

人為的なかく乱の少ない平坦な開かれた土地における 空間線量率分布測定

三上 智、齋藤 公明（原子力機構）

1. 調査目的

福島第一原発から 80 km 圏内を中心にサーベイメータを用いて空間線量率の測定を行い、現在の空間線量率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空間線量率の経時的变化の特徴を調べる。

2. 調査内容

(1) 調査期間

平成 27 年 8 月調査： 平成 27 年 8 月 3 日～9 月 8 日

(2) 調査箇所

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、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 箇所を測定箇所として選定した。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いた 6,577 箇所において測定を実施した。測定箇所を図-1 の左図に示す。

(3) 調査内容の詳細

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、地表面から 1 m 高さの空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$) を測定した。1 箇所を除き NaI (TI) シンチレーション式サーベイメータ（日立アロカメディカル社製 TCS-172B）を用いて測定した。空間線量率が約 30 $\mu\text{Sv/h}$ と高かった 1 箇所は電離箱式サーベイメータ（日立アロカメディカル社製 ICS-323C）を使用して測定した。時定数 10 秒で 5 回読取った値の平均値を空間線量率とした。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 圏内の詳細な空間線量率マップを作成した。

3. 結果と考察

(1) 空間線量率マップ

今回の調査における空間線量率の測定結果を図-1 の右図に示す。

(2) 空間線量率の短期的変化

前回の調査（平成 26 年 11 月）から今回の調査（平成 27 年 8 月）の約 9 ヶ月間の空間線量率の変化を確認するため、平成 26 年 11 月調査と平成 27 年 8 月調査における空間線量率を比較した。比較にあたっては、天然放射性核種からの空間線量率への寄与が 0.05 $\mu\text{Sv/h}$ と仮定¹ し、この寄与分を全ての空間線量率の測定値から一律に差し引いた値を用いた。サーベイメータによる空間線量率測定に伴う不確かさ（くり返し測定のばらつきから）は線量率の大きさ等測定環境によるが 90 パーセントイル値で 7.4%（変動係数）であった。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、平成 27 年 8 月調査

¹ 日本原子力研究開発機構，“平成 26 年度放射性物質測定調査委託費（東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約及び移行モデルの開発）事業，” 成果報告書，page. 63，（平成 27 年 3 月）。

では平成 26 年 11 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。両者の相関を図-2 に、空間線量率の合計値の比率（以下「合計線量率比」という。）を表-1 に示す。空間線量率の合計値を測定箇所数で割ると平均線量率になるため、今回のように同一測定箇所と比較する場合においては、合計線量率比は平均線量率の比率と同じである。

平成 26 年 11 月調査に対する平成 27 年 8 月調査における合計線量率比は 0.83 と評価された。この期間の放射性セシウムの物理減衰に伴う空間線量率の減少は 0.89 であることから、物理減衰に対する合計線量率比の比率は 0.94 となることが確認された。

このうち、平成 26 年 11 月調査から平成 27 年 8 月調査までに除染の実施が確認できた 57 箇所及び整地等により地表面の状況が変化していると判断された 287 箇所を抽出し、これを除外した評価を行った。ただし、除染等の実施箇所の抽出は測定員による現地確認の他、測定箇所の近隣の方や地元自治体への問い合わせにより行った。必ずしも全ての除染等実施の情報が得られたわけではないのでこの分類の段階で一定の不確かさが含まれる。合計線量率比による比較を表-2 に示す。これら箇所を除外して算出した合計線量率比は 0.85 と評価された。これより、物理減衰に対する合計線量率比の比率は 0.96 となることが確認された。

空間線量率は年間を通じて一定の速度で減少するのではなく、減少率が比較的大きい時期と小さい時期があるのではないかといた空間線量率の減少に対する季節依存性の有無を確認するため、除染箇所等を除いて平成 24 年 8 月調査から平成 27 年 8 月調査までの直近の 2 調査間について、各測定箇所での空間線量率の減少率と物理減衰との比率の平均値を算出し、「夏から冬」及び「冬から夏」の季節による減少傾向の比較を行った（図-3）。各比率の分布はほぼ正規分布に従った。「夏から冬」と「冬から夏」の物理減衰との比率の平均値について差の検定を行ったところ、両者に有意差が認められた（95%信頼度）。この結果、「夏から冬」では物理減衰とほぼ同等程度の減少率、「冬から夏」では物理減衰よりも大きな減少率を示すことが確認された。

(3) 空間線量率の長期的変化

平成 23 年 6 月調査から平成 27 年 8 月調査までの 9 つの時期の空間線量率マップを図-4 に示す。高い空間線量率を示す赤や黄色で示される箇所が減少してきていることがわかる。

平成 23 年 6 月調査から平成 27 年 8 月調査までの約 50 ヶ月間の空間線量率の変化を図-5 に示す。平成 23 年 6 月調査を基準とした各調査での合計線量率比を放射性セシウムの物理減衰の曲線とともに示したものである。上段のグラフは全ての地点を含めた評価結果を青色で、除染の実施を確認した箇所及び地面の状況が変化すると判断された箇所を除外した場合の評価結果を茶色で示す。一方、下段は平成 27 年 9 月 5 日時点の避難指示区域に基づき区域内外に分けて評価した結果を示す（除染箇所等を含めた評価）。比較にあたっては、前項と同様、天然放射性核種からの空間線量率への寄与が $0.05 \mu\text{Sv/h}$ と仮定し、この寄与分を全ての空間線量率の測定値から一律に差し引いた値を用いている。これらより、空間線量率は物理減衰よりも速く減少していることがわかる。さらに、上段の図から、除染等が実施された箇所を含めた全ての地点での評価のほうが除染箇所等を除いた評価に比べて空間線量率の減少が早く、除染の効果が表れていると考えられる。また、平成 27 年 9 月 5 日時点の避難指示区域に基づき区域内外に分けて評価した結果では、区域内の空間線量率の減少速度は区域外に比べて遅いことが示された。

図-6 に、平成 23 年 6 月調査以降 8 回の調査について福島第一原発から 80 km 圏内を対象として空間線量率の範囲ごとにその線量率範囲に入る測定箇所数が全体に占める割合を示した。経時的に $0.2 \mu\text{Sv/h}$ 以下の箇所が増加し、 $0.2 \mu\text{Sv/h}$ を超える箇所が減少して

