

歩行サーベイによる生活経路における空間線量率の測定

山本 英明、斎藤 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セシウムの環境中における 2 次元的な分布状況を詳細に調査し、この結果を空間線量率分布の予測モデル構築に役立てるため、KURAMA-II システムを背負って歩行しながら空間線量率を測定する。

平成 24 年度までの調査結果から、走行サーベイにより測定した道路上の空間線量率の経時的な減少傾向は、人為的なかく乱の少ない平坦な開かれた土地においてサーベイメータで測定した空間線量率（平坦地上定点における空間線量率）の減少傾向に比べて顕著に大きいことが明らかになっているが、人間が生活する環境の空間線量率は、走行サーベイの測定値あるいは平坦地上定点における測定値のどちらにより近いのかを検討することを目的とし、平成 25 年度から調査を開始した。

様々な土地利用状況が混在する平坦地と道路の間の地域においては、その状況に応じて空間線量率が様々に変化するため、自動車が走行できない地域も含めて広範囲の測定が可能な歩行サーベイにより走行サーベイや平坦地上定点における測定結果を補完して、生活経路における空間線量率分布の特徴を明らかにすることを目指した。

2. 調査内容

(1) 調査期間

前期調査：平成 27 年 6 月 29 日～8 月 5 日

後期調査：平成 27 年 10 月 26 日～12 月 4 日

(2) 調査地域

福島第一原発から 80 km 圏の地域を 1 km×1 km に分割したメッシュで、走行サーベイの測定ルートが含まれていて平坦地上定点の空間線量率の測定が行われているものの中から、土地利用状況、空間線量率範囲、地域の代表性を考慮して調査対象のメッシュ（調査箇所）を選んだ。調査箇所数は 539 箇所であった。また、非可住区域の森林（ALOS 土地利用分類で落葉樹又は常緑樹に分類されている場所）10 箇所を測定を行った。（図-1）

(3) 調査内容の詳細

KURAMA-II システムとバッテリーを測定者が背負い、歩きながら 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。測定者が KURAMA-II システムを背負うことにより、空間線量率の測定高さは概ね地上 1 m 高さになる。（図-2）

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り、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 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。また、測定値の統計的なばらつきを低減させると同時に、空間線量率の 2 次元的な分布が詳細に把握できるように、歩行地域を 20 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。

3. 結果と考察

歩行サーベイにおいては、自動車の入り込めない住宅周辺や樹木の間、田畑の周辺などの場所、人の往来、清掃、農耕などの生活・産業活動の行われる場所において測定を行った。したがって、歩行サーベイによる空間線量率の測定は住民が生活時間の多くを費やす生活環境における空間線量率の様態に比較的近いと考えられる。このことを前提に、走行サーベイによる空間線量率の測定結果または平坦地上定点の空間線量率の測定結果と歩行サーベイによる測定結果とを比較して、これら 3 者の関係を把握し、生活環境における空間線量率推定のための基礎となる情報を得た。

(1) 走行サーベイの測定結果と歩行サーベイの測定結果との比較

道路上の空間線量率と歩行サーベイを行った場所の空間線量率の関係を調べるために、走行サーベイの測定結果と歩行サーベイの測定結果とを比較した。走行サーベイの測定結果を平均する 100 m メッシュと、歩行サーベイの測定結果を平均する 20 m メッシュとが重なる場合にそれらの空間線量率を比較した。該当する 20 m メッシュのデータ数は、前期調査時は $n = 99,539$ 、後期調査時は $n = 86,391$ であった。なお、走行サーベイの結果は車外の地上 1 m の値に換算した値である。

① 相関図・回帰直線による比較

歩行サーベイと、同じ時期に行われた走行サーベイの空間線量率の比較対象データ間の相関図を作成し、回帰直線の比較を行った。比較対象データ数の 95% 以上は $1.0 \mu\text{Sv/h}$ 以下であったので、 $1.0 \mu\text{Sv/h}$ 以下のデータのみでも相関図を作成した。測定されたすべての線量率領域及び $1.0 \mu\text{Sv/h}$ 以下の線量率領域の相関図を図-3 に示す。なお、自然放射線の寄与（バックグラウンド）は含んでいる。測定されたすべての線量率領域で比較すると、歩行サーベイでは、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 1.06 倍大きい値を示すことがわかる。一方、 $1.0 \mu\text{Sv/h}$ 以下の線量率領域での比較では 1.20 倍となった。

調査箇所が、原子力災害対策本部が設定した避難指示区域（避難指示解除準備区域、居住制限区域及び帰還困難区域）の内側に位置するか、あるいは、外側に位置するかによる回帰直線の傾きの特徴を解析した。なお、避難指示区域内外の分類は、平成 27 年 9 月 5 日時点のものを使う。表-1 に示すように、全線量率域では避難指示区域内では回帰直線の傾きが避難指示区域外よりも 10% 程度小さくなっており、避難指示区域内のほうが、道路上と周囲との空間線量率の差が小さいことがわかる。

