

4. 土壌における放射性セシウムの分布状況

4.1. 放射性セシウムの深度分布

4.1.1. 調査目的

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。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。

4.1.2. 調査内容

4.1.2.1. サンプル採取・測定方法

土壌採取箇所及び採取期間は次の通りである。

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

採取期間：令和元年 8 月 21 日～9 月 13 日

土壌の採取は、地表面（0 cm）～0.5、0.5～1.0、1.0～1.5、1.5～2.0、2.0～3.0、3.0～4.0、4.0～5.0、5.0～7.0、7.0～10.0 cm の計 9 層で実施した。ただし、平成 29 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、過去に地表面付近の土壌に除染等によるかく乱があったと考えられた採取箇所のうち、平成 30 年度と同じ採取地点（040N050）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。U-8 容器に封入した土壌（以下「土壌試料」という。）は、（公財）日本分析センターに送付し、ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトル解析でセシウム 134 とセシウム 137 の放射能の定量を行った。

4.1.2.2. 重量緩衝深度の解析方法

採取した各層の土壌試料の定量分析で得られた放射性セシウムの単位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「重量深度」という）（g/cm²）とした深度分布の図を作成した（典型的な例は図 4-2 参照）。このとき、各層の重量深度（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(cm)×30(cm)=450(cm²））を用いて換算した。

放射性セシウムの深度分布は、多くの場合、その放射能濃度が重量深度に対して指数関数的に減少することが知られているため(図 4-2(a) 参照)⁹⁾、重量深度を ζ (g/cm²)、重量深度における放射能濃度を $A_m(\zeta)$ (Bq/kg)とし、式(3) に示す指数関数式¹⁰⁾ を用いて重量緩衝深度 β (g/cm²)を解析した。

$$A_m(\zeta) = A_{m,0} \exp(-\zeta/\beta) \quad (3)$$

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 4-2(b) 参照) は、36 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 30 年度の調査では 51 箇所 (全 85 箇所中) で観測されており、全体に占める割合は減少した。このような深度分布に対しては、式 (4) に示す双曲線正割関数¹¹⁾ に基づく近似式を用いて重量緩衝深度 β を解析した。

$$A_m(\zeta) = A_{m,0} \cosh(\zeta_0/\beta) \operatorname{sech}\{-(\zeta - \zeta_0)/\beta\} \quad (4)$$

$$\text{※sech}(x) = 1/\cosh(x)$$

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

ここで、 ζ_0 は放射能濃度が最大となる重量深度 (g/cm²) 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 (4) は土壌の深部において式 (3) と同じ関数形となる特徴を有しているため、土壌の深部での単位 β あたりの放射能濃度の減少割合は 1/e ($\approx 1/2.7$) となる。

なお、深度分布の全体像を把握することができなかった場合、又は、除染等で人の手が加わり、深度分布が不連続若しくは不自然であり、式 (3) の指数関数及び式 (4) の双曲線正割関数で近似することが不適当な場合 (図 4-2 (c) 参照：この採取箇所 (015N035) 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、 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 (3) が 2 パラメータ ($A_{m,0}$ 及び β) で構成されており、その内の重量緩衝深度 β を与えることで深度分布の形状を特定することができるため、in-situ 測定によって、土壌に沈着した放射性セシウムの単位面積あたりの放射能 (以下「沈着量」という。単位: Bq/cm²) を定量することができる。しかし、ある深さに放射能濃度のピークを持つ深度分布の場合には、式 (4) 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 (4) で解析した深度分布を持つ場合の沈着量と

空間線量率の関係が指数関数的な深度分布を持つ場合の沈着量と空間線量率の関係と同じになるよう、地中に沈着したガンマ線源の強度に対する環境中における地上 1 m 高さでの空気カメラへの換算係数¹²⁾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、平成 29 年度の報告書¹³⁾を参照）。

重量緩衝深度 β (g/cm^2) は土壌の深度に直接対応せず、放射性セシウムの地中への浸透の度合いを深さ (cm) で示すものではないため、90%深度（放射性セシウムの沈着量の 90%が含まれる地表面からの深度: $L_{90\%}$ ）を評価した。なお、90%深度 $L_{90\%}$ の詳細な算出方法は、平成 28 年度の報告書¹⁴⁾を参照のこと。

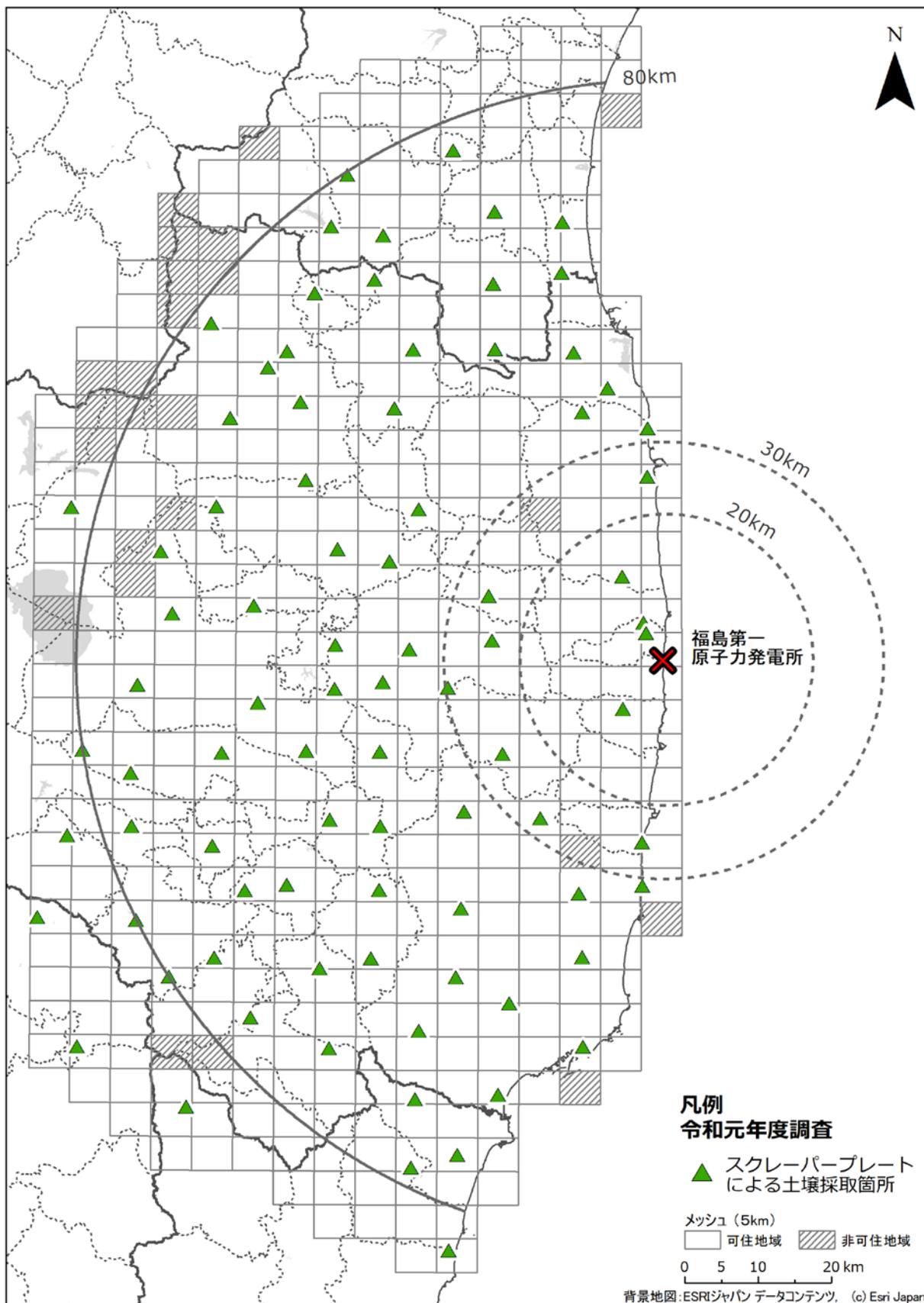


図 4-1 令和元年度の放射性セシウム深度分布調査での土壌採取箇所

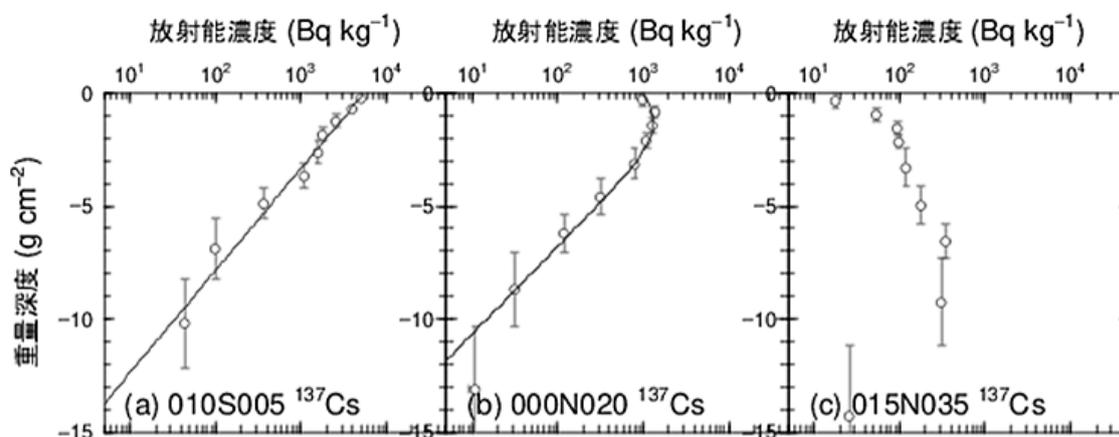


図 4-2 セシウム 137 の深度分布の典型的な例

((c) 015N035 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。)

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 Appendix-1 に示す。これらセシウム 137 の深度分布を、目視により指数関数的な深度分布又はある深さに放射能濃度のピークを持つ深度分布に分類し、それぞれの深度分布に対して式 (3) 又は式 (4) を用いて β の解析を行った。式 (3) を適用した深度分布は 32 箇所、式 (4) を適用した深度分布は 36 箇所であった。除染等で人の手が加わり深度分布が不連続若しくは不自然であったため β の解析を行わなかった採取箇所は、17 箇所 (005S035、015N035、015S035、020N030、025S025、030S000、030S055、035N035、035S035、040N050、040S075、045N030、045S055、055N020、065N010、065S030 及び 075S030) であった。(上記、 β の解析を行わなかった採取箇所については、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付した。)

1) 重量緩衝深度 β

式 (3) 又は式 (4) 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 2.70 g/cm² (n= 68)、幾何標準偏差 1.79、

最小値 0.67 g/cm²、最大値 14.79 g/cm²

2) 実効的な重量緩衝深度 β_{eff}

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

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

ある。

幾何平均値 3.67 g/cm² (n= 68)、幾何標準偏差 1.81、
最小値 0.87 g/cm²、最大値 19.61 g/cm²

放射性セシウムの土壤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 4-5 に示す。令和元年度の β_{eff} の幾何平均値は昨年と比べ減少したが、その要因として、経時的な変化が小さくなるとともに β が算出できないエリアの数が多くなり、ばらつきの影響が相対的に大きくなっていることが挙げられる。本調査を開始した平成 23 年 12 月から現在（令和元年 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（図中の点線）。放射性セシウムの土壤中深度分布の変化の度合いは降雨量等による影響を受けるため、年度や季節といった任意の時間間隔で見た場合に β_{eff} の増加傾向に偏りが存在する。また、 β_{eff} の増加は複数の異なる要因が関わっていると考えられ、今後も一次関数的な増加が継続するかどうかは確かではない。一方で、放射性セシウムの土壤中深度分布の変化の度合いは、土壌特性等による影響を受けるため採取箇所により異なっている。実効的な重量緩衝深度の幾何標準偏差は、この土壌特性等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 4-6 参照)は、時間の経過とともに僅かずつ増加（深さ方向に移動）してきており、令和元年 9 月時点での $L_{90\%}$ の幾何平均値は 4.6 cm であった。

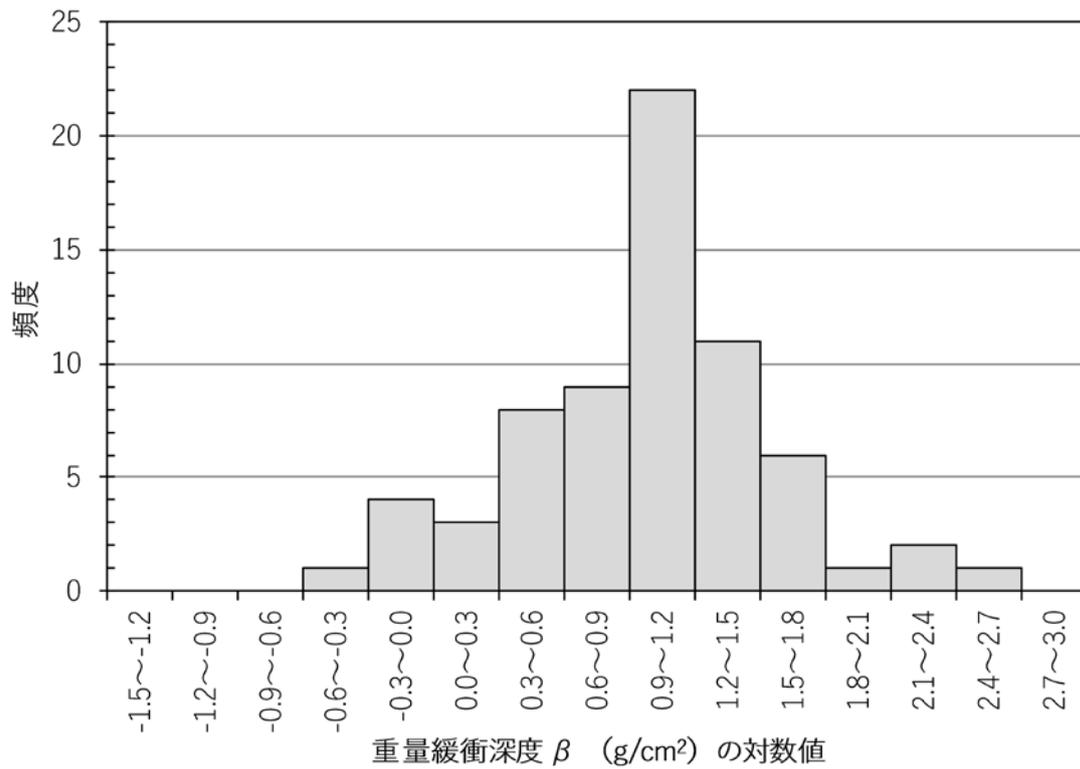


図 4-3 令和元年度の深度分布調査による重量緩衝深度 β の自然対数値の頻度分布

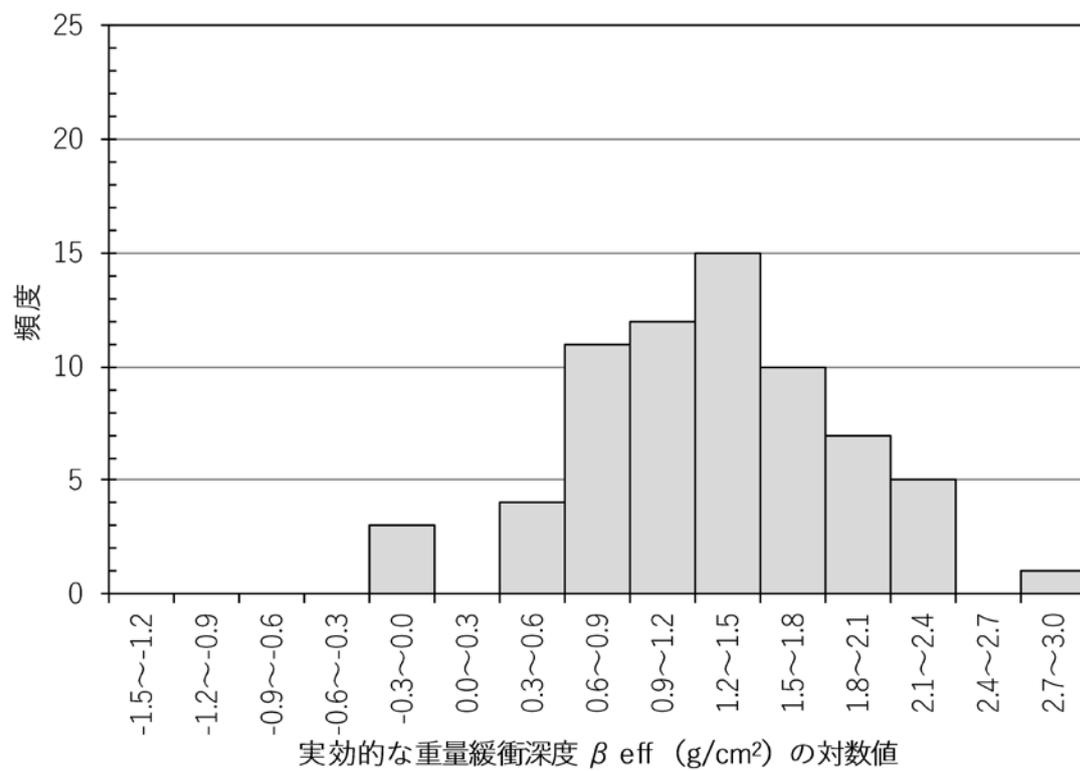


図 4-4 令和元年度の深度分布調査による実効的な重量緩衝深度 β_{eff} の自然対数値の頻度分布

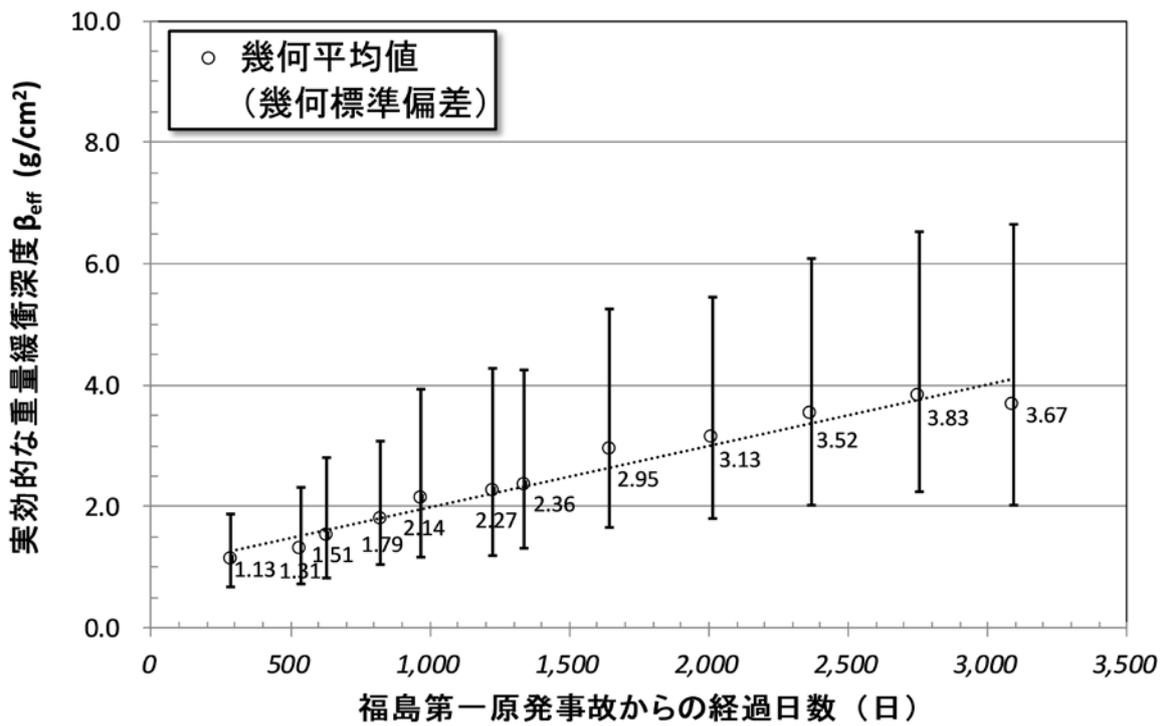


図 4-5 平成 23 年 12 月からの実効的な重量緩衝深度 β_{eff} の経時的な変化
(誤差棒は幾何標準偏差を示す)

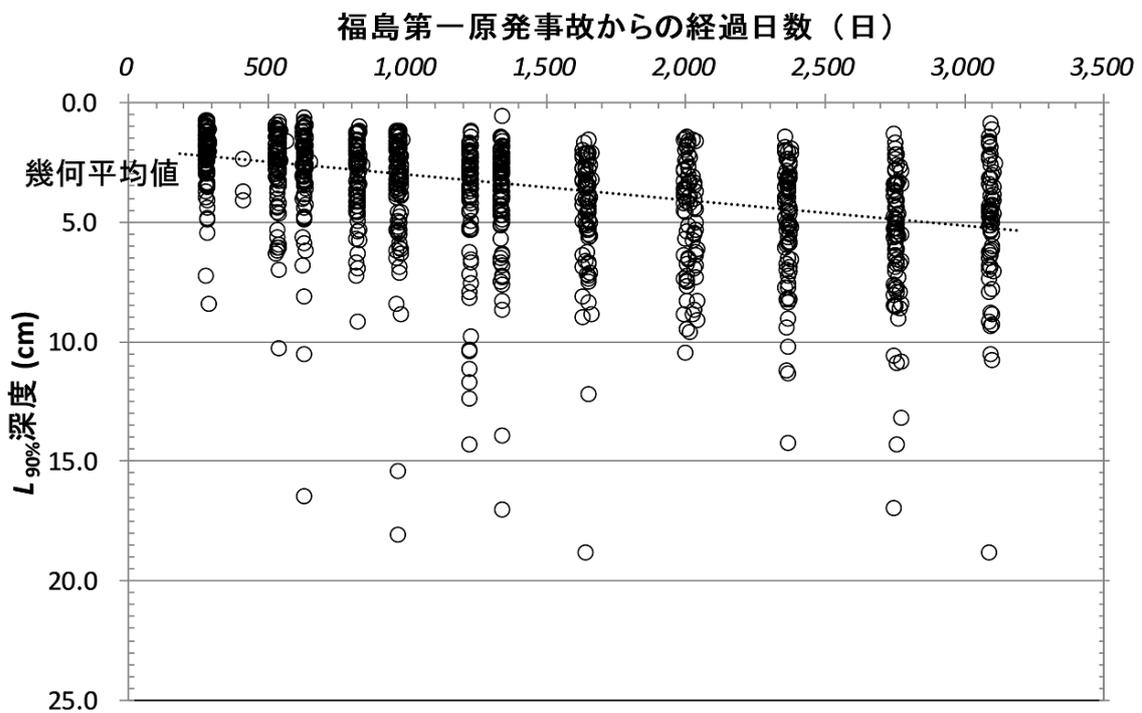


図 4-6 平成 23 年 12 月からの 90% 深度 $L_{90\%}$ の経時的な変化及びその幾何平均値

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ゲルマニウム半導体検出器（以下「可搬型 Ge 検出器」という。）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した。

4.2.2. 調査内容

4.2.2.1. 測定方法

測定箇所については、80 km 圏内（福島県東部、宮城県南部及び茨城県北部）の地域を基準地域メッシュをベースとした 5 km×5 km のメッシュに分割し、福島第一原発事故以前に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。合計 384 箇所において測定を実施した。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。令和元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。測定期間は令和元年 8 月 8 日～11 月 1 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、原子力規制庁のマニュアル¹⁵⁾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）¹⁰⁾を参照した。また、in-situ 測定によるデータ解析で使用する重量緩衝深度には、4.1 節に示した土壌深度分布調査によって導出した実効的な重量緩衝深度 β_{eff} の幾何平均値（3.67 g/cm²）を用いた。

4.2.2.2. 測定結果の信頼性の確認

放射性セシウム沈着量の測定結果については、使用した一部の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 NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータ（日立製作所製 TCS-171B）によりグレイ(Gy)単位（空気カーマ）で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 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、ここでは ICRU Report 53¹⁰⁾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。

4.2.2.3. 放射性セシウムの土壌沈着量分布マップの細密化

空間線量率に寄与している人工放射性核種のほとんどが放射性セシウムであるとの仮定の下、

過去の調査において、かく乱の少ない平坦地では土壌への放射性セシウムの沈着量と空間線量率が良好な直線関係を示すことが確認されている。そこで、in-situ 測定を行った箇所で NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータを用いて空間線量率の測定を同時に行い、調査時点における空間線量率と放射性セシウム沈着量との相関関係を求め、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から評価した。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。この空間線量率から評価した沈着量を可搬型 Ge 検出器を用いた 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。

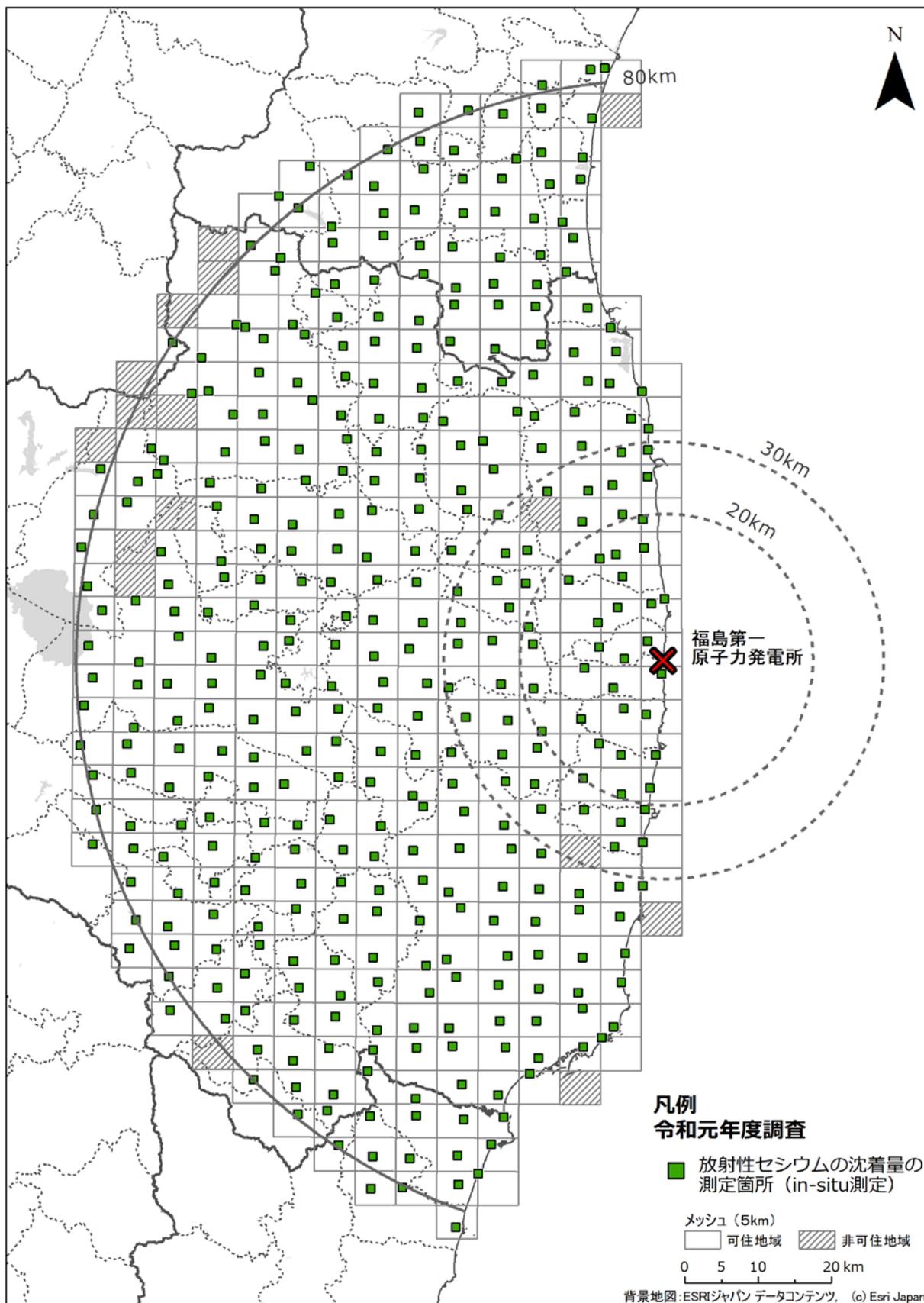


図 4-7 令和元年度の可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定による放射性セシウム沈着量の測定箇所

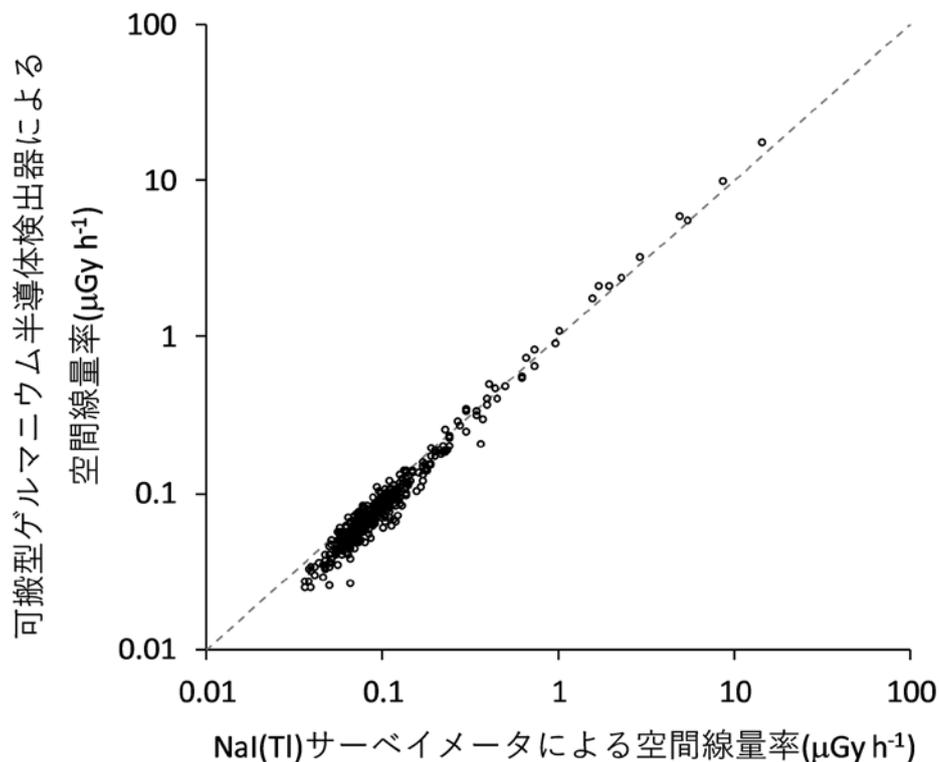


図 4-8 可搬型 Ge 検出器による in-situ 測定の結果を基に求められた空間線量率($\mu\text{Gy/h}$)と NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータによる空間線量率($\mu\text{Gy/h}$)の相関

4.2.3. 調査結果

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 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、令和元年度調査については令和元年 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の幾何平均値を用いたが、重量緩衝深度の分布（10–90 パーセントイル）に起因する沈着量評価値の不確かさは最大約 49%であった。

放射性セシウムの土壌沈着量分布マップを細密化するために、以下のように空間線量率から評価した沈着量を求めた。令和元年度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 384 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 4-10）。比較にあたっては、天然放射性核種からの空間線量率への寄与が $0.05 \mu\text{Sv/h}$ と仮定し、この寄与分を全ての空間線量率の測定値から一律に差し引いた値を用いた。なお、上記 384 箇所のうち空間線量率が $0.05 \mu\text{Sv/h}$ 以下であった測定箇所は対象から除いた。NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータによ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。これら空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$) と放射性セ

シウム沈着量 (Bq/m^2) の相関関係を定点サーベイにより 4,944 箇所 (全測定箇所の内、空間線量率が $0.05 \mu\text{Sv/h}$ 以下であった測定箇所を除外) で測定された空間線量率に適用し、放射性セシウム沈着量とした。

本手法による土壌沈着量分布マップの細密化の妥当性を確認するために、in-situ 測定による結果と最近傍の空間線量率から評価した沈着量を比較した。比較は、散布図による比較及び相対偏差のヒストグラムによる比較を行った。相対偏差 $RD2$ を下記のように定義する。

$$RD2 = (CD - C) / C \quad (5)$$

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

図 4-11(a) に示した全データによる散布図を見るとプロットは 1:1 の直線の周辺に分布し、全体的にはよい相関性が確認できるものの、低い沈着量の領域のプロットのばらつきは大きいことがわかる。相対偏差のヒストグラムを見ると、分布の形状は 0 付近を頂点にした正規分布に近いものの、空間線量率から評価した沈着量が in-situ 測定による沈着量の 2 倍以上を示す点が 25% 以上確認された。最近傍点が 20 m 以内のデータのみで処理したグラフを図 4-11(b) に示す。このヒストグラムも全データと大きく傾向が変わらなかったことから、このばらつきは本手法の限界であると理解することが出来る。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、80 km 圏内全体を可視化し過去との比較を行う手法としては有効であるため、引き続き本手法を踏襲し、80 km 圏内全体のマップを作成する。一方、変化傾向については今までどおり in-situ 測定の結果で議論する。

in-situ 測定により直接求めた沈着量に空間線量率から評価した沈着量を加えて記した土壌沈着量分布マップを図 4-12 に示す。平成 23 年度調査から令和元年度調査までの各調査による放射性セシウムの土壌沈着量分布マップを図 4-13 に示す。約 103 ヶ月の間にセシウム 134 の土壌沈着量分布マップでは赤や黄色で示される比較的高い濃度の測定箇所がほとんどなくなり沈着量の減少の様子が確認できる。セシウム 137 はセシウム 134 に比べて半減期が長いいため沈着量の変化は比較的小さい。

