

令和 3 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) 事業

成果報告書

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 3 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）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）からの委託を受け、平成 23 年 6 月から令和 3 年度まで放射性物質の分布状況調査等を実施してきた。本報告書は、「令和 3 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）事業」（以下「令和 3 年度調査」という。）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（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（2 回；ただし、1 回は地方自治体との協働による測定を含め東日本広域での測定）、サーベイメータによる平坦地上の測定（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経時変化を分析した。放射性セシウムの土壌沈着量に関しては、可搬型ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定（1 回）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（1 回）をそれぞれ実施した（いずれも 80 km 圏内）。さらに、これまで蓄積した測定結果を基に空間線量率及び沈着量の実効半減期を評価した。測定箇所の重要度分類のためのスコア化の検討では、平成 30 年度に開発した「スコア」化手法を基に福島県及び 80 km 圏内でのスコアマップを作成するとともに、スコアの「普遍性」を評価するため、多年度のモニタリングデータを使用した場合のスコアの変化要因について考察した。海洋のモニタリングデータについて、令和 2 年度までに総合モニタリング計画で実施された海域モニタリングの測定結果を集約するとともに、事故による影響が大きかったセシウム 137 について過去からの変動や濃度などの測定結果の詳細な解析評価を行なった。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、走行サーベイ、サーベイメータによる平坦地上の測定及び歩行サーベイの測定結果に福島県によるモニタリングメッシュ調査及び規制庁による航空機サーベイの測定結果を加えるとともに林野庁調査の結果を統合し、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、「放射線量等分布マップ拡大サイト」に令和 3 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した。測定データの CSV 化では、本事業で取得した測定データを CSV（場合によっては Excel®、KMZ）形式にて保存した。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）形式にて保存した。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。

目 次

1.	はじめに	1
2.	地上における広域の空間線量率の分布測定	3
2.1	調査目的	3
2.2	調査手法	3
2.2.1	走行サーベイ	3
2.2.2	定点サーベイ	4
2.2.3	歩行サーベイ	4
2.2.4	令和 2 年度との比較	5
2.2.5	測定手法間の比較	5
2.3	空間線量率測定結果	10
2.3.1	空間線量率分布マップ	10
2.3.2	令和 2 年度との比較	20
2.3.3	平成 23 年度との比較	21
2.3.4	測定手法間の比較	21
3.	無人ヘリによる発電所周辺の空間線量率測定	27
3.1	調査目的	27
3.2	調査手法	27
3.2.1	調査場所・期間	27
3.2.2	調査機器	27
3.2.3	データ取得方法	28
3.2.4	無人ヘリ測定データの空間線量率への換算	28
3.2.5	空間線量率マップの作成	29
3.3	調査結果	31
3.3.1	空間線量率マップ	31
3.3.2	測定結果の妥当性の検証	31
3.3.3	令和 2 年度との比較	31
3.3.4	天然放射性核種による空間線量率マップ	31
3.3.5	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	32
4.	土壌における放射性セシウムの分布状況	42
4.1	放射性セシウムの深度分布	42
4.1.1	調査目的	42
4.1.2	調査内容	42
4.1.3	調査結果	45
4.2	放射性セシウム沈着量の面的調査	48

4.2.1	調査目的	48
4.2.2	調査内容	48
4.2.3	調査結果	51
4.2.4	天然放射性核種による空間線量率の評価	63
5.	空間線量率及び放射性セシウム土壌沈着量の実効半減期の評価	65
5.1	目的	65
5.2	測定結果の変化傾向	65
5.3	バックグラウンドの設定	70
5.4	実効半減期算出方法	71
5.5	空間線量率の実効半減期	72
5.6	放射性セシウム沈着量の実効半減期	77
5.7	同一メッシュにおける空間線量率の変化傾向	79
5.8	モニタリングポストによる空間線量率解析の試行	82
6.	測定箇所の重要度分類のためのスコア化の検討	86
6.1	目的	86
6.2	総合モニタリング計画	86
6.3	空間線量率等モニタリングを取り巻く状況	88
6.3.1	空間線量率の分布の状況	88
6.3.2	これまでの測定ポイントの設定方法	89
6.3.3	重点化・最適化の方向性	90
6.4	モニタリング代表性の高い場所を選定するための評価方法案	90
6.4.1	地域スコア化手法	90
6.4.2	スコア評価例	91
6.4.3	年度別の評価例	96
6.5	評価結果のまとめ	100
7.	海洋のモニタリングデータの評価	101
7.1	調査目的	101
7.2	調査内容	101
7.3	調査結果	102
7.3.1	海水モニタリングの解析	102
7.3.2	海底土モニタリングの解析	103
7.3.3	過年度評価結果との比較	105
8.	実測データの統合的解析	109
8.1	調査目的	109
8.2	調査内容	110
8.2.1	異なる測定方法による空間線量率の特徴	110
8.2.2	統合手法の概要	110
8.3	80 km 圏内を対象とした令和 2 年度統合マップの作成	111

8.3.1	対象とした測定データ	111
8.3.2	歩行サーベイ結果の空間分布パターンの解析	114
8.3.3	走行サーベイと歩行サーベイの比較	117
8.3.4	航空機サーベイと歩行サーベイの比較	119
8.3.5	統合結果	120
8.4	福島県全域を対象とした統合マップの作成	121
8.4.1	対象とした測定データ	121
8.4.2	歩行サーベイを対象とした空間パターンの解析	122
8.4.3	走行サーベイデータと歩行サーベイデータの比較	124
8.4.4	航空機サーベイデータと歩行サーベイデータの比較	125
8.4.5	統合結果	126
8.5	統合マップの精度検証	127
9.	空間線量率等分布マップの作成と公開	130
9.1	目的	130
9.2	空間線量率等分布マップの作成と公開	130
9.3	空間線量率等分布マップの運用管理	131
10.	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	133
10.1	測定方法及び測定結果	133
10.1.1	空間線量率	133
10.1.2	積算線量	133
10.1.3	大気浮遊じん中放射性物質濃度	133
10.1.4	環境試料（土壌及び松葉）中放射性物質濃度	133
10.2	測定結果の公開	134
11.	測定データのCSV化	140
11.1	CSV等の形式で保存した測定データ	140
11.2	保存した測定データの公開	140
12.	まとめ	144
	参考文献	146
	付録1 セシウム137の深度分布	151
	付録2 令和3年度技術検討会の概要	156

表リスト

表 1-1	各調査における測定項目ごとの実施時期	2
表 2-1	各測定手法における測定期間及び測定エリア	6
表 2-2	比較の組み合わせ	6
表 2-3	令和 2 年度と比較した令和 3 年度の空間線量率測定結果の相対変化率	20
表 2-4	平成 23 年度と比較した令和 3 年度の空間線量率測定結果の変化傾向	21
表 3-1	テストサイトにおける換算パラメータ取得条件	29
表 5-1	評価された実効半減期の一覧	73
表 5-2	モニタリングポストデータから求めた実効半減期（速い成分）	83
表 5-3	モニタリングポストデータから求めた実効半減期（遅い成分）	83
表 6-1	総合モニタリング計画における測定種別及び担当省庁	87
表 6-2	図 6-1 の作成に使用したモニタリング情報一覧	88
表 6-3	ランドマークデータの詳細情報	92
表 6-4	スコア付与例	92
表 6-5	平成 30 年度/平成 29 年度のスコア差	96
表 6-6	令和元年度/平成 29 年度のスコア差	96
表 6-7	令和 2 年度/平成 29 年度のスコア差	97
表 7-1	各海域の海水ランク分け結果	103
表 7-2	各海域の海底土ランク分け結果	104
表 7-3	令和 2 年度海域事業評価結果からランクが変化した地点（海水）	106
表 7-4	令和 2 年度海域事業評価結果からランクが変化した地点（海底土）	107
表 7-5	平成 31 年度海域事業から令和 3 年度調査にかけてのランク変化状況	107
表 8-1	使用データ一覧	112
表 8-2	関連のパラメータ	119
表 10-1	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の実施項目ごとの測定地点数及び測定（採取）頻度	134
表 11-1	分布状況調査で取得した測定データの項目とレコード数	141
表 11-2	原子力規制庁・環境省が保有する測定データの項目とレコード数	142
表 11-3	測定データを統一フォーマットに変換した自治体リスト	143

図リスト

図 2-1	令和 3 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箇所	7
図 2-2	令和 3 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	8
図 2-3	令和 3 年度調査における歩行サーベイに用いた測定システムの概要	9
図 2-4	各測定場所のイメージ	9
図 2-5	令和 3 年度 1 回目（第 22 回）走行サーベイによる空間線量率の測定結果	11
図 2-6	令和 3 年度 2 回目（第 23 回）走行サーベイによる空間線量率の測定結果	12
図 2-7	平成 23 年度から令和 3 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マップの変化	13
図 2-8	令和 3 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	15
図 2-9	平成 23 年度から令和 3 年度までの定点サーベイによる空間線量率マップの変化	16
図 2-10	令和 3 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	18
図 2-11	平成 25 年度から令和 3 年度までの歩行サーベイによる空間線量率マップの変化	19
図 2-12	令和 2 年度の測定結果に対する令和 3 年度の測定結果の比	23
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	24
図 2-14	令和 3 年度調査での測定手法間の比較	25
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	26
図 3-1	無人ヘリの仕様等	28
図 3-2	令和 3 年度無人ヘリサーベイの飛行軌跡	30
図 3-3	令和 3 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	33
図 3-4	平成 24 年度から令和 3 年度までの無人ヘリサーベイによる空間線量率マップの変化	34
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	35
図 3-6	令和 2 年度と令和 3 年度の無人ヘリサーベイによる空間線量率測定結果の比較	36
図 3-7	令和 2 年度に対する令和 3 年度の無人ヘリサーベイによる空間線量率測定結果の比の分布	37
図 3-8	令和 2 年度から令和 3 年度にかけて空間線量率が顕著に減少した場所の要因調査	38
図 3-9	令和 3 年度調査における無人ヘリサーベイにより評価した天然放射性核種による空気カーマ率の分布測定結果	39
図 3-10	平成 28 年度～平成 30 年度の可搬型 Ge 検出器による放射性セシウム沈着量測定結果（令和 3 年度に物理減衰補正）と無人ヘリサーベイによる放射性セシウム沈着量の換算結果との比較	40
図 3-11	無人ヘリサーベイによる放射性セシウム沈着量分布マップ	41
図 4-1	令和 3 年度の放射性セシウム深度分布調査での土壌採取箇所	44
図 4-2	セシウム 137 の深度分布（重量深度に対する放射能濃度の測定結果）の典型的な例	45
図 4-3	令和 3 年度の深度分布調査による重量緩衝深度 β の自然対数値の頻度分布	46

図 4-4	令和 3 年度の深度分布調査による実効的な重量緩衝深度 β_{eff} の自然対数値の頻度分布	47
図 4-5	平成 23 年 12 月からの実効的な重量緩衝深度 β_{eff} の経時的な変化	47
図 4-6	平成 23 年 12 月からの 90%深度 $L_{90\%}$ 及びその幾何平均値の経時的な変化	48
図 4-7	令和 3 年度調査における可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定による放射性セシウム沈着量の測定箇所	50
図 4-8	可搬型 Ge 検出器による in-situ 測定の結果を基に求められた空間線量率と NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータによる空間線量率の相関	51
図 4-9	令和 3 年度調査における可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定による放射性セシウムの沈着量分布マップ	53
図 4-10	NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータによる地表面から 1 m 高さの空間線量率と可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定による放射性セシウム沈着量の相関.....	55
図 4-11	可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定による沈着量と定点サーベイ最近傍点における NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータによる空間線量率から評価したセシウム 137 沈着量の比較	56
図 4-12	令和 3 年度調査における放射性セシウムの土壌沈着量分布マップ	57
図 4-13	平成 23 年度から令和 3 年度調査までの in-situ 測定（一部、土壌試料採取による）及び空間線量率から評価した土壌沈着量の分布マップの変化	59
図 4-14	in-situ 測定により評価した天然放射性核種による空気カーマ率の分布	64
図 5-1	分布状況調査で得られた空間線量率の変化傾向	67
図 5-2	分布状況調査で得られた放射性セシウム沈着量の変化傾向.....	69
図 5-3	天然放射性核種由来の線量率マップ	70
図 5-4	走行サーベイ結果（80 km 圏内）における空間線量率変化傾向及び指数関数の近似	74
図 5-5	定点サーベイ、歩行サーベイ及び無人ヘリサーベイ結果における空間線量率変化傾向及び指数関数の近似	75
図 5-6	航空機サーベイ結果における空間線量率変化傾向及び指数関数の近似	76
図 5-7	可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定結果における放射性セシウムの沈着量変化傾向及び指数関数の近似	78
図 5-8	走行サーベイ、定点サーベイ、歩行サーベイ及び航空機サーベイの全測定手法によるデータセットが存在する調査メッシュ箇所（データ抽出箇所）	80
図 5-9	各モニタリングのイメージと測定対象	81
図 5-10	全測定手法によるデータセットがある調査メッシュにおける空間線量率の変化傾向	81
図 5-11	モニタリングポストの概観と基本性能.....	84
図 5-12	モニタリングポストの測定データ例	84
図 5-13	解析に使用したモニタリングポストの設置場所	85
図 5-14	モニタリングポストデータから求めた実効半減期.....	85

図 6-1	基準地域メッシュ内の最大空間線量率マップ	89
図 6-2	福島市及び富岡町における空間線量率の測定状況（平成 29 年度測定例）	90
図 6-3	空間線量率の分布傾向と閾値.....	93
図 6-4	人口密度の分布傾向と閾値	93
図 6-5	平成 29 年度に測定された空間線量率のスコアマップ例.....	94
図 6-6	平成 29 年時点における空間線量率及び事故前の人口密度を合計したスコアマップ例	94
図 6-7	平成 29 年時点における空間線量率、事故前の人口密度及び避難指示区域を合計したスコアマップ例	95
図 6-8	平成 29 年時点における空間線量率、事故前の人口密度、避難指示区域及びランドマークを合計したスコアマップ例	95
図 6-9	平成 30 年時点における空間線量率、事故前の人口密度、避難指示区域及びランドマークを合計したスコアマップ	98
図 6-10	令和元年時点における空間線量率、事故前の人口密度、避難指示区域及びランドマークを合計したスコアマップ	98
図 6-11	令和 2 年時点における空間線量率、事故前の人口密度、避難指示区域及びランドマークを合計したスコアマップ	99
図 6-12	各年度のスコアの差異	99
図 7-1	海底土のセシウム 137 濃度の測定結果例	102
図 7-2	令和 2 年度海域事業評価結果からランクが上昇した地点（海水）	108
図 7-3	令和 2 年度海域事業評価結果からランクが上昇した地点（海底土）	108
図 8-1	令和 3 年度に実施された歩行、走行及び航空機サーベイ結果（80 km 圏内）	113
図 8-2	JAXA の高解像度土地利用土地被覆図に基づく土地利用状況	114
図 8-3	令和 3 年度に実施された旧避難指示区域内外における歩行サーベイによる空間線量率のバリオグラム解析結果.....	116
図 8-4	令和 3 年度に実施された旧避難指示区域内外における走行サーベイ（Car survey）と歩行サーベイ（Walk survey）による空間線量率の相関分析結果	118
図 8-5	令和 3 年度に実施された旧避難指示区域内外における航空機サーベイ（Air survey）と歩行サーベイ（Walk survey）による空間線量率の相関分析結果.....	120
図 8-6	各種測定結果を統合した統合マップ（80 km 圏内）	121
図 8-7	令和 3 年度に実施された歩行、走行及び航空機サーベイ結果（福島県全域）	122
図 8-8	令和 3 年度に実施された福島県全域における歩行サーベイによる空間線量率のバリオグラム解析結果	123
図 8-9	令和 3 年度に実施された走行サーベイデータ（Car survey）と歩行サーベイ（Walk survey）との相関分析結果（福島県全域）	124
図 8-10	令和 3 年度に実施された航空機サーベイ（Air survey）と歩行サーベイ（Walk survey）との相関分析結果（福島県全域）	125
図 8-11	令和 3 年度に実施された各種測定結果を統合した統合マップ（福島県全域及び 80 km	

圈内)	126
図 8-12 統合マップに除外された歩行サーベイ相当データの箇所	128
図 8-13 統合マップ作成時に除外された歩行サーベイ相当データの結果との比較	128
図 8-14 令和 2 年度統合マップとの比較	129
図 9-1 拡大サイトにおける測定データ（第 22 回走行サーベイ）表示例	131
図 10-1 測定及び採取地点	135
図 10-2 総合モニタリング計画に基づく空間線量率の測定結果	136
図 10-3 積算線量の経時変化	137
図 10-4 大気浮遊じん中セシウム 137 濃度の経時変化	138
図 10-5 土壌中セシウム 137 濃度の経時変化	138
図 10-6 松葉中セシウム 137 濃度の経時変化	139

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」（第 1 次分布状況等調査）、「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」（第 2 次分布状況等調査）、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」（第 3 次分布状況等調査）を実施した。これら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 25 年度調査）、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」（平成 26 年度調査）、平成 27 年度以降は「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」（各年度について、平成 27 年度調査、平成 28 年度調査、平成 29 年度調査、平成 30 年度調査、令和元年度調査、令和 2 年度調査）を実施した¹⁾。令和 3 年度は、令和 2 年度に引き続き、「令和 3 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）事業」（令和 3 年度調査）を実施した。以下、これらを総称して「分布状況調査」という。各年度調査における測定項目ごとの実施時期を表 1-1 にまとめる。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 3 年 7 月 1 日の場合 R3/7/1 とする）。

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) 拡大マップサイト等を通じたデータの公開

等を実施してきた。

令和 3 年度調査の目的は、1) 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を詳細に調査してその変化傾向を把握すること、2) 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原子力規制庁のウェブサイトで公開すること、3) これまでの調査結果を使用して沈着量や空間線量率の経時変化を分析するとともに測定評価手法の高度化を検討することである。本報告書では、令和 3 年度調査で得られた成果についてまとめる。なお、令和 3 年度調査実施期間中、有識者からの助言を得るための技術検討会を 3 回開催した。

表 1-1 各調査における測定項目ごとの実施時期

	平成 23 年度 (第 1 次) ^{a)}	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)	平成 30 年度 (第 9 次)	令和元年度 (第 10 次)	令和 2 年度 (第 11 次)	令和 3 年度 (第 12 次)
走行サーベイ ^{a)}	第 1 回 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	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
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	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
定点サーベイ ^{b)}	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	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
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 H25/11/19-1/7	第 5 回 H26/6/23-7/22 第 6 回 H26/11/14-1/15	第 7 回 H27/9/2-10/22	第 8 回 H28/9/1-10/13	第 9 回 H29/6/13-9/5	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
沈着量 (in-situ)	土壌試料 採取 ^{d)}	第 1 回 H23/12/13- H24/5/29	第 2 回 H24/8/13-9/19 第 3 回 H24/11/5-12/12	第 4 回 H25/6/3-7/10 第 5 回 H25/10/28-12/6	第 6 回 H26/6/23-7/30 第 7 回 H26/10/27-12/5	第 8 回 H27/8/24-10/7	第 9 回 H28/8/24-10/6	第 10 回 H29/8/30-10/11	第 11 回 H30/9/13-10/25	第 12 回 R1/8/8-11/1	第 13 回 R2/8/6-10/15	第 14 回 R3/8/6-10/19
深度分布 (スクレーパープレート)	鉄パイプ試料 採取 ^{e)}	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	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

a) 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。 b) 定点サーベイ:人為的な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。
c) ()内は通算調査次数の意味。 d) 第 1 次調査では in-situ 測定はせず土壌試料採取を実施。 e) 第 1 次調査及び第 2 次調査(一部)の深度分布は鉄パイプ等により試料採取。

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

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、車載機器による走行サーベイ、サーベイメータによる人為的な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（以下「定点サーベイ」という。）、及び歩行サーベイによる測定を実施している。令和3年度調査においても、これまでの調査に引き続き同様の手法を用いて、地上における広域の空間線量率の測定を行った。

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「80 km 圏内」という。）を中心に人為的な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、及び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。測定は年 2 回とし、これまでの調査結果を基に空間線量率が 0.2 $\mu\text{Sv/h}$ 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 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）。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 は測定開始前に点検・校正を実施した（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セシウム 134 及び 137（以下「放射性セシウム」という。）によるものであり、2 回の各測定期間中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%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、これまでと同様に、走行地域を総務省が指定する 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。

2.2.2 定点サーベイ

点検・校正されている 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。

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。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 5,026 箇所であった（図 2-1 参照）。

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）、歩きながら空間線量率データ及び位置情報を収集した。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。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 566 箇所を選んだ（図 2-2 参照）。測定箇所は、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。

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。

なお、本測定では令和元年度に改良した KURAMA-II 測定システムを使用した。本改良型測定システム（図 2-3 参照）は、検出器本体に Wi-Fi 通信を用いて直接接続できるタブレットを追加し、4G データ通信ができない場所においてもデータの確認及び保存が可能である。また、検出器本体とタブレットが直接通信することにより、ほぼタイムラグなしの状態での測定状況を確認できるようになり、合わせて検出器エラーや検出器温度情報、GPS エラー等も直接タブレット上で確認できるようになっている。本測定ではタブレットにあらかじめ作成した測定ルート情報を読み込み、その測定ルートをなぞりながら測定を実施した。

2.2.4 令和 2 年度との比較

測定結果の妥当性と令和 2 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令和 2 年度と令和 3 年度の調査結果を比較した。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。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。

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

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 2 年度に対する令和 3 年度の相対変化率は、 $(D_{R3} - D_{R2}) / D_{R2}$ である（ここで、 D_{R2} 及び D_{R3} はそれぞれ令和 2 年度及び令和 3 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く、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。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、中央値を求めた。

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

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 2-1 各測定手法における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 22 回	第 23 回		第 15 回	第 13 回
測定期間	R3/6/22 ～7/8	R3/11/4 ～12/3	R3/10/19 ～12/2	R3/8/19 ～9/30	R3/5/11 ～11/18
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	主に 80 km 圏 内*1	8 県*2	7 県*3	主に 80 km 圏 内	主に 80 km 圏 内
測定距離 又は 測定点数	8,520 km	14,965 km	16,881 km	実績 5,026 点 (中止 5 点)	566 箇所*4

*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

*3 岩手県、宮城県、福島県、茨城県、栃木県、群馬県、埼玉県

*4 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 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

