

# 廃棄物の陸上埋立に起因する地下水汚染の現状と将来予測

京大工学部 正会員 村上頼輝  
京大工学部 正会員 O森澤真輔  
大 阪 市 山田泰正

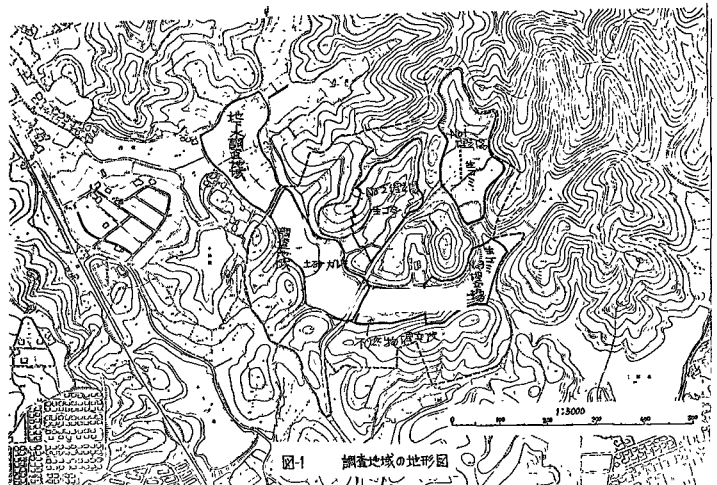
## 1. はじめに

廃棄物を環境に放出する場合、特に人類の生活環境の内部で廃棄物を処分する場合には、必ず何らかの危害と環境および人間に与えられる。他の形態の汚染、例えば大気の汚染・海洋の汚染・河川の汚染等と異なり、地下水汚染をめぐる問題にはつぎのような特徴があるといえる。すなわち、(1)汚染は比較的狭い範囲に限られること、(2)汚染原因物質の移動・伝達速度が遅いこと、(3)汚染の影響が現われ始めるまでに長時間を要すること、(4)一度汚染を生ずるとその修復時間が極めて長いこと、(5)汚染源の数が通常は単独で、汚染の発生時間と共に増加しうること、(6)一度汚染した地下水を浄化するための有効な工学的な方法も現在では皆無に近く、地下水取水を放棄して水道水に切替えることにより問題を解決する場合が多いこと、等々である。したがって、同じく汚染の将来を予測するにしても、一般に予測の時間スケールは長くなる。本報告では、山間の谷筋に一般廃棄物を埋立てた某埋立処分場を例にとり、地下水汚染の現状を調査し、汚染の将来を予測する方法について検討した。その成果について報告する。

## 2. 地下水汚染の現状

### 2. 1. 埋立場の概要

埋立場の地形図を図-1に示す。概略で固く円形に成る埋立場である。埋立場は1つの谷筋と、これにほぼ直角に流入する2つの谷筋よりなっており、これらの谷筋には生ゴミ、不燃物、工材・ガレキ等を各々処分されて埋立られている。埋立場の敷地境界は降水の分水界とはほぼ一致しており、埋立場に降る雨水はこれらの谷筋に集まり、敷地境界を経て河川に流出するものと考えられる。地下水汚染の調査はこの河川(敷地外)とそれに続く敷地内部(工材・ガレキ埋立区)より地下水を採取することによって行った。ボーリング調査によれば調査区域には3種類の地下水が存在することを確認されている。すなわち、第1は埋立ゴミ層を透過した雨水が埋立前の地表面(水田)に滲り流動している地下水であり、第2は埋立場として使用する以前より地表面下に存在した地下水である。第3はゴミ層内部に雨水浸透水がレンズ状に溜まり、極めて中層帯水(留水)である。第1の地下水と第2の地下水とは粘土層(旧地表面;水田)で分離されているため、水理学的な連絡はないものと考えられる。第2の地下水は承压地下水であることも確認されている。また、第1の地下水は敷地境界付近にある集水暗渠によって集水され、処理を受けた後に放流されている。一方、第3の地下水は定常的に移動することなく、移動した場合