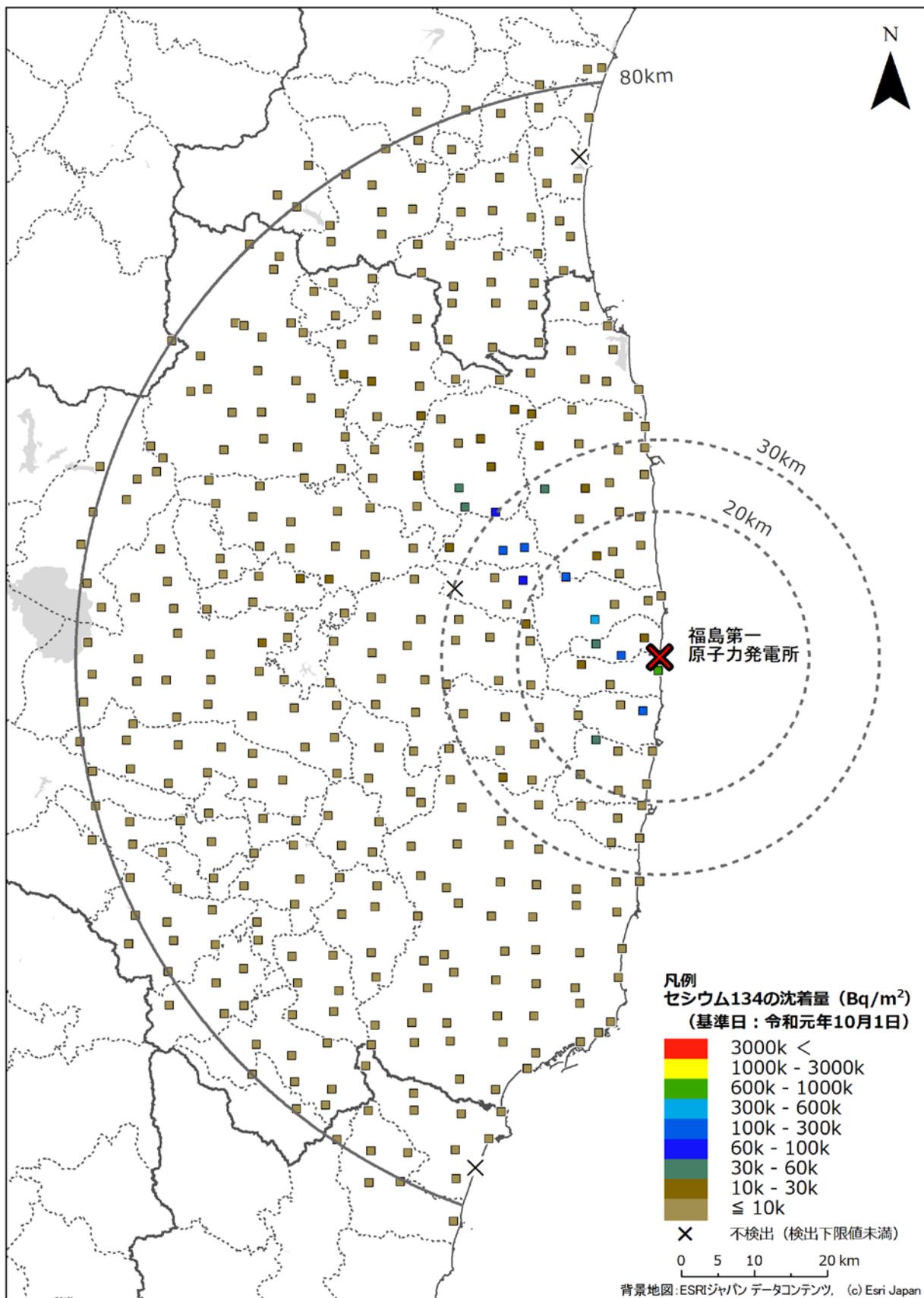


図 4-9 令和元年度調査における可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定による放射性セシウムの沈着量分布マップ (a) セシウム 134 (実効的な緩衝深度 $\beta_{\text{eff}} = 3.67 \text{ g/cm}^2$ を用いた解析結果。)

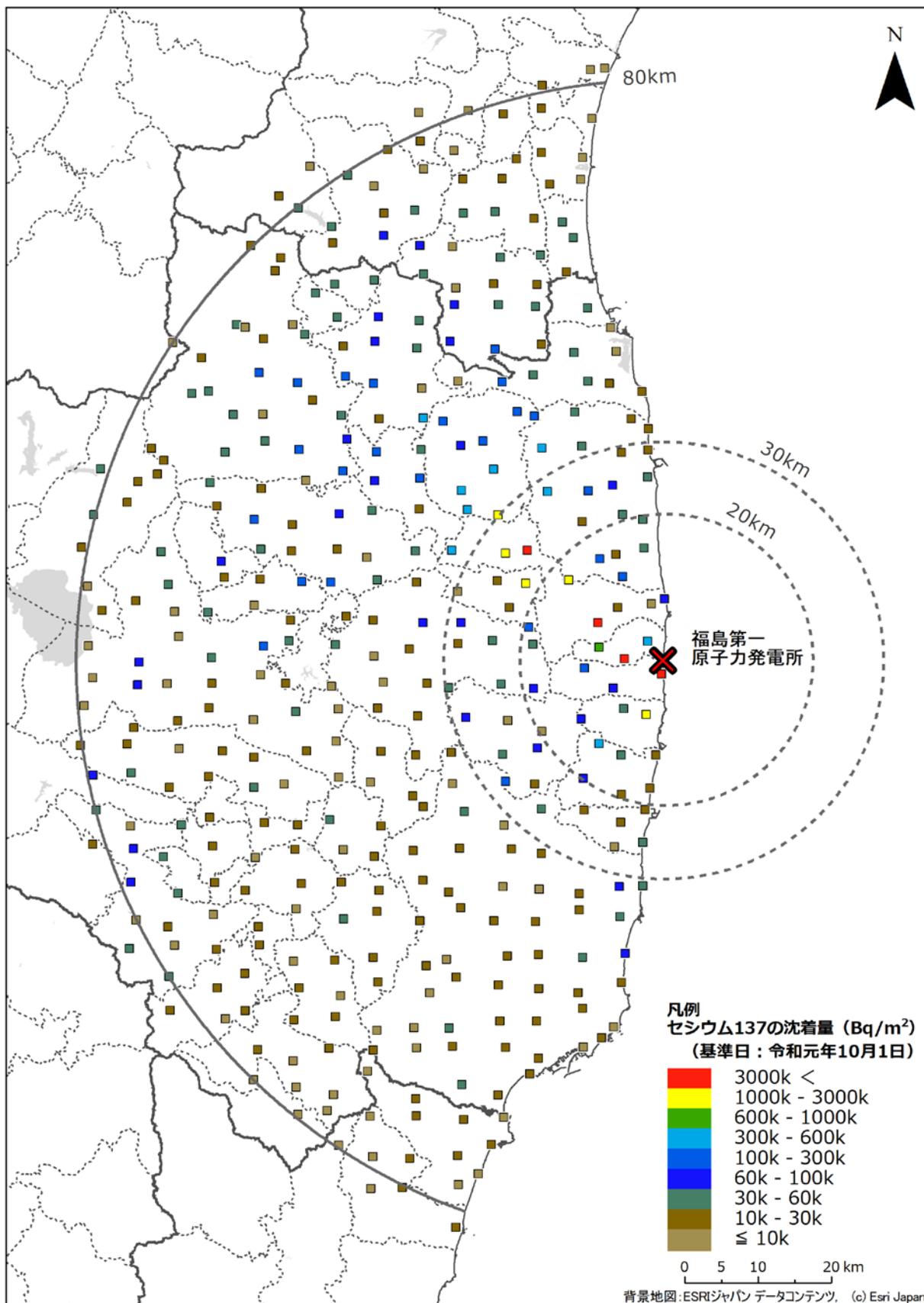


図 4-9 令和元年度調査における可搬型 Ge 検出器を用いた in-situ 測定による放射性セシウムの沈着量分布マップ (b) セシウム 137 (実効的な緩衝深度 $\beta_{\text{eff}} = 3.67 \text{ g/cm}^2$ を用いた解析結果。)

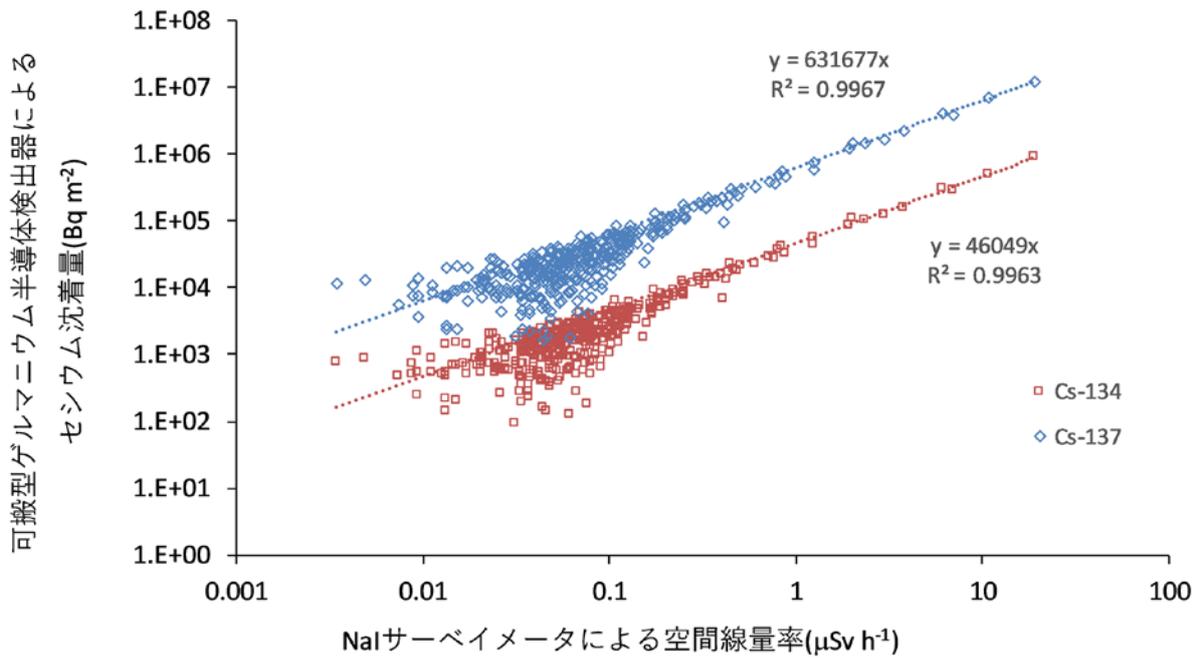


図 4-10 サーベイメータによる地表面から 1 m 高さの空間線量率と放射性セシウム沈着量の相関
 (赤口: セシウム 134 との相関(データ数 n=374)、青◇: 空間線量率とセシウム 137 との相関(データ数 n=375)を示す。実効的な緩衝深度 $\beta_{\text{eff}}=3.67 \text{ g/cm}^2$ を用いた解析結果。)

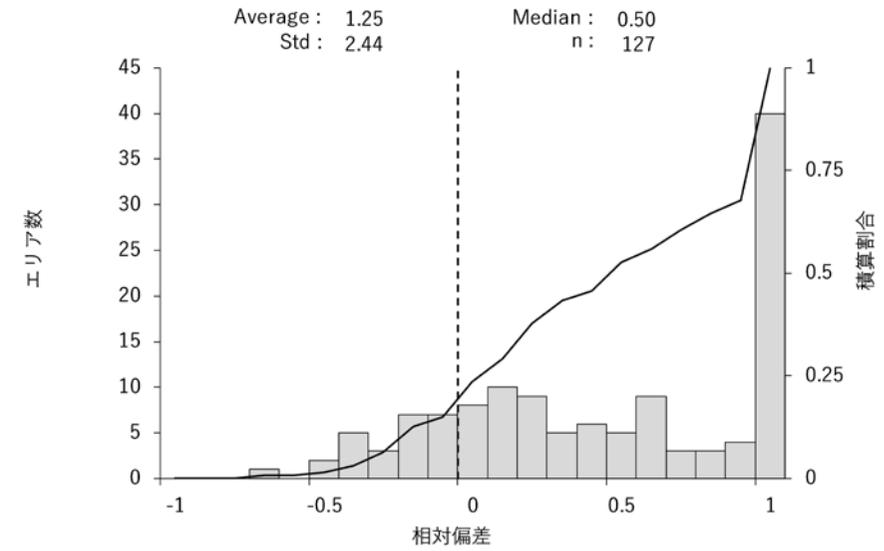
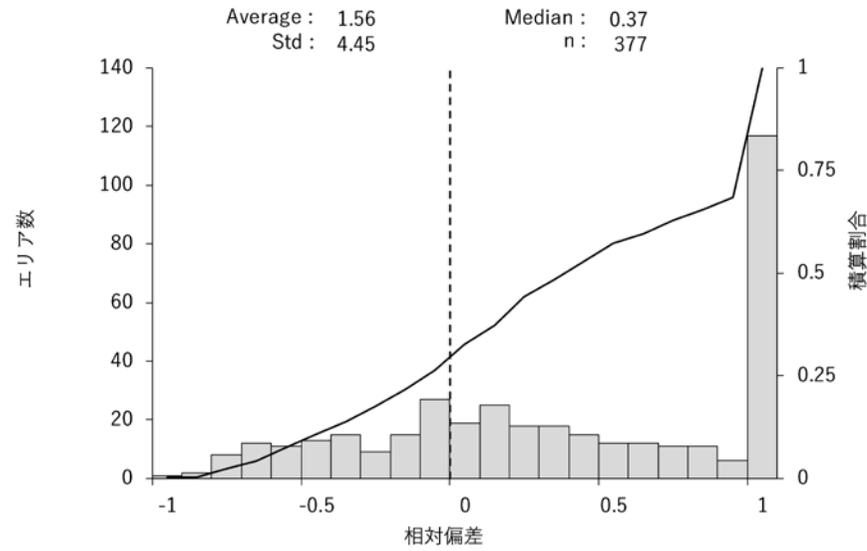
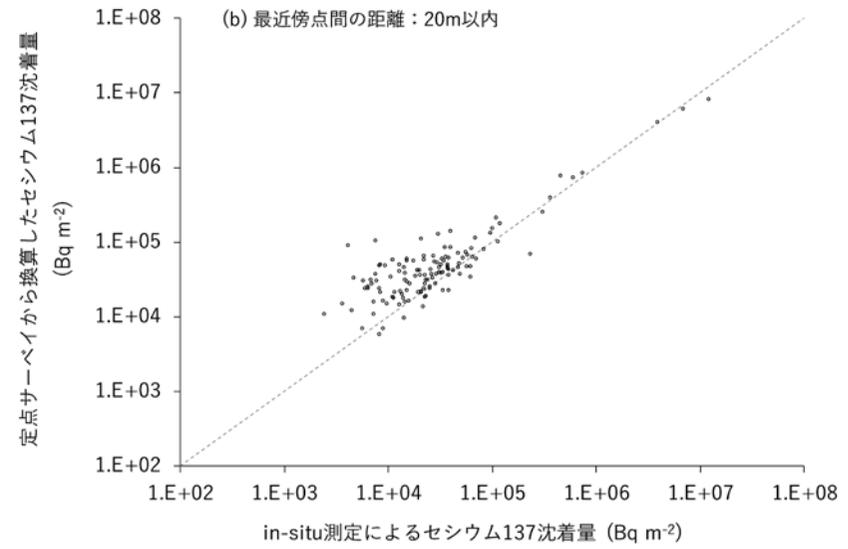
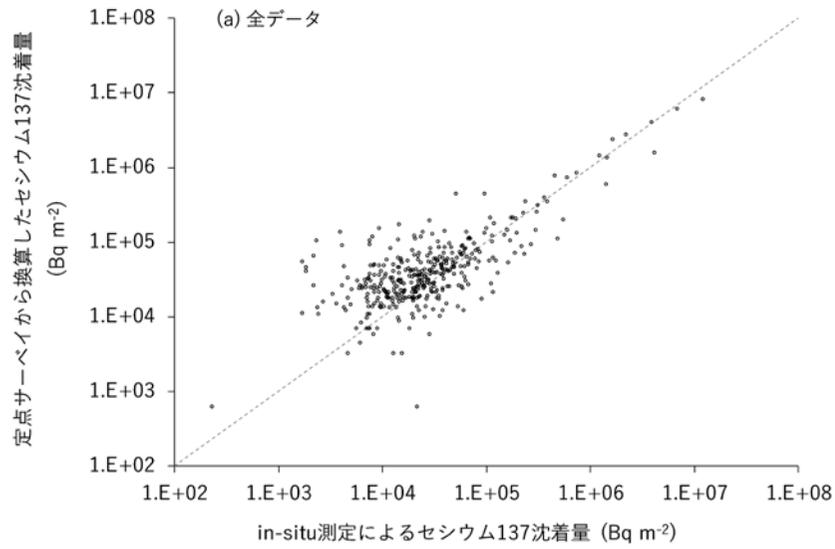


図 4-11 令和元年度調査での in-situ 測定による沈着量と最近傍点における空間線量率から評価した沈着量(ともにセシウム 137)の比較

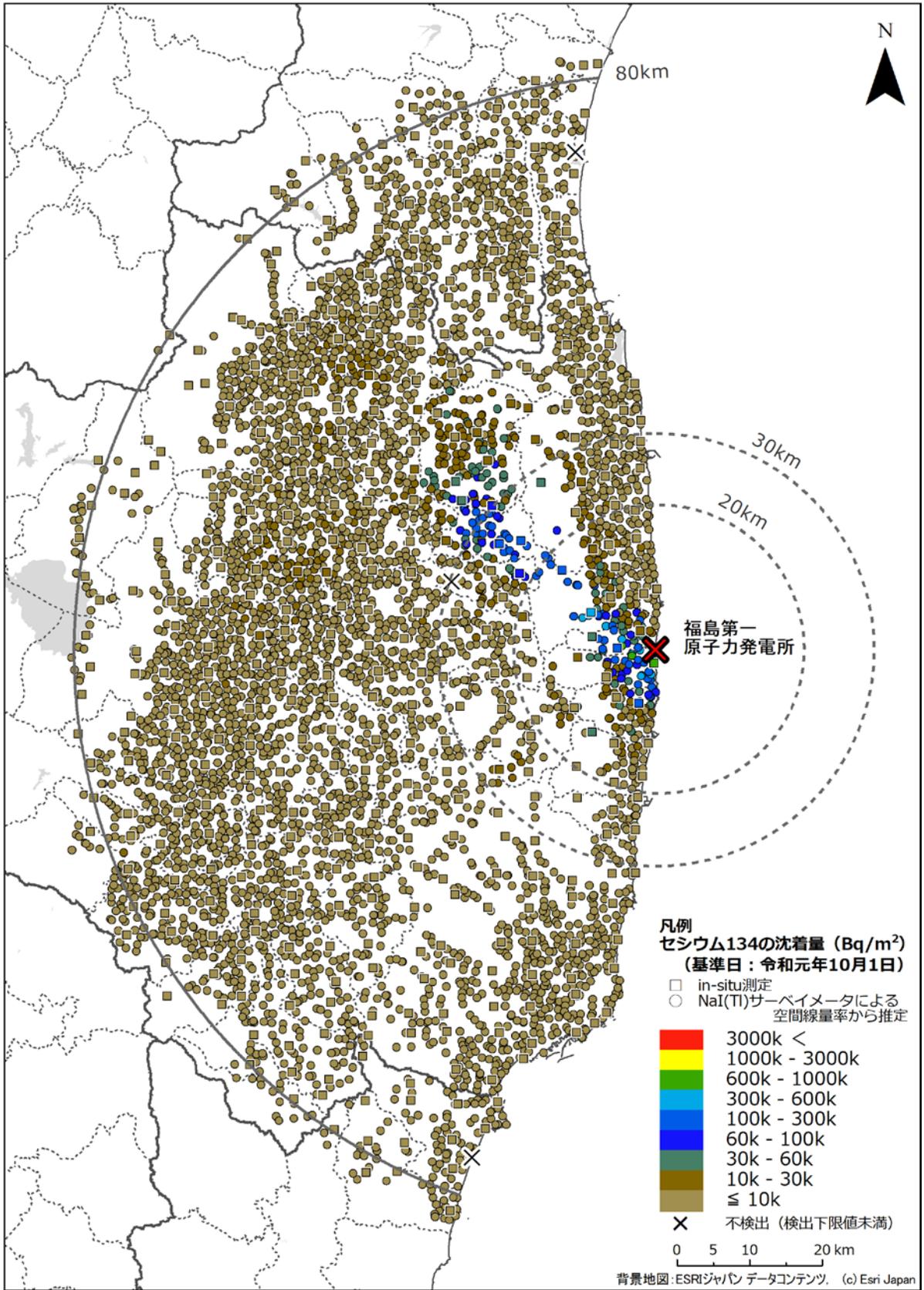


図 4-12 令和元年度調査における放射性セシウムの土壌沈着量分布マップ (a) セシウム 134 (in-situ 測定により測定した沈着量(□)に空間線量率から評価した沈着量(○)を追加。実効的な緩衝深度

$\beta_{\text{eff}} = 3.67 \text{ g/cm}^2$ を用いた解析結果。)

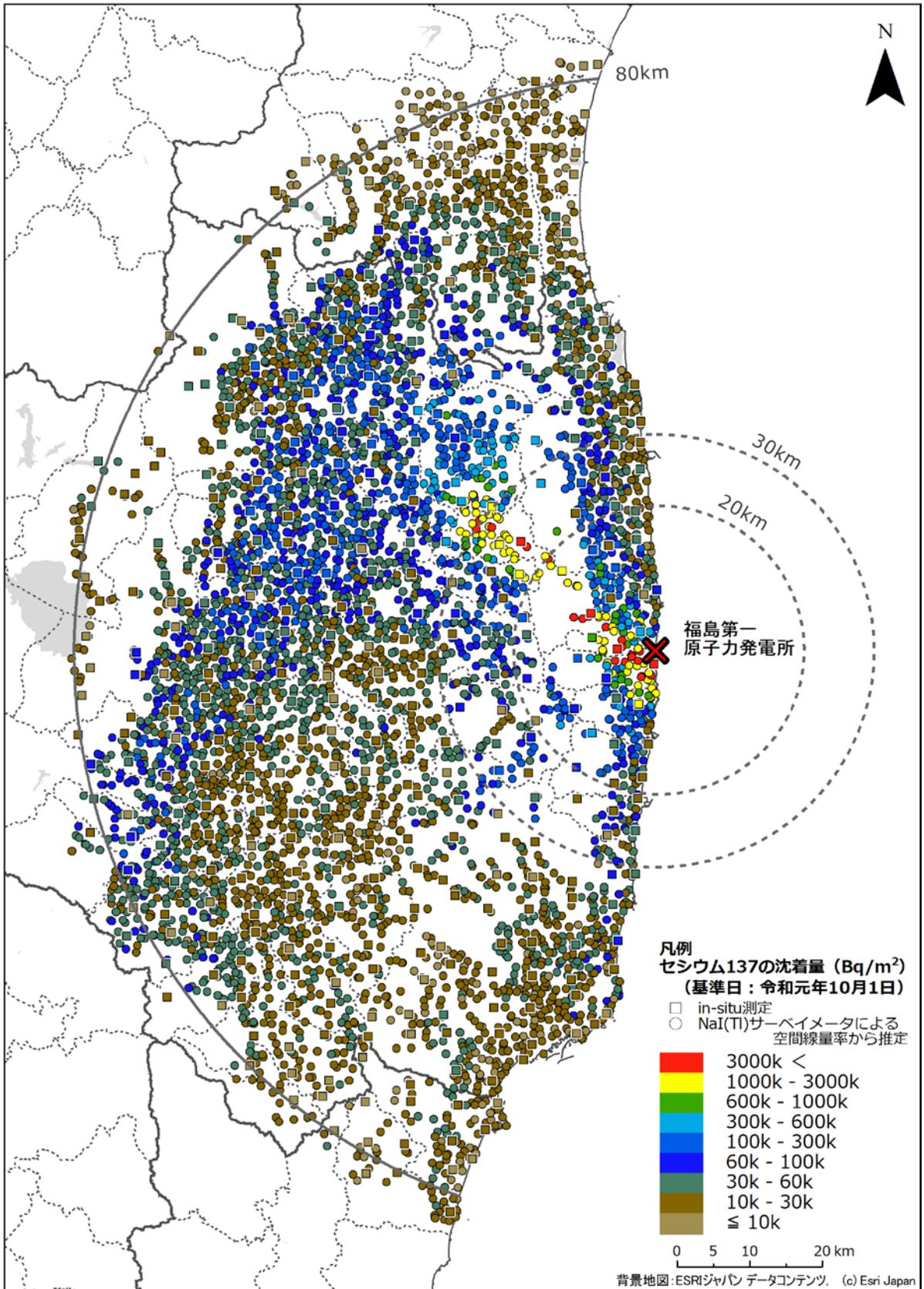
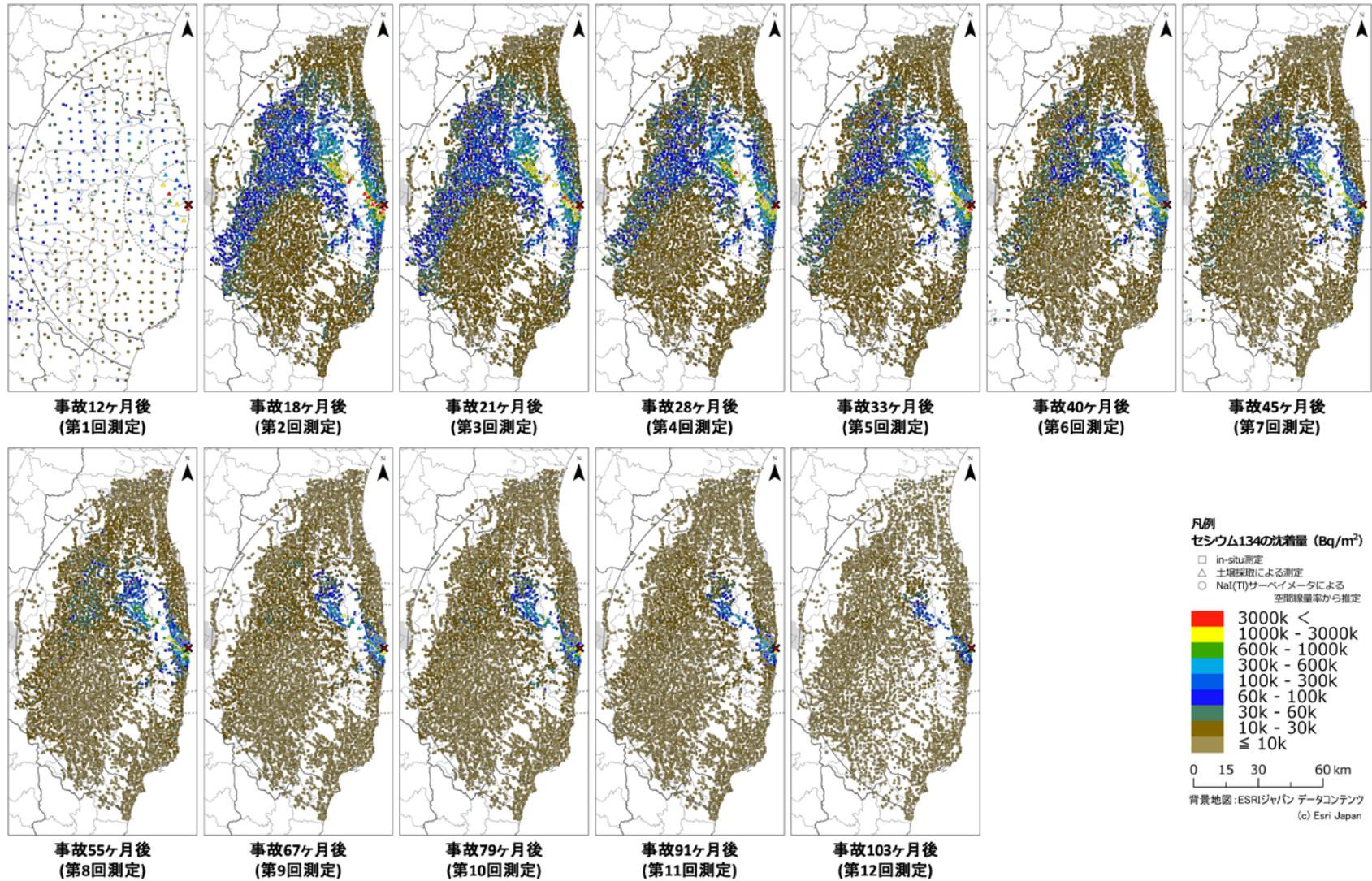


図 4-12 令和元年度調査における放射性セシウムの土壌沈着量分布マップ (b) セシウム 137 (in-situ 測定により測定した沈着量(□)に空間線量率から評価した沈着量(○)を追加。実効的な緩衝深

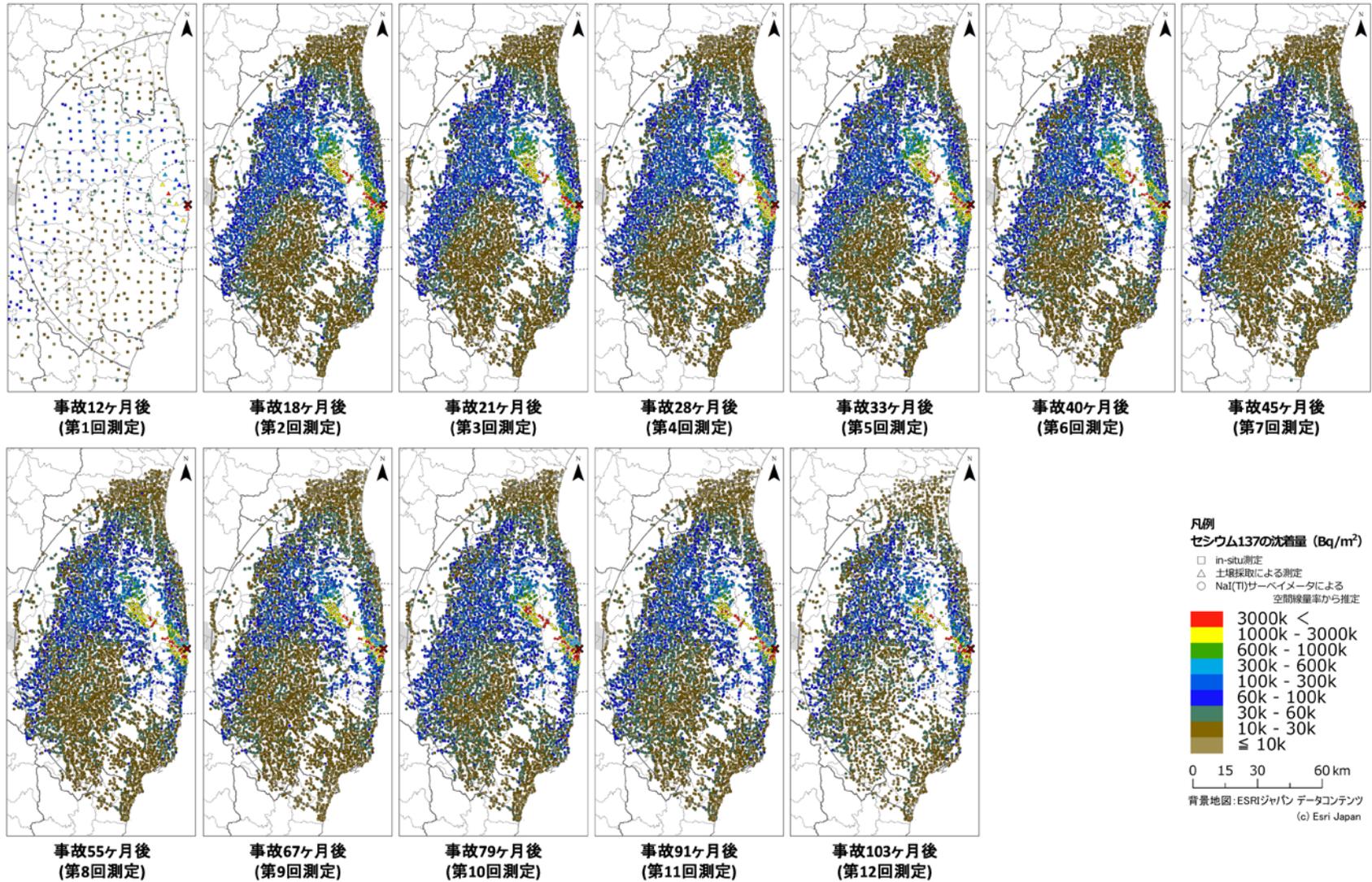
度

($\beta_{\text{eff}} = 3.67 \text{ g/cm}^2$ を用いた解析結果。)



(a) セシウム 134

図 4-13 平成 23 年度以降の in-situ 測定、土壌採取による測定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



(b) セシウム 137

図 4-13 平成 23 年度以降の in-situ 測定、土壌採取による測定及び空間線量率から評価した土壌沈着量の分布マップの変化

4.2.4. 天然放射性核種による空間線量率の評価

可搬型 Ge 検出器による in-situ 測定では、放射性セシウム沈着量の評価と同時に土壤中に含まれる天然放射性核種濃度の定量も行った。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%を占めるため¹²⁾、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のほぼ全体を評価することが可能である。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。

