



外生ドリフトクリギングを利用した サイト解放検認方法の検討

安全研究センター 環境影響評価研究グループ

本研究は原子力規制委員会原子力規制庁「平成29, 30年度廃止措置・クリアランスに関する検討」として実施したものである

はじめに

- 廃止措置終了では解放後の跡地利用などによる公衆の被ばく線量が基準以下であることを確認する必要がある。被ばく評価の前提となる敷地内の放射能分布について、空間的な相関を考慮できる地球統計学的手法クリギングにより、限定された測定点における濃度データから、敷地内の放射能分布を推定するプログラムESRADの開発を進めてきた。
- 本研究では、最終的に行われる試料採取などによる代表点測定に加えて、事前サーベイにより得られることが想定される敷地全体の線量率分布を放射能濃度分布推定の補足的情報として活用できる可能性を考慮し、外生変数を取り入れたクリギング（外生ドリフトクリギング）を行えるように、ESRADを改良した。本報告では、その手法と適用例を紹介する。

放射能分布推定プログラムESRAD

- 地球統計学的手法クリギングに基づき領域内での限定された測定点数の濃度から空間的相関を考慮して領域全体の濃度分布を推定する計算プログラム

クリギングとは

- 限定された地点での測定濃度から非測定点での濃度を補間法で推定
- 非測定点の濃度 $z^*(x)$ を測定濃度 $z(x_\alpha)$ ($\alpha = 1, \dots, n$)の加重平均で近似

$$z^*(x) = \sum_{\alpha=1}^n w_\alpha z(x_\alpha)$$

- 測定濃度を基に2点間の相関を考慮して重み係数 w_α を決定
- $\sum_{\alpha=1}^n w_\alpha = 1$ の条件下で真値と推定値の差の分散 $\text{var}(z^*(x) - z(x))$ を最小化

物理量 $z(x)$ に対する仮定

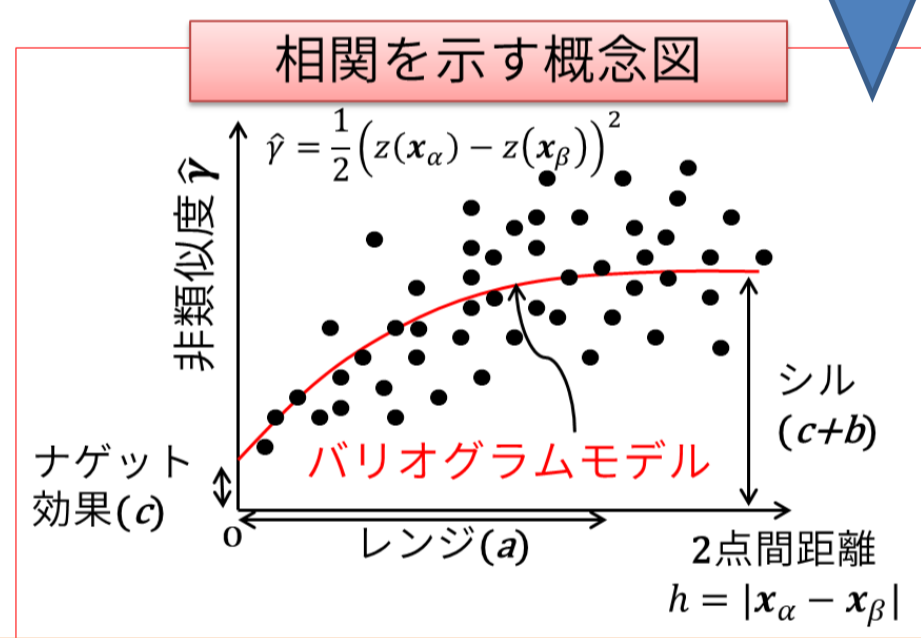
- 期待値 $[z(x)]$ が定数 μ となるような確率変数
- 2点間の相関が距離 h に従い低下する
- 非類似度を示す関数：バリオグラム $\gamma(h)$ が増加
 $\gamma(h) = \frac{1}{2}[z(x+h) - z(x)]^2$

- 通常型クリギング方程式： $\beta = 1, \dots, n$ の連立方程式

$$\sum_{\alpha=1}^n w_\alpha \gamma(x_\alpha - x_\beta) + \mu = \gamma(x_\beta - x)$$

