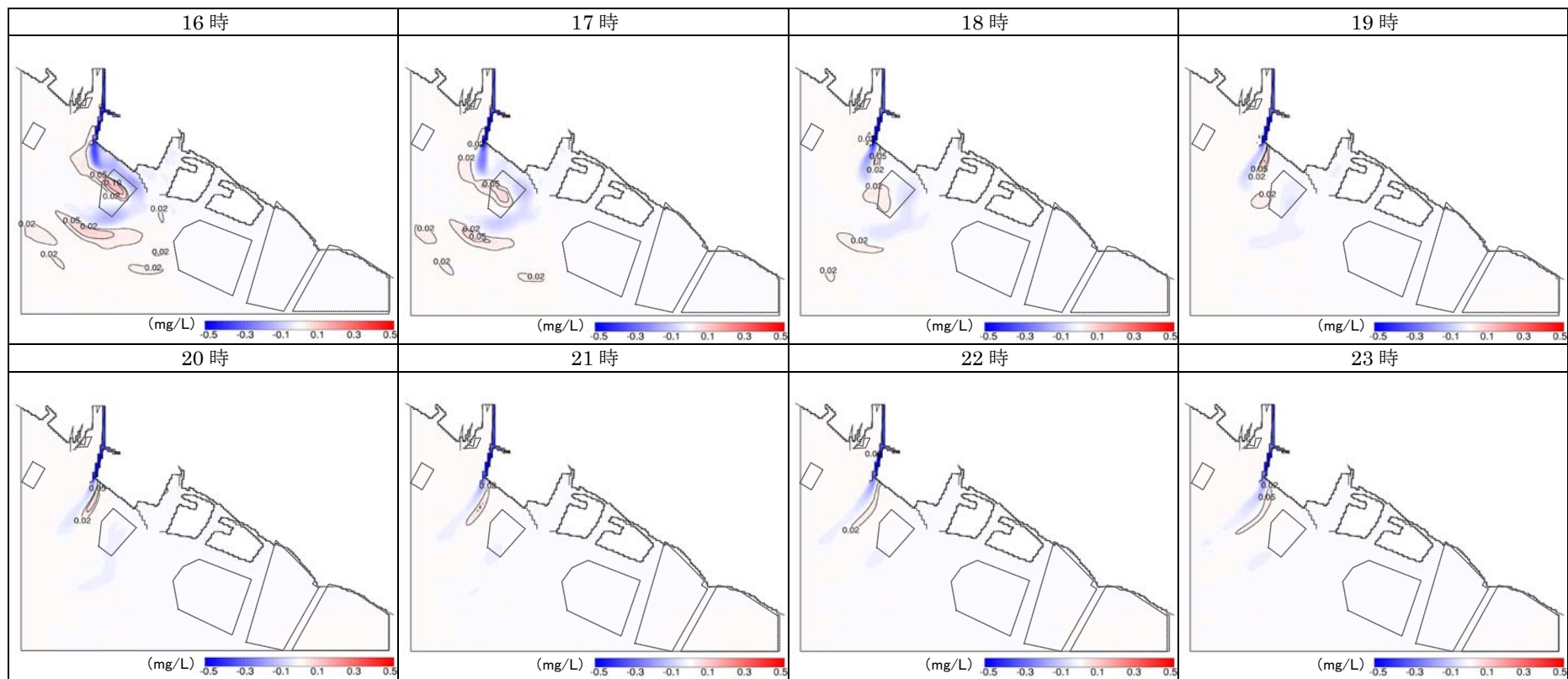


図 3.2-6 (3) 加古川から泊川河口沖水路に導水した際の全窒素の影響 (毎時結果は差値) [平成 18 年 2 月 15 日]

### 3.2.3 海水交換防波堤（遊水室型）の設置

#### (1) 検討概要

東播磨港（別府港）では港内が滞留域であることから富栄養化状態にあり、夏季には底層で貧酸素水塊が生じている。そのため、滞留を軽減し港内の DIN 濃度を低下させ、反対に貧栄養化した状態となっている沖合域に港内の富栄養水を供給する対策について検討を実施した。東播磨港の港口部に位置する二つの防波堤（東播磨港別府西防波堤、東播磨港別府東防波堤）を遊水室型海水交換防波堤（図 3.2-7）に変えて、港湾内外の海水交換を促進させることにより、窒素濃度が港湾内と港湾外でどの程度変化するかをシミュレーションモデルにより計算した。

対象とする防波堤を図 3.2-8 の赤丸に示す。防波堤の周辺の水深は約 9m である。波浪等の条件から、1 メッシュ（100m、底層）あたり 40m<sup>3</sup>/s 程度の海水交換量に設定した。

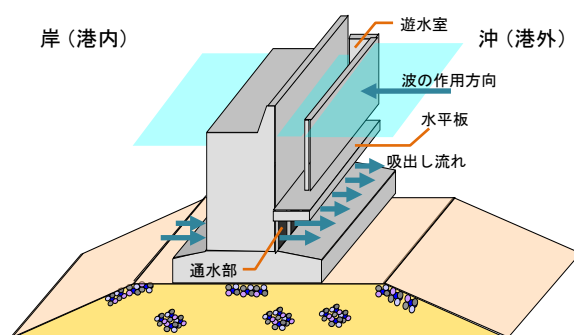


図 3.2-7 海水交換防波堤（遊水室型）のイメージ

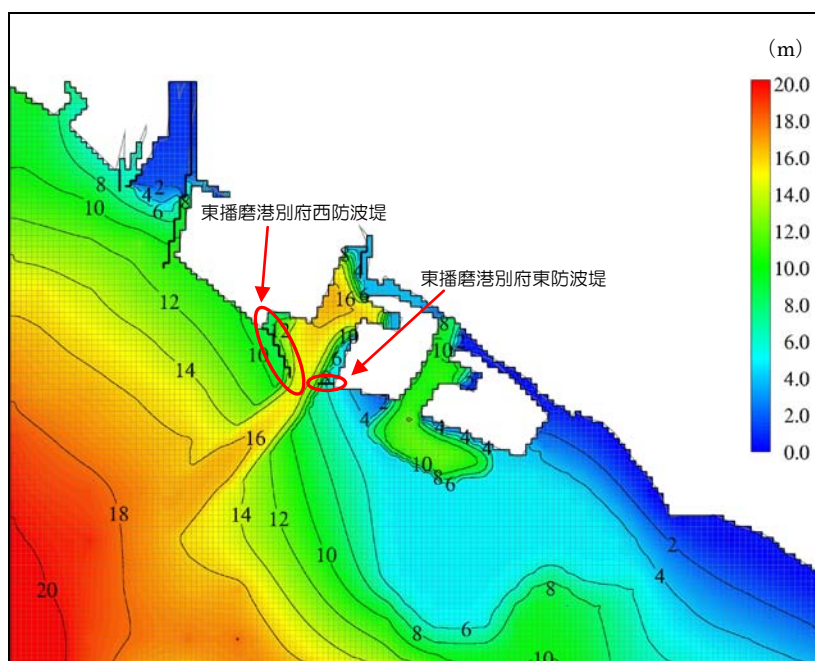


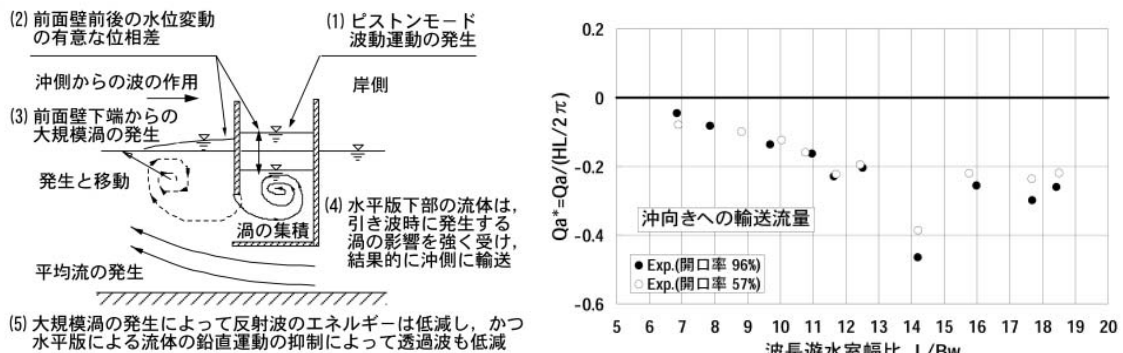
図 3.2-8 計算対象防波堤の位置

## (2) 流れの発生機構と計算方法

滞留海域の水質・底質環境問題を克服する手段の一つとして、海水交換を積極的に促進する海水交換施設の整備が進められてきている。このうち、海水交換防波堤については、「波を流れに変換する機構」を有する各種構造体が提案され、実用化されている。ここでは、遊水室型海水交換防波堤を施工した場合を想定した検討を行った。

海水交換防波堤（遊水室型）による平均流の発生機構の概念図を図 3.2-9 に示す。遊水室のピストンモードの波動運動を原動力に、前面壁下部付近に強い渦流れを発生させることで、波から渦流れへとエネルギーを変換させる。同時に、没水平板による渦流れの制御によって、堤体下部に設けた通水部を介して有意な平均流が生成され、海水交換が図られる仕組みである。

なお、ここで挙げた海水交換防波堤（遊水室型）は低反射、低透過であるため、港湾の外郭施設である防波堤の一部を海水交換防波堤（遊水室型）としても、港外の低反射化、また港内の静穏化効果等を十分に発揮できるため、防災機能も有している。



出典：大村智宏・中村孝幸・大飯邦昭・中山哲巖・榎木亨（2007）：波による渦流れを利用する遊水室型海水交換防波堤の研究開発－波浪制御特性および海水交換特性について－，水工研技報 29，1-20

図 3.2-9 海水交換防波堤（遊水室型）の平均流の発生機構と断面平均輸送流量

波により発生する平均流の流量（ $=Q$ ）は、波の状況の他に、海水交換防波堤の構造により変化する。第 5 回全国漁港漁場整備技術研究発表会講演集などの文献では、平均流の流量を「無次元輸送流量（ $=Q^*$ ）」と定義し、海水交換防波堤の構造を様々に変化させた実験を行うことにより、平均流の流量と海水交換防波堤の構造に関わるパラメータとの関係を一般化している（例えば、図 3.2-9 右図）。ただし、無次元輸送量は 1 波・単位長さあたりに通過する平均的な輸送流量（20 波程度の時間平均）を波の質量輸送量である峰の水塊量（ $=HL/2\pi$ ）で除したものとしている。

$$Q^* = Q / (HL/2\pi)$$

図 3.2-9 右図より、最適な設計が実施できた場合、概ね無次元輸送流量が 0.4 程度（冲向き）になることが期待できる。平均流の流量は  $0.4 \times HL/2\pi$  として算定でき、概ね  $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$  程度となった。1 メッシュが水平方向 100m 格子であるため、メッシュ毎に  $40 \text{ m}^3/\text{s}$  の平均流を設定することとした。



補足：【波高・波長の算定について】

播磨灘北東部地域における冬の平均的な波浪の波高（= $H$ ）と波長（= $L$ ）を求めるために、平成17年12月～平成18年3月にわたって、海象年表江井ヶ島の波浪データのエネルギー平均を行った。波高および波長は以下の式により求めた。

$$\bar{H} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (H_i^2 T_i)}{\sum_{i=1}^N T_i}} \quad , \quad \bar{L} = \frac{\sum_{i=1}^N (L_i)}{N}$$

