

資料 - 8 汚濁防止膜を考慮した数値シミュレーションについて

汚濁防止膜を地形条件として考慮した数値シミュレーションの参考に資するため、新門司港土砂処分場近傍の浚渫に伴う濁りの拡散シミュレーションを行った。この工事に伴う汚濁防止膜周辺での流れと濁りの現地調査が実施されており、これを再現目標として、汚濁防止膜を考慮した数値シミュレーション手法について検討した。

8-1 新門司沖土砂処分場工事

本シミュレーションの計算対象とする工事は、新門司沖土砂処分場工事のうちの処分場北側における浚渫工事(20m³グラブ)であり、現況水深-6m~-7mを-8mまで掘り下げるものである。工事位置周辺海域と浚渫位置及び汚濁防止膜展張範囲を図 8-1 に示す。

また、汚濁防止膜及び汚濁防止枠の鉛直方向の長さの対象海域の代表的な水深、調査時の潮位差との関係を模式的に図 8-2 に示す。

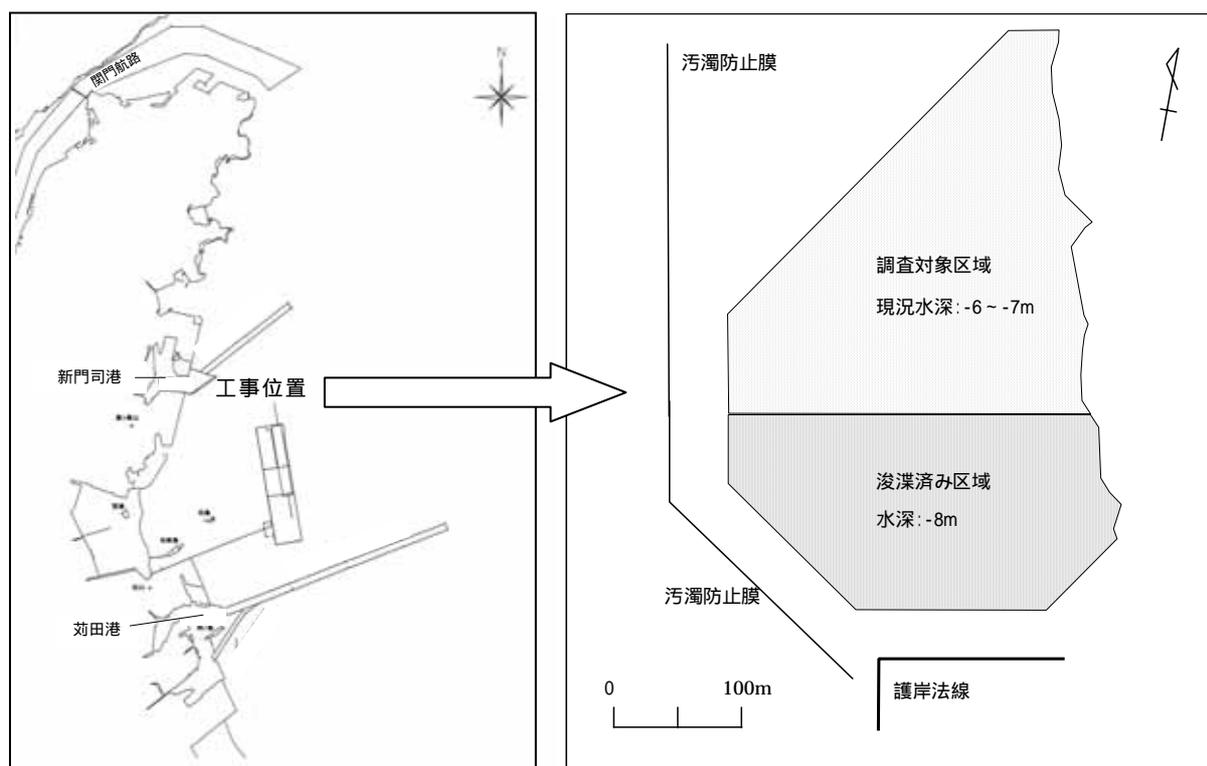


図 8-1 浚渫位置及び汚濁防止膜展張位置

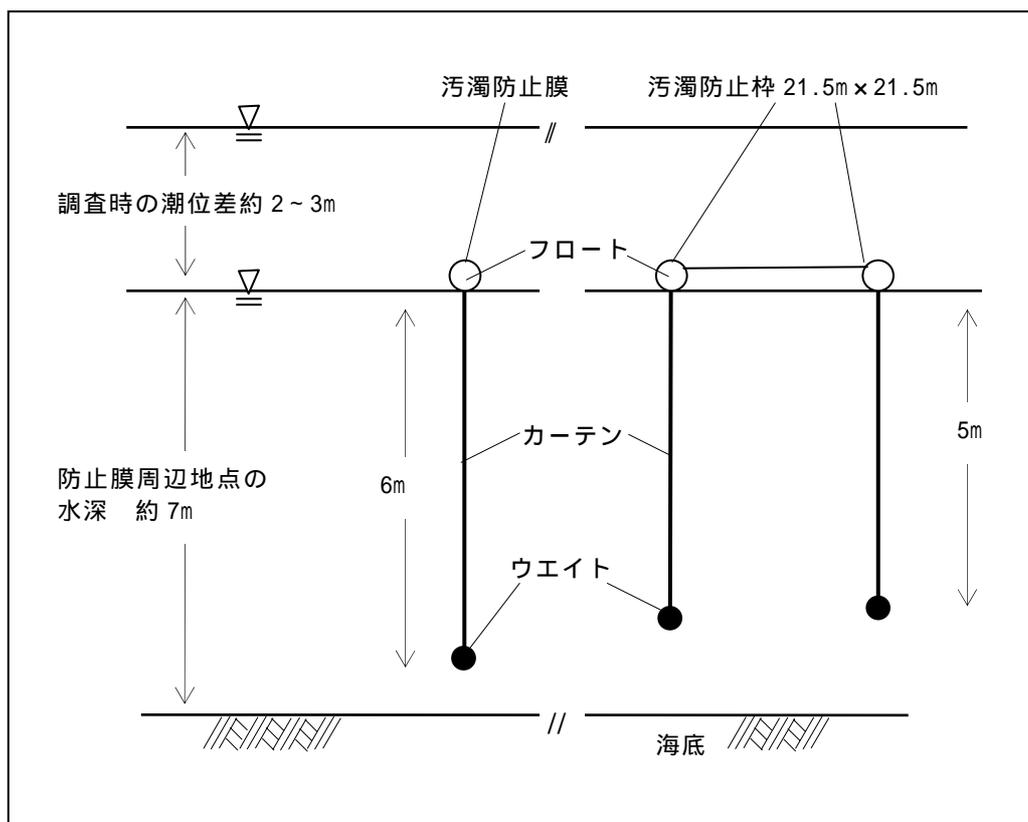


図 8-2 汚濁防止膜及び汚濁防止枠の鉛直方向の長さとお対象海域の代表的な水深、調査時の潮位差との関係

8-2 汚濁防止膜を地形条件として表現した数値シミュレーション

(1) 計算に用いるモデル

1) 流動モデル

汚濁防止膜の展張状態を地形条件として考慮するため、鉛直方向に多層に区分したレベルモデルを用いた。冬季の現地調査結果を再現対象とし、大潮期の潮流振幅が 50cm/s 程度と比較的流速が大きい海域であることから、水温と塩分は考慮しない密度一様なモデルを用いた。以下に基本方程式を示す。

