

# 土壌中の放射性物質の広域的な濃度分布調査とそのマッピング

神山和則

キーワード 放射性セシウム濃度分布図, 福島第一原発事故, 濃度分布, 空間線量率, 農地土壌

## 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東京電力福島第一原子力発電所（福島第一原発）の事故に伴い、放射性物質が大気中に放出され、福島県を中心に放射性物質による汚染が広範囲で発生した。事故の初期は放射性ヨウ素（ $^{131}\text{I}$ ）の影響が大きかったが、半減期が8.02日と短いためその影響は時間の経過とともに減少した。現在では放射性セシウム（ $^{134}\text{Cs}$ と $^{137}\text{Cs}$ ）が主要な核種である。 $^{134}\text{Cs}$ と $^{137}\text{Cs}$ の半減期はそれぞれ2年、31年と長い長期の影響が懸念されている。

放射性物質による汚染状況を把握することは、人体への影響、農作物の安全性、除染の必要性などの評価のために不可欠であり、分布図作成のための調査が関係機関によって行われた。本稿では文科省が中心となって実施した航空機モニタリング調査と放射性物質の土壌濃度分布調査及び農水省が中心となって実施した農地における放射性セシウムの濃度分布図の作成について紹介する。

## 2. 航空機モニタリング調査

航空機モニタリングは航空機に高感度の放射線検出器を搭載し、地上に蓄積した放射性物質からのガンマ線を広範囲に測定する手法である。文科省が中心となって実施した航空機モニタリングではヘリコプターを用い対地高度150～300mで飛行することにより1～2kmメッシュで地表面から1mの高さの空間線量率と地表面に沈着した放射性物質（主に $^{134}\text{Cs}$ と $^{137}\text{Cs}$ ）濃度を測定した。調査は福島第一原発から80km圏内で始められ、2012年7月には全国の調査が終了し、その結果が公表された（文部科学省、2012）。これにより全国の放射性物質による汚染状況が明らかになった。この後も福島第一原発から80km圏内を中心に繰り返し測定が行われ、この地域の空間線量率と放射性物質濃度の経時的な変化も明らかになってきた。最新の結果によれば、2011年11月5日（第4次調査）か

ら2013年9月28日（第7次調査）の間に空間線量率は47%減少した、と報告されている（原子力規制庁2013）。この減少割合は $^{134}\text{Cs}$ と $^{137}\text{Cs}$ の物理的減衰から推定される減少割合（34%）に比べやや大きく、放射性物質の再移動や除染などの影響を受けていると考えられる。

## 3. 放射性物質の土壌濃度分布調査

本調査は文科省が中心となり実施された（文部科学省、2012）。以下はその報告書から関連する事項を抜粋したものである。本調査では、福島第一原発から80km圏内を2km×2kmメッシュ（国土数値情報の3次メッシュを東西、南北にそれぞれ2メッシュ結合したメッシュに相当）、80～100km圏内を10km×10kmメッシュ（国土数値情報の2次メッシュに相当）に分割し、それぞれのメッシュ内の1地点が調査地点として選定された。非可住区域、調査不能地点もあったため、最終的な調査地点数は2183地点であった。攪乱されていない場所を調査地点とし、3m×3mの範囲で5箇所から5cmの深さで土壌試料が採取された。これらの試料のガンマ線放出核種（ $^{131}\text{I}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 及び $^{137}\text{Cs}$ ）をGe半導体検出器により測定し、その算術平均値をその調査地点の放射能濃度とした。さらに、ベータ線放出核種およびアルファ線放出核種の測定も行われた。

この調査の結果、福島第一原発から100km圏内の $^{134}\text{Cs}$ 及び $^{137}\text{Cs}$ の土壌濃度（単位面積あたりの放射能濃度）マップが作成され公表された。この地図と前述の航空機モニタリングで測定された結果を比べると、局所的には違いがあるものの全体としては同様の傾向を示していることが確認された。一方、 $^{131}\text{I}$ の測定は $^{131}\text{I}$ の半減期が8.02日と短いこと、調査開始が放射性物質の放出から約80日間に経過していたことから多くの試料で統計的に有意な測定結果を得ることは困難であった。最終的に $^{131}\text{I}$ が検出されたと判断された地点は415地点であった。このデータに基づいて $^{131}\text{I}$ の土壌濃度マップが作成された。さらに、 $^{131}\text{I}$ と $^{137}\text{Cs}$ の濃度比を計算し、これをマップ化した結果、 $^{131}\text{I}$ の比率が高い地域が福島第一原発の南側に存在していることが明らかになった。

