

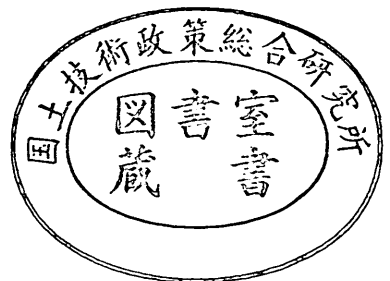
運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 26 NO. 2(1) JUNE 1987

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第26巻 第2号 (Vol. 26, No. 1), 1987年6月 (June 1987)

目 次 (CONTENTS)

1. Bearing Capacity of a Foundation on Top of High Mound Subjected to Eccentric and Inclined Load
..... Masaaki TERASHI and Masaki KITAZUME..... 3
(偏心傾斜荷重を受ける高マウンド上の浅基礎の支持力 寺師昌明・北詰昌樹)
2. Fatigue Properties of Prestressed Concrete Beam-to-Column Joints for Waves
..... Osamu KIYOMIYA, Hiroshi YOKOTA, Toshiyuki YOKOI, Muneto ABE, Osamu KOHRIYAMA, Koichi MINAMIKAWA and Kunihiro MUKAI..... 25
(プレストレストコンクリート柱・はり接合部の波力に対する疲労特性 清宮 理・横田 弘・横井聰之・阿部宗人・郡山 修・南川光一・迎 邦博)
3. 汀線位置の短期変動特性とそのモデル化の試み
..... 加藤一正・柳嶋慎一・村上裕幸・末次広児..... 63
(Daily Changes of Shoreline Position and its Tentative Predictive Model Kazumasa KATO, Shin-ichi YANAGISHIMA, Hiroyuki MURAKAMI and Kohji SUETSUGU)
4. ベイズ型モデルを用いた方向スペクトルの推定 橋本典明..... 97
(Estimation of Directional Spectra from a Bayesian Approach Noriaki HASHIMOTO)
5. 湧昇流を発生させるための水中設置構造物背後の流れと乱れ特性
..... 鶴谷広一・松延嘉國・惟住智昭・柳嶋慎一.....127
(Measurements of Turbulent Flow Downstream of a Submerged Structure Hiroichi TSURUYA, Yoshikuni MATSUNOBU, Tomoaki KOREZUMI and Shin-ichi YANAGISHIMA)
6. 波と底泥の相互干渉による波高減衰と底泥の流動について
..... 中野 晋・鶴谷広一・鷹濱 潤.....171
(On Wave Attenuation and Flowing of Mud Layer due to an Interaction of Waves with a Mud Bottom Susumu NAKANO, Hiroichi TSURUYA and Jun TAKAHAMA)
7. 水質自動観測データの解析と赤潮予測への応用 村上和男.....213
(Analysis of Water Quality Data obtained by Automatic Measurement System and Its Application of Red-Tide Prediction Kazuo MURAKAMI)

8. 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堀江 毅.....253
 (Mathematical Modeling on the Fate of Suspended Particles Caused by Marine Works and Application of thd Models to Environmental Monitoring
 Takeshi HORIE)
9. マイクロコズムとセジメントトラップとを用いた沿岸域での浮遊粒子挙動の観測
 細川恭史・三好英一・関根好幸・堀江 毅.....297
 (Field Observation of Dynamics of Suspended Particles in Coastal Sea by Microcosm and Sediment Trap Experiments
 Yasushi HOSOKAWA, Eiichi MIYOSHI, Yoshiyuki SEKINE and Takeshi HORIE)
10. 捨石マウンドの支持力の新しい計算法
 小林正樹・寺師昌明・高橋邦夫・中島謙二郎・小谷 拓.....371
 (A New Method for Calculating the Bearing Capacity of Rubble Mounds
Masaki KOBAYASHI, Masaaki TERASHI, Kunio TAKAHASHI,
 Kenjiro NAKASHIMA and Hiraku ODANI)
11. 砂地盤の支持力に及ぼす複数基礎の干渉効果.....寺師昌明・北誥昌樹.....413
 (Interference Effect on Bearing Capacity of Foundations on Sand
 Masaaki TERASHI and Masaki KITAZUME)
12. 砂地盤の横方向反力に対する杭幅の影響.....高橋邦夫・春日井康夫.....437
 (Influence of Pile Width on Lateral Reaction of Sandy Subgrade
 Kunio TAKAHASHI and Yasuo KASUGAI)
13. コンクリート舗装構造の非破壊評価法の開発 ——フォールリングウエイトデフレク
 トメーターによる八谷好高・佐藤勝久・田中孝士.....465
 (Development of Non-Destructive Evaluating Method of Concrete Pavement—
 by Falling Weight Deflectometer
 Yoshitaka HACHIYA, Katsuhisa SATO and Takashi TANAKA)
14. 港湾構造物及び海洋構造物の安全性照査に関する検討
 ——作用荷重の変動係数と荷重係数の算定——白石 悟・上田 茂.....493
 (Study on the Method of Verification of Structural Safety of Port and Offshore Structures —Computation of Coefficients of Variation of Loads and Load Factors—Satoru SHIRAISHI and Shigeru UEDA)
15. 防波堤ケーソンに用いる新形式フーチング構造の力学特性と構造解析
 横田 弘・清宮 理.....577
 (Mechanical Properties and Structural Analyses of New Types of Footing
 Used in Breakwater Caissons Hiroshi YOKOTA and Osamu KIYOMIYA)

8. 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

堀江 毅*

要 旨

海上工事をを行うに当たっては、海域環境保全の見地から、工事に伴う濁りの特性を把握する必要がある。このためには、濁りの拡散を予測し、濁りを制御する技術を開発する必要がある。

本文においては、まず、濁り拡散防止の必要性を、濁り規制に対する法的背景および濁りの周辺環境への影響の視点から述べ、つぎに、こうした濁り問題に対する取り組み、濁りの定義、濁り発生量、懸濁粒子の沈降速度についての考え方、測定法について述べた。さらに、濁り拡散を予測するためのモデルの種類、原理、特徴、予測手順、ならびに、濁り監視に対する予測モデルの適用性について述べた。

本研究の結果、海上工事による濁りの拡散分布は、周囲水の流れの影響を強く受けるけれども、適当な時・空間平均をとることにより定量的な扱いが可能となること、予測モデルとしては解析解、半解析解、Dump & Jet モデル、三次元数値モデルなどのうち適用範囲の広さにおいて三次元数値モデルが最も優れていること、三次元数値モデルに対して、所定の濁り発生量、沈降速度を与えた計算により、実測の濁り分布を満足のいく程度に再現できること、さらに、この三次元数値モデルに対して、データのファイリング、予測値と実測値との照合によるパラメータ修正、モデル改良などにより、予測の迅速性とモデルの再現性を高めることができ、三次元数値モデルの濁り監視システムへの適用が十分可能であることが明らかとなった。

* 海洋水理部 海水浄化研究室長

8. Mathematical Modeling on the Fate of Suspended Particles Caused by Marine Works and Application of the Models to Environmental Monitoring

Takeshi HORIE*

Synopsis

The dispersion of suspended particles caused by marine works should be controlled within a minor influence for the environmental protection. For the purpose of this, the suitable mathematical model is required.

The necessity of the turbidity dispersion control is recognized from the viewpoint of regulational background and the influence to marine animals and plants. The fundamental problems are discussed with respect to the definition of turbidity, the generation rate of turbidity, settling rate of suspended particles, and the measuring method of turbidity.

The major attention is focused on such problems as assumptions, properties, and application procedures of models on the prediction of the fate of suspended particles, and also the application to the environmental control.

As the result of the investigation, the following items are clarified. The fate of suspended particles can be mathematically treated through the temporal and spatial averages of particle distributions, even though they are still under strong influence of the ambient current. The three-dimensional model has the widest application, among the analytical, semi-analytical and all other models. The three-dimensional model has also high possibility to play important roles in the turbidity control, when more field data are accumulated and the applicability of the model is proved by comparing the predicted values to the field data.

* Chief of the Purification Hydraulics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

目 次

要 旨	253
1. ま え が き	257
2. 濁り防止の必要性	257
2.1 工事による濁り規制の法的背景	257
2.2 濁りの周辺環境への影響	258
3. 工事に伴う濁りへの対応	260
3.1 大規模海上工事に伴う濁りの問題への取り組み	260
3.2 濁りの把握と測定法	260
4. 濁り発生量の算定	263
5. 沈降速度とその測定	265
5.1 微細懸濁粒子の沈降	265
5.2 測定法	265
5.3 室内沈降試験結果の濁り予測モデルへの適用	266
6. 濁りの予測法	267
6.1 予測モデルとその特徴	267
6.2 予測モデルの選定	283
6.3 予測手順	284
7. 予測モデルの濁り監視への適用	287
7.1 監視システムの中のモデルの役割	287
7.2 濁り防止対策の効果予測シミュレーション	288
7.3 データファイリングとフィードバック	291
8. ま と め	293
参 考 文 献	294

1. まえがき

海面の埋立，防波堤等の外郭施設の建設，航路の掘削，養浜，底質の浄化に関連した浚渫または敷砂等の海上工事においては，水中の懸濁物質による濁りが発生する。濁りの程度は，工事の種類，方法，規模，周辺の地形や流れの状況などにより異なる。また，濁りに対する影響は，濁りの程度，継続時間，海域の利用状態によって異なる。

人為的な濁りに対する水質の低下や海洋生物への影響評価について難しい課題が多く，しばしば問題提起がされている。

こうした状況のもとで，将来の大規模海上工事に伴う濁りの問題に対する取組み方と対処方針についてあらかじめ十分な措置を講じておくことは重要である。これまでに関西国際空港建設計画に伴う環境アセスメントの一環として，関係機関の努力と，多くの専門家の知識，多額の子算を投じ，濁りに対する総合的な技術課題が十数年の歳月を費やして検討されてきた。それらの成果は「土砂による海水汚濁の予測手法（通年報告）」¹⁾としてまとめられている。

本文は，今後，濁りの問題に対処する際，上述の成果を有効に活用するため，重要事項を再認識するとともに，その後の調査研究によってそこでは述べることのできなかった事項を中心に，海上工事に伴う濁りの拡散予測および濁り監視への適用性についてとりまとめたものである。

本文のとりまとめに際しては，まず，2.において，濁り防止の必要性に関連して，法的規制の面および濁りの海域環境への影響の面から述べた。次に，3.においては，濁りの実態把握に関連し，濁りの定義とその測定法，現地における濁りの発生と拡散特性の実態についてとりまとめた。さらに，4.においては，濁りの予測を行う上で重要となる濁り発生量，5.において粒子の沈降速度の捉え方，算定法について述べた。つぎに，6.においては，本文の中心課題となる濁りの予測法に関し，予測モデルの特徴，その選定，および，予測手順について述べた。7.においては，予測モデルの濁り監視への適用性についてとりまとめた。最後に，8.においては，以上の成果をとりまとめた。

2. 濁り防止の必要性

2.1 工事による濁り規制の法的背景

わが国の公害関係諸法の根幹となっている「公害対策基本法」においては，事業者，国及び地方公共団体の公

害防止に関する責務の明確化，環境基準の設定，公害防止計画の策定等の公害防止に関する施策の基本事項，費用負担及び財政措置に関する事項についての基本的考え方，公害対策会議及び公害対策審議会に関する事項を定めている（公害対策基本法第三～三十条²⁾）。これらのうち，環境基準の設定と公害防止計画の作成を除けば，実質的な規制の措置は本法の趣旨を受けて制定された大気，水質，土壌，騒音，振動，地盤沈下，悪臭，廃棄物等に関する個別法で規定されている。これらのうちから，港湾の環境保全に特に関係の深いのは水質汚染と廃棄物関連である。

まず，水質汚濁防止法は，「工場又は事業場からの排出」を対象としている。港湾事業との関連においては，作業船の海底攪乱は本法には該当しないと解される。「海洋汚染及び海上災害の防止に関する法律」では，埋立場所等の護岸その他の施設に設けられている余水吐から流出する汚濁水や，船舶及び海洋施設からの排出油及び廃棄物について規制している。ポンプ式浚渫船等の作業も該当すると解釈され，浚渫土砂についても「埋立用材」としてでなく「不要物」と解釈されると本法が適用される。同法では，浚渫土砂を「水底土砂」，熱しゃく減量が20%以上の「指定水底土砂」，銅，鉛，ふっ化物を一定基準値以上溶出する「特定水底土砂」，および水銀，カドミウム，亜鉛，有機リン，六価クロム，ヒ素，シアン，PCBを一定基準値以上溶出する「有機水底土砂」の4つに分類し，排出海域及び排出方法を規定している（海洋汚染及び海上災害の防止に関する法律施行令第五条³⁾）。

次に「廃棄物の処理及び清掃に関する法律⁴⁾」は，廃棄物を適正に処理し，生活環境を清潔にすることにより，生活環境の保全および公衆衛生の向上をはかることを目的としたものであるが，浚渫土砂はここでいう廃棄物に含まれない。

また，「瀬戸内海環境保全特別措置法」は，瀬戸内海の特異性を考慮し，環境悪化を防止するために特別に制定されたもので，後述の公有水面埋立法の免許または承認にあたって以下の事項を十分配慮することとされている。すなわち，海域環境保全の立場からは，海面の消滅および自然海岸線の変更による海水の自浄能力の低下をもたらし周辺海域への影響の度合いが軽微であること，埋立地からの排水によりCOD負荷量が目標値を越えないこと，埋立てによる潮流の変化がもたらし水質の悪化の度合い及び異常堆砂，異常洗掘等による隣接海岸への影響の度合いが軽微であること，埋立工事に伴う濁り等の周辺海域への拡散等による水質悪化の度合いを軽微に

する工法がとられていること、などが規定されている。さらに、自然環境保全上及び水産資源保全上の見地から、埋立、埋立地の用途及び埋立工事による自然環境（生物生態系、自然景観、及び文化財を含む）への影響が軽微であること、埋立てそのものの海水浴場等の利用に与える影響が軽微であること、埋立てによる海面消滅および埋立地からの排水による水産資源への影響が軽微であること、埋立工事に伴う汚染の拡散が、水産資源及びその利用に与える影響の度合いを軽微にする工法がとられていること、などである⁹⁾。

一方、上述した一連の公害防止法令とは別に、水面を陸地とするための手続きを定めた「公有水面埋立法」が大正10年に制定されている。これは、事業者が公有水面を変じて陸地とし、財産権を附与する制度を定めた手続法である。

昭和30年代には本格的な高度経済成長期に入り、この間に造成された臨海部埋立は今日の日本経済を支える基盤となっている。しかしながら、その後、埋立規模の大型化、埋立地利用の多様化等の社会情勢の変化により本法が適合しなくなった面がでてきた。昭和40年代後半に入り、人間生活の快適性と安定性のための「環境保全」が強く叫ばれるようになって、上述の公有水面埋立法にも一部改正が行われた。また、都道府県知事等が埋立ての免許をするにあたっては、同法に基づき、水面を陸地にすることによる自然破壊（野鳥、魚介類の棲息や、自然海岸等の地形・地質の形質の変更および潮流・水流、漂砂等の水域現象の変化）に対する検討項目の一つとして、埋立工事による水質の汚濁および水産資源への影響等について慎重に審査している⁹⁾。

一方、埋立事業者は、「公有水面の埋立て及び干拓に係る環境影響評価指針について」（昭和61年3月26日、港湾局長通達）に基づき、その公有水面の埋立てが環境に及ぼす影響について調査、予測、および評価を行う。さらに、「運輸省所管の大規模事業に係る環境影響評価実施要領⁹⁾」（昭和60年4月26日運輸大臣通達、61年9月より施行）に基づく環境影響評価準備書を管轄する都道府県知事および市町村長に送付すると同時に、同要領に定められた所定の事項について掲示、公報、新聞等への掲載その他の方法により公示し、準備書を公示の日から1か月間縦覧することとされている。これは法律としての強制力はないまでも、埋立事業者の理解と協力を期待し、行政指導を行っていかうとするものである。本指針で対象事業となるのは50haを超える港湾内の埋立てであり、鉄道、飛行場も含むものである。

環境に影響を及ぼすおそれのある要因の把握は、埋立

に係る工事で事業者が施工するものと、工事完了後の土地及び工作物の存在とについて行うこととなっている。評価は、調査、予測および対策措置の検討結果をふまえ、環境保全目標に照らして事業者の見解を明らかにすることにより行われる。海域における水質汚濁についての環境保全目標は、「浮遊物質量(SS)が水産生物、日常生活において支障がない程度」とされている⁹⁾。

以上のように、港湾の埋立事業に関連した環境保全に関する法律・規制等があり、工事による濁りの発生および拡散防止に対する重要性がうかがわれる。

2.2 濁りの周辺環境への影響

海上工事による濁りの影響には、図-1に示すように、工事中に発生する濁りによる環境へのインパクトと、工事完了後、埋立地、航路、構造物などが新たに存在することによるものが考えられる。

前者の工事中のインパクトとしては、濁りの発生、つまり、水中への懸濁粒子の浮遊による水中照度の低下と植物プランクトン・水生植物の光合成障害、海水・底泥間の物質循環の不均衡化等である。さらに過度の懸濁粒子は魚の呼吸に影響を与えるといわれている。特に、卵や稚仔は濁りに敏感で、ふ化率や成長率に影響を与え、魚介類、底生生物の生産を低下させるともいわれている。また、懸濁粒子は水中の有機物・栄養塩類の吸・脱着によって水質底質を変化させ、海底に堆積すると、底生生物の埋没、底質有機物濃度上昇等の原因によるといわれている。海底表面においては、舞い上がり底質による溶存酸素消費や、有機物・栄養塩類の水中への回帰促進などが懸念されている。

一方、新たな存在によるインパクトとしては、たとえば航路掘削のような浚渫においては、海底地形の局所的な増深による流れの増速、堆積泥の舞い上がり促進、濁りの発生・拡散、などによる濁りの広域化が考えられる。また、局所的な深掘れは、周辺からの浮泥の流入・堆積と浮泥の分解による溶存酸素消費、低層水の貧酸素化、赤潮、青潮への進行などが考えられる。一方、埋立地、外郭施設その他の構造物の存在に対しては、海面の消滅のほか、流れの局所的増減速、海水の停滞、濁りの長期化等の可能性がある。このように、存在そのものによる周辺環境へのインパクトは、一般に、小さくかつ緩やかながら長期性を帯びているのが特徴的である。

上述のように、工事によって発生する濁りが周辺環境に及ぼすと思われるインパクトは複雑であり、特に、濁りが水中生物に及ぼす影響を定量的に把握することは容易でない。四国連絡架橋漁業影響調査¹⁰⁾においては、魚介類、水生植物の濁りに対する影響調査が行われてい

る。

この調査においては、卵稚仔、貝類、のり類などのように運動しないもの、あるいは運動能力の乏しいものに対する影響調査、および、運動能力の高い浮遊魚の濁りに対する影響実験等が行われている。養殖はまちのように生育場所が限定されるものについてはこれらの実験結果から濁りに対する影響が推定しやすいと思われる。しかし、自ら生活場所を変えることのできる一般の魚類については濁りから忌避するため、行動範囲の制約された水槽での実験結果のみから実海域での影響を把握することは難しいと思われる。

このようなわけで、濁りの影響は、生物の種類、成長段階、環境により異なり、濁りによって変化する条件が相乗して作用するものと考えられる。

以上を総合すると、水中の光合成や浮遊魚に係る濁りとしてはSS（または濁度）を、底生貝類に対する埋没深さ（SS堆積厚）としてはそれらの殻厚を、のり等の水中植物に対しては成葉へのSS堆積厚をそれぞれ影響評価の対象に考えるとよいようである。

3. 工事に伴う濁りへの対応

3.1 大規模海上工事に伴う濁りの問題への取り組み

一般に、海上の工事においては、浚渫と埋立てが大きな割合を占めている。工事による濁りは、こうした浚渫・埋立てに伴う陸土や海底土の取り扱い土砂、またはまわりの海底土の一部が流れ、攪乱、舞い上がりしながら周囲に拡がることによるものである。したがって、濁りの発生度合いは、取扱い土砂の量、粒度分布、流れの大きさ、地形、海底土の特性（主として粒径、組成）、などと深い関係があることはいうまでもない。

取り扱う土砂の量は、工事の規模によってその総量が決まる。土粒子の粒度分布は、埋立てであれば対象とする山土または海底土の特性によって決まる。工事現場周辺が閉鎖性海域で流れが小さいか、また逆に、流れが比較的大きいかにより、濁りの発生や拡散状況は異なってくる。さらに、濁りの程度は、施工法、施工機械によっても異なる。特に大規模急速施工の工事の場合は、時間当たりの濁り発生量も大となり、SS濃度が上昇する。施工区域が集中的となるか離散的となるかも濁りの拡散分布に影響する。同じ土捨であっても、大型バージから直投する場合と、砂まき船で中・下層から散布する場合とでも当然濁りの発生量、拡散パターンは異なる。

