

日々の工事管理を目的とした 流れ・濁り予測システム

FLOW AND TURBIDITY PREDICTION SYSTEM FOR DAILY CONSTRUCTION MANAGEMENT IN THE CONSTRUCTION WORKS AT SEA

稲垣 聡¹・田中昌宏²・奈良 靖³・齋藤勲雄⁴・日野 勝⁵

Satoshi INAGAKI, Masahiro TANAKA, Yasushi NARA, Isao SAITOU and Masaru HINO

¹正会員 工修 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

²正会員 工博 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

³正会員 工修 鹿島建設株式会社 関西支店 (〒550-0011 大阪市西区阿波座1-3-15)

⁴正会員 鹿島建設株式会社 関西支店 (〒550-0011 大阪市西区阿波座1-3-15)

⁵正会員 工修 リテックエンジニアリング株式会社 関西支店 (〒541-0053 大阪市中央区本町4-4-17)

The technology of predicting turbidity distribution with sufficient accuracy is necessary in the construction sites at sea since circumference environment may be affected if the turbidity flows out from the construction area. This research developed a system to predict the three-dimensional flow of the next day on the daily basis for the land reclamation site of the Osaka Bay Phoenix Project. Since the construction site is located near the mouth of the Yodo River, tidal flow, wind-induced flow and density flow are calculated at the same time. This system gains the input data especially the wind and the flow rate of river discharges every day. The system was verified by the field observation at the site. Through these preparations, this system started to distribute the prediction results in November 2002 and they are referred for the daily construction management.

Key Words : Flow Prediction , Turbidity, Numerical Simulation, Construction Works at Sea

1. はじめに

海工事などで、発生する濁りが工事海域外に流出すると周辺環境に影響を与える可能性があるため、濁りを精度良く予測し管理する技術が不可欠である。本研究では、稲垣ら¹⁾で検討した流れ・濁りの数値シミュレーションを発展させ、大阪沖埋立て処分場の工事海域での利用を念頭に、日々の工事において原則として翌日の工事海域の流れを予測し、さらに土砂投入による濁りが移動する方向・拡散する範囲を予測するシステムの構築を行った。工事海域が大阪湾奥の淀川河口に近く、潮流・風による吹送流・河川流入による密度流が同程度に寄与する複雑な現地の流れを毎日迅速に十分な精度で予測することがポイントになるため、計算に必要な入力データを随時取得し計算するシステムの構築と、現地で検証観測を行いモデル適合性の確認を行った。

このような流れ・濁りの予測は、堀江²⁾によって先駆的に提唱され、細田ら³⁾の潮流と吹送流の簡易的な重ね合わせによる取り組みがある。本研究のシステム整備は潮流・吹送流・密度流すべてを組み込んだ精密な流れ予測を短時間に行うことで、密度成

層の強い場所を含む日本近海のほぼどのような場所の工事にも適用できることを目標とした。

2. 計算モデルについて

本システムは3次元流動・濁質拡散の数値シミュレーションにより予測を行うものである。本計算システムで毎日の予測を実施するときのフローを図-1に示す。前日行った計算の最終時刻を初期条件とし、計算条件を与えて解析を行い、図化し配信するまでの流れとなる。現場海域の流れは、潮汐・風・河川流入の影響を受けて変化するので、これらを考慮した流れの予測シミュレーションを行う。このとき、大阪湾の潮流の変化が複雑であるため、最終的に工事海域周辺のみ流れを求めることが目的であっても、まず大阪湾全体の流れ計算を実施し、それに接続(ネスティング)して工事海域の周辺を詳しく解く、という手法を用いている。大阪湾全体計算の計算範囲と計算格子を図-2に、工事海域周辺の計算領域と計算格子を図-3に示す。

