JAEA-Technology
2022-026
DOI:10.11484/jaea-technology-2022-026

令和３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 2021 (Contract Research)

福島マップ事業対応部門横断グループ

Group for Fukushima Mapping Project

January 2023

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
〒 319-1195　茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, 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.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2023

JAEA-Technology 2022-026

令和 3 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

（2022 年 10 月 14 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 3 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 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。令和 2 年度までに総合モニタリング計画で実施された海域モニタリングの測定結果を集約し、事故による影響が大きかったセシウム 137 について過去からの変動や濃度などの測定結果の詳細な解析評価を行なった。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、「放射線量等分布マップ拡大サイト」への令和 3 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 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」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

JAEA-Technology 2022-026

Investigations on Distribution of Radioactive Substances Owing to the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident in the Fiscal Year 2021 (Contract Research)

Group for Fukushima Mapping Project

Japan Atomic Energy Agency
Hitachinaka-shi, Ibaraki-ken

(Received October 14, 2022)

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 FY2021. Car-borne surveys, a flat ground measurement using survey meters, a walk survey and an unmanned helicopter survey were carried out to obtain air dose rate data to create air dose rate 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 for Fukushima Prefecture and the 80 km zone from the FDNPS, and the factors causing changes in the score when monitoring data from multiple years were used were discussed. Monitoring data in coastal area performed owing to the comprehensive radiation monitoring plan until 2020 was summarized, and temporal changes in cesium-137 were analyzed. Using the Bayesian hierarchical modeling approach, we obtained maps that integrated the air dose rate distribution data obtained in this project with respect to the region within 80 km from the FDNPS and Fukushima Prefecture. The measurement results for FY2021 were published on the “Expansion Site of Distribution Map of Radiation Dose”, 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, Air Dose Rate, Car-borne Survey, Walk Survey, NaI(Tl) Survey Meter, Helicopter Survey, Deposit of Radiocesium, Depth Profile, Effective Half-life, Importance of Measurement Points, Coastal Area Monitoring, Integrated Map

目　次

1. はじめに 1
2. 地上における広域の空間線量率の分布測定 3
2.1 調査目的 3
2.2 調査手法 3
2.2.1 走行サーベイ 3
2.2.2 定点サーベイ 4
2.2.3 歩行サーベイ 4
2.2.4 令和 2 年度との比較 4
2.2.5 測定手法間の比較 5
2.3 空間線量率測定結果 9
2.3.1 空間線量率分布マップ 9
2.3.2 令和 2 年度との比較 17
2.3.3 平成 23 年度との比較 18
2.3.4 測定手法間の比較 18
3. 無人ヘリによる発電所周辺の空間線量率測定 24
3.1 調査目的 24
3.2 調査手法 24
3.2.1 調査場所・期間 24
3.2.2 調査機器 24
3.2.3 データ取得方法 25
3.2.4 無人ヘリ測定データの空間線量率への換算 25
3.2.5 空間線量率マップの作成 26
3.3 調査結果 28
3.3.1 空間線量率マップ 28
3.3.2 測定結果の妥当性の検証 28
3.3.3 令和 2 年度との比較 28
3.3.4 天然放射性核種による空間線量率マップ 28
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 29
4. 土壌における放射性セシウムの分布状況 39
4.1 放射性セシウムの深度分布 39
4.1.1 調査目的 39
4.1.2 調査内容 39
4.1.3 調査結果 43
4.2 放射性セシウム沈着量の面的調査 46

4.2.1 調査目的 46
4.2.2 調査内容 46
4.2.3 調査結果 49
4.2.4 天然放射性核種による空間線量率の評価 59
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 61
5.1 目的 61
5.2 測定結果の変化傾向 61
5.3 実効半減期算出方法 66
5.4 空間線量率の実効半減期 67
5.5 放射性セシウム沈着量の実効半減期 73
5.6 同一メッシュにおける空間線量率の変化傾向 75
5.7 モニタリングポストによる空間線量率解析の試行 78
6. 測定箇所の重要度分類のためのスコア化の検討 82
6.1 目的 82
6.2 総合モニタリング計画 82
6.3 空間線量率等モニタリングを取り巻く状況 84
6.3.1 空間線量率の分布の状況 84
6.3.2 これまでの測定ポイントの設定方法 85
6.3.3 重点化・最適化の方向性 86
6.4 モニタリング代表性の高い場所を選定するための評価方法案 86
6.4.1 地域スコア化手法 86
6.4.2 スコア評価例 87
6.4.3 年度別の評価例 92
6.5 評価結果のまとめ 96
7. 海洋のモニタリングデータの評価 97
7.1 調査目的 97
7.2 調査内容 97
7.3 調査結果 98
7.3.1 海水モニタリングの解析 98
7.3.2 海底土モニタリングの解析 99
7.3.3 過年度評価結果との比較 101
8. 実測データの統合的解析 105
8.1 調査目的 105
8.2 調査内容 106
8.2.1 異なる測定方法による空間線量率の特徴 106
8.2.2 統合手法の概要 106
8.3 80 km 圏内を対象とした令和 2 年度統合マップの作成 107
8.3.1 対象とした測定データ 107

8.3.2 歩行サーベイ結果の空間分布パターンの解析 110
8.3.3 走行サーベイと歩行サーベイの比較 113
8.3.4 航空機サーベイと歩行サーベイの比較 115
8.3.5 統合結果 116
8.4 福島県全域を対象とした統合マップの作成 117
8.4.1 対象とした測定データ 117
8.4.2 歩行サーベイを対象とした空間パターンの解析 118
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 120
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 121
8.4.5 統合結果 122
8.5 統合マップの精度検証 124
9. 空間線量率等分布マップの作成と公開 127
9.1 目的 127
9.2 空間線量率等分布マップの作成と公開 127
9.3 空間線量率等分布マップの運用管理 128
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 130
10.1 測定方法及び測定結果 130
10.1.1 空間線量率 130
10.1.2 積算線量 130
10.1.3 大気浮遊じん中放射性物質濃度 130
10.1.4 環境試料（土壌及び松葉）中放射性物質濃度 130
10.2 測定結果の公開 131
11. 測定データのCSV化 137
11.1 CSV 等の形式で保存した測定データ 137
11.2 保存した測定データの公開 137
12. まとめ 141
謝辞 142
参考文献 143
付録 セシウム137の深度分布 148

Contents

1. Introduction ····· 1
2. Air dose rate measurements on the ground ····· 3
2.1 Purpose ····· 3
2.2 Measurement method ····· 3
2.2.1 Car-borne survey ····· 3
2.2.2 Flat-ground fixed-point measurement ····· 4
2.2.3 Walk survey ····· 4
2.2.4 Comparison with results in 2020 ····· 4
2.2.5 Comparison between measurement methods ····· 5
2.3 Results of measurements ····· 9
2.3.1 Air dose rate distribution map ····· 9
2.3.2 Comparison with results in 2020 ····· 17
2.3.3 Comparison with results in 2011 ····· 18
2.3.4 Comparison between measurement methods ····· 18
3. Air dose rates measurement around FDNPS using unmanned helicopter ····· 24
3.1 Purpose ····· 24
3.2 Measurement method ····· 24
3.2.1 Region and period of measurement ····· 24
3.2.2 Measurement equipment ····· 24
3.2.3 Data acquisition method ····· 25
3.2.4 Conversion of measurement data of helicopter survey to air dose rates ····· 25
3.2.5 Air dose rate distribution map ····· 26
3.3 Results ····· 28
3.3.1 Air dose rate distribution map ····· 28
3.3.2 Verification of measurement result ····· 28
3.3.3 Comparison with results in 2020 ····· 28
3.3.4 Distribution map of air dose rate owing to natural radioactivity ····· 28
3.3.5 Deposition density within 5 km from FDNPS ····· 29
4. Distribution of radiocesium in ground soil ····· 39
4.1 Depth profile ····· 39
4.1.1 Purpose ····· 39
4.1.2 Method ····· 39
4.1.3 Results ····· 43
4.2 Deposition density ····· 46
4.2.1 Purpose ····· 46
4.2.2 Method ····· 46

4.2.3 Results ····· 49
4.2.4 Evaluation of air dose rate owing to natural radioactivity ····· 59
5. Evaluation of effective half-life ····· 61
5.1 Purpose ····· 61
5.2 Changing trend ····· 61
5.3 Evaluation of background ····· 66
5.4 Analysis method for effective half-life ····· 67
5.5 Effective half-life evaluated with air dose rate data ····· 73
5.6 Effective half-life evaluated with radiocesium deposition data ····· 75
5.7 Changing trend of air dose rate in same mesh ····· 78
6. Scoring of importance in measurement points ····· 82
6.1 Purpose ····· 82
6.2 Comprehensive radiation monitoring plan ····· 82
6.3 Situation of air dose rate monitoring ····· 84
6.3.1 Situation of air dose rate distribution ····· 84
6.3.2 Selection of measurement point ····· 85
6.3.3 Directionality of optimization ····· 86
6.4 Proposal of evaluation method to select highly representative place ····· 86
6.4.1 Scoring method ····· 86
6.4.2 Example of scoring ····· 87
6.4.3 Example of evaluation as for each year ····· 92
6.5 Results of evaluation ····· 96
7. Evaluation of monitoring data in coastal area ····· 97
7.1 Purpose of investigation ····· 97
7.2 Survey contents ····· 97
7.3 Results ····· 98
7.3.1 Analysis of sea water monitoring ····· 98
7.3.2 Analysis of sediment monitoring ····· 99
7.3.3 Comparison with results of previous years' evaluations ····· 101
8. Integral analyses method ····· 105
8.1 Purpose ····· 105
8.2 Survey contents ····· 106
8.2.1 Features in air dose rates obtained by different measurement methods ····· 106
8.2.2 Outline of integral analyses method ····· 106
8.3 Evaluation of integral map inside 80 km range ····· 107
8.3.1 Measurement data for analysis ····· 107
8.3.2 Analysis of areal distribution of the result of walk survey ····· 110
8.3.3 Comparison between car-borne and walk surveys ····· 113

8.3.4 Comparison between air-borne and walk surveys ····· 115
8.3.5 Results of integral analysis ····· 116
8.4 Evaluation of integral map as for whole area of Fukushima Prefecture ····· 117
8.4.1 Measurement data used for the analysis ····· 117
8.4.2 Analysis of areal pattern for the corresponding walk survey data ····· 118
8.4.3 Comparison between car-borne and corresponding walk survey data ····· 120
8.4.4 Comparison between air-borne survey data and corresponding walk survey data ····· 121
8.4.5 Results of integral method ····· 122
8.5 Validation of integral map ····· 124
9. Creating air dose rate distribution map and its publishing on web ····· 127
9.1 Purpose ····· 127
9.2 Distribution map ····· 127
9.3 Operation of distribution map ····· 128
10. Radiation monitoring and environmental sample analysis based on comprehensive monitoring plan ····· 130
10.1 Method and result ····· 130
10.1.1 Air dose rate ····· 130
10.1.2 Integral dose ····· 130
10.1.3 Radioactivity density in air ····· 130
10.1.4 Radioactivity density in samples (soil and pine leaf) ····· 130
10.2 Publishing of measurement result ····· 131
11. Store of measurement data ····· 137
11.1 Store of measurement data ····· 137
11.2 Publishing of stored data ····· 137
12. Summary ····· 141
Acknowledgements ····· 142
References ····· 143
Appendix Depth profile of Cesium-137 ····· 148

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測定期間及び測定エリア 6
表 2-2　測定手法間の比較の組み合わせ 6
表 2-3　令和 2 年度と比較した令和 3 年度の空間線量率測定結果の相対変化率 17
表 2-4　平成 23 年度と比較した令和 3 年度の空間線量率測定結果の変化傾向 18
表 3-1　テストサイトにおける換算パラメータ取得条件 26
表 5-1　評価された実効半減期の一覧 69
表 5-2　モニタリングポストデータから求めた実効半減期の速い成分（単位：年） 79
表 5-3　モニタリングポストデータから求めた実効半減期の遅い成分（単位：年） 79
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 83
表 6-2　図 6-1 の作成に使用したモニタリング情報一覧 84
表 6-3　ランドマークデータの詳細情報 88
表 6-4　スコア付与例 88
表 6-5　平成 30 年度/平成 29 年度のスコア差 92
表 6-6　令和元年度/平成 29 年度のスコア差 92
表 6-7　令和 2 年度/平成 29 年度のスコア差 93
表 7-1　各海域の海水ランク分け結果 99
表 7-2　各海域の海底土ランク分け結果 100
表 7-3　令和 2 年度海域事業評価結果からランクが変化した地点（海水） 102
表 7-4　令和 2 年度海域事業評価結果からランクが変化した地点（海底土） 102
表 7-5　平成 31 年度海域事業から令和 3 年度調査にかけてのランク変化状況 103
表 8-1　使用データ一覧 108
表 8-2　相関のパラメータ 115
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 131
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 138
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 139
表 11-3　測定データを統一フォーマットに変換した自治体リスト 140

図リスト

図 2-1　令和 3 年度調査における定点サーベイによる空間線量率の測定箇所 7
図 2-2　令和 3 年度調査における歩行サーベイによる空間線量率の測定箇所 8
図 2-3　令和 3 年度 1 回目（第 22 回）走行サーベイによる空間線量率の測定結果.....10
図 2-4　令和 3 年度 2 回目（第 23 回）走行サーベイによる空間線量率の測定結果.....11
図 2-5　平成 23 年度から令和 3 年度までの走行サーベイによる 80 km 圏内を中心とした空間線量率マップの変化.....12
図 2-6　令和 3 年度調査における定点サーベイによる空間線量率の測定結果 13
図 2-7　平成 23 年度から令和 3 年度までの定点サーベイによる空間線量率マップの変化....14
図 2-8　令和 3 年度調査における歩行サーベイによる空間線量率の測定結果 15
図 2-9　平成 25 年度から令和 3 年度までの歩行サーベイによる空間線量率マップの変化....16
図 2-10　令和 2 年度の測定結果に対する令和 3 年度の測定結果の比 20
図 2-11　走行サーベイ及び定点サーベイによる空間線量率結果の平成 23 年度との比較.....21
図 2-12　令和 3 年度調査での測定手法間の比較 22
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....23
図 3-1　無人ヘリの仕様等 25
図 3-2　令和 3 年度無人ヘリサーベイの飛行軌跡.....27
図 3-3　令和 3 年度調査における無人ヘリサーベイによる空間線量率測定結果.....30
図 3-4　平成 24 年度から令和 3 年度までの無人ヘリサーベイによる空間線量率マップの変化.....31
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 32
図 3-6　令和 2 年度と令和 3 年度の無人ヘリサーベイによる空間線量率測定結果の比較 33
図 3-7　令和 2 年度に対する令和 3 年度の無人ヘリサーベイによる空間線量率測定結果の比の分布.....34
図 3-8　令和 2 年度から令和 3 年度にかけて空間線量率が顕著に減少した場所の要因調査..35
図 3-9　令和 3 年度調査における無人ヘリサーベイにより評価した天然放射性核種による空気カーマ率の分布 36
図 3-10　平成 28 年度～平成 30 年度の可搬型 Ge 検出器による放射性セシウム沈着量測定結果（令和 3 年度に物理減衰補正）と無人ヘリサーベイによる放射性セシウム沈着量の換算結果との比較 37
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.....38
図 4-1　令和 3 年度調査における放射性セシウム深度分布測定箇所 42
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.....43
図 4-3　令和 3 年度の深度分布調査による重量緩衝深度βの自然対数値の頻度分布 44
図 4-4　令和 3 年度の深度分布調査による実効的な重量緩衝深度β_{eff}の自然対数値の頻度分布.....45

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 45
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 46
図 4-7　令和 3 年度調査における可搬型 Ge 検出器を用いた放射性セシウム沈着量の測定箇所 48
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 49
図 4-9　令和 3 年度調査における可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定による放射性セシウムの沈着量分布マップ 51
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 53
図 4-11　令和 3 年度調査における放射性セシウムの土壌沈着量分布マップ 54
図 4-12　平成 23 年度から令和 3 年度調査までの in-situ 測定（一部、土壌試料採取による）及び空間線量率から評価した土壌沈着量の分布マップの変化 56
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 58
図 4-14　in-situ 測定により評価した天然放射性核種による空気カーマ率の分布 60
図 5-1　分布状況調査で得られた空間線量率の変化傾向 63
図 5-2　分布状況調査で得られた放射性セシウム沈着量の変化傾向 65
図 5-3　走行サーベイ結果（80 km 圏内）における空間線量率変化傾向及び指数関数の近似 70
図 5-4　定点サーベイ、歩行サーベイ及び無人ヘリサーベイ結果における空間線量率変化傾向及び指数関数の近似 71
図 5-5　航空機サーベイ結果における空間線量率変化傾向及び指数関数の近似 72
図 5-6　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 74
図 5-7　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調査メッシュ箇所（データ抽出箇所） 76
図 5-8　各測定手法の測定状況と測定対象のイメージ 77
図 5-9　全測定手法によるデータが存在する調査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） 77
図 5-10　モニタリングポストの概観と基本性能 80
図 5-11　モニタリングポストの測定データ例 80
図 5-12　解析に使用したモニタリングポストの設置場所 81
図 5-13　モニタリングポストデータから求めた実効半減期の頻度分布及び累積頻度 81
図 6-1　基準地域メッシュ内の最大空間線量率マップ 85
図 6-2　福島市及び富岡町における空間線量率の測定状況（平成 29 年度測定例） 86
図 6-3　空間線量率の分布傾向と閾値 89

図 6-4　人口密度の分布傾向と閾値 89
図 6-5　平成 29 年度に測定された空間線量率のスコアマップ例 90
図 6-6　平成 29 年時点における空間線量率及び事故前の人口密度を合計したスコアマップ例 90
図 6-7　平成 29 年時点における空間線量率、事故前の人口密度及び避難指示区域を合計したスコアマップ例 91
図 6-8　平成 29 年時点における空間線量率、事故前の人口密度、避難指示区域及びランドマークを合計したスコアマップ例 91
図 6-9　平成 30 年時点における空間線量率、事故前の人口密度、避難指示区域及びランドマークを合計したスコアマップ 94
図 6-10　令和元年時点における空間線量率、事故前の人口密度、避難指示区域及びランドマークを合計したスコアマップ 94
図 6-11　令和 2 年時点における空間線量率、事故前の人口密度、避難指示区域及びランドマークを合計したスコアマップ 95
図 6-12　各年度のスコアの差異 95
図 7-1　海底土のセシウム 137 濃度の測定結果例 98
図 7-2　令和 2 年度海域事業評価結果からランクが上昇した地点（海水） 103
図 7-3　令和 2 年度海域事業評価結果からランクが上昇した地点（海底土） 104
図 8-1　空間線量率の統合に用いた令和 3 年度の歩行、走行及び航空機サーベイ結果 109
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 110
図 8-3　令和 3 年度に実施された旧避難指示区域内外における歩行サーベイによる空間線量率のバリオグラム解析結果 112
図 8-4　令和 3 年度に実施された旧避難指示区域内外における走行サーベイ（Car survey）と歩行サーベイ（Walk survey）による空間線量率の相関分析結果 114
図 8-5　令和 3 年度に実施された旧避難指示区域内外における航空機サーベイ（Air survey）と歩行サーベイ（Walk survey）による空間線量率の相関分析結果 116
図 8-6　各種測定結果を統合した統合マップ（80 km 圏内） 117
図 8-7　空間線量率の統合に用いた令和 3 年度の歩行、走行及び航空機サーベイ結果（福島県全域） 118
図 8-8　令和 3 年度に実施された福島県全域における歩行サーベイによる空間線量率のバリオグラム解析結果 119
図 8-9　令和 3 年度に実施された走行サーベイデータ（Car survey）と歩行サーベイ（Walk survey）との相関分析結果（福島県全域） 120
図 8-10　令和 3 年度に実施された航空機サーベイ（Air survey）と歩行サーベイ（Walk survey）との相関分析結果（福島県全域） 121
図 8-11　令和 3 年度に実施された各種測定結果を統合した統合マップ（福島県全域及び 80 km 圏内） 123
図 8-12　統合マップに除外された歩行サーベイ相当データの箇所 125

図 8-13　統合マップ作成時に除外された歩行サーベイ相当データの結果との比較.....126
図 8-14　令和 2 年度統合マップとの比較.....126
図 9-1　拡大サイトにおける測定データ（第 22 回走行サーベイ）表示例 128
図 9-2　拡大サイトへの令和 3 年度アクセス状況.....129
図 10-1　測定及び採取地点 132
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.....133
図 10-3　積算線量の経時変化.....134
図 10-4　大気浮遊じん中セシウム 137 濃度の経時変化 135
図 10-5　土壌中セシウム 137 濃度の経時変化 135
図 10-6　松葉中セシウム 137 濃度の経時変化 136

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]、佐々木　美雪[+1]、越智　康太郎[+1]、阿部　智久[+1]、
操上　広志[+2]、長尾　郁弥[+2]、
三上　智[+3]、安藤　真樹[+3]、志風　義明[+3]、
澤幡　義郎[*1]、石田　睦司[*1]、卜部　嘉[*1]、片岡　亮平[*1]、蔀　雅章[*1]、宇野　騎一郎[*1]、
山田　勉[*2]、中曽根　孝政[*2]、
谷森　奏一郎[*3]
田中　圭[*4]

+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モニタリングディビジョン
+2 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
+3 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
*3 アドバンスソフト株式会社
*4 一般財団法人日本地図センター

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 [1)]。令和 3 年度においても、引き続き、「令和 3 年度放射性物質測定調査委託費（東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約）事業」を実施した。以下、これら各調査を「平成〇年度調査」または「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）放射性セシウムの環境中移行メカニズムの調査（平成 26 年度終了）、
3）空間線量率予測モデルの開発（平成 27 年度終了）、
4）適正な調査地点及び頻度の検討（モニタリングポイントの分析）、
5）実測データの統合的解析、
6）拡大マップサイト等を通したデータの公開

等を実施してきた。

令和 3 年度調査の目的は、1）福島第一原発から放出された放射性物質の現状における沈着状況を詳細に調査してその変化傾向を把握すること、2）取得したデータを基に作成した空間線量率分布等に関するマップ等を原子力規制庁のウェブサイトで公開すること、3）これまでの調査結果を使用して沈着量や空間線量率の経時変化を分析するとともに測定評価手法の高度化を検討することである。本報告書では、令和 3 年度調査で得られた成果についてまとめる。

表 1-1　各調査における測定項目ごとの実施時期

	平成 23 年度（第 1 次）[c]	平成 23 年度（第 2 次）	平成 24 年度（第 3 次）	平成 25 年度（第 4 次）	平成 26 年度（第 5 次）	平成 27 年度（第 6 次）	平成 28 年度（第 7 次）	平成 29 年度（第 8 次）	平成 30 年度（第 9 次）	令和元年度（第 10 次）	令和 2 年度（第 11 次）	令和 3 年度（第 12 次）
走行サーベイ [a]	第 1 回 H23/6/4-6/13	第 2 回 (J)H23/12/5-12/28 第 3 回 (自)H24/3/13-3/30	第 4 回 (J)H24/8/20-9/7 (自)H24/9/3-10/12 第 5 回 (J)H24/11/5-11/30 (自)H24/11/9-12/10	第 6 回 (J)H25/6/12-8/8 (自)H25/6/24-7/26 第 7 回 (J)H25/11/5-12/4 (自)H25/11/5-12/12	第 8 回 (J)H26/6/23-7/24 (自)H26/7/1-8/8 第 9 回 (J)H26/11/4-12/5 (自)H26/11/4-12/5	第 10 回 (J)H27/7/2-7/24 (自)H27/6/29-8/4 第 11 回 (J)H27/11/5-11/27 (自)H27/11/2-12/18	第 12 回 (J)H28/6/27-7/19 (自)H28/7/4-8/5 第 13 回 (J)H28/10/31-12/16 (自)H28/10/31-11/30	第 14 回 (J)H29/7/3-7/21 第 15 回 (J)H29/10/24-11/27 (自)H29/10/20-12/5	第 16 回 (J)H30/7/30-8/24 第 17 回 (J)H30/11/1-11/30 (自)H30/10/22-12/5	第 18 回 (J)R1/6/27-7/16 第 19 回 (J)R1/11/11-12/4 (自)R1/10/28-12/13	第 20 回 (J)R2/6/23-7/30 第 21 回 (J)R2/11/4-12/1 (自)R2/10/26-12/1	第 22 回 (J)R3/6/22-7/8 第 23 回 (J)R3/11/4-12/3 (自)R3/10/19-12/2
歩行サーベイ				第 1 回 H25/6/10-7/5 第 2 回 H25/11/5-12/4	第 3 回 H26/7/28-9/12 第 4 回 H26/10/30-12/16	第 5 回 H27/6/29-8/5 第 6 回 H27/10/26-12/4	第 7 回 H28/6/29-8/5 第 8 回 H28/10/27-12/13	第 9 回 H29/10/30-12/1	第 10 回 H30/11/1-12/5	第 11 回 R1/6/12-11/22	第 12 回 R2/6/9-11/6	第 13 回 R3/5/11-11/18
定点サーベイ [b]	第 1 回 H23/6/4-6/14 H23/6/27-6/29 H23/6/28-7/8	第 2 回 H23/12/13-H24/5/29	第 3 回 H24/8/14-9/7 第 4 回 H24/11/5-12/7	第 5 回 H25/6/3-7/4 第 6 回 H25/10/28-12/4	第 7 回 H26/7/15-9/5 第 8 回 H26/11/4-12/5	第 9 回 H27/8/3-9/8	第 10 回 H28/8/22-10/4	第 11 回 H29/8/28-10/10	第 12 回 H30/9/13-10/26	第 13 回 R1/8/22-9/27	第 14 回 R2/8/20-10/1	第 15 回 R3/8/19-9/30
無人ヘリ			第 1 回 H24/8/30-10/20 第 2 回 H25/1/27-3/20	第 3 回 H25/6/6-7/31 第 4 回 H25/11/19-H26/1/7	第 5 回 H26/6/23-7/22 第 6 回 H26/11/14-H27/1/15	第 7 回 H27/9/2-10/22	第 8 回 H28/9/1-10/13	第 9 回 H29/6/13-9/5	第 10 回 H30/7/11-10/16	第 11 回 R1/6/13-12/1	第 12 回 R2/6/9-10/6	第 13 回 R3/5/17-10/4
沈着量（in-situ）	土壌試料採取 [d]	第 1 回 H23/12/13-H24/5/29	第 2 回 H24/8/13-9/19 第 3 回 H24/11/5-12/12	第 4 回 H25/6/3-7/10 第 5 回 H25/10/28-12/6	第 6 回 H26/6/23-7/30 第 7 回 H26/10/27-12/5	第 8 回 H27/8/24-10/7	第 9 回 H28/8/24-10/6	第 10 回 H29/8/30-10/11	第 11 回 H30/9/13-10/25	第 12 回 R1/8/8-11/1	第 13 回 R2/8/6-10/15	第 14 回 R3/8/6-10/19
深度分布（スクレーパープレート）	鉄パイプ試料採取 [e]	第 1 回 H23/12/12-12/22、 H24/4/17-4/19	第 2 回 H24/8/21-9/5, 9/26 第 3 回 H24/11/26-12/7、12/21	第 4 回 H25/6/3-6/27 第 5 回 H25/10/28-11/29	第 6 回 H26/7/14-7/24 第 7 回 H26/11/4-11/13	第 8 回 H27/8/24-9/25	第 9 回 H28/8/23-10/11	第 10 回 H29/8/23-9/13	第 11 回 H30/9/13-10/11	第 12 回 R1/8/21-9/13	第 13 回 R2/8/18-9/7	第 14 回 R3/8/18-9/10

a）走行サーベイにおける(J)は原子力機構、(自)は自治体による測定。　b）定点サーベイ：人為的な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。
c）（　）内は通算調査次数の意味。　d）平成 23 年度(第 1 次)調査では in-situ 測定はせず土壌試料採取を実施。　e）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。

2. 地上における広域の空間線量率の分布測定

2.1 調査目的

事故により福島第一原発から放出された放射性物質の現状における沈着状況等を詳細に調査しその変化傾向を把握するとともに多角的に空間線量率を評価するため、車載機器による走行サーベイ、サーベイメータによる人為的な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実施している。令和 3 年度調査においても、これまでの調査と同様の手法を用いて、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 μSv/h 以上の比較的空間線量率が高い地域の主要幹線道路について、主に 80 km 圏内について 1 回、岩手県から千葉県までの 8 県を含む東日本広域について 1 回実施した。さらに、地方自治体が希望する細かな道路を含む測定を地方自治体と協働で 1 回実施した（地方自治体が KURAMA-II を用いて測定し､原子力機構は解析を担当)。測定期間及び測定エリア等について表 2-1 に示す。なお、KURAMA-II は測定開始前に点検・校正を実施した（歩行サーベイに用いた KURAMA-II も同様)。

車内における空間線量率測定値を車外の空間線量率に換算するための補正係数 [2] を用いて、車内での測定結果から道路上 1 m 高さの空間線量率を求めた。現在の空間線量率への寄与の大部分がセシウム 134 及び 137（以下「放射性セシウム」という。）によるものであり、2 回の各測定期間中の放射性セシウムの物理的減衰に伴う空間線量率の減少は 1%程度と評価される。この減少率は測定機器の有する不確かさよりも十分に小さいことを考慮して、空間線量率測定値を一定の日付に揃える減衰補正を行なわず、測定した日の測定結果をそのま

ま使用した。道路上において連続的に測定された空間線量率の測定結果を基に、これまでと同様に、走行地域を総務省が指定する 1 km×1 km の「基準地域メッシュ」をベースとした 100 m×100 m のメッシュ（以下「100 m メッシュ」という。本報告書において、他の大きさのメッシュも同様に 20 m メッシュや 10 m メッシュなどという。）に分割し、そのメッシュ内に含まれる空間線量率の値を平均してメッシュの代表値とした。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

点検・校正されている NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータ（日立製作所製 TCS-172B）を使用して、地面から 1 m 高さの空間線量率を測定した。時定数 10 秒で 5 回読取った値の平均値をその地点での空間線量率測定値とした。GPS を用いて測定箇所の位置情報を取得した。

測定期間及び測定エリア等について表 2-1 に示す。80 km 圏内を中心に基準地域メッシュに分割し、事故以前に人が居住していなかった地域（以下「非可住区域」という。）を除く各基準地域メッシュ内で測定に適した 1 箇所を測定箇所として選定した。測定箇所までの道路が通行止め等により測定が困難であった箇所を除いた測定箇所数は 5,026 箇所であった（図 2-1 参照）。

2.2.3 歩行サーベイ

KURAMA-II システムを測定者が背負い（空間線量率の測定高さは概ね地上 1 m）、歩きながら空間線量率データ及び位置情報を収集した。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測定を実施した。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 2 年度との比較

測定結果の妥当性と令和 2 年度の調査結果からの変化傾向を確認するため測定手法ごとに令和 2 年度と令和 3 年度の調査結果を比較した。比較に用いるデータは、基準地域メッシュごとに、メッシュ内に入る測定結果を平均した。また、定量的に傾向を把握するために式 (1)

のように相対変化率 RC を定義し、基準地域メッシュごとに計算した数値をヒストグラムにして平均値及び中央値を求めた。

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

ここで、D_1 及び D_2 はそれぞれ比較対象の測定時期での測定結果及び基準とする測定時期での測定結果である。例えば、令和 2 年度に対する令和 3 年度の相対変化率は、$(D_{R3} - D_{R2})/\,D_{R2}$ である（ここで、D_{R2} 及び D_{R3} はそれぞれ令和 2 年度及び令和 3 年度の測定結果)。なお、双方とも天然放射性核種による空間線量率寄与を含んだ数値である。

2.2.5 測定手法間の比較

3 種類の測定手法は、それぞれ次のような特徴がある。走行サーベイは、車内に検出器を搭載して車道を走行しながら空間線量率を測定しているため、車道上の空間線量率変化の影響を受けやすい。定点サーベイは、アスファルト等で覆われていない平坦で開かれた場所を選定しており、人為的なかく乱の影響が少ない。歩行サーベイは、定点サーベイで選定された測定点周辺の車道や歩道で測定しており、走行サーベイと同様に車道上の空間線量率の影響を受けやすく、場所によっては定点サーベイに近い測定環境であるといえる。これらの測定手法の特徴の違いが測定結果に与える影響を評価するために相互比較を行った。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。

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

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

表 2-1　地上における空間線量率測定の測定期間及び測定エリア

測定	走行サーベイ			定点サーベイ	歩行サーベイ
	第 22 回	第 23 回		第 15 回	第 13 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	R3/6/22 ～7/8	R3/11/4 ～12/3	R3/10/19 ～12/2	R3/8/19 ～9/30	R3/5/11 ～11/18
測定エリア	主に 80 km 圏内[*1]	8 県[*2]	7 県[*3]	主に 80 km 圏内	主に 80 km 圏内
測定距離又は測定点数	8,520 km	14,965 km	16,881 km	実績 5,026 点 （中止 5 点）	566 箇所[*4]

[*1] 宮城県、福島県、茨城県

[*2] 岩手県、宮城県、福島県、茨城県、栃木県、群馬県、埼玉県、千葉県

[*3] 岩手県、宮城県、福島県、茨城県、栃木県、群馬県、埼玉県

[*4] 測定ルートが含まれる基準地域メッシュ（1 km×1 km）の数

表 2-2　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

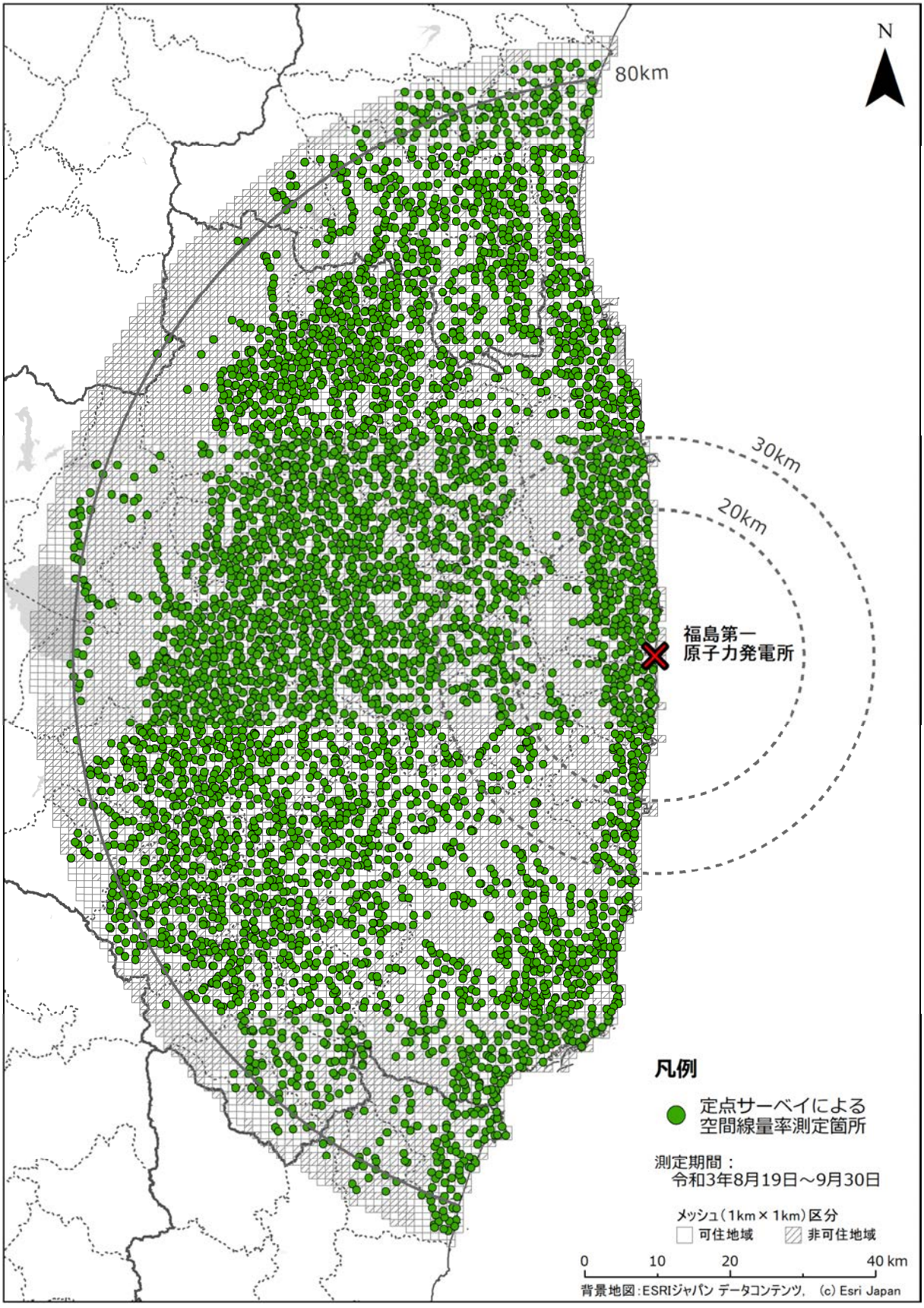


図 2-1　令和 3 年度調査における定点サーベイによる空間線量率の測定箇所

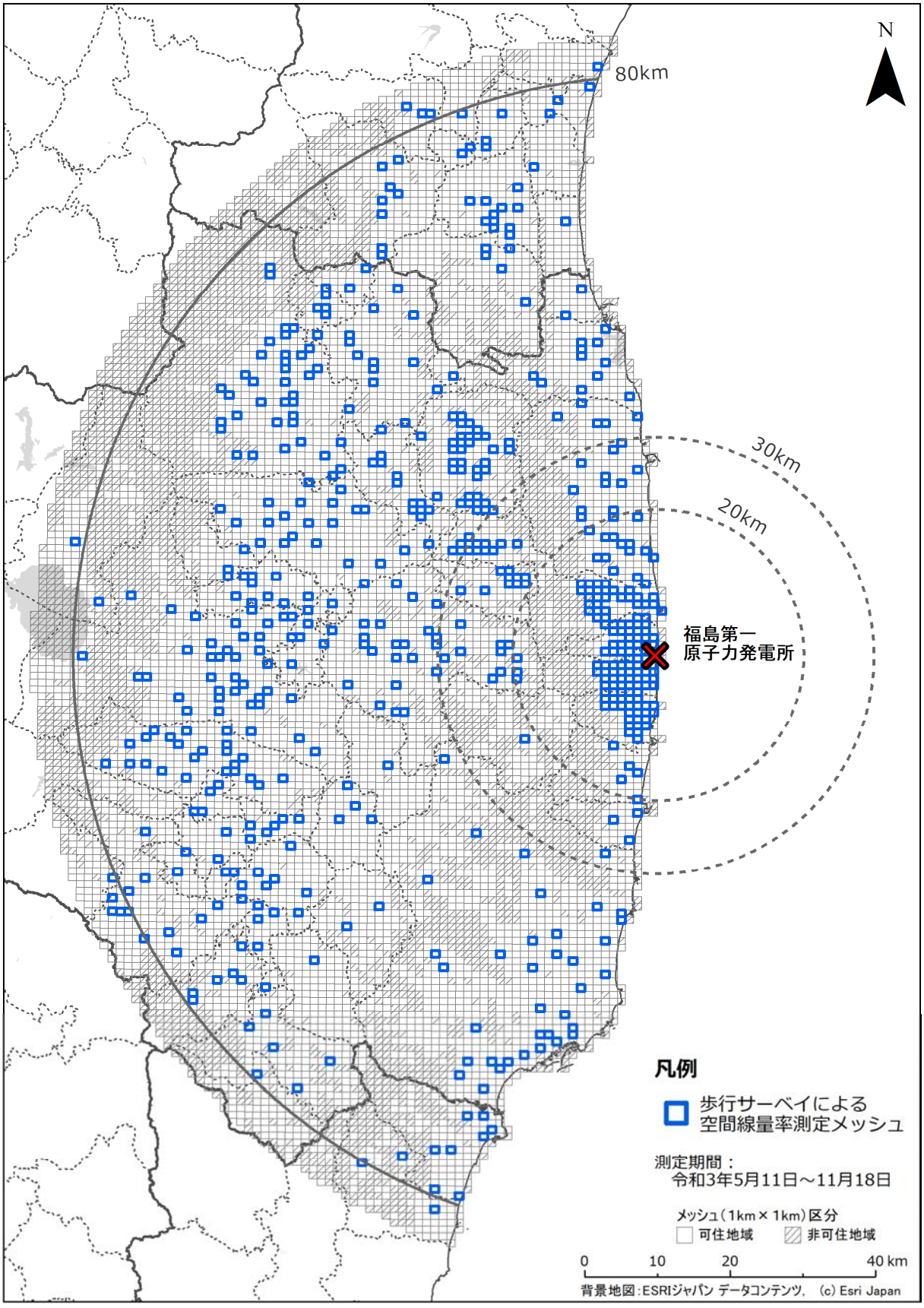


図 2-2　令和 3 年度調査における歩行サーベイによる空間線量率の測定箇所

2.3 空間線量率測定結果

2.3.1 空間線量率分布マップ

1) 走行サーベイ

令和 3 年度の 2 回の走行サーベイの結果に基づき作成した空間線量率分布マップをそれぞれ図 2-3 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)。これらの図より、現状では、80 km 圏内や栃木県北東部の一部を除き、0.2 μSv/h 未満の地域がほとんどを占めていることが分かる。各年度の比較のため、平成 23 年度（第 1 次調査）（第 1 回走行サーベイ）から令和 3 年度 2 回目（第 23 回走行サーベイ）までの測定結果（主に 80 km 圏内について事故後約 3 ヶ月、9 ヶ月、18 ヶ月、28 ヶ月、40 ヶ月、52 ヶ月、76 ヶ月、100 ヶ月及び 123 ヶ月における空間線量率分布マップ）を図 2-5 に示す。福島第一原子力発電所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。

2) 定点サーベイ

令和 3 年度の定点サーベイによる空間線量率の測定結果を図 2-6 に示す。また、平成 23 年度調査から令和 3 年度調査までの測定結果（事故後約 3 ヶ月、12 ヶ月、17 ヶ月、27 ヶ月、41 ヶ月、53 ヶ月、78 ヶ月、102 ヶ月及び 126 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 3 年度の歩行サーベイの結果に基づき作成した空間線量率分布マップを図 2-8 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、80 ヶ月、102 ヶ月及び 125 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 μSv/h 以上となる橙色や赤色で示されるデータは少ない。

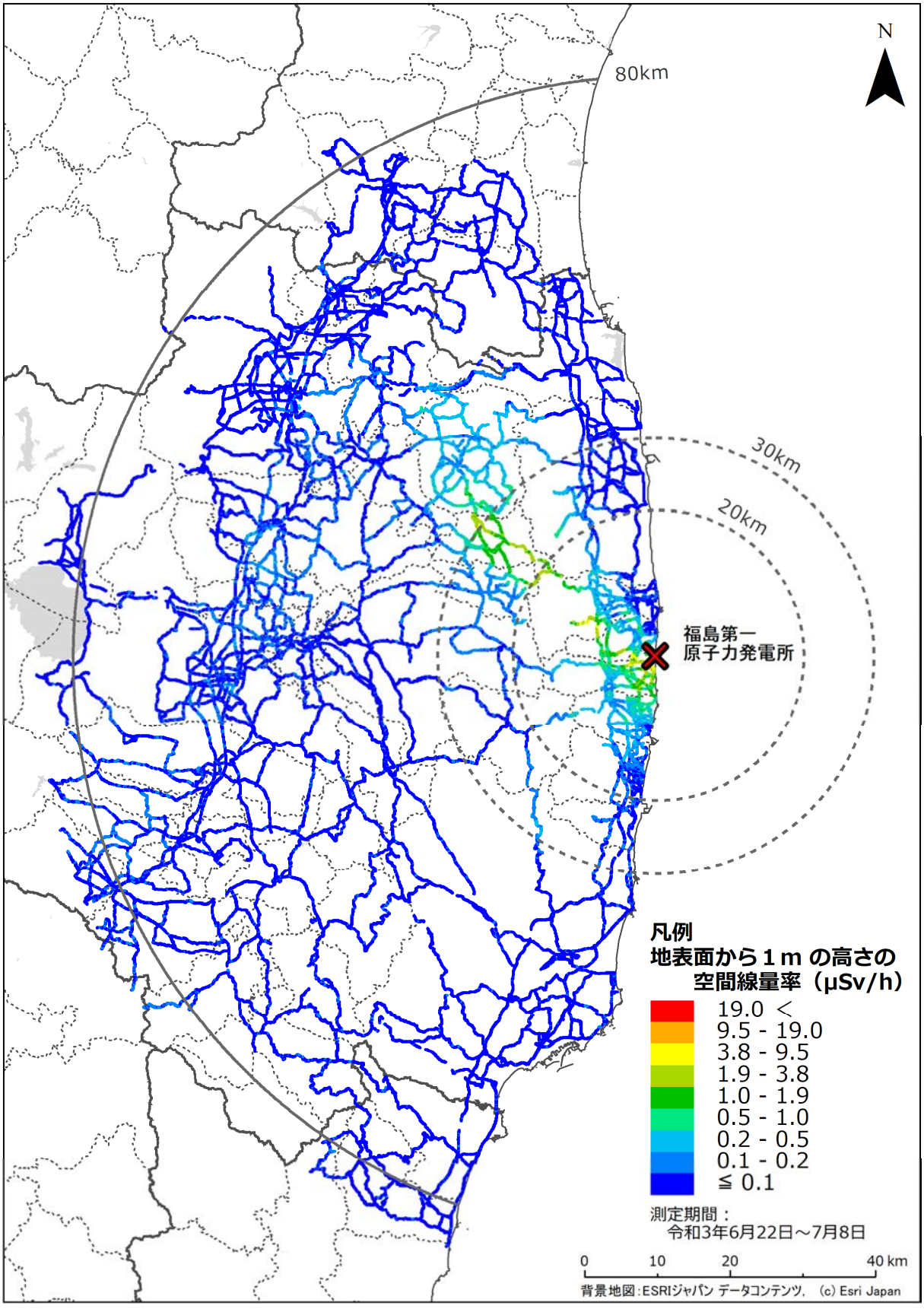


図 2-3　令和 3 年度 1 回目（第 22 回）走行サーベイによる空間線量率の測定結果
（天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。）

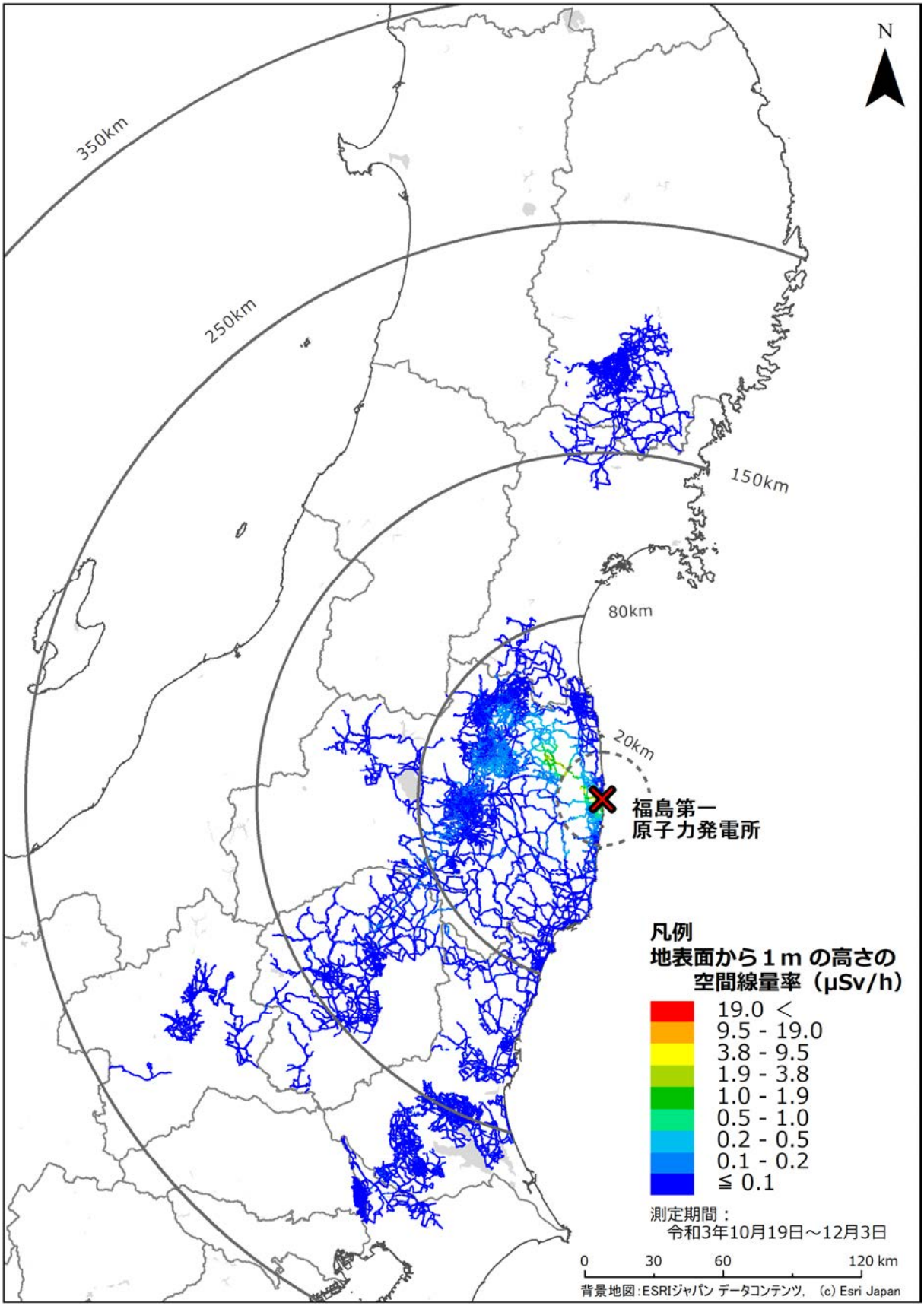
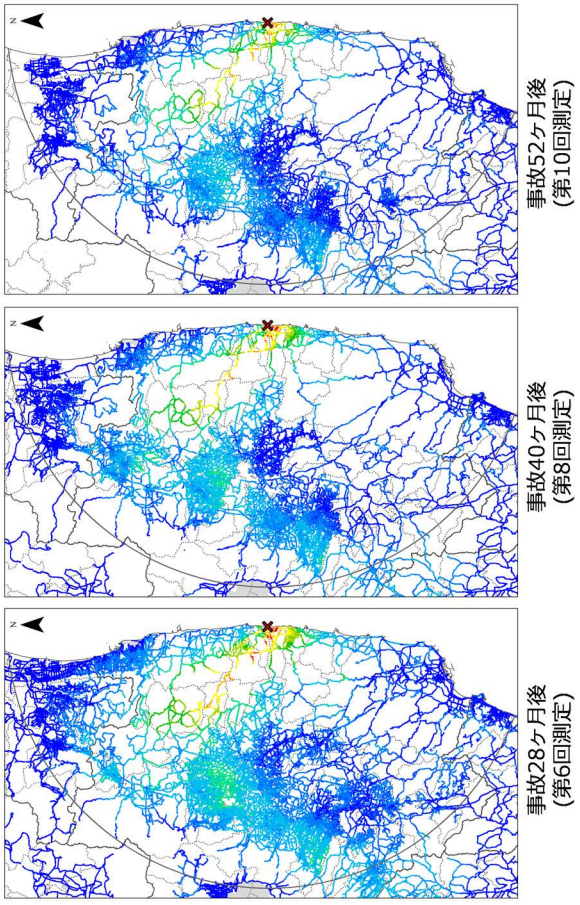


図 2-4　令和 3 年度 2 回目（第 23 回）走行サーベイによる空間線量率の測定結果
（天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。）



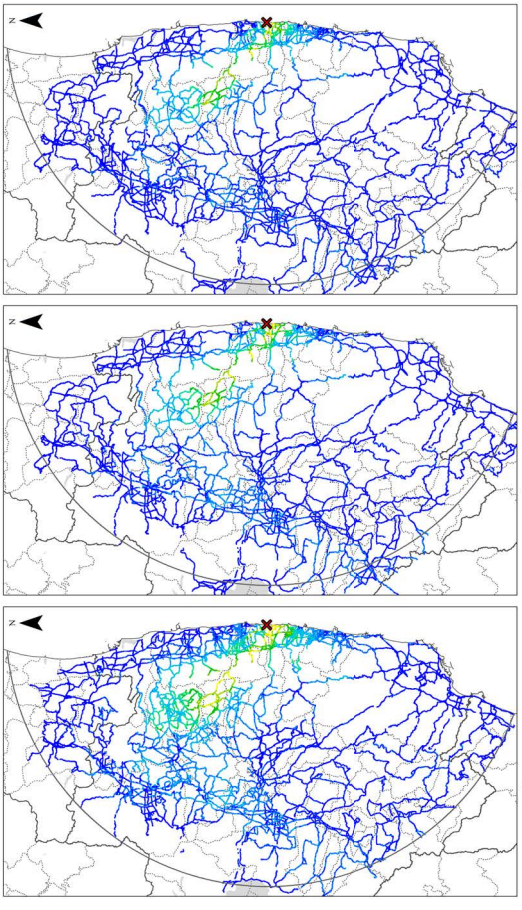


図 2-5　平成 23 年度から令和 3 年度までの走行サーベイによる
80 km 圏内を中心とした空間線量率マップの変化
（天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。）

