

現地で運用するための工事中の 濁り拡散予測システムの開発

DEVELOPMENT OF PORTABLE NUMERICAL FORECAST SYSTEM FOR ESTIMATION OF INFLUENCE ON SUSPENDED SEDIMENT DISTRIBUTIONS DUE TO DREDGING IN THE COASTAL SEA

柴木秀之¹・高尾敏幸²・白木喜章³・山下義昭⁴・田中丈裕⁵

Hidenori SHIBAKI, Toshiyuki TAKAO, Yoshiaki SHIRAKI,
Yoshiaki Yamashita and Takehiro TANAKA

¹正会員 博(工) 株式会社エコー 防災・水工部 (〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4)

²正会員 工修 株式会社エコー 環境・計画部 (同上)

³博(理) 株式会社エコー 環境・計画部 (同上)

⁴岡山県 土木部港湾課 (〒700-8570 岡山市内山下2-4-6)

⁵農修 岡山県 農林水産部水産課 (同上)

Field observation and numerical simulation are conducted in the Mizushima Port in order to develop the portable numerical forecast system for estimation of influence on suspended sediment distributions due to dredging in the port. This paper presents an outline of system design and numerical simulation model, and its applications. The characteristics of tidal current fields and SS diffusion were revealed by the observational works. The forecasting model simulates tidal current and SS distribution with high accuracy. The numerical system is used for environmental assessment and management of water quality around dredging area.

Key Words : Potable system, forecast, numerical simulation, tidal current, suspended sediment, dredging, Mizushima port

1. はじめに

コンテナ船等の大型化に伴い、全国の航路・泊地で浚渫工事が鋭意実施されている。これら浚渫工事により発生する濁り(SS)は、周辺海域の水質を短時間に变化させ、漁場環境への影響が少なからず懸念される。従来から、施工時の濁り拡散予測は、環境影響評価の1項目として、予測計算とその評価が実施されている。しかし、代表的な条件下で実施されており、多様な条件に対する予測事例は少ない。新たに開発した「工事中の濁り拡散予測システム」は、現地で運用するためにパーソナル・コンピュータ(PC)を利用し、流況と濁り拡散シミュレーションにより、浚渫工事に伴う濁りの拡散状況を容易かつ高精度に予測するために開発された。このシステムは、工事の環境基準に配慮した浚渫工事等の年度計画の立案及び施工管理への活用を目的とする。本報告は、予測システムの構成、流況・濁り拡散シミュレーションの概要及び観測データとの比較に基づく現地への適用性を述べる。また、システムの入力・予測計算の実行・出力の各処理について、水島港への適用事例をもとに述べるものである。

2. 予測システムの概要

(1) 予測モデルの特徴

濁り拡散予測システムに組み込まれる流況・濁り拡散予測モデルは、水島港周辺海域における流況・水質の現地観測成果^{1), 2)}を反映し、15昼夜連続の現地観測結果との比較から水島港海域への適用性が確認されたもの³⁾である。実測の気象・海象情報を入力条件とすれば、流況・水質の再現性は良好である。

図-1 に計算領域と水深分布を示す。計算領域は水島港を包含する範囲とし、東西端を開境界とする。水島港周辺は100m格子間隔の高解像度小領域とし、その外側を500m格子間隔の大領域として、ネスティングにより接続する。鉛直方向は σ 座標系を基本とし、詳細計算は等間隔に20層の分割、簡易計算は上・下層の層厚を小さくした不等間隔の6層分割とし、計算所要時間に応じ2タイプを選択する。流況予測モデルは、次のような機能を有する。

① マルチレベルと σ 座標系を選択することが可能

な3次元流動モデル、②複数分潮 (M_2 , S_2 , K_1 , O_1 等)の潮汐変動を開境界で入力し、領域の潮汐・潮流を再現、③水平渦動粘性係数はスマゴリンスキーモデル、鉛直渦動粘性係数はリチャードソン数依存型(Munk and Anderson)を用い、乱流や密度成層の効果を考慮、④海面熱収支と河川からの淡水流入を考慮した水温・塩分の拡散式を計算し、状態方程式から密度の時空間変動を追跡し、密度流を計算、⑤密度流・吹送流・通過流等の平均流を予測し、吹送流の外力は近隣の海上風推定値を設定等である。