流れ計算条件の詳細を表-1と表-2に示す。流れの計算では、風(風向・風速)の予測データが特に重要であるが、風の予測値には、民間気象予測会社が

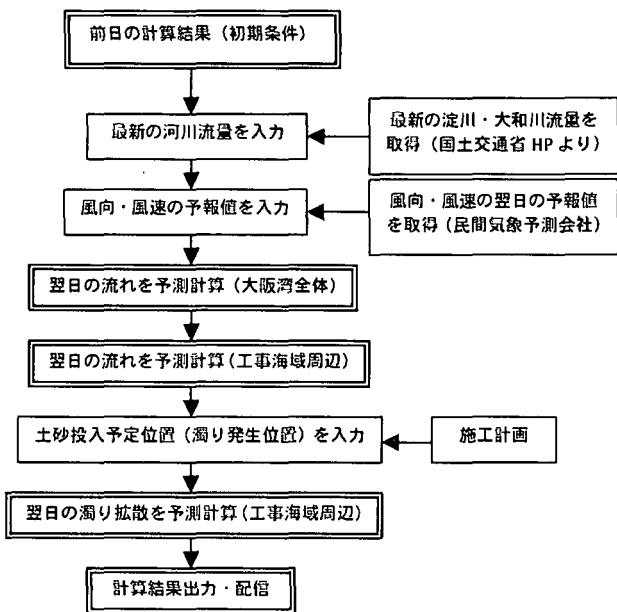


図-1 本システムを用いた日々の予測計算のフロー

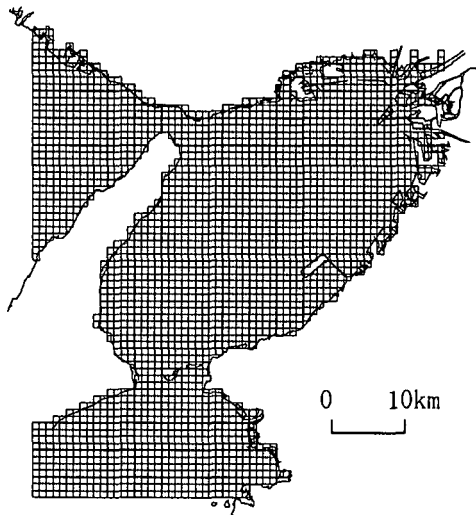


図-2 大阪湾の全体計算の計算範囲と計算格子

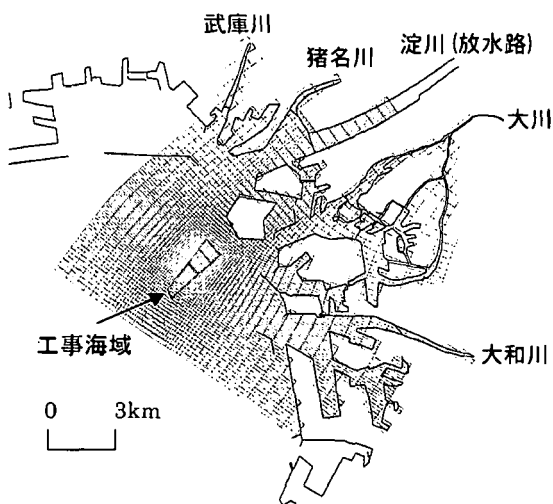


図-3 工事海域周辺計算の計算範囲・計算格子と考慮した流入河川

表-1 大阪湾全体流れ計算 計算条件

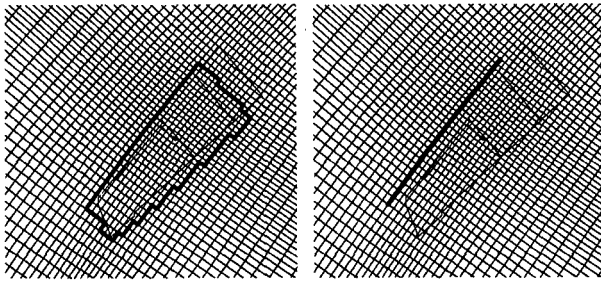
計算格子	図-2参照 (水平解像度1km)
水深	海図データより作成
鉛直方向層分割	5層 (均等分割)
潮汐条件	友ヶ島水道の南及び明石海峡の西の開境界において、12分潮 ($Q_1, O_1, P_1, K_1, M_2, N_2, S_2, K_2, Sa, Ssa, Mm, Mf$) を設定。高砂、江井、海南の値を使用。
風条件	民間気象予測会社の予測風向・風速
河川流量	淀川・枚方観測所の最新の観測水位を国土交通省のHPより入手し、水位-流量曲線を用いて流量にまず換算する。その値から下流での取水量 ($80\text{m}^3/\text{s}$) を引いた値 (Q_0 とする) を用い、以下に設定 $Q_0 \leq 124.5\text{m}^3/\text{s}$ のとき・淀川放水路からは魚道からの $4.5\text{m}^3/\text{s}$ を放流し、残り全量を大川から流す。 $Q_0 > 124.5\text{m}^3/\text{s}$ のとき・大川から $120\text{m}^3/\text{s}$ 流し、残りの量を淀川放水路から流す。 大和川・柏原観測所の水位を流量に変換 猪名川・大和川流量の半分を与える 武庫川・大和川流量の半分を与える
塩分濃度境界条件	2つの開境界で32.5一定
水平方向拡散係数	$50\text{m}^2/\text{s}$
鉛直方向拡散係数	$k-\epsilon$ 乱流モデルによる

