

# 揮発性有機化合物で汚染した地下水を 修復するための地下水揚水の制御手法

島 俊郎<sup>1</sup>・宮田喜壽<sup>2</sup>・木暮敬二<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 正会員 フジタ技術センター 環境研究部 環境技術グループ (〒243-0125 厚木市小野2025-1)

<sup>2</sup> 正会員 博(工) 防衛大学校 講師 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 横須賀市走水1-10-20)

<sup>3</sup> 正会員 工博 防衛大学校 理工学研究科 教務主事 兼 教授 (〒239-8686 横須賀市走水1-10-20)

揮発性有機化合物で汚染した地下水の浄化方法として、地下水揚水法が代表的である。本研究では、修復の効率化を図るために、ファジイ推論による地下水揚水の制御手法について検討した。提案する制御アルゴリズムは、地下水位と汚染濃度に関するモニタリングデータを用い、周辺環境へ与える影響と浄化効率の向上を考慮して、揚水量を算定する。アルゴリズムの妥当性について検討するために、実際の汚染地盤のデータを用いて模擬地盤を作成し、数値シミュレーションを実施した。その結果、本アルゴリズムを適用することで揚水に要するエネルギーを大幅に削減できる可能性が明らかになった。

**Key Words** : remediation, pump-and-treat, fuzzy inference, rationalize

## 1. はじめに

近年、工場跡地の再開発等にもとない土壌・地下水汚染問題が顕在化している。地下水の汚染事例に関する環境省の調査結果によれば、1998年以降毎年300件以上の汚染が新たに判明しており、2001年度迄の汚染判明件数は約3,400件にのぼる<sup>1)</sup>。2003年2月に、土壌汚染対策法が施行された。土壌・地下水汚染対策のより一層の推進が必要である。

地下水の汚染事例をみると、トリクロロエチレン、テトラクロロエチレンに代表される揮発性有機化合物が原因物質である場合が多い。揮発性有機化合物は、発がん性など健康への悪影響がある物質であり、環境基準値が定められている。汚染した地下水の修復では、今後も揮発性有機化合物に対する対策が重要である。

揮発性有機化合物で汚染した地下水の修復事例をみると、検討中のものも含め約70%は地下水揚水法で修復されている<sup>1)</sup>。地下水揚水法の適用にあたっては、事前調査結果に基づく修復井戸の配置はもちろんのこと、修復期間中のモニタリング結果に基づく揚水量の決定が修復の成功のために必要となる<sup>2)</sup>。本研究では、地下水揚水法の修復の効率化を図るために、ファジイ推論による地下水揚水の制御手法について検討した。本論文では、提案する制御手法の概要を説明し、数値シミュレーションの結果を示して、その有効性を検証する。

## 2. ファジイ推論に基づく修復アルゴリズム

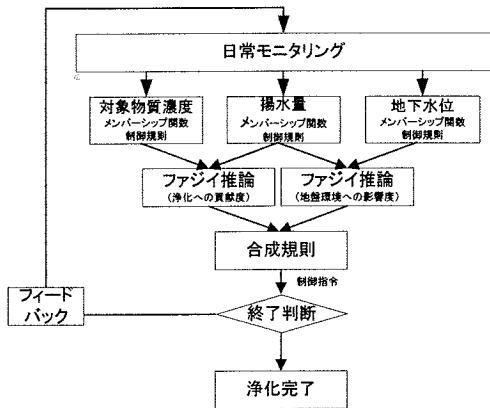
### (1) 着目した制御理論

地盤における汚染物質の挙動は非常に複雑である。また、汚染サイトから得られる各種計測データのばらつきは種々の要因で比較的大きい。地下水揚水法による汚染地下水の修復では、対象が持つ複雑性とばらつきの大きいデータに適した制御アルゴリズムの適用が重要となる。

あいまいさを許容し、過度な精密性の追求を避けることで、扱いやすさ、頑健性、低コスト性などを目指す情報処理手法は、一般にソフトコンピューティングと呼ばれる<sup>3)4)</sup>。ソフトコンピューティングの具体的な手法としては、ファジイ、ニューラルネットワーク、遺伝的アルゴリズム、カオスなどが提案されている。このうち、ファジイ理論は、1965年カリフォルニア大学のZadeh教授により提案された数学モデルであり、あいまいさを処理できる数学的理論・方法論である<sup>5)6)</sup>。制御分野への応用は、1974年にマムダニがスチームエンジンの制御へ適用し、その有効性を実証したことに始まる<sup>7)</sup>。わが国においては、1980年ごろに土木工学への応用に関する研究が始められ、地盤工学、土木計画学等の幅広い分野で応用されている<sup>8)9)10)11)</sup>。土壌・地下水汚染問題に関しては、廃棄物埋め立て処分場における漏出位置の推定や、汚染した地下水のモニタリ