きていることが明示されている。平成23年6月調査から今回の調査(平成27年8月調査)における全体に占める割合の変化を見てみると、 $0.2 \mu\text{Sv/h}$ 以下の箇所が15.0%から67.9%へ、 $0.5 \mu\text{Sv/h}$ 以下の箇所が53.7%から90.7%へ増加している。

図-7には、図-6で示した線量率範囲に入る測定箇所数が全体に占める割合について避難指示区域内外ごとに評価した結果を示す。図-7上段のグラフには平成27年9月5日時点の避難指示区域内の結果を示す。避難指示区域内の測定箇所数は全測定箇所の1割程度とサンプル数が少ないものの、区域内では $1.0 \mu\text{Sv/h}$ 以下の箇所が経時的に増加してきており、 $3.8 \mu\text{Sv/h}$ を超える箇所が減少してきていることがわかる。一方、図-7下段に示す区域外の結果をみると、図-6の空間線量率が高い部分を除いた分布形状となっており、同じ傾向が観察される。

平成23年6月調査から平成27年8月調査までの約50ヶ月間の空間線量率の変化を比較した。両者の相関を図-8に、合計線量率比による比較を表-3に示す。前項と同様、天然放射性核種からの空間線量率への寄与が $0.05 \mu\text{Sv/h}$ と仮定し、この寄与分を全ての空間線量率の測定値から一律に差し引いた値を用いている。なお、平成23年6月調査と平成27年8月調査で測定した箇所が一致している箇所(20m未満)を評価対象とした(627箇所)。このうち、平成23年6月調査から平成27年8月調査までに除染の実施が確認できた38箇所及び整地等により地表面の状況が変化していると判断された126箇所を抽出した。図-9において、除染の実施が確認できた38箇所を赤色で、地表面の状況が変化していると判断された126箇所を緑色で示す。図-9ではこの赤色及び緑色で示した計164箇所を除いた「変化なし」と判断された463箇所のデータ(青色)で評価した回帰直線を青色で示した。

表-3に示すように、平成23年6月調査と平成27年8月調査における合計線量率比は、除染箇所等を含めた場合では0.24、これら箇所を除外した場合には0.28と評価された。この期間の放射性セシウムの物理減衰に伴う空間線量率の減少は0.43であることから、物理減衰に対する合計線量率比の比率は除染箇所等を含めた場合では0.56、これらの箇所を除外した場合には0.66となることが確認された。

また、除染の実施が確認された箇所及び地表面の状況が変化していると判断された箇所の変化傾向を確認するため、平成23年6月調査と平成27年8月調査における合計線量率比とこの期間の物理減衰に対する比率を地表面の変化状況別に算出した(表-4)。地表面に変化の見られない箇所では物理減衰に対する合計線量率比の比率は0.66であるのに対し、除染の実施が確認された箇所では0.32、状況が変化していると判断された箇所では0.38と評価された。

空間線量率の減少傾向と土地利用状況との関係を調べるため、土地利用区分²ごとに合計線量率比を比較した。除染の実施が確認された箇所及び地表面の状況が変化していると判断された箇所を除外した合計線量率比を赤色で、これら箇所をすべて含めた合計線量率比を青色で示す(図-10)。図-10のグラフからは、「田」では両者の差がほとんどなく他の土地利用区分とは異なる傾向を示している可能性や、「田」に分類されるデータは除染の実施及び状況が変化していると判断された箇所を除いても空間線量率の減少率が他の土地利用区分に比べて大きい可能性が観察された。比率の差異について定量的に評価するために、①土地利用区分ごとに、除染の実施が確認された箇所及び地表面の状況が変化していると判断された箇所を除外した場合とこれらを含めた場合の評価で、空間線量率の減少傾向に差があるか否か、比率の差の検定を行った(95%信頼度)。その結果、全ての土地利用区分で有意差は認められなかった。また、②各土地利用区分間の比率の差について検定(95%信頼度)したところ、除染等箇所を除外した場合とこれらを含む場合の両方とも、土地利

² 国土交通省国土政策局, “国土数値情報 土地利用区分細分メッシュ 第2.3版,” (平成25年3月)。

用区分間の差に有意差は認められなかった。

4. まとめ

福島第一原発から 80 km 圏内を中心に平成 27 年 8 月にサーベイメータを用いた空間線量率の測定を約 6,500 箇所で行い、空間線量率の測定結果を示したマップを作成した。これにより平成 27 年現在の空間線量率の詳細な分布状況を把握することができた。

今回の測定結果と過去の結果を比較することで空間線量率の経時変化の特徴を調べた。除染の実施が確認された箇所及び地表面の状況が変化していると判断された箇所を除外した評価においては、短期的（平成 26 年 11 月と平成 27 年 8 月）な変化では物理減衰により予想される空間線量率の比率に対する各調査における空間線量率の合計値の比（合計線量率比）の比率は 0.96 であることが確認された。一方、長期的（平成 23 年 6 月と平成 27 年 8 月）な変化では物理減衰により予想される比率に対する合計線量率比の比率は 0.66 であり、物理減衰よりも大きな減衰が確認された。

空間線量率の減少に対する季節依存性の有無について調べた結果、夏から冬では物理減衰とほぼ同等程度の減少率、冬から夏では物理減衰よりも大きく減少していることが確認された。

空間線量率の減少傾向と土地利用区分との関係を調べた結果、除染の実施が確認された箇所及び地表面の状況が変化していると判断された箇所を除外した場合とこれらを含めた場合の評価においても、また、土地利用区分間の比較評価においても、空間線量率の減少率に有意差は認められなかった。

表-1 平成26年11月調査と平成27年8月調査の合計線量率比の比較
 (平成26年11月調査と平成27年8月調査において測定箇所が合致する6,370箇所の合計線量率比から、期間中の物理減衰に対する合計線量率比の比率を算出)

調査名 (調査期間)	平成26年11月調査との比率		
	合計線量率比	物理減衰	物理減衰に対する 合計線量率比の比率
平成27年8月調査 (平成27年8月3日～9月8日)	0.83	0.89	0.94

(データ数 n= 6,370)

表-2 平成26年11月調査と平成27年8月調査の合計線量率比の比較
 (平成26年11月調査と平成27年8月調査において測定箇所が合致する6,026箇所の合計線量率比から、期間中の物理減衰に対する合計線量率比の比率を算出。表-1に示す6,370箇所より、平成26年11月調査から平成27年8月調査までに除染の実施が確認された57箇所及び地表面の状況が変化すると判断された287箇所を除外して評価)