## 4. 農地土壌の放射性セシウムの濃度分布調査

### 1) 水稻の作付けの可否のための水田土壌調査

農地土壌における最初の広域な放射能濃度調査は2011

年3月末から4月上旬にかけて、水稻の作付けの可否を明らかにするために、宮城県14地点、山形県5地点、福島県165地点（計画的避難区域\*、緊急時避難準備区域\*を含む）、茨城県18地点、栃木県13地点、群馬県8地点、千葉県10地点、神奈川県5地点、新潟県5地点の水田土壌（一部、水田以外の農地を含む）を対象に行われた。水稻作付けの可否の判断には移行係数（玄米1kg中の放射能濃度と作土1kg中の放射能濃度の割合）が用いられた。すなわち、駒村ら（2006）の土壌と玄米中の放射能濃度の長期モニタリング調査の結果などを基に土壌から玄米への移行係数を0.1とし、玄米の放射能濃度の暫定基準値 $500\text{Bqkg}^{-1}$ を超えない土壌中の放射性セシウム濃度（ $^{134}\text{Cs}$ と $^{137}\text{Cs}$ の合計値） $5000\text{Bqkg}^{-1}$ が土壌中の放射性セシウム濃度の作付け上限値となった。この調査における土壌中の放射性セシウム濃度は福島県で $9\sim 29000\text{Bqkg}^{-1}$ 、福島県以外の県で検出下限値以下（ND）から $1826\text{Bqkg}^{-1}$ の範囲であったが、警戒区域\*、計画的避難区域\*、緊急時避難準備区域\*以外の地域で $5000\text{Bqkg}^{-1}$ を超える土壌はなかった（農林水産省, 2011b）。以後の農地の放射性セシウムの濃度調査においても移行係数を考慮し、乾土1kgあたりの濃度で示してある。

## 2) 広域的な農地土壌の放射性セシウム濃度分布図の作成

広域的な土壌調査はこの後、これまでに宮城県、福島県、栃木県、群馬県、茨城県、千葉県を対象とした第1回調査（農林水産省, 2011b）、調査密度を高め、対象都県を増やした第2回調査（農林水産省, 2012）、経時的な変化を把握するために行われた第3回調査（農林水産省, 2013b）が行われてきた。ここでは、最も調査地点数が多く広範囲に行われた第2回調査の概要について紹介する（農林水産省, 2012; Takata *et al.*, 2014; 神山ら, 2013）。

### (1) 対象地域と土壌調査方法

この調査では15都県（岩手県、宮城県、山形県、福島県、茨城県、栃木県、群馬県、埼玉県、千葉県、東京都、神奈川県、新潟県、山梨県、長野県、および静岡県）を対象地域として、2011年10月7日～2012年2月3日にかけて3423地点（うち福島県2247地点）の農地土壌が調査された。調査対象圃場は水田、普通畑、樹園地または4月以降に更新した草地である。これらの圃場で圃場の対角線の交点となる中心1点及び中心と圃場の4隅を結ぶ線の中点4点の計5箇所からライナー付き土壌試料採取器（5cm径）を用いて30cm深まで採取した。同時に、GPSを用いて調査圃場の位置を決定するとともにNaIシンチレーションサーベイメータ等を用いて、調査地点の1mおよび1cm高さにおける空間線量率を測定した。採取した5箇所の試料は混合して分析試料としGe半導体検出器により土壌中の放射性セシウム濃度を測定した。この際に、前述した航空機モニタリング第4次調査に対応させるため、2011年11月5日を基準日として補正した。

### (2) 放射性セシウム濃度推定図の作成方法

この調査の福島県における調査地点数は2247地点で

あったが、これは福島県の農地67haに1地点（最も高密度に調査が行われた川内村、楢葉町で8haに1地点）の割合となる。このように限られた実測データによって対象地域全域の分布をカバーすることは困難なため、以下の手順により放射性セシウム濃度推定図を作成した。すなわち、(a) 実測した土壌の放射性セシウム濃度と空間線量率との回帰式を作成した。この際に、耕起の有無、農業的土地利用（水田、畑、樹園地など）、土壌の種類によっていくつかのグループに区分し精度の向上を図った。図1に土壌の放射性セシウム濃度と空間線量率の関係を示した（Takata *et al.*, 2014）。(b) 農耕地のデジタル土壌図（土壌の種類と農業的土地利用）（高田ら, 2009）、第4次航空機モニタリング調査データ（空間線量率）（文部科学省, 2011）を用いて、それぞれの場所におけるグループを決定し、適用する回帰式を決めた。なお、耕起の有無に関する分布情報がなかったため警戒区域\*、計画的避難区域\*、緊急時避難準備区域\*を「未耕起」、それ以外の地域を「耕起」とした。(c) 得られた推定値と実測値の誤差を計算し、回帰クリギングを用いて誤差の空間分布を明らかにすることで、精度向上をはかった。

