

走行サーベイによる道路及びその近傍における空間線量率の測定

安藤 真樹、齋藤 公明（原子力機構）

1. 調査目的

福島第一原発から放出された放射性物質による現状における空間線量率を把握するため、KURAMA-II（小型 CsI シンチレーション検出器と GPS が一体となった簡易型測定システム）を用いた走行サーベイによる調査を実施してきた。

平成 28 年度は、過去の走行サーベイによる地表面から 1 m 高さの空間線量率の測定結果と今回の測定結果を比較・解析し、現状における空間線量率の状況や変化傾向を把握する。また、事故から 5 年が経過し、沈着した放射性セシウムと天然核種による線量率の差が小さくなってきている状況を鑑み、天然核種による影響を分離し評価することを可能にする等の KURAMA システムの改良（高度化）を行う。

2. 調査内容

(1) 調査期間及び調査地域

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、原子力機構が走行サーベイを実施した。さらに、地方自治体と協働（原子力機構は解析を担当）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測定を実施した。原子力機構による測定は、基本的に平成 27 年度までの調査と同じ道路について実施したが、平成 27 年度までの測定結果より福島第一原発事故による影響がない（空間線量率が低下しほぼ自然ガンマ線のレベルに達している、または元々自然ガンマ線レベルであった）と判断した地域では、実施していない。

第 1 回目：第 12 次走行サーベイ

- 原子力機構による測定：平成 28 年 6 月 27 日～7 月 19 日
 - 対象地域：8 県（岩手県、宮城県、福島県、茨城県、栃木県、群馬県、埼玉県、千葉県）
- 地方自治体（7 県、約 60 市町村）による測定：平成 28 年 7 月 4 日～8 月 5 日
- 合計測定距離：約 4.0 万 km

第 2 回目：第 13 次走行サーベイ

- 原子力機構による測定：平成 28 年 10 月 31 日～12 月 16 日
 - 対象地域：8 県（岩手県、宮城県、福島県、茨城県、栃木県、群馬県、埼玉県、千葉県）
- 地方自治体（7 県、約 50 市町村）による測定：平成 28 年 10 月 31 日～11 月 30 日
- 合計測定距離：約 3.7 万 km

(2) 調査内容の詳細

自動車の後部座席の右側後方に KURAMA-II を設置し 3 秒ごとに空間線量率を測定した。GPS による位置情報とともに携帯電話回線を通してデータ収集用サーバに送信した。車内における空間線量率測定値を車外の地上 1 m 高さの空間線量率に換算するための補正係数¹

¹ 平成 23 年度放射能測定調査委託事業、「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

を用いて、車内での測定結果から道路上 1 m 高さの空間線量率を求めた。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と想定しても、測定期間中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 2%以下と評価され測定機器の有する不確かさよりも十分に小さいことを考慮して、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。

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元に、これまでと同様に、走行地域を 100 m 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箇所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。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区別せず使用した。なお、KURAMA-II による空間線量率測定の不確かさ（装置の系統的誤差）は 1 回の測定で $\pm 10\%$ ²、空間線量率の比をとる場合には誤差伝播を考慮し $\pm 14\%$ である。

これらの測定結果を用いて、空間線量率の経時変化状況を確認するとともに、避難指示区域の違い等に基づく空間線量率の変化傾向の違いを検討した。

(3) KURAMA システムの改良

本来環境放射線を対象とするには、Tl-208 の全吸収ピーク (2614keV) を含むようエネルギー上限が 3000keV 程度までであることが望ましいが、これまで放射性セシウムからの空間線量率が支配的な時期には 2000keV までの測定で必要な精度の測定を実施してきた。しかしながら、沈着した放射性セシウムによる放射線レベルが低くなり自然放射線の影響が無視できなくなってきたこと、空間線量率をより正確に測定するためエネルギーの上限を 2000keV から 3000keV まで拡張した。また、周辺に比べて高い線量率が観測された時に、その原因を明らかにするための情報を得るため、ガンマ線スペクトルを出力するよう改良した。空間線量率が全般的に低減している状況を鑑み、一部 KURAMA について浜松ホトニクス製 CsI(Tl) 検出器を高感度型（従来の 10 倍の結晶容積）に置き換え、検出効率の向上を図った。

3. 結果と考察

(1) 走行サーベイ

平成 28 年度の第 12 次走行サーベイ及び第 13 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それぞれ図-1 及び図-2 に示す。現状では、福島第一原発から 80 km 圏内や栃木県北東部の一部を除き、 $0.2 \mu\text{Sv/h}$ 未満の地域がほとんどを占めていることが分かる。比較のため、第 1 次走行サーベイ（平成 23 年 6 月 4 日から 6 月 13 日）以降の測定結果に基づき作成した空間線量率マップ（ただし福島第一原発から 80 km 圏内主体）を Appendix-1 に示す。これら図から、時間の経過とともに全体的に空間線量率が低下していることが確認できる。また、事故直後に空間線量率の比較的高い地域（福島第一原発から北西方向や福島市から南西に延びる帯状の地域；Appendix-1 の第 1 次走行サーベイの空間線量率分布マップに赤丸表示）においては空間線量率の変化が大きい。

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（ただし福島第一原発から 80 km 圏内）における第 12 次走行サーベイ及び第 13 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-3 に示す。第 12 次走行サーベイから第 13 次走行サーベイでは時間が約 4 ヶ月間経過しているが、空間線量率の変化は小さかった。第 12 次走行サーベイと第 13 次走行サーベイでの共通するメッシュ（福島第一原発から 80 km 圏内）での空間

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://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat01/pdf05/01-04.pdf>.

² 安藤真樹, 他, “福島県及び隣接県における空間線量率の経時変化に関する考察,” JAEA-Technology 2015-060, (2016).

線量率の相関を県及び立入制限区域ごとに調べた結果を Appendix-2 に示す。

第1次走行サーベイと第2次以降の走行サーベイで共通の100mメッシュの空間線量率を合計し、第1次走行サーベイに対する比率（以下「合計線量率比」という。）をとり、第1次走行サーベイからの空間線量率の経時変化を図-4に示す。合計線量率をデータ数で割ると平均空間線量率が得られ、この合計線量率比は平均空間線量率の比と同じである。これまで空間線量率の経時変化を議論する際、自然ガンマ線によるバックグラウンドを含んだままとしていたが、空間線量率の低下を鑑み、KURAMA-IIによる測定結果から各県市町村平均として求められた自然ガンマ線由来の空間線量率線寄与（バックグラウンド）³を差し引いた事故由来の放射性セシウムによる空間線量率として解析評価する（本報告書の以下の経時変化図において同様）。放射性セシウムの物理減衰及び攪乱のない平坦地上で測定した空間線量率の経時変化をあわせて示した。平坦地上測定結果については、バックグラウンドとして一律 $0.05 \mu\text{Sv/h}$ の寄与を差し引いている⁴。第12次走行サーベイでは、第1次に対する合計線量率比が0.12となり、放射性セシウムの物理減衰から計算した線量率比0.37のほぼ3割となっている。