令和元年度調査において 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 338 箇所のデータを対象として、天然放射性核種による空間線量率を評価した。なお、全測定箇所の約 20%は若干の降雨の中での測定であった。5 核種について ICRU Report 53¹⁰⁾の Table 5.2 の換算係数を用いて採取箇所ごとに空気カーマ率を求めた結果、この 338 箇所の平均値は 0.032 $\mu\text{Gy/h}$ 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¹⁶⁾。前述のように、令和元年度の in-situ 測定では天然放射性核種起因の全てのガンマ線を評価対象としていないことを踏まえると、80 km 圏内における平均的な天然放射性核種による空間線量率として 0.05 $\mu\text{Sv/h}$ を仮定したことは妥当であると考えられる。

各測定箇所での 5 核種による空気カーマ率の合計値を地図上にプロットしたものを図 4-14 に示す。なお、平成 22 年度原子力発電所周辺環境放射能測定結果報告書 (福島県、東京電力株式会社)¹⁷⁾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(Tl)シンチレーション検出器) 23 箇所で福島県が測定した空間線量率 (期間平均値) は 0.036~0.051 $\mu\text{Gy/h}$ と報告されており、本結果とも矛盾しない。

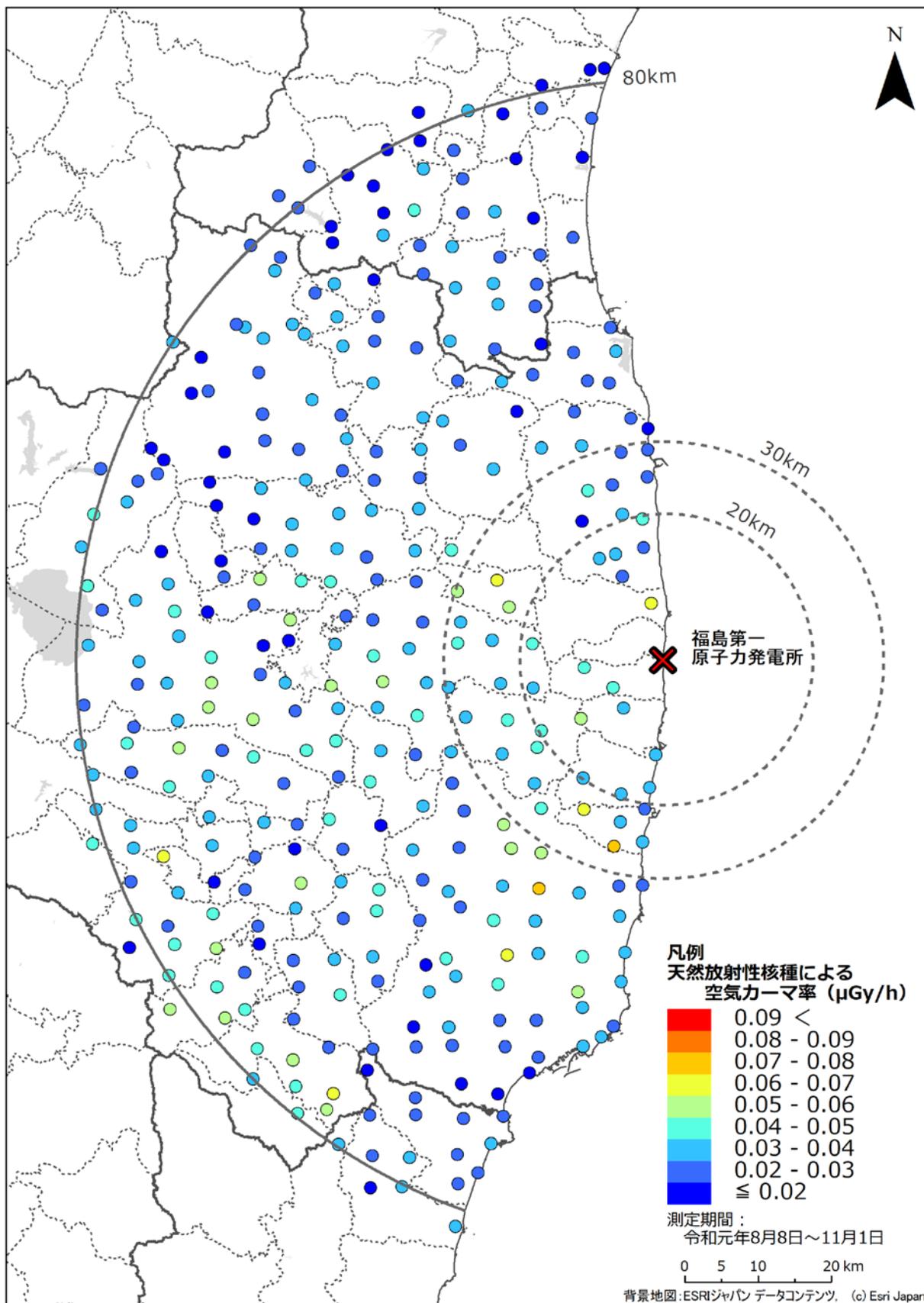


図 4-14 天然放射性核種による空気カーマ率(μGy/h)の分布

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8年が経過し、事故直後から実施してきた本事業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。そこで令和元年度は、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 (6) で表される。

$$\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T_{Cs}} + \frac{1}{T_{eco}} \quad (6)$$

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

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

5.2. 測定結果の変化傾向

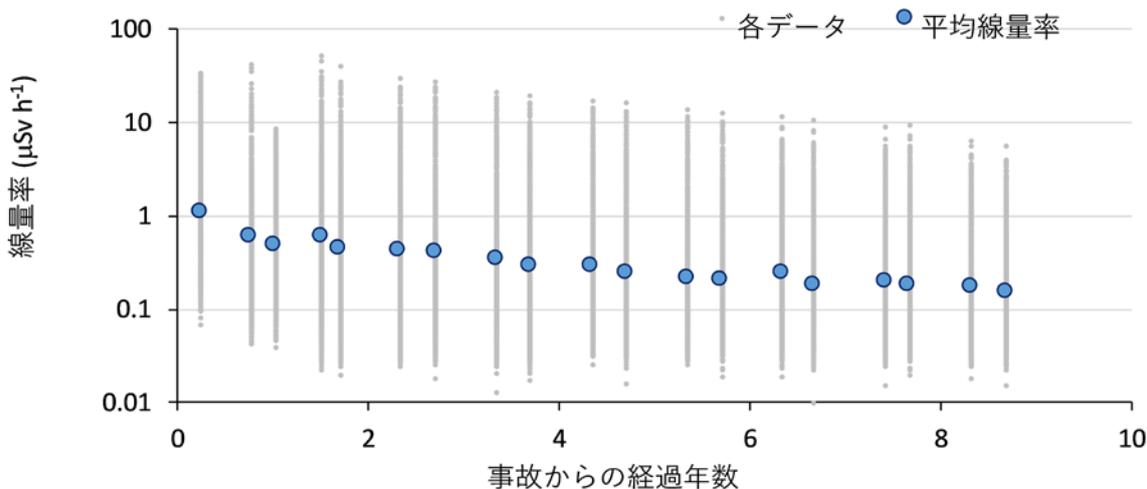
平成23年度から令和元年度までを対象に、測定結果の経時変化傾向を走行サーベイ、定点サーベイ、歩行サーベイ及び無人ヘリサーベイで得られた空間線量率について図5-1に、in-situ測定による土壌中放射性セシウム沈着量について図5-2それぞれ示す。各データは、基準地域メッシュ(1km)ごとに平均した値を、さらに80km圏内で測定値がある10,168メッシュについて平均した線量率(または沈着量)としている。

走行サーベイは、第1回から4,000メッシュ以上の場所について測定が行われている。他の測定と比較すると網羅的に80km圏内の地域を測定している。しかしながら、走行ルートについては、避難指示区域の解除等の理由から毎回異なること、測定対象が舗装された車道上であることに注意が必要である。定点サーベイは、住宅地内にある公共施設など開けた舗装されていない平坦地及び空間線量率が狭い範囲で急激に変化しない場所を選定しているため、他の測定結果と比較して、エリアを代表する数値として使用しやすい。ただし、第1回及び第2回において、迅速な汚染範囲の調査を目的としたため、測定点数が他の測定に比べて極端に少ない。歩行サーベイについては、定点サーベイで選定された測定点の周辺車道や歩道を測定対象としており、第3回以降では一定の場所での測定データが得られている。in-situ測定については、ガンマ線スペクトルを利用しバックグラウンドの影響なしに測定でき、直接的に物理的半減期との比較が可能である。一方、測定時間がかかるため測定点数は多くない。

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

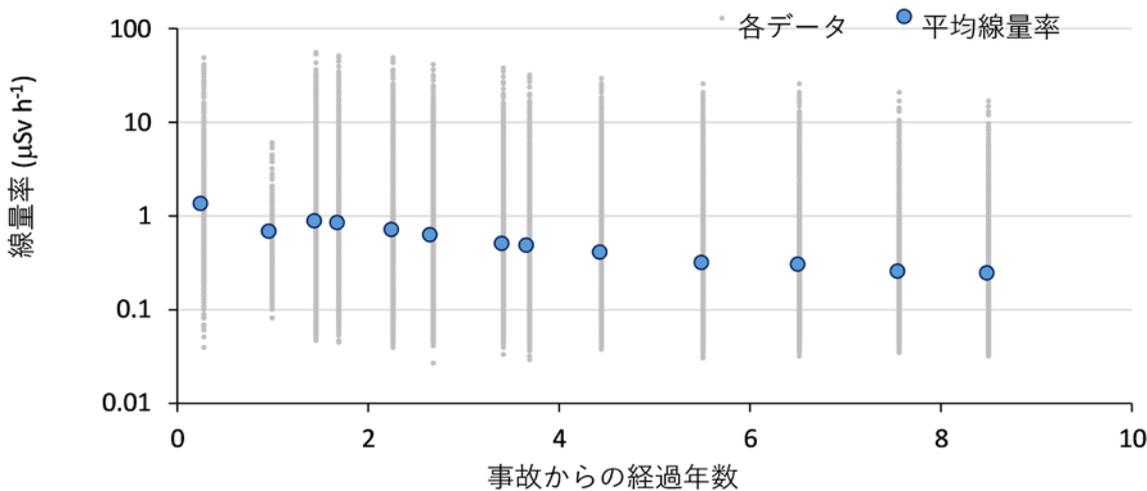
びその減衰傾向を考察するにあたっては面的及び時間的に不連続なデータの取り扱いが課題となる。また、近年では、放射性セシウムによる空間線量率が減少し、天然放射性核種によるバックグラウンドの空間線量率が無視できない状況となっている。よって、それぞれの課題を解決し、現状の放射線分布の変化量について定量的に表すには、バックグラウンド減算及びデータの測定場所等の条件をそろえ、かつデータ点数を考慮する必要がある。これらを考慮し、最適なデータセットの検討及び実効半減期の算出を試みた。

1) 走行サーベイ



測定回	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回	第6回	第7回	第8回	第9回	第10回	第11回	第12回	第13回	第14回	第15回	第16回	第17回	第18回	第19回
事故からの経過年	0.23	0.76	1.02	1.51	1.69	2.32	2.70	3.34	3.68	4.34	4.70	5.34	5.70	6.33	6.66	7.41	7.67	8.31	8.68
平均線量率	1.09	0.60	0.47	0.58	0.45	0.43	0.40	0.33	0.29	0.28	0.25	0.21	0.20	0.24	0.17	0.20	0.18	0.17	0.15
標準偏差	2.62	1.82	0.87	2.01	1.52	1.49	1.38	1.11	0.95	0.89	0.77	0.66	0.61	0.61	0.45	0.46	0.47	0.39	0.31
測定エリア数	4536	3518	2908	6149	4994	6160	5746	5312	5496	5156	5224	5481	5100	4044	5510	3874	3832	3883	4966
初回からの平均値の割合	100	55	43	53	41	39	36	31	26	26	22	19	19	22	16	18	17	15	13

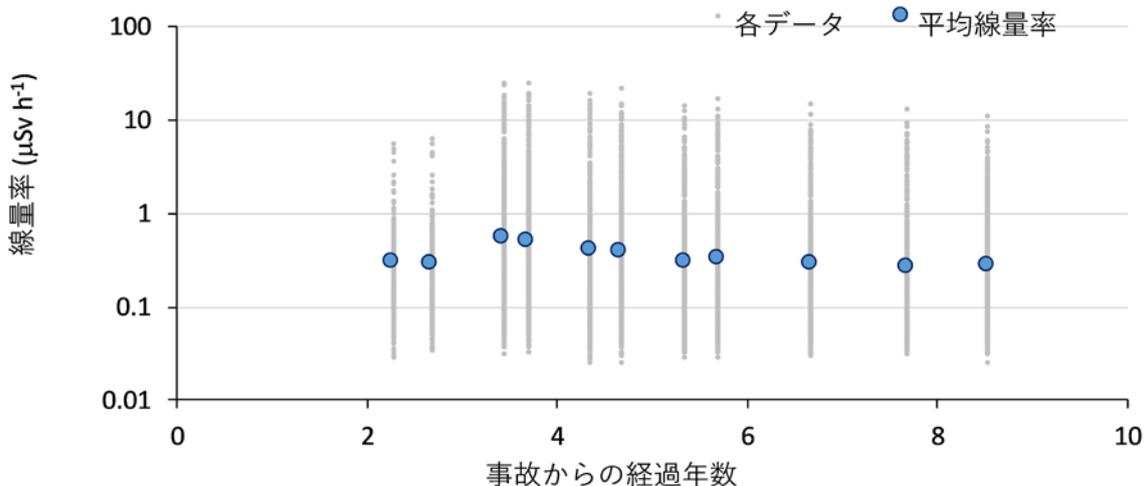
2) 定点サーベイ



測定回	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回	第6回	第7回	第8回	第9回	第10回	第11回	第12回	第13回
事故からの経過年	0.27	0.98	1.45	1.69	2.26	2.67	3.41	3.68	4.44	5.50	6.51	7.56	8.49
平均線量率	1.30	0.65	0.85	0.80	0.69	0.60	0.47	0.46	0.39	0.30	0.29	0.24	0.23
標準偏差	3.60	0.86	2.70	2.50	2.30	1.90	1.60	1.60	1.30	1.00	1.00	0.77	0.70
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

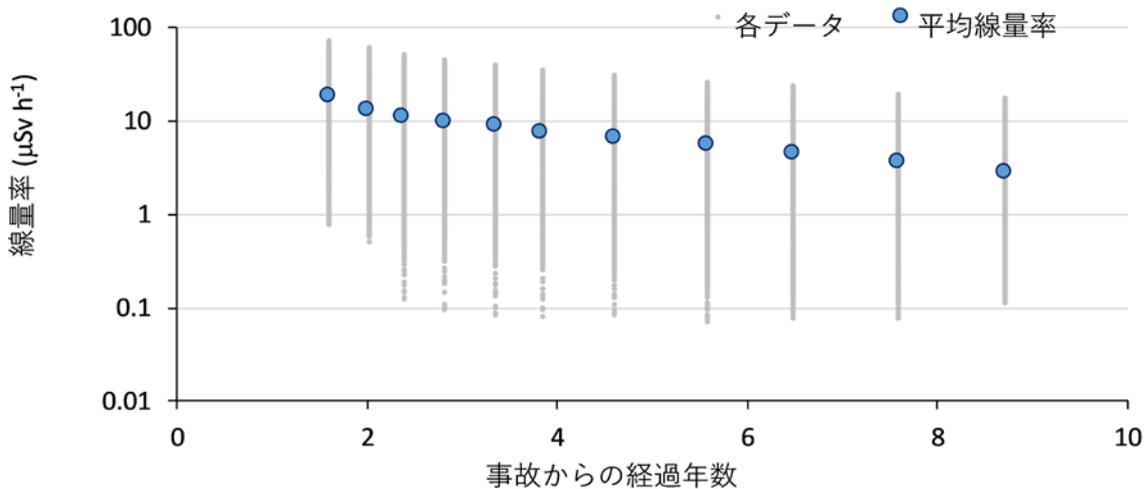
図 5-1 本事業で得られた空間線量率の変化傾向 (1/2)
(天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

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
事故からの経過年	2.27	2.68	3.43	3.69	4.34	4.67	5.34	5.69	6.67	7.68	8.53
平均線量率	0.30	0.28	0.54	0.49	0.41	0.39	0.30	0.32	0.29	0.26	0.27
標準偏差	0.46	0.41	1.80	1.60	1.40	1.30	0.88	1.00	0.84	0.71	0.65
測定エリア数	739	878	1960	1977	1964	1946	2000	1976	2118	2117	1766
初回からの平均値の割合	100	93	180	163	137	130	100	107	97	87	90

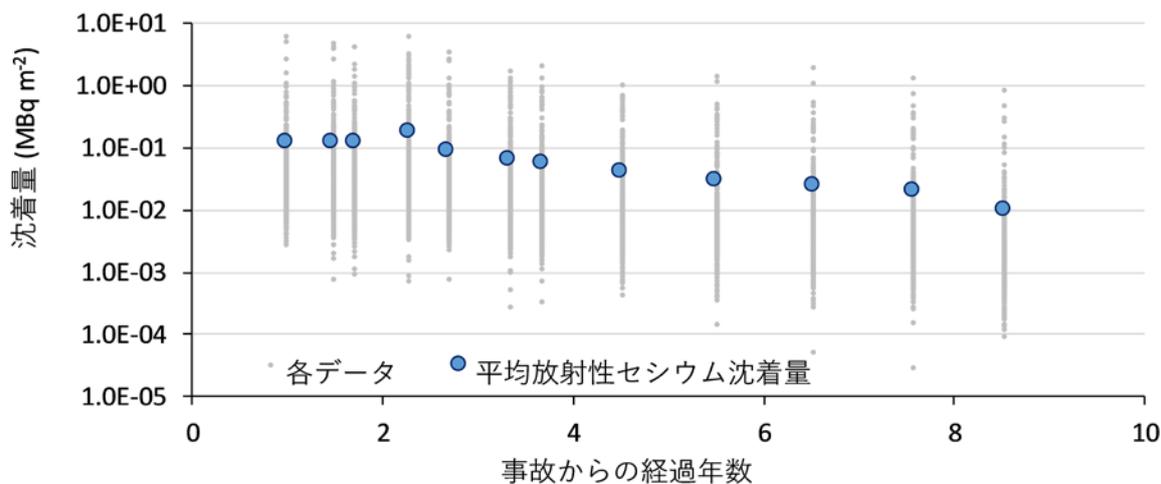
4) 無人ヘリサーベイ



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

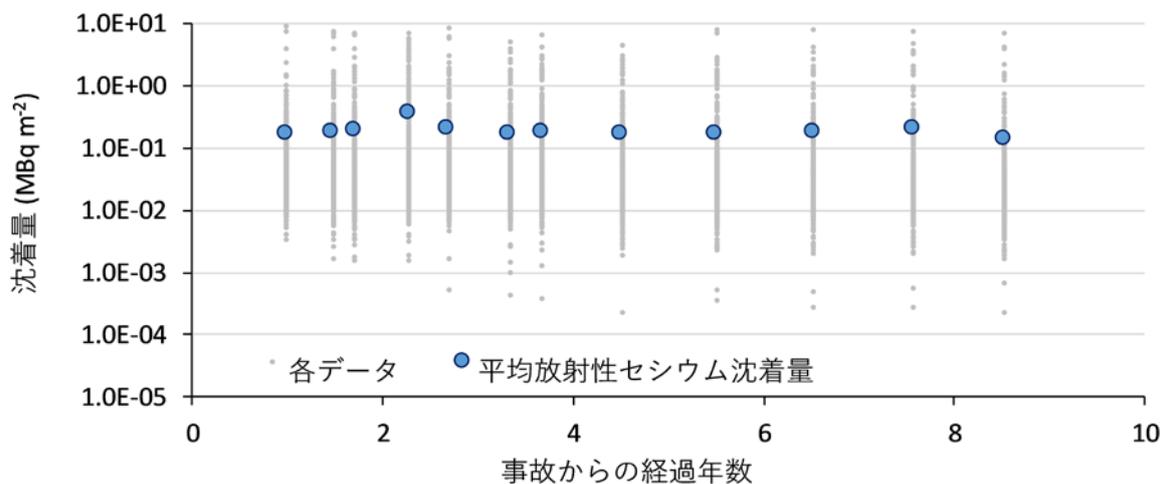
図 5-1 本事業で得られた空間線量率の変化傾向 (2/2)
(天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

1) in-situ測定（セシウム134）



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

2) in-situ測定（セシウム137）



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

図 5-2 本事業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

令和元年度実施した空間線量率測定においては、事故から8年が経過しているため、空間線量率はバックグラウンドである天然放射性核種による空間線量率に比較的近い数値を示す場所が多くなってきている。変化傾向を定量化する場合、天然放射性核種による空間線量率を正確に減算する必要がある。分布状況調査における KURAMA-II による走行サーベイ結果を基に、東日本の市町村別のバックグラウンド線量率が評価されている¹⁸⁾。ここでは、このバックグラウンド線量率データを採用し減算に用い、市町村ごとに放射性セシウム由来の空間線量率を算出した。

実効半減期算出には、走行サーベイ、定点サーベイ、歩行サーベイのデータを基準地域メッシュ(1km)ごとに集計し、平均値を使用した。また、他事業になるが、航空機サーベイのデータについても同様な評価を行った。さらに無人ヘリサーベイの結果については、測定範囲が狭いため、100mメッシュの平均値を計算した。指数関数近似に用いたデータは、それぞれの測定手法ごとに、調査期間すべてにおいてデータがそろっているメッシュのみ抽出した。本解析には、80km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(平成31年4月時点)のデータを対象とした。測定期間については、データ数を考慮し、走行サーベイ、無人ヘリサーベイ、航空機サーベイ及び in-situ 測定について全期間、定点サーベイについては第3回(平成24年度調査の1回目)以降、及び歩行サーベイについては第1回(平成25年度1回目)以降のデータを使用した。

抽出したデータについて、走行サーベイ、無人ヘリサーベイ及び航空機サーベイについては、式(7)に示した二項の指数関数近似を行い、実効半減期を算出した。

$$D = a \exp\left(-\frac{0.693}{t_{short}} \times t\right) + b \exp\left(-\frac{0.693}{t_{long}} \times t\right) \quad (7)$$

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

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の指数関数または指数関数近似により評価した実効半減期について表5-1にまとめる。走行サーベイの変化傾向及び二項の指数関数近似を行った結果を図5-3に示す。80km圏内全域のデータについて、速い成分は0.53年及び遅い成分は3.64年となった。セシウム134とセシウム137の半減期と比較しても速い速度で減少していることが分かる。この要因の一部としては道路上のセシウムの洗い流し効果や、4.1節で示した放射性セシウムの土壌の深度方向への移動が考えられる。

定点サーベイについて指数関数近似を行った結果を図5-4に示す。定点サーベイでは、データ数が少ない事故直後の測定データを除外したため、速い成分の分析はできなかったが、遅い成分は80

km 圏内で 2.62 年及び避難指示区域で 2.90 年となった。図 5-4 のプロットを見ると直近の 3 年分のデータが近似直線から外れている。80 km 圏内と避難指示区域で遅い成分の実効半減期が異なる要因として、速い成分の影響が無視できない、又はバックグラウンド減算の誤差が影響している可能性が挙げられる。また、避難指示区域において除染作業や中間貯蔵施設の建設が始まっており、人為的な環境変化の影響も考えられる。

歩行サーベイについて指数関数近似を行った結果を図 5-5 に示す。歩行サーベイは、平成 25 年度に調査を開始したため、速い成分の分析はできなかったが、遅い成分は 80 km 圏内で 2.82 年、となった。この数値は定点サーベイの 2.62 年と近い値だが、走行サーベイの 3.64 年より小さい。これは、フィッティングに用いた指数関数モデルの違いによると考えられる。すなわち、二項の指数関数とした走行サーベイに対して 1 成分のみであり、速い成分の影響が無視できない可能性が挙げられる。

無人ヘリサーベイについては、測定範囲が福島第一原発から 5 km 圏内と限られている。実効半減期は、速い成分は 0.59 年及び遅い成分は 3.73 年となった。この数値は、航空機サーベイの評価で得られた数値と等価であり、走行、定点及び歩行のような地上からアプローチできない森林の影響が加味されているものと考えられる。

表 5-1 評価された実効半減期の一覧

項目	対象	測定手法	実効半減期 (年)			
			80 km 圏内		避難指示区域 (平成31年4月時点)	
			早い成分	遅い成分	早い成分	遅い成分
空間線量率	車道上	走行サーベイ	0.53	3.64	-	-
			(0.41 - 0.64)	(2.81 - 4.46)		
	平たん地上 (土壌上)	定点サーベイ	-	2.62	-	2.90
				(2.51 - 2.73)		(2.70 - 3.10)
	歩道上	歩行サーベイ	-	2.82	-	-
				(2.60 - 3.04)		
平均値	無人ヘリサーベイ	-	-	0.59	3.73	
				(0.30 - 0.88)	(3.26 - 4.20)	
平均値	航空機サーベイ	0.69	4.96	0.53	4.06	
		(0.54 - 0.85)	(3.87 - 6.05)	(0.36 - 0.71)	(3.37 - 4.76)	
放射性セシウム沈着量	Cs-134	In-situ	1.69		-	
			(1.40 - 1.97)			
	Cs-137		28.3		-	
			(-12.7 - 69.3)			

* () 内は 95%信頼区間を示している。

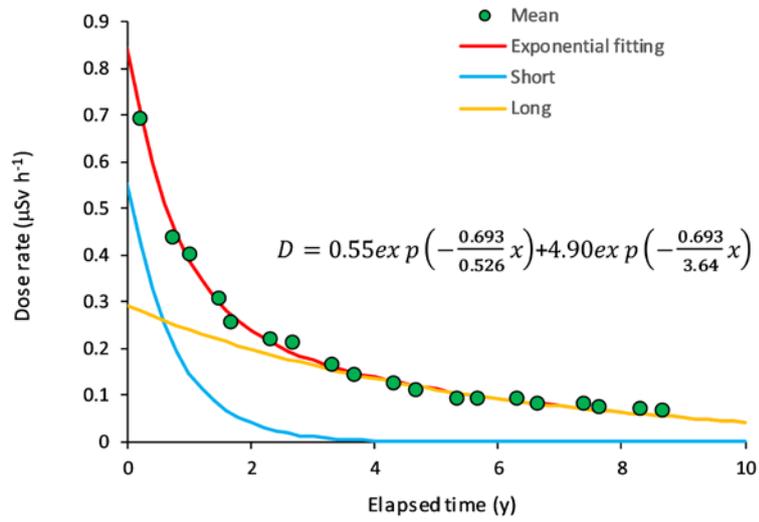
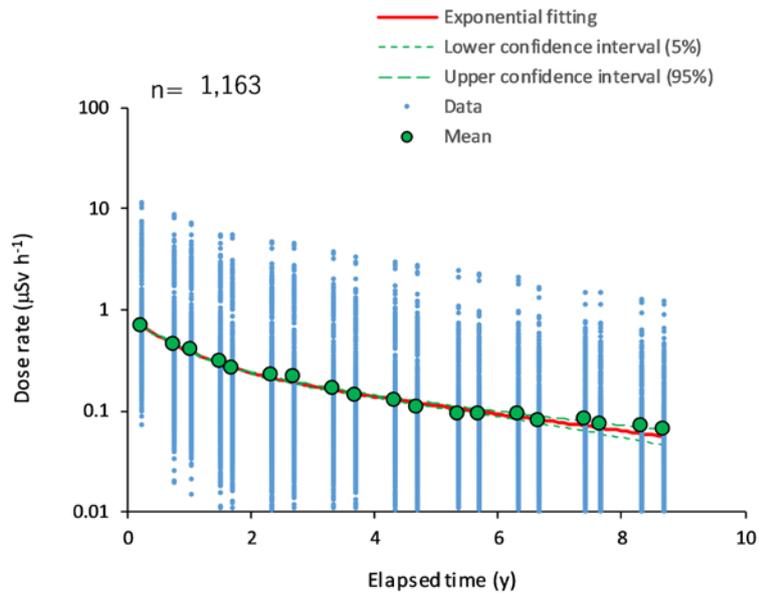