また、濁り(SS)拡散予測モデルは、①流況予測モデルと一体化した3次元移流・拡散モデル、②計算所要時間に応じて、流況との同時計算と分離計算を選択、③多粒径のSSについて、巻上げ(再浮遊)・沈降・堆積を考慮し、ブロック形成の効果を考慮、④巻上げ・沈降に関するパラメータは季節変化を考慮、⑤河川や陸域から海域に供給されるSSの負荷を鉛直分布として考慮した境界条件を採用、⑥バックグラウンドのSSと工事によるSSを分離表示、⑦SSの発生原単位は、現地調査成果や工種別のマニュアル値^{4),5)}を引用等の機能を有する。

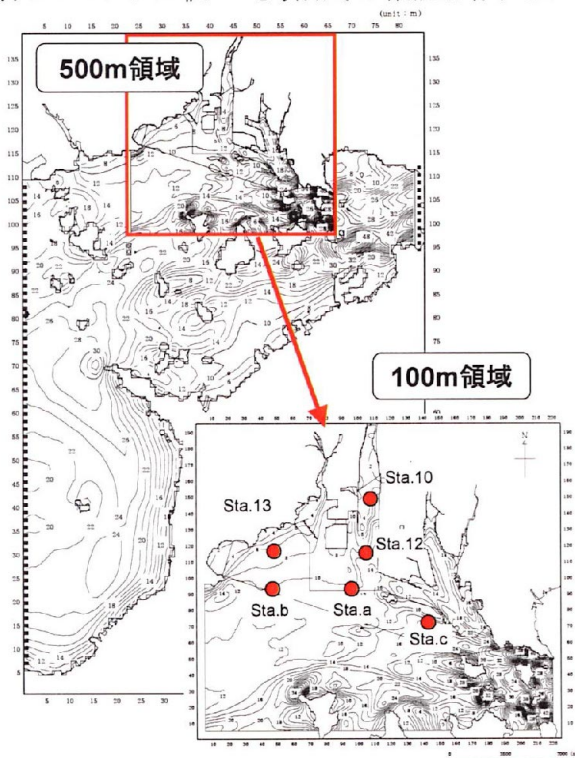


図-1 計算領域と領域内の水深分布

(2) 予測システムの構成と予測の流れ

予測システムは現地の工事事務所等に常設されているPC上で構築され、PC画面からの対話型により予測処理を実行する。図-2は、システムの構成を表し、入力処理、予測計算、出力処理に分類できる。入力処理は、予報期間や予報時の気象・海象情報、工事情報の入力操作であり、簡易入力と詳細入力に分類する。簡易入力は入力情報を必要最小限とする

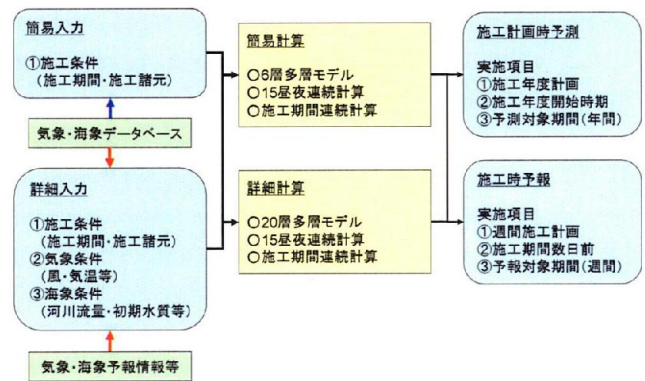


図-2 予測システムの構成と予測の流れ

もので、システム内のデータベースを参照し、対象年月日時から、同時刻の平均的な気象・海象情報を設定する。設定において参照するデータベースは、対象海域沿岸における5年間分の毎時の気象・海象情報を解析し、同時刻の平均値と標準偏差値を1年間分記憶したものである。すなわち、自然条件の経年変動に関する情報を毎時値として保存し、任意年月日時の平均値と変動幅(平均値からの強弱の幅を標準偏差で表現)が設定できる。工事条件は、工事の種類・機械、工事位置の情報等から近似的な濁りの発生量を選択する。情報を選択するために、マニュアル値^{4),5)}をデータ登録した。一方、詳細入力は、毎時の気象・海象情報の予報値(または実測値)を入力する方式である。入力値は水島港沿岸のあらかじめ定められた地点の情報であり、気象庁、海上保安部、国土交通省のデータベースのホームページを参照して収集する。

