

(16) 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 —

OPTIMUM ALLOCATION OF ENVIRONMENTAL MONITORING
WELLS FOR DETECTING GROUNDWATER POLLUTION
AROUND AN ASSUMUED SOLID WASTE BURIAL SITE

Monitoring Well Allocation under the Stochastic and
Fuzzy Information

森 澤 真 輔* 田 崎 芳 郎** 井 上 頼 輝*
Shinsuke MORISAWA*, Yoshirou TASAKI** & Yoriteru INOUE*

ABSTRACT; Optimum allocation method was proposed and simulation studies were executed for allocating monitoring wells around an assumed municipal solid waste burial site by use of a computer. The problem to allocate monitoring wells was formulated as a multi-attribute design problem and was tried to solve based on utility assessment techniques, under the conditions where environmental parameters such as permeability, porosity, diffusivity, distribution coefficient and so on were given as stochastic variables in each given range, and where attribute utility functions were given as fuzzy information.

Two dimensional convective dispersion equation was solved numerically under stochastic environmental parameters to get travel time distribution of a hazardous material, which should be used for determining fuzzy expectation of each attribute under appropriate conditions. Some examples of optimum well allocations were shown and the characteristics of the optimum alternatives and the proposed allocation method were examined.

KEYWORDS; Environmental monitoring, Fuzzy information, Groundwater pollution, Optimum design, Multi-attribute design problem, Solid waste disposal

1. 緒 言

地下水層(土壌・地下水)を合理的に管理するためには、潜在的な汚染原因行為の事前評価を十分に行うとともに、地下水層の保全状況を実測データに基づいて確認する作業が不可欠である。環境モニタリングシステムは、対象物質の実測データを用いて設計されることが望ましい。しかしながら、地下水層中での物質の移動速度は遅く、一度汚染した地下水層の浄化・回復は事実上不可能である等の地下水汚染の特徴⁽¹⁾を考慮すると、汚染物質の実測データを得てモニタリングシステムを設計するのでは手後れであることが多い。また、実測データが得られるためには何らかのモニタリングシステムが配備されていない限り不可能である。それ故、地下水層を合理的に管理するためには、潜在的な汚染原因行為の実施に先行して環境モニタリングシステムを配備する必要がある。

筆者等は、既に前報⁽²⁾で、一般廃棄物の想定埋立処分場周辺に地下水汚染監視用井戸群を最適配置する方法について、関連情報が確定的に与えられるとの前提条件の下で検討するとともにその配置例を示した。モニタリングシステムを配置するためには、種々の特性値を入手する必要があるが、これらの特性値が確定値として与えられることは一般には稀であると考えられる。環境パラメータのように、文献値や現場調査結果等から、ある範囲に変動する量として、或いは効用関数のように価値判断の主観的あいまいさを有する量として設定されることになる。本研究では、前報で提示した最適配置手法の基本的枠組みを踏襲し、関連情報が確定的には与えられない場合にも適用できるように同手法を拡張することを試みる。

* 京都大学工学部衛生工学教室 (Dept. Environ. & Sanitary Engg., Kyoto Univ.)

** 松下電器産業株式会社 (Matsushita Electric Co., Ltd.)

2. 最適配置手法

2.1 最適配置の考え方

本研究において設定する多属性設計問題の解、すなわち決定すべき設計変数はモニタリング井戸の数と位置である。最適なモニタリング井戸の数と位置は、前報⁽²⁾と同じく代替案の有する4属性が同時に満たされる、すなわち(1)できるだけ速く(迅速性)、(2)確実に(確実性)、(3)少数のモニタリング井戸で(経済性)、かつ、(4)モニタリング井戸に故障が生じても余裕をもって(冗長性)汚染を監視できるように決定する必要がある。採用した4属性の計量尺度は同一ではないので、各属性の効用(価値、満足度)を主観的に評価して属性効用値(価値、満足度)とし、これを加法的に結合して代替案の総合効用(価値、満足度)を設定することにする。総合効用が最大の代替案を最適案とする。

2.2 最適案の選定手順

すでに述べたように、モニタリング計画は少なくとも廃棄物の処分作業が実施される以前に策定しておく必要がある。有害物質の輸送媒体である地下水の流況(流れ場)に関する情報は得られても、物質の流動(濃度場)に関するデータは得られていないのが普通である。従って、地下水汚染監視のための井戸群を配置するためには、まず有害物質の挙動を推定する必要がある。あるいは、現に汚染が進行しつつある場所やその恐れのある場所のモニタリングを強化する場合には、濃度場に関する限られた実測データによる条件づけを行ったシミュレーション⁽³⁾を実行することにより濃度場推定の不確実性を減少させることになる。このシミュレーションの直接の目的は、想定漏出位置から漏出した有害物質がモニタリング井戸に達するまでに要する時間(トラベルタイム: TVLT)を得ることである。前報でも述べたように、最適代替案はTVLT分布を基礎にして選定されることになる。すなわち、モニタリング井戸の最適配置手順は有害物質の非定常挙動を推定する段階と、最適案を選定する段階とから構成される。この手順の概略をFig. 1に示す。前者の段階については前報⁽²⁾で詳述しているので、本報では主として後者について検討する。

2.3 必要な情報とその特性

Fig. 1に示す最適案選定の各手順において用いる情報の種類と性質及び本研究におけるそれらの処理方法を整理してTable 1に示す。

(A) 地層特性

有害物質のTVLT分布を推定するシミュレーションに必要な地層特性は、地層の間隙率 f 、地下水位 H 、透水係数(厳密には透水係数を算定するKozenyの公式の、間隙率以外の係数)、土壌密度 ρ 、および分散能 α_L, α_T である。これらは、廃棄物埋立処分場の地下水流動を把握する事前調査によって入手される。調査の密度を増すとその変動範囲は狭くなると思われるが、これらの特性値はある範囲内に変動するのが普通である。変動特性(分布関数)を想定する根拠も乏しいので、ここではこれらの特性値が後述する範囲内(後述のTable 2参照)に一樣に確率変動すると仮定する。この結果、TVLTも確率変数となる。

(B) 吸着特性

有害物質の土壌への吸着特性は分配係数 k_d を用いて定量化する。物質を定めて実験条件を固定し、例えばバッチ法により繰り返し測定しても、分配係数はある範囲内に変動する。ここでは k_d もある範囲内に一樣に変動する確率変数とする。 k_d の変動はTVLTの変動の原因となる。

(C) 漏出位置

検討対象の処分場敷地は一辺10 mの正方形格子網で覆い、全ての格子点はモニタリング井戸の候補位置に、また廃棄物埋立区域内の格子点は有害物質の想定漏出位置となる(後述のFig. 3参照)。格子点が現実の漏出位置を代表するとの保証はないので、これがあいまいさの原因となる。計算機の記憶容量等の制約もあるが、このあいまいさは格子間隔を

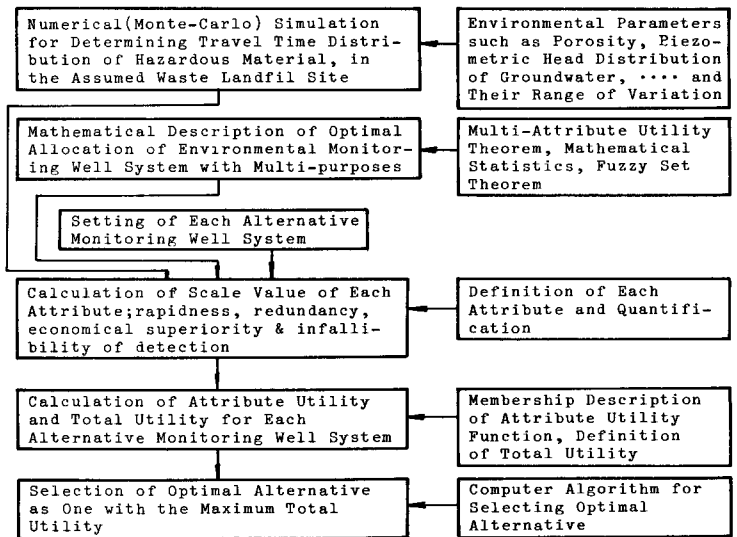


Fig. 1 Flow of Procedures, Used in This Study for Selecting Optimum Monitoring Well Allocation

