

# 衛星データによる濁りの平面分布を活用した 濁り拡散解析の検討

高山 百合子\*<sup>1</sup>・大野 剛\*<sup>1</sup>・織田 幸伸\*<sup>1</sup>

Keywords : turbidity diffusion prediction, satellite data, visible band, sedimentation, reclamation work

濁り拡散予測, 衛星データ, 可視域バンド, 沈降, 埋め立て工事

## 1. はじめに

埋立てや浚渫等の濁りが発生する海洋工事においては、その濁りを監視し生態系や海洋環境に与える影響を把握する必要がある。一般的に濁りの監視は限られた監視点において実施されており、濁度や SS（浮遊物質量）を計測し、基準を超過した場合には原因調査や対策を講じている。そのため、翌日の濁り拡散を予測し、基準値を超えないことを確認した上で工事を進めることが合理的である。

海洋における濁りの予測は、その拡散状況が流れの影響を大きく受けることから流動シミュレーションに基づいた数値解析手法が有効であり、工事計画に活用するための手引きや資料が整備されている<sup>1)2)</sup>。しかしながら、日々の工事に活用するようなリアルタイムの濁り拡散予測は導入が進んでいない現状がある。その一因として、拡散予測の解析初期値が不明であることが挙げられる。工事では、監視点における濁りをモニタリングしているが、実際の濁りは複数の点源からの重なりや過去の残留分によって面的に広がっているため、解析の初期値として、どのように濁りの平面分布をモニタリングするかが一つの課題である。そこで本研究では、工事に活用可能な濁り拡散予測の精度を確保するために、濁りの平面分布をリアルタイムに取得し、解析初期値に取り入れる手法の開発を目的とする。

濁りの平面分布については、衛星画像等のリモートセンシングにより捉えられた事例が多く報告されており<sup>3)4)</sup>、衛星データと濁度やクロロフィル a 等、水質との関係を定式化し推定する手法について様々提案されてきた<sup>5)6)</sup>。また、衛星データの撮影頻度が高ければ水

質の移流や拡散を捉えることが可能なことから、日ごとの衛星データと比較することにより流動や水質解析の検証を行った事例が報告されている<sup>7)</sup>。このように衛星データは水質モニタリングへの有用性が高いため、データの即時性向上が期待されている。他方、衛星データアルゴリズム研究を応用し、デジタルカメラの画像から水質のモニタリングを試みる事例も見られ始めていることを鑑みると<sup>8)</sup>、海上における画像を日々取得し、そこからリアルタイムの水質情報を得ることは実現性が高いと言える。

今回は、濁りの平面分布を捉えている画像として衛星データを活用し、濁り分布を計算の初期値とした拡散計算を実施した。本報では、工事では翌日～翌々日の濁り拡散予測が必要となることから、1, 2 日後の計算結果を対象に、衛星データから推定した濁り分布に対する再現性を検証し、濁りの平面分布を初期値に取り入れる拡散予測計算手法の妥当性および課題について報告する。なお工事では SS 等の基準値超過/未超過を確認するため、予測においては濁り値の精度が求められるが、ここでは第一段階として初期値に対する濁り拡散範囲の再現性について確認している。

## 2. 衛星データによる推定濁り分布の作成

### 2.1 使用した衛星データ

衛星データは NASA の地球観測衛星 (Terra/Aqua) に搭載されている中分解能撮像分光放射計 (MODIS, 光学センサー) による観測データを用いた。Terra 衛星は 1999 年 12 月に、Aqua 衛星は 2002 年に打ち上げられ、それぞれが同一地点を昼と夜一日 1～2 回観測してい

\*1 技術センター 社会基盤技術研究部 水理研究室

ることから短い周期の観測データを確認することができる。MODISは、250m～1kmの空間解像度で、36chの多波長バンド特性を持ち、雲、放射エネルギー束、エアロゾル、土地被覆、水域の濁り等の多種の観測や推定を行うことができる。また、NASA や JAXA 等により MODIS の観測データおよび高次処理された様々なプロダクトが公開されており無料で取得することができる<sup>9)</sup>。MODIS の主な波長と空間解像度を表-1 に示す。