合は第1の地下水に合流する。今回の地下水汚染の調査は、  
 敷地内外で連続して11本の第2の地下水について実施した。  
 この地下水は、上下を粘土層で挟まれた低圧地下水である。  
 厚さ約1mの帯水層は黄褐色の固結花崗岩の成り、  
 空隙率は50.2%、現場揚水試験により測定した透水係数  
 は  $2 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$  である。

## 2.2. 調査方法および調査結果

調査区域の各所に設けたボーリング孔から地下水を採取し、廃棄物埋立場周辺の地下水汚染を考慮する上で重要と思われる物質について水質分析を行った。分析方法はおおむねJISに依った。地下水のボーリング位置を図-2に、分析結果を表-1に示す。表-1中“地水”は敷地境界外のボーリング孔であることを、また“浸”は旧地表面に沿って流れる自由地下水(第1の地下水)であることを意味する。

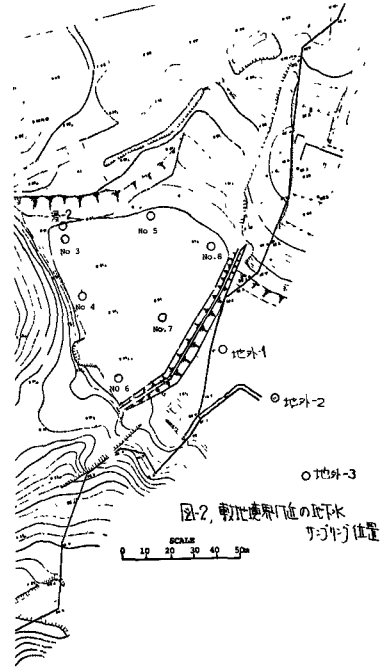


図-2 敷地境界周辺の地下水ボーリング位置

## 3. 地下水汚染の将来予測

### 3.1. 予測理論

汚染原因物質が地中を移動する間に生物・化学反応を受けて消滅したり、他の物質に変化したりしない場合には、これらの物質の地中移動を記述する基礎式は輸送拡散方程式となる。汚染物質の地中での物質収支式を2次元空間座標について書くと、

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(C + \frac{1-f}{f} \rho \cdot q) \\ = \frac{\partial}{\partial x}(D_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(D_y \frac{\partial C}{\partial y}) \\ - \frac{\partial}{\partial x}(v_x C) - \frac{\partial}{\partial y}(v_y C) \end{aligned} \quad \text{----- (1)}$$

となる。ここに、 $q$ 、 $C$ は各々汚染物質の土壌中・地下水での濃度( $\text{mg/l}$ )、 $D_x, D_y$ は拡散係数( $\text{cm}^2/\text{hr}$ )、 $v_x, v_y$ は地下水の流速( $\text{cm/hr}$ )である。ここで、地下水中および土壌中の汚染原因物質濃度とお互いに平衡関係にあると仮定して、

$$q = K_d \cdot C \quad \text{----- (2)}$$

この関係式を導入する。ここに、 $K_d$ は平衡分配係数( $\text{ml/g}$ )である。この仮定は、一般に地下水の移動速度が極めて遅く、地下水と土壌との接触時間と長いためほぼ妥当であると思われる。(2)式を(1)式に代入し、 $\partial/\partial t$ 時間に関する変数変換  $T = (1 + \frac{1-f}{f} \rho K_d) \cdot t$  を施すと、(1)式は地下水の移動を記述する方程式(3)に帰着される。ただし、 $f$ は帯水層の空隙率(-)、 $\rho$ は帯水層を構成する土壌の密度( $\text{g/cm}^3$ )である。

$$\frac{\partial C}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial x}(D_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(D_y \frac{\partial C}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial x}(v_x C) - \frac{\partial}{\partial y}(v_y C) \quad \text{----- (3)}$$

