

曳航式装置を用いた海底放射能の面的分布の把握

Mapping the surface distribution of seafloor radiation using towed measuring instrument

学籍番号 47-146654 村田 幸輔

指導教員 巻 俊宏 准教授・浅田 昭 教授

(平成 28 年 2 月 2 日発表)

Keywords: 海底土放射能, 曳航式ガンマ線計測装置, 底質分布, 補間手法

Keywords: Seafloor radiation, Towed gamma-ray spectrometer, Sediment distribution, Interpolation

1. 序論

1.1 研究背景

東北地方太平洋沖地震に起因する東京電力第一原子力発電所（以下、「F1NPP (Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant)」)で発生した事故により放射性物質が海洋へ流入した。 ^{137}Cs の推定流入量は $3.5 \times 10^{15}\text{Bq}$ [1]という膨大な量であり、その半減期は約 30 年と長いことから流入後の挙動について多くの調査や研究がされてきた。その結果、F1NPP の事故後の東北地方沿岸の海底では ^{137}Cs の堆積が確認されている[2]。また放射性物質の海洋への流入経路は F1NPP からの直接流入以外にも、大気中へ放出されたものが降雨、陸上、河川、地下水などを経由する経路がある[3]。よって、放射性物質が継続的に流入し、海底面へ堆積した放射性物質は周囲の環境へ継続的に影響を与える可能性がある。以上より、長期的な海底放射能分布モニタリングが必要である。

放射能分布モニタリングは陸上では盛んであり、土壌サンプリング、自動車サーベイ、航空機マッピングなどの手法を用いた継続的なモニタリングにより広範囲の面的な放射能分布情報が得られている。比較して従来の海底土放射能モニタリング手法である海底土壌サンプリングは、調査範囲に対して得られる空間的分布情報は乏しく面的な分布の把握は難しい。先行研究では、海底放射能分布モニタリングに適した手法として曳航式ガンマ線計測装置を開発した。F1NPP 周辺海域および阿武隈川河口域における調査では、線状の放射能分布計測手法によって高濃度濃集帯の発見に至っている[4]。しかしながら線状の計測が限界であり面的分布を捉えられないという課題がある。

1.2 本研究の目的

本研究では、計測装置により得られる線状の分布情報をもとに、面的な分布を推定する手法を開発する。この補間推定手法に関して、これまでの調査によって報告されている放射性物質と海底の底質の依存性が軸となる。計測された線状データを単純に空間的に補間するのではなく、海底の底質分布を考慮することでより正確な分布を把握することを目的とする。

2. 曳航式ガンマ線計測装置

先行研究において東京大学生産技術研究所は曳航式ガンマ線計測装置 RESQhose (Radiometric Environment Survey and Quantification hose)を開発した。曳航式ガンマ線計測装置は NaI シンチレータ、光電子増倍管、マルチチャンネルアナライザなどから構成されるガンマ線計測装置が耐圧容器内に封入されており、その上をさらにゴムホースで覆うことでシステムを保護する。運用時は船舶からケーブルを用いてセンサが海底面に密着するように曳航し、センサが通過した位置の放射線を計測することで海底の放射能連続計測を可能としている。ガンマ線計測装置によってガンマ線のエネルギースペクトルを取得し、そのうち 662keV の ^{137}Cs 由来のエネルギーピーク面積に該当する光電ピークカウント数 (CPS : Count Per Second) を算出する。曳航式ガンマ線計測装置による調査とその後の処理により Fig.1 に示す様な線状の連続的な放射能分布が計測できる。なお Fig.1 は F1NPP から北へ約 80km に位置する阿武隈川河口域における調査の一例である。この阿武隈川河口域では、河口から東へ約 3km、南へ約 2km の地点を中心に範囲の広い高濃度帯が曳航計測により確認でき、継続的なモニタリングにより高濃度帯の状況を把握し続けることが可能である。現状では線状の分布把握が限界であるが、過

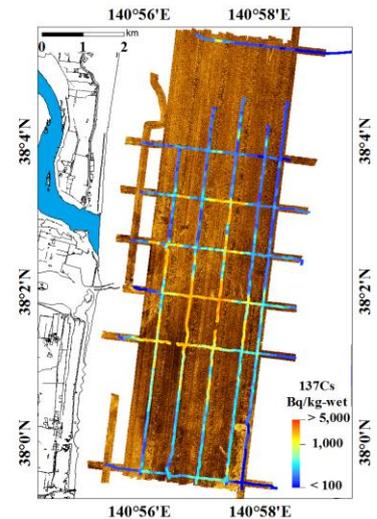


Fig. 1 ^{137}Cs distribution at Abukuma river mouth (October 2013).