μ ：ラグランジュの未定乗数

- 推定結果の推定分散 σ^2 を算出： $\sigma^2 = \mu + \sum_{\alpha=1}^n w_\alpha \gamma(x_\alpha - x)$
- 推定値とともにその不確かさ情報を提供



外生ドリフト法の導入

- 本来の測定値（主変数）に加え、線形的な関係を持つ補足的な測定値（外生変数）を用いることで、情報を補完することが可能
- 外生変数を利用する外生ドリフト法を組み合わせ、推定精度を向上

測定値を、確率成分 $y(x)$ とドリフト成分 $m(x)$ に分離

$z(x)$ を $y(x)$ に置き換えてバリオグラムを作成

$$z(x) = y(x) + m(x) \quad s(x): \text{外生ドリフト関数} \quad \gamma_y(h) = \frac{1}{2}[y(x+h) - y(x)]^2$$

a, b : 定数

※上記の通常型の場合、 $b = 0$ のため $\gamma(h) = \gamma_y(h)$

外生ドリフトクリギング方程式	$\sum_{\alpha=1}^n w_\alpha \gamma_y(x_\alpha - x_\beta) + \mu_0 + \mu_1 s(x_\beta) = \gamma_y(x_\beta - x)$
推定点の推定値	$z^*(x) = \sum_{\alpha=1}^n w_\alpha y(x_\alpha) + s(x) = \sum_{\alpha=1}^n w_\alpha z(x_\alpha)$
推定点の推定分散	$\sigma^2 = \mu_0 + \mu_1 s(x) + \sum_{\alpha=1}^n w_\alpha \gamma_y(x_\alpha - x)$

まとめ

- 廃止措置終了確認における検認に向けて、放射能濃度分布推定プログラムESRADに外生ドリフト法を導入した
- 事前に取得した線量率分布を外生変数として利用した外生ドリフトクリギングにより、放射能濃度の測定点数が限定された場合でも、分布推定を改善できる見通しが得られた