< 連続の式 >

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (8-2.1)$$

< 運動方程式 >

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_x \dots\dots\dots (8-2.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_y \dots\dots\dots (8-2.3)$$

$$\rho g = -\frac{\partial p}{\partial z} \dots\dots\dots (8-2.4)$$

右辺の F は平均的な流れと別に短時間の流れの強弱、方向の変化によって海水が混合され、運動が一様化される効果（水平拡散項）で、以下の式で表される。

$$F_x = \frac{\partial}{\partial x} \left[A_M \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[A_M \frac{\partial u}{\partial y} \right] \dots\dots\dots (8-2.5)$$

$$F_y = \frac{\partial}{\partial y} \left[A_M \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[A_M \frac{\partial v}{\partial x} \right] \dots\dots\dots (8-2.6)$$

ここで、

- | | | | |
|-----------|---------------|-----------|---------------------|
| x, y, z | : 直交座標系、上向きを正 | u, v, w | : x, y, z 方向の流速成分 |
| P | : 圧力 | f | : コリオリ係数 |
| ρ_0 | : 代表密度 | ρ | : 密度 |
| K_M | : 鉛直渦動粘性係数 | K_H | : 鉛直渦動拡散係数 |
| A_M | : 水平渦動粘性係数 | A_H | : 水平渦動拡散係数 |
| G | : 重力加速度 | t | : 時間 |

汚濁防止膜を数値シミュレーションで考慮する方法は、「資料-7 汚濁防止膜を地形条件として表現した数値シミュレーション手法」に示したとおり、線境界として考慮することを基本とする（図 7-1）。図にあるように汚濁防止膜が水深の一部分のみ遮蔽している場合には、開いている部分に対応する層で海水通過率として考慮する。その際、通過部での抵抗による流速減を考慮することは重要である。この抵抗を考慮せず、連続の式を通して海水通過率のみ考慮する場合、通過率（開口水深/全水深）に比べて、計算上の通過流量は遮蔽が全くない場合の通過流量に近い値になる傾向がある。つまり通過流量を過大評価する傾向、逆にいうと汚濁防止膜の効果を過小評価する傾向がある。そこで「資料-7 汚濁防止膜を地形条件として表現した数値シミュレーション手法」に示すような開口部における抵抗を導入している。

一方、汚濁防止膜が全水深を遮蔽している場合は、図 7-1 に示すような線境界として汚濁防止膜を表現すると、通過流量はゼロとなり、したがって SS フラックスもゼロとなる。実際には潮汐の影響もあり、干潮時には全水深を遮蔽している場合でも満潮時には開口部が生じる場合がある。また、汚濁防止膜のようにフレキシブルなものは、流水抵抗によってふかれ(傾き)が生じ、これによって開口部が生じることもある。開口部が生じる場合に、汚濁防止膜を「硬い」線境界として通過流量(SS フラックス)ゼロと表現するのは、今度は汚濁防止膜の効果を過大評価することになる。

2) SS 拡散モデル

濁り拡散モデルは、流れの多層レベルモデルに対応した移流拡散モデルで、SS の沈降を考慮したものとする。以下に基本方程式を示す。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(S_n \cdot D_n) = & -\frac{\partial}{\partial x}(u_n \cdot S_n \cdot D_n) - \frac{\partial}{\partial y}(v_n \cdot S_n \cdot D_n) \dots\dots\dots : \text{移流項} \\ & + \frac{\partial}{\partial x}\left(A_H \cdot D_n \frac{\partial}{\partial x} S_n\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(A_H \cdot D_n \frac{\partial}{\partial y} S_n\right) \dots\dots\dots : \text{水平拡散項} \\ & + \frac{K_z}{(D_{n-1} + D_n)/2} (S_{n-1} - S_n) - \frac{K_z}{(D_n + D_{n+1})/2} (S_n - S_{n+1}) : \text{鉛直拡散項} \\ & - S_{n-1,n} \cdot (W_{n-1,n} - W_s) + S_{n,n+1} \cdot (W_{n,n+1} - W_s) \dots\dots : \text{鉛直移流項} \\ & + Sa_n \dots\dots\dots : \text{SS 負荷} \end{aligned}$$

