

海面最終処分場閉鎖・廃止基準適用検討調査

報 告 書 流動解析 編

平成 1 7 年 9 月

財団法人 日本環境衛生センター

流動解析調査

目 次

| | |
|--|----|
| 1 . 目的 | 1 |
| 2 . 検討内容 | 1 |
| 3 . 流動解析の基礎理論 | 2 |
| 3.1 飽和 - 不飽和浸透流解析 | 2 |
| 3.1.1 ダルシーの法則 | 2 |
| 3.1.2 サクシオン | 2 |
| 3.1.3 飽和・不飽和解析の構成方程式 | 3 |
| 3.1.4 体積含水率と比透水係数の関係(K_r -), 水分特性曲線(-) | 3 |
| 3.1.5 有効間隙率 | 4 |
| 3.1.6 貯留係数 | 5 |
| 3.1.7 比貯留係数 | 5 |
| 3.2 移流分散解析 | 6 |
| 3.2.1 移流, 分散, 拡散の概念 | 6 |
| 3.2.2 移流分散方程式 | 7 |
| 3.2.3 拡散係数を決定するパラメータ | 8 |
| 4 . 解析モデル a | 9 |
| 4.1 検討概要 | 9 |
| 4.2 解析条件 | 9 |
| 4.2.1 前提条件 | 9 |
| 4.2.2 モデル概要 | 9 |
| 4.2.3 解析メッシュ | 10 |
| 4.2.4 外海水位と管理水位の条件 | 10 |
| 4.2.5 沖積粘土層の水理定数 | 11 |
| 4.2.6 移流分散パラメータ | 11 |
| 4.3 解析結果 | 12 |
| 4.4 まとめ | 19 |
| 5 . 解析モデル b・c | 20 |
| 5.1 検討概要 | 20 |
| 5.2 解析モデル b | 22 |
| 5.2.1 解析条件 | 22 |
| (1) 解析断面および初期水位 | 22 |
| (2) 材料定数 | 22 |
| (3) 降雨浸透条件 | 22 |
| (4) 解析ケース | 22 |
| 5.2.2 解析結果 | 22 |
| 5.3 解析モデル c | 26 |
| 5.3.1 解析条件 | 26 |
| (1) 解析断面および初期水位・濃度 | 26 |
| (2) 降雨浸透条件 | 26 |
| (3) 材料定数 | 26 |
| 5.3.2 解析結果 | 27 |
| (1) 暗渠部の比濃度 | 27 |
| (2) 周辺部の比濃度 | 27 |
| 5.4 まとめ | 32 |

1. 目的

海面最終処分場の閉鎖・廃止基準適用マニュアル作成にあたり，閉鎖・廃止基準の適用において考慮すべき保有水等の浸透挙動（処分場系外への移動特性，管理水位面以浅の保有水等挙動特性），ならびに管理水位面以深の保有水等に係わる汚濁特性を把握することを目的に数値解析的手法（断面 2 次元 F E M 解析）による検討を行った。

2. 検討内容

保有水等挙動に関わる流動解析

1 式

<モデル a>

処分場の管理水位を外海の潮位に対して相対的な水位に設定したときの飽和移流分散解析を行い，管理水位面以下に存在する汚濁成分の系外への漏出の可能性について，長期的な挙動を把握した。

<モデル b>

内水ポンドを有する処分場に対して，降雨浸透を管理水位への作用条件として飽和・不飽和浸透流解析を実施し，比較的短期の管理水位の挙動を把握した。

<モデル c>

処分場の集排水設備として排水暗渠を設置した場合に降雨浸透を管理水位への作用条件として飽和・不飽和移流分散解析を実施し，管理水位面下の汚濁物質の挙動を把握した。

3. 流動解析の基礎理論

本検討における流動解析は、大きく「水の流れをシミュレートする浸透流解析」と「汚濁物質の流れをシミュレートする移流分散解析」に区分できる。移流分散解析は水溶性汚濁物質の挙動（水に溶けるか混合されて移動する）をシミュレートするものであり、水の流れ（浸透流）が明らかでなければシミュレートすることはできない。したがって、移流分散解析を行うにあたっては、地下水（飽和域）あるいは不飽和域の保有水等の流動状況が浸透流解析によって確定できる条件が整っていないなければならない。これらのことを基本的に把握し、次章以降の流動解析結果の解釈において誤解が生じないように、本章では浸透流解析および移流分散解析の基礎理論について簡単に述べることとする。

なお、本検討に用いた移流分散解析のプログラムは、「Dtransu-2D・EL」¹⁾であるが、浸透流解析のみ検討したモデルケースでは、「2D-Flow」を用いている²⁾。浸透流解析において、両プログラムに基本的な違いはない。

1) Dtransu-2D・EL, 3D・EL: 岡山大学西垣教授, 三菱マテリアル(株), (株)ダイヤコンサルタント共同開発(著作権登録番号 P第4135-1号, P第7169-1号, 国土交通省の新技术情報提供システム NETIS 登録番号: KT-000069)

2) 2D-Flow 2次元飽和 - 不飽和浸透流解析: (株)地層科学研究所

3.1 飽和 - 不飽和浸透流解析

3.1.1 ダルシーの法則

浸透流解析において最も基本的で重要なことは「ダルシーの法則」である。つまり、「砂の中（水が流れる帯水層）を通過する水の量、あるいは流速は水頭勾配（動水勾配）に比例する」ということである。この関係は次式で示される。

$$v = -k \cdot i \quad (3.1.1)$$

ここに、

v : 土中水の流速（見かけの流速，ダルシー流速とも言う）

i : 動水勾配

k : 透水係数

3.1.2 サクシオン

不飽和状態の圧力水頭は、負の圧力水頭として取り扱って良く、これをサクシオンと呼ぶ。つまり、自由水面が存在していた場合、水面よりも下へ向かうほど圧力水頭は正の方向に増加していく。逆に水面より上へ向かう場合は、圧力水頭が負の方向に増加すると考える。この負の圧力水頭のことをサクシオンと呼ぶ。一般にサクシオンは飽和度が低いほど高く、飽和度が高いほど低くなる。また、土粒子が小さい方ほどサクシオンが大きくなる。

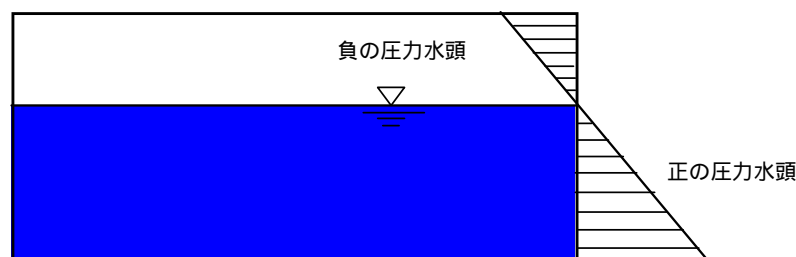


図 - 3.1.1 サクシオン（負の圧力水頭）の概念

3.1.3 飽和・不飽和解析の構成方程式

浸透問題では、土の間隙を通る水の流れを支配する基礎方程式は、質量保存で表現される連続の式とダルシーの法則からなる運動方程式を結び付けることにより導き出される。

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = f \quad (3.1.2)$$

$$v_x = k_x \frac{\partial h}{\partial x} \quad v_z = k_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (3.1.3)$$

ここでは、鉛直方向を z 軸とする。 f は領域内の間隙にある水の体積の変化量を表す。式(3.1.3)を式(3.1.2)に代入すると、浸透問題の基礎方程式が得られる。飽和した地盤の場合、右辺は間隙の変化と等しくなるので、

$$f = \frac{\partial n}{\partial t} = \frac{dn}{dh} \frac{\partial h}{\partial t} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.1.4)$$

ここで、 n は間隙率、 S_s は比貯留係数で、水頭変化による帯水層の間隙の変化率を表す係数である。いま、全水頭 (h) とサクション (θ) と位置水頭 (z) の関係、 $h = \theta + z$ を用いて未知数を θ のみに直して整理すると、飽和領域内の浸透流の支配方程式は以下ようになる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial \varphi}{\partial z} + k \right) = S_s \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (3.1.5)$$

一方、不飽和地盤の場合、負の圧力水頭の変動によって間隙率の変化は生じないものと仮定すると f は以下ようになる。

$$f = \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{d\theta}{d\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = C \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (3.1.6)$$

ここで、 θ は体積含水率、 C は比水分容量で、水分特性曲線の勾配の値で、不飽和領域内の浸透流の支配方程式は以下ようになる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k(\theta) \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k(\theta) \frac{\partial \varphi}{\partial z} + k(\theta) \right) = C \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (3.1.7)$$

ただし、透水係数は含水率によって変化するため $k(\theta)$ としている。

圧力水頭が 0 の点を連ねた面が自由水面と仮定し、それを境界として飽和領域と不飽和領域に分かれるとする。この手法を用いて上記の飽和の式と不飽和の式をまとめて 1 つの式にしようとする。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k(\theta) \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k(\theta) \frac{\partial \varphi}{\partial z} + k(\theta) \right) = (C(\varphi) + S_s) \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (3.1.8)$$

0 : 不飽和領域

1 : 飽和領域

式(3.1.8)により不飽和領域と飽和領域の混在する地盤を同時に解析することが出来る。

また、不圧地下水問題を解く場合は、不飽和状態の材料特性として、体積含水率と透水係数の関係 ($k_r - \theta$) と水分特性曲線 ($\theta - \varphi$) が必要となる。一方、被圧地下水問題を解く場合は飽和領域のみを扱うことになるので、これらの曲線は必要なくなる。

3.1.4 体積含水率と比透水係数の関係 ($k_r - \theta$)、水分特性曲線 ($\theta - \varphi$)

先に述べたように、不飽和領域においては、体積含水率と比透水係数の関係 ($k_r - \theta$) と水分

特性曲線(-)が必要となる。おおざっぱな傾向として、不飽和状態の土の透水係数は体積含水率が低いほど小さくなる。そして飽和になると一定値となる。同じく、サクシオンと体積含水率との関係は、体積含水率が低いほどサクシオンが負の方向に大きくなる。逆に体積含水率が高いほどサクシオンは0に近づいていく。

実際に土試料から計測した場合、体積含水率と比透水係数の関係及びサクシオンと体積含水率との関係は一般に次のような傾向になる。

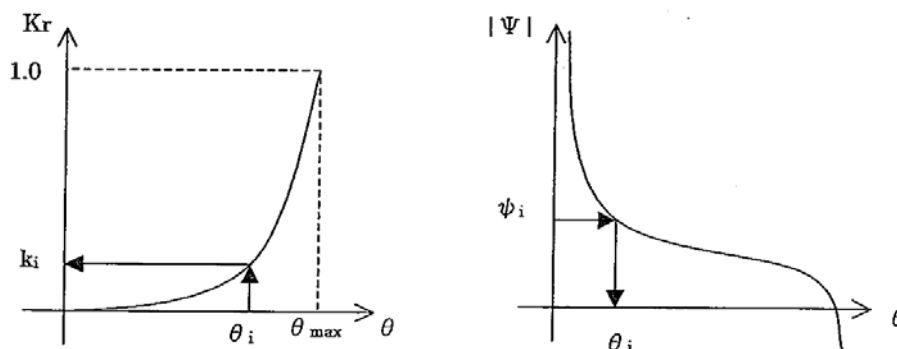


図 - 3.1.2 体積含水率 と比透水係数 \$k_r\$ およびサクシオン の関係 (不飽和の土の性質)

この二つの曲線は、不飽和の土の性質を決定するものであるが、一般にこれを計測することは困難である。そのため、これらの曲線を推定式で表現する研究も多く行われており、これには Van-Genuchten の式や Hillel の式、Irmay の式などがある。また先の式(3.1.8)では、未知数に \$\theta\$ と \$\psi\$ の2つが出てくるが、比透水係数及びサクシオンと体積含水率との関係を用いることにより未知数が \$\theta\$ のみとすることが出来る。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k(\varphi) \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k(\varphi) \frac{\partial \varphi}{\partial z} + k(\varphi) \right) = (C(\varphi) + S_s) \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (3.1.9)$$

ここでは、不飽和の土の性質を決定する代表的なモデルとして Van-Genuchten の式を以下に示す。

Van-Genuchten の式

$$S_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha \varphi)^n} \right]^{1 - \frac{1}{n}} \quad (3.1.10)$$

$$k_r = \frac{k}{k_s} = S_e^2 \left[1 - (1 - S_e^{\frac{1}{m}})^m \right]^2 \quad m = 1 - \frac{1}{n}$$

ここに、

\$k_r\$: 比透水係数, \$S_e\$: 有効飽和度 (次式)

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (0 \leq S_e \leq 1) \quad (3.1.11)$$