## 2.2 衛星データを用いた推定濁度分布図の作成

本報では、大阪湾における 2013 年の台風 18 号による濁水流出による濁り分布を対象とした。そのため、濁水の拡散状況を捉えた5日間（2013/9/17～9/21、時刻は各日とも 13:30）を選定し、MODIS 観測データのうち、可視域バンド 1, 3, 4, 空間解像度 500m のデータ（大気補正済みの地表面反射率）を取得した。

大串ら<sup>9)</sup>により提案された透明度指標のアルゴリズムを参考に取得した地表面反射率を推定濁度に換算した。透明度は可視域バンドと相関が高く、長期観測データの解析による式(1)が得られている。ここでは式(1)により透明度 $C$ を求め、透明度は濁りと反比例することから式(2)を用いて 0～100 に正規化した濁度 $T$ を算出した。なお、この数値と濁度の関係は別途キャリブレーションにより設定する必要がある。

$$C = (1.8041 + 0.1472b_3 - 0.2652b_4 + 0.1076b_1)^2 \quad (1)$$

$$T = 100 - (C - Cmin)/(Cmax - Cmin) \times 100 \quad (2)$$

ここで、 $C$  は透明度[m]、 $b_1, b_3, b_4$  は各バンドの大気補正済地表面反射率、 $T$  は正規化された推定濁度である。 $Cmax$  と  $Cmin$  は、5 日間のうちで濁度が最も高いと考えられる 9 月 17 日における  $C$  の最大値、最小値である。

## 3. 濁りの拡散解析

### 3.1 流動モデルおよび拡散計算方法

流動モデルは、ナビエ・ストークスの運動方程式と質量保存則による連続の式を基礎式とする 3 次元流動解析モデル (Delft3D-flow)<sup>9)</sup> であり、濁り拡散は、流動計算と同時に沈降を考慮しない保存物質の移流拡散方程式を解いている (例えば国交省港湾局<sup>1)</sup>)。水平座標系は直交座標系、鉛直方向は海底地底に沿うように定義される  $\sigma$  座標系である。本流動モデルでは、 $\sigma$  座標系における水平地形の急変場において発生する過大な数値拡散を抑制するために、 $\sigma$  座標面に添った拡散

表-1 MODIS の波長と空間解像度

Table 1 Wavelength and spatial resolution of MODIS sensor

バンド数	波長	空間解像度
band1 赤	620-670 nm	250m
band2 近赤外	841-876 nm	
band3 青	459-479 nm	500m
band4 緑	545-565 nm	
band5	1,230-1,250 nm	
band6 中間赤外	1,628-1,652 nm	
band7 中間赤外	2,105-2,155 nm	

表-2 主な計算条件

Table 2 Numerical simulation conditions

計算領域	60 km×60 km
水平座標系	直交座標
鉛直座標系 (分割数)	$\sigma$ 座標 (5 層)
計算格子幅	270 m
水平拡散係数	10 m <sup>2</sup> /s
鉛直拡散係数	乱流モデル(k- $\epsilon$ モデル)により計算
再現期間	2013 年 9 月 17 日 13:30 ～9 月 21 日 13:30
境界条件	潮汐 (6 分潮)
	水温・塩分: 24°C, 32psu
	風向・風速 (北北東・1 m/s)
河川流入	主要 6 河川の流量 (図-1, 2) 濁度 100