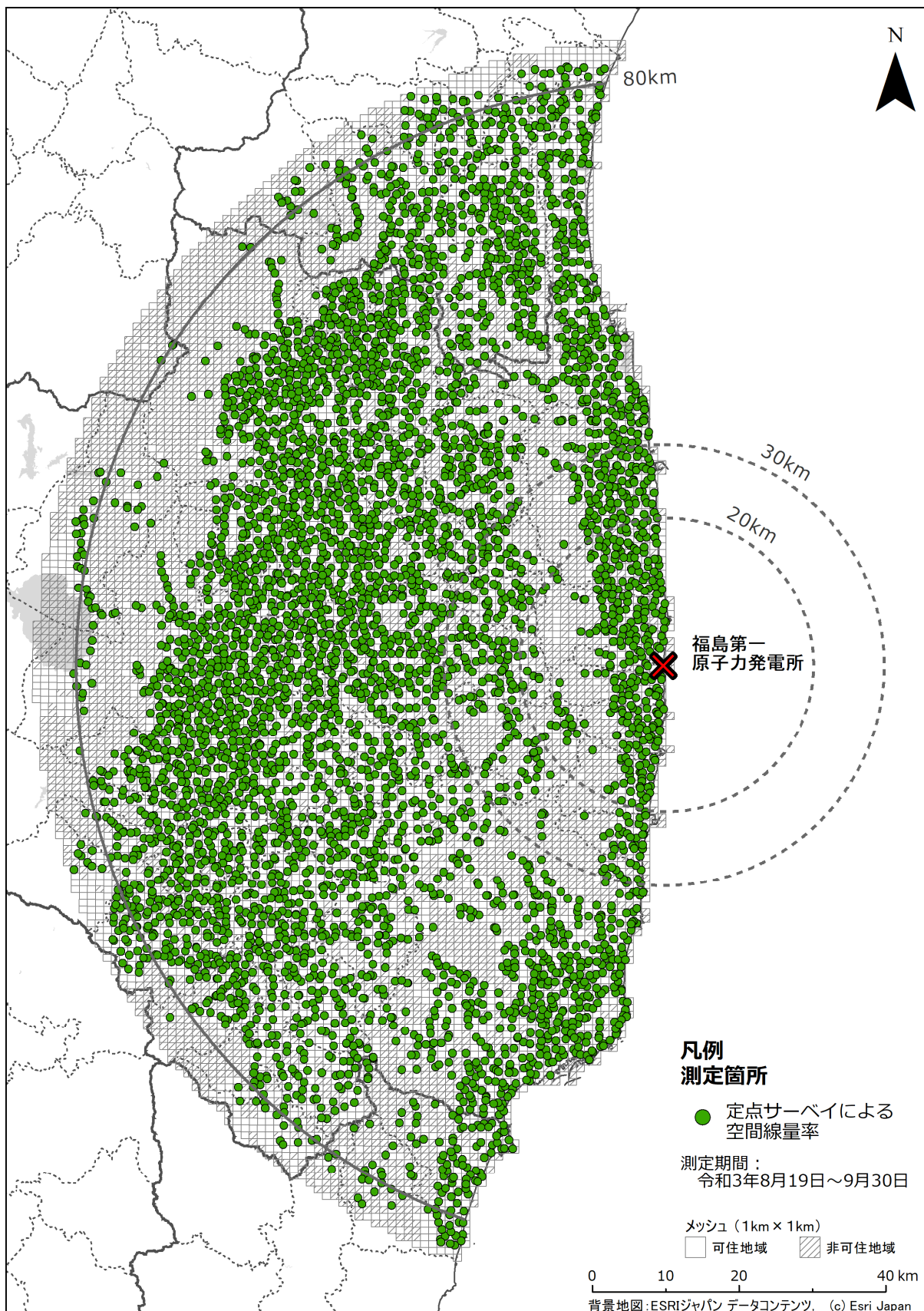


図 2-1 令和3年度調査における定点サーベイによる空間線量率の測定箇所

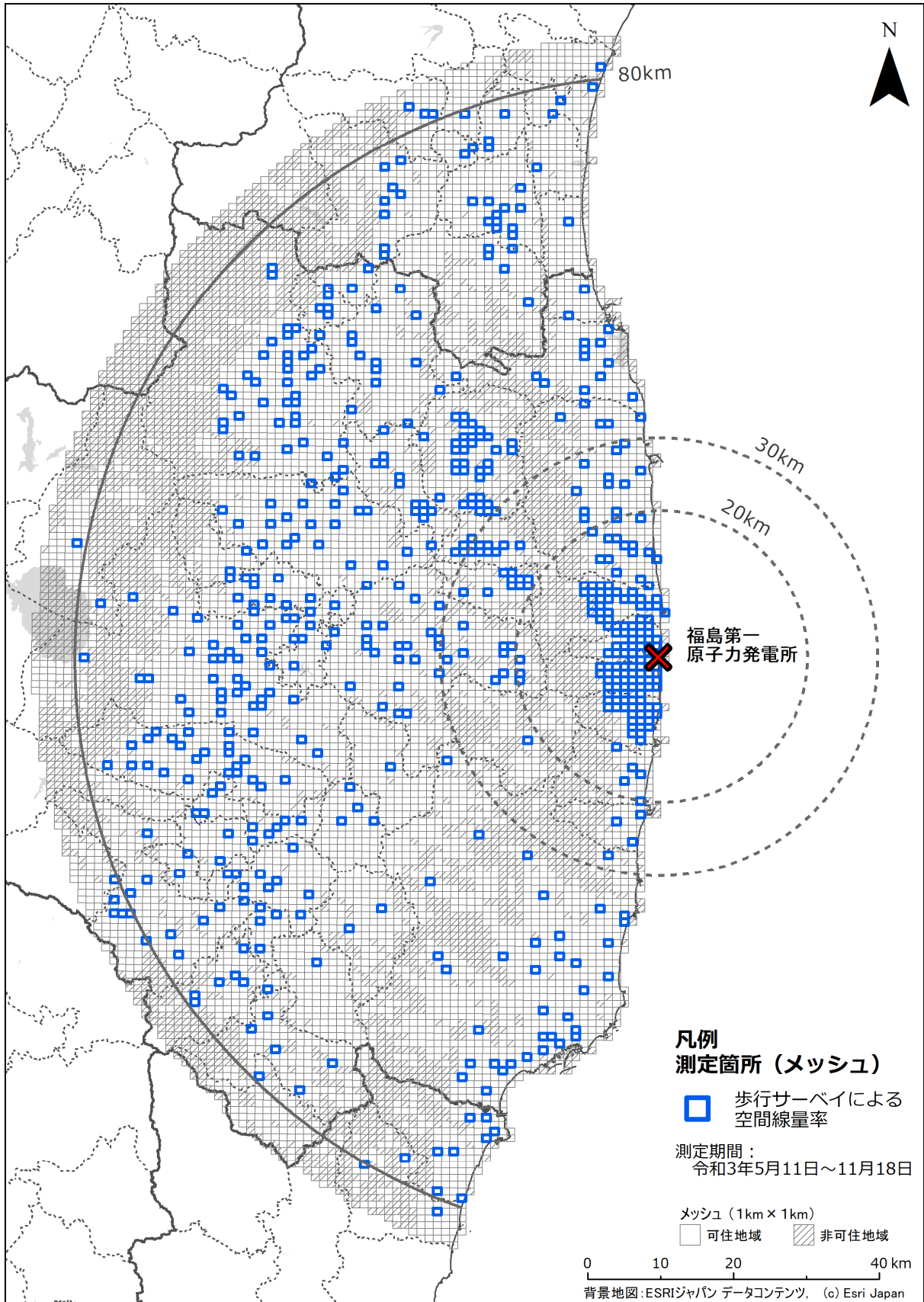


図 2-2 令和3年度調査における歩行サーベイによる空間線量率の測定箇所

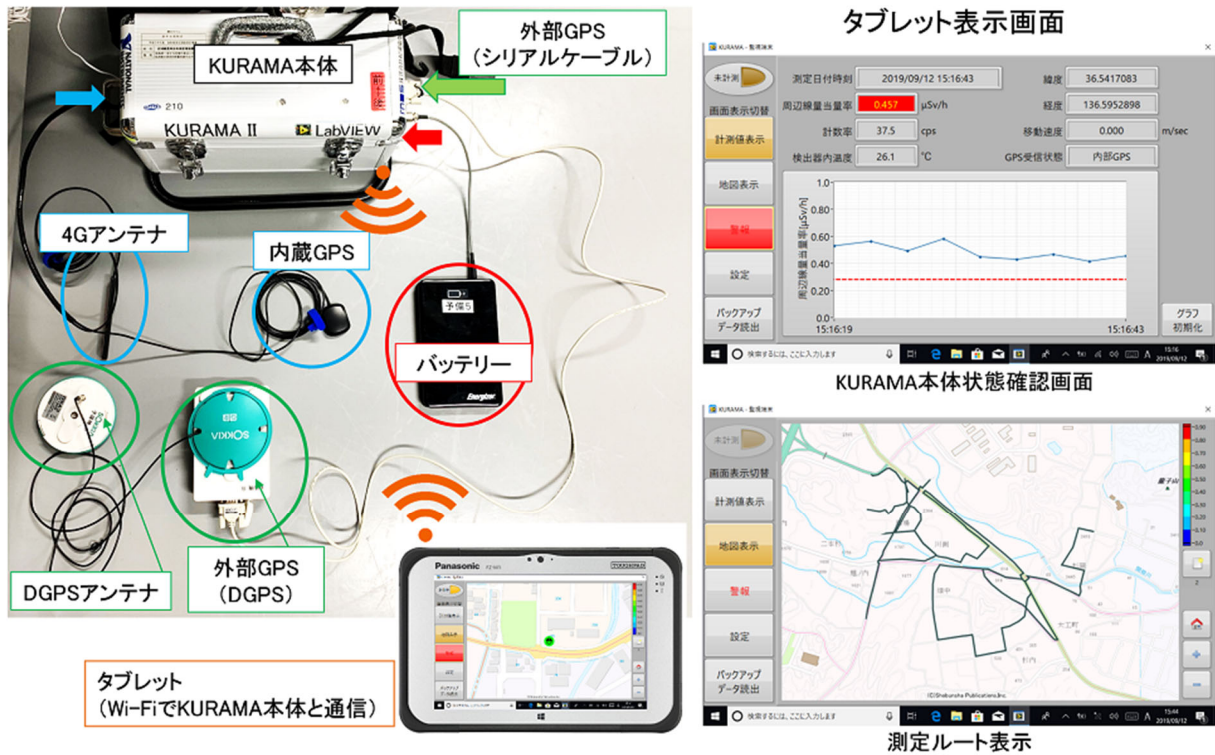


図 2-3 令和 3 年度調査における歩行サーベイに用いた測定システムの概要

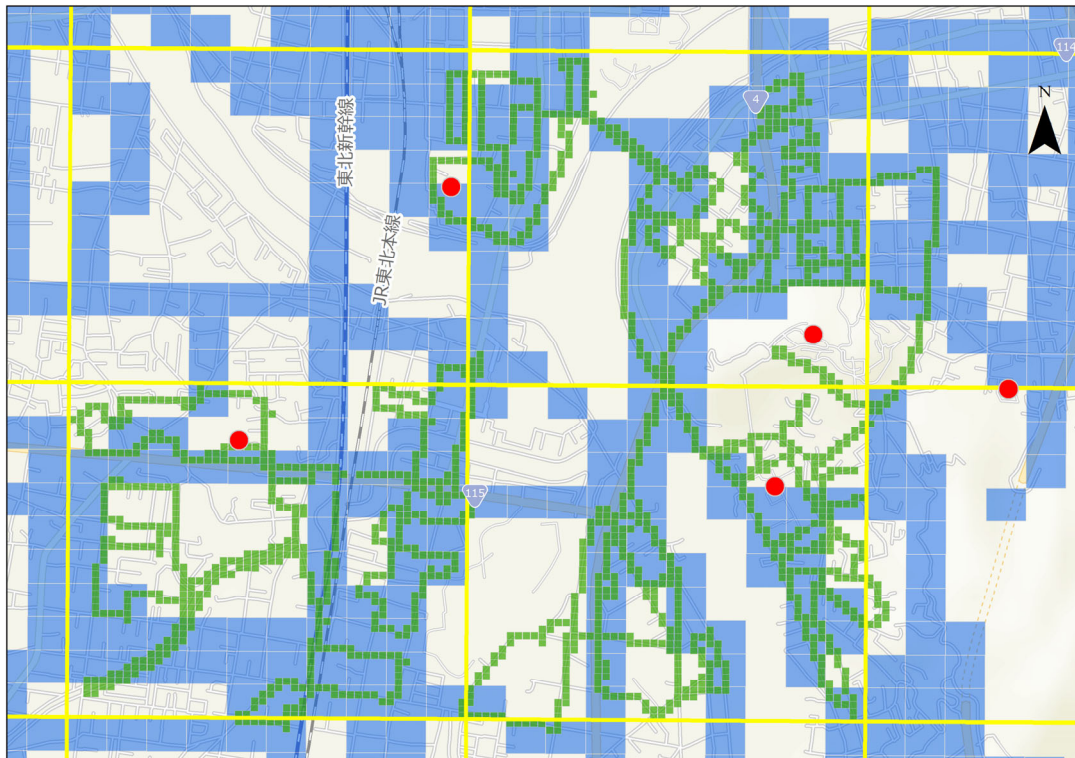


図 2-4 各測定場所のイメージ

(青: 走行サーベイ (100 m メッシュ)、赤: 定点サーベイ、緑: 歩行サーベイ (20 m メッシュ)、黄色枠は基準地域メッシュ。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

令和3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 $\mu\text{Sv/h}$ 未満の地域がほとんどを占めていることが分かる。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）から令和3年度2回目（第23回走行サーベイ）までの測定結果（主に80 km 圏内）を図2-7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）。

2) 定点サーベイ

令和3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年度調査から令和3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

令和3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。

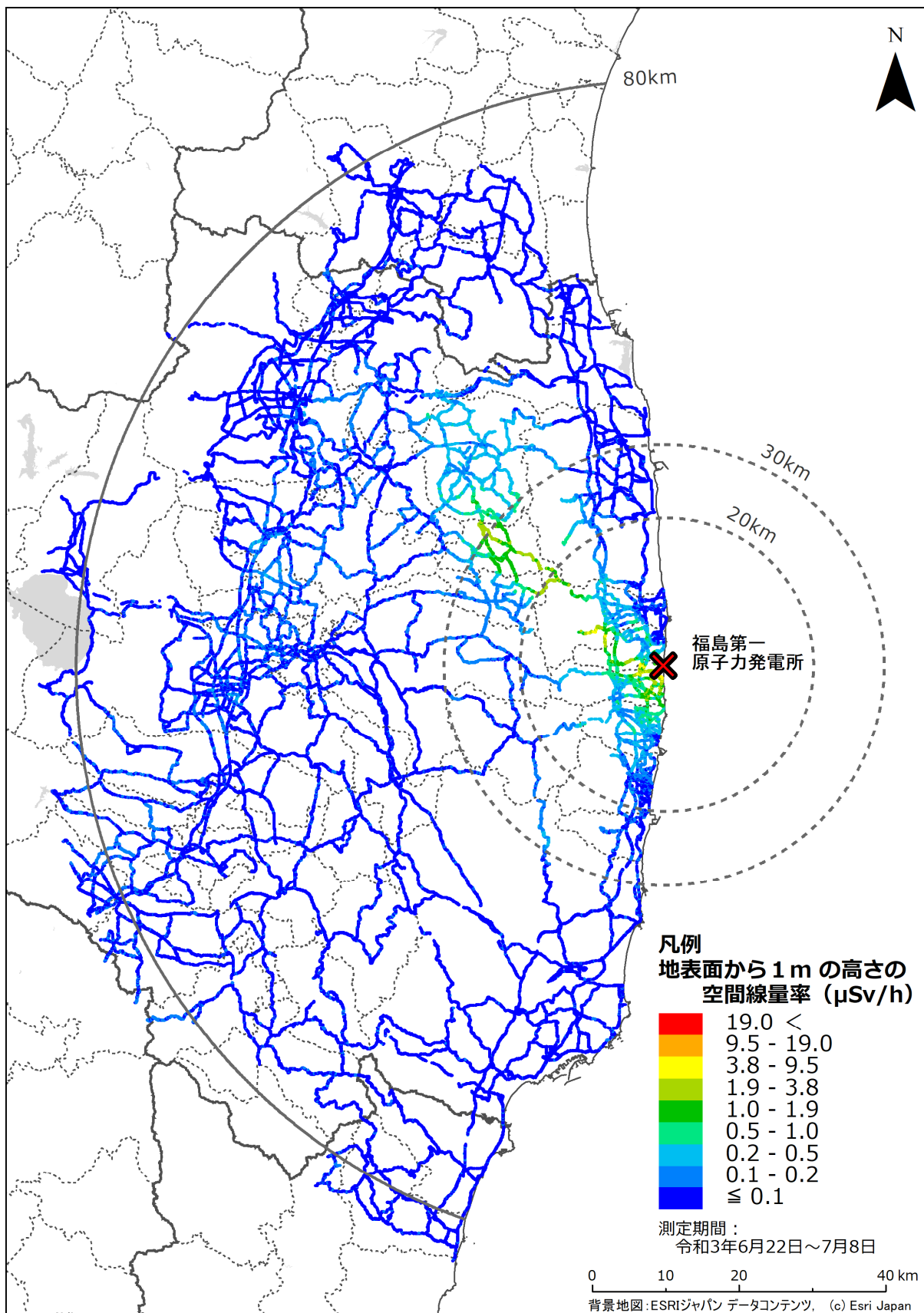


図 2-5 令和3年度1回目(第22回)走行サーベイによる空間線量率の測定結果
(天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

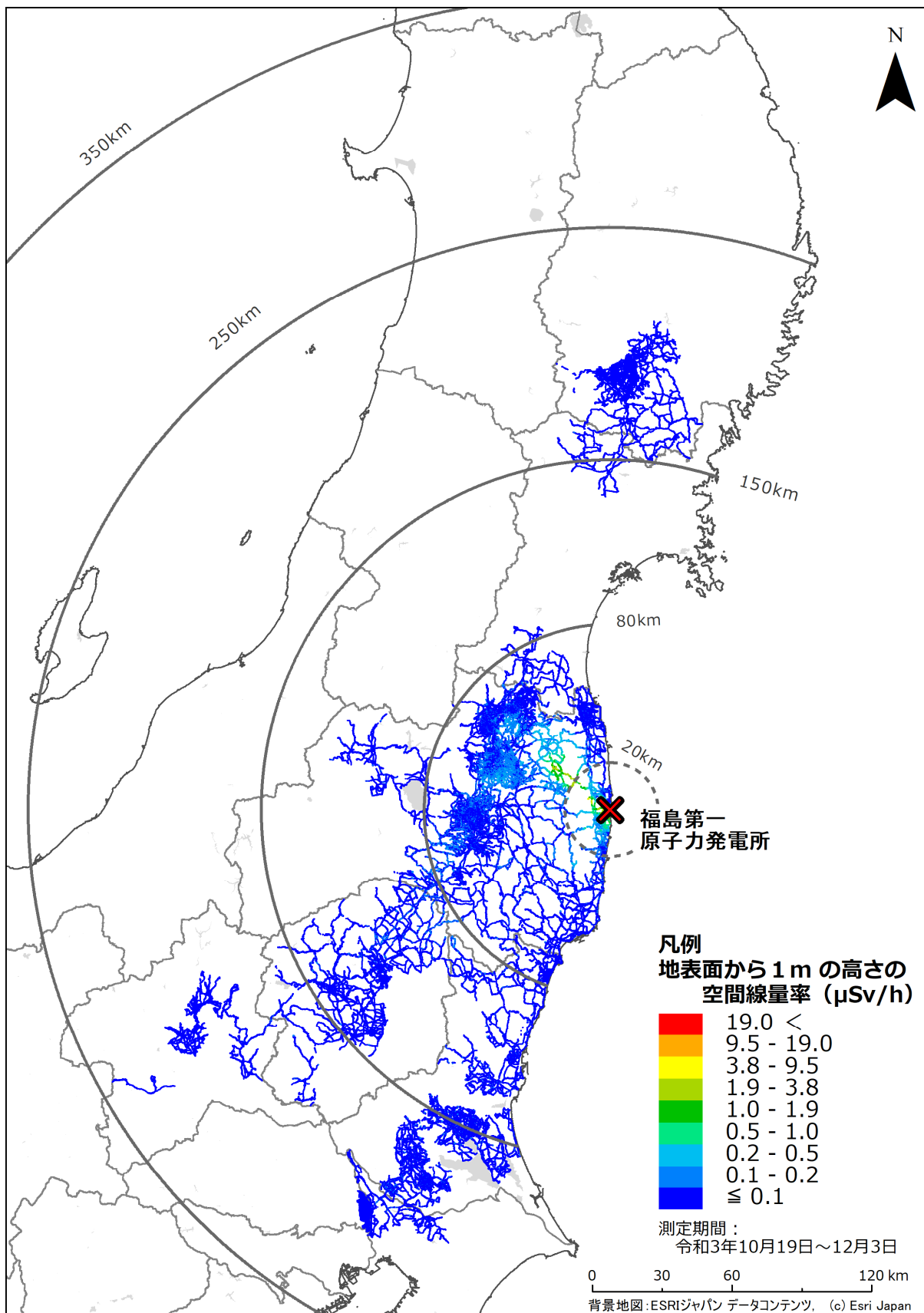


図 2-6 令和3年度2回目(第23回)走行サーベイによる空間線量率の測定結果
 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

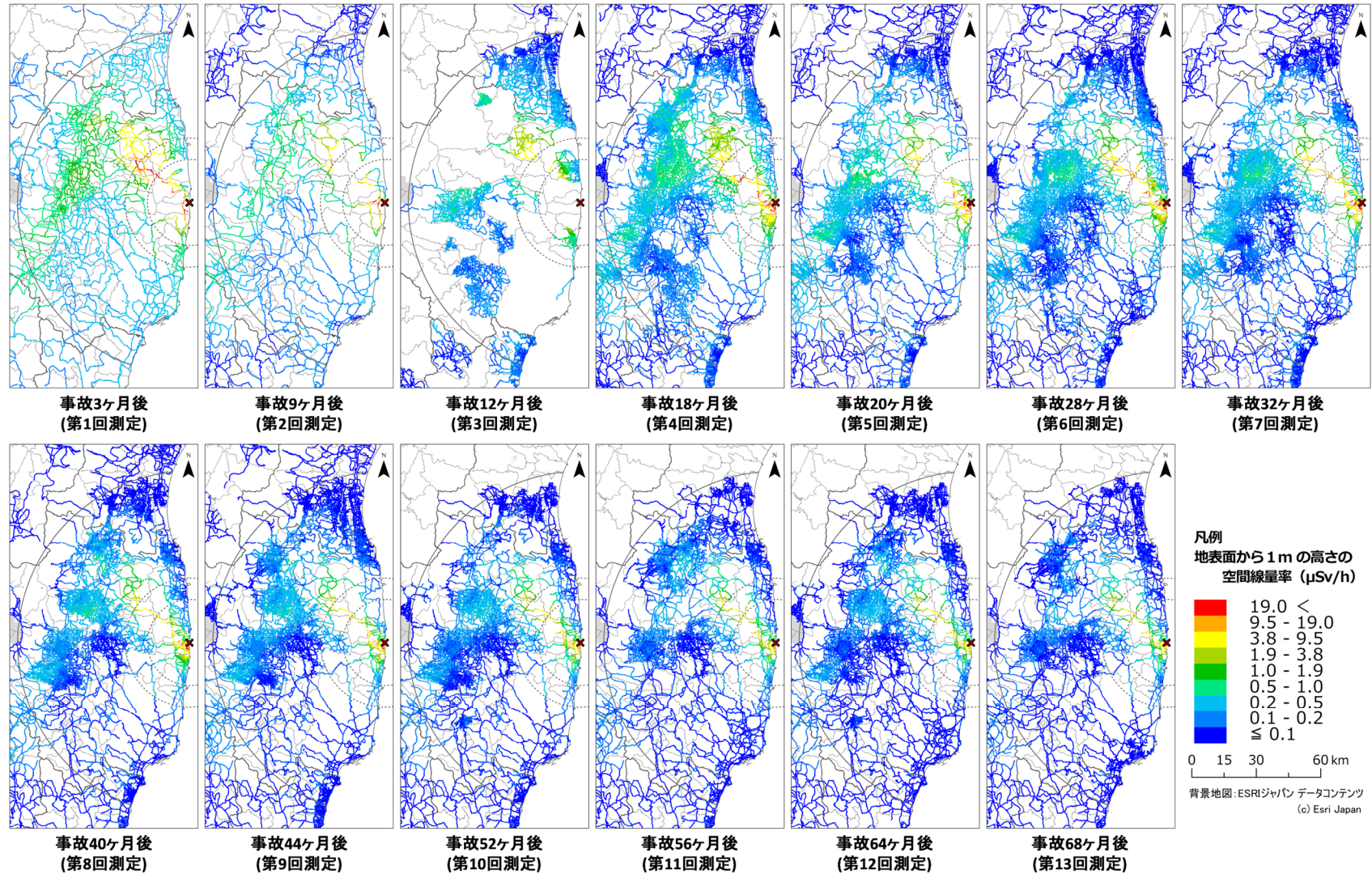


図 2-7 平成 23 年度から令和 3 年度までの走行サーベイによる 80 km 圏内を中心とした空間線量率マップの変化 (1/2)
 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

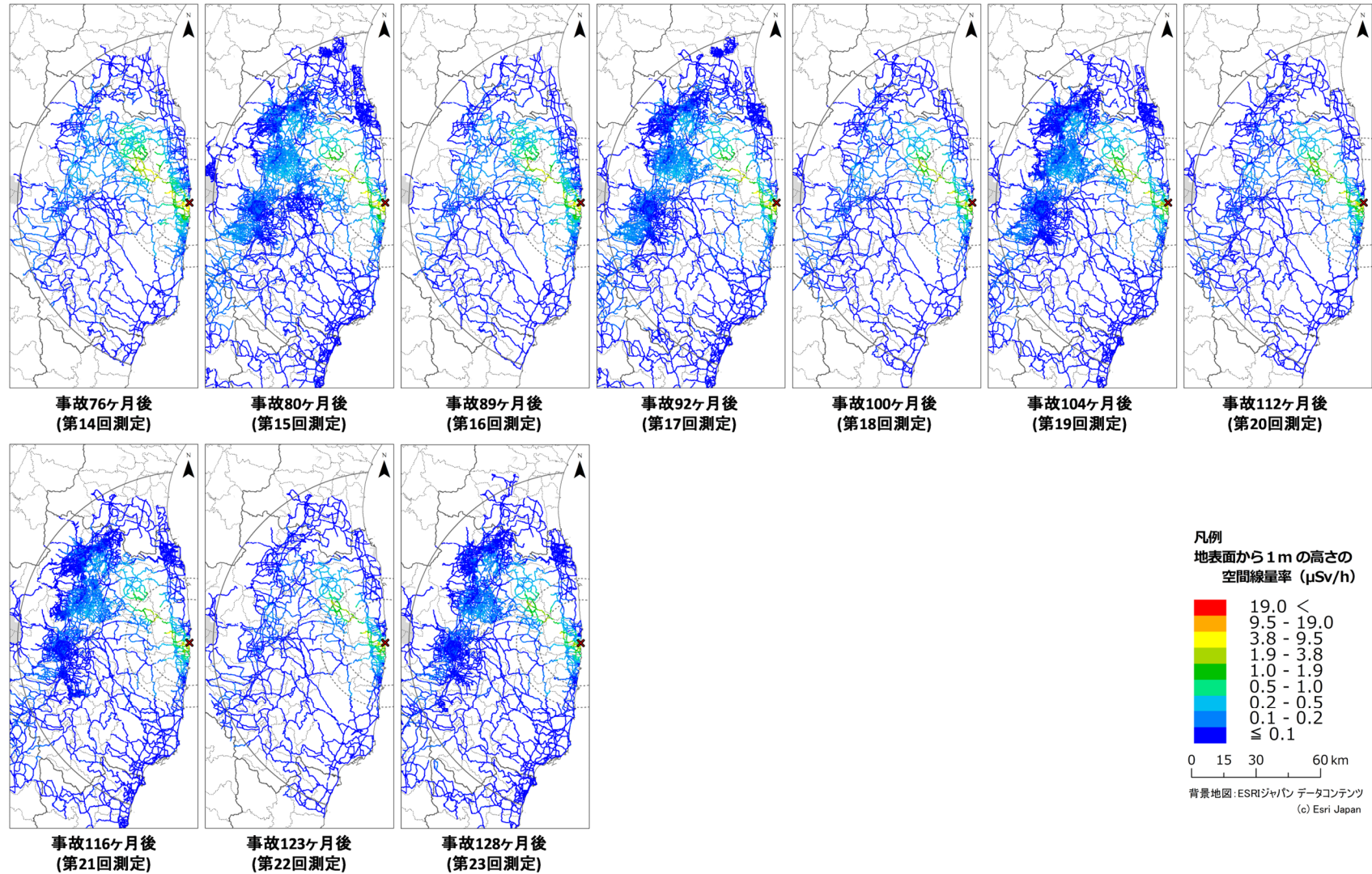


図 2-7 平成 23 年度から令和 3 年度までの走行サーベイによる 80 km 圏内を中心とした空間線量率マップの変化 (2/2)
 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

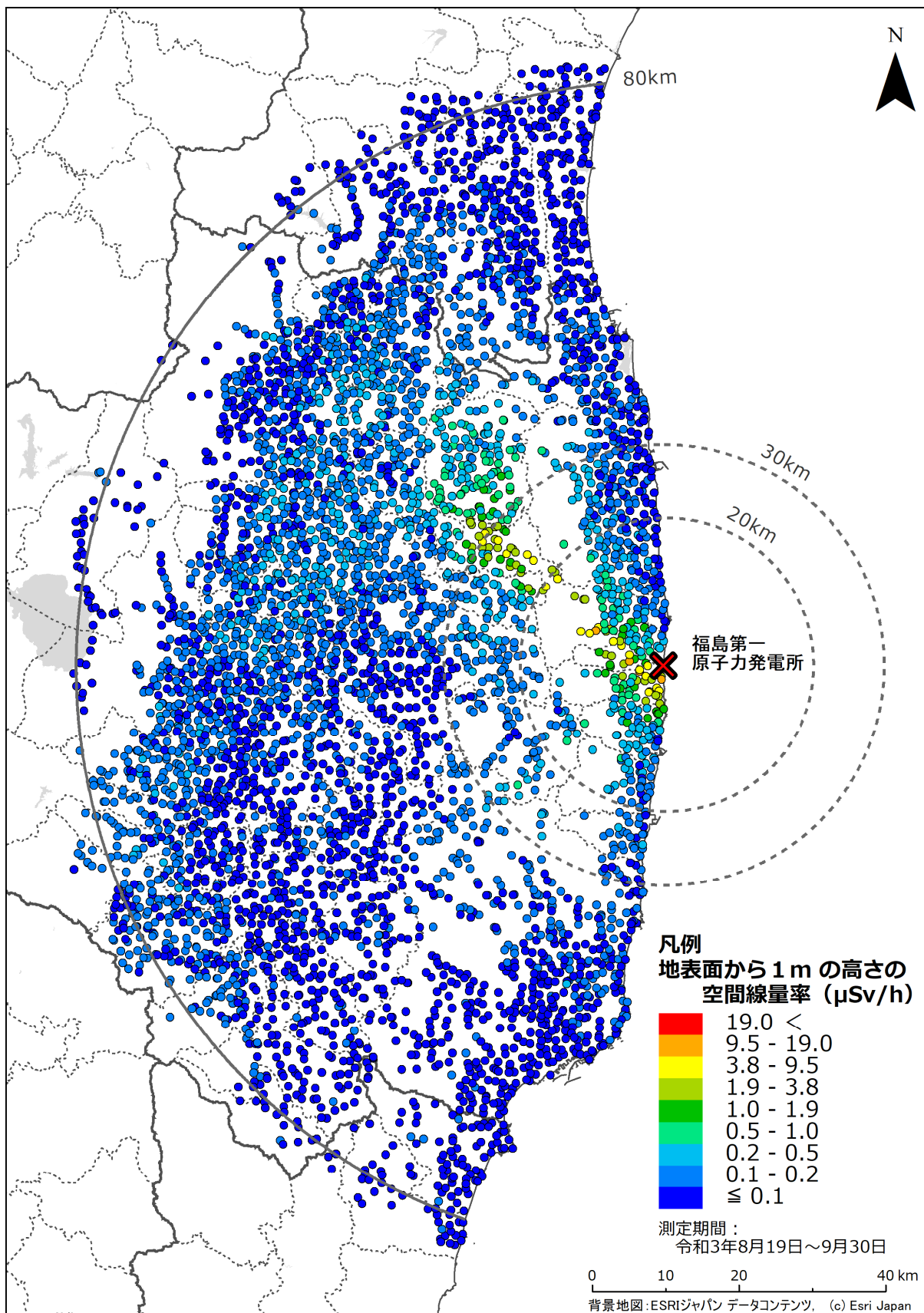


図 2-8 令和3年度調査における定点サーベイによる空間線量率の測定結果
 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

