

2.2 放射性物質の分布状況の詳細調査

2.2.1 福島第一原子力発電所から 80 km 圏内の空間線量率及び放射性物質沈着量の測定

斎藤 公明（原子力機構）

(1) 調査目的

自然環境中における放射性物質の分布状況の変化モデルの作成に資するために、空間線量率及び放射性セシウムの沈着量の変化傾向の把握に向けた調査研究を実施した。放射性物質の移行に大きな影響を与える可能性がある台風による空間線量率及び放射性セシウムの沈着量への変化の影響を確認するとともに、これまでのモニタリング結果を用いて福島第一原発から 80 km 圏内の空間線量率及び放射性セシウムの沈着量の変化傾向を確認することを目的とした。今回の調査期間中、台風 17 号が 9 月 30 日から 10 月 1 日にかけて福島県内を通過したが、福島県への降雨量は最高でも 50 mm 程度とそれ程多くはなかった。

(2) 調査内容

以下の内容で台風期前後の 2 回の環境調査と解析を実施した。

1) 調査期間

① 空間線量率の測定

台風期前：平成 24 年 8 月 14 日～9 月 7 日

台風期後：平成 24 年 11 月 5 日～12 月 7 日

② 放射性セシウムの沈着量の測定

台風期前：平成 24 年 8 月 13 日～9 月 19 日

台風期後：平成 24 年 11 月 5 日～12 月 12 日

2) 調査機関

① 空間線量率の測定

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

② 放射性セシウムの沈着量の測定

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空間線量率測定及び放射性セシウムの沈着量測定の箇所は図 2.2.1-1 に示すとおりである。空間線量率測定については、福島第一原発から 80 km 圏内の地域を 1 km × 1 km のメッシュに分割し、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。測定箇所までの道路が通行止め等により測定が困難であった箇所を除き、台風期前は 6,551 箇所、台風期後は 6,549 箇所において測定を実施した。土壌への沈着量測定に関しては、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、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。測定箇所までの道路が通行止め等により測定が困難であった箇所を除き、台風期前は 381 箇所、台風期後は 380 箇所において測定を実施した。

4) 調査内容の詳細

(a) 空間線量率マップの作成

校正履歴の明確な信頼のおけるサーベイメータを使用して地上 1 m 高さの空間線量率 (μ Sv/h) を測定した。空間線量率が 30μ Sv/h 以下の地域では NaI(Tl) シンチレーション式サーベイメータを用い、空間線量率が 30μ Sv/h 以上の地域では電離箱式サーベイメータを使用して測定を実施した。GPS (全地球測位システム: Global Positioning System) 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 圏内の詳細な空間線量率マップを作成した。

(b) 放射性セシウムの土壌濃度マップの作成

可搬型ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定等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線核種毎の放射能量。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上 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 53 (1994) [2] に示された値を使用した。また、第 2 次分布状況等調査における放射性セシウムの深度分布の結果を基に、in-situ 測定に使用する緩衝深度 (土壌表層の放射性セシウムの放射能濃度が $1/e^{*7}$ になる深さ) は 1.2 g/cm^2 であることを仮定して全データの解析を実施した。

空間線量率等が非常に高いこと等により in-situ 測定が適切に行えないと判断された調査箇所においては、第 1 次分布状況等調査と同様に各箇所 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、固定式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。

(c) 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分布状況等調査においても、土壌への放射性セシウムの沈着量と空間線量率が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、(b) 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、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の作成にあたっては、台風期前の測定分については放射性セシウムの物理的半減期を考慮し、調査期間 (平成 24 年 8 月 13 日~9 月 19 日) の中間の期日である平成 24 年 9 月 1 日時点の値に補正を行った。台風期後の測定分についても、調査期間 (平成 24 年 11 月 5

*7 e は自然対数の底として用いられる数学定数の一つであり、その値は約 2.72 である。

日～12月12日)の中間の期日である平成24年12月1日の値に補正を行なった。

(3) 結果と考察

1) 空間線量率マップ及び土壌マップ

台風期前後に行なった調査結果を基に作成した空間線量率マップを図 2.2.1-2 と図 2.2.1-3 にそれぞれ示す。また、in-situ 測定により作成したセシウム 134 の土壌濃度マップを図 2.2.1-4 に、セシウム 137 の土壌濃度マップを図 2.2.1-5 にそれぞれ示す。また台風期前後両方の測定において、少ない箇所であったが銀 110m が観測された。参考のために、銀 110m の土壌濃度マップを Appendix 2.2.1-図 1 及び図 2 に示す。

2) 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同一箇所空間線量率及び放射性セシウムの沈着量を測定している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確認した。その結果、図 2.2.1-6、図 2.2.1-7 に示すように、台風期前、台風期後ともに空間線量率とセシウム 134、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から評価した放射性セシウムの沈着量を、in-situ 測定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。台風期前のセシウム 134 及びセシウム 137 の詳細な土壌濃度マップを図 2.2.1-8 及び図 2.2.1-9 に、台風期後のマップを図 2.2.1-10 及び図 2.2.1-11 にそれぞれ示す。

3) 空間線量率、放射性セシウムの沈着量の測定結果の信頼性の確認

空間線量率の測定結果については、校正履歴の明らかなサーベイメータを用いて測定し、さらに、測定時の写真等を基に適切な測定が行われていることを確認した。また、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全てを用いて同一個所で測定を行い、同様の沈着量評価値が得られることを確認した後に本格的な測定を実施した。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表示のサーベイメータにより測定した地上 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ており、in-situ 測定の信頼性が確認された。参考のために比較結果を Appendix 2.2.1-図 3 及び図 4 に示す。

4) 台風期前後における空間線量率ならびにセシウムの沈着量の変化

台風期前と台風期後の空間線量率の相関を図 2.2.1-12 に示す。台風期前後の空間線量率の変化を比較するのに、相関図上の回帰直線の傾きに加え、空間線量率の積算値の比率も参考にした。これは、相関図上の回帰直線の傾きは空間線量率の高い部分のデータに大きく影響を受け、全体の空間線量率の減衰傾向を適切に表現できない場合があるためである。台風期前後の空間線量率の比は、相関図上の回帰直線の傾きからは 0.94、空間線量率の積算値からも 0.94 と評価された(表 2.2.1-1 参照)。物理的減衰によるこの間の空間線量率の減少は 5%程度であるため、この期間における台風期前後でのウェザリング効果等による空間線量率の減少はほとんど見られないことが明らかになった。

図 2.2.1-13 において、台風期前と台風期後の空間線量率の比率を、台風期前の空間線量率の範囲毎に示した。後ほど検討する第 1 次分布状況等調査と第 3 次分布状況等調査の間の傾

向のように顕著ではないが、空間線量率の減衰傾向に線量率依存性がある可能性を示唆する結果が得られている。

台風期前と台風期後の放射性セシウムの沈着量の相関を図 2.2.1-14 に示す（台風期前と台風期後の銀 110m の沈着量の相関については Appendix 2.2.1-図 5 を参照）。台風期前後のセシウム沈着量の比率は、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 0.89、沈着量の積算値の比較からは 0.87、セシウム 137 に関しては相関図上の回帰直線の傾きからは 0.97、沈着量の積算値の比較からは 0.94 と評価された。ちなみに物理的減衰により予想される比率はセシウム 134 と 137 に対してそれぞれ、0.92 と 0.99 であり、セシウムの沈着量に着目してもウェザリングの効果は小さいことが確認された。

台風期前と台風期後の調査の間に台風 17 号が 9 月 30 日から 10 月 1 日にかけて福島県内を通過したが、福島県への降雨量は多い所で 50 mm 程度とそれ程多くはなかったことが報告されており、空間線量率の変化からもセシウム沈着量の変化からも、この期間のウェザリング効果による放射性物質の移行は小さかったことを示唆する結果が得られた。

5) 空間線量率の長期的変化

福島第一原発から 80 km 圏内の空間線量率の変化状況を確認するため、第 3 次分布状況等調査（台風期前）の測定結果と放射性物質の第 1 次分布状況等調査（平成 23 年 6 月 6 日～7 月 8 日に実施）の測定結果との比較を行った。なお、今回の調査と第 1 次分布状況等調査との測定結果の比較にあたっては、GPS データには 20 m 程度の測定誤差が含まれるため、第 1 次分布状況等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。第 1 次分布状況等調査と第 3 次分布状況等調査（台風期前）の空間線量率を図 2.2.1-15 で比較した。

その結果、第 1 次分布状況等調査から今回の調査までに約 14 ヶ月の時間が経過することで、空間線量率は回帰直線の傾きによれば 33% 程度、空間線量率の積算値の比によれば 35% 程度減衰していることが確認された。セシウムの物理的減衰に伴う空間線量率の減少は 14 ヶ月間で約 25% 弱と評価されるため、主に降雨を始めとするウェザリング等の影響により 8～10% 程度、空間線量率が減少していることがわかった。

図 2.2.1-15 の低線量率域のデータを観察すると、第 1 次分布状況等調査に比べて大幅に空間線量率が減少している傾向を示す複数の箇所が確認され、第 1 次分布状況等調査に比べて空間線量率が 55% 以上減少している箇所が全部で 45 箇所あった。この大幅に空間線量率が減少している箇所について除染状況を地元市町村等に確認したところ、これらのうちの 22 箇所を除染が行なわれていることが確認された。また、第 1 次分布状況等調査と今回の調査の測定箇所の写真等とを比較して、整地や砂利敷き等により明らかに第 1 次分布状況等調査から地面の状況が変わっている 17 箇所を抽出した。図 2.2.1-15（右側）において、除染が実施されたことを確認できた 22 箇所を緑色の印で、地面の状況が変化していると判断された 17 箇所を赤色の印で示す。

次に、緑色及び赤色の印で示した空間線量率が全て、除染あるいは土地利用状況の変化により大きく変化したと想定し、除染等の影響以外すなわち純粹にウェザリング効果により、どの程度空間線量率が減少したかを評価した。評価にあたっては、緑色と赤色で示されたポイント以外の調査箇所を対象に、今回の調査及び第 1 次分布状況等調査で測定された空間線量率の相関図を作成するとともに、それぞれの調査における空間線量率を積算し、この積算値の変化率を比較した。第 1 次分布状況等調査と第 3 次分布状況等調査（台風期前）の空間線量率の比較を図 2.2.1-16 に、第 1 次分布状況等調査と第 3 次分布状況等調査（台風期後）

の比較を図 2.2.1-17 にそれぞれ示す。また表 2.2.1-1 には空間線量率の積算値から評価した空間線量率の変化率をまとめる。

図 2.2.1-16 から分かるように、第 1 次分布状況等調査から第 3 次分布状況等調査(台風期前)までに空間線量率が約 32%減衰していることが確認された。この期間(約 14 ヶ月)の放射性セシウムの物理的減衰のみを考慮した空間線量率の変化率は約 25%であるので、物理的減衰及び除染以外の要因により空間線量率が 7%程度減衰していることが確認された。なお、第 1 次分布状況等調査から第 3 次分布状況等調査(台風期後)の期間では、空間線量率が約 37%減衰していることが確認された。この期間(約 18 ヶ月)の放射性セシウムの物理的減衰のみを考慮した空間線量率の変化率は約 29%であるので、物理的減衰及び除染以外の要因により空間線量率が 8%程度減衰していることが確認された。

また、空間線量率の詳細な変化状況を確認するため、上述した除染された箇所(緑色の箇所)ならびに土地の利用状況が変化したと判断される箇所(赤色の箇所)を除き、第 1 次分布状況等調査と第 3 次分布状況等調査の空間線量率の比率を計算して、空間線量率の大きさごとに比較した(図 2.2.1-18 参照)。ここでは、個々のケースにおける統計的な空間線量率の変動の影響を抑えるために、空間線量率の範囲を設定し、その範囲に含まれる空間線量率を積算した上で、空間線量率の積算値の変化率を計算した。台風期前のデータを青色で、台風期後のデータを赤色で示している。

その結果、第 1 次分布状況等調査と今回の調査における空間線量率の比率は、台風前後とともに第 1 次分布状況等調査の空間線量率に依存して異なる傾向があることが確認された。特に、第 1 次分布状況等調査における空間線量率が $0.25 \mu\text{Sv/h}$ 以下の部分では、空間線量率の変化率が小さいことが確認された。放射性セシウムの物理的減衰の効果は、いずれの空間線量率域でも同様に効いていると考えられるものの、この原因としては、1) 放射性セシウムの移動の影響が低線量率地域では大きく現れる傾向にあること、2) 天然放射線核種からのガンマ線の空間線量率への寄与により、低線量率の変化率が低めに見積もられていること等が考えられた。考えられる二番目の原因については、in-situ 測定で得られた典型的な値を参照して天然放射性核種からの空間線量率への寄与が 50 nSv/h と仮定し、この寄与を全ての空間線量率値から差し引いた後に同様の比較を行なったが、図 2.2.1-18 の傾向が顕著に変化することはなかった(Appendix 2.2.1-図 6 参照)。従って、空間線量率変化率の線量率依存性は、一番目の原因に寄るものと推測されるが、現時点では因果関係は明らかになっていないことから、この現象の詳細解析のため、今後も継続的な調査を通じて空間線量率、放射性セシウムの沈着量の変化率を確認していくことが必要である。

6) 放射性セシウムの沈着量の長期的変化

第 1 次分布状況等調査では、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 箇所ですら採取した 5 試料の放射性セシウムの放射能濃度の変動係数が平均で 36%と大きいことが確認されている。

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 測定を実施した第 2 次分布状況等調査(平成 23 年 3 月 1 日時点)及び今回の第 3 次分布状況等調査(平成 24 年 9 月 1 日時点ならびに 12 月 1 日時点)のセシウム 137 の沈着量の結果について比較を行った。なお、第 2 次分布状況等調査の結果と今回の調査の比較にあたっては、空間線量測定と同様に、GPS データには 20 m 程度の測定誤差が含まれ

ることを考慮し、第2次分布状況等調査で測定した箇所から20mの範囲内にある箇所を同一箇所とした。

その結果、図2.2.1-19に示すように、セシウム137の沈着量に関しては、第2次分布状況等調査から今回の調査（台風期前）までの半年間ではほとんど減少がみられなかった。ちなみにこの期間に予想される物理的減衰は1%程度であり、全体の傾向として、この期間におけるウェザリング等の効果はほとんど観察されなかった。なお、この結果は台風期をはさんだ第3次分布状況等調査（台風期後）の調査においても同様であった。

先の(2)で示したように、空間線量率の変化率に線量率依存性の影響が観察されている。セシウム137の沈着量の変化状況を確認するにあたって、第2次分布状況等調査から第3次分布状況等調査（台風期前）までの期間では半年程度しかなく期間が短いこと、沈着量を比較する際の調査箇所数が少ないことから、今回調査ではセシウム137の沈着量の変化状況を詳細に確認できなかった。

(4) まとめ

サーベイメータによる地上1m高さの空間線量率マップ及びin-situ測定等に基づく放射性セシウムの土壌への沈着量を示すマップを作成した。さらに、放射性セシウムの沈着量と空間線量率の相関関係を基に、詳細な放射性セシウムの土壌濃度マップを作成した。これまでに実施したモニタリング結果（平成23年6月期の第1次分布状況等調査、平成23年12月期の第2次分布状況等調査の結果及び今回実施した2回の調査の結果（平成24年8月期及び11月期の第3次分布状況等調査））を基に、各地域における空間線量率、放射性セシウムの沈着量の変化傾向を確認したところ、以下のような知見を得た。

- 台風期前後の空間線量率の平均的な比率は0.94～0.95と評価された。物理的減衰によるこの間の空間線量率の減少は5%程度であるため、この期間における台風期前後でのウェザリング効果等による空間線量率の減少はほとんど見られなかった。
- 第1次分布状況等調査（平成23年6月期）から第3次分布状況等調査（平成24年9月期＝台風期前）までに空間線量率が32%減少した。この期間（約14ヶ月）の放射性セシウムの物理的減衰のみを考慮した空間線量率の変化率は約25%であるので、物理的減衰及び除染以外の要因により空間線量率が約7%減衰していることが確認された。また、第1次分布状況等調査（平成23年6月期）から第3次分布状況等調査（平成24年12月期＝台風期後）までに空間線量率が36%減衰した。この期間（約18ヶ月）の放射性セシウムの物理的減衰のみを考慮した空間線量率の変化率は約29%であるので、物理的減衰及び除染以外の要因により空間線量率が約7%減衰していることが確認された。
- セシウム137の沈着量に関しては、第2次分布状況等調査から第3次分布状況等調査（台風期前）までの半年間ではほとんど減少がみられなかった。ちなみにこの期間に予想される物理的減衰は1%程度であり、全体の傾向として、この期間におけるウェザリング等の効果はほとんど観察されなかった。なお、この結果は台風期をはさんだ第3次分布状況等調査（台風期後）の調査においても同様であった。
- 空間線量率の減衰傾向に線量率依存性があり、空間線量率の高い地域では空間線量率の減衰が早く、逆に空間線量率の低い地域、特に $0.25 \mu\text{Sv/h}$ 以下の地域では減衰が遅い傾向が確認された。

参考文献：

- [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)

表 2.2.1-1 除染箇所等を除いた、放射性物質の第 1 次分布状況等調査（平成 23 年 6 月 6 日～7 月 8 日に測定）と第 3 次分布状況等調査の空間線量率の積算値の比較
 （第 1 次分布状況等調査と第 3 次分布状況等調査の空間線量率の測定結果をそれぞれ積算し、その積算値を比較し、空間線量率の積算値の比率を算出）

空間線量率の積算値

調査期間	空間線量率 の積算値	3 次/1 次 (積算値から算出)	3 次/1 次 (物理的減衰による 空間線量率の減衰 から算出)
第 1 次分布状況等調査 (平成 23 年 6 月 4 日～7 月 8 日)	965	—	—
第 3 次分布状況等調査(台風期前) (平成 24 年 8 月 14 日～9 月 7 日)	660	0.68	0.75
第 3 次分布状況等調査(台風期後) (平成 24 年 11 月 5 日～12 月 7 日)	618	0.64	0.71