細かくすることや、格子をずらすことによって処理することができる。このあいまいさは、井戸配置結果に影響を及ぼす主要な原因にはなりにくいと考えられる。

(D) 漏出濃度

有害物質の漏出濃度は、そこに何がどのように埋められているかによって支配される。言い換えると、埋められている廃棄物の種類(後述するファジィ情報として与えられると考えられる)と、種類の明確な廃棄物からの有害物質の漏出濃度(恐らくは埋立環境に支配される確率情報になると考えられる)とによって定まる。本研究では、ある範囲に一樣に変動する確率変数とする。廃棄物の種類に関するファジィ情報や溶出試験等の結果が得られれば、その変動範囲が狭くなることになる。漏出濃度は時間的に変動する。漏出濃度の経時変化を設定するに足る基礎データが乏しいので、ここでは漏出濃度の定常性を仮定する。また、漏出の確率は漏出位置によらず一定であるとする。

(E) 漏出開始時刻と継続時間

モニタリング井戸は、埋立用施設が整備されていても、有害物質の漏出を想定して配置することになる。埋立開始と共に漏出の可能性があり、一度漏出を開始した有害物質が自然に漏出を停止するとは考え難い。ここでは、埋立開始と共に漏出も開始し、以後漏出探知の後、対策を実施するまで漏出が継続するものとする。

(F) 効用関数

代替案の4属性の効用は、意思決定者の主観的価値判断に基づいて決定される。あるいは意思決定者の選好構造を反映して計画策定者により設定される。後述するように、この決定が確定的にされることは稀で、あいまいさ(意味のあいまいさ、主観的あいまいさ)を伴うのが普通である。

(C) 効用の重み

効用と同じく意思決定者の価値判断を通じて主観的に決定されるものであるから、あいまいさを伴うのが普通である。効用関数をファジィ量としているので、問題設定を簡潔にするためここでは各属性の重みは確定的に与えられると仮定する。重みも同時にファジィ量とする場合については別の機会に報告する。

2.4 最適配置問題の設定

モニタリング井戸配置の代替案の4属性を以下のように定義する。

迅速性 (X_1) : 各漏出位置から漏出する有害物質が、代替案を構成する井戸のいずれかによって探知されるのに要する時間。

冗長性 (X_2) : 代替案を構成する井戸のいずれかが故障し、かつ汚染物質が探知される確率。

経済性 (X_3) : モニタリング井戸群の建設・運用に要する費用。

確実性 (X_4) : 任意の漏出位置から漏出した有害物質を、代替案を構成するいずれかの井戸で探知できる確率。

Keeney⁽⁴⁾ によると、意思決定者の選好構造が選好独立であ

Table 1 Kind, Characteristics and Treatment of Each Parameter and/or Information, Used in This Study

Kind of Parameters and/or Information		Characteristics of Variation	Treatment of Parameters and/or Information
A) Hydrogeological	Porosity f , Soil density ρ , Piezometric head H , Permeability k , Diffusivity, α_L , α_T	Stochastic & Steady	Uniform distribution is assumed in each given range of variation.
B) Sorptive-desorptive	Distribution coef. kd	Stochastic & Steady	Same as above.
C) Release point of hazardous material		Deterministic & Steady	Material release at node-point selected in the burial zone.
D) Release concentration of hazardous material		Stochastic & Steady	Uniform distribution is assumed.
E) Release starting time and continuing period		Instant and permanent	Assumption
F) Attribute utility		Fuzzy	Express by membership function.
G) Weight of attribute utility		Deterministic	Assumption

Table 2 Assumed Range of Each Parameter, Used for Determining Travel Time Distribution of Hazardous Material by Monte-Carlo Simulation

Parameter	Unit	Assumed Range of Variation			Reference
		Upper Limit	Median	Lower Limit	
Piezometric head distribution, H	m	$1.1 \times H$	H (in Fig. 2)	$0.9 \times H$	Fig. 2 for Median distribution
Porosity distribution, f	—	$1.1 \times f$	f (in Fig. 2)	$0.9 \times f$	Same as above
Parameter in Kozeny's equation except porosity	cm/day	6.8×10^4	3.4×10^4	1.7×10^4	
True density of soil, ρ	g/cm	2.92	2.65	2.39	
Distribution Coef., kd	ml/g	10.0	5.0	2.5	
Release concentration of hazardous material		$10 \times C_0$	C_0	$0.1 \times C_0$	Detection limit is $10^{-4} C_0$
Diffusivity, α_L	cm	10.0	1.0	0.1	$\alpha_T = 0.2 \alpha_L$

れば総合効用は属性効用の和で与えられるという。ここでは便宜的に効用関数が加法的であると仮定して、第 ℓ 代替案の総合効用 U_ℓ を、式(1)で与えることにする。

$$U_\ell = \sum_{m=1}^4 W_m u(X_{m,\ell}) \quad (1)$$

ここに、 W_m は第 m 属性の重み、 $u(X_{m,\ell})$ は第 ℓ 代替案の第 m 属性の尺度値 $X_{m,\ell}$ の属性効用である。最適代替案 ℓ^* は式(2)で与えられる。

$$U_{\ell^*} \equiv \max_{\ell} U_\ell = \max_{\ell} \left\{ \sum_{m=1}^4 W_m u(X_{m,\ell}) \right\} \quad (2)$$

3. 最適配置のケーススタディ

3.1 想定した一般廃棄物埋立処分場

想定した廃棄物埋立処分場敷地をFig. 2に示す。図中の実線は地下水位の、破線は透水係数のそれぞれ想定中央値の分布を示している。他の環境パラメータについても十分な調査により、その代表値と変動範囲(Table 2参照)が把握されているものとする。

3.2 有害物質挙動の数値シミュレーション

環境パラメータがTable 2に示す範囲内で一様に変動することを除けば、シミュレーションの内容は前報⁽²⁾と全く同じである。また、Table 2中の各パラメータの中央値は前報で用いた値と一致している。有害物質の想定漏出位置をFig. 3に示す。

シミュレーションは一様乱数を発生させてパラメータの組を得、TVLTを計算することとし、この計算を100回繰り返した。シミュレーション回数は300回まで試行したが、最適配置に対する X_1 尺度値(式(3)参照)の頻度分布の試行回数による変化は高々3%程度であり、 X_4 尺度値の場合はこれよりも小さくなる。計算に要する時間も考慮して、試行回数は100回に設定した。

3.3 属性尺度値の設定

前述の定義に従い、第 ℓ 代替案の属性尺度値 $X_{m,\ell}$ を下式により定量化する。

$$X_{1,\ell} = \frac{1}{KEND} \sum_{k=1}^{KEND} M_{in} \{ TVLT(i,j,k) | (i,j) \in \mathfrak{L} \} \quad (3)$$

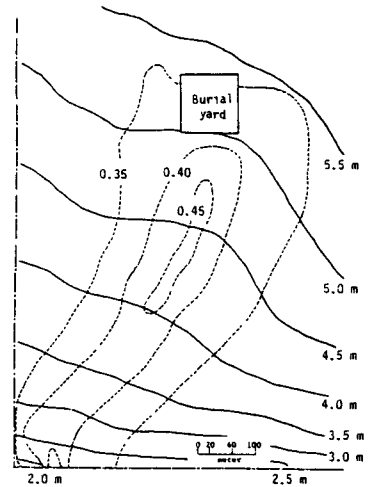
$$X_{2,\ell} = 1.0 - \sum_{i=1}^{NOMP_\ell} \frac{1}{NOMP_\ell} C_i P(1-P)^{NOMP_\ell-i} (1-X_{4,\ell}^i) \quad (4)$$

$$X_{3,\ell} = (NOMP_\ell)^s \quad (5)$$

$$X_{4,\ell} = M_{in} \int_0^D f \left[M_{in} \{ TVLT(i,j,k) | (i,j) \in \mathfrak{L} \} \right] dTVLT(i,j,\ell) \quad (6)$$

