



JAEA-Technology
2023-024

DOI:10.11484/jaea-technology-2023-024

令和4年度東京電力株式会社
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
(受託研究)

Investigations on Distribution of Radioactive Substances Owing to
the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident
in the Fiscal Year 2022
(Contract Research)

福島マップ事業対応部門横断グループ
Group for Fukushima Mapping Project

March 2024

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課
〒319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).

Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan

E-mail: ird-support@jaea.go.jp

令和 4 年度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

(受託研究)

日本原子力研究開発機構

福島マップ事業対応部門横断グループ

(2023 年 11 月 30 日受理)

東京電力（株）福島第一原子力発電所（福島第一原発）事故による放射性物質の分布状況を平成 23 年 6 月より調査してきた。本報告書は、令和 4 年度の調査において得られた結果をまとめたものである。空間線量率については、走行サーベイ、平坦地上でのサーベイメータによる定点サーベイ、歩行サーベイ及び無人ヘリコプターサーベイを実施し、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そ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、*in-situ* 測定及び土壌中深度分布調査をそれぞれ実施した。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。モニタリングの重要度を相対的に評価するスコアマップを福島県及び福島第一原発から 80 km 圏内について作成するとともに、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。過去の海水中トリチウムの濃度データの変動幅を把握しその要因について考察した。総合モニタリング計画に基づき実施された海域モニタリングについて令和 4 年度の測定結果を集約するとともに、過去からの変動などに関して解析評価を行った。階層ベイズ統計手法を用いて、走行サーベイや歩行サーベイ等の調査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域に広げた統合マップを作成した。これらの他、「放射性物質モニタリングデータの情報公開サイト」への令和 4 年度の測定結果の公開、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測定データの CSV 化を実施した。

本研究は、原子力規制庁からの委託事業「令和 4 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」で得られた成果をとりまとめたものである。

原子力緊急時支援・研修センター：〒311-1206 茨城県ひたちなか市西十三奉行 11601-13

Investigations on Distribution of Radioactive Substances Owing to
the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident in the Fiscal Year 2022
(Contract Research)

Group for Fukushima Mapping Project

Japan Atomic Energy Agency
Hitachinaka-shi, Ibaraki-ken

(Received November 30, 2023)

This report presents results of the investigations on the distribution-mapping project of radioactive substances owing to TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (FDNPS) conducted in FY2022. Car-borne surveys, a measurement using survey meters, a walk survey and an unmanned helicopter survey were carried out to obtain air dose rate data to create their distribution maps, and temporal changes of the air dose rates were analyzed. Surveys on depth profile of radiocesium and in-situ measurements as for radiocesium deposition were performed. Based on these measurement results, effective half-lives of the temporal changes in the air dose rates and the deposition were evaluated. Score maps to classify the importance of the measurement points were created, and the factors causing changes in the score when monitoring data from multiple years were used were discussed. The range of fluctuation of past tritium concentration data in seawater was determined, and the causes of the fluctuation were discussed. Monitoring data in coastal area performed in 2022 owing to the comprehensive radiation monitoring plan was summarized, and temporal changes in cesium-137 were analyzed. Using the Bayesian hierarchical modeling approach, we obtained maps that integrated air dose rate distribution data acquired through surveys such as car-borne and walk surveys with respect to the region within 80 km from the FDNPS and Fukushima Prefecture. The measurement results for FY2022 were published on the “Database for Radioactive Substance Monitoring Data”, and measurement data were stored as CSV format. Radiation monitoring and analysis of environmental samples owing to the comprehensive radiation monitoring plan were carried out.

Keywords: Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident, Car-borne Survey, Walk Survey, NaI(Tl) Survey Meter, Unmanned Helicopter Survey, Deposit of Radiocesium, Depth Profile, Effective Half-life, Importance of Measurement Points, Tritium, Coastal Area Monitoring, Integrated Map, Monitoring Database

This report summarized the results of the distribution-mapping projects that JAEA carried out as commissioned business by the Nuclear Regulation Authority in FY2022.

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.....	4
2.1	調査目的.....	4
2.2	調査手法.....	4
2.2.1	走行サーベイ.....	4
2.2.2	定点サーベイ.....	5
2.2.3	歩行サーベイ.....	5
2.2.4	令和3年度との比較.....	5
2.2.5	測定手法間の比較.....	6
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3年度との比較.....	18
2.3.3	平成23年度との比較.....	19
2.3.4	測定手法間の比較.....	19
3.	無人ヘリによる発電所周辺の空間線量率測定.....	25
3.1	調査目的.....	25
3.2	調査手法.....	25
3.2.1	調査場所・期間.....	25
3.2.2	調査機器.....	25
3.2.3	データ取得方法.....	26
3.2.4	無人ヘリ測定データの空間線量率への換算.....	26
3.2.5	空間線量率マップの作成.....	27
3.3	調査結果.....	30
3.3.1	空間線量率マップ.....	30
3.3.2	測定結果の妥当性の検証.....	30
3.3.3	令和3年度との比較.....	30
3.3.4	天然放射性核種による空間線量率マップ.....	30
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.....	31
4.	土壌における放射性セシウムの分布状況.....	41
4.1	放射性セシウムの深度分布.....	41
4.1.1	調査目的.....	41
4.1.2	調査内容.....	41
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	62
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	64
5.1	目的	64
5.2	測定結果の変化傾向	64
5.3	実効半減期算出方法	69
5.4	空間線量率の実効半減期	70
5.5	放射性セシウム沈着量の実効半減期	74
5.6	同一メッシュにおける空間線量率の変化傾向	76
6.	測定箇所の重要度分類のためのスコア化の検討	79
6.1	目的	79
6.2	総合モニタリング計画	79
6.3	地域スコア化によるモニタリング代表性評価	81
6.3.1	地域スコア化手法	81
6.3.2	スコアの評価例	83
6.3.3	年度別のスコア評価例	86
6.4	評価結果のまとめ	90
7.	海洋のモニタリングデータの評価	91
7.1	処理水海洋放出に向けた海水中トリチウム濃度データの解析	91
7.1.1	モニタリングポイントと頻度	91
7.1.2	海水中のトリチウム濃度レベル	97
7.1.3	濃度変動幅の把握	102
7.1.4	濃度変動要因の推定	106
7.1.5	海産物中のトリチウム濃度の計測例	112
7.1.6	トリチウムモニタリングデータの報告レベルの提案	113
7.2	海域モニタリング地点の重要度分類	115
7.2.1	調査内容	115
7.2.2	調査結果	116
7.2.3	過年度評価結果との比較	119
8.	実測データの統合的解析	123
8.1	調査目的	123
8.2	調査内容	123
8.2.1	統合マップ作成に用いた空間線量率測定データ	123
8.2.2	測定データ統合手法の概要	124
8.3	80 km 圏内を対象とした統合マップの作成	125
8.3.1	統合マップ作成に使用した測定データ	125

8.3.2	歩行サーベイ結果の空間分布パターンの解析	129
8.3.3	走行サーベイと歩行サーベイの比較	131
8.3.4	航空機サーベイと歩行サーベイの比較	132
8.3.5	統合結果	134
8.4	福島県全域を対象とした統合マップの作成	136
8.4.1	対象とした測定データ	136
8.4.2	歩行サーベイを対象とした空間パターンの解析	139
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	140
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	141
8.4.5	統合結果	142
8.5	統合マップの精度検証	144
9.	空間線量率等分布マップの作成と公開	147
9.1	目的	147
9.2	EMDB での空間線量率等分布マップの作成と公開	147
9.3	EMDB の運用管理	148
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	150
10.1	測定方法及び測定結果	150
10.1.1	空間線量率	150
10.1.2	積算線量	150
10.1.3	大気浮遊じん中放射性物質濃度	150
10.1.4	環境試料（土壌及び松葉）中放射性物質濃度	151
10.2	測定結果の公開	151
11.	測定データのCSV化	160
11.1	CSV 等の形式で保存した測定データ	160
11.2	保存した測定データの公開	160
12.	まとめ	164
	謝辞	165
	参考文献	166
	付録 セシウム137の深度分布	172

Contents

1. Introduction	1
2. Air dose rate measurements on the ground	4
2.1 Purpose	4
2.2 Measurement method	4
2.2.1 Car-borne survey	4
2.2.2 Flat-ground fixed-point measurement	5
2.2.3 Walk survey	5
2.2.4 Comparison with results in 2021	5
2.2.5 Comparison between measurement methods	6
2.3 Results of measurements	10
2.3.1 Air dose rate distribution map	10
2.3.2 Comparison with results in 2021	18
2.3.3 Comparison with results in 2011	19
2.3.4 Comparison between measurement methods	19
3. Air dose rates measurement around FDNPS using unmanned helicopter	25
3.1 Purpose	25
3.2 Measurement method	25
3.2.1 Region and period of measurement	25
3.2.2 Measurement equipment	25
3.2.3 Data acquisition method	26
3.2.4 Conversion of measurement data of helicopter survey to air dose rates	26
3.2.5 Air dose rate distribution map	27
3.3 Results	30
3.3.1 Air dose rate distribution map	30
3.3.2 Verification of measurement result	30
3.3.3 Comparison with the results in 2021	30
3.3.4 Distribution map of air dose rate owing to natural radioactivity	30
3.3.5 Deposition density within 5 km from FDNPS	31
4. Distribution of radiocesium in ground soil	41
4.1 Depth profile	41
4.1.1 Purpose	41
4.1.2 Method	41
4.1.3 Results	45
4.2 Deposition density	48
4.2.1 Purpose	48
4.2.2 Method	48

4.2.3	Results	51
4.2.4	Evaluation of air dose rate owing to natural radioactivity	62
5.	Evaluation of effective half-life	64
5.1	Purpose	64
5.2	Changing trend	64
5.3	Analysis method for effective half-life	69
5.4	Effective half-life evaluated with air dose rate data	70
5.5	Effective half-life evaluated with radiocesium deposition data	74
5.6	Changing trend of air dose rate in same mesh	76
6.	Scoring of importance in measurement points	79
6.1	Purpose	79
6.2	Comprehensive radiation monitoring plan	79
6.3	Evaluation of representativity using scoring method	81
6.3.1	Scoring method	81
6.3.2	Example of scoring	83
6.3.3	Example of evaluation as for each year	86
6.4	Results of evaluation	90
7.	Evaluation of monitoring data in coastal area	91
7.1	Analysis of tritium concentration data in seawater	91
7.1.1	Points and frequency of sampling	91
7.1.2	Tritium concentration level in seawater	97
7.1.3	Determination of the range of concentration fluctuation	102
7.1.4	Estimation of factors for concentration fluctuation	106
7.1.5	Example of tritium concentration measurement in marine products	112
7.1.6	Proposal of reporting level on tritium monitoring data	113
7.2	Importance classification of ocean monitoring sites	115
7.2.1	Survey contents	115
7.2.2	Results	116
7.2.3	Comparison with results of previous years' evaluations	119
8.	Integral analyses method	123
8.1	Purpose	123
8.2	Survey contents	123
8.2.1	Features in air dose rates obtained by different measurement methods	123
8.2.2	Outline of integral analyses method	124
8.3	Evaluation of integral map inside 80 km range	125
8.3.1	Measurement data for analysis	125
8.3.2	Analysis of areal distribution of the result of walk survey	129
8.3.3	Comparison between car-borne and walk surveys	131

8.3.4	Comparison between air-borne and walk surveys	132
8.3.5	Results of integral analysis	134
8.4	Evaluation of integral map as for whole area of Fukushima Prefecture	136
8.4.1	Measurement data used for the analysis	136
8.4.2	Analysis of areal pattern for the corresponding walk survey data	139
8.4.3	Comparison between car-borne and corresponding walk survey data	140
8.4.4	Comparison between air-borne survey data and corresponding walk survey data	141
8.4.5	Results of integral method	142
8.5	Validation of integral map	144
9.	Creating air dose rate distribution map and its publishing on web	147
9.1	Purpose	147
9.2	Distribution map	147
9.3	Operation of distribution map	148
10.	Radiation monitoring and environmental sample analysis based on comprehensive monitoring plan	150
10.1	Method and result	150
10.1.1	Air dose rate	150
10.1.2	Integral dose	150
10.1.3	Radioactivity density in air	150
10.1.4	Radioactivity density in samples (soil and pine leaf)	151
10.2	Publishing of measurement result	151
11.	Store of measurement data	160
11.1	Store of measurement data	160
11.2	Publishing of stored data	160
12.	Summary	164
	Acknowledgements	165
	References	166
	Appendix Depth profile of Cesium-137	172

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	地上における空間線量率測定の実施期間及び測定エリア	7
表 2-2	測定手法間の比較の組み合わせ	7
表 2-3	令和 3 年度調査と比較した令和 4 年度調査の空間線量率測定結果の相対変化率	18
表 2-4	平成 23 年度調査と比較した令和 4 年度調査の空間線量率測定結果の変化傾向	19
表 3-1	テストサイトにおける換算パラメータ取得条件	27
表 5-1	評価された実効半減期の一覧	71
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	80
表 6-2	図 6-1 の作成に使用した空間線量率測定データ一覧	82
表 6-3	ランドマークデータの詳細情報	82
表 6-4	スコア付与例	84
表 6-5	平成 29 年度からスコアに変動が生じたメッシュ数 (平成 30 年度)	87
表 6-6	平成 29 年度からスコアに変動が生じたメッシュ数 (令和元年度)	87
表 6-7	平成 29 年度からスコアに変動が生じたメッシュ数 (令和 2 年度)	87
表 6-8	平成 29 年度からスコアに変動が生じたメッシュ数 (令和 3 年度)	87
表 7-1	総合モニタリング計画に記載されている海水モニタリング	92
表 7-2	海水モニタリングポイントの番号割り振り	93
表 7-3	近似関数の係数と半減期及び変動幅	102
表 7-4	各海域の海水ランク分け結果	117
表 7-5	各海域の海底土ランク分け結果	118
表 7-6	令和 3 年度調査での評価結果からランクが変化した地点 (海水)	120
表 7-7	令和 3 年度調査での評価結果からランクが変化した地点 (海底土)	120
表 7-8	平成 31 年度海域事業から令和 4 年度調査にかけてのランク変化状況	121
表 8-1	80 km 圏内統合マップ作成に使用したデータ一覧	126
表 8-2	関連のパラメータ	133
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	150
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	161
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	162
表 11-3	測定データをデータベースに保存した自治体リスト	163

図リスト

図 2-1	令和 4 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	8
図 2-2	令和 4 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	9
図 2-3	令和 4 年度 1 回目 (第 24 回) 走行サーベイによる空間線量率の測定結果	11
図 2-4	令和 4 年度 2 回目 (第 25 回) 走行サーベイによる空間線量率の測定結果	12
図 2-5	平成 23 年度から令和 4 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 2-6	令和 4 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	14
図 2-7	平成 23 年度から令和 4 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 ...	15
図 2-8	令和 4 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	16
図 2-9	平成 25 年度から令和 4 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 ...	17
図 2-10	令和 3 年度調査に対する令和 4 年度調査の測定結果の比	21
図 2-11	令和 4 年度調査での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 年度調査との比較	22
図 2-12	令和 4 年度調査での測定手法間の比較	23
図 2-13	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	24
図 3-1	無人ヘリの仕様等	28
図 3-2	令和 4 年度調査での無人ヘリサーベイの飛行軌跡	29
図 3-3	令和 4 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	32
図 3-4	平成 24 年度から令和 4 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	33
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	34
図 3-6	令和 3 年度調査と令和 4 年度調査での無人ヘリサーベイによる空間線量率測定結果の比較	35
図 3-7	無人ヘリサーベイによる空間線量率測定結果の令和 3 年度調査に対する令和 4 年度調査の比の分布	36
図 3-8	令和 3 年度調査から令和 4 年度調査に空間線量率が顕著に減少した要因の調査結果	37
図 3-9	令和 4 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	38
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 4 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	39
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 3 年度調査、右: 令和 4 年度調査)	40
図 4-1	令和 4 年度調査における放射性セシウム深度分布測定箇所	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 4 年度調査での深度分布測定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 4 年度調査の深度分布測定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 4 年度調査における可搬型 Ge 検出器を用いた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 4 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	54
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	56
図 4-11	令和 4 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 4-12	平成 23 年度から令和 4 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 4-13	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	61
図 4-14	令和 4 年度調査での 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	63
図 5-1	分布状況調査で得られた空間線量率の経時変化傾向	66
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経時変化傾向	68
図 5-3	空間線量率変化傾向及び指数関数の近似	72
図 5-4	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	75
図 5-5	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 データが存在するデータを抽出した箇所（基準地域メッシュ）	77
図 5-6	各測定手法の測定状況と測定対象のイメージ	78
図 5-7	全測定手法によるデータが存在する基準地域メッシュを抽出して解析した空間線量率 の変化傾向	78
図 6-1	基準地域メッシュ内の最大空間線量率マップ（令和 3 年測定データ）	83
図 6-2	平成 29 年度に測定された空間線量率のスコアマップ例	84
図 6-3	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のスコアを合計したスコア マップ例.....	85

図 6-4	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のスコアを合計したスコアマップ例	85
図 6-5	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のスコアを合計したスコアマップ例	86
図 6-6	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のスコアを合計したスコアマップ	88
図 6-7	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のスコアを合計したスコアマップ	88
図 6-8	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のスコアを合計したスコアマップ	89
図 6-9	令和 3 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のスコアを合計したスコアマップ	89
図 6-10	平成 29 年度に対する各年度のスコア変動	90
図 7-1	モニタリングポイントの位置	95
図 7-2	海水中のトリチウムモニタリング結果（令和 3 年度）	98
図 7-3	海水中のトリチウムモニタリング結果（令和 4 年度）	99
図 7-4	事故前（1988 年～1991 年）に福島県原子力センターにより測定された陸水（河川水、湖沼水）及び海岸の海水中トリチウム濃度の分析結果	101
図 7-5	事故後からの海水中のトリチウムモニタリング結果の検出下限値を超えた割合	103
図 7-6	傾向解析に使用したサンプリングポイント	104
図 7-7	トリチウム濃度の傾向解析	105
図 7-8	トリチウム濃度のトレンド（福島第一原発港湾内）	107
図 7-9	トリチウム濃度のトレンド（0-1 km）	108
図 7-10	トリチウム濃度のトレンド（1-2 km）	108
図 7-11	トリチウム濃度のトレンド（2-30 km）	109
図 7-12	トリチウム濃度のトレンド（>30 km）	110
図 7-13	降水量とトリチウム濃度との関係（上 2 つ：富岡川、下 3 つ：請戸川）	111
図 7-14	東京電力の実施するヒラメのサンプリングポイント	112
図 7-15	ヒラメ筋肉中 TWTF の経時変化	113
図 7-16	モニタリングデータの報告レベル案	114
図 7-17	海底土のセシウム 137 濃度の測定結果例	116
図 7-18	令和 3 年度調査での評価結果からランクが上昇した地点の放射能濃度変化（海水）	121
図 7-19	令和 3 年度調査での評価結果からランクが上昇した地点の放射能濃度変化（海底土）	122
図 8-1	令和 4 年度の統合マップ作成に使用した空間線量率データ（80 km 圏内）	127
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	128

図 8-3	避難指示区域（令和 2 年 3 月 10 日）の形状.....	128
図 8-4	令和 4 年度に実施された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.....	130
図 8-5	令和 4 年度に実施された避難指示区域内外及び全域（区域内外の区別なし）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.....	132
図 8-6	令和 4 年度に実施された避難指示区域内外及び全域（区域内外の区別なし）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.....	134
図 8-7	令和 4 年度に実施された各種測定結果を統合した 80 km 圏内の統合マップ（左）及び その標準偏差分布（右）.....	135
図 8-8	統合化を行う令和 4 年度の福島県全域における空間線量率測定結果.....	137
図 8-9	令和 4 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.....	139
図 8-10	令和 4 年度に実施された走行サーベイ（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（福島県全域）.....	140
図 8-11	令和 4 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） による空間線量率の相関分析結果（福島県全域）.....	141
図 8-12	令和 4 年度に実施された各種空間線量率測定結果を統合した福島県全域及び 80 km 圏内の統合マップ（上）及びその標準偏差分布（下）.....	143
図 8-13	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.....	145
図 8-14	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.....	145
図 8-15	令和 3 年度統合マップとの比較.....	146
図 9-1	EMDB における測定データ（第 23 回走行サーベイ）表示例.....	148
図 9-2	EMDB への令和 4 年度アクセス状況.....	149
図 10-1	総合モニタリング計画に基づき実施した空間線量率、積算線量、大気浮遊じん中放射 性物質濃度、土壌並びに指標植物（松葉）中放射性物質濃度の測定（採取）地点	152
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.....	153
図 10-3	総合モニタリング計画に基づく積算線量の経時変化.....	154
図 10-4	総合モニタリング計画に基づく大気浮遊じん中セシウム 137 濃度の経時変化.....	156
図 10-5	総合モニタリング計画に基づく土壌中セシウム 137 濃度の経時変化.....	157
図 10-6	総合モニタリング計画に基づく松葉中セシウム 137 濃度の経時変化.....	158

執筆者リスト

福島マップ事業対応部門横断グループ

眞田幸尚⁺¹、操上広志⁺¹、長尾郁弥⁺¹、御園生敏治⁺¹、佐々木美雪⁺¹、越智康太郎⁺¹、阿部智久⁺¹、
三上智⁺²、安藤真樹⁺²、志風義明⁺²、
石田睦司^{*1}、卜部嘉^{*1}、片岡亮平^{*1}、根本侑弥^{*1}、薮雅章^{*1}、沢田憲良^{*1}、宇野騎一郎^{*1}、
山田勉^{*2}、中曾根孝政^{*2}、

+1 福島研究開発部門廃炉環境国際共同研究センター環境影響研究ディビジョン

+2 安全研究・防災支援部門原子力緊急時支援・研修センター防災研究開発ディビジョン

*1 株式会社NESI

*2 日本放射線エンジニアリング株式会社

1. はじめに

平成 23 年 3 月 11 日に発生した太平洋三陸沖を震源とするマグニチュード 9.0 の東北地方太平洋沖地震とそれに伴って発生した津波により、東京電力（株）福島第一原子力発電所（以下「福島第一原発」という。）の事故（以下「事故」という。）が発生し、その結果、福島第一原発の原子炉施設から環境中へ大量の放射性物質が放出された。事故状況の全体像を把握して影響評価や対策に資するために、文部科学省からの委託を受けた日本原子力研究開発機構（以下「原子力機構」という。）が多くの大学や研究機関と協力し、平成 23 年 6 月から平成 24 年度に「放射性物質の分布状況等に関する調査研究」、「福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の第二次分布状況等に関する調査研究」及び「福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の長期的影響把握手法の確立」を実施した。これら 3 回の調査を継承する形で、平成 25 年度には原子力規制庁からの委託を受け「平成 25 年度東京電力（株）福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の長期的影響把握手法の確立」、平成 26 年度は「東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約及び移行モデルの開発」を実施した¹⁾。平成 27 年度以降は同一の調査名称となり、「東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約」を実施した²⁾。令和 4 年度においても、引き続き、「令和 4 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」を実施した。以下、これら各調査を「平成〇年度調査」又は「令和〇年度調査」といい、総称して「分布状況調査」という。分布状況調査において実施してきた各種測定の実施時期を表 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測定結果のマップ化、
- 2) 放射性セシウムの中移行メカニズムの調査（平成 26 年度終了）、
- 3) 空間線量率予測モデルの開発（平成 27 年度終了）、
- 4) 適正な調査地点及び頻度の検討（モニタリングポイントの分析）、
- 5) 実測データの統合的解析、
- 6) 海洋のモニタリングデータについての詳細な解析評価、
- 7) 放射性物質モニタリングデータの情報公開サイト（令和 3 年度調査までは「拡大マップサイト」）等を通じたデータの公開

等を実施してきた。

令和 4 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等についてその変化傾向を把握するため、沈着量や空間線量率の詳細な調査を実施すること、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である。本報告書では、令和 4 年度調査で得られた成果についてまとめる。

表 1-1 各調査における測定項目ごとの実施時期 (1/2)

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

*1 走行サーベイにおける(J)は原子力機構、(自)は自治体による測定。

*2 定点サーベイ：人為的なく乱のない平坦な開かれた土地における空間線量率分布測定。

*3 平成 23 年度（第 1 次及び第 2 次（一部））調査では in-situ 測定はせず土壌試料採取を実施。括弧内日付は放射能濃度を補正した基準日。

*4 () 内は通算調査次数の意味。

*5 平成 23 年度（第 1 次及び第 2 次（一部））調査の深度分布は鉄パイプ等により試料採取。

表 1-1 各調査における測定項目ごとの実施時期 (2/2)

	平成 29 年度 (第 8 次)*4	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)	令和 4 年度 (第 13 次)
走行サーベイ*1	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	第 24 回 (J)R4/6/22-7/19 第 25 回 (J)R4/11/7-12/7 (自)R4/10/17- 12/6
歩行サーベイ	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	第 14 回 R4/5/11-11/18
定点サーベイ*2	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	第 16 回 R4/8/23-10/20
無人ヘリ	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	第 14 回 R4/5/11-9/15
沈着量*3 (in-situ)	第 10 回 H29/8/30-10/11 (H29/10/1)	第 11 回 H30/9/13-10/25 (H30/10/1)	第 12 回 R1/8/8-11/1 (R1/10/1)	第 13 回 R2/8/6-10/15 (R2/10/1)	第 14 回 R3/8/6-10/19 (R3/10/1)	第 15 回 R4/8/22-10/21 (R4/10/1)
深度分布 (スクレーパー プレート)	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	第 15 回 R4/8/17-10/6

*1 走行サーベイにおける(J)は原子力機構、(自)は自治体による測定。

*2 定点サーベイ：人為的なく乱のない平坦な開かれた土地における空間線量率分布測定。

*3 括弧内日付は放射能濃度を補正した基準日。

*4 ()内は通算調査次数の意味。

2. 地上における広域の空間線量率の分布測定

2.1 調査目的

分布状況調査では、事故により福島第一原発から放出された放射性物質の現状における沈着状況等を詳細に調査しその変化傾向を把握するとともに多角的に空間線量率を評価するため、走行サーベイ、サーベイメータによる人為的なかく乱のない平坦な開かれた土地における空間線量率分布測定（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継続実施している。令和4年度調査においても、これまでと同様の手法により地上における広域の空間線量率の分布測定を行った。

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。）を中心に人為的なかく乱のない平坦な開かれた土地を対象として現在の空間線量率の詳細な分布状況を把握するとともに、過去の測定結果との比較により空間線量率の経時的変化の特徴を調べることを目的としている。

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 圏内を対象に 1 回、岩手県から千葉県までの 8 県を含む東日本広域を対象に 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 は測定開始前に標準線源を用いて点検・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 回の測定間隔（約 4.5 ヶ月）での放射性セシウムの物理的減衰に伴う空間線量率の減少は 1%程度と評価される。この減少率は測定機器の有する不確かさよりも十分に小さいことを考慮して、空間線量率測定値を一定の日付に揃える減衰補正を行わず、測定した日の測定結果

をそのまま使用した。道路上において連続的に測定された空間線量率の測定結果を基に、これまでの分布状況調査と同様に、走行地域を総務省統計局により定義される1 km×1 kmの「基準地域メッシュ」をベースとした100 m×100 mのメッシュ（以下「100 mメッシュ」という。本報告書において、他の大きさのメッシュも同様に20 mメッシュや10 mメッシュなどという。）に分割し、そのメッシュ内に含まれる空間線量率の値を平均してメッシュの代表値とした。自治体による測定と原子力機構による広域での測定が同時期であるため、両者を合わせて100 mメッシュ平均値を求めた。

2.2.2 定点サーベイ

標準線源を用いて点検・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を用いて測定箇所的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4箇所を当初予定箇所から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）歩くことで空間線量率データ及び位置情報を連続的に収集した。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メッシュを選んだ（図2-2参照）。本測定では令和元年度に改良したKURAMA-II測定システム³⁾を使用し、あらかじめ作成した測定ルート情報をタブレットに表示させ、その測定ルートをなぞりながら実施した。測定ルートは、主に道路脇や歩道の上であり、そのほとんどは舗装されている。

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。測定値の統計的なばらつきを低減させると同時に、空間線量率の2次元的な分布が詳細に把握できるように、対象とした測定箇所（歩行地域）は基準地域メッシュをベースとした20 mメッシュに分割し、そのメッシュ内に含まれる空間線量率の値を平均して20 mメッシュの代表値とした。

2.2.4 令和3年度との比較

測定結果の妥当性と令和3年度調査での測定結果からの変化傾向を確認するため測定手法ごとに令和3年度と令和4年度の測定結果を比較した。比較に用いるデータは、基準地域メッシュごとに、メッシュ内に入る測定結果を平均した。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 3 年度調査に対する令和 4 年度調査の相対変化率は、 $(D_{R4} - D_{R3}) / D_{R3}$ である（ここで、 D_{R3} 及び D_{R4} はそれぞれ令和 3 年度及び令和 4 年度調査での測定結果）。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。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 地上における空間線量率測定の実施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 24 回	第 25 回		第 16 回	第 14 回
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
測定期間	R4/6/22 ～7/19	R4/11/7 ～12/7	R4/10/17 ～12/6	R4/8/23 ～10/20	R4/5/11 ～11/18
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	8,475.7 km	13,110 km	14,478.4 km	実績 5,026 点 (中止 4 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 測定手法間の比較の組み合わせ

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

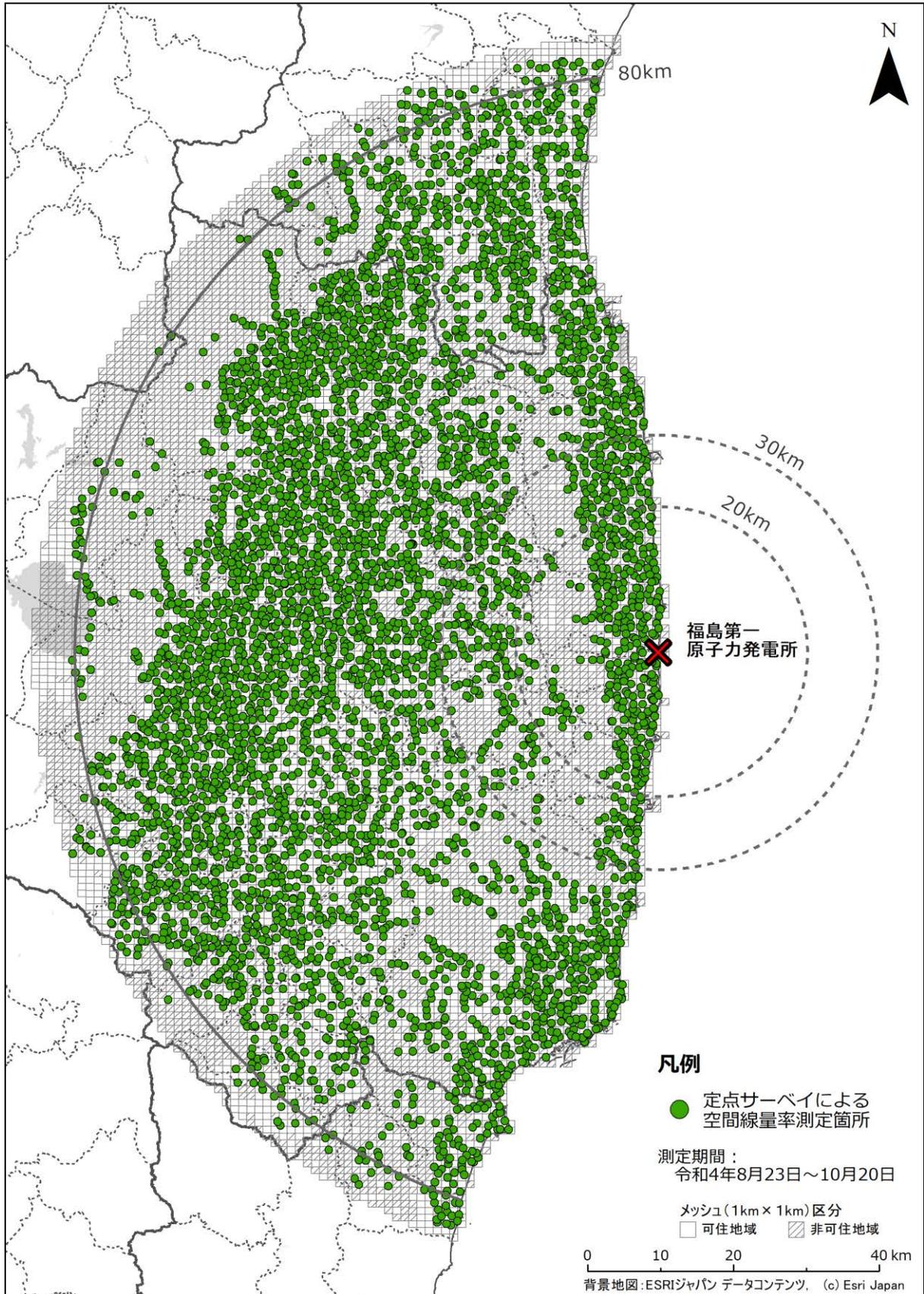


図 2-1 令和4年度調査における定点サーベイによる空間線量率の測定箇所

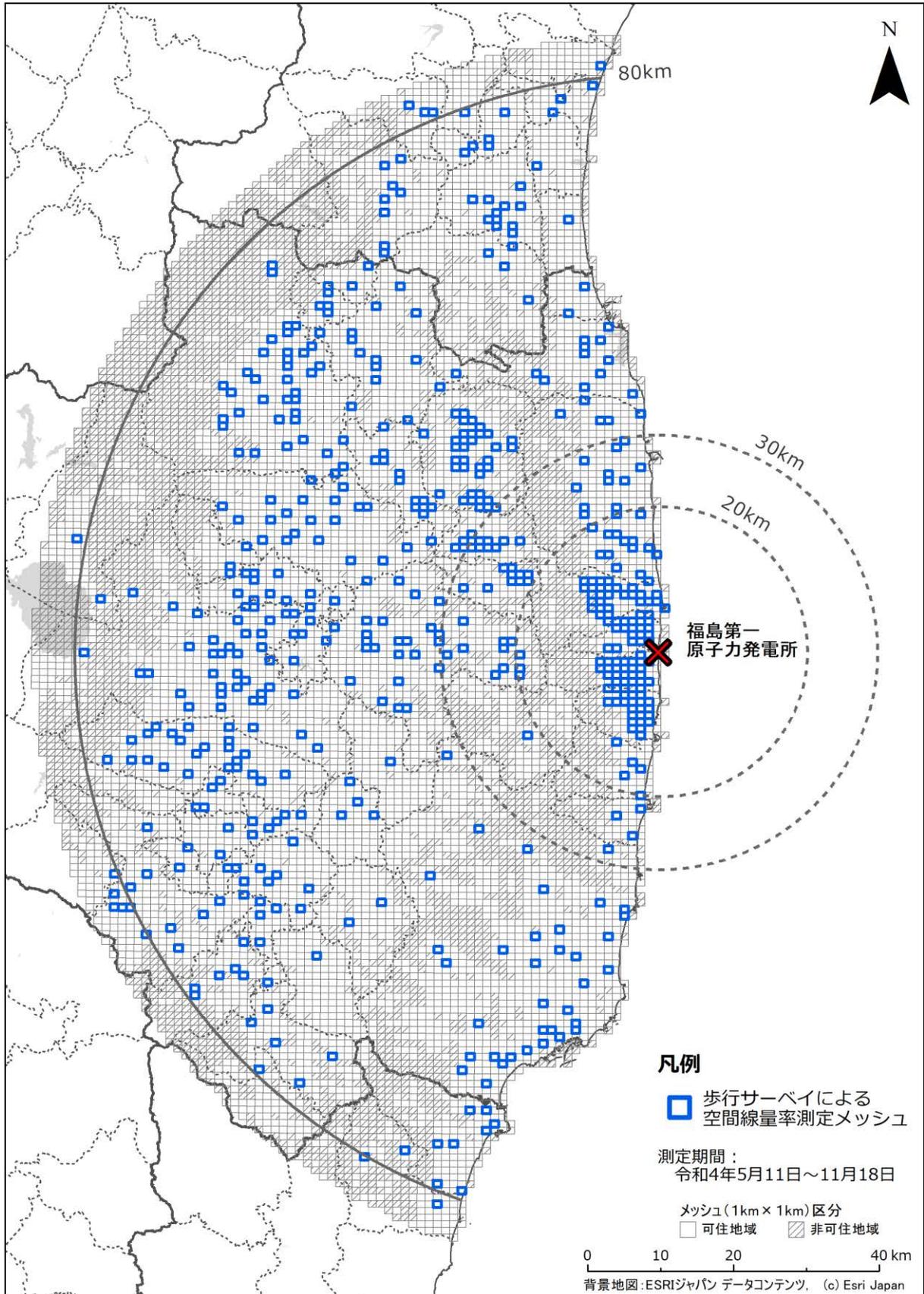


図 2-2 令和4年度調査における歩行サーベイによる空間線量率の測定箇所

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4年度調査での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2-3及び図2-4に示す。なお、空間線量率分布マップでは天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる（以下、本章において同様）。福島県外で0.2 $\mu\text{Sv/h}$ 以上であったのは、2回の合計約106,000メッシュのうち栃木県及び茨城県の5メッシュのみであった。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4年度2回目（第25回走行サーベイ）までの測定結果（主に80 km圏内について事故後約3ヶ月、18ヶ月、28ヶ月、52ヶ月、76ヶ月、100ヶ月、123ヶ月及び136ヶ月における空間線量率分布マップ）を図2-5に示す。福島第一原発周辺及び北西方向にかけて比較的高い空間線量率を示す赤から黄色で示される箇所が減少してきていることが分かる。なお、空間線量率の経時変化傾向の定量的評価については第5章で述べる（定点サーベイ及び歩行サーベイも同様）。

2) 定点サーベイ

令和4年度調査での定点サーベイによる空間線量率の測定結果を図2-6に示す。また、平成23年度調査から令和4年度調査までの測定結果（事故後約3ヶ月、17ヶ月、27ヶ月、41ヶ月、53ヶ月、78ヶ月、102ヶ月及び138ヶ月における空間線量率分布マップ）を図2-7に示す。走行サーベイ同様、比較的高い空間線量率を示す赤から黄色で示される箇所が減少してきていることが分かる。

3) 歩行サーベイ

令和4年度調査での歩行サーベイの結果に基づき作成した空間線量率分布マップを図2-8に示す。また、平成25年度以降の歩行サーベイの測定結果（事故後約27ヶ月、41ヶ月、52ヶ月、64ヶ月、80ヶ月、102ヶ月及び137ヶ月における空間線量率分布マップ）を図2-9に示す。比較的高い空間線量率を示す黄色で示される箇所が減少してきていることが分かる。なお、平成25年度の測定開始当初は帰還困難区域での測定がほとんどないため9.5 $\mu\text{Sv/h}$ 以上となる橙色や赤色で示されるデータは少ない。

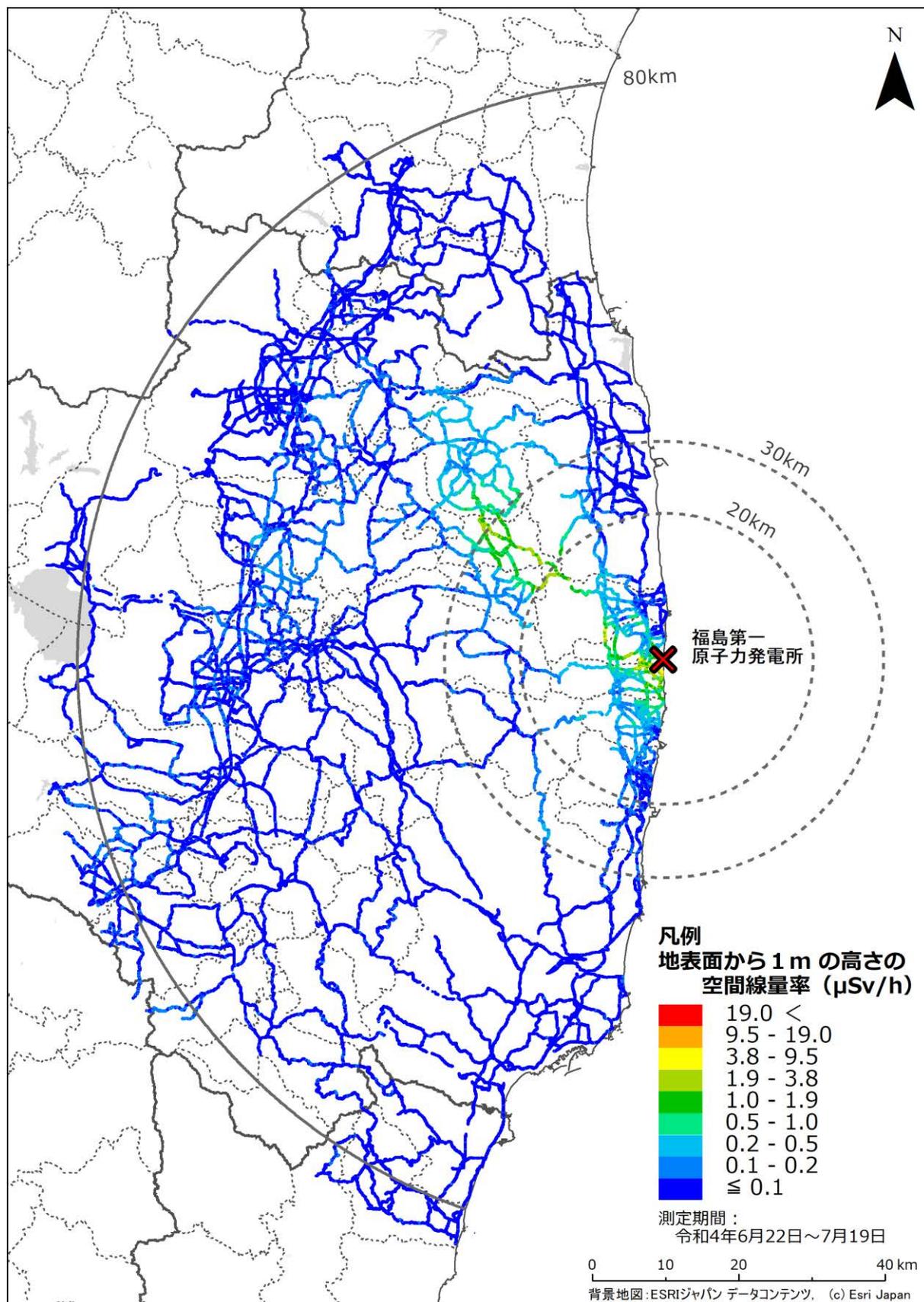


図 2-3 令和4年度1回目(第24回)走行サーベイによる空間線量率の測定結果
(天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

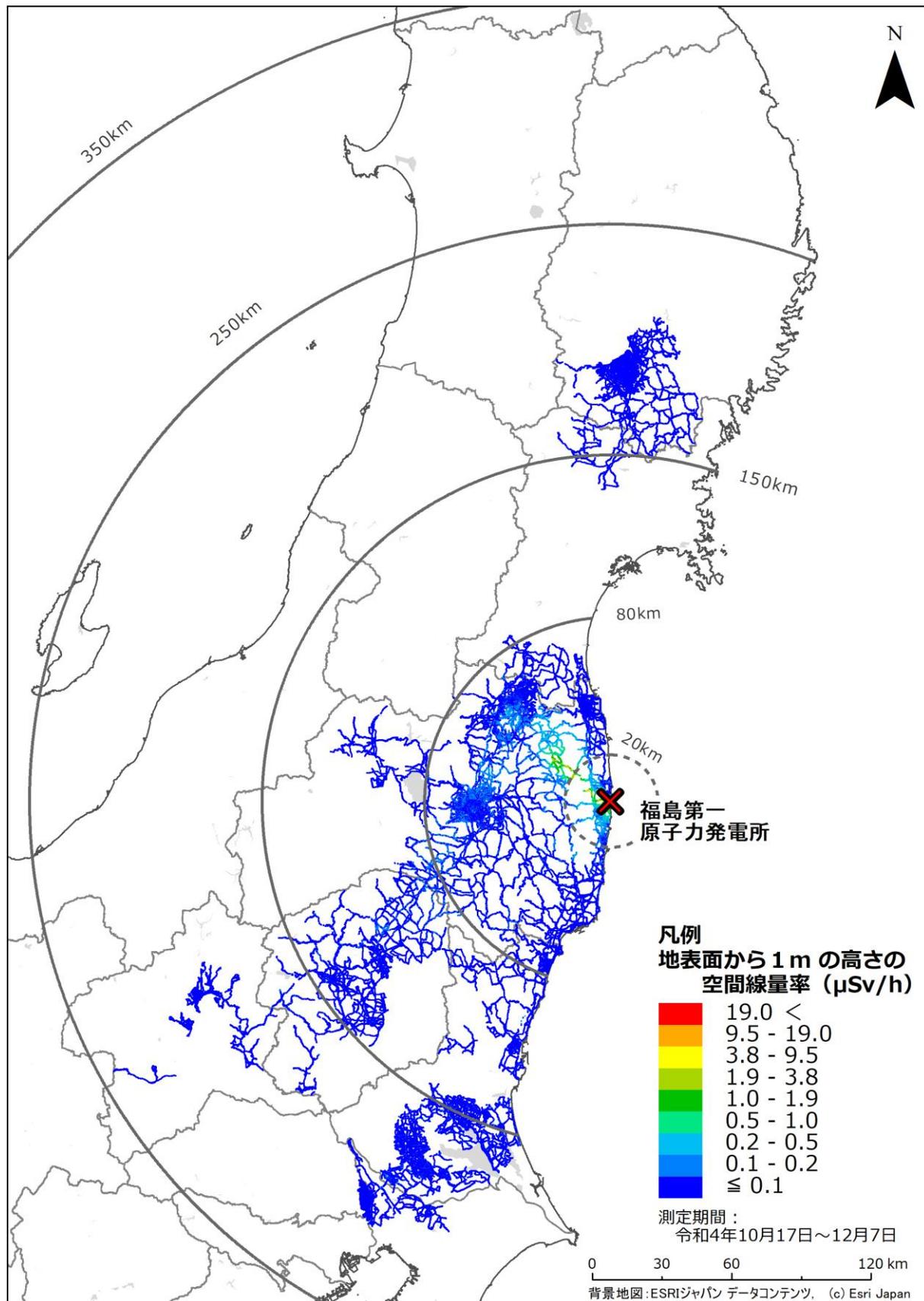


図 2-4 令和4年度2回目(第25回)走行サーベイによる空間線量率の測定結果
 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

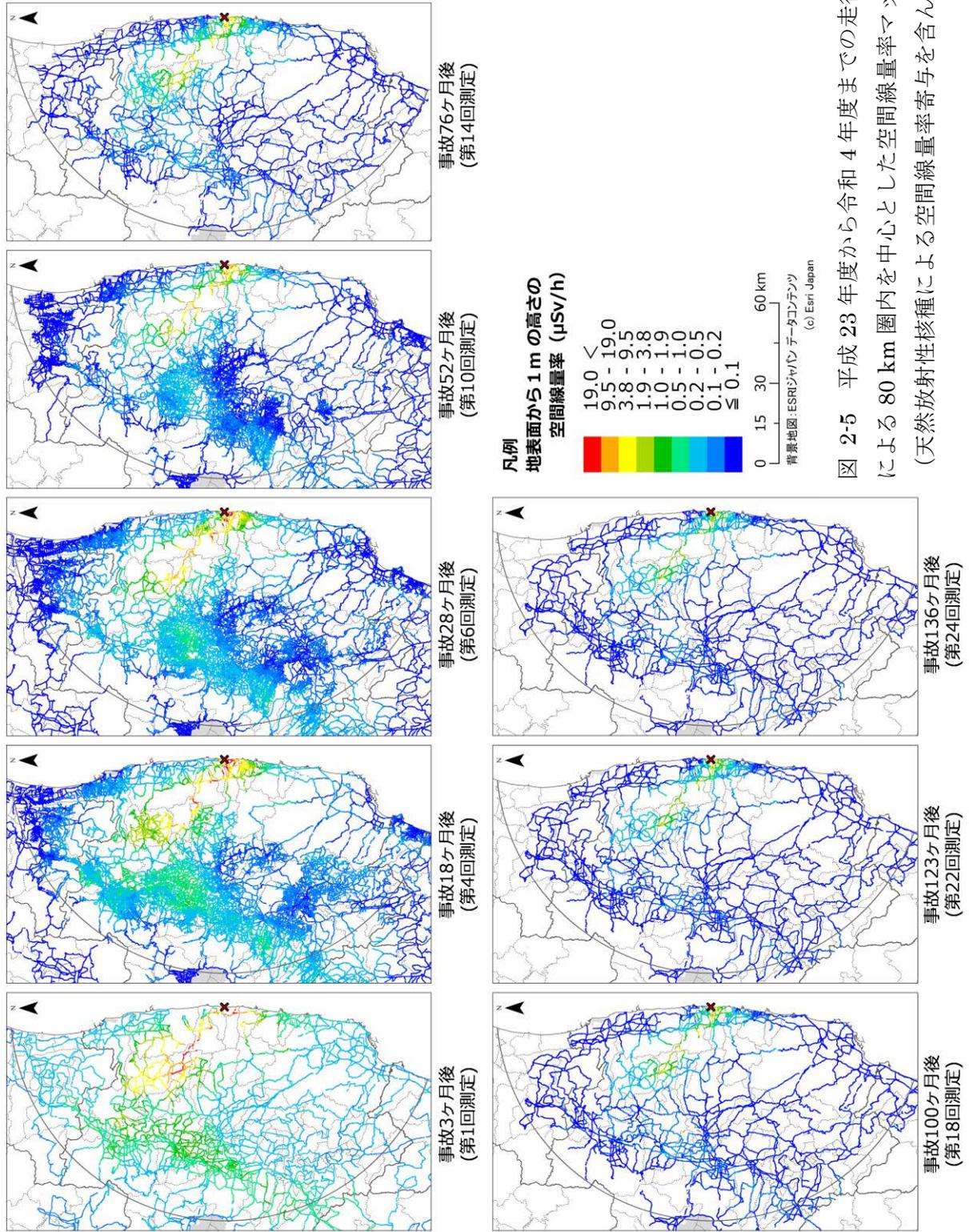


図 2-5 平成 23 年度から令和 4 年度までの走行サーベイによる 80 km 圏内を中心とした空間線量率マップの変化 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

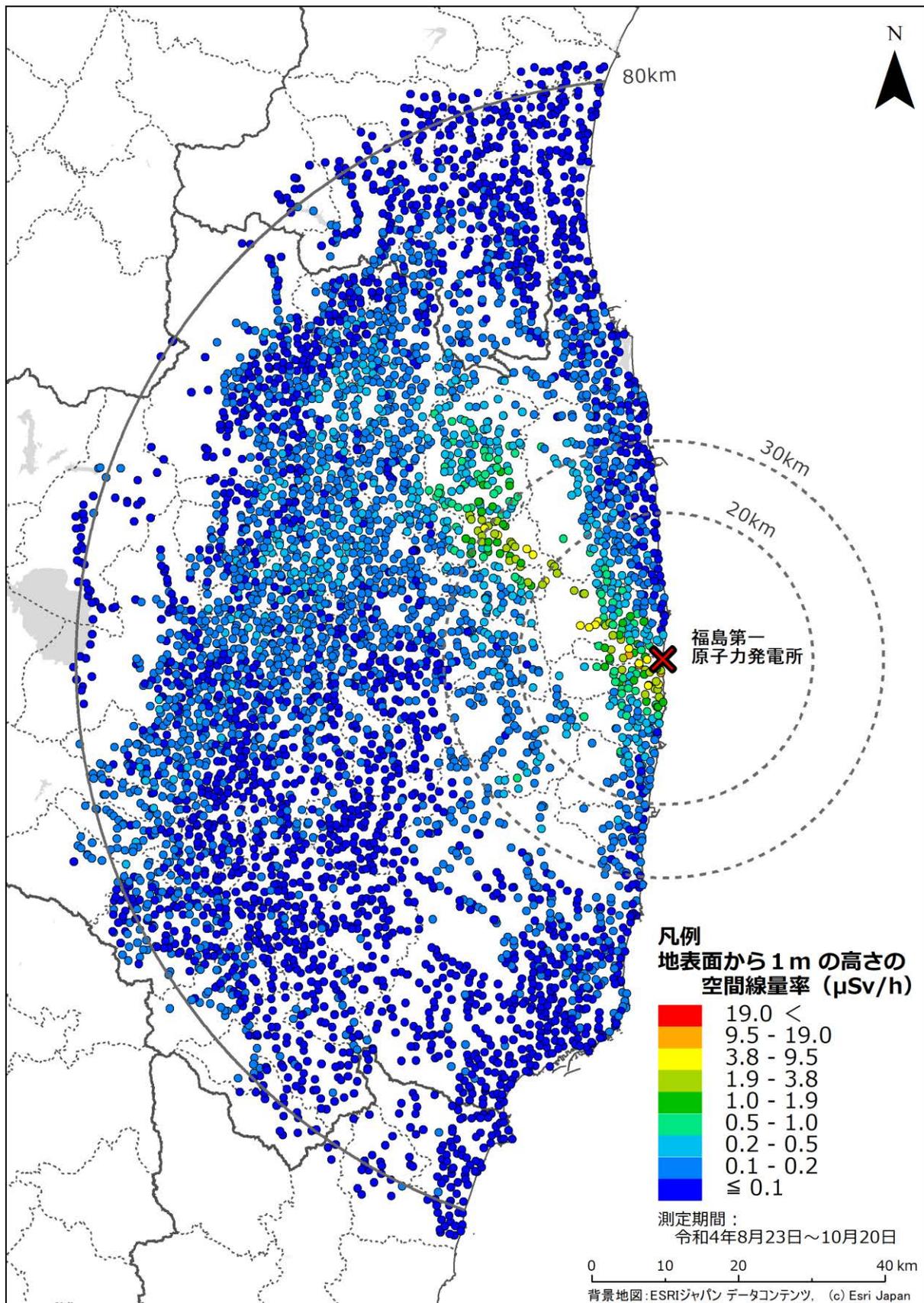


図 2-6 令和4年度調査における定点サーベイによる空間線量率の測定結果
 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

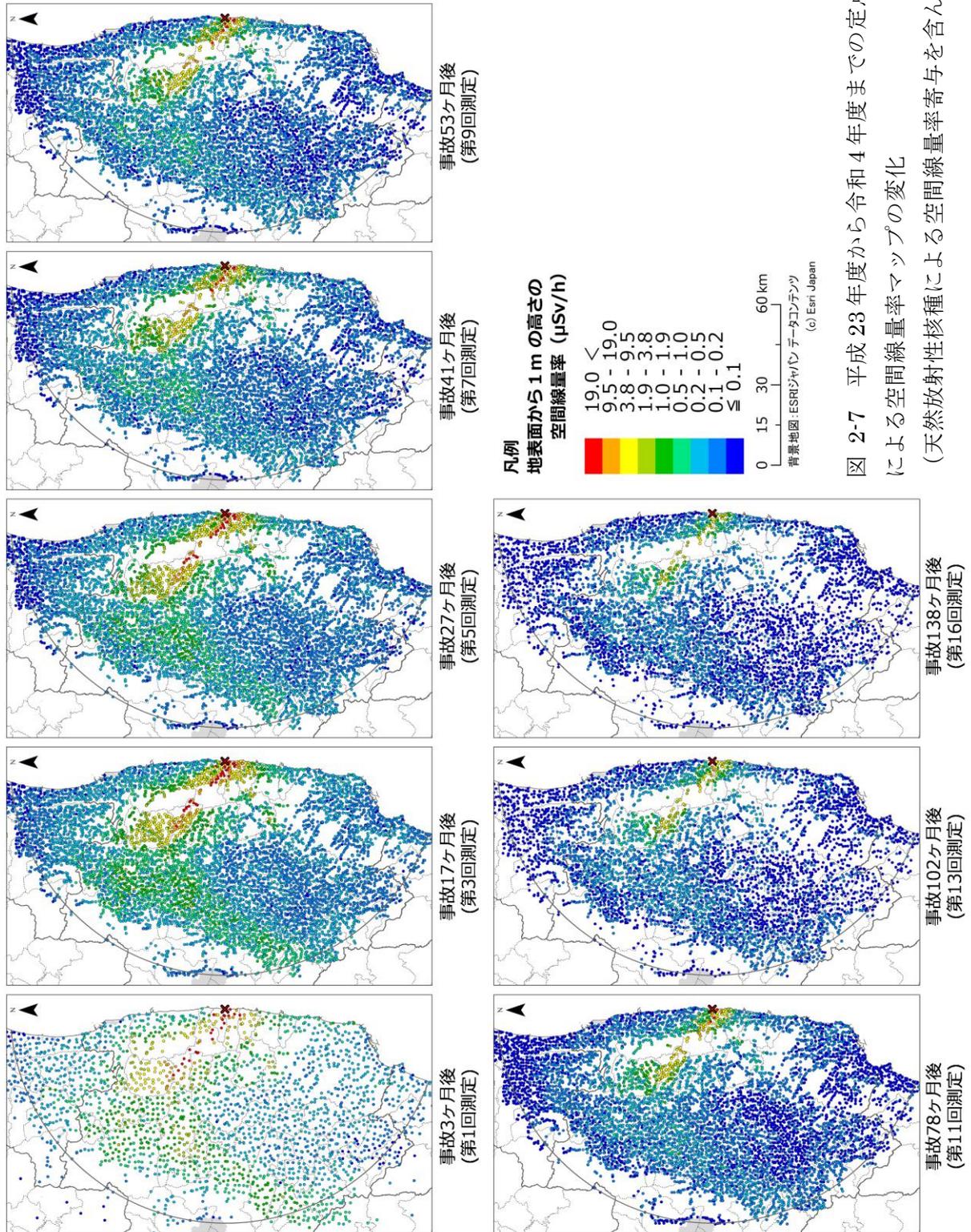


図 2-7 平成 23 年度から令和 4 年度までの定点サーベイによる空間線量率マップの変化 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

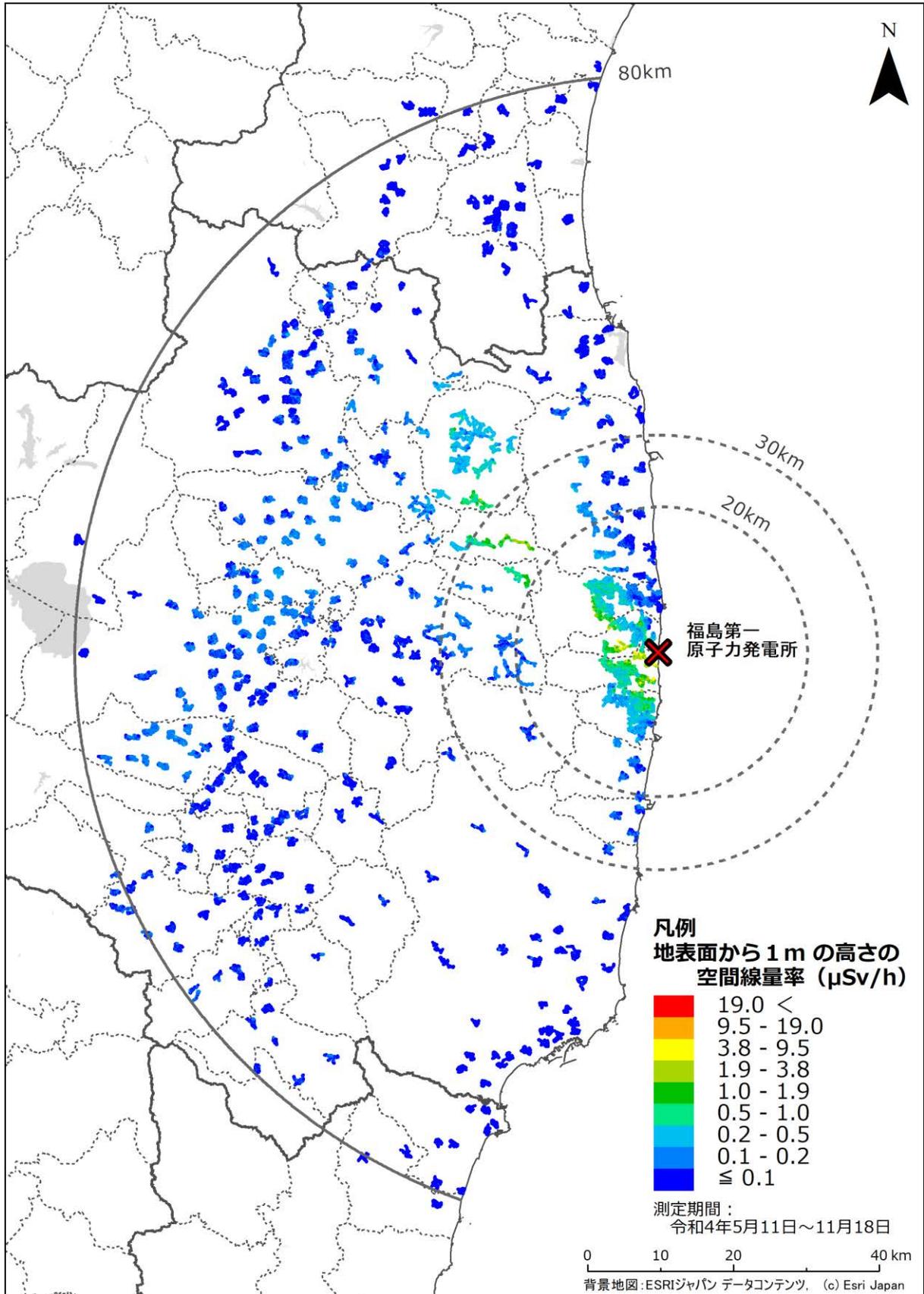


図 2-8 令和4年度調査における歩行サーベイによる空間線量率の測定結果
 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

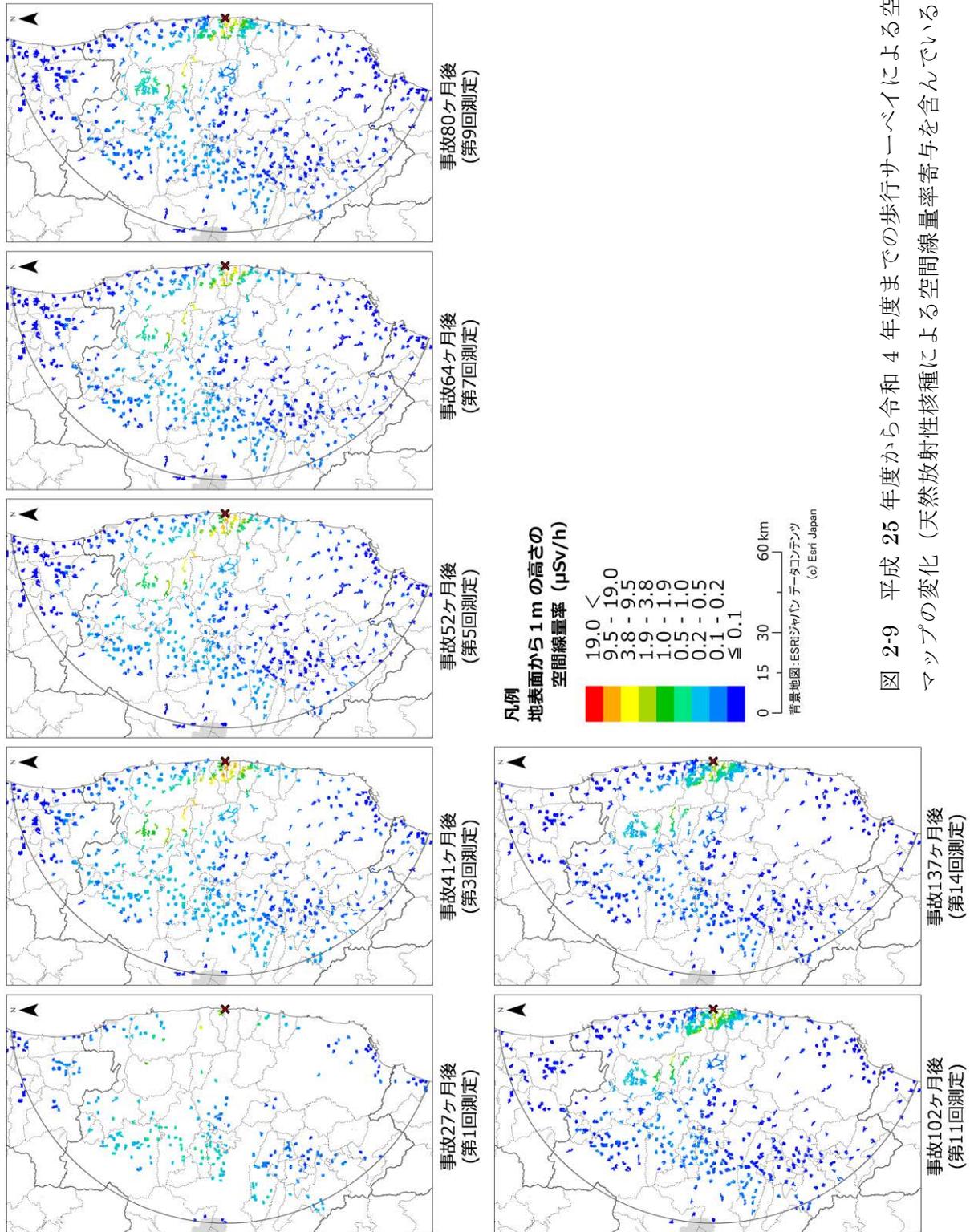


図 2-9 平成 25 年度から令和 4 年度までの歩行サーベイによる空間線量率マップの変化 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

2.3.2 令和 3 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 3 年度調査での測定結果との比較について、散布図及び式(1)により計算した相対変化率 RC のヒストグラム及び積算割合を図 2-10 に示す。全測定手法について令和 3 年度調査と令和 4 年度調査の空間線量率測定結果は良い相関関係にあり、相対変化率 RC は正規分布に近い釣鐘型を示した。

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計算式を式 (3) に示す。

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

ここで、

D_t : 時間 t における空間線量率、 D_0 : 時間 $t=0$ での空間線量率

λ_{134} : 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、文部科学省と日本分析センターが平成 23 年 8 月 13 日に実施した土壌サンプルと 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 2 年度から令和 3 年度までの空間線量率の変化率 (走行サーベイ-2.6%、定点サーベイ+1.4%、歩行サーベイ-4.1%)⁴⁾ に対して令和 3 年度から令和 4 年度までは、定点サーベイ-0.6%、歩行サーベイ-1.6%と変化率が小さくなっている。走行サーベイについては +0.3%となり令和 3 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注意する必要がある。

表 2-3 令和 3 年度調査と比較した令和 4 年度調査の空間線量率測定結果の相対変化率

	走行サーベイ *	定点サーベイ	歩行サーベイ
令和 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
令和 4 年度の測定期間	R4/6/22-R4/7/19	R4/8/23-R4/10/20	R4/5/11-R4/11/18
放射性セシウムの半減期による変化率	-4.9%	-4.9%	-4.5%
測定結果による相対変化率の平均値	0.3%	-0.6%	-1.6%

