

可搬型ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定による環境調査

三上 智、斎藤 公明（原子力機構）

1. 調査目的

福島第一原発から 80 km 圏内を中心に平成 25 年 6 月と 11 月の 2 回にわたり可搬型ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定を行い、現在の放射性セシウム沈着量の詳細な分布状況を把握するとともに、過去の測定結果との比較により沈着量の経時的変化を解析した。

2. 調査内容

(1) 調査期間

平成 25 年 6 月調査： 平成 25 年 6 月 3 日～7 月 10 日

平成 25 年 11 月調査： 平成 25 年 10 月 28 日～12 月 6 日

(2) 調査機関

原子力機構、(公財)日本分析センター、(公財)放射線計測協会、(公財)原子力安全技術センター

(3) 調査箇所

今回の調査における放射性セシウム沈着量の測定箇所を図-1 に示す。測定箇所については、福島第一原発から 80 km 圏内の地域を 5 km×5 km のメッシュに分割し、福島第一原発事故以前にも住民が存在しなかった地域（非可住区域）を除いて各メッシュ内で測定に適した 1 箇所を選定した。平成 25 年 6 月調査及び 11 月調査ともに 381 箇所において測定を実施した。

(4) 調査内容の詳細

(a) 放射性セシウムの土壌濃度マップの作成

in-situ 測定により放射性セシウムの土壌への沈着量（土壌単位面積あたりの放射性核種毎の放射エネルギー。単位は Bq/m²）を測定し、放射性セシウムの沈着量を地図上に記した土壌濃度マップを作成した。放射性セシウムの沈着量の測定にあたっては、可能な限り可搬型ゲルマニウム半導体検出器を使用した。可搬型ゲルマニウム半導体検出器を地表面から 1 m 高さに設置してガンマ線スペクトル測定を実施し、スペクトル解析（核種分析）により放射性セシウムの土壌への沈着量を測定した。

in-situ 測定は、文部科学省のマニュアル¹に基づき実施し、解析の基礎データは国際放射線単位測定委員会(ICRU: International Commission on Radiation Units and Measurement)のレポート²を参照した。また、in-situ 測定によるデータ解析で使用する緩

¹ 文部科学省, 放射能測定法シリーズ「ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法」(平成 20 年 3 月).

² 国際放射線単位測定委員会(ICRU), “Gamma-ray spectroscopy in the Environment” ICRU Report 53 (1994).

衝深度（放射性セシウムの放射能濃度が土壌表層に比べて $1/e$ になる深さ³）は、本事業で別途実施している土壌深度分布調査の結果を基に決定した値を用いた。平成 25 年 7 月時点の緩衝深度は 2.06 g/cm^2 、また、同年 12 月時点の緩衝深度は 2.62 g/cm^2 であった。

空間線量率が高い場所では、ゲルマニウム半導体検出器による測定の数え落しが高い頻度で起きるため、この現象が起きる可能性のある場所（平成 25 年 6 月調査では 7 箇所、11 月調査では 6 箇所）においては、各箇所 5 地点で表層 5 cm の土壌を採取し、それらを良く攪拌して土壌試料を作成し、実験室でゲルマニウム半導体検出器を用いて核種分析を実施した。

GPS を用いて測定箇所の位置情報を取得し、これらの情報を基に福島第一原発から 80 km 圏内の放射性セシウムの土壌への沈着量を記した土壌濃度マップを作成した。

(b) 放射性セシウムの土壌濃度マップの詳細化

現在、空間線量率に寄与している人工放射性核種のほとんどが放射性セシウムであり、これまでに実施した調査においても、攪乱のない平坦地では土壌への放射性セシウムの沈着量と空間線量率が非常に良い相関を示すことが確認されている。そこで、in-situ 測定を行なった箇所で空間線量率の測定を同時に行い、調査時点における空間線量率と放射性セシウム沈着量との相関関係を求め、この関係を用いることで、放射性セシウムの沈着量を直接に測定していない箇所における放射性セシウムの沈着量を空間線量率から評価した。

この放射性セシウム沈着量の空間線量率からの評価結果を基に、(a) で作成した放射性セシウムの土壌濃度マップを詳細化した。なお、平成 25 年 6 月調査については同年 7 月 1 日時点の値に、11 月調査については同年 12 月 1 日時点の値に補正を行なった。

3. 結果と考察

(1) 測定結果の信頼性の確認

放射性セシウムの沈着量の測定結果については、使用した一部のゲルマニウム半導体検出器に対して標準線源を用いた校正を実施するとともに、使用するゲルマニウム半導体検出器の全てを用いて同一箇所で測定を行い、同様の沈着量評価値が得られることを確認した。また、in-situ 測定から求められた空間線量率の評価値と同一箇所でグレイ (Gy) の出力が可能な NaI サーベイメータにより測定した地表面から 1 m 高さの空間線量率の測定結果を比較したところ、全体に非常に良く一致した（図-2）。

(2) 放射性セシウムの土壌濃度マップ

今回の調査における土壌濃度マップを図-3 に示す。

(3) 放射性セシウムの土壌濃度マップの詳細化

放射性セシウムの土壌濃度マップを詳細化するために、今回の調査において空間線量率及び放射性セシウムの沈着量の両方を測定している約 380 箇所における空間線量率、放射性セシウムの沈着量の測定結果の相関関係を調べた。ここでは、土壌採取により沈着量を測定した箇所の結果は含めなかった。その結果、平成 25 年 6 月調査（図-4）、平成 25 年 11 月調査（図-5）ともに、空間線量率とセシウム 134、または、セシウム 137 の沈着量との間に非常に良い正の相関関係が確認された。そこで、空間線量率と放射性セシウムの沈着量の相関関係を基に、空間線量率のみの測定が実施された約 6,560 箇所について空間線

³ e は自然対数の底として用いられる定数であり、その値は約 2.72 である。

量率から評価した放射性セシウムの沈着量を、in-situ 測定及び土壌採取により直接に求めた沈着量に加えて記した土壌濃度マップを作成した。セシウム 134 の詳細な土壌濃度マップを図-6 に、セシウム 137 の土壌濃度マップを図-7 にそれぞれ示す。平成 25 年 6 月調査の結果を左図に、平成 25 年 11 月調査の結果を右図に示した。