ただし、 $N$  はデータ数（1時間データ）であり、 $T$  は周期である。ここでは、平均波高と平均周期の時間データを利用して整理を行った。 $h$  は検討海域を代表する水深であり、ここでは7.5mと設定した。水深と周期から波が短波であるか長波であるかを判定できるが、検討海域ではどちらにも該当しなかったため、波長の時間データは周期の時間データから以下の式を用いて近似解を算定して、平均的な波長の算定に用いている。

$$L_i = \frac{g}{2\pi} T^2 \tanh \frac{2\pi h}{L_i}$$

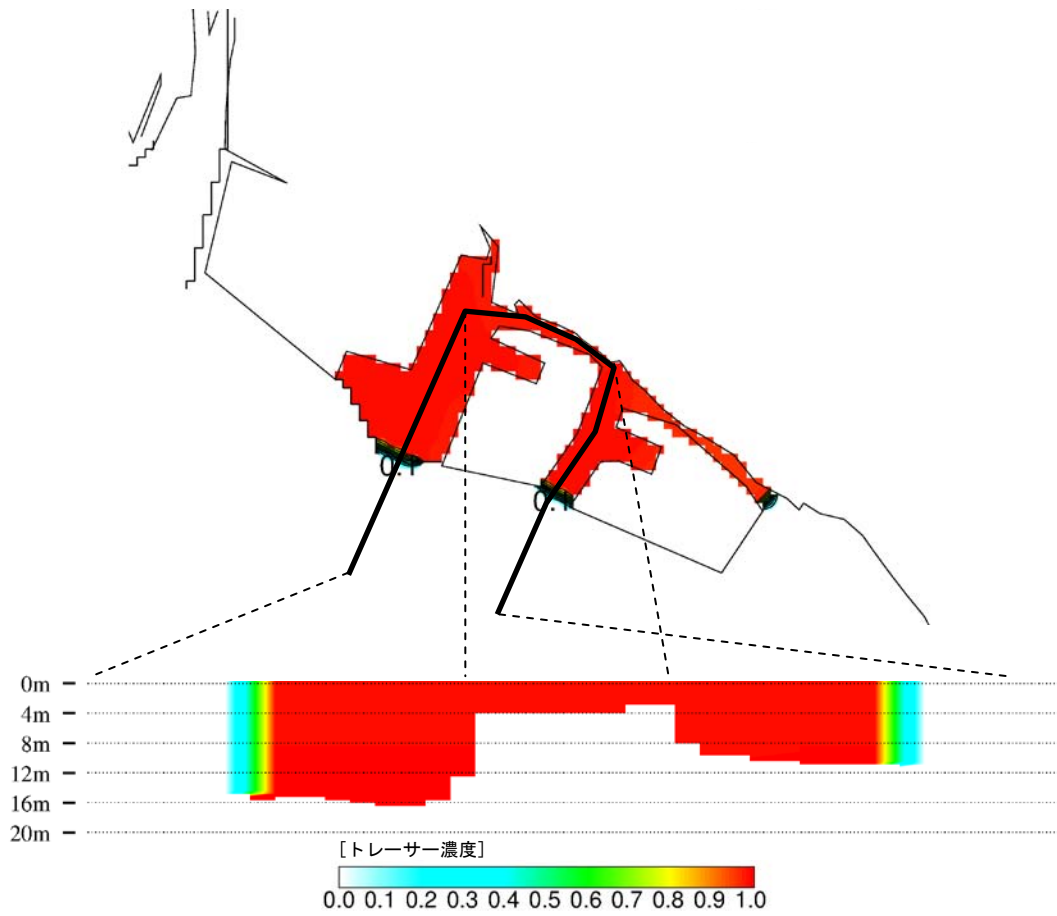
### （3） トレーサーを利用した効果検証

現況ケースと海水交換防波堤設置ケースについて、計算開始直後に図 3.2-10 に示す位置に濃度1の沈降しないトレーサーを投入した場合のトレーサー濃度の分布と流況の時間経過を図 3.2-11 に示す。

通水部が位置する第8層の防波堤前面において、港外に向けたトレーサー濃度の上昇が発生するとともに、2つの防波堤を挟む航路部から港外の水塊が港内に侵入してくる様子が示された。

また、現況ケースでは港湾内の奥部下層でトレーサーが比較的高い濃度を長期間維持しており、水塊が滞留しているとみられたが、海水交換防波堤ではこのような港湾内の奥部下層における滞留域の軽減に貢献していた。

さらに、海水交換防波堤の設置により港内の水塊が港外へ広く拡散しており、港外におけるトレーサー濃度が特に第1層において広い範囲で上昇していることが確認された。



※ 平面図中黒線の位置において断面分布図を作成している

図 3.2-10 トレーサーの初期設定

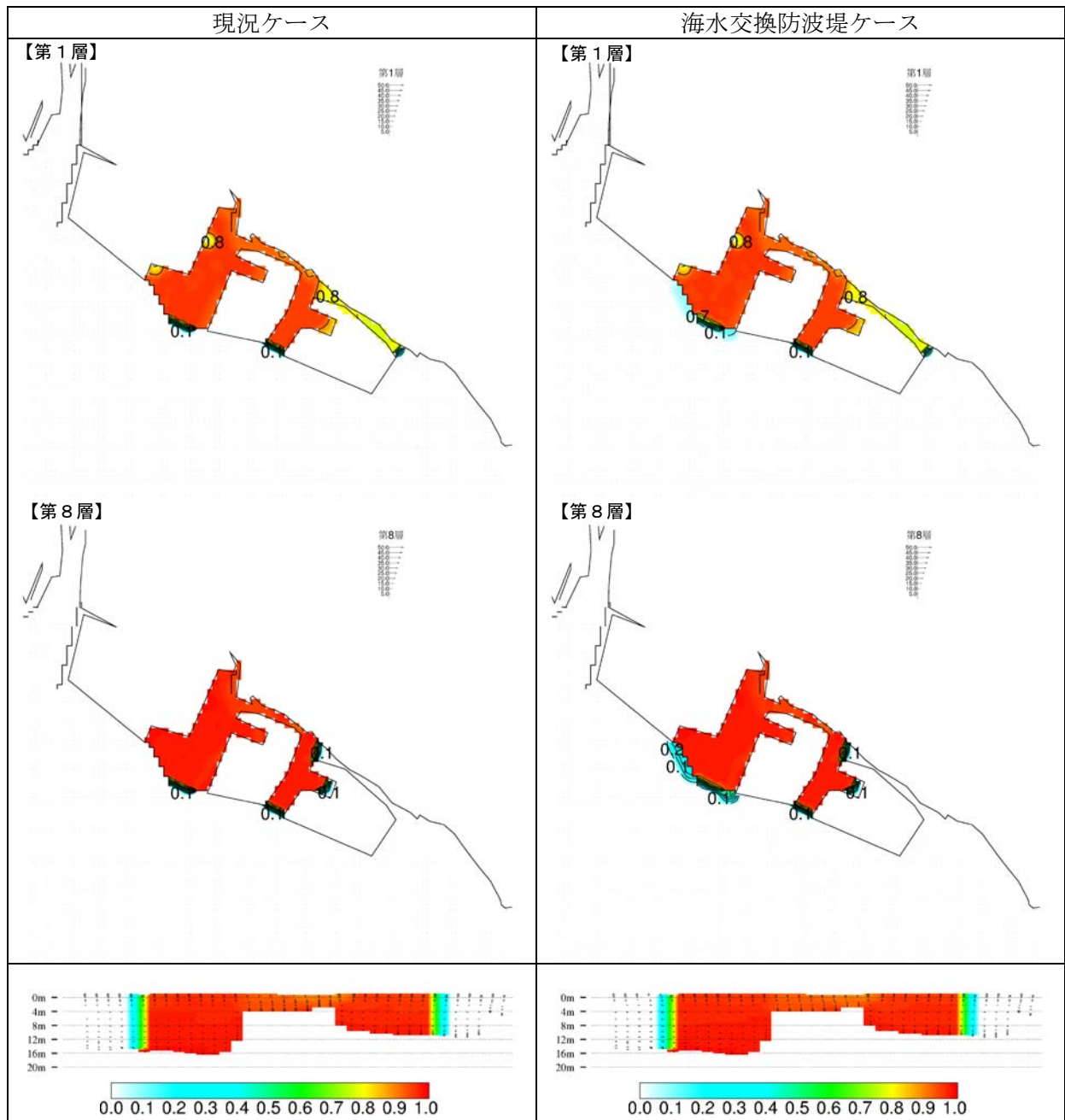


図 3.2-11 (1) トレーサー濃度の分布と流況の比較  
(計算開始から0日6時間後)

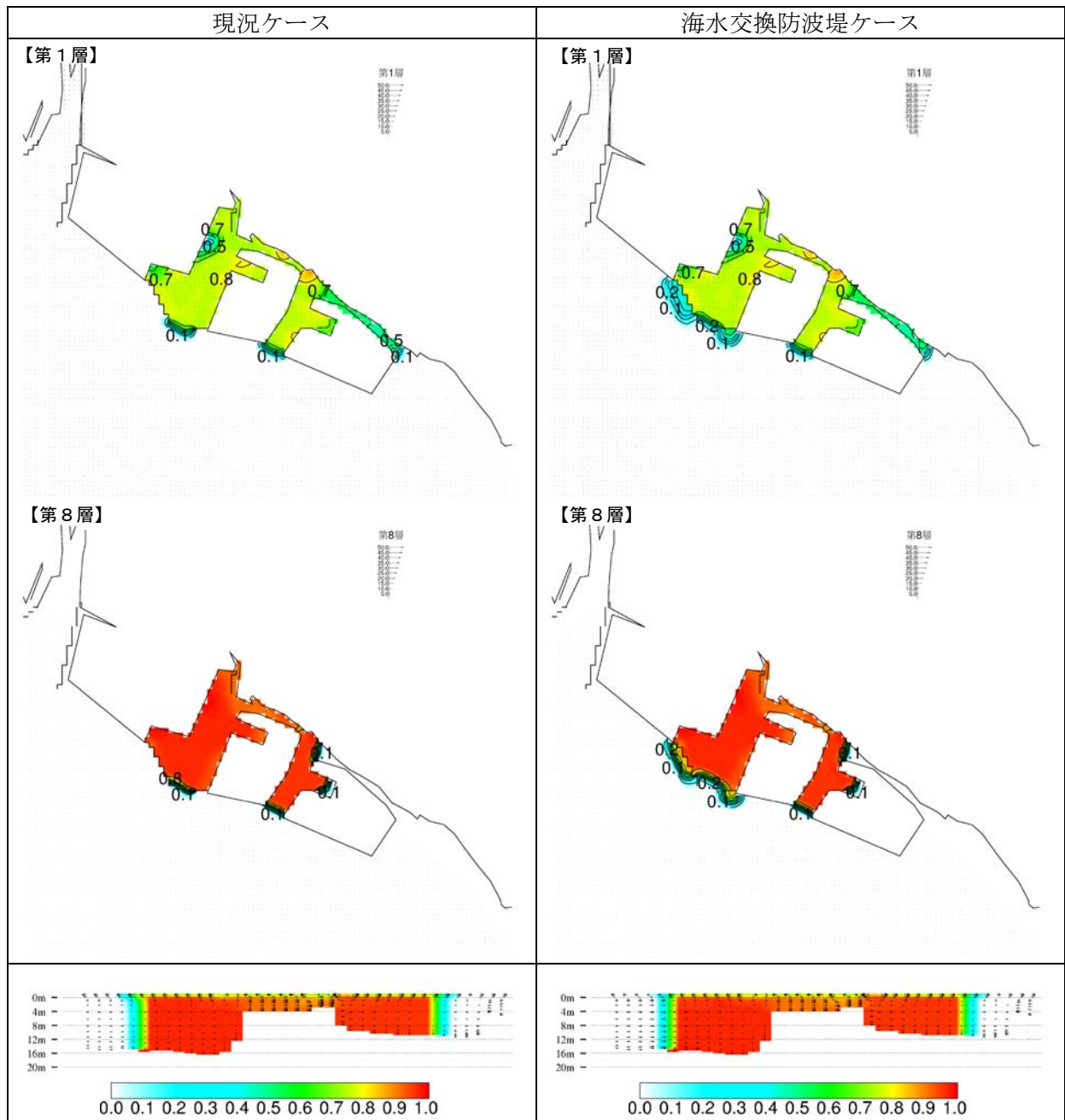


図 3.2-11 (2) トレーサー濃度の分布と流況の比較  
(計算開始から0日12時間後)

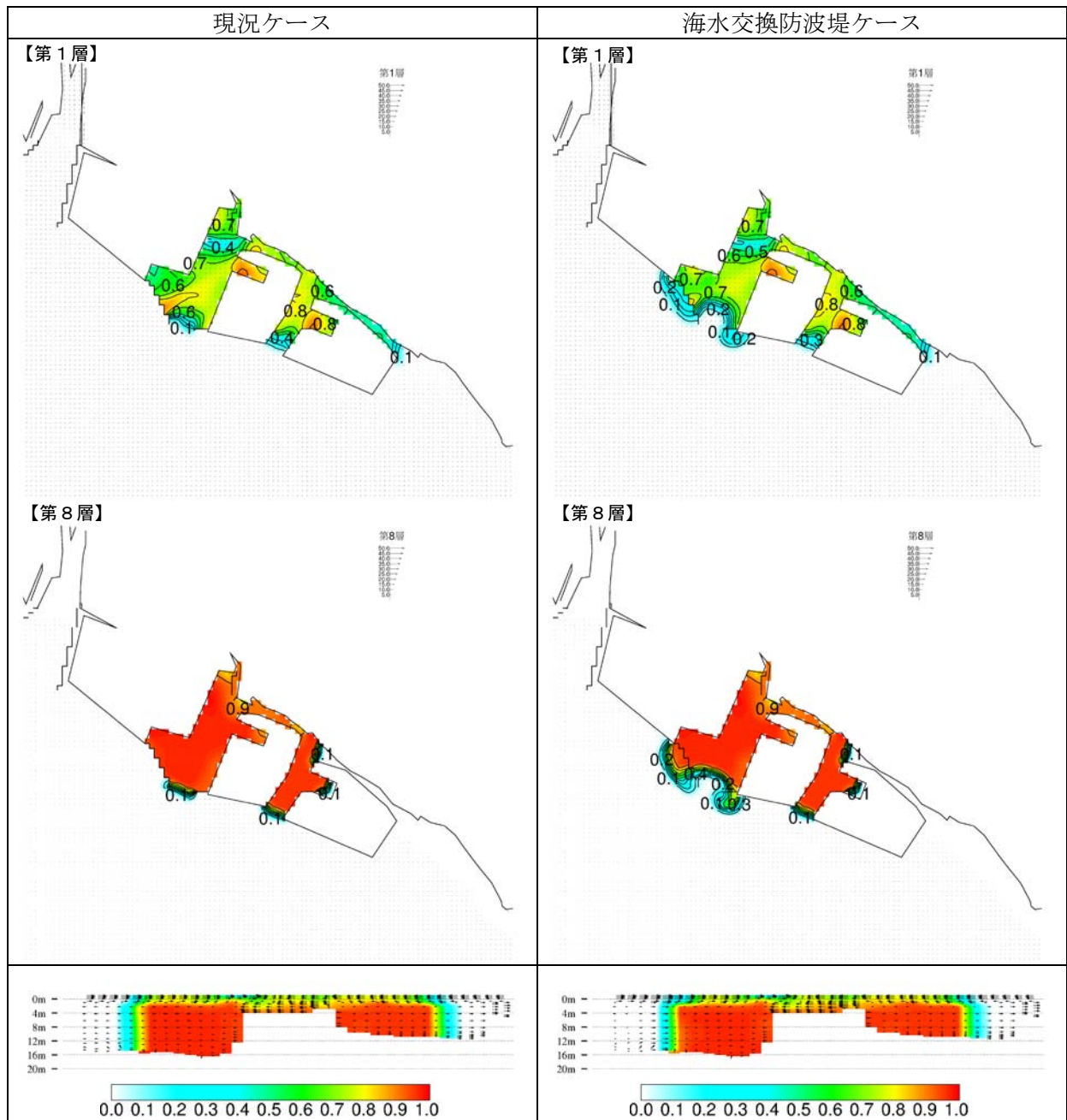


図 3.2-11 (3) トレーサー濃度の分布と流況の比較  
(計算開始から0日18時間後)

