

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

平成30年3月

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

目 次

全体概要

全体概要	1
------	---

Part1 : 空間線量率の分布測定

1.1. 走行サーベイによる道路及びその近傍における空間線量率の測定	3
1.2. 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	15
1.3. 人為的なかく乱の少ない平坦な開かれた土地における空間線量率 分布測定	24
1.4. 東京電力福島第一原子力発電所から80 km 圏内の空間線量率の 変化傾向	30
1.5. 無人ヘリによる東京電力福島第一原子力発電所から5 km 圏内の 空間線量率分布の測定	38

Part2 : 土壌における放射性セシウムの分布調査

2.1. 放射性セシウム沈着量の面的調査	51
2.2. 土壌中の放射性セシウムの深度分布調査	66

Part3 : 実測データの統合的解析

空間線量率の統合評価	78
------------	----

Part4 : 空間線量率等分布マップの作成と公開

空間線量率等分布マップの作成と公開 89

Part5 : 放射線モニタリング及び環境試料分析

放射線モニタリング及び環境試料分析 98

Part6 : 測定データの CSV 化

測定データの CSV 化 100

全体概要

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 年度の終わりにかけて、「放射性物質の分布状況等に関する調査研究」（第 1 次分布状況等調査）、「福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の第二次分布状況等に関する調査研究」（第 2 次分布状況等調査）、及び「福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の長期的影響把握手法の確立」（第 3 次分布状況等調査）を実施した。これらの調査を継承する形で、平成 25 年度には原子力規制庁からの委託を受け「平成 25 年度東京電力(株)福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の長期的影響把握手法の確立」（平成 25 年度調査）、平成 26 年度は「東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約及び移行モデルの開発」（平成 26 年度調査）、平成 27 年度、28 年度及び 29 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」（平成 27 年度調査、平成 28 年度調査、平成 29 年度調査）をそれぞれ実施した（以下、これらを総称して「分布状況調査」と呼ぶ）。

一連の分布状況調査の中で、1) 放射性物質の土壌沈着量および空間線量率に関する大規模環境測定とマップ化、2) 放射性セシウムの環境中移行メカニズムの調査（平成 26 年度終了）、3) 空間線量率予測モデルの開発（平成 27 年度終了）、4) 拡大マップサイト等を通じたデータの公開をそれぞれ実施してきた。これまでに蓄積した調査結果の解析により、福島第一原発事故により放出された放射性セシウムの土壌沈着量分布および空間線量率分布の経時変化の特徴が明らかになるとともに、その変化を理解するための放射性セシウムの環境中動態についても知識が蓄積された。また、ここで得られた知識に基づき福島第一原発から 80 km 圏内の全域を対象に、将来の空間線量率の変化を予測するためのモデルを開発した。さらに、環境調査で得られた大量の環境測定データを、マップ形態ならびに数値情報として公開を継続してきた。平成 28 年度事業においては、異なる方法を用いて測定した空間線量率分布を統合する試みを開始した。

今年度、大規模環境測定は昨年度と基本的に同じ内容で行った。空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$) に関してはサーベイメータによる平坦地上の測定、走行サーベイ、歩行サーベイ、無人ヘリコプターサーベイを、放射性セシウムの土壌沈着量 (Bq/m^2) に関しては可搬型ゲルマニウム検出器を用いた in situ 測定（現地における測定）を、土壌中深度分布 (Bq/kg) についてはスクレーパープレートで深さ別に採取した土壌試料の分析をそれぞれ実施した。人間の生活に関連した空間線量率データが得られる走行サーベイ及び歩行サーベイは年に 2 回実施し、その他の測定は 1 回実施した。測定の範囲は 80 km 圏内全域を基本的に対象としたが、走行サーベイの第 2 回については東日本の広い地域を対象に実施した。但し、事故から 6 年以上が経過し空間線量率レベルが相当に減少してきているため、空間線量率に応

じて対象範囲を昨年よりもさらに縮小した。

走行サーベイ、歩行サーベイ及び航空機モニタリングで取得した空間線量率データをベイズ統計手法を用いて統合する試みを昨年度に引き続き実施した。昨年度は避難指示区域内を対象に統合を行ったが、今年度は対象地域を 80 km 圏内全域に広げ、歩行サーベイを 80 km 全域で行ったと想定した場合に得られる空間線量率マップを作成した。各測定データ間の相関関係が避難指示区域内外また土地利用状況で異なることを考慮し、統合のための基本モデルを状況毎に作成して使用した。歩行サーベイ実測値を用いて行った検証により、統合が全域で適切に行われたことを確認した。

本調査の結果をマップ化して公開してきたマップ拡大サイトへは、平成 29 年度は 1 日あたりにして約 180 件程度のユニークアクセス（同一 IP アドレスからのアクセスを重複せずにカウント）があった。日本国内からのアクセスが約 90%程度であり、都道府県別で見ると東京都、福島県、宮城県、茨城県からのアクセスが多かった。また、地域により訪問元の業種が異なり、東京都からはエネルギー関連、福島県からは公務、茨城からは学術研究の関係者の訪問数が多かった。

走行サーベイによる道路及びその近傍における空間線量率の測定

1. 調査目的

福島第一原発から放出された放射性物質による現状における空間線量率を把握するため、KURAMA-II（小型 CsI シンチレーション検出器と GPS が一体となった簡易型測定システム）を用いた走行サーベイによる調査を実施してきた。

本調査の目的は、過去の走行サーベイによる地表面から 1 m 高さの空間線量率の測定結果と今回の測定結果を比較・解析し、現状における空間線量率の状況や変化傾向を把握することである。

2. 調査内容

(1) 調査期間及び調査地域

原子力機構による測定は年 2 回とし、平成 26 年度までの調査結果を基に空間線量率が $0.2 \mu\text{Sv/h}$ 以上の主要幹線道路について、福島県及びその周辺の地域を中心とした福島第一原発から 80km 圏内と岩手県から千葉県までを含む広域の走行サーベイを 1 回ずつ実施した。さらに、地方自治体と協働（原子力機構は解析を担当）で細かな道路を含む地方自治体が希望する道路について測定を 1 回実施した。80km 圏内での測定では、これまでの原子力機構による走行サーベイでの測定対象道路に加え、平成 27 年 9 月から平成 29 年 4 月までに避難指示が解除となった区域（避難指示解除準備区域が解除：檜葉町及び川内村、居住制限区域及び避難指示解除準備区域が解除：葛尾村、南相馬市、浪江町、川俣町、飯館村及び富岡町）においてはより詳細に測定を実施した。

第 1 回目：第 14 次走行サーベイ

- 原子力機構による測定：平成 29 年 7 月 3 日～7 月 21 日
 - 対象地域：3 県（宮城県、福島県、茨城県）
- 合計測定距離：約 8.5 千 km

第 2 回目：第 15 次走行サーベイ

- 原子力機構による測定：平成 29 年 10 月 24 日～11 月 27 日
 - 対象地域：8 県（岩手県、宮城県、福島県、茨城県、栃木県、群馬県、埼玉県、千葉県）
- 地方自治体（8 県（同上）、約 75 市町村）による測定：平成 29 年 10 月 20 日～12 月 5 日
- 合計測定距離：約 5.7 万 km

(2) 調査内容の詳細

自動車の後部座席の右側後方に KURAMA-II を設置し 3 秒ごとに空間線量率を測定した。GPS による位置情報とともに携帯電話回線を通してデータ収集用サーバに送信した。車内における空間線量率測定値を車外の地上 1 m 高さの空間線量率に換算するための補正係数¹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放射性セシウムによるものと想定しても、測定期間中

¹ 平成 23 年度放射能測定調査委託事業、「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」、日本原子力研究開発機構ホームページ、第 1 編、1-47、<http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat01/pdf05/01-04.pdf>

の放射性セシウムの物理減衰に伴う空間線量率の減少は 1%程度と評価され測定機器の有する不確かさよりも十分に小さいことを考慮して、空間線量率測定値を一定の日付に揃える減衰補正を行わず、測定した日の測定結果をそのまま使用した。

道路上において連続的に測定された空間線量率の測定結果を元に、これまでと同様に、走行地域を 100 m 四方のメッシュに分割し、そのメッシュ内に含まれる各測定箇所での空間線量率の値を平均してメッシュの代表値とした。マップ作成の基になる空間線量率データは、原子力機構及び地方自治体の測定結果を区別せず使用した。なお、平成 28 年度に高度化した KURAMA-II は、平成 29 年度の 80km 圏内での測定には用いていない。KURAMA-II による空間線量率測定の不確かさ(装置の系統的誤差)は 1 回の測定で $\pm 10\%$ ²、空間線量率の比をとる場合には誤差伝播を考慮し $\pm 14\%$ である。

平成 29 年度までの測定結果を用いて、空間線量率の経時変化状況を確認するとともに、避難指示区域の分類(避難指示解除準備区域、居住制限区域及び帰還困難区域)ごとの空間線量率の変化傾向の違いを検討した。

3. 結果と考察

平成 29 年度の第 14 次及び第 15 次走行サーベイの結果に基づき作成した空間線量率マップをそれぞれ図-1 及び図-2 に示す。比較のため、平成 28 年度の第 12 次走行サーベイでの空間線量率マップ(ただし福島第一原発から 80 km 圏内主体)を図-3 に示す。これらの図より、現状では、福島第一原発から 80 km 圏内や栃木県北東部の一部を除き、 $0.2 \mu\text{Sv/h}$ 未満の地域がほとんどを占めていることが分かる。また、第 14 次走行サーベイでは、福島県東部(飯舘村や南相馬市など)の避難指示が解除となった区域において従来の走行サーベイより詳細に測定を実施したが、その状況は図-1 にも現れている。

第 1 次走行サーベイにより得られた空間線量率と同じメッシュ(ただし福島第一原発から 80 km 圏内)における第 14 次走行サーベイ及び第 15 次走行サーベイで得られた空間線量率の測定結果の相関図を図-4 に示す。KURAMA-II による測定結果から各市町村平均として求められた天然放射性核種による空間線量率線寄与³を差し引いた事故由来の放射性セシウムによる空間線量率として解析評価した(本報告書の以下の経時変化図において同様)。第 14 次走行サーベイから第 15 次走行サーベイでは時間が約 4 ヶ月間経過し、回帰直線の傾き(空間線量率の変化率)は 0.14 から 0.11 に変化している。

第 1 次走行サーベイと第 2 次以降の各走行サーベイで共通の 100m メッシュの空間線量率をそれぞれ合計し、第 1 次走行サーベイに対する比率(以下「合計線量率比」という。)をとり、その経時変化を図-5 に示す。合計線量率をデータ数で割ると平均空間線量率が得られ、この合計線量率比は平均空間線量率の比と同じである。なお、第 14 次走行サーベイでは測定範囲を 80km 圏内に特化し走行ルートを見直したため、その前後の第 12 次から第 15 次の計 4 回の走行サーベイと第 1 次走行サーベイにおいて共通の 100m メッシュを抽出し各走行サーベイでの合計線量率を求め、第 1 次走行サーベイに対する比率をとった。表-1 に各合計線量率比等をまとめる。放射性セシウムの物理減衰をあわせて図-5 に示した。最新の第 15 次走行サーベイでは、第 1 次に対する合計線量率比が 0.098 となり、放射性セシウムの物理減衰から計算した線量率比 0.32 のほぼ 30%となっている。平成 28 年度の第 12 次走行サーベイ以降の変化傾向を見ると、それ以前に比べ空間線量率の減少は遅いが、後述する避難指示区域毎の経時変化においても同様の傾向が見られる

² 安藤真樹, 他, “福島県及び隣接県における空間線量率の経時変化に関する考察,” JAEA-Technology 2015-060, (2016).

³ 安藤真樹, 他, “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, Vol. 16, No. 2, p. 63-80 (2017).

ことから 80km 圏内における共通の変化傾向と考えられる。平成 28 年度 1 回目（第 12 次走行サーベイ）の 80km 圏内での雨天日数比率は約 30%であり、その前後に比べてその比率が高かったことから、道路周辺での雨水による遮へい効果による影響が現れた可能性が考えられる。平成 28 年度 2 回目の第 13 次走行サーベイ（2016 年 11 月測定）により規格化した合計線量率比を表-1 中に括弧内に示した。直近の 1 年間では全期間に比べて物理減衰と合計線量率比の差は小さくなっているが、物理減衰に対して測定値の減少は約 8%早く、環境による空間線量率減少の加速が観察される。

空間線量率の減少傾向と土地利用状況との関係を調べるため、走行サーベイを行った道路が存在する 100 m メッシュを国土交通省の国土数値情報⁴ に基づき「田」、「その他農用地」、「森林」及び「建物用地」に分類されたメッシュについて、第 1 次走行サーベイに対する第 14 次及び第 15 次走行サーベイの合計線量率比を図-6 に示す。森林での線量率の減少が他に比べて遅く、建物用地での線量率の減少が他に比べて早い。森林と建物用地での合計線量率比は、それぞれ 0.13 と 0.087（第 1 次走行サーベイに対する第 14 次走行サーベイ）及び 0.12 と 0.081（第 1 次走行サーベイに対する第 15 次走行サーベイ）であり、建物用地での合計線量率比は森林の約 2/3 となっている。測定誤差を超える有意な差であるといえる。ウェザリングの影響の受けやすさ、人間活動量（交通量）や除染の影響等が道路周辺の土地利用によって異なるためと考えられる。

測定した道路が図-7 に示す避難指示区域（原子力災害対策本部が平成 27 年 8 月 7 日に発表した平成 27 年 9 月 5 日時点での避難指示解除準備区域、居住制限区域及び帰還困難区域）のいずれか、あるいは外側に位置するか分類し（本報告書では、避難指示区域内外の分類をこのデータに基づいて解析している）、第 1 次走行サーベイに対する第 2 次以降の走行サーベイの合計線量率比の経時変化を図-8 に示す。図-8 より、全期間の傾向としては、避難指示区域外で空間線量率の減少が最も早く帰還困難区域で最も遅い。また、避難指示解除準備区域及び居住制限区域では、平成 26 年度から大きく減少し始め、帰還困難区域と同様の減少傾向から避難指示区域外と同様の減少傾向に近づいていることが分かる。避難指示区域外では、比較的早い時期において、放射性セシウムの物理減衰から計算した線量率比に対して空間線量率の下がり方が大きい。これは、立入制限を受けておらず車両の往来が多く、事故後早い時期から除染も開始されているためと考えられる。これに対して除染特別地域の指定を受けた市町村では、平成 24 年～平成 25 年にかけて除染計画が策定されたのちに除染作業が本格的に開始されたため、空間線量率の下がり始めた時期が避難指示区域外に比べて遅れたと考えられる。なお、平成 25 年 9 月の環境省報告⁵によれば、除染特別地域に指定されている避難指示区域の大半の市町村での除染進捗状況（実施率）は、田村市（避難指示区域外）、檜葉町（平成 27 年 9 月避難指示解除）、川内村（平成 28 年 6 月避難指示解除）を除き 25%以下（平成 25 年 7 月末時点）と低い。前述の、避難指示解除準備区域や居住制限区域において空間線量率の減少が加速しているのは、避難指示区域内での除染作業が進められた結果と考えられる。また、平成 28 年度 2 回目の第 13 次走行サーベイからの 1 年間に着目すると、表-2 に示すように、避難指示区域の区域間での差はほとんどなく、平成 28 年度までに除染がほぼ終了している避難指示区域外で空間線量率の減少が最も遅いことが分かる。

4. まとめ

⁴ 全国総合開発計画、国土利用計画、国土形成計画などの国土計画の策定や推進の支援のために、国土交通省が国土に関する様々な情報を整備、数値化したデータのこと。100m メッシュ単位に地図記号や衛星画像の色調から判断し 11 種類の項目に分類されている。

⁵ 環境省「除染の進捗状況の総点検について（お知らせ）」<http://www.env.go.jp/press/files/jp/23009.pdf>

第14次及び第15次走行サーベイを実施し第1次走行サーベイからの空間線量率の変化傾向を調べ、現状における空間線量率の状況や変化傾向を把握した。現状では、福島第一原発から80 km圏内や栃木県北東部の一部を除き、0.2 μ Sv/h未満の地域がほとんどを占めている状況であった。

平成23年度の第1次走行サーベイに対する平成29年度の第15次走行サーベイでの合計線量率比は、放射性セシウムの物理減衰から計算した線量率の減少率に対してほぼ3割であった。

空間線量率の減少は土地利用状況に影響を受け、森林においては減少が遅く、建物用地においては減少が早い傾向が見られた。避難指示区域の内外で空間線量率の経時変化を比較した結果、初期の段階では避難指示区域外で空間線量率の減少が最も早い、平成26年度以降、避難指示解除準備区域や居住制限区域において空間線量率の減少が加速し、平成28年度2回目の第13次走行サーベイからの1年間では、避難指示区域の区域間での差はほとんどなく、避難指示区域外で空間線量率の減少が最も遅いことが分かった。

表-1 第1次走行サーベイに対する合計線量率比（第1次とその他各走行サーベイで共通する100mメッシュにおける合計線量率の変化率）の推移（合計線量率は天然放射性核種による空間線量率寄与を差し引いて評価。合計線量率比及び物理減衰の（ ）内数値は、それぞれの第13次に対する比率）

走行サーベイ 測定時期	第2次	第3次	第4次	第5次	第6次	第7次	第8次
メッシュ数	19,484	12,677	33,494	27,717	34,262	32,382	29,770
経過日数 ¹	191	287	465	533	763	899	1,134
合計線量率比	0.66	0.62	0.49	0.41	0.35	0.31	0.23
物理減衰	0.88	0.82	0.74	0.71	0.62	0.57	0.51
走行サーベイ 測定時期	第9次	第10次	第11次	第12次	第13次	第14次	第15次
メッシュ数	30,951	29,957	30,368	23,857	23,857	23,857	23,857
経過日数 ¹	1,260	1,500	1,631	1,865	1,987	2,226	2,349
合計線量率比	0.20	0.17	0.15	0.12	0.12 (1.0)	0.11 (0.92)	0.098 (0.83)
物理減衰	0.48	0.43	0.41	0.37	0.36 (1.0)	0.33 (0.93)	0.32 (0.90)

1) 第1次走行サーベイからの経過日数。それぞれ、測定期間の中間で計算している。

表-2 避難指示区域内外での第13次走行サーベイに対する合計線量率比（合計線量率は天然放射性核種による空間線量率寄与を差し引いて評価。）

走行サーベイ測定時期	第14次	第15次
区域外	0.93	0.87
避難指示解除準備区域	0.92	0.81
居住制限区域	0.89	0.80
帰還困難区域	0.90	0.80

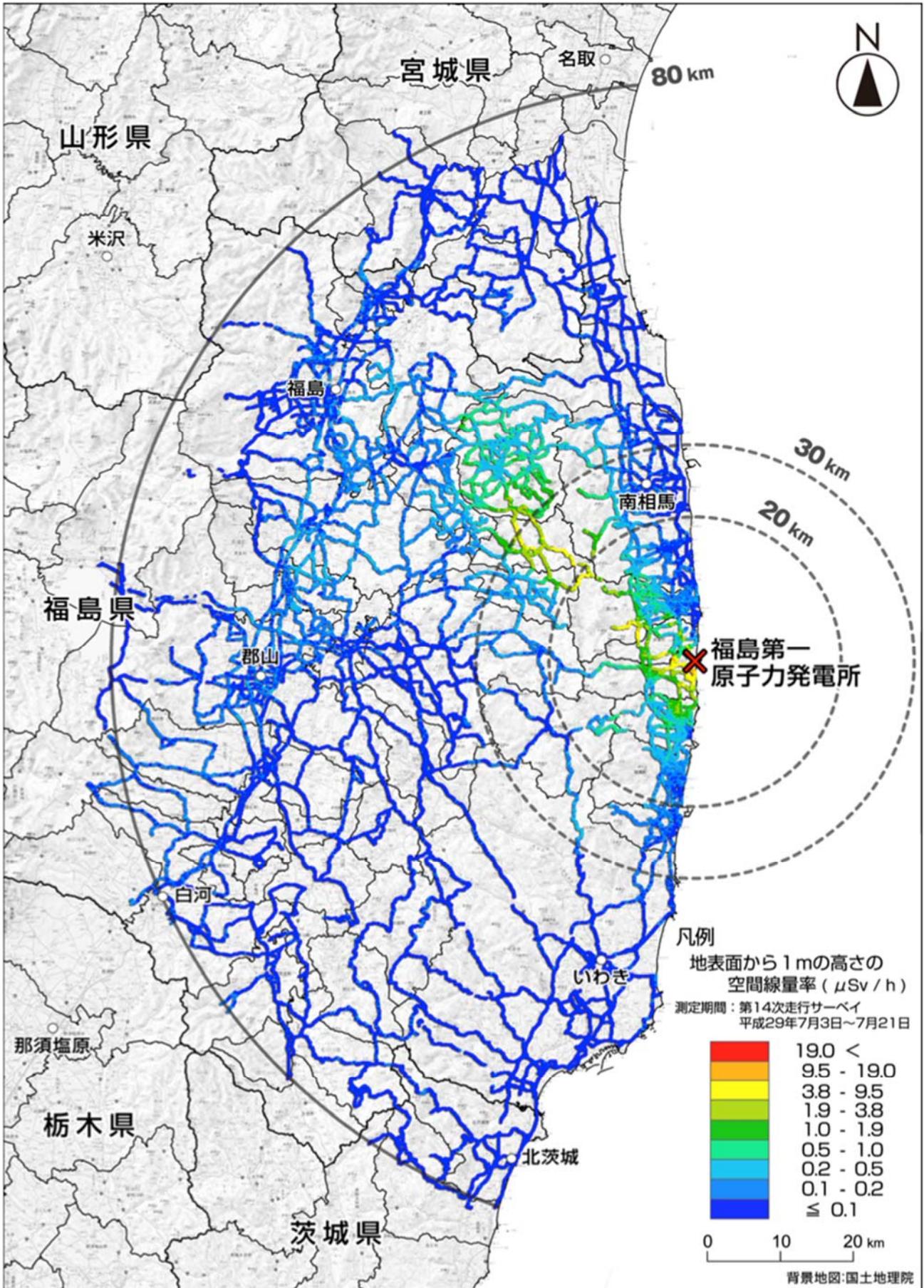


図-1 第14次走行サーベイの測定結果
 (測定データは天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

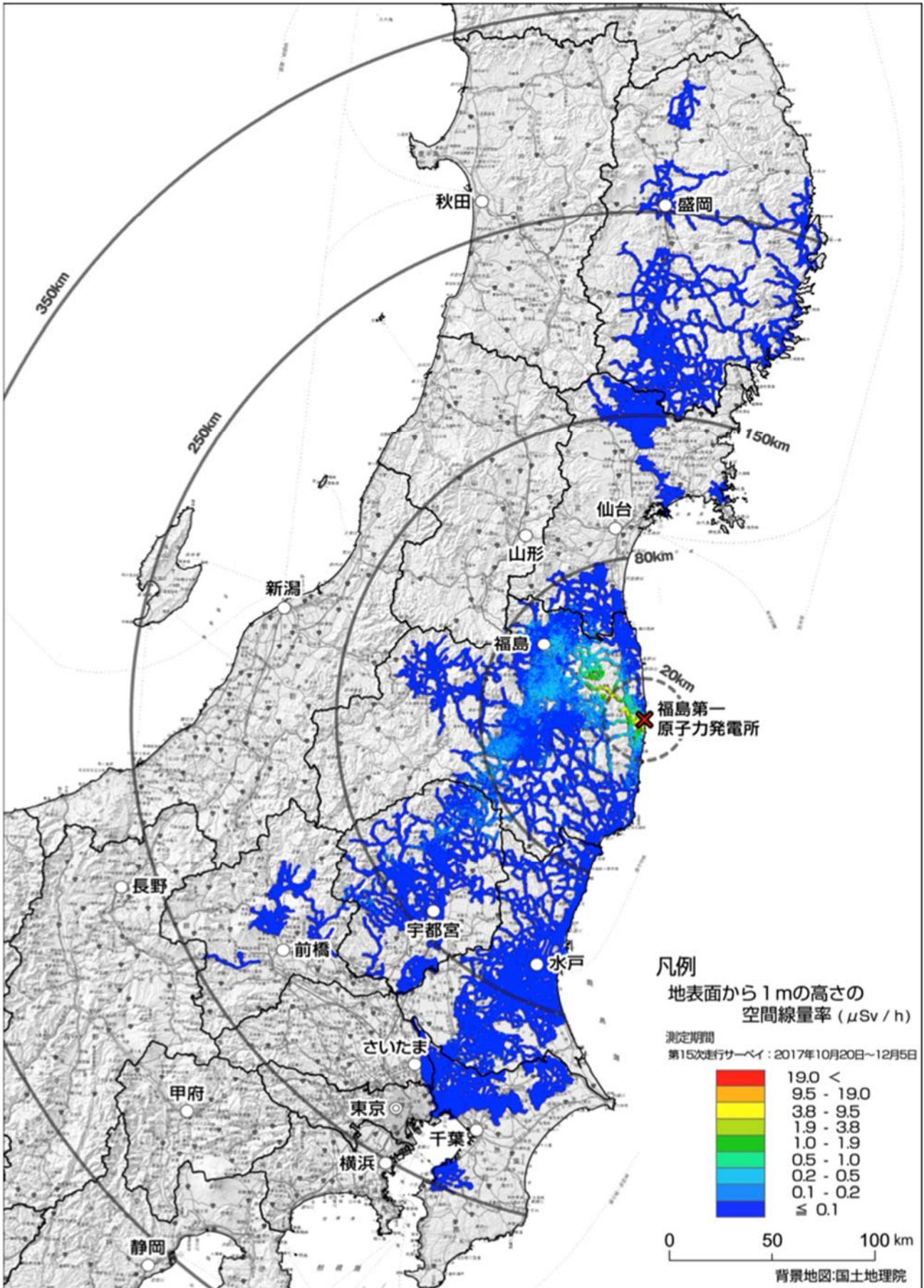


図-2(a) 第15次走行サーベイの測定結果(全域)
 (測定データは天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

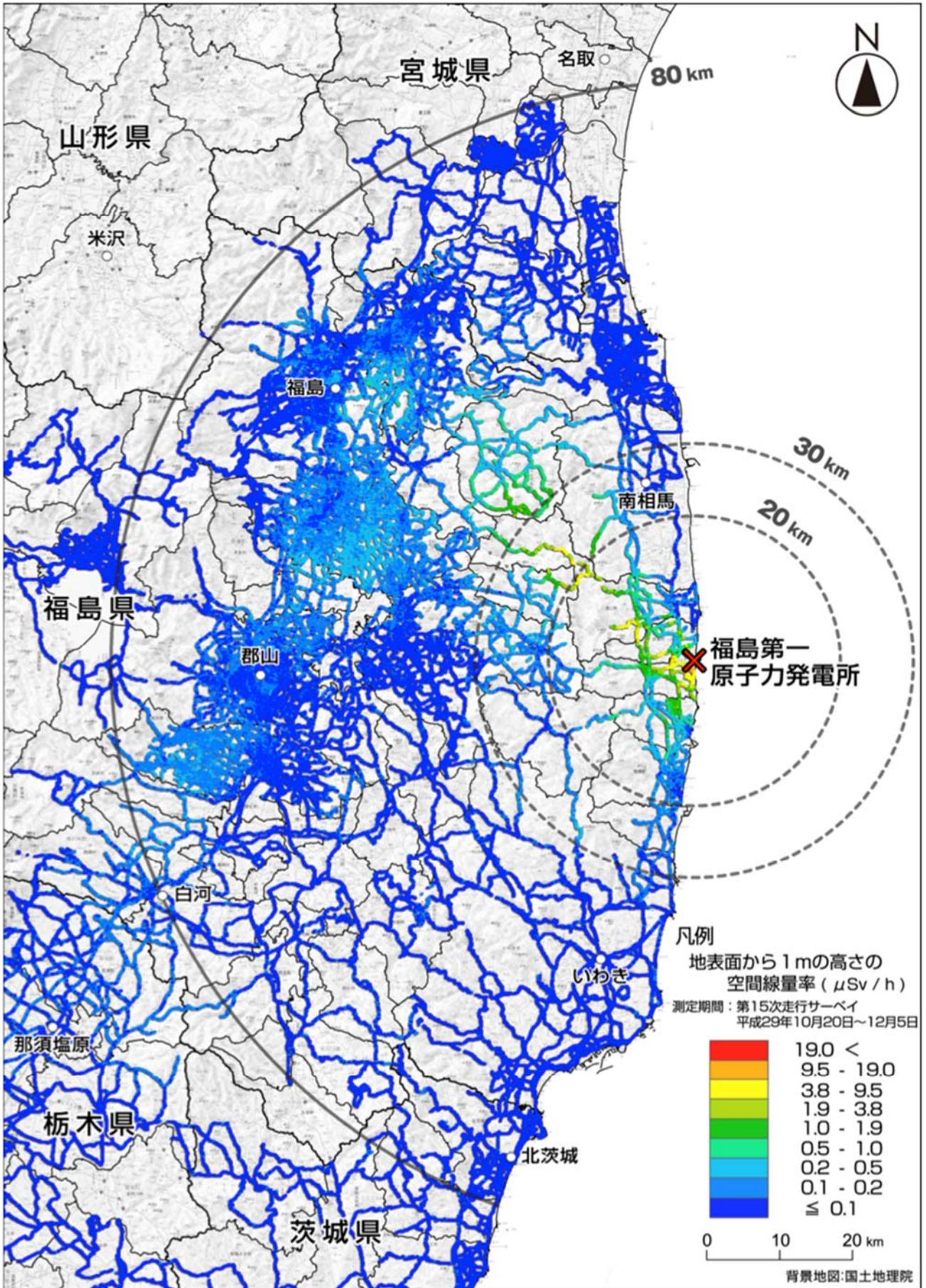


図-2(b) 第15次走行サーベイの測定結果 (80km 圏内中心)
 (測定データは天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

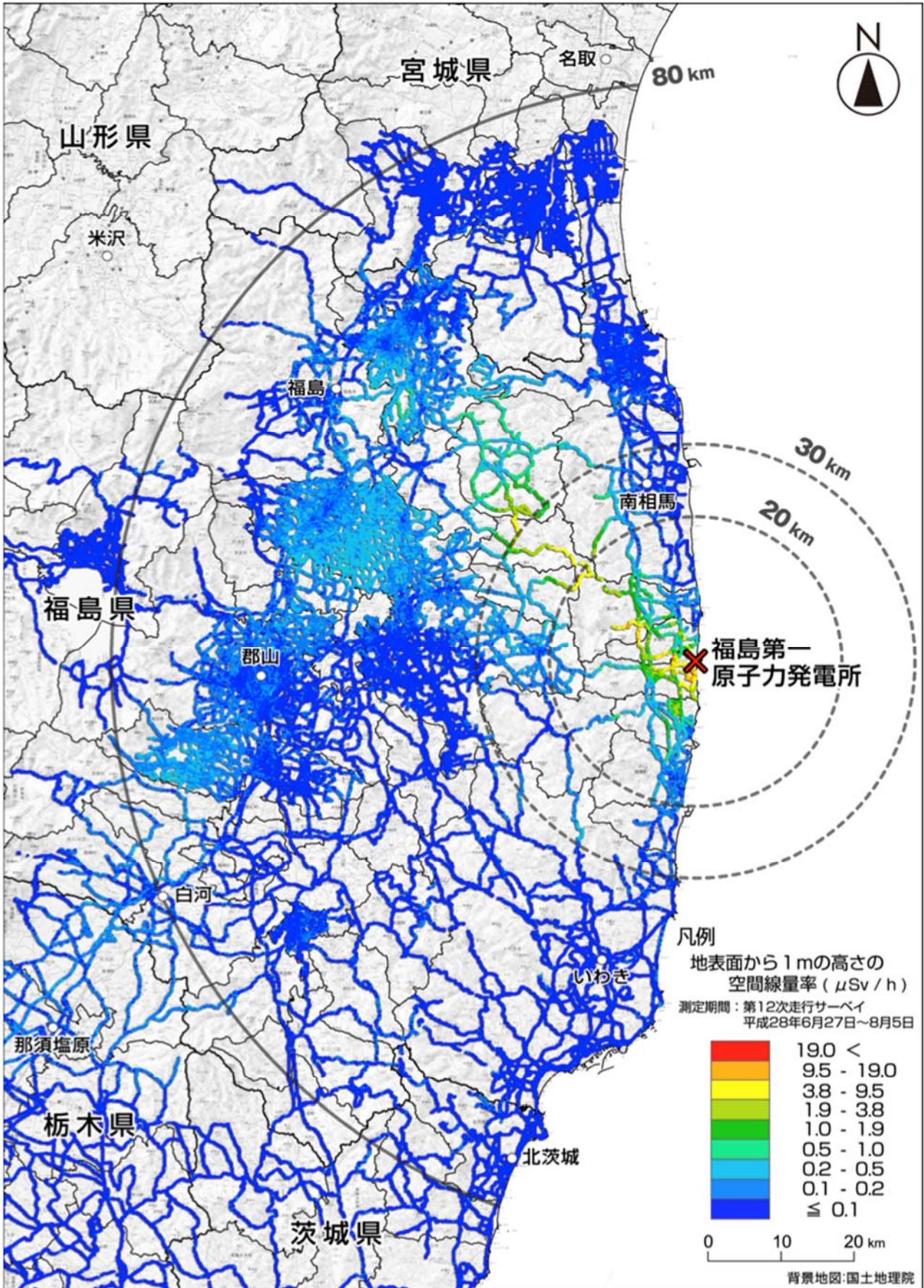
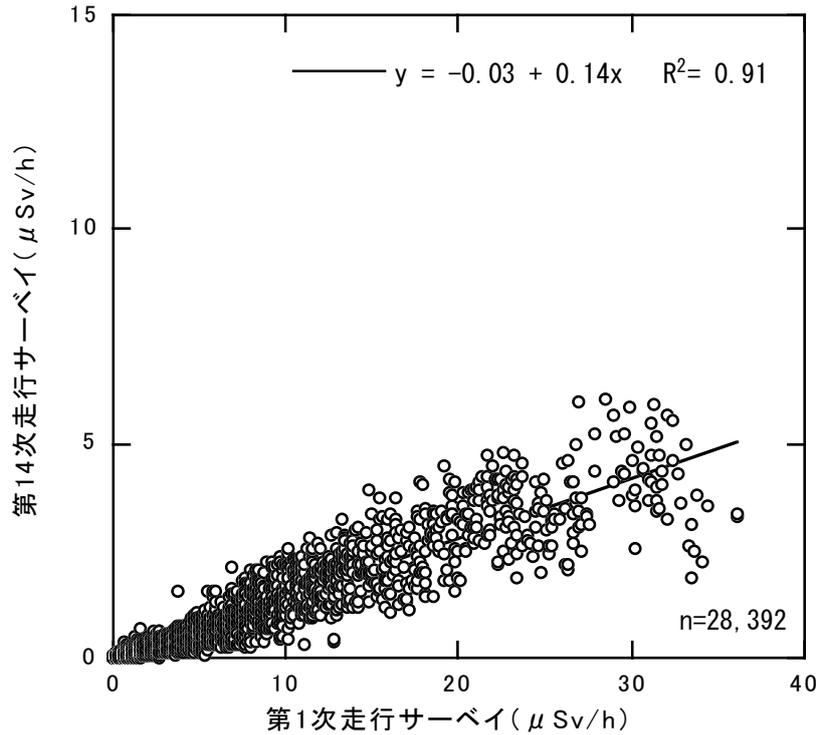
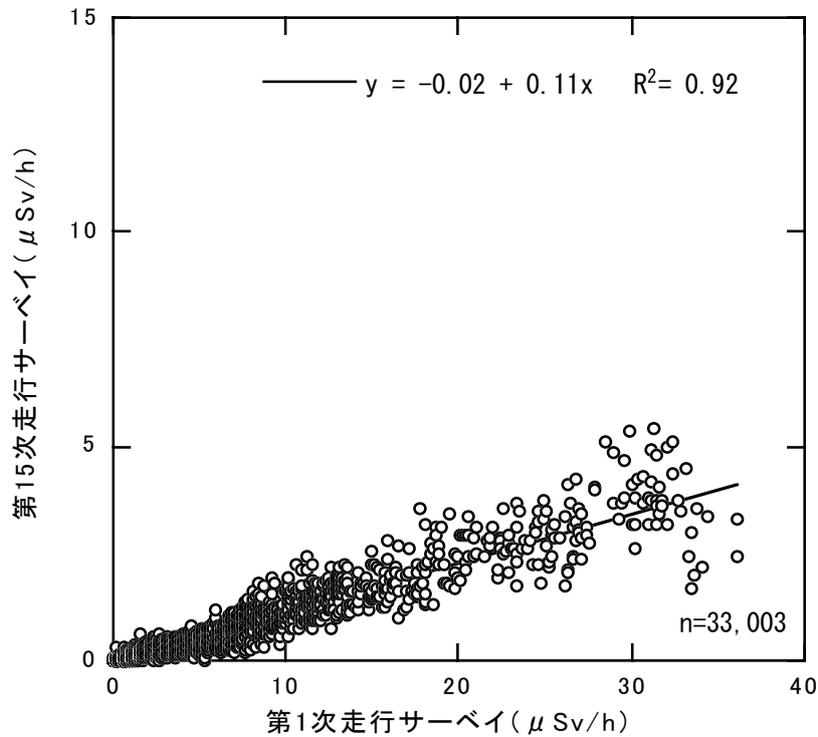


図-3 第12次走行サーベイの測定結果 (80km 圏内中心)
 (測定データは天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)



(a) 第1次走行サーベイと第14次走行サーベイ



(b) 第1次走行サーベイと第15次走行サーベイ

図-4 第1次走行サーベイ結果との相関（福島第一原発から80 km圏内を対象とし、測定データは天然放射性核種による空間線量率寄与を含まない。）

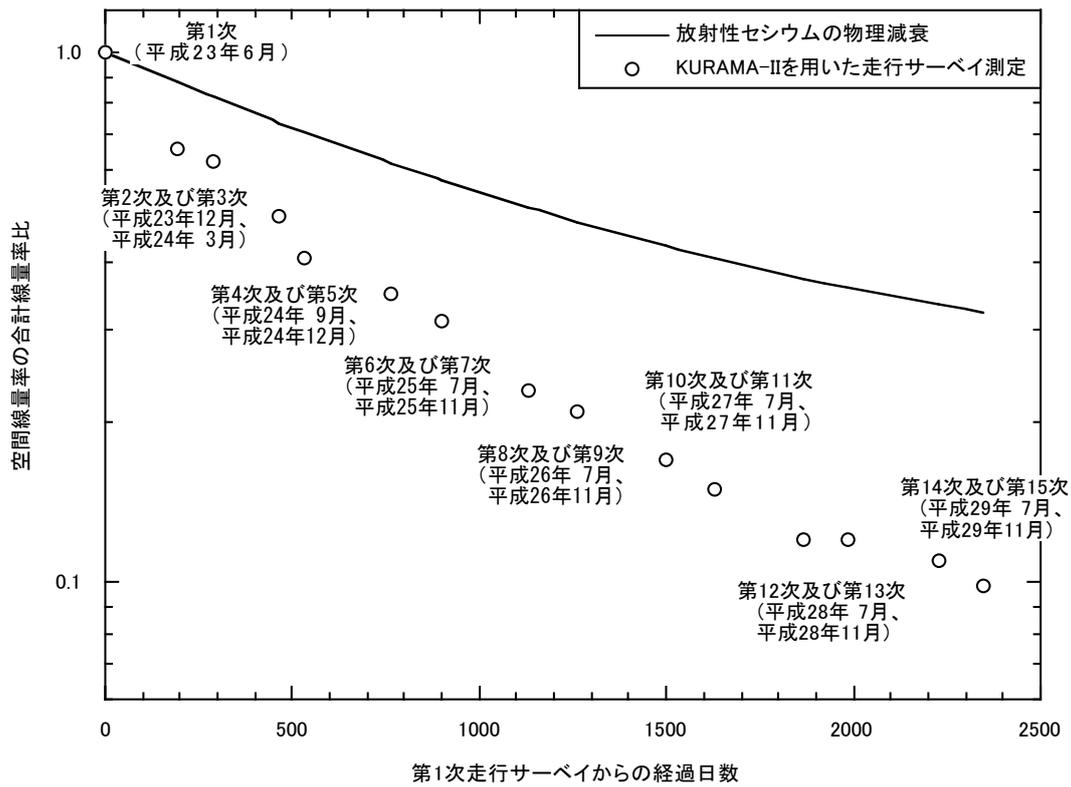


図-5 福島第一原発から 80 km 圏内での第 1 次走行サーベイに対する第 2 次以降の走行サーベイの合計線量率比の経時変化
 (放射性セシウムの物理減衰による経時変化を同時に示した。合計線量率は天然放射性核種による空間線量率寄与を差し引いて評価。)

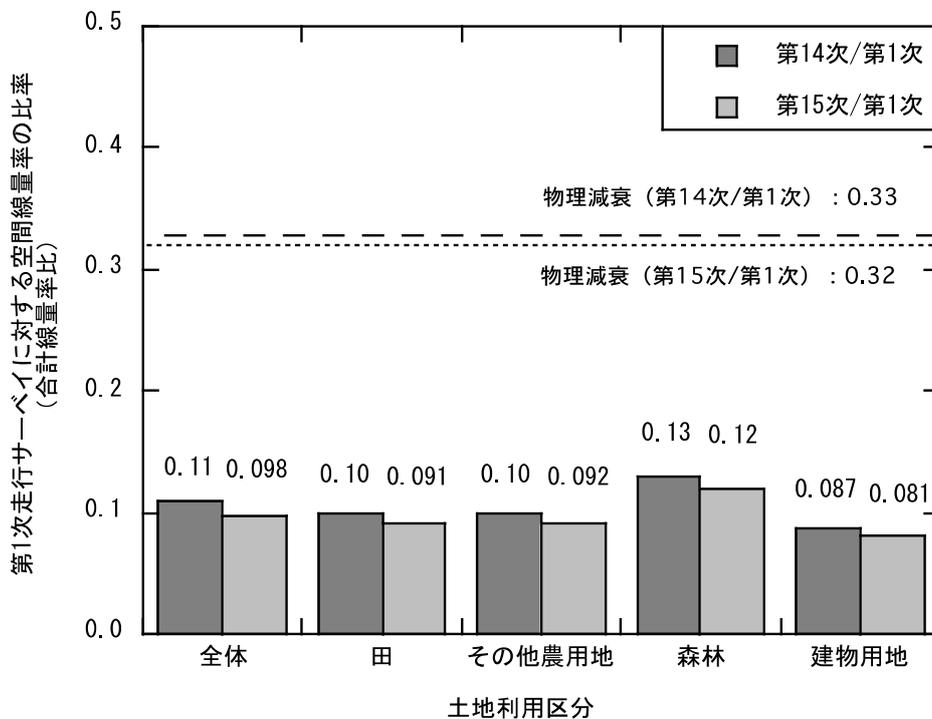


図-6 福島第一原発から 80 km 圏内での走行サーベイの土地利用状況の区分ごとの合計線量率比 (第 1 次走行サーベイに対する第 14 次及び第 15 次走行サーベイ)
 (合計線量率は天然放射性核種による空間線量率寄与を差し引いて評価。)