(4) 平成 25 年 6 月と 11 月における放射性セシウムの沈着量の変化

平成 25 年 6 月調査と 11 月調査の in-situ 測定による放射性セシウムの沈着量の相関及び沈着量の積算値による比較を図-8 に示す。回帰直線の傾きは沈着量の大きなデータの影響を受け易く沈着量全体の変化傾向をうまく表さない場合もあるため、ここでは沈着量を各調査で積算しその比率も算出した。また、GPS データには 20 m 程度の測位誤差が含まれることを考慮し、空間線量率での評価と同様に、平成 25 年 6 月調査で測定した箇所から 20 m の範囲内にある箇所を同一箇所として扱った。

平成 25 年 6 月調査の沈着量に対する 11 月調査の沈着量の比率は、セシウム 134 に関しては相関図上の回帰直線の傾きからは 0.88、沈着量の積算値の比較からは 0.85 と評価された。物理減衰により予想される比率は 0.87 であった。同じくセシウム 137 沈着量の 2 つの時期での比率は、相関図上の回帰直線の傾きからは 1.00、沈着量の積算値の比較からは 0.97 と評価された。物理減衰は 0.99 であった。以上の結果から、6 月と 11 月の間でウェザリング効果による沈着量の減少はほとんど観察されなかった。

今回の 2 回の調査の間の 9 月 16 日に台風 18 号が福島県内を通過したが、9 月 15 日から 16 日の 2 日間のこの台風に伴う福島県への総降水量は、多い所で 230 mm 程度だったことが報告されている（古殿観測所で 230.5 mm、小野新町観測所で 206 mm 等）。平成 25 年 6 月調査と 11 月調査の間で放射性セシウムの緩衝深度が 2.06 g/cm^2 から 2.62 g/cm^2 へと大きく変化していることも分かった。

(5) 放射性セシウムの沈着量の長期的変化

平成 23 年 6 月調査では、各調査箇所の放射性セシウムの平均的な沈着量を測定するため、各調査箇所の 3 m 四方内から 5 地点の土壌を採取し、ゲルマニウム半導体検出器で核種分析した結果の平均値を求めた。しかし、3 m 四方内の非常に狭い範囲ですら、1 箇所で採取した 5 試料の放射性セシウムの放射能濃度の変動係数（標準偏差を平均値で割った値）が平均で 36% と大きかった。

そこで、放射性セシウム沈着量の経時変化の確認にあたっては、各箇所の平均的な沈着量を測定可能な in-situ 測定を実施した平成 24 年 3 月調査及び今回の調査のセシウム 137 の沈着量の結果について比較を行った。今回の調査と平成 24 年 3 月調査との測定結果の比較にあたっては、GPS データの測位誤差を考慮し、平成 24 年 3 月調査で測定した箇所から 20 m の範囲内にある箇所を同一箇所とした。

なお、このうち、平成 25 年 6 月調査と平成 25 年 11 月調査の測定値の比率が 0.8 以下であった箇所について、測定箇所の写真を比較確認した結果、明らかに土地利用状況が変化したことが確認できた 3 箇所については評価対象から除外した。

その結果、図-9 に示すように、セシウム 137 の沈着量に関しては 220 箇所で比較をすることができ、平成 24 年 3 月調査から平成 25 年 6 月調査までの 16 ヶ月間ではほとんど減少がみられなかった。この期間に予想される物理減衰は 3% 程度であった。また、平成 25 年 11 月調査までの 21 ヶ月間においては、物理減衰が 4% 程度であるのに対し、相関図上の回帰直線の傾きからは 0.98、積算値の比較からは 1.01 であった。

(6) 土地利用別の放射性セシウム沈着量割合の評価

平成 25 年 11 月調査で得られた福島第一原発から 80 km 圏内の放射性セシウム沈着量分布をもとに、土地利用状況別にセシウム 137 の総沈着量を評価しその割合を求めた(図-10)。この評価においては、セシウム 137 の沈着量が 1 km メッシュ内では変化しないとの仮定を置き、国土数値情報土地利用データ(平成 21 年)を参照して、土地利用別にセシウム 137 の沈着量を積算して最終的に百分率で表した。すなわち平坦地で測定した結果がその 1 km メッシュ内では土地利用状況が変わっても変化しない、例えば森林であっても田畑であっても一定であると仮定した。この評価は、1 km メッシュ内でも沈着量が増えること、測定が行われていないメッシュがあること等を考慮し、不確実さを含む評価値であることに注意を払う必要がある。

この結果から、放射性セシウムは森林として分類される地域に 58%程度が分布しており、最も大きな沈着量を持つことが確認された。また、田及びその他の農業用地への沈着量は合わせてほぼ 30%であり、2 番目に大きかった。建物用地への沈着量は 8%程度であった。河川や湖沼は、放射性セシウムの長距離移行に関しては主要な経路となると考えられるが、この地域周辺のセシウム沈着量総量の観点からは大きな割合を占めないことが分かった。なお、河川や湖沼に関しては、河底や湖底に蓄積した放射性セシウムを評価している訳ではないので注意が必要である。ちなみに面積比をみると森林が 54%、農地が 31%、建物用地が 9%であり、放射性セシウムと面積はほぼ比例していた。