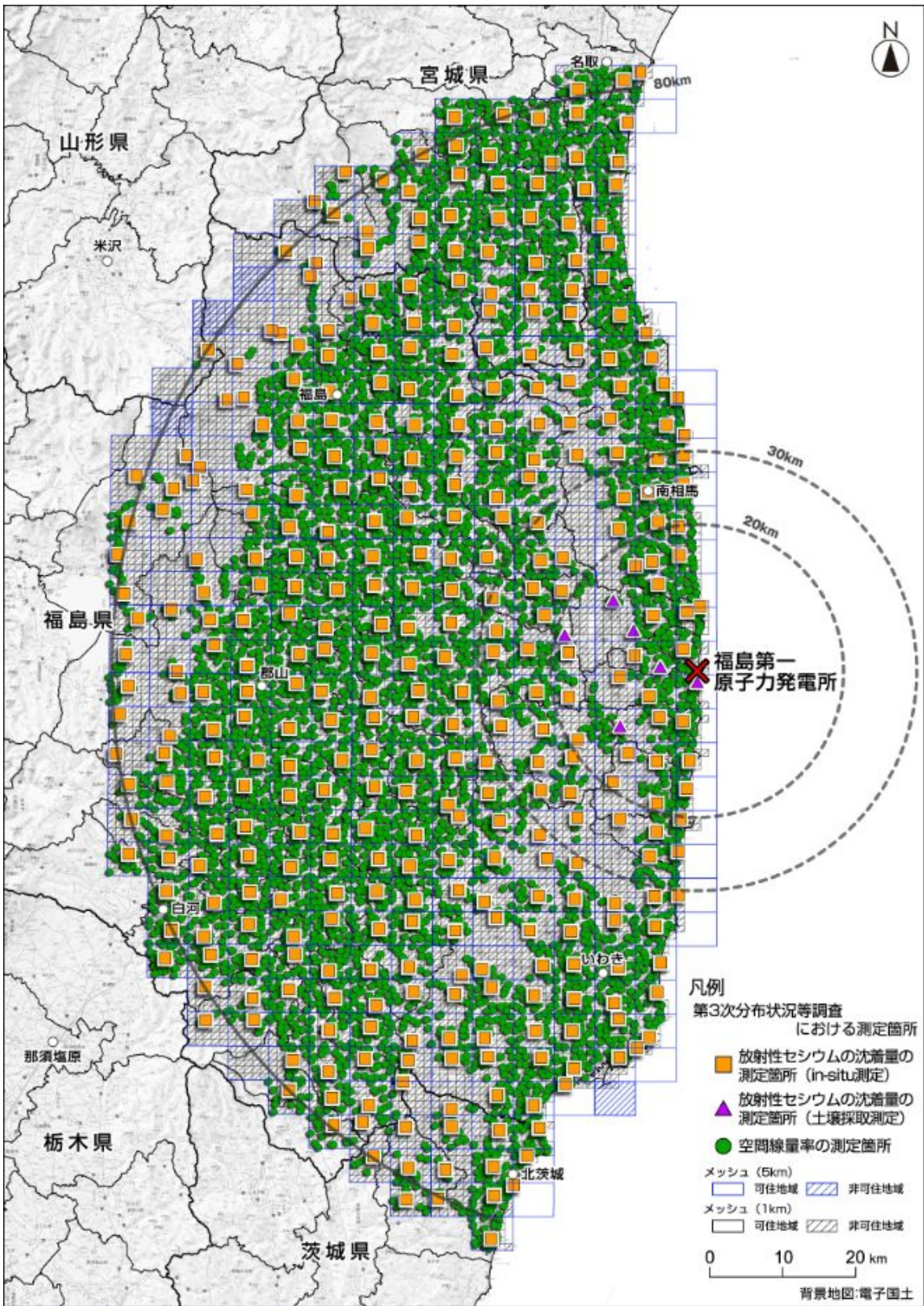


図 2.2.1-1 第3次分布状況等調査における空間線量率の測定箇所及び放射性セシウムの沈着量の測定箇所

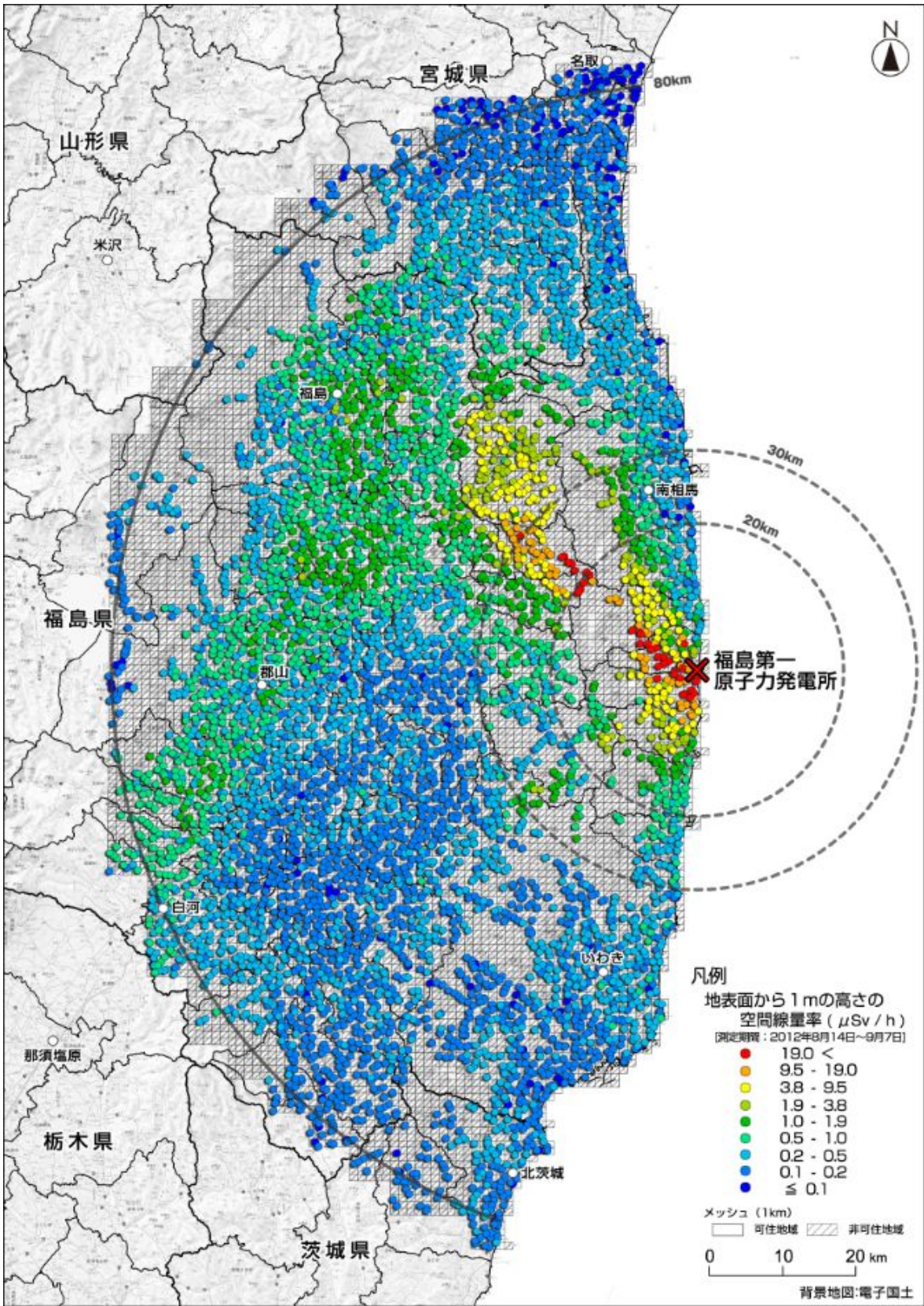


図 2.2.1-2 サーベイメータによる地表面から 1 m 高さの空間線量率の測定結果
 (台風期前:平成 24 年 8 月 14 日~9 月 7 日に測定)

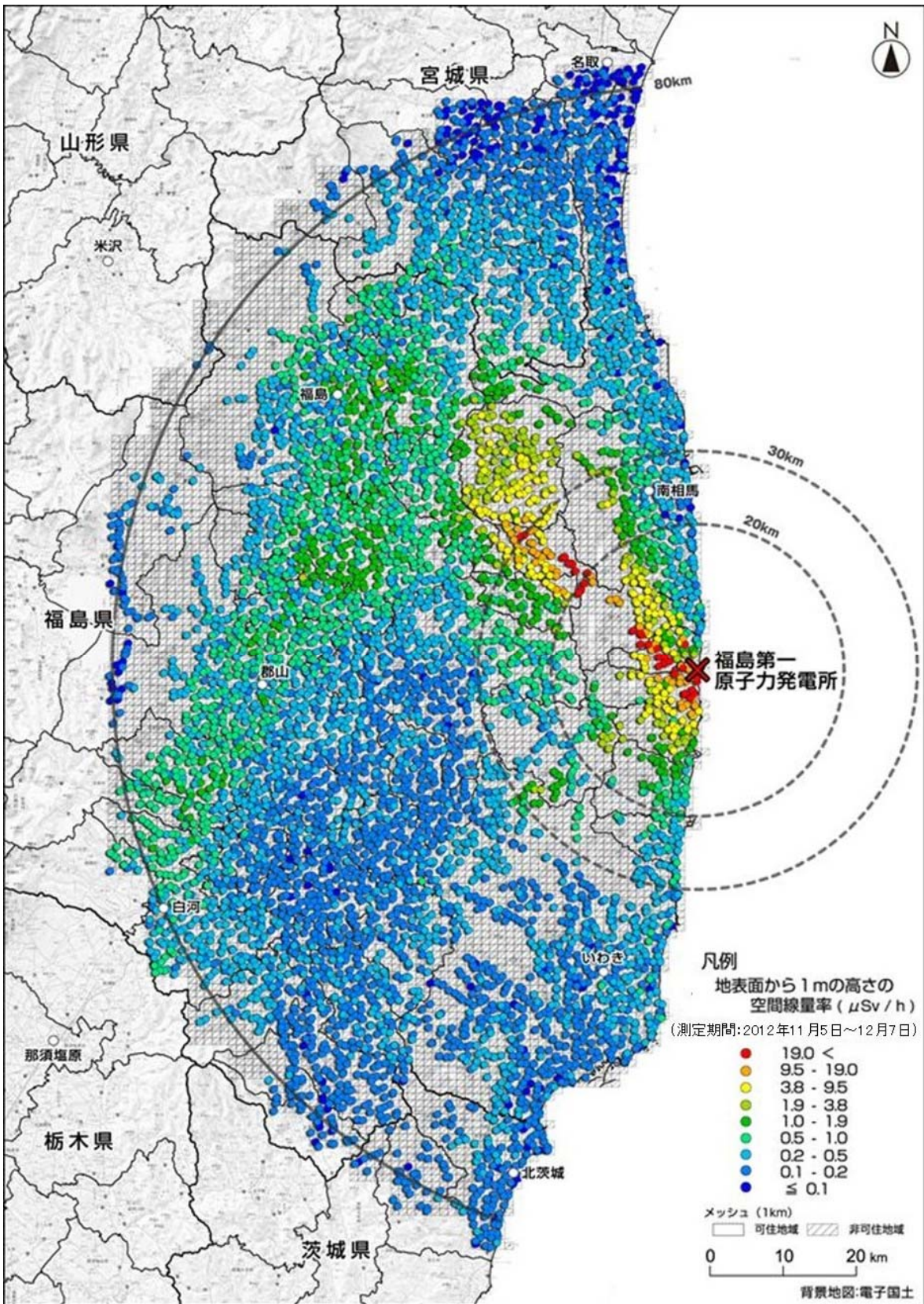


図 2.2.1-3 サーベイメータによる地表面から1 m 高さの空間線量率の測定結果
(台風期後:平成24年11月5日~12月7日に測定)

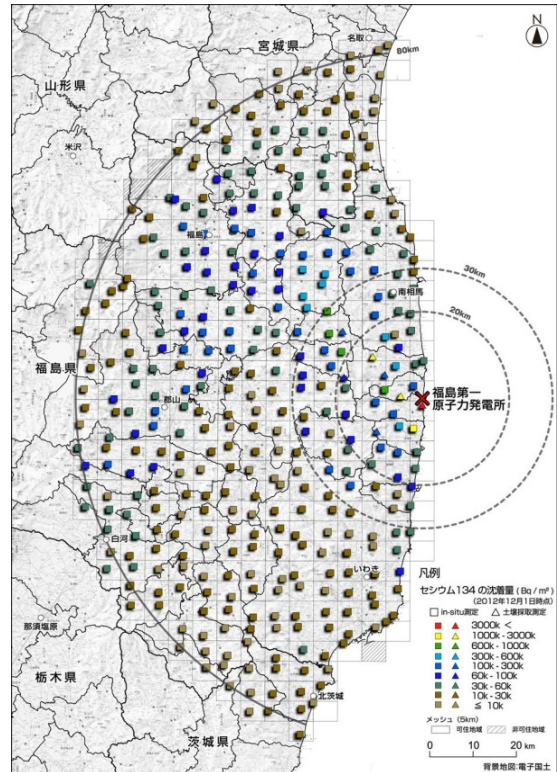
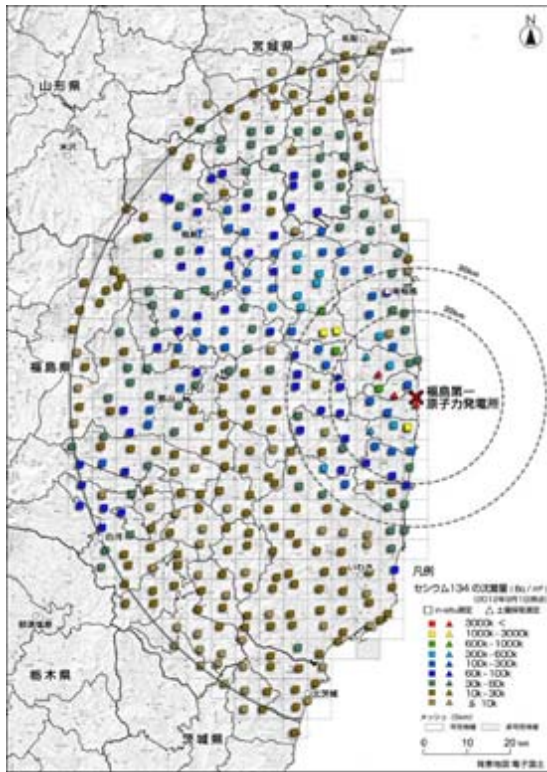


図 2.2.1-4 可搬型ゲルマニウム半導体検出器による in-situ 測定等を用いたセシウム 134 の土壌への沈着量を記したマップ (左:平成 24 年 9 月 1 日時点、右:平成 24 年 12 月 1 日時点)

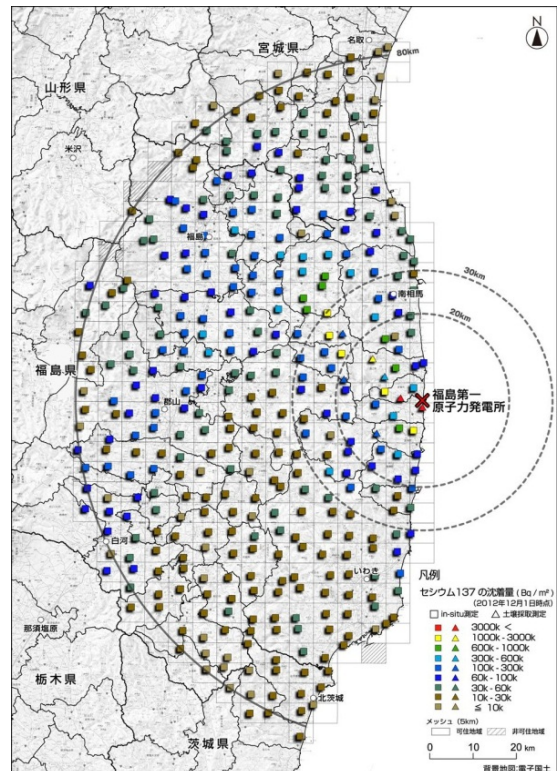
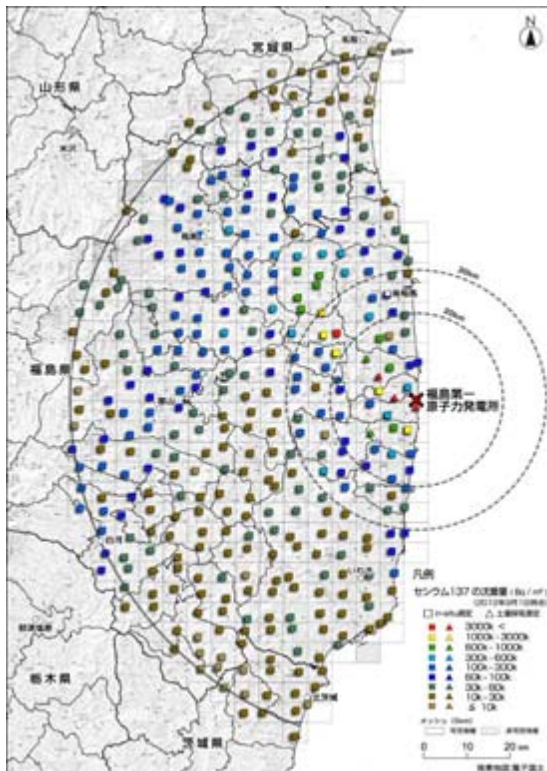


