令和６年度放射性物質測定調査委託費及び
原子力施設等防災対策等委託費
（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）事業

成果報告書

令和７年３月

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

本報告書は、原子力規制庁による令和 6 年度放射性物質測定調査委託費及び原子力施設等防災対策等委託費（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）事業の成果をとりまとめたものである。

要　旨

東京電力（株）福島第一原子力発電所（以下「福島第一原発」という。）事故発生後、文部科学省（後に原子力規制庁）により、放射性物質の分布状況等に関する調査が継続実施されてきた。令和 6 年度の調査では、「令和 6 年度放射性物質測定調査委託費及び原子力施設等防災対策等委託費（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）事業」（以下「令和 6 年度調査」という。）として実施した。本報告書は令和 6 年度調査における以下の調査結果をとりまとめたものである。

周辺線量当量率（以下「空間線量率」という。）の分布測定では、主に福島第一原発から 80 km 圏内（以下「80 km 圏内」という。）において走行サーベイ（1 回）、人為的なかく乱のない平坦地上の定点測定（1 回）、歩行サーベイ（1 回）及び無人ヘリコプターサーベイ（1 回）を実施し、測定結果から空間線量率分布マップを作成するとともに空間線量率の変化傾向を調べた。山間部の詳細な線量分布測定手法の開発を目指して、山間部モニタリングへの無人航空機の適用可能性を確認するため、無人航空機の山間部における基礎性能試験を実施した。土壌における放射性セシウムの分布調査に関しては、可搬型ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定及びスクレーパープレート法で採取した土壌試料の分析による土壌中深度分布調査をそれぞれ 1 回実施した（いずれも 80 km 圏内）。これまで蓄積した測定結果を基に空間線量率及び放射性セシウム沈着量の実効半減期を評価した。

実測データの統合的解析では、階層ベイズ統計手法を用いて、令和 6 年度調査での歩行サーベイ、走行サーベイ及び人為的なかく乱のない平坦地上の測定による結果等を統合し、80 km 圏内及び福島県全域の空間線量率統合マップを作成した。

空間線量率等分布マップの作成と公開では、「放射性物質モニタリングデータの情報公開サイト」に令和 6 年度調査において取得した空間線量率や土壌沈着量の測定結果等を公開した。

総合モニタリング計画に基づく放射線モニタリング及び環境試料分析では、福島第一原発の 20 km 以遠において空間線量率、積算線量、大気浮遊じん中放射性物質濃度、並びに環境試料（土壌及び松葉）中放射性物質濃度を測定するとともに、測定結果の減少傾向と現状の放射能レベルを把握するための総合評価を実施した。

生活行動パターンを模擬した被ばく評価では、避難指示解除区域への帰還後に想定される複数の代表的な生活行動パターンについて積算の被ばく線量を算出し、得られた結果を基に当該地方自治体・住民に向けた説明資料を作成した。

測定データの収集及びとりまとめでは、本事業で取得した測定データ等を CSV（場合によっては Excel®、KMZ）の形式で保存した。又、当該分野の今後の調査等に活用するため、原子力規制庁や環境省が保有する測定データの一部を公開資料から抽出し、CSV（場合によっては Excel®、KMZ）の形式で保存した。これらのデータの一部は原子力規制庁の Web サイトにて公開される。又、モニタリング地点の重要度を相対的に評価するためのスコアマップを作成するとともに、過去からのスコアの変化要因について考察し、モニタリング地点の重点化及び最適化のための基礎評価を実施した。さらに、海水中のトリチウム濃度の評価結果を意思決定者（原子力規制庁）へ報告する体制を構築して運用し、処理水の海洋への放出前後のトリチ

ウム濃度の変動に着目して解析評価した。総合モニタリング計画に基づき実施された海域モニタリングについて令和 6 年度の測定結果を集約するとともに、過去からの変動などに関して解析評価を行った。

目　次

表リスト

図リスト

1. はじめに

平成 23 年 3 月 11 日に発生した太平洋三陸沖を震源とするマグニチュード 9.0 の東北地方太平洋沖地震とそれに伴って発生した津波により、東京電力（株）福島第一原子力発電所（以下「福島第一原発」という。）の事故（以下「事故」という。）が発生し、その結果、福島第一原発の原子炉施設から環境中へ大量の放射性物質が放出された。事故状況の全体像を把握して影響評価や対策に資するために、文部科学省からの委託を受けた日本原子力研究開発機構（以下「原子力機構」という。）が多くの大学や研究機関と協力し、平成 23 年 6 月から平成 24 年度に「放射性物質の分布状況等に関する調査研究」、「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」及び「福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の長期的影響把握手法の確立」を実施した。これら 3 回の調査を継承する形で、平成 25 年度には原子力規制庁からの委託を受け「平成 25 年度東京電力（株）福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の長期的影響把握手法の確立」、平成 26 年度は「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」を実施した。平成 27 年度以降は同一の調査名称となり、「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」を実施した。令和 5 年度からは原子力規制庁からの委託事業「原子力施設等防災対策等委託費（生活行動パターンを模擬した連続的な空間線量率の測定及び詳細モニタリング結果のマップ化）事業」（以下「生活行動パターン事業」という。）についても併せて実施した。以下、これら各年度の調査を「平成〇年度調査」又は「令和〇年度調査」といい、総称して「分布状況調査」という。これら各年度の分布状況調査の内容については文献 [1] に公開されている。令和 6 年度調査においては、「令和 6 年度放射性物質測定調査委託費及び原子力施設等防災対策等委託費（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）事業」として実施した。

一連の分布状況調査においては、

1）放射性物質の土壌沈着量及び周辺線量当量率（以下「空間線量率」という。）に関する大規模環境測定と測定結果のマップ化、
2）放射性セシウムの環境中移行メカニズムの調査（平成 26 年度終了）、
3）空間線量率予測モデルの開発（平成 27 年度終了）、
4）適正な調査地点及び頻度の検討（モニタリングポイントの分析）、
5）実測データの統合的解析、
6）海洋のモニタリングデータについての詳細な解析評価、
7）放射性物質モニタリングデータの情報公開サイト（令和 3 年度調査までは「拡大マップサイト」）等を通したデータの公開

等を実施してきた。これまでの分布状況調査において上記 1)にて実施してきた放射性物質の土壌沈着量及び空間線量率測定は、表 1-1 に示した各調査によって行われてきている。表 1-1 には本年度を含む年度ごとの実施時期をまとめた。なお、本報告書において、表中等の日付短縮表記は、年（和暦）/月/日とする（例：平成 23 年 6 月 4 日の場合 H23/6/4、令和 6 年 7 月 1 日の場合 R6/7/1 とする）。

また、生活行動パターン事業においては、

1）生活行動パターンごとの空間線量率の積算量の算出、

2）詳細モニタリング結果のマップ化、

3）簡易に推定被ばく線量の算出等のできるアプリケーションソフトウェアの開発、

4）得られた成果の地方公共団体への提供

等を実施してきた[2)~5)]。

令和 6 年度調査の主な実施内容は、以下のとおりである。

1）空間線量率等の分布測定（福島第一原発から 80 km 圏内（以下「80 km 圏内」という。）を中心）

走行サーベイ、人為的なかく乱のない平坦な開かれた土地における定点測定（以下「定点サーベイ」という。）、歩行サーベイ及び無人ヘリコプターによる測定を行い、現状における空間線量率の状況や変化傾向を把握する。加えて、無人航空機の山間部への適用可能性を確認するため、無人航空機の山間部における基礎性能試験データを取得する。

2）土壌における放射性セシウムの分布調査（80 km 圏内を中心）

①放射性セシウム沈着量の面的調査

放射性セシウムの沈着量を測定する。沈着量と空間線量率の関係を評価し、その関係を基に定点サーベイの空間線量率から沈着量を導出し、結果をマップ化する。

②放射性セシウムの深度分布の調査

放射性セシウム沈着量を推定するために重要な放射性セシウム深度分布を明らかにするため、スクレーパープレートを用いて深さ方向に 9 層程度の土壌試料を採取し、放射性セシウムの測定・分析を実施する。

3）空間線量率及び放射性セシウム沈着量の経時変化の評価

これまで蓄積した測定結果を基に空間線量率及び放射性セシウム沈着量の経時変化傾向を評価する。

4）測定データの統合的解析

異なる手法により測定した空間線量率のデータを統計的手法により統合したマップ（80 km 圏内及び福島県全域）を作成する。

5）空間線量率等分布マップの作成と公開

取得したデータを基に作成した空間線量率分布等に関するマップ等を Web サイトで公開する。帰還困難区域等の地方自治体の要望により、原子力規制委員会が東京電力と連携して測定した空間線量率の結果をマップ化する。

6）放射線モニタリング及び環境試料分析

総合モニタリング計画に基づき原子力規制委員会が行うこととしている福島県下の放射線モニタリングを実施し、これまでに得られた結果について総合的に評価する。

7）生活行動パターンを模擬した被ばく評価

今後の避難指示区域の見直しが想定される地域等における生活行動パターンを想定した被ばく評価を実施し、得られた結果を元に当該地方自治体・住民に向けた説明資料を作成する。

8）測定データの収集、とりまとめ

令和 6 年度調査で取得または原子力規制庁が保有する測定データ及び地方自治体が測定したデータを収集しとりまとめる。総合モニタリング計画に基づく海域モニタリングの令和 6 年度の測定結果について解析評価を行い、原子力規制庁が指定する報告レベルに従って速やかに報告を行うとともに、解析結果を集約し過去からの変動などに関して評価を行う。モニタリング地点の重点化及び最適化のための基礎評価を実施する。
本報告書では、令和 6 年度調査で得られた成果についてまとめる。

表 1-1　分布状況調査における測定項目の年度ごとの実施時期（1/2）

調査	平成 23 年度 （第 1 次）*4	平成 23 年度 （第 2 次）	平成 24 年度 （第 3 次）	平成 25 年度 （第 4 次）	平成 26 年度 （第 5 次）	平成 27 年度 （第 6 次）	平成 28 年度 （第 7 次）	平成 29 年度 （第 8 次）
走行サーベイ*1	第 1 回 (J)H23/6/4-6/13	第 2 回 (J)H23/12/5-12/28 第 3 回 (自)H24/3/13-3/30	第 4 回 (J)H24/8/20-9/7 (自)H24/9/3-10/12 第 5 回 (J)H24/11/5-11/30 (自)H24/11/9-12/10	第 6 回 (J)H25/6/12-8/8 (自)H25/6/24-7/26 第 7 回 (J)H25/11/5-12/4 (自)H25/11/5-12/12	第 8 回 (J)H26/6/23-7/24 (自)H26/7/1-8/8 第 9 回 (J)H26/11/4-12/5 (自)H26/11/4-12/5	第 10 回 (J)H27/7/2-7/24 (自)H27/6/29-8/4 第 11 回 (J)H27/11/5-11/27 (自)H27/11/2-12/18	第 12 回 (J)H28/6/27-7/19 (自)H28/7/4-8/5 第 13 回 (J)H28/10/31-12/16 (自)H28/10/31-11/30	第 14 回 (J)H29/7/3-7/21 第 15 回 (J)H29/10/24-11/27 (自)H29/10/20-12/5
定点サーベイ*2	第 1 回 H23/6/4-6/14 H23/6/27-6/29 H23/6/28-7/8	第 2 回 H23/12/13- H24/5/29	第 3 回 H24/8/14-9/7 第 4 回 H24/11/5-12/7	第 5 回 H25/6/3-7/4 第 6 回 H25/10/28-12/4	第 7 回 H26/7/15-9/5 第 8 回 H26/11/4-12/5	第 9 回 H27/8/3-9/8	第 10 回 H28/8/22-10/4	第 11 回 H29/8/28-10/10
歩行サーベイ				第 1 回 H25/6/10-7/5 第 2 回 H25/11/5-12/4	第 3 回 H26/7/28-9/12 第 4 回 H26/10/30-12/16	第 5 回 H27/6/29-8/5 第 6 回 H27/10/26-12/4	第 7 回 H28/6/29-8/5 第 8 回 H28/10/27-12/13	第 9 回 H29/10/30-12/1
無人ヘリ			第 1 回 H24/8/30-10/20 第 2 回 H25/1/27-3/20	第 3 回 H25/6/6-7/31 第 4 回 H25/11/19-H26/1/7	第 5 回 H26/6/23-7/22 第 6 回 H26/11/14-H27/1/15	第 7 回 H27/9/2-10/22	第 8 回 H28/9/1-10/13	第 9 回 H29/6/13-9/5
沈着量*3 (in-situ)	土壌試料採取 第一期：H23/6/4-6/14 第二期：H23/6/27-7/8 (H23/6/14)	第 1 回 H23/12/13- H24/5/29 (H24/3/1)	第 2 回 H24/8/13-9/19 (H24/9/1) 第 3 回 H24/11/5-12/12 (H24/12/1)	第 4 回 H25/6/3-7/10 (H25/7/1) 第 5 回 H25/10/28-12/6 (H25/12/1)	第 6 回 H26/6/23-7/30 (H26/7/1) 第 7 回 H26/10/27-12/5 (H26/12/1)	第 8 回 H27/8/24-10/7 (H27/10/1)	第 9 回 H28/8/24-10/6 (H28/10/1)	第 10 回 H29/8/30-10/11 (H29/10/1)
深度分布 （スクレーパープレート）	鉄パイプ試料採取*5	第 1 回 H23/12/12-12/22、 H24/4/17-4/19	第 2 回 H24/8/21-9/5、9/26 第 3 回 H24/11/26-12/7、 12/21	第 4 回 H25/6/3-6/27 第 5 回 H25/10/28-11/29	第 6 回 H26/7/14-7/24 第 7 回 H26/11/4-11/13	第 8 回 H27/8/24-9/25	第 9 回 H28/8/23-10/11	第 10 回 H29/8/23-9/13

*1　走行サーベイにおける(J)は原子力機構、(自)は自治体による測定。　*2　定点サーベイ：人為的なかく乱のない平坦な開かれた土地における空間線量率分布測定。*3　平成 23 年度（第 1 次及び第 2 次（一部））調査では in-situ 測定はせず土壌試料採取を実施。括弧内日付は放射能濃度を補正した基準日。*4（　）内は通算調査次数の意味。*5 平成 23 年度（第 1 次及び第 2 次（一部））調査の深度分布は鉄パイプ等により試料採取。

表 1-1　分布状況調査における測定項目の年度ごとの実施時期（2/2）

調査	平成 30 年度 （第 9 次）*4	令和元年度 （第 10 次）	令和 2 年度 （第 11 次）	令和 3 年度 （第 12 次）	令和 4 年度 （第 13 次）	令和 5 年度 （第 14 次）	令和 6 年度 （第 15 次）
走行サーベイ*1	第 16 回 (J)H30/7/30-8/24 第 17 回 (J)H30/11/1-11/30 (自)H30/10/22-12/5	第 18 回 (J)R1/6/27-7/16 第 19 回 (J)R1/11/11-12/4 (自)R1/10/28-12/13	第 20 回 (J)R2/6/23-7/30 第 21 回 (J)R2/11/4-12/1 (自)R2/10/26-12/1	第 22 回 (J)R3/6/22-7/8 第 23 回 (J)R3/11/4-12/3 (自)R3/10/19-12/2	第 24 回 (J)R4/6/22-7/19 第 25 回 (J)R4/11/7-12/7 (自)R4/10/17-12/6	第 26 回 (J)R5/6/20-7/10 第 27 回 (J)R5/11/7-12/7 (自)R5/10/23-11/29	第 28 回 (J)R6/6/13-11/14 (自)R6/6/24-7/26
定点サーベイ*2	第 12 回 H30/9/13-10/26	第 13 回 R1/8/22-9/27	第 14 回 R2/8/20-10/1	第 15 回 R3/8/19-9/30	第 16 回 R4/8/23-10/20	第 17 回 R5/8/8-10/10	第 18 回 R6/9/9-11/11
歩行サーベイ	第 10 回 H30/11/1-12/5	第 11 回 R1/6/12-11/22	第 12 回 R2/6/9-11/6	第 13 回 R3/5/11-11/18	第 14 回 R4/5/11-11/18	第 15 回 R5/5/15-11/24	第 16 回 R6/5/10-10/31
無人ヘリ	第 10 回 H30/7/11-10/16	第 11 回 R1/6/13-12/1	第 12 回 R2/6/9-10/6	第 13 回 R3/5/17-10/4	第 14 回 R4/5/11-9/15	第 15 回 R5/6/20-10/22	第 16 回 R6/5/10-10/2
沈着量*3 (in-situ)	第 11 回 H30/9/13-10/25 (H30/10/1)	第 12 回 R1/8/8-11/1 (R1/10/1)	第 13 回 R2/8/6-10/15 (R2/10/1)	第 14 回 R3/8/6-10/19 (R3/10/1)	第 15 回 R4/8/22-10/21 (R4/10/1)	第 16 回 R5/8/3-10/18 (R5/10/1)	第 17 回 R6/8/6-10/16
深度分布 (スクレーパープレート)	第 11 回 H30/9/13-10/11	第 12 回 R1/8/21-9/13	第 13 回 R2/8/18-9/7	第 14 回 R3/8/18-9/10	第 15 回 R4/8/17-10/6	第 16 回 R5/8/22-9/13	第 17 回 R6/8/20-9/17

*1　走行サーベイにおける(J)は原子力機構、(自)は自治体による測定。　*2　定点サーベイ：人為的なかく乱のない平坦な開かれた土地における空間線量率分布測定。*3 括弧内日付は放射能濃度を補正した基準日。*4（　）内は通算調査次数の意味。

2. 地上における広域の空間線量率の分布測定

2.1 調査目的

分布状況調査では、事故により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とともに多角的に空間線量率を評価するため、地上において走行サーベイ、定点サーベイ及び歩行サーベイによる広域測定を継続実施している。令和6年度調査においても、これまでと同様の手法により地上における広域の空間線量率分布測定を行った。

走行サーベイでは、車載型の連続測定システムを使用して道路上の空間線量率を測定し、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た。

定点サーベイでは、人為的なかく乱のない平坦な開かれた土地を対象として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た。定点サーベイ測定点としては、住宅地内にある公共施設など開けた舗装されていない平坦地及び空間線量率が狭い範囲で急激に変化しない場所を選定しているため、他の測定結果と比較して、エリアを代表する数値として使用しやすい。

歩行サーベイでは、測定者が背負った連続測定システムにより、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空間線量率測定を行うことで、走行サーベイや定点サーベイ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を目的とした。