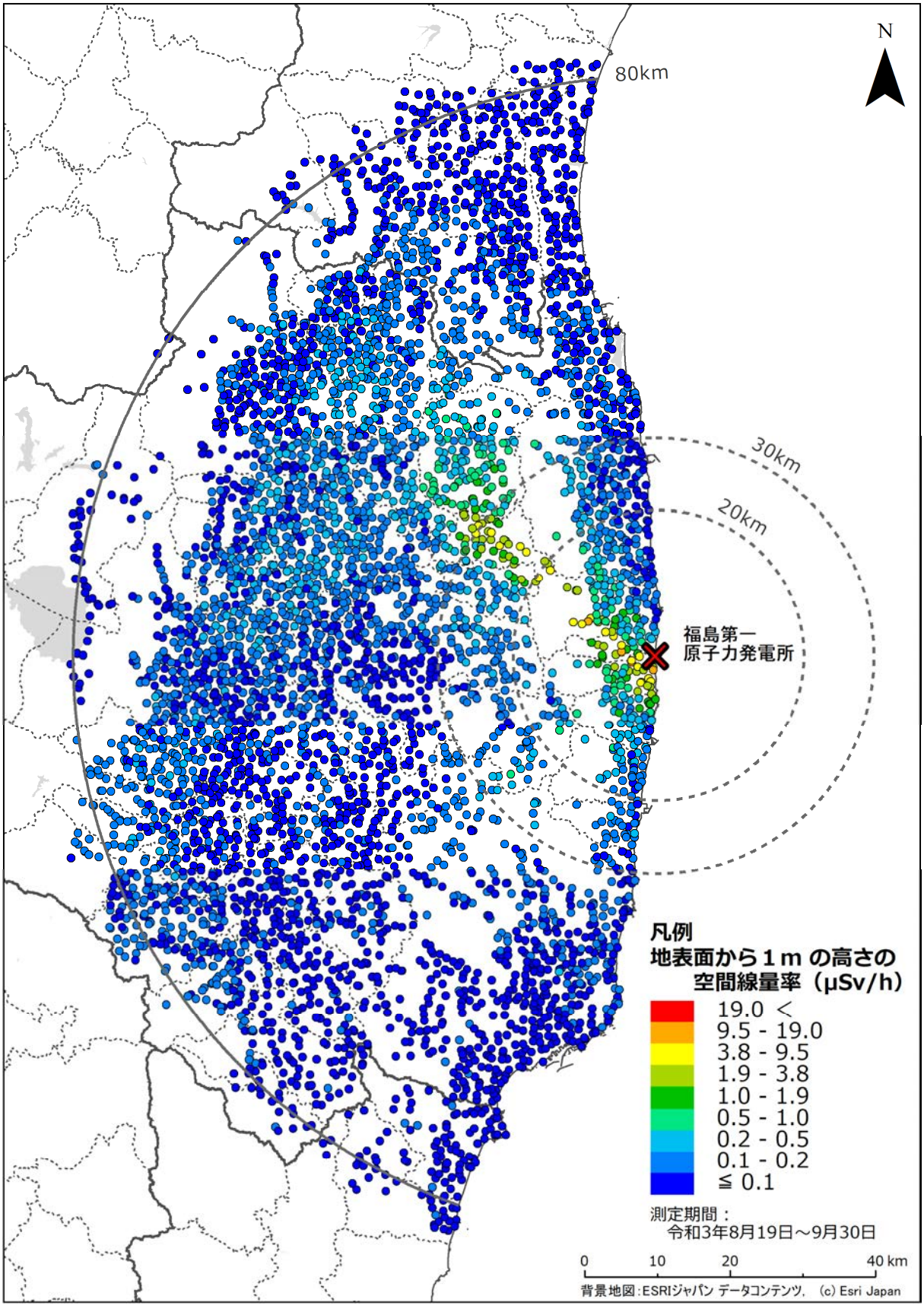


図 2-6　令和 3 年度調査における定点サーベイによる空間線量率の測定結果
（天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。）

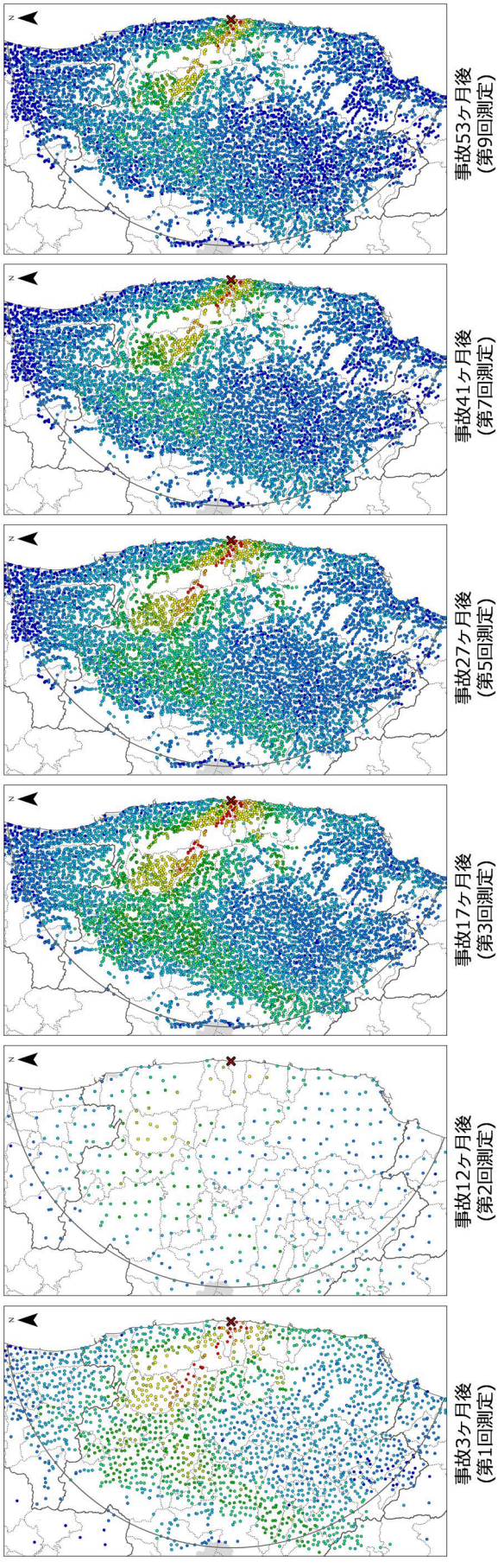


図 2-7　平成 23 年度から令和 3 年度までの定点サーベイによる空間線量率マップの変化
（天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。）

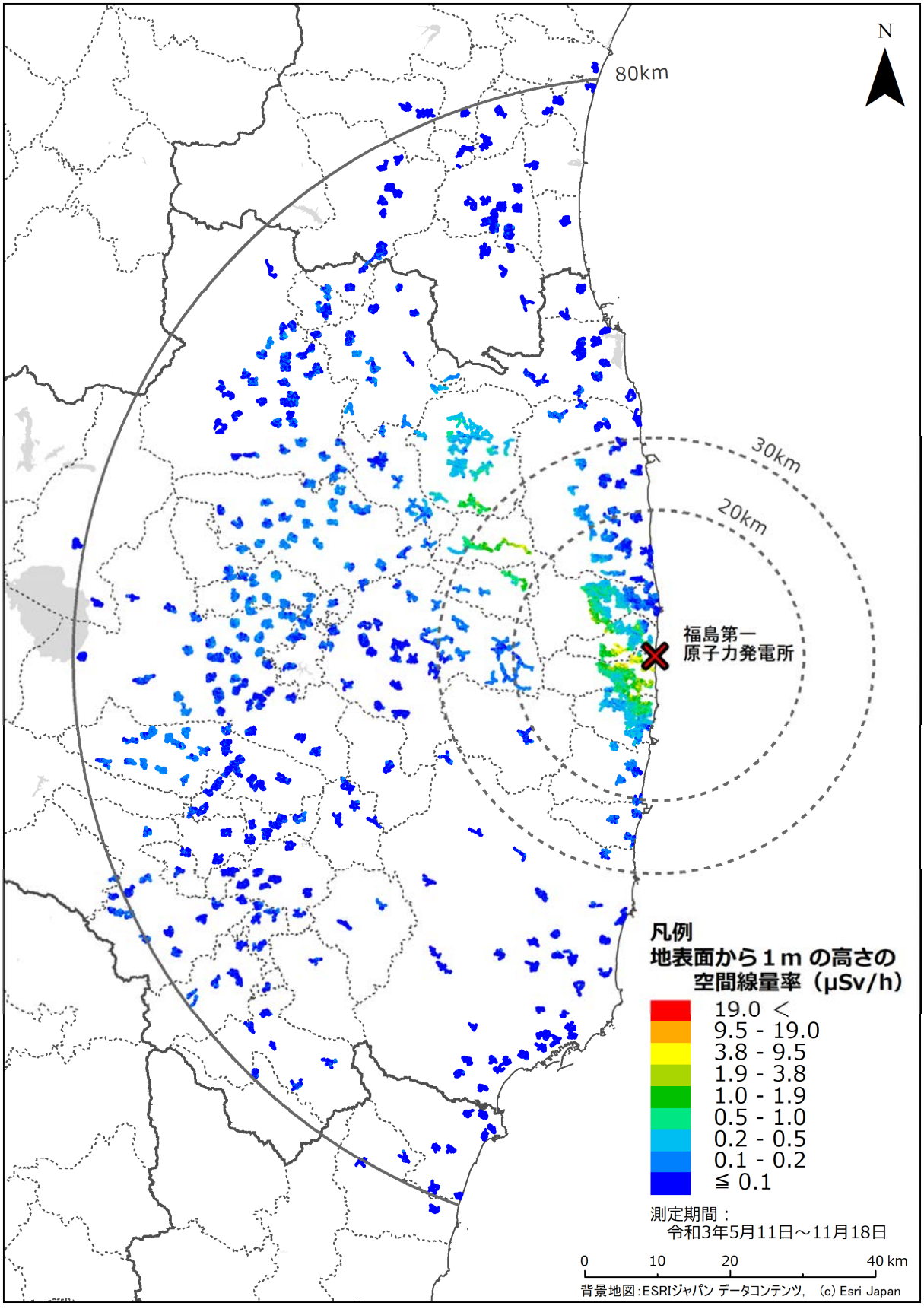


図 2-8　令和 3 年度調査における歩行サーベイによる空間線量率の測定結果
（天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。）

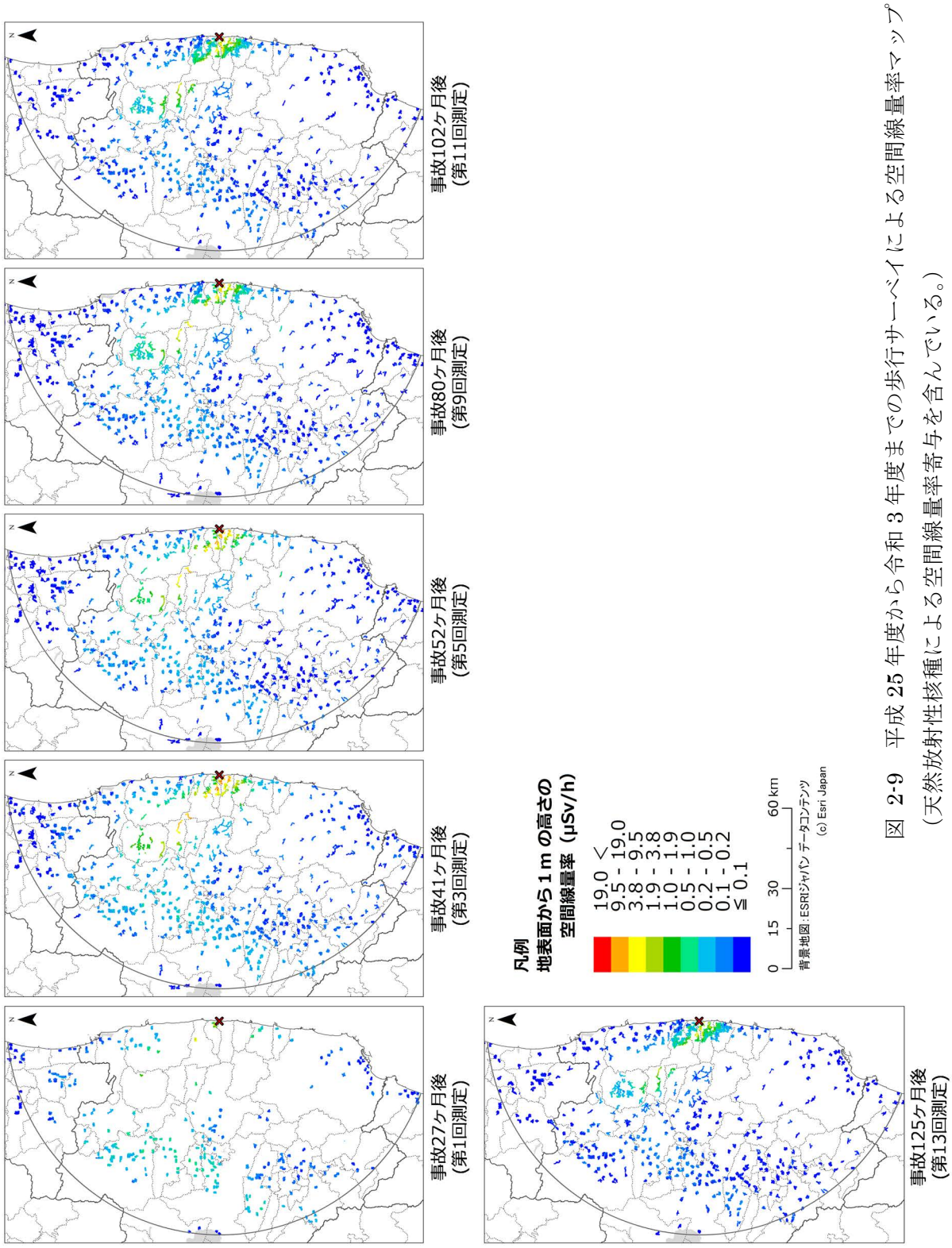


図 2-9　平成 25 年度から令和 3 年度までの歩行サーベイによる空間線量率マップの変化
（天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。）

2.3.2 令和 2 年度との比較

走行サーベイ、定点サーベイ及び歩行サーベイの令和 2 年度の結果との比較について、散布図及び式(1)により計算した相対変化率 RC（ヒストグラム及び積算割合）を図 2-10 に示す。全測定手法について令和 2 年度の結果と令和 3 年度の結果はよい相関関係にあり、相対変化率 RC は正規分布に近い釣鐘型を示した。

各基準地域メッシュにおける相対変化率 RC の平均値を放射性セシウムの半減期から計算した理論的な空間線量率の変化率と比較した結果について表 2-3 に示す。理論的な空間線量率の計算式を式 (3) に示す。

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

ここで、

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

λ_{134}: 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}Cs/^{137}Cs 放射能組成比（1.04）から求めた。

いずれの測定も測定結果による相対変化率の平均値の絶対値は放射性セシウムの半減期による変化率の絶対値よりも小さい（または変化率が正となっている）ことから、放射性セシウムによる空間線量率が減少しバックグラウンドレベルに近づいていることが推測される。また、令和元年度から令和 2 年度までの空間線量率の変化率（走行サーベイ−3.4%、定点サーベイ−5.5%、歩行サーベイ−5.8%）[4]に対して令和 2 年度から令和 3 年度までは走行サーベイ−2.6%、歩行サーベイ−4.1%と変化率が小さくなっている。定点サーベイについては+1.4%となり令和 2 年度から増加している。空間線量率が減少し全体的にバックグラウンドに近づくに従い、測定データのばらつき等により前年度から増加と評価される可能性があるなど、わずかな線量率の変動で比率が大きく変わることに注意する必要がある。

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

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

a) 各年度 1 回目の測定

2.3.3 平成 23 年度との比較

事故直後からデータが蓄積されている走行サーベイ及び定点サーベイについては、第 1 回測定（平成 23 年度調査）の測定結果からの相対変化率を式(1)により求めた。図 2-11 に平成 23 年度における測定結果と令和 3 年度における測定結果の散布図及び平成 23 年度調査に対する令和 3 年度調査の測定結果の相対変化率 RC（ヒストグラム及び積算割合）を示す。図 2-11 (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 年度の測定結果が 0.5 μSv/h 以上であったエリアのみの比較結果を示す。また、図 2-11 (c) には定点サーベイの結果の内、平成 23 年度の測定結果が 0.5 μSv/h 以上であったエリアのみの比較結果を示す。これらの散布図を見ると、走行サーベイと定点サーベイの結果は似た傾向を示しており、相対変化率の平均値はそれぞれ−90%及び−87%となった。この結果は放射性セシウムの半減期による空間線量率の変化と比較して減少が大きい傾向にあり、除染や車両往来等の人為的要因や風雨による放射性物質の除去（移動）に加え、地中への放射性物質の沈み込みによるためと考えられる。それぞれの相対変化率の平均値を表 2-4 にまとめる。

表 2-4　平成 23 年度と比較した令和 3 年度の空間線量率測定結果の変化傾向

	走行サーベイ（全地点）	走行サーベイ（≧0.5 μSv/h）*	定点サーベイ（≧0.5 μSv/h）*
平成 23 年度の測定期間	H23/6/4−H23/6/13		H23/6/4−H23/7/8
令和 3 年度の測定期間	R3/10/19−R3/12/3		R3/8/19−R3/9/30
放射性セシウムの半減期による変化率	−75%		−75%
測定結果による相対変化率の平均値	−84%	−90%	−87%

* 平成 23 年度の空間線量率測定結果が 0.5 μSv/h 以上のエリアのみで評価

2.3.4 測定手法間の比較

令和 3 年度調査での走行サーベイ、定点サーベイ及び歩行サーベイによる空間線量率の相互比較結果（2 者間の相関及び式(2)により計算した相対偏差 RD）について、図 2-12 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 26%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 19%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。

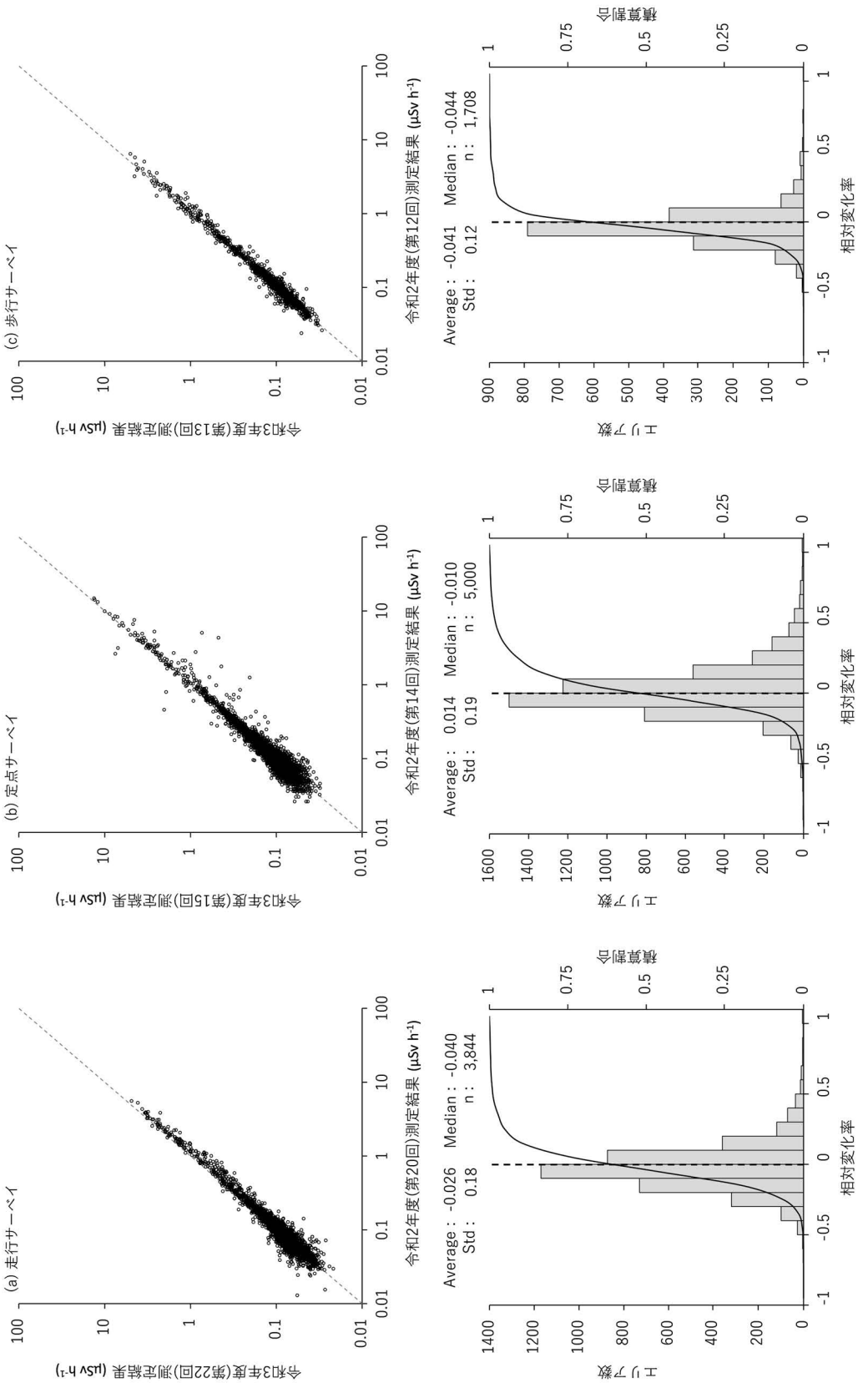


図 2-10　令和 2 年度の測定結果に対する令和 3 年度の測定結果の比
(相関図の破線は y=x、Std は標準偏差、n はデータ数を意味する。)

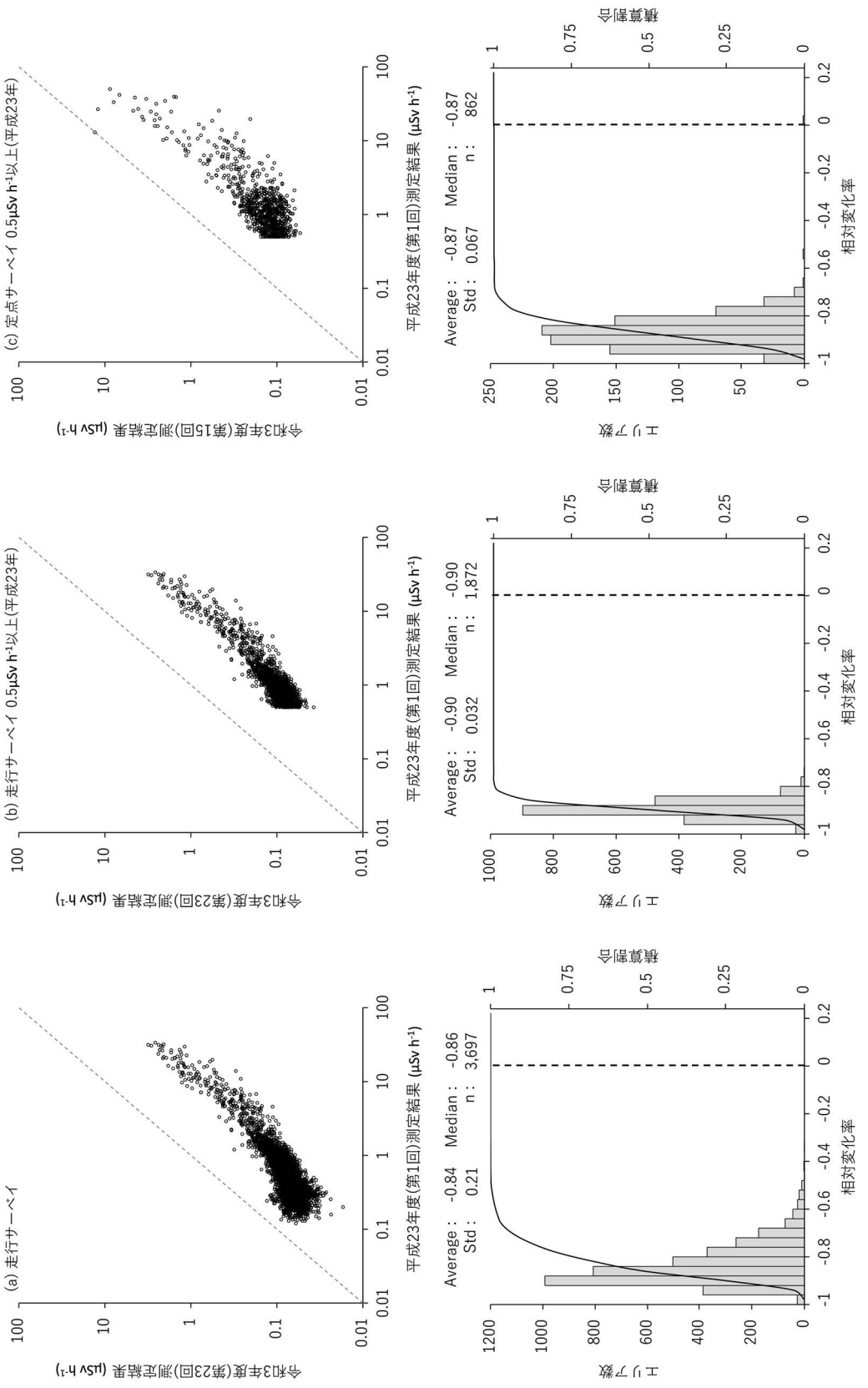


図 2-11　走行サーベイ及び定点サーベイによる空間線量率結果の平成 23 年度との比較
（相関図の破線は y=x、Std は標準偏差、n はデータ数を意味する。）

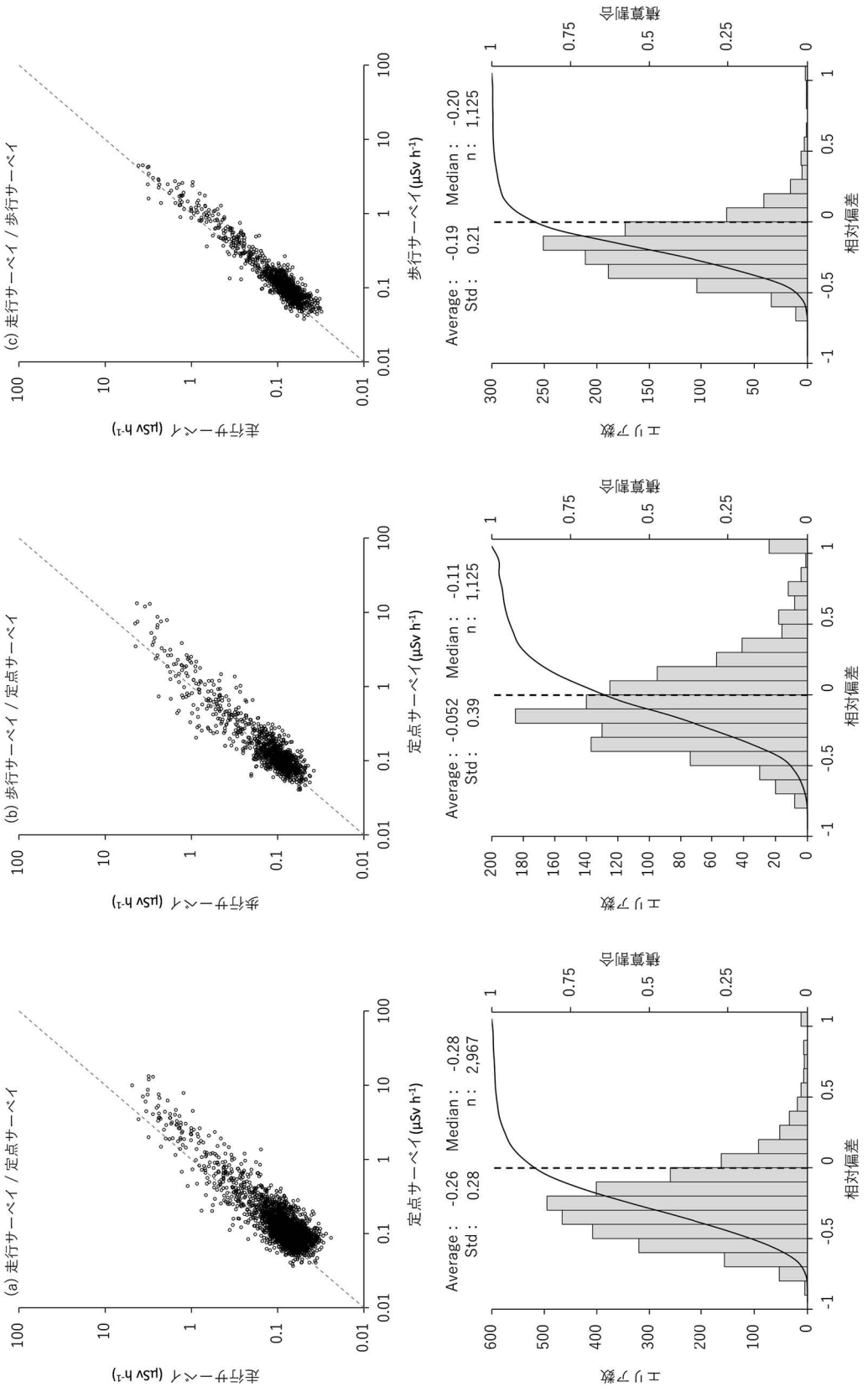


図 2-12　令和 3 年度調査での測定手法間の比較
(相関図の破線は y=x、Std は標準偏差、n はデータ数を意味する。)

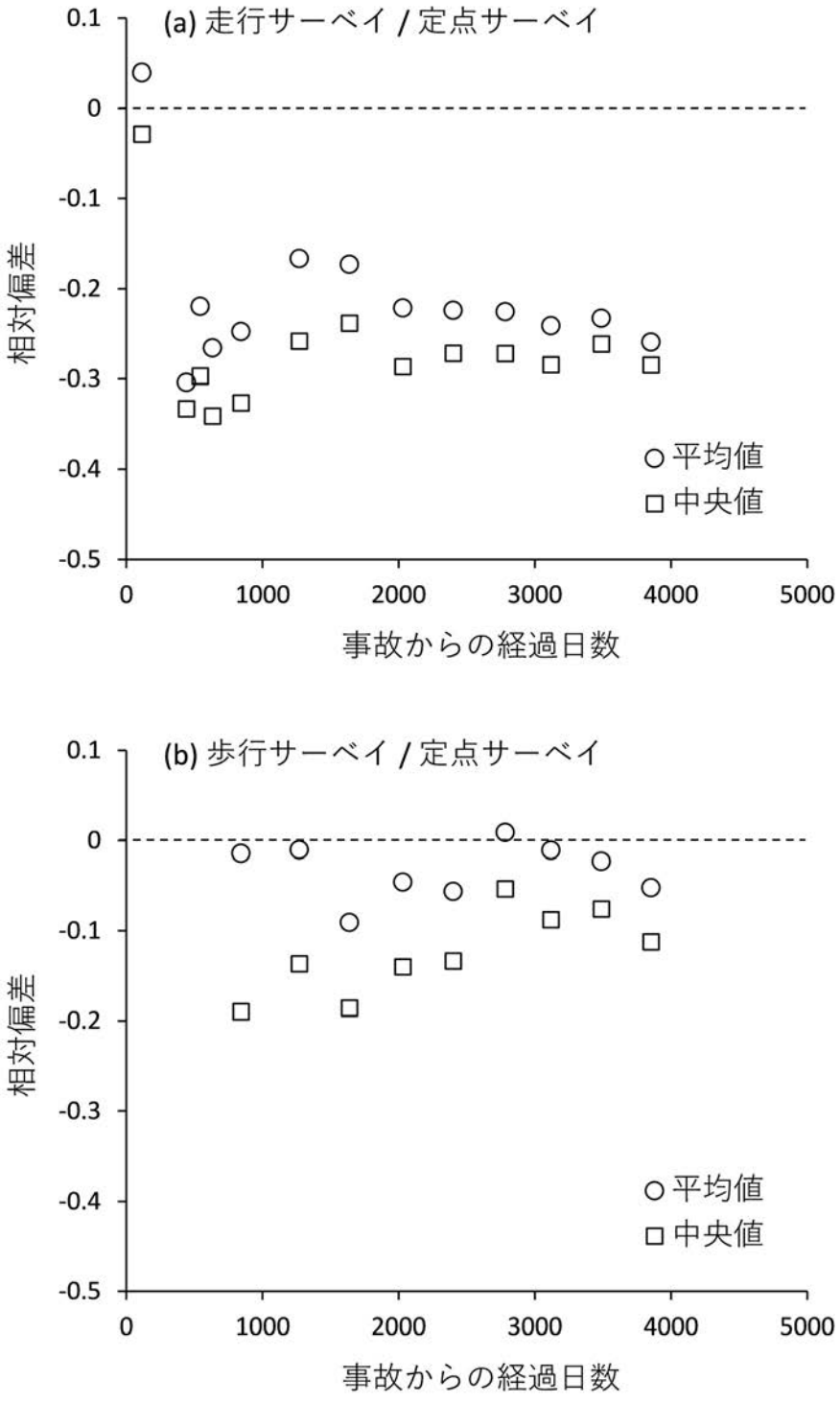


図 2-13　定点サーベイに対する走行サーベイ及び歩行サーベイの空間線量率の相対偏差

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

原子力機構では、事故直後から無人ヘリコプター（以下「無人ヘリ」という。）を用いた放射線分布の測定手法について研究開発を行っている。無人ヘリは、有人ヘリコプターと比較して低高度で飛行が可能であり、ヘリコプターの軌跡幅（測線間隔）も細かく設定できるため、位置分解能の高い空間線量率分布の測定が可能である。原子力機構による無人ヘリによる空間線量率測定（以下「無人ヘリサーベイ」という。）の成果としては、分布状況調査で行っている福島第一原発周辺のモニタリング [5]、河川敷のモニタリング [6] 及び除染前後のモニタリング [7] などが挙げられる。

事故以来、福島第一原発から 3 km 圏内については、航空法による飛行制限区域（平成 25 年 2 月 5 日までは飛行禁止区域）となっており、有人ヘリコプターによるモニタリング（以下「航空機サーベイ」という。）は実施されていなかった。また、地上での測定結果も限られており、本地域の全体像の把握が必要であった。そこで、平成 24 年度より航空法による規制を受けない無人ヘリを用いて福島第一原発から 3 km 圏内の無人ヘリサーベイを開始した [8]。平成 25 年度からは、航空機サーベイとの比較も考慮し、航空機サーベイと 2 km 程度オーバーラップさせ約 5 km 圏内を測定対象とすることにした。本地域は、事故直後には空間線量率が高く帰還困難区域に設定されたことから、事故後数年における放射性物質の移動への人為的な影響が小さい。一方、近年除染によって生じた廃棄物の中間貯蔵施設の建設、高速道路・鉄道の整備及び特定復興再生拠点区域に認定され 5 年後（令和 4 年から）の避難指示解除をめざして除染が加速されるなど、環境が変化している。本地域での面的及び継続的なデータの取得により、放射性物質の環境動態や人為的活動の影響について知見を得ることが可能と考えられる。なお、過去 10 回の測定におけるデータの解析から、無人ヘリサーベイで確認した空間線量率の減衰は、放射性セシウムの物理的半減期から計算した変化量よりも大きいことが分かってきている。

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

3.2 調査手法

3.2.1 調査場所・期間

調査場所は、福島第一原発周辺（5 km 圏内）を設定した。

調査期間：令和 3 年 5 月 17 日～10 月 4 日

フライト範囲：70.2 km^2

合計測定距離：841 km

3.2.2 調査機器

測定にあたっては、ヤマハ発動機（株）自律飛行型無人ヘリ FAZER-R G2 を使用し、地上

からの直達ガンマ線及び空気による散乱線を合わせた全計数率とガンマ線エネルギースペクトルを１秒間に１回連続測定した。また、放射線検出器は $LaBr_3$(Ce)(Lanthanum Bromide)シンチレーション検出器（1.5”Φ×1.5”×3 本）を用いた（図 3-1 参照）。

図 3-1　無人ヘリの仕様等

3.2.3 データ取得方法

無人ヘリの飛行高度は、安全面及び測定データの信頼性を考慮し、対地高度で 80 m を目安とした。上空で測定される放射線は、無人ヘリ下部の直径約 200 m 程度の円内のガンマ線量を平均化したものである[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: μSv/h/cps）を算出した。さらに、テストサイト上空を対地高度 10 m から 100 m まで 10 m ごとにホバリングし、各高度におけるガンマ線計数率を測定し、高度ごとのガンマ線計数率から対地高度とガンマ線計数率との関係式を求め、高度補正係数（*AF*: Attenuation Factor: m^{-1}）を算出した。平成 30 年度から令和 3 年度に取得したテストサイトにおけるキャリブレーション結果を表 3-1 に示す。

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

$$D = \frac{C_{\mathrm{net}} \times HF}{CD} \tag{4}$$

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

表 3-1　テストサイトにおける換算パラメータ取得条件

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

3.2.5 空間線量率マップの作成

マップとして示すために、無人ヘリサーベイによる測定点間の空間線量率の値は、内挿法

（クリギング法）を用いて 5 m メッシュの分解能で内挿補間した。比較等に使用する数値としては、データ数を考慮し、50 m メッシュとした。

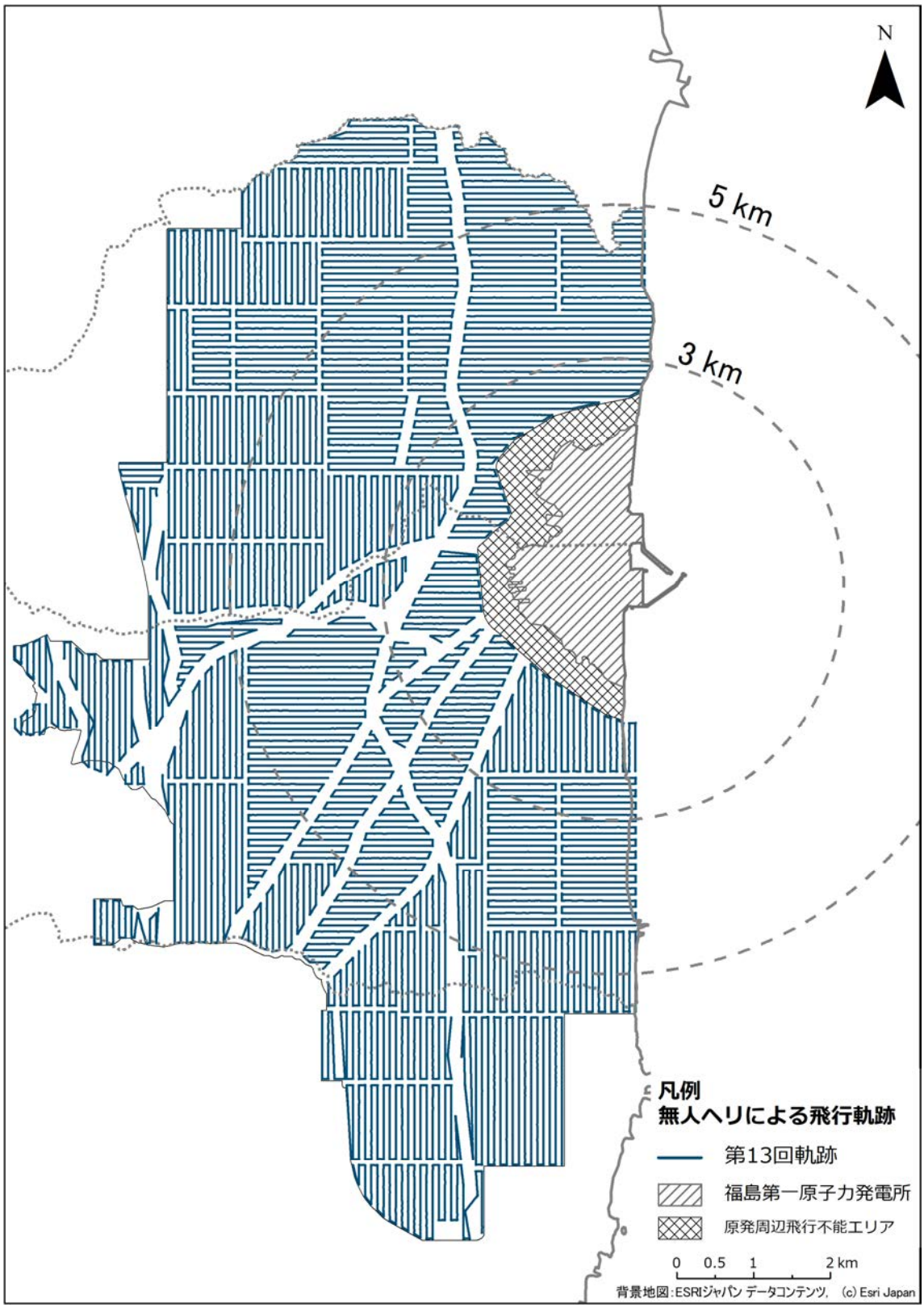


図 3-2　令和 3 年度無人ヘリサーベイの飛行軌跡

3.3 調査結果

3.3.1 空間線量率マップ

令和 3 年度に実施した無人ヘリサーベイによる空間線量率マップを図 3-3 に示す。また、第 1 回から令和 3 年度までの主に 5 km 圏内の空間線量率マップ（事故後約 19 ヶ月、24 ヶ月、28 ヶ月、40 ヶ月、55 ヶ月、78 ヶ月、105 ヶ月及び 127 ヶ月）を図 3-4 に示す。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。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。

3.3.2 測定結果の妥当性の検証

結果の妥当性を検証するために、測定地点直下の地上で測定した結果と比較した。地上における空間線量率は、第 2 章の定点サーベイによる測定結果とした。無人ヘリサーベイの測定結果と同地点における地上での測定結果を比較した散布図及び式(2)に示したような 2 測定間の相対偏差を図 3-5 に示す。散布図を見ると良い相関関係（決定係数 R^2=0.86）を示しており、令和 3 年度の結果は概ね地上の測定結果を再現できていたと考えられる。なお、1 μSv/h 以下の低線量域において無人ヘリサーベイによる測定値が過大評価となり、相対偏差が 1 以上となる頻度がやや大きくなる傾向が近年見られる。この原因として、無人ヘリサーベイは広い範囲の平均的な線量を測定するのに対し、地上での測定が、除染等の理由で周辺の空間線量率と比較して局所的に低い測定ポイントで実施されることが多くなったことが考えられる。

3.3.3 令和 2 年度との比較

測定区域を 100 m メッシュに分割し、メッシュごとに令和 2 年度と令和 3 年度の空間線量率測定結果を比較した。散布図及び式(1)で定義した相対変化率を図 3-6 に示す。散布図は良い相関関係（決定係数 R^2=0.99）を示している。また、令和 3 年度は令和 2 年度から 7% 減少（変化率の平均値で）したことが分かる。

図 3-7 に令和 2 年度の空間線量率測定結果に対する令和 3 年度の空間線量率の測定結果の比をマップにして示す。福島第一原発周辺の地域を中心に顕著に空間線量率の減少が確認できる場所があることが分かった。この要因を調査した結果を図 3-8 に示す。ほとんどの地域は、現在、建設中である中間貯蔵施設のエリア又は特定復興再生拠点区域復興再生計画のエリアと一致しており、施設建設における造成作業や除染による影響が表れているものと考えられる。

3.3.4 天然放射性核種による空間線量率マップ

無人ヘリサーベイではガンマ線スペクトルを測定できるため、平成 25 年度に確立したガンマ線スペクトル情報から放射性核種ごとに評価する手法 [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 keV～2,800 keV の計数率と全計数率の比（*BG-index*）が一定であることを利用して天然放射性核種による空間線量率を評価する。図 3-9 に天然放射性核種による空気カー

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

3.3.5 福島第一原発から約 5 km 圏内の放射性セシウム沈着量評価

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

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

CF を求めるには、重量緩衝深度の設定が必要であるが、4.1 節に示す結果から実効的な重量緩衝深度 β_{eff}=4.11 g/cm² 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 3 年 10 月に半減期補正した値と、本年度の無人ヘリによる測定結果と比較した結果を図 3-10 に示す。このように両者は一定の相関関係にあるが、相対偏差値のヒストグラムを見ると平均値も中央値も無人ヘリでの換算結果が高い傾向にある。また、散布図での分布をみると特に濃度の低いデータについて無人ヘリが高い傾向にあり、バックグラウンド値の評価に課題があることが主な要因と考えられる。

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

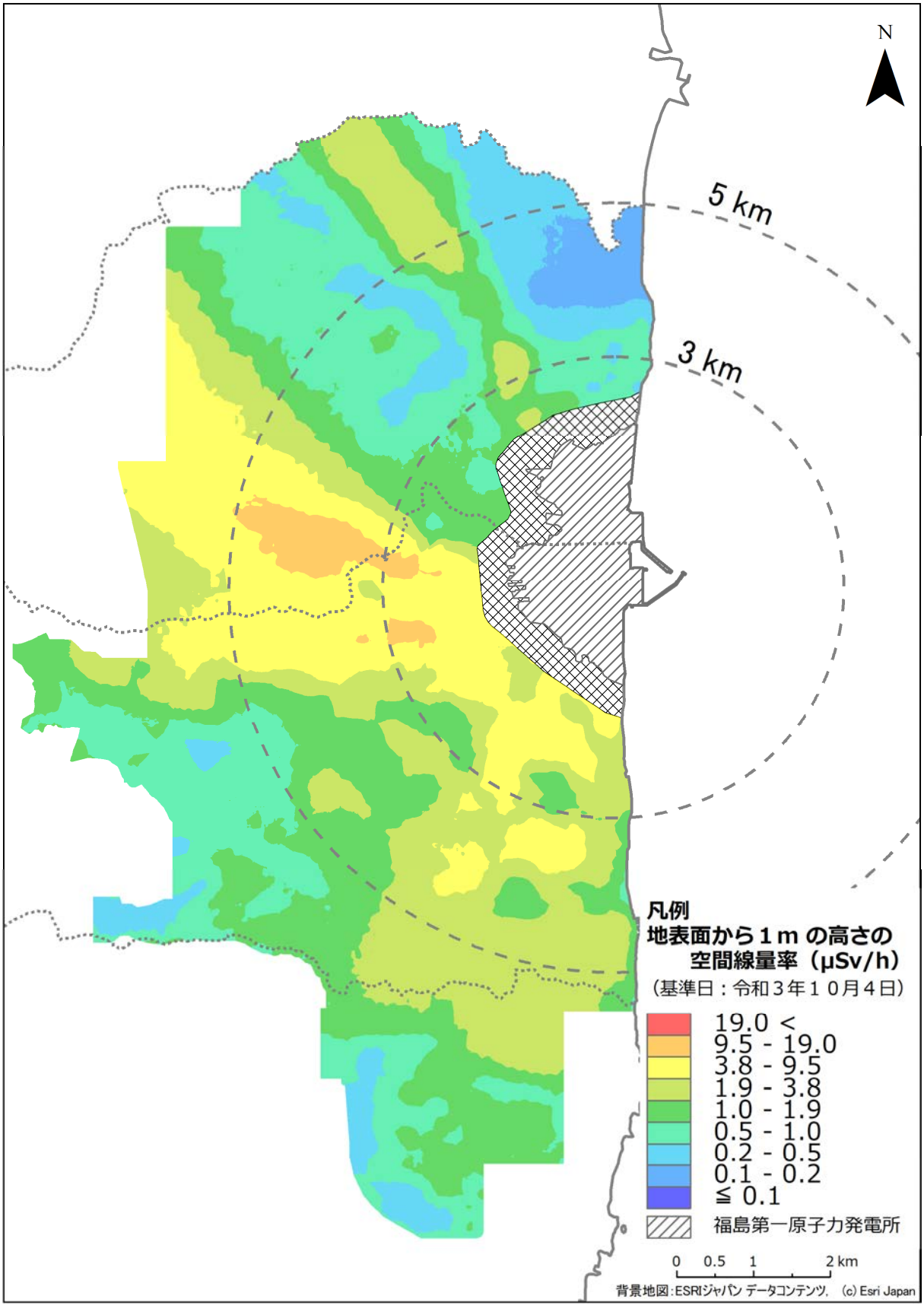


図 3-3　令和３年度調査における無人ヘリサーベイによる空間線量率測定結果
（天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。）

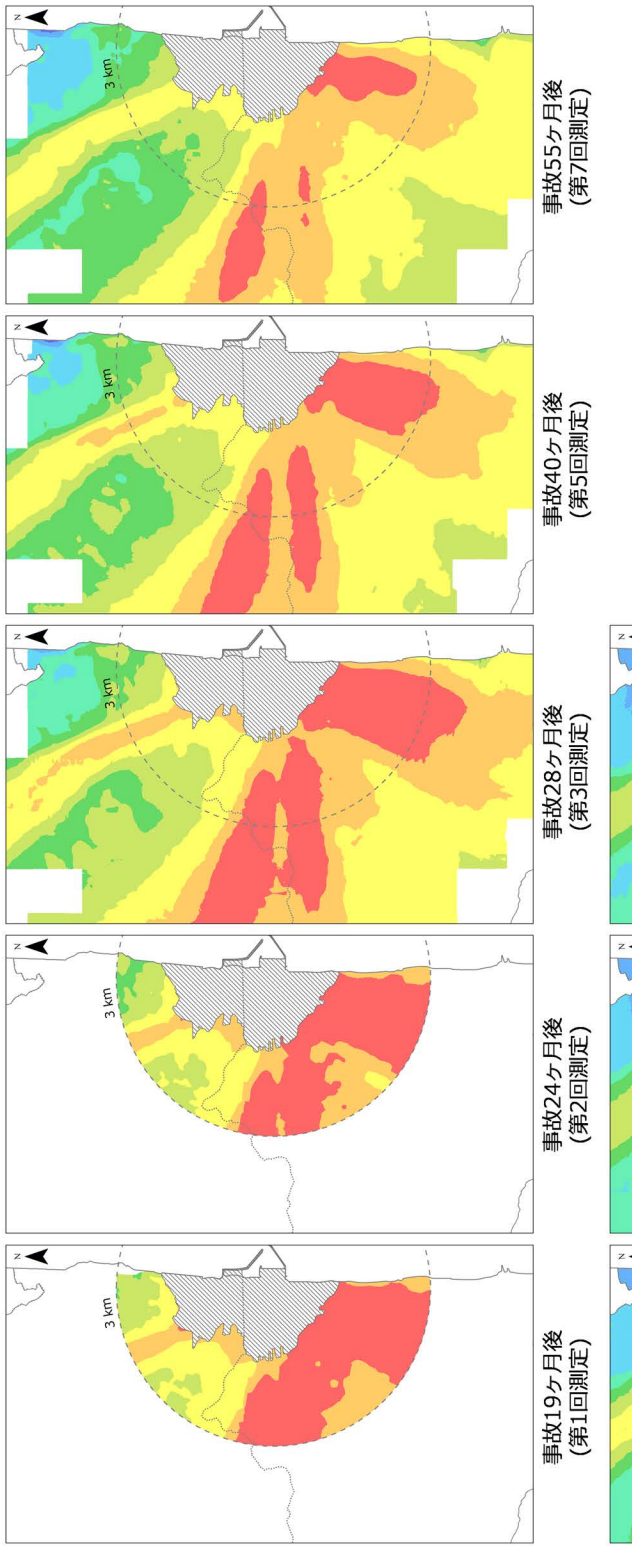


図 3-4　平成 24 年度から令和 3 年度までの無人ヘリサーベイによる空間線量率マップの変化
（福島第一原発から 5 km 圏内主体。天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。）