図 2.2.1-5 可搬型ゲルマニウム半導体検出器による in-situ 測定等を用いたセシウム 137 の土壌への沈着量を記したマップ (左:平成 24 年 9 月 1 日時点、右:平成 24 年 12 月 1 日時点)

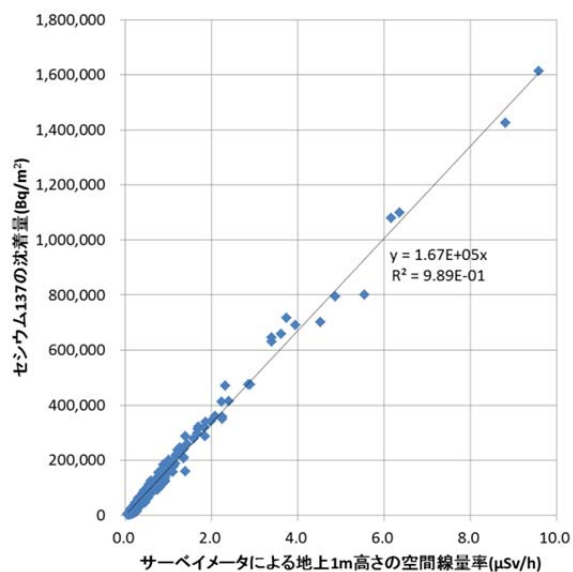
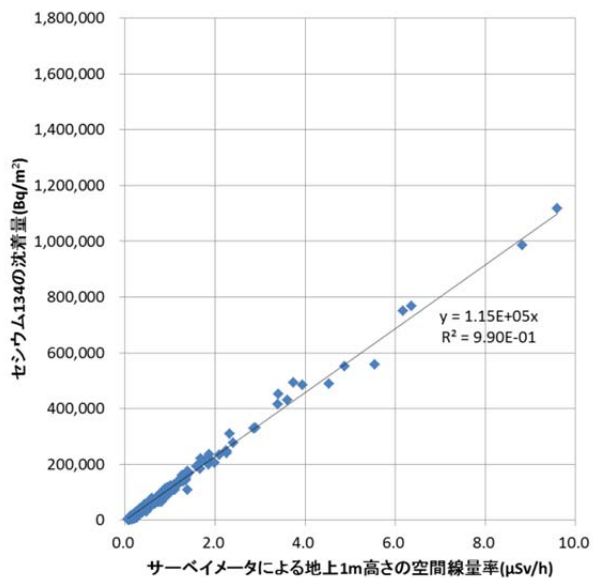


図 2.2.1-6 サーベイメータによる地上 1 m 高さの空間線量率と放射性セシウムの沈着量の相関 (左:セシウム 134、右:セシウム 137)
(台風期前:平成 24 年 8 月 14 日~9 月 7 日に測定) (データ数 n=373)

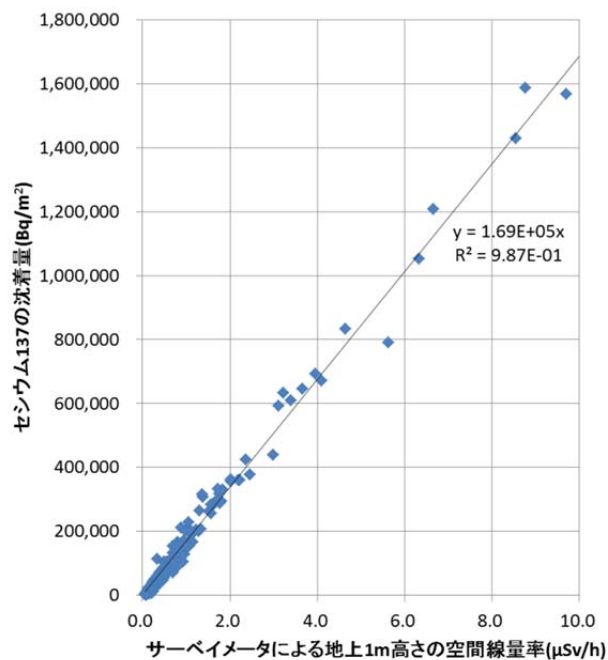
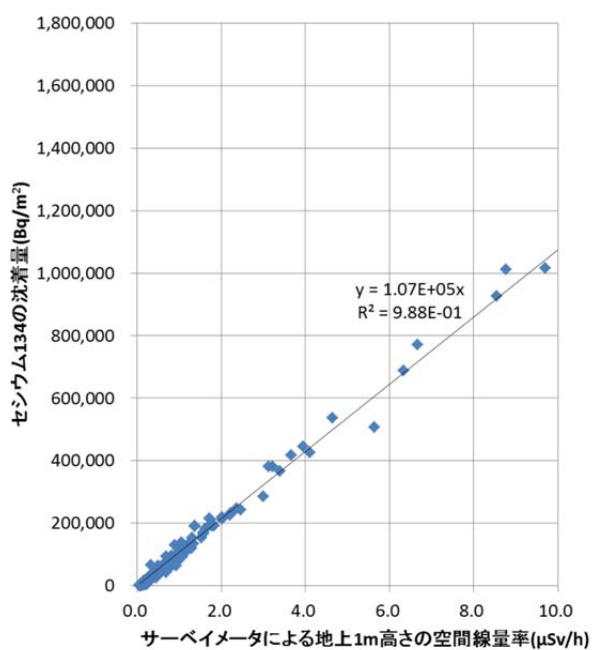


図 2.2.1-7 サーベイメータによる地上 1 m 高さの空間線量率と放射性セシウムの沈着量の相関 (左:セシウム 134、右:セシウム 137)
(台風期後:平成 24 年 11 月 5 日~12 月 7 日に測定) (データ数 n=373)

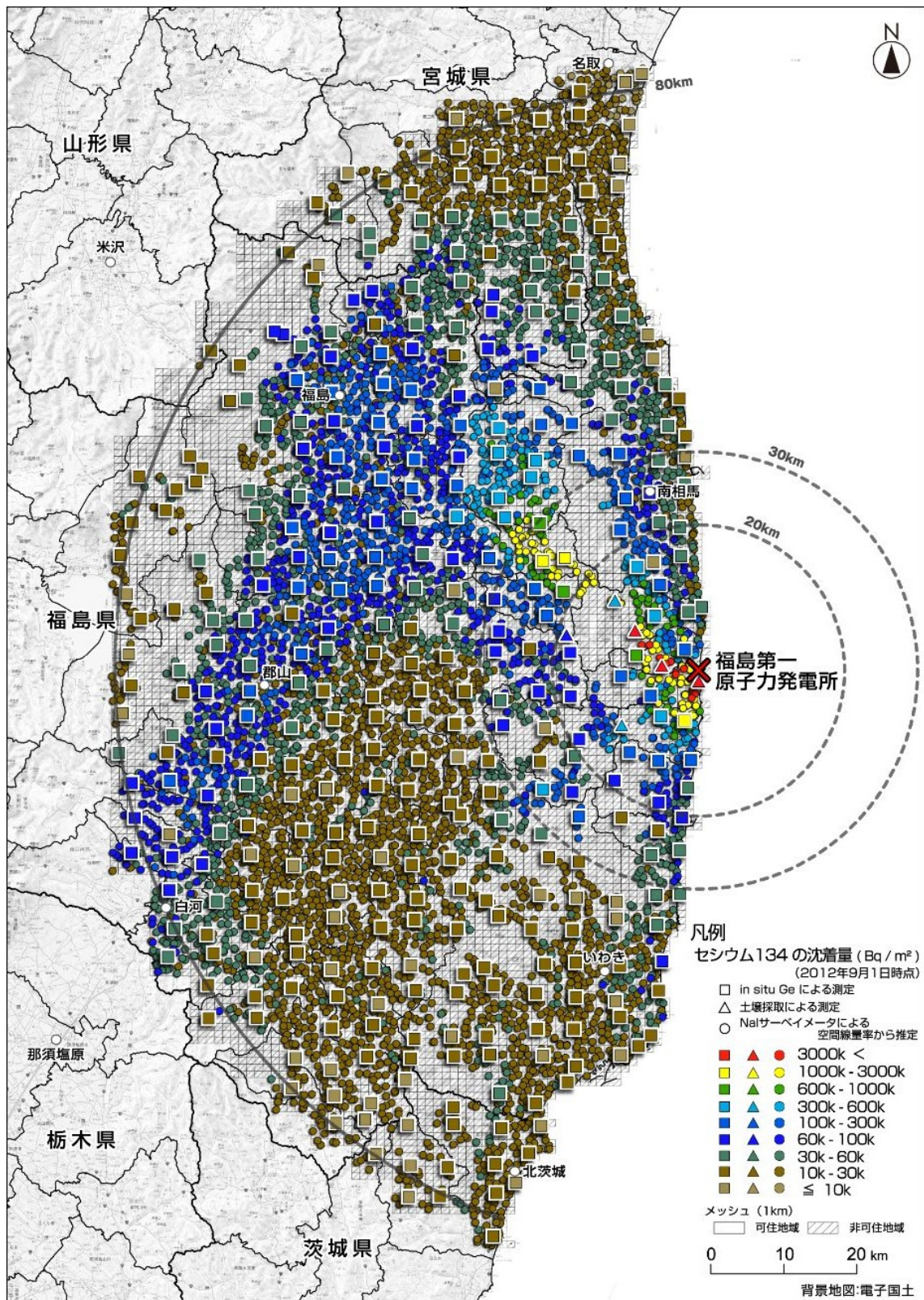


図 2.2.1-8 セシウム 134 の沈着量を記した土壤濃度マップ (今回の調査で直接に測定した沈着量 (□, △) に空間線量率と放射性セシウムの沈着量の相関関係を基に評価したセシウム 134 の沈着量の評価値 (○) を追加) (台風期前: 平成 24 年 8 月 13 日~9 月 19 日に測定)

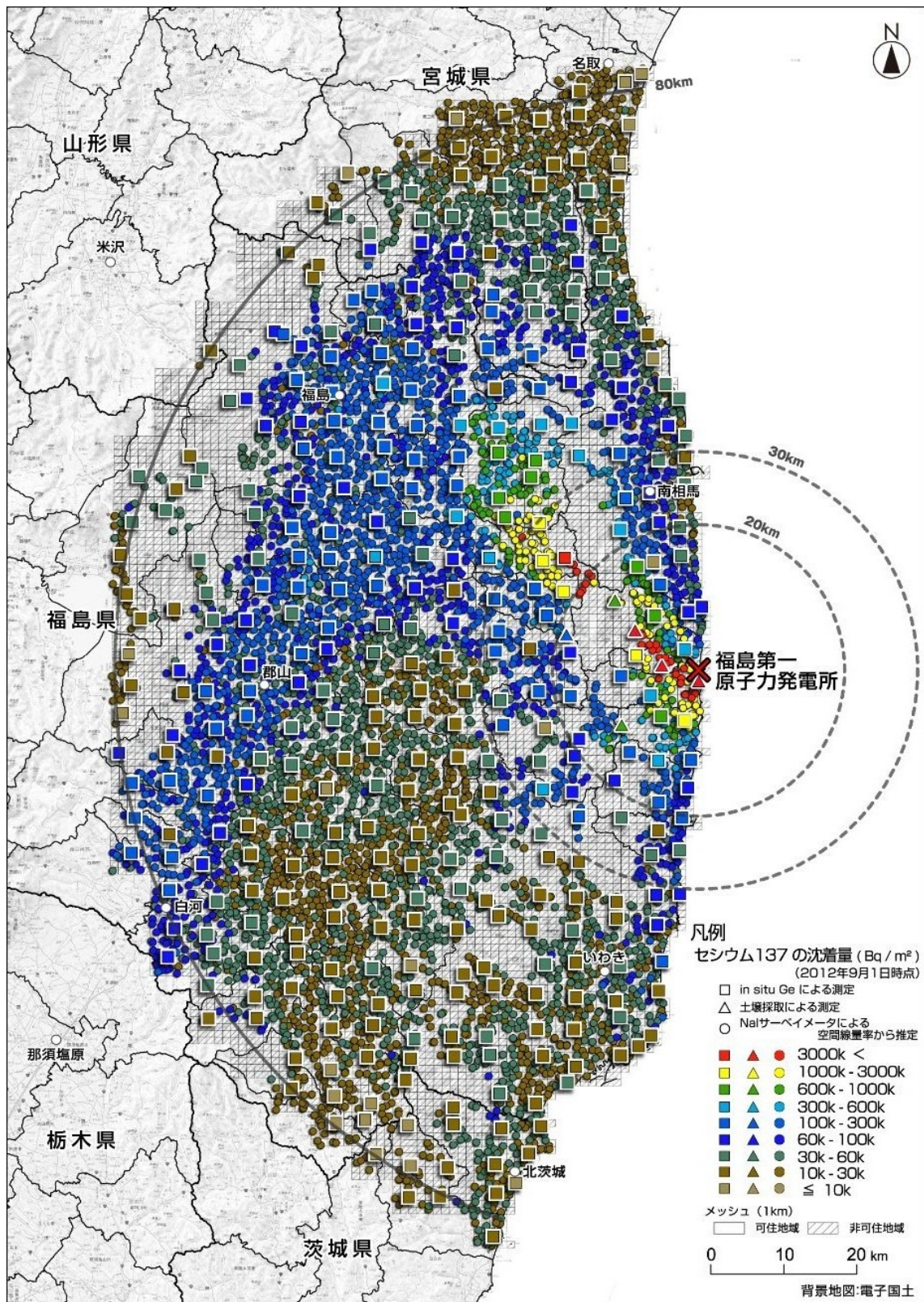


図 2.2.1-9 セシウム 137 の沈着量を記した土壌濃度マップ (今回の調査で直接に測定した沈着量 (□、△) に空間線量率と放射性セシウムの沈着量の相関関係を基に評価したセシウム 137 の沈着量の評価値 (○) を追加) (台風期前:平成 24 年 8 月 13 日~9 月 19 日に測定)

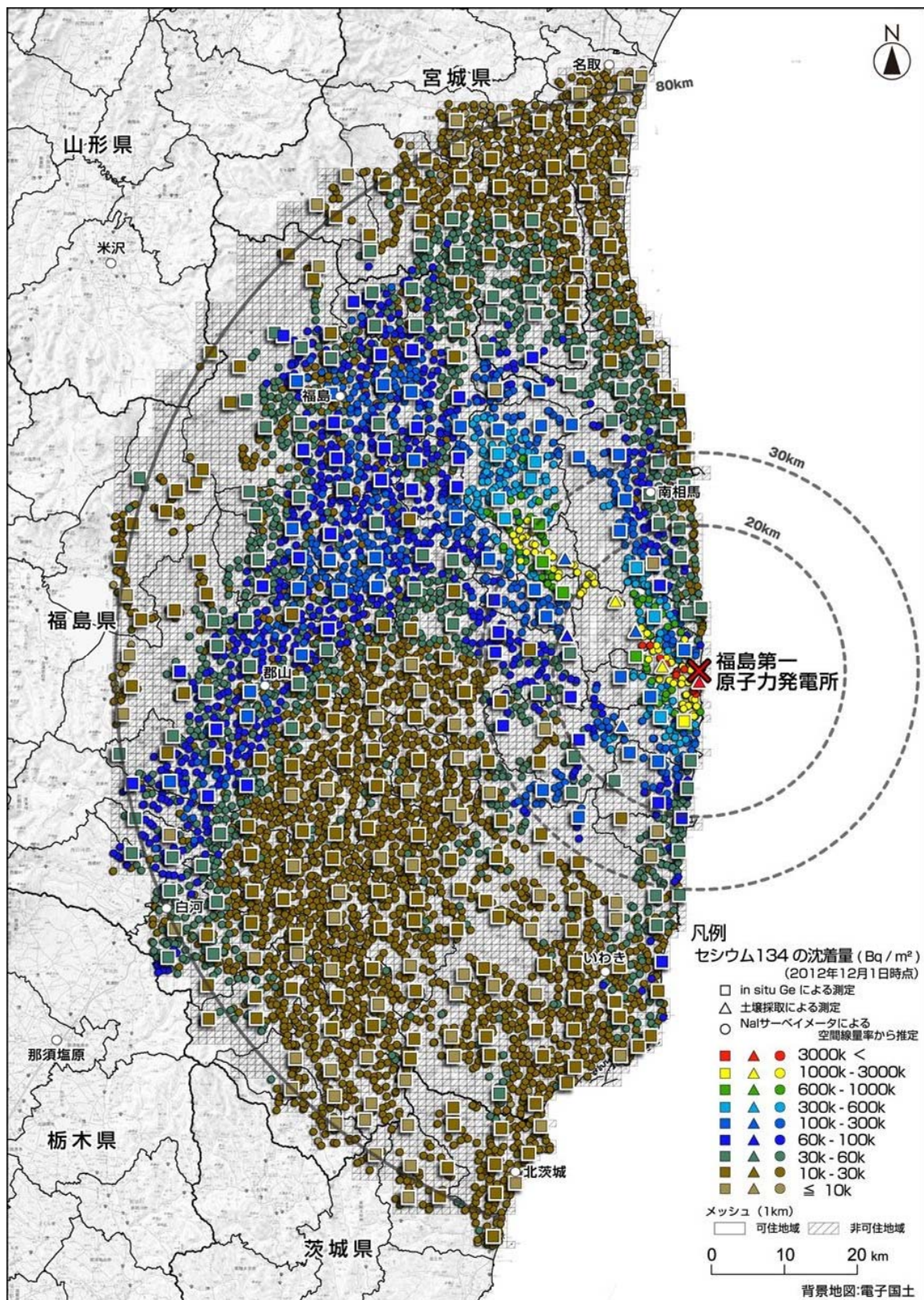


図 2.2.1-10 セシウム 134 の沈着量を記した土壌濃度マップ (今回の調査で直接に測定した沈着量 (□) に空間線量率と放射性セシウムの沈着量の相関関係を基に評価したセシウム 134 の沈着量の評価値 (○) を追加) (台風期後:平成 24 年 11 月 5 日~12 月 12 日に測定)