ここで、

S_n	: 第 n 層の SS 濃度	A_H	: 水平渦動拡散係数
D_n	: 第 n 層の層厚	K_z	: 鉛直渦動拡散係数
u_n	: 第 n 層の x 方向流速	W_s	: 沈降速度
v_n	: 第 n 層の y 方向流速	Sa_n	: 第 n 層の SS 負荷量
$W_{n-1,n}$: 第 $n-1$ 層と第 n 層間の鉛直流速		
$S_{n-1,n}$: $W_{n-1,n} > 0$ なら $S_{n-1,n} = S_n$ $W_{n-1,n} < 0$ なら $S_{n-1,n} = S_{n-1}$		

SS 拡散計算で汚濁防止膜を考慮する場合、以下の点に留意点した。汚濁防止膜が流れに及ぼす影響は流動計算結果に反映されているため、その流動計算結果をそのまま用いることで汚濁防止膜の効果は SS 拡散計算に反映される。ただし、拡散項において汚濁防止膜による遮蔽の効果を考慮する必要がある。汚濁防止膜により海水通過が完全に遮蔽されている層では、拡散のフラックスもゼロ

口とする。膜により海水通過断面が一部遮蔽されている層では、遮蔽がない場合の拡散フラックスに開口率を乗じる。汚濁防止膜の潮汐による上下運動やふかれによる通過率が想定される場合には、拡散フラックスの算定にこの開口率を考慮する。

(2) 流動計算条件の設定

1) 計算範囲と格子分割

計算範囲は新門司土砂処分場を中心に南北約 15km、東西約 10km の海域とする。海岸地形は、新門司港沖土砂処分場を含めて、海図 (W127, 平成 13 年 2 月刊行) により設定した。計算範囲と格子分割図を図 8-3 に示す。図に示すように計算範囲は大領域と小領域に区分し、大領域の格子間隔は 150m、土砂処分場周辺の小領域は 50m 格子間隔とする。

2) 水深の設定

水深は全体的には海上保安庁刊行のデジタル水深データ J-bird を用いた。土砂処分場北側の一部海域では、事務所により実施された平成 10、14、15 年の水深測量成果 (合計約 5 万点の測量) を考慮した。新門司港の水深設定では海図 (W1238, 平成 12 年 9 月刊行)、苅田港の水深設定では海図 (W129, 平成 12 年 10 月刊行) を考慮した。