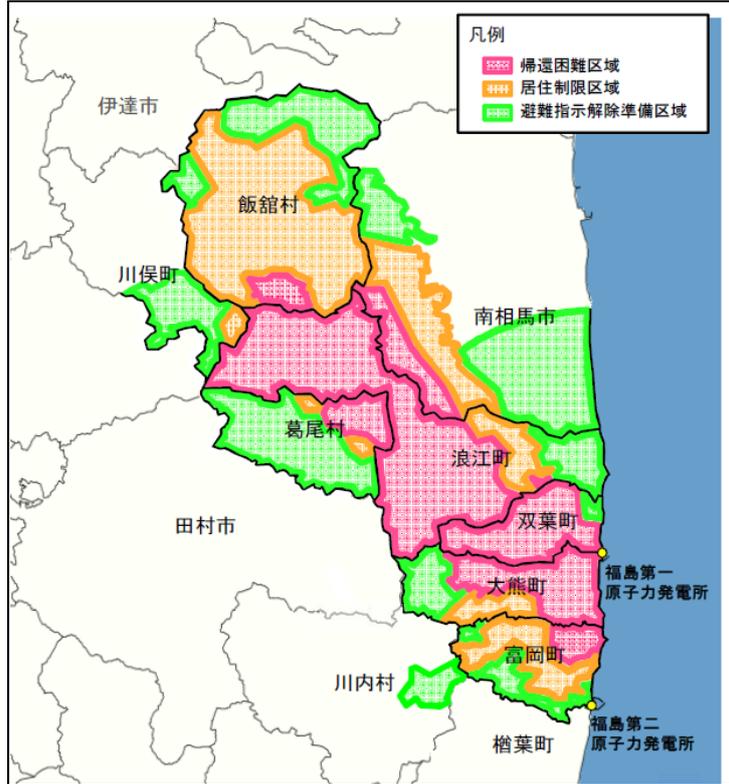


図-7 避難指示区域の概念図(平成 27 年 9 月 5 日時点)

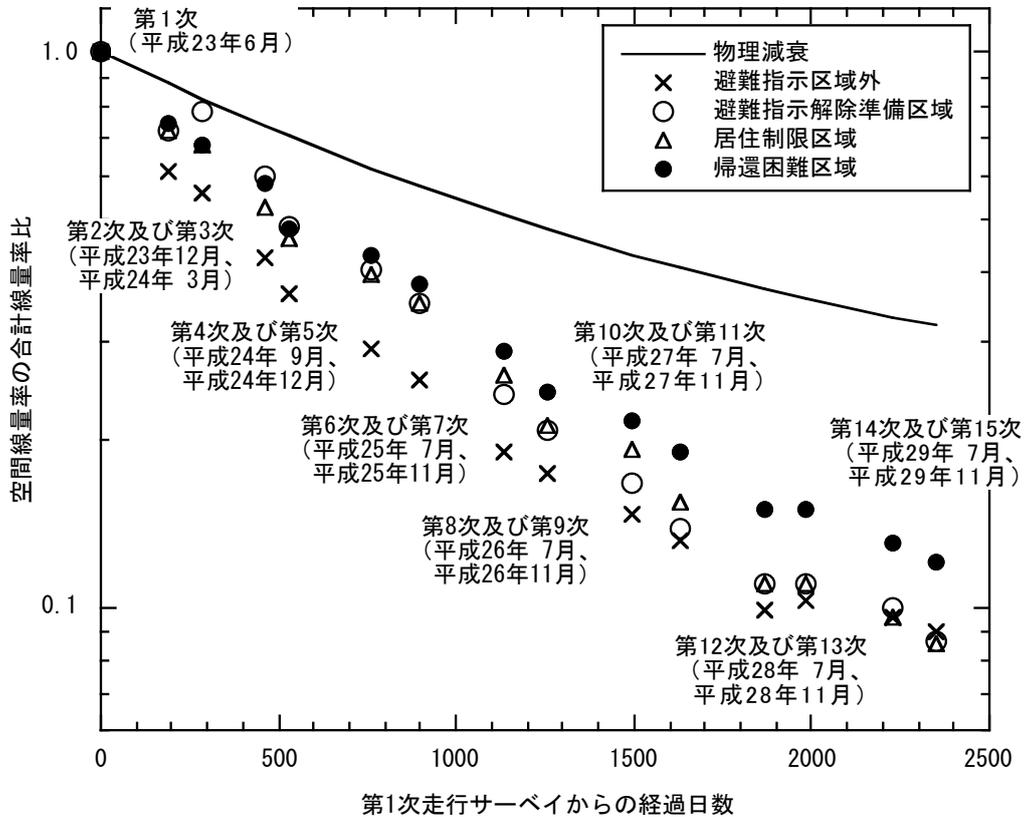


図-8 避難指示区域内各区域及び避難指示区域外（福島第一原発から 80 km 圏内）での空間線量率の経時変化比較（第 1 次から第 15 次走行サーベイ）
 （合計線量率は天然放射性核種による空間線量率寄与を差し引いて評価。）

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

1. 調査目的

福島第一原発から放出された放射性セシウムの中における 2 次元的な分布状況を詳細に調査し、この結果を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ため、KURAMA-II システムを背負って歩行しながら空間線量率を測定する。

平成 24 年度までの調査結果から、走行サーベイにより測定した道路上の空間線量率の経時的な減少傾向は、人為的なく乱の少ない平坦な開かれた土地においてサーベイメータで測定した空間線量率（平坦地上定点における空間線量率）の減少傾向に比べて顕著に大きいことが明らかになっているが、より住民が生活する環境に近い空間線量率の変動傾向を確認することが必要である。そのような詳細なデータ取得には人間が生活する環境を歩いて測定データを収集する歩行サーベイが適しているため、平成 25 年度から本調査を開始した。

本測定では、様々な土地利用状況が混在する平坦地と道路の間の自動車が走行できない地域も含めて広範囲の測定が可能な歩行サーベイ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間して、生活経路における空間線量率分布の特徴を明らかにすることを目指した。

2. 調査内容

(1) 調査期間：平成 29 年 10 月 30 日～12 月 1 日

(2) 調査地域

福島第一原発から 80 km 圏内の地域を 1 km×1 km に分割したメッシュで、走行サーベイの測定ルートが含まれていて平坦地上定点の空間線量率の測定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調査対象のメッシュ（調査箇所）を選んだ。調査箇所数は 600 箇所であった。（図-1）

(3) 調査方法

KURAMA-II システムとバッテリーを測定者が背負い、歩きながら 3 秒毎に測定した空間線量率データと GPS による位置情報を、携帯電話回線を通してデータ収集用サーバに 30 秒毎に転送した。測定者が KURAMA-II システムを背負うことにより、空間線量率の測定高さは概ね地上 1 m 高さになる。（図-2）

現在の空間線量率への寄与の大部分が放射性セシウムによるものであり、測定期間中の放射性セシウムの物理減衰に伴う空間線量率の減少は 1%程度と評価され測定機器の有する誤差よりも低いことを考慮して、空間線量率測定値を一定の日付に揃える減衰補正を行わず、測定した日の測定結果をそのまま使用した。また、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、歩行地域を 20 m 四方のメッシュに分割し、そのメッシュ内に含まれる各測定箇所での空間線量率の値を平均してメッシュの代表値とした。

3. 結果と考察

歩行サーベイにおいては、自動車の入り込めない住宅周辺や樹木の間、田畑の周辺などの場所、人の往来、清掃、農耕などの生活・産業活動の行われる場所において測定を行った。したがって、歩行サーベイによる空間線量率の測定は住民が生活時間の多くを費やす生活環境における空間線量率の様態に比較的近いと考えられる。このことを前提に、走行サーベイ

による空間線量率の測定結果または平坦地上定点の空間線量率の測定結果と歩行サーベイによる測定結果とを比較して、これら3者の関係を把握し、生活環境における空間線量率推定のための基礎となる情報を得た。平坦地上定点と歩行サーベイの測定場所の位置関係(例)を図-3に示す。また、今年度の測定結果を含めた歩行サーベイの過去の測定結果を図-4に示す。なお、自然放射線の寄与(バックグラウンド)は含んでいる。

(1) 平坦地上定点の空間線量率測定結果と歩行サーベイの測定結果の比較

平坦地上定点の空間線量率と生活経路における空間線量率の関係を把握するため、今年度の歩行サーベイ測定結果と平坦地上定点での測定結果¹を比較した。1km×1kmのメッシュごとに、メッシュ内に入る歩行サーベイ結果の平均値と平坦地上定点での空間線量率結果について、散布図及び相対偏差のヒストグラムにより比較した。ここで相対偏差は、下記のように定義する。

$$\text{相対偏差} = \frac{(\text{平坦地上定点での測定結果} - \text{歩行サーベイによる線量率平均値})}{\text{歩行サーベイによる線量率平均値}}$$

区間幅を0.10としたヒストグラムを図-5の左下に示した。この相対偏差の平均値及び標準偏差は 0.23 ± 0.46 であった。即ち、平坦地上定点での測定結果は歩行サーベイの結果に比べ平均的に空間線量率が高いことが確認された。

(2) 走行サーベイの測定結果と歩行サーベイの測定結果の比較

道路上の空間線量率と生活経路における空間線量率の関係を調べるために、今年度の走行サーベイの測定結果(2017年7月)²と歩行サーベイの測定結果を比較した。比較は1km×1kmのメッシュごとに、メッシュ内に入る走行及び歩行サーベイの結果について、(1)の場合と同様に、散布図及び相対偏差のヒストグラムにより行った。ここで相対偏差は、下記のように定義する。

$$\text{相対偏差} = \frac{(\text{走行サーベイによる線量率平均値} - \text{歩行サーベイによる線量率平均値})}{\text{歩行サーベイによる線量率平均値}}$$

区間幅を0.10としたヒストグラムを図-5の右下に示した。この相対偏差の平均値及び標準偏差は -0.15 ± 0.21 であった。即ち、走行サーベイの結果は歩行サーベイの結果に比べ平均的に低いことが確認された。以上のように、今年度の測定結果から、空間線量率は高い方から平坦地上定点、生活経路(歩行サーベイ)、道路(走行サーベイ)の順であることが確認できた。

(3) 線量率の大きさ別の評価

(1)の平坦地上定点の空間線量率測定結果と歩行サーベイの測定結果との比較について、歩行サーベイでの空間線量率が $0.1-1.0 \mu\text{Sv/h}$ と $1.0 \mu\text{Sv/h}$ 以上の場合に分けて同様の評価を行った。(図-6)その結果、 $0.1-1.0 \mu\text{Sv/h}$ のデータでは相対偏差の平均値が 0.17 ± 0.51 であるのに対して、 $1.0 \mu\text{Sv/h}$ 以上では 0.57 ± 0.69 であった。

¹ 本報告書(“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)の「人為的なく乱の少ない平坦な開かれた土地における空間線量率分布測定」

² 本報告書(“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)の「走行サーベイによる道路及びその近傍における空間線量率の測定」

このように平坦地上定点の空間線量率が高いメッシュのほうが平坦地上定点の空間線量率と生活経路上の空間線量率の差が大きいことが分かる。これは、平坦地上定点の空間線量率に比べて生活経路上の空間線量率の減衰が速いため、空間線量率が比較的高い地域においては平坦地上定点と生活経路上の線量率の差が比較的大きくなっているためと考えられる。

(4) 相対偏差の経時変化

定点サーベイを基準として、走行サーベイと歩行サーベイの相対偏差の経時変化について比較した。ここでの相対偏差は以下のように定義する。

$$\text{相対偏差} = \frac{(\text{歩行or 走行サーベイによる線量率平均値} - \text{平坦地上定点での測定結果})}{\text{平坦地上定点での測定結果}}$$

図-7 に相対偏差の経時変化を示す。歩行サーベイの相対偏差のプロットの線形近似式が負の傾きを示すとおり歩行サーベイの相対偏差は経年的な減少を示し、時間の経過とともに定点サーベイとの差が広がっていることが分かる。一方、走行サーベイは、2011年から2012年にかけて大きく減少し、その後は変化が少ないように見える。これは、走行サーベイの測定対象である車道上の放射性セシウムの降雨や交通往来による除去が事故後早い時期に大きく進んだと示唆される。一方、歩行サーベイによる歩道上あるいは道路脇での測定では道路上の放射性セシウムからの放射線に加え道路周辺の様々な土地利用状況の土地に沈着した放射性セシウムからの放射線の影響も加味されるため異なる経時変化傾向を示していると考えられる。今後も定期的な測定と本観点からの評価が必要である。

4. まとめ

福島第一原発から80 km圏内を中心に平成29年10月から12月にわたりKURAMA-IIシステムを用いて空間線量率の測定を行い、生活経路における空間線量率分布の特徴を検討した。本調査全体を通じては、歩行サーベイ、走行サーベイ及び定点サーベイの3つの異なる手法でそれぞれ異なる環境の空間線量率を測定している。

3つの測定方法による広域で平均した空間線量率測定値の大小関係は、大きい順に、平坦地上定点、歩行サーベイ、走行サーベイであることが確認できた。また、高線量率の場所では平坦地上定点と歩行サーベイによる線量率の差が大きいことが確認された。さらに、定点サーベイを基準として、走行サーベイと歩行サーベイの相対偏差の経時変化を比較したところ、歩行サーベイは経年的に漸減し、走行サーベイは事故後初期に大きく減少しその後は大きな変化がない。すなわち、道路上に沈着した放射性セシウムの多くは事故後早い段階で除去されたことが示唆される。

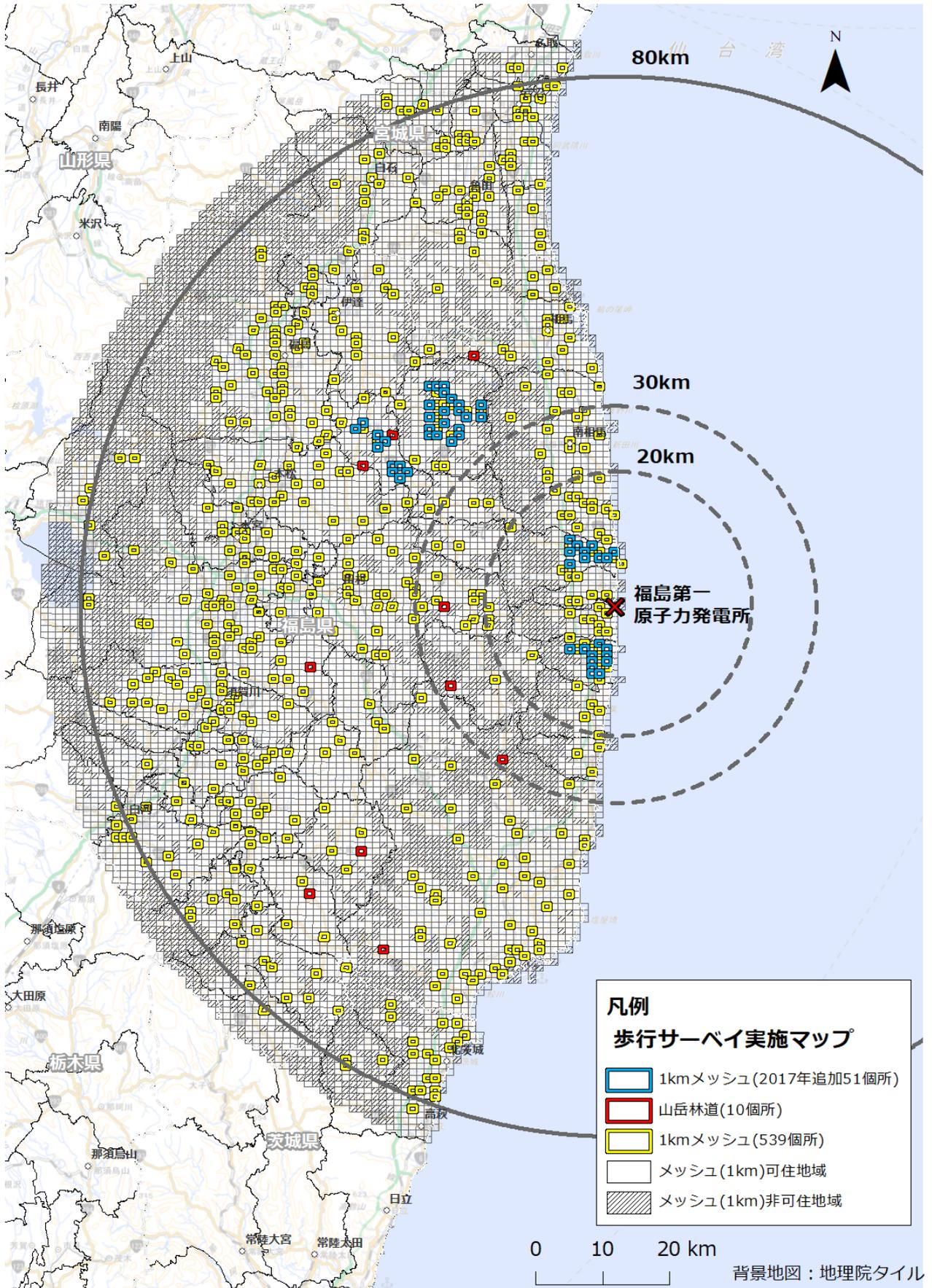


図-1 平成29年度調査における歩行サーベイによる空間線量率の測定箇所（メッシュ）
（赤枠は非可住区域の測定箇所（メッシュ））



図-2 歩行サーベイ測定時の装備

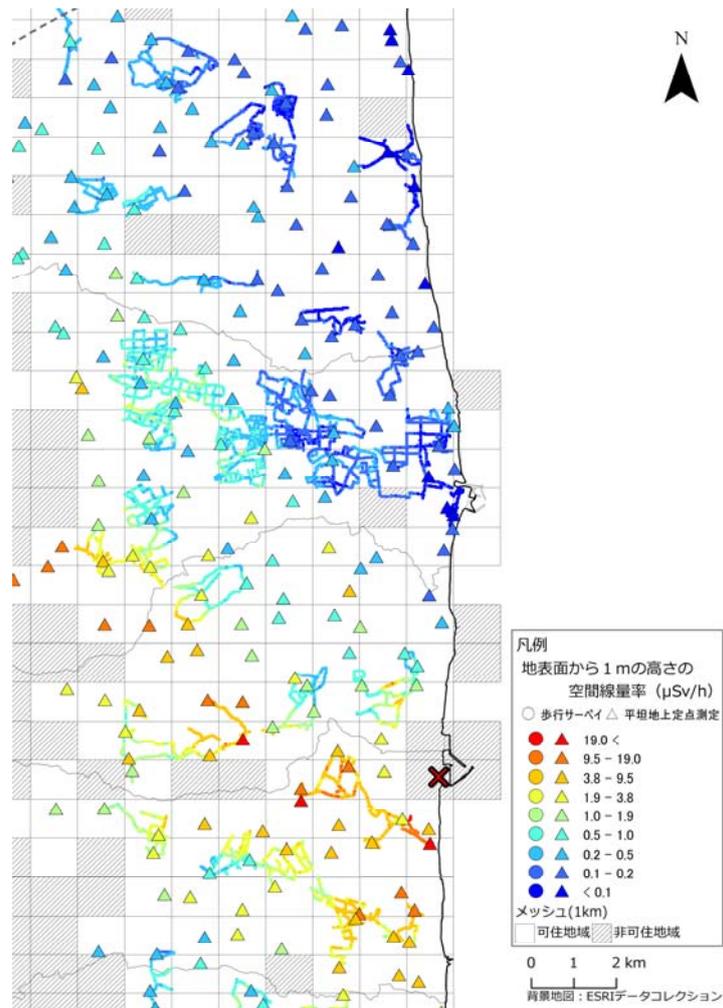


図-3 歩行サーベイ測定結果例 (△は定点測定結果)

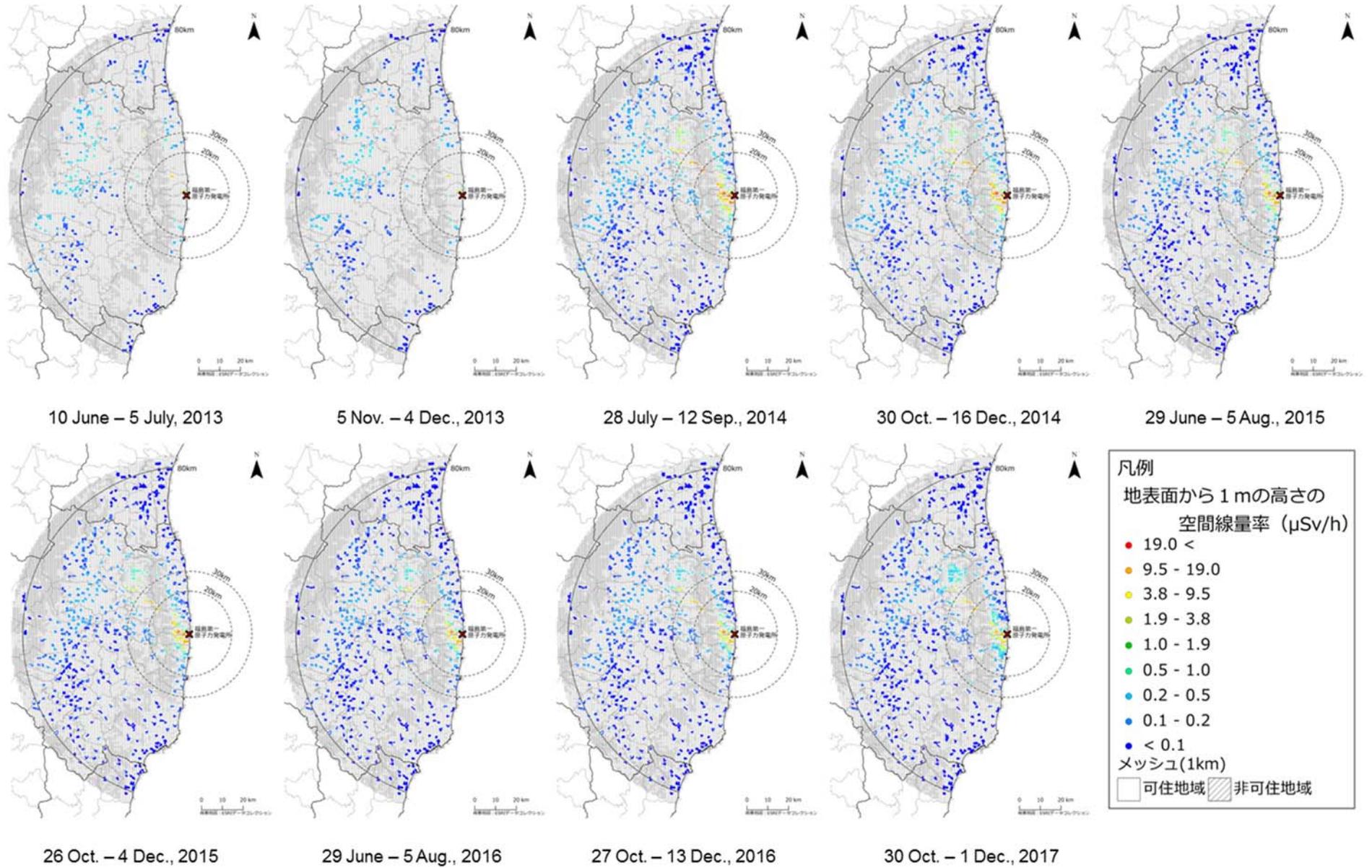


図-4 歩行サーベイ測定結果

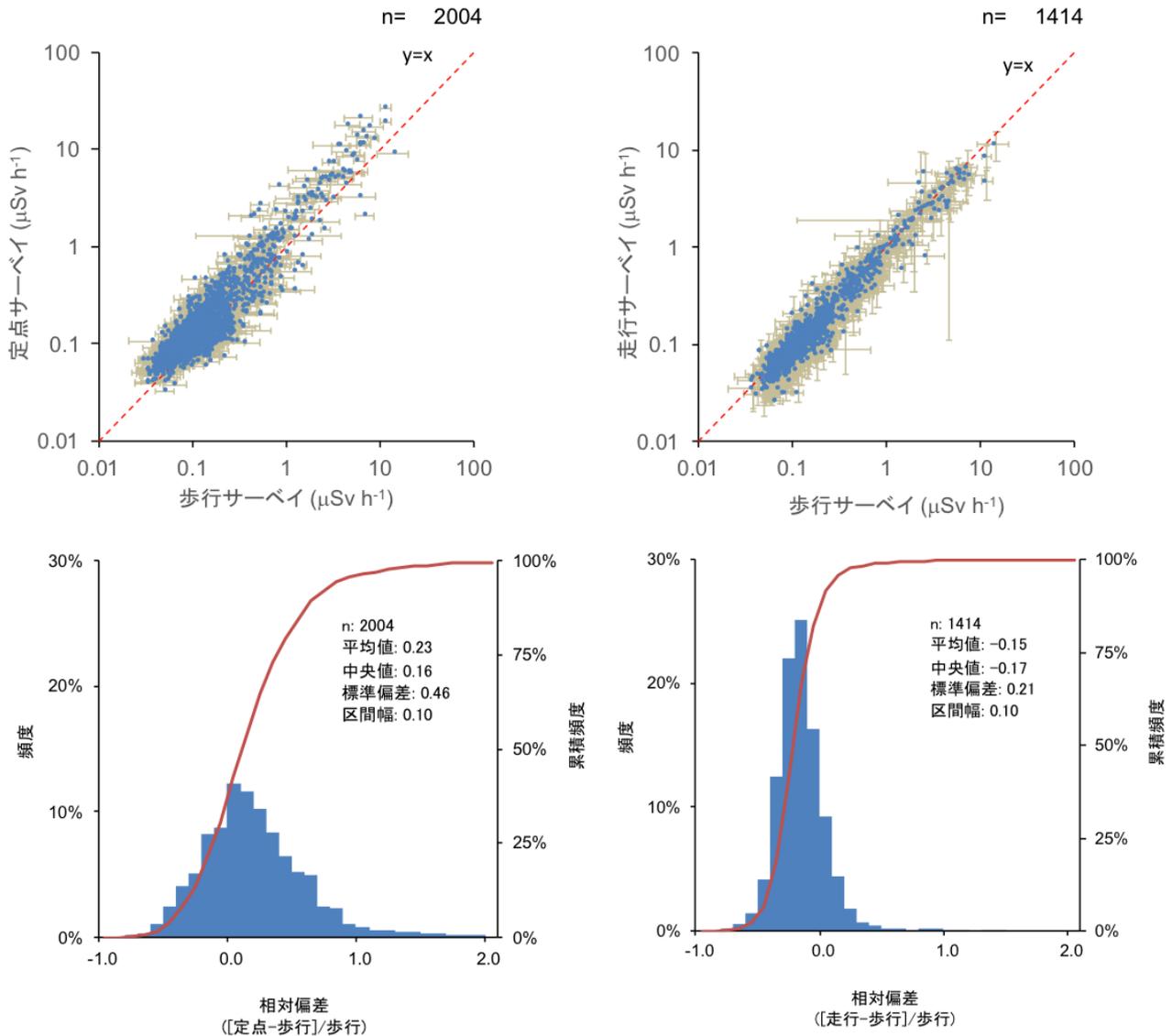


図-5 散布図と相対偏差のヒストグラムによる歩行サーベイと定点サーベイの比較(左)及び歩行サーベイと走行サーベイの比較(右)

(左図の誤差棒は1kmメッシュに含まれる歩行サーベイの単位データ(20mメッシュ平均値)の標準偏差、右図の誤差棒は、1kmメッシュに含まれる歩行サーベイの単位データの標準偏差(X軸方向)及び走行サーベイの単位データ(100mメッシュ平均値)の標準偏差(Y軸方向)を示す。

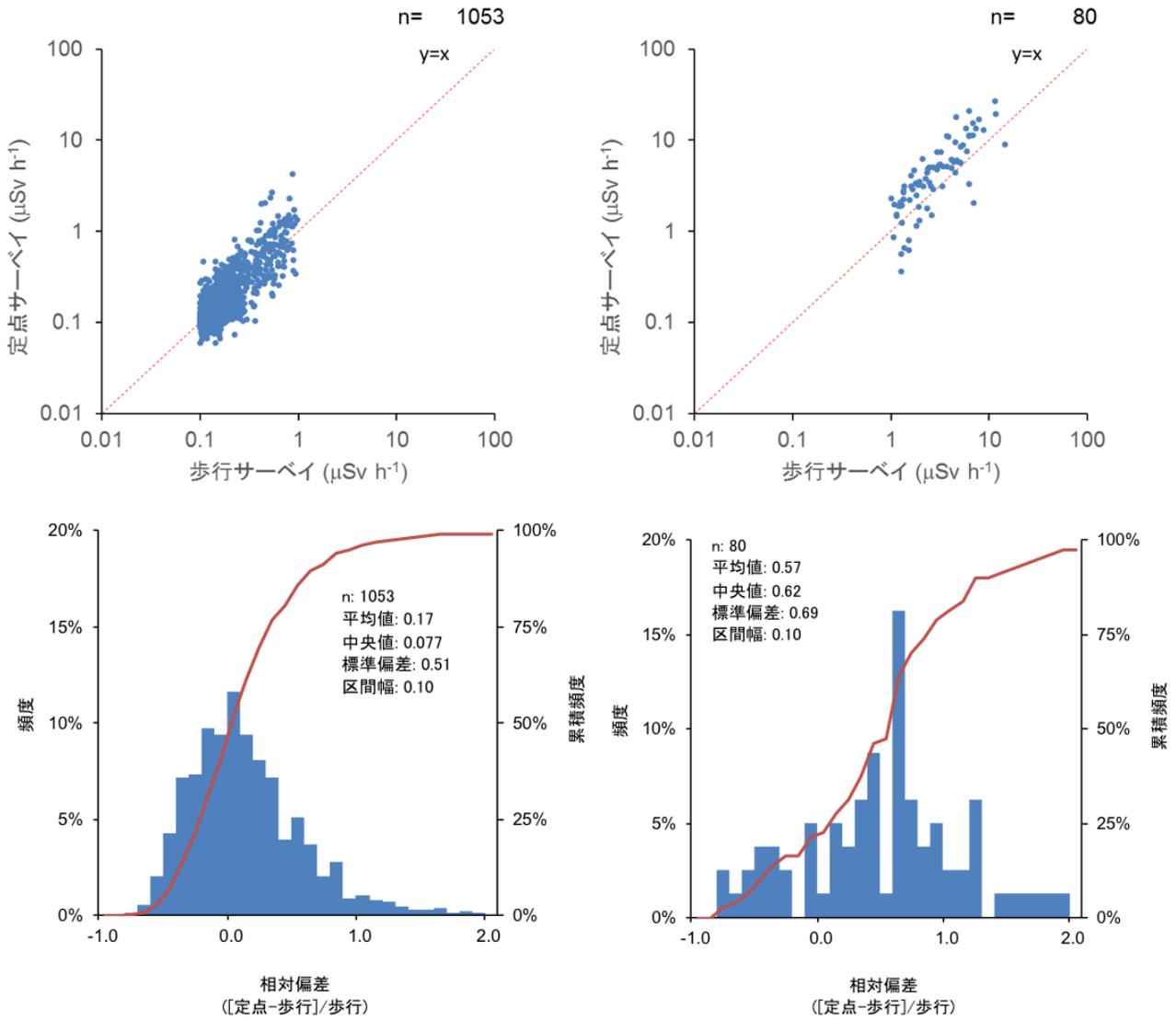


図-6 歩行サーベイと定点サーベイの比較
 左は定点サーベイでの空間線量率が $0.1-1.0 \mu\text{Sv/h}$ の場合、右は $1.0 \mu\text{Sv/h}$ 以上の場合

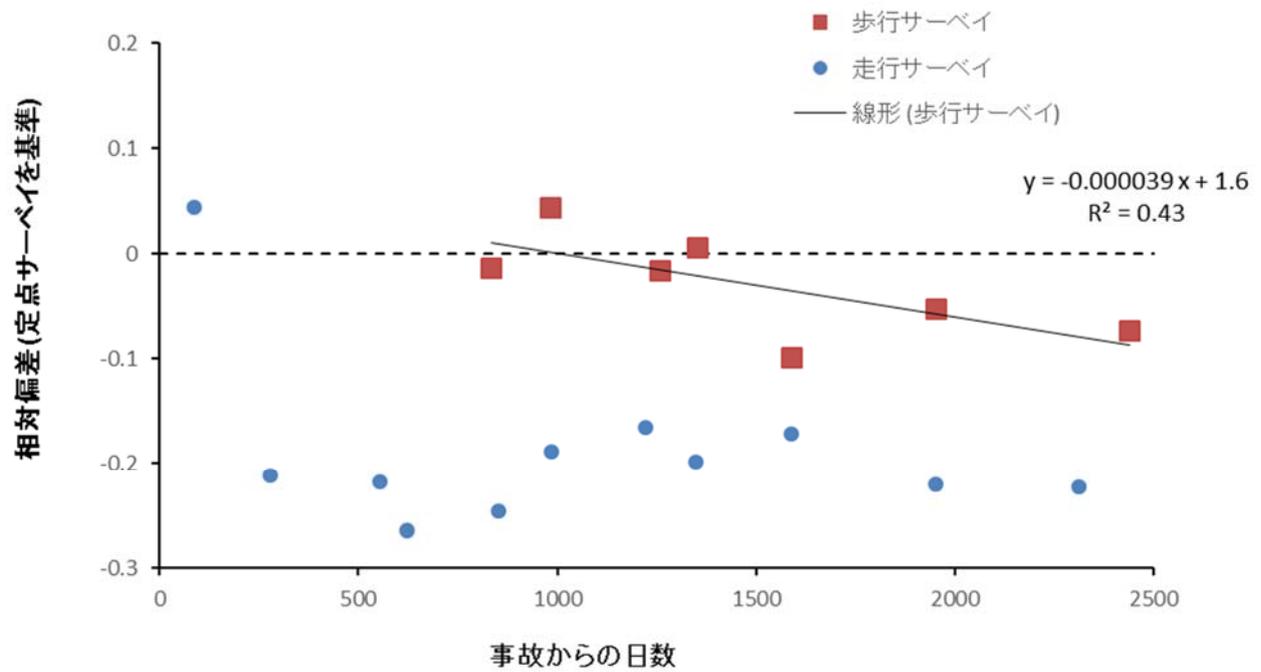


図-7 定点サーベイを基準とした歩行サーベイと走行サーベイの相対偏差の平均値の経時変化（点線は相対偏差が0、直線及び数式は定点サーベイを基準としたときの歩行サーベイの相対偏差の回帰直線及びその線形近似式をそれぞれ示す。）

人為的なく乱の少ない平坦な開かれた土地における 空間線量率分布測定

1. 調査目的

福島第一原発から 80 km 圏内を中心にサーベイメータを用いて空間線量率の測定を行い、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。

2. 調査内容

(1) 調査期間

平成 29 年 9 月調査：平成 29 年 8 月 28 日～10 月 10 日

(2) 調査箇所

福島第一原発から 80 km 圏内の地域を 1 km×1 km のメッシュに分割し、福島第一原発事故以前にも人が居住しなかった地域（非可住区域）を除いて各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 6,568 箇所において測定を実施した。測定箇所を図-1 の左図に示す。

(3) 調査内容の詳細

校正履歴の明確な信頼のおけるサーベイメータ (NaI (TI) 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 ($\mu\text{Sv/h}$) を測定した。時定数 10 秒で 5 回読取った値の平均値を空間線量率とした。GPS を用いて測定箇所の位置情報を取得し、これらの情報を基に福島第一原発から 80 km 圏内の詳細な空間線量率マップを作成した。

3. 結果と考察

(1) 空間線量率マップ

今回の調査における空間線量率の測定結果を図-1 の右図に示す。ただし、天然放射性核種による空間線量率も含んでいる。平成 23 年 6 月調査から平成 29 年 9 月調査までの 11 の時期の空間線量率マップを図-2 に示す。高い空間線量率を示す赤や黄色で示される箇所が減少してきていることがわかる。

(2) 空間線量率の長期的変化

平成 23 年 6 月調査から平成 29 年 9 月調査までの約 75 ヶ月間の空間線量率の変化を図-3 に示す。平成 23 年 6 月調査を基準とした各時期の調査における同一メッシュの測定結果の比を算出し、その平均値と標準偏差を各時期における相対的な空間線量率として示したものである。図には平成 23 年 6 月以降の深度方向への放射性セシウムの移行を考慮しない物理減衰のみの場合に期待される減衰曲線を赤色で、また、物理減衰に加えて平成 23 年以降の緩衝深度 β の変化¹も考慮した時に期待される空間線量率の減衰曲線を青色で示した。また、全ての地点を含めた評価結果を青色の×印で、除染の実施を確認した箇所及び地面の状況が変化したと判断された箇所を除外した場合の評価結果を黄色の○印で示す。比較にあたっては、天然放射性核種からの空間線量率への寄与が $0.05 \mu\text{Sv/h}$ と仮定し、この寄与分を全ての空間線量率の測定値から一律に差し引いた値を用いている。これらより、空間線量率は放

¹ 本報告書（“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）の「2.2 土壌中の放射性セシウムの深度分布調査」を参照のこと。

放射性セシウムの物理減衰よりも速く減少していることがわかる。

一方、除染等が実施された箇所を含めた全ての地点での評価のほうが除染箇所等を除いた評価に比べて空間線量率の減少が早く、除染等の影響が現れていると考えられる。全データと除染箇所等を除いた場合の差について、すべての時期においてt検定を行った結果、事故後27ヵ月後(平成25年6月調査)以降について有意差が確認された。

また、除染箇所を除外した場合の空間線量率の変化は、経年的に変化する緩衝深度 β を考慮した放射性セシウムの物理減衰曲線に沿っており、かく乱の少ない平坦地上で測定する空間線量率の減少の要因としては物理減衰と緩衝深度の増大に伴う土壌による遮へい効果が支配的と考えられる。

図-4に、平成23年6月調査以降10回の調査について福島第一原発から80km圏内を対象として空間線量率の範囲ごとにその線量率範囲に入る測定箇所数が全体に占める割合を示した。経時的に $0.1\ \mu\text{Sv/h}$ 以下の箇所が増加し、 $0.2\ \mu\text{Sv/h}$ を超える箇所が減少してきていることが明示されている。平成23年6月調査から今回の調査(平成29年9月調査)における全体に占める割合の変化を見てみると、 $0.2\ \mu\text{Sv/h}$ 以下の箇所が15.0%から78.1%へ、 $0.5\ \mu\text{Sv/h}$ 以下の箇所が53.7%から94.0%へ増加している。なお、この評価では天然放射性核種からの空間線量率への寄与を含む。

図-5には、図-4で示した線量率範囲に入る測定箇所数が全体に占める割合について平成27年9月5日時点の避難指示区域内外ごとに評価した結果を示す。図-5上段のグラフには避難指示区域内の結果を示す。避難指示区域内の測定箇所数は全測定箇所の1割程度とサンプル数が少ないものの、区域内では $1.0\ \mu\text{Sv/h}$ 以下の箇所が経時的に増加してきており、平成26年度調査以降は $1.9\ \mu\text{Sv/h}$ を超える箇所が減少してきていることがわかる。一方、図-5下段に示す区域外の結果をみると、図-5の空間線量率が高い部分を除いた分布形状となっており、図-4と同じ傾向が観察される。

なお、80km圏内全体の空間線量率の経時変化については1.4章でも議論する。

4. まとめ

福島第一原発から80km圏内を中心に平成29年9月にサーベイメータを用いた空間線量率の測定を約6,500箇所で行い、空間線量率の測定結果を示したマップを作成した。これにより平成29年現在の空間線量率の詳細な分布状況を把握することができた。80km圏内の測定点のうち78%が $0.2\ \mu\text{Sv/h}$ 以下であった。経時的変化の調査から、事故後27ヵ月後(平成25年6月調査)以降のデータでは、全データと除染等箇所を除いたデータでは全データの方が有意に低く、除染の効果が表れているものと考えられた。また、かく乱の少ない平坦地上で測定する空間線量率の変化は、除染等人為的なかく乱を除くと、物理減衰と緩衝深度の増大に伴う土壌による遮へい効果によると考えられる。