\$s\$: 飽和体積含水率, \$r\$: 最小容水量

3.1.5 有効間隙率

有効間隙率とは、飽和した土から重力排水により排水可能な体積(これを間隙の体積とする)と土全体の体積との比のことをいい、以下のように表される。

$$n_e = V_v / V \quad (3.1.12)$$

ここに,

n_e : 有効間隙率, V_v : 間隙の体積, V : 土全体の体積

次項に示す移流分散の方程式においては, 式(3.1.1)に示したダルシー流速ではなく間隙内流速(実流速)が必要となるが, この間隙内流速は, 次式で示される。

$$v_i = \frac{v}{n_e} \quad (3.1.13)$$

ここに,

v_i : 間隙内流速, v : ダルシー流速, n_e : 有効空隙率

3.1.6 貯留係数

貯留係数とは, 水位が1上昇したときの貯水量のことを言う。被圧地下水のときは度の伸縮量に相当し, 不圧地下水の場合は有効間隙率と等しくなる。

3.1.7 比貯留係数

水頭(h)が1増加した場合に単位体積に取り込まれる, または排出される水の体積を示す。不圧地下水のときは0に等しくなる。通常 S_s で表され, 間隙率を n とすると以下の式になる。

$$S_s = \frac{dn}{dh} \quad (3.1.14)$$

3.2 移流分散解析

3.2.1 移流, 分散, 拡散の概念

水溶性汚濁物質の挙動は、大きく“移流”, “分散”, “拡散”によって説明できる。これらについて以降に簡単に述べる。

以降の図, 記述は“第4回地下水移流分散解析ソフト「Dtransu-3D・EL」セミナー資料, 2001.10.26”より抜粋・編集したものである。

(1) 移流(advection)

地下水に溶け込んだ汚染物質が地下水の流れに乗って移動する現象(濃度分布は保持)。

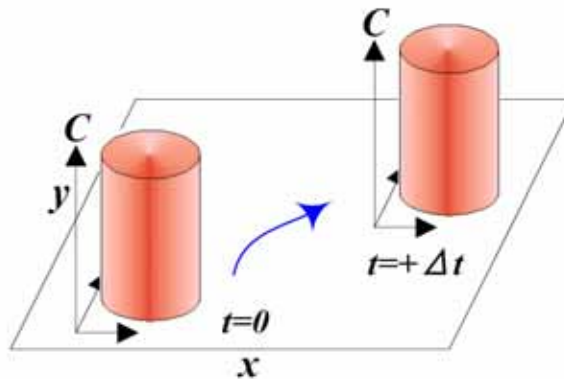


図 - 3.2.1 移流の概念

(2) 分散(dispersion)

多孔質媒体である地盤内を地下水が移動する際, 短いルートや長いルートを移動ケースがあり, これにより汚染濃度が空間的に広げられる現象。

機械的分散

拡散減少と似ているので, 拡散と同じように扱っている。

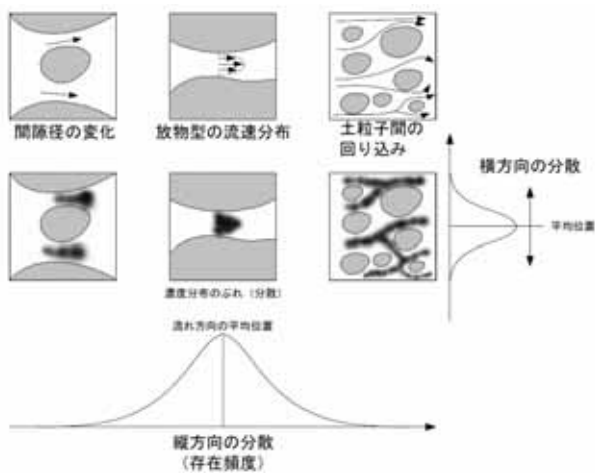


図 - 3.2.2 機械的分散の概念

巨視的分散

帯水層構造のように地盤の透水性の不均質性による濃度の広がり。

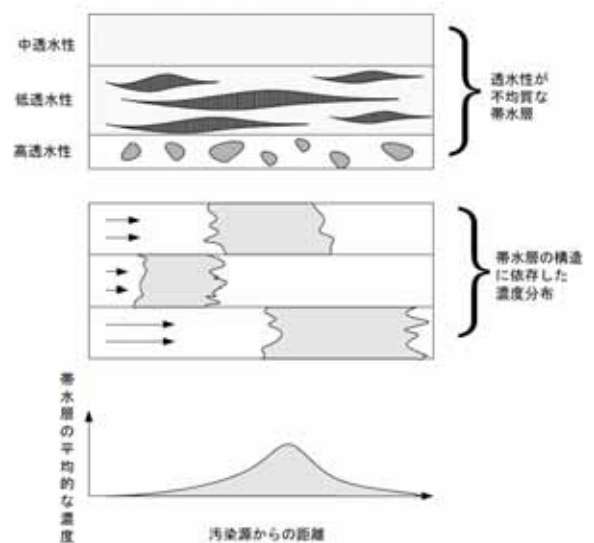


図 - 3.2.3 巨視的分散の概念

(3)分子拡散(diffusion)

ブラウン運動によって、濃い液体が薄くなっていく現象（汚染濃度が広がる現象）。

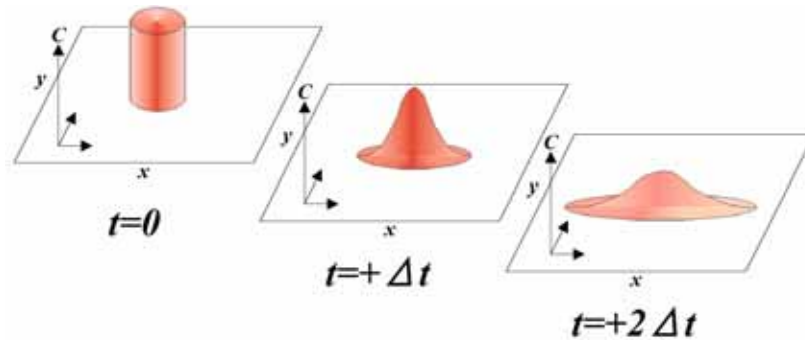


図 - 3.2.4 分子拡散の概念

3.2.2 移流分散方程式

移流分散方程式を簡単に表すために一次元での方程式を以下に示す。移流分散方程式は移流項，分散(拡散)項からなる(場合によって減衰項なども含まれる)。

(1)移流

$$v \cdot c \quad (3.2.1)$$

ここに，

v : 間隙内流速， c : 汚染物質の濃度

(2)分散

$$-D \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \quad (3.2.2)$$

ここに，

D : 拡散係数

Fickの拡散第1法則

拡散により物質が多い(濃度が高い)方から少ない(濃度が低い)方へと移動し，濃度変化は濃度勾配に比例(比例定数を拡散係数 D と呼び分散係数に有効分子拡散係数を加えたもの)するというもの。

したがって地盤中の微小要素に直交する断面を通過する溶質の総量 F は

$$F = v \cdot c - D \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \quad (3.2.3)$$

一方，質量保存の法則より

$$-\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{\partial c}{\partial t} \quad (3.2.4)$$

式(3.2.4)に式(3.2.3)を代入すると，以下の移流分散を表す方程式が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (vc) = \frac{\partial c}{\partial t} \quad (3.2.5)$$

左辺第1項：分散項 第2項：移流項

式(3.2.5)の分散項(左辺第1項)中のDは Bear(ベアー)によって分子拡散係数も含めた流速に依存する次式によって表されている。

$$D = \alpha v + \tau D_m \quad (3.2.6)$$

ここに、

α : 分散長, τ : 屈曲率, D_m : 分子拡散係数 (水の拡散係数: $1 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{sec}$)

3.2.3 分散係数を決定するパラメータ

(1) 分散長

分散: 流れの方向に広がる現象。

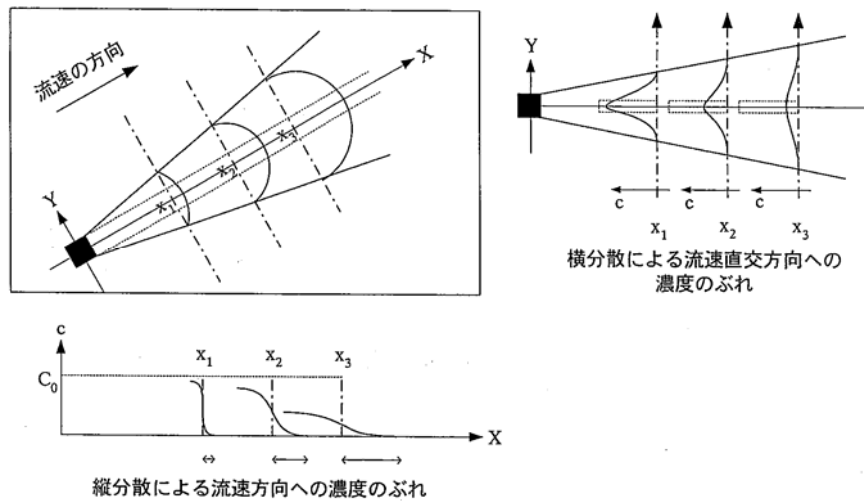
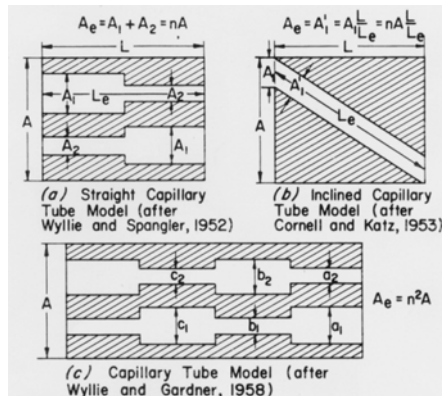


図 - 3.2.5 縦分散, 横分散の概念

(2) 屈曲率(tortuosity)

- a) 屈曲率は、屈曲度とも呼ばれ、分子拡散係数を有効分子拡散係数として、例えば多孔質媒体中に適応するための修正項として取り扱われる。
- b) 実際の流路長さ L_e に対する直線流路長 L の比で定義される。
- c) 室内試験では D_m が直接求まる。



$$\tau = \left(\frac{L}{L_e} \right)^2 \tau = \frac{L}{L_e}$$

図 - 3.2.6 多孔質媒体における流路長のモデル例

4. 解析モデル a

4.1 検討概要

保有水等の管理に対する考え方として、外海水位と処分場内水位（管理水位）の比較から移流分散現象における処分場内部の汚濁物質の外海方向への漏出の可能性について検討した。外海水位は、概ね H.W.L から L.W.L までの潮位変動しているが、どの場合においても系外への漏出を抑制する必要がある。多くの護岸設計は平均潮位 M.S.L で計算されていることが多いが、処分場内部の汚濁物質拡散の観点から有利なのは L.W.L と想定される。一方、降雨浸透などによる水位上昇により管理水位は 1m 程度高くなって H.W.L に近い場合も想定される。そこで、処分場内部の管理水位をどこにおくことが適切であるかについて L.W.L から H.W.L を想定し、管理水位と外海水位の水位差を外力とした飽和移流分散解析を行い、汚濁物質の拡散の比較検討を行った。

4.2 解析条件

4.2.1 前提条件

解析モデルは、海底地盤と護岸を含む処分場（廃棄物層）で構成されており、海底地盤中の地下水流動は処分場の管理水位と外海水位によって決まるものとする。このとき処分場（廃棄物層）底面から海底地盤内での外海方向への汚濁物質の拡散を比較することとして、以下の条件を元にモデル化を行った。

- 1) 海面最終処分場閉鎖・廃止という位置付けから護岸は不透水とする。
- 2) 護岸は構造上の安定性は考慮しない。
- 3) 海底地盤は難透水性である沖積粘土層とする。
- 4) 外海水位は潮位変動を考慮する。
- 5) 処分場（廃棄物層）の管理水位は一定とする。

4.2.2 モデル概要

沖積粘土層を層厚 20m、水平方向 400m の矩形でモデル化し、粘土層上面を下記 3 の境界に区分して解析を行った。

- 護岸下面（10m 幅）：不透水境界
- 廃棄物層下面：水位（次項参照）および濃度を固定境界（比濃度 100）
- 外海の海底面：潮位変動を想定した変動水位境界

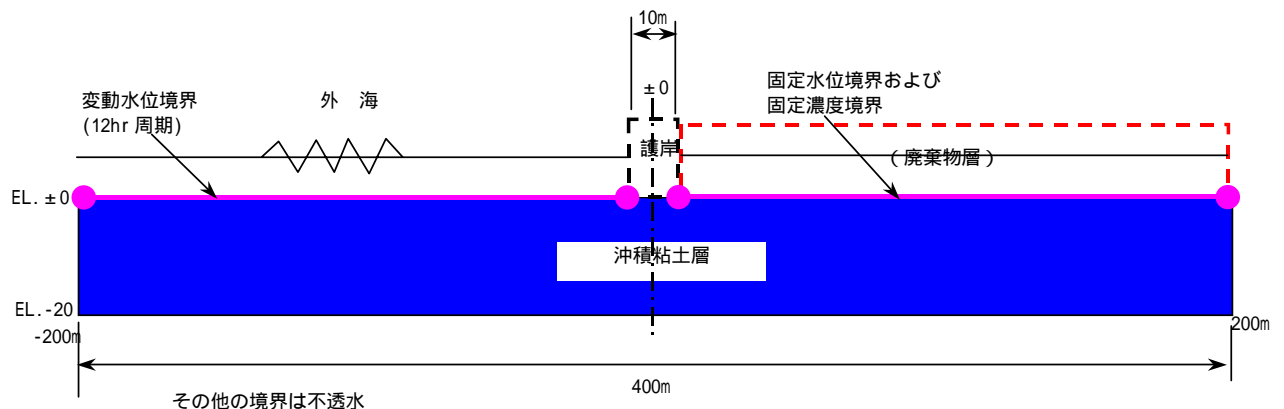


図 - 4.2.1 モデル a の解析モデル概要

4.2.3 解析メッシュ

解析メッシュは，外海水位と処分場（廃棄物層）の水位の差があるとした場合，浸透路長は護岸直下付近が短くなって流速が大きくなると想定されるため，護岸直下付近を中心に小さいメッシュ(要素)とし，護岸から遠ざかるほど大きいメッシュになるように配慮した(図 - 4.2.2)。