* 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 2-11 に平成 23 年度調査における測定結果と令和 4 年度調査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 4 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 2-11 (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 2-11 (b) に平成 23 年度調査での測定結果のうち $0.5 \mu\text{Sv/h}$ 以上であった測定データを用いた比較結果を示す。また、図 2-11 (c) には定点サーベイの結果の内、平成 23 年度調査での測定結果が $0.5 \mu\text{Sv/h}$ 以上であった測定データについての比較結果を示す。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 年度調査と比較した令和 4 年度調査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 ($\geq 0.5 \mu\text{Sv/h}$) *2	定点サーベイ ($\geq 0.5 \mu\text{Sv/h}$) *2
平成 23 年度の測定期間	H23/6/4-H23/6/13		H23/6/4-H23/7/8
令和 4 年度の測定期間*1	R4/10/17-R4/12/7		R4/8/23-R4/10/20
放射性セシウムの 半減期による変化率		-76%	-76%
測定結果による 相対変化率の平均値	-84%	-90%	-87%

*1 走行サーベイは令和 4 年度 2 回目（通算第 25 回）

*2 平成 23 年度調査での空間線量率測定結果が $0.5 \mu\text{Sv/h}$ 以上の測定データのみで評価

2.3.4 測定手法間の比較

令和 4 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 2-12 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 25%小さい（図 2-12 (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 2-12 (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 18%小さくなっており（図 2-12 (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 2-13 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。

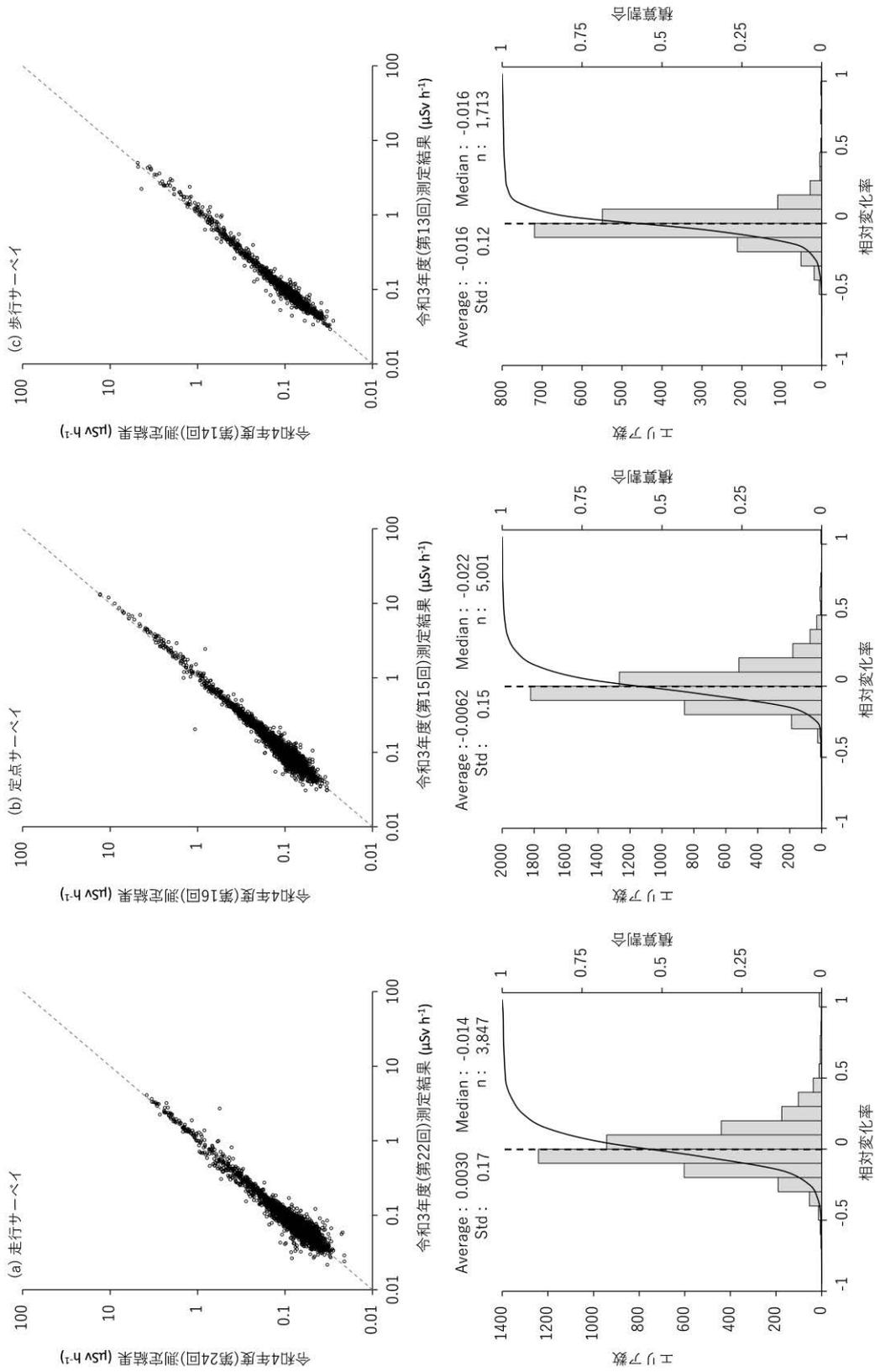


図 2-10 令和3年度調査に対する令和4年度調査の測定結果の比
 (相関図の破線は $y=x$ 、Std は標準偏差、n はデータ数を意味する。)

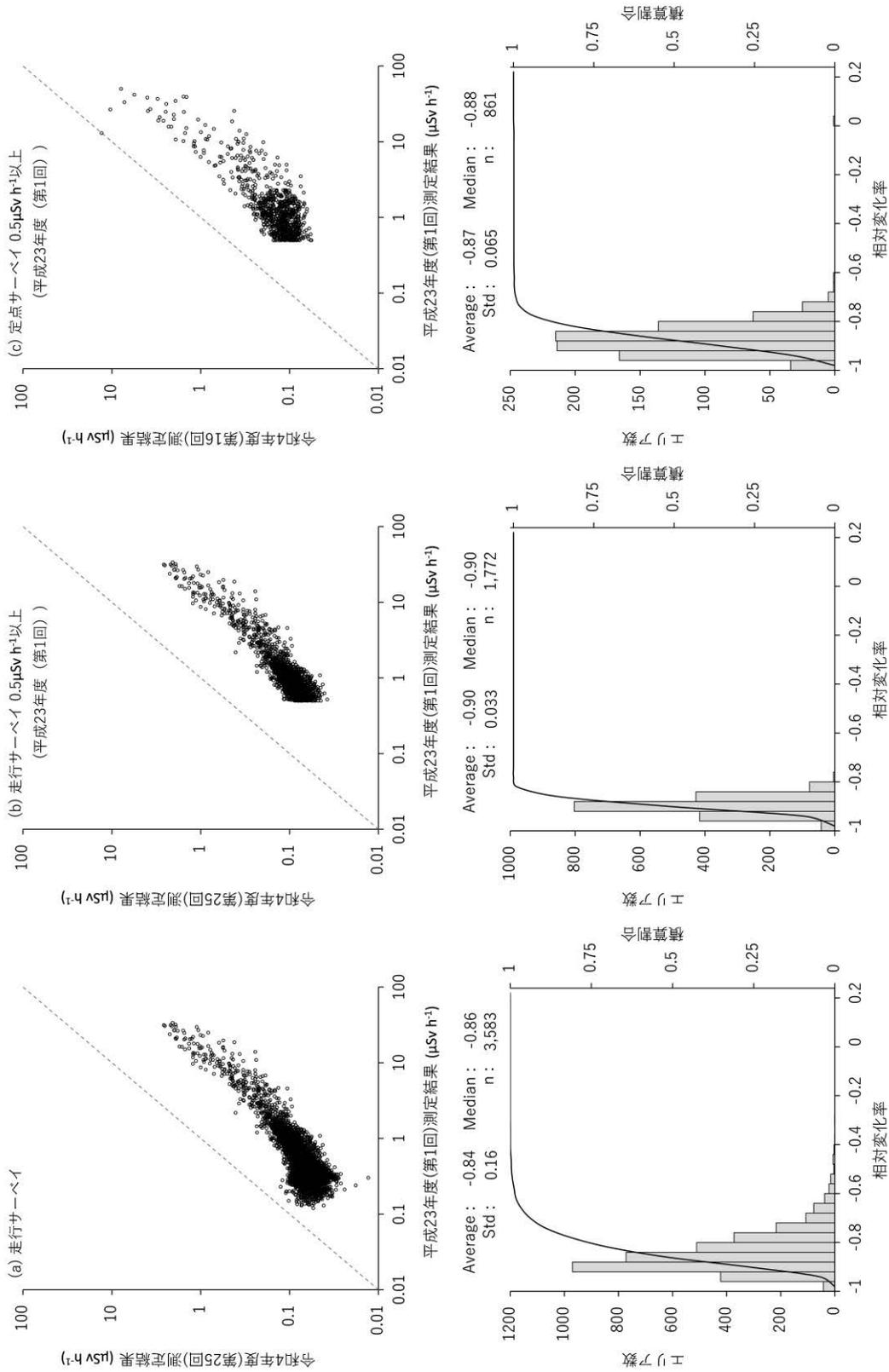


図 2-11 令和4年度調査での走行サーベイ及び定点サーベイによる空間線量率結果の平成23年度調査との比較
(相関図の破線は $y=x$ 、Std は標準偏差、n はデータ数を意味する。)

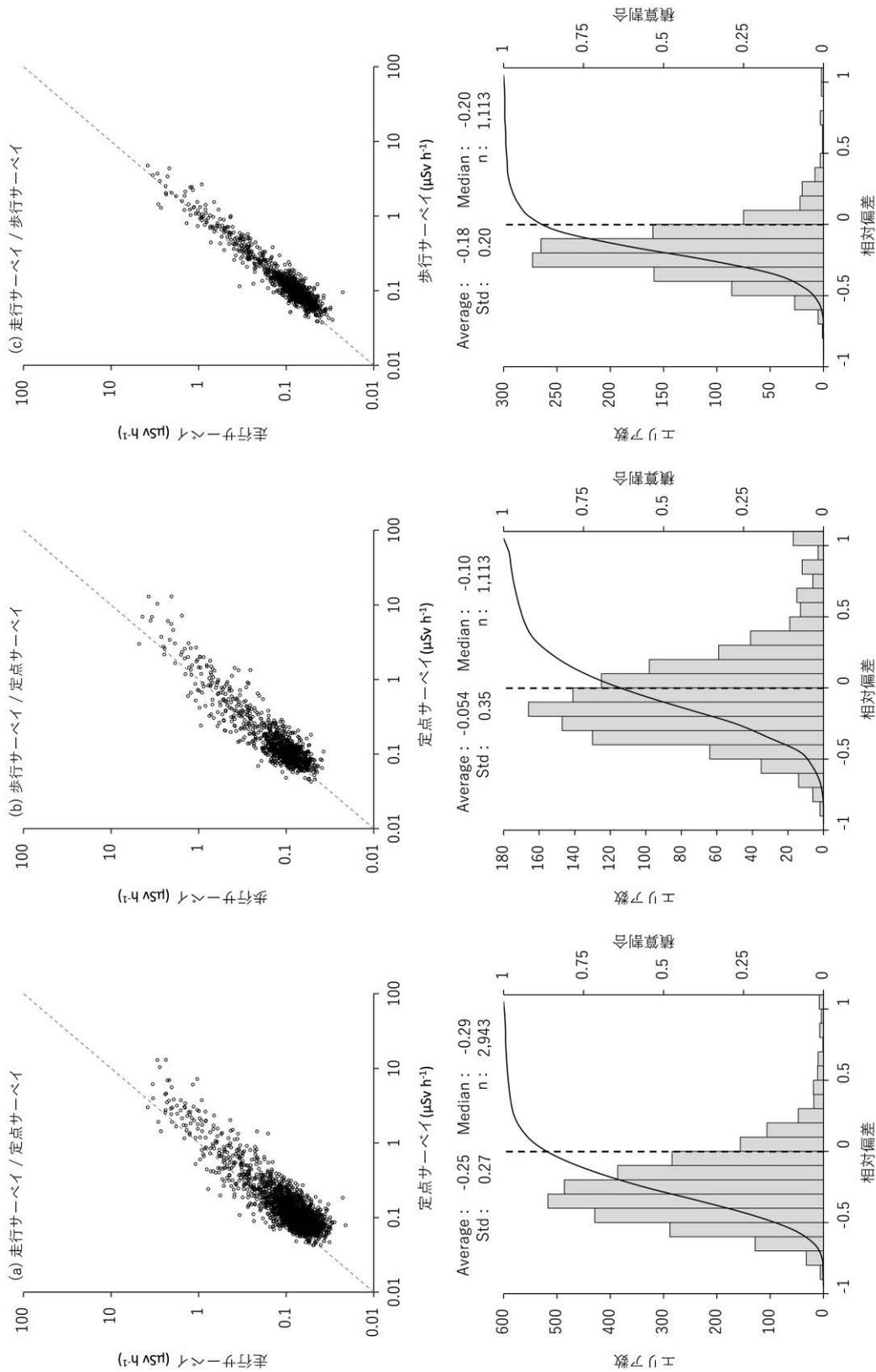


図 2-12 令和 4 年度調査での測定手法間の比較

(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。)

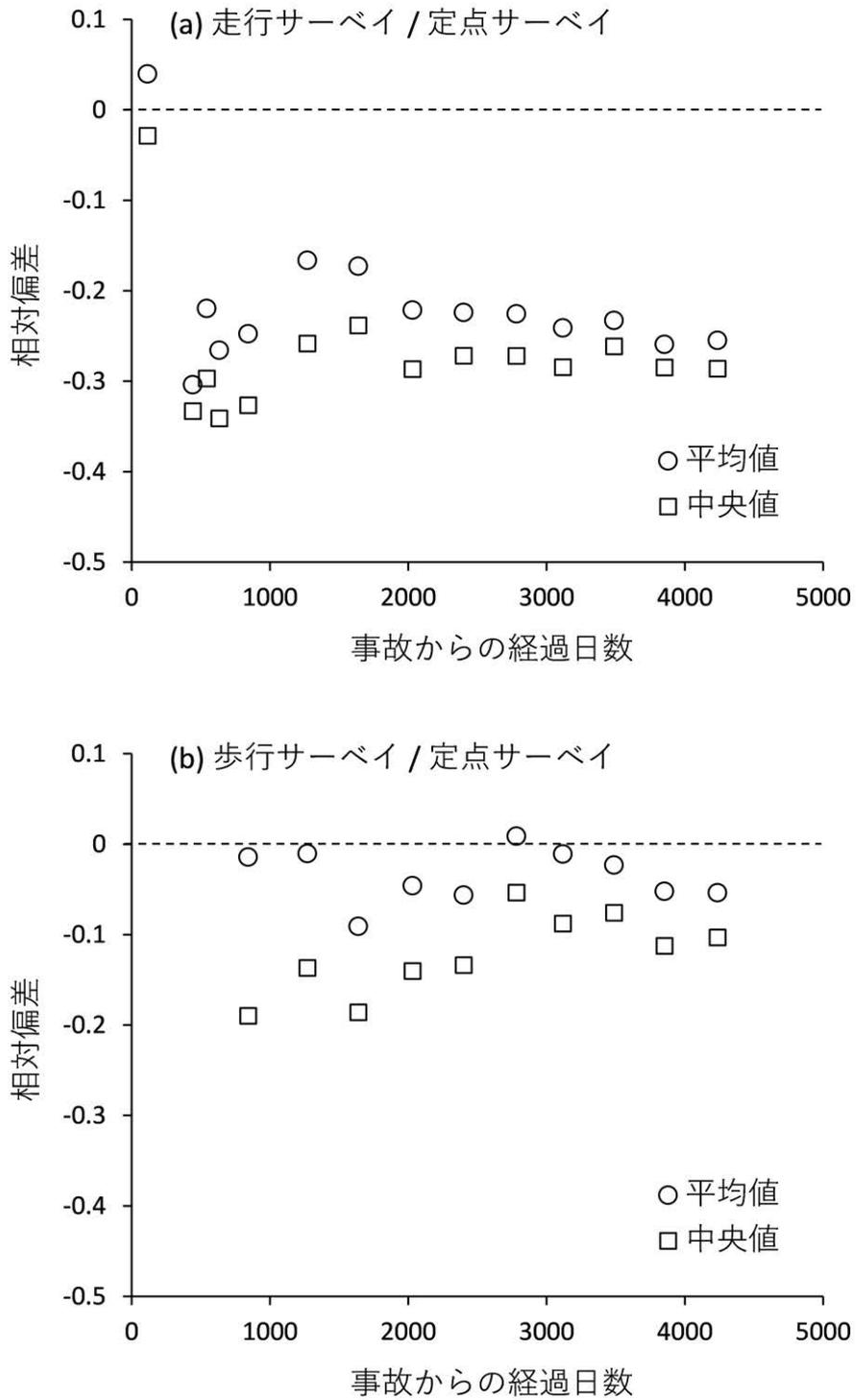


図 2-13 定点サーベイに対する走行サーベイ及び歩行サーベイの空間線量率の相対偏差

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

事故後、福島第一原発から 3 km 圏内については、航空法による飛行制限区域（平成 25 年 2 月 5 日までは飛行禁止区域）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コプター（以下「無人ヘリ」という。）を用いて福島第一原発から 3 km 圏内の放射線量率分布の測定（以下「無人ヘリサーベイ」という。）を開始した⁵⁾。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。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。これまでの分布状況調査での無人ヘリサーベイには、福島第一原発周辺のモニタリング⁶⁾、河川敷のモニタリング⁷⁾及び除染前後のモニタリング⁸⁾などがある。

無人ヘリサーベイの対象地域は、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。

ここでは、令和 4 年度調査において 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 4 年 5 月 11 日～9 月 15 日

フライト範囲：70.2 km²

合計測定距離：840 km

3.2.2 調査機器

測定にあたっては、ヤマハ発動機株式会社製の自律飛行型無人ヘリ FAZER-R G2 を使用し、地上からの直達ガンマ線及び空気による散乱線を合わせた全計数率とガンマ線エネルギースペクトルを 1 秒間に 1 回連続測定した。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)。

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⁹⁾。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、空気減弱係数 AF （Attenuation Factor: m^{-1} ）を求め、高度補正係数 $HF = \exp[AF(H_{\text{std}} - H_a)]$ を算出した。 H_{std} は基準フライト高度として 80 m とした。 H_a は対地高度であり、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。平成 30 年度から令和 4 年度の分布状況調査にて取得したテストサイトにおけるキャリブレーション結果を表 3-1 に示す。テストサイトは平坦で線量率が一定であることが望ましいが、近年では除染等の人為的影響が広がっており、テストサイトとしてふさわしい場所がほぼなくなっている。そこで、実際に使用した検出器の AF と CD については、令和元年度より過去にキャリブレーションで値付けした同じ数値を使用している（ AF : -0.0080 m^{-1} , CD : $4,382 \mu\text{Sv/h/cps}$ ）。すなわち近年のテストサイトでのデータ取得は、キャリブレーションではなく過去の値付けした数値の確認を目的としている。なお、検出器の劣化によるレスポンス変動については、点線源を用いた校正試験で確認し、令和 3 年度との変化が $\pm 10\%$ 以内であることを確認している。

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 HF 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 D ($\mu\text{Sv/h}$) に換算した。地上 1 m 高さでの空間線量率への換算式について、式(4)に示す。

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

ここで、 C_{net} は検出器結晶内に含まれる天然の放射性核種等の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る。なお、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、各測定期間の最終日に換算した。

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	37.38711292	141.0063357	R3.6.14	75	9700	4.68	-0.00801	3796
12	37.38601934	140.9947369	R3.6.21	76	3482	1.71	-0.00769	3696
13	37.38601934	140.9947369	R3.9.21	76	3303	1.46	-0.00771	4063
14	37.38711292	141.0063357	R3.9.21	77	8774	4.03	-0.00828	4141
15	37.387108	141.006331	R4.5.30	73	8435	4.26	-0.00859	3700
16	37.409928	140.972958	R4.6.17	79	4923	2.89	-0.00954	3772
17	37.41126229	140.9581993	R4.6.29	81	4852	2.40	-0.00849	3997
18	37.387108	141.006331	R4.8.2	79	8258	4.12	-0.00842	3896
19	37.409928	140.972958	R4.8.25	81	4910	2.92	-0.00936	3723
20	37.41126229	140.9581993	R4.8.25	81	4684	2.38	-0.00864	3979

3.2.5 空間線量率マップの作成

上空で取得した無人ヘリサーバイによる測定値は前述のように地上高さ 1 m の空間線量率の値に換算し、リンクする位置情報とともに GIS ソフトウェアを用いて、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。内挿補間後に作成された 5 m メッシュのコンター図は空間線量率のレンジで色分けしカラーコンター図としてマップ化した。また、過去のデータとの比較に用いるデータについては、無人ヘリの測定範囲（線源視野範囲）を考慮し、5 m メッシュのデータを基に 50 m メッシュごとに平均した。



図 3-1 無人ヘリの仕様等

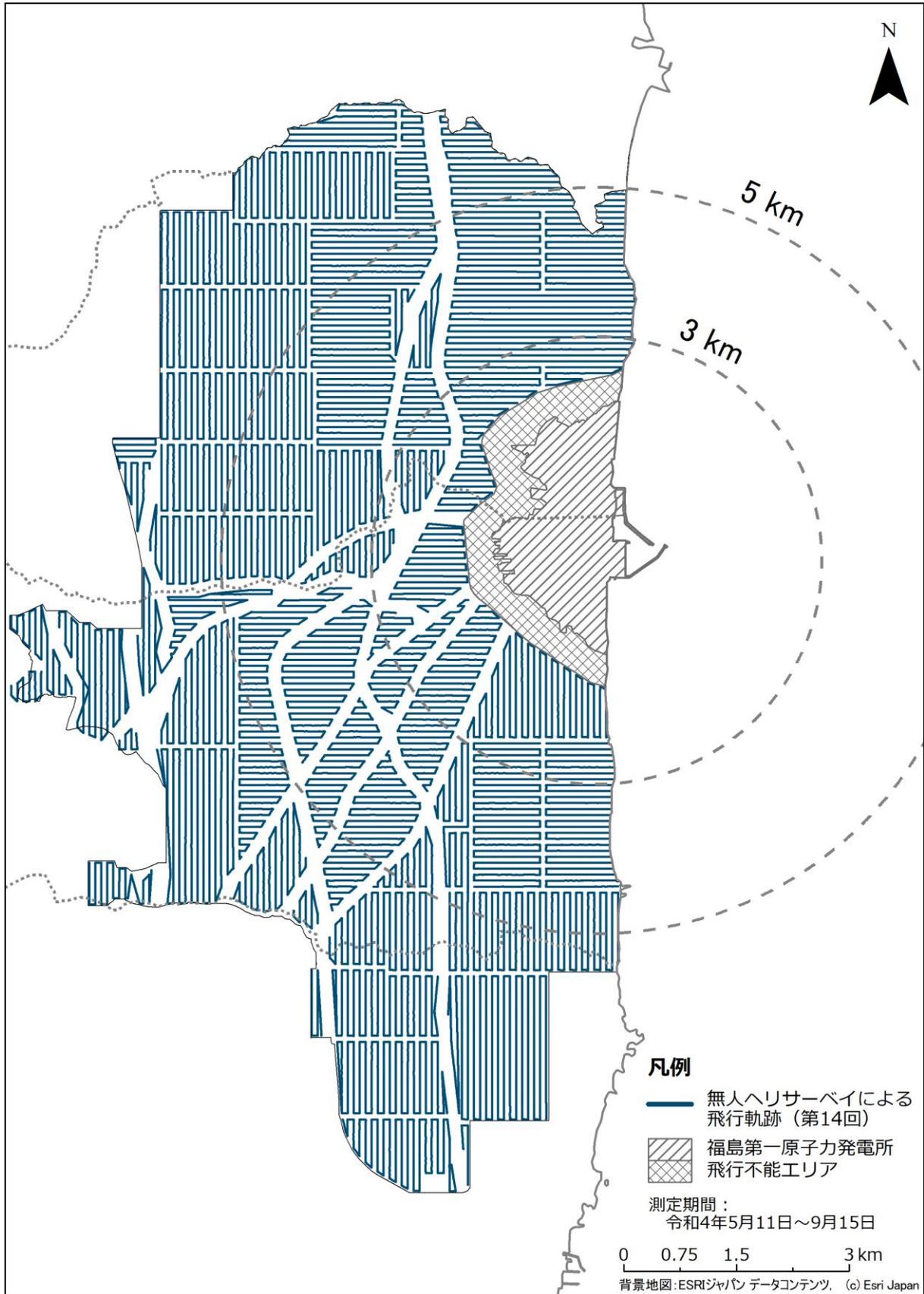


図 3-2 令和4年度調査での無人ヘリサーベイの飛行軌跡

3.3 調査結果

3.3.1 空間線量率マップ

令和 4 年度調査において実施した無人ヘリサーベイによる空間線量率マップを図 3-3 に示す。また、第 1 回から令和 4 年度までの主に 5 km 圏内の空間線量率マップ（事故後約 18 ヶ月、28 ヶ月、40 ヶ月、55 ヶ月、67 ヶ月、91 ヶ月、115 ヶ月及び 138 ヶ月）を図 3-4 に示す。図 3-4 から空間線量率の高い暖色系のエリアが小さくなってきていることが分かる。空間線量率の経時変化傾向の定量的評価については第 5 章で述べる。

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（第 2 章の定点サーベイによる測定結果）と比較した。無人ヘリサーベイの測定結果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 $R^2=0.85$ ）を示しており、令和 4 年度調査での結果は概ね地上の測定結果を再現できていたと考えられる。なお、 $1 \mu\text{Sv/h}$ 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 3 年度との比較

測定区域を 100 m メッシュに分割し、メッシュごとに令和 3 年度調査と令和 4 年度調査での無人ヘリサーベイによる空間線量率測定結果を比較した。散布図及び式(1)で定義した相対変化率を図 3-6 に示す。散布図は良い相関関係（決定係数 $R^2=1.0$ ）を示している。また、令和 4 年度調査では令和 3 年度調査から約 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 3 年度調査の空間線量率測定結果に対する令和 4 年度調査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¹⁰⁾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

～0.06 μGy/h 程度である。また、本結果は過去の結果¹¹⁾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¹⁰⁾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のみの空間線量率（*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* [μSv/h]/[kBq/m²]) 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 $\beta_{eff}=4.31 \text{ g/cm}^2$ 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/m²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 4 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、局所的な除染や周囲を森林に囲まれた場所などの状況が上空からの測定では再現できていない可能性が考えられる。

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 (右) に示す。また、比較のため、令和 3 年度調査での測定結果を同図 (左) に示す。福島第一原発から北西部分と南部分は 3 MBq/m²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/m²以下のエリアも存在する。

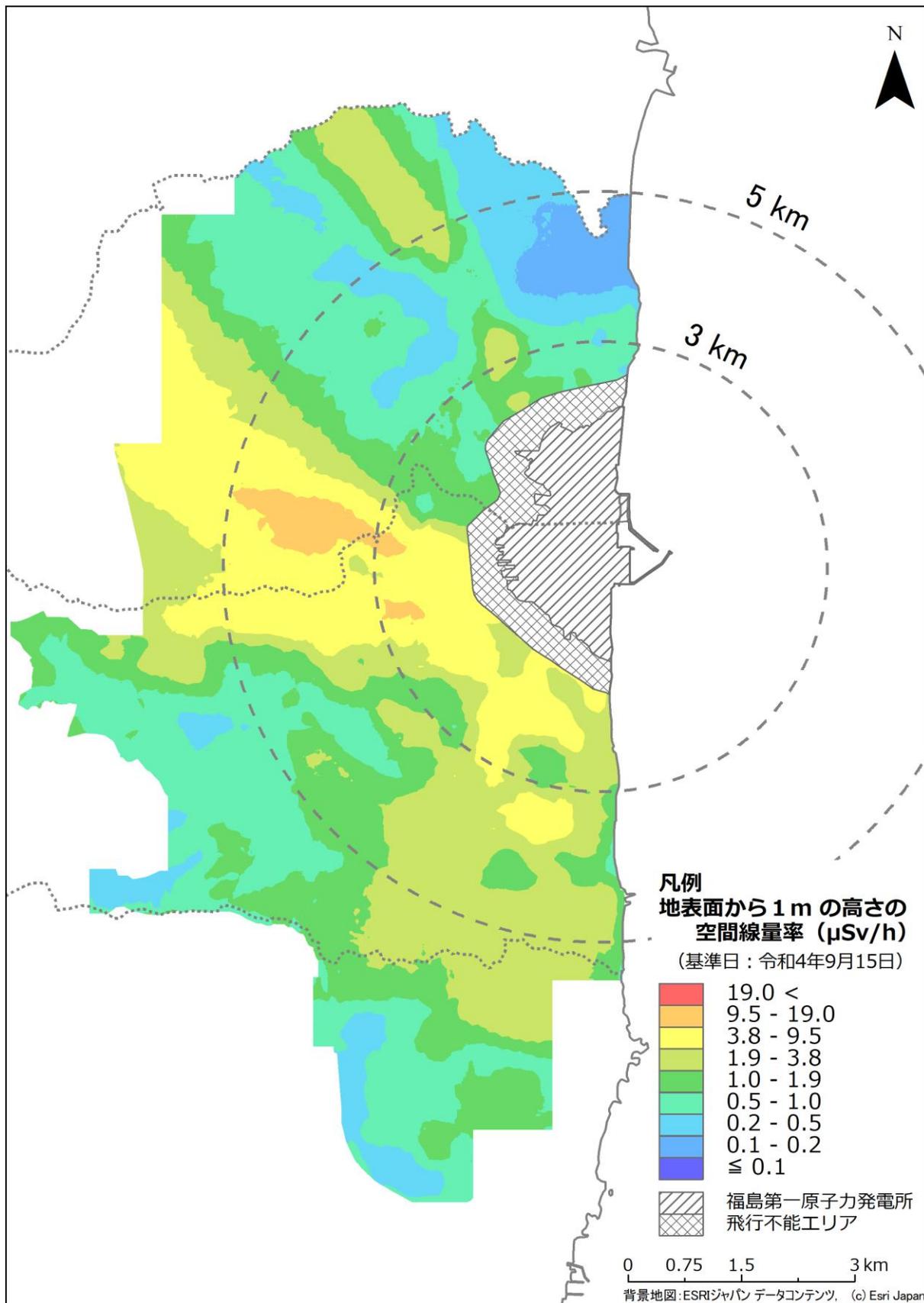


図 3-3 令和4年度調査における無人ヘリサーベイによる空間線量率測定結果
 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

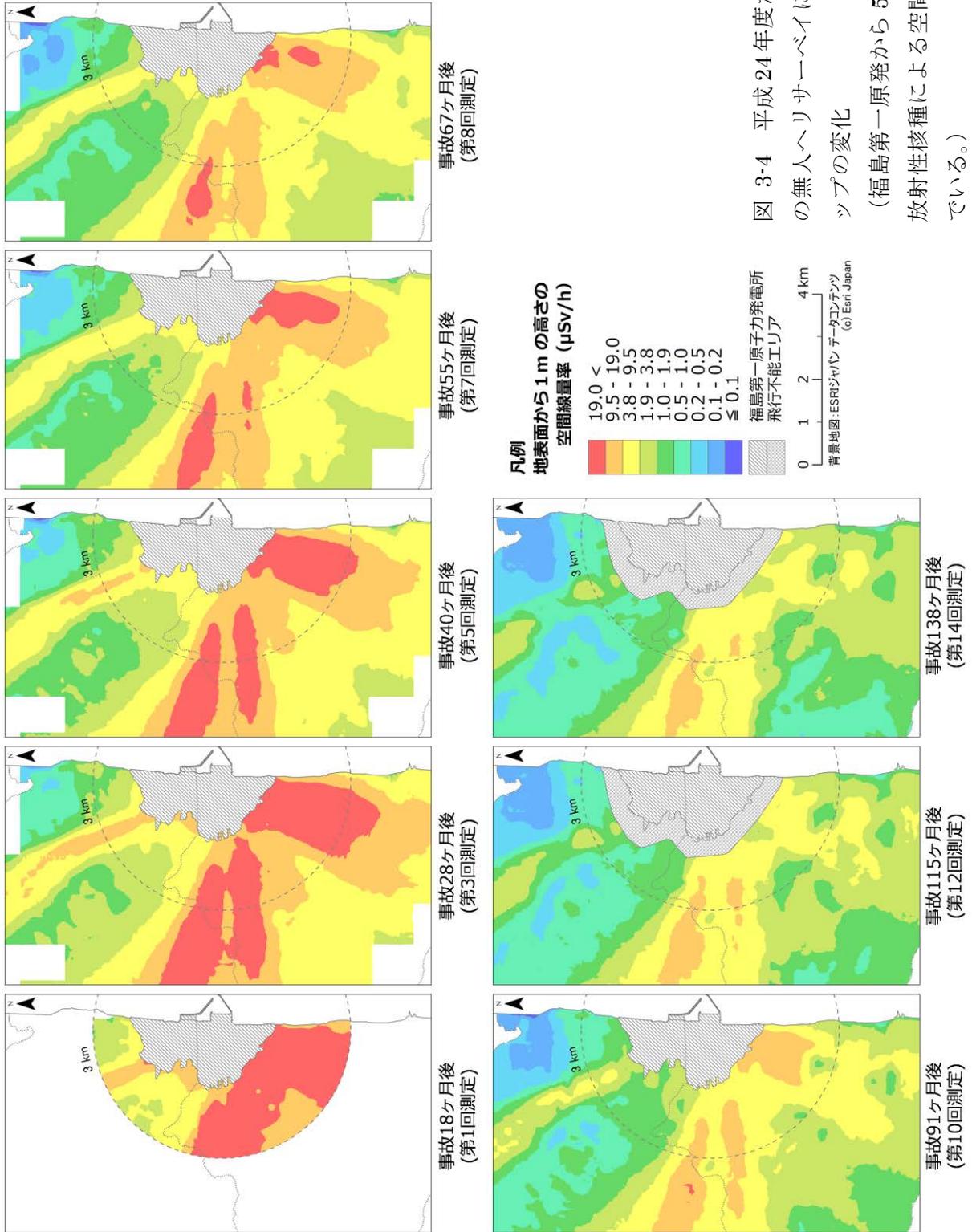


図 3-4 平成 24 年度から令和 4 年度までの無人ヘリサーベイによる空間線量率マップの変化
 (福島第一原発から 5 km 圏内主体。天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

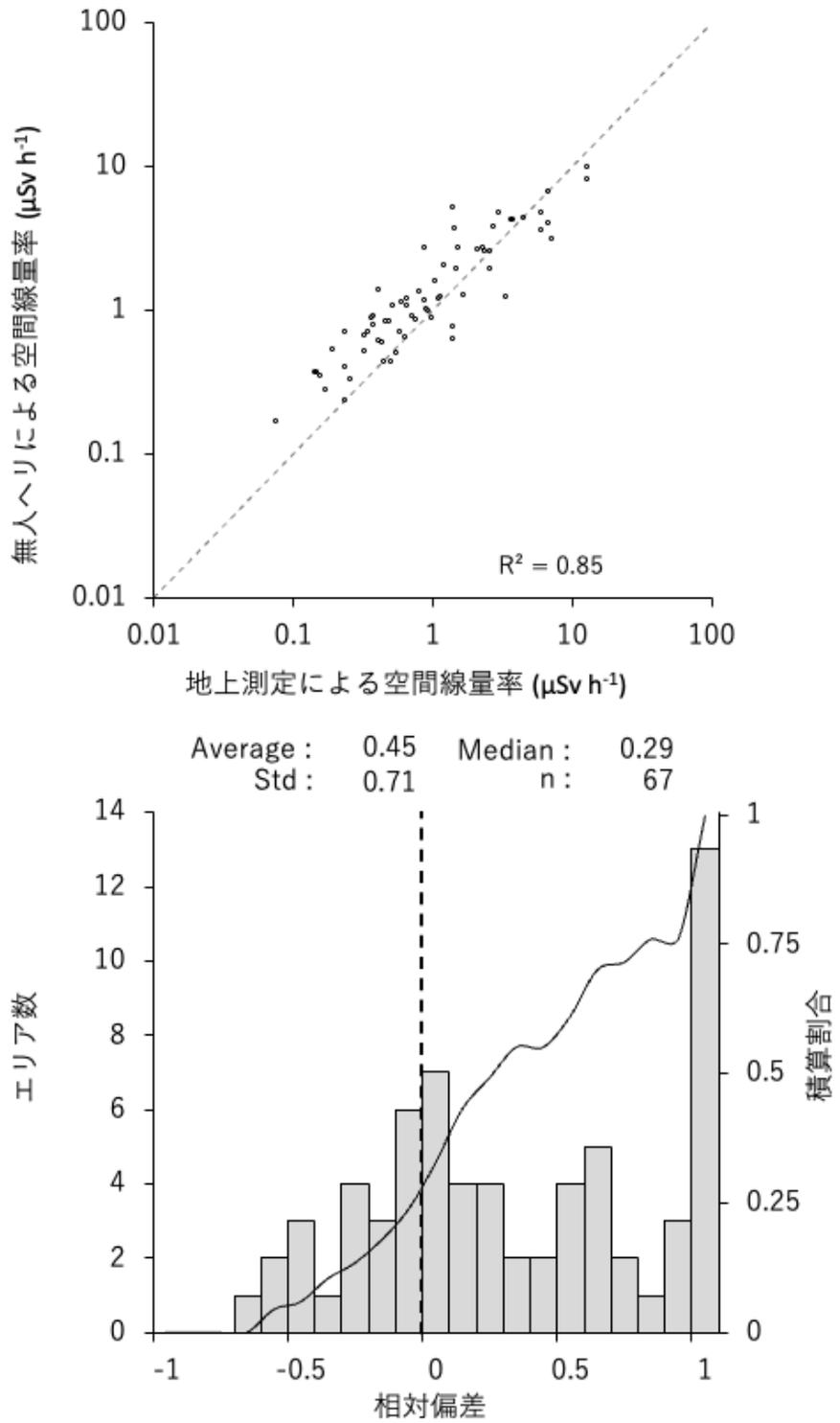


図 3-5 無人ヘリサーベイと地上測定（定点サーベイ）による空間線量率の比較
 （相関図の破線は $y=x$ 、 R^2 は決定係数、Std は標準偏差、n はデータ数を意味する。）

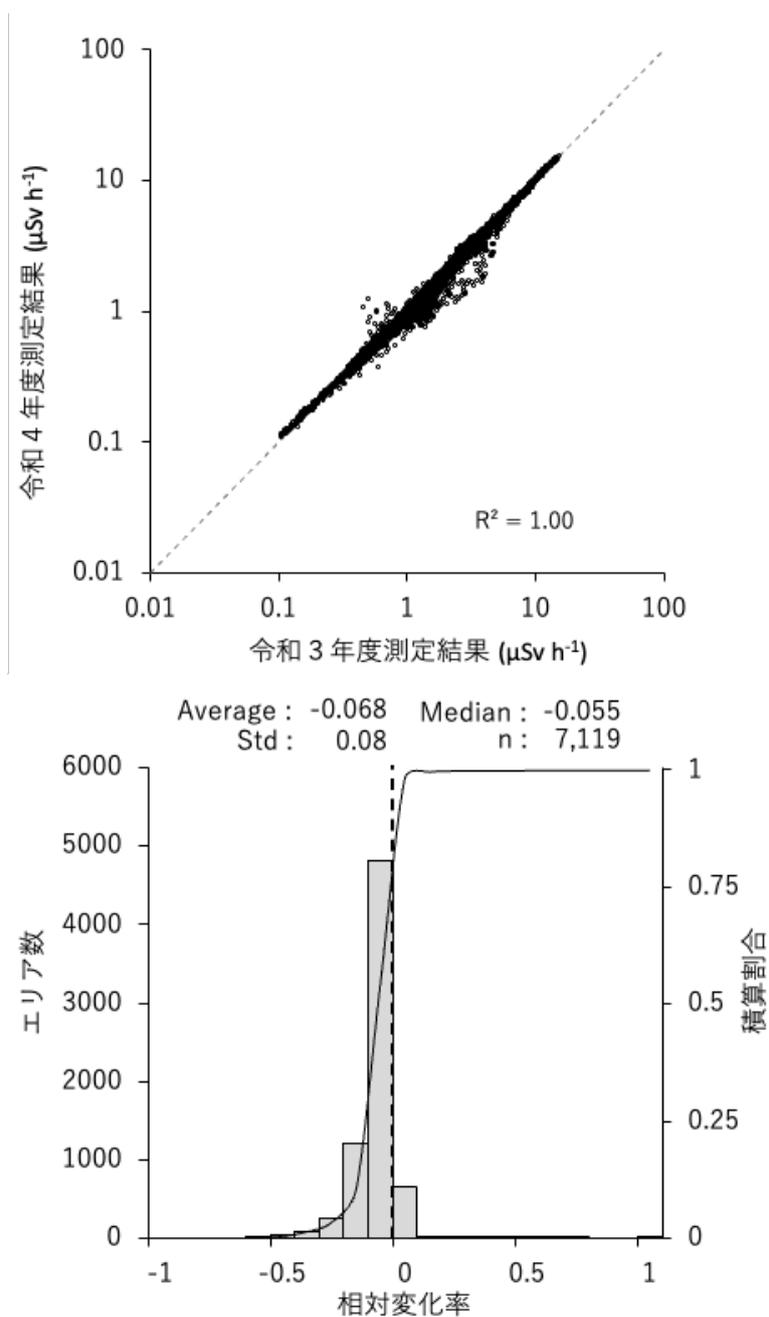


図 3-6 令和 3 年度調査と令和 4 年度調査での無人ヘリサーベイによる空間線量率測定結果の比較

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

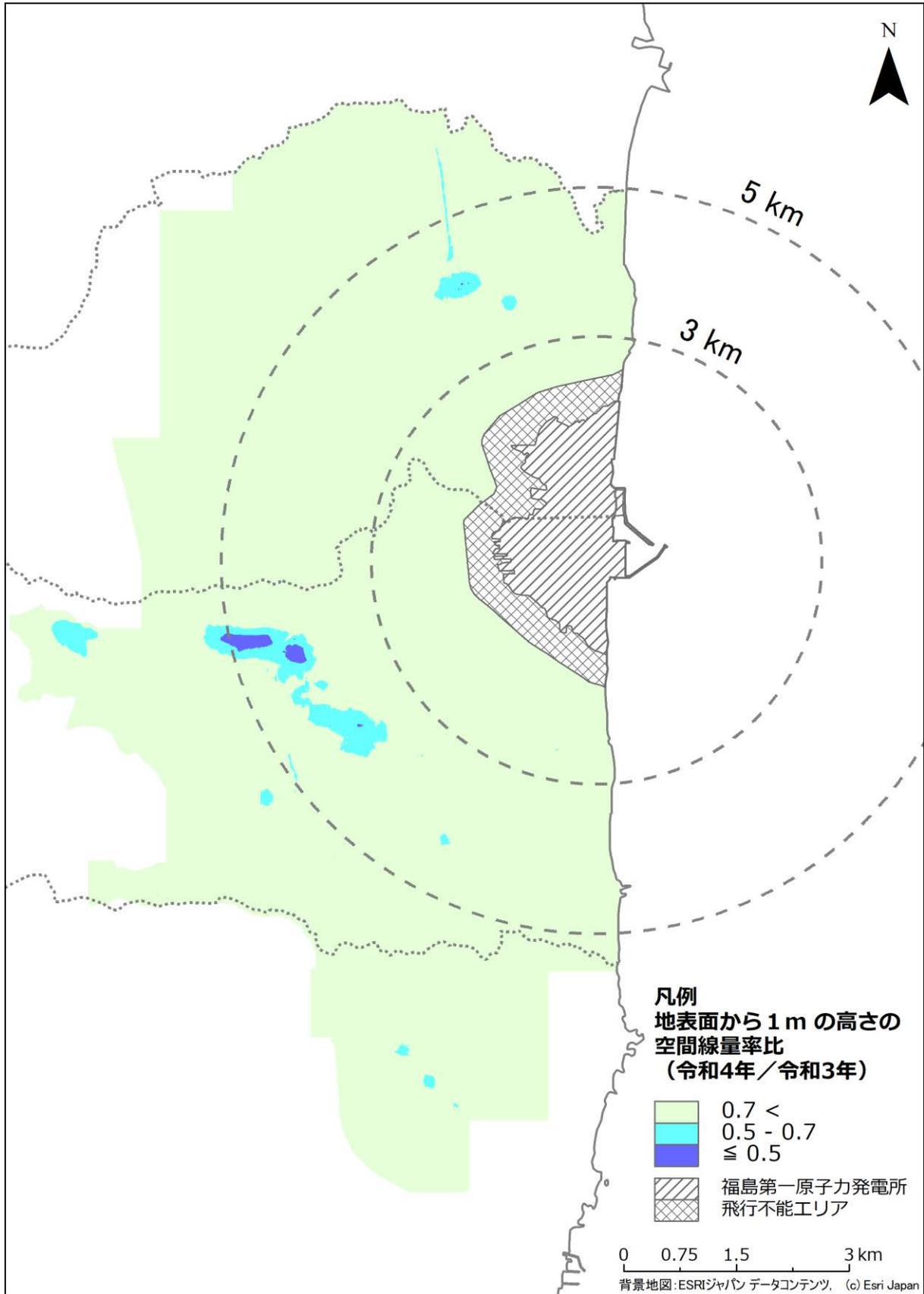


図 3-7 無人ヘリサーベイによる空間線量率測定結果の令和3年度調査に対する令和4年度調査の比の分布



図 3-8 令和3年度調査から令和4年度調査に空間線量率が顕著に減少した要因の調査結果（左から地理院タイル¹²⁾に空間線量率比マップ（図3-7参照）を追記して掲載、地理院タイルに測定中に撮影した写真からオルソ画像（地図と同じく写真上の像の位置ズレをなくし、真上から見たような傾きのない正しい大きさと位置に表示される画像）を作成し追記。）

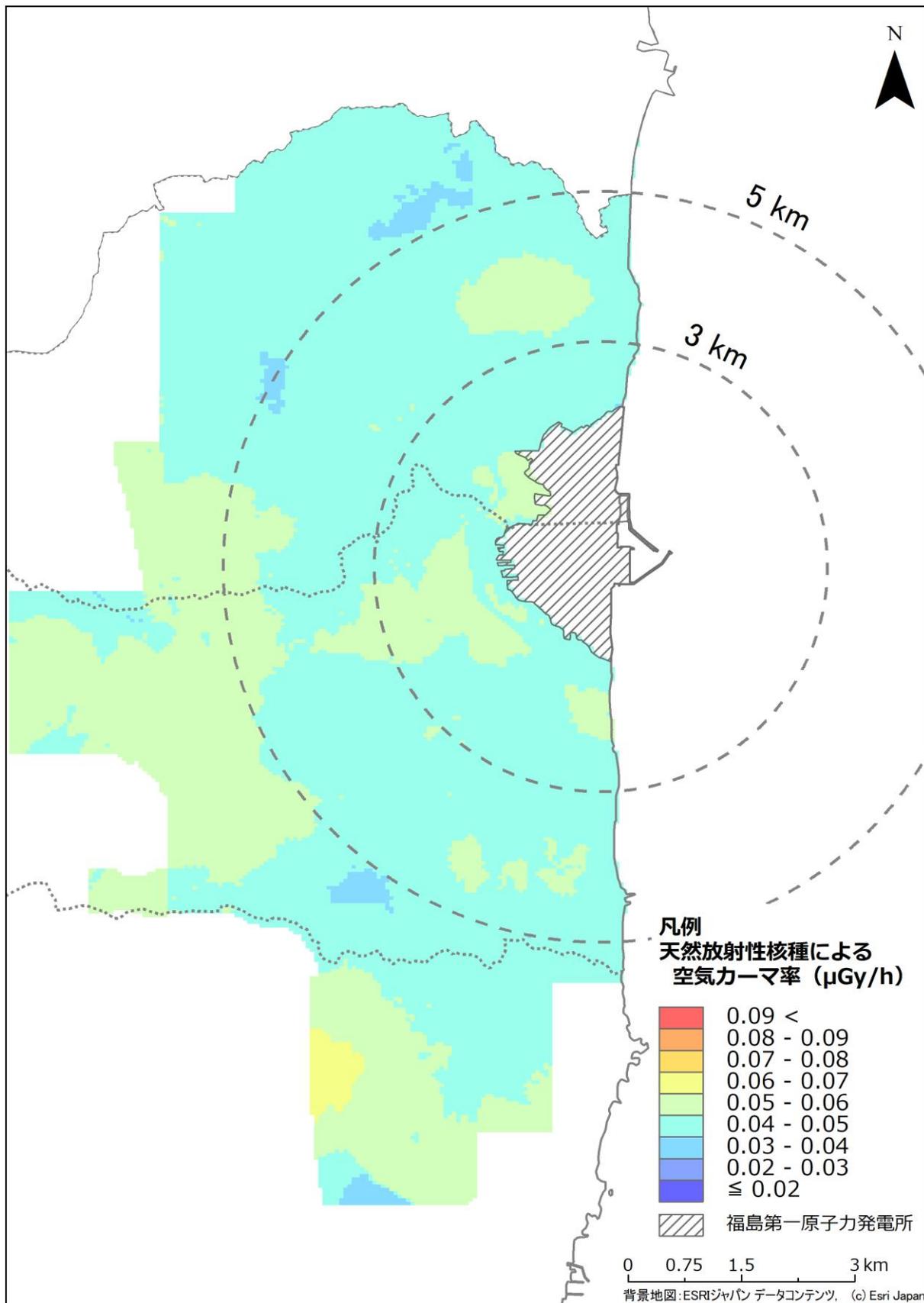


図 3-9 令和 4 年度調査における無人ヘリサーベイにより評価した天然放射性核種による空気カーマ率の分布

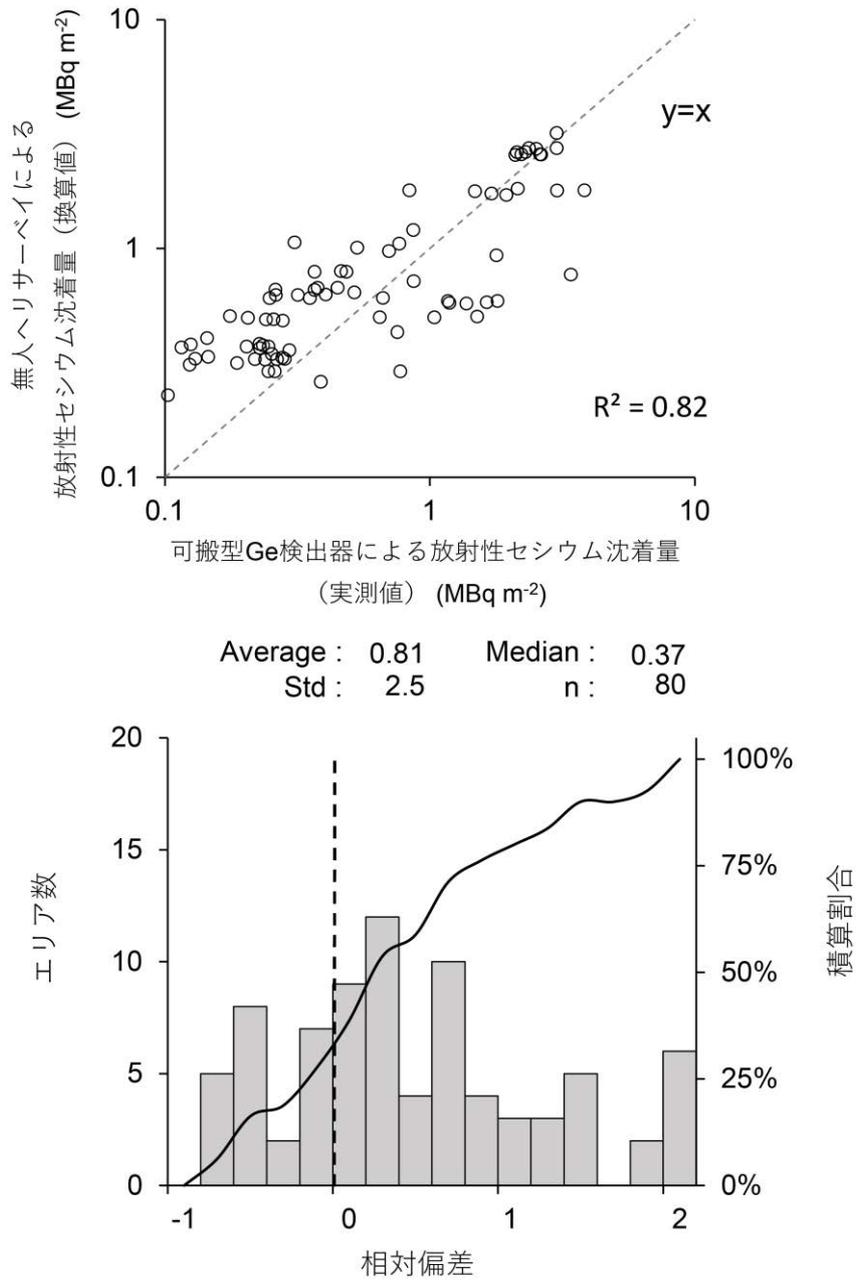


図 3-10 平成 28 年度～平成 30 年度の可搬型 Ge 検出器による放射性セシウム沈着量測定結果（令和 4 年度に物理減衰補正）と無人ヘリサーベイによる放射性セシウム沈着量の換算結果との比較

(R^2 は決定係数、Std は標準偏差、n はデータ数を意味する。)

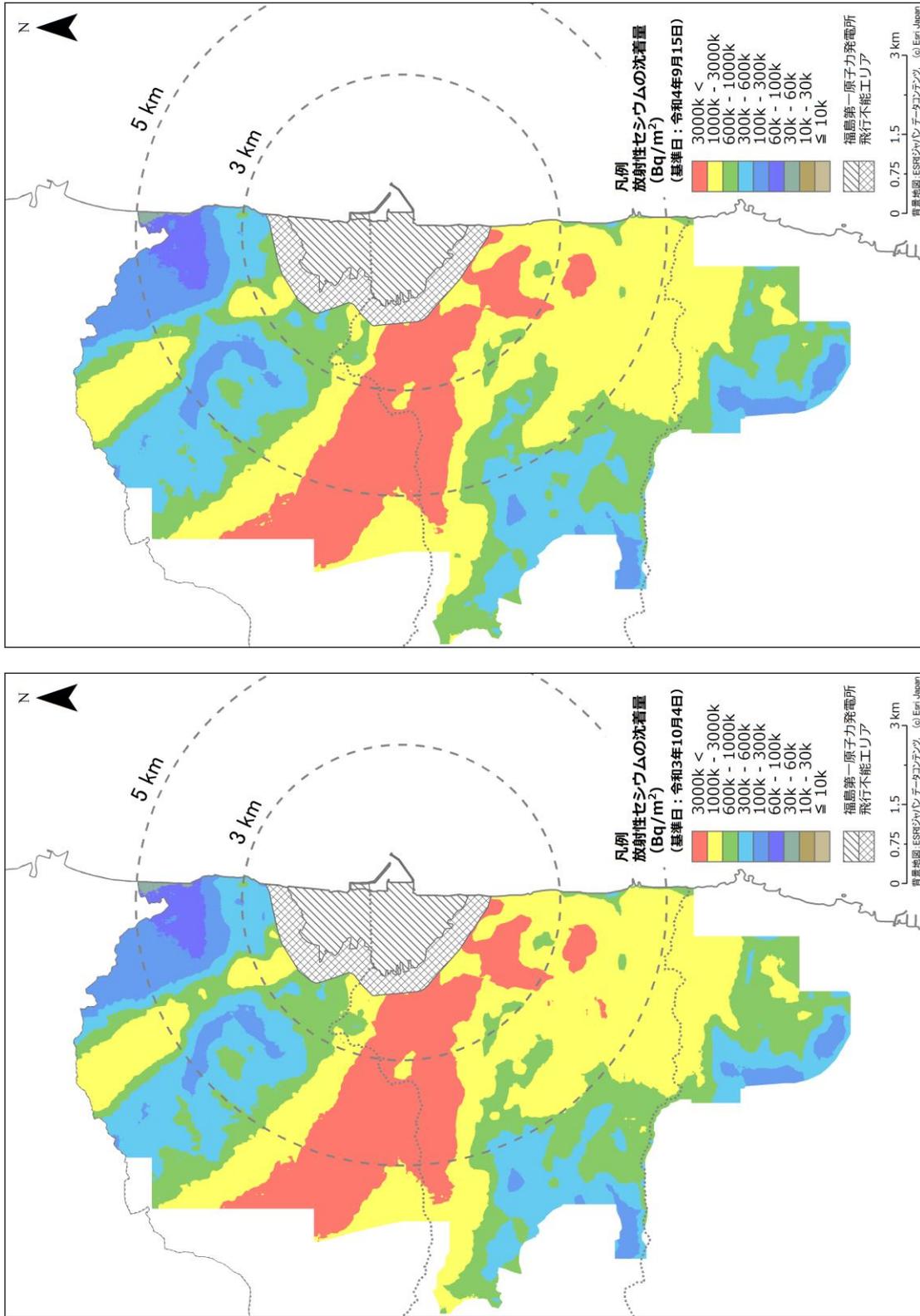


図 3-11 無人ヘリサーベイによる放射性セシウム沈着量分布マップ (左: 令和3年度調査、右: 令和4年度調査)

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沈着量の評価を行う。その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。以下では、4.1 節で重量緩衝深度を求めるための放射性セシウムの深度分布測定について、4.2 節では放射性セシウム沈着量の面的調査について述べる。

4.1 放射性セシウムの深度分布

4.1.1 調査目的

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¹³⁾。

4.1.2 調査内容

1) 深度別土壌試料の採取・測定方法

土壌試料の採取は次のように行った。

- ・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）。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た。
- ・採取期間：令和 4 年 8 月 17 日～10 月 6 日
- ・採取方法：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試料は、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試料は、ゲルマニウム半導体検出器によりガンマ線スペクトル解析を行い、セシウム 134 とセシウム 137 の放射能を定量した。

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、 $15\text{ cm} \times 30\text{ cm} = 450\text{ cm}^2$ ）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）¹⁴⁾、重量深度を ζ (g/cm^2)、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 ¹⁵⁾ 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 $1/e$ ($\cong 1/2.7$) 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、令和 4 年度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 ¹⁶⁾ 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、令和 4 年度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 $1/e$ ($\cong 1/2.7$) 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、除染作業等により、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（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る一例として図 4-2 (c) 参照）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/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 (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係り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 ¹⁷⁾ 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 28 年度の報告書¹⁸⁾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¹⁸⁾を参照のこと。

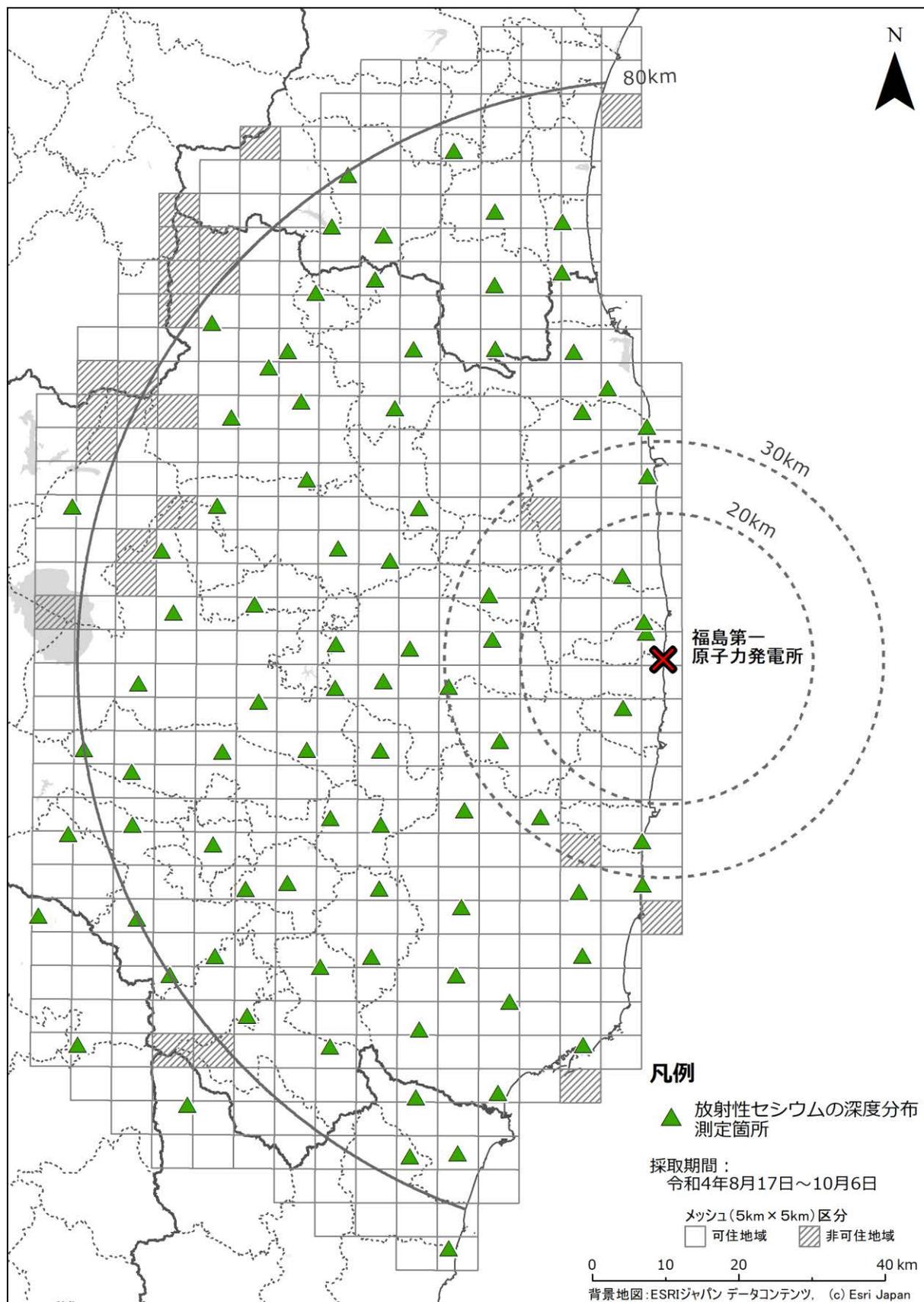


図 4-1 令和 4 年度調査における放射性セシウム深度分布測定箇所

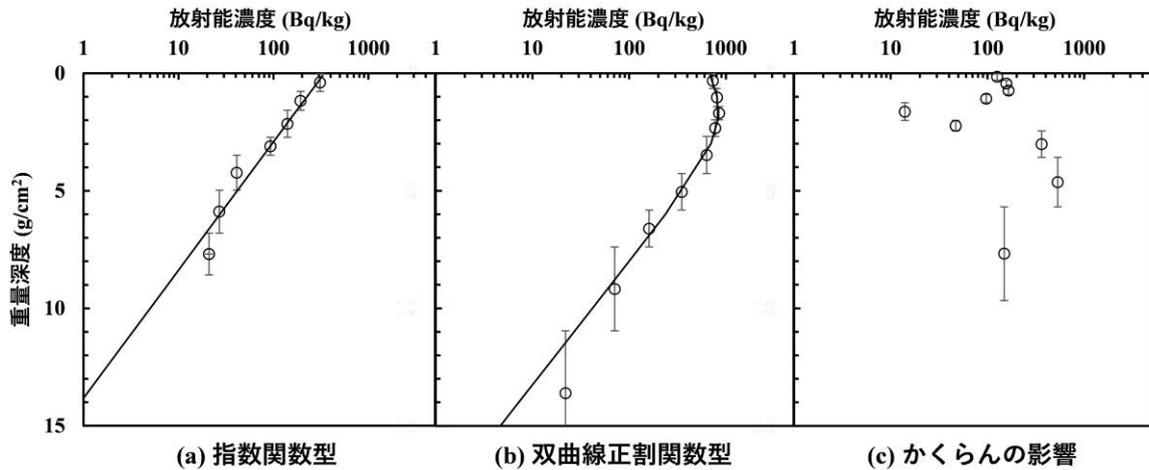


図 4-2 セシウム 137 の深度分布（重量深度に対する放射能濃度の測定結果）の典型的な例

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。令和 4 年度調査で得られた全 85 箇所のセシウム 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 (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 14 箇所、式 (7) を適用した深度分布は 54 箇所であった。なお、令和 3 年度調査では式 (7) を適用した深度分布は 50 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、17 箇所（000N020、005N000、005N060、005S035、015N060、020N030、020S065、025N045、030S000、035N010、035N035、035S010、055N010、055S030、055S050、060S010 及び 075S030）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「※～3cm 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分かったため、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 2.71 g/cm²（データ数 n= 68）、幾何標準偏差 2.03
- ・最小値 0.621 g/cm²、最大値 24.1 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分かったため、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 4.31 g/cm² (データ数 n= 68)、幾何標準偏差 1.93
- ・最小値 1.09 g/cm²、最大値 24.1 g/cm²

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年度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 4 年度調査での β_{eff} の幾何平均値は令和 3 年度調査時からやや増加した。近年では、分布状況調査開始当初のような増加傾向はほとんどない状態が続いているといえる。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 $L_{90\%}$

各年度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わずかずつ増加 (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 4 年 9 月時点での $L_{90\%}$ 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 5.18 cm (データ数 n= 68)、幾何標準偏差 1.82
- ・最小値 1.76 cm、最大値 24.2 cm