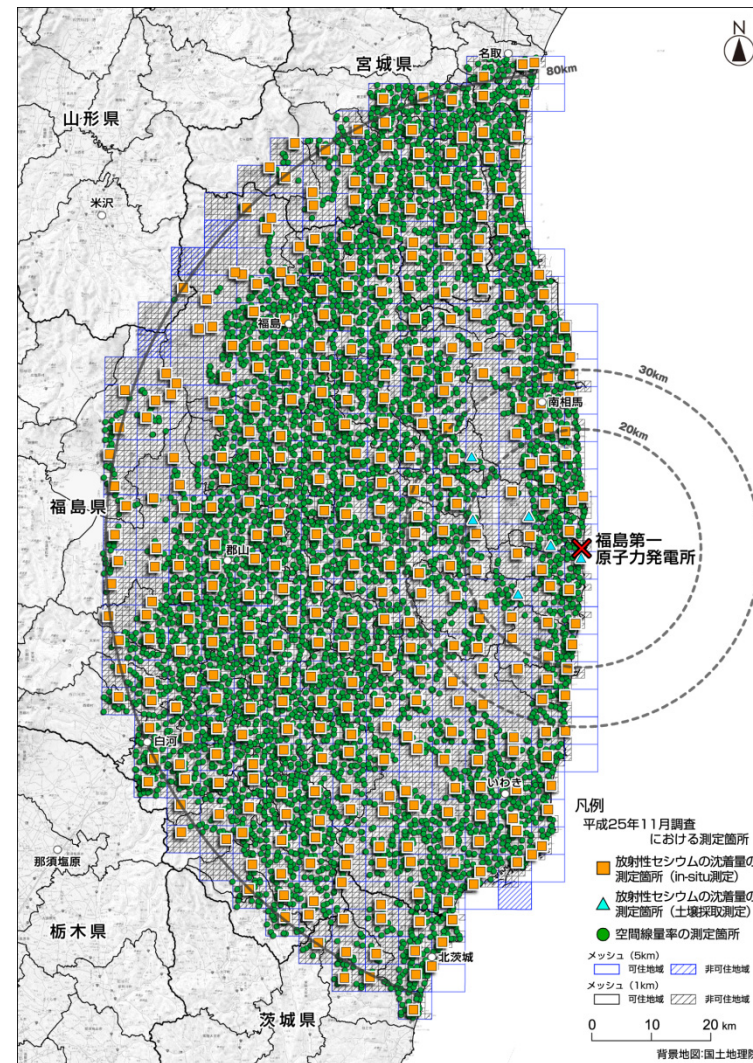
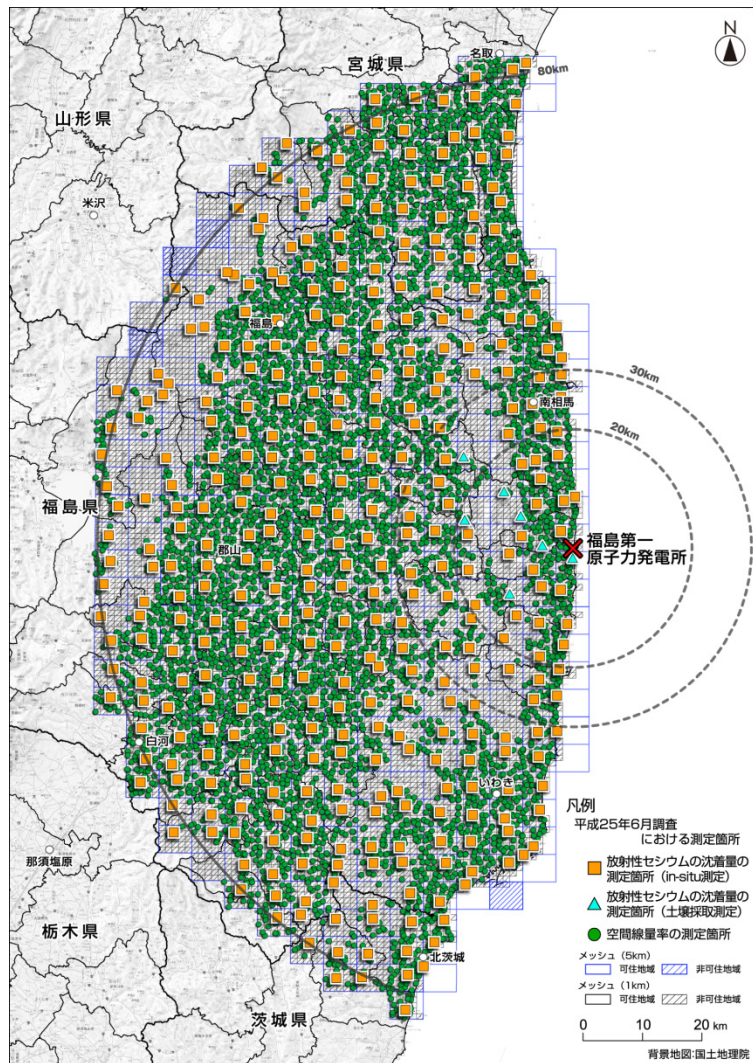