空間線量率（バックグラウンド差引後）の減少傾向について1年ごとに詳しく調べた結果を表-1に示す。表-1より、過去4年間を約1年間隔で短期的に見た場合でも、走行サーベイによる空間線量率の減少は放射性セシウムの物理減衰による減少よりも速いことが確認された。

測定した道路が避難指示区域（原子力災害対策本部が設定した避難指示解除準備区域、居住制限区域及び帰還困難区域）のいずれか、あるいは外側に位置するか分類し（避難指示区域内外の分類は、図-5に示す平成27年9月5日時点のものを使ってデータ解析した。本報告書では、避難指示区域内外の分類をこのデータに基づいて解析している）、第1次走行サーベイに対する第2次以降の走行サーベイの合計線量率比（バックグラウンド差引後）の経時変化を図-6に示す。図-6より、避難指示区域外で空間線量率の減少が最も速く、帰還困難区域では最も遅いことが分かる。平成24年9月の第4次走行サーベイを基準に規格化すると、図-7に示すように避難指示区域内外での経時変化傾向は図-6とは異なり、平成26年度の第8次走行サーベイ以降、避難指示解除準備区域での空間線量率の減少が他区域に比べて速くなっていることが分かる。これは、以下に挙げる道路及び周辺環境の状況変化の違いによる放射性セシウムの減少の違いが現れているものと推測される。

- ①避難指示区域内は、国が除染の計画を策定し除染事業を進める地域として除染特別地域に指定されたが、1F事故後から第4次走行サーベイまでの約1年間においては、除染作業もまださほど進んでいなかったのに対し、避難指示区域外では自治体による除染作業が早い時期から進められた。
- ②避難指示区域内でも立入制限の区分により人間の活動や車両往来等が異なる。
- ③住民の帰還に向けて避難指示解除準備区域において除染が精力的に行われた。

$0.2 \mu\text{Sv/h}$ 以上となる測定結果が比較的多く存在する宮城県、福島県、及び栃木県（福島第一原発から80 km圏外での測定も含まれる）について、第1次走行サーベイに対する第2次以降の走行サーベイの合計線量率比（バックグラウンド差引後）の県ごとの経時変化を図-8に示す。ただし、測定範囲が偏っている第3次走行サーベイは対象外とした。図-8より、宮城県及び栃木県では福島県に比べ事故後比較的早い時期での空間線量率の減少が見られる。福島県における空間線量率の減少が全般に遅いのは避難指示区域を含んでい

³安藤真樹，他，“KURAMA-IIを用いた走行サーベイ測定による東日本での天然放射性核種の空間線量率評価，”日本原子力学会（to be published）。

⁴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）。

るためと考えられるが、他県との差は時間とともに小さくなる傾向にある。

(2) KURAMA システムの改良

エネルギー上限を 3000keV 程度までとするよう KURAMA-II の高度化を図った。改良を加えた KURAMA-II を用いバックグラウンドレベルにおいて、3000 秒（3 秒間×1000 回）のスペクトル測定を行った試験結果を図-9 に示す。改良型 KURAMA-II では、K-40 や Bi-214 に加え、2614keV の Tl-208 のガンマ線をとらえている。上記 KURAMA-II 本体での高度化に加え、測定中に周辺に比べて高い空間線量率が観測された場合に備え、核種同定の判断情報を示す機能を解析システムに追加した。

4. まとめ

第 12 次及び第 13 次走行サーベイを実施し第 1 次走行サーベイからの空間線量率の変化傾向を調べ、現状における空間線量率の状況や変化傾向を把握した。現状では、福島第一原発から 80 km 圏内や栃木県北東部の一部を除き、0.2 μ Sv/h 未満の地域がほとんどを占めている状況であった。第 12 次走行サーベイから第 13 次走行サーベイでは時間が約 4 ヶ月間経過しているが、80km 圏内全体では空間線量率の変化は小さかった。80km 圏内の立入制限の区域ごとに調べた結果、空間線量率が低い区域ほど空間線量率の変化が小さいことが分かった。

平成 23 年度の第 1 次走行サーベイに対する平成 27 年度の第 12 次及び第 13 次走行サーベイでの合計線量率比は、放射性セシウムの物理減衰から計算した線量率の減少率に対してほぼ 3 割であった。また、現状においても走行サーベイによる空間線量率の減少率は放射性セシウムの物理減衰による減少よりも速いことが確認された。

避難指示区域内外で第 1 次走行サーベイからの空間線量率の経時変化を比較した結果、避難指示区域外で空間線量率の減少が最も速く、帰還困難区域では最も遅いことが分かった。平成 24 年 9 月の第 4 次走行サーベイに対する合計線量率の経時変化を区域ごとに比較した結果では、平成 26 年度の第 8 次走行サーベイ以降、避難指示解除準備区域での空間線量率の減少が他地域に比べて速くなっていることが分かった。また、福島第一原発から 80 km 圏外での測定も含む広域測定の結果からは、宮城県及び栃木県では福島県に比べ事故後比較的早い時期での空間線量率の減少が見られた。以上の避難指示区域や県単位での経時変化傾向の相違は、測定地域によって除染の進捗や人間活動・車両往来等が異なることによると考えられる。

KURAMA-II の高度化を図り、3000keV 程度までの自然ガンマ線を測定するとともにガンマ線スペクトルを出力させるよう改良を施した。また、核種同定の判断情報を示す機能を解析システムに追加した。

表-1 線量率比（第1次走行サーベイと各走行サーベイで共通する100mメッシュにおける合計線量率の第4次走行サーベイ以降の約1年間ごとの変化率）の推移（福島第一原発から80 km圏内を対象とし、測定データは自然ガンマ線によるバックグラウンドを含まない。）

走行サーベイ 測定時期	第4次から第6次	第6次から第8次	第8次から第10次	第10次から第12次
	平成24年9月→ 平成25年7月	平成25年7月→ 平成26年7月	平成26年7月→ 平成27年7月	平成27年7月→ 平成28年7月
経過日数	約300日	約370日	約365日	約365日
線量率比 ^{a)}	0.71	0.66	0.76	0.69
物理減衰	0.84	0.82	0.85	0.87
線量率比／物 理減衰	0.85	0.80	0.89	0.79

a) 図-4に示した第1次走行サーベイに対する第4次、第6次、第8次、第10次及び第12次走行サーベイの各合計線量率比を用い、第4次から第6次の期間、第6次から第8次の期間、第8次から第10次の期間及び第10次から第12次の各期間での合計線量率比の変化率を求めたもの。