去に同様のシステムを用いた研究では曳航計測データをもとに面状分布を推定した事例がある。IAEA-MEL (International Atomic Energy Agency, Marine Environment Laboratories) はイギリスのセラフィールド核燃料再処理場からアイリッシュ海へ放出された ^{137}Cs の分布を曳航式ガンマ線計測装置により計測し、計測データにクリギング補間手法を適用し未計測地点の CPS 値を求めることで ^{137}Cs の面的な分布を求めた。本研究でも同様に補間手法の適用により、海底の放射能の面状分布の把握を行う。

3. 海底放射能面状分布の推定手法に関する提案

通常の補間手法では、推定値は観測地との距離にのみ影響される。本研究で調査対象としている ^{137}Cs は粘土鉱物に吸着するという性質があり [8], ^{137}Cs の海底面における分布には海底の底質が関係する。阿武隈川河口域の複数箇所における採泥サンプリングの結果、含水率は 33%~72%であり場所によって底質が異なることを示す。また、泥のような高含水率土壌では放射能濃度が高い傾向がある。よって、阿武隈川河口域では泥質や砂質の領域が混在した底質分布であり、さらに ^{137}Cs は泥質の含水率が高い泥質域に多く存在していることから放射能濃度分布は底質に応じて異なる。本研究ではこの ^{137}Cs と底質の関係に着目し、補間推定では放射能濃度を距離のみの関数として扱うのではなく、海底の底質分布を考慮した補間手法を提案する。提案手法では底質分布を把握する必要があるが、海底の底質などを音響により面的に把握するサイドスキャンソナーにより得られる海底面音響モザイク画像を用いる。モザイク画像から底質分類により底質境界情報を取得し、曳航計測データをどの底質領域で計測されたものか分類する。各底質に対応した計測データセットとなり、各データセットに対して補間推定手法を適用し未計測地点の値を算出する。これにより補間は距離のみに依存するのではなく、放射性物質の分布性状に対応し同一底質領域内の観測値同士による面的補間が可能となる。各底質領域の面状補間図を組み合わせることで最終的には、調査海域全体の放射能面状分布図が得られる。

4. 海底面音響画像を用いた底質分類

本研究では底質境界を基に曳航測線データを底質領域ごとに分割する際に使用する。阿武隈川河口域の底質分布情報はサイドスキャンソナー (Klein System 3000) を使用して 2013 年 7 月に得られた海底面音響反射画像を用いた。音響画像は反射強度を輝度の濃淡で表している。この音響画像から底質境界を抽出するために、音響調査と同時期に採取された 10 地点の採泥サンプリングの土壌含水率とサンプリング地点周囲 (10×10m) の画像特徴量を対応させた標本データを作成し、画像の特徴量から砂域と泥域とに分類した。採泥サンプルの含水率は 53%を閾値とし砂と泥に分類、画像特徴量は 10×10m 内の画素を 1つの単位 (ウィンドウ) として平均輝度とエントロピーのパラメータを分類に使用した。分類結果はさらに watershed 領域分割法を適用し各底質領域に分割し底質境界線を抽出した。分類された底質分布では調査海域内には泥質域と砂質域が混在しているという結果となった。また、底質分類結果を河口の川と海の境を位置基準として曳航計測結果の CPS 値と比較した結果、泥質域では砂質域とで明らかに CPS の挙動が異なっている。泥質域は砂質域よりも放射性物質が堆積しやすく、底質によって放射性物質の分布が異なることがわかった。なお、泥質域においても CPS の低い値は観測されていることから、同じ領域内でも泥質の吸着ポテンシャルは異なる可能性がある。

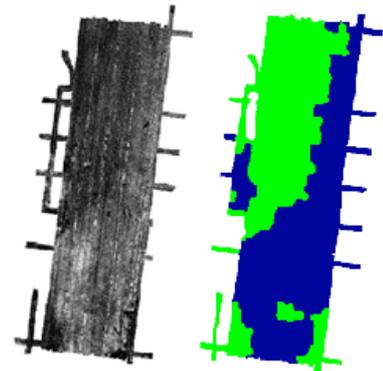


Fig. 2 Acoustic mosaic image and segmented result (Green:Sand, Navy:Mud)