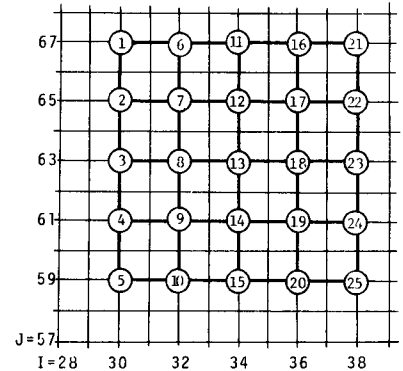
ここに、KENDは想定漏出位置の数(25)、 $NOMP_\ell$ は第 ℓ 代替案を構成するモニタリング井戸の数、 $\mathfrak{L}$ は第 ℓ 代替案を構成する井戸の位置の集合、すなわち、 $\mathfrak{L} = \{(1,j)_1, (i,j)_2, \dots, (1,j)_{NOMP_\ell}\}$ 、 P は1つの井戸の故障確率(0.1)、 C は組み合わせ(Combination)、 s は規模の経済効果を表す定数(0.9)、 $f(*)$ は第 ℓ 代替案の井戸群で第 k 漏出位置から漏出する有害物質を探知するのに要する時間の確率密度関数であり、100回のモンテカルロシミュレーションにより算定される。 D は確実性を評価する場合の評価時間(2000日)、 $X_{4,\ell}^i$ は第 ℓ 代替案を構成する $NOMP_\ell$ 個の井戸の内 i 個が故障したときの確実性尺度値である。

モニタリング井戸における地下水中有害物質濃度が検出限界濃度(代表漏出濃度 C_0 の 10^{-4} 倍に設定した)を超えると必ず探知されるものとし、このとき有害物質がモニタリング井戸に達したと判定することにする。従って、井戸が1つの場合には、有害物質が探知されるのに要する時間は $TVLT(i,j,k)$ と一致することになる。複数の井戸で代替案が構成される場合には、有害物質が探知されるのに要する時間は、各井戸に対する $TVLT(i,j,k)$ の最小時間で与えられると



Solid line is for piezometric head distribution, broken line is for porosity distribution and dotted line is for site boundary

Fig. 2 Assumed Municipal Solid Waste Burial Site



Numerical Value in the circle means identification number of each assumed release point.

Fig. 3 Assumed Allocation of Release Points of Hazardous Materials

した。さらに、全ての漏出位置から漏出する有害物質を複数の井戸で監視する場合の探知所要時間($X_{1,\ell}$)は、TVLT(i,j,k)の(i,j) $_{\ell}$ についての最小値の、 k についての期待値、すなわち式(3)で与えられることになる。ここに、各漏出位置における有害物質の漏出確率は等しいものと仮定している。

式(3)～(6)により明らかのように、 $X_{1,\ell}$ は確率変量に、 $X_{2,\ell} \sim X_{4,\ell}$ は代替案ごとに確定値となる。

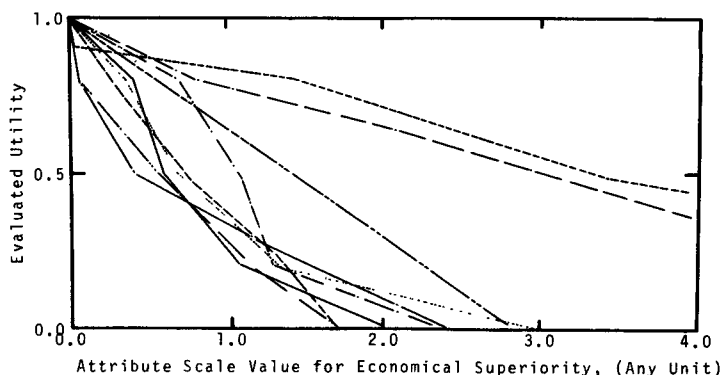
3.4 属性効用の設定

属性効用は、属性尺度値 $X_{m,\ell}$ の効用を主観的に判断することによって定められる。意思決定者が1人の場合はその人の、多数の場合はその集団の価値判断の構造を反映するものであり、通常はアンケート(直接法)や、過去的意思決定事例を調査する(間接法)等の方法で把握される。効用は、 $X_{m,\ell}$ が最も望ましい値をとるときに1、最も劣る値をとるときに0となるように定められる。Fig.4は、10名の被験者に対して廃棄物管理(処理・処分)に要する費用の効用をアンケートすることにより得た効用関数の例である。⁽⁵⁾効用関数をアンケートによって設定する場合には、離散的に属性尺度値を指定し、その効用の評価値を得ることになるが、この評価は主観的に行われるので、ある程度のゆらぎが出ることは避けられない。

効用の評価値に主観的あいまいさがある場合には、効用を一つの効用関数で表現することはできない。そこで、ファジィ集合論で用いられる帰属度関数を用いて、効用をそのあいまいさも含めて定量化することを試みる。すなわち、効用を5段階の効用レベルに区分し、各効用レベルへの帰属の程度を評価することにより、効用関数(Fig. 5 (A) 参照)を帰属度関数(Fig. 5 (B) 参照)を用いて記述することを試みる。ここでは、前報と同じく効用関数は平方根関数で表せるものと仮定し、5段階の効用レベルは便宜的にTable 3で与えられる特性を有する言語変数E～Nで表現できるものとする。

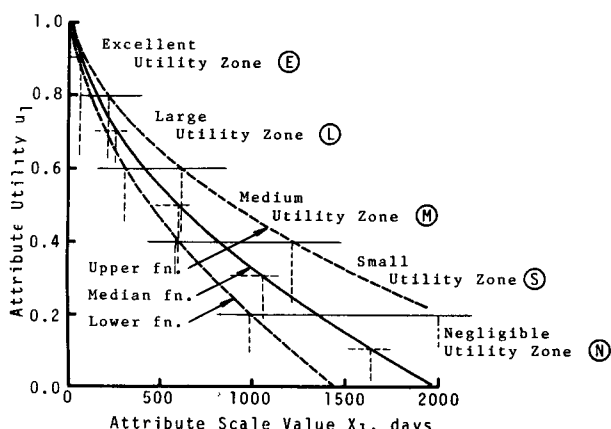
(A) 帰属度関数

迅速性($X_{1,\ell}$)に対する属性効用がFig. 5 (A)のようにある幅をもって定まるとき、効用の中央関数 $u^M(X_{1,\ell})$ および上・下界関数 $u^U(X_{1,\ell})$ 、 $u^L(X_{1,\ell})$ はそれぞれ平方根関数を用いて次式で記述できると仮定する。前報での検討との連続性を保証するために、ここでは中央関数を前報で用

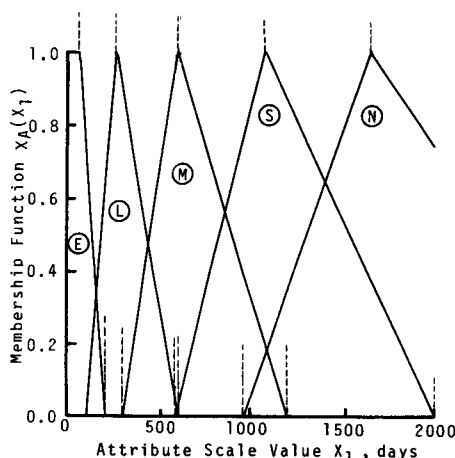


Each line in the figure is given by hypothetical decision-makers.