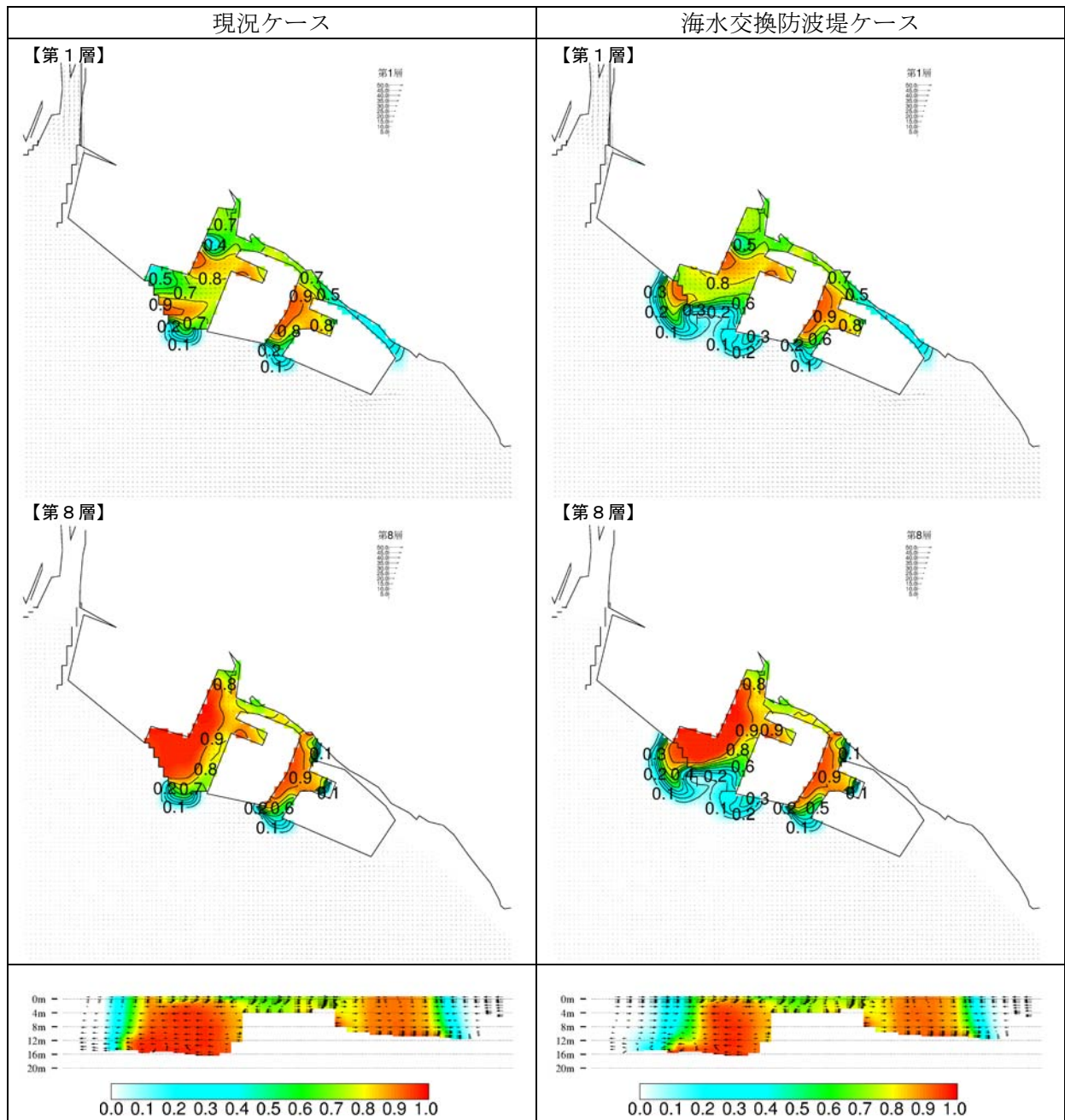


図 3.2-11 (4) トレーサー濃度の分布と流況の比較  
(計算開始から1日0時間後)

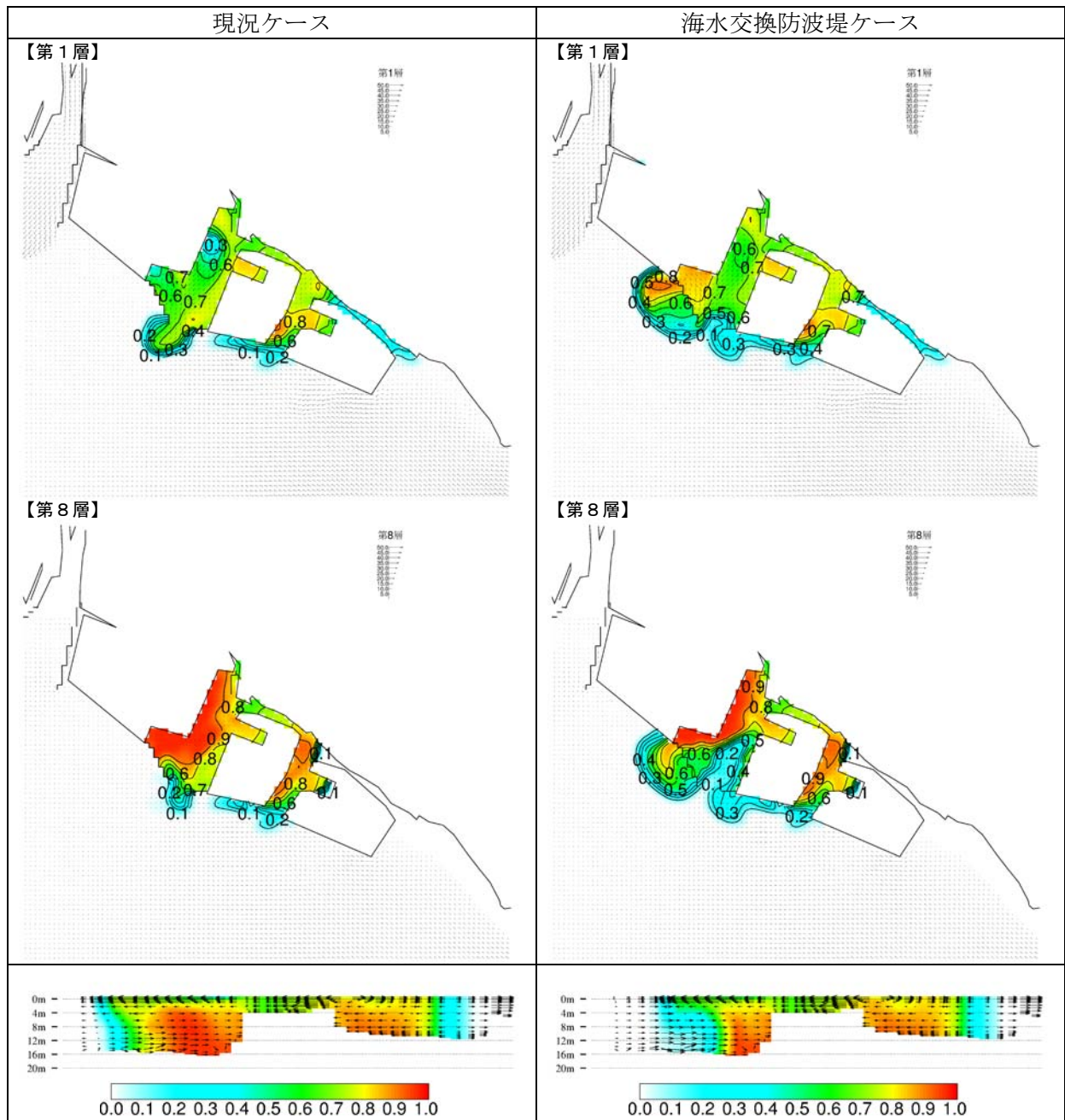


図 3.2-11 (5) トレーサー濃度の分布と流況の比較  
(計算開始から1日6時間後)

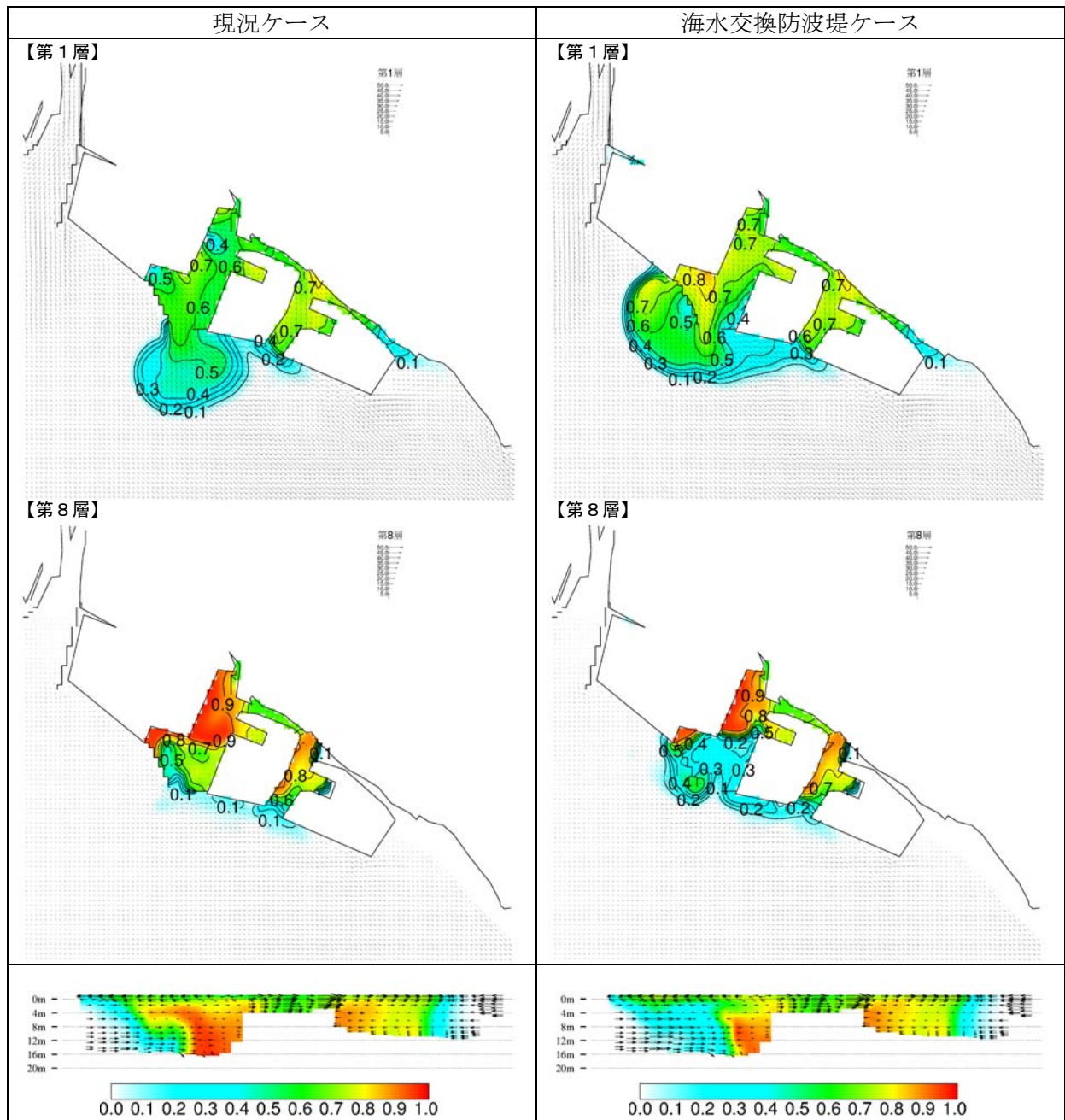


図 3.2-11 (6) トレーサー濃度の分布と流況の比較  
(計算開始から1日12時間後)