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）[6] 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。測定はこれ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、主に福島第一原発から 80 km 圏内（以下「80 km 圏内」という。）を対象に 1 回実施した（以下「原子力機構による測定」という。）。また、地方自治体が希望する細かな道路を含む測定を地方自治体と協働で1回実施した（地方自治体が KURAMA-II を用いて測定し、原子力機構は解析を担当した。以下「自治体による測定」という。）。測定期間及び測定エリア等について表 2-1 に示す。なお、KURAMA-II の点検・校正にはセシウム 137 標準線源（日本アイソトープ協会製 CS402）を用いた（歩行サーベイに用いた KURAMA-II も同様）。

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[6] 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セシウム 137 によるものであり、測定実施期間中（約 5 ヶ月）での放射性セシウムの物理的減衰に伴う空間線量率の減少は 1.4%程度と評価される。この減少率は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基に、これまでの分布状況調査と同様に、走行地域を総務省統計局により定義される 1 km×1 km の「基準地域メッシュ」をベースとした 100 m×100 m のメッシュ（以下「100 m メッシュ」という。本報告書において、他の大きさのメッシュも同様に 20 m メッシュや 10 m メッシュなどという。）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。自治体による測定と原子力機構による測定を合わせて 100 m メッシュ平均値を求めた。

2.2.2　定点サーベイ

セシウム 137 標準線源（QSA Global, Inc.製 CDC804 ）を用いて点検・校正した 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その地点での空間線量率測定値とした。GPS を用いて測定箇所の位置情報を取得した。

80 km 圏内を中心に基準地域メッシュに分割し、事故以前に人が居住していなかった地域（以下「非可住区域」という。）を除く各基準地域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。令和 6 年度調査での測定箇所数の合計は 5,029 箇所であった。測定期間及び測定エリア等について表 2-1 に示す。

2.2.3　歩行サーベイ

KURAMA-II システムを測定者が背負い（空間線量率の測定高さは概ね地上 1 m）歩くことで空間線量率データ及び位置情報を 3 秒ごとに収集した。本測定では令和元年度に改良した KURAMA-Ⅱ測定システム [7]を使用し、あらかじめ作成した測定ルート情報をタブレットに表示させ、その測定ルートをなぞりながら実施した。測定対象の基準地域メッシュは、80 km 圏内を中心に、走行サーベイの測定ルートが含まれ、かつ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選んだ。令和 6 年度は、今後の避難指示区域解除に向けて、帰還困難区域内や特定復興再生拠点区域内の測定箇所を増やした。測定ルートは、主に道路脇や歩道の上であり、そのほとんどは舗装されている。令和 6 年度調査での測定箇所数（基準地域メッシュ数）の合計は 715 メッシュであった。測定期間及び測定エリア等について表 2-1 に示す。

走行サーベイと同様の理由により、測定実施期間中（約 6 ヶ月）の空間線量率測定値を減衰補正により一定の日付に揃えることはしていない。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、対象とした測定箇所（歩行地域）は基準地域メッシュをベースとした 20 m 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 20 m メッシュの代表値とした。

2.2.4　令和 5 年度との比較

測定結果の妥当性と令和 5 年度調査での測定結果からの変化傾向を確認するため、測定手法ごとに令和 5 年度と令和 6 年度の測定結果を比較した。比較に用いるデータは、基準地域

メッシュごとに、メッシュ内に入る測定結果を平均した。なお、走行サーベイについては、令和 5 年度調査での 2 回の測定データを平均し、令和 6 年度調査の測定結果と比較した。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、基準地域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及び中央値を求めた。

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

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、令和 5 年度調査に対する令和 6 年度調査の相対変化率は、$(D_{\mathrm{R6}} - D_{\mathrm{R5}})/\,D_{\mathrm{R5}}$ である（ここで、D_{R5} 及び D_{R6} はそれぞれ令和 5 年度及び令和 6 年度調査での測定結果を示す。）。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車道を走行しながら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いない平坦で開かれた場所を選定しており、人為的なかく乱の影響が少ない。歩行サーベイは、定点サーベイで選定された測定点周辺の車道や歩道で測定しており、走行サーベイと同様に車道上の空間線量率の影響を受けやすいが、場所によっては定点サーベイに近い測定環境であるといえる。これらの測定手法の特徴の違い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。相互比較の方法は基準地域メッシュごとに、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や中央値を求めた。

$$RD = (D_{\mathrm{a}} - D_{\mathrm{b}})/\,D_{\mathrm{b}} \qquad (2)$$

ここで、D_{a}, D_{b} は走行、歩行、定点サーベイによるいずれかの空間線量率である。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 2-1　地上における空間線量率測定の測定期間及び測定エリア

測定	走行サーベイ		定点サーベイ	歩行サーベイ
	第 28 回		第 18 回	第 16 回
実施主体	原子力機構	地方自治体	原子力機構	原子力機構
測定期間	R6/6/13～11/14	R6/6/24～7/26	R6/9/9～11/11	R6/5/10～10/31
測定エリア	主に 80 km 圏内の 3 県*1	6 県*2	主に 80 km 圏内	主に 80 km 圏内
測定距離又は測定点数	9,704 km	10,739 km	5,029 点	715 箇所*3

*1 宮城県、福島県、茨城県

*2 岩手県、福島県、茨城県、栃木県、群馬県、埼玉県

*3 測定ルートが含まれる基準地域メッシュ（1 km×1 km）の数

表 2-2　測定手法間の比較の組み合わせ

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

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

令和 6 年度調査で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図 2-1 に示す。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）。福島県内で空間線量率が 0.2 μSv/h 以上であった 100 m メッシュは県内の合計 59,868 メッシュのうち 7,401 メッシュ（約 12%）であったのに対して、福島県以外では茨城県の 1 メッシュのみであった。9.5 μSv/h を超える空間線量率であったのは大熊町での 12 μSv/h の 1 データのみであった。

各年度の比較のため、平成 23 年度調査（第 1 回走行サーベイ）から令和 6 年度調査までの空間線量率測定結果（主に 80 km 圏内について）を図 2-2 に示す。福島第一原発周辺及び北西方向にかけて比較的高い空間線量率を示す赤から黄色で示される箇所が減少してきていることが分かる。なお、空間線量率の経時変化傾向の定量的評価については第 5 章で述べる（定点サーベイ及び歩行サーベイも同様）。

2) 定点サーベイ

令和 6 年度調査での定点サーベイによる空間線量率の測定結果を図 2-3 に示す。空間線量率が 0.2 μSv/h 以上であった測定箇所は全体の約 10%だったが、9.5 μSv/h を超える空間線量率であったのは、2 箇所（全体の 0.04%）のみであった。また、平成 23 年度調査から令和 6 年度調査までの空間線量率測定結果を図 2-4 に示す。走行サーベイと同様、比較的高い空間線量率を示す赤から黄色で示される箇所が減少してきていることが分かる。

3) 歩行サーベイ

令和 6 年度調査で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 2-5 に示す。空間線量率が 0.2 μSv/h 以上であった 20 m メッシュは全体の約 24%に達し、9.5 μSv/h を超える空間線量率であったのは 114 メッシュ（全体の 0.05%）であった。また、平成 25 年度以降の歩行サーベイの空間線量率測定結果を図 2-6 に示す。比較的高い空間線量率を示す黄色で示される箇所が減少してきていることが分かる。

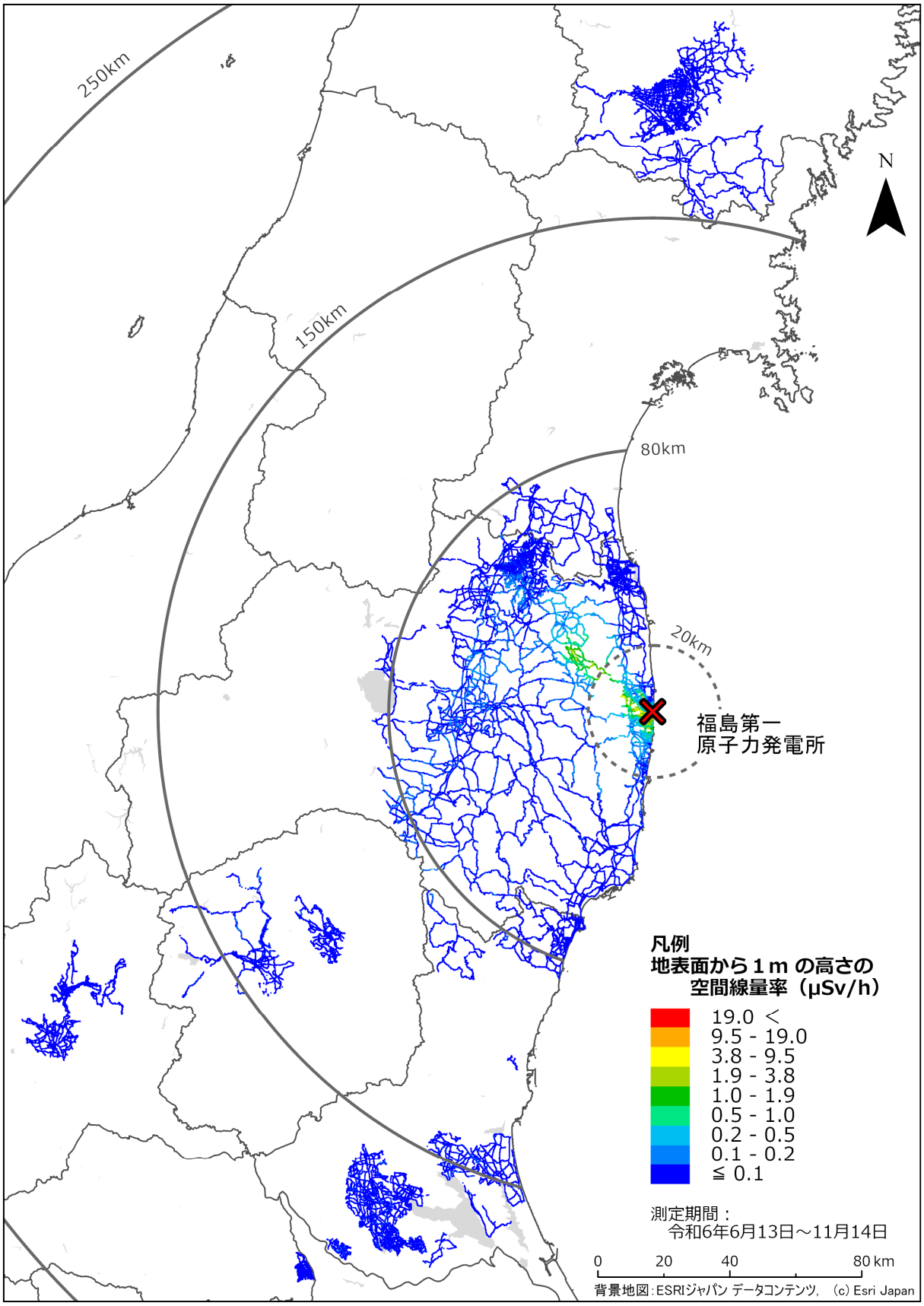


図 2-1　令和 6 年度調査における走行サーベイによる空間線量率の測定結果
（天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。）

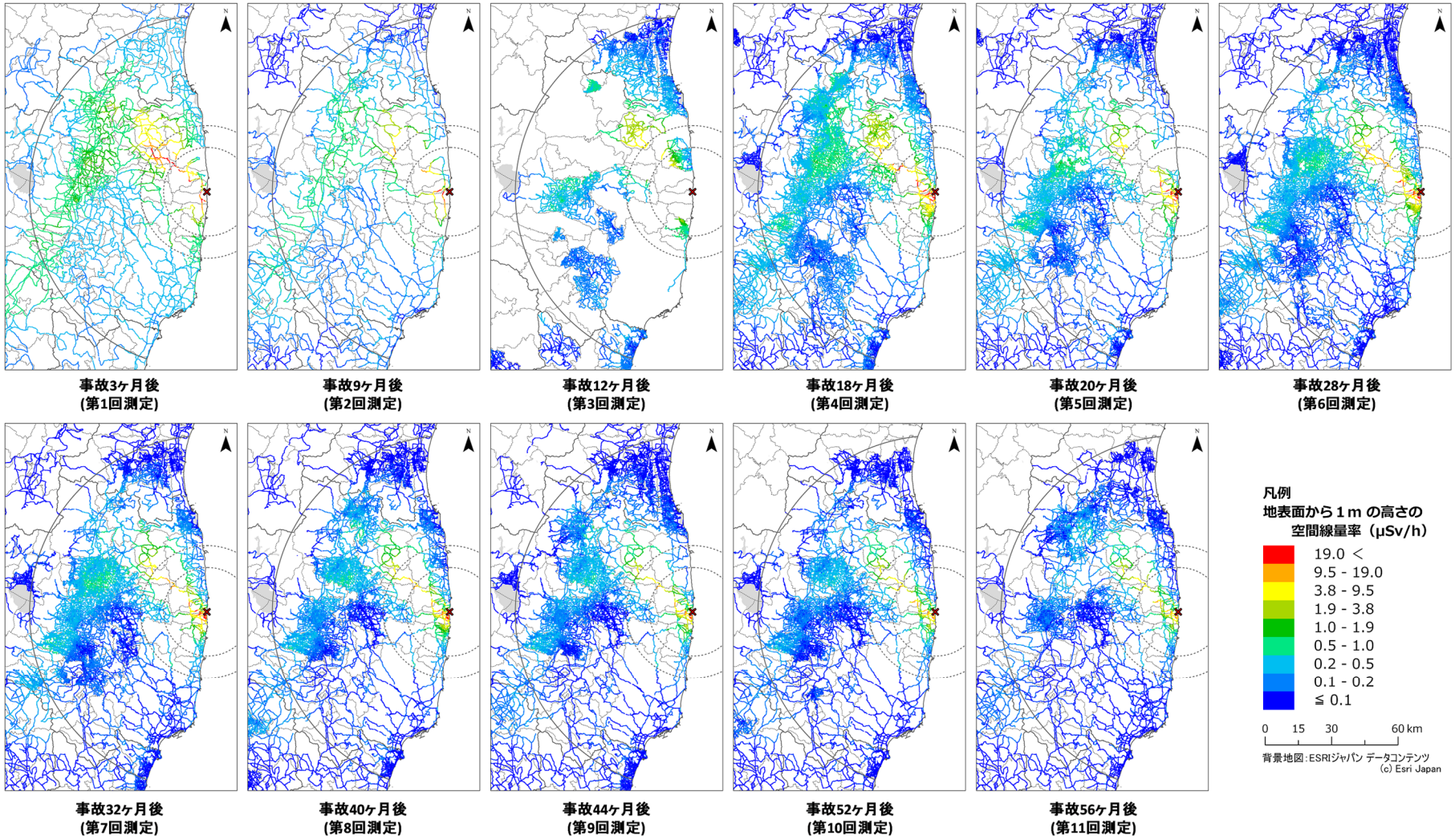


図 2-2　平成 23 年度から令和 6 年度までの走行サーベイによる 80 km 圏内を中心とした空間線量率の変化（1/3）
（天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。）

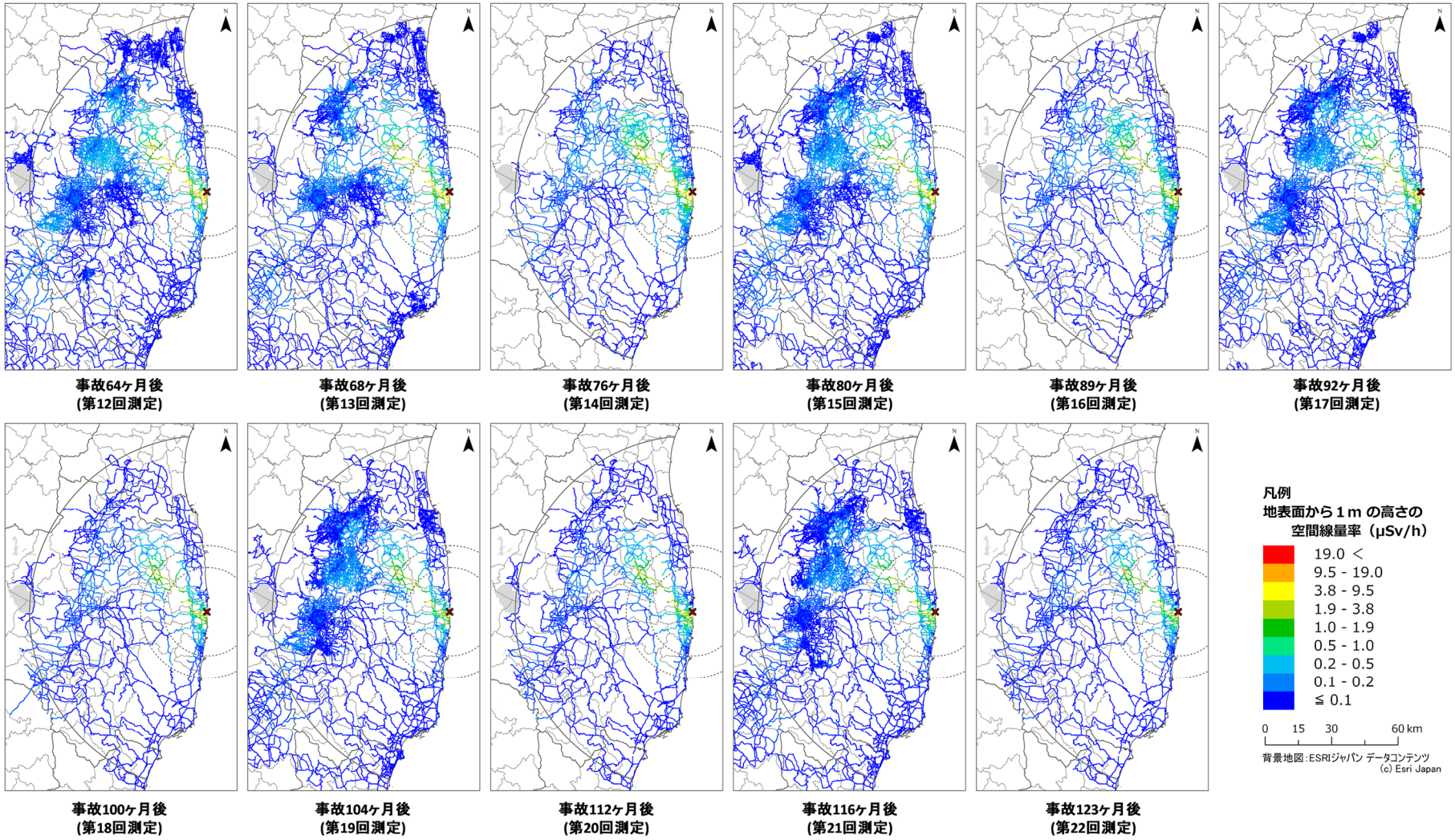


図 2-2　平成 23 年度から令和 6 年度までの走行サーベイによる 80 km 圏内を中心とした空間線量率の変化（2/3）
（天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。）