表-1 地下水の水質・分析結果 (昭和41年 4月)

|      | pH  | BOD | COD  | T-H | T-P  | CL <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | CH <sup>+</sup> | T-S  | T-Hg | Cu <sup>2+</sup> | As    | Cd | Pb   | Cs+Mg |
|------|-----|-----|------|-----|------|-----------------|-------------------------------|-----------------|------|------|------------------|-------|----|------|-------|
| No.1 | 6.7 | 2.3 | 8.8  | 6.3 | 0.24 | 141             | 290                           | ND              | 970  | ND   | ND               | 0.002 | ND | ND   | 624   |
| No.2 | 6.2 | 0.7 | 1.4  | 0.5 | 0.19 | 29.7            | 13                            | ND              | 340  | ND   | ND               | ND    | ND | 0.02 | 195   |
| No.3 | 6.1 | 0.6 | 6.4  | 0.4 | 0.06 | 106             | 47                            | ND              | 490  | ND   | ND               | ND    | ND | ND   | 236   |
| No.4 | 6.1 | 0.1 | 0.4  | 0.4 | 0.03 | 42.6            | 40                            | ND              | 290  | ND   | ND               | ND    | ND | 0.01 | 166   |
| No.5 | 6.2 | 0.2 | 6.1  | 0.7 | 0.06 | 81.0            | 25                            | ND              | 380  | ND   | ND               | ND    | ND | ND   | 179   |
| No.6 | 5.9 | 0.2 | 0.2  | ND  | 0.07 | 39.1            | 5                             | ND              | 240  | ND   | ND               | ND    | ND | 0.03 | 127   |
| No.7 | 5.9 | 0.2 | 6.9  | 0.4 | 0.03 | 236             | 160                           | ND              | 620  | ND   | ND               | ND    | ND | ND   | 171   |
| No.8 | 6.3 | 1.1 | 4.7  | 0.2 | 0.08 | 160             | 230                           | ND              | 1000 | ND   | ND               | ND    | ND | 0.02 | 658   |
| No.9 | 6.2 | 0.2 | 7.9  | 0.4 | 0.27 | 55.8            | 96                            | ND              | 540  | ND   | 0.004            | ND    | ND | ND   | 251   |
| 地水-1 | 6.2 | 0.4 | 2.1  | 0.2 | 0.15 | 19.9            | 10                            | ND              | 320  | ND   | ND               | ND    | ND | ND   | 121   |
| 地水-2 | 6.6 | 0.5 | 2.7  | 0.3 | 0.37 | 15.0            | 4                             | ND              | 210  | ND   | ND               | ND    | ND | 0.01 | 88    |
| 地水-3 | 7.2 | 2.7 | 13.6 | 1.6 | 0.32 | 203             | 37                            | ND              | 640  | ND   | ND               | ND    | ND | ND   | -     |
| 浸-2  | 7.0 | 4.7 | 33.4 | 100 | 0.46 | 94.6            | 290                           | ND              | 2800 | ND   | 0.002            | ND    | ND | ND   | 1312  |

(注1) 単位は pH 以外 ppm/l

(注2) T-H, T-P, Cu<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, CaCO<sub>3</sub> 以外

(注3) 空白は検出以下 ND

このことは、汚染物質の地中移動と地下水そのものの地中移動とを時間に関して相似であることを意味している。したがって、地下水にトレーサーを投入して、トレーサー投入後時間の濃度分布を推定すれば、汚染物質の濃度分布は  $t \cdot K_f$  時間後にトレーサーの濃度分布に一致することになる。ここに、 $K_f$  は時間変換係数 ( $K_f$ -ファクター)で、次式で定義される。

$$K_f \equiv 1 + \frac{1-f}{f} S \cdot \rho_d \quad \dots \dots \dots (4)$$

ゆえに、この理論によると汚染物質の移動および汚染の程度(濃度)を、地下水そのものの移動状況から推定することにより  $K_f$  倍時間だけ早く予測することである。

地下水の移動と汚染物質の移動とを時間について相似であることはすでにみて、以後地下水の移動について検討する。地下水の移動は適当なトレーサーを用いて実測することである。ところで、調査区域における地下水中には廃棄物の由来する放射性物質の塩素イオンが存在し(表-1参照)、しかも塩素イオンは土壌によつて保持固定されることになり、塩素イオンをトレーサーとして地下水の移動を予測することにする。表-1の塩素イオン測定値より推定した、調査区域における塩素イオンの濃度分布を図-3に示す。