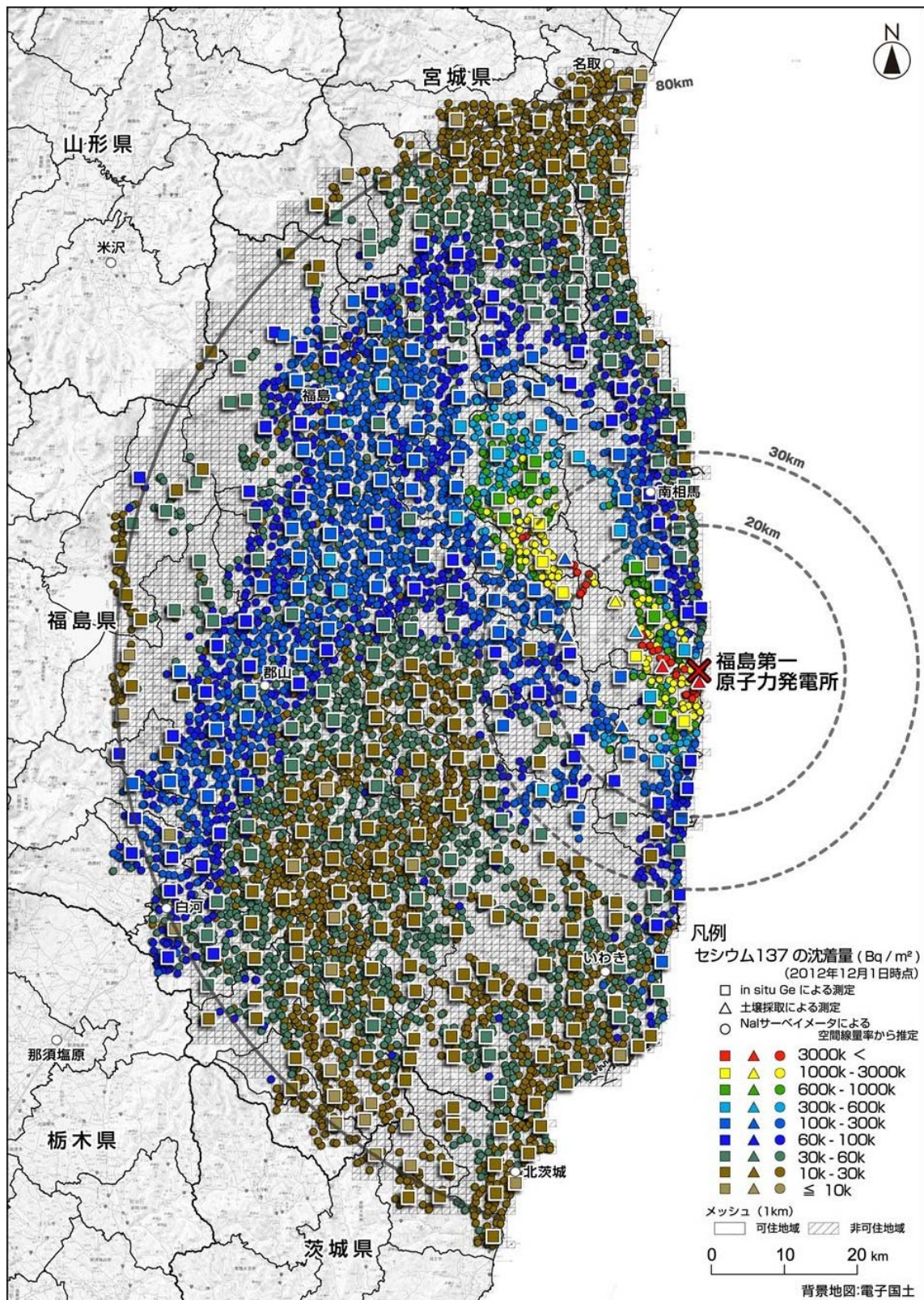


図 2.2.1-11 セシウム 137 の沈着量を記した土壌濃度マップ（今回の調査で直接に測定した沈着量（□）に空間線量率と放射性セシウムの沈着量の相関関係を基に評価したセシウム 137 の沈着量の評価値（○）を追加）（台風期後：平成 24 年 11 月 5 日～12 月 12 日に測定）

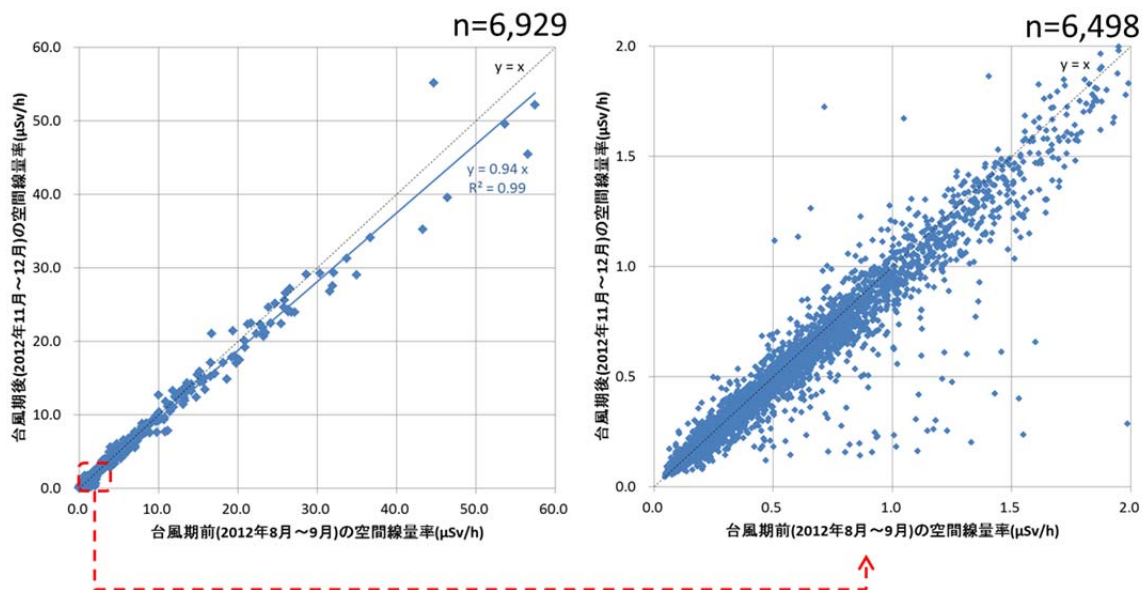


図 2. 2. 1-12 台風期前(平成 24 年 8 月～9 月)と台風期後(平成 24 年 11 月～12 月)の空間線量率の変化 (右図：左図の低線量率部分(赤破線枠)を拡大したもの)

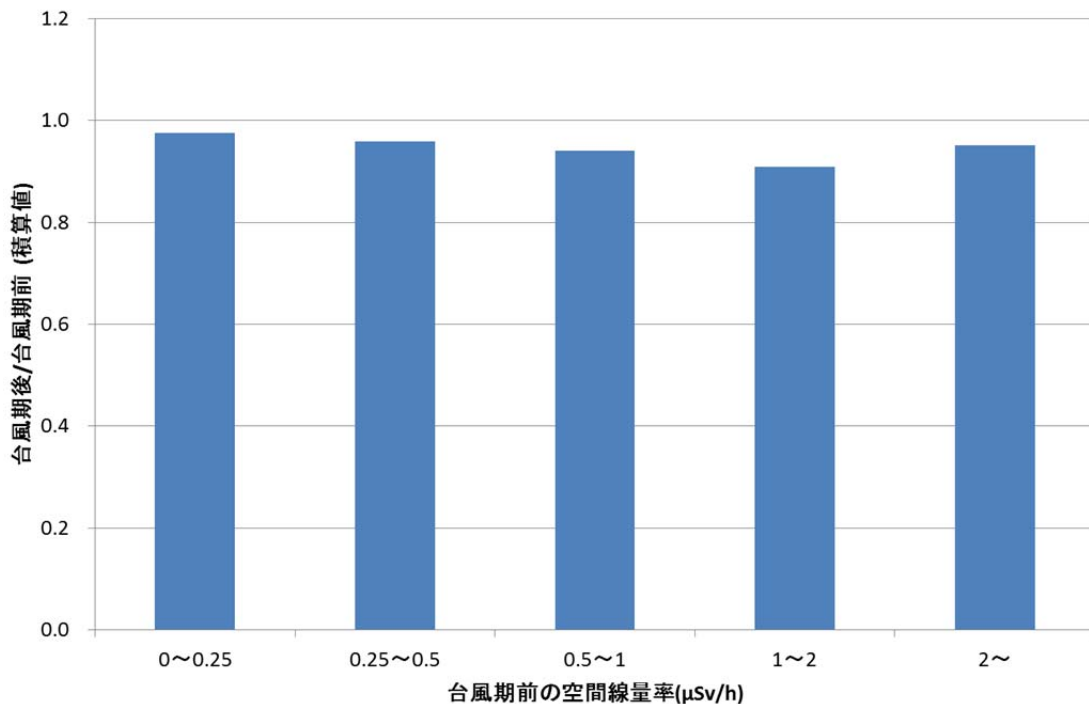


図 2. 2. 1-13 台風期前に測定された空間線量率の範囲ごとの空間線量率の比率 (空間線量率の比率は、台風期前に測定された空間線量率の積算値に対する台風期後の調査で測定された空間線量率の積算値の比率を指す) (データ数 n=6, 929)

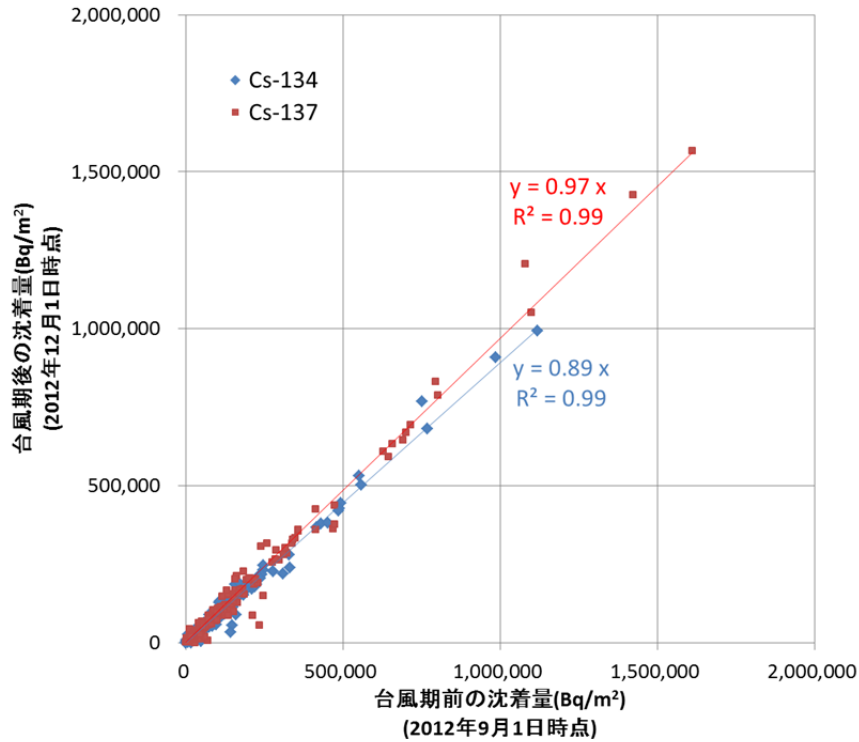


図 2. 2. 1-14 台風期前(平成 24 年 8 月～9 月)と台風期後(平成 24 年 11 月～12 月)の放射性セシウムの沈着量の変化 (データ数 n=372)

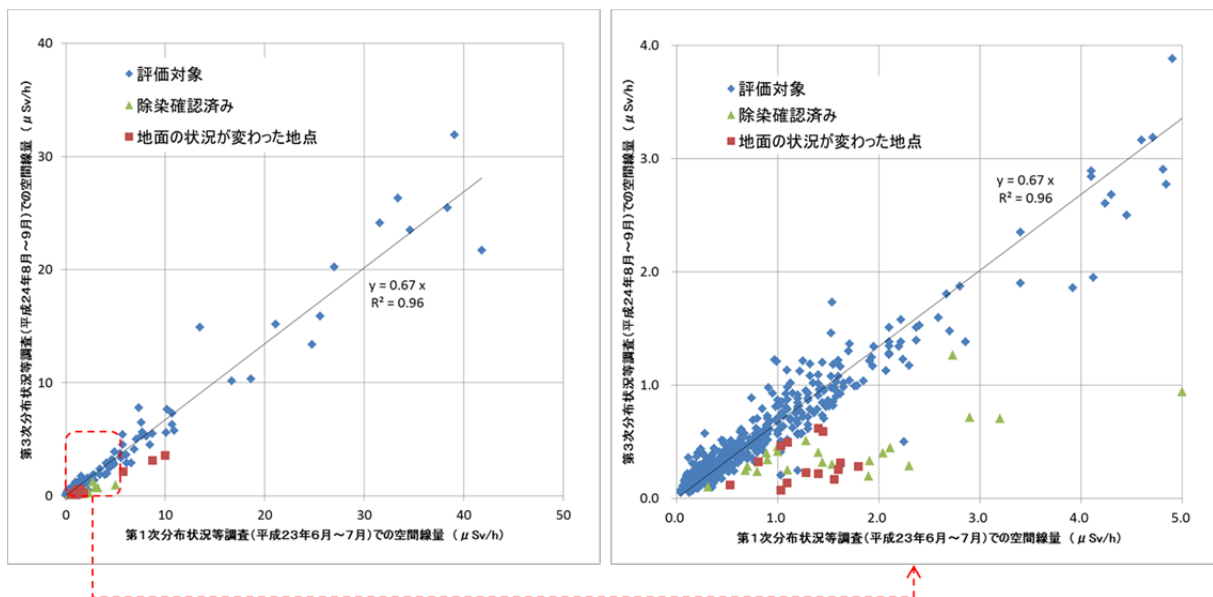


図 2. 2. 1-15 放射性物質の第 1 次分布状況等調査(平成 23 年 6 月 6 日～7 月 8 日に測定)と第 3 次分布状況等調査(台風期前:平成 24 年 8 月 14 日～9 月 7 日に測定)の空間線量率の測定結果の比較(右側の図は左側の図の低線量率部分を拡大したもの。第 1 次分布状況等調査以降に除染した箇所(緑色のポイント)及び地面の状況が変化していると判断された箇所(赤色のポイント)を抽出した。) (データ数 n=741)

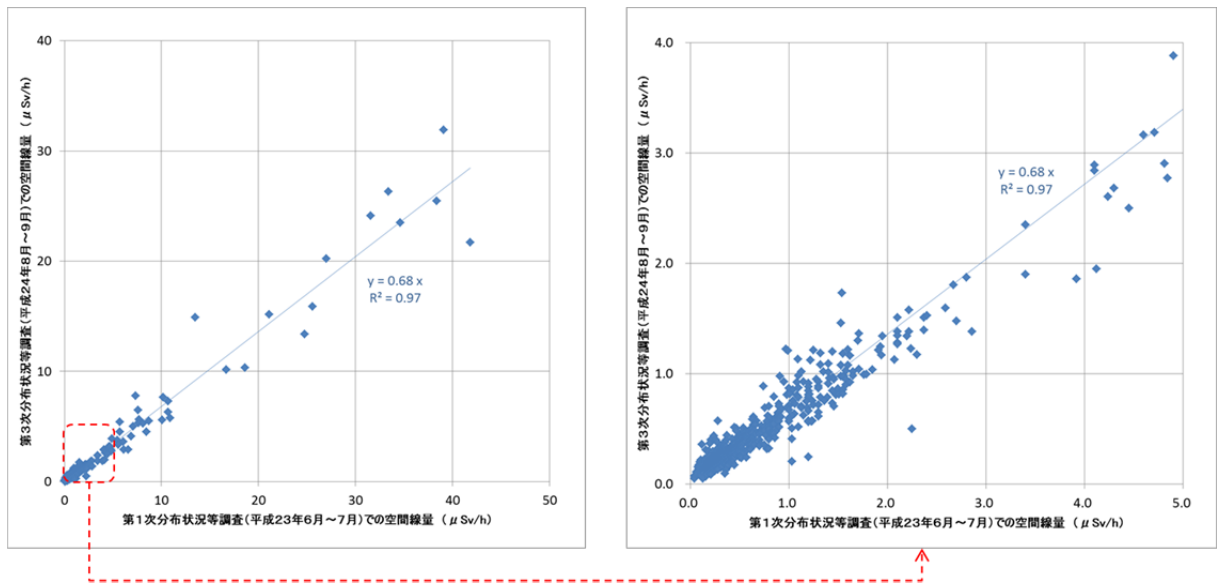


図 2. 2. 1-16 除染箇所等を除いた、放射性物質の第 1 次分布状況等調査（平成 23 年 6 月 6 日～7 月 8 日に測定）と第 3 次分布状況等調査（台風期前：平成 24 年 8 月 14 日～9 月 7 日に測定）の空間線量率の比較（図 2. 2. 1-15 に示した緑色と赤色のポイントを除外）（データ数 n=702）