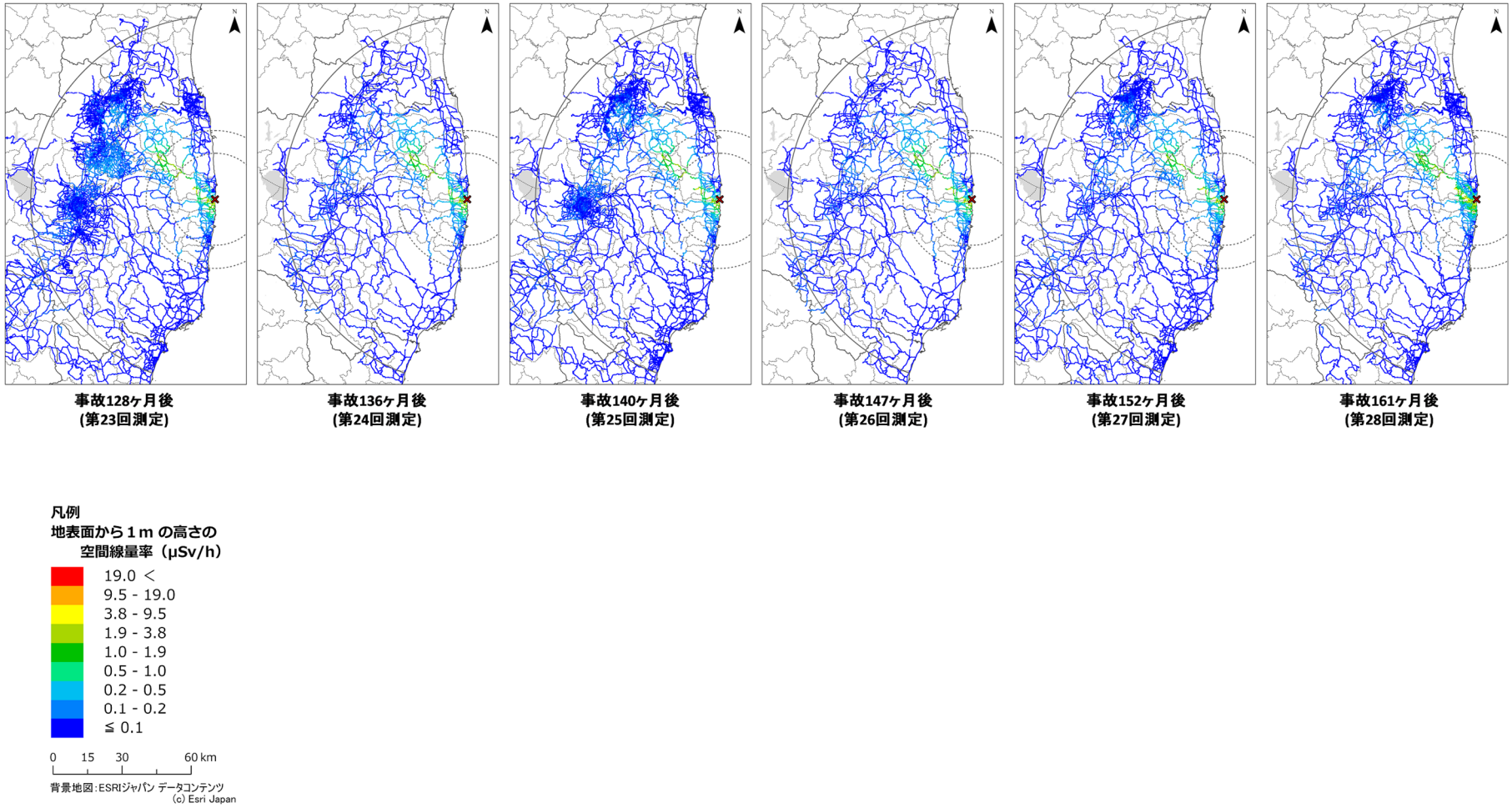


図 2-2　平成 23 年度から令和 6 年度までの走行サーベイによる 80 km 圏内を中心とした空間線量率の変化（3/3）
（天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。）

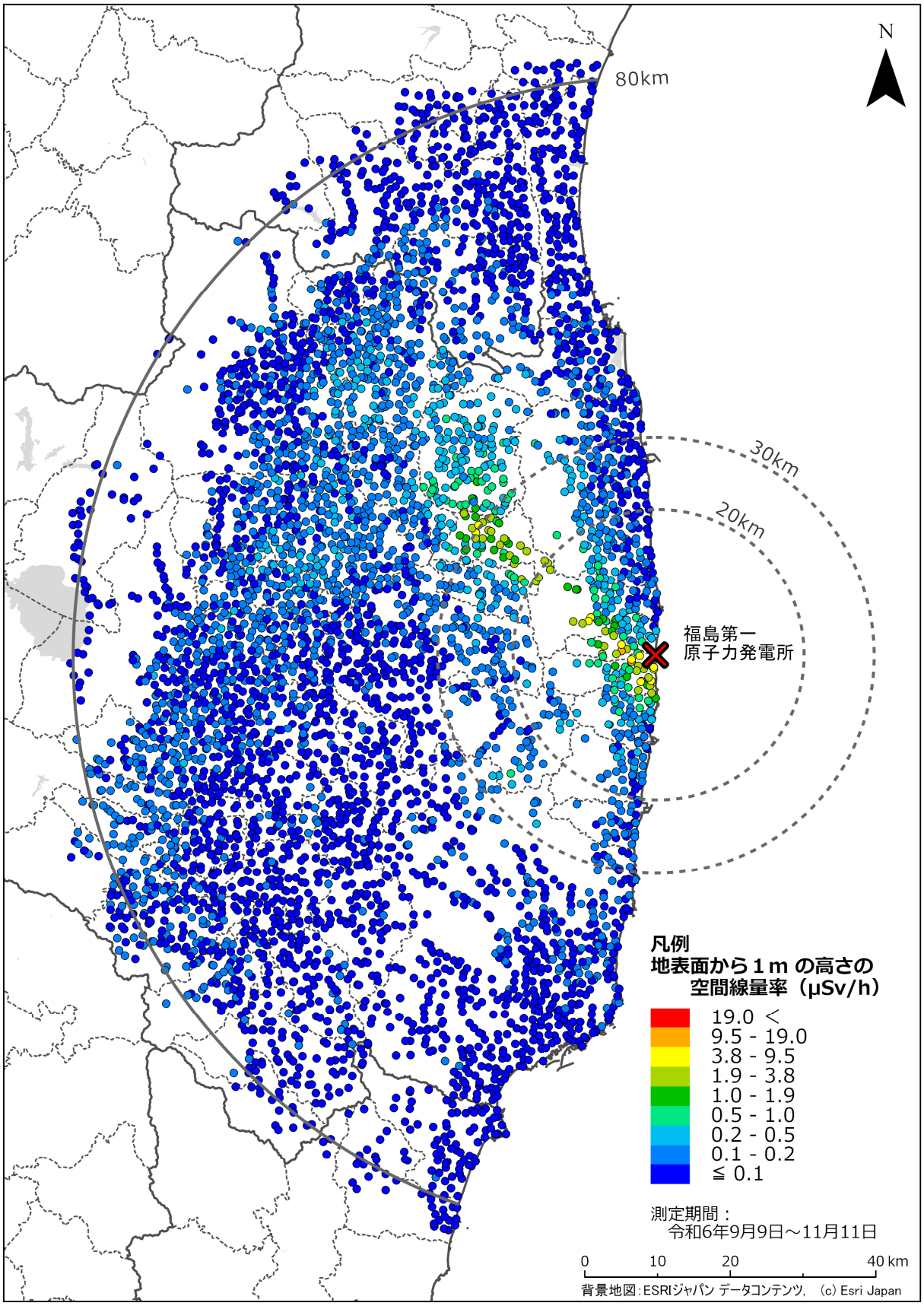


図 2-3　令和 6 年度調査における定点サーベイによる空間線量率の測定結果
（天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。）

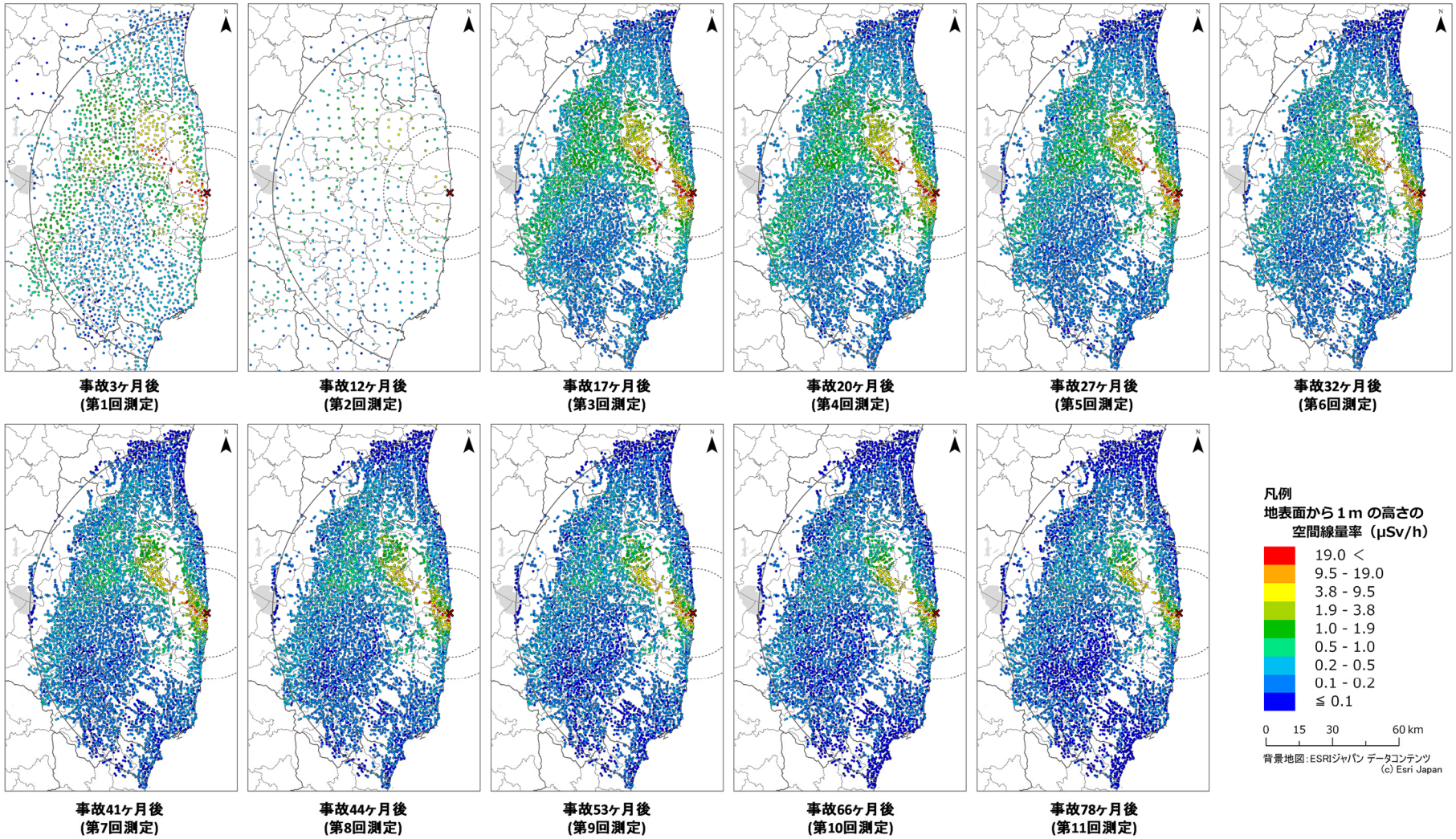


図 2-4　平成 23 年度から令和 6 年度までの定点サーベイによる空間線量率の変化（1/2）
（天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。）

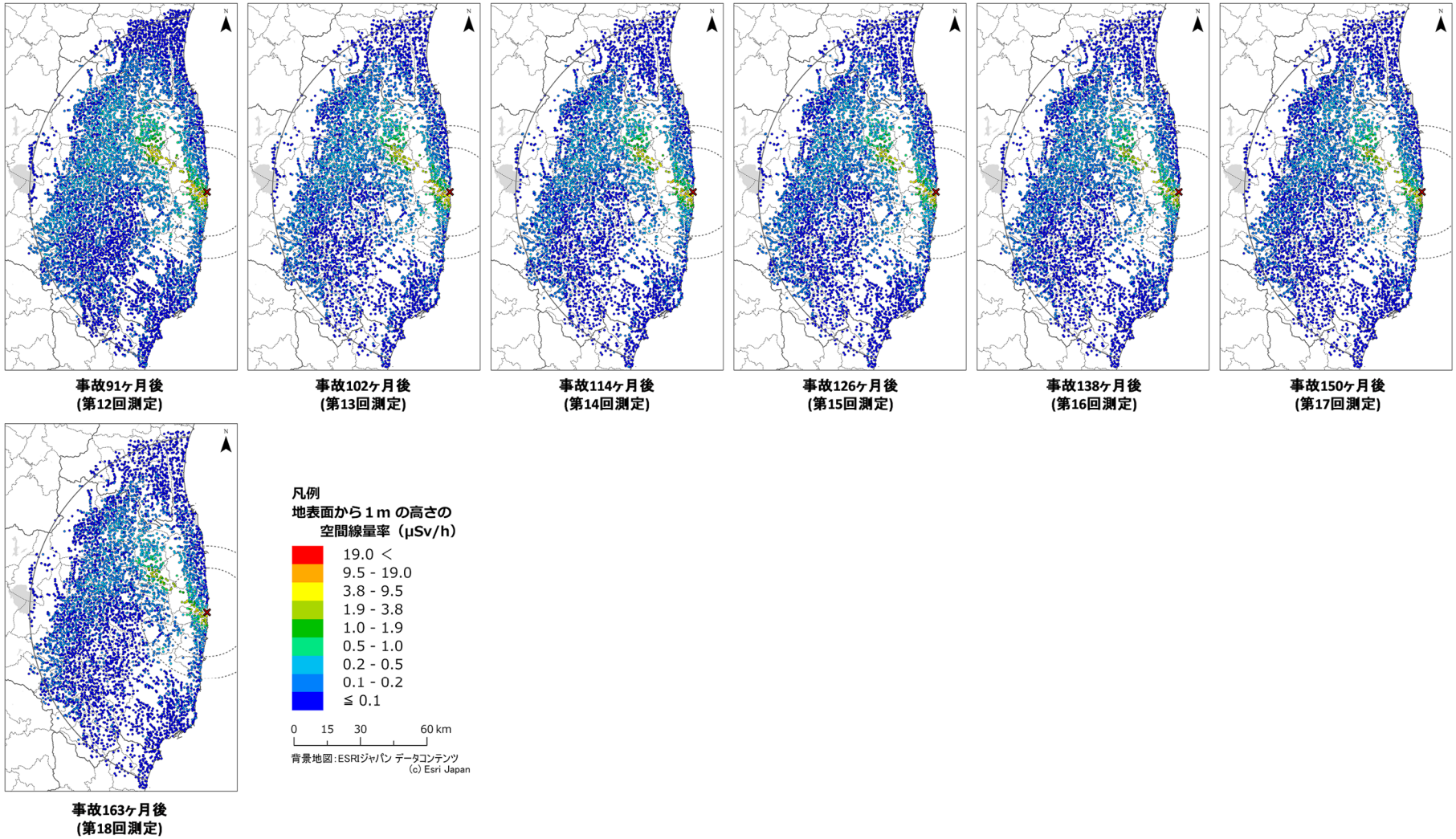


図 2-4　平成 23 年度から令和 6 年度までの定点サーベイによる空間線量率の変化（2/2）
（天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。）

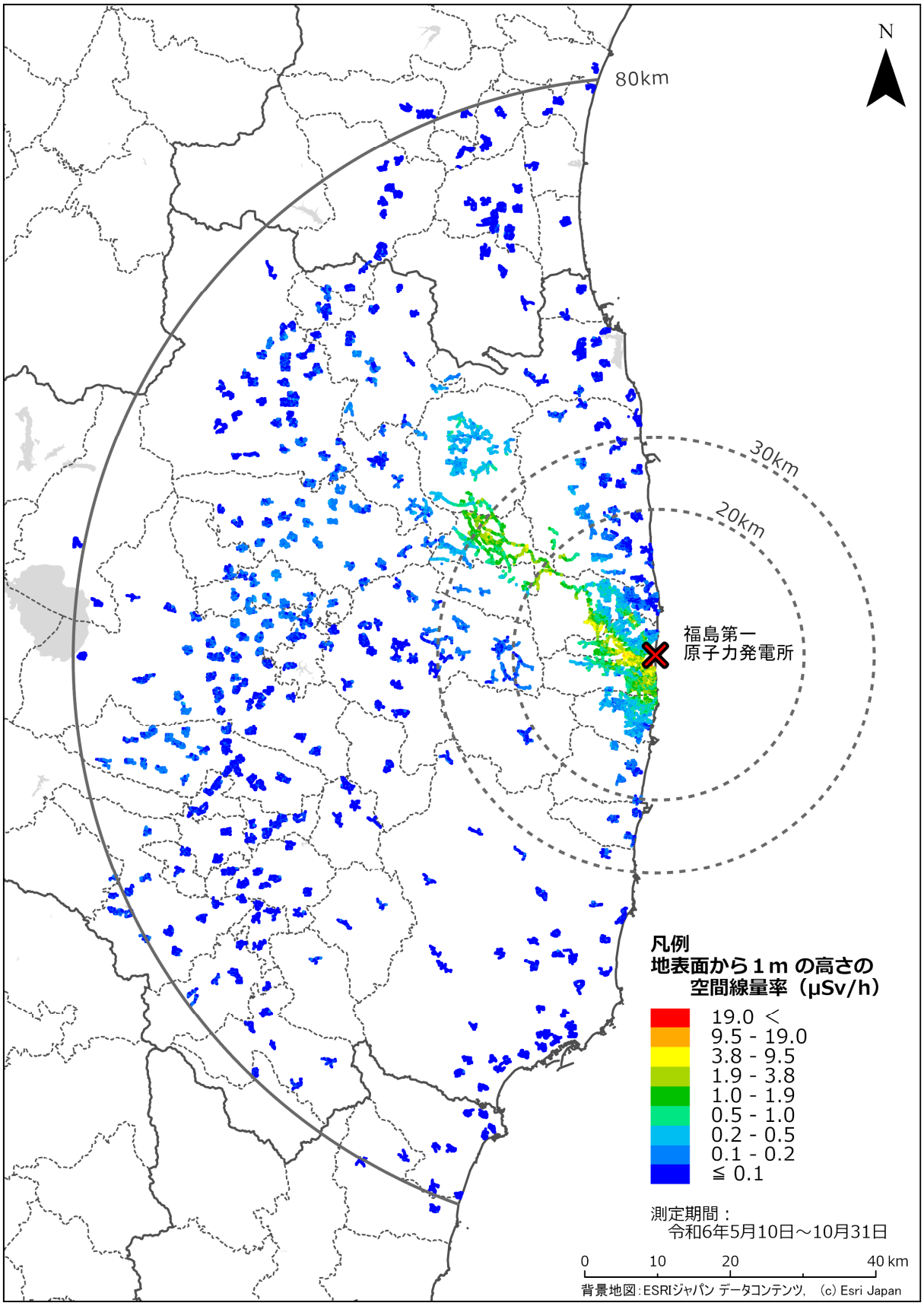


図 2-5　令和 6 年度調査における歩行サーベイによる空間線量率の測定結果
（天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。）