また、前期調査及び後期調査について比較した。表-1 に示すように、回帰直線の傾きは、前期調査における傾きに比べて後期調査の方が 10% 程度大きくなった。平成 26 年度も同様の傾向が観察されたが、平成 25 年度は反対の傾向がみられており、季節的な変動を示したもののなかどうか現時点では明らかではない。

同様に、土地利用状況ごとの測定結果について、測定値の点数として約 1,000 点を越えるものが得られた土地利用状況（「水域」と「裸地」以外）のデータを対象に比較した。前期調査及び後期調査について、全線量率領域と $1.0 \mu\text{Sv/h}$ 以下の線量率領域での相関の回帰直線の傾きを図-4 に示す。回帰直線の傾きは、都市以外の地域では全般に、 $1.0 \mu\text{Sv/h}$ 以下の線量率領域では全体に比べて比率が高い、すなわち道路上と周囲の空間線量率の差が大きい傾向が見られた。

② 合計線量率による比較

空間線量率の歩行サーベイによる測定値の合計値（以下「合計線量率」という。）と走

行サーベイによる合計線量率の比率（以下「合計線量率比」という。）による比較を行った。合計線量率は測定数で割れば平均線量率になるため、今回のように測定箇所数で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。解析の例として、測定されたすべての線量率領域についての合計線量率の比較結果を図-3 の上部に示す。歩行サーベイと走行サーベイの合計線量率比は 1.14 であり、全地域に対する回帰直線の傾き 1.06 と $1.0 \mu\text{Sv/h}$ 以下の線量率域に対する回帰直線の傾き 1.20 の中間の値を示した。

表-2 に示すように、避難指示区域内外の差異に関しては、避難指示区域に含まれる調査箇所に係る比率の方が区域外に係る比率より小さく、避難指示区域内外どちらも後期調査の比率が前期調査の比率より大きかった。

③ 測定値の比率の頻度分布による比較

走行サーベイの測定結果に対する歩行サーベイの測定結果の比率の頻度分布を解析した。累積頻度は走行サーベイの測定値に対する歩行サーベイの測定値の比率の分布を低い方から積分した分布であり、比率がどのようにばらついているかを定量的に理解するための指標となる。比率の中央値（50%）に対するばらつきの程度を解析するために、累積頻度の割合が 10% 及び 90% となる比率も求め、その結果を表-3 に示す。また、表-3 には避難指示区域内外の差異に関する解析結果も示した。

走行サーベイに対する歩行サーベイの線量率比の頻度分布を見ると、10% 値が 0.8、90% 値が 1.8 と広い分布を示しており、走行サーベイの 100 m メッシュ内でも場所により空間線量率が大きく変動していることが確認された。また、どのケースについても、比率の中央値は合計線量率比に近い値となった。すなわち、避難指示区域内では前期測定が 1.09、後期測定が 1.19、避難指示区域外では前期測定が 1.11、後期測定が 1.24 となった。

土地利用状況の区分ごとの差異に関しては、約 1,000 点を超える測定値が得られた土地利用区分（「水域」と「裸地」以外）について解析した。前期調査及び後期調査について得られた累積頻度の割合が 10%、50% 及び 90% となる歩行サーベイ／走行サーベイの比率を表-4 に示す。土地利用状況による差は大きくないが、「落葉樹」と「常緑樹」に区分される土地利用状況では他の土地利用状況に比べて低い比率を示す傾向が見られた。

(2) 平坦地上定点の空間線量率測定結果と歩行サーベイの測定結果との比較

この比較においては、土地利用状況区分や避難指示区域内外による解析を行うのには十分なデータ数が得られていないので、これらの区分によらない解析のみを行った。

① 相関図・回帰直線による比較

平坦地上定点の空間線量率の測定結果と、同じ時期に行われた歩行サーベイの測定結果の相関図を作成し比較した。定点測定箇所との間の距離が 20 m 以内、100 m 以内及び 200 m 以内となる歩行サーベイの 20 m メッシュの平均空間線量率を平坦地上定点測定の空間線量率測定値と比較した。比較対象データ数の約 90% 以上は $1.0 \mu\text{Sv/h}$ 以下であったので、 $1.0 \mu\text{Sv/h}$ 以下のデータのみでも相関図を作成した。相関図の例として、図-5 に定点測定箇所との間の距離が 20 m 以内のものを示す。

表-5 に示すように、全線量率領域での回帰直線の傾きは、平坦地上定点測定の箇所との間の距離が 20 m 以内では 0.66、100 m 以内では 0.60、200 m 以内では 0.61 となった。一方、 $1.0 \mu\text{Sv/h}$ 以下の線量率領域では、回帰直線の傾きは、距離が 20 m 以内では 0.85、100 m 以内では 0.87、200 m 以内では 0.88 となった。3 種類の比較範囲による差はあま

