2. 広域の空間線量率の分布測定

2.1. 調査目的

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沈着状況等を詳細に調査し、その変化傾向を把握するため、これまでの調査に引き続き同様の手法を用いて、空間線量率の測定を行った。多角的に空間線量率を評価するため、走行サーベイ、サーベイメータによる定点サーベイ、歩行サーベイ及び無人ヘリによる測定を実施している。ここでは、平成 30 年度調査における広域な地上での空間線量率測定である走行サーベイ、定点サーベイ及び歩行サーベイについて述べる。

走行サーベイでは、広範囲にわたり現状における空間線量率の分布状況を確認するとともに、過去の走行サーベイによる空間線量率の測定結果と現状での測定結果を比較・解析し変化傾向を把握することを目的としている。

定点サーベイでは、福島第一原発から 80 km 圏内（以下「80km 圏内」という。）を中心に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変化の特徴を調べることを目的としている。

歩行サーベイでは、道路と平坦地との間の自動車が走行できない地域も含めた詳細な測定により、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、住民が生活する環境（生活経路）に近い空間線量率分布の特徴を明らかにすること、空間線量率分布の統合マップ作成や詳細解析に役立てることを目的としている。

2.2. 調査手法

2.2.1. 走行サーベイ

KURAMA-II (小型 CsI(Tl)シンチレーション検出器と GPS が一体となった GPS 連動型放射線自動計測システム) [2] を自動車の後部座席の右側後方に設置し、3 秒ごとに空間線量率を測定した。車内における空間線量率測定値を車外の空間線量率に換算するための補正係数 [2] 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ため、測定期間中のセシウム 134 及び 137（以下、放射性セシウムとする。）の物理的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なわず、測定した日の測定結果をそのまま使用した。

測定は年 2 回とし、平成 26 年度までの調査結果を基に空間線量率が 0.2 μSv/h 以上の比較的空間線量率が高い地域の主要幹線道路について、80 km 圏内に含まれる福島県及びその周辺の地域について 1 回、岩手県から千葉県までの 8 県を含む広域について 1 回実施した。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の測定を 1 回実施した。測定期間及び測定エリア等について表 2-1 に示す。

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基に、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空間線量率の値を平均してメッシュの代表値とした。その際、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。

2.2.2. 定点サーベイ

校正履歴の明確な信頼性の高い NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータ（日立製作所製 TCS-172B）を使用して、地面から 1 m 高さの空間線量率を測定した。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た。

測定期間及び測定エリア等について表 2-1 に示す。80 km 圏内の地域を 1 km×1 km のメッシュ（以下「1 km メッシュ」という。）に分割し、福島第一原発事故以前に人が居住していなかった地域（非可住区域）を除く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測定箇所数は 6,549 箇所であった（図 2-1 参照)。

2.2.3. 歩行サーベイ

KURAMA- II 又は KURAMA-m[1]システムとバッテリーを測定者が背負い（空間線量率の測定高さは概ね地上 1 m)、歩きながら空間線量率データ及び位置情報を収集した（図 2-2 参照)。走行サーベイと同様の理由により、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。

測定期間及び測定エリア等について表 2-1 に示す。80 km 圏内の 1 km メッシュで、走行サーベイの測定ルートが含まれていて定点サーベイ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（測定箇所）600 箇所を選んだ（図 2-3 参照)。

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、測定箇所（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空間線量率の値を平均してメッシュの代表値とした。

[1] 歩行サーベイを主な用途に開発された携帯性に優れた KURAMA であり、KURAMA-II と同種の CsI(Tl)シンチレーション検出器を使用する。

表 2-1 各測定手法における測定期間及び測定エリア

測定手法	走行サーベイ 第16回	走行サーベイ 第17回		定点サーベイ	歩行サーベイ
測定期間	H30/7/30 ～8/24	H30/11/1 ～11/30	H30/10/22 ～12/5	H30/9/13 ～10/26	H30/11/1 ～12/5
実施主体	原子力機構	原子力機構	自治体	原子力機構	原子力機構
測定エリア	福島第一原発から80km 圏内*1	8 県*2	8 県*2	福島第一原発から 80 km 圏内	福島第一原発から 80 km 圏内
測定距離又は測定点数	8,156 km	17,325 km	28,053 km	実績 6,549 点 中止 39 点	600 箇所（1 km メッシュ）

*1 宮城県、福島県、茨城県

*2 岩手県、宮城県、福島県、茨城県、栃木県、群馬県、埼玉県、千葉県

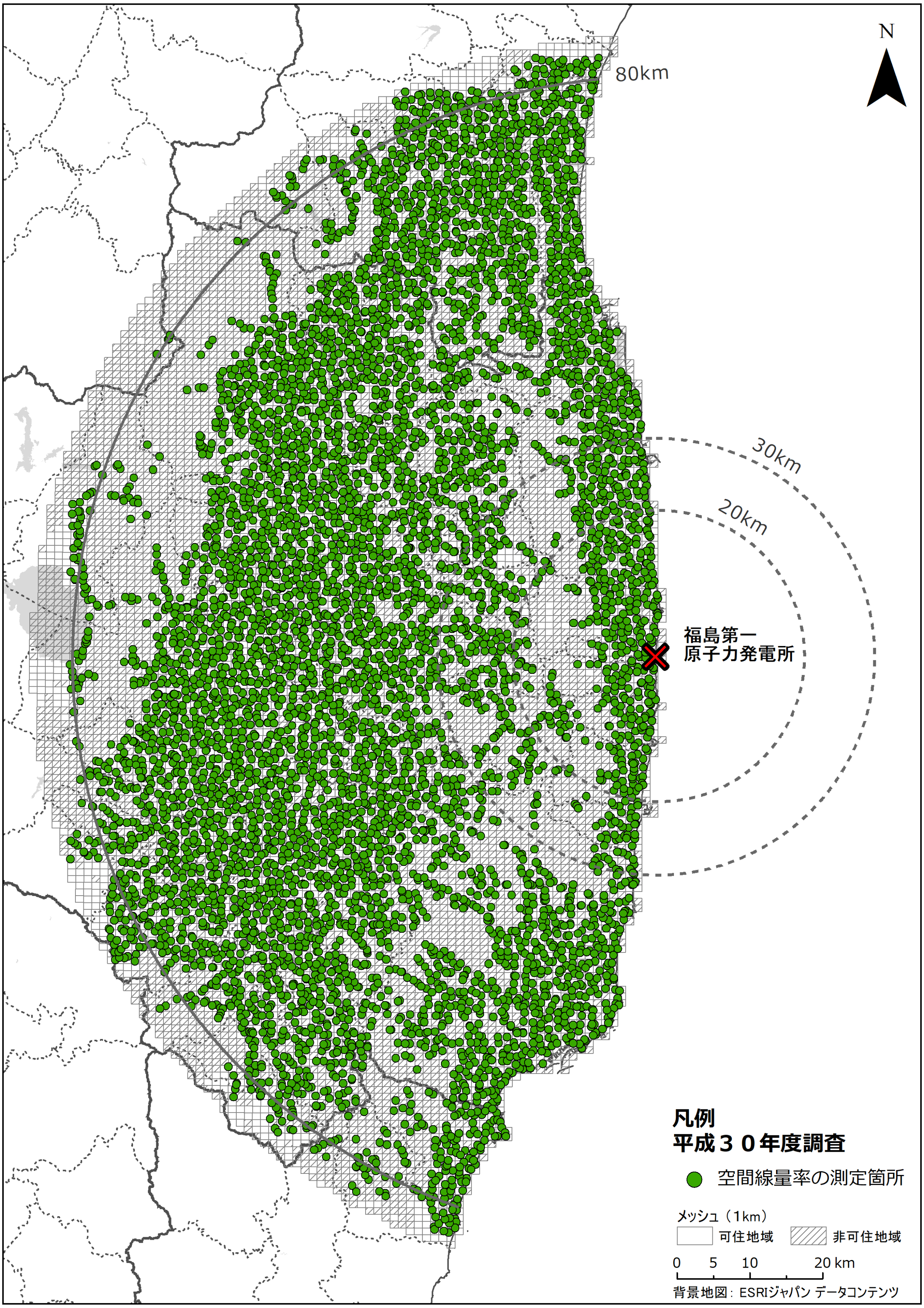

図 2-1 平成 30 年度調査における定点サーベイによる地面から 1 m 高さの空間線量率の測定箇所（1 km メッシュ）（背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ（(c) Esri Japan）を使用。）