予測計算は、簡易計算と詳細計算を選択し、簡易計算は計算時間を短縮化させるために、鉛直層数を6層とし、上層と下層の層厚を小さくしたモデルを、詳細計算は20層のモデルを予測計算に用いる。簡易計算で上層と下層の層厚を小さくするのは、河川水の流出、底泥の巻き上げによる濁りの発生現象、浚渫工事等による底層からの濁りの発生状況を表現できるようにするためである。これにより、予測にかかる計算時間を短縮する。詳細計算は20層のため、計算時間が長くなり、迅速な処理を行えない。そこで、成層が発達する時期のように、高い鉛直分解能を有する予測が必要な時に活用する。

出力処理は、①流況予測計算結果、②濁り拡散予測結果の2種類が、PC画面と紙面を選択して行われ、対話形式で複数の図面を出力する。また、予測結果は付属ハードディスクに保存され、任意の日時に参照することを可能とした。予測結果の利用用途は、図-2に表すように工事計画段階の予測と工事実施段階の予報とに分けられる。工事計画段階の予測は、海上工事の計画において、その工事による濁りの影響を事前に把握することを目的とする。一方、工事実施段階の予報は、工事実施日の流況や濁りの

拡散状況を把握するもので、1週間程度先までの濁り拡散の予報が対象となる。工事計画段階の予報は簡易入力とし、計算は簡易または詳細計算で行う。工事実施段階の予報は、基本的な組合せとして、詳細入力とし、計算時間の制約から簡易計算を基本とする。

予測システムを実行するPCの標準能力として、演算プロセッサ2.6GHz以上、メモリ1.0GB以上とした。この処理能力において、15昼夜連続計算の所要時間は、詳細計算（20層計算）が約5日、簡易計算（6層計算）が約1.5日となる。所要時間の80%程度を流況計算が占めることから、工事対象期間の1週間前から流況計算を先行して実行し、その結果を保存する。そして、保存された流況予測結果を入力条件とする濁り拡散予測を行うことにより、効率的なシステム運用を行うことも可能である。

3. 予測モデルの現地適用性

(1) 現地適用性を確認するための観測データ

予測モデルの現地適用性を確認するための観測データは、2006年の低温季（3月1日～3月20日）、増水季（6月29日～7月18日）、高温季（8月21日～9月7日）の3季で観測した^{1),2)}。3観測点（図-1のSta.a, b, c）では、流速・水温・塩分・濁度の15昼夜連続観測を行った。流速はADCPを用いて鉛直層厚25cm、10分間隔で計測し、水温・塩分・濁度は、水温・塩分計、濁度計を上層（海面下2m）と海底上2mに係留し、10分間隔で計測した。この連続観測期間中に、水温・塩分、濁度の鉛直分布観測を行い、上層（海面下2m）、中層（水深の1/2）、下層（海底上2m）で6回の採水も行った。採水資料は、分析によりSS量の定量化を行った。これらSS量と濁度との相関解析を行い、濁度をSS量へ換算する式を求めた。また、ADCPにより観測される反射強度から後方散乱強度を算出し、さらに、後方散乱強度からSSへ換算するための相関式も求めた²⁾。以降で記述するSS量は、濁度またはADCPの反射強度を、各々の式により換算した値である。

(2) 流況の再現

図-3は低温季のSta.a, b, cの上層において卓越するM₂分潮の潮流楕円の観測値と計算値の比較を表す。Sta.a, bは観測値と計算値がほぼ一致する。潮流が強く、複雑な地形に位置するSta.cはやや観測値とずれがあるものの、長軸の向きや大きさ、位相ともに再現性は高い。潮流は季節変動が小さく、他の2季や他の層も再現性は良好である。図-4は25時間移動平均により潮流成分を除去した低温季の平均流の比較結果を表す。Sta.bとcの計算値は流速、変動傾向ともに観測値とほぼ一致する。

