

令和 2 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2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 2 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 2 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」における以下の調査結果をとりまとめたものである。

空間線量率の分布測定では、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）、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。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、航空機サーベイ、走行サーベイ、歩行サーベイにより取得した空間線量率分布データを統合し、80 km 圏内を対象とした統合マップ及び解析対象を福島県全県に広げた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 2 年度の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<sup>®</sup>、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<sup>®</sup>、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 ページにて公開される。

## 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	令和元年度との比較 .....	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	令和元年度との比較 .....	20
2.3.3	平成 23 年度との比較 .....	20
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	令和元年度との比較 .....	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
4.1.4	セシウム沈着量から空間線量率への換算係数に関する検証 .....	49

4.2	放射性セシウム沈着量の面的調査	54
4.2.1	調査目的	54
4.2.2	調査内容	54
4.2.3	調査結果	58
4.2.4	天然放射性核種による空間線量率の評価	68
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	70
5.1	目的	70
5.2	測定結果の変化傾向	70
5.3	バックグラウンドの設定	75
5.4	実効半減期算出方法	76
5.5	空間線量率の実効半減期	76
5.6	放射性セシウム沈着量の実効半減期	82
5.7	同一メッシュにおける空間線量率の変化傾向	84
6.	測定箇所の重要度分類のためのスコア化の検討	87
6.1	目的	87
6.2	総合モニタリング計画	87
6.3	空間線量率等モニタリングを取り巻く状況	89
6.3.1	空間線量率の分布の状況	89
6.3.2	これまでの測定ポイントの設定方法	91
6.3.3	重点化・最適化の方向性	91
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	92
6.4.1	地域スコア化手法	92
6.4.2	スコア評価例	92
6.4.3	年度別の評価例	97
6.5	評価結果のまとめ	99
7.	実測データの統合的解析	101
7.1	調査目的	101
7.2	調査内容	101
7.2.1	異なる測定方法による空間線量率の特徴	101
7.2.2	統合手法の概要	102
7.3	80 km 圏内を対象とした令和 2 年度統合マップの作成	103
7.3.1	対象とした測定データ	103
7.3.2	歩行サーベイ結果の空間分布パターンの解析	105
7.3.3	走行サーベイと歩行サーベイの比較	106
7.3.4	航空機サーベイと歩行サーベイの比較	108
7.3.5	統合結果	109
7.4	福島県全域を対象とした統合マップの作成	112
7.4.1	対象とした測定データ	112

7.4.2	歩行サーベイ相当データを対象とした空間パターンの解析 .....	113
7.4.3	走行サーベイデータと歩行サーベイ相当データの比較 .....	114
7.4.4	航空機サーベイデータと歩行サーベイ相当データの比較 .....	115
7.4.5	統合結果 .....	115
7.5	統合マップの精度検証 .....	117
7.5.1	令和元年度統合マップの精度検証 .....	117
7.5.2	森林での測定データを加えた令和元年度統合マップ .....	120
8.	空間線量率等分布マップの作成と公開 .....	133
8.1	目的 .....	133
8.2	空間線量率等分布マップの作成と公開 .....	133
8.3	空間線量率等分布マップの運用管理 .....	133
8.4	分布マップシステムの改善検討 .....	134
9.	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 .....	135
9.1	測定方法及び測定結果 .....	135
9.1.1	空間線量率 .....	135
9.1.2	積算線量 .....	135
9.1.3	大気浮遊じん中放射性物質濃度 .....	135
9.1.4	環境試料（土壌及び松葉）中放射性物質濃度 .....	135
9.2	測定結果の公開 .....	136
10.	測定データのCSV化 .....	142
10.1	CSV等の形式で保存した測定データ .....	142
10.2	保存した測定データの公開 .....	142
11.	まとめ .....	146
	参考文献 .....	148
	付録1 セシウム137の深度分布 .....	152
	付録2 令和2年度技術検討会の概要 .....	157

## 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	5
表 2-2	比較の組み合わせ	6
表 2-3	令和元年度と比較した令和 2 年度の空間線量率測定結果の変化傾向	20
表 2-4	平成 23 年度と比較した令和 2 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	77
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	88
表 6-2	図 6-1 の作成に使用したモニタリング情報一覧	89
表 6-3	ランドマークデータの詳細情報	93
表 6-4	スコア付与例	93
表 6-5	平成 30 年度/平成 29 年度のスコア差	97
表 6-6	令和元年度/平成 29 年度のスコア差	97
表 9-1	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	136
表 10-1	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	143
表 10-2	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	144
表 10-3	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	145

## 図リスト

図 2-1	令和 2 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 2 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 2 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 2 年度 1 回目（第 20 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 2 年度 2 回目（第 21 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 年度以降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 2 年度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 年度以降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 2 年度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 年度以降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	令和元年度の測定結果に対する令和 2 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 2 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 2 年度無人ヘリサーベイの飛行軌跡	30
図 3-3	令和 2 年度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 年度以降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	令和元年度と令和 2 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	令和元年度に対する令和 2 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	令和元年度から令和 2 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 2 年度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可搬型 Ge 検出器による放射性セシウム沈着量測定結果の比較	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 2 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 の深度分布の典型的な例	45
図 4-3	令和 2 年度の深度分布調査による重量緩衝深度 $\beta$ の自然対数値の頻度分布	47
図 4-4	令和 2 年度の深度分布調査による実効的な重量緩衝深度 $\beta_{eff}$ 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 $\beta_{eff}$ の経時的な変化	48



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	$\beta$ に対する沈着量から空間線量率への換算係数の変化	52
図 4-8	平成 23 年 12 月からの実効的な重量緩衝深度 $\beta_{eff}$ の変化傾向	53
図 4-9	平成 23 年 12 月からの $CF_{Cs137, \beta_{eff}}$ の変化傾向	53
図 4-10	空間線量率と $CF_{Cs137, \beta_{eff}}$ を基に推定したセシウム 137 沈着量と土壤試料中セシウム 137 積算沈着量との関係	54
図 4-11	空間線量率と ICRU 推奨 $\beta$ に基づく $CF_{Cs137}$ を基に推定したセシウム 137 沈着量と土壤試料中セシウム 137 積算沈着量との関係	54
図 4-12	令和 2 年度の可搬型 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	57
図 4-13	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	58
図 4-14	令和 2 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	60
図 4-15	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	62
図 4-16	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	63
図 4-17	令和 2 年度調査における放射性セシウムの土壤沈着量分布マップ	64
図 4-18	平成 23 年度以降の in-situ 測定（一部、土壤試料採取による）及び空間線量率から評価した土壤沈着量の分布マップの変化	66
図 4-19	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	69
図 5-1	分布状況調査で得られた空間線量率の変化傾向	72
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	74
図 5-3	天然放射性核種由来の線量率マップ	75
図 5-4	走行サーベイ結果（80 km 圏内）における二項指数関数の近似	78
図 5-5	定点サーベイ結果における指数関数の近似	79
図 5-6	歩行サーベイ及び無人ヘリサーベイ結果における指数関数の近似	80
図 5-7	航空機サーベイ結果における指数関数の近似	81
図 5-8	可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定結果における指数関数の近似	83
図 5-9	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ある調査メッシュ箇所	85
図 5-10	各モニタリングのイメージと測定対象	86
図 5-11	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	86
図 6-1	基準地域メッシュ内の最大空間線量率マップ	90
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	91

図 6-3	空間線量率の分布傾向とスコア化のための閾値 .....	94
図 6-4	人口密度の分布傾向とスコア化のための閾値 .....	94
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 .....	95
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 .....	95
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 .....	96
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 .....	96
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	各年度のスコアの差異 .....	99
図 7-1	令和 2 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) .....	104
図 7-2	80 km 圏内における土地利用状況 .....	104
図 7-3	令和 2 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 .....	106
図 7-4	令和 2 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 .....	107
図 7-5	令和 2 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 .....	109
図 7-6	各種測定結果を統合した統合マップ (80 km 圏内) .....	111
図 7-7	令和 2 年度に実施された福島県モニタリングメッシュ調査結果 (m-mesh survey) と歩行サーベイ (Walk survey) による空間線量率の相関分析 .....	112
図 7-8	空間線量率の統合 (福島県全域) に用いた令和 2 年度の歩行サーベイ相当データ、走行サーベイ及び航空機サーベイ結果 .....	113
図 7-9	令和 2 年度に実施された福島県全域 (ただし旧避難指示区域外) における歩行サーベイ相当データによる空間線量率のバリオグラム .....	114
図 7-10	令和 2 年度に実施された走行サーベイデータ (Car survey) と歩行サーベイ相当データ (Walk survey) との相関分析結果 (旧避難指示区域を除いた福島県全域) .....	114
図 7-11	令和 2 年度に実施された航空機サーベイデータ (Air survey) と歩行サーベイ相当データ (Walk survey) との相関分析結果 (旧避難指示区域を除いた福島県全域) .....	115
図 7-12	令和 2 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 圏内) .....	116
図 7-13	令和元年度の統合マップと定点サーベイの空間線量率の比較 .....	118
図 7-14	統合解析による空間線量率と定点サーベイによる空間線量率の比較 .....	119

図 7-15	旧避難指示区域の内外における統合マップと定点サーベイとの空間線量率の比較 .....	120
図 7-16	令和元年度の林野庁調査結果 (Forest Agency) と歩行サーベイ (Walk survey) に よる空間線量率の相関分析結果 .....	121
図 7-17	空間線量率の統合 (福島県全域) に用いた令和元年度の歩行サーベイ相当データ、走 行サーベイ及び航空機サーベイ結果 .....	122
図 7-18	歩行サーベイ (青)、モニタリングメッシュ調査 (橙)、林野庁調査 (赤及び緑) の測 定点.....	122
図 7-19	令和元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相当データによ る空間線量率のバリオグラム解析結果.....	123
図 7-20	令和元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データ (Car survey) と歩行サーベイ相当データ (Walk survey) との相関分析結果 .....	125
図 7-21	令和元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データ (Air survey) と歩行サーベイ相当データ (Walk survey) との相関分析結果 .....	126
図 7-22	林野庁調査の有無による航空機サーベイデータ (Air survey) と歩行サーベイ相当デ ータ (Walk survey) の相関分析 (森林) への影響 .....	127
図 7-23	令和元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) .....	128
図 7-24	令和元年度の統合マップ拡大例 .....	129
図 7-25	森林サーベイの組み込み前後における森林サーベイ結果との空間線量率の比較..	131
図 7-26	森林サーベイの組み込み前後における定点サーベイ結果との空間線量率の比較..	132
図 8-1	拡大サイトにおける地名の英語・日本語表記例 .....	134
図 9-1	測定及び採取地点 .....	137
図 9-2	総合モニタリング計画に基づく空間線量率の測定結果.....	138
図 9-3	積算線量の経時変化.....	139
図 9-4	大気浮遊じん中セシウム 137 濃度の経時変化 .....	140
図 9-5	土壌中セシウム 137 濃度の経時変化 .....	140
図 9-6	松葉中セシウム 137 濃度の経時変化 .....	141

## 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）を実施した<sup>1)</sup>。令和 2 年度は、令和元年度に引き続き、「令和 2 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 2 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 2 年 7 月 1 日の場合 R2/7/1 とする）。

一連の分布状況調査において、

- 1) 放射性物質の土壌沈着量及び空間線量率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) 測定箇所の重要度分類のためのスコア化の検討、
- 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。本報告書では、令和 2 年度調査で得られた成果についてまとめる。本年度調査の目的は、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、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図ることである。なお、令和 2 年度事業実施期間中、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) <sup>o)</sup>	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)
走行サーベイ <sup>a)</sup>	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 1 回 H25/6/10-7/5 第 2 回 H25/11/5-12/4	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 3 回 H26/7/28-9/12 第 4 回 H26/10/30-12/16	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 5 回 H27/6/29-8/5 第 6 回 H27/10/26-12/4	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 7 回 H28/6/29-8/5 第 8 回 H28/10/27-12/13	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 9 回 H29/10/30-12/1	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 10 回 H30/11/1-12/5	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 11 回 R1/6/12-11/22	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 12 回 R2/6/9-11/6
歩行サーベイ											
定点サーベイ <sup>b)</sup>	第 1 回 H23/6/4-6/14 H23/6/27-6/29 H23/6/28-7/8	第 2 回 H23/12/13-12/22 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
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
沈着量 (in-situ)	土壌試料採取 <sup>d)</sup>	第 1 回 H23/12/13-12/22 H24/5/29	第 2 回 H24/8/13-9/19 第 3 回 H24/11/5-12/12 第 2 回 H24/8/21-9/5、9/26 第 3 回 H24/11/26-12/7、12/21	第 4 回 H25/6/6-7/10 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
深度分布 (スクレーパープレート)	鉄パイプ試料採取 <sup>e)</sup>	第 1 回 H23/12/12-12/22、 H24/4/17-4/19	第 4 回 H25/6/6-7/24 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	

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) ( )内は通算調査回数。 d) 平成 23 年度(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2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）<sup>2)</sup> 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<sup>2)</sup>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、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。

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  $\mu\text{Sv/h}$  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、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、走行地域を総務省が指定する 1 km $\times$ 1 km の基準地域メッシュをベースとした 100 m $\times$ 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

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バイメータ（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 圏内の地域を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 5,029 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。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 圏内で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（図 2-3 参照）。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。

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			定点サーベイ	歩行サーベイ
	第 20 回	第 21 回		第 14 回	第 12 回
測定期間	R2/6/23 ～7/30	R2/11/4 ～12/1	R2/10/26 ～12/1	R2/8/20 ～10/1	R2/6/9 ～11/6
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	80 km 圏内*1	8 県*2	7 県*3	80 km 圏内	80 km 圏内
測定距離 又は	8,303 km	14,898 km	20,691 km	実績 5,029 点 (中止 3 点)	566 箇所*4
測定点数					

\*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 基準地域メッシュの数

#### 2.2.4 令和元年度との比較

測定結果の妥当性と令和元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元年度と令和 2 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、令和元年度に対する令和 2 年度の相対変化率は、 $(D_{R2} - D_{R1}) / D_{R1}$  である（ここで、 $D_{R1}$  及び  $D_{R2}$  はそれぞれ令和元年度及び令和 2 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かく乱が少なく、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 2-2 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

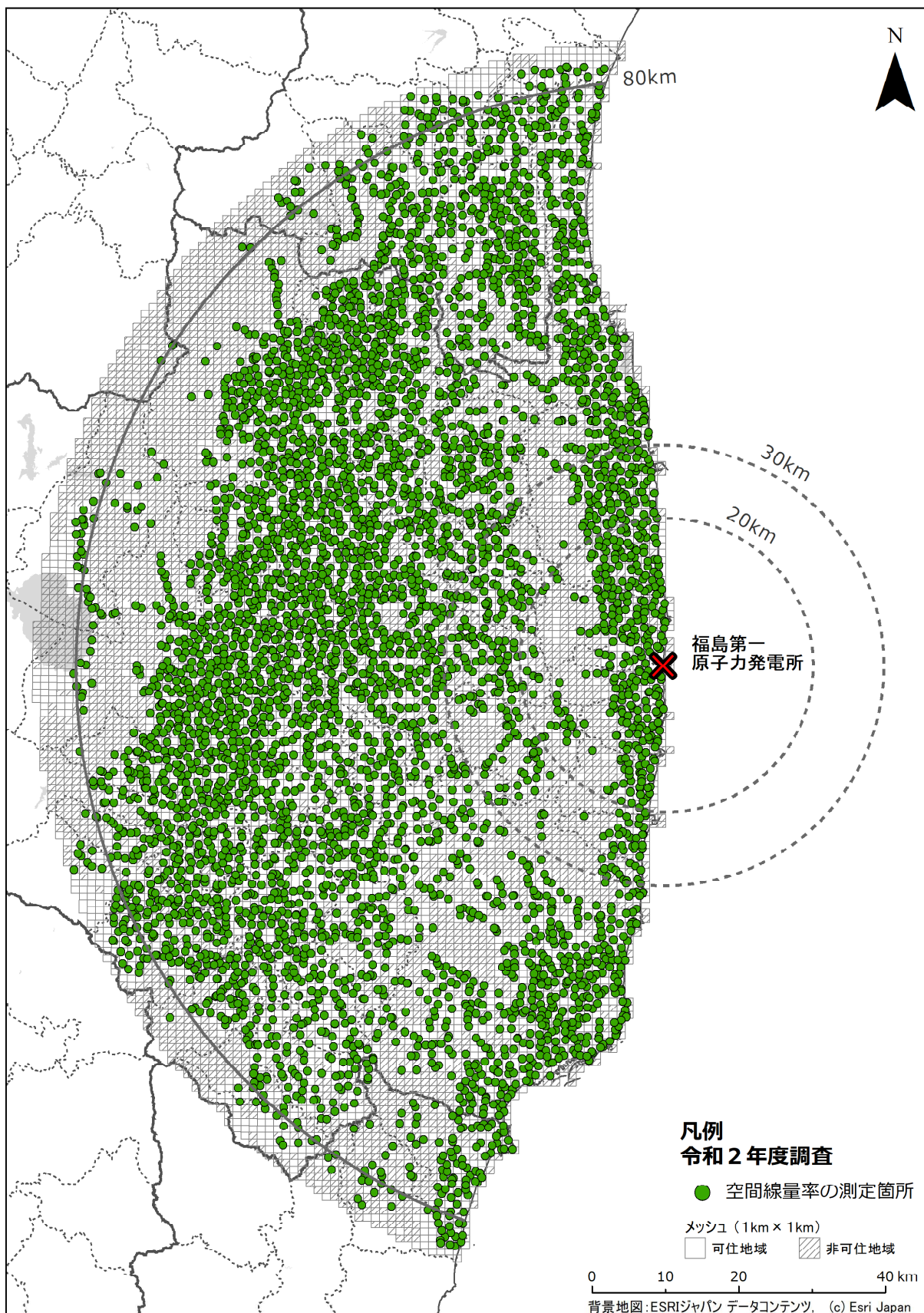


図 2-1 令和2年度調査における定点サーベイによる空間線量率の測定箇所

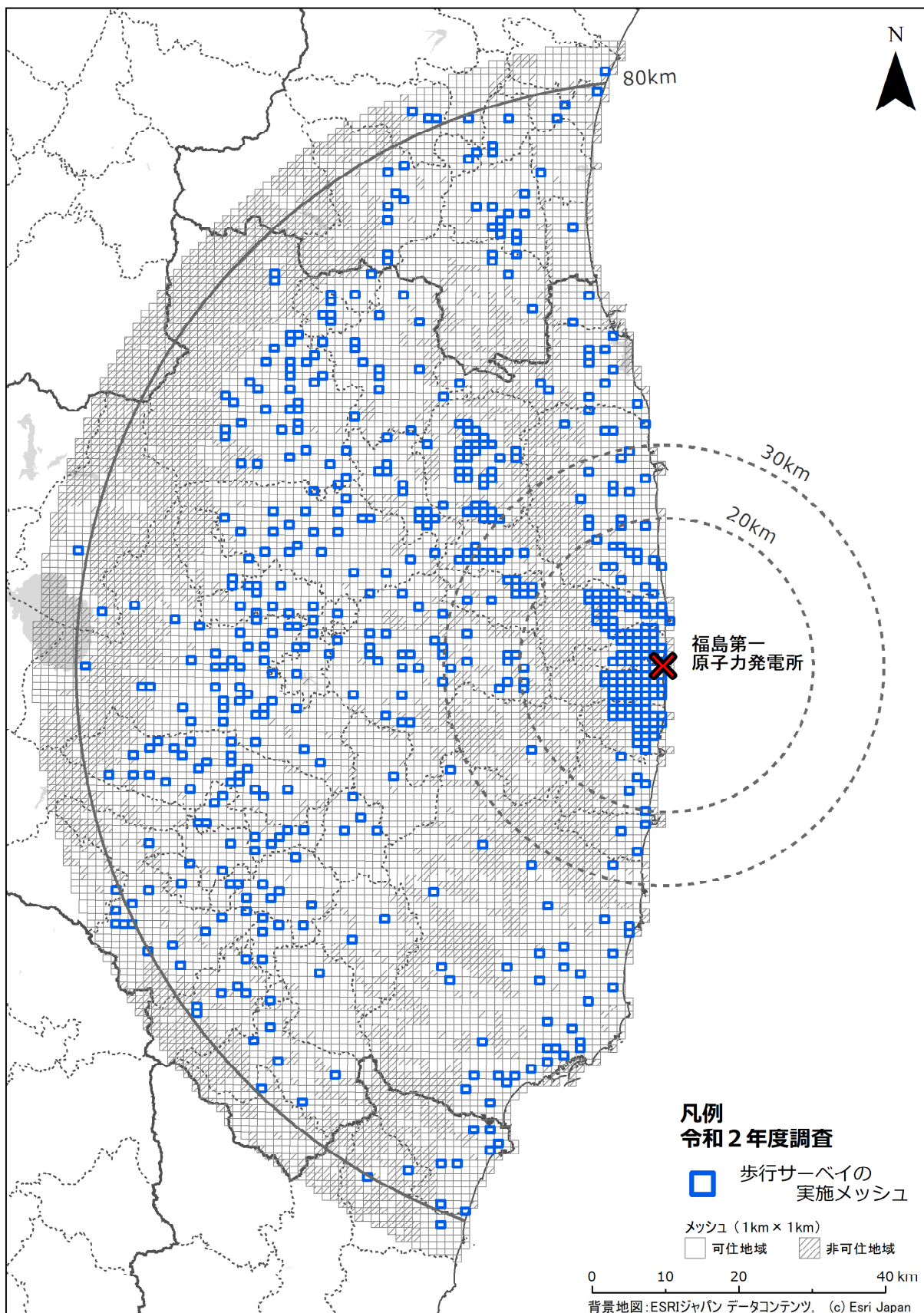


図 2-2 令和2年度調査における歩行サーベイによる空間線量率の測定箇所

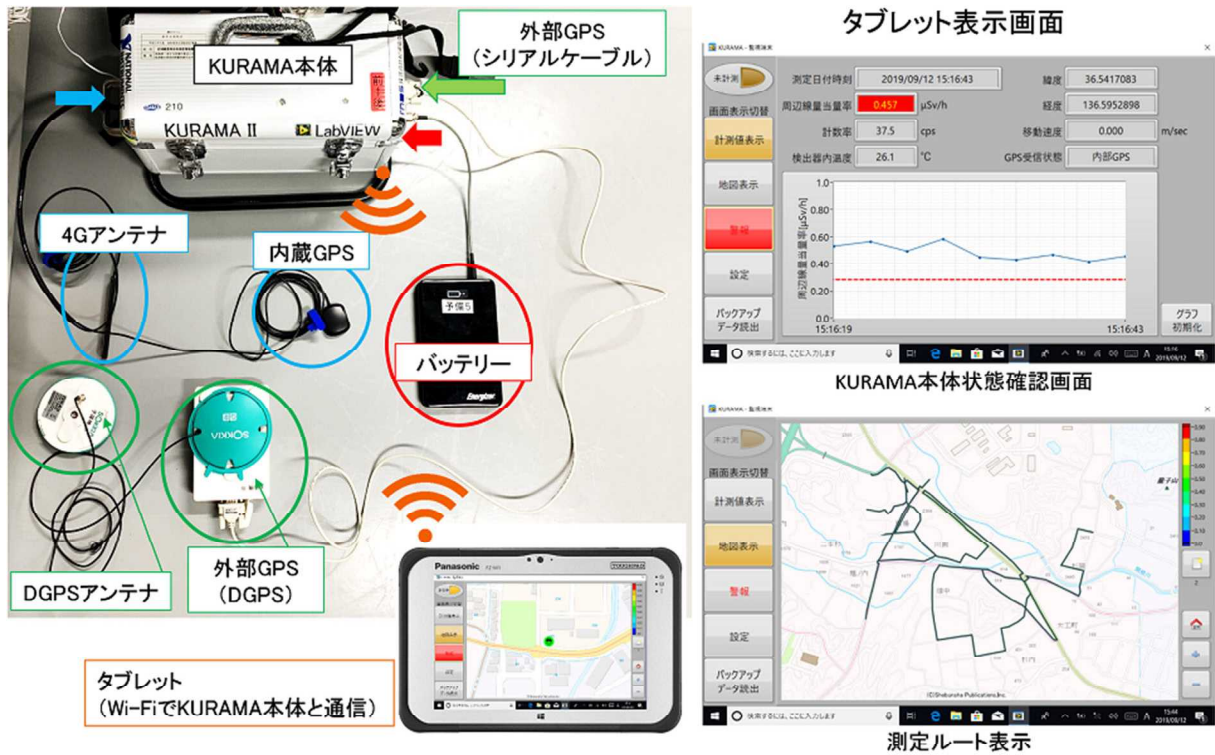


図 2-3 令和 2 年度調査における歩行サーベイに用いた測定システムの概要

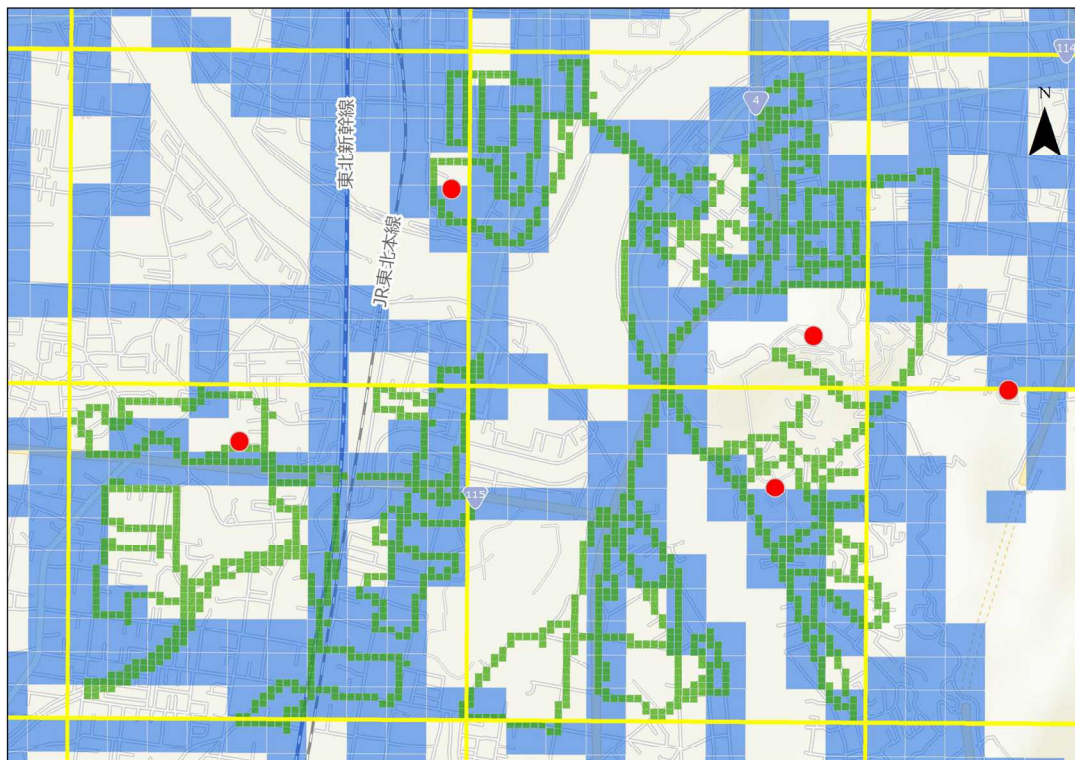


図 2-4 各測定場所のイメージ

(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 2 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 2 年度 2 回目（第 21 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 2 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 2 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 2 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。

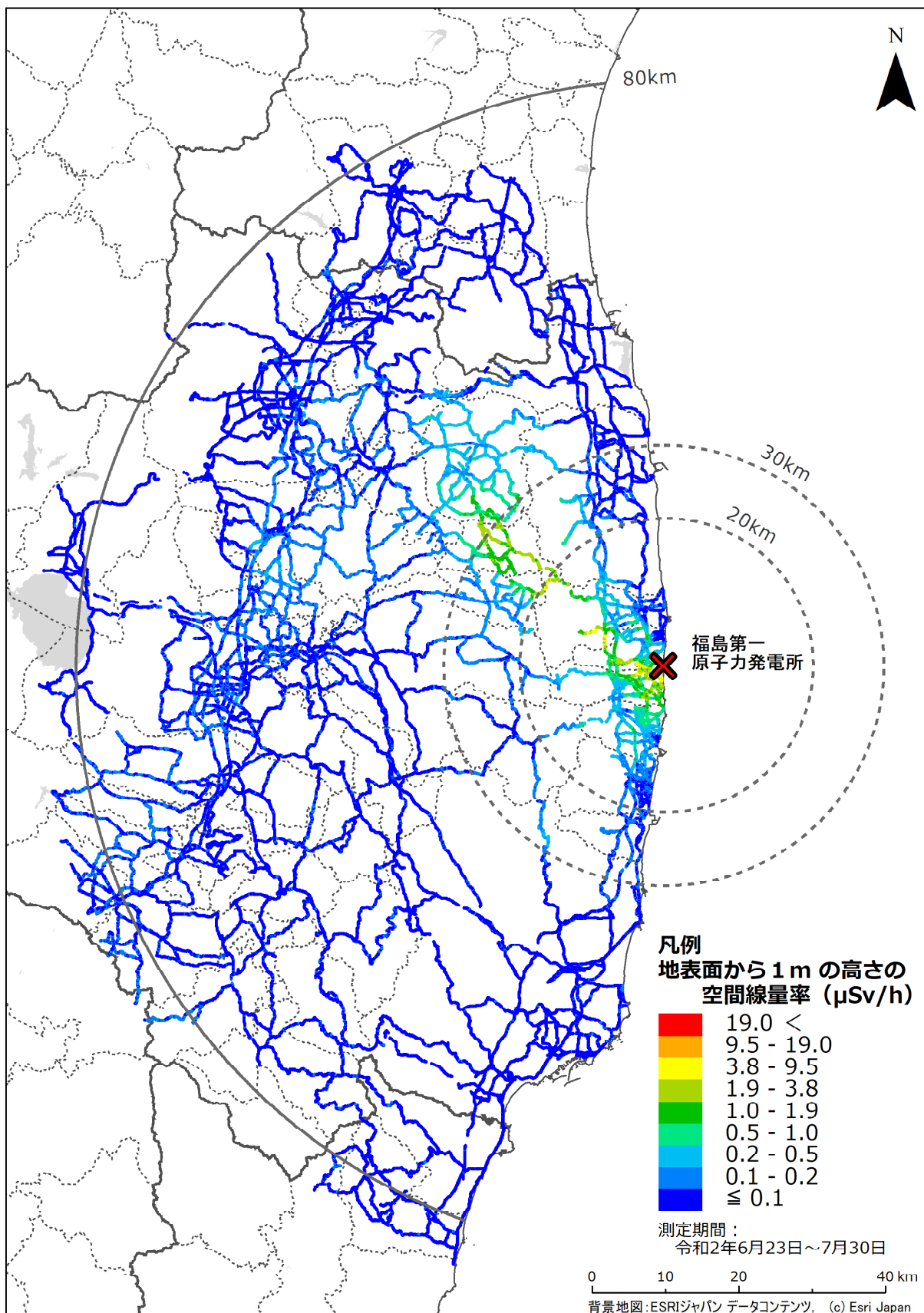


図 2-5 令和2年度1回目(第20回)走行サーベイによる空間線量率の測定結果  
 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

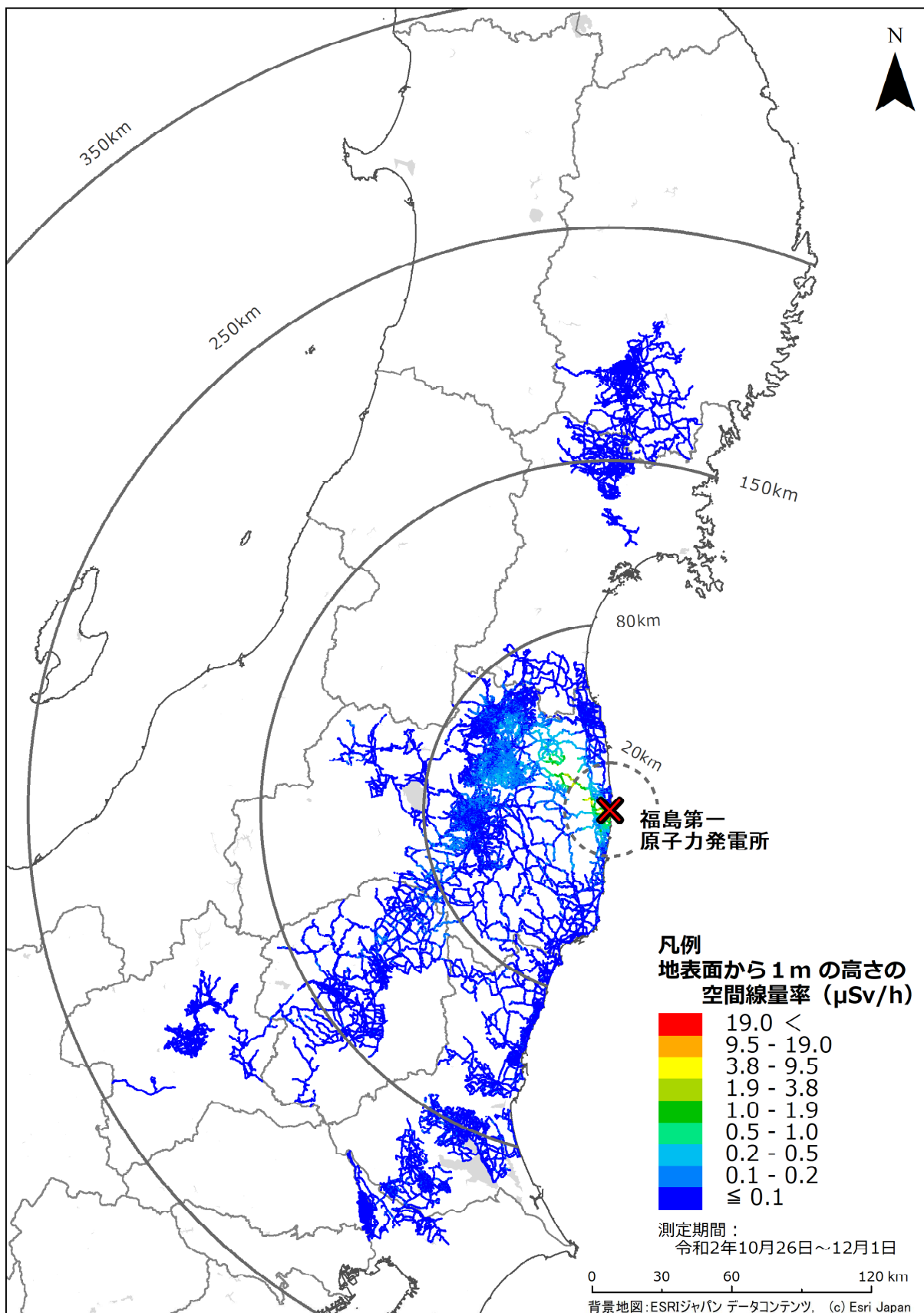


図 2-6 令和2年度2回目(第21回)走行サーベイによる空間線量率の測定結果  
 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

