

6. 濁り拡散予測計算

6.1 手順

事業計画や環境の現況、濁り発生量の算定結果をふまえ、適切な拡散計算方法を選定し、拡散計算を行う。

【解説】

濁り拡散予測計算の基本的な手順は、図- 6.1.1に示すとおりである。

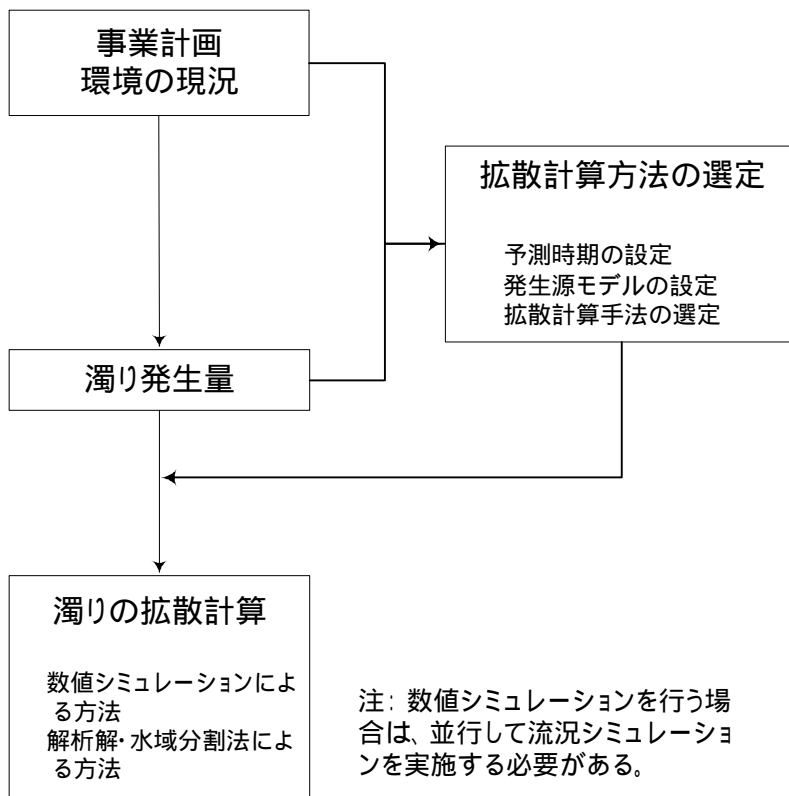


図- 6.1.1 濁り予測拡散計算の予測手順

6.2 予測時期の設定

事業計画、環境の現況、濁り発生量の算定結果等をふまえ、拡散計算を行う適切な予測時期を選定する。

【解説】

予測時期の設定は、環境への影響が最も大きくなると想定される時期を対象とすることが基本となるが、濁りの発生量が最大になる時期に加えて、事業規模や事業期間に応じて、周辺海域の水域利用や生物の生息状況と施工場所に配慮して、適宜設定する必要がある。

通常は、濁り発生量が最大となる時期とすることが多いが、例えば、海水浴場などの人と自然との触れ合い活動の場や藻場等の水生生物の生息にとって重要な場が、濁りの影響が想定される範囲にある場合には、これらの場の近傍で港湾工事を実施する場合などを予測時期として選定することも考えられる。

