

海上工事の濁り監視について

運輸省港湾技術研究所 正会員 堀 江 毅

1. まえがき

最近の海上工事においては、大規模化、大水深化、施工の急速化が進む一方で、工事が周辺環境に与える影響を評価することがますます重要となってきた。なかでも濁りは工事の直接的影響と考えられるため、その発生、拡散を最小限にいとめる必要がある。このため、工事による濁りを事前に予測して監視体制に備えると同時に、工事中においては濁りの進行を予測して工事へのフィードバックや濁り拡散の防止対策を行う必要がある。

本文では、工事による濁りの発生や分布が、工事の規模、工種工法、現場の地形・流れとの関連においてどのような特性をもつのかについて概説し、つぎに濁り監視の必要性和その実態、ならびに数値シミュレーションを利用した濁り監視システムの試案について述べることにする。

2. 海上工事による濁りの発生と拡散

海域における濁りは、出水時における河川からの直接流入、波浪・流れなどによる底質のまき上げ、内部生産による水中懸濁物質の急増などによるところが小さくないが、ここでは海上工事により人為的に発生する土砂の濁りに限定する。

海上工事による濁りの量、形態は、工種工法、取扱われる土砂の種類・特性、および周辺の地形、流れなどの条件に異なる。とくに、濁りに関係の深い工種は地盤改良、しゅんせつ、埋立である。たとえば地盤改良工事には深層混合処理工法、サンドコンパクションバイブル打設、サンドドレーン工法、床掘置換、敷砂などの工法がある。これらのうち、前三者は隔壁のない状態で行うことが多く、海底の微細泥を攪乱するため濁りの発生量は比較的大きくなる。深層混合処理の場合は海底で攪拌翼を回転させながらセメントミルクと海底泥を混合するもので、攪拌翼の打込み時と引抜時に濁りが発生する。サンドコンパクションでは海底にケーシングを行うため、この打設時と引抜時およびエアブロー時に濁りの発生が大となる。濁りの発生量は、深層混合処理、サンドコンパクション、サンドドレーンとも底層において大、ついで表層、中層の順となる。床掘ではバケット船が最も発生量が大きいがグラブ船、ポンプ船、ドラグ船の順に小さくなる。敷砂の場合は通常粒径の大きい山土が用いられるため海底泥に比べ濁りの発生量は小さく底層付近に集中する。

一方、埋立に先立って行われる護岸工事は、マウンド土砂の投入、捨石、坑打、セル打設等があるが、濁りの発生は少い。さらに、土運船からの土砂の直投、ベルトコンベアによる揚陸などがあるが、護岸により周辺海域と大部分が遮断されていることが多く、この場合には濁り発生量は小さくなる。

このため、工法別に過去の調査例をもとにして、単位の取扱い土量に対する濁り発生原単位が、調査の対象となったシルト分以下の粒径加積率とともに求められている¹⁾(表-1参照)。

表-1 工種別濁り発生原単位の一例

工 法	シルト分以下の粒径加積百分率	発生原単位 (t/m ³)
ボ ン プ	2.5 ~ 99.0 (%)	(0.08 ~ 45.23) × 10 ⁻³
グ ラ ブ	54.8 ~ 87.5 (%)	(9.91 ~ 89.03) × 10 ⁻³
土 運 船	2.7 ~ 82.2 (%)	(0.02 ~ 123.43) × 10 ⁻³
ガ ッ ト 船	4.7 (%)	5.04 × 10 ⁻³
ド ラ グ	63.8 ~ 92.0 (%)	(7.90 ~ 25.9) × 10 ⁻³
バ ケ ッ ト	10.4 ~ 27.7 (%)	(17.58 ~ 55.77) × 10 ⁻³

注) 発生原単位は試験に用いられた船型、取扱い土砂の種類についてより細かく分類し求められているが、ここでは船種毎にまとめその範囲で示した。予測に用いる発生原単位は詳細分類された内から最も近いものを選び汚濁限界流速に相当する粒径の加積百分率による補正を行って使用する。

問題とするケースの濁り発生量は、上記の原単位に対し、取扱い土砂の現場における汚濁限界流速に対応する粒径の加積百分率と取扱い土砂量を考慮して推定される。

施工地点を中心にして点源または線源として発生する濁りは周囲の流れとともに四方に分散する。この濁りの分布形については解析解や数値シミュレーションによって推定される。