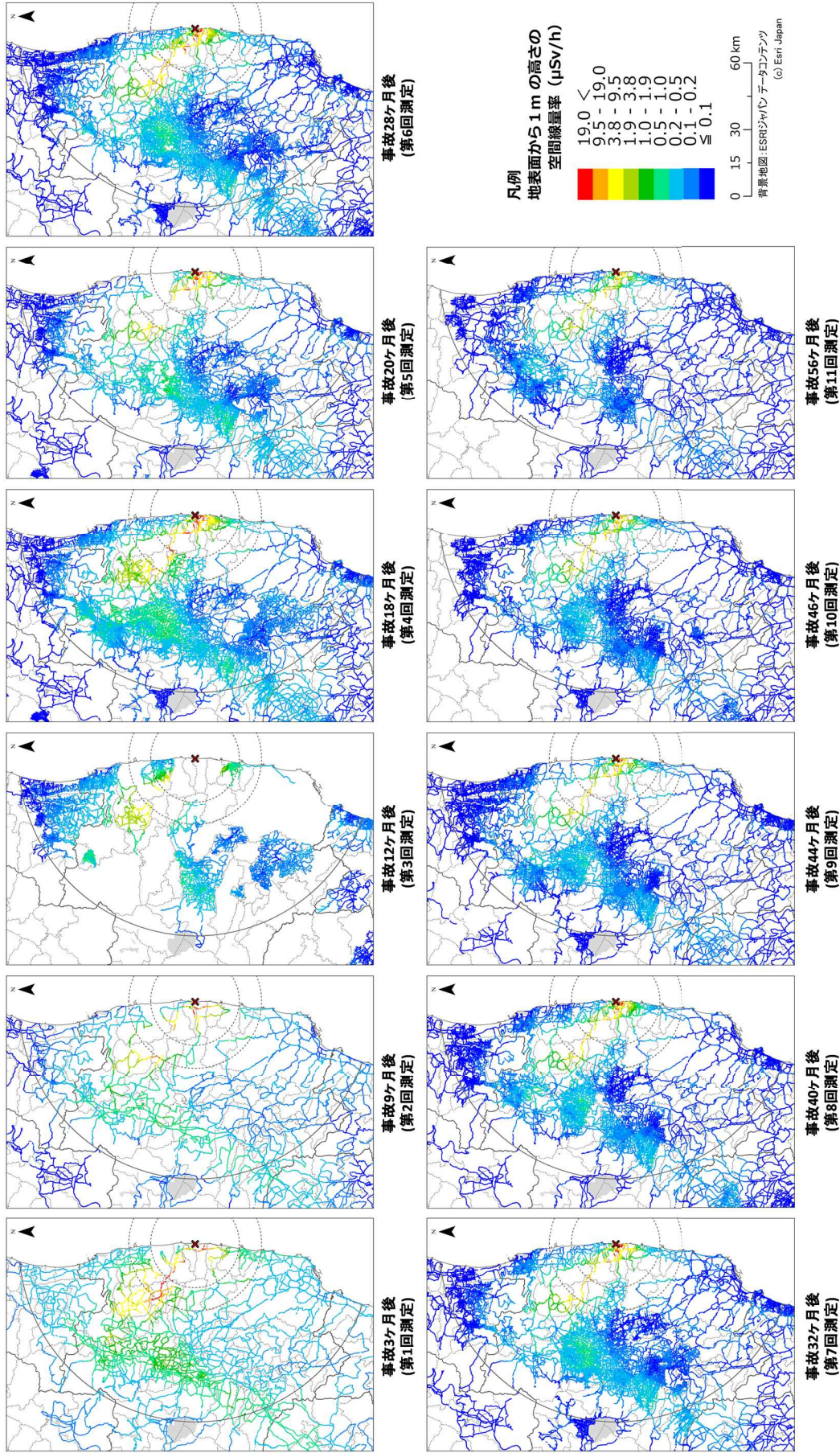


図 2-7 平成 23 年度以降の走行サーベイによる 80 km 圏内を中心とした空間線量率マップの変化 (1/2)  
 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)



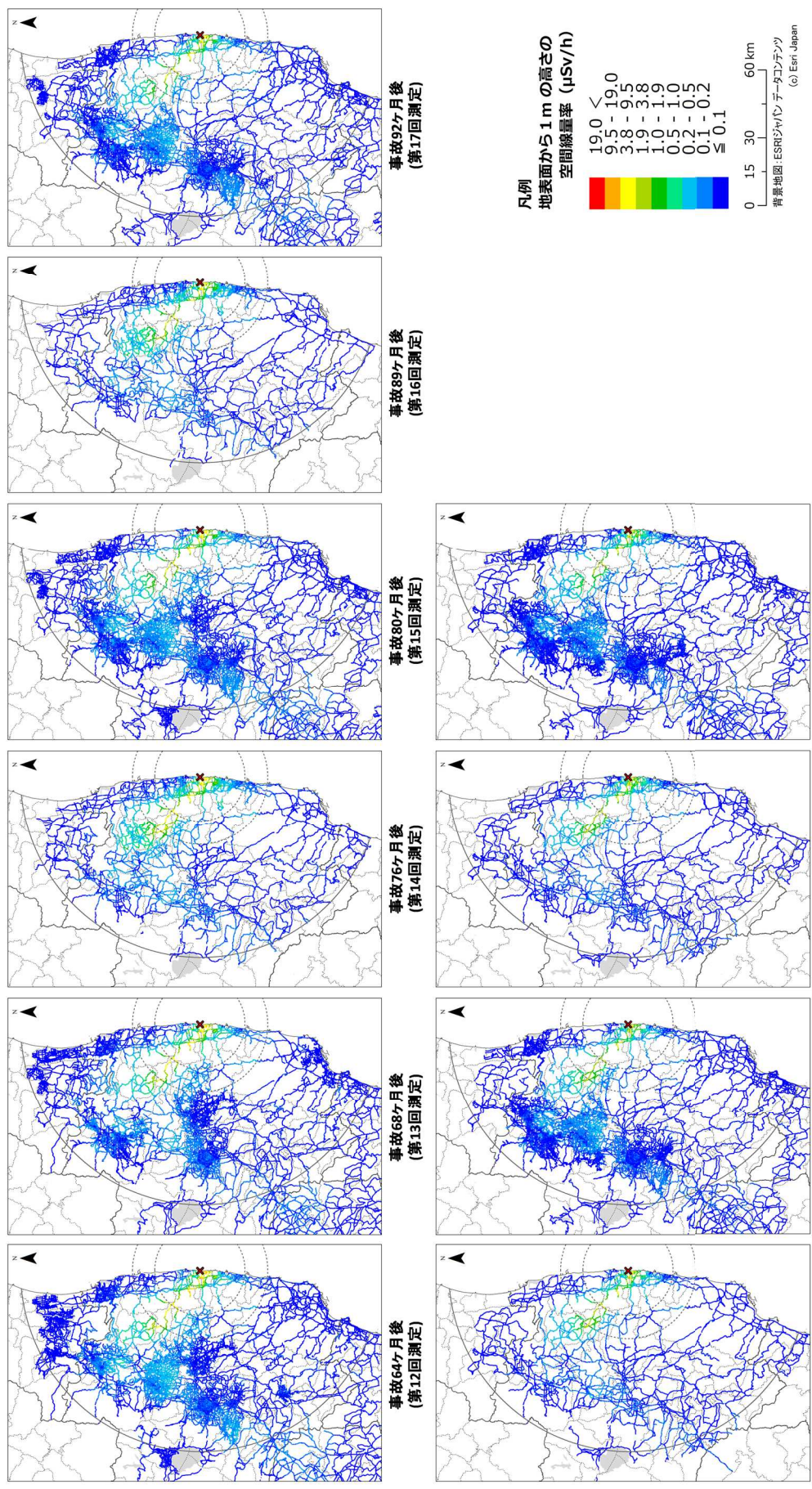


図 2-7 平成 23 年度以降の走行サーベイによる 80 km 圏内を中心とした空間線量率マップの変化 (2/2)  
 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

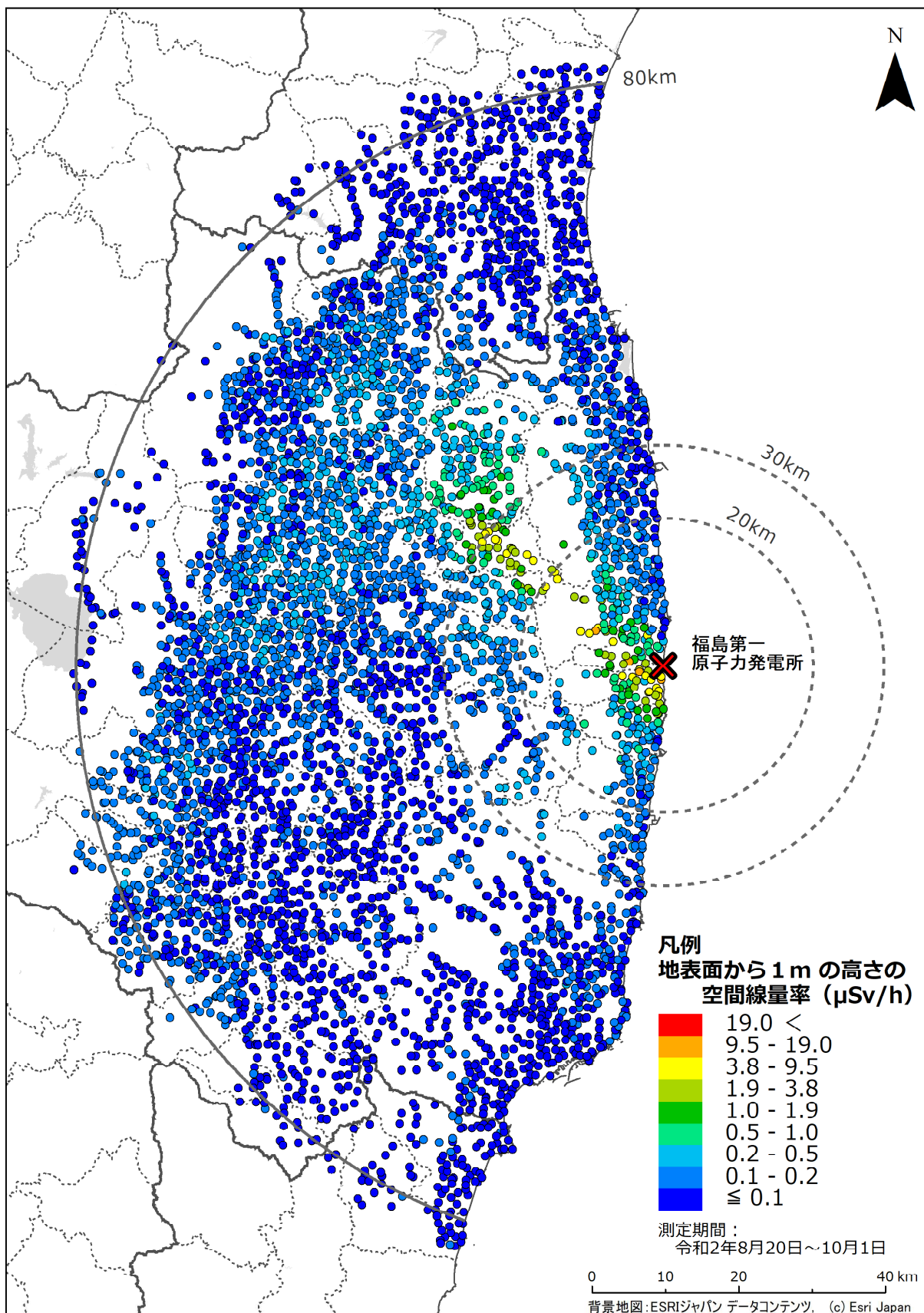


図 2-8 令和2年度定点サーベイによる空間線量率の測定結果  
 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

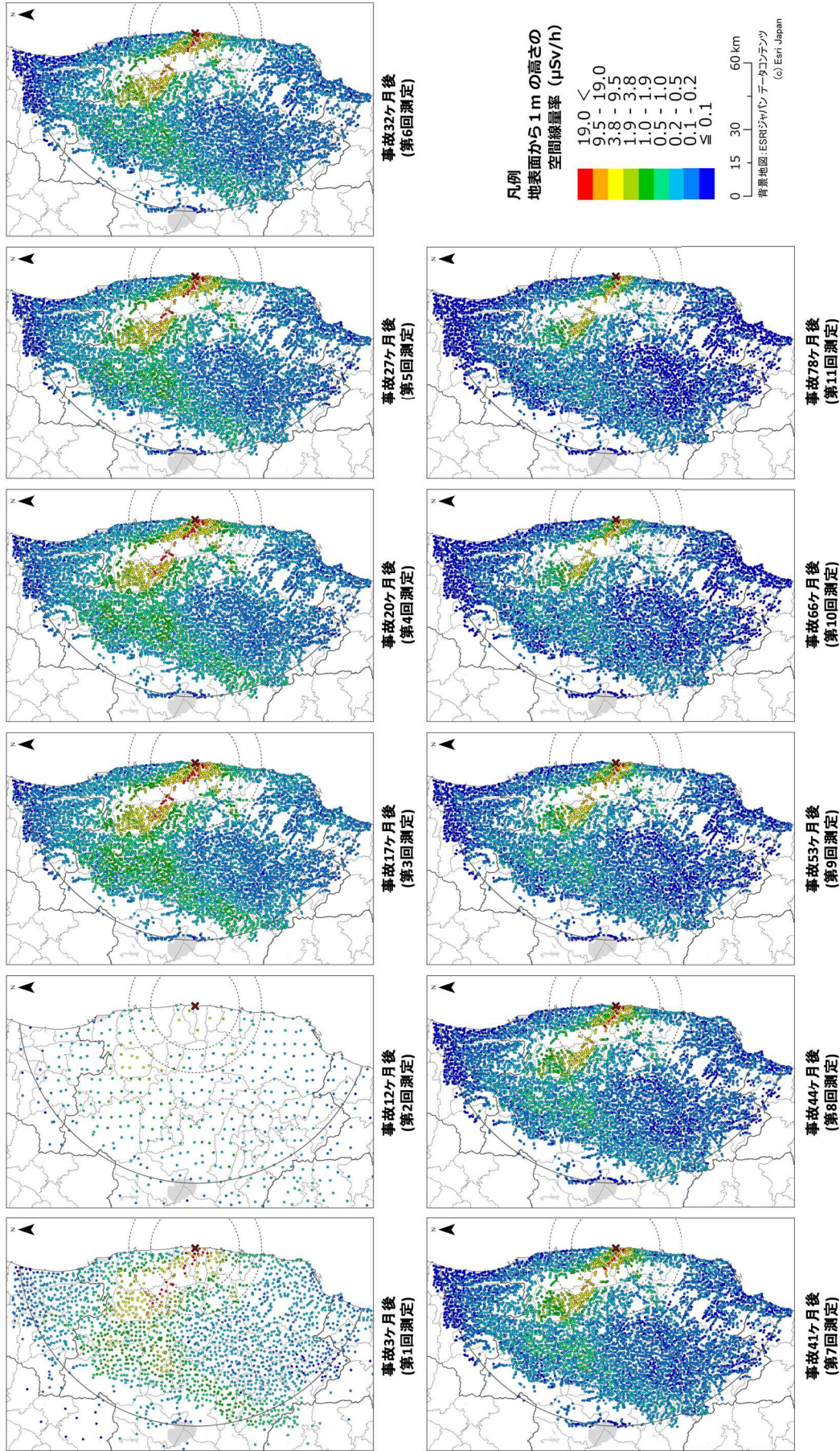


図 2-9 平成 23 年度以降の定点サーベイによる空間線量率マップの変化 (1/2)  
 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

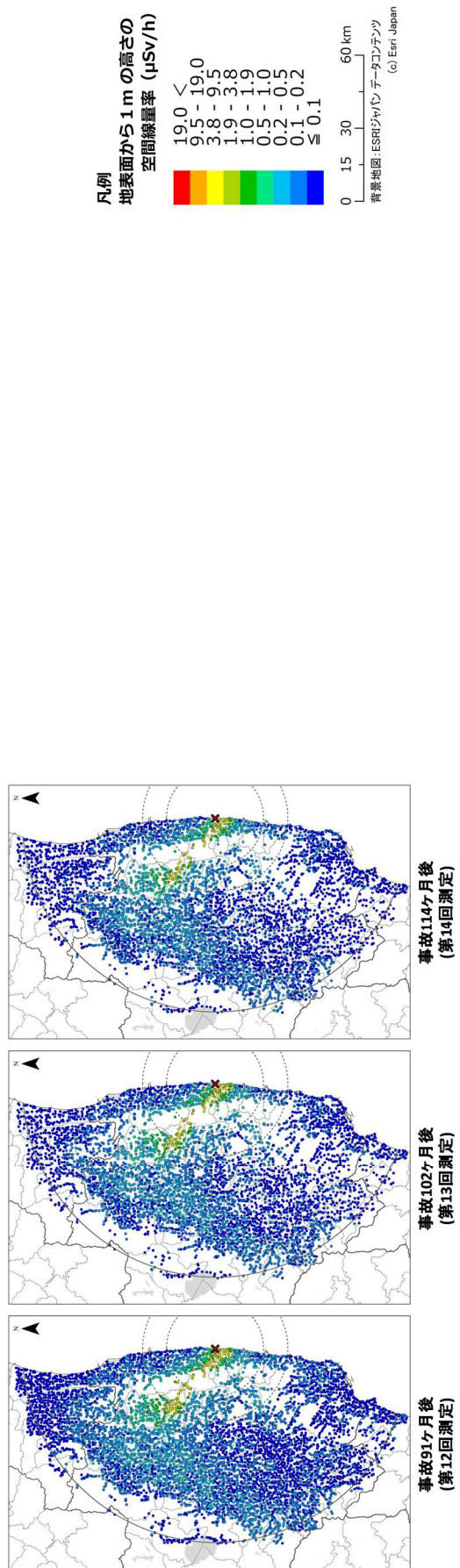


図 2-9 平成 23 年度以降の定点サーベイによる空間線量率マップの変化 (2/2)  
(天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

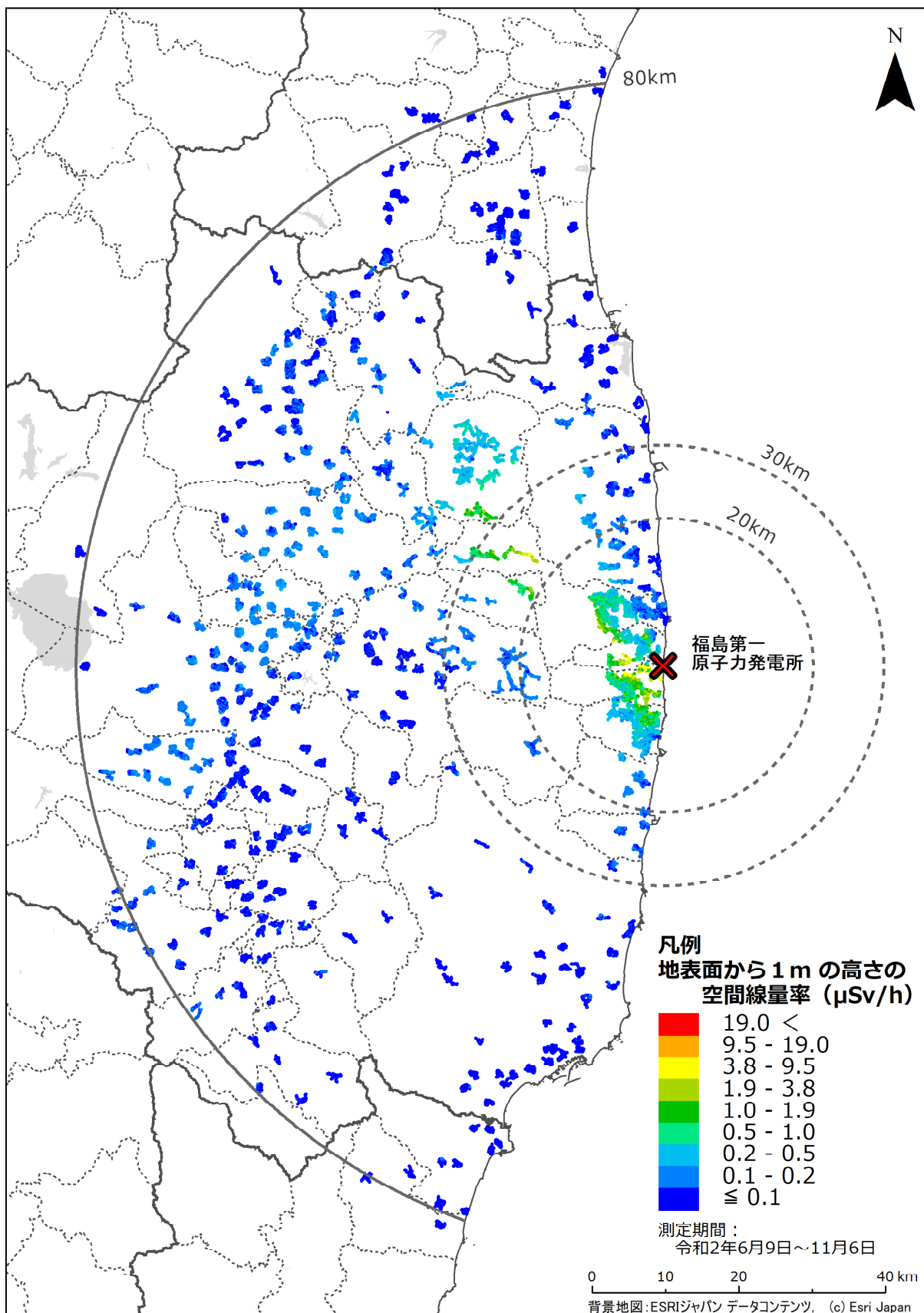


図 2-10 令和2年度歩行サーベイによる空間線量率の測定結果  
 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

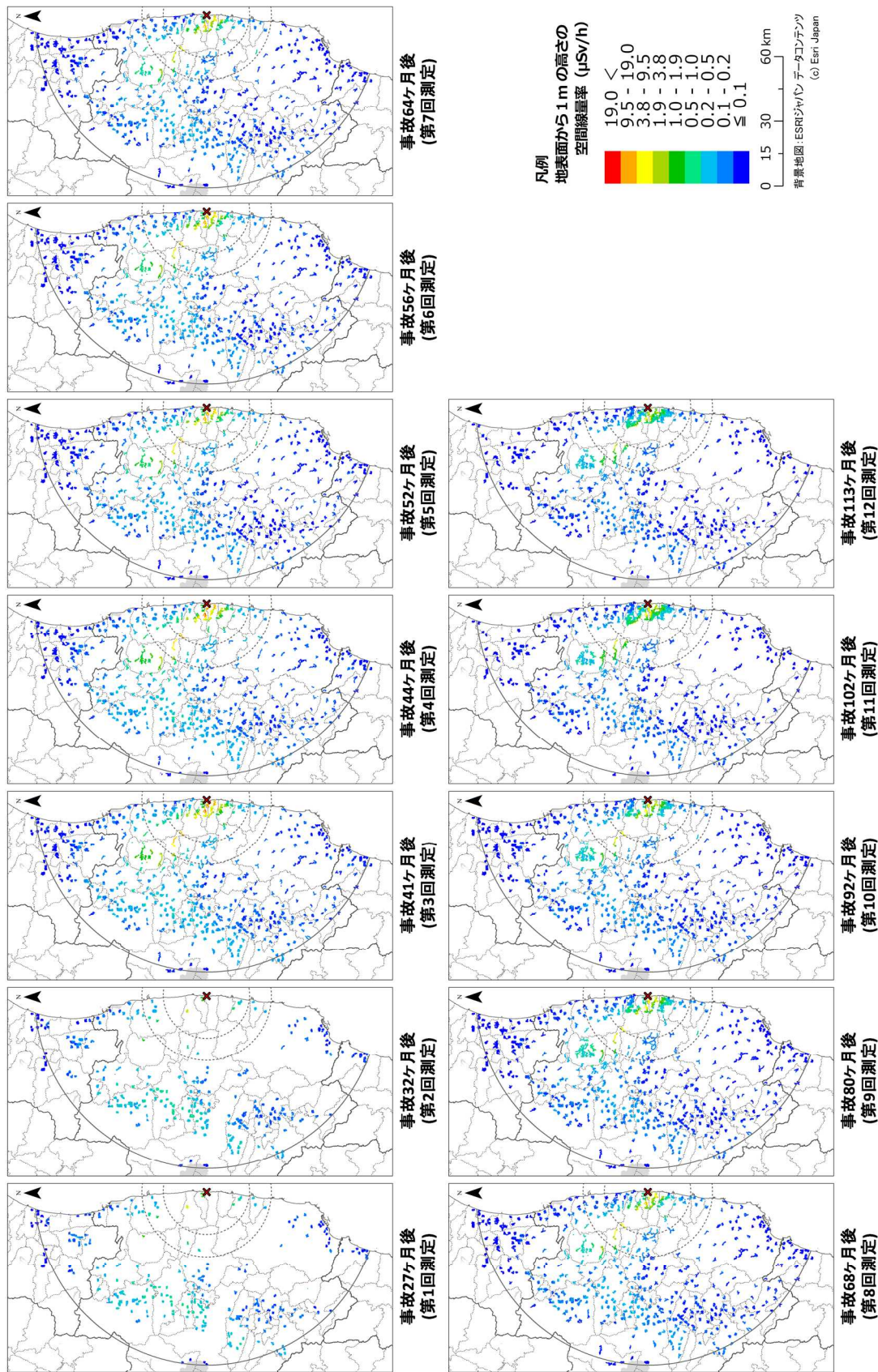


図 2-11 平成 25 年度以降の歩行サーベイによる空間線量率マップの変化  
 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

### 2.3.2 令和元年度との比較

走行サーベイ、定点サーベイ及び歩行サーベイの令和元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元年度の結果と令和 2 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。なお、定点サーベイにおいて令和元年度に比べて令和 2 年度の測定値が大きく減少しているデータが数点見られるが、これらは福島第一原発の 5 km 圏内(空間線量率が比較的高い場所) で進められている復興再生拠点での除染や中間貯蔵場の造成等に起因していると考えられる。

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。いずれの測定も半減期による理論値よりも変化が小さく、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、平成 30 年度から令和元年度までの空間線量率の変化率(走行サーベイ-7.1%、定点サーベイ-5.4%、歩行サーベイ-9.7%) に対して令和元年度から令和 2 年度までは走行サーベイ-3.4%、歩行サーベイ-5.8%と変化率が小さくなっているのに対して、定点サーベイでは-5.5%とほぼ同じ減少率となっている。道路上(走行サーベイ及び歩行サーベイ)の方がかく乱の少ない平坦地(定点サーベイ)よりもバックグラウンドレベルに近づいているためと考えられる。なお、これら変化率について  $t$  検定を行い、走行サーベイ及び歩行サーベイでは令和元年度と令和 2 年度のデータ間に有意差がある ( $p < 0.01$ ) ことを確認した。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るわずかな線量率の変動でも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 令和元年度と比較した令和 2 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
令和元年度の測定期間	R1/6/27-R1/7/16	R1/8/22-R1/9/27	R1/6/12-R1/11/22
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
放射性セシウムの 半減期による変化率	-6.8%	-6.5%	-6.0%
測定結果による 相対変化率の平均値	-3.4%	-5.5%	-5.8%

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 2 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 2 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-89%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絶対値が大きい傾向にあり、天候や車両往来等による環境影響や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 2 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 ( $\geq 0.5 \mu\text{Sv/h}$ ) <sup>a)</sup>	定点サーベイ ( $\geq 0.5 \mu\text{Sv/h}$ ) <sup>a)</sup>
平成 23 年度の測定期間	H23/6/4-H23/6/13		H23/6/4-H23/7/8
令和 2 年度の測定期間	R2/10/26-R2/12/1		R2/8/20-R2/10/1
放射性セシウムの 半減期による変化率		-74%	-73%
測定結果による 相対変化率の平均値	-83%	-89%	-87%

a) 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 2 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 2%程度であり（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 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）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。

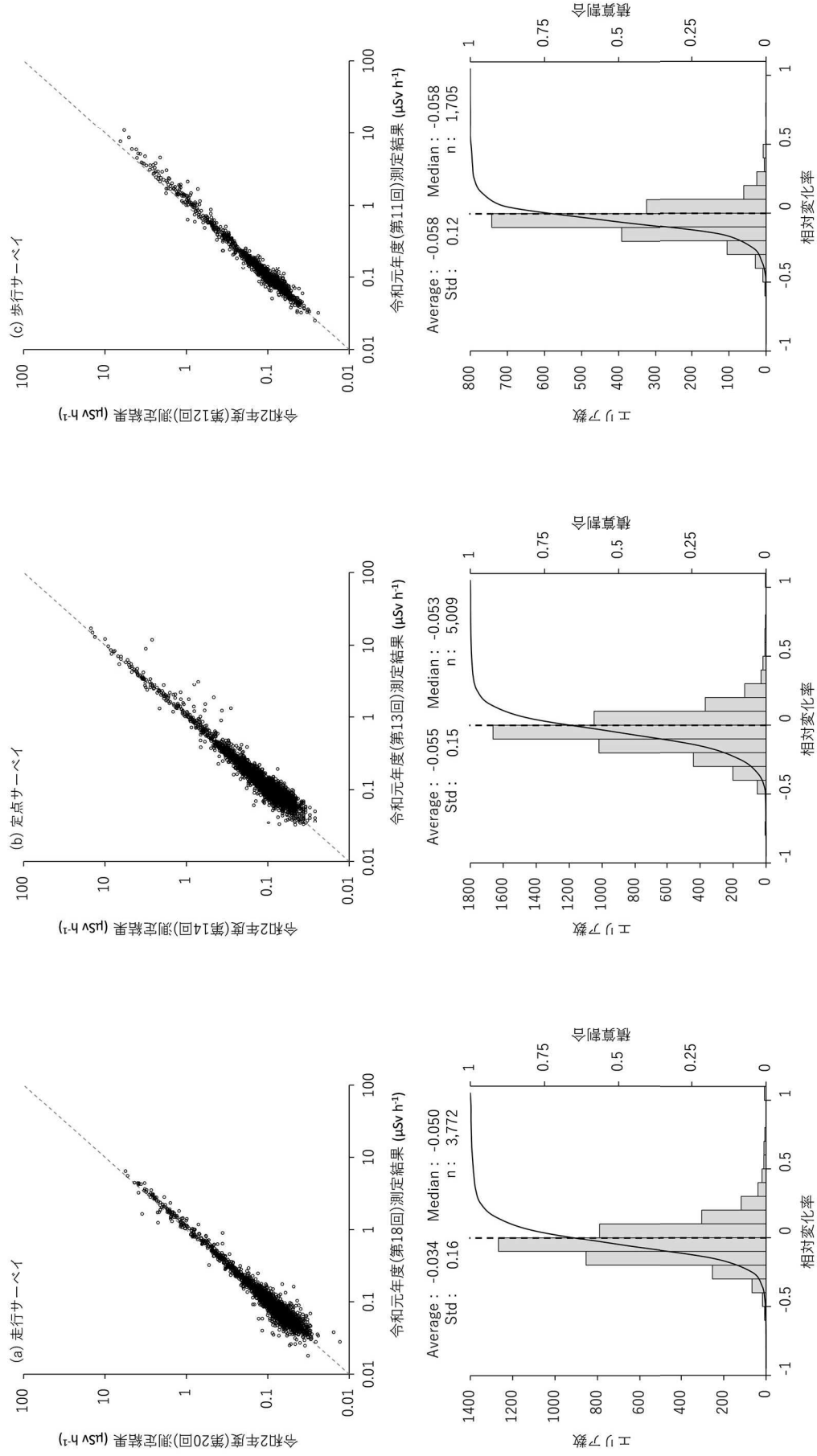


図 2-12 令和元年度の測定結果に対する令和2年度の測定結果の比  
(相関図の破線は  $y=x$ 、Std は標準偏差、n はデータ数を意味する。)