5. 底質を考慮した ^{137}Cs 分布の面状補間

提案手法では、まず海底面底質分布図を用いて曳航式ガンマ線計測装置の計測結果を底質領域ごとに分類した。分類後、領域ごとに補間手法を適用することで同じ底質領域で計測されたデータ同士による領域内の未計測地点の補間を可能とした。なお面状補間図の解像度は、高濃度帯の広がり数が数百 m から数 km オーダーであることと曳航式ガンマ線計測装置の位置推定精度が数十 m 以内であることを考慮し 100m とした。提案手法において、本研究では代表的な補間推定手法である以下の 4 手法に適用した際の各補間手法に対する提案手法の有効性について検討を行った。

- クリギング: バリオグラムという空間的連続性を観測地点 \mathbf{x}_i における観測値 $z(\mathbf{x}_i)$ から評価したモデルを用いて、推定誤差を最小とするような重み係数 w_i を算出し、加重した観測値の総和として推定値 $z(\mathbf{x}_0)$ を得る手法。

$$z(\mathbf{x}_0) = \sum w_i z(\mathbf{x}_i) \quad (i=1, \dots, n)$$

- IDW (Inverse Distance Weighting): 推定地点 \mathbf{x}_0 周囲の複数の観測値 $z(\mathbf{x}_i)$ の重み付き平均により推

定値を算出する手法. 重み係数 w_i は推定地点 \mathbf{x}_0 と観測地点 \mathbf{x}_i の距離 $d(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_i)$ の逆数にパワーバリュー α という影響度を制御する乗数で累乗して算出される. このパワーバリューと使用する観測値の空間的な範囲は任意で設定する必要がある.

$$w_i = d(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_i)^{-\alpha} / \sum d(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_i)^{-\alpha} (i=1, \dots, n)$$

$$z(\mathbf{x}_0) = \sum w_i z(\mathbf{x}_i) (i=1, \dots, n)$$

- **Natural Neighbour** : 推定地点 \mathbf{x}_0 および観測地点からなるポロノイ図を利用して, 推定地点の n 個の近傍観測点 \mathbf{x}_i を選出する. 推定地点 \mathbf{x}_0 のポロノイ領域面積を W , 近傍観測地点 \mathbf{x}_i のポロノイ領域のうち W に内包される面積を A_i として重み係数を w_i 算出し, 加重した観測値の総和を推定値 $z(\mathbf{x}_0)$ とする.

$$w_i = A_i/W (i=1, \dots, n)$$

$$z(\mathbf{x}_0) = \sum w_i z(\mathbf{x}_i) (i=1, \dots, n)$$

- **Nearest Neighbour** : 推定地点の最近傍の観測点の値を, 推定値とする手法.

提案手法の適用例として, クリギングによる 2013 年 10 月と 2014 年 8 月面状分布図を Fig.3 に示す.

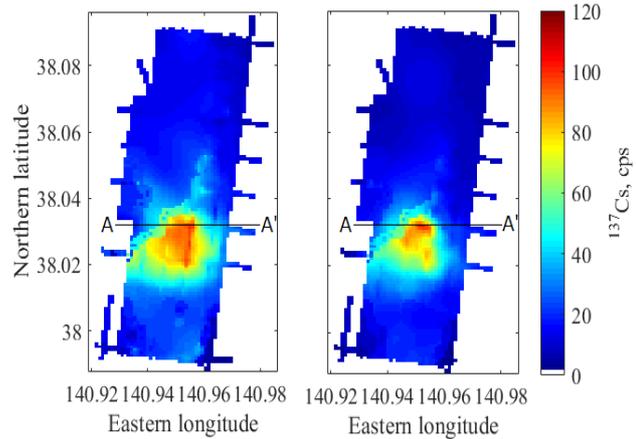


Fig. 3 Distribution map in different time period (left:October2013, right:August2014 line AA': Cross section position in Fig.6)