6.3 濁り発生源モデルの設定

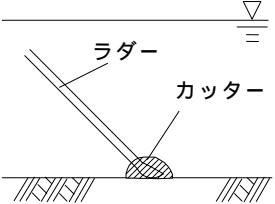
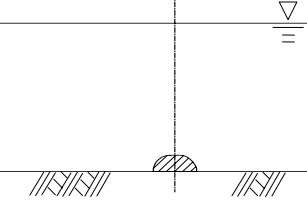
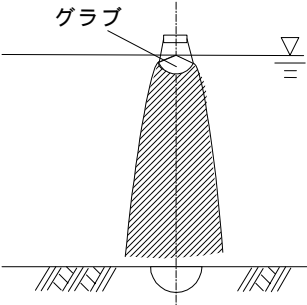
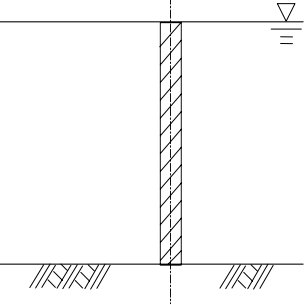
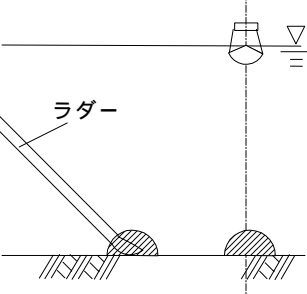
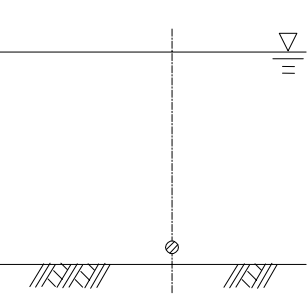
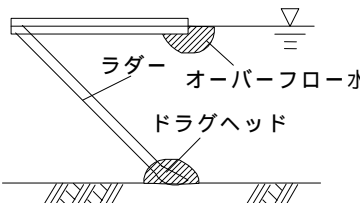
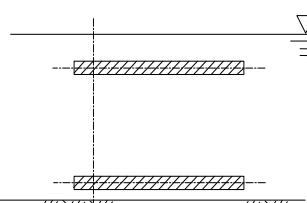
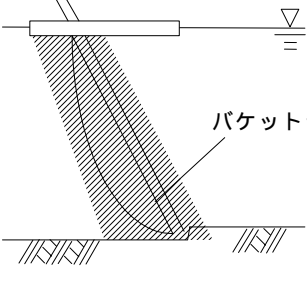
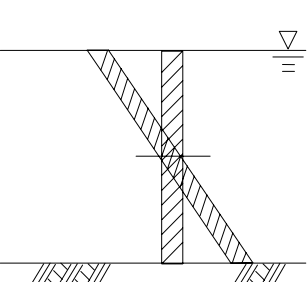
拡散計算の対象とする工種の濁りの発生源モデルを設定する。

【解説】

工種により、水中での濁り発生メカニズムが異なることから、拡散計算の対象となる工種については、使用船舶の稼動内容をふまえ、既存資料等により水中での濁りの発生状況を勘案し、濁りの発生源モデルを設定する。

濁りの発生源モデルの設定例を表-6.3.1に示す。

表- 6.3.1 濁りの状態と発生源モデル(浚渫工事)

使用船舶・機械	濁りの状態	発生源モデル	発生源の状態
ポンプ浚渫船			<p>スイング時に海底の浚渫箇所から濁りが発生する。 濁り発生箇所は、海底となる。</p>
グラブ浚渫船 ディッパー浚渫船 バックホウ浚渫船			<p>海底からの地切り時の土砂の巻き上げ、水中引き上げ時の付着土の拡散、水面にあげる際の土砂の漏れ出しにより濁りが発生する。 濁り発生箇所は、海底から海面までとなる。</p>
密閉グラブ浚渫船 軟泥浚渫船			<p>海底からの地切り時の土砂の巻き上げにより濁りが発生する。 濁り発生箇所は、海底となる。</p>
ドラグサクシオン浚渫船			<p>海底付近の水底土砂の巻き上がり、水面付近でのオーバーフロー水により、濁りが発生する。 濁り発生箇所は、海底及び海面となる。</p>
バケット浚渫船			<p>海底からの地切り時の土砂の巻き上げ、水中引き上げ時の付着土の拡散、水面にあげる際の土砂の漏れ出しにより濁りが発生する。 濁り発生箇所は、海底から海面までとなる。</p>

注：密閉グラブ浚渫船、軟泥浚渫船は、さまざまな種類があり、種類によって濁りの発生状態が異なると考えられることから、使用を予定している船舶の特徴を踏まえて、発生源モデルを設定する必要がある。