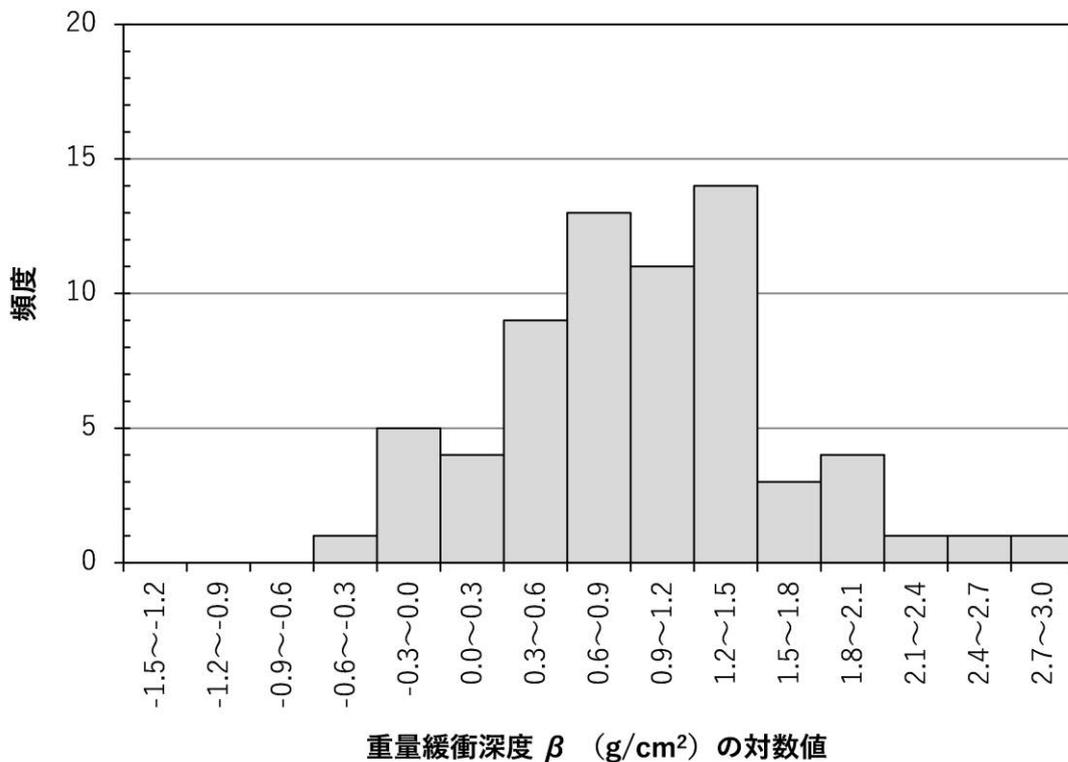


図 4-3 令和 4 年度調査での深度分布測定による重量緩衝深度 β の自然対数値の頻度分布

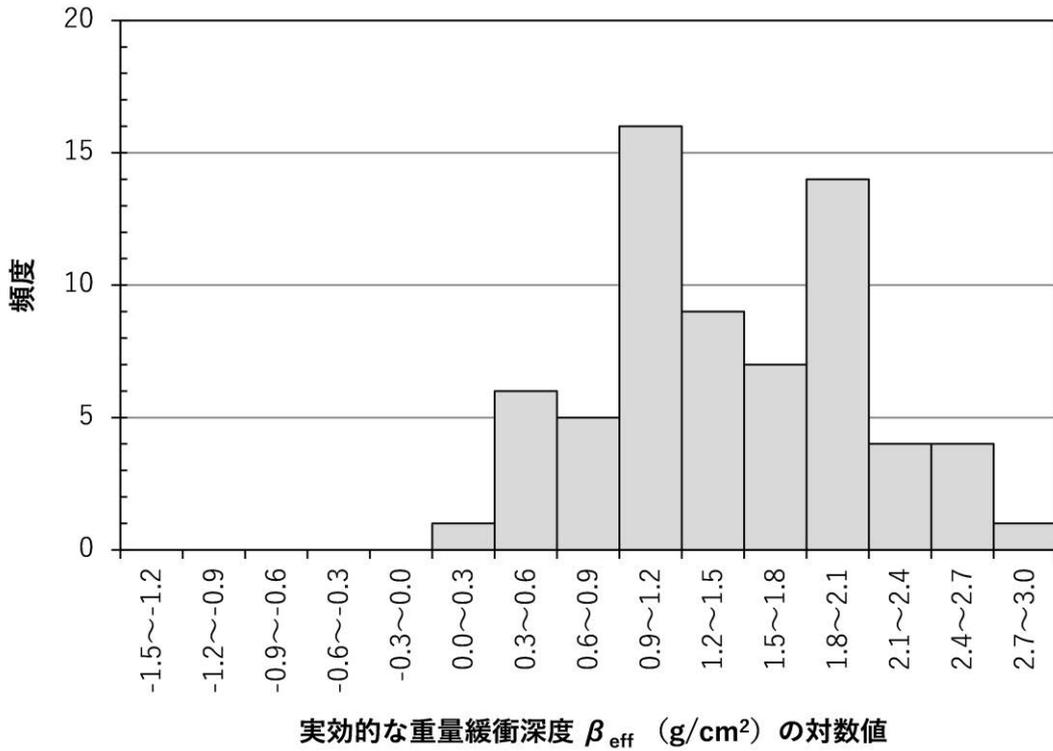


図 4-4 令和 4 年度調査の深度分布測定による実効的な重量緩衝深度 β_{eff} の自然対数値の頻度分布

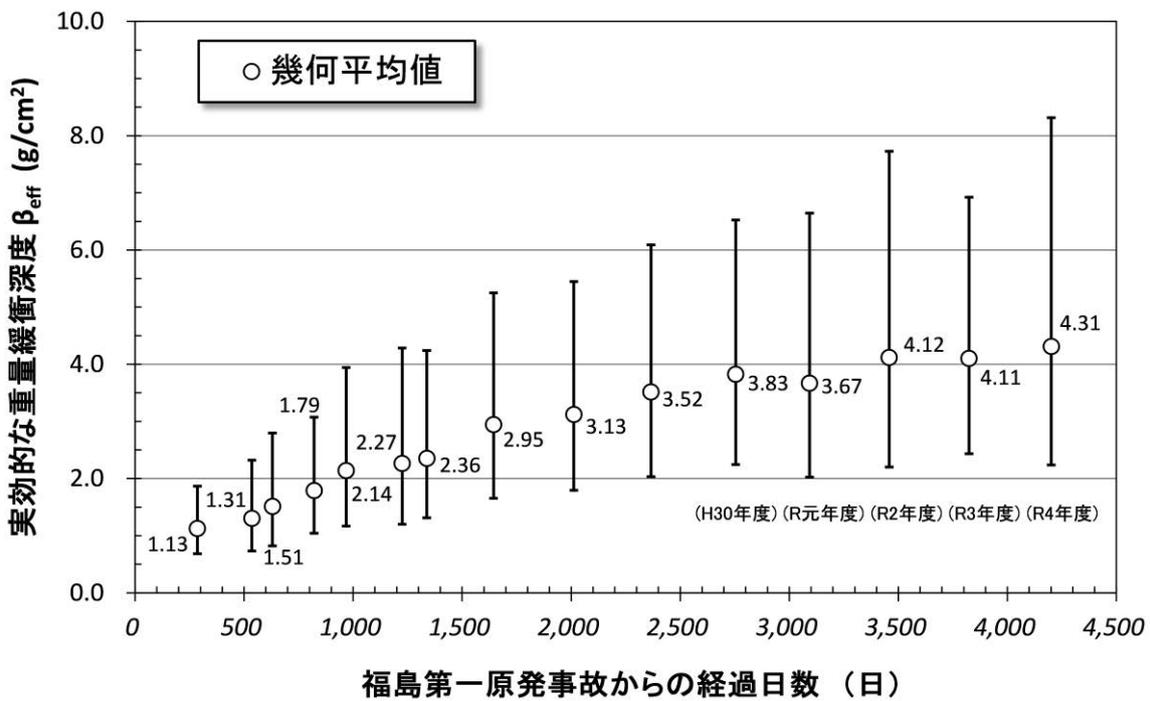


図 4-5 平成 23 年 12 月からの実効的な重量緩衝深度 β_{eff} の経時的な変化 (誤差棒は幾何標準偏差を示す。)

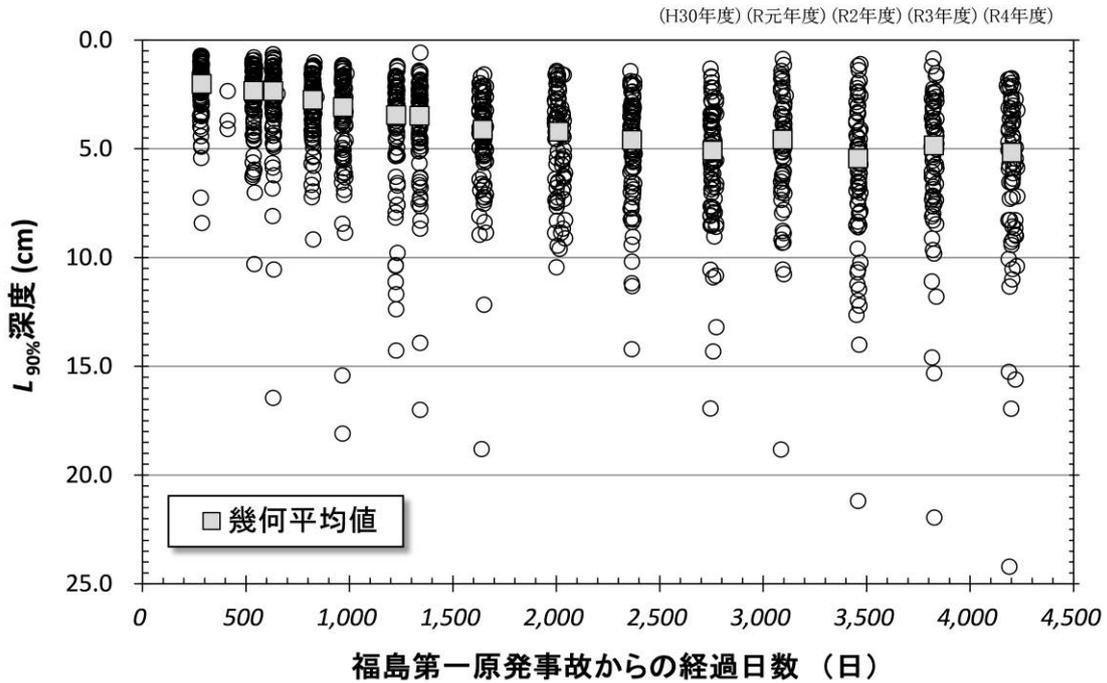


図 4-6 平成 23 年 12 月からの 90%深度 $L_{90\%}$ 及びその幾何平均値の経時的な変化

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

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 4 年度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 4 年 8 月 22 日～10 月 21 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能量。単位： Bq/m^2 ）

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¹⁹⁾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)¹⁵⁾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
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 β_{eff} の幾何平均値 (4.31 g/cm²) を
全ての測定結果について用いた。

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
同一箇所ですべて同時測定を行い、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 (ICRU Report 53¹⁵⁾に従って $\mu\text{Gy/h}$ 単位で表し
た空気カーマ率。天然放射性核種と人工放射性核種を合計した。) と、同一箇所ですべて NaI(Tl)
シンチレーション式サーベイメータ (日立アロカメディカル製 TCS-171 又は TCS-171B。
以下、本章では特に断らない限り「サーベイメータ」という。) 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、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)結晶内の天然放射性核種 (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²⁰⁾。

3) 放射性セシウムの土壌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 箇所ですべてサーベイ
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に適用し放射性
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。

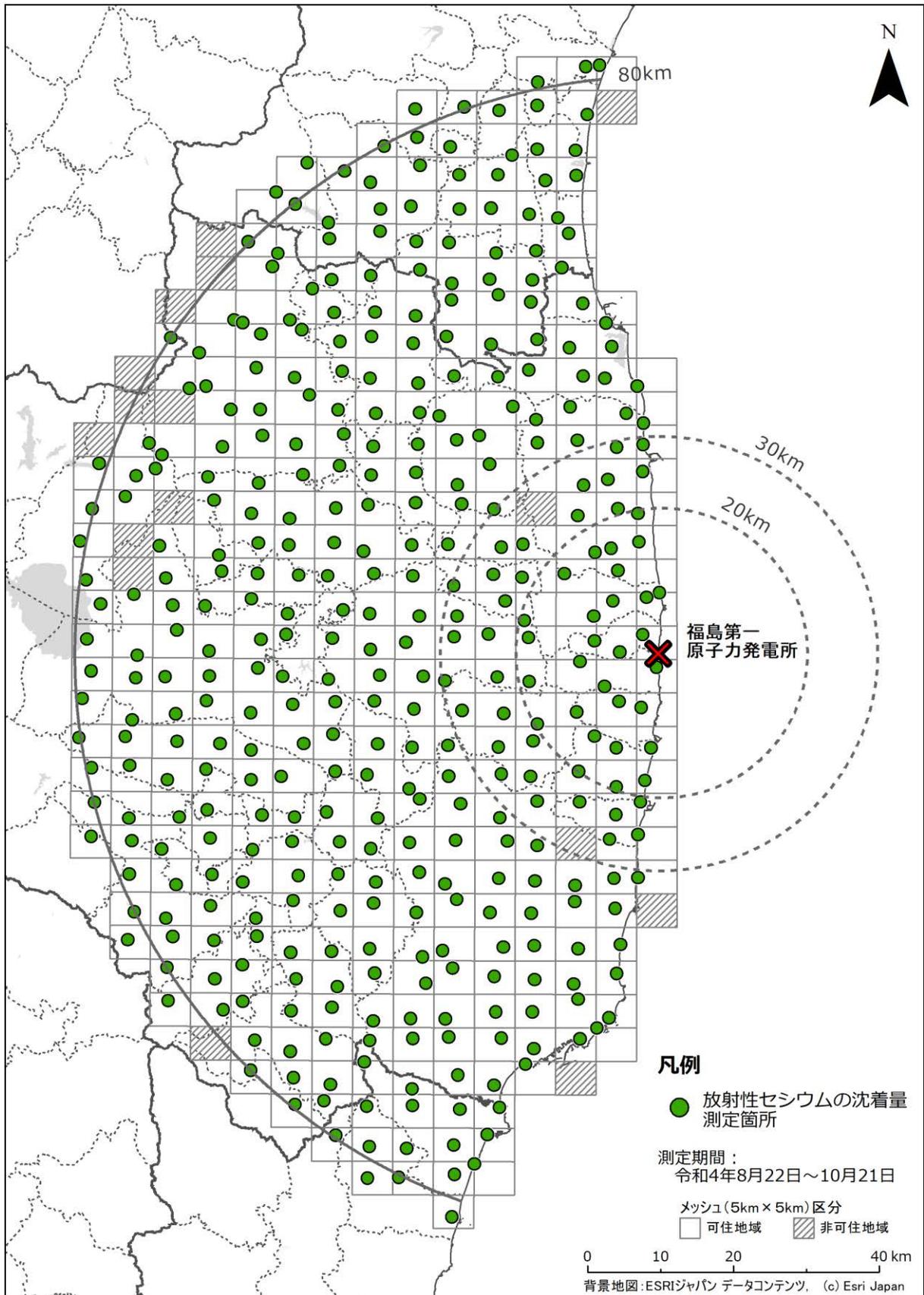


図 4-7 令和4年度調査における可搬型 Ge 検出器を用いた放射性セシウム沈着量の測定箇所

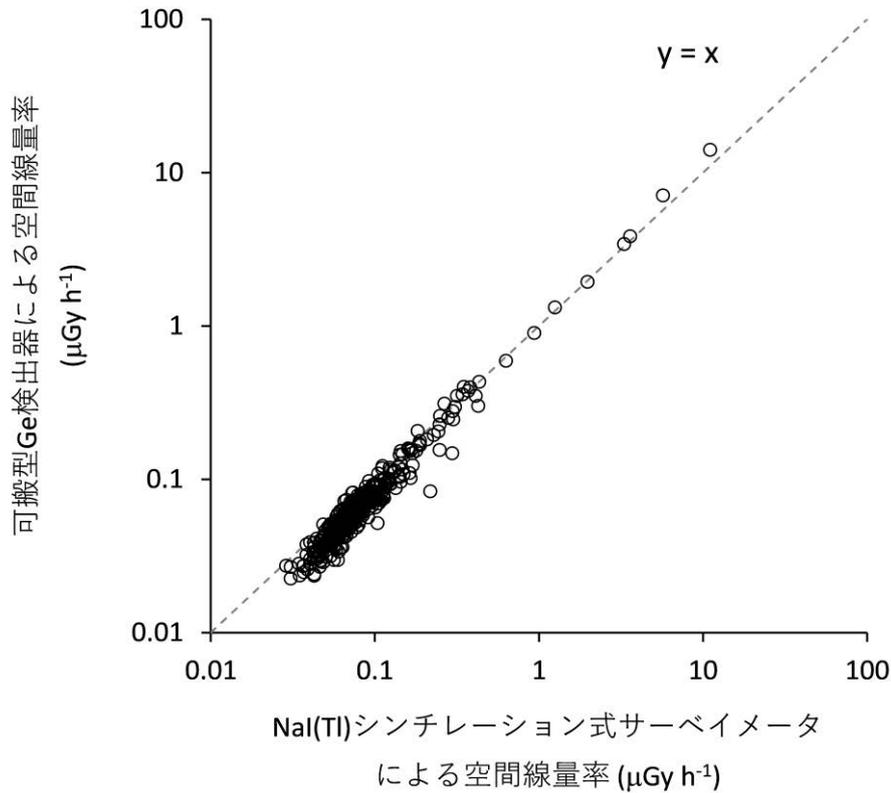


図 4-8 可搬型 Ge 検出器による in-situ 測定の結果を基に求められた空間線量率と NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータによる空間線量率の相関

4.2.3 調査結果

(1) in-situ 測定の結果

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 4 年度調査については令和 4 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 (4.31 g/cm^2) 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 65%であった。

(2) 放射性セシウムの土壌沈着量分布マップの細密化

4.2.2 3)で述べた方法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するために、令和 4 年度調査において in-situ 測定を行った 383 箇所における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。サーベイメータで測定した線量率はバックグラウンドを含んでいるため、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、過去の可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定により評価した天然放射線核種からの空間線量率の平均値を参考とし、 $0.05 \mu\text{Sv/h}$ をサーベイメータによる空間線量率から一律に差し引いた (この妥当性については、4.2.4 項にて詳述する)。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解析対象から除いた。

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。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。サーベイメータにより測定した空間線量率 x (単位: $\mu\text{Sv/h}$) に対する放射性セシウム沈着量 y (単位: Bq/m^2) の関係式は、以下のように求められた。

- ・セシウム 134 : $y=23113x$

- ・セシウム 137 : $y=812004x$

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。また、天然放射線核種からの寄与分を 0.05 $\mu\text{Sv/h}$ として一律に差し引いている影響も要因の一つとして考えられる。

これらの空間線量率と放射性セシウム沈着量の相関関係を令和 4 年度調査の定点サーベイにより測定された 4,945 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。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 4-11 に示す。また、平成 23 年度調査から令和 4 年度調査までの測定結果 (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事故後約 3 ヶ月、18 ヶ月、28 ヶ月、40 ヶ月、55 ヶ月、79 ヶ月、103 ヶ月及び 139 ヶ月における分布マップ) を図 4-12 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。図 4-12 より、事故後約 139 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。

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。

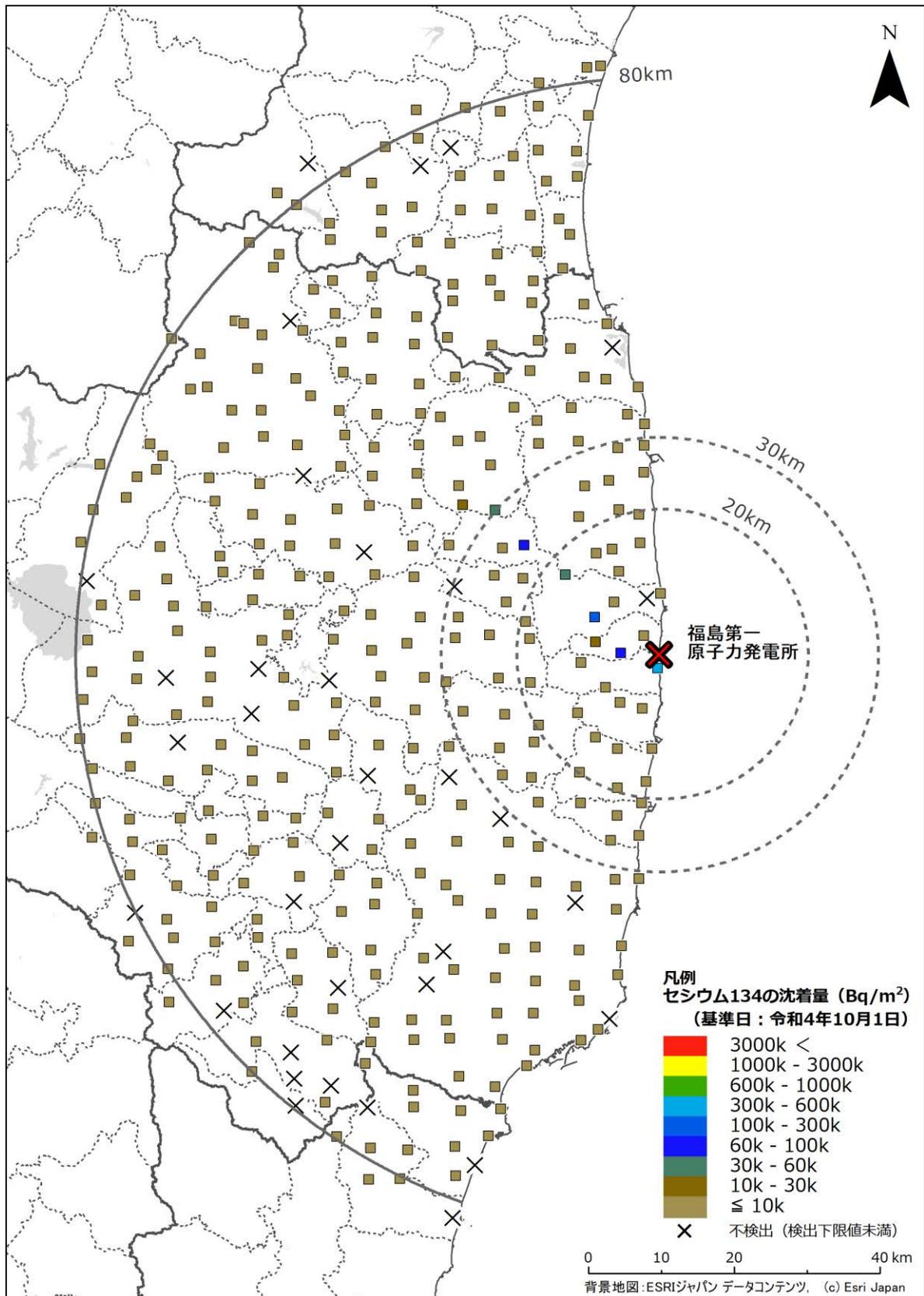
$$RD3 = (CD - C) / C \quad (8)$$

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 4-13 (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、全体的には良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分かる。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

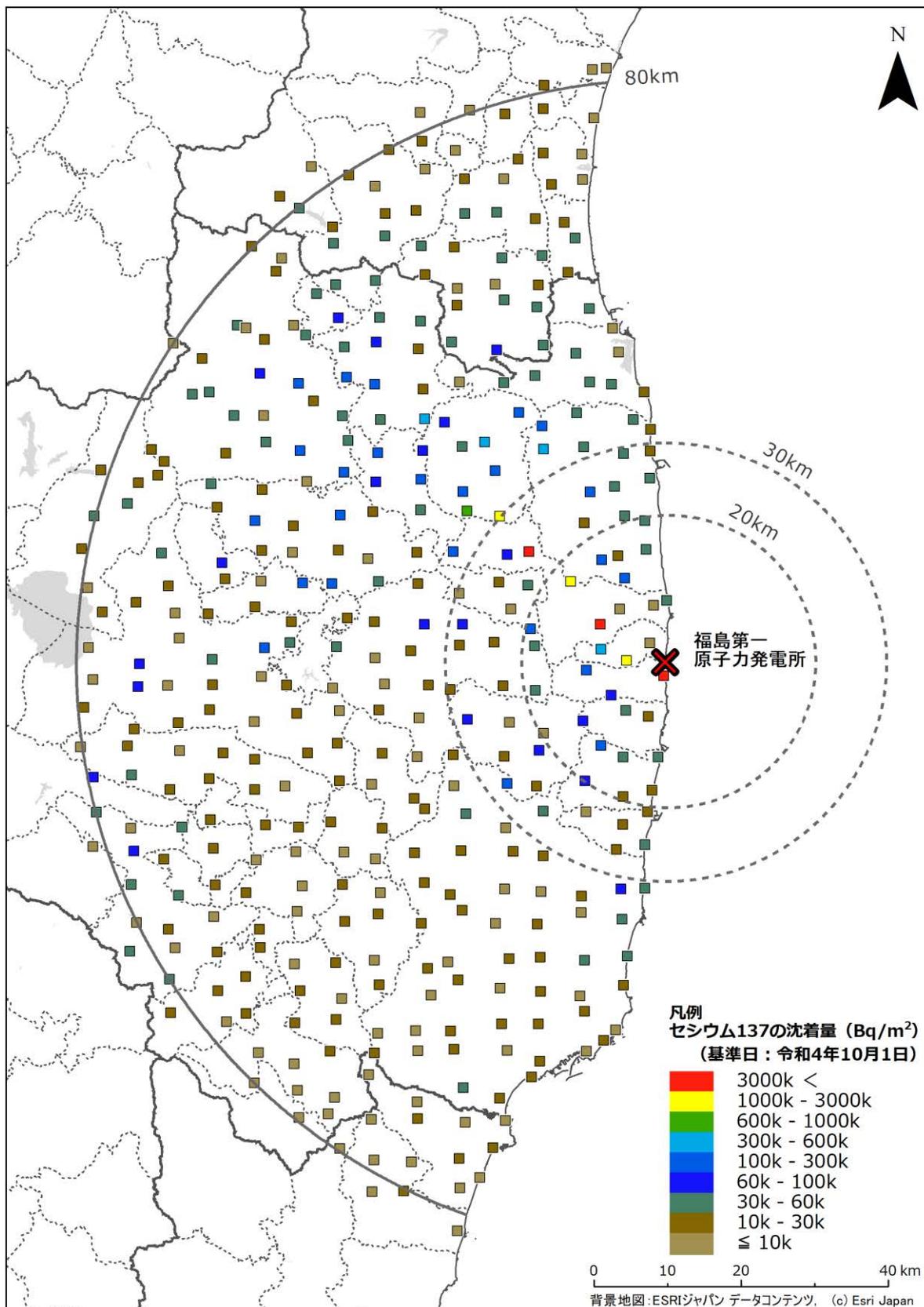
測定による沈着量の 2 倍以上を示す点が 40%以上確認された。図 4-10 に見られたように低線量域でばらつきが大きく、空間線量率から評価した沈着量が in-situ 測定による沈着量を過大評価しているものと考えられる。

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 4-13(b)に示す。全データの場合より散布図のばらつき方は小さくなったが、相対偏差のヒストグラムの全体的な分布傾向は変わらず、このばらつきは本手法の限界である（空間線量率が低いデータでは、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）と理解することができる。一方、高線量率の測定結果については、全データの場合でも良い相関関係を有している。以上より、本手法は 80 km 圏内の放射性セシウム沈着量の全体傾向を可視化するためには有効であるといえる。なお、放射性セシウム沈着量の経時変化に対する定量的評価（第 5 章）にはこれまでどおり in-situ 測定の結果のみを用いて議論する。



(a) セシウム 134

図 4-9 令和 4 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 4 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)

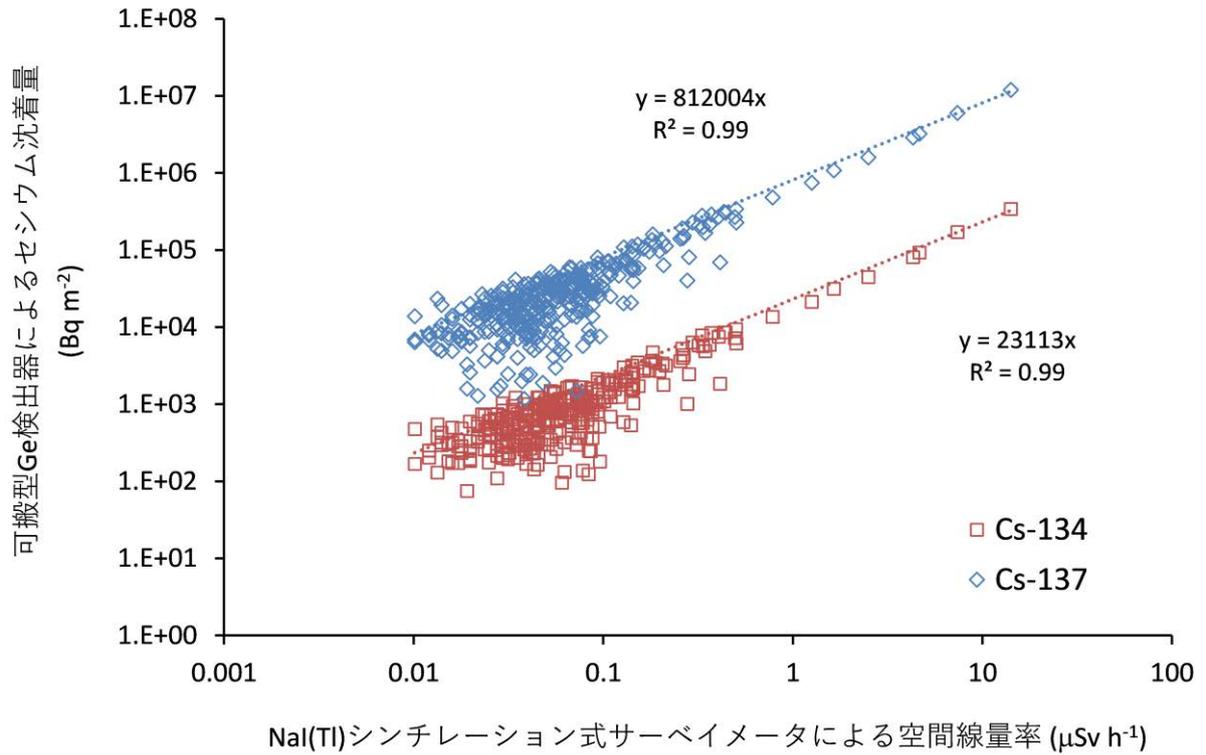


図 4-10 NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータによる地表面から 1 m 高さの空間線量率と可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定による放射性セシウム沈着量の相関
 (□: 空間線量率とセシウム 134 沈着量との相関 (データ数 n=349)、◇: 空間線量率とセシウム 137 沈着量との相関 (データ数 n=383)、R²は決定係数。天然放射性核種による空間線量率寄与を含まない。)

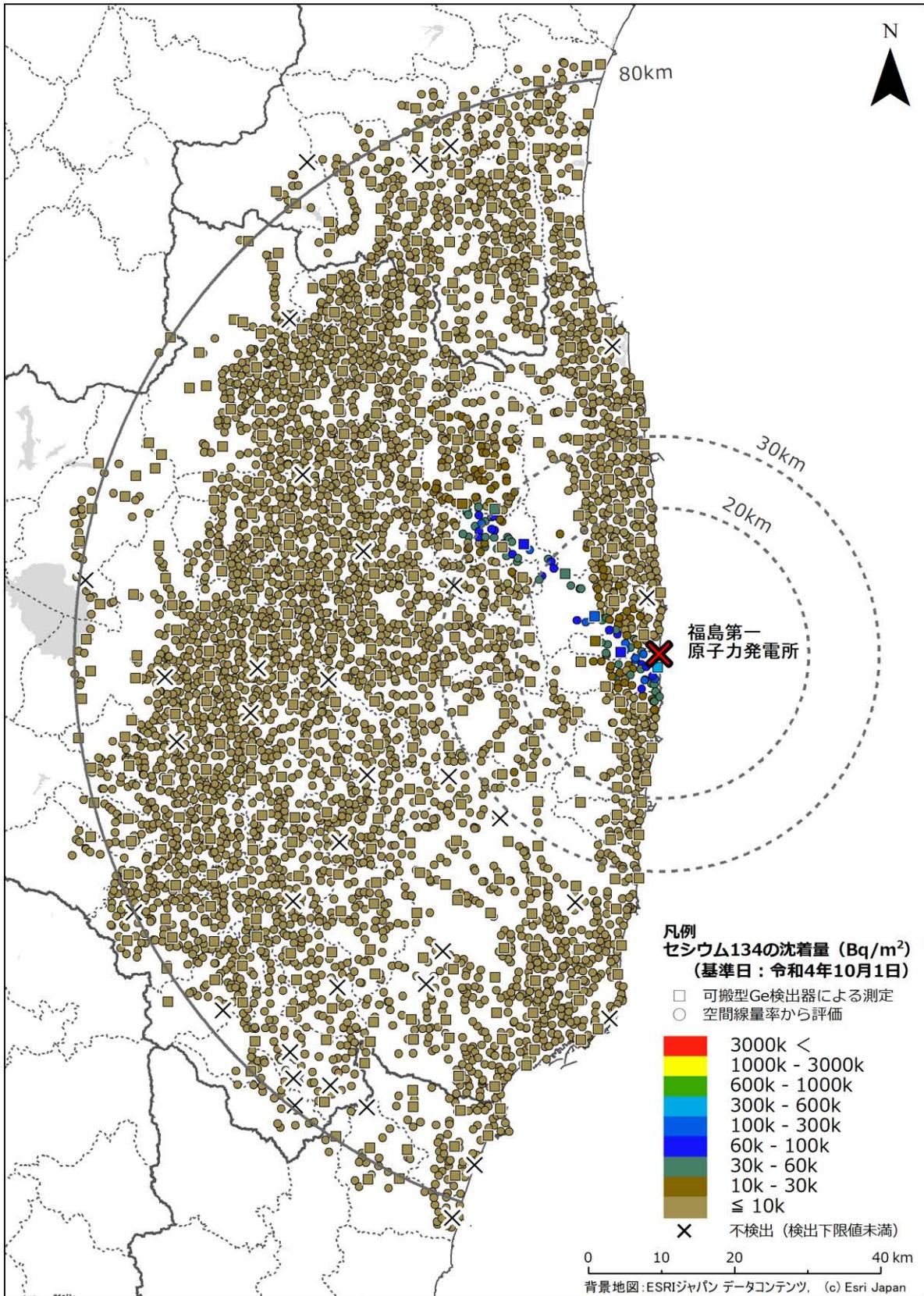


図 4-11 令和4年度調査における放射性セシウムの土壌沈着量分布マップ (1/2)

(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。)

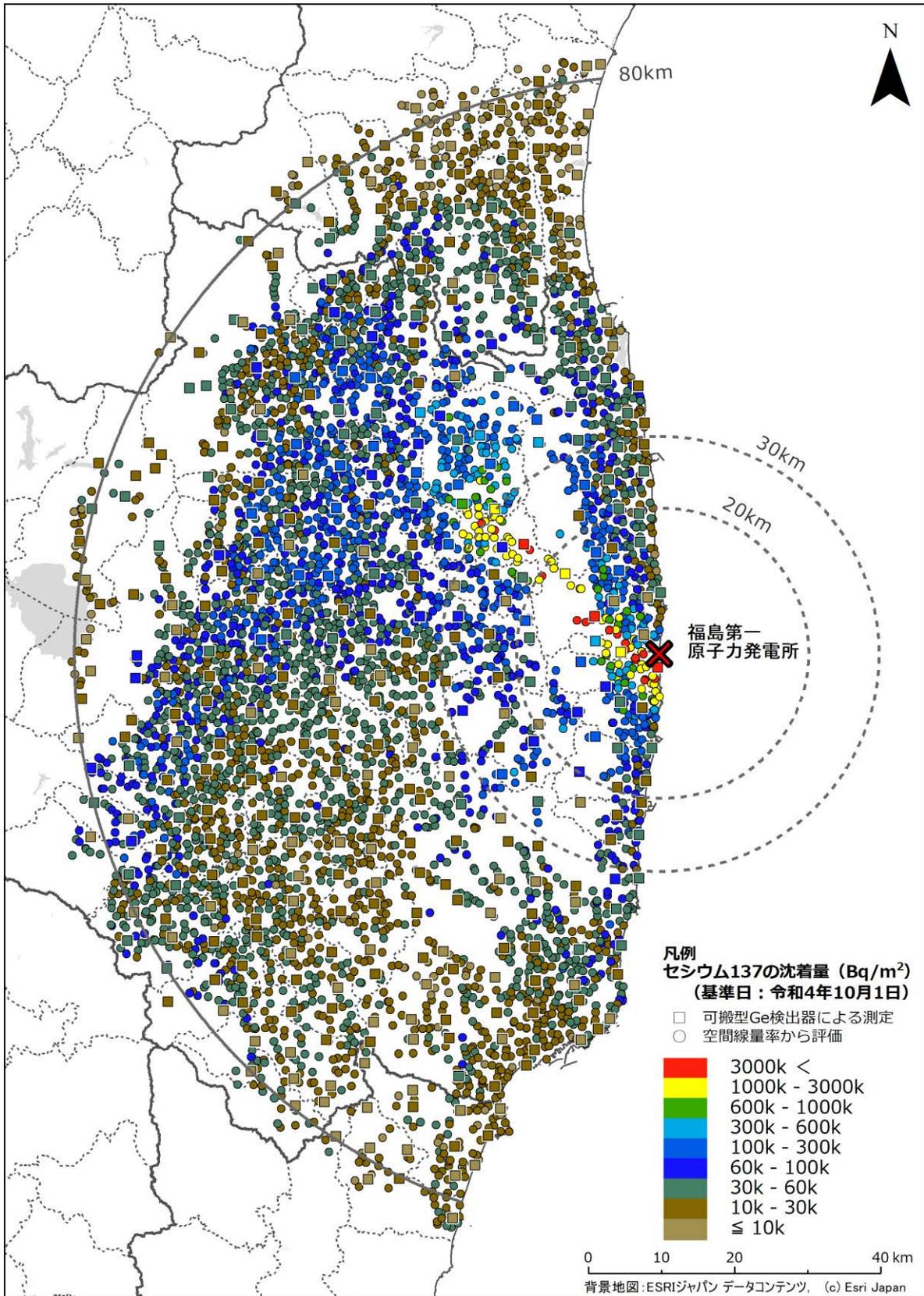


図 4-11 令和 4 年度調査における放射性セシウム137の土壌沈着量分布マップ (2/2)

(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。)

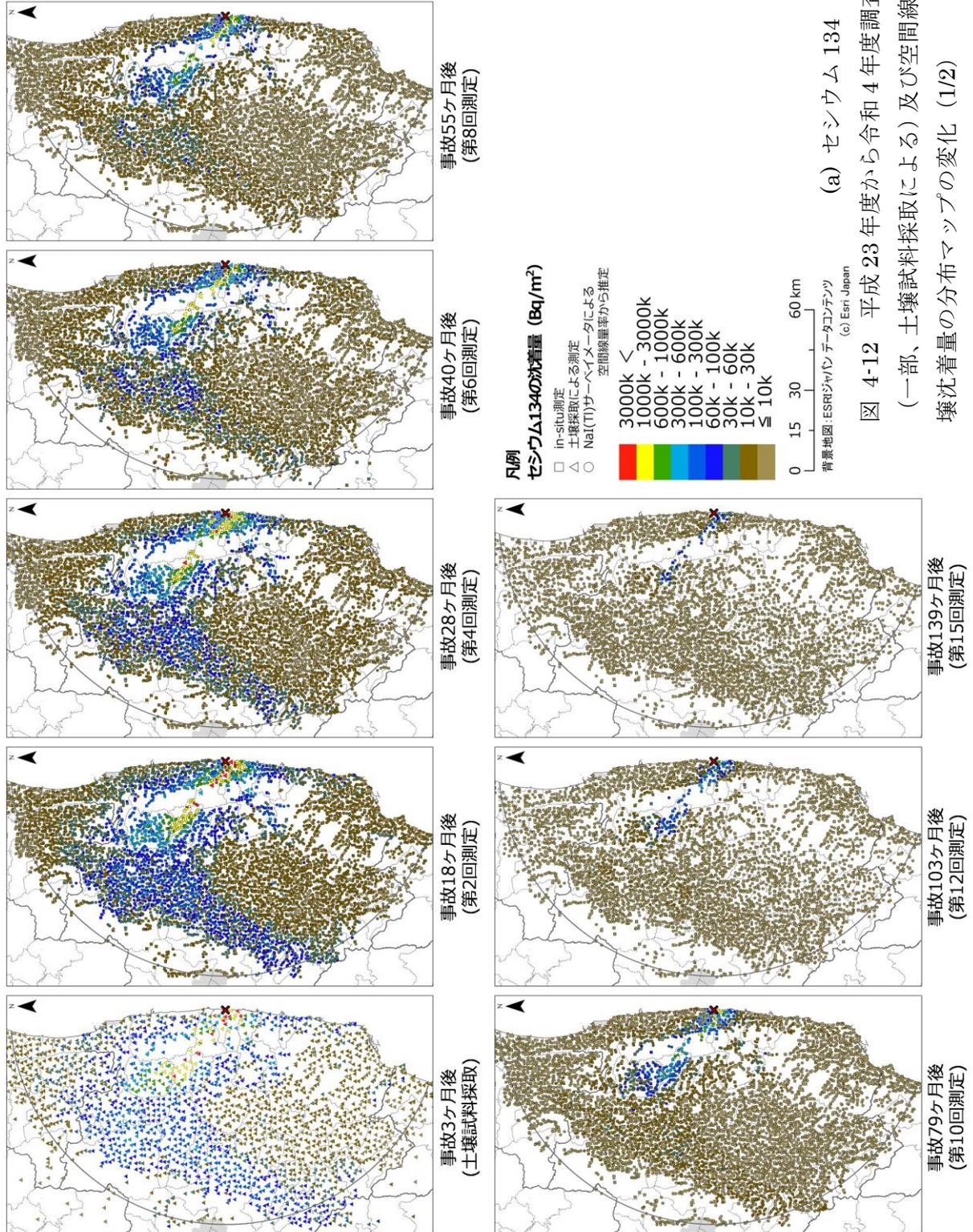


図 4-12 平成 23 年度から令和 4 年度調査までの in-situ 測定
 (一部、土壌試料採取による) 及び空間線量率から評価した土
 壌沈着量の分布マップの変化 (1/2)

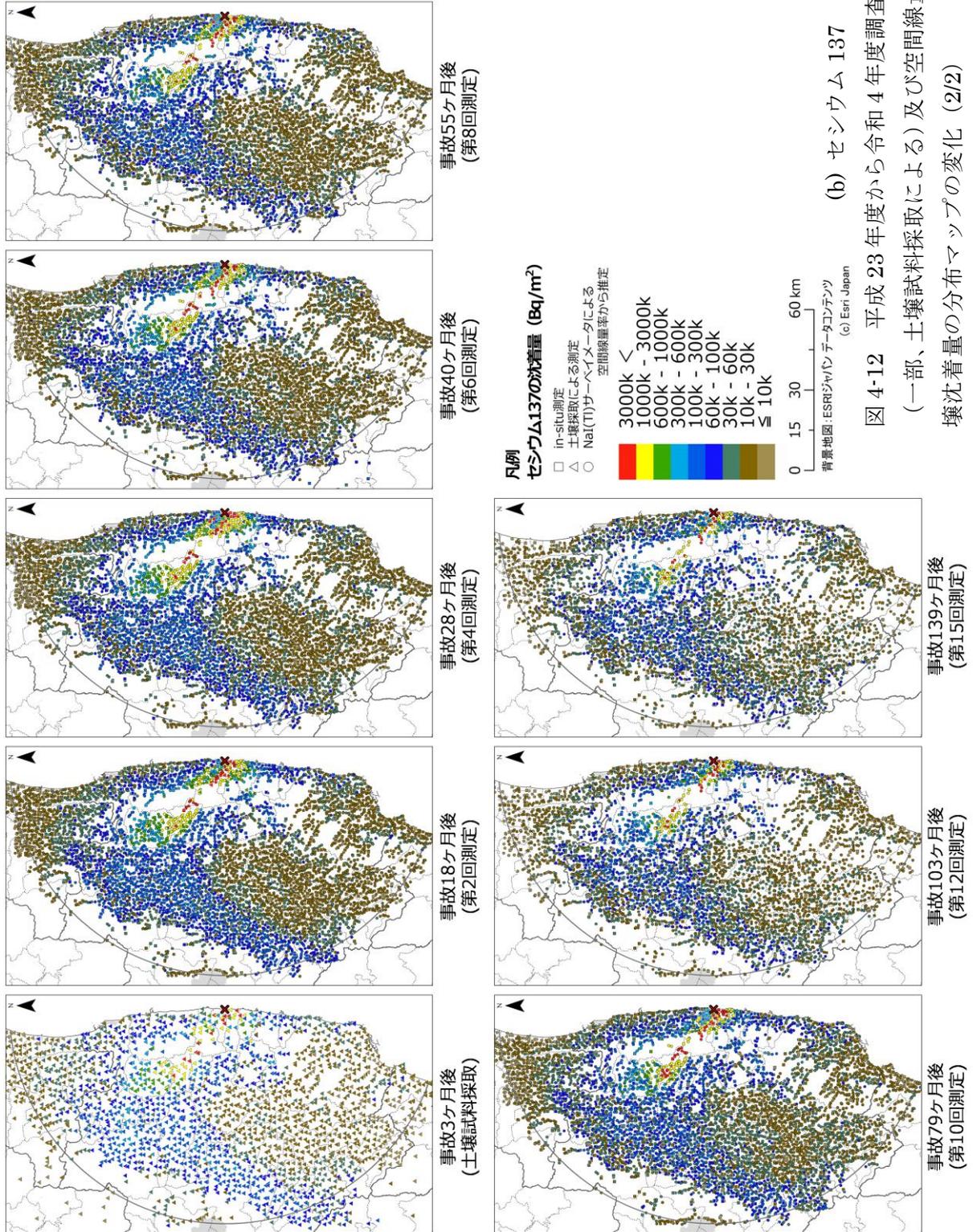


図 4-12 平成 23 年度から令和 4 年度調査までの in-situ 測定
 (一部、土壌試料採取による) 及び空間線量率から評価した土
 壌沈着量の分布マップの変化 (2/2)

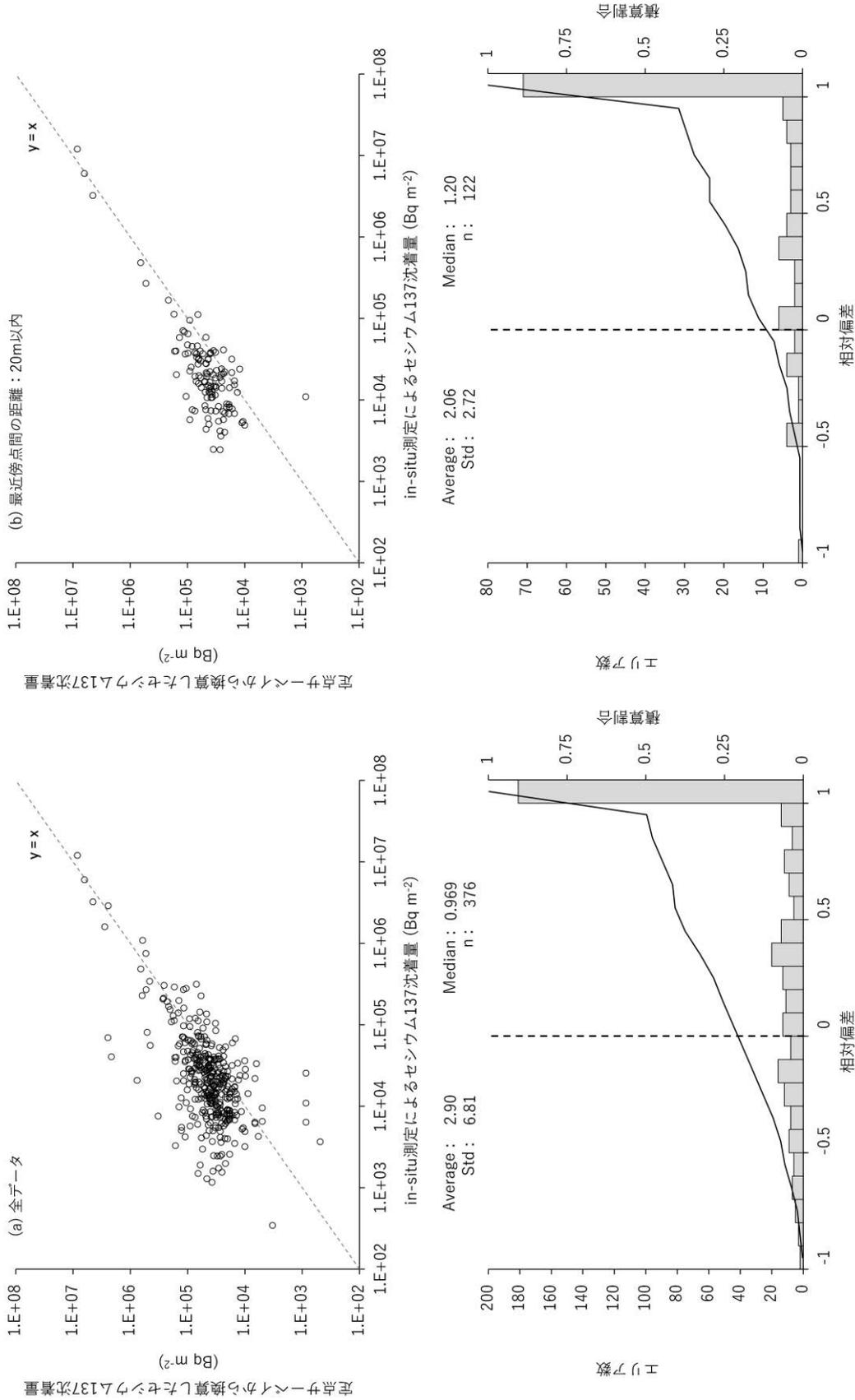


図 4-13 可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定による沈着量と定点サーベイ最近傍点における NaI(Tl) シンチレーション式サーベイメータによる空間線量率から評価したセシウム 137 沈着量の比較 (Std は標準偏差、n はデータ数を意味する。)

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^{15,17)}、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 4 年度調査の in-situ 測定において上記天然放射性核種 5 核種が全て有意検出された 337 箇所の内、測定時に降雨があった 48 箇所を除く 289 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 53¹⁵⁾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。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。

289 箇所における天然放射性核種 5 核種による空気カーマ率の平均値は 0.036 $\mu\text{Gy/h}$ であった。これは空間線量率(周辺線量当量率)では約 0.044 $\mu\text{Sv/h}$ に相当する²¹⁾。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。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)²²⁾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。

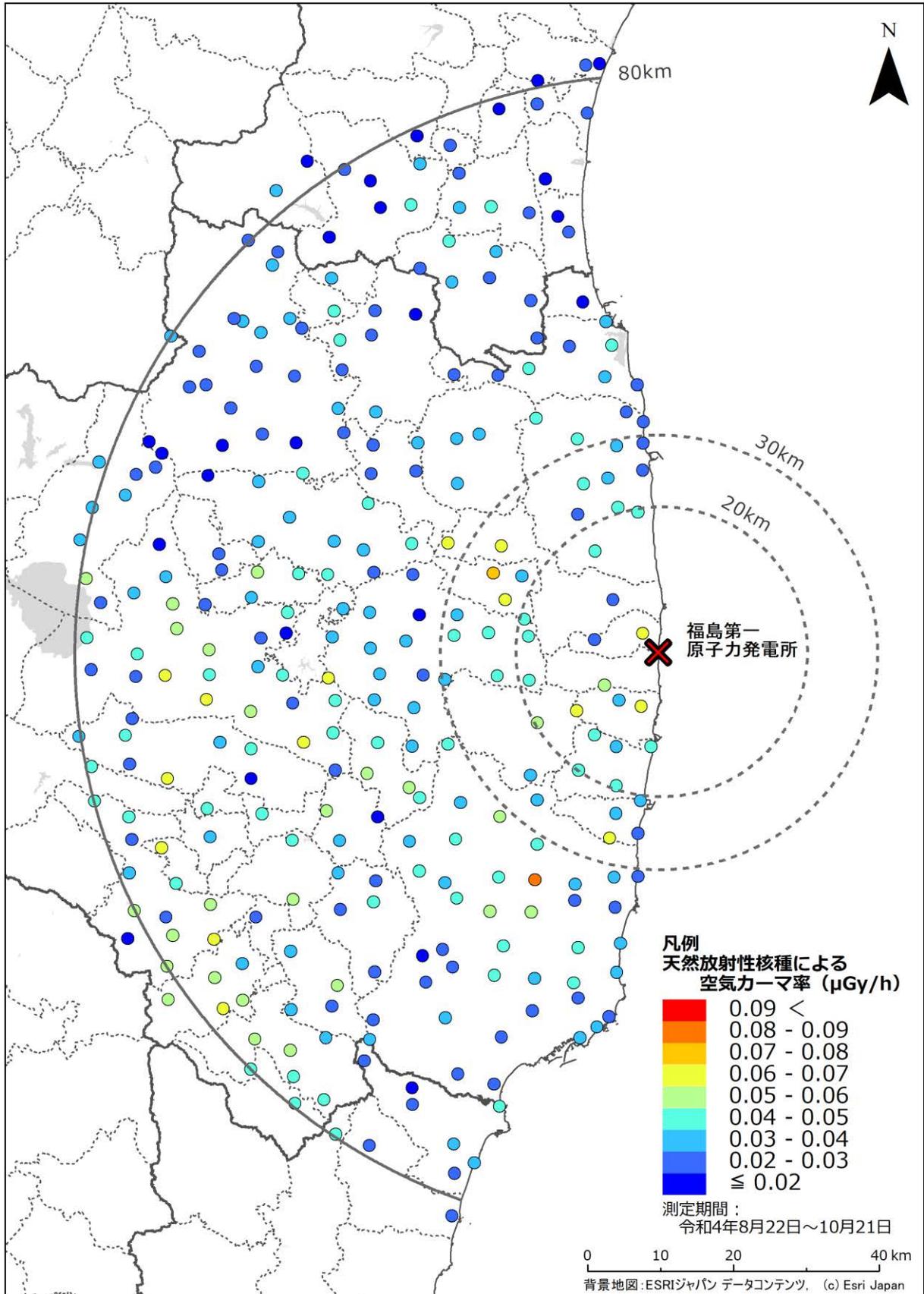


図 4-14 令和4年度調査での in-situ 測定により評価した天然放射性核種による空気カーマ率の分布

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 10 年以上が経過し、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 (9) で表される。

$$\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T_{Cs}} + \frac{1}{T_{eco}} \quad (9)$$

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ョルノービ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。

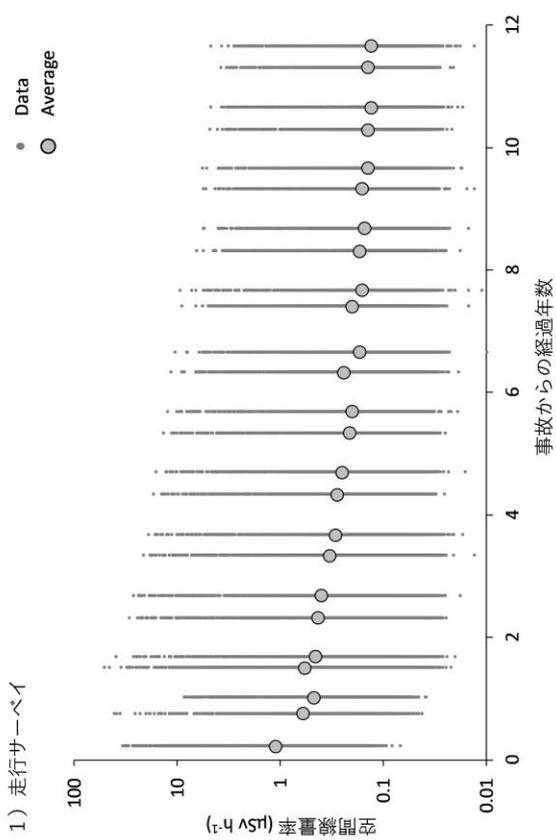
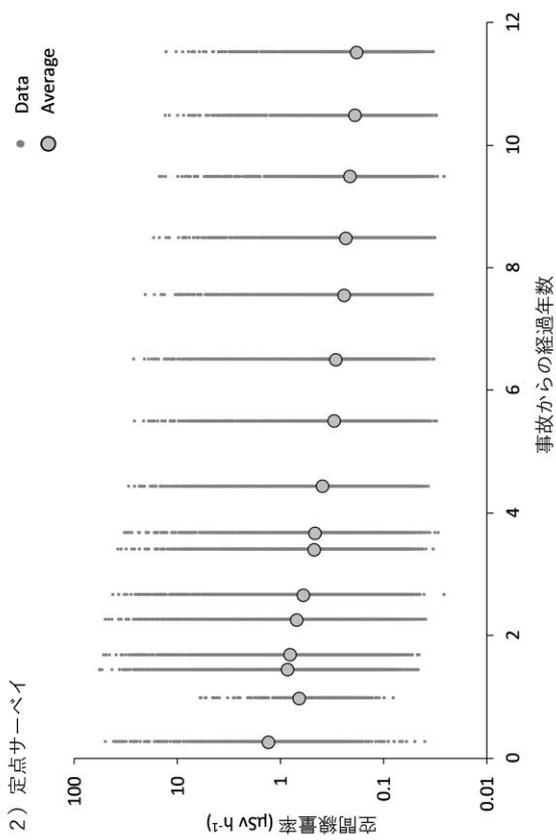
5.2 測定結果の変化傾向

平成 23 年度から令和 4 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、80 km 圏内を総務省統計局により定義される基準地域メッシュで分割し測定値があるメッシュについて各々のメッシュ内の空間線量率（又は沈着量）（・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全メッシュ内の数値を測定回ごとに算術平均した数値（○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 80 km 圏内の地域を網羅的に測定している。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必ずしも毎回同じではないこと、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 測定は開けた舗装されていない平坦地を測定場所としており、ガンマ線スペクトルからバックグラウンドの影響なしに測定できるため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。ただし、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 測定データ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。

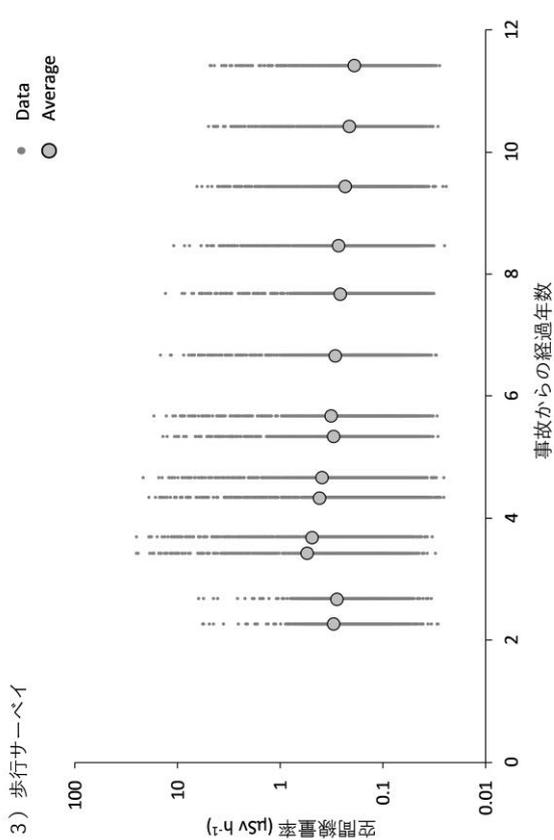
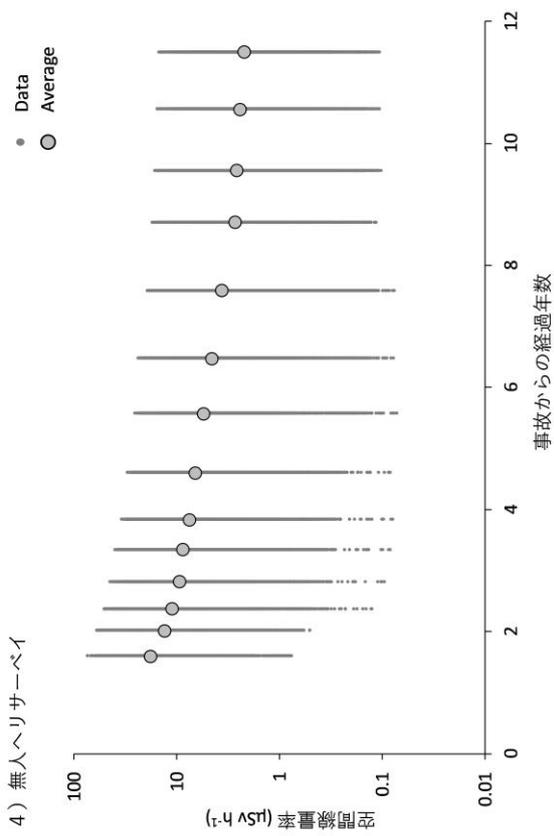
このように過去の地上で得られたデータは、空間線量率や放射性物質の沈着状況を面的に把握することを目的としていた。さらに測定法の特徴を整理すると、定点サーベイでは測定点における線量率、歩行サーベイでは歩行経路に沿った線量率、走行サーベイでは道路上の線量率と、それぞれの測定手法に応じて限定的な条件下での線量率情報が得られる。このため、沈着量分布の全体像及びその減衰傾向を考察するにあたっては面的及び時間的に不連続なデータの取り扱いが課題となる。また、近年では、放射性セシウムによる空間線量率が減少し、天然放射性核種によるバックグラウンドの空間線量率が無視できない状況となっている。よって、それぞれの課題を解決し、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。



測定回	第14回	第15回	第16回
事故からの経過年数(年)	9.49	10.5	11.5
平均空間線量率($\mu\text{Sv h}^{-1}$)	0.21	0.19	0.18
標準偏差	0.62	0.57	0.51
測定エリア数	5018	5013	5020
初回からの平均値の割合	16	15	14

測定回	第14回	第15回	第16回	第17回	第18回	第19回	第20回	第21回	第22回	第23回	第24回	第25回
事故からの経過年数(年)	6.33	6.66	7.41	7.67	8.31	8.68	9.33	9.67	10.3	10.7	11.3	11.7
平均空間線量率($\mu\text{Sv h}^{-1}$)	0.24	0.17	0.20	0.16	0.17	0.15	0.16	0.14	0.14	0.13	0.14	0.13
標準偏差	0.61	0.45	0.46	0.40	0.39	0.31	0.37	0.29	0.31	0.26	0.27	0.24
測定エリア数	4044	5510	3874	5204	3883	4966	3943	4990	3955	4904	3913	4592
初回からの平均値の割合	22	15	18	15	15	14	15	13	13	12	13	12

図 5-1 分布状況調査で得られた空間線量率の経時変化傾向 (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。)



測定回	第14回
事故からの経過年数(年)	11.5
平均空間線量率($\mu\text{Sv h}^{-1}$)	2.2
標準偏差	2.2
測定エリア数 (100m ² メッシュ)	7119
初回からの平均値の割合	12

測定回	第14回
事故からの経過年数(年)	11.4
平均空間線量率($\mu\text{Sv h}^{-1}$)	0.19
標準偏差	0.38
測定エリア数 (100m ² メッシュ)	1732
初回からの平均値の割合	63

図 5-1 分布状況調査で得られた空間線量率の経時変化傾向 (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。)

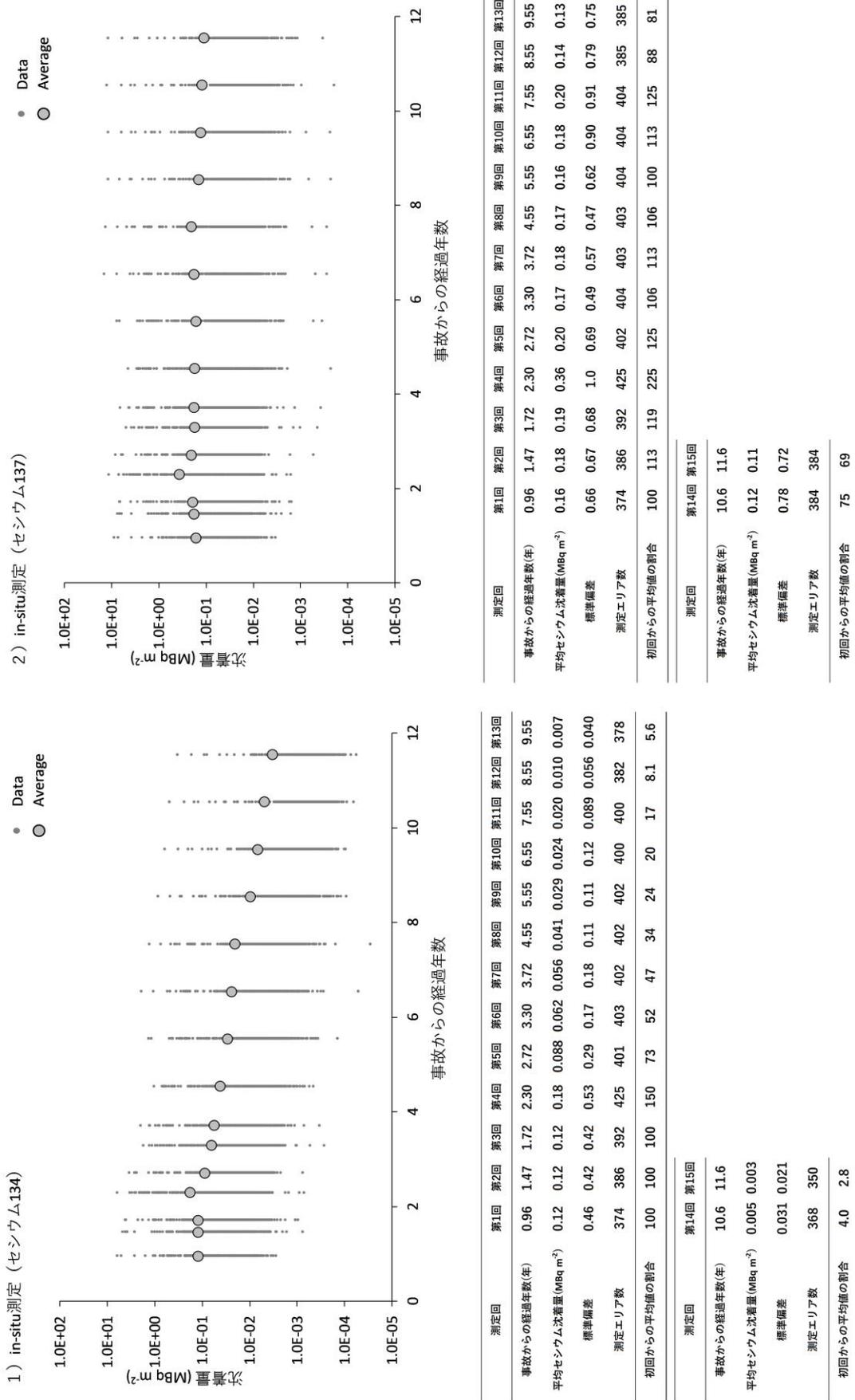


図 5-2 分布状況調査で得られた放射性セシウム沈着量の経時変化傾向

5.3 実効半減期算出方法

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用いて実効半減期を算出した。また、地上での測定結果との比較のため、無人ヘリサーベイ及び航空機サーベイ²³⁾のデータについても実効半減期を算出した。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、同一メッシュ内のデータを平均化し集計した。ただし、無人ヘリサーベイの結果については、測定範囲が 3 km 圏内と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には、測定手法ごとに全調査期間においてデータが存在しているメッシュを抽出して用いた。事故由来の空間線量率の変化傾向を定量化するためには、天然放射性核種による空間線量率（バックグラウンド線量率）を減算する必要がある。本章では、バックグラウンド線量率として、走行サーベイのデータについては KURAMA-II による走行サーベイ結果を基に評価されたデータ²⁴⁾を採用し、その他のサーベイデータについては位置分解能が細かい航空機サーベイの結果から作成したデータ²⁵⁾を採用した。

本解析には、80 km 圏内のデータを対象とした。解析対象とした測定期間については、データ数を考慮し、走行サーベイについては全期間、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 年度調査の 1 回目）以降、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 測定については全期間のデータをそれぞれ使用した。