りなかった。空間線量率が高いほど平坦地上定点測定との差が大きく、走行サーベイとの関係と異なる傾向を示した。

② 合計線量率による比較

平坦地上定点測定と歩行サーベイによる合計線量率を比較した。平坦地上定点測定箇所との間の距離が20 m以内、100 m以内及び200 m以内となる歩行サーベイの20 mメッシュの合計線量率を平坦地上定点測定の合計線量率と比較した。

表-5に示すように、合計線量率比(歩行サーベイ/平坦地上定点測定)は、最小0.72、最大0.74となった。

(3) 走行サーベイ、平坦地上定点、歩行サーベイによる空間線量率の測定結果の比較

表-1、表-2及び表-3(累積頻度の中央値)に示すように、歩行サーベイによる生活経路の空間線量率測定値と走行サーベイによる道路上の空間線量率測定値の比(歩行サーベイ/走行サーベイ)は、1.0から1.3程度となったが、前期は1.1程度の、後期は1.2程度の値が多かった。また、表-5に示すように、平坦地上定点において行ったサーベイメータによる空間線量率測定値との比(歩行サーベイ/平坦地上定点測定)は、比較方法により0.6から0.9程度となったが、合計線量率比では0.7程度の値が得られた。

(4) 経時変化

平成25年度からの経時変化として、歩行サーベイによる空間線量率の測定結果の経時変化、走行サーベイと歩行サーベイの関係の経時変化、及び平坦地上定点の空間線量率測定と歩行サーベイの関係の経時変化について調べた。

なお、平成25年度と平成26、27年度では歩行サーベイの測定地点数に違いがあるので、これを表-6にまとめる。

① 歩行サーベイによる空間線量率の測定結果の経時変化

平成25年度から6回実施した歩行サーベイの調査結果を基に、空間線量率の経時変化を調査した。6回を通じて測定を行った114箇所における合計線量率を計算し、平成25年6月調査の値に対する比を計算した。平成25年6月の調査から平成27年11月の調査まで、約29ヶ月が経過する間に、歩行サーベイを行った場所の空間線量率は、平成25年6月に比べて約49%に減衰した。この間、放射性セシウムの物理減衰によって空間線量率は約58%になると計算されるので、物理減衰よりも速い空間線量率の減少が観測された。(図-6)。

② 走行サーベイとの関係の経時変化

表-7に、合計線量率比(歩行サーベイ/走行サーベイ)を示す。避難指示区域内で1.02~1.16、避難指示区域外で1.14~1.33となった。

表-8に、走行サーベイの測定結果に対する歩行サーベイの測定結果の比率の頻度分布を解析した結果を示す。表中の値は、累積頻度の中央値(50%)となる比率で、避難指示区域内で1.07~1.22、避難指示区域外で1.11~1.27となった。

歩行サーベイと走行サーベイの空間線量率比に経時変化はあまり見られず、両者の空間線量率の減少率はほぼ同じと考えられる。

③ 平坦地上定点の空間線量率測定との関係の経時変化

表-9に、合計線量率比(歩行サーベイ/平坦地上定点測定)を示す。

歩行サーベイと平坦地上定点測定の間線量率比の経時変化から、平成 25 年度以降、歩行サーベイの間線量率が平坦地定点測定の間線量率に比べて少し速く減少する傾向がうかがえる。

(5) 非可住区域の森林の間線量率の測定結果

走行サーベイと平坦地上定点測定を実施していない区画 10 箇所で行歩行サーベイを実施し、間線量率の累積頻度を調べた。これらは全て ALOS 土地利用分類で落葉樹又は常緑樹に分類されており、以下、この 10 箇所を「非可住区域の森林」という。累積頻度が 10%、50%及び 90%となる間線量率を表-10 に示す。表-10 には併せて、同じ時期に歩行サーベイを実施した 539 箇所のデータも示した。この 539 箇所については、ALOS 土地利用分類で落葉樹又は常緑樹に分類されている箇所（以下「可住区域の森林」という。）、及び ALOS 土地利用分類で都市、水田、畑地、草地、水域、裸地に分類されている箇所（以下「可住区域の森林以外」という。）に分けて示す。

非可住区域の森林の間線量率の測定結果は、可住区域の森林及び可住区域の森林以外の測定結果より概して高い値を示した。平成 26 年度調査の報告書において森林中の間線量率が樹種によって異なる傾向を示すことが示されている¹ が、このことと森林における人間活動が間線量率に与える影響を併せて考察することにより森林部の間線量率の状況が推定できると考えられる。

4. まとめ

福島第一原発から 80 km 圏内を中心に平成 27 年 6 月から 8 月及び 10 月から 12 月の 2 回にわたり KURAMA-II システムを用いて間線量率の測定を行い、生活経路における間線量率分布の特徴を検討した。