したがって、工事に伴って発生する濁りについては、これらの特徴を把握した上で扱わなくてはならない。

一方、濁りの発生と拡散の現象をそれらの機構面から

みると、工事現場では土砂の落下や海底土の攪乱による舞い上がりなど重力との係わりが強い鉛直運動が支配的であり、工事現場から離れると流れによる移流と拡散が支配的となる。一般の工事では、工事区域を設定して工事の施工管理や環境への影響管理を行っている。濁りの周辺環境への影響に関しては、上述の工事区域より外側の周辺海域が特に対象の主体になるとと思われる。

3.2 濁りの把握と測定法

(1) 濁りの意義とその測定法

“濁り”は、水中に浮遊している微細粒子によって光が散乱、反射、吸収されたものが視覚を通じて感じとられるもので、この水の濁りは、存在する粒子の量、質、形状、光の性質等により決まる。

濁りはもともとこうした視覚として捉えられるものであり、これを計器によって量的に計測すると、その測定法によって感覚との間にずれの生ずることは必至である。

計器による濁りの測定法には、懸濁物質を含む水を採取し測定する方法と、透視法あるいは光の散乱、反射、吸光度などの光学的な性質を利用して測定する方法とがある。

透明度は、透明板といわれる円形板を海水中に降ろし、これを上から見て丁度見えなくなる限界の深さをメートルで表したものである。

透視度は、底の平らなガラス管の底に5号活字をはりつけ、それに懸濁物を含む試水を注入し、上から見て活字の見えなくなる水層の厚さをセンチメートルで表したものである。

濁度は、精製カオリン1mgを水1l中に含む場合の濁りを1度（または1ppm）としている。測定法には、試水の濁りを濁度標準液と比較して測定する方法と、光電光度計または光電分光光度計を用いて測定する方法とがある。測定方式には、試水に平行光束を当て、透過した光を直接受光部で受けて測定する通過光方式、平行光線が懸濁粒子によって散乱された光の量を測定する散乱光方式、透過光と散乱光との比から測定する方式、などがある。

一方、懸濁物質量を直接測定する方法として、試水をろ紙（たとえば孔径1 μ m）でろ過し、残留物を乾燥後秤量して求める方法がある。これはSS（浮遊物質）といわれるもので、上述の濁度が濁りを光学的に捉えるものとは違い、物質（濃度）として捉えるものである。

以上、濁りの捉え方は基本的には調査の目的に応じた測定法を採用することになるが、工事による濁りの把握

においてはろ過法による SS 測定, および, 濁度計による濁度測定が適していると考えられる。

(2) 工事による濁りの発生, 拡散状況とそれらの測定法

海上工事による濁りの発生と拡散特性を把握するため, 大阪湾内の泉州沖約 5 km の海上観測塔設置点 (N 34°25'49", E 135°14'25") 北東寄りの地点にて, 昭和58年12月より同59年3月の間に, 一次敷砂, サンドドレーンおよび二次敷砂の試験工事が行われている¹¹⁾。そこで, 上述調査のうちから一例をとりあげて, 工事に伴う濁りの発生および拡散状況の特性ならびにそれらの測定法について述べる。

一連の調査は, 工事施工中の濁り状況を連続的に把握するための基礎調査, 調査地点配置のための予備調査, 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, 海砂と山砂を用いた調査が実施された。

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, 採水採泥を行って後 SS はかの水質底質の分析が行われた。透明度はセッキ板 (円形板), 水色は日本色研名帳, 濁度は水中濁度計 (SEI-SKIM-1), 水温は ET-II 型水温計, 塩分は EIL ザリノメータ, 流向流速はアンデラー RCM-4 によってそれぞれ測定された。

上述方法にて実施された全ケースの調査の中から, 固定点における基礎調査と, 山砂を用いた二次敷砂の結果の概要について述べる。

基礎調査では昭和58年12月22日から同59年3月24日までの50日間, 透明度ほか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

げ潮は SSW が卓越した。流速は 18~30 cm/s, 水温は 4.9~12.8℃, 塩分は 30~33.1% であった。透明度は 2.9~10.4 m まで変化した。試験開始前の濁度は 0.5~1.6 m⁻¹ (光束消散係数) 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 100m, 幅 22m) 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-2 に示されている。

濁度の測定は, 初めの 1 時間は 5 分ごと, 続いて 10 分間ごとに 6 回, さらに 20 分間ごとに 3 回の計 3 時間, また測定層の配置は, 鉛直方向に 1 m 間隔で行われた。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-3 である。同図において X, Y 軸はそれぞ

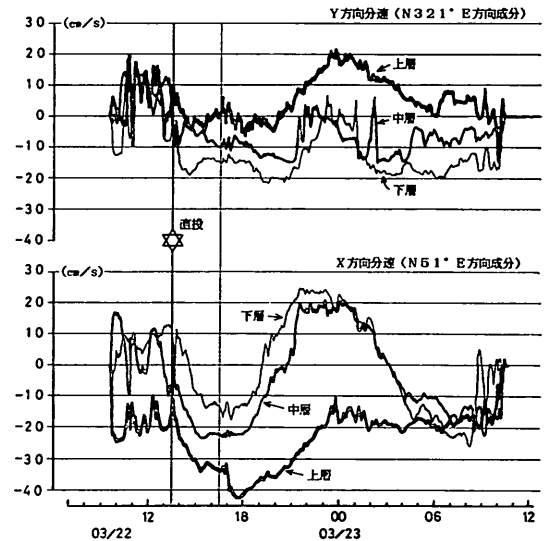


図-3 潮流測定結果

れ N51° E (対岸にほぼ平行) および N321° E 方向に向いている。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) では中層および下層 (海底上 2 m) に対し反対方向に流れる時間帯が特に多いようである。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。

つぎに, 図-2 の 17 測点各 1 m 深ピッチで水中濁度計

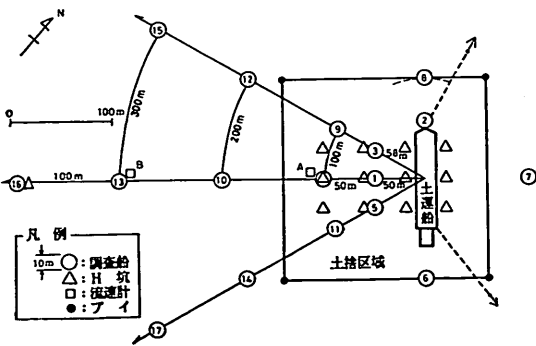


図-2 測点の配置

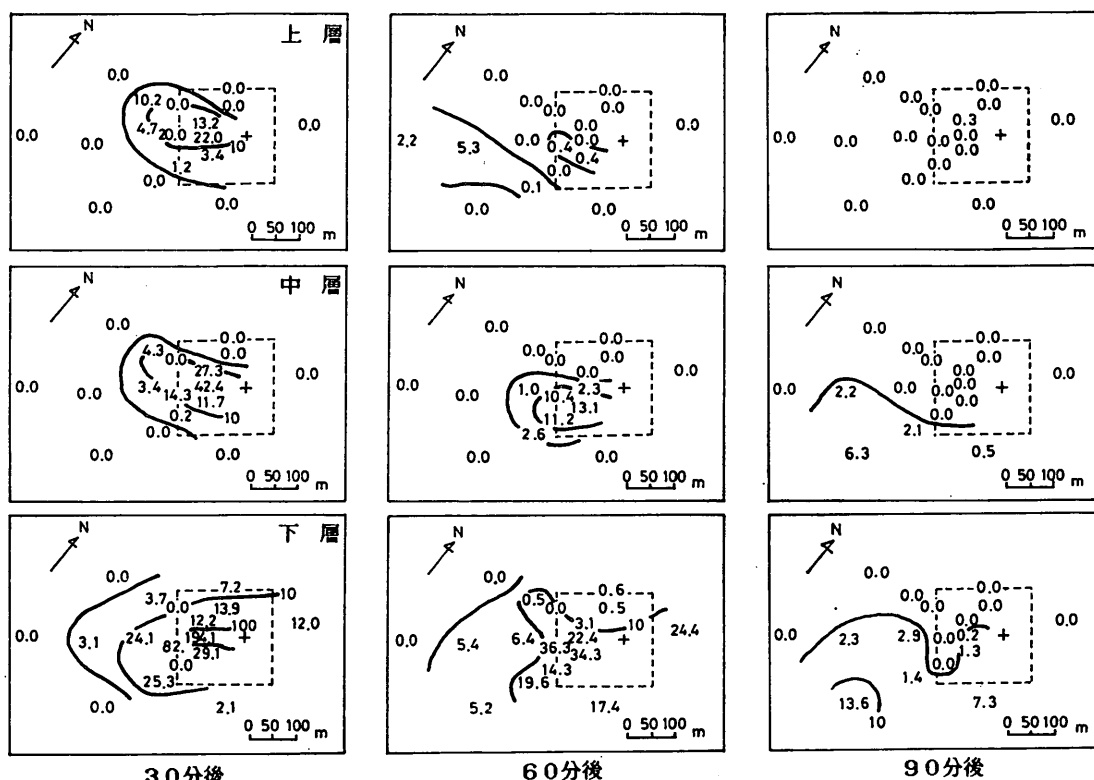


図-4 直投試験による濁り拡散の測定結果 (SS mg/l)

により測定された濁度を濁度-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 換算値で示す。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・上層に SS はほとんど達していない。投下後10分で下層の 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 の濃度が半径 30m 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 の濃度が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-4 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-4 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。

なお、図-4 に示される濁り (SS) の分布形状は必ずしも同心円形状のパッチとなっていない。しかし、同図の濁り分布の結果を各層について 100m 格子上に内外挿によって測定値を落とし直し再整理すると図-5 のような同心円形状に近い分布となることがわかる。

他の本調査のケースについても同様の傾向が観測された。

以上の結果をまとめると、土砂投下後30分間では工事地点下層で SS 100 mg/l が観測されるけれども、工事地点から 500m も離れると 10 mg/l 以下となって BG 値と区別できなくなること、また、時間的には土砂投下後90分で下層及び中層の一部を除けば濁りはほとんど識別できなくなること、濁りの分布形状は流れとの関係が極めて強いこと、したがって、層間では必ずしも分布形状

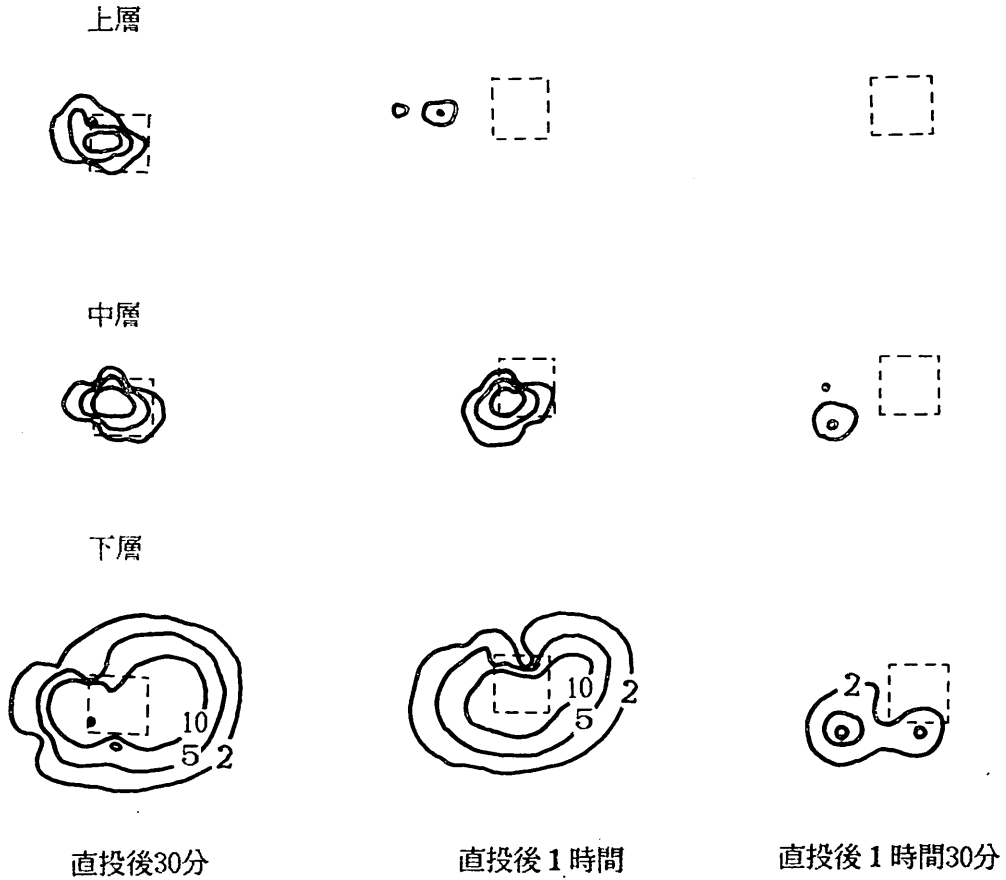


図-5 空間平均された濁り分布 (SS mg/l)

が相似とならないこと、さらに、濁りの拡がり各層での平面分布形状を適宜空間平均をとることにより同心円形状の分布に近づくことがわかる、などである。

4. 濁り発生量の算定

海上工事による濁りの発生量は、濁りの対象となる土砂、工法、施工機械の種類と大きさ、施工区域の流れの大きさなどにより決まる。

各工法、施工機械に伴う濁りの発生量は、単位の取り扱い土砂量に対する発生量、すなわち、濁り発生原単位によって算定する。

濁り発生原単位は、通常、次式に従って求められる。

すなわち、

$$w = \frac{R}{R_{74}} w_0 \quad \dots\dots(1)$$

ここに、 w : 当該区域における濁り発生原単位 (t/m^3)

w_0 : 発生原単位表における濁り発生原単位 (t/m^3)

R_{74} : 濁り発生原単位表における w_0 値算定の対象となった土砂のシルト分以下 (粒径 $74 \mu m$ 以下) の粒径加積百分率 (%)

R : 現地流速に対する汚濁限界粒子径の粒径加積百分率 (%)

である。

R は、現地流速と汚濁限界粒子径に関する Ingersol-Camp の式の関係、および、取扱い土砂の粒径加積曲線を用いて 図-6 の手順により求められる。

表-1 汚濁発生原単位

工 法	シルト分以下の粒径加算百分：	発生原単位 (t/m ³)
ポンプ	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

表-2 汚濁発生原単位の層別比率

工 種	汚濁発生原単位層別比率		
	上 層	中 層	下 層
(地 盤 改 良)			
サンドコンパクション	0.37	0.08	0.55
サンドドレーン	0.37	0.08	0.55
深層混合処理	0.25	0.04	0.71
床 掘	0.16	0.20	0.64
置 換 え 砂	0.10	0.40	0.50
敷 砂	0	0	1.00
(護 岸)			
余 盛 土 砂	0.10	0.40	0.50
捨 石	1.00	0	0
杭 打 ち	0.25	0.25	0.50
セ ル	0.25	0.25	0.50
中 詰 め 砂	1.00	0	0
(埋 立 て)			
直 投	0.10	0.40	0.50
ベルトコンベア	1.00	0	0

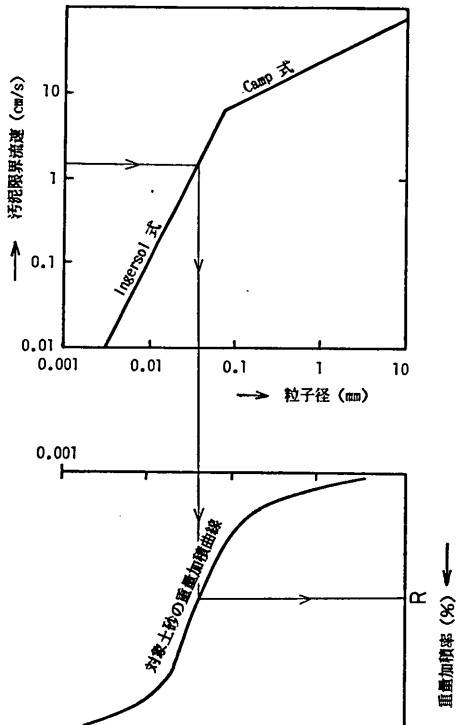


図-6 汚濁限界粒子径の粒径加算百分率 (%)

また、発生原単位表における原単位 w_0 は、工法（浚渫、土捨、捨石、置換砂、サンドコンパクション等）、施工機械（ポンプ、グラブ、ドラグサクシオン、バケット、汚泥用ポンプ、密閉グラブ、土運船、ガット船）、施工機械の容量、原単位算定の対象となった土砂の分類と粒径特性（シルト以下および粘土以下の含有率）等とともに求められている。

この発生原単位は、既往の濁り発生調査事例をもとに作成されており、上述の工法、施工機械の種類と容量、取扱い土砂などの条件により表-1 に示すような広い範囲の値をとる。したがって、当該工法の発生原単位を決

める際には、細かく分類された別表から、最も近い条件のものを採択する。

濁り発生量 $Q(t/d)$ または $M(t)$ は、こうして求められた発生原単位 w_0 に取扱い土量 Q_S を掛けて求めることができる。

$$Q(\text{または } M) = w_0 \cdot Q_S \quad \dots\dots(2)$$

なお、濁り発生量に関し、多層モデルではさらに発生源の層別分布が必要である。工法別にいえば、捨石やベルトコンベアによる揚陸においては濁りの発生量はほとんどが上層に集中するのに対し、その他の工法においては濁りの発生量は中・下層で大きくなる。このような濁り発生層別分布に関する実測資料は十分とはいえないが、既往の調査結果および室内実験結果をもとに設定される。表-2 は、関西空港の濁り関連調査において設定された例から、上・中・下層における濁り発生量の比率

を示したものである。この場合、上・中・下層はそれぞれ6m厚、7m厚、およびそれ以深の層厚を対象としている。一般の適用に際してはモデルの層数と層厚に応じてこれらの比率を適宜設定する。

5. 沈降速度とその測定

5.1 微細懸濁粒子の沈降

液体中の粒子の沈降は、粒子の形状、密度、濃度、凝集性、液体密度・粘性などに支配される。液体中の濃度が高まるに従って、粒子の沈降は、単粒子沈降、干渉沈降、圧密沈降の特性を示すようになる¹²⁾。

単粒子沈降は、濃度が小さくて、単一とみなせる粒子が浮力、抗力に打勝って重力落下する等速運動から求めるもので静水中では次式により沈降速度 w_s が求められる。

$$w_s = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{d}{C_D} \cdot \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} g} \quad \dots\dots(3)$$

ここに、 d ：粒径、 ρ_s ：粒子の密度、 ρ_w ：液体密度、 g ：重力加速度、 C_D ：抗力係数である。

C_D はレイノルズ数 (Re) の関数として、

$$\left. \begin{aligned} C_D &= \frac{24}{Re} & (Re < 2) \\ C_D &= 10/\sqrt{Re} & (2 < Re < 500) \\ C_D &= 0.4 & (500 < Re < 20000) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(4)$$

のように与えられる。

干渉沈降は、液体中に存在する濃度が1%を超えると、粒子間相互に干渉作用が起こり、単粒子の場合とは異なる速度で沈降することをいう。通常、粒子群としての沈降速度は低下する。

さらに粒子の濃度が高まると粒子間に接触が生じ、これによって粒子の自重の一部が粒子を通じて下方に伝達される、いわゆる圧密沈降が生ずる。

海上工事に伴う濁り問題を扱う場合、濁り発生場所、発生初期では粒子濃度は数万 mg/l 以上の高濃度にも達するけれども、シミュレーションで扱う領域は発生位置から一定距離だけ隔たり、かつ、濃度も数 100 mg/l 以下の領域であり、この領域においては干渉沈降、圧密沈降などは対象外として扱ってよいと考えられる。

一方、懸濁中の粒子は、液体中のイオン濃度の変化に伴って粒子間相互の反発力が弱まり凝集化が起こる。この凝集化は、液体の流れ・乱れの強さ、粒子濃度、塩分濃度などの強さに応じて促進される。しかし、このような凝集沈殿に関する定量的な成果はまだほとんど得られていないようである¹³⁾。

5.2 測定法

濁りを構成する微細粒子の沈降速度または粒度分布の室内試験法としては、比重計法のほか、光透過法、吸い上げ法、沈降天秤法、コーンカウンターによる法などがある。これらの各測定法の概要はつぎのとおりである。