抽出した各測定手法によるデータについて、式 (10) 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。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 $a+b+c$ は事故直後の空間線量率を表す。 c は本解析対象期間では減衰傾向が確認できないような定数項を表している。この定数項については、今後のデータを加えることで指数関数の第 3 項として半減期の計算が可能になると考えられる。実効半減期、係数 a 及び b 、定数項 c については最小二乗法により推定値の 95% の信頼区間を計算した。これらパラメータの信頼区間の計算値に対して 95% 下限信頼区間が負数となる場合には、式(10)が測定データの母集団に対して適用性がないと判断し、定数項のない式(11)を適用した。さらに、式(11)でもパラメータの信頼区間の計算値に対して 95% 下限信頼区間が負数となる場合には、一項の指数関数の式(12)を適用した（以下「1 成分モデル」という。）。ここで t_e は 1 成分モデルの実効半減期である。式(12)における g は 1 成分モデルでの定数項である。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及び定数項 $a \sim g$ については参考値とする。

$$D = a \exp\left(-\frac{0.693}{t_{short}} \times t\right) + b \exp\left(-\frac{0.693}{t_{long}} \times t\right) + c \quad (10)$$

$$D = d \exp\left(-\frac{0.693}{t_{short}} \times t\right) + e \exp\left(-\frac{0.693}{t_{long}} \times t\right) \quad (11)$$

$$D = f \exp\left(-\frac{0.693}{t_e} \times t\right) + g \quad (12)$$

可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定による沈着量の実効半減期評価については、放射性セシウムの半減期と直接的に比較できるため、セシウム 134 とセシウム 137 の沈着量の結果に分けて、式(13)を適用した。ここで t_t は1成分モデルの実効半減期である。

$$D = h \exp\left(-\frac{0.693}{t_t} \times t\right) \quad (13)$$

5.4 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又は一項の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、定点サーベイ及び歩行サーベイについて指数関数近似を行った結果をそれぞれ図 5-3 (a)～(c)に示す。走行サーベイについては式(10)で、定点サーベイ及び歩行サーベイについては式(12)により近似した。表 5-1 に示したように、走行サーベイでは実効半減期の速い成分で 0.35 年、遅い成分で 1.8 年、定数項 c は 0.089 $\mu\text{Sv/h}$ であった。また定点サーベイについては、1成分モデルの実効半減期は 1.7 年となり、定数項 g は 0.32 $\mu\text{Sv/h}$ と求められた。歩行サーベイでは1成分モデルの実効半減期は 1.7 年となり、定数項 g は 0.14 $\mu\text{Sv/h}$ と求められた。これら地上での測定による遅い成分または1成分モデルの実効半減期は似通っており、近年においても、セシウム 134 とセシウム 137 の半減期と比較して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。

無人ヘリサーベイ及び航空機サーベイについてそれぞれ式(10)及び式(11)により指数関数近似を行った結果を図 5-3 (d),(e)に示す。無人ヘリサーベイについては実効半減期の速い成分で 0.57 年、遅い成分で 2.9 年、定数項 c として 1.6 $\mu\text{Sv/h}$ であった。他の測定に比べて定数項が比較的高いのは、測定対象の空間線量率が比較的高い福島第一原発の近傍であることが要因として考えられる。航空機サーベイの実効半減期は、速い成分で 0.78 年、遅い成分で 5.8 年であった。

表 5-1 評価された実効半減期の一覧

項目	対象	測定手法	適用モデル	パラメータ		
				実効半減期 (y)	遅い成分	定数項 ($\mu\text{Sv/h}$)
空間 線量率	車道上	走行 サーベイ	式 (10)	0.35 (0.25 - 0.46)	1.8 (1.6 - 2.0)	0.089 (0.074 - 0.10)
	平たん 土壌上	定点 サーベイ	式 (12)	1.7 (1.6 - 1.8)		0.32 (0.28 - 0.37)
	歩道上	歩行 サーベイ	式 (12)	1.7 (1.4 - 2.0)		0.14 (0.11 - 0.16)
	平均値	無人へり サーベイ	式 (10)	0.57 (0.30 - 0.85)	2.9 (2.3 - 3.5)	1.6 (0.94 - 2.3)
	平均値	航空機 サーベイ	式 (11)	0.78 (0.70 - 0.86)	5.8 (5.2 - 6.4)	-
放射性 セシウム 沈着量	Cs-134	In-situ	式 (13)	1.9 (1.6 - 2.2)		-
	Cs-137			37* (-4.3 - 79)		-

パラメータの () 内数値は95%信頼区間を示している。
* p値=0.37>0.05 (有意差なし)

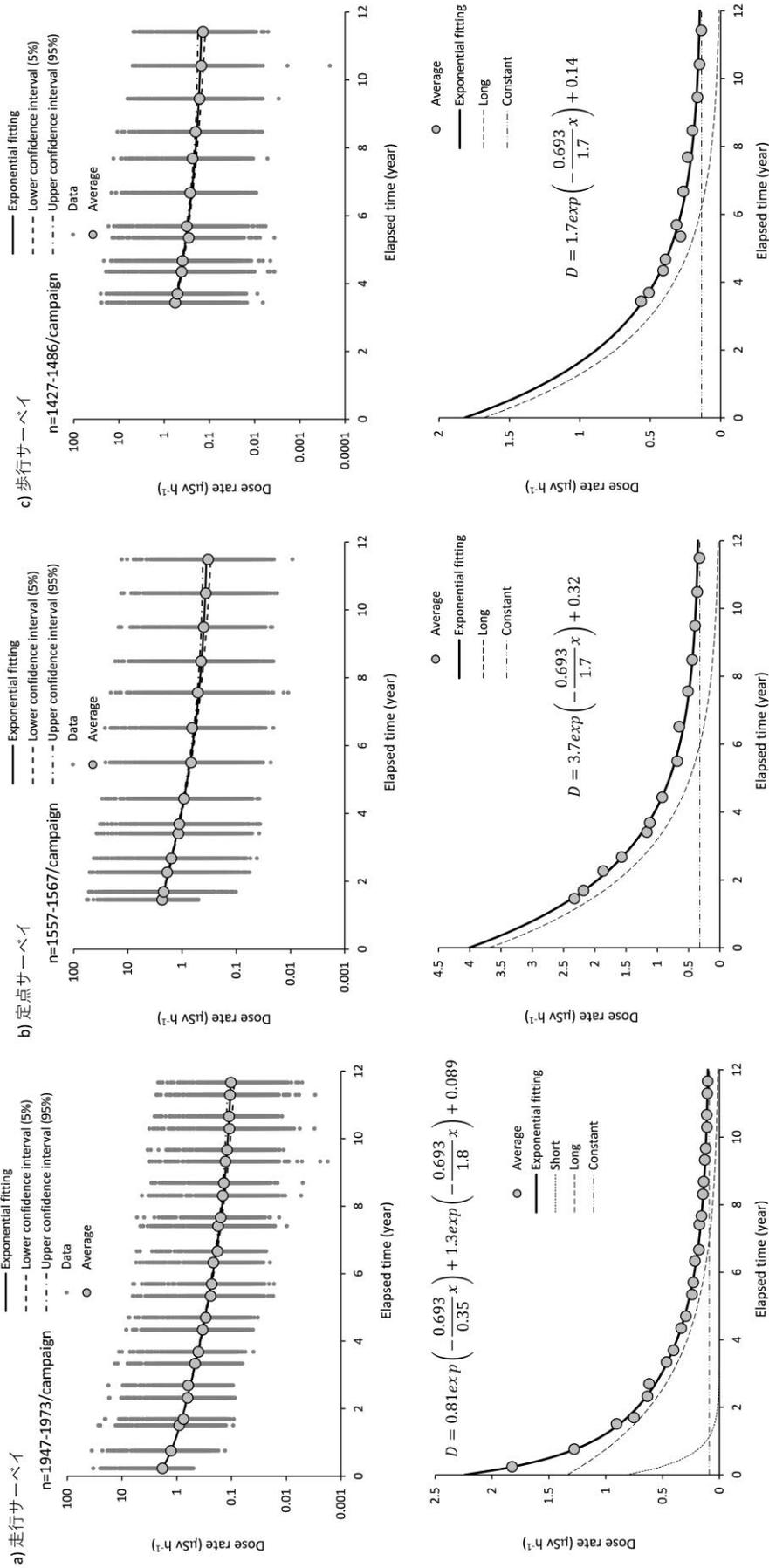


図 5-3 空間線量率変化傾向及び指数関数の近似 (1/2)
 (Short : 速い成分、Long : 遅い成分、Constant : 定数項、n : データ数)

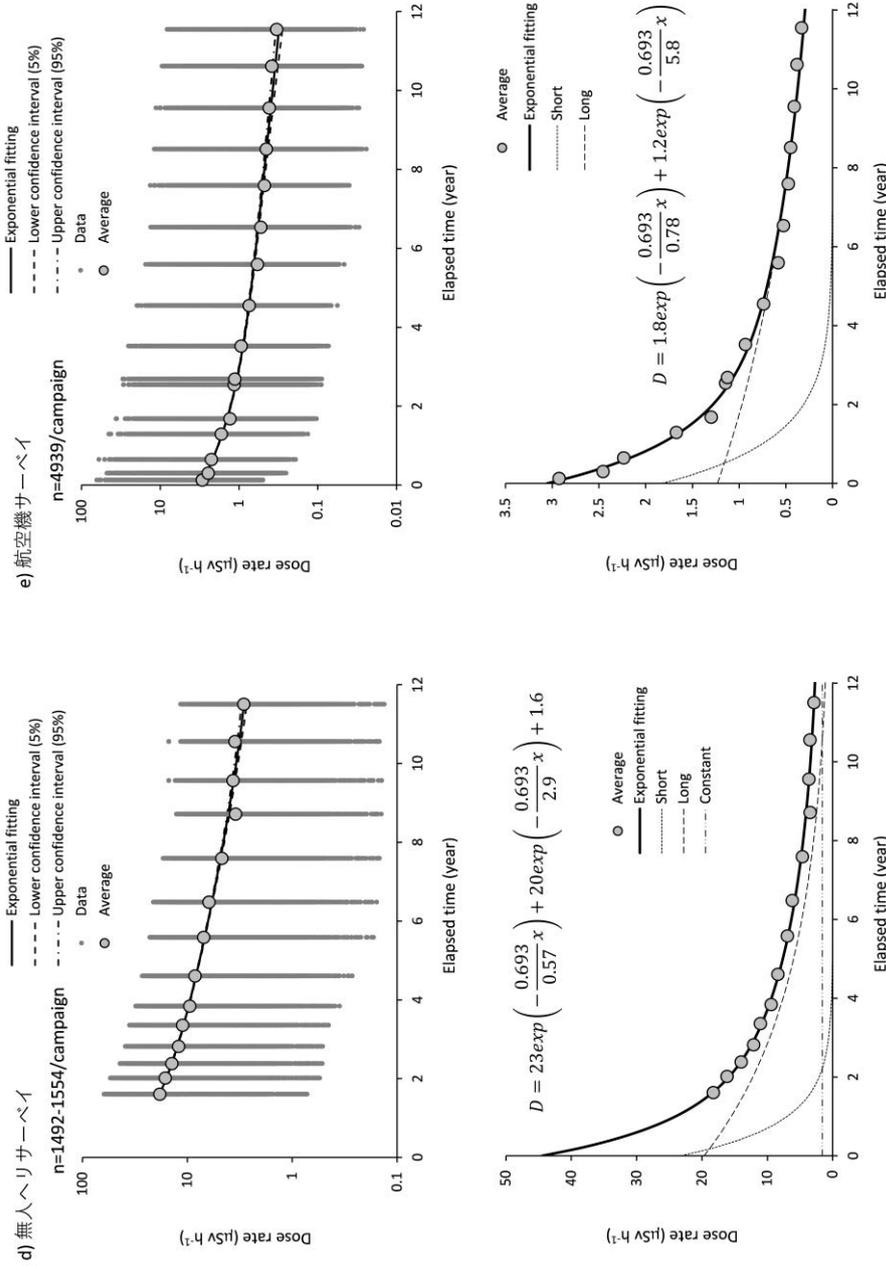


図 5-3 空間線量率変化傾向及び指数関数の近似 (2/2)

(Short : 速い成分、Long : 遅い成分、Constant : 定数項、n : データ数)

5.5 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 5-4 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く、近似した実効半減期は 1.9 年となった。セシウム 137 については、ばらつきが比較的大きく、フィッティング結果も有意とはいえないためさらなる検討が必要と考える。なお、セシウム 137 について平成 28 年度以降で不連続になっているように見えることに関しては、引き続き個別のデータを精査していく。

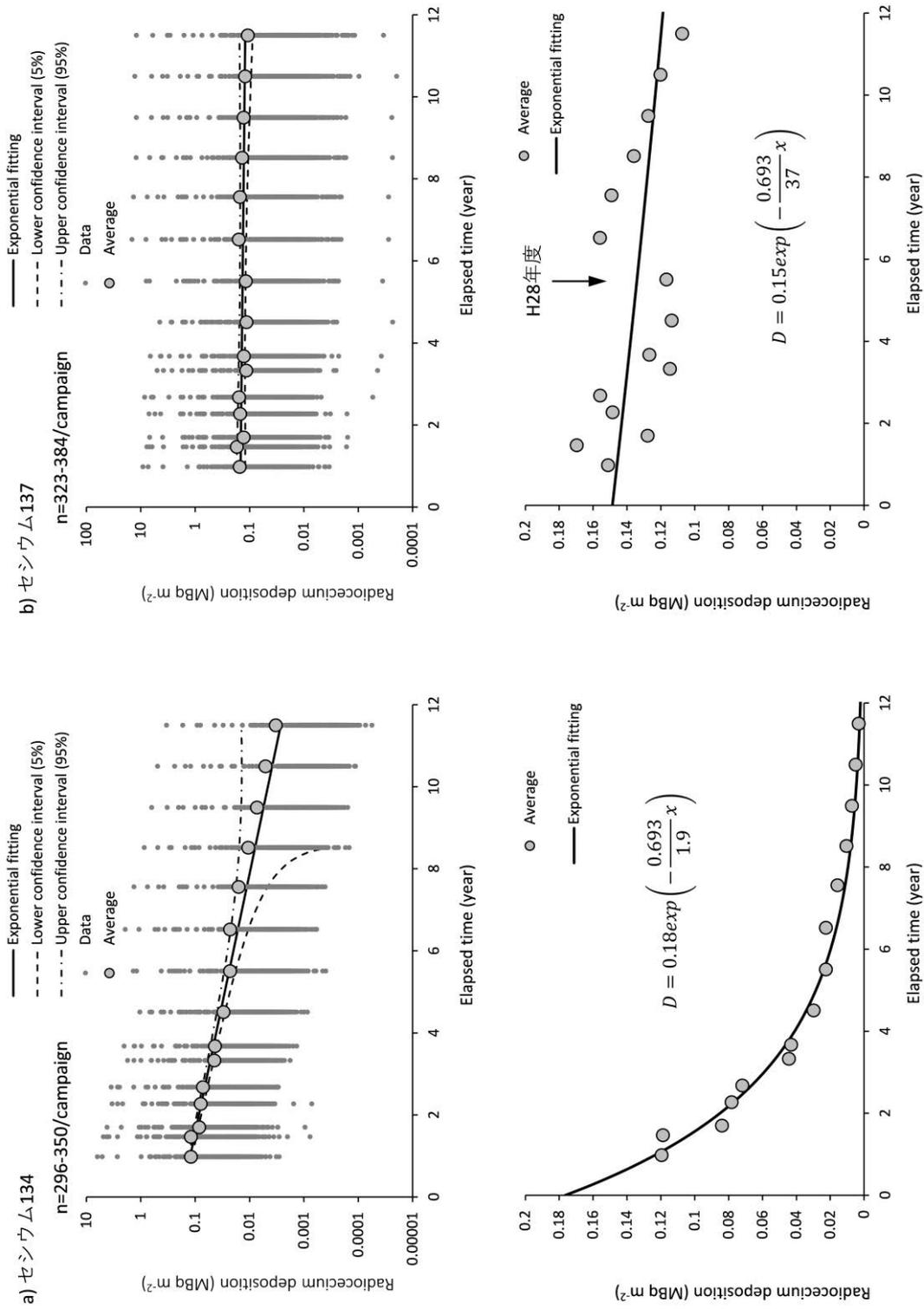


図 5-4 可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定結果における放射性セシウムの沈着量変化傾向及び指数関数の近似 (n : データ数)

5.6 同一メッシュにおける空間線量率の変化傾向

前節までの実効半減期の評価は、測定手法ごとに評価した結果であり、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、各測定手法による空間線量率の変化傾向の特徴を考察するため、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全ての測定手法による空間線量率データが存在する基準地域メッシュを抽出することにより、解析対象とする測定場所をできる限り統一した。この方法により可住地域を中心に抽出した1,236箇所を図5-5に示す。なお、各測定手法の測定場所は図5-6に示すように必ずしも一致せず、それぞれの測定手法の測定場所の特徴及び測定データの集計方法には以下のような違いがある。

- ・ 走行サーベイ：舗装された道路上で移動しながら測定し、100 m メッシュ内のデータを平均化
- ・ 歩行サーベイ：道路又は歩道上で移動しながら測定し、20 m メッシュ内のデータを平均化
- ・ 定点サーベイ：未舗装の土壌面の1点で測定
- ・ 航空機サーベイ：エリアの平均値：対地高度300 mの上空を移動しながら測定し、250 m メッシュ内のデータを地上高さ1 mの数値に換算し平均化²³⁾

図5-5に示した1,236箇所における各測定手法による空間線量率の平均値について平成23年以降の経時変化及び式(10)に示した二項の指数関数近似曲線を図5-7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、航空機サーベイは300 m上空から直下の半径300 mの円内に入る地域の放射線の平均値を計測しており局所的な線量の勾配がトレースできず、3年目以降に本格化した除染作業による影響の差異を反映しているためと考えられる。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。

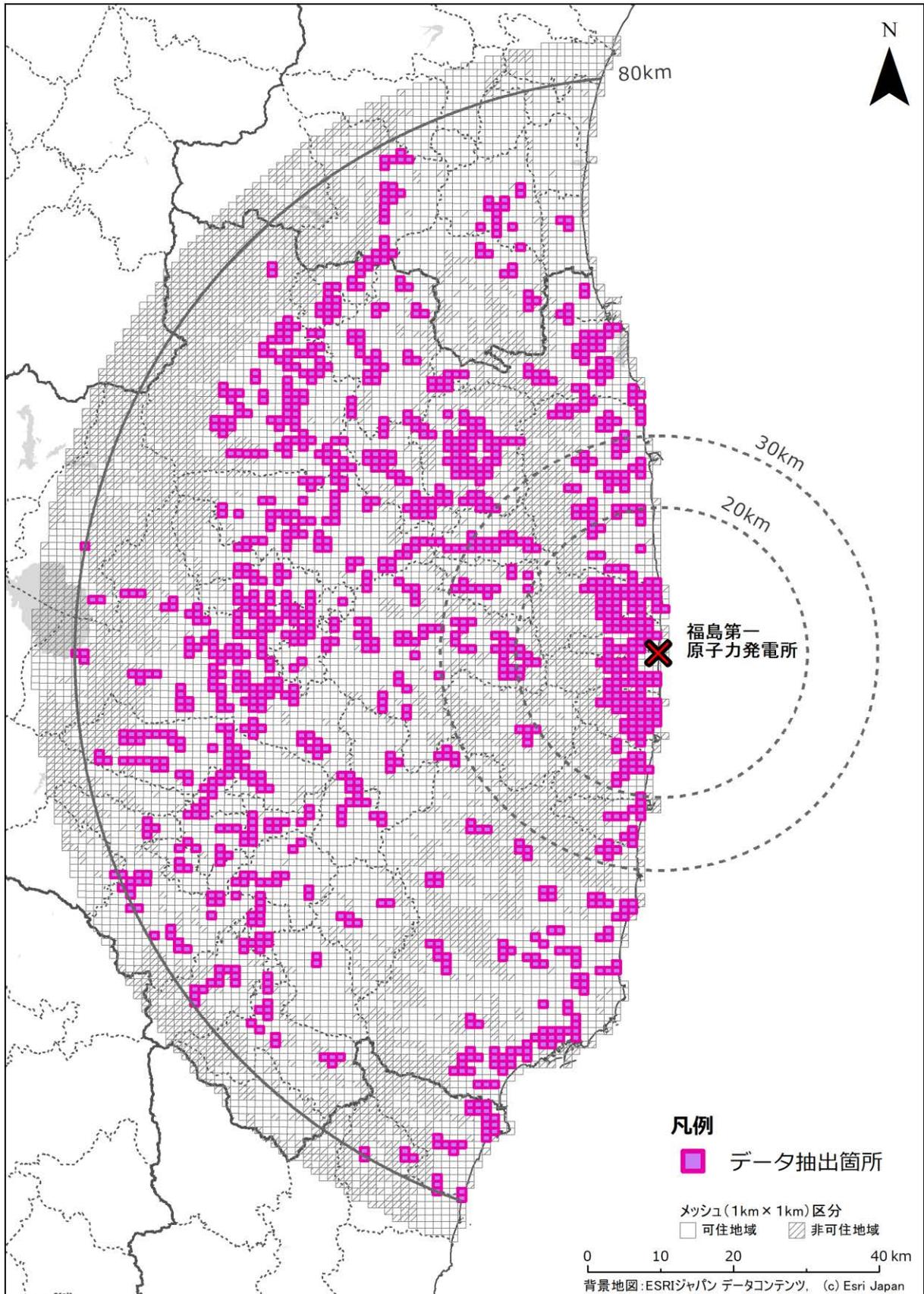


図 5-5 走行サーベイ、定点サーベイ、歩行サーベイ及び航空機サーベイの全測定手法によるデータが存在するデータを抽出した箇所（基準地域メッシュ）



図 5-6 各測定手法の測定状況と測定対象のイメージ

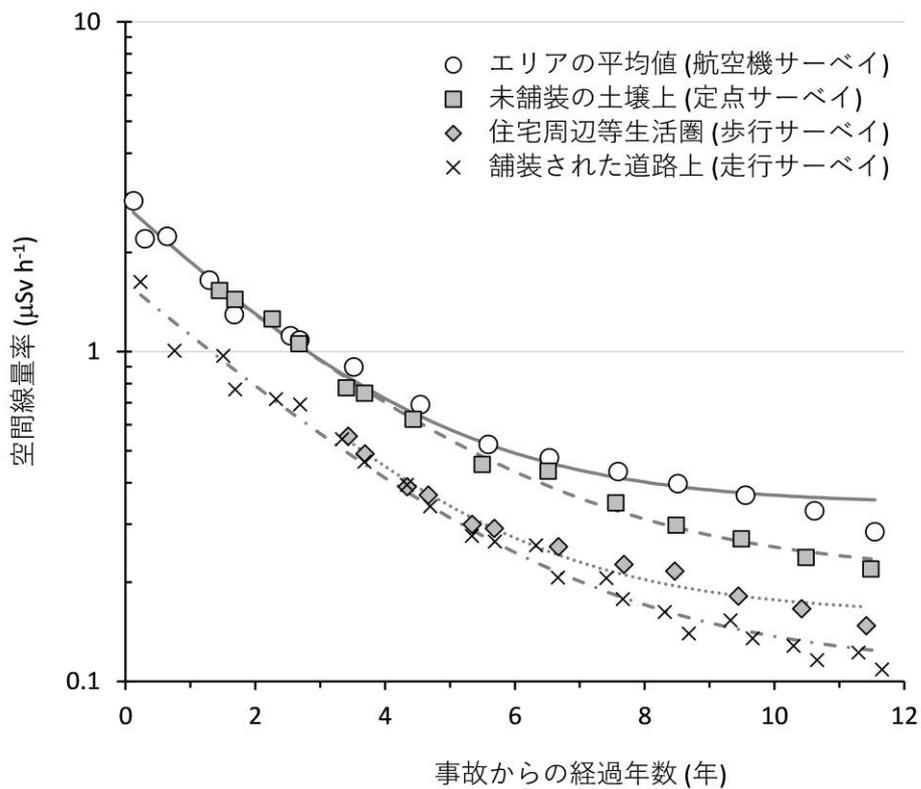


図 5-7 全測定手法によるデータが存在する基準地域メッシュを抽出して解析した空間線量率の変化傾向 (図中の曲線は二項又は一項の指数関数近似曲線)

6. 測定箇所の重要度分類のためのスコア化の検討

6.1 目的

事故後のモニタリングは、政府の決定する総合モニタリング計画（平成 23 年 8 月 2 日モニタリング調整会議制定）²⁶⁾ に則り、関係府省が地方公共団体や原子力事業者等と連携して実施してきた。また政府は平成 27 年度から東日本大震災後 10 年となる令和 2 年度までを「復興・創生期間」と位置付けており、様々な復興のための事業、財源の見直し及び復興事業の整理を実施してきた。そのような状況の中、放射性物質のモニタリングについてもこれまでの実績を総括し長期的視野に立って継続すべきモニタリングの計画策定が求められている。環境放射線モニタリングの最適な測定箇所は、測定目的、測定方法及び測定点数等によって異なり、住民数や現状の空間線量率などを根拠として地域ごとのモニタリング必要性の重要度を評価することは、今後のモニタリング計画策定において、コストの削減やモニタリングすべき場所の欠落を防ぐためにも重要であると考えられる。

令和元年度調査において、分布状況調査で得られた放射線モニタリングデータや国勢調査などで提供されているデータ及び既存のモニタリングポストの設置位置情報などを考慮することにより、1 km×1 km で区切った場所のモニタリングの重要度を相対的に評価するスコア化手法を開発した。「スコア」の設定の目的は、住民や従業者の被ばくに与える地域的な影響度合いの尺度を加えることによって、線量の高低だけでなく総合的に地域の重要度を評価するものである。スコアは、モニタリングデータの誤差や実施回数及び密度等によって大きく変化しないことが望まれる。令和 4 年度調査では、令和 3 年度調査に引き続き、多年度におけるモニタリングデータを使用した場合のスコア評価結果とその変化要因について考察を行った。

6.2 総合モニタリング計画

計画はおよそ 1 年ごとに見直されており、本報告書作成時点での最新は令和 4 年 3 月 30 日に改定されたものである。最新の総合モニタリング計画には、モニタリングの目的として、下記の内容が示されている。

- ① 人が居住している地域や場所を中心とした放射線量、放射性物質の分布状況の中長期的な把握
- ② さまざまな被ばく状況に応じた、被ばく線量を低減させるために講じる除染をはじめとする方策の検討立案・評価
- ③ 将来の被ばくを可能な限り現実的に予測することによる、避難区域の変更・見直しに係る検討及び判断
- ④ 住民の健康管理や健康影響評価等の基礎資料（周辺住民の被ばく（外部被ばく及び内部被ばく）線量を含む）の蓄積
- ⑤ 環境中に放出された放射性物質の拡散、沈着、移動・移行の状況の把握
- ⑥ ALPS 処理水（基本方針で規定している ALPS 処理水のことをいう。）の処分に際しての風評影響の抑制

関係府省、地方公共団体及び原子力事業者等は、これらの項目に必要なデータの収集に努

めることとする。

表 6-1 に最新の総合モニタリング計画で定められている測定種別と担当省庁について示す。

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

項目	担当省庁	項目	担当省庁
<p>○福島第一原発周辺を中心とした陸域モニタリング</p> <ul style="list-style-type: none"> 福島県及び福島近隣県に設置した可搬型モニタリングポスト等の測定結果をインターネットを通じて公開 福島県全域において、サーベイメータ等による空間線量率の定点測定及び積算線量計による積算線量の定点測定を実施 福島第一原発 80km 圏内における航空機モニタリング実施 走行サーベイによる空間線量率の面的測定及び分布マップ作成、福島県内公共施設等でのサーベイメータによる空間線量率測定を実施 大気浮遊じんのモニタリング及び指標植物の放射性物質濃度を測定 地表面への放射性物質の沈着状況を測定し土壌濃度マップを作成 避難指示区域等における詳細モニタリングの実施 	<p>原子力規制委員会 原子力災害対策本部 復興庁 福島県 原子力事業者等</p>	<p>○学校、保育所等のモニタリング</p> <ul style="list-style-type: none"> 福島県内の学校等におけるリアルタイム線量測定システムの測定結果をインターネットを通じて公開 福島県内の学校等にて年に一度校庭等の空間線量率を測定 屋外プールの水の放射性物質の濃度の測定 学校等の給食について、放射性物質を測定するための検査を実施 	<p>原子力規制委員会 文部科学省 福島県 地方公共団体等</p>
		<p>○港湾、公園、下水道等のモニタリング</p> <ul style="list-style-type: none"> 下水汚泥中の放射性物質の濃度の測定 東北・関東地方の港湾において空間線量率や海水中放射性物質濃度を測定 都市公園等や観光地の空間線量率の測定 福島県内の都市公園等や観光地(観光施設・山地・自然・道の駅)における空間線量率を測定 	<p>国土交通省 福島県 地方公共団体等</p>
<p>○水環境</p> <ul style="list-style-type: none"> 福島県並びに近隣県の河川、湖沼・水源地、沿岸等における水質、底質、環境試料の放射性物質の濃度及び海水浴場等における空間線量率測定 福島県並びに近隣県の地下水について、放射性物質の濃度を測定 	<p>環境省 福島県</p>	<p>○野生動植物、廃棄物、除去土壌等のモニタリング</p> <ul style="list-style-type: none"> 野生動植物の採取・分析を実施 放射性物質汚染対処特措法等に基づく以下の実施 <ul style="list-style-type: none"> 水道施設等における廃棄物の調査、廃棄物焼却施設等の排ガス等及び最終処分場等の地下水・放流水の放射性物質濃度の測定 廃棄物焼却施設等の敷地境界における空間線量率等の測定 	<p>環境省 福島県 地方公共団体 事業者等</p>
<p>○海域モニタリング</p> <ul style="list-style-type: none"> 福島第一原発の周辺の(1)近傍海域、(2)沿岸海域、(3)沖合海域、(4)外洋海域及び(5)東京湾について、海水、海底土及び海洋生物の放射性物質の濃度を測定 	<p>原子力規制委員会 水産庁 国土交通省 海上保安庁 環境省 福島県 東京電力等</p>	<p>○農地土壌、林野、牧草等のモニタリング</p> <ul style="list-style-type: none"> 農地土壌の放射性物質の濃度の推移の把握や移行特性の解明 福島県において、森林土壌、枝、葉、樹皮及び木材中の放射性物質の濃度及び空間線量率を測定 関係県の牧草等について放射性物質の濃度を測定 福島県において、ため池等の放射性物質の濃度を測定 	<p>農林水産庁 林野庁 地方公共団体等</p>
<p>○全国的なモニタリング</p> <ul style="list-style-type: none"> 各都道府県におけるモニタリングポストによる空間線量率の測定結果をインターネットを通じてリアルタイムで公開 福島県近隣県で空間線量率の比較の高い地域について、航空機モニタリングを実施 月間降下物(雨やほこり等)及び上水(蛇口)について測定 	<p>原子力規制委員会 地方公共団体等</p>	<p>○水道のモニタリング</p> <ul style="list-style-type: none"> 関係都県毎に、浄水場の浄水及び取水地域の原水に関して採取した水を検査 福島県内については、水源別に水道水における放射性物質の濃度を測定 	<p>厚生労働省 原子力災害対策本部 地方公共団体等</p>
		<p>○食品のモニタリング</p> <ul style="list-style-type: none"> 各都道府県において食品のモニタリングを実施 福島県は、食品中に含まれる放射性物質の濃度の詳細な調査を実施 食品摂取を通じた実際の被ばく線量の推計調査に資する食品中の放射性物質濃度の調査を継続的に実施 	<p>厚生労働省 原子力災害対策本部 福島県 地方公共団体等</p>

6.3 地域スコア化によるモニタリング代表性評価

今後の空間線量率等測定ポイントの重点化・最適化に資するため、これまでに得られたモニタリング結果を基にモニタリング代表性の高い場所を選定する評価手法として地域スコア化手法について検討してきた。

6.3.1 地域スコア化手法

スコア化とは、医療分野の疫学研究などで用いられる「傾向スコア」の考え方に代表されるように、単位の異なる数値情報を相互比較するために数値集団ごとに一定の評価値（スコア）を与える手法である。分布状況調査では、地域の代表性を相互比較するため、空間線量率や人口密度などの性質が異なる情報を統合する方法としてスコア化手法を令和元年度から採用してきた。

測定ポイントの選定には、住民などのステークホルダーとの共通理解の醸成が必要である。ここでは、そのための基礎資料として、地域の特徴を加味し、相対的に代表性について議論する基礎情報となるスコア化による評価手法について検討例を示す。また、スコアに使用するパラメータや数値の重みづけ方法について令和元年度調査の技術検討会で検討した結果を紹介する。

スコア評価の対象範囲としては、福島県及び 80 km 圏内とし、対象範囲を 1 km×1 km の基準地域メッシュに区切った（全 15,646 メッシュ）。スコアのパラメータとして以下の 4 項目を選定した。

①空間線量率：基準地域メッシュ内の最大空間線量率

令和 3 年度に取得された空間線量率の測定結果を基に福島県及び 80 km 圏内について基準地域メッシュごとの空間線量率（最大値）を抽出した結果を図 6-1 に示す。空間線量率の最大値を求める際に使用した測定データの出典を表 6-2 に示す。最大値としたのは、メッシュごとに測定の点数にばらつきがあること及び空間線量率の数値から被ばく線量への換算時に過小評価となることを避けるためである。各測定結果は測定時期が異なるが半減期の補正はしていない。

②事故前の人口密度：平成 22 年度の国勢調査結果²⁷⁾

③避難指示区域：令和元年 11 月における避難指示区域

④ランドマーク：平成 26 年度におけるランドマークの個数

ランドマーク：幼稚園/児童館/保育所/小学校/中学校/高等学校/高等専門学校/短期大学/大学/特別支援学校/市町村役場/公的集会施設/医療機関/駅/保護施設/身体障害者更生援護施設/知的障害者援護施設/精神障害者社会復帰施設/商業施設（売り場面積 500 m² 以上）。

データの詳細参照先については表 6-3 に示す。

表 6-2 図 6-1 の作成に使用した空間線量率測定データ一覧

空間線量率測定データ	実施主体	文献
福島県及びその近隣県における航空機モニタリングの測定結果について	原子力規制委員会	28)
放射性物質の分布状況等調査における走行サーベイ、定点サーベイ及び歩行サーベイによる空間線量率の測定	原子力規制委員会	29)
東京電力株式会社福島第一原子力発電所の 20 km 以遠の空間線量率の測定結果	原子力規制委員会	30)
環境放射線モニタリング・メッシュ調査結果情報	福島県	31)
森林におけるモニタリング調査結果について	福島県	32)
福島県環境放射線モニタリング調査（観光地第 17 回）結果	福島県	33)

表 6-3 ランドマークデータの詳細情報

データ項目	年度	引用データ
幼稚園/児童館/保育所	平成 18 年	国土交通省国土数値情報 ³⁴⁾ 公共施設データ
小学校/中学校/高等学校 高等専門学校/短期大学 大学/ 特別支援学校	平成 25 年	国土交通省国土数値情報 学校データ
市町村役場	平成 26 年	国土交通省国土数値情報 市区町村役場データ
公的集会施設	平成 22 年	国土交通省国土数値情報 市町村役場等及び公的集会施設データ
医療機関	平成 26 年	国土交通省国土数値情報 医療機関データ
駅	平成 29 年	国土交通省国土数値情報 鉄道時系列データ
保護施設/身体障害者更生援 護施設/知的障害者援護施設/ 精神障害者社会復帰施設/ その他	平成 18 年	国土交通省国土数値情報 公共施設データ
商業施設	平成 26 年	経済産業省 商業統計メッシュデータ ³⁵⁾

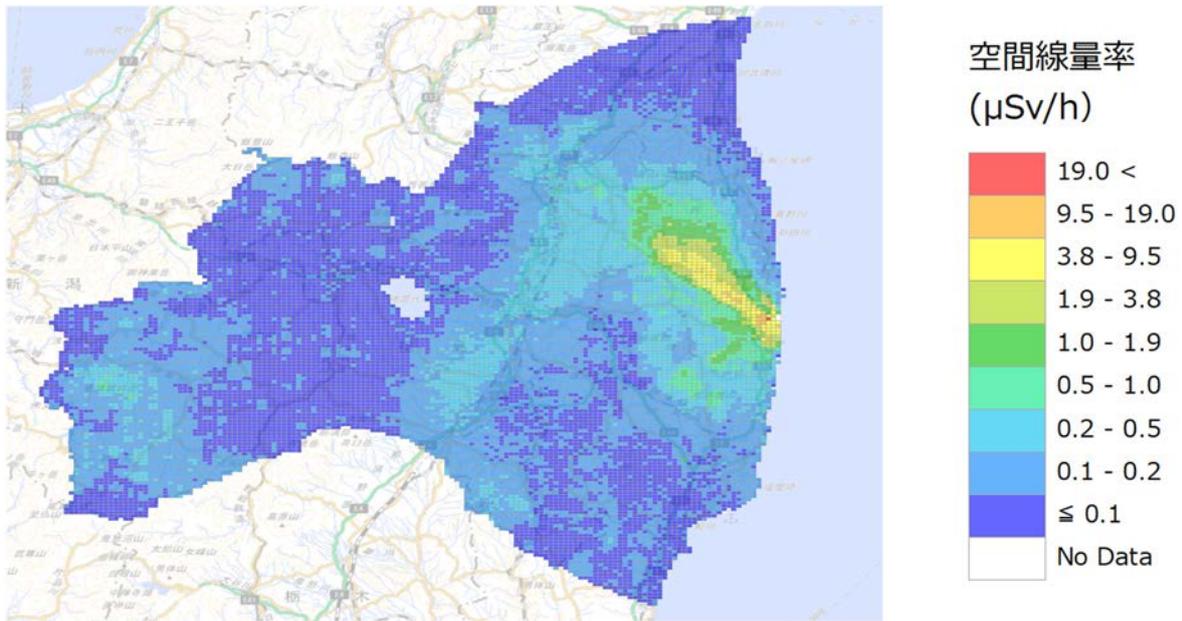


図 6-1 基準地域メッシュ内の最大空間線量率マップ（令和 3 年測定データ）
 （天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。背景地図：国土地理院発行 2.5 万分 1 地形図。）

6.3.2 スコアの評価例

平成 31 年度調査において、6.3.1 項にスコアのパラメータとして示した①～④の情報に対しスコアを設定した³⁶⁾。スコアの評価例として、以下に再掲する。表 6-4 に示すように、スコアは順位により 0～5 までの 6 段階でパラメータごとに付与した。空間線量率については、全体の分布傾向を考慮するとともに、 $0.23 \mu\text{Sv/h}$ （追加被ばく線量年間 1 mSv 相当³⁷⁾）付近を中央の階級とした。人口密度については、全体の分布傾向を考慮し、 100 人 km^{-2} 付近を中央の階級とした。避難指示区域については、該当する場所をスコア 5 とし、避難指示区域以外の場所はスコア 0 とした。ランドマークについては、メッシュ内に 1 箇所でもあれば 3 以上、5 箇所以上でスコア 4 及び 10 箇所以上でスコア 5 とした。

平成 29 年度の各種データを基に評価したスコアマップ例を図 6-2～6-5 に示す。マップには便宜上、5 段階の色分けでスコアを示している。図 6-2 には①空間線量率のスコアマップを、図 6-3 には①+②の空間線量率及び事故前の人口密度のスコアを合計したスコアマップを、図 6-4 には①+②+③の空間線量率、事故前の人口密度及び令和元年時点の避難指示区域のスコアを合計したスコアマップを、図 6-5 にはさらに④ランドマークを含めた 4 つのパラメータによるスコアを合計した結果を示している。図 6-5 を見ると、17 以上のスコアを示す地点は、令和元年時点で避難指示区域となっている大熊町、双葉町や富岡町に存在している。スコア 13～16 を示した地点は、大熊町、双葉町や富岡町の中心部周辺や比較的空間線量率は低い人口の多い中通り地域の福島市や郡山市の市街地であることが分かる。

表 6-4 スコア付与例³⁶⁾

パラメータ	スコア					
	5	4	3	2	1	0
①空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	> 0.4 (1-1600 位)	0.4-0.26 (1601-3200 位)	0.26-0.18 (3201-4800 位)	0.18-0.15 (4801-6637 位)	<0.15 (6638-15428 位)	測定情報がない (216 箇所)
②人口密度	>294 人 (1-1601 位)	294-129 人 (1602-3213 位)	129-57 人 (3214-4804 位)	57-19 人 (4805-6438 位)	<19 人 (6439-7418 位)	0 (8227 箇所)
③避難指示区域	避難指示区域	-	-	-	-	避難指示区域以外
④ランドマーク	>10 箇所 (1-29 位)	9-5 箇所 (30-234 位)	4-1 箇所 (235-2280 位)	-	-	ランドマークなし

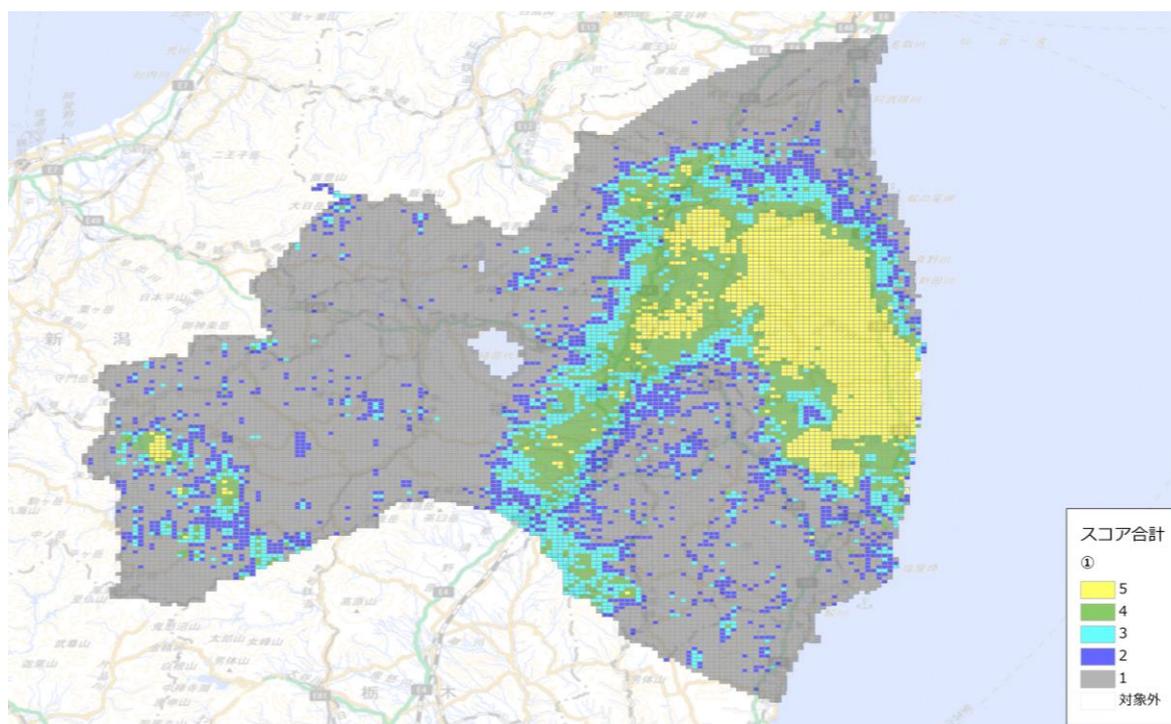


図 6-2 平成 29 年度に測定された空間線量率のスコアマップ例³⁶⁾
(背景地図：国土地理院発行 2.5 万分 1 地形図)

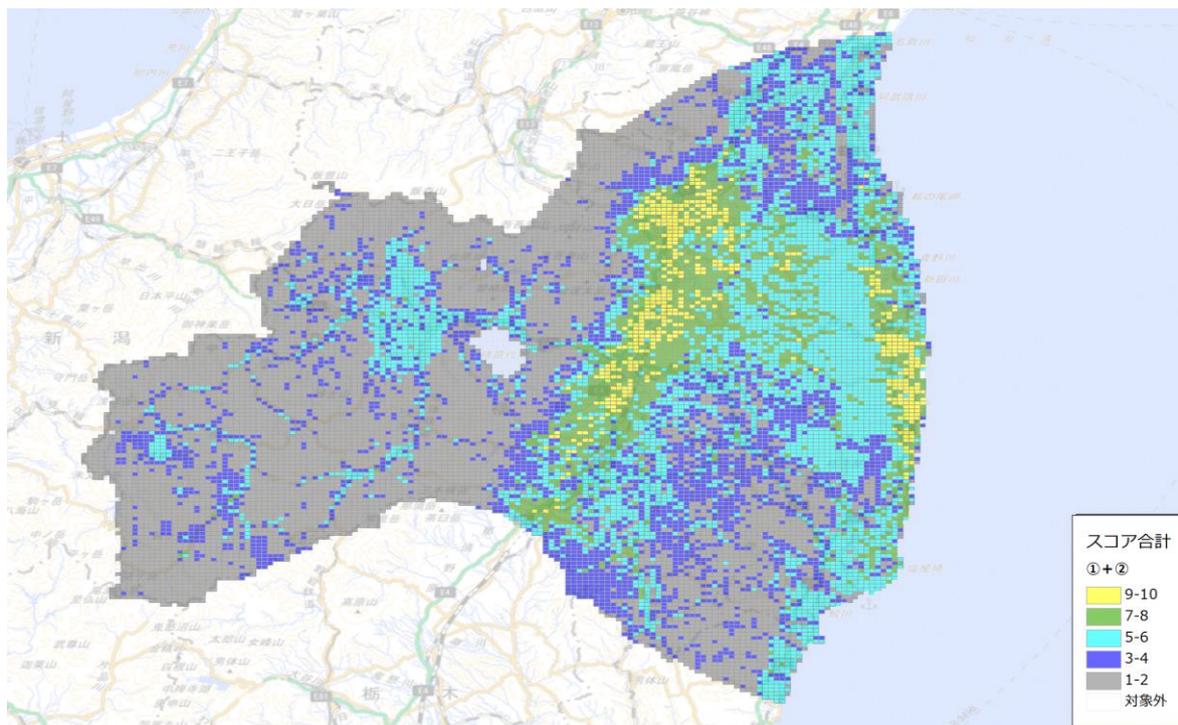


図 6-3 平成 29 年時点における空間線量率及び事故前の人口密度のスコアを合計したスコアマップ例³⁶⁾
 (背景地図：国土地理院発行 2.5 万分 1 地形図)

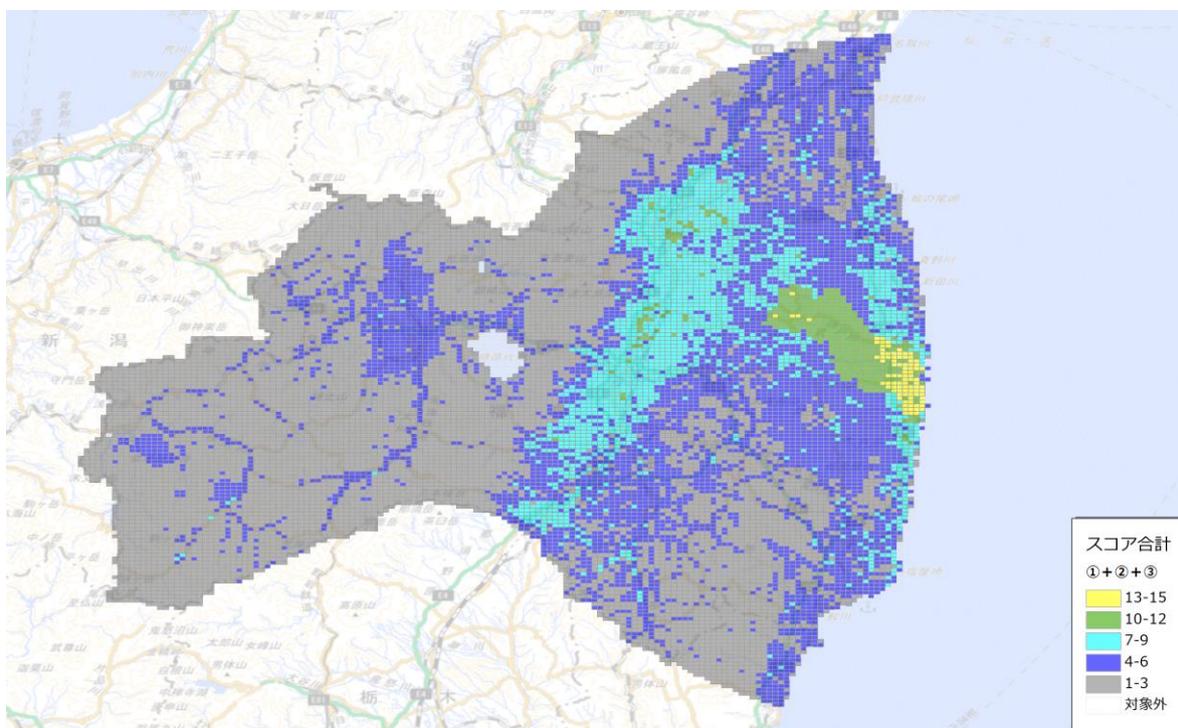


図 6-4 平成 29 年時点における空間線量率、事故前の人口密度及び避難指示区域のスコアを合計したスコアマップ例³⁶⁾
 (背景地図：国土地理院発行 2.5 万分 1 地形図)

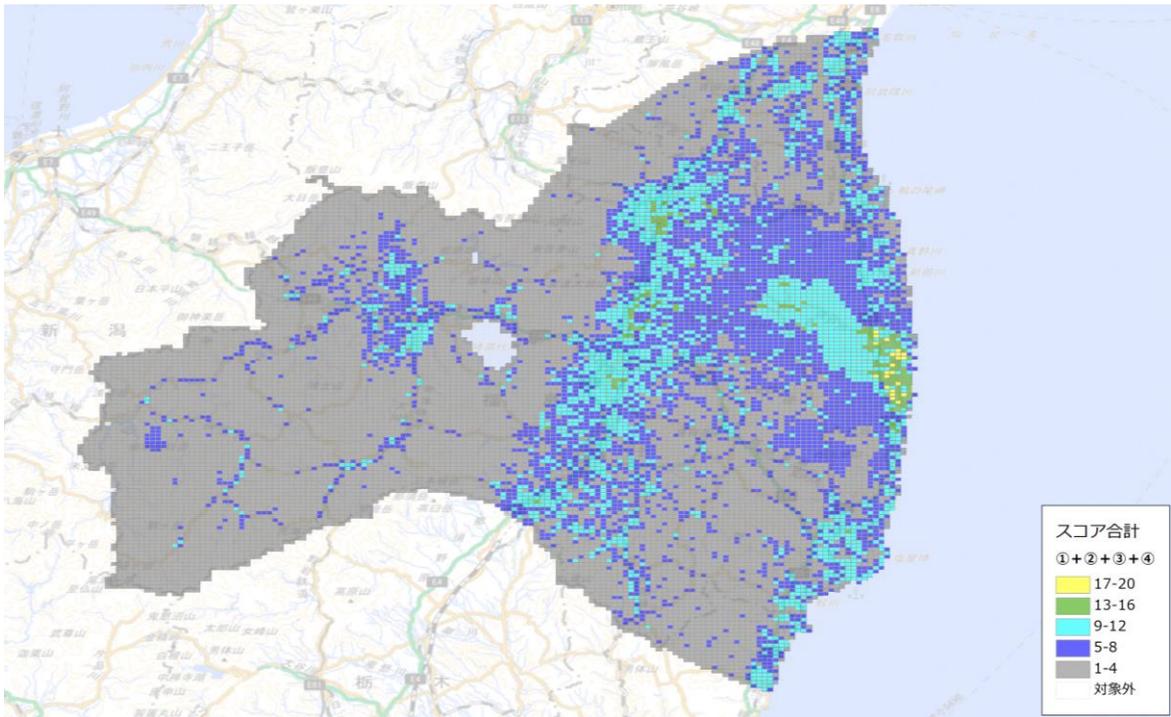


図 6-5 平成 29 年時点における空間線量率、事故前の人口密度、避難指示区域及びブランドマークのスコアを合計したスコアマップ例³⁶⁾ (背景地図：国土地理院発行 2.5 万分 1 地形図)

6.3.3 年度別のスコア評価例

スコアが年度の測定結果によって大きく変動しないかどうかを評価するため、6.3.2 項に示した平成 29 年度時点におけるスコア評価の結果(図 6-5)と平成 30 年度から令和 3 年度の 4 年間ににおける放射線モニタリングデータ等を用いたスコア評価の結果とを比較した。スコア評価は、実際に除染等で線量率が下がった場合にスコアの変動があることは許容されるが、線量率の測定条件や測定場所の増減で大きく変動しないことが望ましい。本項では、そのような測定条件や測定ポイントによる影響の程度について考察する。

平成 30 年度から令和 3 年度に得られたモニタリングデータを加味したスコアマップについて、それぞれ図 6-6～図 6-9 に示す。これら図のスコアマップは、平成 29 年度のスコアマップ(図 6-5)と全体的な傾向については一致している。平成 30 年度から令和 3 年度の各年度のスコアについて、平成 29 年度から変動(+5～-5)が生じたメッシュ数を表 6-5～表 6-8 に示すとともに、ヒストグラムとして図 6-10 に示す。なお、図 6-6～図 6-8 及び表 6-5～表 6-7(平成 30 年度から令和 2 年度まで)は令和 3 年度調査の報告書³⁸⁾からの引用である。スコアが±2 となるメッシュは高スコア(13 以上)では確認されなかった。また、スコア 12 以下で±2 を超える箇所は、年度によって山間部や海岸線沿いのデータで位置情報に若干の違いが生じ測定データの存在するメッシュが異なる等のデータ集計上の誤差が大きくなる場所のみであることが分かった。この結果から、本手法は、継続的なモニタリングデータを使用することによって、変動の少ないある一定のモデルを提示することができるものと考えられる。一方、メッシュ内に測定データの有無が年度によってばらつきがあるような場所では、スコアの変動がありうるため、注意が必要である。

表 6-5 平成 29 年度からスコアに変動が生じたメッシュ数（平成 30 年度）³⁸⁾

スコア	+5	+4	+3	+2	+1	+0	-1	-2	-3	-4	-5
17-20	0	0	0	0	0	22	0	0	0	0	0
13-16	0	0	0	0	4	128	14	0	0	0	0
9-12	0	0	2	12	176	1586	240	12	1	0	0
5-8	0	0	2	24	244	3091	435	35	4	0	0
1-4	0	1	28	202	787	7448	825	110	8	0	0
0	0	0	0	0	0	204	0	0	0	0	0

表 6-6 平成 29 年度からスコアに変動が生じたメッシュ数（令和元年度）³⁸⁾

スコア	+5	+4	+3	+2	+1	+0	-1	-2	-3	-4	-5
17-20	0	0	0	0	0	22	0	0	0	0	0
13-16	0	0	0	0	4	129	13	0	0	0	0
9-12	0	0	1	7	137	1643	233	7	1	0	0
5-8	0	1	7	27	249	3065	441	43	0	1	1
1-4	0	0	35	319	1034	7260	690	66	5	0	0
0	0	0	0	0	0	204	0	0	0	0	0

表 6-7 平成 29 年度からスコアに変動が生じたメッシュ数（令和 2 年度）³⁸⁾

スコア	+5	+4	+3	+2	+1	+0	-1	-2	-3	-4	-5
17-20	0	0	0	0	0	22	0	0	0	0	0
13-16	0	0	0	0	1	127	18	0	0	0	0
9-12	0	0	0	13	159	1598	247	10	2	0	0
5-8	0	0	1	7	287	3051	445	39	3	1	1
1-4	0	3	30	168	875	7510	734	81	8	0	0
0	0	0	0	0	0	204	0	0	0	0	0

表 6-8 平成 29 年度からスコアに変動が生じたメッシュ数（令和 3 年度）

スコア	+5	+4	+3	+2	+1	+0	-1	-2	-3	-4	-5
17-20	0	0	0	0	0	22	0	0	0	0	0
13-16	0	0	0	0	3	126	17	0	0	0	0
9-12	0	0	2	12	178	1580	245	11	1	0	0
5-8	0	0	1	25	256	3033	464	53	2	0	1
1-4	0	1	33	274	1187	7195	671	45	3	0	0
0	0	0	0	0	0	204	0	0	0	0	0

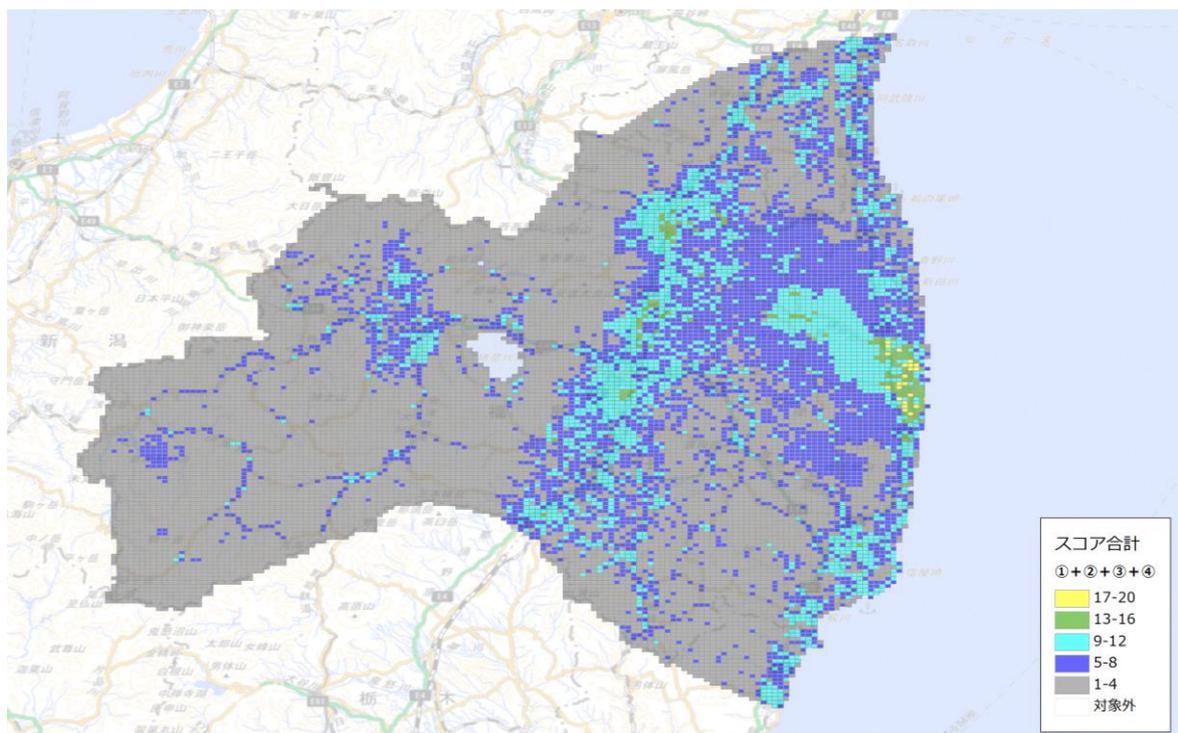


図 6-6 平成 30 年時点における空間線量率、事故前の人口密度、避難指示区域及びランドマークのスコアを合計したスコアマップ³⁸⁾

(背景地図：国土地理院発行 2.5 万分 1 地形図)

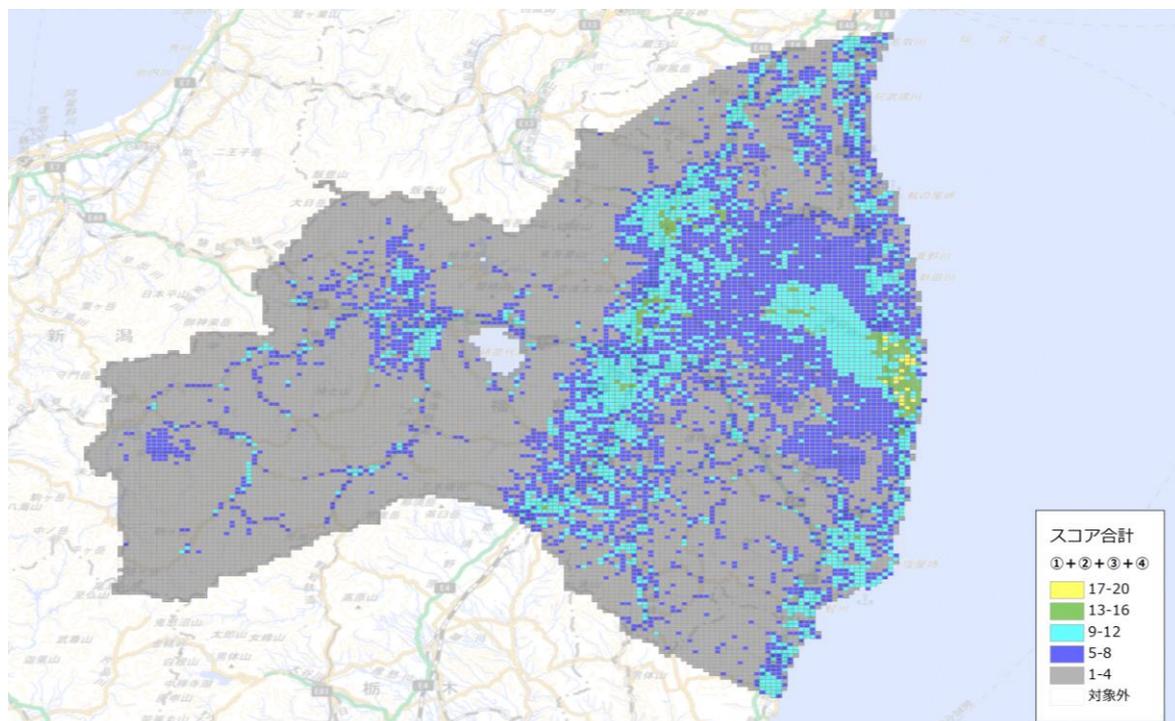


図 6-7 令和元年時点における空間線量率、事故前の人口密度、避難指示区域及びランドマークのスコアを合計したスコアマップ³⁸⁾

(背景地図：国土地理院発行 2.5 万分 1 地形図)

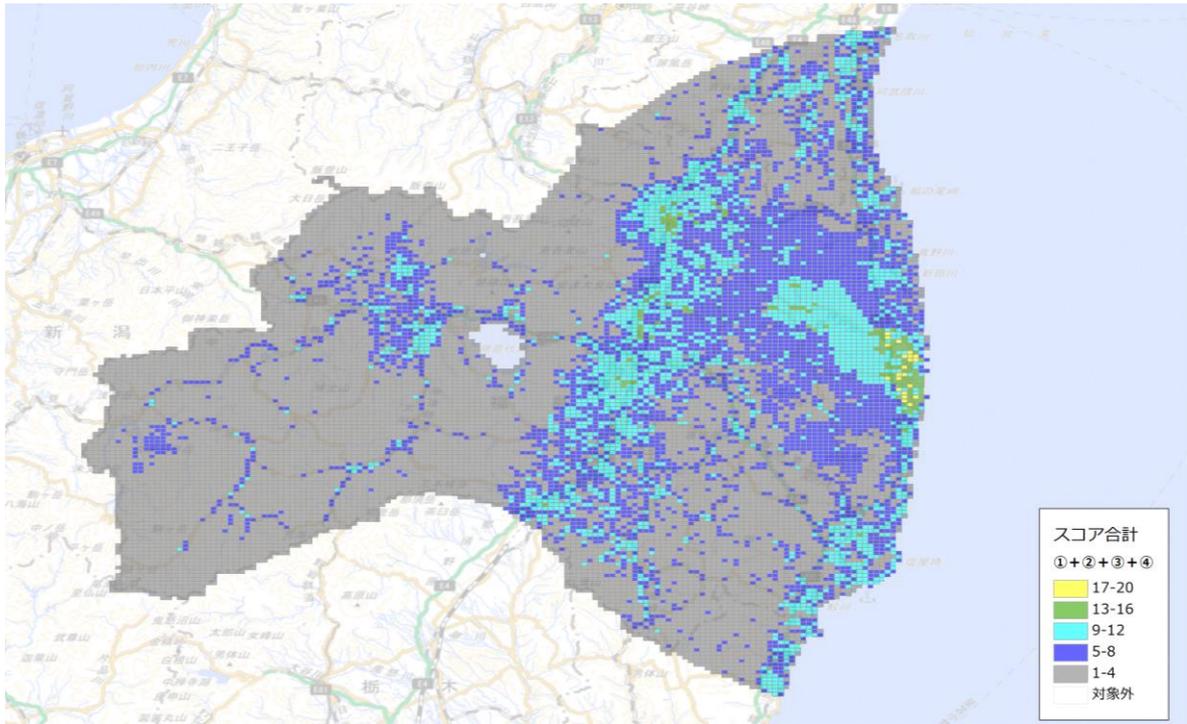


図 6-8 令和 2 年時点における空間線量率、事故前の人口密度、避難指示区域及びランドマークのスコアを合計したスコアマップ³⁸⁾

(背景地図：国土地理院発行 2.5 万分 1 地形図)

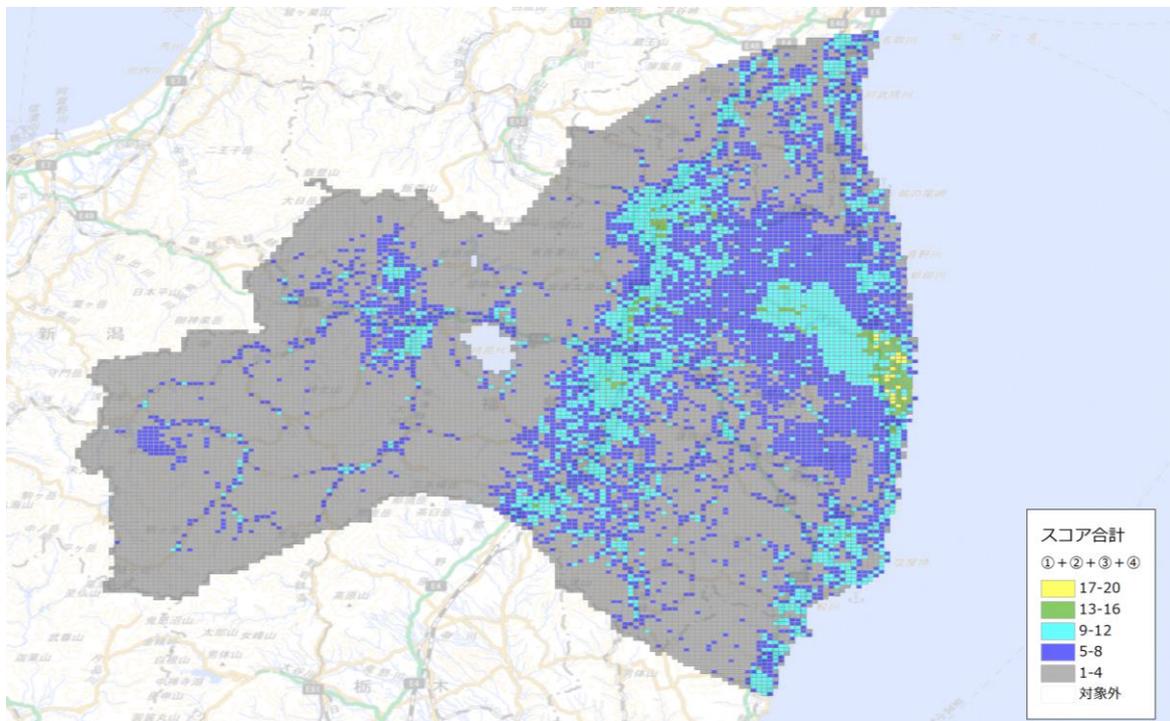


図 6-9 令和 3 年時点における空間線量率、事故前の人口密度、避難指示区域及びランドマークのスコアを合計したスコアマップ

(背景地図：国土地理院発行 2.5 万分 1 地形図)