本調査全体を通じては、3 つの異なる手法でそれぞれ異なる環境の間線量率を測定している。サーベイメータでは人為的なく乱の少ない平坦な開かれた土地（平坦地上定点）において、また、走行サーベイでは道路上の間線量率を測定した。これら 2 つの測定環境の近傍で行った歩行サーベイは、生活経路に沿ったものであり、平坦地上定点や道路上の測定値よりも住民の生活環境における間線量率をより良く代表していると考えられる。3 つの測定方法による広域で平均した間線量率測定値の大小関係は、大きい順に、平坦地上定点測定、歩行サーベイ、走行サーベイとなった。歩行サーベイの間線量率測定値と走行サーベイによる道路上の間線量率測定値との比（歩行サーベイ／走行サーベイ）は、比較方法により 1.0 から 1.3 程度となった。また、平坦地上定点において行ったサーベイメータによる間線量率測定値との比（歩行サーベイ／平坦地上定点測定）は、0.6 から 0.9 程度となった。それぞれ異なる手法によって得られた測定値による比較であり、統計的な観点からの考察が必要ではあるが、これまでのところ、これらの比率から見て、歩行サーベイ結果、すなわち生活環境における間線量率は、走行サーベイ結果より最大およそ 30%大きく、また、平坦地上定点測定結果より最大およそ 40%小さいとの結果が得られた。

ただし、走行サーベイに対する歩行サーベイの間線量率比の頻度分布を見ると、そのばらつきは大きく、走行サーベイを実施した道路周辺的生活経路では、間線量率が大きく変動している箇所がある。

平成 25 年度からの測定結果との比較により間線量率の経時変化の特徴を調べた。平成

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. 108, (平成 27 年 3 月)。

25年6月の調査から平成27年11月の調査までの約29ヶ月間に、歩行サーベイを行った場所の空間線量率は、平成25年6月に比べて約49%に減衰し、放射性セシウムの物理減衰よりも速い空間線量率の減少が観測された。

表-1 空間線量率回帰直線の傾き（歩行サーベイ／走行サーベイ）

区域	避難指示区域内			避難指示区域外		
	全期間 (n=19,678)	前期 (n=9,489)	後期 (n=10,189)	全期間 (n=166,252)	前期 (n=90,050)	後期 (n=76,202)
全線量率域	1.06	1.03	1.11	1.15	1.10	1.22
1.0 μ Sv/h 以下の線量 率領域	1.28	1.23	1.33	1.15	1.10	1.22

表-2 合計線量率比（歩行サーベイ／走行サーベイ）

区域	避難指示区域内		避難指示区域外	
	前期 (n=9,489)	後期 (n=10,189)	前期 (n=90,050)	後期 (n=76,202)
合計線量率比	1.08	1.16	1.14	1.26

表-3 空間線量率測定値の比較（歩行サーベイ／走行サーベイの頻度分布）

累積頻度	避難指示区域内		避難指示区域外	
	前期	後期	前期	後期
10%	0.83	0.88	0.77	0.82
50%	1.09	1.19	1.11	1.24
90%	1.63	1.84	1.67	1.86

表-4 土地利用状況ごとの空間線量率測定値の比率（歩行サーベイ／走行サーベイ）

<前期調査>

累積 頻度	全体 (n=99,539)	都市 (n=29,401)	水田 (n=26,505)	畑地 (n=20,514)	草地 (n=4,103)	落葉樹 (n=12,386)	常緑樹 (n=5,738)
10%	0.77	0.77	0.78	0.78	0.79	0.76	0.77
50%	1.11	1.12	1.12	1.11	1.13	1.06	1.08
90%	1.67	1.75	1.69	1.65	1.68	1.52	1.54

<後期調査>

累積 頻度	全体 (n=86,391)	都市 (n=29,897)	水田 (n=20,260)	畑地 (n=16,657)	草地 (n=3,480)	落葉樹 (n=10,095)	常緑樹 (n=5,171)
10%	0.83	0.79	0.85	0.86	0.87	0.85	0.85
50%	1.23	1.21	1.27	1.26	1.25	1.20	1.20
90%	1.86	1.86	1.94	1.89	1.80	1.73	1.74

表-5 歩行サーベイ／平坦地上定点測定 of 比率

比較の方法		定点から 20 m 以内の歩行	定点から 100 m 以内の歩行	定点から 200 m 以内の歩行
①相関図 ・回帰直線	全線量率域	0.66	0.60	0.61
	1.0 μ Sv/h 以下	0.85	0.87	0.88
②合計値		0.72	0.73	0.74

表-6 歩行サーベイの測定箇所の数（1 km メッシュ）

	平成 25 年度		平成 26 年度		平成 27 年度	
	前期	後期	前期	後期	前期	後期
避難指示区域内	4	4	68	68	68	68
避難指示区域外	257	257	471	471	471	471
合計	261	261	539	539	539	539

※ 平成 25 年度前期から平成 27 年度後期までの共通の測定箇所数は、避難指示区域内が 4 箇所、避難指示区域外が 137 箇所。平成 26 年度前期から平成 27 年度後期までの 539 箇所は全て同じ箇所。