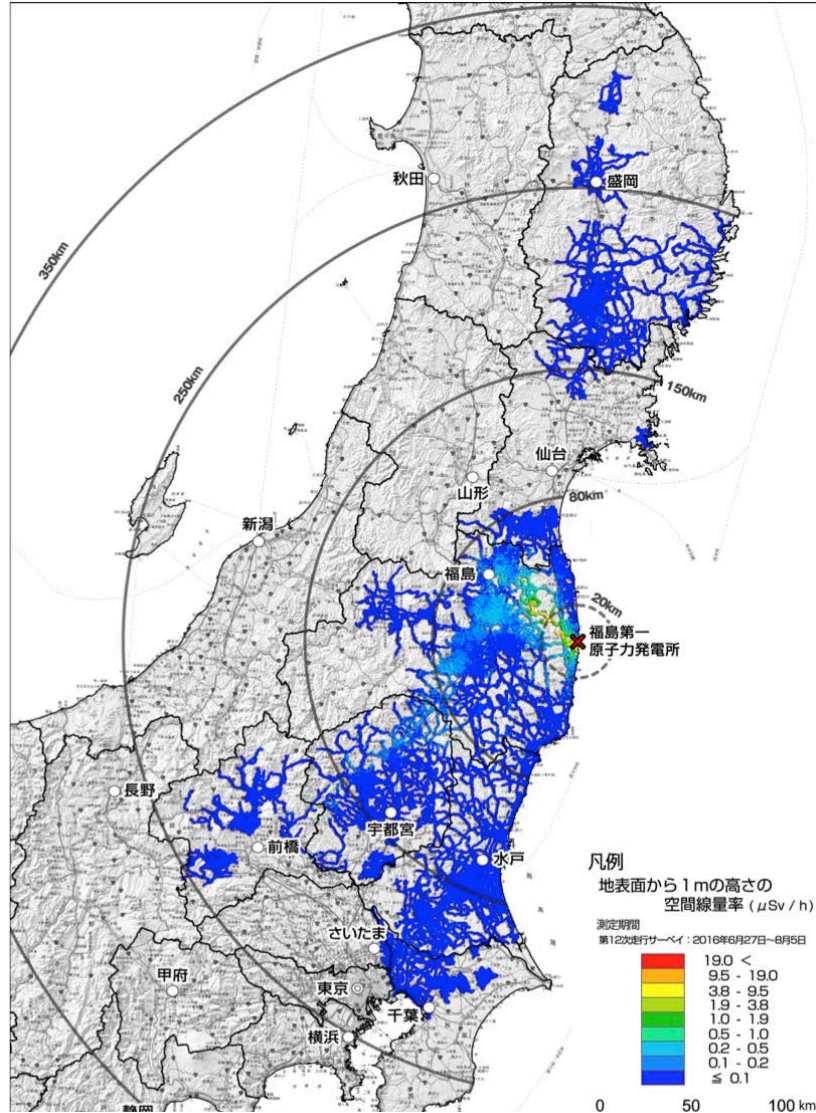


図-1 第12次走行サーベイの測定結果
 (測定期間：平成28年6月27日～8月5日、測定データは自然ガンマ線によるバックグラウンドを含んでいる。)

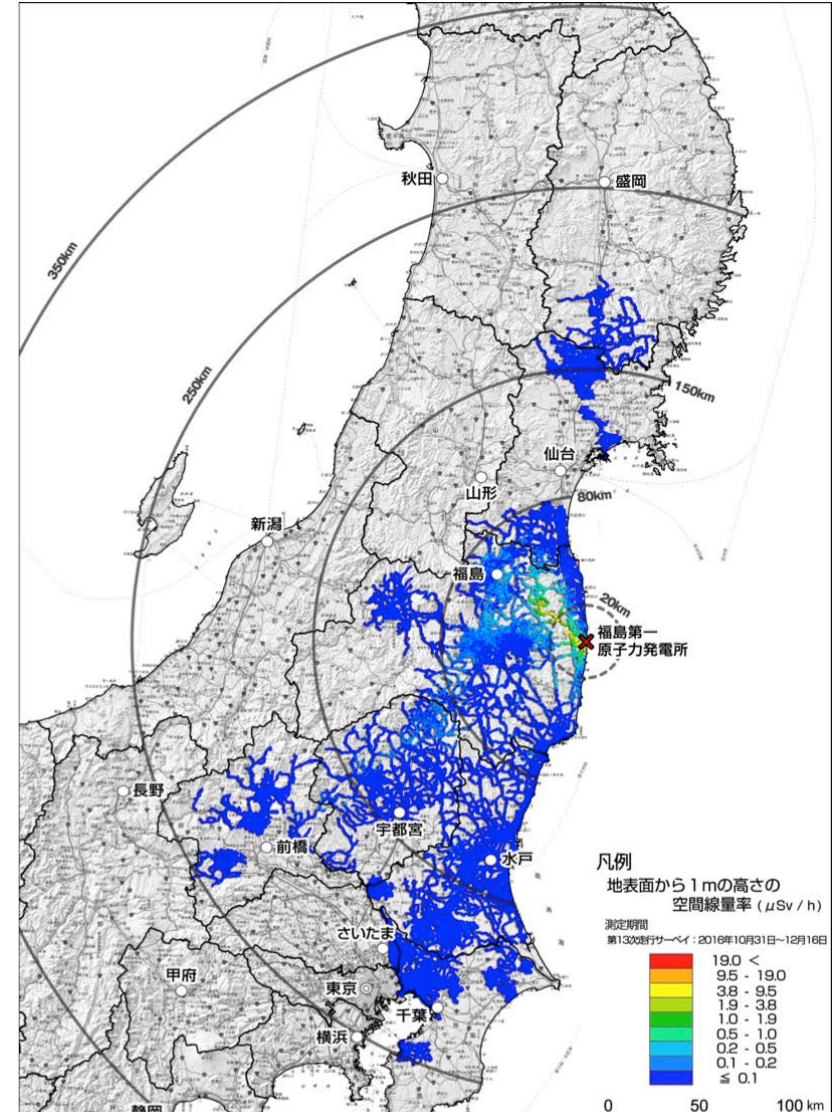
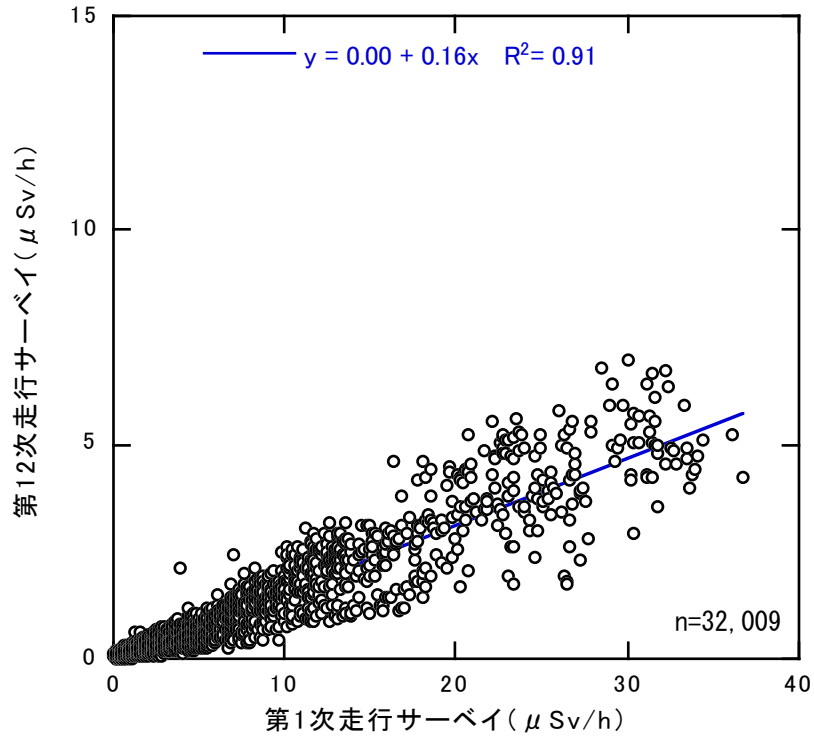
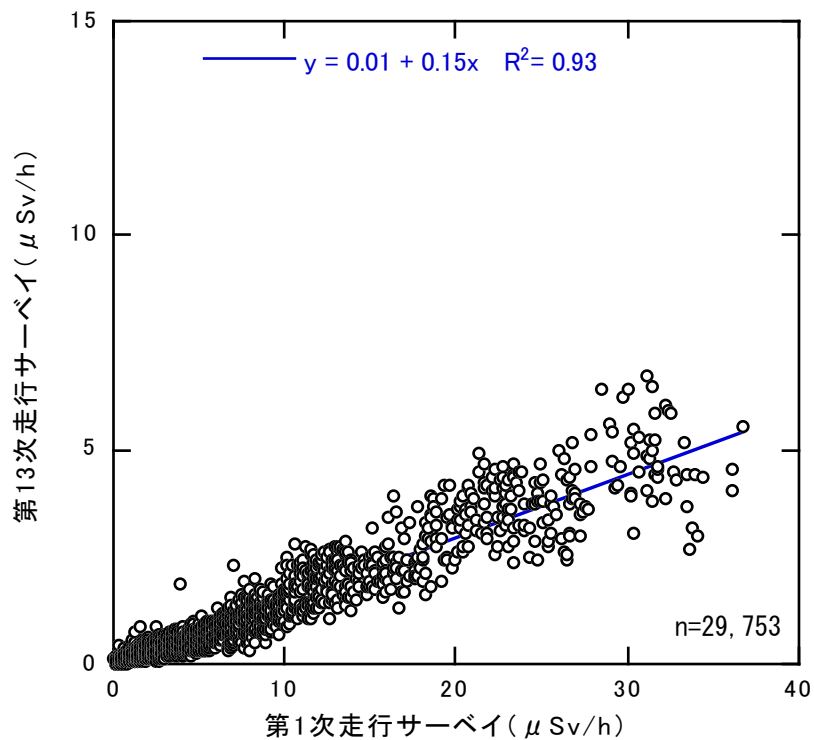


