

(62) LNAPL プールーム探査のための 観測井配置手法の検討

井上 一哉^{1*}・正木 一平²・田中 勉¹

¹神戸大学農学部食料生産環境工学科 (〒657-8501兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

²神戸大学大学院自然科学研究科 (〒657-8501兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

* E-mail: mornel@kobe-u.ac.jp

本研究ではLNAPLプールから地下水へ溶解した汚染プールの探査を目的とした観測井配置について検討する。ラテンハイパーキューブ法により物質移動特性と汚染源性状の不確実性を考慮し、移流分散解析により汚染プールに関するリアライゼーションを得ることで、設置本数に制約を設けた上で探査確率が最大となる観測井配置を遺伝的アルゴリズムにより構成する。また、評価関数に時間0次モーメントを導入することで横分散による汚染探査の重みを低減し、井戸密度を制約条件に組み込む。その結果、観測井配置へ及ぼす第2種および第3種境界条件の差異は小さく、物質移動特性よりも汚染源性状に関する確率分布の影響度が高いことが示され、探査限界値の重要性が示唆された。

Key Words : monitoring well network, LNAPL, genetic algorithm, uncertainty, temporal moment

1. 結論

低比重の難水溶性物質 (Light Non-Aqueous Phase Liquid: LNAPL) は地盤への蓄積性が高く低移動性を有することから産業活動や不慮の事故により地盤環境中へ排出されると水より軽いため、地下水面上にLNAPLプールを形成し、継続的な汚染源となり得る。地下水汚染の発覚は観測井における定期的な水質調査や井戸水の異臭、味覚の違和感など観測井や取水井からの情報に端を発することから、汚染の早期発見と迅速な水質改善策の実行は観測井の設置位置や配置状況に大きく依存する¹⁾と言える。また、汚染対策を立案する場合や浄化対策の効果を検討する場合、観測井で得られる濃度データが貴重な基礎情報となるため、観測井の配置に依存して汚染サイトの状況把握が左右されることとなる。

廃棄物処分場や化学工場を建設する際には汚染物質の漏洩を想定して下流域に観測井を配置し、建設後は定期的に水質を調査することで有害物質の漏洩の有無を確認する作業が実施される。調査費用には制約があることから可能な限り低コストで効果的な汚染調査が望まれるものの、あまりにも少ない観測井数では汚染物質の漏洩を見逃すリスクがある。一方で、配置数の増加に伴い設

置コストやサンプリングコスト、分析コストなど経済的な負担の増加は避けられず、観測井の配置計画は帯水層の汚染状況を効率的に把握する上で重要な課題となる。

地下水汚染に関する観測井配置の研究は線形計画法¹⁻⁴⁾や人工知能⁵⁻⁹⁾により2次元または3次元帯水層を対象に検討がなされてきた。観測井の配置計画において困難な点の1つは地盤物性と汚染源情報が不確実性を有していることであり、すべてのパラメータを確定論的に設定し得たとしても時間の経過に伴い実現象との乖離が生じる可能性を高めることとなる。不確実性に関する研究例^{2,3,8-10)}の多くは地盤物性への対応であり、低比重性のため地下水面上に形成されるLNAPLプールの規模や漏洩時間を確率的に検討し、観測井の配置を検討した研究はあまり見られない³⁾。また、探査時の計測限界値が及ぼす影響に関して言及した事例は見られず、配置決定手法の多様性に欠けるのが現状である。

そこで本研究では、物質移動特性とLNAPL汚染源性状に関する不確実性を確率分布で表現し、その結果を基に濃度分布のリアライゼーションを得ることで遺伝的アルゴリズムにより汚染プールの探査確率が高い最適な観測井配置問題に取り組む。また、評価関数に時間モーメントを導入することで探査確率ベースの評価手法を改

善し、さらには、境界条件や確率分布、探索限界が及ぼす観測井配置への影響について検討する。

2. LNAPL移行解析

(1) 移流分散解析

図-1に示すように、本研究では定常地下水流を有する均質三次元地盤における水よりも比重の小さい難水溶性汚染物質 (LNAPL) の移行挙動を対象とし、地下水面上に存在するLNAPLプールから地下水への溶解相を扱う。これは埋立地や廃棄物処分場、地下貯留タンクが汚染源となって汚染物質が漏洩するような場合に地下水面上にて点あるいは面状にLNAPL汚染源が形成され、時間の経過とともに徐々に地下水へ溶解し、移行していく状態を想定したものである。

本解析ではモンテカルロ法を用いて所与の確率分布に基づいて物質移動特性と汚染源性状の不確実性を考慮し、LNAPLの漏洩を探索可能な最適観測井配置を検討する。また、平面方向のみならず鉛直方向での地下水質のサンプリングを想定し、各観測ポイントにおける時系列濃度変動を算定することにより、限られた設置数の下で探索効率が最適な観測井網を構築することを目的とする。本研究では、不均質地盤における効果的な汚染防止ならびに浄化対策を図るための足がかりとして、LNAPL移行解析を構成するパラメータ群の確率分布が観測井配置へ及ぼす影響を検討するため、地下水流速および流向は一定の条件下にある均質帯水層を対象とした観測井配置問題を設定している。

地下水へ溶解したLNAPLの移行挙動に関して、対象領域の地下水流が x 方向成分のみ有する場合の3次元移流分散方程式は式(1)と式(2)により表される。

$$R \frac{\partial c}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x} + D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - R \lambda c \quad (1)$$

$$D_x = \alpha_L v + D_e, D_y = \alpha_{TH} v + D_e, D_z = \alpha_{TV} v + D_e \quad (2)$$

