

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

Research and Development of expert system for Pump and Treat Method based on Fuzzy Inference

畠 俊郎*・宮田 喜壽**

Toshiro HATA and Yoshihisa MIYATA

*主任 株式会社フジタ 技術センター 環境研究部 (〒243-0125神奈川県厚木市小野2025-1)

**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神奈川県横須賀市走水1-10-20)

The pump and treat method is remediation techniques to dip contaminated groundwater through wells established in contaminated ground and dispose the groundwater. In this paper, a fuzzy inference model to control system for the pump and treat method is proposed in order to rationalize the remediation of contaminated groundwater with Volatile Organic Compounds (VOCs). The proposed model is for controlling of pumping rate at each well with considering remediation efficiency and environmental impact to neighboring ground such as settlement and drying up of well. Efficiency of the model is discussed on numerical results with in-situ monitoring data.

Key Words : Contamination, Groundwater, Fuzzy inference, The Pump and treat method

1. はじめに

近年、工場跡地の再開発などに伴い、土壌・地下水汚染問題が顕在化している。環境省(旧環境庁)が平成11年度末までに地下水汚染が判明した事例を集計した結果によれば、都道府県が把握している汚染事例は2,555件にのぼり、そのうち現在も基準値を超過している事例が1,794件とされている¹⁾。

汚染原因物質で分類した場合、テトラクロロエチレン、トリクロロエチレンなどの揮発性有機化合物(以下VOCsと称す)と硝酸態窒素及び亜硝酸態窒素の超過事例が多い。VOCsは、主として機械部品や衣類等の油汚れを取り除く溶剤として過去に大量に使用されてきた物質である。しかしながら、VOCsはこれまでの検討結果から発ガン性等健康への影響が認められており、米国では1980年にスーパースポット法(通称)を制定し、汚染原因者に対して厳しく責任を課すと共に、浄化対策を促進している。我が国においても、環境省が中心となり、汚染された地下水の浄化措置を制度化すると共に、地下水の水質汚濁に係る環境基準を設定している。

VOCsによる地下水汚染の特徴として、以下の項目が挙げられる²⁾。

- ・ 地表面から深度方向に土壌および地下水が汚染され、水平方向への広がりには比較的小さい。
- ・ 汚染物質が帯水層底部に溜まることがある。
- ・ 地下水の流れに沿って拡散される。

VOCs汚染地下水に対する浄化対策として各種工法が提案されているが、地下水揚水およびバリア井戸による浄化が約半数を占めている。

本研究においては、ファジイ推論をベースとした浄化アルゴリズムの開発を行った。本論文においては、現在の地下水揚水法を概観して、技術者の支援システムとして、ファジイ推論をベースとした浄化アルゴリズムの開発の必要性を論じ、ついでその妥当性を検証するために実施した数値シミュレーションの結果と考察を示す。

2. 地下水揚水法の効率化の必要性

2.1 地下水揚水法の概要³⁾

汚染された地下水を浄化する手法として我が国において広く用いられている地下水揚水法は、飽和帯を浄化対象としている。飽和・不飽和帯で汚染物質が検出された場合には、土壌ガス吸引法と組み合わせることで浄化が可能である。地下水揚水法では、汚染地下水とともに汚染物質を地中から抽出除去する。図-1に地下水揚水法の概念を示す。

地下水面以下にスクリーンをもつ揚水井戸から、汚染地下水をポンプにより汲み上げる。汲み上げた汚染地下水は、ばう気塔の頂部に送られ、下部から塔内に吹き込まれた空気と向流接触し、地下水中の揮発成分を空気の中に移動させる。これにより汚染地下水は浄化される。空気に移行した汚染物質は、浄化現場の状況にあわせた適切な処理方法で処理される。既に実用化されている処理方法としては、活性炭吸着、化学分解、紫外線分解、微生物分解等がある。