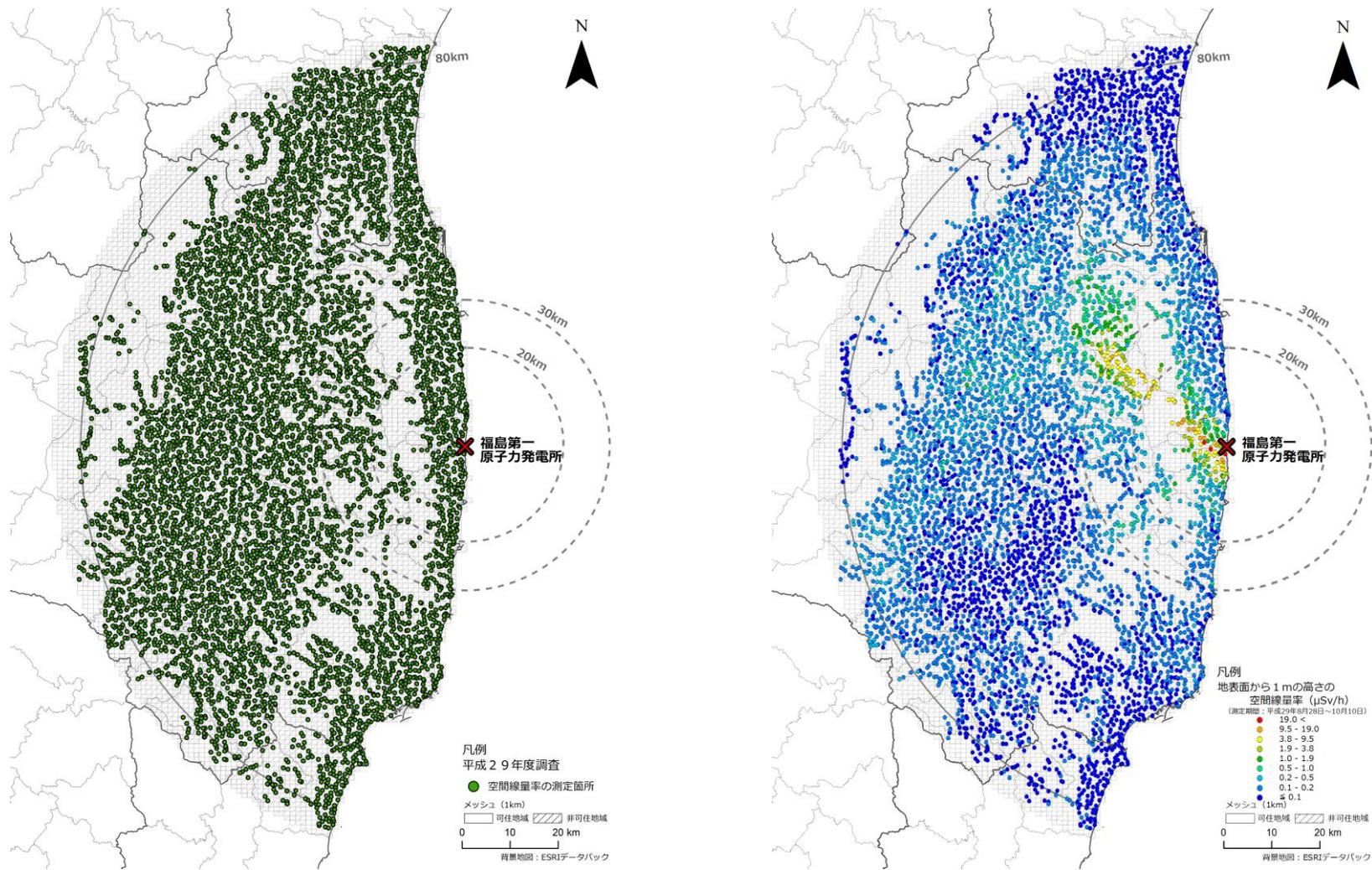


図-1 サurveyメータによる地面から1 m高さの空間線量率の測定箇所及び測定結果
 (測定箇所を左図に、測定結果を右図に示す。測定結果は天然放射性核種による空間線量率への寄与も含む。)
 (平成29年8月28日~10月10日に測定)

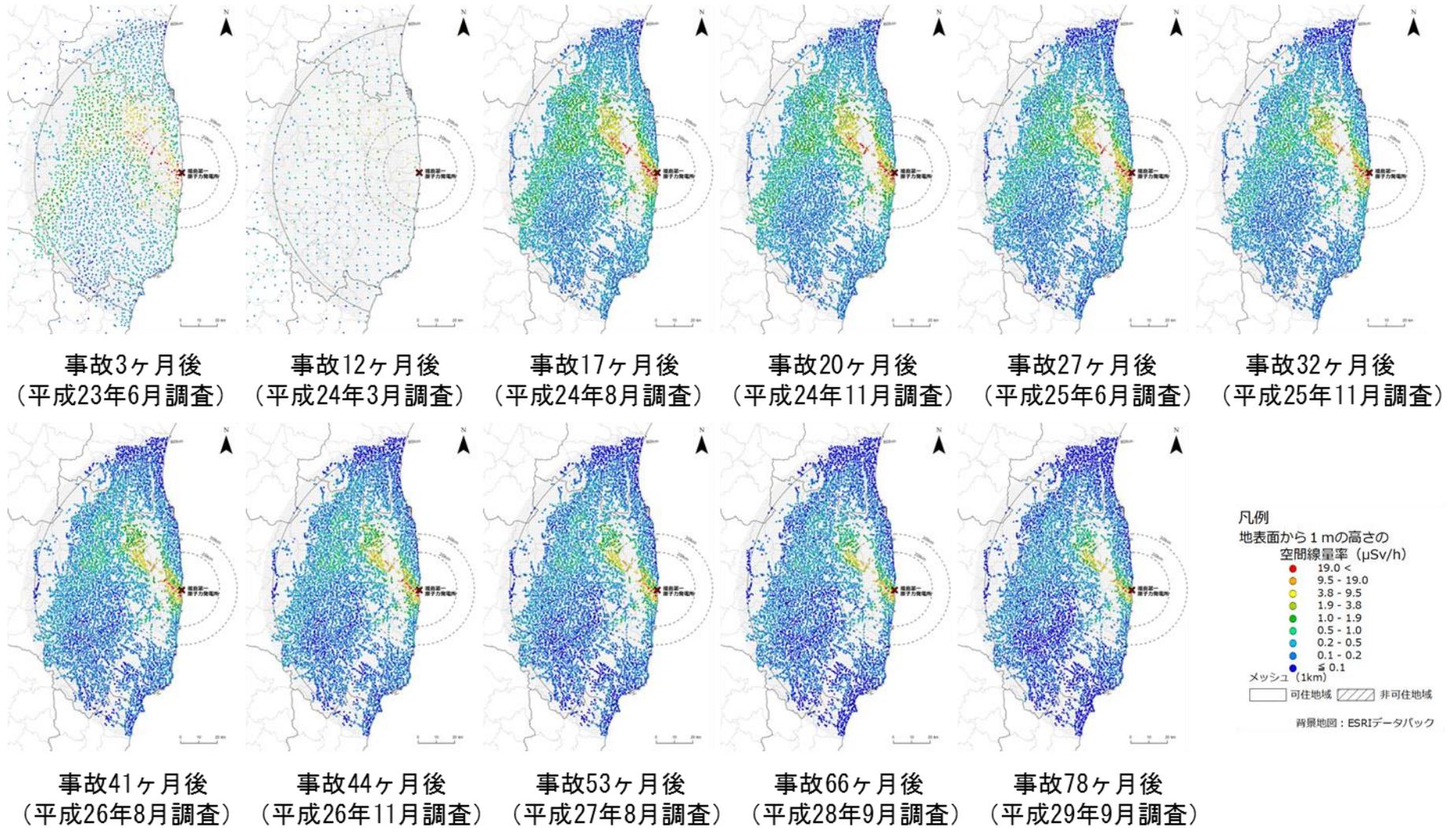


図-2 11の時期の空間線量率マップ
(天然放射性核種による空間線量率への寄与も含む)

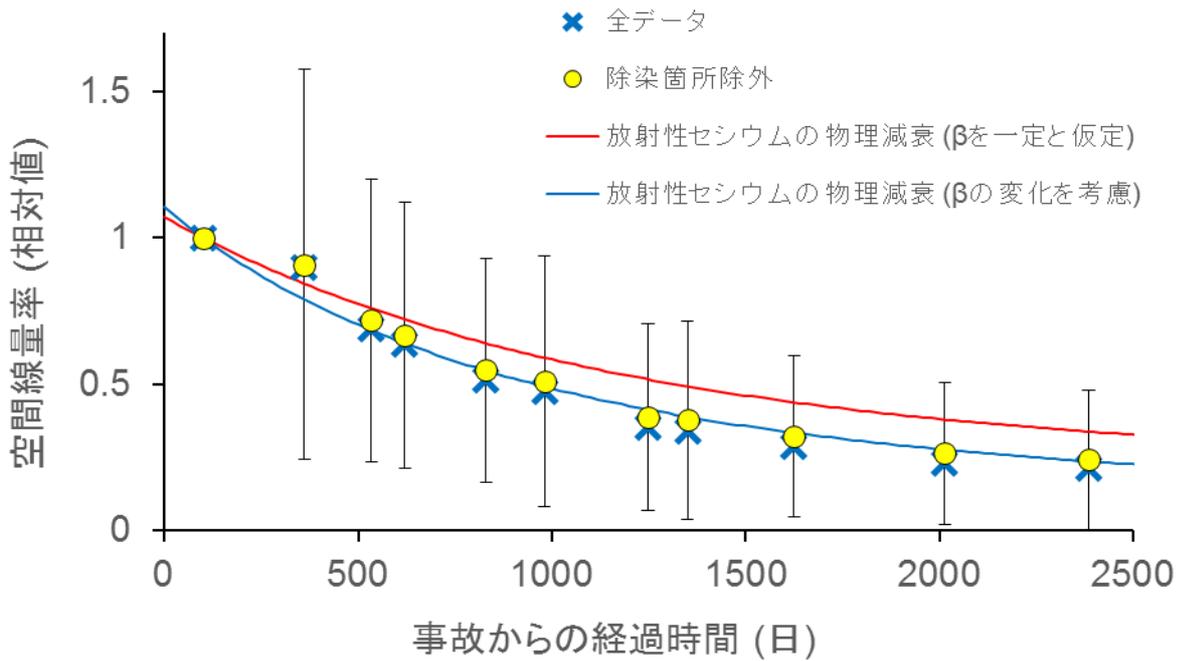


図-3 平成23年6月調査から平成29年9月調査の空間線量率の変化
 (平成23年6月調査を基準とした各調査での測定結果の比の平均値を天然放射性核種からの寄与分を差し引いて比較。誤差棒は除染等箇所を除外した場合の比の標準偏差を示す。)

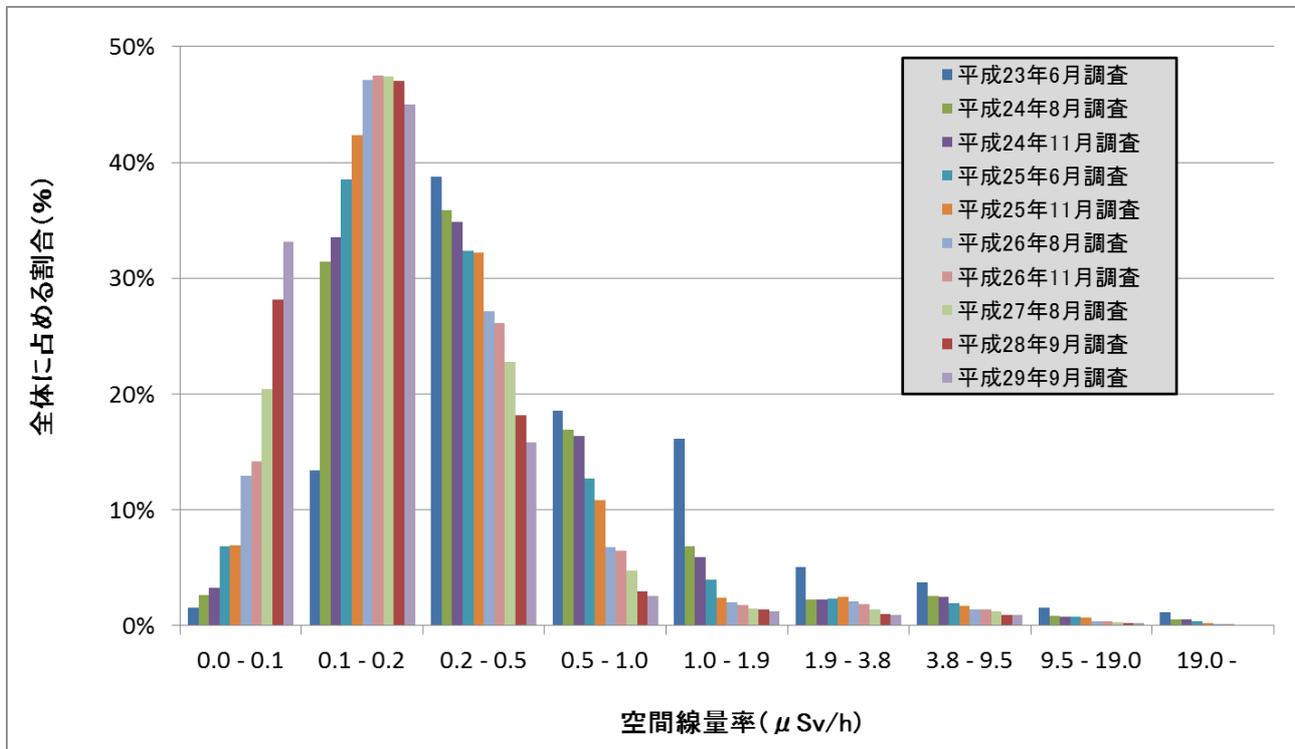


図-4 空間線量率範囲ごとの測定箇所数の分布
 (福島第一原発から80 km圏内を対象とした比較。空間線量率の範囲ごとにその線量率範囲に入る測定箇所数が全体に占める割合を示す。天然放射性核種からの寄与を含む。)

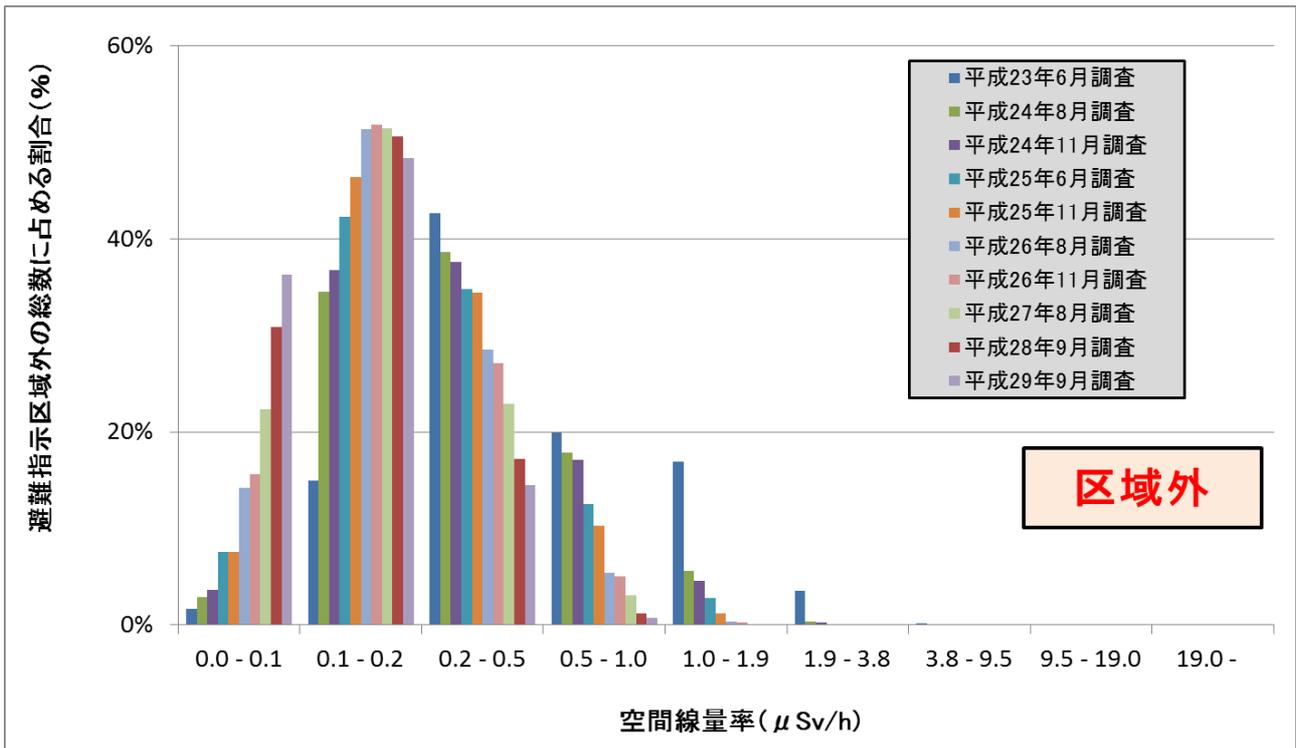
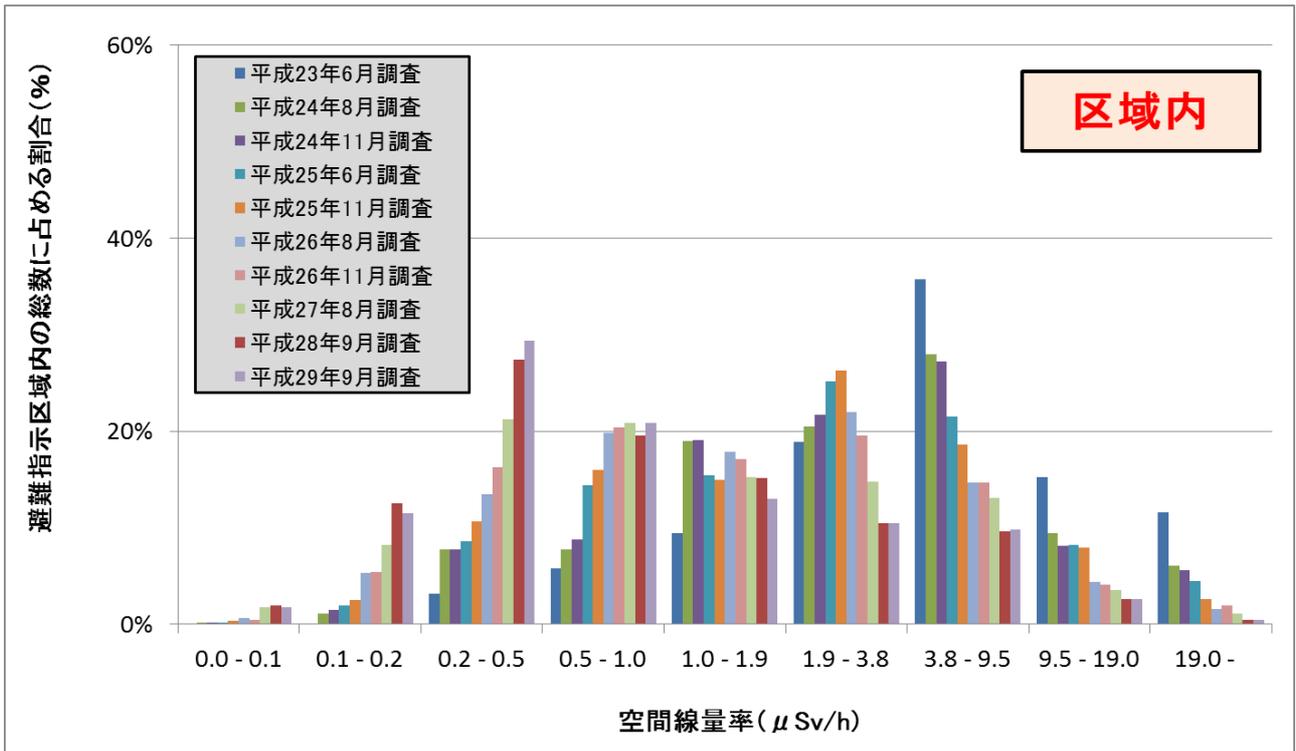


図-5 空間線量率範囲ごとの測定箇所数の分布（避難指示区域内外）
 （福島第一原発から 80 km 圏内を対象とした空間線量率範囲ごとの避難指示区域別の測定箇所数の総数に対する割合。上段は平成 27 年 9 月 5 日時点の避難指示区域に基づく区域内の分布、下段が区域外の分布を示す。天然放射性核種からの寄与を含む。）

東京電力福島第一原子力発電所から 80 km 圏内の 空間線量率の変化傾向

1. 背景

本事業では、空間線量率の測定に 3 つの手法を使用している。

- 1) サーベイメータによる空間線量率測定（定点サーベイ）
- 2) KURAMA-II を搭載した車両による空間線量率測定（走行サーベイ）
- 3) KURAMA-II を用いた人手による空間線量率測定（歩行サーベイ）

本事業で測定されてきたそれぞれの手法による過去の測定結果は、手法毎に空間線量率の変化傾向に関し有用な知見を提供してきたものの、測定手法間の変化傾向の差について詳細な議論はされていなかった。ここでは、異なる手法で取得した測定結果の変化傾向を統一的に解析することによって、東京電力福島第一原子力発電所（以下、発電所）から 80 km 圏内における空間線量率の変化傾向の特徴及び空間線量率の減衰定数について考察する。

2. 評価手法

(1) 対象データ

2011 年から実施している定点サーベイ、走行サーベイ及び 2013 年から開始した歩行サーベイを対象とする。2012 年以降、定点サーベイは 1km メッシュごとに決定した 1 点の測定場所を継続的に測定している。走行サーベイ及び歩行サーベイは、年度ごとに若干測定場所が異なるため、1 km メッシュごとに測定結果を平均し比較した。図-1 に各測定地点のイメージについて示す。なお、各測定手法の詳細については、走行サーベイについては 1.1 章、歩行サーベイについては 1.2 章、定点サーベイについては 1.3 章に詳しい。

(2) 各測定手法の変化傾向の評価方法

メッシュごとにまとめた測定結果は、同地点における最も古い測定結果との比を計算し、全メッシュの平均値及び標準偏差を求めた。測定結果はなるべく放射性セシウムによる空間線量率の変化のみを評価できるように、平均的な天然の放射線核種からの線量率として $0.05 \mu\text{Sv/h}$ を差し引いた後、比の分母となる測定データ（最も古いデータ）が $0.2 \mu\text{Sv/h}$ 以上となる数値のみを採用した。

図-2 に定点サーベイ結果を例に、1 次モニタリングと各次モニタリングの比のヒストグラムを示す。なお、ヒストグラムの広がりから各モニタリング結果のばらつきが評価可能となる。

(3) 測定手法間の相互比較方法と減衰定数

各測定手法間の相互比較を可能とするためには基準を決める必要がある。基準には、事故直後からデータを取得しており、各メッシュの平均的な測定場所（人為的なく乱の少ない平坦地（土壌上））が選定されている定点サーベイの 1 次モニタリングのデータを使用することとした。異なった測定手法間の相互比較においても、天然の放射性核種による線量率の大小の影響をなるべく小さくするため、定点サーベイの 1 次モニタリングのデータが $0.2 \mu\text{Sv/h}$ 以上の測定場所のみを選定した。なお、走行サーベイの 1 次モニタリングの結果については事故直後の混乱期に KURAMA-I と呼ばれるサーベイメータに GPS を組み合わせた簡便なシステムが用いられた。2 次モニタリング以降は、専用の KURAMA-II が開発され、車両の遮蔽や線量率やエネルギーの依存性が実験的に調査され、調査結果から複数の補正係数により KURAMA-I と比較すると高精度化されている。特に、KURAMA-I は $1 \mu\text{Sv/h}$ 未満の線量率で

は天然の放射線の影響を受けて、KURAMA-II と比較すると数値の信頼性が低くなる¹。そこで、走行サーベイの 1 次モニタリングのデータについては、1.0 $\mu\text{Sv/h}$ 以上のデータのみで評価を行った。

上記のように計算した 1 次モニタリングの定点サーベイ結果を分母とした各測定手法の測定結果の比を事故からの経過年数を X 軸としてプロットした。プロットされたデータを元に指数関数近似を行い、近似式の傾きを減衰定数 (λ^{-1}) として定義した。また、減衰定数の逆数は時定数 (τ) として定義できる。ここでの時定数は、線量率が $1/e$ となる年数と定義できる。

3. 結果と考察

(1) 各測定手法の変化傾向

定点サーベイ、走行サーベイ及び歩行サーベイの時間変化傾向について、図-3、図-4 及び図-5 に示す。図には、各測定メッシュの最も古いモニタリングとの比の平均値について測定日時を X 軸にとりプロットし誤差棒として比の標準偏差を記載した。また、図には比較のため放射性セシウムの物理的半減期から計算した空間線量率について示した。赤線が重量緩衝深度 β を一定とした計算値（図のキャプションには放射性セシウムの物理減衰（ β を一定と仮定）と表記）で、青線が 2.2 章に示したスクレーパプレートによる土壌の深度分布調査から得られている平均的な重量緩衝深度の変化を考慮した線量率の計算値（図のキャプションには放射性セシウムの物理減衰（ β の変化を考慮）と表記）である。

図-3 に示した定点サーベイの変化傾向を見ると、平成 24 年 8 月に行ったモニタリング以降、平均的な重量緩衝深度の変化を考慮した線量率の計算値よりも小さな数値となっている。これは、第 1 次モニタリング時と比較して測定点の変化がなかった場所は 1382 地点中 956 地点であったことから、1 次モニタリングのために選定した測定場所の中で、除染や建物の建設のための変化により空間線量率が顕著に減少したと考えられる。

図-4 に示した走行サーベイの結果からは、図-3 の定点サーベイの結果と比較して顕著に変化が大きいことが確認できる。これは、走行サーベイの測定対象が主要な車道上であり、降雨や車両の往来により舗装道路上に沈着した放射性セシウムが洗い流された効果と考えることができる。

図-5 に示した歩行サーベイでは、第 5 回のモニタリング結果以降、重量緩衝深度の変化を考慮した空間線量率よりも若干低い数値を示している。歩行サーベイは走行サーベイで対象とした主要な車道よりも交通量の少ない生活道路を対象としており、降雨や車両の往来により道路上に沈着した放射性セシウムが洗い流された効果と考えることができる。走行サーベイとの差は、道路上で洗い流された放射性セシウムが蓄積しやすい道路端付近を歩行（測定）していること及び道路端を歩くため道路以外の周辺環境からの放射線の影響を受けやすいことや交通量の違いが影響していると考えられる。

(2) 測定手法間の相互比較と減衰定数

図-3 から図-5 に示した変化傾向を合わせて考察するために定点サーベイの 1 次モニタリングの結果を 1 に規格化し、すべての結果を同じグラフ上にプロットした結果を図-6 に示す。定点サーベイの結果に対し、歩行及び走行は線量率が小さくなる傾向にある。また、歩行サーベイは走行サーベイと比べて若干高い傾向にある。この結果は、前章で考察した結果とも矛盾していない。

これらの測定結果を指数関数で近似し、その傾きから減衰定数と時定数の算出を試みた結

¹ 津田修一ら、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, 2013.

果を図-7 に示す。定点サーベイと走行サーベイについては、事故から 2 年後以前と以後で明らかに傾向が異なるため、それぞれ指数関数による近似を行った。歩行サーベイについては全期間で実施した。このようにそれぞれ指数関数により精度よく近似される。これらの近似曲線から求めた減衰定数及び時定数を表 1 に示す。事故後 2 年以前における定点サーベイと走行サーベイの時定数は 2.4 年及び 1.4 年となった、これは、走行サーベイの測定対象である車道上の空間線量率の減少が周辺環境に比べて早いことを示している。事故後 2 年後以後の定点サーベイと走行サーベイの時定数は、4.2 年及び 3.8 年であり、現在でも車道上の早い空間線量率の減少は続いているが、差が小さくなってきていることから、走行サーベイによる空間線量率は道路上よりも周辺からの放射線の影響の寄与割合が大きくなってきていることが推察される。歩行サーベイの結果をみると、定点サーベイと車両サーベイの間にプロットされる。これは、歩行サーベイの主な測定場所が生活道路上であり、車道ほどではないが周辺環境と比較すると空間線量率が早く減少していることが示唆される。歩行サーベイの時定数を見ると走行サーベイとほぼ等価となっており、事故 2 年後以降の車道と生活道路の空間線量率の減少率は道路上の放射性セシウムからの影響よりは周辺からの影響が大きくなってきていることが示唆される。今回、異なった測定手法の相互評価を行うことにより、より詳細な空間線量率の変化傾向の特徴について考察することができた。今後とも本手法を用いて空間線量率を相互比較の上変化傾向を確認していくことが望ましい。

4. まとめ

- 各モニタリング結果の空間線量率の経時変化傾向について相互比較を行った。
- 定点サーベイ、歩行サーベイ、走行サーベイの結果の順に空間線量率の減少率は高くなっている。
- 各変化傾向から、それぞれの減衰定数を求めたところ、事故後 2 年以前の車両サーベイによる測定結果は定点サーベイ比較して減少割合が大きく、車道上の放射性セシウムの洗い流しの効果が示唆される。
- 近年の傾向見ると時定数は各サーベイで同等になってきており、道路上の洗い流しによる効果は小さくなってきていると考えられる。

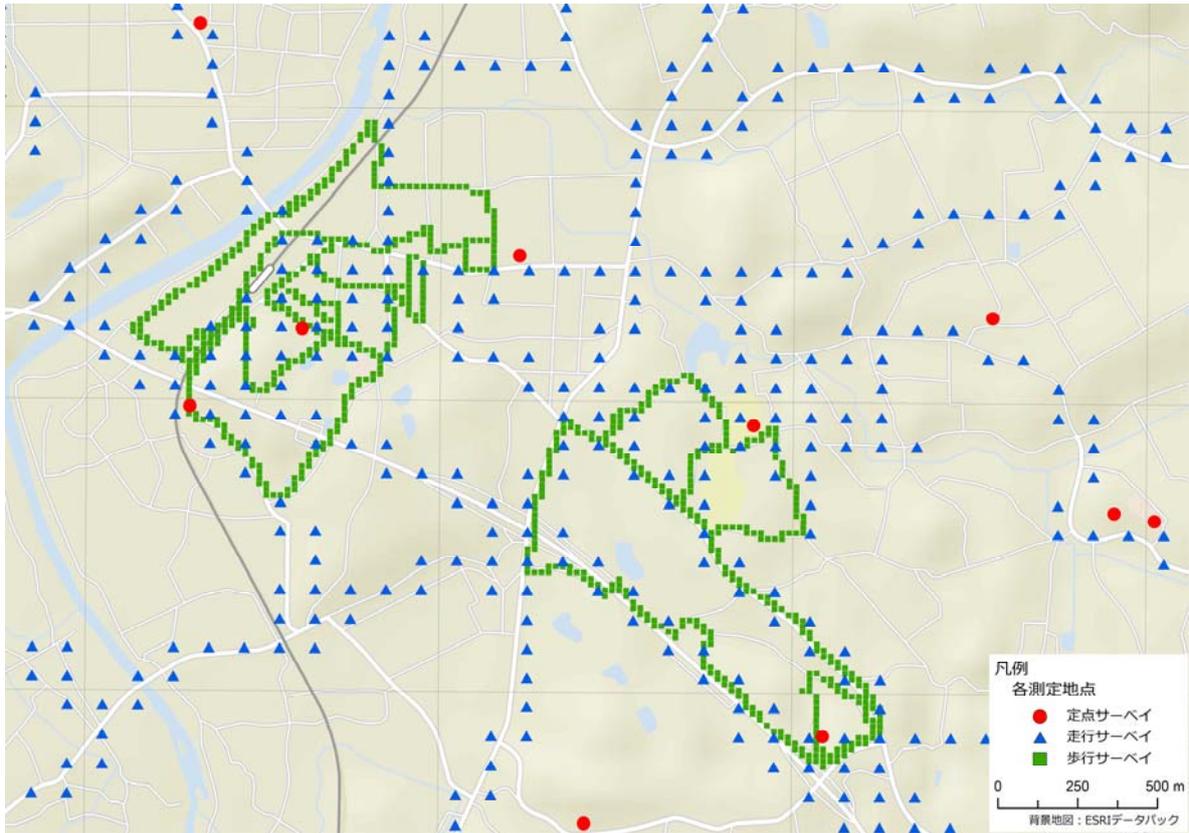


図-1 各測定場所のイメージ

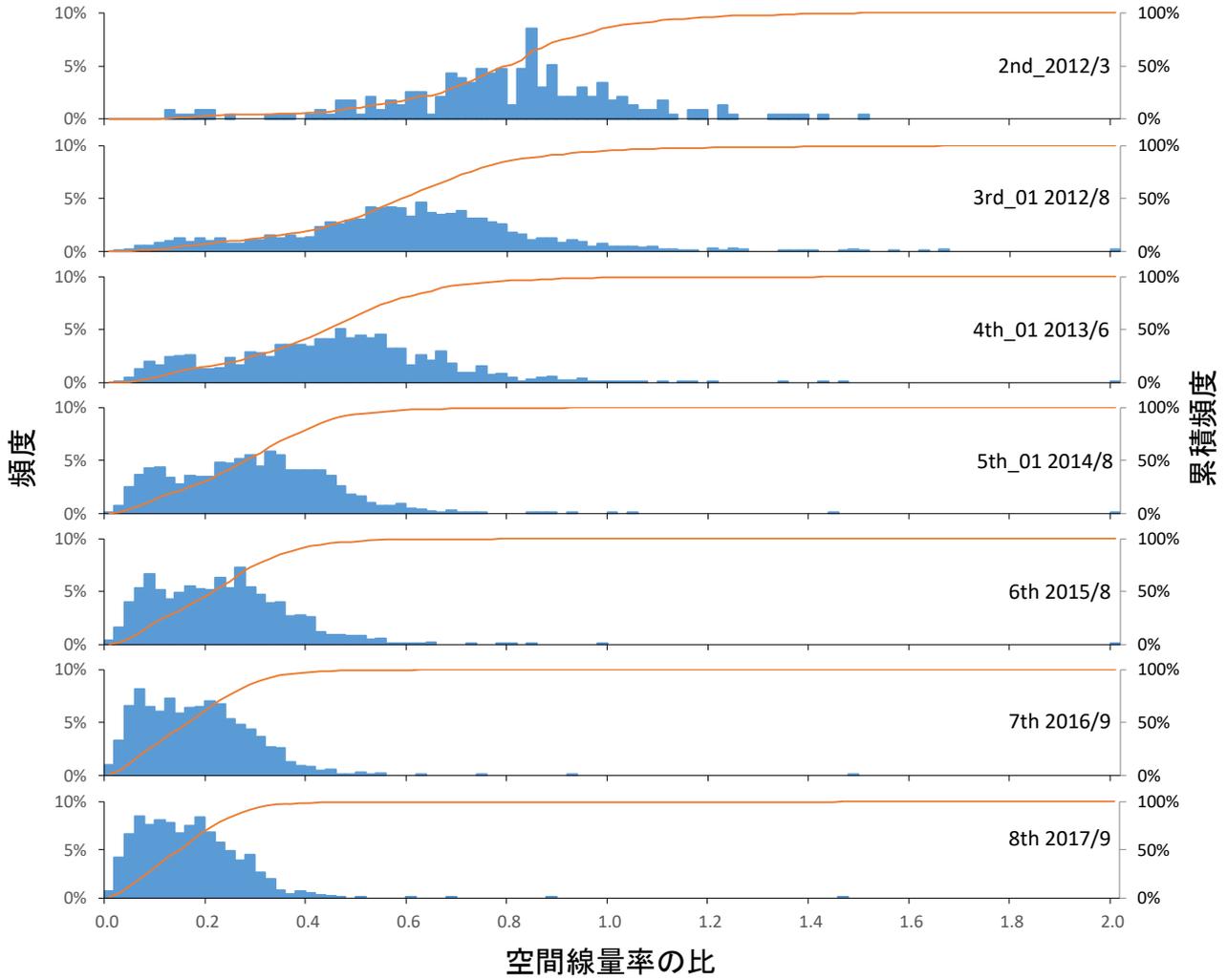


図-2 空間線量率の比のヒストグラム
 (定点サーベイ結果における1次モニタリングとの比)

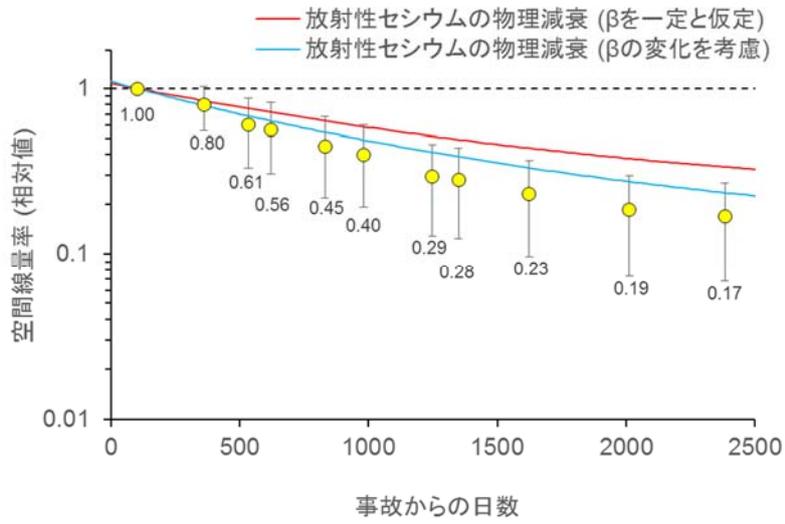


図-3 定点サーベイ結果の変化傾向

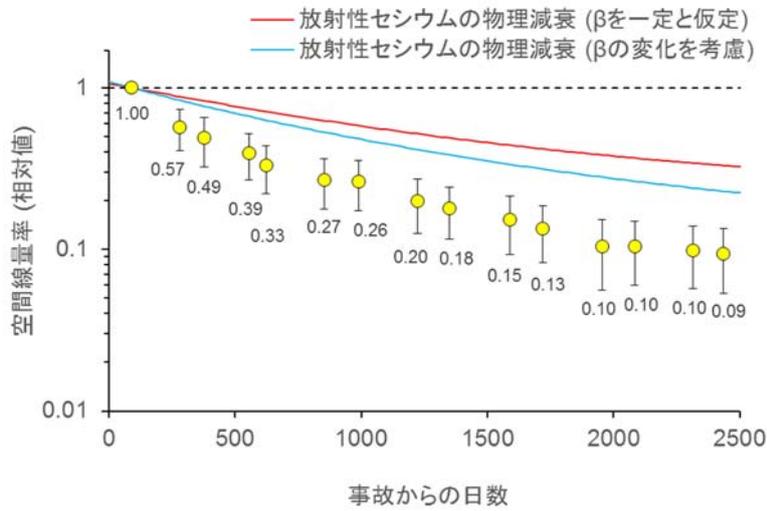


図-4 走行サーベイ結果の変化傾向

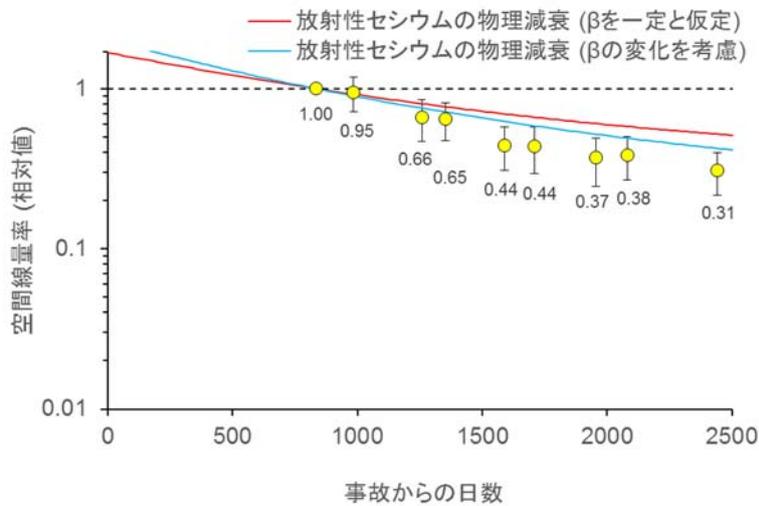


図-5 歩行サーベイ結果の変化傾向

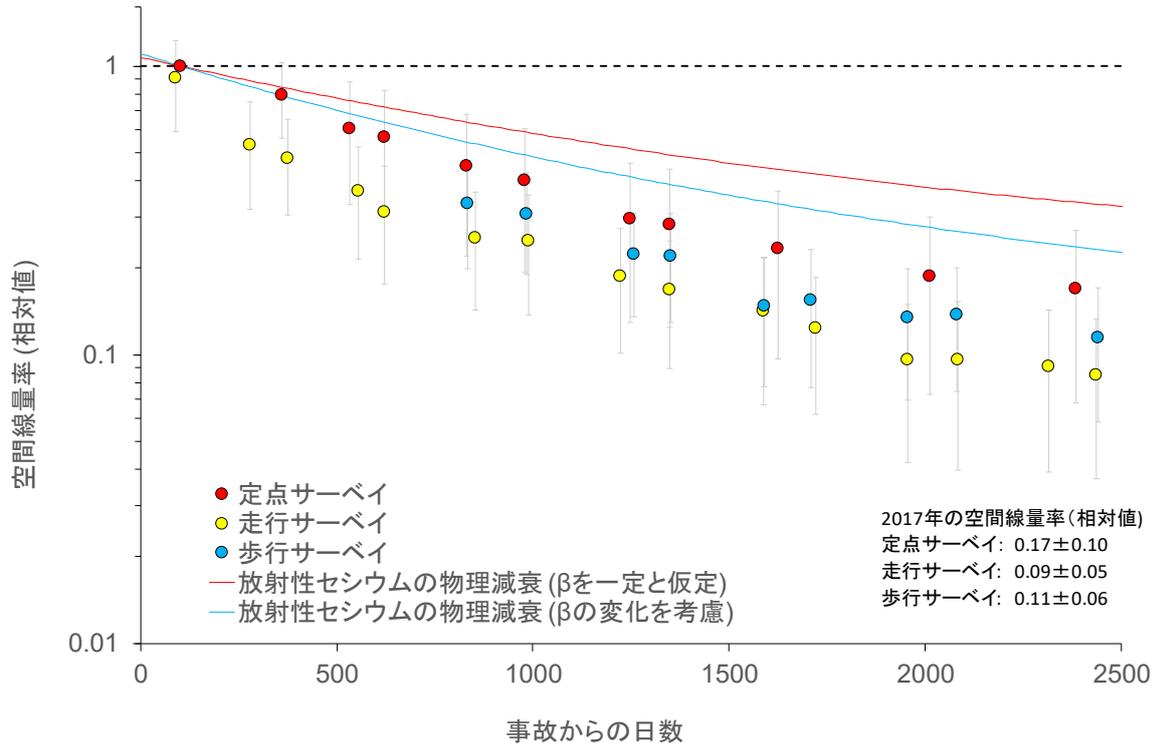


図-6 各モニタリングの時間変化の相互比較

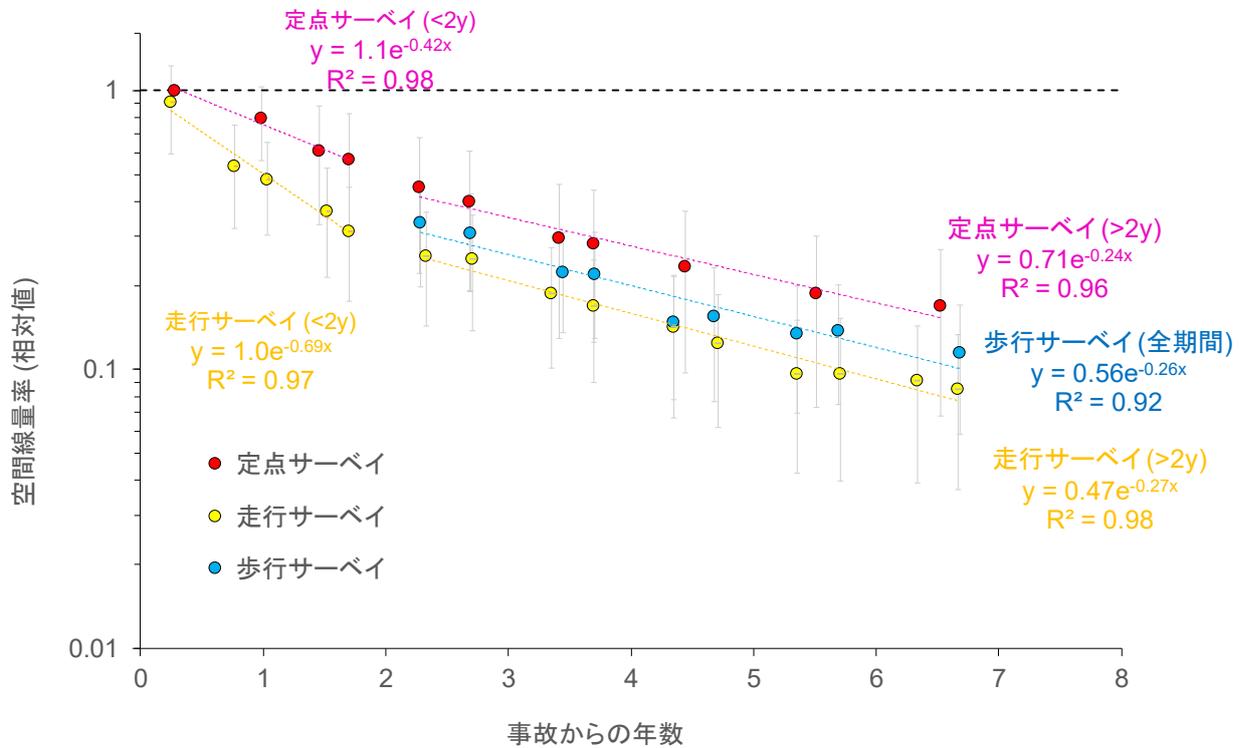


図-7 各モニタリング結果の変化傾向と指数近似曲線

表-1 各モニタリング結果から算出した減衰定数及び時定数

事故からの 経過年数	測定的手法	減衰定数 (y^{-1})	時定数 (y)*
0-2 年	定点サーベイ	0.42	2.4
	走行サーベイ	0.69	1.4
2-7 年	定点サーベイ	0.24	4.2
	歩行サーベイ	0.26	3.8
	走行サーベイ	0.27	3.7

* $1/e$ (ネイピア数)となる時間

無人ヘリによる東京電力福島第一原子力発電所から 5 km 圏内の 空間線量率分布の測定

1. 調査目的

原子力機構では、福島第一原発事故直後から、無人ヘリコプター（以下「無人ヘリ」という。）を用いた放射線分布の測定手法について研究開発を行っている。無人ヘリは、有人ヘリコプターと比較して低高度で飛行が可能であり、ヘリコプターの軌跡幅（測線間隔）も細かく設定できるため、位置分解能の高い空間線量率分布の測定が可能である。原子力機構による無人ヘリの成果としては、本事業で行っている福島第一原発周辺のモニタリング¹、河川敷のモニタリング² 及び除染前後のモニタリング³ などが挙げられる。さらに、福島第一原発周辺のモニタリングデータを詳細に解析し、放射性セシウムの比（セシウム 134/セシウム 137）の分布を明らかにすることにより、汚染の起源となった原子炉の推定を行っている⁴。

事故以来、福島第一原発から 3 km 圏内については、航空法による飛行制限区域（平成 25 年 2 月 5 日までは飛行禁止区域）となっており、有人ヘリコプターによる航空機モニタリングは実施されていなかった。また、地上での測定結果も限られており、本地域の全体像の把握が必要であった。そこで、平成 24 年度より航空法による規制を受けない無人ヘリを用いて福島第一原発から 3 km 圏内のモニタリングを開始した¹。平成 25 年度からは、航空機モニタリングとの比較も考慮し、航空機モニタリングと 2 km 程度オーバーラップさせ約 5 km 圏内を測定対象とすることにした。過去 8 回のデータにおけるデータの解析から、無人ヘリモニタリングで確認した空間線量率の減衰傾向は、放射性セシウムの半減期から計算した変化量よりも大きいことがわかってきている⁵。本地域は、事故直後には空間線量率が高く帰還困難区域に設定されたことから、事故後数年における放射性物質の移動への人為的な影響が小さい。一方、近年除染によって生じた廃棄物の中間貯蔵施設の建設、高速道路・鉄道の整備及び特定復興再生拠点に認定され 5 年後の解除をめざして除染が加速し、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から、放射性物質の環境動態や人為的活動の影響について知見を得ることが可能と考えられる。

ここでは、平成 29 年度に 1 回実施した無人ヘリによる福島第一原発から概ね 5 km の範囲の空間線量率の測定結果と、過去データとの比較についてまとめる。また、本年度は無人ヘリの測定結果と地上の測定値に顕著に差が出る測定点を抽出し、その要因について詳細な調査を実施した。

2. 調査内容

(1) 調査場所・期間

無人ヘリによる福島第一原発周辺（5 km 圏内）のモニタリングを平成 29 年 6 月 13 日～9 月 5 日に 1 回実施した。これまで実施してきたモニタリングとその期間を表-1 に示す。

¹ Y. Sanada and T. Torii, Aerial radiation monitoring around the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant using an unmanned helicopter. J. Environ. Radioact., 139, 294-299, 2015.