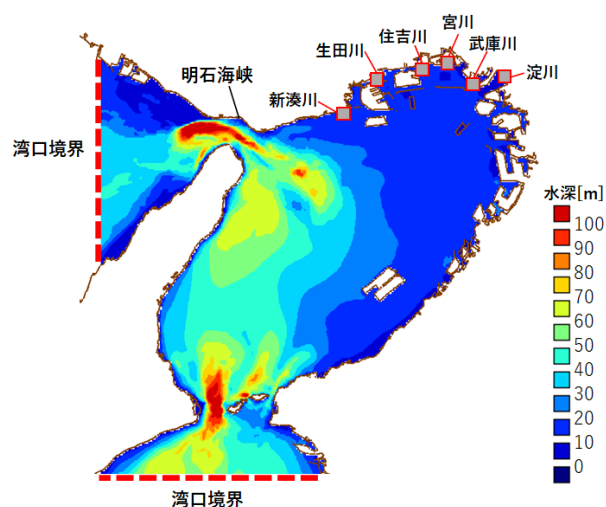


図-1 計算領域と海底地形

Fig.1 Computational domain and bathymetry

勾配を水平面に補正している。主な計算条件を表-2 に示す。MODIS データの空間解像度は 500m であるため、解析の水平格子間隔は 270m とした。図-1 に計算領域と海底地形を示す。

### 3.2 濁り拡散に関する計算条件

台風時の河川出水に伴う海の濁りは、降雨による河川流出により運ばれた土砂が汚濁源となる。台風 18 号通過時における降水量（大阪）と河川流量（淀川：枚方観測所）を図-2 に示す。図-2 より、降雨は 9/15 から 36 時間程度継続して 9/16 の 9 時頃に終了していることが分かる。淀川の流量は、9/15 の 20 時までデータが欠測していたため 9/15 の 21 時以降を見ると急激に増大しており、9/16 の 14 時にピークとなり、その後、9/17 の 18 時にかけて急激に減少し、平常時の流量となった。

河川から流入する濁度の初期条件および境界条件を表-3 に示す。流量と濁度を与えた位置は図-1 に示した主要 6 河川である。濁度については、沈降や巻き上げを考慮していない保存物質の移流拡散として計算した。流量は、淀川については図-2 の通り与え、その他の河川は過去の河川流量比<sup>1)</sup>に応じて係数を乗じた流量を与えた。係数は淀川を 1 とし、武庫川 0.03、住吉川と新湊川 0.003、宮川と生田川は 0.02 であり淀川に比べると非常に少ない流量である。河川から流入する濁度は、2.2 節の方法による濁度  $T$  の最大値 100 とし設定し、主要 6 河川の河口部に鉛直全層から流入させた。濁度分布の初期値は 2.2 節の方法により作成した濁度  $T$  の平面分布であり、9/17 13:30 の濁度  $T$  を表層から 4 層目まで一様に与え、最下層（5 層目）は 0 とした。図-1 に示す湾口境界の濁度は、計算の初期値とした 9/17 13:30 における境界付近の平均的な値として 80 と設定した。

### 3.3 計算ケース

計算ケースは、表-2 および表-3 に示した計算条件をケース 1 とし、濁りの平面分布に影響を与える条件について比較検討する目的で表-4 に示すケースを実施した。河川流入に関して、ケース 2 は濁度をケース 1 の 2 倍とし、ケース 3 は表層からの流入とした。ケース 4 は淀川の流量をケース 1 の 1/2 とした。またケース 5 は、初期値として与える濁度の鉛直分布を全層としたケースである。ケース 6 は、ケース 5 を基に大阪湾の流況に変化を与えたケースとするため、明石海峡側の湾口部を流速境界として流速を 2 倍程度増大させることにより流れを大きくした。

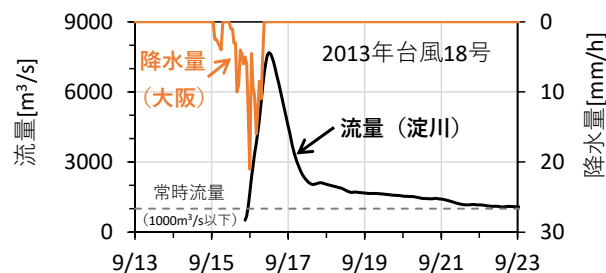


図-2 2013 年台風 18 号における降水量と河川流量  
Fig.2 Rainfall and river discharge in Typhoon Man-yi, 2013