Fig. 4 An Example of Attribute Utility Evaluation for Economical Superiority in Municipal Solid Wastes Management Process, Taken from Literature (5)



(A) Variation of Attribute Utility u_1 and Its Classification into Five Zones



(B) Description of Fuzzy Attribute Utility by Membership Functions

Fig. 5 Fuzziness in Attribute Utility Evaluation for Rapidness and the Description by Membership Functions

いた効用関数に一致させ、上・下界関数は中央関数の上下に等しい効用の変化幅が与えられるように設定した。

$$\begin{cases} u^U(X_{1,\ell}) = 1.09 - 1.99 \times 10^{-2} \sqrt{X_{1,\ell}} \\ u^M(X_{1,\ell}) = 1.11 - 2.48 \times 10^{-2} \sqrt{X_{1,\ell}} \\ u^L(X_{1,\ell}) = 1.13 - 2.98 \times 10^{-2} \sqrt{X_{1,\ell}} \end{cases} \quad (7)$$

Table 3 Attribute Utility, Classified and Used in This Study

Fuzzy Class of Utility	Symbol	Value of Attribute Utility		Reference
		Representative	Range	
Excellent Utility	E	0.9	0.8 - 1.0	Fig. 5(A), Fig. 6(A), Eq. (7), Eqs. (8)-(10)
Large Utility	L	0.7	0.6 - 0.8	
Medium Utility	M	0.5	0.4 - 0.6	
Small Utility	S	0.3	0.2 - 0.4	
Negligible Utility	N	0.1	0.0 - 0.2	

Fig. 5 (A) において $X_{1,\ell} = 1.000$ 日とすると、その効用は非常に小さい (N) と判断される場合、小さい (S) と判断される場合および中程度 (M) と判断される場合があることがわかる。このあいまいさは効用判断のあいまいさを反映したものであり、確率で表現されるあいまいさ (randomness : 生起のあいまいさ、客観的あいまいさ) と区別して、ファジネス (fuzziness : 意味のあいまいさ、主観的あいまいさ) と呼ばれる。Fig. 5 (B) は、尺度値 $X_{1,\ell}$ の5段階のファジィ効用レベル E ~ N に対する帰属度 $x_{E \sim N}(X_{1,\ell})$ を用いて、Fig. 5 (A) の効用関数を表現する方法である。ここでは帰属度関数の特定の位置の値を下式で定め、これらの中で帰属度関数は線形変化すると仮定する。

$$\begin{aligned} x_E(X_{1,\ell}) &= \begin{cases} 1.0 & \dots\dots\dots X_{1,\ell} \leq \{ X_{1,\ell} \mid u^M(X_{1,\ell}) = 0.9 \} \\ 0.0 & \dots\dots\dots X_{1,\ell} \geq \{ X_{1,\ell} \mid u^U(X_{1,\ell}) = 0.8 \} \end{cases} \\ x_L(X_{1,\ell}) &= \begin{cases} 0.0 & \dots\dots\dots X_{1,\ell} \leq \{ X_{1,\ell} \mid u^L(X_{1,\ell}) = 0.8 \} \\ 1.0 & \dots\dots\dots X_{1,\ell} = \{ X_{1,\ell} \mid u^M(X_{1,\ell}) = 0.7 \} \\ 0.0 & \dots\dots\dots X_{1,\ell} \geq \{ X_{1,\ell} \mid u^U(X_{1,\ell}) = 0.6 \} \end{cases} \\ x_M(X_{1,\ell}) &= \begin{cases} 0.0 & \dots\dots\dots X_{1,\ell} \leq \{ X_{1,\ell} \mid u^L(X_{1,\ell}) = 0.6 \} \\ 1.0 & \dots\dots\dots X_{1,\ell} = \{ X_{1,\ell} \mid u^M(X_{1,\ell}) = 0.5 \} \\ 0.0 & \dots\dots\dots X_{1,\ell} \geq \{ X_{1,\ell} \mid u^U(X_{1,\ell}) = 0.4 \} \end{cases} \\ x_S(X_{1,\ell}) &= \begin{cases} 0.0 & \dots\dots\dots X_{1,\ell} \leq \{ X_{1,\ell} \mid u^L(X_{1,\ell}) = 0.4 \} \\ 1.0 & \dots\dots\dots X_{1,\ell} = \{ X_{1,\ell} \mid u^M(X_{1,\ell}) = 0.3 \} \\ 0.0 & \dots\dots\dots X_{1,\ell} \geq \{ X_{1,\ell} \mid u^U(X_{1,\ell}) = 0.2 \} \end{cases} \\ x_N(X_{1,\ell}) &= \begin{cases} 0.0 & \dots\dots\dots X_{1,\ell} \leq \{ X_{1,\ell} \mid u^L(X_{1,\ell}) = 0.2 \} \\ 1.0 & \dots\dots\dots X_{1,\ell} = \{ X_{1,\ell} \mid u^M(X_{1,\ell}) = 0.1 \} \\ 0.0 & \dots\dots\dots X_{1,\ell} \geq \{ X_{1,\ell} \mid u^U(X_{1,\ell}) = 0.0 \} \end{cases} \end{aligned}$$

これらの関係を図示したものが Fig. 5 (B) である。Fig. 5 (B) において $X_{1,\ell} = 1.000$ 日とすると、その N, S, M レベルへの帰属度はそれぞれ 0.04、0.84、0.34 となり、 $X_{1,\ell} = 1.000$ 日の効用が非常に小さい (N)、小さい (S)、中程度 (M) と判断される場合があることを示している。Fig. 5 (B) が Fig. 5 (A) のあいまいな効用関数の一つの定量的表現であることは明らかである。

他の属性に対しても全く同様にして帰属度関数を設定することができる。冗長性、経済性、確実性に関する効用関数を式 (8) ~ (9) に、また冗長性に対する帰属度関数の設定例を Fig. 6 に示す。

$$\begin{cases} u^U(X_{2,\ell}) = 0.2 + 0.8 \sqrt{X_{2,\ell}} \\ u^M(X_{2,\ell}) = \sqrt{X_{2,\ell}} \\ u^L(X_{2,\ell}) = -0.2 + 1.2 \sqrt{X_{2,\ell}} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} u^U(X_{3,\ell}) = 1.52 - 0.52\sqrt{X_{3,\ell}} \\ u^M(X_{3,\ell}) = 1.65 - 0.65\sqrt{X_{3,\ell}} \\ u^L(X_{3,\ell}) = 1.77 - 0.77\sqrt{X_{3,\ell}} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} u^U(X_{4,\ell}) = 0.2 + 0.8\sqrt{X_{4,\ell}} \\ u^M(X_{4,\ell}) = \sqrt{X_{4,\ell}} \\ u^L(X_{4,\ell}) = -0.2 + 1.2\sqrt{X_{4,\ell}} \end{cases} \quad (10)$$

$0 \leq x_A(X_{m,\ell}) < 1$ ($A \in E, L, M, S, N$)である。また、後でファジィ確率を定義するときに必要なので、 $x_A(X_{m,\ell}) / \sum_A x_A(X_{m,\ell})$ を新たに $x_A(X_{m,\ell})$ と置くことにより、帰属度関数を直交化⁽⁶⁾しておくことにする。すなわち、

$$\sum_A x_A(X_{m,\ell}) = 1, \text{ 但し } A \in E, L, M, S, N \quad (11)$$

とし、以後 $x_A(X_{m,\ell})$ は全て直交化してあるものとする。

(B) 属性効用

第 m 属性の属性効用 $u(X_{m,\ell})$ を次式のように期待値で定量化する。

$$\begin{aligned} u(X_{m,\ell}) &= \sum_A u_A(X_{m,\ell}) P_A(X_{m,\ell}) \\ &= \int \sum_A u_A(X_{m,\ell}) x_A(X_{m,\ell}) \\ &\quad \cdot f(X_{m,\ell}) dX_{m,\ell} \quad (12) \end{aligned}$$

ここに、 $u_A(X_{m,\ell})$ は、属性尺度値 $X_{m,\ell}$ がファジィ効用レベル A ($A \in E, L, M, S, N$)に属するときの効用であり、Table 3に示す通り、 $A = E, L, M, S, N$ のときそれぞれ0.9、0.7、0.5、0.3、0.1という値をとる。