調査名 (調査期間)	平成26年11月調査との比率		
	合計線量率比	物理減衰	物理減衰に対する 合計線量率比の比率
平成27年8月調査 (平成27年8月3日～9月8日)	0.85	0.89	0.96

(データ数 n= 6,026)

表-3 平成23年6月調査と平成27年8月調査の合計線量率比の比較
 (平成23年6月調査と平成27年8月調査において測定箇所が合致する箇所の合計線量率比から、期間中の物理減衰に対する合計線量率比の比率を算出)

除染箇所等を含めた627箇所を算出

調査名 (調査期間)	平成23年6月調査との比率		
	合計線量率比	物理減衰	物理減衰に対する 合計線量率比の比率
平成27年8月調査 (平成27年8月3日～9月8日)	0.24	0.43	0.56

(データ数 n= 627)

除染の実施が確認された38箇所、地面の状況が変化していると判断された126箇所を除いた463箇所を算出

調査名 (調査期間)	平成23年6月調査との比率		
	合計線量率比	物理減衰	物理減衰に対する 合計線量率比の比率
平成27年8月調査 (平成27年8月3日～9月8日)	0.28	0.43	0.66

(データ数 n= 463)

表-4 平成23年6月調査と平成27年8月調査の合計線量率比の比較
 (地表面の変化状況ごとに、平成23年6月調査と平成27年8月調査において測定箇所が合致する箇所の合計線量率比と、期間中の物理減衰に対する合計線量率比の比率を算出)

地表面の 変化状況	平成23年6月調査と平成27年8月調査の比率			
	データ数	合計線量率比	物理減衰	物理減衰に対する 合計線量率比の比率
変化なし	463	0.28	0.43	0.66
除染実施	38	0.14	0.43	0.32
状況変化	126	0.16	0.43	0.38

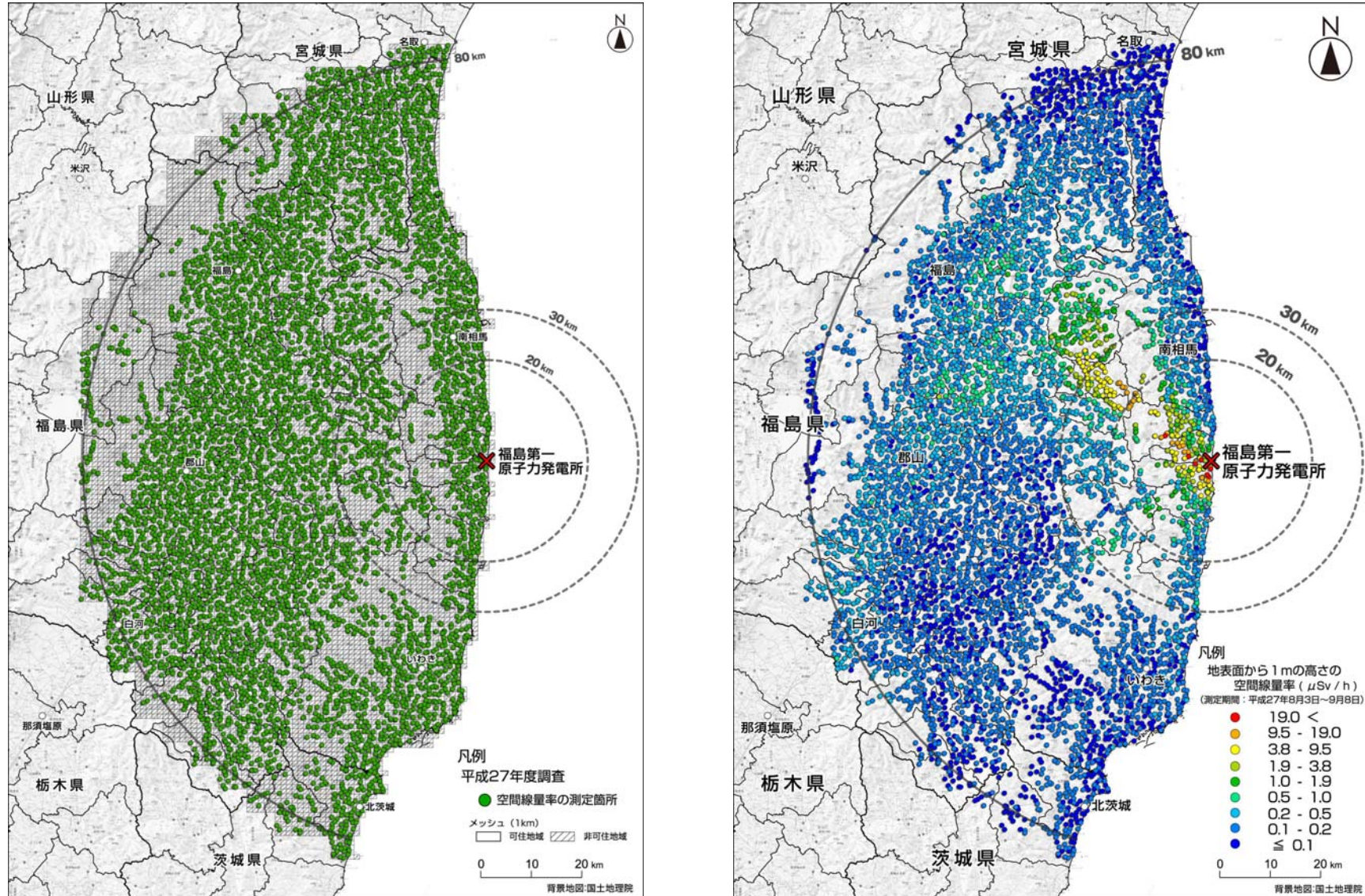


図-1 サーベイメータによる地表面から1 m高さの空間線量率の測定箇所及び測定結果
(平成27年8月3日~9月8日に測定)