(1) 比重計法

土の粒度試験法 (土質試験法 JISA1204)¹⁴⁾ に規定されている。本法によると、まず、2000 μ m ふるいを通じた試料に対し、砂質土場合は約 100g、シルト質または粘土質土の場合は約 50g をとり質量をはかり、メスシリンダー (ϕ 60, l 450, l l 容) に移し約 l l 容になるまで蒸留水を加える。つぎに、このシリンダーを恒温水槽中に入れ、懸濁水が水槽の温度 (15 $^{\circ}$ C) に等しくなったときにシリンダーを1分間振とうし、振とう終了後1分、2分、5分、15分、30分、60分、90分、及び1440分の各時間に比重浮ひょうの読み (深さ L) を読みとる。

深さ L の液中に懸濁している試料の質量百分率 P は次式により求められる。

$$P = \frac{100}{m_{so}/V} \cdot \frac{G_s}{G_s - 1} (r' + F) \rho_w (\%) \quad \dots\dots(5)$$

ここに、 m_{so} ：乾燥試料質量 (g)、 V ：懸濁液の体積 (cm^3)、 r' ：比重浮ひょうの読み、 F ：浮ひょう計に固有の補正係数、 ρ_w ：水の密度 (g/cm^3)、 G_s ： T° C の水に対する土粒子の比重、である。

また、時間 t 、深さ L において懸濁している粒子の最大径 d はストークスの原理を用い次式により算出される。

$$d = \sqrt{\frac{0.019 \eta}{(G_s - 1) \tau_w} \cdot \frac{L}{t}} \quad (\text{mm}) \quad \dots\dots(6)$$

ここに、 η ： T° C における水の粘性係数 ($gf \cdot s/m^2$)、 t ：沈降時間 (分) である。

つぎに、74 μ m 標準網ふるいでメスシリンダー内容物を水洗いし、ふるいに残った部分を炉乾燥し、標準網ふるい 840, 420, 250, 105, および 74 μ m によってふるい分け、各残留分の質量をはかって、全重量に対する各粒径ごとの質量百分率を求める。

なお、上記土質試験法は、試料の粒度分布を求めることを目的とする試験法を定めたもので、試料は試験に供する前に綿毛化防止のため、硝子板上でのねり返し、煮沸、珪酸ナトリウム、カ性ソーダまたは過酸化水素水などの添加攪拌などの操作を行う。しかし、粒子の濁り拡散を扱う上では、粒子をあえて分散させる必要のないことから、本試験においては、このような分散化操作はすべて省略することとしている。

また、沈降試験の際の液体 (この場合メスシリンダー

内)は蒸留水をすべて海水に置換えて行うこととしている。

(2) その他の方法

光透過法は、懸濁粒子を含む試水を測定用セル(長さ約7cm)に満たし、セル側面の一方からあてた弱い光の通過光を反対側に設けた光電管を受けて電気的に測定する。セル中の懸濁粒子は時間の経過とともに、粒径の大きいものから沈降していくので、一定時間に光の通過照度の測定を行うことによって試水中の粒度分布が求められる。低濃度(100mg/l程度)でも測定可能である。実験時間を短縮するため遠心分離操作を行うことがある。

吸い上げ法は、メスシリンダー(φ40, 1400, 1l容)に懸濁粒子を分散させた試水を満たして静置し、一定時間後に一定深さまでの試水を吸い上げて過し粒子濃度を求める。この操作を種々の静置時間に対して行い、静置時間～粒子濃度の関係から粒度分布を算定する¹⁵⁾。100 mg/l以下の低濃度でも測定できる。

沈降天秤法は、懸濁液を満たした試験筒の底部に秤量天秤を設置し、沈降量を一定時間に直接測定して粒度分布を測定する方法である¹⁵⁾。

一方、コールターカウンタによる方法では、電解液中に分散させた粒子を吸引力により電流の流れている細孔(アパチャー)を通過させる。この粒子の通過に際し、細孔断面において電解液が粒子と置換されることにより電気抵抗が増加し、粒子の体積に比例した電圧パルスが生ずる。したがって、この電気パルスの長さや数を電気的に測定することにより、粒子数と個々の粒子体積が測定される。この方法は、粒子の形状、色、比重、屈折率などの影響を受けない。細孔径をとりかえることによって広範囲の径(0.3~800 μm)の粒子の測定ができる。

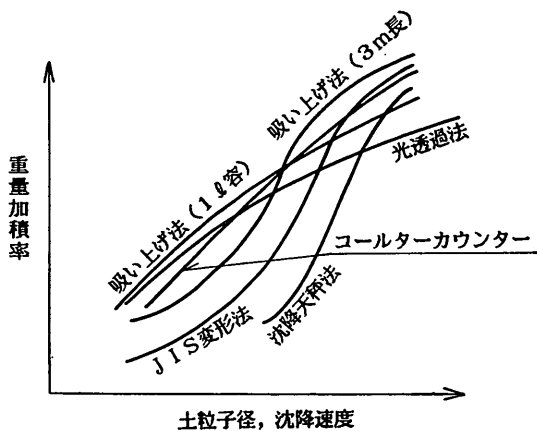


図-7 各試験法による粒径(または沈降速度)加積曲線

5.3 室内沈降試験結果の濁り予測モデルへの適用

5.2に述べた各室内粒度試験による測定結果の一例を模式的に示したものが図-7である。図-7の結果によると、光透過法による方法、1l容メスシリンダーを用いた吸い上げ法による方法は細粒径側へ分布が偏るのに対し、沈降天秤法は最も粗粒径側に分布が偏っている。3m長の沈降筒を用いた吸い上げ法では、1l容メスシリンダーを用いた吸い上げ法に比べ、細粒径側から粗粒径側への顕著な分布移行がみとめられる。試料前処理としてのねり返し、分散剤使用、煮沸などを省略した土質試験法に準ずる方法(変形法JISという)による結果は、3m長沈降筒を用いた吸い上げ法と沈降天秤法による結果とのほぼ中間的な分布形が得られている。

このように、各試験法によって得られる粒度分布(沈降速度分布)に違いのあることが明らかである。

いま、室内における各試験法の試験条件と、現場海域での沈降条件とを考慮して室内試験法の妥当性についてしらべてみると次のようなことがいえる。

① 土質試験法(JISA 1204)

前処理として、ねり返し、煮沸、分散剤添加等の操作を行うため、粒子間の分散が促進され、現場海域での沈降条件と大分異なる。

② 土質試験法変形(JIS変形法)

①に対し、攪拌1分の操作を除く前処理を省略したもので、この意味では現場条件に近い。試水の懸濁濃度が1% (10000mg/l)以下になると測定が困難となる。

③ 光透過法

沈降管である測定セル長が7cm(実質長は6cm程度)と小さく、また遠心分離操作を行うなど、沈降距離、沈降時間などの点で現場海域の条件と異なる点が多い。

④ コールターカウンターによる方法

測定するのは粒子の容積である。極めて低濃度(10 mg/l程度)で、しかも粒子を極めて速い速度(m/sのオーダー)で細孔部を通過する状態で測定するため、現場海域の条件と異なる点が多い。

⑤ 吸い上げ法、沈降天秤法

沈降距離、懸濁濃度を変えた実験が可能で、原理時には現場海域の条件に近づけることもできる。

以上のように、各測定法には、測点原理、沈降距離、懸濁濃度などに制約があり、いずれをとっても一長一短である。前述の図-7の結果からもわかるように、一般には沈降距離・時間および懸濁濃度が大きくなれば粒径は粗な方に偏る傾向がある。さらに、室内試験の条件と現

場域の条件と異なるもう一つの点は、液体（海水）が静水でなく、通常は流れや乱れがあることである。このような沈降距離・時間、懸濁濃度等に加えて、流れ・乱れが粒子間の凝集、分散にどのように作用するかを定量的に評価するには至っておらず、現場海域で起こっている沈降現象の把握が難しいことがわかる。

濁り予測に適用する粒子の沈降速度（粒度）分布の決定においては、測定原理、測定のしやすさ、および、測定結果の中位性などを考慮して、JIS 変形法により得られる粒度分布（沈降速度分布）をとりあげ、その妥当性については、これを予測モデルに適用して得られる濁りの再現性により判定することとした。この結果は 6.1(4)にて述べる。

6. 濁りの予測法

6.1 予測モデルとその特徴

(1) 解析解モデル

海域における任意の一点から瞬間的に放出された物質の固り（パッチ）は、海水の流れによって運ばれると同時に、流れの乱れ成分によってその重心部から外部に拡がりその濃度を減じていく。一般に、海水の流れや乱れは単純でないため、パッチの形状は円形とはならない。しかし、物質拡散の基本的な特性を知る上で円形パッチの理論がしばしば引用される。

円形パッチの解析では、上述の瞬間放出されたパッチの全体的な移動は度外視して、ある時間ごとのパッチ形状をその面積と等価な円に置換えて取り扱う。海域での乱れは水平方向が鉛直（水深）方向に比べてはるかに大きいこと、および、鉛直方向にはある一定の厚さの層にわたって均一の濃度が保たれると仮定して次のような 2 次元解が求められている¹⁰⁾。すなわち、

フィックの解：

$$s(r, t) = \frac{M}{4\pi ktH} \exp\left(-\frac{r^2}{4kt}\right) \quad \dots\dots(9)$$

ジョセフ・センドナーの解：

$$s(r, t) = \frac{M}{2\pi(\rho t)^2 H} \exp\left(-\frac{r}{\rho t}\right) \quad \dots\dots(10)$$

オズミドフの解：

$$s(r, t) = \frac{M}{6\pi\gamma^3 t^3 H} \exp\left(-\frac{r^{2/3}}{\gamma t}\right) \quad \dots\dots(11)$$

大久保・ブリチャードの解：

$$s(r, t) = \frac{M}{\pi\omega^2 t^2 H} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega^2 t^2}\right) \quad \dots\dots(12)$$

大久保の解：

$$s(r, t) = \frac{M}{\frac{4}{3}(\pi^{3/2}\alpha^3 t^3)H} \exp\left(-\frac{r^{4/3}}{\alpha^2 t^2}\right) \quad \dots\dots(13)$$

オブコフの解：

$$s(r, t) = \frac{M}{\pi\beta^3 t H} \exp\left(-\frac{r^2}{\beta^3 t^3}\right) \quad \dots\dots(14)$$

である。

ここに、 $s(r, t)$ ：投入後時間 t ，中心よりの距離 r における物質濃度， k ：拡散係数， M ：瞬間放出量， ω, ρ ：拡散速度， α, γ ：パラメータ， H ：層厚，などである。

式(9)～(14)に含まれる $k, \rho, \gamma, \omega, \alpha, \beta$ などのパラメータは一定と仮定している。式(2)における p は、海洋の 10～1000km のスケールに対し $1 \pm 0.5 \text{ cm/s}$ 、深層または成層では 0.1 cm/s のオーダーとしている¹⁷⁾。

いま、一例として、よく知られたジョセフ・センドナーの解（式(10)）に対し、 $M=10(t)$ ， $p=1(\text{cm/s})$ ， $H=20(\text{m})$ ， $t=1$ （時間）を代入して求めた拡散状況を示すと 図-8 のようになり、等濃度線は同心円として表される。他の 5 つの解についても同様である。

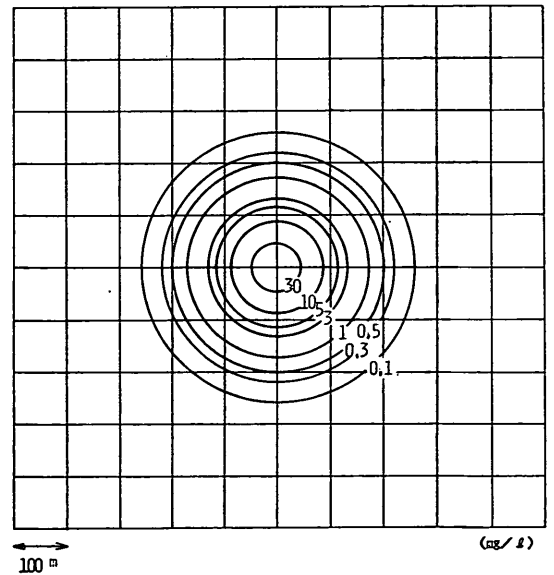


図-8 ジョセフ・センドナーの解（1時間後）

以上の二次元解に対し、水深方向（ z ）を加えた三次元解析に拡張されたものとして、

$$s(x, y, z) = \frac{M}{(2\pi)^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z} \exp\left\{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right\}$$

$$\times \left[\exp\left\{-\frac{(H_e-z)^2}{2\sigma_z^2}\right\} + \exp\left\{-\frac{(H_e+z)^2}{2\sigma_z^2}\right\} \right] \quad \dots\dots(15)$$

または、

$$s(x, y, z) = \frac{m_e}{2\pi\sigma_x\sigma_z} \exp\left\{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2}\right\} \times \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{y+Y}{\sigma_y}\right) \mp \operatorname{erf}\left(\frac{y-Y}{\sigma_y}\right) \right\} \times \left[\exp\left\{-\frac{(H_e-z)^2}{2\sigma_z^2}\right\} + \exp\left\{-\frac{(H_e+z)^2}{2\sigma_z^2}\right\} \right] \quad \dots\dots(16)$$

などがある。

$$\left. \begin{aligned} \text{ここに、} \sigma_x^2 &= 2K_x t \\ \sigma_y^2 &= 2K_y t \\ \sigma_z^2 &= 2K_z t \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(17)$$

K_x, K_y, K_z : 拡散係数

$$\operatorname{erf}(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y e^{-\frac{y^2}{2}} dy$$

m_e : 瞬間線源

(x_0, Y, H_e) : 発生源の (x, y, z) 座標

である。

式(15)または(16)によって鉛直方向の分布をとり入れた濃度分布の時間変化が計算できる。

式(10)~(16)で示されるこれらの解はいずれも瞬間点源に対する拡散分布を時間的に追跡するモデルである。これに対し、連続的に発生する濁りの分布形状の解析も求められている。連続点源に対する解は前述の瞬間点源に対する解をもとに時間積分することにより与えられる。

定常的な流れ (x 軸方向の流速 u) が存在するもとで連続的に発生する点源 Q に対しては、流れの方向にブルーム状に拡がる。このような拡散については、二次元モデルとして、

大久保・ブリチャードの解:

$$s(x, y) = \frac{Q}{\sqrt{2\omega x H}} \exp\left(-\frac{u^2 y^2}{\omega^2 x^2}\right) \quad \dots\dots(18)$$

岩井の解:

$$s(x, y) = \frac{Q}{2\pi k H} \exp\left(\frac{u x}{2K}\right) K_0\left[u \frac{1}{2K} \sqrt{x^2 + y^2}\right] \quad \dots\dots(19)$$

ここに、 K_0 : 第二種変形ベッセル関数

ブルックスの解¹⁸⁾:

$$\left. \begin{aligned} \frac{L}{b} &= \left(1 + 2\beta \frac{x}{b}\right)^{\frac{1}{2}}, \\ \frac{c_{\max}}{c_0} &= \operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{3}{4\beta x/b}}\right) \quad (k/k_0=1 \text{ の場合}) \\ \frac{L}{b} &= 1 + \beta \frac{x}{b}, \\ \frac{c_{\max}}{c_0} &= \operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{3/2}{(H\beta x/b)^2 - 1}}\right) \quad (k/k_0=L/b \text{ の場合}) \\ \frac{L}{b} &= \left(1 + \frac{2}{3}\beta \frac{x}{b}\right)^{\frac{3}{2}}, \\ \frac{c_{\max}}{c_0} &= \operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{3/2}{\left(1 + \frac{2}{3}\beta x/b\right)^3 - 1}}\right) \quad (k/k_0=(L/b)^{4/3} \text{ の場合}) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(20)$$

ここに、 k_0 : 放流点 ($x=0$) での拡散係数、 k : $x=x$ での拡散係数、 b : 放流幅、 β : 無次元パラメータ ($= 12k_0/(Ub)$)、 U : 一様流速、 c_0 : $x=0$ での濃度、 c_{\max} : $x=x$ での主軸上の濃度、 $\operatorname{erf}(\quad)$: 誤差関数、 L : 拡散幅、 $L=2\sqrt{3}\sigma$ 、 σ : 濃度の分散値 ($\sigma^2=(1/c_0b)\int_{-\infty}^{\infty} y^2 c dy$)、 c : $x=x$ での濃度である (図-9参照)。

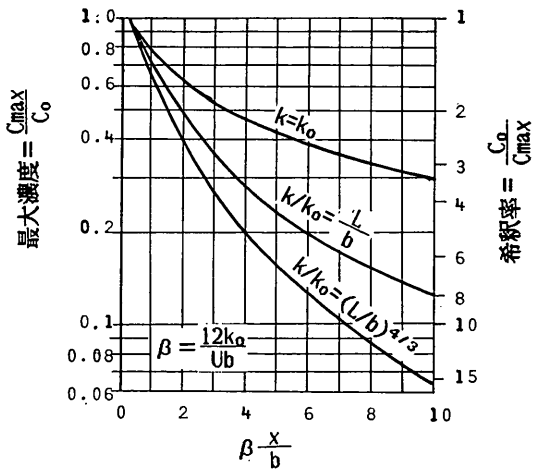
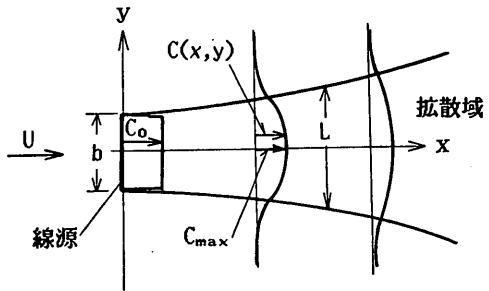


図-9 ブルックスの解

などがある。

また、三次元モデルとして、

$$s(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_x \sigma_y} \exp\left\{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2}\right\} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \times \left[\exp\left\{-\frac{(H_e-z)^2}{2\sigma_z^2}\right\} + \exp\left\{\frac{(H_e+z)^2}{2\sigma_z^2}\right\}\right] \quad \dots\dots(21)$$

または、

$$s(x, y, x) = \frac{qe}{\sqrt{2\pi} u \sigma_z} \exp\left\{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2}\right\} \left\{\operatorname{erf}\left(\frac{y+Y}{\sigma_y}\right) \mp \operatorname{erf}\left(\frac{y-Y}{\sigma_y}\right)\right\} \times \left[\exp\left\{-\frac{(H_e-z)^2}{2\sigma_z^2}\right\}\right]$$

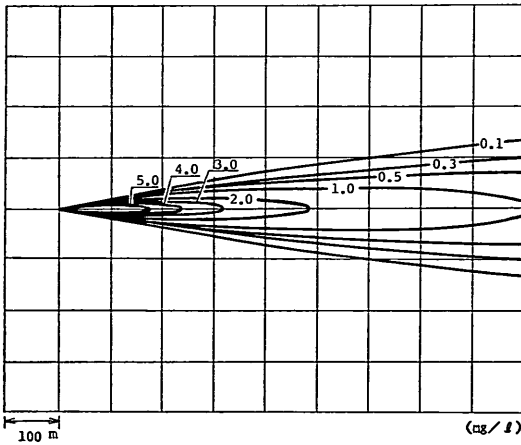


図-10 大久保・プリチャードの解 ($\omega=1$ cm/s)

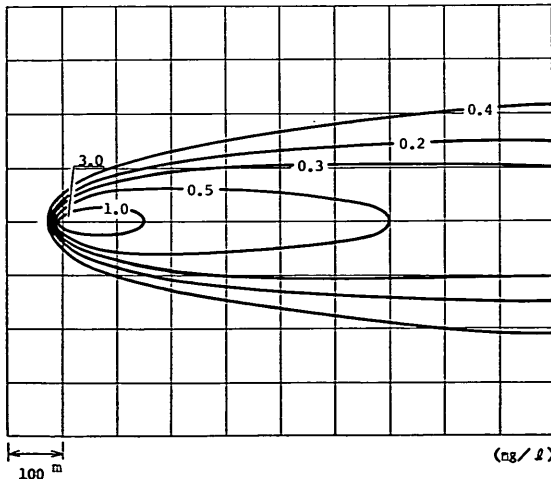


図-11 岩井の解 (SS mg/l)

$$+ \exp\left\{-\frac{(H_e+z)^2}{2\sigma_z^2}\right\}\right] \quad \dots\dots(22)$$

などがある。

いま、これらの解(式(21)~(22))のうち、大久保・プリチャードの解(式(21))に対し、 $Q=1$ t/h, $u=10$ cm/s, $H=20$ m, $\omega=1$ cm/s を代入して得られた濃度分布を示したものが図-10であり、また岩井の解(式(22))に対し、 Q, u, H は同一、拡散係数 $K=10^4$ cm²/s を代入して得られた濃度分布を示したものが図-11である。

以上示した13の解析解は、二次元または三次元の無限領域で、流れがないか、または、一様流れの場合において、瞬間または連続的な放出源からの拡散分布を求めるものである。これらのモデルに適用される物質はそれ自体が増減しない保存性物質を対象としている。