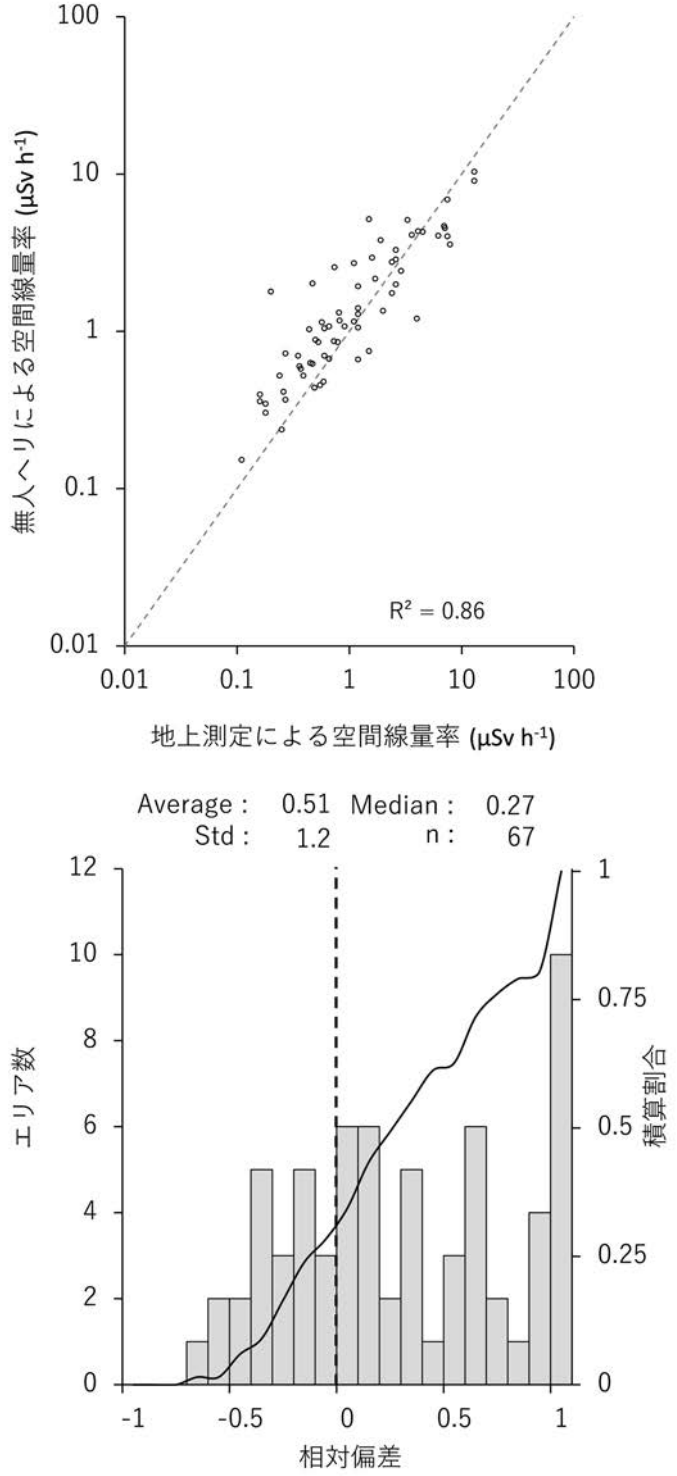


図 3-5　無人ヘリサーベイと地上測定（定点サーベイ）による空間線量率の比較
（相関図の破線は y=x、R^2 は決定係数、Std は標準偏差、n はデータ数を意味する。）

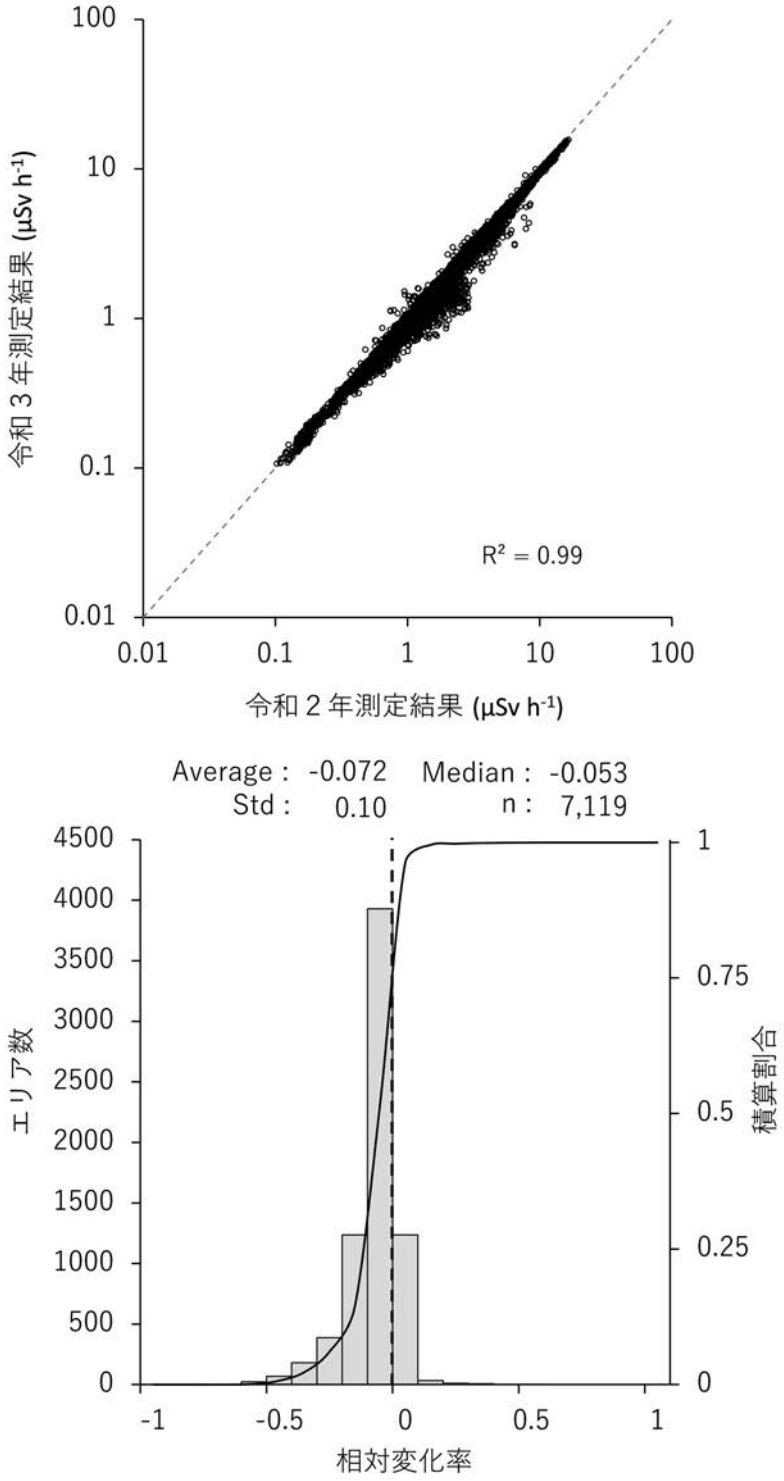


図 3-6　令和 2 年度と令和 3 年度の無人ヘリサーベイによる空間線量率測定結果の比較
（相関図の破線は y=x、R^2 は決定係数、Std は標準偏差、n はデータ数を意味する。）

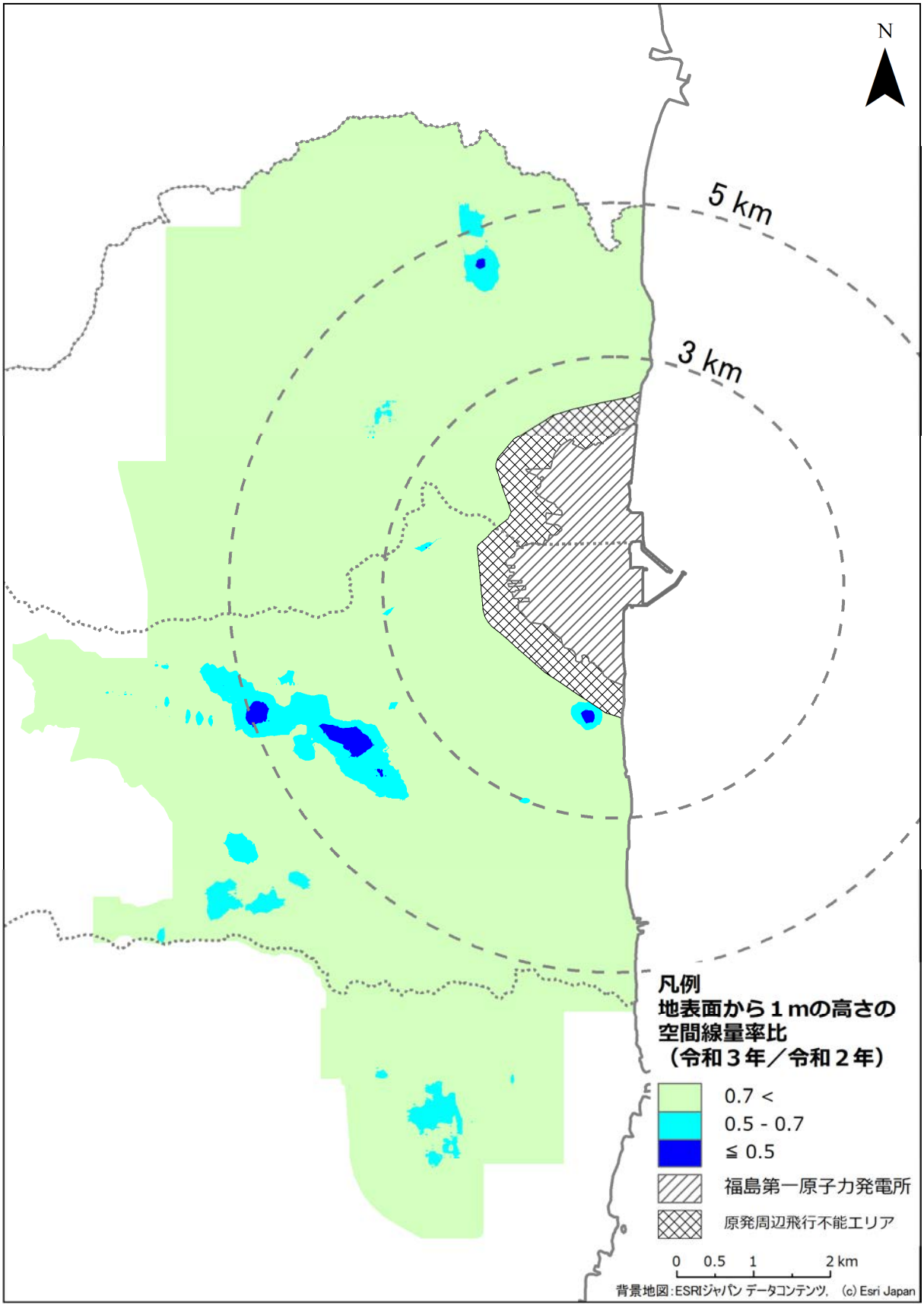


図 3-7　令和 2 年度に対する令和 3 年度の無人ヘリサーベイによる空間線量率測定結果の比の分布

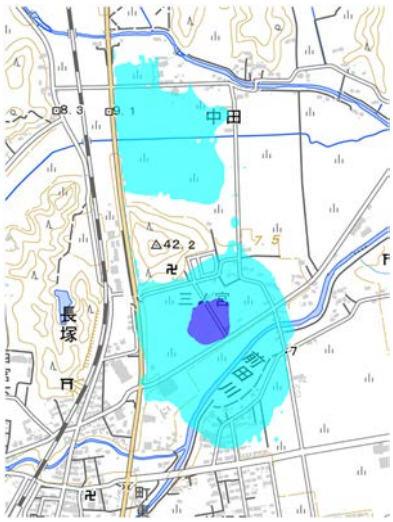
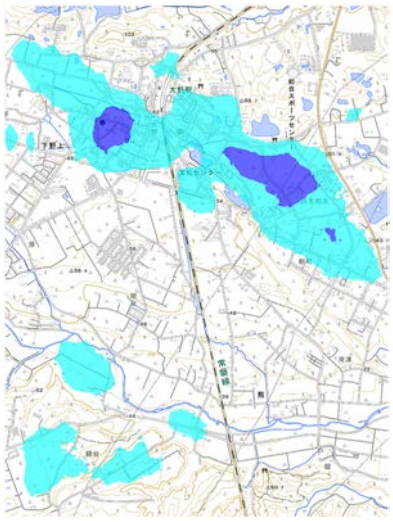
		**[双葉町長塚・中田付近]** 双葉町特定復興再生拠点区域復興再生計画の再生可能新エネルギー活用・農業再生ゾーンのエリア。 令和2年度に引き続き除染作業が進められた。
		[大熊町福島第一原発周辺] 中間貯蔵施設などの造成・建設作業が進行中であることが確認された。 著しく減少した場所では施設の造成工事が進行中であった。
		**[大熊町大野駅周辺地区と**下野上地区（居住・営農ゾーン）] 大熊町特定復興再生拠点区域復興再生計画の大野駅周辺区域と下野上地区（居住・営農ゾーン）の南側エリア。 令和2年度同様に、家屋の解体、土壌表面を除去する除染作業または圃場が耕されているのが確認できた。

図 3-8　令和 2 年度から令和 3 年度にかけて空間線量率が顕著に減少した場所の要因調査（左から地理院タイル [11] に空間線量率比マップ（令和 3 年度/令和 2 年度）を追記して掲載、地理院タイルに測定中に撮影した写真からオルソ画像（地図と同じく写真上の像の位置ズレをなくし、真上から見たような傾きのない正しい大きさと位置に表示される画像）を作成し追記。）

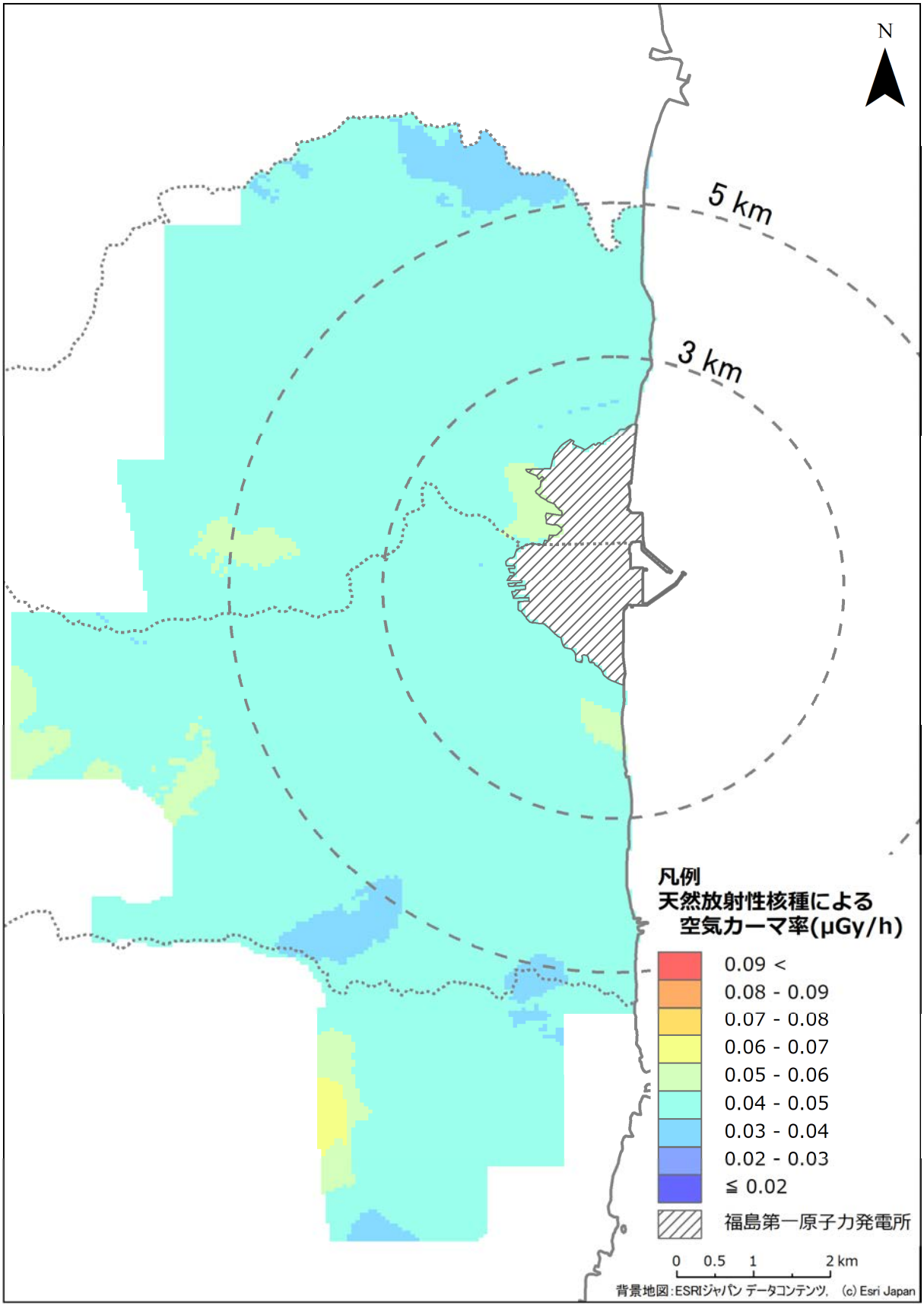


図 3-9　令和 3 年度調査における無人ヘリサーベイにより評価した天然放射性核種による空気カーマ率の分布

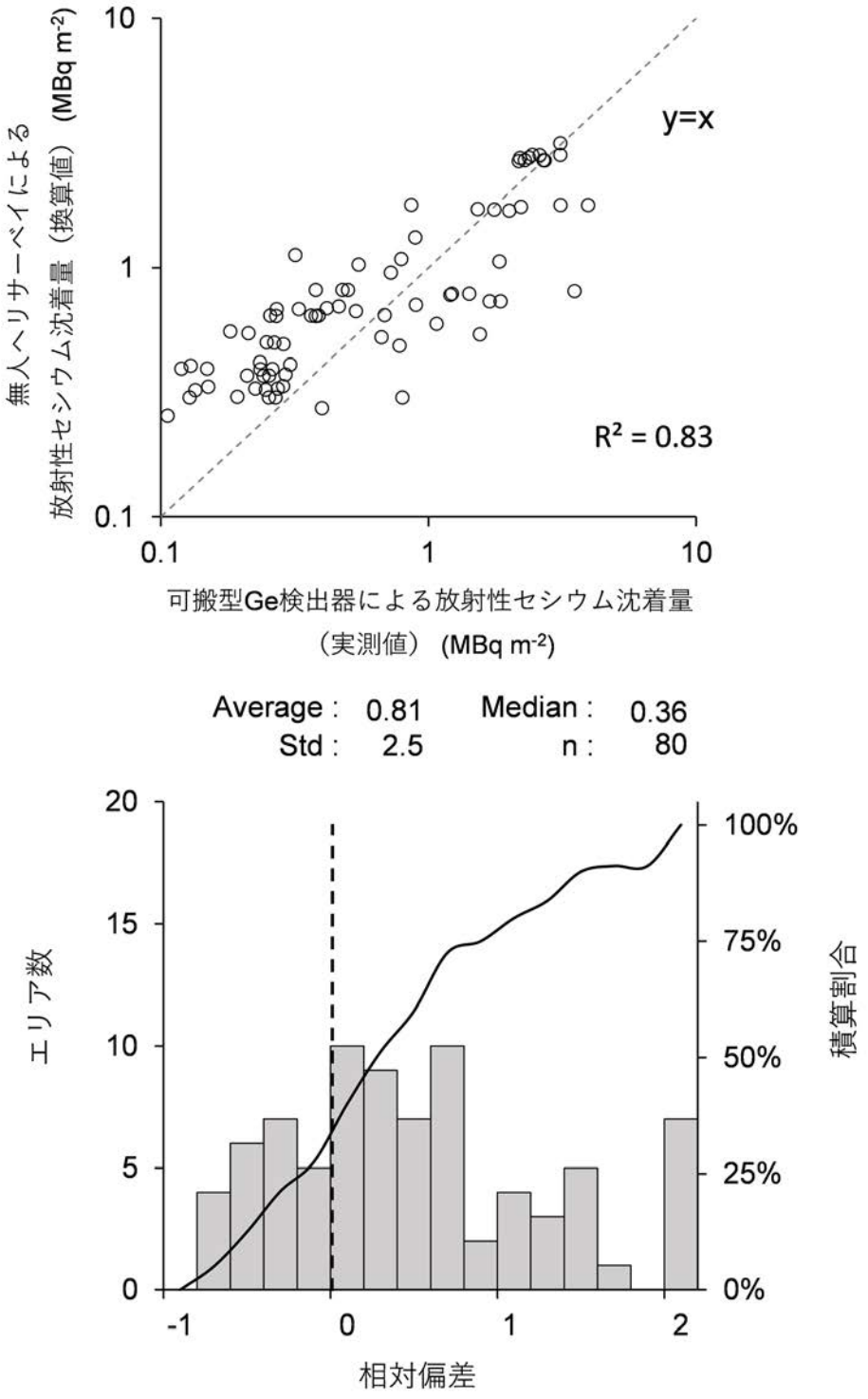


図 3-10　平成 28 年度～平成 30 年度の可搬型 Ge 検出器による放射性セシウム沈着量測定結果（令和 3 年度に物理減衰補正）と無人ヘリサーベイによる放射性セシウム沈着量の換算結果との比較

（R^2 は決定係数、Std は標準偏差、n はデータ数を意味する。）

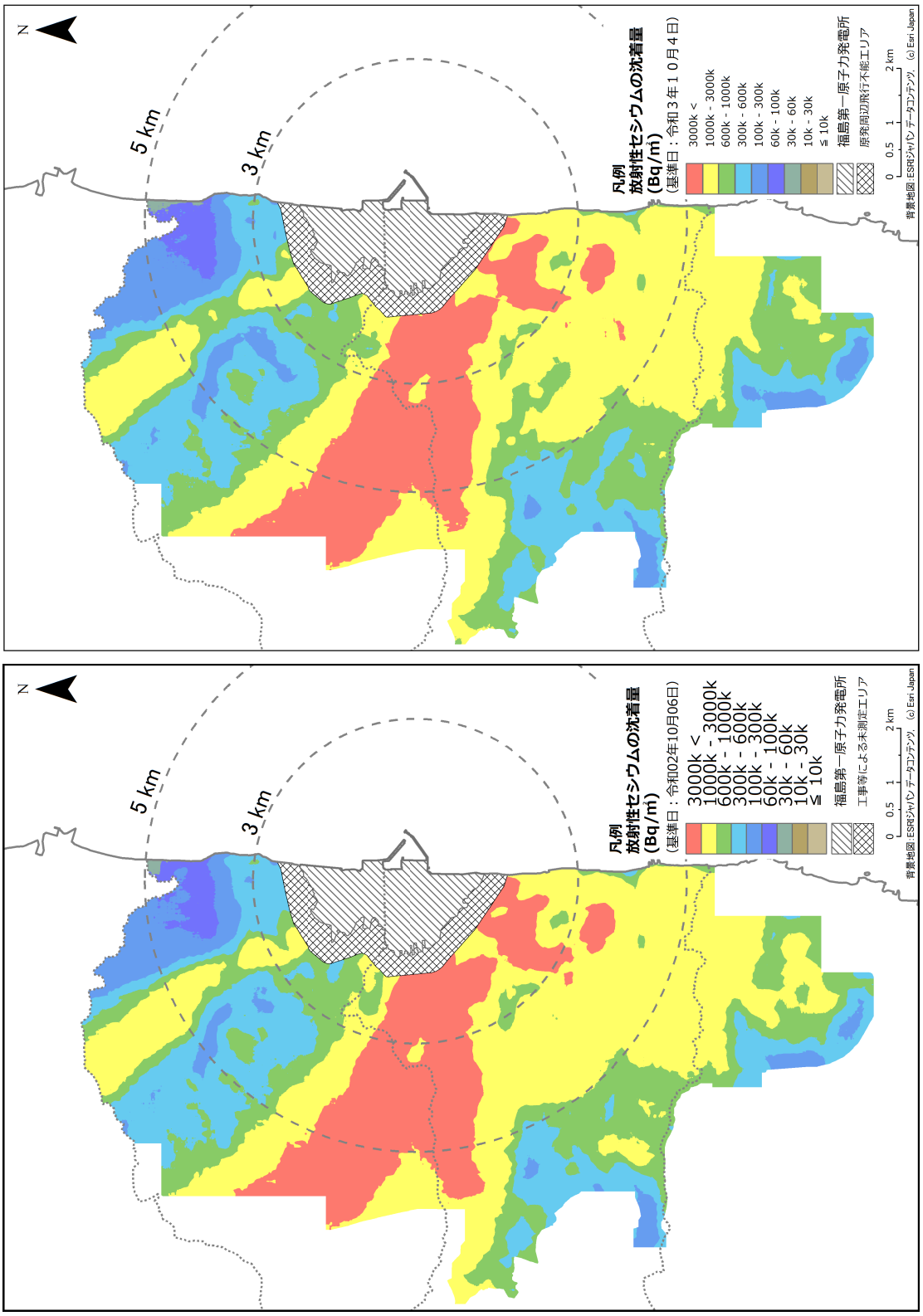


図 3-11　無人ヘリサーベイによる放射性セシウム沈着量分布マップ（左：令和２年度、右：令和３年度）

4. 土壌における放射性セシウムの分布状況

本章では、可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定により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 [12)]。

4.1.2 調査内容

1)深度別土壌試料の採取・測定方法

土壌試料の採取箇所及び採取期間は次の通りである。

・採取箇所：福島県、宮城県南部及び茨城県北部の 85 箇所（詳細は図 4-1 参照）

・採取期間：令和 3 年 8 月 18 日～9 月 10 日

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

2)重量緩衝深度の解析方法

採取した各層の土壌試料の定量分析で得られた放射性セシウムの単位湿重量あたりの放射能（以下「放射能濃度」という。）を土壌採取箇所ごとにまとめ、横軸を放射能濃度（単位：Bq/kg）、縦軸を単位面積あたりの土壌の湿重量で表される地表面からの深度（以下「重量深度」という。単位：g/cm^2）とした深度分布の図を作成した（典型的な例は図 4-2 参照）。このとき、各層の重量深度は、地表面（0 cm）から土壌を採取した層の中間までの深度として、地表面から当該層の中間までの土壌の重量及び土壌を採取した面積（スクレーパープレートによる土壌採取で使用した枠の大きさは、15 cm×30 cm＝450 cm^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）[13]、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 [14] 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（≒1/2.7）となる重量深度であり、放射性セシウムの地中（深さ方向）への移行状況を表す指標となる。$A_{m,0}$及びβは、調査で得られた深度分布を基に、最小二乗法で算出した。

他方、これまでの深度分布測定において、時間経過とともに放射能濃度分布が変化しある深さにピークを持つ深度分布（図 4-2 (b) 参照）となる場合があることが分かっている。このような深度分布に対しては、式 (7)に示す双曲線正割関数に基づく近似式 [15]を用いて重量緩衝深度β を解析した。

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

$$※\mathrm{sech}(x) = 1/\cosh(x)$$

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

ここで、ζ_0は放射能濃度が最大となる重量深度である。$A_{m,0}$、ζ_0及びβは、調査で得られた深度分布を基に、反復法アルゴリズムを利用した最小二乗法により算出した。式 (7) は土壌の深部において式 (6) と同じ関数形となる特徴を有しているため、土壌の深部での単位βあたりの放射能濃度の減少割合は 1/e（≒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（一例として図 4-2 (c) 参照；採取箇所 045S055 では、全体的にかく乱の影響を受け不自然な深度分布になっていた。）には、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関係に係る解析上便利である。そのために、式 (7) で解析した深度分布を持つ場合の沈着量と空間線量率の関係が指数関数的な深度分布を持つ場合の沈着量と空間線量率の関係と同じになるよう、地中に沈着したガンマ線源の強度に対する地上 1 m 高さでの空気カーマへの換算係数 [16] を用いて実効的な重量緩衝深度を算出した（算出方法の詳細は、平成 29 年度の報告書 [17] 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。

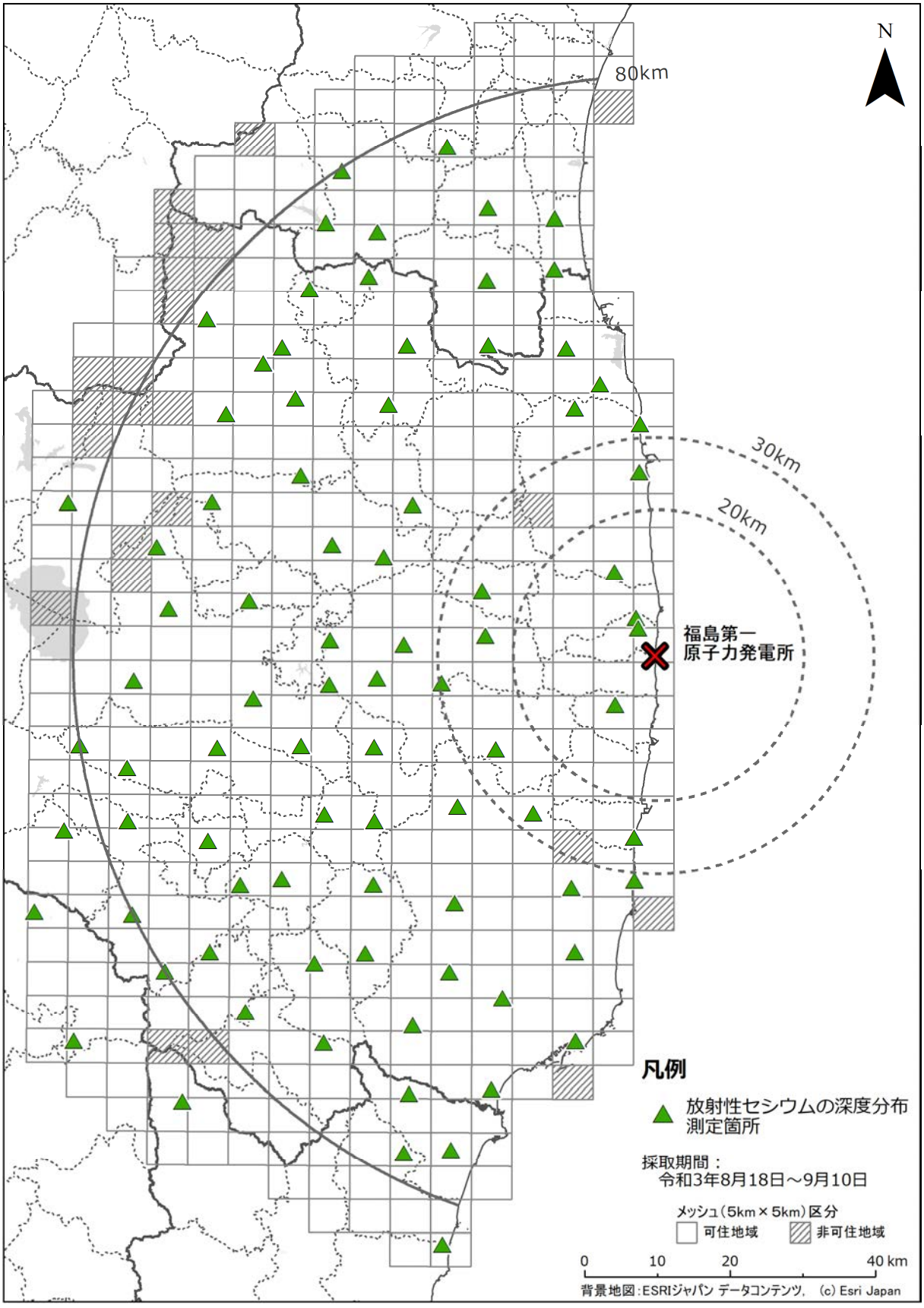


図 4-1　令和 3 年度調査における放射性セシウム深度分布測定箇所

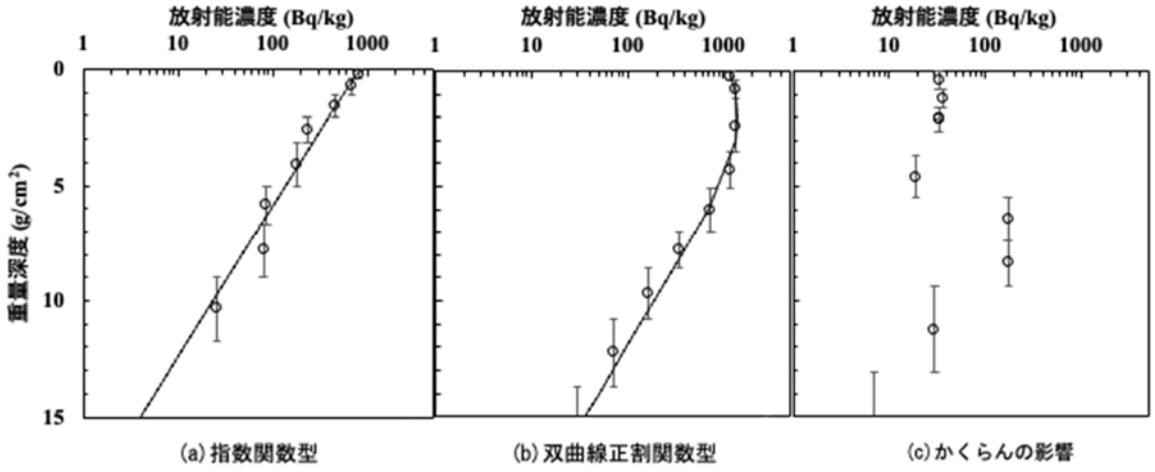


図 4-2　セシウム 137 の深度分布（重量深度に対する放射能濃度の測定結果）の典型的な例

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

1） 重量緩衝深度β

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

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

・幾何平均値 2.67 g/cm^2（データ数 n= 65）、幾何標準偏差 1.69

・最小値 0.881 g/cm^2、最大値 11.5 g/cm^2

2） 実効的な重量緩衝深度β_{eff}

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

幾何標準偏差及び最小値・最大値は、以下のとおりである。

・幾何平均値 4.11 g/cm^2（データ数 n= 65）、幾何標準偏差 1.69

・最小値 0.924 g/cm^2、最大値 11.5 g/cm^2

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

3） 90%深度 $L_{90\%}$

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

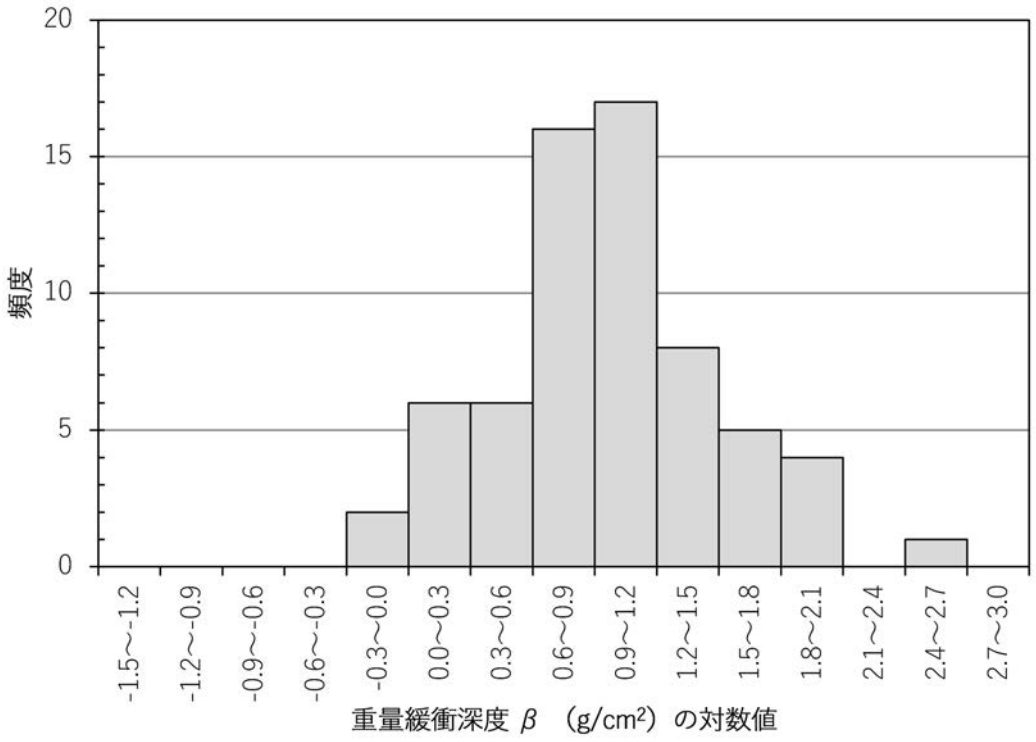


図 4-3　令和 3 年度の深度分布調査による重量緩衝深度βの自然対数値の頻度分布

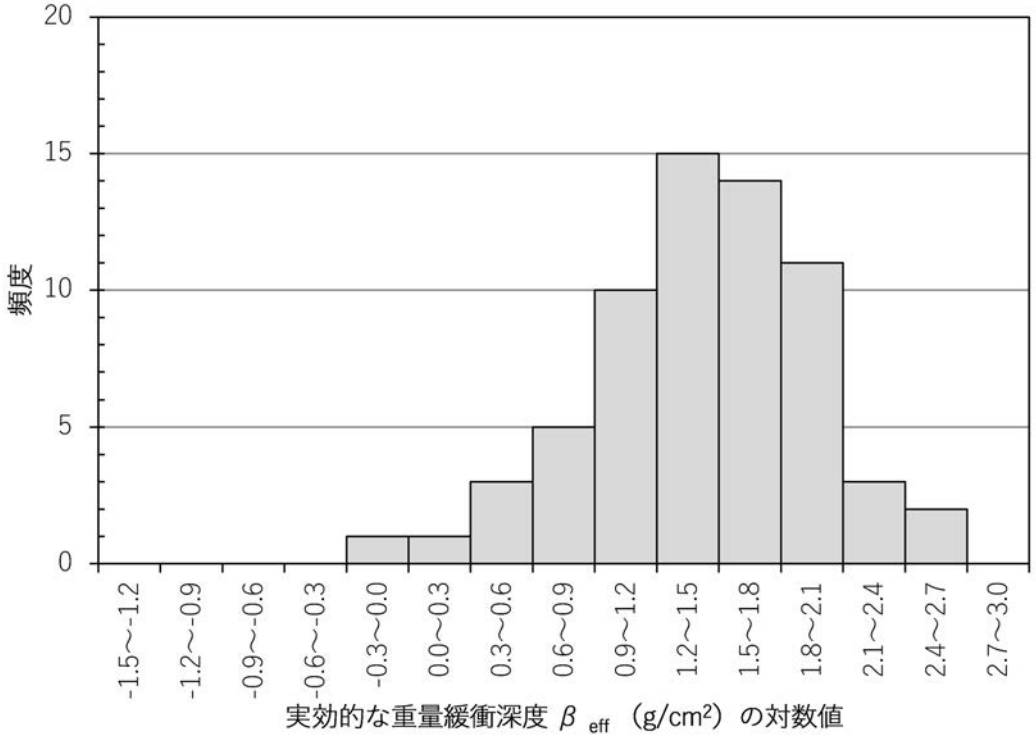


図 4-4　令和 3 年度の深度分布調査による実効的な重量緩衝深度β_{eff}の自然対数値の頻度分布

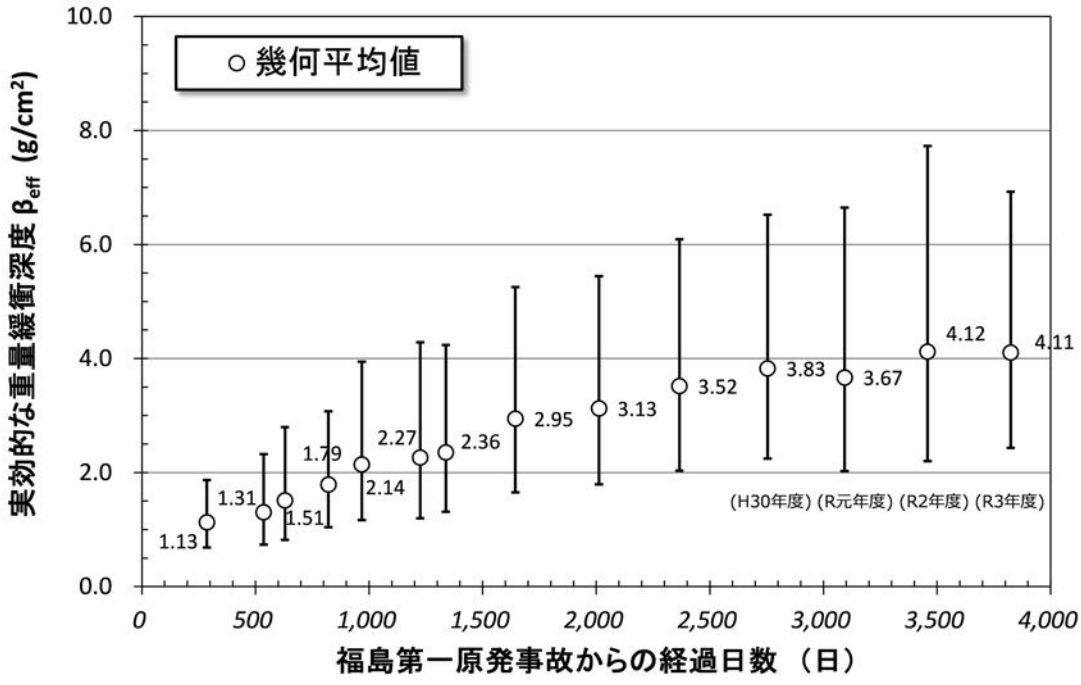


図 4-5　平成 23 年 12 月からの実効的な重量緩衝深度β_{eff}の経時的な変化
（誤差棒は幾何標準偏差を示す。）

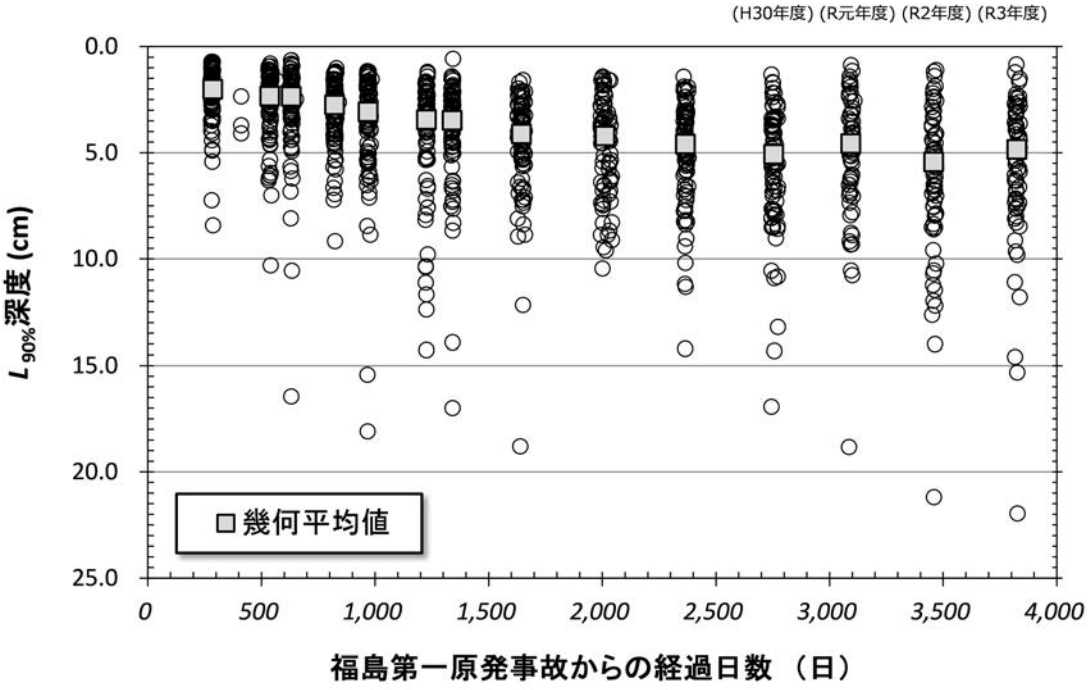


図 4-6　平成 23 年 12 月からの 90%深度 $L_{90\%}$及びその幾何平均値の経時的な変化

4.2 放射性セシウム沈着量の面的調査

4.2.1 調査目的

80 km 圏内において可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定を行い、現在の放射性セシウム沈着量の詳細な分布状況を把握するとともに、過去の測定結果との比較により沈着量の経時的変化を解析した。本節では、可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定を単に「in-situ 測定」と呼ぶ。

4.2.2 調査内容

1)測定方法

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

放射性セシウム沈着量の測定にあたっては、可搬型 Ge 検出器を地表面に向けて 1 m 高さに設置してガンマ線スペクトルを測定し、スペクトル解析（核種分析）により放射性セシウムの土壌への沈着量（土壌単位面積あたりの放射性核種ごとの放射能量。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）[14] 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（4.11 g/cm^2）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 53 [14]に従って μGy/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 NaI(Tl) シンチレーション式サーベイメータ（日立製作所製 TCS-171B。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（μGy/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 [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 箇所でサーベイメータを用いて空間線量率の測定を同時に行い、調査時点における空間線量率と放射性セシウム沈着量との相関関係を求め、2.2.2 項で述べた定点サーベイにより測定した空間線量率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。

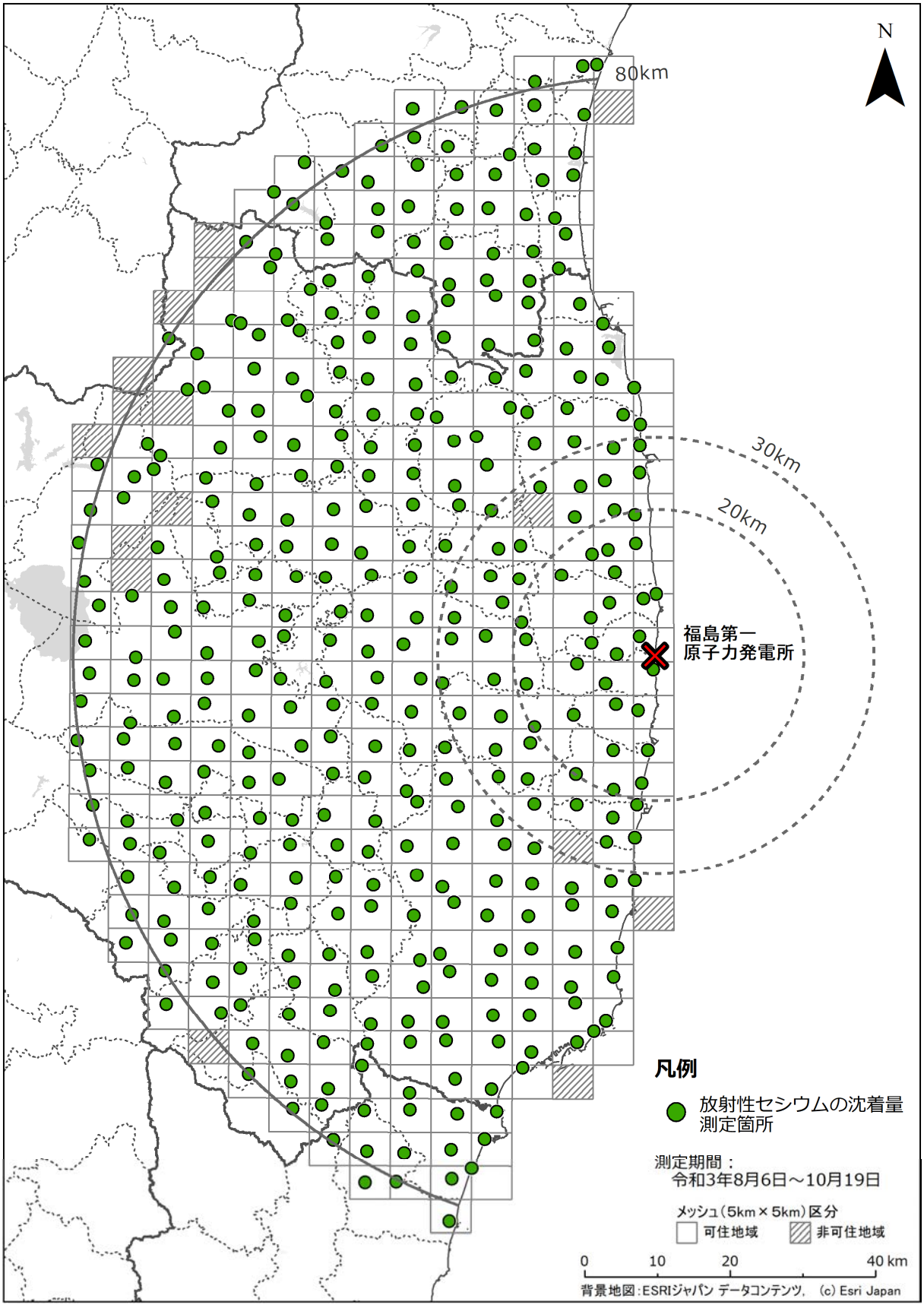


図 4-7　令和 3 年度調査における可搬型 Ge 検出器を用いた放射性セシウム沈着量の測定箇所

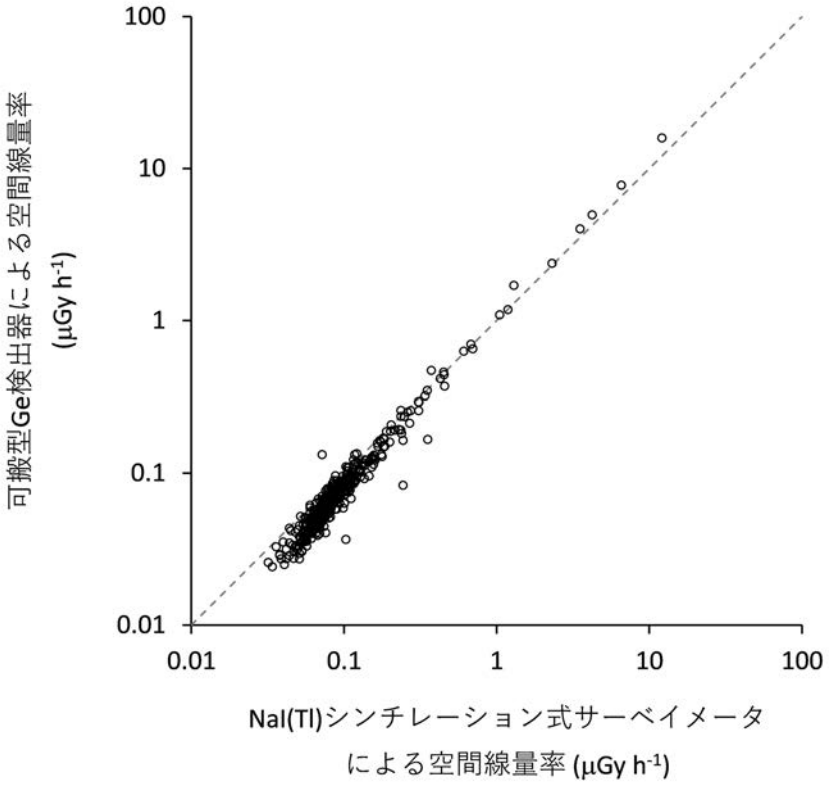


図 4-8　可搬型 Ge 検出器による in-situ 測定の結果を基に求められた空間線量率と NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータによる空間線量率の相関

4.2.3 調査結果

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

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 3 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。後述のように in-situ 測定において天然放射性核種による空間線量率を評価可能であるが、全 383 箇所で評価しているわけではない。そのため、サーベイメータによる空間線量率と放射性セシウム沈着量の比較にあたっては、天然放射性核種からの空間線量率への寄与が 0.05 μSv/h と仮定し、この寄与分を全てのサーベイメータによる空間線量率の測定値から一律に差し引いた。なお、上記 383 箇所のうち空間線量率が 0.05 μSv/h 以下であった測定箇所は対象から除いた。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。なお、空間線量率が約 0.3 μSv/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。これらの空間線量率（単位 : μSv/h）と放射性セシウム沈着量（単位：Bq/m²）の相関関係を令和 3 年度調査の定点サーベイにより測定された 4,931 箇所（全測定箇所の内、空間線量率が 0.05 μSv/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 3 年度調査までの各調査による放射性セシウムの土壌沈着量分布マップを図 4-12 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 127 ヶ月の間にセシウム 134 の土壌沈着量分布マップでは赤や黄色で示される比較的高い濃度の測定箇所がほとんどなくなり沈着量の減少の様子が確認できる。セシウム 137 はセシウム 134 に比べて半減期が長いため沈着量の変化は比較的小さい。