表-3 濁度の初期条件および境界条件  
Table 3 Initial and boundary conditions of turbidity

初期値	平面分布	9/17 13:30 の濁度分布
	鉛直分布	表層から 4 層目まで一様
境界条件 (湾口)	濁度	大阪湾 80
河川 流入負荷	流入箇所	主要 6 河川 (図-1)
	濁度	100
	流入層	全層
	流量	図-2 のとおり (淀川)

表-4 計算ケース  
Table 4 Numerical simulation case

ケース 1	表-2, 表-3 に示した条件
ケース 2	河川の濁度：ケース 1 の 2 倍
ケース 3	河川の濁度流入層：表層
ケース 4	河川流量：ケース 1 の 1/2 倍
ケース 5	濁度初期値の鉛直分布：全層
ケース 6	湾口境界 (明石海峡側) 流況：強 濁度初期値の鉛直分布：全層

## 4. 衛星データによる濁り拡散と解析結果の比較

### 4.1 大阪湾の流動計算

流動計算結果の検証として、流速および潮汐残差流の観測資料である大阪湾の潮流図および恒流図<sup>1)</sup>と計算結果の比較を図-3 に示す。流速は、明石海峡東流最強時と西流最強時の流速および主な流向について潮流図を概ね再現していることを確認した (図-3(a), (b))。

図-3(c)は、2013 年 9 月 21 日の流動計算結果を用いて求めた潮汐残差流の流速ベクトルと流速分布 (カラーコンター) であり、その上に大阪湾の恒流<sup>1)</sup>を白太矢印で記載した。図-3(c) に示すように、計算結果では、