一方、濁りの拡散においては、粒径が大きくなればなるほど沈降の効果が現れる。この意味で、上述モデルは粒径の小さい、たとえば、ミクロン以下、の粒子より成る濁りを対象としていることとなる。

粒子の沈降効果を解析解にとり入れるには、

$$\exp(-\lambda t) \quad \dots\dots(23)$$

$\lambda = w_s/H$ (w_s :沈降速度, H :水深, t :時間)

を解の右辺に乗ずればよい。

以上述べた解析解の適用性については、現地拡散試験等で検討されなければならないが、いずれの解も海域における濁り拡散の一応の目安を知る程度にとどめるべきであろう。

(2) 半解析解モデル

前述の解析解モデルは数表または卓上計算機にて解を求めることができるのに対し、本モデルは、瞬間線源からの拡散に対する解を時間積分して濁りの時間変化を追跡するもので、パーソナルコンピュータ以上の計算機を必要とする。Christodoulou, G. C.¹⁹⁾ らによって開発されたモデルは、つぎのような仮定により構築されている。すなわち、

①物質濃度の鉛直的な平衡は、水平方向の濃度が平衡になる以前に達成される

②懸濁物質の濃度 $c(x, y, z, t)$ (x, y は水平2成分の座標, z は鉛直成分の座標, t は時間) は、鉛直分布関数 $\phi(\zeta)$ により

$$c(x, y, z, t) = \bar{c}(x, y, t) \phi(\zeta) \quad \dots\dots(24)$$

$\zeta = z/h$, h :水深

と表される

③水深は一定である

④一様な鉛直線源である

⑤線源の位置は海岸からは十分離れており、濁りの分

布は陸海境界の影響を受けない

⑥濁りの物質は多くの微細粒子群から成り、それぞれの粒子群は一定の沈降速度 w_s をもっている

⑦流れは、潮せき（汐）による往復流成分と恒流成分とから構成されている。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} u(t) &= U_T \sin \omega t + U_f \\ v(t) &= V_T \sin \omega t \end{aligned} \right\} \dots\dots(25)$$

ここに、 U_f : 恒流、 U_T, V_T : 潮汐流の振幅成分等である。

上記仮定のもとで、濁り拡散物質の平衡方程式はつぎのように表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} - w_s \frac{\partial c}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \end{aligned} \dots\dots(26)$$

w_s : 粒子の沈降速度

$\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$: 乱流又は分子拡散係数

式(26)において、

$$\left. \begin{aligned} u &= U + u'' \\ v &= V + v'' \\ c &= \bar{c} + c'' \end{aligned} \right\} \dots\dots(27)$$

U, V, \bar{c} : 水深方向に平均化された濃度

u'', v'', c'' : それぞれ U, V, \bar{c} からの変位

とし、さらに、式(24)を用いて z に関して積分 ($0 \leq z \leq h$) すると、

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + U_s \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + V_s \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \\ = E_x \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x^2} + E_y \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial y^2} - \alpha \bar{c} \\ \alpha = \left[\frac{w_s \phi(0)}{h} + \frac{1}{h^2} \left(\epsilon_\zeta \frac{\partial \phi}{\partial \zeta} \right)_{\zeta=0} \right] \\ - \left[\frac{w_s \phi(1)}{h} + \frac{1}{h^2} \left(\epsilon_\zeta \frac{\partial \phi}{\partial \zeta} \right)_{\zeta=1} \right] \end{aligned} \dots\dots(28)$$

$$U_s = \int_0^1 u \phi d\zeta$$

$$V_s = \int_0^1 v \phi d\zeta$$

E_x, E_y : 分散係数

となる。

なお、式(24)で定義される ϕ については、前述の仮定①により、鉛直濃度が平衡状態にある場合の Schmidt の解

$$c = c_a \left(\frac{\frac{h}{z} - 1}{\frac{h}{a} - 1} \right)^z \dots\dots(29)$$

$C_a : z = a$ における濃度

を用い、 $a = 0.05 h$ として

$$\begin{aligned} \phi(\zeta) &= \phi(0.05) \left[\frac{\frac{1}{\zeta} - 1}{20 - 1} \right]^z \quad (\zeta \geq 0.05) \\ \phi(\zeta) &= \phi(0.05) \quad (\zeta < 0.05) \end{aligned} \dots\dots(30)$$

$$= \frac{1}{\left[0.05 + \int_{0.05}^1 \left\{ \frac{1}{\zeta} - 1 \right\}^z dz \right]}$$

により求められる。

さて、式(26)に対して、変数変換 (式(31))

$$\left. \begin{aligned} \xi &= x - \int_\tau^t (U_{fS} + U_{TS} \sin \omega t) dt \\ &= x - U_{fS}(t - \tau) + \frac{U_{TS}}{\omega} \\ &\quad \times (\cos \omega t - \cos \omega \tau) \\ &= x - U_{fS}(t - \tau) + \frac{U_{TS} T}{2\pi} \\ &\quad \times \left(\cos 2\pi \frac{t}{T} - \cos 2\pi \frac{\tau}{T} \right) \\ \eta &= y - \int_\tau^t V_{TS} \sin \omega T dt \\ &= y + \frac{V_{TS} T}{2\pi} \left(\cos 2\pi \frac{t}{T} - \cos 2\pi \frac{\tau}{T} \right) \\ s &= \bar{c} e^{-\alpha(t-\tau)} \end{aligned} \right\} \dots\dots(31)$$

を行うと、

$$\frac{\partial s}{\partial t} = E_x \frac{\partial^2 s}{\partial \xi^2} + E_y \frac{\partial^2 s}{\partial \eta^2} \dots\dots(32)$$

が得られる。

したがって、式(28)において、時刻 $t = \tau$ に質量 dM が瞬間的に放出された場合の解は

$$\left. \begin{aligned} d\bar{c} &= dM \frac{\exp \left[-\frac{\xi^2}{4E_x(t-\tau)} \right]}{\sqrt{4\pi E_x(t-\tau)}} \\ &\quad \frac{\exp \left[-\frac{\eta^2}{4E_y(t-\tau)} - \alpha(t-\tau) \right]}{\sqrt{4\pi E_y(t-\tau)}} \\ d\bar{c} &= d_s \cdot e^{-\alpha(t-\tau)} \end{aligned} \right\} \dots\dots(33)$$

となる。したがって、連続放出 $dM = m_i \cdot dt$ に対しては、式(34)により求められる。

$$\bar{c} = \int_0^t m_i dt$$

$$\times \frac{\exp\left[-\frac{\xi^2}{4E_x(t-\tau)} - \frac{\eta^2}{4E_y(t-\tau)} - \alpha(t-\tau)\right]}{4\pi(t-\tau)\sqrt{E_x E_y}} dt \quad \dots\dots(34)$$

ここに、 m_i ：第 i 粒径群の汚濁物質の単位時間当たりの放出量であり、

$$m_i = V c_{0i} \quad \dots\dots(35)$$

V ：単位時間当たりに放出される汚濁水体積
 c_{0i} ：第 i 粒径群の放出濃度

である。

式(34)を数値積分することにより、任意の場所 (x, y) 、時刻 t における濁り濃度を求めることができる。水深方向については、式(34)を用いて式(24)のようにして求められる。このようにして求めた各粒径群 i の濃度を互いに重ね合わせるにより、混合粒径としての濃度の経時変化を算定することができる。

本モデルに必要な入力値は、

- ①各濁り放出源の位置、放出量、放出時刻
- ②濁り物質の各粒径群の沈降速度とそれらが占める割合
- ③恒流の大きさ、往復流の振幅と方向
- ④拡散係数

⑤濁り濃度予測位置と時刻

⑥その他、同化のために必要な定数

などである。

なお、Christodoulou らによって開発された上述モデルに対し、さらに、多点からの同時発生による計算、濁り発生形態が連続的の場合のみならず、瞬間的および間欠的であっても対応できるように改良した。また、直線海岸の影響については、鏡像の原理を利用した重ね合わせ

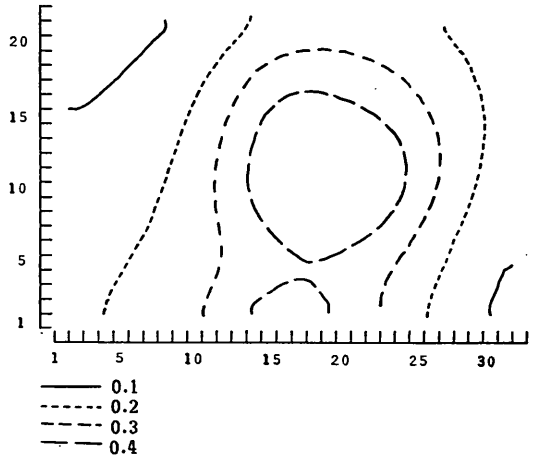


図-12 半解析解 (SS mg/l)

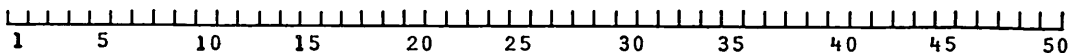
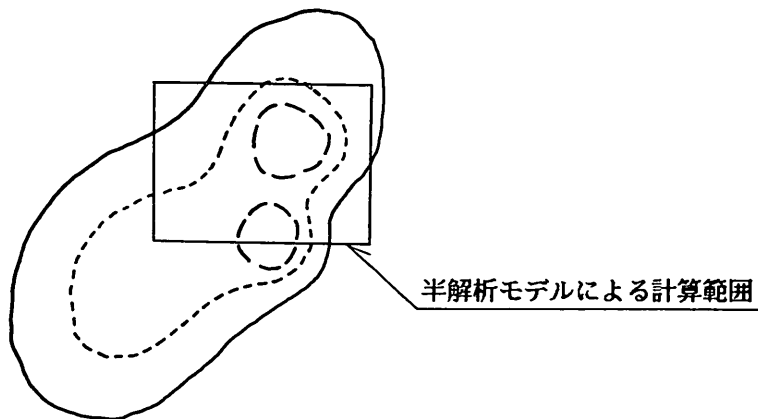
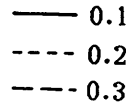


図-13 三次元数値モデルによる解 (SS mg/l)

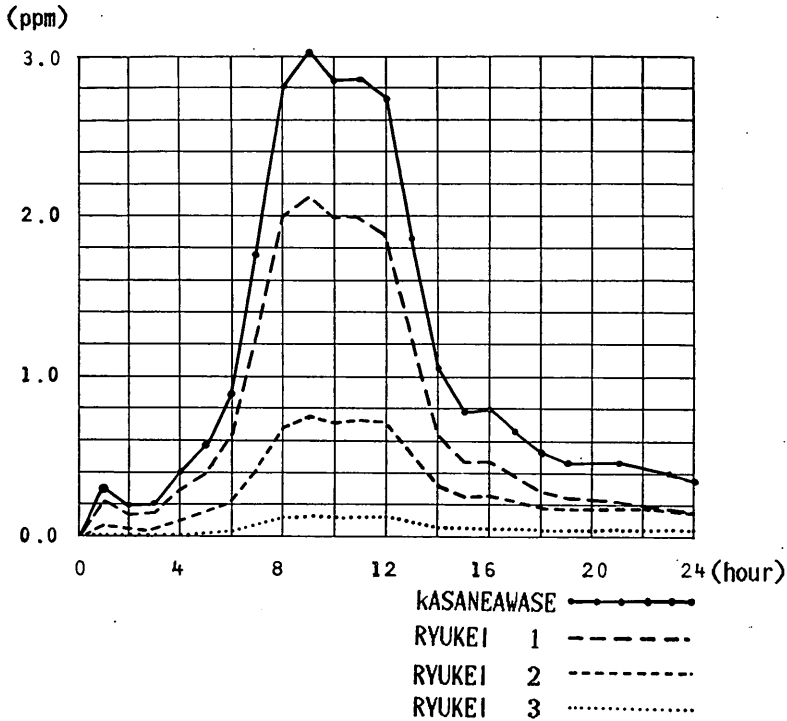


図-14 半解析解モデルによる定点濁り経時変化

せ法をとり入れて適用可能とした。さらに、これらの結果を図示するためのプログラムを作成した。

いま、水深 (h)18m, 恒流 (U_{fs})4.3cm/s, 潮流の振幅 (U_{TS}, V_{TS})=(12.1cm/s, 1.0cm/s), 分散係数 (E_x, E_y) $10^5\text{cm}^2/\text{s}$, 濁り土砂の粒径 $10\mu\text{m}$ (沈降速度 6.68m/日), $20\mu\text{m}$ (同 20.72 m/日), $30\mu\text{m}$ (同 60.12 m/日) (含有率それぞれ 2.9%, 18.4%, 62.3%) が 6 点より計 742.3t/日で 12 時間工事, 12 時間休止の繰り返しの各条件にて実施された場合の, 工事開始後 12 時間時点の濁り分布を示したものが 図-12 である。後述する三次元数値モデルによる同一条件での計算結果 (図-13) と対比すれば明らかなように, 両モデル間ではほぼ同様の濁り分布が得られている。また, 図-14 は, 図-12 の点 (20.1, 18.8) における濁り濃度の経時変化を図示したものである。同図において, 粒径 1, 2, 3 はそれぞれ粒径 10, 20, $30\mu\text{m}$ の粒径群による濃度であり, 重ね合わせはそれらを合計したものである。

このようにして, 濁りの分布, 経時変化が式(8)の数値積分により求められる。ところが, 本モデルは, 図-14 に示されるような特定点での濃度の経時変化を求めるには有利であるが, 図-12 のような平面分布を求めるには多点における積分をすることとなり計算時間が長くな

って本モデルの長所は活かされない。

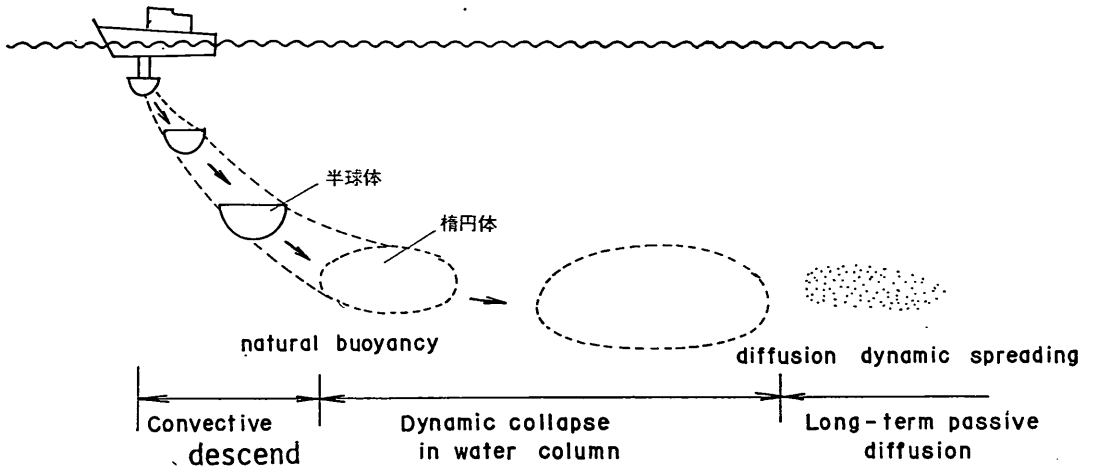
(3) 土運船またはポンプ船からの濁り解析モデル (Dump および Jet モデル)

本モデルは, Maynard, G. ら²⁰⁾によって開発されたもので, 土運船から一時的に海中に放出された土砂の拡散と堆積, またはポンプ船の排砂管等からの排出土砂の拡散と堆積とを取り扱うものである。本文では前者を落下モデル (Dump モデル), 後者を噴射モデル (Jet モデル) として区別する。両モデルの取り扱いを図示すると 図-15, 図-16 のようになる。両モデルとも, 作業船から発生する濁りに対し, 落下 (convective descent) 段階, 崩壊 (dynamic collapse) 段階, および拡散 (passive diffusion) 段階の 3 段階に分けて取り扱っている。

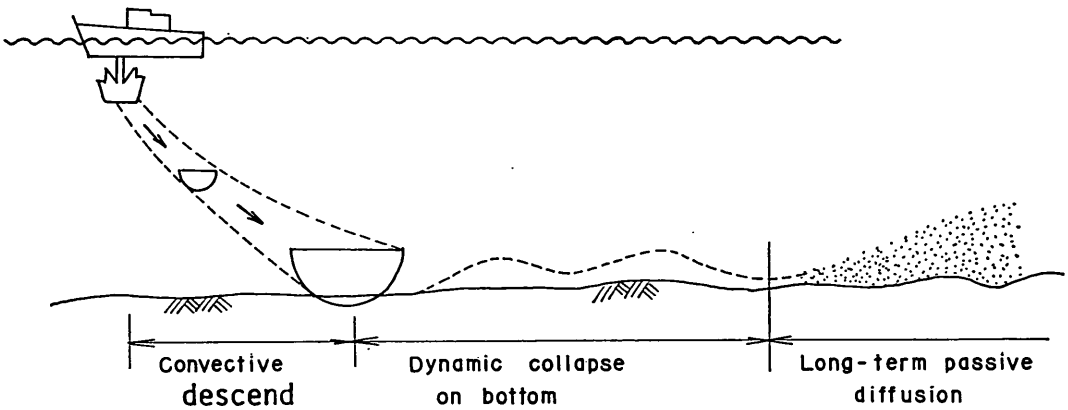
噴射モデルは, 落下モデルが一時的な濁り発生であるのに対し, 連続的となるのが最も顕著な違いであり, 取扱いは両モデルで大きな差はない。

両モデルは, 図-15, 図-16 に示されるように, 濁りの発生源およびその周辺領域 (near field) から遠く隔った領域 (far field) までを一体化して解くものである。

まず落下 (Dump) モデルにおける落下段階においては, 瞬間的な土砂の放出により, 拡散雲は 図-17 に示されるような半球体が形成され, 落下しつつ, 周囲の海水



(1) 水深が十分大きい、または成層が強い場合



(2) 水深が小さい場合、または成層が弱い場合

図-15 落下 (Dump) モデル概念図

と置換わりながら沈降するとしている。成層中ではこの半球体が中立浮力の層に近づくにつれ落下速度を減じ、中立浮力の層を中心にして上下方向の減衰振動を続ける。この間に半球体はまわりの海水と混合して水平方向に拡大し周囲水と力学的な平衡状態に近づく。この間の

運動がつぎのような式で表されている。すなわち、半球体の質量保存則より

$$\frac{d}{dt}(V_0\rho) = E\rho_a - \sum_i S_i\rho_i \quad \dots\dots(6)$$

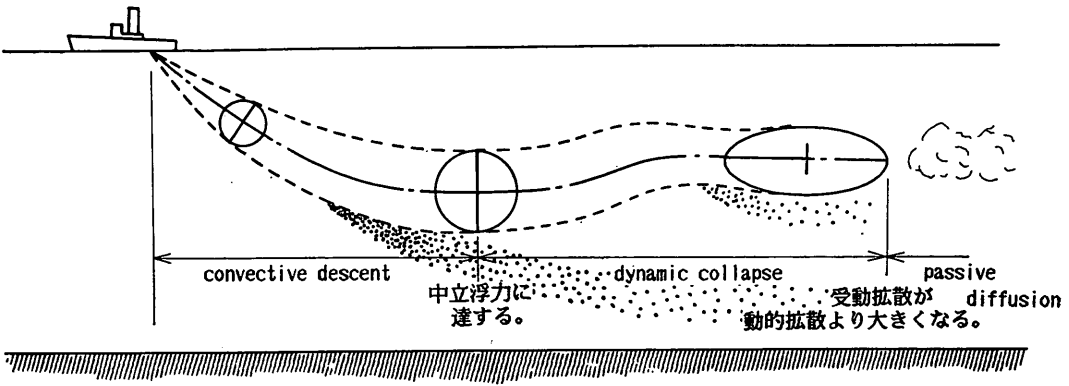


図-16 噴射 (Jet) モデル概念図

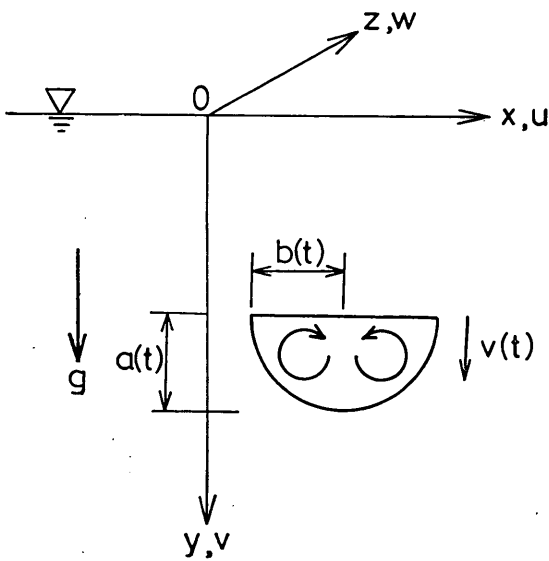


図-17 Dump モデルの半球体

$V_0 = \frac{2}{3}\pi a^3$; 半球の体積

$E = 2\pi a^2 \alpha |\vec{U} - \vec{U}_a|$; 進行率
 $S_i = \pi a^2 |V_{fi}| C_{si} (1 - \beta_i)$; 固体粒子の体積減少率