表-2 工事海域周辺流れ計算 計算条件

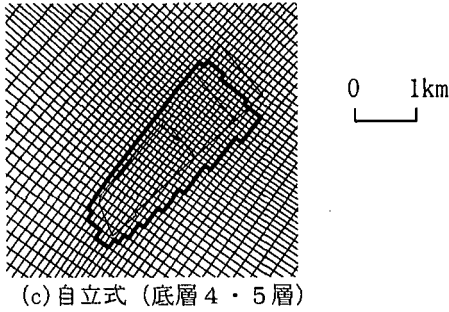
計算格子	図-3参照 (工事区域内は水平解像度70m, 周辺に行くに連れて拡大)
水深	海図データ及び港湾区域図より作成
鉛直方向層分割	5層 (均等分割)
境界条件	大阪湾全体計算の結果を用いる。 (水位・流れ・塩分) (南側境界で水位、西側境界で流速を与える。塩分濃度はともに鉛直分布を与える)
風条件	大阪湾全体計算と同じ
河川流量	大阪湾全体計算と同じ
汚濁防止膜	図-4の位置に、垂下式・自立式・自立式(2)のフェンスを設定する。
水平方向拡散係数	$10\text{m}^2/\text{s}$
鉛直方向拡散係数	$k-\epsilon$ 乱流モデルによる

提供するピンポイント予報を用いる。これについては、2002年8月に予報値と実測値の比較を行い、予測計算に耐える精度を持つことを確認している。

河川流入量は、国土交通省のホームページに示される淀川・大和川の最新時刻の水位から、流量に変換して与えるようにした。淀川は上流に複数のダムを持ち、通常の流量は制御されている。国土交通省淀川工事事務所毛馬出張所によると、淀川の通常の流量時には、河口から9km地点の淀川大堰により本



(a) 垂下式 (表層1層) (b) 自立式(2) (2・3層)



(c) 自立式 (底層4・5層)

図-4 汚濁防止膜の設定

表-3 濁り計算条件に必要な項目

項目	内容
濁り発生量	毎秒の発生量を与える 発生場所・発生時刻が設定可能
沈降速度	濁り粒子の平均沈降速度を与える
水平拡散係数	濁り粒子濃度の拡散係数を与える
鉛直方向濁り発生	鉛直方向の各層からの、発生割合を設定可能

線に流れる水量は魚道を維持するための水量 $4.5\text{m}^3/\text{s}$ のみとなり、残りは全量毛馬水門から大川に流されている。降雨時の出水時のみ、淀川大堰のゲート操作により、放水路に水が流される。このような状況を考慮するため、堰上流の枚方観測所の流量を用いて表-1に示した設定を行った。なお、猪名川、武庫川は流量のデータが無いため、流域面積がともに大和川の約半分であることから流量も大和川の半分として設定した。なお、現状では計算時の最新時刻の河川水位が翌日まで継続すると仮定し、雨量等による水位変化の予測までは行っていない。

工事海域周辺の流れの計算では、解像度70mの細かい格子を用いる。水深は各格子毎に与えるので将来考えられる埋立て工事進捗に伴う水深の変化にも対応が可能である。さらに、工事海域には汚濁防止膜が設置されているが、垂下式、自立式及び北護岸沿いに設置されている中層をカバーする自立式(2)の膜について、現地の設置位置に最も近くなるよう計算格子上で図-4に示す位置に設定を行っている。

また、このシステムでは土砂の投入位置・投入量を翌日の工事計画をもとに入力すると、濁りが拡散する範囲・濃度の予測計算を行う部分まで整備している。表-3に、この濁り計算までを行う場合の入力条件についてまとめる。これらの値については、現地濁りサンプルの沈降試験、粒度組成等の調査のほ