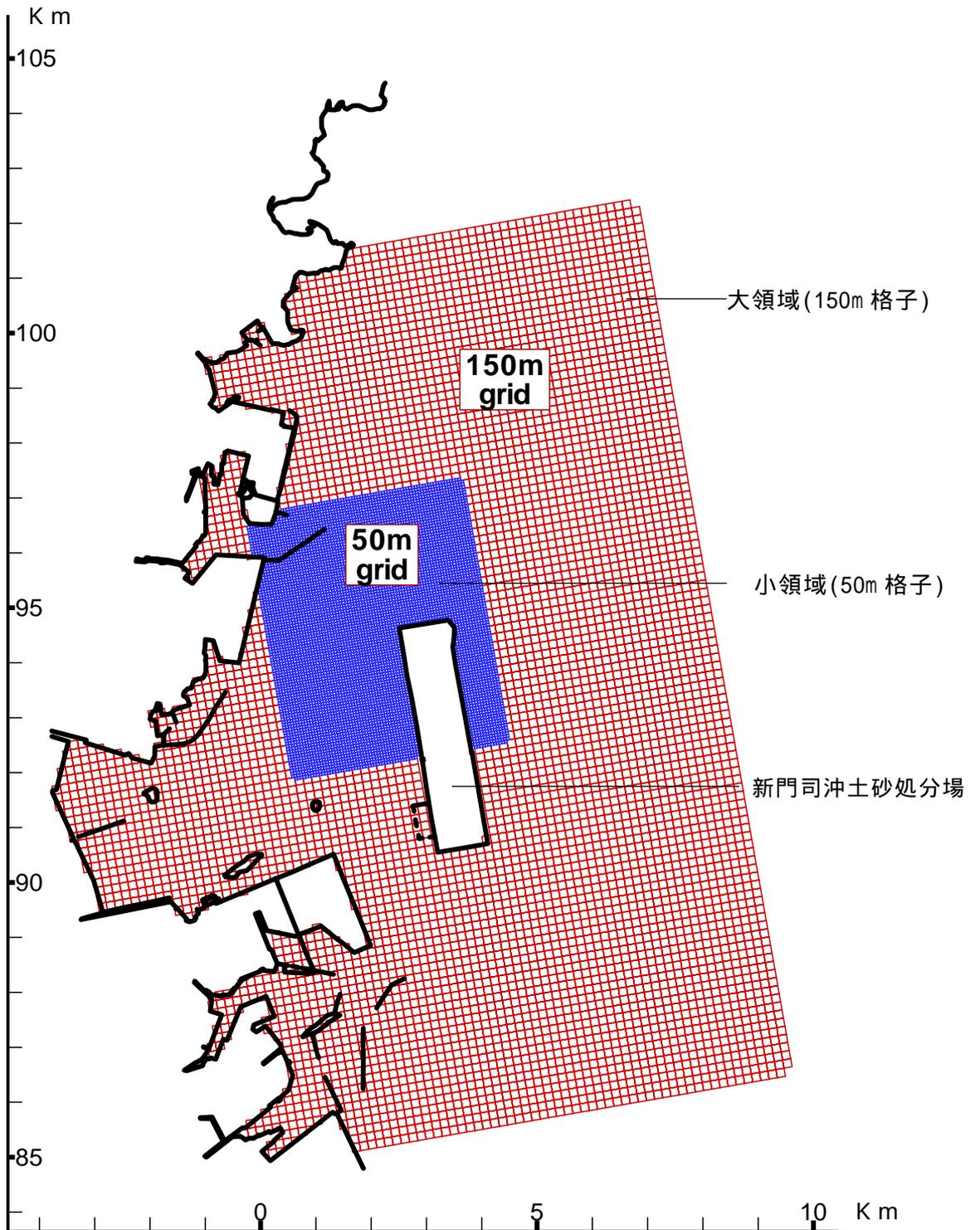


図 8-3 計算範囲と格子間隔

3) 諸係数等

海上保安庁発行の「日本沿岸潮汐調和定数表」平成4年2月刊行によると、
 苅田港の主要潮汐は M2、S2 分潮のいわゆる半日周潮が卓越している。したがって
 流動シミュレーションで用いる境界条件は、半日周潮を与えることを基本とし、
 実際に用いる振幅や遅角は現地調査時の潮汐条件を考慮して設定する。

流動計算の主な計算条件を表 8-1 に示す。

表 8-1 流動計算の主な計算条件

設定項目	設定値(案)	備考
格子分割	大領域、格子間隔 150m、 x 方向分割数 85 y 方向分割数 110 小領域、格子間隔 50m、 x 方向分割数 82 y 方向分割数 100	図 8-3 参照
水深	用いた資料 <ul style="list-style-type: none"> ・海上保安庁発行のデジタル水深データ J-bird ・事務所実施の平成 10、14、15 年の水深測量成果(合計約 5 万点の測量) ・新門司港海図(W1238, 平成 12 年 9 月刊行) ・苅田港海図(W129, 平成 12 年 10 月刊行) 	
外海境界条件	半日周潮を基本とし、現地調査時の潮汐条件を考慮して設定する。	
淡水流入量	考慮せず ^{注1}	
渦動粘性係数	$10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ とした。	
海底摩擦係数	0.0026 とした。	
コリオリ係数	緯度 33.85 度として、 $f = 8.1 \times 10^{-5}/\text{s}$ とする。	
タイムステップ	計算安定性を考慮して $T = 3$ 秒とする。	
積分時間	潮汐の周期的定常状態を確保するため、6 潮汐(72 時間)計算し、最終の 6 潮汐目を拡散計算で繰り返し用いた。	