図-2 第13次走行サーベイの測定結果
 (測定期間：平成28年10月31日～12月16日、測定データは自然ガンマ線によるバックグラウンドを含んでいる。)



(a) 第1次走行サーベイ結果と第12次走行サーベイ



(b) 第1次走行サーベイ結果と第13次走行サーベイ

図-3 第1次走行サーベイ結果との相関(福島第一原発から80 km圏内を対象とし、測定データは自然ガンマ線によるバックグラウンドを含んでいる。)

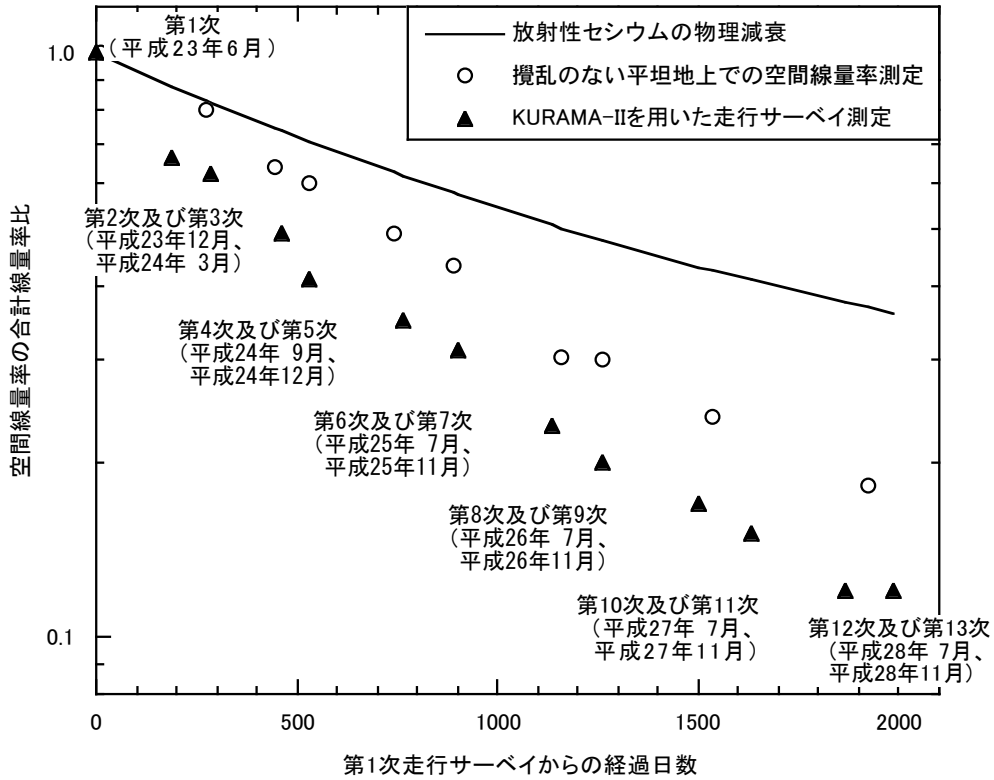


図-4 福島第一原発から 80 km 圏内での第 1 次走行サーベイに対する第 2 次以降の走行サーベイの合計線量率比の経時変化
 (攪乱のない平坦地上での空間線量率の変化傾向と物理減衰による経時変化を同時に示した。測定データは自然ガンマ線によるバックグラウンドを含まない。)