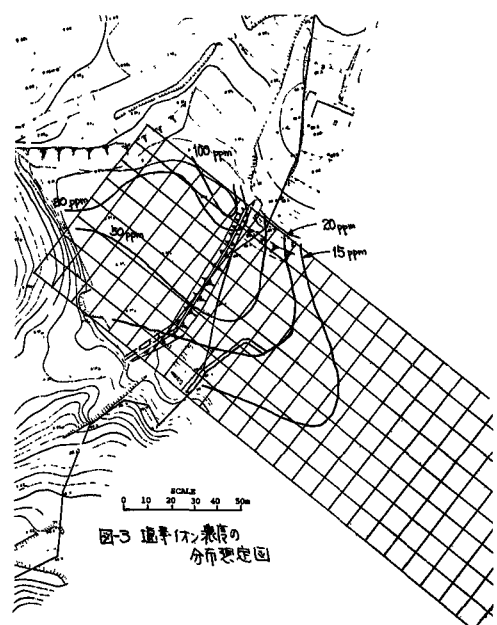


図-3 塩素イオン濃度の分布推定図

### 3. 2. 基礎式の数値解法

調査区域の帯水層は、上下に粘土層に挟まれた厚さ約1mの被圧層であり、その厚さ(1m)は水平方向の広がり(最長約60~70m)に比べると小さい。したがって、調査区域における地下水(塩素イオン)の移動を予測するために基礎式として2次元非定常輸送拡散方程式を便用と考へられる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (D_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (D_y \frac{\partial C}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial x} (v_x C) - \frac{\partial}{\partial y} (v_y C) \quad \dots \dots \dots (3)$$

ただし、拡散係数  $D_x, D_y$ 、地下水の流速  $v_x, v_y$  は空間座標のみの関数であるとす。  $v_x, v_y$  は現場で実測した地下水位等高線図(図-4)より Darcy の法則によつて、次の拡散係数は次式

$$D_x = D_m \cdot |v_x| + D_d, \quad D_y = D_m \cdot |v_y| + D_d \quad \dots \dots \dots (5)$$

で与えられるとする。ここに、 $D_m$  は分子拡散係数(カル4法による測定値は  $D_m = 0.134 \text{ cm}^2/\text{s}$ )、 $D_d$  は分子拡散係数 ( $0.036 \text{ cm}^2/\text{hr}$ ) である。(3)式を差分近似法により数値的に解くことにする。

(3)式を Crank-Nicolson 法により差分近似し、逐次過緩和法(S.O.R.)によつて解く。このときの差分型は時間ステップを  $t = k \cdot \Delta t = k \cdot h$ 、空間ステップを  $x = i \cdot \Delta x = i \cdot a$ 、 $y = j \cdot \Delta y = j \cdot a$ 、緩和係数を  $\omega$  とすると、

$$C_{i,j}^{k+1} = C_{i,j}^k + \omega \cdot E_{i,j}$$

$$E_{i,j} = \{ (P - A_{i,j}^1) \cdot C_{i,j}^k + A_{i,j}^2 \cdot (C_{i+1,j}^k + C_{i-1,j}^k) + A_{i,j}^3 \cdot (C_{i,j+1}^k + C_{i,j-1}^k) \}$$

$$+ A_{i,j}^4 (C_{i,j-1}^{k+1} + C_{i,j+1}^k) + A_{i,j}^5 (C_{i,j-1}^{k+1} + C_{i,j+1}^k) \} / (P + A_{i,j}^1) - C_{i,j}^{k+1} \quad \dots (6)$$

$$\text{ただし } P \equiv (\Delta x)^2 / \Delta t = (\Delta y)^2 / \Delta t = \alpha^2 / R$$