² Y. Sanada et al., Radiation monitoring using an unmanned helicopter in the evacuation zone around the Fukushima daiichi nuclear power plant., Explor. Geophy., 45, 3-7, 2014.

³ 眞田幸尚, 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, 2013.

⁴ Y. Nishizawa et al., Distribution of the ¹³⁴Cs/¹³⁷Cs ratio around the Fukushima Daiichi nuclear power plant using an unmanned helicopter radiation monitoring system, J. Nucl. Sci. Tech., 53, 468-474, 2015.

⁵ Y. Sanada et al., Temporal variation of dose rate distribution around the Fukushima Daiichi nuclear power station using unmanned helicopter., Appl. Radiat. Isot., 118, 308-316, 2016.

(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 RMAX G1 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 γ 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 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ (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-1 参照)。

(3) 無人ヘリによる測定データの取得方法

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⁶。無人ヘリの軌跡幅 (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 DGPS⁷ (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。フライトの測線を図-2 に示す。

(4) 無人ヘリ測定データの地上 1 m 高さ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地上 1 m 高さでの空間線量率の値に換算するための係数を取得するために、測定地域内において比較的空間線量率が一定で平坦な場所に直径 200 m の円形のテストサイトを設定した。テストサイト内では、あらかじめ NaI サーベイメータを用いて、地上から 1 m 高さの空間線量率データを取得した。その後、テストサイトの中心から上空の対地高度 80 m で無人ヘリをホバリングさせ、この高度 (基準高度) で取得されたガンマ線計数率とテストサイトの地上における空間線量率とを比較し、空間線量率換算係数 (CD: Conversion factor: cps/($\mu\text{Sv/h}$)) 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。

実際のフライトで取得されたガンマ線計数率は、対地高度と基準高度のずれを高度補正係数 AF により補正し、空間線量率換算係数 CD から地上 1 m 高さでの空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$) に換算した。なお、対地高度は GPS により測位した GPS の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を差し引くことにより求めた。

(5) 空間線量率マップの作成

マップとして示すために、無人ヘリによる測定点間の空間線量率の値は、内挿法 (クリギング法) を用いて内挿補間した。

3. 結果と考察

第 9 回モニタリングの結果を、図-3 に空間線量率マップとして示す。比較的高い空間線量率の分布が、北西、西北西、西、南方向に広がっていることがわかる。

⁶ 眞田幸尚ら、平成 27 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, 2015, 95p

⁷ 位置の判っている基準局が発信する電波を利用して、GPS の計測結果の誤差を修正して位置決め精度を高める技術。

(1) 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 NaI サーベイメータ及び電離箱式サーベイメータで測定した。無人ヘリの測定結果と同地点における地上の線量率を比較した結果を散布図にして図-4 に示す。散布図を見ると傾きはほぼ1であり、今回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。一方、整合の良い場所が複数点ある。この要因については、昨年度の地上の詳細測定との比較から、整合が良い地点は地上の空間線量率分布が局所的に急激に変化しており、不整合の原因は測定機器の系統的な誤差等ではなく、無人ヘリと地上測定とで測定高度により測定対象範囲が異なることが原因であることが明らかとなっている⁸。

(2) 過去の測定データとの比較

今回の測定と過去第1回からの測定結果が得られている3 km 圏内の空間線量率マップを図-5 に示す。なお、各測定箇所における地上1 m 高さの空間線量率及び地表面の放射性セシウムの沈着量の値は、放射性セシウムの物理減衰を考慮し、各モニタリングの最終日に換算された値である。マップをみると、空間線量率の高い暖色系のエリアが小さくなってきていることがわかる。

過去のモニタリング結果を比較するために、モニタリングした区域を5 m メッシュに分割し、メッシュごとに第1回モニタリングの空間線量率測定結果と今回の空間線量率測定結果の比（相対偏差）を求めた。今回の測定と第1回モニタリングの測定結果を比較した散布図及び相対偏差のヒストグラムを図-6 に示す。散布図は良い相関関係を示し、相対偏差のヒストグラムに見られる相対偏差の分布はガウス分布に近い。空間線量率の相対偏差の平均値を基に得られた空間線量率の相対偏差は、全体の傾向として第1回モニタリングの実施された平成24年10月20日時点を100%とすると35%（相対偏差が-0.65）となっている。このように、メッシュごとに相対偏差を算出して過去の無人ヘリでの測定結果と今回の結果を比較すると、発電所周辺の空間線量率の減少傾向を定量的に理解できる。

今回の結果と過去8回の結果を第1回の測定結果を基準とし、事故からの経過日数と第1回のモニタリング結果を1に規格化した空間線量の平均値を図-7 にプロットした。また、図には各メッシュでの比較結果の標準偏差を誤差棒として表示した。図-7には比較のため、重量緩衝深度を一定として、放射性セシウムの半減期を基に計算した空間線量率の変化を赤線に示している。青線は、重量緩衝深度の変化を考慮して計算した空間線量率の変化を示している。無人ヘリによる測定結果のプロットと赤線で示した半減期を基に計算した空間線量率の変化を比較すると、無人ヘリの測定結果は下回っており、実測値は放射性セシウムの半減期を基に計算した空間線量率よりも多く減少していることを示唆している。一方、実測結果と重量緩衝深度の経時変化を考慮した空間線量率の変化はよく一致することが分かる。この結果は、空間線量率の減衰の要因として放射性セシウムの物理的壊変だけでなく、土壤中への放射性セシウムの浸透により、放射線が遮蔽される効果が寄与していることを示している。本結果は、今回の測定対象範囲の全体的な傾向として推定されるものであり、他の除染や河川を介した放射性セシウムの移動などの局所的に寄与する要因については、(3) で示したようなメッシュごとの線量率の比較や地上におけるサンプル測定等から考察されるべきである。

(3) 顕著な線量率の低下場所

⁸ 平成27年度原子力規制庁委託事業「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」 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5 km 圏内の空間線量率分布の測定, pp. 31-43.

今年度の測定結果（第9回モニタリング）と昨年度の測定結果（第8回モニタリング）を比較し、線量率比のマップを作成した（図-8）。線量率のマップは前述のように5 mメッシュで作成しており、同じ位置の今年度の測定結果と昨年度の測定結果の比を計算し、コンタ一図として示した。全体的に0.7-0.8の範囲であった一方、測定対象範囲内に3カ所の顕著に線量率の比が小さい場所がみられた。それぞれについて、詳細な場所とその推定される原因について、図-9及び下記に示す。

- ・夫沢地区、熊川地区については、除染廃棄物の仮置き場が造成されている地域であり、造成の際の土の入れ替えや事前の除染作業により、線量率が低下したものと推定される。
- ・大野小学校周辺については、2015年8月28日から除染作業が開始されており、その影響から線量率が低下したものと推定される。

(4) 放射性セシウム沈着量評価

平成25年度に確立した γ 線スペクトル情報から放射性核種ごとに評価する手法⁹を用いて、放射性セシウムの沈着量（Cs134+Cs137）分布マップ及び天然の空間線量率を計算し、マップ化した。図-10にマップを示す。空間線量率の高かった発電所から北西部分と南部分は3000 kBq m⁻²を超える比較的高いエリアが広がっている。一方、北側の海岸沿いは、300 kBq m⁻²以下のエリアも存在する。一方、天然の空間線量率は、0.04~0.07 μ Sv h⁻¹程度であることが分かった。

4. まとめ

- 平成29年度に1回の無人ヘリによる福島第一原発周辺のモニタリングを実施し、全体の傾向として空間線量率の減少が確認できた。
- 今回の測定結果から空間線量率は、平成24年10月20日を100%とすると35%程度である。
- 過去のモニタリングの結果と比較すると放射性セシウムの土壤中への浸透具合を考慮した空間線量率の計算結果とよく一致し、空間線量率の減衰の要因は放射性セシウムの物理的壊変だけでなく土壤中への放射性セシウムの浸透により放射線が遮蔽される効果が寄与していることが示唆された。ただし、この結果は今回の測定対象範囲の全体的な傾向を考察したものであり、除染などの局所的に寄与する要因については、メッシュごとの線量率の比較や地上における測定等による検討が必要である。
- 昨年度と比較して顕著に空間線量率が低下している地域が3カ所存在したが、除染及び施設建設のための影響によるものであることを確認した。

⁹ 平成27年度原子力規制庁委託事業「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」成果報告書、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.

表-1 福島第一原子力発電所周辺の無人ヘリによるモニタリング

モニタリング名	測定期間	測定場所
第1回モニタリング	H24/8/30~H24/10/20	福島第一原発から3 km 圏内
第2回モニタリング	H25/1/27~H25/3/20	福島第一原発から3 km 圏内
第3回モニタリング	H25/6/6~H25/7/31	福島第一原発から概ね5 km 圏内
第4回モニタリング	H25/11/19~H26/1/7	第3回モニタリングと同一の範囲
第5回モニタリング	H26/6/23~H26/7/22	第3回モニタリングと同一の範囲
第6回モニタリング	H26/11/13~H27/1/15	第3回モニタリングと同一の範囲
第7回モニタリング	H27/9/2~H27/10/22	第3回モニタリングと同一の範囲
第8回モニタリング	H28/9/1~H28/10/13	第3回モニタリングと同一の範囲
第9回モニタリング	H29/6/13~H29/9/5	第3回モニタリングから約17 km ² 追加



図-1 無人ヘリの仕様

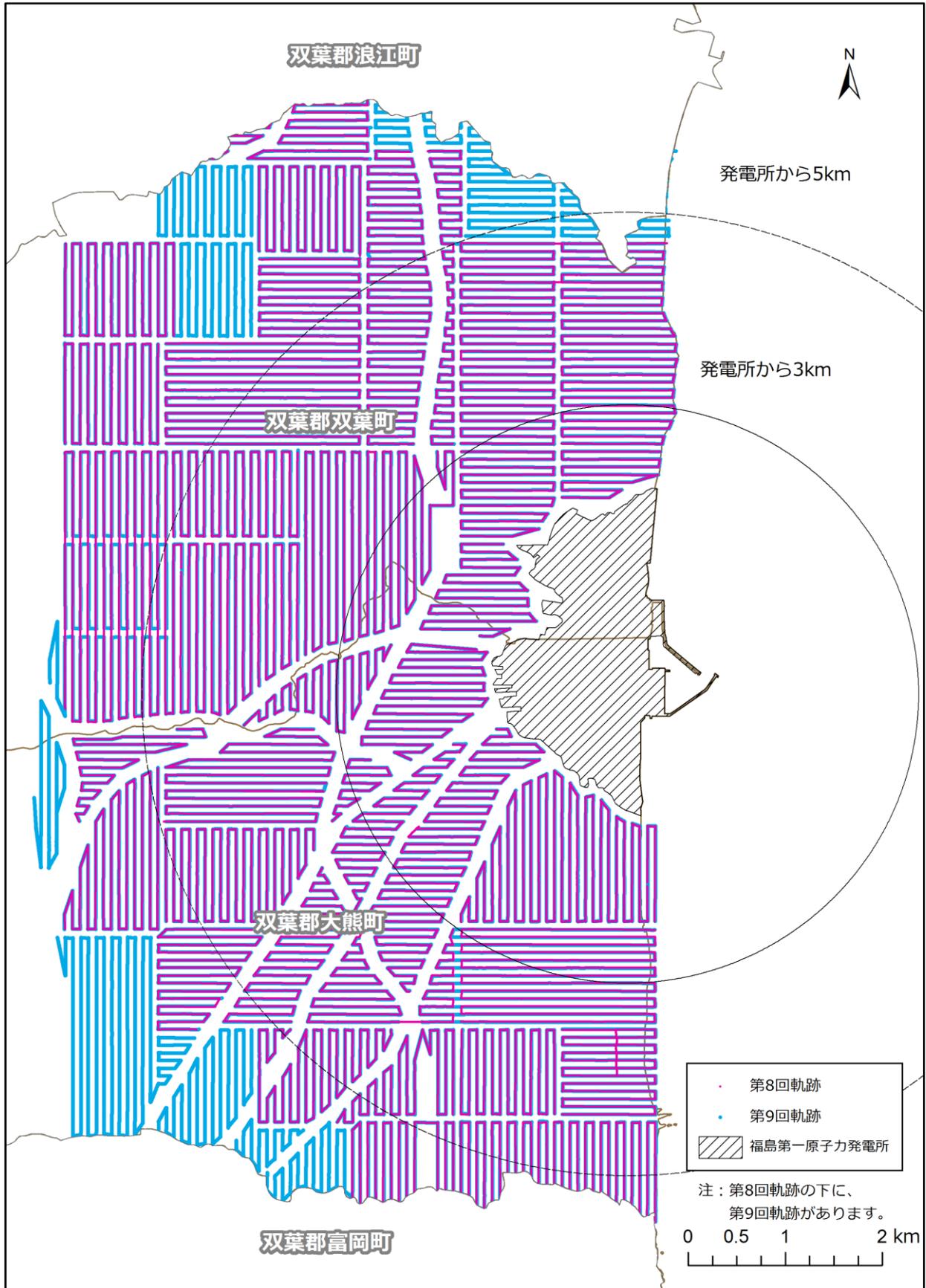


図-2 無人ヘリの飛行軌跡

(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

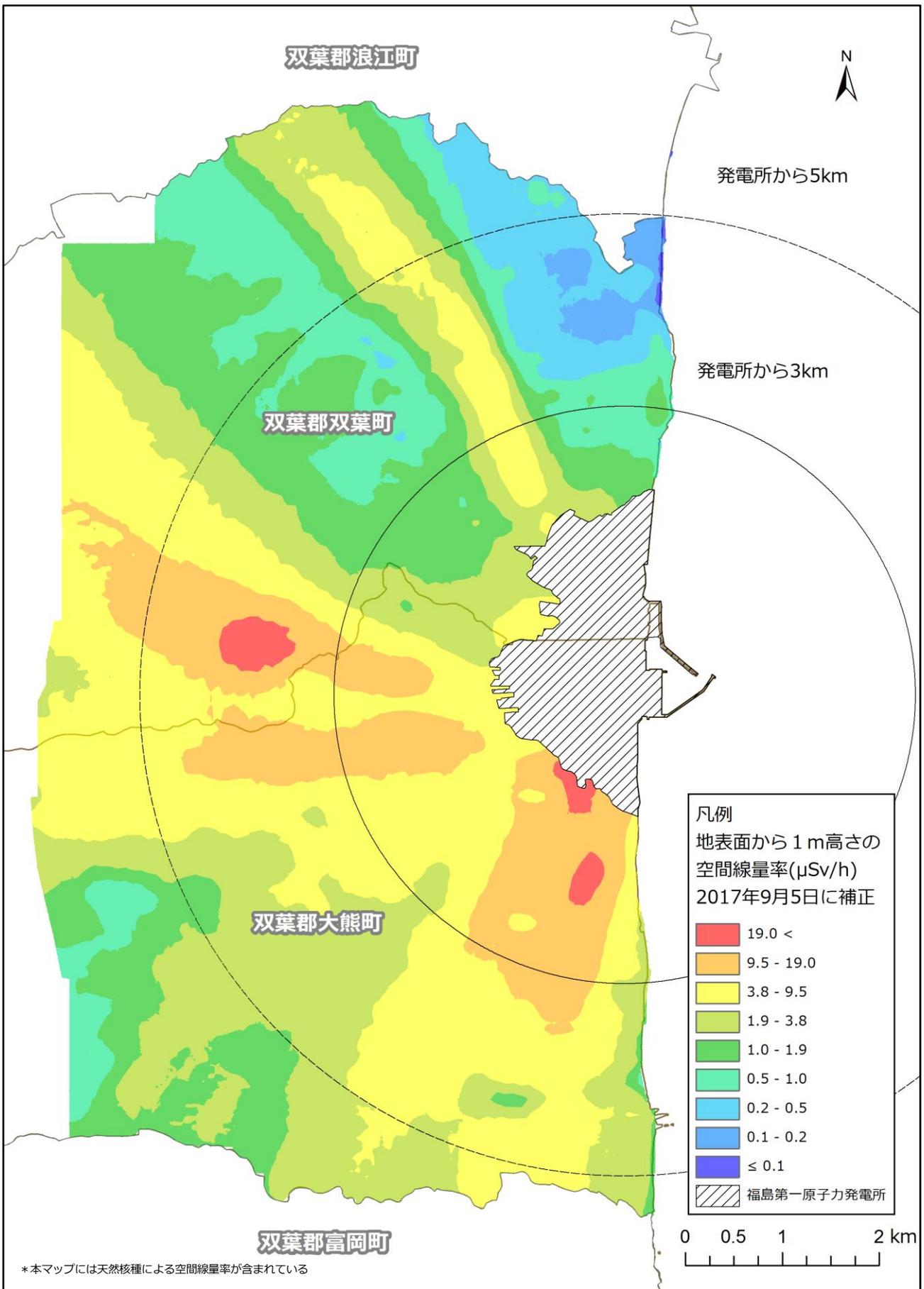


図-3 第9回モニタリングの空間線量率マップ

(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

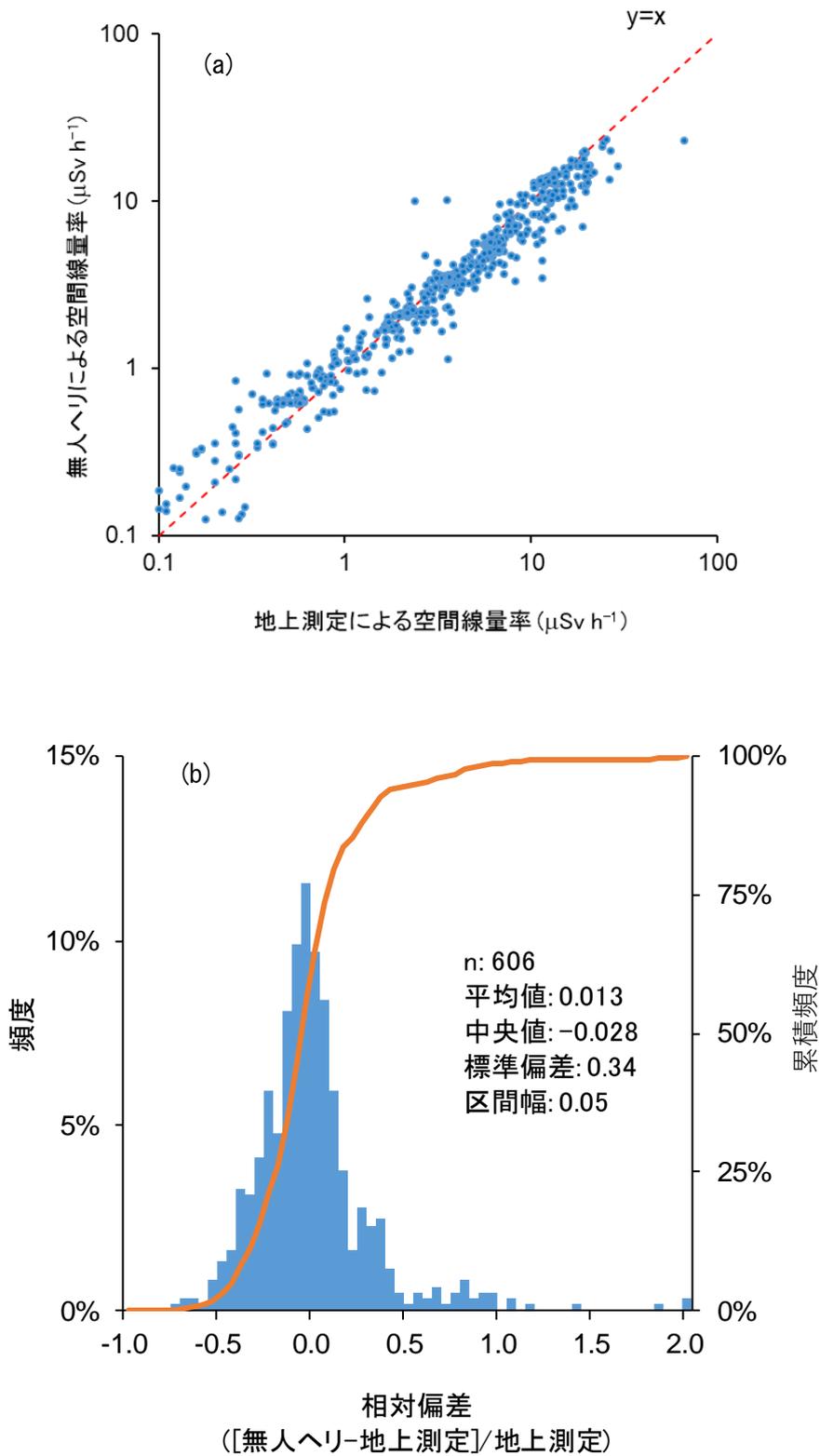


図-4 地上の空間線量率測定結果と無人ヘリによる測定結果の比較
 (a) 散布図 (b) 相対偏差のヒストグラム

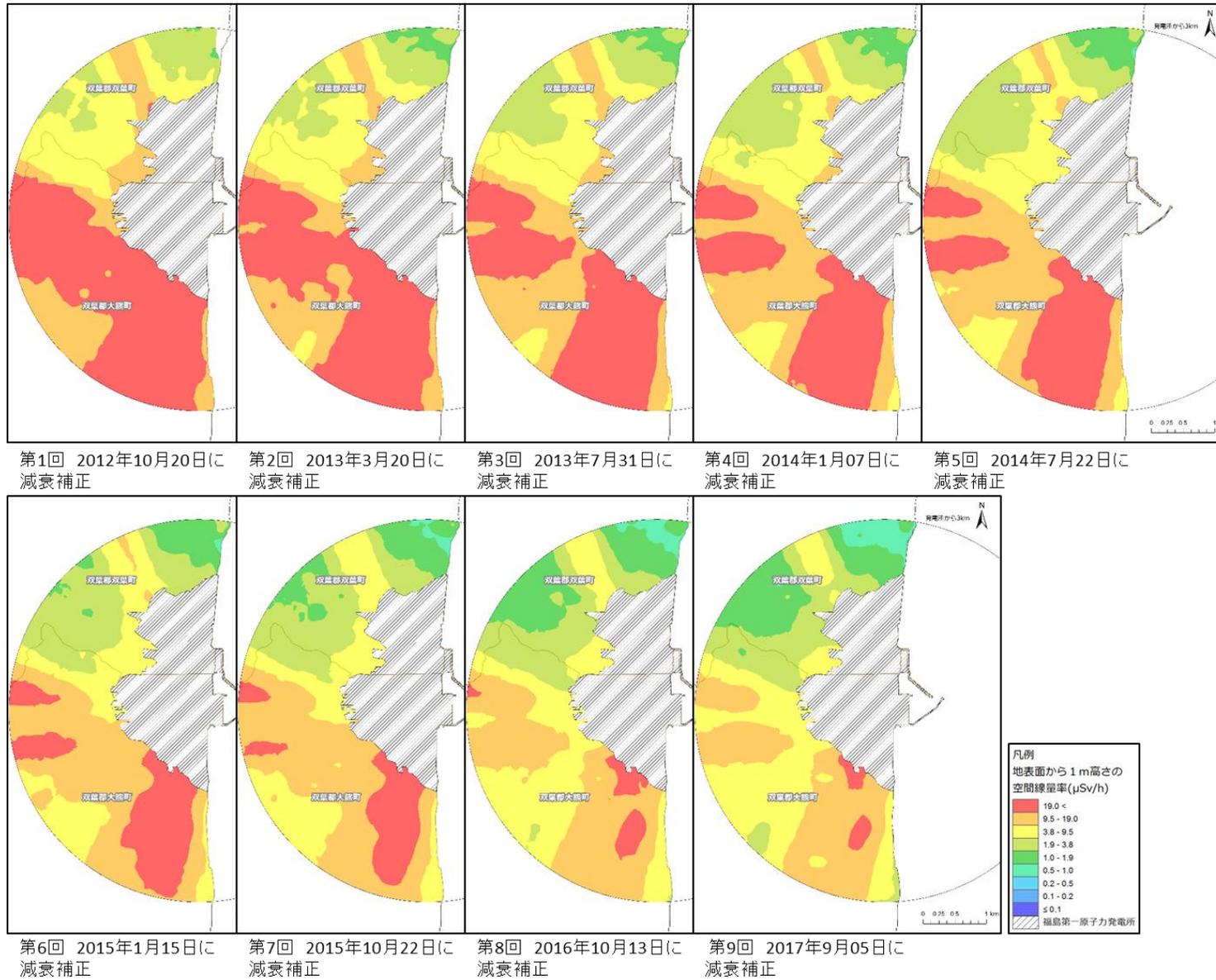


図-5 過去の無人ヘリによる空間線量率測定結果（地上1 mへの換算値）の比較
 （背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック（ESRI, Co. Ltd.）を使用）

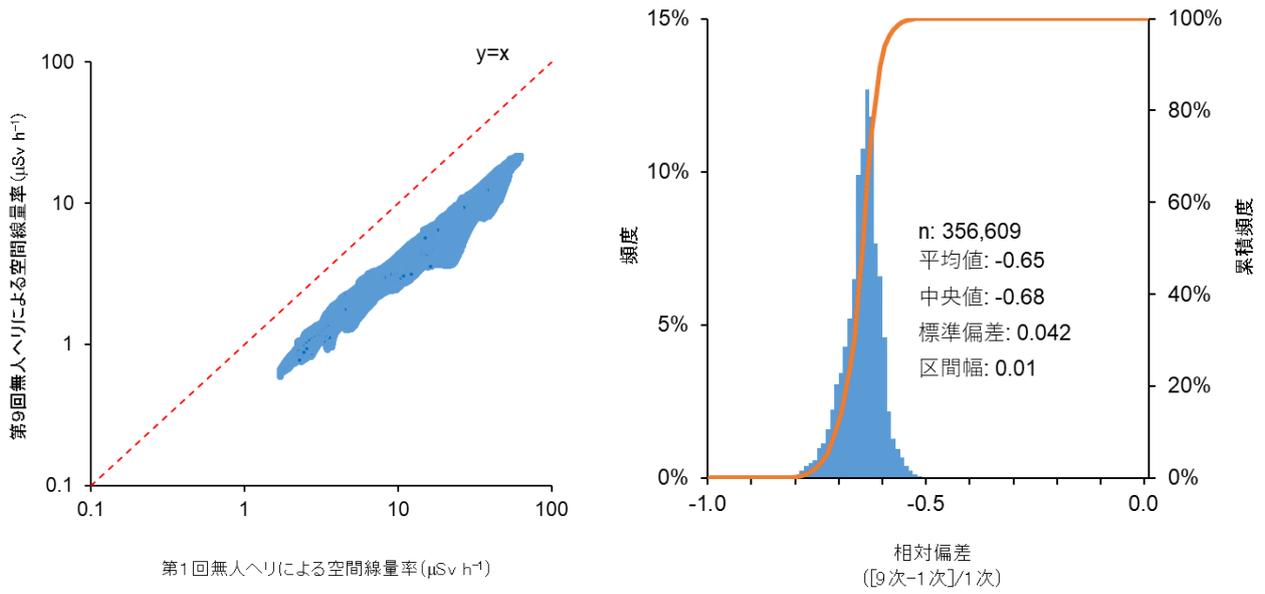


図-6 第9回モニタリングの第1回モニタリングからの変化傾向

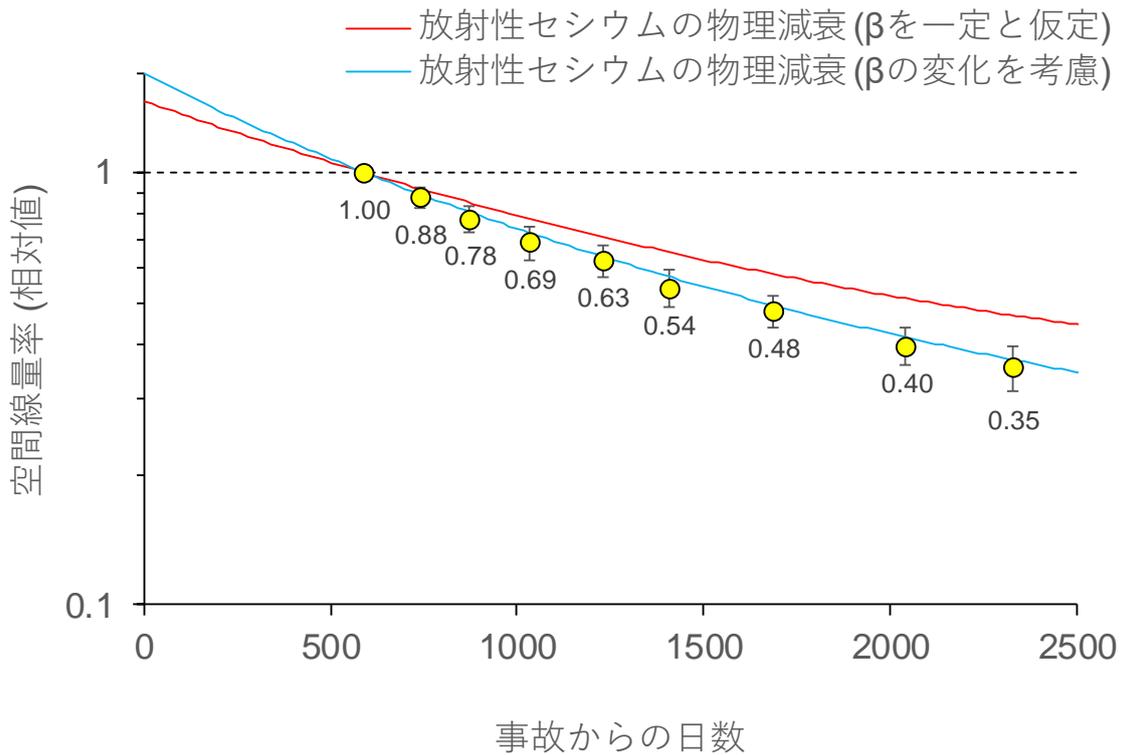


図-7 第1回モニタリングから第9回モニタリングまでの変化傾向

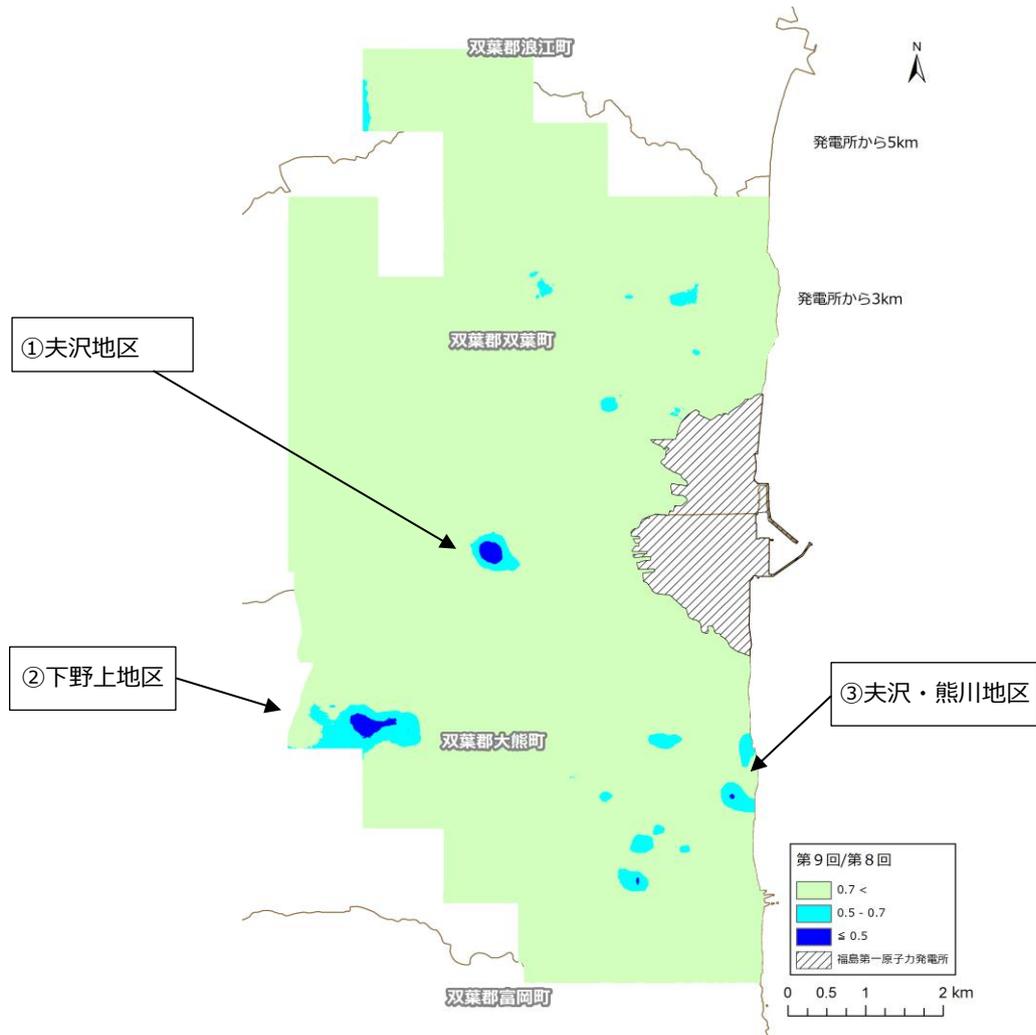


図-8 第9回無人ヘリモニタリングによる空間線量率の
 第8回無人ヘリモニタリングによる空間線量率に対する変化率
 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

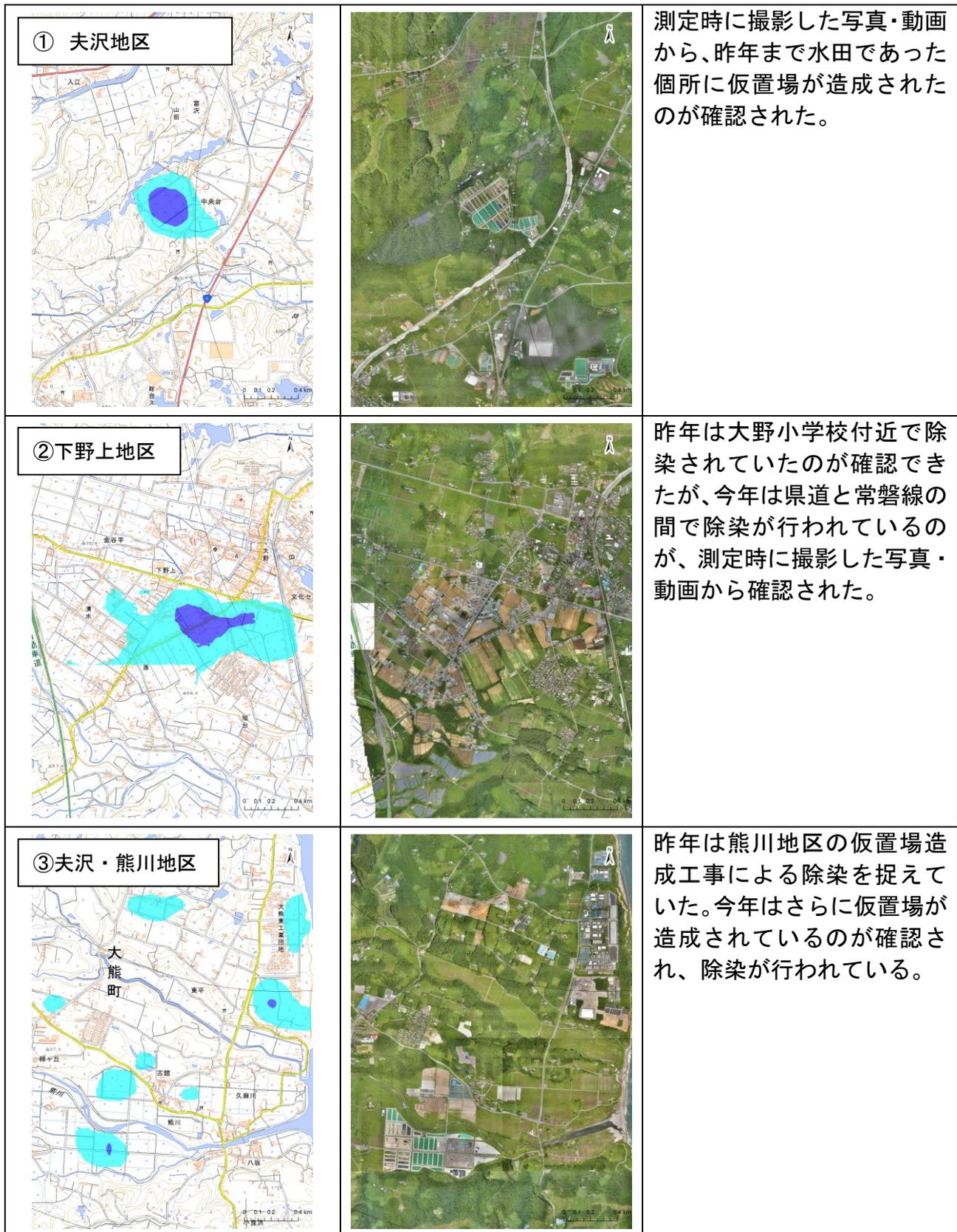


図-9 第9回無人ヘリモニタリングによる空間線量率の第8回無人ヘリモニタリングによる空間線量率に対する変化率に顕著に差のあった場所
(背景地図は、地理院地図を使用)

