

(15) 廃棄物処分場における有害物質漏出位置推定のための地下水汚染モニタリング井戸の追加

Additinal Allocation of Monitoring Wells for Identification of Groundwater Contaminants Leakage Point at a Municipal Solid Waste Landfill Site

森澤眞輔* 井上頼輝* 田中 勝**

Shinsuke MORISAWA,* Yoriteru INOUE* and Masaru TANAKA**

ABSTRACT: Probability technique for estimation of contaminant leakage points was combined with the numerical simulation technique for contaminant transportaion in the ground, to develop practical procedures for identifying the leakage point at a hypothetical municipal solid waste landfill site. The procedures were applied on the optimum monitoring wells system, which was allocated in advance of the landfill operation, to illustrate how to identify the leakage points using the additinal monitoring information after the landfill operation.

The results obtained under the limits considered can be summarized as follows;

- (1) The framework to allocate additional monitoring wells for identification of contaminant leakage points can be mathematically described as the problem to find the numbers of wells and their locations which show the least expectation of an entropy of the conditional probability for identification of leakage points.
- (2) The entropy of the conditional probability can be used as the index which shows how certain the identification of leakage points is. The less entropy shows the more certain identification. Zero entropy means ideal identification.
- (3) Example allocations of additional monitoring wells were illustrated using possible set of monitoring information.

KEYWORDS: Environmental monitoring, groundwater contamination, waste landfill, optimum design, entropy of probability, conditional probability, monitoring system design

1. はじめに

廃棄物埋立処分場においては、埋立処分の対象になる廃棄物の特性に応じた管理がなされ、とりわけ最近の構造基準を満たす埋立処分場においては通常は廃棄物に由来する有害物質が埋立処分場の敷地外に漏出することは無いとされる。しかしながら、埋立廃棄物に由来する物質が漏出する可能性は否定できないことから、漏出が無いことを確認する、あるいは漏出が生じた場合の地下水汚染の態様を把握し漏出位置を推定し

* 京都大学工学部衛生工学教室 (Dept. of Environ. & Sanit. Eng., Kyoto University)

** 国立公衆衛生院 (The Institute of Public Health, Ministry of Health and Welfare)

て必要な対策を計画する等の検討が必要になる。

廃棄物埋立処分場の操業に先立ち、事前に最適配備された環境モニタリングシステム^{1)~3)}の運用によって種々の情報が収集される。これらの情報には、有害物質の漏出の有無の判定に直接関係する地下水試料の水質分析結果等の情報と有害物質の挙動に間接的に関与する地層環境等に関する情報とに区分することができる。後者の情報によるモニタリングシステムの変更手順と追加情報収集の優先順位については既に報告⁴⁾した。ここでは、事前に配備された最適モニタリングシステムによって有害物質の漏出が確認された場合に、漏出位置を推定するために追加すべき井戸の数と位置とを合理的に決定する方法について検討すると共に、想定埋立処分場を対象にその配置手順と配置例を示す。

2. モニタリング井戸の最適追加手法

2.1 問題設定

事前情報によって埋立処分場の周辺に最適配備された、 N 個の井戸からなる有害物質の漏洩を探知するための井戸群がある。これらの井戸のそれぞれから、ある時点において有害物質が検出されたか否かの情報が寄せられる。この情報から、先ず①有害物質の漏出位置として可能性がある場所を特定し、さらに②漏出位置を特定するための井戸を追加し、③追加井戸から得られる有害物質の検出情報から漏出位置の推定範囲を狭め、④最終的に漏出位置を特定するために必要な追加井戸の数と位置とを決定する。そのような井戸の数と位置とを合理的に設計するための手順を明らかにする。

2.2 井戸の追加手法

廃棄物埋立処分場の敷地を1辺が10 mの正方形格子網($\Delta x = \Delta y = 10$ m)で覆い、任意の格子点の位置 (x, y) を $(i, j) = (i \Delta x, j \Delta y)$ で表す。また、モニタリング井戸の位置や有害物質の漏出位置は格子点位置 (i, j) で代表されるとみなす。