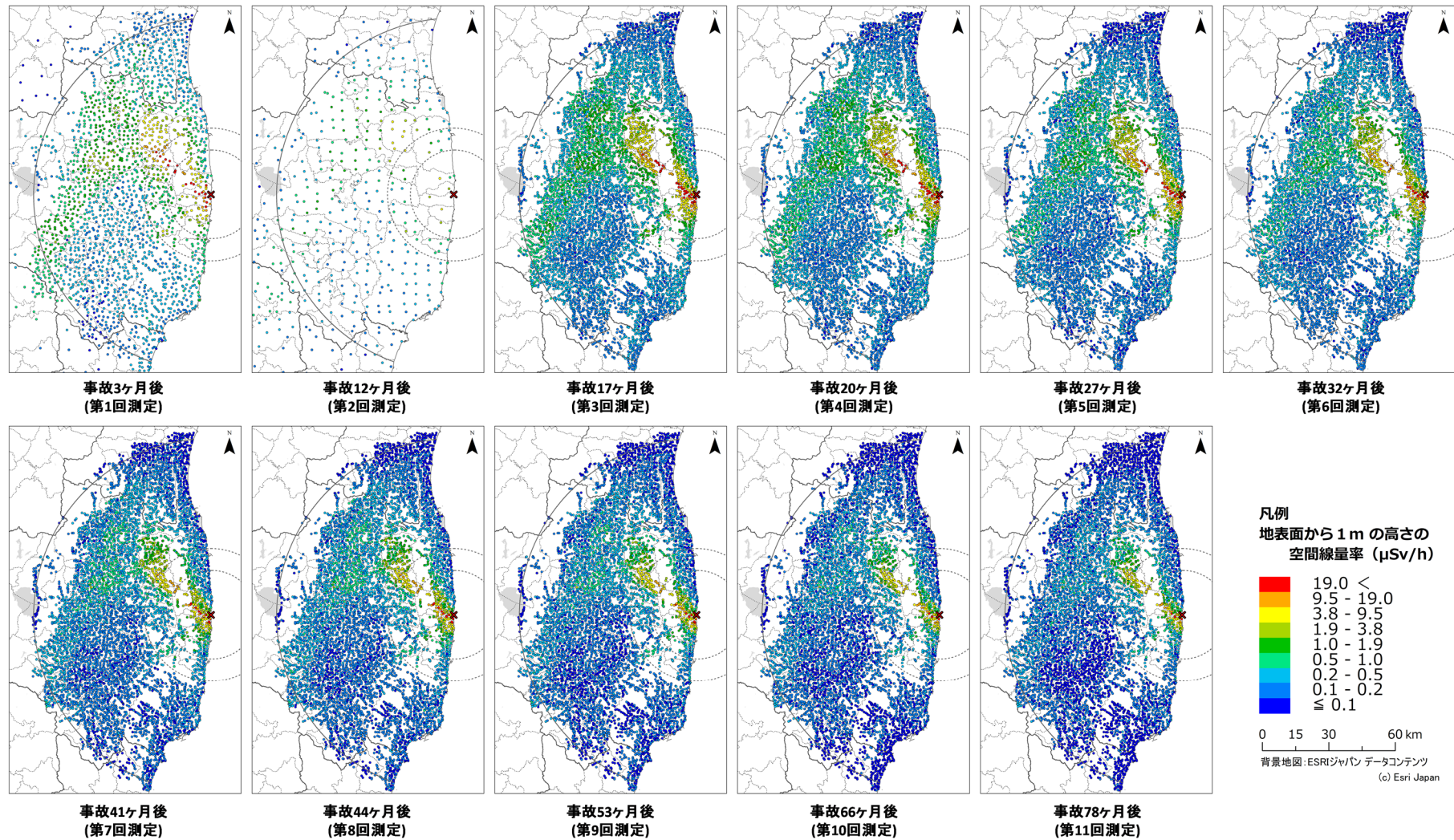


図 2-9 平成 23 年度から令和 3 年度までの定点サーベイによる空間線量率マップの変化 (1/2)
 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

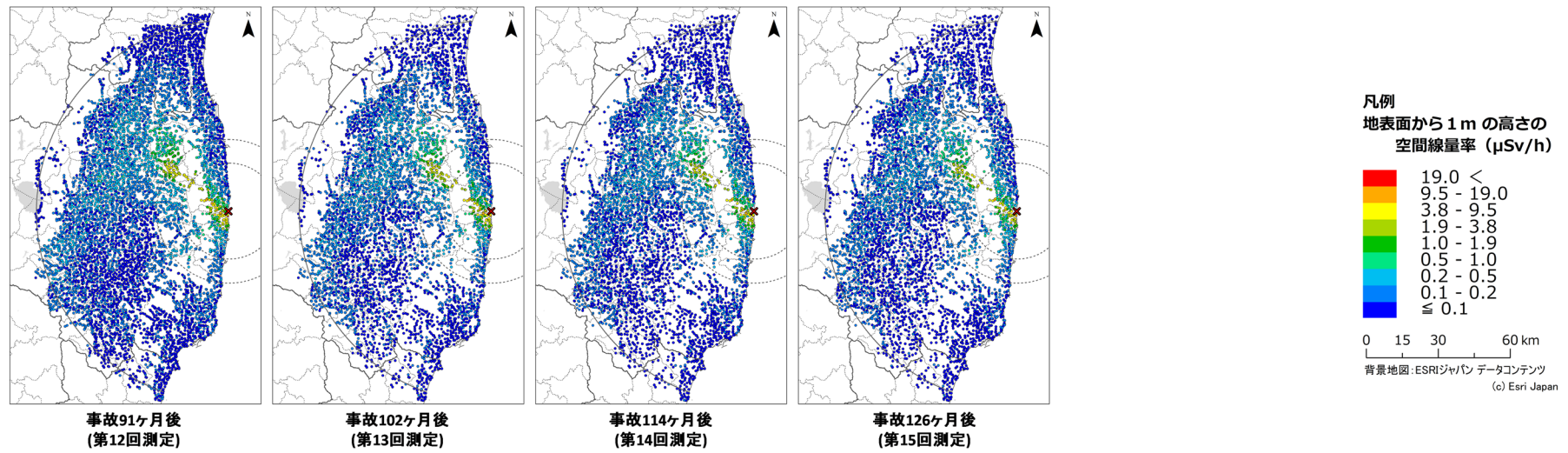


図 2-9 平成 23 年度から令和 3 年度までの定点サーベイによる空間線量率マップの変化 (2/2)
(天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

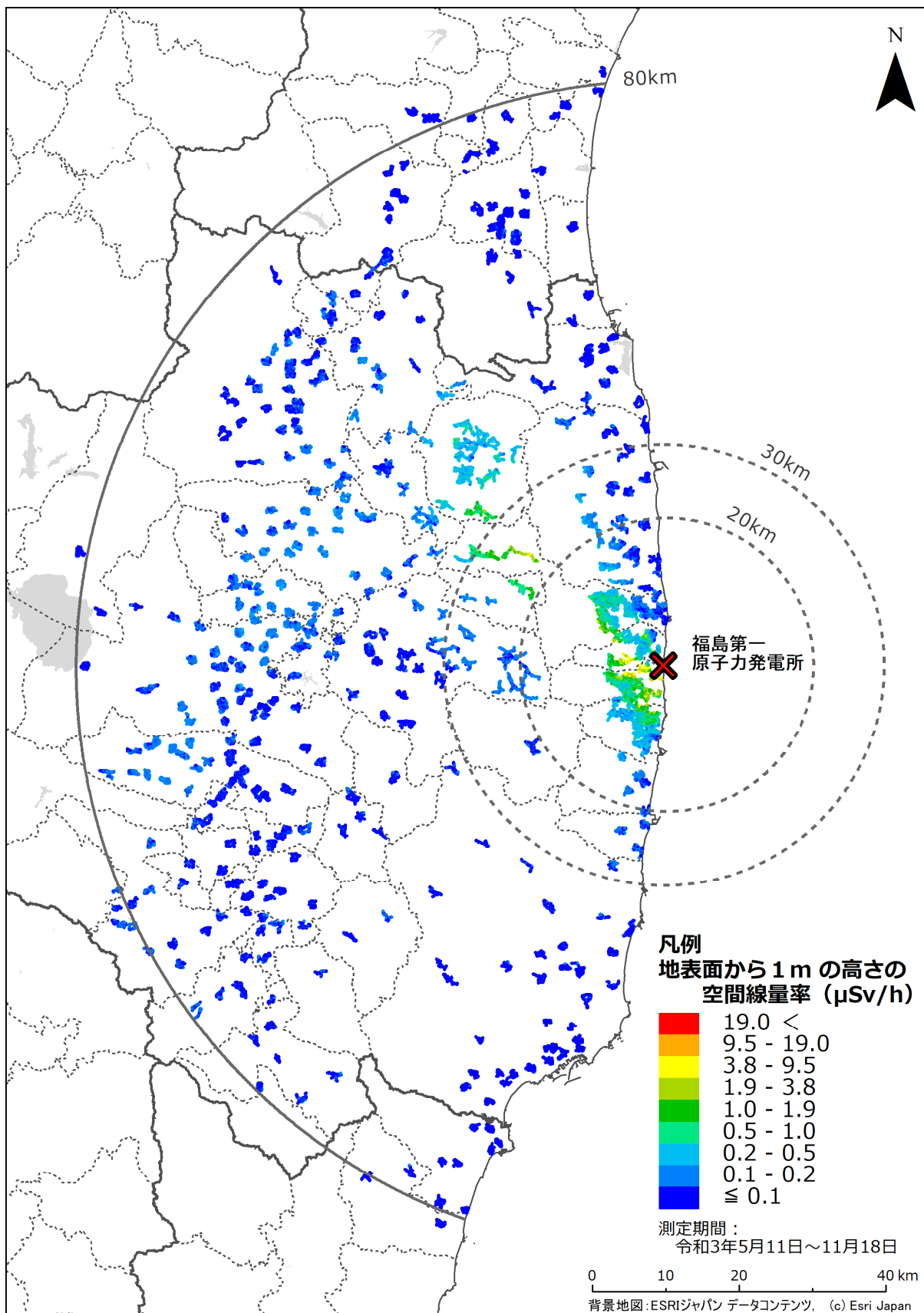


図 2-10 令和3年度調査における歩行サーベイによる空間線量率の測定結果
 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

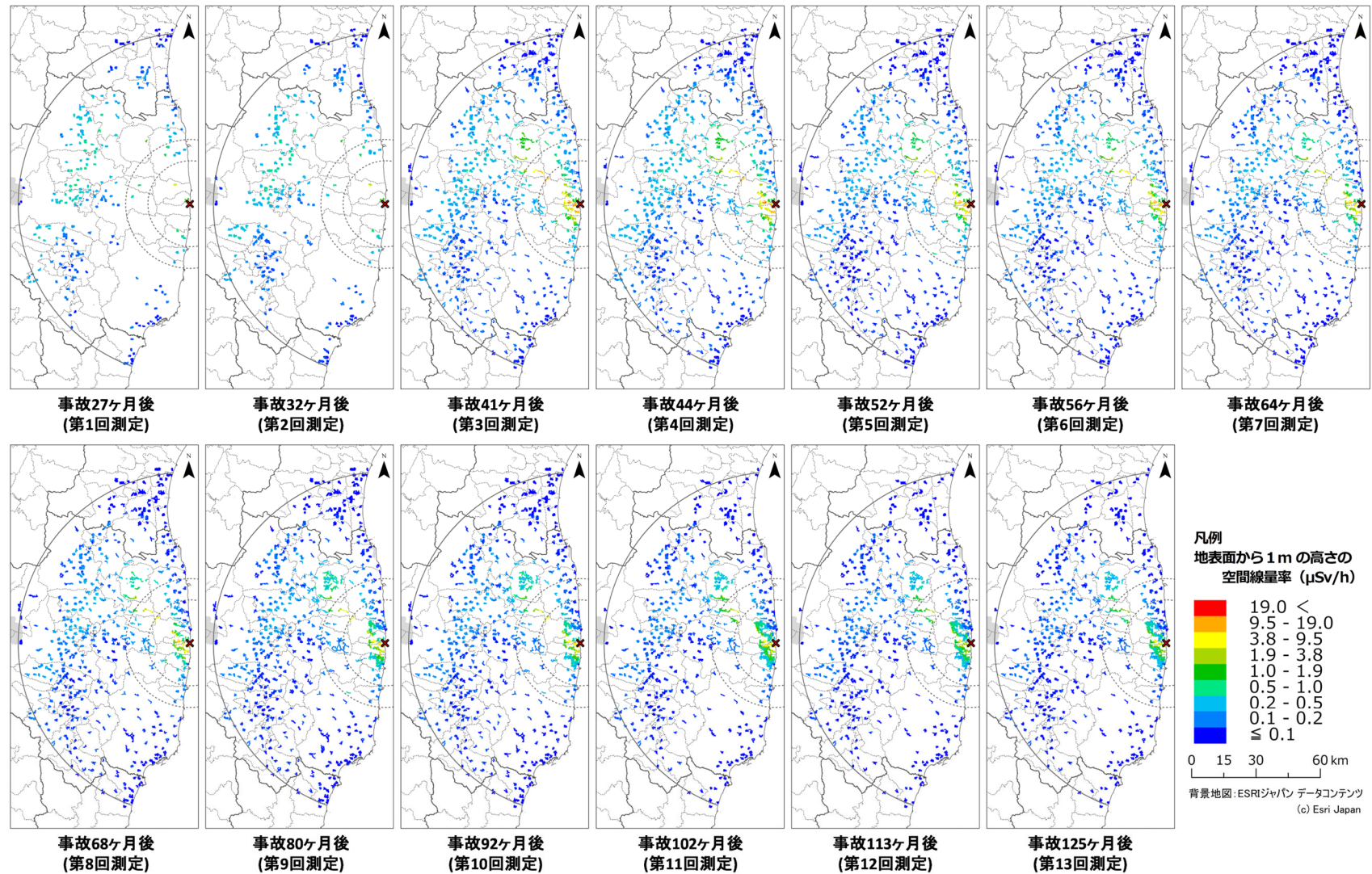


図 2-11 平成 25 年度から令和 3 年度までの歩行サーベイによる空間線量率マップの変化
(天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

2.3.2 令和 2 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 2 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令和 2 年度の結果と令和 3 年度の結果はよい相関関係にあり、相対変化率 RC は正規分布に近い釣鐘型を示した。

各基準地域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。理論的な空間線量率の換算式を式 (3) に示す。

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

λ_{134} : 崩壊定数 (0.693/半減期)

λ_{137} : 崩壊定数 (0.693/半減期)

t : 経過時間

k : 初期の Cs-134 及び Cs-137 の線量率比 (=2.7)

ここで、 $k=2.7$ については、文科省と日本分析センターが事故後平成 23 年 8 月 13 日に実施した土壌サンプルと 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 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能組成比 (1.04) から求めた。

いずれの測定も測定結果による相対変化率の平均値の絶対値は放射性セシウムの半減期による変化率の絶対値よりも小さい (または変化率が正となっている) ことから、放射性セシウムによる空間線量率が減少しバックグラウンドレベルに近づいていることが推測される。また、令和元年度から令和 2 年度までの空間線量率の変化率 (走行サーベイ-3.4%、定点サーベイ-5.5%、歩行サーベイ-5.8%) に対して令和 2 年度から令和 3 年度までは走行サーベイ-2.6%、歩行サーベイ-4.1%と変化率が小さくなっている。定点サーベイについては+1.4%となり令和 2 年度から増加している。

空間線量率が減少し全体的にバックグラウンドに近づくに従い、測定データのばらつき等により前年度から増加と評価される可能性があるなど、わずかな線量率の変動で比率が大きく変わることには注意する必要がある。

表 2-3 令和 2 年度と比較した令和 3 年度の空間線量率測定結果の相対変化率

	走行サーベイ a)	定点サーベイ	歩行サーベイ
令和 2 年度の測定期間	R2/6/23-R2/7/30	R2/8/20-R2/10/1	R2/6/9-R2/11/6
令和 3 年度の測定期間	R3/6/22-R3/7/8	R3/8/19-R3/9/30	R3/5/11-R3/11/18
放射性セシウムの 半減期による変化率	-5.2%	-5.4%	-5.5%
測定結果による 相対変化率の平均値	-2.6%	1.4%	-4.1%

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令和 3 年度における測定結果の散布図及び平成 23 年度調査に対する令和 3 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線量率の変化が線量率の高い場所に比べて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 $0.5 \mu\text{Sv/h}$ 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 $0.5 \mu\text{Sv/h}$ 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 -90% 及び -87% となった。この結果は放射性セシウムの半減期による空間線量率の変化と比較して減少が大きい傾向にあり、除染や車両往来等の人為的要因や風雨による放射性物質の除去（移動）に加え、地中への放射性物質の沈み込みによるためと考えられる。それぞれの相対変化率の平均値を表 2-4 にまとめる。

表 2-4 平成 23 年度と比較した令和 3 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 ($\geq 0.5 \mu\text{Sv/h}$) *	定点サーベイ ($\geq 0.5 \mu\text{Sv/h}$) *
平成 23 年度の測定期間	H23/6/4-H23/6/13		H23/6/4-H23/7/8
令和 3 年度の測定期間	R3/10/19-R3/12/3		R3/8/19-R3/9/30
放射性セシウムの 半減期による変化率		-75%	-75%
測定結果による 相対変化率の平均値	-84%	-90%	-87%

* 平成 23 年度の測定結果において $0.5 \mu\text{Sv/h}$ 以上のエリアのみで評価

2.3.4 測定手法間の比較

令和 3 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 26% 小さい（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 -5% 程度であり（図 2-14 (b)）、両者の相違は小さい。走行サーベイは歩行サーベイより 19% 小さくなっており（図 2-14 (c)）、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。

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 年度調査（事故から約 3 ヶ月）を除き平均値で -20%から-30%で推移している。平成 23 年度調査の時点で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が、こ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考えられる。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 0% から-10%の間で推移しており、走行サーベイに比べて定点サーベイとの違いは小さいといえる。

以上より、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。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ことを示唆している。

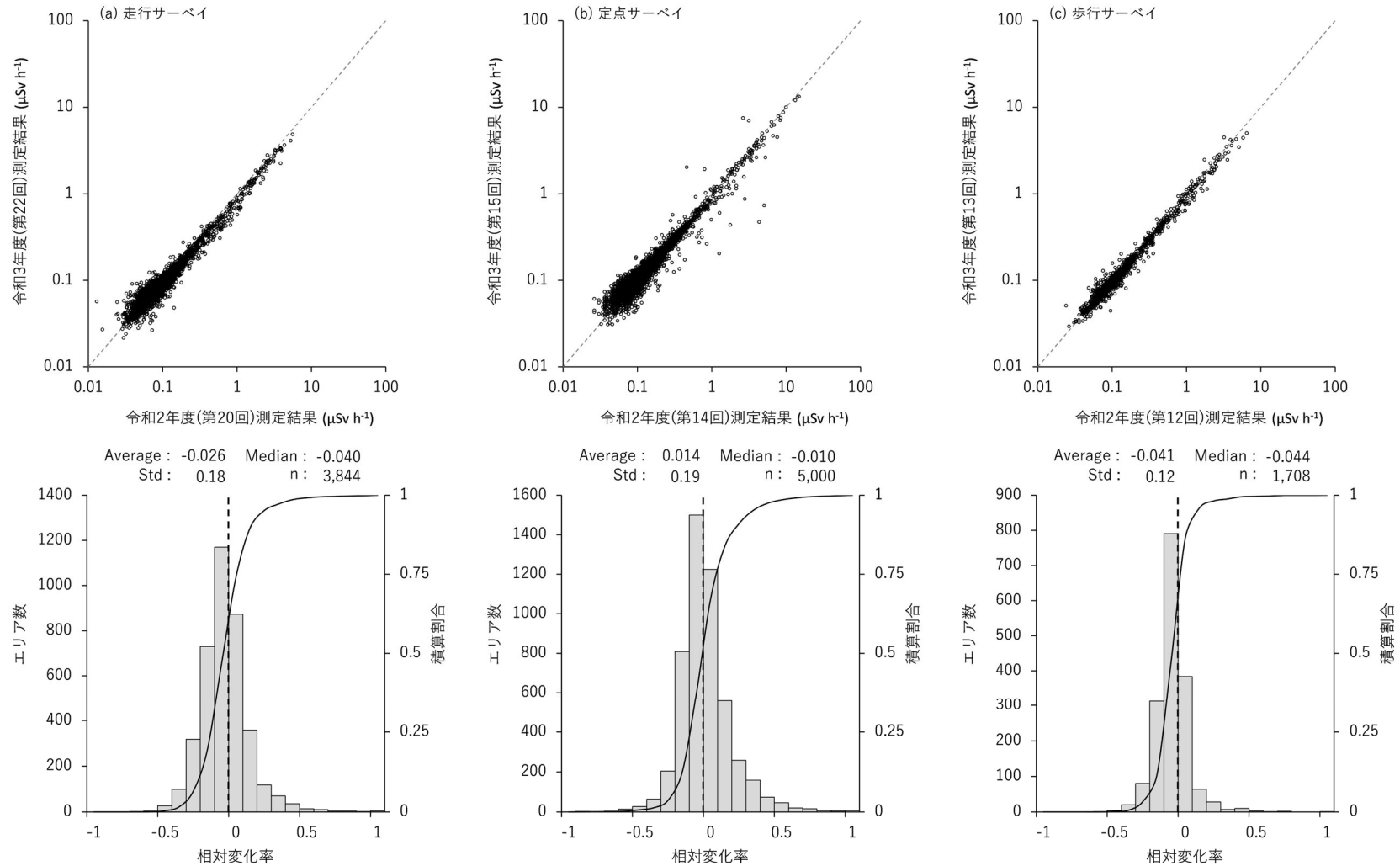


図 2-12 令和2年度の測定結果に対する令和3年度の測定結果の比
(相関図の破線は $y=x$ 、Std は標準偏差、n はデータ数を意味する。)

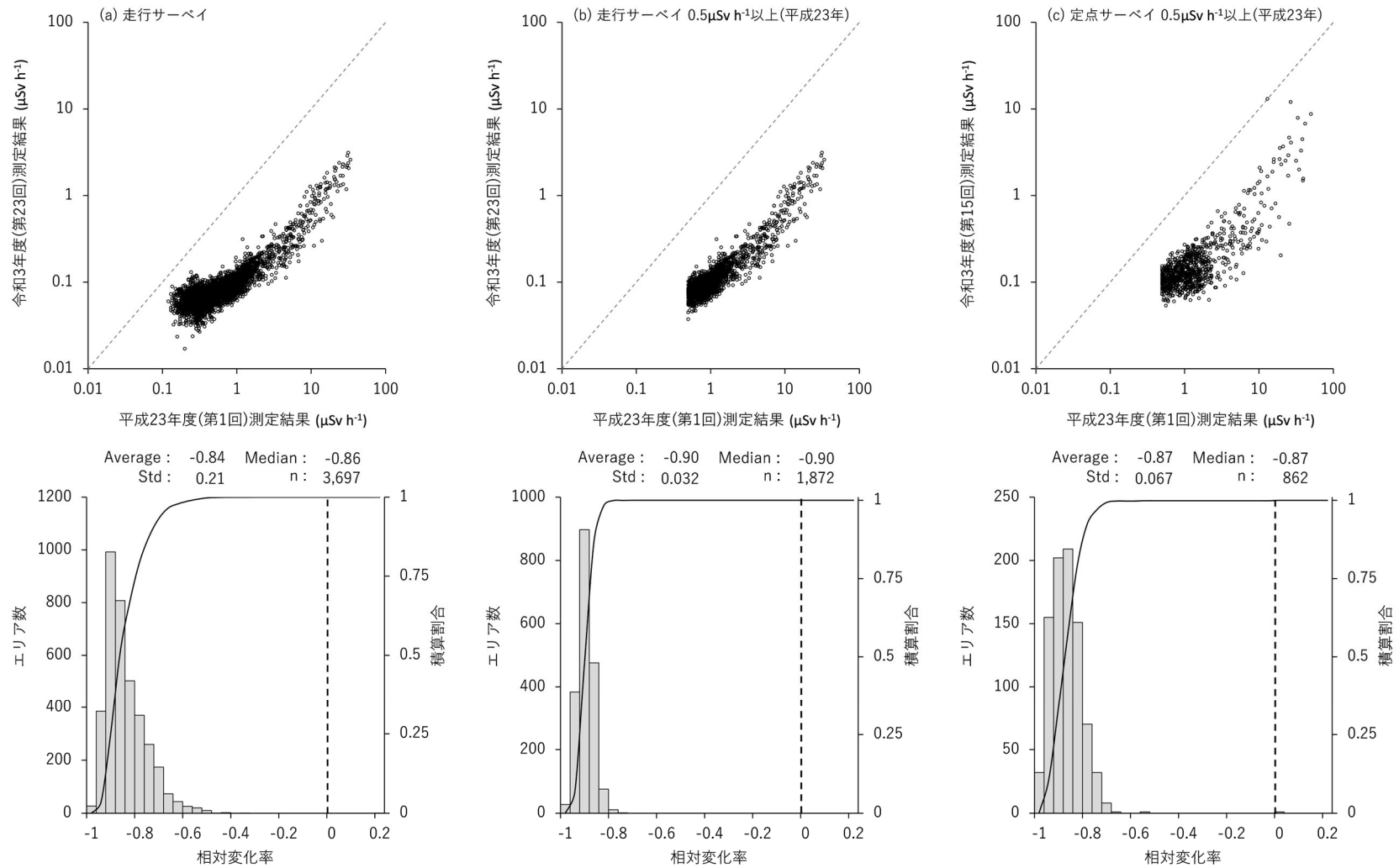


図 2-13 走行サーベイ及び定点サーベイによる空間線量率結果の平成23年度との比較
(相関図の破線は $y=x$ 、Std は標準偏差、n はデータ数を意味する。)

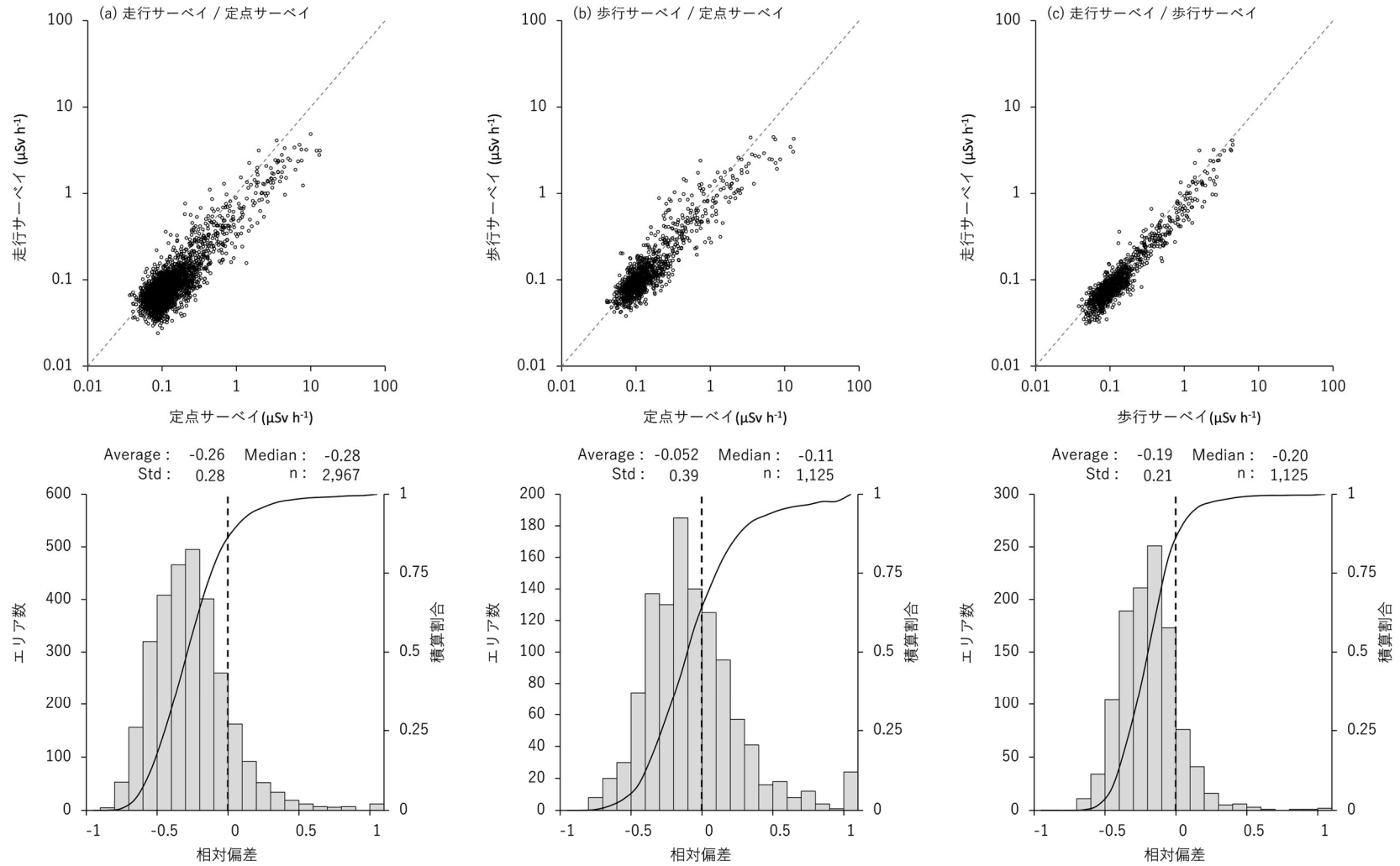


図 2-14 令和 3 年度調査での測定手法間の比較
(相関図の破線は $y=x$ 、Std は標準偏差、n はデータ数を意味する。)