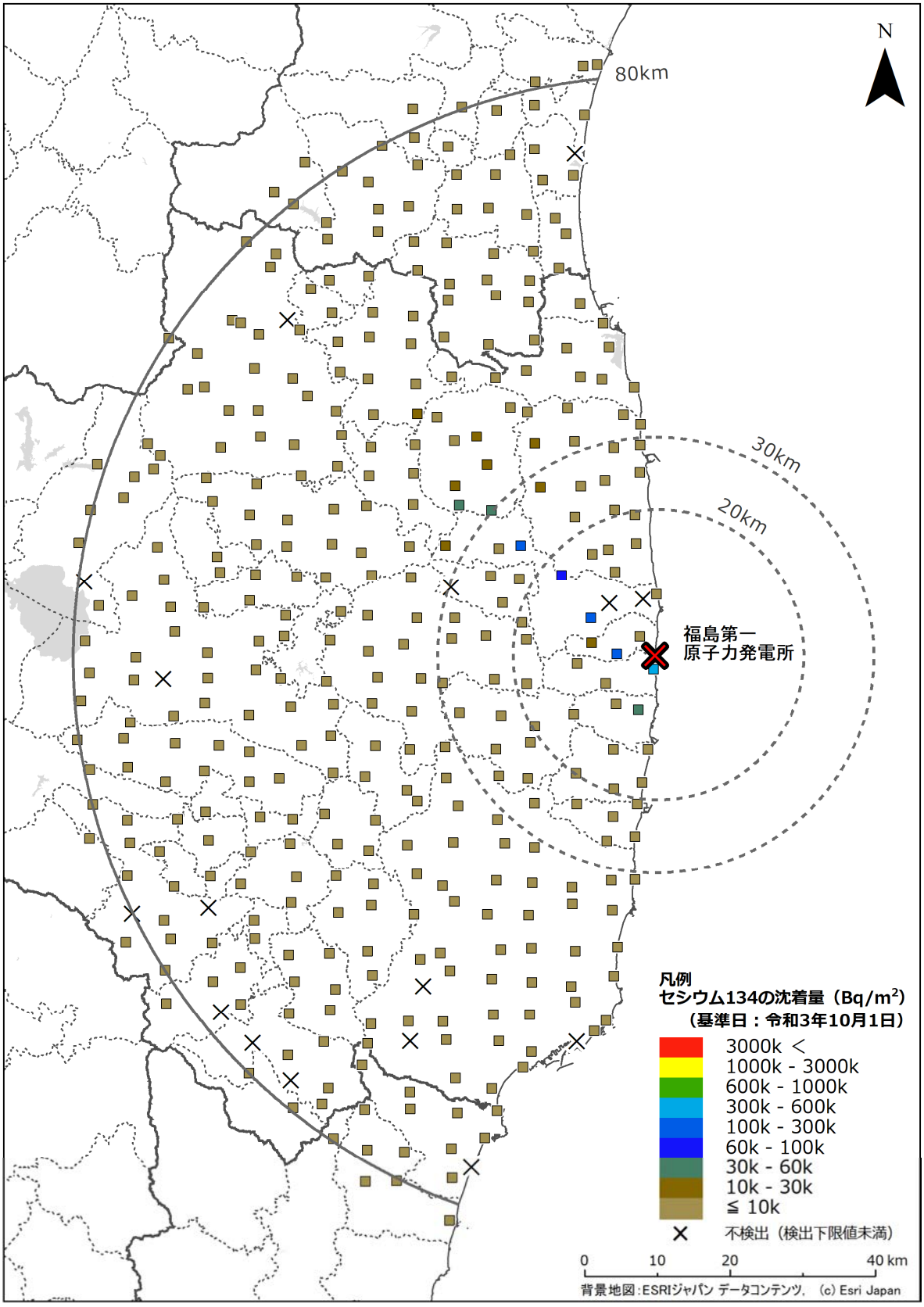
本手法による土壌沈着量分布マップの細密化の妥当性を確認するために、in-situ 測定による沈着量測定地点と最近傍にある定点サーベイによる空間線量率から評価した沈着量を比較した。比較は、散布図による比較及び相対偏差のヒストグラムによる比較を行った。相対偏差 $RD3$ を式(8)のように定義する。

$$RD3 = (CD - C)/C \tag{8}$$

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。

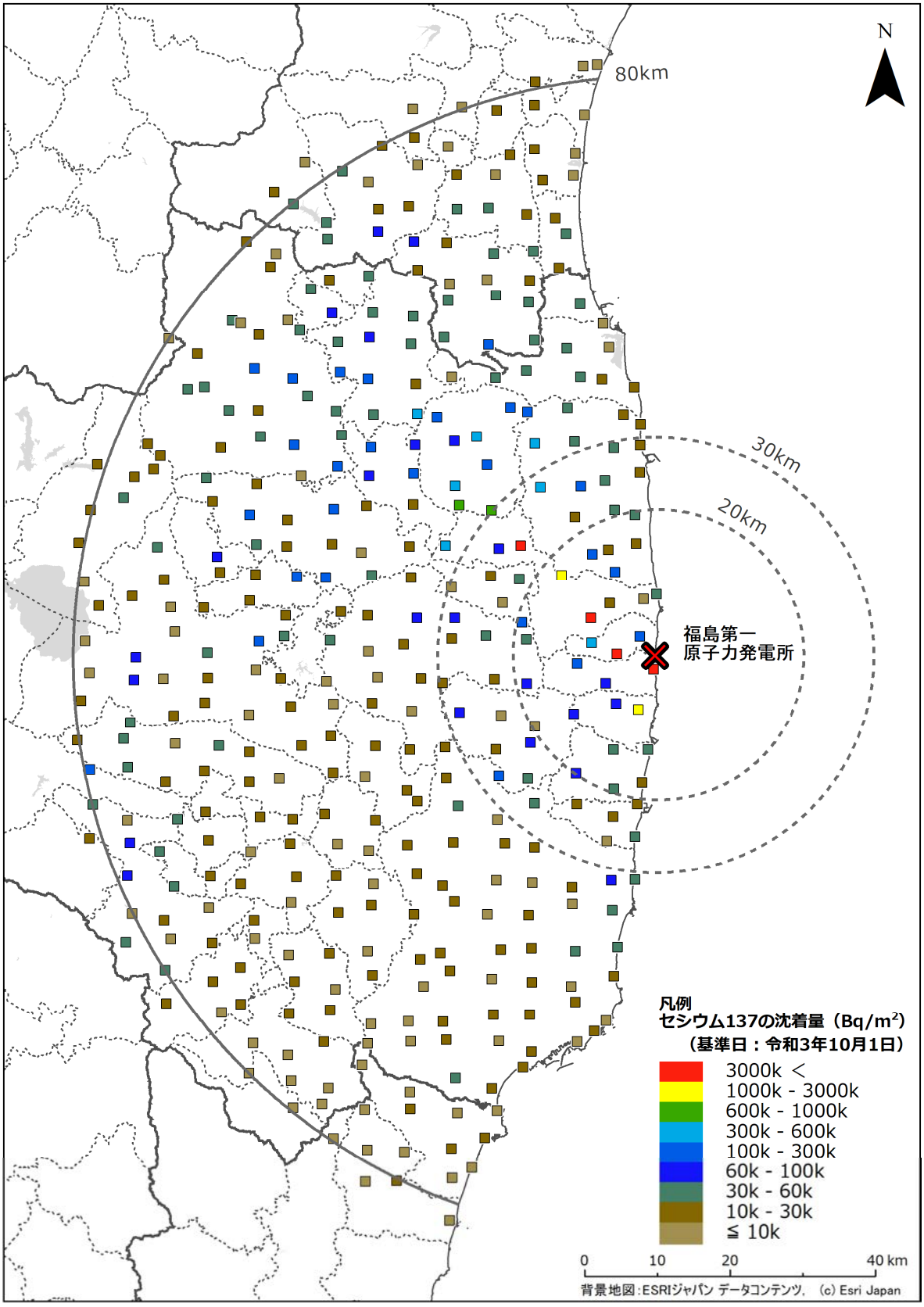
図 4-13 (a)に示したセシウム 137 の全データによる散布図を見るとプロットは 1:1 の直線の周辺に分布し、全体的にはよい相関性が確認できるものの、低い沈着量の領域のプロットのばらつきは大きいことが分かる。相対偏差のヒストグラムを見ると、分布の形状は 0 付近を頂点とした釣鐘型を示しているものの、空間線量率から評価した沈着量が in-situ 測定による沈着量の 2 倍以上を示す点が 40%以上確認された。図 4-10 に見られたように低線量域でばらつきが大きく、空間線量率から評価した沈着量が in-situ 測定による沈着量を過大評価しているものと考えられる。

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



(b) セシウム 137

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

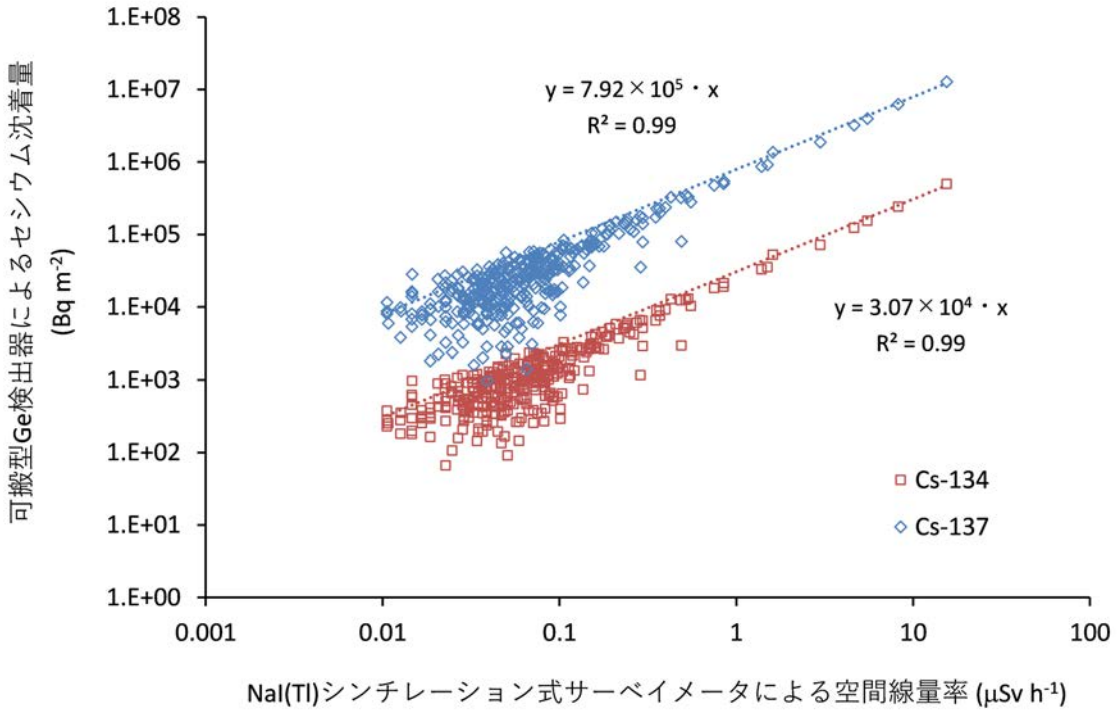


図 4-10　NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータによる地表面から 1 m 高さの空間線量率と可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定による放射性セシウム沈着量の相関
（□: 空間線量率とセシウム 134 沈着量との相関（データ数 n=367）、◇：空間線量率とセシウム 137 沈着量との相関（データ数 n=383）を示す。R^2 は決定係数。天然放射性核種による空間線量率寄与を含まない。）

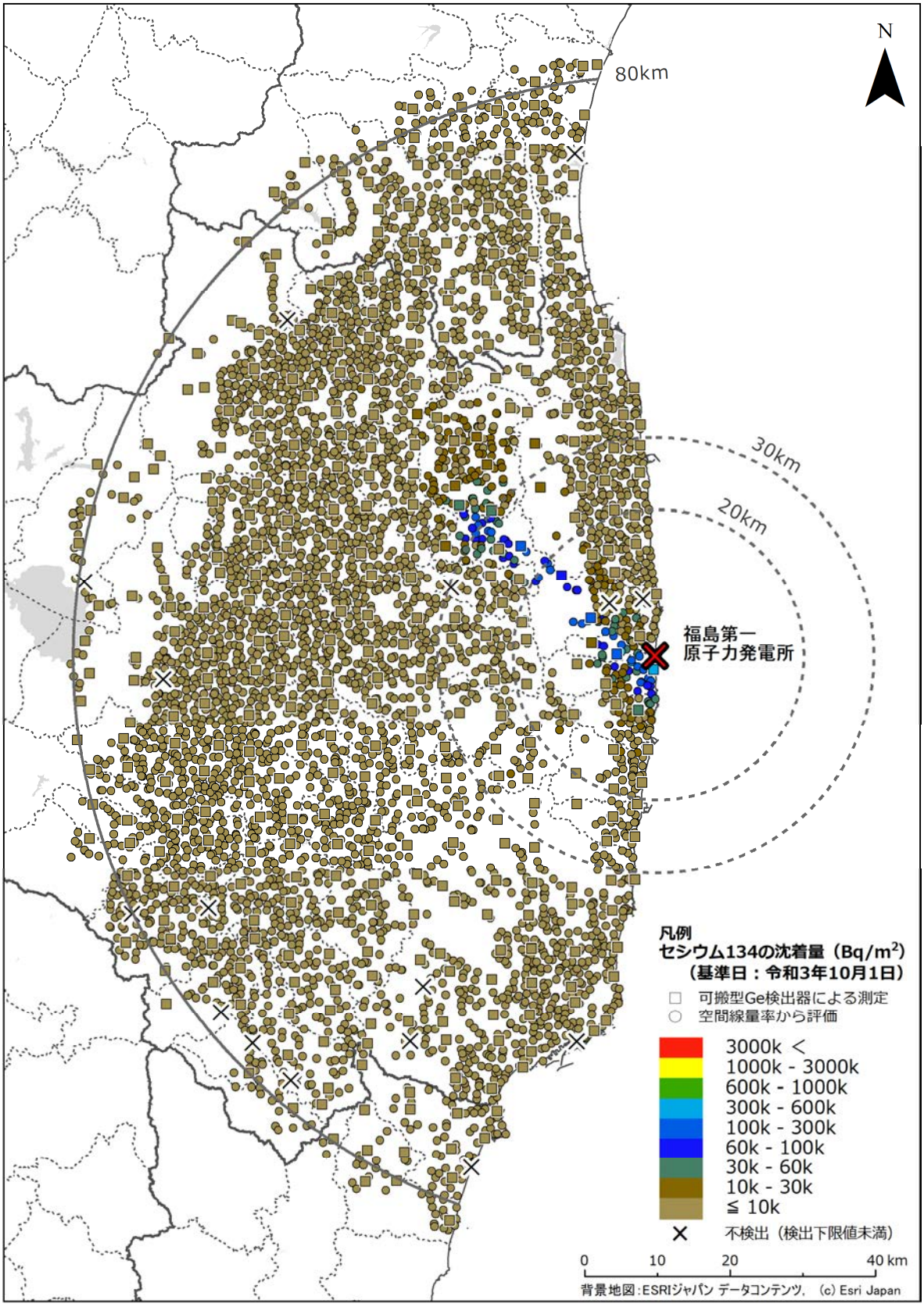


図 4-11　令和 3 年度調査における放射性セシウムの土壌沈着量分布マップ（1/2）
(a) セシウム 134（可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定による沈着量（□）に空間線量率から評価した沈着量（○）を追加。）

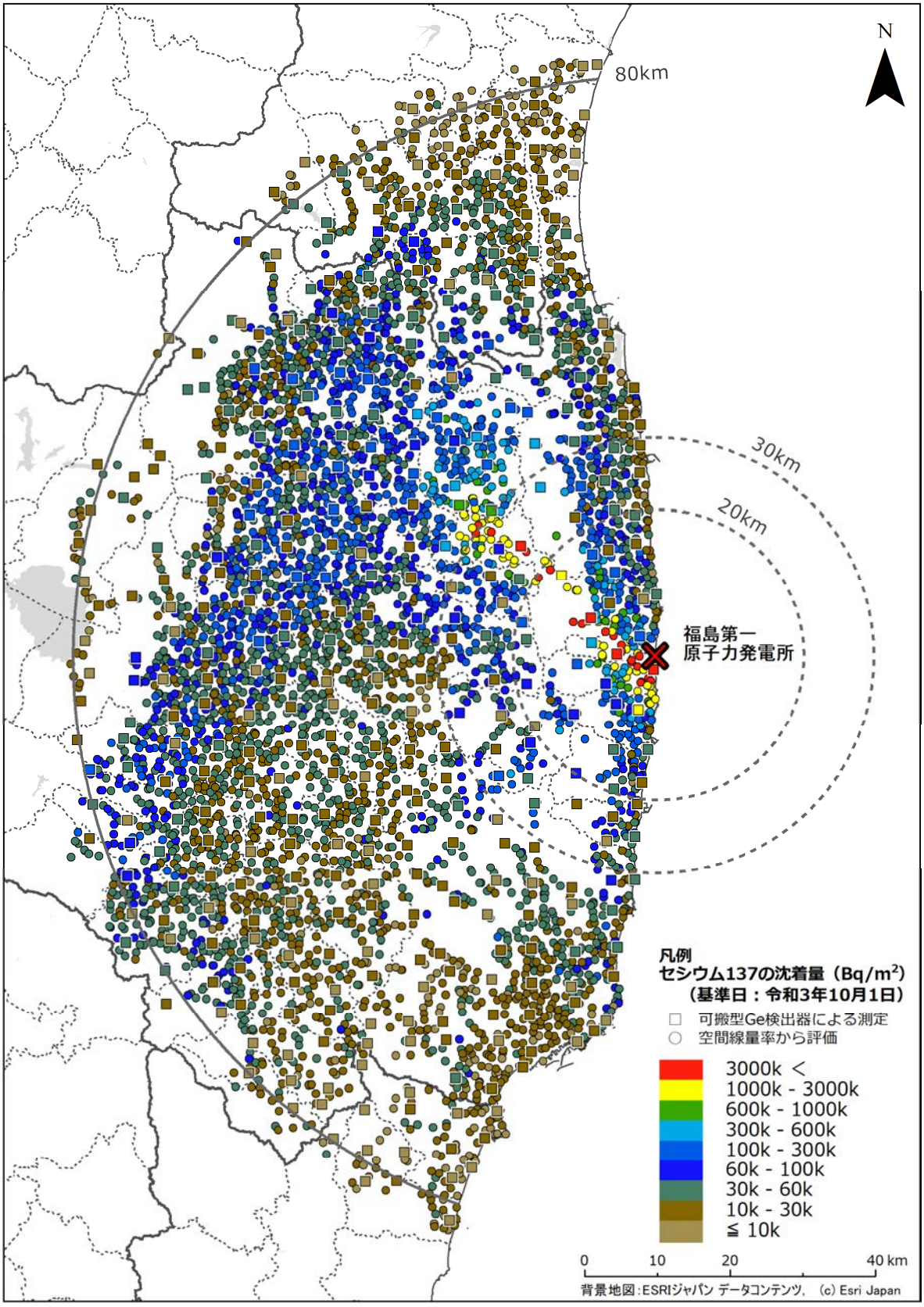
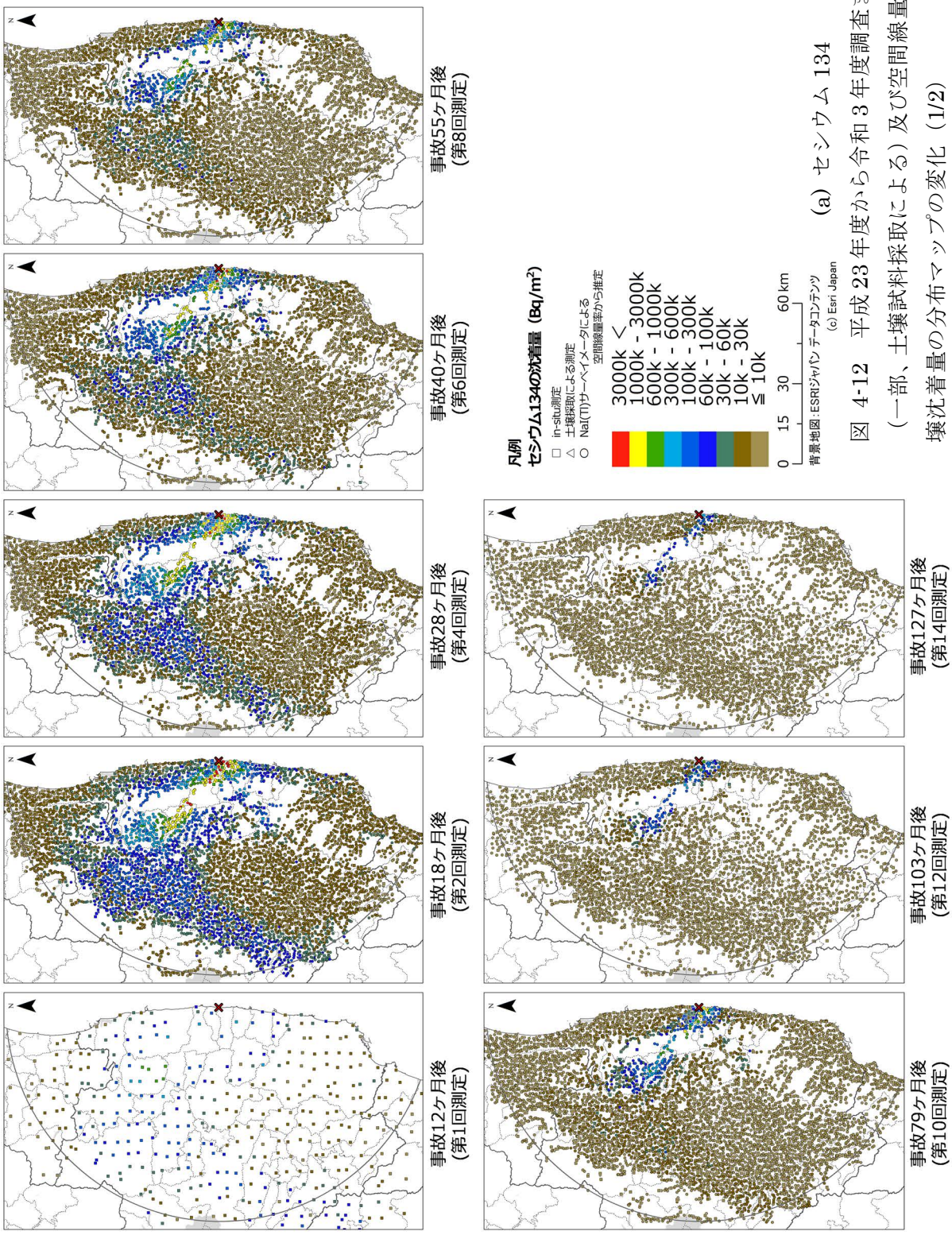


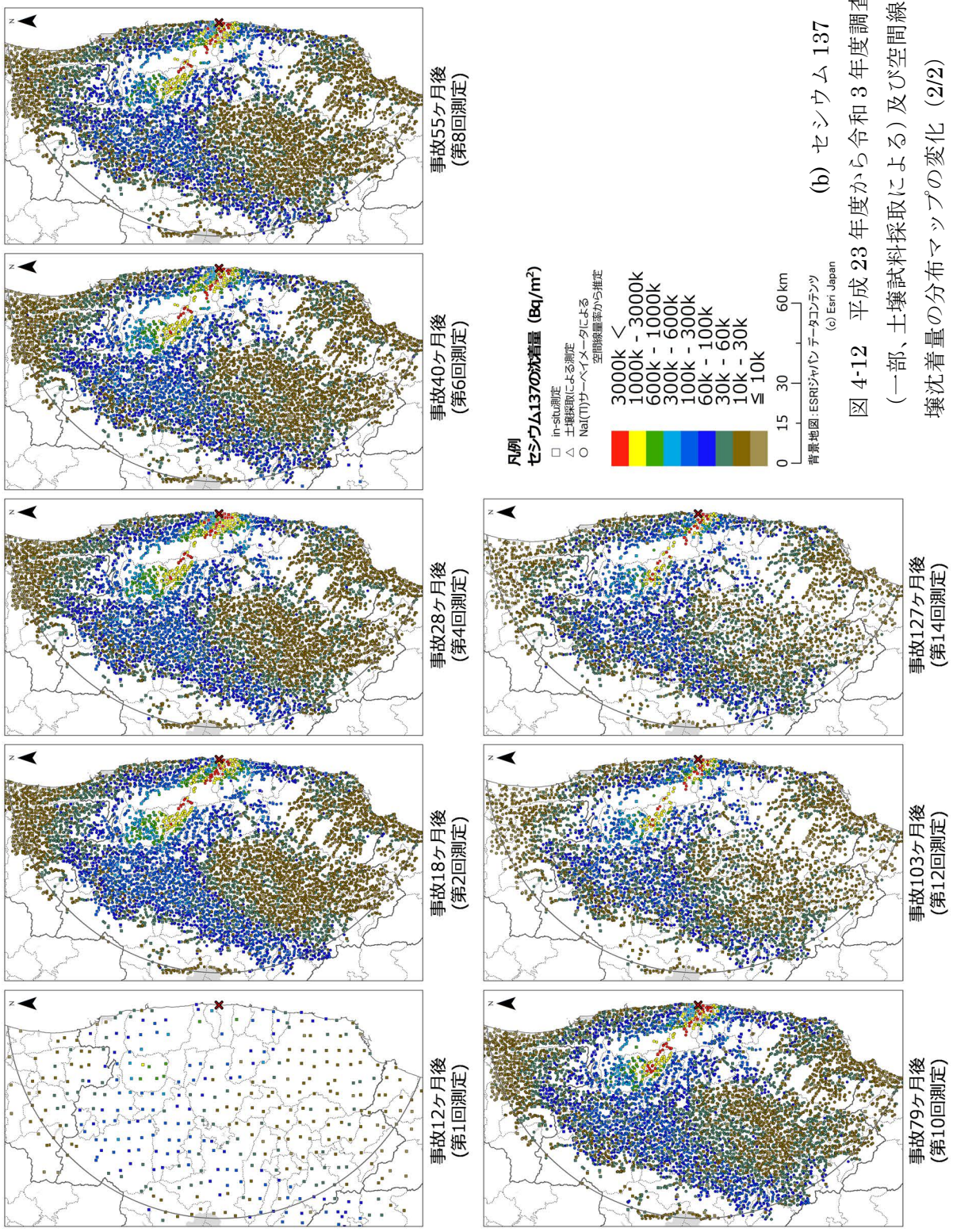
図 4-11　令和 3 年度調査における放射性セシウムの土壌沈着量分布マップ（2/2）

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



(a) セシウム 134

図 4-12 平成 23 年度から令和 3 年度調査までの in-situ 測定（一部、土壌試料採取による）及び空間線量率から評価した土壌沈着量の分布マップの変化（1/2）



(b) セシウム 137

図 4-12 平成 23 年度から令和 3 年度調査までの in-situ 測定（一部、土壌試料採取による）及び空間線量率から評価した土壌沈着量の分布マップの変化 (2/2)

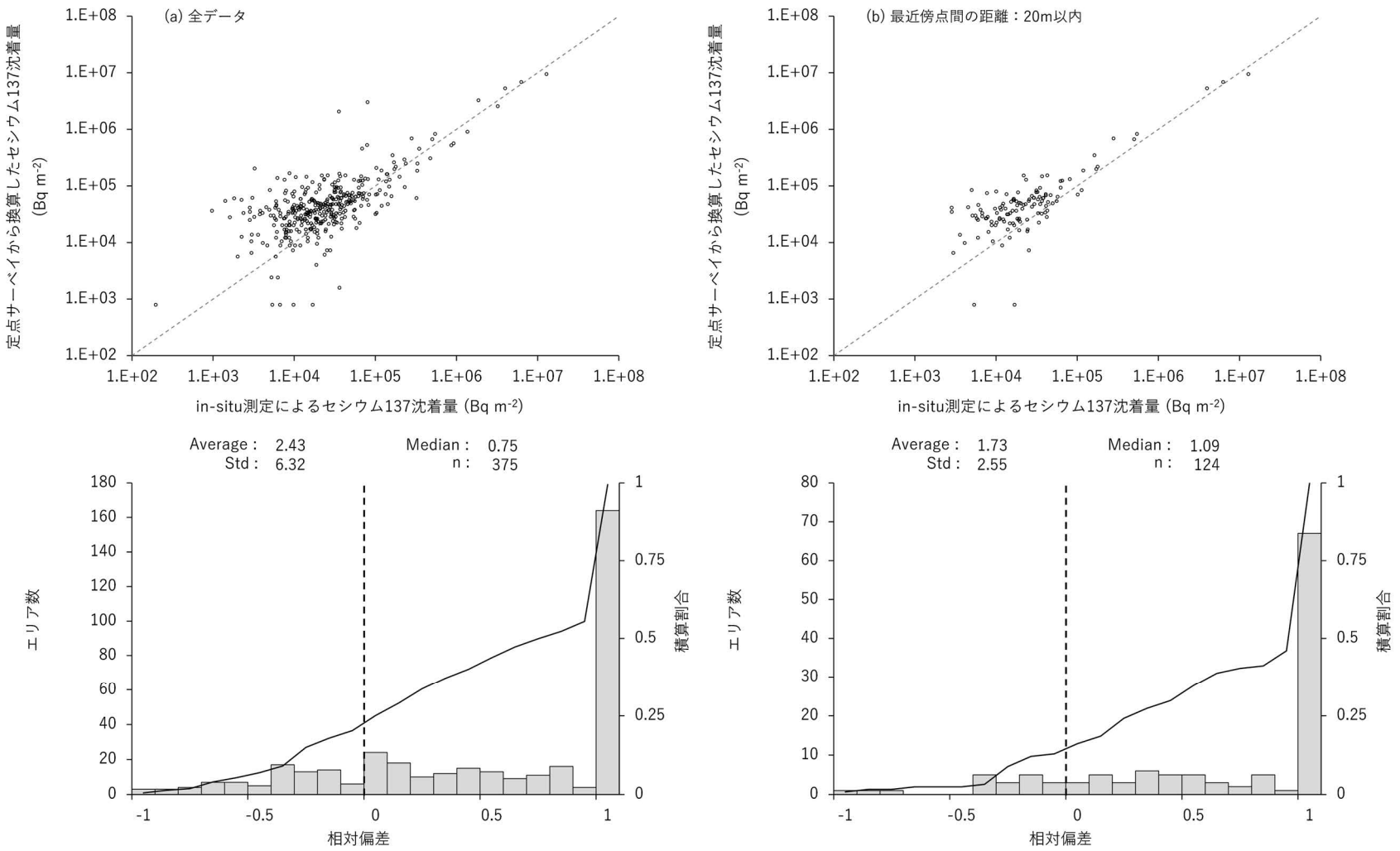


図 4-13　可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定による沈着量と定点サーベイ最近傍点における NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータによる空間線量率から評価したセシウム 137 沈着量の比較

（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壌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 [14,16]、ウラン系列核種による空間線量率を評価する場合には、上記 2 核種からの評価結果に 1.014（100/98.6）を乗じ、また、トリウム系列核種による空間線量率を評価する場合には 1.104（100/90.6）を乗じそれぞれの系列による空間線量率とした。補正を加えた 2 つの系列の空間線量率にカリウム 40 による空間線量率を加えて天然放射性核種による空間線量率とした。

令和 3 年度調査において in-situ 測定を実施した 383 箇所のうち、上記天然放射性核種 5 核種が全て有意検出された 352 箇所のうち測定時に降雨があった 78 箇所を除く 274 箇所のデータを対象として、天然放射性核種による空間線量率を評価した。5 核種について ICRU Report 53 [14]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。

274 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 0.038 μGy/h であった。これは空間線量率（周辺線量当量率）では約 0.05 μSv/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 μSv/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 μGy/h と報告されており、本結果とも矛盾しない。

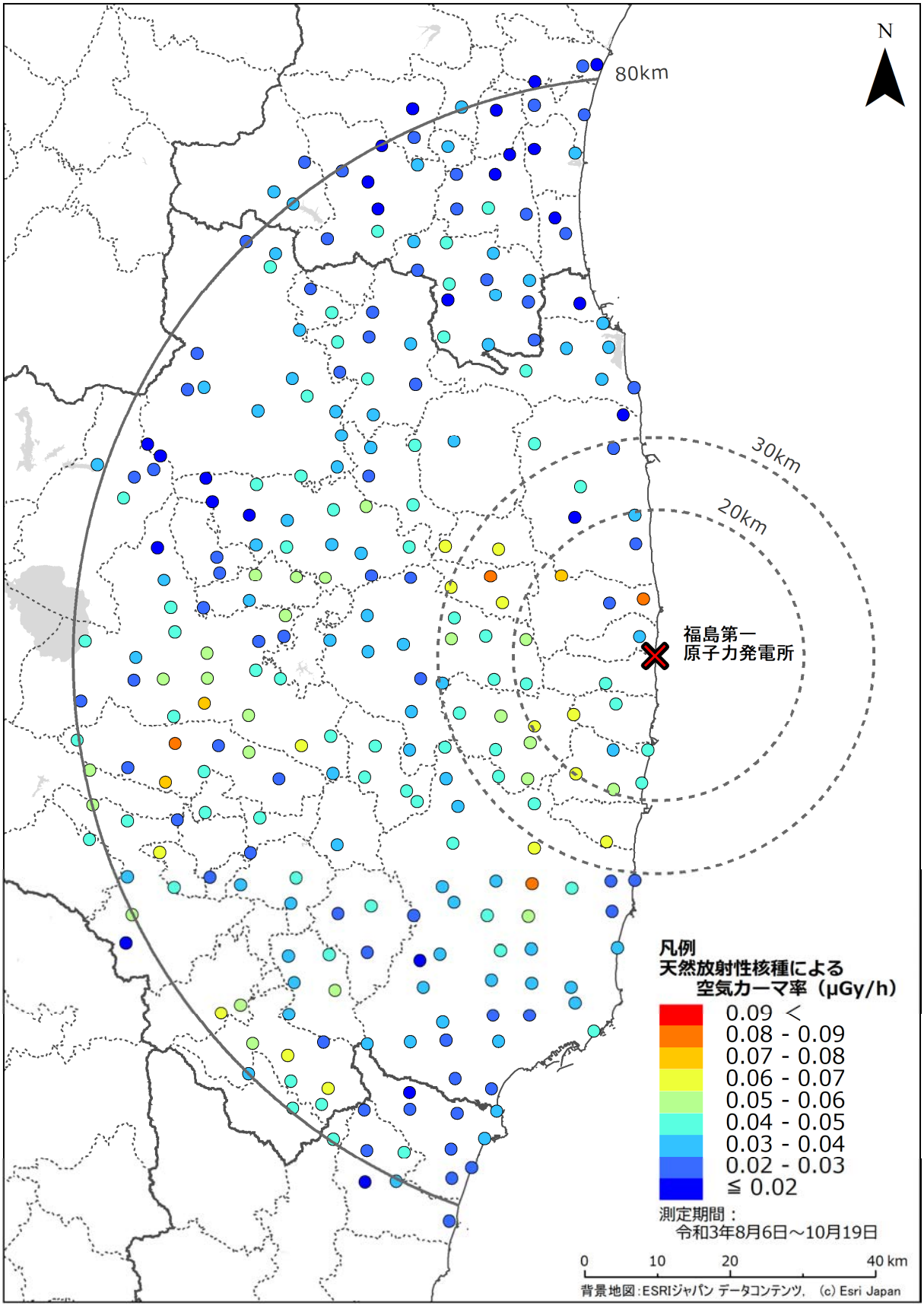


図 4-14　in-situ 測定により評価した天然放射性核種による空気カーマ率の分布

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。

$$\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T_{Cs}} + \frac{1}{T_{eco}} \tag{9}$$

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ェ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。

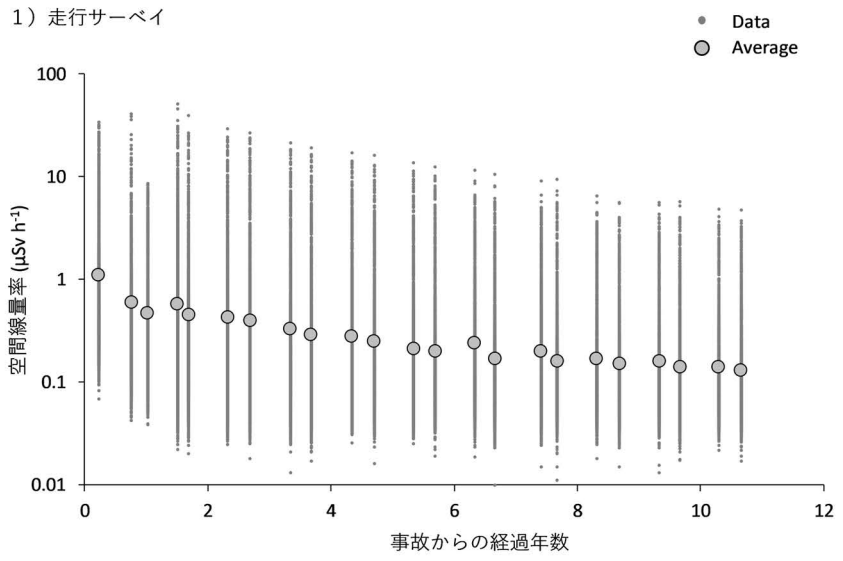
5.2 測定結果の変化傾向

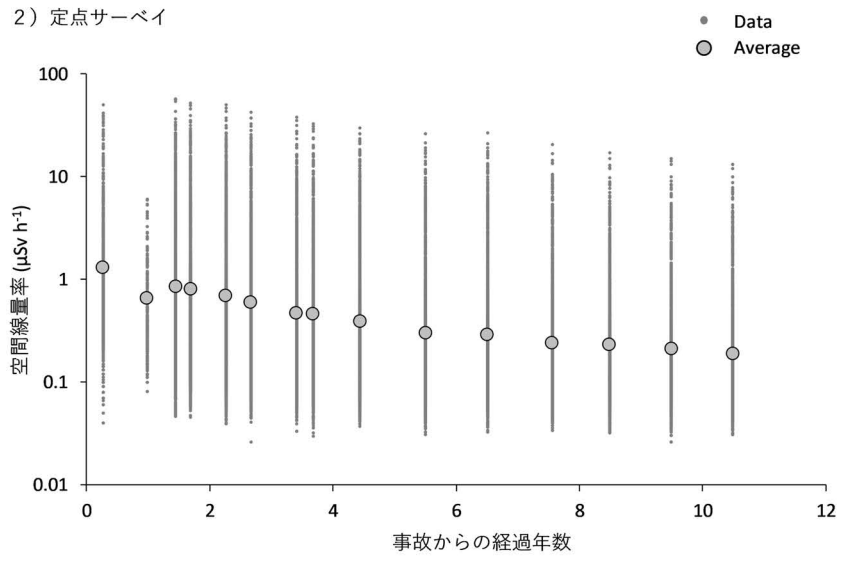
平成 23 年度から令和 3 年度までを対象に、走行サーベイ、定点サーベイ、歩行サーベイ及び無人ヘリサーベイで得られた空間線量率について図 5-1 に、可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定による土壌中放射性セシウム沈着量について図 5-2 にそれぞれ示す。各データは、80 km 圏内を政府の推奨する基準地域メッシュ（全 10,168 メッシュ）で分割し測定値があるメッシュについて各々のメッシュ内の線量率（又は沈着量）（・シンボル；各測定回で多数存在）と、各サーベイ手法において全メッシュ内の数値を測定回ごとに算術平均した数値（〇シンボル；各測定回に一つ）をプロットした。

走行サーベイは、第 1 回から 4,000 メッシュ以上の場所について測定が行われている。他の測定と比較すると網羅的に 80 km 圏内の地域を測定している。しかしながら、走行ルートについては、避難指示区域の解除等の理由から毎回異なること、測定対象が舗装された車道上であることに注意が必要である。定点サーベイは、住宅地内にある公共施設など開けた舗装されていない平坦地及び空間線量率が狭い範囲で急激に変化しない場所を選定しているため、他の測定結果と比較して、エリアを代表する数値として使用しやすい。ただし、第 1 回及び第 2 回において、迅速な汚染範囲の調査を目的としたため、測定点数が他の測定に比べて極端に少ない。歩行サーベイについては、定点サーベイで選定された測定点の周辺車道や歩道を測定対象としており、第 3 回以降では一定の場所での測定データが得られている。可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定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1回	第2回	第3回	第4回	第5回	第6回	第7回	第8回	第9回	第10回	第11回	第12回	第13回
事故からの経過年数(年)	0.23	0.76	1.02	1.51	1.69	2.32	2.69	3.34	3.68	4.34	4.70	5.34	5.69
平均空間線量率(μSv h^{-1})	1.1	0.60	0.47	0.58	0.45	0.43	0.40	0.33	0.29	0.28	0.25	0.21	0.20
標準偏差	2.6	1.8	0.87	2.0	1.5	1.5	1.4	1.1	0.95	0.89	0.77	0.66	0.61
測定エリア数	4536	3518	2908	6149	4994	6160	5746	5312	5496	5156	5224	5481	5100
初回からの平均値の割合	100	55	43	53	41	39	36	30	26	25	23	19	18

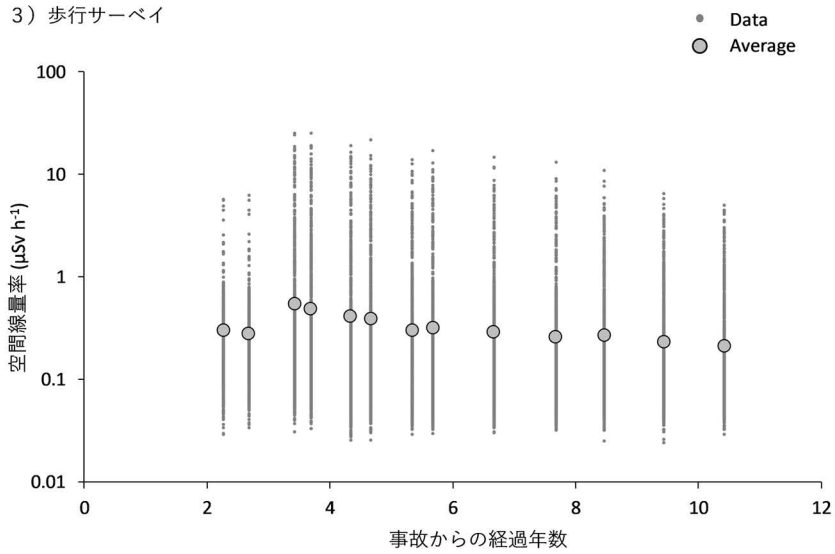
測定回	第14回	第15回	第16回	第17回	第18回	第19回	第20回	第21回	第22回	第23回
事故からの経過年数(年)	6.33	6.66	7.41	7.67	8.31	8.68	9.33	9.67	10.3	10.7
平均空間線量率(μSv h^{-1})	0.24	0.17	0.20	0.16	0.17	0.15	0.16	0.14	0.14	0.13
標準偏差	0.61	0.45	0.46	0.40	0.39	0.31	0.37	0.29	0.31	0.26
測定エリア数	4044	5510	3874	5204	3883	4966	3943	4990	3955	4904
初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

測定回	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回	第6回	第7回	第8回	第9回	第10回	第11回	第12回	第13回
事故からの経過年数(年)	0.27	0.98	1.45	1.69	2.26	2.67	3.41	3.68	4.44	5.50	6.51	7.56	8.49
平均空間線量率(μSv h^{-1})	1.3	0.65	0.85	0.80	0.69	0.60	0.47	0.46	0.39	0.30	0.29	0.24	0.23
標準偏差	3.6	0.86	2.7	2.5	2.3	1.9	1.6	1.6	1.3	1.0	1.0	0.77	0.70
測定エリア数	1998	354	6419	6403	6406	6404	6422	6415	6424	6407	6414	6399	5024
初回からの平均値の割合	100	50	65	62	53	46	36	35	30	23	22	18	18

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

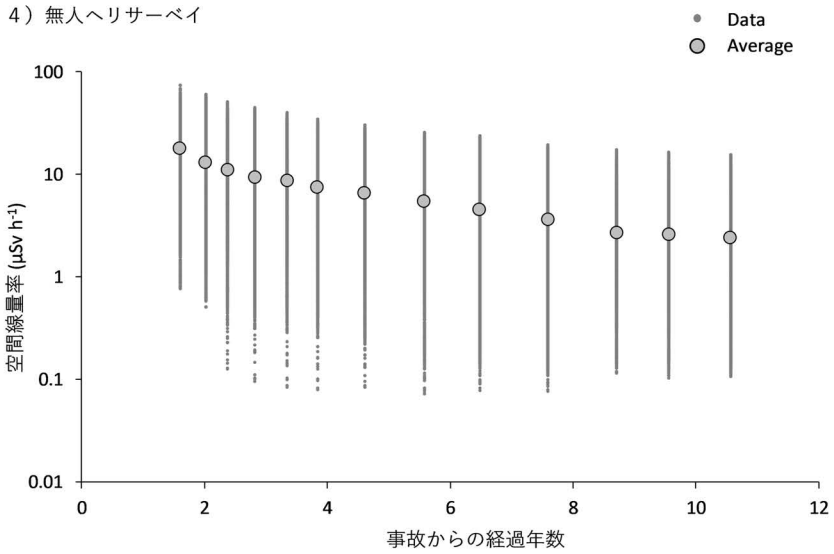
図 5-1　分布状況調査で得られた空間線量率の変化傾向（1/2）
（天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。）

3）歩行サーベイ



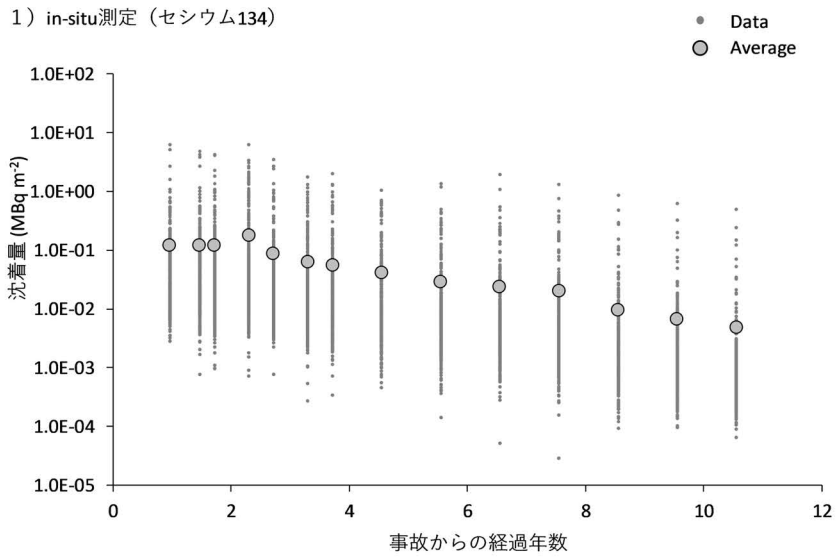
測定回	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回	第6回	第7回	第8回	第9回	第10回	第11回	第12回	第13回
事故からの経過年数(年)	2.27	2.68	3.43	3.69	4.34	4.67	5.34	5.68	6.67	7.68	8.47	9.44	10.4
平均空間線量率(μSv h-1)	0.30	0.28	0.54	0.49	0.41	0.39	0.30	0.32	0.29	0.26	0.27	0.23	0.21
標準偏差	0.46	0.41	1.8	1.6	1.4	1.3	0.88	1.0	0.84	0.71	0.65	0.48	0.43
測定エリア数	739	878	1960	1977	1964	1946	2000	1976	2118	2117	1766	1729	1748
初回からの平均値の割合	100	93	180	163	137	130	100	107	97	87	90	77	70

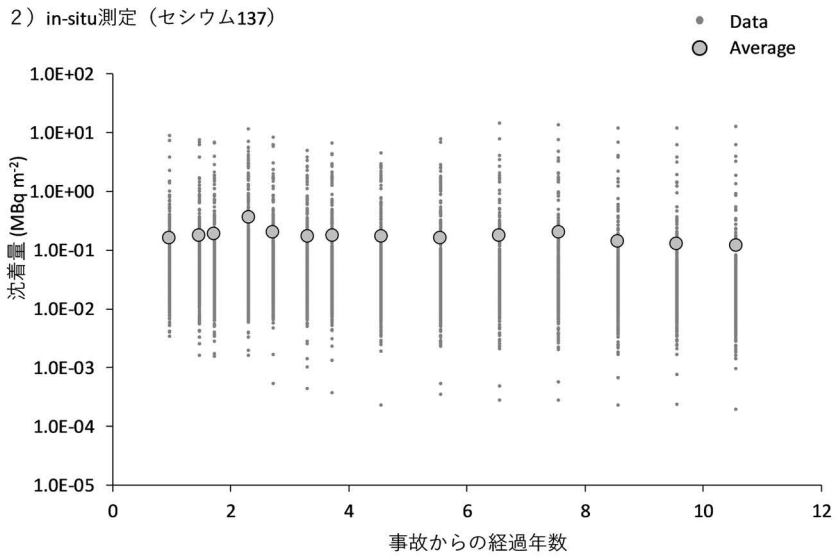
4）無人ヘリサーベイ



測定回	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回	第6回	第7回	第8回	第9回	第10回	第11回	第12回	第13回
事故からの経過年数(年)	1.6	2.02	2.38	2.82	3.35	3.84	4.61	5.58	6.48	7.59	8.71	9.56	10.6
平均空間線量率(μSv h-1)	18	13	11	9.4	8.6	7.4	6.6	5.4	4.5	3.6	2.7	2.6	2.4
標準偏差	15	12	9.4	8.2	7.4	6.3	5.6	4.7	4.2	3.3	2.5	2.4	2.3
測定エリア数（100mメッシュ）	1761	4624	5377	5382	5382	5376	5385	5385	6139	6139	7420	7119	7119
初回からの平均値の割合	100	72	61	52	48	41	37	30	25	20	15	14	13

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





測定回	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回	第6回	第7回	第8回	第9回	第10回	第11回	第12回	第13回
事故からの経過年数(年)	0.96	1.47	1.72	2.30	2.72	3.30	3.72	4.55	5.55	6.55	7.55	8.55	9.55
平均セシウム沈着量(MBq m^{-2})	0.12	0.12	0.12	0.18	0.088	0.062	0.056	0.041	0.029	0.024	0.020	0.010	0.007
標準偏差	0.46	0.42	0.42	0.53	0.29	0.17	0.18	0.11	0.11	0.12	0.089	0.056	0.040
測定エリア数	374	386	392	425	401	403	402	402	402	400	400	382	378
初回からの平均値の割合	100	100	100	150	73	52	47	34	24	20	17	8.1	5.6

測定回	第14回
事故からの経過年数(年)	10.6
平均セシウム沈着量(MBq m^{-2})	0.005
標準偏差	0.031
測定エリア数	368
初回からの平均値の割合	4.0

測定回	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回	第6回	第7回	第8回	第9回	第10回	第11回	第12回	第13回
事故からの経過年数(年)	0.96	1.47	1.72	2.30	2.72	3.30	3.72	4.55	5.55	6.55	7.55	8.55	9.55
平均セシウム沈着量(MBq m^{-2})	0.16	0.18	0.19	0.36	0.20	0.17	0.18	0.17	0.16	0.18	0.20	0.14	0.13
標準偏差	0.66	0.67	0.68	1.0	0.69	0.49	0.57	0.47	0.62	0.90	0.91	0.79	0.75
測定エリア数	374	386	392	425	402	404	403	403	404	404	404	385	385
初回からの平均値の割合	100	113	119	225	125	106	113	106	100	113	125	88	81

測定回	第14回
事故からの経過年数(年)	10.6
平均セシウム沈着量(MBq m^{-2})	0.12
標準偏差	0.78
測定エリア数	384
初回からの平均値の割合	75

図 5-2　分布状況調査で得られた放射性セシウム沈着量の変化傾向

5.3 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]を採用することとした。

本解析には、80 km 圏内全域のデータ、及び人為的なかく乱など環境変化の影響や高空間線量率エリアでの影響を考察するため、避難指示区域（令和元年 4 月時点）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第 4 回（平成 24 年度調査の 1 回目）以降、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。定数項である c は本解析期間では減衰傾向が確認できないような超長期半減期成分（以下「第 3 成分」という。）を表している。この第 3 成分については、現時点では、傾きを計算できる条件が整っていないが、今後のデータを加えることで計算が可能になると考えられる。実効半減期及び定数項である a, b, 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。これらの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、定数成分のない式(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_{eff} は 1 成分モデルの実効半減期である。式(12)における f は式 (10)の c（第 3 成分）に相当する定数項である。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 a、b、d、e については参考値とする。

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

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

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

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_{eff}は 1 成分モデルの実効半減期である。

$$D = g\ exp\left(-\frac{0.693}{t_{eff}} \times t\right) \quad (13)$$

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。

走行サーベイの空間線量率変化傾向及び指数関数近似を行った結果を図 5-3 に示す。走行サーベイについては、式(10)で近似したところ、パラメータは収束しなかった。式(11)では、図のように数値は導出できたものの、表 5-1 のように t_{long}の 95%の信頼区間を見ると信頼性が担保されているとはいえない。一方、式(12)については、パラメータが収束したため、走行サーベイについては、式(12)の結果を基に考察する。表 5-1 に示したように、1 成分モデルの実効半減期は 1.9 年となった。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。また、第 3 成分として、0.077 μSv/h と計算できた。

定点サーベイについて指数関数近似を行った結果を図 5-4 a)に示す。データ数が少ない事故直後の測定データを除外したため式(12)のみパラメータが収束し、1 成分モデルの実効半減期は 1.7 年となった。測定対象は開けた場所の土壌上としており、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の影響を受けていると考えられる。第 3 成分は 0.15 μSv/h と求められた。