6. 考察

6.1 交差検証による手法の評価

提案手法を交差検証により評価した. 調査海域を含む南北 12 km, 東西 6 km を解析対象領域とし, 領域を格子状のグリッドに分割する. 任意のグリッドを 1 つ選び, そのグリッドに内包される曳航計測データは取り除き, グリッド外のデータを補間で使用する標本データとする. この標本データを用いてグリッドの中心を推定する. こうすることで, 推定地点周囲に観測値のない状態を疑似的に作り出し, 観測地点と推定地点間の距離に対する推定精度を検証する. グリッド幅は 600, 1000, 1600, 2000m の 4 つに設定し, RMSEP(Root Mean Square Error of Prediction), 縦軸を推定値, 横軸を実測値からなる 2 次元プロットの近似直線の勾配 ($y=mx$ の m 値) を評価関数とした. 提案手法にクリギング, IDW, Natural Neighbour, Nearest Neighbour を適用した場合および各手法の従来方法とで比較する. RMSEP と勾配 m 値の結果を fig.4 に示す. 従来手法と提案手法の比較をすると, Nearest Neighbor と Natural Neighbor は RMSEP および m 値ともあまり変化は見られない. 提案手法のように底質から空間的に範囲を限定しても, Nearest Neighbour と Natural Neighbour は推定地点近傍の観測値というさらに限定的なデータを推定に使用しているため, 従来手法との差が出なかったものと思われる. クリギングと IDW は RMSEP の結果からは推定点から観測点まで 500m 以内は提案手法が優位であり, m 値では提案手法のクリギングすべてのグリッド幅において優位であった. この差としては, クリギングは空間分布のモデリングにより IDW のように近ければ大きな加重を付加するだけでなく, 遠方のデータ同士の非類似度を考慮することで IDW に比べてより適した重み係数を付加していることが要因であると考えられる. 交差検証から, 提案手法によりクリギングは精度の向上が確認され, IDW についても限られた範囲であれば精度は高いことがわかった.

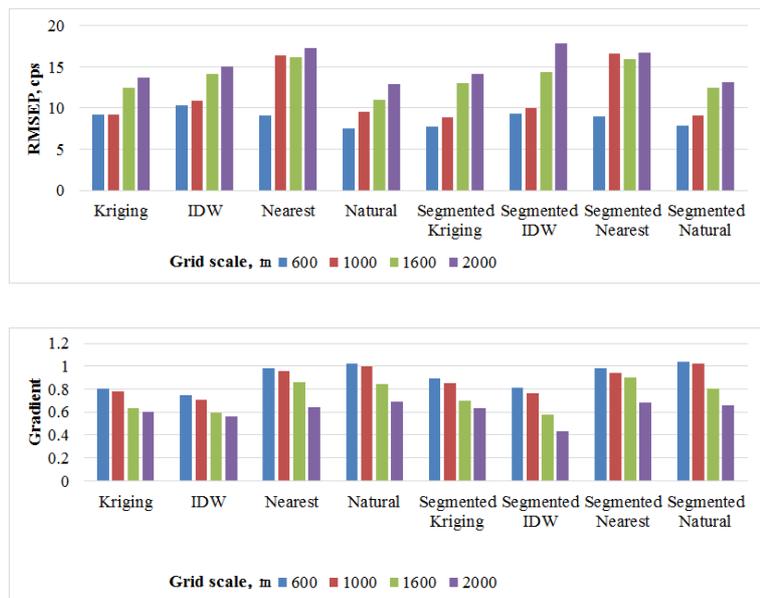


Fig. 4 Cross validation result

6.2 面状分布図

従来のクリギング, IDW, Natural Neighbour, Nearest Neighbour と提案手法を適用したクリギングの ^{137}Cs 面状分布図について考察する. Nearest Neighbour の補間図は不連続な分布となっており, 実際にその様な人工的で不連続な値の境界は存在しないことから Nearest Neighbour は面状補間には適切ではないと判断する. Natural Neighbour と IDW は滑らかな分布変化を示した自然な補間ができています. この2手法は交差検証の結果から, Natural Neighbour が IDW よりも優れていることがわかる. また, Natural Neighbour はクリギングよりも交差検証結果が優れていた. ただし, クリギングは推定誤差を算出可能であるという特徴がある. 推定誤差は今後時系列変化を評価する際に, その変化が有意なものかを判断するのに重要な指標となる. この点を評価しクリギングを用いた面状補間が適切であると考えた.

