# 情報の価値を用いた逐次型調査地点最適化と空間分布推定法の基礎検討

東京都市大学　学生会員　○田﨑　陽介
東京都市大学　正会員　吉田　郁政
東京都市大学　非会員　小西　駿二郎

## １．はじめに

これまで，調査計画の多くは経験的に立案されてきた．近年，調査地点の最適配置に関する研究が増えつつあるが，既往研究の多くは不確定性の大きさに注目した手法であり，限界状態を超過した場合の影響度の大きさまでは考慮していないことが多い．著者らは，情報の価値（Value of Information，VoI）の考え方に基づく最適な調査計画の方法について研究を進めてきた[1]．

土壌汚染は現代社会で対処しなければならない問題の一つである．環境省のガイドライン[2]には汚染を特定するための調査方法 5 地点均等混合方式が示されている．本研究では，汚染調査を例として最適な調査計画の方法について検討した．汚染地域を検出するための調査をいくつかのステップで実行する場合の最適な地点配置と対象とするパラメタの空間分布推定の例を示す．

## ２．情報の価値に基づく最適配置の検討手法

情報の価値 VoI とは，不確定性を考慮した意思決定のための指標であり，環境リスク，医学，情報工学などの多くの分野で利用されている．しかし，土木分野での利用は多くはない．

Kriging を用いて対象領域内の汚染濃度の推定値とその不確定性の分布を推定する．本研究では，推定値が基準値（=1.0）を上回る場合は対策が必要，下回る場合に対策不要と判断すべきと仮定し，それぞれの判断と実際の調査結果に対しペナルティ $C_{11}$, $C_{12}$, $C_{21}$，$C_{22}$ を設定する．対策実施の判断と実際の状況との関係により生ずる不利益を意味する．例えば，対策が不要であると判断したが，実際は必要であった場合，人的被害等が発生する可能性があると考えられ, その経済損失をペナルティ $C_{12}$ として考慮する．各ペナルティとその発生確率を掛け合わせることで判断によるコストの期待値を算定する．コストの期待値が小さくなるように意思決定をすることが合理的である．対策が不要である確率を $P_1$，評価点を $i$ とすると，評価領域全体における判断によるコストの期待値 $J$ は，次式より求められる．

$$J=\sum_i L_i=\sum_i \min\left(C_{11}\left(1-P_{1,i}\right)+C_{12}P_{1,i},\quad C_{21}\left(1-P_{1,i}\right)+C_{22}P_{1,i}\right) \tag{1}$$

追加調査前後の判断によるコストの期待値の差分が VoI である．評価点における汚染度の評価値ベクトル $x$ が観測量ベクトル $z$ によって Kriging により更新されたとする．観測量ベクトルに関する確率密度分布を $p(z)$とすると，VoI は次式で表される．

$$VoI=\int J(x\,|\,z)\,p(z)\,dz-J(x) \tag{2}$$

本研究において VoI は，情報を得ることによるコスト削減量の期待値と捉えることができる．VoI が最大となるような調査の配置は，判断ミスによるコストを最も削減できるということを意味する．最適化には，大域解探索手法の一つである粒子群最適化手法（Particle Swarm Optimization，PSO）を用いる．

## ３．土壌汚染対策を対象とした最適調査配置

2 次元平面において, 汚染地域を検出するための調査計画をいくつかのステップで実行する．まず，5 箇所で調査を行い，汚染度を確認する．次に，その情報に基づき，次の調査位置を決定する．この手順を繰り返し汚染領域を特定する．調査対象地域は 32m×32m の正方形である．

**図−1 (1)** に仮定した真の汚染分布を示す．**図−1 (2)** は，環境省のガイドライン[2]に示された調査方法に基づいて決定された 5 つの調査地点を示している．また，その調査結果からクリギングによって推定された汚染の分布も併せて示している．推定された分布は，真の分布とは程遠いものである．黒の等高線は閾値 $x_0$=1.0 の値を示しており，黒線の内側が汚染領域である．自己相関距離と標準偏差は，それぞれ,

キーワード　意思決定論，リスク，不確実性，確率場，クリギング，最適配置
連絡先　〒158-8557　東京都世田谷区玉堤１丁目２８－１　東京都市大学　ＴＥＬ03-5707-0104