ここに、 πa^2 : 鉛直方向に投影された半球体の面積、
 V_{fi} : 粒径群 i の沈降速度、 C_{si} : 粒径群 i の拡散雲中の体積割合、 $(1 - \beta_i)$: 粒径群 i の沈降率、

$$\beta_i : \text{沈降速度} \begin{cases} 0 & (|\frac{V}{V_{fi}}| < 1) \\ \beta_0 & (|\frac{V}{V_{fi}}| \geq 1) \end{cases}$$

$a(t)$: 半球体の半径 (図-17), $\vec{U}(t)$: 拡散雲の速度,
 $\rho(t)$: 拡散雲の平均密度, $\vec{U}_a(x, y, z, t)$: 周囲流速,
 ρ_i : 拡散雲中の第 i 粒径群の粒子の密度, である。

さらに、運動量保存則より

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \vec{F}_i - \vec{D} + E\rho_a\vec{U}_a - \sum_i S_i\rho_i\vec{U} \quad \dots\dots(37)$$

$\vec{M} = C_m\rho\frac{2}{3}\pi a^3\vec{U}$: 運動量

$F = \frac{2}{3}\pi a^3 g(\rho - \rho_a)$: 浮力

$\vec{D} = (D_x, D_y, D_z)$

$D_x = 0.5\rho_a C_D \frac{\pi a^2}{2} |\vec{U} - \vec{U}_a| (U - U_a)$

$D_y = 0.5\rho_a C_D \frac{\pi a^2}{2} |\vec{U} - \vec{U}_a| V$

$D_z = 0.5\rho_a C_D \frac{\pi a^2}{2} |\vec{U} - \vec{U}_a| (w - w_a)$

浮力の保存式より

$$\frac{dB}{dt} = E(\rho_a(0) - \rho_a) - \sum_i \{S_i(\rho_a(0) - \rho_i)\} \quad \dots\dots(38)$$

$B = \frac{2}{3}\pi a^3(\rho_a(0) - \rho)$

拡散雲中の第 i 粒径群の固体容積の保存式より

$$\frac{dp_i}{dt} = -S_i \quad \dots\dots(39)$$

$$p_i = \frac{2}{3} \pi a^2 c_{si}$$

c_m : みかけの質量係数 (=1.0~1.5)

c_D : 抗力係数 (=0.5)

渦度の保存式より

$$\frac{dK}{dt} = -A\varepsilon \quad \dots\dots(40)$$

K : 渦度

A : 消散係数

$$(\frac{d\rho_a}{dy})$$

ε : 密度勾配

$$\left(= \frac{d\rho_a}{dy} \right)$$

$$\alpha = \alpha_0 \sqrt{\tanh\left(\frac{B}{2\pi g c_1 K^2 \alpha_0}\right)^2}$$

$$\alpha_0 = 0.25, c_1 = 0.16$$

以上の式(39)から式(40)でもって、初期値を与えることにより解を得ることができる。

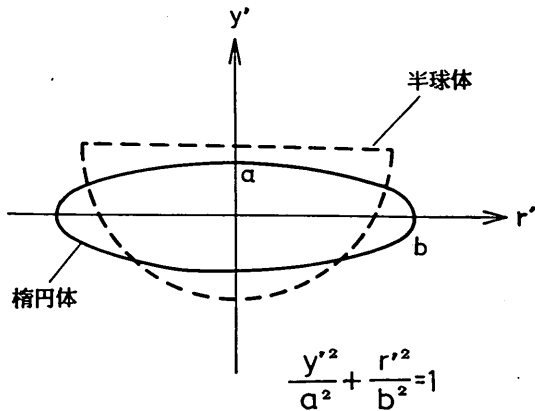


図-18 Dump モデルの楕円体

次に、半球体拡散雲が落下とともにそれ自体の密度を減じ、中立密度に近づくと上下運動が抑制され、水平方向に引き伸ばされる。この形状を次の式で表される扁平な楕円と仮定している (図-18)。

$$\frac{y'^2}{a^2} + \frac{r'^2}{b^2} = 1 \quad \dots\dots(41)$$

この場合も、半球体の場合と同様、質量、運動量、浮力、粒子の保存式が次のように表される。

$$\frac{d}{dt}(V_c \rho) = E\rho_a - \sum_i S_i \rho_i \quad \dots\dots(42)$$

$$V_c = \frac{4}{3} \pi a b^2$$

$$E = \left\{ 2\pi b^2 + \pi \frac{a^2 b}{R} \ln\left(\frac{b+R}{b-R}\right) \right\}$$

$$\times \left(\alpha |\vec{U} - \vec{U}_a| + \alpha_c \frac{db}{dt} \right)$$

$$K = \sqrt{b^2 - a^2}$$

α_c : 崩壊による連行係数

$$\alpha = \left(\frac{a}{b}\right)^2 \alpha_0, \alpha_0 : \text{熱乱流連行係数}$$

$$S_i = \pi b^2 |v_{fi}| c_{si} (1 - \beta_i)$$

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \vec{F}j - \vec{D} + E\rho_a \vec{U}_a - \sum S_i \rho_i \vec{U} \quad \dots\dots(43)$$

$$\vec{M} = c_M \rho \frac{4}{3} \pi a b^2 \vec{U}$$

$$F = \frac{4}{3} a b^2 g (\rho - \rho_a)$$

$$D_x = \frac{1}{2} \rho_a c_{D3} \pi a b |\vec{U} - \vec{U}_a| (U - U_a)$$

$$D_y = \frac{1}{2} \rho_a c_{D4} \pi b^2 |\vec{U} - \vec{U}_a| v$$

$$D_z = \frac{1}{2} \rho_a c_{D3} \pi a b |\vec{U} - \vec{U}_a| (w - w_a)$$

c_M : みかけの質量係数

c_{D3} : 回転楕円体くさびの抗力係数

c_{D4} : 球面の抗力係数

$$\frac{dB}{dt} = E(\rho_a(0) - \rho_a) - \sum_i S_i (\rho_a(0) - \rho_i) \quad \dots\dots(44)$$

$$\frac{dp_i}{dt} = -S_i \quad \dots\dots(45)$$

$$p_i = \frac{4}{3} \pi a b^2 c_{si}$$

さて、楕円体拡散雲の崩壊については、拡散雲の重心を原点にとるとその形状は式(41)で表される。いま、図-19に表されるような楕円体の単位 (スライス) を考えると、これに働く水平圧力 F_D は、

$$F_D = \frac{\rho_a \pi \left(1 - \frac{\gamma a^0}{a}\right) \varepsilon g a^3 b}{16} d\theta \quad \dots\dots(46)$$

$$0 \leq \gamma \leq 1$$

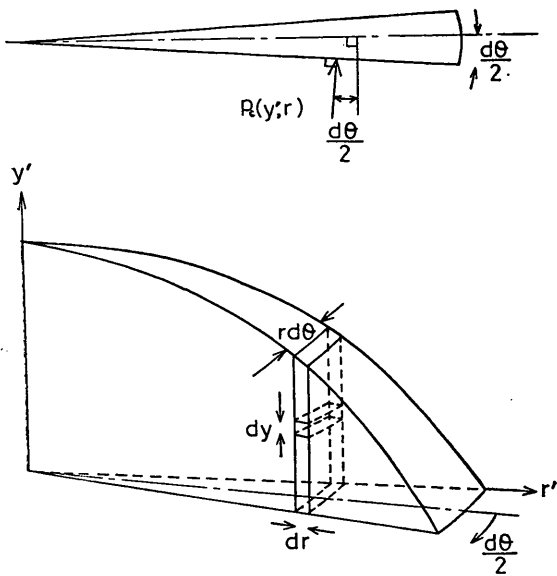


図-19 楕円体のスライス

$$\epsilon = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho_0}{dy}$$

となる。

崩壊による拡散雲の先端速度 (v_1) とスライス中心の水平速度 (c) との間には次の関係がある。

$$v_1 = \frac{16}{3\pi} \frac{dc}{dt} \quad \dots\dots(47)$$

スライス崩壊抗力としては抗力 D_D と表面摩擦抗力 F_f から成りそれぞれ

$$D_D = c_{drag} \rho_a \frac{ab}{4} |v_1| v_1 d\theta \quad \dots\dots(48)$$

$$F_f = c_{fric} \rho_a \frac{b^2}{2a} v_1 d\theta \quad \dots\dots(49)$$

c_{drag} : スライスに対する抗力係数

c_{fric} : 平板に対する摩擦係数

となる。

拡散雲スライスの水平慣性 (I) は、その質量とスライス中心速度の積の時間変化率である。すなわち、

$$I = \frac{d}{dt} \left(\rho \frac{\pi ab^2}{16} v_1 \right) d\theta \quad \dots\dots(50)$$

したがって、

$$I = F_D - D_D - F_f \quad \dots\dots(51)$$

となる。

進行による拡散雲の容積増加率は、拡散雲の鉛直方向

の大きさ (一定値) に対する先端速度の増加率より表され、これを v_2 とすると、

$$\frac{db}{dt} = v_1 + v_2 \quad \dots\dots(52)$$

となる。積分ステップの間で拡散雲の密度と鉛直方向の大きさが一定とすると、 b だけ成長するための進行は

$$v_2 = \frac{E\rho_a - \sum_i S_i \rho_i}{\rho \frac{8}{3} \pi ab} \quad \dots\dots(53)$$

となる。

以上の式(40)~(53)を用い、先の落下段階より得られる値を初期値として解かれる。

なお、成層が弱く、拡散雲が海底で崩壊する場合についても上とほぼ同様の解析法にて追跡できる。

拡散段階 (Passive diffusion) においては、一様平均流場で解析解を利用する方向、または格子単位に数値積分して濁りを追跡する方法がとられている。

落下モデル (Dump モデル) に必要なおもな入力データは、

- ①地形、水深
- ②海水の鉛直密度分布 (ただし、水平的には一様とする)
- ③周囲水の海水の流れ
(別途、三次元数値シミュレーションにより求める)
- ④投入土砂等に関するもの
 - a. 土捨位置
 - b. 土砂拡散雲の初期半径
 - c. 土砂拡散雲の初期濃度 (0 でよい)
 - d. 投入土砂全体の密度
 - e. 投入土砂全体の空隙率
 - f. 投入土砂を構成する粒径群の拡散密度
 - g. 各粒径群の投入土砂全体に対する体積比
 - h. 各粒径群の沈降速度
 - i. 各粒径群の空隙率

等である。一方、このモデルにより出力されるおもな項目は、

- ①拡散雲の重心の (x, y, z) 座標
- ②拡散雲の流速成分
- ③周囲水と拡散雲の密度差
- ④拡散雲の大きさ (半径等)
- ⑤粒径群ごとの濃度
- ⑥粒径群ごとの堆積厚さ

である。

また、噴射モデル (Jet モデル) においても、落下モデル (Dump モデル) と全く同様な手法を用いて、ジェ

ットの先端形状，空間位置を計算できるようになっている。

噴射モデルにおける主な入力データとしては、

- ①格子間隔，水深
- ②ジェット開始時刻と位置
- ③計算時間
- ④噴射開始時の船の位置と航行方向・速度
- ⑤噴射されるジェットに関するデータ
 - a. 噴射流量
 - b. ジェットの半径の初期値
 - c. 噴射孔の深さ
 - d. 噴射孔の角度
 - e. 噴射孔部分での密度
 - f. 全体の空げき率

- ⑥ 噴射ジェットを構成する粒子群に関するデータ
 - a. 各粒径群の乾燥密度
 - b. 各粒径群の全体に対する体積比
 - c. 各粒径群の沈降速度
 - d. 各粒径群の空隙率

⑦ 流れの場合

等である。一方，おもな出力としては、

- ①ジェットの軌跡
- ②ジェット先端部の中心の位置 (x, y, z) 座標
- ③ジェット先端部の速度
- ④ジェット先端部の半径または短・長軸
- ⑤周囲との密度差
- ⑥濃度
- ⑦各粒子群の濃度

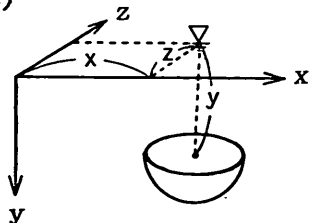
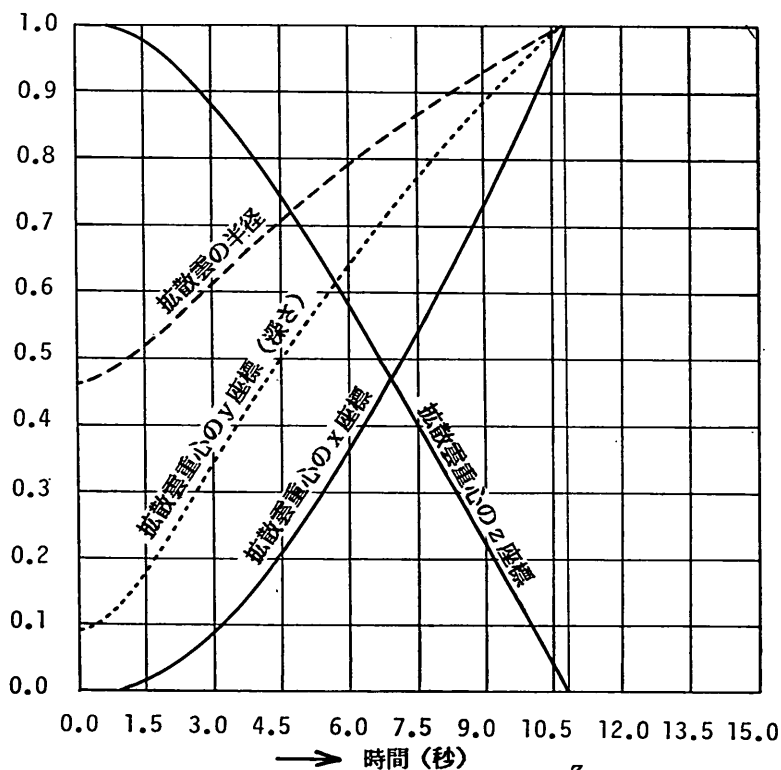


図-20 拡散雲の中心の座標と半径の経時変化

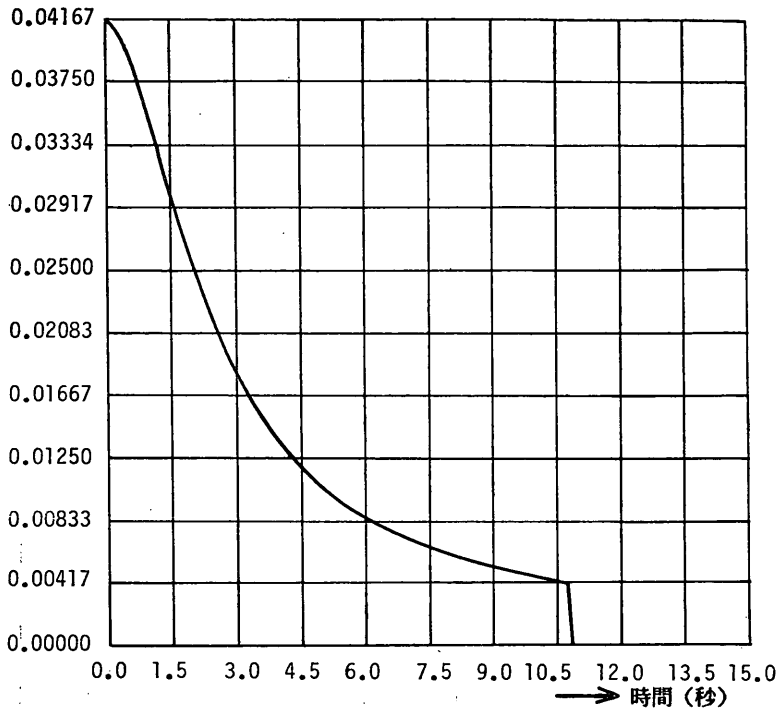


図-21 固体成分の濃度の経時変化

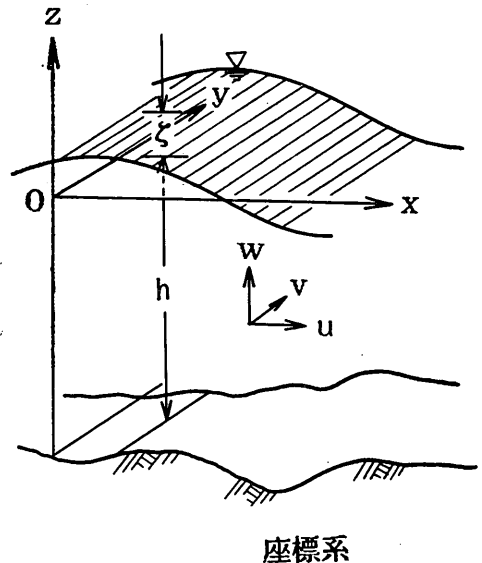
などがおもな項目である。

落下モデルを用い、約14km×13kmの領域（平均水深約20m）のほぼ中央、水面下0.5mを中心とする初期半球（半径10m）の拡散雲を与えた場合の落下段階（convective descent）における濁りの拡散雲の位置 (x, y, z) 、拡散雲の半径、各粒子群濃度等の時間変化を示したものが図-20、21である。図-20、21における縦軸はそれぞれの最大値を基準にした相対値で表している。なお、本計算に用いられた3つの土粒子群の沈降速度はそれぞれ0.3048、1.524および2.743 cm/sであり、それらの含有率はいずれも4.2%として計算されている。この計算結果によると、約10.8秒間で海底に達していることがわかる。

図-21、22の結果からも明らかなように、落下モデルまたは噴射モデルにより、現象はかなり理想化されているとはいえ、土砂の投棄（又は噴射）の瞬間から拡散雲の落下、着底、崩壊などの状況を追跡できることがわかる。しかし、本モデルにより再生される拡散雲の挙動が実際の現象をどの程度まで表現し得ているかを確認できるほどの現地資料はまだ得られていない。

(4) 三次元数値モデル

一般の海上工事においては、周辺の海底地形は水平面



座標系

図-22 三次元座標系

ではなく、海岸線形状その他も複雑な境界条件下にある。したがって、そこでの流れは平面的にはいうまでも

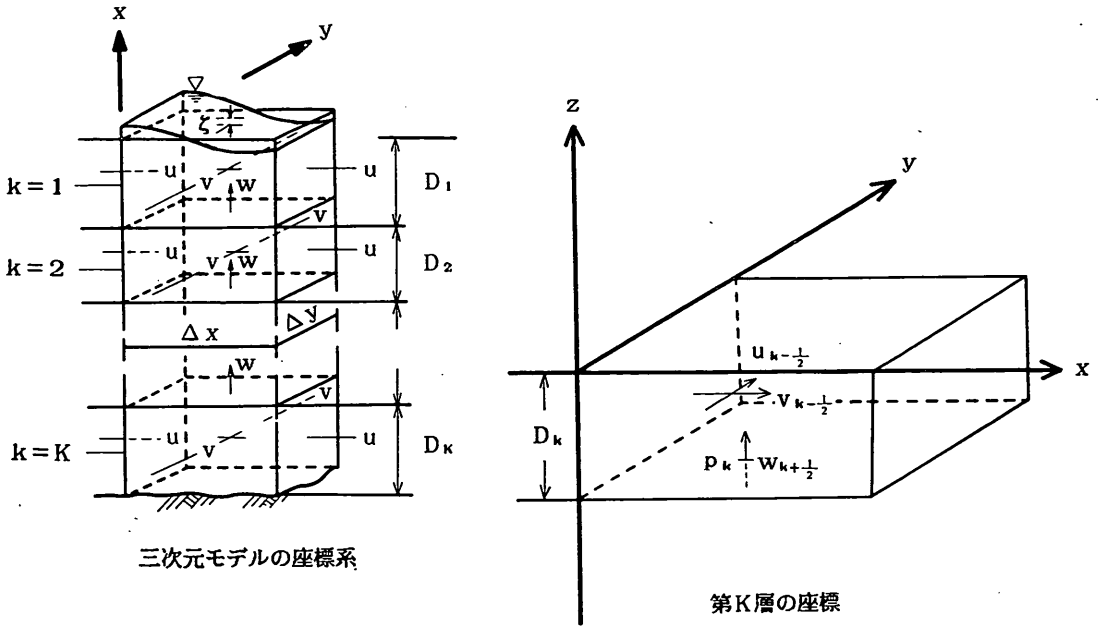


図-23 三次元数値モデルの座標系

なく、鉛直的にも複雑な変動をする。それゆえ、海上工事によって発生する濁りの拡散も流れの影響を受けて三次元的となる。このような流れ、濁り拡散の三次元性、非定常性、および、濁り防止対策による効果予測などに対応するためには三次元的に取り扱った非定常解析法によらなければならない。このような理由から、以下に述べる三次元数値モデルが開発された。