表—1 地下水揚水法に関するヒアリングの結果

分類	細目	現場数
モニタリング項目	地下水位	5
	対象物質濃度	5
	揚水量	5
	pH	2
	電気伝導率	1
揚水量の可変周期	毎日	1
	1週間	2
	1ヶ月	1
	適宜	1
制御の有効性	有り	4
	無し	1

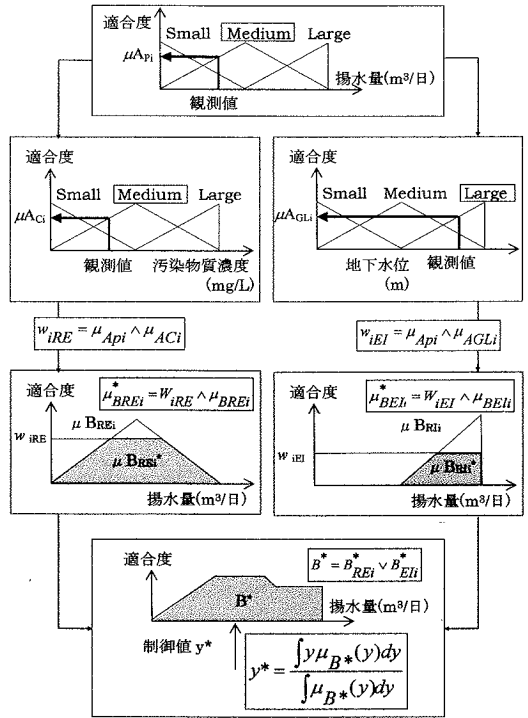


図—1 提案する制御アルゴリズム

ングに用いる井戸の最適配置に応用した事例が報告されている<sup>12),13)</sup>。本研究では、ファジィ推論を適用した地下水揚水制御アルゴリズムについて検討した。

(2) ファジィ推論に基づく修復アルゴリズム

制御アルゴリズムの開発に先立ち、地下水揚水法に携わる技術者に対して、日常のモニタリング項目、揚水量の可変周期、制御の有効性に関するヒアリングを実施した<sup>14),15)</sup>。ヒアリング結果を表—1に示す。ヒアリングの数は非常に少ないが、技術者は、地下水位と対象物質濃度という項目についてモニタリングを行いながら、揚水量を決定していることが明らかになった。この実情をふまえ、本研究においては、入力を揚水井戸の位置 $y$ における汚染物質濃度と地下水位、出力を $y$ における揚水量とする制御アルゴリズムを開発した。その概要を図—1に示す。ファジィ推論では、1)入力データがファジィ集合ではなく、モニタリング値(実数値)である、2)制御周期の短縮が必要不可欠である、ことを考慮し、一般のファジィ推論よりも簡略化した



図—2 推論の手順

マムダニの推論法を採用した<sup>16),17),18)</sup>。マムダニの推論法は、ファジィ制御で用いられた最初の推論方法であり、推論手順が簡単で理解しやすいため広く用いられている。本研究で開発した制御アルゴリズムの推論手順を、図—2を用いて説明する。メンバーシップ関数の形状は、ファジィ制御で一般的な3角型を用いることとした。ファジィ制御規則は、以下のような形式で与えた。

- if "揚水量" is "medium" and "対象物質濃度" is "medium" then "浄化への貢献度" is "medium"
- if "揚水量" is "medium" and "地下水位" is "large" then "地盤環境への影響度" is "large"
- if "浄化への貢献度" is "medium" and "地盤環境への影響度" is "large" then "揚水量" is "large"

ここで、浄化への貢献度は、揚水  $1\text{m}^3$  あたりの汚染物質の回収量とし、地盤環境への影響度は、揚水  $1\text{m}^3$  あたりの地下水位低下量とした。次に、制御対象の状態変数を  $x_i$ 、制御対象への操作量を  $y$  とし、時点  $i$  における揚水量に関する言語変数(ファジィラベル)を  $A_{ip}$ 、地下水位に関する言語変数を  $A_{iGL}$ 、対象物質濃度に関

する言語変数を  $A_{iC}$ , それぞれに対するファジイ集合を  $A_p, A_{GL}, A_C$  で表す。はじめに, 揚水量  $x_p^*$ , 地下水位  $x_{GL}^*$ , 対象物質濃度  $x_C^*$  の入力値に対する各規則の適合度  $w_{iRE}, w_{iEI}$  を次式で計算する。

$$w_{iRE} = \mu_{A_{pi}}(x_p^*) \wedge \mu_{A_{Ci}}(x_C^*) \quad (i=1 \sim n) \quad (1)$$

$$w_{iEI} = \mu_{A_{pi}}(x_p^*) \wedge \mu_{A_{GLi}}(x_{GL}^*) \quad (i=1 \sim n) \quad (2)$$