図 5-3 走行サーベイ結果(80 km 圏内)における二項指数関数の近似

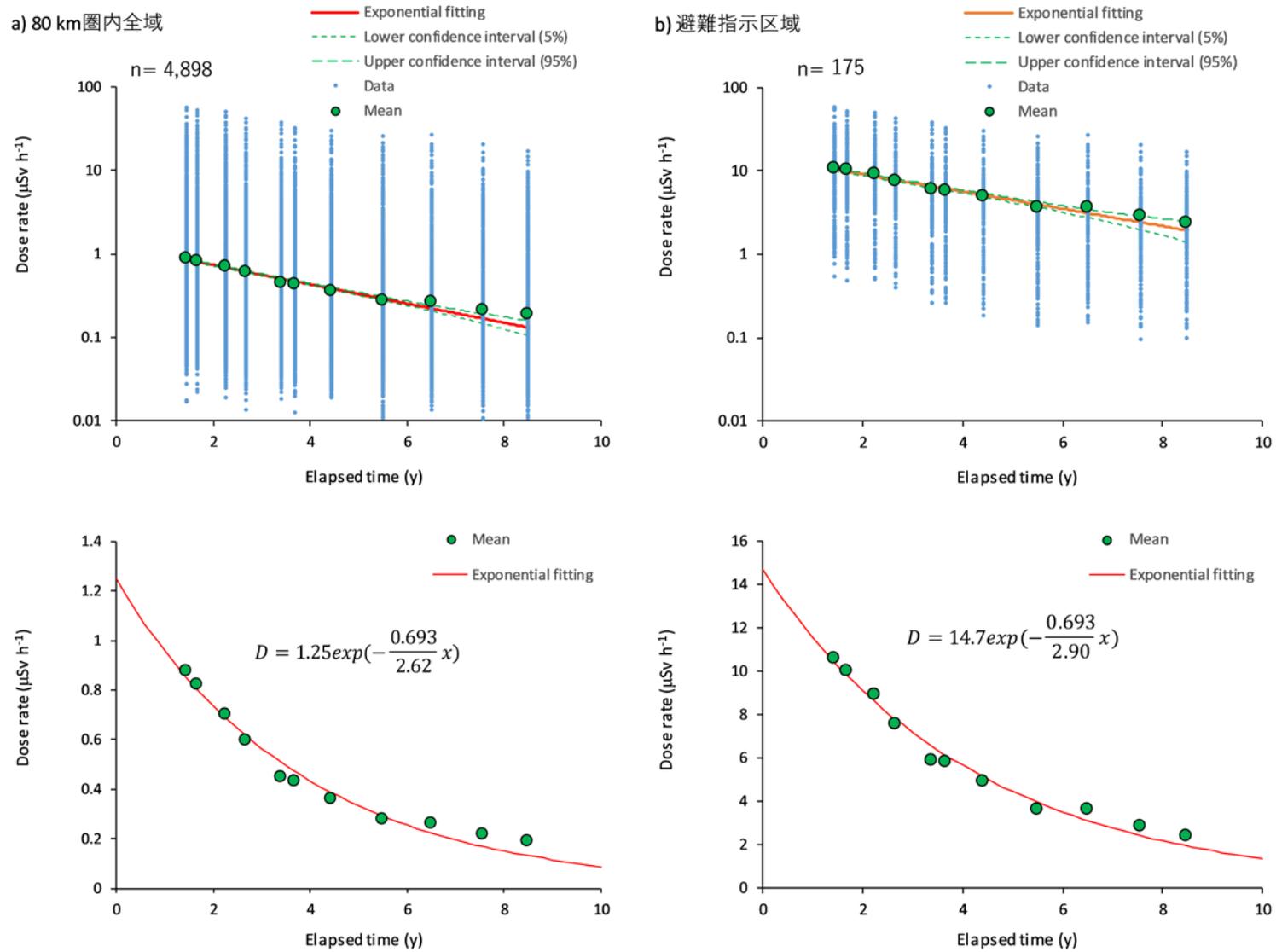


図 5-4 定点サーベイ結果における指数関数の近似

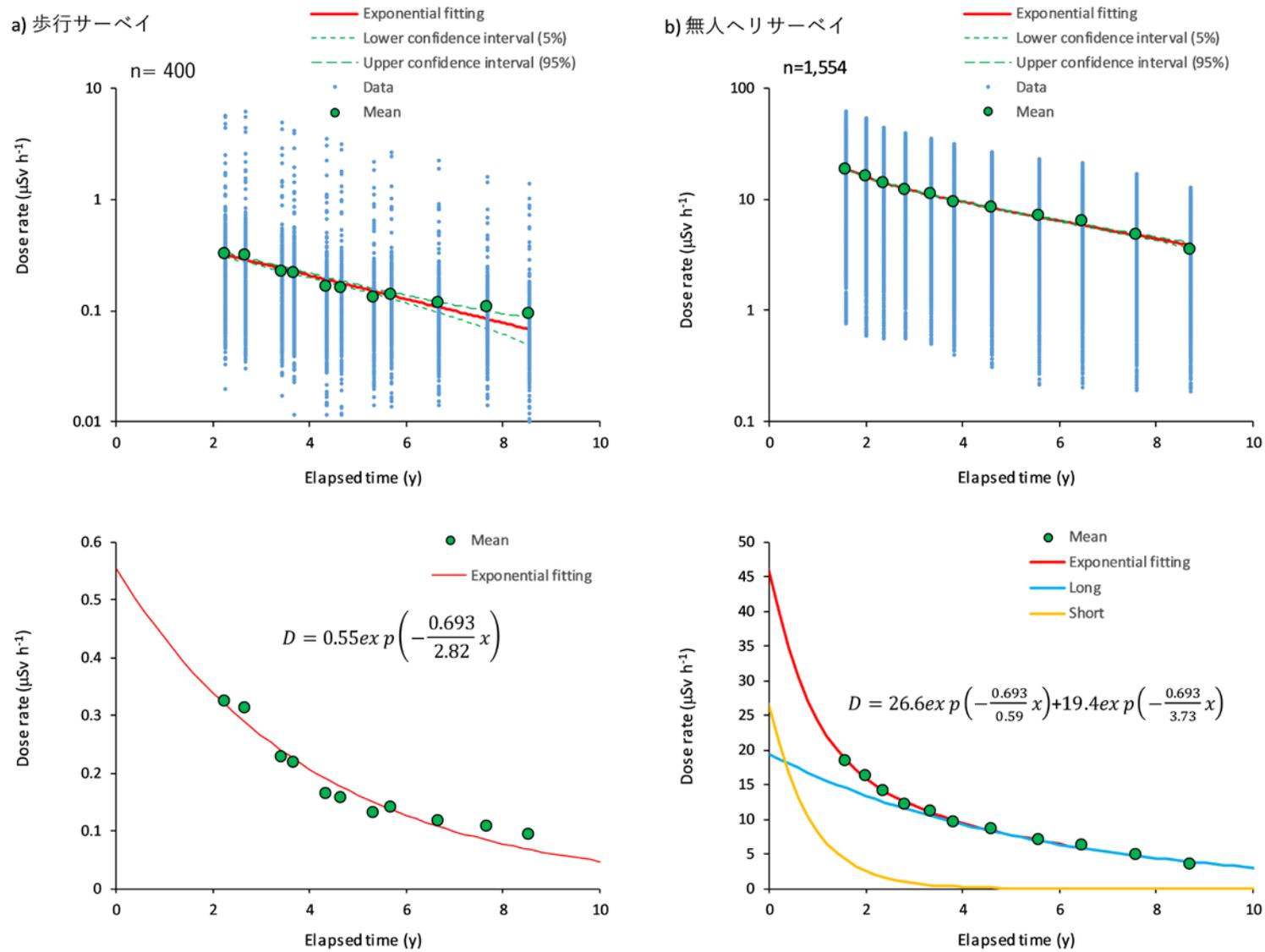


図 5-5 歩行サーベイ及び無人ヘリサーベイ結果における指数関数の近似

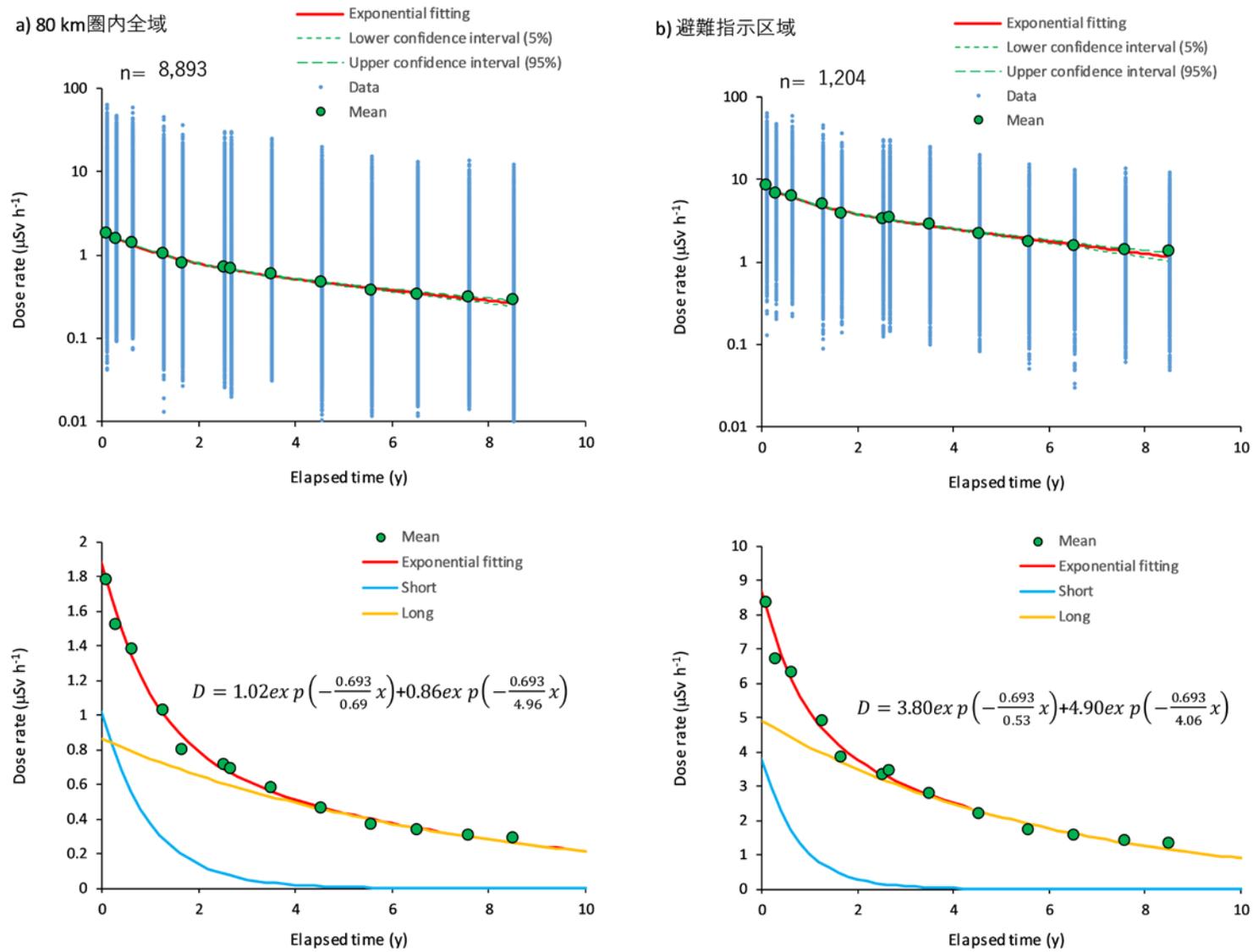


図 5-6 航空機サーベイ結果における指数関数の近似

5.5. 放射性セシウム沈着量の実効半減期

in-situ 測定による土壤中放射性セシウムの沈着量に対して指数関数フィッティングした結果を図 5-7 に示す。図に示すようにセシウム 134 は近似曲線にプロットが乗っているものの、セシウム 137 については、ばらつきが比較的大きいようにみえる。この理由ははっきりしていないが、in-situ 測定の測定誤差の影響か、測定場所の環境変化による影響が考えられる。セシウム 134 とセシウム 137 の実効半減期はそれぞれ、1.69 年及び 28.3 年となり、物理的半減期と比較すると速い数値となった。この数値の違いの原因としては、人為的な測定場所の環境変化が考えられる。今後、測定場所の土地利用による依存性や除染等の影響の有無について検討が必要と考える。

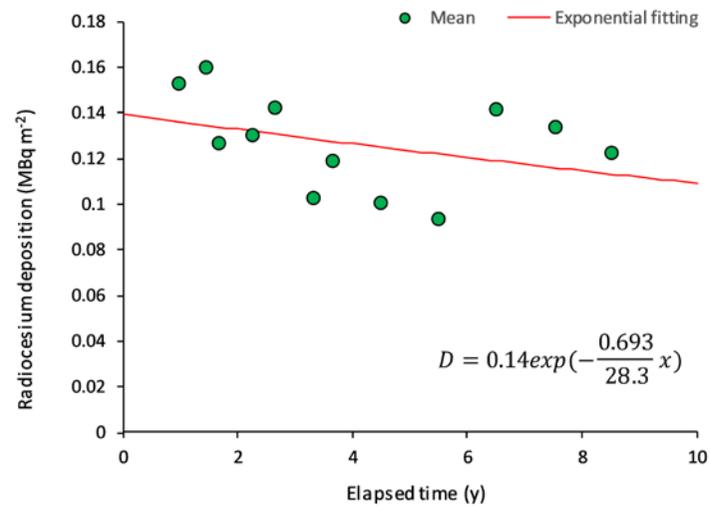
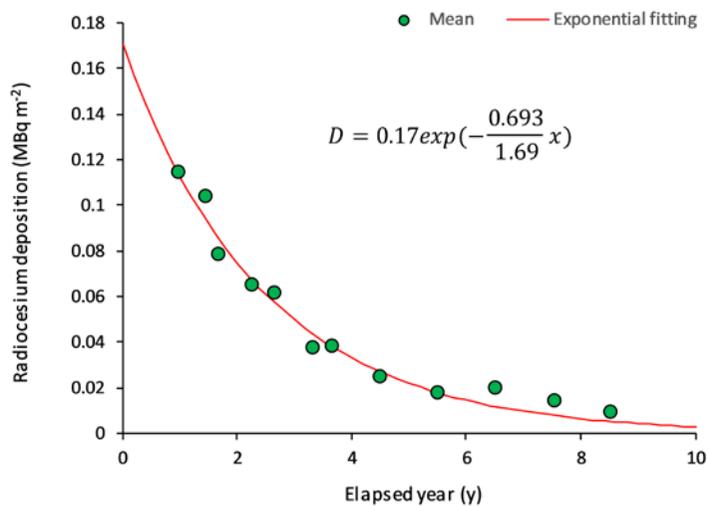
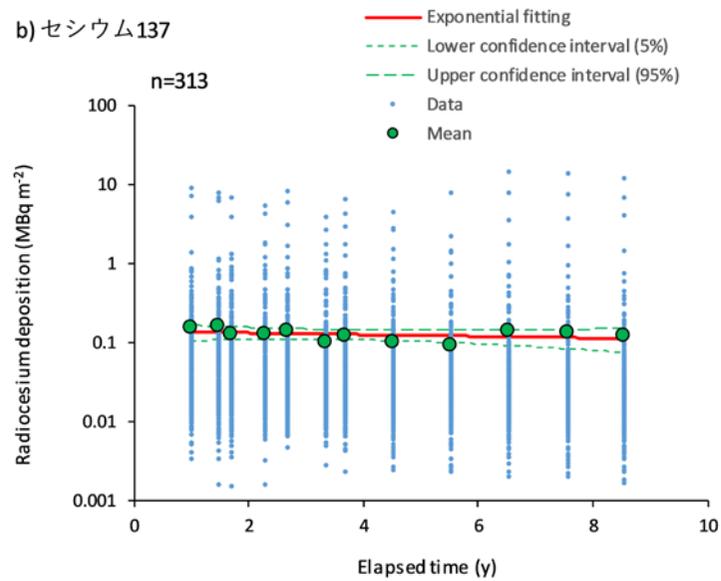
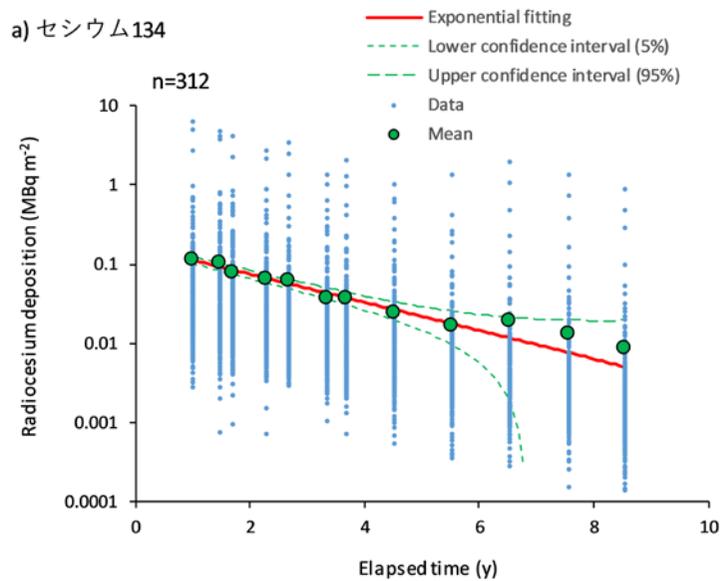


図 5-7 in-situ 測定結果における指数関数の近似

5.6. 同一メッシュにおける空間線量率の変化傾向

生活圏における空間線量率の変化傾向を考察するため、走行サーベイ、歩行サーベイ、定点サーベイ及び航空機サーベイすべての測定手法がそろっている調査メッシュ（基準地域メッシュ（1km））を抽出した。図 5-8 に抽出メッシュの場所を示す。図に示すように、可住地域を中心に約 1,000 箇所抽出できる。それぞれの測定手法の対象は以下のような特徴があるといえる。図 5-9 にそれぞれの測定手法のイメージと測定範囲について示す。

- ・ 走行サーベイ：舗装された道路上（Paved road）
- ・ 歩行サーベイ：家屋周辺の生活圏（Living area）
- ・ 定点サーベイ：未舗装の土壌面（Unpaved ground）
- ・ 航空機サーベイ：エリアの平均値（Area average）

図 5-10 に平成 23 年からの約 1,000 箇所における各測定手法の平均値及び式 (7) に示した二項の指数関数近似結果を示す。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 年目までは数値が同じ傾向にあったが、3 年目以降は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影響によるものと考えられる。また、歩行サーベイは定点サーベイや航空機サーベイに比べ低い傾向にある。これは、家屋周辺で重点的に行われた除染の影響や舗装道路上の放射性セシウムの雨水等による洗い流しが原因と考えられる。走行サーベイについては、他の 3 測定手法より低い傾向にある。これは、実効半減期の評価の章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。これらの傾向は生活圏における放射性セシウムの挙動を反映しているものと考えられ、象徴的に本事業の成果を表している。

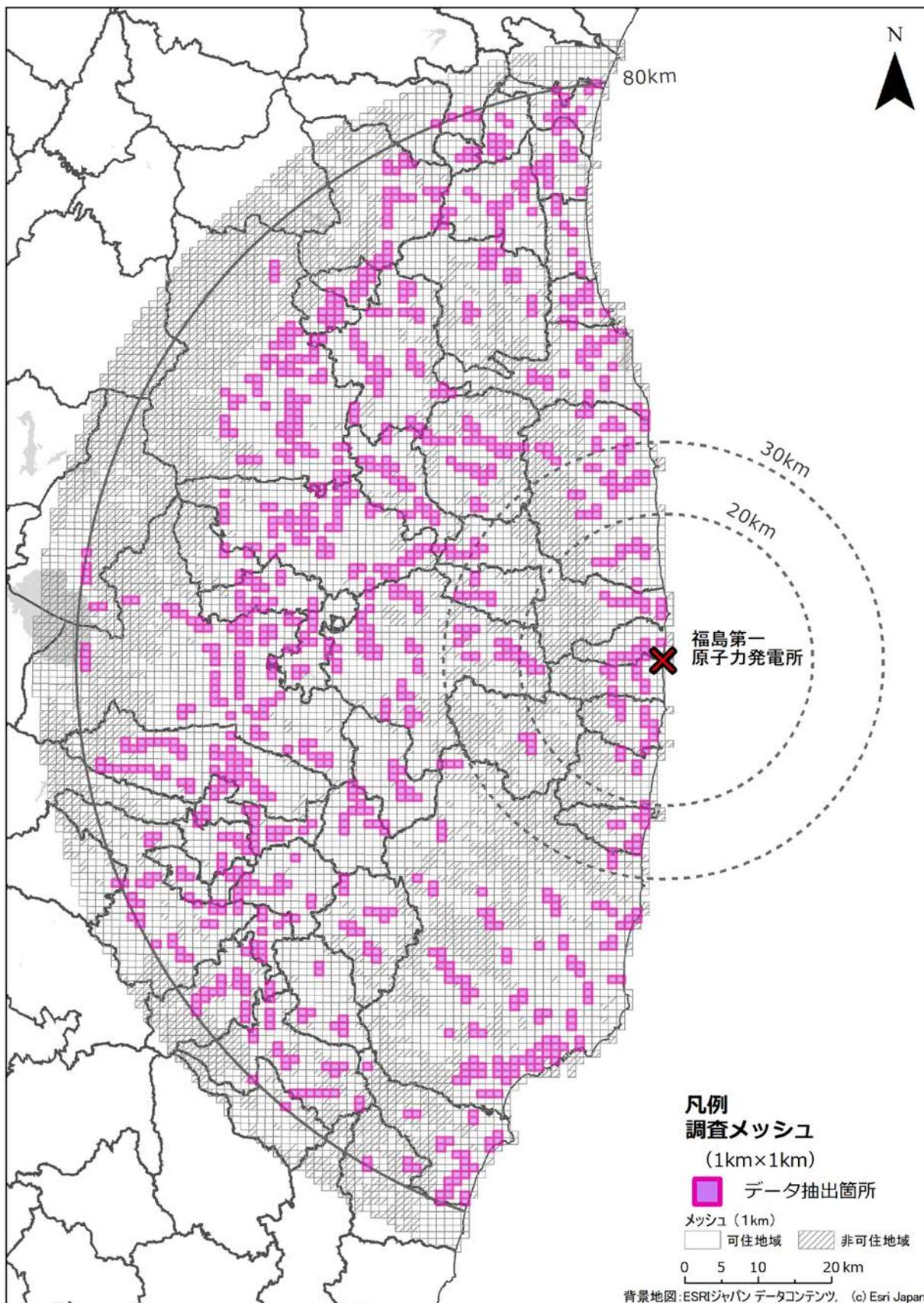


図 5-8 走行サーベイ、定点サーベイ、歩行サーベイ及び航空機サーベイの全測定データセットがある調査メッシュ箇所



図 5-9 各モニタリングのイメージと測定対象

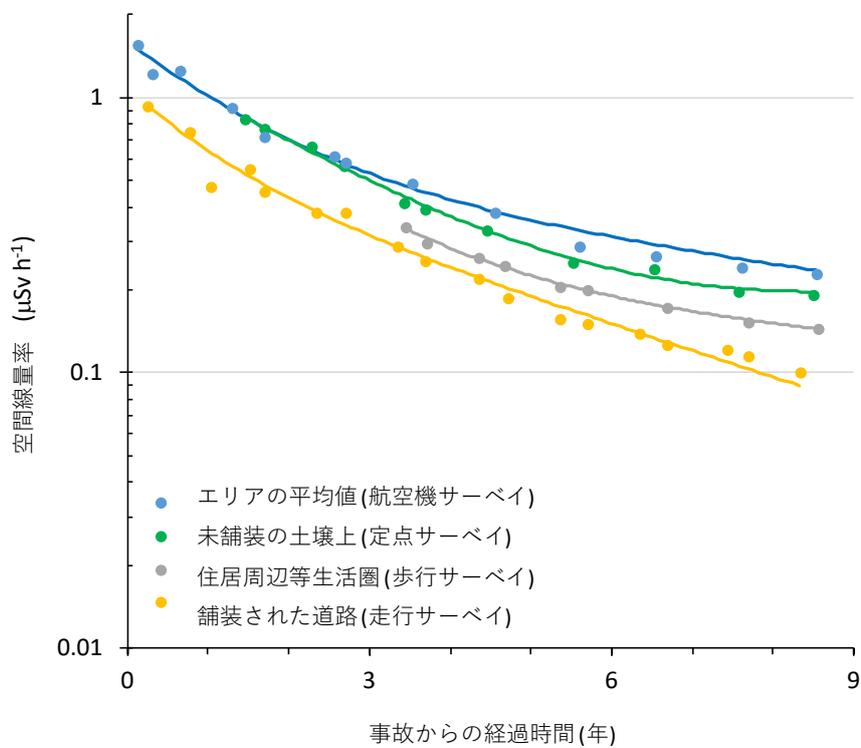


図 5-10 全測定データセットがある調査メッシュにおける空間線量率の変化傾向

6. 測定箇所的重要度分類のためのスコア化の検討

福島第一原発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）¹⁹⁾ に則り、各省庁や関係機関が横断的に実施してきた。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。最適な測定位置は、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抜けを防ぐためにも重要であると考えられる。情報処理装置の高度化に伴い、GIS ソフトウェ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いる。平成 30 年度は、本事業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や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、地域のモニタリング代表性について相対的な判断に使用できる「スコア」化手法を開発した。令和元年度は、この「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の作成を試みた。

本検討結果について、検討会で審議した内容については Appendix-2「陸域における放射性物質濃度モニタリングの在り方について- 報告書 -」にまとめる。

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
(赤字は空間線量率に関する項目)

項目	担当省庁	項目	担当省庁
<p>○福島県全域の環境一般モニタリング</p> <ul style="list-style-type: none"> 可搬型モニタリングポスト等の測定結果の公開 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 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 原災本部 福島県 原子力事業者等	<p>○学校、保育所等のモニタリング</p> <ul style="list-style-type: none"> 福島県内の学校等における空間線量率の測定結果を公開 屋外プールの水の放射性物質の濃度の測定 学校等の給食の放射性物質を測定 	原子力規制委員会 文科省 福島県等
		<p>○港湾、空港、公園、下水道等のモニタリング</p> <ul style="list-style-type: none"> 下水汚泥中の放射性物質の濃度の測定 港湾、空港、都市公園等の空間線量率の測定 	国交省 福島県 地方公共団体等
<p>○水環境</p> <ul style="list-style-type: none"> 福島県並びに近隣県の河川、湖沼・水源地、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	<p>○野生動植物、廃棄物のモニタリング</p> <ul style="list-style-type: none"> 野生動植物の採取・分析を実施 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 	環境省 福島県 地方公共団体 事業者等
<p>○海域モニタリング</p> <ul style="list-style-type: none"> 東京電力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 国交省 海保庁 環境省 福島県 東京電力等	<p>○農地土壌、林野、牧草等のモニタリング</p> <ul style="list-style-type: none"> 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、樹皮及び木材等の放射性物質の濃度を測定 関係都道府県毎に都道府県各地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 	農水省 林野庁 地方公共団体等
<p>○全国的な環境一般のモニタリング</p> <ul style="list-style-type: none"> 各都道府県におけるモニタリングポストによる空間線量率の測定結果をインターネットを通じて公開 月間降下物（雨や空気中のほこり等）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	<p>○水道のモニタリング</p> <ul style="list-style-type: none"> 関係都県毎に、浄水場の浄水及び取水地域の原水、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 	厚労省 原災本部 地方公共団体等
		<p>○食品のモニタリング</p> <ul style="list-style-type: none"> 食品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 	厚労省 原災本部 農水省 水産庁 福島県 関係地方公共団体等

7. 実測データの統合的解析

7.1. 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調査（航空機サーベイ）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、それぞれの測定データは個別に蓄積されている。もしこれらの空間線量率情報を統合することが出来れば、対象領域全域に対して精度と空間分解能の高いマップを作成することが出来る。すなわち、統合的解析の目的は、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ことである。

本目的のために、平成 28 年度においては、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²⁰⁾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を作成した²¹⁾。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空間線量率マップを作成した。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 圏内の統合空間線量率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、統合空間線量率マップを作成した。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 圏内の統合空間線量率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空間線量率マップを作成した。

7.2. 調査内容

7.2.1. 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、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有用に用いられるが、調査領域が車道上に限定される。航空機サーベイは 300m 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大きな特徴を有している。本調査では、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した。具体的には、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統合した。

7.2.2. 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サーベイ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した。統合に際しては、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手法²⁰⁾を応用した。

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、最も信頼に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。 $p(y|z_w, z_c, z_A)$ 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。

$$p(y|z_w, z_c, z_A) \propto p(z_A|y) p(z_c|y) p(y|z_w) \quad (8)$$

$p(z_A|y)$: 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

ここで、 $p(y|z_w)$ 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 (8) 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。

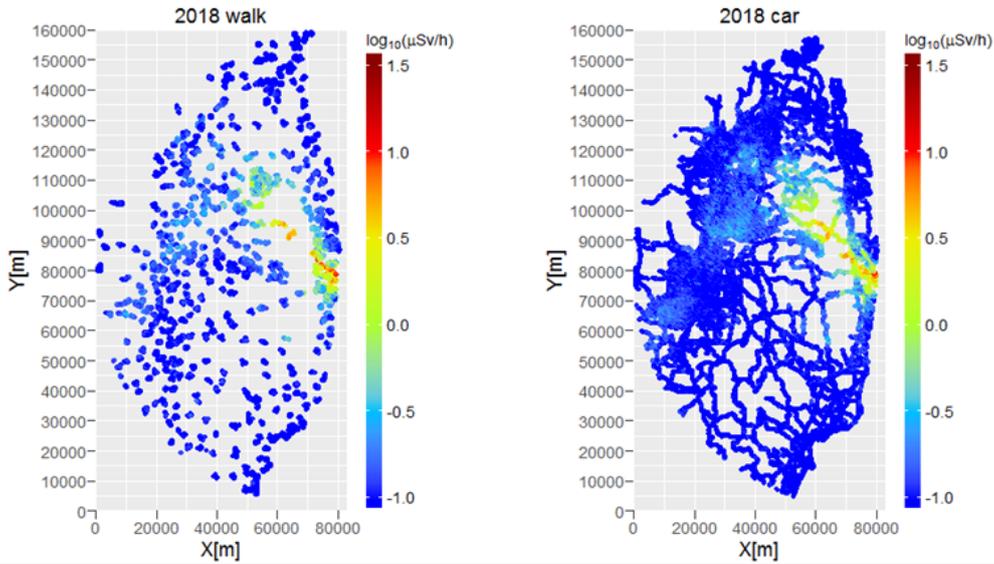
$p(y|z_w)$ と関連したプロセスモデルは、歩行サーベイ結果の空間パターンの解析から得られる。具体的には歩行サーベイにおいて、離れた2メッシュ間の空間線量率が距離によりどのように変化するかを解析した。データモデル及びプロセスモデルの基となる環境モニタリング測定データ間の相関関係は土地利用状況により異なることがわかっているので、土地利用状況別に統計解析を実施しその結果を用いた。これらの関係を利用しながら確率が最大となる y とその信頼区間(分散)を推定した。

7.3. 80 km 圏内を対象とした統合マップの作成

7.3.1. 対象とした測定データ

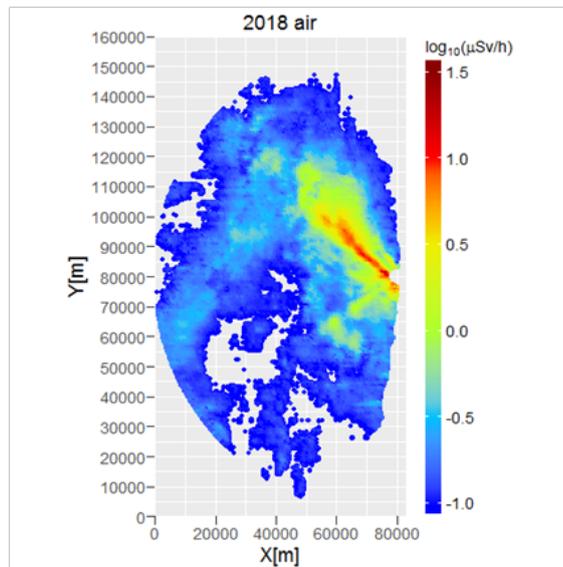
80 km 圏内を対象として、平成 30 年 11 月及び令和元年 11 月に測定された各種データを年度ごとに統合した統合空間線量率マップの作成を行った。

統合に用いた歩行サーベイ、走行サーベイ及び航空機サーベイの測定結果を図 7-1 及び図 7-2 に示す。なお、過去に実施した解析により、各測定結果間の関係が平成 28 年 7 月 12 日時点における避難指示区域内と区域外で異なることが明らかになっていることから、今回の解析においても避難指示区域内外を分割した解析を行った。また、対象領域における土地利用状況によっても放射性物質の分布状況及び変化傾向が異なることが明らかになっていることから、JAXA より公開されている高解像度土地利用データ²²⁾に基づき測定データを分類して解析を実施した。今回の解析に使用した 80 km 圏内における避難指示区域の境界及び土地利用状況を図 7-3 に示す。



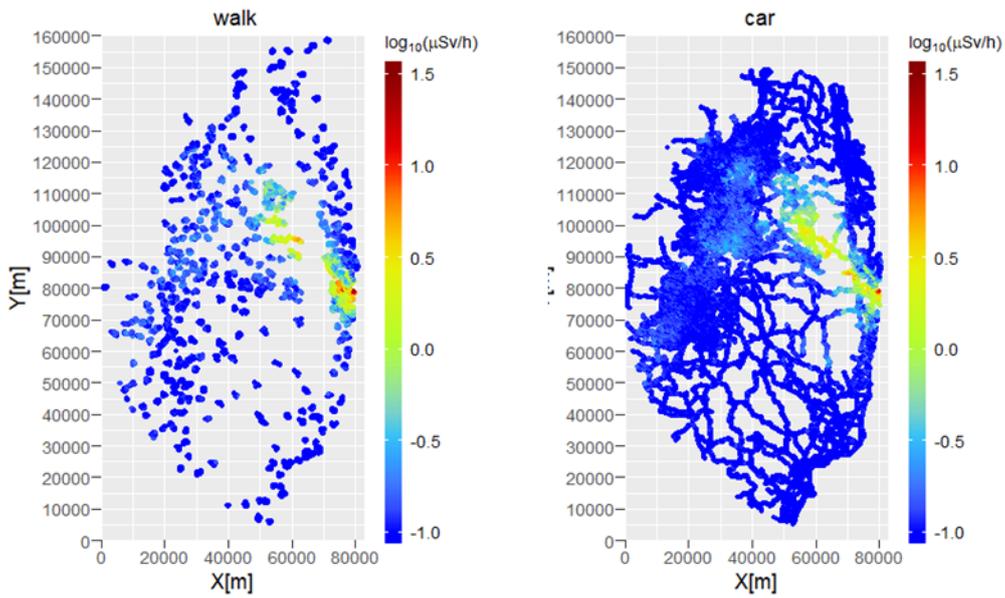
歩行サーベイ結果

走行サーベイ結果



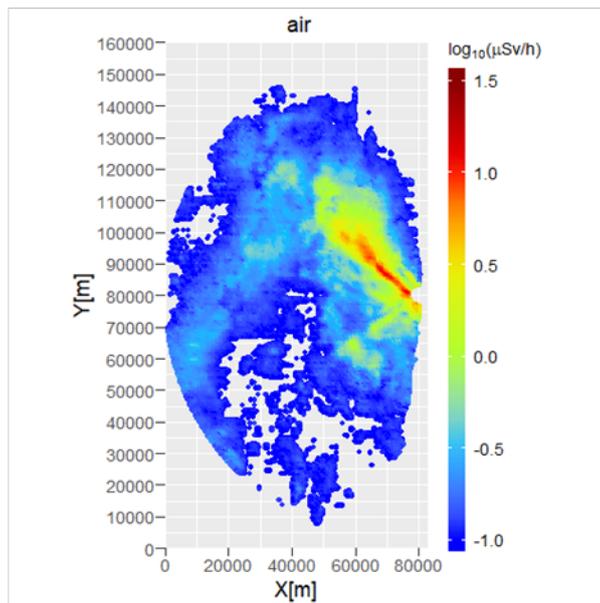
航空機サーベイ結果

図 7-1 平成 30 年度 11 月期に実施された歩行、走行及び航空機サーベイ結果 (80 km 圏内)
(天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)



歩行サーベイ結果

走行サーベイ結果



航空機サーベイ結果

図 7-2 令和元年度 11 月期に実施された歩行、走行及び航空機サーベイ結果 (80 km 圏内)
(天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

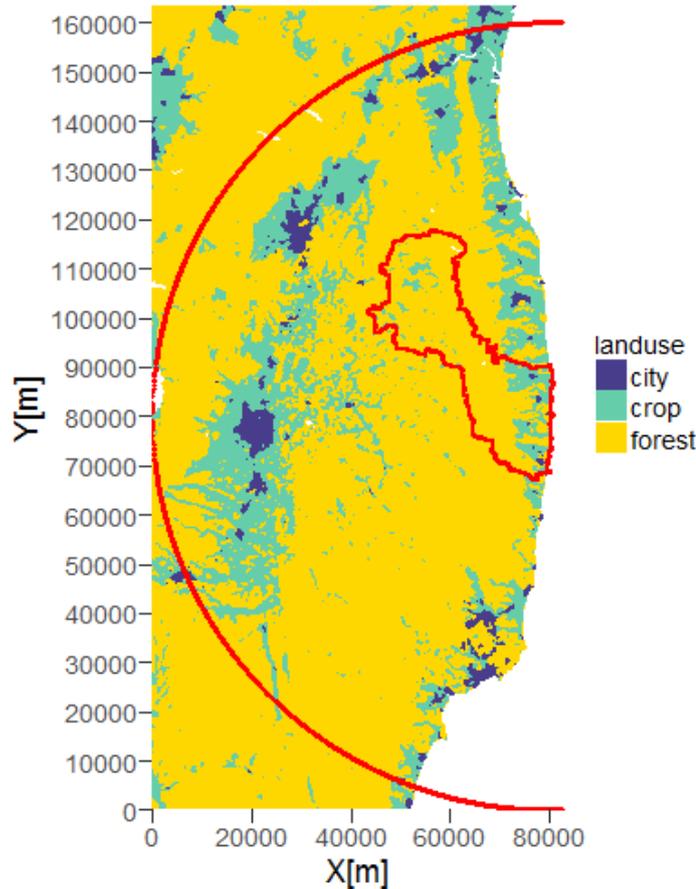


図 7-3 80 km 圏内における土地利用状況
 (青:市街地、緑:農地、黄色:森林、赤線:避難指示区域境界及び80 km 境界)
 (背景図は、高解像度土地利用図²²⁾(c)JAXA)を使用)

7.3.2. 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分布パターンの解析(バリオグラム解析)を行った。避難指示区域内及び同区域外(ただし80km 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。平成30年度及び令和元年度についてのバリオグラム解析結果を図7-4及び図7-5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(9)に示す。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2|N(h)|} \sum_{N(h)} (z_i - z_j)^2 \quad (9)$$

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。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、セミバリエンスの値をシルと呼ぶ。シルは空間線量率のばらつきの大きさ（分散）を表す。

統合マップ作成において、歩行サーベイの測定データは局所的なスケールの空間線量率の分布特性を分析するために用いられ、広域的なスケールの空間線量率の分布特性の分析には航空機サーベイの測定データが用いられることから、本バリオグラム解析においては、最も細かなスケールの相関を示すシル及びレンジの値を採用した。