図 - 4.2.2 モデル a の解析メッシュ全体図

4.2.4 外海水位と管理水位の条件

表 - 4.2.1 に外海水位および管理水位の条件を示す。

外海水位は 12hr 周期，振幅 1m の潮位変動を三角波で与えた。

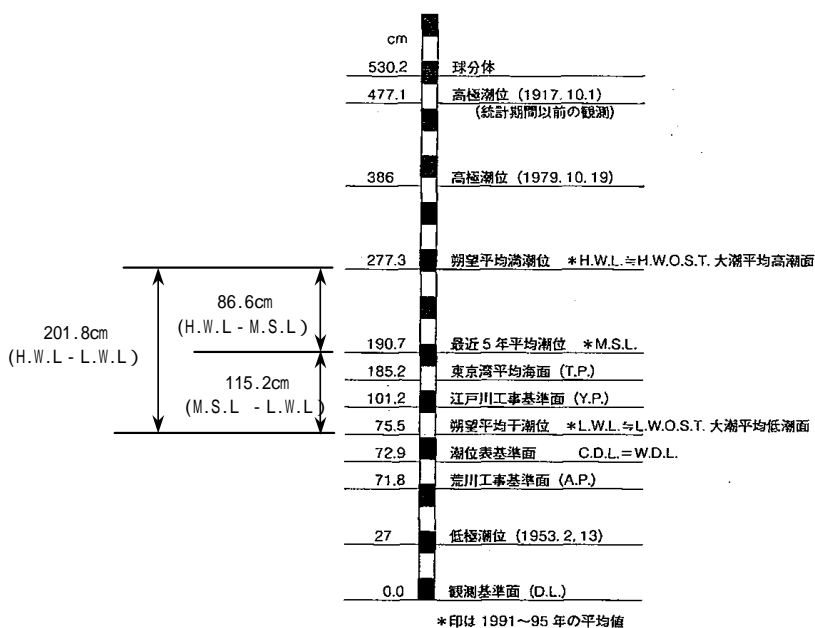
表 - 4.2.1 管理水位と外海水位の条件（解析ケース）

| ケース名 | 外海水位（変動） | 管理水位（一定） |
|-------|--|-------------------------------|
| ケース 1 | M.S.L=EL+16.0m±1.0m 12hr 周期の三角波形 潮位変動パターン — 三角波，周期12hr，振幅1m | M.S.L+1.0m=H.W.L =EL+17.0m |
| ケース 2 | | L.W.L+1.0m=M.S.L =EL+16.0m |
| ケース 3 | | L.W.L=EL+15.0m |

< 参考資料：東京湾(晴海)検潮所の潮位実況図 >

右図は，各潮位，基本水準面 (C.D.L.)，東京湾平均海面 (T.P.)，及びそのほかに常用される各種の潮位との関係を，東京検潮所を例にとった図である。

右図の望望平均満潮位 H.W.L (277.3cm 大潮平均高潮面) と望望平均干潮位 L.W.L (75.5cm 大潮平均低潮面) の差は約 2m であることより，これを参考に解析における潮位変動を片振幅 1m とした。



参・図 - 4.1 東京(晴海)検潮所の潮位実況図

出典：港湾の施設の技術上の基準・同解説，平成 11 年 4 月，上巻，p.172

4.2.5 沖積粘土層の水理定数

透水係数 $k = 1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$

有効空隙率 $ne = 0.3$

粘土層の透水係数の参考値

透水係数と土質の関係における一般的な概念として、下表のような資料がある。これによれば、堆積粘土に相当する透水係数は $10^{-4} \sim 10^{-7} \text{cm/s}$ の範囲に分布している。ここで、透水性に着目すると、半透水性と不透水性の境界が 10^{-6}cm/s である。

表-2.2.1 透水係数と透過係数の典型的な値

| $-\log_{10} \cdot K(\text{cm/s})$ | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|-----------------------------------|-----|----|-------|------|---|---------------|---|------|----|----------|----|----------|----|----|
| 透水性 | 透水性 | | | 半透水性 | | | | 不透水性 | | | | | | |
| 帯水層 | 良 | | | | 悪 | | | | 非 | | | | | |
| 土質 | 礫 | | 砂, 砂礫 | | | 細砂, シルト, ローム等 | | | | | | | | |
| | | | | | | ピート | | 堆積粘土 | | 未風化粘土 | | | | |
| 岩盤 | | | | | | 油田 | | 砂岩 | | 石灰岩, 粘板岩 | | 花崗岩, 角礫岩 | | |
| $-\log_{10} \cdot K(\text{cm}^2)$ | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| $-\log_{10} K(\text{md})$ | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | -1 | -2 | -3 | -4 | -5 |

出典：(社)地盤工学会，地盤工学ハンドブック，1999.3.20，p.17

4.2.6 移流分散パラメータ

縦分散長 $AL(\text{m})$: 3m (観測規模 100m 程度を想定)

横分散長 $AT(\text{m})$: 0.3m ($AT/AL = 1/10$)

分子拡散係数 : $1.0 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ (水)

屈曲率 : 0.5 (一般に 0.3 ~ 0.64 程度 < 1.0)

遅延係数 R : 1.0 (固相への吸脱着なし)

減衰定数 : 0.0 (減衰は考慮しない)

分散長の設定における参考事例：国土交通省 国土技術政策総合研究所 足立一美・北澤壮介，管理型廃棄物埋立護岸の浸透・移流分散解析による遮水性能の評価，国土技術政策総合研究所資料，No.91，June，2003

4.3 解析結果

解析時間 50 年間の結果について、比濃度コンターの経年変化、着目点における濃度の経年変化をそれぞれ、図 - 4.3.1 および 4.3.2 に示す。また、護岸直下断面における外海方向への浸出流量（比濃度流量）を断面内側（右側）の平均ダルシー流速と平均濃度分布から求めた。このとき、潮位変動により流向・流速は変化するので、外海方向への流速が最大となる潮位 = L.W.L 時の各ケースのダルシー流速（図 - 4.3.3）を用いて、これを一定として、比濃度流量を求めた結果を図 - 4.3.4 に示す。同図において比濃度流量を求めた断面軸は、廃棄物層端部（護岸との境界）からの水平距離で $x = 0\text{m}$ から 5m までの範囲で 1m 間隔に設定した。また、設定した断面軸の水平距離 x （護岸と廃棄物層の境界を基準）と比濃度流量の関係を図 - 4.3.5 に示す。

以降、結果の概要を記す。

- 1) 全体に濃度は下方に拡大するが、護岸直下付近は下方より水平（外海）方向への濃度拡大が卓越する。濃度の拡大範囲は、管理水位が最も高いケース 1 (L.W.L) が大きいですが、ケース 2 (M.S.L) はケース 3 (L.W.L) と同等か、わずかに小さい（図 - 4.3.1）。これは、ケース 3 (L.W.L) のように流向が外海から処分場方向であっても外海方向への濃度拡大を抑制する効果が解析プログラムでうまく再現できていないことを示唆している。
- 2) 護岸直下の比濃度の経年変化を見ると、やはりケース 1 (H.W.L) が最も比濃度が大きいですが、ケース 2 (M.S.L) とケース 3 (L.W.L) の比濃度を比較すると、経過時間 20 年以下ではケース 2 (M.S.L) が小さく、それ以降はケース 2 (M.S.L) が大きい（図 - 4.3.2）。
- 3) 各ケースの護岸直下のダルシー流速は、外海と処分場の水位差に応じた大きさになり、浅い深度ほど大きい分布を示す図 - 4.3.3）。これは浅い深度ほど浸透路長が短いためと考えられる。
- 4) 外海方向への比濃度流量はケース 3 (L.W.L) は、どの断面軸についても比濃度流量はほぼゼロである（図 - 4.3.4 および図 - 4.3.5）。これは、ダルシー流速がほぼゼロである（図 - 4.3.3）ことによる。
- 5) ケース 1 (H.W.L)、ケース 2 (M.S.L) の比較において、比濃度流量は 2 倍以上の差があり、両者の差は時間とともに拡大傾向にある。また、廃棄物層端部と断面軸の水平距離 x が大きいほど比濃度流量は小さくなる傾向がある（図 - 4.3.4 および図 - 4.3.5）。これは、主に水平および深度方向に比濃度が小さくなるためである。しかし、両ケースとも $x = 0\text{m}$ 軸よりも $x = 1\text{m}$ 軸の比濃度流量が大きくなっている（図 - 4.3.5）。これはダルシー流速が $x = 0\text{m}$ 軸よりも $x = 1\text{m}$ 軸の方が大きいためである。
- 6) ケース 2 (M.S.L) の比濃度流量は、水平距離 $x = 3\text{m}$ 付近からかなり小さい値になり、 $x = 5\text{m}$ でゼロに近づくのに対して、ケース 1 (H.W.L) は、 $x = 5\text{m}$ であってもケース 2 (M.S.L) の $x = 0 \sim 1\text{m}$ の比濃度流量程度を示す（図 - 4.3.5）。