か、過去の関西国際空港工事等の資料が参考になる。

なお、計算プログラムの基本部分には、DELFT3D・鹿島モデル (Delft Hydraulics⁴⁾) を用いている。これは、オランダ・デルフト水理研究所が開発した3次元流動・物質拡散等の解析ソフト「Delft-3D」をベースに、共同研究で日本の海域に適用できるよう改良を加えたものである。

3. 計算モデルの検証について

(1) 2002年2月の流速時系列との比較

まず計算モデルの妥当性検討のため、2002年2月に工事海域周辺で観測された流向・流速時系列の、このシステムによる再現を実施した。なお、この項では風・河川水位の入力条件に予報ではなく実測値を用い、実測の正しい風向・風速及び河川流量が与えられた際に計算システムは正確な流動計算を行えることの確認を目的とする。この項に用いた実測値は、大阪湾広域臨海環境整備センター⁵⁾記載の工事海域の北西2kmにおける計測値である。

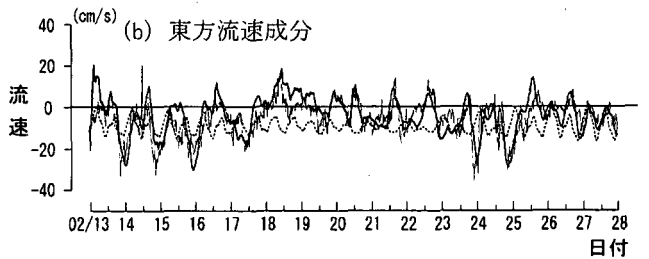
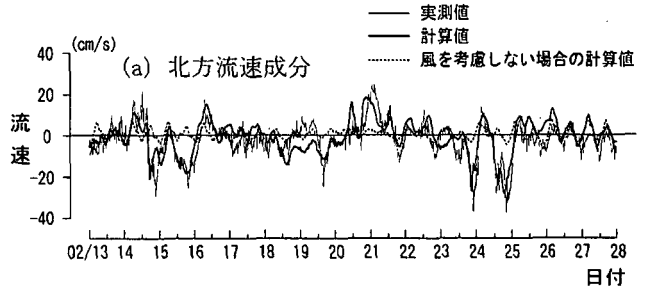


図-5 2002年2月実測値と計算値の比較 (表層)

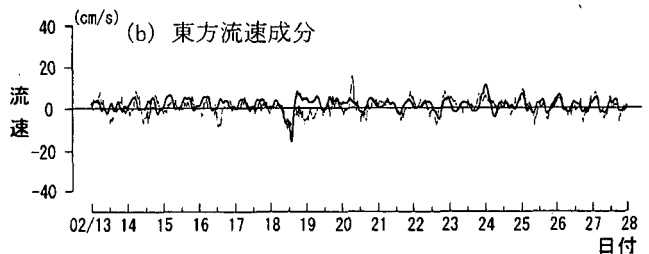
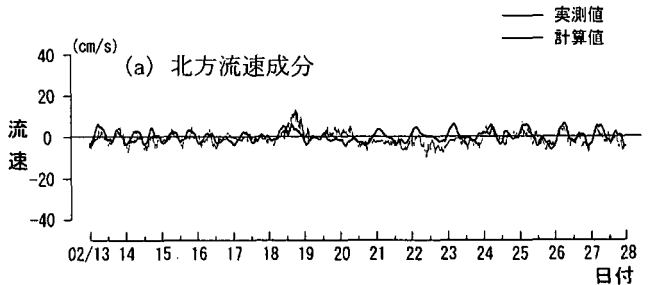


図-6 2002年2月実測値と計算値の比較 (底層)

図-5, 6に計算結果の一例を実測値と共に示す。計算結果と実測値の対応を見ると、観測の流速変動を計算はほぼ再現している。期間の序盤及び終盤の部分は大潮の時期であるが、これらの部分では表層・底層とも比較的良く一致している。また海底面上1mの深い場所においては、全期間を通じて一致度が高い。これは、深い位置では潮汐による水の動きのみが支配的で、予測が比較的容易であるためと考えられる。一方で、表層近くにおいては、特に期間中盤の小潮期において、実測値とずれる点が見られる。潮流が弱くなったとき、風または密度流などの力で海水が微妙な動きをするときに予測が困難であることを示唆している。