一方、 $P_A(X_{m,\ell})$ は、 $X_{m,\ell}$ が効用のファジィレベル A に属するファジィ確率であり次式で定義される。⁽⁶⁾

$$\begin{aligned} P_A(X_{m,\ell}) &= \int x_A(X_{m,\ell}) dP(X_{m,\ell}) \\ &= \int x_A(X_{m,\ell}) f(X_{m,\ell}) dX_{m,\ell} \quad (13) \end{aligned}$$

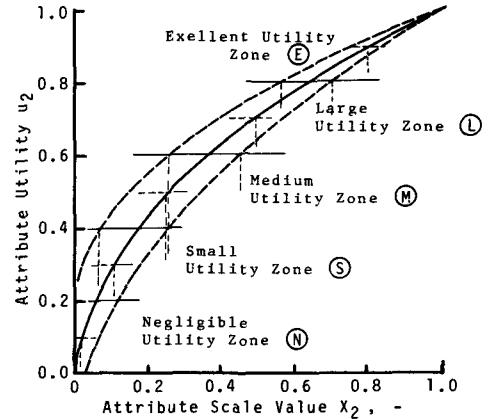
$f(X_{m,\ell})$ は $X_{m,\ell}$ の通常の意味での確率密度関数である。式(11)より、

$$\sum_A P_A(X_{m,\ell}) = \int \sum_A x_A(X_{m,\ell}) f(X_{m,\ell}) dX_{m,\ell} = \int f(X_{m,\ell}) dX_{m,\ell} = 1$$

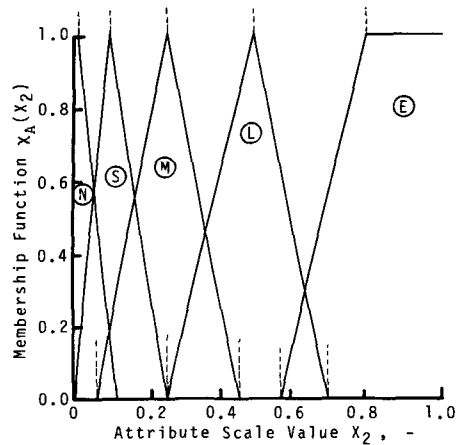
となり、 $X_{m,\ell}$ は必ずいずれかのファジィ効用レベルに属することになる。

$X_{1,\ell}$ 以外の属性尺度は確率変量ではないので、結局式(12)から、それぞれの属性効用は次式で与えられることになる。

$$\begin{cases} u(X_{1,\ell}) = \int \sum_A u_A(X_{1,\ell}) x_A(X_{1,\ell}) f(X_{1,\ell}) dX_{1,\ell} \\ u(X_{2,\ell}) = \sum_A u_A(X_{2,\ell}) x_A(X_{2,\ell}) \\ u(X_{3,\ell}) = \sum_A u_A(X_{3,\ell}) x_A(X_{3,\ell}) \\ u(X_{4,\ell}) = \sum_A u_A(X_{4,\ell}) x_A(X_{4,\ell}) \end{cases} \quad (14)$$



(A) Variation of Attribute Utility u_2 and Its Classification into Five Zones



(B) Description of Fuzzy Attribute Utility by Membership Functions

Fig. 6 Fuzziness in Attribute Utility Evaluation for Redundancy and the Description by Membership Functions

例えば、 $x_A(X_{1,\ell})$ はFig. 5 (B)で与えられ、 $f(X_{1,\ell})$ は式(6)に関連して述べたように有害物質の移動についてのモンテカルロシミュレーション結果から算定されることになる。効用がファジイでない場合には、帰属度関数 $\chi_A(X_{m,\ell})$ が、通常の確率の定義に使用される特性関数 $\lambda_A(X_{m,\ell})$ ($X_{m,\ell} \leq A$ のとき1、 $X_{m,\ell} \not\leq A$ のとき0)となるので、式(14)は、

$$\begin{cases} u(X_{1,\ell}) = \int u^M(X_{1,\ell}) dX_{1,\ell} \\ u(X_{2,\ell}) = u^M(X_{2,\ell}) \\ u(X_{3,\ell}) = u^M(X_{3,\ell}) \\ u(X_{4,\ell}) = u^M(X_{4,\ell}) \end{cases} \quad (15)$$

と簡単になる。

3.5 重みの設定

4つの属性効用に等しい重みを与えることを基準にする。前報で採用したZelenyの改良重みや、他の重みを採用することによるモニタリング井戸配置の変化についても検討することにする。 $\sum_m W_m = 1$ である。

3.6 総合効用の設定

既に述べたように、第 ℓ 代替案の総合効用は式(1)で与えられるものとする。

3.7 最適配置

選定したモニタリング井戸の上位5代替案の特性をTable 4に、また上位3代替案の配置図をFig. 7に示す。Fig. 7の配置は、本研究において設定した条件下での最も基本的な配置であり、以下に考察における比較の基準となる。Table 4からも明らかなように、上位4代替案の総合効用は等しく、属性尺度の段階でわずかの差が認められるにすぎない。Table 4には、迅速性の尺度値として X_1 の期待値を参考のために掲げている。すでに述べたように、 X_1 は確率変数である。

Table 4 Superior Top Five Alternatives of Monitoring Well Allocation, in Descending Order of Superiority

No.	Total U	Attribute Utility				Attribute Scale Value				Location of Monitoring Points
		u_1	u_2	u_3	u_4	X_1^*	X_2	X_3	X_4	
1	0.822	0.890	0.900	0.598	0.900	409.4	0.761	2.688	0.840	(30,58)(32,63)(36,59)
2	0.822	0.890	0.900	0.598	0.900	414.7	0.761	2.688	0.840	(30,58)(32,61)(36,59)
3	0.822	0.889	0.900	0.598	0.900	384.1	0.765	2.688	0.840	(30,59)(32,63)(36,59)
4	0.822	0.889	0.900	0.598	0.900	397.7	0.765	2.688	0.840	(30,59)(32,61)(36,59)
5	0.821	0.885	0.900	0.598	0.900	443.7	0.778	2.688	0.770	(30,59)(32,59)(36,59)

(Note) Expected value of X_1 is listed for reference. Equal weight is given for each attribute.

最適代替案は3つの井戸で構成され、これらの井戸において、漏出した有害物質を2,000日以内に探知できる確率(X_4)は、0.84、井戸が故障してもなお2,000日以内に有害物質を探知できる確率(X_2)は0.76、また探知するのに要する時間の期待値は409日である。

最適代替案を構成する3井戸の役割を明確にするために、有害物質の漏出位置 k をNo.13 (Fig. 3 参照)に固定した場合の、各井戸におけるTVLT(i, j, k)の頻度分布および井戸群に対する頻度分布 $\min_{(i,j)} \{TVLT(i, j, k) | (i, j) \in \mathcal{L}\}$ (式(3)参照)をTable 5に示す。漏出位置がNo.13に限られている場合には、最適配置により有害物質を迅速に探知する機能は位置(32,63)の井戸により完全に支配され、位置(36,59)の井戸は全く機能しないことを示している。また、位置(30,58)において4,000日以内に有害物質を探知する頻度の和は100であるから、仮に井戸(32,63)が故障しても、No.13漏出位置からの漏出有害物質はこの最適配置(特に井戸(30,58))により、迅速性は損なわれるものの、確実に探知されることになる。

また、最適代替案に対する迅速性尺度 X_1 (式(3)参照)の頻度分布を、代替案を構成する個々の井戸に対するそれと共にTable 6に示す。ここでは、有害物質は全ての漏出位置から漏出するものとしている。一方、個々の漏出位置から

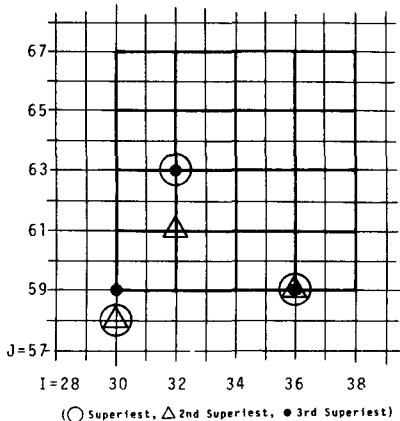


Fig. 7 Optimum Allocation of Monitoring Wells, Determined under the Reference Conditions