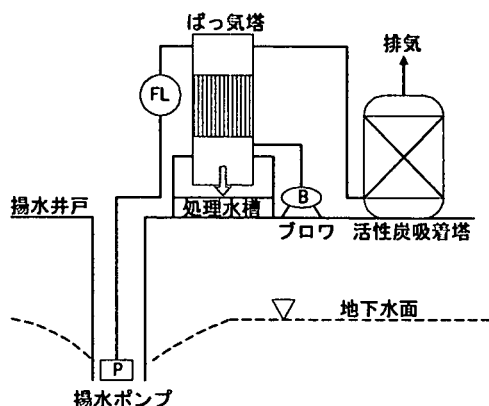


図-1 地下水揚水法の適用概念

地下水揚水法の適用では、事前に実施する表層土壌ガス調査および深度方向調査や地下水流向・流速調査の結果を踏まえて最も濃度の高い場所に浄化井戸を設置する事が求められる。また、汚染の拡散を防止する目的でバリア井戸として設置する場合も事前の調査結果を踏まえて最も効率よく拡散を防止できる地下水汚染地域の下流域に設置する事が求められる。しかしながら、現時点では浄化期間中複雑に変化する不均質な帯水層での汚染物質の挙動を精度良く予測することは困難とされる。また、地下水を揚水することにより地盤沈下や近隣の井戸涸れ等の地下水障害を引き起こしてはならない。揚水が地盤に与える影響は事前に解析できるが、地下水位の年間変動など気象条件に左右される項目については精度良く予測することは困難とされる。これらの課題を解決し、長期に渡り効率よく浄化を継続することができれば汚染地盤の掘削除去等の他工法に比べてより多くの汚染物質を回収できる可能性がある。

2.2 地下水揚水法の効率化の必要性

汚染地下水の浄化や拡散防止に広く用いられている地下水揚水法であるが、環境基準値以下まで効率よく浄化することについては解決すべき課題も少なくない。浄化の初期には一日に数kg回収でき、対策の成功と受け取られたサイトにおいても、ある程度浄化が進むとそれ以上地下水濃度を低下させることは容易ではなく浄化完了までに長期間を必要とした事例も報告されている。近年では、これら課題の解決を目的として揚水ばっ気の浄化予測を正確に行う研究も進められている⁹⁾。新規に浄化を実施するサイトについては、これらの研究結果を踏まえた浄化計画の策定が重要となる。しかしながら、既に浄化に着工し、現在も継続中のサイトにおいては既存設備の能力を最大限に生かしながら浄化を進める対策が重要となる。現実には、地下水浄化サイトに常駐している熟練技術者は自らの経験に基づき効率よく浄化を進めている。効率的な浄化期間の短縮は、浄化費用の削減ももたらすことから、エンジニアリング的なアプローチが重要となる。重要な判断は技術者自ら行うべきではあるが、浄化期間中熟練技術者を常駐させることは不可能と考える。そこで、本研究

では熟練技術者の経験を取り込み安価に浄化を支援するシステムの開発に取り組んだ。

2.3 ファジイ推論の適用

先に述べた通り、地下水揚水法において効率よく浄化を進めるためには、熟練技術者の経験をフィードバックさせることが重要となる。一方、浄化期間中複雑に変化する汚染物質の挙動や、季節変化を考慮した地下水位の変動を精度良く予測することは非常に困難とされる。また、開発した浄化システムが現場内で稼働することから、あまり複雑な計算を伴うモデルの適用は避けなければならない。浄化アルゴリズムの検討に先立って、地下水揚水法による浄化の経験を持つ複数の熟練技術者にヒアリングを行った。その結果、彼らは日常のモニタリング結果（揚水量、対象物質濃度、地下水位）をもとに自らの経験を踏まえて最適な揚水量を決定している事が明らかになった。このような個人の経験をベースとしたフィードバック制御を可能とする数学モデルは何種類かあるが、本研究ではファジイ推論が有効であると考えファジイ推論をベースとした浄化アルゴリズムの開発を行った。

3. ファジイ推論に基づく浄化アルゴリズム

3.1 浄化モデルの概要⁹⁾

複数の熟練技術者へのヒアリングを踏まえて考案した浄化アルゴリズムの概要を図-2に示す。彼らは、日常モニタリングの3項目（地下水位、揚水量、対象物質濃度）を使って総合的に揚水量を決定している。浄化アルゴリズムでは、まず最初に対象物質濃度と揚水量から現在の揚水状態がどの程度浄化に貢献しているかを評価する。次に、揚水量と地下水位から現在の揚水作業が周辺の地盤環境への程度影響を与えているかを評価する。最適な揚水量の決定は、浄化サイトの状況に合わせて重みづけした2つの評価値を総合的に判断することで行う。