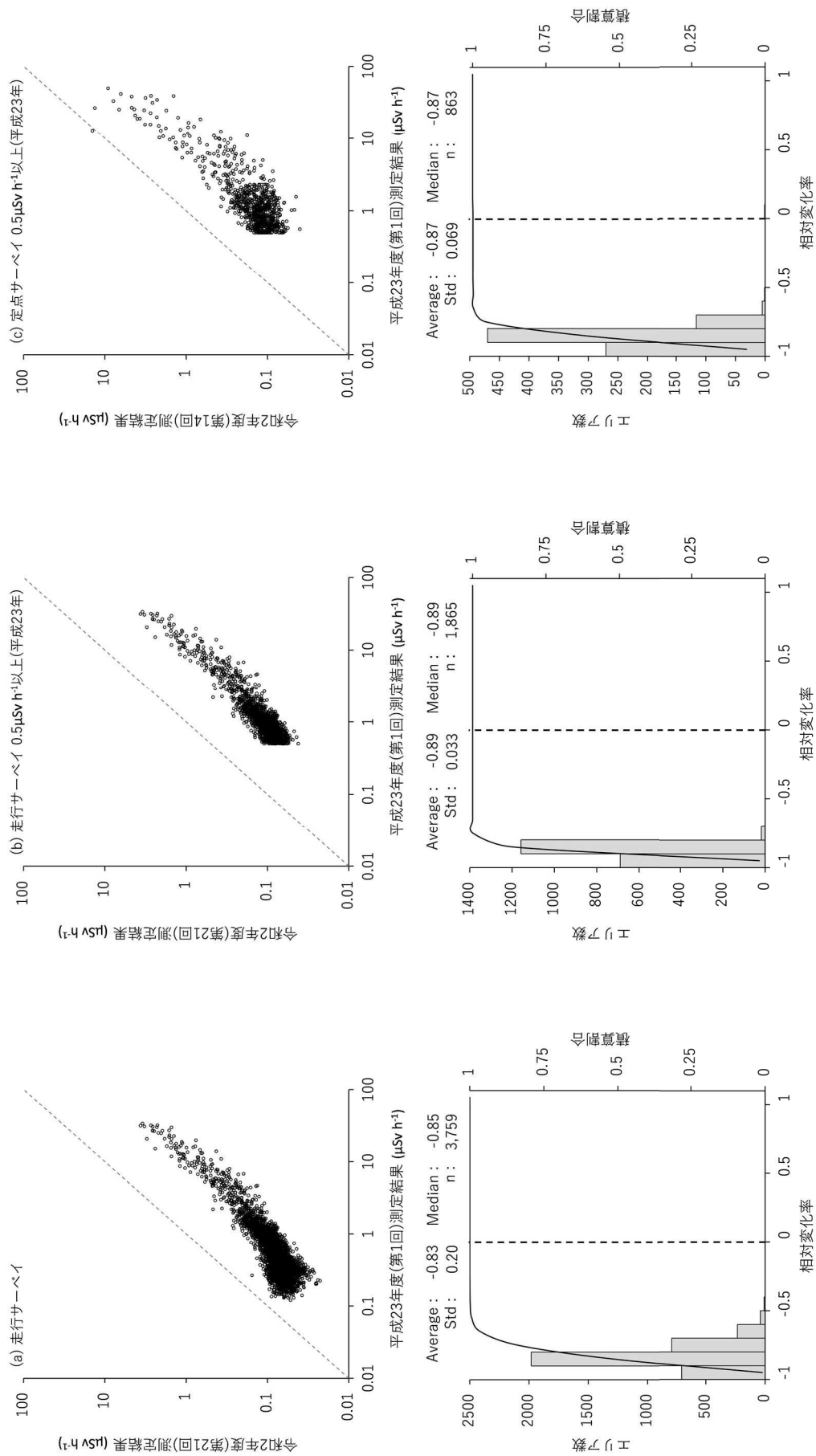


図 2-13 走行サーベイ及び定点サーベイによる空間線量率結果の平成23年度との比較

(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。)

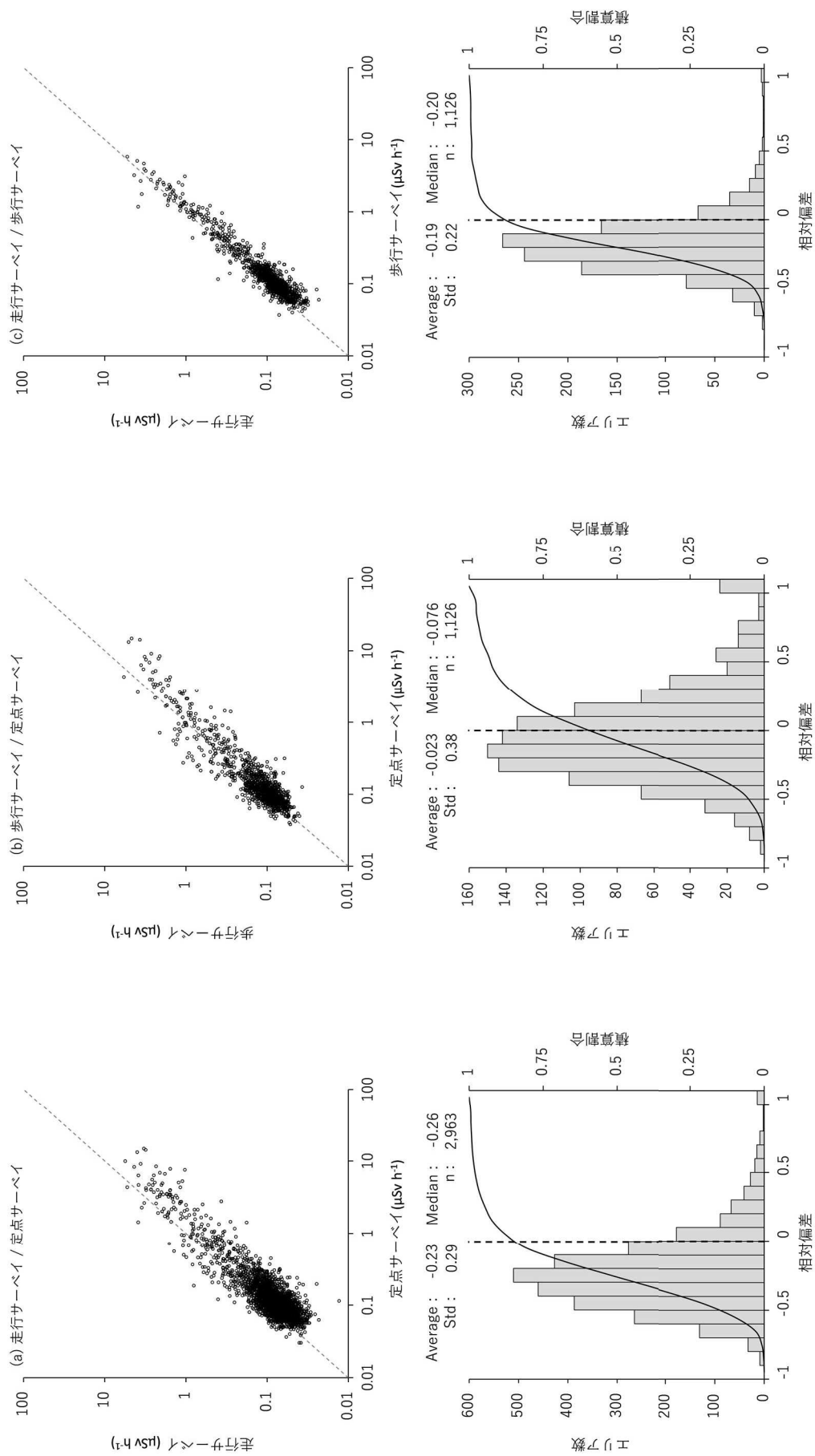


図 2-14 令和2年度調査での測定手法間の比較

(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。)

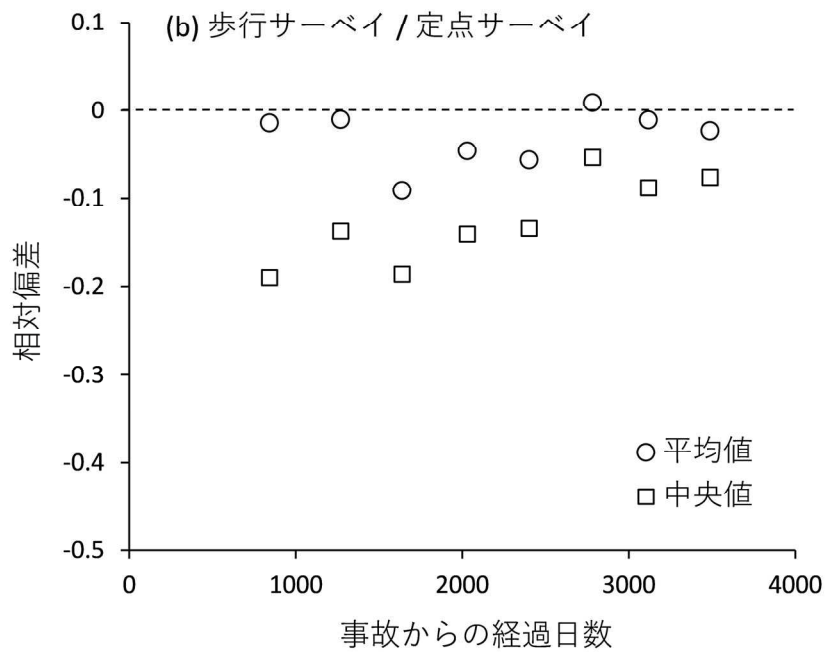
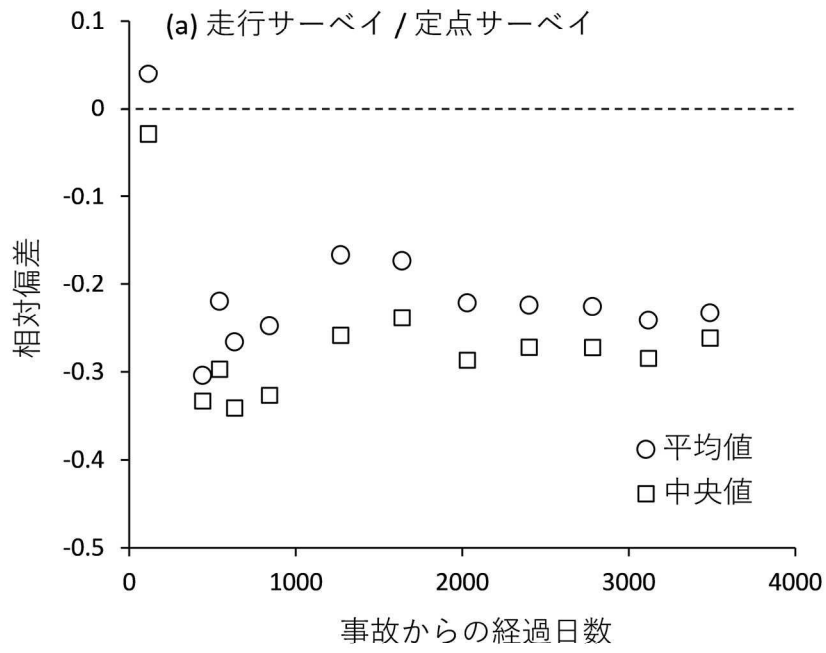


図 2-15 定点サーベイに対する走行サーベイ及び歩行サーベイの空間線量率の相対偏差

### 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<sup>3)</sup>、河川敷のモニタリング<sup>4)</sup>及び除染前後のモニタリング<sup>5)</sup>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航空機モニタリング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を開始した<sup>6)</sup>。平成25年度からは、航空機モニタリングとの比較も考慮し、航空機モニタリングと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傾向は、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2年度に1回実施した無人ヘリ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2年6月9日～10月6日

フライト範囲：70.2 km<sup>2</sup>

合計測定距離：839 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 LaBr<sub>3</sub> (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 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<sup>7)</sup>。無人ヘリの飛行軌跡幅（測線間隔）は 80~100 m、無人ヘリの飛行速度は 8 m/s (= 28.8 km/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 NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータを用いて、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:  $\text{m}^{-1}$ ）を算出した。

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。令和 2 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。

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 50 m)	地上値 ( $\mu\text{Sv/h}$ )	AF ( $\text{m}^{-1}$ )	CD ( $\mu\text{Sv/h/cps}$ )
	緯度	経度						
1	37.38916996	141.0010944	2018/6/4	48	9498	2.55	-0.00864	5561
2	37.41075887	140.9787564	2018/8/23	82	13144	6.48	-0.00841	4048
3	37.41342321	140.9854456	2019/10/15	81	16972	8.63	-0.00930	4143
4	37.36137103	141.0078806	2020/6/17	80	3160	1.34	-0.00646	3925
5	37.38711193	141.0063403	2020/6/29	77	9614	4.22	-0.00830	4313
6	37.38602783	140.9947421	2020/7/27	80	3542	1.56	-0.00779	4230
7	37.4099319	140.9729545	2020/8/24	80	8336	3.52	-0.00768	4357
8	37.3871103	141.0063297	2020/8/28	76	10390	4.41	-0.00808	4392
9	37.38601914	140.994735	2020/9/10	79	3706	1.62	-0.00769	4225
10	37.40992418	140.9729688	2020/9/18	81	7867	3.14	-0.00761	4622
平均値							-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。



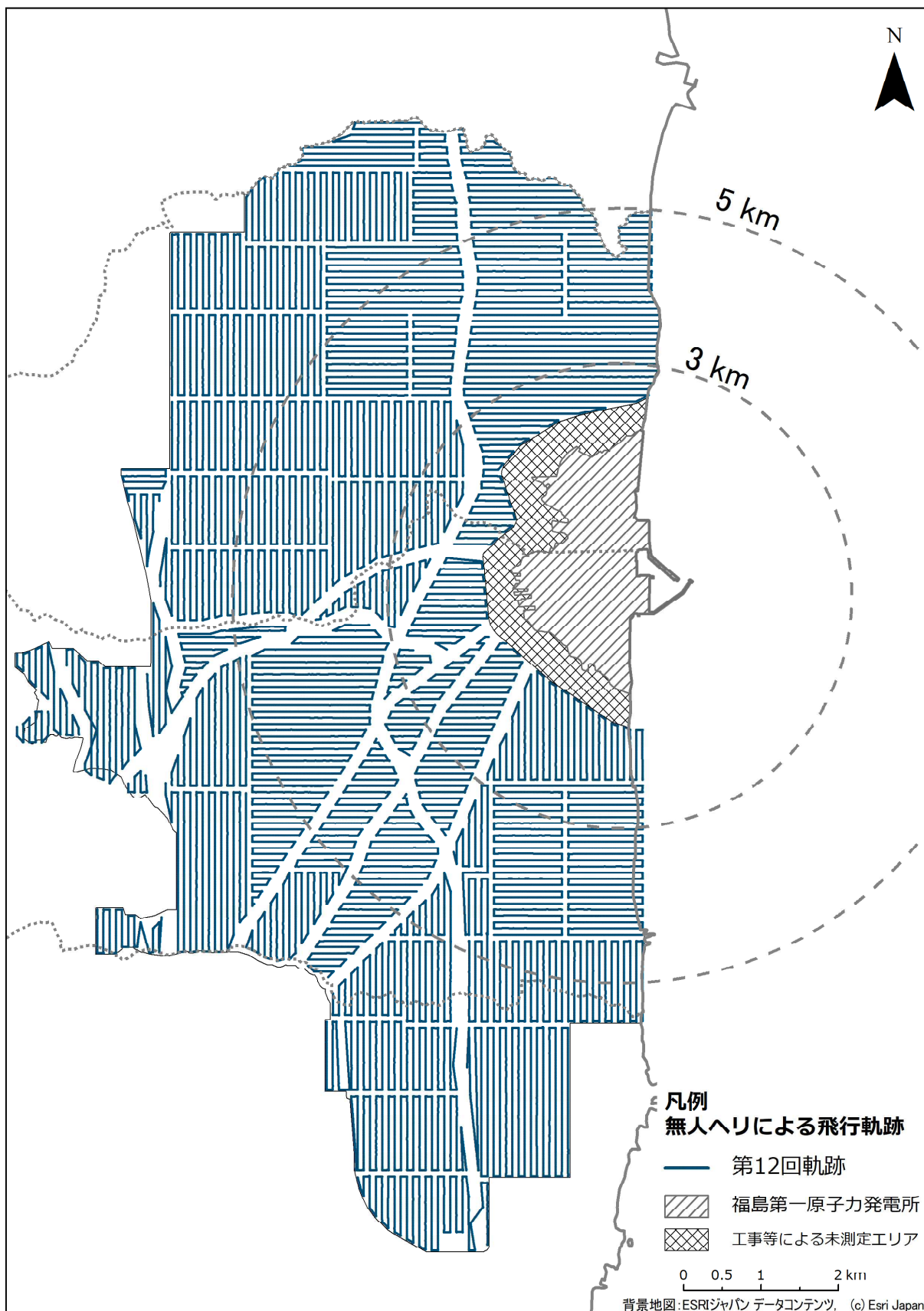


図 3-2 令和2年度無人ヘリサーベイの飛行軌跡

### 3.3 調査結果

#### 3.3.1 空間線量率マップ

令和 2 年度実施した無人ヘリによる空間線量率マップを図 3-3 に示す。また、令和 2 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 高さの空間線量率及び地表面の放射性セシウムの沈着量の値は、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  $R^2=0.81$ ）を示しており、令和 2 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 以上の範囲での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 令和元年度との比較

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元年度と令和 2 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 2 年度は令和元年度から 7%減少（変化率の平均値で）したことが分かる。

図 3-7 に令和元年度の空間線量率測定結果と令和 2 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<sup>8)</sup>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、 $1,400 \text{ keV} \sim 2,800 \text{ keV}$  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、 $0.03 \sim 0.06 \mu\text{Gy/h}$

程度である。また、本結果は過去の結果と整合的である。

### 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<sup>8)</sup>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(3)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、放射性セシウムだけの計数率 ( $C_{Cs}$ ) 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だけの空間線量率 ( $D_{Cs}$ ) を算出する。
- ⑤ 式(3)より、空間線量率  $D_{Cs}$  を空間線量率－放射能換算係数 ( $CF$  ( $[\mu\text{Sv/h}]/[\text{kBq/m}^2]$ ) : 4.1.4 にて詳述する。) で除して放射性セシウムの沈着量  $Rd$  を求める。

$$Rd = \frac{D_{Cs}}{CF} \quad (3)$$

本手法による空間線量率への換算には、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  $\beta_{eff}=4.12 \text{ g/cm}^2$  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  $9.8 \text{ kBq/m}^2$  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、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。

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、令和元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発電所から北西部分と南部分は  $3,000 \text{ kBq/m}^2$  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、 $300 \text{ kBq/m}^2$  以下のエリアも存在する。

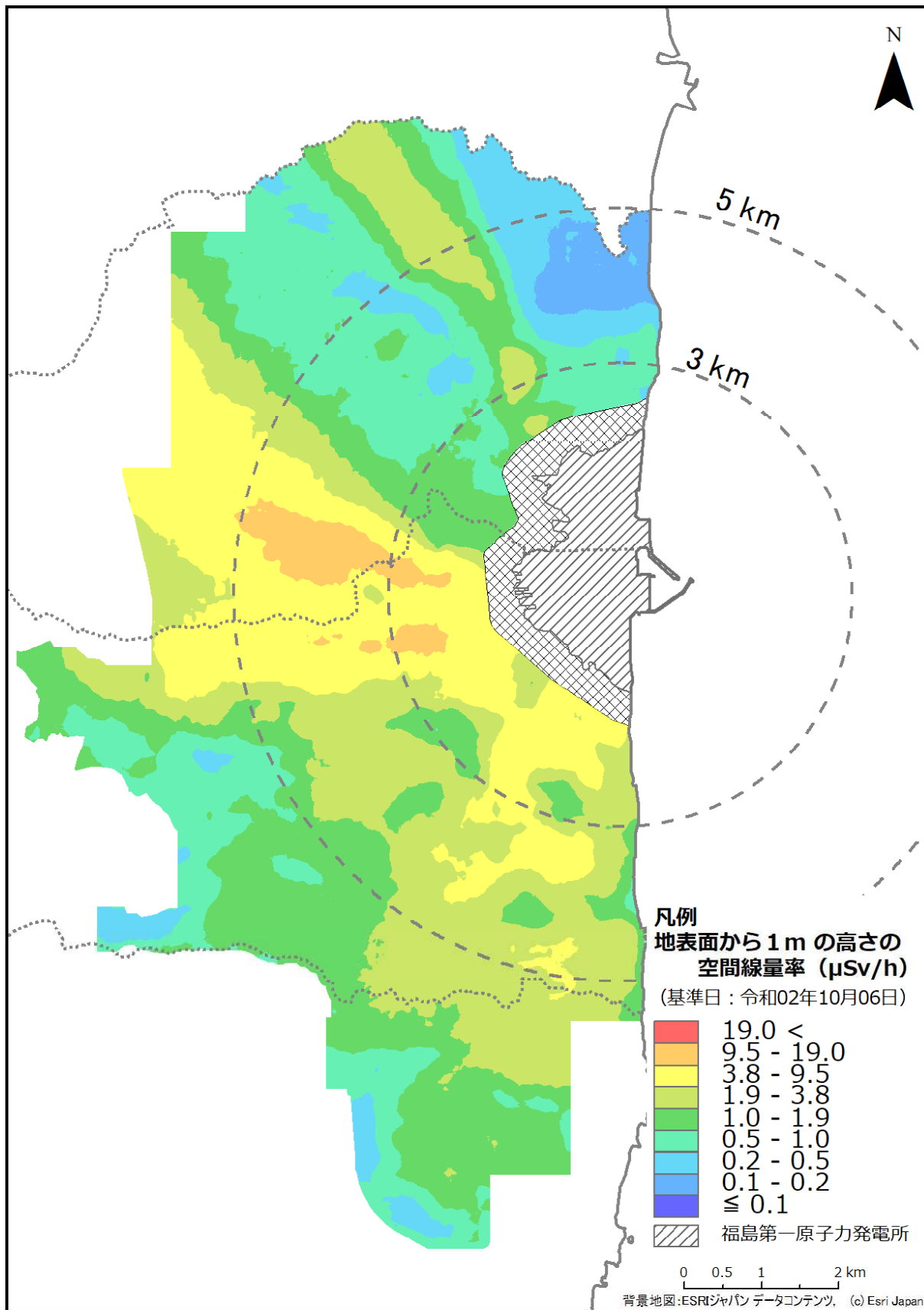


図 3-3 令和2年度無人ヘリサーベイによる空間線量率測定結果  
 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

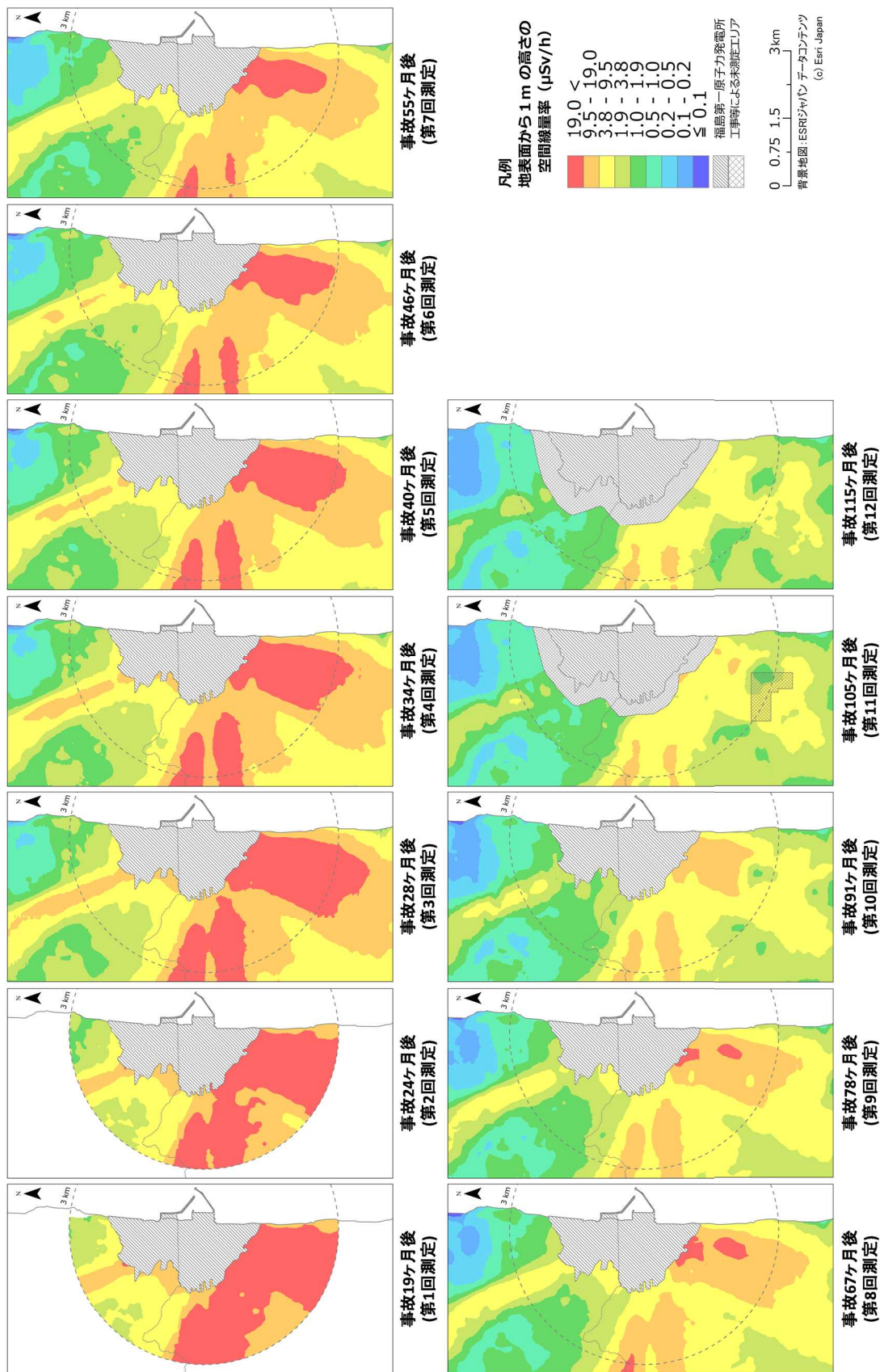


図 3-4 平成 24 年度以降の無人ヘリサーベイによる空間線量率マップの変化  
 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

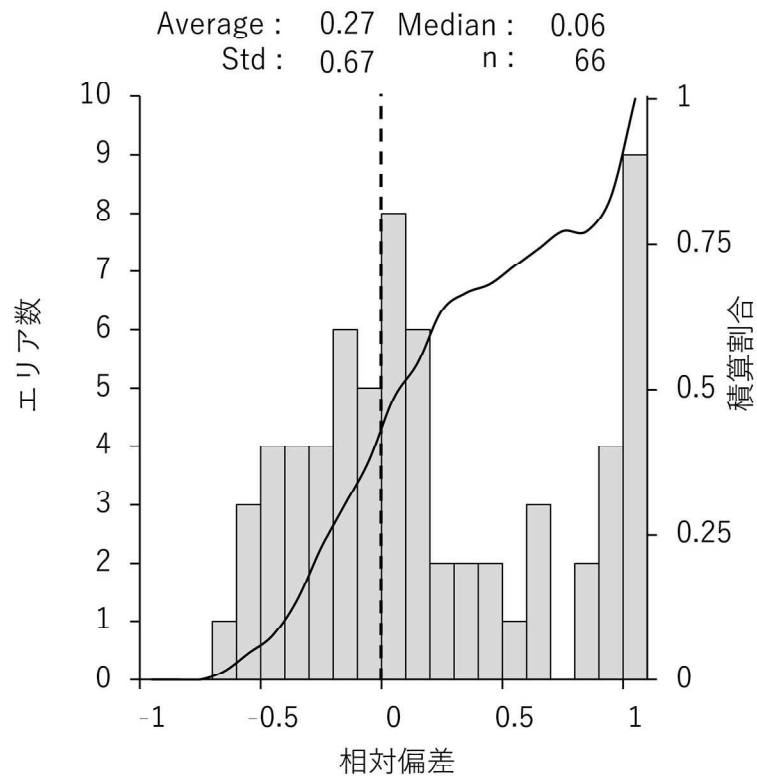
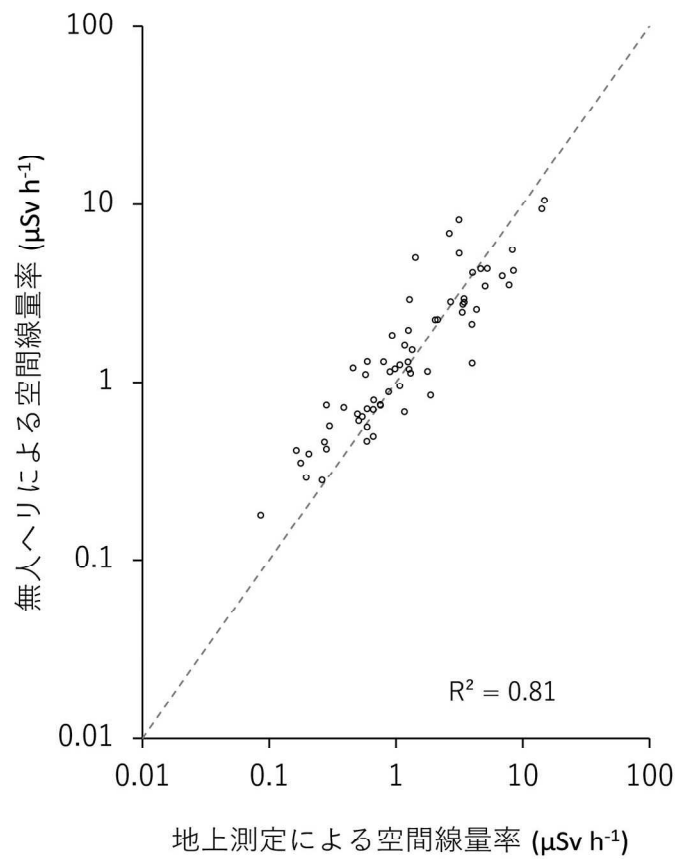


図 3-5 無人ヘリサーベイと地上測定（定点サーベイ）による空間線量率の比較

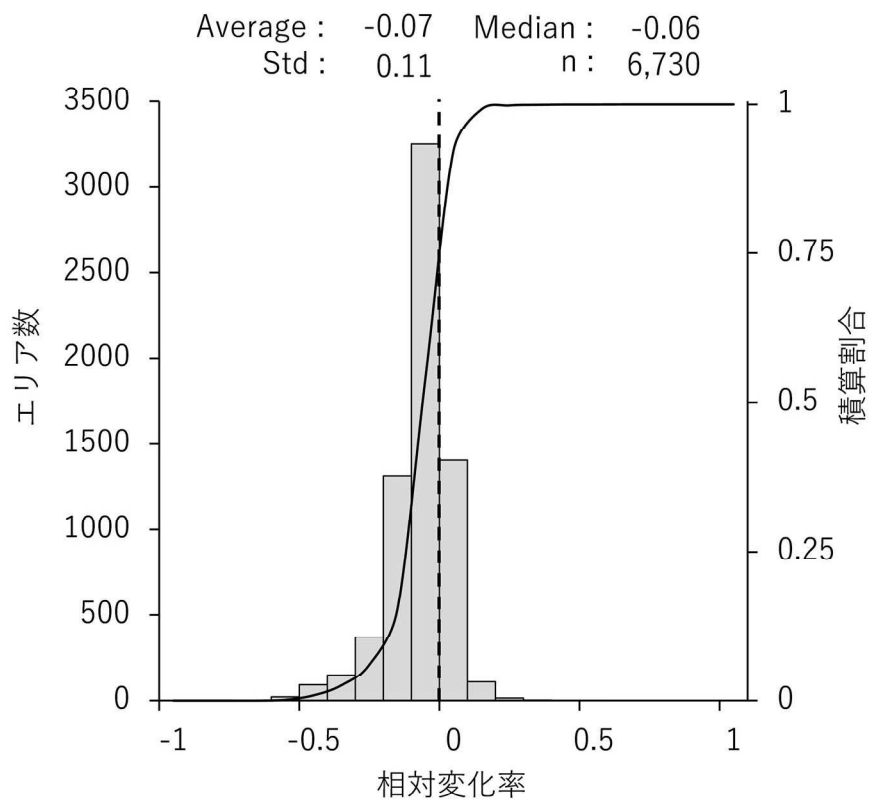
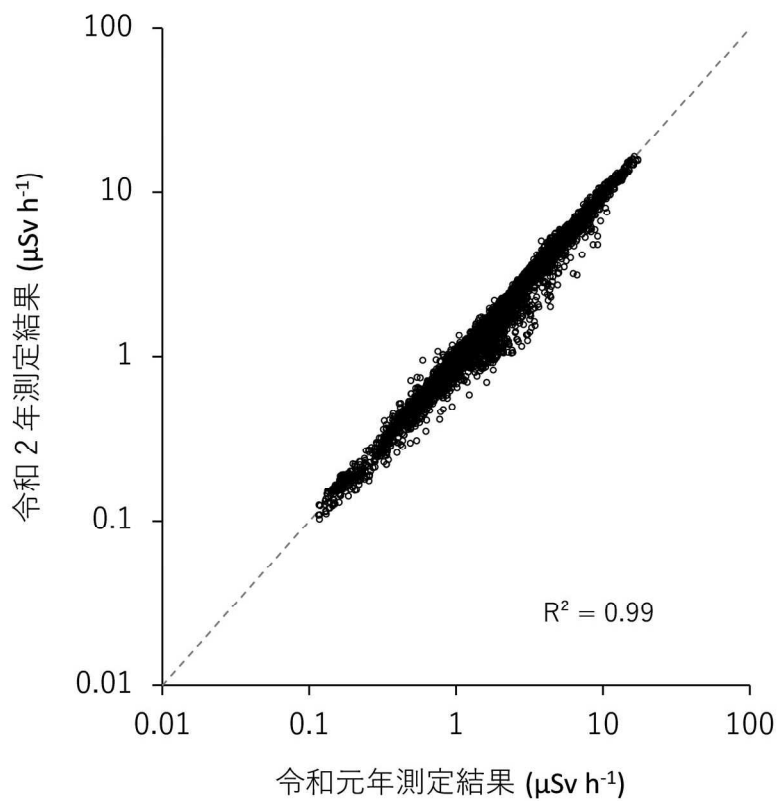