漏出する有害物質を、最適代替案によって 2,000 日以内に探知する確率を Fig. 8 に示す。25 個の漏出位置の内、探知確率の最小のものは 0.84 である。すなわち、この配置による確実性尺度値は 0.84 となる (式 (6)、Table 4 参照)。Fig. 8 中の数値が小さい漏出位置ほど、図示の 3 井戸によるモニタリングの確率は小さい。それ故、システムの探知確率を向上させるためには、それらの漏出位置に対する探知確率の大きい位置に井戸を追加すればよいことになる。

4. 考察

4.1 最適配置に影響を及ぼす要因

(A) 総合効用関数

式 (1) で与えられる総合効用 に代て、式 (16) を用いる場合の上位 3 代替案の配置を Fig. 9 に第 1 代替案の特性を Table 7 に示す。

$$U_{\ell} = M_{\ell n}.$$

$$\{W_m \cdot u(X_{m,\ell})\}$$

(16)

第 ℓ 代替案の総合効用が、代替案の属性効用の内最小のもので与えられるとする考え方である。この考え方では、いずれか 1 つの属性効用が 0 であればその代替案は排除されることになる。Fig. 9 の配置は、比較の基準になる Fig. 7 の配置から、廃棄物理立区域内の井戸を 1 つ除去して得られる配置に、極めて近いといえ

Table 5 Frequency Distribution of Time, Required for Detecting Hazardous Material Which is Released at No.13 Release Point, Calculated for All and Each Monitoring Well of the Optimum Alternative

TVLT (days)	Location of Monitoring Point			
	All three	(30,58)	(32,63)	(36,59)
0 ~ 100	86	0	86	0
100 ~ 200	12	0	12	0
200 ~ 300	2	0	2	0
300 ~ 400	0	0	0	0
400 ~ 500	0	0	0	0
500 ~ 600	0	0	0	0
600 ~ 700	0	3	0	0
700 ~ 800	0	13	0	0
800 ~ 900	0	7	0	0
900 ~ 1000	0	4	0	0
1000 ~ 1100	0	9	0	0
1100 ~ 1200	0	5	0	0
1200 ~ 1300	0	7	0	0
1300 ~ 1400	0	6	0	0
1400 ~ 1500	0	5	0	0
1500 ~ 1600	0	3	0	0
1600 ~ 1700	0	7	0	0
1700 ~ 1800	0	2	0	0
1800 ~ 1900	0	3	0	0
1900 ~ 2000	0	5	0	0
2000 ~ 2100	0	2	0	0
2100 ~ 2200	0	7	0	0
2200 ~ 2300	0	0	0	0
2300 ~ 2400	0	6	0	0
2400 ~ 2500	0	1	0	0
2500 ~ 2600	0	2	0	0
2600 ~ 2700	0	1	0	0
2700 ~ 2800	0	0	0	0
2800 ~ 2900	0	1	0	0
2900 ~ 3000	0	1	0	0
3000 ~ 3100	0	0	0	0
3100 ~ 3200	0	0	0	0
3200 ~ 3300	0	0	0	0
3300 ~ 3400	0	0	0	0
3400 ~ 3500	0	0	0	0
3500 ~ 3600	0	0	0	0
3600 ~ 3700	0	0	0	0
3700 ~ 3800	0	0	0	0
3800 ~ 3900	0	0	0	0
3900 ~ 4000	0	0	0	0

Table 6 Frequency Distribution of the Attribute Scale Value X_1 for Rapidness, Calculated for All and Each Monitoring Well of the Optimum Alternative

TVLT (days)	Location of Monitoring Point			
	All three	(30,58)	(32,63)	(36,59)
0 ~ 100	37.48	10.28	12.60	14.60
100 ~ 200	11.40	3.64	3.52	4.24
200 ~ 300	9.04	3.28	2.60	3.24
300 ~ 400	6.64	3.68	2.04	2.12
400 ~ 500	5.28	2.44	1.80	2.20
500 ~ 600	4.76	2.96	1.32	1.96
600 ~ 700	4.12	3.16	1.12	1.48
700 ~ 800	4.20	2.96	1.36	2.24
800 ~ 900	2.40	2.24	1.36	1.12
900 ~ 1000	2.72	2.92	1.12	1.00
1000 ~ 1100	2.20	2.92	1.08	0.92
1100 ~ 1200	1.84	2.44	1.12	0.88
1200 ~ 1300	1.12	2.32	0.52	0.44
1300 ~ 1400	1.20	2.08	0.60	0.68
1400 ~ 1500	1.24	2.32	0.96	0.56
1500 ~ 1600	0.72	1.40	0.92	0.40
1600 ~ 1700	0.88	2.00	1.16	0.48
1700 ~ 1800	0.52	1.32	0.52	0.24
1800 ~ 1900	0.64	2.12	0.64	0.28
1900 ~ 2000	0.44	1.52	0.48	0.24
2000 ~ 2100	0.36	2.16	0.52	0.16
2100 ~ 2200	0.32	1.76	0.64	0.20
2200 ~ 2300	0.20	1.44	0.48	0.12
2300 ~ 2400	0.12	1.56	0.60	0.08
2400 ~ 2500	0.08	1.44	0.56	0.04
2500 ~ 2600	0.04	1.32	0.28	0.04
2600 ~ 2700	0.0	1.44	0.48	0.0
2700 ~ 2800	0.04	1.28	0.28	0.04
2800 ~ 2900	0.0	1.08	0.24	0.0
2900 ~ 3000	0.0	0.72	0.28	0.0
3000 ~ 3100	0.0	1.08	0.36	0.0
3100 ~ 3200	0.0	1.20	0.16	0.0
3200 ~ 3300	0.0	0.56	0.24	0.0
3300 ~ 3400	0.0	0.68	0.40	0.0
3400 ~ 3500	0.0	0.96	0.08	0.0
3500 ~ 3600	0.0	0.76	0.32	0.0
3600 ~ 3700	0.0	0.40	0.08	0.0
3700 ~ 3800	0.0	0.96	0.12	0.0
3800 ~ 3900	0.0	0.80	0.12	0.0
3900 ~ 4000	0.0	0.68	0.16	0.0

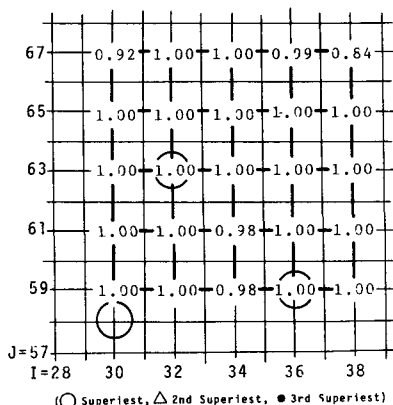


Fig. 8 Distribution of the Attribute Scale Value X_4 for Infallible Detection, Calculated for the Optimum Well Allocation Shown in the Figure

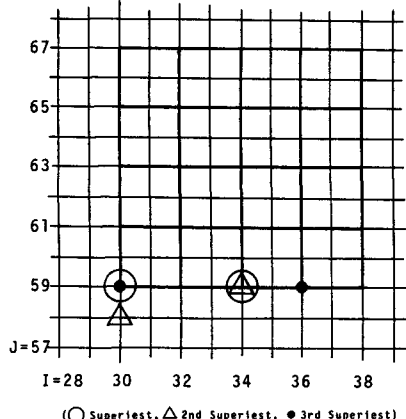


Fig. 9 Optimum Allocation of Monitoring Wells, Determined Using Max-Min Principle for Calculation of Total Utility

る。

(B) 属性効用関数

属性効用が式(15)で与えられる場合、すなわち効用関数がファジイではなく確定的に与えられる場合の上位3代替案の配置をFig.10に、第1代替案の特性をTable 7に示す。本研究では、記述の通り属性効用の上界関数と下界関数のほぼ平均値に一致するように中央関数を設定している。それ故、