モニタリングシステムの第 n 代替案を構成する N_n 個の井戸の内、 m 番目のモニタリング井戸 $(i, j)_m$ で有害物質が検出される(物質の濃度が検出限界濃度 $D_L = 10^{-4} \cdot C_0$ を超える： C_0 は漏出位置における物質の濃度)事象を $(i, j)_m = 1$ 、検出されない事象を $(i, j)_m = 0$ と書く。モニタリングシステムから、情報 $\{(i, j)_m = [1, 0] : m = 1, 2, \dots, N_n\}$ (以後この情報を、簡単のため M_n と表記する)が与えられたとき、探知された物質が k 番目の漏出位置から漏出している確率は $P[k | M_n]$ 、次式(1)の条件付き確率で与えられる。

$$P[k | M_n] = P[k, M_n] / P[M_n] \quad (1)$$

ここに、 $P[k, M_n]$ は第 k 番目の漏出位置から有害物質が漏出する事象と、情報 M_n が与えられる事象の同時生起確率を、また $P[M_n]$ は情報 M_n が与えられる事象の生起確率である。

一方、第 k 漏出位置から有害物質が漏出したときに、情報 $\{(i, j)_m = [1, 0] : m = 1, 2, \dots, N_n\}$ が与えられる確率 $P[M_n | k]$ は、次式(2)の条件付き確率で与えられる。

$$P[M_n | k] = P[k, M_n] / P(k) \quad (2)$$

ここに、 $P(k)$ は第 k 漏出位置で物質が漏出している確率である。

ところで、

$$P[M_n] = \sum_k P(k) \cdot P[M_n | k] \quad (3)$$

であるから、式(1)~(3)より、

$$P[k | M_n] = P(k) \cdot P[M_n | k] / \sum_k P(k) \cdot P[M_n | k] \quad (4)$$

特に、 $P(k) = 1/k_{end}$ (一定) の場合には、

$$= P[M_n | k] / \sum_k P[M_n | k] \quad (5)$$

となる。ここに、 $\sum_k$ は $k=1$ から $k=k_{end}$ までの和、 k_{end} は想定漏出位置の総数 (Fig.4 参照) である。すなわち、所与の情報 M_n を得て漏出位置 k を推定する問題 (確率 $P[k | M_n]$ を推定する問題) は、条件付き確率 $P[M_n | k]$ を推定する問題に置換される。

確率情報の多さを表す指標としてエントロピーが用いられる。与えられるモニタリング情報から漏出位置を推定する場合のエントロピー (E_{NT}) を、一般的に用いられる定義式(6)で算定することにする。

$$E_{NT} = -\sum_k P[k | M_n] \times \text{Log} \{P[k | M_n]\} \quad (6)$$

有害物質の漏出位置の推定精度が大きくなるにつれて、このエントロピーは小さくなる。特に、モニタリング情報 M_n を得て有害物質の漏出位置が特定される状態は、特定の k に対して確率 $P[k | M_n] = 1$ 、それ以外の k に対して $P[k | M_n] = 0$ となる状態であり、このとき式(6)で定義されるエントロピーは0になる。すなわち、漏出位置 k を特定できるモニタリングシステムは、事前の最適配置に a 個の井戸を追加し、エントロピーが0になる追加井戸の数 a (井戸の総数は N_{n+a}) とそれらの位置 $\{(i, j)_m : m=N_{n+1}, \dots, N_{n+a}\}$ を定めることによって得ることができる。

追加した a 個の井戸でどのようなモニタリング情報が得られるかは、井戸を設置しモニタリングを実施した後には明らかになるにすぎない。しかし、モニタリング情報 $M_{n+a} \equiv \{(i, j)_m : m=N_{n+1}, \dots, N_{n+a}\}$ が得られる確率 $P[M_{n+a}]$ を推定することは可能である。結局、次式(7)で定義されるエントロピーの期待値を最小にする追加井戸のシステム (井戸の数とそれらの位置) が、最適追加井戸システムとなる。

$$E[E_{NT}] = -\sum_a \sum_k P[k | M_{n+a}] \times \text{Log} \{P[k | M_{n+a}]\} \times P[M_{n+a}] \quad (7)$$