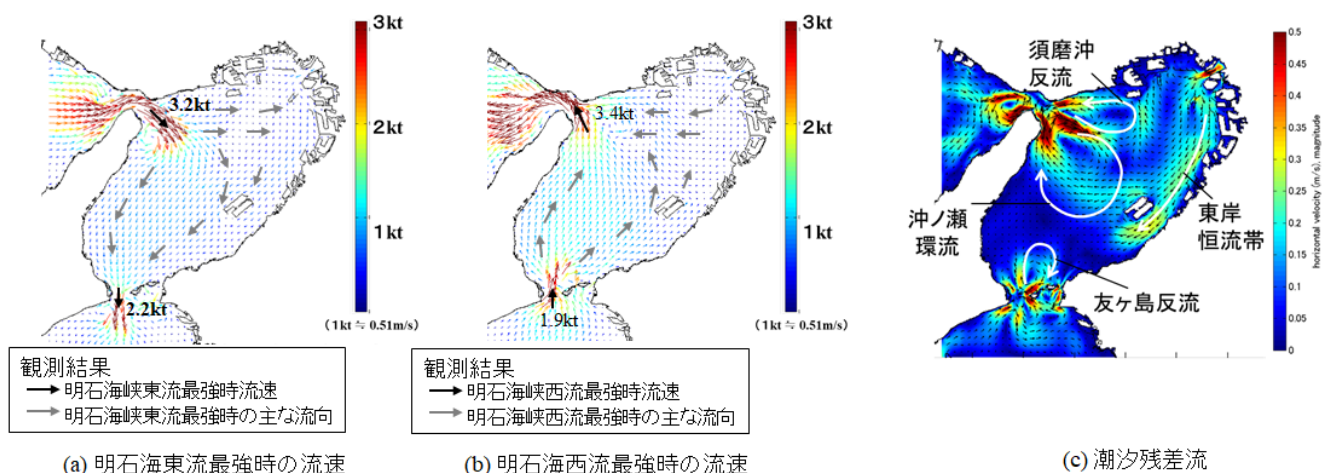


図-3 大阪湾の流況

Fig.3 Flow pattern of Osaka bay

恒流の特徴である沖ノ瀬環流，須磨沖反流，友ヶ島反流，東岸恒流帯が形成されていることから，流況パターンは概ね再現できていることを確認した。

#### 4.2 衛星データによる大阪湾の濁り拡散状況

図-4 は，2.2 節の方法を用い衛星データから作成した濁度分布である。図-4 より，9/17 から 9/21 まで淀川河口から神戸港周辺にかけて高濁度領域が確認できる。濁度 80 以上の高濁度領域（黄色から赤色の範囲）に着目すると，9/17 に淀川河口から神戸側（須磨側）にかけて形成された領域は，日が経過するにつれてその範囲が狭くなっていることが分かる。湾奥の高濁度領域のうち，湾奥東側（淀川河口から阪南港にかけた範囲）は，9/19 までは濁度が低下したが，これ以降に濁度がやや高くなり濁度 70 程度の領域が見られた。湾南西側の広い範囲では 9/18 以降は低濃度領域（濃い青色）であった。

#### 4.3 大阪湾の濁りの拡散解析

##### 4.3.1 濁りの拡散状況

図-5 は，ケース 1 における表層の濁度分布の計算結果である。図-5 では，初期値として与えた湾奥部の高濁度領域が，日の経過とともに阪南港側に拡がる様子が分かる。明石海峡付近（図-1 参照）では，西側から低濁度水が流入するため低濁度領域が形成されている。この低濁度領域を見ると（濁度  $T=70$  以下，青色の範囲），須磨付近まで及んでおり，この範囲は衛星データから作成した濁度分布（図-4）と概ね一致した。図-5 における湾奥部の高濁度領域（濁度  $T=80$  以上，黄色から赤色の範囲）を見ると，計算開始から 24 時間後の 9/18 では，計算結果の値は衛星データから作成した濁度分布図（図-4）に対してやや低いものの平面分布が

再現出来ている。しかし 9/19 以降になると，計算の高濁度領域が湾奥に拡がり始め，9/21 には阪南港付近まで拡がった。この傾向は推定濁度分布図（図-4）との大きな相違点であった。この理由として，計算開始時は濁度の鉛直勾配が大きいため鉛直混合が起こるのに対し，計算の経過とともに濁度の鉛直分布が均等となって鉛直混合が起こらなくなることで平面分布の拡がりが顕著に表れた可能性が挙げられる。実際の河川出水による海域の濁度は，河川から流れてきた土砂のうち粒径の大きい土砂は早期に沈降するために，低減する。計算において濁度成分の沈降は考慮していないが，結果的に計算初期の鉛直混合が表層の濁度を低下させる一因になったと考えられた。

次に，計算結果において翌日（9/18）は拡散範囲を概ね再現したことから，ケース 1 において初期値の採用日のみをそれぞれ 9/18, 9/19, 9/20 に変えて計算した翌日の濁度分布を図-6 に示した。図-6 では，湾奥の高濁度領域が図-5 に対して狭くなり，淀川河口から神戸側に拡がる図-4 の分布形状に近づいた。なお図-4 に対して，図-5，図-6 とともに境界付近の濁度に差異があるが，これは計算における境界濁度を一定としていることに起因する。以上のことから，濁り拡散予測計算において，濁度分布の初期値を日々更新することによって翌日の平面分布を精度良く計算できる可能性が示された。

##### 4.3.2 濁度の平面分布に影響を与える計算条件

ここでは計算条件として設定が必要となる項目を念頭に，濁度の平面分布に影響を与える条件をケーススタディにより検討する。図-7 にケーススタディの結果を示す。図-7 は，翌日（9/18），翌々日（9/19）の表層の濁度分布を示した。ケース 2, 3, 4 は，河川流入に