図 3-6 令和元年度と令和2年度の無人ヘリサーベイによる空間線量率測定結果の比較

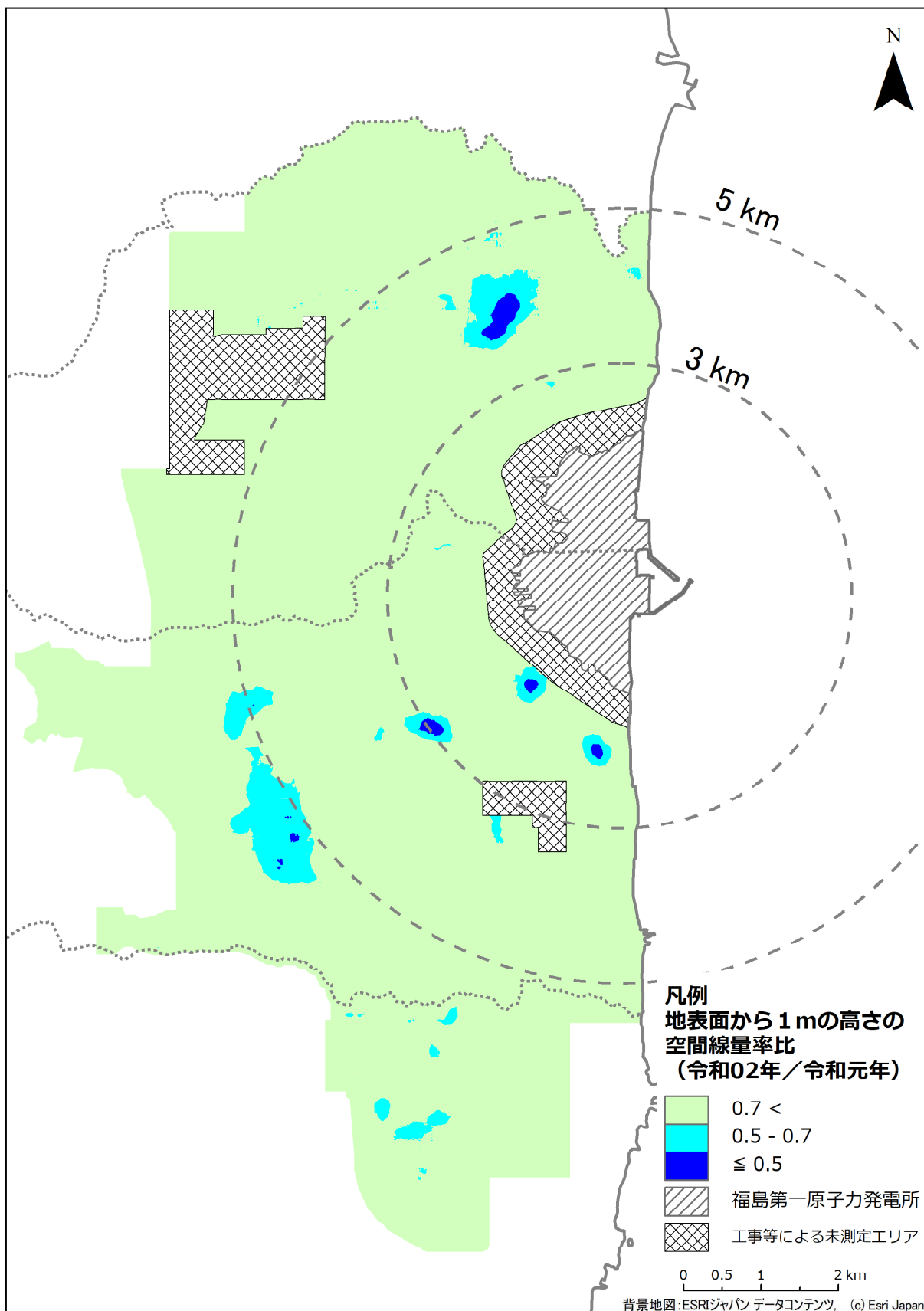


図 3-7 令和元年度に対する令和2年度の無人ヘリサーベイによる空間線量率測定結果の比の分布



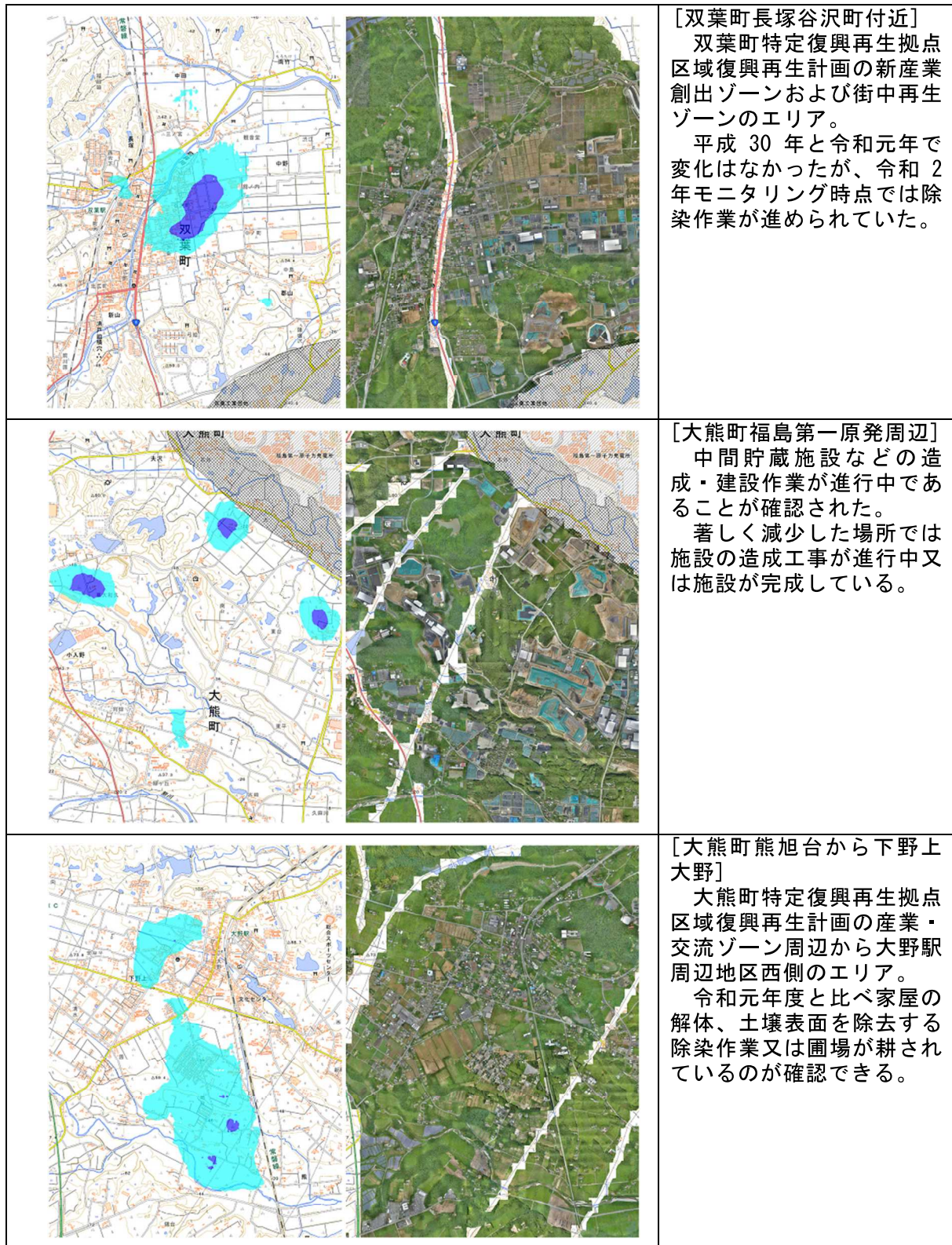


図 3-8 令和元年度から令和2年度にかけて空間線量率が顕著に減少した場所の要因調査  
(左から地理院タイル<sup>®</sup>)に線量マップ(令和2年度/令和元年度)を追記して掲載、地理院タイルに測定中に撮影した写真からオルソ画像(地図と同じく写真上の像の位置ズレをなくし、真上から見たような傾きのない正しい大きさで位置に表示される画像)を作成して掲載。)

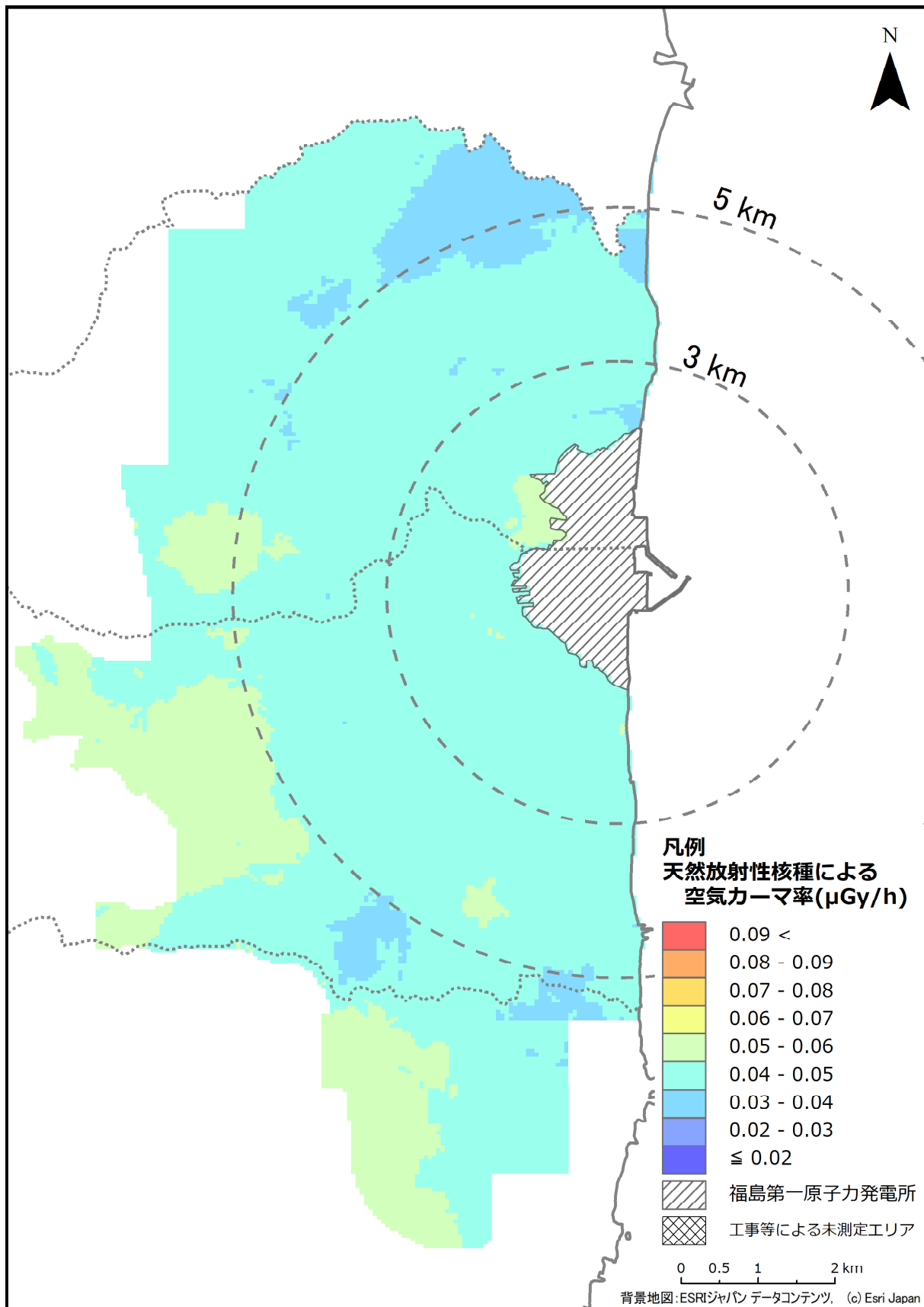
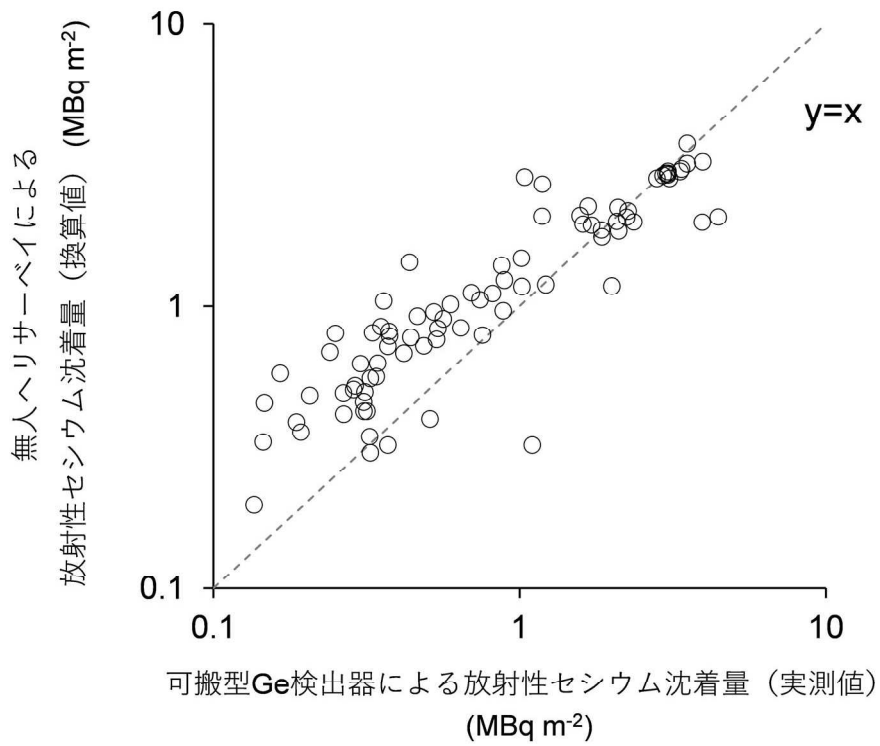


図 3-9 令和 2 年度無人ヘリサーベイにより評価した天然放射性核種による空気カーマ率の分布測定結果



Average : 0.76    Median : 0.44  
Std : 1.89      n : 86

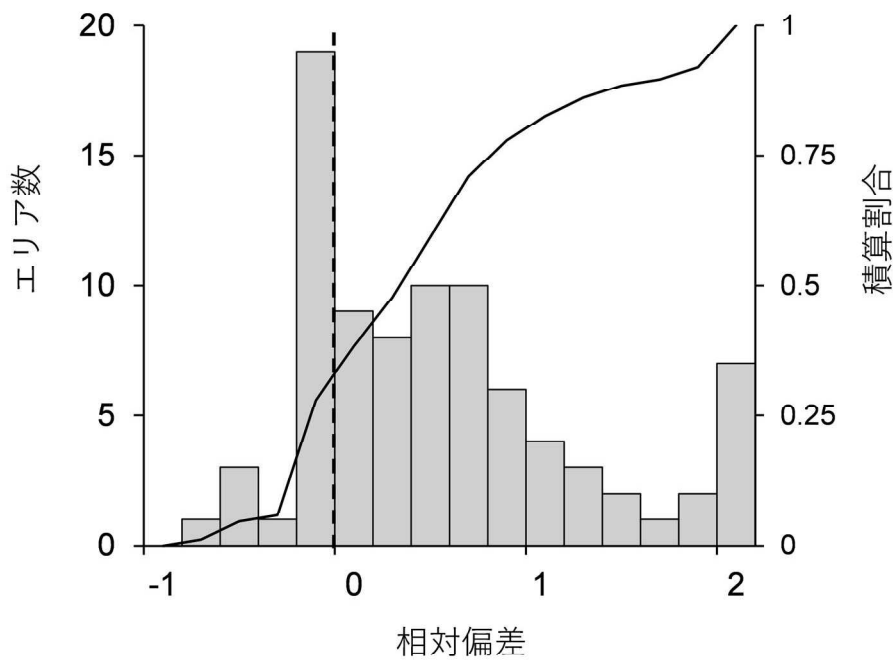


図 3-10 平成 28 年度～平成 30 年度の無人ヘリサーベイによる放射性セシウム沈着量の換算結果と可搬型 Ge 検出器による放射性セシウム沈着量測定結果の比較

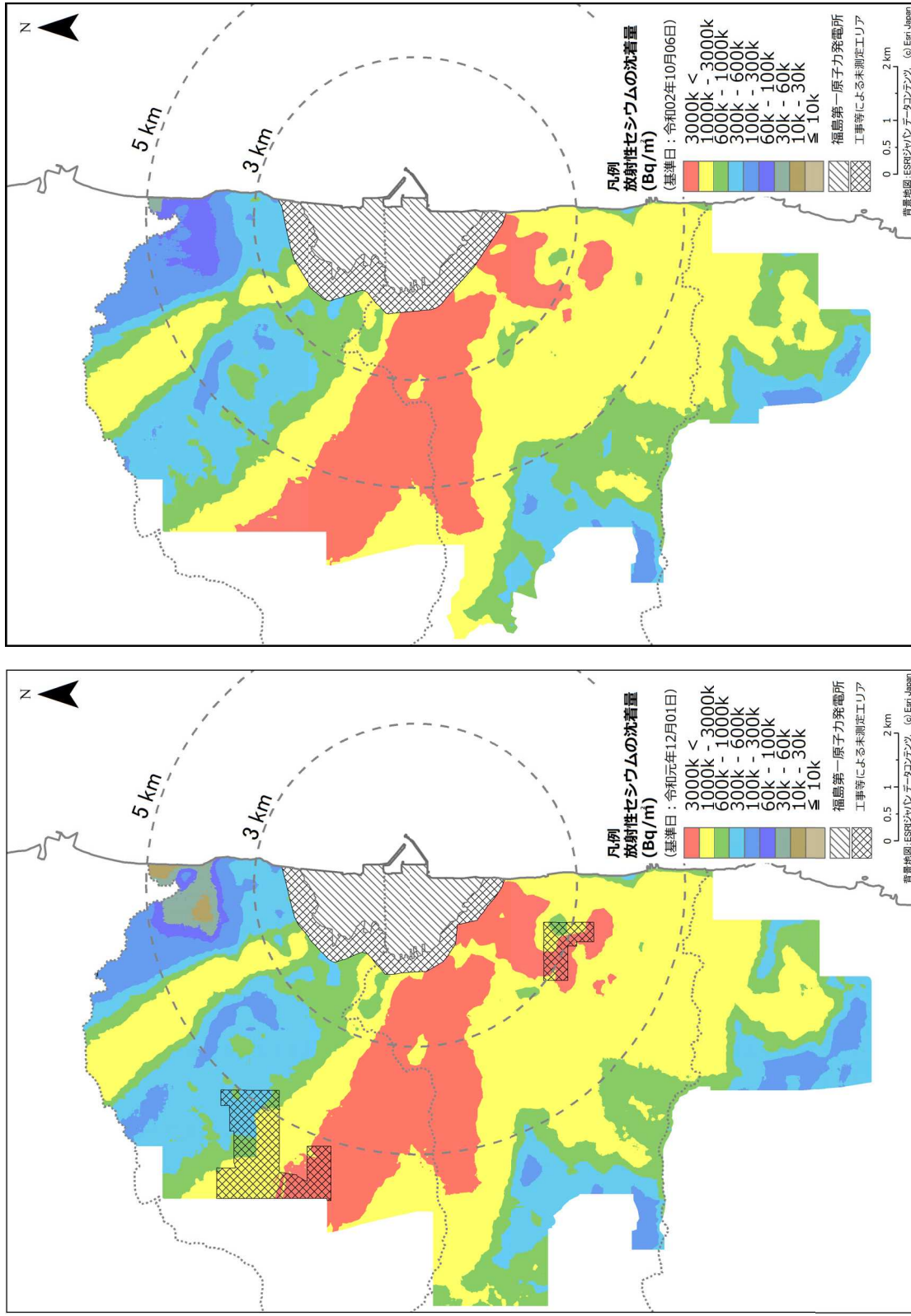


図 3-11 無人ヘリサーベイによる放射性セシウム沈着量分布マップ (左：令和元年度、右：令和2年度)

## 4. 土壌における放射性セシウムの分布状況

### 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 $\beta$ 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<sup>10)</sup>。

#### 4.1.2 調査内容

##### 4.1.2.1 サンプル採取・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 2 年 8 月 18 日～9 月 7 日

土壌の採取は、地表面（0 cm）～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、7.0～10.0 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、（公財）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/cm<sup>2</sup>）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 cm<sup>2</sup>）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）<sup>11)</sup>、重量深度を $\zeta$  (g/cm<sup>2</sup>)、重量深度における放射能濃度を $A_m(\zeta)$  (Bq/kg) とし、式(4) に示す指数関数式<sup>12)</sup>を用いて重量緩衝深度 $\beta$ を解析した。

$$A_m(\zeta) = A_{m,0} \exp(-\zeta/\beta) \quad (4)$$

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 $\beta$ 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 $\beta$ 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。

これまでの深度分布測定において、指数関数的な放射性セシウムの深度分布が経時的な変化によりある深さに放射能濃度のピークを持つ深度分布（図 4-2 (b) 参照）とな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 (5)に示す双曲線正割関数<sup>13)</sup>に基づく近似式を用いて重量緩衝深度 $\beta$ を解析した。

$$A_m(\zeta) = A_{m,0} \cosh(\zeta_0/\beta) \operatorname{sech}\{-(\zeta - \zeta_0)/\beta\} \quad (5)$$

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

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

ここで、 $\zeta_0$ は放射能濃度が最大となる重量深度である。 $A_{m,0}$ 、 $\zeta_0$ 及び $\beta$ 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 (5)は土壤の深部において式 (4) と同じ関数形となる特徴を有しているため、土壤の深部での単位 $\beta$ 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つた場合、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であり、式 (4) の指数関数及び式 (5) の双曲線正割関数で近似することが不適當な場合（一例として図 4-2 (c) 参照；採取箇所 025S035 では、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、 $\beta$ の解析を行わなかつた。

指数関数的な深度分布の場合は、式 (4) が 2 パラメータ ( $A_{m,0}$  及び $\beta$ ) で構成されており、その内の重量緩衝深度 $\beta$ 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、土壤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:  $\text{Bq}/\text{cm}^2$ ）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 (5) が 3 パラメータ ( $A_{m,0}$ 、 $\zeta_0$  及び $\beta$ ) で構成されているため、 $\beta$ 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効的な重量緩衝深度（以下「実効的な重量緩衝深度」といい、略称を $\beta_{\text{eff}}$ とする。）を評価しておくことが土壤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 (5) 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環境中における地上 1 m 高さでの空気カーマへの換算係数<sup>14)</sup>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<sup>15)</sup>を参照）。

重量緩衝深度 $\beta$ は土壤の深度に直接対応せず、放射性セシウムの地中への浸透の度合いを深さ (cm) で示すものではないため、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<sup>16)</sup>を参照のこと。

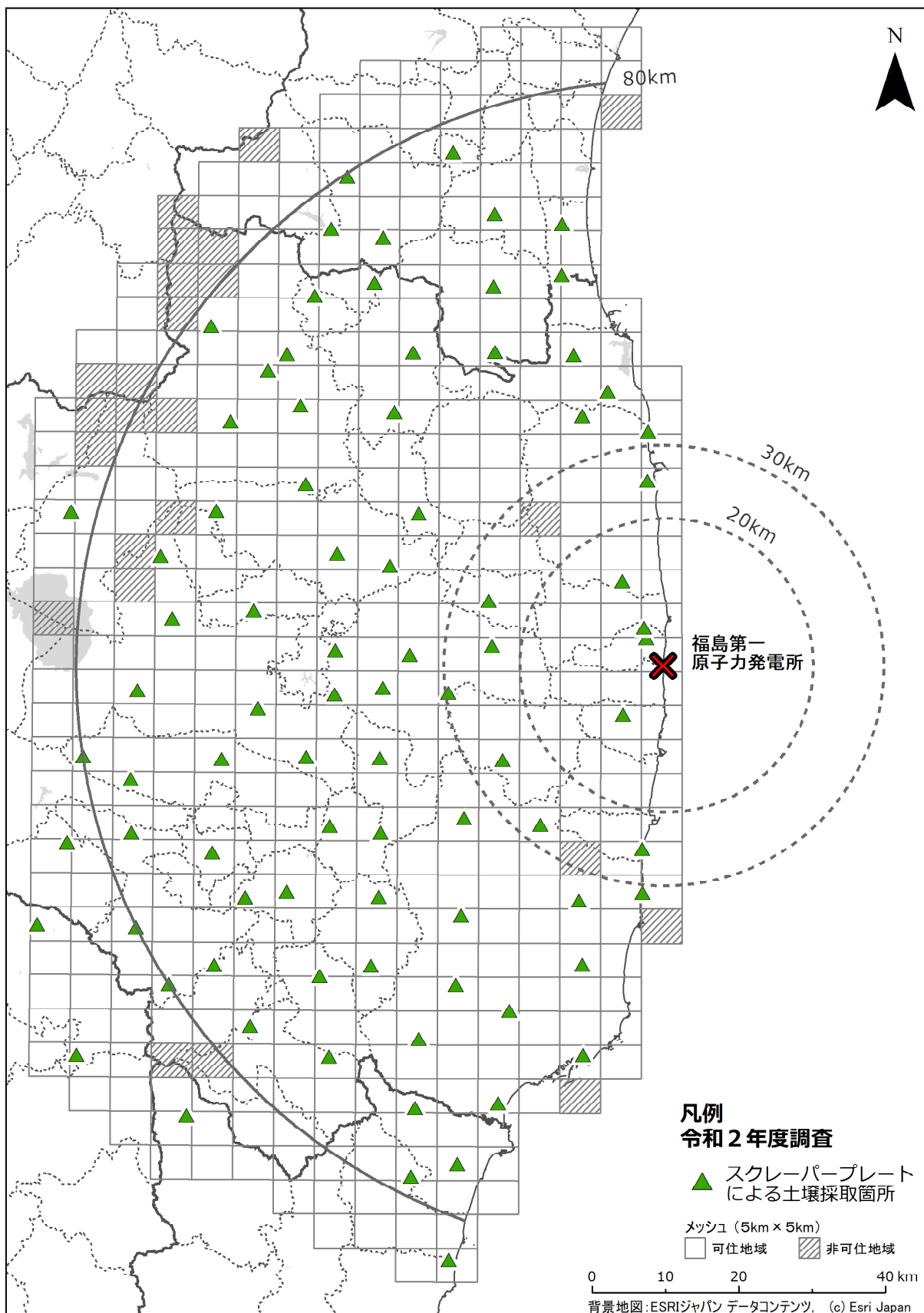


図 4-1 令和2年度の放射性セシウム深度分布調査での土壌採取箇所

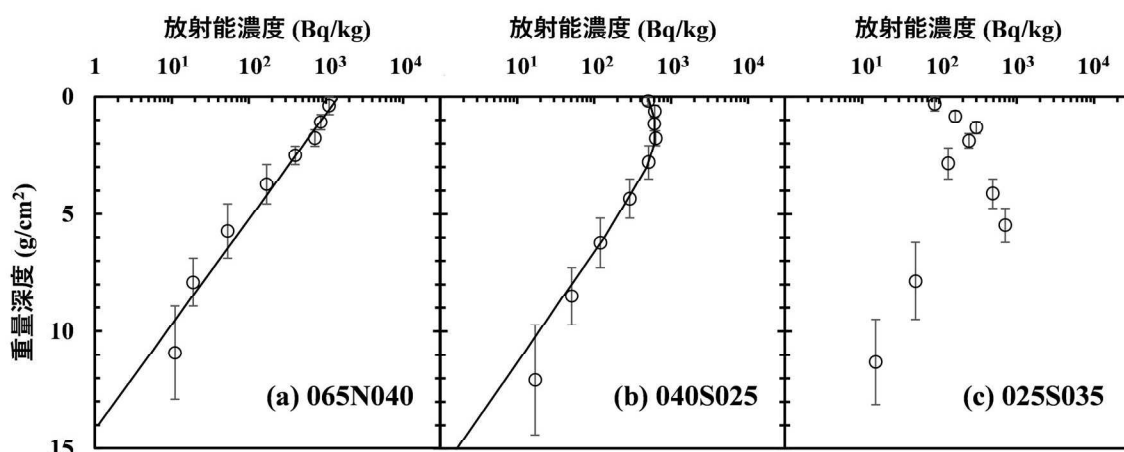


図 4-2 セシウム 137 の深度分布の典型的な例

#### 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 箇所でのセシウム 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 (4) 又は式 (5) を用いて  $\beta$  の解析を行った。85 箇所中、式 (4) を適用した深度分布は 31 箇所、式 (5) を適用した深度分布は 39 箇所であった。なお、令和元年度の調査では式 (5) を適用した深度分布は 36 箇所（全 85 箇所中）で観測されており、全体に占める割合はほぼ同程度であった。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  $\beta$  の解析を行わなかった採取箇所は、15 箇所(000N000、005S040、015N035、020N030、025N000、025S035、030S055、035N000、035N010、040N050、045S055、055N020、055N045、055S030 及び 075S030)であった。(上記、 $\beta$  の解析を行わなかった採取箇所については、付録 1 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 $\beta$

式 (4) 又は式 (5) 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 3.10 g/cm<sup>2</sup> (データ数 n=70)、幾何標準偏差 1.89
- ・最小値 1.07 g/cm<sup>2</sup>、最大値 18.1 g/cm<sup>2</sup>

##### 2) 実効的な重量緩衝深度 $\beta_{eff}$

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 4.12 g/cm<sup>2</sup> (データ数 n= 70)、幾何標準偏差 1.87
- ・最小値 1.07 g/cm<sup>2</sup>、最大値 18.1 g/cm<sup>2</sup>

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 $\beta_{eff}$  (式 (4) 又は式 (5) 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 2 年度の $\beta_{eff}$ の幾何平均値は令和元年度と比べ増加しており、本調査を開始した平成 23 年 12 月から令和 2 年 9 月までの $\beta_{eff}$ の幾何平均値の経時的な変化は、おおよそ一次関数的な増加を示している (図中の点線)。放射性セシウムの土壌中深度分布の変化の度合いは降雨量等による影響を受けるため、年度や季節といった任意の時間間隔で見た場合に $\beta_{eff}$ の増加傾向に偏りが存在する。また、 $\beta_{eff}$ の増加は複数の異なる要因が関わっていると考えられ、今後も一次関数的な増加が継続するかどうかは確かではないが、増加傾向が徐々に小さくなっている様子が見てとれる。一方で、放射性セシウムの土壌中深度分布の変化の度合いは、土壌特性等による影響を受けるため採取箇所により異なっている。 $\beta_{eff}$ の幾何標準偏差は、この土壌特性等による放射性セシウムの鉛直方向移行挙動の差異を反映したものである。

### 3) 90%深度 $L_{90\%}$

平成 23 年 12 月からの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、時間の経過とともに僅かずつ増加 (深さ方向に移動) してきており、令和 2 年 9 月時点での  $L_{90\%}$ の幾何平均値は 5.45 cm であった。