ここに、 c は濃度 (g/m^3)、 t は時間 (day)、 x, y, z は座標 (m)、 v は x 方向流速 (m/day)、 D_x, D_y, D_z は分散係数 (m^2/day)、 R は遅延係数、 λ は崩壊定数 (day^{-1})、 α_L は縦分散長 (m)、 α_{TH} は水平方向横分散長 (m)、 α_{TV} は鉛直方向横分散長 (m)、 D_e は有効拡散係数 (m^2/day) である。

次に、初期状態における領域内のLNAPL濃度はゼロと仮定し、 $z=0$ においてフラックスを既定する第2種境界条件を次式で表す。

$$\frac{\partial c}{\partial z} = \begin{cases} -\Gamma(x, y, t) & (x_1 < x < x_2, y_1 < y < y_2) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

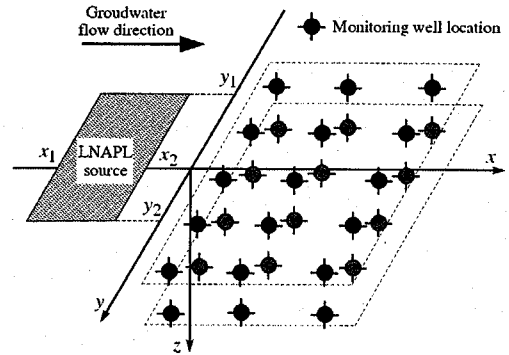


図-1 LNAPL汚染源と最適観測井配置領域の概略図

ここに、 Γ は複数のパラメータで構成されるパラメータであり、次式で表される。

$$\Gamma = \frac{k^* c_0}{D_e} \quad (4)$$

ここに、 c_0 は基準濃度であり、本解析では後述するようにベンゼンを対象物質とするため、ベンゼンの水への溶解度に等しいものとする¹⁾。また、 k^* は物質輸送係数であり、LNAPL汚染源の x 方向と y 方向長さである l_x と l_y を用いて次式により定義する¹²⁾。

$$k^* = 2 D_e \sqrt{\frac{v}{\pi D_z \sqrt{l_x l_y}}} \quad (5)$$

このとき、解析解は次式(6)と(7)により表される¹³⁾。

$$c = \int_0^t \frac{\Gamma(t-\tau)}{4 \sqrt{\pi \tau R / D_z}} \exp \left(-\mu \tau - \frac{R z^2}{4 D_z \tau} \right) \Psi d\tau \quad (6)$$

$$\Psi = \left(\operatorname{erfc} \left(\frac{y-y_2}{\sqrt{4 D_y \tau / R}} \right) - \operatorname{erfc} \left(\frac{y-y_1}{\sqrt{4 D_y \tau / R}} \right) \right) \left(\operatorname{erfc} \left(\frac{R(x-x_2)-v \tau}{\sqrt{4 D_x R \tau}} \right) - \operatorname{erfc} \left(\frac{R(x-x_1)-v \tau}{\sqrt{4 D_x R \tau}} \right) \right) \quad (7)$$

本解析では解析解を用いることでLNAPLの移行現象を扱い、観測井配置の基礎となす。そのため、透水係数が空間的に大きく変動するような不均質地盤への適用は困難である。

第2種境界条件に加えて、観測井配置結果に及ぼす境界条件の差異を検討するため、 $z=0$ において次式により定義される第3種境界条件を採用する。

$$\frac{\partial c}{\partial z} = k(x, y, t)(c(x, y, 0, t) - g(x, y, t)) \quad (8)$$

$$g(x, y, t) = \begin{cases} c_0 & (x_1 < x < x_2, y_1 < y < y_2) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

表-1 不確実性を有するパラメータ

パラメータ	確率分布	確率分布*	平均値	標準偏差	下限値	上限値
縦分散長: α_L (m)	対数正規分布	一樣分布	0.70	0.333	0.6	40.0
縦横分散長比: α_{TH} / α_L (-)	一樣分布	正規分布	0.45	0.11	0.1	0.8
縦横分散長比: $\alpha_{TV} / \alpha_{TH}$ (-)	一樣分布	正規分布	0.45	0.11	0.1	0.8
遅延係数: R (-)	一樣分布	正規分布	5.5	1.4	1.0	10.0
漏洩時間: t_L (days)	一樣分布	正規分布	915.0	280.0	30.0	1800.0
漏洩位置: x_1 (m)	一樣分布	一樣分布	-	-	-50.0**	0.0
漏洩位置: x_2 (m)	一樣分布	一樣分布	-	-	-50.0**	0.0
漏洩位置: y_1 (m)	一樣分布	-	-	-	20.0	80.0
漏洩位置: y_1 (m)	一樣分布	-	-	-	20.0	80.0

* 比較検討項目として 4.3 および 4.4 節にて適用する。 ** 4.3 と 4.4 節では 25.0 に設定する。

ここに、 k は物質輸送係数であり、 c と c_0 は溶解度の上下限界を表す¹⁹。第3種境界条件の下で解析解は次式および式(7)で表される¹⁹。

$$c = \int \frac{kc_0}{4R} \exp(-\mu\tau) \left(\sqrt{\frac{D_z R}{\pi\tau}} \exp\left(-\frac{Rz^2}{4D_z\tau}\right) - kD_z \exp\left(k(z + kD_z\tau/R)\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{Rz + 2kD_z\tau}{\sqrt{4D_zR\tau}}\right) \right) \Psi d\tau \quad (9)$$