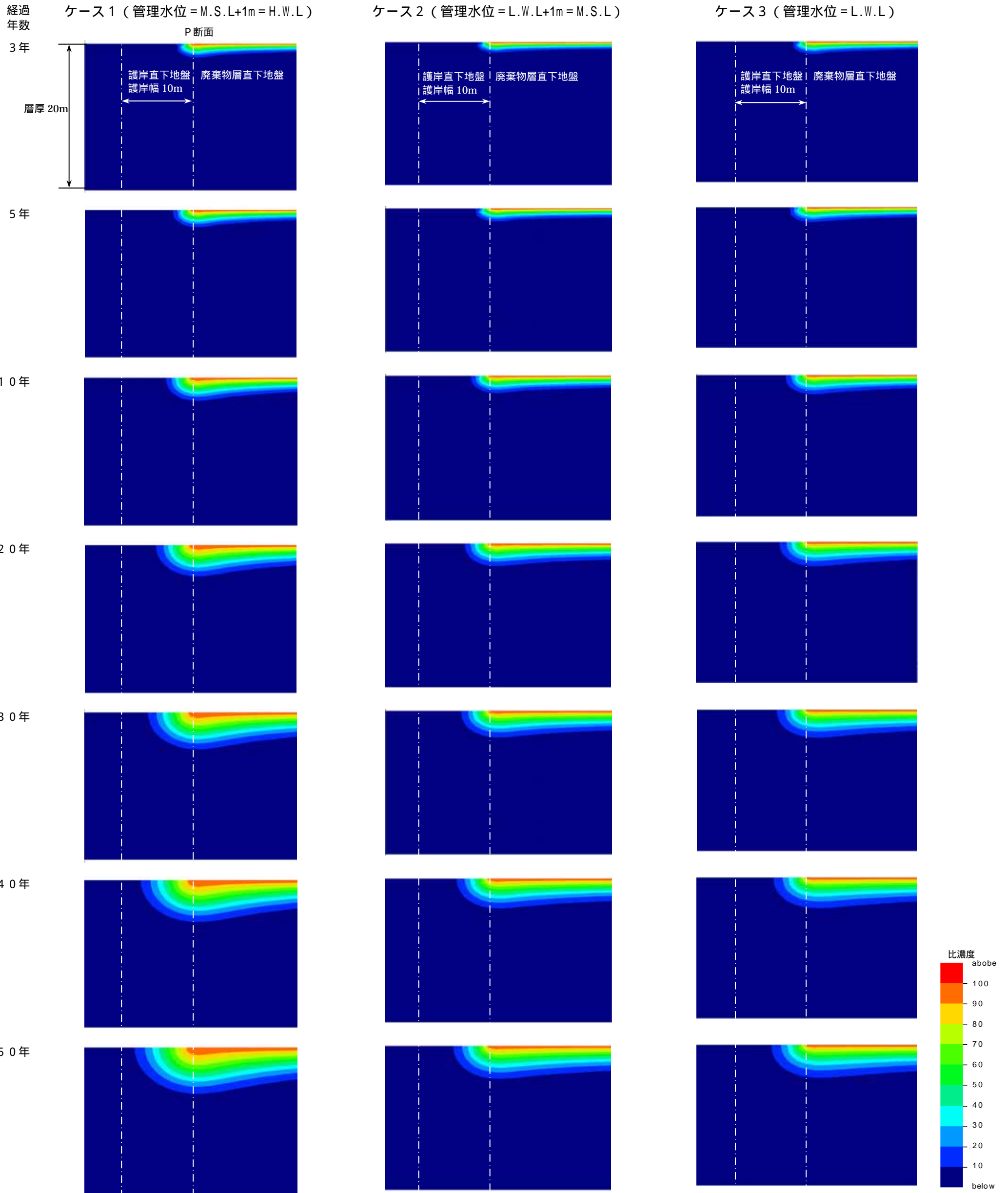


図 - 4.3.1 濃度コンターの経時変化
 廃棄物層と護岸の境界付近の拡大図 コンターは 10 ピッチで出力，赤色が比濃度 100

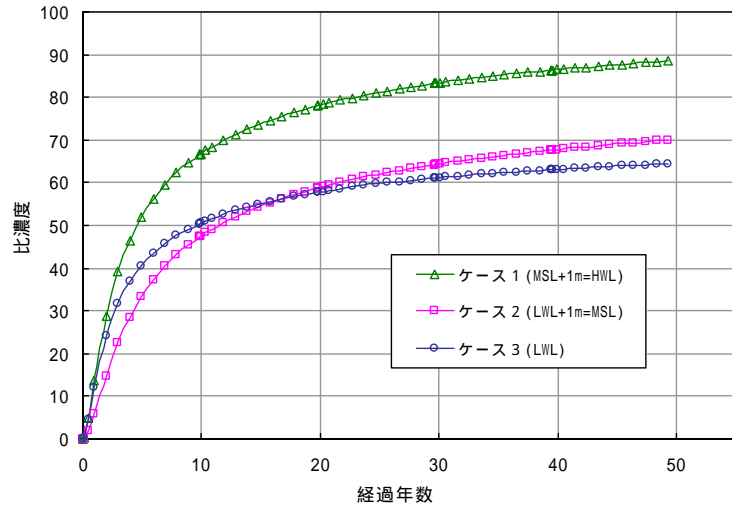
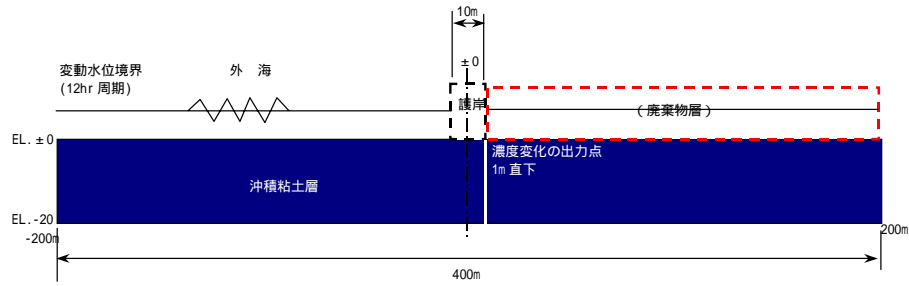


図 - 4.3.2 護岸直下の比濃度の経年変化

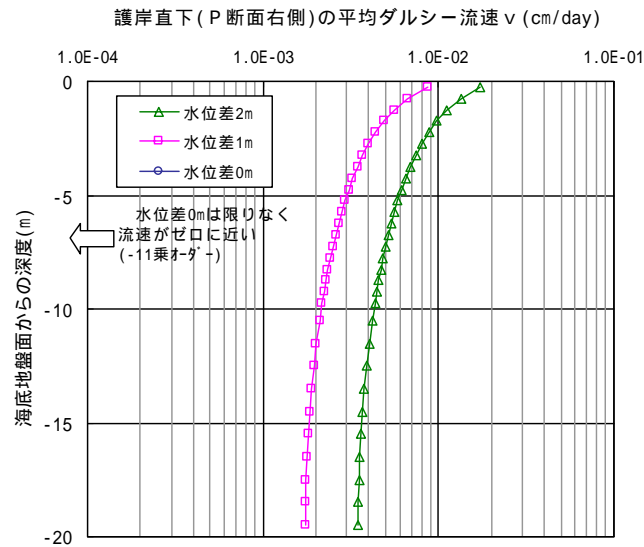
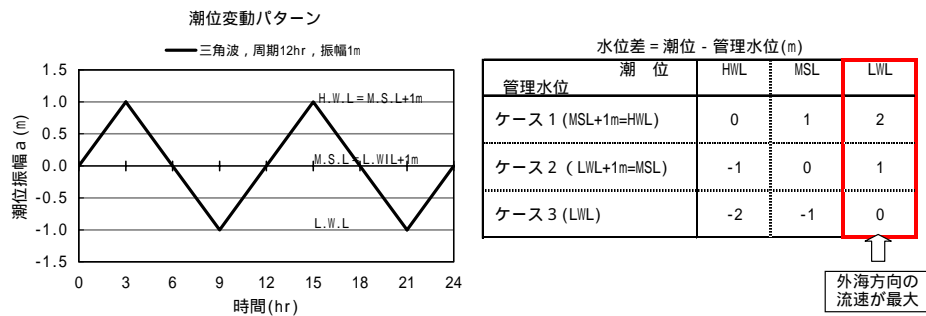


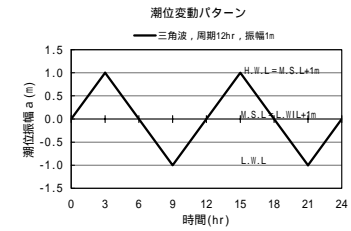
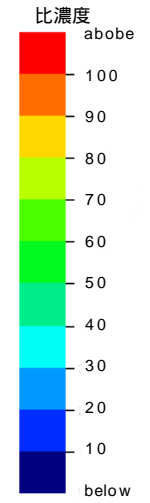
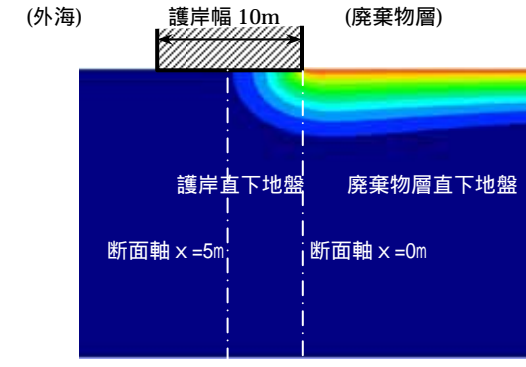
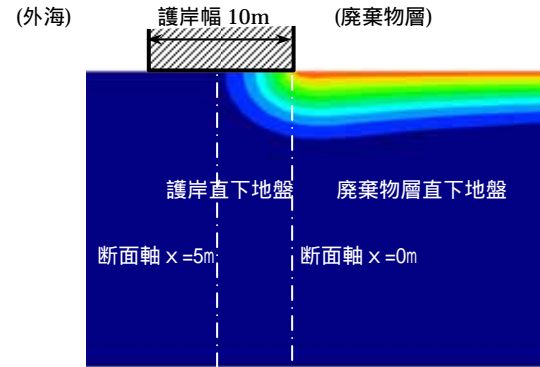
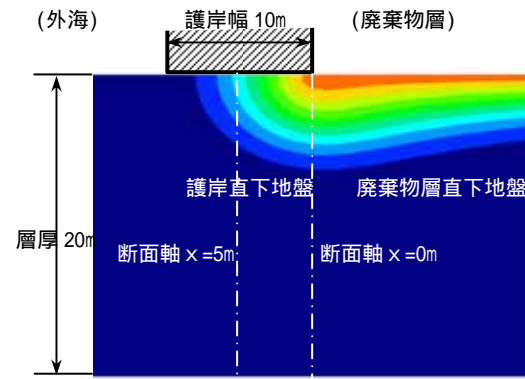
図 - 4.3.3 平均ダルシー流速の深度分布

ケース 1 (管理水位 = M.S.L.+1m = H.W.L.)

ケース (管理水位 = L.W.L.+1m = M.S.L.)

ケース 3 (管理水位 = L.W.L.)

経過年数 50 年における
濃度コンター
(廃棄物層と護岸の境界付近拡大図)



| 管理水位 | 水位差 = 潮位 - 管理水位 (m) | | |
|--------------------|---------------------|-----|-----|
| | 潮位 | H/L | L/L |
| ケース 1 (MSL+1m+H/L) | 0 | 1 | 2 |
| ケース 2 (LWL+1m+MSL) | -1 | 0 | 1 |
| ケース 3 (L/L) | -2 | -1 | 0 |

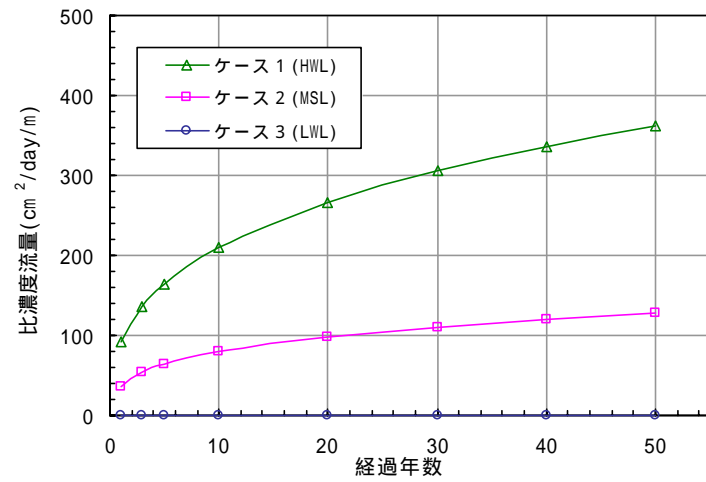
【各断面軸における外海方向への浸出流量(比濃度流量)の算定式】

$$S = \sum (c_i v_i \Delta H)$$

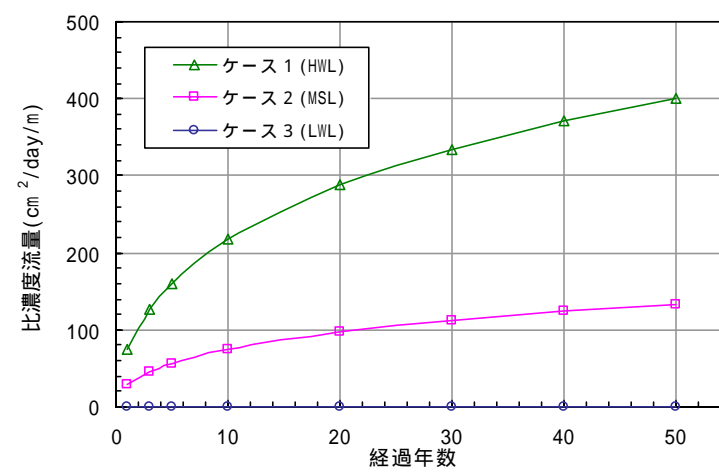
ここに、
 c_i : i 番目の要素の平均濃度
 v_i : i 番目の要素の平均ダルシー流速
 H_i : i 番目の要素の鉛直方向の長さ