図 2-2 歩行サーベイ測定時の装備

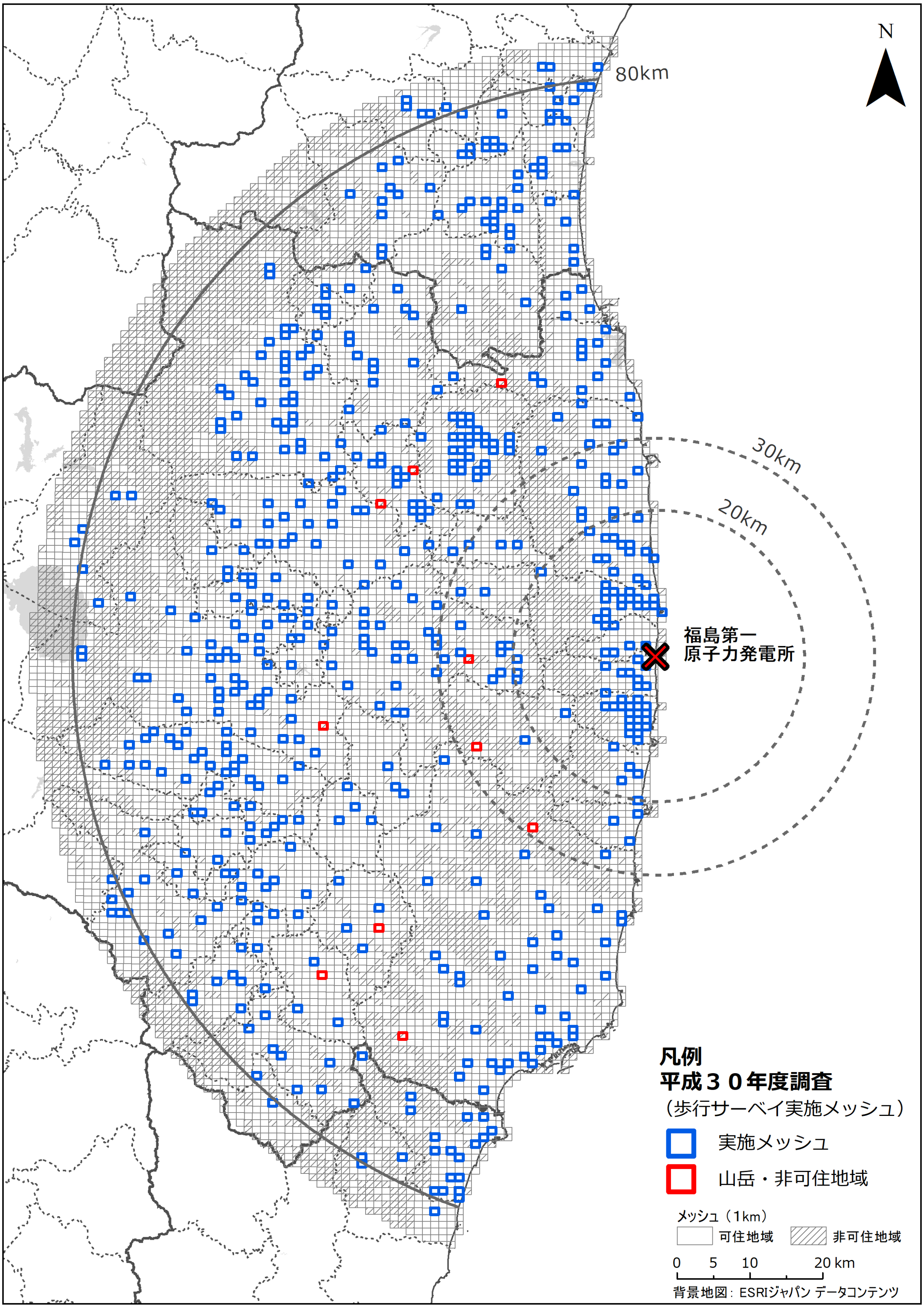

図 2-3 平成 30 年度調査における歩行サーベイによる空間線量率の測定箇所（1 km メッシュ）
（背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ（(c) Esri Japan）を使用。）

2.2.4. 平成 29 年度との比較

測定結果の妥当性と平成 29 年度の調査結果からの変化傾向を確認するため測定手法ごとに平成 29 年度と平成 30 年度の調査結果を比較した。比較は、1 km メッシュごとに、メッシュ内に入るそれぞれの測定結果を散布図として比較した。走行、歩行サーベイについては、メッシュ内の平均値を比較した。また、定量的に傾向を把握するために式 (1) のように相対変化率 RC を定義し、メッシュごとに計算した数値をヒストグラムにして平均値、中央値を求めた。

$$RC = (D_1 - D_2)/\ D_2 \qquad (1)$$

ここで、D_1 及び D_2 はそれぞれ比較対象の測定時期での測定結果及び基準とする測定時期での測定結果である。例えば、平成 29 年度に対する平成 30 年度の相対変化率は、$(D_{H30} - D_{H29})/\ D_{H29}$ である（ここで、D_{H29}、D_{H30} はそれぞれ平成 29 年度及び平成 30 年度の測定結果）。なお、双方とも天然放射性核種による空間線量率寄与を含んだ数値である。

2.2.5. 測定手法間の比較

3 種類の測定手法は、それぞれ次のような特徴がある。走行サーベイは、車内に検出器を搭載して空間線量率を測定しているため、車道上の空間線量率変化の影響を受けやすい。定点サーベイは、アスファルト等で覆われておらず人為的な攪乱が少なく、平坦で開かれた場所を選定している。歩行サーベイは、定点サーベイで選定された測定点の周辺車道や歩道で測定している。これらの測定手法上の特徴が測定結果に与える影響を評価するために相互比較を行った。各測定場所のイメージを図 2-4 に示す。相互比較の方法は 1 km のメッシュごとに、メッシュ内に入るそれぞれの測定結果を散布図として比較した。また、定量的に傾向を把握するために式 (2) のように相対偏差 RD を定義し、メッシュごとに計算した数値をヒストグラムにして平均値、中央値を求めた。

$$RD = (D_a - D_b)/\ D_b \qquad (2)$$

ここで、D_a, D_b は走行、歩行、定点サーベイによる空間線量率である。D_a, D_b の組み合わせは表 2-2 のとおりである。いずれも天然放射性核種による空間線量率寄与を含んだ数値である。

表 2-2 比較の組み合わせ

No	D_a	D_b
1)	走行サーベイ	定点サーベイ
2)	歩行サーベイ	定点サーベイ
3)	走行サーベイ	歩行サーベイ

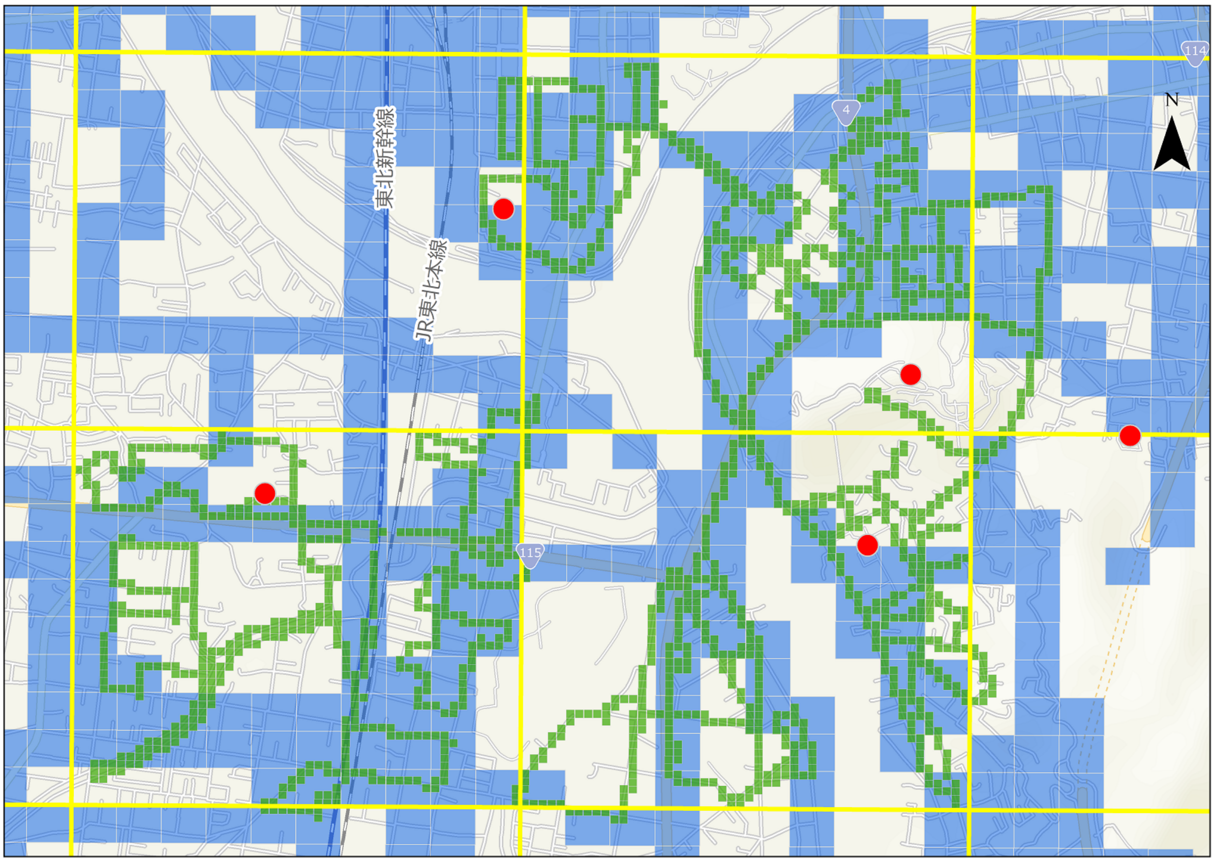

図 2-4 各測定場所のイメージ（青：走行サーベイ，赤：定点サーベイ，緑：歩行サーベイ，黄色枠は 1 km の標準メッシュ。背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ((c) Esri Japan)を使用。）