一方、今回の検討で、表層において風の働きが特に重要であることが明らかになった。図-5には、潮汐・河川流入の条件はそのままに、風を考慮しなかった場合の計算結果を重ねてある。表層で、流速の計算値が著しく小さくなり、計測結果を再現できないことがわかる。風速数m/s程度の風で表層水は動き、今後の予測計算においても風向・風速の予測が大きなポイントになることがわかる。

(2) 2002年8月の流速平面分布との比較

(1)における比較は工事海域外側の1点における流速の比較であったが、特に汚濁防止膜の効果を含む工事海域内外での平面的な流速分布の比較はできていなかった。その検証を行うため、2002年8月に図-7内の実測値計測点に示す工事海域の内外の7点でADCPにより流速を計測、同時にクロロテックによって水温・塩分・濁度の鉛直分布の観測を実施した。観測は8月7～11日、20～22日、26～28日の期間で原則として午前1回・午後1回の観測を行った。1隻

の観測船を用い、1点につき5分間の停船による観測で、7点の観測に移動時間を含め約90分を要した。

図-7に2002年6月20日午前の比較例を示す。この計算においては、2. に示した予測の風・河川流量を用いた計算を行っている。河川流入により基本的に成層状態にあるこの海域において、表層はこの日に吹いた強い北風に影響され、中層以下は主に潮汐により表層と大きく異なる方向に流れるものの、予測値では表層から底層まで平面的な分布を含めよく一致している。汚濁防止膜の近傍では、汚濁防止膜で囲まれた範囲内側で外側より流速が小さくなる様子、表層で北西側汚濁防止膜付近では膜に沿う流れ、南西側シルトフェンスの背後で流れが弱くなる様子など実測結果に見られる傾向が計算においても表現されていることがわかる。

(3) 汚濁防止膜の考慮について

流れに対する汚濁防止膜の効果については、(2)において平面流速分布について予測計算で表現されており、計算にある程度正しく取り入れられていると考える。しかしながら、それよりも細かいレベルの、汚濁防止膜近傍での流れの挙動が精密に再現されているかという点については、現場の流れが鉛直に2層・3層構造など複雑かつともとも流れの速度が大きくなり、細かい正確な測定が困難であり、今回の観測結果からだけではこれ以上の検討は困難を伴う。

小野ら⁶⁾は、室内模型実験と数値計算を行い、汚濁防止膜周辺の流れを詳しく調べている。その論文記載の計測結果(図-8)及び3次元計算結果(図-9)と、本研究のモデルで実験条件の計算を行った結果(図-10及び図-11)を示す。