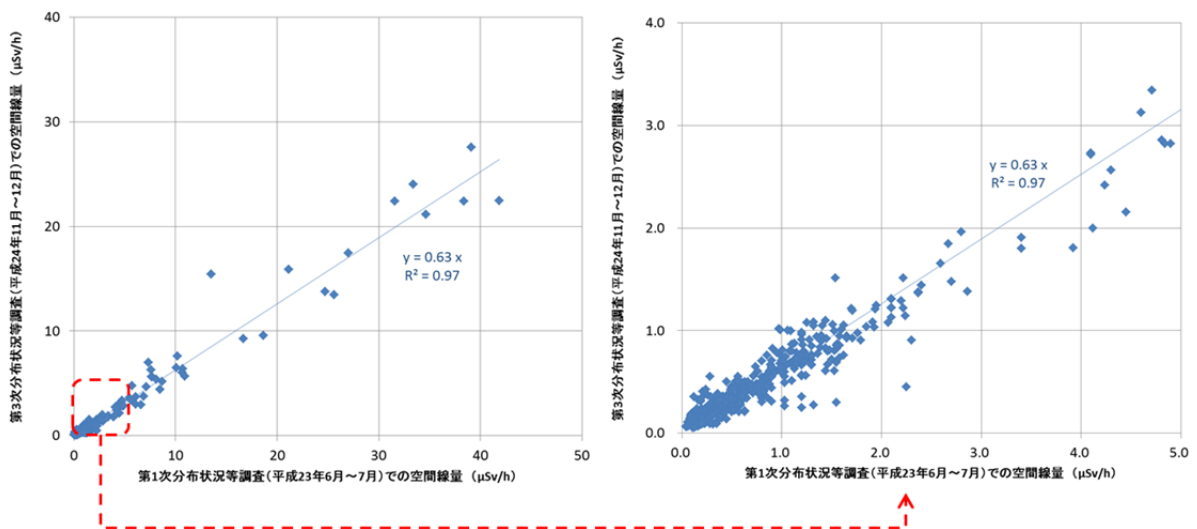


図 2. 2. 1-17 除染箇所等を除いた、放射性物質の第 1 次分布状況等調査（平成 23 年 6 月 6 日～7 月 8 日に測定）と第 3 次分布状況等調査（台風期後：平成 24 年 11 月 5 日～12 月 7 日に測定）の空間線量率の比較（図 2. 2. 1-15 に示した緑色と赤色のポイントを除外）（データ数 n=702）

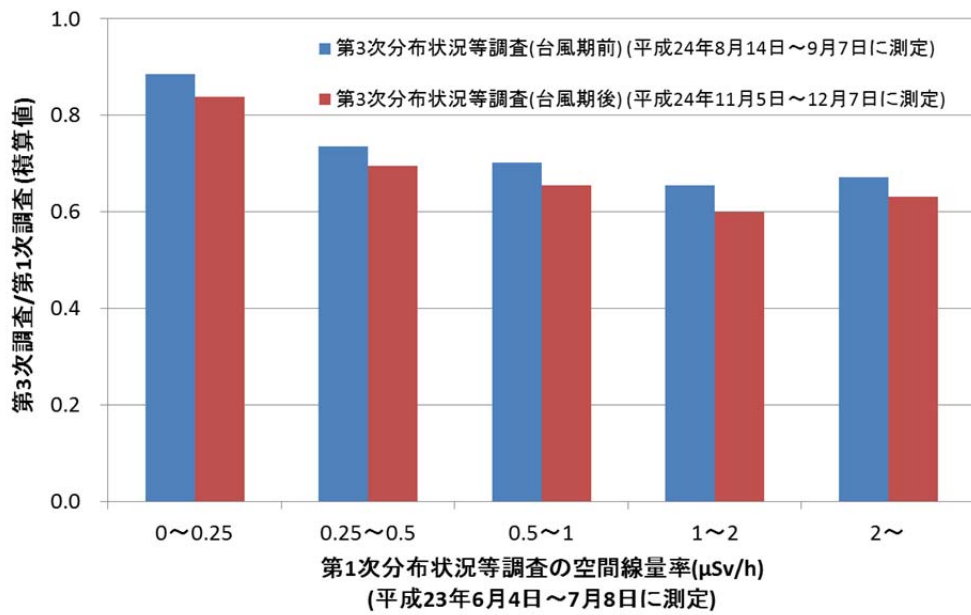


図 2. 2. 1-18 第 1 次分布状況等調査で測定された空間線量率の範囲ごとの空間線量率の変化の割合（空間線量率の変化の割合は、第 1 次分布状況等調査で測定された空間線量率の積算値に対する第 3 次分布状況等調査で測定された空間線量率の積算値の比率を指す。なお、第 3 次分布状況等調査の測定結果からは除染箇所及び土地利用状況が変化した箇所を除いている。）

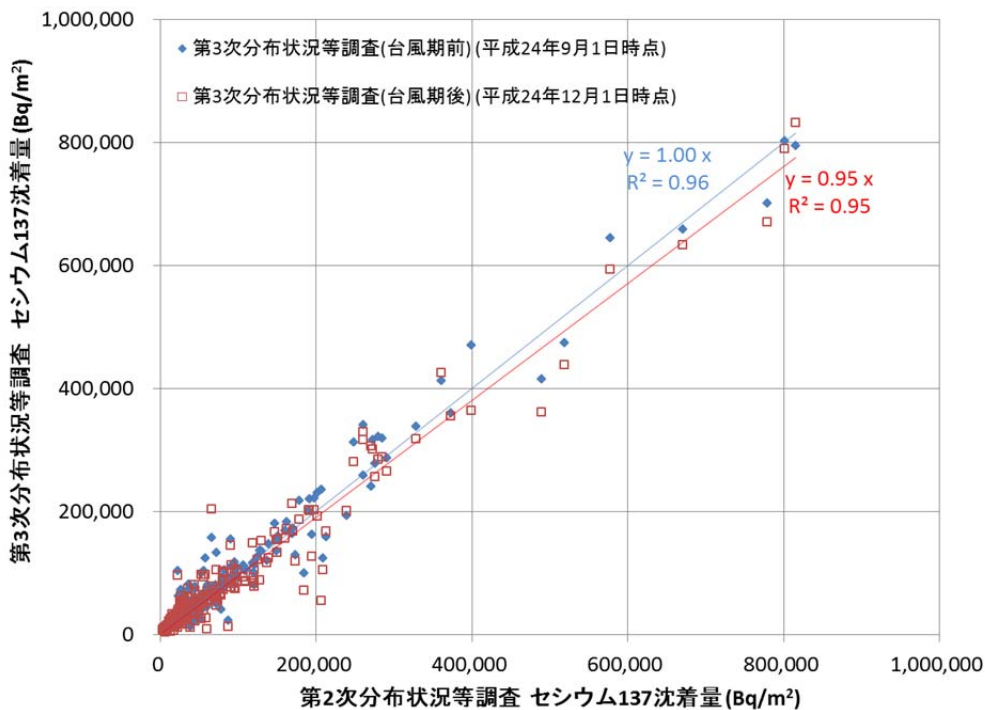


図 2. 2. 1-19 第 2 次分布状況等調査（平成 24 年 3 月 1 日時点）と第 3 次分布状況等調査におけるセシウム 137 の沈着量の比較（データ数 n=259）

2.2.2 走行サーベイを利用した広域における空間線量率分布調査

斎藤 公明（原子力機構）

(1) 調査目的

福島第一原発事故に起因する自然環境中における放射性セシウムの2次元的な分布状況を詳細に調査し、この結果を変化モデルの作成に役立てるため、KURAMA-IIシステムを用いた走行サーベイにより空間線量率の変化傾向を把握するための調査を実施した。平成24年度には、台風期前後に走行サーベイを実施し、道路上における福島第一原発から放出された放射性物質の現状における蓄積状況の詳細を明らかにすること、放射性物質の移行に大きな影響を与える可能性がある台風による空間線量率の変化の状況を確認すること、これまでの走行サーベイ結果との比較により事故後の空間線量率の変化傾向を確認することを目的とする。平成24年には、台風17号が9月30日から10月1日にかけて福島県内を通過したが、福島県への降雨量は多い所で50mm程度とそれ程多くはなかった。

(2) 調査内容

以下の内容で原子力機構ならびに地方自治体が主体となり、台風期前後の2回の走行サーベイを実施した。

1) 調査期間及び調査実施機関

(台風期前：第4次走行サーベイ)

- ① 空間線量率が $0.2 \mu\text{Sv/h}$ 以上の地域を中心に、主要幹線道路について走行サーベイを実施（原子力機構）：平成24年8月20日～9月7日
- ② 空間線量率が $0.2 \mu\text{Sv/h}$ 以上の地域を中心にその他の地域についても、調査に協力する各都県、市町村にKURAMA-IIを一定期間提供し、測定を必要とした主要幹線道路や細かい道路を含めて走行サーベイを実施（13都県、約200市町村）：平成24年9月3日～10月12日

(台風期後：第5次走行サーベイ)

- ① 空間線量率が $0.2 \mu\text{Sv/h}$ 以上の地域を中心に、主要幹線道路について走行サーベイを実施（原子力機構）：平成24年11月5日～11月30日
- ② 空間線量率が $0.2 \mu\text{Sv/h}$ 以上の地域を中心にその他の地域についても、調査に協力する各都県、市町村にKURAMA-IIを一定期間提供し、測定を必要とした主要幹線道路や細かい道路を含めて走行サーベイを実施（13都県、約130市町村）：平成24年11月9日～12月10日

2) 調査地域

(台風期前：第4次走行サーベイ)

- 空間線量率が $0.2 \mu\text{Sv/h}$ 以上の地域、及び調査協力を行う各自治体が測定を必要と判断した地域（対象県：1都12県：福島県、茨城県、岩手県、神奈川県、群馬県、埼玉県、千葉県、東京都、栃木県、新潟県、山形県、山梨県、宮城県）

- 測定した道路の合計距離：85,000 km程度

(Appendix 2.2.2-図1参照)

(台風期後：第5次走行サーベイ)

- 空間線量率が $0.2 \mu\text{Sv/h}$ 以上の地域、及び調査協力を行う各自治体が測定を必要と判断した地域 (対象県：1都12県：福島県、茨城県、岩手県、神奈川県、群馬県、埼玉県、千葉県、東京都、栃木県、新潟県、山形県、山梨県、宮城県)
- 測定した道路の合計距離：65,000 km 程度
(Appendix 2.2.2-図2参照)

3) 調査内容の詳細

小型 CsI シンチレーション検出器を用いた簡易型走行サーベイシステム KURAMA-II を用いた測定を実施した。セダン型の自動車の後部座席の右側後方に KURAMA-II システムを設置し、3秒毎に測定した空間線量率データと GPS による位置情報を、携帯電話回線を通してデータ収集用サーバに30秒毎に転送した。原子力機構が主体となり主要幹線道路等の測定を実施した。さらに、地方自治体と原子力機構(解析を担当)と協同で細かな道路を含む地方自治体が希望する道路について詳細な測定を実施した。車内における空間線量率測定値を車外の地上1m高さの空間線量率に換算するための補正係数を用いて、測定結果から道路1m高さの空間線量率を求めた。均一に放射性セシウムが沈着した広い場所を多数選んで行なった実測に基づき、線量率依存性のある補正係数[1]を用いた。

得られた空間線量率の測定結果及びGPSを用いて取得された位置情報を基に、道路上において連続的に測定された空間線量率の測定結果を地図上に記した空間線量率マップを作成した。これまでの調査で空間線量率マップを作成した際と同様に、現在の空間線量率への寄与の大部分が放射性セシウムによるものであること、測定期間中の放射性セシウムの減衰に伴う空間線量率の減少は1%程度と評価され測定機器の有する誤差よりも低いことを考慮して、空間線量率測定値を一定の日付に揃える減衰補正を行わず、測定した日の測定結果をそのまま使用した。マップ作成の基になる空間線量率データは、原子力機構及び地方自治体の測定結果を合わせて使用した。また、測定値の統計的なばらつきを低減させるため、第3次走行サーベイ時と同様に、走行地域を100m四方のメッシュに分割し、そのメッシュ内に含まれる各測定地点での空間線量率の値を平均してメッシュの代表値とした。

台風期の前後期に2回走行サーベイを実施し、空間線量率の変化状況を確認するとともに、土地利用の違い等に基づく空間線量率の変化傾向の違いを確認した。

(3) 結果と考察

台風期前の走行サーベイ(第4次走行サーベイ)及び台風期後の走行サーベイ(第5次走行サーベイ)の結果に基づき作成した空間線量率マップを図2.2.2-1及び図2.2.2-2に示す。また、第2次走行サーベイ(平成23年12月)及び第3次走行サーベイ(平成24年3月)の結果を合成して平成24年3月の値に換算した結果を図2.2.2-3に示す。第2次及び第3次走行サーベイの結果に比べ第4次走行サーベイでは、新潟県、岩手県等の測定地域が広がるとともに、地域的に測定密度が高くなったことがわかる。第5次走行サーベイにおいては、第4次走行サーベイと時期が近接していたこと等により測定に参加した地方自治体の数が減ったため、走行サーベイを行なった地域も多少減少した。

第2次及び第3次走行サーベイの空間線量率マップと第4次走行サーベイ及び第5次走行サーベイの空間線量率マップを比べると、全体に空間線量率の減衰傾向が明らかに見て取れる。例えば、茨城県から千葉県へかけて海岸沿いに存在する相対的に空間線量率の高い地域の面積が確実に減少

している。一方、測定地域を拡大したことにより、宮城県北部から岩手県南部にかけての周囲に比べて空間線量率が高い地域の状況が詳細に明らかになった。

第1次走行サーベイにより得られた空間線量率と、同じメッシュにおける第3次走行サーベイ、第4次走行サーベイならびに第5次走行サーベイで得られた空間線量率の測定結果の相関図を、図2.2.2-4～図2.2.2-6に示す。図2.2.2-4は測定値全体に対する比較、図2.2.2-5は国土交通省の国土数値情報に基づき森林に分類されたメッシュに対する比較、図2.2.2-6は建物用地に分類されたメッシュに対する比較である。図には原点を通る回帰直線の傾きと決定係数^{*8} R^2 を示す。また、参考のために、第1次、第3次、第4次及び第5次の走行サーベイにより得た空間線量率の積算値とその比率（以下、「積算線量率比」という。）を示す。森林及び建物用地以外のここに示さなかった土地利用状況に対する結果も含めて（Appendix 2.2.2-図3及び図4参照）、第3次及び第4次走行サーベイの結果は第1次走行サーベイの結果と良い相関があった。また、空間線量率の変化の指標として回帰直線の傾きと積算線量率比を比較したが、その差は全般に数%以内であった。

台風期前後の測定結果を比較すると、回帰直線の傾きによれば4%程度、積算線量率比では9%程度の減少があったことになる。この期間における物理的な減衰は5%程度であると評価されるため、台風に伴うウェザリング等の効果による空間線量率の変化は大きくないことが明らかになった。平成24年、台風17号が福島県を通過したが、降水量は50 mm程度とそれ程大きなものでなかったため、大きな効果をもたらさなかったと考えられる。

第1次走行サーベイに比べて第3次走行サーベイでは時間が約9ヶ月間経過することで、道路上の空間線量率は回帰直線の傾きによる比較で62%（積算線量率比では58%）程度に減少している。また、第1次走行サーベイに比べて第4次走行サーベイでは時間が約15ヶ月経過することで、道路上の空間線量率は回帰直線の傾きによる比較で47%（積算線量率比では45%）程度に、第5次走行サーベイでは時間が約18ヶ月経過することで、傾きで56%（積算線量率比で60%）に減少した。空間線量率の減少には土地利用への依存性があり、森林においては減少が小さく、建物用地においては減少が大きい傾向が見られる。この傾向は、本調査と並行して開発を行っている放射性物質の分布状況の時間変化予測モデルの環境半減期（空間線量率が物理減衰を除いて1/2になる期間を指す）の解析結果とも符号するものである。

次に、道路上の空間線量率とその周辺の空間線量率の相関を調べるために、走行サーベイの結果と平坦地の地上1 m高さの空間線量率測定結果とを比較した。走行サーベイの結果を平均した100 mメッシュ内に、第3次分布状況等調査で測定した地上1 m高さの空間線量率測定データ（平成24年8月14日～9月7日に測定）が存在する場合にその地上1 m高さの空間線量率との比較を行なった。図2.2.2-7に、第4次走行サーベイ及び第5次走行サーベイと、それぞれ同じ時期に行われた地上1 m高さの空間線量率の測定データ間の相関図を示す。それぞれ明確な相関が確認できることから、走行サーベイの結果は周囲の地上1 m高さの空間線量率を反映した結果となっていることが判る。第4次走行サーベイでは、道路周辺の地上1 m高さの空間線量率は走行サーベイの値に対して回帰直線の傾きによる比較で1.24倍程度大きい値を示すことがわかる。第5次走行サーベイでは、地上1 m高さの空間線量率値の走行サーベイ結果に対する大きさは、回帰直線の傾きによる比較で1.41倍程度、積算線量率値の比較で1.55倍程度と評価された。走行サーベイ結果は、車体による遮蔽効果等の影響を補正するための補正係数を乗じた後の値であり、道路上の空間線量率そのものとして考えて良い。道路上の空間線量率値が地上1 m高さの空間線量率値に比べて全般に低いのは、道路上及びその周辺の放射性セシウムが風雨等の影響で除去され易いためであると推定される。こ

^{*8} 回帰直線がデータにどの程度フィットしているかの指標となる係数。1に近い程、良いフィットをしていることを示す。

の比率を用いて走行サーベイの結果から周辺の大凡の空間線量率値を推定することが可能である。

上記の比較においては、回帰直線の傾きと積算線量率比との間で比較的大きな違いが見られた。空間線量率が高い部分で回帰直線から外れたデータがある場合には、これが回帰直線の傾きに顕著に影響する傾向があるが、走行サーベイ結果と地上1 m高さの測定結果の比較においては、測定地点が全く同じではないためにこの影響が大きく出ることが違いの原因であると考えられる。従って、今回は積算線量率比を用いて比較を行なうことがより適切であると判断した。これによれば、第4次走行サーベイにおいては、道路周辺の地上1 m高さにおける空間線量率は走行サーベイの測定値に比べて1.4倍程度、また第5次走行サーベイに関しては1.55倍程度大きいと判断される。平成23年12月の第2次走行サーベイの結果に対して行なった同様の解析結果でも、道路周辺の地上1 m高さの空間線量率と走行サーベイの値は良い相関を示し、その比率は平均で約1.2であった。これらの結果から、走行サーベイと周辺の空間線量率の比率は徐々に大きくなっていることが確認された。