ここで,  $\mu$ : メンバシップ関数,  $w_{iRE}$ : 時点  $i$  における浄化への貢献度,  $w_{iEI}$ : 時点  $i$  における地盤環境への影響度,  $n$ : 制御規則の個数,  $\vee$  は最大値を選択,  $\wedge$  は最小値を選択するファジイ演算記号および  $*$  はファジイ集合を示している。

次に, 時点  $i$  における各規則の条件部の推論結果  $B_{REi}^*$ ,  $B_{EIi}^*$  を次式で計算する。

$$\mu_{B_{REi}^*}(y) = w_{iRE} \wedge \mu_{B_{REi}}(y) \quad (3)$$

$$\mu_{B_{EIi}^*}(y) = w_{iEI} \wedge \mu_{B_{EIi}}(y) \quad (4)$$

そして, 時点  $i$  における浄化への貢献度および地盤環境への影響度の推論結果  $B_{REi}^*$ ,  $B_{EIi}^*$  を統合して, 規則全体の推論結果  $B^*$  を次式で計算する。

$$B^*(y) = B_{REi}^* \vee B_{EIi}^* \quad (5)$$

最後に, 推論結果  $B^*$  の重心  $y^*$  を次式で計算する。

$$y^* = \frac{\int y \mu_{B^*}(y) dy}{\int \mu_{B^*}(y) dy} \quad (6)$$

このような推論法は, min-max 重心法と呼ばれている。

以上述べた方法は, 各井戸独立に揚水量を決定する方法であり, 井戸相互の関連性については考慮していない。筆者らは, 全ての井戸の稼動状況やより広範囲なデータをもとに特定の井戸の揚水量を制御する新しいアルゴリズムについても検討を行っている。その議論については稿を改めて行うものとし, これ以降, 制御の基本となる独立型のアルゴリズムの有効性について考察を行う。

### 3. 解析方法の概要

#### (1) 解析の概要

制御アルゴリズムの有効性は, 実サイトで検証することが本来望ましい。しかし, 対象とする問題が市民の健康に影響することや検討に要するコストを考慮して, コンピュータ上に模擬地盤を作成し, 数値シミュレーションで検証を行った。

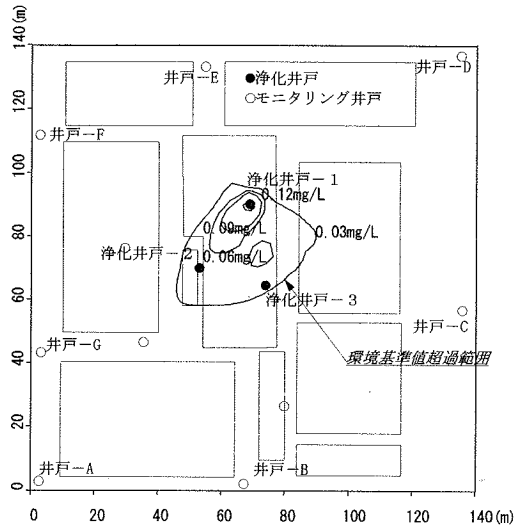


図-3 模擬地盤の対象とした実汚染サイト

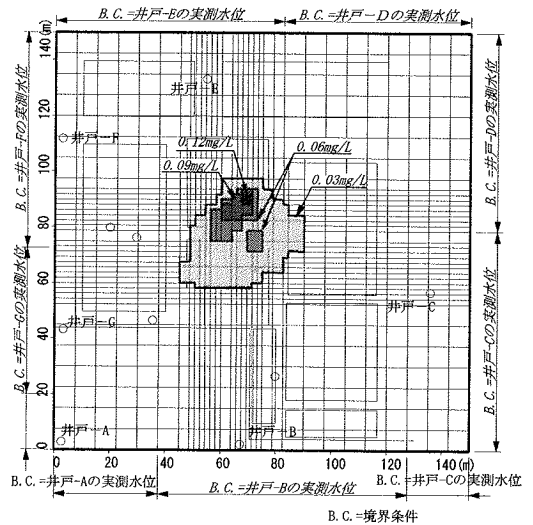


図-4 濃度の初期条件と水位に関する境界条件

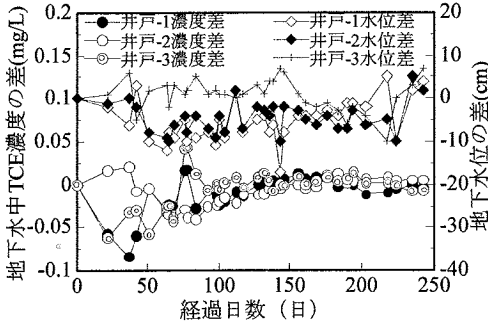
具体的には, 3次元の移流・拡散解析で計算された井戸の座標値における対象物質濃度, 地下水位および揚水量の計測値をもとに, 各井戸の揚水量をファジイ推論で計算し, その結果を井戸の境界条件に反映させて, 次の時間ステップにおける濃度分布を計算するという作業を繰り返し行った。ここでは, 模擬地盤の作成, 数値シミュレーションの概要を説明し, 解析結果を示して, 提案する制御アルゴリズムの妥当性について考察する。