本解析では濃度既定の第1種境界条件を用いた濃度分布は他の境界条件と比して実現象との乖離が大きい¹⁹ことから採用していない。また、本解析モデルではプールの厚みは考慮されず、座標軸の設定を変えることでDNAPLの溶解と移行に対処可能である。

(2) 不確実性解析

モンテカルロ法により多数のパラメータに関する不確実性を考慮する場合、信頼性のある結果を得るにはパラメータ同士の組み合わせに配慮して生成回数を増やす必要が生じる。そのため、解析に要する時間は莫大になり、計算効率の向上を図ることが望まれる。ラテンハイパーキューブ法 (Latin Hypercube Sampling)¹⁹ は層別サンプリングを伴う手法であり、対象の各パラメータを出現確率が等しい領域に分割し、各領域からランダムに値を抽出する。その後、パラメータの組み合わせをランダムに決定することで、シミュレーションの入力値とし、モンテカルロ法よりも少ないサンプル数で効率的にパラメータのばらつきを検討することが可能である¹⁹。

実地盤を考えた場合、地盤の物理的・化学的性質により汚染源の不特定部分から漏洩する移流分散特性は大きく変化する。分散長がとり得る値はサイトの地質性状や観測規模により様々であるため、一意的に与えるのではなく、文献¹⁰を参考に縦分散長は対数正規分布に従うと

仮定する。一方、横分散長は生成される縦分散長に応じて変化するものとし、水平方向横分散長および鉛直方向横分散長は縦分散長との比を一樣分布で表す。次に、土粒子への吸着性を示す汚染物質の場合、物質濃度だけでなく地層状況や地盤内の有機物含有量に応じて分配係数に変動が生じ¹⁷、結果的に遅延係数の変化につながる。そのため、遅延係数に関しても不確実性を有するパラメータと見なすものの、確率分布を裏付ける研究例¹⁰が希少であることから、一樣分布にて表現する。表-1に本解析で扱う不確実パラメータの確率分布と統計特性を列記する。

地下水面上に形成されるLNAPLプールの規模は漏洩状況や不飽和層における挙動により様々である。そのため、汚染源の面的規模に加えて、特定が困難な漏洩時間を一樣分布により表現することで汚染源に関する不確実特性として設定する。漏洩時間に関しては式(6)あるいは式(9)において濃度既定量 c_0 をパルス型関数により表現することで対処し、LNAPLプールの大きさは解析期間内で一定とする。すなわち、既定規模のLNAPLプールからの地下水への溶解が所定の期間継続する状態となっている。

本解析では対象となる不確実パラメータが9つあり、乱数の発生数に結果が依存することが懸念されるため、既往の研究例⁹に基づいて、500個の乱数を生成する。一般的なモンテカルロ法を用いると数十倍から数百倍の乱数生成が必要とされることからラテンハイパーキューブ法の効率性が伺える。

3. 観測井配置手法

(1) 遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA)

GAは生物の進化を工学的に模した多点探索による最適手法であり、多変数を未知量とした最適化問題で遭遇する複雑な解空間での探索が可能である¹⁹⁾。そのため、多数の観測井設置地点が対象となる本問題へ適用可能な手法であると考えられる。GAでは遺伝子コードである個体を生成するために決定変数、つまりは未知量をバイナリ化することで表現し、複数の個体を構築して個体群を作り出す。その後、各々の個体に対して環境への適合度、すなわち対象とする問題へのあてはまりの良さが決定され、これが高いもののほど次世代に選択されやすく、交叉や突然変異などの遺伝的作用により次世代の個体群を生み出す。この遺伝子操作を繰り返すことで世代の進行とともに適合度の上昇が期待され、最終的に得られた適合度の最も高い個体が推定すべき未知量の解を与えることになる。

本解析では設置数に制約がある条件下で、観測井配置の候補となる観測井すべてに固有の番号を与え、それらが推定すべき決定変数となり、バイナリ表現された遺伝子コードを進化させることで既定の世代交代を経た遺伝子配列が観測井配置案となる。すなわち、観測井網を構成する各観測候補井戸の組み合わせ番号を作成し、後述する汚染物質の探査確率が向上するように進化させることで最適な組み合わせを探索することとなる。

GAの探索過程において必要となるGAパラメータは経験的⁹⁾、また試行錯誤により個体数を100、トーナメントサイズを2、交叉率を0.75、突然変異を0.1、最終世代を500に設定する。

(2) 観測井配置候補地点と探査限界の設定

広域な汚染の進行を防ぎ、汚染源から所定の下流域内にて汚染物質を発見することを目的として、汚染物質が所定の時間内に拡がり得る濃度変動を所与の確率分布に基づいて500通りのリアライゼーションを生成することで想定し、既定濃度を超過して汚染物質が通過する地点を観測井配置の候補とする。

図-2に示す配置候補となる観測井群は汚染源から180mの下流域に10m間隔で設置し、176本の井戸に対して深度方向の1m, 5m, 10mにサンプリング点を設け、計528地点が観測井配置の候補となる。実際の水質観測状況を考えた場合、マルチサンブラ等の深度方向に複数地点でサンプル採取可能な機器が存在することから1つの井戸に対して深度方向に複数地点の観測位置を設けている。

実際、探査限界は測定・分析機器の精度やそれに関わるコストを勘案して設定され、環境基準値等が既定濃度を決定する指標になると考えられる。本解析ではLNAPLの代表例としてベンゼンを対象とし、ベンゼン濃度に対する探査限界の下限値を地下水への溶解度の