平成 30 年度及び令和元年度における空間線量率測定結果を各々式(8)の z_w として用い、本分析において採用したシルやレンジの値をプロセスモデルとして用いることで、事前分布 y を作成した。

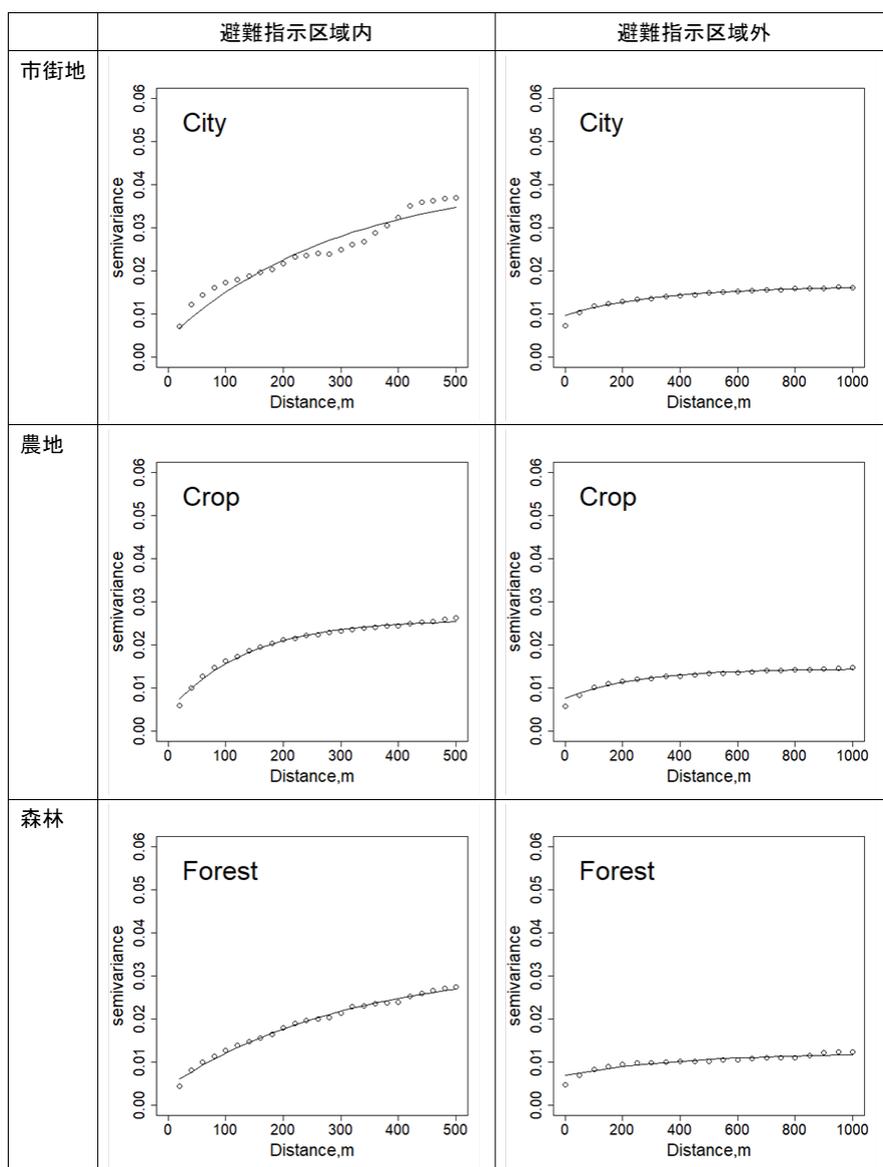


図 7-4 平成 30 年度 11 月期に実施された避難指示区域内外における歩行サーベイによる空間線量率のバリオグラム解析結果

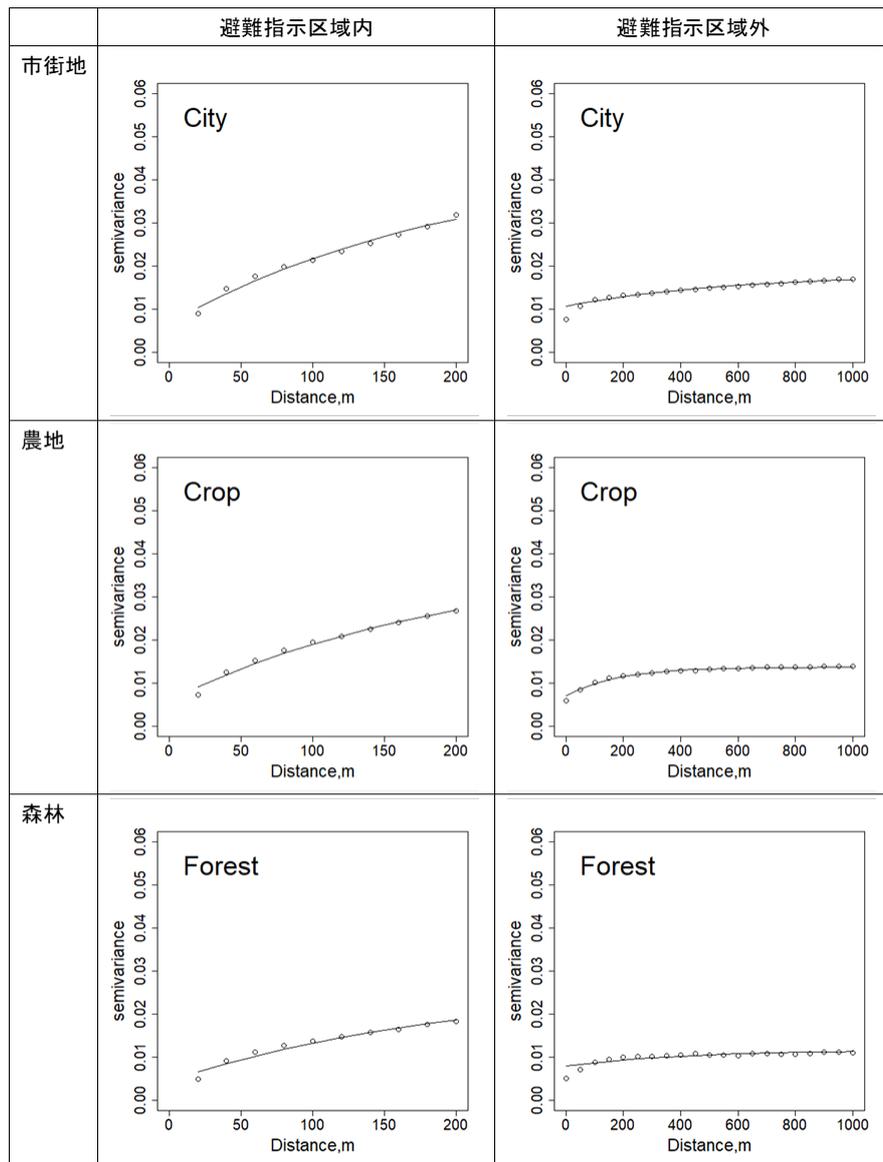


図 7-5 令和元年度 11 月期に実施された避難指示区域内外における歩行サーベイによる空間線量率の
パリオグラム解析結果

7.3.3. 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の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。平成 30 年度及び令和元年度についての比較結果を図 7-6 及び図 7-7 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 100m 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 100m 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 (8) における z_c として用いた。

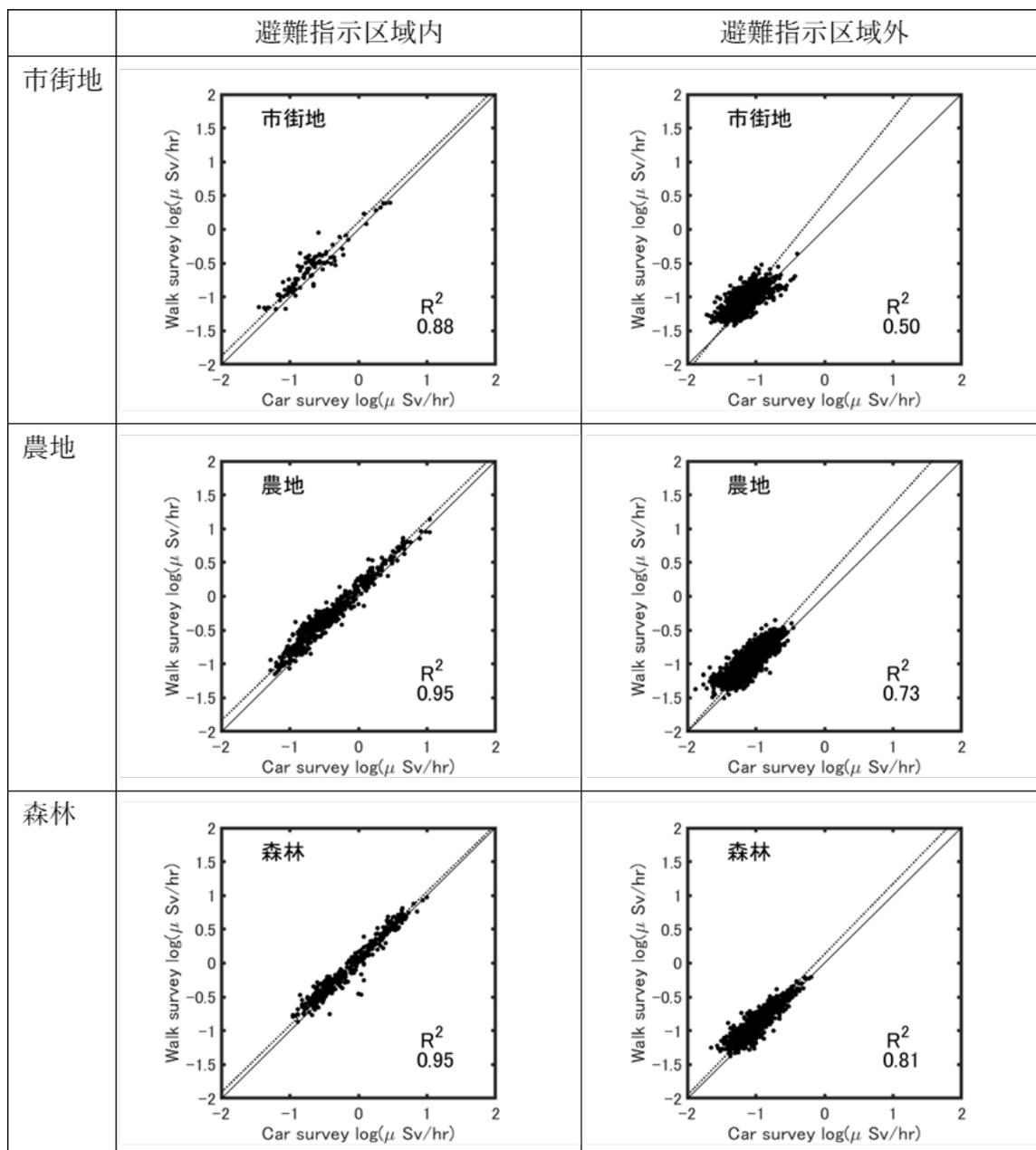


図 7-6 平成 30 年度 11 月期に実施された避難指示区域内及び避難指示区域外における走行サーベイと歩行サーベイによる空間線量率の相関分析
 (図中の R^2 は決定係数、破線は最小二乗法による回帰直線、実線は $Y=X$ の直線)
 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

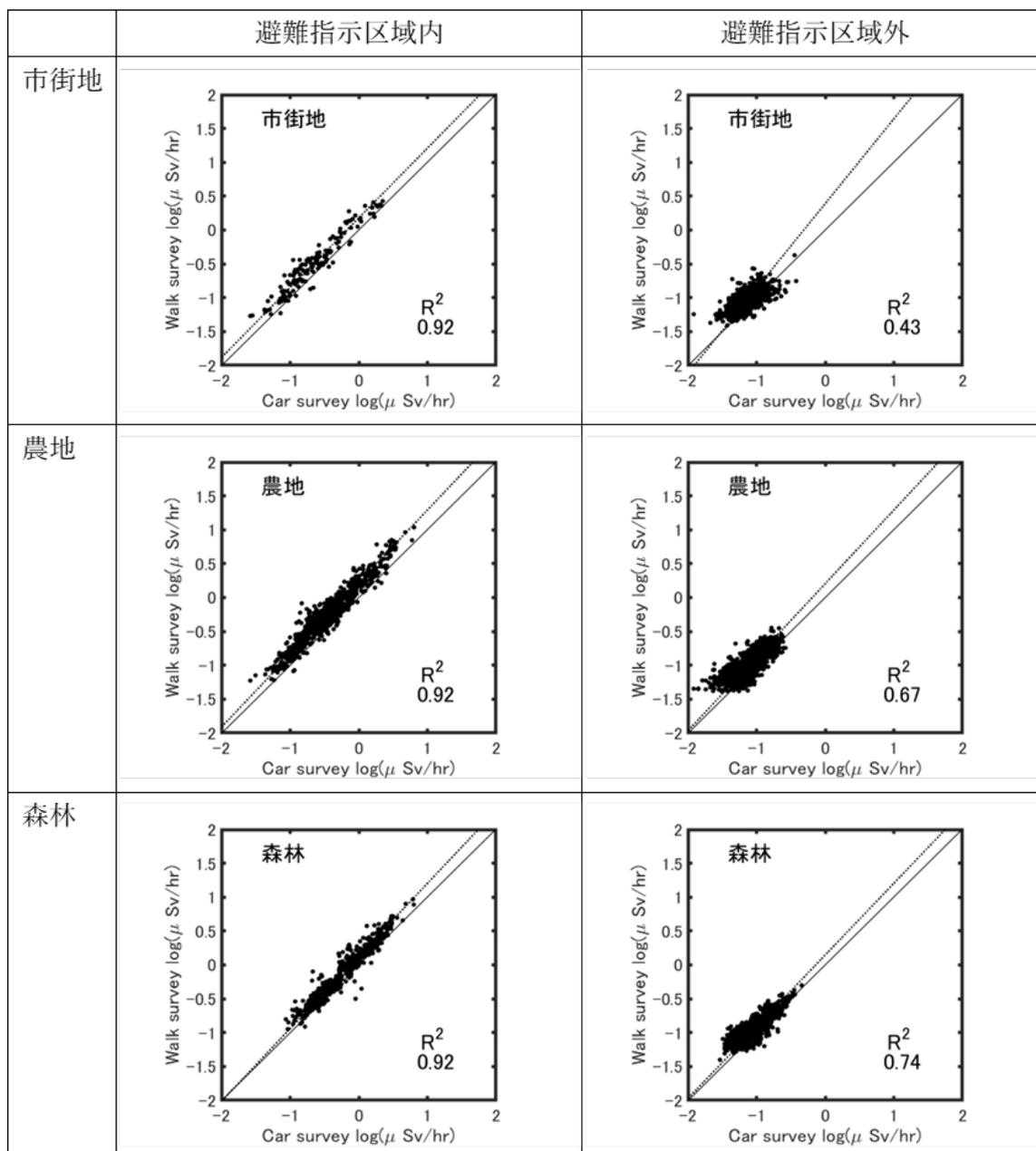


図 7-7 令和元年度 11 月期に実施された避難指示区域内及び避難指示区域外における走行サーベイと歩行サーベイによる空間線量率の相関分析
 (図中の R^2 は決定係数、破線は最小二乗法による回帰直線、実線は $Y=X$ の直線)
 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

7.3.4. 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、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。平成 30 年度及び令和元年度についての比較結果を図 7-8 及び図 7-9 にそれぞれ示す。平成 29 年度の解析により、航空機サーベイの結果を距離

に応じて加重平均化したものと比較したデータと歩行サーベイのデータを比較することで、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距離に応じて加重平均した航空機サーベイ結果と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、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 (8) における z_A として用いた。

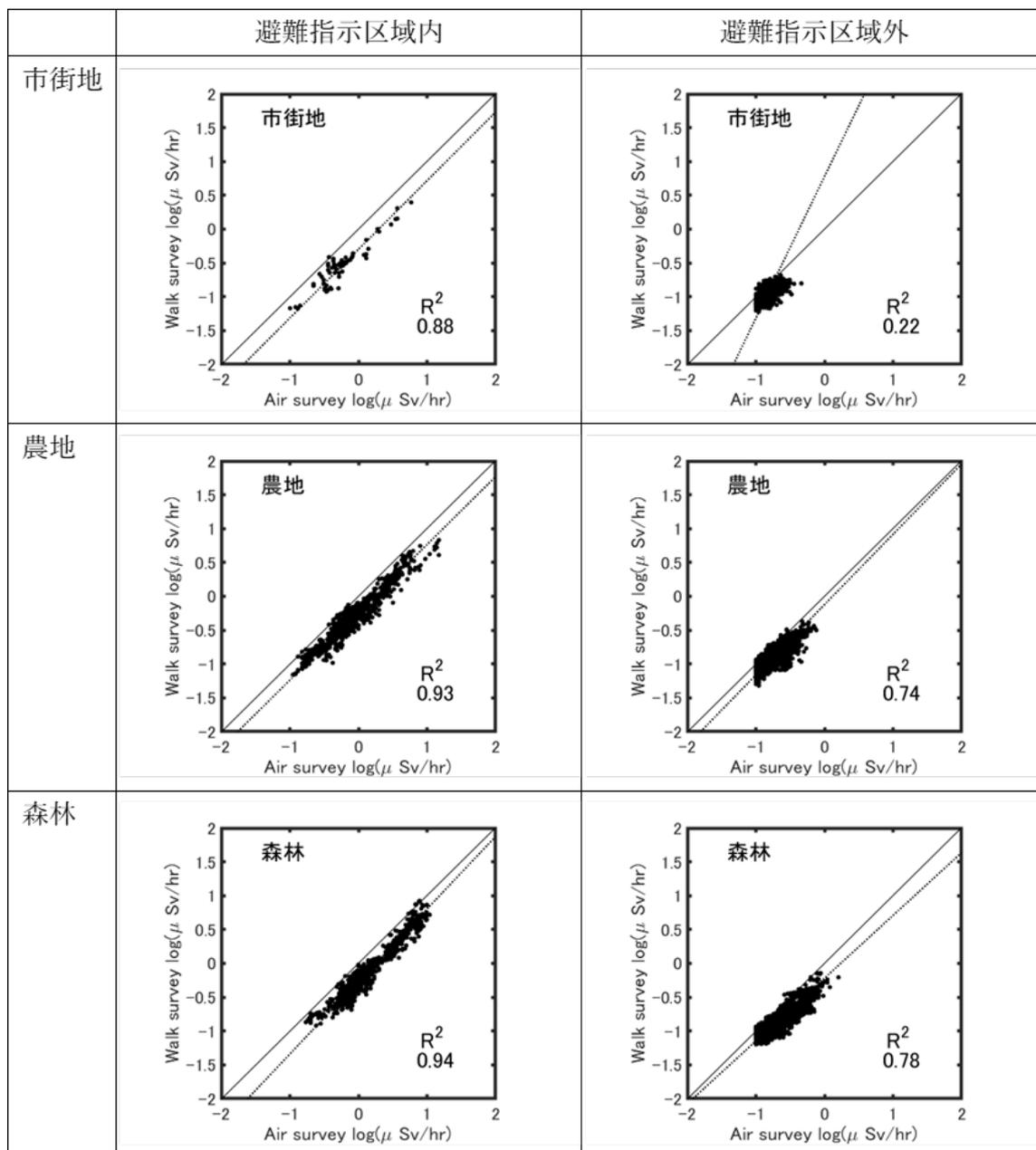


図 7-8 平成 30 年度に実施された航空機サーベイと歩行サーベイによる空間線量率の相関分析
 (図中の R^2 は決定係数、破線は最小二乗法による回帰直線、実線は $Y=X$ の直線)
 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

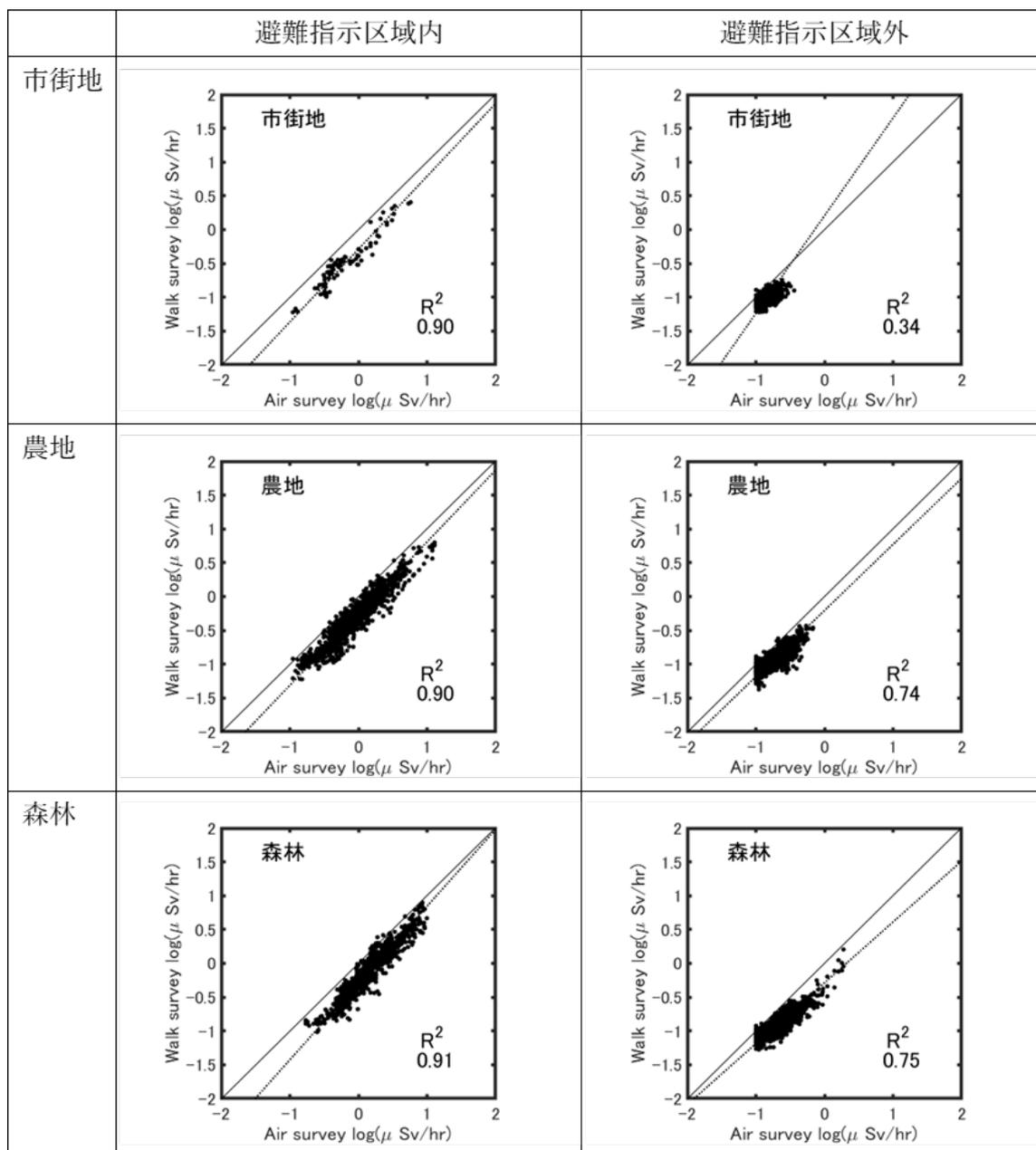


図 7-9 令和元年度に実施された航空機サーベイと歩行サーベイによる空間線量率の相関分析
 (図中の R^2 は決定係数、破線は最小二乗法による回帰直線、実線は $Y=X$ の直線)
 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

7.3.5. 統合結果

平成 30 年度及び令和元年度に実施された航空機サーベイ、走行サーベイ及び歩行サーベイによる測定データを統合した 80 km 圏内の統合空間線量率マップを図 7-10 に示す。避難指示区域内外それぞれに対して解析した結果により得られたモデルパラメータを用いて統合を行い、その結果を合成したものである。図 7-1、図 7-2 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、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等分布が得られている。

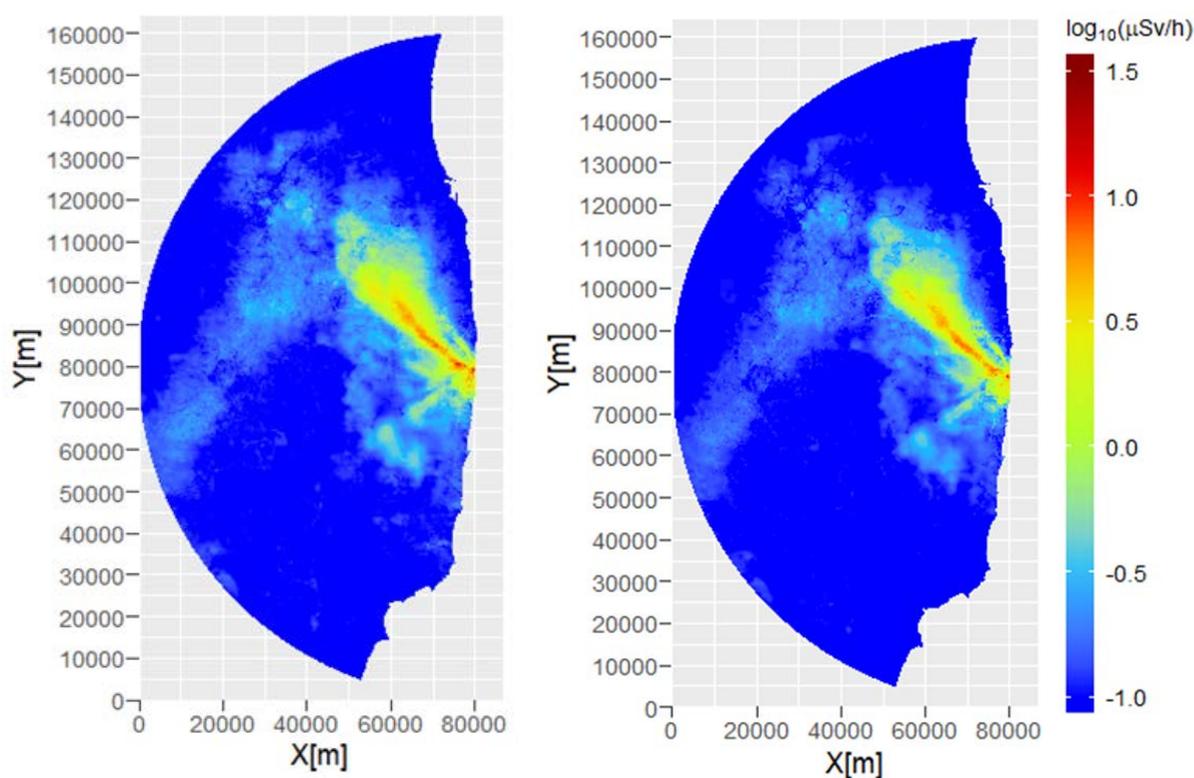


図 7-10 各種測定結果を統合した統合空間線量率マップ（80 km 圏内）

（左：平成 30 年度、右：令和元年度）

（天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。）

7.3.6. 妥当性検証

作成した統合マップの妥当性を検証するために、以下の手順で分析を行った。

- (1) 両年度に実施された歩行サーベイデータを各々避難指示区域内外に分類し、土地利用種ごとに 100 点をランダムに抽出する。
- (2) 抽出点を除外した歩行サーベイデータを用いて統合空間線量率マップを作成するとともに、階層ベイズ統計手法に基づき 99%信頼区間を算出する。
- (3) 各抽出点に対し、抽出点で測定された空間線量率の値が算出した 99%信頼区間に含まれるかどうかを確認する。

確認結果を図 7-11 及び図 7-12 に示す。これら図において、横軸は統合空間線量率マップにおいて計算された空間線量率の値を示し、縦軸は抽出点で測定された空間線量率の値を示している。青線は階層ベイズ統計手法に基づき算出された 99%信頼区間を示す。

信頼区間に含まれなかった抽出データ（外れ値）の比率は、両年度において 1～2%程度に抑え

られていること、系統的な歪みがなく高い相関性が得られている（回帰直線の傾きが～1.0 であり、切片の値が～0.0 となっている。また、決定係数（ R^2 ）も 0.6 を超えている）ことから、信頼性の高い統合マップが作成されたと考えられる。

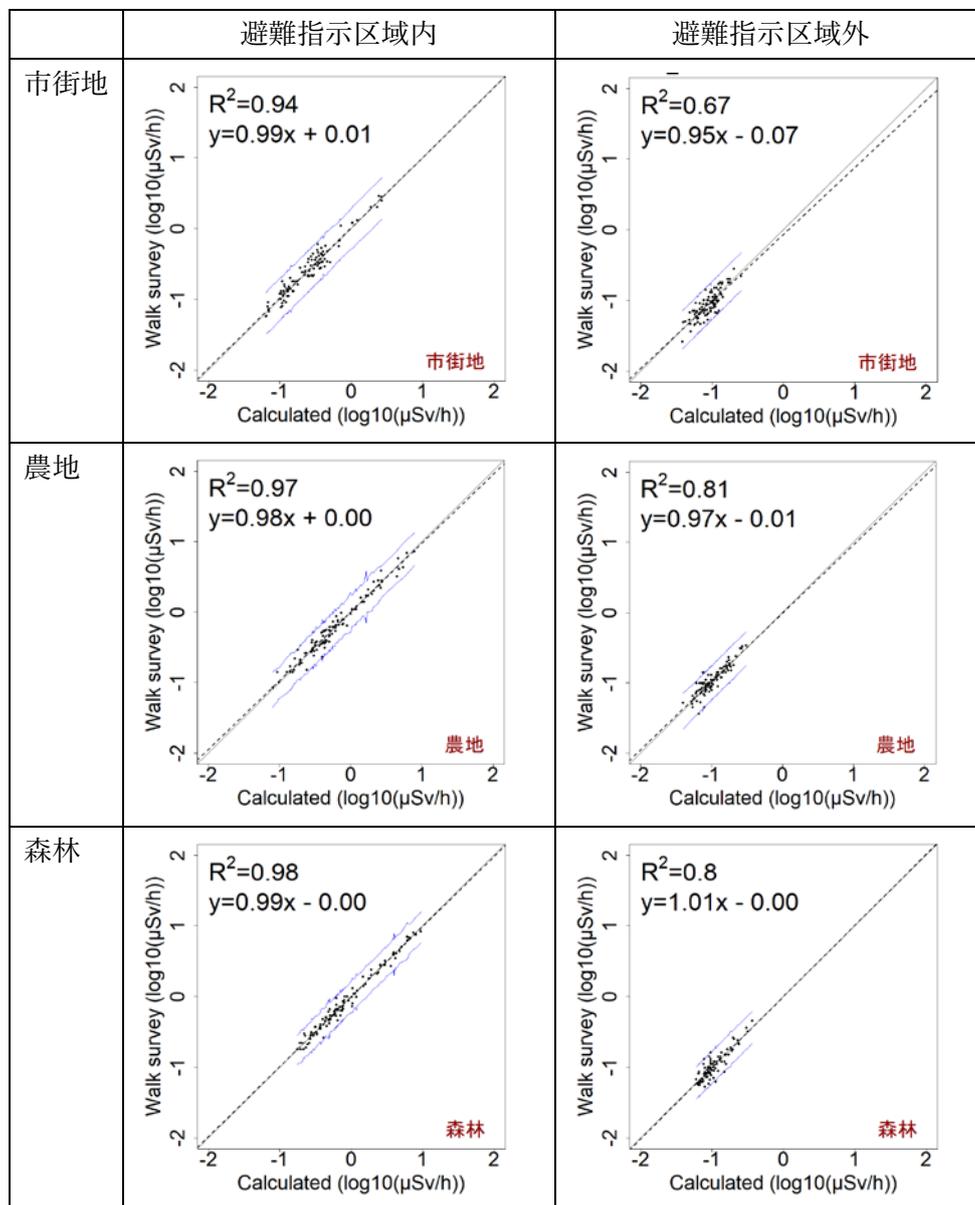


図 7-11 平成 30 年度統合空間線量率マップと計算から除外した歩行サーベイデータの相関
 (図中の R^2 は決定係数、破線と数式は最小二乗法による回帰直線、青色の線は 99%信頼区間)
 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