図-1 平成25年度の調査における放射性セシウムの沈着量の測定箇所（空間線量率の測定箇所を含む）
（左図が平成25年6月調査、右図が平成25年11月調査）

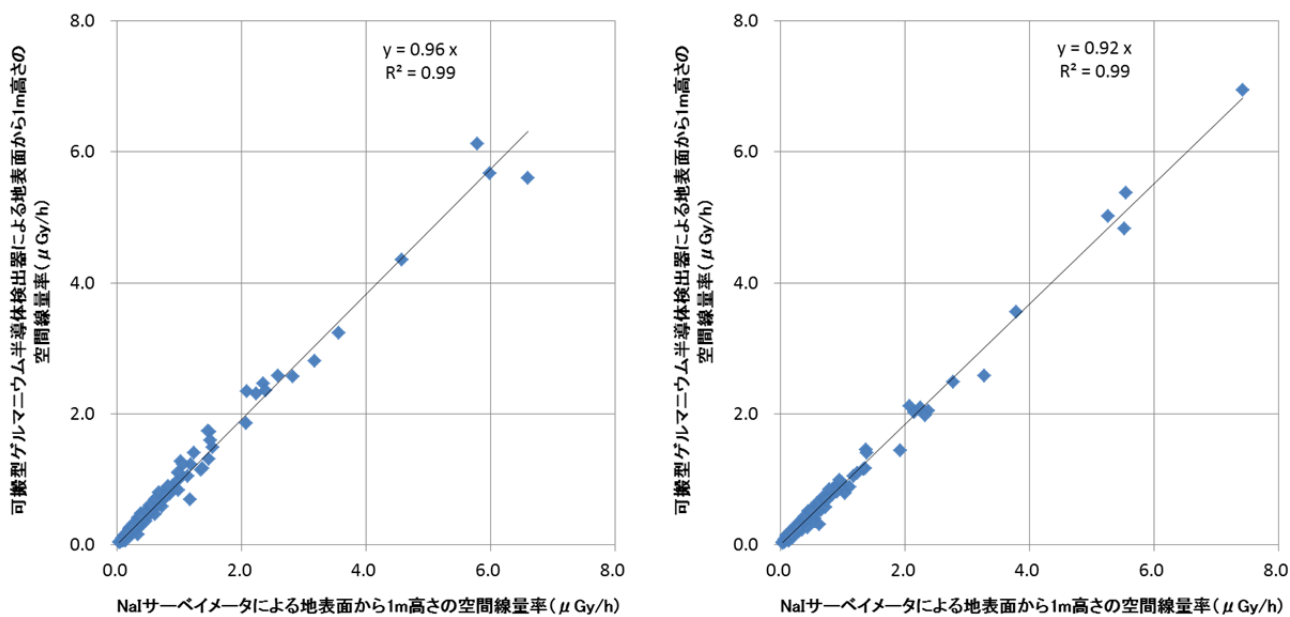
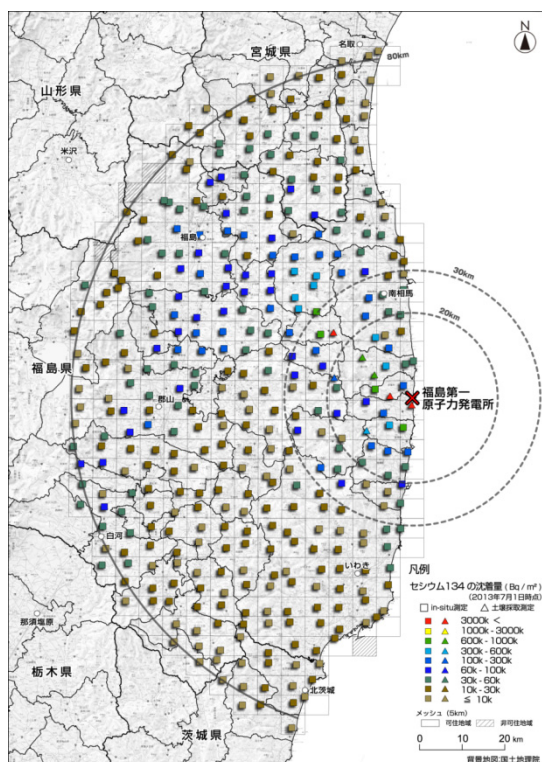
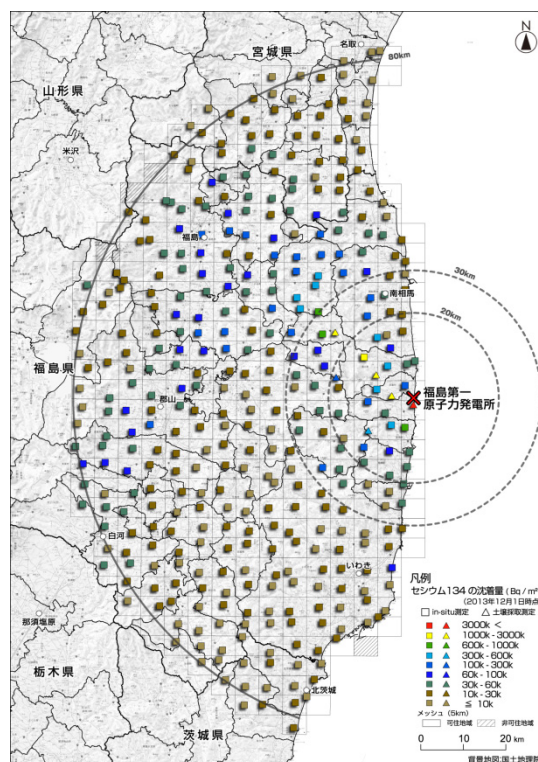


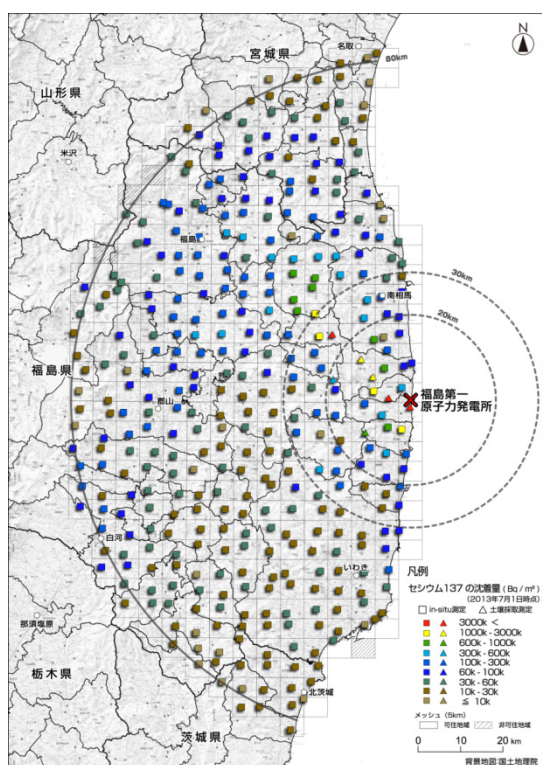
図-2 可搬型ゲルマニウム半導体検出器による in-situ 測定の結果を基に求められた空間線量率 ($\mu\text{Gy/h}$) とサーベイメータによる地表面から 1 m 高さの空間線量率 ($\mu\text{Gy/h}$) の相関 (左図が平成 25 年 6 月調査(平成 25 年 6 月 3 日～7 月 10 日に測定)、右図が平成 25 年 11 月調査(平成 25 年 10 月 28 日～12 月 6 日に測定))