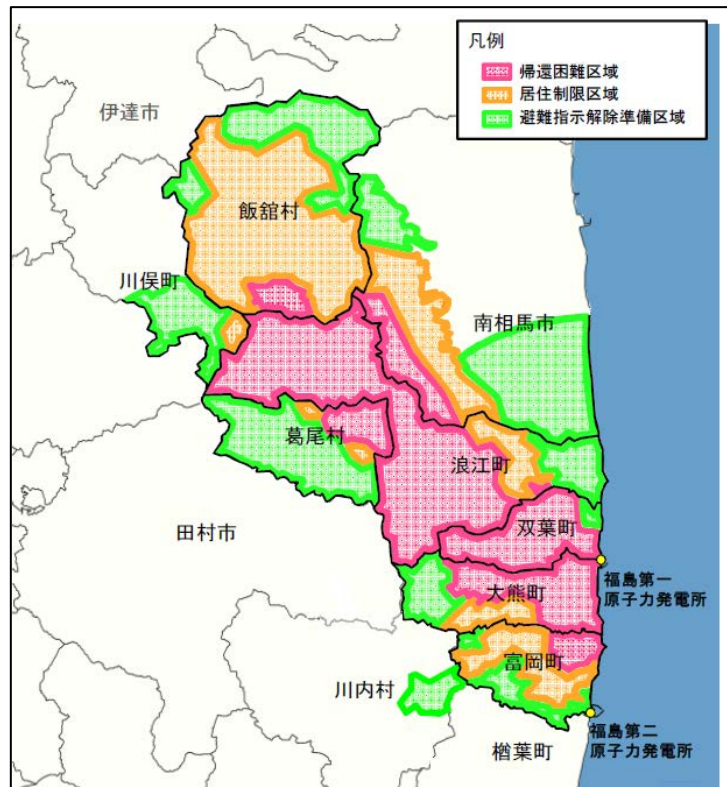


図-5 避難指示区域の概念図(平成 27 年 9 月 5 日時点)

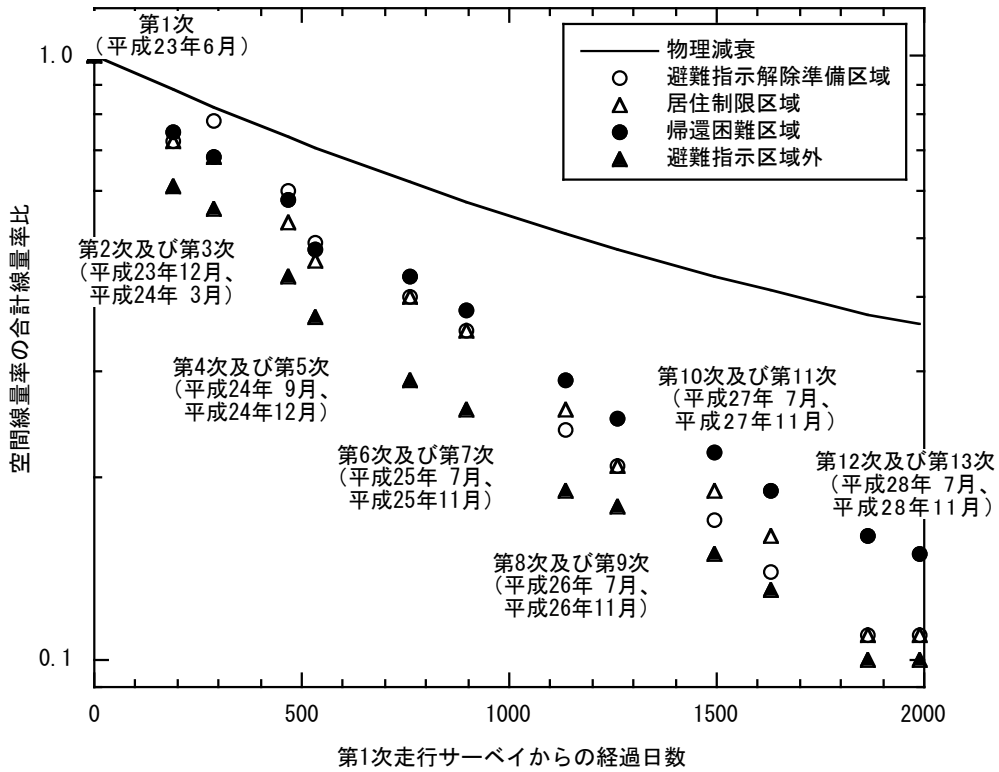


図-6 避難指示区域内各区域及び避難指示区域外（福島第一原発から 80 km 圏内）での空間線量率の経時変化比較（第 1 次から第 13 次走行サーベイ）
（測定データは自然ガンマ線によるバックグラウンドを含まない。）

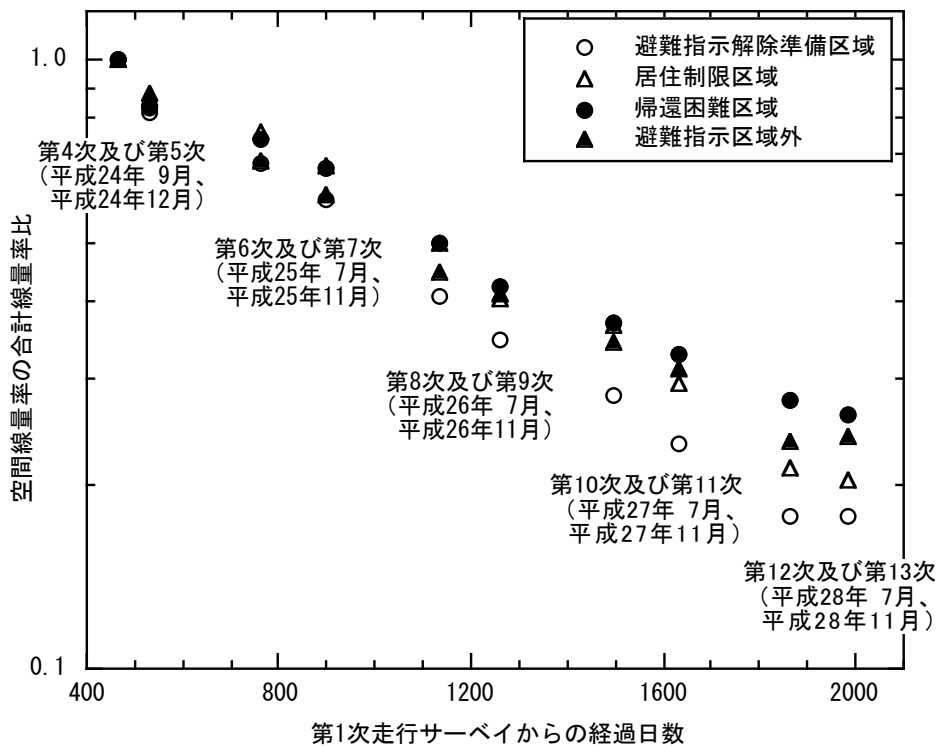


図-7 避難指示区域内各区域及び避難指示区域外（福島第一原発から 80 km 圏内）での空間線量率の変化傾向比較（第 4 次から第 13 次走行サーベイ）
（測定データは自然ガンマ線によるバックグラウンドを含まない。）