今後の課題

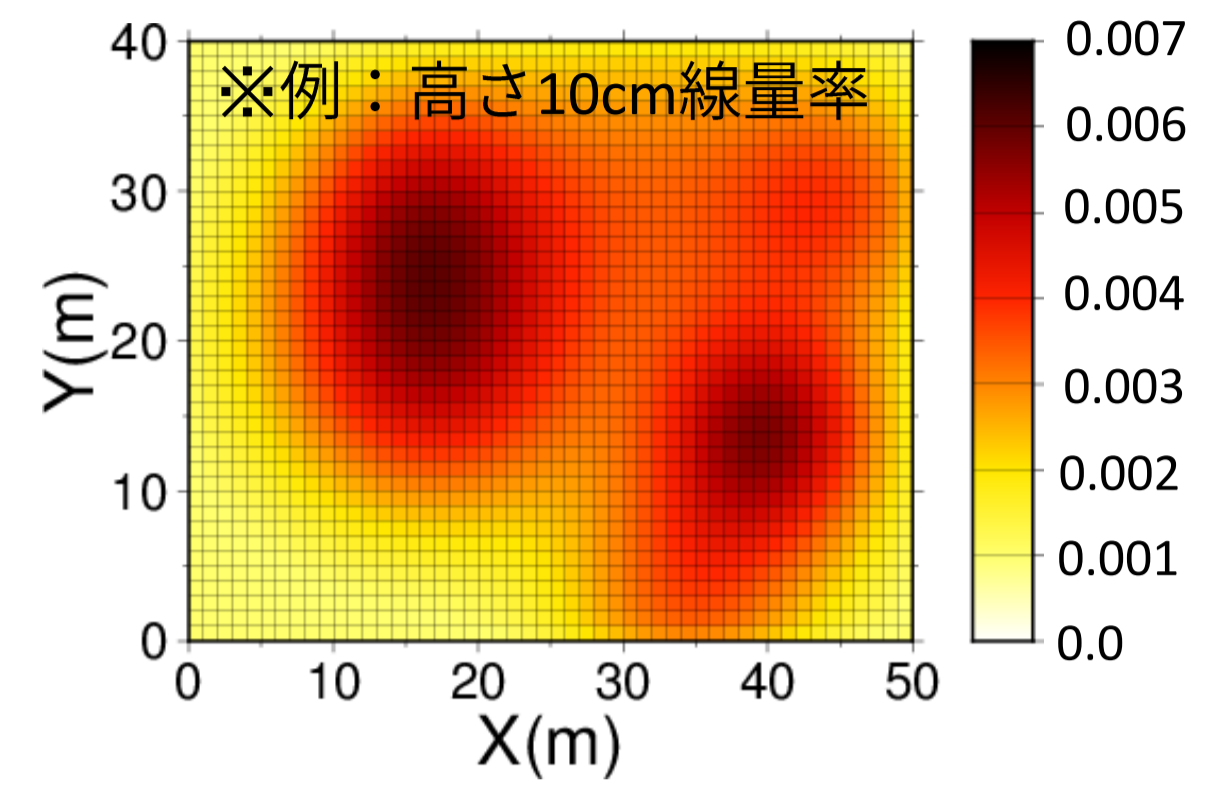
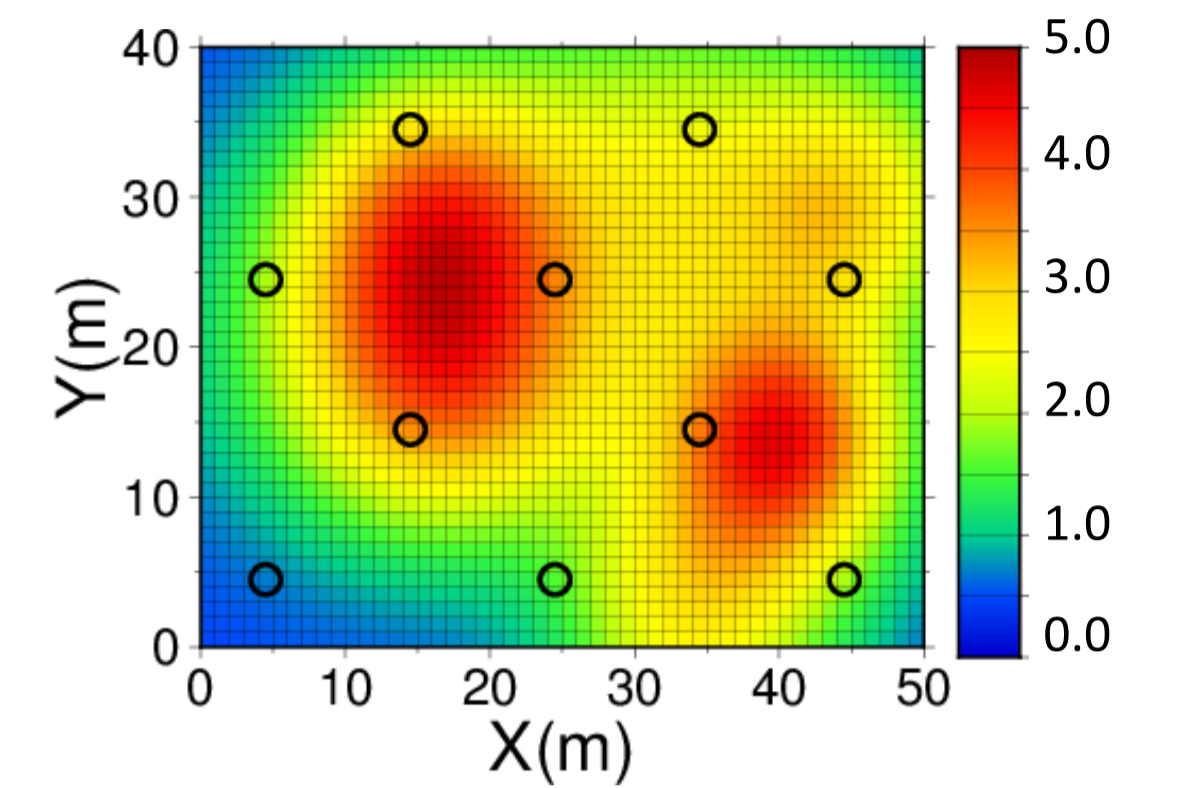
- 線量率測定結果には測定誤差が含まれることから、測定値に応じた測定誤差を与えて、放射能濃度分布推定に与える影響を評価できるようにESRADを改良
- 廃止措置終了確認時に想定される敷地内のさまざまな放射能濃度分布を設定し、方向依存性、領域分割、適用範囲などの観点から、手順を検討する。