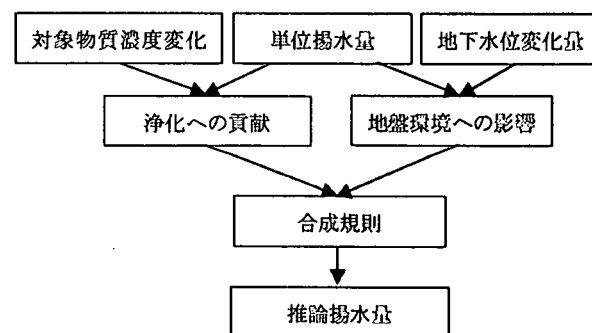


図-2 浄化アルゴリズムの概要

ファジイ制御規則は、if “単位揚水量” is “目標範囲” and “対象物質濃度” is “やや少ない” then “浄化への貢献度” is “やや少ない”, if “単位揚水量” is “やや少ない” and “地下水位変化量” is “やや多い” then “地

盤環境への影響” is “やや多い”, if “浄化への貢献度” is “やや少ない” and “地盤環境への影響” is “やや多い” then “揚水量” is “やや少ない”の形式で、それぞれ $5^2+5^2+5^2=75$ 通りを熟練技術者へのヒアリングをもとに設定した。メンバーシップ関数については、ファジィ制御で一般に用いられている3角形を用い、推論手法にはMamdaniの推論法を用いた⁹⁾。

適用サイトによって許容される地下水位の変動幅は大きく異なることは少ないが、浄化対象濃度は高濃度から低濃度まであらゆるケースが想定される。浄化開始と浄化完了目標の濃度差が大きい場合には、制御規則の固定は精度の面で問題があると考え、対象物質濃度を用いたフィードバック制御規則についてのみ適応制御モデルを組み込むこととした。今回採用したファジィ適応制御モデルでは、以下の流れで処理を行う。

- ・ あらかじめ想定される濃度変化にあわせて複数のファジィ制御規則を準備する
- ・ 実測される濃度にあわせて最適なファジィ制御規則を選択する
- ・ あらかじめ準備している濃度レベル毎の補正係数を乗じて推論値を出力する

4. 解析結果と考察

4.1 解析条件

システムの基本的な考えの妥当性を検証する目的で、実汚染サイトで得られたデータを用いたシミュレーションを行った。

(1) 実汚染サイトのデータの概要

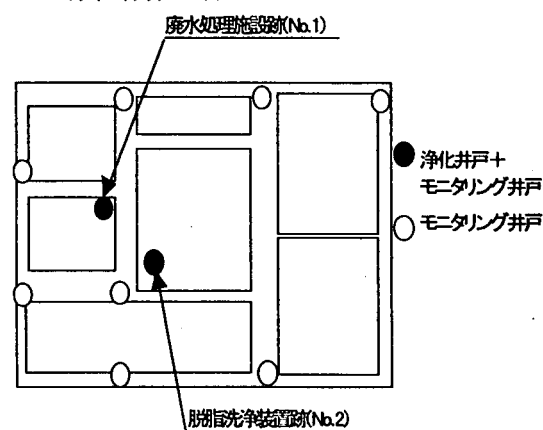
汚染現場の地表面は、深度約0.5mまで盛土で覆われており、0.5～4.0mに関東ローム層、4.0～8.00mまで粘土混じり細砂層、8.0～10.0mまで細砂層、10.0～12.0mに粘土質シルト層（不透水層）が存在していた。細砂層で行った透水試験の結果を表―1に示す。

表―1 透水試験結果

調査点名	土質名称	試験深度	透水係数
No.1	細砂	GL-8.0～8.5m	3.31×10^{-3} cm/sec
	細砂	GL-10.0～10.5m	1.12×10^{-2} cm/sec
	細砂	GL-14.5～15.0m	7.22×10^{-3} cm/sec