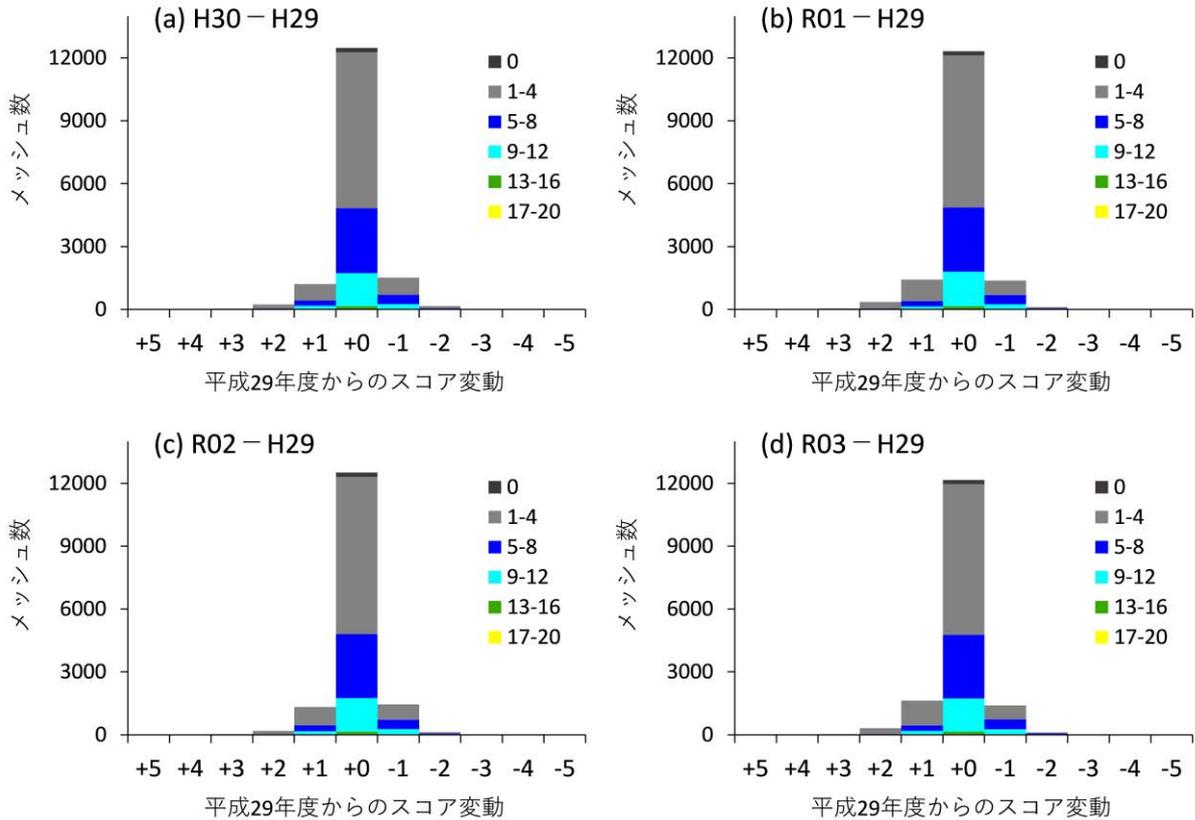


図 6-10 平成 29 年度に対する各年度のスコア変動

((a) 平成 30 年度-平成 29 年度³⁸⁾、(b) 令和元年度-平成 29 年度³⁸⁾、(c) 令和 2 年度-平成 29 年度³⁸⁾及び(d) 令和 3 年度-平成 29 年度)

6.4 評価結果のまとめ

本検討では、現在実施されている空間線量率や土壌中の放射性物質濃度の測定の状況を整理するとともに、測定に際しエリアの代表性を評価する方法案を提示した。事故から 10 年以上経過し、政府機関、研究機関、関係自治体により陸域のモニタリングが実施されたことにより、大量のデータが蓄積されている。現状の空間線量率の測定は、有人ヘリコプターを用いた航空機サーベイや車両を用いた走行サーベイ等様々な手法が採用されているが、手法の特徴を加味して、それぞれの地域に適材適所で適用するモニタリング手法を選定すべきと考える。現状の空間線量率の数値は、避難指示区域を除いて、全体としては低い水準であることが確認されている。このような状況を踏まえると、6.4 節で示したような評価手法を元に測定頻度とポイント数と配置の見直しを行うことは有効と考えられる。ただし、空間線量率の測定の目的は「住民の安全・安心のための基礎データ」という一面もあり、モニタリングデータの科学的な評価結果だけでは測定ポイントの重点化・最適化に対して住民の理解が得られない可能性があることに留意が必要である。

7. 海洋のモニタリングデータの評価

7.1 処理水海洋放出に向けた海水中トリチウム濃度データの解析

福島第一原発敷地内のタンクに保管されているALPS処理水の海洋放出が令和5年度以降に予定されている。これに伴い、令和4年度よりトリチウムを中心に海水中の放射性核種のモニタリングが強化されている。このモニタリングの目的は、海洋放出後のトリチウム濃度レベルとその分布を把握しステークホルダーへ情報提供することである。一方、モニタリングデータを総合的に評価することで、トリチウムの環境中での挙動に関する知見や放出源（福島第一原発）からの異常検知に資することができると考えられる。ここでは、将来的な海水のモニタリングの継続的な評価手法の確立を目的とし、過去の海水中のトリチウムの濃度データの変動幅を把握しその変動要因について考察した。

7.1.1 モニタリングポイントと頻度

政府の行うモニタリングは総合モニタリング計画²⁶⁾にまとめられており、海水のモニタリングについてもその別紙に記載がある。総合モニタリング計画（令和4年3月30日改訂）に記載がある採取ポイント、分析頻度及び検出下限値について表7-1にまとめる。実施機関としては、東京電力、環境省、原子力規制委員会及び福島県の4者であり、福島第一原発からの距離に応じて、モニタリングの頻度や検出下限値が設定されている。これらのモニタリングポイント及び東京電力が実施する福島第一原発の港湾内（以下「港湾内」という。）のモニタリングポイントについて表7-2のように番号を割り振る。また、モニタリングポイントを図7-1に示す。

表 7-1 総合モニタリング計画に記載されている海水モニタリング

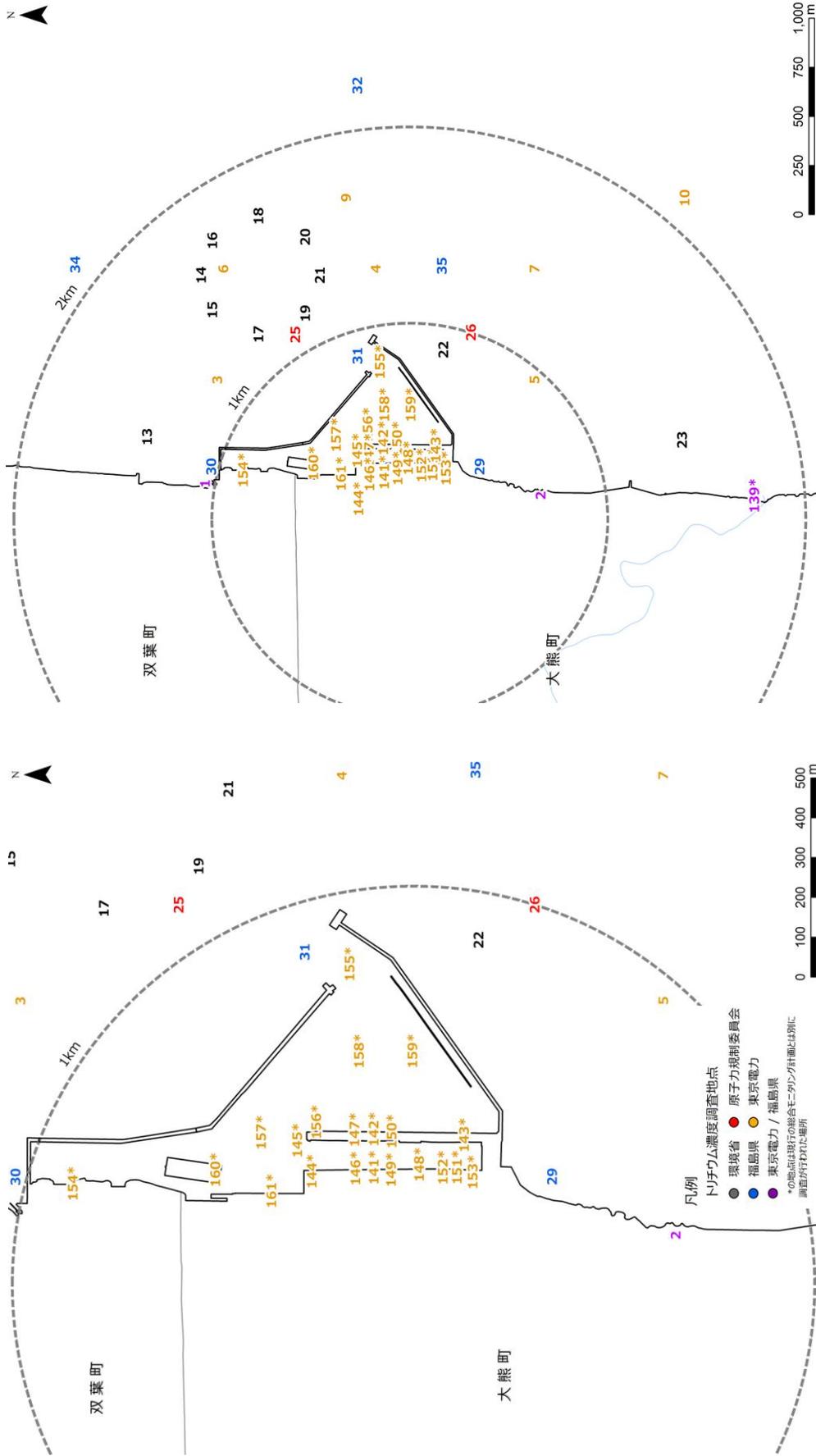
実施機関	採取ポイント	採取深度	分析頻度	検出下限値 (Bq/L)
東京電力	T-1, T-2, T-0-1, T-0-2, T-0-3, T-0-1A, T-0-3A, T-A1, T-A2, T-A3	表層	1回/週	0.4
	T-3, T-6, T-5, T-D1, T-D5, T-D9	表層	1回/週	0.1(当面は 0.4)
	T-S1, T-S2, T-S3, T-S4, T-S5, T-S7, T-S8, T-B1, T-B2, T-B3, T-B4, T-13-1, T-7, T-18, T-12, T-17-1, T-20, T-22, T-MA, T-M10	表層	1回/月	0.1(当面は 0.4)
環境省	E-S1, E-S2, E-S4, E-S5, E-S6, E-S7, E-S8, E-S9, E-S11, E-S12, E-S13, E-S14, E-S15, E-S16, E-S17, E-S18, E-S19, E-S20, E-S21, E-S22, E-S23, E-S24, E-S25, E-S26, E-S27, E-S28, E-S29, E-S30, E-S31, E-S32 (ALPS 処理水海域モニタリ ング)	表層/底層	1回/3ヶ月	0.1
	福島沿岸(海水浴場)(E-SK1, E-SK2, E- SK3, E-SK4, E-SK5, E-SK6)	表層	2回/年	0.1
原子力規制 委員会	M-101, M-102, M-103, M-104	表層	1回/月	0.1
	M-B1, M-C3, M-D3, M-E3, M-E5, M-F3, M-G3, M-G4, M-H1, M-H3, M-L1	表層	1回/3ヶ月	0.1
	M-C1, M-D1, M-E1, M-F1, M-G1	表層/底層	1回/3ヶ月	0.1
福島県	F-P01, F-P02, F-P03, F-P04, F-P05, F-P06, 福島沿岸(浅海漁場), F-P29, F-P30, F-P31, F-P32, F-P33, F-P34, F-P35	表層	1回/月	0.5
	F-P07, F-P08, F-P09, T-1, T-2, F-P10, F-P11	表層	1回/3ヶ月	0.5
	F-P12	表層	1回/年	0.5
	福島沿岸(海水浴場) F-P36, F-P37, F-P38, F-P39, F-P40, F-P41, F-P42, F-P43, F-P44, F-P45, F-P46, F-P47, F-P48, E-71, E-72, E-73, E-74, E-75, E-76, E-77, E-78, E-79, E-7A, E-7B, E-7F, E-7G, E-7H, E-7I	表層	2回/年	0.5

表 7-2 海水モニタリングポイントの番号割り振り (1/2)

No.	実施機関	地点名称	No.	実施機関	地点名称
1	東京電力 / 福島県	T-1	51	東京電力	T-B2
2	東京電力 / 福島県	T-2	52	東京電力	T-B3
3	東京電力	T-0-1	53	東京電力	T-B4
4	東京電力	T-0-2	54	東京電力	T-13-1
5	東京電力	T-0-3	55	東京電力	T-7
6	東京電力	T-0-1A	56	東京電力	T-18
7	東京電力	T-0-3A	57	東京電力	T-12
8	東京電力	T-A1	58	東京電力	T-17-1
9	東京電力	T-A2	59	東京電力	T-20
10	東京電力	T-A3	60	東京電力	T-22
11	環境省	E-S1	61	東京電力	T-MA
11L	環境省	E-S1-L	62	東京電力	T-M10
12	環境省	E-S2	63	環境省	E-S18
12L	環境省	E-S2-L	63L	環境省	E-S18-L
13	環境省	E-S4	64	環境省	E-S19
13L	環境省	E-S4-L	64L	環境省	E-S19-L
14	環境省	E-S5	65	環境省	E-S20
14L	環境省	E-S5-L	65L	環境省	E-S20-L
15	環境省	E-S6	66	環境省	E-S21
15L	環境省	E-S6-L	66L	環境省	E-S21-L
16	環境省	E-S7	67	環境省	E-S22
16L	環境省	E-S7-L	67L	環境省	E-S22-L
17	環境省	E-S8	68	環境省	E-S23
17L	環境省	E-S8-L	68L	環境省	E-S23-L
18	環境省	E-S9	69	環境省	E-S24
18L	環境省	E-S9-L	69L	環境省	E-S24-L
19	環境省	E-S11	70	環境省	E-S25
19L	環境省	E-S11-L	70L	環境省	E-S25-L
20	環境省	E-S12	71	環境省	E-S26
20L	環境省	E-S12-L	71L	環境省	E-S26-L
21	環境省	E-S13	72	環境省	E-S27
21L	環境省	E-S13-L	72L	環境省	E-S27-L
22	環境省	E-S14	73	環境省	E-S28
22L	環境省	E-S14-L	73L	環境省	E-S28-L
23	環境省	E-S15	74	環境省	E-S29
23L	環境省	E-S15-L	74L	環境省	E-S29-L
24	環境省	E-S16	75	環境省	E-S30
24L	環境省	E-S16-L	75L	環境省	E-S30-L
25	原子力規制委員会	M-101	76	環境省	E-S31
26	原子力規制委員会	M-102	76L	環境省	E-S31-L
27	原子力規制委員会	M-103	77	環境省	E-SK1
28	原子力規制委員会	M-104	78	環境省	E-SK2
29	福島県	F-P01	79	環境省	E-SK3
30	福島県	F-P02	80	環境省	E-SK4
31	福島県	F-P03	81	環境省	E-SK5
32	福島県	F-P04	82	環境省	E-SK6
33	福島県	F-P07	83	福島県	F-P05
34	福島県	F-P08	84	福島県	F-P06
35	福島県	F-P09	85	福島県	F-P10
36	環境省	E-S17	86	福島県	F-P11
36L	環境省	E-S17-L	87	福島県	F-P12
37	東京電力	T-3	88	福島県	F-P29
38	東京電力	T-6	88L	福島県	F-P29-L
39	東京電力	T-5	89	福島県	F-P31
40	東京電力	T-D1	89L	福島県	F-P31-L
41	東京電力	T-D5	90	福島県	F-P32
42	東京電力	T-D9	90L	福島県	F-P32-L
43	東京電力	T-S1	91	福島県	F-P33
44	東京電力	T-S2	91L	福島県	F-P33-L
45	東京電力	T-S3	92	福島県	F-P34
46	東京電力	T-S4	92L	福島県	F-P34-L
47	東京電力	T-S5	93	福島県	F-P35
48	東京電力	T-S7	93L	福島県	F-P35-L
49	東京電力	T-S8	94	福島県	F-P36
50	東京電力	T-B1	95	福島県	F-P37

表 7-2 海水モニタリングポイントの番号割り振り (2/2)

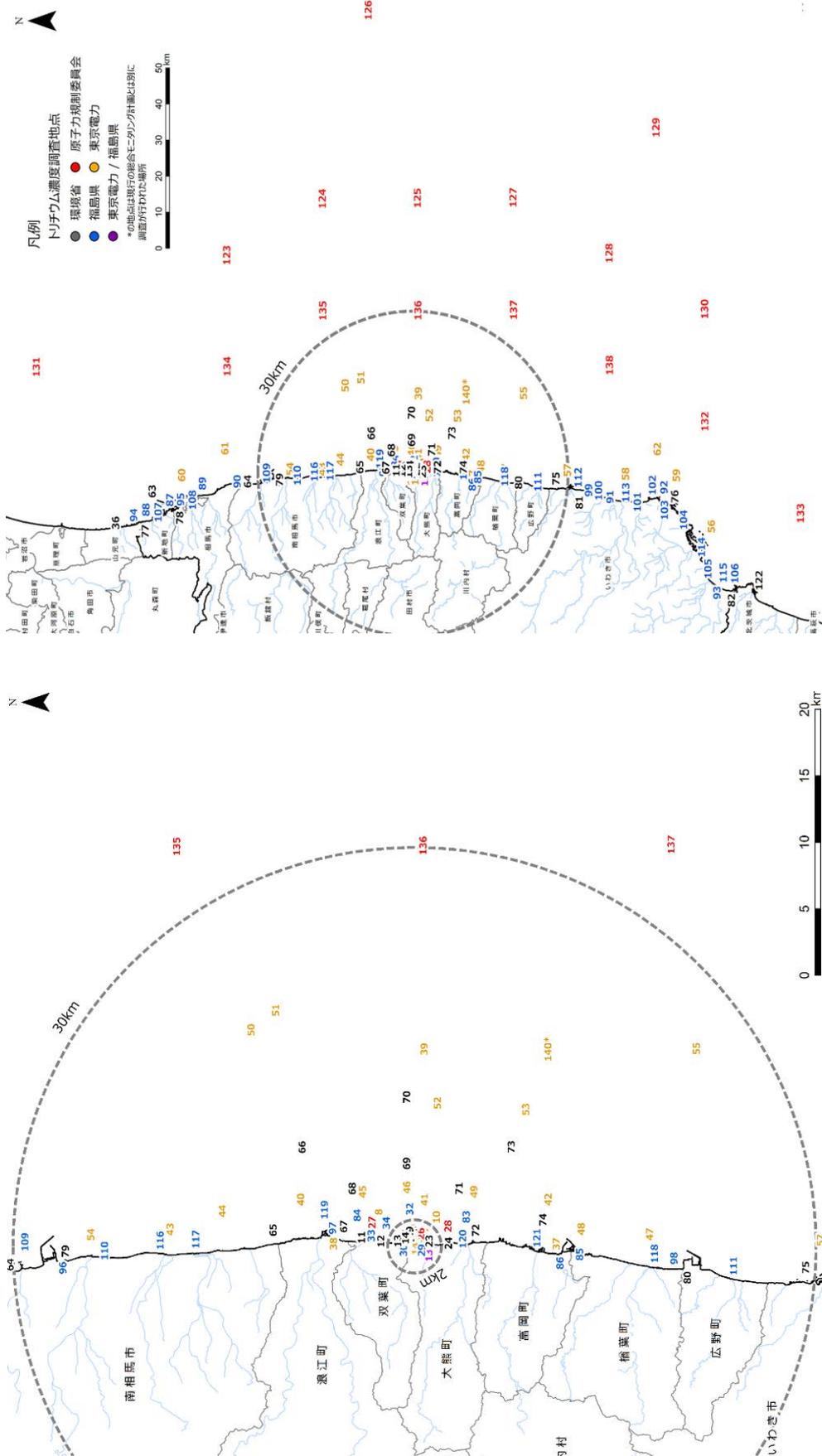
No.	実施機関	地点名称	No.	実施機関	地点名称
96	福島県	F-P38	139*	東京電力 / 福島県	T-2-1
97	福島県	F-P39	140*	東京電力	8
98	福島県	F-P40	141*	東京電力	1,2号機取水口間(表層)
99	福島県	F-P41	142*	東京電力	1,2号機取水口間(下層)
100	福島県	F-P42	143*	東京電力	1~4号機取水口内南側(遮水壁前)
101	福島県	F-P43	144*	東京電力	1~4号機取水口内北側
102	福島県	F-P44	145*	東京電力	1~4号機取水口内北側(東波除堤北側)
103	福島県	F-P45	146*	東京電力	1号機スクリーン
104	福島県	F-P46	147*	東京電力	1号機取水口(遮水壁前)
105	福島県	F-P47	148*	東京電力	2,3号機取水口間
106	福島県	F-P48	149*	東京電力	2号機スクリーン
107	福島県	E-71	150*	東京電力	2号機取水口(遮水壁前)
108	福島県	E-72	151*	東京電力	3,4号機取水口間
109	福島県	E-73	152*	東京電力	3号機スクリーン(シルトフェンス内側)
110	福島県	E-74	153*	東京電力	4号機スクリーン(シルトフェンス内側)
111	福島県	E-75	154*	東京電力	6号機取水口前
112	福島県	E-76	155*	東京電力	港湾口
113	福島県	E-77	156*	東京電力	港湾中央
114	福島県	E-78	157*	東京電力	港湾内西側
115	福島県	E-79	158*	東京電力	港湾内東側
116	福島県	E-7A	159*	東京電力	港湾内南側
117	福島県	E-7B	160*	東京電力	港湾内北側
118	福島県	E-7F	161*	東京電力	物揚場前
119	福島県	E-7G	<ul style="list-style-type: none"> ・総合モニタリング計画内ではM-L1を予定しているが、実際の調査はM-I1で行っている模様 ・赤字地点は現行の総合モニタリング計画とは別に調査を行っている地点 ・青字地点(No.及び地点名称にLが付く)は、下層もしくは底層を示す 		
120	福島県	E-7H			
121	福島県	E-7I			
122	環境省	E-S32			
122L	環境省	E-S32-L			
123	原子力規制委員会	M-C3			
124	原子力規制委員会	M-D3			
125	原子力規制委員会	M-E3			
126	原子力規制委員会	M-E5			
127	原子力規制委員会	M-F3			
128	原子力規制委員会	M-G3			
129	原子力規制委員会	M-G4			
130	原子力規制委員会	M-H3			
131	原子力規制委員会	M-B1			
132	原子力規制委員会	M-H1			
133	原子力規制委員会	M-I1			
134	原子力規制委員会	M-C1			
134L	原子力規制委員会	M-C1-L			
135	原子力規制委員会	M-D1			
135L	原子力規制委員会	M-D1-L			
136	原子力規制委員会	M-E1			
136L	原子力規制委員会	M-E1-L			
137	原子力規制委員会	M-F1			
137L	原子力規制委員会	M-F1-L			
138	原子力規制委員会	M-G1			
138L	原子力規制委員会	M-G1-L			



a) 福島第一原発から半径1 km

b) 福島第一原発から半径2 km

図 7-1 モニタリングポイントの位置 (1/2)
(国土数値情報³⁴⁾ (行政区域データ) を加工して作成)



d) 福島第一原発から半径 30 km 以遠

c) 福島第一原発から半径 30 km

図 7-1 モニタリングポイントの位置 (2/2)
 (国土数値情報³⁴⁾ (行政区域データ) を加工して作成)

7.1.2 海水中のトリチウム濃度レベル

現状の海水中のトリチウムレベルを明らかにするために、令和3年度及び令和4年度(2022年4月から2023年1月まで)の測定結果をそれぞれ図7-2及び図7-3に示す。検出下限値を超えたデータのみを箱ひげ図として表示し、検出下限値以下のデータについては測定で評価された検出下限値の年間最大値を赤色のバーとして表示した。箱ひげ図に対して検出下限値を示す赤いバーが上位に位置するデータについては、年度の期中に分析方法を変更し、検出下限値が変わったポイントであることを表している。

令和3年度及び令和4年度のグラフを比較すると分かるように、測定ポイント数は令和3年度の25地点から令和4年度には116地点に増加している。トリチウム濃度レベルについては、特に検出下限値レベルを下げた測定が行われている令和4年度のデータから、港湾内についてはほぼ全てのポイントで1 Bq/Lを超えているが、港湾外のポイントについては、距離に関わらず0.1 Bq/L付近にとどまっていることが分かる。

福島第一原発事故の影響がない通常環境について比較できるトリチウム濃度レベルの例として、事故前に福島県原子力センターが実施した陸水(河川水、湖沼水)及び海岸の海水中のトリチウム濃度測定結果³⁹⁾を基に分析した結果を図7-4に示す。海岸水のトリチウム濃度中央値で0.53 Bq/Lであり、令和4年度の濃度測定結果はそれよりも同レベルか低いデータが多い。これは、事故前の福島県の調査が陸水の影響を受けやすい海岸水を対象としており、沖合のサンプルを計測していないことによるものと思われる。環境中でのトリチウムの起源は、原子力発電所由来以外に、宇宙線による核反応由来及び核実験由来があり、一般的に陸水のトリチウム濃度が海水に比べて高いことが知られている⁴⁰⁾。

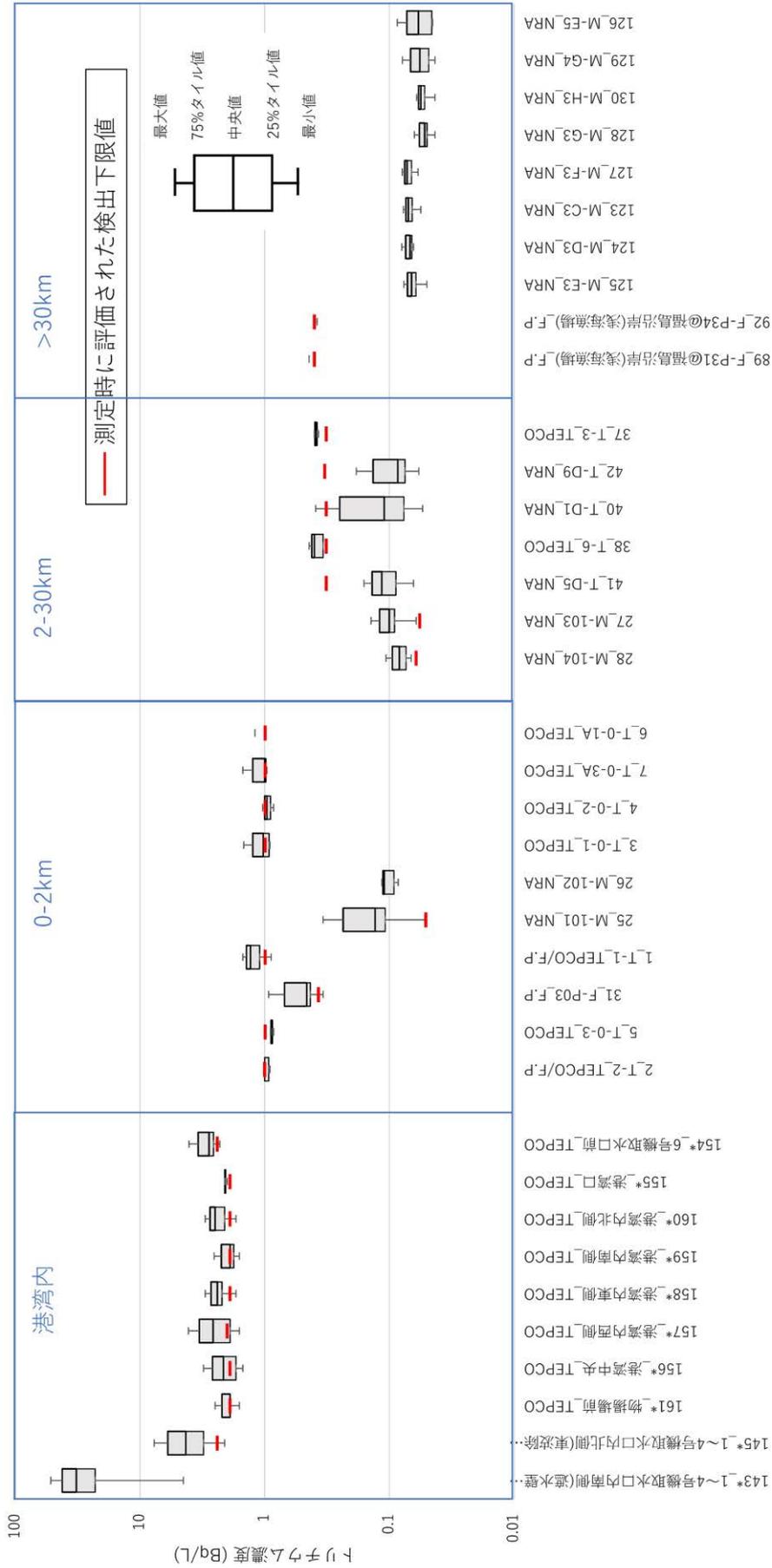


図 7-2 海水中のトリチウムモニタリング結果 (令和 3 年度)

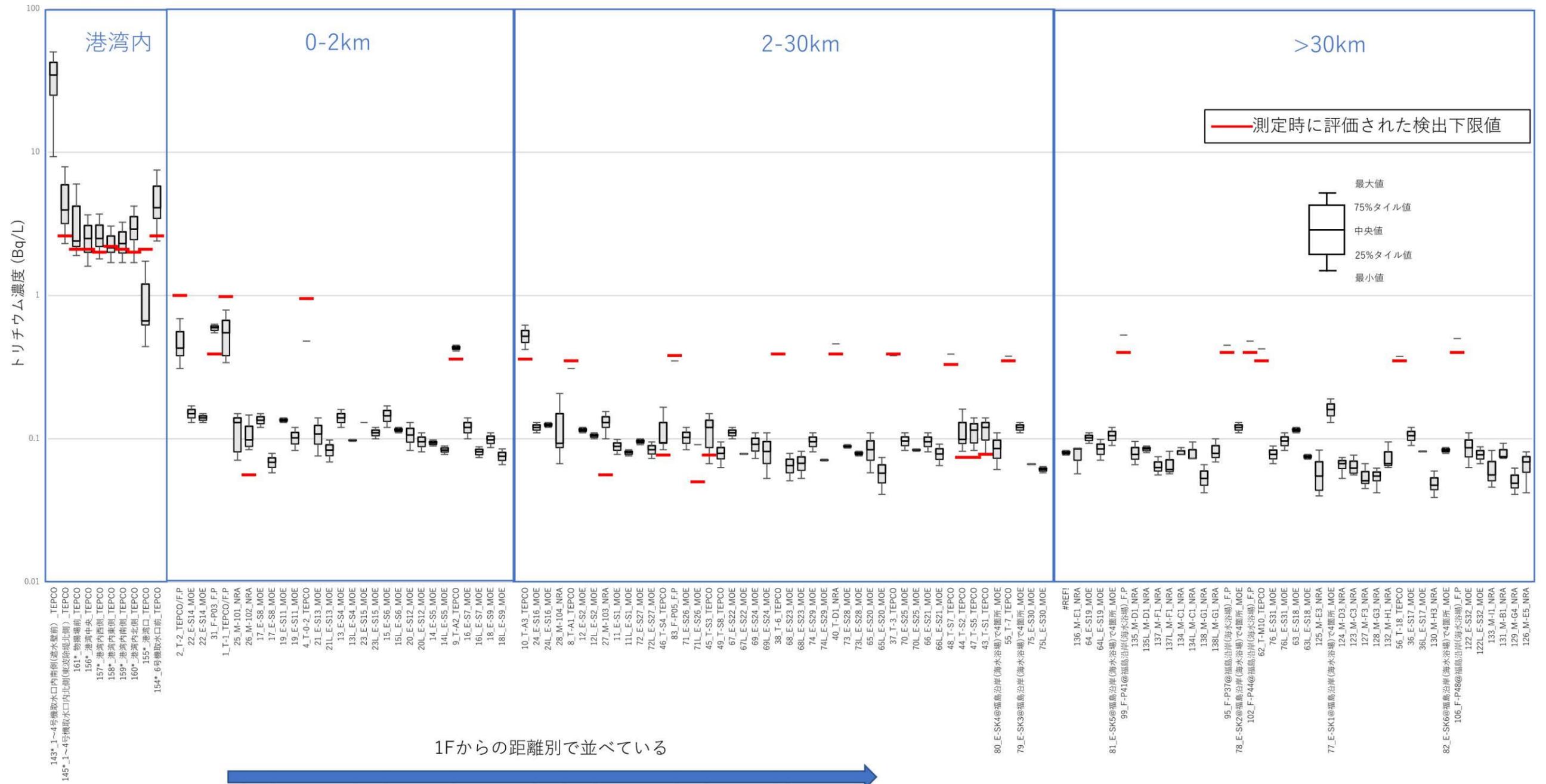
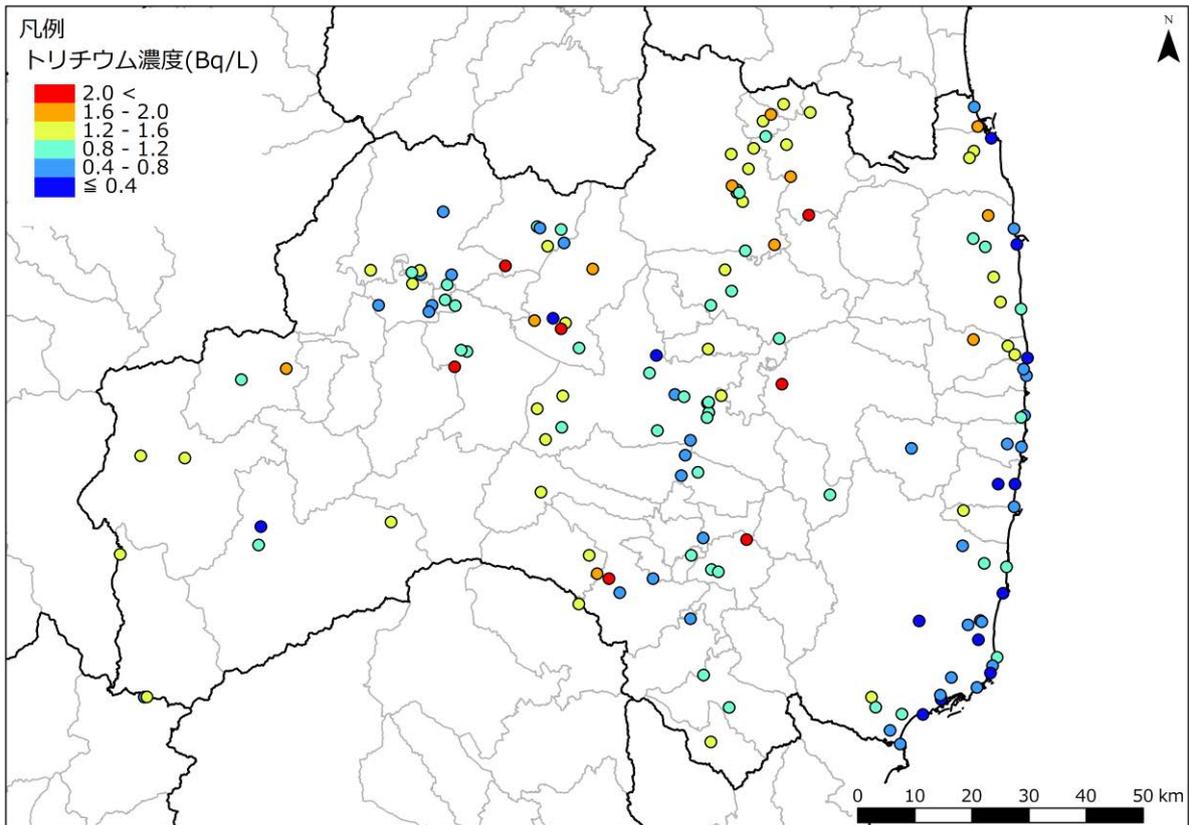


図 7-3 海水中のトリチウムモニタリング結果 (令和 4 年度)



背景地図：ESRI ジャパンデータコンテンツ, (c) Esri Japan

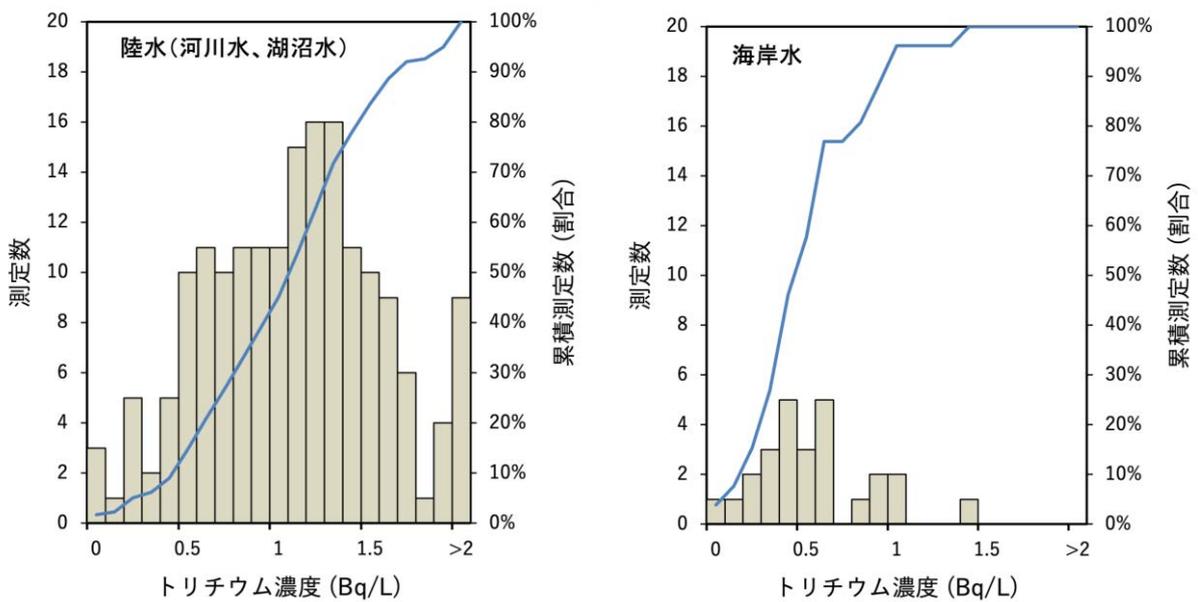


図 7-4 事故前（1988 年～1991 年）に福島県原子力センターにより測定された陸水（河川水、湖沼水）及び海岸の海水中トリチウム濃度³⁹⁾ の分析結果（曲線は累積測定数）

7.1.3 濃度変動幅の把握

事故後からのモニタリング結果について、トリチウム濃度の変動幅を調査するために、全ての地点ごとにデータを調査した。測定回数自体は多いものの、検出下限値を超えるデータが少ない場合が多く、長期間において統計的に解析できる地点が少ない。図 7-5 に各モニタリングポイントの測定回数及びデータの検出下限値以上のデータが含まれる割合について示す。トリチウム濃度の経時変化を評価するため、2013年～2022年の期間に検出下限値を超えるデータ数が毎年存在する No.25～28 及び No.123～130 の 12 ポイントについて、統計的な傾向解析を試みた。これら解析対象としたサンプリングポイントを図 7-6 に示す。

解析方法は、まず濃度を指数変換し一次関数 ($y=ax+b$) で近似する。近似した一次関数の係数について 95%信頼区間及び 95%予測区間を計算した。計算結果をグラフにした結果を図 7-7 に示す。このように解析した全てのモニタリングポイントについて緩やかな減少傾向にあることが分かった。表 7-3 に近似関数の係数及び傾きの係数である a から求めた半減期 ($0.693/a$) を示す。このように、半減期は 7.6 年～42 年と評価される。

これらのデータの濃度変動幅として、最新のデータの採取時点における近似曲線から求めた濃度 (m) と 95%予測区間の上限濃度 (n) の比 (n/m) を求めた (表 7-3)。このように、n/m 比は 1.3～3.2 の範囲内 (No.25 を除けば n/m 比は 2 未満) となった。No.25 については他の地点と比べて n/m 比が大きく、この要因として濃度が他の地点に比べて比較的高いこと及び定期的に通常時よりも濃度の高いデータが検出されていることが考えられる。

表 7-3 近似関数の係数と半減期及び変動幅

No	地点 No	係数 a	係数 b	半減期 (年)	変動幅 (最新のデータ時点)			
					事故から の年数	近似値: m (Bq/L)	95%予測 区間上限: n (Bq/L)	n/m
25	M-101	-0.077	-1.4	9.0	10.8	0.103	0.23	3.2
26	M-102	-0.092	-1.5	7.6	10.8	0.087	0.19	1.9
27	M-103	-0.017	-2.2	42	10.6	0.094	0.20	1.7
28	M-104	-0.043	-2.0	16	10.8	0.085	0.18	1.8
123	M-C3	-0.052	-2.3	13	10.8	0.057	0.12	1.5
124	M-D3	-0.045	-2.3	15	10.8	0.061	0.13	1.3
125	M-E3	-0.049	-2.3	14	10.8	0.057	0.12	1.5
126	M-E5	-0.034	-2.5	20	10.8	0.057	0.12	1.4
127	M-F3	-0.048	-2.4	14	10.8	0.054	0.12	1.5
128	M-G3	-0.058	-2.3	12	10.8	0.052	0.11	1.3
129	M-G4	-0.019	-2.7	36	10.8	0.056	0.12	1.4
130	M-H3	-0.062	-2.3	11	10.8	0.049	0.10	1.4

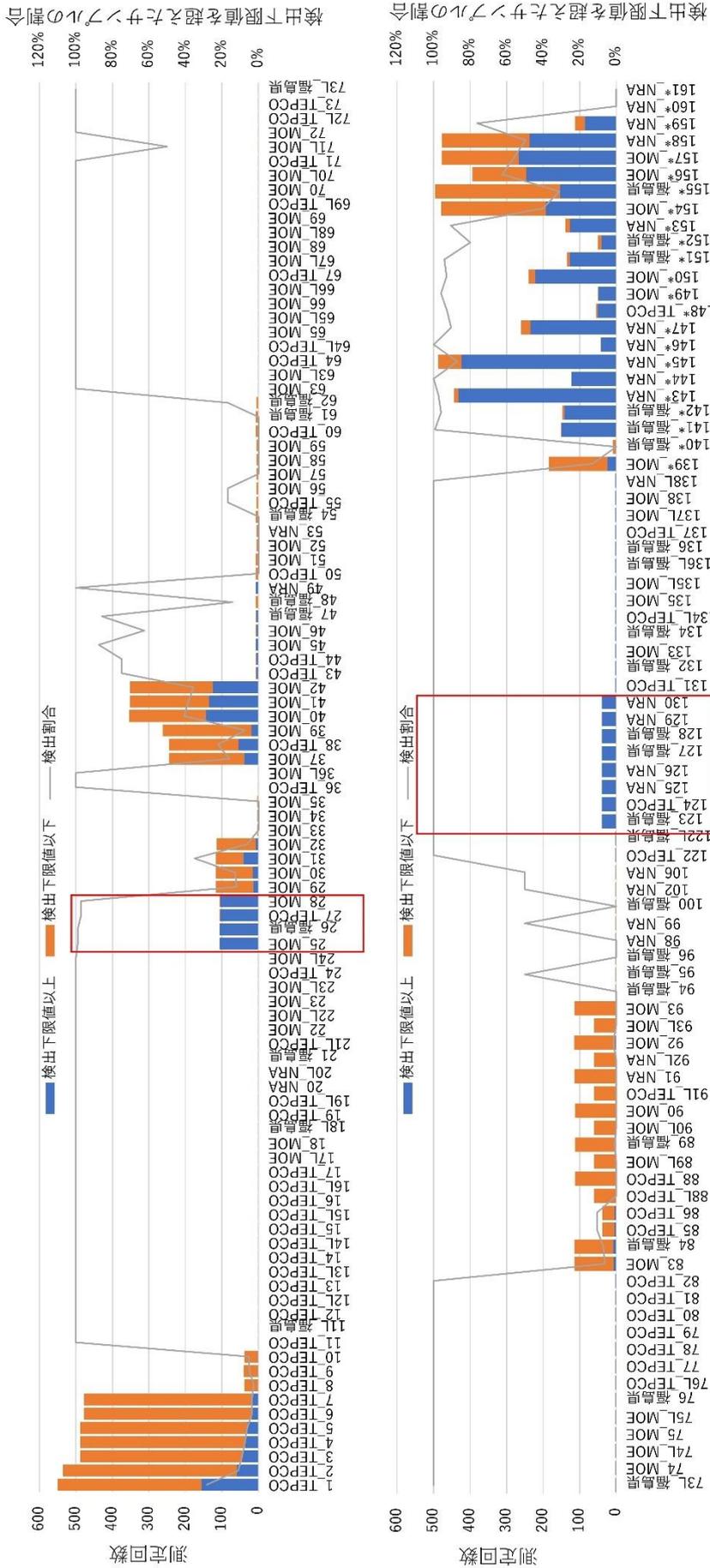


図 7-5 事故後からの海水中のトリチウムモニタリング結果の検出下限値を超えた割合

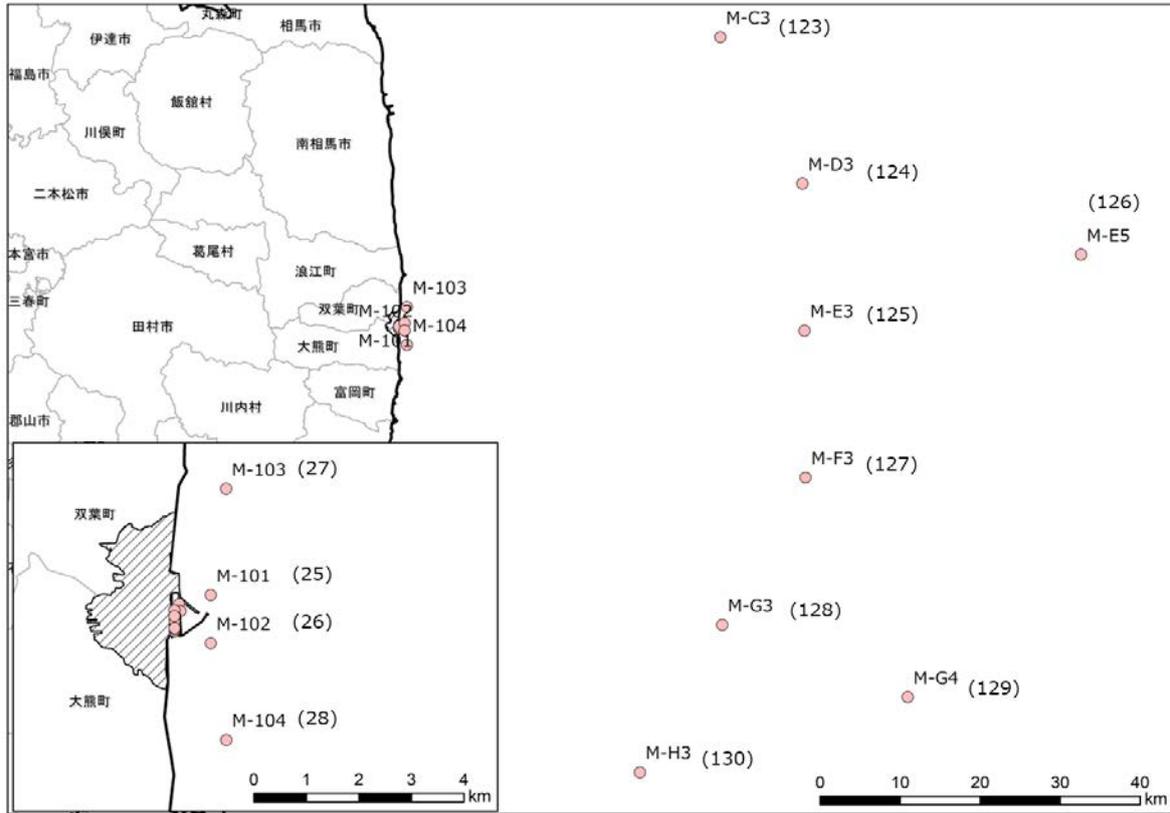


図 7-6 傾向解析に使用したサンプリングポイント
 (国土数値情報³⁴⁾ (行政区画データ) を加工して作成

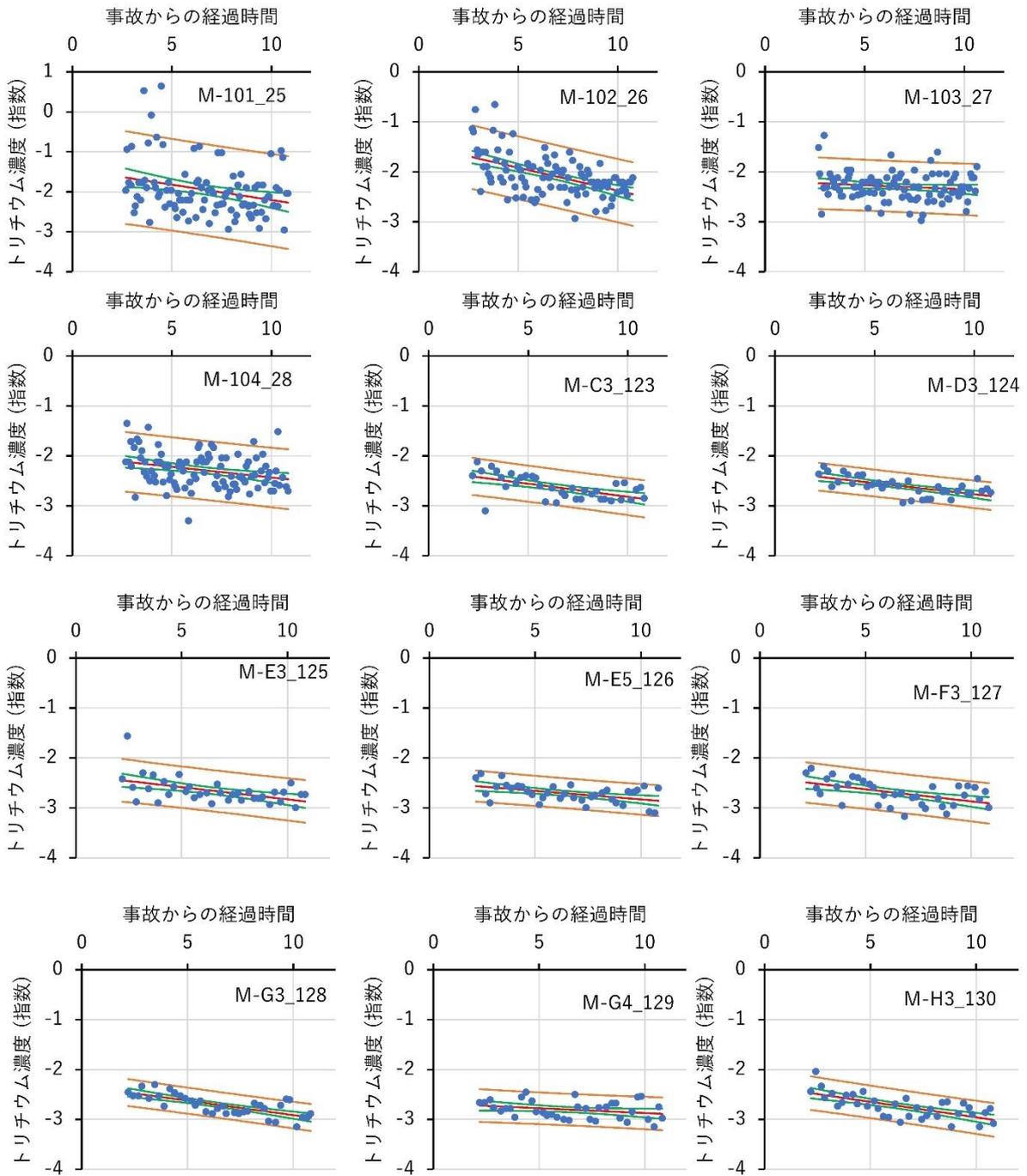


図 7-7 トリチウム濃度の傾向解析

(図中の線は、赤：近似曲線、緑色：95%信頼区間、橙色：95%予測区間。M-101_25は、地点名称 M-101 及び No.25 の意味)

7.1.4 濃度変動要因の推定

(1) 放出源からの距離との関係

事故後から計測されてきた海水のトリチウム濃度について、福島第一原発からの距離によってカテゴリー分けし、図 7-8～図 7-12 に示す（これら図は、データ種類が多いため番号順に 4～6 サンプルずつに分けている）。なお、本データには検出下限値を超えたデータのみを収録している。

- ・ 港湾内（図 7-8）

2015 年 10 月を境にトリチウム濃度が明確に減少していることが分かる。これは福島第一原発の地下に新設された凍土遮水壁の運用の開始時期と一致しており、原子炉建屋から地下水を介して海側に流出していたトリチウムの影響が低減したことを示している。港湾内のトリチウム存在量については町田らがサンプリングデータと統計解析手法から詳細に評価している⁴⁾。

- ・ 福島第一原発から 1 km 以内（図 7-9）

総合モニタリング計画で実施されているモニタリングポイントでの最近の濃度は、0.1～1.0 Bq/L 程度であり、図 7-8 に示した港湾内のデータと比べると低い傾向にある。この濃度は、事故前のトリチウム濃度のレベルに近い。また、過去からの濃度のトレンドは港湾内の傾向と関連性は見られない。また、凍土遮水壁の運用が開始された 2015 年 10 月から 2018 年 3 月までプロットが欠落しているように見える。これは、測定が実施されていないのではなく、検出下限値以上の検出例が少ないことによる。実際の関連性は不明であるが、2018 年 3 月は福島第一原発で敷地内の排水路を変更した時期と一致する。この傾向はこの後に示す 2 km～30 km の地点にも散見されている。

- ・ 福島第一原発から 1 km 以上 2 km 以内（図 7-10）

データの濃度レベルの傾向は概ね 1 Bq/L 近辺のレベルの地点と 0.1 Bq/L 近辺のレベルの地点の 2 つの数値集団に分けられるが、図 7-10（上）に示した地点は検出下限値が高い（1 Bq/L）ため、検出下限値を超えたデータのみがプロットされていることによる。

- ・ 福島第一原発から 2 km 以上 30 km 以内（図 7-11）

データの濃度レベルは概ね 1 Bq/L 以下の低い水準が維持されている。

- ・ 福島第一原発から 30 km 以遠（図 7-12）

データの濃度レベルは過去から概ね一定値を維持している。No. 99、102 及び 106 のいわき市沿岸のサンプリングポイントで通常の濃度レベルを逸脱する 0.5 Bq/L 程度の測定結果が複数回あるがこの原因は不明である。

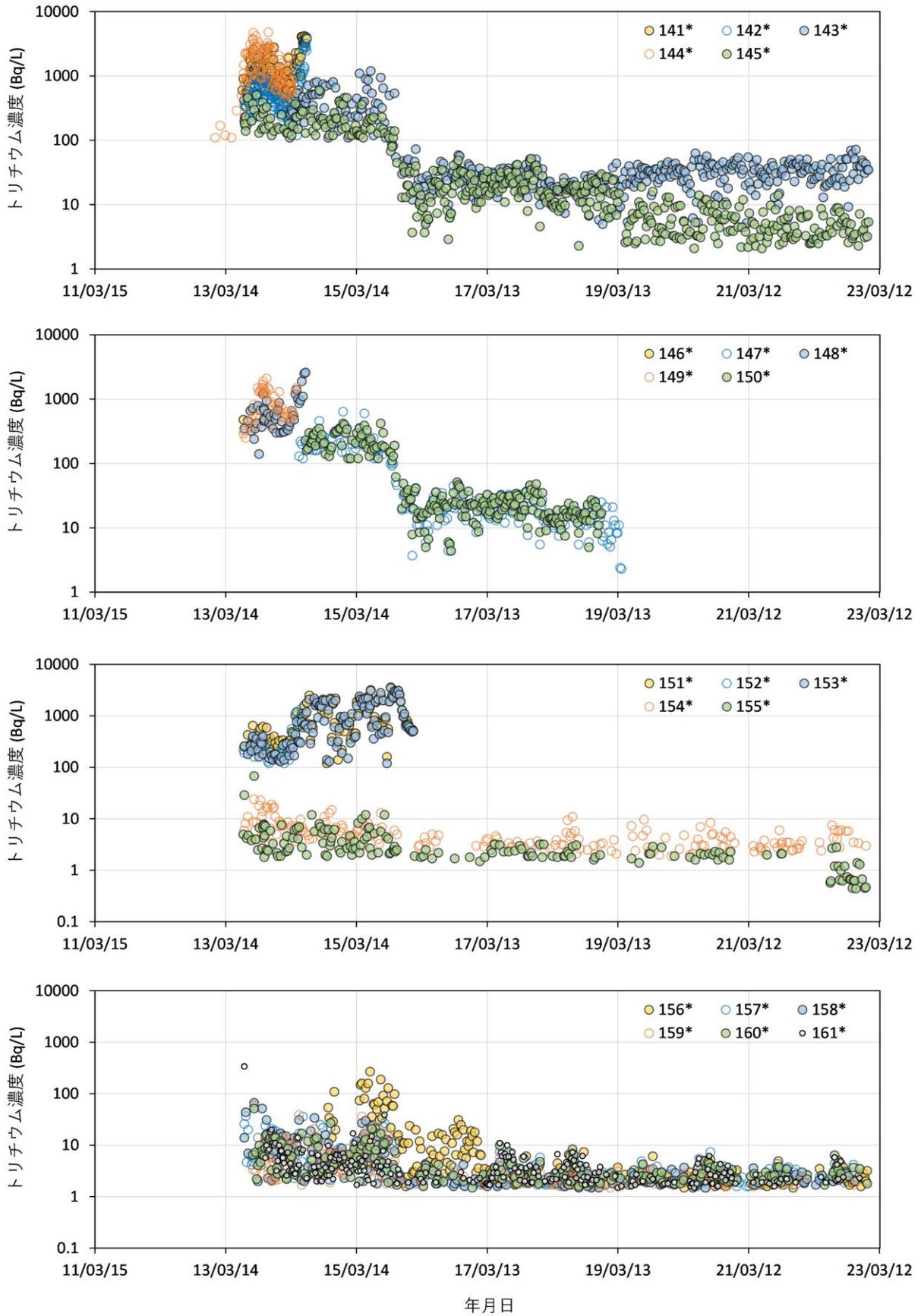


図 7-8 トリチウム濃度のトレンド（福島第一原発港湾内）

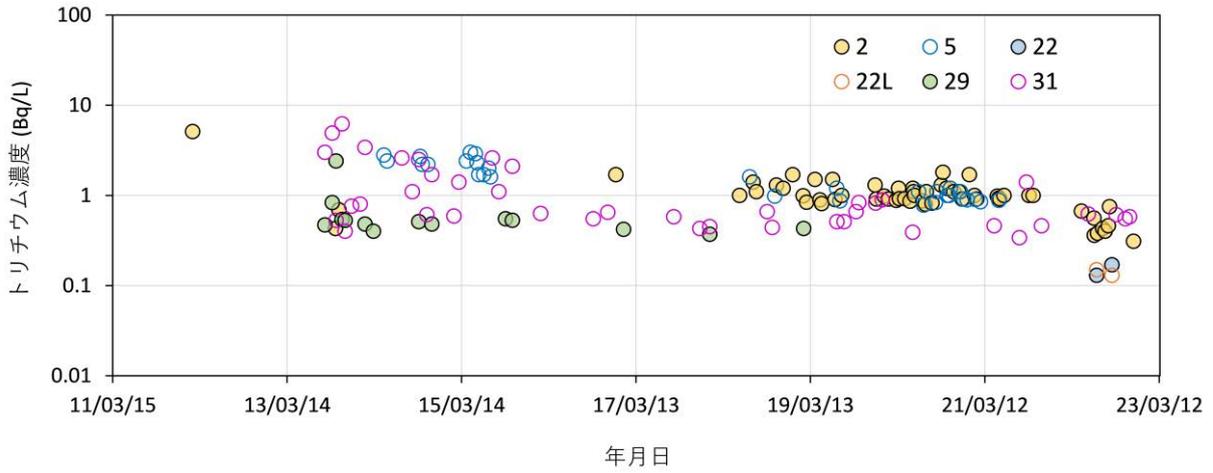


図 7-9 トリチウム濃度のトレンド (0-1 km)

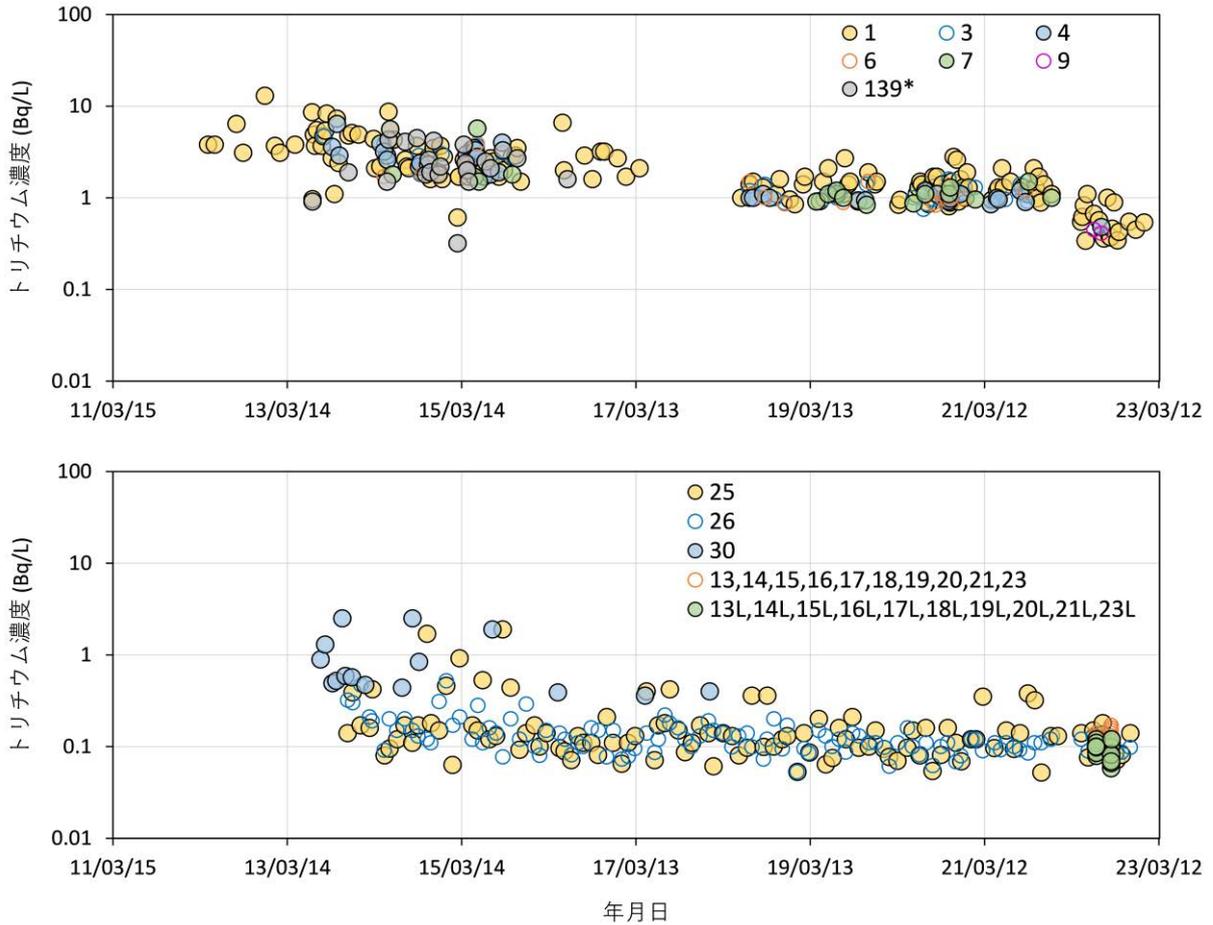


図 7-10 トリチウム濃度のトレンド (1-2 km)

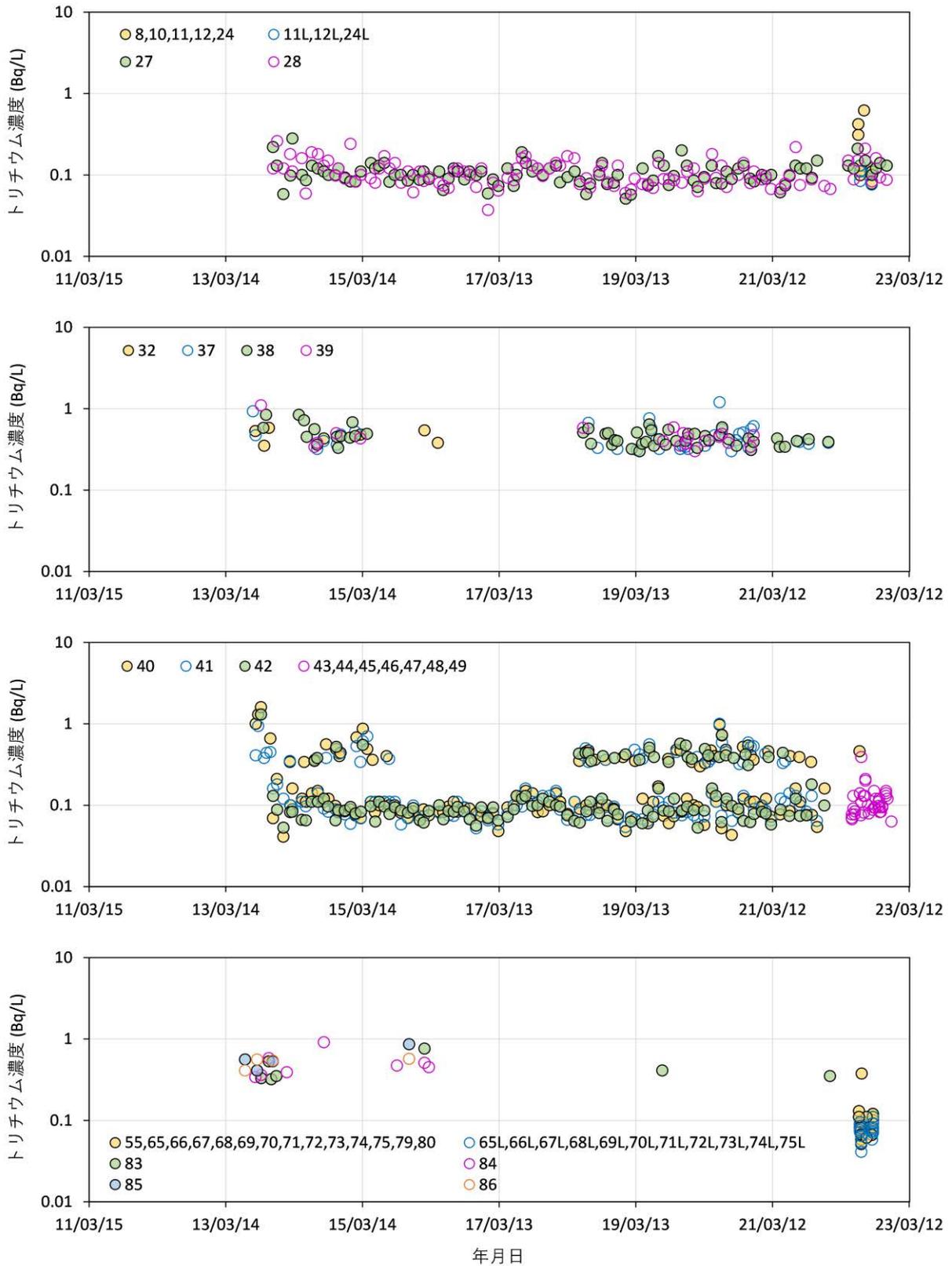


図 7-11 トリチウム濃度のトレンド (2-30 km)