ここでさらに, 提案手法と従来手法とのクリギングによる面補間で算出された誤差の面状分布について考察する. 従来手法では曳航測線付近は誤差が小さく, 遠く離れるにつれて推定誤差が大きくなるという傾向である. 提案手法では領域によって推定誤差の分布傾向は異なるが, 推定誤差が従来手法よりも小さく抑えられている. これは, 領域分割によって形成されたバリオグラムモデルが, 観測値の空間分布を従来手法よりも正確にモデル化できているためと考えられる. ただ, 1つの領域では測線から離れた位置の推定誤差が従来手法よりも大きい結果であり, この領域では底質分類後でも分布が距離のみに依存しておらず他の要因の影響により, 正確なモデル化ができていないと思われる. 要因として川から流れ込む放射性物質を含む堆積物の由来地, 流れ込んだ時期の違いが影響する可能性がある. この要因は提案手法では対応できないため今後の課題である. 他の領域では推定誤差は抑えられているので, 提案手法は精度向上及び推定誤差を小さくすることが可能な手法であると言える.

6.3 異なる時期における ^{137}Cs の分布

Fig.3 に示した阿武隈川河口域の 2013 年 10 月と 2014 年 8 月の提案手法により作成した面状分布図から差分をとると, 高濃度帯の東側で ^{137}Cs の CPS 値が低下していることがわかった. この点について各分布図の高濃度帯を東西方向に通る AA'断面における CPS 値とその推定誤差を Fig.6 のようにプロットすることで変化の優位性について検証した. その結果高濃度帯東側の CPS 値の低下は推定誤差の範囲外で起きていることから, 実際に放射能分布に変化したと言える. ^{137}Cs の半減期は約 30 年であるので, この変化は川からの堆積物が時間変化によって異なる場所に移動した可能性があり, 6.2 で述べた分布に影響する底質と距離以外の要因とも考えられる.

7. 結論

底質を考慮した補間手法である提案手法は, クリギングに適用することで推定精度の向上および推定誤差を抑えながら ^{137}Cs の面状分布を曳航式ガンマ線計測装置によって取得されたデータを補間することが可能である. 底質以外の要因が分布に影響を与える場合は提案手法では対応しきれないため, 今後の課題であると言える.

参考文献

- [1] D. Tsumune, T. Tsubono, M. Aoyama et al., "Distribution of oceanic ^{137}Cs from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant simulated numerically by a regional ocean model," Environmental Radioactivity, Vol.111, pp.100-108, 2012.
- [2] S. Otsuka, and Y. Kato, "Radiocesium derived from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident in seabed sediments: initial deposition and inventories," Environmental Science, Vol. 16, pp. 978-990, 2014
- [3] N. Yoshida, J. Kanda, "Tracking Fukushima radionuclides," Science, Vol. 336, pp. 1115-1116, 2012
- [4] B. Thornton, S. Ohnishi, T. Ura, et al., "Distribution of local ^{137}Cs anomalies on the seafloor near the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant," Marine Pollution Bulletin, Vol. 74, pp. 344-350, 2013

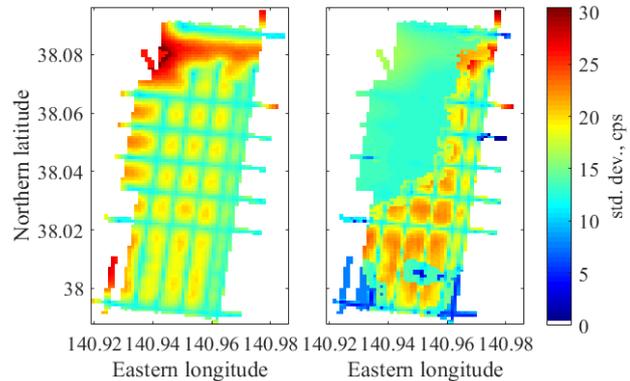


Fig. 6 Distribution map of Kriging estimation error (left:Conventional method, right:Proposal method)

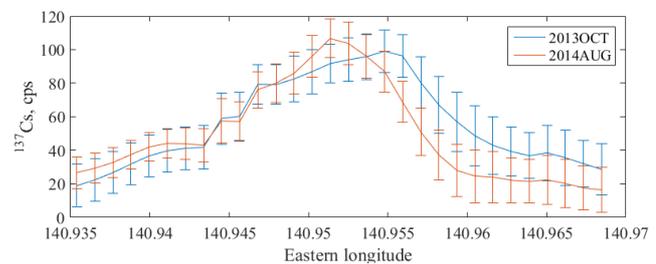


Fig. 6 Difference of ^{137}Cs CPS in cross section of anomaly