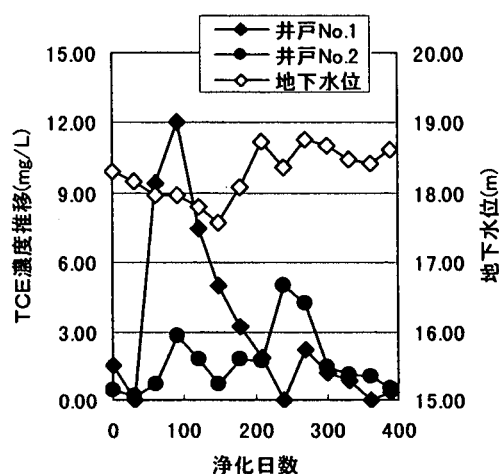
浄化計画の立案に先立ち、汚染の可能性が高いと予想される箇所を中心とした土壌ガス調査を行った。調査の結果、脱脂洗浄設備周辺から廃水処理設備跡に向けて廃水溝を通じて汚染が拡散している可能性が高いと判断された。調査の結果、敷地外へ汚染物質が拡散している可能性は低いと推定された。土壌および地下水中に含まれるTCE濃度を測定する目的で、表層土壌ガスが高濃度で検出された地点と敷地境界沿いに、図―3に示す計10本の深度方向調査井戸を設置した。調査の結果、環境基準値の約400倍の濃度で汚染された地下水が、浄化井戸それぞれの周辺約2,000m²に渡って広がっていることが推定さ

れた。また、地下水下流域に向かって希釈を伴いながら拡散している可能性が認められたことから早急に対策を講じない場合、汚染域が拡大する可能性が高いと判断された。そこで、地下水揚水法による浄化を行った。浄化条件としては、配置した浄化井戸：2本、日処理水量：150m³以下、浄化目標濃度：0.30mg/L（排水基準値）、浄化期間：1年間とした。揚水量と浄化期間に制約を受けていたため、モニタリングデータを手動でフィードバックさせながら浄化作業を行った。



図―3 モニタリング井戸および浄化井戸配置

浄化井戸毎のTCE濃度推移を図―4に示す。このサイトでは浄化期間内に目標の排水基準値まで濃度を低下させることができた。現在も、環境基準値に向けて浄化を継続中である。これらのデータを用いて、前章に示した浄化アルゴリズムの妥当性について検証することにした。



図―4 モニタリング結果

4.2 解析結果

図―4に示した汚染濃度の経時変化を得るために必要となる揚水量を浄化アルゴリズムにもとづくファジィ推論で計算した。図―3に示す2つの井戸での観測値を用いて計算した必要揚水量（推論揚水量）を図―5に示す。図中には実際の浄化作業における揚水量（実測揚水量）もあわせて示した。なお、今回の検討では対象とする地下水中TCE濃度が広範