いま、図-22 に示されるように、平均水面上の一点を原点0とし、水平2軸(x, y)、および鉛直上方にz軸をとると、拡散物質の沈降過程を含む保存式は次のようになる。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uc) + \frac{\partial}{\partial y}(vc) + \frac{\partial}{\partial z}(wc) \\ &= \frac{\partial}{\partial x}\left(D_x \frac{\partial c}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_y \frac{\partial c}{\partial y}\right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial z}\left(D_z \frac{\partial c}{\partial z}\right) + w_s \frac{\partial c}{\partial z} \end{aligned} \quad \dots\dots 54$$

ここに、c：物質濃度、(u, v, w)：x, y, z方向の流速、(D_x, D_y, D_z)：x, y, z方向の拡散係数、w_s：物質の沈降速度、である。

図-23 に示されるような水柱においてこれをK層に鉛直分割し、その第k層に対してに関する積分をすると、式54はつぎのようになる。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(C_k D_k) + \frac{\partial}{\partial x}(u_k C_k D_k) + \frac{\partial}{\partial y}(v_k C_k D_k) \\ &+ w_{k-\frac{1}{2}} c_{k-\frac{1}{2}} - w_{k+\frac{1}{2}} c_{k+\frac{1}{2}} \\ &= \frac{\partial}{\partial x}\left(K_x D_k \frac{\partial c_k}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y D_k \frac{\partial c_k}{\partial y}\right) \\ &+ \gamma_i(c_{k-1} - c_k) - \gamma_i(c_k - c_{k+1}) \\ &+ w_{sc_{k-1}} - w_{sc_k} \end{aligned} \quad \dots\dots 55$$

ここに、C_k：第k層の物質濃度、D_k：第k層の層厚、w_{k+1/2}：第k層と第(k+1)層との内部境界面における鉛直流、c_{k+1/2}：第k層と第(k+1)層との内部境界面における物質濃度、(K_x, K_y)：分散係数、γ_i：内部境界面の交換係数、である。

さらに、

$$\left. \begin{aligned} M_k &= u_k D_k \\ N_k &= v_k D_k \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots 56$$

とすると、上式55は、

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(c_k D_k) + \frac{\partial}{\partial x}(c_k M_k) + \frac{\partial}{\partial y}(c_k N_k) \\ &+ w_{k-\frac{1}{2}} c_{k-\frac{1}{2}} - w_{k+\frac{1}{2}} c_{k+\frac{1}{2}} \\ &= \frac{\partial}{\partial x}\left(K_x D_k \frac{\partial c_k}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y D_k \frac{\partial c_k}{\partial y}\right) \\ &+ \gamma_i(c_{k-1} - c_k) - \gamma_i(c_k - c_{k+1}) \end{aligned}$$

$$+wsc_{k-\frac{1}{2}}-wsc_{k+\frac{1}{2}} \quad \dots\dots(57)$$

となる。

ただし、式57は、最上層 ($k=1$) と最下層 ($k=K$) においては次の変更が加わる。すなわち、

$k=k$	$k=1$	$k=K$
$w_{k-\frac{1}{2}}c_{k-\frac{1}{2}}-w_{k+\frac{1}{2}}c_{k+\frac{1}{2}}$	$-w_{\frac{3}{2}}c_{\frac{3}{2}}$	$w_{K-\frac{1}{2}}c_{K-\frac{1}{2}}$
$\gamma_i(c_{k-1}-c_k)-\gamma_i(c_k-c_{k+1})$	$-\gamma_i(c_1-c_2)$	$\gamma_i(c_{K-1}-c_K)$

となる。

式57に対して、ADI法による差分解法を適用する。まず、時間積分を交互に前半ステップと後半ステップに分け、前半ステップに対して x は方向の成分に対してつぎのようにインプリシットに表現する。すなわち、

$$c_{i,j,k}^{n+1} \cdot D_{i,j,k}^{n+1} = c_{i,j,k}^n \cdot D_{i,j,k}^n$$

$$-\frac{\Delta t}{\Delta x} \left\{ (f_{i+\frac{1}{2},j,k}^n(-\theta) \cdot c_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} + f_{i+\frac{1}{2},j,k}^n(\theta) \cdot c_{i,j,k}^{n+1}) \cdot M_{i+\frac{1}{2},j,k}^n - (f_{i-\frac{1}{2},j,k}^n(-\theta) \cdot c_{i-\frac{1}{2},j,k}^{n+1} + f_{i-\frac{1}{2},j,k}^n(\theta) \cdot c_{i,j,k}^{n+1}) \cdot M_{i-\frac{1}{2},j,k}^n \right\}$$

$$-\frac{\Delta t}{\Delta y} \left\{ (g_{i,j+\frac{1}{2},k}^n(-\theta) \cdot c_{i,j+\frac{1}{2},k}^{n+1} + g_{i,j+\frac{1}{2},k}^n(\theta) \cdot c_{i,j,k}^{n+1}) \cdot N_{i,j+\frac{1}{2},k}^n - (g_{i,j-\frac{1}{2},k}^n(-\theta) \cdot c_{i,j-\frac{1}{2},k}^{n+1} + g_{i,j-\frac{1}{2},k}^n(\theta) \cdot c_{i,j,k}^{n+1}) \cdot N_{i,j-\frac{1}{2},k}^n \right\}$$

$$+\frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} K_x \left\{ HX_{i+\frac{1}{2},j,k}^n \cdot (c_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} - c_{i,j,k}^{n+1}) - HX_{i-\frac{1}{2},j,k}^n \cdot (c_{i-\frac{1}{2},j,k}^{n+1} - c_{i,j,k}^{n+1}) \right\}$$

$$+\frac{\Delta t}{(\Delta y)^2} K_y \left\{ HY_{i,j+\frac{1}{2},k}^n \cdot (c_{i,j+\frac{1}{2},k}^{n+1} - c_{i,j,k}^{n+1}) - HY_{i,j-\frac{1}{2},k}^n \cdot (c_{i,j-\frac{1}{2},k}^{n+1} - c_{i,j,k}^{n+1}) \right\}$$

$$-\frac{1}{2} \Delta t \cdot w_{i,j,k-\frac{1}{2}}^n \left\{ h_{i,j,k-\frac{1}{2}}^n(-\theta) \cdot c_{i,j,k-\frac{1}{2}}^{n+1} + h_{i,j,k-\frac{1}{2}}^n(\theta) \cdot c_{i,j,k}^{n+1} \right\}$$

$$-\frac{1}{2} \Delta t \cdot w_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n \left\{ h_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n(-\theta) \cdot c_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{n+1} + h_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n(\theta) \cdot c_{i,j,k}^{n+1} \right\}$$

$$+\frac{1}{2} \Delta t \cdot w_{i,j,k-\frac{1}{2}}^n \left\{ h_{i,j,k-\frac{1}{2}}^n(-\theta) \cdot c_{i,j,k}^{n+1} + h_{i,j,k-\frac{1}{2}}^n(\theta) \cdot c_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{n+1} \right\}$$

$$+\frac{1}{2} \Delta t \cdot w_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n \left\{ h_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n(-\theta) \cdot c_{i,j,k}^{n+1} + h_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n(\theta) \cdot c_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{n+1} \right\}$$

$$+\frac{1}{2} \Delta t \cdot \gamma_i \left(c_{i,j,k+1}^{n+1} - c_{i,j,k}^{n+1} \right)$$

$$+\frac{1}{2} \Delta t \cdot \gamma_i \left(c_{i,j,k-1}^{n+1} - c_{i,j,k}^{n+1} \right)$$

$$-\frac{1}{2} \Delta t \cdot \gamma_i \left(c_{i,j,k}^{n+1} - c_{i,j,k+1}^{n+1} \right)$$

$$-\frac{1}{2} \Delta t \cdot \gamma_i \left(c_{i,j,k}^{n+1} - c_{i,j,k-1}^{n+1} \right)$$

$$+\frac{1}{2} \Delta t \cdot w_s \left(c_{i,j,k-1}^{n+1} - c_{i,j,k}^{n+1} \right)$$

$$+\frac{1}{2} \Delta t \cdot w_s \left(c_{i,j,k+1}^{n+1} - c_{i,j,k}^{n+1} \right) \quad \dots\dots(58)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} f_{i+\frac{1}{2},j,k}^n(\theta) &= 0.5 + \text{sign}(M_{i+\frac{1}{2},j,k}^n) \cdot \theta \\ g_{i,j+\frac{1}{2},k}^n(\theta) &= 0.5 + \text{sign}(N_{i,j+\frac{1}{2},k}^n) \cdot \theta \\ h_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n(\theta) &= 0.5 + \text{sign}(w_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n) \cdot \theta \\ 0 &\leq \theta \leq 0.5 \end{aligned} \right\} \dots\dots(59)$$

である。したがって、 $\theta=0$ では中央差分、 $\theta=0.5$ では上流差分となる。また、

$$\left. \begin{aligned} M_{i+\frac{1}{2},j,k}^n &= u_{i+\frac{1}{2},j,k}^n \cdot HX_{i+\frac{1}{2},j,k}^n \\ N_{i,j+\frac{1}{2},k}^n &= v_{i,j+\frac{1}{2},k}^n \cdot HY_{i,j+\frac{1}{2},k}^n \\ HX_{i+\frac{1}{2},j,k}^n &= \frac{1}{2} (D_{i,j,k}^n + D_{i+1,j,k}^n) \\ HY_{i,j+\frac{1}{2},k}^n &= \frac{1}{2} (D_{i,j,k}^n + D_{i,j+1,k}^n) \end{aligned} \right\} \dots\dots(60)$$

である。式60において肩字 ($n+1$) を付した項は未知数であり、 j = 一定に対して、 $i=1, 2, \dots, I$ 、 $k=1, 2, \dots, K$ (今の場合 $K=3$) に応じた $I \times K$ 個の未知数をもつ連立方程式となっている。これらの方程式はガウス消去法によって解くことができる。

後半のステップにおいては、式57において x 方向をエクスプリシットに、 y 方向をインプリシットに表現した差分式により式60と同様の連立方程式が組立てられ、 i = 一定に対する濃度が求められる。

なお、濁り拡散計算に必要な流れのデータ (u, v, w 等) は三次元の流れモデル²¹⁾により算出されたものを利用する。

本モデルに必要なおもな入力データは、

- ①三次元流れのデータ。水深、地形を含む
- ②分散係数
- ③交換係数 (層間)
- ④開境界での希釈係数
- ⑤濃度の初期値
- ⑥濁り発生源、発生形態を表す定数 (開始時、終了時、サイクルタイム等)

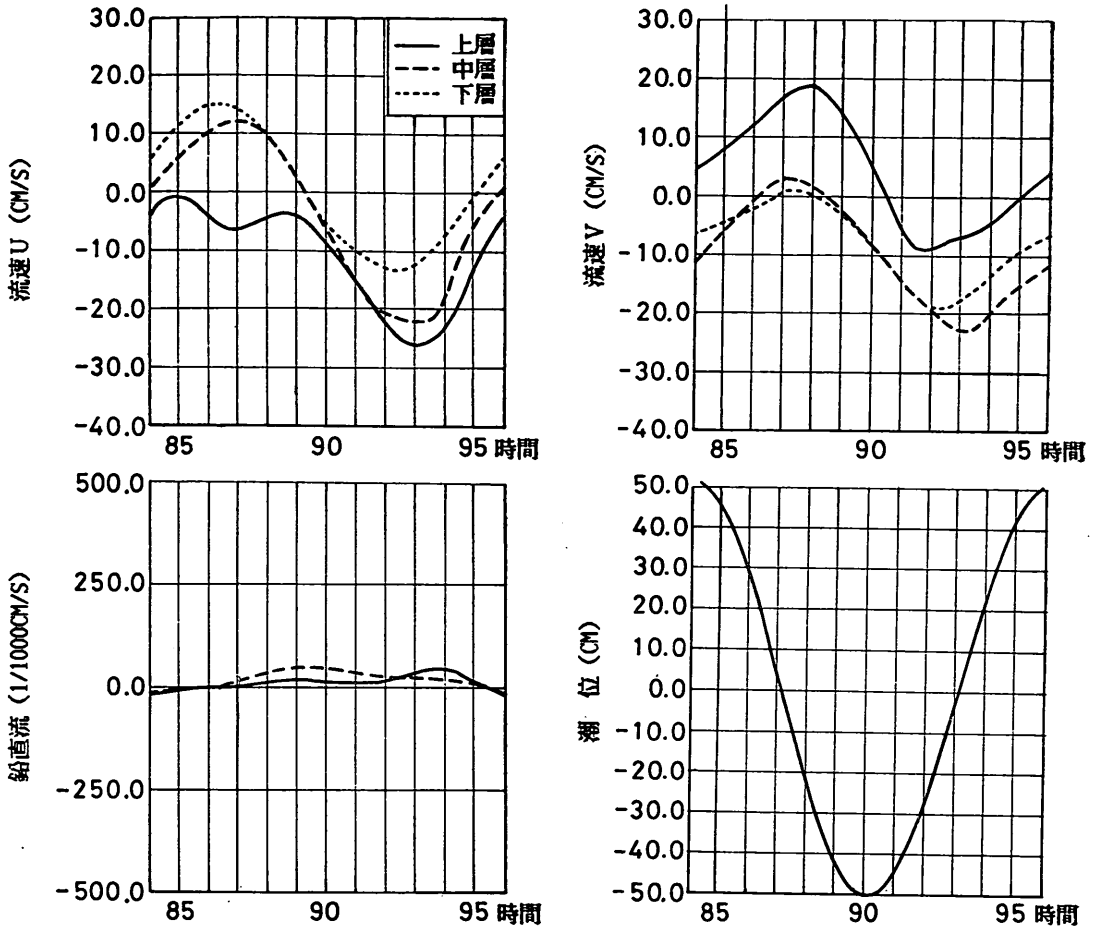


図-24 代表点における流れと水位のシミュレーション結果

⑦上・中・下層の濁り発生量

⑧その他入・出力コントロールのためのデータ等である。

本モデルによって任意時間、任意地点における濁り濃度、分布状況、堆積厚などを追跡することができる。

本モデルにより予測される濁り分布の妥当性を調べるため、先に3.2(2)にて述べた現地二次敷砂試験における濁り拡散分布の再計算を行った²²⁾。

濁り拡散計算に用いる流れのデータは 図-3 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 km×2 km 領域に対して軸は対岸の海岸線とほぼ平行になるN51°Eにより、水平格子は100 m×100m、鉛直分割は6 m (上層)、7 m (中層)、全水深-13m (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潮せき間の経時変化を代表的について示したものが 図-24 である。同図の横軸は計算開始からの時間を示している。図-3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-24 の88時間目と対応させることとした。

つぎに、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、流れの得測値をそのまま使用すると、 $2 \times 10^9 \sim 2.5 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、潮流を含む12時間50分以上の長周期成分を除去すると、 $(2.8 \sim 9.8) \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、さらに、潮流を含む6時間25分以上の長周期成分を除去するとおおむね $10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ のオーダーとなる。本試験時の濁り拡散は1潮せき時内の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-24の結果にも見られるように、鉛直流が0.03cm/s程度あり、これによる移

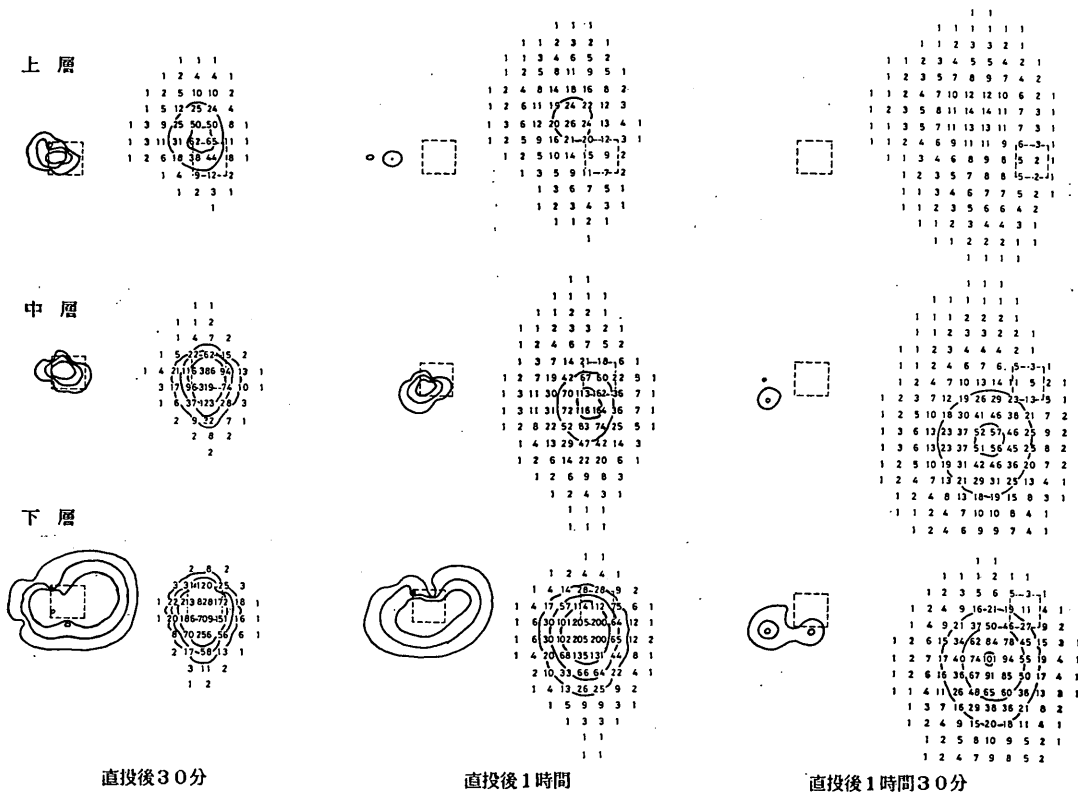


図-25 直投による濁り拡散の実測値と予測値との対比

流効果が大きいので、鉛直拡散係数は0とした。

濁りの発生量は、前述の原単位表より 15kg/m^3 と定めた。したがって、今回の取扱い土量 3065m^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。

取り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えし、煮沸、分散剤添加等の前処理は行わない）により得られたものを採用した。

複合粒径より構成される土粒子に対し特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、 $30\mu\text{m}$ の代表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た。

各粒径ごとの拡散計算は、図-25 に示す流れの場で88時間時点から敷砂施工地点に上・中・下層から濁り発生量を与え、タイムステップ180秒、初期濃度 0mg/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ごと、時間ごと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 $200\mu\text{m}$ 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り扱いの対象から除外したためである）。

こうして得られた結果を先の図-4 に示す実測値とともに示したものが図-25である。

図-26 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、 10mg/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 $1/10\text{mg/l}$ ）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 10mg/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、 5mg/l 、 1mg/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ないが、図-25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とでやや異なるけれども、拡散範囲はおおむね同程度となる。中・下層では直投後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対し、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三次元数値モデルによるシミュレーション結果との対比を行った。その結果、濁りの分布形状は水平および鉛直方向の流れに対し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。

流れのある海水中で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の積重ねによって明らかにされる必要がある。

本モデルによる再現シミュレーション結果はつぎのように要約できる。

- ①3000 m^3 級土運船からの土砂の直投試験によると、濁り拡散は工事場所を中心にほとんどは500m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濁りの原単位表を用いて推定できる。
- ④濁りの原因となる取り扱い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ると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。

6.2 予測モデルの選定

濁り予測の手段となるモデルにおいては次のような条件を備えていることが要求される。すなわち、

- ①濁りの発生、拡散を支配する要素・過程ができるだけ多くとり入れられること
- ②取り扱いができるだけ簡単なこと
- ③精度が高いこと

である。

①に関しては、工事区域の地形、水深、流れの条件が先ず問題となる。工事の規模、濁りの拡散範囲や周辺の地形の影響の度合、さらには、その領域内の水深変化の状況などから判断して「無限領域」として取り扱うことができる場合と、「有限領域」として取り扱わざるを得ない場合とがある。無限領域としての取り扱いが無理な場合には、地形、海底地形の条件を備える必要がある。また、流れについては、これを、無視できる場合、全水深一方向一様流とみなせる場合、一方向の往復流とする場合、および、任意の流れ場を条件としてとり入れる必要がある場合とがある。さらに、濁りの発生形態として、土捨て、沖捨て等のように連続的と考えてよい場合、および、グラフ、ディッパー、密閉グラフなどのようにサイクルタイムによって連続的と考えるべき場合、あるいは間欠的と考えた方がよい場合とがある。また、濁りの発生場所が海底の一か所に限定された点源と考えられる場合、あるいはグラフのように海底から海面にわたる線源とした方がよい場合、および、上、中、下層ごとにある分布を与えた方がよい場合などがある。粒子の沈降速度は濁りを決定する重要な値であり、単一粒径とみなした沈降速度（減衰係数として扱うことがある）、一般の混合粒径としての扱い、および、微細粒子に対しては、ほとんど沈降しないとして扱う場合とがある。拡散防止対策としての防止膜の展張効果を予測するための条件も場合によっては要求される。