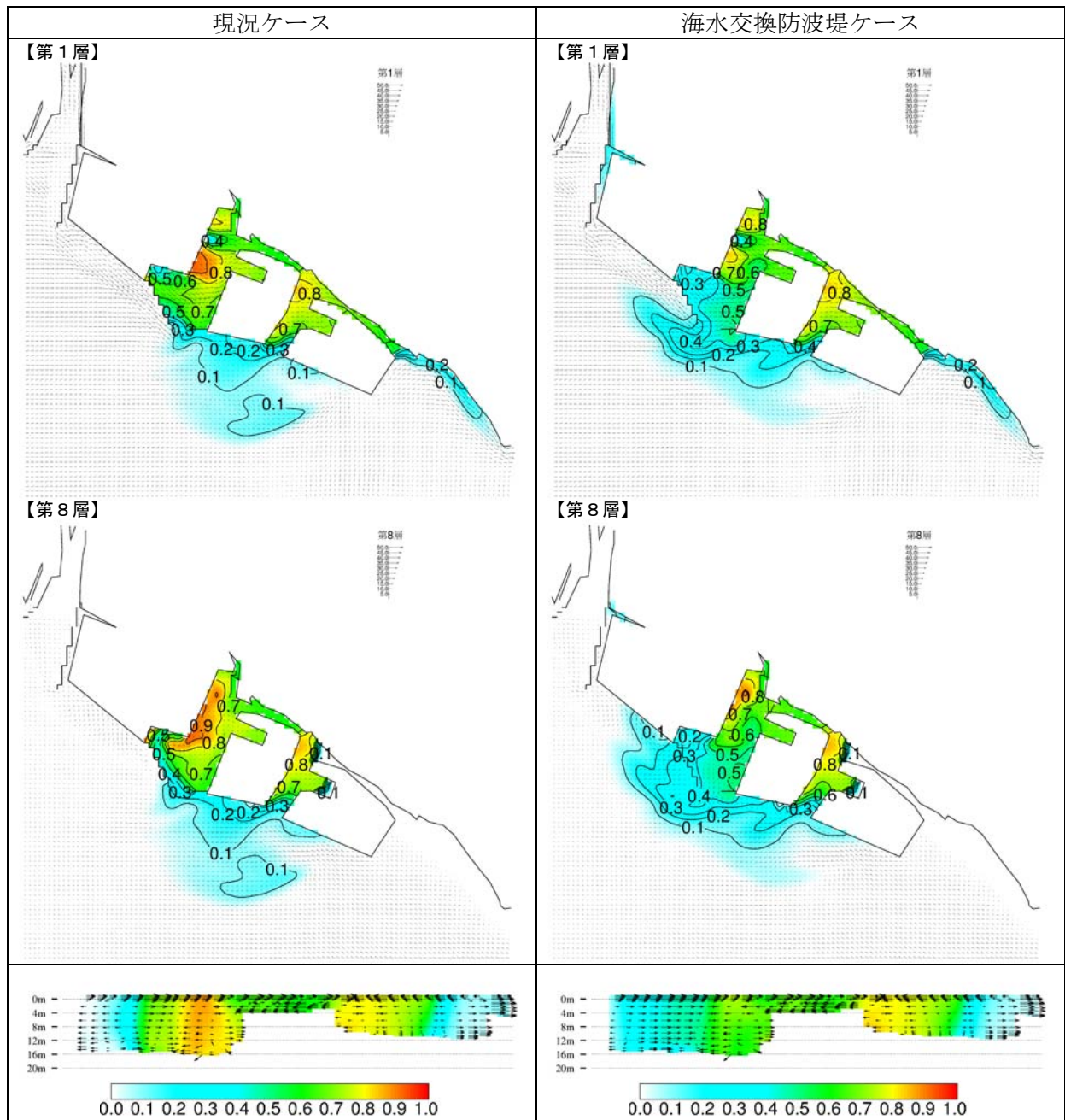


図 3.2-11 (7) トレーサー濃度の分布と流況の比較  
(計算開始から1日18時間後)

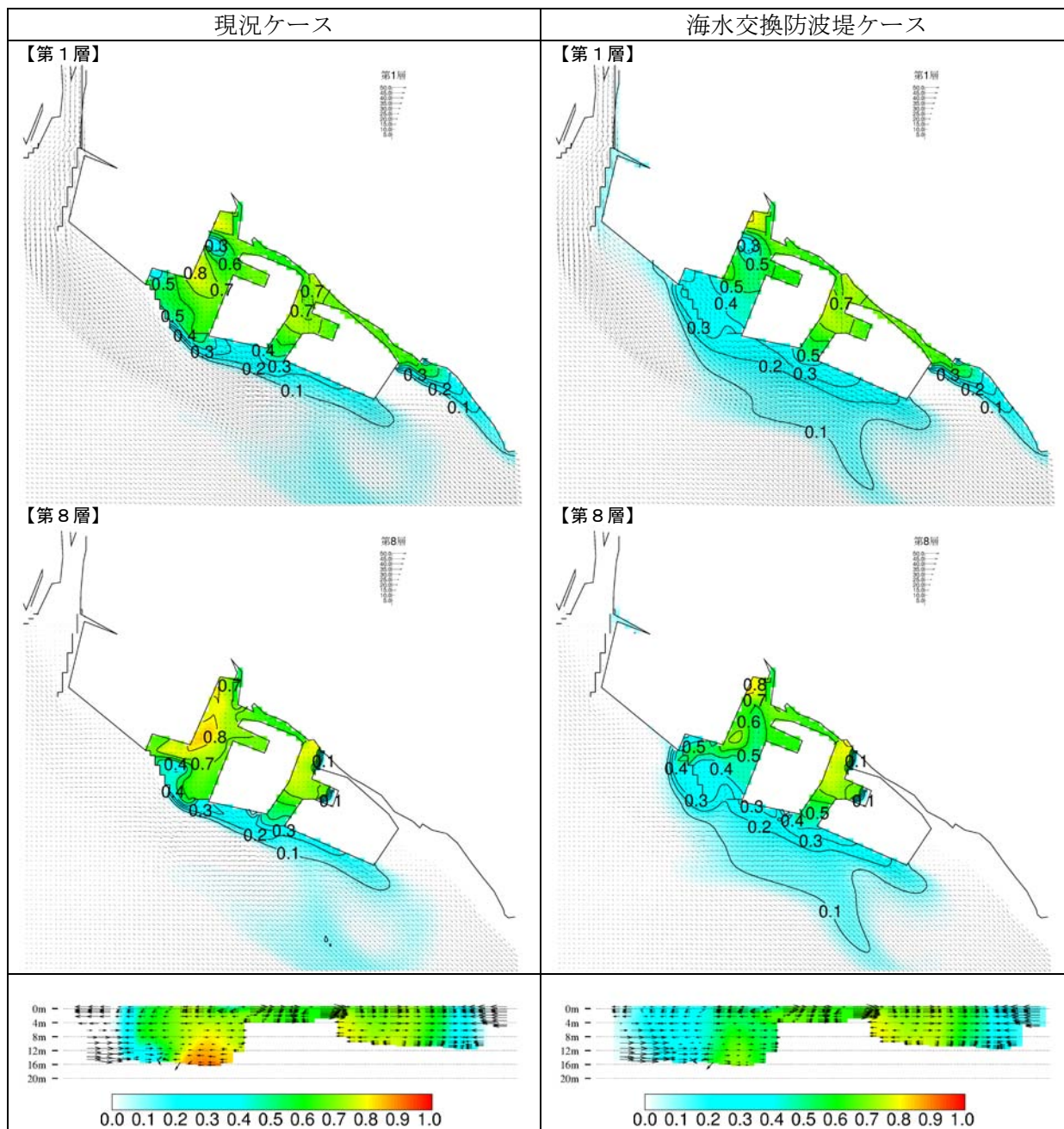


図 3.2-11 (8) トレーサー濃度の分布と流況の比較  
(計算開始から2日0時間後)

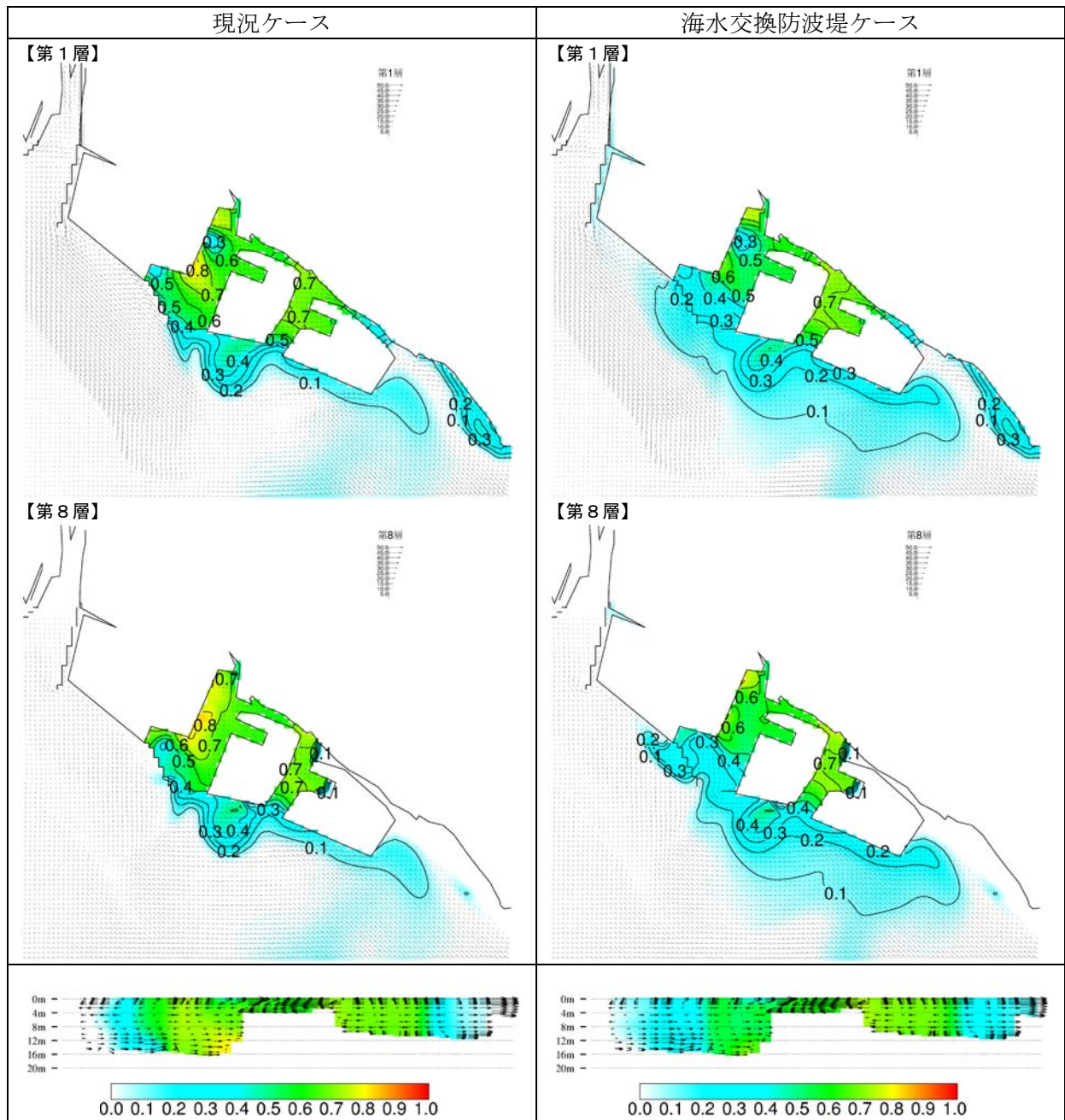


図 3.2-11 (9) トレーサー濃度の分布と流況の比較  
(計算開始から2日6時間後)