#### (2) 模擬地盤の作成方法

模擬地盤は, トリクロロエチレンで汚染された地下水を地下水揚水法で修復した実サイトのデータをもと

表—2 模擬地盤の解析パラメータ

層の名称	ローム層	砂層	砂礫層
深度の範囲(m)	0-3	3-12	12-
透水係数 $k$ (cm/s)	$8.5 \times 10^{-4}$	$4.6 \times 10^{-3}$	$1.4 \times 10^{-2}$
比貯留係数 $S_s$ (1/m)	$1.8 \times 10^{-4}$	$4.6 \times 10^{-5}$	$9.4 \times 10^{-5}$
間隙率 $\theta$ (%)	50	40	35
有効間隙率 $n_e$ (%)	20	20	15



図—5 模擬地盤の作成精度

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + q_s = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (7)$$

$$R\theta \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C) \quad (8)$$

$$D_{ij} = \alpha_T \sqrt{v_k v_k} \delta_{ij} + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{v_i v_j}{\sqrt{v_k v_k}} \quad (9)$$

$$v_i = \frac{u_i}{n_e} = \frac{1}{n_e} \left( K \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) \quad (10)$$

に作成した。サイトの概要を図—3に示す。図中には、3次スプライン補完アルゴリズムを用いて計算した修復作業開始前のトリクロロエチレンの濃度分布も示した。このサイトでは、事前調査結果、揚水中のトリクロロエチレンの濃度や地下水位の変化などが詳細に計測されている。模擬地盤の作成にあたり、このサイトにおける地下水の流れ、汚染物質の濃度変化が式(7),(8),(9),(10)で表現できると仮定した。ここで、 $i$ と $j$ は次元を表す添え字で、1から3の整数、 $K$ :透水量係数、 $h$ :水頭、 $q_s$ :湧き出し量、 $S_s$ :貯留係数、 $R$ :遅延係数、 $\theta$ :土壌層の体積含有率、 $C$ :地下水中に含まれる汚染物質の濃度、 $D$ :拡散係数、 $v$ :地下水の間隙内流速、 $u$ :地下水流速、 $n_e$ :有効間隙率、 $\alpha_L$ :縦方向分散度、 $\alpha_T$ :横方向分散度である。以上の2つの方程式を、新たな汚染物質の供給がないと仮定し、図—4に示す境界条件と初期条件のもとで解いた濃度—時間関

表—3 ファジマトリックス (ケース1)

		地盤環境への影響度		
		地下水位		
		Small	Medium	Large
揚水量	Small	Small	Small	Medium
	Medium	Small	Medium	Medium
	Large	Medium	Medium	Large
		浄化への貢献度		
		地下水中 TCE 濃度		
		Small	Medium	Large
揚水量	Small	Small	Medium	Medium
	Medium	Medium	Medium	Large
	Large	Large	Large	Large

表—4 ファジマトリックス (ケース2)

		地盤環境への影響度		
		地下水位		
		Small	Medium	Large
揚水量	Small	Small	Small	Medium
	Medium	Small	Medium	Large
	Large	Medium	Medium	Large
		浄化への貢献度		
		地下水中 TCE 濃度		
		Small	Medium	Large
揚水量	Small	Small	Medium	Medium
	Medium	Small	Medium	Large
	Large	Medium	Medium	Large

係が、実際の値にできるだけ近くなるような地盤パラメータを試行的に算定した。差分式の解法には強陰解法を用いた。算定した地盤パラメータの一覧を表—2に示す。また、このパラメータのもとで再現された値と、実汚染サイトで計測された値の差を図—5に示す。濃度については、修復初期における濃度の激しい上下動を再現することは困難であったが、約100日経過後から実測と $\pm 0.02\text{mg/L}$ 程度の範囲内で濃度推移を再現できた。水位については、修復期間を通じて $\pm 15\text{cm}$ 程度の範囲内で地下水位の推移を再現できた。

### (3) 解析ケース

制御目標を、ケース1:修復期間の短縮を最優先とする場合と、ケース2:修復期間の短縮と揚水量の削減を両立させる場合について、数値シミュレーションを実施した。「地下水位がSmall」で「揚水量がLarge」であれば「地盤環境への影響度はMedium」と判断するといった形式で表したファジフォーマットを表—3, 4に、技術者へのヒアリングに基づき、環境基準値(0.03mg/L)から4倍までの範囲を対象として定めたメンバーシップ関数を図—6, 7に示す。修復時の制約条件は、実汚染サイトと同じく、日処理水量:120m<sup>3</sup>未満、水位低下量:-1.0m以内、修復目標濃度:0.03mg/L、修復期間:1年以内と設定した。移流拡散解析から揚水量を計算する時間間隔は、1週間とした。

