

海上工事による濁りの分布特性と数値シミュレーション

堀 口 孝 男*・ 古 土 井 光 昭**・ 堀 江 毅***

1. ま え が き

海岸・内湾の水域環境保全のため、浚渫や埋立等の海上土木工事による濁りの発生とその拡散は最小限にいとめる必要がある。このため、工事の実施に当っては、事前に十分な調査を行って工種工法を選定し、濁りの防止対策を確立しておくことが重要である。近年では海上工事による濁りに対し数値モデルによる予測シミュレーションが随所で実施されアセスメント資料に供される例が多くなっている。しかし、このような場合にも濁りの予測手法が必ずしも確立されているわけではなく、また予測値と実際の濁りとの照合を行った例もそれほど多くないのが実情である。

本研究は、このような状況に基づき、大規模海上埋立工事が計画されている現場海域において行った試験工事による濁りの拡散状況を把握するとともに、数値モデルによる濁りの拡散のシミュレーションを行って再現性の検討と、濁り発生量、沈降速度等の取扱いについて述べたものである。

2. 敷砂による拡散現地試験

(1) 試験方法

海上工事による濁りの発生と拡散特性を把握するため、大阪湾内泉州沖約 5 km の海上観測塔設置点 (N34°25'49", E135°14'26") 北東隣りの地点にて、昭和 58 年 12 月より 59 年 3 月の間に、一次敷砂、サンドドレン、および二次敷砂の試験工事が行われた¹⁾。

調査は、工事施工中の濁り状況を時系列的に把握するための基礎調査、調査測点配置のための予測調査、濁りのバックグラウンド値把握のための事前調査、および、砂まき船による一次敷砂と土運船による二次敷砂から成る本調査が実施された。敷砂には海砂または山砂が用いられた。

調査項目は、透明度、水色、濁度、水温、塩分、pH、溶存酸素、流向流速などであり、採泥を行って後 SS は

か水質底質の分析をした。透明度はセッキ板、水色は日本色研色名帳、濁度は水中濁度計 (SEI-SKIM-1)、水温は ET-II 型水温度計、塩分は EIL サリノメータ、流向流速はアンデラー RCM-4 によってそれぞれ測定した。

(2) 試験工事結果

上述方法にて実施した全 9 ケースの調査の中から本文では固定点における基礎調査と、山砂を用いた二次敷砂の本調査との結果について以下で検討することとした。

基礎調査では昭和 58 年 12 月 22 日から 59 年 3 月 24 日までの 50 日間、透明度以下の項目について測定された。この間、流れは概ね半日周潮が卓越し、上げ潮は NNE、下げ潮時は SSW が卓越した。流速は 30~18 cm/s、水温は 4.9~12.8°C、塩分は 30~33.1‰ であった。透明度は 10.4~2.9 m まで変化した。試験開始前の濁度は 0.5~1.6 m⁻¹ 程度であり、下層はやや高いが鉛直的にはほぼ一様であった。

本調査では底開式土運船 (神海-7002、長さ 100 m、幅 22 m) による二次敷砂のための直投試験が 4 回実施された。このうち昭和 59 年 3 月 22 日の本調査では山砂 3065 m³ (比重 2.647、総重量 8113 トン) が投下された。この時の土砂投下地点と測点との関係が図-1 に示されている。

濁度の測定は、初めの 1 時間は 5 分毎、続いて 10 分毎に 6 回、さらに 20 分毎に 3 回の計 3 時間、また鉛直方向には 1 m 間隔で行った。試験当日のアンデラー流速計による流況測定結果を示したものが図-2 である。同図において X、Y 軸は後述する数値シミュレーション

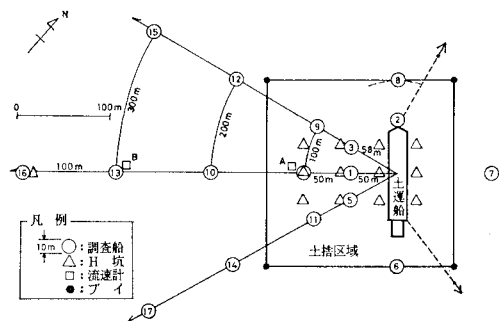


図-1 本調査測点配置

* 正会員 工博 東京大学工学部 工学部土木工学科

** 正会員 工修 関西国際空港株式会社工務部長

*** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所海洋水理部海水浄化研究室長

の主軸に合わせるため、それぞれ N51°E (対岸にはほぼ平行) および N321°E 方向に回転している。この結果によると、X軸方向分速 (U) は 20~40 cm/s の間で変