適用例

真値が既知である仮想分布（2000セル）に対し、10点の濃度測定点から全体分布を推定

主変数：放射能濃度(Bq/g) ($\times 10^{-2}$)

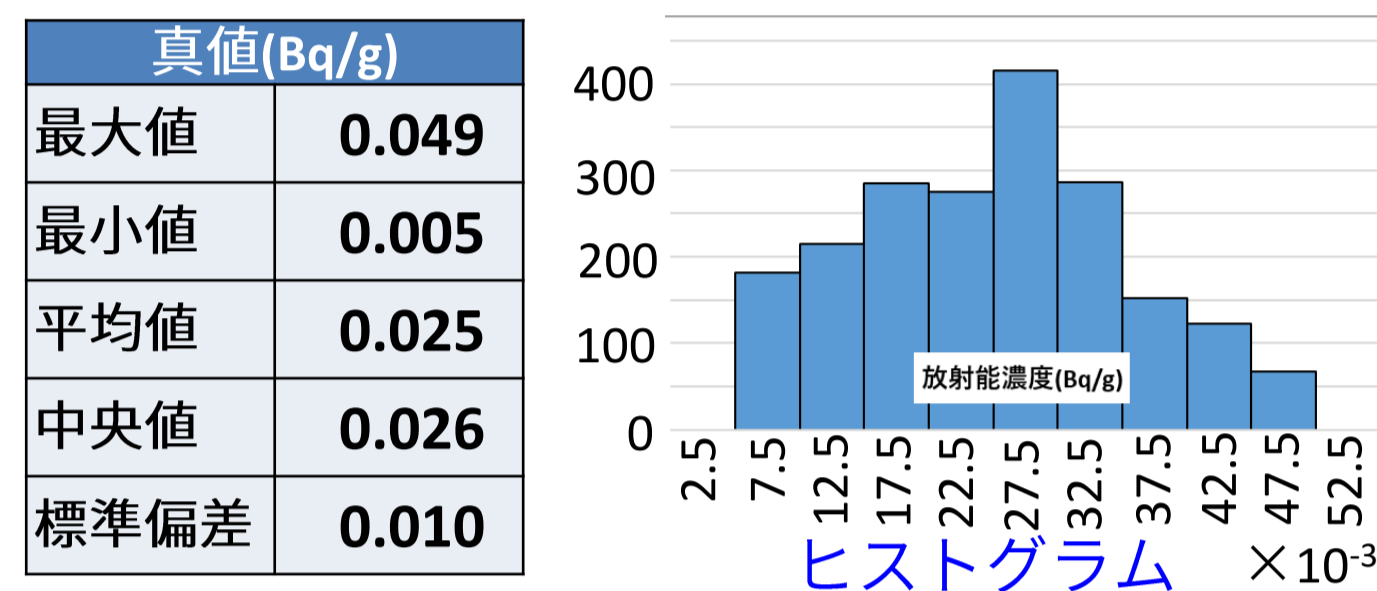
外生変数：線量率($\mu\text{Sv/h}$)



○ 濃度測定点：10点

線量率測定点：2000点

仮想分布の濃度データ概要（2000セル）



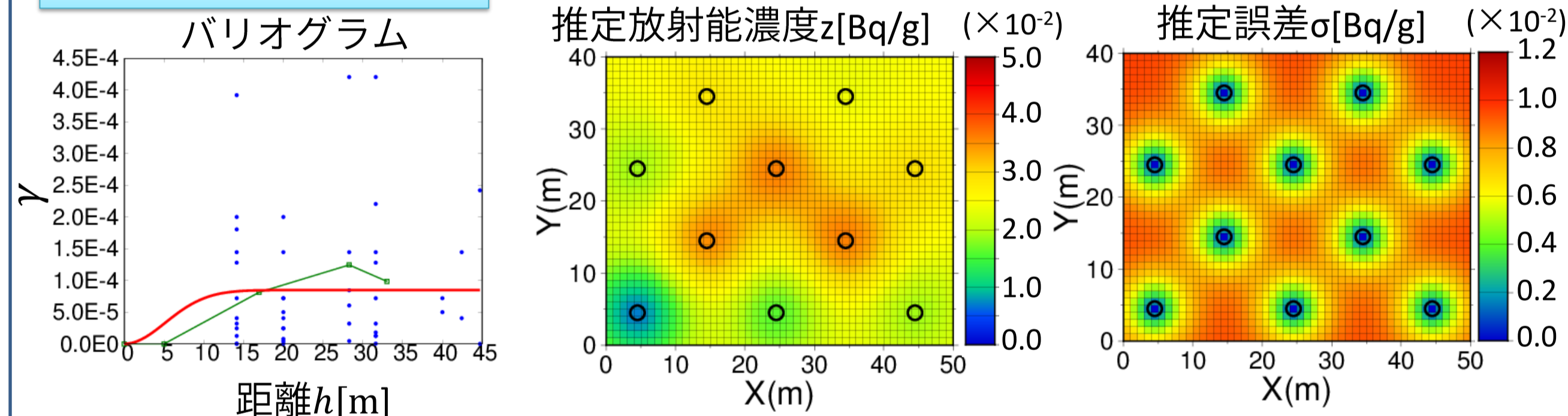
ただし、実際の敷地線量率サーベイでは、天然核種によりバックグラウンド放射線が存在するため、単核種の寄与のみを取得できるようにスペクトルサーベイメータなどを適用する必要がある