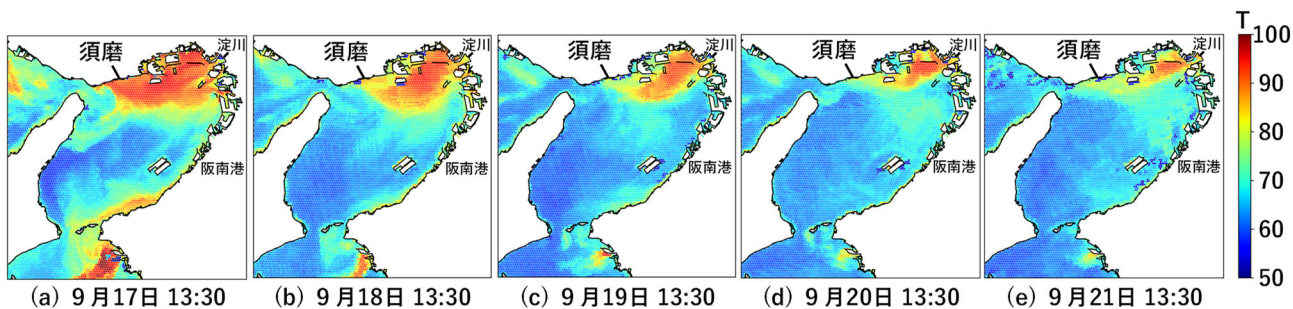


図-4 衛星データから作成した濁度分布  
Fig.4 Turbidity distribution with satellite data

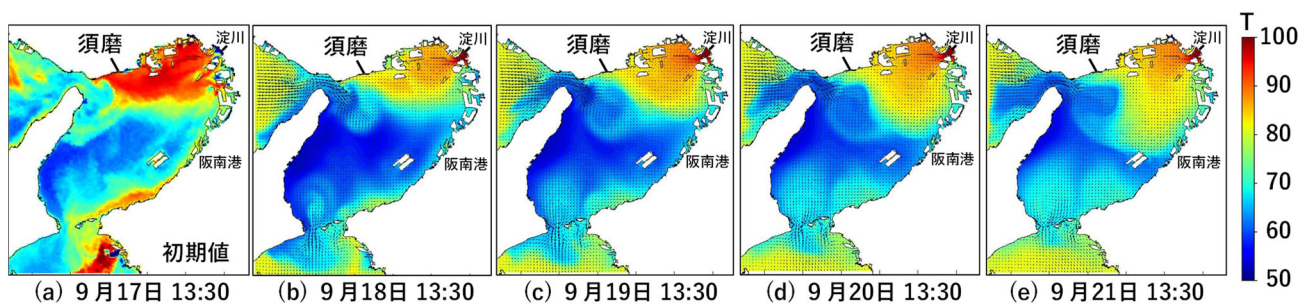


図-5 濁度分布の計算結果 (9/17を初期値とした4日間の計算結果, ケース1)  
Fig.5 Numerical simulation results of turbidity distribution (Results for 4 days, case1)

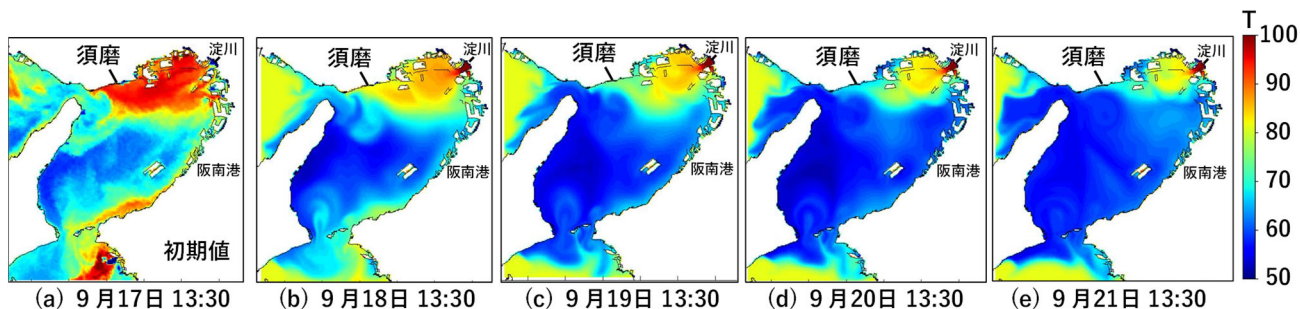


図-6 濁度分布の計算結果 (各日を初期値とした翌日の計算結果, ケース1)  
Fig.6 Numerical simulation results of turbidity distribution (Results after 1 day, case1)