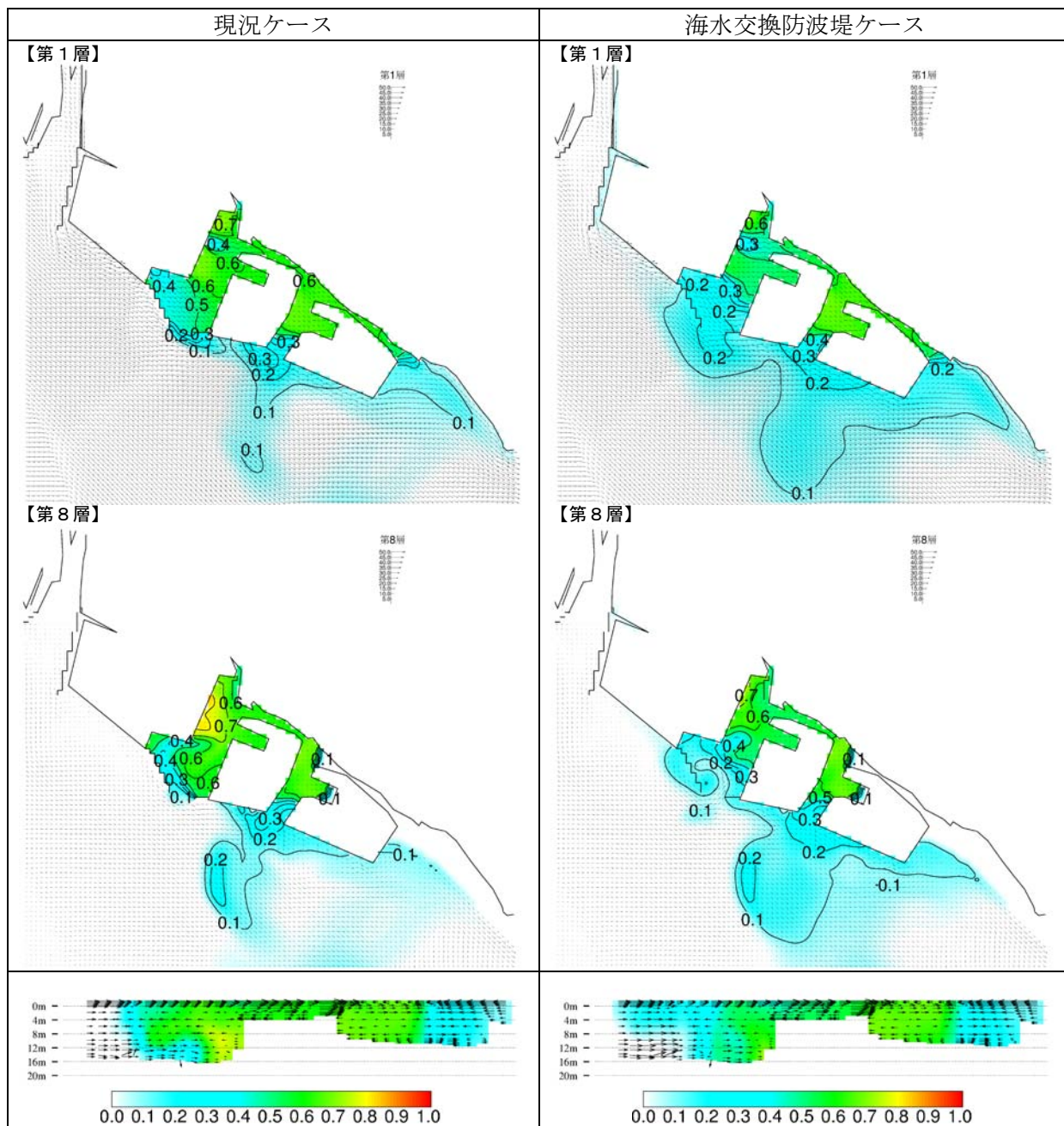


図 3.2-11 (10) トレーサー濃度の分布と流況の比較  
(計算開始から2日12時間後)

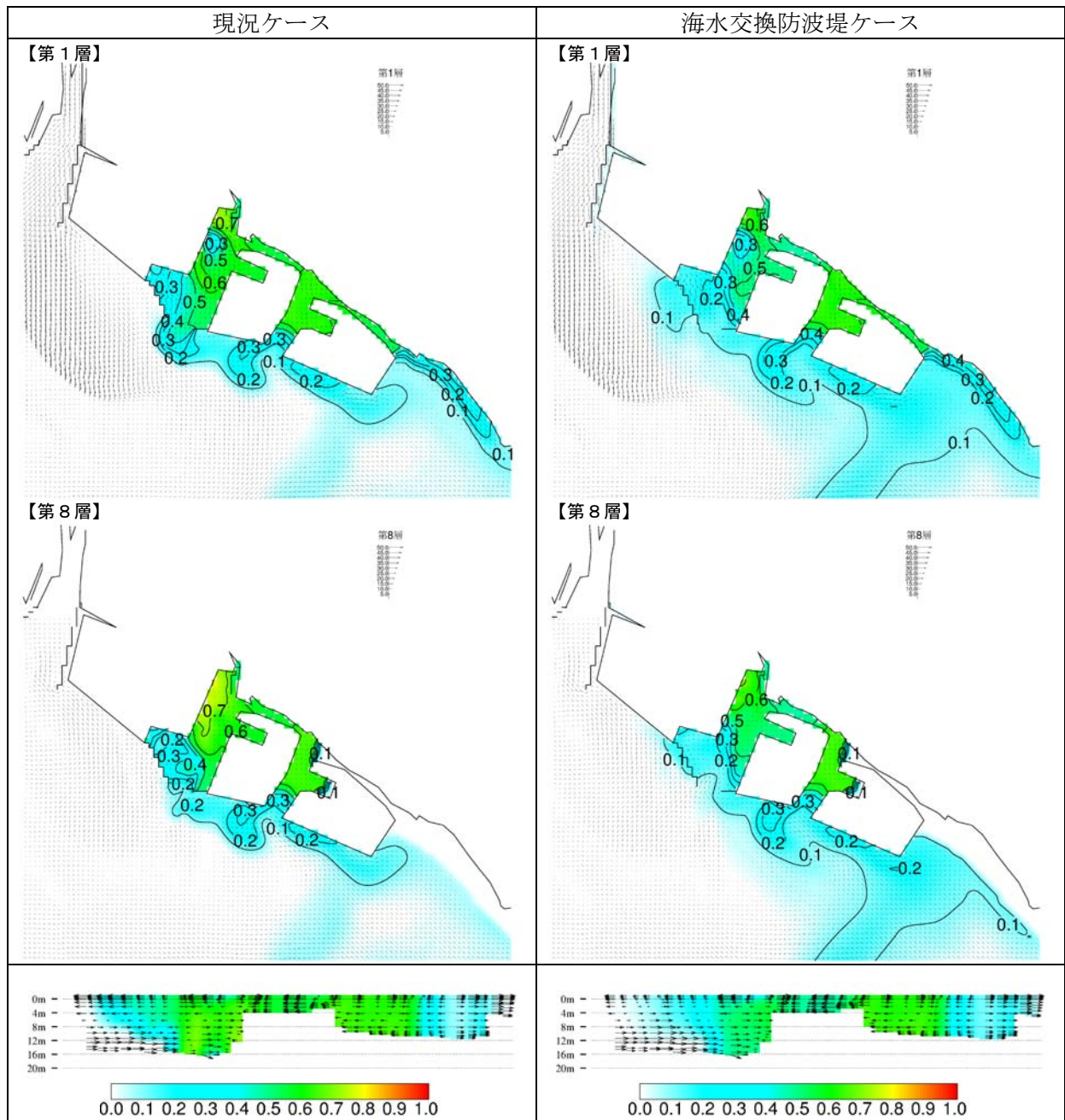


図 3.2-11 (11) トレーサー濃度の分布と流況の比較  
(計算開始から2日18時間後)

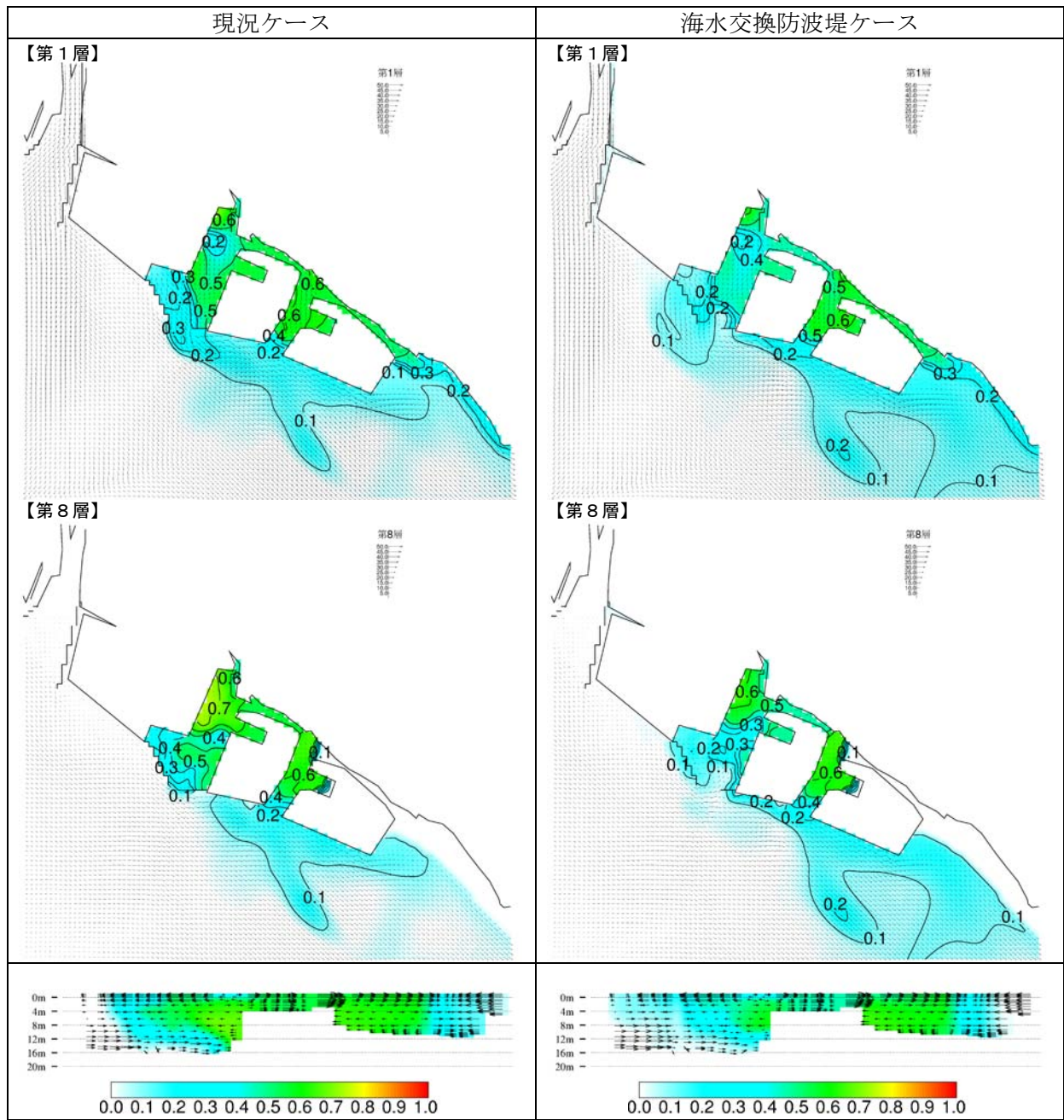


図 3.2-11 (12) トレーサー濃度の分布と流況の比較  
(計算開始から3日0時間後)

海水交換防波堤（遊水室型）の設置による海水交換状況の変化を把握するため、滞留時間の算定を行った。検討の手順は次のとおり行った。①東播磨港港内にトレーサー（沈降速度 0）を濃度 1 で投入する（図 3.2-12 左側）。②流れによるトレーサーの港外への流出や港内への新たな流入水（トレーサーを含まない）により、港内のトレーサーの平均濃度は低下していく（図 3.2-12 右側）。③この港内のトレーサー平均残留率の時系列変化を整理し、トレーサーの投入した時点から港内平均残留率が  $1/e$  に達するまでの時間を滞留時間として定義する。

滞留時間を算定した結果、現況ケースで東播磨港内の滞留時間は 4 日と 3 時間程度であったが、海水交換防波堤（遊水室型）の設置により 3 日と 5 時間程度にまで短縮でき、効果が東播磨港の別府地区から播磨地区、二見地区まで波及することを確認できた。

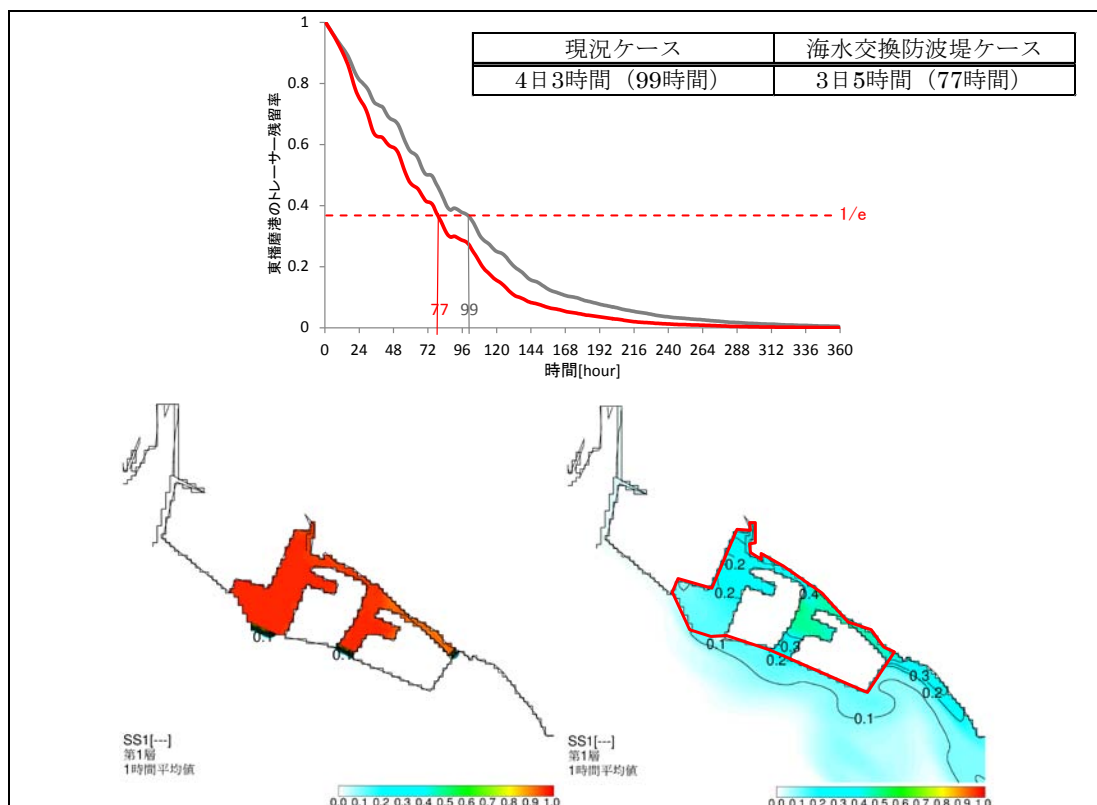


図 3.2-12 滞留時間の比較

#### (4) 水質計算

図 3.2-13、図 3.2-14 には、第 1 層と第 8 層（海水交換防波堤の通水部がある水深）の全窒素（TN）の水平分布をそれぞれ示した。

第 1 層では港内の濃度が減少するとともに港外に広く濃度が上昇する領域が確認できた。港外の濃度上昇により、民間事業場 a が冷却水用に取水する海水の窒素濃度も上昇し、民間事業場 a の排水の影響範囲における窒素濃度も上昇していた。また、第 8 層においても港内の濃度が減少していることが確認できた。