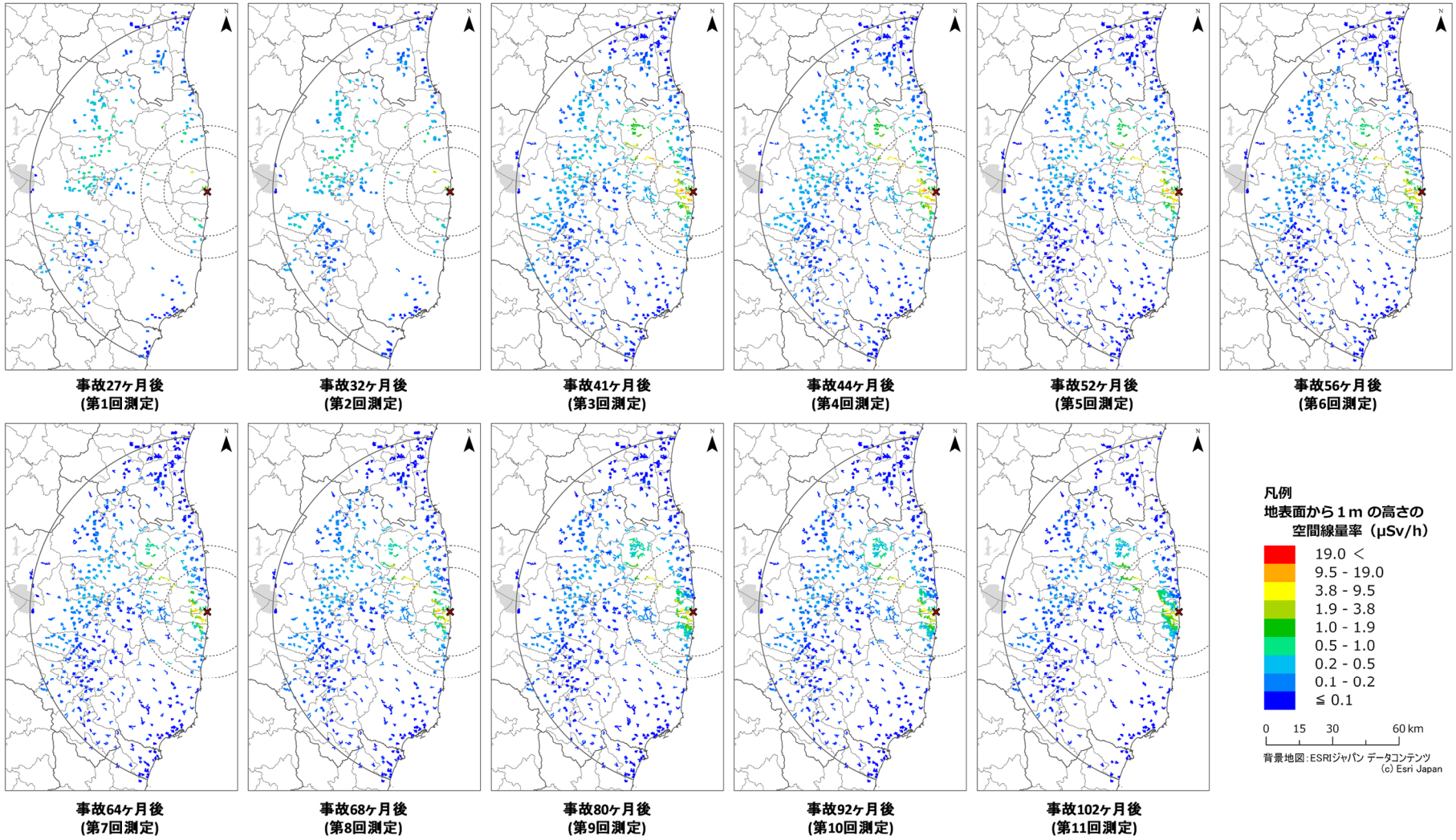


図 2-6　平成 25 年度から令和 6 年度までの歩行サーベイによる空間線量率の変化（1/2）
（天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。）

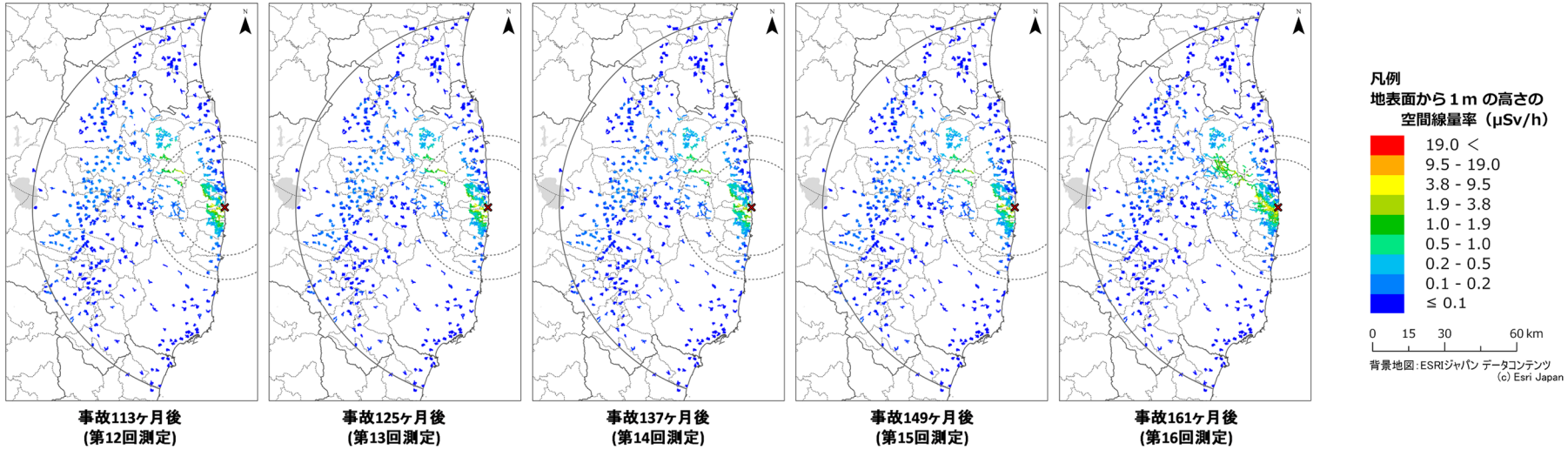


図 2-6　平成 25 年度から令和 6 年度までの歩行サーベイによる空間線量率の変化（2/2）
（天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。）

2.3.2　令和 5 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令和 5 年度調査での測定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* のヒストグラム及び積算割合を図 2-7 に示す。全測定手法について令和 5 年度調査と令和 6 年度調査の空間線量率測定結果は決定係数 R^2＝0.90～0.97 と良い相関関係にあり、相対変化率 *RC* は正規分布に近い釣鐘型を示した。一部のデータは令和 5 年度よりも令和 6 年度で高い値が確認された。これは、測定地域の空間線量率が全体的に減少してバックグラウンドレベルに近づいた結果、空間線量率の低い地域では測定誤差が影響したものと考えられる。また比較的空間線量率が高い（1 μSv/h 以上）箇所でも、令和 6 年度で空間線量率の増加が認められたが、これは同一メッシュ内の走行ルートや定点での測定箇所が前年度と異なったことによる。一例として走行サーベイにおける令和 5 年度調査と令和 6 年度調査の測定経路の違いを図 2-8 に示す。令和 6 年度は令和 5 年度と比較して空間線量率の高い経路を測定しており、その結果メッシュの平均空間線量率が増加している。ただし、この影響は等しい確率で空間線量率の減少要因にもなりうるものであり、増加と減少の双方の影響が相殺しているとした場合、*RC* への影響は限定的であると考えられる。

各基準地域メッシュにおける相対変化率 *RC* の平均値及び放射性セシウム（セシウム 134 及びセシウム 137）の半減期から計算した空間線量率の変化率を表 2-3 に示す。空間線量率の半減期補正の計算式を式 (3) に示す。

$$D_t = D_0 \frac{k \cdot exp(-\lambda_{134} \cdot t) + exp\,(-\lambda_{137} \cdot t)}{k+1} \qquad (3)$$

ここで、

D_t: 時間 t における空間線量率、D_0: 時間 t=0 での空間線量率、λ_{134}: セシウム 134 の崩壊定数（0.693/セシウム 134 の半減期）、λ_{137}: セシウム 137 の崩壊定数（0.693/セシウム 137 の半減期）、k: 初期のセシウム 134 及び 137 の線量率比（=2.7）である。k=2.7 については、文部科学省と日本分析センターが平成 23 年 8 月 13 日に実施した土壌試料と in-situ 測定の相互比較を行った際の数値 0.917 を半減期補正した平成 23 年 3 月 15 日時点におけるセシウム 134/セシウム 137 放射能組成比（1.04）及び緩衝深度 β（第 4 章で後述）を 1 と仮定した沈着密度－線量率換算係数（セシウム 134：0.00444 (μGy/h)/(kBq/m²)、セシウム 137：0.00173 (μGy/h)/(kBq/m²)）[8)]を考慮して求めた。

表 2-3 より、走行サーベイ、定点サーベイ及び歩行サーベイの全てにおいて、令和 5 年度調査に対する令和 6 年度調査の相対変化率 *RC* は、放射性セシウムの半減期から計算した空間線量率の変化率に比べて小さくなった。これは空間線量率に占める天然放射性核種の寄与が大きくなったためと考えられる。

表 2-3　令和 5 年度調査と比較した令和 6 年度調査の空間線量率測定結果の相対変化率

	走行サーベイ	定点サーベイ	歩行サーベイ
令和 5 年度の測定期間	R5/6/20−R5/12/7	R5/8/8−R5/10/10	R5/5/15−R5/11/24
令和 6 年度の測定期間	R6/6/13−R6/11/14	R6/9/9−R6/11/11	R6/5/10−R6/10/31
放射性セシウムの半減期による変化率	−3.3%	−3.9%	−3.3%
測定結果による相対変化率の平均値	−0.78%	−2.4%	−1.4%

2.3.3　測定手法間の比較

令和 6 年度調査での定点サーベイに対する走行サーベイ及び歩行サーベイによる空間線量率の比較結果（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 2-9 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 21%小さい（図 2-9 (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−3%程度であり（図 2-9 (b)）、走行サーベイと定点サーベイの相違に比べて小さい。図 2-9 (c)を見ると走行サーベイは歩行サーベイより 14%小さくなっており、両者の測定対象の違い（車道と歩道）によりセシウムの移動状況の違いが表れていると考えられる。以上より、走行サーベイ及び歩行サーベイでは、定点サーベイによる人為的影響の少ない環境に比べ、空間線量率の減少が速いことが分かる。これは、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ためであると考えられる。

これら相対偏差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（相対偏差）を図 2-10 に示す。走行サーベイ/定点サーベイの結果は、事故から約 3 ヶ月後の平成 23 年度調査を除き平均値で−15%から−30%で推移している。定点サーベイに対する歩行サーベイの相対偏差の平均値は概ね 0% から−10%の間で推移している。事故直後を除いて測定手法間による空間線量率の違いに経時的な変化はほとんど見られないと言える。

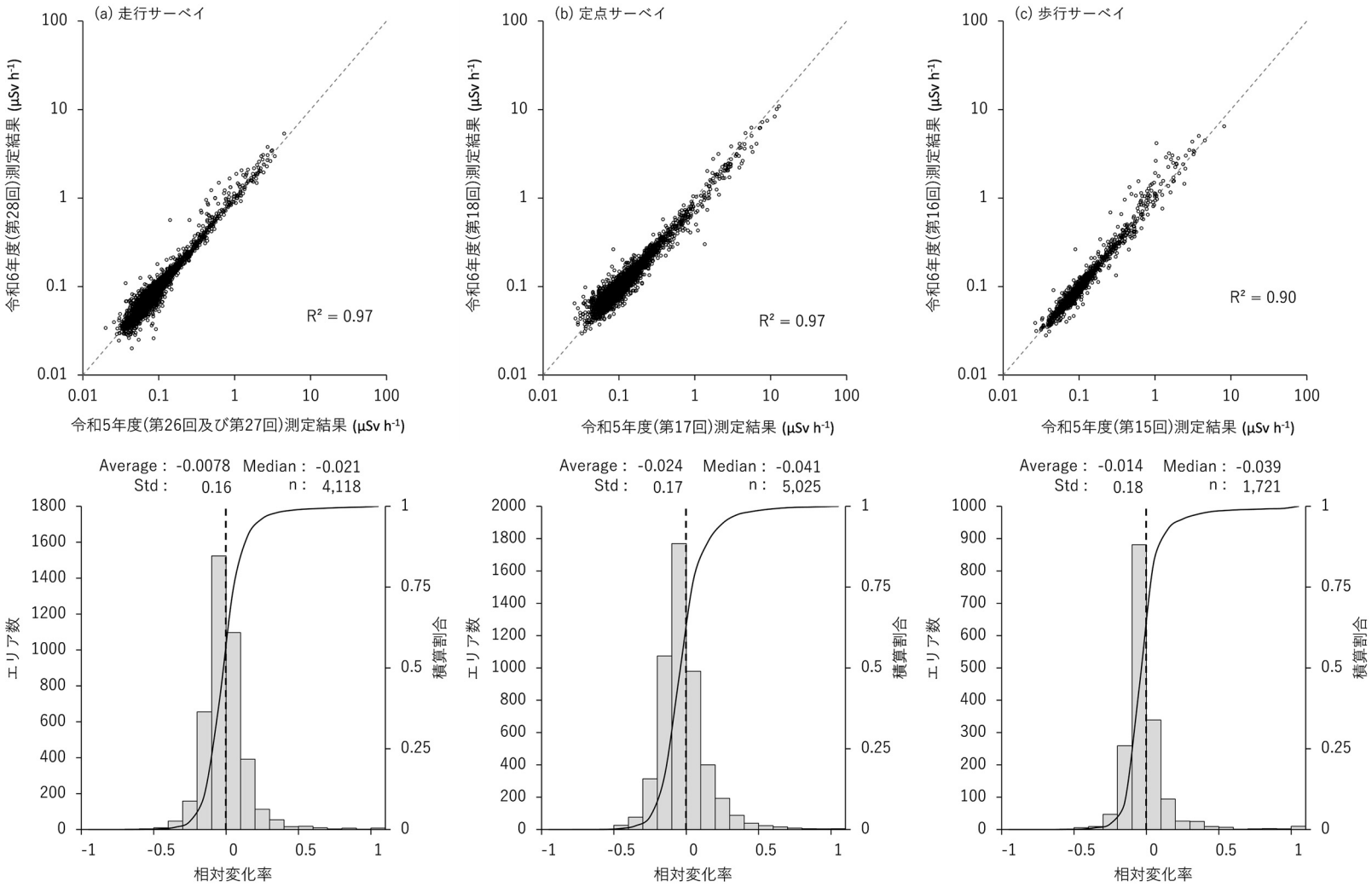


図 2-7　令和 5 年度調査と令和 6 年度調査の空間線量率測定結果の比較

（相関図の破線は $y=x$、R^2 は決定係数、Std は標準偏差、n はデータ数を意味する。）

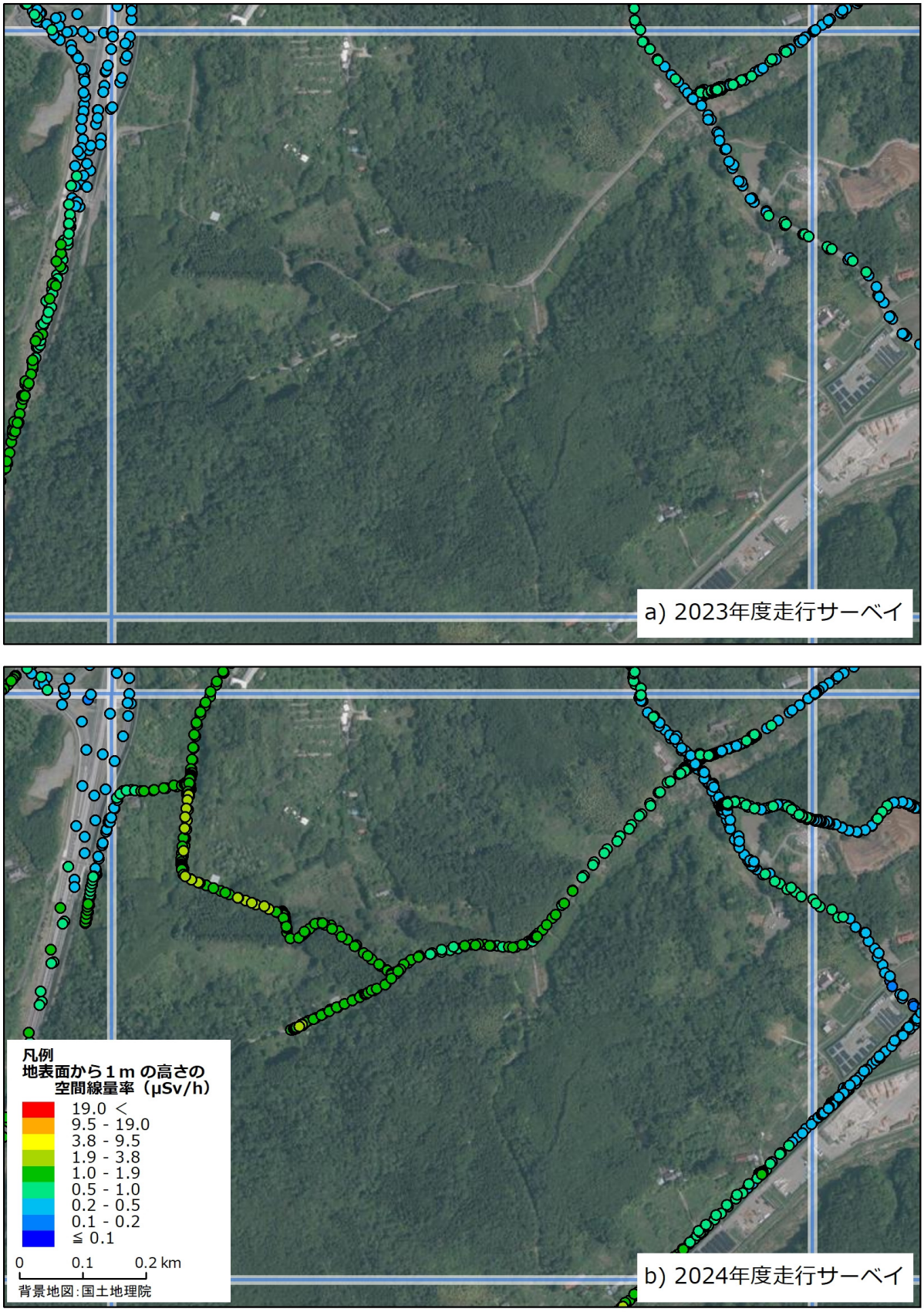


図 2-8　令和 5 年度調査及び令和 6 年度調査における走行サーベイの走行ルートの違いの一例
（天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。）