v_i は、外海方向(上図の左側)のダルシー流速が最大となる外海水位 L.W.L 時の値を採用する。

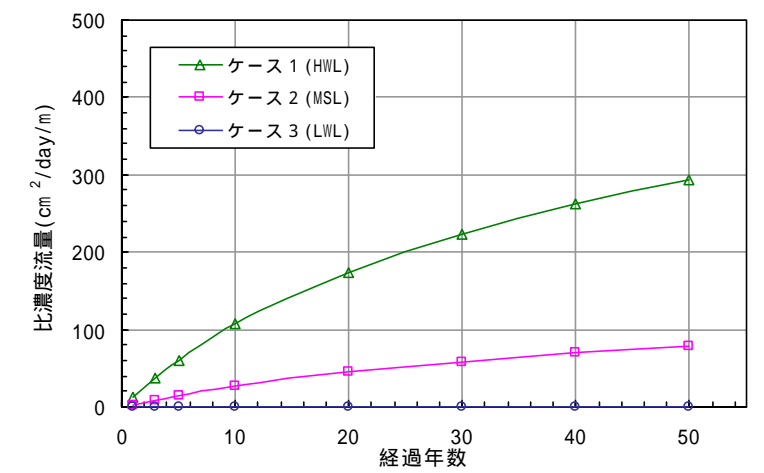
廃棄物層端部と断面軸の水平距離 : $x = 0m$



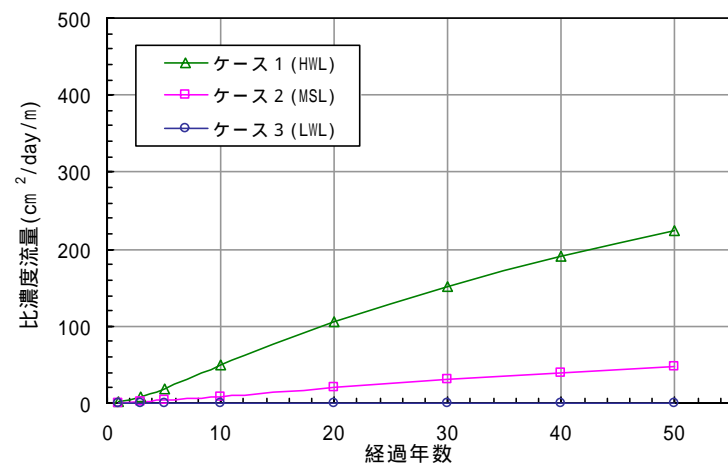
廃棄物層端部と断面軸の水平距離 : $x = 1m$



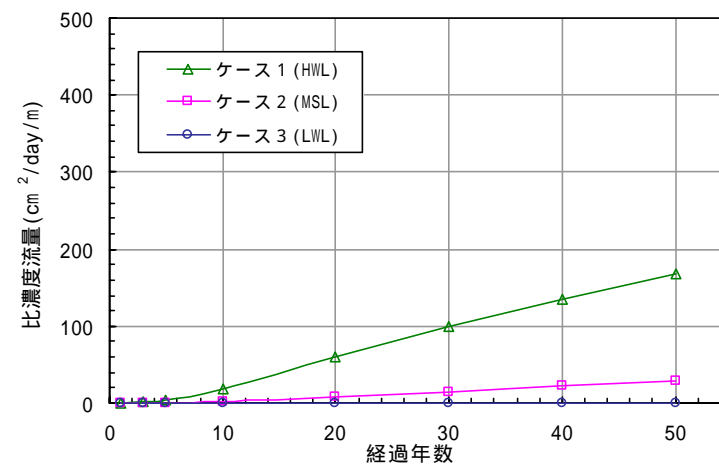
廃棄物層端部と断面軸の水平距離 : $x = 2m$



廃棄物層端部と断面軸の水平距離 : $x = 3m$



廃棄物層端部と断面軸の水平距離 : $x = 4m$



廃棄物層端部と断面軸の水平距離 : $x = 5m$

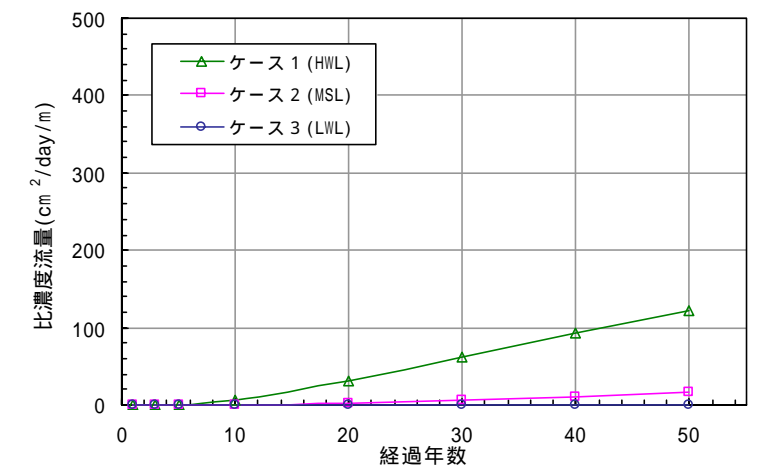


図 - 4.3.4 流量・濃度の経時変化

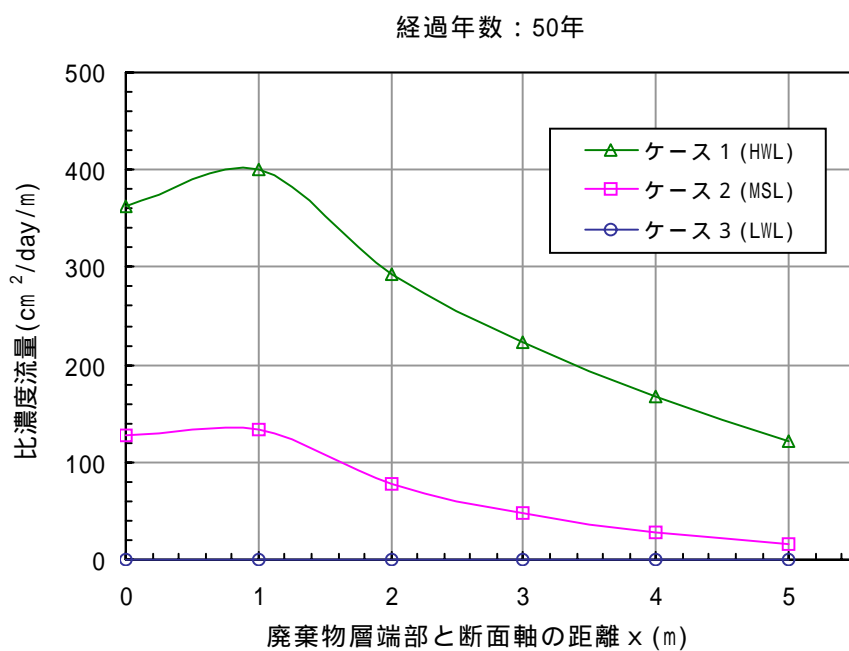


図 - 4.3.5 水平距離 x と比濃度流量の関係 (経過年数 50 年を対象)

4.4 まとめ

解析結果より、汚濁物質の外海への浸出流量(比濃度流量)は、管理水位を低くするほど小さくなる傾向が明らかである。しかしながら、管理水位を L.W.L とすることは、現実的に難しい場合が多いと想定され、図 - 4.3.4 や 4.3.5 から推定すると周囲護岸の条件によっては、M.S.L でも十分な効果があると考えられる。ただし、本検討は汚染物質に対する絶対的な評価ではないため、各処分場における環境基準に対する評価については別途検討が必要である。

5 . 解析モデル b ・ c

5.1 検討概要

1) 解析モデル b (飽和・不飽和浸透流解析)

内水ポンドを有する処分場に対して、比較的短期の挙動を把握する目的で、降雨浸透を管理水位への作用条件として飽和・不飽和浸透流解析を実施した。

2) 解析モデル c (移流分散解析)

管理水位(初期水位)面以下に比濃度 100 を与え、集排水設備として排水暗渠を設置した場合に降雨浸透を管理水位への作用条件として飽和・不飽和移流分散解析を実施した。このとき、管理水位面下の汚濁物質の挙動に着目し、管理水位の排水暗渠による管理の妥当性について検討した。

図 - 5.1.1 に検討フローを示す。

本検討では、処分場の管理水位を設定して、水位上昇を一定量以下に徹底させる条件を浸透流解析による感度解析(解析モデル b)から把握した後、排水暗渠を設置して管理水位を徹底した場合に管理水位面付近の安定化の挙動を移流分散解析(解析モデル c)により把握して、廃止基準を満足する条件について考察を行った。

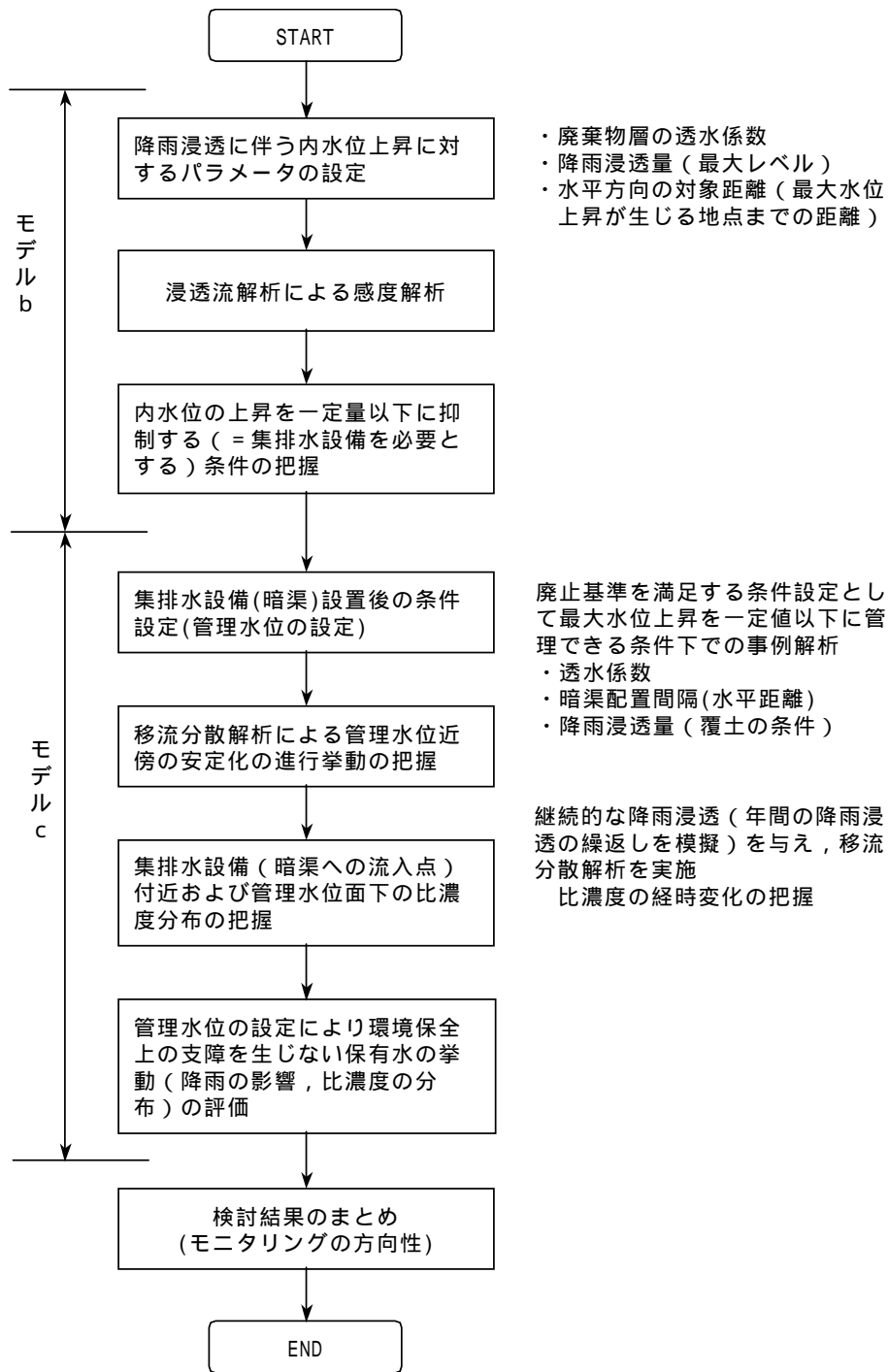


図 - 5.1.1 解析モデル b・c の検討フロー

5.2 解析モデルb

5.2.1 解析条件

(1) 解析断面および初期水位

図 - 5.2.1(上段・中段)に示すように内水ポンドを有する処分場に対して縦断方向の解析断面を設定し、廃棄物層厚さ 20m を一定として、境界端部までの水平距離 L を最大 200m とし、100m, 50m の 3 ケースに変化させた。初期水位はいずれも地表から 5m の深さで一定とした。

(2) 材料定数

廃棄物層で概ね想定される透水係数として、 $k = 1.0 \times 10^{-2}, 1.0 \times 10^{-3}, 1.0 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ の 3 条件で、鉛直・水平方向とも同値とした。不飽和特性は、解析実績が多い van Genuchten モデルとした。van Genuchten モデルのパラメータは、前記の透水係数の代表として下記の値を用い、これは透水係数によらず一定とした。

van Genuchten モデルの式：

$$S_e(\theta) = \left(\frac{1}{1 + (\alpha\phi)^n} \right)^m$$
$$k_r = S_e(\theta)^{\frac{1}{2}} = \left\{ 1 - (1 - S_e(\theta)^{1/m})^m \right\}^2$$

ここに、 S_e : 体積含水率、 α : 限界毛管水頭 c_r の逆数、定数 m と n には $m = 1 - 1/n$ の関係がある。

設定値：

| | |
|---------|---------------------------------------|
| $(1/m)$ | : 6.32 |
| n | : 1.405 |
| s | : 0.41 (飽和時の体積含水率、有効空隙率 n_e と同義とした) |

(3) 降雨浸透条件

図 - 5.2.1(下段)に示すように、先行降雨と最大降雨からなる非定常降雨浸透条件とした。先行降雨は、不飽和領域を実地盤に近い飽和度にするためのものであり、1mm/d の一定降雨で計算を実施して有意な水位上昇が表れる直前の時間 t_0 を求め、 t_0 経過後に最大降雨 80mm を与えた。最大降雨の考え方は、例えば、東京湾岸における近年の約 15 年の記録では日最大降雨量は 250mm 程度であり、その 1/3 程度が廃棄物層に浸透する有効降雨量としたもので、計算においては解の収束性も考慮して 2 日間(=t1)で与えた。

なお、 t_0 は透水係数に支配され、透水係数毎に $k_{02} = 120\text{d}$, $k_{03} = 360\text{d}$, $k_{04} = 840\text{d}$ となった。

(4) 解析ケース

降雨浸透条件は一定として、境界端部までの水平距離 L (解析モデルの大きさ) と透水係数の組合せにより表 - 5.2.1 に示す 7 ケースを実施した。なお、解析コードは 2D-Flow を用いた。

5.2.2 解析結果

図 - 5.2.2 に解析モデル b の解析結果を示し、以下に要点を記す。

- 1) 廃棄物層の透水係数が $k = 1.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ の場合、境界端部までの水平距離 L が大きいほど水位上昇が大きく、50cm を管理目標とすると、これを満足するのは $L = 50\text{m}$ で、 $L = 100\text{m}$ は管理目標をやや超え、 $L = 200\text{m}$ は明らかに管理目標を越える結果となった。

- 2) $L = 50\text{m}$ で透水係数を变化させた結果より $k = 1.0 \times 10^{-3}\text{cm/s}$ 以下であれば管理目標を満足するが、 $k = 1.0 \times 10^{-4}\text{cm/s}$ の最大水位上昇は、管理目標を大きく越える。
- 3) 管理目標を定めた場合、平均動水勾配 $i = h_{\text{max}}/L$ を小さくする必要があるが、この平均動水勾配 i は、内水ポンドから境界端部までの水平距離 L よりも廃棄物層の透水係数が支配的と考えられる。