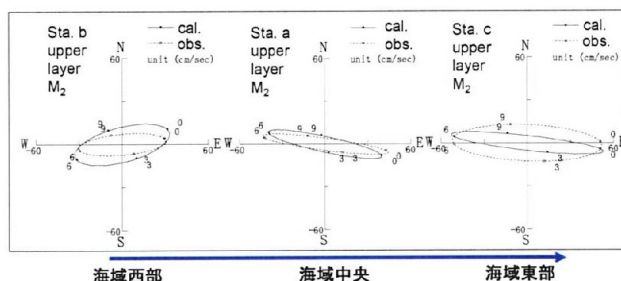


図-3 潮流楕円による観測値と計算値の比較

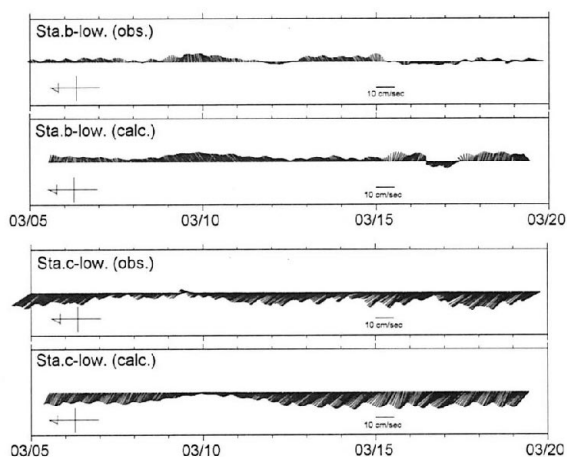


図-4 15昼夜平均流の観測値と計算値の比較

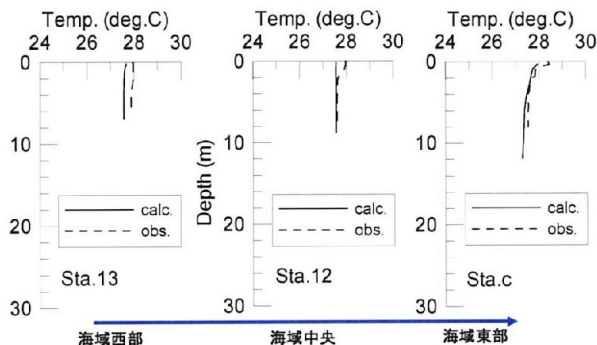


図-5 高温季の水温鉛直分布の観測値と計算値の比較

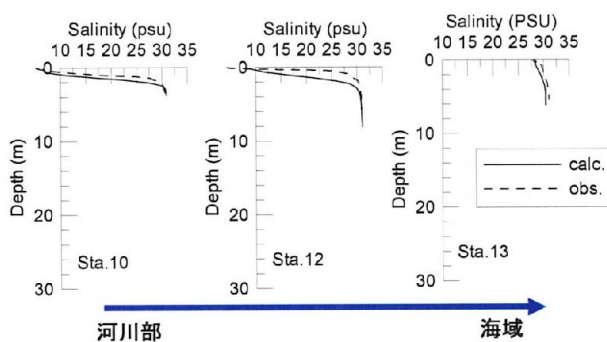


図-6 増水季の塩分鉛直分布の観測値と計算値の比較

(3) 水質の再現

水質予測の現地適用性は、密度流に影響する水温・塩分の分布と、バックグラウンドのSS濃度分布について、観測データを再現することで確認する。

a) 水温・塩分の分布

水温の再現は、3季のうち最も水温の高くなる高温季について行う。図-5 は、図-1 中の Sta.12（河口部）、Sta.13（領域西部）、Sta.c（領域東部）の水温鉛直分布の観測値と計算値の比較を表す。計算値と観測値はほぼ一致している。一方、塩分の再現性は、河川流量の比較的多い増水季について行う。図-6 は河口から沖側に配置された Sta.10, 12, 13 の塩分鉛直分布の比較結果を表す。河口から沖側にかけて見られる表層の薄い低塩分層を計算値は良く再現している。高梁川の上流は人工堰により流量が制御されていることから、河川上流端境界において、河川水を最上層のみから流入させた。これにより、河口の塩分分布の再現性は向上した。

b) 濁り（SS）の分布

濁り拡散モデルは、高梁川起源の粒子と海底からの巻き上げによる再懸濁粒子の2粒径を考慮する。設定条件は、現地観測結果を参照する³⁾。SS分布の再現性は、相対的にSS濃度が高い高温季で行う。図-7 はSS濃度の空間分布を、計算と河川流量がほぼ同程度の時期に測得された衛星写真の画像で比較した。河川起源の濁りが河口から西側に広がり、西側海域で停滞する状況を良く再現している。再現対象期間に、河口部で観測されたSS濃度を、河川水流入条件と同様に、最上層から与えることにより、海域への広がりを良好に再現できることを確認した。なお、出水時の河川流量と上流からのSS流入量の関係は、観測データの不足により十分に把握できていない。この点については、今後、出水時の観測結果を収集し、モデル改良に反映させる必要がある。