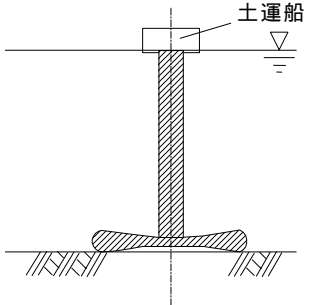
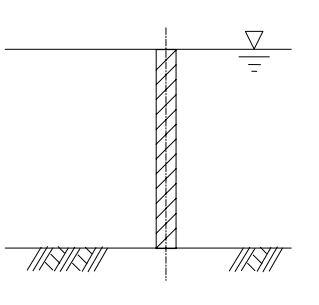
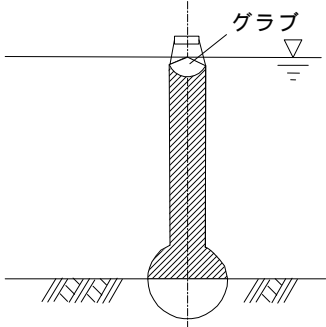
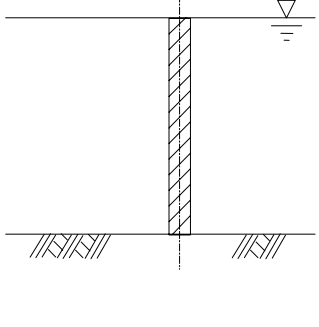
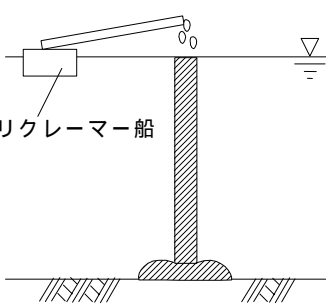
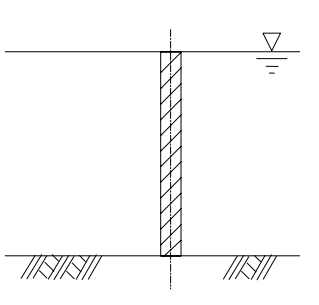
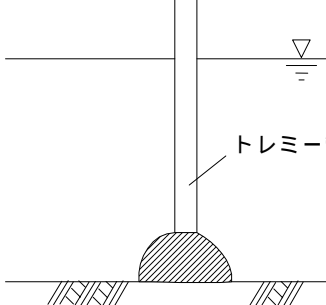
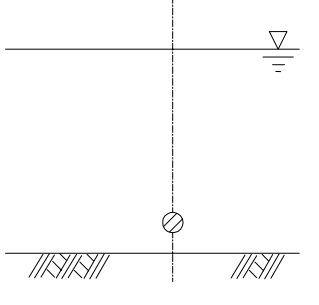
：濁りの発生箇所を示す。

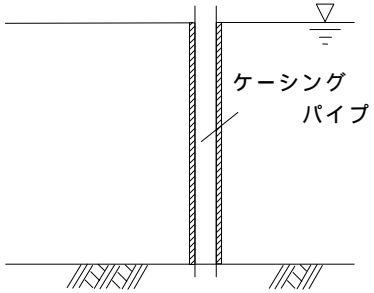
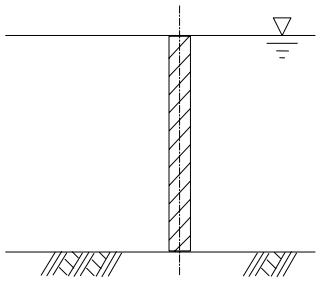
表- 6.3.2 濁りの状態と発生源モデル(土砂投入工事)


使用船舶・機械	濁りの状態	発生源モデル	発生源の状態
土運船 (底開式)			船底から投入される土砂により濁りが発生する。 濁り発生箇所は、海面から海底までとなる。
グラブ船 ガット船 (捨石・土砂投入等)			投入石材に付着した土砂及び投入土砂により濁りが発生する。 濁り発生箇所は、海面から海底までとなる。
リクレーマー船 揚土船 砂撒船(水面投入)			投入土砂により、濁りが発生する。 水面から投入する場合の発生箇所は、海面から海底までとなる。
砂撒船 (トレミー船)			投入土砂により、濁りが発生する。 トレミーを用いて、下層に投入する場合の発生箇所は、下層となる。

注：バージアンローダー船は、埋立地等の閉鎖的な水域への土砂投入に用いられ、発生した濁りは、余水吐きや護岸開口部から放流されることが多い。

 : 濁りの発生箇所を示す。

表- 6.3.3 濁りの状態と発生源モデル（地盤改良工事）

使用船舶・機械	濁りの状態	発生源モデル	発生源の状態
サンドコンパクション船 サンドドレーン船 深層混合処理船			ケーシングパイプ引き抜き時の付着土砂により濁りが発生する。 濁り発生箇所は、海底から海面までとなる。