2.3. 空間線量率測定結果

2.3.1. 空間線量率分布マップ

1）走行サーベイ

平成 30 年度の 2 回の走行サーベイの結果に基づき作成した空間線量率分布マップをそれぞれ図 2-5 及び図 2-6 に示す。これらの図より、現状では、80 km 圏内や栃木県北東部の一部を除き、0.2 μSv/h 未満の地域がほとんどを占めていることが分かる。各年度の比較のため、平成 23 年度（第 1 次調査）（第 1 回走行サーベイ）から平成 30 年度 2 回目（第 17 回走行サーベイ）までの測定結果（主に 80km 圏内）を図 2-7 に示す。ただし、平成 24 年度から平成 29 年度は各年度 1 回目とした。なお、空間線量率分布マップでは天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる（以下、本章において同様）。

2）定点サーベイ

平成 30 年度の定点サーベイによる空間線量率の測定結果を図 2-8 に示す。また、平成 23 年度調査から平成 30 年度調査までの測定結果を図 2-9 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。

3）歩行サーベイ

平成 30 年度の歩行サーベイの結果に基づき作成した空間線量率分布マップを図 2-10 に示す。また、平成 25 年度以降の歩行サーベイの測定結果を図 2-11 に示す。

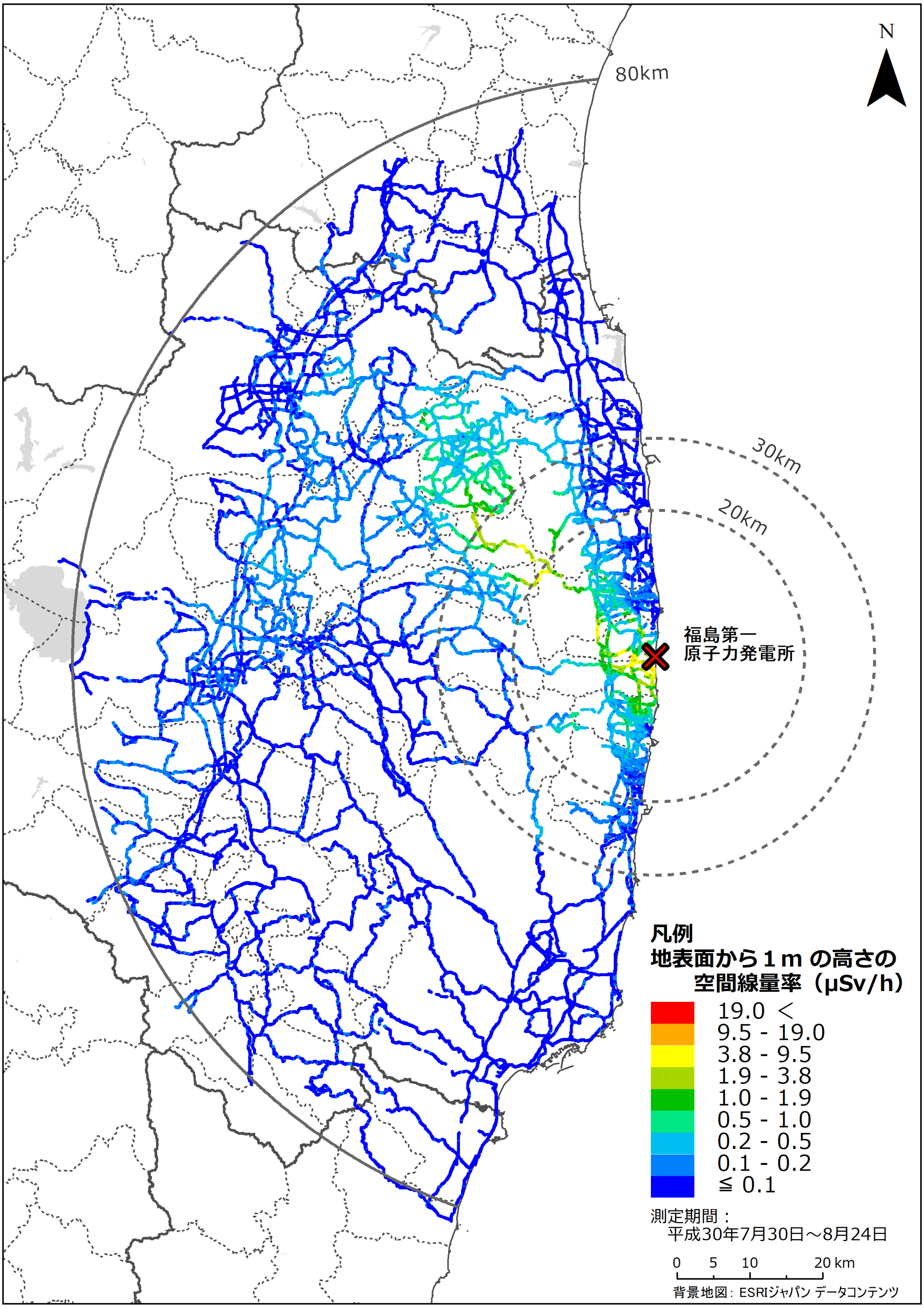

図 2-5 平成 30 年度 1 回目（第 16 回）走行サーベイによる空間線量率の測定結果
（天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ（(c) Esri Japan）を使用。））