ここに、 $\sum_a$ は a 個の追加井戸によって得られるモニタリング情報 M_{n+a} の種類 (2^a ケース) についての和を計算することを意味している。

3. 井戸の最適追加配置例

3.1 想定埋立処分場

想定した廃棄物埋立処分場の敷地を Fig.1 に、事前情報に基づいて有害物質の漏出の有無を確認するために最適配備されたモニタリング井戸群⁴⁾を Fig.2 に、その特

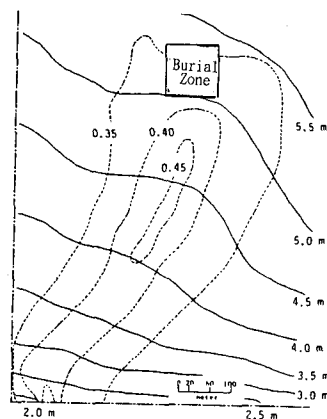


Fig.1 Municipal solid waste landfill site assumed for this study

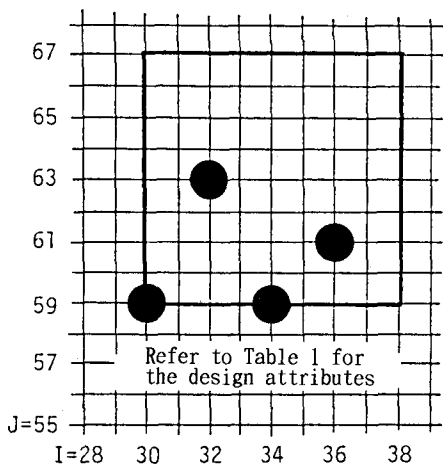


Fig. 2 The optimum monitoring wells allocation, based on pre-operational data

性値を Table 1 に示す。本論文では、平地に設けられた廃棄物層の底部が元の地下水面（環境地下水層）の上部に位置するような廃棄物の埋立処分場を暗黙の内に想定している。モニタリングの対象は埋立地内部の地下水（浸出水）ではなく、外部（廃棄物層の下部）の環境地下水である。遮水工の有無については特に設定していないが、例えば、遮水シートの破損等によって漏出した有害物質が、環境地下水に移行することによって、地下水を汚染するケースを想定している。Fig.2 では、埋立区域内に井戸が配置されているが、これは例えば遮水シート等の下部にポーラスカップを備えた特殊なモニタリング用の集水パイプを予め設定しておくことを想定していることになる。

Table 1 Characteristics of the optimal monitoring wells network, allocated by the pre-operational information

Evaluated total utility	Attribute scale value ^{a)}				Monitoring wells allocation
	①	②	③	④	
0.752	362.3	0.722	3.482	0.790	Fig.2

a) ① means rapidness attribute, ②redundancy, ③economy and ④ infallible detection.

Table 2 Assumed range of environmental parameters used for determining travel time distribution of groundwater contaminant around a solid waste landfill site

Parameter (unit)	Assumed range of variation		
	Upper limit	Median	Lower limit
Hydraulic head ^{a)} , h (m)	1.1xh	h	0.9xh
Porosity ^{a)} , f (-)	1.1xf	f	0.9xf
Permeability ^{b)} , p (cm/d)	6.8x10 ⁴	3.4x10 ⁴	1.7x10 ⁴
Soil density, ρ (g/cm ³)	2.92	2.65	2.39
Distn. coef., K _d (ml/g)	10.0	5.0	2.5
Leakage conc. ^{c)} , C ₀ (-)	10.0xC ₀	C ₀	0.1xC ₀
Dispersivity ^{d)} , α _L (cm)	10.0	1.0	0.1

a) Refer to Fig.1 for their median distribution.

b) Parameter in Kozeny-Carman equation except porosity.

c) Detection limit was set to be 10⁻⁴x C₀ for contaminant.

d) Diffusivity in transversal direction was set as α_T=0.2xα_L.