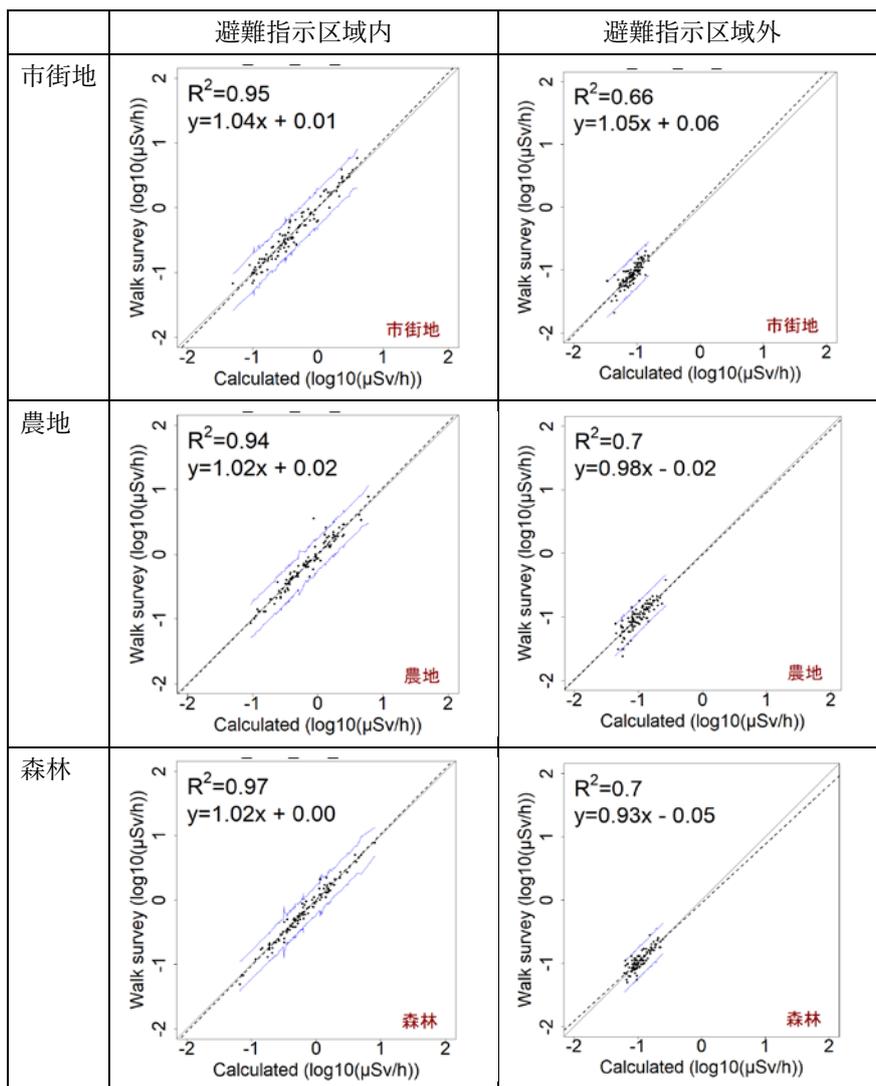


図 7-12 令和元年度統合空間線量率マップと計算から除外した歩行サーベイデータの相関
(図中の R^2 は決定係数、破線と数式は最小二乗法による回帰直線、青色の線は 99%信頼区間)
(天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

7.4. 福島県全域を対象とした統合マップの作成

7.4.1. 対象とした測定データ

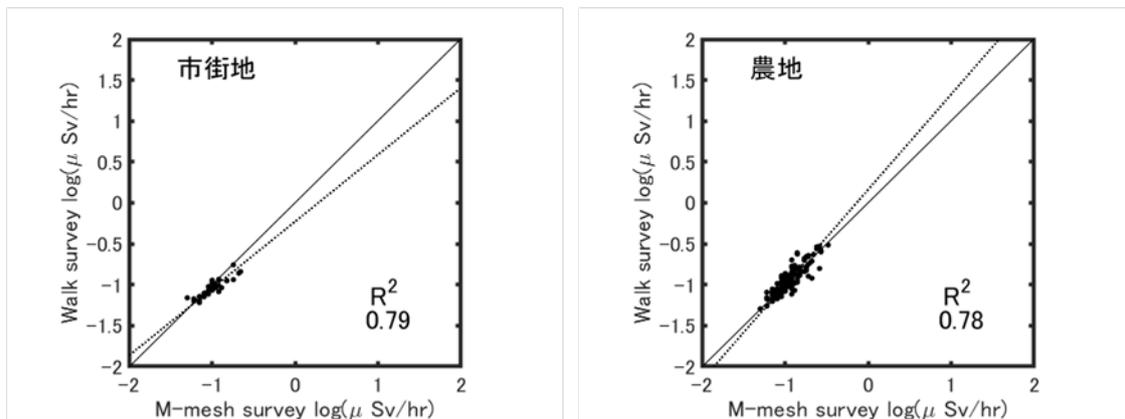
福島県全域を対象として、平成 29 年度、平成 30 年度及び令和元年度に測定された各種データを用い空間線量率の統合化を行なった。

福島県全域を対象とした場合、80 km 圏外において歩行サーベイがほとんど実施されていないという問題点が存在する。歩行サーベイのデータは事前分布の作成に必須であることから、歩行サーベイデータの欠如は精度の高い統合マップの作成に大きな影響を与える。この問題を解決す

るために、福島県が県全域を対象に毎年実施している「モニタリングメッシュ調査」^{b)}の結果を使用することにした。具体的には、100 m 以内の距離で測定されたモニタリングメッシュ調査結果と歩行サーベイ測定結果を抽出し、それらのデータの相関分析を土地利用状況ごとに実施した。相関分析結果を図 7-13～図 7-15 に示す。全ての比較結果において決定係数が 0.6 を超えており、明らかな相関性が見られる。その相関分析結果に基づいてモニタリングメッシュ調査結果を補正し、歩行サーベイ相当のデータであると見做して歩行サーベイデータに加え、福島県全域（避難指示区域外）を対象とした事前分布を作成した。以下、補正したモニタリングメッシュ調査結果を付加した歩行サーベイデータを「歩行サーベイ相当データ」とする。

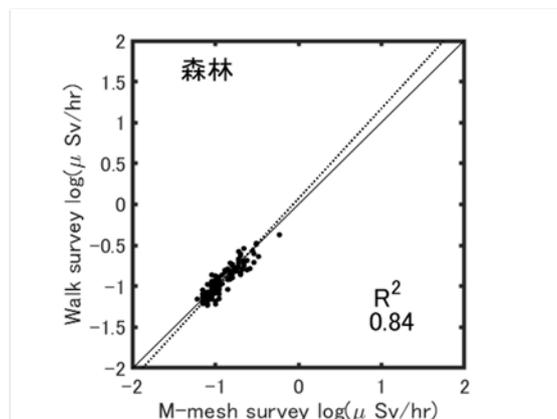
空間線量率の統合に用いた走行サーベイ、航空機サーベイ及び歩行サーベイ相当の各データを平成 29 年度～令和元年度の各年度について図 7-16～図 7-18 に示す。

^{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毎に 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²³⁾。この調査は福島県内全域を対象とした代表的な測定であり、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。



市街地域を対象とした相関分析結果

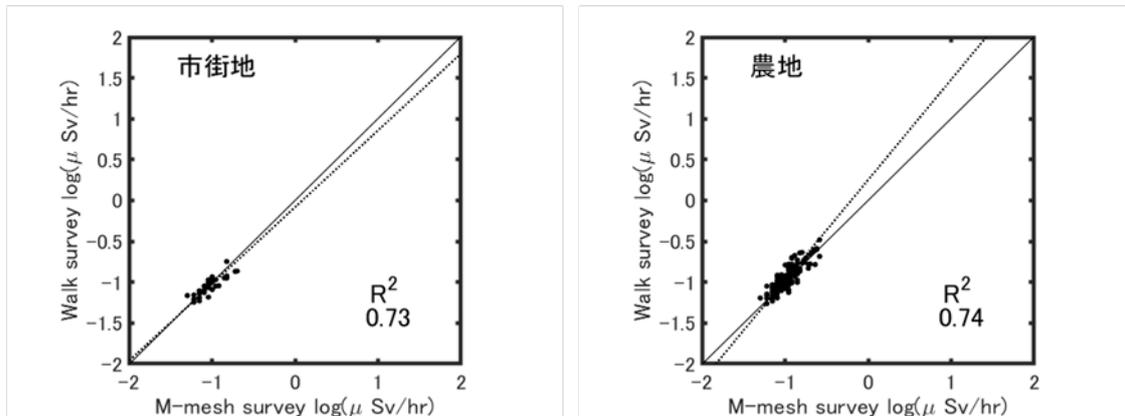
農地域を対象とした相関分析結果



森林域を対象とした相関分析結果

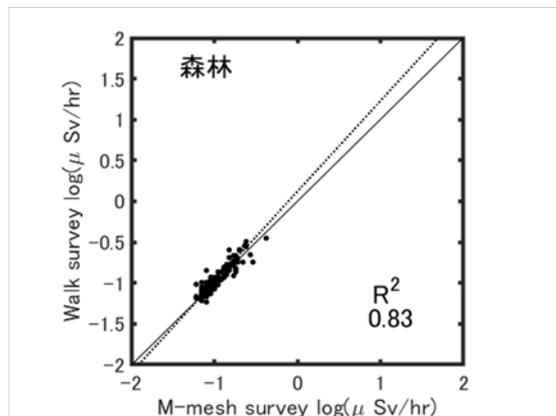
図 7-13 平成 29 年度に実施されたモニタリングメッシュ調査と歩行サーベイによる空間線量率の相関分析

(横軸の M-mesh survey はモニタリングメッシュ調査による空間線量率の意。図中の R^2 は決定係数、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。)



市街地域を対象とした相関分析結果

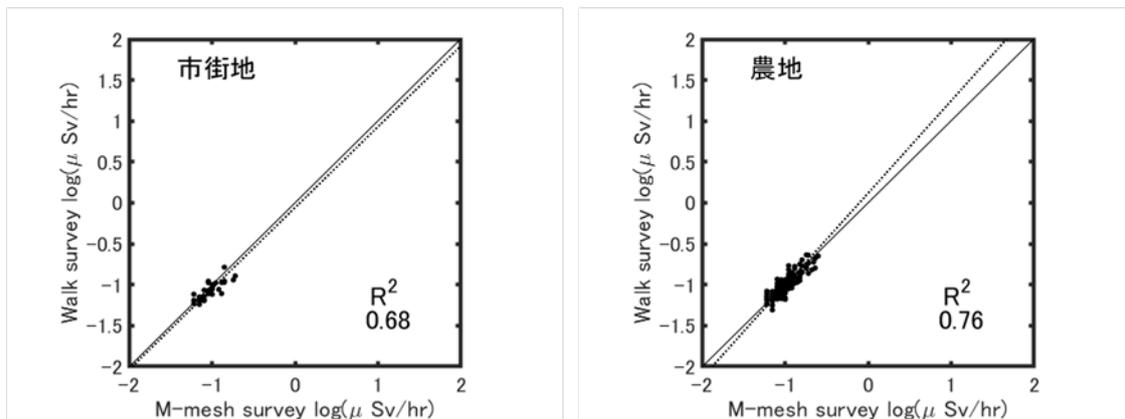
農地域を対象とした相関分析結果



森林域を対象とした相関分析結果

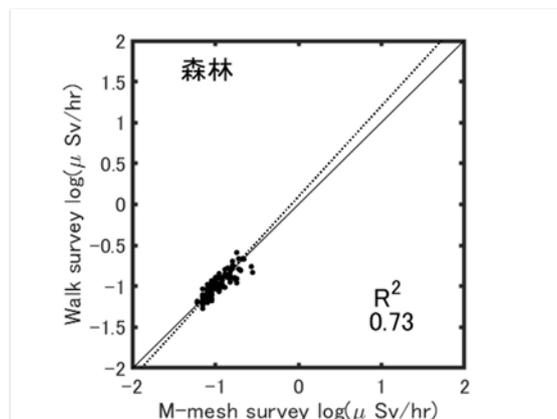
図 7-14 平成 30 年度に実施されたモニタリングメッシュ調査と歩行サーベイによる空間線量率の相関分析

(横軸の M-mesh survey はモニタリングメッシュ調査による空間線量率の意。図中の R^2 は決定係数、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。)



市街地域を対象とした相関分析結果

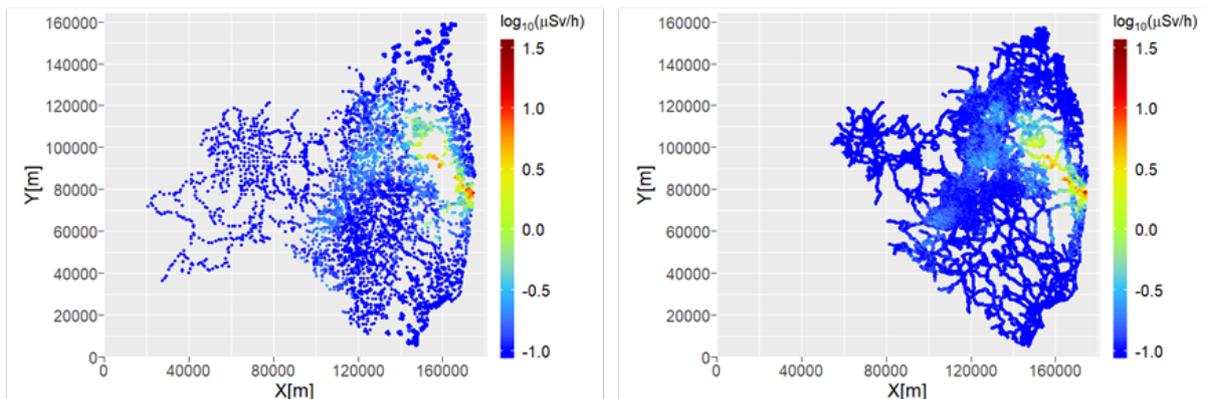
農地域を対象とした相関分析結果



森林域を対象とした相関分析結果

図 7-15 令和元年度に実施された福島県モニタリングメッシュ調査と歩行サーベイによる空間線量率の相関分析

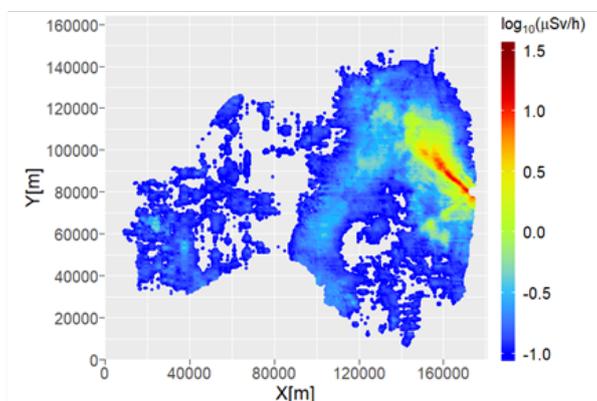
(横軸の M-mesh survey はモニタリングメッシュ調査による空間線量率の意。図中の R^2 は決定係数、破線は最小二乗法による回帰直線、実線は $Y=X$ の直線)
 (天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)



歩行サーベイ結果 +

走行サーベイ結果

モニタリングメッシュ調査結果



航空機サーベイ結果

図 7-16 空間線量率の統合(福島県全域)に用いた平成 29 年度の歩行サーベイ相当データ、走行サーベイ及び航空機サーベイ結果
(歩行サーベイ結果 + モニタリングメッシュ調査結果: 歩行サーベイ相当データ。天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

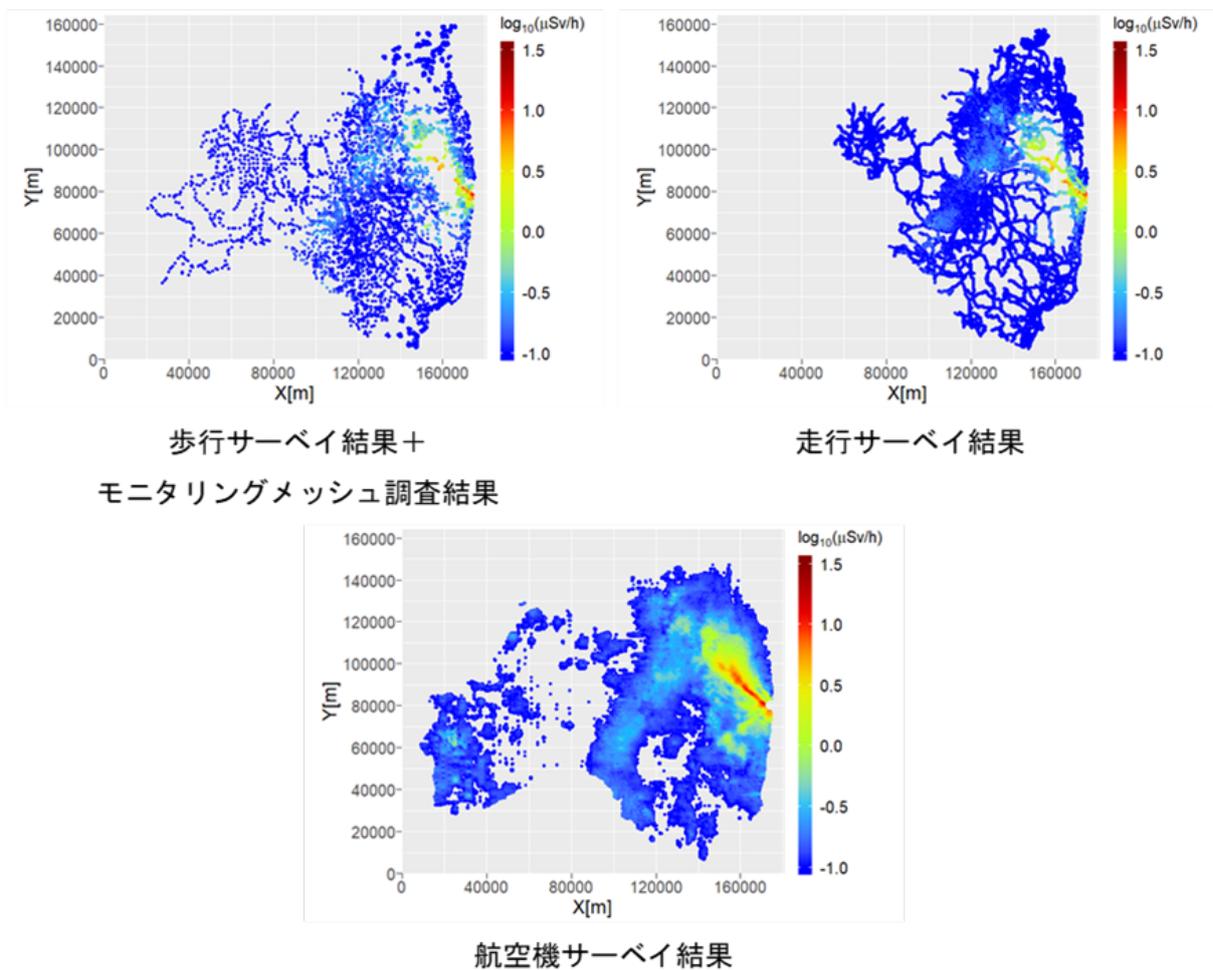


図 7-17 空間線量率の統合(福島県全域)に用いた平成 30 年度の歩行サーベイ相当データ、走行サーベイ及び航空機サーベイ結果
(歩行サーベイ結果+モニタリングメッシュ調査結果:歩行サーベイ相当データ。天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

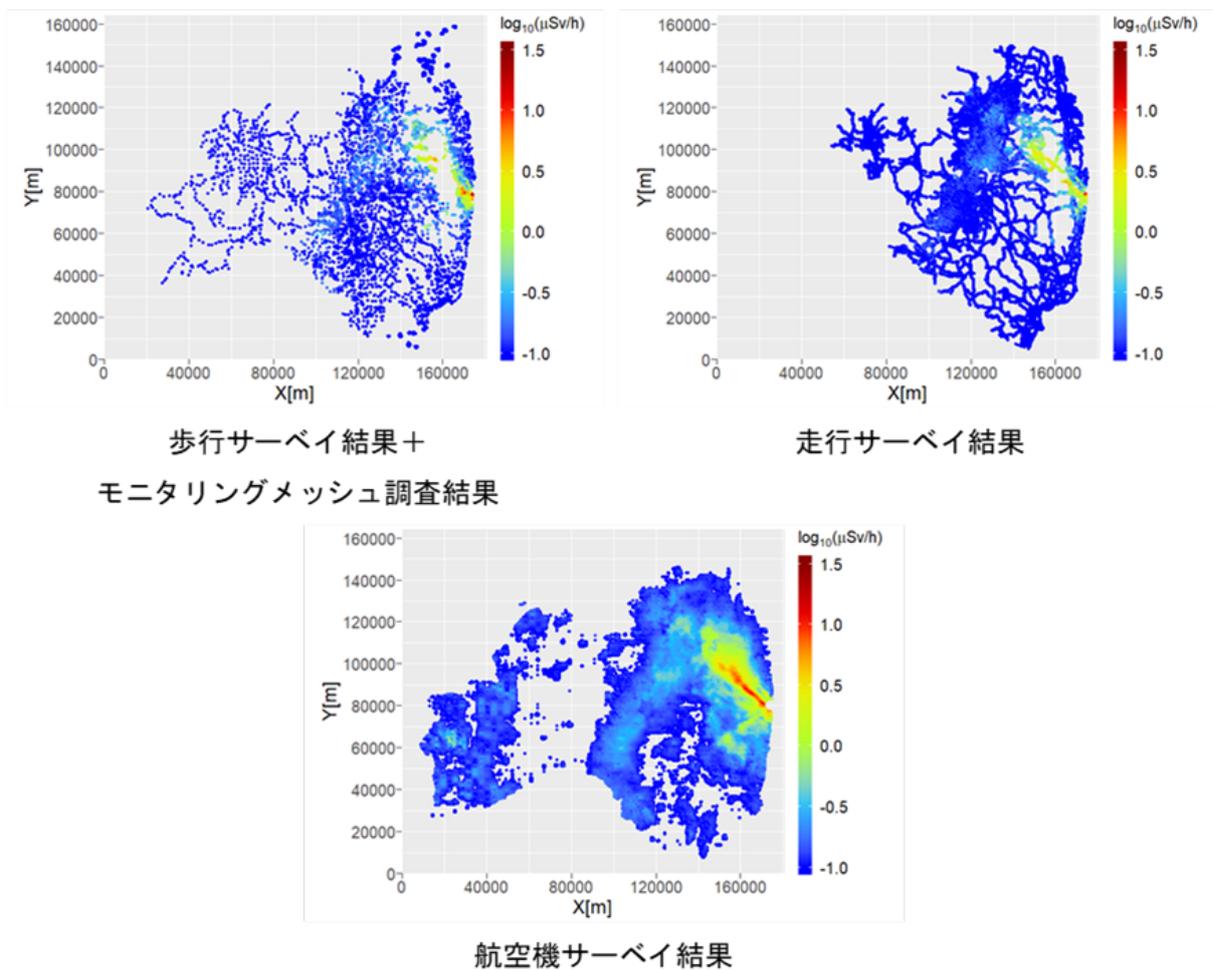
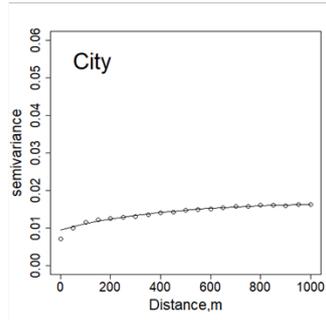


図 7-18 空間線量率の統合(福島県全域)に用いた令和元年度の歩行サーベイ相当データ、走行サーベイ及び航空機サーベイ結果
 (歩行サーベイ結果+モニタリングメッシュ調査結果:歩行サーベイ相当データ。天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)

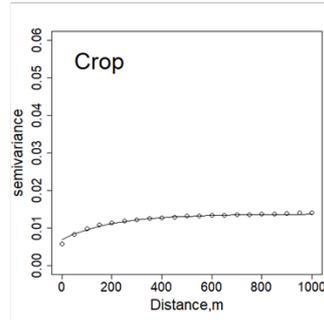
7.4.2. 歩行サーベイ相当データを対象とした空間パターンの解析

歩行サーベイ相当データを対象に、福島県全域（避難指示区域外）についてバリオグラム解析を行った結果を各年度について図 7-19～図 7-21 に示す。

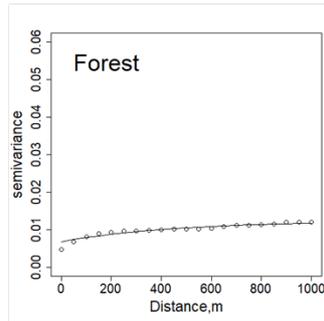
本分析において採用したシルやレンジの値を用いてグラフの形状を指数関数で近似しプロセスモデルとして用いることで、空間線量率の事前分布を作成した。得られた各年度のバリオグラムを比較すると、年度によらず各土地利用区域において同様のセミバリオグラム（曲線）が得られており、年度によらない均質な測定が実施されたと考えられる。



市街地域を対象としたバリオグラム解析結果

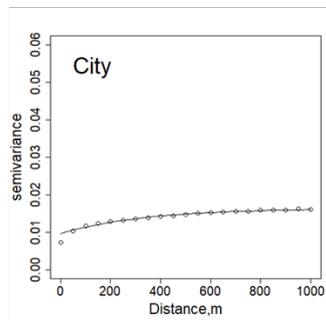


農地域を対象としたバリオグラム解析結果

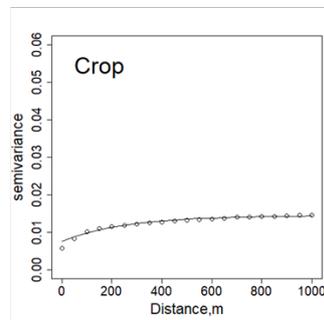


森林域を対象としたバリオグラム解析結果

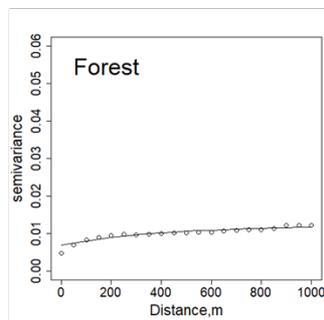
図 7-19 平成 29 年度 11 月期に実施された避難指示区域外における歩行サーベイ相当データによる空間線量率のバリオグラム



市街地域を対象としたバリオグラム解析結果



農地域を対象としたバリオグラム解析結果



森林域を対象としたバリオグラム解析結果

図 7-20 平成 30 年度 11 月期に実施された避難指示区域外における歩行サーベイ相当データによる空間線量率のバリオグラム

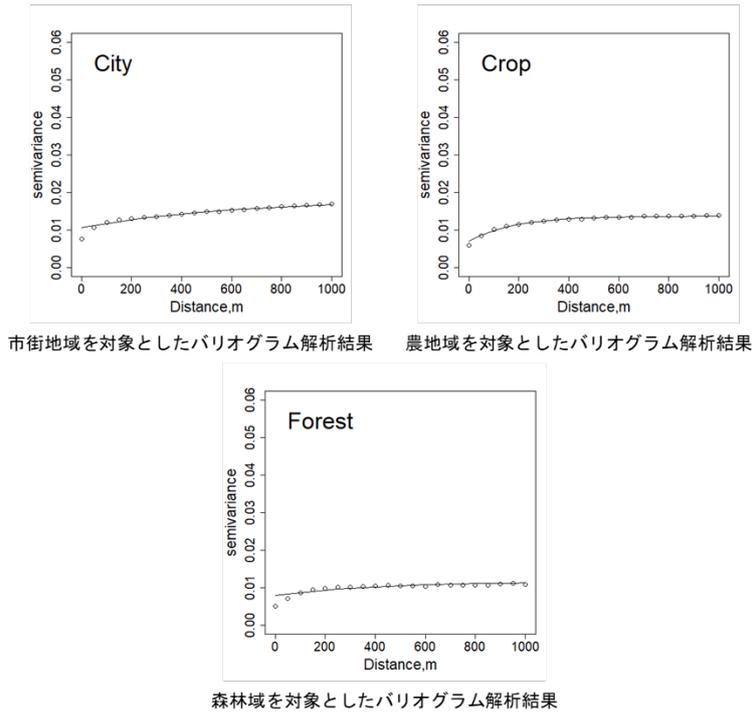
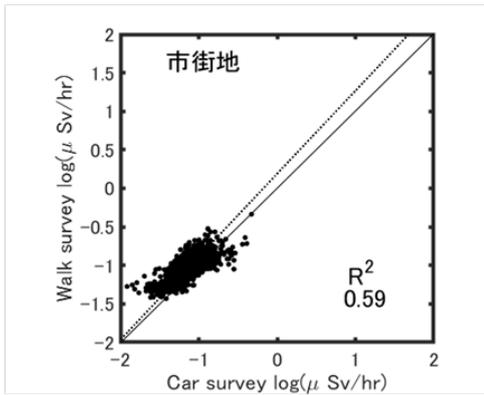


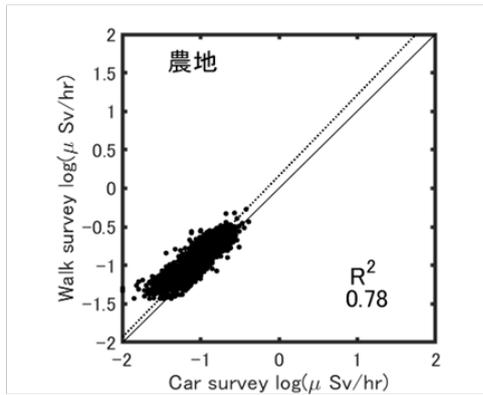
図 7-21 令和元年度 11 月期に実施された避難指示区域外における歩行サーベイ相当データによる空間線量率のバリオグラム

7.4.3. 走行サーベイデータと歩行サーベイ相当データの比較

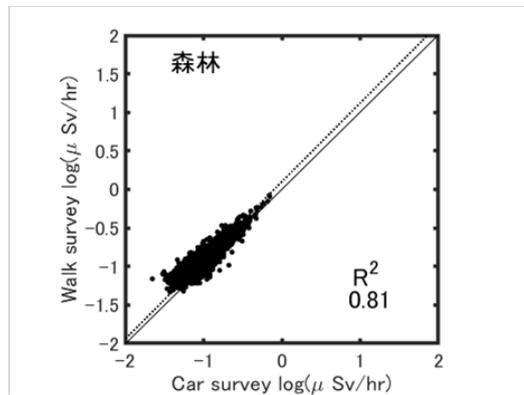
歩行サーベイ相当データと走行サーベイデータに対して土地利用別に相関分析を実施した。福島県全域（避難指示区域内を除く）を対象とした分析結果を各年度について図 7-22～図 7-24 に示す。この相関分析結果をもとに、走行サーベイによる空間線量率と 100m メッシュ内で平均化した歩行サーベイの空間線量率に対数軸上で線形関係にあるとしたデータモデルを用いて走行サーベイデータを補正し、式 (8) における z_0 として用いた。得られた相関分析結果に関し、森林および農地における相関分析結果においては 0.6 を超える高い決定係数が得られている。市街地については、農地や森林より値は低いが 0.4 程度の決定係数が得られており、土地利用状況によらず、両測定結果の間には相関性があると考えられる。



市街地域を対象とした相関分析結果



農地域を対象とした相関分析結果

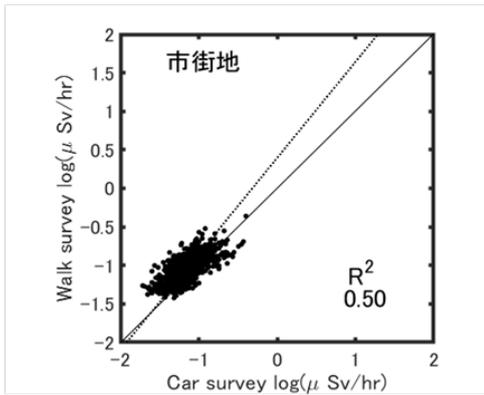


森林域を対象とした相関分析結果

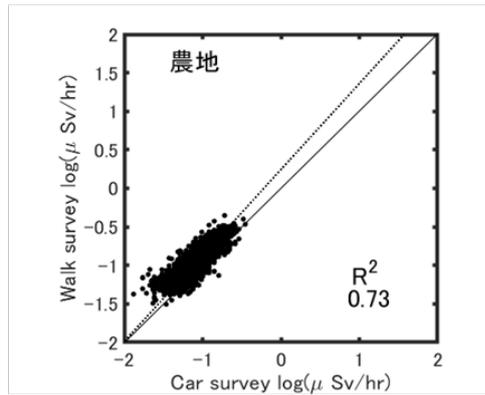
図 7-22 平成 29 年度に実施された走行サーベイデータと歩行サーベイ相当データとの相関分析結果
(福島県全域)

(図中の R^2 は決定係数、破線は最小二乗法による回帰直線、実線は $Y=X$ の直線)

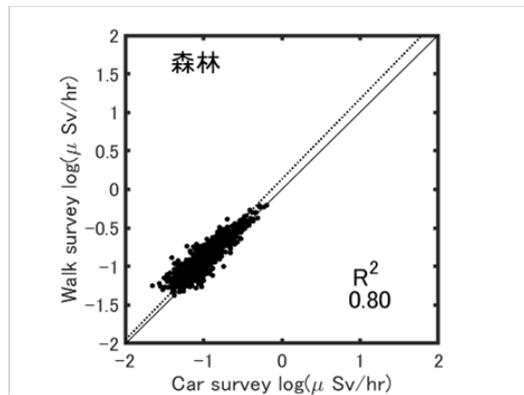
(天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)



市街地域を対象とした相関分析結果



農地域を対象とした相関分析結果

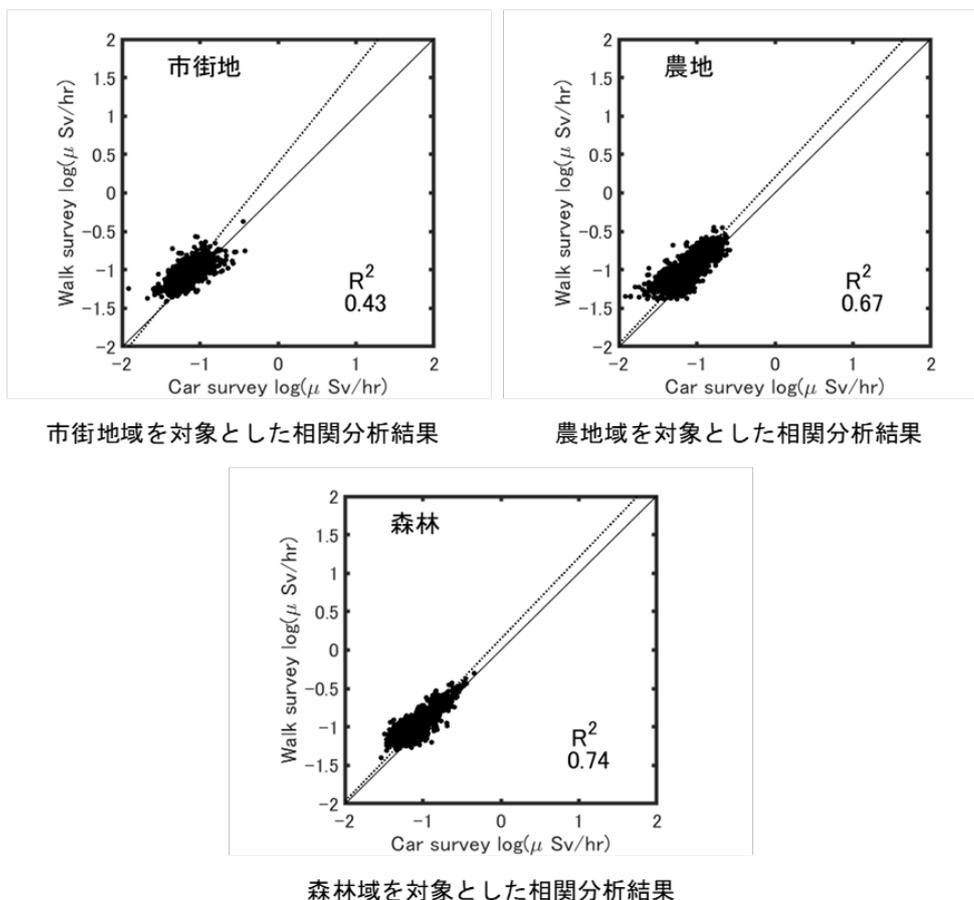


森林域を対象とした相関分析結果

図 7-23 平成 30 年度に実施された走行サーベイデータと歩行サーベイ相当データとの相関分析結果
(福島県全域)