3. 工事中の濁り監視

通常は建設計画の段階において環境アセスメントがなされ、濁り防止を配慮した施工計画が立てられているが、実際の工事現場においては、気象海象条件の変化、汚濁バックグラウンド値の変化、工種工法の細かい組合せの変更による条件変化などにより、当初想定したとおりの条件で工事が実施されるとは限らない。また工事中に濁りを測定することにより周囲海域に一定濃度以上の濁りが拡散することを未然に防止する必要がある。このような意味から、工事中の濁りを系統的に監視できる手順と手法をあらかじめ確立しておくことが要求される。

この手順、手法に対して、

- ①当該水域の水質変化が把握できるため長期・短期にわたる必要な計測項目の基礎データが得られること、
- ②迅速で精度の高い安定した計測、分析ができること、
- ③計測データの処理・伝達が迅速、確実に行えること、
- ④計測された情報から周辺海域の水質汚濁の評価が出せること、
- ⑤汚濁変化の予測に必要な種々の予測手法や解析法が整備されていること、
- ⑥現場における気象海象条件、施工条件などの変化に迅速にかつ柔軟に対応できること、および
- ⑦工事の円滑な進捗に効果的に作用すること

などの条件が要求される。²⁾

まず水質の監視項目として上述の条件に対応でき、法令や協定で基準化が可能であり、かつ工事に直接関係してその制御が可能なものとして濁度とSS（浮遊物質濃度）とがある。また工事に直接関係しなくても周辺海域の水質把握のために、水温、塩分、pH、DO、透明度など測定が容易なものや、COD、栄養塩類についても測定されている例が多い。

これらの項目の監視点は一般に工事区域を中心として、図-1に示されるように、工事を施工する工事区域、工事の影響を受ける場合が生ずると考えられる環境監視海域、および工事による影響を防止すべき一般海域とに区別することができる。

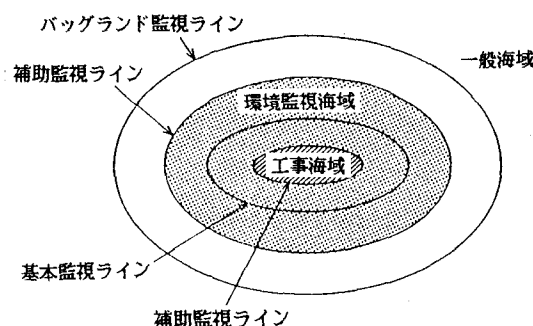


図-1 工事区域と監視ライン³⁾

環境監視海域において工事による影響の有無、程度を把握するための基本的な監視ラインとして基本監視ラインを設定し、一般海域では工事による影響のない海域の状態を知るためのバックグラウンド値（BG値）監視ラインが設定される。さらに必要に応じて補助的な監視ラインが設定される。

基本監視ライン上でのSS、濁度等の基準値は、水質環境の保全、魚介類の保護、地域住民に対する配慮のもとに設定される。この基準値については既往例では大小かなりの差が見られるが、監視点では概ねSS 30mg/ℓ以下、余水吐では10～50mg/ℓの範囲に含まれる例が多い。第四港湾建設局による全国工事例のアンケート調査によると、53例中、SS基準値はBG+10mg/ℓが約36%、BG+2mg/ℓが約10%、50mg/ℓが約15%となっている。水質環境保全の立場からいえば絶対値による上限の設定が必要であろうが、BG値は通常の場合でもSS 2～10mg/ℓの範囲で変動するため、BG値を上乗せした基準値でないと工事が出来ない状態も起り得る。

監視基準値を守るべき領域として前述の基本監視ラインが濁りの拡散状況、工事の規模、周辺の海域利用状況などを考えて設定される。水質監視を円滑に行うため、基本監視ラインの内外に補助監視ラインが設定される。内側ラインでは濁りをいち早く把握して基本監視ラインでの濃度を予測したり、濁り防止対策の先手を打つことに利用する。一方外側ラインでは、基本監視ラインを越えて拡散する濁りの追跡と、工事によらない濁り、すな

わちBG値の把握のために設定する。これらのライン上にはパイとアンカーとを組合せた固定監視点と、限られた固定点の間隙を補完して濁りの主拡散領域の追跡、緊急時の陸上との連絡などに備えた移動監視点を配置する。

固定点または移動点にて取得された測定データ、または記録紙、分析データシート、あるいは試料は、直接または間接的にパンチカードやキーボードを介して電子計算機に入力されるか、試料については分析室に持込まれる。これらの結果は平均化、経時変化表示、統計処理などを経て、タイプライター、磁気テープ、モニターテレビなどに出力される。