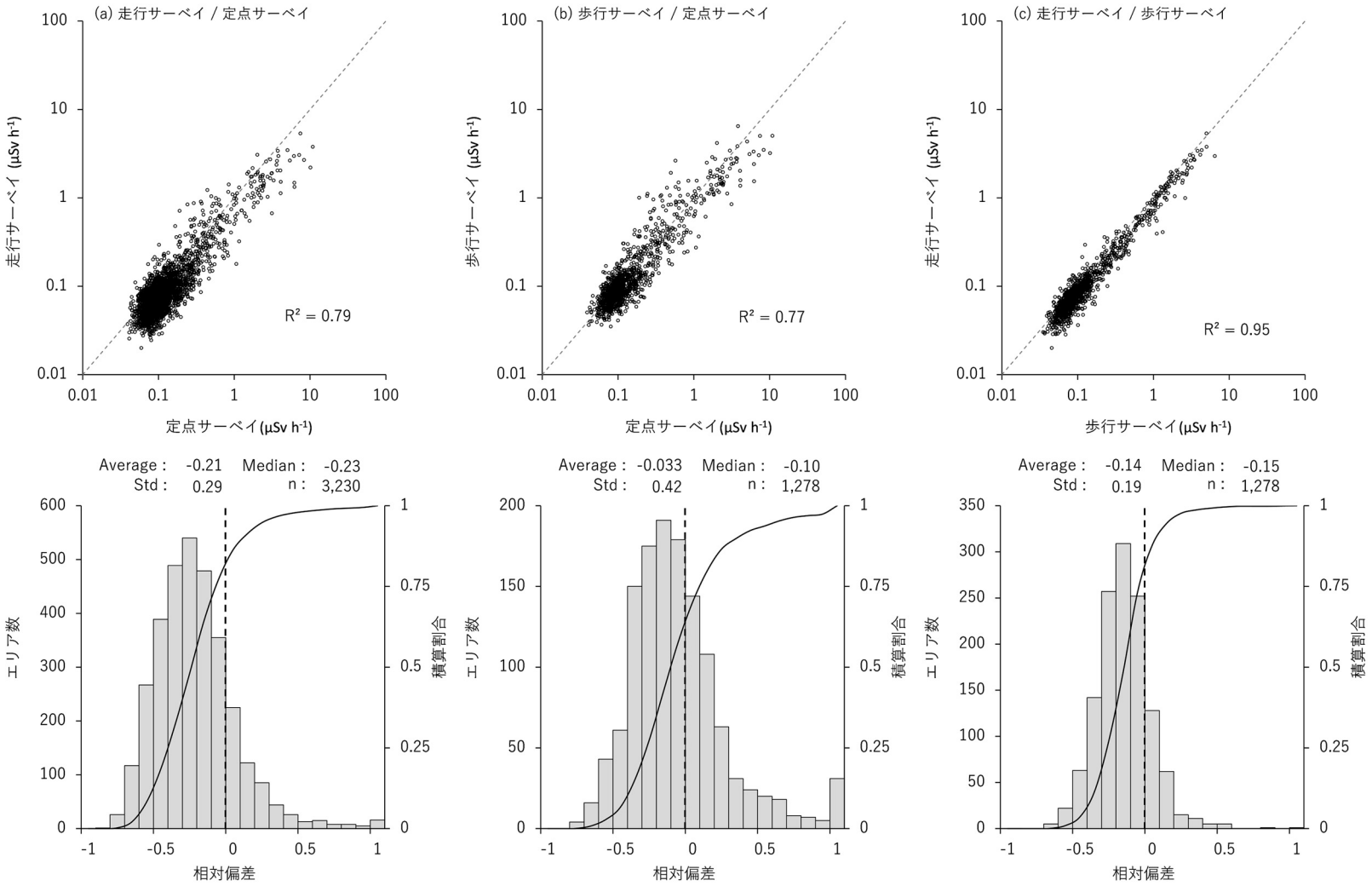


図 2-9　令和 6 年度調査での空間線量率測定手法間の比較

（相関図の破線は $y=x$、R^2 は決定係数、Std は標準偏差、n はデータ数を意味する。）

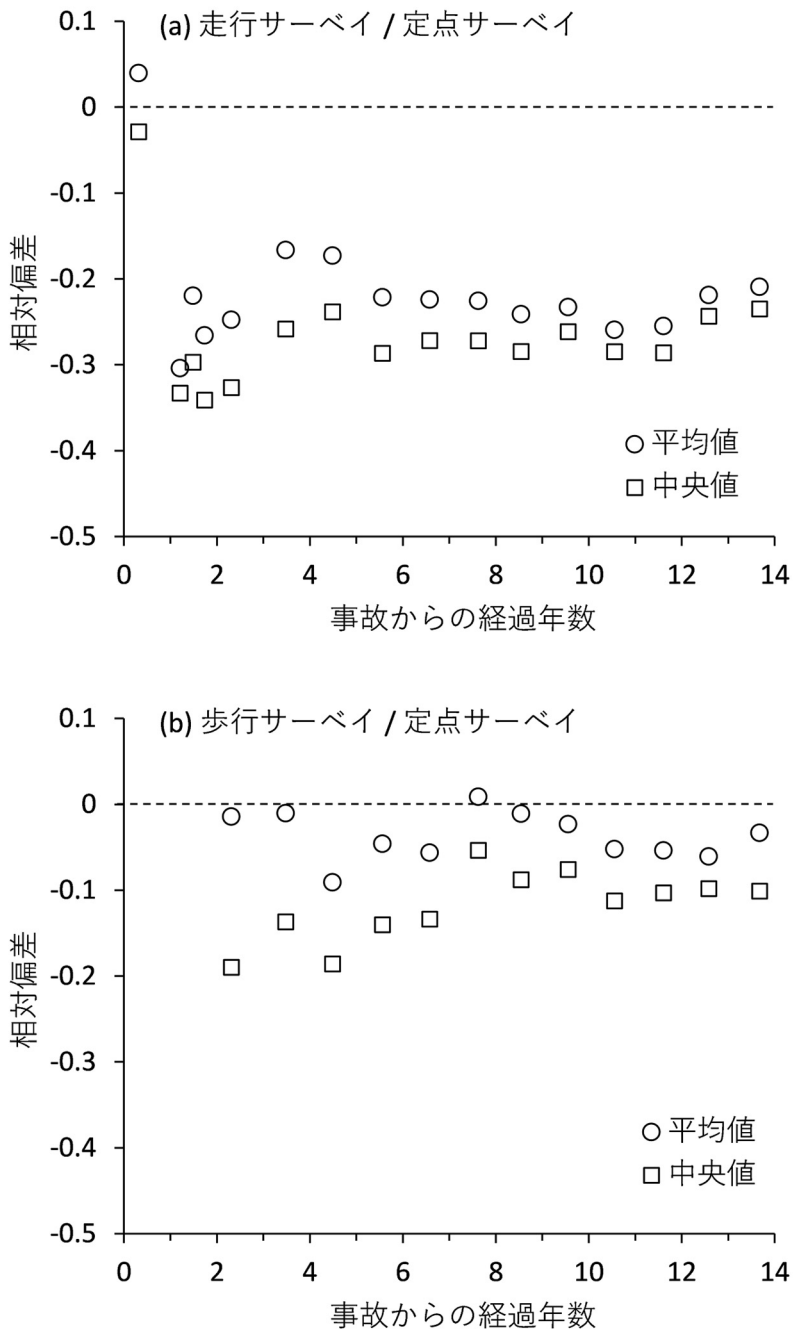


図 2-10　定点サーベイに対する走行サーベイ及び歩行サーベイの空間線量率の相対偏差

3. 無人ヘリによる発電所周辺の測定及び無人航空機の山間部における基礎性能試験

3.1 調査目的

無人ヘリコプター（以下「無人ヘリ」という。）は、有人ヘリコプターによるモニタリング（以下「航空機サーベイ」という。）と比較して低高度で飛行が可能でヘリコプターの軌跡幅（測線間隔）も細かく設定できるため、位置分解能の高い空間線量率分布の測定が可能である。具体的には、航空機サーベイでは 250 m メッシュの分解能に対し、無人ヘリでは 5 m メッシュの分解能で空間線量率分布の評価が可能である。令和 6 年度調査では、無人ヘリサーベイにより福島第一原発から概ね 5 km の範囲の空間線量率等の測定を実施した。また、無人航空機の山間部への適用可能性を確認するため、固定翼型無人航空機（以下「無人機」という。）を用い山間部において基礎性能試験データ取得試験を実施した。以下、これを「無人機サーベイ」という。

なお、事故後、福島第一原発から 3 km 圏内については、航空法による飛行制限区域（平成 25 年 2 月 5 日までは飛行禁止区域）であり航空機サーベイは実施されていなかった。分布状況調査では、平成 24 年度より航空法による規制を受けない無人ヘリを用いて福島第一原発から 3 km 圏内の放射線量率分布測定が開始され [9]、平成 25 年度調査から航空機サーベイと 2 km 程度オーバーラップさせた約 5 km 圏内を測定対象とした [10]。

3.2 無人ヘリによるガンマ線測定及び空間線量率マップの作成

3.2.1 調査手法

令和 6 年度の無人ヘリサーベイ実施期間等は以下のとおりである。

- 調査期間：令和 6 年 5 月 10 日～10 月 2 日
- フライト範囲：74.2 km^2
- 合計測定距離：865.8 km

測定には、ヤマハ発動機株式会社製の自律飛行型無人ヘリ FAZER-R G2 を使用し、地上からの直達ガンマ線及び空気による散乱線を合わせた全計数率とガンマ線エネルギースペクトルを 1 秒間に 1 回連続測定した。放射線検出器には $LaBr_3$ (Ce)シンチレーション検出器（2.0"Φ×2.0"長さ×3 本）を用いた。測定データの位置情報取得には差分全地球測位システム DGPS（Differential Global Positioning System）を用いた。無人ヘリサーベイに用いた機材の仕様等を図 3-1 に示す。なお、検出器の特性確認として、試験用標準線源（日本アイソトープ協会製 CS462CE）を用いて、正味の計数率とエネルギー分解能を評価するとともに、測定ごとに解析システムによりガンマ線エネルギーピークの位置に変動がないことを確認した。

無人ヘリの飛行高度は、安全面及び測定データの信頼性を考慮し、対地高度で 80 m を目安とした。上空で測定される放射線は、無人ヘリ下部の直径約 200 m 程度の円内のガンマ線量を平均化したものである [11]。無人ヘリの飛行軌跡幅（測線間隔）は 80～100 m、飛行速度は 8 m/s（= 28.8 km/h）程度とした。これらフライト条件は測定結果の比較を容易にするため、第 3 回以降は全く同じとしている。フライトの飛行軌跡を図 3-2 に示す。

上空で測定されたガンマ線計数率には、地表の放射性セシウムや天然放射性核種に由来する計数率（C_{net}）に加え、検出器結晶内に由来するバックグラウンド計数率が含まれる。バックグラウンド計数率の影響を除くため、事前に陸域の影響の無い海上でガンマ線計数率を求め、以後の解析においては取得データからこのバックグラウンド計数率を減じ、各種係数や空間線量率の算出に用いた。

上空で測定されたガンマ線計数率から地上のガンマ線計数率を推定するため、開けたテストサイト上空において、対地高度 20 m、30 m、40 m、60 m、80 m、100 m、120 m、150 m でホバリングし、ガンマ線計数率を取得した。各対地高度の平均値とガンマ線計数率の平均値は指数近似曲線で表され、この曲線の傾きを空気減弱係数 *AF*（Attenuation Factor、単位： m^{-1}）として求めた。

ガンマ線計数率から空間線量率を求めるため、ホバリング地点の中心座標から半径 80 m 範囲内の空間線量率の平均値を求め、高度 1 m の推定計数率と空間線量率平均値の比を空間線量率換算係数 *CD*（cps/(μSv/h)）として求めた。令和 6 年度調査にて取得したテストサイトにおけるキャリブレーション結果を表 3-1 に示す。令和 6 年度の *AF* と *CD* は、10 回のキャリブレーションで取得した平均値（*AF*：-0.00675 m^{-1}, *CD*：7,195 cps/ (μSv/h)）とした。

地上 1 m における空間線量率（*D*）は、式(4)により求めた。

$$D = \frac{C_{\mathrm{net}} \times \exp^{((H_s - H_m)\ \cdot\ AF)}}{CD} \tag{4}$$

ここで、H_s は基準高度（=1 m）、H_m は測定高度である。

D は上述のように、天然放射性核種と放射性セシウムの両方に由来する。そのため放射性セシウムの減衰補正を行う前に、放射性セシウムに由来する空間線量率（D_{cs}）のみを求める必要がある。ここでは、1,400 keV を超える高エネルギー帯のガンマ線が放射性セシウムに由来しない事に基づき、以下の手順にて放射性セシウムに由来する D_{cs} を求めた。

① あらかじめ放射性セシウムの無い地域でフライトすることでガンマ線スペクトルを取得し、（50 keV－2,800 keV の計数率）／（1,400 keV－2,800 keV の計数率）比（以下、*BG-index* という。）を求める。

② 福島第一原発の周辺で取得されたガンマ線スペクトルの 1,400 keV－2,800 keV の計数率と①で求めた *BG-index* から、天然放射性核種に由来する 50 keV－2,800 keV のガンマ線計数率を求める。

③ 天然放射性核種に由来するガンマ線計数率を減じて放射性セシウムに由来するガンマ線計数率を求める。

④ 式(4)に従い地上 1 m における放射性セシウムに由来する D_{cs} を求める。

求めた D_{cs} に放射性セシウムの減衰補正を施し、測定期間の最終日時点の値に換算した。地上高 1 m の空間線量率 *D* は、これに天然放射性核種に由来する空間線量率を足し合わせて求めた。求めた *D* は、同時取得された座標情報とともに GIS ソフトウエアを用いて、内挿法（クリギング法）により 5 m メッシュの分解能で内挿補間しマップ化した。また、過去のデータ等との比較に用いるデータについては、無人ヘリの測定範囲（線源視野範囲）

を考慮し、5 m メッシュのデータを基に 100 m メッシュごとに平均した。

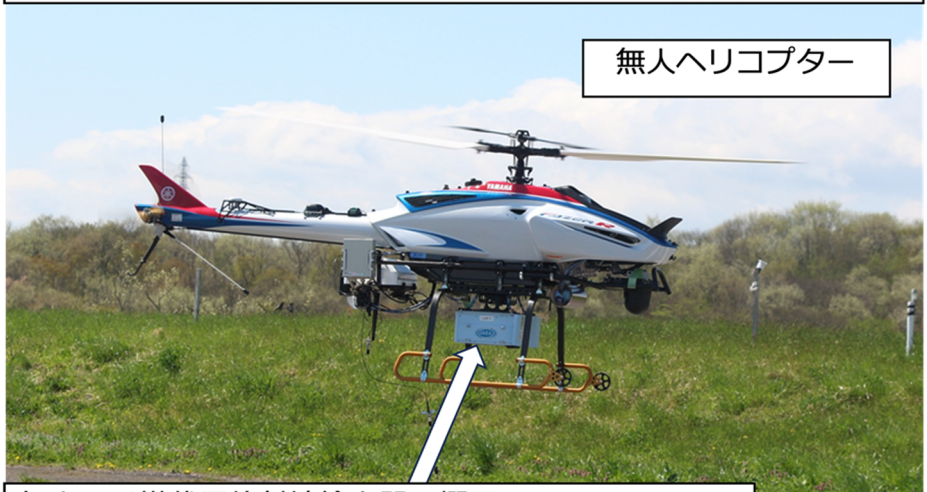
表 3-1　テストサイトにおける換算パラメータ及びそれらの取得条件

ID	テストサイト場所		実施日	ホバリングの	基準高度計数率	地上値	AF	CD
	緯度	経度		対地高度(m)	(cps at 80m)	(μSv/h)	(m^{-1})	(cps/(μSv/h))
1	37.41125842	140.9582196	R6.5.10	76	7619	2.19	-0.00928	7248
2	37.40474360	140.9912167	R6.5.22	76	2574	0.53	-0.00594	7508
3	37.38600586	140.9947473	R6.6.7	70	3288	0.86	-0.00681	6542
4	37.41125553	140.9582216	R6.6.17	79	7919	2.26	-0.00910	7178
5	37.40474327	140.9912158	R6.6.26	75	2646	0.50	-0.00561	8233
6	37.38602095	140.9947547	R6.7.2	73	3377	0.92	-0.00660	6161
7	37.40474865	140.9912227	R6.7.16	76	2498	0.51	-0.00573	7739
8	37.38602676	140.9947493	R6.7.29	73	3483	0.87	-0.00647	6674
9	37.38601725	140.9947445	R6.10.2	74	3279	0.84	-0.00643	6517
10	37.40474578	140.9912239	R6.10.2	76	2506	0.48	-0.00550	8147
						平均値	-0.00675	7195
						採用値	-0.00675	7195