Fig. 10の配置は、効用関数がファジイである場合の配置(Fig. 7参照)と極めてよく類似している。

(C) 重み

本研究では各属性に等しい重みを確定量として主観的に付与するケースを基本状態とした。この重みの配分を変更し、経済性に0.5、残り3属性にそれぞれ0.16を与えた場合の配置をFig.11(A)に、その第1代替案の特性をTable 7に示す。また、前報⁽²⁾で採用したZelenyの改良重み法で客観的に決定した重みを用いて選定した配置例をFig.11(B)に、その第1代替案の特性をTable 7に示す。

Fig. 11(A)はFig. 9と、また、Fig. 11(B)はFig. 7とそれぞれ一致している。

(D) 属性尺度値

本研究では、迅速性の属性効用を算定する段階でその期待値を用いたが、より簡単なケースとして迅速性尺度値を算定する段階でその期待値を用いることが考えられる。このような簡略化を行うと、得られる上位3代替案の配置は効用関数がファジイであるか否かによらずFig. 10と完全に一致した。

4.2 制約条件下での最適配置

(A) 単一井戸の

優劣

すでに得た最適井戸配置を概観すると、いずれの場合にも位置(30,58)、(30,59)、(34,59)、(36,59)等はモニタリング井戸の設定位置として選定される頻度が大きい。そこで、モニタリング井戸数を1つに限定して、その効用が大きいものから順に13番まで番号を付してFig.12に示した。上述の各位置はそれぞれ単一井戸位置としても相対的に大きい

効用を有する位置であることがわかる。Fig. 2からも推定できるように、地下水の流れは全体として廃棄物埋立区域の

Table 7 Characteristics of Each Determined Optimum Monitoring Well Location

Design Condition	Item	Total U	Attribute Utility				Weight				Attribute Scale Value				Fig.
			u ₁	u ₂	u ₃	u ₄	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	
Reference state		0.82	0.89	0.90	0.59	0.90	0.25	0.25	0.25	0.25	409	0.76	2.68	0.84	Fig. 7
Max Min principle		0.17	0.84	0.90	0.72	0.69	0.25	0.25	0.25	0.25	671	0.81	1.86	0.44	Fig. 9
Deterministic attribute utility function		0.75	0.62	0.87	0.58	0.91	0.25	0.25	0.25	0.25	384	0.76	2.68	0.84	Fig.10
Different subjective weight		0.77	0.85	0.90	0.72	0.70	0.16	0.17	0.50	0.17	616	0.81	1.86	0.49	Fig.11(A)
Objective Zeleny's weight		0.73	0.89	0.90	0.59	0.90	0.01	0.01	0.53	0.45	409	0.76	2.68	0.84	Fig.11(B)
Infallible detection constraint		0.67	0.90	0.90	0.20	-	0.33	0.33	0.33	-	181	0.79	5.01	1.00	Fig.13

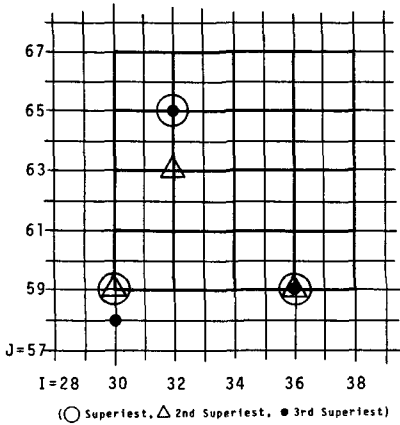
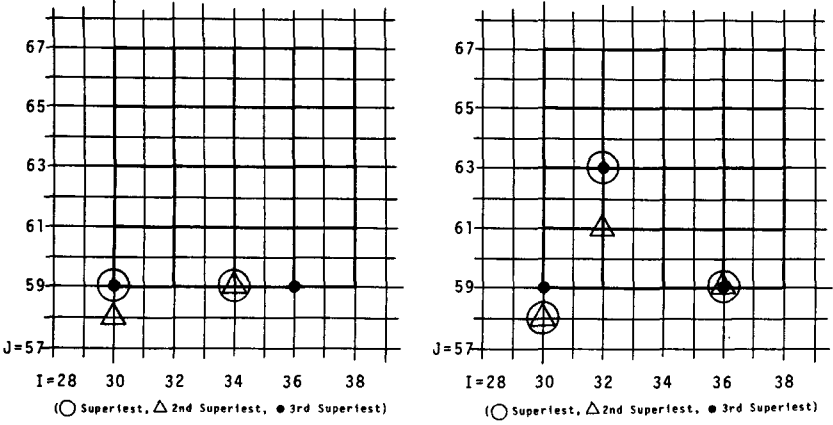


Fig. 10 Optimum Allocation of Monitoring Wells, Determined Using Deterministic Attribute Utility Functions



(A) Weight Determined Subjectively as $W_1=0.16, W_2=0.17, W_3=0.50$ and $W_4=0.17$
(B) Weight Determined Objectively by Zeleny's Method

Fig. 11 Optimum Allocation of Monitoring Wells, Determined for Different Weight

右上部から左下部に向かっており、従って想定漏出位置から漏出した有害物質は上述の各位位置に向かって移送されることになる。一般的に、有害物質の輸送媒体である地下水の流下側において、廃棄物埋立区域の境界上の位置がモニタリング井戸の設定位置としての適性が高いといえよう。

(B) 井戸数を設定する場合

モニタリング井戸配備に経済的制約がある場合には、設定する井戸の数が制限されることになる。井戸数を1～8のそれぞれに固定した場合の最適代替案をTable 8に示す。Table 8は、汚染物質の全ての漏出位置からの漏出をモニターする、すなわち確実性の尺度値(X₄)を1.0にするためには6個以上の井戸が必要になることを示している。経済性尺度値X₃が大きくなる(効用は小さくなる)につれて、他の3属性の効用は大きくなる。これは、経済性の効用とその他の効用との間にトレードオフ関係があることを意味している。

(C) 確実探知の制約条件を課する場合

前報⁽²⁾では確実探知(X₄ = 1.0)を絶対制約条件とした。そこで、いずれの漏出位置から漏出した有害物質であっても、2,000日以内に必ず探知できるとの制約を課して最適配置を選定した。結果をFig.13およびTable 7に示す。確実探知の要件を満たすためには、必然的に井戸の数が多くなり冗長性の効用が大きくなる反面、経済性の効用は小さくなる(Table 7参照)。Fig. 13の最適配置は前報の対応する最適井戸配置(前報、Fig.10(B))と極めてよく類似している。両者の差異は、前報では地層特性等のパラメータが確定値として与えられるのに対し、本報ではそれらが確率変動していることに起因している。

4.3 最適配置手法の特性

本研究で構成した最適モニタリング井戸配置の選定手法の基本的枠組みは、前報⁽²⁾のそれと本質的には同じである。全ての関連情報が確定的に与えられることを前提にした前報に対して、本研究では地層条件等が確率的に変動することや、効用関数の設定に際しては主観的あいまいさ(ファジィネス)を避け難い等の、より現実的な条件を考慮して、配置手法の適用範囲を拡張している。

ファジィ効用関数の定量化に際しては、前報との連続性を保つために、例えばFig. 5 (A)のように効用関数がある幅をもって定めることを想定し、これからFig. 5 (B)の帰属度関数を得る手順を示した。しかしながら、Fig. 5 (B)のように属性尺度値の効用が先に5段階表示(言語変数表示)されると考えても全く不都合はない。この場合には、式(11)のように直交化された帰属度関数x_A(X_{m,ℓ})を用いて、Fig. 5 (A)の中央効用関数に相当する関数を、例えば次式

$$u(X_{m,\ell}) = \sum_A x_A(X_{m,\ell}) u_A(X_{m,\ell}) \tag{17}$$

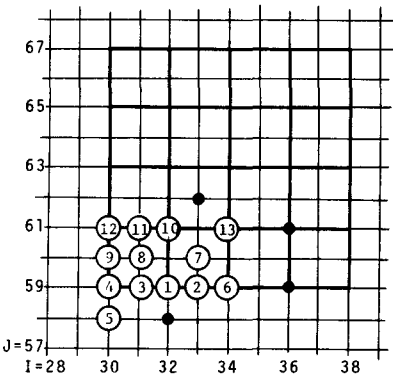


Fig. 12 Superiority of Each Candidate Node Point for Monitoring Well Location

Table 8 Example and Characteristics of Optimum Monitoring Well Allocation When the Number of Monitoring Well is Fixed at Each Given Number