### (3) 農地土壌における放射性セシウムの濃度別面積

得られた放射性セシウム濃度推定図を用いて濃度区分ごとの面積を算出した結果、岩手県、宮城県、埼玉県、東京都、神奈川県、新潟県、山梨県、長野県、静岡県においては $1000\text{Bqkg}^{-1}$ を超える農地は分布しなかった（農林水産省, 2012）。一方、除染の目安（農林水産省, 2011a）となる $5000\text{Bqkg}^{-1}$ を超える農地は福島県のみ分布し、水田が5900ha、畑（普通畑・樹園地・牧草地）が3000ha、合計が8900haであった（神山ら, 2013）。

### 3) 土壌中の放射性セシウム濃度の経時変化

第3回調査では第2回調査と同じ地点の調査が行われた。その結果、土壌中の放射性セシウム濃度の経時変化について明らかになってきた（農林水産省, 2013b）。すなわち、2011年11月5日（第2回調査結果）と2012年12月28日（第3回調査結果）を比較すると約1年間で避難指示区域外の水田で19.8%、畑で15.2%、避難指示区域内の農地で23.3%低下していた。この期間における放射性セシウムの物理的減衰にとまらぬ土壌濃度の低下は17.3%であるのでほぼ同等ないしはやや多めの低下割合であった。また、 $5000\text{Bqkg}^{-1}$ を超える農地の面積も8900haから7500haへと減少した。

\*警戒区域、計画的避難区域、緊急時避難準備区域のうち緊急時避難準備区域は2011年9月に解除された。また、それ以外の区域についても2013年8月までに見直しが行われ、帰還困難区域、居住制限区域、避難指示解除準備区域に再編された。本稿では公表当時の区域で表示している。

## 5. 圃場内の放射性セシウム濃度のバラツキ

文科省が行った放射性物質の濃度分布調査では $3\text{m}\times$

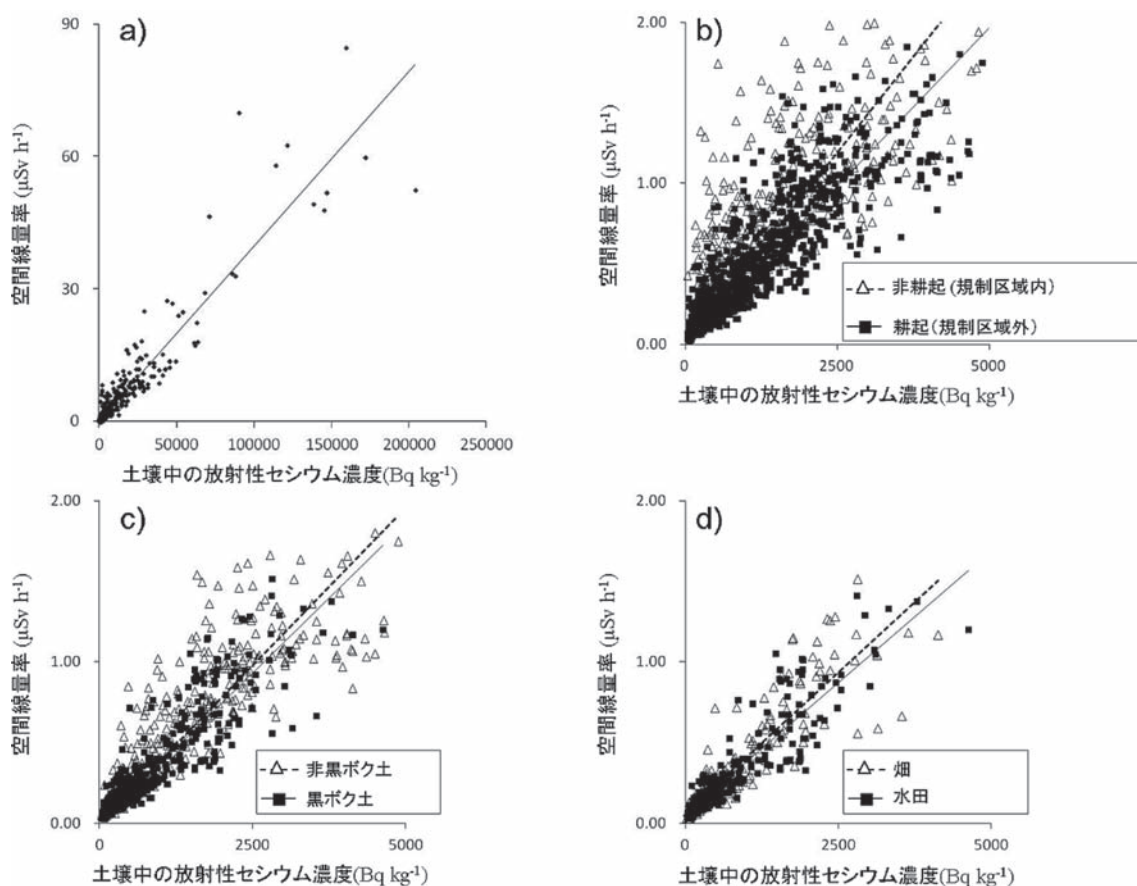


図1 土壤中の放射性セシウム濃度と空間線量率の関係 (Takata *et al.*, 2014)