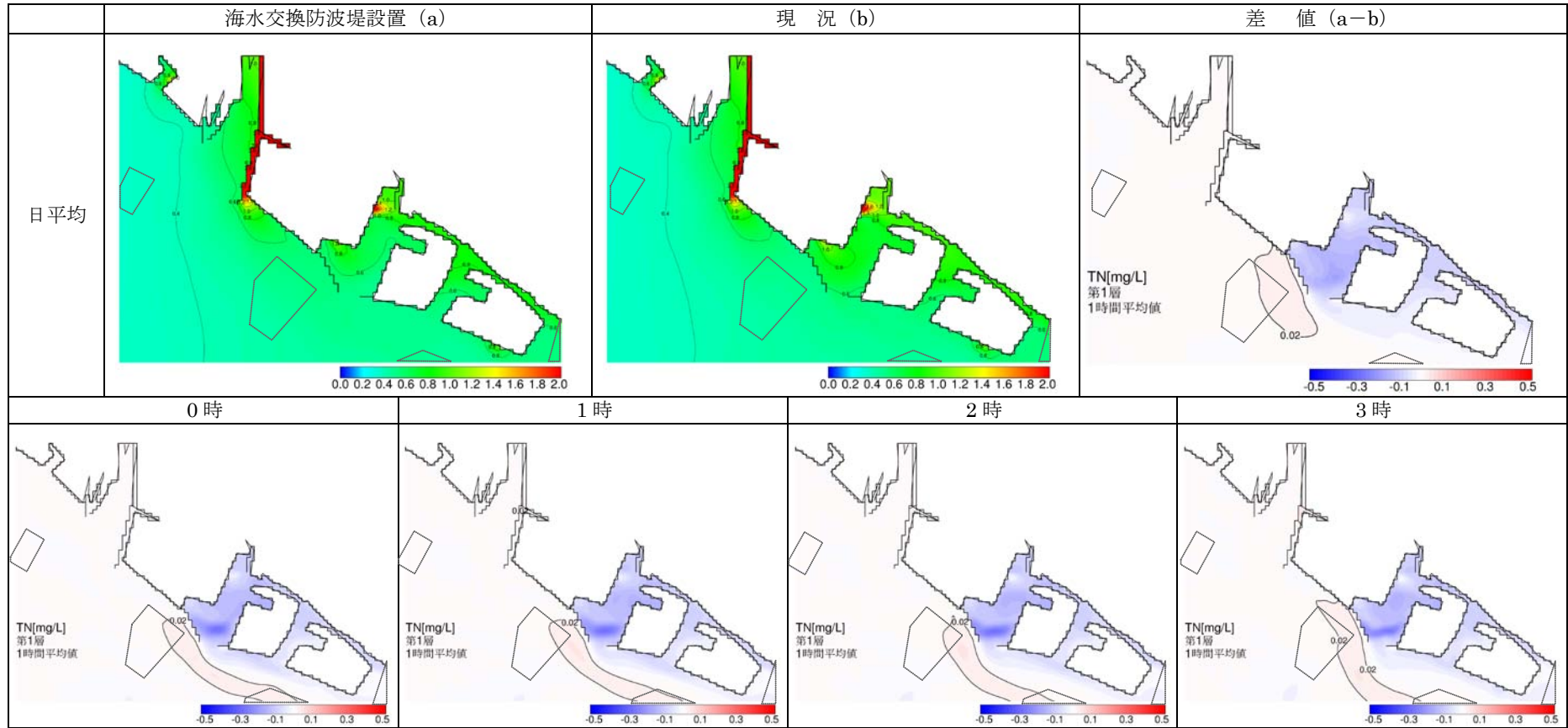


図 3.2-13 (1) 海水交換防波堤設置による全窒素の影響 (毎時結果は差値) [平成 17 年 12 月 15 日、第 1 層]



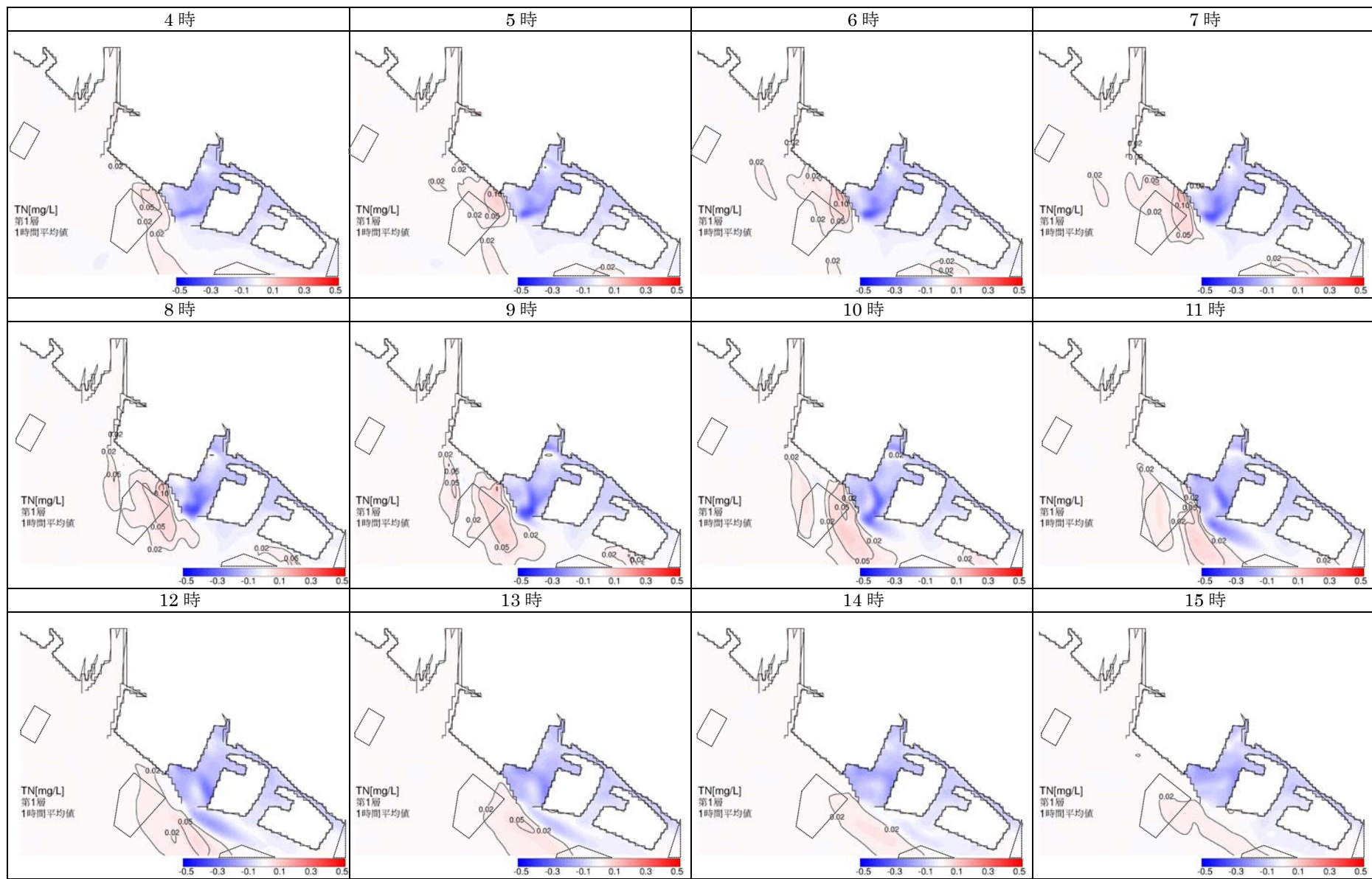


図 3.2-13 (2) 海水交換防波堤設置による全窒素の影響 (毎時結果は差値) [平成 17 年 12 月 15 日、第 1 層]

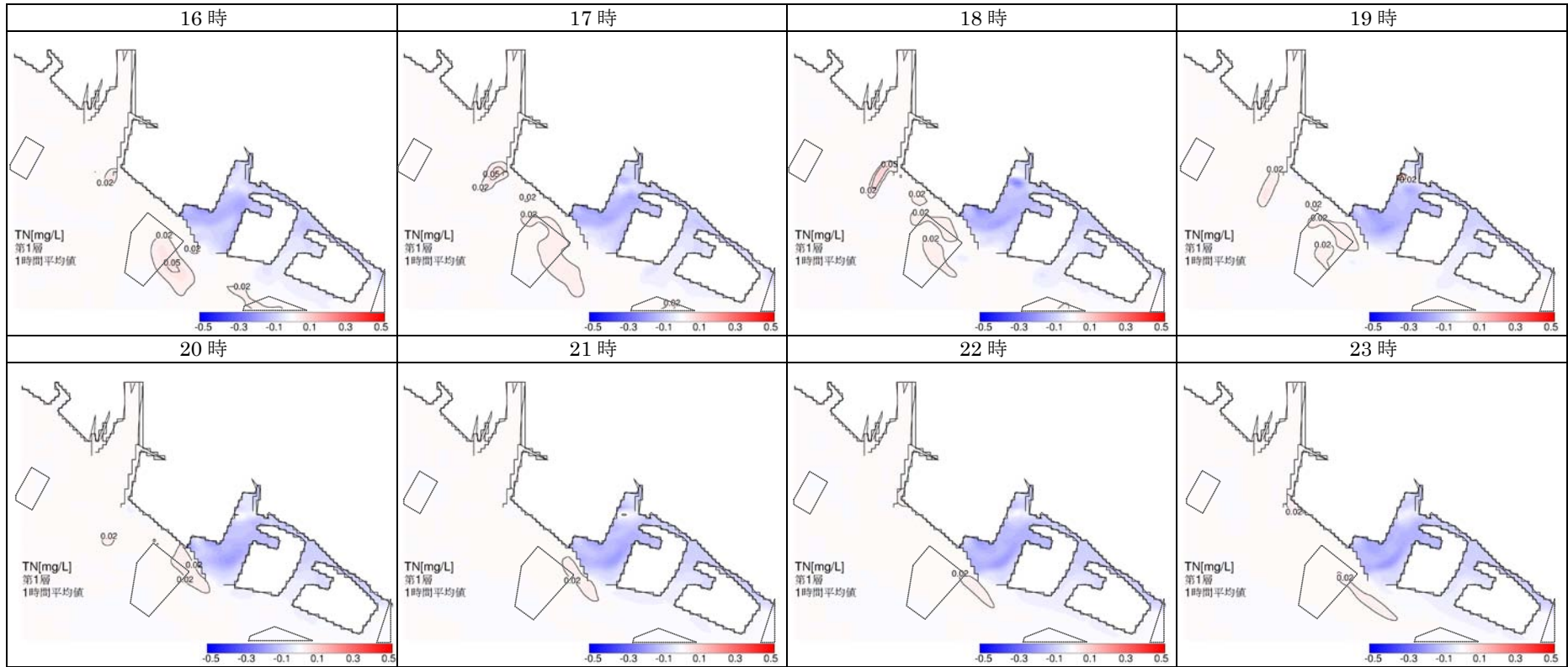


図 3.2-13 (3) 海水交換防波堤設置による全窒素の影響 (毎時結果は差値) [平成 17 年 12 月 15 日、第 1 層]