また、この埋立処分場周辺地下水層の環境パラメータ等は Table 2 に示す上限値と下限値との間で一様に変動する（密度関数の値が一定である）ものとする。

3. 2 有害物質の移動所要時間の推定

想定埋立処分場周辺の対象地下水層は自由水面を有する浅層地下水層であり、その地下水流動は次式(8)で与えられるとする。廃棄物層によって環境地下水の流動が変化することが考えられるが、ここでは簡単のため地下水流動が式(8)で表現できると仮定する。

$$\frac{\partial}{\partial t} (fh) = \frac{\partial}{\partial x} (fhv_x) + \frac{\partial}{\partial y} (fhv_y) + r. \quad (8)$$

また地下水の間隙平均流速 v_x , v_y は式(9)の Darcy 則により与えられるとする。

$$\begin{cases} v_x = - (K \partial h / \partial x) / f \\ v_y = - (K \partial h / \partial y) / f \end{cases} \quad (9)$$

ここに、f, K は地下水層の間隙率及び透水係数、h は地下水位 (Fig.1 参照)、r は有効降水量である。

一方、非分解性有害物質の挙動は次の移流分散方程式で記述できるものとする。ただし、ρ は地層を構成する土壌の真密度である。

$$\frac{\partial}{\partial t} \{ fhC + (1-f) \rho hq \}$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left\{ f h D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + f h D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right\} - \frac{\partial}{\partial x} (f h v_x C) \quad (10)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left\{ f h D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + f h D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \right\} - \frac{\partial}{\partial y} (f h v_y C)$$

また、通常は地下水の流速は遅く、濃度が希薄な有害物質の土壌と地下水との間の収脱着反応は常に平衡状態にあると考えられるので、地下水および土壌中の有害物質濃度 C 、 q の間には次の関係式が成立するものとする。 k_d は分配係数である。

$$q = k_d \cdot C \quad (11)$$

結局、式(8)～(11)を適切な初期、境界条件 (Fig.3 参照) の下に解くことによって、有害物質の対象地下水中での挙動を解析することができる。なお、基礎式群の計算にあたっては透水係数 K と間隙率 f との間に Kozeny-Carman の式(12)が成立するとし、分散係数 D_{ij} (2階のテンソル) は式(13)で与えられるものとした。

$$K = \text{Const.} \cdot f^3 / (1-f)^2 \quad (12)$$

$$\begin{cases} D_{xx} = \alpha_L \cdot v_x^2 / v + \alpha_T \cdot v_y^2 / v + D_d \\ D_{yy} = \alpha_T \cdot v_x^2 / v + \alpha_L \cdot v_y^2 / v + D_d \\ D_{xy} = D_{yx} = (\alpha_L - \alpha_T) v_x v_y / v, \\ v = (v_x^2 + v_y^2)^{1/2} \end{cases} \quad (13)$$

ここに、 α_L 、 α_T は各々流れ方向、流れと直交する方向の分散能、 D_d は分子拡散係数である。

Fig.4 に示す第 k 想定漏出位置から漏出した有害物質の、モニタリング井戸 $(i, j)_m$ における濃度 $C(i, j, k)$ が検出限界濃度 $D_L (=10^{-4} \cdot C_0)$ を超えるのに要する時間、すなわち物質の移動所要時間を $T_{VLT}(i, j, k)$ とする。ここでは物質移動に関連するパラメータが確率変動する (Table 2 参照) ことを想定しているため、有害物質の検知に要する時間 $T_{VLT}(i, j, k)$ も確率変動することになる。

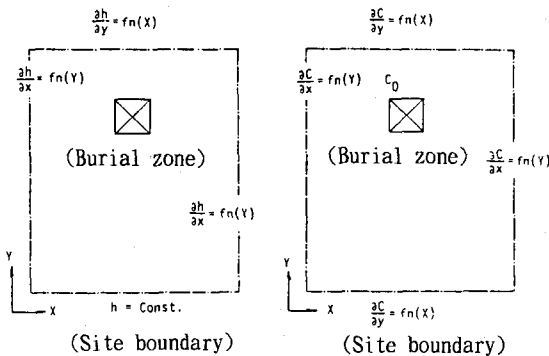


Fig.3 Boundary conditions used in this study to estimate the contaminant transportation in the groundwater zone near solid waste landfill site