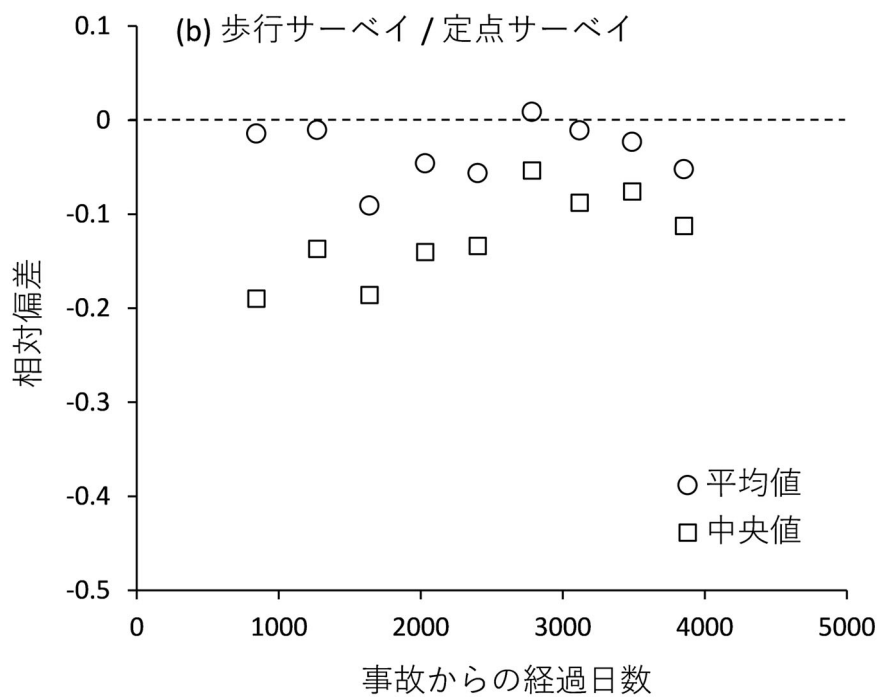
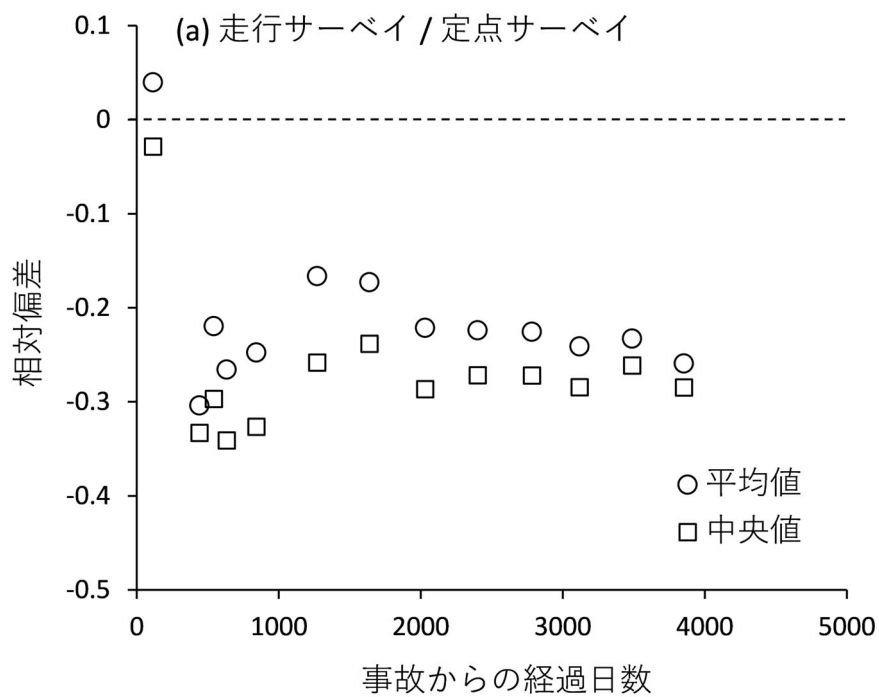


図 2-15 定点サーベイに対する走行サーベイ及び歩行サーベイの空間線量率の相対偏差

3. 無人ヘリによる発電所周辺の空間線量率測定

3.1 調査目的

原子力機構では、事故直後から、無人ヘリコプター（以下「無人ヘリ」という。）を用いた放射線分布の測定手法について研究開発を行っている。無人ヘリは、有人ヘリコプターと比較して低高度で飛行が可能であり、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。原子力機構による無人ヘリによる空間線量率測定の成果としては、分布状況調査で行っている福島第一原発周辺のモニタリング³⁾、河川敷のモニタリング⁴⁾及び除染前後のモニタリング⁵⁾などが挙げられる。

事故以来、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）となっており、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。）は実施されていなかった。また、地上での測定結果も限られており、本地域の全体像の把握が必要であった。そこで、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 圏内のモニタリング（以下「無人ヘリサーベイ」という。）を開始した⁶⁾。平成25年度からは、航空機サーベイとの比較も考慮し、航空機サーベイと2 km 程度オーバーラップさせ約5 km 圏内を測定対象とすることにした。本地域は、事故直後には空間線量率が高く帰還困難区域に設定されたことから、事故後数年における放射性物質の移動への人為的な影響が小さい。一方、近年除染によって生じた廃棄物の中間貯蔵施設の建設、高速道路・鉄道の整備及び特定復興再生拠点区域に認定され5年後（令和4年から）の避難指示解除をめざして除染が加速されるなど、環境が変化している。本地域での面的及び継続的なデータの取得により、放射性物質の環境動態や人為的活動の影響について知見を得ることが可能と考えられる。なお、過去10回の測定におけるデータの解析から、無人ヘリサーベイで確認した空間線量率の減衰は、放射性セシウムの物理的半減期から計算した変化量よりも大きいことがわかってきている。

ここでは、令和3年度に1回実施した無人ヘリサーベイによる福島第一原発から概ね5 km の範囲の空間線量率の測定結果と、過去データとの比較についてまとめる。また、無人ヘリサーベイの測定結果と地上の測定値に顕著に差が出る測定点を抽出し、その要因について詳細な調査を実施した。

3.2 調査手法

3.2.1 調査場所・期間

調査場所は、福島第一原発周辺（5 km 圏内）を設定した。

調査期間：令和3年5月17日～10月4日

フライト範囲：70.2 km²

合計測定距離：841 km

3.2.2 調査機器

測定にあたっては、ヤマハ発動機（株）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。また、放射線検出器はLaBr₃(Ce)(Lanthanum Bromide)シンチレーション検出器(1.5”Φ×1.5”×3本)を用いた(図3-1参照)。



図 3-1 無人ヘリの仕様等

3.2.3 データ取得方法

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80m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200m程度の円内のガンマ線量を平均化したものである。無人ヘリの飛行軌跡幅(測線間隔)は80~100m、無人ヘリの飛行速度は8m/s(=28.8km/h)程度とした。取得データは、放射線検出器で測定される1秒ごとのガンマ線のデータ(計数率)とエネルギースペクトル及びそれに対応するDGPS(差分全地球測位システム: Differential Global Positioning System)による位置情報である。データ取得のための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。

3.2.4 無人ヘリ測定データの空間線量率への換算

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係数を取得するため

に、測定地域内において比較的空間線量率が一定で平坦な場所に直径 200 m の円形のテストサイトを設定した。テストサイト内では、あらかじめ KURAMA-II を用いて、地上から 1 m 高さの空間線量率データを取得した。その後、テストサイトの中心から上空の対地高度 80 m で無人ヘリをホバリングさせ、この高度（基準高度）で取得されたガンマ線計数率とテストサイトの地上における空間線量率とを比較し、空間線量率換算係数（*CD*: Conversion factor: $\mu\text{Sv/h/cps}$ ）を算出した。さらに、テストサイト上空を対地高度 10 m から 100 m まで 10 m ごとにホバリングし、各高度におけるガンマ線計数率を測定し、高度ごとのガンマ線計数率から対地高度とガンマ線計数率との関係式を求め、高度補正係数（*AF*: Attenuation Factor: m^{-1} ）を算出した。平成 30 年度から令和 3 年度に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。

実際のフライトで取得されたガンマ線計数率は、対地高度と基準高度のずれを高度補正係数 *AF* により補正し、空間線量率換算係数 *CD* から地上 1 m 高さでの空間線量率（ $\mu\text{Sv/h}$ ）に換算した。なお、対地高度は GPS により測位した高度から国土地理院が作成した 10 m メッシュの数値標高モデル DEM（Digital Elevation Model）データ及びジオイド高（地球を仮想的に表した楕円体表面から、平均海面を仮想的に陸地へ延長した面までの高さ）を差し引くことにより求めた（ H_a ）。換算式について、式(4)に示す。

$$D = \frac{C_{\text{net}} \times HF}{CD} \quad (4)$$

ここで、 C_{net} は検出器固有のバックグラウンド計数を差し引いた正味計数率であり、 HF は $\exp[AF(H_{\text{std}} - H_a)]$ とした高度補正係数である。 H_{std} は基準フライト高度として 80m とした。

表 3-1 テストサイトにおける換算パラメータ取得条件

ID	テストサイト場所		実施日	ホバリングの 対地高度(m)	基準高度計数率 (cps at 50m)	地上値 ($\mu\text{Sv/h}$)	AF (m^{-1})	CD ($\mu\text{Sv/h/cps}$)	
	緯度	経度							
1	37.38916996	141.0010944	H30.6.4	48	9498	2.55	-0.00864	5561	
2	37.41075887	140.9787564	H30.8.23	82	13144	6.48	-0.00841	4048	
3	37.41342321	140.9854456	R1.10.15	81	16972	8.63	-0.00930	4143	
4	37.36137103	141.0078806	R2.6.17	80	3160	1.34	-0.00646	3925	
5	37.38711193	141.0063403	R2.6.29	77	9614	4.22	-0.00830	4313	
6	37.38602783	140.9947421	R2.7.27	80	3542	1.56	-0.00779	4230	
7	37.4099319	140.9729545	R2.8.24	80	8336	3.52	-0.00768	4357	
8	37.3871103	141.0063297	R2.8.28	76	10390	4.41	-0.00808	4392	
9	37.38601914	140.994735	R2.9.10	79	3706	1.62	-0.00769	4225	
10	37.40992418	140.9729688	R2.9.18	81	7867	3.14	-0.00761	4622	
11	37.38601934	140.9947369	R3.9.21	76	3303	1.46	-0.00771	4063	
12	37.38711292	141.0063357	R3.9.21	77	8774	4.03	-0.00828	4141	
							平均値	-0.00800	4335
							採用値	-0.00800	4382

3.2.5 空間線量率マップの作成

マップとして示すために、無人ヘリサーベイによる測定点間の空間線量率の値は、内挿法（クリギング法）を用いて 5 m メッシュの分解能で内挿補間した。比較等に使用する数値と

しては、データ数を考慮し、50 m メッシュとした。

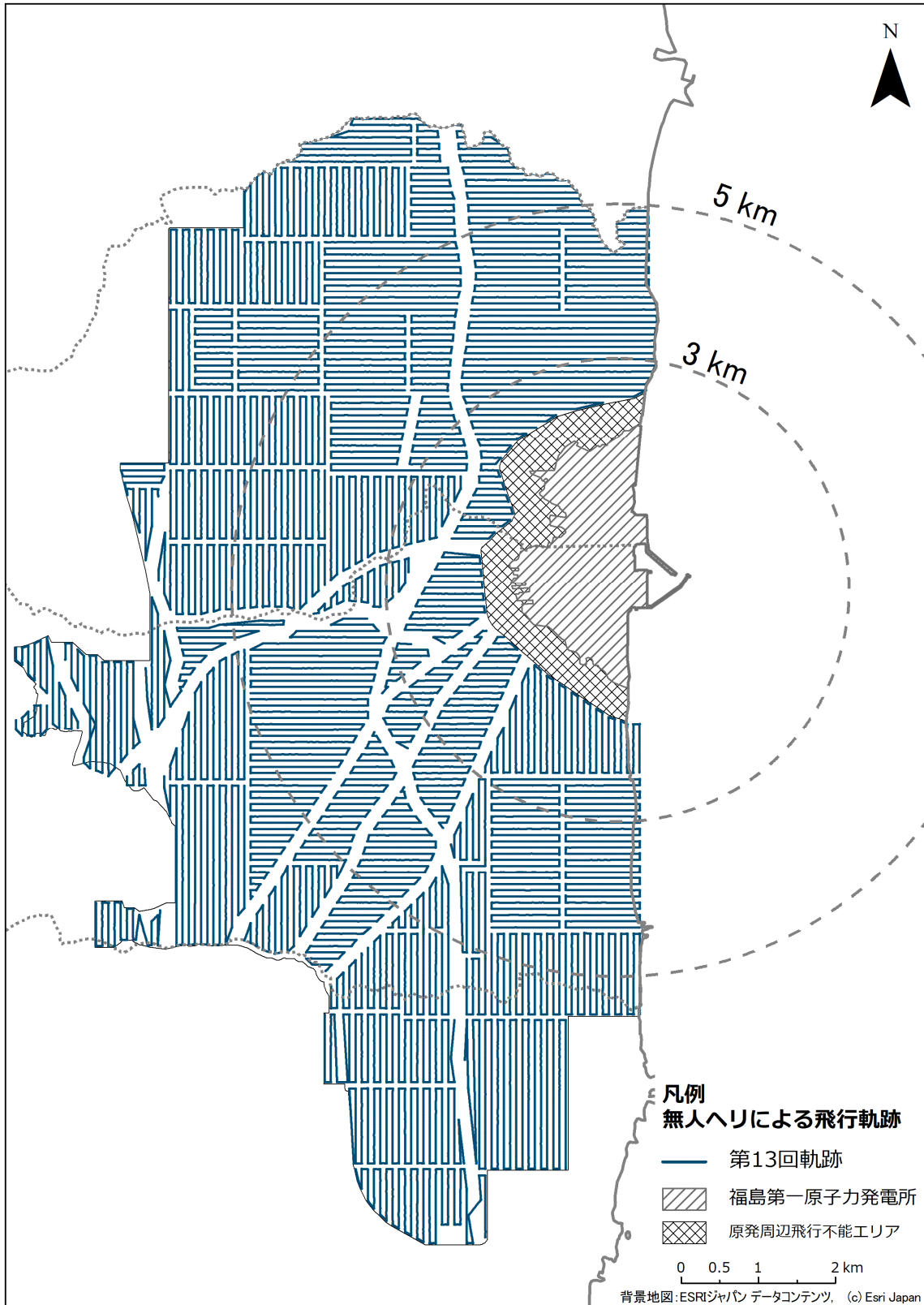


図 3-2 令和 3 年度無人ヘリサーベイの飛行軌跡

3.3 調査結果

3.3.1 空間線量率マップ

令和 3 年度に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、令和 3 年度の測定と過去第 1 回からの測定結果が得られている 3 km 圏内の空間線量率マップを図 3-4 に示す。なお、各測定箇所における地上 1 m 高さの空間線量率の値は、放射性セシウムの物理的減衰を考慮し、各モニタリングの最終日に換算された値である。マップをみると、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わかる。

3.3.2 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と比較した。地上における空間線量率は、第 2 章の定点サーベイによる測定結果とした。無人ヘリサーベイの測定結果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式(2)に示したような 2 測定間の相対偏差を図 3-5 に示す。散布図を見ると良い相関関係（決定係数 $R^2=0.86$ ）を示しており、令和 3 年度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、1 $\mu\text{Sv/h}$ 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、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。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。

3.3.3 令和 2 年度との比較

モニタリングした区域を 100 m メッシュに分割し、メッシュごとに令和 2 年度と令和 3 年度の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 $R^2=0.99$ ）を示している。また、令和 3 年度は令和 2 年度から 7%減少（変化率の平均値で）したことが分かる。

図 3-7 に令和 2 年度の空間線量率測定結果に対する令和 3 年度の空間線量率の測定結果の比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、建設中である中間貯蔵施設のエリア又は特定復興再生拠点区域復興再生計画のエリアと一致しており、施設建設における造成作業や除染による影響が表れているものと考えられる。

3.3.4 天然放射性核種による空間線量率マップ

無人ヘリサーベイではガンマ線スペクトルを測定できるため、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⁸⁾を用いて天然放射性核種による空間線量率の評価が可能である。天然放射性核種のみで構成されるガンマ線スペクトルでは、1,400 keV~2,800 keV の計数率と全計数率の比（*BG-index*）が一定であることを利用して天然放射性核種による空間線量率を評価する。図 3-9 に天然放射性核種による空気カー

マ率の分布を示す。図に示されているように、天然放射性核種による空気カーマ率は、0.03～0.06 $\mu\text{Gy/h}$ 程度である。また、本結果は過去の結果と整合している。

3.3.5 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⁸⁾を用いている。

本方法は天然核種のみを含む地域を測定して得られるガンマ線スペクトルにおいて、放射性セシウムが放出するガンマ線を含まない 1,400 keV～2,800 keV の計数率と全計数率の比（*BG-index*）が一定であることに着目するものである。機体と検出器の組み合わせごとに、あらかじめ放射性セシウムによる汚染がない地域をフライトして得られたデータを基に *BG-index* を設定し、実際のフライトデータの 1,400 keV～2,800 keV の計数率を基に全体の計数率から減算する。

これらのパラメータを用いた放射性セシウムの沈着量の算出手順を以下に示す。また、計算式を式(5)に示す。

- ① 測定で得られたガンマ線スペクトルから 1,400 keV～2,800 keV の計数率（ C_{BG} ）を計算する。
- ② C_{BG} に *BG-index*（ I_{BG} ）を乗じて天然核種起源の全計数率（ BG_{nat} ）を算出する。
- ③ C_{net} から BG_{nat} を差し引き、放射性セシウムのみを計数率（ C_{Cs} ）を求める。
- ④ C_{Cs} に *HF*を乗じ、*CD*で除することで放射性セシウムのみを空間線量率（ D_{Cs} ）を算出する。
- ⑤ 式(5)より、空間線量率 D_{Cs} を空間線量率－放射能換算係数（ $CF[\mu\text{Sv/h}]/[\text{kBq/m}^2]$ ）で除して放射性セシウムの沈着量 Rd を求める。

$$Rd = \frac{D_{Cs}}{CF} \quad (5)$$

*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 $\beta_{eff}=4.11 \text{ g/cm}^2$ とした。なお、検出下限値は、本測定範囲の平均的なバックグラウンド計数率で計算すると 9.8 kBq/m^2 と計算できる。また、平成 28 年度から平成 30 年度まで同地域で可搬型ゲルマニウム半導体検出器（以下「可搬型 Ge 検出器」という。）による放射性セシウム沈着量測定を行い令和 3 年 10 月に半減期補正した値と、本年度の無人ヘリによる測定結果と比較した結果を図 3-10 に示す。このように両者は一定の相関関係にあるが、相対偏差値のヒストグラムを見ると平均値も中央値も無人ヘリでの換算結果が高い傾向にある。また、散布図での分布をみると特に濃度の低いデータについて無人ヘリが高い傾向にあり、バックグラウンド値の評価に課題があることが主な要因と考えられる。

換算結果を基に作成した放射性セシウムの沈着量分布マップを図 3-11 に示す。また、比較のため、令和 2 年度のモニタリング結果について、同図内に示す。空間線量率の高かった福島第一原発から北西部分と南部分は 3.00 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。

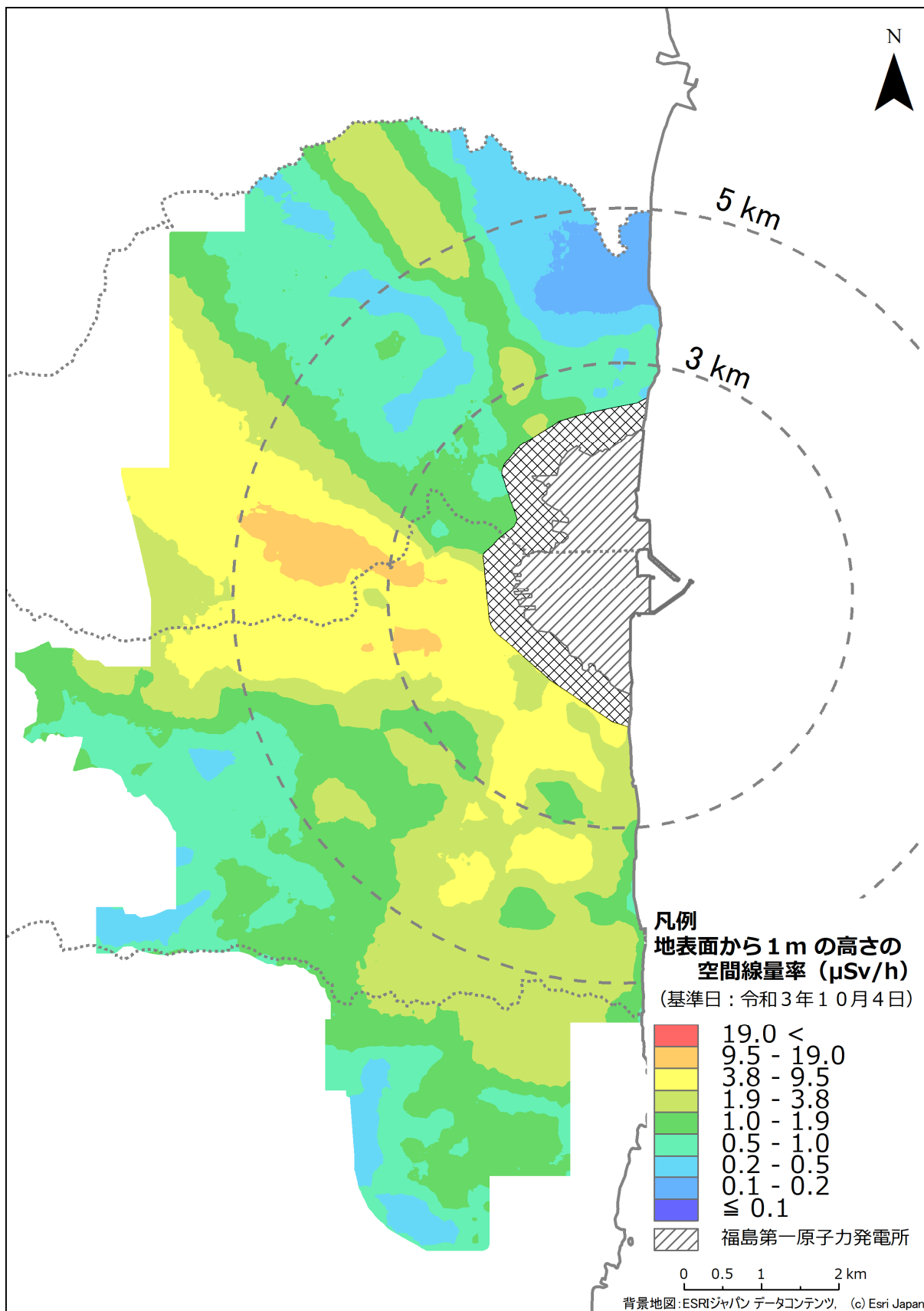


図 3-3 令和3年度調査における無人ヘリサーベイによる空間線量率測定結果
 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

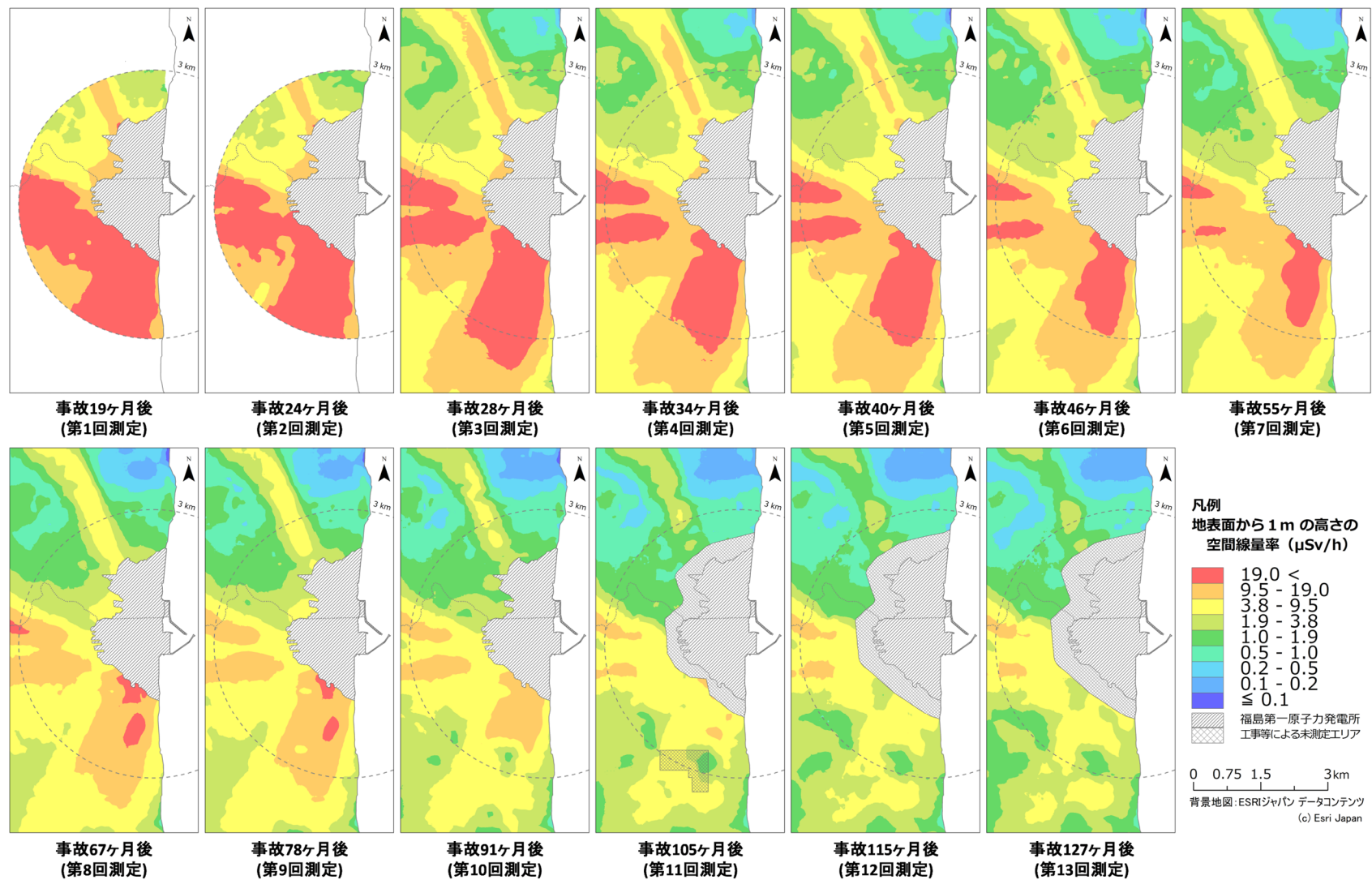


図 3-4 平成 24 年度から令和 3 年度までの無人ヘリサーベイによる空間線量率マップの変化
 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