注：  : 濁りの発生箇所を示す。

6.4 拡散計算手法の選定

対象海域の特性や事業による濁り発生量などを勘案し、適切な拡散計算方法を選定する。

【解説】

拡散計算手法の選定にあたっては、地形、潮流等の海域の特性、土砂による水濁りの変化特性をふまえ、適切な手法を選定する必要がある。

拡散計算手法としては、表- 6.4.1に示すような方法がある。

表- 6.4.1 拡散計算手法

種類		基本的考え方	特徴
定量的予測手法	数値シミュレーションによる方法	運動方程式、連続方程式等の非線形連立微分方程式を解いた流れのモデルと濁りの拡散沈降過程を解く水質モデルの組み合わせで計算する方法。 近年では環境影響評価における水質予測手法の主流となっている。	任意の地形条件、水質条件に対して予測が可能。 時間的に変動する複雑な境界条件を考慮することが可能。 三次元の現象を表現することには精度的に限界がある。
	解析解による方法	いくつかの条件下で拡散方程式を簡略化し、方程式を直接解くところにより解析解を得る方法	拡散状況の短期的ミクロ的把握に適する。
	水域分割法による方法	対象水域をいくつかに分け、各ブロックが完全混合をする仮定の上で平衡解を求める方法	拡散状況の長期的マクロ的把握に適する。

資料：「港湾分野の環境影響評価ガイドブック 1999」（財団法人港湾空間高度化センター 港湾・海域環境研究所）を元に作成

工事期間中にいくつもの発生源からの濁りが重ね合わされる場合及び長期の濁りの蓄積分残留濃度を考慮すると、数値シミュレーションによる計算手法が適切と考えられる。地形や流況並びに工事内容からみて解析解や水域分割法による計算で十分な信頼性が期待できると判断される場合は、これらの計算手法を用いることも考えられる。

6.5 数値シミュレーションによる予測計算

対象海域の特性、事業計画をふまえ、適切な格子分割・層分割を行い、数値シミュレーションにより予測計算を行う。

【解説】

(1) 基本方程式

濁りの拡散を数値シミュレーションで計算するためには、対象海域の流況シミュレーションを行う必要がある。流況は、運動方程式及び連続の式を連立して解くことにより求められる。濁りの拡散は、事前に計算された流況を入力として拡散方程式を解くことにより求められる。

運動方程式、連続方程式及び拡散方程式の基本式は、次に示すとおりである。

なお、数値シミュレーションによる濁りの拡散計算は、これらの連立方程式を差分化し、コンピューターを用いて近似的に解を求める方法が一般的である。

なお、濁りの拡散予測に先立ち、流況計算結果について、対象海域の流況が再現できるよう予測モデルを構築しておく必要がある。

1) 運動方程式・連続方程式

< 運動方程式 >

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_h \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_h \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

$$\rho g = -\frac{\partial p}{\partial z}$$

< 連続方程式 >

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

ここで、

x, y, z	: 直交座標軸、上向きを正 (cm)
u, v, w	: x, y, z 方向の流速成分 (cm/s)
p	: 圧力 (g/cm/s ²)
f	: コリオリ係数 (1/s)
	($f = 2\omega \sin\phi$, ϕ : 緯度, ω : 地球自転角加速度)
ρ_0	: 代表密度 (g/cm ³)
A_z	: 鉛直渦動粘性係数 (cm ² /s)
A_h	: 水平渦動粘性係数 (cm ² /s)
ρ	: 海水の密度 (g/cm ³)
g	: 重力加速度 (cm/s ²)

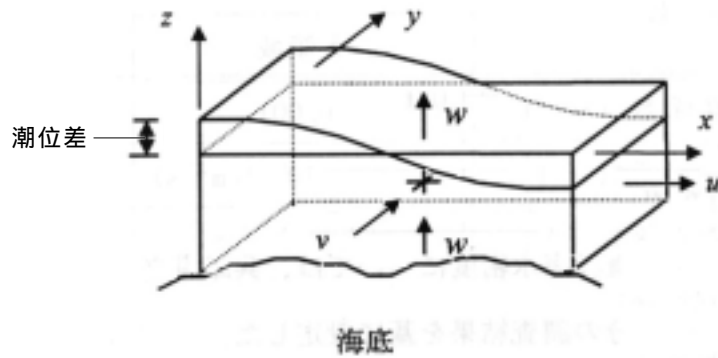


図- 6.5.1 座標系

2) 濁りの拡散方程式

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + (w - \omega) \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial S}{\partial z} \right) + q$$