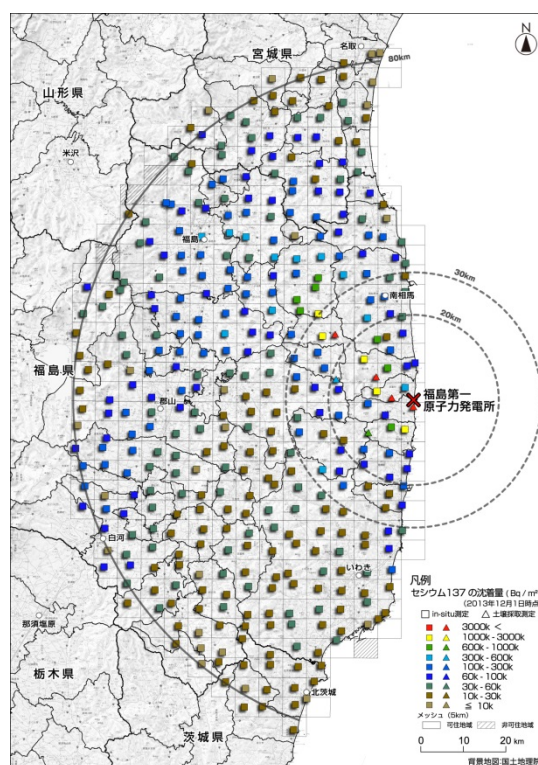
セシウム134 (平成25年6月調査)



セシウム134 (平成25年11月調査)



セシウム137 (平成25年6月調査)



セシウム137 (平成25年11月調査)

図-3 可搬型ゲルマニウム半導体検出器による in-situ 測定等を用いた
放射性セシウムの沈着量を記したマップ

(左図が平成25年6月調査(平成25年7月1日時点: 緩衝深度 $\beta = 2.06 \text{ g/cm}^2$ を用いた解析結果)、右図が平成25年11月調査(平成25年12月1日時点: 緩衝深度 $\beta = 2.62 \text{ g/cm}^2$ を用いた解析結果))

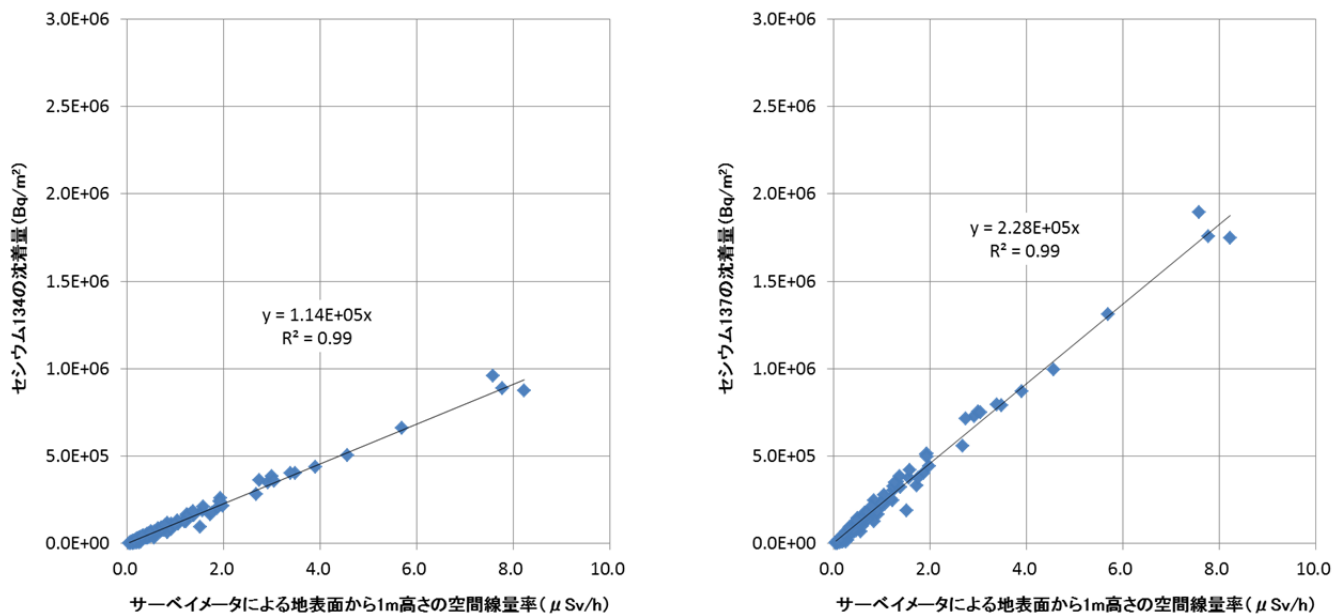


図-4 サーベイメータによる地表面から1 m 高さの空間線量率と放射性セシウムの沈着量の相関（左図がセシウム 134、右図がセシウム 137）
（平成 25 年 6 月調査：平成 25 年 6 月 3 日～7 月 10 日に測定）
（緩衝深度 $\beta = 2.06 \text{ g/cm}^2$ を用いた解析結果）（データ数 $n = 374$ ）