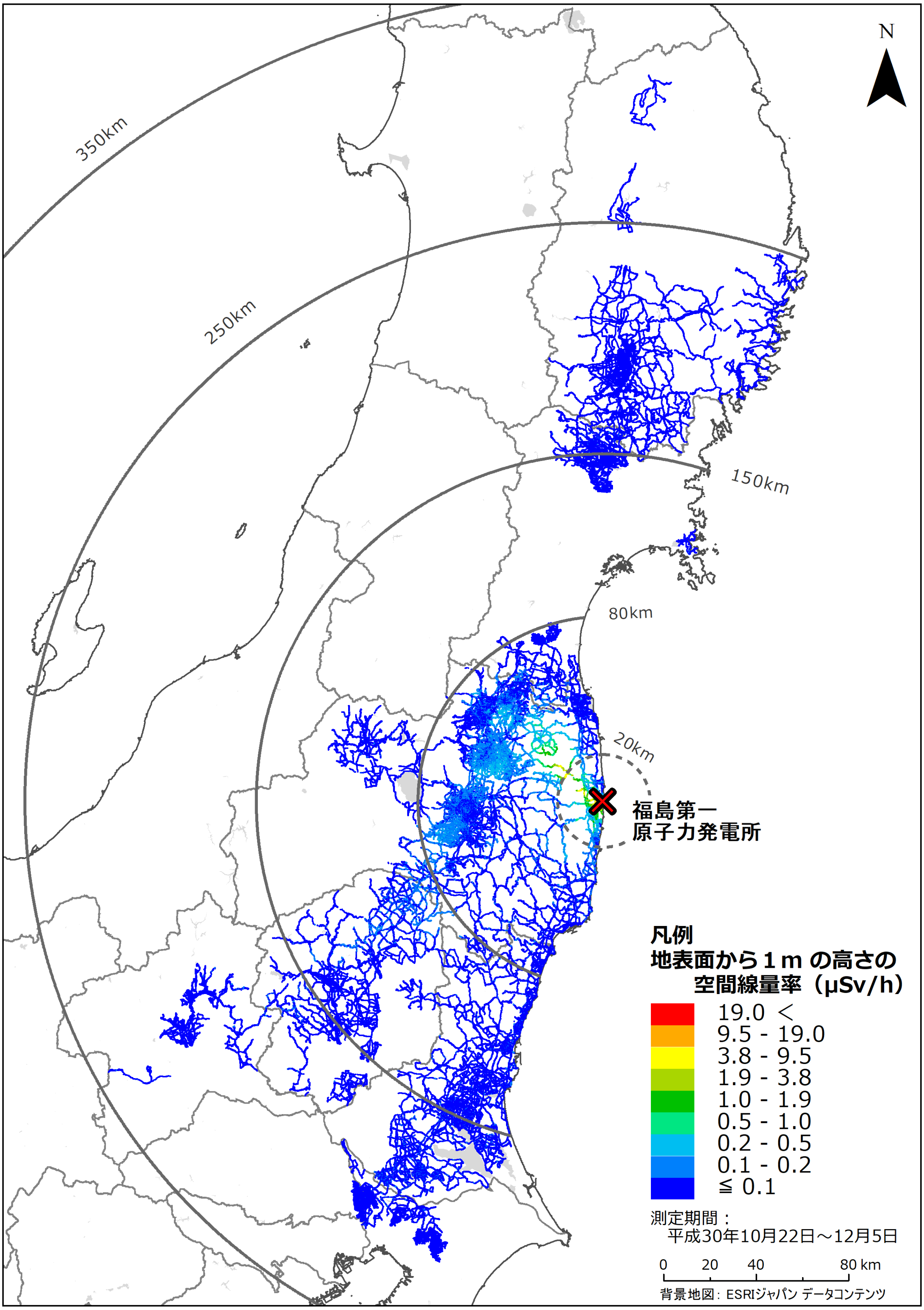

図 2-6 平成 30 年度 2 回目（第 17 回）走行サーベイによる空間線量率の測定結果
（天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ（(c) Esri Japan）を使用。））

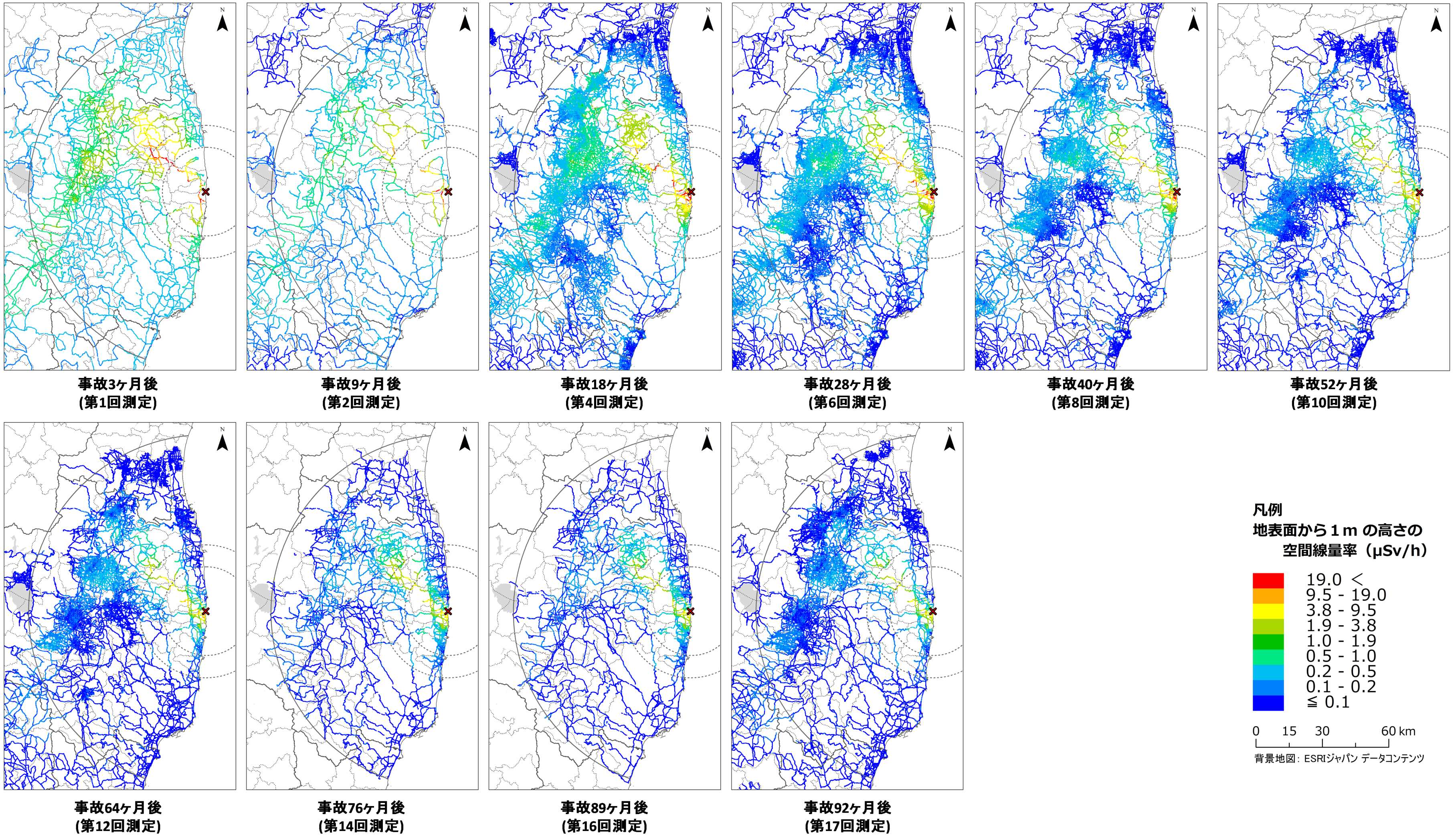

図 2-7 平成 23 年度以降の走行サーベイによる 80km 圏内を中心とした空間線量率マップの変化（主に各年度 1 回目の測定結果を示す。天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ（(c) Esri Japan）を使用。）