ヤマハ発動機（株）自立飛行型無人ヘリコプターFAZER-R G2

- 最大離陸重量　　：110kg*
- 全長・全幅・全高　　：3,665mm・770mm・1,078mm*
- 飛行時間　　：100分*
- 最大搭載可能測定器重量　　：28kg*
- 最高速度　　：72km/h*
- 搭載機器　　：全方位カメラ、GPSセンサー
- 線量計からのデータを無線で基地局に送信できること

＊：国土交通省機体登録届出値



無人ヘリ搭載用放射線検出器の概要

- 検出部　　：$LaBr_3$(Ce)検出器
- 検出部サイズ　　：2.0″Φ × 2.0″H × 3本（51mmΦ x 51mmH x 3本）
- 検出範囲　　：BG ～0.1 mSv/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）

無人ヘリの操縦（基地局）

図 3-1　無人ヘリサーベイの機材の仕様等

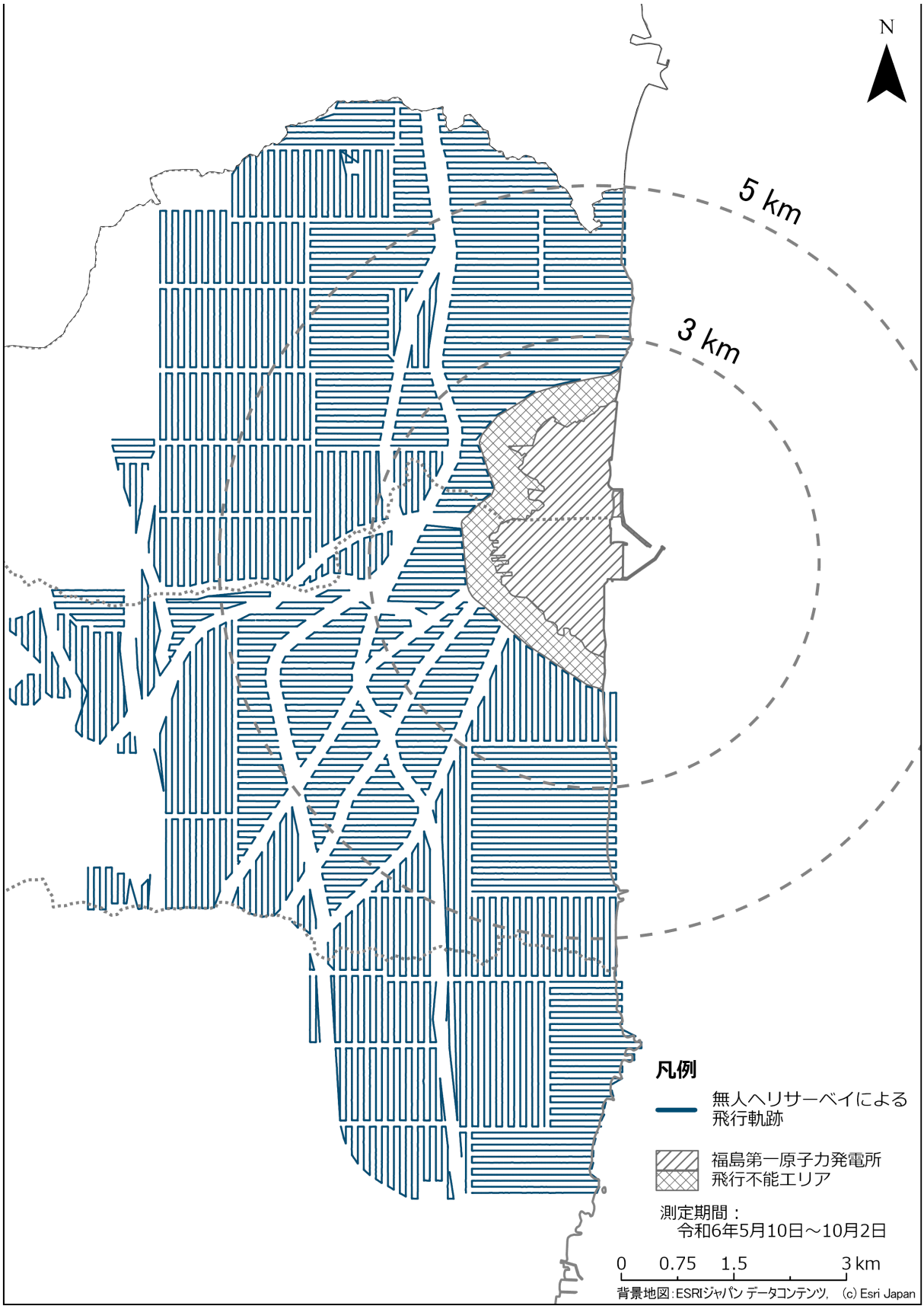


図 3-2　令和 6 年度調査での無人ヘリサーベイの飛行軌跡

3.2.2　福島第一原発から約 5 km 圏内の空間線量率測定結果

1）空間線量率分布マップ

令和 6 年度調査において実施した無人ヘリサーベイによる空間線量率マップを図 3-3 に示す。また、第 1 回から令和 6 年度までの主に 5 km 圏内の空間線量率マップを図 3-4 に示す。図 3-4 から時間の経過とともに空間線量率の高い暖色系のエリアが小さくなってきていることが分かる。空間線量率の経時変化傾向の定量的評価については第 5 章で述べる。

2）測定結果の妥当性の検証

結果の妥当性を検証するために、測定地点直下の地上で測定した結果（第 2 章の定点サーベイによる測定結果）と比較した。無人ヘリサーベイの測定結果から評価した 100 m メッシュデータと同地点における地上での測定結果を比較した散布図及び 2 測定間の相対偏差（式(2)において、無人ヘリサーベイの測定結果を D_a、同地点における定点サーベイによる測定結果を D_b とした。）を図 3-5 に示す。なお、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。散布図を見ると良い相関関係（決定係数 R^2=0.87）を示しており、令和 6 年度調査での結果は概ね地上の測定結果を再現できていたと考えられる。なお、図 3-5 上図では 1 μSv/h 以下の低線量域において無人ヘリサーベイによる測定値が過大評価となり、図 3-5 下図では相対偏差が 1 以上となる頻度がやや大きくなる傾向が近年見られる。令和 6 年度調査ではその割合が 15%程度となった。この原因として、無人ヘリサーベイは広い範囲の平均的な線量を測定するのに対し、地上での測定が除染等の理由で周辺の空間線量率と比較して、局所的に低い測定ポイントで実施されることが多くなったことが考えられる。

3）令和 5 年度との比較

測定区域を 100 m メッシュに分割し、メッシュごとに令和 5 年度調査と令和 6 年度調査での無人ヘリサーベイによる空間線量率測定結果を比較した。散布図及び式(1)で定義した相対変化率を図 3-6 に示す。散布図は良い相関関係（決定係数 R^2=1.0）を示している。また、令和 6 年度調査では令和 5 年度調査から約 5%減少（変化率の平均値で）したことが分かる。

図 3-7 に令和 5 年度調査の空間線量率測定結果に対する令和 6 年度調査の空間線量率の測定結果の比（相対変化率）をマップにして示す。福島第一原発周辺の地域を中心に顕著に空間線量率の減少が確認できる場所があることが分かった。この要因を調査した結果を図 3-8 に示す。ほとんどの地域は、現在、建設中である施設のエリア又は特定帰還居住区域のエリアと一致しており、施設建設における造成作業や農地の耕起による影響が表れているものと考えられる。

3.2.3　福島第一原発から約 5 km 圏内の放射性セシウム沈着量評価

無人ヘリによる上空からの放射線測定結果を基に福島第一原発周辺（半径 5 km 程度）の放射性セシウム沈着量を求めた。沈着量評価には、平成 25 年度に確立したガンマ線スペク

トル情報から放射性核種ごとに評価する手法[12]を用いている。

放射性セシウムの沈着量の算出手順を以下に示す。

① 3.2.1 項に示した手法に従い *BG-index* と式(4)用いて放射性セシウムのみの空間線量率（D_{Cs}）を算出する。

② 式(5)より、D_{Cs} を空間線量率－放射能換算係数（*CF*：セシウム 134 で 3.25E^{-6}、セシウム 137 で 1.265E^{-6}（μSv/h)/(kBq/m^2)）で除して放射性セシウムの沈着量 *Rd* を求める。

$$Rd = \frac{D_{Cs}}{CF} \tag{5}$$

CF を求めるには、重量緩衝深度の設定が必要であるが、4.1 節に示す結果から実効的な重量緩衝深度β_{eff}=4.49 g/cm^2 を用いた。

検出下限値を求める際には、バックグラウンド計数率の標準偏差(σ_{Nb})から式(6)に示した Currie の式[13]に当てはめ、検出下限値(*Nd*)を算出した結果、9.1 kBq/m^2 と求められた。

$$Nd = 4.653\sigma_{Nb} + 2.706 \tag{6}$$

無人ヘリサーベイの測定結果から求めた沈着量（換算値）の分布マップを図 3-9（右）に示す。また、比較のため、令和 5 年度調査での測定結果を同図（左）に示す。福島第一原発から北西部分と南部分は 3 MBq/m^2 を超える比較的高いエリアが広がっていることが分かる。一方、北側の海岸沿いは、300 kBq/m^2 以下のエリアも存在する。令和 5 年度調査での沈着量（換算値）と比較すると、測定範囲の全体で沈着量がわずかに低くなったことが分かる。

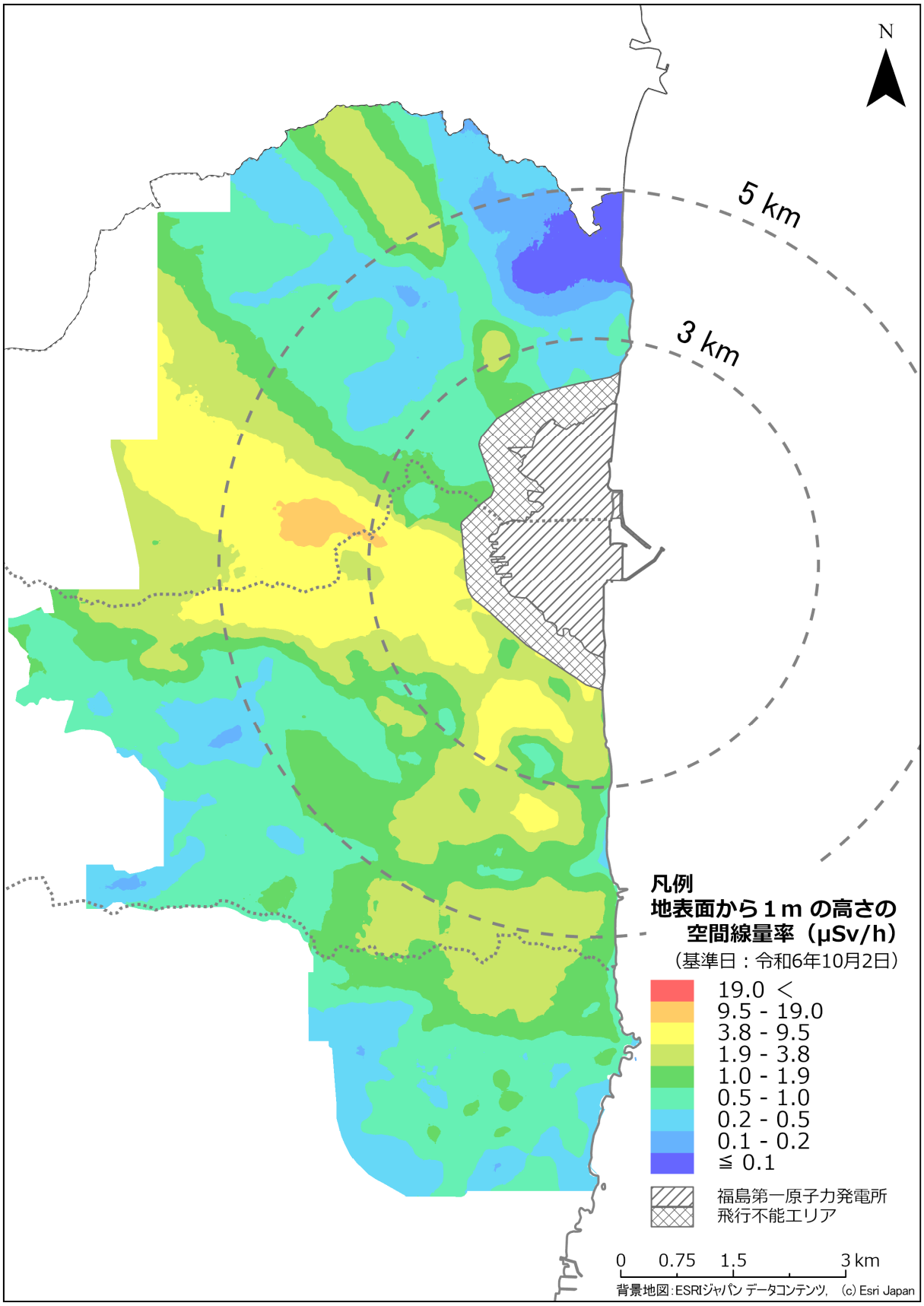


図 3-3　令和 6 年度調査における無人ヘリサーベイによる空間線量率測定結果
（天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。）

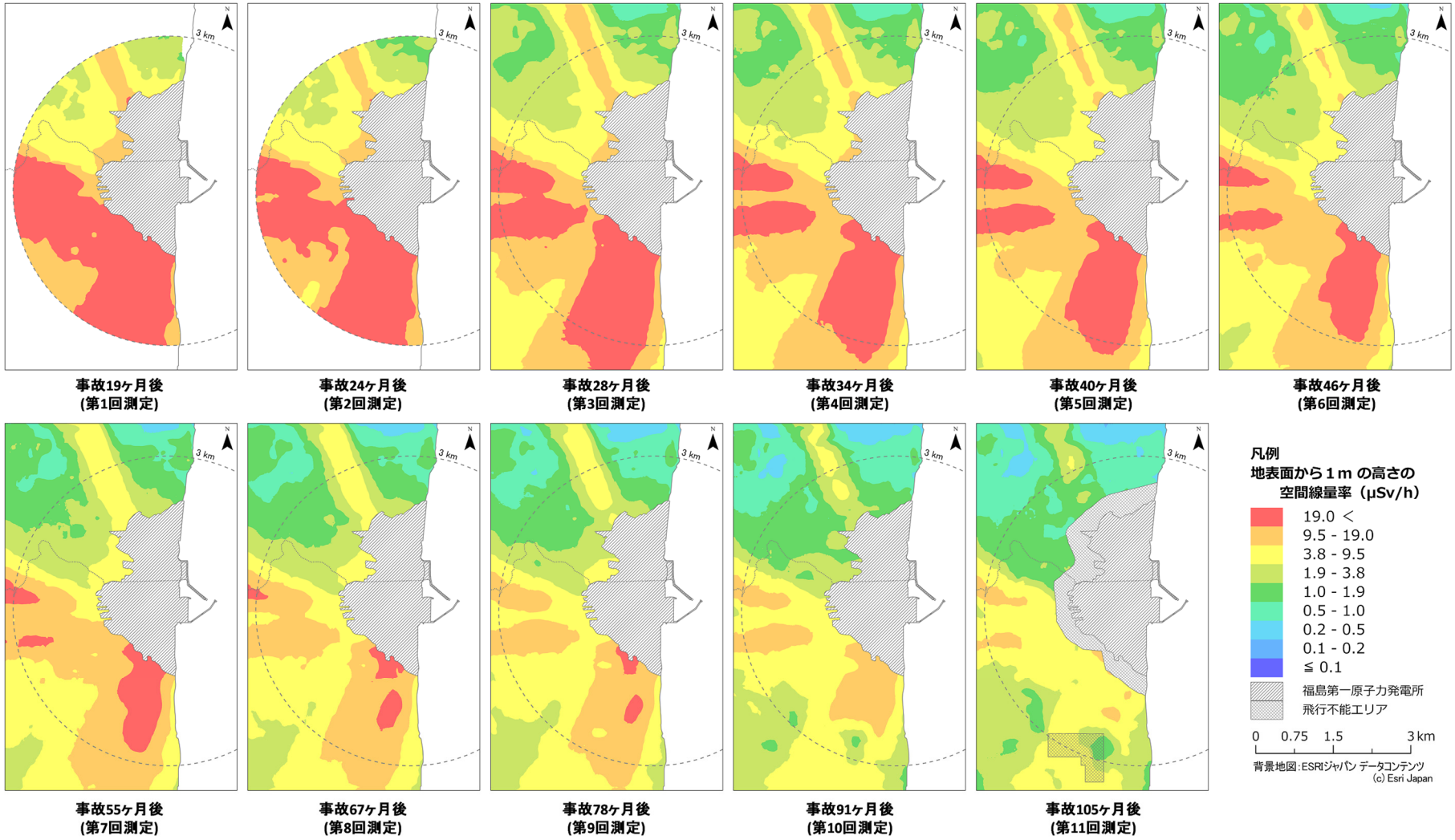


図 3-4　平成 24 年度から令和 6 年度までの無人ヘリサーベイによる空間線量率の変化（1/2）
（福島第一原発から 5 km 圏内主体。天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。）