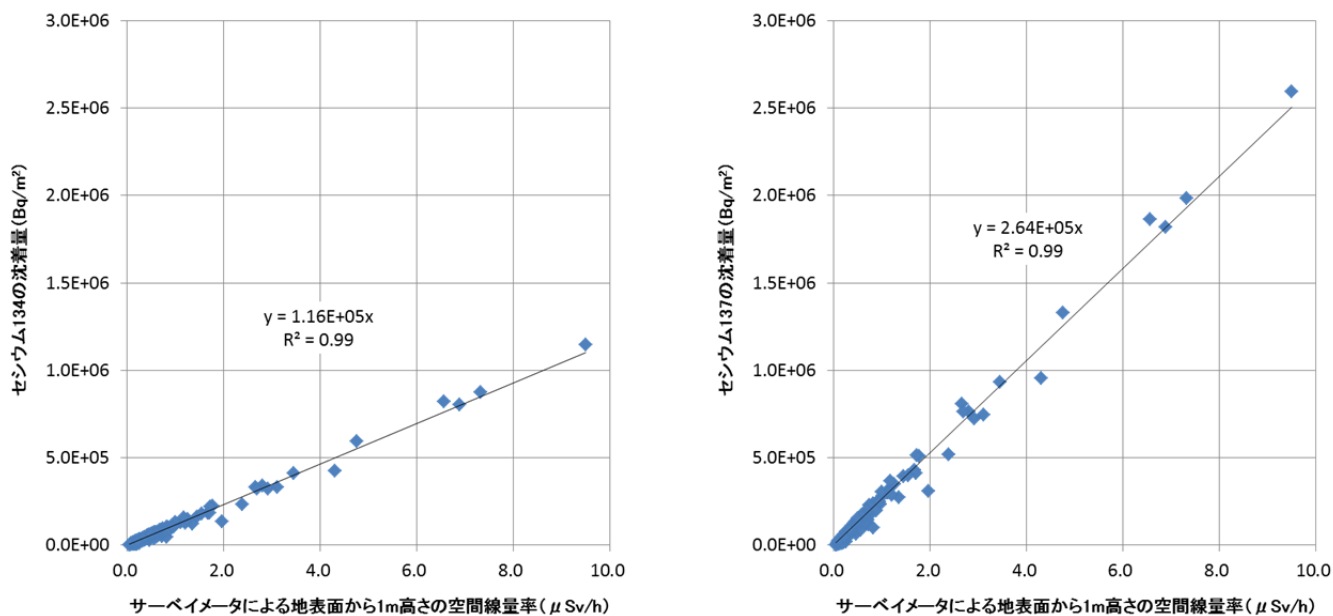


図-5 サーベイメータによる地表面から1 m 高さの空間線量率と放射性セシウムの沈着量の相関（左図がセシウム 134、右図がセシウム 137）
（平成 25 年 11 月調査：平成 25 年 10 月 28 日～12 月 6 日に測定）
（緩衝深度 $\beta = 2.62 \text{ g/cm}^2$ を用いた解析結果）（データ数 $n = 375$ ）

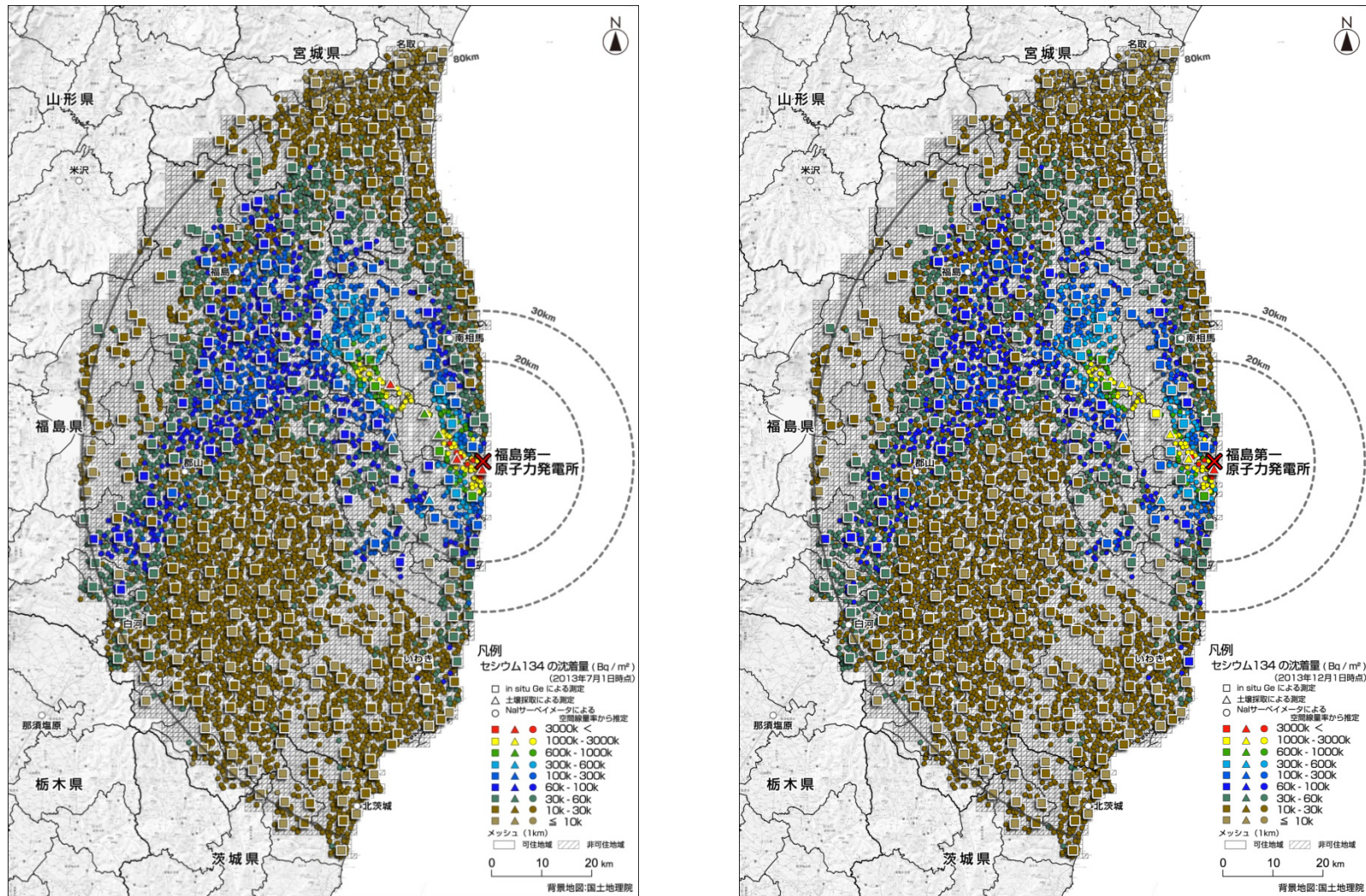


図-6 セシウム 134 の沈着量を記した土壤濃度マップ

(直接に測定した沈着量(in-situ 測定を□、土壤採取による測定を△)に空間線量率と放射性セシウムの沈着量の相関関係を基に評価したセシウム 134 の沈着量の評価値(○)を追加。左図が平成 25 年 6 月調査(平成 25 年 7 月 1 日時点：緩衝深度 $\beta = 2.06 \text{ g/cm}^2$ を用いた解析結果)、右図が平成 25 年 11 月調査(平成 25 年 12 月 1 日時点：緩衝深度 $\beta = 2.62 \text{ g/cm}^2$ を用いた解析結果))