図2.2.2-8に、第1次走行サーベイと第2次以降の走行サーベイについて積算線量率比の変化傾向を示す。空間線量率の減少率が放射性セシウムの物理的減衰による減少率よりもかなり大きくなっていることが確認された。これは、道路ならびに道路の周辺は車の通行や人間の活動等により放射性セシウムの移行が早く進むためであると考えられる。図2.2.2-9に、道路上の空間線量率と道路周辺の地上1 m高さの空間線量率の相関における道路幅員の影響を示す。全体の傾向（左のグラフ）に比べて、幅員の大きい4車線以上の道路では周囲の地上1 m高さの空間線量率に比べて道路上の空間線量率が小さい傾向が見られる（全体、4車線以上(1.3 m~2.5 m)以外の幅員における第4次走行サーベイの結果をAppendix 2.2.2-図5に、第5次走行サーベイの結果をAppendix 2.2.2-図6に示す）。これは、幅の広い道路においては道路表面に沈着した放射性セシウムが放出するガンマ線の空間線量率への寄与が大きな割合を占めるため、道路に沈着した放射性セシウムの減少が空間線量率に大きく反映されることによると推定される。

(4)まとめ

台風期の前後に2回（平成25年8月期（第4次）及び平成25年11月期（第5次））、東日本の広い地域を対象としてKURAMA-IIを用い走行サーベイを実施し、その測定結果を100 mメッシュ内で平均して地図上にプロットして空間線量率マップを作成した。台風期の前後でのウェザリング効果による空間線量率の減少は大きくなかった。平成23年6月に実施した第1次走行サーベイを基準とした、第2次（平成23年12月）、第3次（平成24年3月）、第4次及び第5次走行サーベイの空間線量率の減少率を調べた結果、物理的減衰により予想される減少率比べて相当に大きいことが明らかになった。また、土地利用状況により空間線量率の減少傾向が異なり、森林地域では空間線量率の減少が遅いものに対して建物用地では減少が早いことが確認された。

参考文献：

- [1] 日本原子力研究開発機構，“「福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の第二次分布状況等に関する調査研究」”，日本原子力研究開発機構ホームページ，第1編，1-47，
http://www.jaea.go.jp/fukushima/kankyoanzen/mapping_report/mappinglist.html

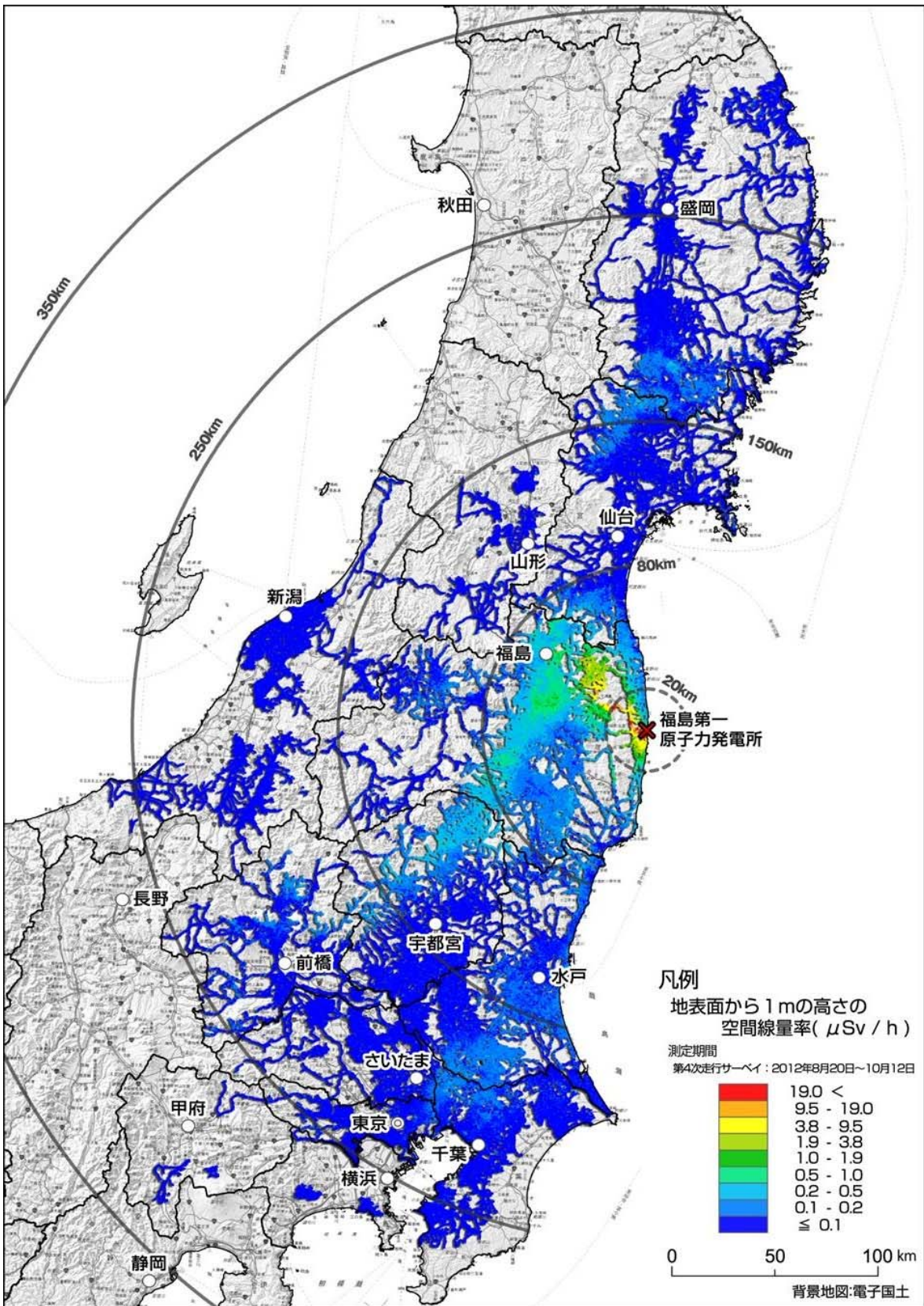


図 2.2.2-1 第4次走行サーベイの測定結果 (100 mメッシュ内で平均して表示)
 (測定期間:平成24年8月20日~10月12日)

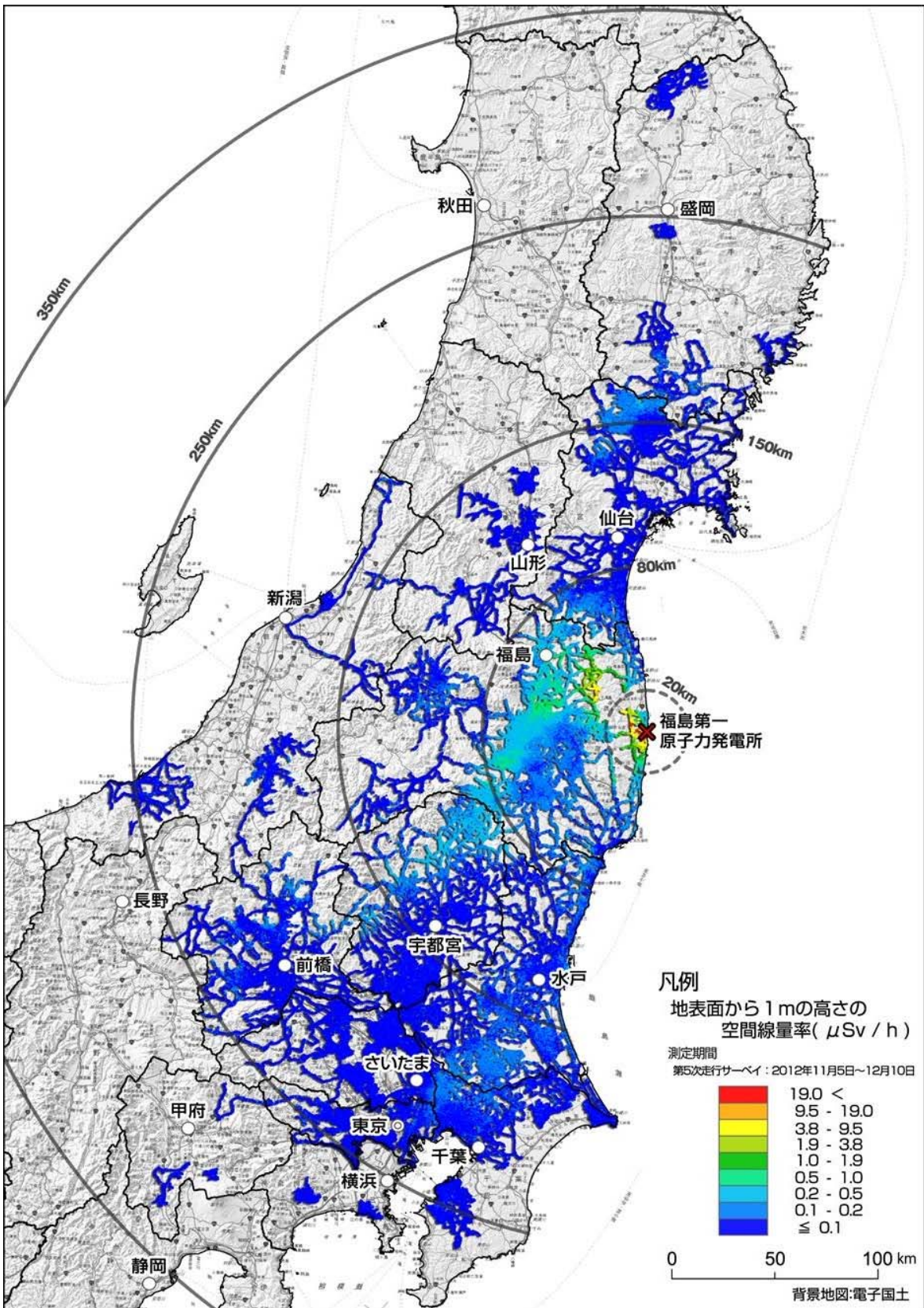


図 2.2.2-2 第5次走行サーベイの測定結果 (100 mメッシュ内で平均して表示)
 (測定期間: 平成24年11月9日~12月10日)

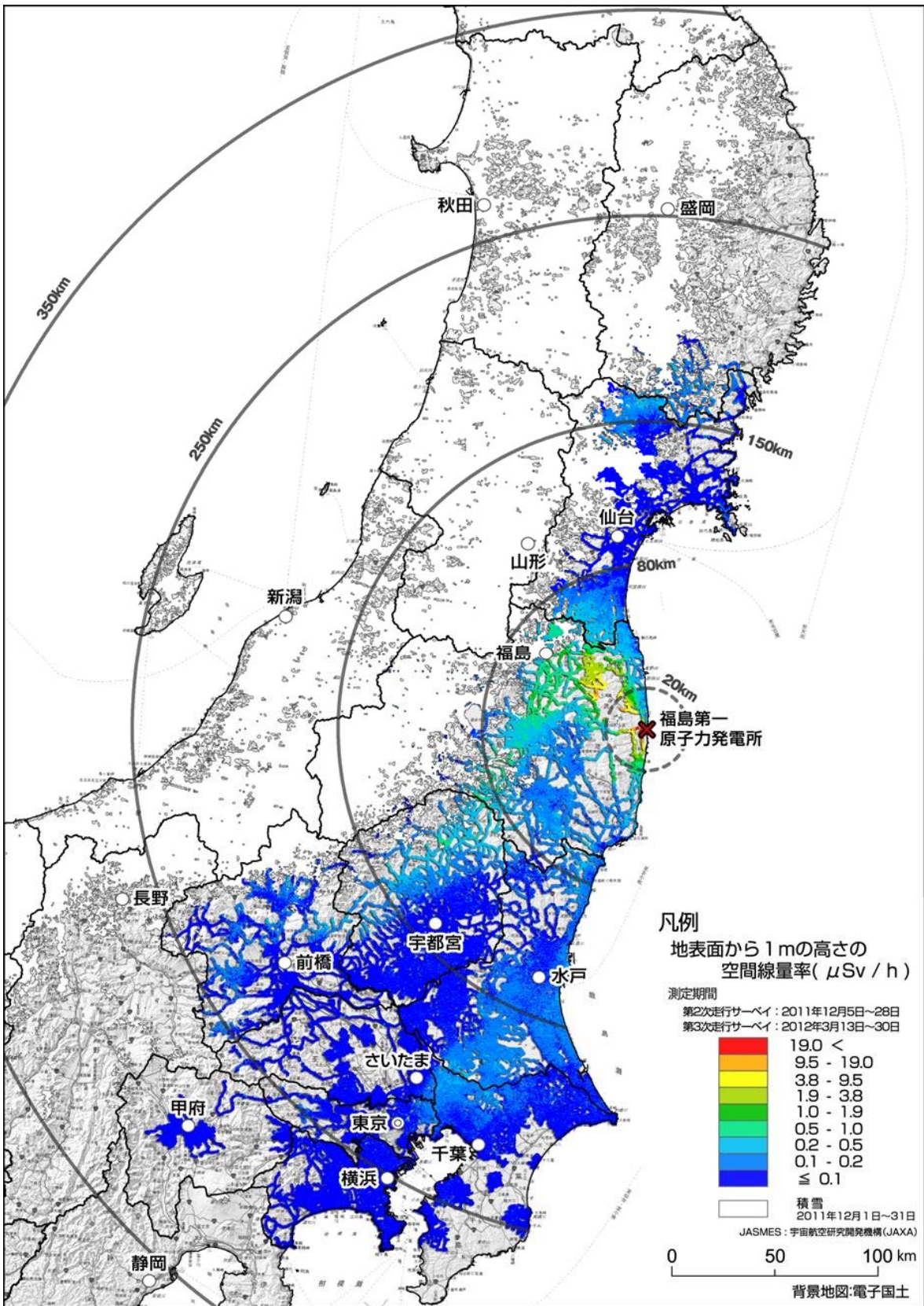
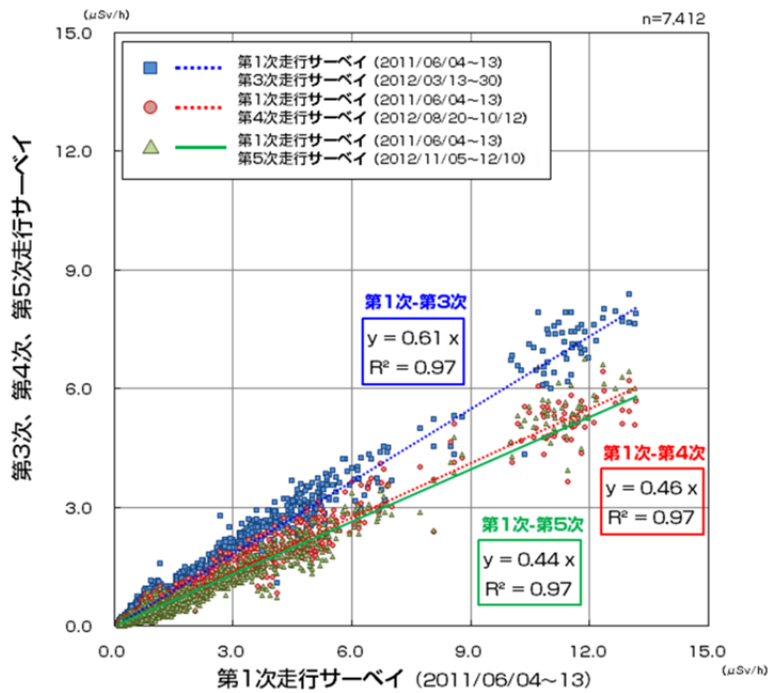


図 2.2.2-3 第2次及び第3次走行サーベイの測定結果
 (平成24年3月の値に換算し100mメッシュ内で平均して表示)



空間線量率の積算値 n=7,412

第1次走行サーベイ	第3次走行サーベイ	3次/1次
5549	3133	56.5%

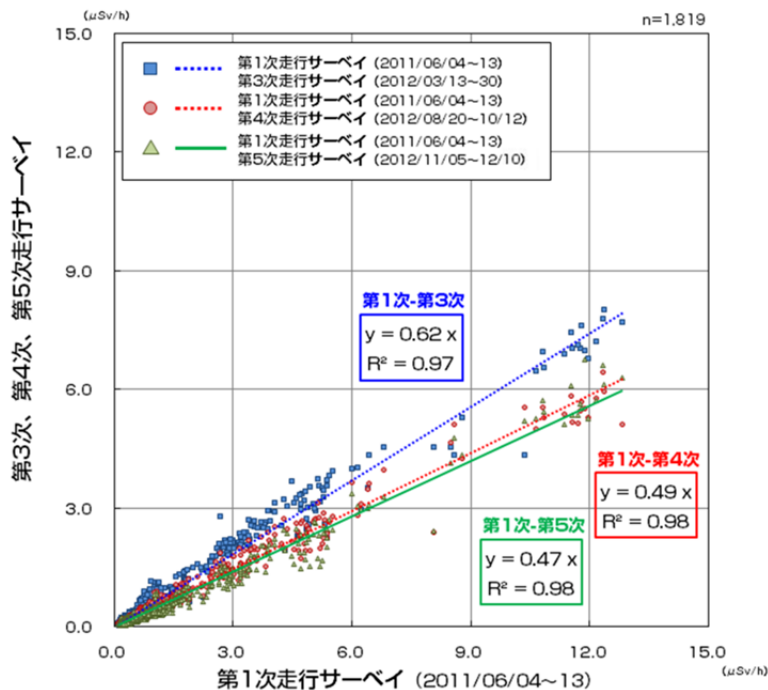
空間線量率の積算値 n=7,412

第1次走行サーベイ	第4次走行サーベイ	4次/1次
5549	2449	44.1%

空間線量率の積算値 n=7,412

第1次走行サーベイ	第5次走行サーベイ	5次/1次
5549	2227	40.1%

図 2. 2. 2-4 第 1 次走行サーベイ結果と第 3 次～第 5 次サーベイ結果との相関図 (全体)