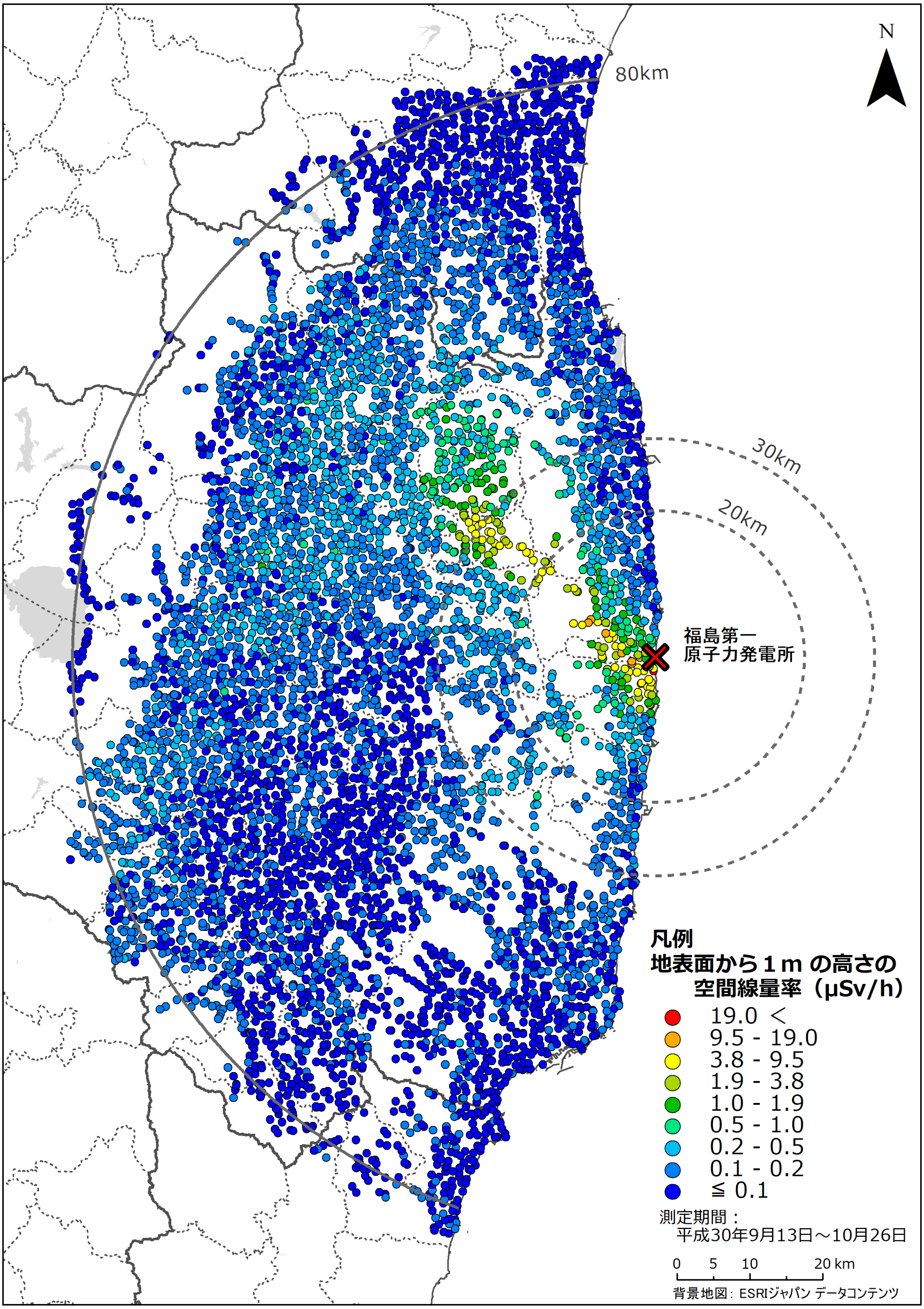

図 2-8 平成 30 年度定点サーベイによる空間線量率の測定結果

（天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ（(c) Esri Japan）を使用。)）

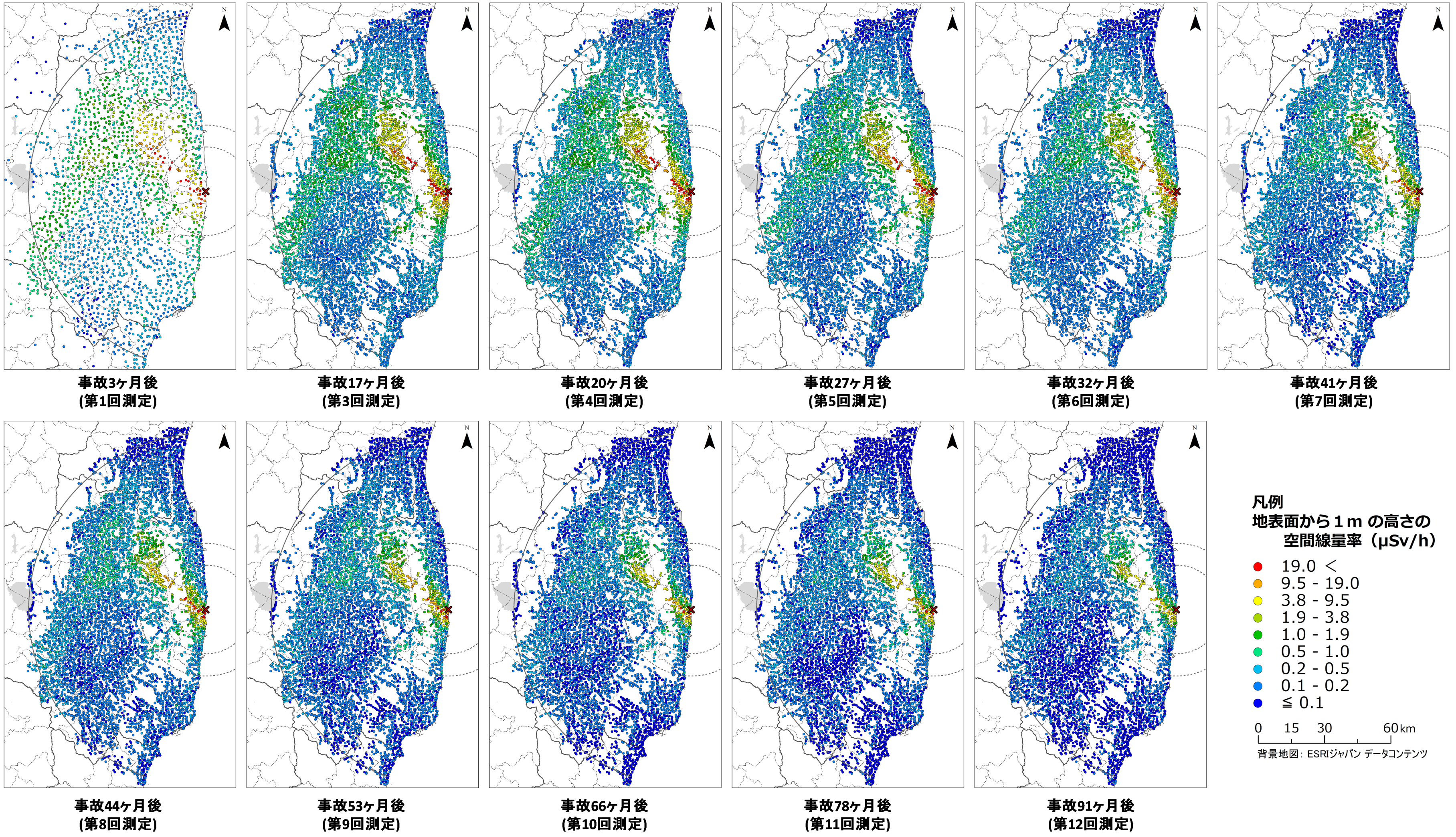

図 2-9 平成 23 年度以降の定点サーベイによる空間線量率マップの変化（測定データ数の少ない第 2 回測定を除く。天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ（(c) Esri Japan）を使用。）