濁りの予測計算により入れるべき上述のような諸条件に加えて、予測される結果に対する要件も重要である。

まず、濁りの発生源からの拡散を場所的・時間的に求める非定常解モデルと、固定点からの連続的な発生源からの濁り分布のように時間的には変化しない定常解モデルとがある。瞬間的（または一時的）あるいは間欠的に発生する濁りの拡散分布については非定常モデルによることになる。この場合、特定点での平均濃度、最大濃度、拡散速度、または一定濃度以上の継続時間などを予測することができる。さらに、それらの濃度分布が全層平均として扱ってよい場合、もしくは、層別に区分して鉛直分布をとり入れた解析をする必要のあることなどが生ずる。堆積層を算定する必要のある場合にはこれに対応できるモデルが要求される。

次に、②に関しては、予測モデルの仕組みが簡単であ

ること、つまり、ブラックボックス的要素が少いこと、煩雑な入力データ量ができるだけ少く、かつそれらが確定しやすいこと、できるだけ計算が容易に実行できること、などである。モデルの内容がわかりやすいという点では解析解モデルが一番である。簡単なものは、べき乗、指数関数の計算が可能なポケット型電子計算器によっても濁り濃度の分布を計算することができる。中にはベッセル関数を必要とするものもあり、これに至っては数表またはパーソナルコンピュータ以上の計算機が必要となる。一方、差分式または有限要素法にもとづく数値モデルは、一般向けとしてはその内容がわかり難いとされ、取り扱いも解析モデルほど容易でなく、ミニコンピュータ以上の計算機によらなければならない。計算に必要なインプットデータとしては、別途流れのシミュレーションから得られる流向流速に関するデータに加えて、濁り発生場所、発生量、拡散係数、沈降速度などが必要である。他の水質予測モデルと比べれば計算に必要なデータ量は少い方である。通常、分オーダーの時間刻みで濁りの分布を追跡計算するため、くり返ししの計算回数が多く、計算時間を要するのでできる限り高速の大型電子計算機を利用することが望ましい。しかしながら、海上工事の多くは、昼間稼働、夜間休止となるため、濁りの発生は工事期間中約半日発生、半日休止のくり返しとなり、これに伴う濁りの分布も1日周期をもつ分布のくり返しとなる。この意味では、濁り分布追跡のための計算時間についても24時間分を計算すればよく、他の水質予測モデル、たとえば、COD、栄養塩、溶存酸素追跡の場合などとは異り、計算時間は短くて済む。

さらに、③の予測の精度に関しては、その評価が容易でない。解析モデルでは、濁りは円形パッチまたはパフ状に拡がるもので、濁り拡散をかなり理想化して扱っているため、実態とのギャップは否定できない。これに対して、数値モデルは、できるだけ多くの条件を組込んでモデル化しているため、出力される結果についてもそれに応じた情報が提供される。しかし、モデルが複雑であることと、これによって得られる結果の精度とは別問題と考えるのが妥当であり、所定の再現性の確認が必要である。数少ない実証試験ではあるが、濁りの分布形状についてある程度満足できることが確認されている。

上述の諸状況を考え合わせると、前述の予測モデルに要求される条件①、②、③はそれぞれ相受け容れ難い要素があり、同時に全部を満足するモデルはないといえる。いま、解析モデル、半解析解モデル、Dump & Jetモデル、および三次元数値モデルについていくつかの特性からそれらの特徴を定性的に比較すると表-3のよう

になる。

以上より、予測の目的、モデルの制約等を考え合わせ、モデルを選定する。

6.3 予測手順

濁り予測の一般的な手順は図-26のように表すことができる。

まず、埋立地、航路、外郭施設、岸壁その他の港湾関連施設の建設の必要性に対して工事計画が立案される。この際、工事の規模は建設の必要性によって決まる。工事の場所は、候補地の自然条件、開発目的、海域利用状況を把握して設定される。自然条件のうち、海底地形を含む海岸線、水際線形状は、上述関連施設の位置、規模の設定のみならず、海域の潮位、潮流を支配する重要な条件である。数十km四方程度の領域を対象にする場合は市販の海図(縮尺1万分の一から十万分の一程度)で十分間に合わせることができる。

工事場所の選定に際し、建設目的に対する機能面からの検討とは別に、自然条件面からは、海岸の欠壊埋設、波浪の集中発散、流れの増速または停滞、水面の一部消滅に伴う高潮津波への影響等が考慮される。一方、海域利用状況については、航路または港など海上交通、荷物輸送のための空間、水産養殖漁場としての空間、海水浴、海釣り、潮干狩、ヨットハーバー、マリナーパーク等のレジャー空間、自然海浜、干潟、野島公園、文化財、国立公園など景観保護または文化財保護区域としての空間、等についての現状把握および将来の海域利用の展望が重要な条件である。

上述の自然条件、海域利用状況を考慮して工事の規模、位置が設定されると、工法および工程に関する施工計画が立てられる。工法については、敷砂、サンドコンパクション、深層混合処理、置換、余盛撤去、土捨、矢板打、捨石、浚渫などがあり、これら各工法に対して施工機械が選定される。ポンプ、グラブ、バケット等の浚渫船、ガット、バージ、クレーマー、ミキサー、サンドコンパクション、深層混合処理のための船、ケーソン据付け、消波ブロック据付け、鋼板セル据付けのための起重機船等がおもな施工機械である。これらの各機械を組み込んだ工程計画が立てられる。またこれらの各工程において取り扱われる土砂が決められる。その場合、埋立て、敷砂、捨石のように外部から持込まれる場合はそれらが取り扱い土砂であり、浚渫、サンドコンパクション、深層混合処理、などは工事現場の海底泥が濁りの対象泥となる。普通、海底の堆積泥の方が外部から持込まれる山土、海砂よりも細かく、濁りへの寄与率が高い。取り扱い土砂(または濁りの対象となる土砂)が決まる

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

表-3 各モデルの特徴

項目	モデル	解析解モデル	半解析解モデル (Christodoulou, G.C. ¹⁹⁾)	Dump & Jet モデル (Maynard, G. ら ²⁰⁾)	三次元数値モデル		
地形の考慮		無限領域として取り扱う。 (一部半無限領域としての取扱いあり ¹⁸⁾)	通常は無限領域鏡像法等を利用して近似的に直線海岸等の影響を取り扱うことができる。	落下、崩壊の段階では無限領域、拡散段階では地形の考慮が可能。	格子(または要素)単位で任意の地形を取り扱うことができる。		
海底地形の考慮		一樣水深として取り扱う	同	左	格子(または要素)単位で海底地形を考慮できる。		
濁りの鉛直分布の表現		限られた解(モデル)を除き、鉛直分布の細かい表現はできない。	鉛直分布関数を仮定すれば、表現可能。	可	能	格子(または要素)単位で任意の時間、場所層における濁り分布の計算が可能。	
成層または密度効果の導入		できない。	一般にできない。			海水の鉛直密度分布を入力することにより取り扱い可能	導入できる。
濁り発生形態の任意性		連続、瞬間、点源、線源などが可能である。規則性を要する。	発生時間、位置等についてかなり任意である。	Dump モデルは半球体、Jet モデルはブルーム状を仮定している。		発生場所、時間間隔層、その他の条件はかなり任意にとり入れることができる。	
濁り防止膜対策工等の検討の可能性		できない。	一般にできない。			拡散段階に入ればできる。	ほぼ任意にとり入れて検討できる。
局所的瞬間的現象の予測		特異点(たとえば発生点)で解が求まらない。	周囲の濃度に関係なく、必要な測点の情報のみから計算することができる。	土捨ての瞬間から長期的な移流拡散まで一環して計算することができる。		マック法、モンテカルロ法などを利用した特殊なモデルでは取り扱い可能と考えられるが、一般には広範に及ぶ移流拡散段階の濁り予測に適している。	
モデルの再現性		拡散係数(拡散速度)、拡散層厚、減衰率(沈降)などによって拡散分布は変化するが、実測値に適合する保証はない。	計算条件を単純化した三次元数値モデルによる計算結果との比較によると、ほぼ類似の結果が得られる。	半球体の初期半径、初期密度など不明な点があり、再現性をチェックするに十分な実測データがとれていない。		直投試験結果との照合では一応の再現性は確認されている。しかし、今後のアフターケアによりさらに精度の向上をはかる必要がある。	
モデルの使いやすさ		やや高性能のポケット型電子計算機によっても大抵の計算はできる。	限られた測点位置での計算は有利である。測点数が増えたと時間が要し、本モデルの長所が失われる。	理論は複雑であるが、入・出力データの取り扱いは容易である。		ミニコン以上の高度電子計算機が必要である。一般に、入力データ数が多く準備に手間どる。計算機の進歩により、計算は将来とも容易になっていく。	
濁り監視システムへの適用性		濁り監視の基本計画策定時の概算等に利用する。	限られた測点での暫定的な濁り予測など、補助的手段として利用する。	濁りの発生から far field 拡散まで一環して扱えるモデルであるが、三次元数値モデルと比べると不都合な点が多い。		運用時にパラメータやモデルの修正をはかりつつ、データのファイリング、検索システムを導入することにより、適用できる。	
港湾技術研究所におけるモデルの整備状況		ジョセフ・センドナー、大久保・ブリチャード、岩井の解等について整備済。	計算プログラム、図化プログラムを含めて整備済	同	左	同	左

と、その土砂に対する粒度分布（粒径加積曲線）が求められる。この加積曲線によって決定される粒径ミクロン以下の含有率、前述の施工機械の種類と大きさ、および濁りの対象領域になると考えられる海域での浮遊限界流速（一応平均流速を目途とする）とにより濁りの発生原単位が決まる。さらに、工事計画による位置、取り扱い土量、工法・工程計画による工事場所と工事期間、サイクルタイムと先の濁り発生原単位とによって、工事場所ごと、層ごと、工法ごとの時系列的な濁り発生量が算定される。

一方、濁りの拡散に対して大きな影響をもつ海域の流れについては、自然条件の把握の際に述べた地形、潮位、潮流の資料に従って、濁りの対象となる領域の流れの計算を行う。場合によっては、河川流入、塩分分布、水温分布、海上風、躍層などの効果を考慮した流れを計算する。通常は半日または1日の周期をもつ潮流を求めることが多く、長期間の濁り拡散予測を行う場合もこれらの周期流をくり返し利用する。濁り拡散予測に用いる流れは、流向流速はもちろんのこと、残差流と呼ばれる一周期平均の流向流速もまた濁り分布形状を決定づける大きな要素である。

次に、濁り拡散の度合いを支配するもう一つの要素としての拡散係数を設定する。この拡散係数は固有に存在するものではなく、流れの大きさ、乱れの強さ、流れの平面および鉛直分布形状等に依存する他、濁りの計算に用いるモデルやそのときの流れのデータにも依存する。実際には $10^4\text{cm}^2/\text{s} \sim 10^5\text{cm}^2/\text{s}$ の値を用いることが多い。

以上の流れのデータ、拡散係数、濁りの発生量、および、先の取り扱い土砂（または海底泥）の粒度分布より決まる沈降速度分布を用いて濁り拡散計算を行う。沈降速度は、粒径加積曲線において粒径数ミクロンから $200\mu\text{m}$ までの間を3～10階級程度に分割し、各階級ごとの代表粒径に対する沈降速度（ストーク式に適合すると仮定）を与えて階級ごとの濁り計算を行い、それらの結果を各代表粒径の含有率に応じて重ね合わせ、混合粒径としての土砂による濁り分布形状とする。

濁り拡散予測計算により一応この段階において、濁りの拡散範囲、拡散の速度、堆積厚等を出すことができる。これらの結果は、先に海域利用の実態もしくは将来の利用計画、または、水域の環境保全等の観点から定められたSS基準値、SS目標値等と照合する。計算によるSS予測値がこれらの値を大きく上回るようであれば、工事計画まで立返り、位置の変更、規模の縮小、施工期間の延伸、濁り発生防止型の建設機械の導入、取り扱

い土砂の変更、濁り拡散防止膜の展張、等の条件変更を行って濁り拡散の再計算を行う。拡散防止膜展張のみの対策工の場合には、防止膜による流れの変化もあり得るため、流れの計算についても再計算してやり直すこととなる。こうした濁り防止対策工により計算される濁りの強さが濁りの基準値（または目標値）を上回らなければ濁りの拡散予測はこの段階で終結する。

濁りの予測計算のための手順は大略上述のとおりである。ただし、上に述べたのは現在の大型電子計算を利用し、三次元数値モデルで適用して予測計算する場合を例にとって示したものである。6.1(1)、(2)および(3)で述べた簡単なモデルにおいては、必ずしも図-27に示されたような各フローのすべての過程をとり扱うようには構築されていないため、いくつかの過程を省略した予測となり、予測のために取入れることのできる条件およびその結果として出される出力の情報量は当然のことながら少い。

7. 予測モデルの濁り監視への適用

7.1 監視システムの中のモデルの役割

工事に伴う濁りについては、建設計画の段階において十分な環境影響評価が行われ、濁り拡散の防止を配慮した施工計画が立てられている。しかし、実際の工事段階になると、気象海象条件の変化に応じて当初予定された施工計画に変更の必要が生じたり、河川からの異常出水、風、降雨、プランクトンの異常発生などにより濁りのバックグラウンド値に変動が生ずる。このため、工事中においては濁りの測定をして濁りの現況を監視するとともに、濁りが上昇する傾向が認められるならば、いち早くその原因を究明し、濁りを低下するための対策を講じなければならない。

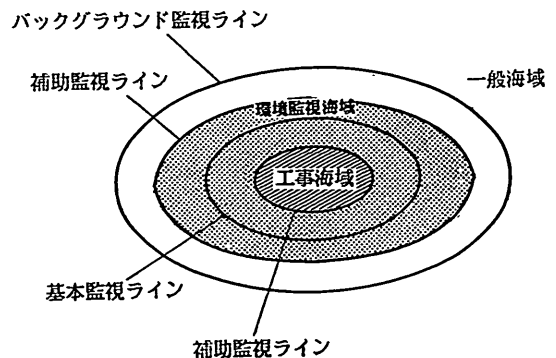


図-27 工事区域と濁り監視区域

このような意味から、濁りの監視システムは、濁りの事前影響評価とともに、工事による濁りを制御する上で重要となる。

一般に、工事区域をとり囲む領域は、図-27 に示すように、工事を施工する“工事区域”，工事の影響を受けることがあり得ると想定される“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。

環境監視海域においては、工事による影響の有無、程度を把握するための“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。基本監視ラインでの SS、濁度等の基準値は、水質環境の保全、魚介類への影響、当該海域の利用形態などを考慮して設定される。この基準値は、水産用水側からは人工的に付加される SS は 2 ppm が限度⁹⁾という厳しい条件もあるが、現地海域では SS のバックグラウンド値がほぼ 2～10mg/l の範囲で変動しており、人工的付加分の SS を検出することは容易でない。基準値に関する既往事例を見ると、それらの間には大小かなりの開きはあるが、基本監視点では概ね SS 30mg/l、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、監視ライン上の SS 基準値は、40例中、10mg/l が17例、20mg/l が4例、30mg/l が5例、50mg/l が4例、BG値+2mg/l が2例、BG値+10mg/l が4例等となっている。一方、余水吐の SS 基準値は、50mg/l が3例、100mg/l が2例、150mg/l が1例、200mg/l が3例等となっている。

監視基準値以下に維持すべき基本監視ラインでは、濁りの拡散状況、工事の規模、周辺海域利用状況などを考えて設定される。さらに、監視を円滑に行うため、基本監視ラインの内外に補助的な監視ラインを設け、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する。外側ラインにおいては、基本監視ラインを越えて拡散する濁りを追跡し、BG値の把握を行う。

このような濁り監視システムに対して予測モデルに要求される役割りとしてつぎのように整理することができる。

- ①濁りの原因究明
- ②濁りの将来変化の予測
- ③濁り防止対策に対する効果予測
- ④工種工法の変更に伴う濁り変化予測

まず、①に関し、濁りの現況値は監視ライン、または補助的な監視ラインにおける水質測定によって把握される。濁りの測定値は、工事による濁りの他、河川等からの流入、風による底泥のまき上げ、降雨、植物プランクトンの異常増殖、赤潮の発生などが加わって変動する。濁りの増大、拡散を制御するためには、このような濁りの原因をいち早く明らかにする必要がある。工事による直接的な濁りについては6.に述べた数値モデルによって大略を把握することができる。異常出水による濁りについても、流域面積の降雨量より出水時間、出水量が推定できるため、それによる濁りの発生量、拡散を数値モデルによって把握できる。しかし、降雨や気温の変化、水質変化などに伴うプランクトンの異常増殖、あるいは、赤潮の発生による濁りについてはまだその機構が明らかでないため、数値モデルで再現するには至っていないようである。

次に、②に関しては、①と極めて関係深いのが、現況の施工条件、気象海象条件等が継続した場合の濁り変化を予測し、基準値以下になることを確認することである。予測シミュレーションによって、対策の必要性の有無、緊急性を探る。

③に関しては、濁り防止対策が必要な場合、濁り拡散防止膜の展張方式について効果予測を行い、最も効果的な防止性策を見つめる。

さらに、④に関しては、工程計画の変更、濁り防止膜では制御できない場合の工種工法の変更、施工機械の変更に伴う濁り予測である。

以上述べたように、監視システムにおける濁りシミュレーションモデルは、建設計画段階では予測し得なかった条件の変化、変更に伴う濁りの予測、および、現況値の確認など、事前環境影響評価の補完的役割として重要な使命が果せられている。

7.2 濁り防止対策の効果予測シミュレーション

濁り防止対策としては、

- ①拡散防止膜やエアースクリーンなどの展張のように物理的な手段による方法
- ②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
- ③濁り発生防止のために特別に改良された施工機械（作業船等）を用いる方法、あるいは、
- ④施工速度を低下させる方法
- ⑤沈殿池、ろ過槽を設ける方法

などがある。これらの各濁り防止対策による効果予測のためのシミュレーションはつぎのように考えて行うことができる。

まず、凝集剤による沈降促進に関しては、数値シミュレーションでは沈降速度を増加させることにより対応できる。凝集剤には有機系のものと無機系のものがあるが、有機系ものは現在あまり使用されていない。凝集剤を使用した濁り抑制効果の実験例²³⁾によると、SS 200 mg/l 以上に対して沈降促進効果があると報告されている。実際は、現地において使用する凝集剤の種類、使用量、土砂の種類、流れの状況等を考慮した現地試験などにより沈降促進効果を求めてシミュレーションを行うのがよい。

濁り発生防止のために特別に改良された施工機械を用いる場合には、濁り発生原単位の見直し、およびこれに伴う濁り発生量と発生層の見直しにより対応する。カッターレスポンプ船による試験例によると、濁り発生量は従来型と比べ約6~7割となっている。

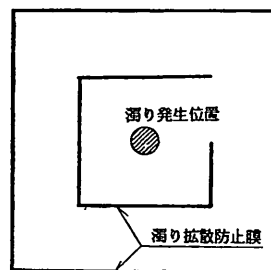
施工速度の抑制、工事区域の制限、施工の休止などがこれに該当する。これらは、時間当たりの土砂取り扱い土量の減少に伴う濁り発生量の低下としてシミュレーションに反映させることができる。

沈殿池やろ過槽の設置は、余水を高濃度 SS 状態ですでに長時間滞留させ沈殿させて後海域に放出することを目的とするもので、余水処理法として最も効果的である。整流沈殿池の現地試験例²⁴⁾では SS 除去率が65%という実績も報告されている。沈殿池やろ過槽の SS 除去率は“通水断面法”によって蓄測される²⁵⁾。

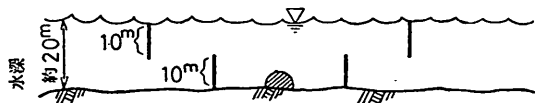
拡散防止膜の展張は、工事区域の水面下の一部を防止膜によって取り囲むことにより、高濃度の SS を含む海水を一時的に滞留させこの間の沈降促進を期待するものである。防止膜の効果は、SS の高濃度域（たとえば100

mg/l 以上）では効果が大きく、低濃度になれば効果は低下する。また、海上の流れの強さに支配され易く、流れが小さい程濁りの防止効果は大きくなる。流れが強くなると防止膜が鉛直とならず傾斜して汚濁水が上・下をう回して流れ、濁りも海水とともに流出するため、防止膜の構造、防止膜の多重展張などの検討、または、防止膜固定の強化などの処置が必要である。