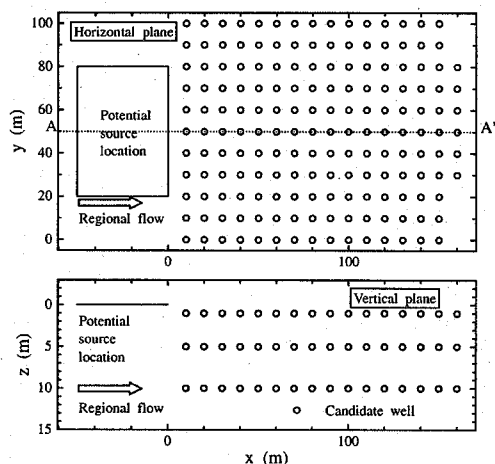


図-2 解析領域と候補井戸の配置. 上: 平面図, 下: A-A'断面図

1/1000倍とし、所定の時間内に拡がる濃度分布に基づいて観測井を配置する。また、危険側に濃度推移を評価するため崩壊定数は考慮せず、浸透流速 v を0.1m/day、有効拡散係数 D_e を $2.16 \times 10^{-5}(\text{m}^2/\text{day})$ に設定²⁰⁾し、解析期間を5年、計測間隔を60日とする。これは低流速に加えて遅延特性を考慮しているためであり、5年間の移行挙動に基づく観測井配置となっている。

(3) 評価関数の設定

探査限界値を超過した汚染ブルームが通過する領域内で井戸を設置する過程では候補となる観測井網を選定し、生成された濃度変動リアライゼーションに対して、少なくとも1つの観測井で探査限界を超える汚染ブルームが探査されれば探査できたものと見なす。この過程を全リアライゼーションに対して実施し、探査されたブルーム数に応じて探査確率を次式で定義し、評価関数とする。

$$DP(MW) = \frac{NDP}{TNR} \quad (10)$$

ここに、 DP は探査確率、 MW は設置観測井数、 NDP は探査されたブルーム数であり、 TNR は総リアライゼーション数を表す。本解析では、井戸の設置上限数がある条件下にて観測井網の探査確率が最大となる配置を探索する。

$$\text{maximize } DP(MW) \quad (11)$$

$$\text{subject to } \sum_{i=1}^{NW} P_i \leq MW$$

$$P_i = 0 \text{ or } 1 \quad i = 1, \dots, NW \quad (12)$$

ここに、 P_i は井戸を設置する場合に1、設置対象外では0

となる指標値である。GAでは1つの個体が1つの観測井網を構成しており、適合度の評価には探索確率を採用している。そのため、観測井の設置上限数や配置場所に応じて探索確率は変化することとなり、既定の進化を経た適合度の高い個体が最適観測井配置となる。

観測井より濃度情報を獲得する目的は水質状況の把握だけでなく、汚染源推定や水質浄化方法の材料とすることにある⁷²⁾。このとき、井戸同士が密集して設置される場合、観測データの質や量が類似の傾向を示すため、汚染探索後の有効材料にはなりにくい⁷⁾。また、汚染発覚時ならびに発覚後における濃度の空間分布を推定する場合、汚染プルームを捉えた観測井が空間的に広く分布している方が推定精度が向上する⁹⁾ため、観測井を密集させずに空間的に広く配置することも想定される。式(11)に示す条件だけでは密集した観測井網が構成される場合があり、設置上限数に加えて、井戸密度を考慮する。これは既定半径内への設置本数に制約を課すものであり、本解析では1本とする。井戸密度を考慮しない解析をパターン1とし、密度半径が20mあるいは30mの状態をパターン2、3とする。井戸密度の設定は汚染探索時の濃度分布推定ならびに汚染源推定における観測データの共線性を回避することを想定したものである。本解析では候補となる観測井を10m間隔で設置していることから、密度半径を20mまたは30mと設定することで配置状態を比較している。GAの探索過程では、既定距離以内に設置される観測井網の適合度を強制的にゼロと評価することで井戸密度を組み込むことが可能である。

4. 観測井配置結果と考察

(1) 境界条件の影響

観測井の設置や定期計測には多大な時間と労力が費やされ、コスト面での制約も考えられる。限られた少ない観測井を効率的に配置するため、本解析では設置上限を5本に設定する。また、深度方向に設けている3箇所の計測地点を地下水面に近い側の層から、Layer 1, 2, 3と表記することで深度方向への配置状態を検討する。

第2種および第3種境界条件の観測井配置へ及ぼす影響を考察するため、パターン1に対する配置結果を図-3に示す。配置結果は両条件ともに一致し、汚染源に近い位置で配置されており、探索確率は約95%が得られている。両条件は類似した濃度変動を導くため、結果として配置への影響は小さくなる。特にパターン1では一致あるいは似通った配置となっている。井戸密度を考慮する場合には設置間隔が拘束されるため、一致する配置になりにくいものの、配置状況が類似した結果が得られている。