ここで、

x, y, z	: 直交座標軸、上向きを正 (cm)
u, v, w	: x, y, z 方向の流速成分 (cm/s)
S	: SS 濃度 (mg/L)
K_x, K_y, K_z	: 拡散係数 (cm ² /s)
	: 沈降速度 (cm/s)
q	: SS 負荷量 (mg/L・s)

(2) 拡散係数

数値シミュレーションを行う場合には、対象海域での流速、流向変動の長時間連続観測結果を統計処理して求めた拡散係数を用いることが適切である。

流速・流向変動の長時間連続観測結果（多くの場合 15 日連続観測）を統計処理して水平拡散係数を評価する方法は、温排水拡散予測手法に関連して和田ら^{1,2}によって示されている。

(3) 格子分割・層分割

計算格子の分割は、工事区域周辺の地形を表現できるように設定する必要がある。

また、計算範囲は濁りの拡散範囲を十分に包含するように設定する。層分割は、対象海域の地形、水深、流況等を勘案し、設定する必要がある。海面から海底までの流れが一様であるとするに無理のある場合は、2層モデルなど、複

¹ 和田 明、他、沿岸海域における温排水拡散予測手法の適合性に関する研究、電力中央研究所報告、73011、1974.

² 土木学会、水理公式集、平成 11 年度版、pp320～322.

数の計算層に分割したモデルを用いる必要がある。またすぐ後に示すように、汚濁防止膜の設置構造などを数値シミュレーションで表現する場合にも複数の計算層に分割したモデルが必要である。

(4) 濁り発生源モデルの扱い

数値シミュレーション手法を用いることにより、「6.3 濁り発生源モデルの設定」に示した濁り発生源モデルやさらにSS負荷量の発生時間などの時間変動要素まで考慮した詳細な濁り発生源の取り扱いが可能となる。

(5) 沈降速度の扱い

「5.5 沈降速度の設定」に示した沈降速度の設定方法において、対象土砂の粒度組成をもとにストークスの式を用いて沈降速度を設定する場合でも、対象土砂について沈降試験を行う場合でも、沈降速度は単一の値ではなく、ある広がりを持っている。そのことは粒度試験の結果は粒径加積曲線として表現されることから明確であり、沈降試験の結果も粒径加積曲線と同様な沈降加積曲線として表現される。

数値シミュレーションによる場合、連続的に変化する沈降速度をそのまま扱うことはできず、代表沈降速度を設定する必要がある。その際に単一の沈降速度を設定する場合には、中央粒径あるいは中央沈降速度に対応する沈降速度を設定する。

また、沈降速度に大きな幅があり、単一の沈降速度で代表することが近似上問題である場合は、加積曲線の重量百分率を1/3~1/5に区分し、それぞれの区分毎に代表沈降速度を設定するとよい。それぞれの代表沈降速度に対応する負荷発生量は全体負荷量に加積曲線の重量百分率を乗じた値とする。なお、区分を代表する沈降速度は区分の中央をとることも考えられるが、安全側の予測とすることを考慮し、区分の下限值を採用することが望ましい。

(6) 汚濁防止膜の扱い

濁り拡散対策として汚濁防止膜を展張する場合については、その効果を見込んだ予測を行うことが必要となる。

数値シミュレーションにおいて汚濁防止膜効果を見込む方法としては、負荷発生源において「除去率を適用する方法」がある。

この「除去率を適用する方法」は、現地調査で得られた汚濁防止膜内側と外側の濃度の関係から汚濁防止膜の効果を設定するものである。これまでの環境影響評価等においてほとんどの場合この方法が用いられており、汚濁防止膜の効果を見込む数値シミュレーションを行う場合には、この方法が基本的な方法となる。

なお、他に汚濁防止膜の効果を見込む方法として、「汚濁防止膜を地形条件として表現する方法」がある。この方法は、汚濁防止膜の存在による流れの変化及び流れの変化による濁りの滞留、沈降の促進を表現したモデルにより予測を行うものである。汚濁防止膜の展張箇所を透過した濁りの3次元での広がりや汚濁防止膜の展張方法を細やかに検討することが可能な方法であるが、現時点では汚濁防止膜のふかれの表現など、技術的に確立されていない課題も残されている。