表-7 合計線量率比（歩行サーベイ／走行サーベイ）

	平成 25 年度		平成 26 年度		平成 27 年度	
	前期	後期	前期	後期	前期	後期
避難指示区域内	1.16 (n=722)	1.02 (n=601)	1.07 (n=10,894)	1.14 (n=8,410)	1.08 (n=9,489)	1.16 (n=10,189)
避難指示区域外	1.33 (n=61,806)	1.28 (n=66,522)	1.19 (n=101,062)	1.30 (n=108,429)	1.14 (n=90,050)	1.26 (n=76,202)

※ n：歩行サーベイ 20m メッシュのデータ数

表-8 空間線量率測定値の比率（歩行サーベイ／走行サーベイの累積頻度 50%）

	平成 25 年度		平成 26 年度		平成 27 年度	
	前期	後期	前期	後期	前期	後期
避難指示区域内	1.22 (n=722)	1.09 (n=601)	1.07 (n=10,894)	1.15 (n=8,410)	1.09 (n=9,489)	1.19 (n=10,189)
避難指示区域外	1.27 (n=61,806)	1.24 (n=66,522)	1.18 (n=101,062)	1.26 (n=108,429)	1.11 (n=90,050)	1.24 (n=76,202)

※ n：歩行サーベイ 20 m メッシュのデータ数

表-9 合計線量率比（歩行サーベイ／平坦地上定点測定）

	平成 25 年度		平成 26 年度		平成 27 年度	
	前期	後期	前期	後期	前期	後期
定点から 20 m 以内	0.86 (n=234)	0.88 (n=262)	0.80 (n=784)	0.77 (n=784)	0.72 (n=842)	
定点から 100 m 以内	0.90 (n=343)	0.89 (n=405)	0.80 (n=1,163)	0.79 (n=1,145)	0.73 (n=1,254)	
定点から 200 m 以内	0.93 (n=422)	0.91 (n=479)	0.82 (n=1,267)	0.82 (n=1,263)	0.74 (n=1,336)	

※ n：歩行サーベイ 20 m メッシュのデータ数

表-10 森林（落葉樹又は常緑樹）の歩行サーベイによる空間線量率測定結果

単位： $\mu\text{Sv/h}$

累積頻度	非可住区域の森林 (n=1,691)	可住区域の森林 (n=34,094)	可住区域の森林以外 (n=154,768)
10%	0.089	0.073	0.056
50%	0.26	0.13	0.11
90%	0.83	0.68	0.34