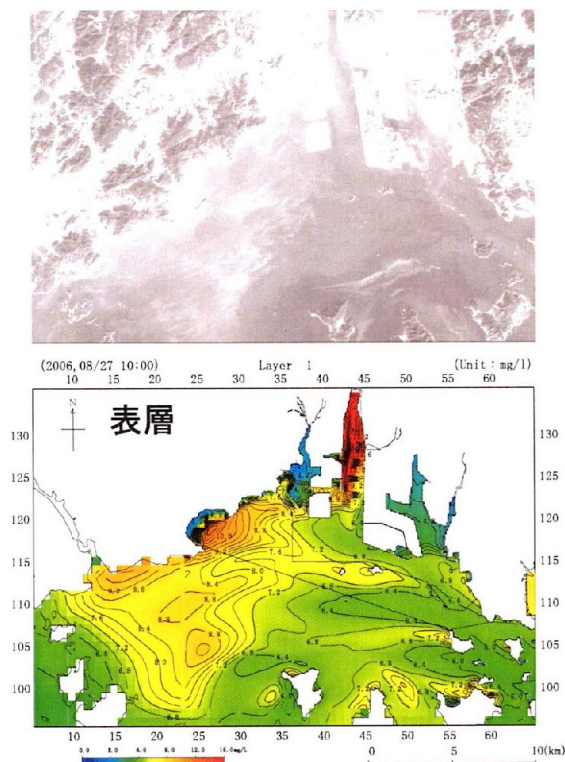


図-7 河川起源の濁りの拡散状況の再現

表-1 工事中の濁り拡散計算で設定された条件

項目	内容	
使用モデル	①簡易計算(6層モデル) ②詳細計算(20層モデル)	
対象期間	2008年9月2日0:00 ～ 9月3日0:00	
気象・海象条件	潮位	開境界での推算値(天文潮位)
	風向・風速	笠岡(アメダス)の観測値
	日射量	高松地方気象台の観測値
	気温・蒸気圧・雲量・海面気圧	岡山地方気象台の観測値
	河川水位	高梁川日羽観測所の観測値
	平均潮位(通過流)	松山港・高松港の観測値
工事条件	位置	施工当日の工事位置を設定
	工種	密閉グラブ浚渫船(18m ³)
	発生原単位	水島港原単位調査結果を適用
	濁り発生水深	鉛直分布(下層から多く発生する分布形)
	工事時間帯	施工当日の工事時間を設定
	取扱土量	施工実績を設定(200m ³ /h)
	汚濁防止枠の有無	汚濁防止枠の設置された状態を適用

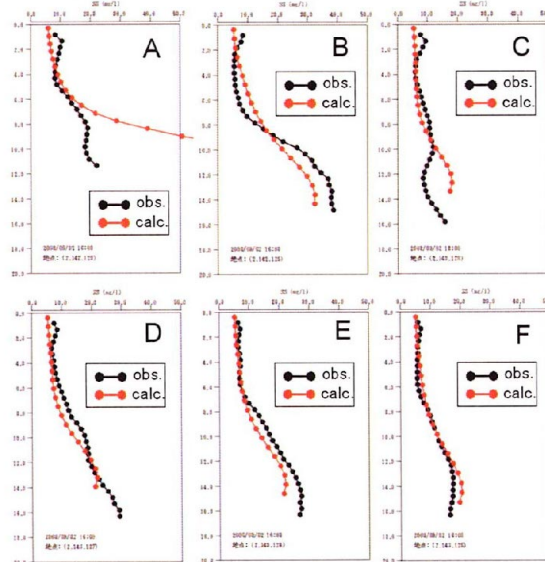
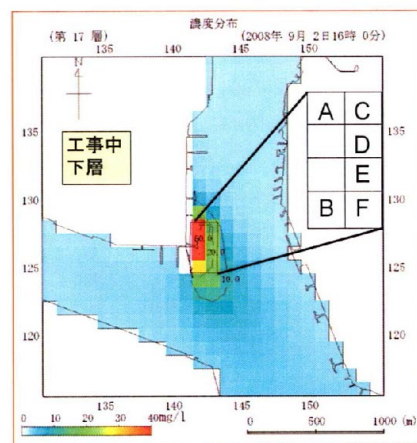