こうした濁り防止膜による防止効果を扱えるのは三次元数値モデルにおいて他にない。防止膜は通常、海面へか海底まで全水深にわたって展張されることはなく、多くは海面から一定水深まで垂下するか(垂下方式)、または、海底から一定水深まで立ち上げる(自立方式)。また、平面的にも、作業船の出入りや余水の放出のため、



(平面図)



(立面図)

図-28 汚濁拡散防止膜展張法の一例

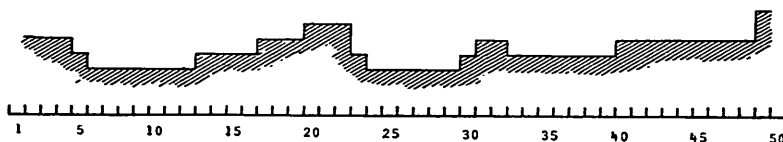
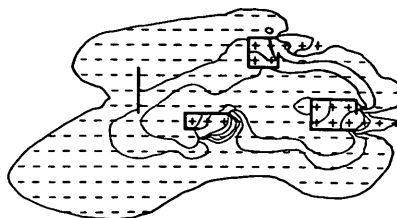


図-29 汚濁拡散防止膜展張効果のシミュレーション例

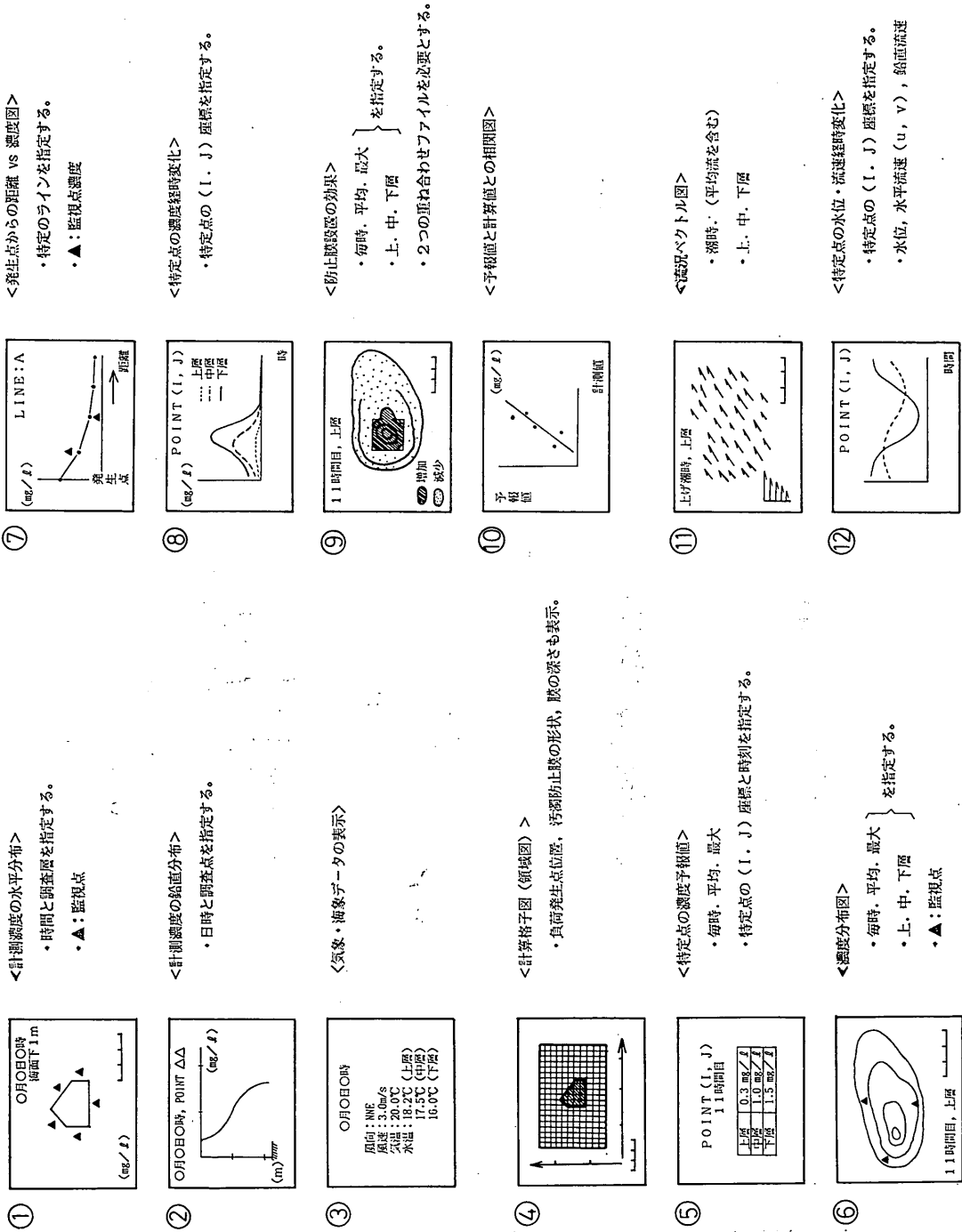


図-30 濁り監視に係る予測結果の図化表示法

防止膜は閉塞することなく、断続的に展張される。したがって、予測シミュレーションにおける層分割や格子分割（差分方式の場合）などの空間分割と防止膜の展張とが一致しなくなるのが普通である。このような不都合を除くため、層および平面格子に対して“縮小断面法²⁶⁾”を採用している。この方法によって、格子間隔や層厚と一致しない防止膜の開口部や長さを入力することができる。

濁り拡散防止膜展張の場合の計算に必要な入力データは、先の通常の濁り予測に必要なデータ（6.1(4)参照）に加えて、この防止膜の展張位置、展張長さを示す情報のみでよい。

いま、水深約20mの海域において2か所の工区で工事が行われる場合に、それぞれの工区において、防止膜を図-28に示すように、海底から10m立ち上げた自立方式と、その外側に海面から10m垂下した垂下方式で二重に展張した場合の濁り防止効果の一例を下層（水深13m以深）について示したものが図-29である。図-29において、-印はSS濃度が防止膜により減少する領域、+印は逆にSS濃度が増加する領域を表している。

この他、濁り監視に関し、図-30に示すような、現地水質監視点位置と計測値表示図、鉛直濃度分布図、特定点の濃度経時変化図、同濃度変化予測図、特定点の潮流ベクトル表示図など、濁り監視を遂行するのに必要な情報をできるだけ図化表示する。

なお、濁り監視においては、普通、前述の事前環境影響評価の場合に比べ、時間的にも空間的にも細かく計算する必要がある。このため、一次計算として大きな領域で計算し、次に二次計算としてその領域の一部をとり出し、小格子間隔、小時間刻みで濁り計算をする手法についても開発している。この計算においては、流れはもとの大領域計算で得られた値を各格子に対して次式のように調和解し、

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^3 a_i \cos\left(\frac{2\pi}{T_i}t - c_i\right) \quad \dots\dots(6)$$

$T_1=12$ (時間), $T_2=6$ (時間), $T_3=3$ (時間)

第3成分までとって、これらにより得られる流速を新しい小領域計算の境界流速として小領域小格子の流れを求める。

濁り計算についても、大領域計算での計算濃度を境界濃度とし、先に求めた流れの結果を用いて小領域での濁り拡散計算が行えるようになっている。

7.3 データファイリングとフィードバック

濁り監視のために要求されるモデルの機能、条件は、

一般の濁り予測の場合と同様に、できるだけ多くの条件がとり入れられること（条件の広範性）、入出力が煩雑でないこと（簡便性）、結果の精度が高いこと（高精度）等に加えて、解が迅速に得られること（迅速性）が特に重要である。

入出力が簡単であることのみでは解析解モデルまたは半解析解モデルに歩がある。たとえば、補助監視ライン上の濁りから基本監視ライン上の一定時間後の濁りの推定などのように2点間の濃度の関係を単純な条件下で求める場合には、簡単な解析モデルを適用して図表化しておけばよい。しかし、このモデルでは複雑な流れや地形の効果、複雑な濁り発生形態のとり込み、あるいは、濁り防止対策効果などのとり込みができない。Dumpモデル、Jetモデルにおいても解析モデルに比べれば条件の広範性を高めることができる反面、入出力は難しくなる。また、三次元数値モデルにおいては、とり込むことのできる条件の広範性においては最も優れているものの、入出力の単純性、計算の迅速性に関しては他のモデルに比べて最も劣る。

濁り監視に要求される予測モデルの要件は、6.2においても既に述べたとおり、互いに相容れない内容であり、これらを同時に満たすモデルはない。

したがって、これまでにとりあげたモデルの特徴を最大限に活かして濁り監視システムに運用していくことを考える必要がある。

条件の広範性は監視システムに要求される最も重要な条件であり、三次元数値モデルがこの点で有利である。そこで、三次元数値モデルに対して、入出力の定形化に簡便化をはかると同時に、計算を迅速に行うための方策を考える。この一つの方策は、予測計算が必要と想定される条件での計算をできるだけ多くのケースについて予め実施し、その結果を標識化（ラベリング）の後保存（以後ファイリングと呼ぶ）しておくことである。こうしておくことにより、必要に応じて検索し、できるだけ速やかに解を引き出せるようにする。特に流れのデータについては、発生頻度の高い流れのパターンのいくつかについてファイリングをしておく効果的である。後々に使用が予定される濁り防止膜の展張時の流れ等についても、防止膜の展張法（位置、形状、大きさ、深さ）を想定して計算しファイリングしておくこと計算時間が節約できる。濁りの計算についても、施工計画に基づく条件に対しては1～2週間分程度は工事と先行して単粒子ごとの計算を行いファイリングしておく。

予測計算を行う場合、予めファイリングしたデータの中から該当する条件をもつデータが見つからない場合に

はその時点で新たな計算を行う。この際にも計算の終了時には保管データとしてファイリングしておく。このようにすると、ファイリングされたデータ量は際限なく増えていくことになるけれども、工事の進捗とともに地形や流れに変化が生じて計算条件が異なってくるため、古くなったデータは不要となり抹消することができる。

次に、必要に応じて、工事時期、地形、流れ、取り扱う土砂の種類、対策工法などの条件をキーボードから入力して所要データを検索する。検索によって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、予測時間などを入力すれば濁りの分布形状が出力されるようにしておく。

つぎに、予測モデルの精度向上に関し、濁り監視において現地データが一定時間ごとに取得されているため、これを用いて予測値の再現性を検証することができる。実測による濁りの値と数値モデルによる予測値との間にずれが生ずれば、モデルの改良、パラメータの調整を行う。こうすることによって、予測モデルの再現精度を高めることができる。

三次元数値モデルを主体に濁り監視システムにおけるデータファイリングでフィードバックとの関係を示すと図-31 のようになる。なお、解析解モデル、半解析解モデル等は補足的に用いるとよい。

8. ま と め

以上、海上工事に伴う濁りの予測モデルおよび濁り監視への適用性について述べた。それらの内容を要約するとつぎのようになる。

- i) 工事による濁りに関して、埋立護岸又は余水吐からの排出については水質汚濁防止法が、ポンプ浚渫船等の作業については海洋汚染及び海上災害の防止に関する法律が、瀬戸内海における埋立工事に伴う濁り問題については瀬戸内海特別措置法が、さらに、埋立免許に伴う環境アセスメント手続きまたはその手法を定めた公有水面埋立法、又は、埋立て及び干拓に係る環境影響評価指針があり、濁りの発生と拡散の防止に対する法規制または行政指針がある。
- ii) 海上工事による濁りの影響には、工事中の濁りによるものと、工事完了後新たな埋立地、航路、構造物が存在することによるものとがある。前者は環境へのインパクトが大きくても短期的であるのに対し、後者は環境へのインパクトが僅少または緩やかであっても長期的である。
- iii) 水中の光合成や浮遊魚に係る濁りとしては SS(または濁度)を、底生貝類に対する埋没深さ(SS 堆積厚)としてはそれらの殻厚を、のり等の水中植物に対しては成葉への堆積厚をそれぞれの影響評価の対象と考えてよい。
- iv) 工事に伴う濁りの問題は、取り扱う土砂の粒度、量、流れの大きさ、地形、海底土の特性、施工法等によって取り扱う。
- v) 濁りの周辺環境への影響領域は、濁り粒子の水平移流・拡散が支配的となる工事区域より外側が対象の中心となると考えてよい。
- vi) 濁りの測定法には、懸濁物を含む水を採取し測定するろ過法と、透明板や透視度計による透過法、ならびに、光の散乱、反射、吸光度などの光学的な性質を利用して測定する方法とがある。工事による濁りの把握、予測、監視においては、ろ過による SS 測定と、濁度計による濁度測定が適している。
- vii) 現地直投試験によると、土砂投下後分間では工事地点下層で SS 100mg/l が観測されるけれども、工事地点より 500m 隔たると 10mg/l 以下となり、バックグラウンド値と区別できなくなる。
- viii) 濁りの分布形状は流れに支配されやすい。また、各層とも濁りの分布形状は、適当な空間平均をとることにより、同心円形状の分布に近づけられる。
- ix) 濁りの分布を予測するおもなモデルとして、解析解モデル、半解析解モデル、Dump および Jet モデル、および三次元数値モデルがある。
- x) 解析解モデルでは数表または卓上計算機で計算可能であるが、地形、水深、流れ、濁り発生形態(連続、瞬間、点源、線源など)、沈降項などの取り扱いに制約がある。
- xi) 半解析解モデルではパーソナルコンピュータ以上の計算機は必要であるけれども、簡単な地形の条件がとり入れられること、流れ、濁り発生形態、沈降項などに関しては解析解モデルに比して取り扱える範囲が広く、特に限られた点数間の濁りの経時変化を計算するには適している。また、条件を限れば、三次元数値モデルにより濁り分布とほぼ同様の結果を得ることができる。
- xii) Dump または Jet モデルは、土運船またはポンプ船からの土砂投棄、放出、水中落下、周囲拡散の過程を一体として取り扱うものである。濁り拡散雲の大きさ、浪度、水平・鉛直位置などを時間的に追跡することができる。入力は簡単であるが、拡散雲の初期半径など不明確なものがあり、適用に際しては実測資料に基づいて検討する必要がある。
- xiii) 三次元数値モデルは、大型電子計算機を必要と

- し、入出力には労力がかかる。しかし、地形、水深、濁り発生形態、防止膜など、多くの条件をとり入れた予測が可能であり、濁りの計算値は現地試験による濁り分布特性を満足のいく程度に再現することができる。
- xiv) 既往の工種別原単位表を用いて計算した濁り発生量による予測計算結果と実測濃度との対比によると、これまでの濁り発生量算定法の妥当性が容認される。
- xv) 取り扱い土砂の沈降速度は、ねり返しし、分散操作を除いた比重計法による方法で求めても、濁りの濃度、拡散範囲を過少に見積もることにはならない。
- xvi) 濁り予測モデルに要求される条件は、簡便性、適用の広範性、結果の精度である。これらの要件を同時に満たすモデルはないので、予測の目的、必要性に応じてモデルを選択するとよい。
- xvii) 濁りの監視においても、濁り予測モデルに求められる要件は、濁り予測の簡便性、計算の迅速性、適用条件の広範性、予測精度の高さである。これらの要件を満たすため、三次値数値モデルに対して、流れ、濁りに関する先行計算とそれらの出力データのファイリングによる計算の迅速化、予測値と監視により得られた実測値との照合によるパラメータ修正、モデル改良による予測精度の向上化をはかる。なお、解析解モデル、半解析解モデル、Dump および Jet モデルなどは補助的手段として用いる。
- xviii) 予測結果は、流れ、濁りなどに関しできるだけ図画表示方式をとってわかりやすくする。

海上工事による濁りの事前環境影響予測および濁り監視において濁り予測モデルに果せられた使命は大きい。濁り予測モデルは、こうした使命に応えるため、関西国際空港建設計画とともに開発改良が積重ねられてきた。しかしながら、予測モデルが濁りについてあらゆる現象を再現し得るわけではなく、今後の研究課題として残された問題は少くない。将来、関西国際空港をはじめ海上工事に伴う濁り関連の現地調査資料が蓄積されるとさらに信頼性の高い予測モデルが構築されると期待される。

なお、本文でとりあげた半解析解モデル、Dump および Jet モデル、三次元数値モデルは図画処理も含め、港湾技術研究所所有の大型電子計算機 (ACOS-1000/10) にて処理可能なように整備されている。

最後に、本研究は、関西国際空港建設に先立つ濁りの環境影響評価のフォローと、同空港建設時の濁り監視システムの導入を目指し、濁り予測モデルの改良開発について検討した成果の一部である。本研究成果の多くは、

昭和56年から58年までの約3か年にわたり堀口孝男東京都立大学教授の指導のもとで、元第三港湾建設局関西空港計画室、および日本埋立浚渫協会の協力により得られたものである。また、本文中の図画整理では、港湾技術研究所海洋水理部海水浄研究室三好英一研究官に負うところが大きい。上記各位に対し深く感謝の意を表します。

(昭和62年3月31日受付)

参考文献

- 1) 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手法—手法開発のための調査研究(通年報告)一、1980年3月、643 p.
- 2) 環境庁水質保全局編集・水質公害関係法令集、第一法規、pp. 22~33—4.
- 3) 文献2), pp. 51~58.
- 4) 文献2), pp. 683の3~684の4, 同pp. 693~693の4.
- 5) 運輸省港湾局監修海事法令研究会編：港湾六法, 海事法令シリーズ⑤, 昭和61年版, 成山堂, pp. 924~926.
- 6) 文献5), pp. 924~926.
- 7) 公有水面埋立法第二条~四条, 海上保安六法, 海事法令シリーズ4, 昭和61年版, 成山堂, 1986年3月 pp. 147~149.
- 8) 埋立て及び干拓に係る環境影響評価指針, 昭和61年3月26日港管第716号, 埋立と浚渫, No. 129, 1986年, pp. 14~20.
- 9) 水産用水基準(改訂版), 日本水産資源保護協会, 1983年3月.
- 10) 日本水産資源保護協会：本州四国連絡架橋漁業影響調査報告, 1972年8月.
- 11) 運輸省第三港湾建設局・関西空港計画室・新日本気象海洋株式会社：地盤改良に伴う濁りの挙動調査報告書, 1984年3月.
- 12) 楠田哲也・沈砂・沈殿処理, 実務家のための最新下水道ハンドブック, 建設産業調査会, 1982年9月, pp. 577~585.
- 13) 細川恭史・堀江 毅・三好英一・加藤道康：沿岸域におけるけん濁粒子の沈降測定法について—数種の測定法の比較—, 港湾技研資料, No. 433, 1982年9月, 26 p.
- 14) 土質工学会編：土質試験法, 1979年11月, pp. 2-5-1~2-5-35.
- 15) 文献1), pp. 197~272.
- 16) 大久保明：海洋乱流・拡散, 海洋物理 I, 海洋科学講座1, 東海大学出版会, 1970年12月, pp. 265~375.
- 17) 文献16), pp. 345~346.
- 18) Brooks, N. H.: Diffusion of sewage effluent in an ocean-current, *Proc. of the First International Conference on Waste Disposal in the Marine Environment*, Pergamon Press, July 1959, pp. 246~267.
- 19) Christodoulou, G. C., W. F. Leimkuhler and A. T. Ippen, *Mathematical models of the Massach-*

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

- usetts Bay, Part III, A mathematical model for the dispersion of suspended sediments in coastal waters, Ralph M. Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics, Report No. 179, MIT, January 1979, 143 p.
- 20) Brandsma, M. G. and D. J. Divoky, Development of models for prediction of short-term fate of dredged material discharged in the estuarine environment, Tetra Tech. Incorporated, May, 1976, 133 p.
- 21) 堀江 毅・細川恭史：海域における物質循環モデルの水質支配要因について，港湾技術研究所報告，Vol. 22, No. 3, 1983年9月，pp. 201～202.
- 22) 堀口孝男・古戸井光昭・堀江 毅：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，第32回海岸工学講演会論文集，1985年11月，pp. 268～272.
- 23) 文献1)，pp. 211～271.
- 24) 佐藤英輔：埋立余水の処理工法について（主として土木的大量処理技術について），埋立と浚渫，No. 73, 1977, pp. 44～55.
- 25) 白鳥保夫：埋立地における土砂の沈降除去について—土砂水濃度と堆積土砂の影響—，埋立と浚渫，No. 112, 1983, pp. 37～42.
- 26) 堀江 毅：沿岸海域の水の流れと物質の拡散に関する水理学的研究，港湾技研資料，No. 360, 1985年12月，pp. 185～187.