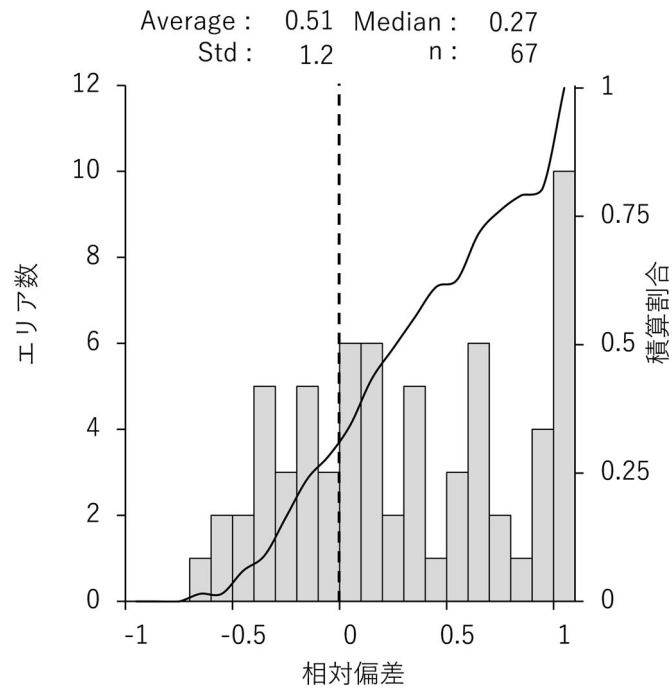
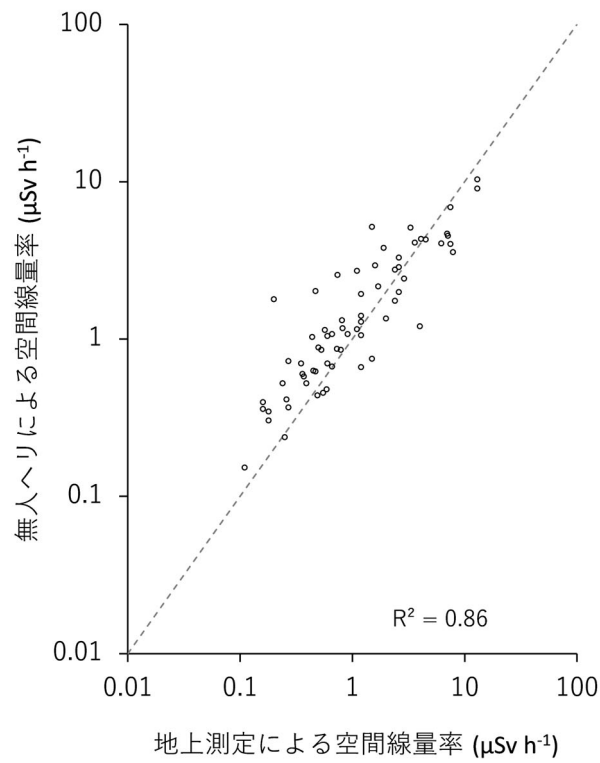


図 3-5 無人ヘリサーベイと地上測定（定点サーベイ）による空間線量率の比較
 （相関図の破線は $y=x$ 、 R^2 は決定係数、Std は標準偏差、n はデータ数を意味する。）

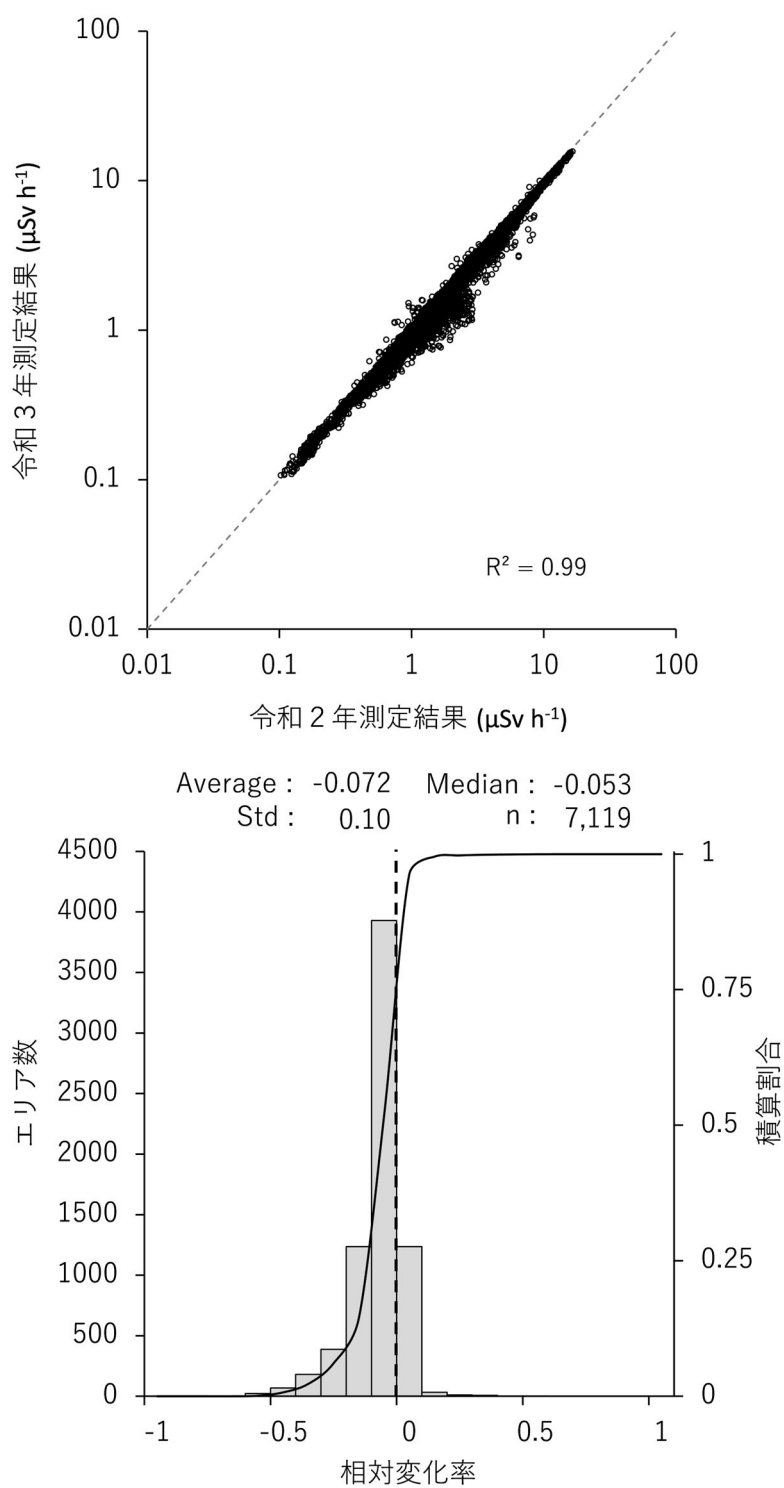


図 3-6 令和 2 年度と令和 3 年度の無人ヘリサーベイによる空間線量率測定結果の比較
 (相関図の破線は $y=x$ 、 R^2 は決定係数、Std は標準偏差、 n はデータ数を意味する。)

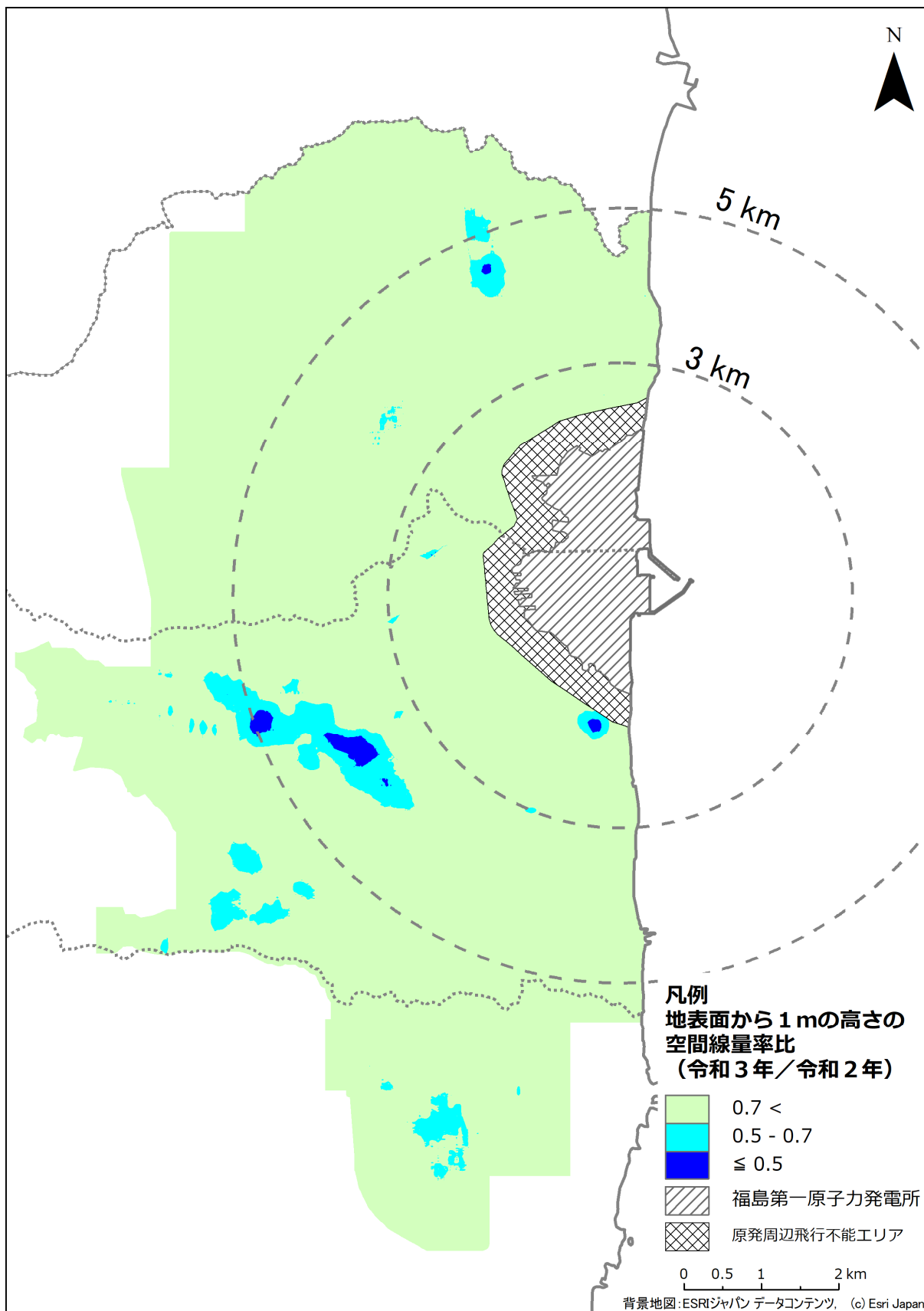


図 3-7 令和2年度に対する令和3年度の無人ヘリサーベイによる空間線量率測定結果の比の分布

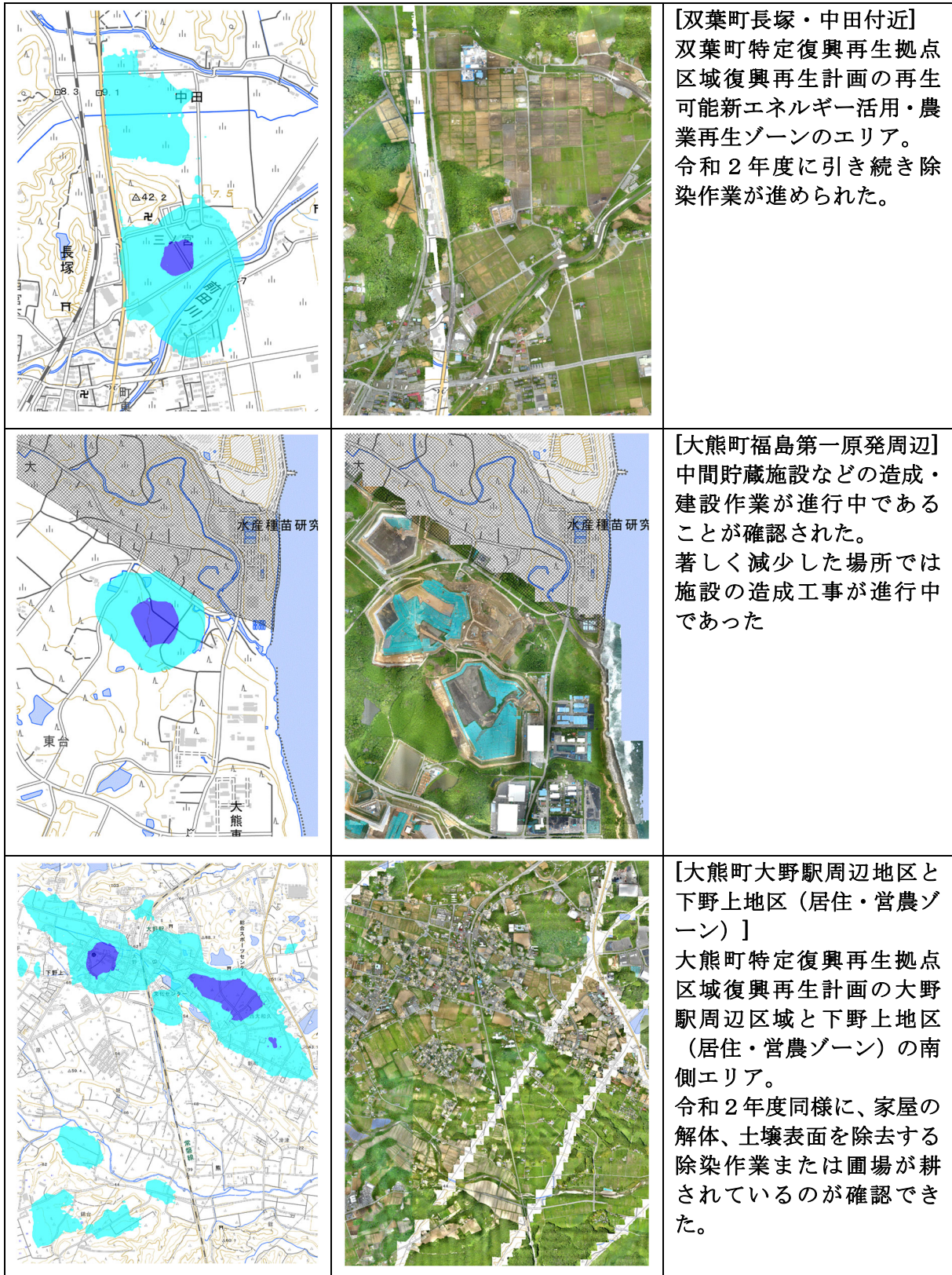


図 3-8 令和2年度から令和3年度にかけて空間線量率が顕著に減少した場所の要因調査（左から地理院タイル⁹⁾に空間線量率比マップ（令和3年/令和2年）を追記して掲載、地理院タイルに測定中に撮影した写真からオルソ画像（地図と同じく写真上の像の位置ズレをなくし、真上から見たような傾きのない正しい大きさと位置に表示される画像）を作成し追記。）

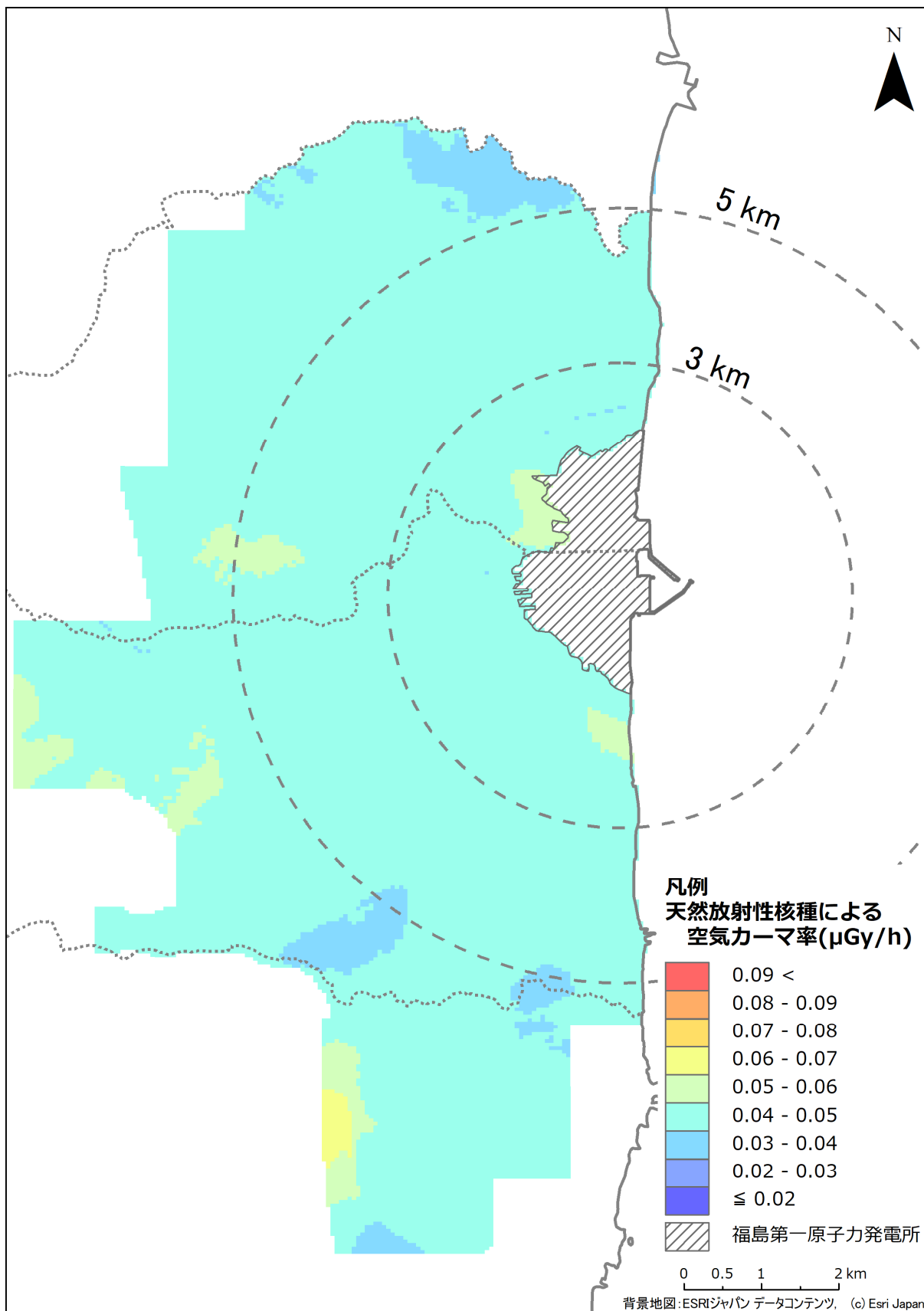
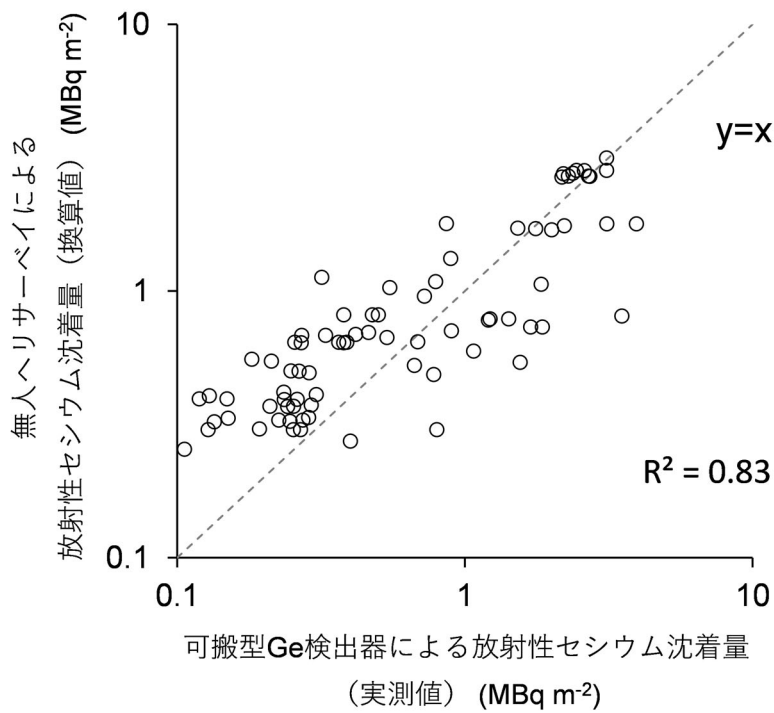


図 3-9 令和 3 年度調査における無人ヘリサーベイにより評価した天然放射性核種による空気カーマ率の分布測定結果



Average : 0.81 Median : 0.36
Std : 2.5 n : 80

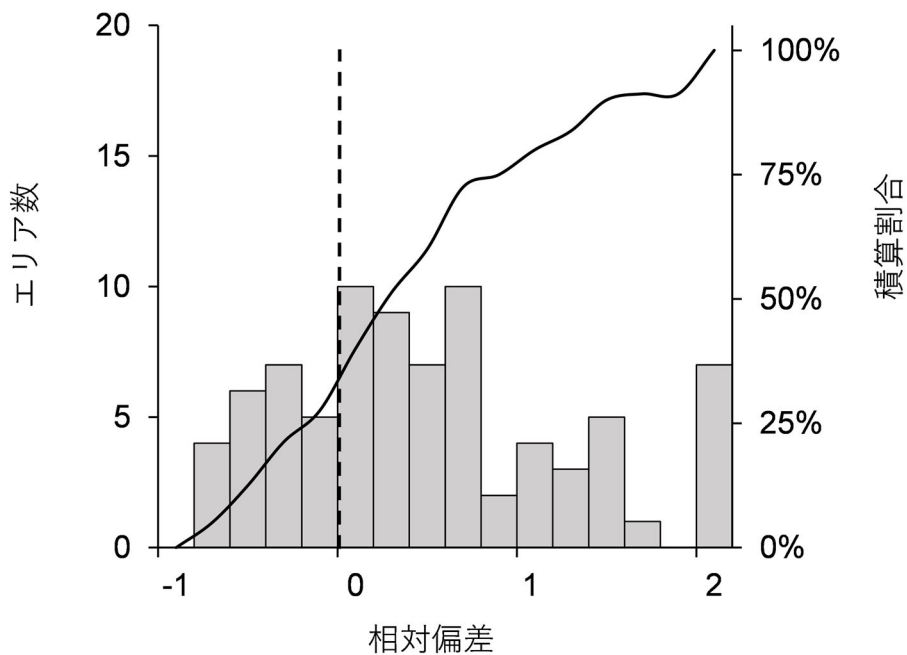


図 3-10 平成 28 年度～平成 30 年度の可搬型 Ge 検出器による放射性セシウム沈着量測定結果 (令和 3 年度に物理減衰補正) と無人ヘリサーベイによる放射性セシウム沈着量の換算結果との比較

(R^2 は決定係数、Std は標準偏差、n はデータ数を意味する。)

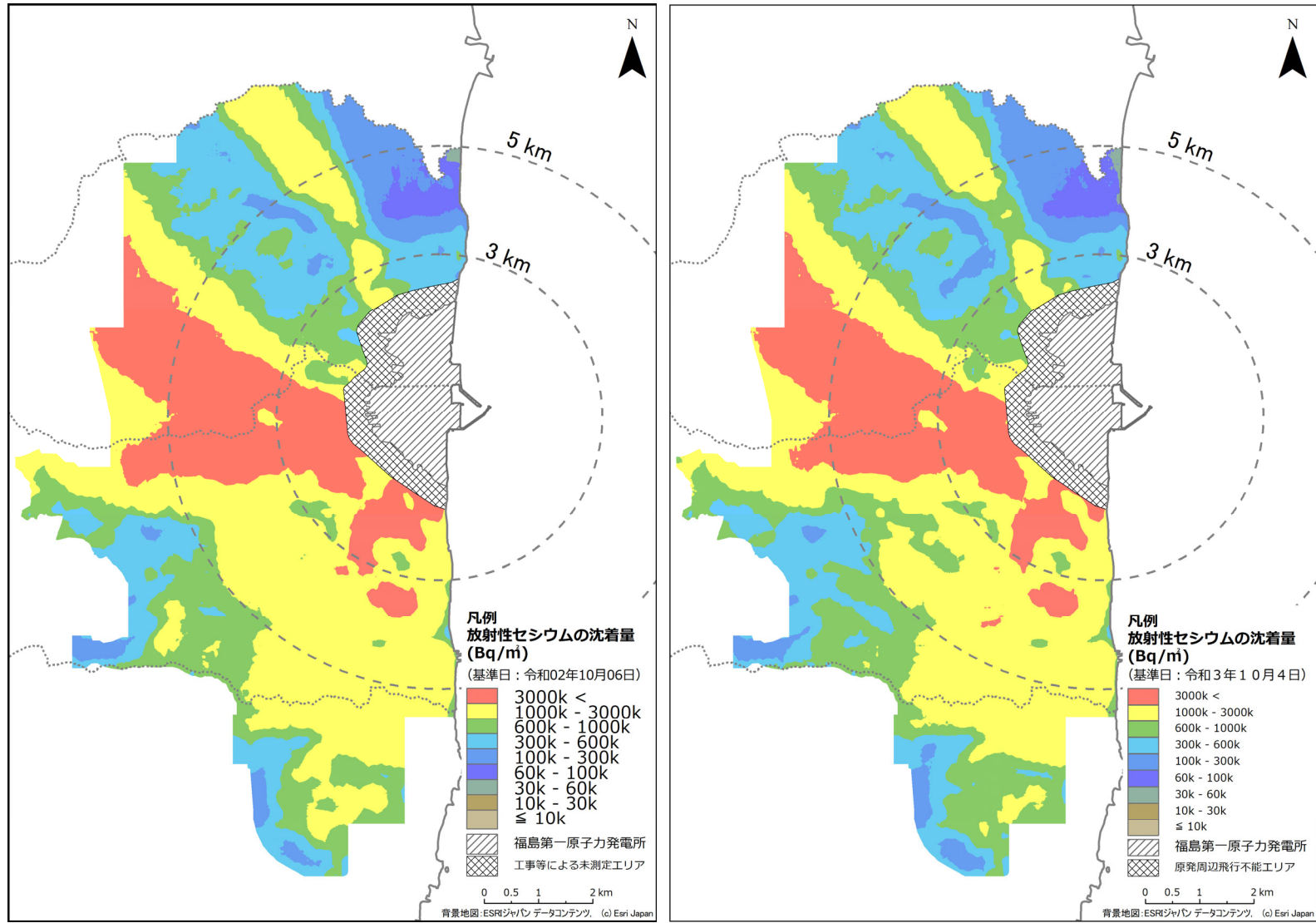


図 3-11 無人ヘリサーベイによる放射性セシウム沈着量分布マップ (左: 令和2年度、右: 令和3年度)