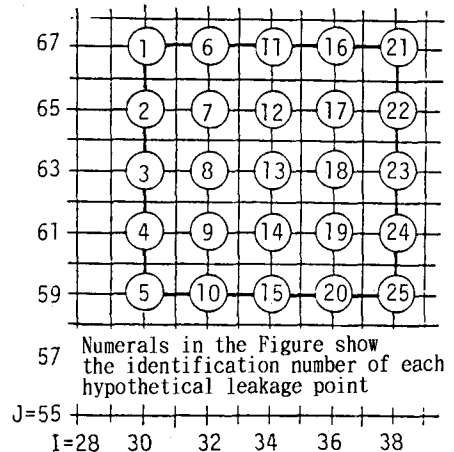


Fig.4 Hypothetical leakage points in the solid waste burial zone

$T_{VLT}(i, j, k)$ の確率密度関数を、モンテカルロシミュレーションにより推定し、その結果の一部を Fig.5 に示す。

3.3 条件付き確率 $P[M_n | k]$ の推定

第 k 想定漏出位置から漏出した有害物質を、第 n モニタリングシステムを構成する N_n 個の井戸の各々で D 日以内に検出し、あるいは検出しない確率は、例えば検出パターン情報 M_n が $\{(i, j)_1=1, (i, j)_2=0, \dots, (i, j)_{N_n}=1\}$ で与えられるとき、次式(14)で算定することができる。

$$P[\{(i, j)_1=1, (i, j)_2=0, \dots, (i, j)_{N_n}=1\} | k] \\ = P[\{T_{VLT} \leq D \text{ for } (i, j)_1, k\} \cap \{T_{VLT} > D \text{ for } (i, j)_2, k\} \\ \cap \dots \cap \{T_{VLT} \leq D \text{ for } (i, j)_{N_n}, k\}] \quad (14)$$

で与えられる。第 k 想定漏出位置から物質が漏出したとき、Fig.2 に示す最適配置井戸の各々で有害物質の検出 (1) 非検出 (0) の情報 (事象) が与えられ、そのような事象が2,000日以内に出現する確率を、 $T_{VLT}(i, j, k)$ の確率分布 (Fig.5 参照) を用いて推定し、その結果を Table 3 に示す。例えば同表は、第14想定漏出位置から有害物質が漏洩しているとき、4つのモニタリング井戸で (1,0,1,0) という検出パターンが得られる確率が0.80であることを示している。

3.4 井戸の追加

モニタリングシステムの運用開始後に Fig.2 を構成する各井戸から、有害物質の検出 (1)、非検出 (0) の情報が与えられたとき、第 k 想定漏出位置が真の漏出位置である確率を式 (5) により算定し、漏出位置毎に Table 4 に示す。同表は

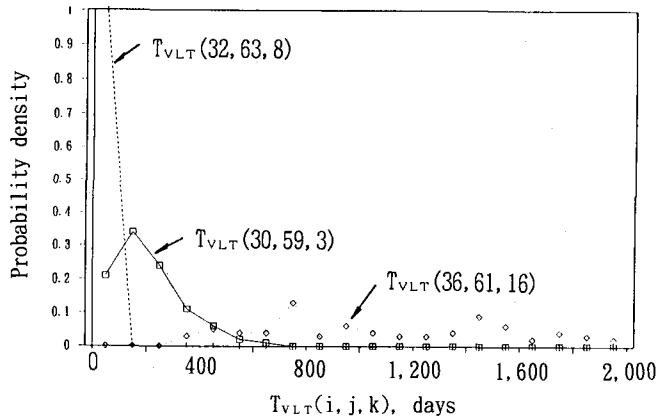


Fig.5 Probability density function of travel time $T_{VLT}(i, j, k)$, which means the time interval required for a contaminant to be transported from the k -th leakage point to the monitoring well location (i, j)

Table 3 Examples of contaminants detection patterns $\{(i, j)_m=[1,0]:m=1,2,3,4\}$ and their conditional probability of the detection pattern $P[\{(i, j)_m=[1,0]:m=1,2,3,4\} | k]$