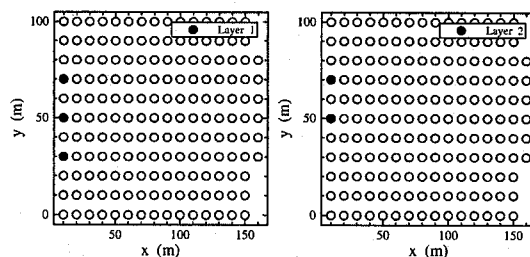


図-3 第2種および第3種境界条件による観測井配置

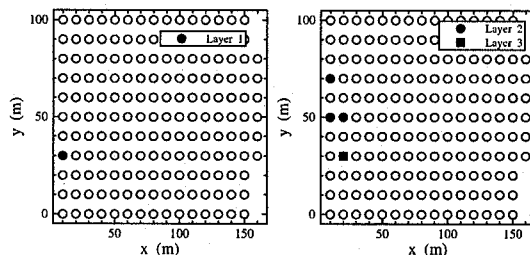


図-4 評価関数(14)を用いた観測井配置結果

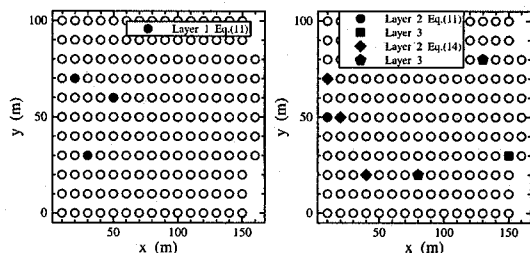


図-5 評価関数による観測井配置の差異

Leij and van Genuchtenが指摘¹³⁾するように、第2種境界条件は第3種境界条件よりも現実的な設定であり、観測井探索の境界条件に対する依存性が低いことから、以降の解析では第2種境界条件を用いた配置結果を示す。

(2) 評価関数の再設定

図-3に示す配置は高い探索確率であるものの、観測井同士の間や観測井網の外側を通過する汚染プルームに対しては、プルームのフロント部分を捉えるのではなく、時間の経過とともに横分散により汚染領域が拡大することで測定濃度が上昇する結果、LNAPLプルームを探索している。つまりは、高濃度領域が観測井網を通過した後に探索されるプルームが存在することを示している。この点はMeyerらも指摘³⁾しており、汚染探索時に汚染プルームは観測井群よりも下流域に拡大している可能性があり、探索後の浄化対策や汚染源の推定への連携に支障をきたすことが懸念されるため、そのような状況を可能な限り回避することが望まれる⁹⁾。

そこで、観測地点における濃度上昇に関する縦分散または横分散への依存性を測る指標として、時間モーメントを導入し、評価関数を再設定する。ある観測井*i*における時間0次モーメントは次式により表される。

$$M_{0,j}^i = \int_0^{\infty} c(x, y, z, t) dt \quad (13)$$

対象となるプルーム*j*に対して、すべての観測井にて時間0次モーメント $M_{0,j}^i$ を評価し、モーメント量が最大となる地点の値 $M_{0,j}^{\max}$ で基準化することで基準化された値が最大となる観測井の組み合わせを求めることとなる。以上の議論より、最大化する評価関数は次式で表される。

$$\text{maximize} \sum_{i=1}^{MW} \sum_{j=1}^{TNR} \frac{M_{0,j}^i}{M_{0,j}^{\max}} \quad (14)$$

LNAPLプールの規模や漏洩時間に依存してモーメント量は大きく変化することから、特定の漏洩ケースにおけるモーメント量の偏りを抑えるため、モーメント量を基準化している。また制約条件は式(12)である。これにより、探査確率を大きく低下させずに、横分散により汚染物質が到達する状況の重みを低下することが可能となる。一方、探査確率の最大化を唯一の目的に設定する場合には、式(11)に基づいた配置で目的は達成されと考えられる。

評価関数(14)に基づく配置結果を図-4に示す。図-3と比して第3層目に観測井が設置されることで、*y*-*z*面で広く汚染プルームを探索する配置になっており、探査確率は約93%である。

次に、評価関数(11)と(14)に関して、20mの井戸密度を考慮したパターン2の結果を図-5に示す。井戸密度の制約により空間的に広く観測井が配置されるものの、評価関数(11)の方は比較的汚染源に近い領域に集中して配置される傾向にある。探査確率は約7%高く得られるが、前述した汚染探査後の情報活用という観点からは疑問の残る配置である。そのため、観測井にて計測する濃度データの利用目的に沿った評価関数の設定が望まれる。なお、以降の解析では式(14)に示される評価関数を適用している。

(3) 確率分布の影響

パラメータの不確実性は対象となる地盤や物質に応じて不確実度合いや確率分布が異なってくる。そのため、確率分布の配置結果へ及ぼす影響について検討することは有意義であると言える。図-6に縦分散長の確率分布を対数正規分布から一様分布に変化させた場合の配置結果