罫に渡るため、適応制御モデルを採用することとした。

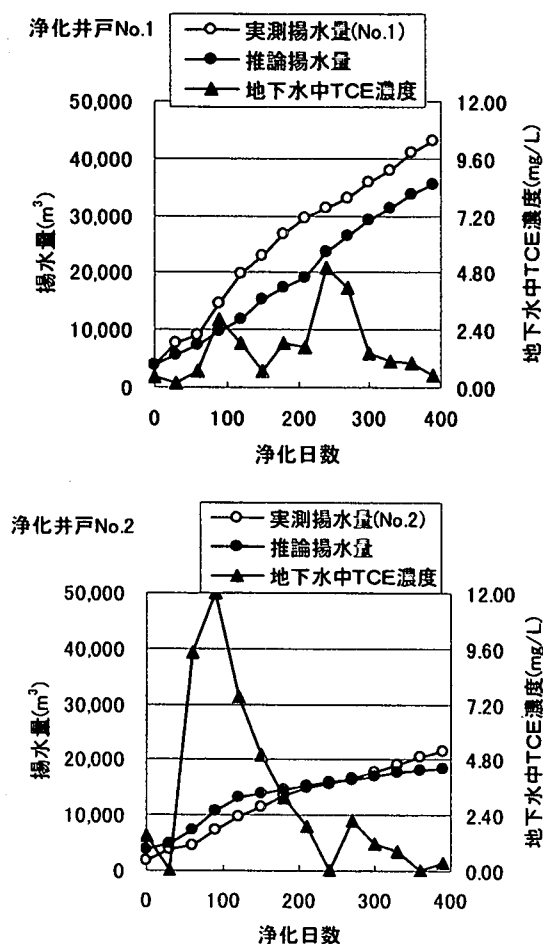


図-5 推論結果

以下、推論値と実測値を比較した結果をまとめる。浄化井戸No.1においては、浄化開始後約100日と250日の地下水中TCE濃度の上昇に対して揚水量を大きく、150日から200日にかけての濃度低下に対して揚水量を小さくする傾向が示された。全体としては、実測揚水量に比べて約20%の揚水量削減効果は期待できるものの、滑らかさに欠ける結果となった。この原因としては、当初想定した汚染範囲より外の新たな汚染プルームを揚水作業により呼び込んだ影響が考えられる。新たな汚染物質の供給に対しても提案した浄化アルゴリズムは安定した制御値を出力する可能性が示された。浄化井戸No.2においては、浄化開始後約100日後の地下水中TCE濃度の上昇に対して揚水量を大きくする傾向が示された。その後の濃度低下に合わせて揚水量を小さくする傾向が示された。全体としては、ややなめらか制御パターンとなった。この原因としては、地下水中TCE濃度推移を想定して設定したメンバーシップ関数およびファジィ制御規則が適切であったことが考えられる。効率の良い浄化を実現するためには、よりなめらかに制御できるメンバーシップ関数およびファジィ制御規則の設定が必要と考えられる。推論の結果、浄化井戸No.2については実測揚水量に比べて約15%の

削減が見込める結果となった。

以上より、提案した浄化アルゴリズムを用いることで実測値に比べて少ない揚水量で安定した制御を行える可能性が示された。更に、今回考案した浄化アルゴリズムでは、メンバーシップ関数およびファジィ制御規則を浄化対象サイトの汚染レベルにあわせて複数個設定することで幅広い汚染に柔軟に対応できる事が期待できる結果となった。

5. まとめ

本論文では、地下水揚水法を対象とした汚染地盤の浄化方法を対象として、ファジィ推論に基づくエキスパートシステムについて検討を行った。

主要な結論は以下のようにまとめられる。

- ・ 浄化過程で得られるデータを揚水計画にフィードバックさせることで揚水処理の効率化が可能となる。
- ・ フィードバックさせる場合は、浄化への貢献度と周辺環境への影響度の2つの因子を考慮する必要がある。
- ・ 熟練技術者の経験を表現するモデルとしてファジィ推論が有効である。
- ・ 浄化対象濃度が広範囲に渡る場合は、ファジィ適用制御モデルが有効である。

本論文では、ヒアリング結果をもとにメンバーシップ関数、ファジィ制御規則、適応濃度範囲を事前に設定したが、より一般的な手法の確立には汚染状況にあわせて自ら判断し設定を変更する事も必要になると考えている。また、適応制御モデルでは一部滑らかさに欠ける制御結果が認められた。この原因としては、適合度や推論結果を求める際に非線形の強いmin演算やmax演算が使われていることや、個別に設定するメンバーシップ関数およびファジィ制御規則の不連続性が考えられる。今後は、エネルギー効率の面からも制御出力の滑らかさが必要と考えられることから、ファジィ推論手法にproduct-sum重心法を適用すること等を行っていきたい。

謝辞：防衛大学校 木暮敬二教授には有益な助言を頂いた。文末ながら謝意を表させて頂く。

参考文献

- 1) 環境庁水質保全局企画課 地下水・地盤環境室：地下水汚染事例に関する調査について H12.12
- 2) 環境庁水質保全局：事業者のために地下水汚染対策 H9.3
- 3) 木暮敬二：地盤環境の汚染と浄化修復システム 技報堂,2000
- 4) 今村聡：揚水記録からの揮発性有機化合物存在量の推定 第35回地盤工学研究発表会（岐阜）2000.6.
- 5) 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 2001.5
- 6) 講座「ファジィ」第5巻：ファジィ制御，日刊工業新聞社（1993）