© Japan Society of Civil Engineers

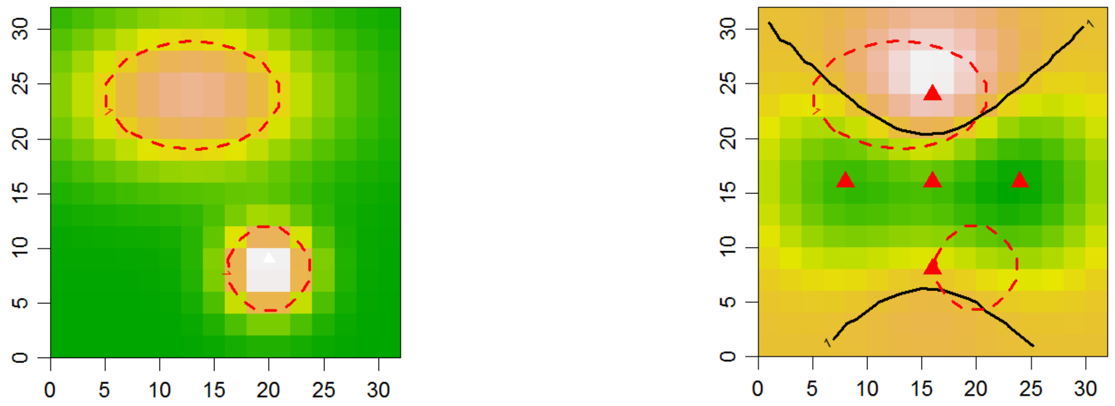
7.5m，0.1 と仮定した．観測誤差の標準偏差は 0.01 とした．コスト $C_{11}$，$C_{12}$，$C_{21}$，$C_{22}$ は 0，10，2，2 と仮定した．初回の 5 つの調査結果を考慮し，情報の価値 VoI に基づき決定された 5 つの追加調査の地点を**図-2**(1)に示す．また，初回の 5 点の調査および追加の 5 点の調査，すなわち合計 10 点の調査結果に基づいて，クリギングにより推定された汚染の分布を併せて示している．以降，同様に 5 つの追加調査位置を決定する手順を繰り返す．合計 20 と 25 点の調査を行った結果を**図-2**(2)と(3)に示す．調査数が増えるにつれて，汚染領域が明確に同定される．同様にしていくつかの汚染パターンに対して検討を行ったところ，想定する自己相関距離が大切であり，適切に設定していない場合は適切に汚染地点を同定できない場合もあった．

## 4．おわりに

本研究では，土壌汚染を対象に危険な領域を検出するための追加調査地点について，情報の価値 VoI に基づく最適配置を例示した．本研究では，各事象のコスト，ランダム成分の標準偏差や自己相関距離などのパラメタを仮定している．自己相関距離は汚染領域を検出するための重要なパラメタであり，各ステップで情報が増えるに従い更新することが好ましい．こうしたデータ適用型のアルゴリズムの開発は将来的研究課題の一つである．

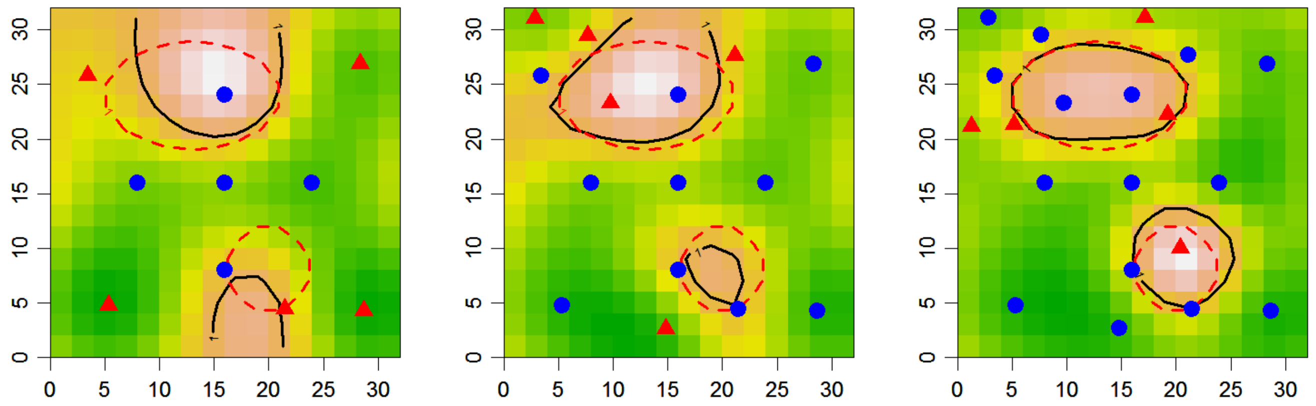
**参考文献**

1) Yoshida, I.，Tasaki, Y.，Otake, Y. ，Wu, St. ：Optimal sampling placement in a Gaussian random field based on Value of Information，ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering，Vol. 4，No. 3, 2018.
2) 環境省：土壌汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン（改訂第 2 版），2012.



(1) 真の汚染分布　　(2) 自己相関距離 7.5m とした場合の 5 の調査結果

**図-1** 汚染領域の真の分布



(1) 合計 10 の調査　　(2) 合計 15 の調査　　(3) 合計 20 の調査

**図-2** 情報の価値 VoI に基づく最適配置の結果


© Japan Society of Civil Engineers