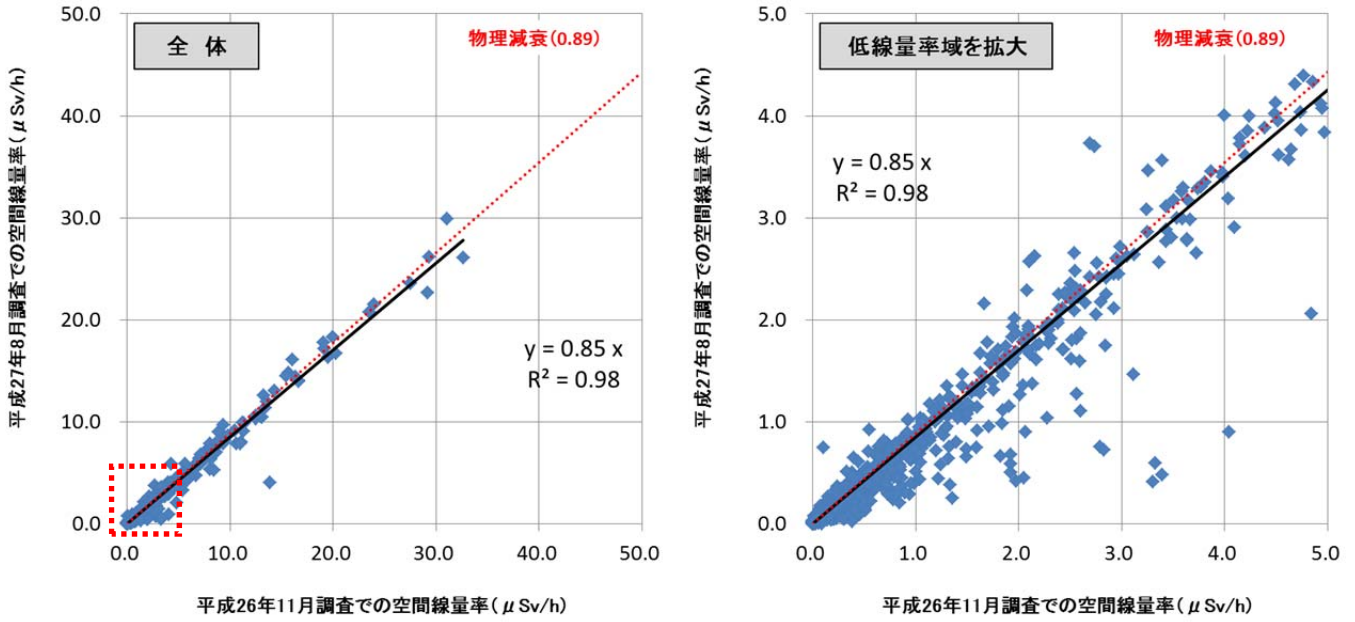


図-2 平成26年11月調査と平成27年8月調査の空間線量率の変化
 (右図は平成26年11月調査での空間線量率が5.0 μSv/h未満の部分(左図の赤点線で囲んだ部分)を拡大したもの)(データ数 n= 6,370)

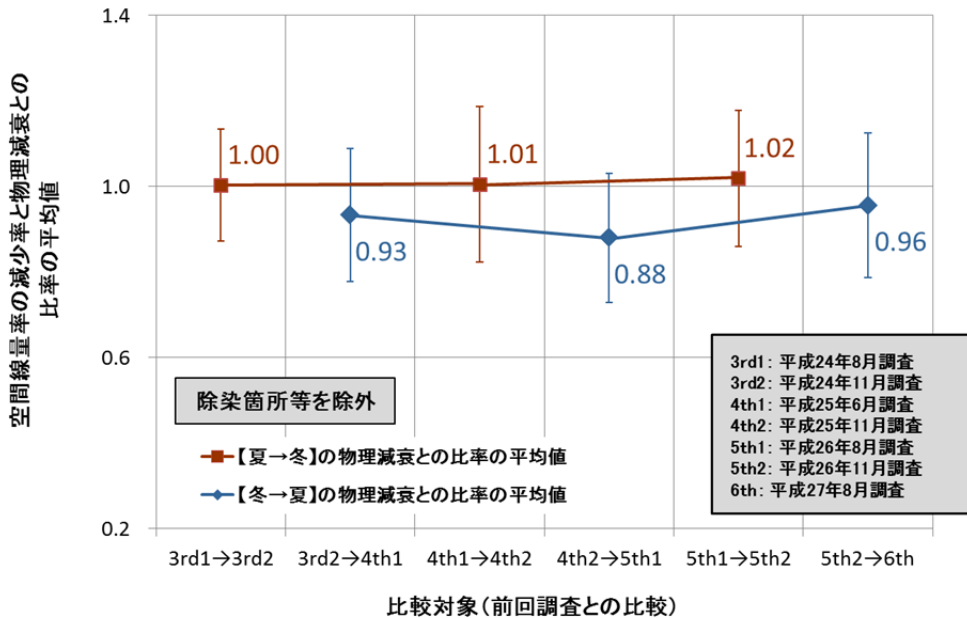
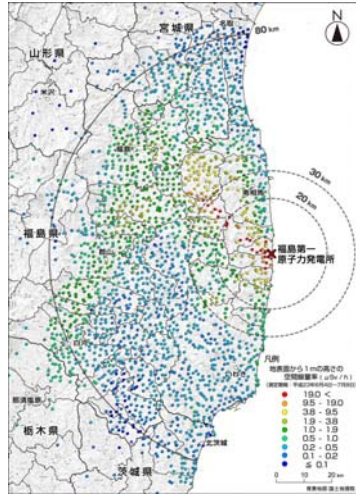
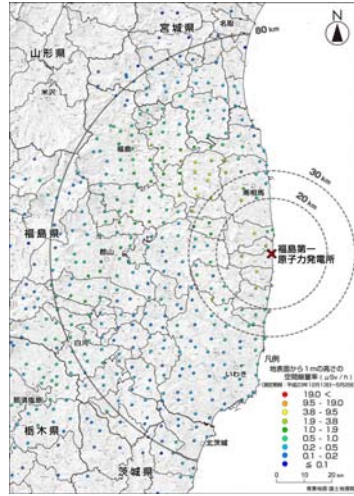


図-3 空間線量率の減少率と物理減衰との比率の平均値による季節ごとの変化傾向の違い

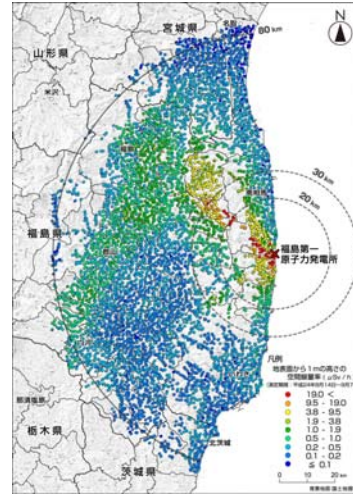
(各調査間における空間線量率の減少率と物理減衰との比率の平均値を算出。誤差棒は1標準偏差を示す)