以上より、管理水位を設定して内水ポンドのみで管理できる実際的な条件は、下記の2つと考えられる。

廃棄物層の透水係数が 10^{-3}cm/s 程度以上

内水ポンドから境界端部までの水平距離 L が 100m 程度以下

ここで、実際の廃棄物層の透水係数は、水平方向に対して鉛直方向が1オーダー程度小さい場合が想定されるため、透水係数評価にあたっての調査・試験方法に注意が必要である。

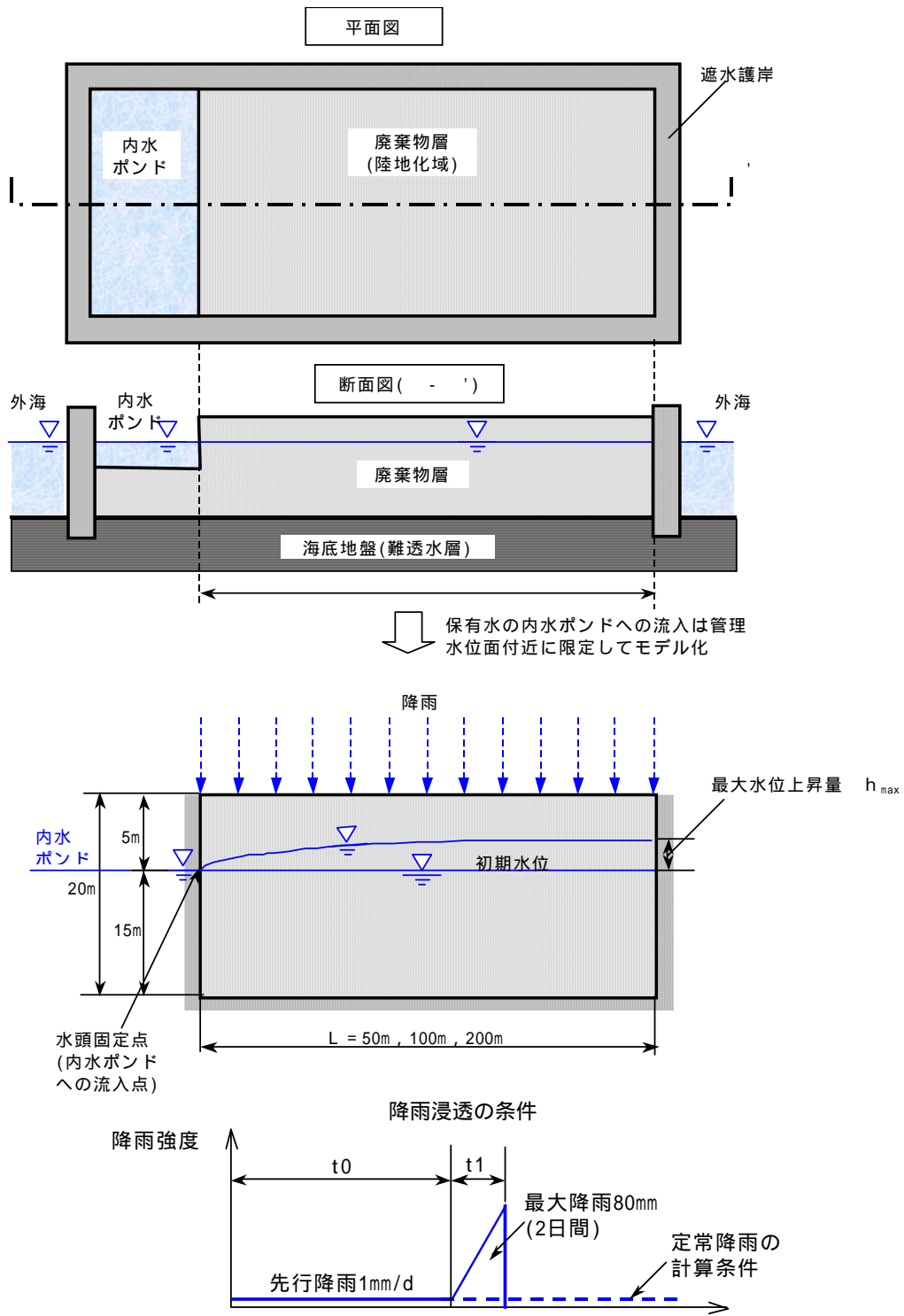


図 - 5.2.1 解析モデルb (浸透流解析) の概要

表 - 5.2.1 解析モデルの検討ケース

| 廃棄物層の透水係数 Log k (cm/s) | 内水ポンド ~ 境界端部の水平距離 L | | |
|---------------------------|---------------------|------|------|
| | 50m | 100m | 200m |
| -2 | | | |
| -3 | | | |
| -4 | | - | - |

1) : 実施した解析ケース

2) 透水係数は例えば $\text{Log } k = -2 (= 1 \times 10^{-2} \text{cm/s})$ を簡易に $k02$ と表記する

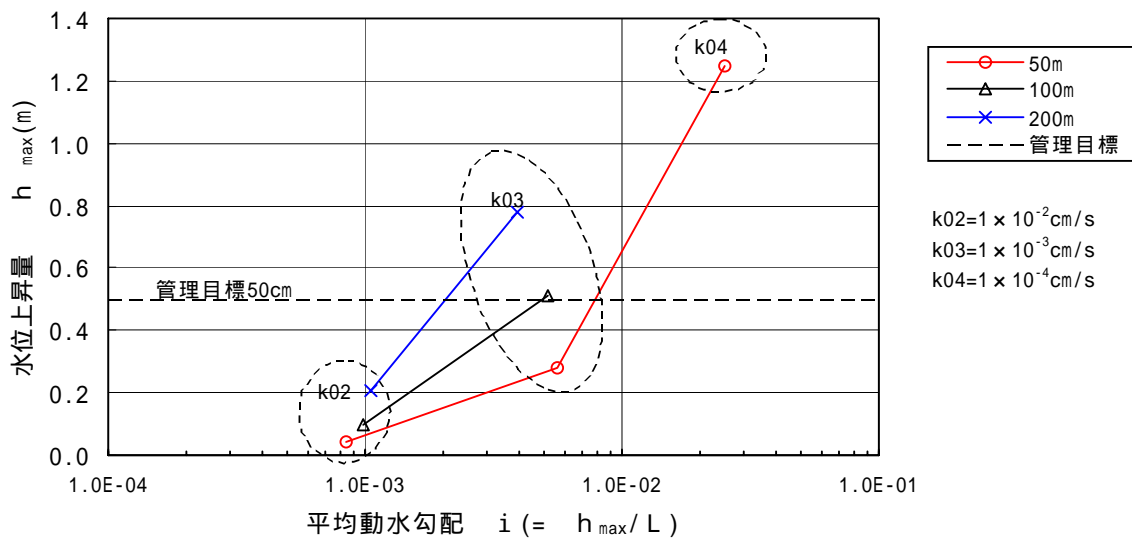
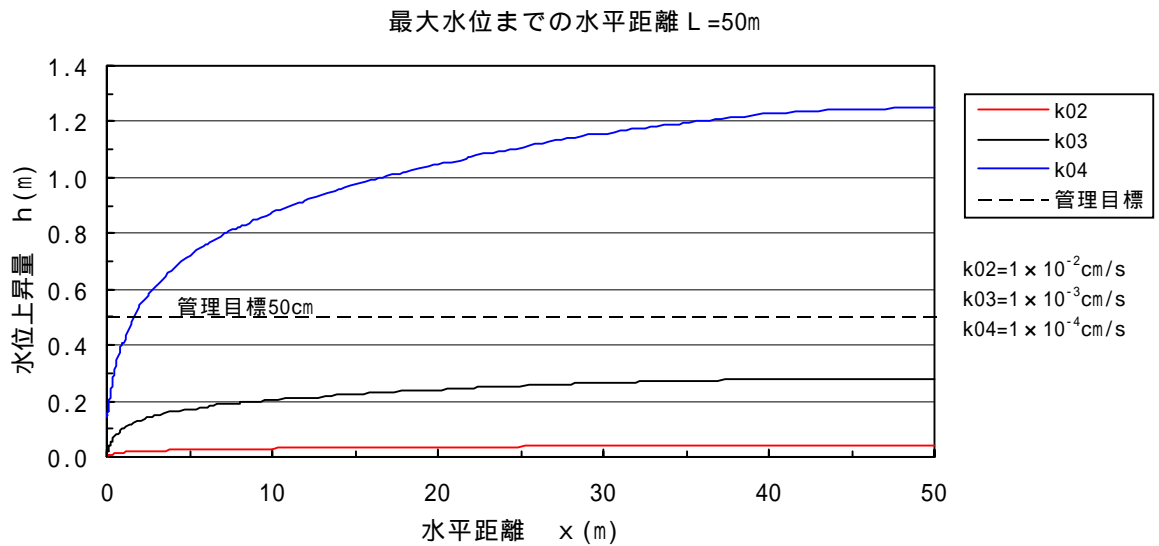
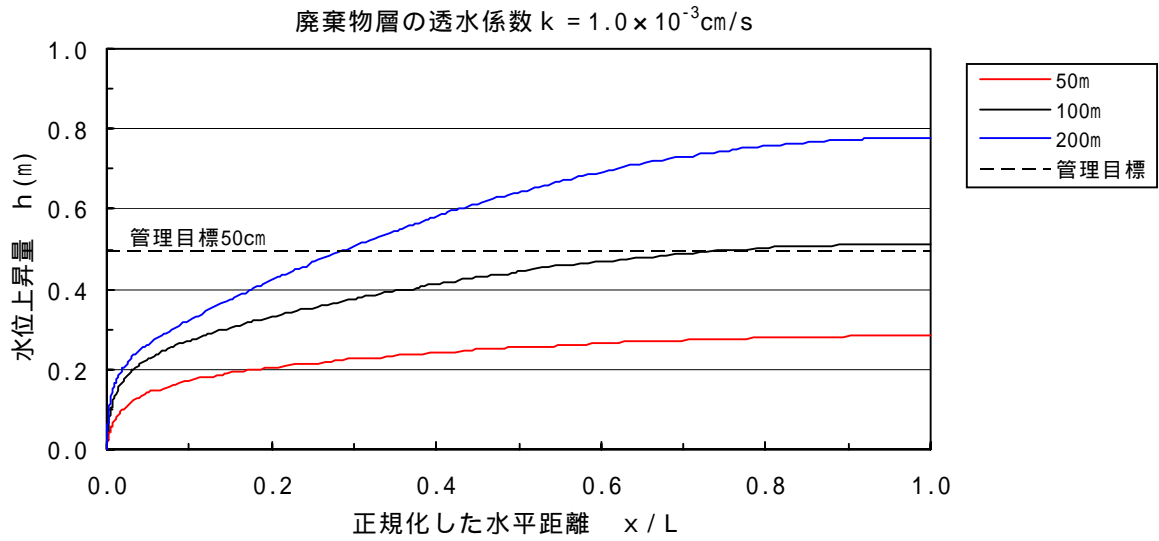


図 - 5.2.2 解析モデルbの解析結果
(内水位の上昇量と廃棄物層パラメータの関係)

5.3 解析モデルc

5.3.1 解析条件

(1) 解析断面および初期水位・濃度

解析モデルbの結果を参考として、集排水設備（暗渠）を設置して管理水位を徹底する条件となる解析断面の規模を決定した。図 - 5.3.1 に示すように排水暗渠を配置した場合の横断方向の半分を解析断面（断面对象）として、水平方向の範囲を 50m, 100m の 2 ケースとした。これは、暗渠配置間隔 100m および 200m に相当するモデルである。解析モデルbと同様に、廃棄物層の厚さ 20m, 初期水位は地表から 5m で一様とし、これを管理水位とした。

また、管理水位面以下に初期濃度として比濃度 100 を与え、比濃度を固定しない条件で解析した。管理水位面以下に比濃度を設定したのは、管理水位面以上は廃止基準を満たし、下部は廃止基準を満たしていない（浄化されていない）処分場を模擬したものである。したがって、解析においては、降雨浸透時に保有水等が排水暗渠へ流入するときの下部の高比濃度を吸い上げ等に着目した。

(2) 降雨浸透条件

本解析では定常降雨浸透条件で 20 年間（7300 日）の解析を行った。定常降雨浸透としたのは、水位上昇に寄与する有意な降雨（＝涵養量）は冬場を除いて年間のうち比較的長期に作用していること、本モデルのように管理水位が地表から 5m と比較的深い場合、この区間が涵養の中間領域となっているため、実際の降雨強度に応じた非定常解析であっても長期的には定常降雨浸透と同等の条件と考えられるためである。ただし、今回の解析では、暗渠配置間隔が 100m および 200m に該当するモデルに対して、最大水位上昇（右端水位）が 50cm 以下になるように降雨浸透量を調整した。

暗渠配置間隔 100m : 1.0mm/d

暗渠配置間隔 200m : 0.48mm/d

(3) 材料定数

解析モデルbの結果を参考として、下記の条件とした。暗渠部のモデル化については、図 - 5.3.2（下段のメッシュ拡大図）に示すとおり、単純な矩形断面に簡素化し、空洞ではなく透水材料を与えた。この理由は、暗渠部を空洞として有孔部を浸出面境界と設定すると、水位上昇時にその浸出面境界で水頭固定条件となった場合に過剰な流量になることが懸念されるためである。なお、暗渠下部は無孔部であるため、矩形断面の下部と側面の 10cm は不透水境界（モデル上は二重節点）とし、暗渠の内側中心部に圧力水頭ゼロ点を設定して、ここより系外に排水される条件とした。