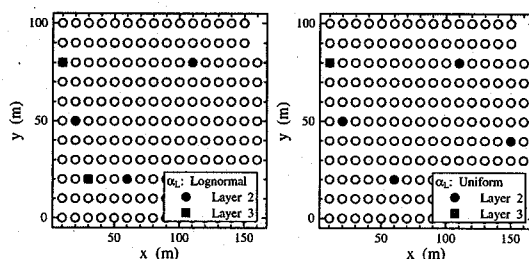


図-6 縦分散長の確率分布を変えた配置結果

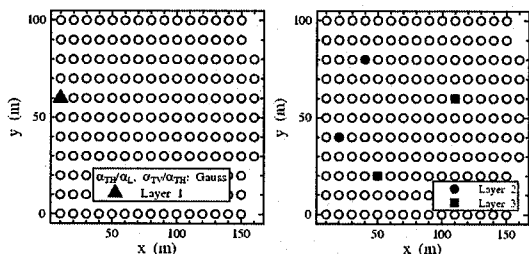


図-7 縦横分散長比の確率分布を変えた配置結果

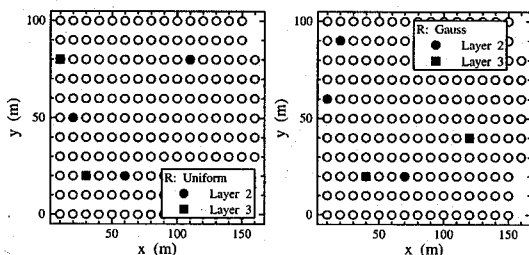


図-8 遅延係数の確率分布を変えた配置結果

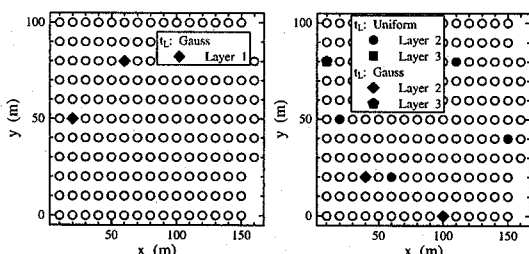


図-9 漏洩時間の確率分布を変えた配置結果

を示す。両結果ともにLayer 1への配置は生じていないため、左に対数正規、右に一様分布の結果をパターン3について示している。両者はほぼ同じ分布となっており、縦分散長の確率分布が及ぼす影響は小さいことがわかる。縦分散は地下水流れ方向に対する汚染プルームの拡大を表す現象であるため、観測井配置への影響度合いは小さくすると推察される。

一方、縦横分散比の確率分布を一様分布から正規分布へ変化させることにより、配置結果は図-7となる。分散

比の確率分布, つまりは横分散長の取り得る分布を変化させることでLayer 1へ観測井が設置され, Layer 2よりも下流域にてLayer 3の観測井が配置されている。すなわち, 地下水面から溶解するLNAPLブルームが形成する濃度分布に沿った配置となっている。横分散長が正規分布にて表現されることにより, 一様分布よりは平均値付近の値が多く生成され, 鉛直方向に対するブルームの拡大規模が特定されることが要因であると推察され, ブルームの鉛直方向への拡大と呼応した配置を形成することが探査確率の向上につながることを示唆していると考えられる。前述のように, 評価関数に時間0次モーメントを導入することで汚染探査時にLNAPLブルームが観測井よりも下流域へ流下している可能性の低下を図っているものの, 配置結果へ及ぼす横分散の影響は縦分散よりもかなり大きいことが伺える。

ベンゼンを代表としてBTEXならびに有機系の物質は地盤内の有機物濃度に比例して吸着量が増加し, 分配係数や遅延係数の増加につながる。地質調査等により汚染サイトの遅延係数の取り得る範囲を限定できるような場合を考慮して確率分布に正規分布を適用し, 配置結果を図-8に示す。図-6と同様に観測井はLayer 1へ設置されない結果を得ており, 左に一様分布, 右に正規分布による結果を示す。設置地点は異なるものの, 最下流部への配置を除いて, 他の観測井は1つ隣のノードへ移動する結果となり, 確率分布の影響は小さいと考えられる。

以上のことより, 均質地盤においては物質移動パラメータの確率分布が観測井配置へ与える影響は比較的小さいと言える。しかしながら, 物理的・化学的不均質性が高い地盤では巨視的分散や遅延特性の空間変動により確率分布の設定が影響してくることが考えられる。これらの点は本研究の対象外ではあるものの, より最適な配置を勘案する上で重要な課題と位置づけられる。

物質移動パラメータの設定以上に, 漏洩時間に関する確率分布の設定は困難な作業であり, 予測される漏洩期間内で一様分布させることが安全側の評価と考えられるが, ある程度の予測がなされ不確実度合いを低減できるような場合には正規分布等の異なる分布を想定することも可能である。図-9に示すように, 漏洩時間の確率分布を変化させることで配置は大きく変動しており, 確率分布の影響が見られる。漏洩時間は観測地点の時間モーメントに大きく影響することが配置位置を変化させる要因であり, 正規分布となることで汚染ブルームの多様性がある程度限定され, 結果として時間モーメント量の変化が少なくなることと異なる配置結果を得たと推察される。