a) 全データ, b) 耕起と非耕起に区分, c) 黒ボク土と非黒ボク土に区分, d) 水田と畑に区分

3mの範囲の5箇所から採取された試料を分析した結果、変動係数（平均値に対する標準偏差の比率）の平均は36%で100%を超える地点もみられた（文部科学省, 2012）。一方、農地土壌の調査では1圃場5箇所から採取した試料は混合して分析を行っているため、圃場内の放射性セシウム濃度のバラツキはわからない。

農水省が実施した農地除染対策の技術書（農林水産省 2013a）において、1圃場あたり11箇所（水口、水尻1箇所づつを含む）で放射性セシウム濃度を調査した8圃場の事例が示されている。それによれば、バラツキ状況に共通した傾向はなく、水口、水尻等の特定の箇所に放射性セシウムが集積していることも認められなかった。放射性セシウム濃度のデータを元に変動係数を計算すると、変動係数は47~106%の範囲で平均は69%であった。

## 6. おわりに

2011年秋に実施された玄米における放射性セシウムの汚染調査ではいくつかの地域で暫定基準値（500 Bq kg<sup>-1</sup>）を超える玄米が検出された。福島県・農水省の要因解析調査結果（福島県・農林水産省, 2012）によれば、土壤中の放射性セシウム濃度が高い場所であっても必ずしも玄米中の放射性セシウム濃度が高いわけではなく、交換性カリ含量、作土深などの複合的な要因が関与すると考えられてい

る。しかしながら、圃場の放射性セシウム濃度を把握し、作物中の放射性セシウム濃度を低める対策を施すことが安全な農作物の供給に不可欠と思われる。また、今後も放射性セシウムの分布状況をモニタリングしながら長期的な変動を明らかにしていくことが必要である。

## 文 献

- 福島県・農林水産省 2012. 放射性セシウムを含む米が生産された要因の解析（中間報告）. [http://www.pref.fukushima.jp/keishien/kenyukaihatu/gijyutsufukyuu/05gensiryoku/240112\\_tyukan.pdf](http://www.pref.fukushima.jp/keishien/kenyukaihatu/gijyutsufukyuu/05gensiryoku/240112_tyukan.pdf)
- 原子力規制庁 2013. 東京電力福島第一原子力発電所事故から30か月後の航空機モニタリングによる空間線量率について（第37回原子力規制委員会資料5）. <http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/362/list-1.html>
- 神山和則・高田裕介・小原 洋・谷山一郎・齋藤 隆 2013. 東日本における農地土壌の放射性セシウム濃度分布. *インベントリー*, 11, 51-54.
- 駒村美佐子・津村昭人・山口紀子・藤原英司・木方展治・小平 潔 2006. わが国の米, コムギおよび土壌における<sup>90</sup>Srと<sup>137</sup>Cs濃度の長期モニタリングと変動解析. *農環研報*, 24, 1-21.
- 文部科学省 2011. 文部科学省による第4次航空機モニタリングの測定結果について. <http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/5000/4901/view.html>
- 文部科学省 2012. 放射線量等分布マップの作成等に関する報告書（第1編）. <http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/6000/>

5235/view.html

農林水産省 2011a. 農地土壌の放射性物質除去技術 (除染技術) について. <http://www.saffrc.go.jp/docs/press/110914.htm>

農林水産省 2011b. 農地土壌の放射性物質濃度分布図の作成について. <http://www.saffrc.go.jp/docs/press/110830.htm>

農林水産省 2012. 「農地土壌の放射性物質濃度分布図」の作成について. <http://www.saffrc.go.jp/docs/press/120323.htm>

農林水産省 2013a. 農地除染対策の技術書 (第4編 参考資料編). <http://www.maff.go.jp/j/nousin/seko/josen/pdf/sankou.pdf>

pdf

農林水産省 2013b. 「農地土壌の放射性物質濃度分布図」の作成について. <http://www.saffrc.go.jp/docs/press/130809.htm>

高田裕介・中井 信・小原 洋 2009. 1992年の農耕地分布に基づくデジタル農耕地土壌図の作成. 土肥誌, **80**, 502-505.

Takata, Y., Kohyama, K., Obara, H., Maejima, Y., Ishitsuka, N., Saito, T., and Taniyama, I. 2014. Spatial prediction of radioactive Cs concentration in agricultural soil in East Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.*, (印刷中).