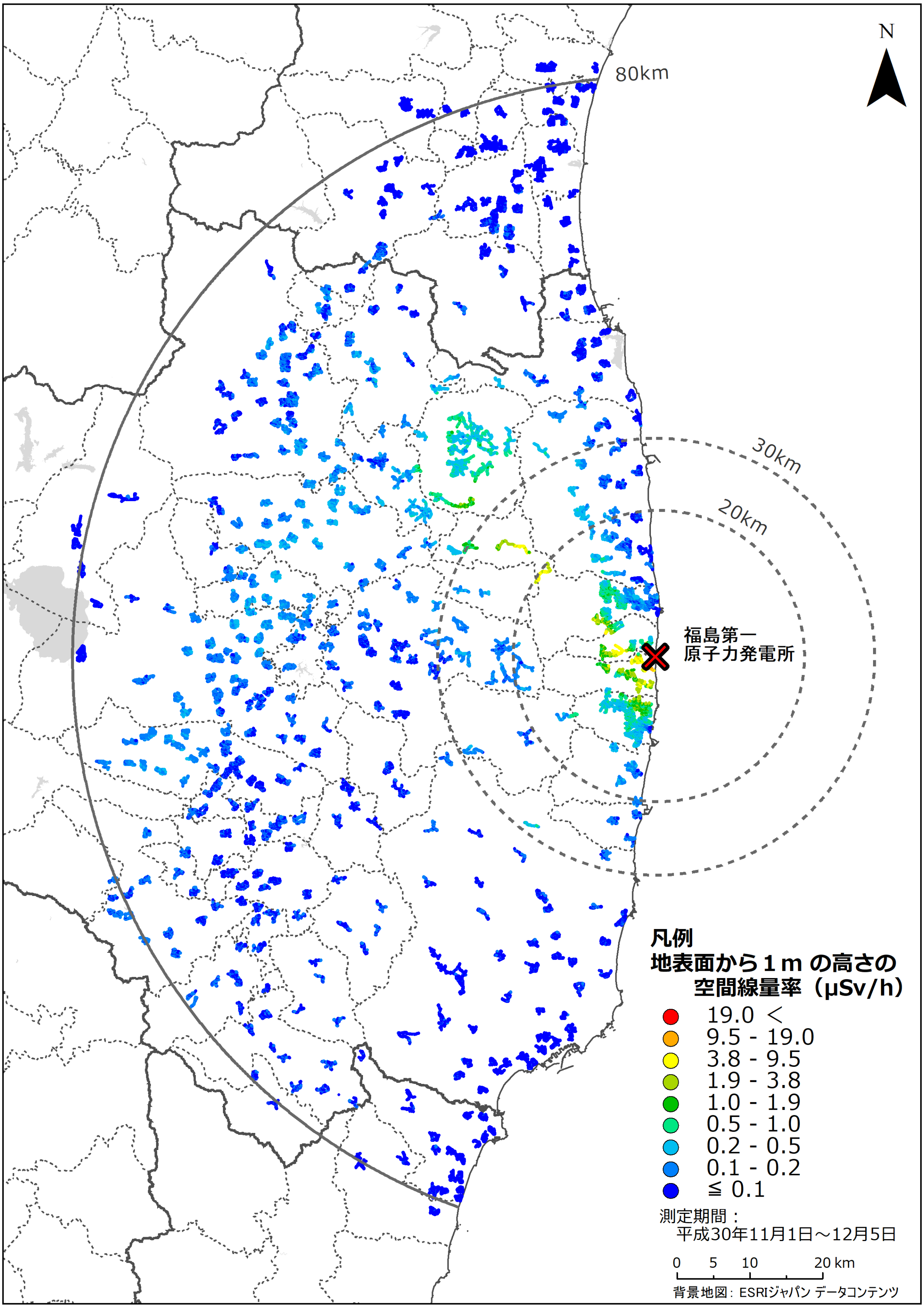

図 2-10 平成 30 年度歩行サーベイによる空間線量率の測定結果

（天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ（(c) Esri Japan）を使用。）

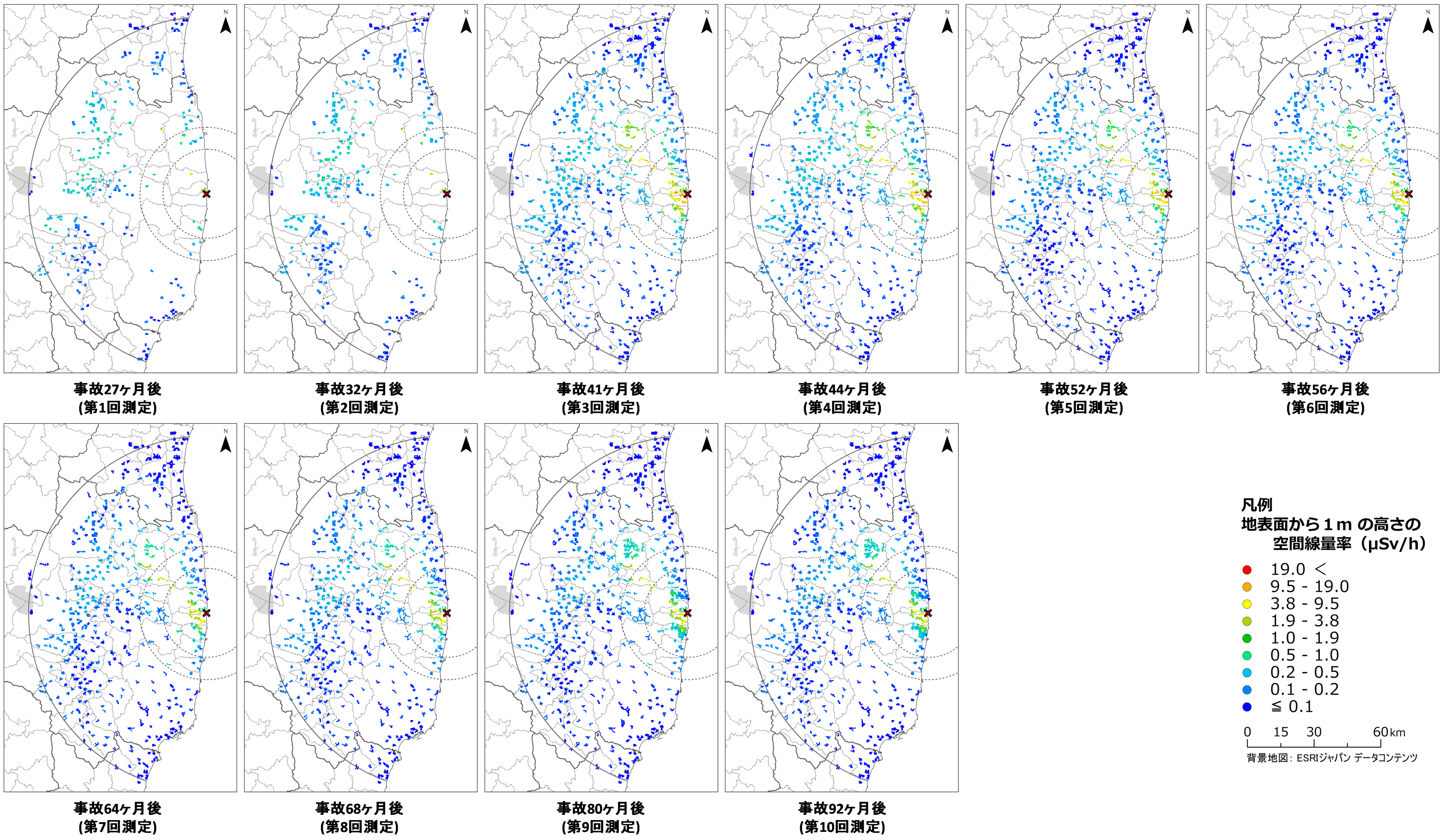

図 2-11 平成 25 年度以降の歩行サーベイによる空間線量率マップの変化

（天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ（(c) Esri Japan）を使用。）

2.3.2. 平成 29 年度との比較

走行サーベイ、定点サーベイ及び歩行サーベイの平成 29 年度の結果との比較について、散布図及び式(1)により計算した相対変化率 *RC*（ヒストグラム及び積算割合）を図 2-12 に示す。全測定手法について平成 29 年度の結果と平成 30 年度の結果はよい相関関係にあり、相対変化率 *RC* は正規分布に近い形を示した。

各 1km メッシュにおける相対変化率 *RC* の平均値を放射性セシウムの物理的半減期から計算した理論的な空間線量率の変化率と比較した結果について表 2-3 に示す。走行サーベイ及び定点サーベイについては、物理的半減期による理論値と概ね整合した。一方、歩行サーベイについては、理論値よりも変化が小さい傾向にあった。平成 28 年度と平成 29 年度の結果を同様に比較すると、測定結果による平均変化率は−8.1%であり、物理的半減期による変化率−10%と比較しても概ね整合している。この要因は分かっていないが、平成 30 年度の結果が特異的に空間線量率の高い道路の側溝付近を計測してしまった等、測定条件の偏りが考えられる。来年度以降も注意深くデータを精査することが必要である。

表 2-3 平成 29 年度と比較した平成 30 年度の空間線量率測定結果の変化傾向

	走行サーベイ [a]	定点サーベイ	歩行サーベイ
平成 29 年度の測定期間	H29/7/3−H29/7/21	H29/8/28−H29/10/10	H29/10/30−H29/12/1
平成 30 年度の測定期間	H30/7/30−H30/8/24	H30/9/13−H30/10/26	H30/11/1−H30/12/5
放射性セシウムの物理的半減期による変化率	−10.1%	−9.3%	−8.8%
測定結果による相対変化率の平均値	−9.7%	−8.4%	−2.9%

a）各年度 1 回目の測定

2.3.3. 平成 23 年度との比較

事故直後からデータが蓄積されている走行サーベイ及び定点サーベイについては、第 1 回測定（平成 23 年度調査 ）の測定結果からの相対変化率を式(1)により求めた。図 2-13 に平成 23 年度における測定結果と平成 30 年度における測定結果の散布図及び平成 23 年度調査に対する平成 30 年度調査の測定結果の相対変化率 *RC*（ヒストグラム及び積算割合）を示す。図 2-13 (a) に示した走行サーベイの全データを見ると線量率が低い場所の相対変化率が小さくなっていることが分かる。これはバックグラウンドになる天然の放射線の寄与が相対的に大きくなるためである。80 km 圏内全体の傾向及び放射性セシウムによる空間線量率の変化傾向を確認するため、図 2-13 (b) に平成 23 年度の測定結果が 0.5 μSv/h 以上であったエリアのみの比較結果を示す。また、図 2-13 (c) には定点サーベイの結果の内、平成 23 年度の測定結果が 0.5 μSv/h 以上であったエリアのみの比較結果を示す。これらの散布図を見ると、走行サーベイと定点サーベイの結果は似た傾向を示しており、相対変化率の平均値はそれぞれ−87%及び−84%となった。この結果は放射性セシウムの物理的半減期による空間線量率の変化と比較して大きい傾向にある。表 2-4 には、それぞれの相対変化率の平均値をまとめる。

表 2-4 平成 23 年度と比較した平成 30 年度の空間線量率測定結果の変化傾向

	走行サーベイ(全地点)	走行サーベイ(≧0.5 μSv/h)*	定点サーベイ(≧0.5 μSv/h)*
平成 23 年度の測定期間	H23/6/4−H23/6/13		H23/6/6−H23/7/8
平成 30 年度の測定期間	H30/10/22−H30/12/5		H30/9/13−H30/10/26
放射性セシウムの物理的半減期による変化率	−70%		−69%
測定結果による相対変化率の平均値	−80%	−87%	−84%

* 平成 23 年度の測定結果において 0.5 μSv/h 以上のエリアのみで評価

2.3.4. 測定手法間の比較

平成 30 年度調査での走行サーベイ、定点サーベイ及び歩行サーベイによる空間線量率の相互比較結果（2 者間の相関及び式(2)により計算した相対偏差 *RD*）について、図 2-14 に示す。相対偏差 *RD* の平均値をみると、走行サーベイは定点サーベイより 23%小さく（図 2-14 (a)）、これは、定点サーベイは測定場所として開けた平坦な土壌の上を選定しているのに対し、走行サーベイがアスファルトの道路上を測定していることに起因している。歩行サーベイと定点サーベイによる空間線量率の相対偏差はほぼ 0%であり（図 2-14 (b)）、両者の相違はほとんどないといえる 。走行サーベイは歩行サーベイより 20%小さくなっており（図 2-14 (c)）、車道上と歩道又は道路脇の違いが表れていると考えられる。