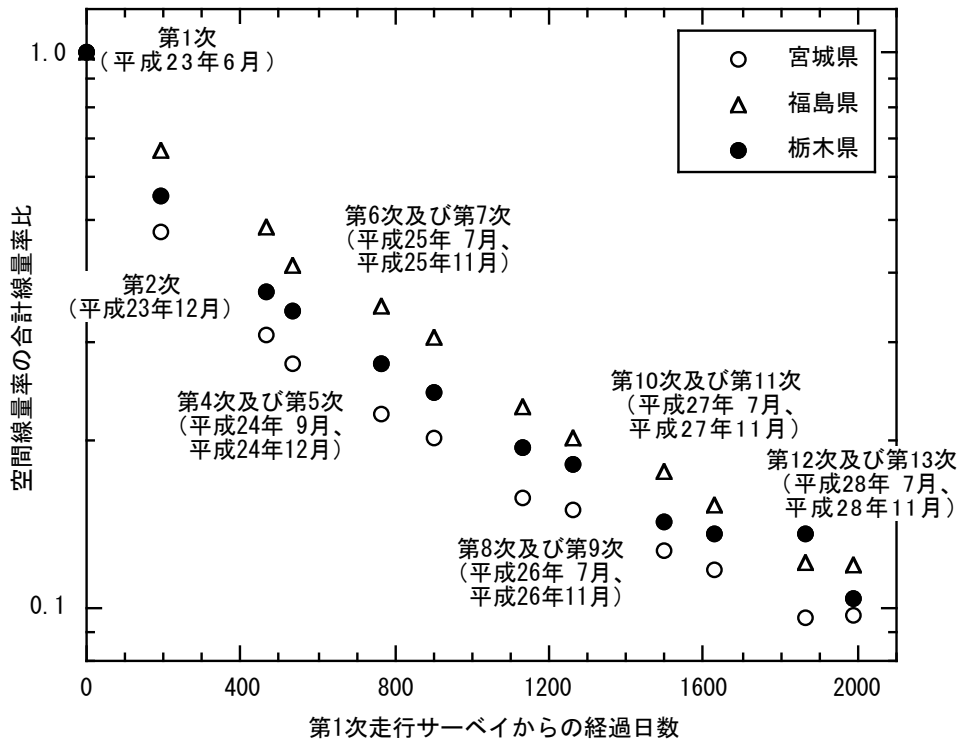


図-8 第1次走行サーベイに対する第2次以降の走行サーベイの各県内合計線量率比の経時変化 (測定データは自然ガンマ線によるバックグラウンドを含まない。)

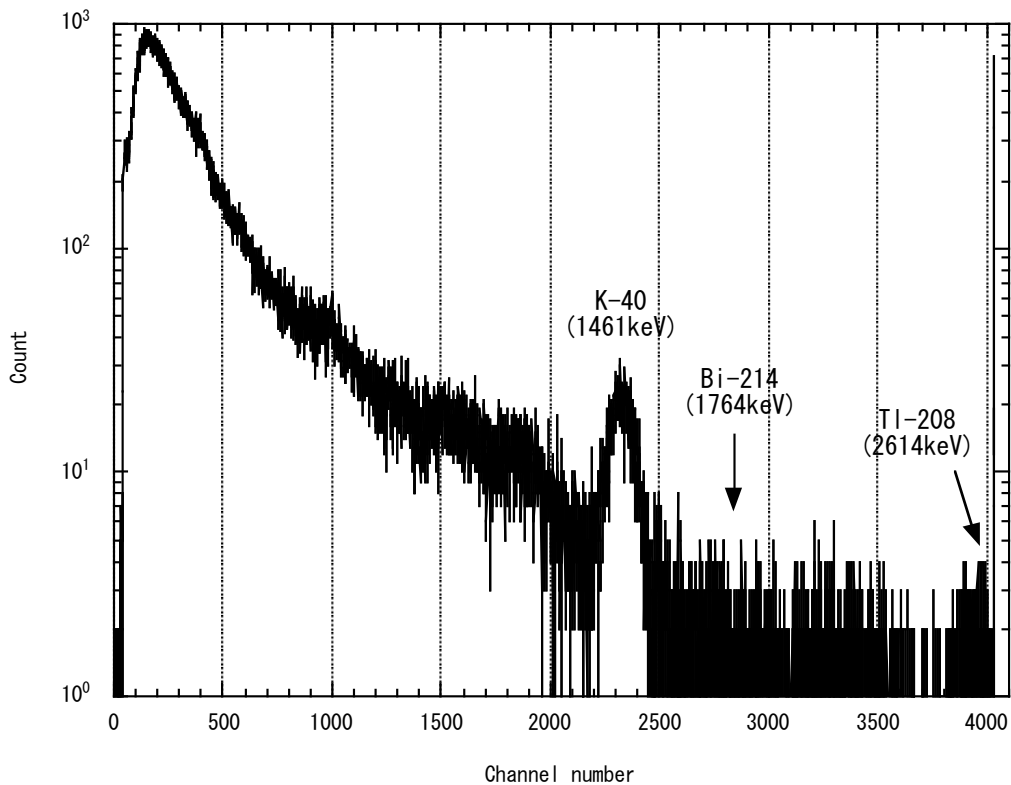
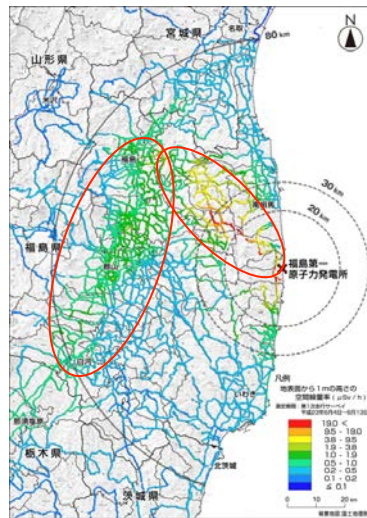
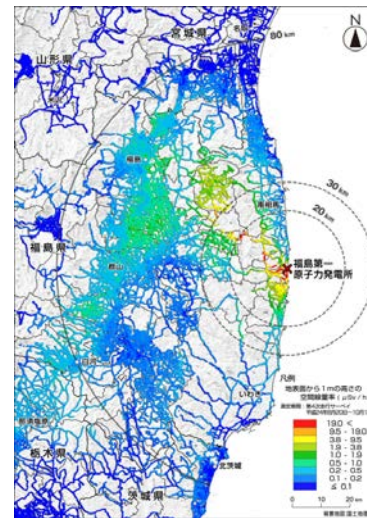


図-9 改良型 KURAMA-II によるガンマ線測定結果 (バックグラウンドレベル)