※ n：歩行サーベイ 20 m メッシュのデータ数

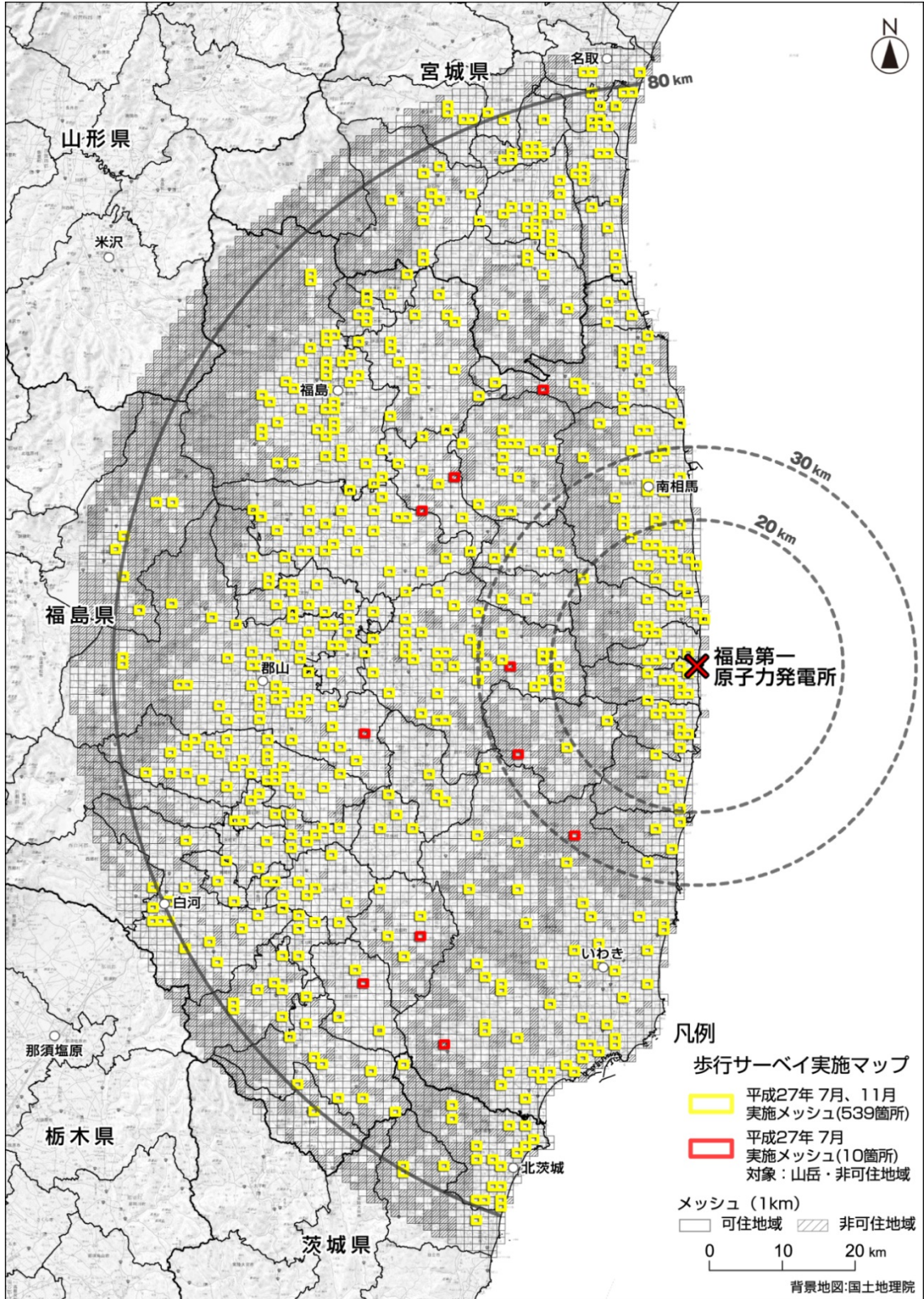


図-1 平成27年度調査における歩行サーベイによる空間線量率の測定箇所(メッシュ)
(赤枠は非可住区域の測定箇所(メッシュ))