4. 土壌における放射性セシウムの分布状況

本章では、可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定により放射性セシウム沈着量の評価を行う。その評価に必要な重量緩衝深度を求めめるため放射性セシウムの深度分布を測定した。

4.1 放射性セシウムの深度分布

4.1.1 調査目的

事故に起因して自然環境中に放出された放射性セシウムの土壌沈着量を可搬型 Ge 検出器で測定・評価を行うためには土壌中の深度分布を表すパラメータである重量緩衝深度 β の情報が必要不可欠である。土壌中の深度分布を把握し重量緩衝深度を評価するため、スクレーパープレート法による深度別土壌試料の採取及び放射能分析を実施した。スクレーパープレート法とは、土壌の表層から一定の間隔で土壌を削り取りながら採取できる装置（スクレーパープレート）を用いた土壌採取法である。土壌採取時のクロス・コンタミネーション（層外からの混入）が僅かで、層中の正確な放射能濃度が測定できるため、国際原子力機関（IAEA）においても標準的な土壌採取法として認められている¹⁰⁾。

4.1.2 調査内容

4.1.2.1 深度別土壌試料の採取・測定方法

土壌採取箇所及び採取期間は次の通りである。

- ・採取箇所：福島県、宮城県南部及び茨城県北部の 85 箇所（詳細は図 4-1 参照）
- ・採取期間：令和 3 年 8 月 18 日～9 月 10 日

4.2 節に示す放射性セシウム沈着量の面的調査とは独立に採取箇所を選定し、地表面（0）～0.5、0.5～1.0、1.0～1.5、1.5～2.0、2.0～3.0、3.0～4.0、4.0～5.0、5.0～7.0、7.0～10（単位：cm）の計 9 層で実施した。採取した各層の土壌は、重量（小石等を含む）を測定した後、十分に攪拌し、既定量を U-8 容器に封入した。U-8 容器に封入した土壌（以下「土壌試料」という。）は、公益財団法人日本分析センターに送付し、ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトル解析でセシウム 134 とセシウム 137 の放射能の定量を行った。

4.1.2.2 重量緩衝深度の解析方法

採取した各層の土壌試料の定量分析で得られた放射性セシウムの単位湿重量あたりの放射能（以下「放射能濃度」という。）を土壌採取箇所ごとにまとめ、横軸を放射能濃度（単位：Bq/kg）、縦軸を単位面積あたりの土壌の湿重量で表される地表面からの深度（以下「重量深度」という。単位：g/cm²）とした深度分布の図を作成した（典型的な例は図 4-2 参照）。このとき、各層の重量深度は、地表面（0 cm）から土壌を採取した層の中間までの深度として、地表面から当該層の中間までの土壌の重量及び土壌を採取した面積（スクレーパープレートによる土壌採取で使用した枠の大きさは、15 cm×30 cm=450 cm²）を用いて換算した。

放射性セシウムの深度分布は、多くの場合、その放射能濃度が重量深度に対して指数関数的に減少することが知られているため（図 4-2 (a) 参照）¹¹⁾、重量深度を ζ （g/cm²）、重量深

度における放射能濃度を $A_m(\zeta)$ (Bq/kg) とし、式(6) に示す指数関数式¹²⁾ を用いて重量緩衝深度 β を解析した。

$$A_m(\zeta) = A_{m,0} \exp(-\zeta/\beta) \quad (6)$$

ここで、 $A_{m,0}$ は地表面における放射能濃度である。重量緩衝深度 β は、放射能濃度が地表面の $1/e$ ($\approx 1/2.7$) となる重量深度であり、放射性セシウムの地中（深さ方向）への移行状況を表す指標となる。 $A_{m,0}$ 及び β は、調査で得られた深度分布を基に、最小二乗法で算出した。

他方、これまでの深度分布測定において、時間経過とともに放射能濃度分布が変化し、ある深さにピークを持つ深度分布（図 4-2 (b) 参照）となる場合があることが分かっている。このような深度分布に対しては、式 (7) に示す双曲線正割関数に基づく近似式¹³⁾ を用いて重量緩衝深度 β を解析した。

$$A_m(\zeta) = A_{m,0} \cosh(\zeta_0/\beta) \operatorname{sech}\{-(\zeta - \zeta_0)/\beta\} \quad (7)$$

$$\text{※} \operatorname{sech}(x) = 1/\cosh(x)$$

$$\cosh(x) = \{\exp(x) + \exp(-x)\}/2$$

ここで、 ζ_0 は放射能濃度が最大となる重量深度である。 $A_{m,0}$ 、 ζ_0 及び β は、調査で得られた深度分布を基に、反復法アルゴリズムを利用した最小二乗法により算出した。式 (7) は土壌の深部において式 (6) と同じ関数形となる特徴を有しているため、土壌の深部での単位 β あたりの放射能濃度の減少割合は $1/e$ ($\approx 1/2.7$) となる。

なお、深度分布の全体像を把握することができなかった場合、又は、除染等で人の手が加わり、深度分布が不連続若しくは不自然となり、式 (6) の指数関数及び式 (7) の双曲線正割関数で近似することが不適当な場合（一例として図 4-2 (c) 参照；全体的にかく乱の影響を受け、不自然な深度分布になっていた。）には、 β の解析を行わなかった。

指数関数的な深度分布の場合は、式 (6) が 2 パラメータ ($A_{m,0}$ 及び β) で構成されており、その内の重量緩衝深度 β を与えることで深度分布の形状を特定することができるため、in-situ 測定によって、土壌に沈着した放射性セシウムの単位面積あたりの放射能（以下「沈着量」という。単位: Bq/cm²）を定量することができる。しかし、ある深さに放射能濃度のピークを持つ深度分布の場合には、式 (7) が 3 パラメータ ($A_{m,0}$ 、 ζ_0 及び β) で構成されているため、 β を与えるだけでは深度分布の形状を特定することができない。したがって、このような深度分布については、指数関数的な深度分布を仮定した実用的な重量緩衝深度（以下「実効的な重量緩衝深度」といい、略称を β_{eff} とする。）を評価しておくことが土壌中の放射性セシウムの深度分布と空間線量率の関係に係る解析上便利である。そのために、式 (7) で解析した深度分布を持つ場合の沈着量と空間線量率の関係が指数関数的な深度分布を持つ場合の沈着量と空間線量率の関係と同じになるよう、地中に沈着したガンマ線源の強度に対する地上 1 m 高さでの空気カーマへの換算係数¹⁴⁾ を用いて実効的な重量緩衝深度を算出した（算出方法の詳細は、平成 29 年度の報告書¹⁵⁾ を参照）。

加えて、放射性セシウムの地中への浸透の度合いを直接的に示す指標として、90% 深度（放射性セシウムの沈着量の 90% が含まれる地表面からの深度: $L_{90\%}$ ）を評価した。なお、90% 深度 $L_{90\%}$ の詳細な算出方法は、平成 28 年度の報告書¹⁶⁾ を参照のこと。

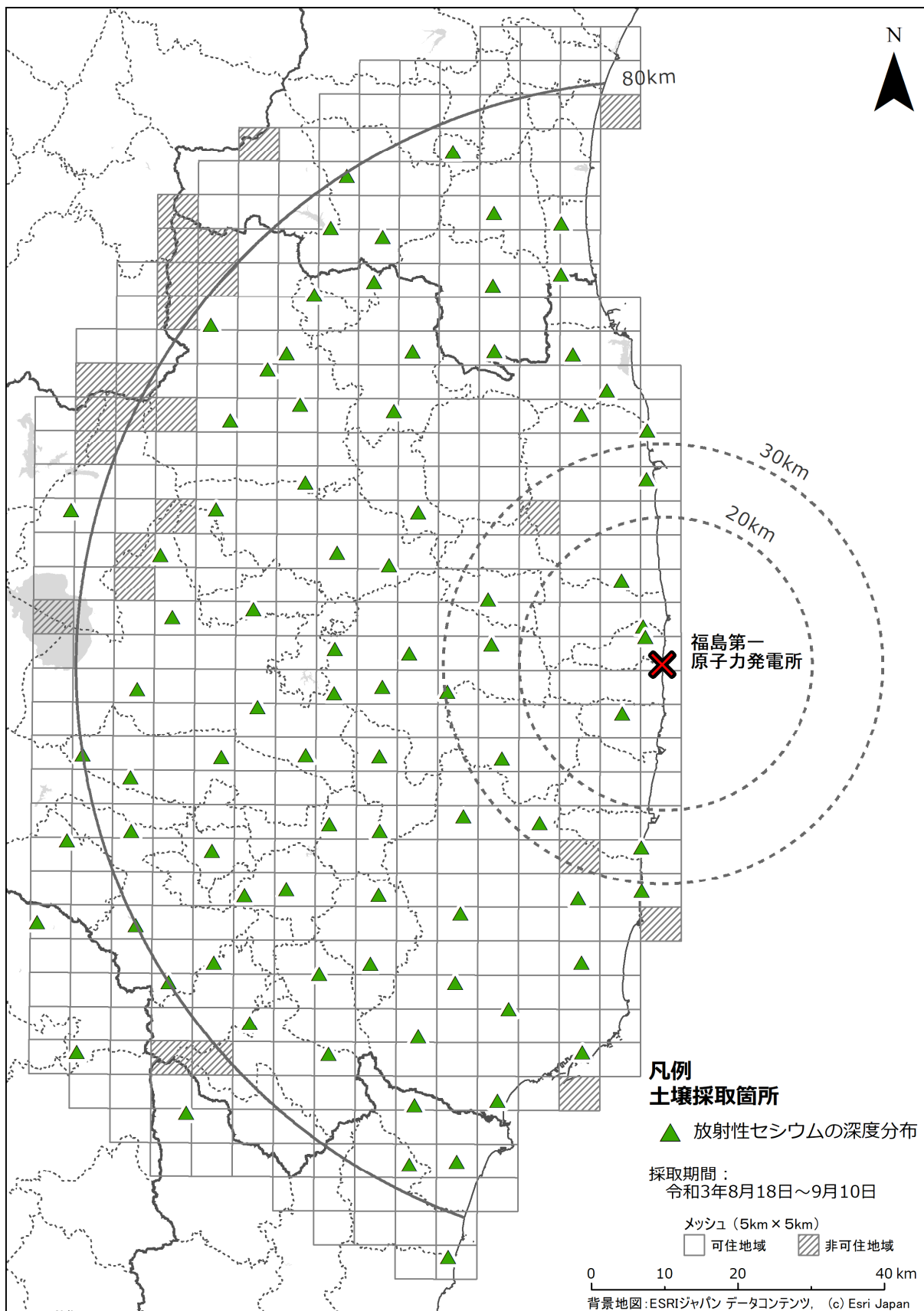


図 4-1 令和3年度の放射性セシウム深度分布調査での土壤採取箇所

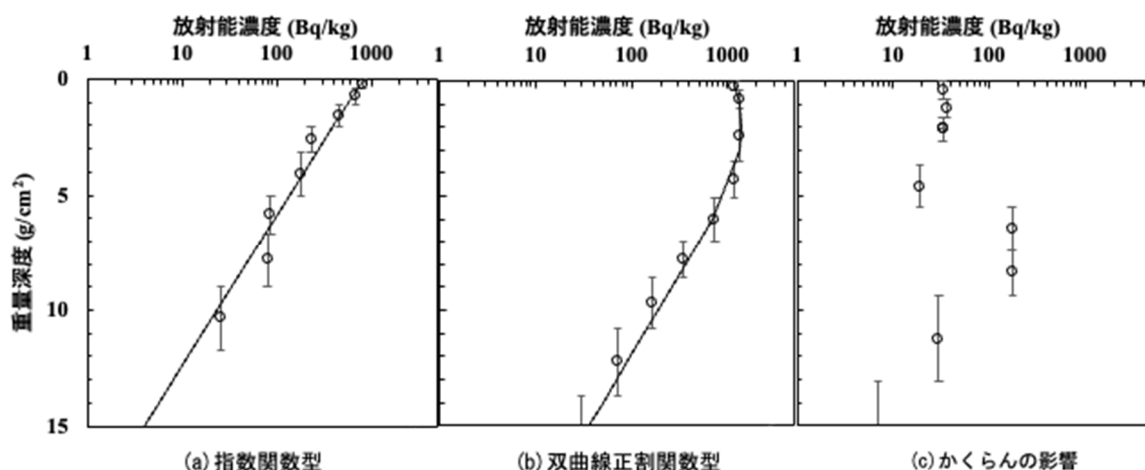


図 4-2 セシウム 137 の深度分布（重量深度に対する放射能濃度の測定結果）の典型的な例

4.1.3 調査結果

セシウム 134 とセシウム 137 は化学的性質が同じで深度分布も良く似ているため、半減期の長いセシウム 137 に注目した。本調査で得られた全 85 箇所 of セシウム 137 の深度分布を付録 1 に示す。これらセシウム 137 の深度分布を、目視により指数関数的な深度分布又はある深さに放射能濃度のピークを持つ深度分布に分類し、それぞれの深度分布に対して式 (6) 又は式 (7) を用いて β の解析を行った。85 箇所中、式 (6) を適用した深度分布は 15 箇所、式 (7) を適用した深度分布は 50 箇所であった。なお、令和 2 年度の調査では式 (7) を適用した深度分布は 39 箇所（全 85 箇所中）で観測されており、全体に占める割合は増加した。除染等で人の手が加わり深度分布が不連続若しくは不自然であったため β の解析を行わなかった採取箇所は、20 箇所（005N000、005N050、005S025、005S035、005S065、010N020、010S050、015S020、015S055、020N030、025S025、025S040、030S000、030S055、030S075、040N050、045N010、045S055、055N010 及び 055N020）であった。上記、 β の解析を行わなかった採取箇所については、付録の図中に「※かく乱」や「※～4cm までの除染」のように、放射性セシウムの土壌中深度分布の変遷から読み取れる除染等の可能性を付した。

1) 重量緩衝深度 β

式 (6) 又は式 (7) で解析した重量緩衝深度の頻度分布（図 4-3 参照）は、対数正規分布に近い分布をとることがわかったため、幾何平均値を算出した。

重量緩衝深度の幾何平均値、幾何標準偏差及び最小値・最大値は、以下のとおりである。

- ・幾何平均値 2.67 g/cm²（データ数 n= 65）、幾何標準偏差 1.69
- ・最小値 0.881 g/cm²、最大値 11.5 g/cm²

2) 実効的な重量緩衝深度 β_{eff}

実効的な重量緩衝深度の頻度分布（図 4-4 参照）についても、対数正規分布に近い分布になることがわかったため、幾何平均値を算出した。実効的な重量緩衝深度の幾何平均値、

幾何標準偏差及び最小値・最大値は、以下のとおりである。

- ・幾何平均値 4.11 g/cm^2 (データ数 $n=65$)、幾何標準偏差 1.69
- ・最小値 0.924 g/cm^2 、最大値 11.5 g/cm^2

放射性セシウムの土壌中深度分布の経時的な変化として、事故からの経過日数に対する各調査実施期間における実効的な重量緩衝深度 β_{eff} (式 (6) 又は式 (7) で解析した指数関数型とピーク型) の幾何平均値を図 4-5 に示す。令和 3 年度の β_{eff} の幾何平均値は令和 2 年度から変化はほとんどない。本調査を開始した平成 23 年 12 月から平成 30 年度頃までは β_{eff} の幾何平均値の経時的な増加傾向が見られるが、近年では増加率が徐々に小さくなっている (増加傾向は明確ではない) 様子が見てとれる。放射性セシウムの土壌中深度分布の変化には降水量や土壌特性等の複数の要因が関わっており、 β_{eff} もそれらを反映した変動を示していると考えられる。

3) 90%深度 $L_{90\%}$

各調査実施期間における 90%深度及びその幾何平均値 (図 4-6 参照) は、平成 23 年 12 月から平成 30 年度頃までは時間の経過とともに僅かずつ増加 (深さ方向に移動) してきているが、平成 30 年度以降は変化がほとんど見られない。令和 3 年 9 月時点での $L_{90\%}$ の幾何平均値は 4.85 cm であった。

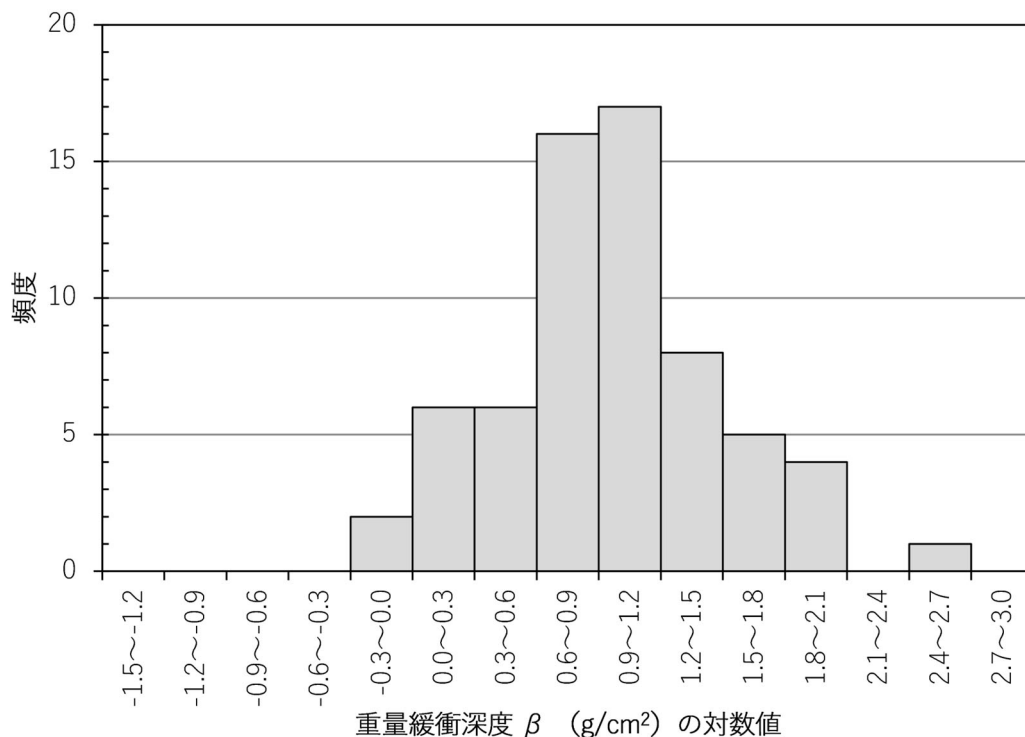


図 4-3 令和 3 年度の深度分布調査による重量緩衝深度 β の自然対数値の頻度分布

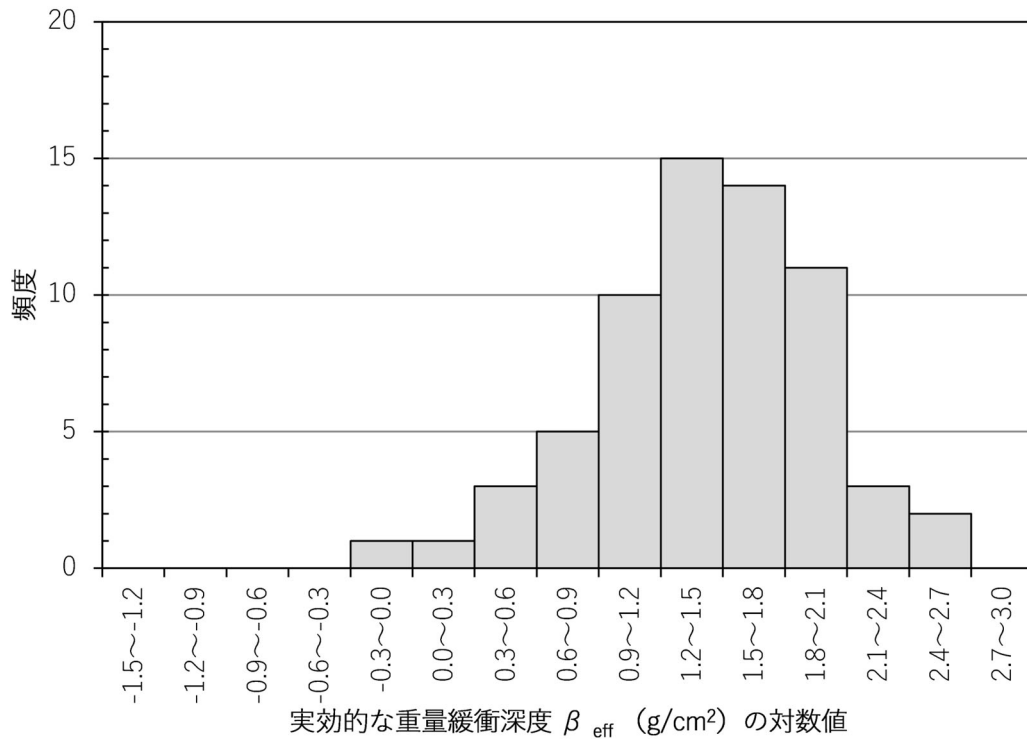


図 4-4 令和 3 年度の深度分布調査による実効的な重量緩衝深度 β_{eff} の自然対数値の頻度分布

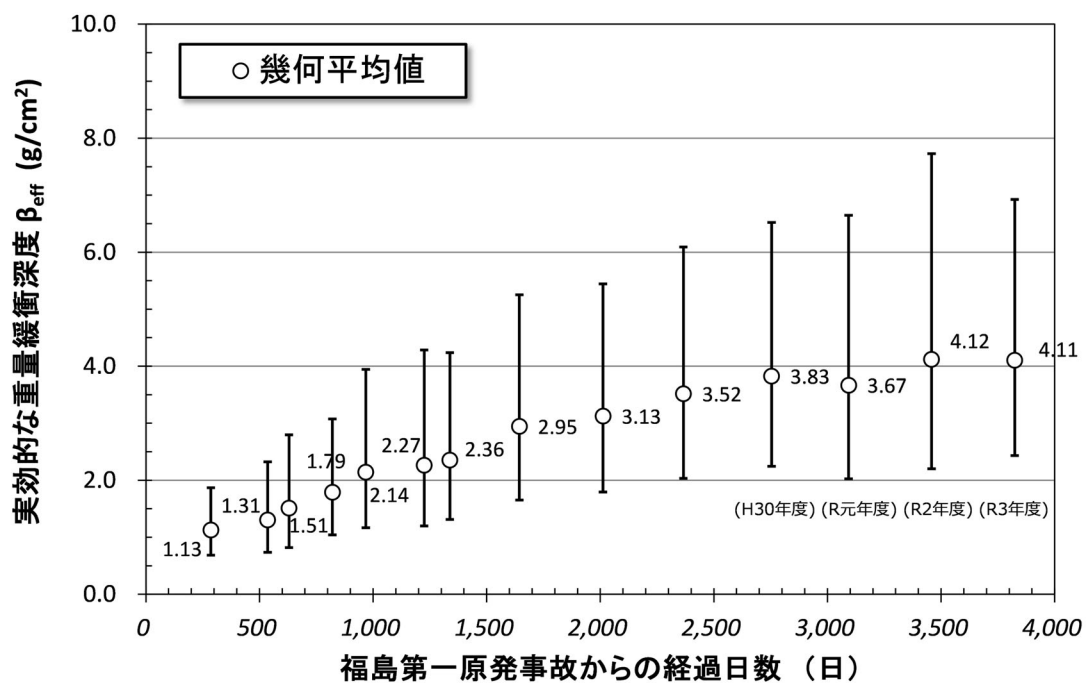


図 4-5 平成 23 年 12 月からの実効的な重量緩衝深度 β_{eff} の経時的な変化 (誤差棒は幾何標準偏差を示す。)

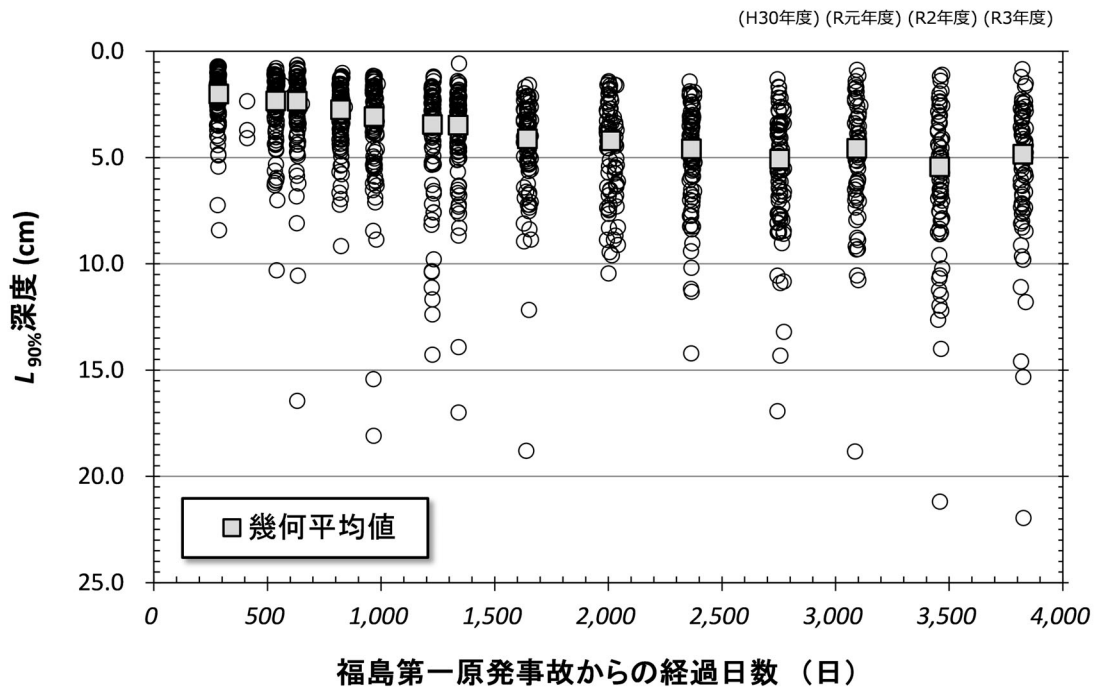


図 4-6 平成 23 年 12 月からの 90%深度 $L_{90\%}$ 及びその幾何平均値の経時的な変化

4.2 放射性セシウム沈着量の面的調査

4.2.1 調査目的

80 km 圏内において可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定を行い、現在の放射性セシウム沈着量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沈着量の経時的変化を解析した。本節では、可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定を単に「in-situ 測定」と呼ぶ。

4.2.2 調査内容

4.2.2.1 測定方法

測定箇所については、80 km 圏内（福島県東部、宮城県南部及び茨城県北部）の地域について基準地域メッシュをベースとした 5 km メッシュに分割し、非可住区域を除いて各メッシュ内で公有地を中心に人為的なかく乱の少ない平坦な開かれた土地である等測定に適した 1 箇所を選定し、合計 383 箇所において測定を実施した。令和 3 年度の調査における放射性セシウム沈着量の測定箇所を図 4-7 に示す。なお、測定予定地点に人為的な変化が認められた場合であっても近傍の変化のない適当な場所の選定が難しい場合には場所を移動せず測定を実施した。測定期間は令和 3 年 8 月 6 日～10 月 19 日であった。

放射性セシウム沈着量の測定にあたっては、可搬型 Ge 検出器を地表面に向けて 1 m 高さに設置してガンマ線スペクトルを測定し、スペクトル解析（核種分析）により放射性セシウムの土壌への沈着量（土壌単位面積あたりの放射性核種ごとの放射エネルギー。単位：Bq/m²）を

求めた。測定時間は 30 分とした。ただし、天然放射線の測定精度向上のため全測定箇所 の 1 割程度は 60 分測定とした。また、GPS を用いて測定箇所の位置情報を取得した。

in-situ 測定は、原子力規制庁のマニュアル¹⁷⁾に基づき実施し、解析の基礎データは国際放射線単位測定委員会のレポート (ICRU Report 53)¹²⁾を参照した。また、in-situ 測定のデータ解析では、重量緩衝深度の地域依存性はないという前提で、4.1 節に示した土壤深度分布調査によって導出した実効的な重量緩衝深度 β_{eff} の幾何平均値 (4.11 g/cm²) を全ての測定結果について用いた。