歩行サーベイについて指数関数近似を行った結果を図 5-4 b)に示す。歩行サーベイは平成 25 年度に開始したため二項（二成分）の指数関数近似はできず、1 成分モデルの実効半減期は 1.3 年となった。測定対象は歩道上であり、走行サーベイと同じく道路上のセシウムの洗い流し効果により比較的速い半減期となっていると推定される。第 3 成分は 0.19 μSv/h と求められた。

無人ヘリサーベイについては、測定範囲が福島第一原発から 5 km 圏内と限られている。1 成分モデルの実効半減期は、図 5-4 c)に示すように 2.1 年となった。第 3 成分として 2.3 μSv/h と計算できた。他の測定に比べて第 3 成分が比較的高いのは、速い成分が計算できていないことも要因として考えられる。今後のデータ追加時の評価に速い成分の抽出について考慮が必要と考えられる。

航空機サーベイについては、式(10)での計算が可能であった（図 5-5）。初期のデータがあることと、地理的な測定密度が比較的均一であるため、計算が可能になったと考えられる。実効半減期は、速い成分で 0.52 年、遅い成分で 2.3 年及び第 3 成分が 0.19 μSv/h であった。また、避難指示区域のみを抽出したところ、図 5-5 b)に示すように式(11)での近似が可能であり、速

い成分が 0.61 年、遅い成分が 4.8 年であった。避難指示区域のみの遅い成分の減少速度が遅いのは、人為的な除染の開始時期に関係があると考えられる。他の測定手法に比べて、航空機モニタリングの結果は地域の平均的な状況を表していると考えられる。

表 5-1　評価された実効半減期の一覧

項目	対象	測定手法	パラメータ							
			80 km圏内				避難指示区域（平成31年4月時点）			
			適用モデル	速い成分 (y)	遅い成分 (y)	第3成分 (μSv/h)	適用モデル	速い成分 (y)	遅い成分 (y)	第3成分 (μSv/h)
空間線量率	車道上	走行サーベイ	式 (11)	*1.9* [a] *(1.1 – 2.7)*	*37.6* [a] *(-598 – 673)*	-	データ不足	-	-	-
			式 (12)	1.9 (1.7 – 2.1)		0.077 (0.053 – 0.10)	データ不足	-	-	-
	平たん土壌上	定点サーベイ	式 (12)	1.7 (1.5 – 1.9)		0.15 (0.12 – 0.17)	データ不足	-	-	-
	歩道上	歩行サーベイ	式 (12)	1.3 (0.87 – 1.7)		0.19 (0.15 – 0.22)	データ不足	-	-	-
	平均値	無人ヘリサーベイ	範囲外	-	-	-	式 (12)	2.1 (2.0 – 2.3)		2.3 (2.0 – 2.6)
	平均値	航空機サーベイ	式 (10)	0.52 (0.25 – 0.78)	2.3 (1.3 – 3.2)	0.19 (0.13 – 0.25)	式 (11)	0.61 (0.44 – 0.79)	4.8 (4.0 – 5.6)	-
放射性セシウム沈着量	Cs-134	In-situ	式 (13)		1.8 (1.4 – 2.2)		データ不足		-	
	Cs-137				22 (-6.9 – 51)				-	

a) 参考データ

（　）内は95%信頼区間を示している。

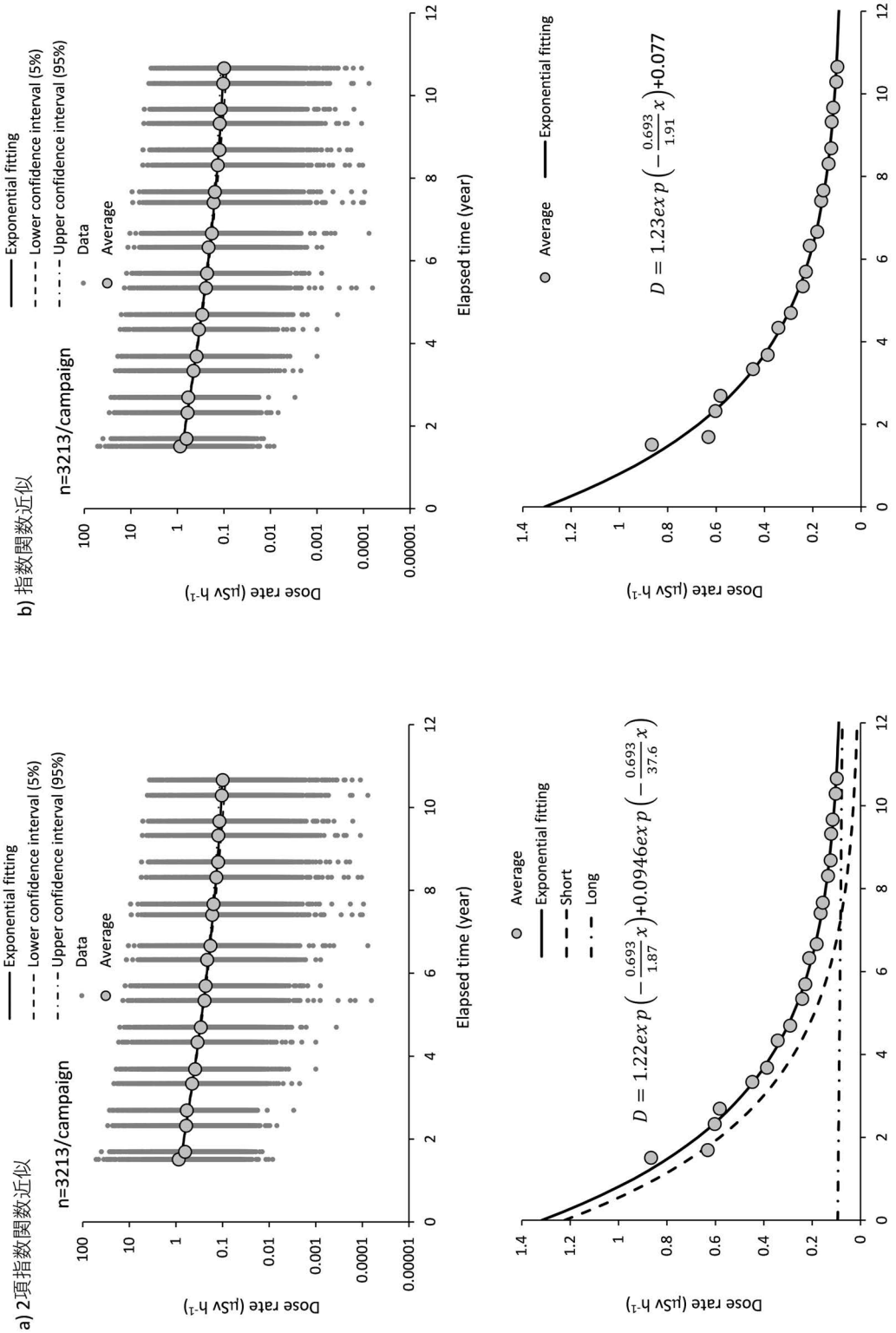


図 5-3　走行サーベイ結果（80 km 圏内）における空間線量率変化傾向及び指数関数の近似
（Short：速い成分、Long：遅い成分、n：データ数）

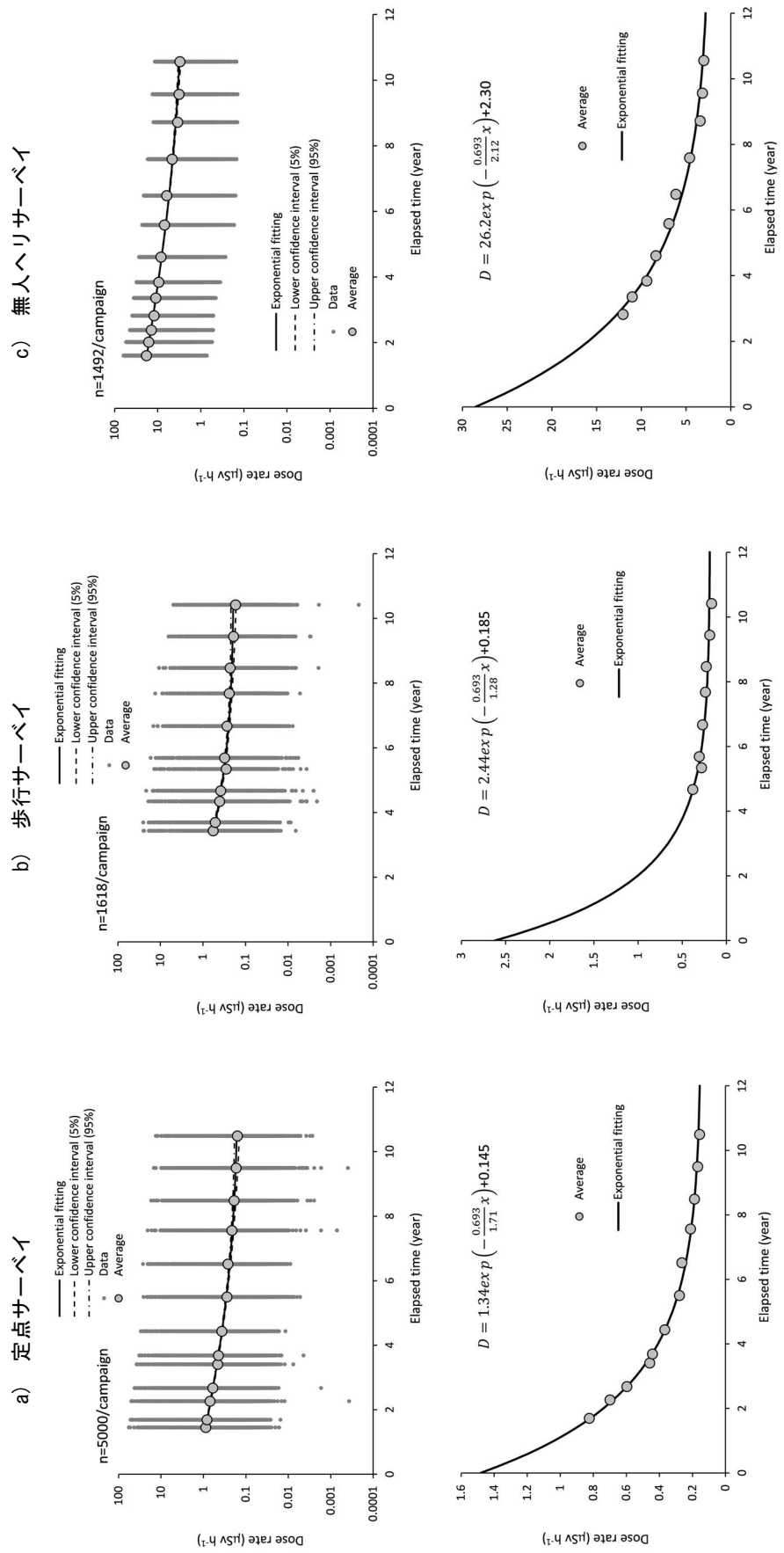


図 5-4　定点サーベイ、歩行サーベイ及び無人ヘリサーベイ結果における空間線量率変化傾向及び指数関数の近似
（n：データ数）

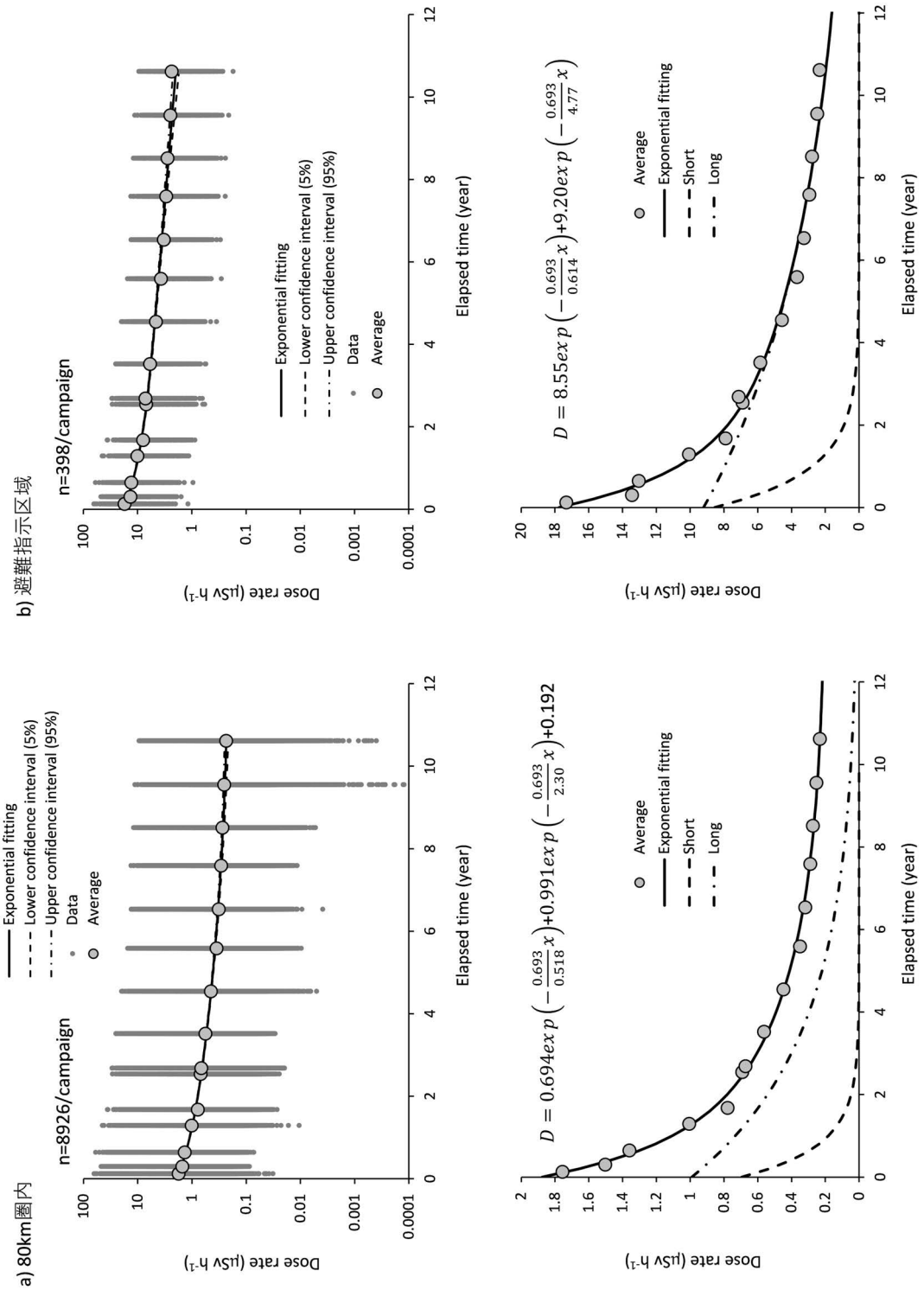


図 5-5 航空機サーベイ結果における空間線量率変化傾向及び指数関数の近似
(Short：速い成分、Long：遅い成分、n：データ数)

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 5-6 に示す。図に示すようにセシウム 134 は近似曲線と測定データ点の一致性が良いものの、セシウム 137 については、ばらつきが比較的大きい。また、平成 28 年度の結果以降、不連続になっているように見える。この理由として、in-situ 測定の測定誤差の影響、設定した重量緩衝深度の不確かさ及び測定場所の環境変化による影響等が考えられ、個別のデータを精査して検討をしているが、まだ原因は明らかではない。近似した実効半減期は、セシウム 134 については 1.8 年となった（表 5-1）が、セシウム 137 については有意な結果とはいえないためさらなる検討が必要と考える。

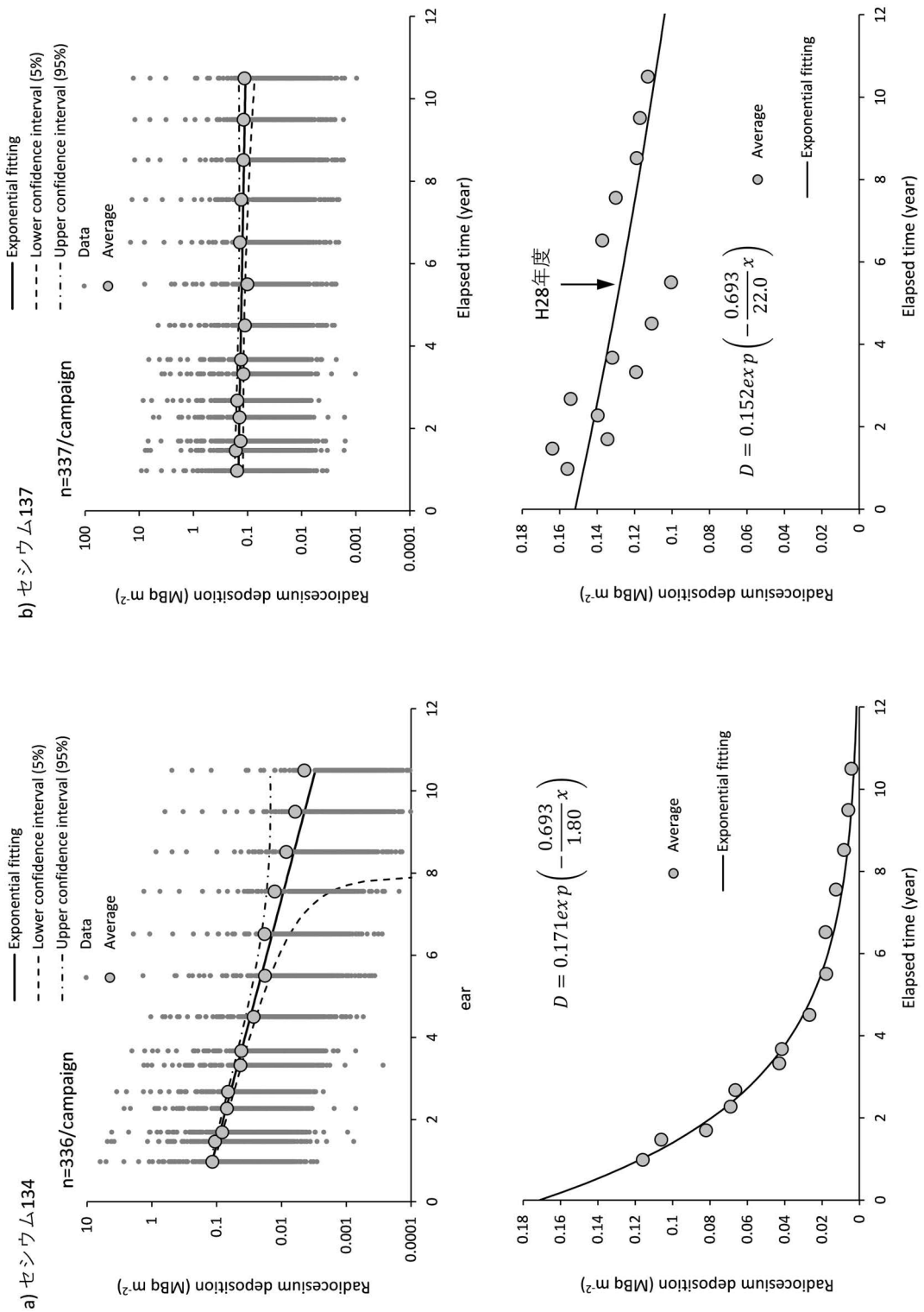


図 5-6　可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定結果における放射性セシウムの沈着量変化傾向及び指数関数の近似（n：データ数）

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約1,340 箇所を図 5-7 に示す。なお、各測定手法の測定場所は図 5-8 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 5-7 に示した 1,340 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 5-9 に示す（ただし、定点サーベイ及び歩行サーベイについては一項の指数関数近似とした)。このように、空間線量率は航空機サーベイ、定点サーベイ、歩行サーベイ及び走行サーベイの順に大きい傾向にあることが分かる。航空機サーベイと定点サーベイの傾向を見ると、事故後 2 年目までは減少傾向が似通っていたが、3 年目以降両者の差が開き定点サーベイの方が低くなっている。これは、3 年目以降に本格化した除染作業の時期や、航空機サーベイは 300 m 上空から測定しているため、直下の半径 300 m の円内に入る地域の放射線の平均値を計測していることから局所的な線量の勾配がトレースできないことを考えると、除染による線量の減少が、各測定手法の測定値に与える影響の差異を反映している。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、5.5 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。

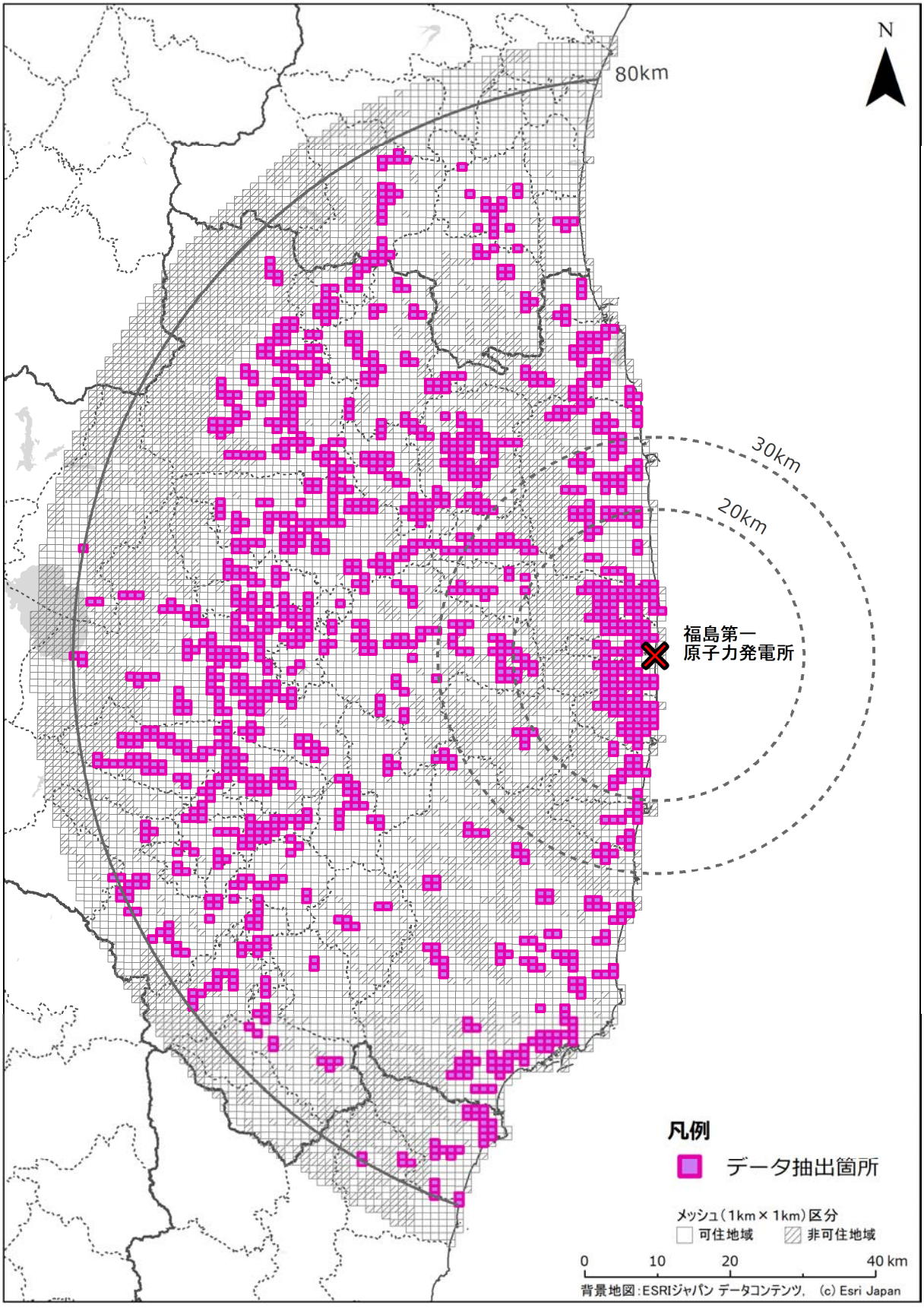


図 5-7　走行サーベイ、定点サーベイ、歩行サーベイ及び航空機サーベイの全測定手法によるデータが存在する調査メッシュ箇所（データ抽出箇所）

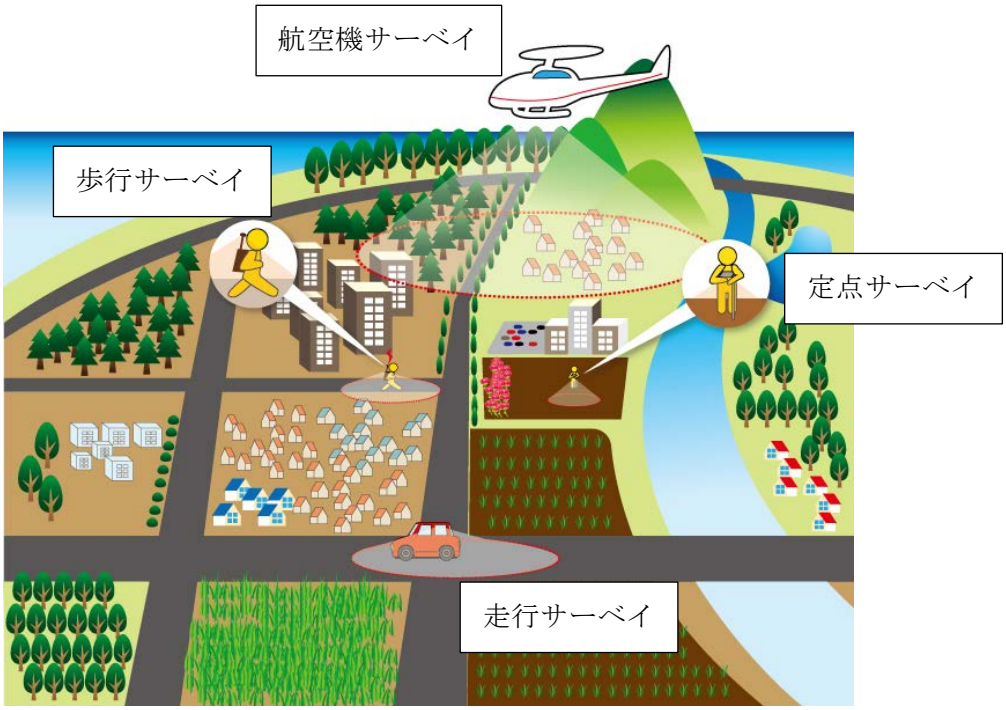


図 5-8　各測定手法の測定状況と測定対象のイメージ

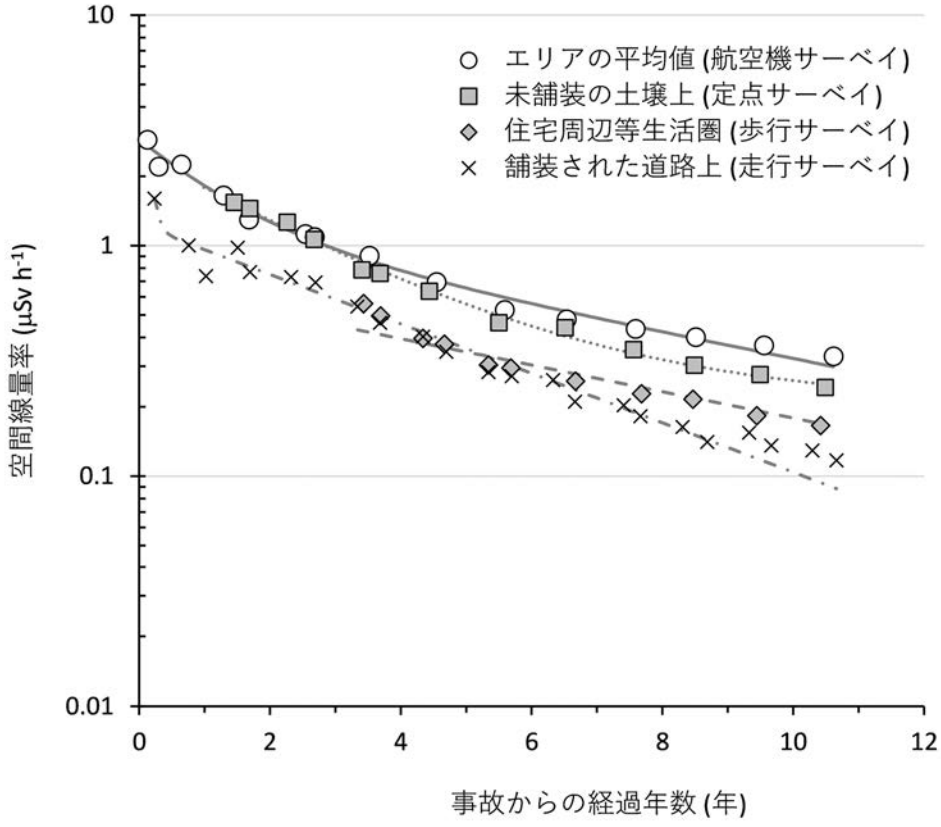


図 5-9　全測定手法によるデータが存在する調査メッシュを抽出して解析した空間線量率の変化傾向（図中の曲線は二項又は一項の指数関数近似曲線）

5.7 モニタリングポストによる空間線量率解析の試行

事故後、福島県内には多くのモニタリングポストと呼ばれる固定式の連続ガンマ線モニターが設置された。これらは、機能に合わせてリアルタイム線量測定システム及び可搬型モニタリングポストと分類されている。図 5-10 にモニタリングポストの概観を示す。これらのモニタリングポストは平成 30 年時点でリアルタイム線量測定システムが 2,974 台、可搬型モニタリングポストが 576 台設置されている。台数については、機器の故障や設置位置の状況により多少変動がある。モニタリングポストは、一般的に電源の供給が必要であることから、生活圏に近いところのデータが取得されているという特徴がある。また、分布状況調査のような広域のモニタリングと比べて、地域の網羅性は劣るものの、1 分ごとのデータが自動的に蓄積されており、時間分解能が高いという特徴を有する。ここでは、これらのデータを利用し、変動傾向の解析を試行した。

モニタリングポストのデータについて、平成 23 年 4 月から平成 30 年 8 月までのデータを入手し、1 日ごとに平均化した。モニタリングポスト名や測定位置は設置場所の状況に応じて変化するため、位置情報で同じ設置場所であるデータは結合するとともに、期間中に場所が変更になったモニタリングポストデータは除外した。測定データのバックグラウンド減算には航空機モニタリングデータを利用して求めたバックグラウンドデータ[25]を採用した。バックグラウンド減算後 0.01 μSv/h 以下となったデータについては解析対象から除外し、式（11）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。

代表的な、モニタリングポストのデータの一例を図 5-11 に示す。福島県は積雪地帯であるため、冬場はモニタリングポスト周辺の雪が遮蔽となり、空間線量率が低くなる傾向がある。したがって積雪期のデータを除外するなどのデータクレンジングが必要であるといえる。また、周辺の人為的な除染により生じた空間線量率のギャップも確認できる。加えて、モニタリングポストの種類によっては、測定値を Gy 単位に変換したものをそのまま Sv 単位表示にしているものもあり、絶対値の比較には注意が必要である。よって、ここでは、実効半減期のみについて述べる。

解析対象としたモニタリングポストは 2,142 台であり、採用したモニタリングポストの設置場所を図 5-12 に示す。モニタリングポスト毎に実効半減期の速い成分 t_{short} 及び遅い成分 t_{long} を求めた結果をヒストグラムにして図 5-13 に示す。速い成分は 1 年付近にピークをもつ分布を示した。この分布の統計的な情報を地域別に表 5-2 に示す。中央値である 50%タイル値は 1.0～1.2 付近を示し、地域差は見られなかった。県中地域以外は中央値と平均値の数値は近いことが分かる。県中地域は平均値が極端に大きいが、うまく近似できない解析上問題のあるデータが含まれていることが推測される。一方、遅い成分については、図 5-13 のヒストグラムに示したように明確な数値の分布は見られず 40 年以上となる評価結果が多かった。表 5-3 に示した数値を見ても最大で百万年以上となるデータが多く、平均値と中央値には大きな乖離が見られた。これは、近年では空間線量率がバックグラウンドレベルとなり、明確な減少傾向として数値に現れないことが原因と考えられる。一方、中央値を見ると 10～31 年の間の数値となっており、これが平均的な t_{long} の数値とも考えられる。

以上のように、モニタリングポストの解析を試行した。ほぼ全てのモニタリングポストに除

染による空間線量率のギャップが記録されていたことから、このようなデータは除染効果の評価に活用できる可能性がある。解析の最適化や結果の考察の深化には、今後も最新のデータを追加し解析を継続していく必要があると考えられる。

表 5-2　モニタリングポストデータから求めた実効半減期の速い成分（単位：年）

	全域	浜通り	県北	県中	県南	会津
平均	5.1	1.4	1.3	18	1.2	1.4
データ数	2142	880	339	482	180	261
25%タイル値	0.63	0.53	0.58	0.78	0.65	0.62
50%タイル値	1.1	1.2	1.1	1.1	1.1	1.0
75%タイル値	1.7	1.8	1.6	1.5	1.5	1.8

表 5-3　モニタリングポストデータから求めた実効半減期の遅い成分（単位：年）

	全域	浜通り	県北	県中	県南	会津
平均	2.6.E+06	2.5.E+06	2.3.E+06	3.9.E+06	3.4.E+06	5.2.E+05
データ数	2142	880	339	482	180	261
25%タイル値	5.1	4.5	5.0	6.5	6.3	4.6
50%タイル値	18	16	24	31	17	10
75%タイル値	1.5.E+06	1.5.E+06	2.5.E+06	4.6.E+06	2.0.E+06	1.0.E+05

（表中の E+06 は 10^6 を E+05 は 10^5 を意味する。）

リアルタイム線量測定システム	可搬型モニタリングポスト
測定範囲：BG～99.99μSv/h 指示誤差：±20%以内	測定範囲：BG～100,000μGy/h 指示誤差：±10%以内（BG ～ 10μGy/h） ±20%以内（10μGy/h ～）

図 5-10　モニタリングポストの概観と基本性能

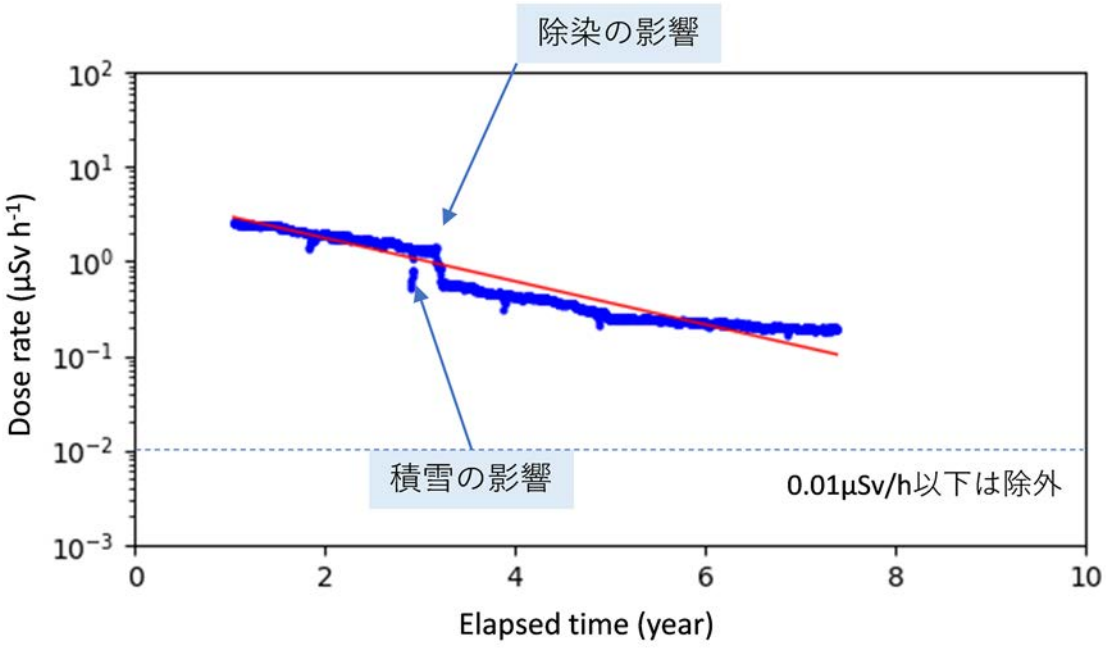


図 5-11　モニタリングポストの測定データ例
（実線はフィッティング曲線）

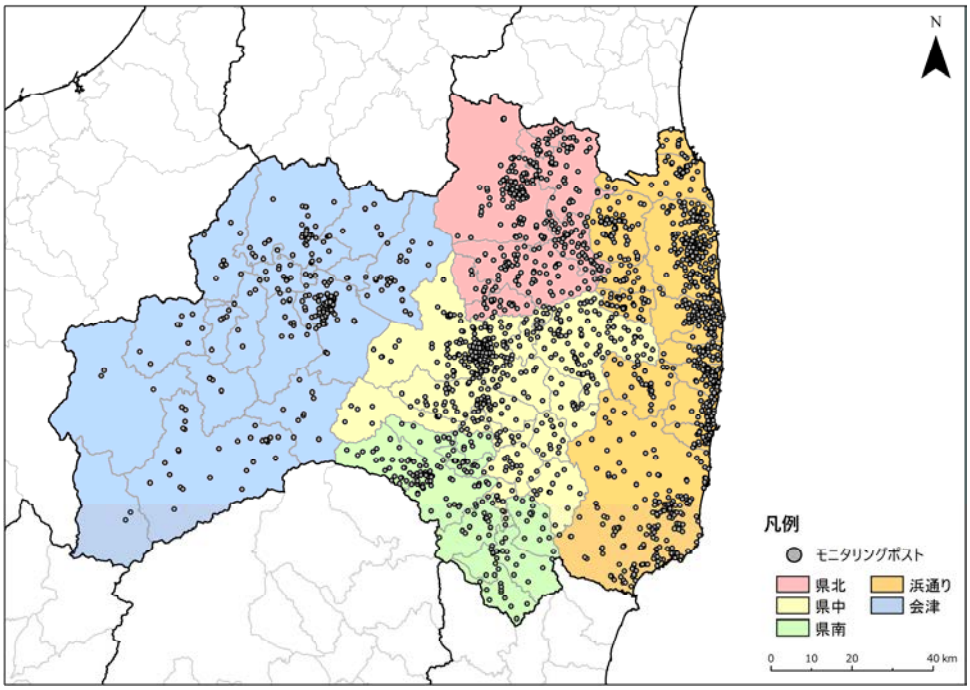


図 5-12　解析に使用したモニタリングポストの設置場所

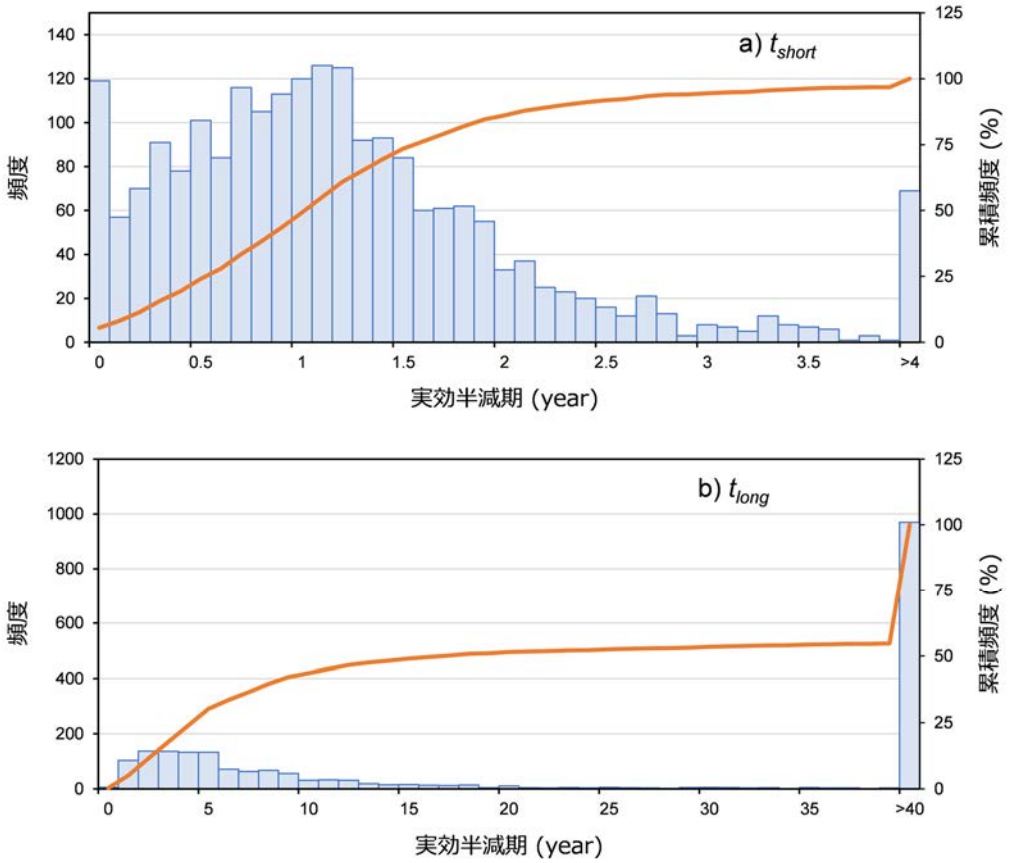


図 5-13　モニタリングポストデータから求めた実効半減期の頻度分布及び累積頻度
（上：速い成分、下：遅い成分）

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

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今後継続すべき環境放射線モニタリングの計画策定が求められている。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、各省庁や関係機関が横断的に実施してきた。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、最終的な決定には行政判断が必要になると考えられる。その判断の一助として、地域ごとに住民数や現状の空間線量率などを根拠として、相対的にモニタリングの必要性の重要度分類をすることは、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。

令和元年度は、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、線量の高低だけの尺度だけでなく、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、総合的に地域の重要度を評価するものであり、モニタリングデータの誤差、実施回数及び密度等によって大きく変化しない「普遍性」を持つことが望まれる。令和 3 年度は、令和 2 年度に引き続き、スコアの「普遍性」を評価するために、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とその変化要因について考察を行った。情報処理装置の高度化に伴い、GIS（地理情報システム：Geographic Information System）ソフトウエアは様々なデータを取り込んで階層別に比較できるようになっており、本章での検討に活用した。

6.2 総合モニタリング計画

総合モニタリング計画は、平成 23 年 8 月 2 日に政府が原子力災害対策本部の下にモニタリング調整会議を設置し策定したもので、この計画に基づき、関係府省、地方公共団体、原子力事業者等が連携してモニタリングを実施することとなっている。表 6-1 に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。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 2 年 4 月 1 日に改定されたものである。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 現在の周辺住民の被ばく（外部被ばく及び内部被ばく）線量及び今後予想される被ばく線量の推定
③ 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

④ 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

⑤ 住民の健康管理や健康影響評価等の基礎資料の蓄積

⑥ 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

ここで示されたそれぞれの目的は、環境モニタリングを実施する上での基本的な目標というべきものであり、総合モニタリング計画において計画されている全てのモニタリングはこの目的の下に実施されている。

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
○福島県全域の環境一般モニタリング • 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 • 原子力発電所周辺の空間線量率、大気浮遊じん(ダスト)等の継続的測定 • 空間線量率の分布、地表面への様々な放射性物質の沈着状況を確認 • 原子力発電所 80km 圏内における航空機モニタリングを定期的に実施 • 避難指示区域等における詳細モニタリングの実施	原子力規制委員会 原子力災害対策本部 福島県 原子力事業者等	**○学校、保育所等のモニタリング** • 福島県内の学校等における空間線量率の測定結果をインターネットを通じて公開 • 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	原子力規制委員会 文部科学省 福島県 地方公共団体等
		○港湾、空港、公園、下水道等のモニタリング • 下水汚泥中の放射性物質の濃度の測定 • 港湾、空港、都市公園等の空間線量率の測定	国土交通省 福島県 地方公共団体等
○水環境 • 福島県並びに近隣県の河川、湖沼・水源地、地下水、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空間線量率の測定	環境省 福島県	**○野生動植物、廃棄物のモニタリング** • 自然生態系への放射線影響の把握に資するために、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き、廃棄物処理施設等の放流水中の放射性物質濃度、敷地境界における空間線量率等の測定を実施	環境省 福島県 地方公共団体 事業者等
○海域モニタリング • 東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所の周辺の(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	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	**○農地土壌、林野、牧草等のモニタリング** ・福島県等において、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を行う ・福島県内の試験地において、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 ・福島県内において、ため池等の放射性物質の濃度を測定	農林水産庁 林野庁 地方公共団体等
○全国的な環境一般のモニタリング • 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公開 • 月間降下物（雨やほこり等）は月に 1 回、上水（蛇口）は年に 1 回の頻度で測定し、放射性物質の濃度を測定 • 福島県隣県の比較的放射性物質の沈着量の高い地域について、航空機モニタリングを実施	原子力規制委員会 地方公共団体等	**○水道のモニタリング** ・関係都県ごとに、浄水場の浄水及び取水地域の原水、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	厚生労働省 原子力災害対策本部 地方公共団体等
		○食品のモニタリング • 食品中に含まれる放射性物質の濃度を測定 • 食品摂取を通じた実際の被ばく線量の推計調査を実施	厚生労働省 原子力災害対策本部 農林水産省 水産庁 福島県 関係地方公共団体等

6.3 空間線量率等モニタリングを取り巻く状況

6.3.1 空間線量率の分布の状況

これまで、多くの政府機関、研究機関、関係自治体等により継続的に空間線量率のモニタリングが行われてきた結果、空間線量率の分布状況等については、概ね明らかになりつつある。図 6-1 に平成 29 年度から令和 2 年度の 4 年間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。また、年度内で測定時期が異なる各測定結果について半減期補正等は実施していない。図 6-1 から、空間線量率の分布は、福島第一原発から北西方向に比較的高い地域が広がっており、福島市や郡山市のある中通り地域の空間線量率は令和元年時点で最大でも 1 μSv/h 程度となっていることが分かる。一方、会津地方については、事故の影響は小さかったことが分かる。なお、新潟県との県境の山地にはカリウム 40 等の天然の放射性核種由来の放射線が高い地域があることが知られている [27] 。表 6-2 に、本図に使用したモニタリング情報の出典を示す。

表 6-2　図 6-1 の作成に使用したモニタリング情報一覧

モニタリング情報	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よる走行サーベイ（KURAMA）	原子力規制委員会	29)
放射性物質の分布状況等調査による空間線量率測定	原子力規制委員会	30)
歩行サーベイによる生活経路における空間線量率の測定	原子力規制委員会	31)
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	32)
環境放射線モニタリング・メッシュ調査結果情報	福島県	33)
森林におけるモニタリング調査結果について	福島県	34)
福島県環境放射線モニタリング調査（観光地第 13 回）結果	福島県	35)

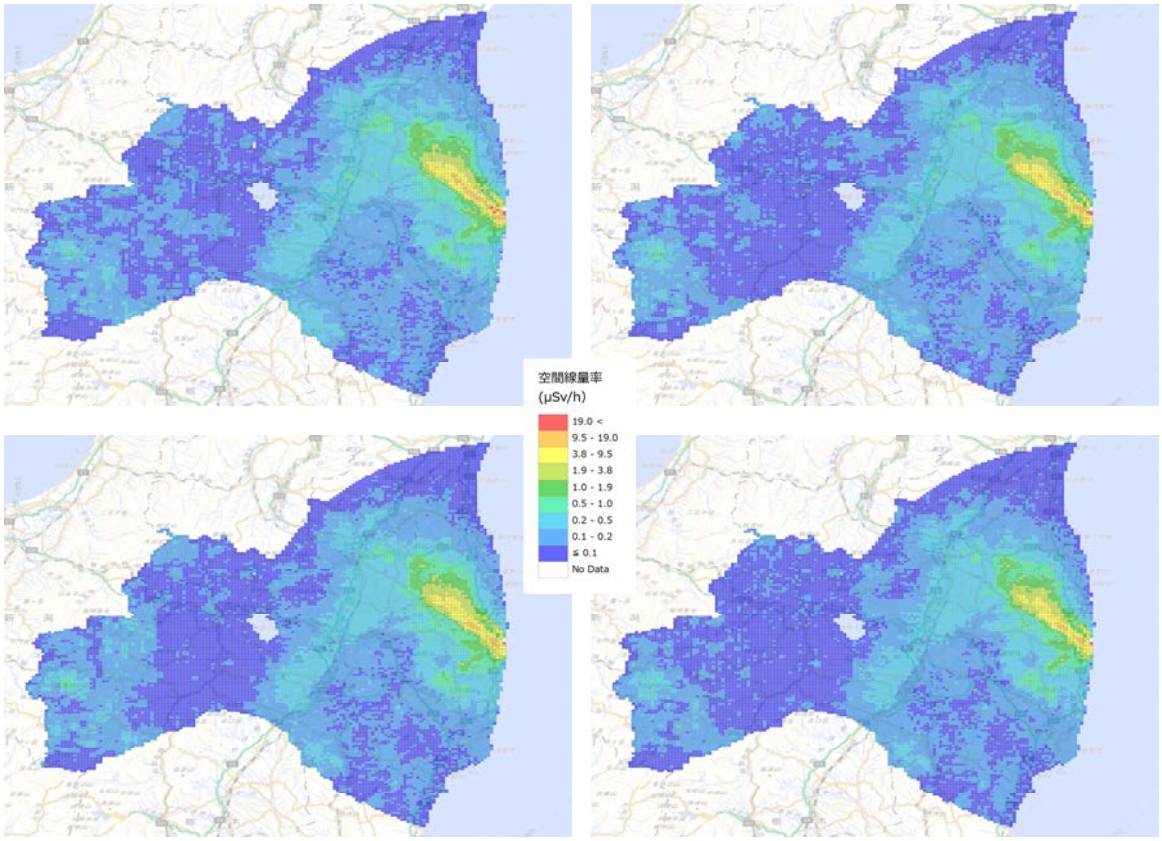


図 6-1　基準地域メッシュ内の最大空間線量率マップ
（左上：平成 29 年度、右上：平成 30 年度、左下：令和元年度、右下：令和 2 年度。天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。背景地図：国土地理院発行 2.5 万分 1 地形図。）

6.3.2　これまでの測定ポイントの設定方法

総合モニタリング計画における空間線量率の測定ポイントについては、空間的な評価を考慮して系統的に決定したもののほか、科学的な分析によらず、別の観点から測定ポイントを決定したのではないかと考えられるものも散見される。また、測定ポイントの選定に関する基準を明示したものは見当たらないものの、現状の測定ポイントを見ると、生活圏に近い場所が重点的に選定されていることが分かる。図 6-2 に福島市と富岡町における空間線量率の測定状況を示す。本データには、表 6-2 で示した情報の他、市町村が独自に測定して公開しているデータを含めている [36, 37]。

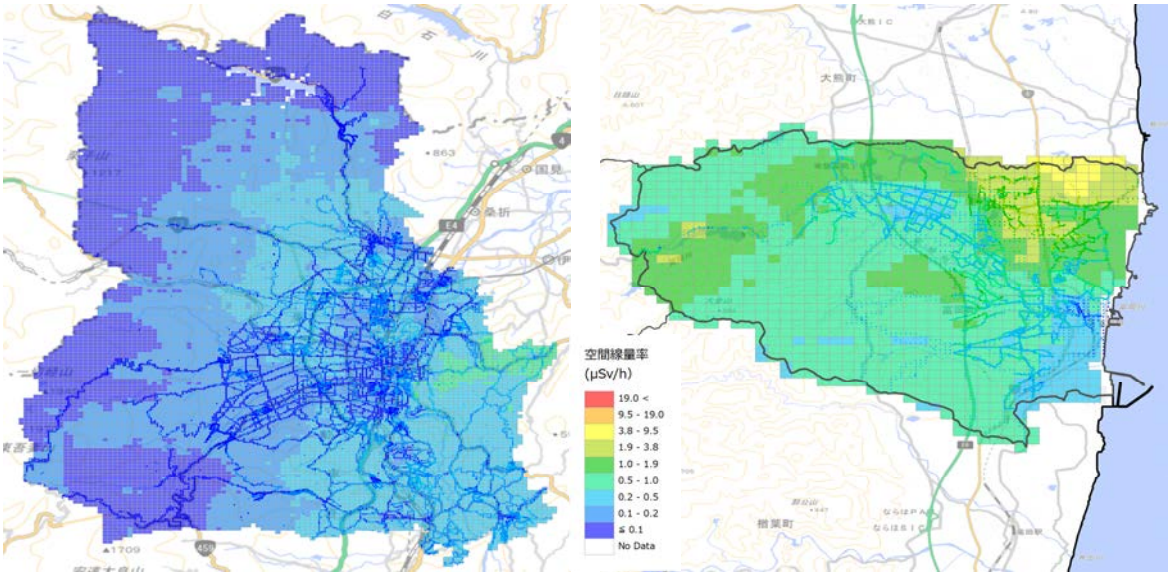


図 6-2　福島市及び富岡町における空間線量率の測定状況（平成 29 年度測定例）
（左：福島市、右：富岡町。天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。背景地図：国土地理院発行 2.5 万分 1 地形図）