空間線量率の積算値 n=1,819

第1次走行サーベイ	第3次走行サーベイ	3次/1次
1464	876	59.8%

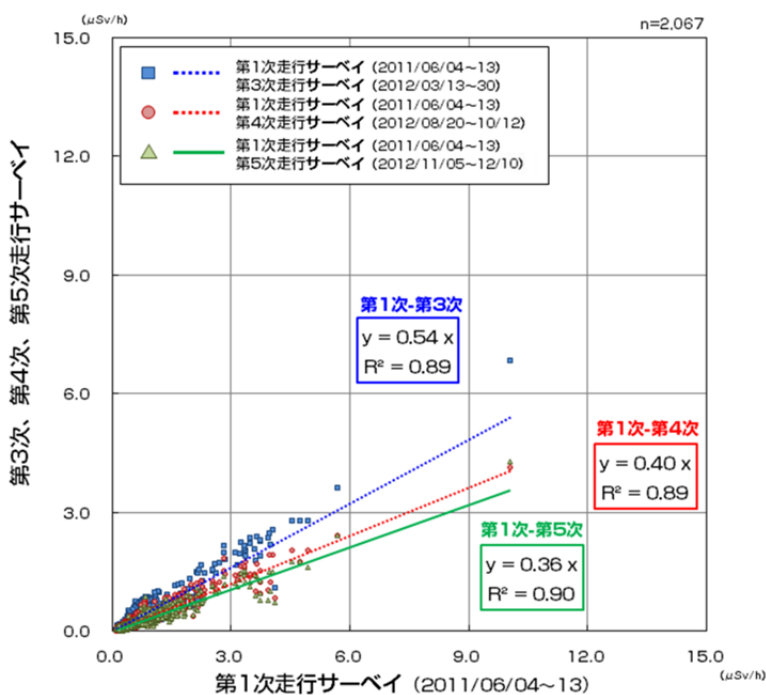
空間線量率の積算値 n=1,819

第1次走行サーベイ	第4次走行サーベイ	4次/1次
1464	708	48.4%

空間線量率の積算値 n=1,819

第1次走行サーベイ	第5次走行サーベイ	5次/1次
1464	641	43.8%

図 2. 2. 2-5 第 1 次走行サーベイ結果と第 3 次～第 5 次サーベイ結果との相関図 (土地利用状況が「森林」に分類される地域)



空間線量率の積算値 n=2,067

第1次走行サーベイ	第3次走行サーベイ	3次/1次
1229	619	50.4%

空間線量率の積算値 n=2,067

第1次走行サーベイ	第4次走行サーベイ	4次/1次
1229	487	39.6%

空間線量率の積算値 n=2,067

第1次走行サーベイ	第5次走行サーベイ	5次/1次
1229	430	35.0%

図 2.2.2-6 第1次走行サーベイ結果と第3次～第5次サーベイ結果との相関図
 (土地利用状況が「建物用地」に分類される地域)

空間線量率の積算値 n=3,108

走行	地上	地上/走行
1,891	2,649	140.1%

空間線量率の積算値 n=2,102

走行	地上	地上/走行
984	1,521	154.6%

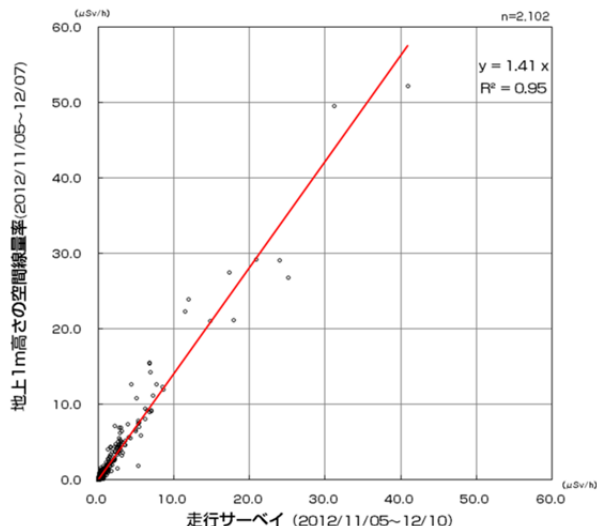
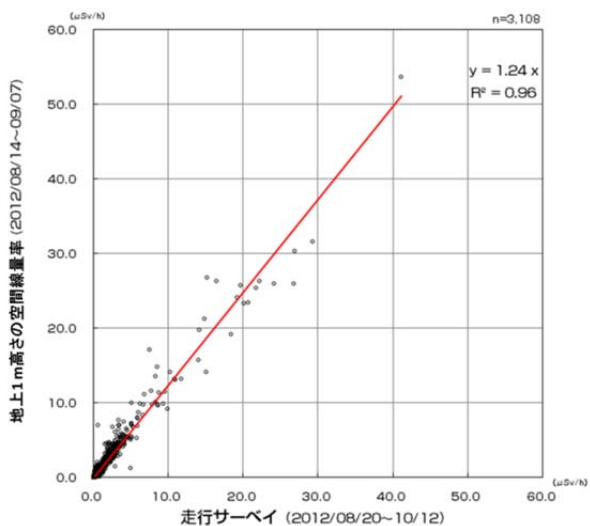


図 2.2.2-7 地上1m高さにおける空間線量率測定と走行サーベイの結果との比較
 (左：第4次走行サーベイ、右：第5次走行サーベイ)

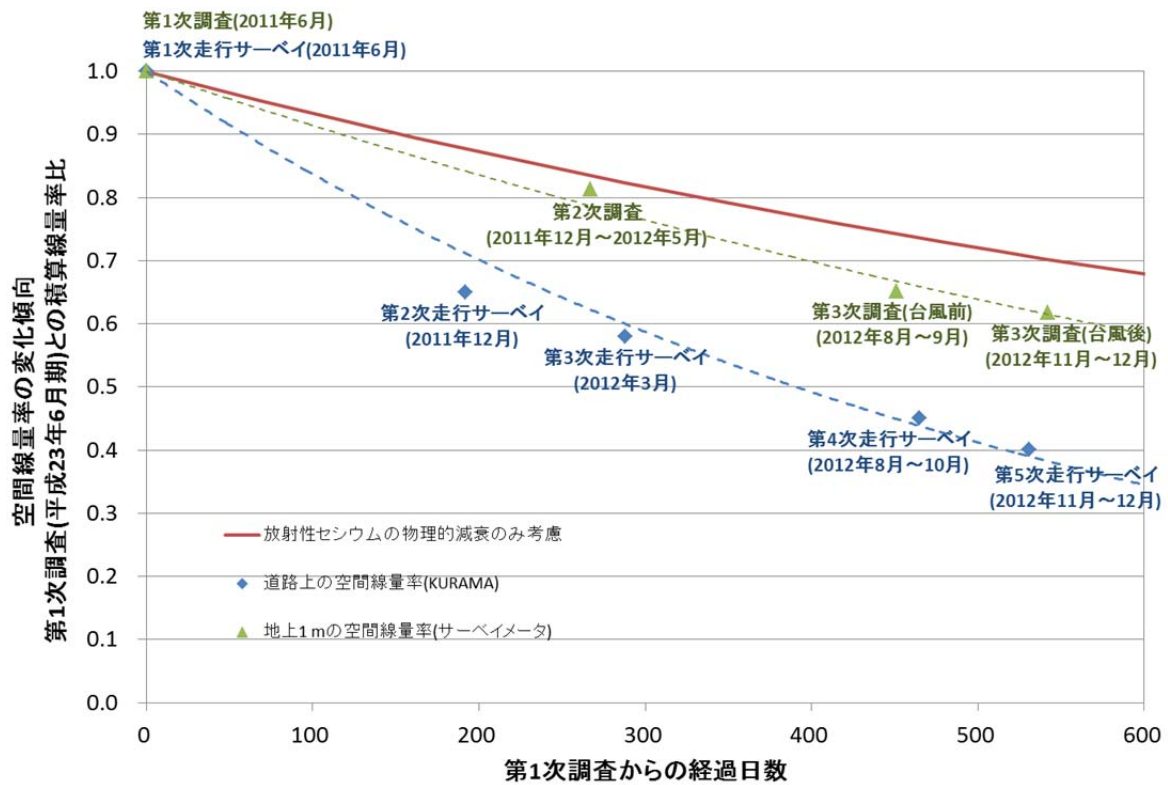


図 2. 2. 2-8 道路上の空間線量率の変化傾向
(第 1 次～第 5 次走行サーベイ)

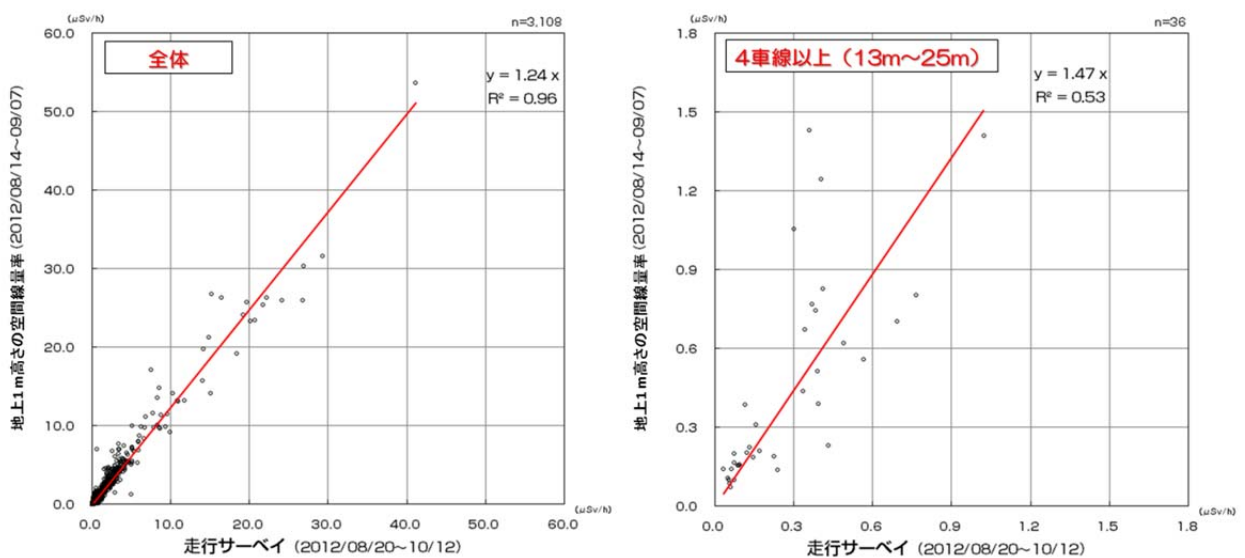


図 2. 2. 2-9 道路上の空間線量率と道路周辺の地表面の空間線量率の
相関における道路幅員の影響

2.2.3 無人ヘリコプターを活用した福島第一原子力発電所から 3 km 圏内における空間線量率、放射性セシウムの沈着量の分布状況の確認

鳥居 建男（原子力機構）

(1) 調査目的

福島第一原発から 3 km 圏内については、福島第一原発事故による放射性物質の放出源（原子炉建屋）に近く、上空からの測定の際に建屋からの直達線や散乱線の影響が考えられたため、航空機モニタリングによる面的な測定は実施されていない^{*9}。原子力機構では、福島第一原発事故以来、無人ヘリコプターを用いた放射線モニタリングを実施している[1]。今回、3 km から福島第一原発敷地境界付近までの狭く入り組んだ地形の範囲を測定することから、低高度飛行で小回りの利く無人ヘリコプターを用いたモニタリングを実施することとした。

(2) 調査内容

1) 調査期間

- 無人ヘリコプターを活用した福島第一原発起因の直達線や散乱線によるガンマ線の影響の測定：平成 24 年 8 月 30 日から 9 月 1 日
- 無人ヘリコプターを活用した福島第一原発から 3 km 圏内の地上 1 m 高さにおける空間線量率、及び地表面における放射性セシウムの沈着量の測定：平成 24 年 10 月 2 日から 10 月 20 日

2) 調査箇所

福島第一原発から 3 km 圏内(陸上) (図 2.2.3-1 参照)

3) 調査機器

測定にあたっては、ヤマハ発動機(株)自律飛行型無人ヘリコプターRMAX G1 を使用し、飛行高度は 50～80 m 程度、測線間隔は 80 m (一部 50 m で実施) 程度で飛行しながら、地上からのガンマ線及び直達線や散乱線によるガンマ線(計数率)とエネルギースペクトルを 1 秒間に 1 回連続測定した。また、放射線検出器は LaBr₃(Ce) (ランタンブロマイド) シンチレーション検出器(1.5" Φ×1.5" ×3 本)を用いた。(図 2.2.3-2 参照)

4) 無人ヘリコプターによる測定でのデータの取得方法

無人ヘリコプターの飛行高度は対地高度で 50～80 m 程度であり、その測定値は、無人ヘリコプター下部の半径 50～80 m 程度(飛行高度により変化)の円内のガンマ線量を平均化したものである。無人ヘリコプターの軌跡幅(測線間隔)は、50 m または 80 m とした。無人ヘリコプターの飛行速度は、8 m/s (= 28.8 km/h) 程度である。取得データは、放射線検出器で測定される 1 秒毎のガンマ線のデータ(計数率)とエネルギースペクトル及びそれに対応す

^{*9} 国土交通省航空局の依頼により、平成 24 年 12 月に原子力機構では福島第一原発の上空について無人ヘリコプターを用いて高度 200 m での空間線量率の測定を行ったが、飛行地点での散乱線等の影響を含めた評価であり、地表付近の空間線量率は評価していない。

国土交通省報道発表： http://www.mlit.go.jp/report/press/kouku10_hh_000060.html

原子力機構発表資料： <http://www.jaea.go.jp/fukushima/other/2013-0205.pdf>

る GPS による位置情報を記録した。

5) 無人ヘリコプターで取得された測定データの地上 1 m 高さでの空間線量率への換算

上空で測定されたガンマ線計数率を地上 1 m 高さでの空間線量率の値に換算するための係数を算出するため、警戒区域内において空間線量率の勾配が小さく、平坦な場所をテストサイトとして設定し、NaI サーベイメータを用いて、テストサイトを中心とした半径 100 m の円内における地上から 1 m 高さの空間線量率の平均値を求めた。次に、テストサイト上空の対地高度 80 m で無人ヘリコプターをホバリングさせ、この高度（基準高度）で取得されたガンマ線計数率と上述したテストサイト周辺の地上における空間線量率とを比較し、空間線量率換算係数 CD (cps/ μ Sv/h) を算出した。その後、テストサイト上空の対地高度 10 m から 100 m までを 10 m 毎にホバリングし、各高度におけるガンマ線計数率を測定した。測定された高度毎のガンマ線計数率を基に、対地高度とガンマ線計数率との関係式を求め、空気によるガンマ線計数率の減弱係数 μ を算出した。

最後に、実際のフライトで取得されたガンマ線計数率を上述の空間線量率換算係数 CD から空間線量率 (μ Sv/h) に換算するとともに、対地高度と空気によるガンマ線計数率の減弱係数 μ により、高度補正を行った。なお、対地高度は GPS により測定した海拔高度から国土地理院が作成した 10 m メッシュの数値標高モデル (DEM: Digital Elevation Model) のデータを差し引くことにより求めた。

6) 無人ヘリコプターで取得された測定データの放射性セシウムの沈着量への換算

警戒区域内で原子力機構が実施した in-situ 測定の結果を基に、天然放射性核種（カリウム 40、ウラン系列、タリウム系列）による空間線量率の平均値 (43 ± 20 nSv/h: 誤差=標準偏差 σ) を評価し、前項で求めた空間線量率からこの値を差し引くことにより、放射性セシウム（セシウム 134、137）のみによる空間線量率を算出した。その後、文部科学省「ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法」に記載されている緩衝深度 ($\beta=1.0$ g/cm²)^{*10} の場合の地表面における放射性セシウムの沈着量と地上 1 m 高さでの空間線量率の換算係数を使用し、地表面におけるセシウム 134 及びセシウム 137 の沈着量を算出した。無人ヘリコプターの検出器で測定されたガンマ線のエネルギースペクトルの例を図 2.2.3-3 に示す。

7) 空間線量率及び放射性セシウムの沈着量の測定結果の一定時点への換算（減衰補正）

各地点の測定結果は測定日が異なるため、各測定地点における地上 1 m 高さの空間線量率及び地表面の放射性セシウムの沈着量の値は、放射性セシウムの物理的減衰を考慮し、今回の福島第一原発から 3 km 圏内の無人ヘリコプターの測定最終日である平成 24 年 10 月 20 日の値に換算した。

8) 無人ヘリコプターを活用した空間線量率及び放射性セシウムの沈着量を記したマップの作成

測定されていない地域の空間線量率及び放射性セシウムの沈着量の値は、各測定地点の空

*10 第 2 次分布状況等調査の結果から、福島第一原発から 80 km 圏内では、緩衝深度 (β) が平均 1.2 g/cm² であることが確認されているが、 $\beta=1.0$ を $\beta=1.2$ にした際の放射性セシウムの沈着量と地上 1 m 高さでの空間線量率の換算係数 ($(\mu$ Gy/h)/(kBq/m²)) は、セシウム 137、134 とともに 1.5~1.8% 程度の差しかいないため、本調査では、文部科学省「ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法」(p. 83-84) に従い、航空機モニタリングの換算方法と同様に $\beta=1.0$ を使用することとした。