No. of MP	Total U	Attribute Utility				Attribute Scale Value				Location of Monitoring Points
		u ₁	u ₂	u ₃	u ₄	X ₁ [*]	X ₂	X ₃	X ₄	
1	0.617	0.570	0.990	0.990	0.100	793.3	0.900	1.000	0.0	(32,59)
2	0.796	0.855	0.900	0.729	0.700	616.4	0.810	1.866	0.490	(30,59)(34,59)
3	0.822	0.890	0.900	0.598	0.900	409.4	0.761	2.688	0.840	(30,58)(32,63)(36,59)
4	0.786	0.895	0.900	0.447	0.900	307.4	0.753	3.482	0.890	(30,59)(36,59)(36,61)(32,63)
5	0.757	0.900	0.900	0.330	0.900	235.3	0.798	4.257	0.990	(30,59)(32,63)(32,59)(36,59)(36,61)
6	0.727	0.900	0.900	0.209	0.900	215.2	0.864	5.016	1.000	(30,59)(32,63)(32,59)(36,59)(30,60)(36,61)
7	0.712	0.900	0.900	0.148	0.900	154.9	0.876	5.762	1.000	(30,59)(32,63)(32,59)(36,59)(36,61)(30,63)(34,63)
8	0.700	0.900	0.900	0.100	0.900	149.8	0.909	6.498	1.000	(30,59)(32,63)(32,59)(36,59)(34,61)(36,61)(30,63)(34,63)

(Note) Expected value of X₁ is listed for reference. MP stands for Monitoring Point. Equal weight is given for each attribute.

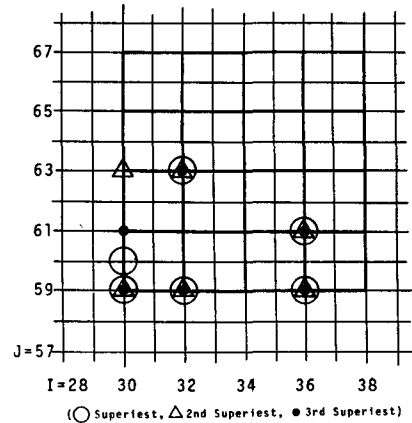


Fig. 13 Optimum Allocation of Monitoring Wells, Determined under Infallible Detection Constraint

を用いて定義することができる。

Fig. 5 (B)においては、ひとまず帰属度関数が直線的に変化することを前提したが、この前提の妥当性および他の関係を用いた場合の最適井戸配置結果の変化については別に検討する必要がある。

本研究では、有害物質が漏出する以前にモニタリング井戸群を配備することを想定している。このモニタリング井戸群により漏出が探知された場合に、どのような対策を構建するのが合理的であるか等を検討するために必要な情報（例えば、漏出位置の逆探知に必要な情報）を得るためにも、この井戸群が最適であるとの保証はない。本研究で示した最適配置手法は、漏出位置を推定するための井戸配置を定めることは目的にはしていないが、配置した井戸における実測データから有害物質の漏出位置を推定することはある程度可能である。⁽⁷⁾なお、有害物質の実測データが得られた後は、実測データに基づいてモニタリングシステムの最適性を診断し、必要に応じてシステムを改良することになる。この課題についての検討は別の機会に譲る。

4.4 実問題への適用

本研究で提示した手法を適用して現実にモニタリング井戸を配置するためには、なお検討すべき事項が多く残されている。本研究では、前報と同じく、廃棄物の埋立処分先に先立ってモニタリング網を配備するために、モニタリング対象物質の地下水層内での挙動(TVLT分布)を数値シミュレーションにより予測している。当然ではあるが、シミュレーションの結果によって選定される井戸配置は変ることになる。数値シミュレーションを実行する場合に、十分な環境情報が正確に得られることは現実には稀であると考えられる。利用できる環境情報に制約がある場合に、文献値等を参照して環境特性値の変動幅を設定し井戸配置を決定する場合の信頼性を評価し、選定された最適配置の信頼性を向上させるためにどのような追加情報をどのような優先順位に従って収集するのが得策であるか等について検討する必要がある。

廃棄物埋立処分場を建設する場合には、ボーリング等により地質調査が行われるのが普通である。このボーリング井戸は、処分開始後にモニタリング井戸として活用できる。新たに井戸を掘るよりも明らかに経済的である。しかしながら、地質調査のための井戸位置が汚染物質のモニタリングのためにも望ましい井戸位置であるとは限らない。既設井戸と新設井戸の経済性の評価値を変えて本研究で提示した手法を適用することにより、より現実的な対応が可能になる。

いずれにしても、本研究で提示した手法の有効性を確認するためには、現実問題に本手法を適用し、ケーススタディを実施する必要がある。

5. 結 論

設定条件下で得られた主要な結論を要約すると以下ようになる。まず、提示した井戸配置手法について、

- (1) 有害物質の地層内挙動に関連する環境パラメータ等が確率変動し、設定した代替案属性の効用評価に主観的あいまいさが避け難い場合にも、有害物質の漏出を探知するための井戸群を最適配置する手法を提示した。
- (2) 変動幅を有する効用関数を、帰属度関数を用いて表現する方法を提示した。
- (3) 地層特性や効用関数にあいまいさが存在することによる井戸配置パターンの変化は著しくなく、選定される井戸配置は1格子間隔程度の変化にとどまる傾向が強い。望ましい(上位の)井戸配置をパターン化することが可能であると考えられる。

また、配置手法の模擬的適用によって得られた結論は下記のようなものである。結論(5),(6)は前報の結論と矛盾しない。

- (4) 代替案の属性効用の内最小のものをその代替案の総合効用とする場合には、代替案の総合効用値が小さくなり、代替案間の優劣を比較し難い場合がある。この場合、最適代替案を構成する井戸は廃棄物埋立区域の地下水流下側境界付近に選定される例が多い。
- (5) 重みを変化させると選定される井戸の位置は変化する。しかしながら、井戸配置パターンの変動はそれ程大きくなく、廃棄物埋立区域の地下水流下側境界付近に井戸が選定される傾向が強い。このことは、井戸配置が重みよりも、有害物質の輸送媒体である地下水の流動パターンにより強く支配されることを示唆している。
- (6) 経済性の効用と、その他3属性(迅速性、冗長性、確実性)の効用の間には、設定するモニタリング井戸の数を媒介としてトレードオフ関係が存在する。

本研究の計算には京都大学大型計算機センターのFACOM VP200を使用しました。

【参考文献】

- (1) 井上頼輝・森澤真輔：地下水の汚染—その現状と傾向—、公害と対策、Vol. 10 No.9, pp.919-930、(1974)
- (2) 森澤真輔・林 伸行・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、衛生工学研究論文集、Vol. 20, pp.133-145、(1984)
- (3) 米田 稔・古市 徹・井上頼輝：不均質帯水層における物質移動予測への確率論的アプローチ、衛生工学研究論文集、Vol. 19, pp.50-59、(1983)
- (4) 高橋康彦、他訳：多目標問題解決の理論と実際、pp.140、(1970)、構造計画研究所(企画センター)
- (5) 森澤真輔・伊東明人・井上頼輝：廃棄物処理処分方法の総合評価、土木計画学研究発表会講演集、Vol. 1, pp.265-270、(1979)
- (6) 浅井喜代治・C. V. ネゴイタ：あいまいシステム理論入門、(1978)、オーム社
- (7) 森澤真輔・井上頼輝・菊池昭二美：廃棄物地中処分場周辺のMonitoring Pointの最適配置、京都大学環境衛生工学会シンポジウム講演論文集、Vol.3, pp.85-90、(1981)