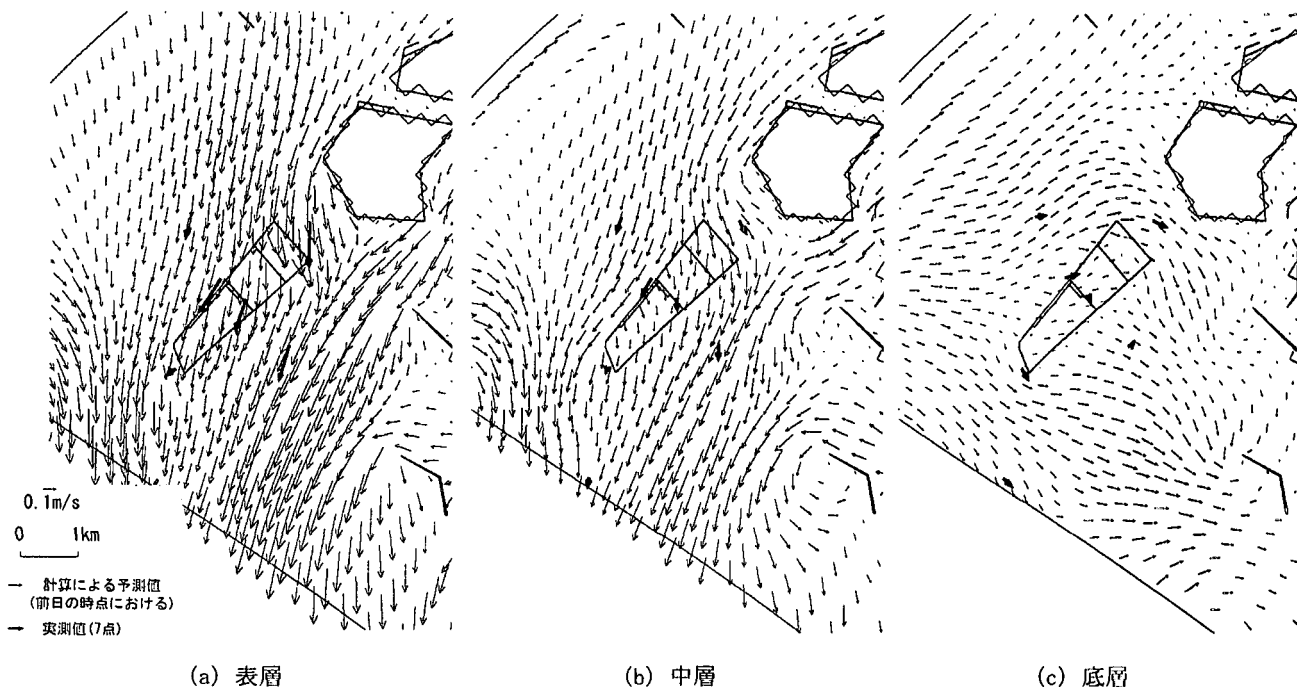


図-7 流れの予測計算結果と現地流速観測結果の比較例 (2002年8月20日午前10時)

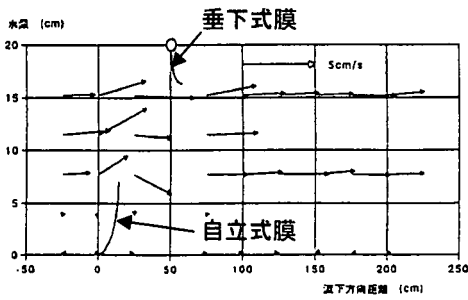


図-8 膜周辺の流速分布の実測結果 (小野ら⁶⁾より)

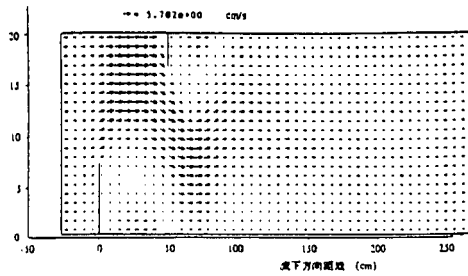


図-9 膜周辺の流速分布の計算結果 (小野ら⁶⁾より)

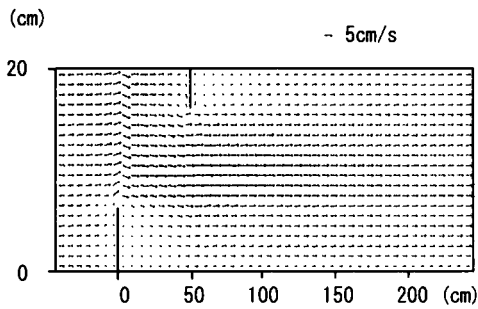


図-10 本研究による計算結果 (鉛直20層)

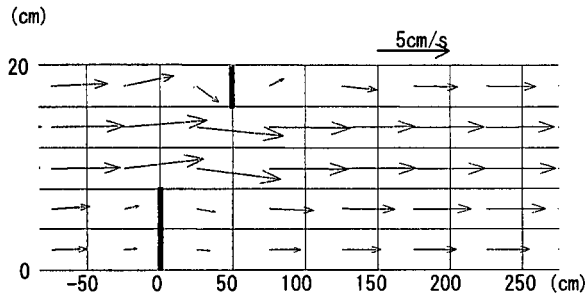


図-11 本研究による計算結果 (鉛直5層)

本研究の計算モデルによっても、鉛直20層に分割した場合(図-10)では、自立式膜・垂下式膜それぞれの背後に見られる死水領域(流速の遅い領域)、2つの膜の間を通過する際に加速する様子が定量的にもほぼ再現されている他、自立式膜の前面に見られる上昇流、垂下膜付近での下降流等も再現されている。実際の工事海域に用いている計算は鉛直方向は5層、水平方向は両汚濁防止膜の間が1メッシュという粗い条件で行っているが、その条件にした場合にも、図-11のように基本的な性質は保