動し、表層 (海面下 2 m) では中・下層 (海底上 2 m) に対し反対方向に流れる時間帯がとくに多いようである。二次敷砂施工時の 3 月 22 日 13 時 30 分~16 時 30 分の間では X、Y 両分速ともに負で下げ潮時の流れになっており、上層では 30 cm/s 程度が観測されている。

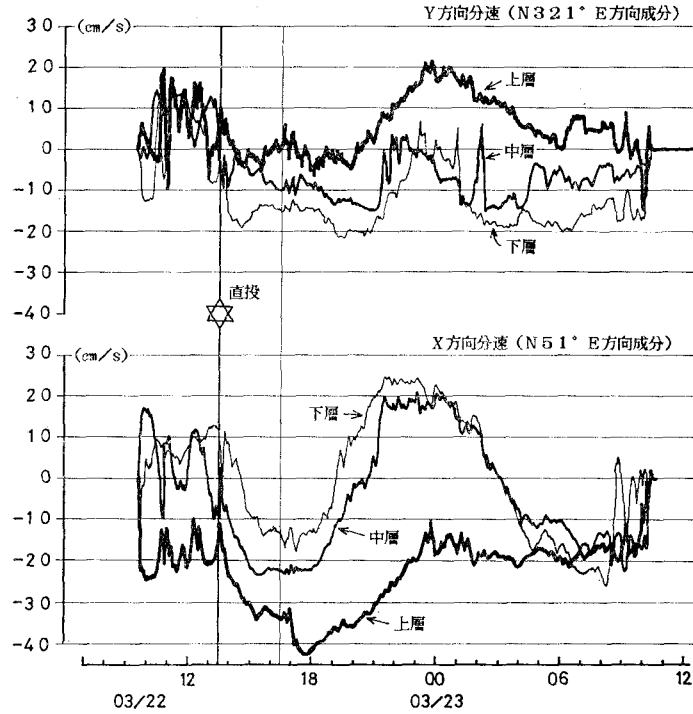


図-2 アンデラー流速計による流速測定結果

つぎに、図-1 の 17 測点各 1 m 深ピッチで水中濁度計により測定された濁度を後述の濁度-SS 相関より SS に換算し、さらにシミュレーションの鉛直層厚 (上層 6 m, 中層 7 m), 下層 (全水深-13 m) に対応して平均化した SS 換算値で示したものが図-3 である。この結果によると、土砂投下直後では+印の投下点より 100 m 程度南西の方向下層で濃度の極値がみられるが、中・下層に SS はほとんど及んでいない。投下後 10 分以下層の SS 10 mg/l の線は半径 200 m の長円状となり、中層にも SS 10 mg/l の線が半径 30 m 程度の大きさとして現れ始める。しかし上層においては依然明確な濁りの到達がみとめられない。投下後 15 分以降になると上層にも 10 mg/l 線が現れ、流れの卓越方向に長円状を成している。この間、中・下層ではそれ程