間線量率及び放射性セシウムの沈着量の測定結果を基に、内挿法（クリギング法）を用いて内挿補間した。空間線量率及び放射性セシウムの沈着量を記したマップの作成にあたっては、補間したデータを含め、文部科学省が実施している航空機モニタリングの空間線量率及び放射性セシウムの沈着量の大きさごとに色分けしてマッピングした。

(3) 結果と考察

福島第一原発近傍で空間線量率及び地表面への放射性セシウムの沈着量を精度良く評価するためには、施設から放出されるガンマ線（直達線、散乱線）の影響を評価する必要がある。しかし、海上での測定結果から、施設起因のガンマ線は敷地外では誤差範囲と判断された（Appendix 2.2.3 参照）。無人ヘリコプターにより測定された計数率を基に福島第一原発から3 km 圏内における地上1 m 高さの空間線量率、及び地表面の放射性セシウムの沈着量を求めた。さらに、その結果を使用して福島第一原発から3 km 圏内の空間線量率マップ、及び放射性セシウムの沈着量を記した土壌濃度マップを作成した（図 2.2.3-5^{*11} 参照）。測定の結果、福島第一原発から南側と西側に19 μ Sv/h 以上の高線量率地域が広がっていることが分かった。また、福島第一原発から北西方面に向かって帯状に放射性セシウムの沈着量が高い地域が広がっていることが分かった。

上記の測定結果の妥当性を検証するため、福島第一原発から3 km 圏内の約100箇所でNaI サーベイメータを用いて空間線量率を測定し、その結果と無人ヘリコプターから求められた空間線量率を比較した。その結果、図 2.2.3-4 に示すように、地上でサーベイメータにより測定された結果と無人ヘリコプターにより測定された結果との間には良い相関があり、ほぼ一致していることが確認された。地上の測定と無人ヘリコプターによる測定における値のずれの要因としては、以下の要因が挙げられる。

- 測定場所の線量分布の不均一

地上でのサーベイメータによる測定範囲は、狭い（半径3 m 程度）ことに対し、上空からの測定範囲は広い（例えば、高度80 m の場合は地上の半径80 m の円の平均値を求めていることになる）。よって、測定場所が不均一であれば、地上の測定値と合致しない可能性がある。

- 地形の効果

無人ヘリコプターの換算係数は、下からの放射線に限定して決定しており、山間部、森林や高い建物の脇等が無人ヘリコプターと地上との距離よりも近くにある場合、横からの放射線の影響を受けて、過剰評価する場合が考えられる。また、対地高度の求め方は、海拔高度から地表面の海拔高度（DEM データ）を差し引いて求めており、森林や建物の上空では、過大評価となる可能性がある。

今後、この要因については、対地高度のより正確な測定方法の確率、検出器の位置分解能の向上等、測定・評価補正方法を含めて検討が必要である。

(4) まとめ

航空機モニタリングにより面的な測定が行われていなかった福島第一原発から3 km 圏内において、無人ヘリコプターを用いたモニタリングを実施することにより、3 km 圏内の敷地外における空間線量率分布及び放射性セシウムの沈着量分布が明らかになった。本モニタリング結果は、地上で測定

^{*11} 背景地図には、ArcGIS データコレクション スタンダードパックを使用。

可能な地点での測定結果とも良く一致しており、妥当なものと判断された。

参考文献：

- [1] 日本原子力研究開発機構，福島第一原子力発電所事故に係る避難区域等における除染実証業務【除染計画策定のための詳細モニタリング事業編】報告書，2012年6月，
http://www.jaea.go.jp/fukushima/kankyoanzen/d-model_report/report_5.pdf

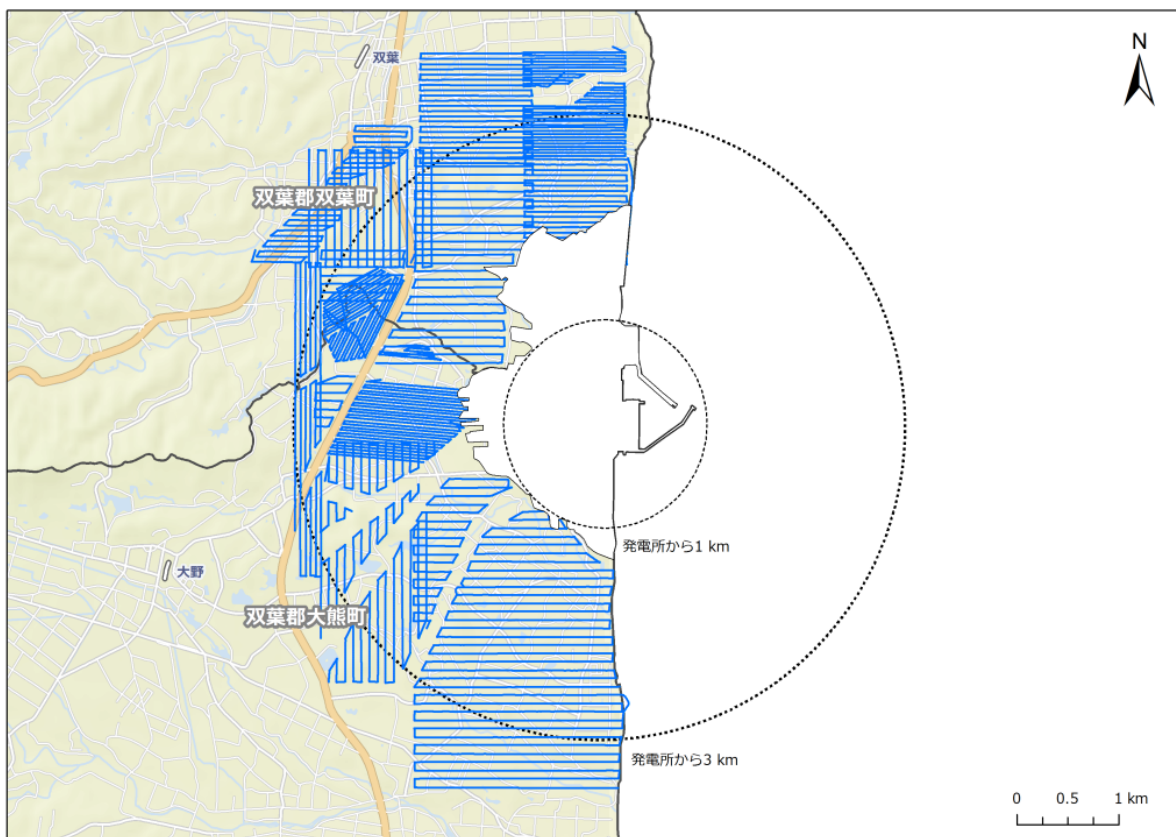


図 2.2.3-1 福島第一原子力発電所から 3 km 圏内のガンマ線量（計数率）の測定における無人ヘリコプターの飛行軌跡（青色）



- ・ ヤマハ発動機(株)自律飛行型無人ヘリコプター-RMAX G1
- ・ 最大重量:94kg
- ・ 全長・全幅・全高:3630mm・720mm・1220mm
- ・ 飛行時間:90分
- ・ 最大搭載可能測定器重量:10kg
- ・ 最高速度:72km/h
- ・ 搭載機器:全方位CCDカメラ、GPSセンサー
- ・ 線量計からのデータを無線で基地局に転送できること



ヘリ操作



無線(受信部)

無人ヘリ搭載用放射線測定器の概要

- ・ 検出器(LaBr3(Ce)検出器)
(38mmΦ × 38mmH × 3本)
検出範囲 : 0.01 ~ 0.1mSv/h
検出エネルギー : 60keV以上
データ収集周期 : 1回/秒
測定器重量 : 約 8.0kg (筐体含む)

図 2. 2. 3-2 無人ヘリコプターの仕様

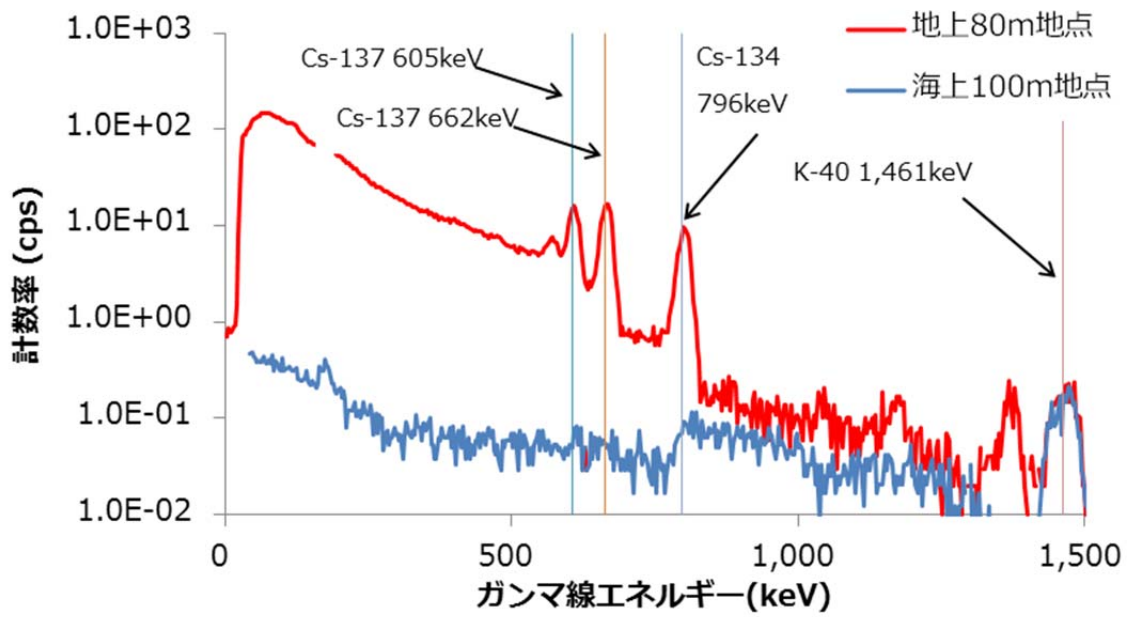


図 2.2.3-3 無人ヘリコプターの検出器で測定されるガンマ線のエネルギースペクトルの事例
 (赤：海上でのデータ；緑：3 km 圏内の地上でのデータ)

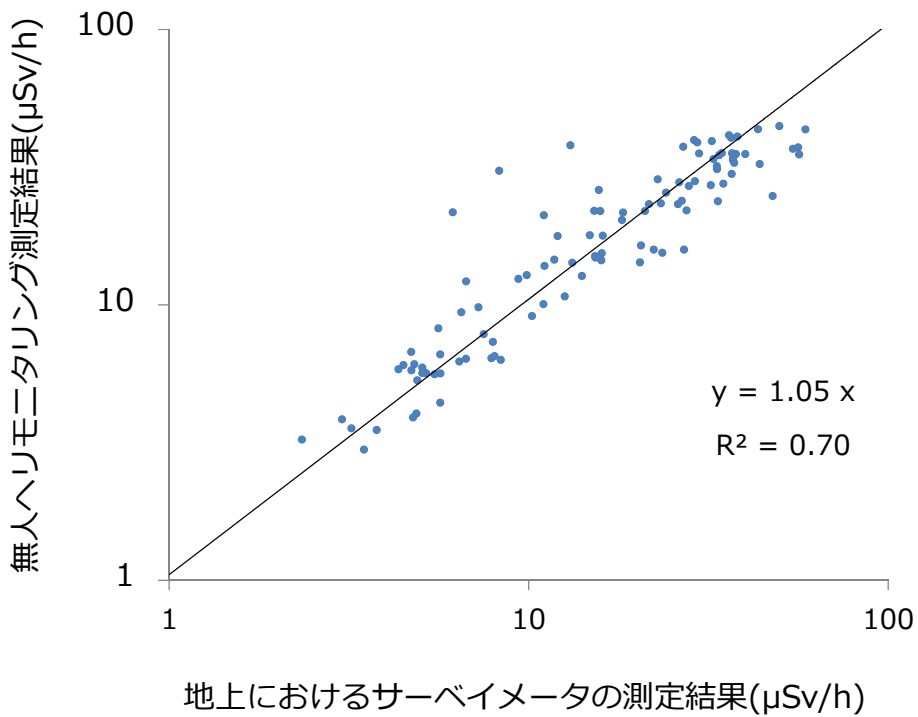
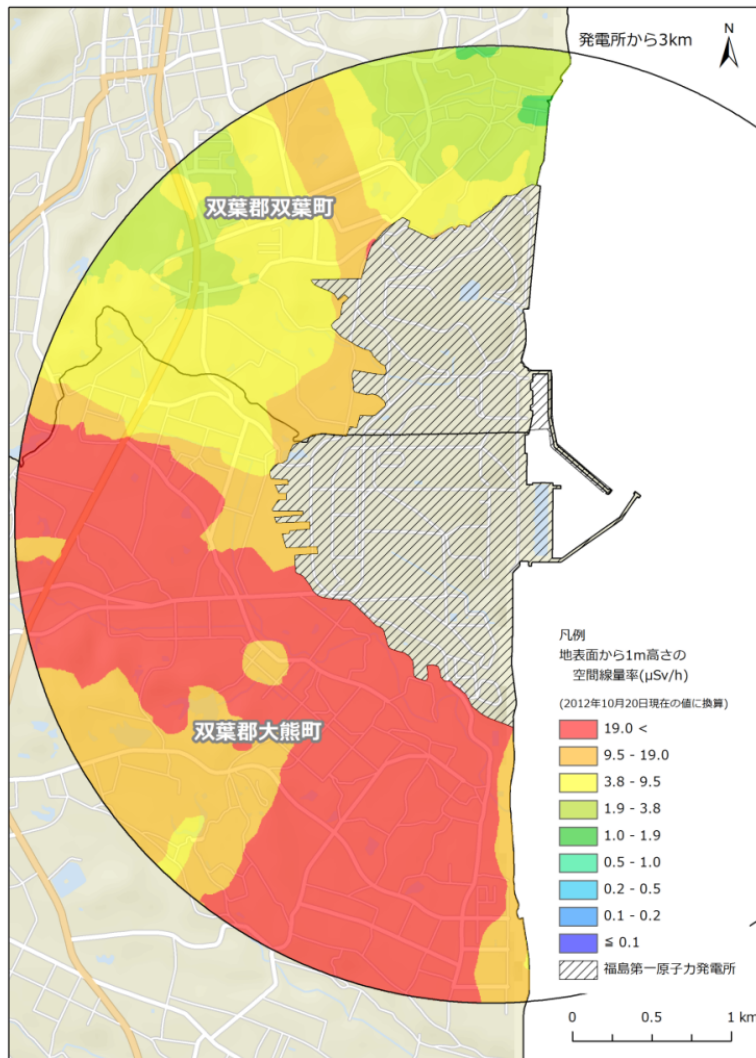


図 2.2.3-4 無人ヘリコプターによる空間線量率の測定結果と地上でサーベイメータにより測定された空間線量率の相関関係



*本マップには天然核種による空間線量率が含まれている。

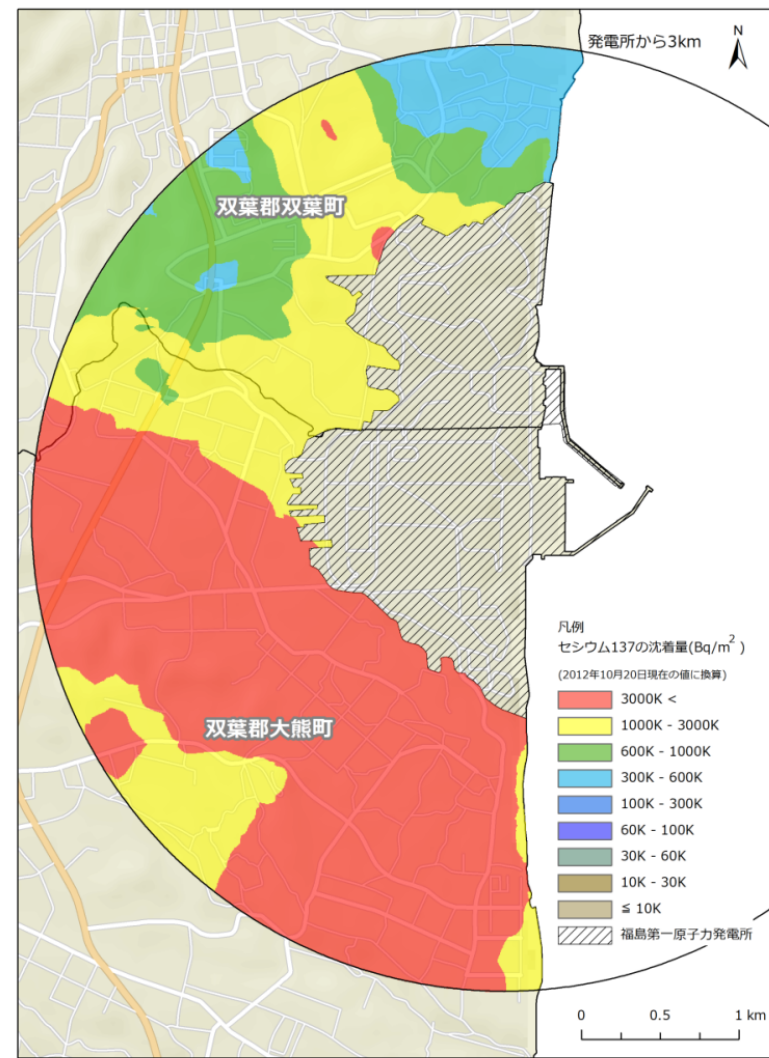


図 2.2.3-5 無人ヘリコプターを活用した福島第一原子力発電所から 3 km 圏内の地表面から 1 m 高さの空間線量率(左) 及びセシウム 137 の沈着量(右)の測定結果 (平成 24 年 10 月 20 日時点)