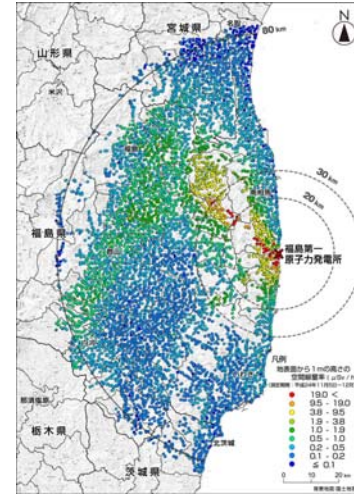
事故 3 ヶ月後
(平成 23 年 6 月調査)



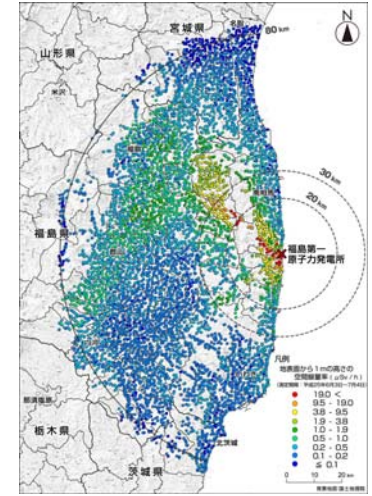
事故 12 ヶ月後
(平成 24 年 3 月調査)



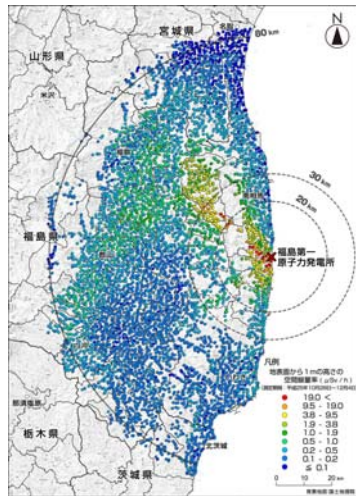
事故 17 ヶ月後
(平成 24 年 8 月調査)



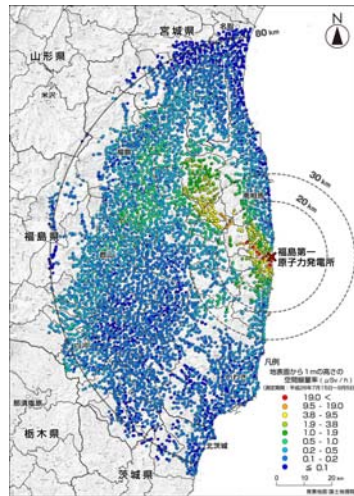
事故 20 ヶ月後
(平成 24 年 11 月調査)



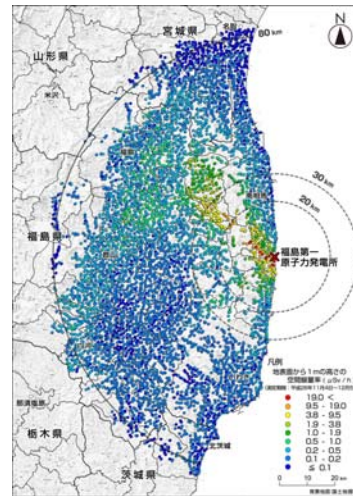
事故 27 ヶ月後
(平成 25 年 6 月調査)



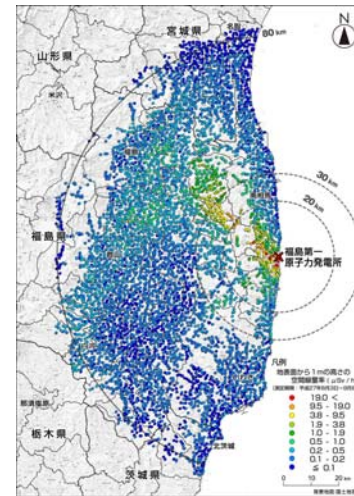
事故 32 ヶ月後
(平成 25 年 11 月調査)



事故 41 ヶ月後
(平成 26 年 8 月調査)



事故 44 ヶ月後
(平成 26 年 11 月調査)



事故 53 ヶ月後
(平成 27 年 8 月調査)