出力されたデータをもとに、汚濁範囲、濃度およびその継続時間などを考慮して解析を行う。監視基準値をすでに上回っている場合、または警戒濃度に達した場合には、その原因が工事によるものか、あるいは周辺のBG値の影響によるものであるのかについての解析が行われる。また、このような事態に及んだ場合には監視の時間的空間的密度を高めて汚濁の変化を詳細に追跡する一方、濁りの防止について対策が講じられる。

濁りの防止対策としては、拡散防止膜、傾斜堤、エアースクリーンなどのように物理的な手段による方法や、微細粒子の凝集作用を利用して沈降促進をはかる化学的な手段による方法のほか、濁り防止のために特別に改良開発された工法に切替える方法などが考えられる。ワイドスクイーバー方式、クリーンアップ方式、ニューマポンプ、ウーザーポンプ、密閉グラブ、ドラグサクシオンなどは濁りを軽減する工法の例である。また、施工速度の変更も濁り対策の一つにとり入れなければならないであろう。

こうした濁りに対して、現況分析、所定区域の一定時間後の汚濁分布解析、あるいは各種汚濁防止対策による効果予測と防止対策の策定に際しては汚濁予測モデルが利用されることになる。

4. 汚濁予測モデルとその適用性

予測モデルに要求される機能、条件としては、適用範囲の広さ、迅速な対応性、条件変化に対する順応性、取り扱い易さ、再現性などが重要である。いま、濁り予測に適用可能と思われるモデルとして、簡単な手計算または図式解より得られる解析解モデル、大型電子計算機を用いる数値シミュレーションモデル、およびそれらの中間的な経験式によるモデルがある。これらの特徴を対比したものが表-2である。

解析解モデルは、流れがないか、または一定な一様流れの場合において点源、または線源が瞬時的あるいは連続的に与えられる場合の時間的空間的分布を求めるもので、それぞれの式に汚濁発生量、拡散係数、水深、流れの大きさなどを入力することにより比較的簡単に得られるが、水深、流れ、地形などが複雑に変化する場合にはその適用が難しくなる。

テトラ・テック⁵⁾では、濁りの発生から長期的な拡散に至るまでの過程を3つの相に分け、水深、成層の有無、直投か吐出かの場合における濁り拡散予測モデルを開発している。これは濁りを含んだ泥水塊が徐々にその体積を増加させつつ重力-浮力のつり合いのもとで沈降し、着底後は流れにより移流拡散させるという方式をとっており、特に第1～2相のモデル化にその特徴がある。現地の条件に促して決定すべきパラメーターが多いため、これらを確定するためのキャリブレーションが必要である。

表-2 汚濁予測モデルの対比

モデル 特 徴	解析解モデル	経験モデル (テトラ・テック)	数値シミュレーション モデル
地形が考慮できる	×	△	◎
水深が考慮できる	×	△	◎
鉛直分布が表現できる	△	○	◎
成層または密度効果の導入	×	○	○
濁り発生形態の任意性	△	○	○
防止膜の効果	×	× or △	○
モデルの使いやすさ	◎	○	△
局所的予測	△	○	△
初期段階の濁り予測	×	○	×
予測処理の迅速性	◎	○	× or △
適用範囲	△	○	○
小型計算機による計算	◎	△ or ○	× or △
応用例	○	○	○
再現性	?	?	?
モデルの発展性	△	○	○

× 不能または極めて劣る

△ 部分的に良 (可)

○ 何とか可能 (又は良)

◎ 優れている

工事の進捗とともに周囲の流れ、地形、汚濁発生が変化し複雑となるため、これに対応できるのは数値シミュレーションモデルである。これは、濁りを移流分散させる流れを流体の連続式と運動方程式より求め、この流れを用いて拡散式より濁り分布を計算するものである。濁り拡散予測を目的としたモデルの一つに二次元3層のレベルモデルがある⁶⁾。他の水質シミュレーションの場合と同様、まず対象領域流れの場を計算する。任意の地形、海底形状を入力し、境界からは潮汐振幅または流量を与える。水温や塩分の分布による密度効果を取り入れたり、海面で風を作用させることも可能である。