6.3.3 重点化・最適化の方向性

事故から 10 年が経過した現在、事故後に測定ポイントを選定した状況から空間線量率は顕著に減少している。この状況を踏まえ、これまでに得られたモニタリングの結果を元に今後の測定ポイントの重点化・最適化について検討することが一般的と考えられる。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。

国（政府）が行うモニタリングにおいては、代表性の高い地域を重点的にかつ不足がないように計画されなければならない。空間線量率のモニタリングに関しては、被ばく評価に直接かかわるため、空間線量率が比較的高い場所だけでなく、人口密度や住民が多く集まる場所等が代表性の高い場所となる。次節以降、「モニタリングの代表性」をキーワードにし、そのために必要なパラメータの設定例について示す。

6.4 モニタリング代表性の高い場所を選定するための評価方法案

6.4.1 地域スコア化手法

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に技術検討会で検討した結果を紹介する。

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、まったく単位の異なる関連す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）を与える手法と定義する。ここでは、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を検討した。

6.4.2 スコア評価例

評価の対象範囲としては、福島県及び 80 km 圏内とし、対象範囲を図 6-1 に示した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例として以下の項目を選定した。

①空間線量率：図 6-1 で作成したメッシュ内の最大空間線量率
②事故前の人口密度：平成 22 年度の国勢調査結果 [38]
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/身体障碍者更生援護施設/知的障碍者援護施設/精神障碍者社会復帰施設/商業施設（売り場面積 500 m^2 以上）：データの詳細参照先については表 6-3 に示す。

①～④の情報に対し、設定したスコアについて表 6-4 に示す。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 μSv/h（追加被ばく線量年間 1 mSv 相当）[39] 付近を中央の階級とした。図 6-3 に全体の空間線量率の分布傾向と閾値について示す。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。図 6-4 に全体の人口密度の分布傾向と閾値について示す。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。

評価したスコアのマップを図 6-5～6-8 に示す。マップには便宜上、5 段階の色分けで示している。図 6-5 には、①空間線量率のスコアマップを図 6-6 には①＋②の空間線量率及び事故前の人口密度を合計したスコアマップを、図 6-7 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を合計したスコアマップを示している。さらに、4 つのパラメータによるスコアを合計した結果について図 6-8 に示している。図 6-8 を見ると、17 以上のスコアを示した場所は、令和元年時点で避難指示区域となっている大熊町、双葉町や富岡町となっている。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が人口の多い中通り地域の福島市や郡山市の市街地となっている。

表 6-3　ランドマークデータの詳細情報

データ項目	年度	引用先
幼稚園/児童館/保育所	平成 18 年	国土交通省国土数値情報 [40] 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/身体障碍者更生援護施設/知的障碍者援護施設/ 精神障碍者社会復帰施設/ 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 [41]

表 6-4　スコア付与例

パラメータ	スコア					
	5	4	3	2	1	0
①空間線量率（μSv/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

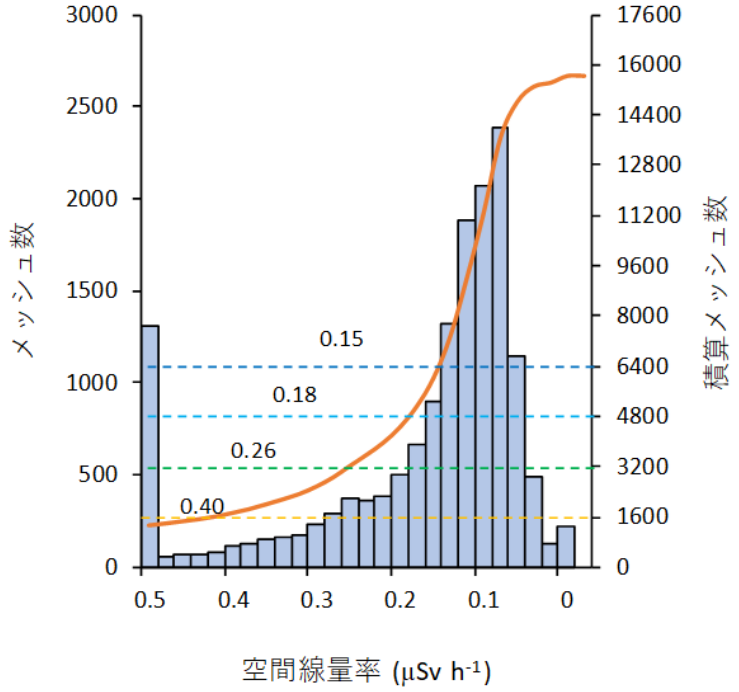


図 6-3　空間線量率の分布傾向と閾値

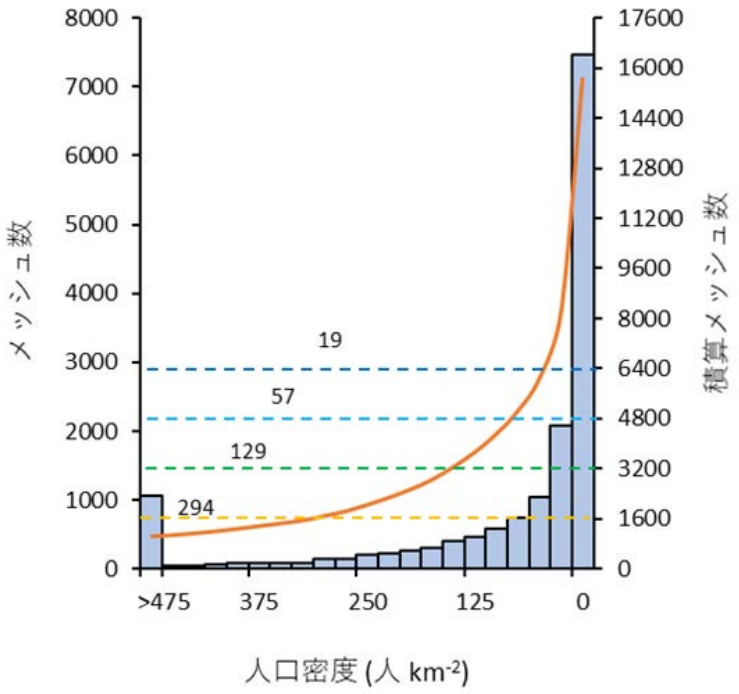


図 6-4　人口密度の分布傾向と閾値

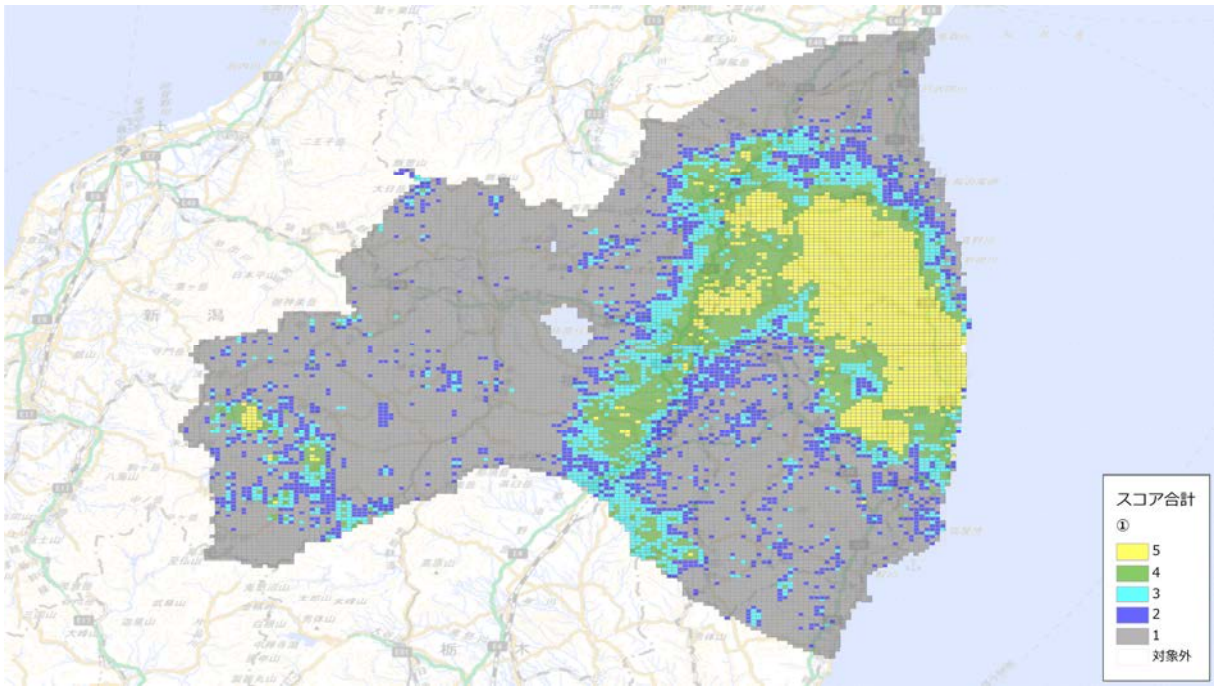


図 6-5　平成 29 年度に測定された空間線量率のスコアマップ例
（背景地図：国土地理院発行 2.5 万分 1 地形図）

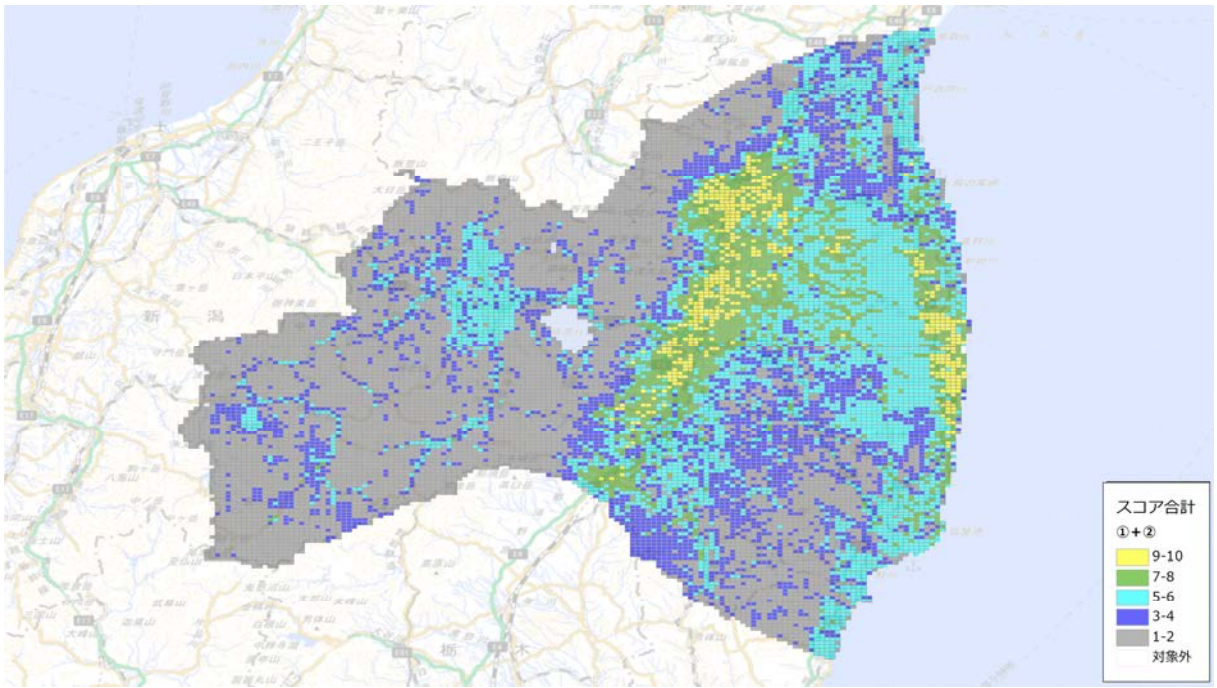


図 6-6　平成 29 年時点における空間線量率及び事故前の人口密度を合計したスコアマップ例
（背景地図：国土地理院発行 2.5 万分 1 地形図）

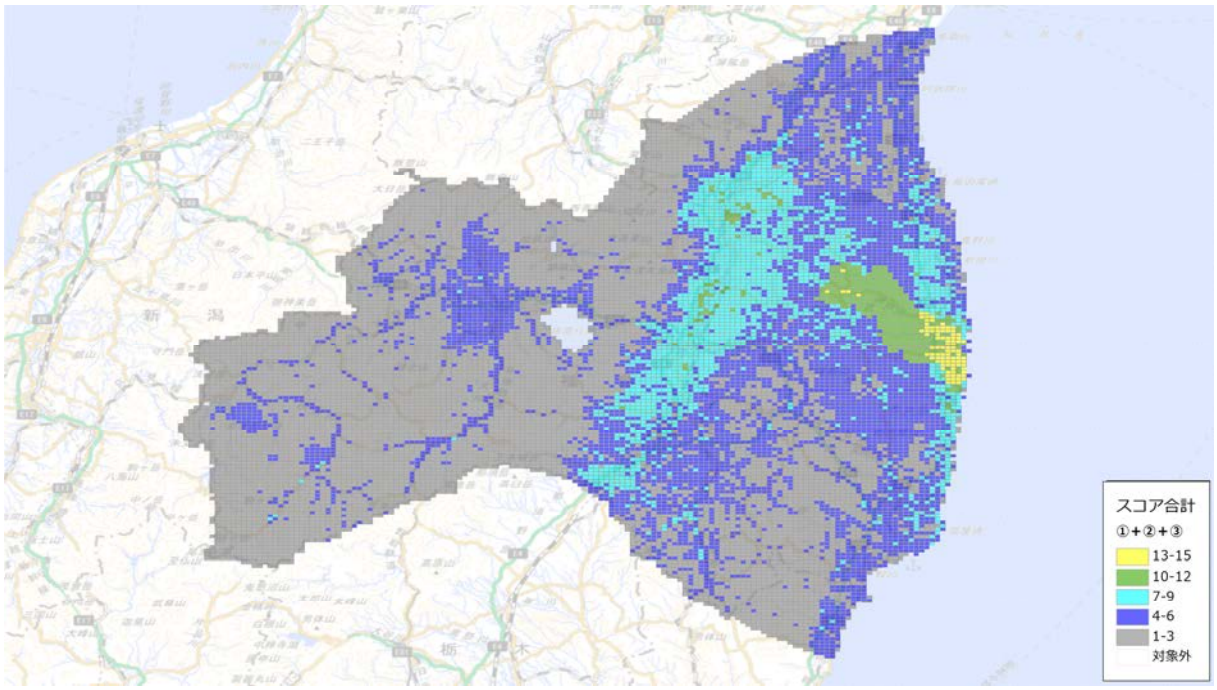


図 6-7　平成 29 年時点における空間線量率、事故前の人口密度及び避難指示区域を合計したスコアマップ例

（背景地図：国土地理院発行 2.5 万分 1 地形図）

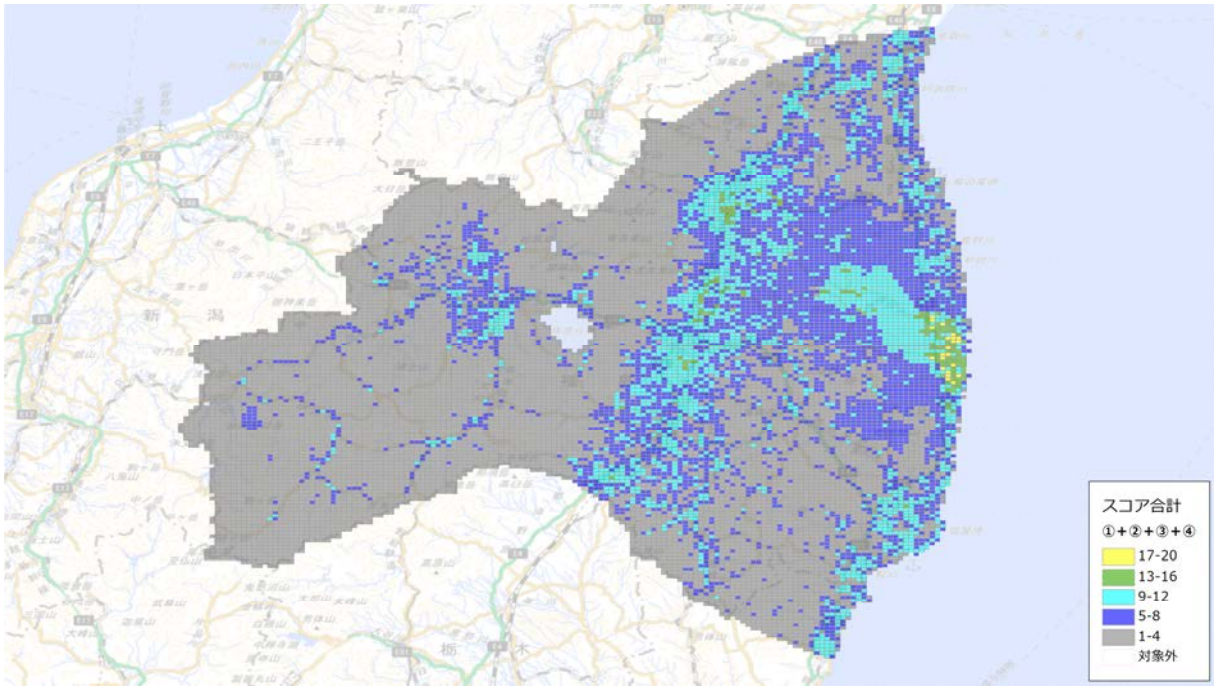


図 6-8　平成 29 年時点における空間線量率、事故前の人口密度、避難指示区域及びランドマークを合計したスコアマップ例

（背景地図：国土地理院発行 2.5 万分 1 地形図）

6.4.3 年度別の評価例

スコアの普遍性について評価するため、平成 30 年度から令和 2 年度の 3 年間における放射線モニタリングデータを用いてスコア評価と平成 29 年度に実施したスコア評価の結果の比較を行った。前述の通り、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。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本項では考察する。

平成 30 年度から令和 2 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 6-9～図 6-11 に示す。このように、平成 29 年度のスコアマップと全体的な傾向については一致している。スコアの差をそれぞれヒストグラムとして図 6-12 に示す。また、変動したメッシュ数について、表 6-5～表 6-7 に示す。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、山間部や海岸線沿いのデータの位置情報の若干の違いにより、メッシュ内に測定箇所が年度により測定結果がある場合とない場合があるような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、一定の「普遍性」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 30 年度/平成 29 年度のスコア差

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　令和元年度/平成 29 年度のスコア差

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　令和 2 年度/平成 29 年度のスコア差

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

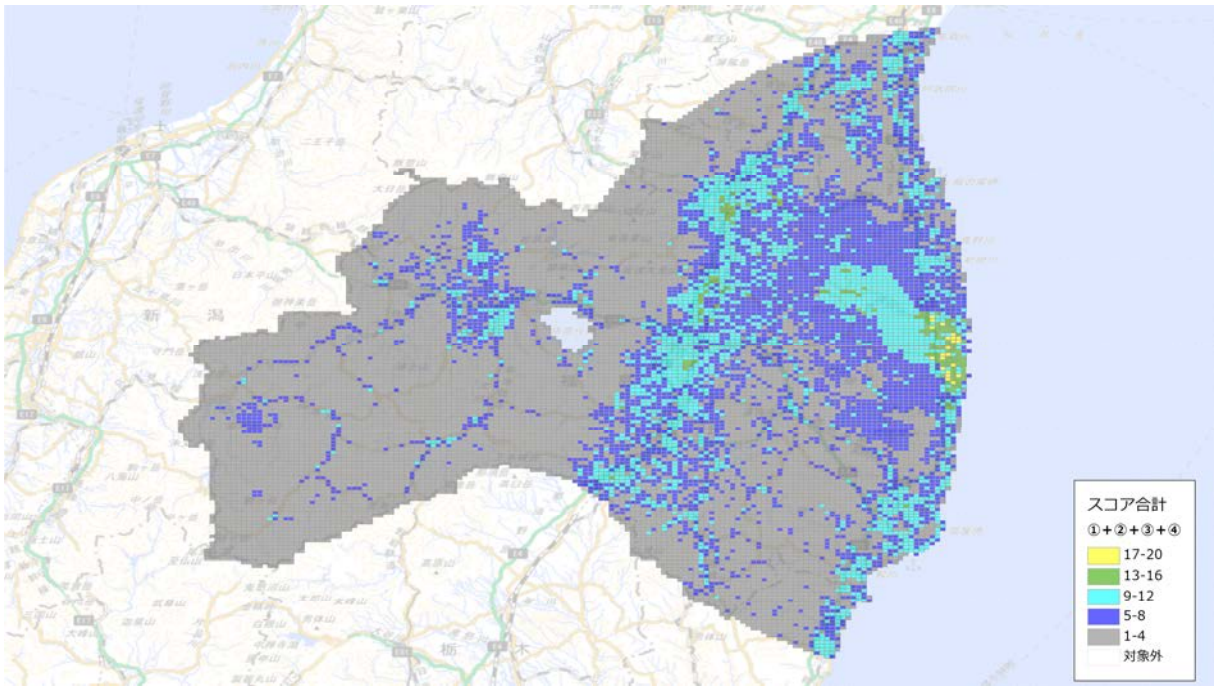


図 6-9　平成 30 年時点における空間線量率、事故前の人口密度、避難指示区域及びランドマークを合計したスコアマップ

（背景地図：国土地理院発行 2.5 万分 1 地形図）

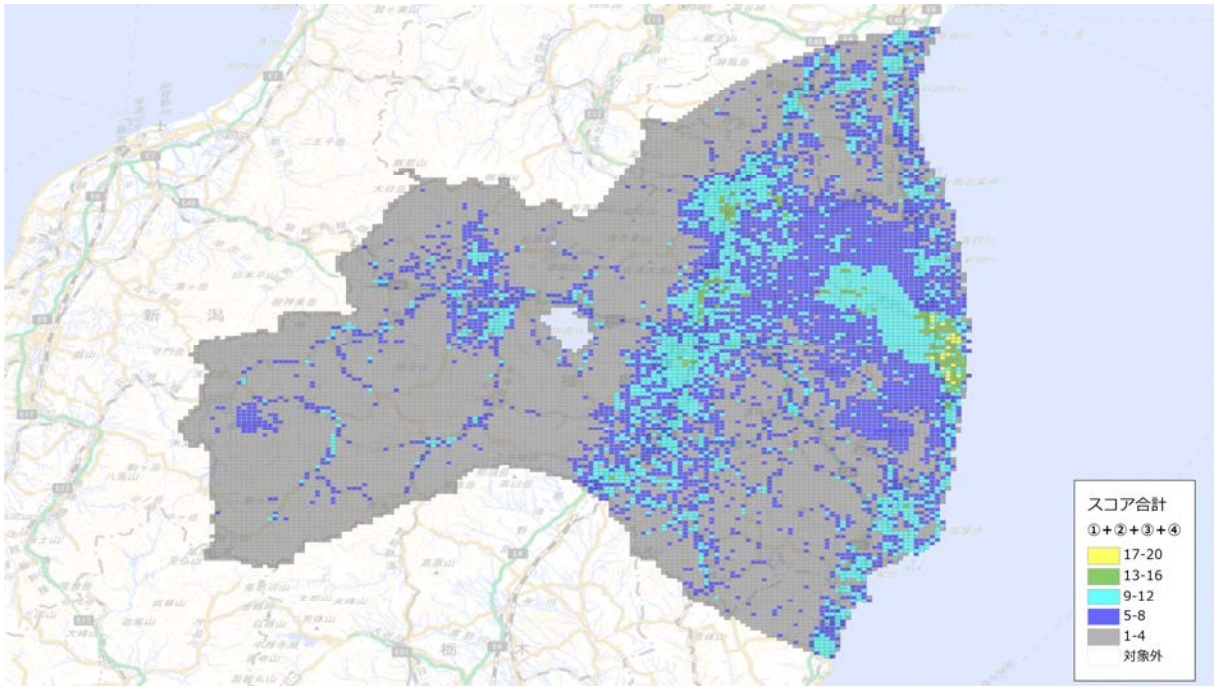


図 6-10　令和元年時点における空間線量率、事故前の人口密度、避難指示区域及びランドマークを合計したスコアマップ

（背景地図：国土地理院発行 2.5 万分 1 地形図）

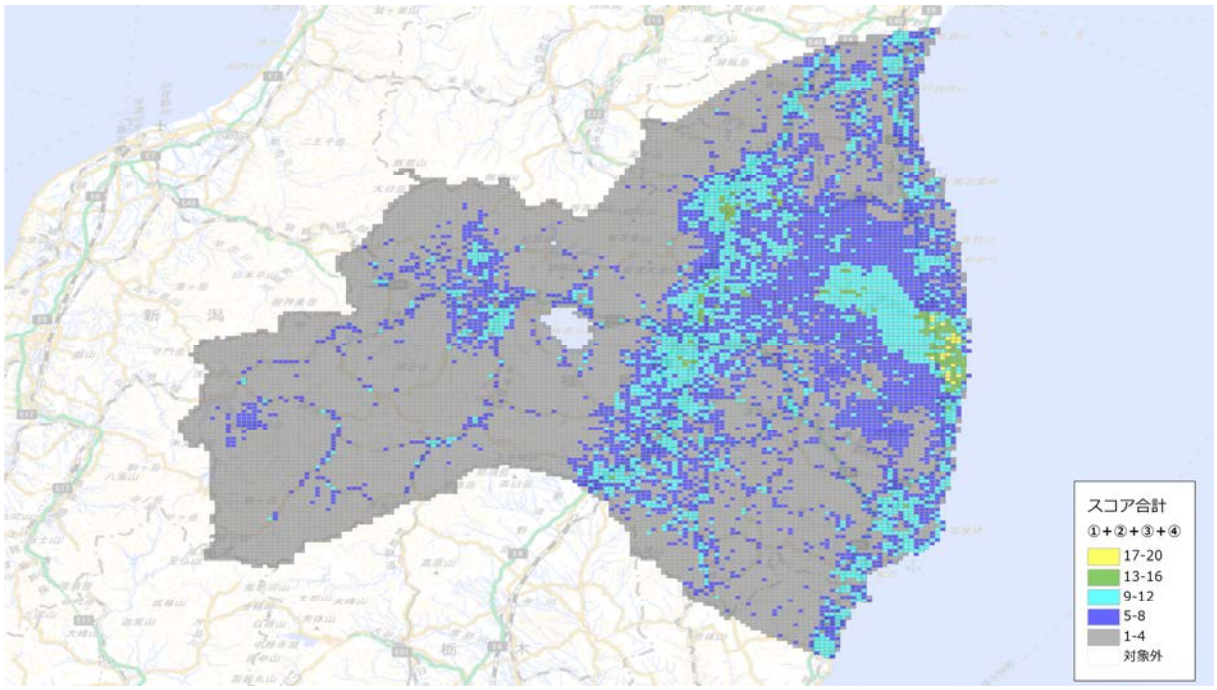
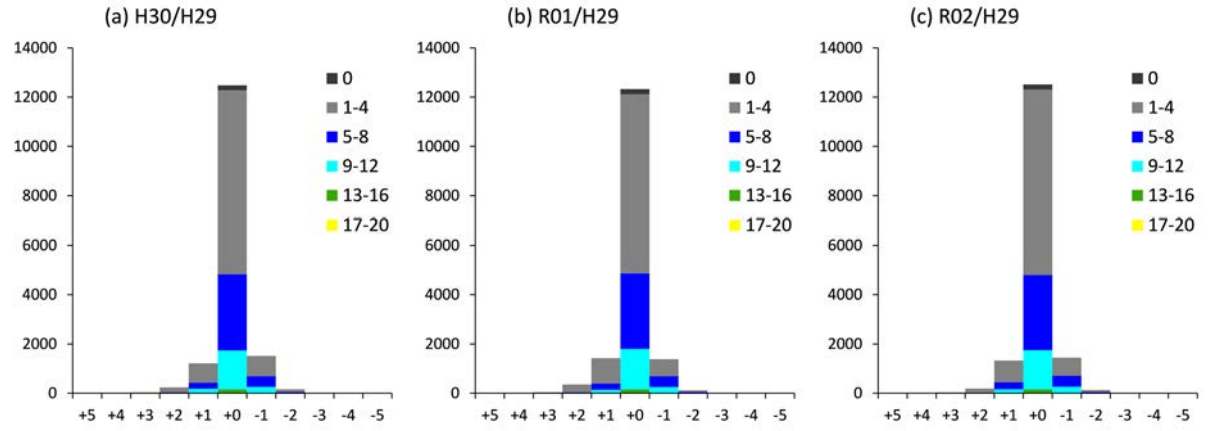


図 6-11　令和 2 年時点における空間線量率、事故前の人口密度、避難指示区域及びランドマークを合計したスコアマップ

（背景地図：国土地理院発行 2.5 万分 1 地形図）



(a) 平成 30 年度/平成 29 年度　(b) 令和元年度/平成 29 年度　(c) 令和 2 年度/平成 29 年度

図 6-12　各年度のスコアの差異

6.5 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 年が経過し、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。

測定ポイントを選定する際に基礎となるデータは、空間線量率だけでなく土壌中の放射性物質濃度などの測定対象ごとに継続的に検討すべきであると考える。令和 3 年度はそのような観点から過去 4 年度分のデータでスコア評価を実施し、その影響について調査した。また、各測定ポイントの分布状況について整理・評価した際、近傍に同スコアに分類されるポイントが存在する測定ポイントが複数確認された。これらの測定ポイントについては、相互の過去のデータを比較し線量の水準が同一レベルであれば、実施機関の間で十分な調整を行った上で、測定ポイントの集約による効率化を検討することが考えられる。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 調査目的

総合モニタリング計画は、平成 23 年 8 月 2 日に政府が原子力災害対策本部の下にモニタリング調整会議を設置し策定したもので、この計画に基づき、関係府省、地方公共団体、原子力事業者等が連携してモニタリングを実施することとなっている。海域に関するモニタリングの実施項目については、別紙「海域モニタリングの進め方」にまとめられている。本計画はおよそ 1 年毎に見直されており、最新は令和 3 年 4 月 1 日に改定されている。事故から 11 年を経過した現在、海域環境中での放射性物質の分布状況は概ね明らかとなりつつあり、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改めて検討する時期に差し掛かっている。

令和 3 年度調査では、令和 2 年度までに総合モニタリング計画で実施された海域モニタリングの測定結果を集約するとともに、過去からの変動や濃度などの測定結果の評価を行なった。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。）の報告書 [42,43]で用いた方法を適用した。本報告書では、海洋のモニタリング（海水・海底土）について、事故による影響が大きかったセシウム 137 に関する詳細な解析結果を示す。

7.2 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 3 年 3 月期までの測定結果を、令和 2 年 3 月期までのデータを解析した令和 2 年度海域事業に倣い、以下の 3 項目について解析を実施した。

① 事故から 6 年後以降（平成 29 年 4 月から令和 3 年 3 月まで）の平均放射性物質濃度（以下、現状の濃度）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）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）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 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 7-1 に示す。

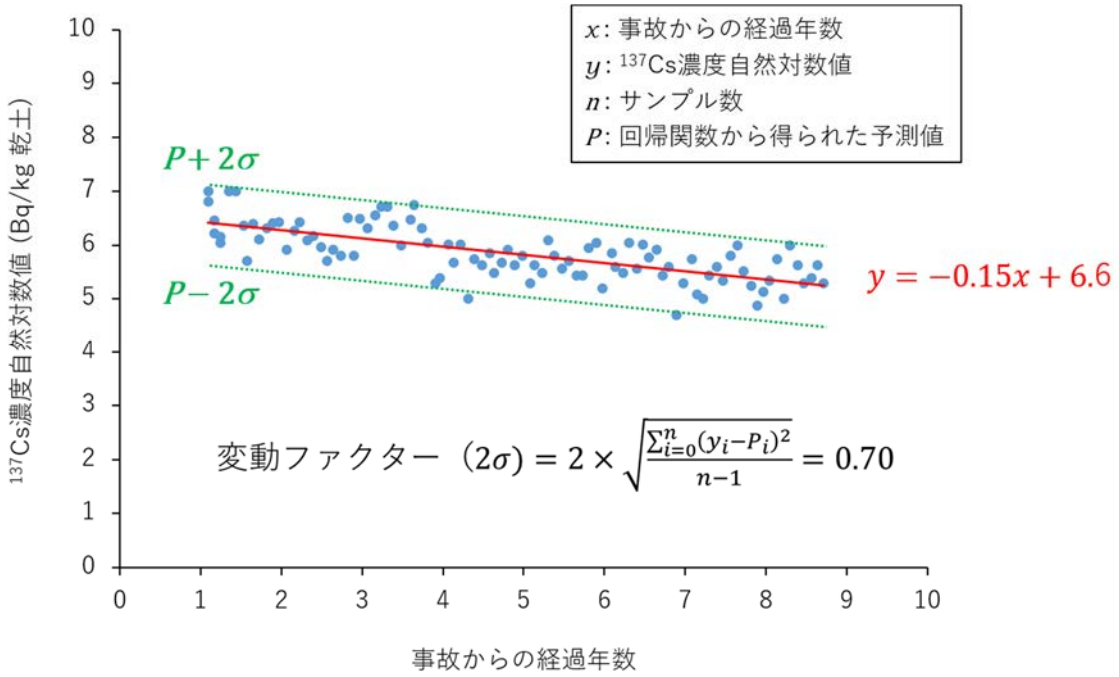


図 7-1　海底土のセシウム 137 濃度の測定結果例
（実線は近似曲線、点線は標本標準偏差（標準誤差）の 2 倍を意味する。）

7.3 調査結果

7.3.1 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 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）」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が、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 超過の可能性がある

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 100 [44] 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 [45] 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 7-1 に各海域のランク分け結果について示す。

表 7-1　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

7.3.2 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 節に示した 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、以下、95 パーセンタイル値）」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、または 95 パーセンタイル値が 10 Bq/kg 乾土超過の可能性がある
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[45]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 7-2 に各海域のランク分け結果について示す。

表 7-2　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	0	4	0	5	2	20
福島県	47	3	34	0	18	9	111
茨城県	0	0	2	0	2	1	5
沖合	4	0	1	0	18	9	32
東京湾	4	3	1	1	12	5	26
計	64	7	42	1	55	31	200

7.3.3 過年度評価結果との比較

7.3.1 項及び 7.3.2 項で評価したランク分け結果について、令和 2 年度海域事業の結果から変化した地点を表 7-3 及び表 7-4 に整理した。令和 2 年度評価結果からランクが上昇した採取ポイントは、海水で 2 地点（全採取ポイントの 0.6%）、海底土で 15 地点（7.5%）であった。また、令和 2 年度評価結果からランクが下降した採取ポイントは、海水で 2 地点（0.6%）、海底土で 14 地点（7.0%）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 86%で、1 年分（令和 2 年 4 月期～令和 3 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。

本年度にランクが上昇した採取ポイント（表 7-3 及び表 7-4、図 7-2 及び図 7-3）のうち、海水の M-20 地点、海底土の M-J1 地点及び M-MI4 地点を除く 14 地点は河口から 5 km 以内の沿岸域に位置している。これらの地点は、令和 2 年度海域事業報告書で言及（「河口近傍 5 km 以内の地点においては、台風のような出水等の事象により海底土の放射性セシウム濃度が上昇する事象が明らかになっており、当面は季節的な変動を評価しうる頻度でのモニタリングを継続することが望ましい。」）されているように、陸域から輸送される放射性セシウムの影響を強く受けていると考えられる。河口から 10 km 程度離れた M-J1 地点及び M-MI4 地点においても、記録的な大出水であった令和元年東日本台風後に、上記地点と同様な海底土中のセシウム 137 濃度の上昇が観察された（図 7-3）。これらの結果を考慮すると、河口周辺における出水期及び出水後の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、M-20 地点については、1 度だけの高い海水中セシウム 137 濃度の観測によってランクが上昇したものであった（図 7-2）。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 年度海域事業の評価結果から、令和 2 年度海域事業の結果でランクが変化したにもかかわらず、令和 3 年度に再び平成 31 年度のランクに戻っている地点が複数存在した（表 7-5）。また、令和 2 年度海域事業からランクが上昇した地点においても、その濃度変動が令和 2 年度海域事業で評価した変動幅の範囲内である地点も複数存在した。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 7-3　令和 2 年度海域事業評価結果からランクが変化した地点（海水）

本年度のランク（令和3年3月までのデータを使用） ＼ 令和２年度海域事業の評価ランク（令和２年３月までのデータを使用）	A	B*	B	C*	C	D
A	■					
B*		■				
B			■		（福島県） T-2	
C*				■		（外洋） M-20
C					■	
D					（宮城県） T-MG4 （福島県） T-22	■

表 7-4　令和 2 年度海域事業評価結果からランクが変化した地点（海底土）

本年度のランク（令和3年3月までのデータを使用） ＼ 令和２年度海域事業の評価ランク（令和２年３月までのデータを使用）	A	B*	B	C*	C	D
A	■	（福島県） T-S8, T-13-1	（福島県） T-11, T-18, 沿岸13, 沿岸14			
B*		■	（岩手県） E-31 （東京湾） E-T6		（福島県） E-7C	
B	（宮城県） E-4G, E-44 （福島県） T-4, T-⑧, T-7, E-79	（茨城県） E-81	■		（岩手県） E-4F （福島県） T-S1, 沿岸12, 沿岸19 （沖合） M-J1	
C*				■		
C		（東京湾） E-T4	（宮城県） E-45 （福島県） 沿岸35 （沖合） M-C3, M-E1 （東京湾） M-C8	（茨城県） E-84	■	（沖合） M-MI4
D						■

表 7-5　平成 31 年度海域事業から令和 3 年度調査にかけてのランク変化状況

H31年度からR3年度までランクが変化しなかった地点	153地点		
R2年度にランクが変化したが、R3年度はH31年度ランクに戻った地点	10地点	R2年度に上昇した地点	4地点
		R2年度に下降した地点	6地点
ランクが1回変化した地点	34地点	R3年度に上昇した地点	7地点
		R3年度に下降した地点	8地点
		R2年度に上昇した地点	10地点
		R2年度に下降した地点	9地点
ランクが2回変化した地点	3地点	2回上昇した地点	2地点
		2回下降した地点	1地点

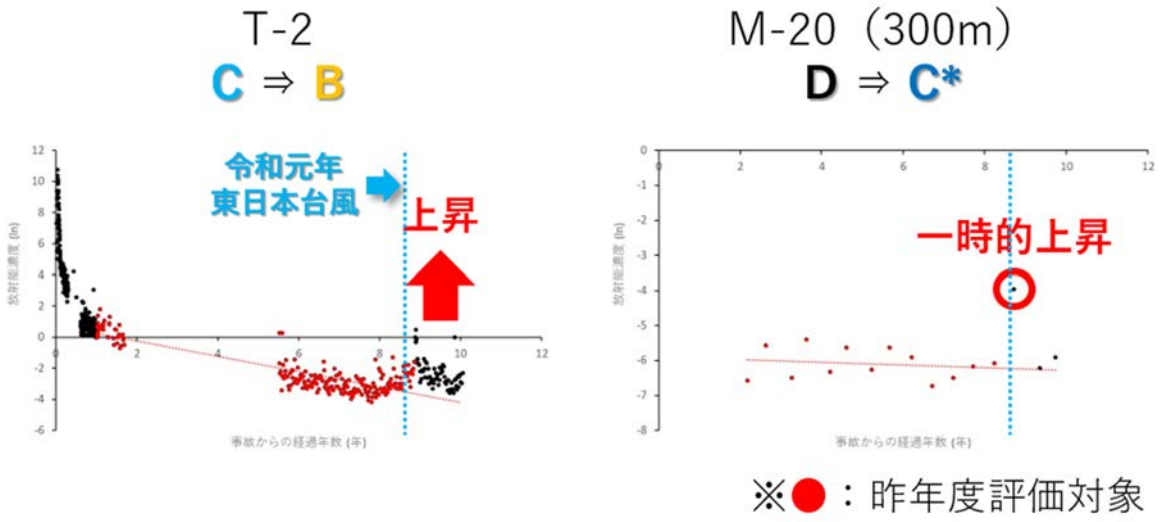


図 7-2　令和 2 年度海域事業評価結果からランクが上昇した地点（海水）

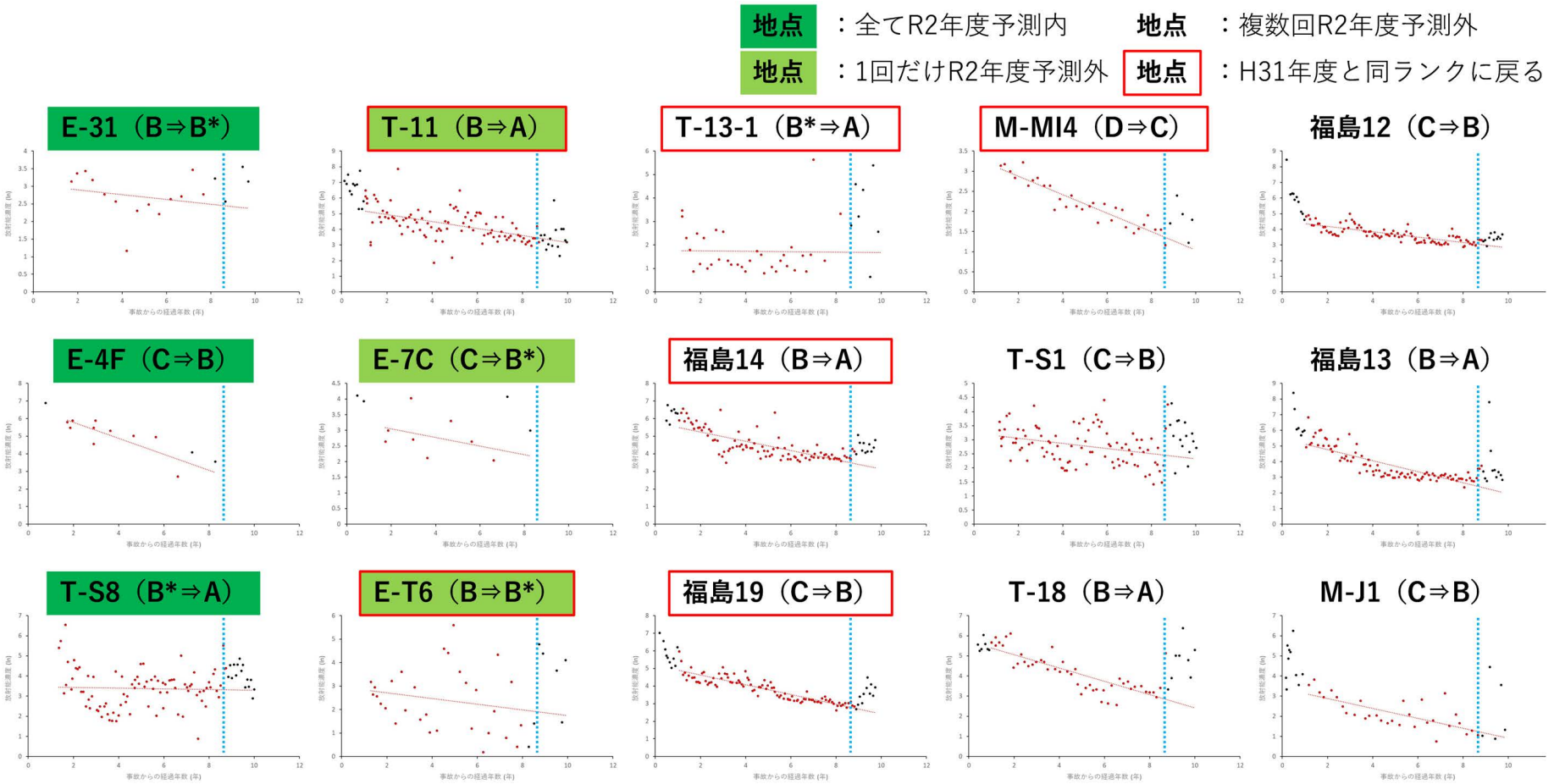


図 7-3　令和 2 年度海域事業評価結果からランクが上昇した地点（海底土）
（各図とも、横軸は事故からの経過年数、縦軸は放射能濃度（Bq/kg）の自然対数値）

8. 実測データの統合的解析

8.1 調査目的

分布状況調査においては、平成 23 年度より、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、分布状況調査と並行して、人が立ち入れない場所を含むより広域を対象とした航空機サーベイが継続的に行われ[23]、広域の空間線量率分布マップが作成されている。しかし、空間線量率の各測定方法にはそれぞれ固有の特性があることから、測定データは個別に評価・考察がされている。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、統一的なわかりやすい情報の提供を可能とし、政策上や被ばく評価上有益であると考えられる。ここでは、精度と空間分解能の異なる多様な空間線量率情報を地図上で統合表示する手法を適用した。

分布状況調査ではこれまで、平成 28 年度に、異なる方法で測定された空間線量率の分布マップを階層ベイズ統計により統合する手法[46]を適用し、平成 27 年度に測定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統合して、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た統合空間線量率マップ（以下「統合マップ」という。）を作成した[47]。また、平成 29 年度は 80 km 圏内全域に解析対象を広げ、平成 28 年度に測定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統合した統合マップを作成した[48]。平成 30 年度は、平成 29 年度に測定された各種測定データを統合して 80 km 圏内の統合マップを作成するとともに、平成 25 年度、平成 26 年度及び平成 27 年度に実施された測定データを対象に、統合のための基本的な情報である各測定データ間の相関関係を解析し、統合マップを作成した[49]。令和元年度は、平成 30 年度及び令和元年度について、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 80 km 圏内の統合マップを作成するとともに、解析対象を福島県全域に広げ、平成 29 年度、平成 30 年度及び令和元年度について統合マップを作成した[50]。福島県全域の解析においては、80 km 圏外の歩行サーベイの不足を補うために、福島県が実施した「モニタリングメッシュ調査」[b]の結果を歩行サーベイ相当データとして利用した。令和 2 年度は、令和 2 年度に測定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統合して 80 km 圏内の統合マップを作成するとともに、モニタリングメッシュ調査の結果を加えて福島県全域の統合マップを作成した[51]。また、令和元年度の福島県全域の統合マップに対して、定点サーベイ及び林野庁による「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」[52]及び「旧避難指示区域等国有林内における

---

[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[33]。測定地点は約 2,900 点である。福島県内全域を測定した代表的な測定結果であり、他の測定結果と比較して 80 km 圏外のデータが多いことから、歩行サーベイデータを補足するデータとして有用であると考えられる。

モニタリング調査事業」[53]（以下「林野庁調査」という。[c]）の測定データとの比較による精度検証を行うとともに、林野庁調査データを歩行サーベイ相当データとして加えた統合マップを作成し、統合マップに与える影響について検討した。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ため、令和 3 年度は、令和 3 年度に測定された歩行サーベイ、定点サーベイ、モニタリングメッシュ調査、走行サーベイ及び航空機サーベイに加え、令和 2 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統合マップを作成した。

8.2 調査内容

8.2.1 異なる測定方法による空間線量率の特徴

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対象とするが、これらはそれぞれ異なる特徴を有する。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る及び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等の特徴を持つが、人間の歩行によるため 80 km 圏内あるいは福島県の全てをカバーした測定は不可能である。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り、得られた大量データは統計解析による空間線量率分布の特徴解明に用いることができるが、調査領域が車道上に限定される。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、測定を行いたい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。

統合マップの作成思想は、これら異なる測定手法により得られたデータの特徴を活かしつつ、各々のデータを統合することで、精度と空間分解能が高い空間線量率マップを作成することである。具体的には、高い空間分解能と精度を持つがカバーできる範囲が限られる歩行サーベイ、空間分解能と精度は劣るが対象領域全域をカバーできる航空機サーベイ、その中間的な性質を持つ走行サーベイの各データを、上述の作成思想に基づいて統合した。なお、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の結果の統合においては、これらが 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（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 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[46]。

---

[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」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」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。

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 z_w、走行サーベイの測定データセット z_c、航空機サーベイの測定データセット z_A が得られた時に、最も信頼のおける空間線量率分布 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 $p(y|z_w,z_c,z_A)$が最大になるような y 及びその分散を求める。$p(y|z_w,z_c,z_A)$ は、z_w,z_c,z_A が観測されたという条件で空間線量率分布が y である確率を意味する。$p(y|z_w,z_c,z_A)$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。

$$p(y|z_w,z_c,z_A) \propto p(z_A|y)\, p(z_c|y)\, p(y|z_w) \quad (14)$$

ここで、

$p(z_A|y)$: 空間線量率分布が y の時に z_A が観測される確率

$p(z_c|y)$: 空間線量率分布が y の時に z_c が観測される確率

$p(y|z_w)$: z_w が観測された時に空間線量率分布が y である確率

とする。

$p(y|z_w)$を事前確率と呼び、観測値 z_w に基づき得られた空間線量率分布 y を事前分布と呼ぶ。また、$p(y|z_w,z_c,z_A)$を事後確率と呼び、得られた空間線量率分布 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 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。$p(z_A|y)$ 及び $p(z_c|y)$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。

$p(y|z_w)$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 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 圏内を対象とした令和 2 年度統合マップの作成

8.3.1 対象とした測定データ

まず、80 km 圏内を対象として、令和 3 年度に測定された各種データを統合した統合マップの作成を行った。

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 2 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のみを考慮して令和 3 年 10 月 25 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うち歩行サーベイの測定点に近すぎるもの、およ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。また、航空機サーベイについては過年度と同様に補正後に 0.1 μSv/h 未満のデータを削除した（以下、同様）。統合化を行った令和 3 年度の歩行サーベイ、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旧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 [54]（ver.21.03）に基づき測定データを分類して解析を実施した。解析に使用した土地利用状況を図 8-2 に示す。

表 8-1　使用データ一覧

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 3	
走行サーベイ	原子力規制庁	令和 3	2 回目（通算第 23 回）
歩行サーベイ	原子力規制庁	令和 3	
歩行サーベイ相当データ	原子力規制庁	令和 3	定点サーベイ
	福島県	令和 3	モニタリングメッシュ調査
	林野庁	令和 2	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
	林野庁	令和 2	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

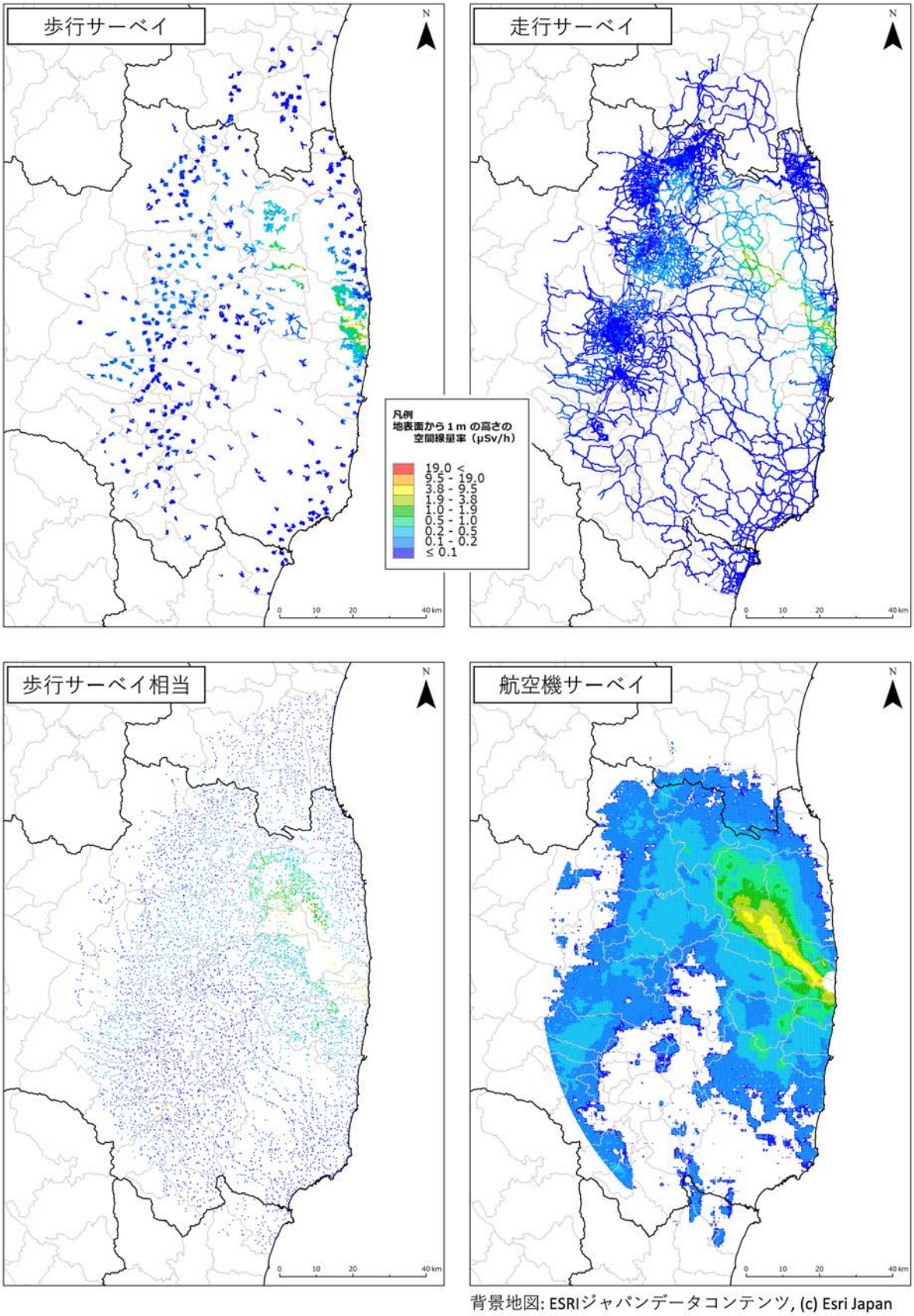


図 8-1　空間線量率の統合に用いた令和 3 年度の歩行、走行及び航空機サーベイ結果
（80 km 圏内。天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。）