^{注1} 工事中の濁りと直接関係せず、潮流に大きな影響を与えるような大流量河川も周辺にないため、淡水流入量は考慮しない。

なお、鉛直層分割は 5 層レベルモデルとし、その深さは以下の通りとした。

	0m	平均海面
第1層	3m	
第2層	5m	
第3層	7m	
第4層	9m	
第5層		海底まで

図 8-4 5層モデルの鉛直層区分

今回の現地実験時に用いられた汚濁防止膜は、鉛直長さ 6m の垂下式であり、したがって第 1 層と第 2 層では水の通過はないものとし、第 3 層の開口率は 50% とした。第 4 層以深はその層が存在する場合は 100% の開口率とした。現地海域は干満差 2m 程度の潮位変動があり、防止膜下端と海底の間は潮時に応じて距離を変化させているが、ここではそうしたことは考慮せず、一定の間隔とした。なお、防止膜が設置された格子で流速の計算を行うとき、第 3 層以深において抵抗による流速減衰を考慮した。また、今回工事は鉛直長さ 5m の汚濁防止枠を設置して実施されており、負荷の発生源モデルにおいて、第 1, 2 層からの負荷の発生はないものとし、第 3 層以深で鉛直一様に発生するものとした。

(3) SS 拡散計算条件

1) 濁り発生量の算定

濁り発生量の算定は、濁り発生源単位等に従って行う。使用船舶、日浚渫量などは現地調査時の諸元を用いる。再浮上限界粒径に係る流速も現地調査時の流速平均値を基本とする。

現地調査時の施工状況

浚渫船バケツ容量：20m³

1月27日：浚渫土量 4,800m³、施工時間 7:10～18:00

1月28日：浚渫土量 5,100m³、施工時間 7:00～18:10

なお、27日の前日26日にも4,800m³の施工が実施されている。

濁り発生量は、次式で算定する。

$$W = W_0 \times R_0 / R_{74} \times Q$$

ここで、 W ：濁り発生量(t)

W_0 ：発生原単位(t/m³)

R_0 ：現地流速を再浮遊限界粒径とする粒径の加積百分率(%)

R_{74} ：発生原単位測定時の対象土砂の粒径 74 ミクロンに相当する粒径加積百分率(%)

Q ：施工時の取り扱い土砂量(m³)

原単位は以下を選定し、原単位およびについて、平均値を用いた。

使用船舶	形式	取り扱い土砂シルト・粘土分 (%)	発生原単位(t/m ³)
グラブ浚渫船	18 m ³	96.6	17.25 × 10 ⁻³
		84.8	18.40 × 10 ⁻³
平均		90.7	17.83 × 10 ⁻³

現地流速は現地調査結果から平均流速 10cm/sとする。この場合、camp式から再浮上限界粒径は 0.2mmとなり、現地粒径加積曲線を考慮し、 R_0 は 100%とする。 $Q=5000$ m³とし、濁り発生量は 98.3t/日となる。

2) 諸係数

SS 拡散計算の主な計算条件を表 8-2 に示す。

表 8-2 SS 拡散計算の主な計算条件

設定項目	設定値(案)
拡散計算に用いる流れ	流動計算結果
境界濃度	工事によるインパクト分を計算対象とし、境界で流れが流入時には濃度ゼロとする。流出時は上流移流条件 ^{注1)} 。
初期濃度	ゼロとする。
渦動拡散係数	10 ⁵ cm ² / sとした。
沈降速度	取扱い土砂の粒径加積曲線からシルト・粘土分が支配的であり、沈降速度は 0.3m/日と小さい値を設定した。
負荷発生パターン	現地調査時の施工パターンに合わせ、午前 7:00 から午後 18:00 までの間に 98.3t の負荷が発生するものとした。負荷が発生している時間帯は連続発生とした。
タイムステップ	計算安定性を考慮して $T = 60$ 秒とする。
積分時間	現地調査時間帯を対象とする 3 日間。