図-8 浚渫工事による濁り拡散状況の計算値と観測値の比較（上：平面分布，下：鉛直分布）

(4) 施工時の濁り拡散の再現

2008年に実施された浚渫工事の期間に観測された工事時の濁りの拡散状況と計算値との比較を行

い、工事中の濁り拡散状況の再現性を確認する。

a) 施工時の条件設定

表-1 は、予測計算で設定した気象・海象条件と施工条件を一覧表としてまとめたもので、工事は水島港奥の岸壁前面の航路・泊地浚渫である。表中の発生原単位及び濁り発生水深の欄に記述したように、工事位置近傍の濁りと流速の鉛直分布の観測結果をもとに、下層に多くの発生負荷量を与え、総負荷量を一致させる入力条件とした。なお、当該海域の港奥からのSSの流入はない。

b) 工事中の濁り (SS) の分布

図-8 は施工箇所近傍で計算される下層のSS平面分布及び代表格子のSSの鉛直分布と、観測値との比較を表す。観測値は、計算値との比較を行うために、100m×100mの範囲内で空間平均を行う。

工事中のSSの平面分布を見ると、弱い下げ潮によって、下層を中心に施工箇所（地区A）の南側に拡散する。鉛直分布を見ると、浚渫位置の最下層は、計算が100m格子で実施されていることもあり、解像度不足となっている。しかし、その他のB～F地区の鉛直分布はほぼ観測値と計算値で一致している。

4. 予測システムのアプリケーション

(1) 入力処理と予測計算の実行

入力処理は、簡易入力と詳細入力があり、入力項目は、流況と濁り拡散予測の共通条件、流況予測に関する気象・海象条件、濁り拡散予測に関する工事条件に分類される。簡易入力では、入力項目を必要最小限とする。そのため、年度開始等の工事の計画段階での予測に有効である。一方、詳細入力は、気象条件や工事条件を1時間毎に入力する。そのため、条件が確定する海上工事の実施直前の段階で有効である。図-9 は自然条件を入力するための画面表示例であり、図-10 は工事条件を入力するための画面表示例を表す。各入力項目は、入力条件メニューで表示されるダイアログから設定を選択する。

図-9の上図に表すように、簡易入力は、対象期間を設定するのみで気象・海象のデータベース情報を抽出し、入力条件として設定される。また、下図に表す詳細入力は、毎時値を入力するための入力シートが表示され、作業者がキー入力を行う。

工事条件の入力は、図-10 に表す複数の条件を画面により入力する。入力項目は、①工事位置、②工事期間、③工事諸元（工事種類・使用機械等）、④濁り発生量である。工事位置は、地形図上をマウスで指定する方法と座標入力で指定する方法がある。工事期間は、開始と終了の年月日時を設定する。簡易入力は、工事時間帯を昼、夜、昼夜の3種類から選択し、詳細入力は、1時間単位で施工時間を設定

する。工事諸元は、工種・取扱土量・汚濁防止フェンスの使用有無を設定する。濁り発生原単位（ R_0 、 W_0 ）は、マニュアル^{4),5)}に記載されている一覧表をデータベース化し、工種・使用船舶の選択から設定される。底質のシルト分、粘土分の割合は、底質調