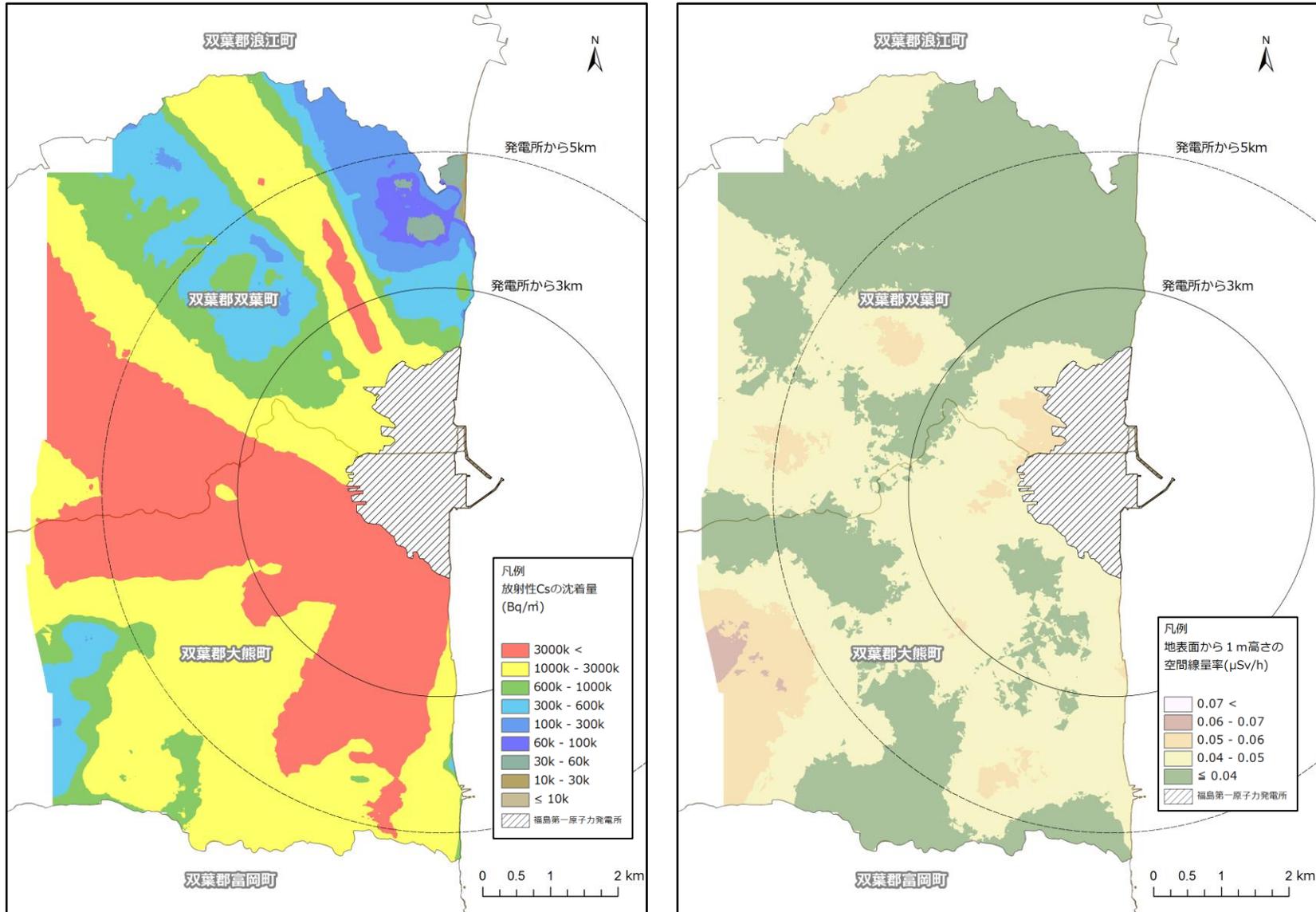


図-10 (左)放射性セシウムマップ($\beta=3.52$)、(右)天然放射性核種による空間線量率マップ、

放射性セシウム沈着量の面的調査

1. 調査目的

福島第一原発から 80 km 圏内において可搬型ゲルマニウム半導体検出器を用いた 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变化を解析する。

2. 調査内容

(1) 調査期間

平成 29 年 9 月調査： 平成 29 年 8 月 30 日～10 月 11 日

(2) 調査機関

原子力機構、(公財)日本分析センター、(公財)放射線計測協会、(公財)原子力安全技術センター

(3) 調査箇所

今回の調査における放射性セシウム沈着量の測定箇所を図-1 に示す。測定箇所については、福島第一原発から 80 km 圏内の地域を 5 km×5 km のメッシュに分割し、福島第一原発事故以前にも人が居住しなかった地域（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 箇所を選定した。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 384 箇所において測定を実施した。

(4) 調査内容の詳細

(a) 放射性セシウムの土壌濃度マップの作成

放射性セシウム沈着量の測定にあたっては、可搬型ゲルマニウム半導体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測定を実施し、スペクトル解析（核種分析）により放射性セシウムの土壌への沈着量（土壌単位面積あたりの放射性核種ごとの放射エネルギー。単位は Bq/m²）を測定した。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をねらいとして全測定箇所の 1 割程度は 60 分測定とした。

in-situ 測定は、文部科学省のマニュアル¹ 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² を参照した。また、in-situ 測定によるデータ解析で使用する重量緩衝深度³ には、本事業で別途実施している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⁴ の幾何平均値を用いた。本結果から推定された平成 29 年 10 月時点の実効的な重量緩衝深度は 3.52 g/cm² であった⁵。

¹ 原子力規制委員会，“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，（平成 29 年 3 月）。

² 国際放射線単位測定委員会(ICRU: International Commission on Radiation Units and Measurements), “Gamma-ray spectroscopy in the Environment,” ICRU Report 53, (1994).

³ 放射性セシウムの放射能濃度が指数関数的に減少し土壌表層に比べて 1/e になる深さで、深度分布の形状を表す指標。

⁴ 実際の放射性セシウムの分布は指数関数に適合しない場合もある。その場合に、指数関数的分布に等価な地上 1 m 高さの空間線量率を与える重量緩衝深度を実効的な重量緩衝深度という。ここでの実効的な重量緩衝深度は指数関数から求めた重量緩衝深度と実効的な重量緩衝深度の両者を含む幾何平均値である。

⁵ 本報告書（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

GPS を用いて測定箇所の位置情報を取得し、これらの情報を基に福島第一原発から 80 km 圏内の放射性セシウムの土壌への沈着量を記した土壌濃度マップを作成した。なお、平成 29 年 9 月調査については同年 10 月 1 日時点の値に補正を行った。

(b) 放射性セシウムの土壌濃度マップの細密化

空間線量率に寄与している人工放射性核種のほとんどが放射性セシウムであるとの仮定の下、過去の調査において、かく乱の少ない平坦地では土壌への放射性セシウムの沈着量と空間線量率が良好な直線関係を示すことが確認されている。そこで、in-situ 測定を行った箇所で NaI (TI) シンチレーション式サーベイメータ（日立製作所製 TCS-171B）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ることで、放射性セシウム沈着量を直接に測定していない箇所における放射性セシウムの沈着量を空間線量率⁶ から評価した。この放射性セシウム沈着量の空間線量率からの評価結果を基に、(a) で作成した放射性セシウムの土壌濃度マップを細密化し、全体の放射性セシウム沈着量の可視化を行った。

3. 結果と考察

(1) 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、使用した一部のゲルマニウム半導体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、使用するゲルマニウム半導体検出器の全てを用いて同一箇所で測定を行い、同様の沈着量評価値が得られることを確認した。また、in-situ 測定から求められた空間線量率の評価値と同一箇所でグレイ (Gy) 単位 (空気カーマ) での出力が可能な NaI サーベイメータ（日立製作所製 TCS-171B）により測定した地表面から 1 m 高さの空間線量率の測定結果を比較したところ、全体に良く一致した (図-2)。この結果より、スクレーパ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、ここでは ICRU Report 53 に従って $\mu\text{Gy/h}$ で表した空気カーマ率について比較を行っている。

(2) 放射性セシウムの土壌濃度マップ

今回の調査における福島第一原発から 80 km 圏内を中心としたエリアの放射性セシウムの土壌濃度マップを図-3 に示す。

放射性セシウムの沈着量を評価する際に重量緩衝深度の幾何平均値を用いたが、重量緩衝深度の分布に伴う不確かさは最大約 46% (90%信頼区間) であった。

(3) 放射性セシウムの土壌濃度マップの細密化

放射性セシウムの土壌濃度マップを細密化するために、今回の調査において空間線量率及び放射性セシウム沈着量の両方を測定している約 380 箇所におけ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 (図-4)。比較にあたっては、天然放射性核種からの空間線量率への寄与が $0.05 \mu\text{Sv/h}$ と仮定⁷ し、この寄与分を全ての空間線量率の測定値から一律に差し引いた値を用いた。

その結果、空間線量率とセシウム 134 沈着量、空間線量率とセシウム 137 沈着量との間に

布データの集約) 事業” 成果報告書) の「土壌中の放射性セシウムの深度分布調査」を参照のこと。

⁶ 本報告書 (“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) の「人為的なく乱の少ない平坦な開かれた土地における空間線量率分布測定」を参照のこと。

⁷ 日本原子力研究開発機構, “平成 26 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及び移行モデルの開発) 事業,” 成果報告書, page. 63, (平成 27 年 3 月)。

は直線関係が確認された。これは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、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ためである。そこで、同様に人為的なかく乱の少ない平坦地約 6,570 箇所⁶で測定された空間線量率⁶について、この空間線量率と放射性セシウム沈着量の相関関係を基に放射性セシウム沈着量を評価した。空間線量率から評価した放射性セシウム沈着量を、in-situ 測定及び土壌採取により直接に求めた沈着量に加えて記した土壌濃度マップを作成した(図-5)。

本手法による算出結果の妥当性を確認するために、in-situ 測定による結果と最近傍の空間線量率から推定した放射性セシウムの沈着量を比較した。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。ここで相対偏差は、下記のように定義する。

$$\text{相対偏差} = \frac{(\text{空間線量率からの推定値} - \text{in-situ測定による結果})}{\text{in-situ測定による結果}}$$

図-6(a)に示した全データによる散布図を見るとプロットは1:1の直線の周辺に分布し、全体的にはよい相関性が確認できるものの、低い沈着量の領域のプロットのばらつきは大きいことがわかる。一方、相対偏差のヒストグラムを見ると分布の形状は0付近を頂点にした正規分布に近いものの、推定値が測定値の2倍以上を示す点が15%以上確認された。一方、最近傍点が20m以内のデータのみで処理したグラフを図-6(b)に示す。このヒストグラムも全データと大きく傾向が変わらなかったことから、このばらつきは手法の限界であると理解することが出来る。すなわち、空間線量率が低い場所では、天然放射性核種由来の空間線量率を一律で減算している影響及び放射性セシウム沈着量への換算に伴う誤差が大きくなることが示唆される。一方、高線量率の測定結果については、よい相関関係を有している。本手法は、全体を可視化し過去との比較を行う手法としては有効であるため、継続的に本手法を踏襲し、全体のマップを作成する。一方、変化傾向については今までどおり in-situ 測定の結果で議論する。

(4) 放射性セシウム沈着量の長期的変化

平成24年3月調査から平成29年9月調査までの10の時期のセシウム134土壌濃度マップを図-7に、同じくセシウム137土壌濃度マップを図-8に示す。約79ヶ月の間にセシウム134土壌濃度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⁸ため濃度変化は顕著ではない。

平成23年6月調査では、各調査箇所の放射性セシウムの平均的な沈着量を得るため、各調査箇所の3m四方内から5地点の土壌を採取し、固定式ゲルマニウム半導体検出器で核種分析した結果の平均値を求めた。しかし、3m四方内の非常に狭い範囲ですら、1箇所で採取した5試料の放射性セシウムの放射能濃度の変動係数が平均で36%と大きかった⁸。そこで、放射性セシウム沈着量の経時変化の確認にあたっては、各箇所の平均的な沈着量を測定可能な in-situ 測定を実施した平成24年8月調査と各時期の調査における測定結果の比を算出し、その平均値を各時期における相対的な放射性セシウムの沈着量として時間変化を考察する。また、各時期の比の標準偏差を測定値のばらつきとして考察に加える。さらに、測定値は過去の測定時期において測定場所に除染などの状況変化が確認されたことが一度も無い場合のデータとすべてのデータについて実施し、人為的なかく乱の放射性セシウム沈着

⁸ 文部科学省、農林水産省、"平成23年度科学技術戦略推進費 東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故に伴い放出された放射性物質の分布状況等に関する調査研究結果、" 放射線量等分布マップの作成等に関する報告書(第1編)(文部科学省)、page.1-54、(平成24年3月)。

量に及ぼす影響を考察した。

図-9 に平成 24 年 3 月調査から平成 29 年 9 月調査の放射性セシウム沈着量の変化傾向について示す。沈着量の変化の評価にあたっては、空間線量率や沈着量の低減率からの判断ではなく、測定員による現地確認の他、測定箇所付近の方や地元自治体への問合せにより情報が得られた箇所を除染の実施が確認された箇所とした。必ずしもすべての除染実施の情報が得られたわけではないので、この分類の段階で一定の不確かさが含まれる。なお、除染等の実施が確認された箇所での測定でも同じ重量緩衝深度を適用し沈着量の評価しているため、これら地点では実際の沈着量よりも過小評価される⁹。除染箇所を除外した黄色のシンボルは、放射性セシウムの半減期から計算した理論的な曲線上に一致した。一方、全データを示す青色のシンボルは半減期の曲線から下方にプロットが位置しており、除染等による放射性セシウムの沈着量減少が認められた。2015 年以降については、t 検定により有意差が確認された。この結果から、事故により沈着した放射性セシウムは除染等人為的かく乱の影響を除けば物理的半減期に従い減少していることがわかる。

(5) 天然放射性核種の評価

可搬型ゲルマニウム半導体検出器による in-situ 測定では、放射性セシウム沈着量の評価と同時に土壤中に含まれる天然放射性核種濃度の定量も行った。ウラン系列の全核種による空間線量率のうち鉛 214 (Pb-214) とビスマス 214 (Bi-214) からの寄与が 98%、トリウム系列に関してはタリウム 208 (Tl-208) とアクチニウム 228 (Ac-228) の寄与が 90% を占める¹⁰ ため、これらの核種及びカリウム 40 (K-40) からの空間線量率を評価することで天然放射性核種に起因する空間線量率全体をほぼ評価することが可能であることから、対象核種はウラン系列から Pb-214、Bi-214、トリウム系列から Tl-208、Ac-228、及び K-40 とした。核種濃度の定量は、Pb-214 は 352 keV、Bi-214 は 1765 keV、Tl-208 は 583 keV、Ac-228 は 911 keV、K-40 は 1461 keV のガンマ線に着目して実施した。

平成 29 年 9 月調査において in-situ 測定を実施した 384 箇所のうち、上記天然放射性核種 5 核種がすべて有意検出された 350 箇所のデータを対象として、天然放射性核種による空間線量率を評価した。なお、若干の降雨の中での測定結果も含まれる(全測定箇所の 20% 程度)。5 核種について ICRU Report 53 の Table 5.2 の換算係数を用いて調査箇所ごとに空気カーマ率を求めた結果、この 350 箇所の平均値は $0.034 \mu\text{Gy/h}$ であった。これは空間線量率(周辺線量当量率)では $0.04 \mu\text{Sv/h}$ に相当する¹¹。前述のように、今回の in-situ 測定では天然放射性核種起因の全てのガンマ線の評価対象としていないことを踏まえると天然放射性核種による空間線量率を $0.05 \mu\text{Sv/h}$ ⁶ と仮定したことは妥当である。

5 核種による空気カーマ率の範囲ごとの頻度分布を図-10 に示す。また、各調査箇所での 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-11 に示す。なお、平成 22 年度 原子力発電所周辺環境放射線測定結果報告書(福島県、東京電力株式会社)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 3m のモニタリングポスト(NaI 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 $0.036 \sim 0.051 \mu\text{Gy/h}$ と報告されており、本結果とも矛盾しない。

4. まとめ

⁹ 日本原子力研究開発機構 “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, page 61 (平成 28 年 3 月)。

¹⁰ K. Saito, P. Jacob, “Fundamental data on environmental gamma-ray fields in the air due to sources in the ground,” JAERI-Data/Code 98-001, (1998 年 2 月)。

¹¹ ICRP, “Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation,” ICRP Publication 74, (1996)。

福島第一原発から 80 km 圏内を中心に平成 29 年 9 月に可搬型ゲルマニウム半導体検出器による in-situ 測定等による放射性セシウムの土壌への沈着量（土壌沈着量）の測定を 384 箇所において実施した。その結果をセシウム 134 またはセシウム 137 の土壌濃度マップとして示した。

得られたセシウム 134 またはセシウム 137 の沈着量と、土壌沈着量測定箇所と同一箇所でサーベイメータにより測定した空間線量率との相関関係から、空間線量率のみの測定が実施された約 6,570 箇所について放射性セシウム沈着量を評価した。これを in-situ 測定及び土壌採取により直接に求めた箇所のマップに加えて記すことで細密な土壌濃度マップを作成した。

放射性セシウム沈着量の経時変化について、過去の測定時期において除染の実施など状況変化が一度も確認されなかった箇所の評価と全ての箇所での評価を比較した結果、除染による沈着量の有意な減少が確認された。また、除染等箇所を除くと、長期的（平成 24 年 3 月から平成 29 年 9 月）な変化では、ほぼ物理減衰に従って減少していることが確認できた。

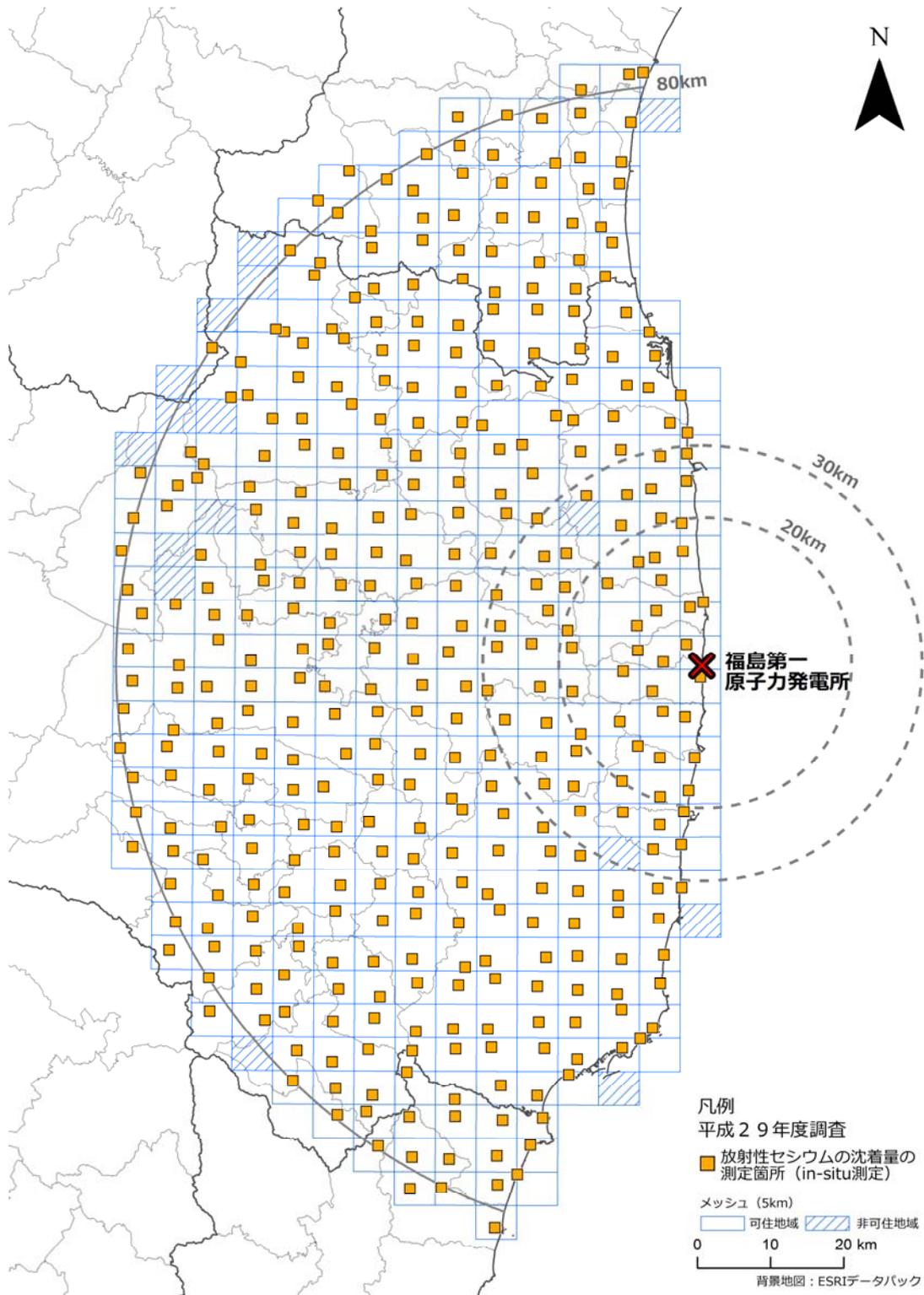


図-1 可搬型ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定等による放射性セシウム沈着量の測定箇所

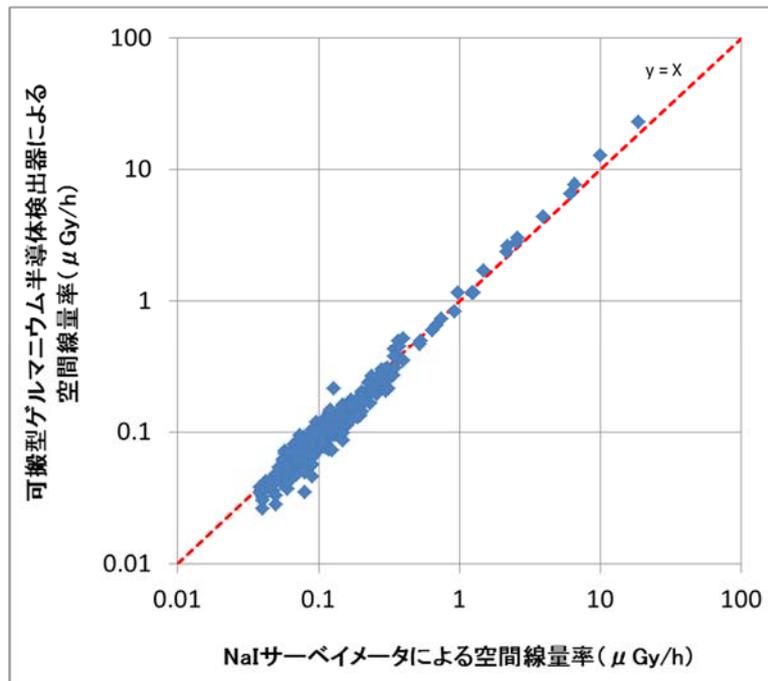


図-2 可搬型ゲルマニウム半導体検出器による in-situ 測定の結果を基に求められた空間線量率(μGy/h)とサーベイメータによる空間線量率(μGy/h)の相関
(平成 29 年 8 月 30 日～10 月 11 日に測定)

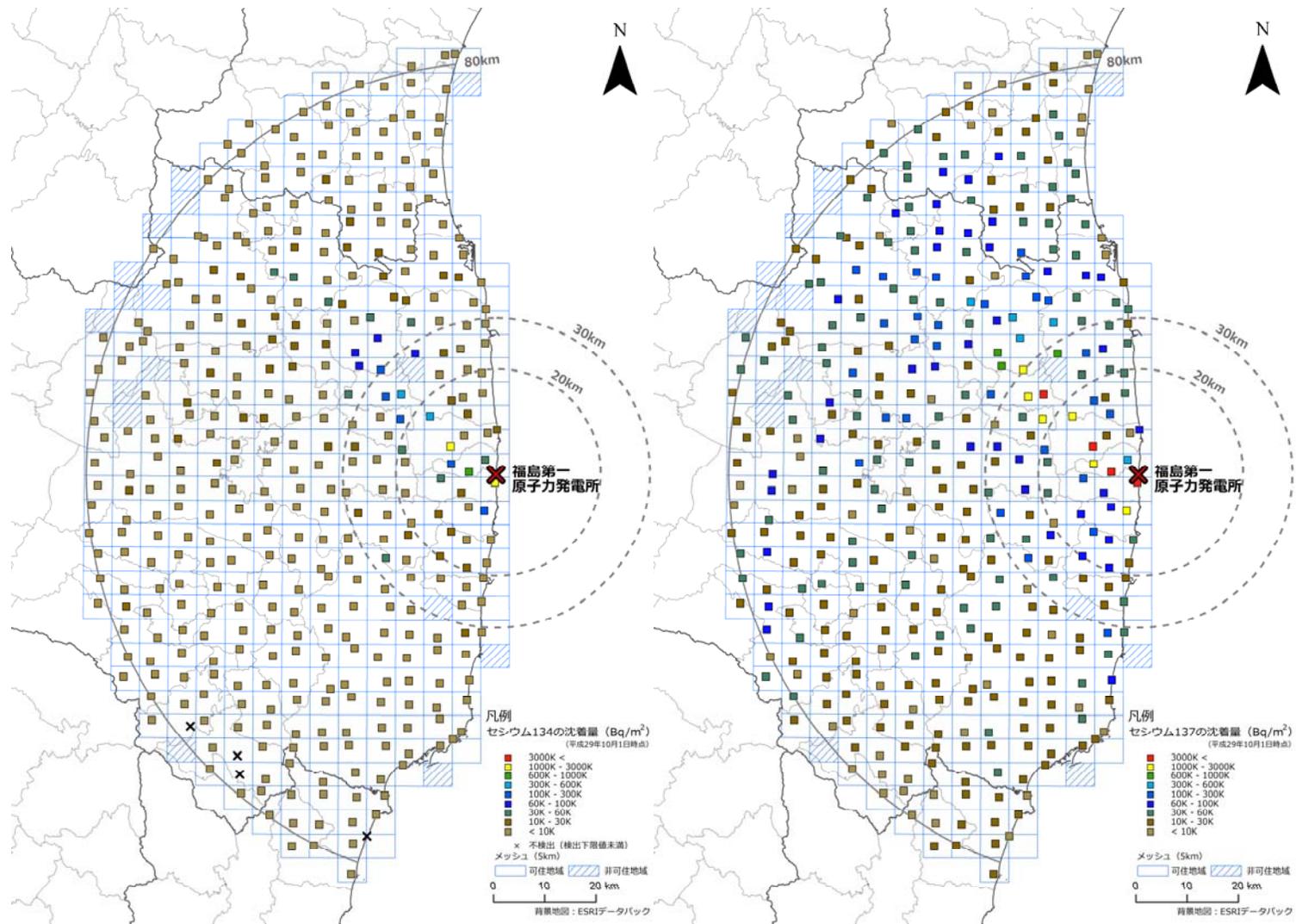


図-3 可搬型ゲルマニウム半導体検出器による in-situ 測定等を用いた放射性セシウムの沈着量を記したマップ (平成 29 年 10 月 1 日時点：緩衝深度 $\beta = 3.52 \text{ g/cm}^2$ を用いた解析結果。左図がセシウム 134、右図がセシウム 137)

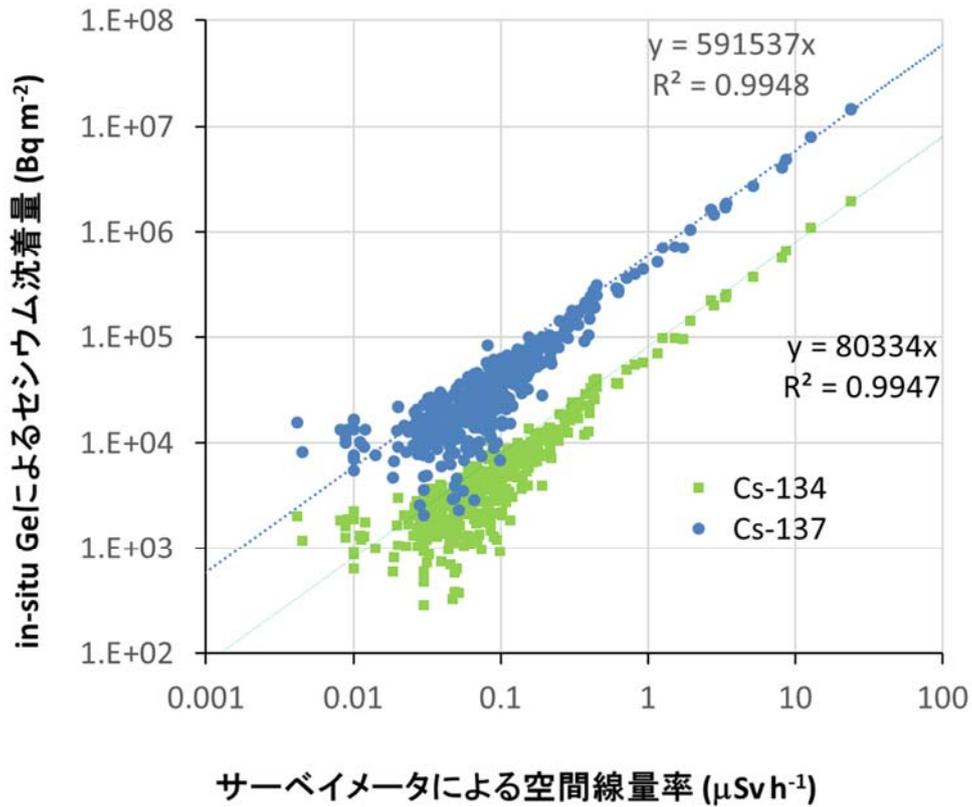


図-4 サーベイメータによる地表面から1 m高さの空間線量率と放射性セシウム沈着量の相関

(緑：セシウム134との相関(データ数 $n = 377$)、青：空間線量率とセシウム137との相関(データ数 $n = 380$)を示す。緩衝深度 $\beta = 3.52 \text{ g/cm}^2$ を用いた解析結果。平成29年8月30日～10月11日に測定)

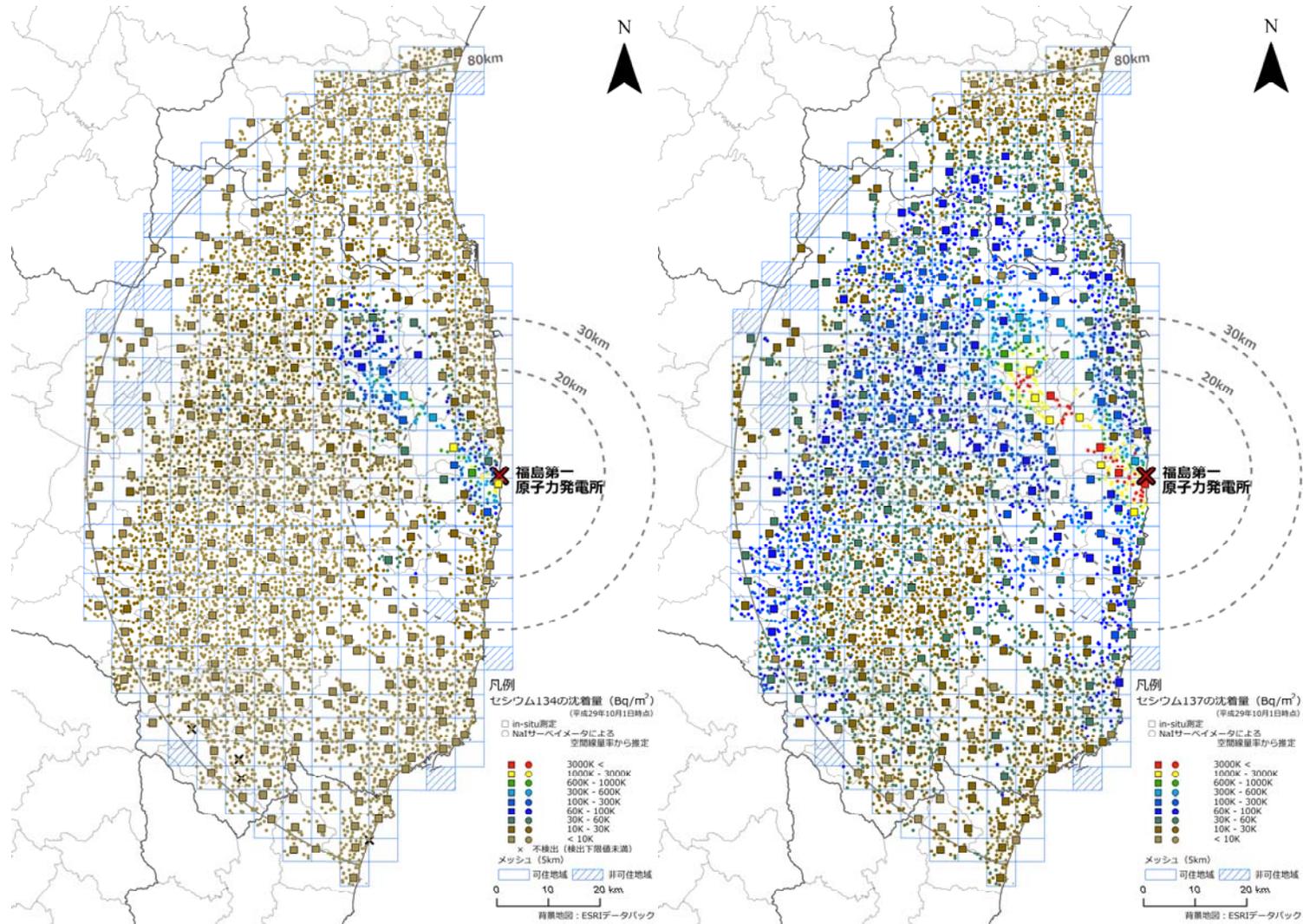
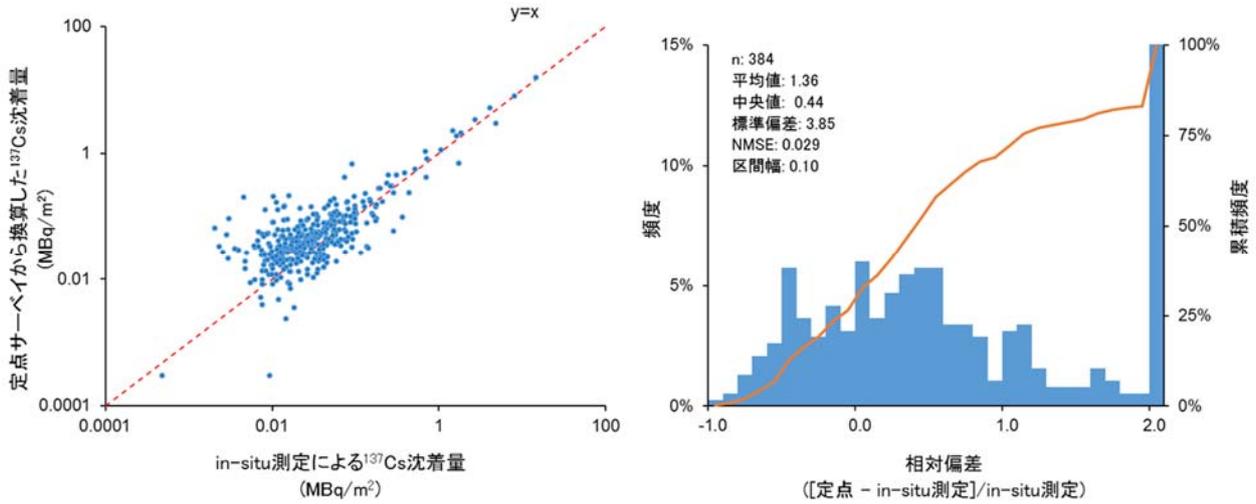


図-5 放射性セシウムの沈着量を記した土壤濃度マップ

(直接に測定した沈着量 (in-situ 測定を□) に空間線量率と放射性セシウム沈着量の相関関係を基に評価した放射性セシウムの沈着量の評価値 (○) を追加。左図がセシウム 134、右図がセシウム 137。平成 29 年 10 月 1 日時点：緩衝深度 $\beta = 3.52 \text{ g/cm}^2$ を用いた解析結果)

(a) 全データ



(b) 近傍 20 m 内のデータ

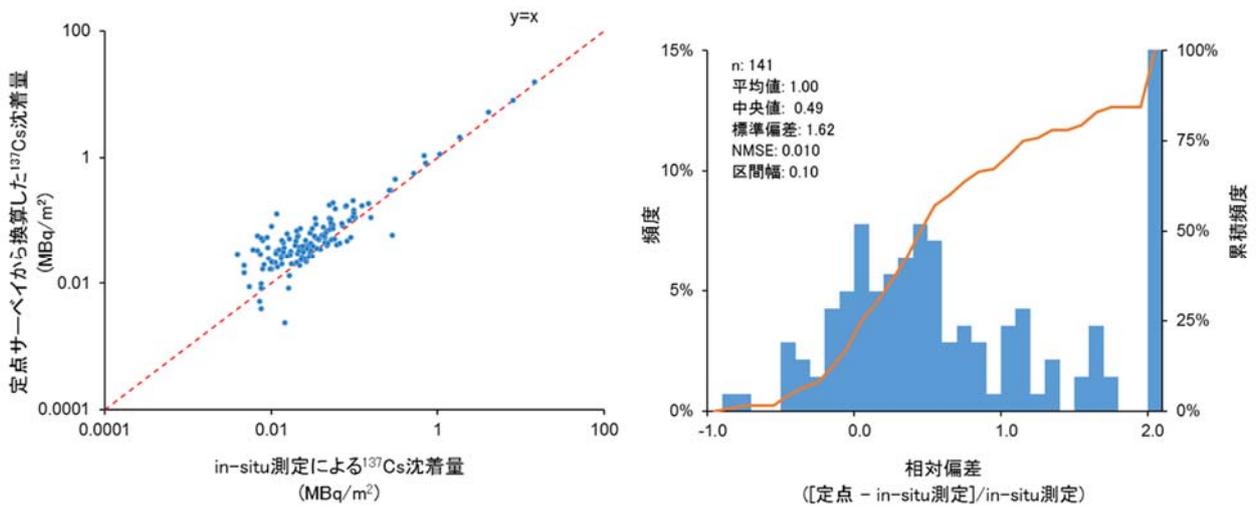


図-6 in-situ 測定によるセシウム 137 沈着量と最近傍点における定点サーベイによる空間線量率から推定したセシウム 137 沈着量の比較

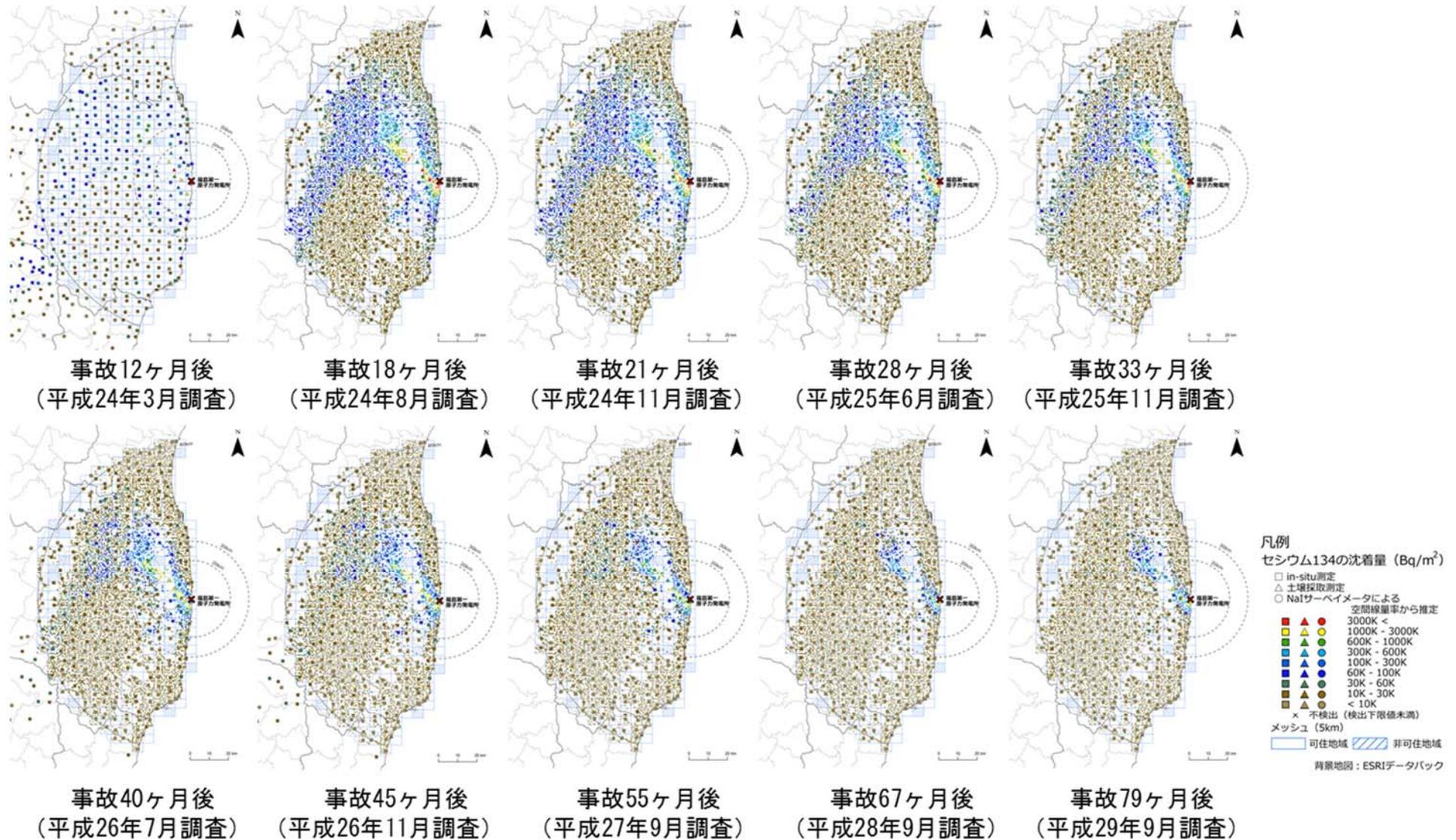


図-7 10の時期の土壌濃度マップ (セシウム134)