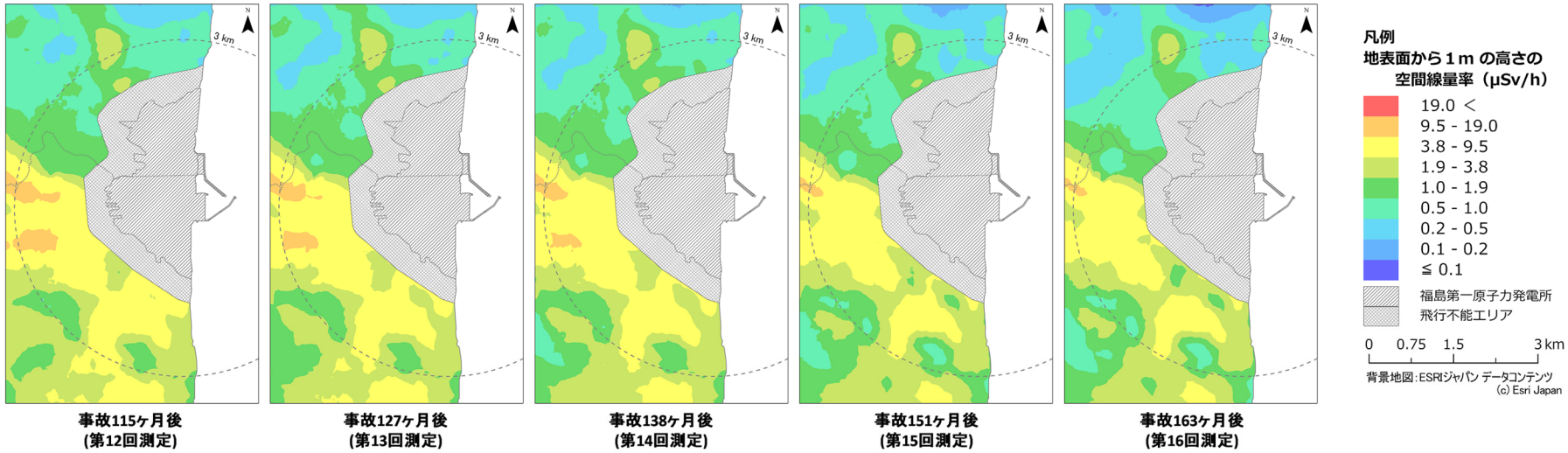
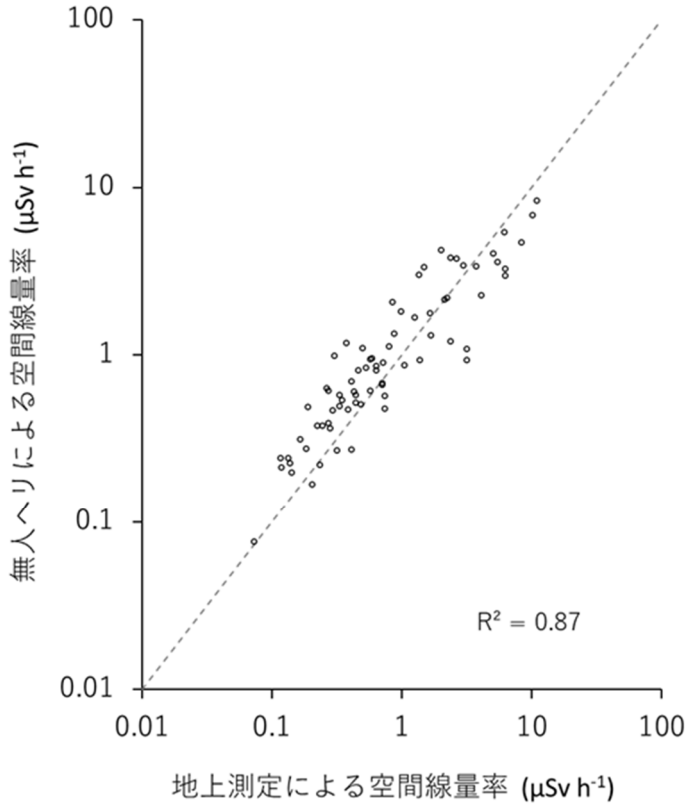


図 3-4　平成 24 年度から令和 6 年度までの無人ヘリサーベイによる空間線量率の変化（2/2）
（福島第一原発から 5 km 圏内主体。天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。）



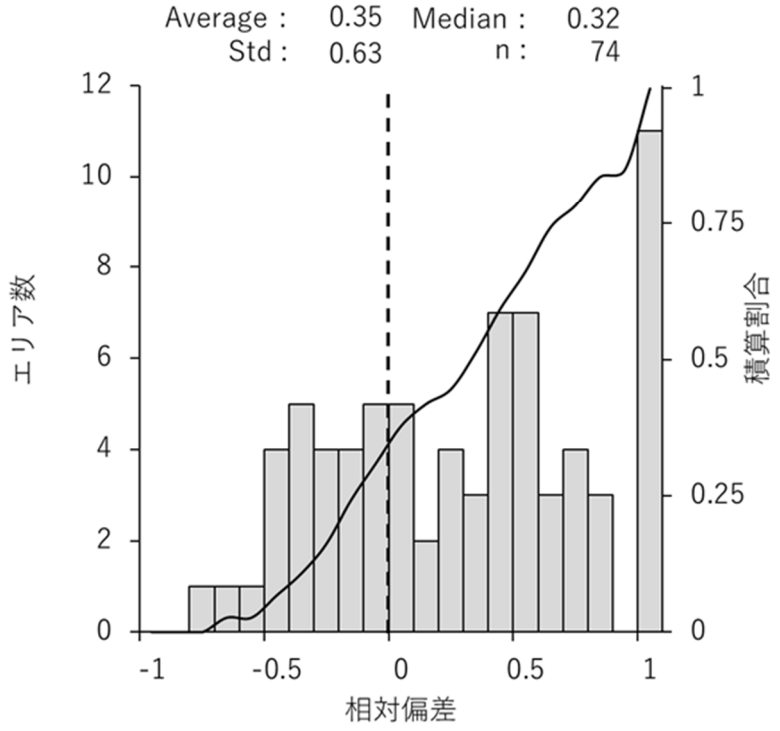
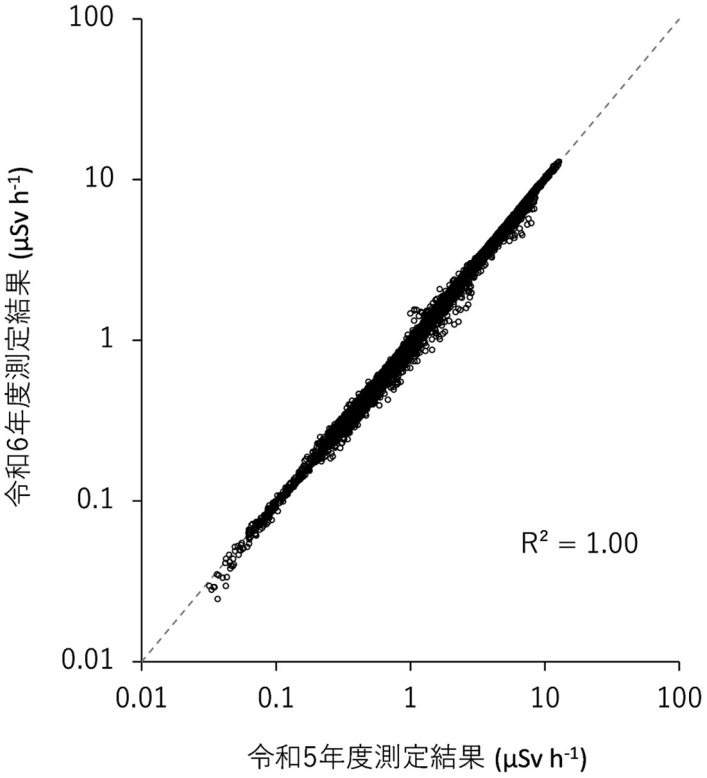


図 3-5　無人ヘリサーベイと地上測定（定点サーベイ）による空間線量率の比較
（相関図の破線は $y=x$、R^2 は決定係数、Std は標準偏差、n はデータ数を意味する。）



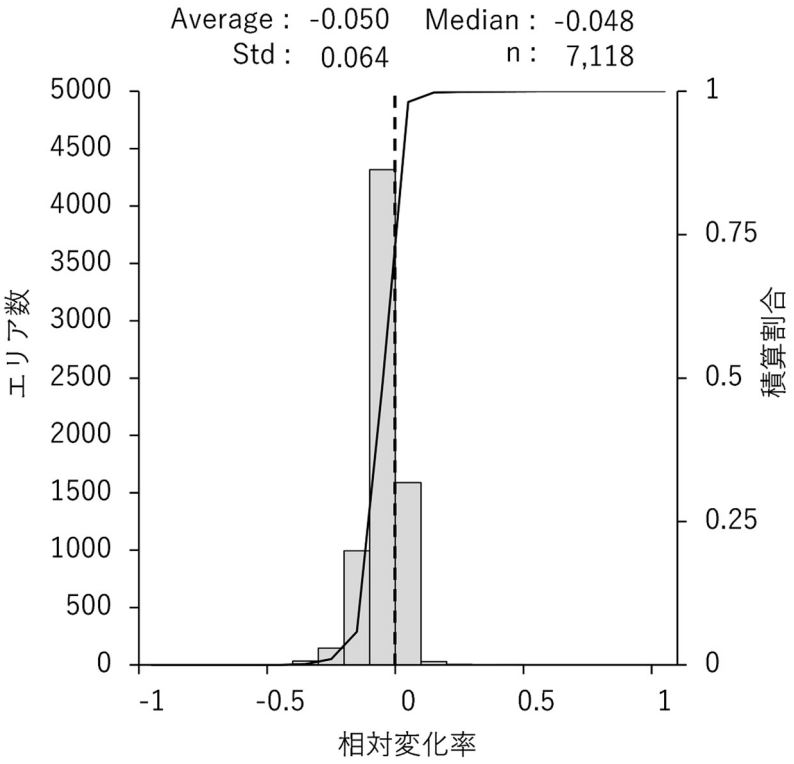


図 3-6　令和 5 年度調査と令和 6 年度調査での無人ヘリサーベイによる空間線量率測定結果の比較

（相関図の破線は $y=x$、R^2 は決定係数、Std は標準偏差、n はデータ数を意味する。）

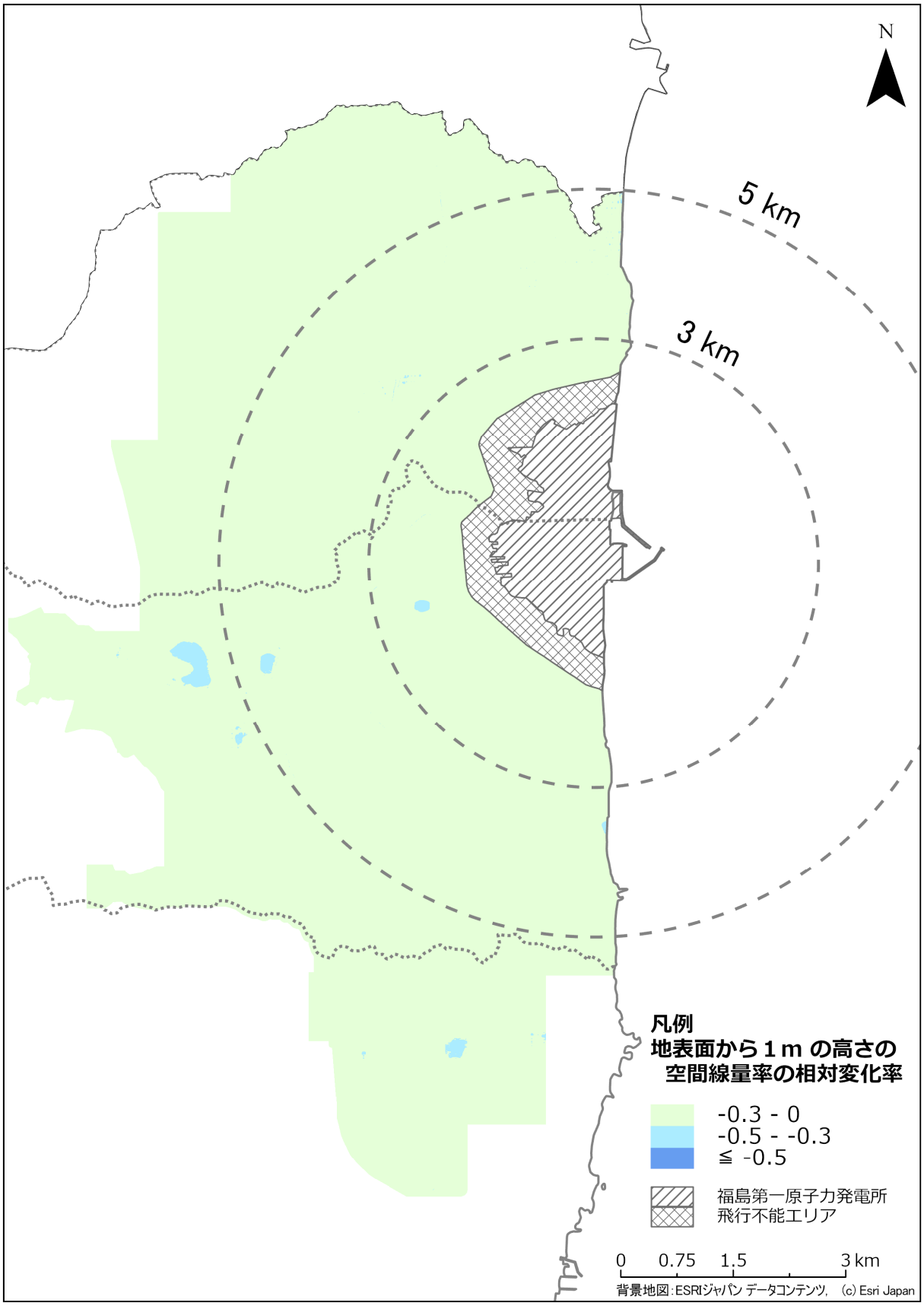


図 3-7　無人ヘリサーベイによる空間線量率測定結果の令和 5 年度調査に対する令和 6 年度調査の相対変化率の分布

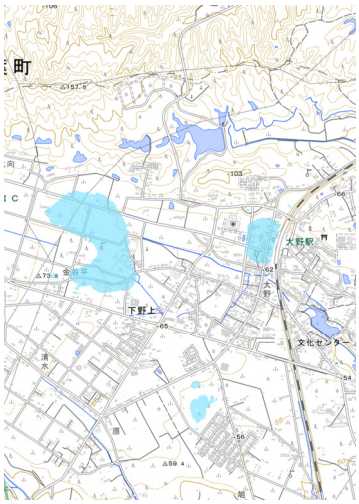
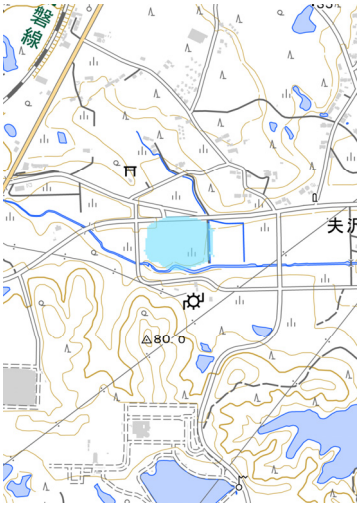
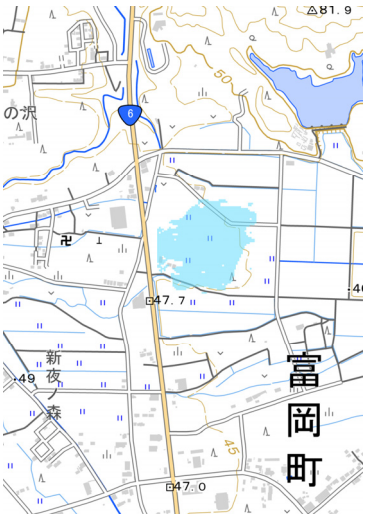
		**[大熊町下野上・大野駅西口付近]** 大野駅西口および特定帰還居住区域のエリアで線量が減少している。 大野駅西口に、新たに商業施設が建設されている。 特定帰還居住区域のエリアの農地の耕起が確認された。
		**[大熊町夫沢]** 著しく減少した場所では施設の造成工事が確認された。
		**[富岡町本岡]** 著しく減少した場所では農地の耕起が確認された。

図 3-8　令和 5 年度調査から令和 6 年度調査に空間線量率が顕著に減少した要因の調査結果（左から地理院タイル [14]に相対変化率マップ（図 3-7 参照）を追記して掲載、地理院タイルに測定中に撮影した写真からオルソ画像（地図と同じく写真上の像の位置ズレをなくし、真上から見たような傾きのない正しい大きさと位置に表示される画像）を作成し追記。）

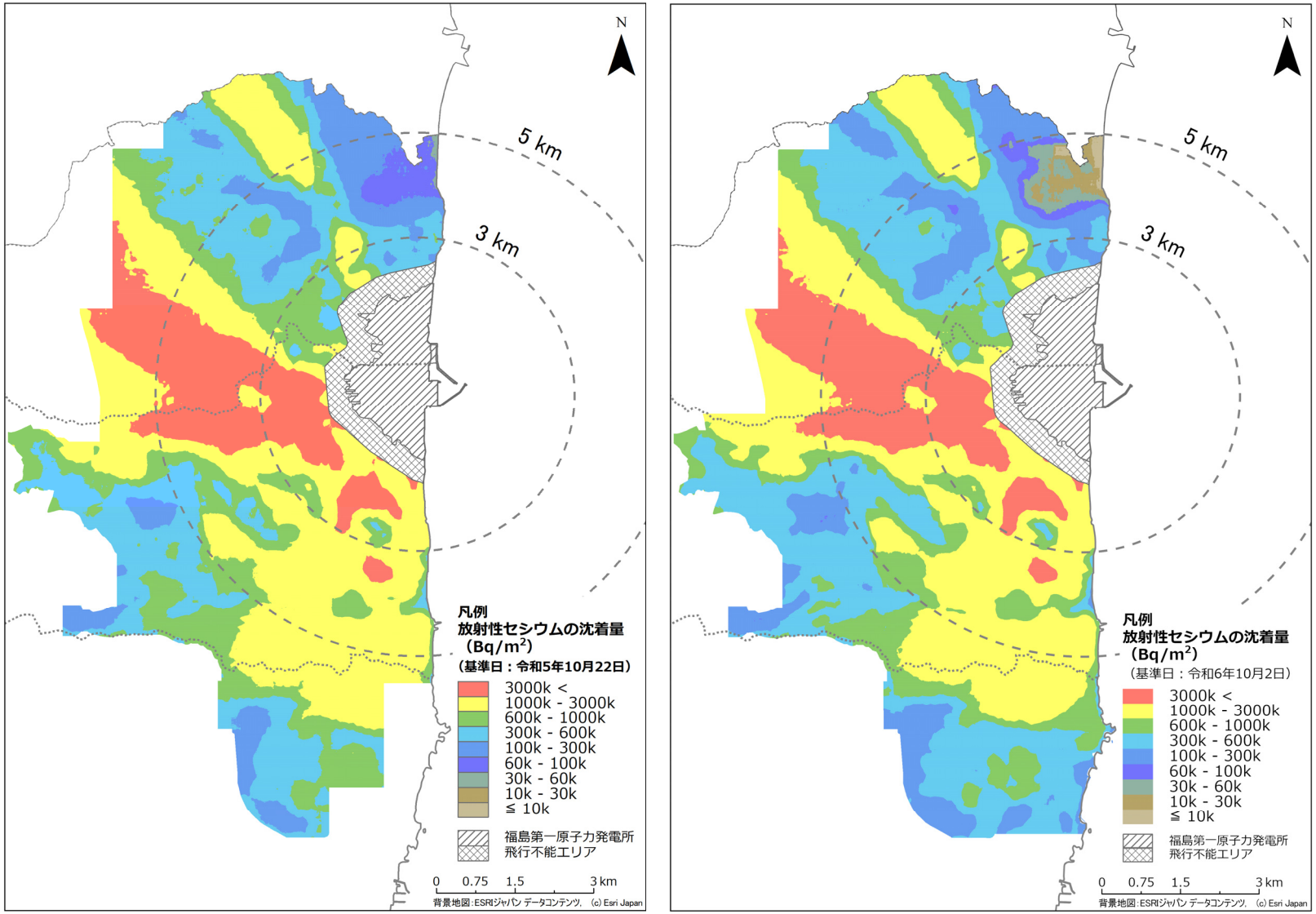


図 3-9　無人ヘリサーベイによる放射性セシウム沈着量（換算値）分布マップ（左：令和 5 年度調査、右：令和 6 年度調査）

3.3　無人機を用いた山間部での空間線量率測定手法の検討

3.3.1　無人機の仕様及び調査手法

無人機を用いた山間部サーベイ（無人機サーベイ）の実施期間等は以下のとおりである。

- 調査期間：令和 7 年 1 月 27 日～1 月 28 日
- 飛行測定範囲：0.34 km^2

  飛行測定範囲は山間部上空を円状に飛行したエリア（直径 0.47 km）とし、2 日間測定の円の面積の合計とした。
- 合計測定距離：2.9 km

  合計測定距離は、各測定日の円の円周の合計とした。実際には、各高度で複数回旋回を行ったため、飛行測定範囲と合計測定距離は前述の値よりも大きい。

無人機には、Edge autonomy 社製の Penguin C を使用し、地上からの直達ガンマ線及び空気による散乱線を合わせた全計数率とガンマ線エネルギースペクトルを 1 秒間に 1 回連続測定した。無人機の頭頂部に放射線検出器 HR-GAGG（10 mm ×10 mm ×10 mm）2 個及びプラスチックシンチレーション検出器（0.98" ×0.98" ×0.012"）を設置した。これら放射線検出器の構成を図 3-10 に示す。測定データの位置情報取得には無人機の GPS を用いた。無人機サーベイに用いた機材等及び測定状況の写真を図 3-11 に示す。空間線量率の評価には、搭載検出器下部に位置する HR-GAGG シンチレーション検出器の計数率を用いた。