なお、ここで示した方法は、現時点での技術水準に基づくものであり、今後の技術的知見の向上に伴って適宜見直していく必要があることに留意する必要がある。

： 除去率の考え方及び汚濁防止膜を地形条件として表現した各々の数値シミュレーション手法については、資料編(「資料 - 6 汚濁防止対策の考え方」、「資料 - 7 汚濁防止膜を地形条件として表現した数値シミュレーション手法」)に示す。

6.6 解析解・水域分割法による予測計算

対象海域の特性、事業計画をふまえ、適切な拡散式、拡散係数等を選定し、予測計算を行う。

【解説】

(1) 解析解・水域分割法

ある条件下で拡散方程式を簡略化し、方程式を直接解くことにより、発生源から比較的近い距離にある場所での濁りの濃度分布を求める方法である。

よく使用される解析解を、表- 6.6.1に示す。

また、水域分割法による方法は、ボックスモデルとも呼ばれ、海域をいくつかの領域に分割し、それぞれの領域は上げ潮時に外部の領域から海水が流入し、その領域内で完全混合した後、下げ潮時に外部へ流出すると仮定して計算するものである。

基本式は、次のとおりである。

< 水域分割モデル：基本式 >

$$C_{i-1} \cdot F_{i-1} + C_{i+1} \cdot E_i + Q_i = C_i (F_i + E_{i-1})$$

ここで、

F : 上げ潮時の流入量 (m^3)

E : 下げ潮時の流出量 (m^3)

C : 区間中の平均濃度 (mg/L)

Q : 区間中に負荷される負荷量 ($kg/1$ 潮時)

添え字 i はボックスのナンバーを示す。

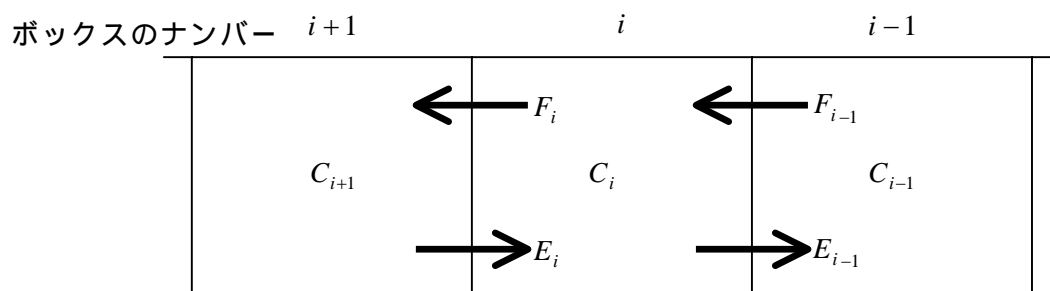


図- 6.6.1 水域の分割

表- 6.6.1 解析解 (点源の濁り拡散)

発生状態		拡散式	拡散係数	適用
点源	一時的	・ ジョセフ・センドナー $S(r \cdot t) = \frac{MH^{-1}}{2\pi(Pt)^2} \exp\left(-\frac{r}{Pt}\right)$ S : 任意の位置における濃度 (g/cm ³) M : 一時的発生量 (g) r : 中心からの距離 (cm) t : 発生後の経過時間 (s) H : 水深 (cm) P : 拡散速度 (ジョセフ・センドナー cm/s)	$K = Pr$	水平面内での乱れが均等であるとした場合に適用
	連続的	・ 大久保・プリチャード $S(X, Y, T) = \frac{qH^{-1}}{\sqrt{\pi p x}} \exp\left(-\frac{u^2 y^2}{p^2 x^2}\right)$ $0 < x < uT$ $uT < x$ S : 任意の位置における濃度 (g/cm ³) q : 単位時間の発生量 (g/s) u : 流速 (cm/s) t : 発生後の経過時間 (s) H : 水深 (cm) p : 拡散速度 (大久保・プリチャード cm/s)	$K = p^2 t$	定常状態で一定の平均流であるとした場合に適用
	連続的	・ 岩井の解 $S = \frac{q \exp\left(\frac{ux}{2K}\right)}{2\pi HK} IK_0\left[\frac{u}{2K} \sqrt{x^2 + y^2}\right]$ S : 任意の位置における濃度 (g/cm ³) q : 単位時間の発生量 (g/s) u : 流速 (cm/s) H : 水深 (cm) $IK_0[x]$: 0 次の第 2 種変形ベッセル関数	K	定常状態で一定の平均流であるとした場合に適用
	連続的	・ ジョセフ・センドナー式 $S = (S_0 - S_1) \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{Q}{\pi h p} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1}\right)\right] \right\} + S_1$ S : 対象地点 SS 濃度 (mg/L) S ₀ : 排水の SS 濃度 (mg/L) S ₁ : r ₁ におけるバックグラウンド濃度 (mg/L) Q : 排水量 (m ³ /日) h : 排水の拡散層厚 (m) r, r ₁ : 排水点からの距離 P : 拡散速度 (= 864m/日)	-	淡水系余水排水に適用。 計算では、r ₁ を設定する必要がある。 r ₁ は新田の実験式より求めることができる。 $\log \frac{\pi r_1^2}{2} = 1.23 \log Q + 0.086$ ここでは、平面的にみた場合の拡散範囲を半円としている。