漏洩時間とともにLNAPLブルームの規模に関しても予見は困難なパラメータの1つである。一様分布で漏洩範囲を設定するものの, 想定される汚染源が x 方向に縮

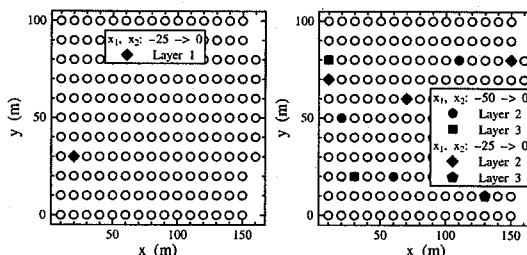


図-10 汚染源規模を変えた配置結果

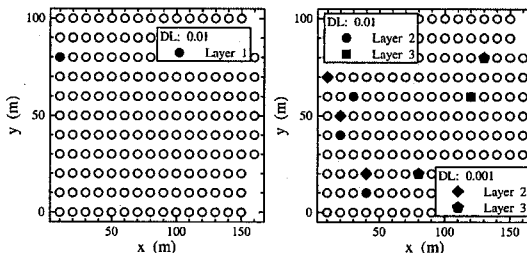


図-11 探査限界を大きく設定した配置結果

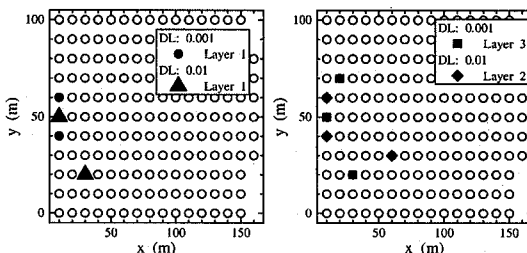


図-12 探査限界と確率分布を変えた配置結果

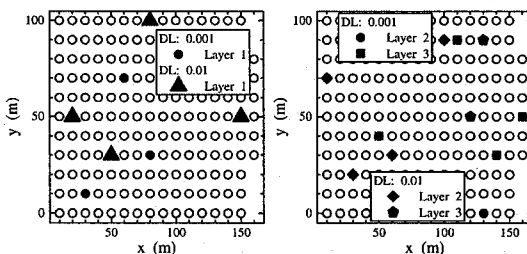


図-13 設置井戸数を10とした配置結果

小される場合の結果を図-10に示す。流下方向へ漏洩規模が縮小することで鉛直方向へのブルーム濃度分布が変化するため, Layer 1でのブルーム探査が生じていると考えられる。また, モーメント量を評価関数に採用することで横分散によるブルームの到達よりも縦分散による汚染探査が重視された結果, Layer 3への設置数が増加したと考えられる。さらには, 井戸設置間隔の制約とも相まってより汚染源から離れた地点に配置される観測井が増加したと推察される。

全体として、モーメント量を評価関数へ適用すると汚染源に比較的近い領域と下流域へ分散して配置される結果を導くことと、地下水面に最も近い地点ではなく、水面下5mの位置を中心とした配置となることがわかる。これは井戸密度の影響に加えて、時間モーメントの影響が考えられる。評価関数(14)において重みが低下するのは漏洩するブルームの中心軸から大きく離れた地点であり、常にLayer 2や3の重みが小さいとは限らず、Layer 1においてもブルームの通過後に横分散によりブルーム探索と判定される地点が多く存在する。そのため、結果的に地下水面に近い層のみが設置対象になるとは限らず、Layer 2への配置が中心となっており、この点は高濃度地点のみを配置対象とすることが必ずしも効率的な配置とはならないことを示唆している。

(4) 探索限界値の影響

探索限界 (Detectable limit: DL) の値が小さいほど濃度レベルの低い汚染ブルームを捉えることができるため、設置数は少なくても観測井網としての精度は向上する。しかしながら、低濃度レベル汚染を探索する必要性はサイト特有の問題であり、汚染物質や調査状況により要求される測定精度に差が生じてくる。そこで、探索限界値が観測井配置結果へ与える影響について検討するため、探索限界の下限値を0.001から0.01へ大きく設定した際のパターン2に対する観測井網を図-11に示す。配置状態は大きく異なり、探索確率は87.4%から72.4%へ低下する。これは探索限界まで到達しない汚染ブルームが発生するためである。なお、探索限界が0.001の配置により0.01の探索限界で探索確率を求めると70%を下回り、探索確率の高い観測井網が構成されていることがわかる。

配置状態が似通った例として、異なる確率分布を使用した場合のパターン1に関する結果を図-12に示す。井戸密度に関する制約が課されないため、観測井同士が汚染源に近い地点に配置され、探索限界の値に関わらず類似した観測井網が構成されている。このときの探索確率は探索限界が大きい方が80%、小さい方が85%となっている。また、観測井の設置数を10に増加させた場合のパターン2に対する結果を図-13に示す。探索限界に応じて配置状態は大きく異なり、下限値設定の影響が見て取れる。下限値を引き上げると探索限界を下回る汚染状態が存在することで探索確率が変動し、結果的に配置形態へ影響を及ぼすこととなる。実際には、探索限界値および観測井設置数の設定にはコスト評価が関連する項目となるため、観測井配置はより複雑な問題となる。したがって、観測井配置において探索限界値の設定は重要な検討事項であり、不確実要素の確率分布と同様に状況に応じた設定が望まれる。

5. 結論

本研究ではLNAPLプールから地下水への溶解するLNAPLブルームに対する観測井の配置方法ならびにパラメータの確率分布の影響に関して検討した。得られた成果を列記すると以下ようになる。

1. 第2種境界条件と第3種境界条件が観測井配置に及ぼす影響は小さく、LNAPLプールから地下水への溶解を考えると第2種境界条件の方が現実に近いモデルと言える。
2. 時間0次モーメントを観測井配置の指標に用いると横分散による汚染ブルーム探索の重みを低減させるものの、地下水面に最も近い地点ではなく、地下水面下5mの位置を中心とした配置となる。この点は高い探索確率を目的とした観測井配置において、高濃度地点のみを配置対象とすることが必ずしも効率的な配置とはならないことを示唆している。
3. 物質移動特性の確率分布が配置状態へ及ぼす影響は小さいが、汚染源性状の与える影響は大きい。特に、観測井網は漏洩時間の統計の見積もりに依存する。
4. 探索限界の設定値に応じて探索確率だけでなく、観測井網は異なる。
5. GAは観測井設置数や井戸密度の組み込み、種々の評価関数に対応可能な手法であり、観測井配置案の検討に対するGAの適用可能性を示すことができた。

本解析で適用した評価関数は配置の優先度合いを考慮すると汚染源に比較的近い地点へ設置されやすい状況を生み出す。これは1つの観測井だけで汚染ブルーム探索が可能となる条件の下にある結果であり、より汎用性・実用性の高い制約条件として、汚染探索時の適切な濃度分布推定³⁸⁾などを付加すると異なる配置結果になると推察される。本研究はそのための足がかりとなるものであり、今後の課題の1つである。

参考文献

- 1) Hudak P.F., Loaiciga H.A. and Marino M.A.: Regional-scale ground water quality monitoring via integer programming, *Journal of Hydrology*, Vol.164, pp.153-170, 1995.
- 2) Meyer P.D. and Brill E.D.: A method for locating wells in a groundwater monitoring network under conditions of uncertainty, *Water Resources Research*, Vol.24, No.8, pp.1277-1282, 1988.
- 3) Meyer P.D., Valocchi A.J. and Eheart J.W.: Monitoring network design to provide initial detection of groundwater contamination, *Water Resources Research*, Vol.30, No.9, pp.2647-2659, 1994.