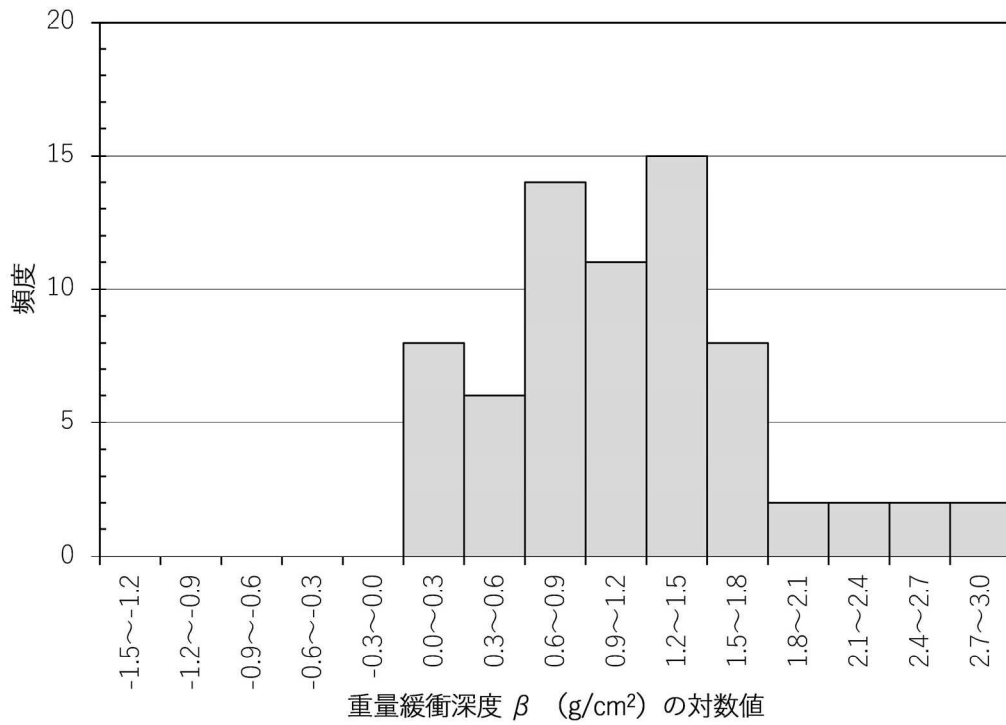


図 4-3 令和 2 年度の深度分布調査による重量緩衝深度 $\beta$ の自然対数値の頻度分布

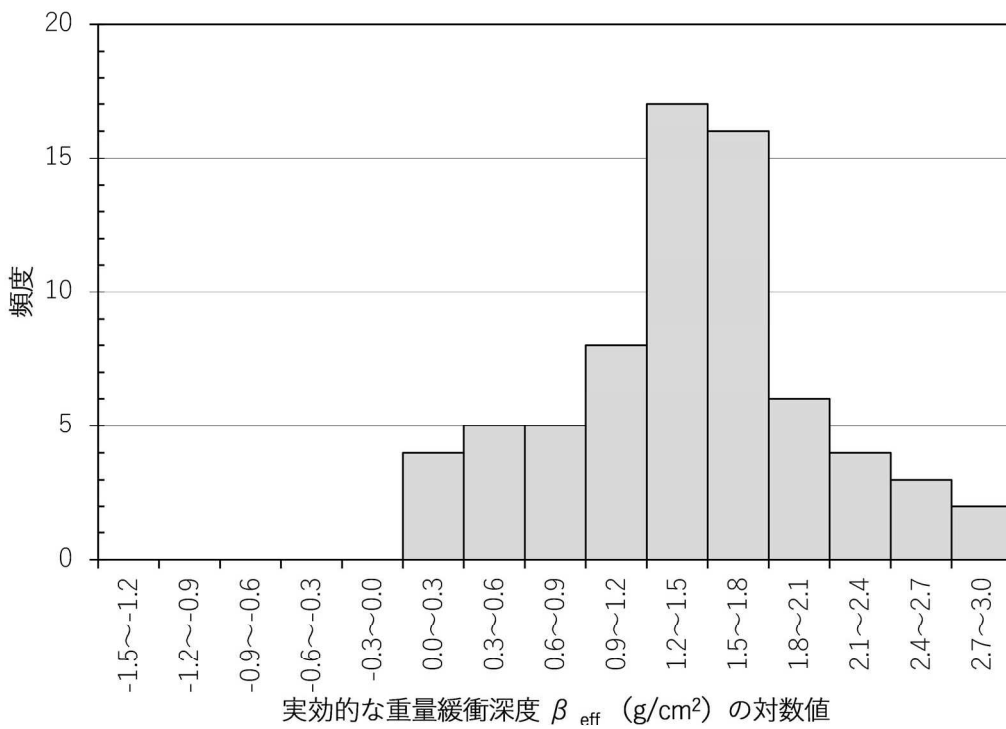


図 4-4 令和 2 年度の深度分布調査による実効的な重量緩衝深度 $\beta_{eff}$ の自然対数値の頻度分布

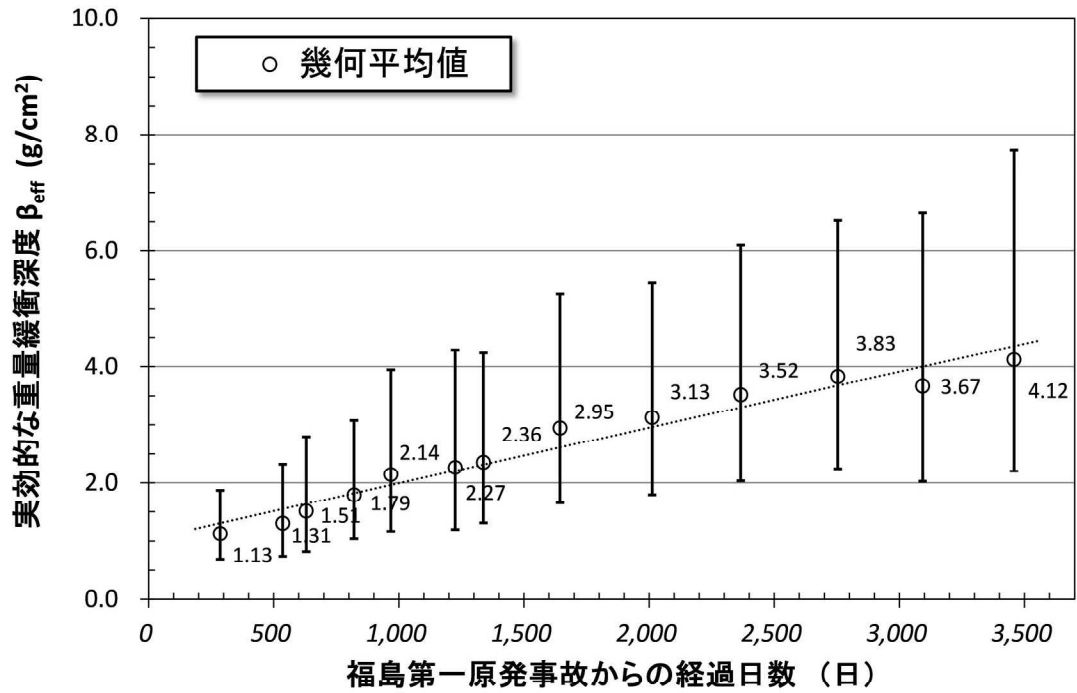


図 4-5 平成 23 年 12 月からの実効的な重量緩衝深度  $\beta_{eff}$  の経時的な変化  
 (誤差棒は幾何標準偏差を示す。破線は幾何平均値の経時変化を直線フィッティングした結果である。)

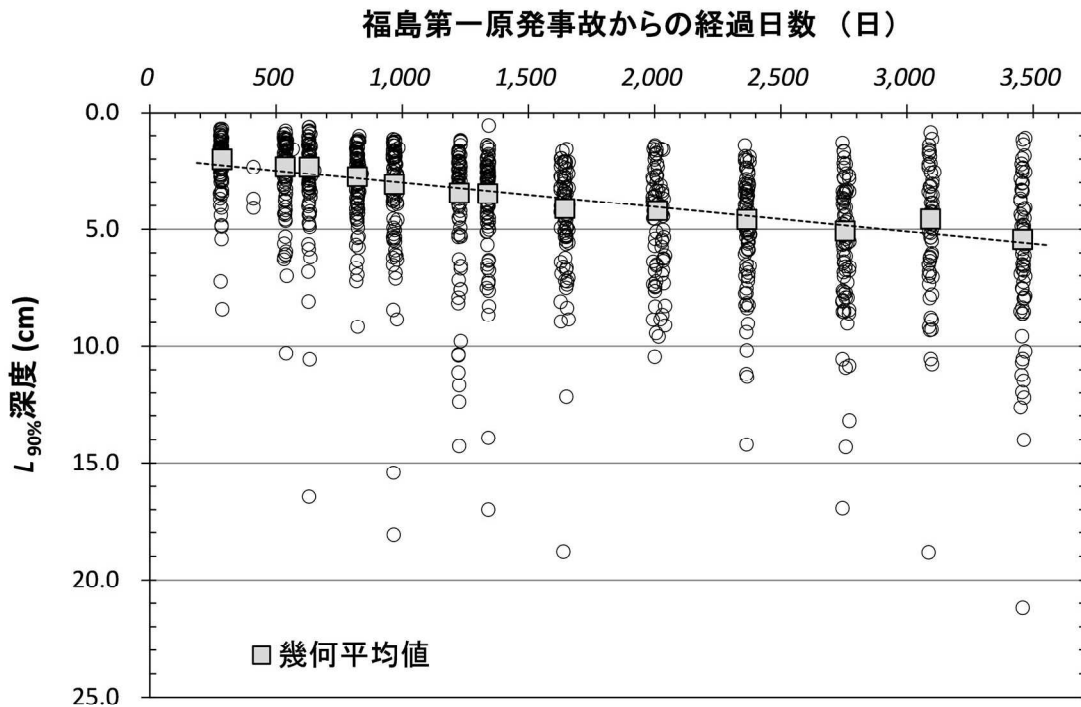


図 4-6 平成 23 年 12 月からの 90% 深度  $L_{90\%}$  及びその幾何平均値の経時的な変化  
 (破線は幾何平均値の経時変化を直線フィッティングした結果である。)

#### 4.1.4 セシウム沈着量から空間線量率への換算係数に関する検証

##### 4.1.4.1 調査目的

異なる重量緩衝深度におけるセシウム沈着量から周辺線量当量率（以下「空間線量率」という。）への換算係数  $CF$  がモンテカルロシミュレーションによって与えられている<sup>17)</sup>（図 4-7 参照）。この  $CF$  は放射性セシウム濃度が地表から深部にかけて指数関数的に減少し、均一な土壌組成を持った環境を想定している。しかし、実環境では前章のように放射性セシウム濃度ピークが下方へと浸透しているケースや、土壌組成が異なるケースが考えられる。本項では、スクレーパープレートによる深度分布調査を行った各地点で得られた実効的な重量緩衝深度  $\beta_{eff}$  に対する  $CF$  を用いて NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータで測定した地上 1 m 高さの空間線量率から各地点のセシウム 137 沈着量を推定した。一方、同じ地点で採取した各深度別の採取面積当たりの土壌重量、据置型のゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリーで測定した土壌試料中セシウム 137 放射能濃度から計算したセシウム 137 沈着量（単位面積あたりの放射エネルギー (Bq/m<sup>2</sup>) の全層の積算値と比較することで換算係数の検証を試みた。なお、ICRU が推奨している重量緩衝深度  $\beta$ （以下「ICRU 推奨  $\beta$ 」という。）<sup>12)</sup> を適用し同様の比較評価を行った。

##### 4.1.4.2 調査内容

###### 1) 解析対象データ

調査対象期間は、平成 23 年 12 月 12 日～令和 2 年 9 月 7 日（計 13 回調査）とした。比較検討の解析に用いたデータは以下のとおりである（下記データは各測定地点で異なる）。

###### (A) サーベイメータによる空間線量率と文献<sup>17)</sup>の換算係数に基づく沈着量評価

- ・ 文献<sup>17)</sup>のセシウム 134 又はセシウム 137 沈着量からセシウム 134 又はセシウム 137 による空間線量率への換算係数  $CF$ （以下、それぞれ  $CF_{Cs134}$  及び  $CF_{Cs137}$ ；単位はいずれも ( $\mu\text{Sv/h}$ )/(MBq/m<sup>2</sup>)）
- ・ 土壌採取地点で NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータを用いて測定した地上 1 m 高さの空間線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )
- ・ 土壌採取地点で得た実効的な重量緩衝深度  $\beta_{eff}$   
放射性セシウムの下方浸透や土壌かく乱に由来する  $\beta_{eff}$  のばらつきが  $\beta_{eff}$  に対する換算係数  $CF_{Cs137, \beta_{eff}}$  に与える影響を評価するため、各地点の  $\beta_{eff}$  は放射性セシウムの土壌深度分布のタイプ（指数関数型、ピーク型、かく乱型）に依らず、全てを評価対象とした。
- ・ ICRU 推奨  $\beta$ <sup>12) a</sup>

###### (B) 採取土壌の実測に基づく沈着量評価

- ・ 各層の土壌密度
- ・ 各層の採取厚み

---

a セシウム 137 のフォールアウトから 0～1 年は 1.0、1～5 年は 3.0、5～20 年は 10.0。

- ・ 据置型のゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリーで評価した土壌試料中セシウム 137 放射能濃度
- ・ 土壌密度とセシウム 137 放射能濃度に基づくセシウム 137 沈着量

2) 各地点の重量緩衝深度に対する、沈着量から空間線量率への換算係数

$CF_{Cs134}$  及び  $CF_{Cs137}$ <sup>17)</sup>を基に式(6)及び(7)により補間することで各地点の $\beta_{eff}$ に対する換算係数  $CF_{Cs134,\beta_{eff}}$  及び  $CF_{Cs137,\beta_{eff}}$  を求めた<sup>18)</sup>。

$$CF_{Cs134,\beta_{eff}} = 10^{\left\{ \log CF_{Cs134,\beta_1} + \frac{(\log CF_{Cs134,\beta_2} - \log CF_{Cs134,\beta_1})(\log \beta_{eff} - \log \beta_1)}{(\log \beta_2 - \log \beta_1)} \right\}} \quad (6)$$

$$CF_{Cs137,\beta_{eff}} = 10^{\left\{ \log CF_{Cs137,\beta_1} + \frac{(\log CF_{Cs137,\beta_2} - \log CF_{Cs137,\beta_1})(\log \beta_{eff} - \log \beta_1)}{(\log \beta_2 - \log \beta_1)} \right\}} \quad (7)$$

ここで、 $CF_{Cs134,\beta_1}$  及び  $CF_{Cs134,\beta_2}$  は $\beta_1$  及び $\beta_2$ における $CF_{Cs134}$ 、 $CF_{Cs137,\beta_1}$  及び  $CF_{Cs137,\beta_2}$  は $\beta_1$  及び $\beta_2$ における $CF_{Cs137}$ 、 $\beta_1$  及び $\beta_2$ は、文献<sup>17)</sup>に数値の記載がある $\beta$  (0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0, 10.0, 20.0, 30.0, 50.0, 100.0 ; 単位は g/cm<sup>2</sup>)。  $\beta_1$  は $\beta_{eff}$ よりも小さく $\beta_2$ は $\beta_{eff}$ よりも大きい。 $\beta_1$ が0の際の $CF_{Cs134,\beta_1}$  及び  $CF_{Cs137,\beta_1}$  は、 $\beta_1$ が $1.0 \times 10^{-6}$  g/cm<sup>2</sup>の際の $CF_{Cs134,\beta_1}$  及び  $CF_{Cs137,\beta_1}$  と同等と定義した。設定した $\beta$ の範囲 ( $1.0 \times 10^{-6} \sim 100.0$ ) に鑑み、 $\beta_{eff}$ が100以下のデータのみ換算係数を算出した (データ数 n=1,080)。なお、セシウム 137 のフォールアウトから0~1年、1~5年及び5~20年におけるICRU推奨 $\beta$ はそれぞれ1.0, 3.0及び10.0 g/cm<sup>2</sup>であり<sup>12)</sup>、その時の $CF_{Cs134}$  及び  $CF_{Cs137}$ を用いた。

3) サーベイメータによる空間線量率と  $CF$ に基づく土壌中セシウム 137 沈着量の推定

各地点で NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータで測定した空間線量率と得られた実効的な重量緩衝深度 $\beta_{eff}$ に対応した $CF_{Cs137}$ に基づき、セシウム 137 沈着量を推定する。空間線量率と放射性セシウム沈着量の関係は、式(8)で表される。

$$D_{Cs134} + D_{Cs137} = CF_{Cs134} I_{Cs134}' + CF_{Cs137} I_{Cs137}' \quad (8)$$

ここで、

$D_{Cs134}$  及び  $D_{Cs137}$ : セシウム 134 及びセシウム 137 の空間線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )

$CF_{Cs134}$  及び  $CF_{Cs137}$ : 各地点の $\beta_{eff}$ 及びICRU推奨 $\beta$ にそれぞれ対応した  $CF$

$I_{Cs134}'$  及び  $I_{Cs137}'$ : 空間線量率と  $CF$ を基に推定したセシウム 134 及びセシウム 137 沈着量 (MBq/m<sup>2</sup>)

放射性セシウム由来の空間線量率を算出するためには、全放射性核種由来の空間線量率から天然放射性核種由来の空間線量率を差し引く必要がある。放射性セシウム由来の空間線量率は式(9)により求めた。

$$D_{Cs134} + D_{Cs137} = D_{1m} - D_{BG} \quad (9)$$

ここで、

$D_{1m}$ : 土壌採取地点で NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータを用いて測定した地上 1 m 高さの空間線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )

$D_{BG}$ : 航空機モニタリングで得られた土壌採取地点における天然放射性核種由来の空間線量率<sup>19)</sup> ( $\mu\text{Sv/h}$ )

式(8)の中で  $I_{137\text{Cs}}$  に関して以下のように式を簡略化する。

$$I_{\text{Cs134}}' = I_{\text{Cs137}}'/R(t) \quad (10)$$

$$R(t) = A_{\text{Cs137}}(t)/A_{\text{Cs134}}(t) \quad (11)$$

$$A_{\text{Cs137}}(t) = A_{\text{Cs137},0} \exp(-(\ln 2/T_{\text{Cs137}})t) \quad (12)$$

$$A_{\text{Cs134}}(t) = A_{\text{Cs134},0} \exp(-(\ln 2/T_{\text{Cs134}})t) \quad (13)$$

ここで、

$R(t)$ :  $A_{\text{Cs134}}(t)$  に対する  $A_{\text{Cs137}}(t)$  の比

$A_{\text{Cs137}}(t)$  及び  $A_{\text{Cs134}}(t)$ : セシウム 137 のフォールアウトからの経過時間  $t$  (y) におけるセシウム 137 及びセシウム 134 の放射能 (Bq)

$A_{\text{Cs137},0}$  及び  $A_{\text{Cs134},0}$ : セシウム 137 のフォールアウト直後におけるセシウム 137 及びセシウム 134 の放射能 (Bq)

$T_{\text{Cs137}}$  及び  $T_{\text{Cs134}}$ : セシウム 137 及びセシウム 134 の半減期 (y)

最終的に式(14)によりセシウム 137 の沈着量を推定する。

$$I_{\text{Cs137}}' = (D_{1m} - D_{BG}) / ((CF_{\text{Cs134}}/R(t)) + CF_{\text{Cs137}}) \quad (14)$$

ここで初期の放射能である  $A_{\text{Cs137},0}$  と  $A_{\text{Cs134},0}$  は等しいと定義した<sup>20)</sup>。推定したセシウム 137 沈着量の妥当性は上記(B)のデータセットで計算した積算沈着量との比較により検証した。式(15)の相対偏差  $RD2$  により検証した。

$$RD2 = (I_{\text{Cs137}}' - I_{\text{Cs137}}) / I_{\text{Cs137}} \quad (15)$$

ここで、 $I_{\text{Cs137}}$  は土壌試料中セシウム 137 の積算沈着量 ( $\text{MBq/m}^2$ ) である。また、 $I_{\text{Cs137}}'$  は式(16)により算出される。

$$I_{\text{Cs137}} = \sum_{i=1}^n (A_{\text{Cs137},i} \rho_i d_i) \quad (16)$$

ここで、

$A_{\text{Cs137},i}$ : 各層 (深度) のセシウム 137 放射能濃度 ( $\text{Bq/kg}$ )

$\rho_i$ : 各層 (深度) の土壌密度 ( $\text{g/cm}^3$ )

$d_i$ : 各層 (深度) の厚み (cm)

$n$ : 土壌層の数 (8-9)

また、 $\rho_i$  は次式(17)により算出される。

$$\rho_i = w_i / (s d_i) \quad (17)$$

ここで、

$w_i$ : 各層（深度）の土壌重量（g）

$s$ : スクレーパープレートによる土壌採取面積（ $\text{cm}^2$ ）

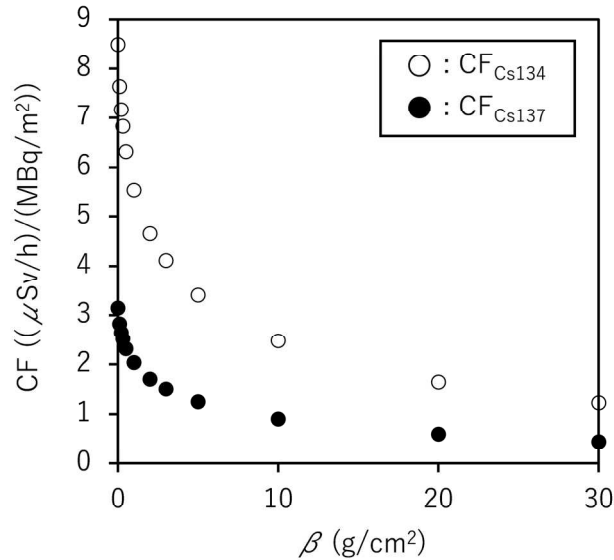


図 4-7  $\beta$ に対する沈着量から空間線量率への換算係数の変化<sup>17)</sup>

（ $CF_{Cs134}$  及び  $CF_{Cs137}$  は、それぞれセシウム 134 及びセシウム 137 沈着量からセシウム 134 及びセシウム 137 空間線量率への換算係数）

#### 4.1.4.3 調査結果

##### 1) 実効的な重量緩衝深度 $\beta_{eff}$

土壌深度分布のタイプ（指数関数型、ピーク型、かく乱型）に依らず評価した $\beta_{eff}$ を図 4-8 に示す。図 4-8 より、 $\beta_{eff}$ は増加傾向にあることが分かった。また、かく乱等の影響により突出した数値が一部の地点で観測された。

##### 2) $\beta_{eff}$ に対応する換算係数

各地点の $\beta_{eff}$ に対応する  $CF_{Cs137, \beta_{eff}}$  を図 4-9 に示す。 $\beta_{eff}$ は地点ごとにばらつきが大きかったが（図 4-8）、 $\beta$ が 10 以上の場合の  $CF$ の差は非常に小さい（図 4-7）。 $CF_{Cs137, \beta_{eff}}$ を用いることで、 $\beta_{eff}$ のばらつきの影響を抑えるとともに放射性セシウムの深度分布を考慮して平均的な放射性セシウム沈着量と空間線量率との関係性を表すことができるといえる。

##### 3) 空間線量率から $\beta_{eff}$ と換算係数を基に推定したセシウム 137 沈着量

各地点の空間線量率から、 $\beta_{eff}$ 又は ICRU 推奨 $\beta$ を用いて算出したセシウム 137 沈着量と実測した土壌試料中セシウム 137 沈着量を比較して、それぞれ図 4-10 と図 4-11 に示した。ICRU 推奨 $\beta$ を適用した際に比べ、各地点の $\beta_{eff}$ を適用した方が、相対偏差の 50 パーセント値が 0 に近く、75 パーセント値が小さい傾向にあり、各地点の土壌中放射性セシウム深度分布

の情報を反映することで、より精度よく放射性セシウム沈着量を推定できることを示唆している。さらに、この結果は、文献 17) の換算係数が、その計算の前提としている障害物のない平面に、かつ、深さ方向に指数関数的に濃度が減少する分布とは異なる実環境の条件下であっても適用できること、即ち、環境条件の変化に対して堅牢であることを示している。また、福島における  $\beta_{\text{eff}}$  は、ICRU 推奨  $\beta$  に比べ低い傾向にあり (図 4-5 と p. 49 の脚注を参照)、ICRU 推奨  $\beta$  の基となった深度分布データが得られたチェルノブイリでは、有機物による放射性セシウムの土壌中粘土鉱物への吸着が阻害されるのに対し、福島では放射性セシウムが粘土鉱物に吸着されやすい<sup>21)</sup>ことが要因の一つとして挙げられる。

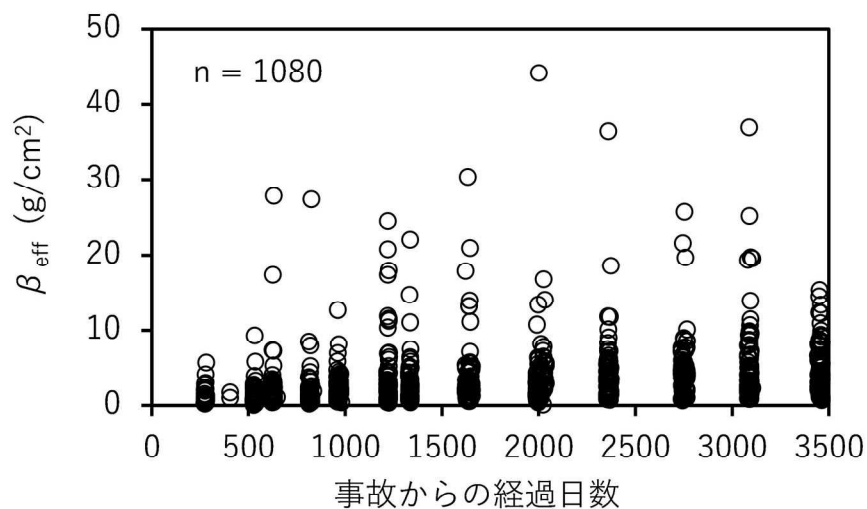


図 4-8 平成 23 年 12 月からの実効的な重量緩衝深度  $\beta_{\text{eff}}$  の変化傾向  
(n はデータ数を意味する)

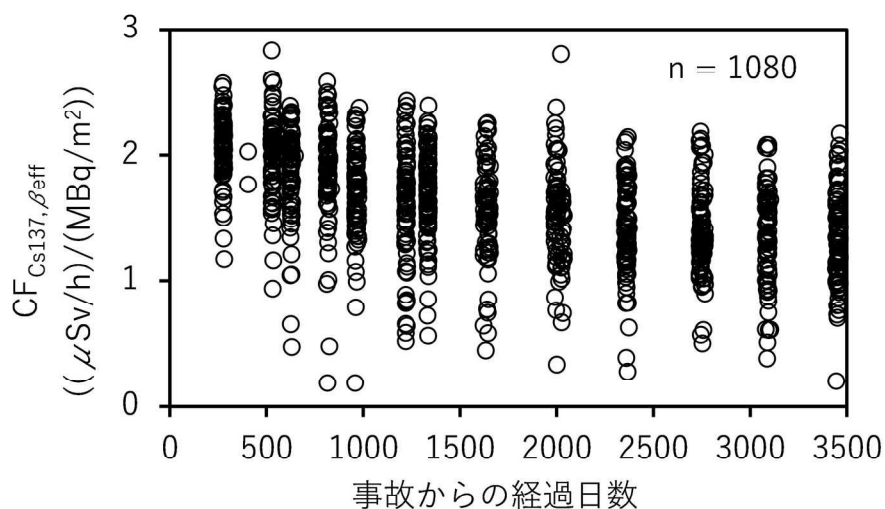


図 4-9 平成 23 年 12 月からの  $CF_{\text{Cs137}, \beta_{\text{eff}}}$  の変化傾向  
(n はデータ数を意味する)



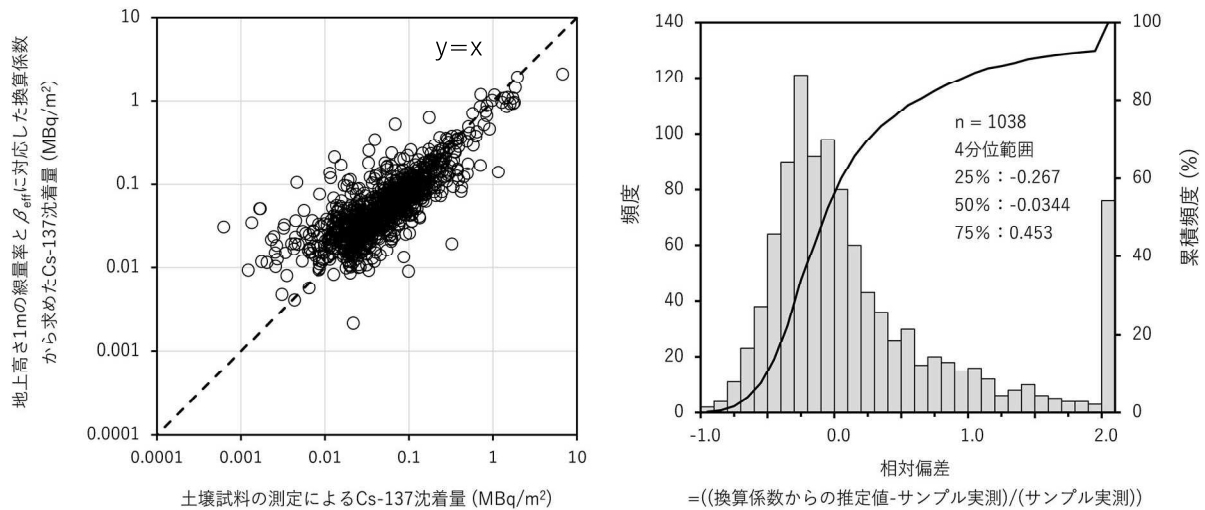


図 4-10 空間線量率と  $CF_{Cs137,eff}$  を基に推定したセシウム 137 沈着量と土壤試料中セシウム 137 積算沈着量との関係

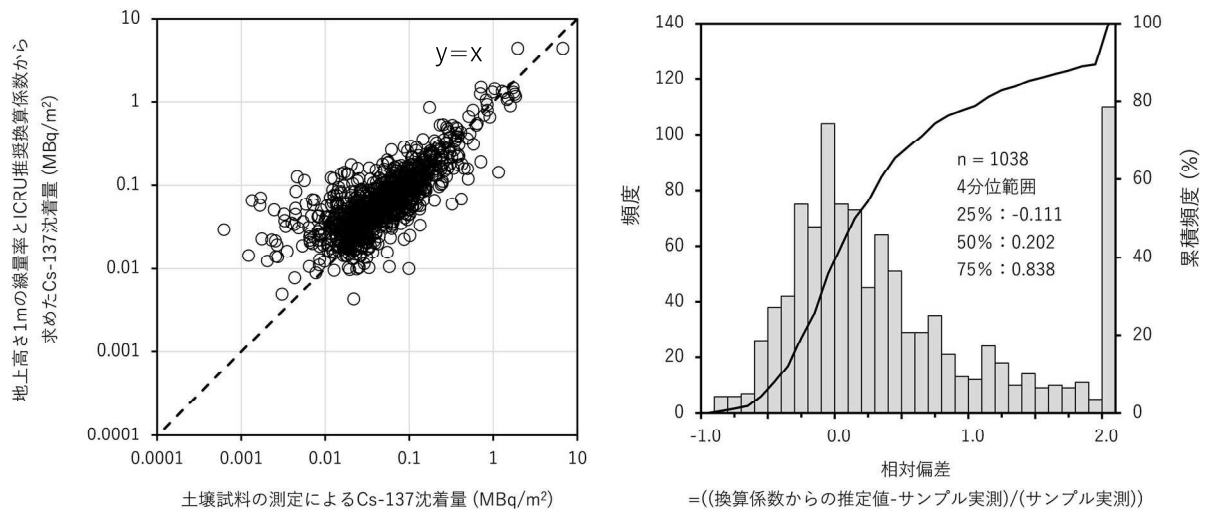


図 4-11 空間線量率と ICRU 推奨  $\beta$  に基づく  $CF_{Cs137}$  を基に推定したセシウム 137 沈着量と土壤試料中セシウム 137 積算沈着量との関係

## 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）の地域を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 2 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 4-12 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 2 年 8 月 6 日～10 月 15 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/m<sup>2</sup>）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<sup>22)</sup>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<sup>12)</sup>を参照した。また、in-situ 測定によるデータ解析で使用する重量緩衝深度には、4.1 節に示した土壌深度分布調査によって導出した実効的な重量緩衝深度 $\beta_{eff}$ の幾何平均値（4.12 g/cm<sup>2</sup>）を用いた。

#### 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も測定を行い、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 53<sup>12)</sup>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 4-13）。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。

#### 4.2.2.3 放射性セシウムの土壌沈着量分布マップの細密化

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の仮定の下、過去の調査において、かく乱の少ない平坦地では土壌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いる。そこで、in-situ 測定を行った 383 箇所でも 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 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 4,846 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 4,846 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前提で、この空間線量率から評価した沈着量を in-situ 測定による土壌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壌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。

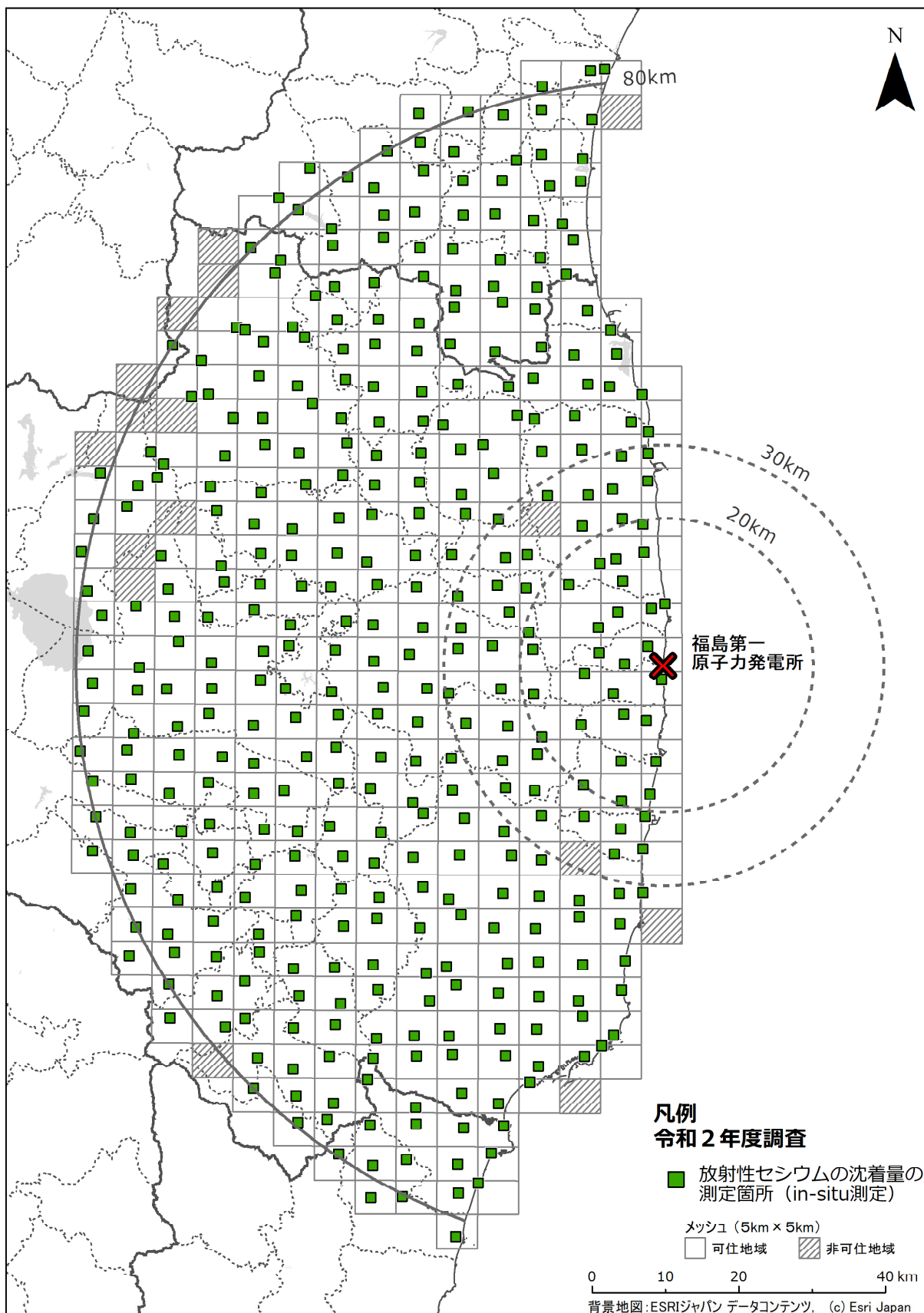


図 4-12 令和2年度の可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定による放射性セシウム沈着量の測定箇所