なお、移流分散解析コードは、Dtransu-2D・EL を用いた。

表 - 5.3.1(1) 廃棄物層と暗渠部の材料定数（浸透流パラメータ）

| 材 料 | 透水係数 k (cm/s) | 有効空隙率 ne | VG モデルパラメータ(両材料共通) | | |
|------|----------------------|-------------|--------------------|-------|------|
| | | | (1/m) | n | s |
| 廃棄物層 | 1.0×10^{-3} | 0.41 | 6.32 | 1.405 | 0.41 |
| 暗渠部 | 1.0×10^{-3} | 1.0 | | | |

表 - 5.3.1(2) 廃棄物層と暗渠部の材料定数（移流分散パラメータ）

| 材 料 | 縦分散長 (m) | 横分散長 (m) | その他(両材料共通) |
|------|-------------|-------------|---|
| 廃棄物層 | 0.10 | 0.10 | 分子拡散係数： $1.0 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ （水） 屈曲率：0.5 |
| 暗渠部 | 0.01 | 0.01 | 遅延係数 R：1.0 減衰定数：0.0 |

5.3.2 解析結果

(1) 暗渠部の比濃度

図 - 5.3.3 に解析時間 20 年（7300 日）後の暗渠部の比濃度コンターおよび流速ベクトルを示す。全体的な流向は暗渠方向であり，暗渠配置間隔 100m と 200m で，流向・流速に大きな差は見られない。暗渠下部の流向は，ほぼ上向きで，暗渠下面の不透水区間を回り込んで保有水が暗渠へ流入する様子が見てとれる。廃棄物層の流速は暗渠流入部に近いほど大きい，暗渠直下の流速は周辺に比較して小さい傾向を示す。

暗渠部における比濃度分布は，暗渠を中心に上に凸の放物線状になり，下方から上方への濃度グラデーションが生じている。また，水位面より上位の不飽和領域にも比濃度が上昇しているが，濃度勾配が上向きであることと，不飽和域も飽和域と同様な扱いであるから流速の依存性が大きい分散と移流の影響と考えられる。総じて暗渠配置間隔 100m の方が低比濃度になっており，暗渠配置間隔による違いが見られる。

図 - 5.3.4 は，暗渠部右側における比濃度と右端水位の経時変化を示す。右端の水位上昇は，暗渠配置間隔 100m は約 42cm，暗渠配置間隔 200m は約 49cm で定常状態になっている。水位上昇とともに暗渠部の比濃度も上昇するが，比濃度の上昇が先行している。これは，暗渠周辺での流速が比較的大きいことによる分散の影響と考えられる。暗渠配置間隔 100m および 200m とともに最大 90 程度まで上昇するまでは両者に明確な差はないが，時間経過とともに比濃度が低下し始めるとその低下速度は暗渠配置間隔 200m に比較して 100m の方が早い。

(2) 周辺部の比濃度

図 - 5.3.5 に全断面の解析時間 20 年（7300 日）後の暗渠部の比濃度コンターを示す。暗渠設置深度から深い深度までの比濃度が低下している。暗渠中心からの離隔（水平距離）が約 20m より大きくなると，比濃度はほぼ水平一様に低下しているが，最深部付近は依然として高比濃度のままである。

図-5.3.6 に暗渠中心からの離隔が 5m，50m，100m における比濃度の深度分布の経時変化を示す。解析時間 1 年では，初期（15m 以深が比濃度 100）からほとんど変化がないが，5 年後には管理水位面下 2～3m において明確な比濃度低下が確認される。この傾向は暗渠配置間隔 200m に比較して 100m の方が大きい。さらに時間を経ると下方に濃度低下が進行するが，5 年間隔でプロットした濃度分布ラインの間隔は，経過年数とともに小さくなる傾向が見られることから，比濃度低下の進行速度は時間とともに収束傾向を示すと考えられる。

このような現象は，暗渠設置により管理水位面下の保有水等が暗渠に流入して，管理水位面直下付近の浄化が進行（安定化）するためで，管理水位面下で低比濃度化した深度分布が形成された場合には，汚濁水が排水暗渠へ流入しなくなるものと考えられる。

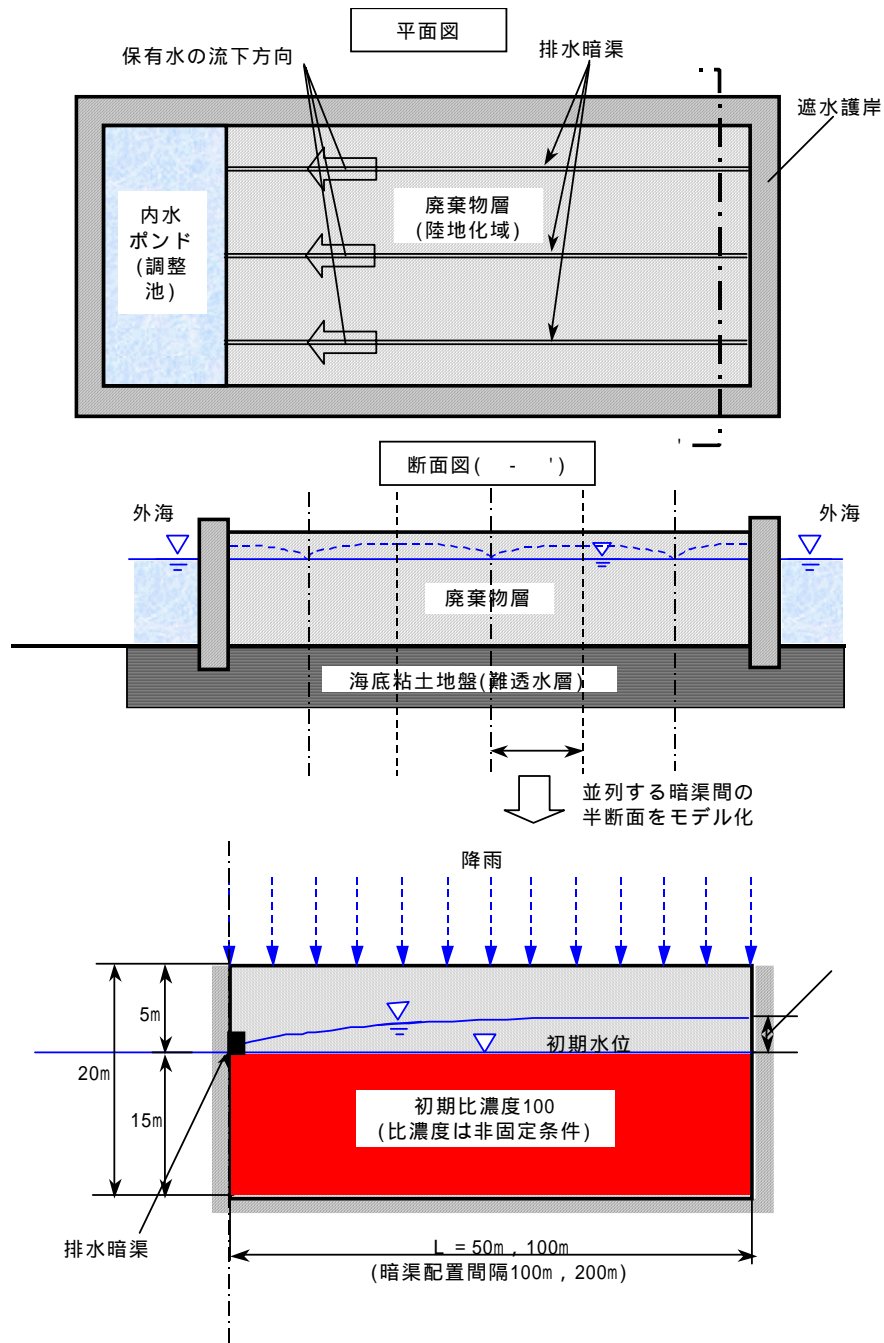


図 - 5.3.1 解析モデルc (移流分散解析) の概要

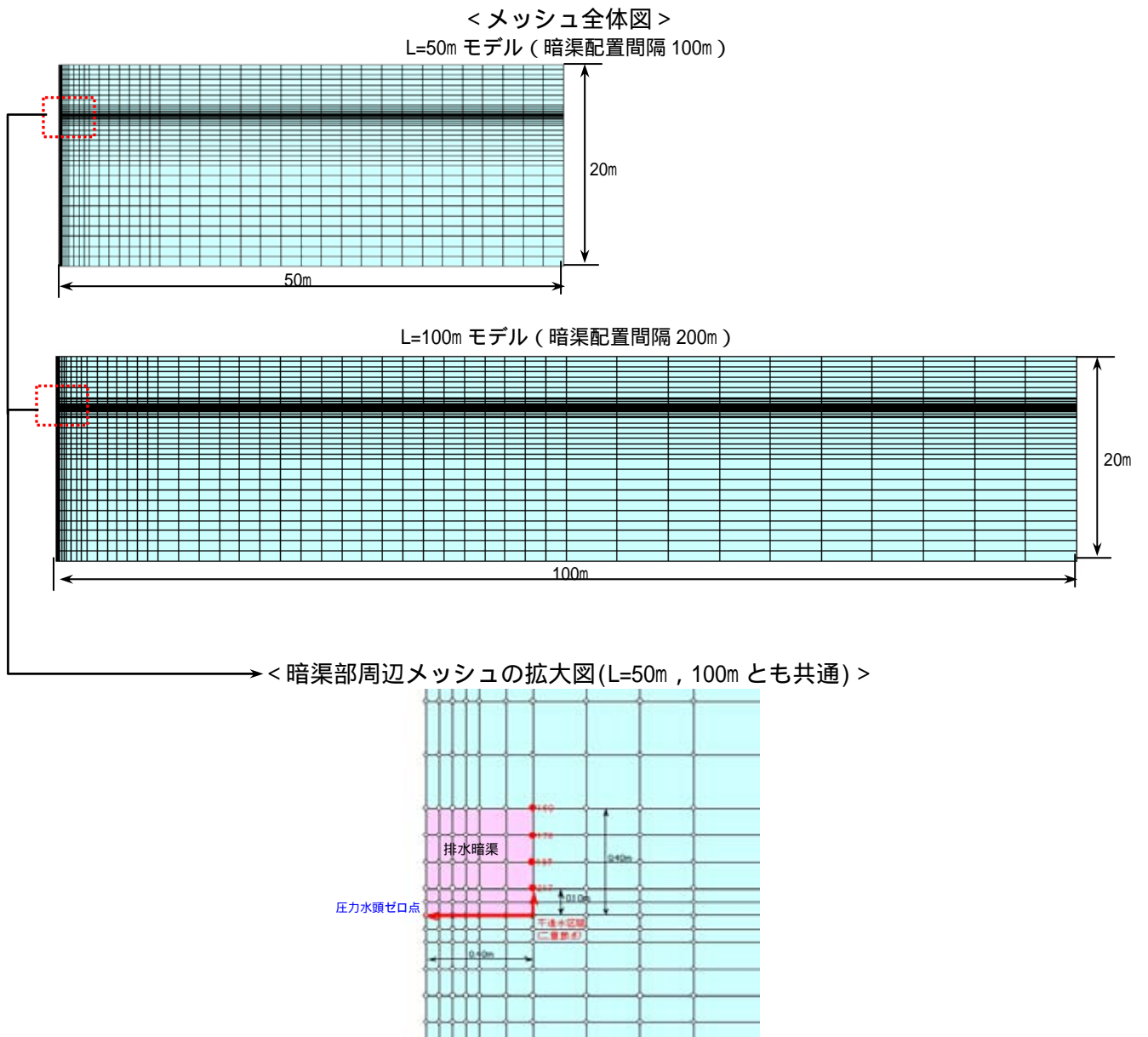
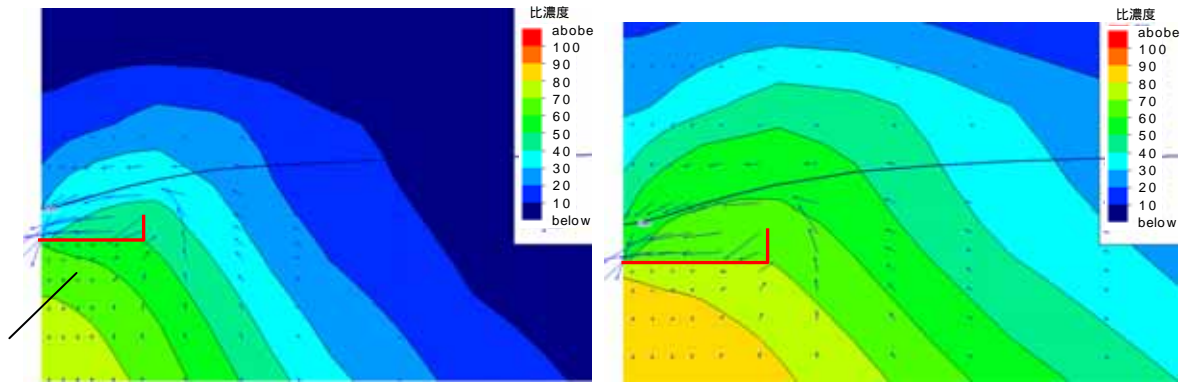