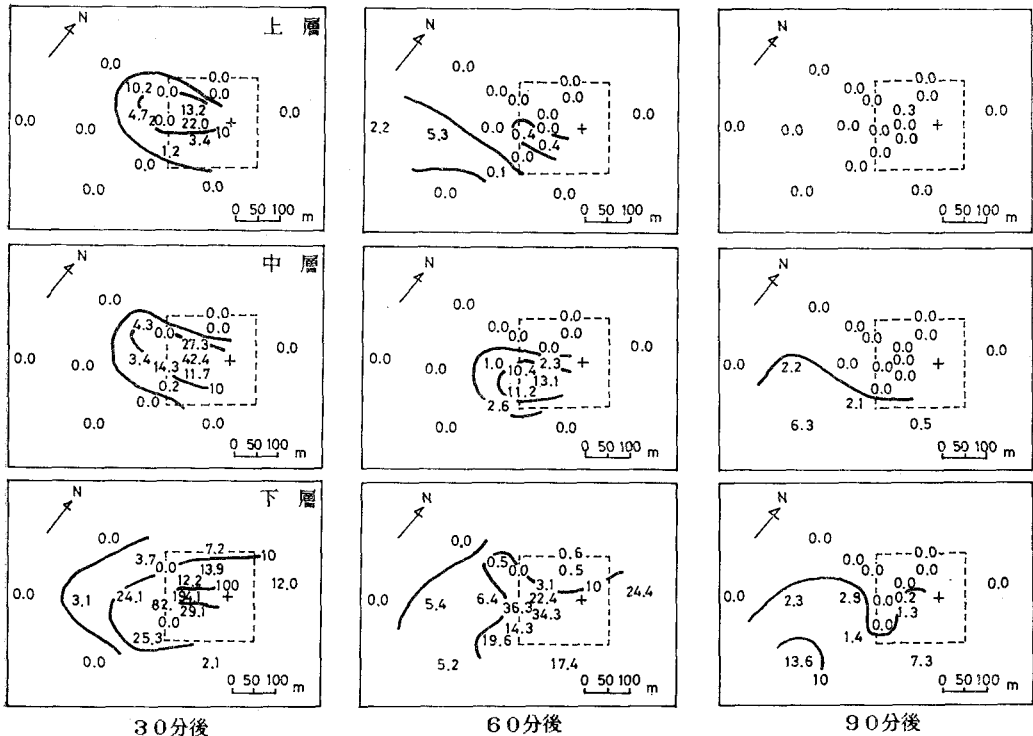


図-3 直投試験による濁り拡散の測定結果 (SS mg/l)

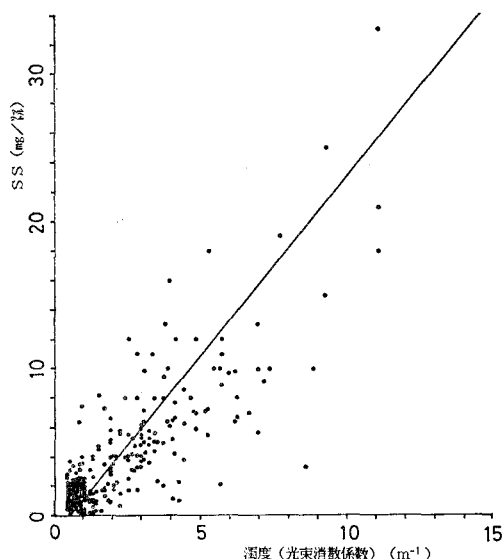


図-4 濁度とSSの相関

顕著な水平拡散はみとめられず、むしろ下層から上層への鉛直拡散が卓越する段階であると思われる。30分後では図-3にも示されるように、上・中層ではほぼ同程度のSS分布となり、下層においては流れによって下流側に拡がっているのがみとめられる。30分以降では上、中、下層ともに水平拡散が進行し、流れが相対的に大きい上層においてはSS拡散の促進によって濃度が再び減少し、1時間後ではバックグラウンド値と区別できなくなる。下層においても濃度は減少し、これより先は各層とも移流、拡散の進行によって図-3に示されるようにバックグラウンド値と区別できなくなる程度にまで希釈される。

一方、他の本調査のケースについても同様の傾向が観測されている。

なお、図-3における濁度-SS変換に際しては、採水分析によるSSと、それに対応する濁度との相関を利用した。ここでは本調査時の全層について求めたSSと濁度の関係が図-4に示されるように $SS = 2.445 \times \text{濁度} - 1.301$ として得られた。SS換算には上式の関係を用いた。

3. 濁り分布の再現シミュレーション

(1) 濁りのシミュレーションモデル

モデルは2次元3層モデルで、流れについては流体の連続式、水平2成分の運動方程式を連立させて水位と各層の水平流速成分および層間の鉛直流を求めるものである。鉛直流は連続式より算出し、静水圧分布を仮定した。これらの微分方程式はADI法による差分式に置換えて計算するモデルとした。