4.2.2.2 測定結果の信頼性の確認

放射性セシウム沈着量の測定結果については、使用した一部の可搬型 Ge 検出器に対して標準線源を用いた校正を実施するとともに、使用する可搬型 Ge 検出器の全てを用いて同一箇所で測定を行い、同様の沈着量評価値が得られることを確認した。また、in-situ 測定から求められた空間線量率の評価値 (天然放射性核種と人工放射性核種の合計) (ICRU Report 53¹²⁾に従って $\mu\text{Gy/h}$ 単位で表した空気カーマ率) と、同一箇所で 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-171B) によりグレイ単位 ($\mu\text{Gy/h}$) で測定した地表面から 1 m 高さの空間線量率 (空気カーマ率) の測定結果を比較したところ、全体に良く一致した (図 4-8)。この結果より、スクレーパープレートにより観察された平均的な重量緩衝深度を用いた in-situ 測定の妥当性が確認できた。なお、低線量率の領域で NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータによる測定結果が in-situ 測定による測定結果より過大に評価されている傾向にあるが、NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータによる測定では地上の構造物等による散乱線や NaI(Tl)結晶のセルフドーズによる寄与分が含まれており低線量率域ではそれら不確かさの影響が相対的に大きくなるためと考えられる¹⁸⁾。

4.2.2.3 放射性セシウムの土壤沈着量分布マップの細密化

かく乱の少ない平坦地では土壤への放射性セシウムの沈着量と空間線量率が良好な直線関係を示すことが確認されており、空間線量率に寄与している人工放射性核種のほとんどが放射性セシウムであると仮定できる。そこで、in-situ 測定を行った 383 箇所で NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータを用いて空間線量率の測定を同時に行い、調査時点における空間線量率と放射性セシウム沈着量との相関関係を求め、2.2.2 項で述べた定点サーベイにより測定した空間線量率 (全測定箇所の内、空間線量率が 0.05 $\mu\text{Sv/h}$ 以下であった測定箇所を除外した 4,931 箇所) に適用し、放射性セシウム沈着量を直接に測定していない 4,931 箇所における放射性セシウムの沈着量を評価した。以下、この手法により評価した放射性セシウム沈着量を「空間線量率から評価した沈着量」という。重量緩衝深度の地域依存性はないという仮定で、この空間線量率から評価した沈着量を in-situ 測定による土壤沈着量測定結果に加えることにより、放射性セシウムの土壤沈着量分布マップを細密化し、80 km 圏内全体の放射性セシウム沈着量の可視化を行った。

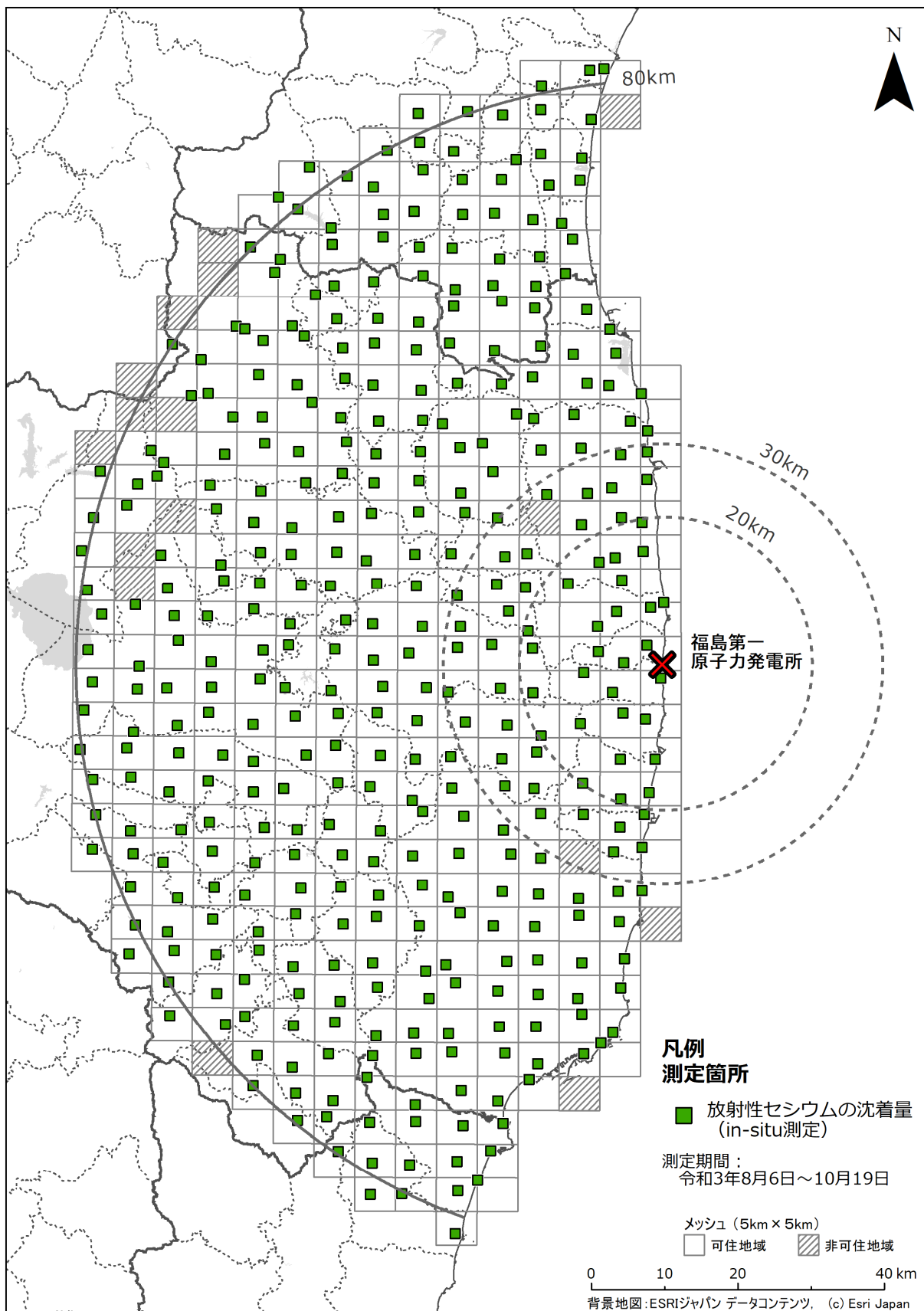


図 4-7 令和 3 年度調査における可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定による放射性セシウム沈着量の測定箇所

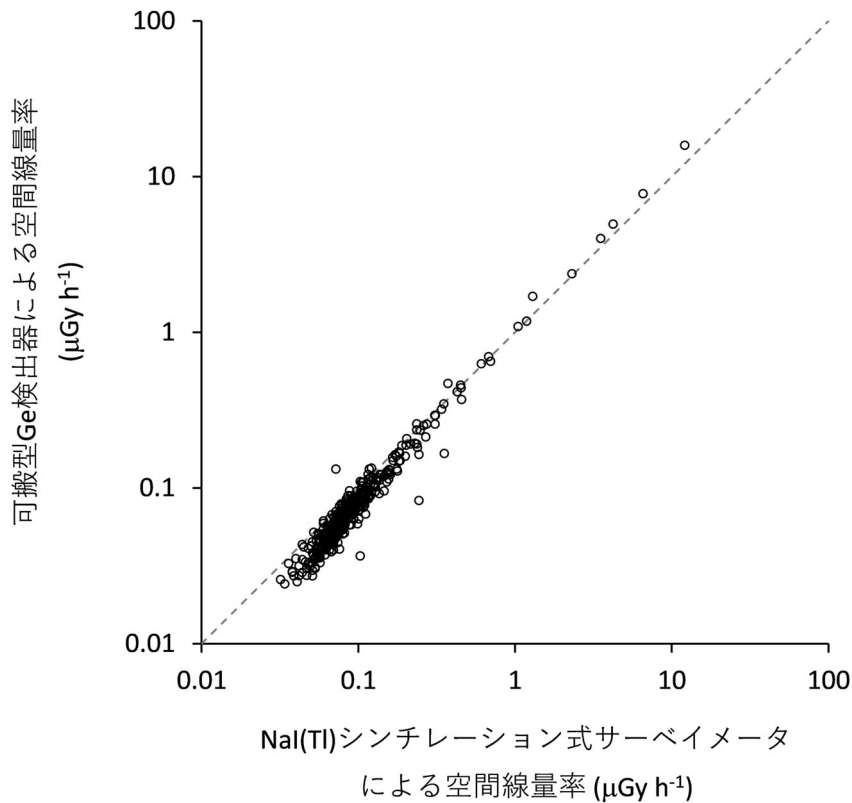


図 4-8 可搬型 Ge 検出器による in-situ 測定の結果を基に求められた空間線量率と NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータによる空間線量率の相関

4.2.3 調査結果

in-situ 測定の結果を基に 80 km 圏内を中心としたエリアの放射性セシウムの土壌への沈着量分布マップを図 4-9 に示す。なお、令和 3 年度調査については令和 3 年 10 月 1 日時点の値に物理的減衰補正を行った。放射性セシウムの沈着量を評価する際に実効的な重量緩衝深度 β_{eff} の幾何平均値 (4.11 g/cm^2) を用いたが、重量緩衝深度の分布 (10–90 パーセンタイル) に起因する沈着量評価値の不確かさは最大約 44%であった。

放射性セシウムの土壌沈着量分布マップを細密化するために、令和 3 年度調査において in-situ 測定を行った 383 箇所における NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータによる空間線量率と放射性セシウム沈着量の測定結果の相関関係を調べた。後述のように in-situ 測定において天然放射性核種による空間線量率を評価可能であるが、全 383 箇所では評価していない。そのため、サーベイメータによる空間線量率と放射性セシウム沈着量の比較にあたっては、天然放射性核種からの空間線量率への寄与が $0.05 \text{ } \mu\text{Sv/h}$ 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た。なお、上記 383 箇所のうち空間線量率が $0.05 \text{ } \mu\text{Sv/h}$ 以下であった測定箇所は対象から除いた。NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータによる空間線量率と放射性セシウム沈着量の相関を図 4-10 に示す。NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータにより測定した空間線量率にはセシウム 134 と

セシウム 137 の両方の寄与があるが、これら核種の沈着量の比は一定と考えることができるので、図 4-10 のように空間線量率とそれぞれの核種の沈着量は直線関係になる。なお、空間線量率が約 0.3 $\mu\text{Sv/h}$ 以下の範囲でばらつきが大きくなる。これは NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータにより測定した空間線量率には地上の構造物等による散乱線や NaI(Tl)結晶のセルフドーズによる寄与分が含まれており低線量率域ではそれら不確かさの影響が相対的に大きくなるためと考えられる。これらの空間線量率（単位： $\mu\text{Sv/h}$ ）と放射性セシウム沈着量（単位： Bq/m^2 ）の相関関係を定点サーベイにより測定された 4,931 箇所（全測定箇所の内、空間線量率が 0.05 $\mu\text{Sv/h}$ 以下であった測定箇所を除外）での空間線量率に適用し、「空間線量率から評価した沈着量」を求めた。

本手法による土壌沈着量分布マップの細密化の妥当性を確認するために、in-situ 測定による沈着量測定地点と最近傍にある定点サーベイによる空間線量率から評価した沈着量を比較した。比較は、散布図による比較及び相対偏差のヒストグラムによる比較を行った。相対偏差 $RD3$ を式(8)のように定義する。

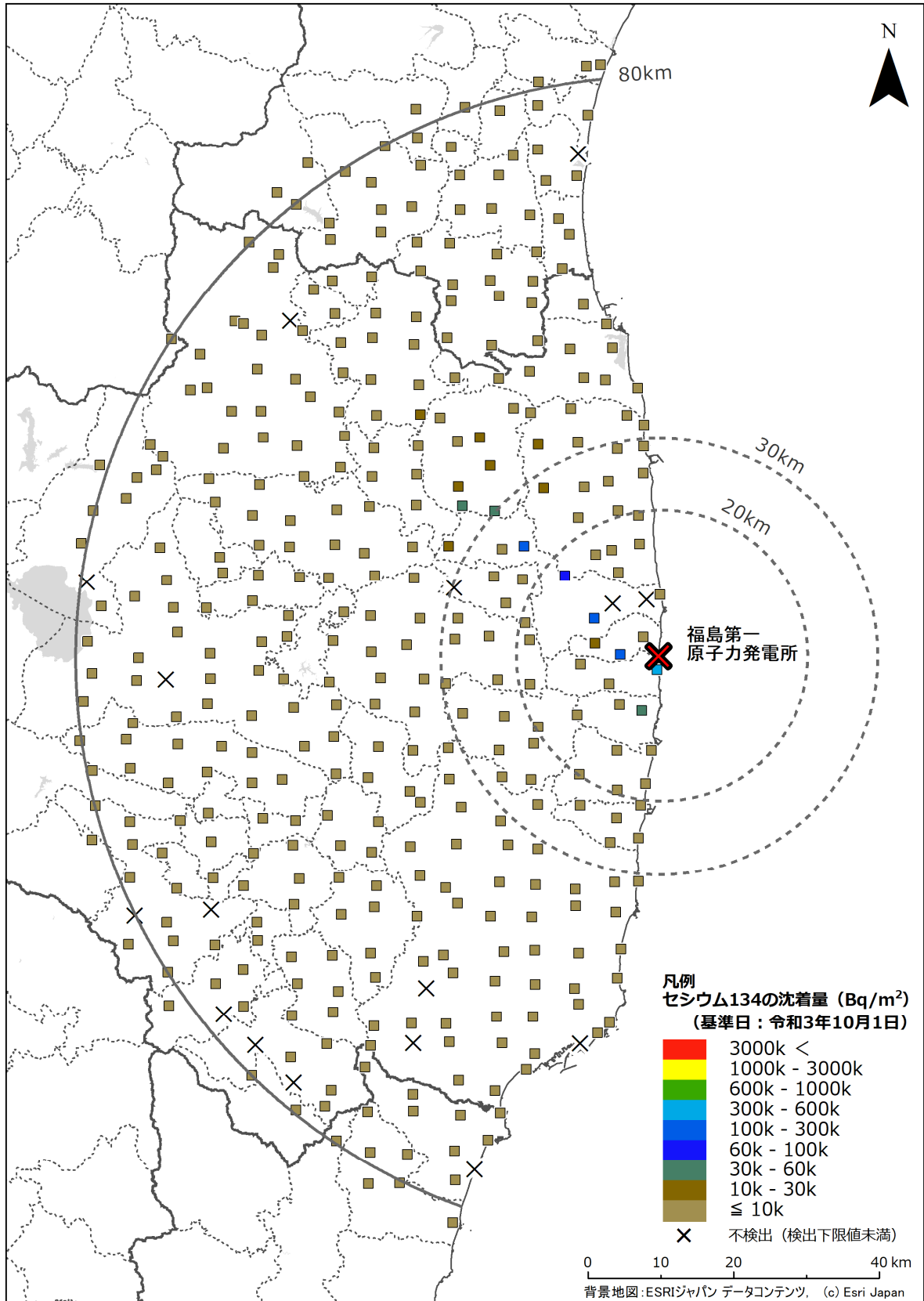
$$RD3 = (CD - C) / C \quad (8)$$

ここで、 CD は空間線量率から評価した沈着量、 C は in-situ 測定による放射性セシウムの沈着量である。

図 4-11 (a) に示したセシウム 137 の全データによる散布図を見るとプロットは 1:1 の直線の周辺に分布し、全体的にはよい相関性が確認できるものの、低い沈着量の領域のプロットのばらつきは大きいことがわかる。相対偏差のヒストグラムを見ると、分布の形状は 0 付近を頂点とした釣鐘型を示しているものの、空間線量率から評価した沈着量が in-situ 測定による沈着量の 2 倍以上を示す点が 40% 以上確認された。図 4-10 に見られたように低線量域でばらつきが大きく、空間線量率から評価した沈着量が in-situ 測定による沈着量を過大評価しているものと考えられる。

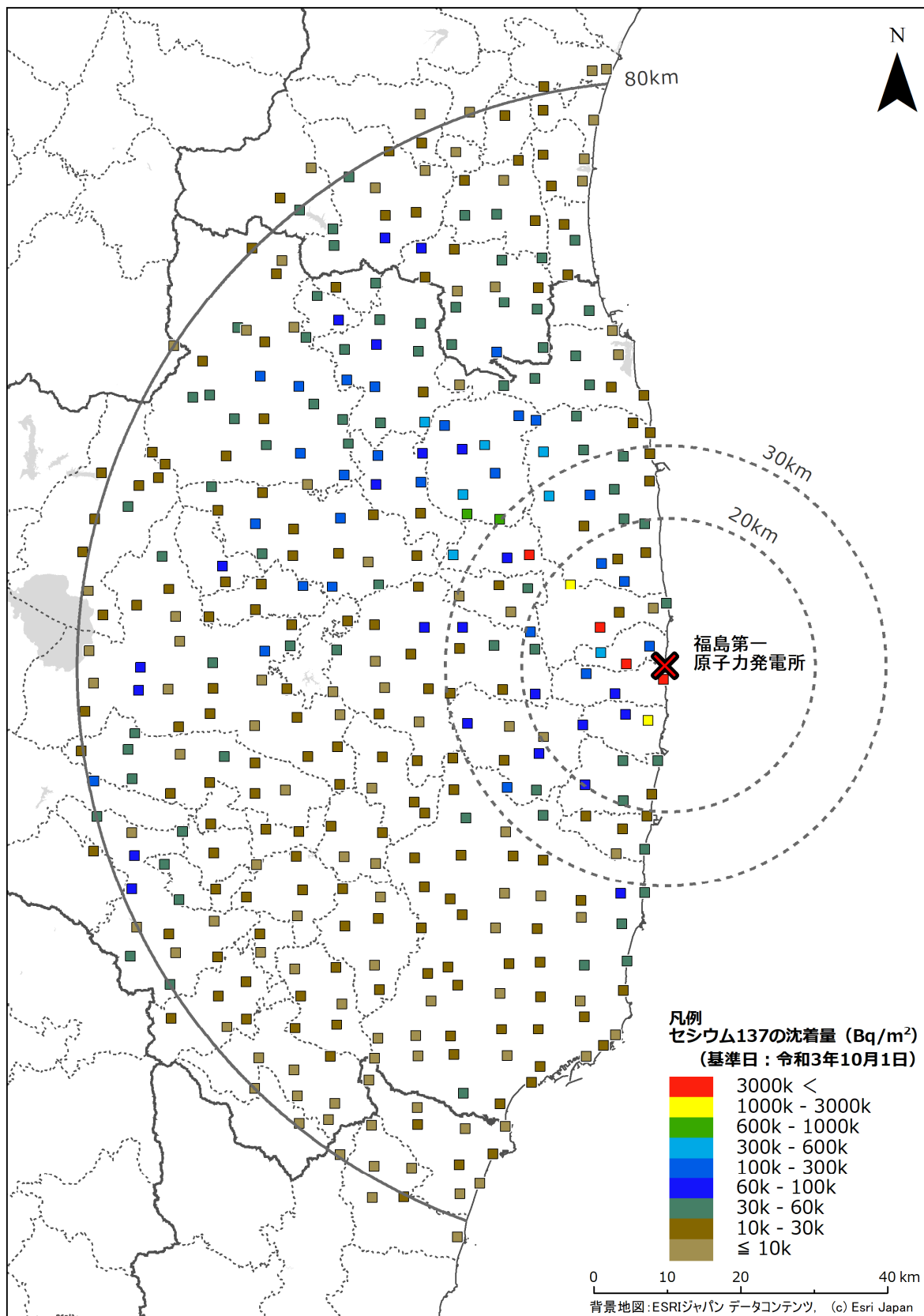
定点サーベイの地点と in-situ 測定地点の最近傍点が 20 m 以内のデータのみで処理したグラフを図 4-11(b) に示す。このヒストグラムも全データと大きく傾向が変わらなかったことから、このばらつきは本手法の限界であると理解することができる。すなわち、空間線量率が低い場所では、天然放射性核種由来の空間線量率を一律で減算している影響及び放射性セシウム沈着量への換算に伴う誤差が大きくなることが示唆される。一方、高線量率の測定結果については、よい相関関係を有している。本手法は、80 km 圏内全体を可視化し過去との比較を行う手法としては有効であるため、引き続き本手法を踏襲し 80 km 圏内全体のマップを作成する。一方、変化傾向については今までどおり in-situ 測定の結果で議論する。

in-situ 測定により直接求めた沈着量に空間線量率から評価した沈着量を加えて記した土壌沈着量分布マップを図 4-12 に示す。平成 23 年度調査から令和 3 年度調査までの各調査による放射性セシウムの土壌沈着量分布マップを図 4-13 に示す。なお、平成 23 年度調査では in-situ 測定はせず土壌試料採取による沈着量測定を実施した。事故後約 127 ヶ月の間にセシウム 134 の土壌沈着量分布マップでは赤や黄色で示される比較的高い濃度の測定箇所がほとんどなくなり沈着量の減少の様子が確認できる。セシウム 137 はセシウム 134 に比べて半減期が長いいため沈着量の変化は比較的小さい。



(a) セシウム 134

図 4-9 令和 3 年度調査における可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定による放射性セシウムの沈着量分布マップ (1/2)



(b) セシウム 137

図 4-9 令和 3 年度調査における可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定による放射性セシウムの沈着量分布マップ (2/2)

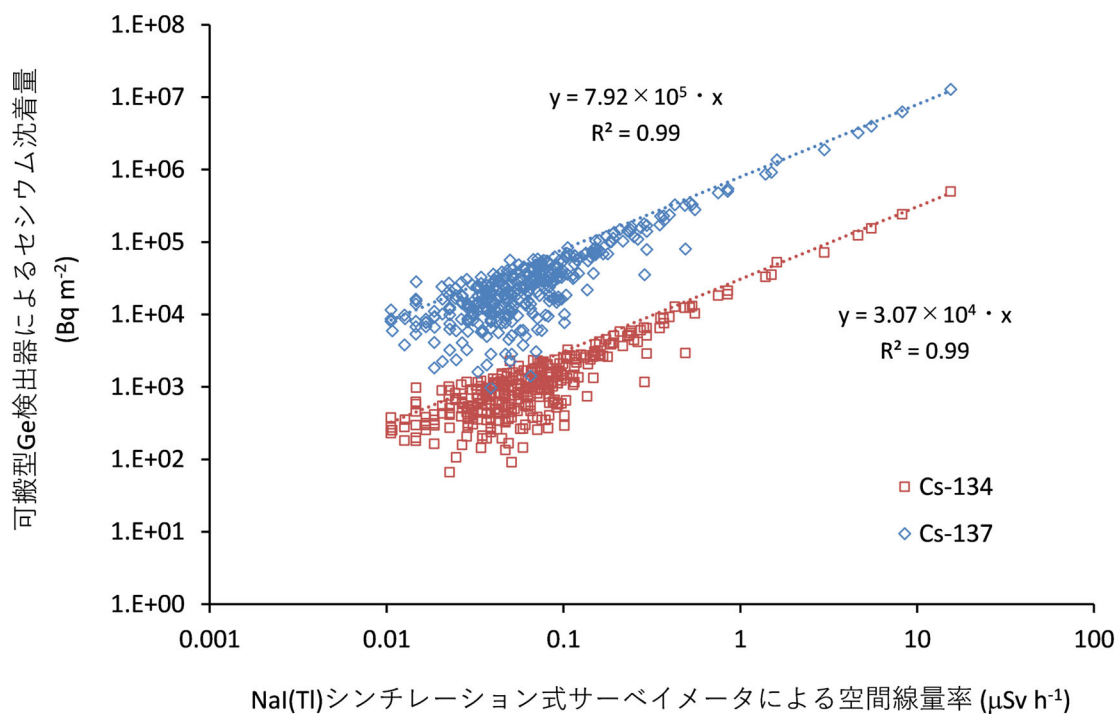


図 4-10 NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータによる地表面から 1 m 高さの空間線量率と可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定による放射性セシウム沈着量の相関

(□: 空間線量率とセシウム 134 沈着量との相関 (データ数 n=367)、◇: 空間線量率とセシウム 137 沈着量との相関 (データ数 n=383) を示す。R² は決定係数。天然放射性核種による空間線量率寄与を含まない。)

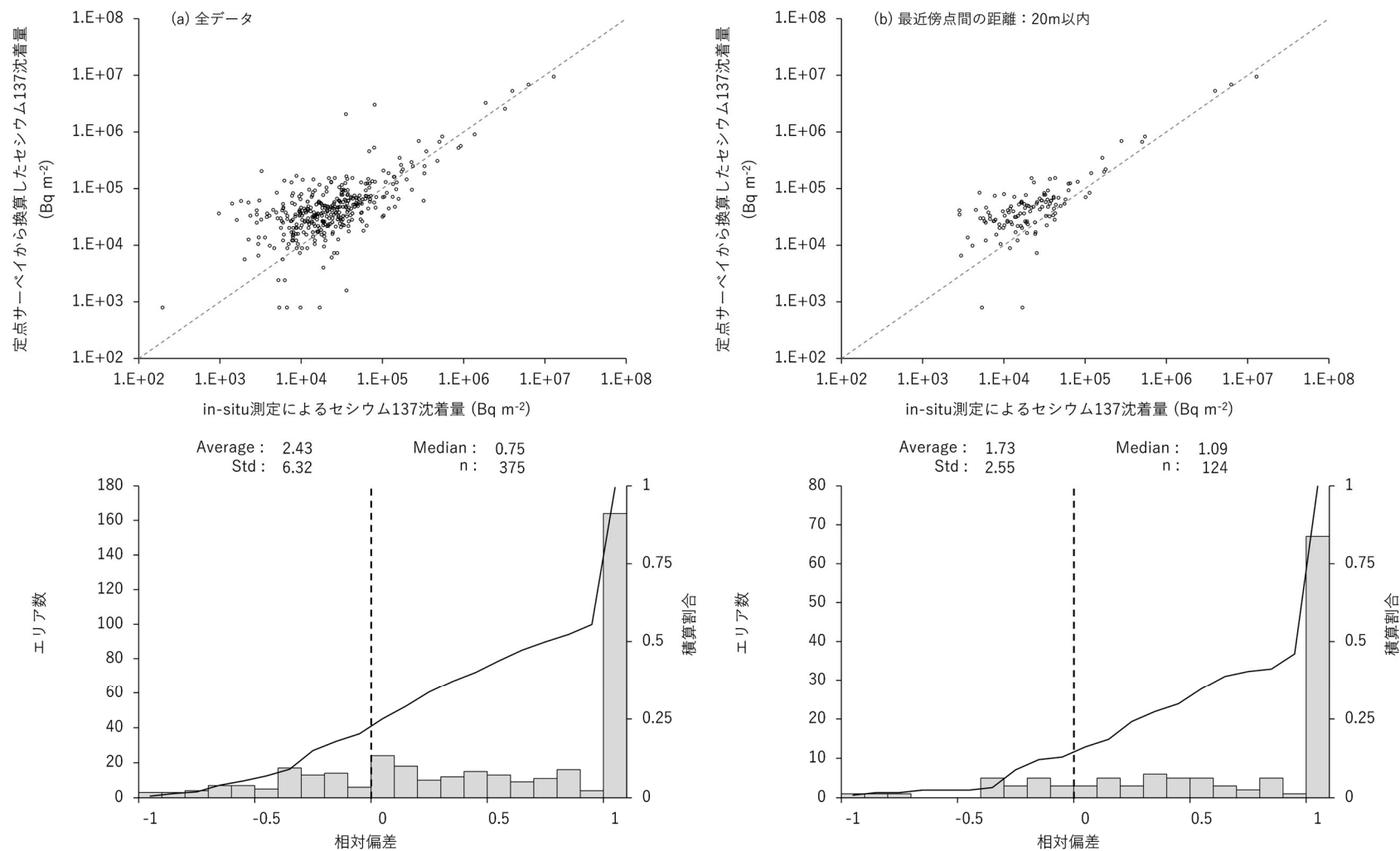


図 4-11 可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定による沈着量と定点サーベイ最近傍点における NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータによる空間線量率から評価したセシウム 137 沈着量の比較