つぎに、濁りの分布計算においては、工事場所、濁り発生量と発生形式（サイクルタイム、継続時間など）、工事開始時と潮汐との関係、拡散係数、汚濁拡散防止膜の展張方式等を入力し、取扱い土砂の代表的な粒径数種について個別に分布計算を行う。こうして得られた粒径群毎の濁り分布を取扱った土砂の粒度組成によって重ね合わせることで任意時刻の濁りの水平・鉛直分布を得る。計算結果の表示に当っては、電子計算機の図化処理機能をフルに活用するとよい。たとえば、計算条件を示す汚濁発生源位置、拡散防止膜の位置、濁り分布の一定時間毎の経時変化、一日平均濃度分布、一日最大濃度分布、特定ライン上での位置的濃度変化図、拡散防止膜の効果表示図、濁り計算に用いた流れのベクトル図などである。一方、監視ライン上で観測されたデータについても図化処理を行い、予測値と観測値との対比、相関図の作成などを行うとよい。

図-2は、水深約20mの海域で、深層混合処理、サンドドレーン、捨石、および敷砂が同時併行的に施工されており（領域内総汚濁発生量 115.42 トン/日）、これに対して拡散防止膜を適用した場合の例を二次元3層モデル、格子の大きさ 100mにて計算し、得られた防止効果の分布図を層別に示したものである。拡散防止膜については、防止膜を内側の中・下層（600m×600m 延長）と外側上・中層（1200m×1200m 延長）に設置した対策Ⅰ、上層外側（1200m×1200m 延長）のみ防止膜を設置した対策Ⅱ、および外側上層（12000×1200m）のみ防止膜を設置した対策Ⅲについて示したものである。図中-印は防止膜により濃度の減少がみられる領域、+印は逆に増加する領域をそれぞれ示している。

上述濁りの計算に用いた代表粒径は $10\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$ 、および $30\mu\text{m}$ であり、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各粒径に対する濁り分布を計算した。取扱い土砂の粒度分布は、土質試験法（JIS-A 1204）によった。この方法により得られる粒度分布は光透過法、コールターカウンタ法などにより得られる粒度