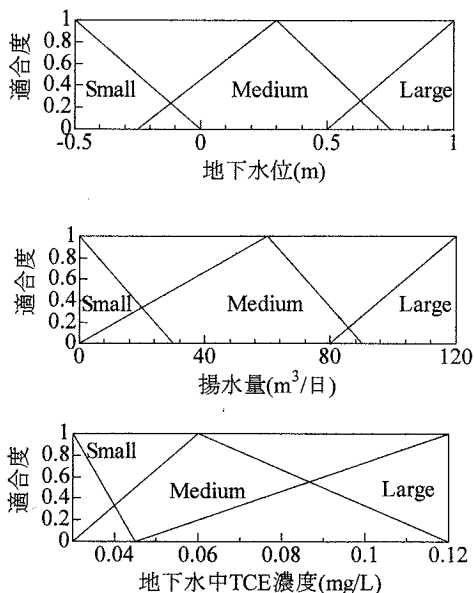


図-6 メンバーシップ関数 (ケース1)

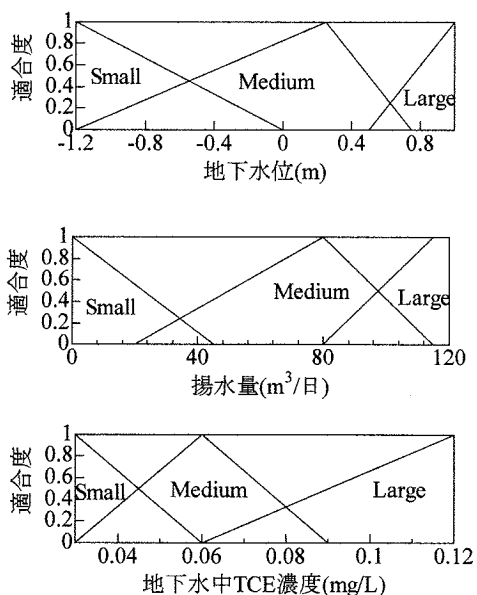


図-7 メンバーシップ関数 (ケース2)

#### 4. 結果と考察

数値シミュレーションの結果を、2つのケースごとに示して考察し、最後に両ケースを通じた考察を行う。

##### (1) ケース1について

修復期間の短縮を目的とした解析ケースにおいて、

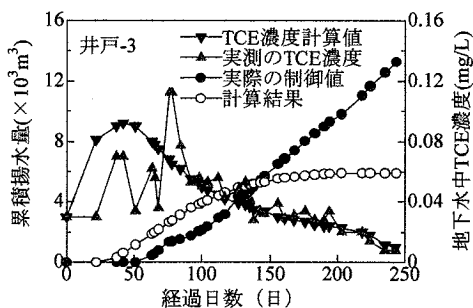
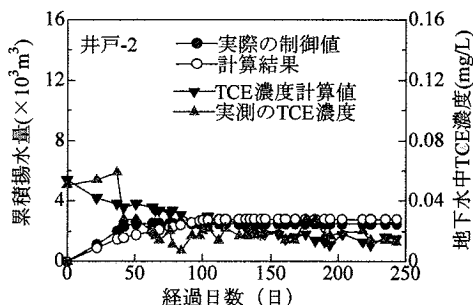
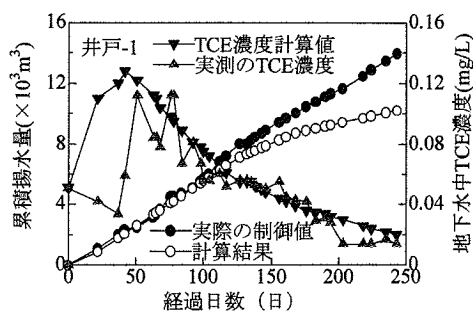


図-8 揚水量に関する比較 (ケース1)

各井戸に対して計算された揚水量(計算値)と、実際に技術者がモニタリングデータをみながら経験的に制御した揚水量(実際値)を井戸毎に比較した結果を図-8に示す。図中には、あわせて地下水中TCE濃度推移のシミュレーション結果と実測値を示した。井戸-1における計算値は、修復開始から約50日にかけては実際値と同程度で、その後約80日までは実際値より高く、80日から250日までは実際値よりも小さい。井戸-2では、実際値より計算値が大きい。急激な濃度低下に、ファジィ制御が適切に対応できなかったことが、その要因として考えられる。井戸-3では、他の井戸と比べても、濃度低下にあわせて急激な揚水量の変動を伴わない制御値が計算された。シミュレーションにおける地下水位の推移と、実際に技術者がモニタリングデータをみながら経験的に制御した場合の地下水位の推移を図-9に示す。井戸-1では、実際は修復開