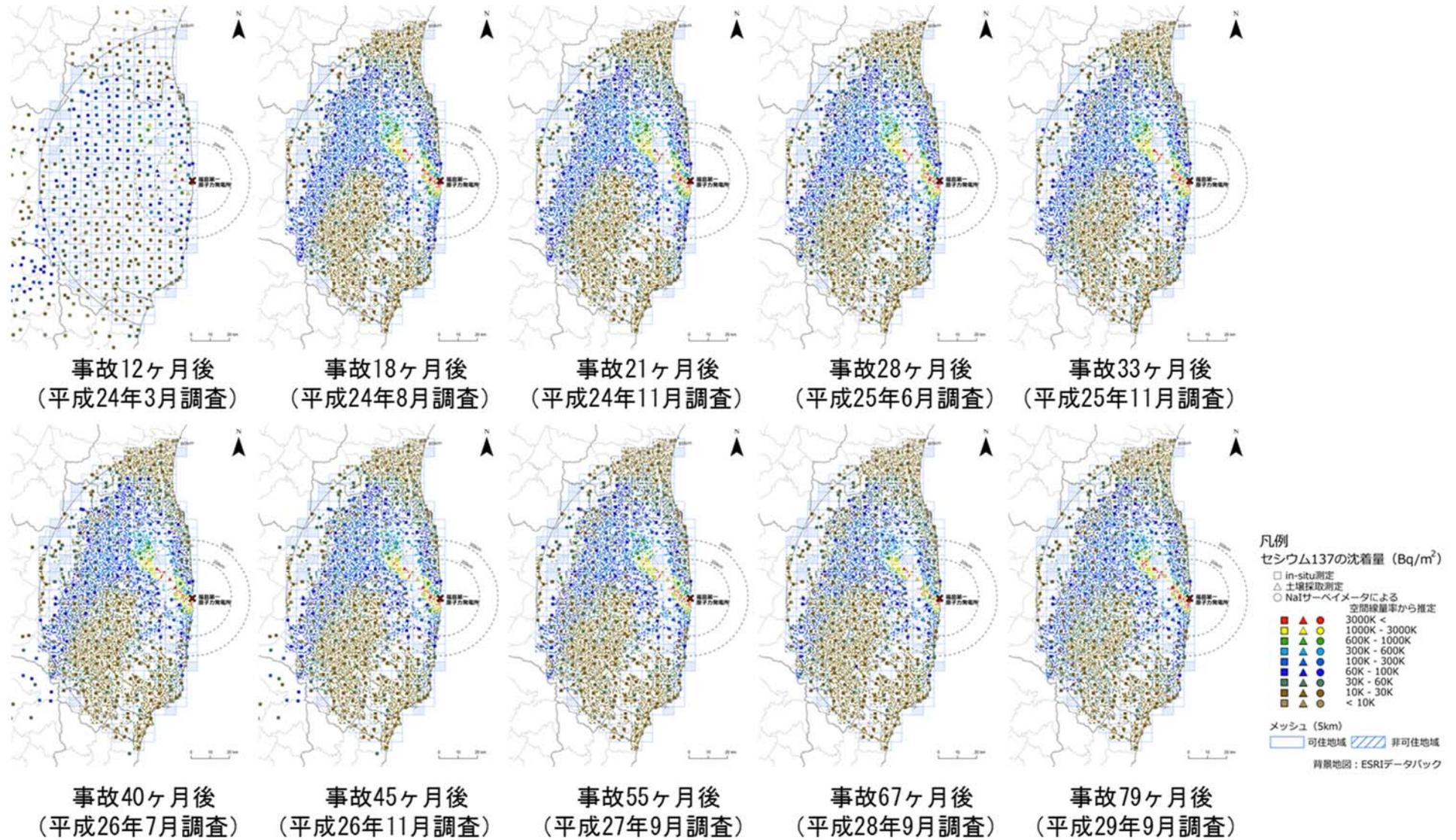


図-8 10の時期の土壌濃度マップ (セシウム137)

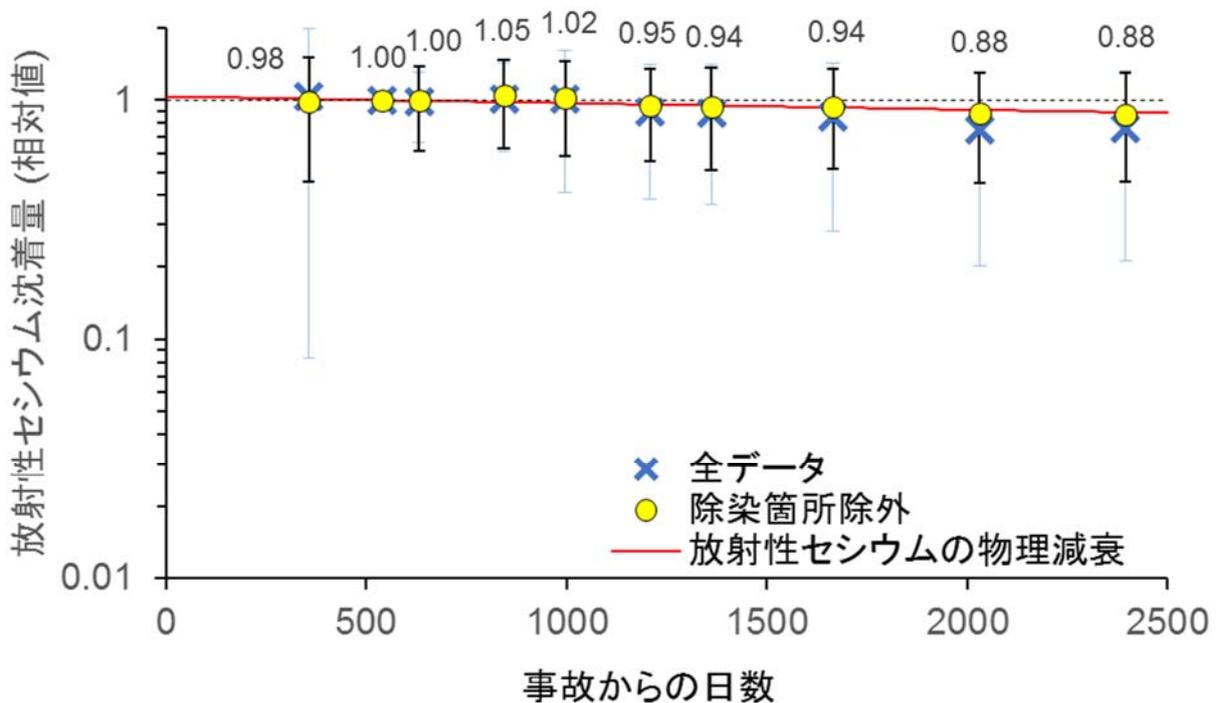
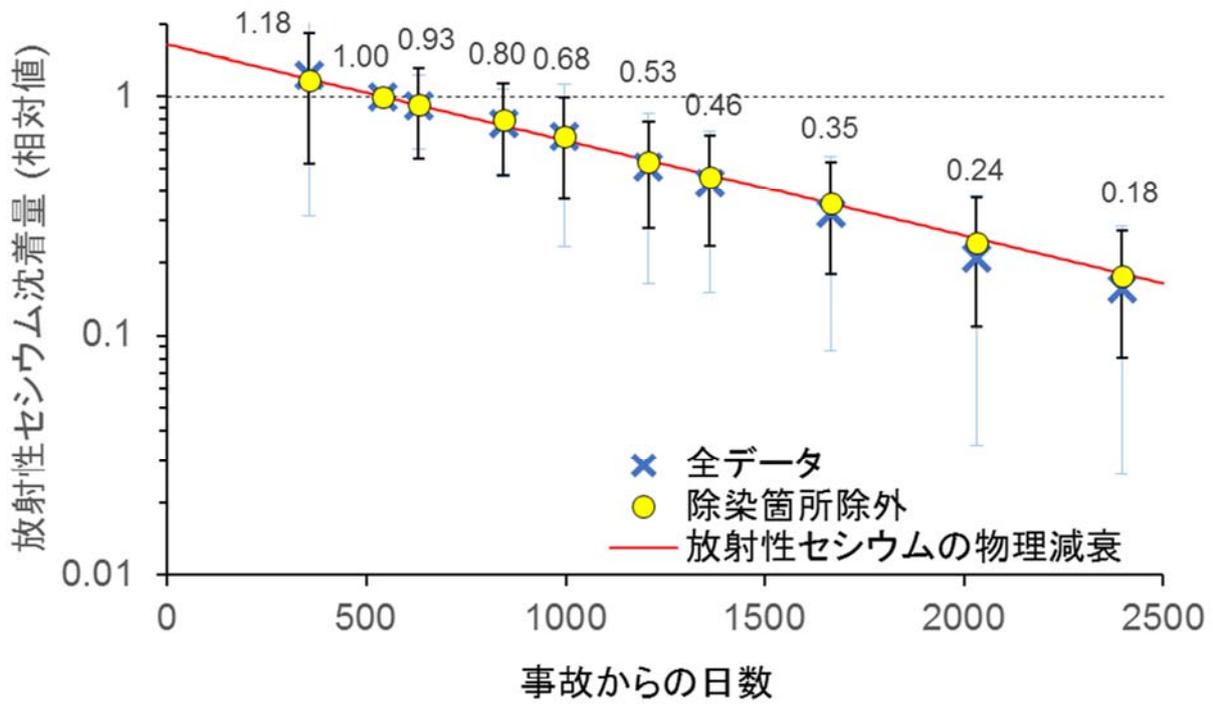


図-9 平成24年3月調査から平成29年9月調査の放射性セシウム沈着量の変化
 (平成24年8月調査を基準とした各調査での測定結果の比の平均値を比較。誤差棒は比の標準偏差を示す。上段はセシウム134、下段はセシウム137。)

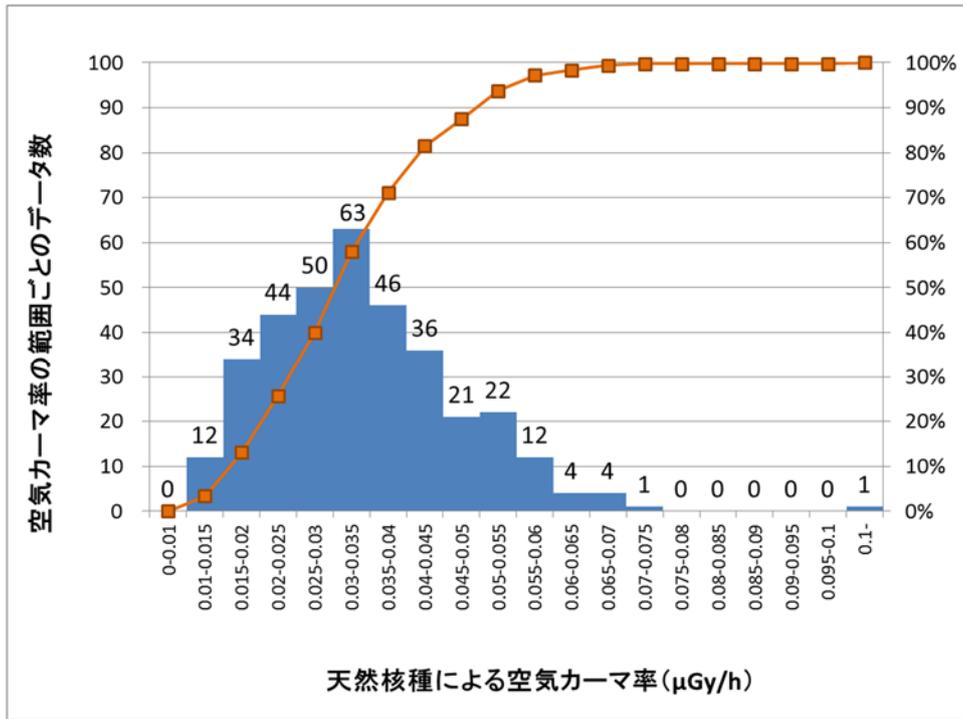


図-10 天然放射性核種による空気カーマ率の範囲ごとの頻度分布 (平成 29 年 9 月調査 : 平成 29 年 8 月 30 日~10 月 11 日に測定)

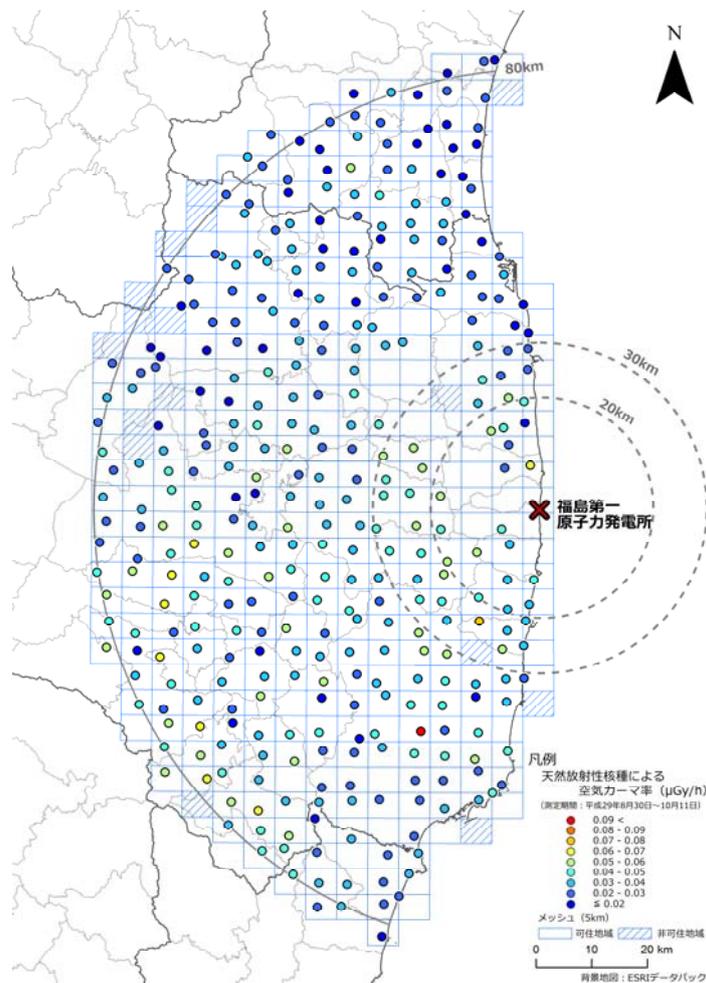


図-11 天然放射性核種による空気カーマ率 (μGy/h) の分布 (平成 29 年 9 月調査 : 平成 29 年 8 月 30 日~10 月 11 日に測定)

土壌中の放射性セシウムの深度分布調査

1. 調査目的

福島第一原発の事故に起因して自然環境中に放出された放射性セシウムの土壌中の深度分布を把握するため、スクレーパー・プレート法¹による土壌採取及び深度別土壌試料の放射能分析を実施する。

2. 調査内容

(1) 土壌採取期間

平成 29 年 8 月 23 日～9 月 13 日

(2) 土壌採取箇所

福島県、宮城県南部及び茨城県北部の 85 箇所（詳細は図-1 参照）。

（原則的には、平成 28 年度の土壌採取箇所（5 km×5 km メッシュ内）の近く。）

(3) 調査機関

原子力機構、（公財）環境科学技術研究所、（公財）日本分析センター

(4) 調査内容の詳細

土壌の採取

土壌の採取は、地表面（0 cm）～0.5、0.5～1.0、1.0～1.5、1.5～2.0、2.0～3.0、3.0～4.0、4.0～5.0、5.0～7.0、7.0～10.0 cm の計 9 層で実施した。ただし、平成 28 年度の調査で土壌深部への放射性セシウムの移行が著しいことがわかった採取箇所（015S020、015S055）は、地表面（0 cm）～2.0、2.0～4.0、4.0～6.0、6.0～8.0、8.0～11.0、11.0～14.0、14.0～17.0、17.0～20.0、20.0～25.0 cm に層分割を変更して土壌の採取を実施した。また、放射性セシウムの放射能の最大値が地中で見られ、除染が実施されたと考えられる採取箇所（005S025、020N030、040N050 及び 065N010）は、地表面（0 cm）～1.0、1.0～2.0、2.0～3.0、3.0～4.0、4.0～5.0、5.0～6.0、6.0～7.0、7.0～8.0、8.0～10.0 cm に層分割を変更して土壌の採取を実施した。

採取した各層の土壌は、重量（小石等を含む）を測定した後、十分に攪拌し、既定量を U-8 容器に封入した。

土壌に含まれる放射性セシウムの定量分析

U-8 容器に封入した土壌（以下「土壌試料」という。）は、（公財）環境科学技術研究所及び（公財）日本分析センターに送付し、ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトル解析でセシウム 134 とセシウム 137 の定量を行った。

放射性セシウムの土壌中深度分布の作成

採取した各層の土壌の重量と土壌試料の定量分析で得られた放射性セシウムの単位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 (Bq/kg)、縦軸を単位面積あたりの土壌の重量で表される地表面からの深度（以下「重

¹ 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。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。

量深度」という。) (g/cm^2)とした深度分布の図を作成した(典型的な例は図-2 参照)。このとき、各層の重量深度(湿潤)は、地表面(0 cm)から土壌を採取した層の中間までの深度として、地表面から当該層の中間までの土壌の重量及び土壌を採取した面積(スクレーパー・プレートによる土壌採取で使用した枠の大きさは、 $15(\text{cm}) \times 30(\text{cm}) = 450(\text{cm}^2)$)を用いて換算した。

重量緩衝深度 β の解析

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² ため(図-2 (a)参照)、重量深度を $\zeta(\text{g}/\text{cm}^2)$ 、重量深度における放射能濃度を $A_m(\zeta)$ (Bq/kg)とし、下に示す指数関数式³ (式-1)を用いて重量緩衝深度 $\beta(\text{g}/\text{cm}^2)$ を解析した。

$$A_m(\zeta) = A_{m,0} \exp(-\zeta/\beta) \quad (\text{式-1})$$

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

指数関数的な放射性セシウムの深度分布からの経時的な変化として、ある深さに放射能濃度のピークを持つ深度分布(図-2 (b)参照)は、52箇所(全85箇所中)で観測された。このような放射性セシウムの深度分布の形状の変化は、平成28年度の調査では38箇所(全85箇所中)で観測されており、全体に占める割合は大きく増加した。このような深度分布に対しては、下に示す双曲線正割関数に基づく近似式⁴ (式-2)を用いて重量緩衝深度 $\beta(\text{g}/\text{cm}^2)$ を解析した。

$$A_m(\zeta) = A_{m,0} \cosh(\zeta_0/\beta) \operatorname{sech}\{-(\zeta - \zeta_0)/\beta\} \quad (\text{式-2})$$

$$\ast \operatorname{sech}(x) = 1/\cosh(x), \cosh(x) = \{\exp(x) + \exp(-x)\}/2$$

ここで、 ζ_0 は放射能濃度が最大となる重量深度(g/cm^2)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-2は、土壌の深部において式-1と同じ関数形となる特徴を有しているため、土壌の深部での単位 β あたりの放射能濃度の減少割合は $1/e$ ($\approx 1/2.7$)となる。

なお、深度分布の全体像を把握することができなかつた場合、又は、除染等で人の手が加わり、深度分布が不連続若しくは不自然であり、式-1の指数関数及び式-2の双曲線正割関数で近似することが不適当な場合(図-2 (c)参照: この調査箇所(020N030)は、地表面から約5 cmまでのセシウム137の放射能濃度が極端に少なく、その境界の深度で不自然な深度分布になっていた。)には、重量緩衝深度 β の解析を行わなかつた。

² 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, (2006).

³ Gamma-ray spectrometry in the environment, International Commission on Radiation Units and measurements (ICRU) report: 53, (1994).

⁴ Norihiro Matsuda, Satoshi Mikami, Susumu Shimoura, Junko Takahashi, Masakazu Nakano, Kiyotaka Shimada, Kiichiro Uno, Shigetomo Hagiwara, Kimiaki Saito, "Depth profiles of radioactive cesium in soil using a scraper plate over a wide area surrounding the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant, Japan," Journal of Environmental Radioactivity, 139, pp. 427-434 (2015).

実効的な重量緩衝深度 β_{eff} の評価

指数関数的な深度分布の場合は、式-1 が 2 パラメータ ($A_{m,0}$ 及び β) で構成されており、そのうちの重量緩衝深度 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⁵ によって、土壤に沈着した放射性セシウムの単位面積あたりの放射能（以下「沈着量」という。）(Bq/cm²) を定量することができる。しかし、ある深さに放射能濃度のピークを持つ深度分布の場合には、式-2 が 3 パラメータ ($A_{m,0}$ 、 ξ_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効的な緩衝深度（以下「実効的な重量緩衝深度 β_{eff} 」という。）を評価しておくことが土壤中の放射性セシウムの深度分布と空間線量率の関係に係る解析上便利である。そのために、式-2 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、斎藤らの地中に沈着したガンマ線源の強度に対する環境中における地上 1 m 高さでの空気カーマへの換算係数⁶ を用いて実効的な重量緩衝深度を算出した（実効的な重量緩衝深度 β_{eff} の詳細な算出方法は、昨年度（平成 28 年度）の報告書⁷ を参照のこと。）。

90%深度 $L_{90\%}$ の評価

重量緩衝深度 β (g/cm²) は土壤の深度に直接対応せず、放射性セシウムの地中への浸透の度合いを直感的に理解することに向かないため、90%深度（放射性セシウムの沈着量の 90% が含まれる地表面からの深度） $L_{90\%}$ (cm) を評価した。

3. 結果と考察

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、物理半減期の長いセシウム 137 に注目した。

本調査で得られた全 85 箇所 of セシウム 137 の深度分布を、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-1 又は式-2 を用いて（式-1 を適用した深度分布は 26 箇所、式-2 を適用した深度分布は 52 箇所であった。）重量緩衝深度 β の解析を行った。深度分布の全体像を把握することができなかつた、又は、除染等で人の手が加わり、深度分布が不連続若しくは不自然であったため、重量緩衝深度 β の解析を行わなかつた調査箇所は、7 箇所 (005S025、010N020、010S050、015S020、020N030、035S045 及び 040S075) であった。（本年度の調査で得られたセシウム 137 の深度分布は Appendix-1 を参照。上記、重量緩衝深度 β の解析を行わなかつた調査箇所については、放射性セシウムの土壤中深度分布の変遷から読み取れる除染等の可能性を赤字で付した。）

(1) 重量緩衝深度 β

式-1 又は式-2 で解析した重量緩衝深度の頻度分布（図-3 参照）は、対数正規分布に近い分布をとることがわかつたため、幾何平均値を算出した。

⁵ 本報告書（“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）の「放射性セシウム沈着量の面的調査」を参照のこと。

⁶ Kimiaki SAITO and Peter JACOB, “Fundamental data on environmental gamma-ray fields in the air due to source in the ground,” JAERI-Data/Code 98-001, (1998).

⁷ “平成 28 年度放射性物質測定調査委託費（東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約）事業” 成果報告書「土壤中の放射性セシウムの深度分布調査」

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、
 幾何平均値 2.39 g/cm² (n= 78)、幾何標準偏差 1.62、
 最小値 0.75 g/cm²、最大値 6.93 g/cm²
 であった。

(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 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、
 幾何平均値 3.52 g/cm² (n= 78)、幾何標準偏差 1.73、
 最小値 1.08 g/cm²、最大値 10.18 g/cm²
 であった。

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、福島第一原発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の幾何平均値と幾何標準偏差を図-5 に示す。本調査を開始した平成 23 年 12 月から現在 (平成 29 年 9 月) までの実効的な重量緩衝深度 β_{eff} の幾何平均値の経時的な変化は、おおよそ一次関数的な増加を示している (図中の緑の点線)。ただし、放射性セシウムの土壌中深度分布の変化の度合いは降雨量等による影響を受けるため、 β_{eff} の増加傾向には年度や季節といった任意の時間間隔で見た場合に偏りが存在する。一方で、土壌特性による影響を受けるため、放射性セシウムの土壌中深度分布の変化の度合いは調査箇所により異なっている。実効的な重量緩衝深度の幾何標準偏差は、この調査箇所による違いを反映したものである。

(3) 90%深度 $L_{90\%}$

平成 23 年 12 月からの各調査実施期間における 90%深度及びその幾何平均値 (図-6 参照) は、時間の経過とともに、わずかずつ増加 (深さ方向に移動) してきていることがわかった。現在 (平成 29 年 9 月) の 90%深度 $L_{90\%}$ の幾何平均値は、4.6 cm であった。

4. まとめ

福島第一原発の事故に起因して自然環境中に放出された放射性セシウムの土壌中の深度分布を把握するため、スクレーパー・プレート法による土壌採取及び深度別土壌試料の放射能分析を実施した。本調査では、可搬型ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定の解析、及び外部被ばく線量の評価のために、現在 (平成 29 年 9 月) の (1) 重量緩衝深度 β 及び (2) 実効的な重量緩衝深度 β_{eff} を評価した。指数関数的な放射性セシウムの深度分布 (図-2 (a) 参照) と、ある深さに放射能濃度のピークを持つ深度分布 (図-2 (b) 参照) が観測されており、後者の割合の増加に大きな変動があったものの、年々増加する傾向が示されている。また、土壌深度分布の経時的な変化の傾向を明らかにするために、(3) 90%深度 $L_{90\%}$ を評価し、その経時的な変化の傾向から、福島第一原発の事故に由来する放射性セシウムが、時間の経過とともに、徐々に地中へと浸透してきていることを明らかにした。

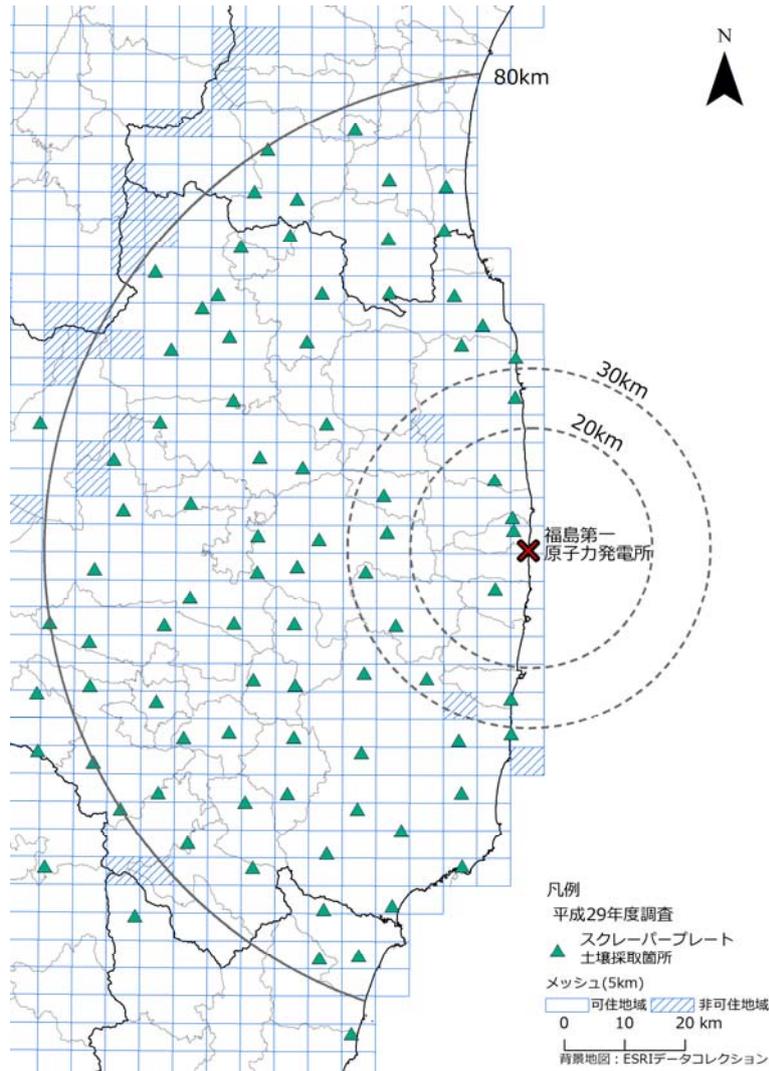


図-1 土壌採取箇所

(土壌採取法：スクレーパー・プレート法、採取期間：平成 29 年 8 月 23 日～9 月 13 日)

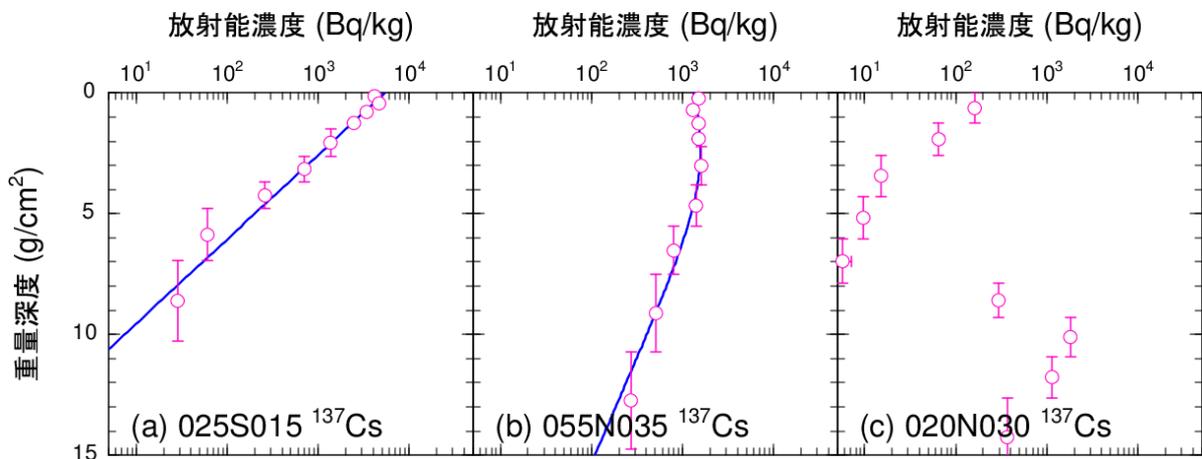


図-2 セシウム 137 の深度分布の典型的な例 (平成 29 年 9 月)

(c) 020N030 の深度分布は、地表面から 8 g/cm² 付近までのセシウム 137 の放射能濃度が極端に少なく、その境界の重量深度で不自然であった。

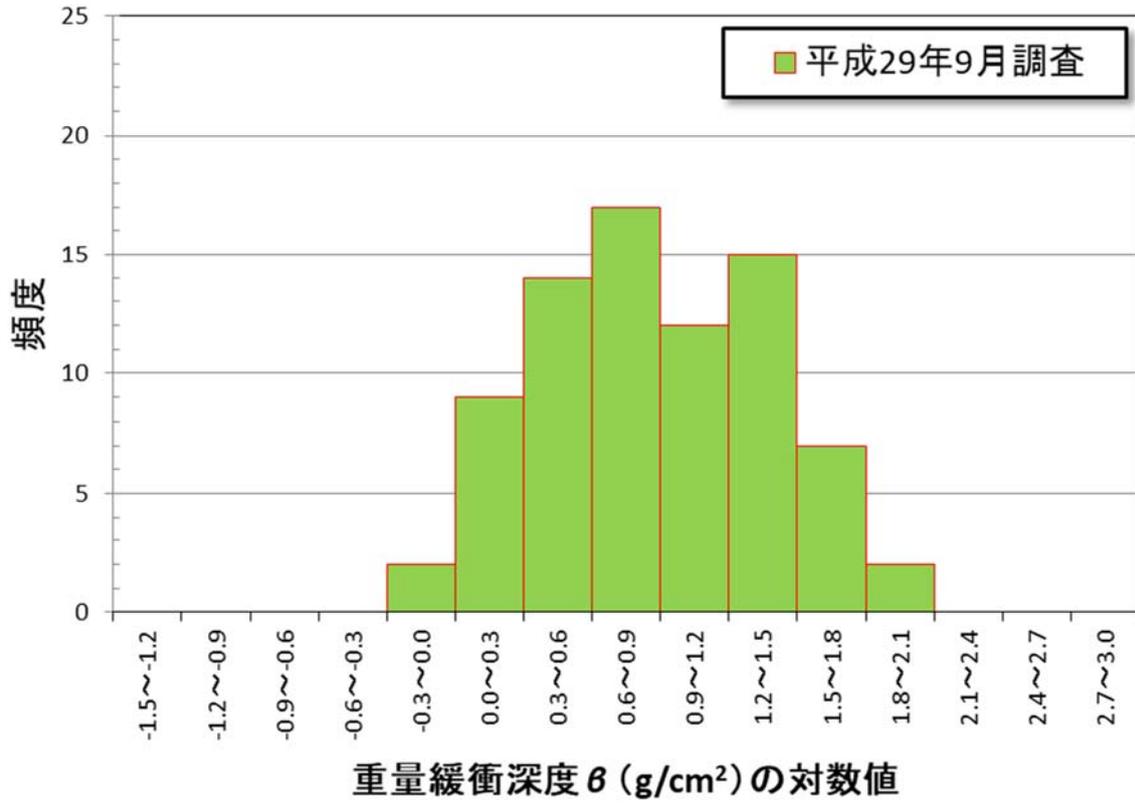


図-3 重量緩衝深度 β を自然対数値としたときの頻度分布

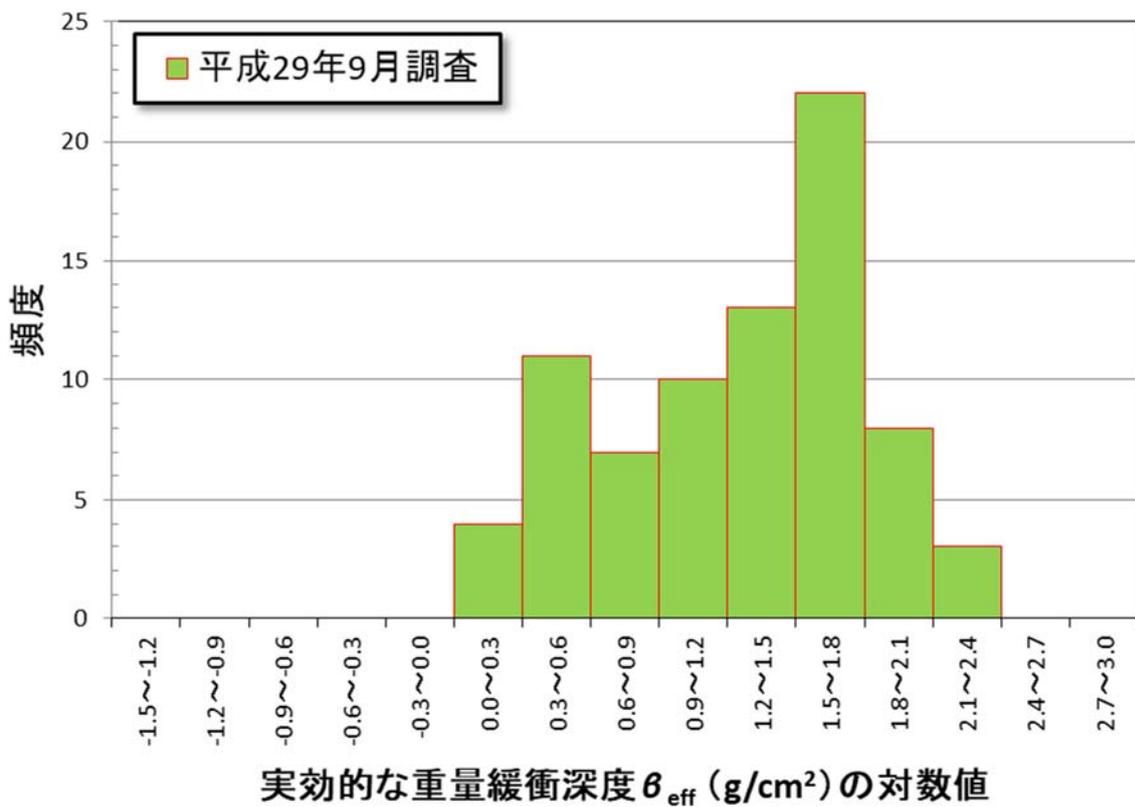


図-4 実効的な重量緩衝深度 β_{eff} を自然対数値としたときの頻度分布

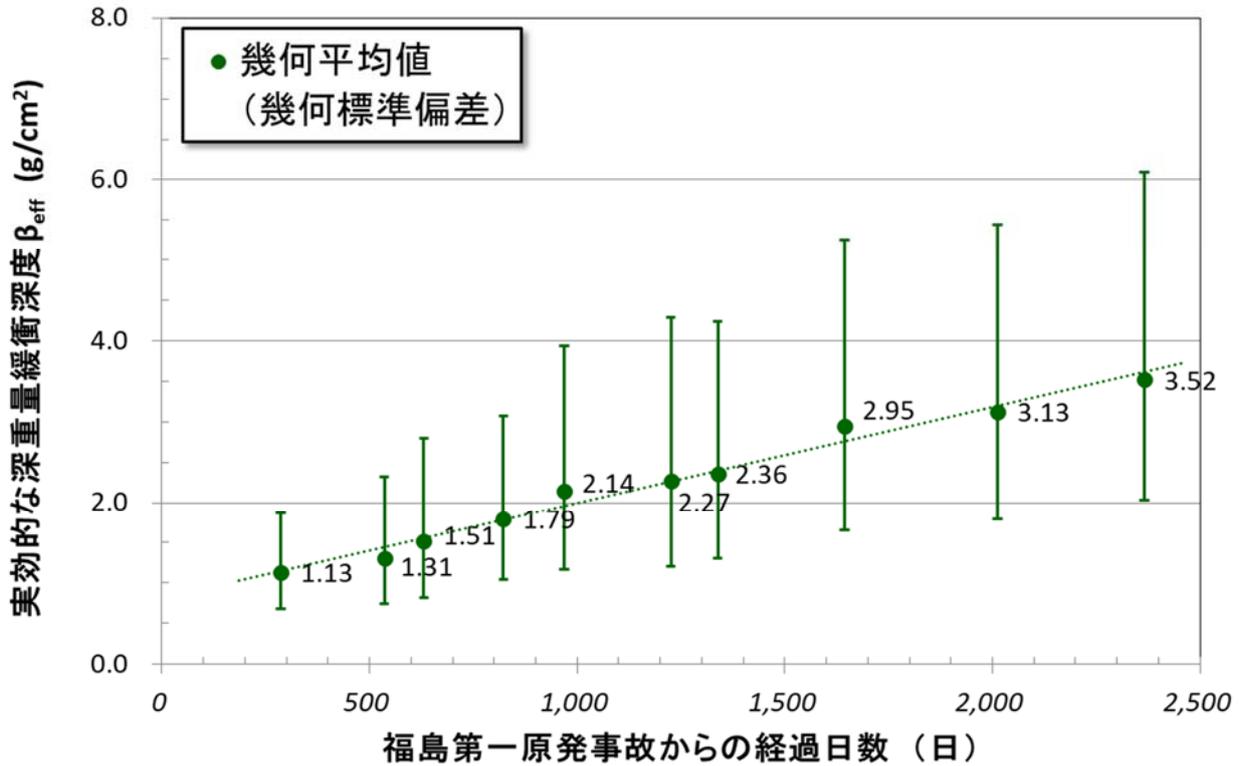


図-5 平成 23 年 12 月からの実効的な重量緩衝深度 β_{eff} の経時的な変化
(各調査実施期間における実効的な重量緩衝深度の幾何平均値を●、
幾何標準偏差を誤差棒で示す。)