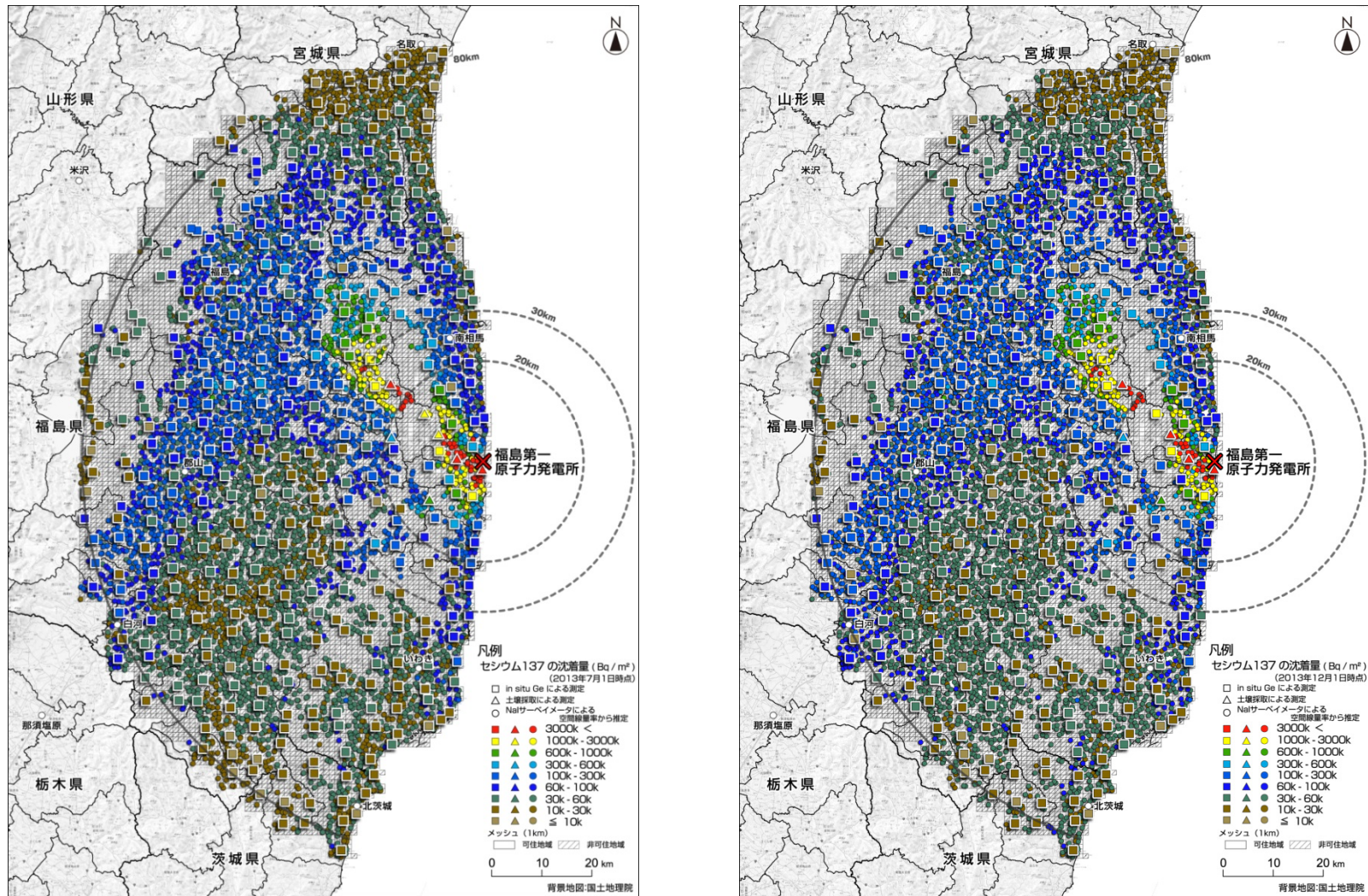
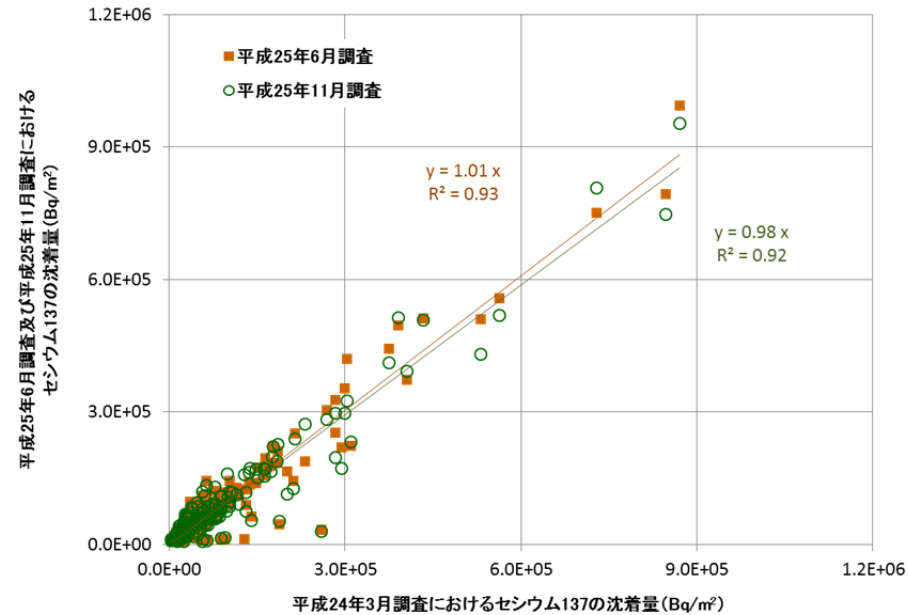
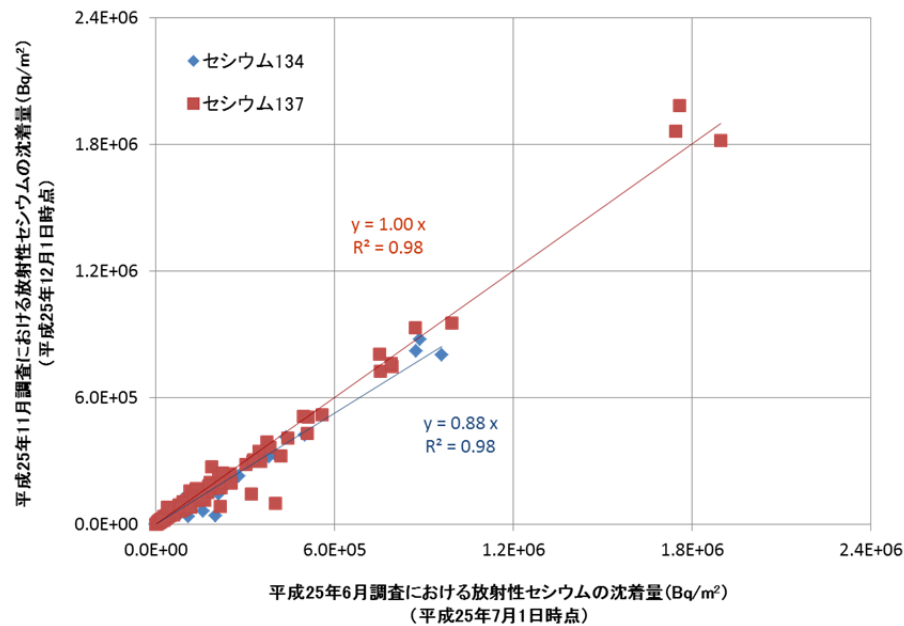