(図中の R^2 は決定係数、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。)



市街地域を対象とした相関分析結果

農地域を対象とした相関分析結果

森林域を対象とした相関分析結果

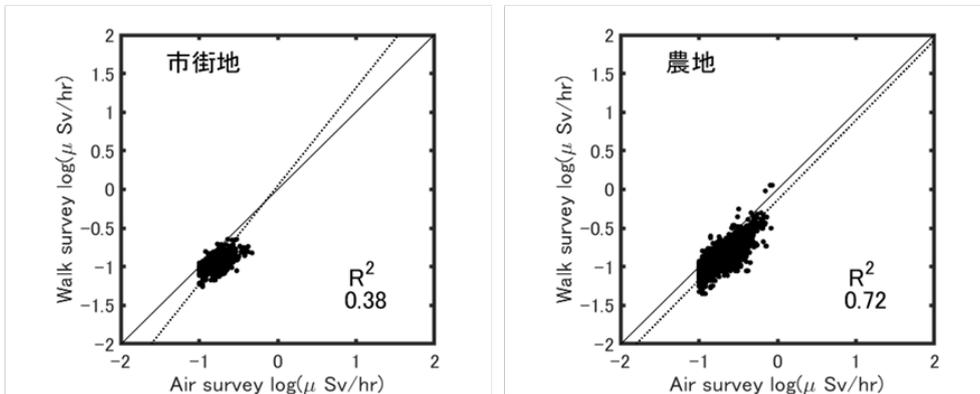
図 7-24 令和元年度に実施された走行サーベイデータと歩行サーベイ相当データとの相関分析結果（福島県全域）

（図中の R^2 は決定係数、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。）

7.4.4. 航空機サーベイデータと歩行サーベイ相当データの比較

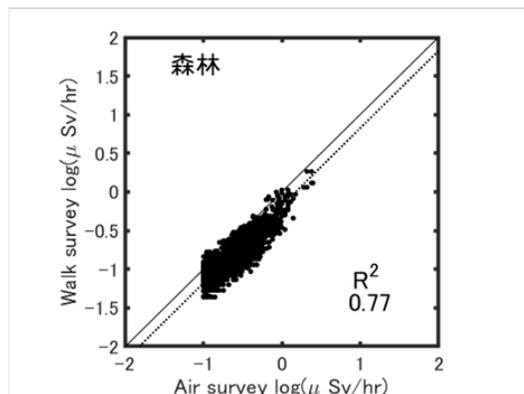
7.4.3 と同様に、歩行サーベイ相当データと航空機サーベイデータを土地利用別に比較した。福島県全域（避難指示区域内を除く）を対象とした分析結果を各年度について図 7-25～図 7-27 に示す。この相関分析結果をもとに、歩行サーベイ結果と加重平均した航空機サーベイ結果が対数軸上で線形関係にあるとしたデータモデルを用いて航空機サーベイデータを補正し、式 (8) における z_A として用いた。得られた相関分析結果については、走行サーベイデータと歩行サーベイ相当データとの相関分析結果と同様、森林および農地における相関分析結果においては 0.6 を超える高い決定係数が得られている。その一方で、市街地においては年々決定係数の値が小さくなってきている。これは、市街地における空間線量率の値が低くなる反面、航空機サーベイにおいては $0.1\mu\text{Sv/h}$ 未満の測定結果については削除されることから、航空機サーベイデータの値域が徐々に小さくなってきたことが原因である。特に、市街地においては除染等により空間線量率の値が

高い領域が少なくなっていることから、この傾向が顕著になっている。この傾向は今後も継続すると考えられることから、航空機サーベイデータと歩行サーベイデータの相関分析における精度維持は今後の課題となる。



市街地域を対象とした相関分析結果

農地域を対象とした相関分析結果

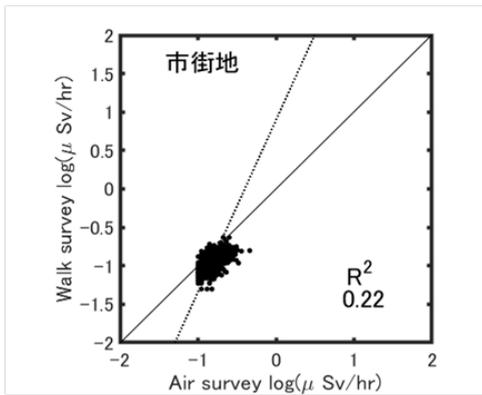


森林域を対象とした相関分析結果

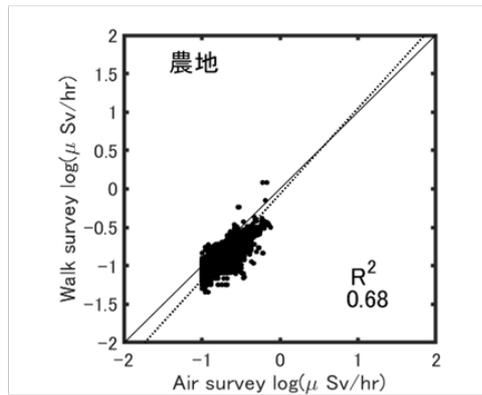
図 7-25 平成 29 年度に実施された航空機サーベイデータと歩行サーベイ相当データとの相関分析結果
(福島県全域)

(図中の R^2 は決定係数、破線は最小二乗法による回帰直線、実線は $Y=X$ の直線)

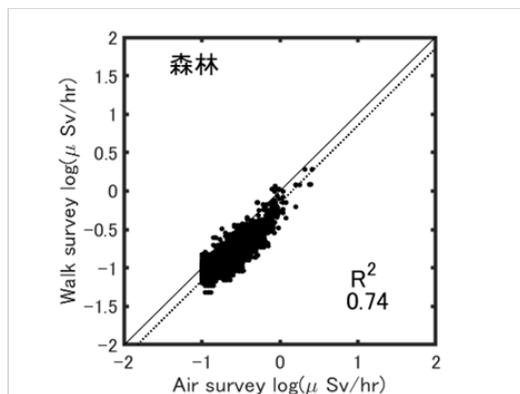
(天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)



市街地を対象とした相関分析結果



農地を対象とした相関分析結果

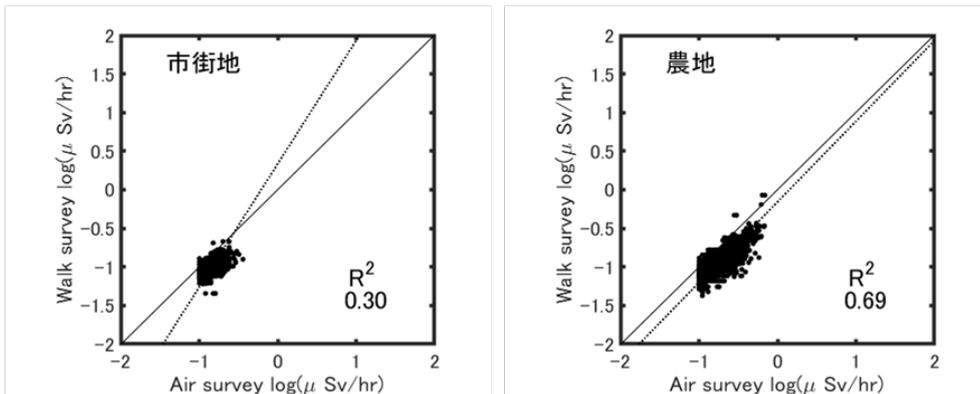


森林域を対象とした相関分析結果

図 7-26 平成 30 年度に実施された航空機サーベイデータと歩行サーベイ相当データとの相関分析結果
(福島県全域)

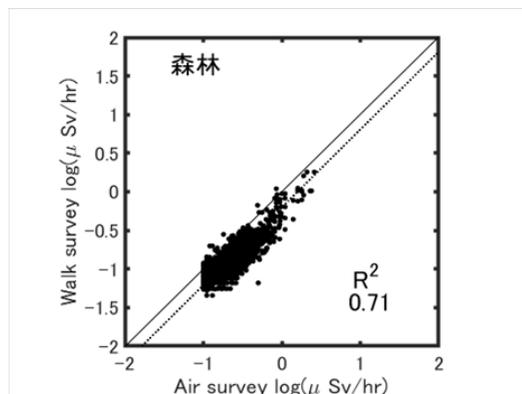
(図中の R^2 は決定係数、破線は最小二乗法による回帰直線、実線は $Y=X$ の直線)

(天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。)



市街地域を対象とした相関分析結果

農地域を対象とした相関分析結果



森林域を対象とした相関分析結果

図 7-27 令和元年度に実施された航空機サーベイデータと歩行サーベイ相当データとの相関分析結果
(福島県全域)

(図中の R^2 は決定係数、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。)

7.4.5. 統合結果

平成 29 年度、平成 30 年度および令和元年度に実施された航空機サーベイ、走行サーベイ、歩行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、福島県全域の統合空間線量率マップを図 7-28～図 7-30 に示す。福島県全域の統合マップ作成に際しては、福島県を 3 つの領域、すなわち、1) 避難指示区域内、2) 避難指示区域外の 80km 圏内、3) 80km 圏外に分け、1)および 2)の領域については、7.3 で述べた 80km 圏内を対象とした統合マップ作成結果を用いた。3)の領域については、本節(7.4)で述べた解析結果に基づき作成した。

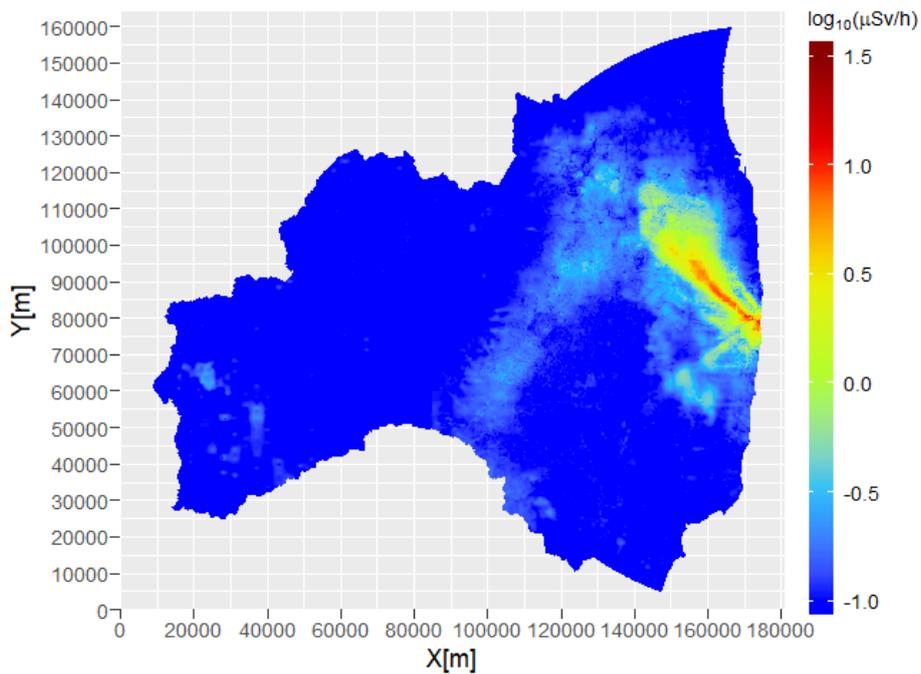


図 7-28 平成 29 年度に実施された各種測定結果を統合した統合空間線量率マップ（福島県全域）
 （天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。）

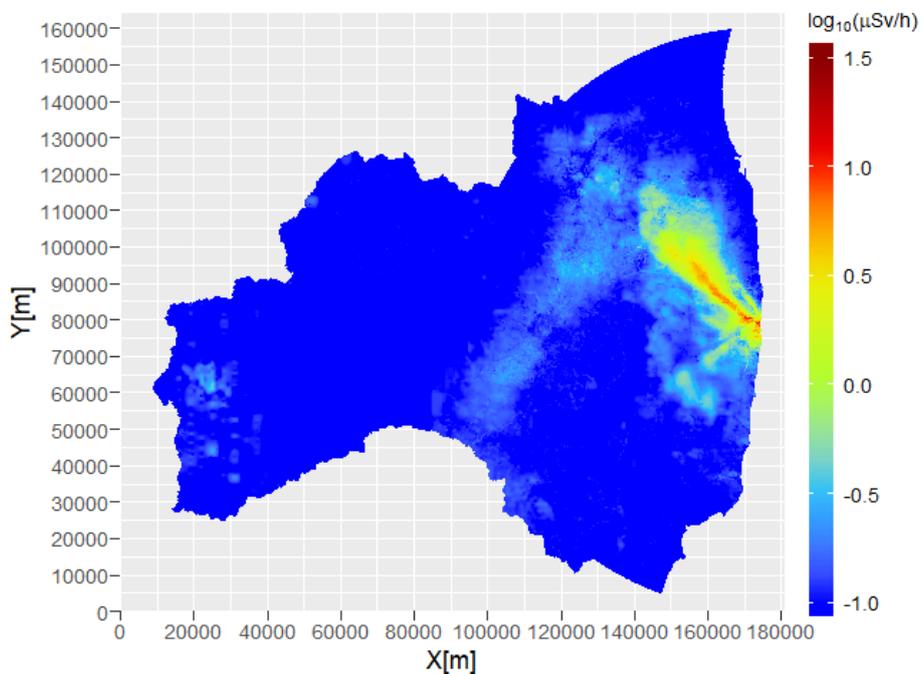


図 7-29 平成 30 年度に実施された各種測定結果を統合した統合空間線量率マップ（福島県全域）
 （天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。）

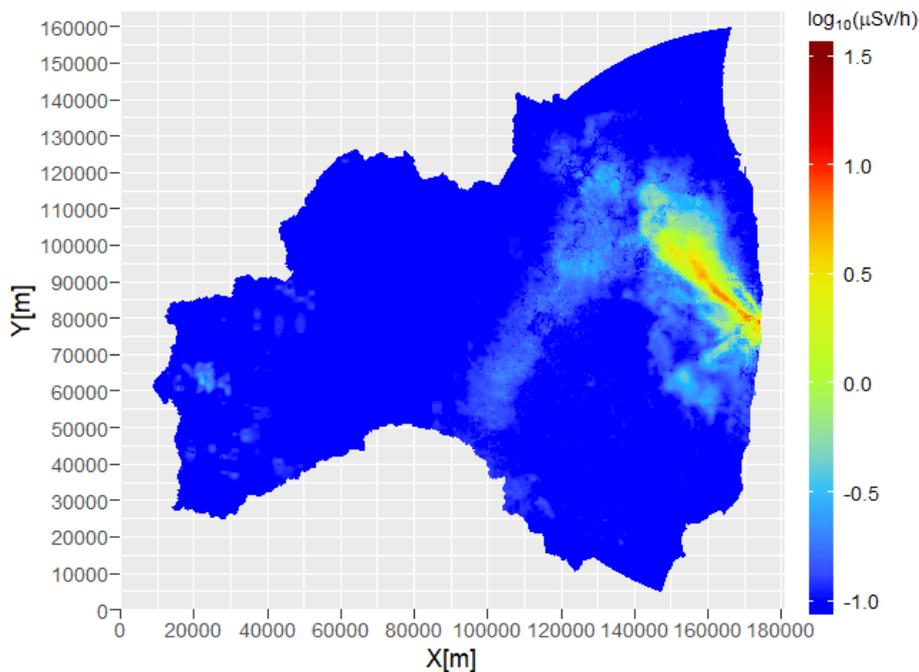


図 7-30 令和元年度に実施された各種測定結果を統合した統合空間線量率マップ（福島県全域）
（天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。）

7.4.6. 妥当性検証

既に 80 km 圏内を対象とした統合空間線量率マップの妥当性検証が別途実施されていることから、福島県全域を対象とした統合空間線量率マップの妥当性検証においては、80 km 圏外の地域を対象とした検証を行った。

80 km 圏内の統合空間線量率マップの妥当性検証においては、土地利用種ごとに 100 点をランダムに抽出し、抽出点を除外した歩行サーベイデータを用いて作成した統合空間線量率マップと抽出データを比較した。しかし、80 km 圏外の統合空間線量率マップの妥当性検証においては、モニタリングメッシュ調査結果のデータ数が多くないことから、上記の手法を用いることができない。そこで、モニタリングメッシュ調査結果のデータ数に応じて数十個の測定データをランダムに抽出し、統合空間線量率マップと比較する試行を繰り返し、統計的に有意に外れ値が 1%以上存在するかどうかを検定した。

平成 29 年度、平成 30 年度及び令和元年度の統合空間線量率マップを対象に各々検定を実施した結果、全ての年度の統合空間線量率マップについて、階層ベイズ統計手法に基づき算出された 99%信頼区間に含まれなかった抽出データ（外れ値）の存在割合が 1%よりも有意に高いとは言えないという統計的な結果が得られたことから、80 km 圏外の統合マップについても、信頼性の高い統合マップとなっていると考えられる。

8. 空間線量率等分布マップの作成と公開

8.1. 目的

本事業等で取得したデータ（走行サーベイ、定点サーベイ、無人ヘリサーベイ、in-situ 測定等による放射性セシウムの土壌濃度及び航空機モニタリング）を検討・解析し、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、関係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、分布マップ閲覧用 Web サイトの構築・運用作業を行った。

また、令和元年度は、地図上で表示される英語を全面的に見直し、小縮尺から大縮尺のレベルに合わせた地名の英語表記及び外国人にわかりやすい地図記号の対応を行った。

8.2. 空間線量率等分布マップの作成と公開

過去 7 ヶ年継続している「放射線量等分布マップ拡大サイト」（以下「拡大サイト」という。）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～平成 30 年度調査のデータに令和元年度に実施した調査による空間線量率測定データ・放射性核種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。

令和元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。

- Web 地図（電子国土）版、スマートフォン版

- 走行サーベイ（第 18 回及び第 19 回）

- 定点サーベイ（第 13 回）

- 無人ヘリサーベイ（第 11 回）

- 土壌沈着量（in-situ 測定）（第 12 回）

- 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。

8.3. 空間線量率等分布マップの運用管理

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。令和元年度調査期間（平成 31 年 4 月 1 日～令和 2 年 1 月 31 日現在までの 306 日間）において、システムサーバ等による障害は生じず、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、拡大サイトへのユニークアクセス数は、85,122 件（1 日あたり平均 278 件/前年平均 212 件）であり、前年より増加する結果となっ

° 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。

た。また、ページビュー^dは 113,247 件（1 日あたり平均 370 件/前年平均 300 件）であり、こちらも増加する結果となった（図 8-1）。図 8-1 の中で、9 月 26 日～10 月 4 日にアクセス数が突出しているが、ログ上の記録から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。令和元年 9 月の台風 15 号（令和元年房総半島台風）による福島県等の被害の報道に伴い閲覧が多くなっていたと考えられる。

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、7 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 8-2 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 1,354 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更で、1 日あたりのページビュー数が減少している。1 日あたりのユニークアクセス数は平成 25 年度の平均 316 件から減少しているが、平均 200 件前後で推移している。なお、平成 29 年度以降はユニークアクセス数は増加傾向となっている。拡大サイト内に滞在する平均時間は平成 25 年度は 341 秒であったが令和元年度では 67 秒と 5 分の 1 に減少しており、訪問者は増加しているが、地図の閲覧時間は減少していることを示している。

過去 6 年間（平成 26 年 4 月 1 日～令和 2 年 1 月 31 日）の 2,132 日間のユニークアクセス数及びページビュー数を図 8-3 に示す。前述のように、平成 28 年からはサイトリニューアルによる仕様変更にもなってアクセス数は減少している。また、東日本大震災の発生した 3 月 11 日前後のアクセス数は、1 日平均の約 5～10 倍の訪問者を毎年記録している。

訪問者の地域分析を行った結果（集計期間：平成 31 年 4 月 1 日～令和 2 年 1 月 31 日）として、表 8-1 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 89.1%であり、次いで韓国（約 2.8%）、アメリカ（約 2.5%）、中国（約 1.0%）の順となった。

多くのアクセス数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^eが大きい傾向となり、特に東京都、福島県、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 年度調査から実施しているが、図 8-4 に示すよう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い傾向にある。

令和元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 81.9%（92,792 件）は一般（一般回線、海外等）からのアクセスで、残りの約 18.1%（20,455 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 8-2 に示すように日本全体では公務、教育・学習支援業（学校教育等）、製造業、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）、情報通信業の順になった。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、大阪府は教育・学習支援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 80%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。茨城県では平成 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

^d 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。

^e 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。

ルタント業等)が1位を占めている。拡大サイトにアクセスする地域的な特徴を示す結果となった。

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。本事業では、様々な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ーに適した地図が表示できるようになっている。表8-3、表8-4に令和元年度における拡大サイトのユーザー環境を利用OSやブラウザ別に関覧頻度をまとめた。集計期間は、いずれも平成31年4月1日～令和2年1月31日である。本調査期間内にサイト訪問したユニークアクセス数のうち半数以上はPC経由での閲覧(訪問者の62.2%)であり、37.8%がスマートフォン・タブレット(iPhone・iPad及びAndroid系のOS)経由での閲覧となっている。なお、スマートフォン・タブレットからのアクセスは年々増加傾向を示している。

表 8-1 国及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	100,964	76,074	89.2
2.韓国	3,187	2,187	2.8
3.アメリカ合衆国	2,825	2,369	2.5
4.中華人民共和国	1,119	892	1.0
5.ドイツ	802	626	0.7
6.スペイン	410	287	0.4
7.ロシア	392	295	0.3
8. フランス	362	250	0.3
9. シンガポール	287	168	0.2
10. 香港	265	201	0.2

集計期間：平成31年4月1日～令和2年1月31日

表 8-2 都道府県ごとの業種別アクセス割合

業 種 ^{a)}	日本全国	東京都	福島県	茨城県	大阪府
公務	25%(1) ^{b)}	20%(1)	85%(1)	3.7%(4)	-
教育・学習支援業	17%(2)	11%(3)	12%(2)	8.6%(3)	23%(1)
製造業	14%(3)	14%(2)	-	40%(2)	18%(2)
学術研究、専門・技術サービス業	12%(4)	11%(4)	-	45%(1)	-
情報通信業	6.0%(5)	-	0.7%(4)	2.1%(5)	9.9%(4)
不動産業、物品賃貸業	-	-	0.6%(5)	-	-
医療、福祉	-	-	-	-	11%(3)
電気・ガス・熱供給・水道業	-	-	-	-	-
建設業	-	-	0.9%(3)	-	6.8%(5)
卸売業、小売業	-	9.8%(5)	-	-	-
その他	27%(-)	35%(-)	1.1%(-)	0.7%(-)	31%(-)
ユニークアクセス数合計	14,319	6,307	2,305	1,031	442

a) 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。

b) () 内数字は全国及び都府県内に占める割合のランキング

表 8-3 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 10	35,842	25,349	30.0
2. iPhone	23,336	19,434	23.0
3. Windows 7	12,338	9,205	10.9
4. Windows 8.1	7,822	5,600	6.6
5. Android 9	6,617	5,133	6.1
6. Mac OS	6,854	4,597	5.4
7. Android 8	4,536	3,543	4.2
8. Linux	3,800	3,106	3.7
9. iPad	4,263	3,040	3.6
10. Android 7	2,692	2,089	2.5

集計期間：平成 31 年 4 月 1 日～令和 2 年 1 月 31 日

表 8-4 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	42,552	34,200	40.5
2. IE 11	18,835	12,995	15.4
3. Microsoft Edge18	4,948	3,166	3.7
4. Google Chrome76	4,279	3,056	3.6
5. Google Chrome75	4,147	2,975	3.5

集計期間：平成 31 年 4 月 1 日～令和 2 年 1 月 31 日

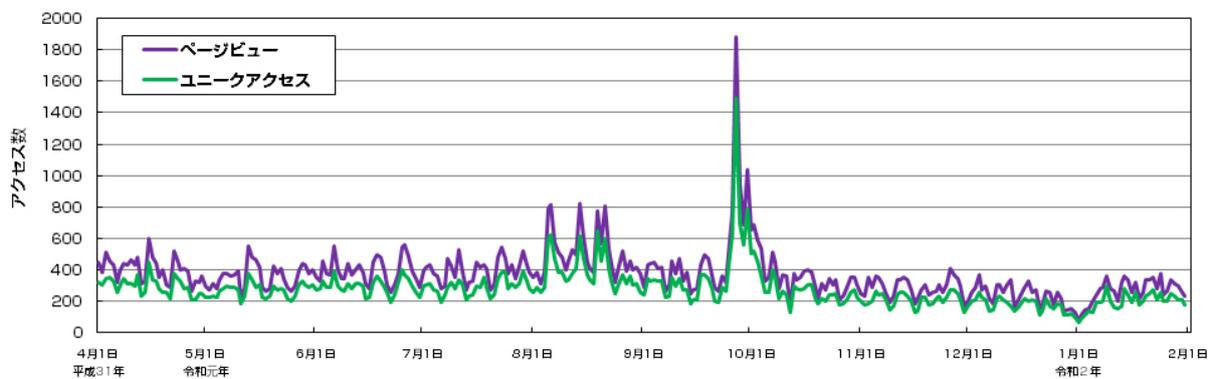


図 8-1 放射線量等分布マップ拡大サイトのアクセス状況

(※集計期間:平成 31 年 4 月 1 日～令和 2 年 1 月 31 日)

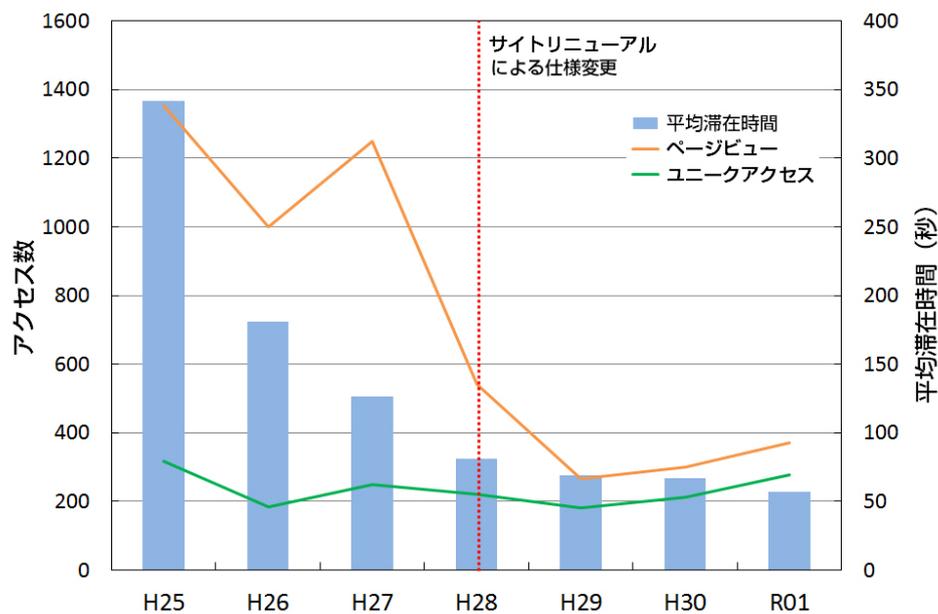


図 8-2 平成 25 年度から令和元年度間のアクセス状況

(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)

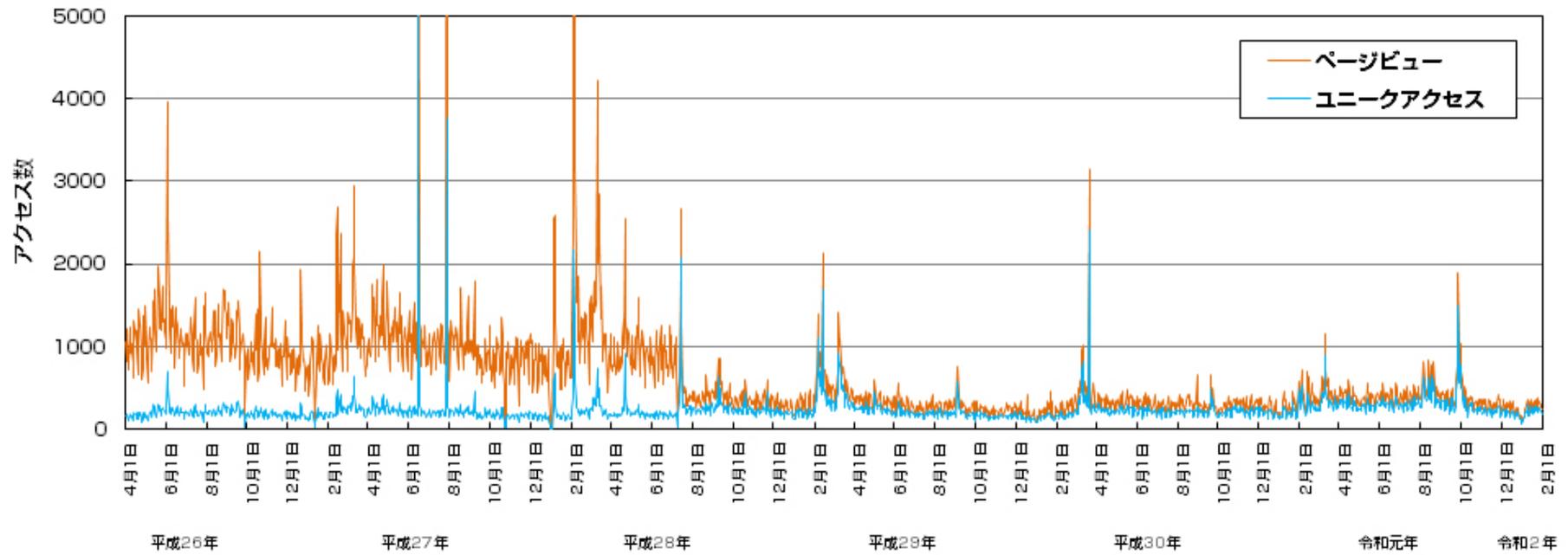
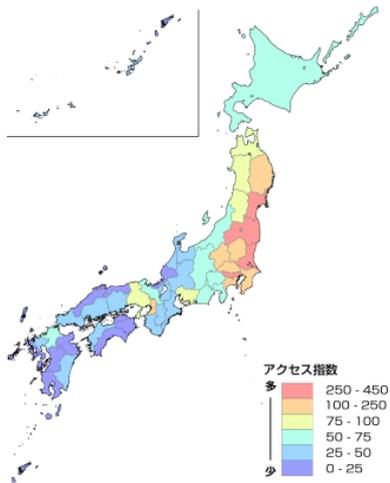
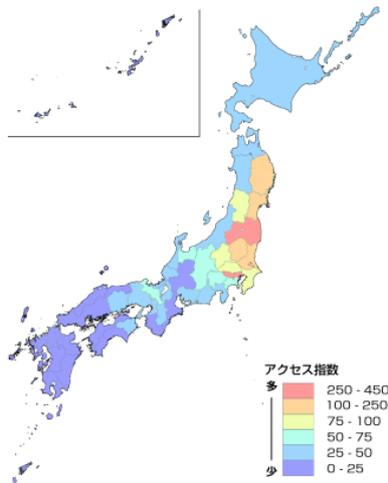


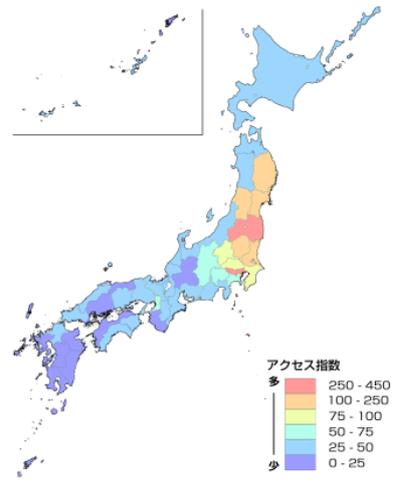
図 8-3 平成 26 年 4 月 1 日～令和 2 年 1 月 31 日における拡大サイトのアクセス状況
 (※集計期間:平成 26 年 4 月 1 日～令和 2 年 1 月 31 日)