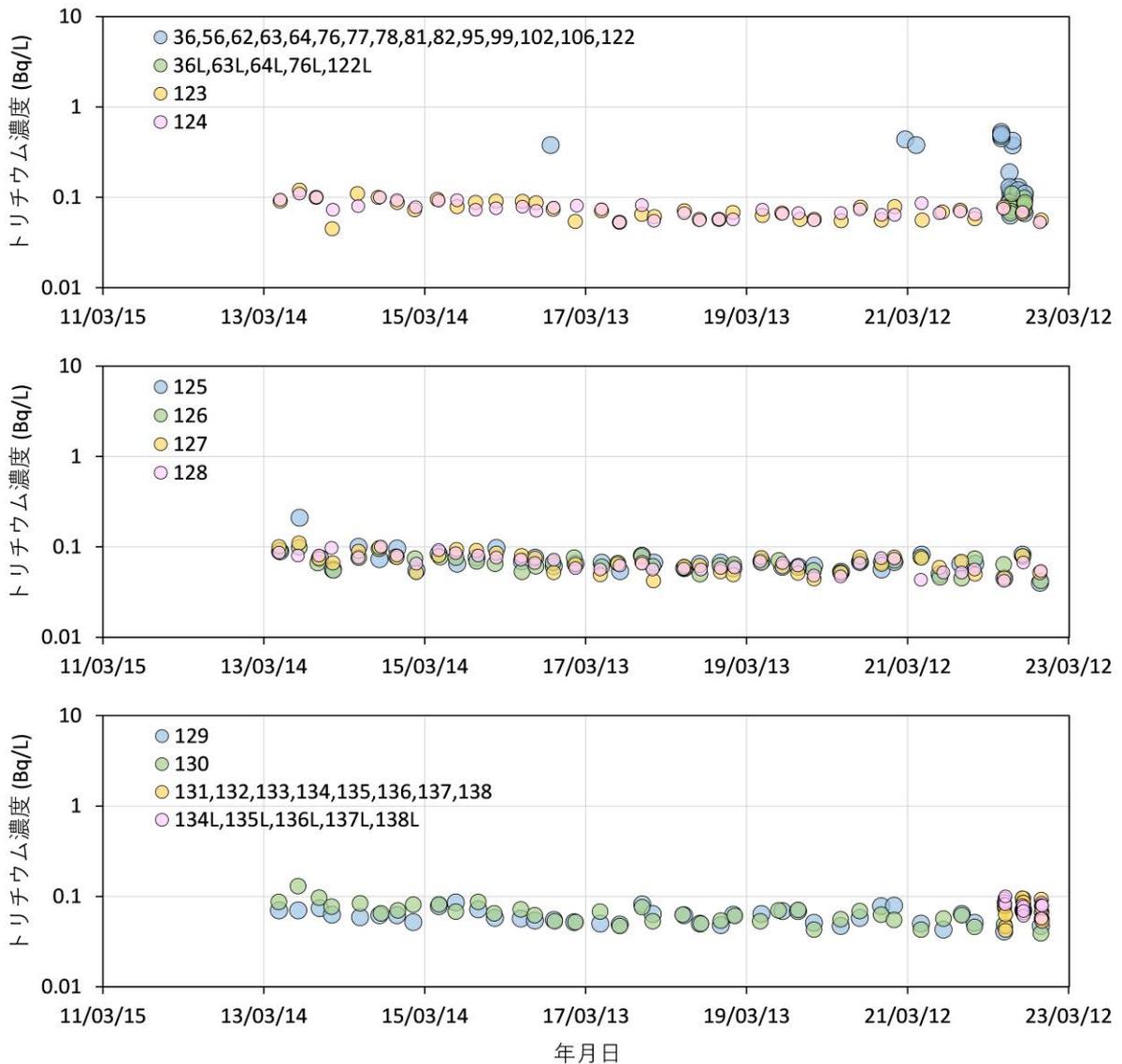


図 7-12 トリチウム濃度のトレンド (>30 km)

(2) 降水量との関係

Sakuma et al. ⁴²⁾の行った解析によると、2014 年以降は、陸上から海洋に流出するトリチウムの総量は福島第一原発由来よりも河川経由の陸上起源のトリチウムの方が多いことが示されている。そこで、降水量及び河川流量に着目し、既往のトリチウム濃度モニタリング結果との関係性について調査した。降水量については、富岡町と浪江町の気象庁のアメダスデータの月降水量をトレンドグラフ化した。それぞれ富岡川沖半径約 5 m 以内のモニタリングポイント及び請戸川沖半径約 5 m 以内のモニタリングポイントのトリチウム濃度データを図 7-13 に比較した。このように、降水量とトリチウム濃度に明確な関係性は確認できなかった。また、各河川の流量データとも明確な関係性は見られなかった。

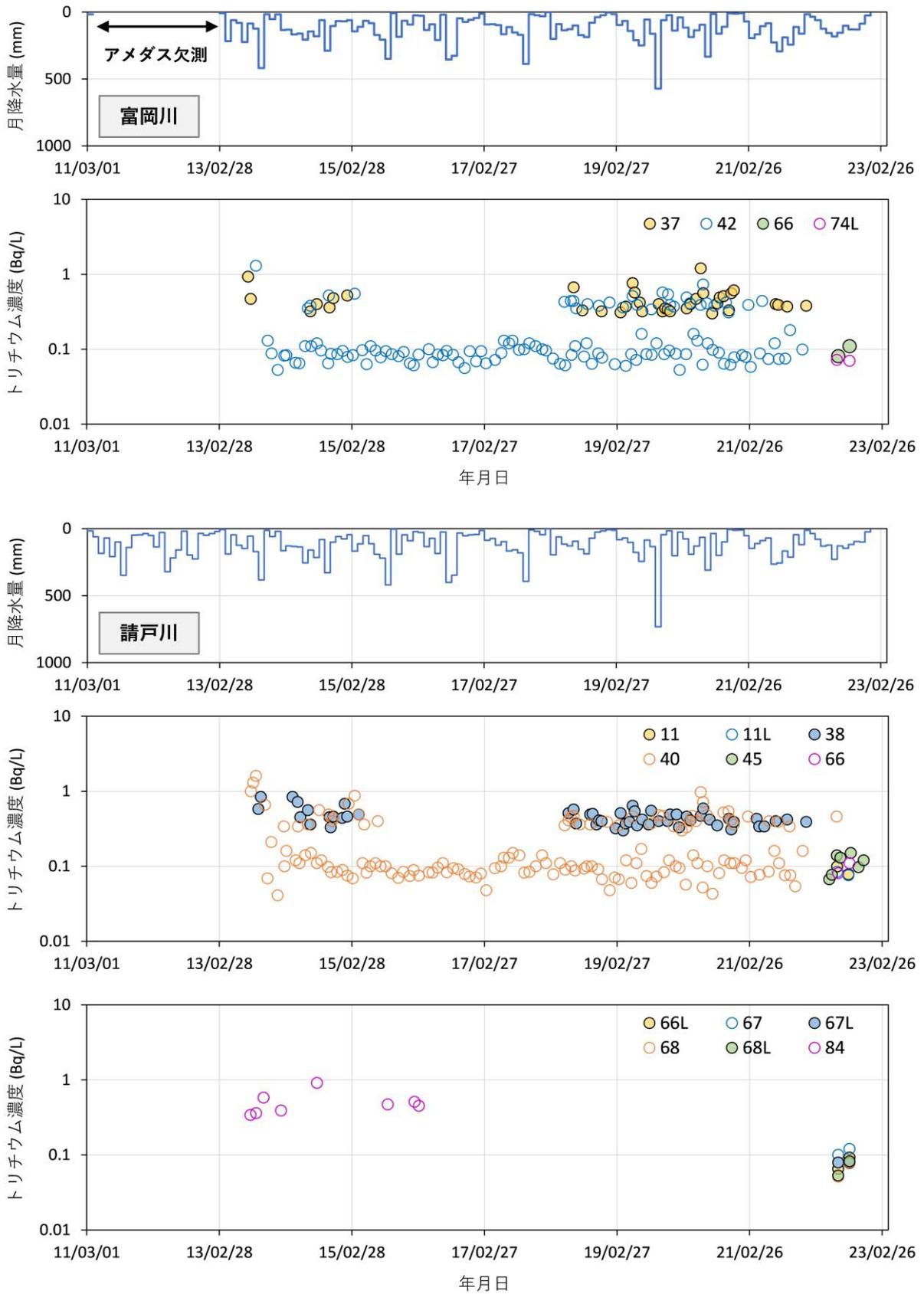


図 7-13 降水量とトリチウム濃度との関係 (上2つ: 富岡川、下3つ: 荒川)

7.1.5 海産物中のトリチウム濃度の計測例

東京電力では、平成 27 年度（2015 年度）より海産物のモニタリングを実施している。モニタリングは底生魚であるヒラメを対象としており、魚の身を凍結乾燥し、水分と有機物に分解して、前者中のトリチウム濃度を組織自由水(TFWT)及び後者を有機結合型トリチウム(OBT)として分析している。なお、分析方法は文部科学省のマニュアル⁴³⁾に従っている。東京電力の実施する海産物採取場所は、図 7-14 に示すように福島県浜通り主要 6 河川の河口域である。これまでの TFWT 分析結果の経時変化を図 7-15 に示す。このように、No.49 の熊川沖 T-S8 については長期にモニタリングが実施されているが、それ以外のポイントについては、令和 4 年度（2022 年度）のみ実施となっている。TFWT の濃度レベルについては、全ポイントで海水の濃度レベルと概ね同等の 0.1 Bq/L 程度である。なお、OBT については、過去 1 度も検出例がない。

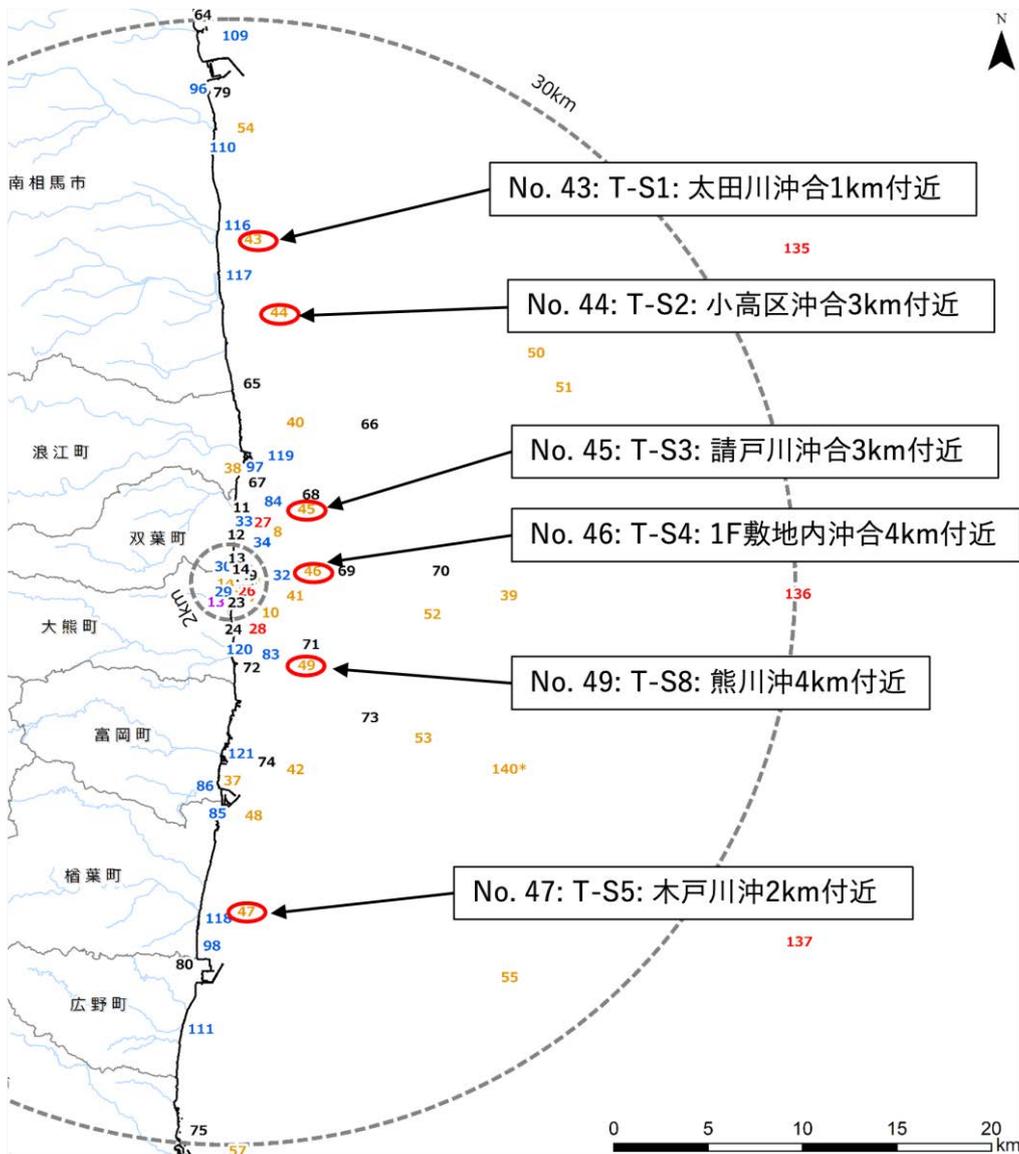


図 7-14 東京電力の実施するヒラメのモニタリングポイント
(国土数値情報³⁴⁾ (行政区域データ) を加工して作成)

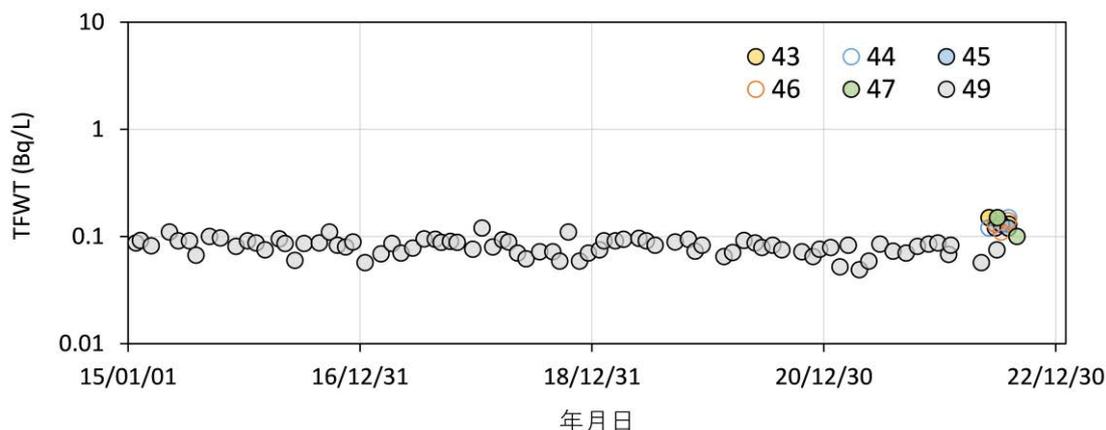


図 7-15 ヒラメ筋肉中 TWTF の経時変化

7.1.6 トリチウムモニタリングデータの報告レベルの提案

原子力規制庁は関係府庁が実施した測定結果の分析・評価の集約・発信を行っており、多くのデータの総合評価や異常検出と判断するレベルの策定が課題となっている。ここでは、トリチウムのモニタリング結果を例に、データの解析担当者が意思決定者（原子力規制庁）へ報告するレベル（報告レベル）の決定フロー案について検討した。図 7-16 に報告レベル案を示す。まず、過去 3 点以上データがあるモニタリングポイントごとに図 7-7 で示したような統計解析を実施し、95%予測区間の上限値を求めておく。その数値を超えたものに関して通常より迅速な報告を必要とするレベル（報告レベル 1~3）を設定する。さらにその中で東京電力の処理水放出基準である 1,500 Bq/L の 1/10 である 150 Bq/L を超えた場合は、最も高いレベルと設定し、速やかな意思決定者への連絡や周辺のモニタリングデータの監視強化などを実施する。また、150 Bq/L を超えなくても、当該ポイントだけでなく周辺のポイントについても過去のデータと比べて上昇傾向が確認されたポイントについては、より上位の報告レベルとする。本例はあくまで現時点で想像しうる対応の例ではあるが、今後、実際の海洋放出時のデータを蓄積しつつ、最適化を図ることが肝要である。

表 7-1 に示したように、モニタリングを実施する機関ごとで検出下限値や測定間隔が異なるため、別機関で実施しているデータの相互比較時には注意が必要である。特に、検出下限値付近のデータについては、単純な数値の比較だけでなく、過去のトレンド、検出下限値以上のデータの特性及びサンプリングや測定プロセスの不確かさなどを考慮し、総合的な判断が必要になる。今後は分析機関間の相互比較を行う方法等についてさらなる検討を行うことが必要である。

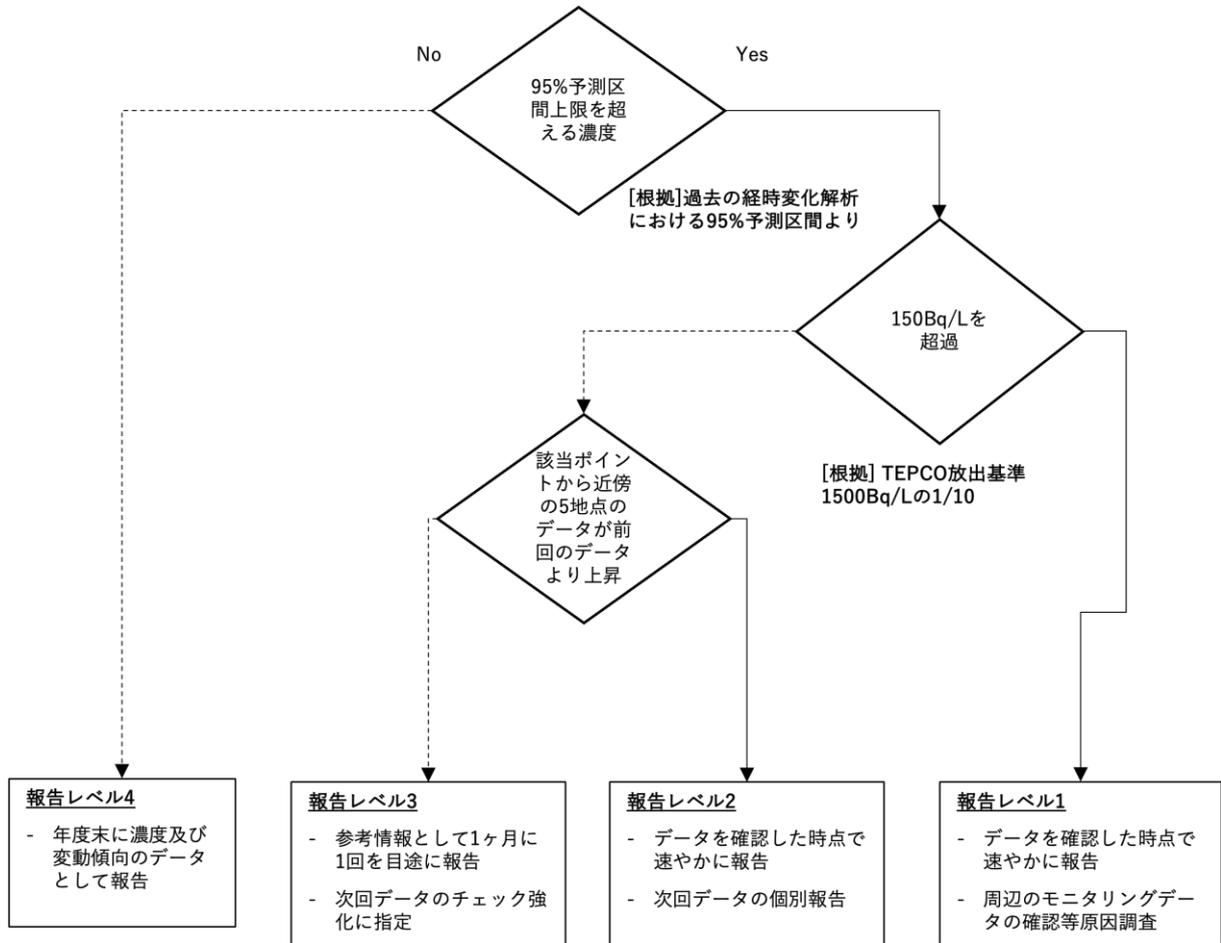


図 7-16 モニタリングデータの報告レベル案

7.2 海域モニタリング地点の重要度分類

本節では、令和 3 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（海水・海底土）の測定結果について集約するとともに、事故による影響が大きいセシウム 137 に関して過去からの変動や濃度などの測定結果の評価を行った。

7.2.1 調査内容

総合モニタリング計画に記載された、放射性セシウム濃度を測定している海水モニタリング地点全 351 地点及び海底土モニタリング地点全 200 地点における令和 4 年 3 月期までの測定結果を用い、以下の 3 項目について解析を実施した。なお、評価方法については、平成 31 年度及び令和 2 年度放射性物質測定調査委託費（福島県近沿岸海域等における放射性物質等の状況調査）事業（以下これらを「平成 31 年度海域事業」及び「令和 2 年度海域事業」という。）^{44,45)}並びに令和 3 年 3 月期までのデータを解析した令和 3 年度調査⁴⁶⁾で用いた方法を適用した。

- ① 事故から 6 年後以降（平成 29 年 4 月から令和 4 年 3 月まで）の平均放射性物質濃度（以下「現状の濃度」という。）の算出。
- ② 事故から 2 年目以降の放射性物質濃度の変動ファクター（以下「変動ファクター」という。）の算出：事故後 2 年目以降のモニタリングデータについて経過時間に対する対数線形回帰分析を行った。実測値と回帰関数から得られた予測値との相対誤差を求め、得られた誤差の標本標準偏差（標準誤差）の 2 倍を変動ファクター（90-95%信頼限界値）と定義した。
- ③ 事故から 2 年目以降の実効半減期（以下「実効半減期」という。）の算出：上記の対数線形回帰直線の傾きから実効半減期を求めた。

評価例として、福島第一原発 5 号機及び 6 号機放水口北側に位置する T-1 地点における海底土のセシウム 137 の測定結果と近似直線を図 7-17 に示す。

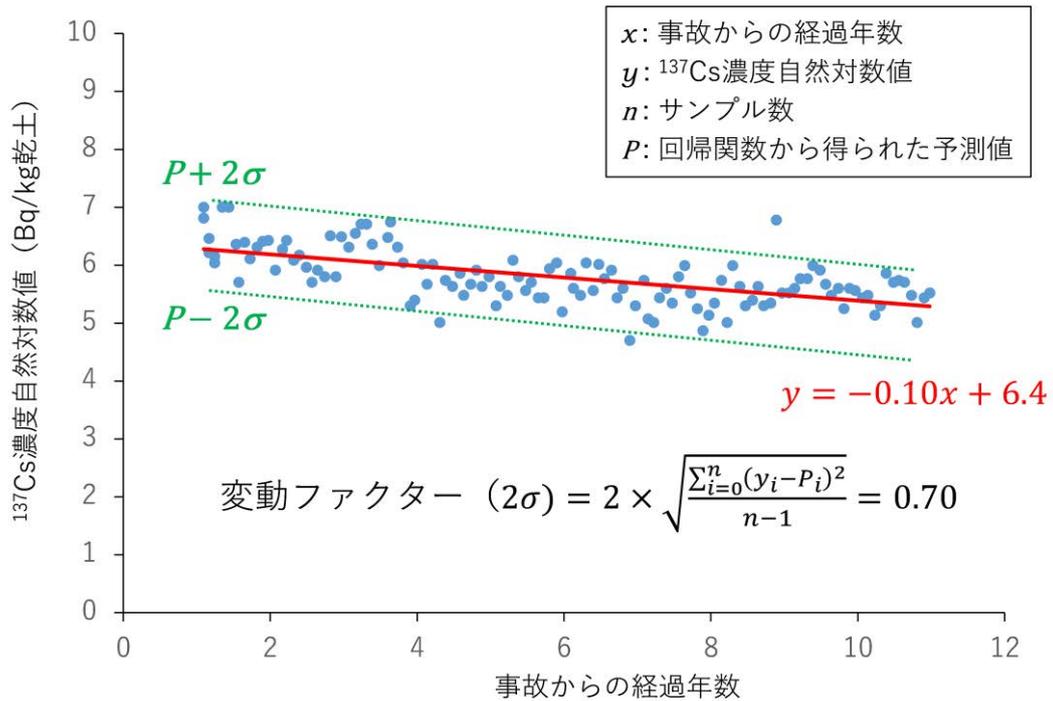


図 7-17 海底土のセシウム 137 濃度の測定結果例
 (実線は近似曲線、点線は標本標準偏差 (標準誤差) の 2 倍を意味する。)

7.2.2 調査結果

1) 海水モニタリングの解析

全 351 地点のセシウム 137 のモニタリング結果について 7.2.1 節に示した 3 項目の解析を行った。採取ポイントの重要度について相互比較を行うため、以下の 2 段階の判定基準を設定し、6 ランクに分類した。

• 第 1 段階

「現状の濃度」及び「変動ファクターから推測される 95 パーセンタイル値^a (現状の濃度×変動ファクター、以下「95 パーセンタイル値」という。)」の 2 つの数値を用いて以下のように判定する。

ランク A : 現状の濃度が 0.5 Bq/L 以上

ランク B : 現状の濃度は 0.5 Bq/L 未満だが、95 パーセンタイル値が 0.5 Bq/L を超過する可能性がある

ランク C : 0.5 Bq/L 超過の可能性は低い、現状の濃度が 0.01 Bq/L 以上、または 95 パーセンタイル値が 0.01 Bq/L 超過の可能性はある

ランク D : 現状の濃度が平常の変動上限値 0.01 Bq/L を下回り、95 パーセンタイル値も 0.01 Bq/L を超過する可能性が低い

^a 試料数により 95-97.5 パーセンタイル値となるが、本報告書では保守的に 95 パーセンタイル値と標記する。

判定基準である 0.5 Bq/L は、濃縮係数を 100⁴⁷⁾ とした場合の水産物の基準値(100 Bq/kg 湿潤)に相当する海水濃度値 (1 Bq/L) に濃度値の誤差やバラつきを考慮した安全係数 2 で除した数値として設定した。もう一つの判定基準となる平常の変動上限値 0.01 Bq/L については、事故前の放射性セシウム濃度レベル (2006～2010 年 (平成 18～22 年)) 度の「海洋環境放射能総合評価事業」におけるモニタリング結果⁴⁸⁾ の最大値 (0.004 Bq/L) 及び「平常時モニタリングについて」(平成 30 年 4 月 4 日付原子力災害対策指針補足参考資料) の陸水セシウム 137 濃度測定目標値 (0.008 Bq/L) を参考として設定した。

• 第 2 段階

第 1 段階においてランク B 及び C に該当した採取ポイントについて、実効半減期がセシウム 137 の物理的半減期相当である 30 年を超えた場合、新たな流入影響の可能性が考えられるため、それぞれランク B* 及び C* として区別した。表 7-4 に各海域のランク分け結果について示す。

表 7-4 各海域の海水ランク分け結果

	A	B*	B	C*	C	D	計
岩手県	0	0	0	0	0	4	4
宮城県	0	0	0	0	1	37	38
福島県	0	0	3	0	49	68	120
茨城県	0	0	0	0	0	22	22
沖合	0	0	0	0	0	84	84
外洋海域	0	0	0	1	0	57	58
東京湾	0	0	0	0	1	24	25
計	0	0	3	1	51	296	351

2) 海底土モニタリングの解析

全 200 地点のセシウム 137 のモニタリング結果について 7.2.1 項に示した 3 項目の解析を行った。海水と同様、採取ポイントの重要度について相互比較を行うため、以下の 2 段階の判定基準を設定し、6 ランクに分類した。

• 第 1 段階

「現状の濃度」及び「変動ファクターから推測される 95 パーセンタイル値 (現状の濃度 × 変動ファクター)」の 2 つの数値を用いて以下のように判定する。

ランク A：現状の濃度が 50 Bq/kg 乾土以上

ランク B：現状の濃度は 50 Bq/kg 乾土未満だが、95 パーセンタイル値が 50 Bq/kg 乾土を超過する可能性がある

ランク C：50 Bq/kg 乾土超過の可能性は低いが、現状の濃度が 10 Bq/kg 乾土以上、又は 95 パーセンタイル値が 10 Bq/kg 乾土超過の可能性はある

ランク D：現状の濃度が平常の変動上限値 10 Bq/kg 乾土を下回り、95 パーセンタイル値も 10 Bq/kg 乾土を超過する可能性が低い

判定基準である 50 Bq/kg 乾土は、原子炉等規制法に定められる放射性セシウムのクリアランスレベル (100 Bq/kg) を参考とし、濃度値の誤差やバラつきを考慮した安全係数 2 で除した数値を設定した。もう一つの判定基準となる平常の変動上限値 10 Bq/kg 乾土については、事故前の放射性セシウム濃度レベル (2006～2010 年 (平成 18～22 年) 度の「海洋環境放射能総合評価事業」におけるモニタリング結果⁴⁸⁾ の最大値 (9.5 Bq/kg 乾土) 及び「平常時モニタリングについて」(平成 30 年 4 月 4 日付原子力災害対策指針補足参考資料) の陸水セシウム 137 濃度測定目標値 (3 Bq/kg 乾土) を参考として設定した。

・ 第 2 段階

第 1 段階においてランク B 及び C に該当した採取ポイントについて、実効半減期がセシウム 137 の物理的半減期相当である 30 年を超えた場合、新たな流入影響の可能性が考えられるため、それぞれランク B* 及び C* として区別した。表 7-5 に各海域の海底土ランク分け結果について示す。

表 7-5 各海域の海底土ランク分け結果

	A	B*	B	C*	C	D	計
岩手県	0	1	0	0	0	5	6
宮城県	9	1	4	0	4	2	20
福島県	43	4	39	0	17	8	111
茨城県	0	0	2	0	3	0	5
沖合	3	0	2	0	17	10	32
東京湾	4	3	2	1	11	5	26
計	59	9	49	1	52	30	200

7.2.3 過年度評価結果との比較

7.2.2 項で評価したランク分け結果が令和 3 年度調査でのランク分けから変化した地点を表 7-6 及び表 7-7 に整理した。令和 3 年度調査での評価結果からランクが上昇した採取ポイントは、海水で 1 地点（全採取ポイントの 0.3%）、海底土で 11 地点（5.5%）であった。また、令和 3 年度調査での評価結果からランクが下降した採取ポイントは、海水で 1 地点（0.3%）、海底土で 10 地点（5.0%）であった。すなわち、海水の採取ポイントの 99%、海底土の採取ポイントの 90%で、1 年分（令和 3 年 4 月期～令和 4 年 3 月期）のモニタリングデータを追加しても、評価ランクが変動しなかったことになる。このことから、平成 31 年度及び令和 2 年度海域事業で策定したモニタリングデータの解析方法は、効率的かつ効果的な海域モニタリングの在り方について検討するにあたり、長期的な変動傾向の評価に一定の有効性があると考えられる。

令和 4 年度にランクが変動した海水の採取地点は、T-22 と T-B1（表 7-6）である。T-22 はこれまで、C（R1 年）⇒C（R2 年）⇒D（R3 年）⇒C（R4 年）と変動している。T-B1 はこれまで、D（R1 年）⇒C（R2 年）⇒C（R3 年）⇒D（R4 年）と変動している。これらは、図 7-18 に示すように、長期的には漸減しているが一時的に上昇している地点である。そのため、C もしくは D のみの変動を示しており、長期的にはランクが増加する可能性は小さいと考えられる。

令和 4 年度にランクが上昇した計 11 地点の海底土の採取地点（表 7-7）のうち、4 地点（E-T3、E-T4、E-7B、E-46）では複数回令和 3 年度の予測範囲を超えていた（図 7-19）。これらの 4 地点は、いずれも近傍河川の河口から 5 km 以内であった。また、そのうち 3 地点は三方を陸に囲まれるような湾内の地点であり、細かな粒子が堆積しやすい地形形状である可能性がある。継続的にランクが上昇する可能性がある地点は、放射能濃度分析のみではなく、粒度分析など物性も評価していく必要があると考えられる。

これらの結果を考慮すると、河口周辺におけるモニタリングについては今後も継続的に実施する必要があると考えられる。一方、令和 3 年度の予測内に入っていたにも関わらずランクが上昇した地点が 3 地点（E-4F、沿岸 18、E-71）、令和 3 年度の予測を 1 回だけ外れており、ランクが上昇した 4 地点（M-G3、T-12、E-85、沿岸 29）も見られた。今回適用した評価方法では、一時的な濃度変化によってもランクが変化しうるため、ランクの変更にあたっては、濃度変化が継続的なものであるか、十分に検討すべきと考えられる。例えば、平成 31 年から令和 4 年まででランクが変動した地点は、51 地点あるが、継続して 3 回変動した地点は無く、2 回変動した地点も 8 地点のみであった（表 7-8）。したがって、都度ランクを変更するのではなく、複数年の結果を踏まえて評価を実施することによって、海域モニタリングの効率化・重点化をより適切に進めることができると考えられる。

表 7-6 令和3年度調査での評価結果からランクが変化した地点（海水）

		令和3年度調査での評価ランク（2021年3月までのデータを使用）					
		A	B*	B	C*	C	D
令和4年度調査でのランク（2022年3月までのデータを使用）	A						
	B*						
	B						
	C*						
	C						(福島県) T-22
	D					(福島県) T-B1	

表 7-7 令和3年度調査での評価結果からランクが変化した地点（海底土）

		令和3年度調査での評価ランク（2021年3月までのデータを使用）					
		A	B*	B	C*	C	D
令和4年度調査でのランク（2022年3月までのデータを使用）	A			(宮城県) E-4F			
	B*			(福島県) E-7B		(宮城県) E-46 (東京湾) E-T3	
	B	(宮城県) E-4K (福島県) E-7H T-11 T-5 沿岸24	(東京湾) M-C5			(東京湾) E-T4 (沖合) M-G3 (福島県) T-12 沿岸18 沿岸29	
	C*						
	C	(沖合) M-I1		(東京湾) M-C2 (福島県) 沿岸12			(福島県) E-71 (茨城県) E-85
	D					(沖合) M-MI4	

表 7-8 平成 31 年度海域事業から令和 4 年度調査にかけてのランク変化状況

ランク変化状況	地点数	ランクの上昇回数	地点数
R1からR4までランクが変化しなかった地点	140		
R1よりランクが上昇した地点	25	2回上昇した地点	5
		1回上昇した地点	20
R1よりランクが下降した地点	26	2回下降した地点	3
		1回下降した地点	23
R1と同じランクの地点	9		

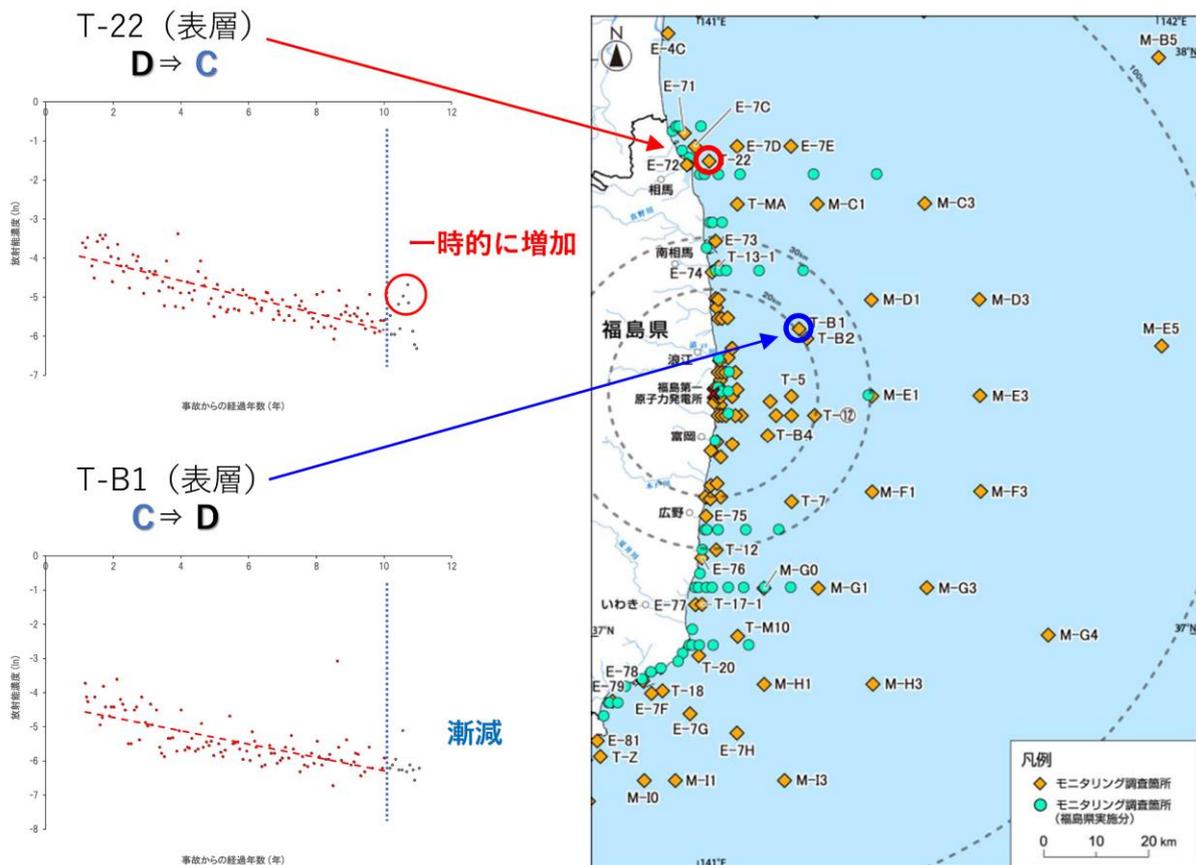


図 7-18 令和 3 年度調査での評価結果からランクが上昇した地点の放射能濃度変化（海水）
 （左図は、横軸は事故からの経過年数、縦軸は放射能濃度（Bq/L）の自然対数値、破線は近似直線、地点名の下は令和 3 年度ランク⇒令和 4 年度ランクをそれぞれ示している。右図は総合モニタリング計画²⁶⁾を引用した。）

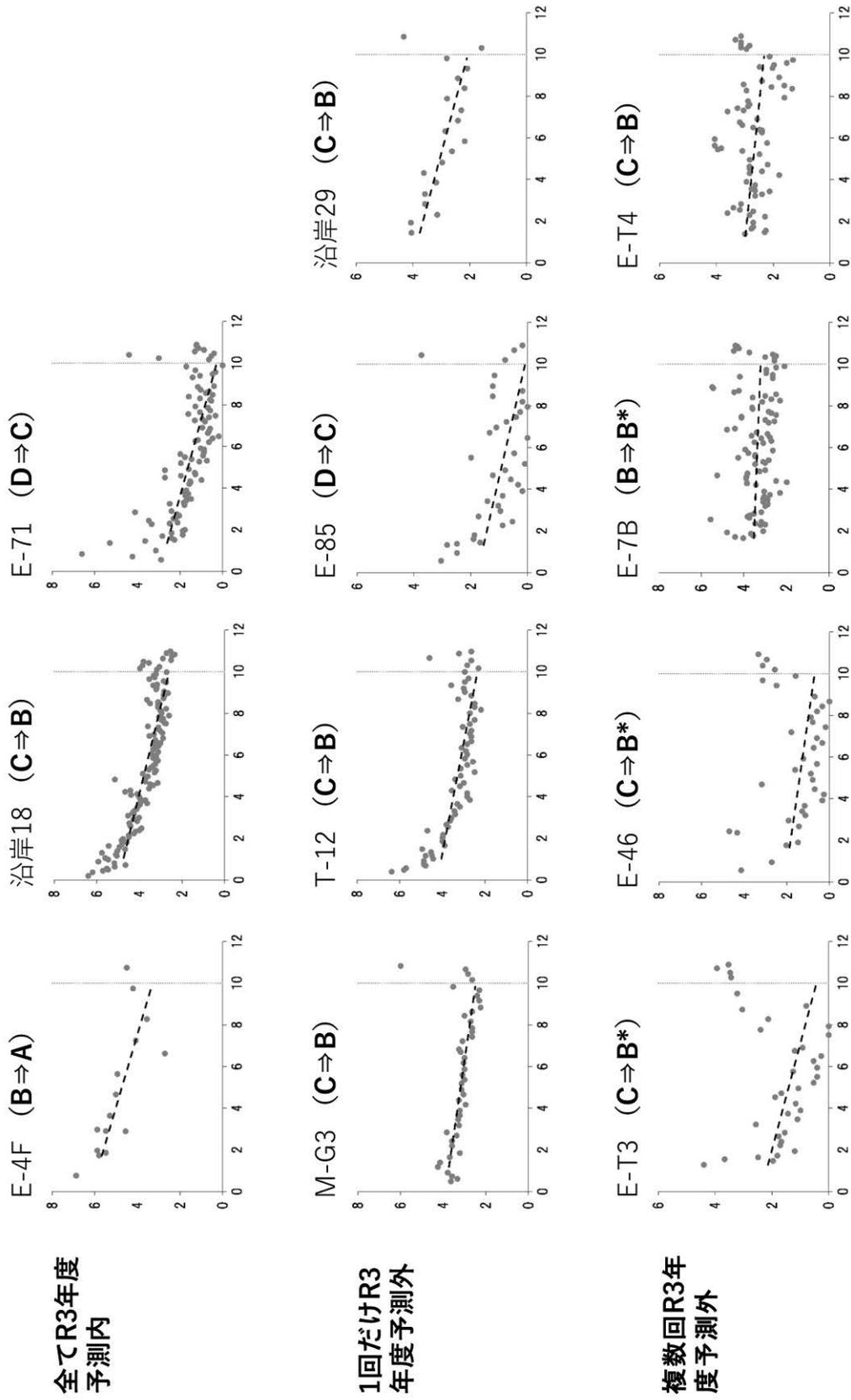


図 7-19 令和3年度調査での評価結果からランクが上昇した地点の放射能濃度変化 (海底土)
 (各図とも、横軸は事故からの経過年数、縦軸は放射能濃度 (Bq/kg) の自然対数値、破線は近似直線、地点名の右括弧内は令和3年度ランク⇒令和4年度ランクを示している)

8. 実測データの統合的解析

8.1 調査目的

分布状況調査では、80 km 圏内を中心に数種類の異なる測定方法を用いて空間線量率分布に関する大規模な調査を行ってきた。また、航空機サーベイ²³⁾では、人が立ち入れない場所を含むより広域を対象として空間線量率分布マップが作成されている。これら空間線量率の各測定方法にはそれぞれ固有の特性があり、測定精度や測定データの空間分解能が異なる。これらの異なった測定手法の特性を考慮して空間線量率情報を統合することは、統一的な分かりやすい情報の提供を可能とし、政策決定や被ばく評価に有益であると考えられる。本章の統合的解析の目的は、多様な空間線量率情報を地図上で統合表示した高精度かつ空間分解能の高い詳細な空間線量率分布マップ（以下「統合マップ」という。）を作成することである。統合マップの作成には、異なる方法で測定された空間線量率データを階層ベイズ統計により統合する手法⁴⁹⁾を適用した。

分布状況調査では、平成 28 年度に統合マップ作成を開始し、人間の生活する場を対象とする歩行サーベイを避難指示区域全域で行ったことを想定し、歩行サーベイ、走行サーベイ及び航空機サーベイの結果を統合した⁵⁰⁾。平成 29 年度及び平成 30 年度調査では統合対象地域を 80 km 圏内とし^{51,52)}、令和元年度調査以降は対象をさらに福島県全域に広げた⁵³⁻⁵⁵⁾。その際、80 km 圏外での歩行サーベイデータの不足を補うために新たな測定データを導入した。

令和 4 年度調査では、令和 3 年度と同様に、当該年度に測定されたデータ等を統合し 80 km 圏内及び福島県全域の統合マップを作成した。

8.2 調査内容

8.2.1 統合マップ作成に用いた空間線量率測定データ

統合マップの作成においては、統計解析を行うのに十分なデータ量を有する歩行サーベイ、走行サーベイ及び航空機サーベイの結果を用いた。歩行サーベイは人間が生活する様々な環境における空間線量率を取得でき、空間線量率の場所による変化を詳細に捉えた測定が可能であるが、人間の歩行による測定であるため 80 km 圏内あるいは福島県の全てをカバーすることは不可能である。走行サーベイでは、広範囲を対象に膨大な量のデータを取得することが可能であるが、測定は自動車が走行可能な道路上に限定される。航空機サーベイは 300 m 高度での測定を行うため地上の細かな空間線量率の変化を捉えることはできないが、測定地域全域をカバーできるという他にない特徴を有している。

福島県全域の解析において 80 km 圏外での歩行サーベイ測定データの不足を補うために、分布状況調査では以下の工夫を行ってきた。令和元年度は、福島県が実施した「モニタリングメッシュ調査」^{b)}の結果を利用した。令和 2 年度はさらなる高精度化を目指し、林野庁によ

^{b)} 福島県内を 2 km メッシュに分け、福島県内（帰還困難区域を除く）の主な生活道路等を対象として、原則としてメッシュごとに 1 調査地点を選定し、サーベイメータを用いた定点測定により地表面から高さ 1 m の空間線量率を測定している³¹⁾。測定地点は約 2,900 点である。

る「福島県内に所在するレクリエーションの森等における空間線量率調査」⁵⁶⁾及び「旧避難指示区域等国有林内におけるモニタリング調査事業」⁵⁷⁾（以下「林野庁調査」^cという。）の測定データを従来の統合解析データに追加した場合の統合マップに与える影響について検証し統合マップの精度向上を確認した⁵⁴⁾。令和3年度には、当該年度内に測定された歩行サーベイ、走行サーベイ、航空機サーベイに定点サーベイ、モニタリングメッシュ調査及び林野庁調査の結果を加え統合し、80 km 圏内及び福島県全域の統合マップを作成した⁵⁵⁾。なお、林野庁調査の結果は前年度の測定データとなるため放射性セシウムの半減期による減衰補正をしている。定点サーベイ、福島県によるモニタリングメッシュ調査及び林野庁調査では、いずれも地上1 m 高さの空間線量率を測定していることから、歩行サーベイと同等とみなし解析を行った（以下では、このように歩行サーベイと同等とみなし得るデータを「歩行サーベイ相当データ」と呼ぶ）。

8.2.2 測定データ統合手法の概要

空間統計学の分野で用いられてきた階層ベイズモデルを、空間線量率分布を統合したマップへ応用するためのアルゴリズムは、原子力機構と米国ローレンス・バークレー国立研究所（LBNL）との共同研究により開発され、福島市周辺の狭い地域を対象に検証済みである⁴⁹⁾。ここでは、統合マップ作成の理論について概説する。

上記手法は、同じ地域を対象とした同時期の測定により歩行サーベイの測定データセット \mathbf{z}_W 、走行サーベイの測定データセット \mathbf{z}_C 、航空機サーベイの測定データセット \mathbf{z}_A が得られた時に、最も信頼のおける空間線量率分布 \mathbf{y} を統計手法により推定するものである。具体的には以下の式 (14) で表した条件確率 $p(\mathbf{y}|\mathbf{z}_W, \mathbf{z}_C, \mathbf{z}_A)$ が最大になるような \mathbf{y} 及びその分散を求める。 $p(\mathbf{y}|\mathbf{z}_W, \mathbf{z}_C, \mathbf{z}_A)$ は、 \mathbf{z}_W 、 \mathbf{z}_C 及び \mathbf{z}_A が観測されたという条件で空間線量率分布が \mathbf{y} である確率を意味する。 $p(\mathbf{y}|\mathbf{z}_W, \mathbf{z}_C, \mathbf{z}_A)$ はベイズの定理により以下のように分けて書くことができる。

$$p(\mathbf{y}|\mathbf{z}_W, \mathbf{z}_C, \mathbf{z}_A) \propto p(\mathbf{z}_A|\mathbf{y}) p(\mathbf{z}_C|\mathbf{y}) p(\mathbf{y}|\mathbf{z}_W) \quad (14)$$

ここで、

$p(\mathbf{z}_A|\mathbf{y})$: 空間線量率分布が \mathbf{y} の時に \mathbf{z}_A が観測される確率

$p(\mathbf{z}_C|\mathbf{y})$: 空間線量率分布が \mathbf{y} の時に \mathbf{z}_C が観測される確率

$p(\mathbf{y}|\mathbf{z}_W)$: \mathbf{z}_W が観測された時に空間線量率分布が \mathbf{y} である確率とする。

$p(\mathbf{y}|\mathbf{z}_W)$ を事前確率と呼び、観測値 \mathbf{z}_W に基づき得られた空間線量率分布 \mathbf{y} を事前分布と呼ぶ。また、 $p(\mathbf{y}|\mathbf{z}_W, \mathbf{z}_C, \mathbf{z}_A)$ を事後確率と呼び、得られた空間線量率分布 \mathbf{y} を事後分布と呼ぶ。前項で述べたように、歩行サーベイでは人間の生活に密着した空間線量率が得られるので、歩行サーベイにより得られた空間線量率が実際の空間線量率（統合により得たい空間線量率）であ

^c 「福島県内に所在するレクリエーションの森等における空間線量率調査」⁵⁶⁾は福島県内に所在する国有林野のうちレクリエーションの森等の約 200 地点において、「旧避難指示区域等国有林内におけるモニタリング調査事業」⁵⁷⁾は旧避難指示区域等国有林内の約 1,400 地点において、サーベイメータを用いて地表面から高さ 1 m の空間線量率を測定している。

ると仮定する。すなわち、歩行サーベイの測定データがある地点の空間線量率はその値を用い、測定データがない地点に対しては、仮に歩行サーベイをその地点で実施した時にどのような値が得られるかを推定する。

式 (14) の条件を満たした \mathbf{y} を求めるために、右辺の 3 つの確率関数の基礎データを測定データの統計解析により取得することになる。 $p(\mathbf{z}_A|\mathbf{y})$ 及び $p(\mathbf{z}_C|\mathbf{y})$ と関連するデータモデルは、航空機サーベイと歩行サーベイの相関関係、走行サーベイと歩行サーベイの相関関係の解析により得られる。

$p(\mathbf{y}|\mathbf{z}_W)$ と関連したプロセスモデルは、歩行サーベイ結果の空間パターンの解析から得られる。具体的には歩行サーベイにおいて、離れた 2 メッシュ間の空間線量率が距離によりどのように変化するかを解析した。データモデル及びプロセスモデルの基となる環境モニタリング測定データ間の相関関係は土地利用状況により異なることが分かっているので、土地利用状況別に統計解析を実施しその結果を用いた。これらの関係を利用しながら確率が最大となる \mathbf{y} とその信頼区間（標準偏差）を推定した。

なお、上記において空間線量率は全て対数変換し解析を実施している。

8.3 80 km 圏内を対象とした統合マップの作成

8.3.1 統合マップ作成に使用した測定データ

80 km 圏内を対象として、令和 4 年度に測定された各種データを用い統合マップを作成した。使用したデータの一覧を表 8-1 に示す。令和 2 年度の検討により、林野庁調査等の定点サーベイを加えることで統合マップの精度が向上することが確認できたことから、歩行サーベイ相当データとして、定点サーベイ、モニタリングメッシュ調査及び林野庁調査結果を含んでいる。ただし、林野庁調査の結果は令和 3 年度の測定結果を利用した。測定された全ての空間線量率を放射性セシウムの物理減衰を考慮して令和 4 年 10 月 21 日（航空機サーベイの補正基準日）での値となるように補正した。なお、後述の歩行サーベイの空間分布パターン解析を円滑に行うため、歩行サーベイ相当データの内歩行サーベイの測定点に近すぎるもの及び歩行サーベイ相当データ内で測定点間距離が近すぎるデータ対の片方を取り除いた。データ対の片方を取り除く距離の基準は 18 m 未満とした。統合化を行う歩行サーベイ、走行サーベイ及び航空機サーベイの測定結果を歩行サーベイ相当データとともに図 8-1 に示す。以下では、統合化に使用する歩行サーベイデータには、断らない限り歩行サーベイ相当データを含んでいる。なお、歩行サーベイ相当データは、歩行サーベイのような連続測定ではないため、20 m メッシュでの平均化は行っていない。

過去に実施した解析により、各測定結果間の関係が平成 28 年 7 月 12 日時点における避難指示区域内と区域外で異なることが明らかになっていることから、今回の解析においても避難指示区域内外を分割した解析を行った。また、対象領域における土地利用状況によっても放射性物質の分布状況及び変化傾向が異なることが明らかになっていることから、宇宙航空研究開発機構（JAXA）より公開されている高解像度土地利用土地被覆図⁵⁸⁾（ver.21.11）に基づき測定データを分類して解析を実施した。今回の解析に使用した土地利用状況を図 8-2 に示す。また、令和 2 年 3 月 10 日時点の避難指示区域区分を使用した。その形状を図 8-3

に示す。令和 4 年度に特定復興再生拠点の一部が解除されたが、それらの解除により空間線量分布が極端に変化することはないため、令和 2 年の避難指示区域の形状をそのまま使用した。

表 8-1 80 km 圏内統合マップ作成に使用したデータ一覧

種別	実施者	測定年度	備考
航空機サーベイ	原子力規制庁	令和 4	
走行サーベイ	原子力規制庁	令和 4	2 回目（通算第 25 回）
歩行サーベイ	原子力規制庁	令和 4	
歩行サーベイ相当 データ	原子力規制庁	令和 4	定点サーベイ
	福島県	令和 4	モニタリングメッシュ調査
	林野庁	令和 3	旧避難指示区域等国有林内におけるモニタリング調査事業

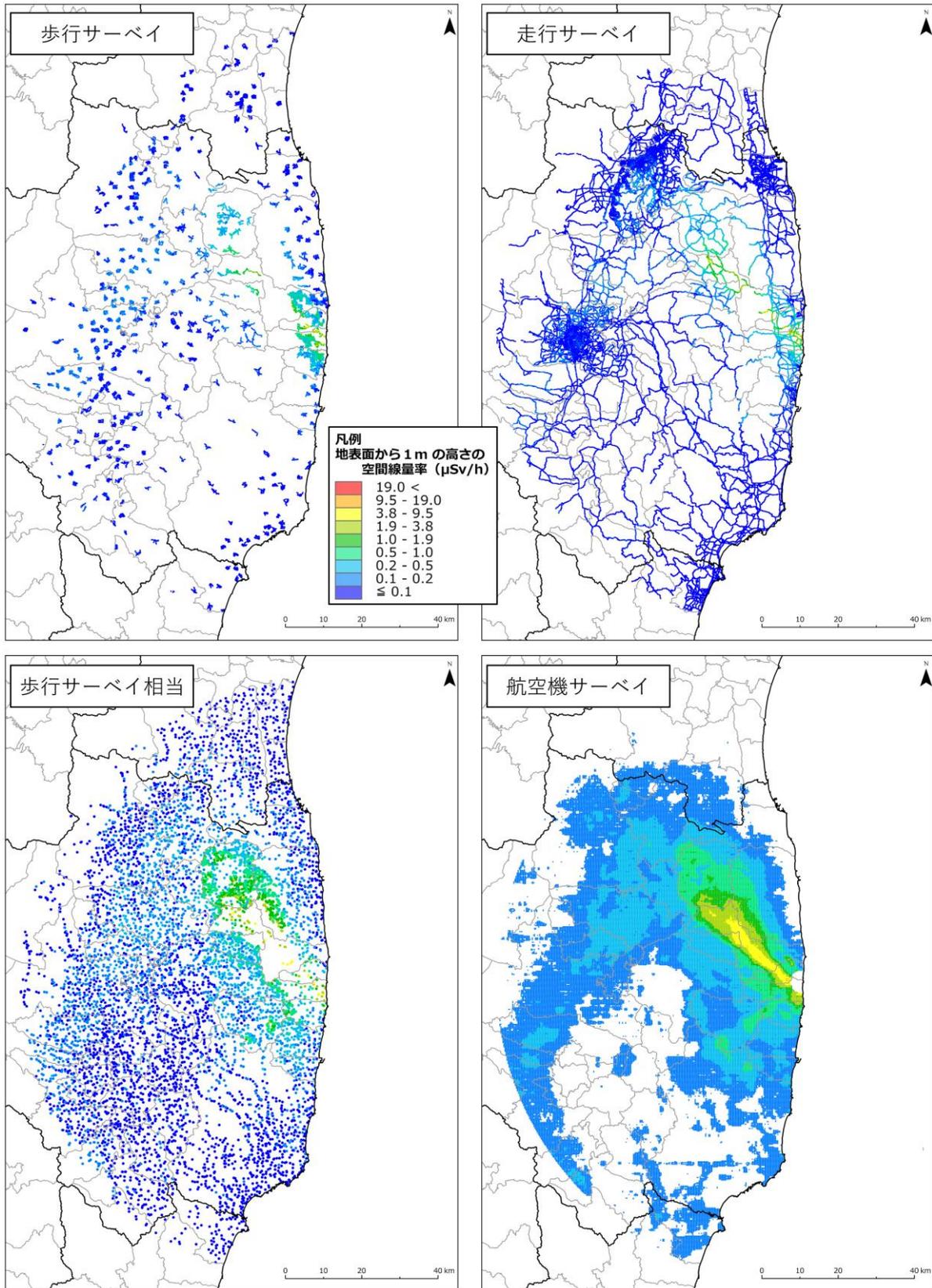


図 8-1 令和 4 年度の統合マップ作成に使用した空間線量率データ (80 km 圏内)
 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。背景地図: ESRI ジャパンデータコンテンツ, (c) Esri Japan.)