これらの経時変化を確認するため、過去のサーベイ結果について定点サーベイに対する走行サーベイ又は歩行サーベイの空間線量率の比率を比較した。比較結果を図 2-15 に示す。

走行サーベイ/定点サーベイの結果は、平成 23 年度を除き平均値で−20%程度で推移している。なお、平成 23 年度（事故から約 3 ヶ月）は相対偏差の平均値がほぼ 0%であり定点サーベイと同程度であった。これは平成 23 年度調査の時期はセシウムの沈着が起こった直後であり、道路上のセシウムの洗い流し効果がまだ十分に現れていなかった可能性がある。

一方、歩行サーベイについては、平成 30 年度（事故から約 91 ヶ月）の結果も含め、定点サーベイに対する相対偏差は 0% から−10%の間で推移している。

走行サーベイ及び歩行サーベイにより測定された主にアスファルト等で舗装された道路上における空間線量率は、定点サーベイによる人為的影響の少ない環境において測定した空間線量率に比べ小さいことが分かる。以上の比較結果は、道路上での測定（走行及び歩行サーベイ）では土壌上での測定（定点サーベイ）に比べセシウムの洗い流し効果が大きいことを示唆している。また、定点サーベイと歩行サーベイ又は定点サーベイと走行サーベイとの間に良い相関があることから、定点サーベイは測定箇所周辺の標準となる値を示すと捉えることができる。