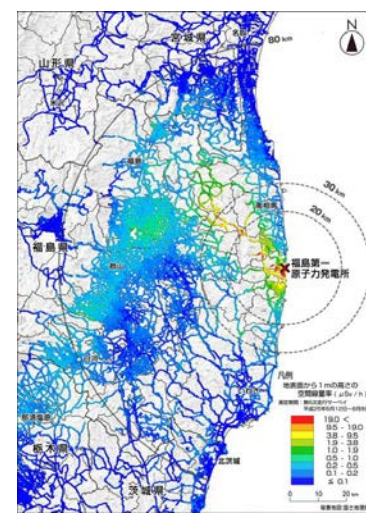
Appendix-1 走行サーベイ測定による空間線量率の変化（主に福島第一原発から 80 km 圏内）



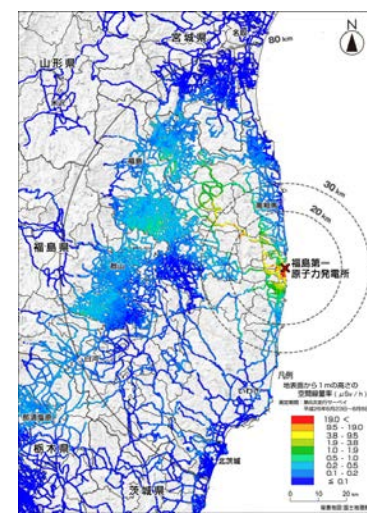
第 1 次走行サーベイ (H23.6、
KURAMA-I)



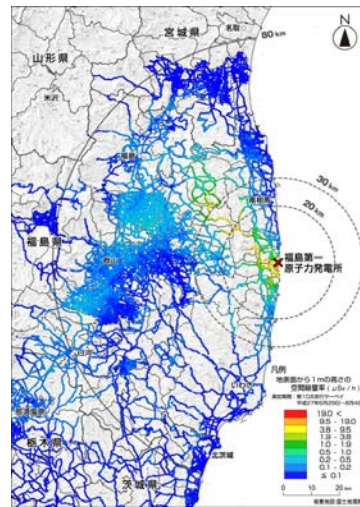
第 4 次走行サーベイ (H24.9、
KURAMA-II)



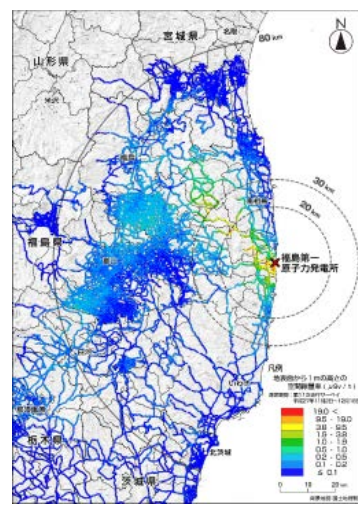
第 6 次走行サーベイ (H25.7、
KURAMA-II)



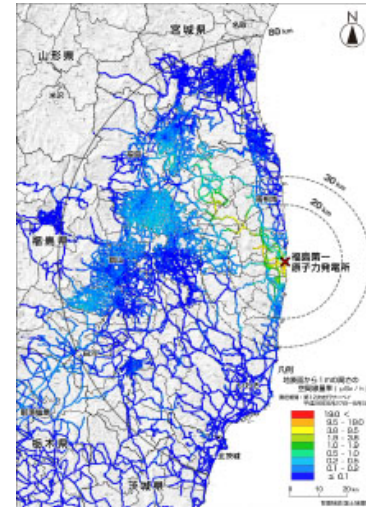
第 8 次走行サーベイ (H26.7、
KURAMA-II)



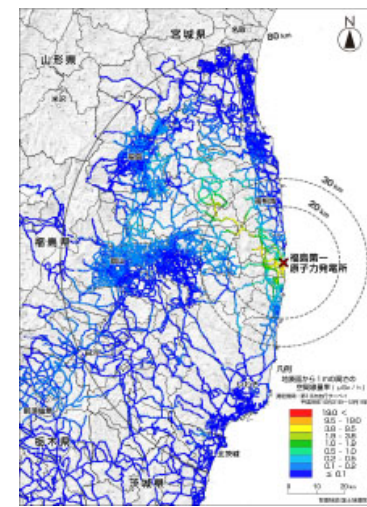
第 10 次走行サーベイ (H27.7、
KURAMA-II)



第 11 次走行サーベイ (H27.11、
KURAMA-II)



第 12 次走行サーベイ (H28.7、
KURAMA-II)



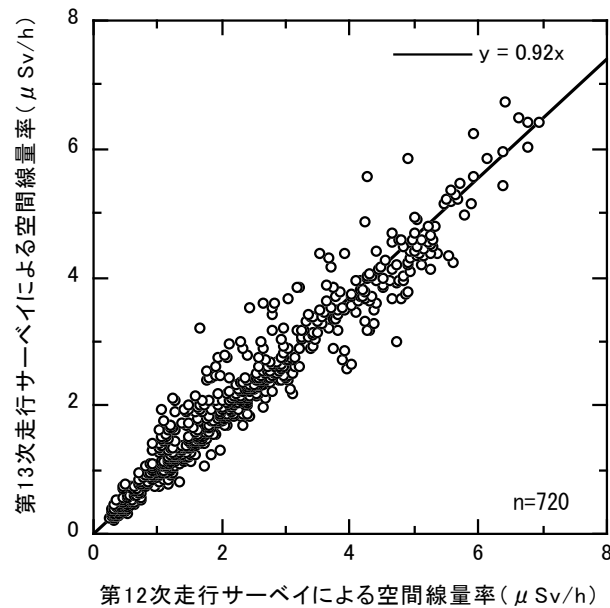
第 13 次走行サーベイ (H28.11、
KURAMA-II)

Appendix-2

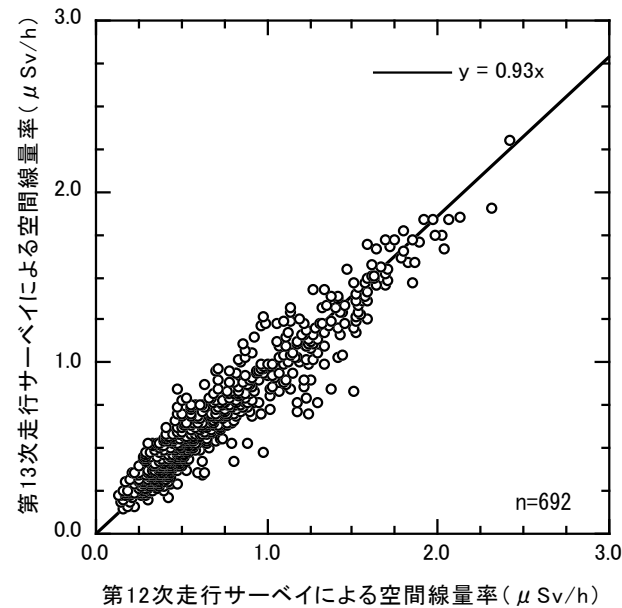
第12次走行サーベイと第13次走行サーベイで共通するメッシュ（ただし、福島第一原発から80km圏内）での空間線量率の相関を県及び地域ごとに調べた。以下に空間線量率の高い順に福島県（帰還困難区域、居住制限区域、避難指示解除準備区域、域避難指示区域外）、宮城県、茨城県について図示する。ただし、測定データは自然ガンマ線によるバックグラウンドを含んでいる。