注1) 上流移流条件は $\frac{\partial S}{\partial t} = -U \frac{\partial S}{\partial x}$ に従って、流下側の境界濃度を定める方法である。ただし、

この境界条件の設定方法は、結果にほとんど影響しないと考えられる。計算範囲はSS拡散の影響がほとんど及ばないほど十分に広くとってある。

8-3 除去率を用いた数値シミュレーション方法

汚濁防止膜による効果を除去率を用いて表現した数値シミュレーションを行った。流れは汚濁防止膜なしの条件で計算した。その他の計算条件、諸係数は「8-2 汚濁防止膜を地形条件として表現した数値シミュレーション」と同様とした。

なお、汚濁防止膜による濁りの除去率は50%とした。

8-4 解析結果

1) 潮流計算結果

潮流および濁度の連続観測が実施された地点の潮流ベクトル経時変化を整理した結果、現地観測値にみられる上げ潮時に西方（岸側）に向かって流れ、下げ潮時に北東方向へ流れる流速変化パターンが再現された。

汚濁防止膜がない場合の計算結果に比べて汚濁防止膜がある場合の計算結果は、上げ潮時と下げ潮時の流向が正反対でない傾向がみられ、このような非対称性は観測値の経時変化の中にもみられる。

2) SS 計算結果の比較

現地調査結果、汚濁防止膜を地形条件として表現したシミュレーション結果、除去率法を用いたシミュレーション結果それぞれの SS の時間平均濃度を求めた。なお、時間平均には観測値が得られている時間帯に相当する時刻の計算結果を用いている。その比較結果を図 8-5 に示す。

これらの結果のうち現況データはバックグラウンド値に工事による負荷が加わった値であるのに対し、汚濁防止膜を地形条件として表現したシミュレーション結果(汚濁防止膜がある場合)、除去率法を用いたシミュレーション結果(汚濁防止膜がない場合)の両者は工事負荷のみの濁りである。よって、これらのシミュレーション結果にバックグラウンド値を加える必要がある。バックグラウンド値としては、工事開始間もない両調査日の7時の上層、下層の SS の平均値(5.8mg/L)とする。



< 観測結果 >

工事箇所近傍における汚濁防止膜内外の値は内 11.6mg/L、外 6.3mg/L であった。

< 汚濁防止膜を地形条件として表現した方法 >

工事箇所近傍における汚濁防止膜内外の値は、内 10.9mg/L、外 7.5mg/L である。バックグラウンド(5.8mg/L)を加味すると内 16.7mg/L、外 13.3mg/L であり、観測結果と比較して高めの値であった。

< 除去率(50%)を用いた方法 >

汚濁防止膜内側にあたる値は、その計算特性から観測値との比較が単純にはできないものの、工事箇所近傍における汚濁防止膜内外にあたる値は内 4.4mg/L、外 2.2mg/L である。バックグラウンドを加味すると内 10.2mg/L、外 8.0mg/L となり、現況比較して同程度の値が得られた。

以上のように、本検討においては、汚濁防止膜を地形条件として表現した方法についてはやや高めの値が得られ、また、除去率 50%を用いる方法による予測結果は観測値と同程度の値となった。

なお、これらのシミュレーションを行う際の拡散係数等の諸係数設定については、それらにより結果が変わることも考えられることから、対象とする海域や土砂性状等をふまえ、十分に検討を行った後に計算を実施する必要がある。