無人機の飛行高度は、山間部での安全面を考慮し、対地高度で 200 m 以上を目安とした。無人機は円状に飛行し、対地高度 200、250、300 m、飛行速度は 20 m/s（＝72 km/h）程度とした。無人機サーベイの飛行軌跡を図 3-12 に示す。広域での無人機の飛行試験の実施可能な飛行試験場かつ近傍に山間部を有するという条件を満たすため、福島ロボットテストフィールド通信塔（小高）付近を調査地点として選定した。調査地点近傍で工事が行われ作業者の上空を飛行させることが難しいことから、国土交通省が定めたレベル 2 飛行（目視内での自動飛行）に準拠させる必要があった。そのため、飛行測定範囲は無人機の飛行許可の取得が可能かつ、目視内飛行が可能な範囲の山間部を選択した。離陸地点から北西方向及び南西方向の山間部を飛行測定範囲としたが、調査当日の風向きを考慮し、南西方向への飛行を行った。北西方向の山間部での測定を終了後、離陸地点の南側エリアでパラシュート開傘し、飛行測定範囲内の離陸地点南部に着陸させた。

空間線量率は前述の式(4)により評価した。上空で測定されたガンマ線計数率を空間線量率の値に換算するための AF 及び CD は、令和 6 年度原子力施設等防災対策等委託費及び放射性物質測定調査委託費（80 km 圏内外における航空機モニタリング）事業により評価された数値（AF: –0.00424 m^{-1}, CD: 46.14 cps/(μSv/h)）を用いた。なお、空間線量率の値は、各測定日時点のものである。地上高さ 1 m の空間線量率の値をリンクする位置情報とともに GIS ソフトウエアを用いてマップ化した。

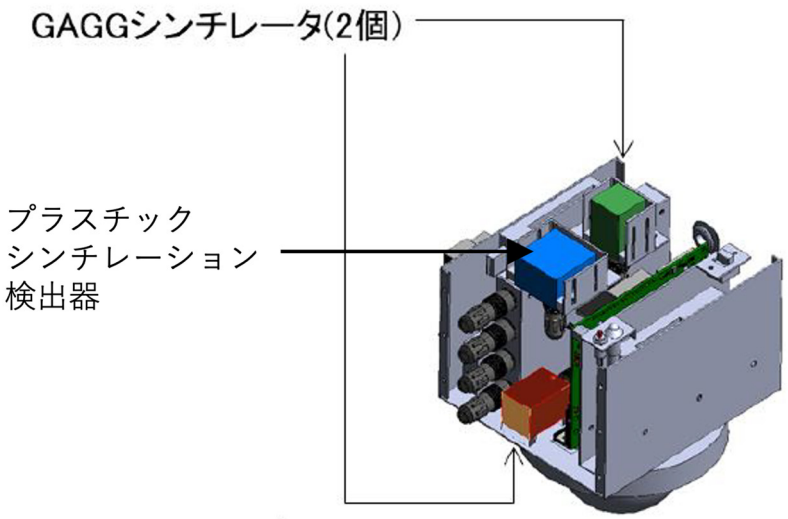


図 3-10　無人機サーベイに用いた検出器の構成

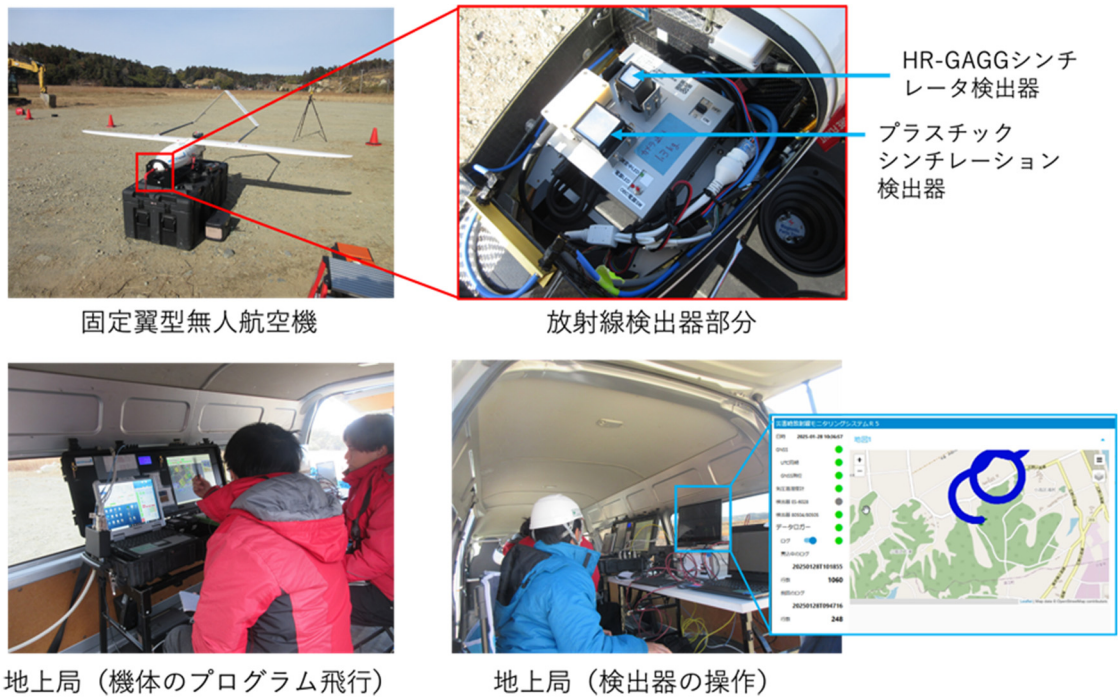


図 3-11　無人機サーベイの機材等及び測定状況

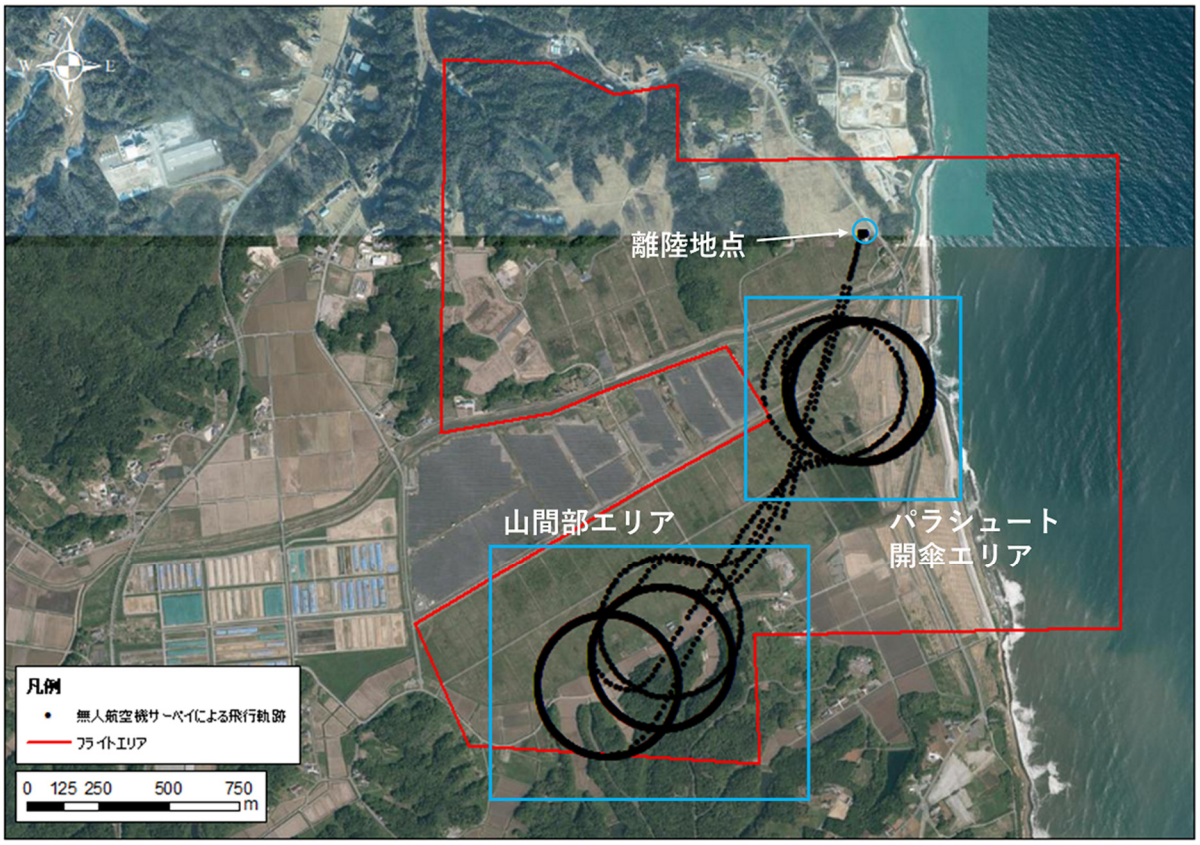


図 3-12　令和 6 年度調査での無人機サーベイの飛行軌跡
（背景地図は地理院地図 Vector [15]）

3.3.2　山間部での空間線量率測定手法の検討結果

無人機サーベイによる空間線量率マップを図 3-13 に示す。無人機の地上局と機体との通信は良好であり、検出器の測定データも地上局 PC にほぼ途切れることなく連続的にダウンリンクできた。山間部で無人機を飛行させる際に、風が複雑に変動しモニタリングに支障が出ることが予想されたが、地上局で機体の速度や周辺の風速と風向きを定期的に監視することで、問題なく運航することができた。これにより、実際に無人機を山間部の放射線モニタリングに適用できることを確認した。原子力災害などの緊急時に、無人機により平野と山間部を横断的に飛行することで、無人ヘリコプターよりも迅速に広域の空間線量率分布を把握することが可能となると考えられる。

高度別の空間線量率の箱ひげ図を図 3-14 に示す。高度 200 m のフライトの位置情報に基づいて 50 m 四方のメッシュを作成し、3 つの高度で共通しているメッシュ内の平均値同士を比較した。高度 200、250、300 m で帰還困難区域外の低線量率エリアの山間部を飛行させた結果を比較したところ、各高度の平均空間線量率に有意な差はなかった。しかし、最も低い高度 200 m で飛行した際に、最も幅広い線量率範囲を評価できたことから、無人機で飛行した際の直下の空間線量率分布を最もよく反映できていると考えられる。今後、帰還困難区域の高線量率エリアの山間部を飛行させる際には、山間部の地形に合わせて可能な限り低い対地高度で飛行することで、詳細な空間線量率分布を把握できると考えられる。

また、福島第一原発事故直後、山間部での放射性セシウムの沈着率が中腹で比較的高かった事例 [16]があることから、緊急時に山間部を無人機でモニタリングすることで、原子力災害が環境に与える影響の迅速な評価の一助となると期待される。

無人機を着陸させる際に、落下許容エリアを 300 m×300 m の範囲に設定する必要があり、モニタリングエリアを選定する際に制約がある。また、着陸に必要なパラシュート開傘地点を風向きや風速に応じて設定する必要がある。離発着地点の範囲の制約の少ない無人ヘリコプターと組み合わせることで、実効的な放射線モニタリングが可能となると考えられる。

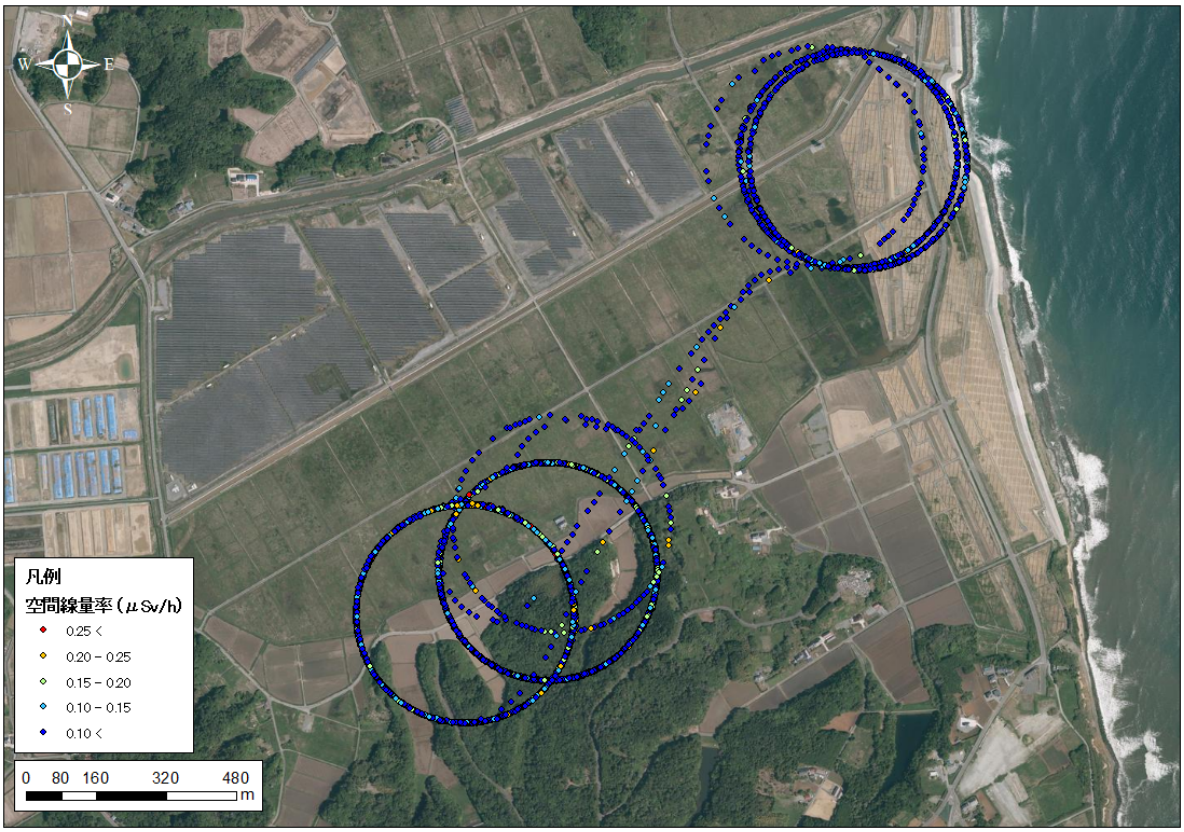


図 3-13　令和 6 年度調査での無人機サーベイによる空間線量率測定結果

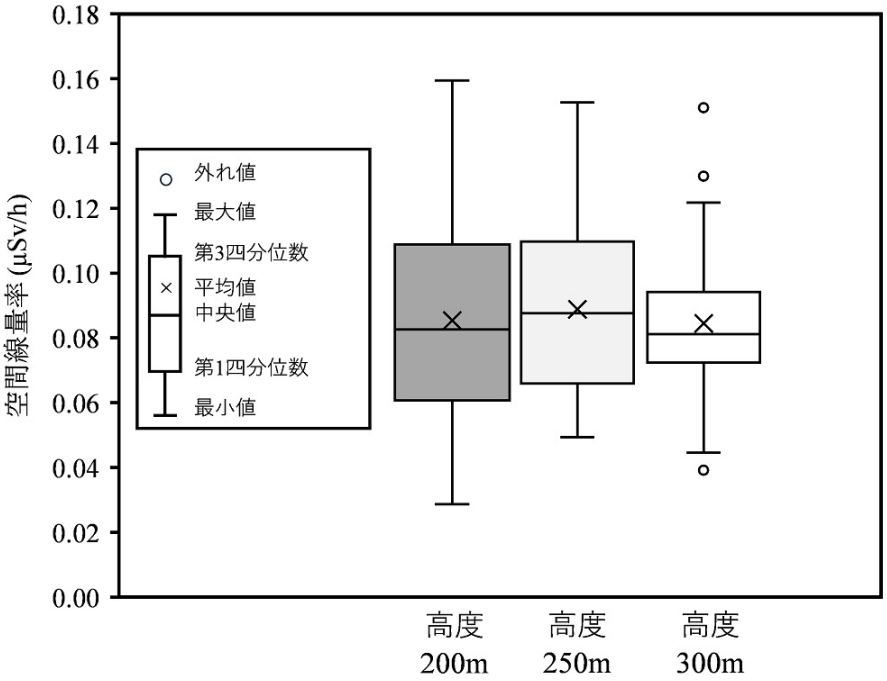


図 3-14　山間部エリアの高度別空間線量率の箱ひげ図