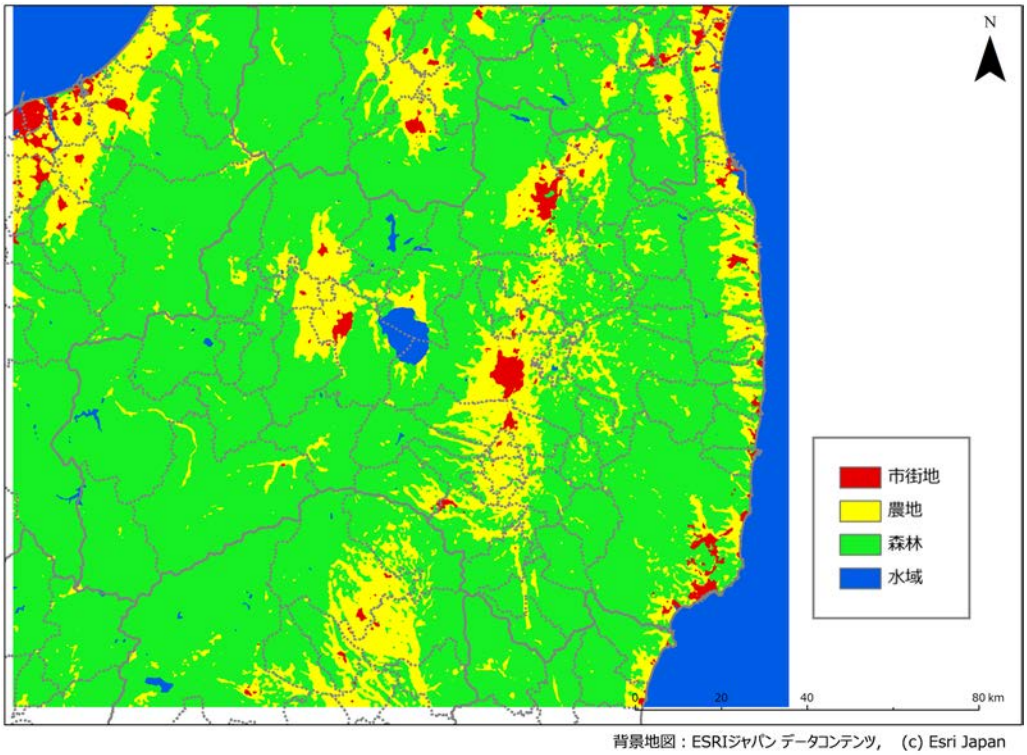


図 8-2　JAXA の高解像度土地利用土地被覆図に基づく土地利用状況

8.3.2　歩行サーベイ結果の空間分布パターンの解析

$p(y|z_w)$ のプロセスモデルを決めるために、旧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。旧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 8-3 に示す。縦軸の値はセミバリア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。セミバリアンスの定義を式（15）に示す。

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

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、一定の距離を越えるとセミバリア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。

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

距離とセミバリアンスの相関が無くなる時点での距離の値をレンジ r、セミバリアンスの値をシル 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、旧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 z_w として用い、本分析において旧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 y を作成した。

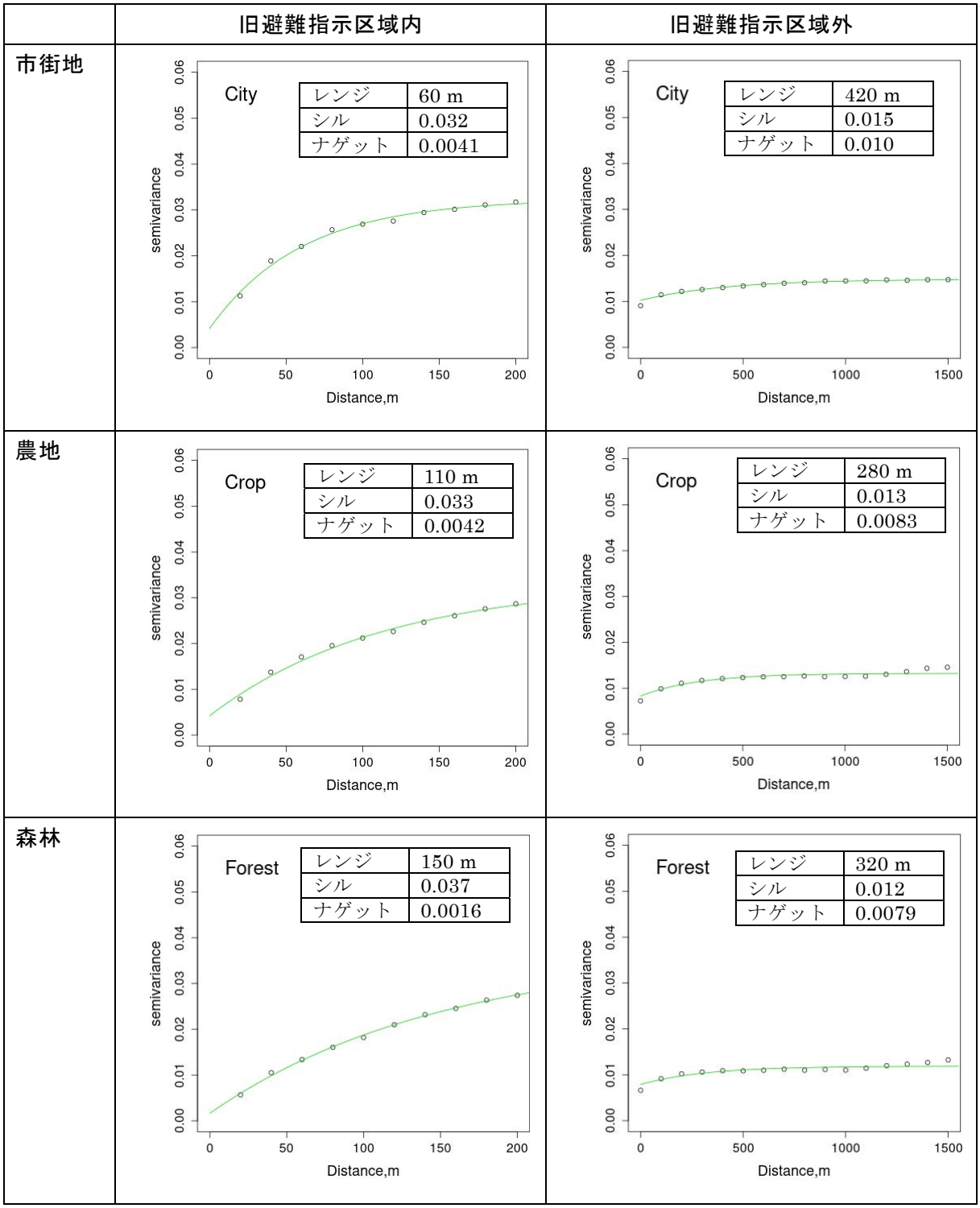


図 8-3　令和 3 年度に実施された旧避難指示区域内外における歩行サーベイによる空間線量率のバリオグラム解析結果

8.3.3　走行サーベイと歩行サーベイの比較

$p(z_c \mid y)$ 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旧避難指示区域内及び同区域外での空間線量率を土地利用別に比較した。比較結果を図 8-4 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 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 0.6 を超える相関係数が得られている。市街地については、0.5 程度と相関は低いものとなっている。なお、旧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。

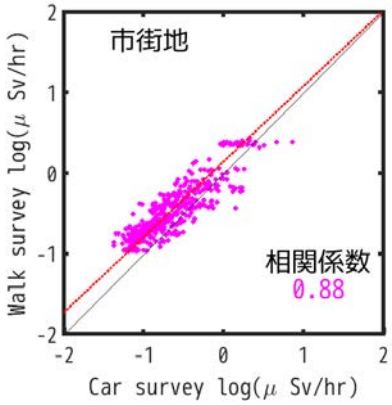
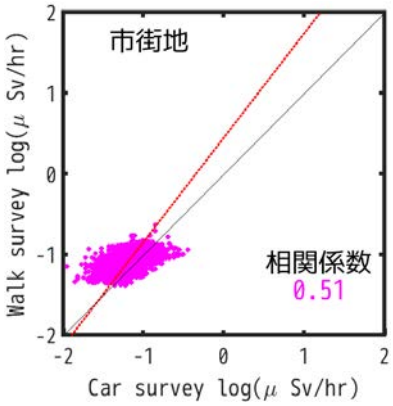
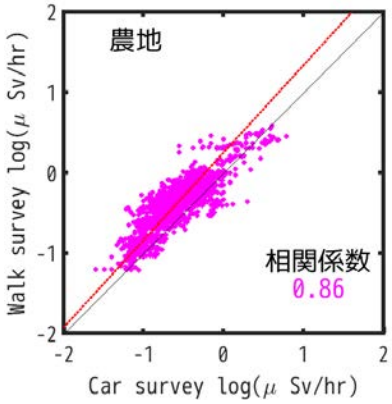
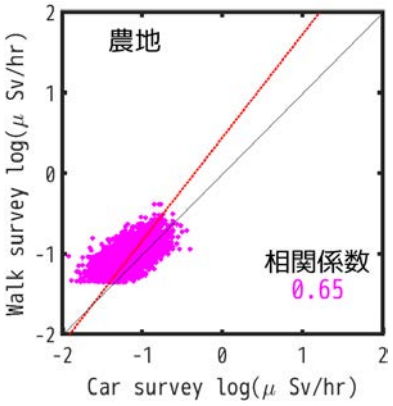
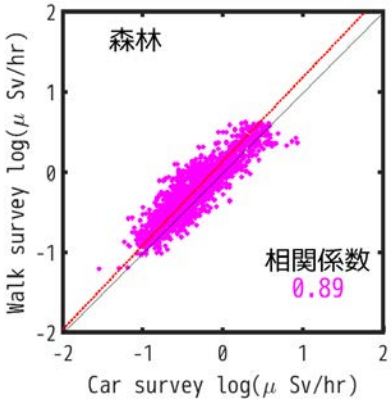
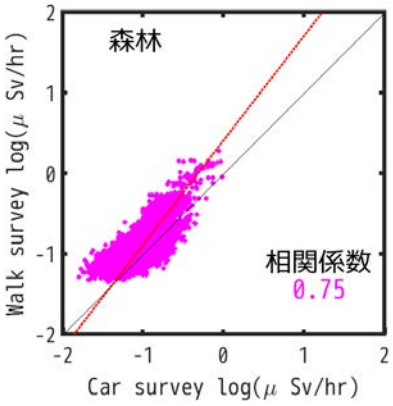
	旧避難指示区域内	旧避難指示区域外
市街地		
農地		
森林		

図 8-4　令和 3 年度に実施された旧避難指示区域内外における走行サーベイ（Car survey）と歩行サーベイ（Walk survey）による空間線量率の相関分析結果
（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

$p(z_A|y)$ のデータモデルを決めるために、旧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 8-5 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航空機サーベイの距離に応じて加重平均化したもの（inverse-distance weighted (IDW) averaging [46]）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。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 に前項および本項における相関パラメータ一覧を示す。

表 8-2　相関のパラメータ

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

		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	避難指示区域内	避難指示区域外
市街地	傾き a	1.07	0.77	0.92	0.42
	切片 b	−0.16	−0.35	0.25	−0.44
	分散	0.039	0.017	0.010	0.007
農地	傾き a	0.92	0.78	0.92	0.82
	切片 b	−0.23	−0.35	0.22	0.00
	分散	0.030	0.017	0.014	0.011
森林	傾き a	0.95	0.77	0.81	0.82
	切片 b	−0.14	−0.32	0.16	0.00
	分散	0.028	0.018	0.027	0.014

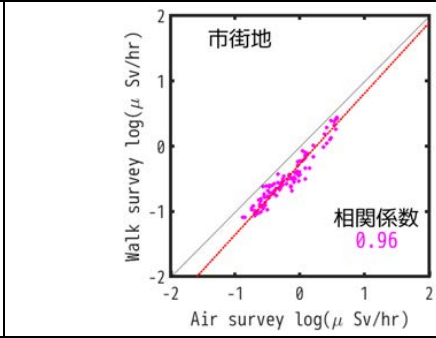
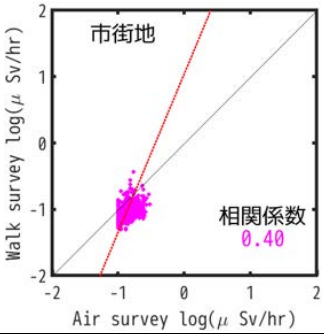
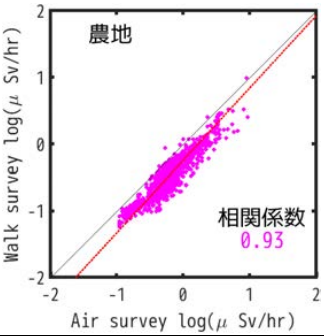
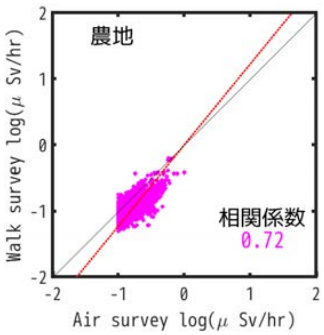
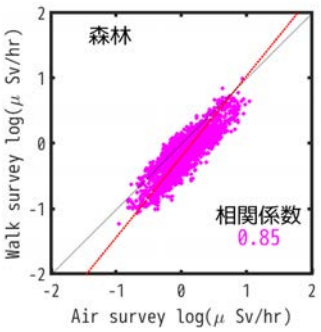
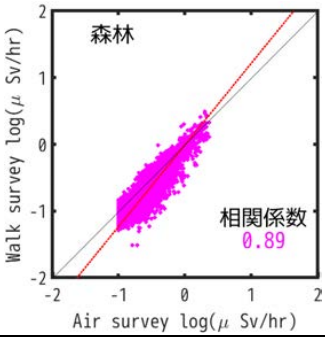
	旧避難指示区域内	旧避難指示区域外
市街地		
農地		
森林		

図 8-5　令和 3 年度に実施された旧避難指示区域内外における航空機サーベイ（Air survey）と歩行サーベイ（Walk survey）による空間線量率の相関分析結果
（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 3 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 8-6 に示す。旧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。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。旧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旧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、旧避難指示区域内ではシルが大きい値となり（図 8-3）、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。

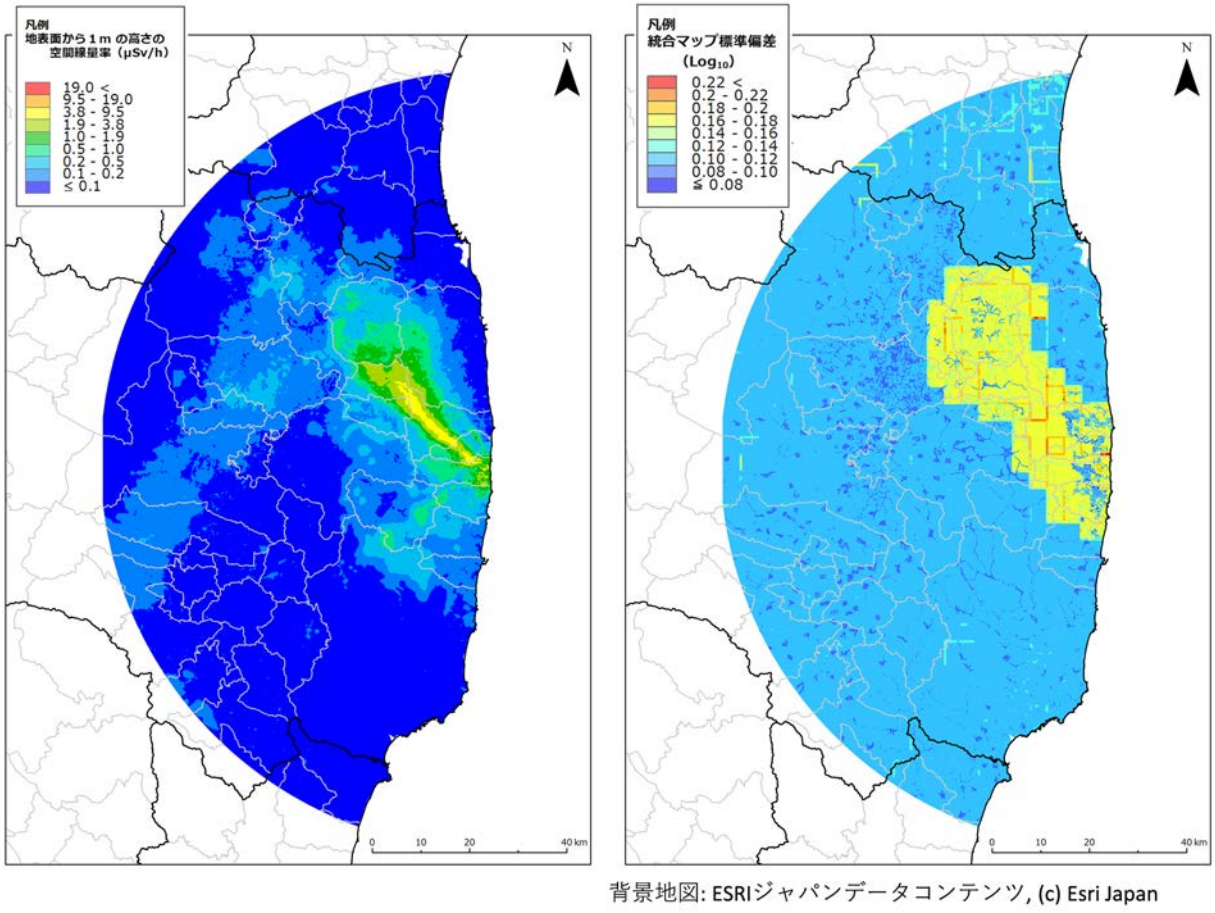


図 8-6　各種測定結果を統合した統合マップ（80 km 圏内）
（左：確率が最大となる空間線量率分布、右：標準偏差分布）
（天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。）

8.4 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 3 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。使用したデータは表 8-1 に示した 80km 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 8-7 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、旧避難指示区域内外を分割して解析を実施した。

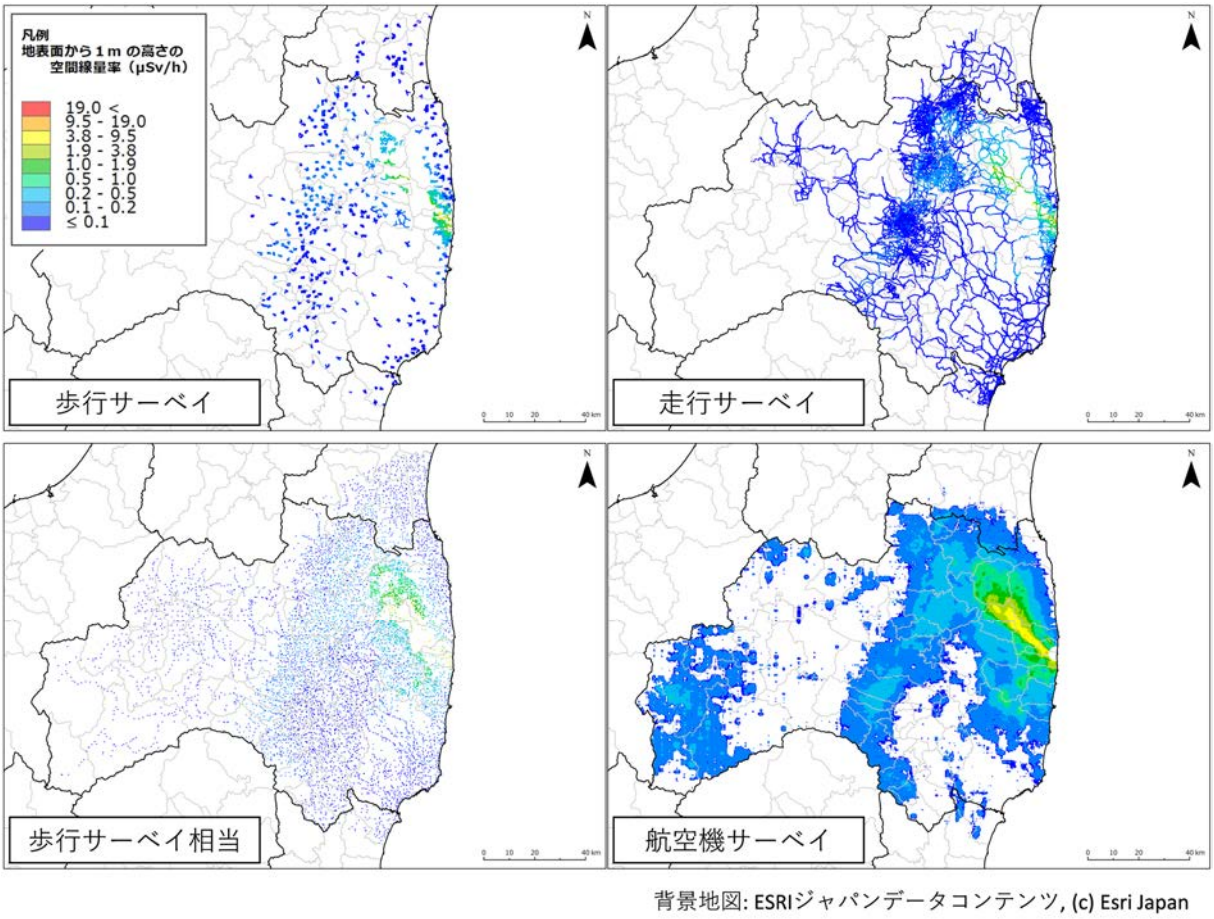


図 8-7　空間線量率の統合に用いた令和 3 年度の歩行、走行及び航空機サーベイ結果（福島県全域）
（天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。）

8.4.2 歩行サーベイを対象とした空間パターンの解析

歩行サーベイを対象にバリオグラム解析を行った結果を図 8-8 に示す。これらの結果は、図 8-3 で示した 80 km 圏内の旧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。

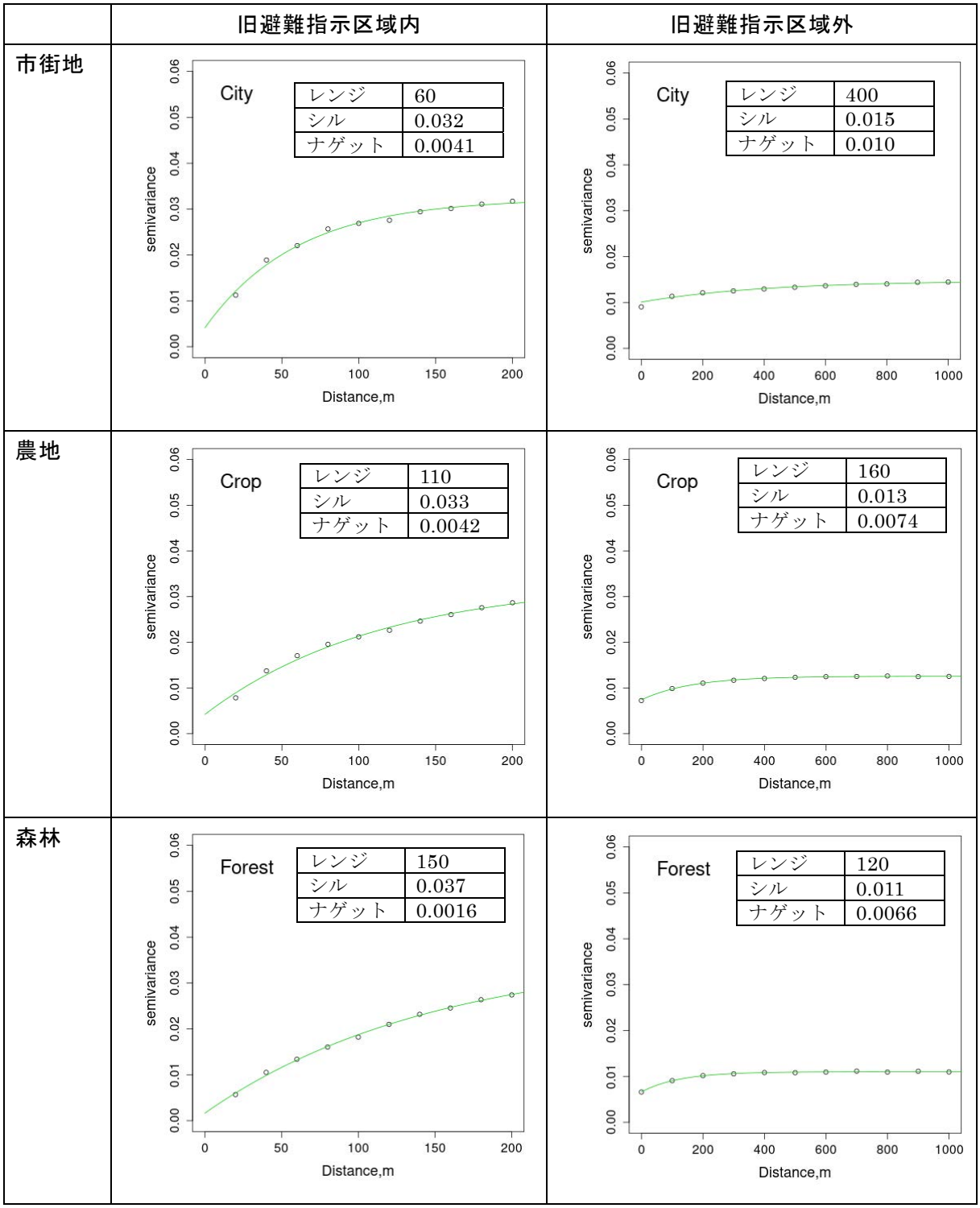


図 8-8　令和 3 年度に実施された福島県全域における歩行サーベイによる空間線量率のバリオグラム解析結果

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

歩行サーベイと走行サーベイ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 8-9 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 zc として用いた。

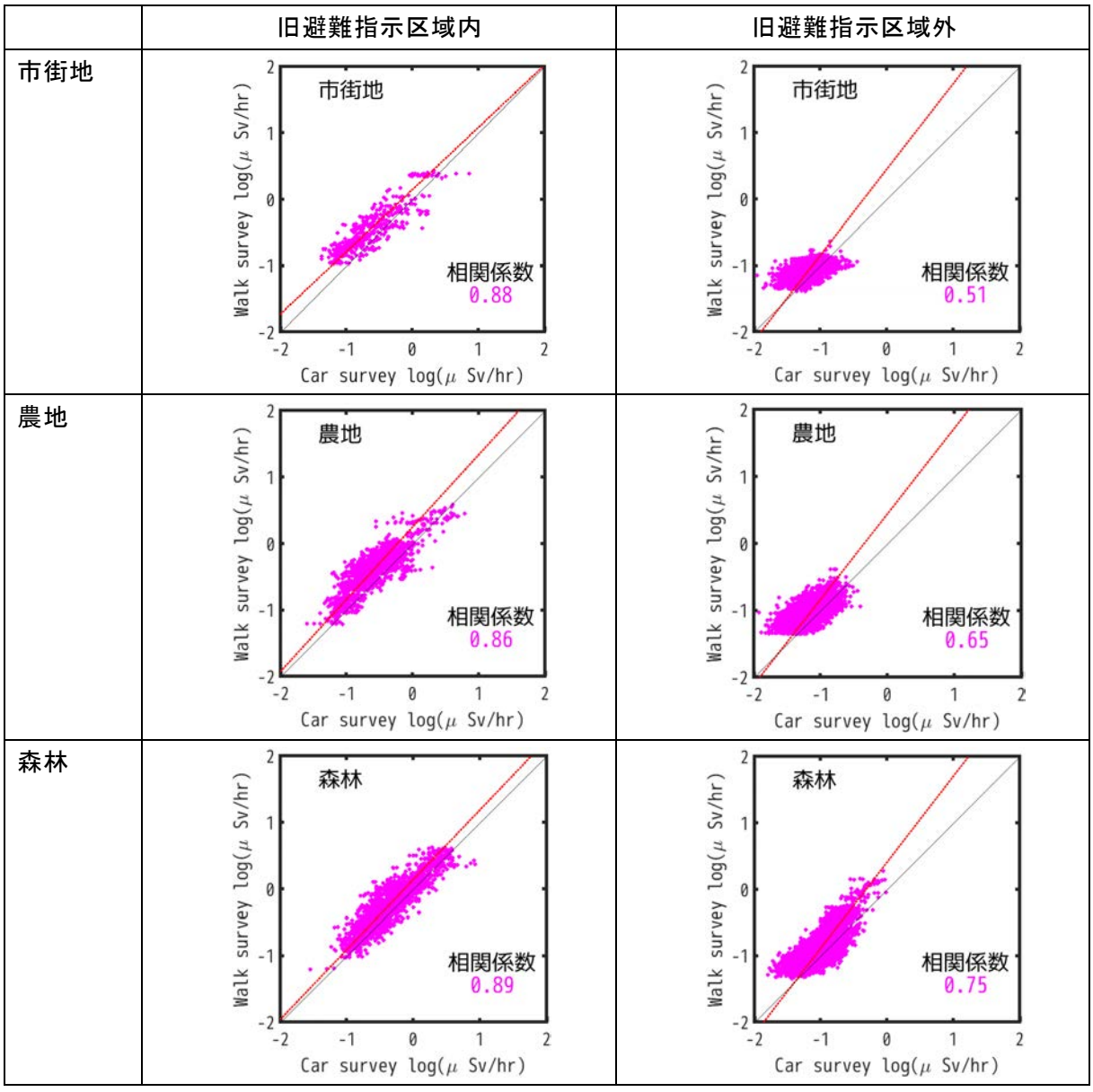


図 8-9 令和 3 年度に実施された走行サーベイデータ（Car survey）と歩行サーベイ（Walk survey）との相関分析結果（福島県全域）

（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 8-10 に示す。これらの結果は、やはり図 8-5 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。

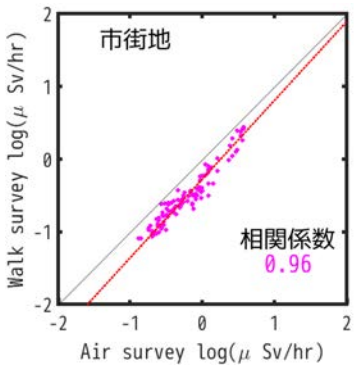
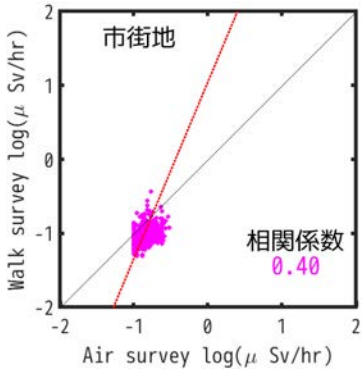
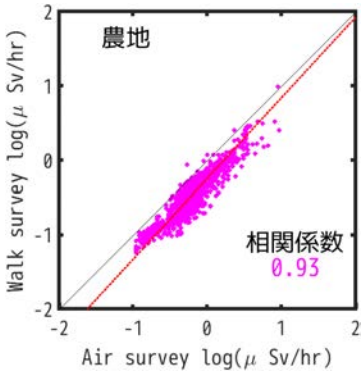
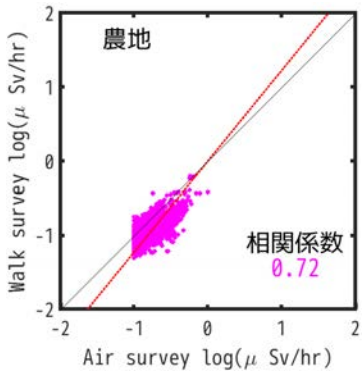
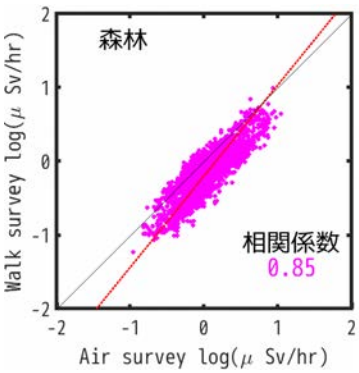
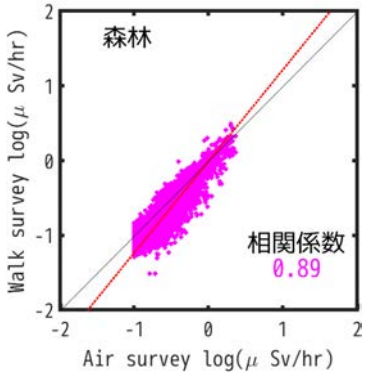
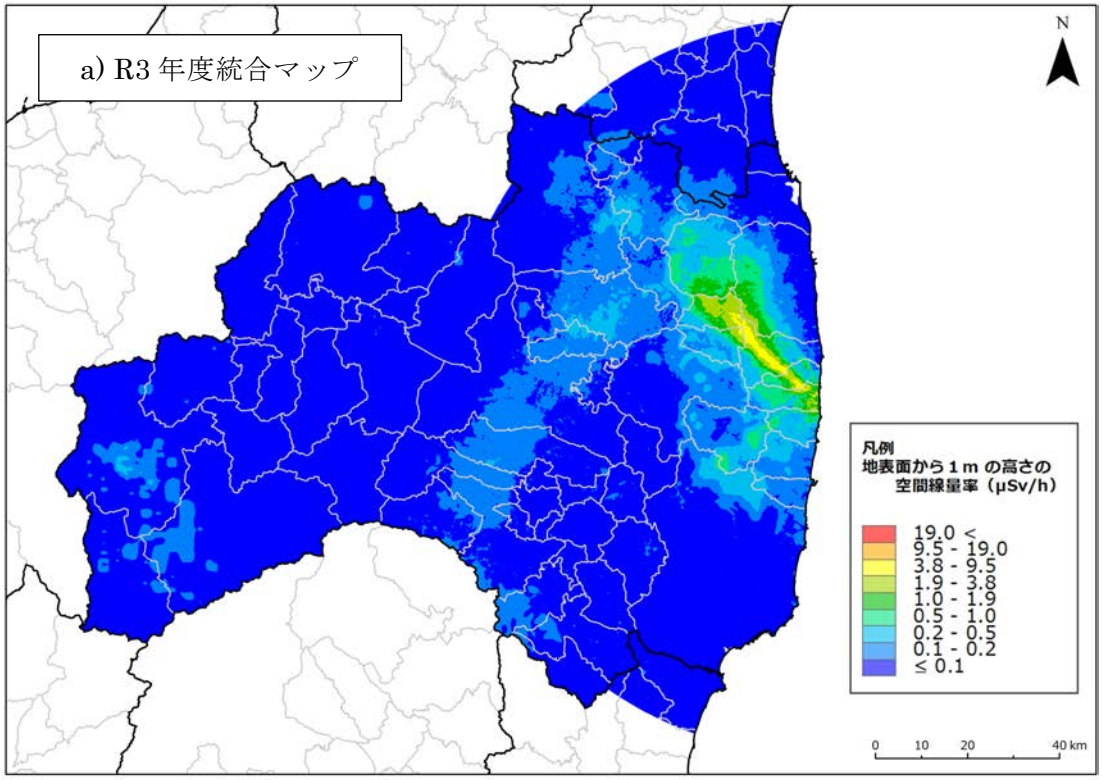
	旧避難指示区域内	旧避難指示区域外
市街地		
農地		
森林		

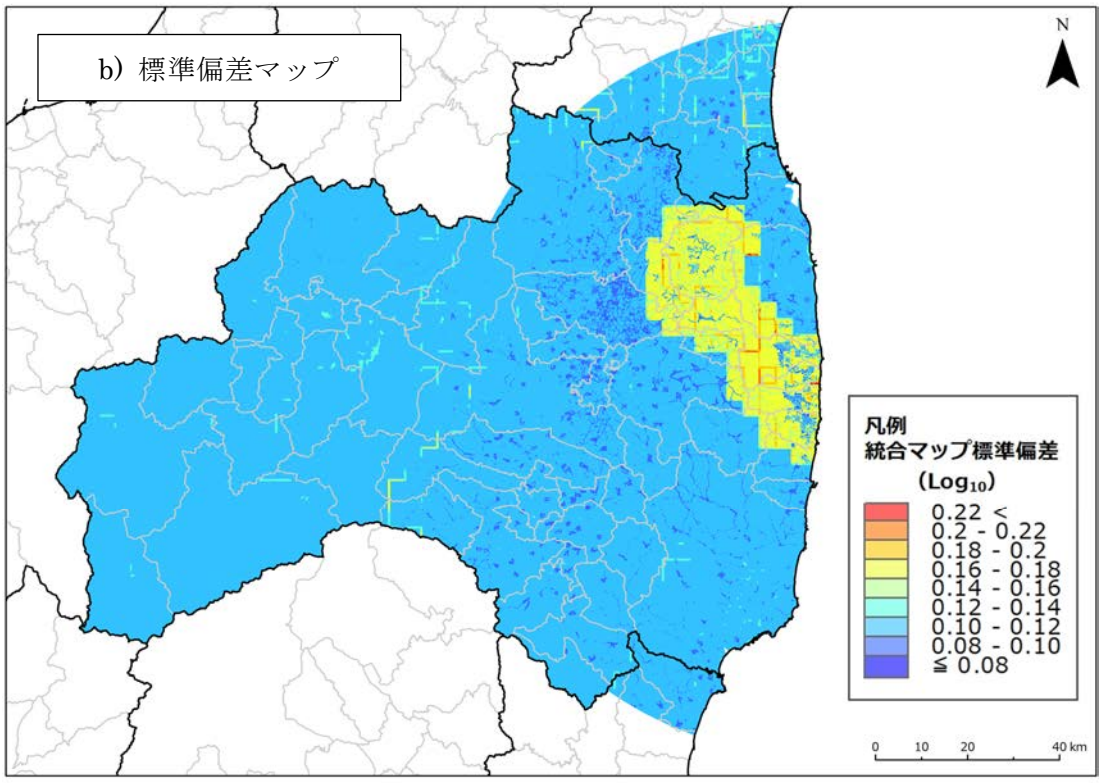
図 8-10　令和 3 年度に実施された航空機サーベイ（Air survey）と歩行サーベイ（Walk survey）との相関分析結果（福島県全域）

（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 3 年度に実施された歩行サーベイ、走行サーベイ、航空機サーベイ及びモニタリングメッシュ調査の結果を用いた、福島県全域の統合マップを図 8-11 に示す。80 km 圏外については、歩行、走行、航空機の各種データが少ないものの、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 8-6）と相違ない結果が得られている。





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

図 8-11　令和 3 年度に実施された各種測定結果を統合した統合マップ（福島県全域及び 80 km 圏内）

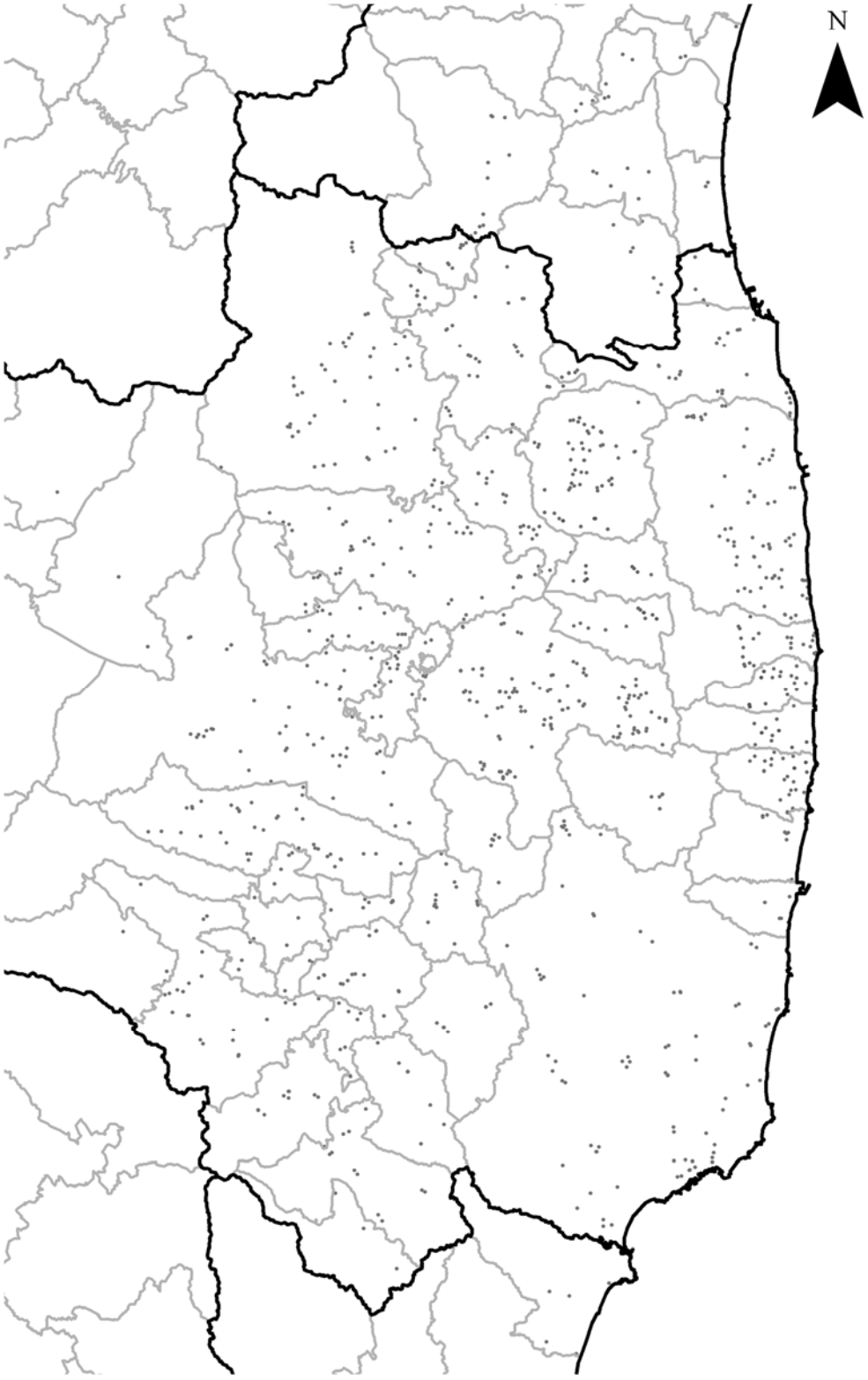
（a）：確率が最大となる空間線量率分布、b）：標準偏差分布。天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。）

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 8-12 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福島県 80 km 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 3 年度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 8-13 に示す。ヒストグラムの平均値を見ると -0.098 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 10%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。

なお、令和 3 年度の統合マップは令和 2 年度の統合マップと作成条件が異なる。令和 2 年度は航空機サーベイ、走行サーベイ、歩行サーベイ、モニタリングメッシュ調査を統合していたが、令和 3 年度はこれに森林内で実施した定点サーベイや分布状況調査で実施した定点サーベイの結果も統合の条件として加えた。令和 3 年度の統合マップは令和 2 年度の統合マップの比較について図 8-14 に示す。ヒストグラムの平均値を見ると、令和 3 年度の統合マップの空間線量率は令和 2 年度の統合マップに比べて 12%程高い傾向にある。これは、森林サーベイを加えたことによる地域の 70%占める森林地域のデータが上昇したことを反映しており、令和 2 年度に評価した結果[51]と概ね整合する。



背景地図：ESRI ジャパンデータコンテンツ, (c)EsriJapan

図 8-12　統合マップに除外された歩行サーベイ相当データの箇所

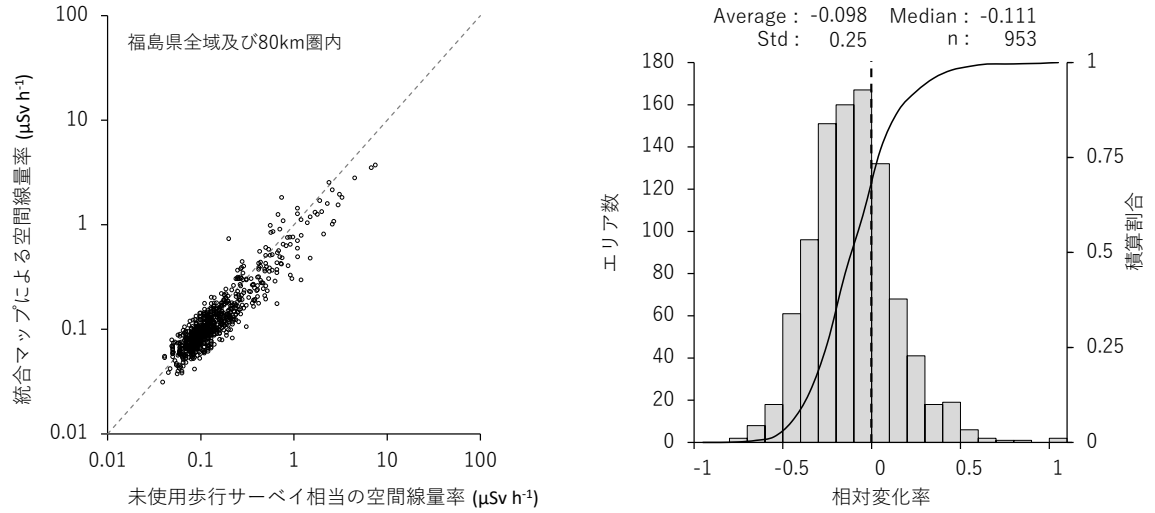


図 8-13　統合マップ作成時に除外された歩行サーベイ相当データの結果との比較

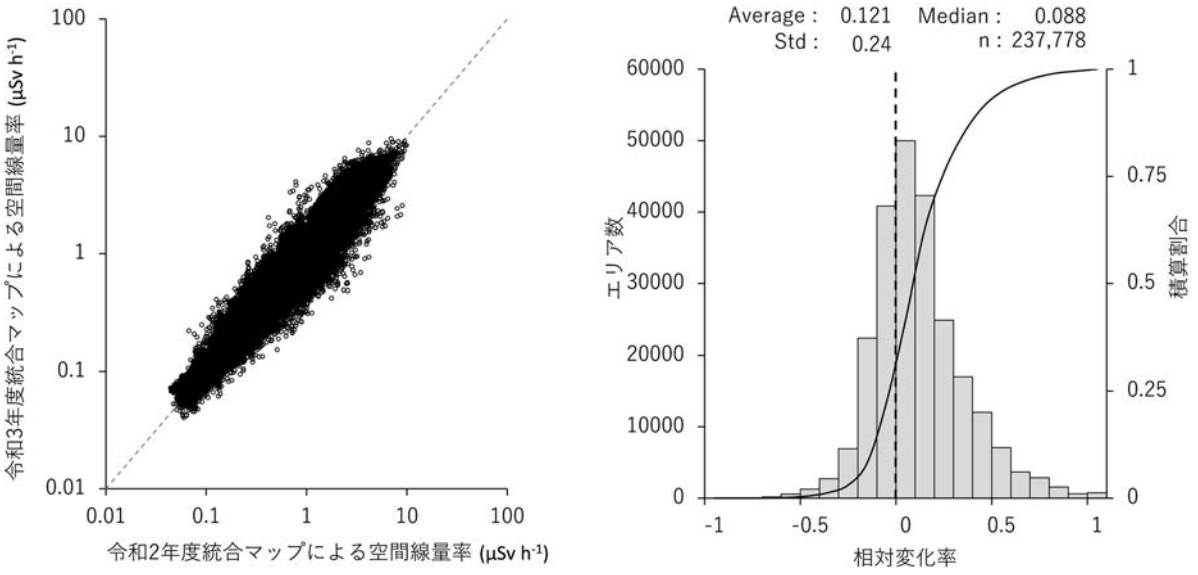


図 8-14　令和 2 年度統合マップとの比較

9. 空間線量率等分布マップの作成と公開

9.1 目的

分布状況調査で取得したデータ（走行サーベイ、定点サーベイ及び無人ヘリサーベイ等による空間線量率、並びに可搬型 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）を基に国土地理院の地図上に掲載する分布マップを作成した。さらに、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、放射線量等の分布マップ閲覧用 Web サイト「放射線量等分布マップ拡大サイト」[d]（以下「拡大サイト」という。）の構築・運用作業を行った。

9.2 空間線量率等分布マップの作成と公開

過去 10 年継続している拡大サイトでは、測定データを国土地理院の地図上に掲載する分布マップを作成し公開している。すでに公開中の平成 23 年度～令和 2 年度調査のデータに令和 3 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、放射線量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。

本調査で測定したデータを公開するにあたって、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分布マップシステムに登録し、マップデータの齟齬がないか関係者の確認を経てから、一般公開用の分布マップシステムに登録を行った。

令和 3 年度に拡大サイトに追加掲載した内容は以下のとおりである。一例として、令和 3 年度走行サーベイ測定データを表示させた画面を図 9-1 に示す。

・Web 地図（電子国土）版、スマートフォン版

走行サーベイ（第 22 回及び第 23 回）
定点サーベイ（第 15 回）
無人ヘリサーベイ（第 13 回）
放射性セシウム土壌沈着量（in-situ 測定）（第 14 回）
避難指示区域（令和 2 年 3 月 10 日現在）

・PDF 版

Web 地図（電子国土）版と同様の内容を A4 サイズの地図上にプロットした日本語版、英語版の PDF ファイル（約 200 枚）を作成し公開した。

---

[d] 拡大サイトは令和 4 年 4 月 1 日より「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：2022 年 7 月 1 日）に移行した。

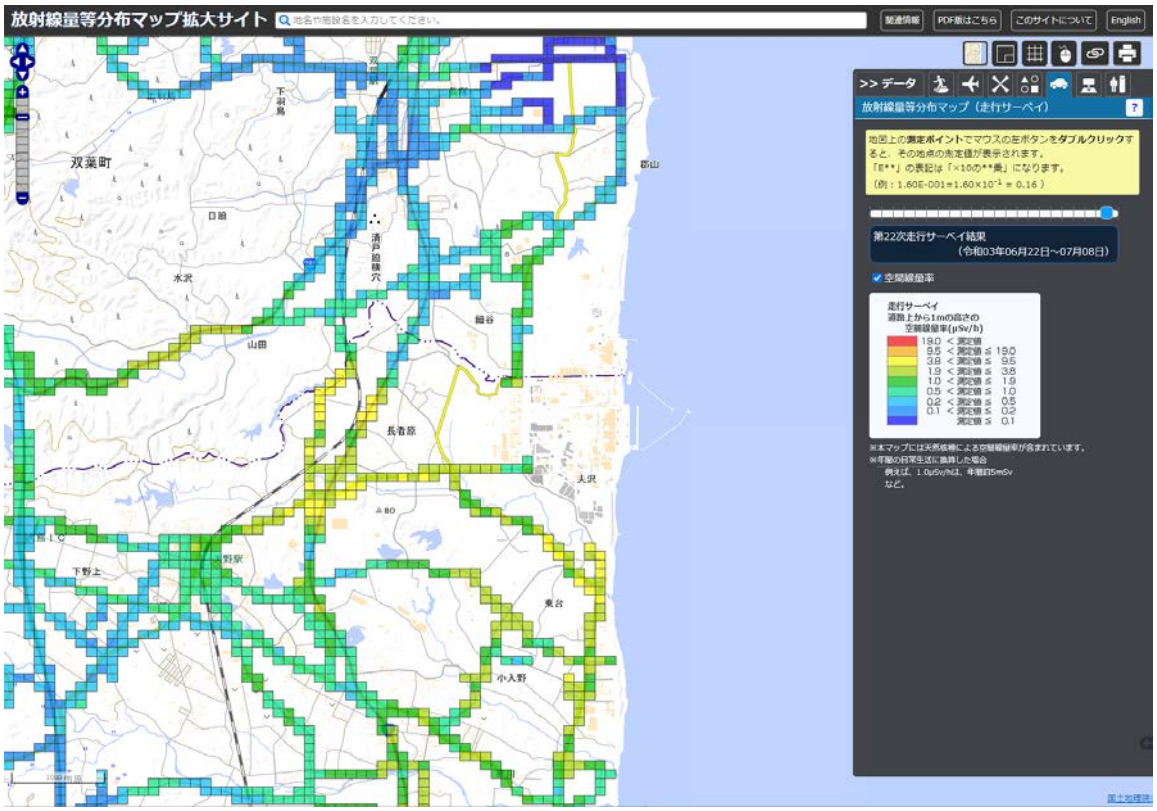


図 9-1　拡大サイトにおける測定データ（第 22 回走行サーベイ）表示例

9.3 空間線量率等分布マップの運用管理

拡大サイト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 3 年 4 月 1 日～令和 4 年 2 月 28 日現在までの 334 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、ユニークユーザ及びページビュー[e]の管理を行った（図 9-2）。

拡大サイトは令和 4 年 3 月 31 日をもって閉鎖するため、令和 3 年 10 月 1 日に原子力機構が本格運用を開始した「放射性物質モニタリングデータの情報公開サイト」にその機能を移行する予定であることを移行後の URL とともに初期画面に表示し、サイト閲覧者への周知を図った。

---

[e] ユニークユーザは、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。ページビューは、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。

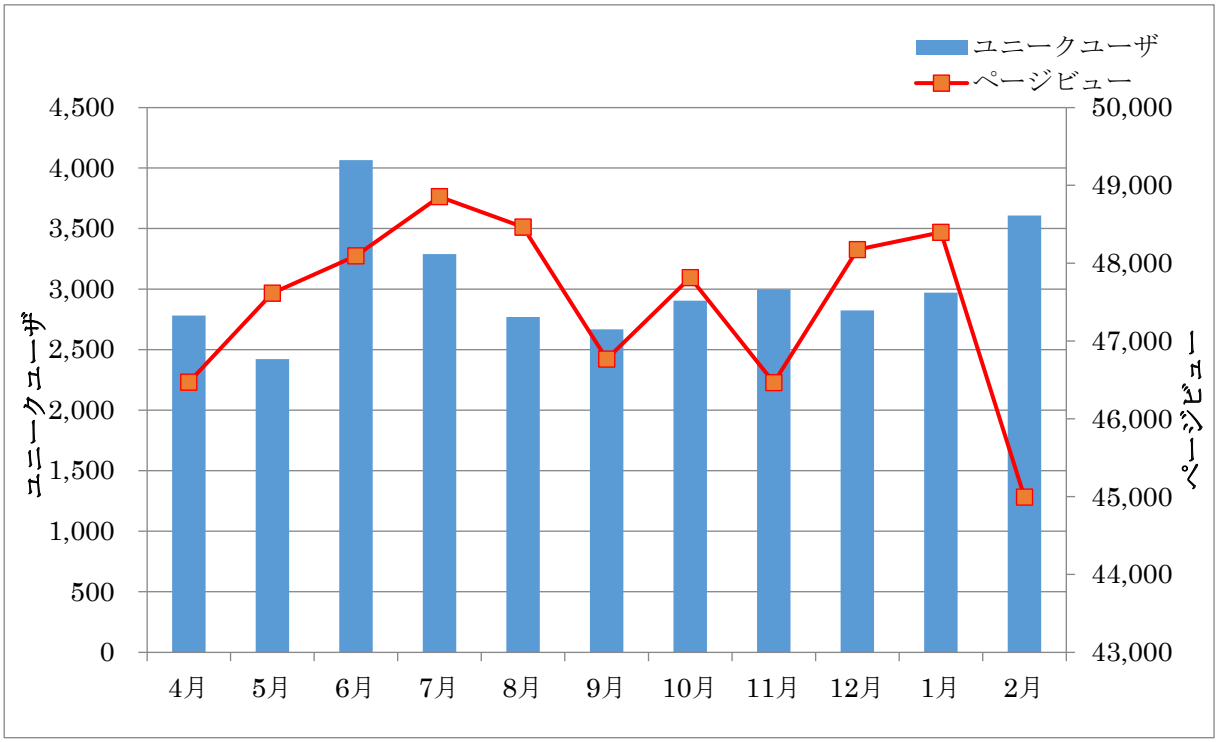


図 9-2　拡大サイトへの令和 3 年度アクセス状況

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。

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、規制庁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 [55]に基づき U8 容器で直接表層から 5cm 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.nsr.go.jp/ja/list/207/list-1.html（参照：2022 年 7 月 1 日）.
- 積算線量
  https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/216/list-1.html（参照：2022 年 7 月 1 日）.
- 大気浮遊じん中放射性物質濃度
  https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/222/list-1.html（参照：2022 年 7 月 1 日）.
- 土壌及び松葉中放射性物質濃度
  https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/482/list-1.html（参照：2022 年 7 月 1 日）.
  https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/483/list-1.html（参照：2022 年 7 月 1 日）.