持されている。これらの結果から、本研究のプログラムは汚濁防止膜の流れに与える影響について妥当な計算が出来ていると考えられる。

(4) 現地の濁り分布の観察と濁り分布テスト計算

(2)で述べた2002年8月の実測時には、汚濁防止膜内側の工事海域内で見られた濁り分布の観察と濃度計測も実施している。図-12に、2002年8月20日午後に見られた現地のトレミー船(敷砂工)による濁り範囲の観察結果を示す。記載の濁り範囲においては、表層SS濃度は約10mg/l程度であった。

これに対し、図-13は濁り分布を計算により予測したものである。この計算に用いたパラメータを

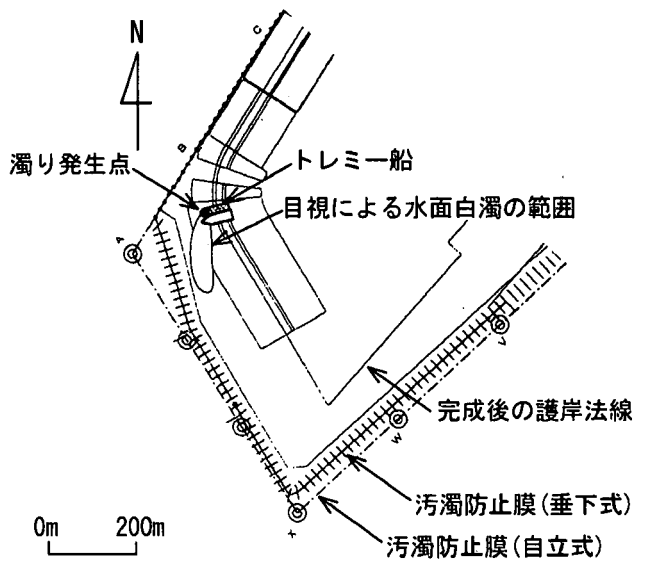


図-12 2002年8月20日午後の濁り観察結果

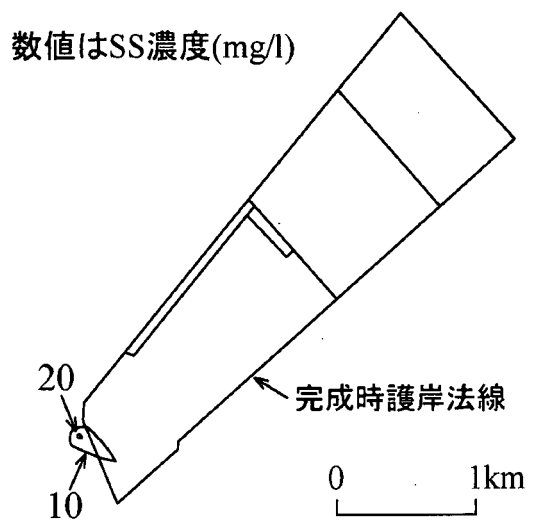


図-13 2002年8月20日午後の濁り分布予測

表-4に示す。この予測計算では、濃度10mg/lの範囲と観察範囲が比較的良く一致していることがわかる。

表-4 濁り分布テスト計算の入力条件

項目	設定値
想定状況	500m ³ /hrの能力のトレミー船で連続投入
濁り発生量	4.5 kg/s
沈降速度	60.48 m/day
水平拡散係数	10 ⁴ cm ² /s
鉛直方向濁り発生	全層から均一と仮定（表層からは20%発生）

4. 流れ予報の配信について

これらの準備を経て、2002年11月に計算システムを稼動、現場各JVに予測結果の配信を開始し、現在日々の工事管理の参考としている。

予測は毎日午前11時の時点で、翌日の予測の配信を行う。但し、週末に関しては、金曜日に土曜・日曜・月曜までの予測結果をまとめて配信する。

配信内容は翌日6時・9時・12時・15時の表層・中層・底層の流れ予測結果（流速ベクトル図）であり、PDF形式のファイルで電子メールにて配信する。配信のサンプルを図-14に示す。なお、濁り分布の予測については、投入土砂の土源による違い等細かい部分の不確定な要素が多いため、現状では実施していない。

この予測計算作業と配信作業は、CPU:Xeon, クロック周波数1GHz程度の能力のパソコンで、条件入力から計算・描図まで1時間強で行うことができ、毎日実施するに耐える作業量となっている。