また  $A_{i,j}^n$  は空間座標  $i, j$  に依存する係数で、例として  $v_x \leq 0, v_y \leq 0$  の場合には

$$\begin{aligned} A_{i,j}^1 &= \frac{1}{2} (D_{x,i+1/2,j} + D_{x,i-1/2,j} + D_{y,i,j+1/2} + D_{y,i,j-1/2}) \\ &\quad - \frac{\alpha}{2} (v_{x,i+1/2,j} + v_{y,i,j+1/2}) \\ A_{i,j}^2 &= \frac{1}{2} D_{x,i+1/2,j} - \frac{\alpha}{2} v_{x,i+1/2,j}, \quad A_{i,j}^3 = \frac{1}{2} D_{x,i-1/2,j} \\ A_{i,j}^4 &= \frac{1}{2} D_{y,i,j+1/2}, \quad A_{i,j}^5 = \frac{1}{2} D_{y,i,j-1/2} - \frac{\alpha}{2} v_{y,i,j-1/2} \end{aligned}$$

となる。

空間ステップ長を  $\Delta x = \Delta y = 0.500 \text{ km}$ , 時間ステップ長を  $\Delta t = 1 = 24 \text{ hrs}$  として、電算機 (卓型入力型計算機ペンター) を用いて計算を実行した。計算のフローチャートを図-5に示す。用いた初期条件・境界条件はつぎの通りである。

**初期条件**; 塩素イオン濃度  $C_{i,j}$  の初期分布を図-3で与える。

**境界条件**; 100 m の長さ 5 m の正方形格子網で覆った調査区域の境界上における、各時刻の塩素イオン濃度について十分な観測値を得ることができなかった。そこで、計算の進行と共に塩素イオン濃度が 100 ppm を超える格子点においては、それ以上塩素イオン濃度を増加することはないとの仮定を採用した。この仮定は塩素イオン濃度の最高値を 100 ppm としたことにはほぼ対応する。

調査区域の上流側における下三層浸透流 (図-2) 中の塩素イオン濃度はほぼ 100 ppm であること (表-1 参照) を考えると、この仮定はほぼ妥当であると思われる。上記以外の境界上における塩素イオン濃度は全て、内部格子点における塩素イオン濃度を境界外側とするに由りて定めた。すなわち、採用した境界条件を式で表わすと、

$$\frac{\partial C}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial C}{\partial y} = 0 \quad \dots (7)$$