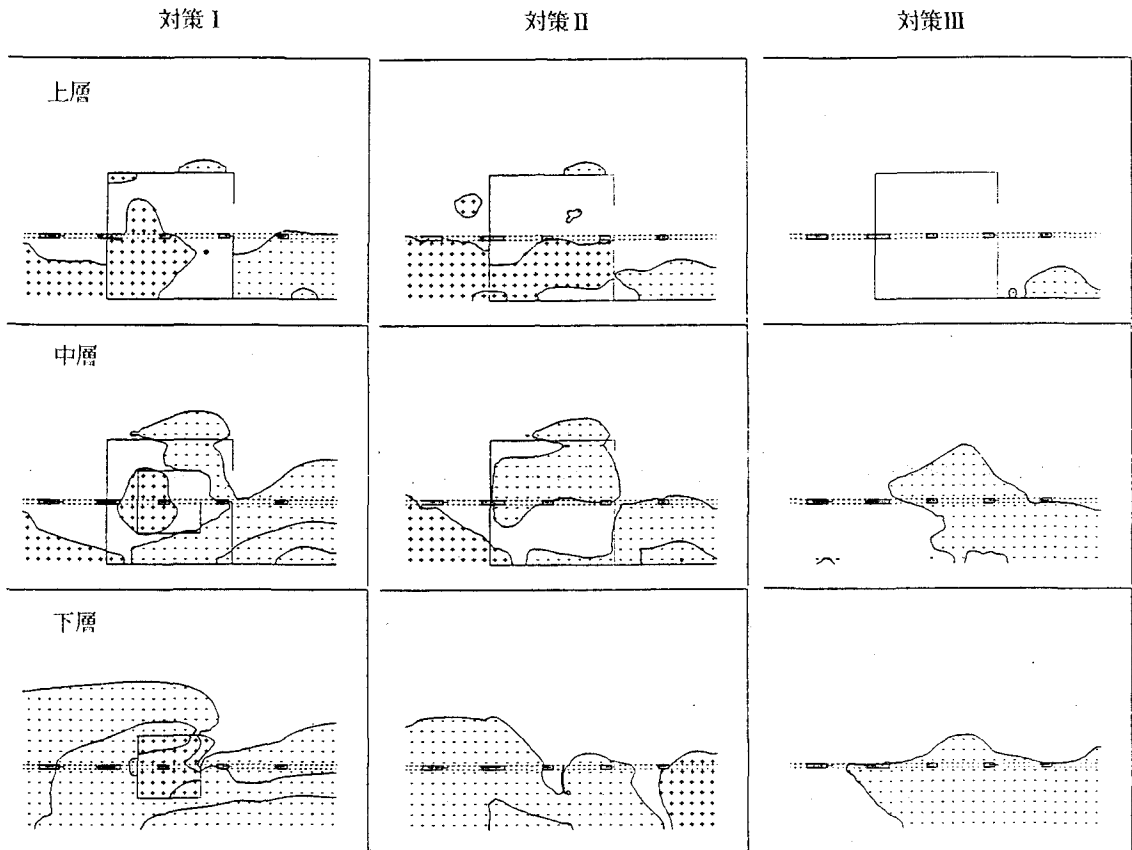


図-2 数値シミュレーションモデルによる濁り予測例

より大き目に出るようであるが、本シミュレーションでは、拡散係数に $10\text{ cm}^2/\text{s}$ を用いて濁りの分布形状が満足出来る程度に再現し得ることが別途確認されている。⁶⁾

このように、数値シミュレーションモデルでは比較的多くの条件を計算にとり入れることができるが、一般には取扱いが複雑であること、結果を得るまでに時間を要することなどが最大の障害となる。これを軽減するため、流れの計算、単位汚濁負荷による濁り分布計算についてはあらかじめ想定される条件について実施し、これを適当な磁気テープまたはディスクに収録し保管しておく。つぎに必要なに応じて工事時期（進捗度）、地形、流れ、取扱い土砂の種類、対策工法などの条件をキーボードにより入力し所要データを検索する。必要なデータがとり出せれば、これらを粒度分布、潮時と工事開始時刻との関係、予測時刻などを入力して濁りの分布形状を出力する。こうして得られた結果はデジタル表示、または見易い形に図化してプロッターに出力したりモニターテレビに映し出す。あらかじめ想定される条件でシミュレーションをして結果をファイリングすることは多くの時間と労力を要し、データ量も膨大となる。このため、データのファイリングは工事の進捗に応じ、1ヶ月程度先を見とおした条件のより確かなものから常時実行していく。検索して必要なデータが得られない場合にはこれらの条件に対する流れや濁りのシミュレーションから開始する。この場合には、異状な濁りに対してうつべき対策を立てるまでに十分間に合うよう余裕をもって適切な情報を提供することが重要である。

数値シミュレーションのもう一つの用件はできるだけ正確な予測ができることである。濁りの監視中において異状のない状態においては得られた観測値と、同条件を入力して得られるシミュレーション結果とを対比してパラメーターやモデルの修正を常に行っていくようにすればこの問題は徐々に解決されていくはずである。これらの手順をフローで示したのが図-3である。

5. あとがき

以上、海上工事中の濁りに関し、その発生と拡散の状況、濁り監視の必要性和その実態、および濁り予測に利用されるモデルの特徴と適用法について述べた。ここで扱った濁り監視の手順はかなり大規模な工事を対象としたものであり、濁りが周辺の海域環境や海域利用に対して問題となる場合に限定されよう。濁りと生態系との関係が必ずしも明確でない現状においては、濁りがどの程度まで許容し得るのかについて基準を定めることは容易ではなく、またその基準が守られたからといって恒久的に安全が約束される訳でもなさそうである。したがって、濁りの監視は工事の円滑な進捗に対する安全弁であるという考えのもとに施工者側では積極的に取り組み、また第三者はこれを見守っていくということが重要と思われる。本文後半に述べた監視手順は机上の論議であり、これが現実に円滑に機能するという保証はない。しかし、このようなシステムは、本来、運用の過程で自動的に修正されてより実用的なものへと進化していく性格をもつものであるという認識のもとに、ここではとりあえずその発端を示したものであるとの理解を頂ければ幸いである。

参 考 文 献

- 1) 港湾環境アセスメント手法の開発ワーキング・グループ：港湾環境アセスメント技術マニュアル（付属資料）昭和53年 1月。
- 2) 堀江 毅：周辺海域の水質監視システム，土木学会誌，Vol.69，No.3，1984，pp51-53。
- 3) 運輸省第三港湾建設局：関西国際空港の調査について—技術管理システム調査編一，昭和58年11月。
- 4) 第四港湾建設局海域整備課：港湾環境影響調査報告書，昭和60年 3月。
- 5) Maynard G. Bradsmas, D.J.Divoky: Development of models for prediction of short-term fate of dredged material discharged in the estuarine environment, Report No.D-76-5, May1976, Tetra Tech, Incorporated, Pasadena, California.
- 6) 堀江 毅：海上試験工事による濁り分布特性と数値シミュレーション，第31回海岸工学講演会論文集，昭和60年11月（予定）。