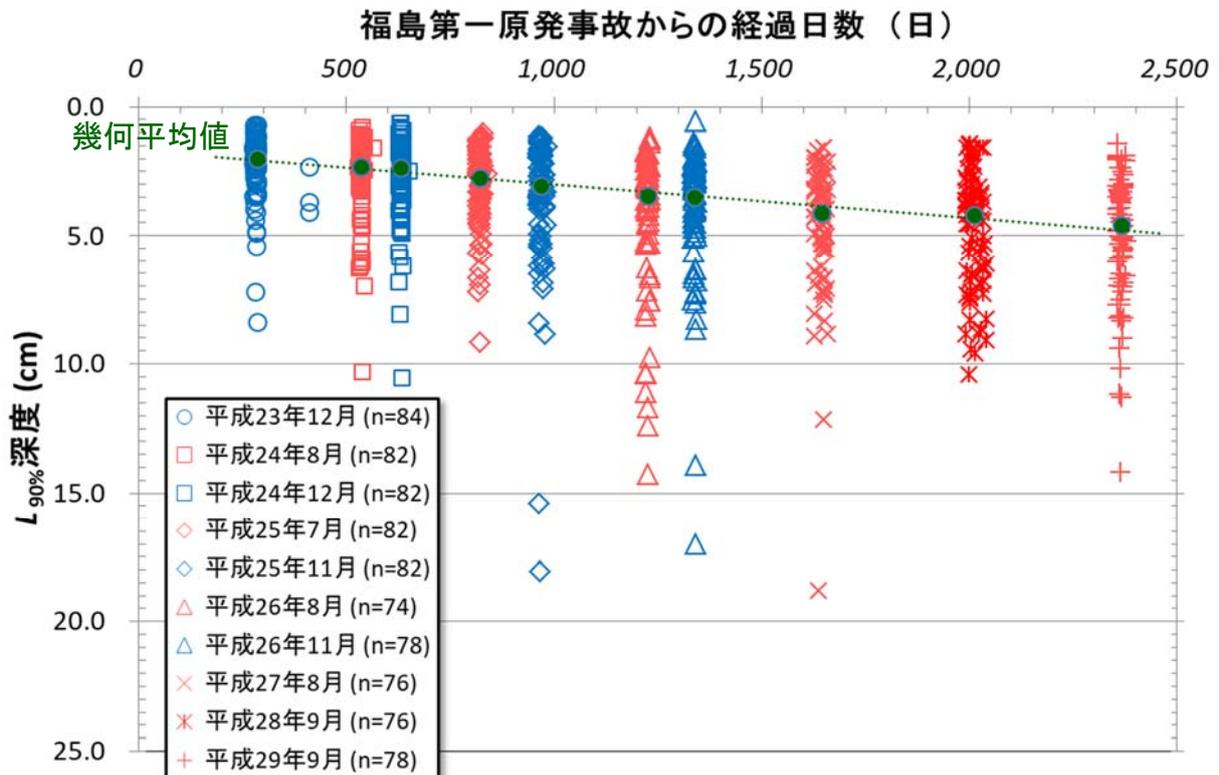
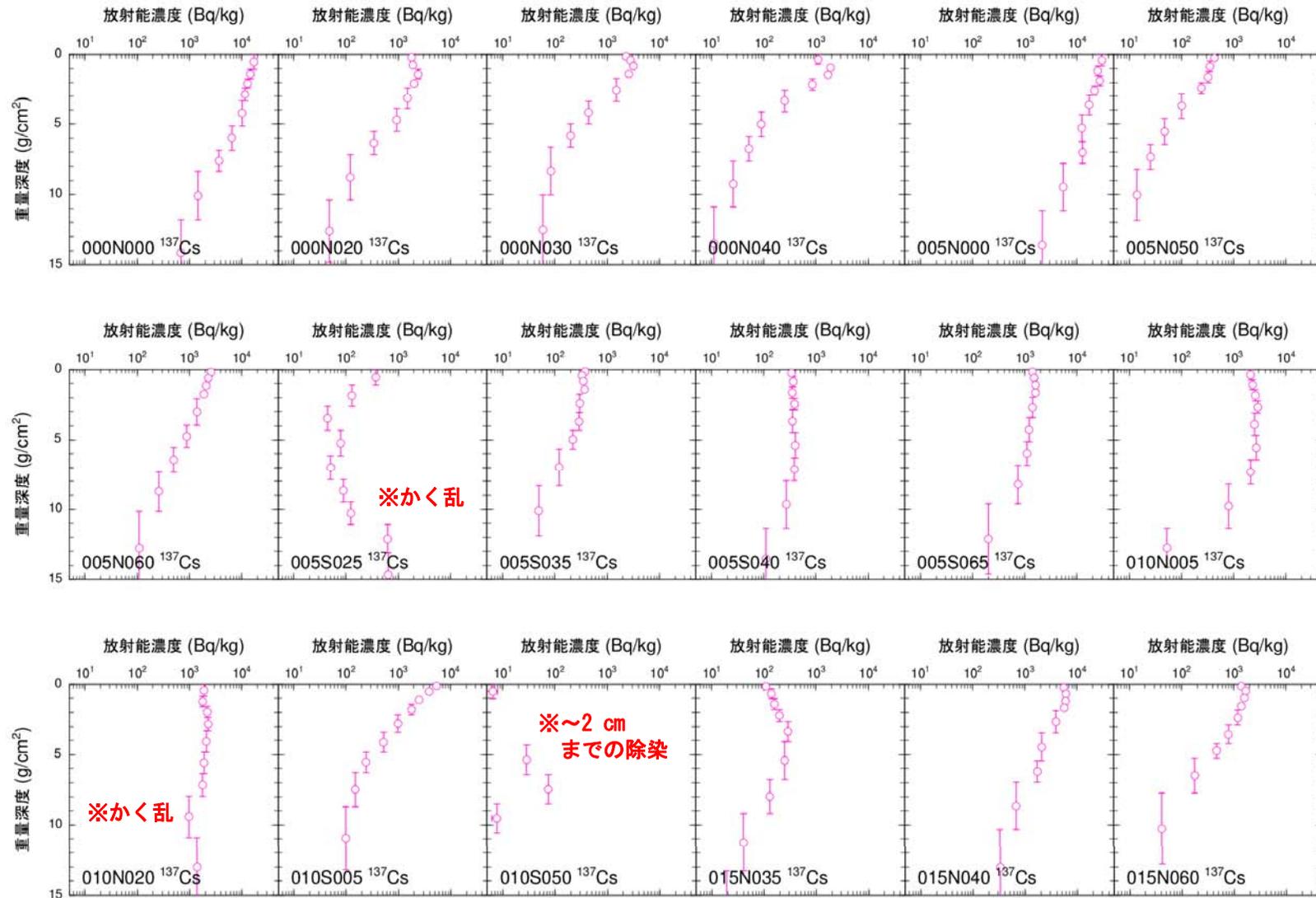


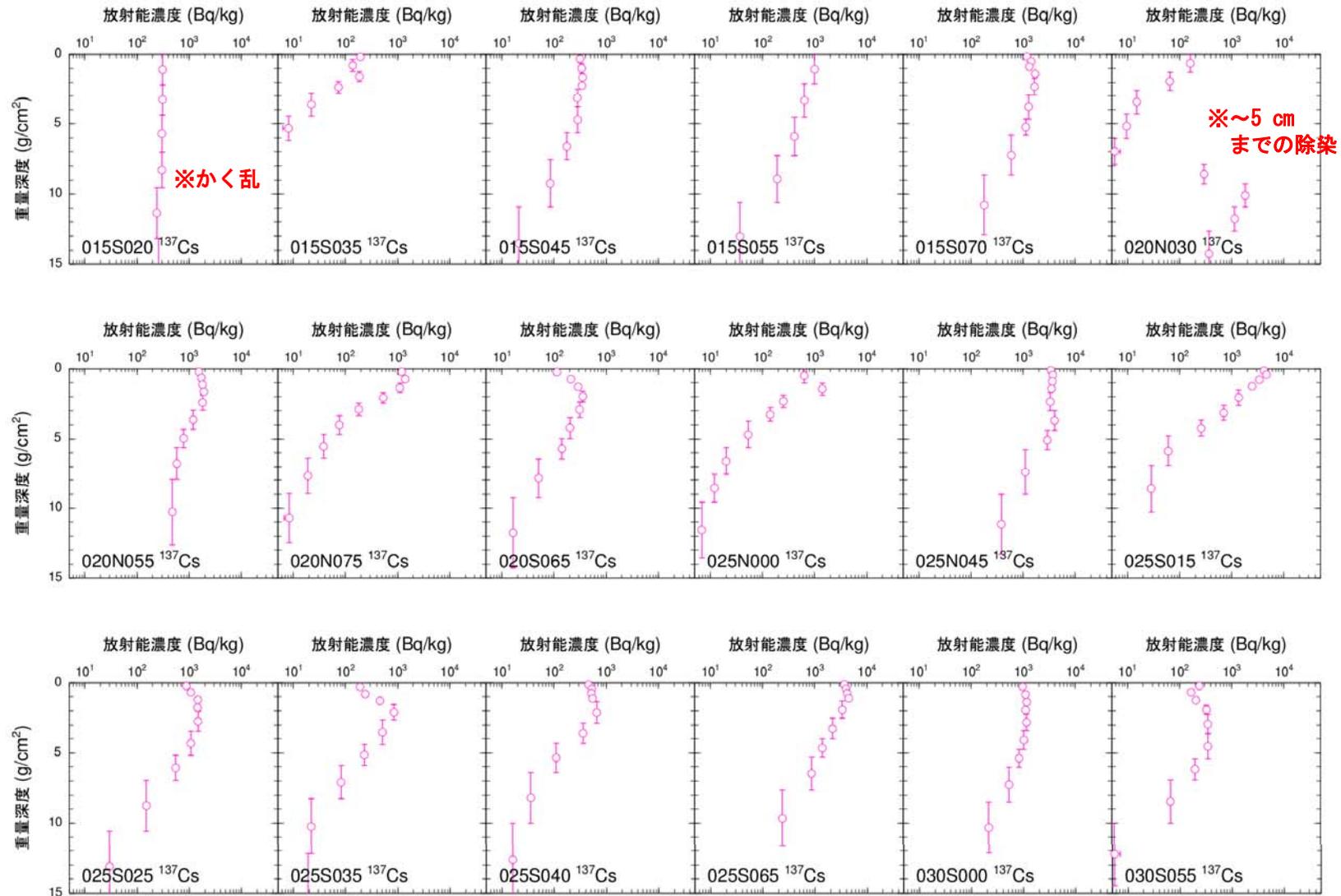
図-6 平成 23 年 12 月からの 90% 深度 $L_{90\%}$ の経時的な変化及びその幾何平均値

Appendix-1 セシウム 137 の深度分布 (平成 29 年度調査) 1/5



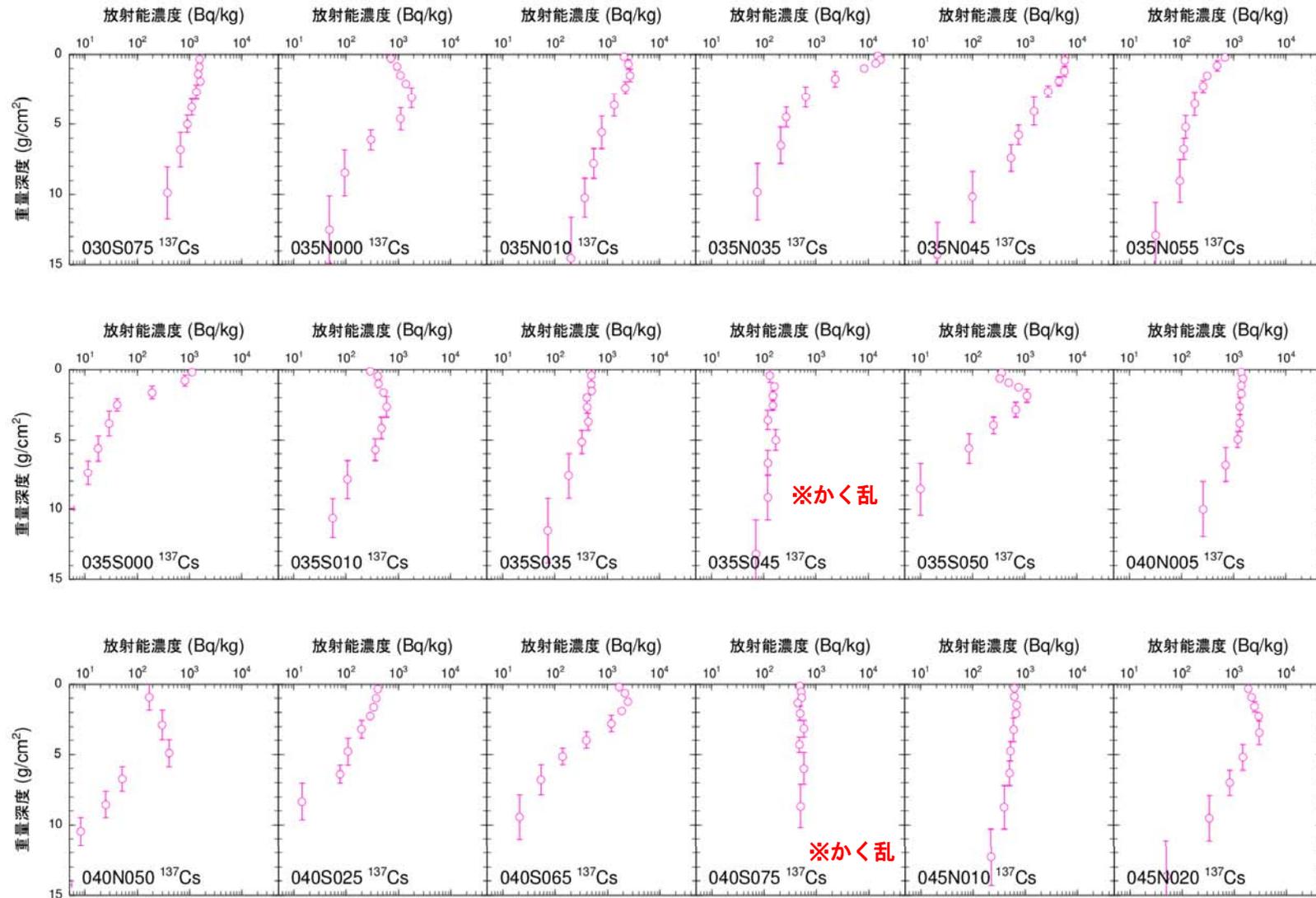
※深度分布の変遷から読み取れる除染等の可能性

Appendix-1 セシウム 137 の深度分布 (平成 29 年度調査) 2/5



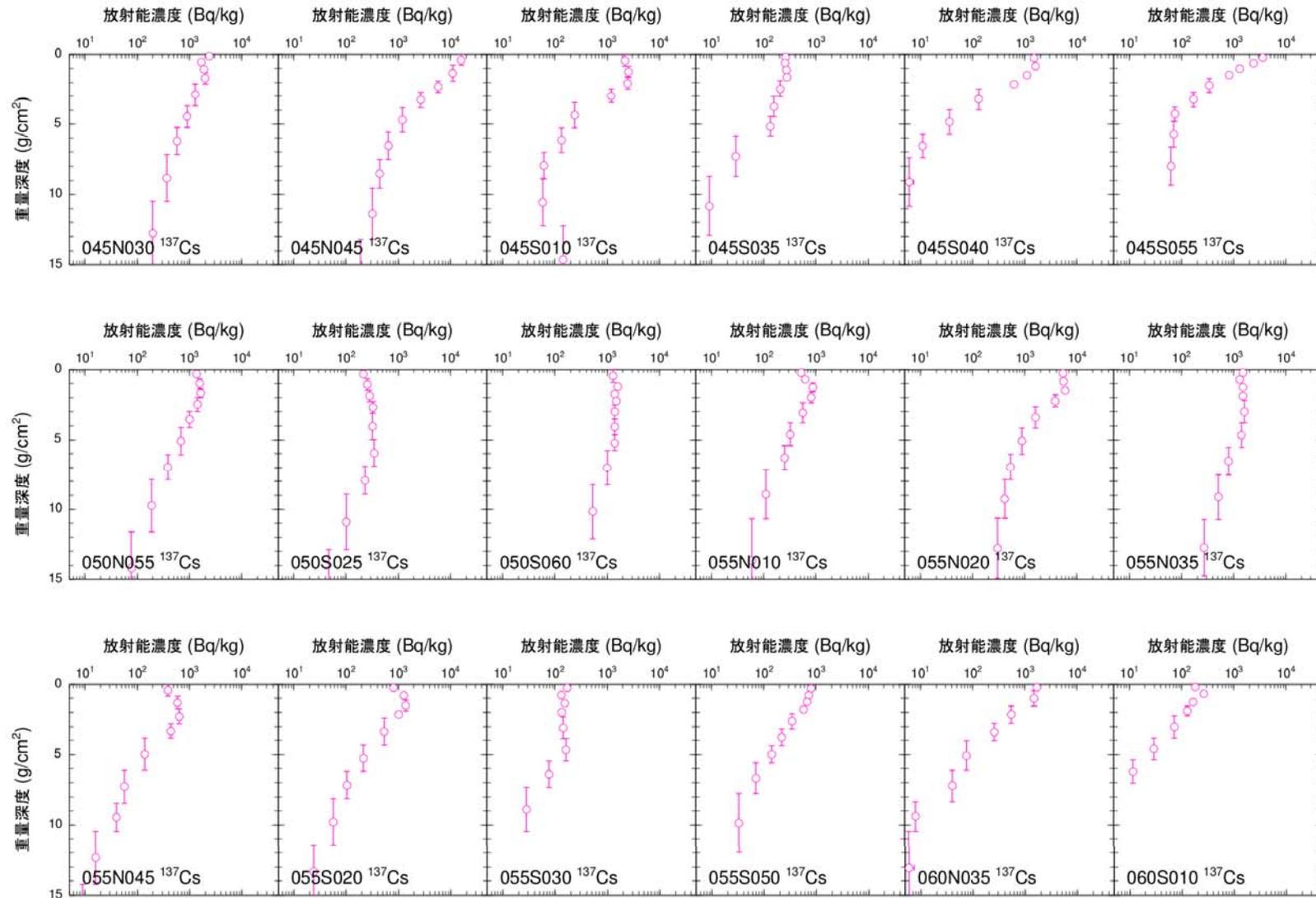
※深度分布の変遷から読み取れる除染等の可能性

Appendix-1 セシウム 137 の深度分布 (平成 29 年度調査) 3/5

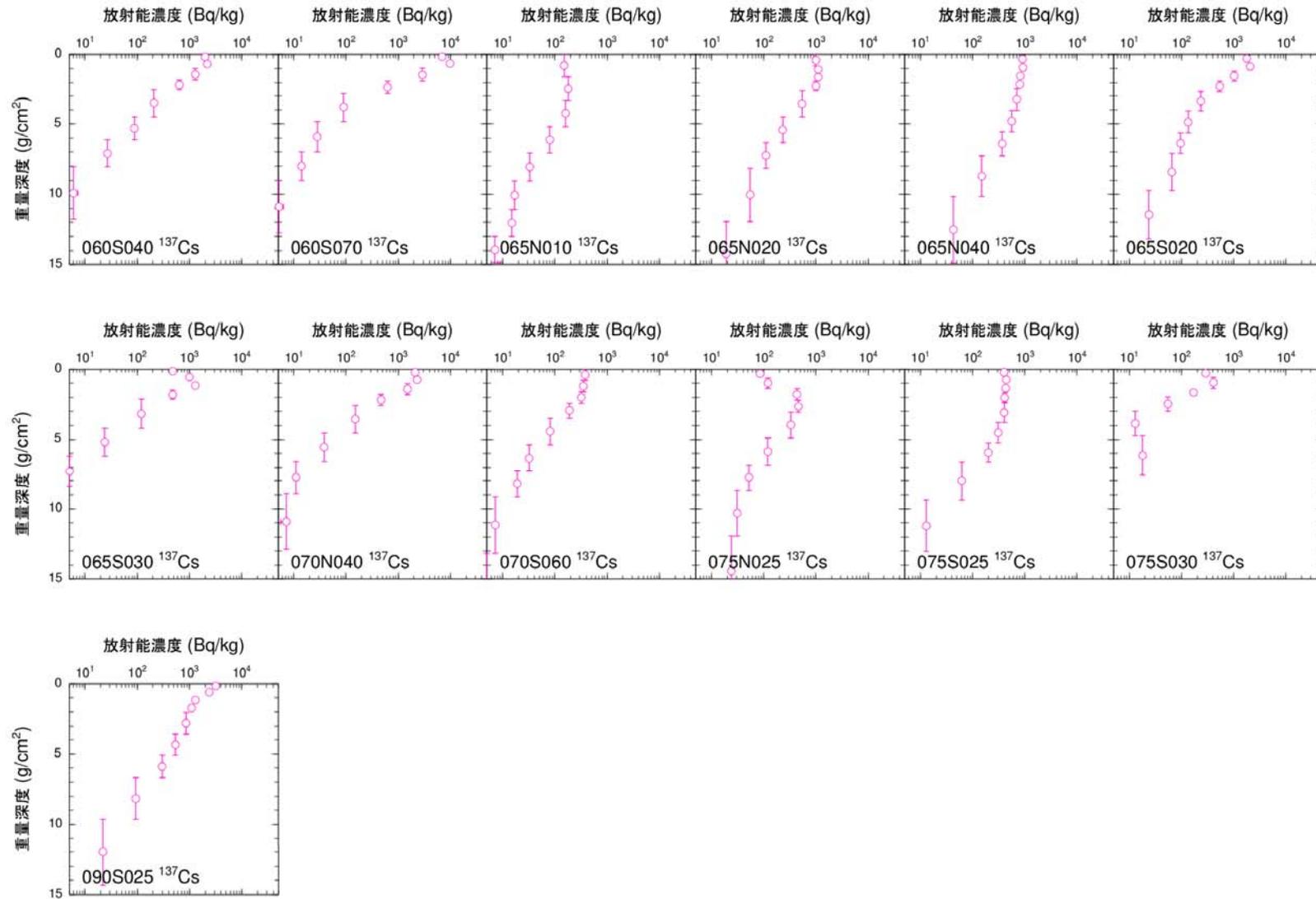


※深度分布の変遷から読み取れる除染等の可能性

Appendix-1 セシウム 137 の深度分布 (平成 29 年度調査) 4/5



Appendix-1 セシウム 137 の深度分布 (平成 29 年度調査) 5/5



空間線量率の統合評価

1. 調査目的

本事業においては、これまでに数種類の異なる測定方法を用いて空間線量率分布の大規模調査を行ってきた。本事業外においても航空機モニタリングが継続的に行われ、広域の空間線量率分布マップが作成されてきた。各測定方法はそれぞれの特徴を有しており、異なる性質を有する空間線量率情報が蓄積されてきている。これらの空間線量率分布情報を統合することにより、対象領域全域に対する精度と空間分解能の高いマップを作成することが可能である。

ローレンスバークレー国立研究所(LBNL)のMurakamiらは階層ベイズ統計を応用し、異なる方法で測定された空間線量率の分布マップを統合する手法を開発し、福島市周辺の狭い地域を対象にしてマップ統合が適切に行われることを検証した¹。昨年度、村上らが開発した統合手法を避難指示区域全域に適用し、歩行サーベイ、走行サーベイ、航空機モニタリングの結果を統合し、人間の生活する場を対象とする歩行サーベイを全域で行ったことを想定した統合空間線量率マップを作成した²。今年度は、80 km 圏内全域を対象とした統合空間線量率マップを作成することとした。本報告では、統合のための基本情報である各測定データ間の相関関係、歩行サーベイ結果の自己相関関係(バリオグラム)及び検証結果とともに統合したマップの結果を示す。

2. 調査内容

(1) 異なる測定方法による空間線量率の特徴

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モニタリングの結果を統合するが、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、空間線量率の場所により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、KURAMAを利用することにより広範囲を対象に膨大な量のデータを地上で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活用することができる。しかし、道路のない地域の測定は行えない。航空機モニタリングは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ず、また空間線量率には系統的な誤差が含まれる^{1,2}。一方、測定対象とする地域全域をカバーできるという他にない大きな特徴を有している。これら異なる測定手法により得られたデータの特徴を生かしつつ、空間線量率データを統合して精度と空間分解能が高い空間線量率マップを作成する。高い位置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、位置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モニタリング、その中間的な性質を持つ走行サーベイの各データを統合する。

(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用いて、歩行サーベイ、走行サーベイ及び航空機モニタリングで得られた空間線量率分布を統合したマップを作成するとともに、統合された空間線量率マップの信頼区間を明らかにする。原子力機構と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手法¹を応用する。

統合の概略は、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 , 航空機モニタリング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ものである。 $p(y|z_w, z_c, z_A)$ 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。

$$p(y|z_w, z_c, z_A) \propto p(z_A|y) p(z_c|y) p(y|z_w) \quad (1)$$

$p(z_A|y)$: 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が y である確率

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）であると想定する。すなわち、歩行サーベイの測定データが存在する地点の空間線量率はその値を用い、測定データが存在し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ことになる（図-1 参照）。

(1) 式の条件を満たした 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 $p(z_c|y)$ を規定するデータモデルは、航空機モニタリング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決定される。歩行サーベイのデータがある地点においては、そのデータが y そのものの要素になるからである。

$p(y|z_w)$ を規定するプロセスモデルは、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データの相関関係が距離によりどのように減少するかを解析する。データモデル及びプロセスモデルの基となる環境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わかっているので、土地利用状況別に統計解析を実施しその結果を用いる。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（分散）を推定する作業を行う。

(3) 対象地域と測定データの時期

今年度は、昨年度の避難指示解除から対象地域を広げて 80 km 圏内全域に対するマップ統合を実施した。図-2 は対象地域の土地利用状況³を表しているが、黄色で示した森林が大半の地域を占めていることがわかる。図-3 は、航空機モニタリング、走行サーベイ及び歩行サーベイで得られた空間線量率マップ、並びにこれらを単純に重ねた空間線量率マップを示している。今回の統合では、空間線量率はいずれも平成 28 年秋に測定された結果を使用した。過去に行った空間線量率予測モデル開発における解析で、各測定結果間の関係が避難指示区域内と外で異なることが明らかになっているため、避難指示区域内外を分割した解析を行った。

3. 結果と考察

(1) 走行サーベイと歩行サーベイの比較

$p(z_c|y)$ 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との空間線量率を土地利用別に比較した。避難指示区域内に関する比較を図-4 に、区域外に関する比較を図-5 にそれぞれ示す。青い丸は走行サーベイと歩行サーベイとで測定地点の距離が最も近い

データ同士を比較した結果、ピンクの丸は走行サーベ이의 100 m メッシュ内に含まれる、歩行サーベ이의 20 m メッシュデータ全てを単純平均したものと比較した結果をそれぞれ示す。避難指示区域内外のいずれの土地利用状況においても、歩行サーベ이의結果が走行サーベ이의結果に比べてわずかに高めに出る傾向にある。区域内では非常に良い相関関係が見られるのに対して、区域外ではデータのばらつきが大きくなり相関関係も相対的に弱くなる傾向にある。区域内外いずれにおいても平均値を計算することで相関係数が改善される。この関係をもとに、走行サーベイによる空間線量率と 100 m メッシュ内で平均した歩行サーベ이의空間線量率と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た。

(2) 航空機モニタリングと歩行サーベ이의比較

$p(z_a|y)$ のデータモデルを決めるために、避難指示区域内の航空機モニタリングと歩行サーベイとの空間線量率を土地利用別に比較し、避難指示区域内の結果を図-6 に区域外の結果を図-7 にそれぞれ示した。青い丸は航空機モニタリングと歩行サーベイで測定地点の距離が最も近いデータを比較した結果、ピンクの丸は距離の関数で歩行サーベイデータに加重して平均し航空機モニタリングデータと比較した結果をそれぞれ示す。加重は、航空機モニタリング測定データに対する地上汚染の寄与割合が水平距離によりどのように変化するかを、Malins らのシミュレーション結果⁴を基に考慮して行った。航空機モニタリングの結果は走行サーベイの結果よりも高めに出ていることがわかる。全般的に良い相関関係が見られるが、区域外の市街地ではデータの相関が他のケースに比べて低い。これは、人間が生活する市街環境では場所による空間線量率の変動が大きいことを示唆している。加重平均値を計算することで相関係数が明らかに改善する。この結果をもとに、航空機モニタリングによる空間線量率と加重平均した歩行サーベイの空間線量率と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ることとした。

(3) 歩行サーベイ結果の空間パターンの解析

$p(y|z_w)$ のプロセスモデルを決めるために、避難指示区域内外の歩行サーベイデータに関する空間パターンの解析（バリオグラム解析）を行った。バリオグラム解析結果を3つの土地利用状況別に異なる色を用いて、避難指示区域内及び区域外に対して図-8 と図-9 にそれぞれ示した。セミバリアンスは2点間で観測される空間線量率の自己相関性の指標で、セミバリアンスが大きくなるほど空間線量率が同じ値を示す確率が小さくなる。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相関を持たない。市街地や農地では森林に比べて空間線量率の場所によるばらつきが大きい。避難指示区域内外を比べると、避難指示区域内のほうが遠い距離まで自己相関性が高い傾向が見られる。いずれも人間活動の影響が線量率のばらつきに影響を与えていることを示唆する結果となっている。このグラフの形状を指数関数で近似してプロセスモデルとして用いた。

(4) 統合結果

航空機モニタリング、走行サーベイ及び歩行サーベイにより測定した 80 km 圏内全域の空間線量率を統合したマップを図-10 に示す。区域内外それぞれに対して、上記の別々に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しこれを合成したものである。本統合では 80 km 圏内全域において 50 m メッシュ毎の空間線量率データが得られており、図-10 はこれをマップ化したものである。図-3 に示された元のマップと比べると、系統的に高めに出ていた航空機モニタリングの結果が全体的に補正されるとともに、細かな空間線量率の分布が再現されている。

(4) 統合過程の検証

今回の統合が適切に実施されていることを確認するために、避難指示区域内外それぞれにおいて土地利用状況ごとの検証を行った。それぞれのケースで 100 の歩行サーベイデータをランダムに削除した上でマップ統合を行い、統合により推定された結果と削除したデータとを比較した。その結果を図-11 と図-12 に示す。推定値は相関図上で 1 対 1 の近辺に分布しており、全体的に統合が適切に行われたことが確認できた。

4. まとめ

階層ベイズ統計手法を応用し 80 km 圏内全域を対象として、航空機モニタリング、走行サーベイ、歩行サーベイにより平成 28 年秋に取得した空間線量率分布データを統合し、統合マップを作成した。統合の基本的な考え方としては、歩行サーベイを対象領域全域で実施したと想定した場合に得られるであろうマップを作成することを目指した。避難指示区域内外で測定データ間の相関関係が異なることを考慮し、区域内と区域外のデータを分けて相関解析を行い、それぞれの結果を用いて統合を行った。統合により、地上の細かな空間線量率分布を反映しつつ全体的な航空機モニタリングの偏りを補正した統合マップが得られた。歩行サーベイ結果の一部を検証用データとして用い、それを除いて得た統合マップと検証用データが整合することが示されたことにより、今回の統合が適切に行われたことを確認した。

参考文献

- 1) Haruko Murakami Wainwright, Akiyuki Seki, Jinsong Chen, Kimiaki Saito, A multiscale Bayesian data integration approach for mapping air dose rates around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, Journal of Environmental Radioactivity, 167, 62–69 (2017).
- 2) Wainwright HM, Seki A, Chen J, Saito K: A multiscale Bayesian data integration approach for mapping air dose rates around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant-17166. Proceeding of WM2017 Conference, March 5–9, 2017, Phoenix, Arizona, USA (2017).
- 3) Takahashi, M., Nasahara, K. N., Tadono, T., Watanabe, T., Dotsu, M., Sugimura, T., & Tomiyama, N., JAXA High Resolution Land-Use and Land-Cover Map of Japan. In Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2013 IEEE International (pp. 2384–2387). IEEE, 2013.
- 4) Malins A, Okumura M, Machida M, Takemiya H, Saito K: Field of view for environmental radioactivity. Proceedings of the 2015 International Symposium on Radiological Issues for Fukushima's Revitalized Future, Paruse Iizaka, Fukushima City, Japan, May 30–31, 2015 (2015).

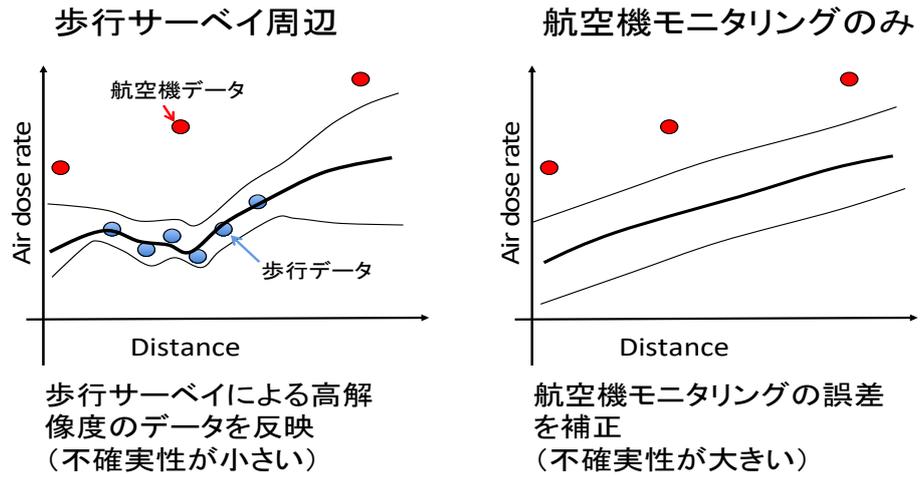


図-1 データ統合の概念図

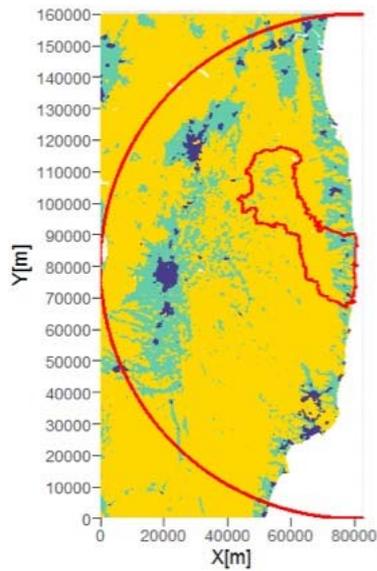


図-2 80 km 圏内における土地利用状況
青：市街地 緑：農地 黄色：森林

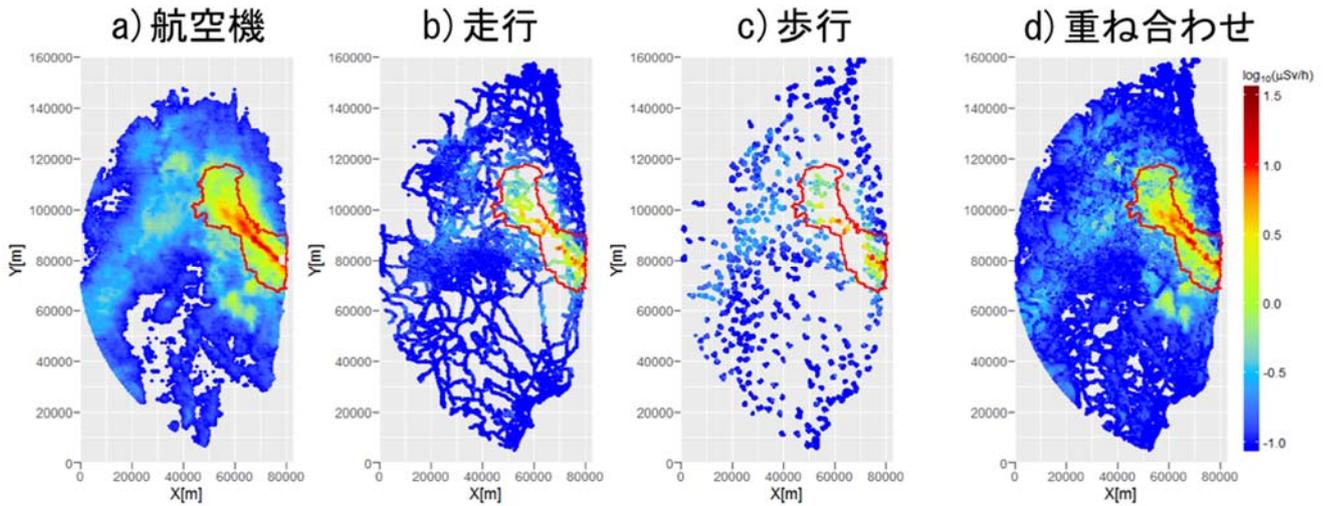


図-3 80 km 圏内における航空機モニタリング、走行サーベイ、歩行サーベイによる空間線量率マップ及びこれらを単純に重ねた空間線量率マップ

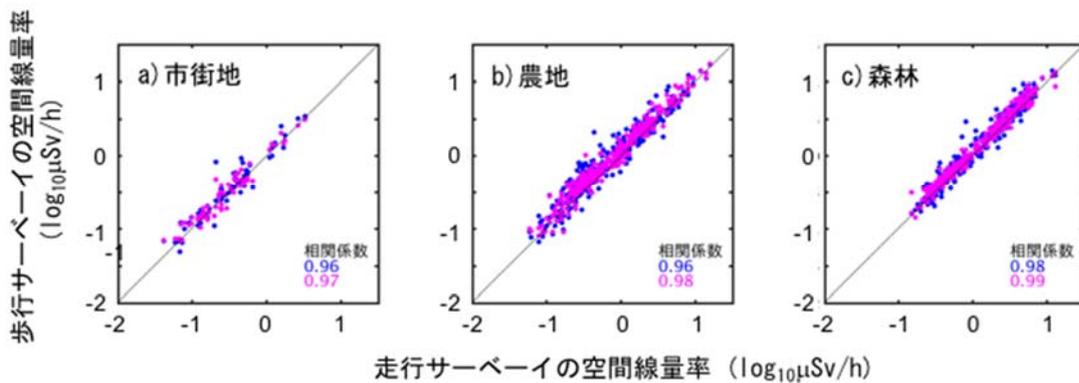


図-4 避難指示区域内における走行サーベイと歩行サーベイによる空間線量率の比較
 青い丸は測定地点間の距離が近いデータ同士の比較を、ピンクの丸は
 走行サーベイの 100 m メッシュ内に含まれる 20 m メッシュ歩行サーベイ結果全てを
 単純に平均した値との比較を示している。それぞれのケースに対する相関係数を色分け
 して図中右下に示す。直線は $y=x$ の関係に相当する。

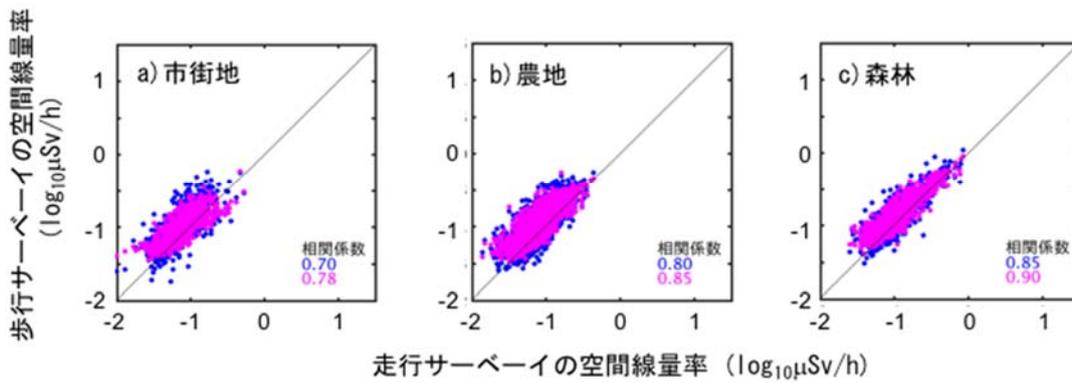


図-5 避難指示区域外における走行サーベイと歩行サーベイによる空間線量率の比較
 青い丸は測定地点間の距離が近いデータ同士の比較を、ピンクの丸は
 走行サーベイの 100 m メッシュ内に含まれる 20 m メッシュ歩行サーベイ結果全てを
 単純に平均した値との比較を示している。それぞれのケースに対する相関係数を色分け
 して図中右下に示す。直線は $y=x$ の関係に相当する。