となる。

### 3.3. 計算結果

地下水サンプリング孔の内、此外-1, 此外-2, 此外-3, および, No.8 についての塩素イオン濃度の, (6) 式の数値計算による予測値を図

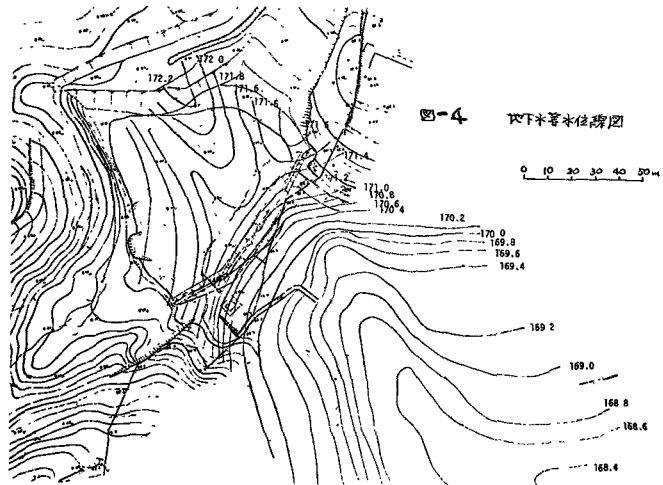


図-4 地下水位分布図

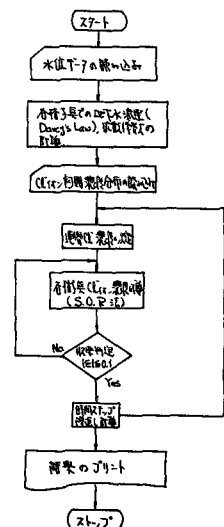


図-5 濃度計算のためのフローチャート概略図

図-6に示す。図-6中の黒丸は表-1の地下水水質を分析した後130日経過したときの塩素イオン濃度の実測値を表わしている。これらのサンプリング孔における塩素イオン濃度については、計算値と実測値とがよく一致しているといえる。また130日経過後の地下水中塩素イオン濃度の実測分布と、数値計算による予測分布とを図-7に示す。図-7の塩素イオン濃度分布を得る場合と同じく、図-7の実測濃度分布は、地下水サンプリング孔における実測値、地下水位等高線図(図-4)等を参照して想定したものである。サンプリング孔の数が少ないことなどから、推定された塩素イオンの実測濃度分布は、厳密に定まるものではなく、ある程度の自由度を有しているものと考えられる。実測濃度分布および初期濃度分布(図-3)の想定にある程度の自由度があること、塩素イオン濃度の最高値をほぼ100ppmであるとみなしたこと(境界条件のとおり)等を考慮しても、130日後の実測分布と予測分布とは比較的良好に一致しているといえる。

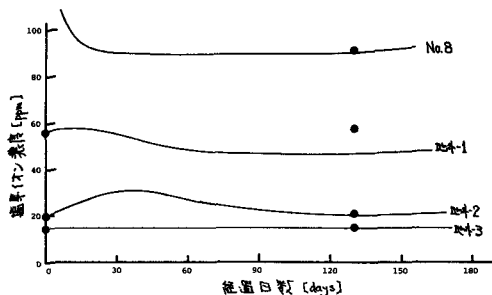


図-6 計算値と実測値との比較(塩素イオン濃度)

#### 4. 結論

本研究により、得られた結論を整理する。まず、当該廃棄物処理場周辺の地下水汚染の現状についてはつぎのとおりである。すなわち、

(1) BOD, CODを指標として表わされる有機性の汚染は現状では顕著ではない。

(2) 着色・臭気による異常は認められない。

(3)  $CN^-$ ,  $Hg$ ,  $As$ ,  $Pb$ ,  $Cd$ ,  $Cr^{6+}$ 等の有害物質による地下水の汚染は現状のとおり認められない。将来においても、これらの物質による地下水汚染が起らないとは言えないが、ゴミ層に近い旧地表面に沿って流れる地下水(図-2;表-1)中にこれらの物質が検出されていないことを考慮すると、当該地下水がこれらの物質により汚染されるには長期間を要すると思われる。これらの物質の地中での移動速度は塩素イオンの移動速度より $K_f$ 倍遅くなるのであるから、これらの物質の内、任意のものの分布が図-3のように検出された後、図-7にまで広がるに要する時間は、ほぼ $130 \times K_f$ 日と要することになる。これらの有害物質について想定した分配係数値 $K_d$ と(4)式の $K_f$ 値とを整理して表-2に示す。

(4)  $Cl^-$ イオン,  $SO_4^{2-}$ イオン等の陰イオン、および硬度( $Ca+Mg$ 濃度)は埋立ゴミの影響をうけて有意に増加しているといえる。

(5) 当該埋立場では、廃棄物と区別別に埋立し、また敷地境界付近では浸透液(旧地表面上を流れる地下水)を収集し処理している。地下水の汚染の進行はこれらの処置によりかなり有効に低減されているものと思われる。

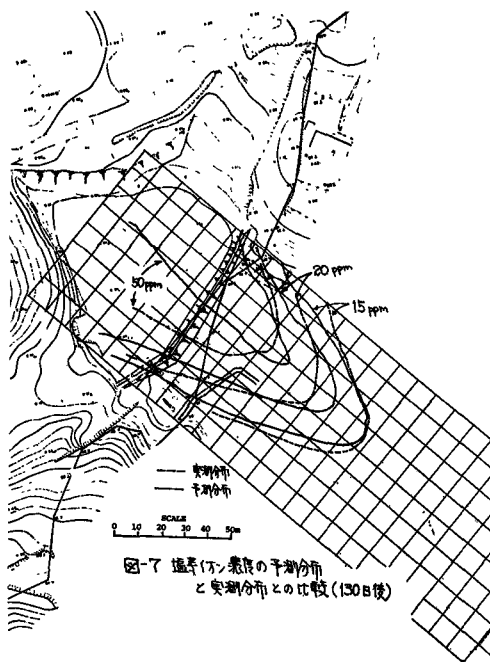


図-7 塩素イオン濃度の予測分布と実測分布との比較(130日後)