5. 結論

- ・ 潮流・吹送流・密度流が混在する工事海域の流れを十分な精度で毎日予測するため、大阪湾全体計算と工事海域周辺の接続を行い、最新の風予報・河川流量データで迅速に計算するシステムを構築した。これにより日々の計算作業時間は1時間程度であり、毎日行う作業量として妥当なものになっている。
- ・ 現地で流動の3次元観測を行い、システムで予測した結果が妥当であることを検証した。
- ・ 特に表層の流れに対しては風による吹送流の影響が大きく、風向・風速の予報データを正確に与えることが本システムにおいて重要である。

謝辞：本研究における現地観測実施と計算のためのデータの開示において、大阪湾広域臨海環境整備センター殿及び財団法人港湾空港建設技術サービスセ

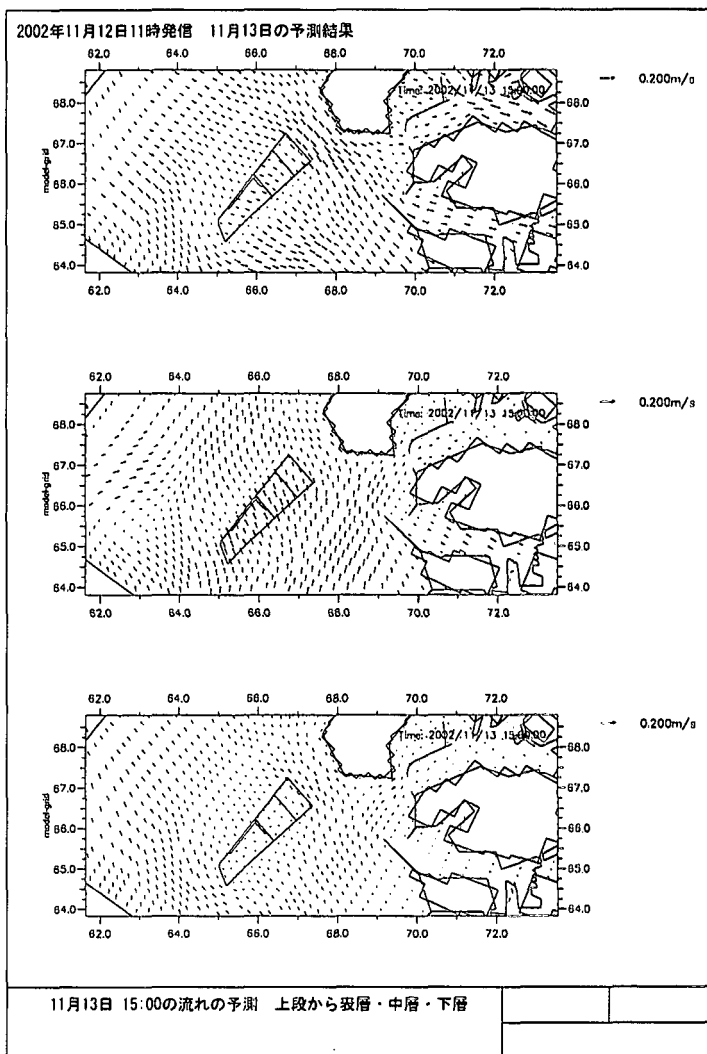


図-14 配信データの例（流れ予報）

ンター殿に多大な協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 稲垣聡・山木克則・田中昌宏・中込國喜・上田純広・松本壽人：工事海域の濁り監視と予測，海岸工学論文集，第49巻，pp. 1496-1500，2002。
- 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，港湾技術研究所報告，Vol. 26，No. 2(1)，pp. 253-295，1987。
- 3) 細田昌広・大下和夫・長峰弘和・宮地匡人・酒井康彦・養父恒夫・伊藤弘樹：空港建設工事に伴う濁り拡散予測と簡易予測モデルについて，関西国際空港開港5周年記念国際シンポジウム関連ワークショップ，pp. 3-1-3-5，1999。
- 4) Delft Hydraulics: DELFT3D-FLOW, A simulation program for hydrodynamic flows and transport in 2 and 3 dimensions; release 3.05, 1999.
- 5) 大阪湾広域臨海環境整備センター：新人工島建設事業に係る環境監視事前調査業務（その3）報告書，2002。
- 6) 小野正順・安井章雄・有光剛・出口一郎：汚濁防止膜による流況制御に関する研究，海洋開発論文集第15巻，pp. 243-248，1999。