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

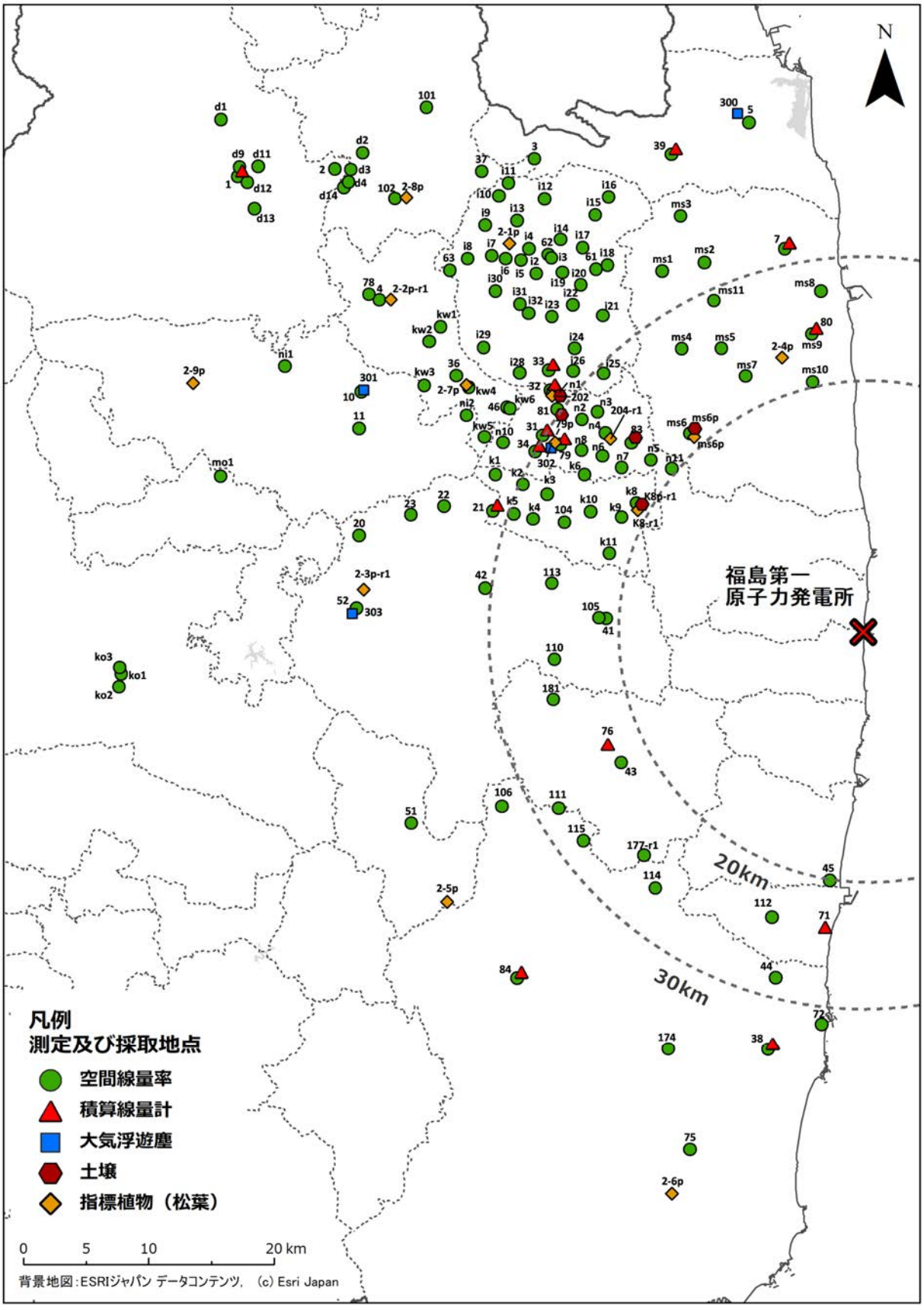


図 10-1 測定及び採取地点

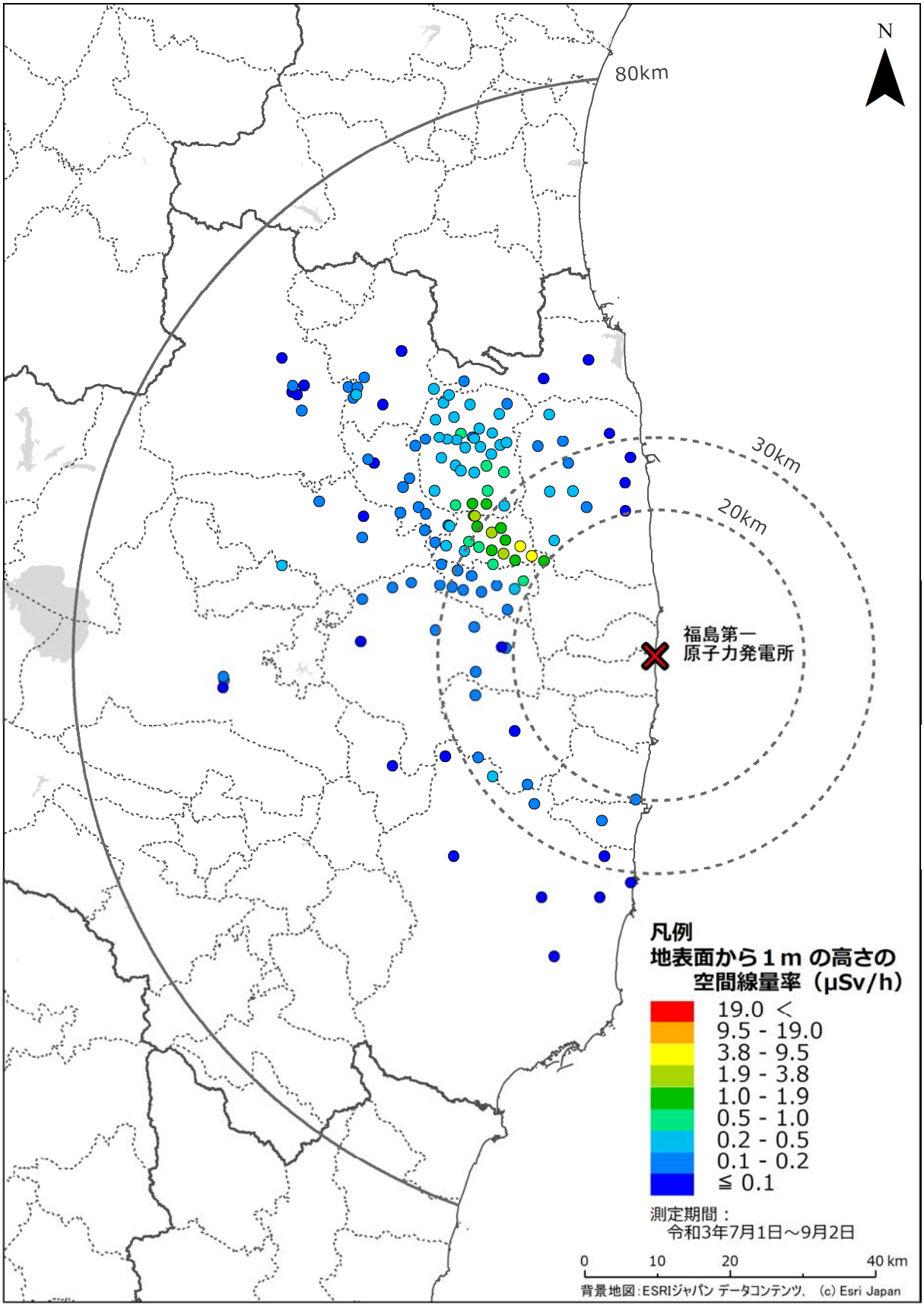


図 10-2　総合モニタリング計画に基づく空間線量率の測定結果

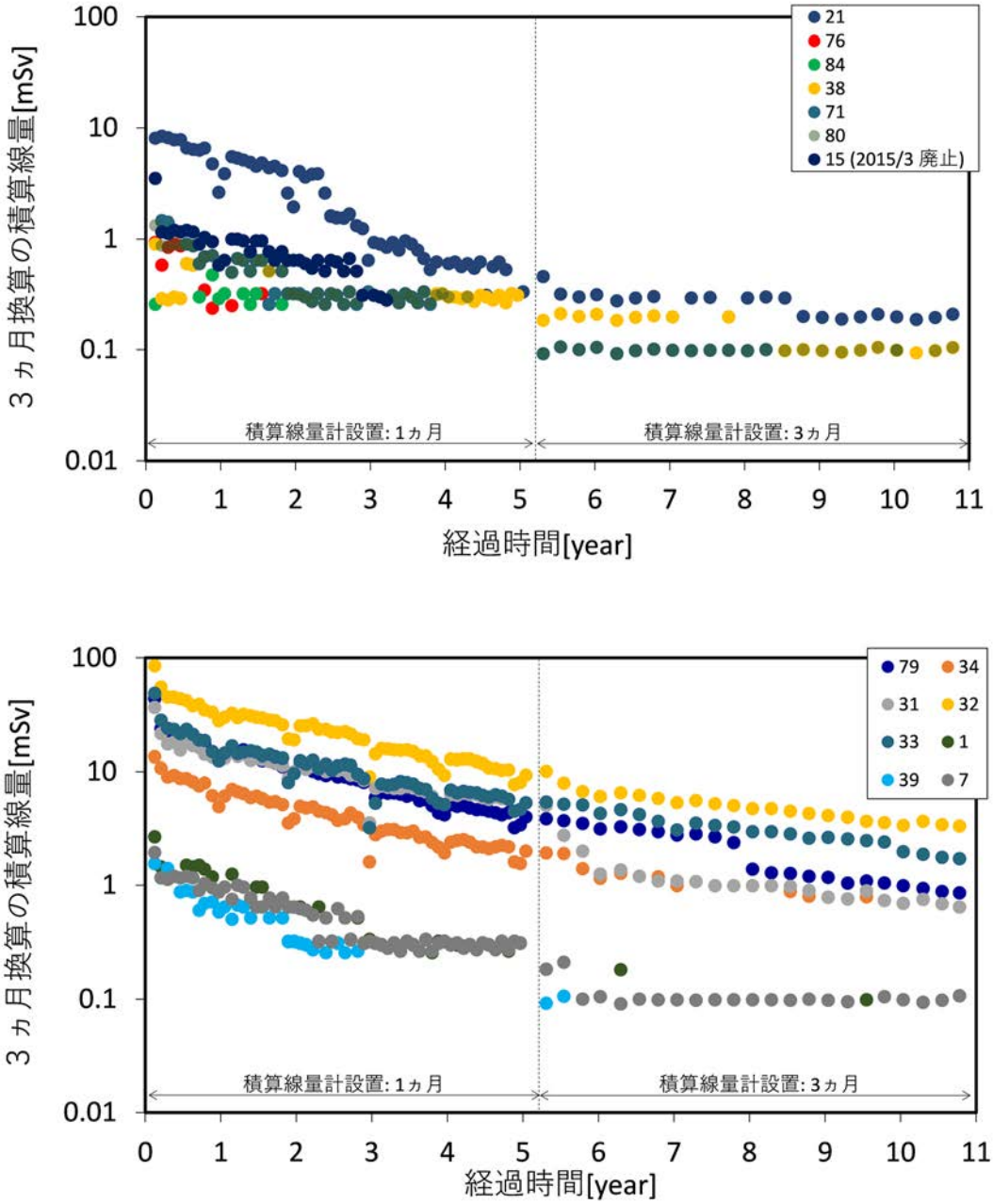


図 10-3　積算線量の経時変化

（凡例の数字は測定地点番号（図 10-1 参照））

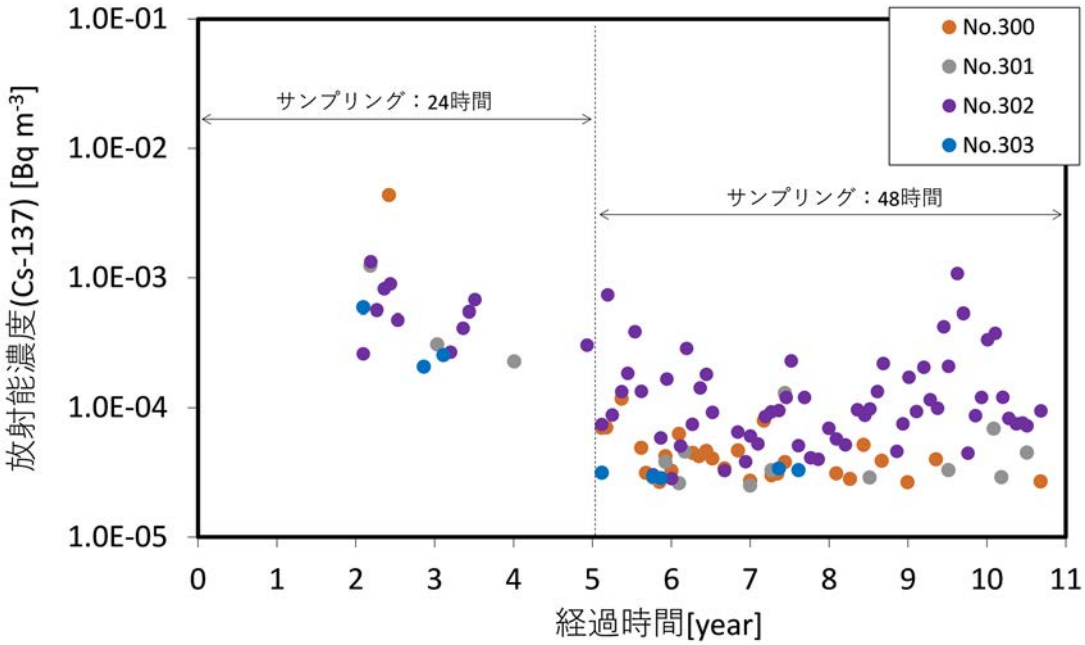


図 10-4　大気浮遊じん中セシウム 137 濃度の経時変化
（凡例の数字は測定地点番号（図 10-1 参照））

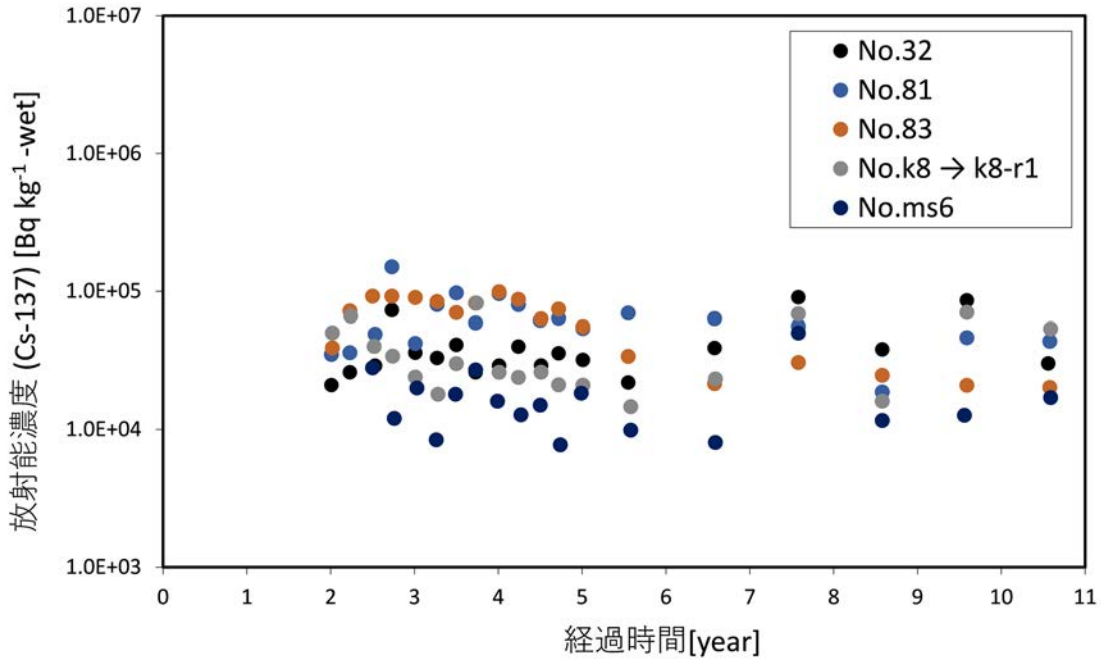


図 10-5　土壌中セシウム 137 濃度の経時変化
（凡例の数字は測定地点番号（図 10-1 参照））

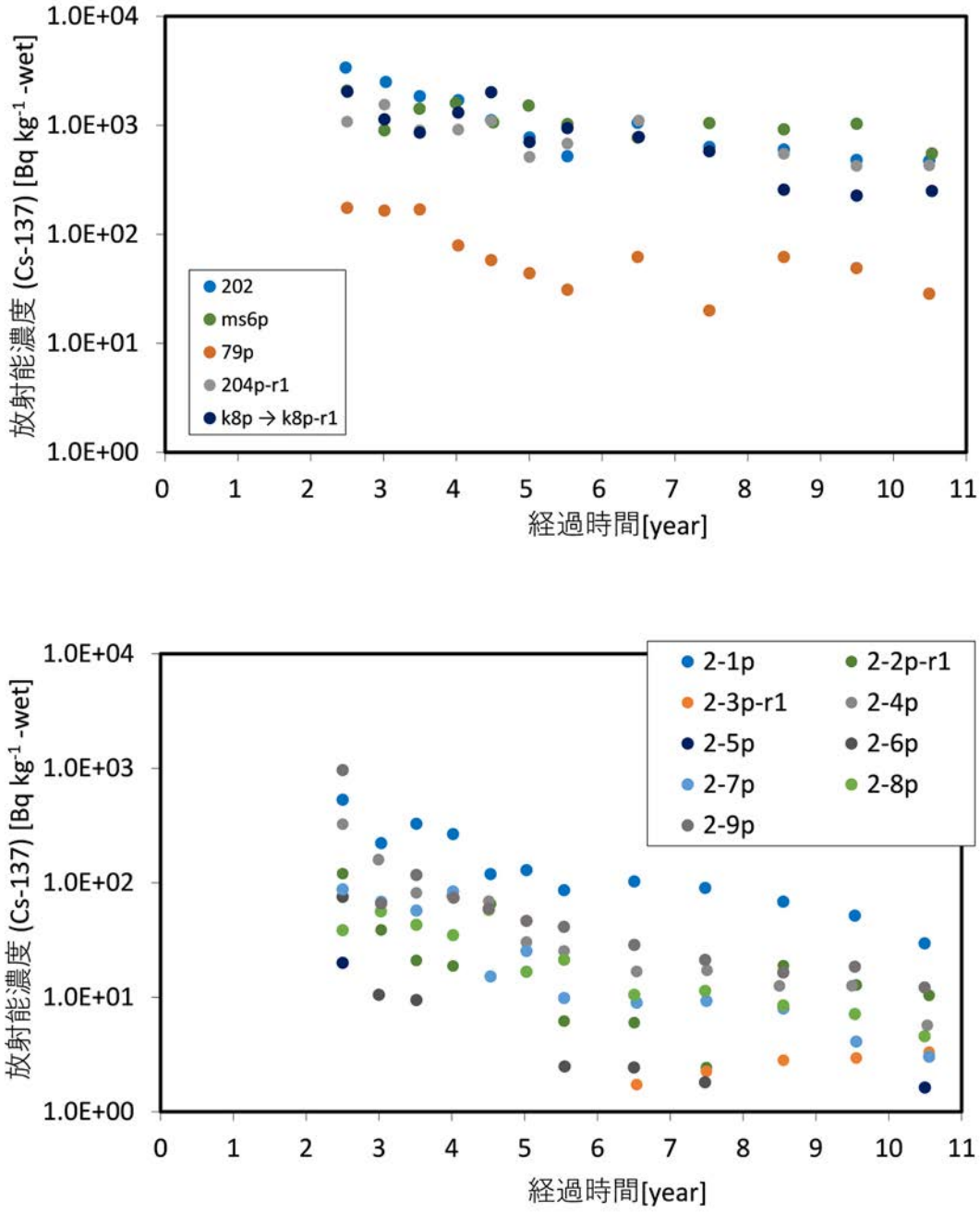


図 10-6　松葉中セシウム 137 濃度の経時変化
（凡例の数字は測定地点番号（図 10-1 参照））

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[56]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 3 年 2 月から令和 4 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[57]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 3 年 2 月から令和 4 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。変換した自治体を表 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.nsr.go.jp/ja/list/338/list-1.html
（参照：2022 年 7 月 1 日）.

・原子力規制庁が保有する測定データ：https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/512/list-1.html
（参照：2022 年 7 月 1 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 22 回：　354,993 第 23 回：　1,467,105
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）	1,238,604
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	13,021	14,525	1,504
2	福島県・宮城県・茨城県周辺の海水のモニタリング	20,915	22,581	1,666
3	福島県周辺の海水のモニタリング	1,773	2,039	266
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	3,380	3,794	414
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	752	852	100
6	東京湾における海域モニタリング結果	162	179	17
7	東京電力による海底土のモニタリング結果	4,440	4,889	449
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）	1,592	1,771	179
9	東京湾における海域モニタリング結果（海底土）	615	690	75
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）	12,895	12,995	100
11	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	35,267	35,403	136
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	1,075	1,131	56
14	東京電力株式会社福島第一原子力発電所の20km以遠の積算線量の測定結果	3,535	3,553	18
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	956	1,028	72
16	原子力規制庁及び福島県による大気浮遊じんの測定結果	4,195	4,255	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	102	112	10
18	原子力規制庁及び福島県による土壌試料の測定結果	1,879	1,884	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	3,448	3,642	194
20	上水（蛇口水）（環境放射能水準調査）	13,807	13,807	0
21	定時降下物のモニタリング（環境放射能水準調査）	18,512	19,076	564
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）	33,995	37,128	3,133
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）	26,078	28,441	2,363
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）	23,040	25,129	2,089

表 11-3　測定データを統一フォーマットに変換した自治体リスト

広域圏	市町村
浜通り	いわき市、相馬市、南相馬市、楢葉町、富岡町、大熊町、双葉町、新地町、飯舘村
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

12. まとめ

本報告書では、「令和 3 年度放射性物質測定調査委託費（東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約）事業」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 2 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調査に関しては、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調査及び可搬型 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、4.11 g/cm^2 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 383 箇所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 0.05 μSv/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、定点サーベイ及び歩行サーベイについては、二項指数関数によるフィッティングが良好ではなく、指数関数及び定数項による近似を採用し、それぞれの実効半減期は 1.9 年、1.7 年及び 1.3 年であった。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、そのスコアの「普遍性」を評価するために、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をその変化要因について考察した。

令和 2 年度までに総合モニタリング計画で実施された海域モニタリングの測定結果を集約するとともに、事故による影響が大きかったセシウム 137 について過去からの変動や濃度などの測定結果の詳細な解析評価を行なった。

階層ベイズ統計手法を用いて、令和 3 年度に測定された走行サーベイ、定点サーベイ及び歩行サーベイの測定結果に福島県によるモニタリングメッシュ調査及び規制庁による航空機サーベイの測定結果を加えるとともに、令和 2 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 3 年度の走行サーベイ、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「放射線量等分布マップ拡大サイト」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。又、当該分野の今後の調査等に活用するため、原子力規制庁や環境省が保有する測定データの一部を公開資料から抽出し CSV（場合によっては Excel®、KMZ）形式にて保存した。これらのデータの一部は原子力規制庁の Web サイトにて公開される。

謝辞

土壌試料分析及び 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関暁之氏（現所属、高速炉サイクル研究開発センター）及び斎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.nsr.go.jp/ja/list/338/list-1.html,（参照：2022 年 7 月 1 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.nsr.go.jp/ja/contents/16000/15217/26/JAEArep_MAPproject_H31_20200807_2_1.pdf,（参照：2022 年 7 月 1 日）.
4) 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, 2_2 地上における広域の空間線量率の分布測定 2, (2021) , https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/17000/16277/27/JAEA_MAPprojectR2_20210802_2-2.pdf,（参照：2022 年 8 月 3 日）.
5) 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).
6) 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).
7) 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).
8) 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).
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.nsr.go.jp/ja/contents/12000/11995/29/part1-3.pdf,（参照：2022 年 7 月 1 日）.
11) 国土地理院, 地理院タイル一覧, https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html,（参照：2022 年 7 月 1 日）.

12)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).
13)Chernobyl forum expert group 'environment', Environmental consequences of the Chernobyl accident and their remediation: twenty years of experience, Report of the Chernobyl forum expert group 'environment', International Atomic Energy Agency (IAEA), Radiological assessment reports series, STI/PUB/1239, 166p.(2006).
14)ICRU, Gamma-ray spectrometry in the environment, International Commission on Radiation Units and measurements (ICRU) Report: 53, 84p.(1994).
15)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).
16)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).
17)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, 土壌中の放射性セシウムの深度分布調査, (2018) ,
https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/14000/13993/33/Part2-2_20181130.pdf,（参照：2022 年 7 月 1 日）.
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, 土壌中の放射性セシウムの深度分布調査, (2017),
https://radioactivity.nsr.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：2022 年 7 月 1 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：2022 年 7 月 1 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 圏内の土壌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 : 2022 年 7 月 1 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.nsr.go.jp/ja/list/362/list-1.html,（参照：2022 年 7 月 1 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.nsr.go.jp/ja/list/204/list-1.html,（参照：2022 年 7 月 1 日）.
27)動力炉・核燃料開発事業団, 日本のウラン資源, PNC TN7420 94-006, 391p. (1994).
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測定結果について, (2017),
https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/13000/12701/24/170213_11th_air.pdf,（参照：2022 年 7 月 1 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, 放射性物質の分布状況等調査による走行サーベイ(KURAMA),
https://emdb.jaea.go.jp/emdb_old/portals/b1010202/,（参照：2022 年 7 月 1 日）.
30)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, 放射性物質の分布状況等調査による空間線量率測定,
https://emdb.jaea.go.jp/emdb_old/portals/b1010116/,（参照：2022 年 7 月 1 日）.
31)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, 歩行サーベイによる生活経路における空間線量率の測定, (2018),
https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/14000/13993/28/Part1-2_20181130.pdf,（参照：2022 年 7 月 1 日）.
32)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(2017 年 11 月), (2019), https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/207/list-201711.html,（参照：2022 年 7 月 1 日）.
33)福島県, 環境放射線モニタリング・メッシュ調査結果,
https://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal/ps-monitaring-mesh.html,（参照：2022 年 7 月 1 日）.
34)福島県, 平成 29 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/267364.pdf,（参照：2022 年 7 月 1 日）.
35)福島県, 福島県環境放射線モニタリング調査（観光地第 13 回）結果, (2017),
https://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal/ps-kankouti-13.html,（参照：2022 年 7 月 1 日）.
36)福島市, 全市放射線量測定マップ,（平成 29 年 2 月 7 日～3 月 7 日実施）,
http://www.city.fukushima.fukushima.jp/kankyo-houshasen/bosai/bosaikiki/shinsai/hoshano/sokute/shinaisokute/documents/map17040385000a2a4.pdf,（参照：2022 年 7 月

1 日）.
37)富岡町, 町内の放射線量調査(町内 142 ヶ所の定点測定), https://tomioka-radiation.jp/air-dose/kukan/kukan2103.html,（参照 : 2022 年 7 月 1 日）.
38)総務省統計局, 平成 22 年国勢調査, http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2010/ ,（参照 : 2022 年 7 月 1 日）.
39)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：2022 年 7 月 1 日）.
40)国土交通省, 国土数値情報ダウンロード, https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/,（参照：2022 年 7 月 1 日）.
41)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, 1 km 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 : 2022 年 7 月 1 日）.
42)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.nsr.go.jp/ja/contents/16000/15193/view.html,（参照：2022 年 7 月 1 日）.
43)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.nsr.go.jp/ja/contents/17000/16227/view.html（参照：2022 年 7 月 1 日）.
44) IAEA, Sediment distribution coefficients and concentration factors for biota in the marine environment, IAEA-TECDOC 422 (2004).
45) 公益財団法人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).
46)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).
47)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.nsr.go.jp/ja/contents/14000/13159/36/空間線量率の統合評価.pdf,（参照：2022 年 7 月 1 日）.
48)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.nsr.go.jp/ja/contents/14000/13993/34/Part3_20181130.pdf,（参照 : 2022 年 7 月 1 日）.
49)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.nsr.go.jp/ja/contents/15000/14765/31/JAEArep_MAPproject_H30_20200302_7.pdf,（参照：2022 年 7 月 1 日）.

50)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.nsr.go.jp/ja/contents/16000/15217/32/JAEArep_MAPproject_H31_20200807_7.pdf,（参照：2022 年 7 月 1 日）.

51) 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.nsr.go.jp/ja/contents/17000/16277/33/JAEA_MAPprojectR2_20210802_7-1.pdf,（参照：2022 年 7 月 1 日）.

52) 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/press/kikaku/200731.html,（参照：2022 年 7 月 1 日）.

53) 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：2022 年 7 月 1 日）.

54)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：2022 年 7 月 1 日）.

55)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：2022 年 7 月 1 日）.

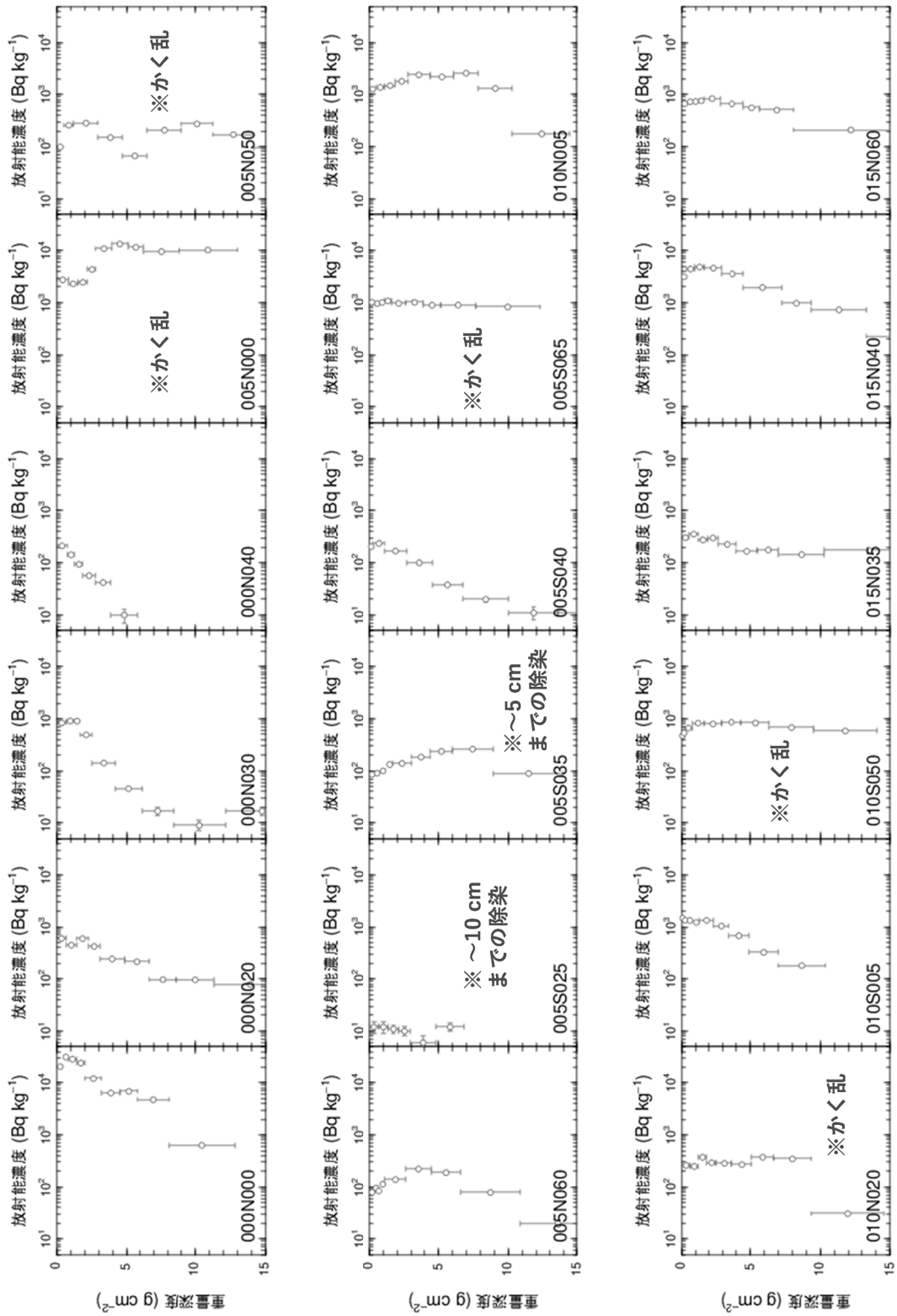
56)原子力規制庁, 放射線モニタリング情報, モニタリング結果,
https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/512/list-1.html,（参照：2022 年 7 月 1 日）.

57)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, https://www.env.go.jp/jishin/monitoring/results_r-pw.html,（参照：2022 年 7 月 1 日）.

付録 セシウム 137 の深度分布

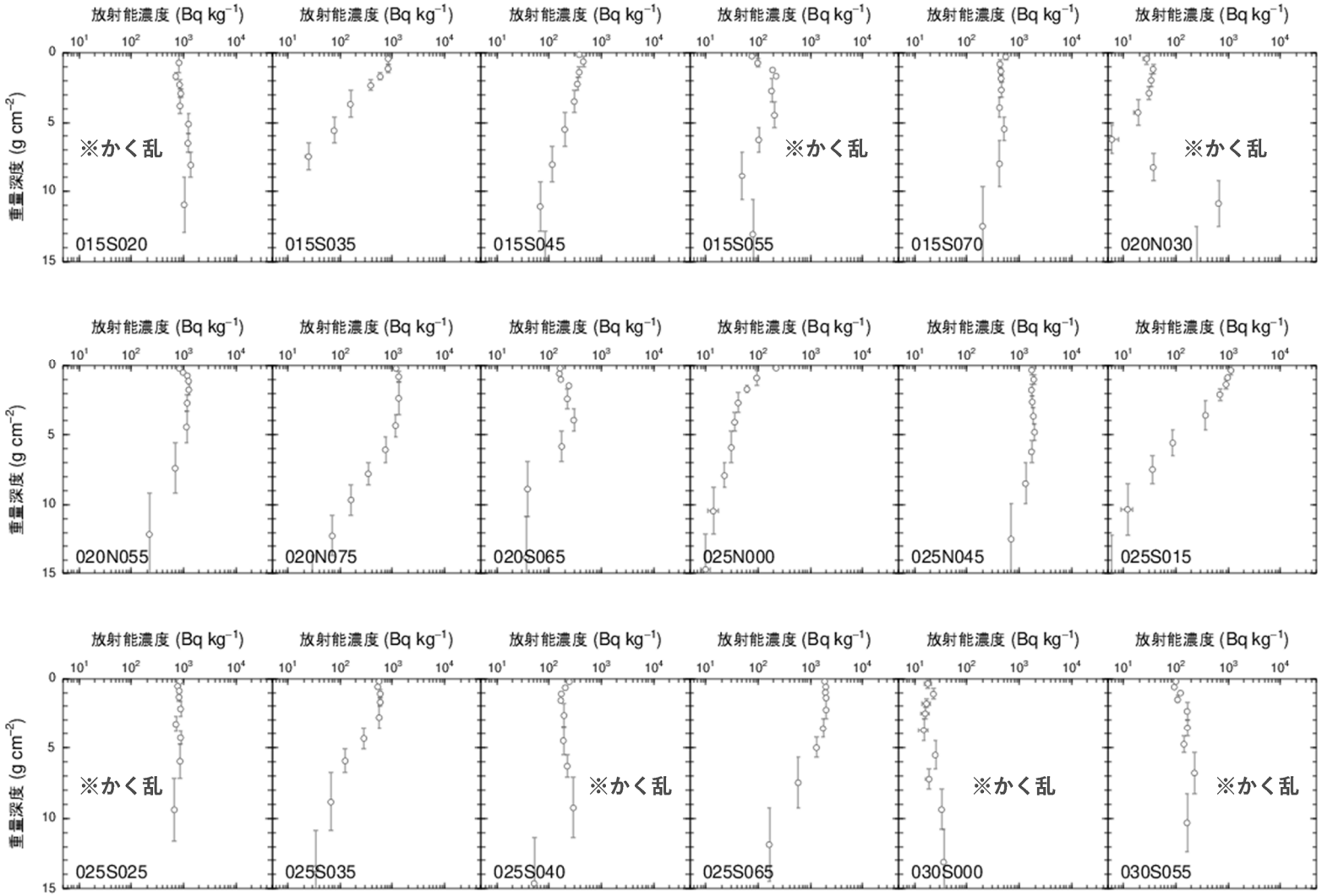
セシウム 137 の深度分布 （1/5）

※深度分布の変遷から読み取れる除染等の可能性



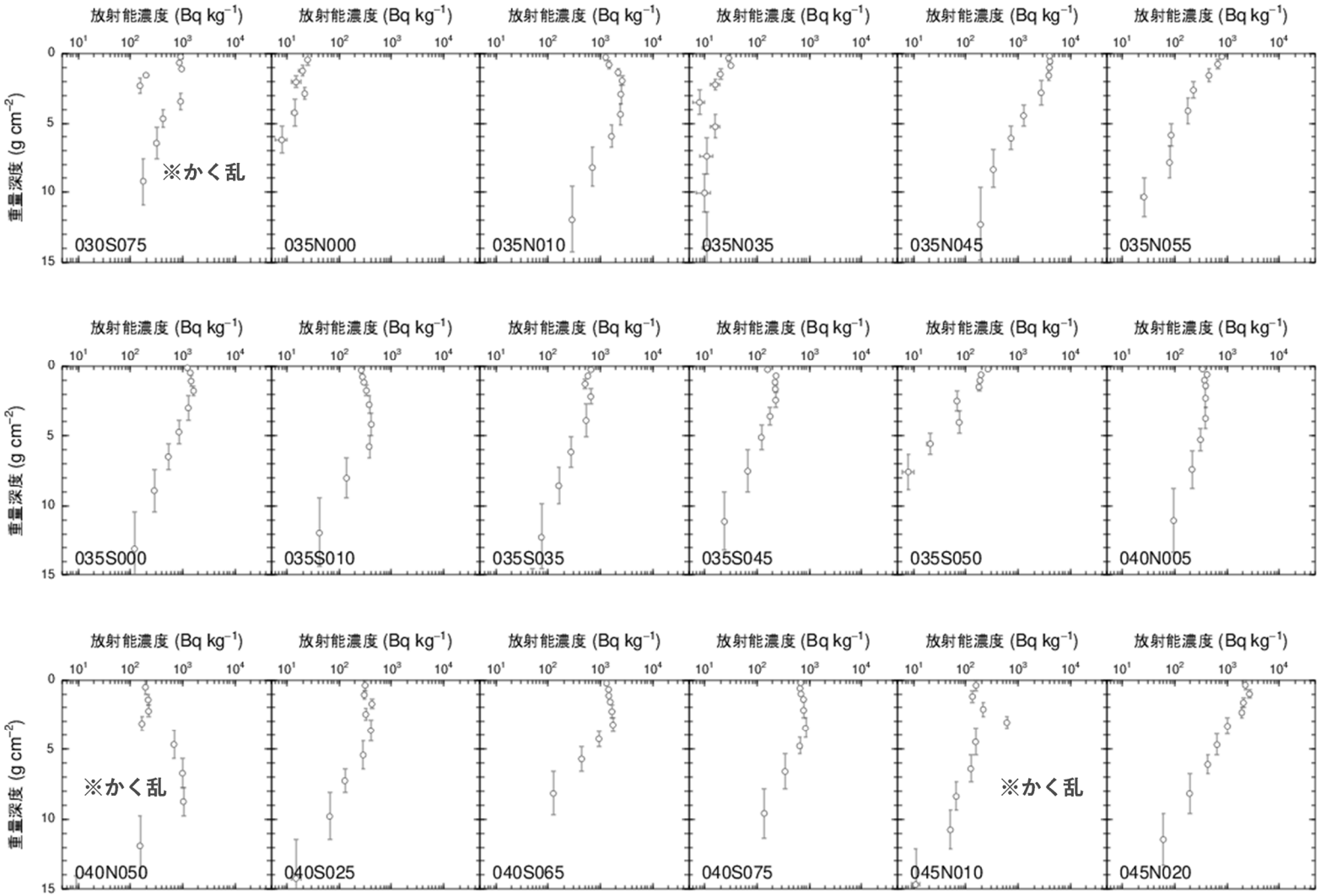
セシウム 137 の深度分布 （2/5）

※深度分布の変遷から読み取れる除染等の可能性



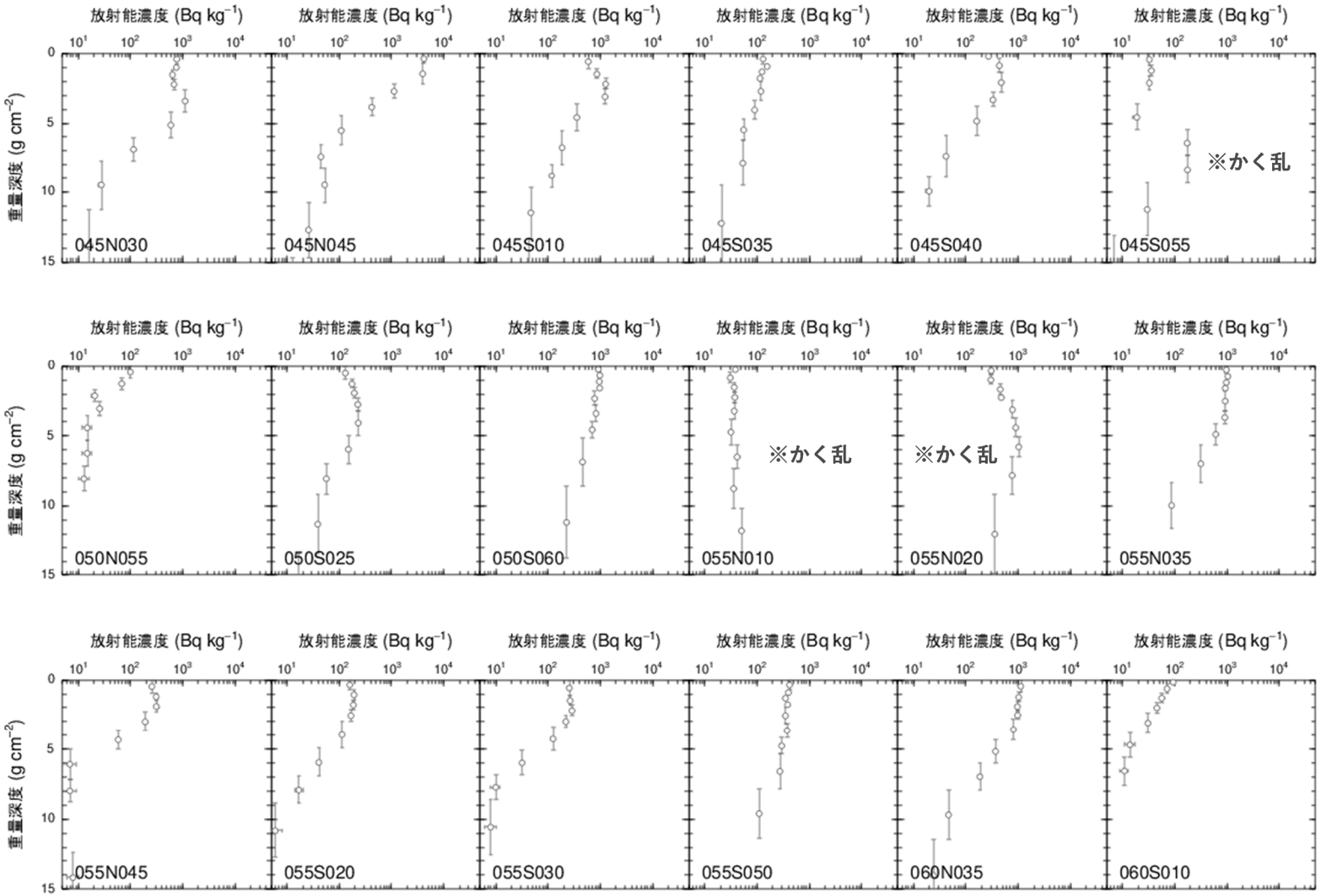
セシウム 137 の深度分布 （3/5）

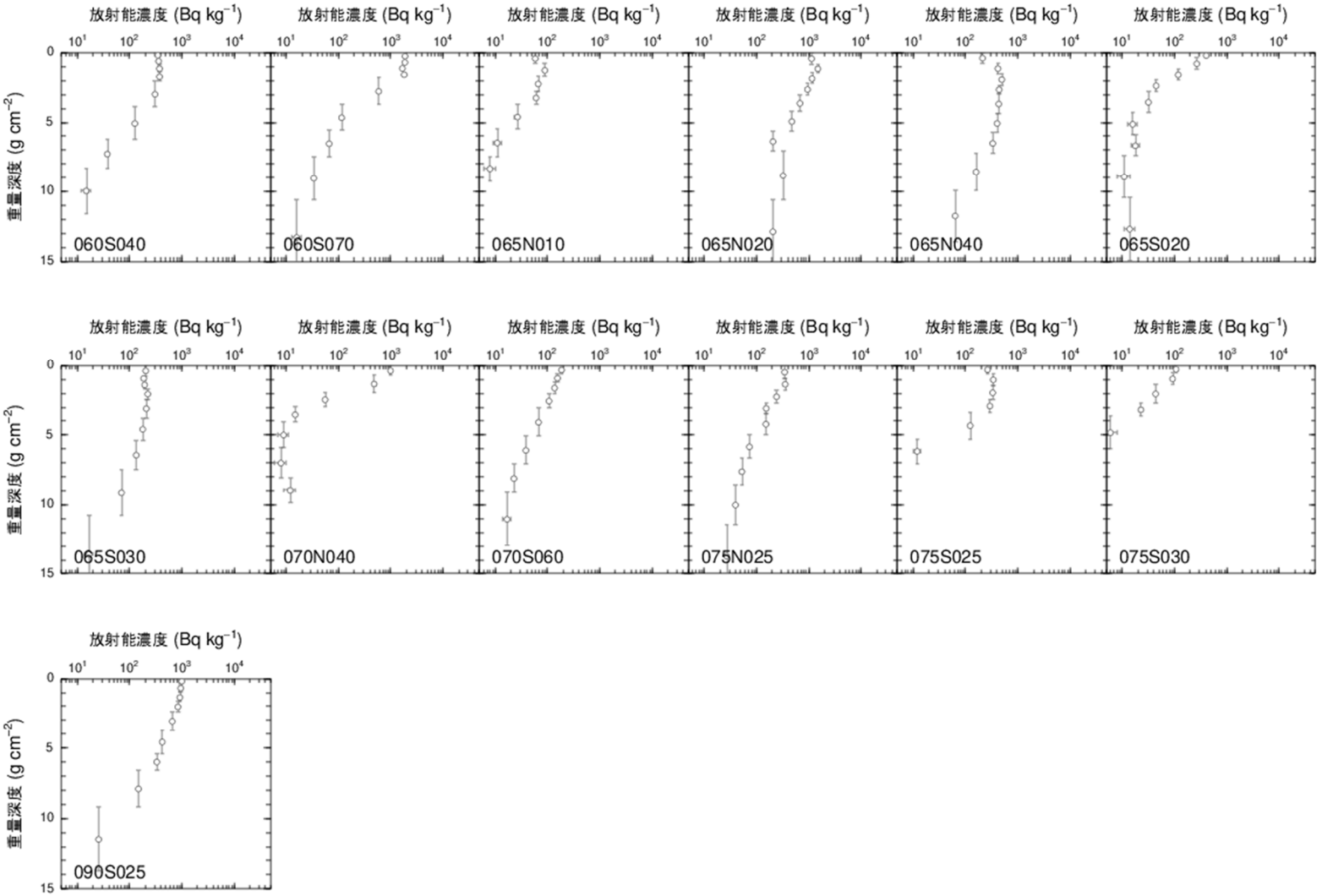
※深度分布の変遷から読み取れる除染等の可能性



セシウム 137 の深度分布 （4/5）

※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 （5/5）

※深度分布の変遷から読み取れる除染等の可能性