濁り拡散モデルはフィック型拡散式に沈降項を加えた通常の式を陽解法で差分化した。

(2) 入力データ

a) 流れに関するデータ

濁り拡散計算に用いる流れのデータは図-2に示した試験工事前後の流況を再現対象とした。計算に当たり工事区域を含む $3\text{ km} \times 2\text{ km}$ 領域に対してX軸は対岸の海岸線とはほぼ平行になる $N51^\circ E$ にとり、水平格子は $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 、鉛直分割は 6 m (上層)、 7 m (中層)、全水深 -13 m (下層) とした。境界においては流量制御による計算を行った。

このようにして得られた流れ計算結果の1潮汐間経時変化を代表点について示したものが図-5である。同図の横軸は計算開始からの時間を示しているが、図-2の実測流れと対比して、敷砂開始の昭和59年3月22日13時30分を図-5の28時間目と対応させることとした。

b) 拡散係数

試験工事区域内の2点において得られた潮流の定点連続観測結果から算出される拡散係数は、流れの測得値をそのまま使用すると $2 \times 10^5 \sim 2.5 \times 10^6\text{ cm}^2/\text{s}$ 、潮流を含

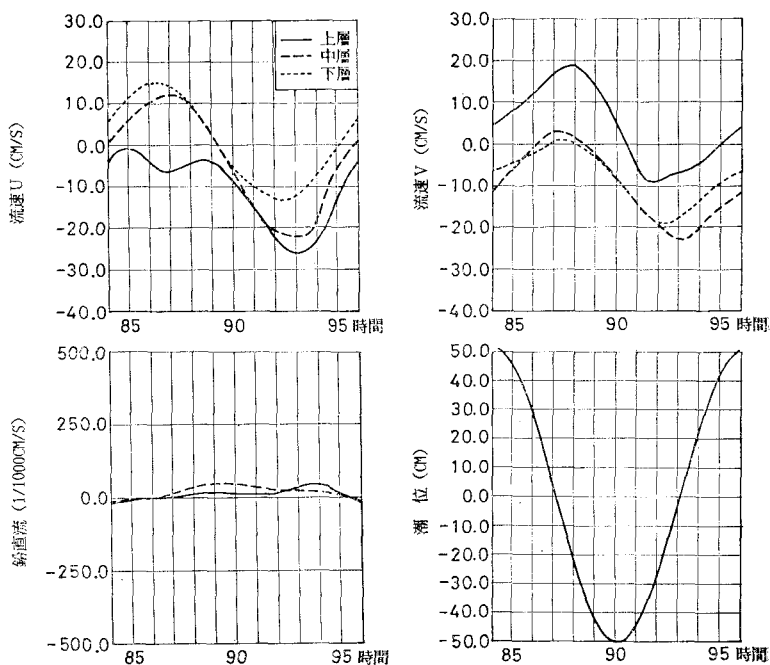


図-5 代表点における流れと水位のシミュレーション結果

む 12.5 時間以上の長周期成分を除去すると (2.8~9.8) $\times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$, さらに, 潮流を含む 6.25 時間以上の長周期成分を除去すると概ね $10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ のオーダーとなる。本試験時の濁り拡散は 1 潮汐時の 1~2 時間の現象であることから水平拡散係数としては $10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ を採用することとした。図-5 の結果にも見られるように, 鉛直流が 0.03 cm/s 程度あり, これによる移流効果が大きい, 鉛直拡散係数は 0 とした。

c) 濁り発生量

濁りの発生量については, 現地直投実験を繰返し行い, 所定の断面を通過する濁りから求められるが, 今回のように限られた実験においては十分な解析ができない。このため, 濁り発生量については既往の調査例から算出された濁りの原単位²⁾を利用することとした。対象区域の浮遊限界流速, 取扱い土砂の粒径分布から直投による濁り発生原単位は 15 kg/m^3 と定められた³⁾。したがって今回の取扱い土量 3065 m^3 から濁り発生量は 45.15 トンとなる。