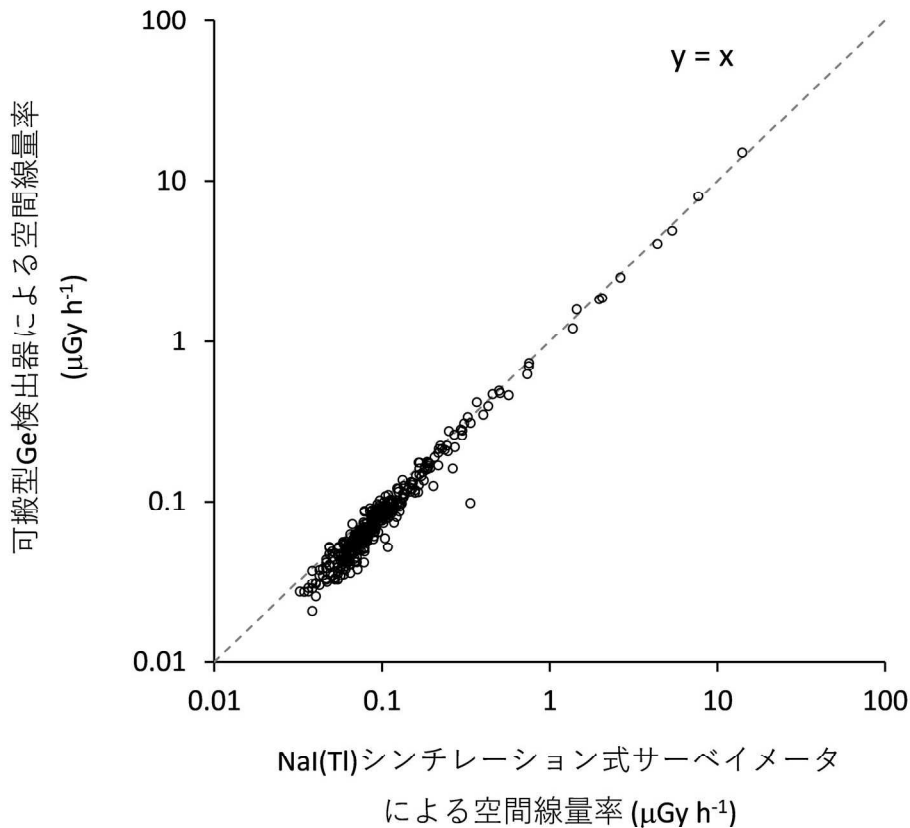


図 4-13 可搬型 Ge 検出器による in-situ 測定の結果を基に求められた空間線量率と NaI(Tl) シンチレーション式サーベイメータによる空間線量率の相関

#### 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 4-14 に示す。なお、令和 2 年度調査については令和 2 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 $\beta_{eff}$ の幾何平均値 (4.12 g/cm<sup>2</sup>) を用いたが、重量緩衝深度の分布 (10–90 パーセントイル) に起因する沈着量評価値の不確かさは最大約 58%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 2 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るわけではない。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  $\mu\text{Sv/h}$  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  $\mu\text{Sv/h}$  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 4-15 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 4-15 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： $\text{Bq/m}^2$ ）の相関関係を定点サーベイにより測定された 4,846 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。

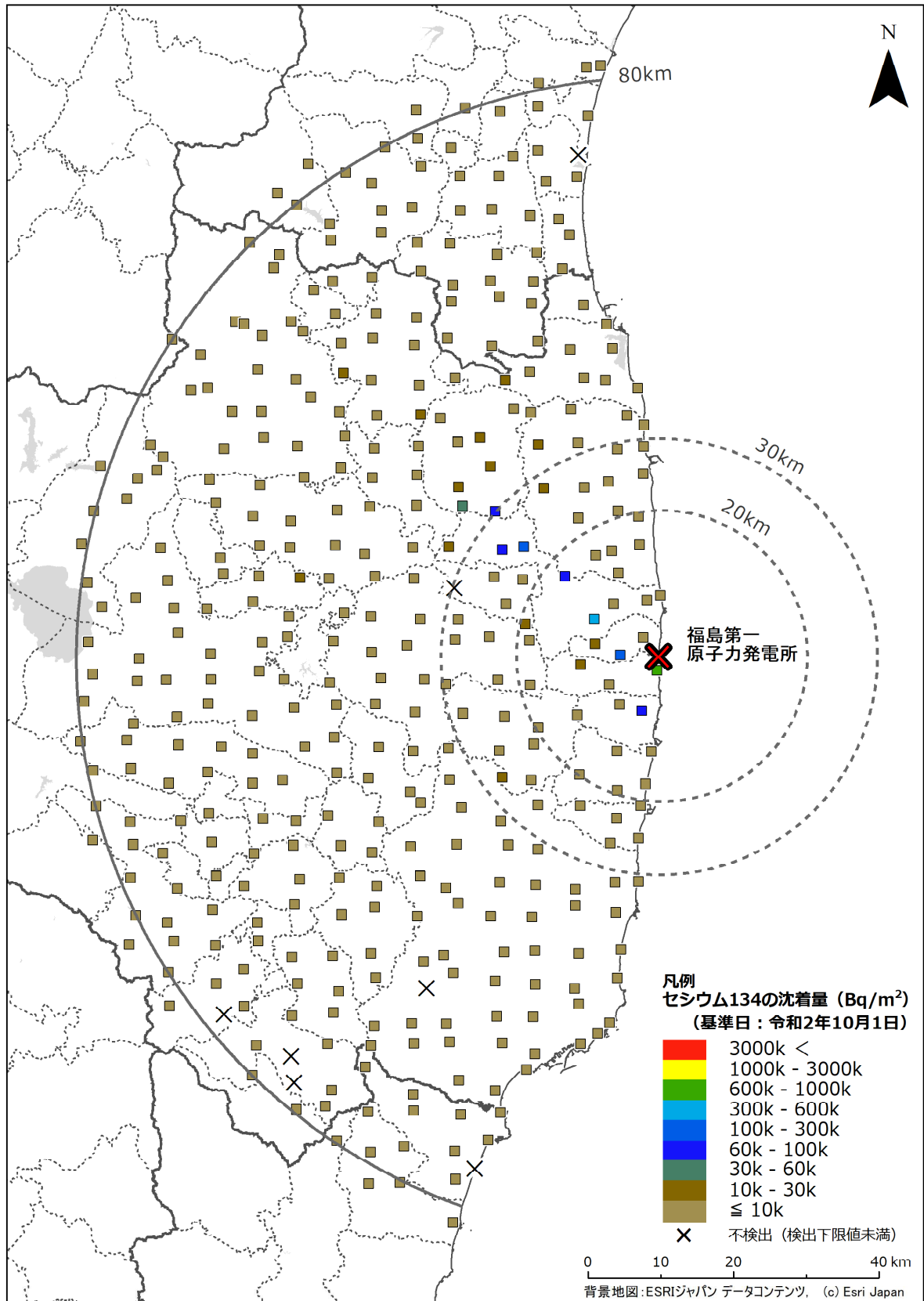
本手法による土壌沈着量分布マップの細密化の妥当性を確認するために、in-situ 測定による沈着量と最近傍の空間線量率から評価した沈着量を比較した。比較は、散布図による比較及び相対偏差のヒストグラムによる比較を行った。相対偏差  $RD3$  を式(18)のように定義する。

$$RD3 = (CD - C) / C \quad (18)$$

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。

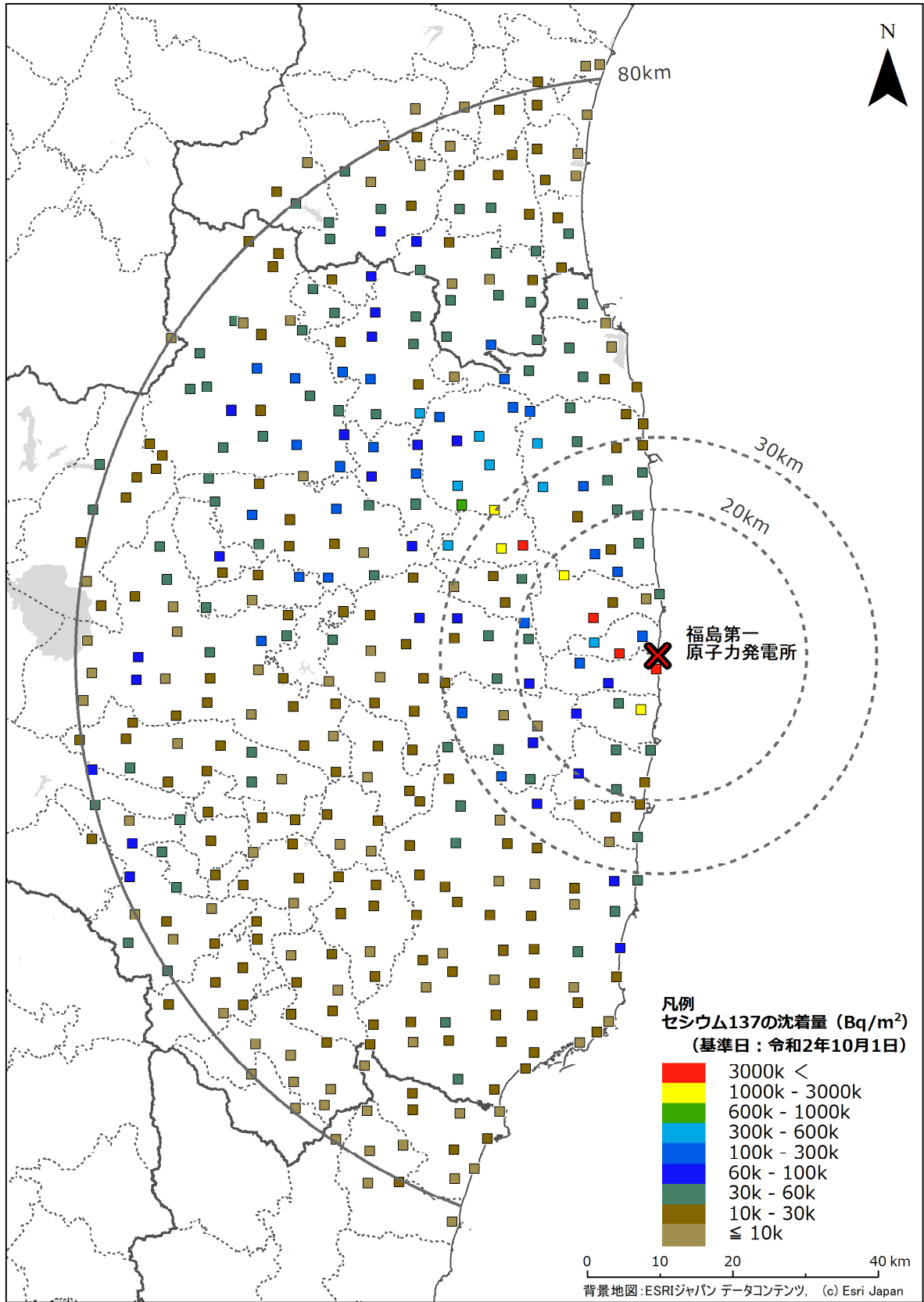
図 4-16 (a) に示した全データによる散布図を見るとプロットは 1:1 の直線の周辺に分布し、全体的にはよい相関性が確認できるものの、低い沈着量の領域のプロットのばらつきは大きいことがわかる。相対偏差のヒストグラムを見ると、分布の形状は 0 付近を頂点にした正規分布に近いものの、空間線量率から評価した沈着量が in-situ 測定による沈着量の 2 倍以上を示す点が 25%以上確認された。図 4-15 に見られたように低線量域でばらつきが大きく、空間線量率から評価した沈着量が in-situ 測定による沈着量を過大評価しているものと考えられる。定点サーベイの地点と in-situ 測定地点の最近傍点が 20 m 以内のデータのみで処理したグラフを図 4-16 (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 4-17 に示す。平成 23 年度調査から令和 2 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 4-18 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。約 115 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 4-14 令和2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 4-14 令和 2 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)



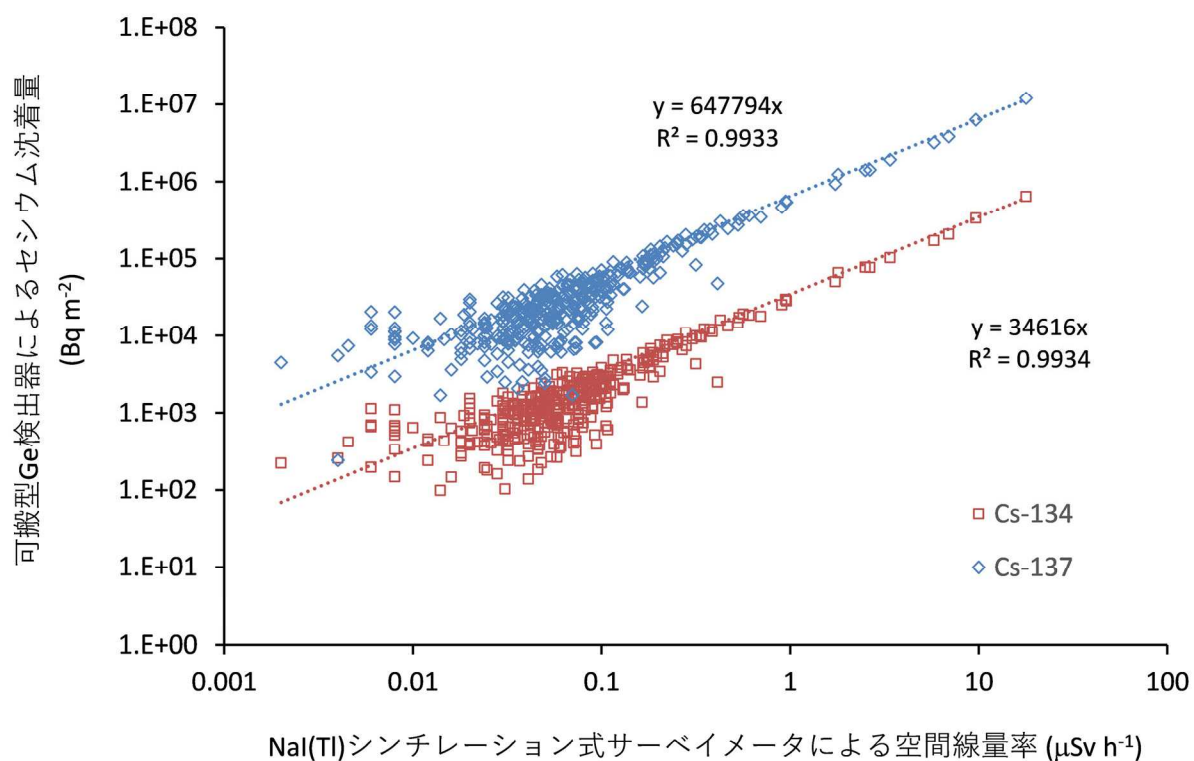


図 4-15 NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータによる地表面から 1 m 高さの空間線量率と可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定による放射性セシウム沈着量の相関

(□: 空間線量率とセシウム 134 沈着量との相関 (データ数 n= 376)、◇: 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。)

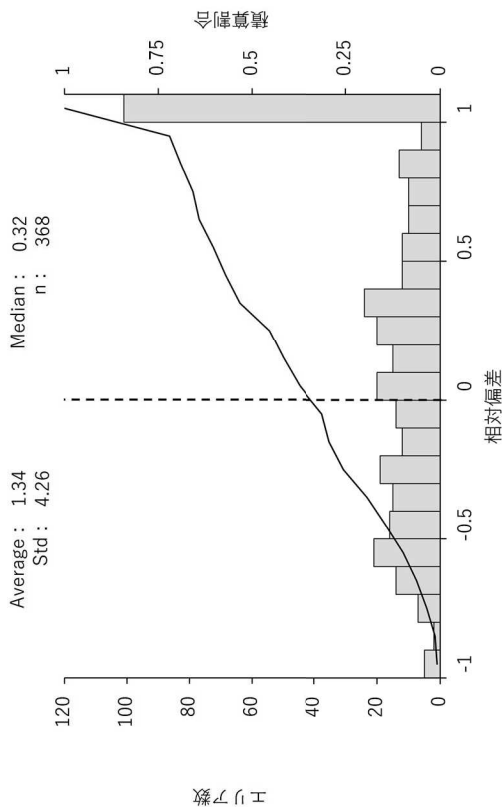
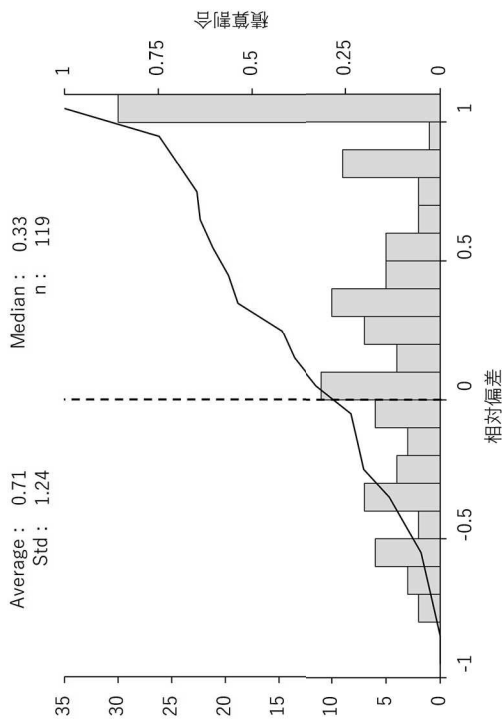
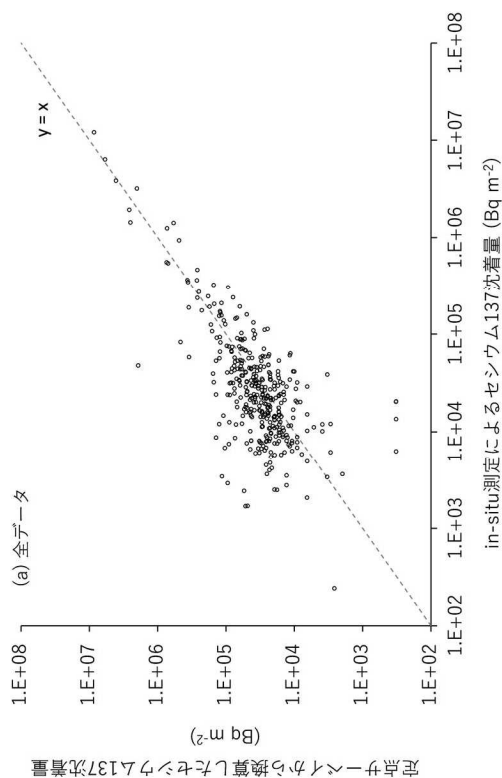
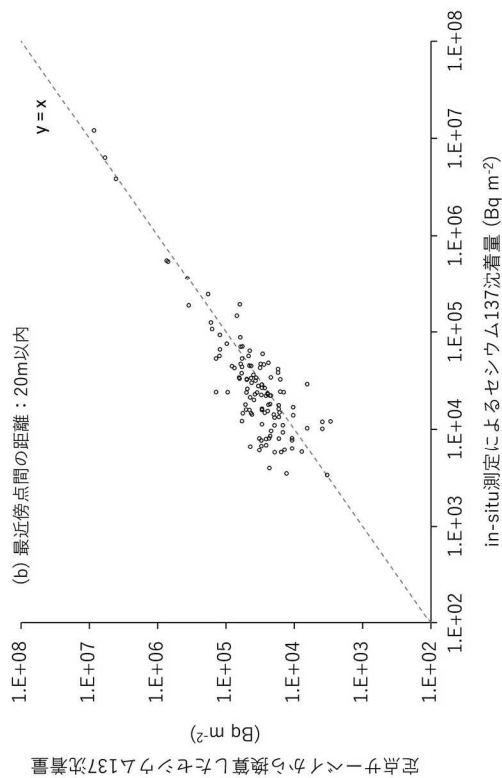


図 4-16 可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定による沈着量と定検サーベイ最近傍点における NaI(Tl) シンチレーション式サーベイメータによる空間線量率から評価したセシウム 137 沈着量の比較

(Std は標準偏差、n はデータ数を意味する。)

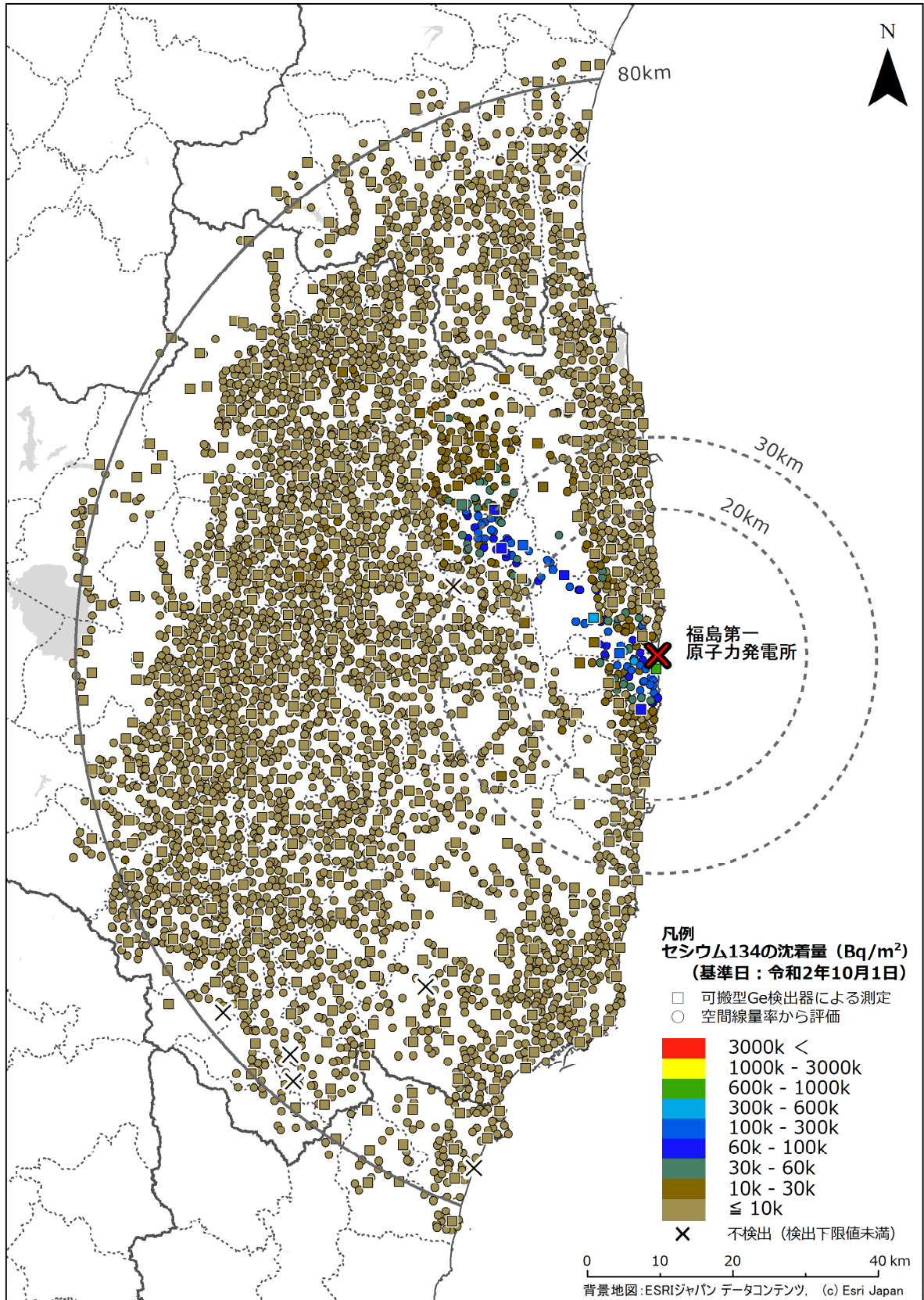


図 4-17 令和2年度調査における放射性セシウムの土壌沈着量分布マップ (1/2)

(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。)

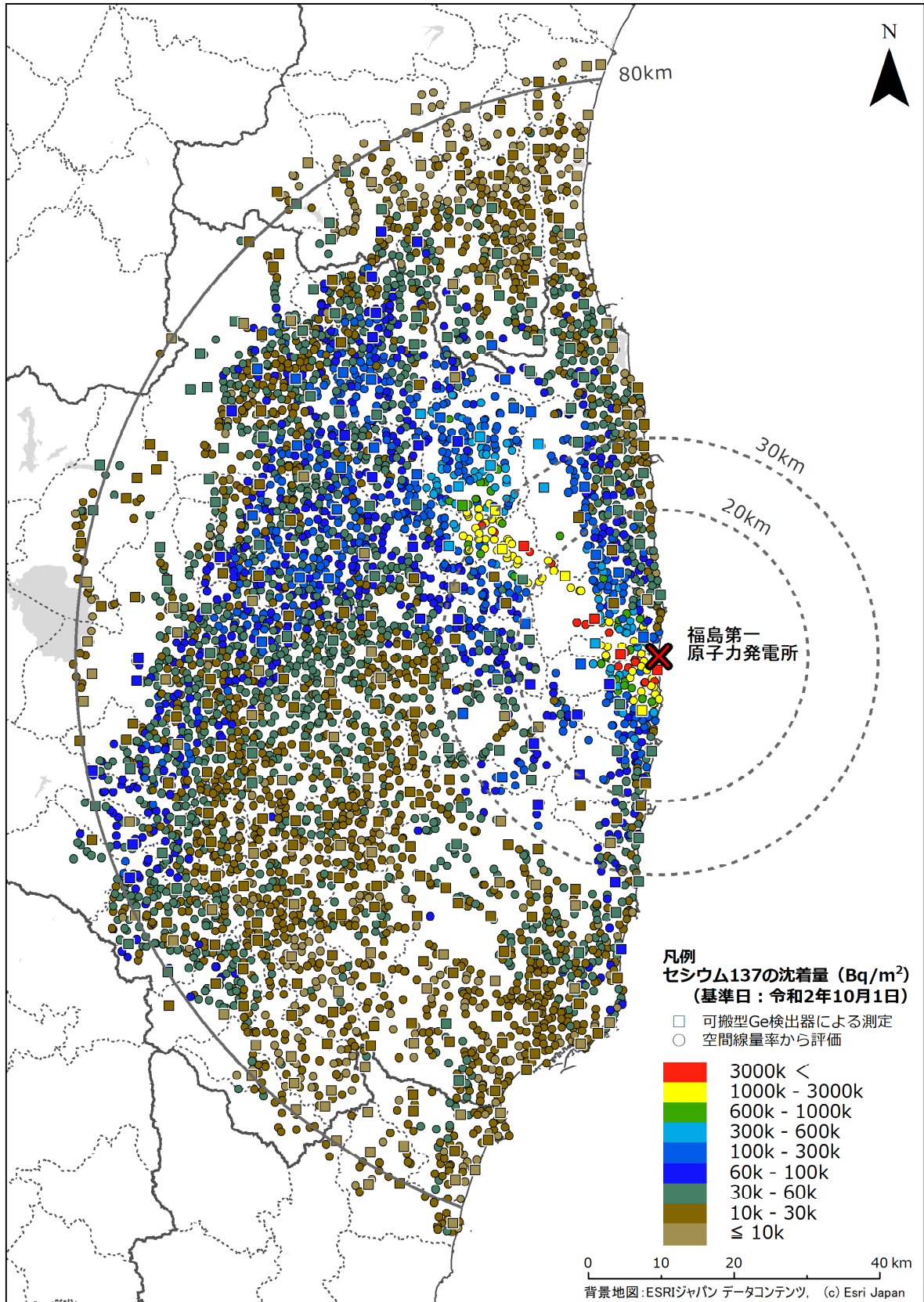
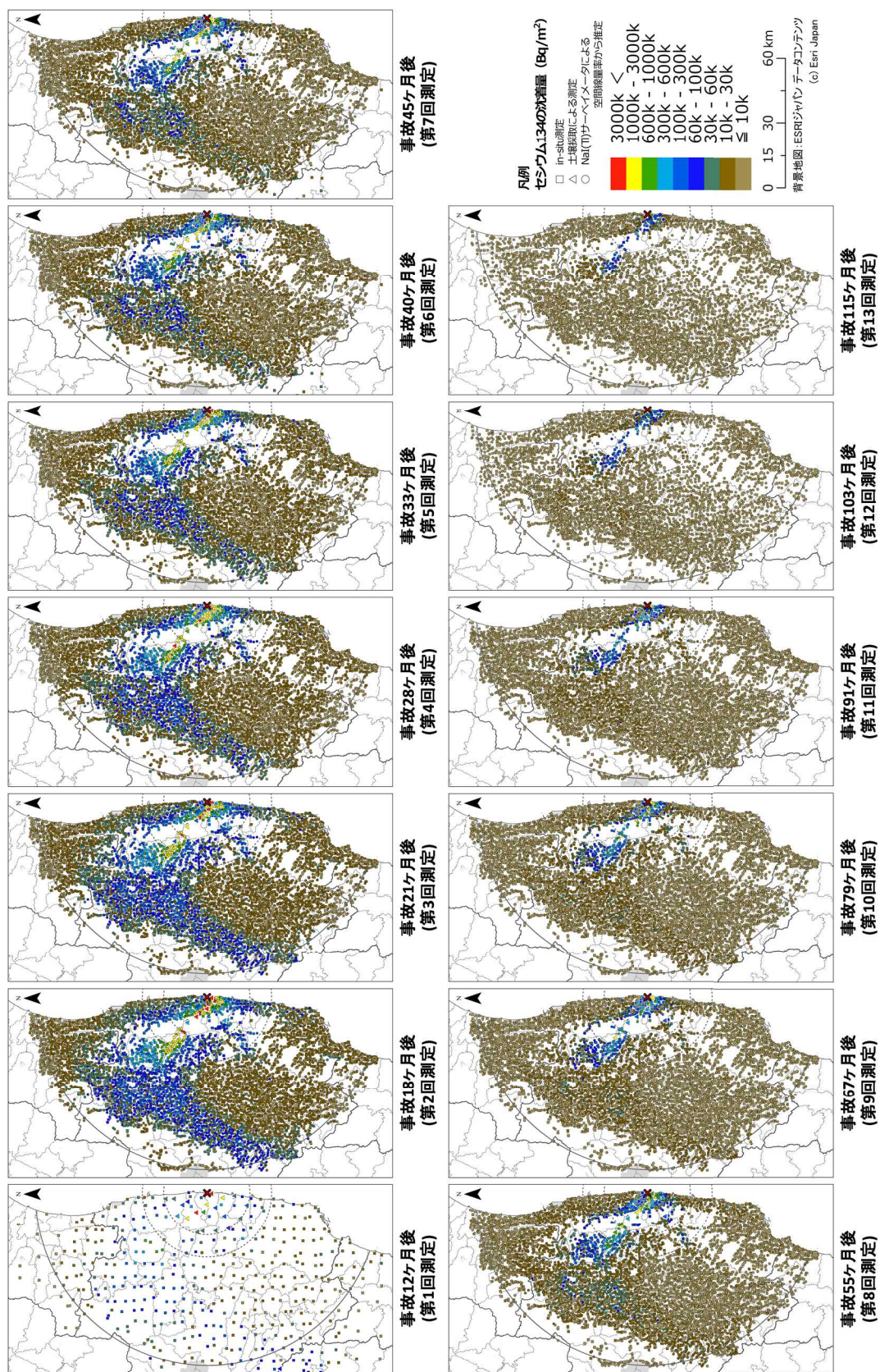


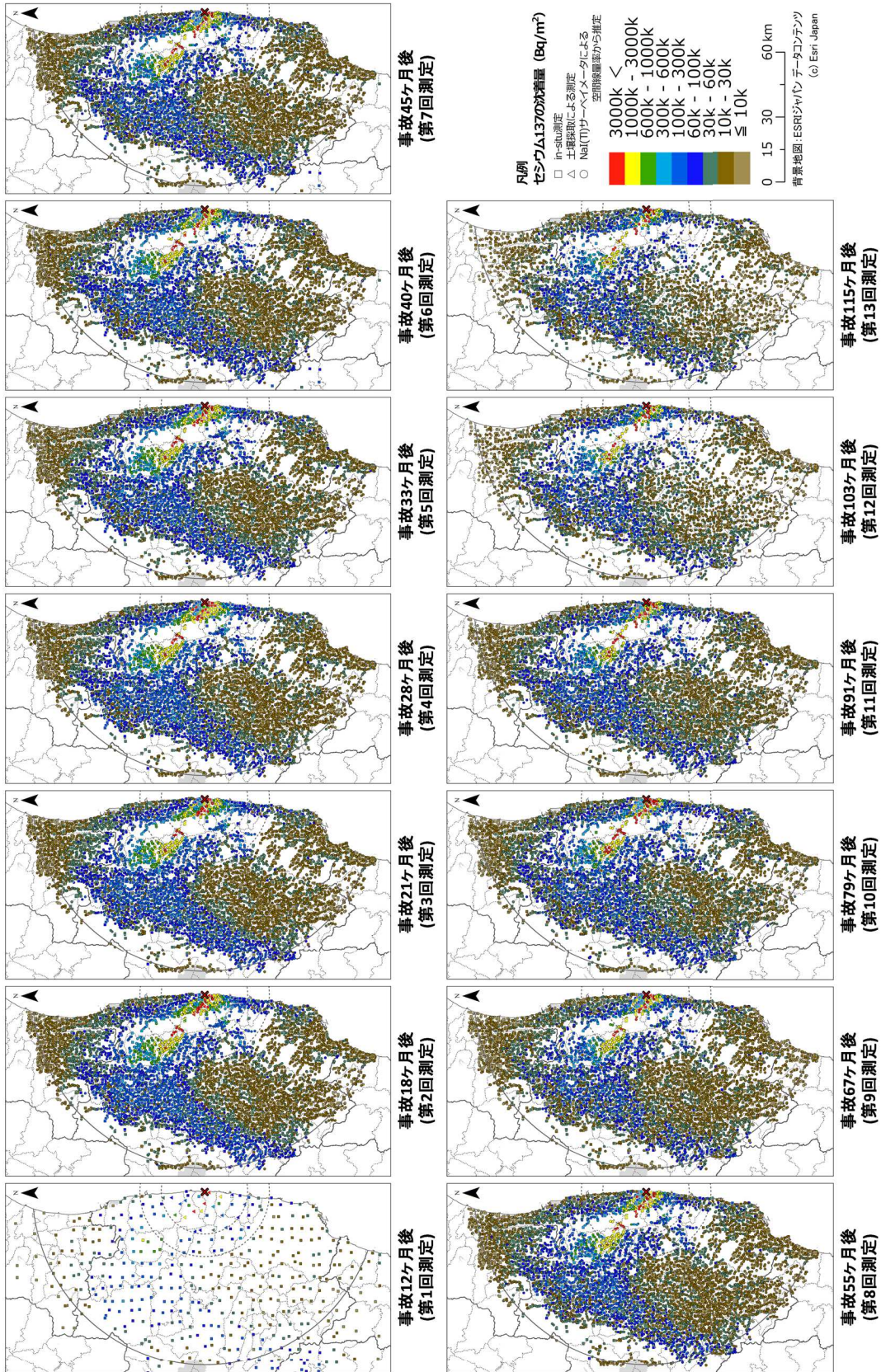
図 4-17 令和 2 年度調査における放射性セシウムの土壌沈着量分布マップ (2/2)