Leakage point k	Contaminants detection pattern ^{a)}				
	1,0,0,0	1,1,0,0	1,1,1,1	1,0,1,0	0,0,0,0
1	0.79	0.00	0.00	0.00	0.21
2	0.99	0.00	0.00	0.00	0.01
3	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.52	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.81	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.98	0.00	0.00	0.00
9	0.96	0.04	0.00	0.00	0.00
10	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04
12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.00	0.00	0.00	0.80	0.00
15	0.00	0.00	0.00	0.63	0.00
16	0.00	0.00	0.09	0.00	0.03
17	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00
18	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00
19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00
21	0.00	0.00	0.01	0.00	0.20
22	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02
23	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03

a) Contaminant detection pattern by the monitoring wells system $\{(30, 59), (32, 63), (34, 59), (36, 61)\}$ is shown like (1,0,1,0); "1" means contaminant detection at the relevant well and "0" means no detection.

例えば、4つの井戸で (1,0,1,0) なる検出情報が得られたとき、検出された物質が第14漏出位置から漏出したであろう事前推定確率が 0.55であることを示している。

井戸を追加してモニタリングを実施することにより追加情報（検出(1)、非検出(0)）が得られれば、この確率は変化する。Fig. 2 に示す最適配置井戸群において検出情報 (1,0,1,0: Table 4 参照) が得られているとき、さらに2つの井戸を位置(33,61)と位置(36,59)とに追加する場合 (Fig. 6 参照) を想定すると、式(7)で定義するエントロピーの期待値は0になる。

追加井戸において、4通りの情報 { (追加井戸1, 追加井戸2) = {(1,1) or (1,0) or (0,1) or (0,0)} が得られるが、その結果、漏出位置の事後推定確率 $P[k | M_{n+a}]$

Table 4 Available monitoring information of contaminant detection $\{(i,j)_m=[1,0]:m=1,2,3,4\}$ and conditional probability of leakage point estimation $P[k | \{(i,j)_m=[1,0]:m=1,2,3,4\}]$

Leakage point k	Contaminants detection pattern ^{a)}				
	1,0,0,0	1,1,0,0	1,1,1,1	1,0,1,0	0,0,0,0
1	0.112	0.000	0.000	0.000	0.339
2	0.152	0.000	0.000	0.000	0.022
3	0.152	0.000	0.000	0.000	0.000
4	0.152	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6	0.000	0.225	0.000	0.000	0.000
7	0.000	0.355	0.000	0.000	0.000
8	0.000	0.422	0.000	0.000	0.000
9	0.14	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.15	0.000	0.000	0.000	0.000
11	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007
12	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
13	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
14	0.000	0.000	0.000	0.55	0.000
15	0.000	0.000	0.000	0.43	0.000
16	0.000	0.000	0.19	0.000	0.068
17	0.000	0.000	0.28	0.000	0.000
18	0.000	0.000	0.43	0.000	0.000
19	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000
21	0.000	0.000	0.002	0.000	0.37
22	0.000	0.000	0.04	0.000	0.04
23	0.000	0.000	0.04	0.000	0.00
24	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00
25	0.000	0.000	0.000	0.000	0.06
ENT	0.84	0.49	0.60	0.34	0.63

a) Refer to the footnote of Table 3.

がどう変化するかを式(5)により算定して Table 5 に示す。追加井戸で情報 {(33,61)=1, (36,59)=0} が得られれば、漏出位置は第20漏出位置に特定され、エントロピーは0になる。検出情報が(0,0)であれば、同様にして、第15漏出位置が特定される。

式(5)で算定される確率 $P[k | M_{n+a}]$ は、最終的な井戸の数とそれらの位置とが同じであれば、井戸の追加順序によっては変化しない。

事前情報を用いて式(7)で定義されるエントロピーの期待値を算定し、最適であると期待される追加井戸を推定することはできる。しかしながら、漏出位置を確認するために井戸を追加して構成したモニタリングシステムが追加情報が得られた後でもなお最適のシステムであるか否かは、追加井戸から得られる情報の内容によって変化する。即ち、有害物質漏出の(事前)推定確率の期待値 $P[k | M_n] \cdot P[M_n]$ と事後確率 $P[k | M_{n+a}]$ とは異なる。最適な追加井戸の数とそれらの位置は、追加井戸から得られる情報を確認しつつ、順次決定されることになる。