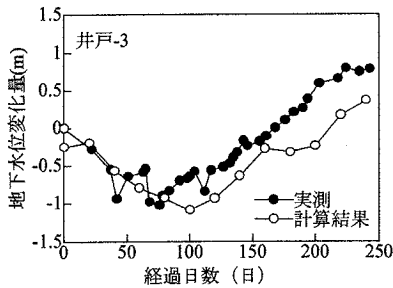
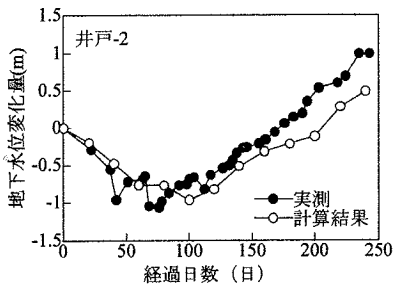
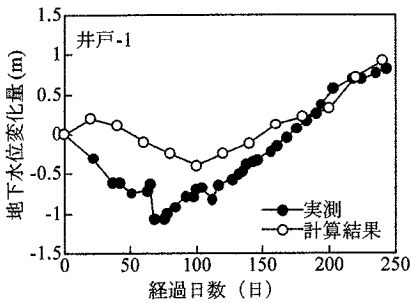


図-9 地下水位に関する比較(ケース1)

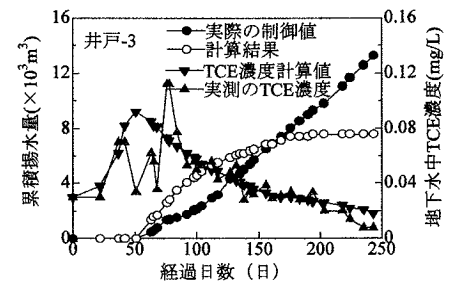
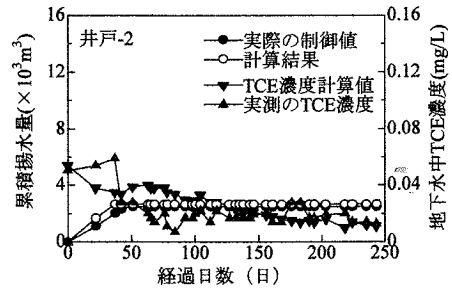
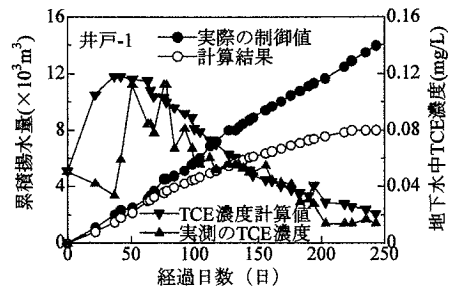


図-10 揚水量に関する比較(ケース2)

始から約 30 日から 130 日目までの間は基準水位より -0.5m から -1.0m 程度低い水位まで低下したが、シミュレーションの結果では -0.5m 以内を維持することができた。井戸-2 では、実際とほぼ同じ傾向を示した。井戸-3 は、累積揚水量の推移ではもっとも優れた結果が得られたが、地下水位の推移では修復目標値を一時的に若干超過する結果となった。この原因として、本ケースにおいて設定された地下水位の下限値(-0.5m)を超過した場合に、地盤環境への影響度を「Medium」と認識する制御規則を用いたことが考えられる。

全体的に、本論文で提案されたファジィ制御による揚水量の値は、目標とする技術者の経験による制御値と同等か、小さい値となった。急激な濃度変化に対する制御は、スムーズにいく場合とそうでない場合があった。この問題は制御間隔をもっと密にするなどすれば解決できると思われる。その適切な時間間隔の設定は今後の課題である。

## (2) ケース 2 について

修復期間の短縮と揚水量の削減の両立を目的とした解析ケースにおいて、計算された揚水量(計算値)と、実際に技術者がモニタリングデータをみながら経験的に制御した揚水量(実際値)を井戸毎に比較した結果を図-10に示す。図中には、あわせて地下水中 TCE 濃度推移のシミュレーション結果と TCE 濃度の実測値も示した。井戸-1 における計算値は修復開始から約 50 日にかけての地下水中 TCE 濃度の上昇時期において、実際値より小さい。しかし、修復期間中における TCE 濃度の最高値は a) の結果よりもわずかに低い。約 80 日にかけて計算値と実際値とは同程度で、80 日から 200 日にかけては実測よりも少ない揚水量で制御できるとの結果が計算された。200 日から 250 日にかけては揚水を抑える効果が確認された。井戸-2 では、濃度低下にあわせて揚水量を削減する傾向を示し、わずかで