(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

図 4-18 平成 23 年度以降の 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 (1/2)



(b) セシウム 137

図 4-18 平成 23 年度以降の 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 (2/2)

#### 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<sup>12,14)</sup>、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 2 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 核種がすべて有意検出された 352 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。なお、全測定箇所の約 11%は若干の降雨の中での測定であったが、測定時期が 8 月～10 月であったこと及び測定対象エリアが主に太平洋側の地域であり海洋性の気塊の影響を受けるため降水中のラドン壊変生成物の濃度は低く<sup>23,24)</sup> 降雨に伴う影響は小さいと判断した。5 核種について ICRU Report 53<sup>12)</sup> 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 352 箇所の平均値は 0.039  $\mu\text{Gy/h}$  であった。これは空間線量率 (周辺線量当量率) では 0.05  $\mu\text{Sv/h}$  に相当する<sup>25)</sup>。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 4-19 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)<sup>26)</sup>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。

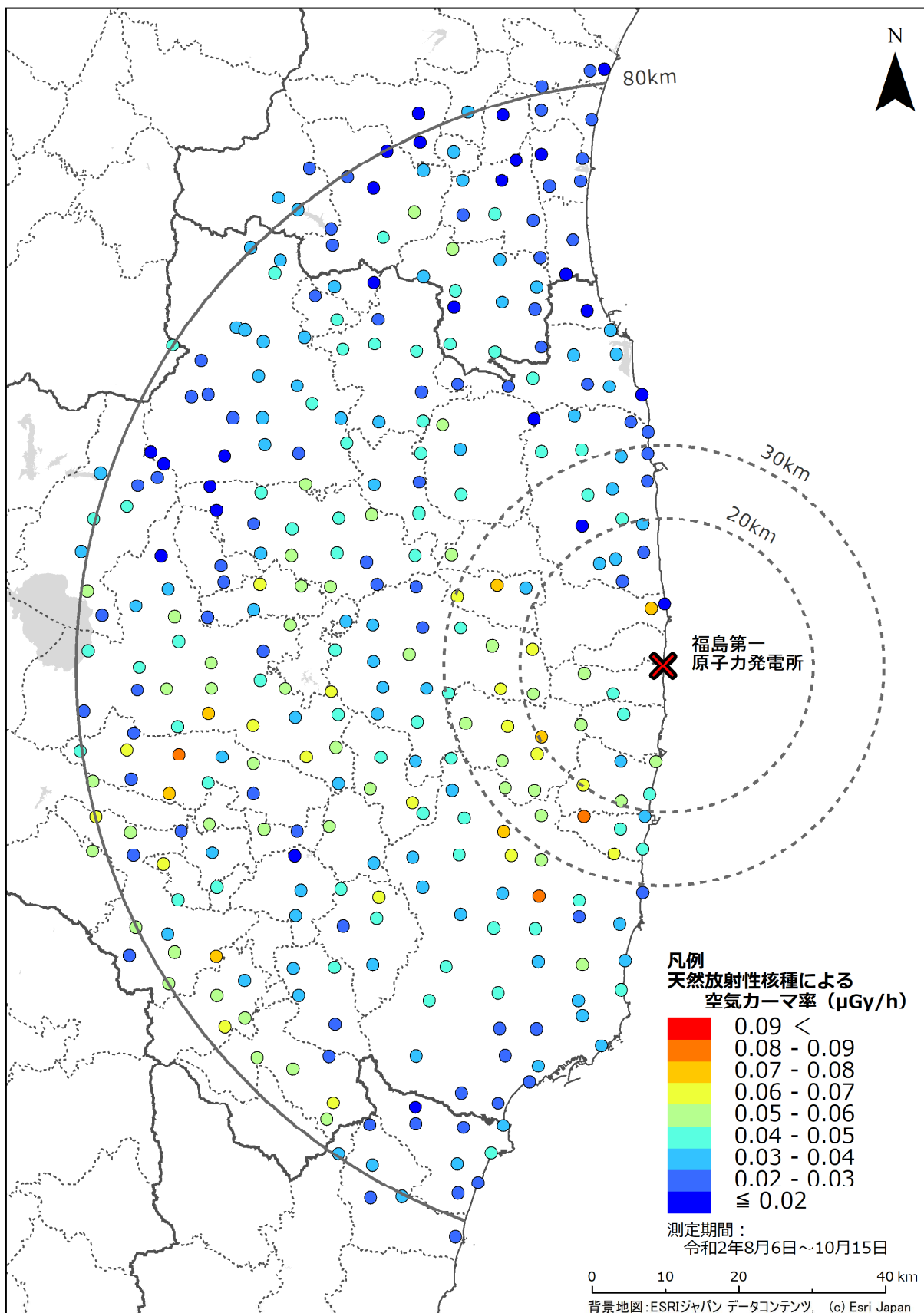


図 4-19 in-situ 測定により評価した天然放射性核種による空気カーマ率の分布



## 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

### 5.1 目的

事故から9年が経過し、事故直後から実施してきた分布状況調査の測定データから環境中の空間線量率は放射性セシウムの物理的減衰よりも速いペースで減少してきていることが分かっている。そこで、空間線量率や放射性セシウム土壌沈着量の減少速度すなわち実効半減期を評価した。実効半減期  $T_{eff}$  は以下の式 (19) で表される。

$$\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T_{Cs}} + \frac{1}{T_{eco}} \quad (19)$$

ここで、 $T_{Cs}$  は放射性セシウムの壊変による半減期及び  $T_{eco}$  は環境半減期である。環境半減期は、天候等の環境要因による減少率として定義される。

環境中における放射性物質の変化は、核実験場での継続的なモニタリングやチェルノブイリ原子力発電所事故のモニタリングから、多項の指数関数で近似できることが知られている。ここでは、これまでの測定データの変化傾向を定量的に把握するため、測定データの指数関数近似について検討した。その結果として求められる実効半減期は、測定データ間の数値の推定や将来の空間線量率の推定に重要なパラメータとなる。

### 5.2 測定結果の変化傾向

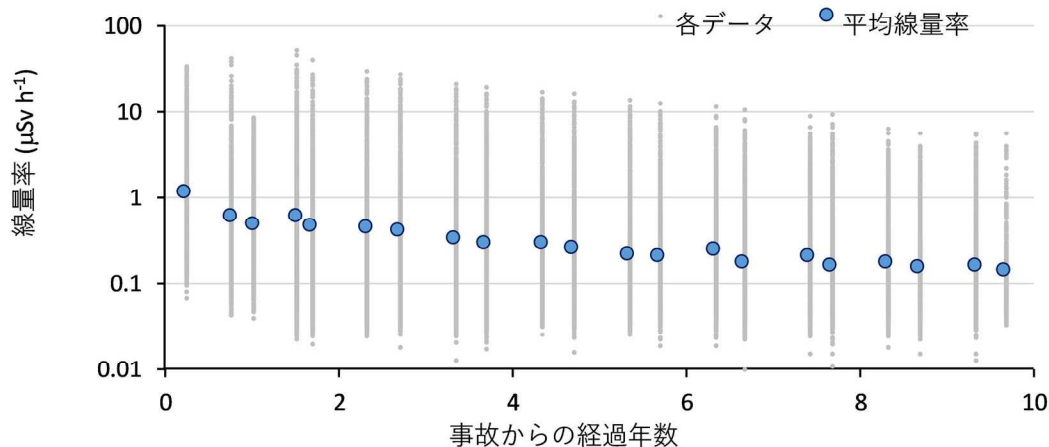
平成23年度から令和元年度までを対象に、走行サーベイ、定点サーベイ、歩行サーベイ及び無人ヘリサーベイで得られた空間線量率について図5-1に、可搬型Ge検出器を用いたin-situ測定による土壌中放射性セシウム沈着量について図5-2にそれぞれ示す。各データは、80km圏内を政府の推奨する基準地域メッシュ（全10,168メッシュ）で測定値があるメッシュについて各々のメッシュ内の線量率（又は沈着量）（灰色・シンボル；各測定回で多数存在）と、各サーベイ手法においてメッシュ内の数値を年度ごとに算術平均した数値（青色○シンボル；各測定回の一つ）をプロットした。

走行サーベイは、第1回から4,000メッシュ以上の場所について測定が行われている。他の測定と比較すると網羅的に80km圏内の地域を測定している。しかしながら、走行ルートについては、避難指示区域の解除等の理由から毎回異なること、測定対象が舗装された車道上であることに注意が必要である。定点サーベイは、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。ただし、第1回及び第2回において、迅速な汚染範囲の調査を目的としたため、測定点数が他の測定に比べて極端に少ない。歩行サーベイについては、定点サーベイで選定された測定点の周辺車道や歩道を測定対象としており、第3回以降では一定の場所での測定データが得られている。可搬型Ge検出器を用いたin-situ測定については、ガンマ線スペクトルを利用しバックグラウンドの影響なしに測定でき、直接的に放射性セシウムの半減期との比較が可能である。一方、測定時間がかかるため測定点数は多くない。なお、図5-2の1)及び2)のグラフには無人ヘリサーベイの校正のために地上で行った可搬型Ge検出器を用いたin-situ測定のデータも含まれている。特に第4回の

データには沈着量の大きな福島第一原発から 5 km 圏内の 15 箇所で取得したデータが含まれているため平均値が上昇している。

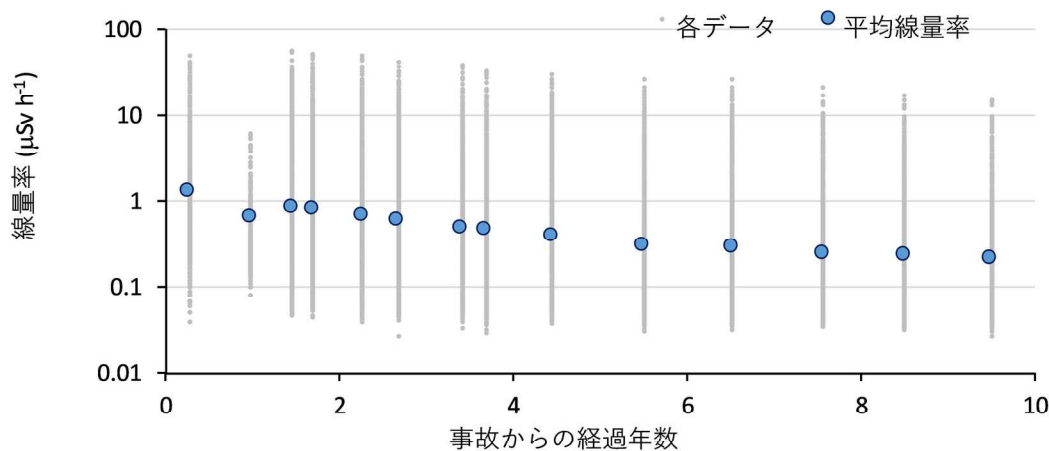
このように過去の地上で得られたデータは、空間線量率や放射性物質の沈着状況を面的に把握することを目的としていた。さらに測定法の特徴を整理すると、定点サーベイでは測定点における線量率、歩行サーベイでは歩行経路に沿った線量率、走行サーベイでは道路上の線量率と、それぞれの測定手法に応じて限定的な条件下での線量率情報が得られる。このため、沈着量分布の全体像及びその減衰傾向を考察するにあたっては面的及び時間的に不連続なデータの取り扱いが課題となる。また、近年では、放射性セシウムによる空間線量率が減少し、天然放射性核種によるバックグラウンドの空間線量率が無視できない状況となっている。よって、それぞれの課題を解決し、現状の放射線分布の変化量について定量的に表すには、バックグラウンド減算及びデータの測定場所等の条件をそろえ、かつデータ点数を考慮する必要がある。これらを考慮し、次節以降において最適なデータセットの検討及び実効半減期の算出を試みた。

## 1) 走行サーベイ



測定回	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回	第6回	第7回	第8回	第9回	第10回	第11回	第12回	第13回	第14回	第15回	第16回	第17回	第18回	第19回	第20回	第21回
事故からの経過年	0.23	0.76	1.02	1.51	1.69	2.32	2.69	3.34	3.68	4.34	4.70	5.34	5.69	6.33	6.66	7.41	7.67	8.31	8.68	9.33	9.67
平均線量率	1.10	0.60	0.47	0.58	0.45	0.43	0.40	0.33	0.29	0.28	0.25	0.21	0.20	0.24	0.17	0.20	0.16	0.17	0.15	0.16	0.14
標準偏差	2.60	1.80	0.87	2.00	1.50	1.50	1.40	1.10	0.95	0.89	0.77	0.66	0.61	0.61	0.45	0.46	0.40	0.39	0.31	0.37	0.29
測定エリア数	4536	3518	2908	6149	4994	6160	5746	5312	5496	5156	5224	5481	5100	4044	5510	3874	5204	3883	4966	3943	4990
初回からの平均値の割合	100	55	43	53	41	39	36	30	26	25	23	19	18	22	15	18	15	15	14	15	13

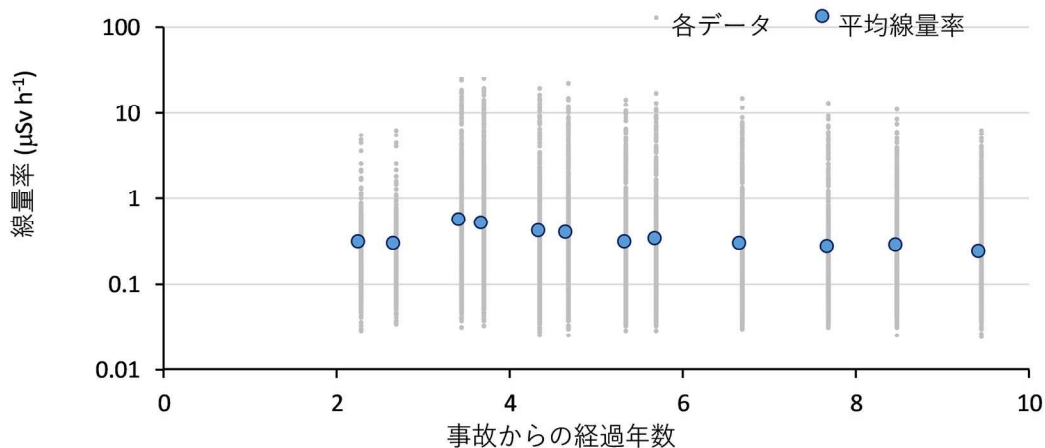
## 2) 定点サーベイ



測定回	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回	第6回	第7回	第8回	第9回	第10回	第11回	第12回	第13回	第14回
事故からの経過年	0.27	0.98	1.45	1.69	2.26	2.67	3.41	3.68	4.44	5.50	6.51	7.56	8.49	9.49
平均線量率	1.30	0.65	0.85	0.80	0.69	0.60	0.47	0.46	0.39	0.30	0.29	0.24	0.23	0.21
標準偏差	3.60	0.86	2.70	2.50	2.30	1.90	1.60	1.60	1.30	1.00	1.00	0.77	0.70	0.62
測定エリア数	1998	354	6419	6403	6406	6404	6422	6415	6424	6407	6414	6399	5024	5018
初回からの平均値の割合	100	50	65	62	53	46	36	35	30	23	22	18	18	16

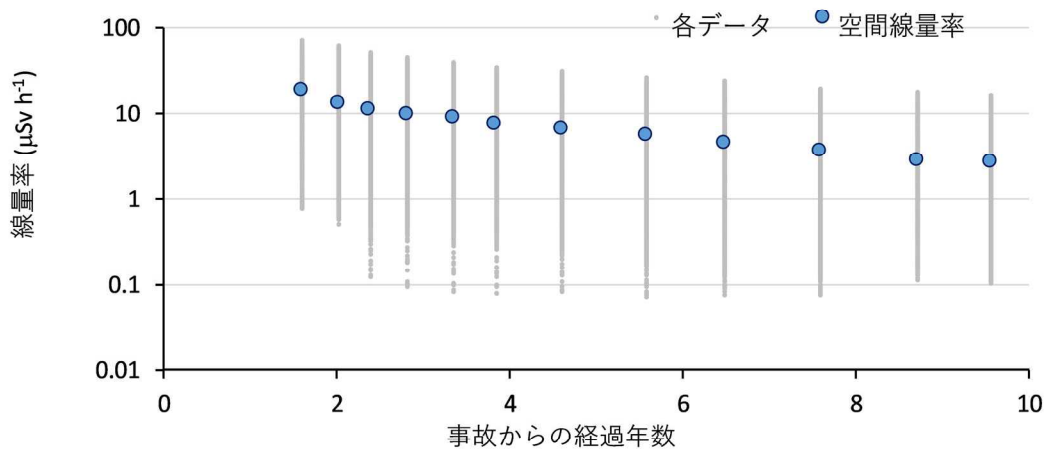
図 5-1 分布状況調査で得られた空間線量率の変化傾向 (1/2)  
(天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

### 3) 歩行サーベイ



測定回	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回	第6回	第7回	第8回	第9回	第10回	第11回	第12回
事故からの経過年	2.27	2.68	3.43	3.69	4.34	4.67	5.34	5.69	6.67	7.68	8.47	9.44
平均線量率	0.30	0.28	0.54	0.49	0.41	0.39	0.30	0.32	0.29	0.26	0.27	0.23
標準偏差	0.46	0.41	1.80	1.60	1.40	1.30	0.88	1.00	0.84	0.71	0.65	0.48
測定エリア数	739	878	1960	1977	1964	1946	2000	1976	2118	2117	1766	1729
初回からの平均値の割合	100	93	180	163	137	130	100	107	97	87	90	77

### 4) 無人ヘリサーベイ

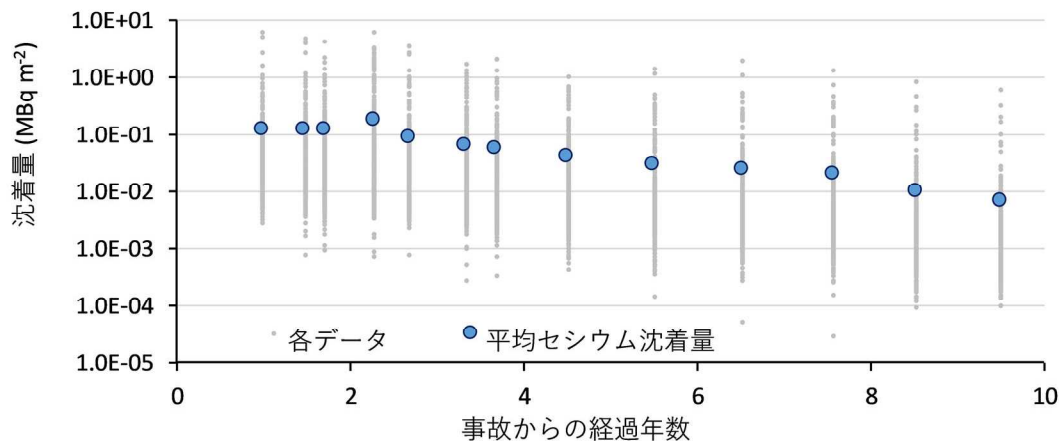


測定回	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回	第6回	第7回	第8回	第9回	第10回	第11回	第12回
事故からの経過年	1.60	2.02	2.38	2.82	3.35	3.84	4.61	5.58	6.48	7.59	8.71	9.56
平均線量率	18	13	11	9.4	8.6	7.4	6.6	5.4	4.5	3.6	2.7	2.6
標準偏差	15	12	9.4	8.2	7.4	6.3	5.6	4.7	4.2	3.3	2.5	2.4
測定エリア数*	1761	4624	5377	5382	5382	5376	5385	5385	6139	6139	7420	7119
初回からの平均値の割合	100	72	61	52	48	41	37	30	25	20	15	14

\* 100 mメッシュ

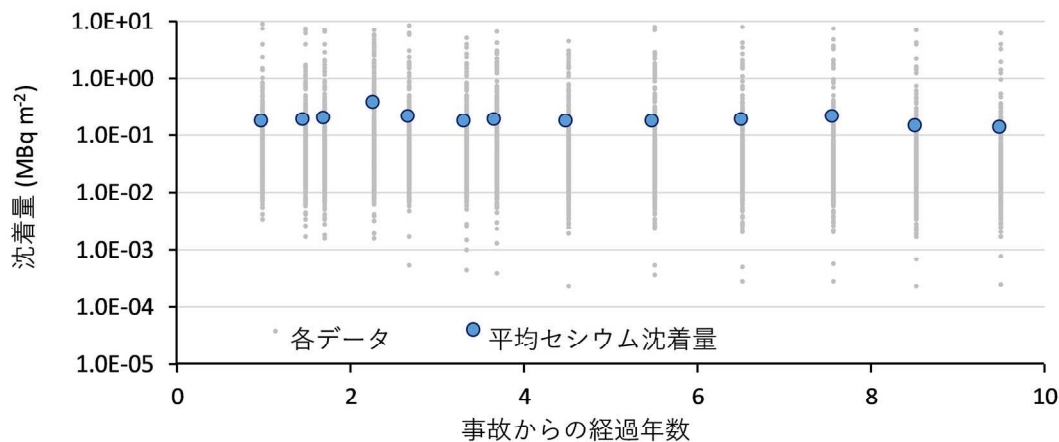
図 5-1 分布状況調査で得られた空間線量率の変化傾向 (2/2)  
(天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

### 1) in-situ測定 (セシウム134)



測定回	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回	第6回	第7回	第8回	第9回	第10回	第11回	第12回	第13回
事故からの経過年	0.98	1.47	1.70	2.27	2.68	3.33	3.67	4.50	5.50	6.52	7.56	8.52	9.49
平均セシウム沈着量	0.12	0.12	0.12	0.18	0.088	0.062	0.056	0.041	0.029	0.024	0.020	0.010	0.007
標準偏差	0.460	0.420	0.420	0.530	0.290	0.170	0.180	0.110	0.110	0.120	0.089	0.056	0.040
測定エリア数	374	386	392	425	401	403	402	402	402	400	400	382	378
初回からの平均値の割合	100	100	100	150	73	52	47	34	24	20	17	8.1	5.6

### 2) in-situ測定 (セシウム137)



測定回	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回	第6回	第7回	第8回	第9回	第10回	第11回	第12回	第13回
事故からの経過年	0.98	1.47	1.70	2.27	2.68	3.33	3.67	4.50	5.50	6.52	7.56	8.52	9.49
平均セシウム沈着量	0.160	0.180	0.190	0.360	0.200	0.170	0.180	0.170	0.160	0.180	0.200	0.140	0.130
標準偏差	0.660	0.670	0.680	1.000	0.690	0.490	0.570	0.470	0.620	0.900	0.910	0.790	0.750
測定エリア数	374	386	392	425	402	404	403	403	404	404	404	385	385
初回からの平均値の割合	100	113	119	225	125	106	113	106	100	113	125	88	81

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

### 5.3 バックグラウンドの設定

令和2年度実施した空間線量率測定においては、事故から9年が経過しているため、空間線量率はバックグラウンドである天然放射性核種による空間線量率に比較的近い数値を示す場所が多くなってきている。変化傾向を定量化する場合、天然放射性核種による空間線量率を正確に減算する必要がある。広域な天然放射性核種による空間線量率の評価例として、事故後実施された複数回の航空機モニタリングのデータを活用し、250 m メッシュの位置分解能で天然放射性核種由来の線量率マップが報告されている<sup>19)</sup>。また、分布状況調査における KURAMA-II による走行サーベイ結果を基に、東日本の市町村別のバックグラウンド線量率が評価されている<sup>27)</sup>。図5-3にそれぞれの天然放射性核種由来の線量率マップを示す。走行サーベイはアスファルト上での測定となるため、周辺の土壌上よりもアスファルト混合物に含まれる天然の放射性核種による影響を受けやすいことから、全体的に航空機モニタリングによるマップの方が線量率は低めに評価されている。ここでは、位置分解能が細かいこと及び土壌を含めた代表的な天然の放射性核種由来の線量率を評価できていることから、航空機モニタリングの結果から作成したバックグラウンド線量率データを採用し減算に使い、放射性セシウム由来の空間線量率を算出した。

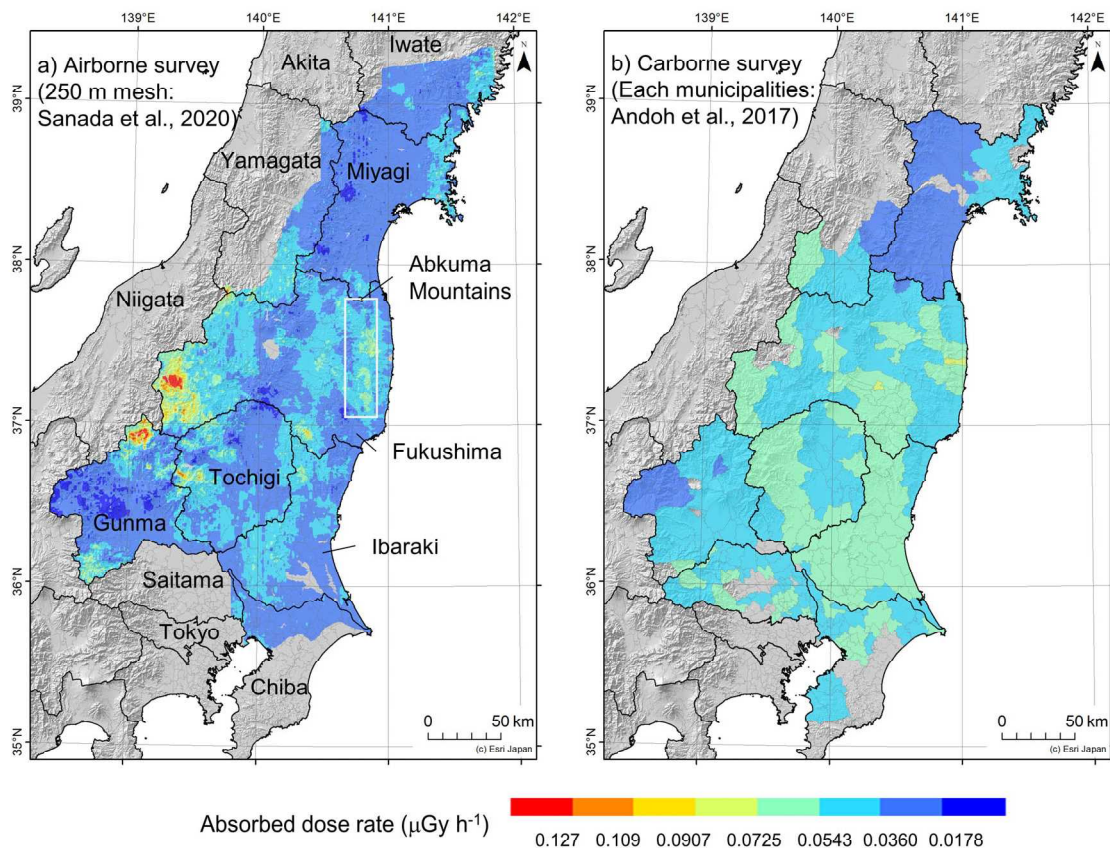


図 5-3 天然放射性核種由来の線量率マップ<sup>19)</sup>

#### 5.4 実効半減期算出方法

実効半減期算出には、測定データを取得した 80 km 圏内を基準地域メッシュで分割し、同一メッシュ内の走行サーベイ、定点サーベイ及び歩行サーベイによる空間線量率並びに可搬型 Ge 検出器による放射性セシウムの沈着量のデータを平均化し集計した。また、他事業になるが、航空機サーベイのデータ<sup>28)</sup>についても同様に 80 km 圏内を基準地域メッシュで分割し、評価データを平均化し集計した。さらに無人ヘリサーベイの結果については、測定範囲が狭いため基準地域メッシュに基づく 50 m メッシュを作成し、メッシュ内の平均値を集計した。指数関数近似に用いたデータは、それぞれの測定手法ごとに、調査期間すべてにおいてデータがそろっているメッシュのみ抽出した。本解析には、80 km 圏内全域のデータ及び人為的なく乱など環境変化の影響や高空間線量率エリアでの影響を考察するため、避難指示区域（平成 31 年 4 月時点）のデータを対象とした。測定期間については、データ数を考慮し、走行サーベイ、無人ヘリサーベイ、航空機サーベイ及び可搬型 Ge 検出器による in-situ 測定について全期間、定点サーベイについては第 3 回（平成 24 年度調査の 1 回目）以降、歩行サーベイについては第 3 回（平成 26 年度 1 回目）以降のデータを使用した。

抽出したデータについて、走行サーベイ、無人ヘリサーベイ及び航空機サーベイについては、式 (20) に示した二項（二成分）の指数関数近似を行い、実効半減期を算出した。なお、この算出の処理には、基準地域メッシュで集計した全データを用いて近似している。

$$D = a \exp\left(-\frac{0.693}{t_{short}} \times t\right) + b \exp\left(-\frac{0.693}{t_{long}} \times t\right) \quad (20)$$

ここで、 $D$  は空間線量率、 $t_{short}$  は実効半減期の速い成分、 $t_{long}$  は実効半減期の遅い成分、 $t$  は事故からの経過時間（年）を表す。なお、ここで切片である  $a+b$  は事故直後の空間線量率を表す。近似曲線については最小二乗法により平均値の 95% の信頼区間を計算するとともに、実効半減期についても 95% の信頼区間を計算した。走行サーベイ、無人ヘリサーベイ及び航空機サーベイ以外のデータについては、指数関数近似を行い、その傾きから実効半減期を算出した。なお、今回は実効半減期  $t_{short}$  及び  $t_{long}$  の導出が主目的であり、事故初期の数値を表す係数  $a$  や  $b$  については参考値とする。

#### 5.5 空間線量率の実効半減期

それぞれの測定手法について二項の指数関数又は指数関数近似により評価した実効半減期について表 5-1 にまとめる。走行サーベイの変化傾向及び二項の指数関数近似を行った結果を図 5-4 に示す。80 km 圏内全域のデータでは、速い成分は 0.57 年及び遅い成分は 3.3 年となった。セシウム 134 とセシウム 137 の半減期と比較しても速い速度で減少していることが分かる。この要因の一部としては道路上のセシウムの洗い流し効果や、4.1 節で示した放射性セシウムの土壌の深度方向への移動が考えられる。

定点サーベイについて指数関数近似を行った結果を図 5-5 に示す。定点サーベイでは、データ数が少ない事故直後の測定データを除外したため、速い成分の分析はできなかったが、遅い成分の実効半減期は 80 km 圏内で 2.7 年及び避難指示区域で 3.0 年となった。図 5-5 のプロットを見ると直近の 3 年分のデータが近似直線から外れている。80 km 圏内と避難指示区域で遅

い成分の実効半減期が異なる要因として、速い成分の影響が無視できない、又はバックグラウンド減算の誤差が影響している可能性が挙げられる。また、避難指示区域において除染作業や中間貯蔵施設の建設が始まっており、人為的な環境変化の影響も考えられる。

歩行サーベイについて指数関数近似を行った結果を図 5-6 a) に示す。歩行サーベイは、平成 25 年度に調査を開始したため、速い成分の分析はできなかったが、遅い成分の実効半減期は 80 km 圏内で 3.2 年となった。この数値は走行サーベイの 3.3 年と近い値だが、定点サーベイの 2.7 年より大きい。これは、フィッティングに用いた指数関数モデルの違いによると考えられる。すなわち、二項の指数関数とした走行サーベイに対して 1 成分のみであり、歩行サーベイ開始初期時点での速い成分の影響が無視できない可能性が挙げられる。

無人ヘリサーベイについては、測定範囲が福島第一原発から 5 km 圏内と限られている。実効半減期は、速い成分は 0.58 年及び遅い成分は 3.7 年となった (図 5-6 b))。この数値は、航空機サーベイについて得られた実効半減期 (図 5-7) よりも早い。この結果は、令和元年度から本格化した避難指示区域内の除染や中間貯蔵場の造成の影響と考えられる。