追加情報によるエントロピーの変化を Table 5 に併せて示す。漏出位置が特定されればこの値は0になり、漏出位置推定の確度が向上すればその数値は減少する。Fig. 6 に示す既設井戸 (●) に2つの井戸 (○) を追加し、そこから得られる情報の内容に応じて更に井戸を追加し、最終

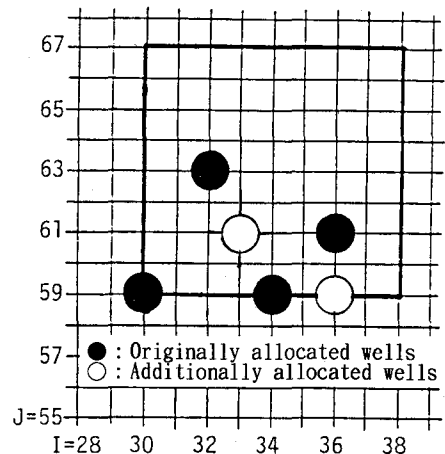


Fig. 6 Additional wells allocation

的に有害物質の漏出位置を特定するに至る経路を Fig. 7に示す。

4. 配置手法の特色

有害物質の漏出位置を推定するために本研究で構成したモニタリング井戸の追加手法では、有害物質の地下水層中での動態を推定する数値シミュレーション手法と漏出位置を確率的に推定する手法とが組み合わせられている。ただし、両手法はお互いに独立に構成されているため、有害物質の地下水層中での動態のモンテカルロ・シミュレーションを大型計算機を用いて解析し、その結果をデータベースとして保存しておけば、追加井戸を最適選定する作業はパソコンで処理することができる。

事前配置したモニタリング井戸から有害物質の濃度や地下水位等の観測値が得られれば、有害物質の動態を記述する方程式群を逆に解くことによって、環境地層パラメータの変動範囲は縮小され、有害物質の地下水層内動態をより精度よく解析することが可能になる⁵⁾。ただしこの手法を採用すると、

Table 5 Probability of leakage point identification estimated by the additional contaminant detection information, compared with the probability of the original system

Leakage point k	Contaminants detection pattern ^{a)}			
	Pre-alloc.	Pre-alloc. wells with the additional two		
	1, 0, 1, 0	1, 0, 1, 0, 1, 0	1, 0, 1, 0, 0, 1	1, 0, 1, 0, 0, 0
1	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.000	0.000	0.000	0.000
3	0.000	0.000	0.000	0.000
4	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.000	0.000	0.000	0.000
6	0.000	0.000	0.000	0.000
7	0.000	0.000	0.000	0.000
8	0.000	0.000	0.000	0.000
9	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.000	0.000	0.000	0.000
11	0.000	0.000	0.000	0.000
12	0.000	0.000	0.000	0.000
13	0.000	0.000	0.000	0.000
14	0.555	0.000	1.000	0.000
15	0.433	0.000	0.000	1.000
16	0.000	0.000	0.000	0.000
17	0.000	0.000	0.000	0.000
18	0.000	0.000	0.000	0.000
19	0.000	0.000	0.000	0.000
20	0.022	1.000	0.000	0.000
21	0.000	0.000	0.000	0.000
22	0.000	0.000	0.000	0.000
23	0.000	0.000	0.000	0.000
24	0.000	0.000	0.000	0.000
25	0.000	0.000	0.000	0.000
ENT	0.34	0.00	0.00	0.00

Note: Original monitoring wells are allocated at {(30,59), (32,63), (34,59), (36,61)} and two wells are added at {(33,61), (36,59)}.

a) Refer to the footnote of Table 3. Detection pattern of {1,1} is impossible at the additional two wells.