一方, 濁り発生時の鉛直分布についても水深, 流れの強さ, 底質その他により異なると思われるが既往の室内実験, 現地試験例から 上層: 中層: 下層 = 1:2.5:6.5 を採用し, 上・中・下層に対してそれぞれ 4.51 トン, 11.29 トン, および 29.35 トンとした。

d) 沈降速度

取扱い土砂の沈降速度分布, あるいは粒度分布は, 土質試験法にもとづく比重計法 (JIS A 1204, ただし試料のねり返し等の前処理は行わない), 光透過法, コールターカウンタ法, 吸い上げ法など測定法によってもかなり異なる結果の得られることが知られている。これら各測定法では測定の方法・原理, 供試体濃度, 測定時の時間やスケールな異なり, これらの条件の相違が影響するようである。今回のような実海域での直投で土砂の沈降挙動がいずれの方法に近いのか判断は難しい。本計算においては比重計法により得られる粒度分布を採用して検討することとした。

(3) 濁り計算結果

複合粒径より構成される土粒子に対しては厳密にいえばその粒径に対応する沈降速度を与えることになる。しかし現実的にはこの方法は難しい。したがってとくに濁り分布に支配的な細かい粒子として $10 \mu\text{m}$, $20 \mu\text{m}$, および $30 \mu\text{m}$ の 3 粒径を採択し, これらの粒径に対応する沈降速度をストークスの式より求めてそれぞれに拡散計算を行い, 得られた濃度を粒径の組成について重ね合わせる方式をとった。