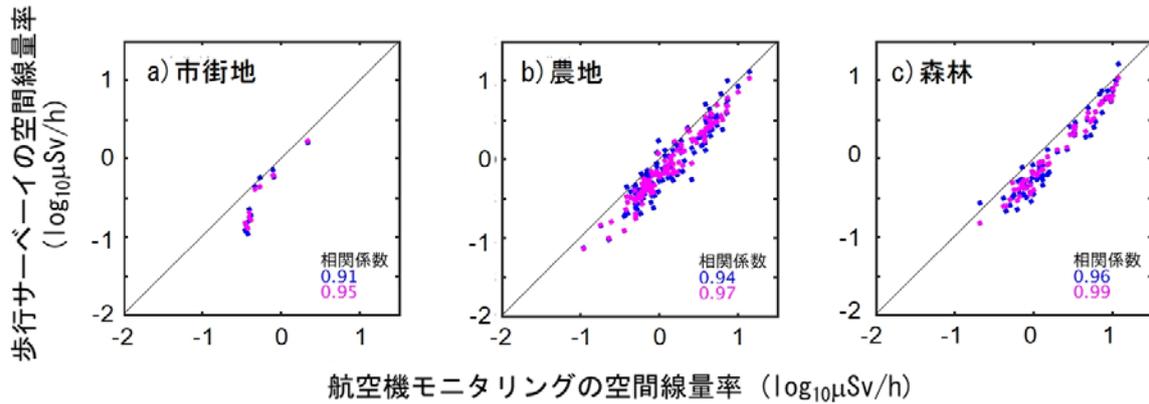


図-6 避難指示区域内における航空機モニタリングと歩行サーベイによる空間線量率の比較

青い丸は測定地点間の距離が近いデータ同士の比較を、
 ピンクの丸は距離の関数で加重平均した歩行サーベイ結果と
 航空機モニタリング結果との比較を示している。

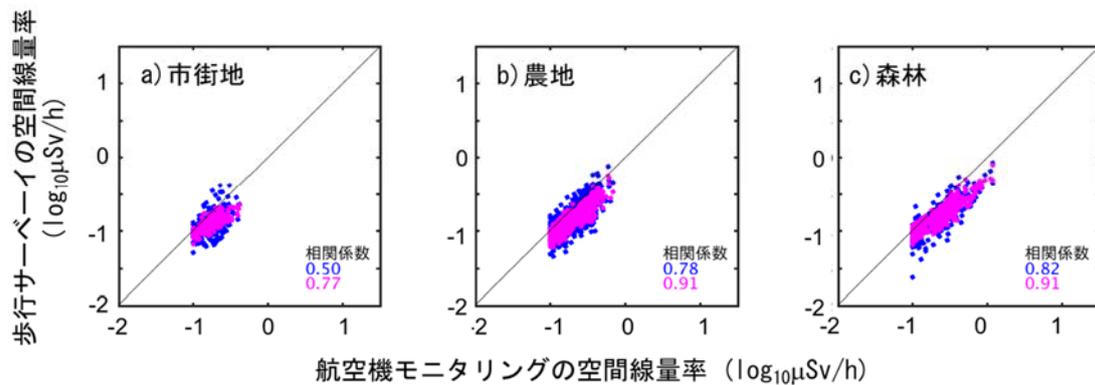


図-7 避難指示区域外における航空機モニタリングと歩行サーベイによる空間線量率の比較

青い丸は測定地点間の距離が近いデータ同士の比較を、
 ピンクの丸は距離の関数で加重平均した歩行サーベイ結果と
 航空機モニタリング結果との比較を示している。

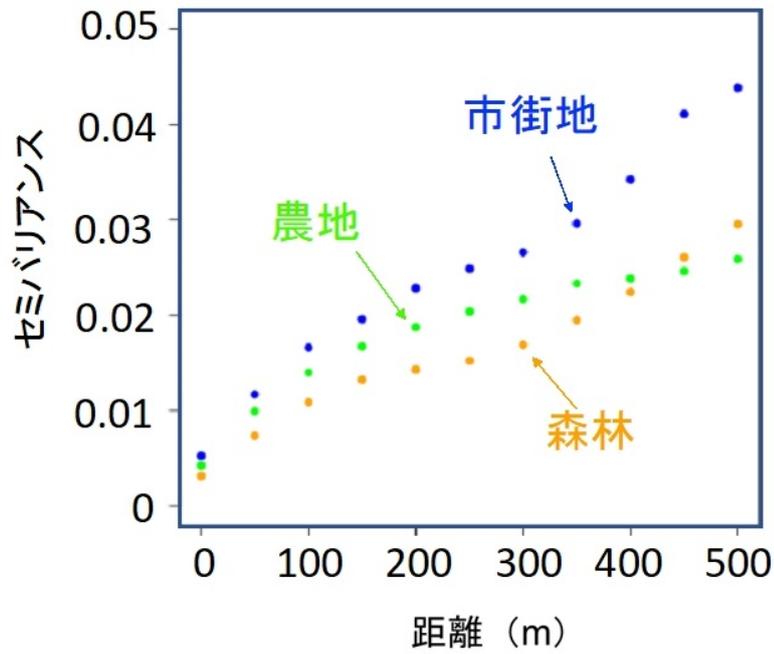


図-8 避難指示区域内における歩行サーベイによる空間線量率のバリオグラム

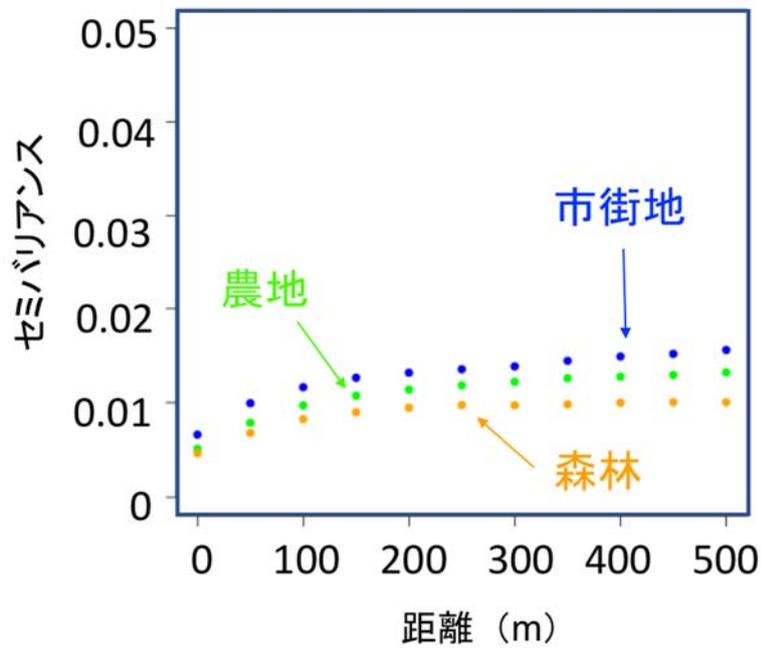


図-9 避難指示区域外における歩行サーベイによる空間線量率のバリオグラム

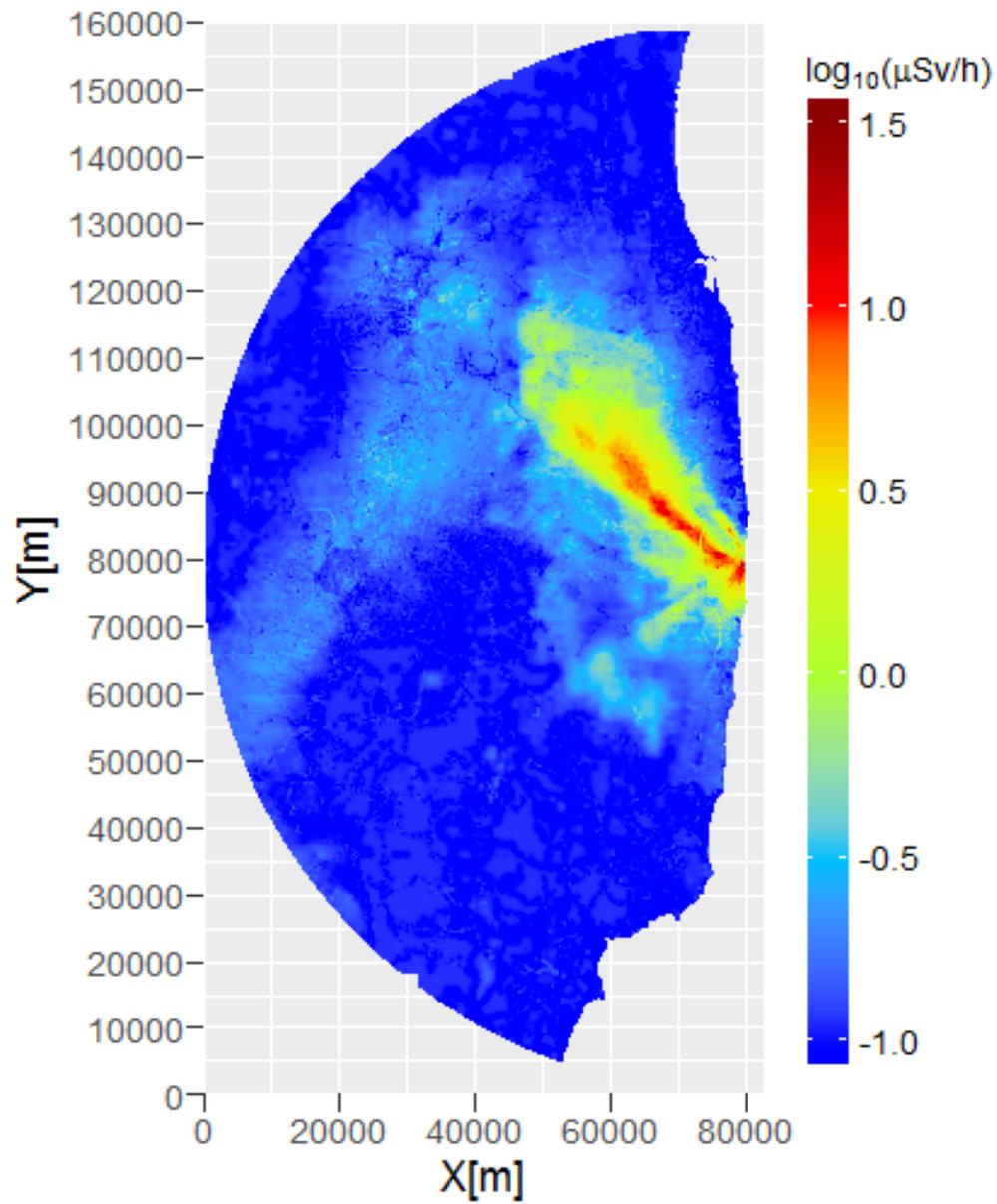


図-10 80 km 圏内全域を対象として統合された空間線量率マップ

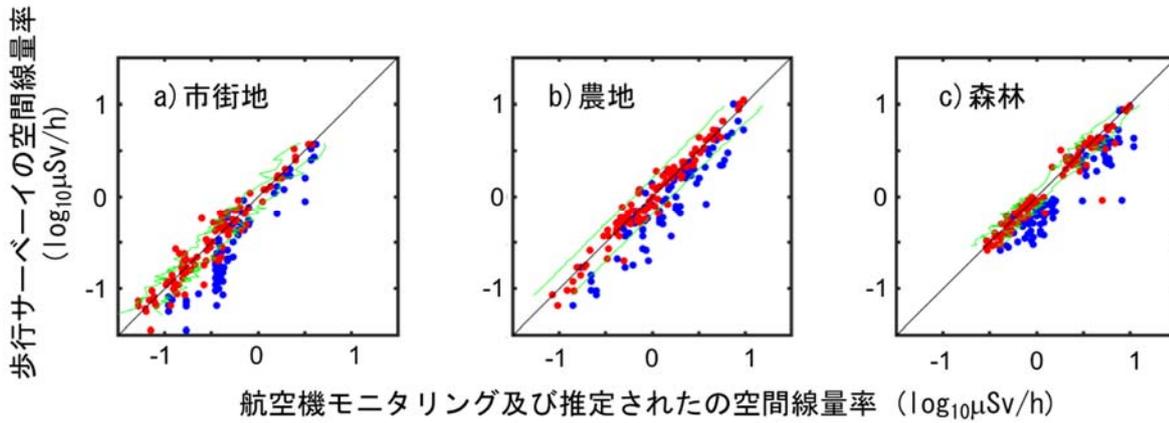


図-11 避難指示区域内を対象とした統合過程の検証結果
 青い丸は航空機モニタリングと歩行サーベイ結果の比較を、
 赤い丸は統合により推定された結果と歩行サーベイ結果の比較を、
 緑の線は統合の信頼区間をそれぞれ示している。

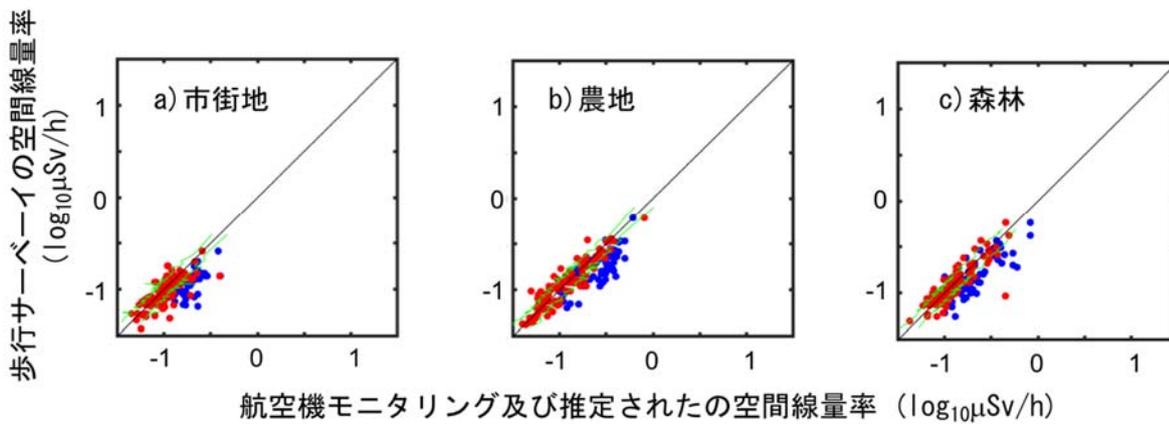


図-12 避難指示区域外を対象とした統合過程の検証結果
 青い丸は航空機モニタリングと歩行サーベイ結果の比較を、
 赤い丸は統合により推定された結果と歩行サーベイ結果の比較を、
 緑の線は統合の信頼区間をそれぞれ示している。

空間線量率等分布マップの作成と公開

1. 目的

本調査で測定し取得したデータを分かりやすく解析・加工し、関係地方自治体や住民に広く公開することで、各種対策の基礎資料を提供するとともに、一般への情報提供を行うことを目的とする。

過去 6 ヶ年継続している放射線量等分布マップ拡大サイトでは、測定データをマップ化し公開している。すでに公開中の平成 23 年度調査、平成 24 年度調査、平成 25 年度調査、平成 26 年度調査、平成 27 年度調査、平成 28 年度調査や航空機モニタリング事業のデータに加え、本年度実施するマップ事業の調査データ等をマップ化することで、放射線量等の経年変化や最新情報を同一マップシステム上で閲覧が可能となる。そのため、さらなる閲覧 Web システムの機能改善および携帯端末（スマートフォン）等を利用した多様で継続的な公開手法の提示と分布マップシステムサーバの安定した運営管理を行う。また、取得したデータを基に放射線量等の分布マップを作成し、常に住民に分かりやすい地図情報を継続的に公開する。

2. 実施内容

(1) 分布マップシステムの整備と運用管理

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。また、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（ログ解析）を実施し、安定した運用管理を心掛けた。

本調査期間内（平成 29 年 4 月 1 日～平成 30 年 3 月 20 日の 353 日間）において、システムサーバ等による障害は生じず、問題なく稼働した。アクセス管理の一環として、ログ解析を実施した結果、放射線量等分布マップ拡大サイトのユニークアクセス数¹ は、67,011 件（1 日あたり平均 190 件/前年平均 220 件）であり、ページビュー² は 98,038 件（1 日あたり平均 277 件/前年平均 540 件）であった（図-1）。図-1 の中で、9 月 3 日、4 日にアクセス数が突出しているが、国内（東京都：新宿区・千代田区）からのアクセスが大半を占めているが、不審な点はなかったため不正アクセスではないと判断した。また、東日本大震災が発災した 3 月 11 日前後に 1 年間を通じたアクセスのピークがあった。

現在のアクセスログ解析は平成 25 年度から実施している。ここでは、5 ヶ年のアクセスログ（1 日あたりのユニークアクセス数、1 日あたりのページビュー数、平均滞在時間）の推移を図-2 に示す。平成 25 年度は 1 日あたりのページビューは 1 日あたり平均 1354 件であったが、時が経つにつれて減少傾向となっている。特に平成 28 年からはサイトリニューアルによる仕様変化で、1 日あたりのページビュー数が減少している。しかし、1 日あたりのユニークアクセス数は平成 25 年度で平均 316 件から減少しているが、平均 200 件前後で推移している。拡大サイト内に滞在する平均時間も同様に、平成 25 年度は 341 秒であったが平成 29 年度では 70 秒と 5 分の 1 に減少している。

次に、訪問者の地域分析を行った。表-1 に国・地域別のアクセス数上位 10 位をまとめた。日本からの訪問数がユニークアクセス数全体の約 87.5% であり、次いでアメリカ合衆

¹ 任意の期間において、同一 IP アドレスからのアクセスを重複せずカウントする集計値。

² 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。

国（約 4.0%）、中国（約 2.0%）、韓国（約 1.5%）の順となった。この中で、多くの割合を示した日本において詳細に解析を行った結果、日本のアクセス状況は東日本地域でアクセス指数³が大きい傾向となり、特に東京都、福島県、宮城県、茨城県からのアクセスが多かった。この地域解析は、平成 25 年度調査から 5 年間実施しており、今年度の結果と同様に東日本地域のアクセス指数が大きく、西日本地域は小さくなる傾向であった（図-3）。また、平成 29 年度の期間内全体のユニークアクセス数の内訳をみると、約 85.3%（57,141 件）は一般（一般回線、海外等）からのアクセスで、残りの約 14.7%（9,870 件）は国・地方自治体や企業等の法人組織からのアクセスであった。IP アドレスに登録されている法人名から業種別（日本標準産業分類）にみると、表-2 に示すように日本全体では教育・学習支援業（学校教育等）、公務、学術研究、専門・技術サービス業（学術・開発研究機関、コンサルタント業等）、製造業、電気・ガス・熱供給・水道業の順になった。さらに、都道府県単位で見ると、東京都・福島県は公務、茨城県は学術研究、専門・技術サービス業、宮城県は電気・ガス・熱供給・水道業の業種が最も多くの割合を占めた。特に、福島県では法人アクセスの半数以上を役所関連の公務が平成 25 年度の調査から常に 1 位を占めている。茨城県も同様に平成 25 年度の調査から常に学術研究、専門・技術サービス業（学術・開発研究機関、コンサルタント業等）が 1 位を占めており、放射線量等分布マップ拡大サイトをアクセスする地域的特徴を示す結果となった。

放射線量等分布マップ拡大サイトは平成 23 年から公開しているが、その間に閲覧するデバイス等の環境も大きく変化してきた。サイトリニューアルにあたり、それぞれのデバイスに最適な地図表示ができるように改善を行っている。現在は、Web 地図（地理院地図）版、PDF 版、スマートフォン版の 3 種類を提供しているが、スマートフォンから拡大サイトにアクセスした場合は、自動的にスマートフォン版に遷移するようユーザに適した地図が表示できるようになっている。

表-3、表-4 に平成 29 年度における放射線量等分布マップ拡大サイトのユーザ環境を利用 OS やブラウザ別に閲覧頻度をまとめた。本調査期間内におけるサイト訪問したユニークアクセス数の半数以上は PC 経由での閲覧（訪問者の 65.2%）であり、34.8%がスマートフォン・タブレット経由⁴での閲覧となっている。スマートフォン・タブレットのアクセスは年々増加傾向を示している。

(2) 空間線量率等分布マップの作成と公開

① 地図画像の作成

本年度実施した福島県及び近隣各県の空間線量率測定データ・放射性核種沈着量測定データ、走行サーベイによる空間線量率モニタリングデータ等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で公開した。平成 29 年度に掲載した内容について、以下に記載する。

・ Web 地図（電子国土）版、スマートフォン版

【避難指示区域】の表示

避難指示区域（平成 29 年 4 月 1 日現在）

【走行サーベイ】の結果

第 14 次走行サーベイ（平成 29 年 7 月 3 日～7 月 21 日）

³ 都道府県間のアクセスの多寡を比較するために、アクセス元の地域データを正規化した指数。

⁴ iPhone・iPad および Android 系の OS をスマートフォン・タブレットとする。

第 15 次走行サーベイ（平成 29 年 10 月 20 日～12 月 5 日）

【放射線量等分布マップ】

平成 29 年調査（空間線量率、セシウム 134、セシウム 137）

・ 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 500 枚）を作成し、公開を行った。

②マップシステムの改善

近年、ブラウザとサーバのデータのやり取りが安全にできるように「HTTPS (Hyper Text Transfer Protocol over SSL/TLS)」の移行が推奨されている。HTTPS はデータ通信を暗号化し、第三者が解読できないようにセキュリティ対策がされているサイトを示す。放射線量等分布マップ拡大サイトも 11 月 1 日から HTTPS サイトを構築し、移行期間を設けた。現在では、ユーザ側の設定など作業なく、HTTPS サイトに完全移行している。なお、現時点まで分布マップシステムは安定に管理、運用を実施できている。

ユーザ間での情報やり取りのために、URL 上に表示している主題図や位置情報を追加することで、閲覧している状態を共有できるようにシステム変更を行った。従来まではサイトを表示すると、福島県周辺の最新の航空機モニタリングの結果が表示するようになっていた。また、サイトの URL は SNS 上でもやり取りできるように変更を行った。

(3) 避難指示区域の地図データ管理

避難指示区域は放射線量等分布マップ拡大サイトにおいても閲覧できるようにしている。また、避難指示解除の際には、その都度データ更新を行っている。図-4 に平成 29 年 4 月 1 日現在の避難指示区域を示す。

3. まとめ

本調査では、測定結果を関係地方自治体や住民に広く公開することで、各種対策の基礎資料を提供するとともに、一般への情報提供を行うことを目的としており、分布マップシステムのログ解析からそれらの情報提供を定量的に示すことができた。分布マップシステムのアクセスは日本国内からが圧倒的に多く、東日本大震災が発災した 3 月 11 日に年間アクセスのピークがあった。また、東日本地域からのアクセスが多く、西日本地域からは少ないという傾向は平成 25 年度調査から同様であることがわかった。

業種別に解析を行うと、地域によってサイトを訪問する業種の割合が異なる結果（東京都・福島県：公務、茨城県：学術研究、専門・技術サービス業、宮城県：電気・ガス・熱供給・水道業）となった。特に、福島県の公務、茨城県の学術研究、専門・技術サービス業は平成 25 年度調査から常に最も訪問数が多い業種であることがわかった。

次に、地図表示システムおよび過去に測定したデータを格納するデータベースについて、最新かつ安全なシステム更新として HTTPS 化を行った。

表-1 国および地域別アクセス状況（上位10番目まで）

国・地域名	ページビュー	ユニークアクセス	ユニークアクセス割合(%)
1. 日本	85,761	58,142	87.5
2. アメリカ合衆国	3,874	3,141	4.0
3. 中華人民共和国	1,912	1,420	2.0
4. 韓国	1,450	1,043	1.5
5. フランス	548	372	0.6
6. 香港	547	327	0.6
7. ドイツ	514	319	0.5
8. 台湾	498	326	0.5
9. スペイン	364	265	0.4
10. イギリス	309	167	0.3

※集計期間：平成29年4月1日～平成30年3月20日

表-2 都道府県ごとの業種別アクセス割合

業種別	日本全国	東京都	福島県	茨城県	宮城県
ユニークアクセス数	9,870	4,514	1,061	836	559
教育・学習支援業	24.0% (1)	16.7%(2)	30.0%(2)	12.2%(3)	43.6%(2)
公務	20.3%(2)	18.3% (1)	68.0% (1)	11.5%(4)	1.8%(4)
学術研究、専門・技術サービス業	12.1%(3)	11.3%(3)	-	39.4% (1)	-
製造業	10.6%(4)	-	-	34.9%(2)	-
電気・ガス・熱供給・水道業	6.2%(5)	10.9%(4)	-	-	48.4% (1)
情報通信業	-	9.8%(5)	0.6%(3)	1.7%(5)	-
金融業、保険業	-	-	0.4%(4)	-	-
医療、福祉	-	-	0.4%(4)	-	-
建設業	-	-	-	-	2.1%(3)
サービス業	-	-	-	-	1.4%(5)
その他	26.8%(-)	33.0%(-)	0.6%(-)	0.3%(-)	2.7%(-)

※業種分類は日本標準産業分類（総務省）を用いた。

上記以外の分類項目を「その他」としてまとめた。

※（）は全国、都、県内に占める割合のランキング

表-3 ユーザ環境（利用OS）別閲覧頻度（上位10番目まで）

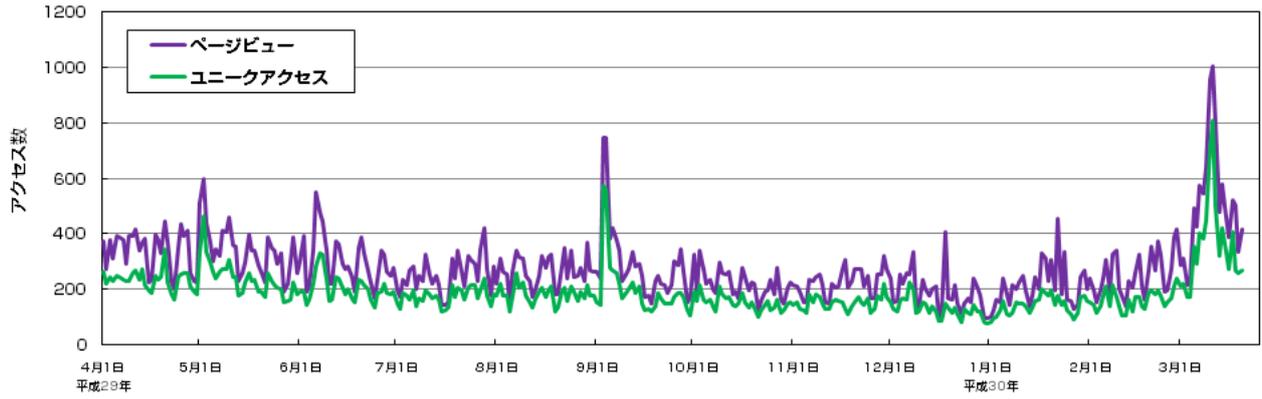
OS	ページビュー	ユニークアクセス	ユニークアクセス 割合(%)
1. Windows 7	25,614	15,696	23.4
2. Windows 10	23,698	15,092	22.5
3. iPhone	15,193	12,820	19.1
4. Windows 8.1	8,434	5,234	7.8
5. Mac OS	6,967	4,460	6.7
6. Android 7	3,587	2,814	4.2
7. iPad	3,559	2,488	3.7
8. Android 6	3,211	2,476	3.7
9. Android 5	2,483	1,923	2.9
10. Android 4	2,312	1,892	2.8

※集計期間：平成29年4月1日～平成30年3月20日

表-4 ユーザ環境（利用ブラウザ）別閲覧頻度（上位5番目まで）

OS	ページビュー	ユニークアクセス	ユニークアクセス 割合(%)
1. Mobile Safari	28,868	23,291	34.8
2. IE 11	26,631	16,479	24.6
3. Google Chrome58	3,524	2,399	3.6
4. Safari	3,551	2,205	3.3
5. Google Chrome63	3,046	1,891	2.8

※集計期間：平成29年4月1日～平成30年3月20日



※集計期間：平成 29 年 4 月 1 日～平成 30 年 3 月 20 日

図-1 放射線量等分布マップ拡大サイトのアクセス状況

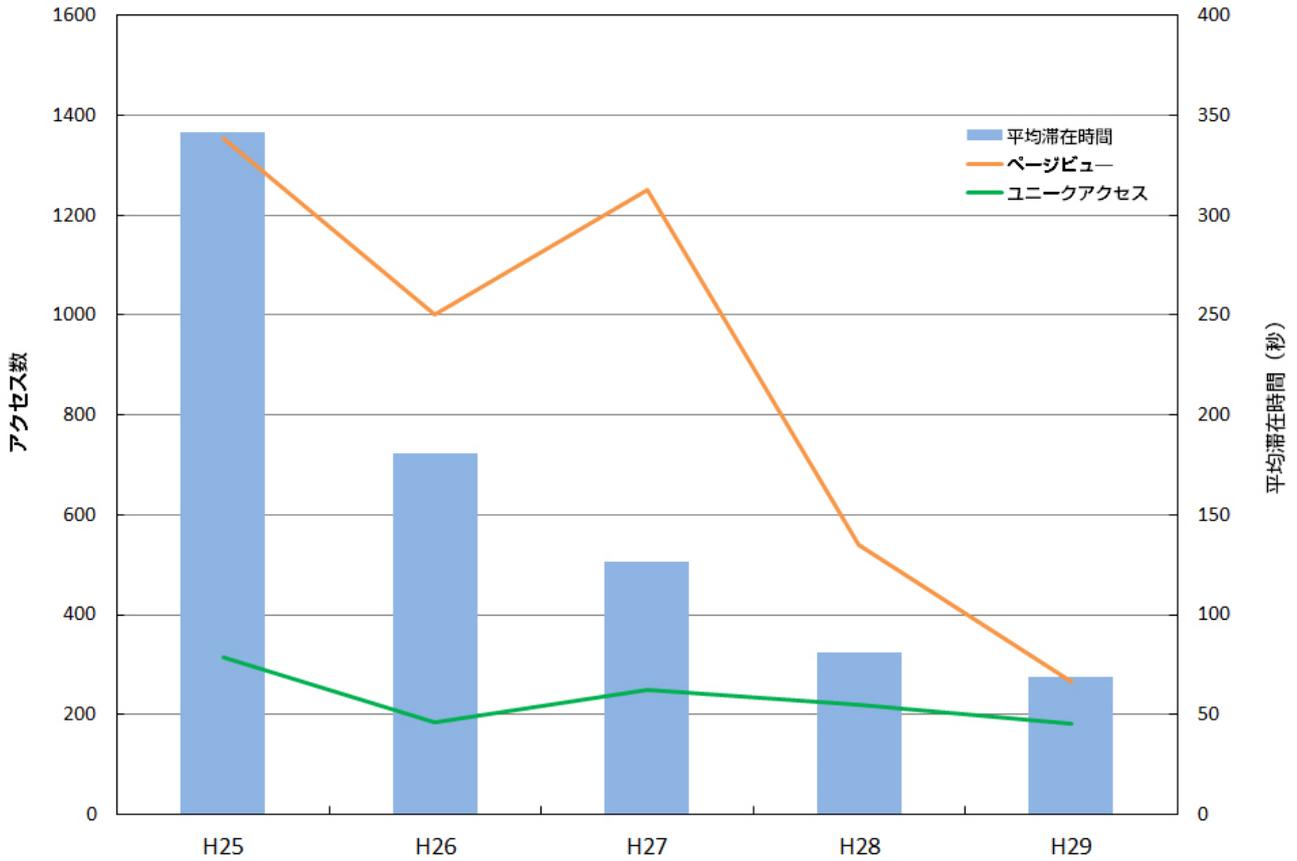


図-2 平成 25 年度から平成 29 年度間のアクセス状況
(1 日あたりのユニークアクセス数、1 日あたりのページビュー数、平均滞在時間)

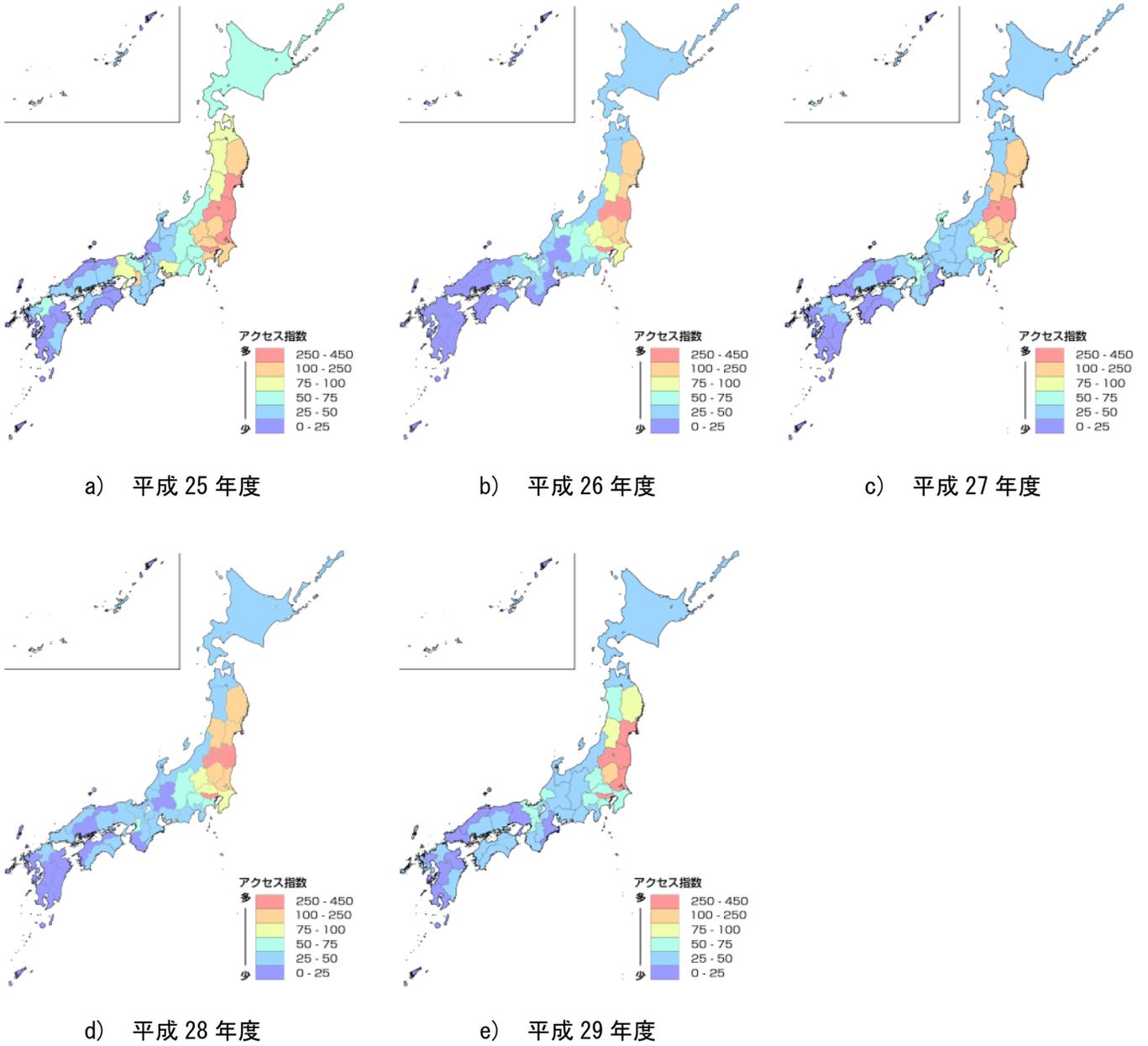


図-3 都道府県ごとのアクセス指数（平成 25 年度から平成 29 年度）

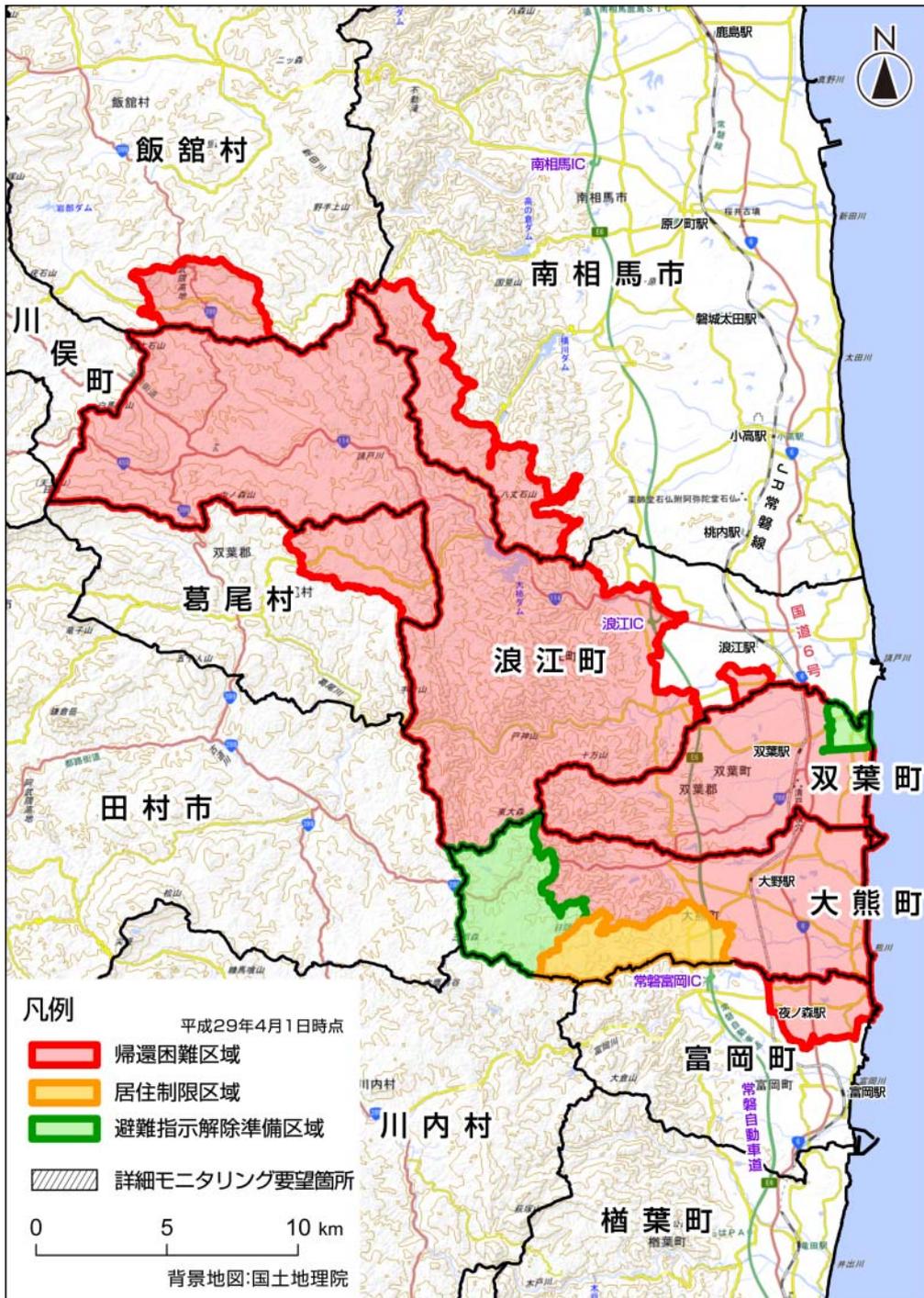


図-4 避難指示区域（平成29年4月1日現在）

放射線モニタリング及び環境試料分析

1. はじめに

総合モニタリング計画（原子力規制委員会制定、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、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。

2. 測定方法

(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ーを用いて測定した。測定地点は 134 地点であり、図-1 に示した。各地点年 1 回測定した。

(2) 積算線量

積算線量は、ガラス式積算線量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、毎四半期毎の積算線量を測定した。測定地点は 14 地点であり、図-1 に示した。

(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 Ge 検出器により測定することにより、Cs134, Cs137 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。測定地点は 4 地点であり、図-1 に示した。

(4) 環境試料（土壌及び松葉）中放射性物質濃度

土壌中及び松葉中の Cs134, Cs137 濃度は、土壌及び松葉を採取し Ge 検出器により測定した。土壌試料は 5 地点、松葉試料は 14 地点で採取した。採取地点を図-1 に示した。採取は年 1 回行った。

3. 測定結果

本測定結果は以下の HP に公開した。

- ・ 空間線量率

<http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/207/list-1.html>

- ・ 積算線量

http://radioactivity.nsr.go.jp/en/contents/13000/12586/24/214_1_20180131.pdf

- ・ 大気浮遊じん中放射性物質濃度

<http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/222/list-1.html>

- ・ 土壌及び松葉中放射性物質濃度

http://radioactivity.nsr.go.jp/en/contents/13000/12481/24/482_20171201.pdf

http://radioactivity.nsr.go.jp/en/contents/13000/12443/24/483_%2020171113.pdf

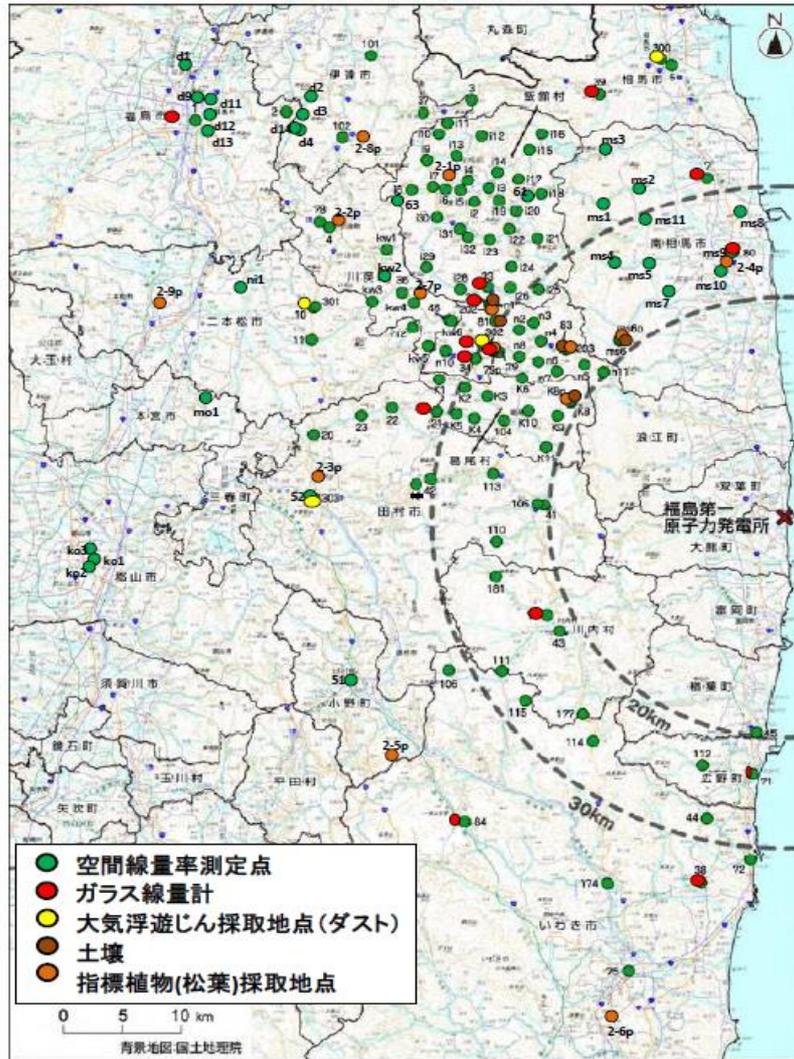


図-1 測定及び採取地点

測定データの CSV 化

1. はじめに

本事業で取得又は原子力規制庁が保有する測定データを当該分野の今後の調査等に活用するため、データを CSV、あるいは Excel、KMZ の形式で保存した。本事業で取得し、CSV 等の形式で保存した測定データは全 6 項目である。原子力規制庁が保有する測定データのうち CSV 等の形式で保存した測定データは全 21 項目である。

2. CSV 等の形式で保存した測定データ

(1) 本事業で取得した測定データ

本事業で実施した環境モニタリングの測定データについて、今後の調査等に活用するため、データを CSV、Excel、KMZ の形式で保存した。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は表-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、ホームページ上で公開している環境モニタリングの測定データについて、今後の調査等に活用するため、データを CSV、あるいは Excel の形式で保存した。保存した測定データは、公開している資料（PDF）を作成した際の電子ファイルから抽出している。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は表-2 にまとめる。また、作業開始時点ですでに CSV 化されていた測定データのうち、修正（レコードの分割、緯度経度情報の修正等）されたレコード数についてもまとめている。

3. 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は、以下の規制庁ホームページにて公開される。

- ・ 本事業で取得した測定データ
<http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/338/list-1.html>
- ・ 原子力規制庁が保有する測定データ
<http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/514/list-1.html>

表-1 本事業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
走行サーベイによる道路及びその近傍における空間線量率の測定	第 14 回:398380 第 15 回:2476688
人為的なく乱の少ない平坦な開かれた土地における空間線量率分布測定	6568
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	空間線量率:2428514 Cs 沈着量: 2428514
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	1454641
放射性セシウム沈着量の面的調査	384
土壌中の放射性セシウムの深度分布調査	85

表-2 原子力規制庁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	修正測定データ
福島第一原子力発電所近傍の海水のモニタリング	5365	8479	1764	1350
福島県・宮城県・茨城県周辺の海水のモニタリング	12932	15880	2004	944
福島県周辺の海水のモニタリング	273	996	251	472
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	1207	2049	467	375
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	352	452	100	0
東京湾における海域モニタリング結果	71	111	40	0
東京電力による海底土のモニタリング結果	2391	3065	578	96
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)	839	1142	152	151
東京湾における海域モニタリング結果(海底土)	287	385	98	0
東京電力株式会社福島第一原子力発電所 20km 圏内の測定結果(空間線量率)	12745	12795	50	0
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	34859	34995	136	0
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)	10833	10833	0	5
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	843	921	78	0
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	3421	3469	48	0
東京電力株式会社福島第一原子力発電所 20km 圏内の空気中放射性物質濃度 の測定結果	662	740	78	0
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	3940	4015	75	0
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 測定結果	87	92	5	0
原子力規制庁及び福島県による土壌試料の測定結果	1854	1864	10	0
原子力規制庁及び福島県による環境試料の測定結果	3378	3406	28	0
上水(蛇口水)(環境放射能水準調査)	13619	13666	47	1
定時降下物のモニタリング(環境放射能水準調査)	16101	16806	705	2