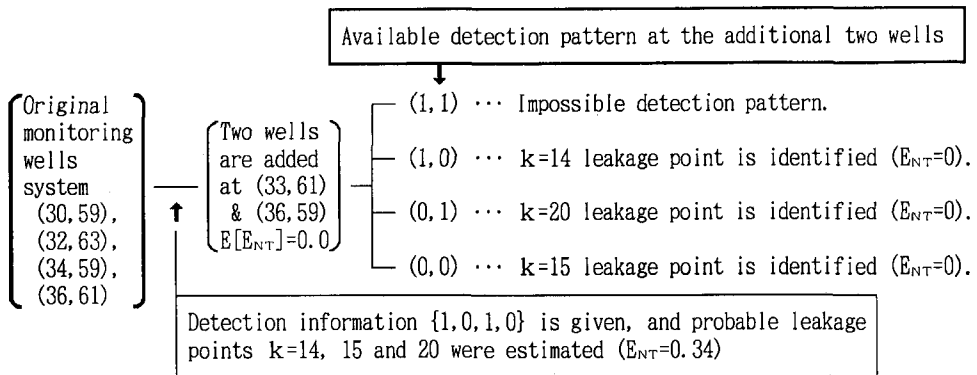


Fig. 7 Identification process of the contaminant leakage points based on the detection information of contaminant at the original/additional wells

有害物質の数値シミュレーションと井戸追加との独立性が損なわれるため、パソコン上で追加井戸を発見することは不可能になる。いずれの効用がより大きいかは別途判断する必要がある。

Fig. 7 では、1つの漏出位置が特定されている。処分場敷地に設定した格子網の間隔が 10 m であるから、1 漏出位置は 10 m x 10 m の範囲を代表しているとみなされる。漏出位置の推定範囲をさらに狭くするためには、格子間隔をより狭くして、本論文の手順を繰り返すことになる。

5. おわりに

有害物質の地下水層中での動態を評価する数値シミュレーション手法と、モニタリング情報を活用して有害物質の漏出位置を確率的に推定する手法とを組み合わせ、漏出位置を把握するための井戸を合理的に追加する手順について検討した。また、廃棄物埋立処分場の操業に先立ち事前環境情報に基づいて有害物質の漏出の有無を確認するために最適配備された井戸群を対象に、漏出位置を推定するための井戸を追加する手順とその適用例を示した。設定条件下で得られた結論を要約すると以下のようになる。

- (1) 有害物質の漏出位置を推定するためのモニタリング井戸群を合理的に追加配備する問題は、(モニタリング情報で条件付けした) 条件付き漏出確率のエントロピーの期待値を最小にする井戸の数と位置とを選定する問題として定式化することができる。
- (2) 埋立処分場の運用開始後に得られるモニタリング情報を用いて漏出位置を特定できる程度を、漏出事象の条件付き確率のエントロピーを用いて定量化することができる。このエントロピーが小さいほど漏出位置推定の確実度は大きくなり、漏出位置が確定するとエントロピーは 0 になる。
- (3) 追加井戸群によって漏出位置が確定できるか否かは、実際に井戸を設置しモニタリング情報(有害物質の検出情報)を得た後でなければ判定できない。本研究で提示した手法により、有害物質の検出パターンに応じて順次モニタリング井戸を追加して漏出位置を特定するプロセスを提示した。

本研究の数値計算には、京都大学大型計算機センターの FACOM M1800 を使用しました。記して関係各位に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 森澤眞輔・田崎芳郎・井上頼輝：廃棄物埋立処分場周辺の地下水汚染モニタリング井戸の最適配置、あいまいな情報下での配置手法の検討、衛生工学研究論文集、第23巻、pp. 183-194、1987。
- 2) 森澤眞輔・井上頼輝・井上正行：あいまい情報下での地下水汚染監視用井戸の最適配置、京都大学環境衛生工学研究会シンポジウム講演論文集、第9巻、pp. 408-415、1987。
- 3) S. Morisawa and Y. Inoue: Optimum Allocation of Monitoring Wells around Solid Waste Landfill Site Using Precursor Indicators and Fuzzy Utility Functions, Journal of Contaminant Hydrology, Vol. 7, pp. 337-370, 1991.
- 4) 森澤眞輔・井上頼輝・田中寛生：廃棄物埋立処分場周辺の地下水汚染モニタリング井戸の最適配置、追加情報による最適配置案の変更、環境工学研究論文集、第29巻、pp. 147-156、1992。
- 5) 米田 稔・井上頼輝・平野智彦：正規分布変換法を用いた透水量係数場の推定、第30回水理講演会論文集、pp. 295-300、1986。