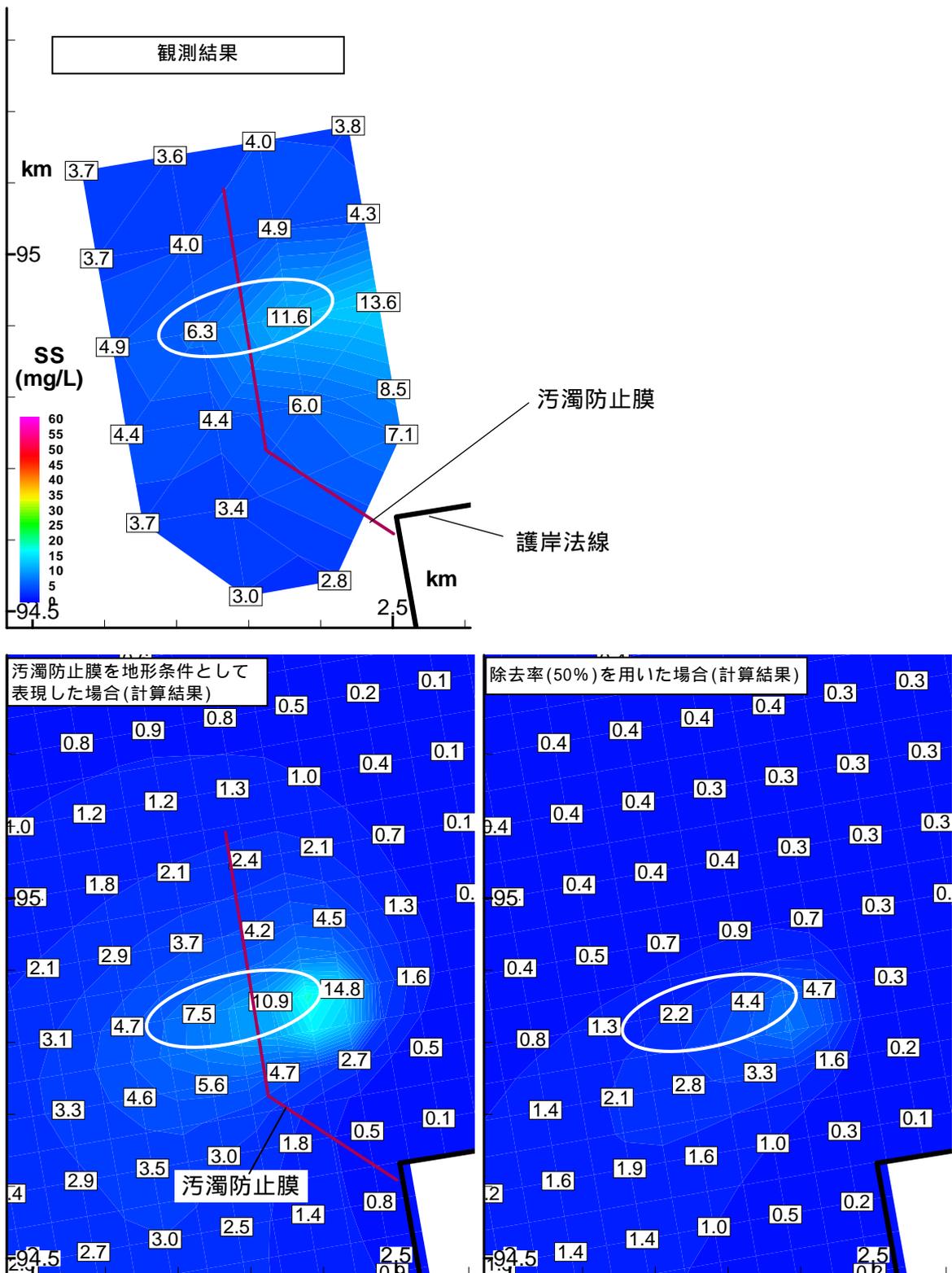


図 8-5 鉛直的・時間的平均濃度による比較