図-4 9つの時期の空間線量率マップ

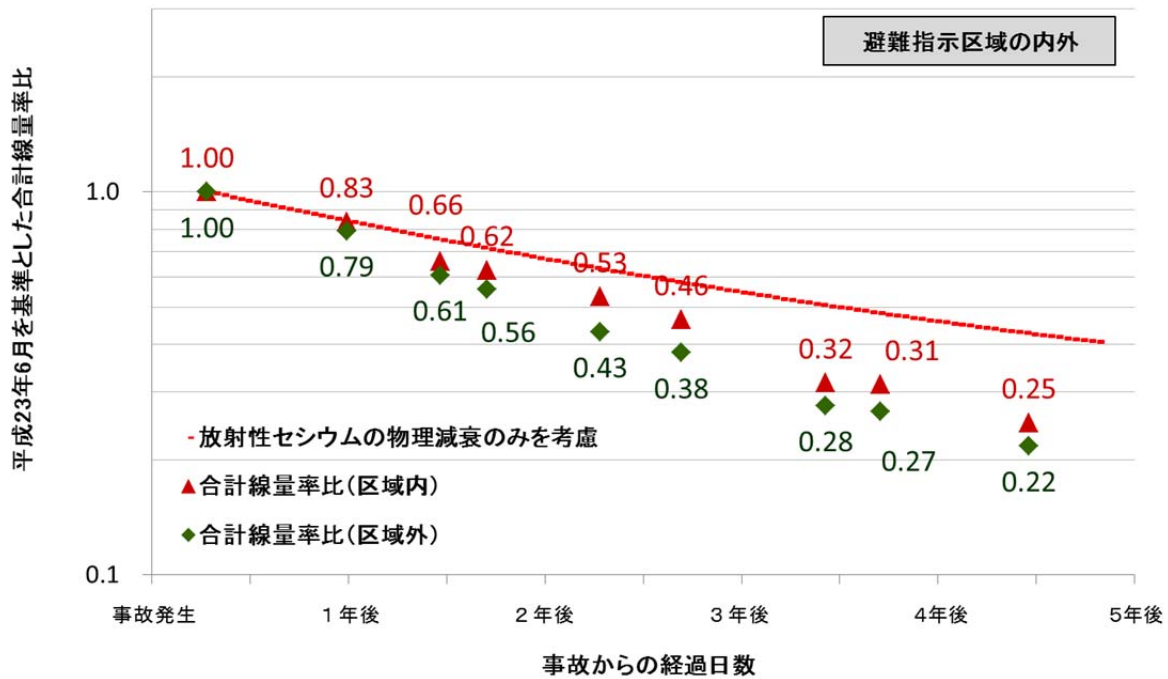
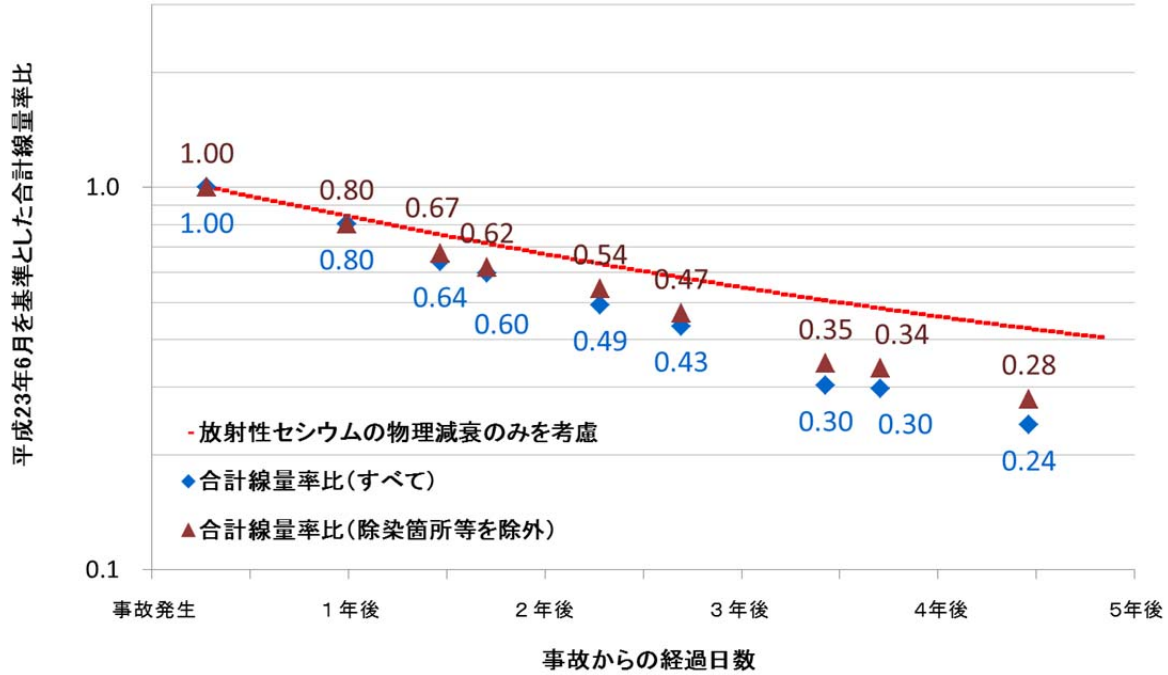


図-5 平成23年6月調査から平成27年8月調査の空間線量率の変化
 (平成23年6月調査を基準とした各調査での合計線量率を比較。上段は除染の実施を確認及び地面の状況が変化すると判断された箇所を除外した場合と含めた場合で評価した結果、下段は平成27年9月5日時点の避難指示区域に基づき区域内外に分けて評価した結果を示す)

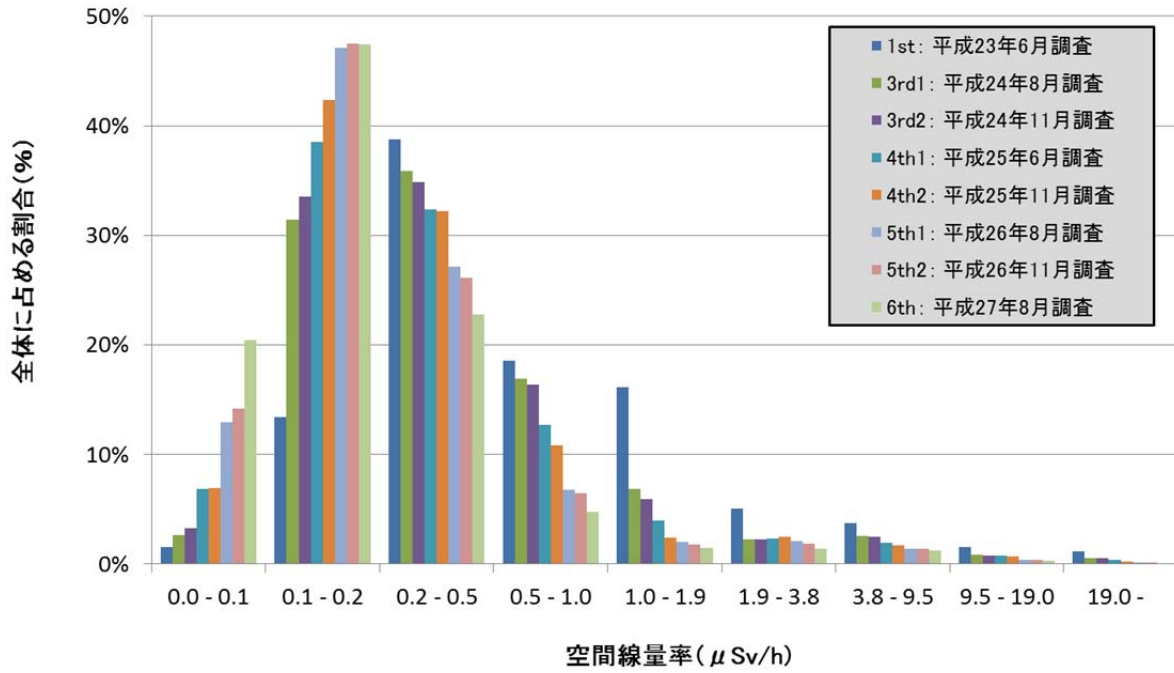


図-6 空間線量率範囲ごとの測定箇所数の分布
 (福島第一原発から 80 km 圏内を対象とした比較。空間線量率の範囲ごとにその線量率範囲に入る測定箇所数が全体に占める割合を示す)