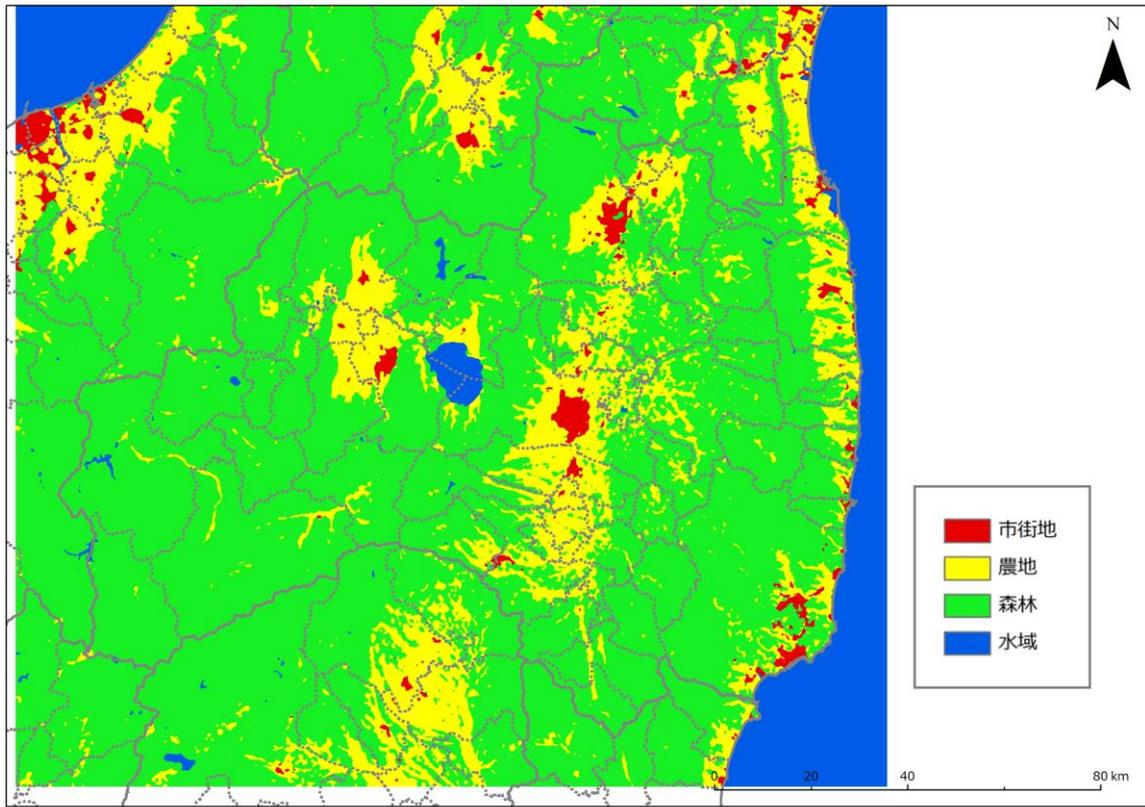


図 8-2 JAXA の高解像度土地利用土地被覆図に基づく土地利用状況

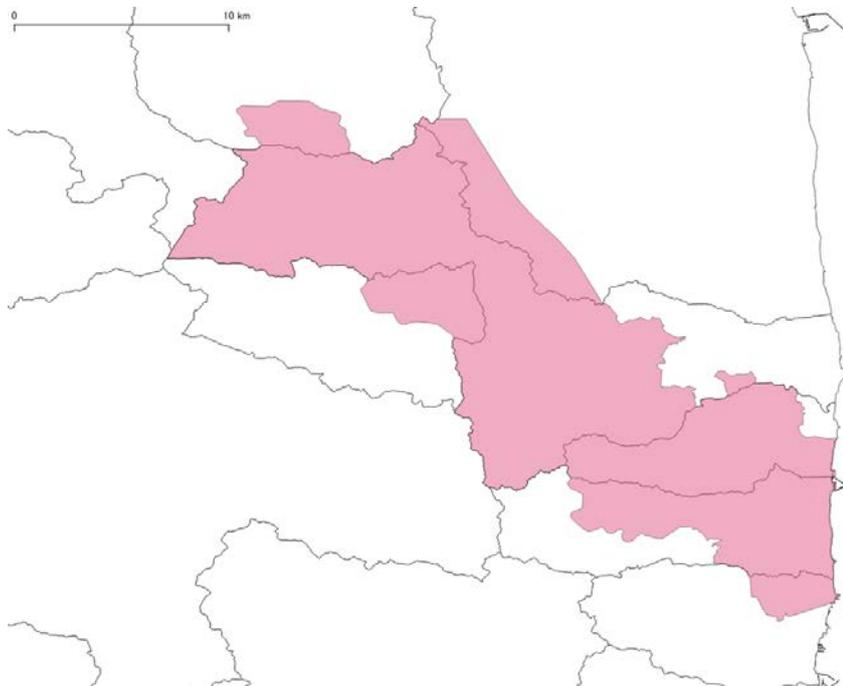


図 8-3 避難指示区域（令和 2 年 3 月 10 日）の形状

8.3.2 歩行サーベイ結果の空間分布パターンの解析

$p(\mathbf{y}|\mathbf{z}_w)$ のプロセスモデルを決めるために、避難指示区域内外の歩行サーベイデータに関する空間分布パターンの解析（バリオグラム解析）を行った。避難指示区域内及び同区域外（ただし 80 km 圏内。以下、本節において同様とする。）におけるバリオグラム解析を、市街地、農地、森林の 3 種の土地利用状況ごとに実施した。バリオグラム解析結果を図 8-4 に示す。縦軸の値はセミバリエンスと呼ばれる量を表しており、2 点間で観測される空間線量率の差と距離の相関を示す指標である。セミバリエンスの定義を式 (15) に示す。

$$\Gamma(h) = \frac{1}{2|N(h)|} \sum_{N(h)} (z_i - z_j)^2 \quad (15)$$

ここで、 $N(h)$ は 2 点間の距離が h となる測定値の集合である。一般に、一定の距離を超えるとセミバリエンスはほぼ一定値になり、それ以遠の空間線量率は距離との相関を持たなくなる。バリオグラムのフィッティング関数は、式 (16) に示す指数関数型を採用した。

$$f(h) = n + (s - n) \left[1 - \exp\left(-\frac{d}{r}\right) \right] \quad (16)$$

距離とセミバリエンスの相関が無くなる時点での距離の値をレンジ r 、セミバリエンスの値をシル s と呼ぶ。シルは空間線量率のばらつきの大きさ（分散）を表す。距離 d がゼロのときの値をナゲット n と呼び、ランダムノイズの効果の大きさを表している。

各パラメータの初期値を複数設定し、最小二乗フィッティングを行ったうえで、最適なパラメータセットを決定した。図から認められるように、避難指示区域内のシルが区域外のシルよりも大きい値となっている。これは、区域内の方が空間線量率のばらつきが大きいためである。

歩行サーベイによる空間線量率測定結果を式 (14) の \mathbf{z}_w として用い、本分析において避難区域内外及び土地利用ごとに採用したシルやレンジ、ナゲットの値を用いてグラフの形状を上記の指数関数で近似しプロセスモデルとして用いることで、空間線量率の事前分布 \mathbf{y} を作成した。

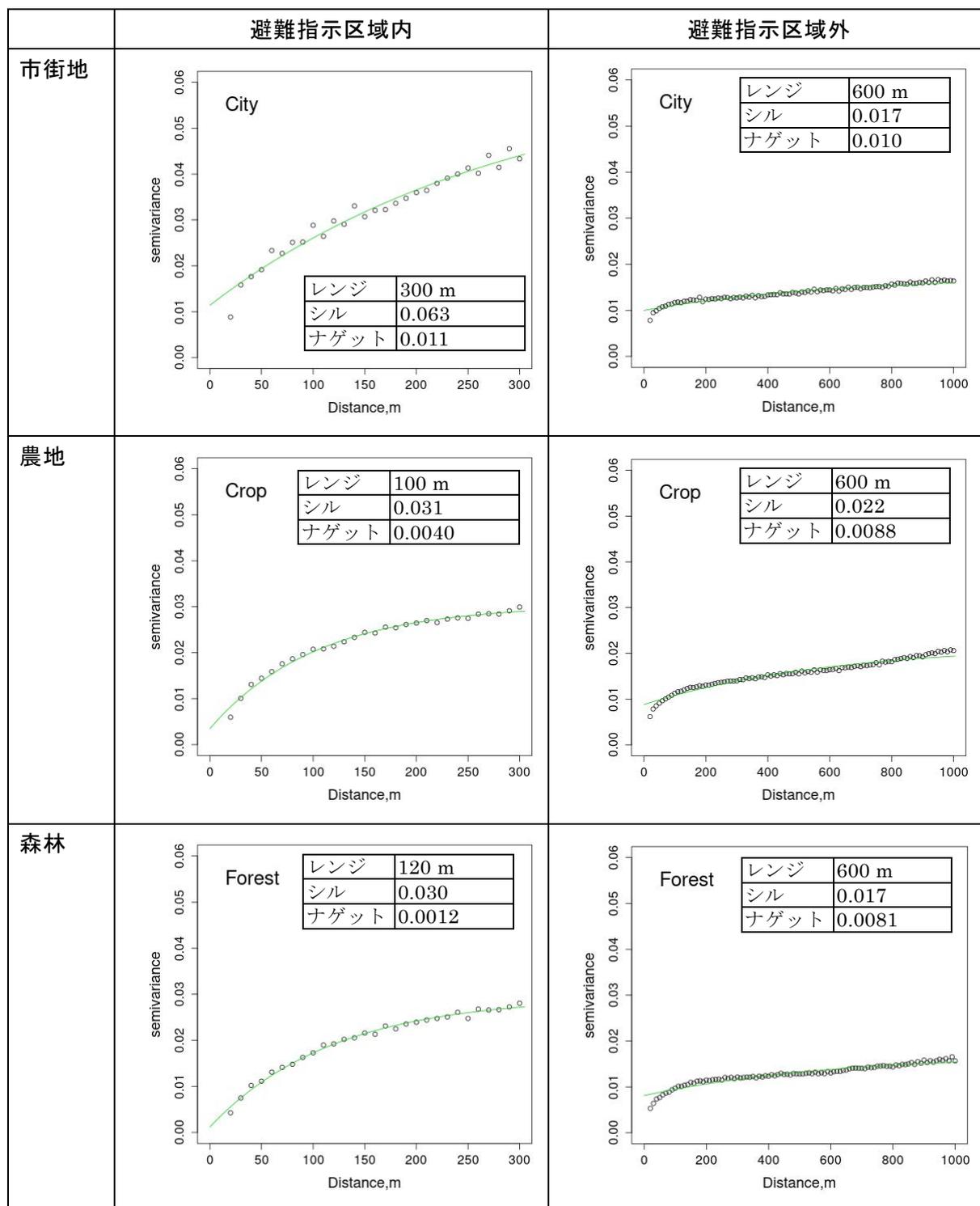


図 8-4 令和 4 年度に実施された避難指示区域内外における歩行サーベイによる空間線量率のバリオグラム解析結果

8.3.3 走行サーベイと歩行サーベイの比較

$p(\mathbf{z}_c|\mathbf{y})$ のデータモデルを決めるために、走行サーベイと歩行サーベイの避難指示区域内、同区域外及び区域内外を区別しない全域での空間線量率を土地利用別に比較した。比較結果を図 8-5 に示す。平成 29 年度の解析により、歩行サーベイのデータを走行サーベイの 100 m メッシュごとに平均化したものと比較した方が、相関が改善されるという知見が得られたことから、今回の解析においても平均化した歩行サーベイ結果と走行サーベイ結果の相関を分析した。この相関分析結果を基に、走行サーベイによる空間線量率と 100 m メッシュ内で平均化した歩行サーベイの空間線量率が対数軸上で線形関係にあるとしたデータモデルを用いて走行サーベイデータを補正し、式 (14) における \mathbf{z}_c として用いた。得られた相関分析結果に関し、森林及び農地における相関分析結果においては 0.7 を超える相関係数が得られている。市街地については、0.6 程度と相関は低いものとなっている。なお、避難指示区域外の相関係数が区域内の値に比べ小さい理由として、区域外の方が空間線量率の値が小さくバックグラウンドや測定精度の影響をより強く受けているものと推察される。区域内外を区別せず 80 km 圏内全域で比較すると、避難指示区域内外を区別した場合よりも空間線量率の範囲が広がるため、相関係数は大きくなる。

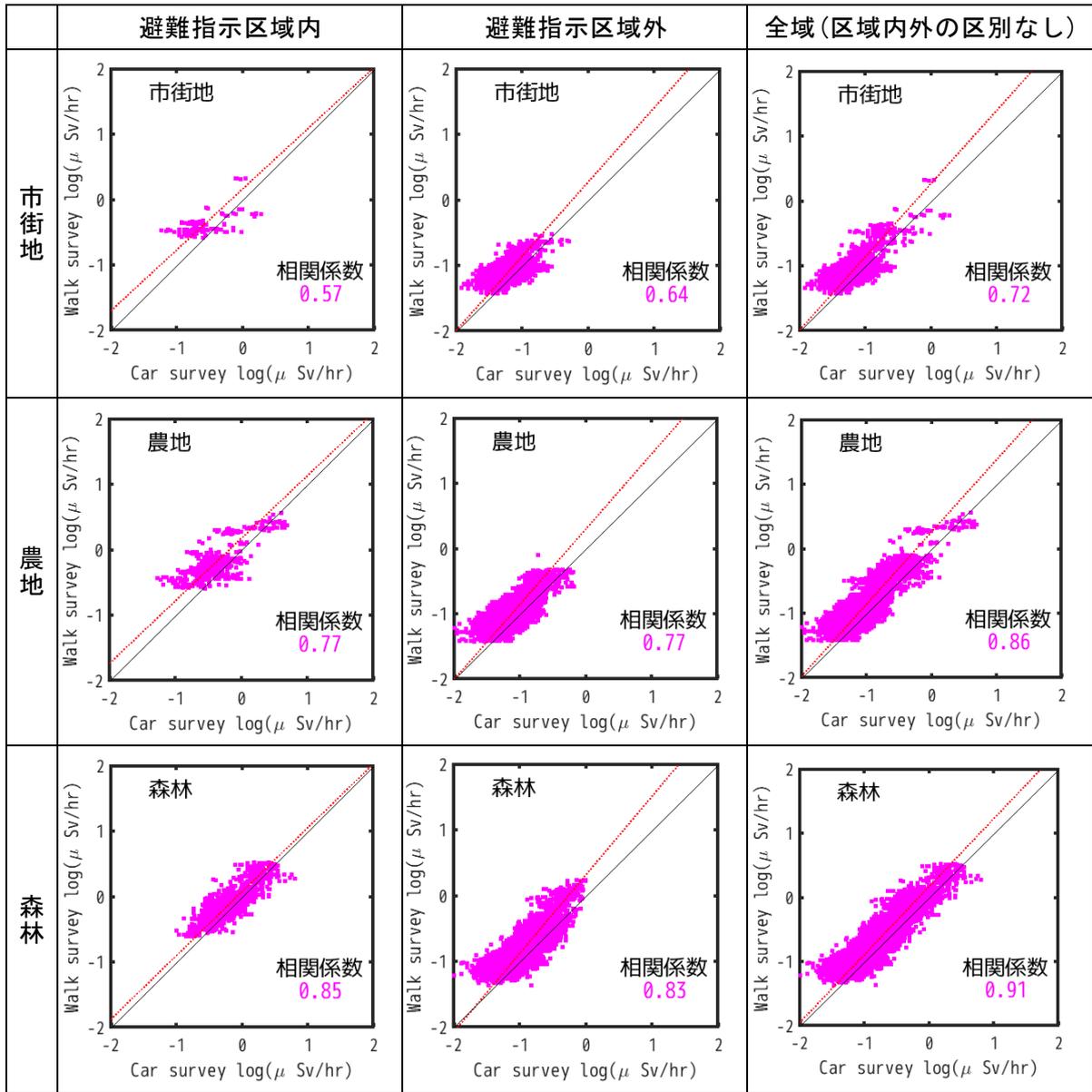


図 8-5 令和 4 年度に実施された避難指示区域内外及び全域（区域内外の区別なし）における走行サーベイ（Car survey）と歩行サーベイ（Walk survey）による空間線量率の相関分析結果

（図中の破線は最小二乗法による回帰直線、実線は $y=x$ の直線。天然放射核種による空間線量率寄与を含んでいる。）

8.3.4 航空機サーベイと歩行サーベイの比較

$p(\mathbf{z}_A|\mathbf{y})$ のデータモデルを決めるために、避難指示区域内外の航空機サーベイと歩行サーベイの空間線量率を土地利用状況ごとに比較した。比較結果を図 8-6 に示す。平成 29 年度の解析により、歩行サーベイのデータを航空機サーベイの距離に応じて加重平均化したもの（参考文献⁴⁹⁾ の inverse-distance weighted (IDW) averaging）と比較することで、相関が

改善されるという知見が得られたことから、今回の解析においても航空機サーベイ結果と距離に応じて加重平均した歩行サーベイ結果の相関を分析した。航空機サーベイとの相関についても避難指示区域内外を区分しないケースの方が全体的に相関係数の向上が見られた。この相関分析結果を基に、加重平均した歩行サーベイ結果と航空機サーベイ結果が対数軸上で線形関係にあるとしたデータモデルを用いて航空機サーベイデータを補正し、式 (14) における z_A として用いた。表 8-2 に前項及び本項における相関パラメーター一覧を示す。

表 8-2 相関のパラメータ

($\log_{10}(\text{走行})=a \times \log_{10}(\text{歩行})+b$ で最小二乗フィットしたときの傾き、切片及び分散)

		走行サーベイ			航空機サーベイ		
		避難指示 区域内	避難指示 区域外	80 km 圏内 全域	避難指示 区域内	避難指示 区域外	80 km 圏内 全域
市 街 地	傾き a	1.07	0.88	0.89	0.75	0.48	0.89
	切片 b	-0.18	-0.25	-0.24	0.17	-0.37	-0.24
	分散	0.070	0.018	0.019	0.009	0.008	0.019
農 地	傾き a	1.05	0.87	0.89	0.82	0.91	0.89
	切片 b	-0.19	-0.26	-0.24	0.19	0.09	-0.24
	分散	0.041	0.019	0.021	0.016	0.011	0.021
森 林	傾き a	1.02	0.84	0.94	0.85	0.77	0.94
	切片 b	-0.08	-0.27	-0.16	0.28	-0.04	-0.16
	分散	0.028	0.021	0.023	0.017	0.017	0.023

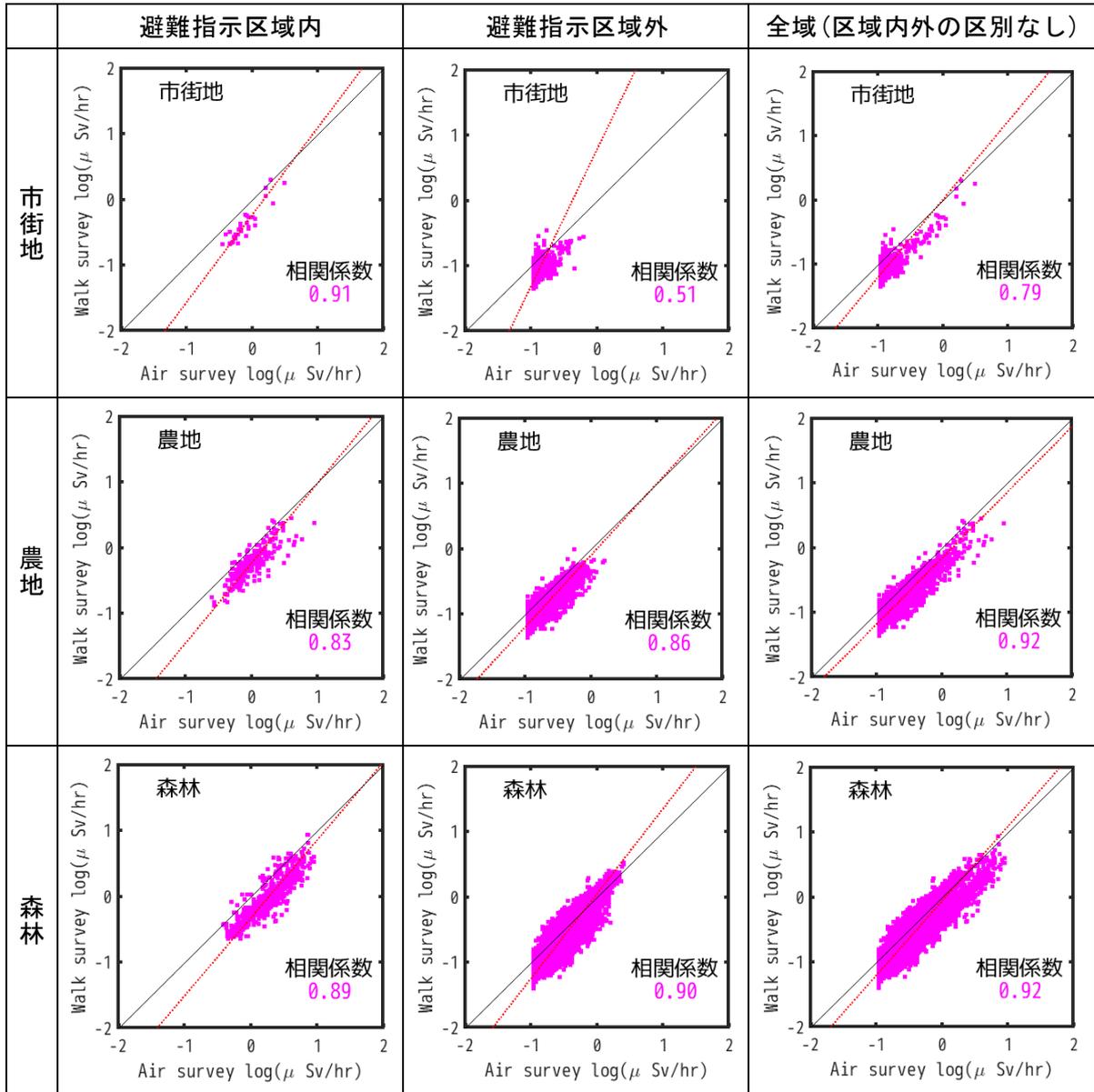


図 8-6 令和 4 年度に実施された避難指示区域内外及び全域（区域内外の区別なし）における航空機サーベイ（Air survey）と歩行サーベイ（Walk survey）による空間線量率の相関分析結果

（図中の破線は最小二乗法による回帰直線、実線は $y=x$ の直線。天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。）

8.3.5 統合結果

令和 4 年度に実施された歩行サーベイ、走行サーベイ及び航空機サーベイによる測定データを統合した 80 km 圏内の統合マップを図 8-7 に示す。避難指示区域内外それぞれに対して解析した結果により得られたモデルパラメータを用いて統合を行い、その結果を合成したものである。なお、相関パラメータについては避難指示区域内外を区別したときよりも相関係数が良好となる全域の値を採用した。図 8-1 に示した歩行、走行及び航空機サーベイ結果

と比較すると、空間線量率分布が航空機サーベイ結果よりも全体的に低くなっており、また歩行サーベイや走行サーベイ結果と同等の詳細かつ連続的な空間線量率分布が得られている。標準偏差分布については、歩行サーベイ、走行サーベイが実施されている地点で小さい値となっており、これらの測定によってマップの精度が高まっていることが分かる。避難指示区域内外において値のギャップが見られるが、これはバリオグラム解析における避難指示区域内外のシルの値の違いに依存している。シルは空間線量率分布のコントラストの大きさを反映していることから、避難指示区域内ではシルが大きい値となり（図 8-4）、標準偏差も大きい値となっている。なお、統合マップは空間線量率を対数で扱うことから、標準偏差は空間線量率分布の倍率を示すこととなる。図中の標準偏差は常用対数で表示しているため、0.1 は $10^{\pm 0.1}$ すなわち平均値から 0.79～1.26 倍の範囲を、0.2 は $10^{\pm 0.2}$ すなわち平均値から 0.63～1.58 倍の範囲を意味する。

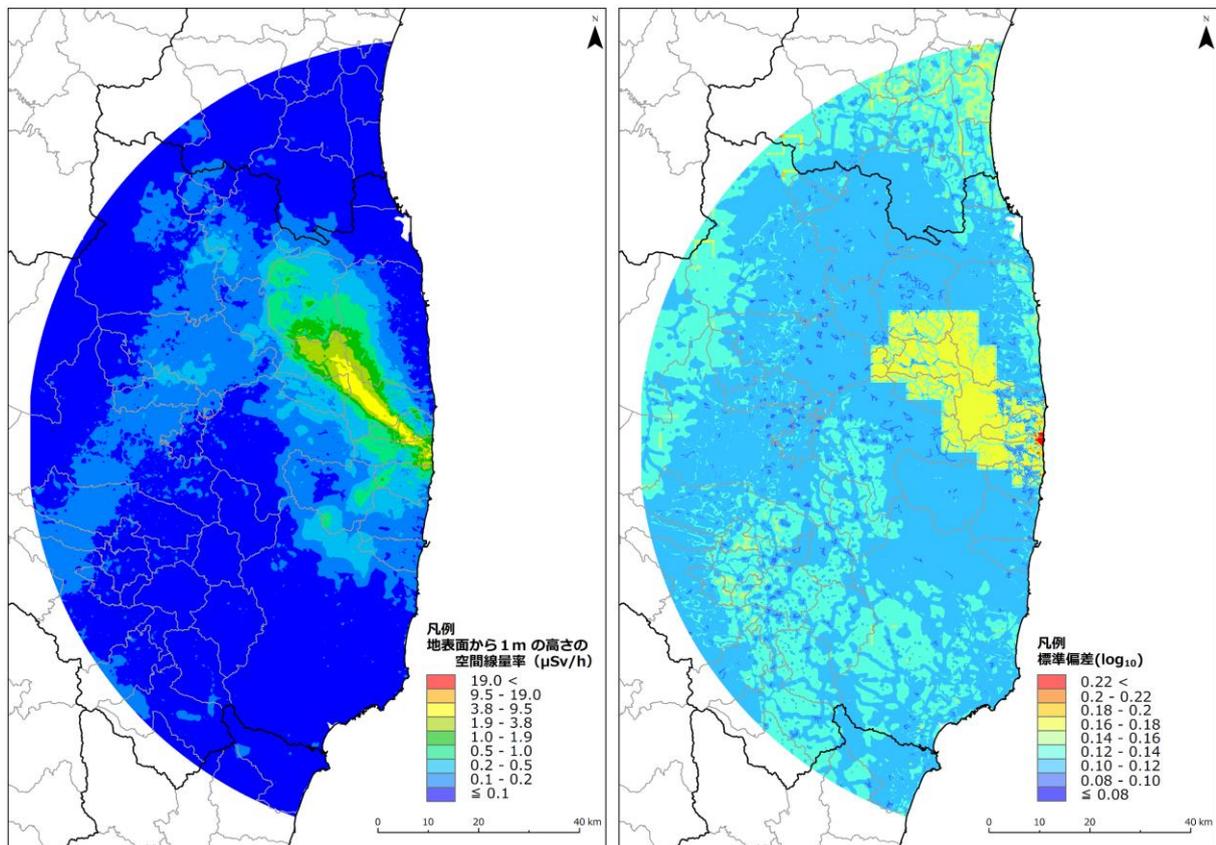


図 8-7 令和 4 年度に実施された各種測定結果を統合した 80 km 圏内の統合マップ（左）及びその標準偏差分布（右）

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

8.4 福島県全域を対象とした統合マップの作成

8.4.1 対象とした測定データ

福島県全域を対象として、令和4年度に測定された各種データを用い空間線量率の統合化を行った。使用したデータの種類及び測定年度は表8-1に示した80 km圏内と同一であり、データの処理方法も抽出範囲を福島県全域に広げた点を除いて同一である。空間線量率の統合に用いた各データを図8-8に示す。土地利用状況データには図8-2に示したものを使用した。福島県全域を対象とした統合マップ作成においては、80 km圏内を対象とした統合マップと同様、避難指示区域内外を分割して解析を実施した。

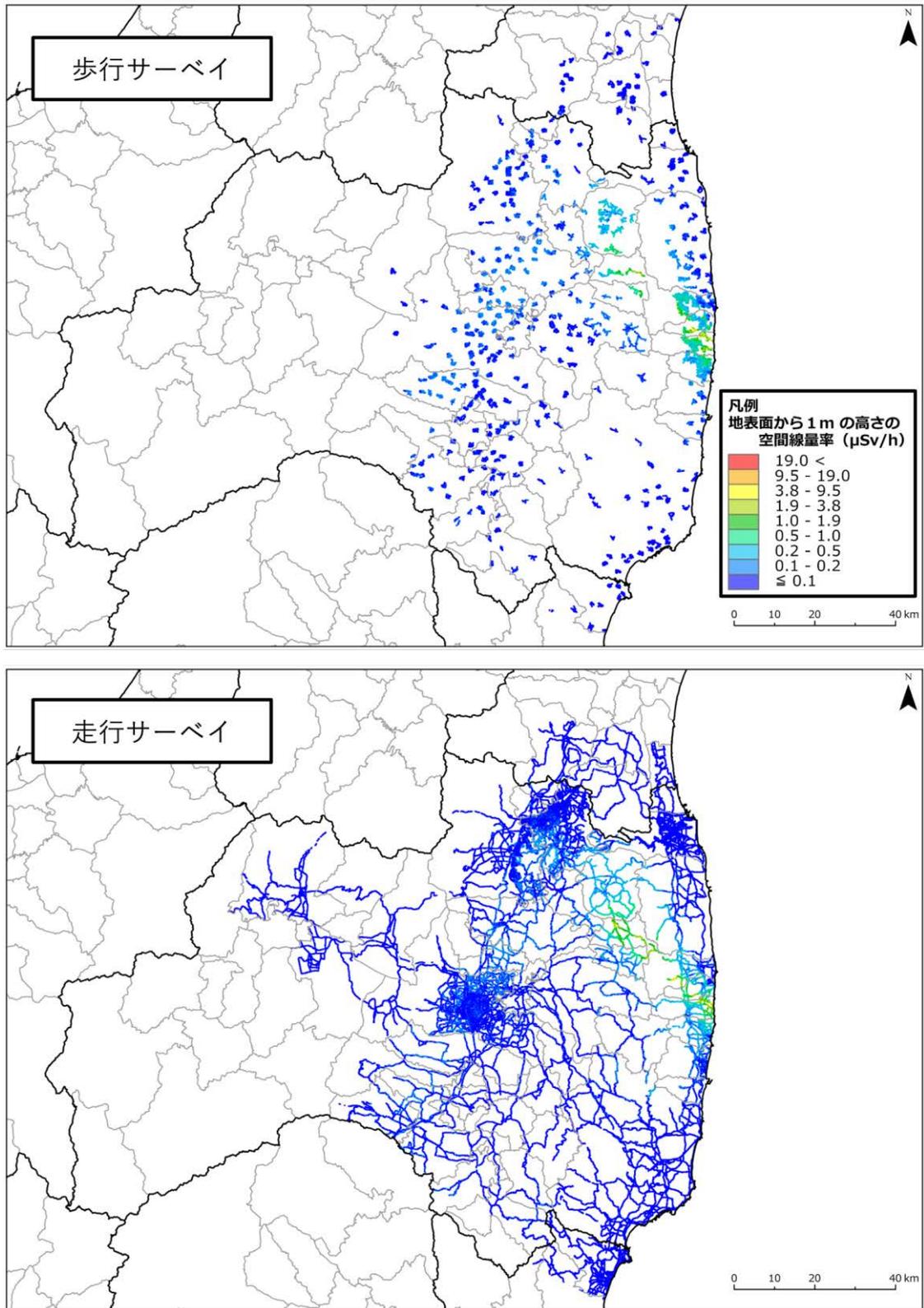


図 8-8 統合化を行う令和4年度の福島県全域における空間線量率測定結果 (1/2)
 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。背景地図：ESRI ジャパンデータコン
 テンツ, (c) Esri Japan.)

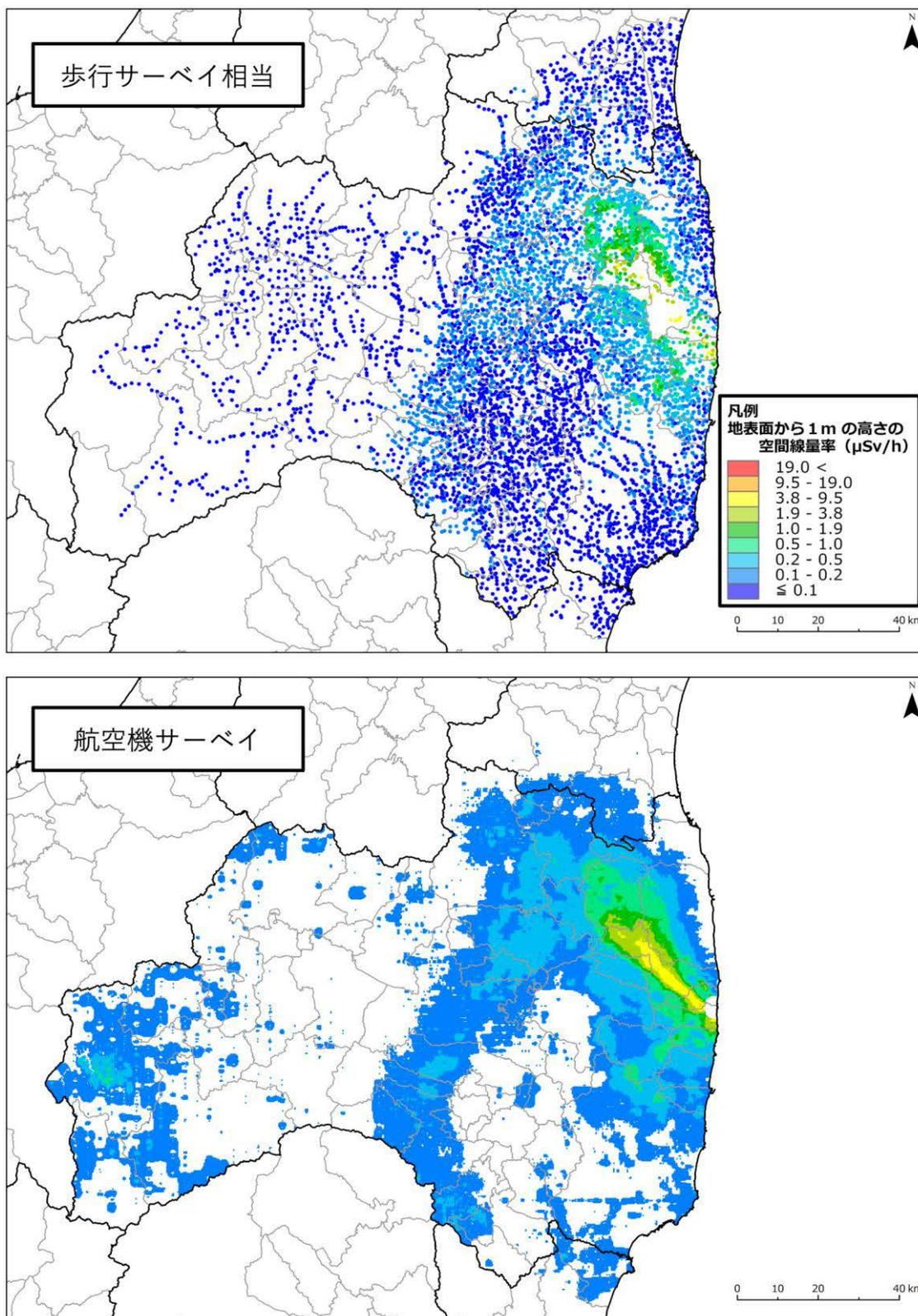


図 8-8 統合化を行う令和4年度の福島県全域における空間線量率測定結果 (2/2)
 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。背景地図：ESRI ジャパンデータコンテンツ, (c) Esri Japan。)

8.4.2 歩行サーベイを対象とした空間パターンの解析

歩行サーベイのデータを対象にバリオグラム解析を行った結果を図 8-9 に示す。これらの結果は、図 8-5 で示した 80 km 圏内の避難指示区域外の結果とほぼ同等であった。本分析において採用したシルやレンジ、ナゲットの値を用いてグラフの形状を指数関数で近似しプロセスモデルとして用いることで、空間線量率の事前分布 y を作成した。

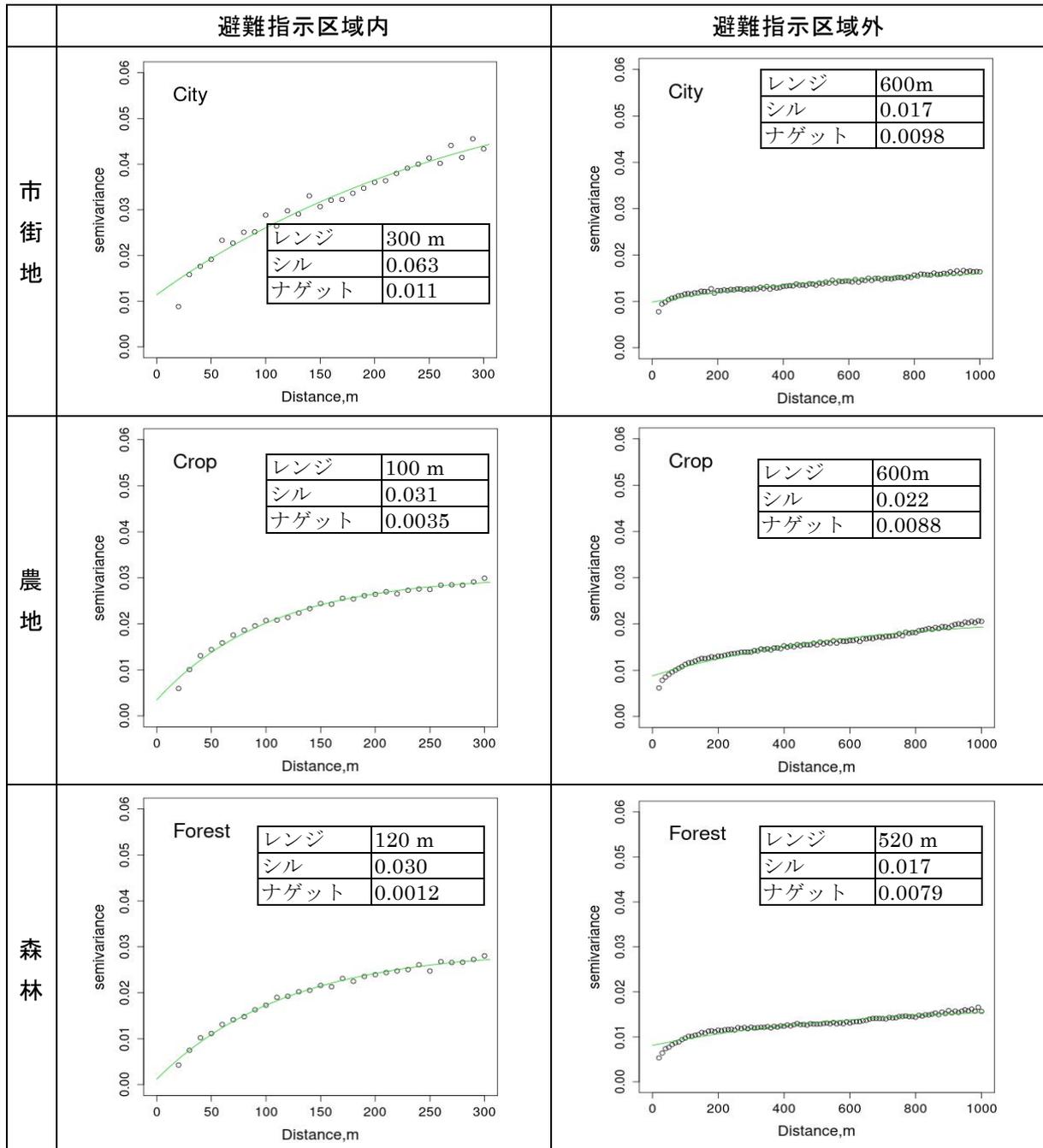


図 8-9 令和 4 年度に実施された福島県全域における歩行サーベイによる空間線量率のバリオグラム解析結果

8.4.3 走行サーバイデータと歩行サーバイデータの比較

歩行サーバイと走行サーバイのデータに対して土地利用別に相関分析を実施した。福島県全域を対象とした分析結果を図 8-10 に示す。これらの結果は、図 8-4 で示した 80 km 圏内の結果とほぼ同等であり、解析領域を広げることによる相関への影響は少ないことを示している。この相関分析結果をもとに、走行サーバイによる空間線量率と 100 m メッシュ内で平均化した歩行サーバイの空間線量率が対数軸上で線形関係にあるとしたデータモデルを用いて走行サーバイデータを補正し、式 (14) における z_A として用いた。

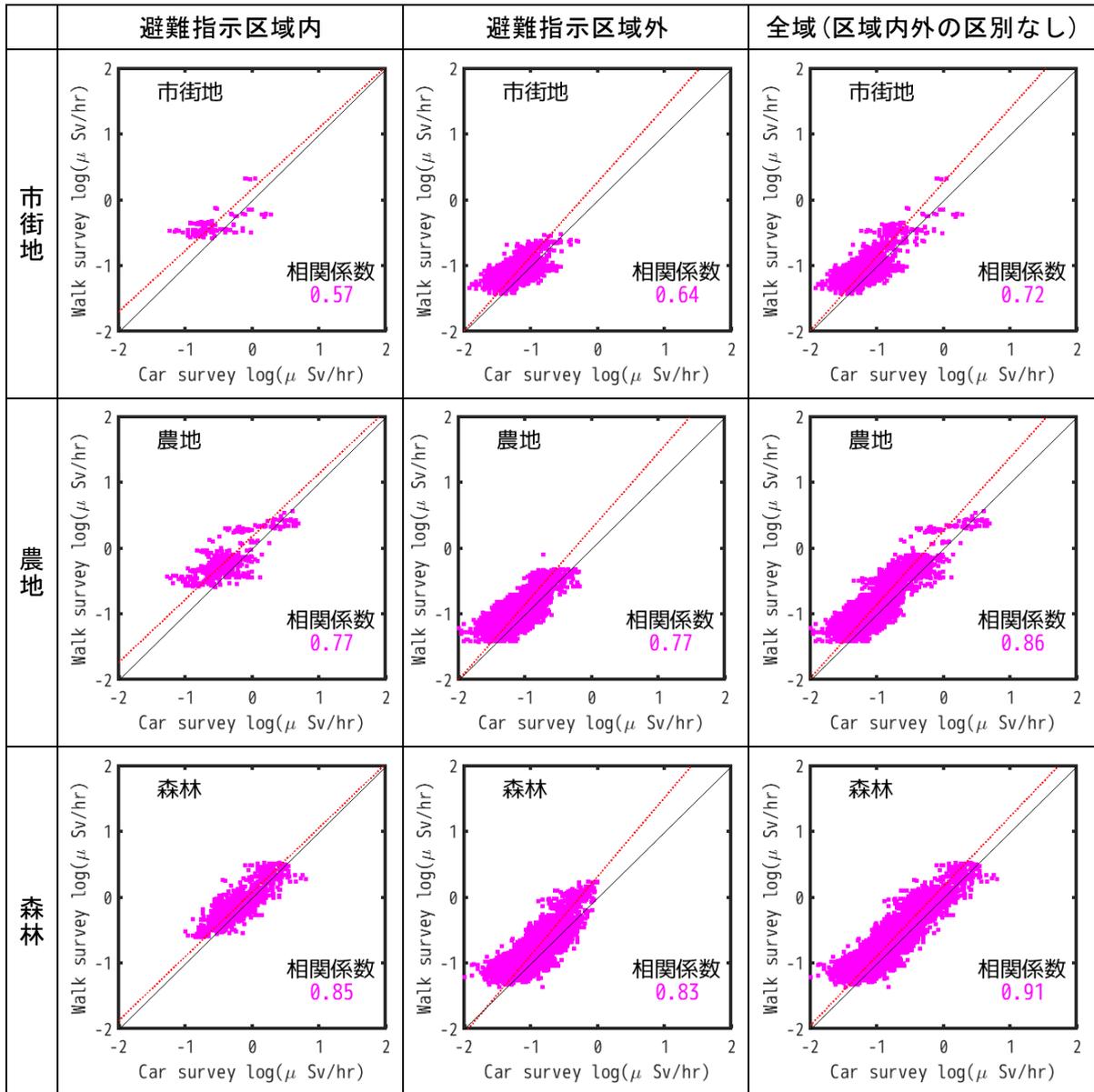


図 8-10 令和 4 年度に実施された走行サーバイ (Car survey) と歩行サーバイ (Walk survey) による空間線量率の相関分析結果 (福島県全域)

(図中の破線は最小二乗法による回帰直線、実線は $y=x$ の直線。天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

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

歩行サーベイと航空機サーベイのデータを土地利用別に比較した。福島県全域を対象とした分析結果を図 8-11 に示す。これらの結果は、やはり図 8-6 で示した 80 km 圏内の結果とほぼ同等であり、相関パラメータも表 8-2 で示したものと少数点以下第 2 位（分散については同第 3 位）まで同じであった。この相関分析結果をもとに、歩行サーベイ結果と加重平均した航空機サーベイ結果が対数軸上で線形関係にあるとしたデータモデルを用いて航空機サーベイデータを補正し、式 (14) における z_A として用いた。

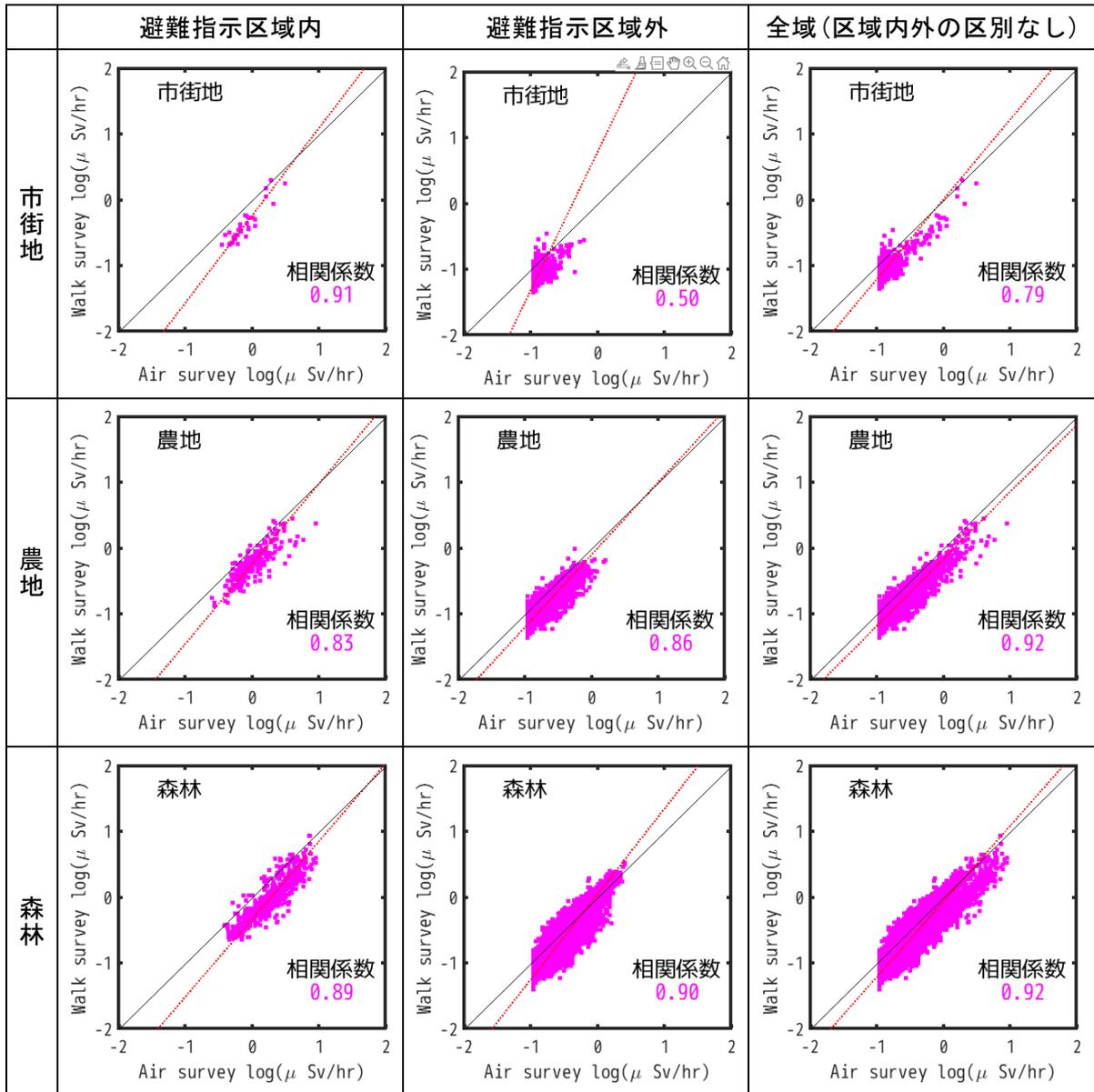


図 8-11 令和 4 年度に実施された航空機サーベイ (Air survey) と歩行サーベイ (Walk survey) による空間線量率の相関分析結果 (福島県全域)

(図中の破線は最小二乗法による回帰直線、実線は $y=x$ の直線。天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

8.4.5 統合結果

令和4年度に実施された歩行サーベイ、走行サーベイ及び航空機サーベイの結果を用いた、福島県全域の統合マップを図8-12に示す。80 km圏内の統合マップと同様に、避難指示区域内外を区別しない全域の相関パラメータを使用した。80 km圏内については、空間線量率、標準偏差とも80 km圏内を対象とした統合マップ(図8-7)と相違ない結果が得られている。80 km圏外においては、歩行サーベイ、走行サーベイ、航空機サーベイの各種データが80 km圏内に比べて少なく、80 km圏内の標準偏差分布に比べて全体的にわずかに標準偏差が高い傾向があるものの、歩行サーベイ相当データのある地点付近(図8-8)で小さい値となっており、歩行サーベイ相当データを中心に妥当な空間線量率分布が得られている。

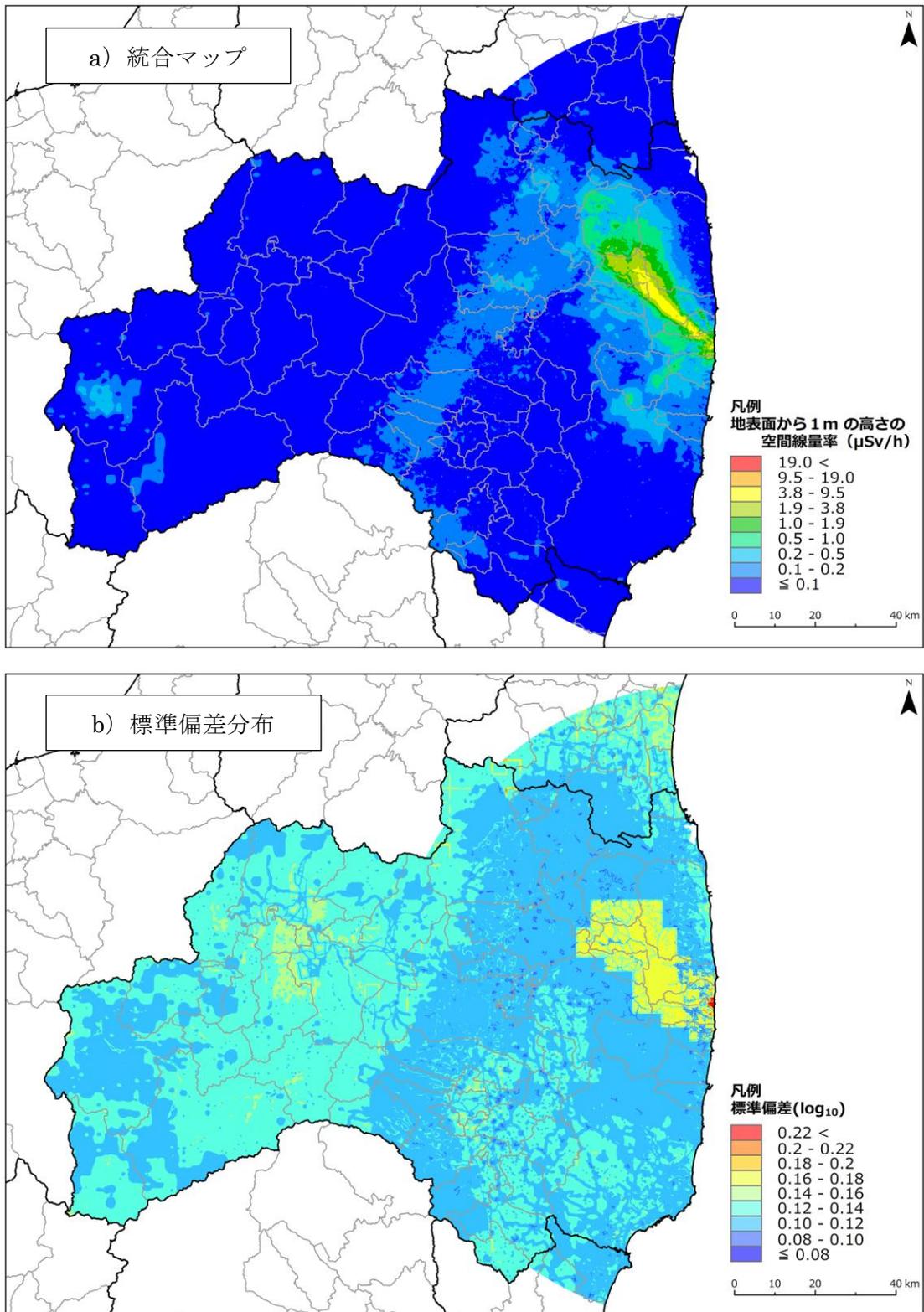


図 8-12 令和 4 年度に実施された各種空間線量率測定結果を統合した福島県全域及び 80 km 圏内の統合マップ（上）及びその標準偏差分布（下）

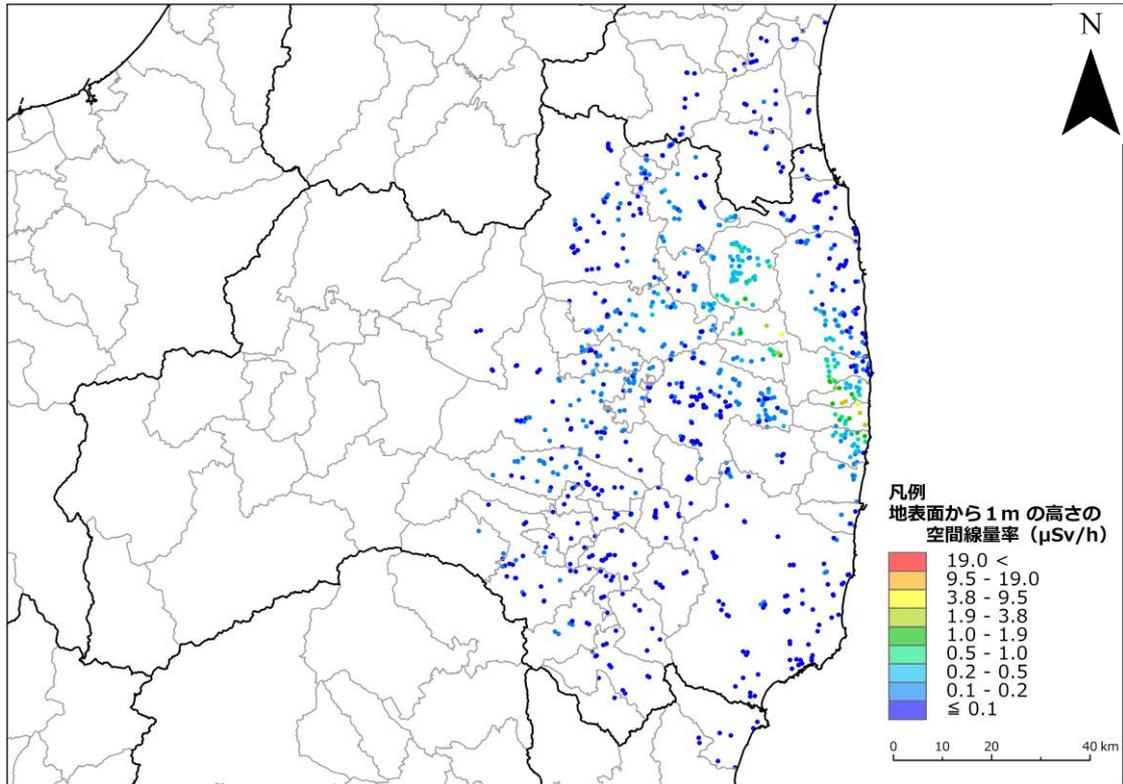
（天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。背景地図：ESRI ジャパンデータコンテンツ, (c) Esri Japan。）

8.5 統合マップの精度検証

統合マップでは標準偏差分布が得られるが、この標準偏差分布は使用するデータや相関分析手法に依存する。そのため、ここでは実態の精度を評価することを目的として、統合マップ作成時に歩行サーベイからの距離が近い等の理由で除外された歩行サーベイ相当データ（全データ数の10%程度）との比較を試みた。比較した歩行サーベイ相当データの場所について、図8-13に示す。このように除外された歩行サーベイ相当データは80 km圏内の全域に位置しており、不確かさ評価の対象データとして使用可能と考えられる。

比較には、令和4年度の福島県全域の統合マップと歩行サーベイ相当データの位置を重ね、同位置にあるデータを抽出し、歩行サーベイ相当データを横軸とした散布図及び相対偏差（（統合マップの空間線量率－歩行サーベイ相当データの空間線量率）／歩行サーベイ相当データの空間線量率）のヒストグラムとして比較した。比較結果を図8-14に示す。ヒストグラムの平均値を見ると-0.092となり、歩行サーベイ相当データと比較して統合マップは9%ほど低くなっている傾向にあることが分かった。統合マップの空間線量率が低い傾向を示すのは、歩行サーベイと定点サーベイなど歩行サーベイ相当データが近い場合に、歩行サーベイを優先して採用しており、歩行<定点という関係に影響を受けるためである。散布図を見ると両者の差の傾向に線量率の依存性は確認できない。また、ヒストグラムは正規分布に近い釣鐘型となっている。この結果から、統合マップは、利用しなかった歩行サーベイ相当データを再現しており、測定データのない箇所の空間線量率を良く推定していると言える。

令和4年度の統合マップを令和3年度の統合マップと比較するため、80 km圏内のマップのうち比較的变化のある20 km圏内を対象に上記の手法と同様に分析を行った。すなわち、両年度の統合マップにおいて同位置にあるデータを抽出し、令和3年度の空間線量率を横軸、令和4年度の空間線量率を縦軸とした散布図及び相対偏差（（令和4年度の空間線量率－令和3年度の空間線量率）／令和3年度の空間線量率）のヒストグラムとして比較した。結果を図8-15に示す。ヒストグラムの平均値を見ると、令和4年度の統合マップの空間線量率は令和3年度の統合マップに比べて6%程高い傾向にある。これは相関パラメータを避難指示区域内外で分けられないように変更したことによる影響がわずかに表れたものと考えられる。



背景地図：ESRI ジャパンデータコンテンツ, (c)EsriJapan

図 8-13 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

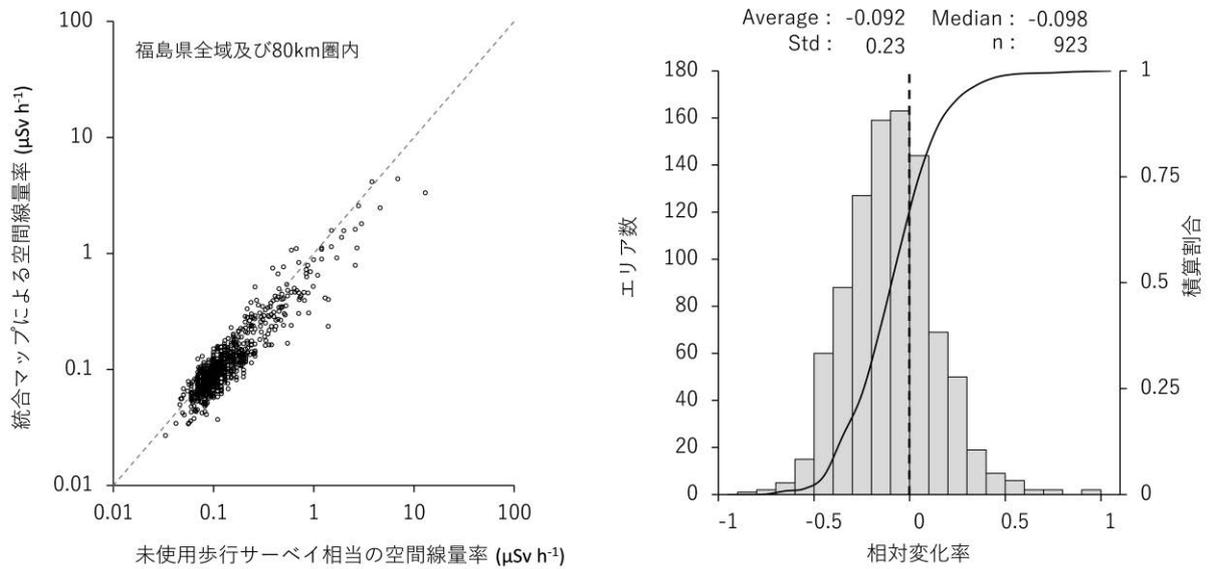


図 8-14 統合マップ作成時に除外された歩行サーベイ相当データの結果との比較
 (相関図の破線は $y=x$ 、Std は標準偏差、n はデータ数を意味する。)

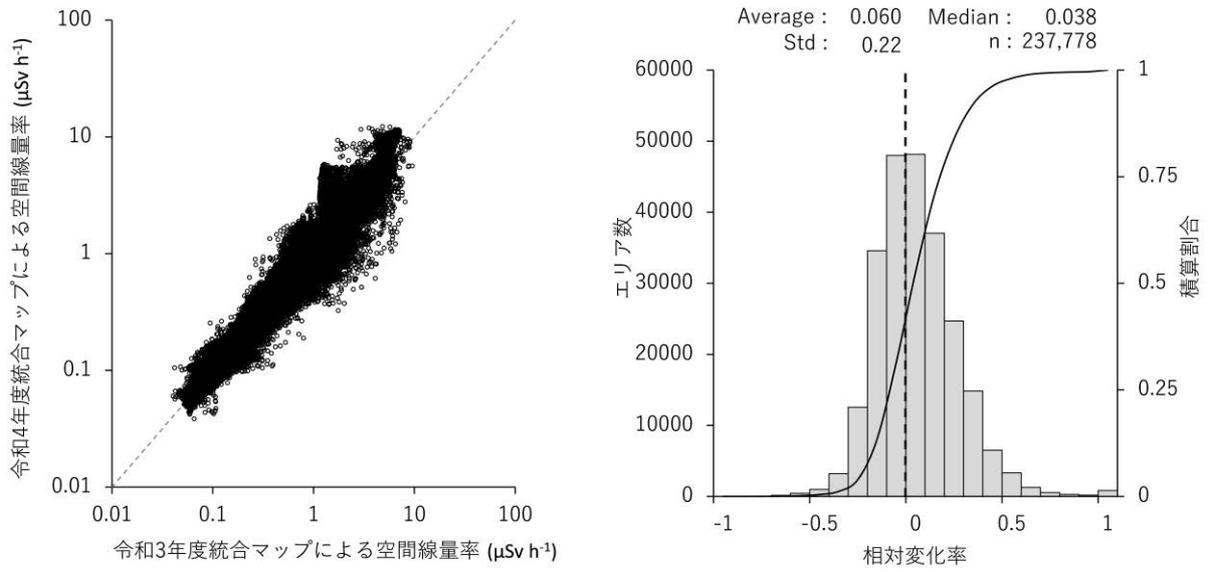


図 8-15 令和 3 年度統合マップとの比較
 (相関図の破線は $y=x$ 、Std は標準偏差、n はデータ数を意味する。)

9. 空間線量率等分布マップの作成と公開

9.1 目的

分布状況調査等で取得したデータ（サーベイメータによる定点サーベイ、走行サーベイ、無人ヘリコプターサーベイ、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土壌沈着量及び航空機モニタリング）を、地方自治体や住民に広く公開し各種対策の基礎資料として提供するため、空間線量率等データの閲覧用 Web サイト「放射性物質モニタリングデータの情報公開サイト」⁵⁹⁾（Environmental Monitoring Database、以下「EMDB」という。）の運用作業を行った。

9.2 EMDB での空間線量率等分布マップの作成と公開

EMDB は、事故後の空間線量率や放射性物質等のモニタリングデータを登録・公開している Web サイトであり、平成 27 年より原子力機構の事業として運用していた。令和 2 年度に利用性を向上させ閲覧者の目的に沿ったデータを表示できるよう次期版開発の検討を行い、令和 3 年度の試験公開を経て、令和 4 年度より分布状況調査での運用を開始した。

EMDB では、登録された測定データを国土地理院等の地図上のメッシュに表示することが可能である。すでに公開中の平成 23 年度～令和 3 年度調査のデータを登録するとともに、令和 4 年度に実施した調査による空間線量率測定データ・放射性セシウム沈着量測定データ等を加えた。これにより、空間線量率等の最新情報や経年変化を同一マップシステム上で閲覧可能とした。また、年次データをダウンロードして利用することも可能である。

EMDB でのモニタリングデータの登録・公開は、以下のような手順で行った。まず、関係者のみが閲覧できる制限付きデータベースに登録し、関係者の確認を経てから、一般公開用のデータベースに登録し公開した。データベースの更新は登録データの準備が出来次第実施し、令和 4 年度はおよそ月に一度の頻度であった（2022 年 4/8、28、5/31、6/24、9/2、10/14、11/24、12/23、2023 年 2/1 及び 3/28）。

令和 4 年度に分布状況調査等で取得したデータを基に EMDB に追加掲載した空間線量率等の内容は以下のとおりである。

- 走行サーベイ（第 24 回及び第 25 回）
- 歩行サーベイ（第 14 回）
- 定点サーベイ（第 16 回）
- 無人ヘリサーベイ（第 14 回）
- 放射性セシウム土壌沈着量（in-situ 測定）（第 15 回）
- 深度分布（スクレーパープレート）（第 15 回）
- 航空機サーベイ（第 17 回）
- 帰還困難区域の詳細モニタリング（2016 年～2021 年）
- 福島県の国有林野内における環境放射線モニタリング（2021 年）
- ALPS 処理水に係る海域環境モニタリングの強化（2022 年）
- 水産物の放射性物質調査（2022 年）

東京電力による魚介類の分析結果（2012年～2022年）

EMDBにて公開しているデータの一例として、第23回走行サーベイ（令和3年度）測定データを表示させた画面を図9-1に示す。

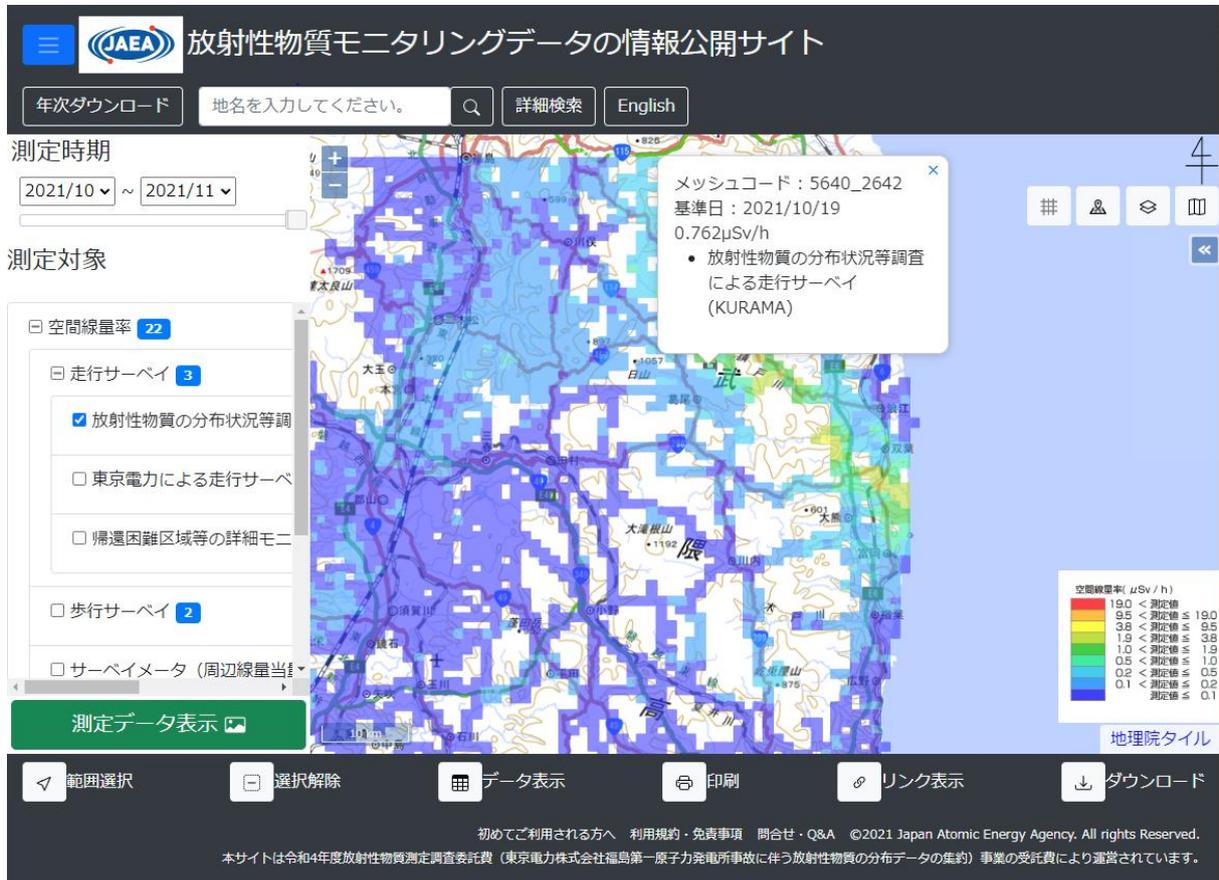


図 9-1 EMDB における測定データ（第 23 回走行サーベイ）表示例
（データは当該期間の初日に補正して登録している。）

9.3 EMDB の運用管理

EMDB を安定して運用するため、登録データの遺失防止のためのバックアップ作業や分布マップシステムへのアクセス管理を実施した。令和 4 年 4 月 1 日～令和 5 年 1 月 31 日現在までの 306 日間において、システムサーバ等に障害は生じなかった。サイト運営管理において、日々のアクセス数の動向を記録し、訪問者及びページ^dの管理を行った（図 9-2）。

^d 訪問者は、日々にアクセスされた IP アドレスを集計したものであり、同一アドレスについては重複して数えず 1 件としてカウントする。ページは、サイトを閲覧した全アクセスをカウントする集計値。同一 IP アドレスも重複してカウントする。

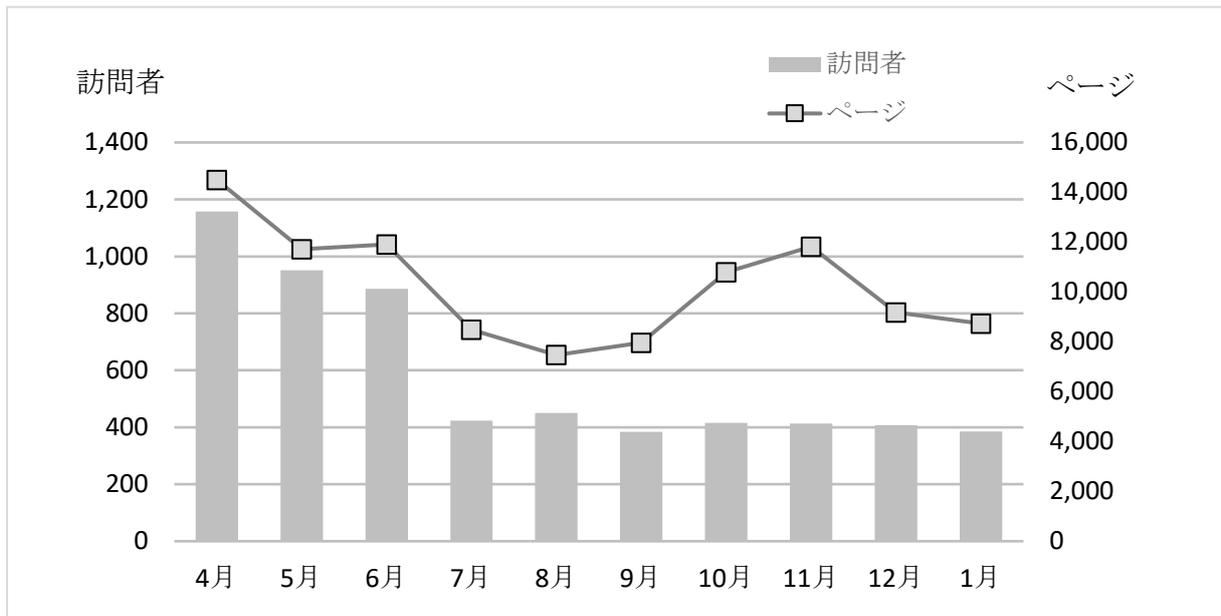


図 9-2 EMDB への令和 4 年度アクセス状況

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

10.1 測定方法及び測定結果

総合モニタリング計画（平成 23 年 8 月 2 日モニタリング調整会議制定、平成 26 年 4 月 1 日改訂）に基づき、福島第一原子力発電所の 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、土壌並びに指標植物（松葉）中放射性物質濃度を測定ないし分析した。各項目の測定地点数及び測定頻度を表 10-1 に、各項目の測定（採取）地点を図 10-1 にそれぞれ示した。測定及び分析は原子力規制庁福島第一原子力規制事務所の担当者と連携して実施した。また、測定場所の手配や試料採取に関しては各自自治体職員と調整を図りながら実施した。測定結果については逐次、原子力規制庁及び原子力規制庁福島第一原子力規制事務所の担当者に遅滞なく報告した。

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

測定項目	測定地点数	測定（採取）頻度
空間線量率の測定	134	1 回／年
積算線量の測定	14	1 回／3 ヶ月
大気浮遊じん中放射性物質濃度	4	1 回／月
土壌中放射性物質濃度	5	1 回／年
指標植物（松葉）中放射性物質濃度	14	1 回／年

10.1.1 空間線量率

空間線量率は 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。測定結果を図 10-2 に示す。

10.1.2 積算線量

積算線量は、ガラス式積算線量計を設置することにより測定した。3 ヶ月間設置し、その後回収することにより 3 ヶ月間の積算線量を測定した。それを繰り返すことにより、四半期ごとの積算線量を測定した。測定結果の経時変化を図 10-3 に示す。図には検出下限値以上のデータについてプロットした。積算線量計の設置期間が 1 ヶ月から 3 ヶ月に変わる時期に測定地点番号 76 や 38 等の測定結果が不連続になっているが、その主な原因として、暴露時間の延長に伴う検出下限値の低下が考えられる。また、そのほかに測定場所の除染や場所の移設が行われた場合も不連続となっている（測定地点番号 79、31 及び 1）。

10.1.3 大気浮遊じん中放射性物質濃度

大気浮遊じん中放射性物質濃度は、ハイボリュームダストサンプラーを用いて大気浮遊じんをダストろ紙上に採取することにより測定した。大気浮遊じんは 800 L/min で 2 日間採取

した。ダストろ紙をゲルマニウム半導体検出器により測定することにより、セシウム 134 及びセシウム 137 を定量した。この作業を毎月繰り返すことにより、毎月の大気浮遊じん中放射性物質濃度を測定した。測定結果の経時変化を図 10-4 に示す。図には検出下限値以上のデータについてプロットした。

10.1.4 環境試料（土壌及び松葉）中放射性物質濃度

土壌及び指標植物（松葉）の試料を採取しゲルマニウム半導体検出器によりセシウム 134 及びセシウム 137 濃度を測定した。土壌試料は、放射能測定法シリーズ No.35 緊急時における環境試料採取法⁶⁰⁾に基づき U8 容器で直接表層から 5 cm 程度のサンプルを採取した。土壌中セシウム 137 濃度の経時変化及び松葉中セシウム 137 濃度の経時変化を図 10-5 及び図 10-6 に示す。