図-7 セシウム137の沈着量を記した土壤濃度マップ

(直接に測定した沈着量(in-situ 測定を□、土壤採取による測定を△)に空間線量率と放射性セシウムの沈着量の相関関係を基に評価したセシウム134の沈着量の評価値(○)を追加。左図が平成25年6月調査(平成25年7月1日時点：緩衝深度 $\beta = 2.06 \text{ g/cm}^2$ を用いた解析結果)、右図が平成25年11月調査(平成25年12月1日時点：緩衝深度 $\beta = 2.62 \text{ g/cm}^2$ を用いた解析結果))



積算値 (セシウム 134)

調査名	積算値 (MBq/m ²)	6月調査との比率	物理減衰
平成25年6月調査	16.9	-	-
平成25年11月調査	14.4	0.85	0.87

積算値 (セシウム 137)

調査名	積算値 (MBq/m ²)	6月調査との比率	物理減衰
平成25年6月調査	34.2	-	-
平成25年11月調査	33.1	0.97	0.99

図-8 平成25年6月調査に対する平成25年11月調査の in-situ 測定による放射性セシウム沈着量の変化 (データ数 n= 335)

積算値 (セシウム 137)

調査名	積算値 (MBq/m ²)	平成24年3月調査との比率	物理減衰
平成24年3月調査	18.4	-	-
平成25年6月調査	19.0	1.03	0.97
平成25年11月調査	18.5	1.01	0.96

図-9 平成24年3月調査に対する平成25年度の調査の in-situ 測定によるセシウム137沈着量の変化 (データ数 n= 220)

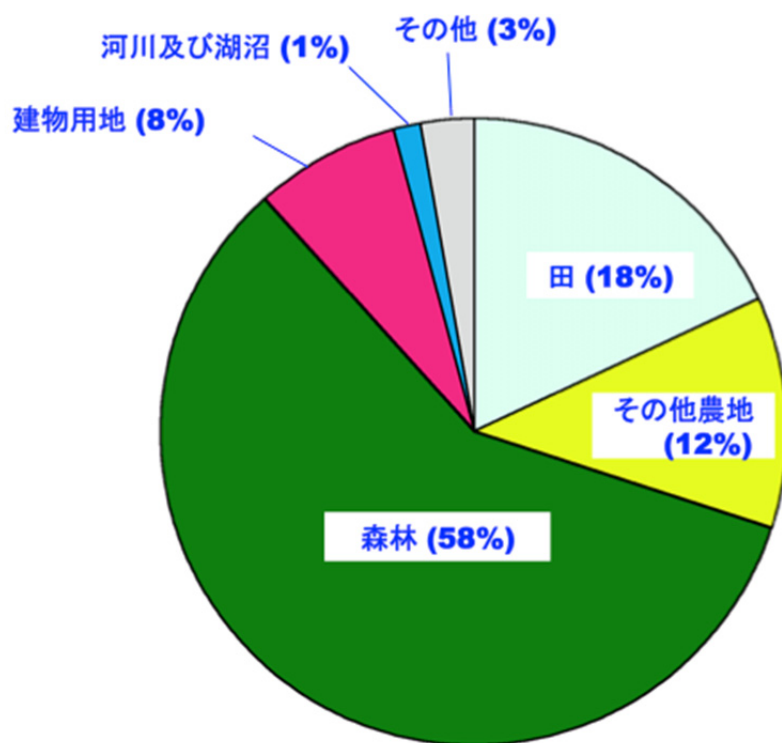


図-10 土地利用区分ごとのセシウム 137 沈着量の割合
(沈着量の割合は土地利用面積にほぼ比例した結果となった)