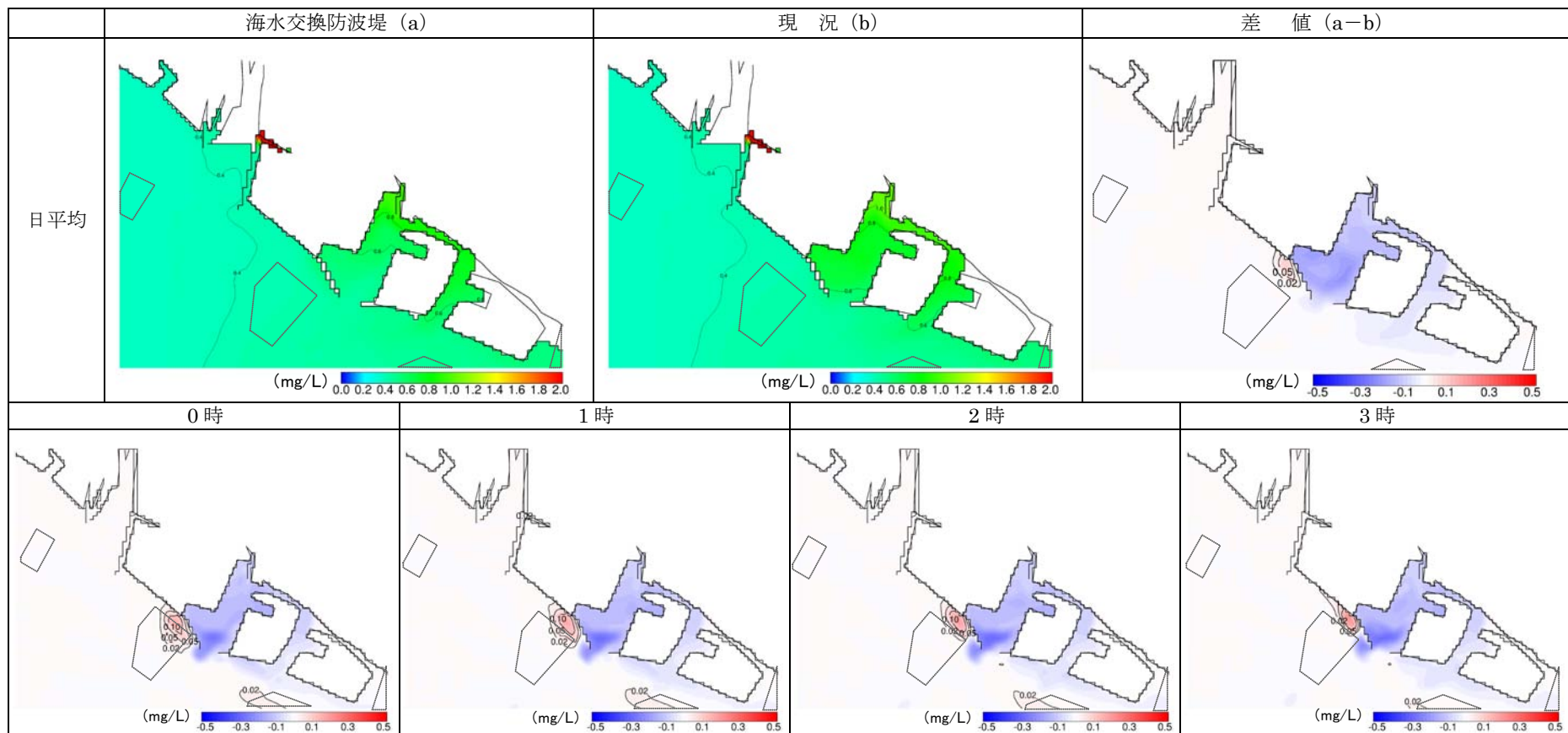


図 3.2-14 (1) 海水交換防波堤設置による全窒素の影響 (毎時結果は差値) [平成 17 年 12 月 15 日、第 8 層]

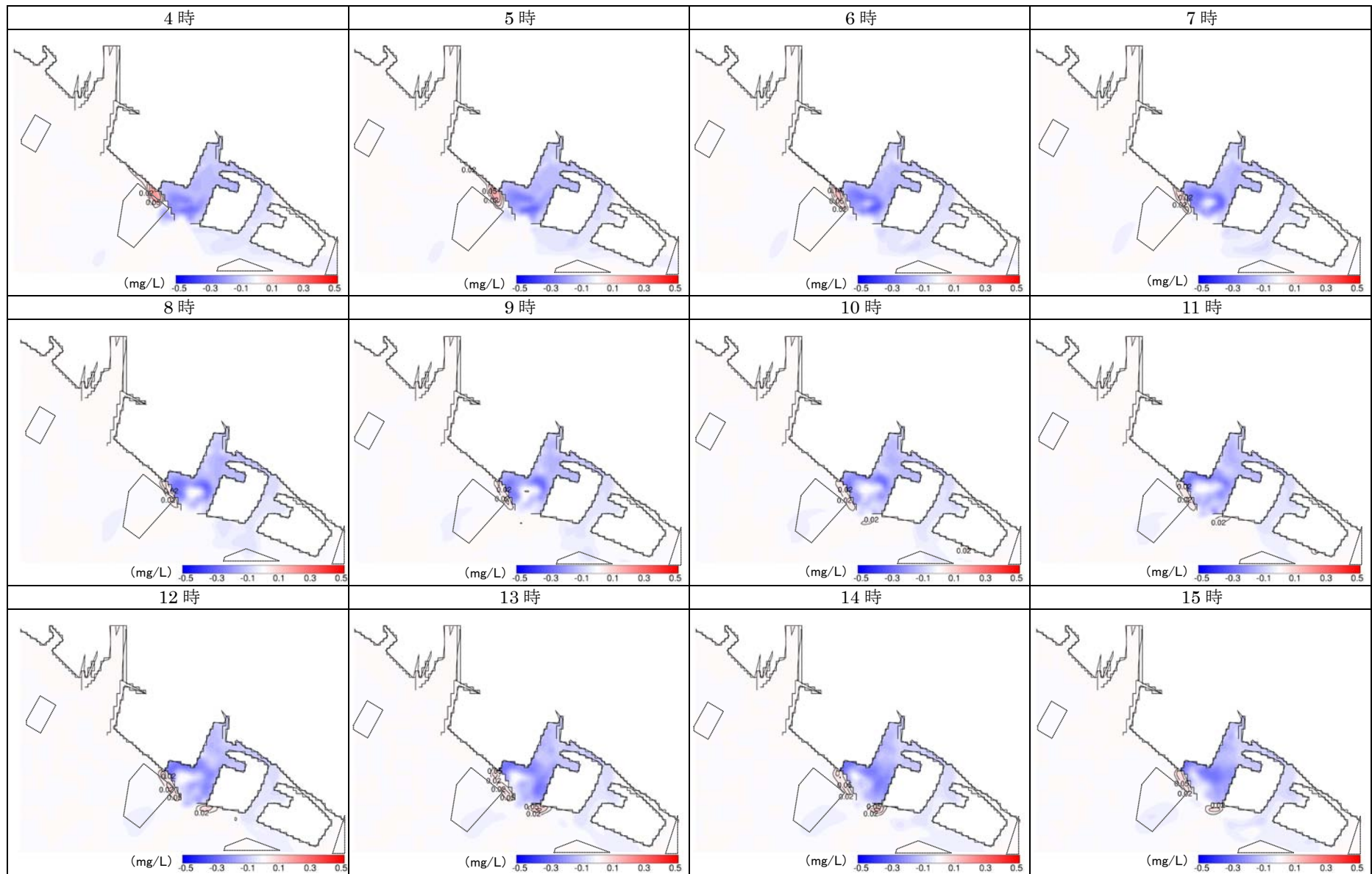


図 3.2-14 (2) 海水交換防波堤設置による全窒素の影響 (毎時結果は差値) [平成 17 年 12 月 15 日、第 8 層]

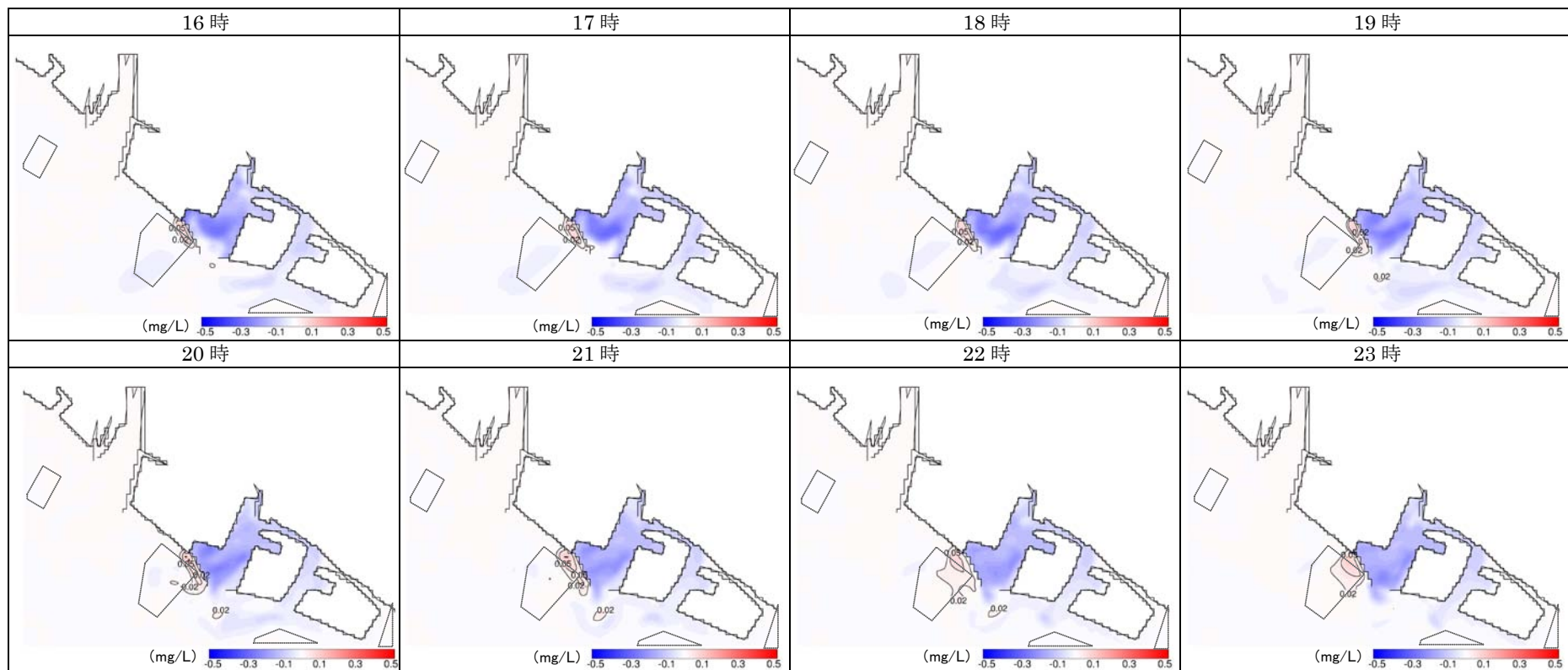


図 3.2-14 (3) 海水交換防波堤設置による全窒素の影響 (毎時結果は差値) [平成 17 年 12 月 15 日、第 8 層]

### 3.2.4 窒素排出量増加運転と導水対策の組み合わせ

加古川下流浄化センターでの窒素排出量増加運転は沿岸～沖合域の窒素濃度の上昇を目的としているが、濃度が高止まりしている泊川河口沖水路内における濃度がさらに上昇することになる。そのため、泊川河口沖水路内の窒素濃度を下げることが期待できる「河川を利用した海水交換の促進対策」を同時に実施することにより、泊川河口沖水路内の濃度上昇を抑えながら、沿岸～沖合域の濃度の上昇が期待できると考えられた。

加古川下流浄化センターでの窒素排出量増加運転中の排水の設定条件は 3.2.1 と同様に DIN を通常時の 1.45 倍とし、河川を利用した海水交換の促進対策の設定条件は 3.2.2 と同様に加古川の表層水を取水して泊川河口沖水路の下層から 1m<sup>3</sup>/s で放水することとした。対策の実施による全窒素濃度の増減の変化を図 3.2-15 に示した。

計算の結果、河川を利用した海水交換促進対策と同様に泊川河口沖水路内で濃度が低下し、沿岸～沖合域では窒素排出量増加運転の効果で河川を利用した海水交換促進対策を単独で実施した場合よりもさらに濃度が高く、影響範囲も拡大していた。したがって、それぞれの対策を個別に実施するよりも二つの対策を同時に実施することで、DIN の偏在化の一層の軽減効果が期待できるとみられた。