(2) 拡散係数等

現地調査により水平方向の拡散係数が求められていない場合において、解析解による予測を行う場合には、既往文献等から設定することも考えられるが、拡散係数等は、地形、流況等により異なることに留意して選定しなければならない。

既往の拡散パラメータ（拡散係数、拡散速度）の例を表-6.6.2～表-6.6.3に示す。

表-6.6.2 水平方向の拡散係数

最大流速 (m/s)	拡散係数 K (cm ² /s)
0～0.3	10 ⁴
0.31～3.0	10 ⁵
3.01以上	10 ⁶

出典：「瀬戸内海環境保全特別措置法施行規則第4条第一項の事前評価について」（環水規則第76号通知）

表-6.6.3 水平方向の拡散パラメータ

	広島湾	東海村沖	相模灘
拡散係数 K (cm ² /s)	9.61×10^2	7.92×10^2	2.0×10^3
拡散速度 P (cm/s)	4.25×10^{-1}	6.26×10^{-1}	8.05×10^{-1}
拡散速度 p (cm/s)	8.50×10^{-1}	1.25	1.61

注：・ K ：岩井の解における拡散係数
 ・ P ：ジョセフ・センドナー式における拡散速度
 ・ p ：大久保・プリチャード式における拡散速度

出典：横浜市公害対策局「水質汚濁・土壌汚染に係る環境影響評価、指導・審査マニュアル」1985年

また、拡散係数 K については、下式のように土木学会で発表された、沿岸からの最短距離の関数として求める方法もある。

$$K = 0.1 \ell$$

ここに、 K ：拡散係数 (cm²/s)
 ℓ ：沿岸からの最短距離 (m)

(文献：堀口孝男「汚染物質拡散の数値解法について」土木学会第16回海岸工学講演会講演案 1969)

しかし、ここであげた各拡散パラメータの値は一応の目安として載せたものであり、地形、流況等により異なるため、それらの点に留意して用いなければならない。現地調査により水平方向の拡散係数が求められている場合には、その値を用いるようにするべきである。

なお、鉛直方向の拡散係数の実測値は少なく、一つの目安として、表-6.6.4の値が示されている。

表-6.6.4 鉛直方向の拡散係数

海の上層の混合層	10 ~ 100cm ² /s
躍層などの密度成層の強いところ	0.01 ~ 1 cm ² /s
深海(1,000m以深)	0.1 ~ 10 cm ² /s
海底の境界層	1 ~ 10 cm ² /s
エスチャリー(河口)	1 ~ 10 cm ² /s

出典：横浜市公害対策局「水質汚濁・土壌汚染に係る環境影響評価、指導・審査マニュアル」1985年

6.7 濃度分布

拡散計算結果は、濁りの最大濃度や拡散範囲が読み取れるよう濃度分布図として整理する。

【解説】

拡散計算結果に基づき、予測ケース毎に濃度分布図を作成する。

分布図においては、最も濃度が高くなる地点及びその濃度、濃度勾配や拡散範囲、周辺地形等との関係が読み取れるよう配慮するとともに、工事施工区域等についても表現することが望ましい。