10.2 測定結果の公開

本測定結果は以下の原子力規制庁の Web サイト上に公開されている。

- ・空間線量率

<https://radioactivity.nra.go.jp/ja/list/207/list-1.html>（参照：2023 年 3 月 3 日）。

- ・積算線量

<https://radioactivity.nra.go.jp/ja/list/216/list-1.html>（参照：2023 年 3 月 3 日）。

- ・大気浮遊じん中放射性物質濃度

<https://radioactivity.nra.go.jp/ja/list/222/list-1.html>（参照：2023 年 3 月 3 日）。

- ・土壌及び松葉中放射性物質濃度

<https://radioactivity.nra.go.jp/ja/list/482/list-1.html>（参照：2023 年 3 月 3 日）。

<https://radioactivity.nra.go.jp/ja/list/483/list-1.html>（参照：2023 年 3 月 3 日）。

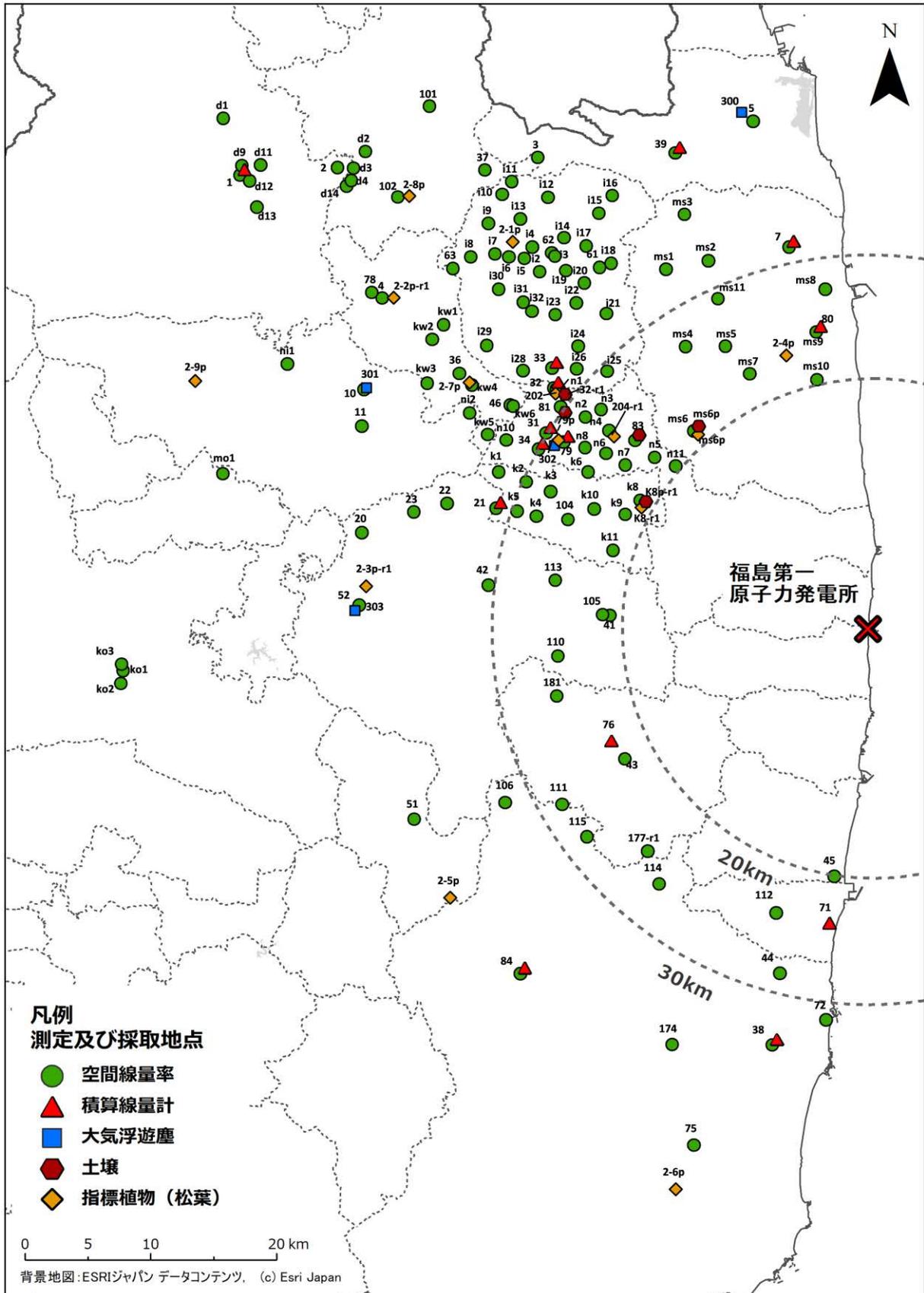


図 10-1 総合モニタリング計画に基づき実施した空間線量率、積算線量、大気浮遊じん中放射物質濃度、土壌並びに指標植物（松葉）中放射物質濃度の測定（採取）地点

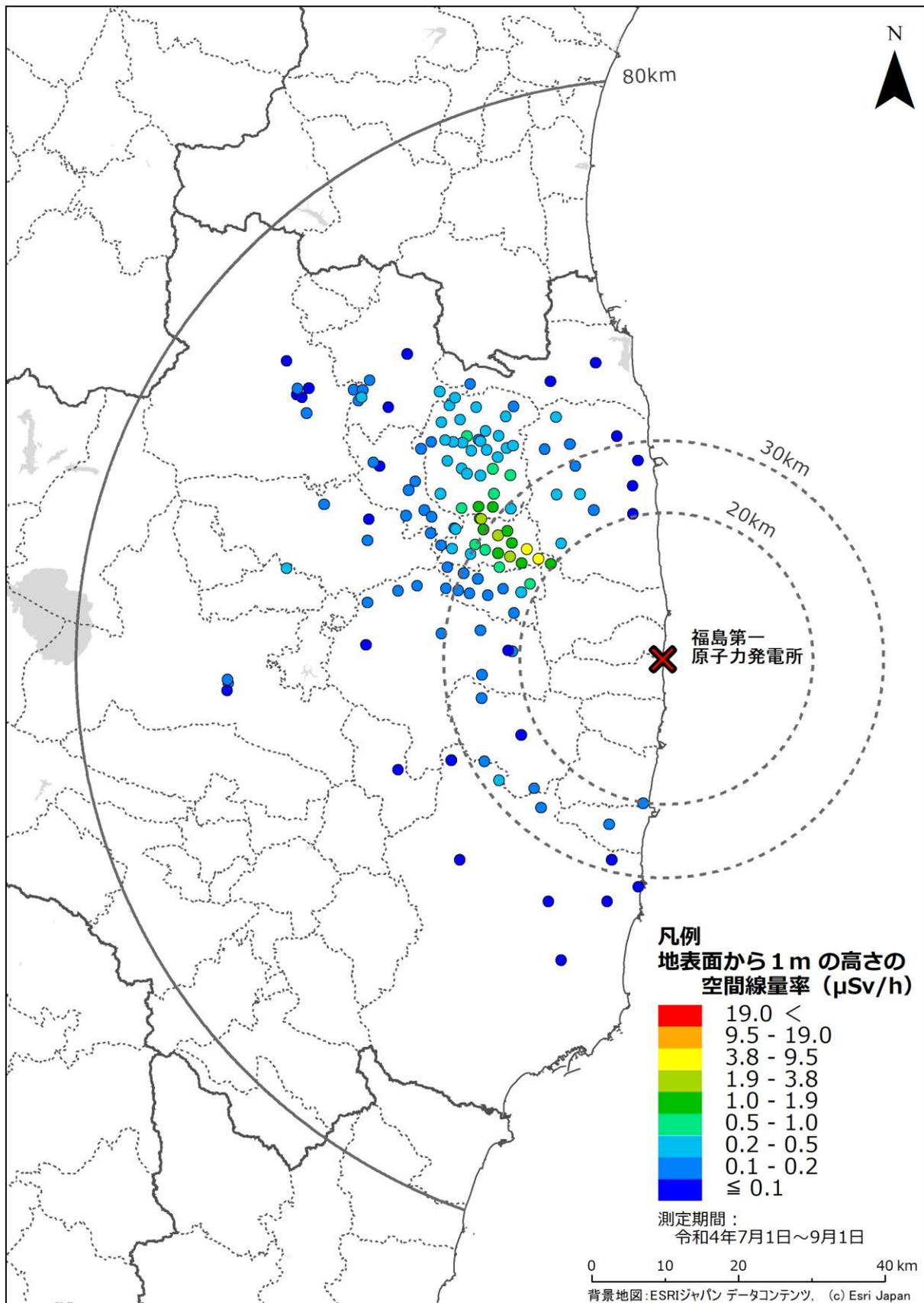


図 10-2 総合モニタリング計画に基づく空間線量率の測定結果

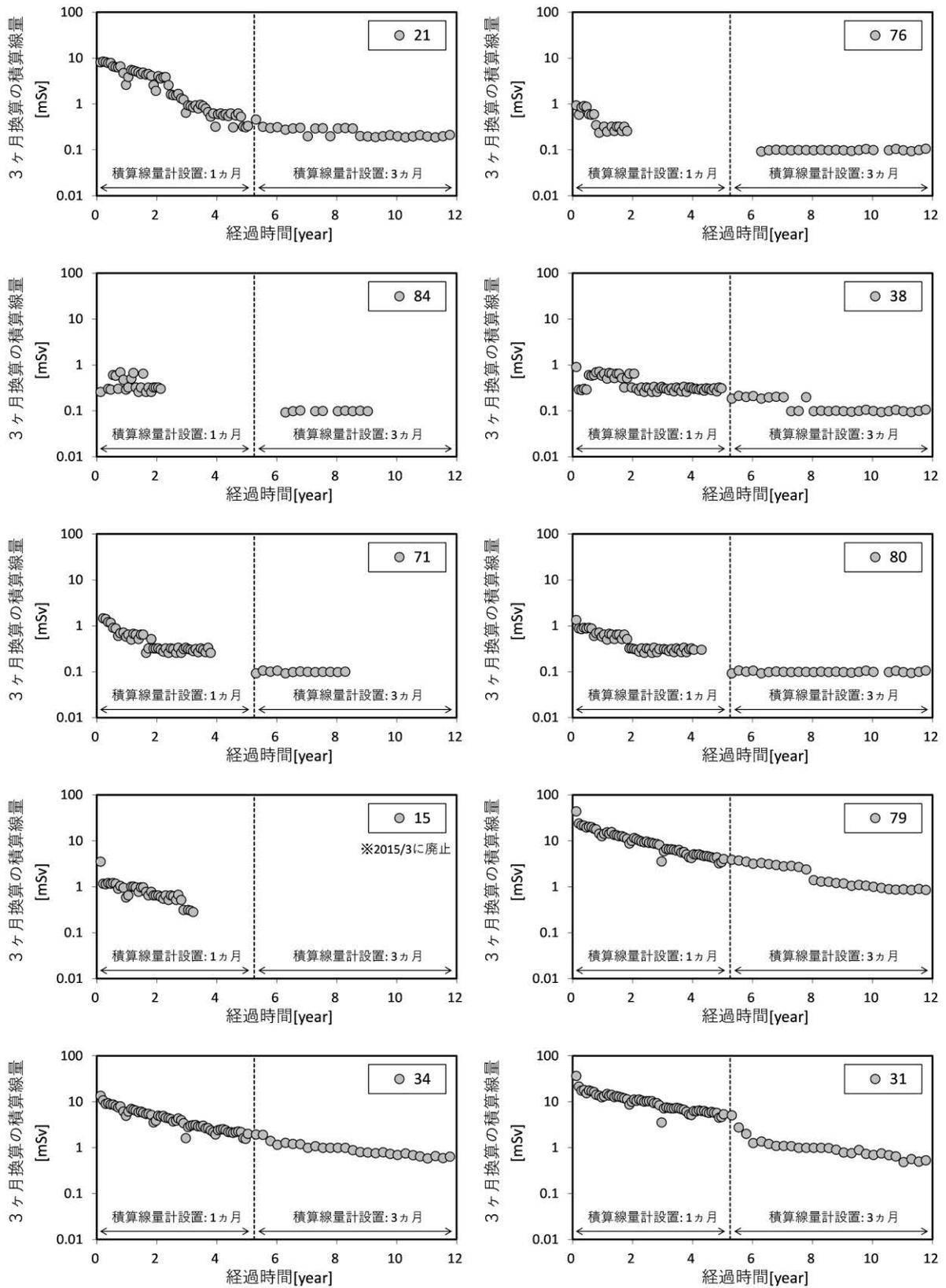


図 10-3 総合モニタリング計画に基づく積算線量の経時変化 (1/2)

(凡例の数字は測定地点番号 (図 10-1 参照)、横軸は 2011 年 3 月 15 日からの経過年数。)

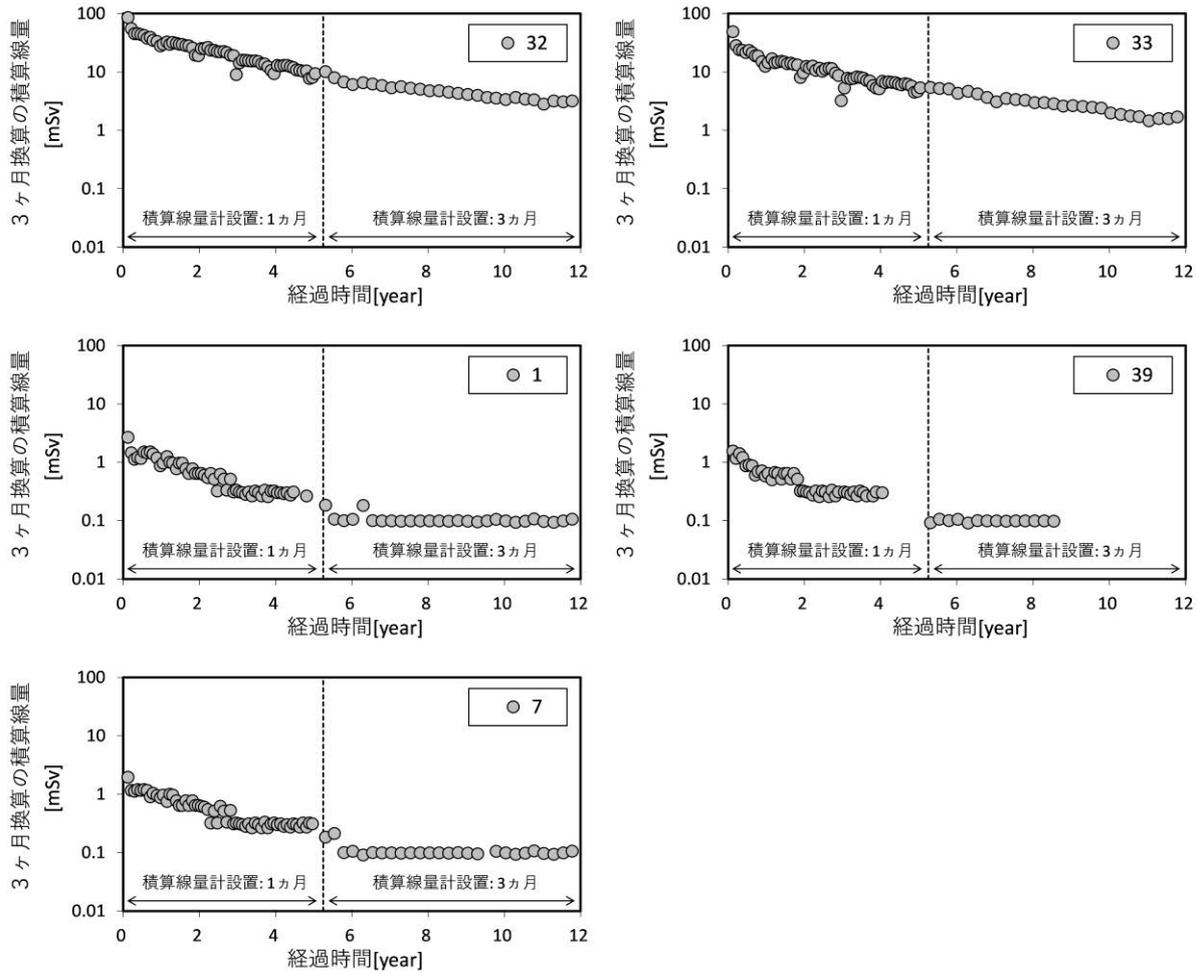


図 10-3 総合モニタリング計画に基づく積算線量の経時変化 (2/2)

(凡例の数字は測定地点番号 (図 10-1 参照)、横軸は 2011 年 3 月 15 日からの経過年数。)

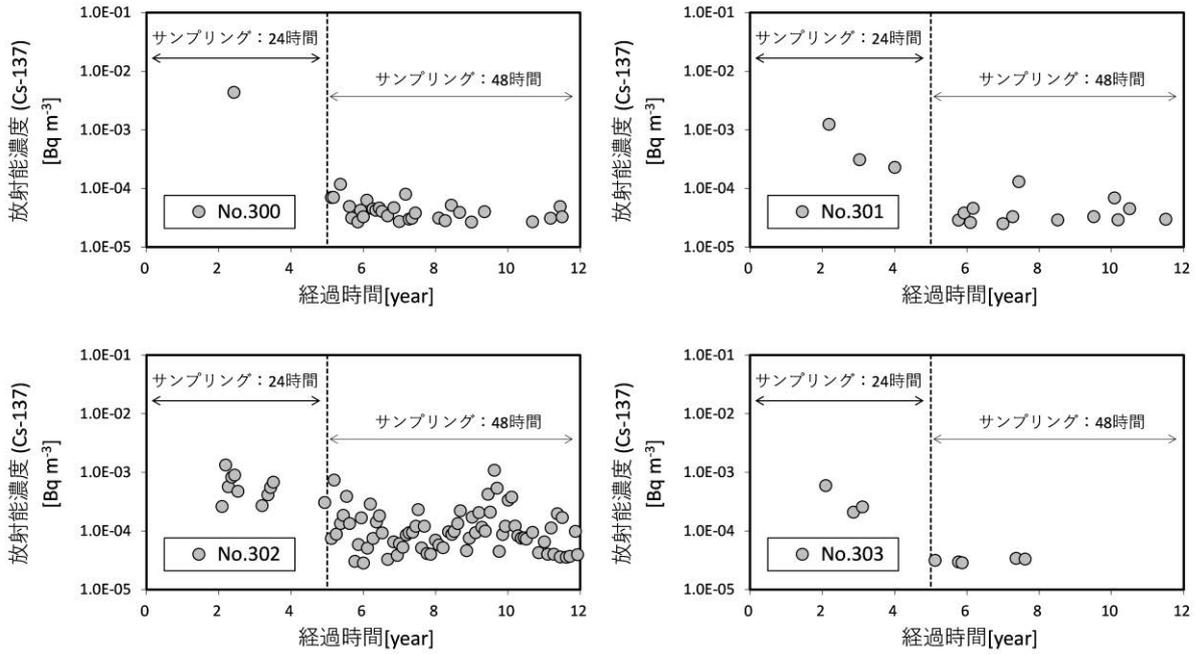


図 10-4 総合モニタリング計画に基づく大気浮遊じん中セシウム 137 濃度の経時変化 (凡例の数字は測定地点番号 (図 10-1 参照)、横軸は 2011 年 3 月 15 日からの経過年数。)

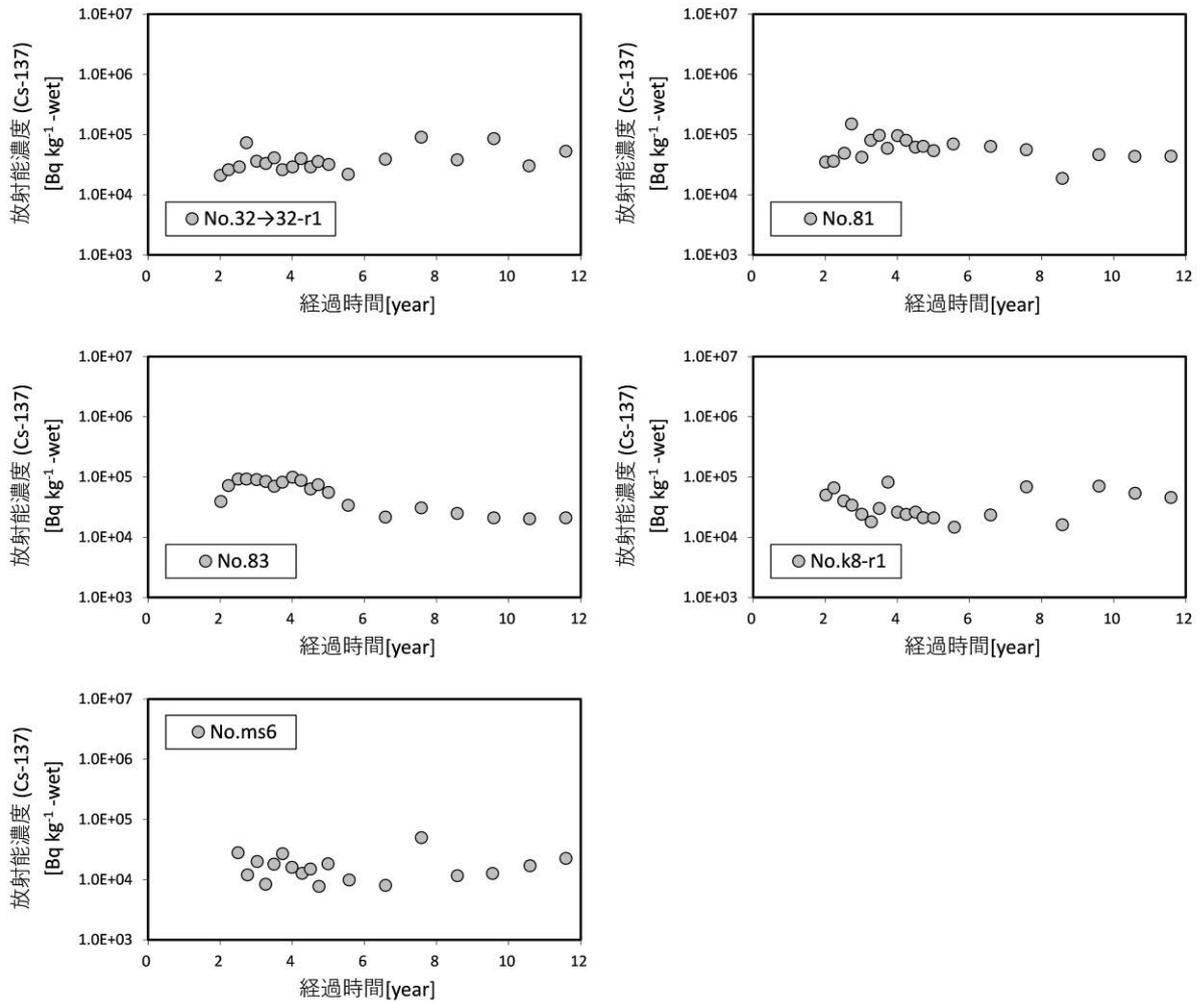


図 10-5 総合モニタリング計画に基づく土壤中セシウム 137 濃度の経時変化
(凡例の数字は測定地点番号 (図 10-1 参照)、横軸は 2011 年 3 月 15 日からの経過年数。)

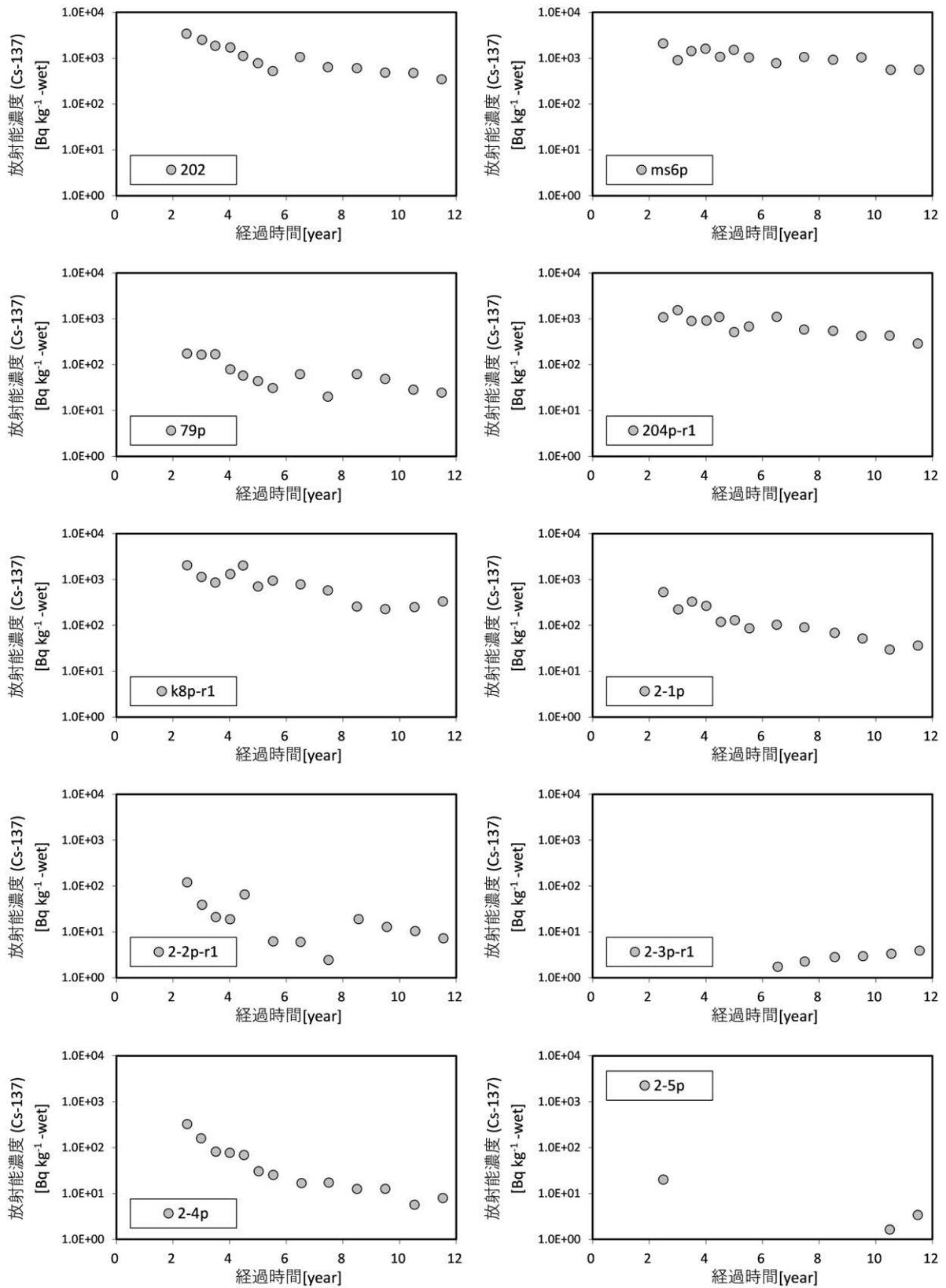


図 10-6 総合モニタリング計画に基づく松葉中セシウム 137 濃度の経時変化 (1/2)
 (凡例の数字は測定地点番号 (図 10-1 参照)、横軸は 2011 年 3 月 15 日からの経過年数。)

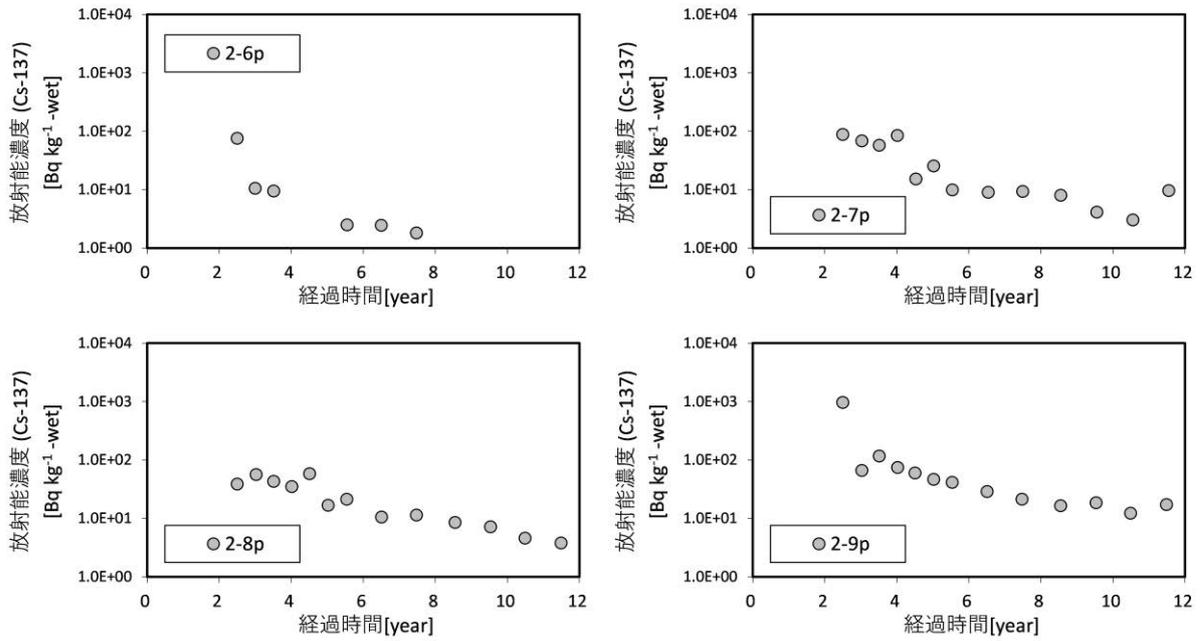


図 10-6 総合モニタリング計画に基づく松葉中セシウム 137 濃度の経時変化 (2/2)
 (凡例の数字は測定地点番号 (図 10-1 参照)、横軸は 2011 年 3 月 15 日からの経過年数。)

11. 測定データの CSV 化

11.1 CSV 等の形式で保存した測定データ

(1) 分布状況調査で取得した測定データ

分布状況調査で実施した環境モニタリングについて、今後の調査等に活用するため、測定データを CSV（場合によっては Excel[®]、KMZ）の形式で保存した。測定データは、測定実施者が解析を行い、原子力規制庁に報告された後のデータから抽出している。対象となった測定データは全 6 項目であり、各項目におけるレコード数を表 11-1 にまとめる。

(2) 原子力規制庁が保有する測定データ

原子力規制庁が実施し、Web サイト上で公開している環境モニタリングの測定データ⁶¹⁾の一部について、今後の調査等に活用するため、データを CSV 等の形式で保存した。保存した測定データは、令和 4 年 2 月から令和 5 年 1 月までに原子力規制庁が公開した資料（PDF）から抽出している。対象となった測定データは全 21 項目であり、各項目におけるレコード数を表 11-2（#1 から#21 まで）にまとめる。

(3) 環境省が保有する測定データ

環境省が実施し、Web サイト上で公開している環境モニタリングの測定データ⁶²⁾の一部について、今後の調査等に活用するため、データを CSV 等の形式で保存した。保存した測定データは、令和 4 年 2 月から令和 5 年 1 月までに環境省が公開した資料（PDF、Excel[®]）から抽出している。対象となった測定データは全 3 項目であり、各項目におけるレコード数を表 11-2（#22 から#24 まで）にまとめる。

(4) 地方自治体が保有する測定データ

地方自治体が実施した環境モニタリングの測定データの一部について、今後の調査等に活用するため、データベースに登録するための統一フォーマットに変換し、Excel[®]等の形式で保存した。環境モニタリングの測定データをデータベースに保存した自治体を表 11-3 にまとめる。

11.2 保存した測定データの公開

CSV 等の形式で保存した測定データの一部は、以下の原子力規制庁の Web サイトにて公開される。

- ・分布状況調査で取得した測定データ：<https://radioactivity.nra.go.jp/ja/list/338/list-1.html>
（参照：2023 年 3 月 3 日）。
- ・原子力規制庁が保有する測定データ：<https://radioactivity.nra.go.jp/ja/list/512/list-1.html>
（参照：2023 年 3 月 3 日）。

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

データ項目	レコード数
広域の空間線量率（走行サーベイ）	第 24 回： 354,382 第 25 回： 1,319,834
広域の空間線量率（定点サーベイ）	5,026
広域の空間線量率（歩行サーベイ）	1,147,753
発電所周辺の空間線量率（無人ヘリサーベイ）	空間線量率： 2,807,358 セシウム沈着量： 2,807,358
土壌中の放射性セシウムの深度分布	85
放射性セシウムの沈着量	383

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

#	データ項目	レコード数		
		作業開始時点	作業終了時点	新規測定データ
1	福島第一原子力発電所近傍の海水のモニタリング	14,525	16,298	1,773
2	福島県・宮城県・茨城県周辺の海水のモニタリング	22,581	24,340	1,759
3	福島県周辺の海水のモニタリング	2,039	2,219	180
4	宮城県・福島県・茨城県・千葉県沖における海域モニタリング結果	3,794	4,248	454
5	宮城県・福島県・茨城県・千葉県外洋における海域モニタリング結果	852	952	100
6	東京湾における海域モニタリング結果	179	198	19
7	東京電力による海底土のモニタリング結果	4,889	5,315	426
8	宮城県・福島県・茨城県・千葉県沖における海域モニタリング結果 (海底土)	1,771	1,946	175
9	東京湾における海域モニタリング結果 (海底土)	690	767	77
10	東京電力株式会社福島第一原子力発電所の20km圏内の測定結果 (空間線量率)	12,995	13,045	50
11	東京電力株式会社福島第一原子力発電所の20km圏内の測定結果 (空間線量率)	35,403	35,671	268
12	緊急時環境放射線等モニタリング実施結果 (福島県による測定)	10,833	10,833	0
13	簡易型線量計を用いた固定測定点における積算線量の測定結果	1,131	1,201	70
14	東京電力株式会社福島第一原子力発電所の20km圏内の積算線量の測定結果	3,553	3,589	36
15	東京電力株式会社福島第一原子力発電所の20km圏内の空気中放射性物質濃度の測定結果	1,028	1,100	72
16	原子力規制庁及び福島県による大気浮遊じんによる測定結果	4,255	4,315	60
17	東京電力株式会社福島第一原子力発電所の20km圏内の土壌中放射性物質濃度の測定結果	112	117	5
18	原子力規制庁及び福島県による土壌試料の測定結果	1,884	1,889	5
19	原子力規制庁及び福島県による環境試料の測定結果	3,462	3,476	14
20	上水 (蛇口水) (環境放射線水準調査)	13,807	13,901	94
21	定時降下物のモニタリング (環境放射線水準調査)	19,076	19,638	562
22	環境省による公共用水域放射性物質モニタリング調査結果 (水質)	37,128	41,404	4,276
23	環境省による公共用水域放射性物質モニタリング調査結果 (底質)	28,441	31,657	3,216
24	環境省による公共用水域放射性物質モニタリング調査結果 (周辺環境)	25,129	28,007	2,878

表 11-3 測定データをデータベースに保存した自治体リスト

広域圏	市町村*
浜通り	いわき市 、 相馬市 、南相馬市、檜葉町、富岡町、 大熊町 、 双葉町 、 新地町 、飯館村
中通り	福島市 、 郡山市 、 白河市 、 須賀川市 、二本松市、 伊達市 、 桑折町 、国見町、 川俣町 、 大玉村 、 鏡石町 、天栄村、 西郷村 、中島村、矢吹町、 棚倉町 、塙町、石川町、玉川村、平田村、浅川町、 三春町 、小野町
会津	会津若松市 、 喜多方市 、只見町、南会津町、北塩原市、西会津町、磐梯町、猪苗代町、会津坂下町、湯川村、金山町、昭和村

*これまでに保存した市町村を全て記載している。**太字**は令和4年度に更新があった自治体。

12. まとめ

本報告書では、「令和 4 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」で得られた結果について報告した。

空間線量率に関しては走行サーベイ（80 km 圏内及び広域について 1 回ずつ）、定点サーベイ（80 km 圏内で 1 回）、歩行サーベイ（80 km 圏内で 1 回）、無人ヘリサーベイ（福島第一原発周辺で 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。令和 3 年度との比較の結果、いずれの測定も放射性セシウムの物理半減期による理論値よりも減少が小さく（または微増）、空間線量率が減少し多くの地点でバックグラウンドレベルに近づきつつあることを示唆する結果であった。

土壌における放射性セシウムの分布状況に関しては、スクレーパープレート法で採取（80 km 圏内で 1 回）した土壌試料の分析による土壌中深度分布測定及び可搬型 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面的調査（80 km 圏内で 1 回）をそれぞれ実施した。深度分布調査の結果、令和 3 年度に得られた実効的な重量緩衝深度 β_{eff} （幾何平均値）は、4.31 g/cm²であった。放射性セシウム沈着量の面的調査を行い土壌沈着量分布マップ（in-situ 測定の結果及び空間線量率から評価した沈着量を追加した詳細マップ）を作成した。また、測定したガンマ線スペクトルから天然放射性核種による空間線量率を評価した（平均値 0.044 μ Sv/h）。

これまで蓄積した 80 km 圏内の測定結果を基に空間線量率及び土壌沈着量の実効半減期を評価した。走行サーベイについては二項指数関数及び定数項による近似を採用し、定点サーベイ及び歩行サーベイについては指数関数及び定数項による近似を採用した。走行サーベイの実効半減期の遅い成分は、定点サーベイ及び歩行サーベイの実効半減期とほぼ同じであった。また、in-situ 測定による土壌中放射性セシウムの沈着量については、セシウム 134 及びセシウム 137 の実効半減期を評価した。

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、多年度における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、継続的なモニタリングデータを使用することにより変動の少ないある一定のモデルを提示できることを示した。

将来的な海水の環境モニタリングの継続的な評価手法の確立を目的とし、過去の海水中のトリチウム濃度データの変動幅を把握しその変動要因について考察した。令和 3 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った。

階層ベイズ統計手法を用いて、令和 4 年度調査での歩行サーベイ、走行サーベイ及び定点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原子力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令和 3 年度に測定された林野庁調査の結果を減衰補正のうえ統合し、80 km 圏内及び福島県全域の空間線量率分布統合マップを作成した。

令和 4 年度調査での走行サーベイ、定点サーベイ及び無人ヘリサーベイによる空間線量率及び in-situ 測定による土壌中放射性セシウムの沈着量の測定結果の分布マップを作成し「放射

性物質モニタリングデータの情報公開サイト」に公開した。

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として、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。

分布状況調査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。また、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。

謝辞

in-situ 測定では、公益財団法人日本分析センターに協力いただきました。第 8 章の統合マップの作成においては、米国ローレンスバークリー国立研究所の Dr. Haruko Wainwright（現所属、マサチューセッツ工科大学）、日本原子力研究開発機構システム計算科学センターの齋藤公明氏に協力いただきました。本分布状況調査における測定やデータ解析に携わっていただいた全ての関係機関及び自治体関係者に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 原子力規制庁, 放射性物質の分布状況等に関する調査,
<https://radioactivity.nra.go.jp/ja/list/338/list-1.html>, (参照: 2023年3月3日) .
- 2) 津田修一ほか, 走行サーベイシステム KURAMA-II を用いた測定の基盤整備と実測への適用, JAEA-Technology 2013-037, 54p.(2013).
- 3) 原子力規制庁, 平成 31 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, 2_1 広域の空間線量率の分布測定 1, (2020) ,
https://radioactivity.nra.go.jp/ja/contents/16000/15217/26/JAEArep_MAPproject_H31_20200807_2_1.pdf, (参照: 2023年3月3日) .
- 4) 原子力規制庁, 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, 2.地上における広域の空間線量率の分布測定, (2022) ,
https://radioactivity.nra.go.jp/ja/contents/17000/16891/26/JAEA_MAPproject_R3_20220329_rev0817_2.pdf, (参照: 2023年3月3日) .
- 5) Y. Sanada, et al., Temporal variation of dose rate distribution around the Fukushima Daiichi nuclear power station using unmanned helicopter, Appl. Radiat. Isot., 118, pp.308-316(2016).
- 6) Y. Sanada and T. Torii, Aerial radiation monitoring around the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant using an unmanned helicopter, J. Environ. Radioact., 139, pp.294-299(2015).
- 7) Y. Sanada et al., Radiation monitoring using an unmanned helicopter in the evacuation zone around the Fukushima Daiichi nuclear power plant, Explor. Geophy., 45, pp.3-7(2014).
- 8) 眞田幸尚ほか, 原子力発電所事故後の無人ヘリコプターを用いた放射線測定, JAEA-Research 2013-049, 129p.(2014).
- 9) 眞田幸尚ほか, 平成 26 年度福島第一原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Research 2015-006, 81p.(2015).
- 10) 原子力規制庁, 平成 27 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, 無人ヘリによる東京電力福島第一原子力発電所から 5km 圏内の空間線量率分布の測定 Appendix-1, 無人ヘリによる測定結果の高精度化のための γ 線スペクトルから天然の放射性核種の影響を除去する方法の検討, pp.48-52, (2016),
<https://radioactivity.nra.go.jp/ja/contents/12000/11995/29/part1-3.pdf>, (参照: 2023年3月3日) .
- 11) 原子力規制庁, 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, 3. 無人ヘリによる発電

- 所周辺の空間線量率測定, (2022),
https://radioactivity.nra.go.jp/ja/contents/17000/16891/27/JAEA_MAPproject_R3_20220329_rev0817_3.pdf, (参照 : 2023 年 3 月 16 日) .
- 12) 国土地理院, 地理院タイル一覧, <https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>, (参照 : 2023 年 3 月 3 日) .
- 13) R.J. Loughran, et al., Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides (Chapter 3 Sampling methods), pp. 41-57 (2002).
- 14) Chernobyl Forum Expert Group 'Environment', Environmental consequences of the Chernobyl accident and their remediation: twenty years of experience, International Atomic Energy Agency (IAEA), Radiological assessment reports series, STI/PUB/1239, 166p.(2006).
- 15) ICRU, Gamma-ray spectrometry in the environment, ICRU Report 53, 84p.(1994).
- 16) N. Matsuda, et al., Depth profiles of radioactive cesium in soil using a scraper plate over a wide area surrounding the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant, Japan, J. Environ. Radioact., 139, pp.427-434(2015).
- 17) K. Saito and P. Jacob, Fundamental data on environmental gamma-ray fields in the air due to source in the ground, JAERI-Data/Code 98-001, 93p.(1998).
- 18) 原子力規制庁, 平成 28 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, 土壤中の放射性セシウムの深度分布調査, (2017),
https://radioactivity.nra.go.jp/ja/contents/14000/13159/35/Part1-6_放射性セシウムの深度分布調査.pdf, (参照 : 2023 年 3 月 3 日) .
- 19) 原子力規制庁, ゲルマニウム半導体検出器を用いた *in-situ* 測定法, 放射能測定法シリーズ 33, 150p.(2017),
<https://www.kankyo-hoshano.go.jp/wp-content/uploads/2020/12/No33.pdf>, (参照 : 2023 年 3 月 3 日) .
- 20) 三上智ほか, 可搬型ゲルマニウム半導体検出器を用いた *in situ* 測定による福島第一原子力発電所から 80km 圏内の土壤中天然放射性核種の空気カーマ率調査, 日本原子力学会誌和文論文誌, 20, pp.159-178(2021).
- 21) 斎藤公明, 遠藤章, 福島周辺における空間線量率の測定と評価, III 環境 γ 線の特徴と被ばく線量との関係, RADIOISOTOPES, 63, pp.585-602(2014).
- 22) 福島県, 東京電力株式会社, 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, (2013), <https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/42296.pdf>, (参照 : 2023 年 3 月 3 日) .
- 23) 原子力規制庁, 航空機モニタリングによる空間線量率の測定結果,
<https://radioactivity.nra.go.jp/ja/list/362/list-1.html>, (参照 : 2023 年 3 月 3 日) .
- 24) 安藤真樹ほか, KURAMA-II を用いた走行サーベイ測定による東日本での天然放射性核種の空間線量率評価, 日本原子力学会和文論文誌, 16, pp.63-80 (2017).

- 25) Y. Sanada, et al., Distribution map of natural gamma-ray dose rates for studies of the additional exposure dose after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station accident, *J. Environ. Radioact.*, 223-224, 106397(2020).
- 26) 原子力規制庁, 総合モニタリング計画, <https://radioactivity.nra.go.jp/ja/list/204/list-1.html>, (参照: 2023年3月3日) .
- 27) 総務省統計局, 平成22年国勢調査, <http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2010/>, (参照: 2023年3月3日) .
- 28) 原子力規制委員会, 福島県及びその近隣県における航空機モニタリングの結果について, (2022),
[https://radioactivity.nra.go.jp/ja/contents/17000/16384/24/2021_16thAirborne_monitoring_press_JPN\(2\).pdf](https://radioactivity.nra.go.jp/ja/contents/17000/16384/24/2021_16thAirborne_monitoring_press_JPN(2).pdf), (参照: 2023年3月3日) .
- 29) 日本原子力研究開発機構, 放射性物質モニタリングデータの情報公開サイト, 空間線量率, <https://emdb.jaea.go.jp/emdb/contents/1/>, (参照: 2023年3月3日) .
- 30) 原子力規制庁, 東京電力株式会社福島第一原子力発電所の20km以遠の空間線量率の測定結果(2022年2月), (2022), <https://radioactivity.nra.go.jp/ja/list/207/list-202202.html>, (参照: 2023年3月3日) .
- 31) 福島県, 環境放射線モニタリング・メッシュ調査結果情報,
<https://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal/ps-monitoring-mesh.html>, (参照: 2023年3月3日) .
- 32) 福島県, 令和3年度森林におけるモニタリング調査結果について, 森林における放射性物質の状況と今後の予測について,
<https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/567169.pdf>, (参照: 2023年3月3日) .
- 33) 福島県, 福島県環境放射線モニタリング調査(観光地第17回)結果, (2021),
<https://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal/ps-kankouti-17.html>, (参照: 2023年3月3日) .
- 34) 国土交通省, 国土数値情報ダウンロード, <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>, (参照: 2023年3月3日) .
- 35) 経済産業省, 平成26年商業統計メッシュデータ・ダウンロード, 1kmメッシュデータ: 世界測地系(2017),
<https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/syougyo/mesh/download.html#1km>, (参照: 2023年3月3日) .
- 36) 原子力規制庁, 平成31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, 6.測定箇所の重要度分類のためのスコア化の検討, (2020),
https://radioactivity.nra.go.jp/ja/contents/16000/15217/31/JAEAreproject_MAPproject_H31_20200807_6.pdf, (参照: 2023年3月3日) .
- 37) 環境省, 放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料(令和2年度版), 第2章 放

- 射線による被ばく、事故後の追加被ばく線量（計算例）, p.54 (2021),
<https://www.env.go.jp/content/900410890.pdf>, (参照：2023年3月3日) .
- 38)原子力規制庁, 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, 6.測定箇所の重要度分類のためのスコア化の検討, (2022),
http://radioactivity.nra.go.jp/ja/contents/17000/16891/30/JAEA_MAPproject_R3_20220329_rev0817_6.pdf, (参照：2023年3月3日) .
- 39)福島県原子力センター, 昭和58年度～平成10年度 福島県内自然放射能実態調査報告書.
- 40)高島良正, 環境トリチウム-その挙動と利用, RADIOISOTOPES, 40, pp.520-530(1991).
- 41)町田昌彦ほか, 福島前面海域におけるトリチウム存在量の推定とその経時変化 -福島沿岸および沖合のトリチウム存在量と1F貯留量および年間放出管理量との比較-, 日本原子力学会和文誌, 22, pp.12-24(2023).
- 42)K. Sakuma et al., A modeling approach to estimate 3H discharge from rivers: Comparison of discharge from the Fukushima Dai-ichi and inventory in seawater in the Fukushima coastal region, Science of The Total Environment, 806, 151344(2022).
- 43)文部科学省, トリチウム分析法, 放射能測定法シリーズ9, 127p. (2002),
<https://www.kankyo-hoshano.go.jp/wp-content/uploads/2020/12/No9.pdf>, (参照：2023年3月3日) .
- 44)原子力規制庁, 平成31年度放射性物質測定調査委託費（福島県近沿岸海域等における放射性物質等の状況調査）事業,
<https://radioactivity.nra.go.jp/ja/contents/16000/15193/view.html>, (参照：2023年3月3日) .
- 45)原子力規制庁, 令和2年度放射性物質測定調査委託費（福島県近沿岸海域等における放射性物質等の状況調査）事業,
<https://radioactivity.nra.go.jp/ja/contents/17000/16227/view.html> (参照：2023年3月3日) .
- 46)原子力規制庁, 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, 7.海洋のモニタリングデータの評価, (2022),
https://radioactivity.nra.go.jp/ja/contents/17000/16891/31/JAEA_MAPproject_R3_20220329_rev0817_7.pdf, (参照：2023年3月3日) .
- 47)IAEA, Sediment distribution coefficients and concentration factors for biota in the marine environment, IAEA-TECDOC 422 (2004).
- 48)海洋生物環境研究所, 平成30年度海洋環境における放射能調査及び総合評価事業調査報告書, (2019).
- 49)H. M. Wainwright et al., A multiscale Bayesian data integration approach for mapping air dose rates around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, J. Environ. Radioact., 167, pp.62-69 (2017).

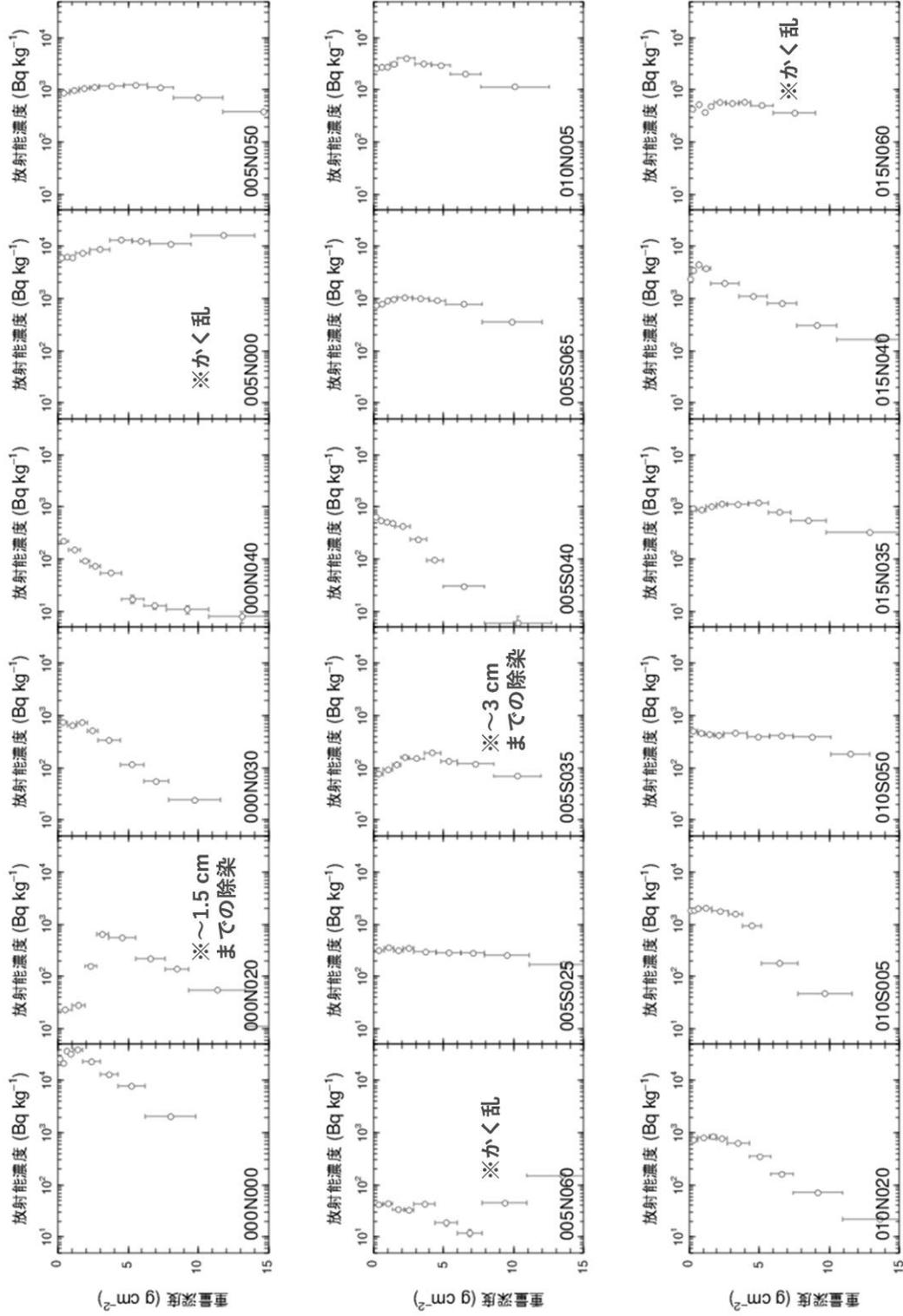
- 50)原子力規制庁,平成 28 年度放射性物質測定調査委託費 (東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約) 事業成果報告書, Part1-7_空間線量率の統合評価, (2017), <https://radioactivity.nra.go.jp/ja/contents/14000/13159/36/空間線量率の統合評価.pdf>, (参照 : 2023 年 3 月 3 日) .
- 51)原子力規制庁,平成 29 年度放射性物質測定調査委託費 (東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約) 事業 成果報告書, Part3 空間線量率の統合評価, (2018),
https://radioactivity.nra.go.jp/ja/contents/14000/13993/34/Part3_20181130.pdf, (参照 : 2023 年 3 月 3 日) .
- 52)原子力規制庁,平成 30 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, 7.実測データの統合的解析, (2019),
https://radioactivity.nra.go.jp/ja/contents/15000/14765/31/JAEAreproject_MAPproject_H30_20200302_7.pdf, (参照 : 2023 年 3 月 3 日) .
- 53)原子力規制庁,平成 31 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, 7.実測データの統合的解析, (2020),
http://radioactivity.nra.go.jp/ja/contents/16000/15217/32/JAEAreproject_MAPproject_H31_20200807_7.pdf, (参照 : 2023 年 3 月 3 日) .
- 54)原子力規制庁,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, 7.実測データの統合的解析, (2021),
https://radioactivity.nra.go.jp/ja/contents/17000/16277/33/JAEA_MAPprojectR2_20210802_7-1.pdf, (参照 : 2023 年 3 月 3 日) .
- 55)原子力規制庁,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, 8.実測データの統合的解析, (2022) ,
https://radioactivity.nra.go.jp/ja/contents/17000/16891/32/JAEA_MAPproject_R3_20220329_rev0817_8.pdf, (参照 : 2023 年 3 月 3 日) .
- 56)林野庁関東森林管理局,福島県内に所在するレクリエーションの森等における空間線量率調査の実施結果について, <https://www.rinya.maff.go.jp/kanto/koho/press/index.html>,
(参照 : 2023 年 3 月 3 日) .
- 57)林野庁関東森林管理局,これまでの調査結果 1.旧避難指示区域等国有林内におけるモニタリング調査事業,
<https://www.rinya.maff.go.jp/kanto/seibi/jyosensennta/chousakekka01.html>, (参照 : 2023 年 3 月 3 日) .
- 58)宇宙航空研究開発機構,高解像度土地利用土地被覆図,
https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/jp/dataset/lulc_j.htm, (参照 : 2023 年 3 月 3 日) .

- 59) 日本原子力研究開発機構, 放射性物質モニタリングデータの情報公開サイト,
<https://emdb.jaea.go.jp/emdb/>, (参照: 2023年3月3日) .
- 60) 原子力規制庁, 緊急時における環境試料採取法, 放射能測定法シリーズ 35, 148p.(2021),
<https://www.kankyo-hoshano.go.jp/wp-content/uploads/2021/06/No35.pdf>, (参照: 2023年3月3日) .
- 61) 原子力規制庁, 放射線モニタリング情報, モニタリング結果,
<https://radioactivity.nra.go.jp/ja/list/512/list-1.html>, (参照: 2023年3月3日) .
- 62) 環境省, 東日本大震災の被災地における放射性物質関連の環境モニタリング調査: 公共用水域,
http://www.env.go.jp/jishin/monitoring/results_r-pw.html, (参照: 2023年3月3日) .

付録 セシウム 137 の深度分布

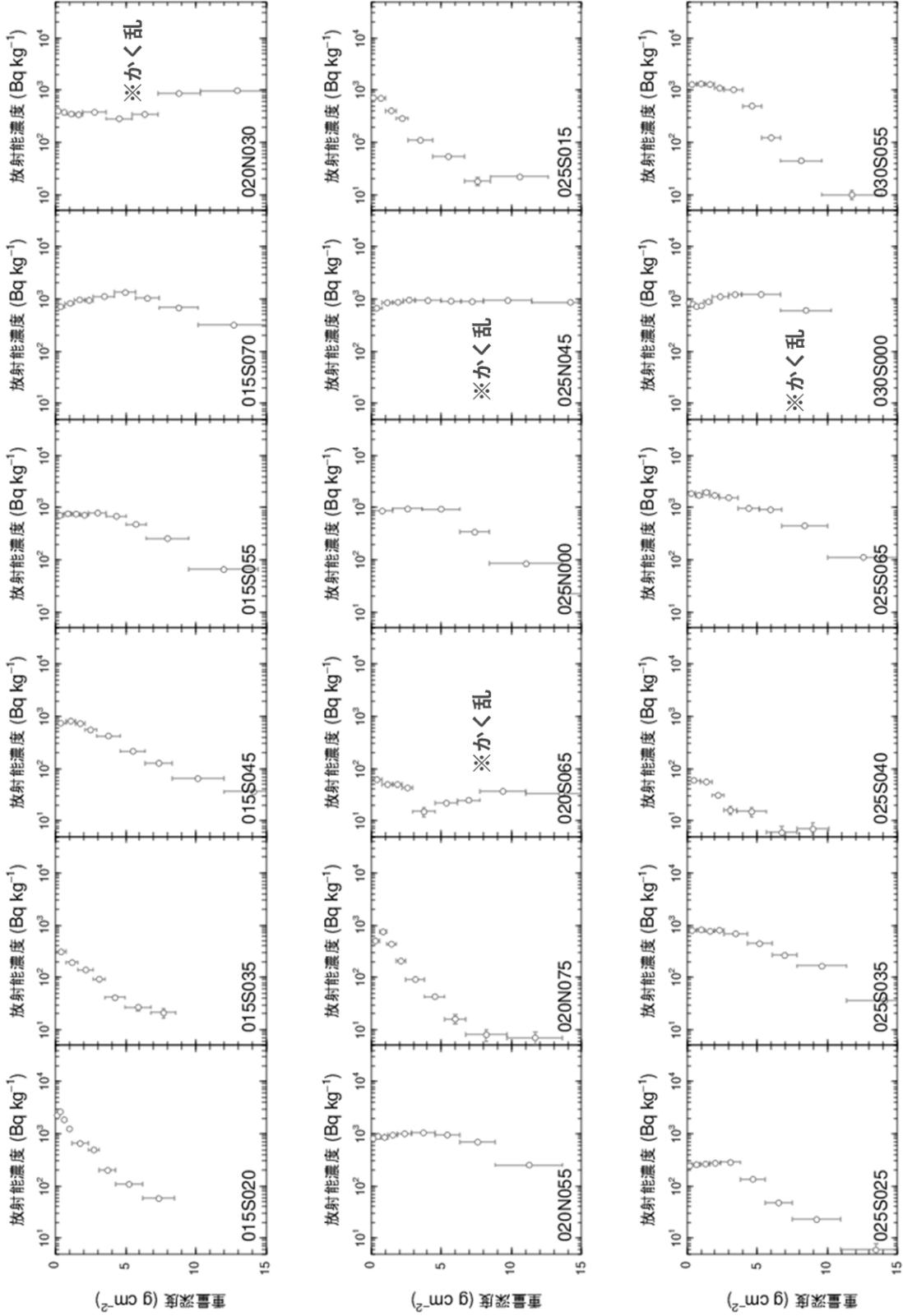
※深度分布の変遷から読み取れる除染等の可能性

セシウム 137 の深度分布 (1/5)



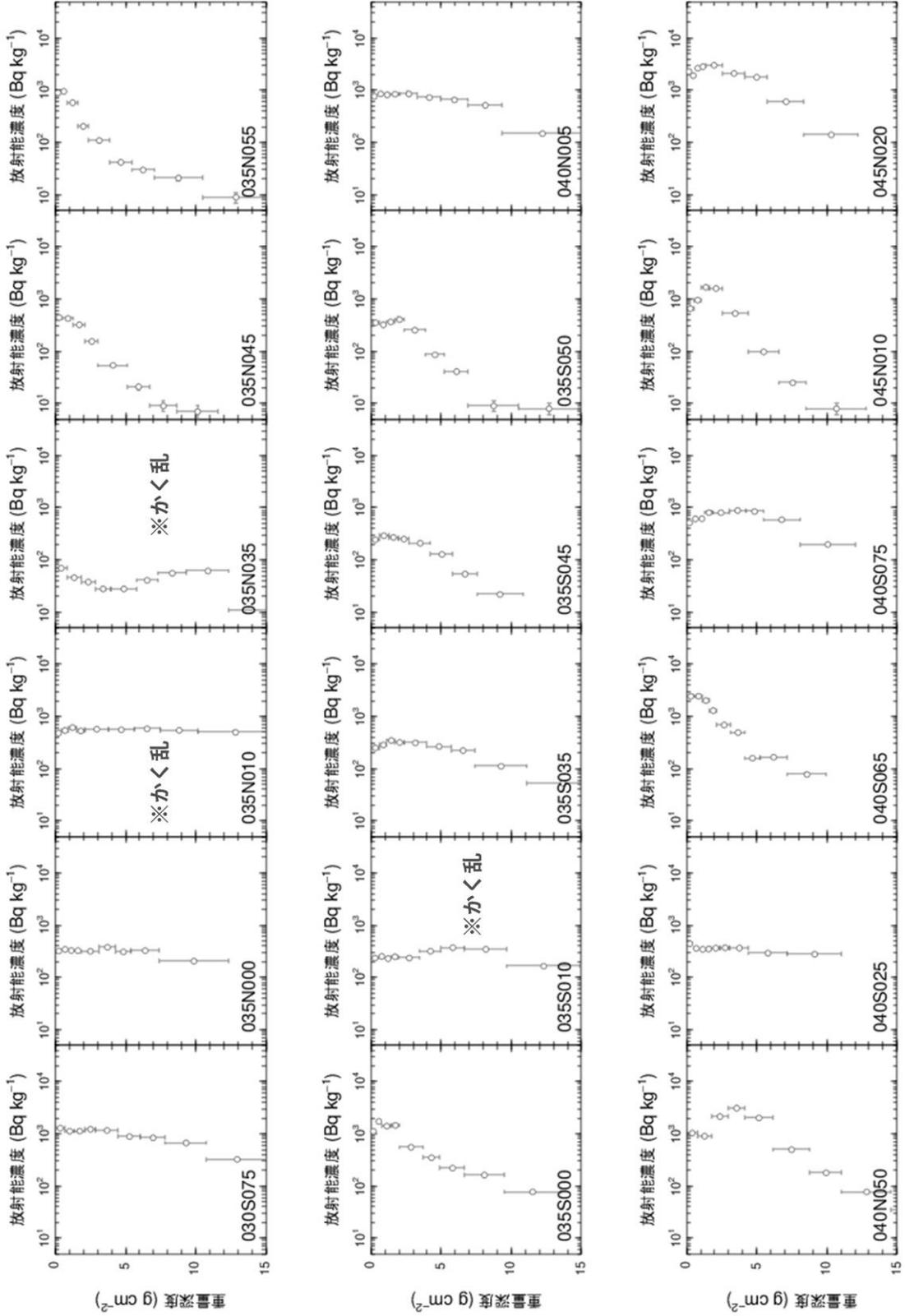
※深度分布の変遷から読み取れる除染等の可能性

セシウム 137 の深度分布 (2/5)



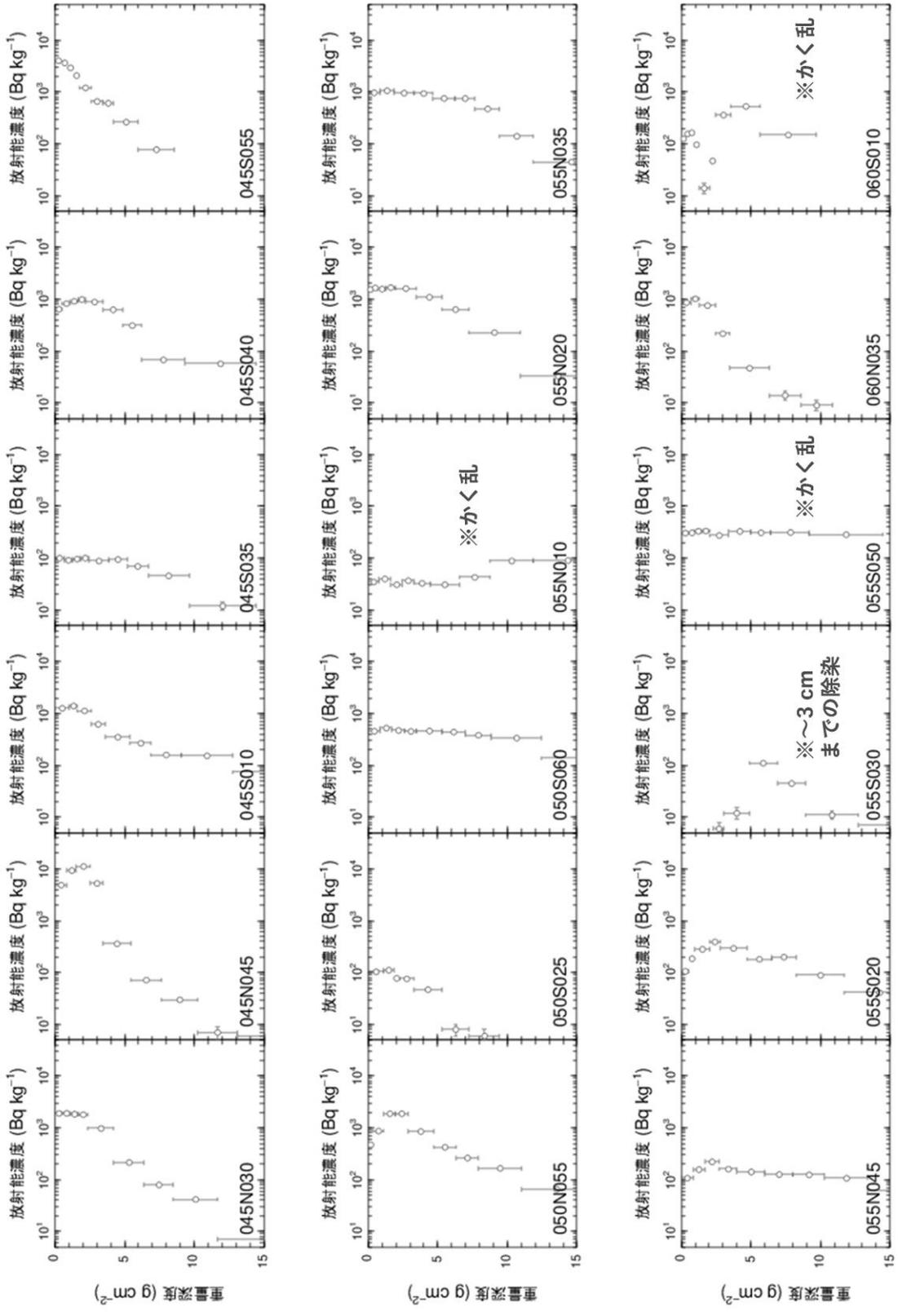
セシウム 137 の深度分布 (3/5)

※深度分布の変遷から読み取れる除染等の可能性



※深度分布の変遷から読み取れる除染等の可能性

セシウム 137 の深度分布 (4/5)



セシウム 137 の深度分布 (5/5)

※深度分布の変遷から読み取れる除染等の可能性