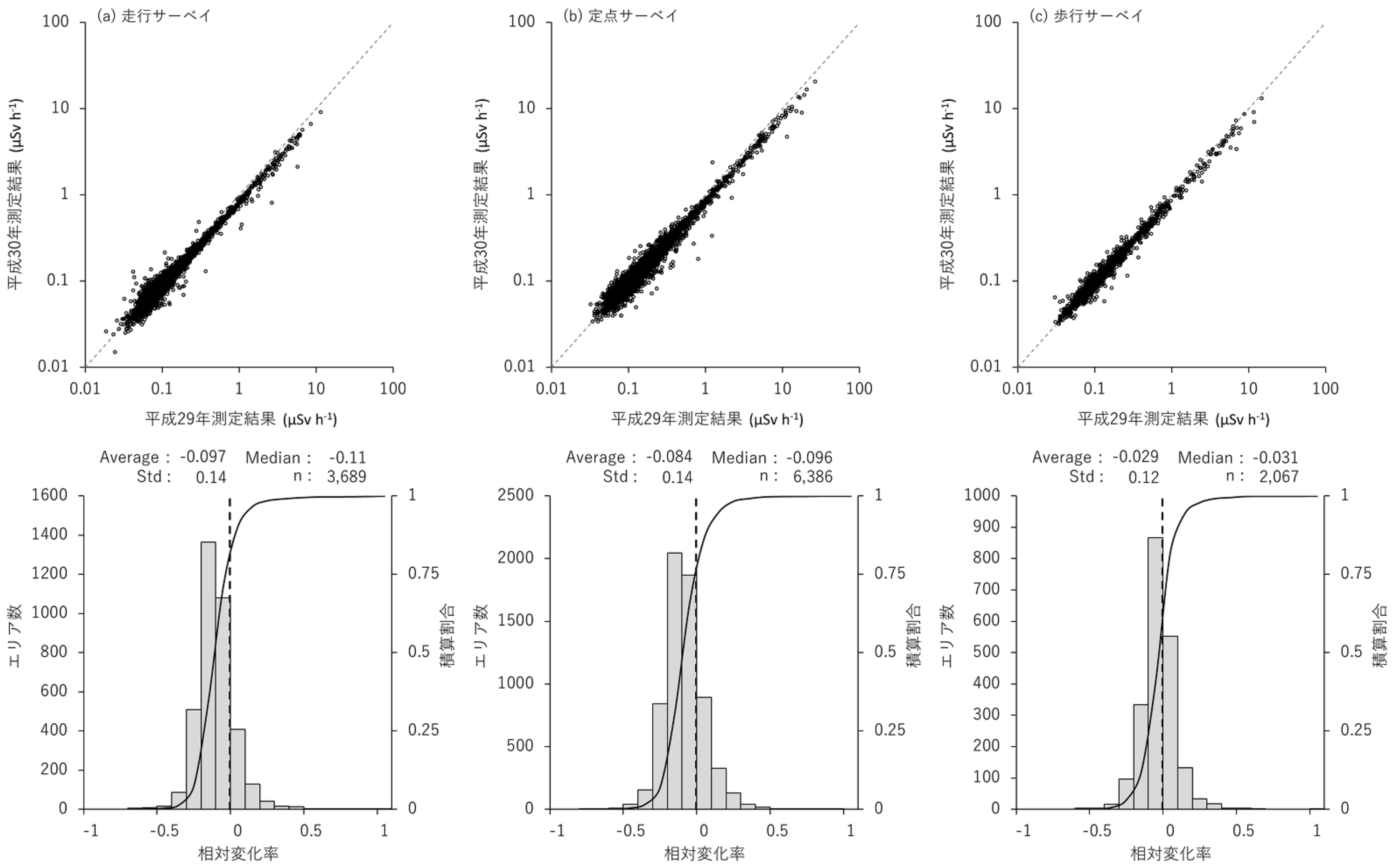

図 2-12 平成 29 年度の測定結果に対する平成 30 年度の測定結果の比

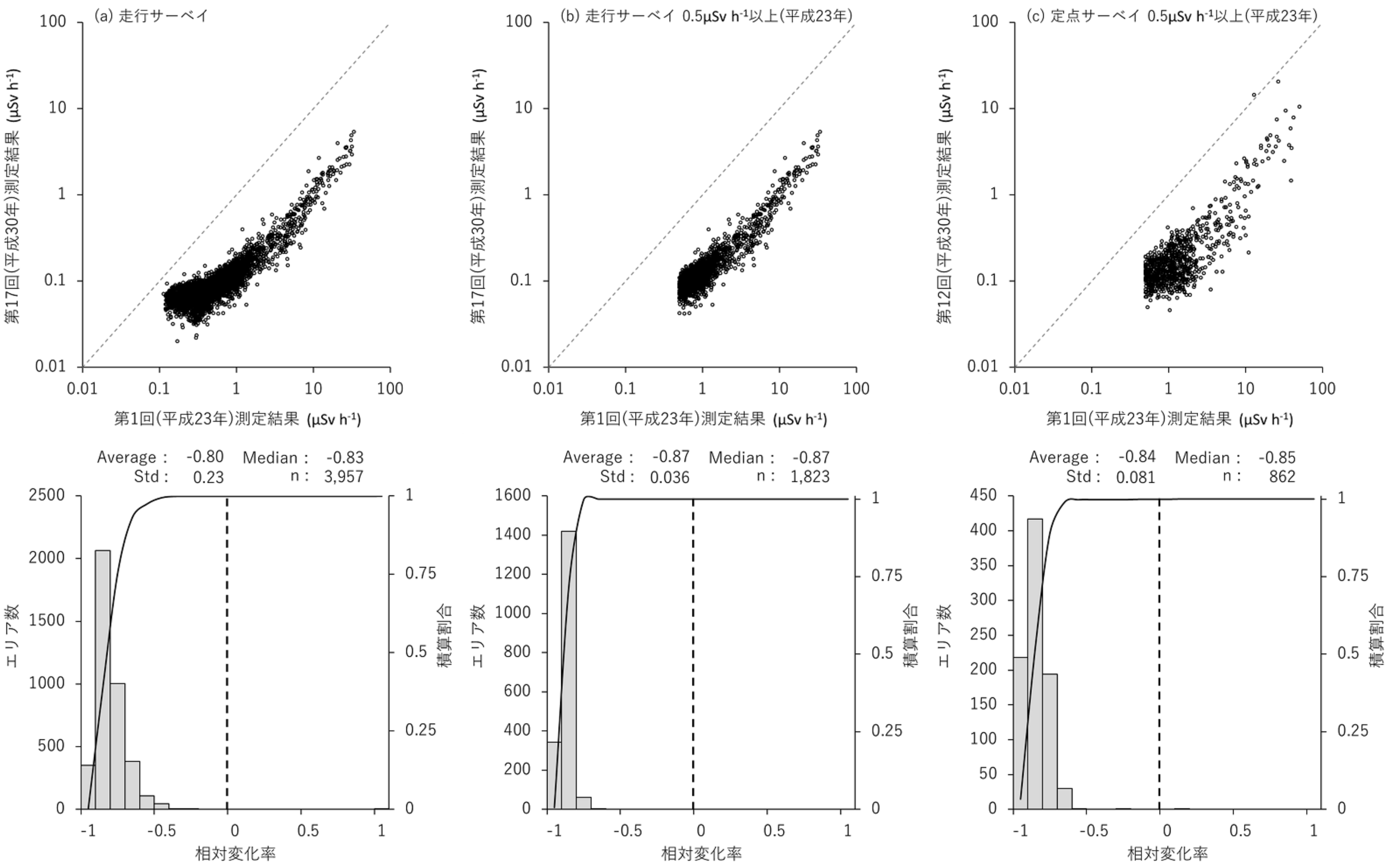

図 2-13 走行サーベイ及び定点サーベイによる空間線量率結果の平成 23 年度との比較

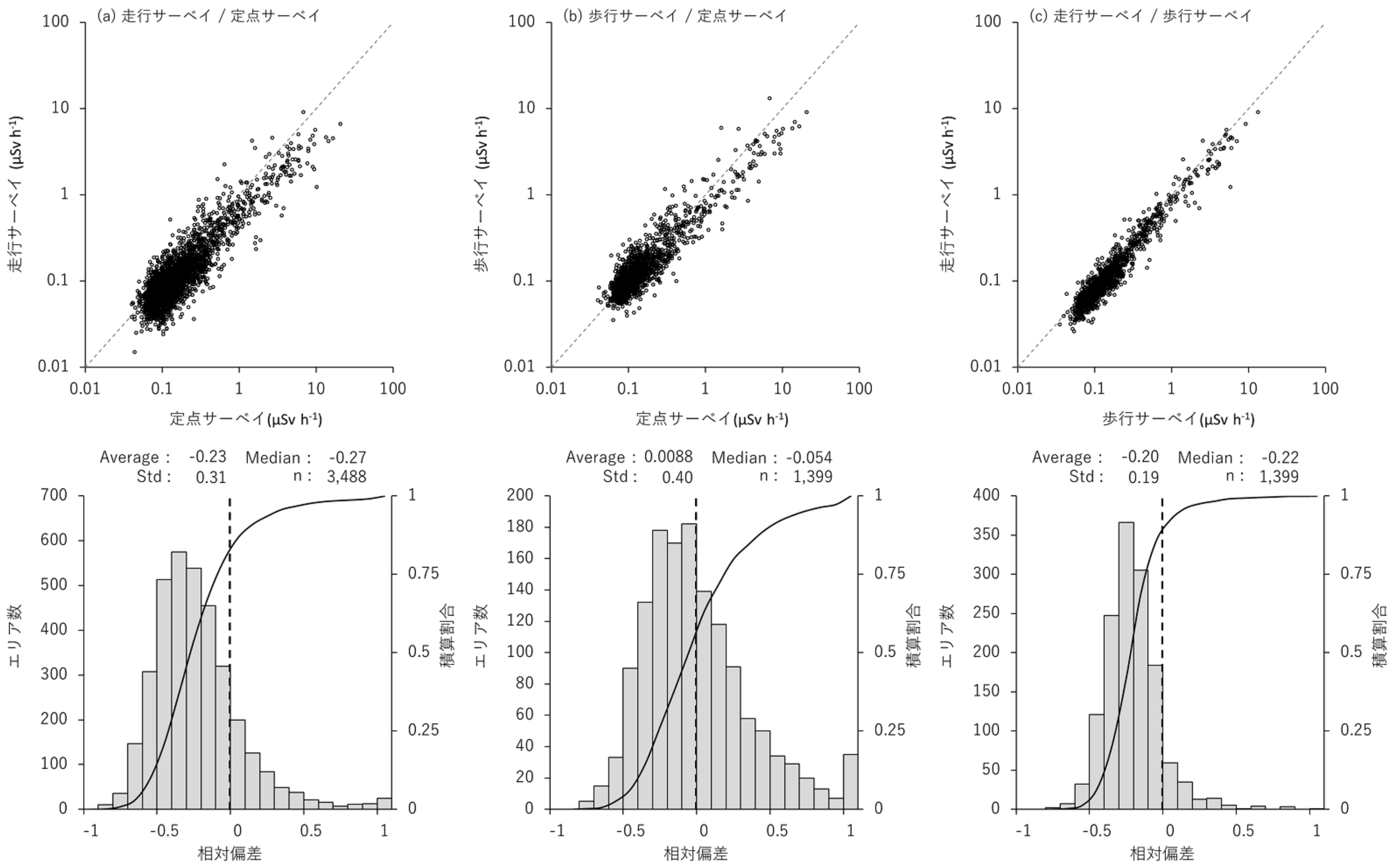

図 2-14 平成 30 年度調査での測定手法間の比較

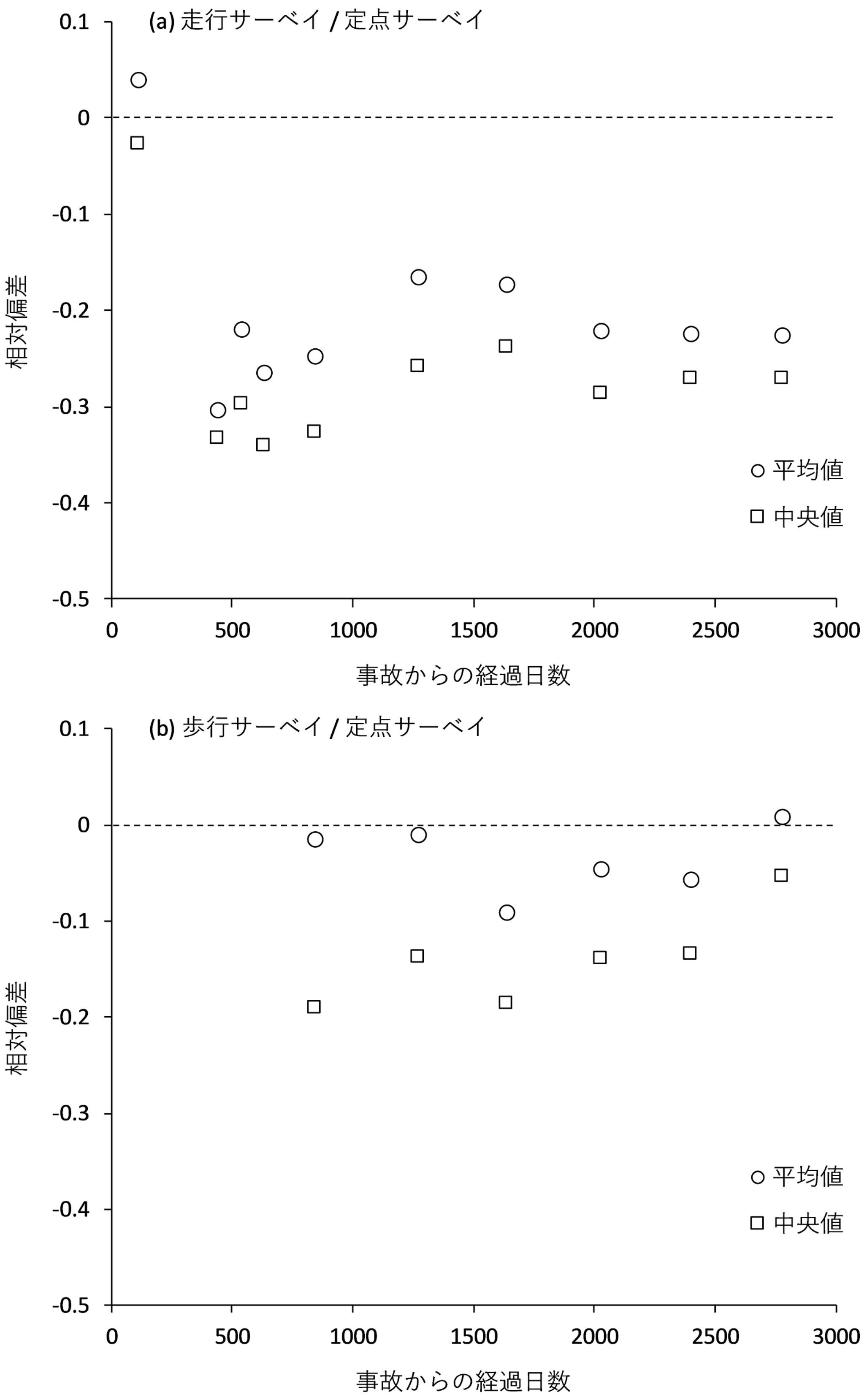

図 2-15 定点サーベイに対する走行サーベイ及び歩行サーベイの空間線量率の相対偏差