- 4) Hudak P.F. and Loaiciga H.A.: An optimization method for monitoring network design in multilayered groundwater flow systems, *Water Resources Research*, Vol.29, No.8, pp.2835-2845, 1993.
- 5) Lee Y.-M. and Ellis J.H.: Comparison of algorithms for nonlinear integer optimization: application to monitoring network design, *Journal of Environmental Engineering*, Vol.122, No.6, pp.524-531, 1996.
- 6) Aly A.H. and Peralta R.C.: Comparison of a genetic algorithm and mathematical programming to the design of groundwater cleanup systems, *Water Resources Research*, Vol.35, No.8, pp.2415-2425, 1999.
- 7) Reed P., Minsker B. and Valocchi A.J.: Cost-effective long-term groundwater monitoring network design using a genetic algorithm and global mass interpolation, *Water Resources Research*, Vol.36, No.12, pp.3731-3741, 2000.
- 8) Montas H.J., Mohtar R.H., Hassan A.E. and AlKhal F.A.: Heuristic space-time design of monitoring wells for contaminant plume characterization in stochastic flow fields, *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol.43, pp.271-301, 2000.
- 9) Inoue K., Masaki I. and Tanaka T.: Monitoring network design for detection of groundwater contamination under parameter uncertainty, *Journal of Rainwater Catchment Systems*, Vol.10, No.2, pp.11-18, 2005.
- 10) Morisawa S. and Inoue Y.: Optimum allocation of monitoring wells around a solid-waste landfill site using precursor indicators and fuzzy utility functions, *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol.7, pp.337-370, 1991.
- 11) Hunt J.R., Sitar N. and Udell K.S.: Nonaqueous phase liquid transport and cleanup: 1. Analysis of mechanisms, *Water Resources Research*, Vol.24, No.8, pp.1247-1258, 1988.
- 12) Chrysikopoulos C.V.: Three-dimensional analytical models of contaminant transport from nonaqueous phase liquid pool dissolution in saturated subsurface formations, *Water Resources Research*, Vol.31, No.4, pp.1137-1145, 1995.
- 13) Leij F.J. and van Genuchten M.Th.: Analytical modeling of nonaqueous phase liquid dissolution with green's functions, *Transport in Porous Media*, Vol. 38, pp. 141-166, 2000.
- 14) Fortin J., Jury W.A. and Anderson M.A.: Dissolution of trapped nonaqueous phase liquids in sand columns, *Journal of Environmental Quality*, Vol.27, pp.38-45, 1998.
- 15) McKay M.D., Beckman R.J. and Conover W.J.: A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code, *Technometrics*, Vol.21, No.2, pp.239-245, 1979.
- 16) Gelhar L.W., Welty C. and Rehfeldt K.W.: A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers, *Water Resources Research*, Vol.28, No.7, pp.1955-1974, 1992.
- 17) Chiou C.T., Porter P.E. and Schmedding D.W.: Partition equilibria of nonionic organic compounds between soil organic matter and water, *Environmental Science and Technology*, Vol.17, No.4, pp.227-231, 1983.
- 18) Baek D.-S., Kim S.-B. and Kim D.-J.: Irreversible sorption of benzene in sandy aquifer materials, *Hydrogeological Processes*, Vol.17, pp.1239-1251, 2003.
- 19) Goldberg D.E.: Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning, Addison-Wesley Publishing, Inc., 412p., 1989.
- 20) Khandelwal A., Rabideau A.J. and Shen P.: Analysis of diffusion and sorption of organic solutes in soil-bentonite barrier materials, *Environmental Science and Technology*, Vol.32, No.9, pp.1333-1339, 1998.
- 21) Mahar P.S. and Datta B.: Optimal monitoring network and ground-water-pollution source identification, *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol.123, No.4, pp.199-207, 1997.

(2006. 5. 26 受付)

A Method for Designing Monitoring Well Networks to Detect LNAPL Plume

Kazuya INOUE¹, Ippei MASAKI² and Tsutomu TANAKA¹

¹Faculty of Agriculture, Kobe University

²Graduate School of Science and Technology, Kobe University

Monitoring networks are designed based on a developed methodology linked contaminant transport simulations from LNAPL source and optimization models. Advection and dispersion simulation generates LNAPL plume realizations while the use of Latin hypercube sampling accounts for uncertainty in transport parameters and in contaminant source characteristics. Genetic algorithm provides a prescribed number of wells in order to maximize a number of detectable LNAPL plumes with a concentration above a specified limit and incorporates temporal moment into objective function to reduce the weight regarding plume detection at a monitoring point where lateral dispersion contributes to the increase of detection probability. Several examples of the method in a three-dimensional hypothetical domain are presented to show the effect of probability density function on a monitoring network, suggesting that source characterization has a substantial effect on allocation of wells relative to transport parameters. Additionally, the results reveal that a little difference of boundary conditions between second-type and third-type is observed while the detectable limit is an important factor in monitoring network design.