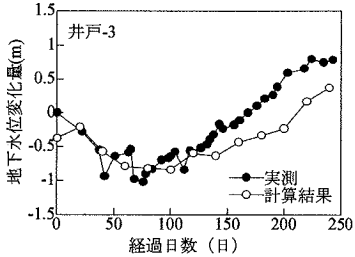
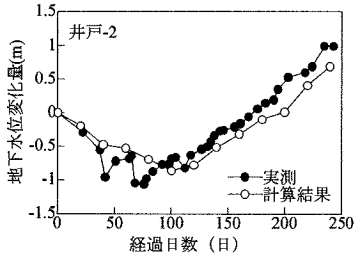
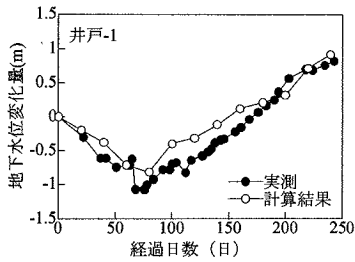


図-11 地下水位に関する比較 (ケース2)

はあるが実際値よりも少ない揚水量で制御を終了する結果となった。井戸-3では、濃度低下にあわせて、急激な揚水量の変動を伴わずに少ない揚水量を維持する効果が確認された。井戸毎の地下水位の推移を図-11に示す。井戸-1と2では、修復期間を通じて制御目標を満たしながら、実測値とほぼ同じ傾向を示した。井戸-3では、a)において目標とする水位低下量-1.0mを一時的に超過する結果を示したにも関わらず、本ケースでは目標範囲内で実測値とほぼ同じ傾向を示す効果が確認された。以上の検討より、提案するアルゴリズムは、メンバーシップ関数およびファジイフォーマットを適宜変更することで、異なる浄化目的の達成に寄与できることが確認された。

### (3) 井戸全体の総揚水量と環境基準値超過面積の推移

これまで、2つのケースにおける制御結果について、井戸毎に考察を行った。ここでは、提案するアルゴリズムが修復の効率化にどのように寄与できるかについて、井戸全体の総揚水量および環境基準値超過面積の

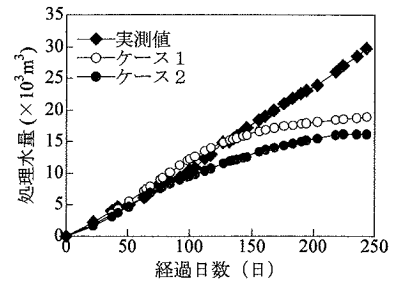


図-12 井戸全体の総揚水量

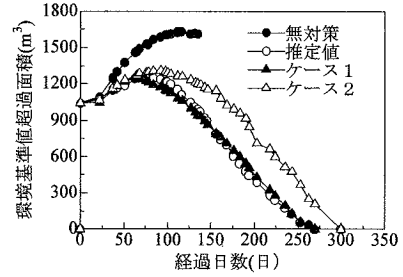


図-13 環境基準値超過面積の推移

推移を通じて考察する。修復を通じての全体揚水量が少なければ、エネルギーが小さいことになる。2つの解析ケースにおける全体揚水量の推移を図-12に示す。なお、図中には実際の揚水量(実測値)も併せて示した。ファジイ推論で計算された制御結果における揚水量は、実測値より3割から4割程度小さい。ファジイ制御に基づく修復アルゴリズムが、地下水揚水法における揚水量の削減に大きく寄与する可能性があるといえよう。修復を実施する際、修復領域外の影響を生じないようにすることが重要である。修復期間における環境基準値超過面積の推移に関する計算結果を図-13に示す。図中には、無対策の場合と、技術者の制御結果に対して計算された値(推定値)もあわせて示した。無対策の場合には、約150日で敷地外に汚染物質が拡散する可能性が示された。修復期間の短縮を目的としたケース1では、実修復とほぼ同じ面積推移を示した。修復期間の短縮と揚水量の削減を目的としたケース2では、実測よりも広い範囲で環境基準値の超過が認められた。いずれの場合においても、無対策の場合による拡散よりも小さい面積で推移したことから、地下水揚水法の適用が汚染物質の拡散防止にも有効な手法であることがわかる。本手法を実際に適用するにあたって、修復領域全体での汚染物質の挙動や各井戸の相互作用の影響を、制御アルゴリズムに組み込む必要があると考えられる。それについての検討は今後の課題としたい。

## 5. まとめ

本研究では、地下水揚水法の修復効率を向上させることを目的として、ファジイ推論による地下水揚水の制御手法について検討した。本論文の内容は以下のようによまとめられる。