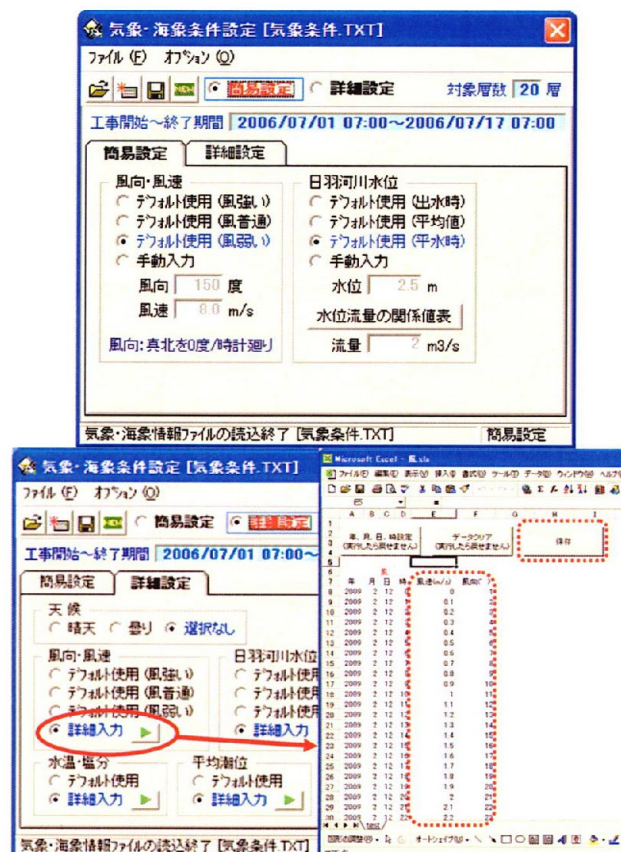


図-9 自然条件入力処理の表示画面例
(上：簡易入力画面、下：詳細入力画面)

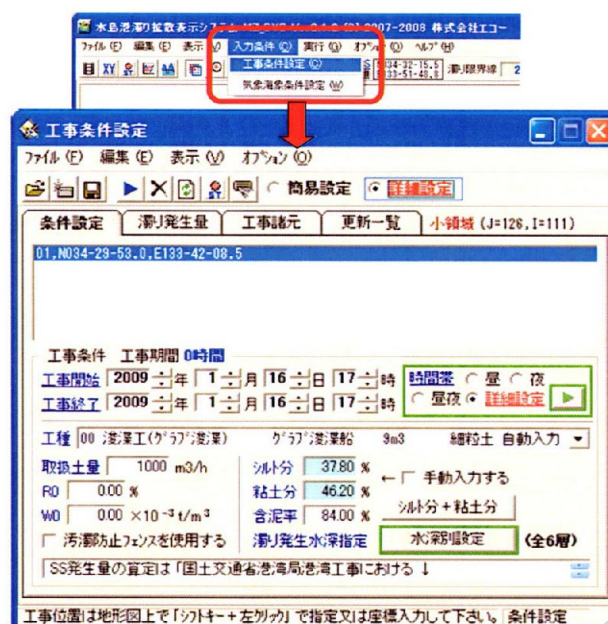


図-10 工事条件入力処理の表示画面例
(上：工事条件入力一覧、下：工事位置設定画面)

査結果を整理した底質粒度組成の空間分布をデータベースとして登録し、工事位置の値を設定する。濁り発生層は水島港で実施された原単位調査によるSSの鉛直分布をもとに設定される。なお、いずれの条件も数値を直接キー入力することが可能である。

入力処理が完了すると、入力条件の保存、流況及び濁り拡散計算を順に実行する。計算の実行時は、計算の進行状況が画面表示される。

(2) 出力処理

図-11 は流況・濁り拡散予測結果の表示画面の例を表す。流況計算結果の出力は、表示メニューから流況計算結果描画を選択し、ベクトル表示と色別による流速の強弱の表示を行う。一方、濁り拡散予測結果の出力は、表示メニューから濁り拡散結果描画を選択し、色別による濃度分布を表示する。画面表示は、バックグラウンド濃度と工事起源の濁りの濃度を判別し、工事期間の平均濃度と最大濃度及び環境基準(2mg/l)を超過する範囲を曲線情報として明示し、港域との位置関係を判定することができる。流況計算結果及び濁り拡散結果ともに、多層の表示、表示範囲の選択(拡大・縮小)、動画作成ができる。

5. おわりに

現地事務所において運用するための「工事中の濁り拡散予測システム」を構築し、現地適用事例として水島港の浚渫工事の予測について述べた。予測システムを構成する流況予測と濁り(SS)拡散予測モデルは、バックグラウンド及び施工時の現地観測結果との比較により、現地の再現性を確認した。予測システムは、現地の工事事務所で実行するように、PC画面による簡易な操作を目指し、入力処理、計算実行、出力処理の表示画面を設計した。2009年より、浚渫工事等の年度計画の立案及び工事の施工管理への本システムの運用が開始される。