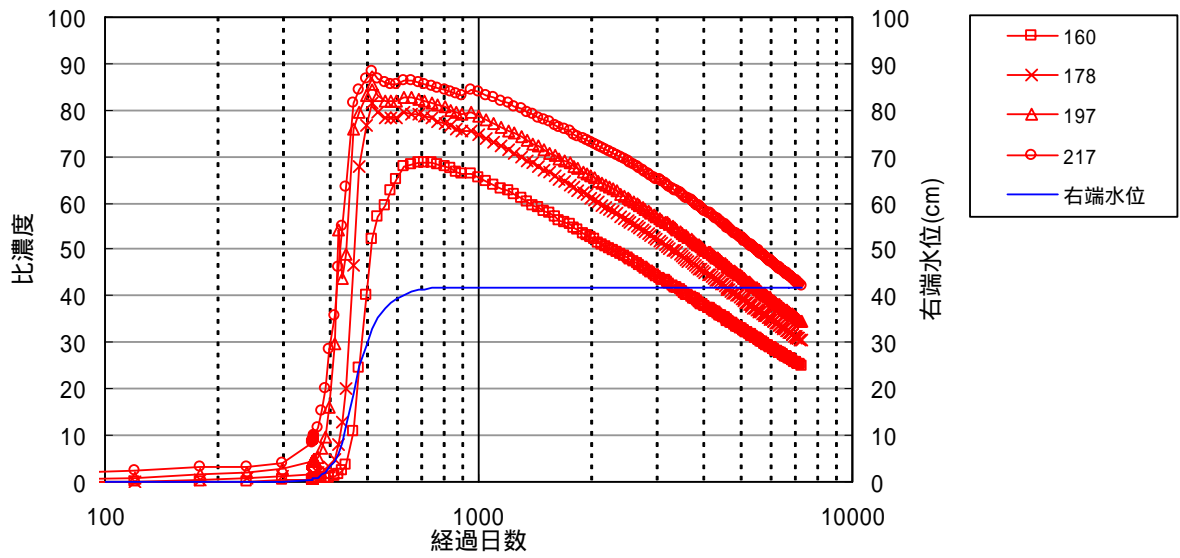
図 - 5.3.2 解析モデルc (移流分散解析) の解析メッシュ



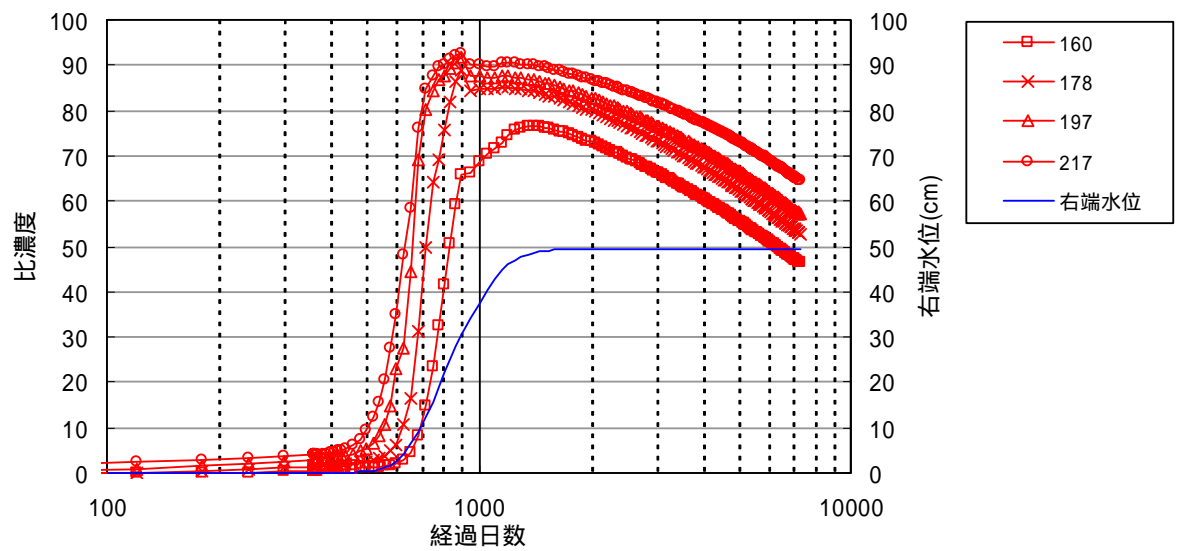
(1)暗渠配置間隔 100m の暗渠部拡大図

(2)暗渠配置間隔 200m の暗渠部拡大図

図 - 5.3.3 解析時間 20 年(7300 日)後の比濃度コンターおよびダルシー流速ベクトル



(1)暗渠配置間隔 100m



(2)暗渠配置間隔 200m

図 - 5.3.4 暗渠部右側節点における比濃度と解析断面右端の水位変化
(暗渠部右側節点は図 - 5.3.2 の最下段図のメッシュ図参照)

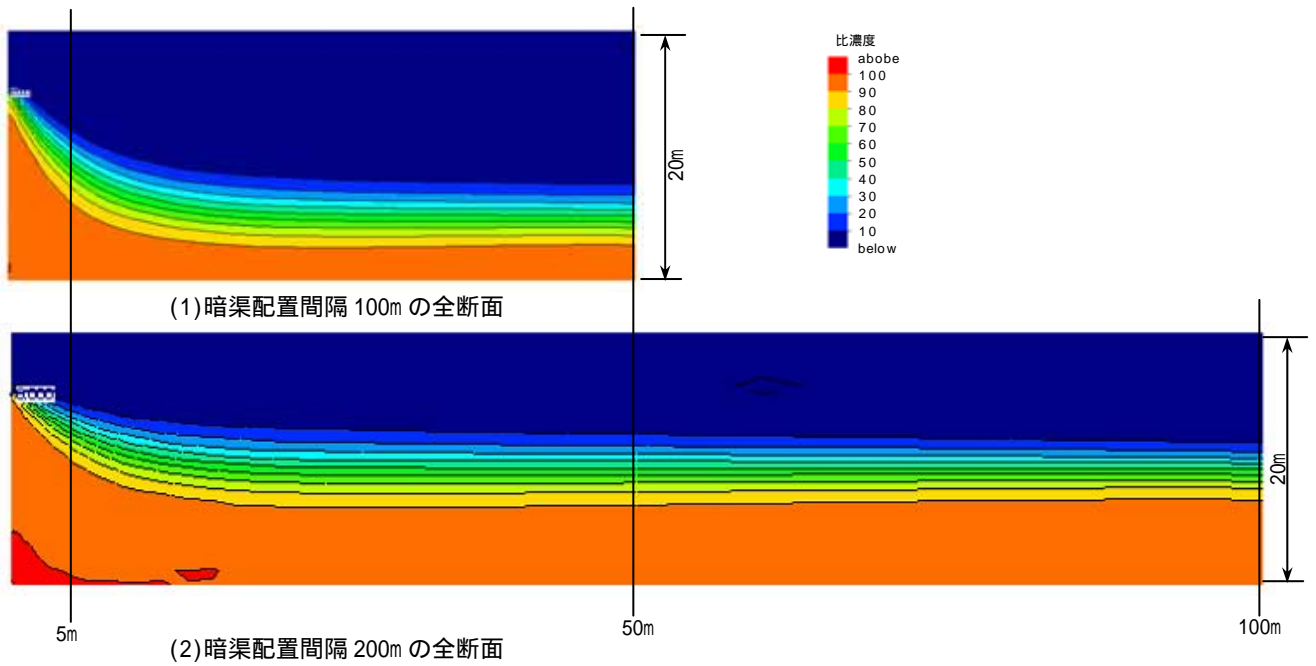


図 - 5.3.5 解析時間 20 年 (7300 日) 後の比濃度コンター

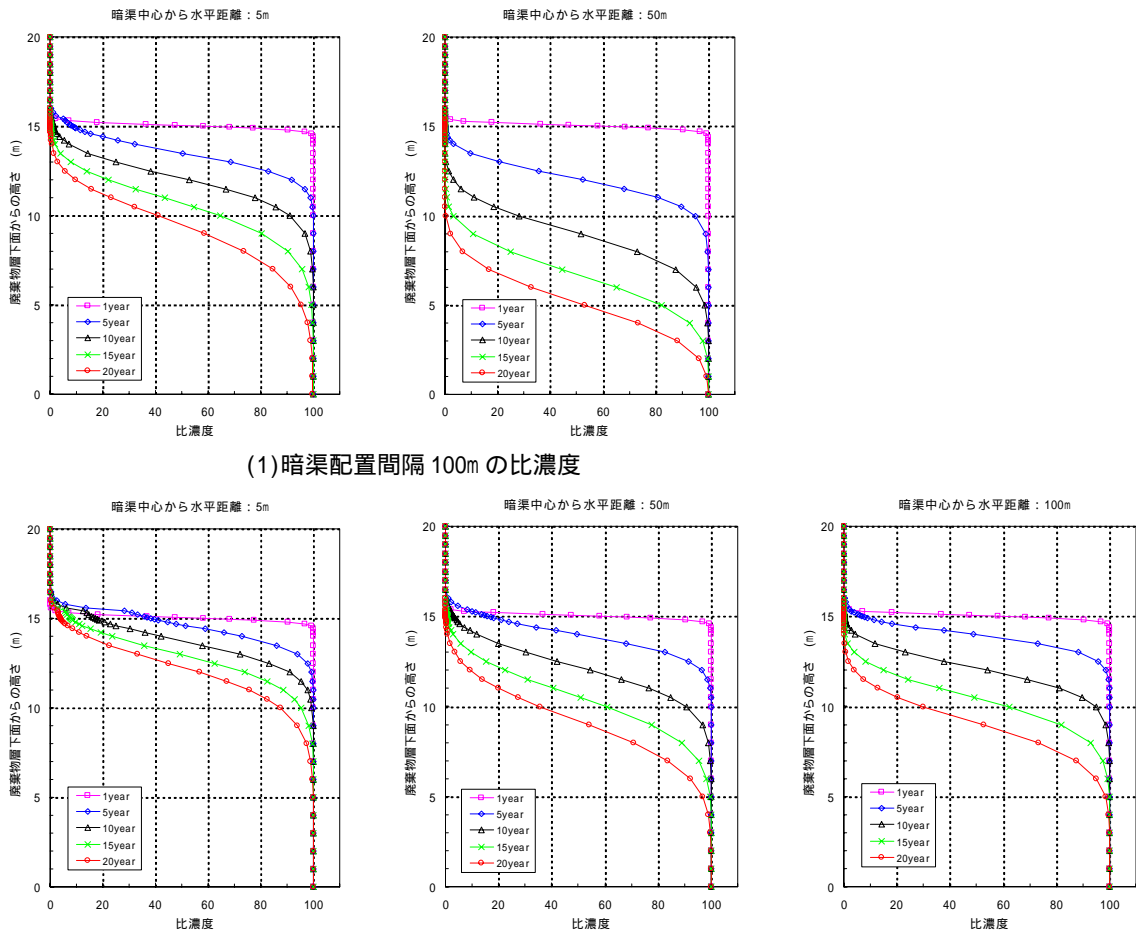


図 - 5.3.6 代表断面軸における比濃度の深度分布

5.4 まとめ

管理水位を設定して、内水ポンドのみで最大レベルの降雨浸透による水位上昇を一定量以下に抑制できる条件として、廃棄物層の透水係数や対象領域の水平距離に着目して浸透流解析を行った結果（解析モデルb）、管理目標を50cmとした場合、透水係数は 10^{-3} cm/s程度以上、対象領域の水平距離は100m程度以下という結果を得た。この条件は地表からの管理水位までの深さや降雨浸透量によって異なる可能性があるが、管理水位を徹底させるための集排水設備の必要性が示された。

排水暗渠を設置して、降雨浸透による管理水位の上昇を50cm以下に抑制した場合の移流分散解析（解析モデルc）を行った結果、暗渠設置により管理水位面下の保有水が暗渠に流入して、管理水位面直下付近の浄化が進行（安定化）する現象が確認された。この浄化の進行速度は、暗渠配置間隔が200mよりも100mの方が速いことが確認できた。管理水位面下で低比濃度化した深度分布が形成された場合、汚濁水が排水暗渠へ流入しなくなるものと考えられる。

以上より、処分場廃止を前提とした場合、廃棄物層の透水係数、降雨浸透時の内水位の上昇量を把握するための調査・試験を行って集排水設備の必要性・規模を検討し、必要な場合にはその設計・施工を行い、暗渠設置後も水質のモニタリングを継続的に行って、排水される保有水等が環境基準を満足することを確認するのがよい。ただし、処分場に排水暗渠を設置した場合、今回の解析結果のような管理水位面下で低比濃度化した深度分布が形成されることを実現象において確認しておく必要がある。

なお、今回の解析モデルでは廃棄物層の透水係数を鉛直方向、水平方向とも同じ値である等方状態としたが、実際には水平方向に対して鉛直方向は1オーダー程度小さい場合が想定される（透水異方性を有する）。鉛直と水平の透水係数を個別に求める透水試験が可能であれば、保有水挙動の把握、流動解析、集配水設備の設計において非常に有意義であると考えられる。一般に行われるボーリング孔（不完全貫入井戸）を利用した現場透水試験は、孔底付近は鉛直流が卓越し、孔壁周辺では水平流が卓越した状態と想定され、得られた透水係数は水平方向に近い値と想定される。