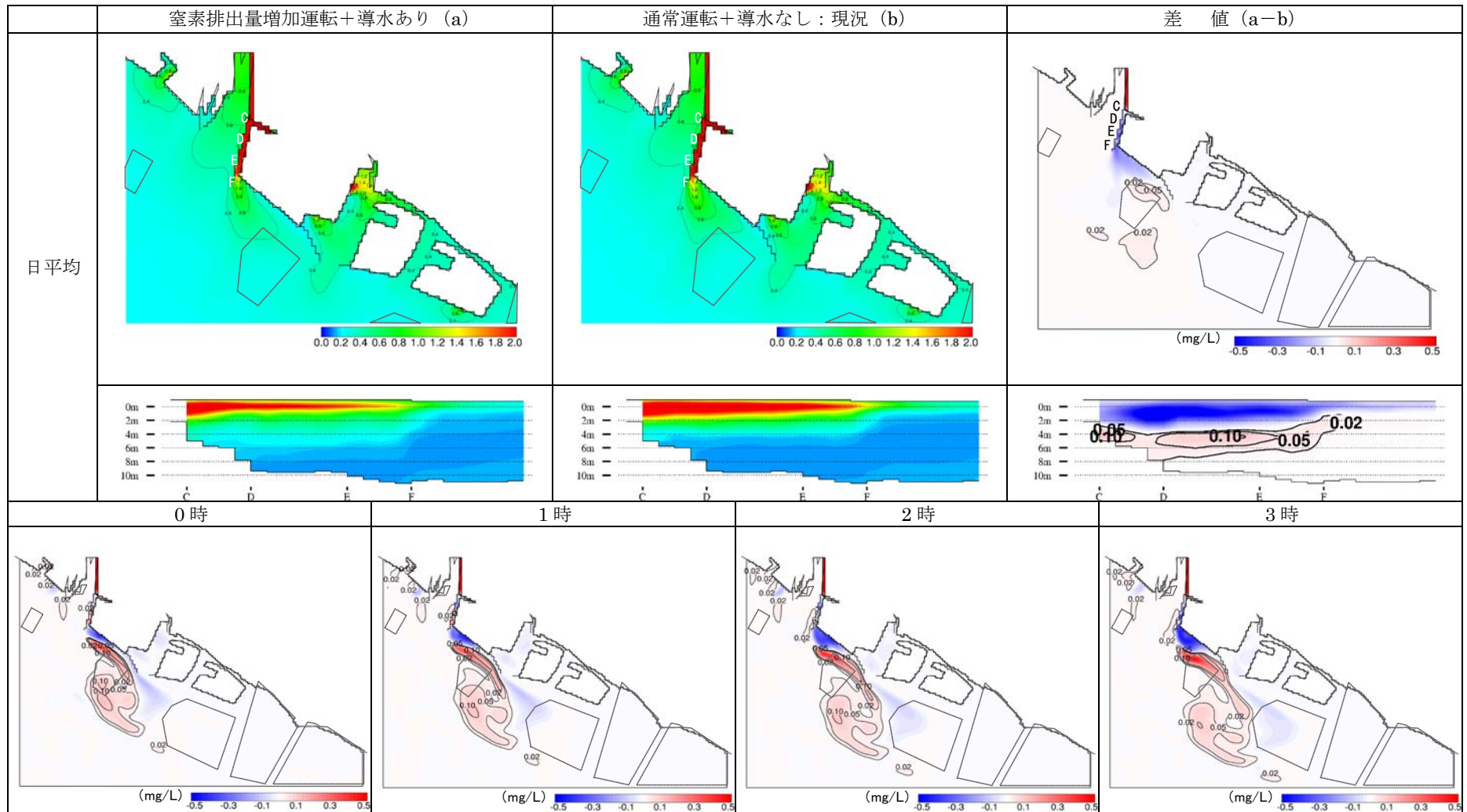


図 3.2-15 (1) 窒素排出量増加運転と導水対策を同時に実施した場合の全窒素の影響（毎時結果は差値）[平成 18 年 2 月 15 日]

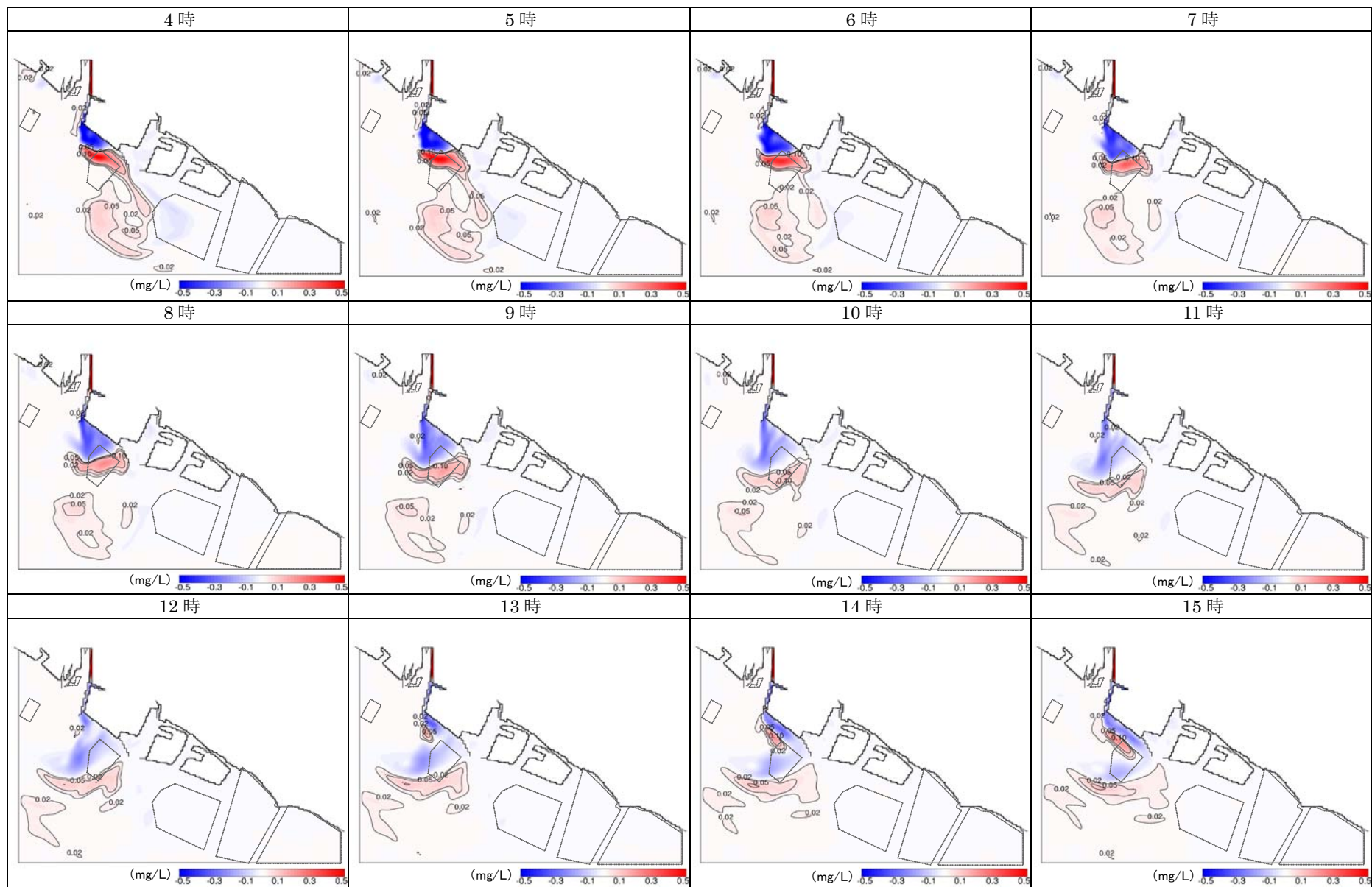


図 3.2-15 (2) 窒素排出量増加運転と導水対策を同時に実施した場合の全窒素の影響 (毎時結果は差値) [平成 18 年 2 月 15 日]



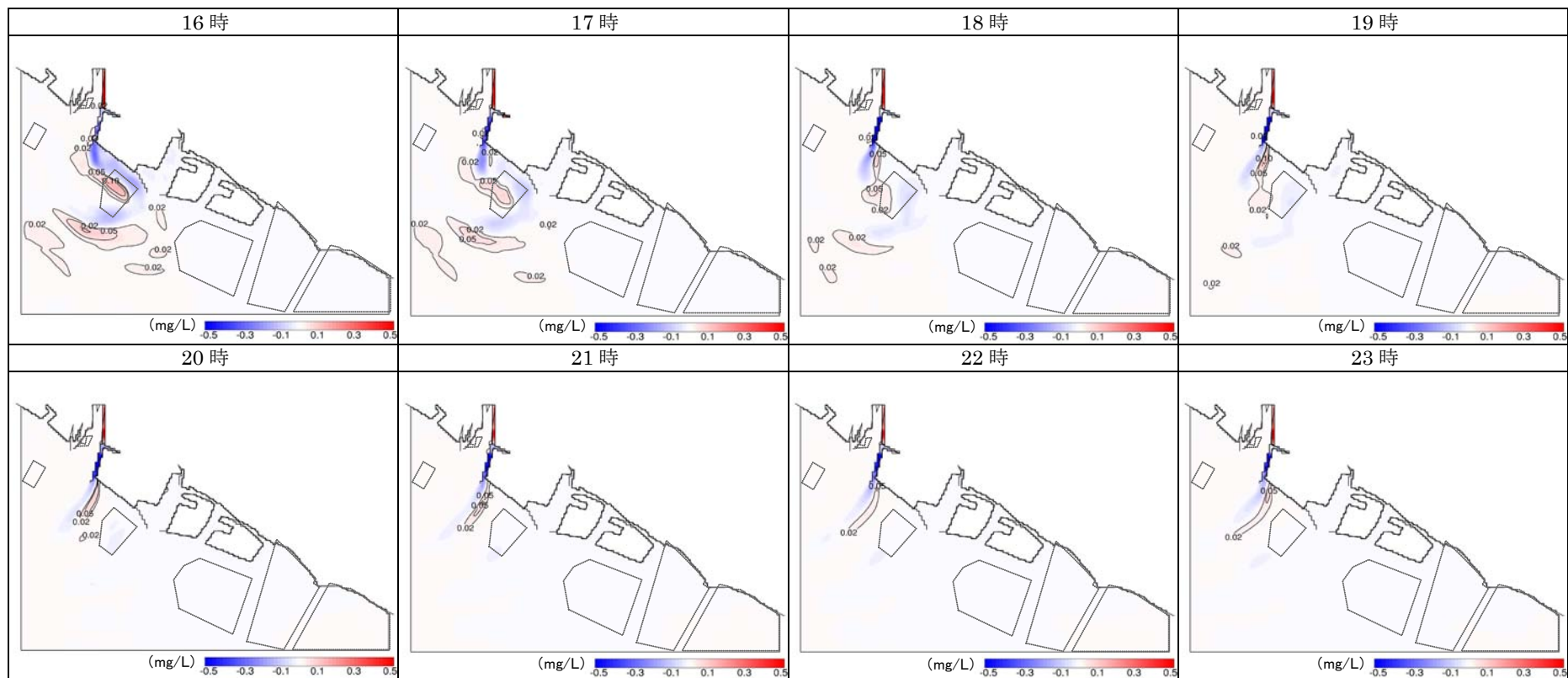


図 3.2-15 (3) 窒素排出量増加運転と導水対策を同時に実施した場合の全窒素の影響（毎時結果は差値）[平成 18 年 2 月 15 日]

### 3.3 対策効果と有効性の検証

#### 3.3.1 対策効果と有効性の考え方

本業務においては「播磨灘北東部地域ヘルシープラン」の策定のために、科学的なデータに基づき対策の効果を示している。「播磨灘北東部地域ヘルシープラン」では対象地域である播磨灘北東部海域で生じている二つの問題（① 港湾奥部の滞留域における DIN 濃度の高止まり、夏季の底層の貧酸素化、② 沿岸～沖合域での DIN 濃度の低下）にターゲットを絞り、それらの問題の解決に資すると考えられる対策案を提示しているが、対策の実施により実際に問題の軽減や解消に効果があったかどうかの判断（評価）については「播磨灘北東部地域ヘルシープラン」を利用する主体（主に地方自治体を想定）が行うことになる。また、そのための判断基準についても対策の実施主体が濃度等の値を設定することを想定しているため、「播磨灘北東部地域ヘルシープラン」では目標の設定の考え方や留意点等を提示するが、本業務で実施したシミュレーションモデルによる計算結果に基づいた対策の評価を行っていない。

対策の有効性については平成 23 年度に実施した民間事業場に対してのヒアリング結果等を踏まえて検討しており、対策の実現性や対策の効果が大きいと想定された対策について、濃度分布や DIN 輸送量の算出等の科学的な検証に基づいて、期待している効果に対して対策の実施が有効であるか客観的に示した。

#### 3.3.2 シミュレーションによる対策効果の検証

##### （1）沿岸域における窒素濃度の増加状況

播磨灘北東部地域ヘルシープランの行動計画でリストアップした対策のうち、シミュレーションモデルを使って流動計算、水質計算を実施した対策（加古川下流浄化センターの窒素排出量増加運転、河川を利用した海水交換の促進対策、海水交換防波堤（遊水室型）の設置、対策の組み合わせ）について、海域における窒素濃度の変動の詳細な解析を実施した。対策ケースと現況ケースについて、計算期間中の DIN 濃度の平均値、最大値の分布状況を図 3.3-1～図 3.3-3 に示し、図 3.3-1 中に示す 1 地点（地点①：ノリ区画の中央付近）における DIN の経時変動を図 3.3-4～図 3.3-6 に示した。

平均値の図からは対策実施による DIN の平均的な濃度上昇の程度が対策毎に比較でき、最大値の図からは対策効果の影響が瞬間的であっても達することができる空間的な範囲を知ることが可能である。

- ・ 加古川下流浄化センターの窒素排出量増加運転

平均値・最大値ともに泊川河口沖水路内で濃度が高い結果となっているが、沿岸～沖合域においても濃度上昇が確認できた。加古川下流浄化センターの排水は硝酸・亜硝酸性窒素の割合が大きいため、硝酸・亜硝酸性窒素の増加範囲や濃度上昇幅がアンモニア性窒素のそれを上回っていた。

- ・ 河川を利用した海水交換の促進対策（導水対策）

この対策は水路内外の海水交換の促進により元々存在していた窒素を有効利用するものであるため、沿岸域における窒素の増加量の平均値は全ての対策ケースの中で最も小さ