各粒径毎の拡散計算は, a) で述べた流れの場合で 28 時間時点から敷砂施工地点に上・中・下層から濁り発生量

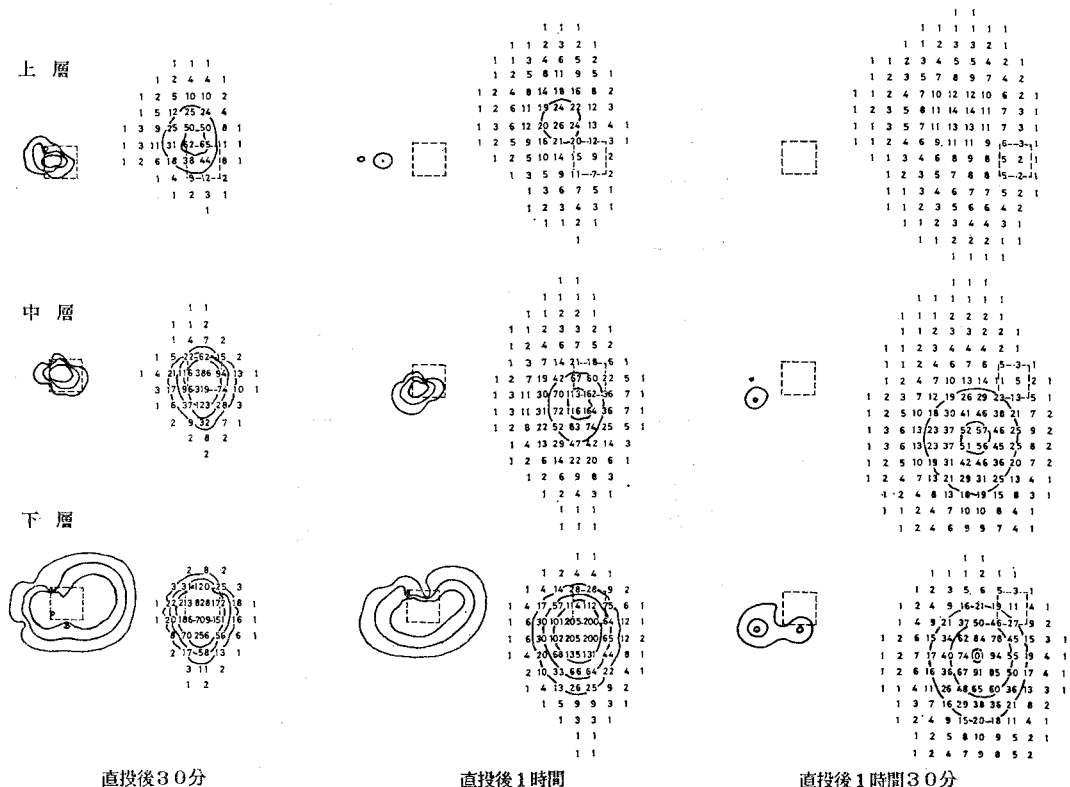


図-6 直投による濁り拡散の実測値と計算値との対比

を与え、タイムステップ 180 秒、初期濃度 0 mg/l、境界での希釈係数 0.9 として 24 時間分を行った。このようにして得られた粒径に対する場所毎、時間毎の濃度を土砂の組成比 ($r_{10} : r_{20} : r_{30} = 1.5\% : 8.5\% : 69.4\%$) で重ね合わせた(ここで 3 粒径の組成比の和が 100% とならないのは粒径 200 μm 以上の大きい粒子に対しては濁りに寄与しないとして取扱いの対象から除外したためである)。

一方、本調査により得られた濁り分布の実測値(図-3 に相当)を数値シミュレーションと対応づけるため、内外挿によって実測値を 100 m 格子上に落し等濃度線を描いた。このようにして得られた実測データを数値シミュレーション結果とともに示したものが図-6 である。

図-6 において、各図の左側は実測データ、右側は数値シミュレーションの結果であり、等濃度線は外側より SS 2, 5, 10 mg/l の値を示している。数値シミュレーションの各数値は格子上の SS (単位 1/10 mg/l) を表している。これらの結果によると、直投後 30 分では下層の 10 mg/l 等濃度線が囲まれる領域は 1 ~ 2 割程度計算の方が小さく、5 mg/l, 1 mg/l の線もやや計算の方が小さめである。これに対し、中・下層では逆に計算値の方が拡がりの範囲は大きめである。このことは、鉛直流の実測値がないため明確ではないが、図-5 の鉛直流計算結果にみられるように、上昇流れの時間帯にあって計算ではこれによる上層側への鉛直移流がやや過大に評価されたためと考えられる。直投後 1 時間においては、下層で分布形状が実測と計算の両方でやや異なるものの、拡散範囲は概ね同程度となる。中・上層では直投後 30 分と同様の理由で計算の方が拡散範囲は大きくなっている。さらに直投後 1 時間 30 分では上・中・下層とも計算の方が拡散範囲は大きくなる。実測で以降時間の経過とともに濁りの分布が周囲のバックグラウンド値と区別できなくなるのに比し、計算では濁りの減衰が遅れてくるのがわかる。

以上、濁りの拡散分布に関する実測値と数値シミュレーションの対比を行ったが、分布形状は水平および鉛直方向の流れに対して極めて敏感であること、および、本調査結果からは濁りの減衰は意外に早いことなどがわかる。計算において、拡散係数は流れの測定値から算出される内で小さめの $10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ を採用し、沈降速度は比較的大きな粒度となる比重計法より求め、これらを適用した。このような条件で得られる濁り分布の推定値は、実測値と同程度またはやや過大となり、濁り管理の面からみて危険側でないといえよう。

流動する海水中の懸濁粒子の沈降特性については未解明な面が少なく、今後さらに現地試験や基礎実験を積み重ねてこれらの問題を明らかにしていく必要がある。

4. ま と め

- 1) 3000 m^3 級土運船からの土砂直投試験によると、濁りの拡散は工事場所を中心にほとんどは 500 m の範囲内に限定され、土砂投下後 1.5 時間でそれによる濁りは周囲水の SS と区別できなくなる。
- 2) 濁り拡散に対して、水平流、鉛直流が分布形状に及ぼす影響は大である。
- 3) 濁り発生量は既往の工事、調査例に基づいて定められた従来 of 工種別原単位法を用いて推定できる。
- 4) 濁り原因となる取扱土砂の沈降速度の分布、すなわち粒度分布は、比重計法による方法で求めても濁りの濃度や拡散範囲を過小に見積ることにはならない。

参 考 文 献

- 1) 運輸省第三港湾建設局・関西国際空港計画室・新日本気象海洋株式会社：地盤改良施工実験に伴う濁りの挙動調査報告書、昭和 59 年 3 月。
- 2) 運輸省第四港湾建設局海域整備課：しゅんせつ埋立による濁り等の影響の事前予測マニュアル、昭和 57 年 3 月。
- 3) 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所：土砂による海水汚濁の予測方法——手法開発のための調査研究(通年報告書)、昭和 55 年 3 月。