- 放射能濃度より、地上10cm～1m高さで測定したものと模擬的に算出
- 核種はCs-137 (γ 線) のみと仮定
- 単核種の寄与のみを考慮する場合、線量率は地表の放射能濃度と理論上相関を持つはず
- 放射能濃度は測定点数が限定されるのに対し線量率は密に取得可能

真の分布と推定分布の差を以下の指標で評価

相対誤差平均：
$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{z_i^*(x_i) - z_i(x_i)}{z_i(x_i)} \right| \quad (N = 2000, z_i^*: \text{推定値}, z_i: \text{真値})$$

通常のクリギング

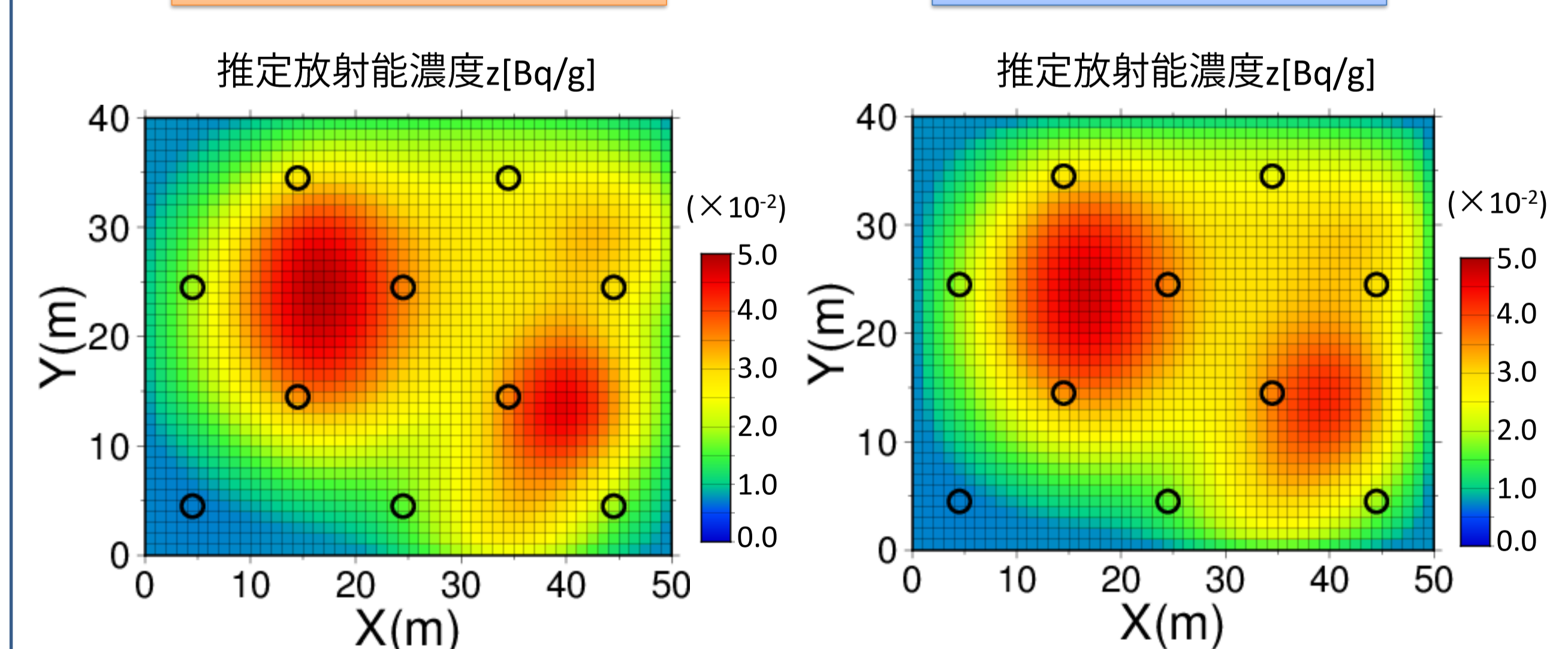