(Std は標準偏差、n はデータ数を意味する。)

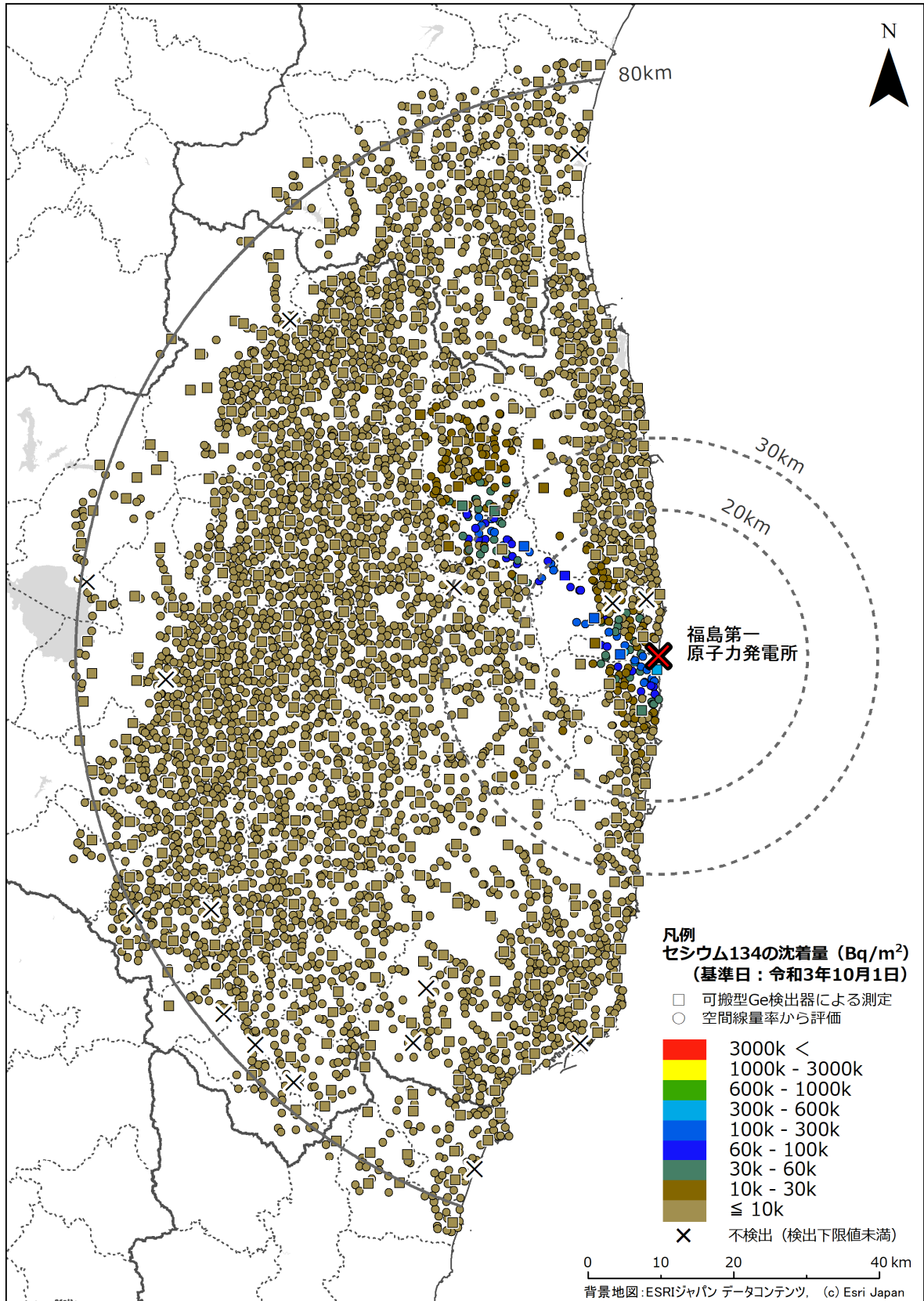


図 4-12 令和3年度調査における放射性セシウムの土壌沈着量分布マップ (1/2)
(a) セシウム134 (可搬型Ge検出器を用いた in-situ 測定による沈着量 (□) に空間線量率から評価した沈着量 (○) を追加。)

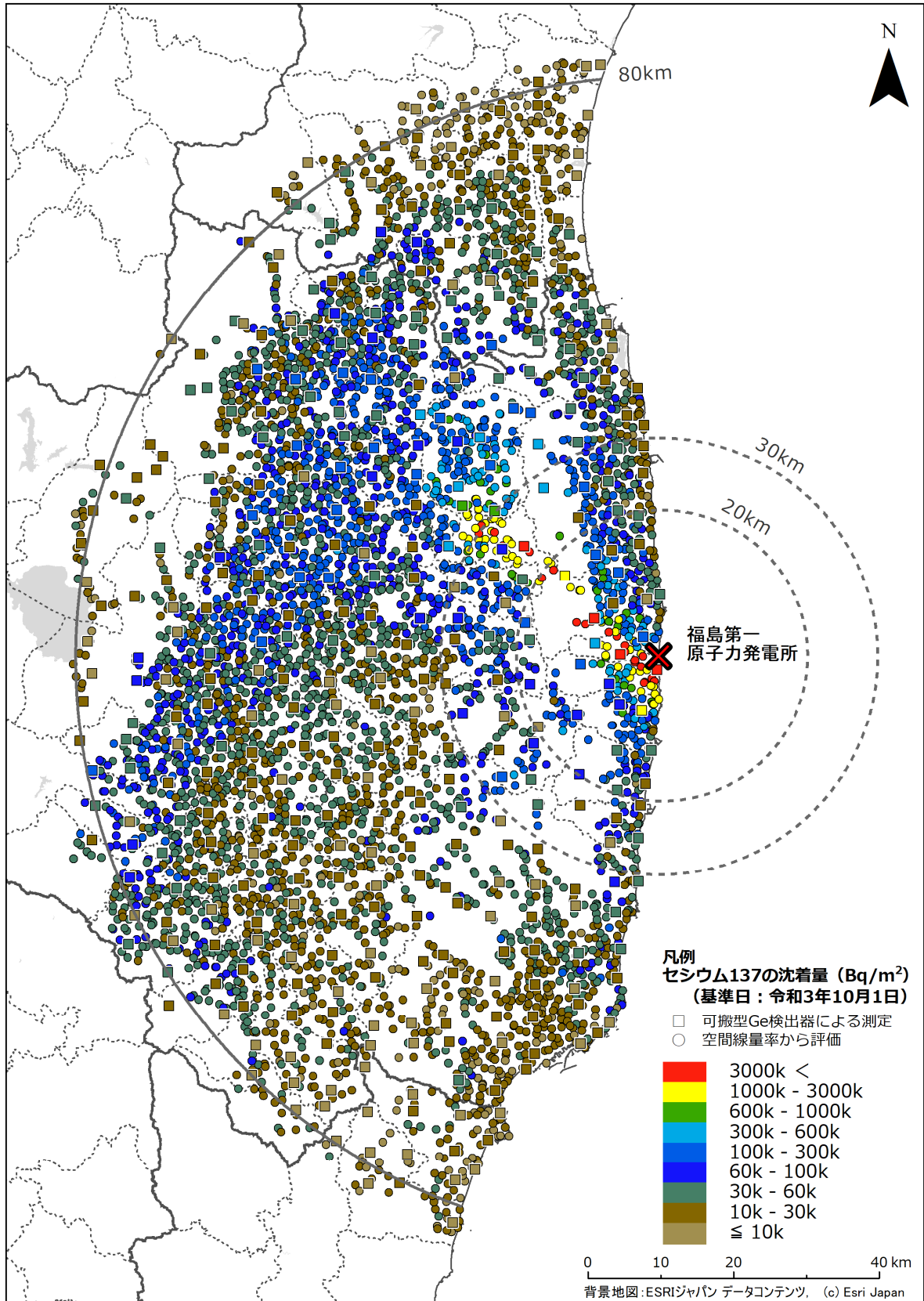
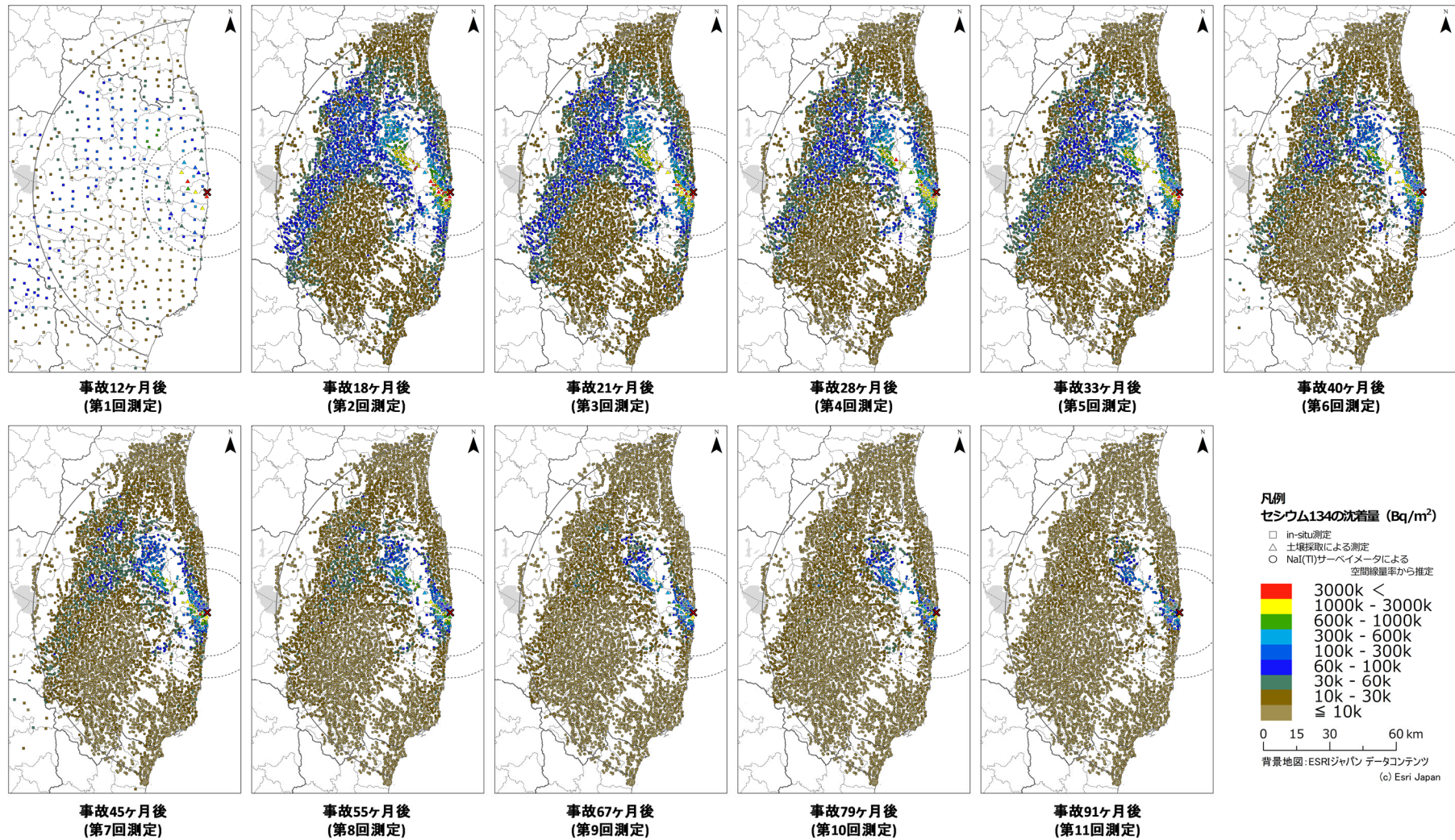


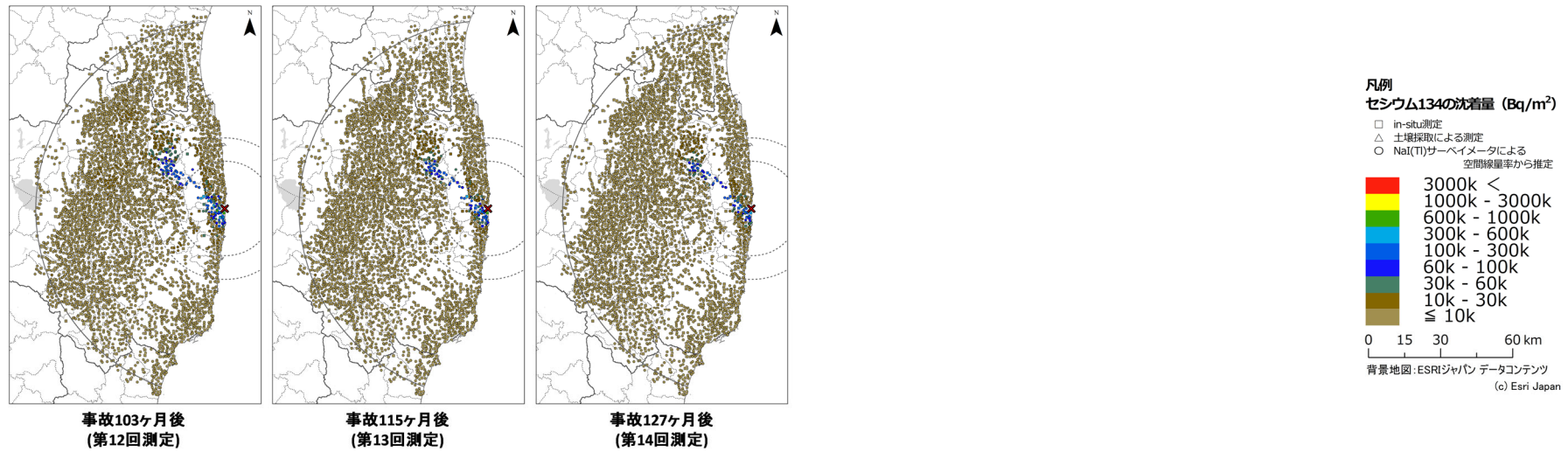
図 4-12 令和 3 年度調査における放射性セシウムの土壌沈着量分布マップ (2/2)

(b) セシウム 137 (可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定による沈着量 (□) に空間線量率から評価した沈着量 (○) を追加。)



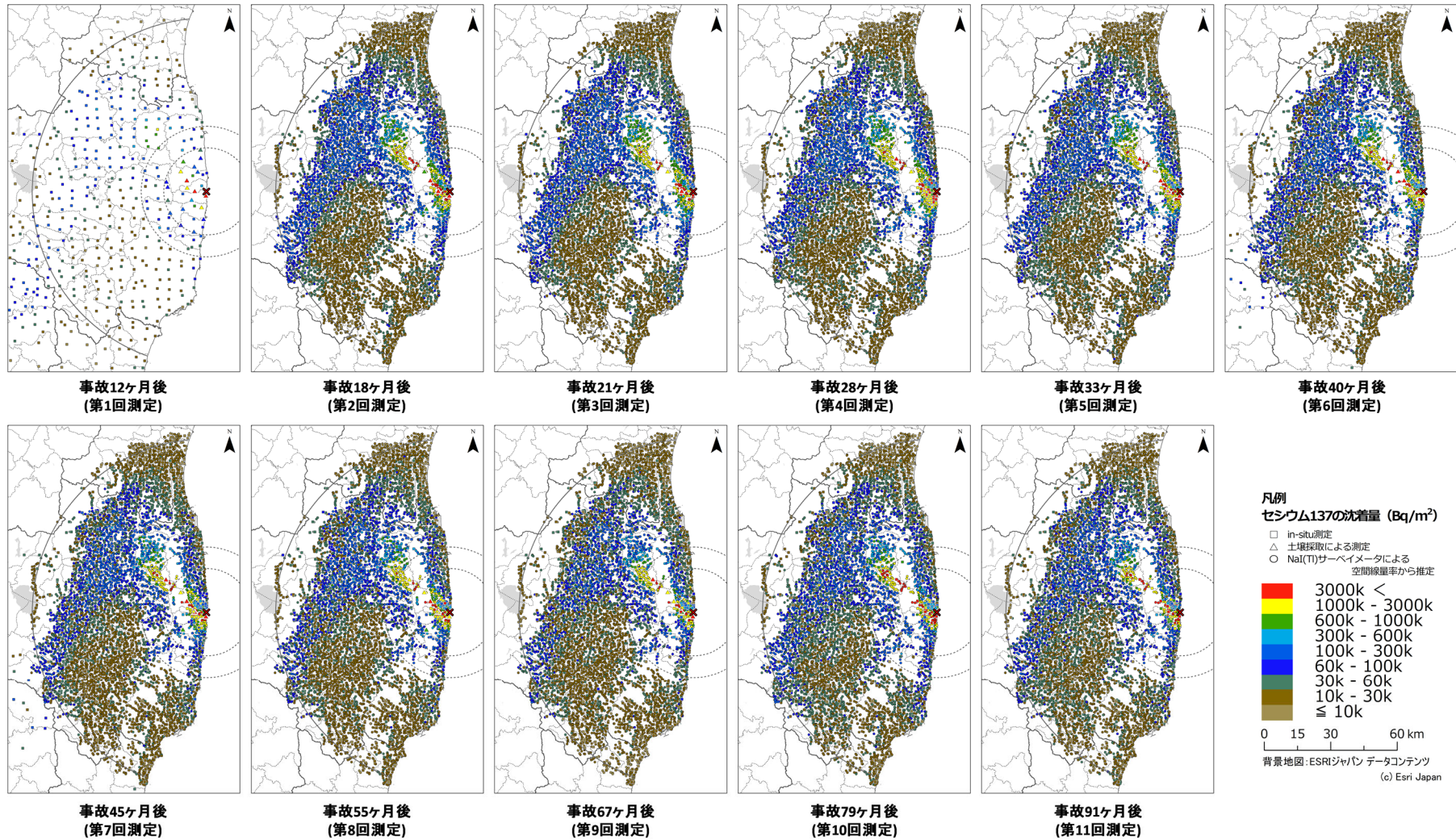
(a) セシウム 134 (1/2)

図 4-13 平成 23 年度から令和 3 年度調査までの in-situ 測定（一部、土壌試料採取による）及び空間線量率から評価した土壌沈着量の分布マップの変化 (1/4)



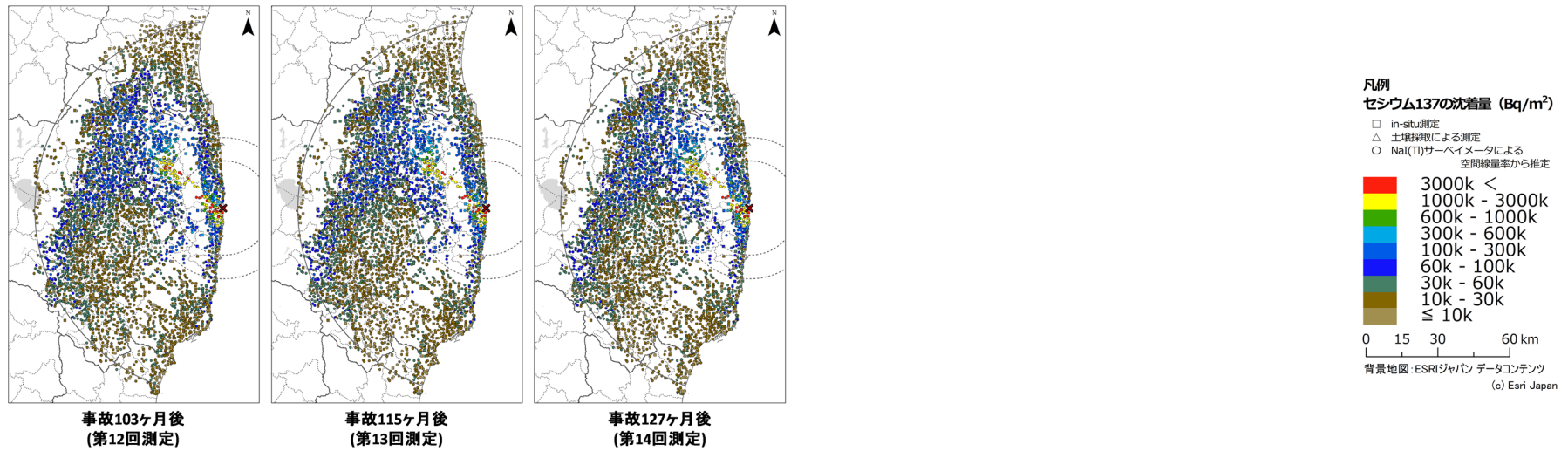
(a) セシウム 134 (2/2)

図 4-13 平成 23 年度から令和 3 年度調査までの in-situ 測定（一部、土壌試料採取による）及び空間線量率から評価した土壌沈着量の分布マップの変化 (2/4)



(b) セシウム 137 (1/2)

図 4-13 平成 23 年度から令和 3 年度調査までの in-situ 測定（一部、土壌試料採取による）及び空間線量率から評価した土壌沈着量の分布マップの変化 (3/4)



(b) セシウム 137 (2/2)

図 4-13 平成 23 年度から令和 3 年度調査までの in-situ 測定（一部、土壌試料採取による）及び空間線量率から評価した土壌沈着量の分布マップの変化 (4/4)

4.2.4 天然放射性核種による空間線量率の評価

可搬型 Ge 検出器による in-situ 測定では、放射性セシウム沈着量の評価と同時に土壤中に含まれる天然放射性核種濃度の定量も行った。核種濃度の定量は、鉛 214 (Pb-214) は 352 keV、ビスマス 214 (Bi-214) は 1764 keV、タリウム 208 (Tl-208) は 583 keV、アクチニウム 228 (Ac-228) は 911 keV、カリウム 40 (K-40) は 1461 keV のガンマ線に着目して実施した。ウラン系列の全核種による空間線量率(空気カーマ率)のうち鉛 214 とビスマス 214 からの寄与が 98.6%、トリウム系列に関してはタリウム 208 とアクチニウム 228 の寄与が 90.6%を占めるため^{12,14)}、ウラン系列核種による空間線量率を評価する場合には、上記 2 核種からの評価結果に 1.014 (100/98.6) を乗じ、また、トリウム系列核種による空間線量率を評価する場合には 1.104 (100/90.6) を乗じそれぞれの系列による空間線量率とした。補正を加えた 2 つの系列の空間線量率にカリウム 40 による空間線量率を加えて天然放射性核種による空間線量率とした。

令和 3 年度調査において in-situ 測定を実施した 383 箇所のうち、上記天然放射性核種 5 核種が全て有意検出された 352 箇所のうち測定時に降雨があった 78 箇所を除く 274 箇所のデータを対象として、天然放射性核種による空間線量率を評価した。5 核種について ICRU Report 53¹²⁾の Table 5.2 の換算係数を用いて採取箇所ごとに空気カーマ率を求めた結果、この 274 箇所の平均値は 0.038 $\mu\text{Gy/h}$ であった。これは空間線量率(周辺線量当量率)では約 0.05 $\mu\text{Sv/h}$ に相当する¹⁹⁾。80 km 圏内における平均的な天然放射性核種による空間線量率として 0.05 $\mu\text{Sv/h}$ を仮定したことは妥当であると考えられる。

各測定箇所での 5 核種による空気カーマ率の合計値を地図上にプロットしたものを図 4-14 に示す。なお、平成 22 年度原子力発電所周辺環境放射能測定結果報告書(福島県、東京電力株式会社)²⁰⁾によると、震災前の平成 22 年 4 月 1 日から平成 23 年 3 月 10 日までの期間、地上約 3 m のモニタリングポスト (NaI(Tl)シンチレーション検出器) 23 箇所で福島県が測定した空間線量率(期間平均値)は 0.036~0.051 $\mu\text{Gy/h}$ と報告されており、本結果とも矛盾しない。

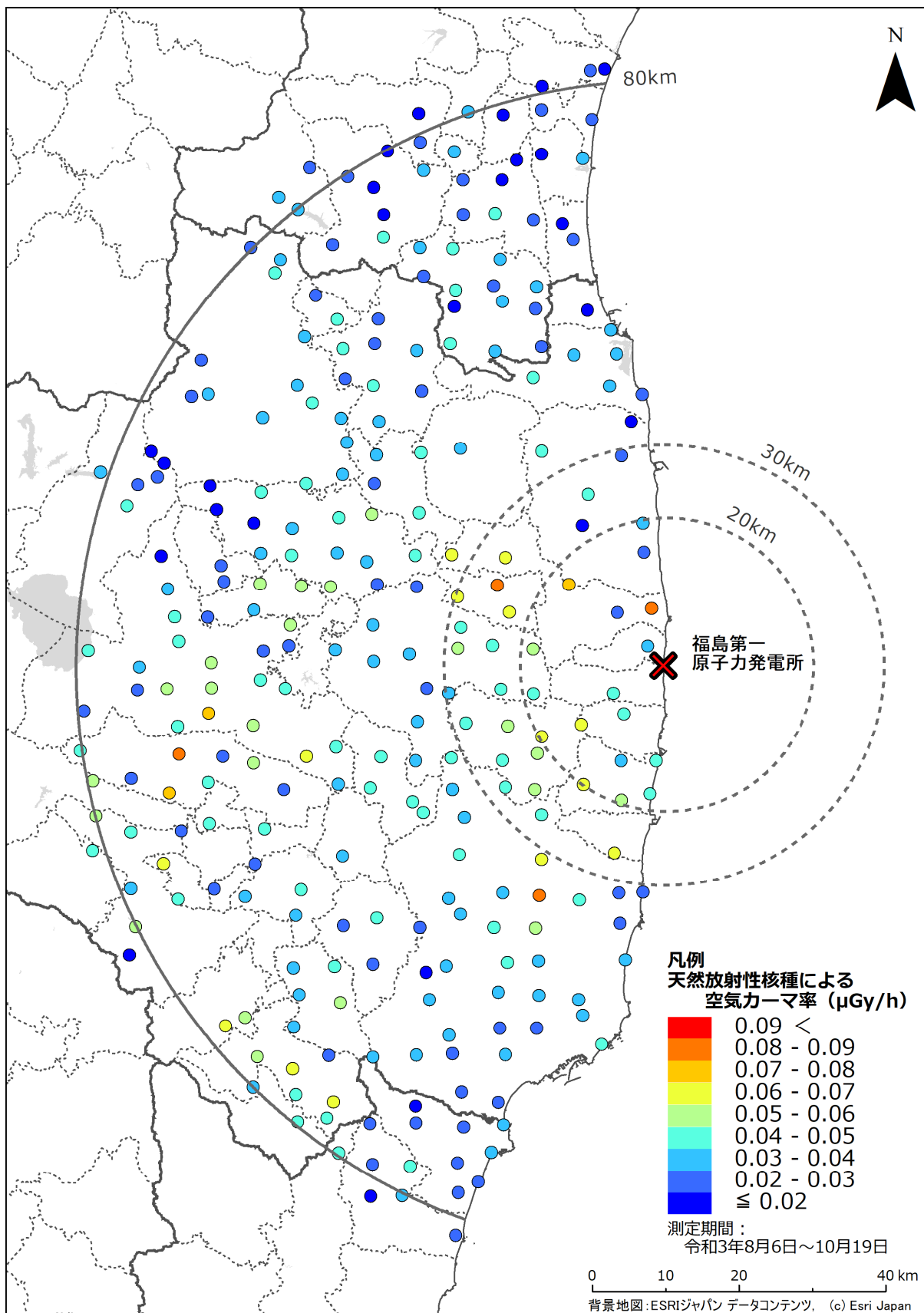


図 4-14 in-situ 測定により評価した天然放射性核種による空気カーマ率の分布