図-2 歩行サーベイ測定の様子

合計線量率

歩行	走行	歩行/走行
67,054	58,741	1.14

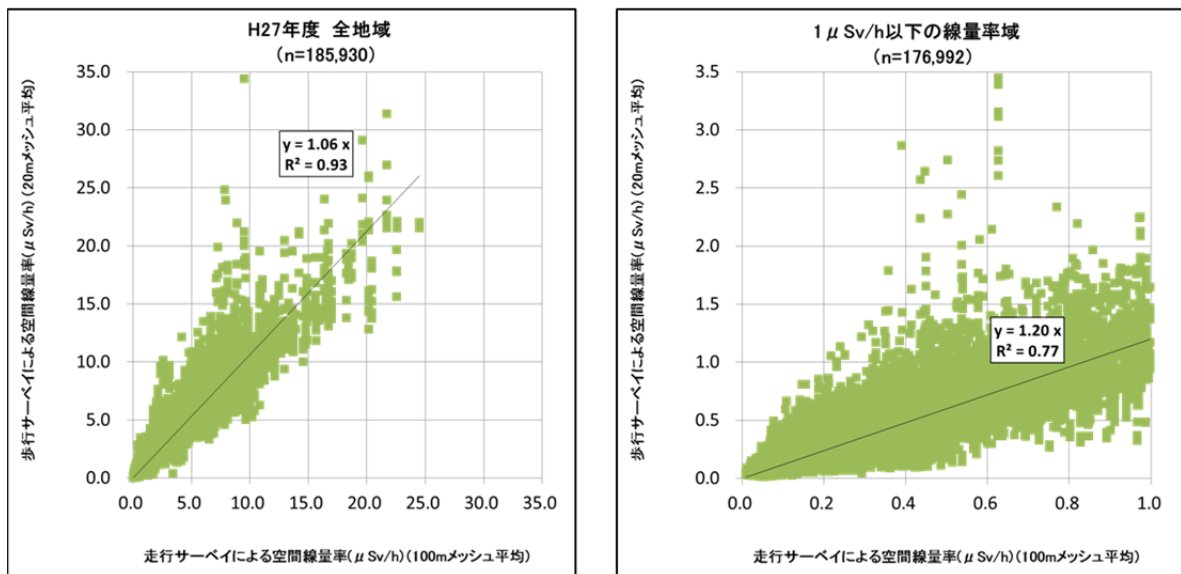
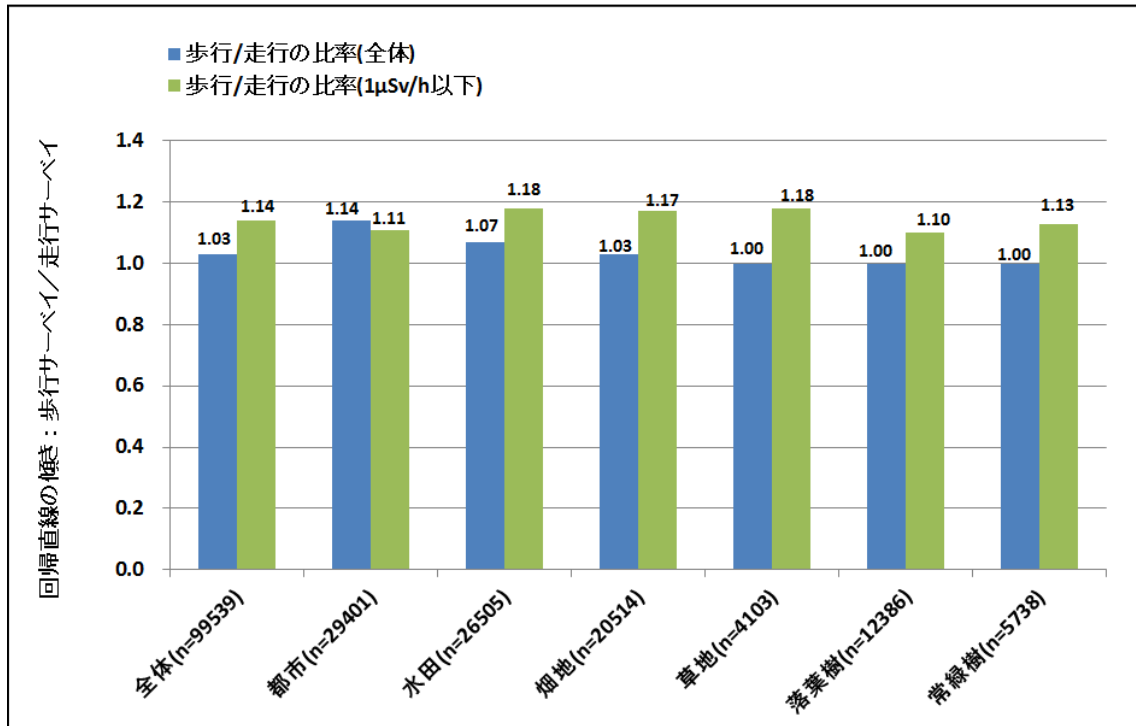