第12次走行サーベイから第13次走行サーベイの間の放射性セシウムの物理減衰は、0.96である。帰還困難区域や居住制限区域では物理減衰より空間線量率の減少が速いが、避難指示解除準備区域や宮城県では物理減衰と同じ程度であることが分かる。避難指示区域外の福島県に含まれるメッシュは80km圏内全体の80%以上を占め、避難指示区域外の福島県での変化傾向が80km圏内で支配的であるが、避難指示区域外の福島県では回帰直線の傾きが1.0に近いので、図-3では第12次走行サーベイから第13次走行サーベイの間で80km圏内平均の空間線量率の変化はごく小さい。

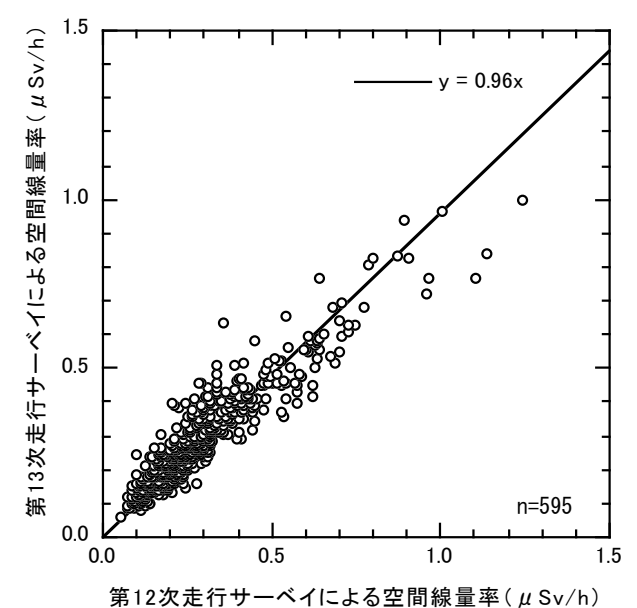
空間線量率が低いほどバックグラウンドによる空間線量率の占める割合が大きくなるため回帰直線の傾きも1.0に近づくのは自明だが、図(d)をみると、避難指示区域外（福島県）の空間線量率が $0.5\mu\text{Sv/h}$ 付近の比較的高い（バックグラウンドの寄与が10%程度）地点であっても空間線量率の減少がほとんどないことが見受けられる。



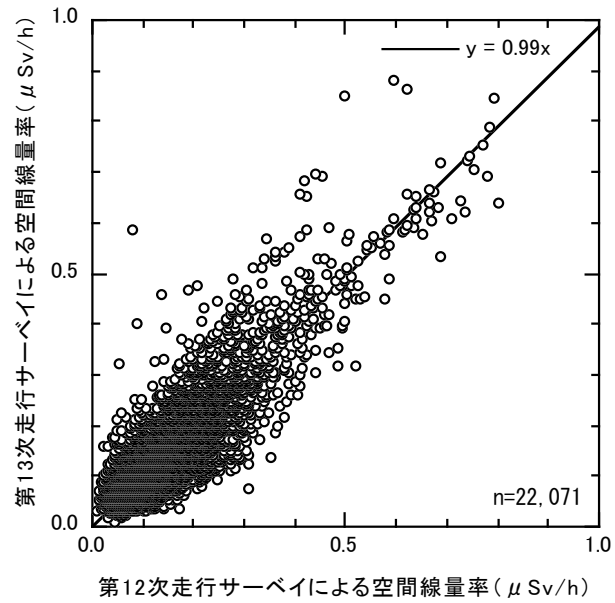
(a) 帰還困難区域



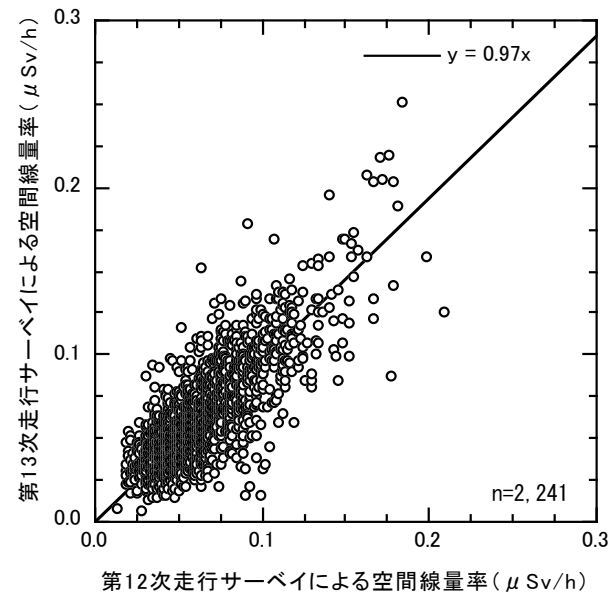
(b) 居住制限区域



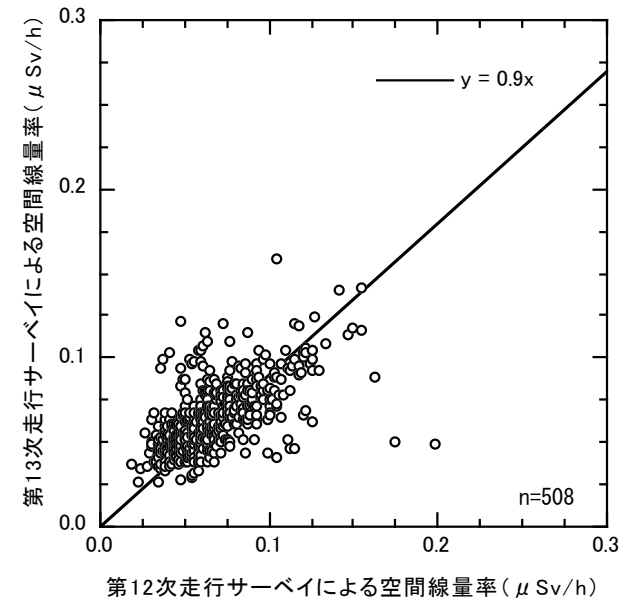
(c) 避難指示解除準備区域



(d) 避難指示区域外の福島県 (80km 圏内)



(e) 宮城県 (80km 圏内)



(f) 茨城県 (80km 圏内)