表 5-1 評価された実効半減期の一覧

項目	対象	測定手法	実効半減期 (年)			
			80 km圏内		避難指示区域 (平成31年4月時点)	
			速い成分	遅い成分	速い成分	遅い成分
空間線量率	車道上	走行 サーベイ	0.57	3.3	-	-
			(0.44 - 0.71)	(2.6 - 4.0)		
	平たん地上 (土壌上)	定点 サーベイ	-	2.7	-	3.0
				(2.5 - 2.8)		(2.7 - 3.3)
	歩道上	歩行 サーベイ	-	3.2	-	-
				(2.8 - 3.7)		
平均値	無人ヘリ サーベイ	-	-	0.58	3.7	
				(0.32 - 0.85)	(3.3 - 4.1)	
平均値	航空機 サーベイ	0.74	5.3	0.53	4.3	
			(0.60 - 0.89)	(4.2 - 6.5)	(0.36 - 0.70)	(3.6 - 5.0)
放射性 セシウム 沈着量	Cs-134	In-situ	1.7		-	
			(1.2 - 2.1)			
	Cs-137		34		-	
			(-49 - 1.2 × 10 <sup>2</sup> )			

\* ( ) 内は 95%信頼区間を示している。



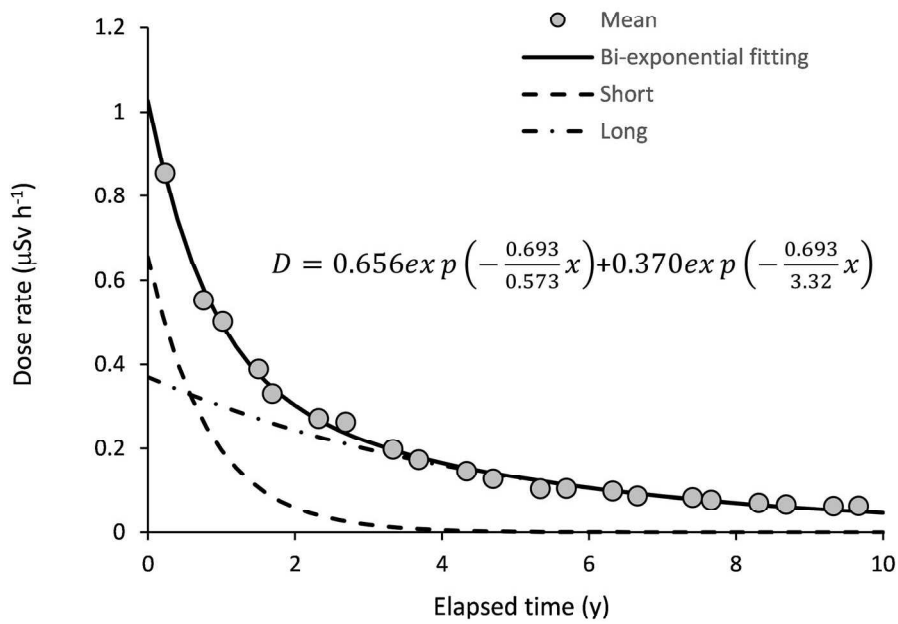
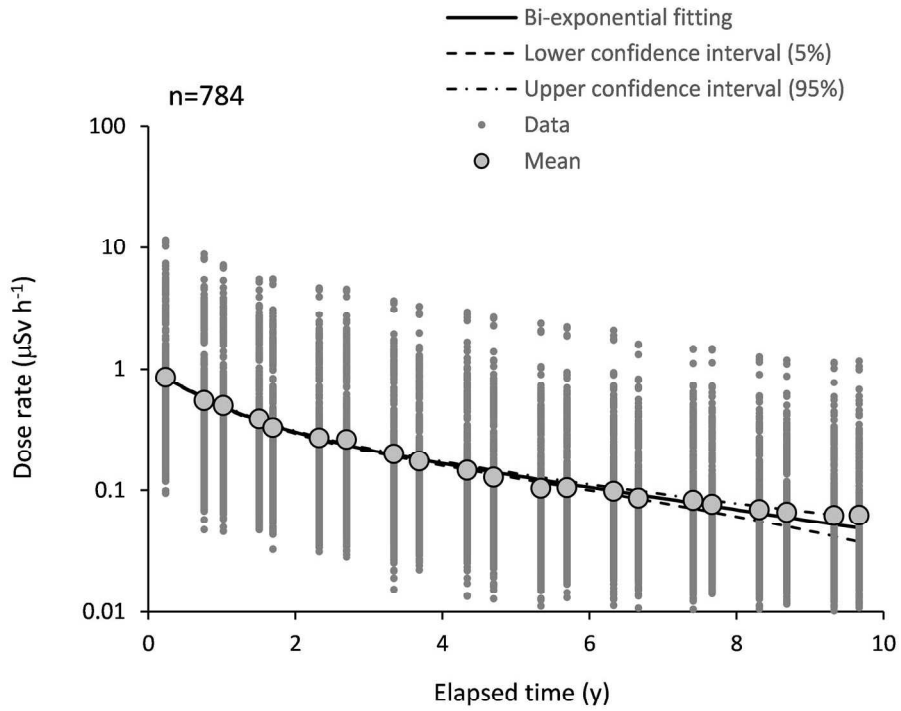


図 5-4 走行サーベイ結果（80 km 圏内）における二項指数関数の近似  
 （Short：速い成分、Long：遅い成分）

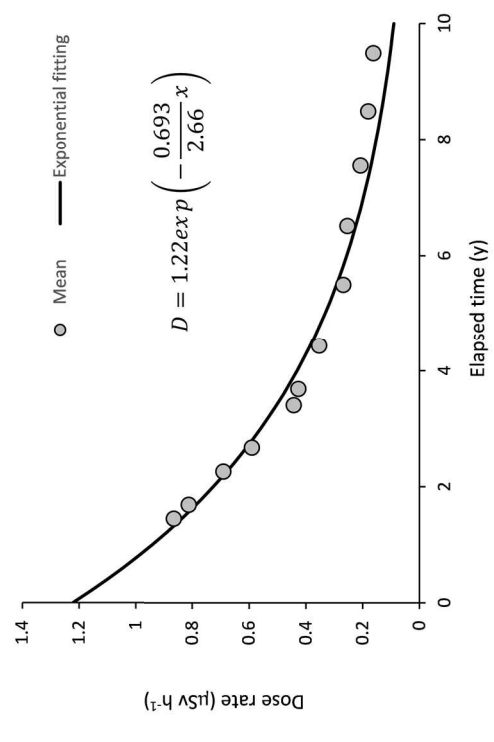
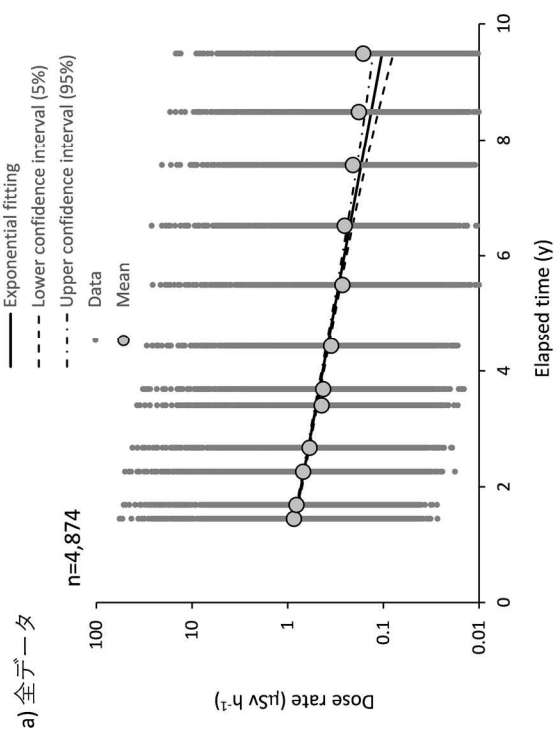
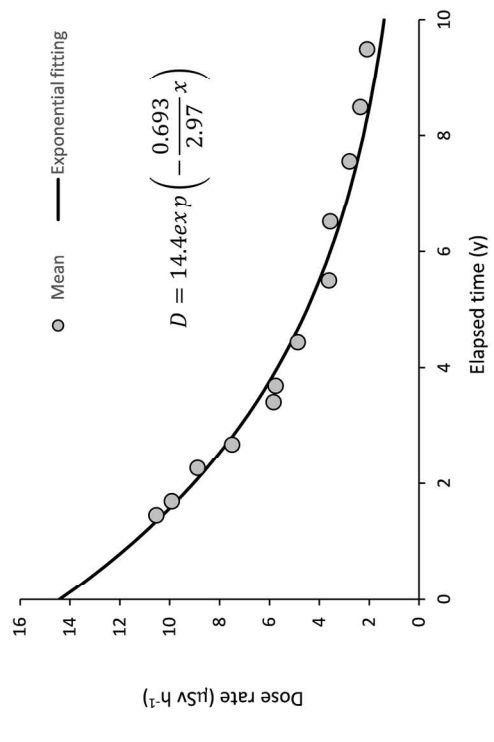
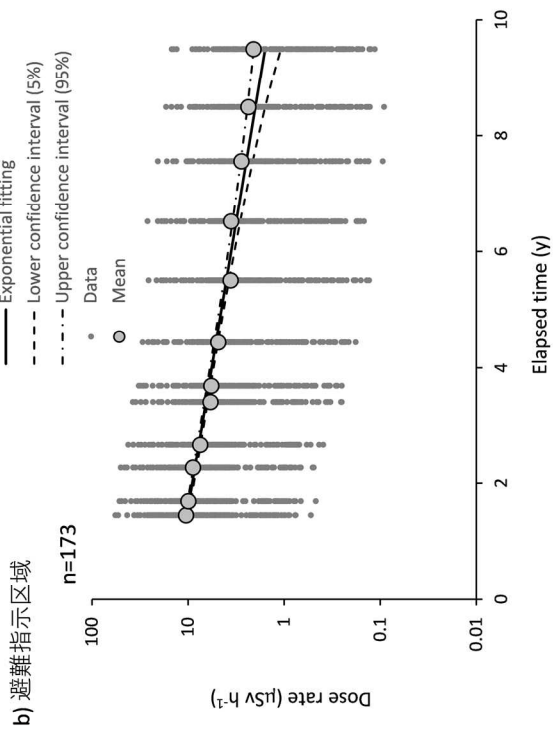


図 5-5 定点サーベイ結果における指数関数の近似

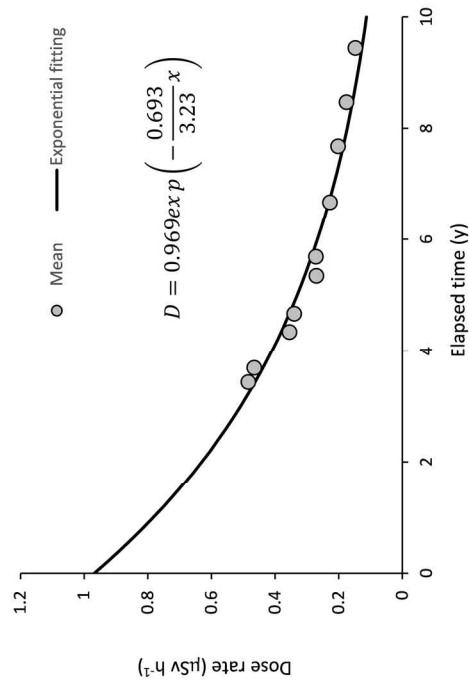
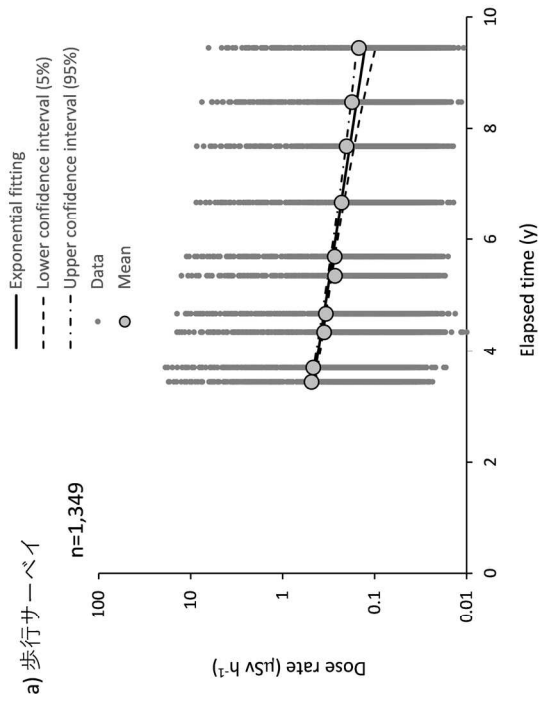
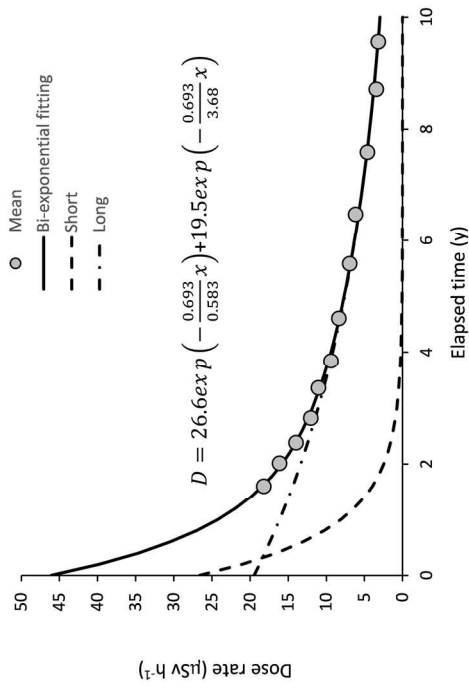
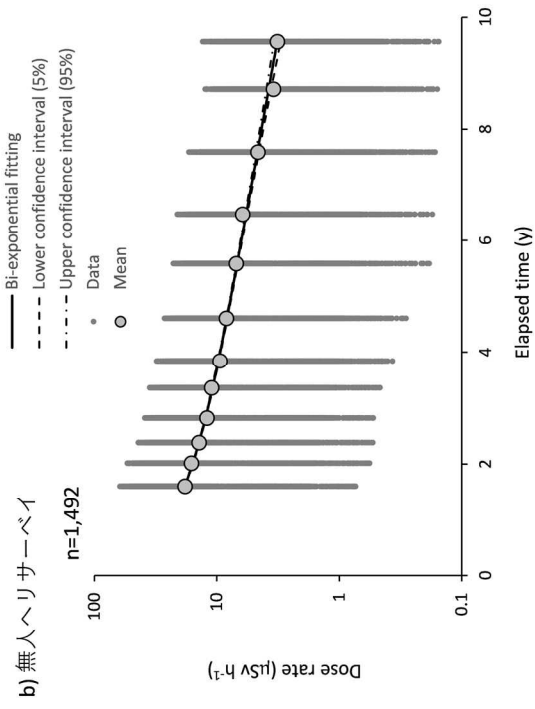


図 5-6 歩行サーベイ及び無人へりサーベイ結果における指数関数の近似  
(Short: 速い成分、Long: 遅い成分)

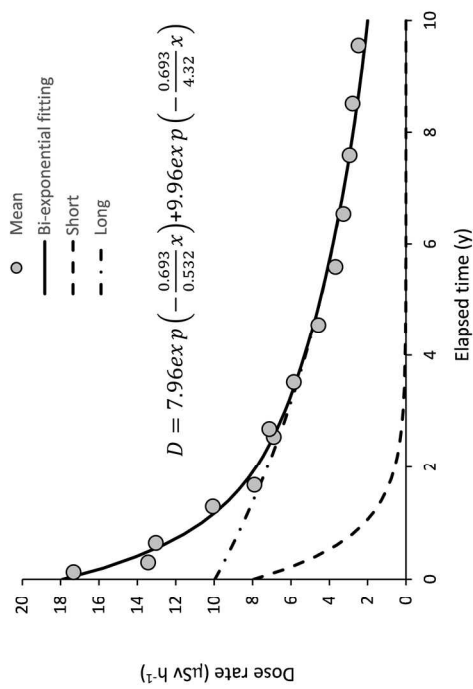
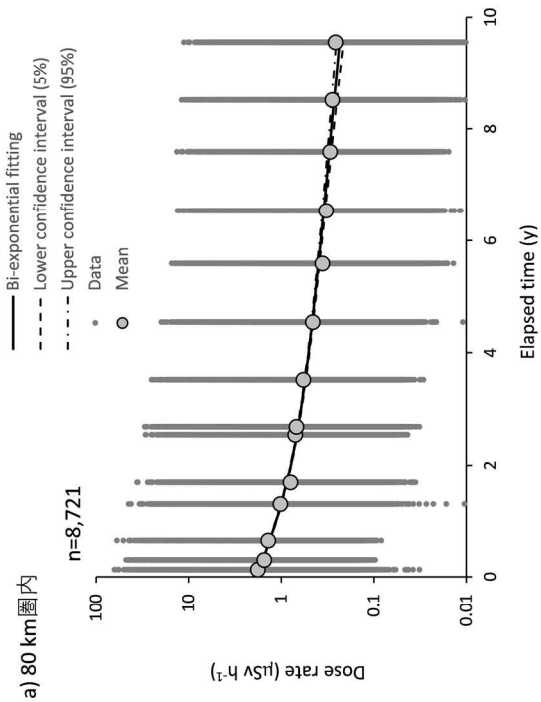
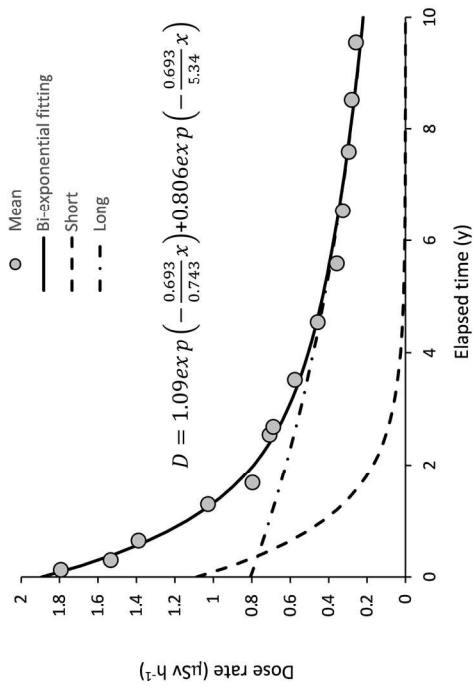
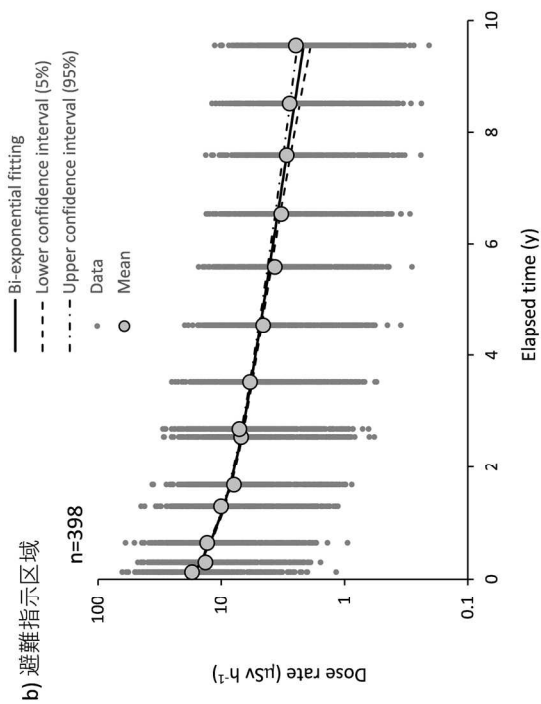


図 5-7 航空機サーベイ結果における指数関数の近似

(Short: 速い成分、Long: 遅い成分)

## 5.6 放射性セシウム沈着量の実効半減期

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に対して指数関数フィッティングした結果を図 5-8 に示す。図に示すようにセシウム 134 は近似曲線と測定データ点の一致性が良いものの、セシウム 137 については、ばらつきが比較的大きい。また、平成 28 年度の結果以降、不連続になっているように見える。この理由ははっきりしていないが、in-situ 測定の測定誤差の影響、設定した重量緩衝深度の不確かさ及び測定場所の環境変化による影響等が考えられる。近似した実効半減期の数値を見ると、セシウム 134 については 1.7 年となり、セシウム 137 については、95%信頼区間を見ると有意な数値ではないが、34 年と計算できた。この数値は、各核種の物理的半減期と比較するとほぼ同等の数値である。この結果は、放射性セシウムの物理的半減期以外に土壌表面のセシウムを変化させる要因が少ないことを示していると考えられる。

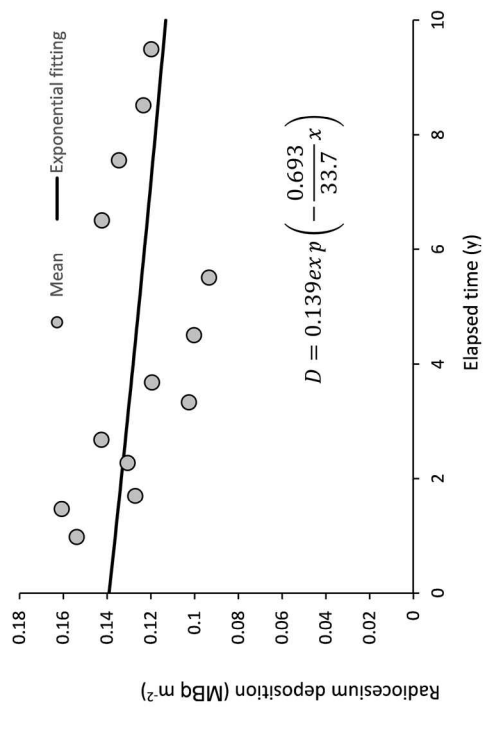
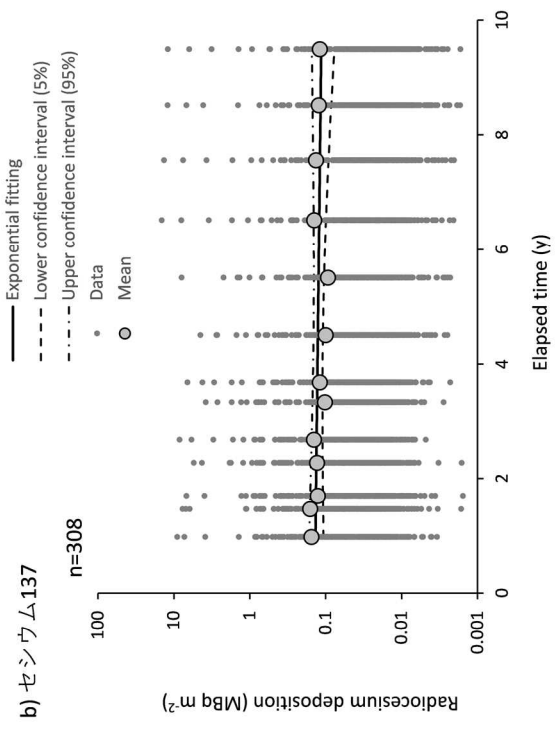
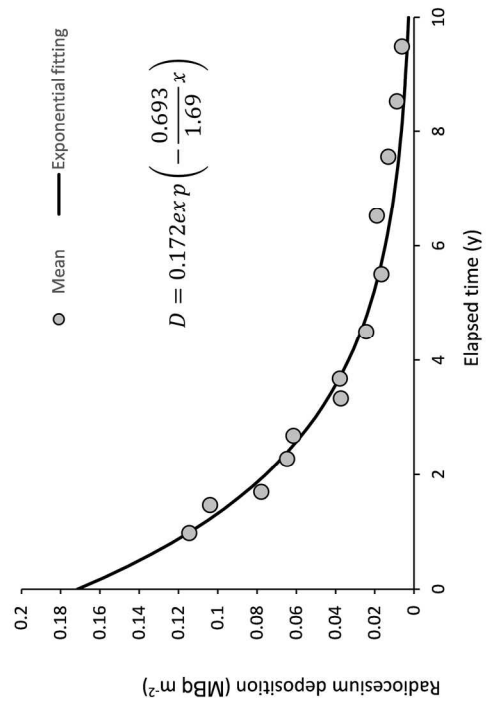
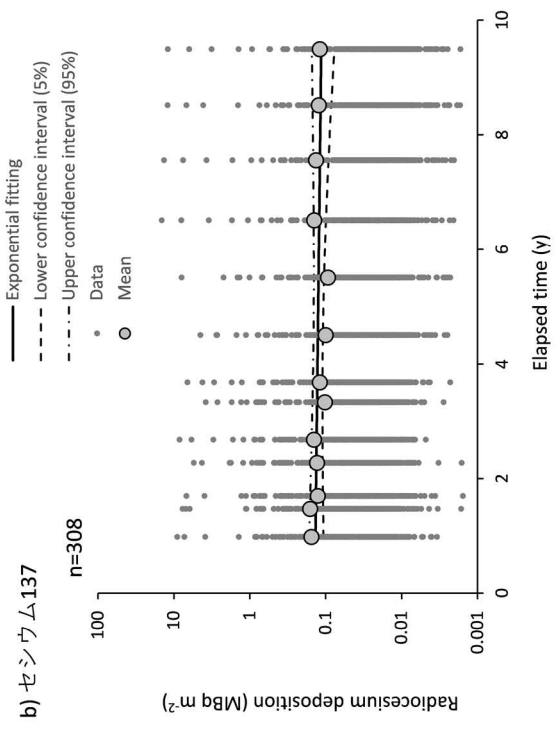


図 5-8 可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定結果における指数関数の近似

## 5.7 同一メッシュにおける空間線量率の変化傾向

これまでの評価は、ランダムに測定している測定種別ごとに評価した結果であり、測定場所が必ずしも一致しないため、近似曲線の傾きでは比較できても線量率の高低での比較は難しい。そこで、空間線量率の変化傾向を考察するため、走行サーベイ、歩行サーベイ、定点サーベイ及び航空機サーベイすべての測定手法による空間線量率データがそろっている基準地域メッシュを抽出することによって、測定場所をできる限り統一し、各測定手法特徴とその変化傾向の考察を試みた。図 5-9 に抽出メッシュの場所を示す。図に示すように、可住地域を中心に約 112 箇所抽出できる。それぞれの測定手法の対象は以下のような特徴があるといえる。図 5-10 にそれぞれの測定手法のイメージと測定範囲について示す。

- ・ 走行サーベイ：舗装された道路上
- ・ 歩行サーベイ：道路又は歩道上
- ・ 定点サーベイ：未舗装の土壌面
- ・ 航空機サーベイ：エリアの平均値

図 5-9 に示した 112 箇所における各測定手法による空間線量率の幾何平均値について平成 23 年以降の経時変化及び式 (20) に示した二項の指数関数近似曲線を図 5-11 に示す(ただし、定点サーベイ及び歩行サーベイについては一項の指数関数近似とした)。このように、空間線量率は航空機サーベイ、定点サーベイ、歩行サーベイ及び走行サーベイの順に大きい傾向にあることが分かる。航空機サーベイと定点サーベイの傾向を見ると、事故後 2 年目までは減少傾向が似通っていたが、3 年目以降両者の差が開き定点サーベイの方が低くなっている。これは、3 年目以降に本格化した除染作業の時期や、航空機モニタリングは 300 m 上空から測定しているため、直下の半径 300 m の円内に入る地域の放射線の平均値を計測していることから局所的な線量の勾配がトレースできないことを考えると、除染の影響を反映しているものと考えられる。また、歩行サーベイは定点サーベイや航空機サーベイに比べ低い傾向にある。これは、家屋周辺で重点的に行われた除染の影響や舗装道路上の放射性セシウムの雨水等による洗い流しが原因と考えられる。走行サーベイについては、他の 3 測定手法より低い傾向にある。これは、5.4 節でも考察したように、舗装道路上の放射性セシウムの洗い流しの影響を受けているものと考えられる。

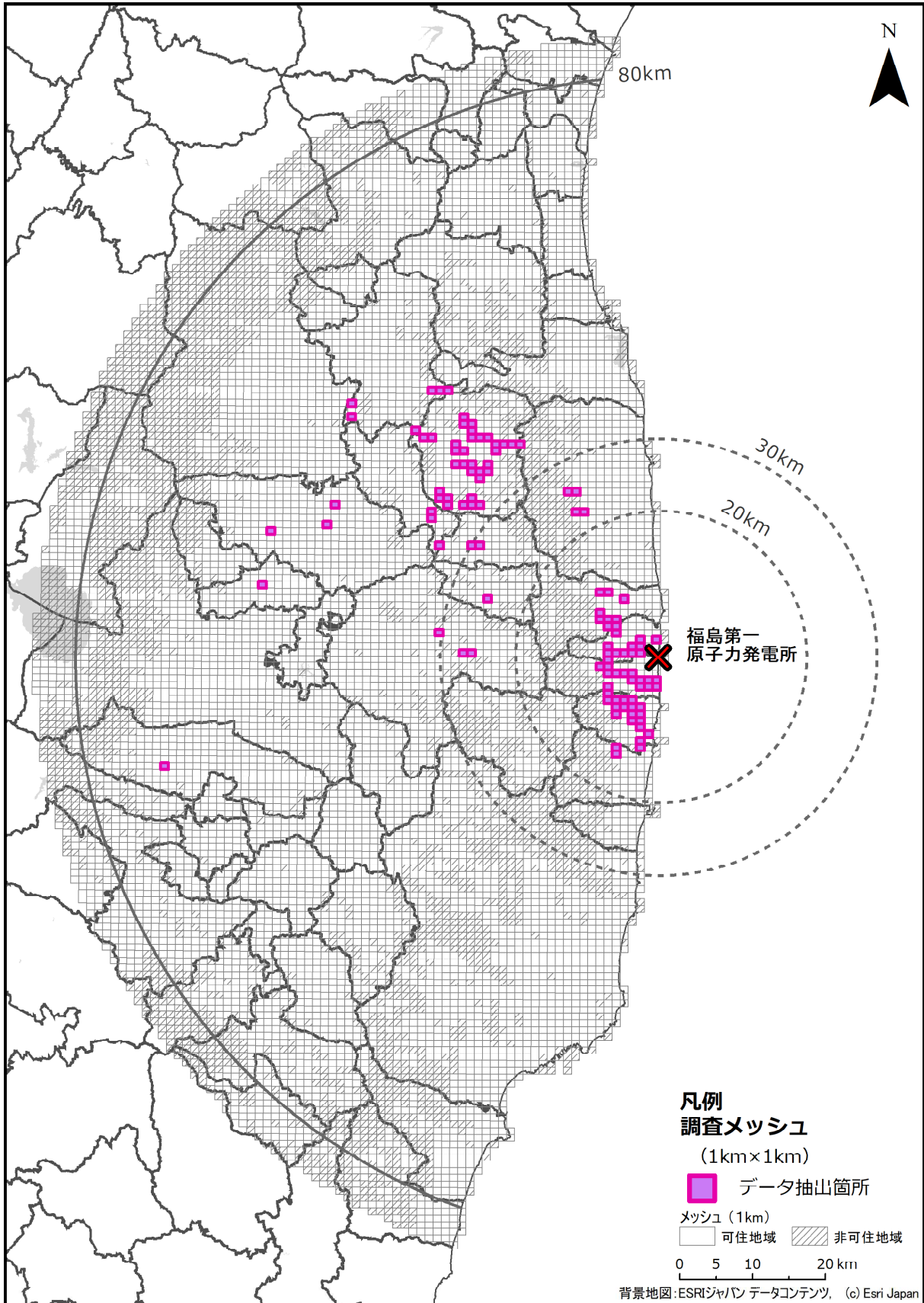


図 5-9 走行サーベイ、定点サーベイ、歩行サーベイ及び航空機サーベイの全測定手法によるデータセットがある調査メッシュ箇所





図 5-10 各モニタリングのイメージと測定対象

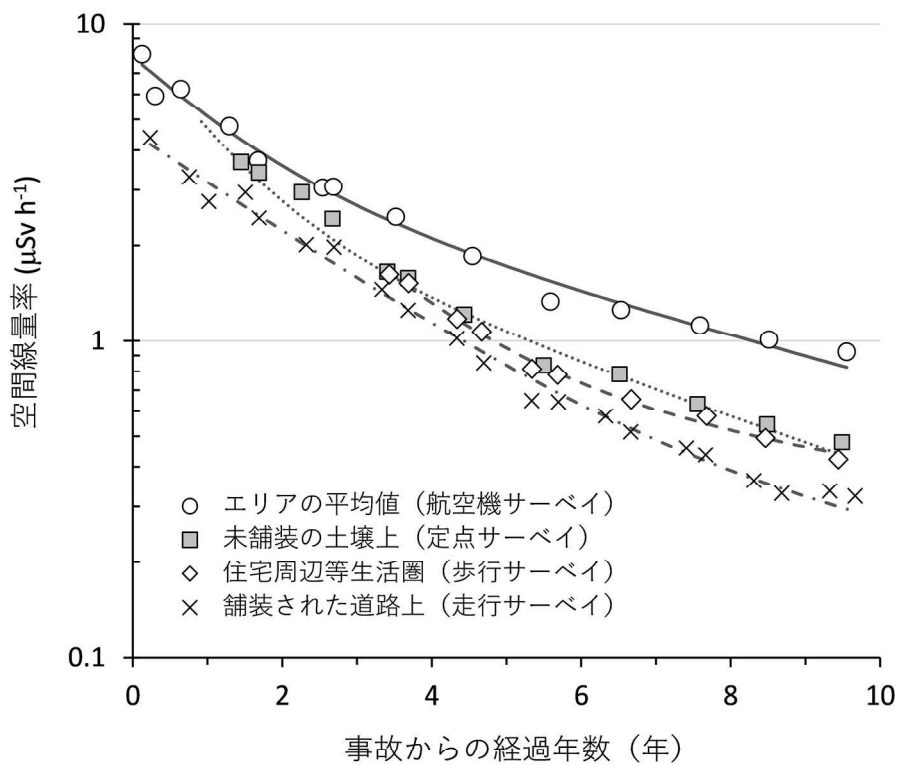


図 5-11 全測定手法によるデータセットがある調査メッシュにおける空間線量率の変化傾向