- (1) 汚染物質の濃度と地下水位を入力する地下水揚水の制御アルゴリズムを提示した。このアルゴリズムは、浄化効率と周辺環境へ与える影響を考慮することができる。
- (2) アルゴリズムの妥当性について検討するために、実際の汚染地盤のデータを用いて模擬地盤を作成し、数値シミュレーションを実施した。異なる制御目標に対する数値シミュレーションの結果、提案するアルゴリズムは、異なった制御目標についても柔軟に対応できることが明らかになった。
- (3) シミュレーションで計算された揚水量の値と、実際に技術者が経験的に決定した値とを比較した。その結果、提案するアルゴリズムを適用すると、揚水量を削減できる可能性があることが明らかになった。
- (4) シミュレーションにおいて、急激な揚水量の変動を伴わない制御ができた場合とそうでない場合があった。また、環境基準値を超過する面積が修復開始後一時的に増加する結果が得られた。適切な制御間隔の設定と、修復領域全体での汚染物質の挙動や各井戸の相互作用の影響の評価は今後の課題である。

## 参考文献

- 1) 環境省 環境管理局 水環境部 土壌環境課 地下水・地盤環境室：平成 13 年度 地下水汚染事例に関する調査について、2002。
- 2) 木暮敬二：地盤環境の汚染と浄化修復システム、技報堂出版、pp.171-174,2000。
- 3) 高木英行：ファジイシステム、ニューラルネット、遺伝的アルゴリズムの融合化技術—FS+NN および FS+GA—、計測と制御、第 33 巻、第 1 号、pp.33-39,1993。

- 4) ファジイ技術の応用とソフト・コンピューティング—Zadeh 教授を囲む座談会（抜粋）—、日本ファジイ学会誌、Vol.5, No.2, pp.151—268, 1993。
- 5) Zadeh, L.A.: Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes, IEEE, Transactions on SMC, SMC-3, Vol.1, 99, 28-44, 1973。
- 6) Zadeh, L.A.: Fuzzy Algorithms, Information and Control, Vol.12, pp.94-102, 1968。
- 7) Mamdani, E.A.: Application of fuzzy algorithms for control of a simple dynamic plant, Proc. IEEE, 121, 12, pp.1584-1588, 1974。
- 8) 白石成人, 古田均, 川村幸男：事故解析へのファジイ積分の応用, 土木学会論文報告集, 第 339 号, pp.33-40, 1983。
- 9) 山田健太郎, 馬智亮, 岡田隆彦, 島田静雄：ファジイ理論を用いた水道管の耐久性評価方法, 土木学会論文集, 第 416 号 / I -13, pp.375-384, 1990。
- 10) 金吉正勝, 古田均, 田中洋：設計者の満足度を考慮したファジイケーブル張力調整法, 土木学会論文集, 第 598 号 / I -44, pp.381-390, 1998。
- 11) 長谷部正彦, 長山八州稔, 黒崎充能力, 桑川高徳：ダム制御操作支援にファジイおよびニューラルネットシステムを用いた貯水池操作について, 土木学会論文集, 第 616 号 / IV -42, pp.77-89, 1999。
- 12) 森澤真輔編：土壌圏の管理技術, コロナ社, pp.43-57, 2002。
- 13) Morisawa, S. and Inoue, Y.: Development of Mathematical Model for Estimating Groundwater Contamination - Preliminary Application on Groundwater Zone around an Assumed Soil Waste Landfill Site, Proc. of 17th IWSA Conf., Rio-de-Janeiro, SS-17, pp.7—9, 1988。
- 14) 島俊郎, 宮田喜壽：揚水量の最適化による TCE 汚染地下水浄化の効率化に関する検討, 第 4 回環境地盤工学シンポジウム, pp.201—204, 2001。
- 15) 島俊郎, 宮田喜壽：ファジイ推論をベースとした地下水揚水法向けエキスパートシステムの研究開発, 第 7 回システム最適化に関するシンポジウム, pp.53—56, 2001。
- 16) 本多中二, 大里有生：ファジイ工学入門, 海文堂, 1989。
- 17) 日本ファジイ学会編：ファジイ制御, 講座ファジイ第 5 巻, 日刊工業新聞社, 1993。
- 18) 計測自動制御学会編：ニューロ ファジイ AI ハンドブック, オーム社, 1994。

(2003. 9. 17 受付)

## CONTROL ALGORITHM FOR PUMPING UP METHOD TO REMEDIATE CONTAMINATED GROUNDWATER WITH ORGANIC COMPOUND

Toshiro HATA, Yoshihisa MIYATA and Keiji KOGURE

New fuzzy control system for contaminated ground water was developed with numerical analysis method and its efficiency was examined. The presented model can calculate the optimum pumping rate with considering remediation efficiency and environmental impact based on knowledge of engineer's skill. In a series of the numerical simulations, the virtual conditions were set by using the actual remediation site data. In calculation, the effect of proposed algorithm was investigated in detail. In this paper, outline of numerical method is explained and the numerical simulation results are shown. Proposed algorithm would be reduce pumping rate than actual data.