拡散方程式を数値的に解くことにより、地下水汚染の将来を予測する方法に関してはつぎのことである。すなわち、

(6) 拡散方程式を数値的に解く方法によつて、地下水汚染の将来を予測する方法は有望であると思われる(図7参照)。特に本研究の調査対象として選んだ地下水域は、この方法を適用するのに適しているものと思われる。

(7) 拡散方程式を数値的に解く方法により地下水汚染の将来を予測するためには、計算に用いる境界条件を決定する十分なデータが必要である。特に、例えは、数値境界における汚染物質濃度については経時的变化を知る必要がある。

(8) 本研究では、地下水層の形状等を利用して、汚染物質の地中移動を2次元非定常輸送拡散方程式で試述できるものと仮定した。より精密を期するためには3次元の場合についても検討し、両者を比較・検討する必要がある。

(9) 計算・実行に際しては、地下水の流速場の時間によつて変化しないとの仮定を採用した。このような仮定は地下水の涵養源が大きい場合には妥当であると考えられるが、調査対象区域のように地下水が主として雨水によつて涵養されているような山間の谷間においては妥当でない場合もあると思われる。実際、調査区域の地下水位は130日を隔てた前後において最大1mの変動が認められた。この地下水位の変動値は埋立場敷地境界より埋立場内部に向かって大きくはなっている。精密を期するためには、流速場の時間的変動など、拡散係数・地下水流速が時間的変数でもある場合についても考慮する必要がある。

(10) 計算の時間ステップ幅( $\Delta t$ )については、6時間、12時間、24時間の場合について比較検討した。これらの濃度計算値の $\Delta t$ の大きさに基づく差の大きさは、塩素イオン濃度のサンプリング・化学分析により生ずる誤差に比べて大きくはないと思われるので、本計算では $\Delta t=24$  hrsを採用した。

表-2 有害物質の分配係数と $K_d$ ファクター

| 物質               | 化学式                                            | $K_d$<br>[ml/g] | $K_f$<br>[-] |
|------------------|------------------------------------------------|-----------------|--------------|
| CN <sup>-</sup>  | HCN                                            | 0.3             | 2            |
| Cd               | Cd(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>              | 180             | 470          |
| Cr <sup>6+</sup> | K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>                | 0.3             | 2            |
| As               | Na <sub>2</sub> HA <sub>2</sub> O <sub>4</sub> | 1.6             | 5            |
| Hg               | HgCl <sub>2</sub>                              | 3.8             | 10           |
| Cl               | NaCl                                           | 0               | 1            |

(注) 土壌の密度は  $\rho = 2.62 \text{ g/cm}^3$ 、孔隙率(空隙率)は  $12.0 \text{ \%}$  (100g 乾土に)

本研究の実施に際して、地下水の状況に関しては京都大学工学部土木工学教室佐藤新一郎教授および研究室の方々に、数回にわたる現地調査においては佐藤氏(現秋田県)の協力を得た。記して感謝の意を表わします。また、本研究の実施に際し協力をおしよられた方々に深く感謝致します。

## 参考文献

- (1) (財) 日本環境衛生センター；「廃棄物の埋立処分に関する技術の調査研究報告書」(1974)
- (2) Y. Inoue and W. J. Kaufman; "Prediction of Movement of Radionuclides in Solution through Porous Media," Health Physics, Vol 9, pp. 705~715, (1963)
- (3) M.N.E. Rifai, W.J. Kaufman and D.K. Todd; "Dispersion Phenomena in Laminar Flow through Porous Media," Sanitary Engineering Research Laboratory, University of California, Berkeley (1956).