相対誤差平均：33.3% 測定点数10点では真の分布を再現できない

外生ドリフトクリギング

高さ10cm線量率を利用

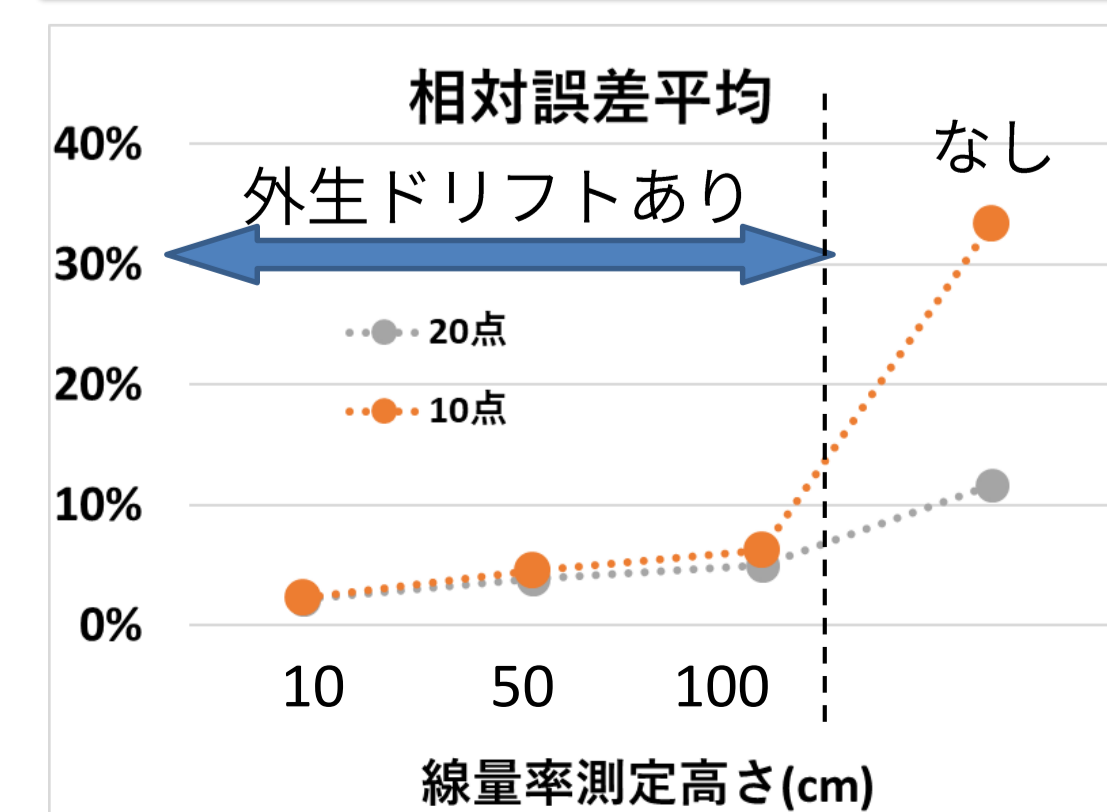
高さ1m線量率を利用



相対誤差平均：2.3%

相対誤差平均：6.2%

- 外生変数で情報を補完することで、推定結果が大きく改善
- 地上高さ1m線量率では、10cm高さに比べ相対誤差はやや大きくなる



- 濃度測定点の数（10個、20個）と線量率データ（2000点：線量率測定高さ10cm～1m）を変えて、相対誤差平均の数値を比較
- 外生変数を使用することで、測定点が10点の場合でも、測定点が20点の場合と同等以上の推定精度が得られる