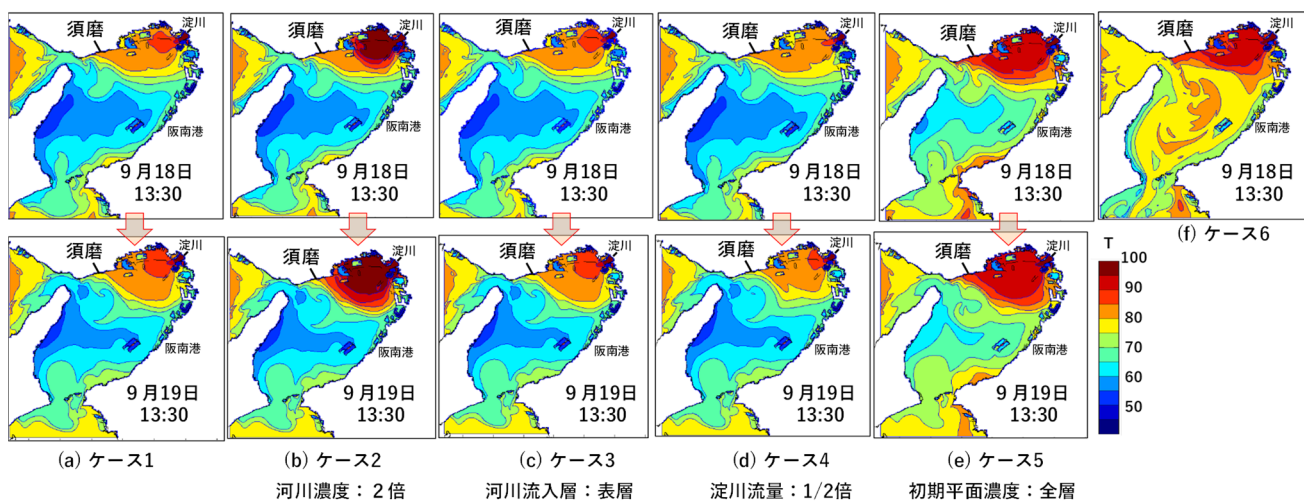


図-7 濁度分布の計算結果 (ケーススタディ)  
Fig.7 Numerical simulation results of turbidity distribution (case study)

関するパラメータであり、高濁度領域（T=80以上、黄色から赤色の範囲）に着目すると、ケース1に対して濁度の値は異なるものの、高濁度領域との差異はあまり見られていない。

ケース5は、濁度の初期値について鉛直方向に一律に与えたケースであり、表層から4層までを一律とし、最下層（5層目）には0を与えたケース1に対して僅かではあるが高濁度領域の分布が広がる結果となった。ケース5は、初期の濁度分布を全層に与えたケースであるため、翌日（9/18）において濁度の平面分布が初期値から狭まらなかったためと考えられる。

ケース6は、初期の濁度分布を全層で与え、かつ、明石海峡からの流入を強めたケースであり、計算期間は9/18 13:30までである。ケース6はケース5に対して、湾奥の高濃度領域の濁度を湾全体に取り込む様子が分かるが、湾奥の非常に高い濁度領域（85以上、赤色）に大きな差異は見られなかった。湾内の流況が強まることは拡散を促進することであるが、明石海峡からの主な流向は、湾口からやや南下して中央に向かう方向であったことから、湾奥の非常に高い濁度領域に与える程の影響はなかったと考えられる。