システムの画面操作等は、他海域への適用が可能な汎用的なものである。しかし、流況・濁り拡散予測モデルで設定される多数の計算上のパラメータは、適用海域の特徴を反映したものが必要である。今後、他海域の流況及び水質の分布特性を把握するための現地観測の実施と、観測データとの比較による実績を蓄積し、予測モデルの現地適用性の確認と予測システムへの組み込みを行う予定である。

謝辞：本報告は、「水島港の濁り拡散予測モデル及びシステム開発検討会」の成果をまとめたものである。検討会において、貴重なご意見を賜りました京都大学名誉教授奥田節夫博士、九州大学教授柳哲雄博士、岡山大学教授大久保賢治博士に感謝いたします。また、観測データの収集にご協力頂きました岡山県備中県民局水島港湾事務所、岡山県水産試験場

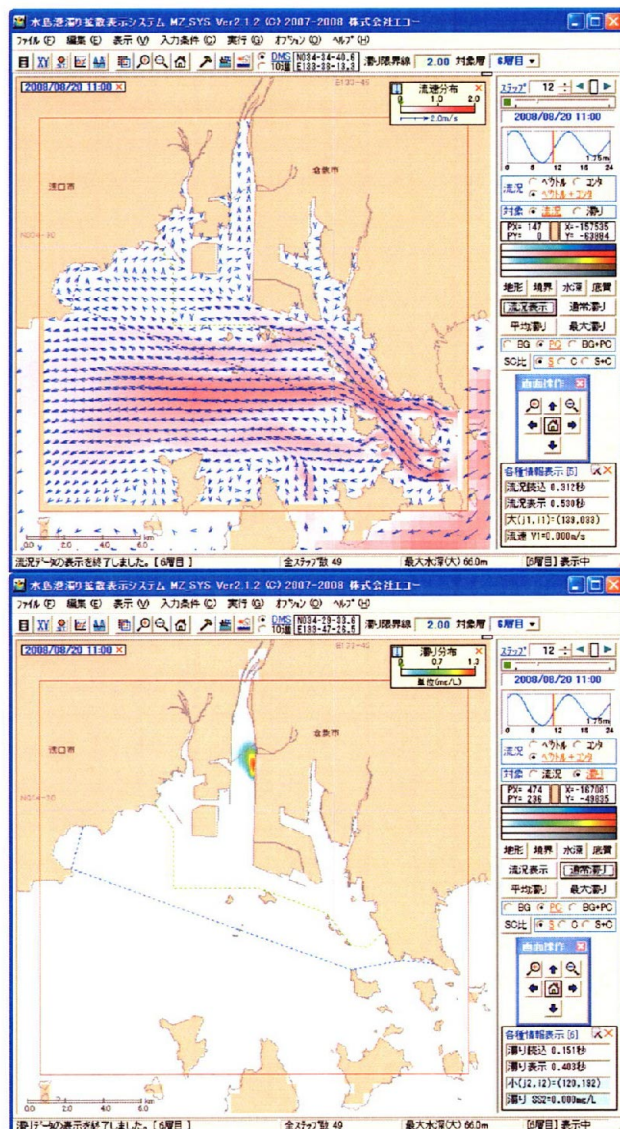


図-11 予想結果の出力画面例
(上：流況予測結果，下：濁り拡散予測結果)

の関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 高尾敏幸，杉松宏一，柴木秀之，常森通浩，田中丈裕：瀬戸内海水島港周辺海域の懸濁粒子(SS)の輸送特性，海洋開発論文集，Vol.23，pp.1153-1158，2007。
- 2) 高尾敏幸，白木喜章，柴木秀之，山下義昭，田中丈裕：瀬戸内海水島港周辺海域における懸濁粒子(SS)の巻き上げ・沈降特性の解析，海洋開発論文集，Vol.24，pp.1075-1080，2008。
- 3) 白木喜章，高尾敏幸，柴木秀之，山下義昭，田中丈裕：岡山県海水島港周辺海域における流況・SS分布予測モデルの開発，海洋開発論文集，Vol.24，pp.1069-1074，2008。
- 4) 運輸省港湾局：港湾環境整備に係わる環境影響評価マニュアル，1977。
- 5) 国土交通省港湾局：港湾工事における濁り影響予測の手引き，2004。