図-3 空間線量率測定結果の比較：歩行サーベイと走行サーベイ
(全期間・全地域)

【前期調査】



【後期調査】

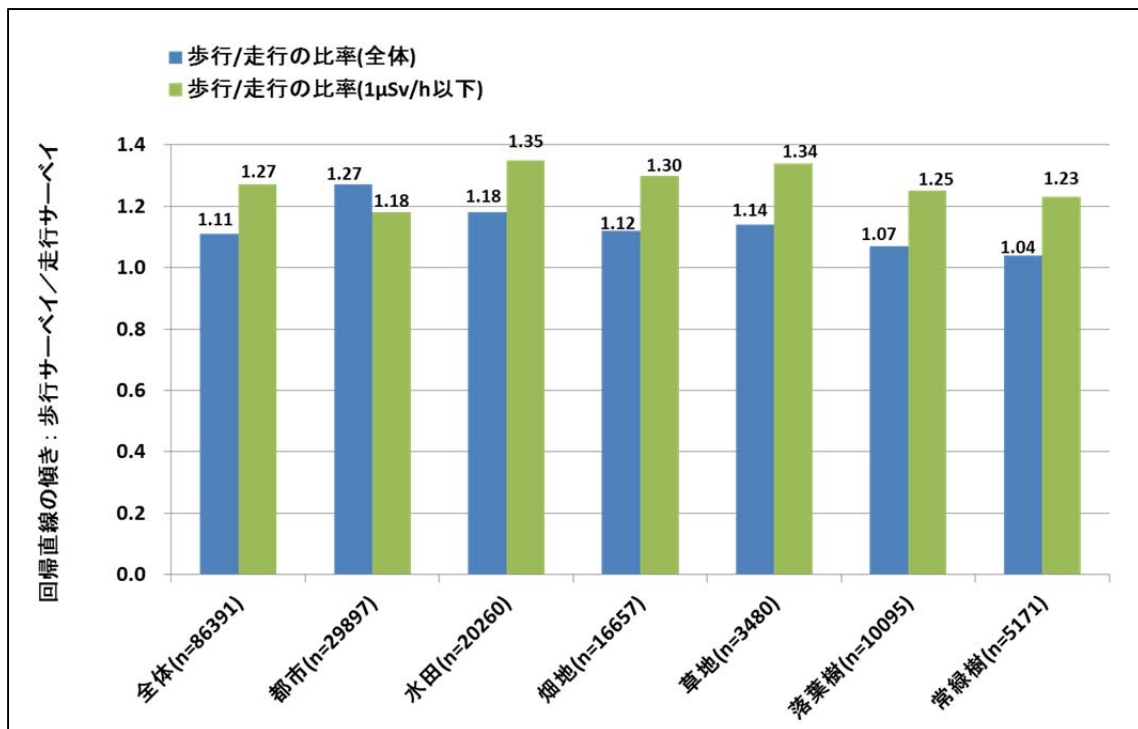


図-4 土地利用状況ごとの回帰直線の傾き（歩行サーベイ／走行サーベイ）

合計線量率

歩行	定点	歩行/定点
403.7	563.9	0.72

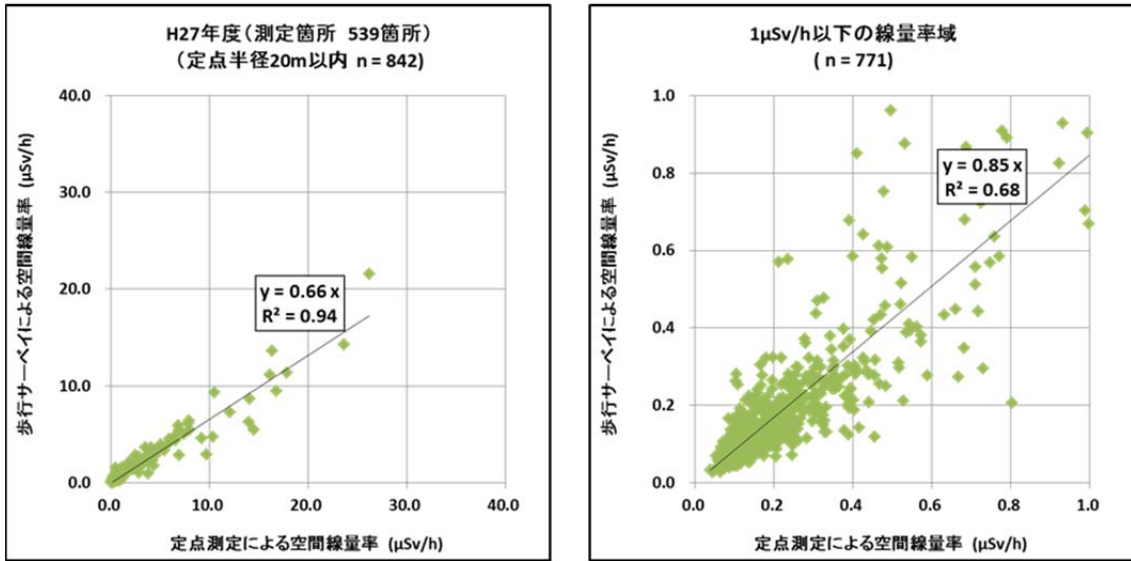


図-5 空間線量率測定結果の比較：歩行サーベイと定点測定
(定点測定から半径 20 m 以内)

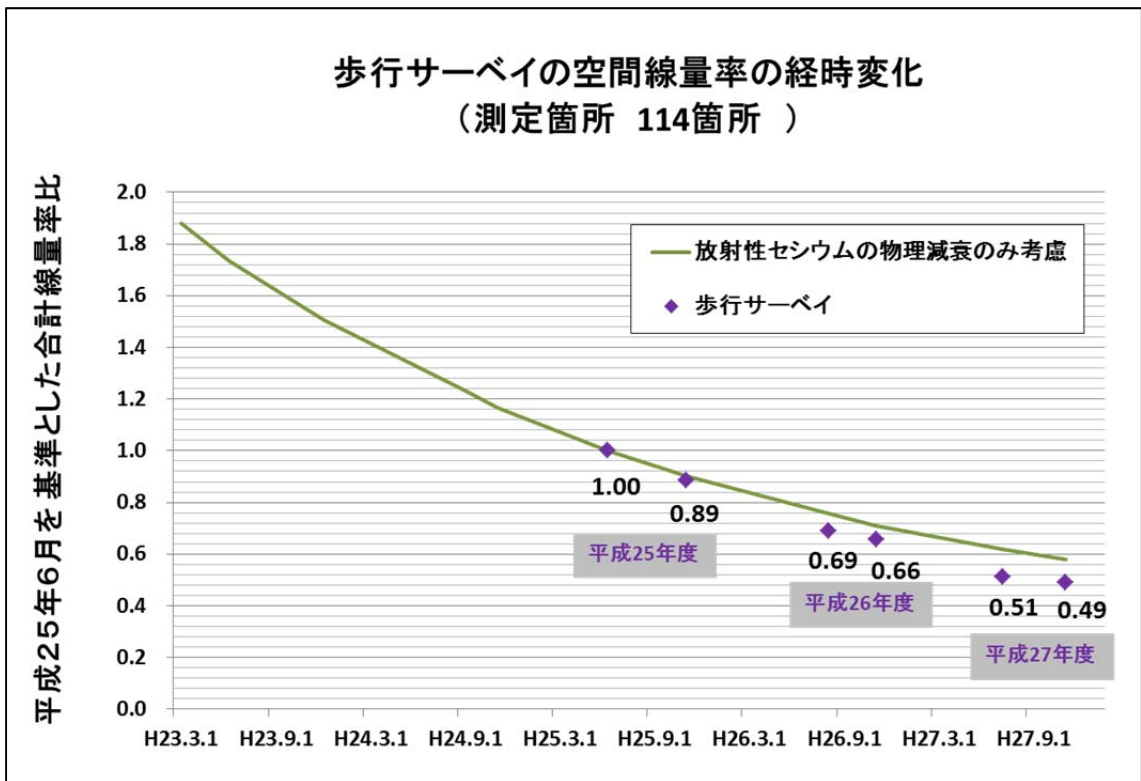


図-6 歩行サーベイの合計線量率の経時変化