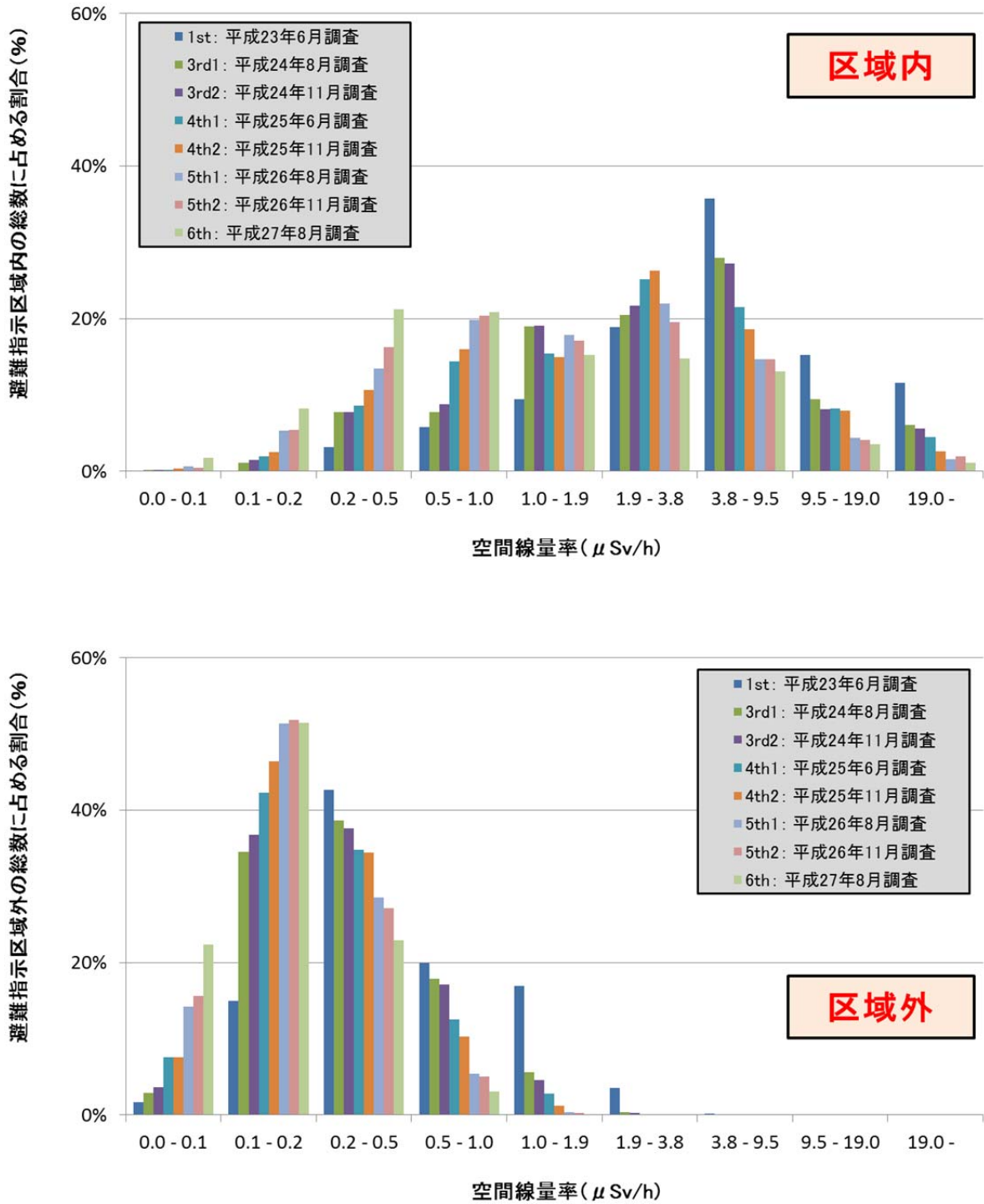


図-7 空間線量率範囲ごとの測定箇所数の分布（避難指示区域内外）

（福島第一原発から 80 km 圏内を対象とした空間線量率範囲ごとの避難指示区域別の測定箇所数の総数に対する割合。上段は平成 27 年 9 月 5 日時点の避難指示区域に基づく区域内の分布、下段が区域外の分布を示す）

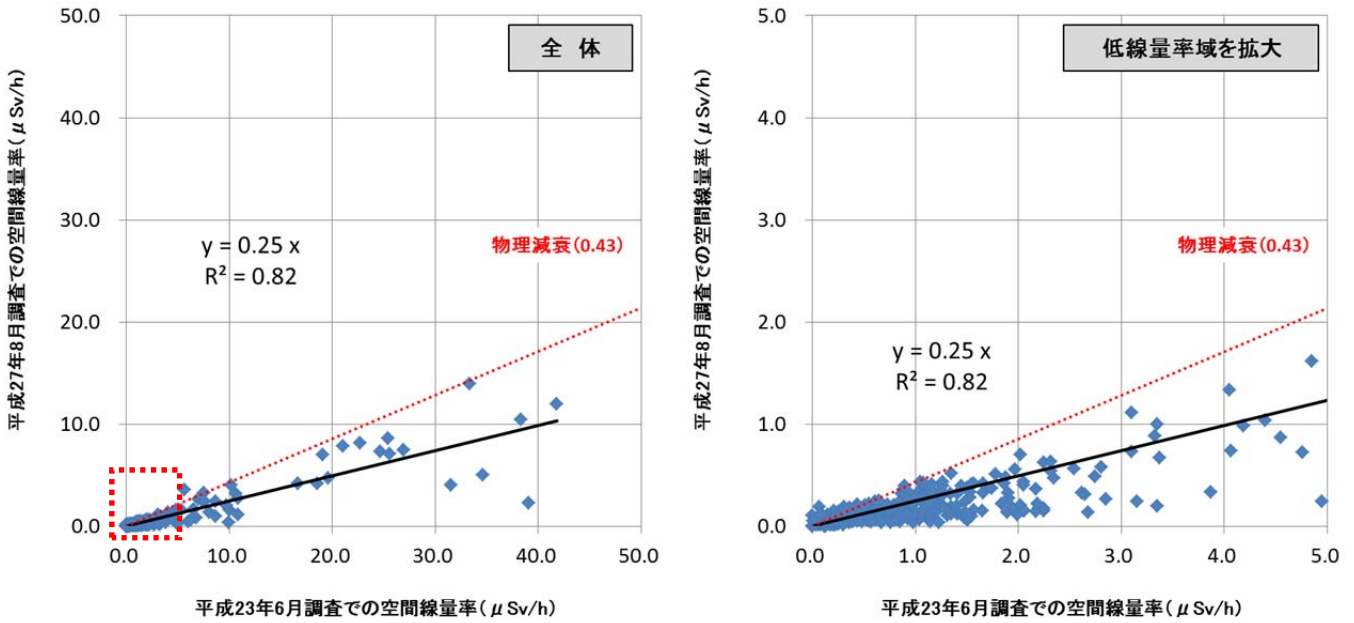


図-8 平成23年6月調査と平成27年8月調査の空間線量率の変化
 (右図は平成23年6月調査での空間線量率が5.0 μSv/h未満の部分(左図の赤点線で囲んだ部分)を拡大したもの)(データ数 n= 627)