河川出水による濁度分布を対象として拡散予測計算を行う場合、河川の流量や濁度の値をリアルタイムで取得することは難しい。しかし、ケース2, 3, 4においてケース1に対する高濁度領域に大きな差異が見られなかったことから、既往の降雨履歴などから代表的な条件を予め設定しておき、降雨規模に合わせて条件設定を行うことで平面分布を対象とした予測は可能であると考えられる。今後、ケース5に見られたような濁度の鉛直分布の与え方や沈降の影響について検討を進め、再現性が高く実用的な計算手法を選定する必要がある。また台風や豪雨など、流出パターンが異なる濁り拡散計算の検証ケースを増やすことにより、流況の違いによる濁り拡散への影響に関する情報が蓄積できる。

## 5. まとめ

本報では、濁りの平面分布を捉えている衛星データを活用し、ここから得られる濁り分布の情報を初期濁度分布として与えた拡散計算を実施し、以下の知見を得た。

衛星データを用いて台風による大阪湾への濁水出水を対象に5日間の推定濁度分布図を作成し、湾奥の高濁度領域が日々縮小していく状況を捉えることが出来た。濁度の拡散計算では、初期値から24時間後までは高濁度分布を概ね再現できたが、それ以降は拡散が拡がり衛星データとの乖離が大きくなった。このことは、沈降成分などの濁度が低減する機構を考慮していないことに起因すると推測された。

また工事では、翌日～翌々日の拡散予測結果が必要となることから、濁度の平面分布を初期値に取り入れる拡散予測計算は、日単位で濁度の初期分布を更新し、沈降等の影響を取り入れることによって、工事に活用可能な濁り拡散予測手法になり得ることが示唆された。

今後、沈降等の濁度低減機構の実用的な取り扱いについて検討を進めるとともに、工事に求められる精度と解析の適用性について調査を継続する予定である。

## 参考文献

- 1) 国交省港湾局：港湾工事における濁り影響予測の手引き、<https://www.mlit.go.jp/kowan/nigori/index.html>, (参照 2022-07-19).
- 2) 堀江毅：海上工事に伴う濁り予測モデルと濁り監視への適用性について、港湾技研資料, Vol.26, No.2, pp.254-295, 1987.
- 3) 藤井壽生, 工藤勝輝, 岩下圭之, 西川肇, 大木正喜, Eric Kieth DEAN：印旛沼の濁度分布経時変化から判読した流動化メカニズム解析-LANDSAT TTM データによる-, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.20, No.3, pp.71-84, 2000.
- 4) 小林勇輝, 田中修三：衛星画像で見る河口流出・拡散現象, 土木学会第69回年次学術講演会講演概要集, II-152, 2014.
- 5) 大串浩一郎, Thian Yew GAN, 荒木宏之：人工衛星画像を用いた有明海の水質解析, 水工学論文集, 第46巻, pp.995-1000, 2002.
- 6) 作野裕司：衛星データによる東北関東大震災後の仙台湾周辺における濁水分布推定, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.37, No.2, I\_1071-I\_1075, 2011.
- 7) 鈴木靖, 佐藤嘉展, 道広有理, 本間基寛, Sergey M. Varlamov：流域圏統合モデルによる伊勢湾への河川水の影響評価, 京都大学防災研究所年報, 第55号 B, pp.511-517, 平成24年.
- 8) 吉田拓司, 岡本佳子, 末廣富士代, 小原和之, 吉田武司, 二瓶泰雄, 片岡智哉：デジタル画像を用いた「見た目アオコ指標」の自動判定の試み, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.74, No.4, I\_823-I\_828, 2018.
- 9) Deltres：Delft3D-FLOW User Manual, pp.672, 2018.
- 10) NASA：EARTH DATA, <https://search.earthdata.nasa.gov/search>, (参照 2022-07-19).
- 11) 国交省近畿地方整備局：大阪湾環境データベース, <http://kouwan.pa.kkr.mlit.go.jp/kankyodb>, (参照 2022-07-19).