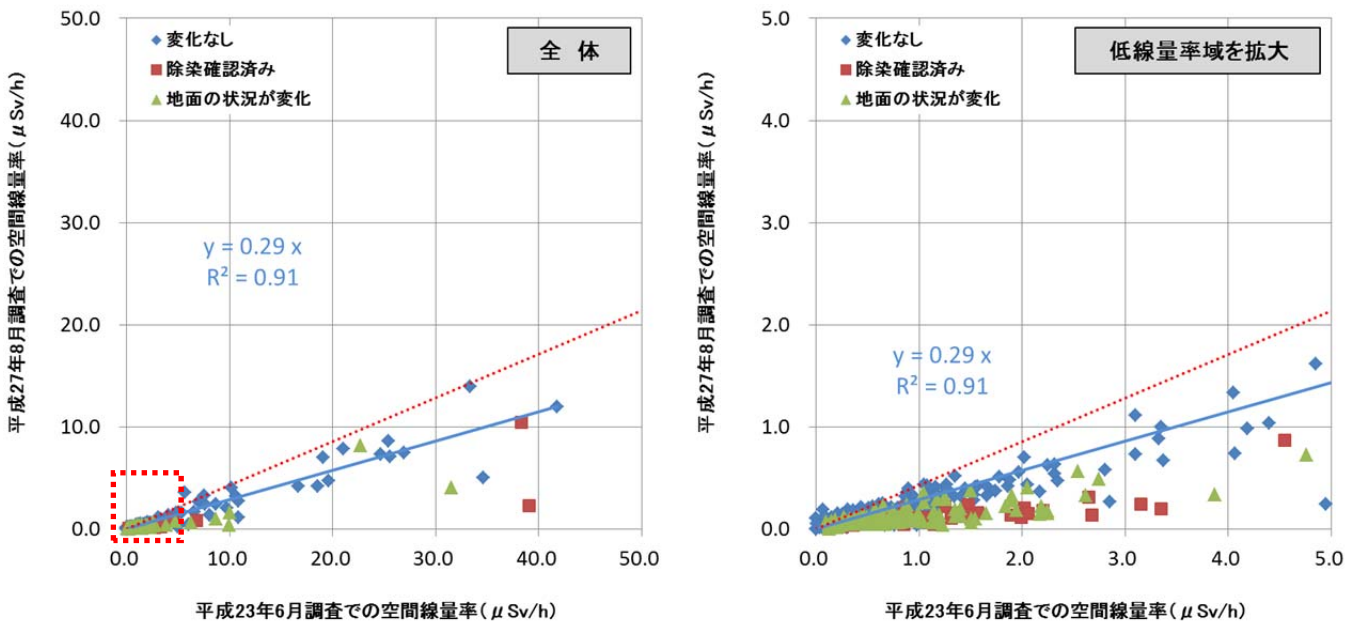


図-9 平成23年6月調査と平成27年8月調査の空間線量率の変化
 (右図は平成23年6月調査での空間線量率が5.0 μSv/h未満の部分(左図の赤点線で囲んだ部分)を拡大したもの。平成23年6月調査から平成27年8月調査までに除染の実施が確認された38箇所を赤い口で、地面の状況が変化すると判断された126箇所を緑の△で示す。青い回帰直線は、除染箇所等を除外した「変化なし」とされた箇所を対象としている)(データ数 n= 463)

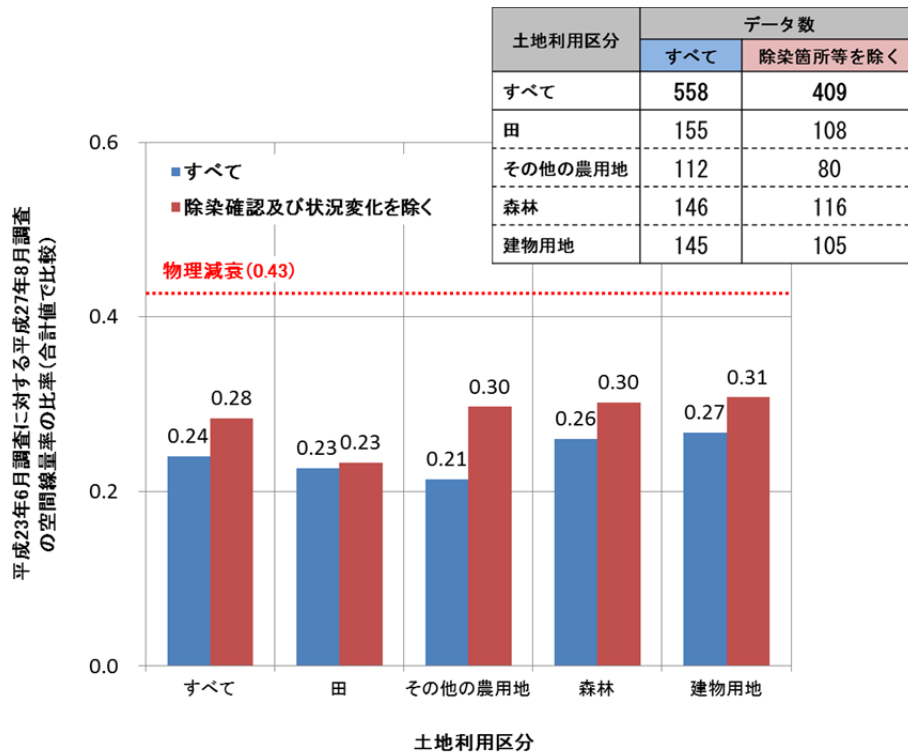


図-10 平成23年6月調査を基準とした平成27年8月調査における土地利用区分ごとの空間線量率の変化の割合

(平成23年6月調査以降に除染の実施が確認された箇所及び地面の状況が変化していると判断された箇所を含めて算出したものを青い棒で示し、これら除染箇所等を除外して算出したものを赤い棒で示す。土地利用区分は、国土交通省国土政策局提供の「国土数値情報 土地利用区分細分メッシュ 第2.3版」の土地利用種別(平成21年度)を利用)