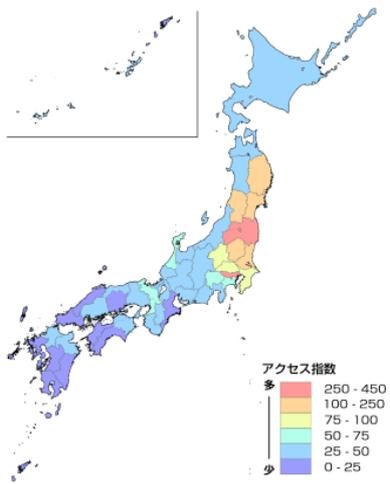
a) 平成 25 年度



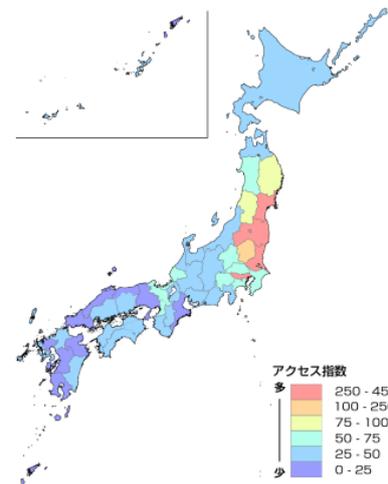
b) 平成 26 年度



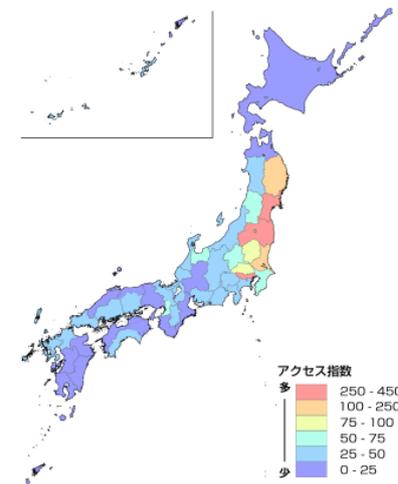
c) 平成 27 年度



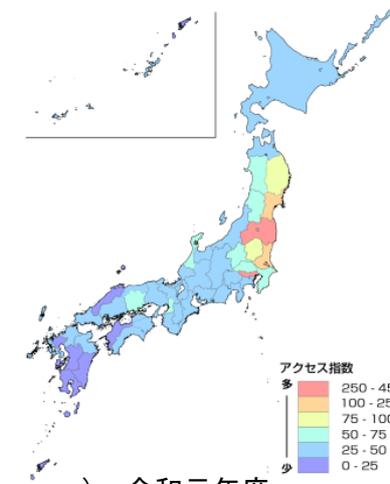
d) 平成 28 年度



e) 平成 29 年度



f) 平成 30 年度



g) 令和元年度

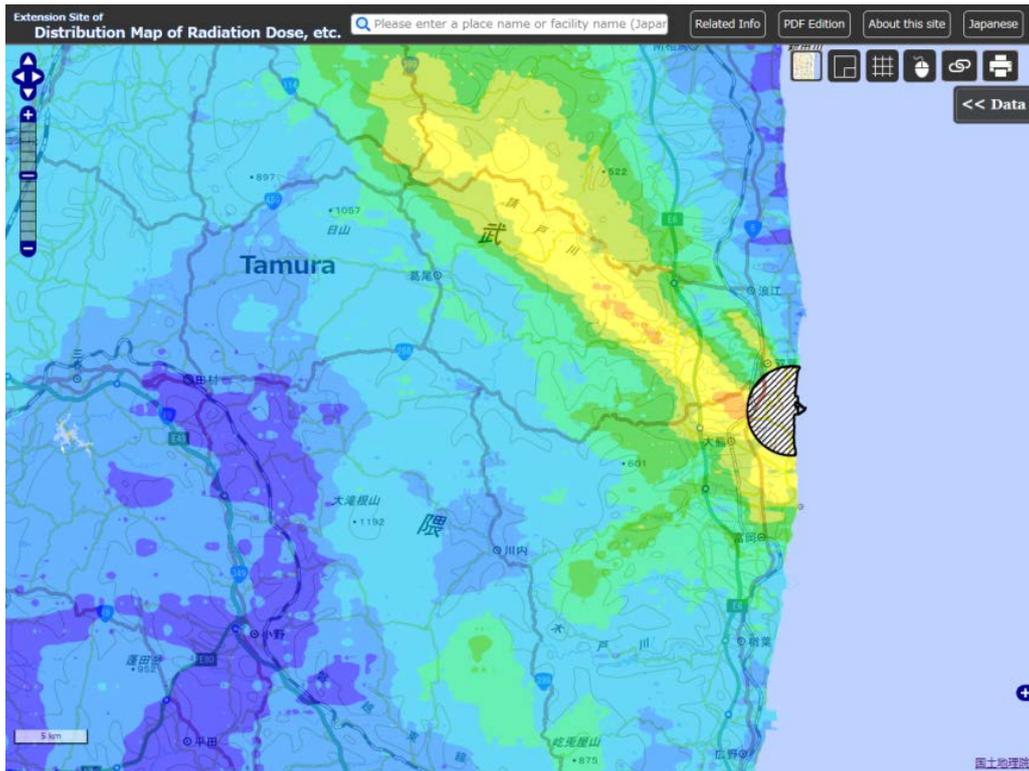
図 8-4 都道府県ごとのアクセス指数
(日本地図出典:行政界(JMC マップ))

8.4. マップシステムの改善検討

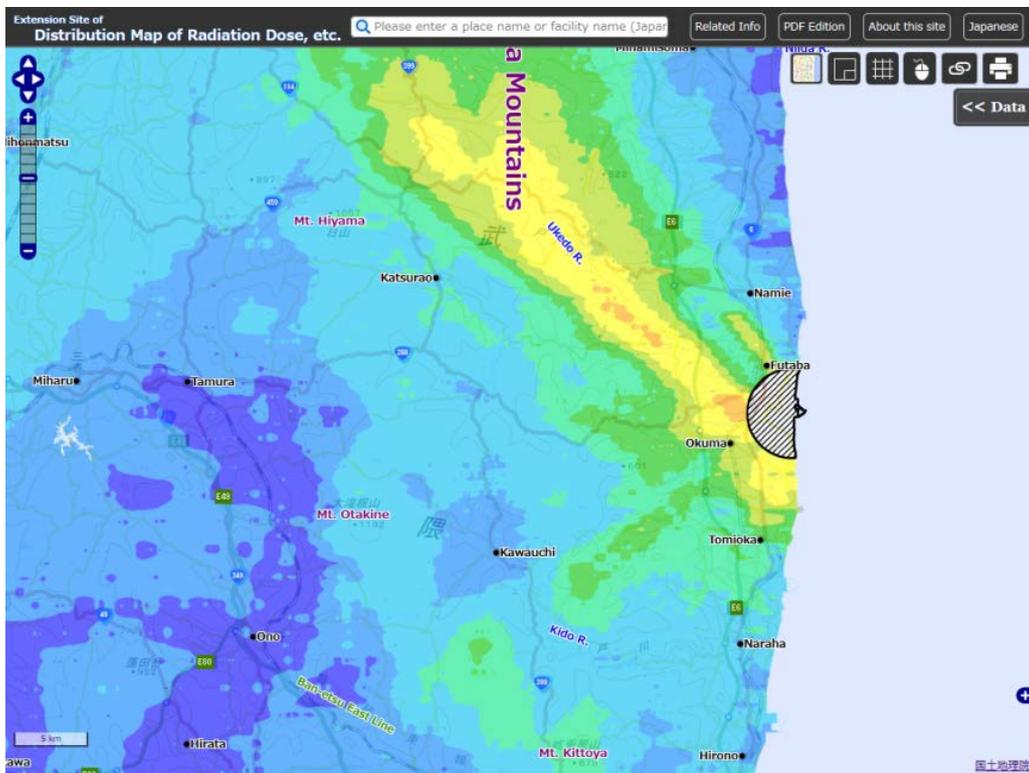
マップシステムでは、平成 24 年度に地名の英語表記化を行い現在まで運用してきた。しかし、当時のシステムの機能制約によって、大縮尺（地名の字レベル）までの英語表記は対応できていなかった。そこで、令和元年度では地図上で表示される英語を全面的に見直し、小縮尺から大縮尺のレベルに合わせた地名の英語表記及び外国人にわかりやすい地図記号の対応を行った。日本の地図記号と外国人向け地図記号の比較を図 8-5 にまとめた。なお、地名の英語表記は国土交通省国土地理院が平成 28 年 3 月に定めた国土交通省地名等の英語表記規程に準ずる。マップシステムでの英語表記の改善前後を図 8-6 に比較する。図 8-6 (a)は現在公開している小縮尺レベルのマップシステムの表示画面で、図 8-6 (b)は見直し後の英語表記である。また、大縮尺レベルを図 8-7 に示す。郵便局や交番など外国人がよく訪れる施設を地図記号で表示できるようになり、外国人にわかりやすい地図の普及に寄与することを期待する。

項目	日本の地図記号		外国人向け 地図記号	由来
博物館		博物館の建物の形のイメージを記号化		「博物館/美術館」のピクトグラムを記号化
神社		神社の参道入り口にある鳥居の形を記号化		神社の参道入り口にある鳥居の形を記号化
キリスト教会		十字架の形を記号化		十字架に建物を合わせたイメージを記号化
温泉		泉源の湯壺と湯けむりを組み合わせて記号化		泉源の湯壺と湯けむりを組み合わせて記号化
空港/飛行場		飛行機の形を記号化		「航空機/空港」のピクトグラムを記号化
交番		警棒(6尺棒)を交差させた形を記号化		警官が敬礼した姿に建物を表す枠をつけたもの
郵便局		逓信省(ていしんしょう)の「テ」を記号化		「郵便」を表すピクトグラムを記号化
病院		旧陸軍の衛生隊のしるしを基に記号化		「病院」のピクトグラムを記号化
ホテル		「hotel」の頭文字Hに○枠をつけて記号化		「ホテル/宿泊施設」のピクトグラムを記号化
銀行/ATM				「キャッシュサービス」のピクトグラムを記号化
ショッピングセンター/ 百貨店				ショッピングカートにものを載せたイメージを記号化
コンビニエンスストア/ スーパーマーケット				サンドイッチと飲み物のイメージを記号化
レストラン				「レストラン」のピクトグラムを記号化
トイレ				「お手洗」のピクトグラムを記号化
鉄道駅				「鉄道/鉄道駅」のピクトグラムを記号化
観光案内所				

図 8-5 日本の地図記号と外国人向け地図記号の比較
(国土地理院の資料をもとに作成)



(a) 現在公開している小縮尺レベルのマップシステムの表示画面例



(b) 見直し後の(a)の英語表記

図 8-6 地名の英語表記における見直し前後の地図表示(小縮尺の例)

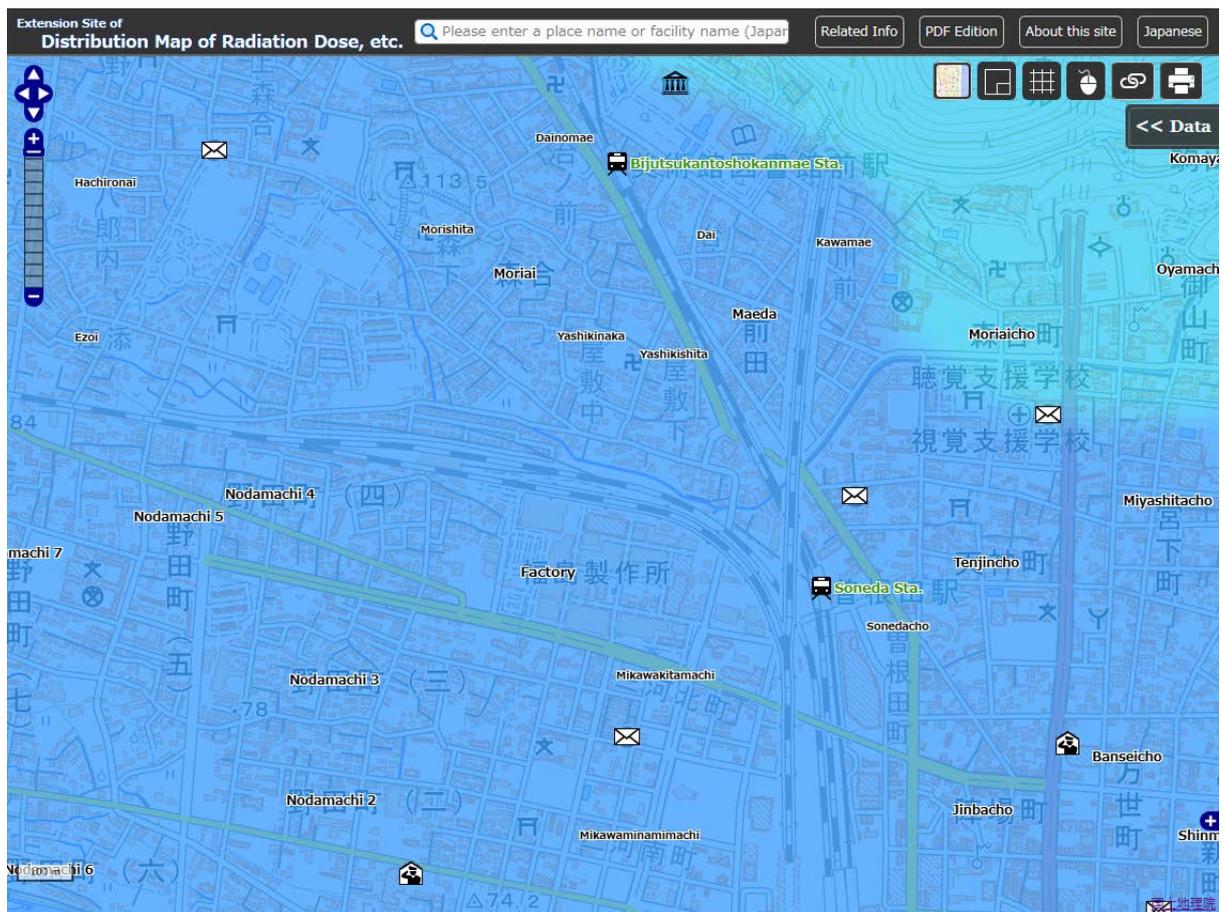


図 8-7 拡大サイトにおける大縮尺レベル表示時の英語表記

9. 総合モニタリング計画に基づく放射線モニタリング及び環境試料分析

9.1. 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、並びに環境試料（土壌及び松葉）中放射性物質濃度を分析及び測定した。各項目の測定地点数及び測定頻度を表 9-1 に、各項目の測定地点を図 9-1 にそれぞれ示した。測定及び分析は南相馬原子力災害対策センターの職員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連携及び技術指導しつつ実施した。測定結果については逐次、原子力規制庁の担当に遅滞なく報告した。

9.1.1. 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 9-2 に示す。

9.1.2. 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 9-3 に示す。図には検出下限値以上のデータについて有意値と表記しプロットした。

9.1.3. 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 9-4 に示す。図には検出下限値以上のデータについて有意値と表記しプロットした。なお、白抜きは検出下限値以下を示している。

9.1.4. 環境試料（土壌及び松葉）中放射性物質濃度

土壌及び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 9-5 及び図 9-6 に示す。

9.2. 測定結果の公開

本測定結果は以下のホームページ上に公開した。

- ・空間線量率

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

- ・積算線量

<https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/216/list-1.html>

- ・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

<https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/482/list-1.html>

<https://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/483/list-1.html>

表 9-1 総合モニタリング計画に基づく放射線モニタリング及び環境試料分析の実施項目ごとの測定地点数及び測定(採取)頻度

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(7月～9月頃)
積算線量の測定	14	3ヶ月に1回
大気浮遊じん中放射性物質濃度	4	1ヶ月に1回
土壌試料中放射性物質濃度	5	1回
松葉試料中放射性物質濃度	14	1回

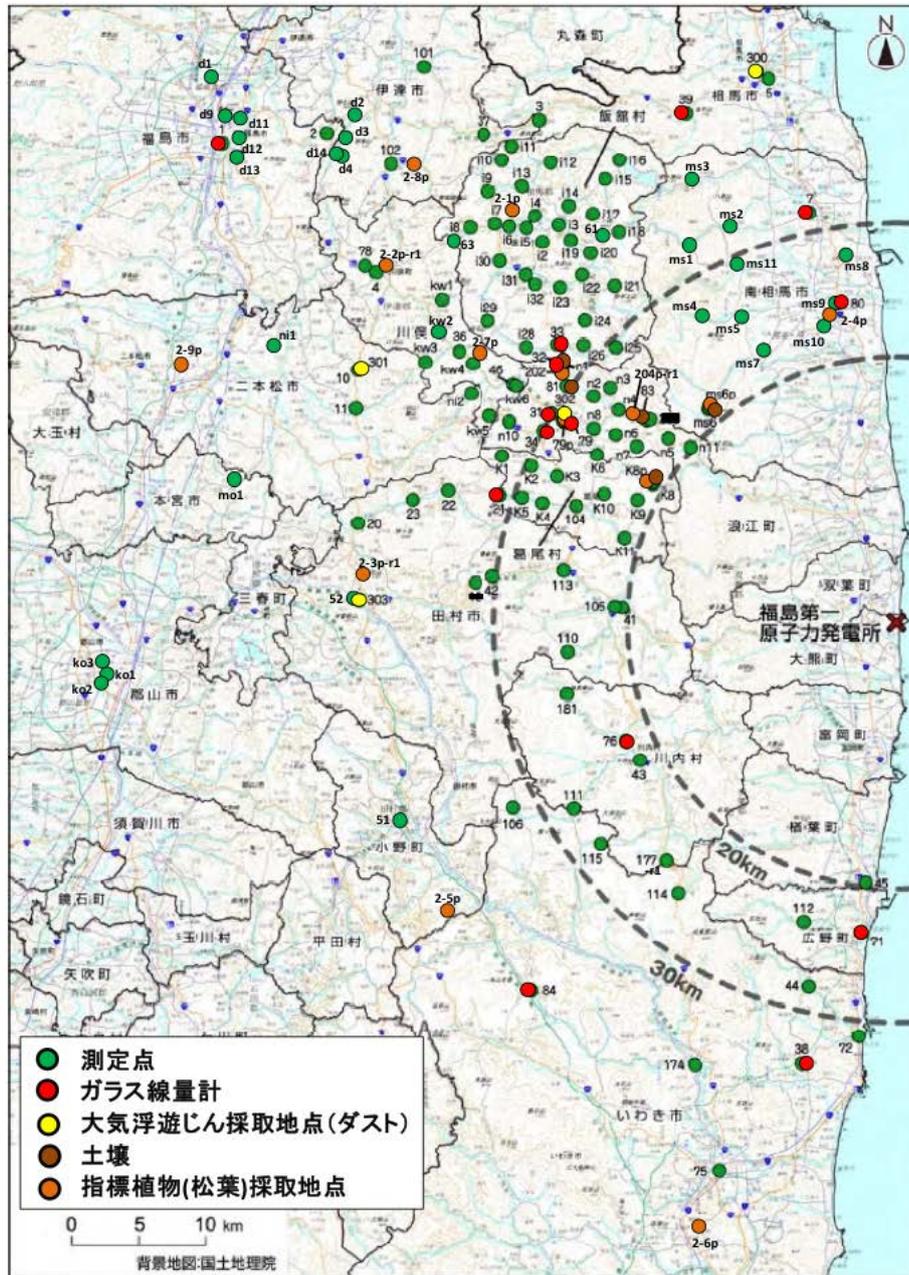


図 9-1 測定及び採取地点
 (地理院タイルに測定点等を追記して掲載。)

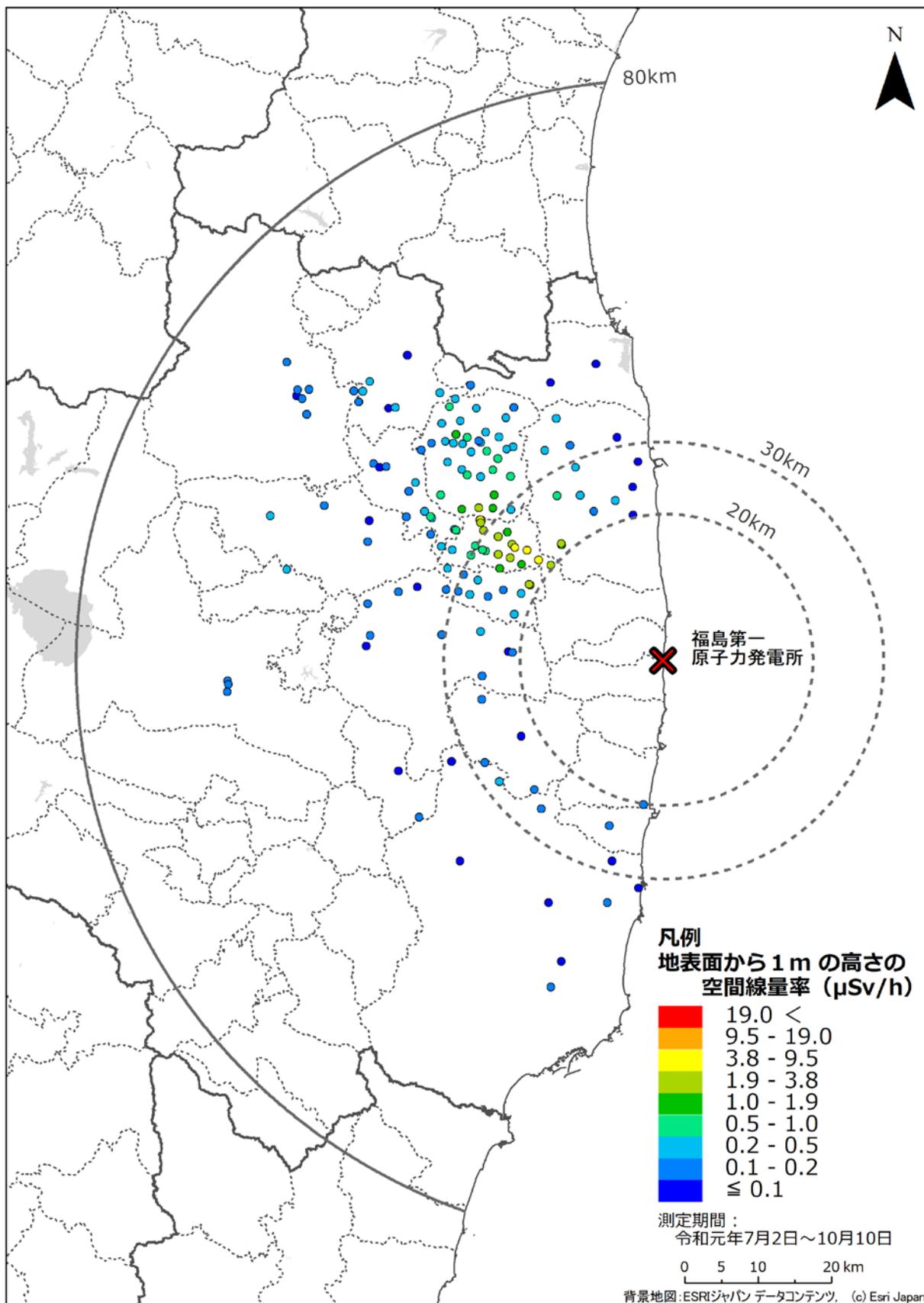


図 9-2 総合モニタリング計画に基づく空間線量率の測定結果

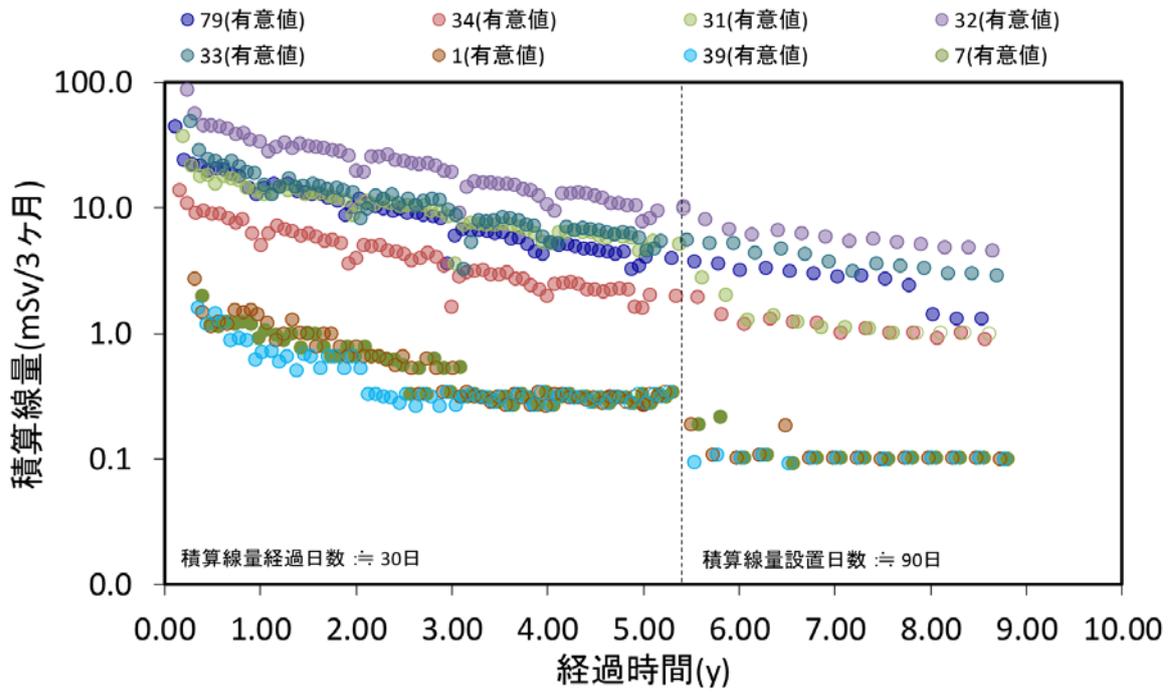
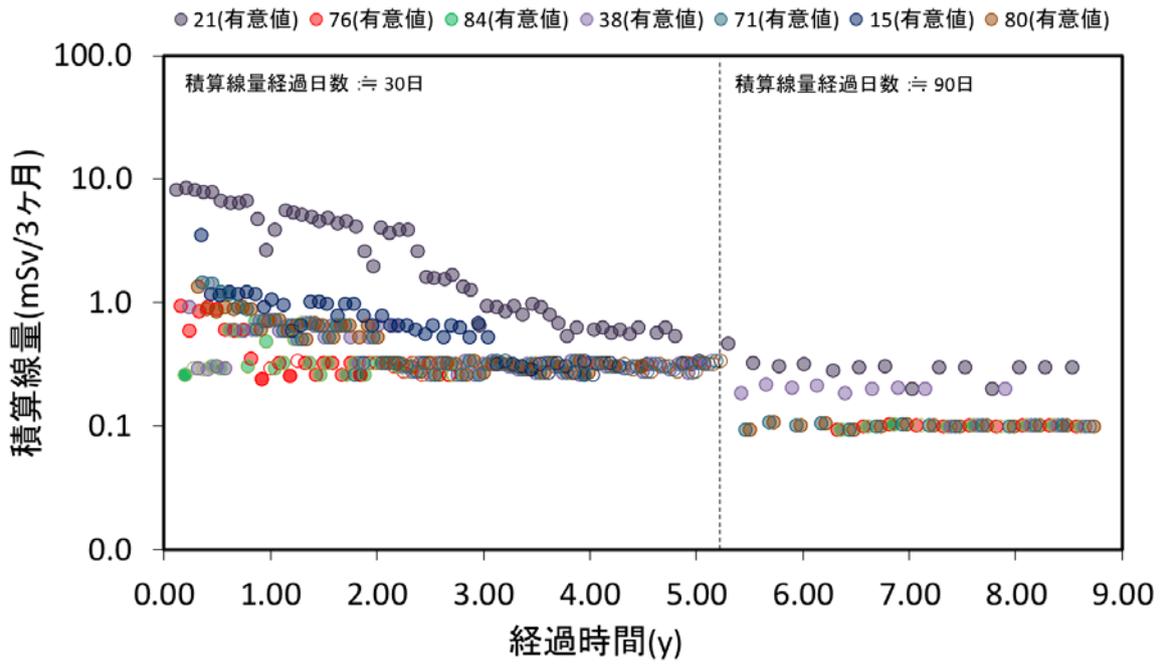


図 9-3 積算線量の経時変化

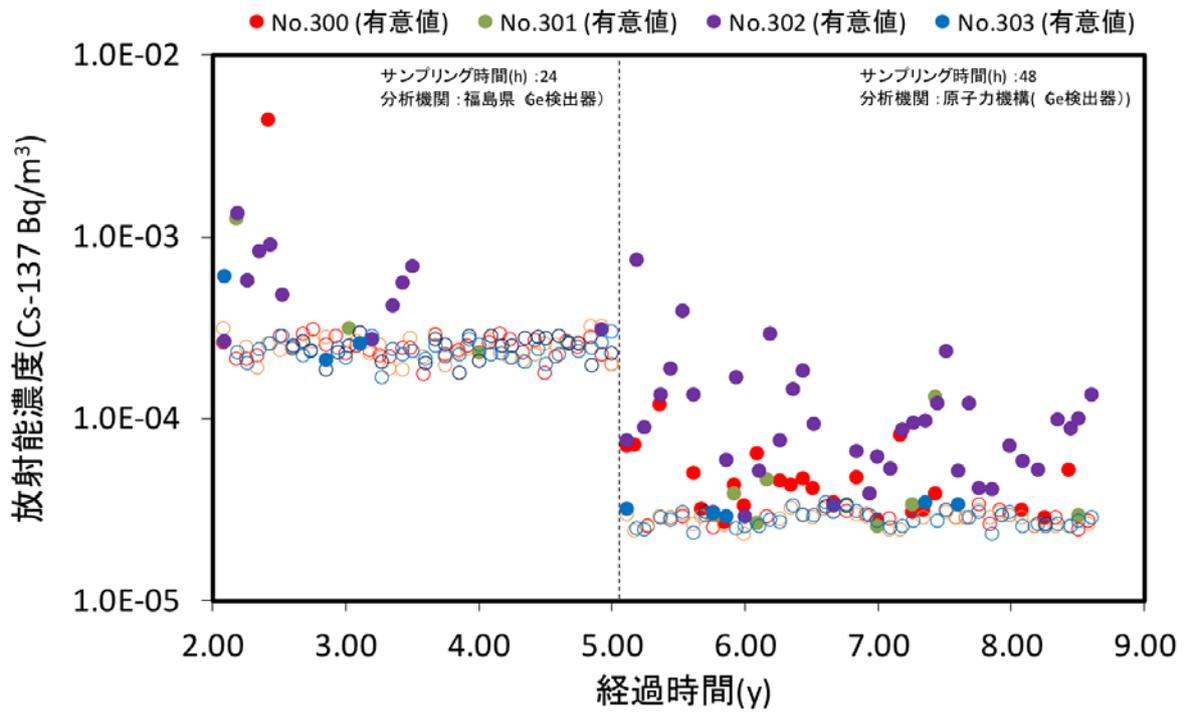


図 9-4 大気浮遊じん中セシウム 137 濃度の経時変化
(白抜きは検出下限値以下)

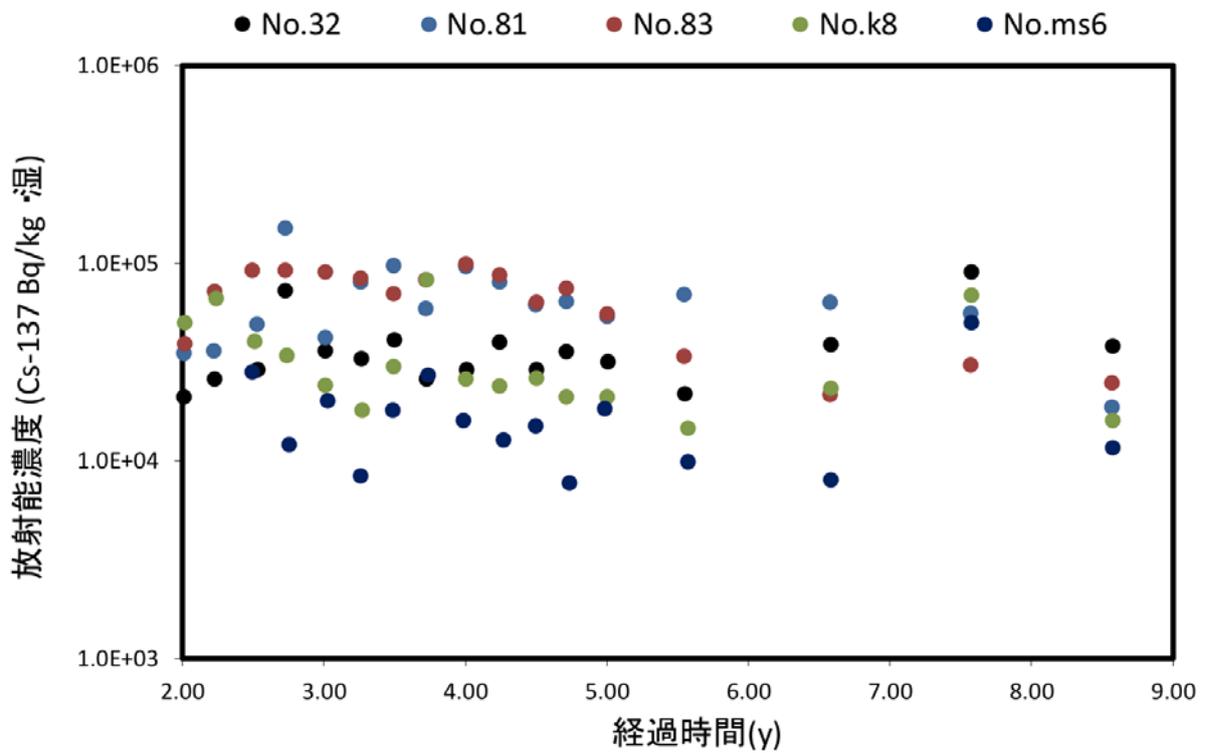


図 9-5 土壌中セシウム 137 濃度の経時変化

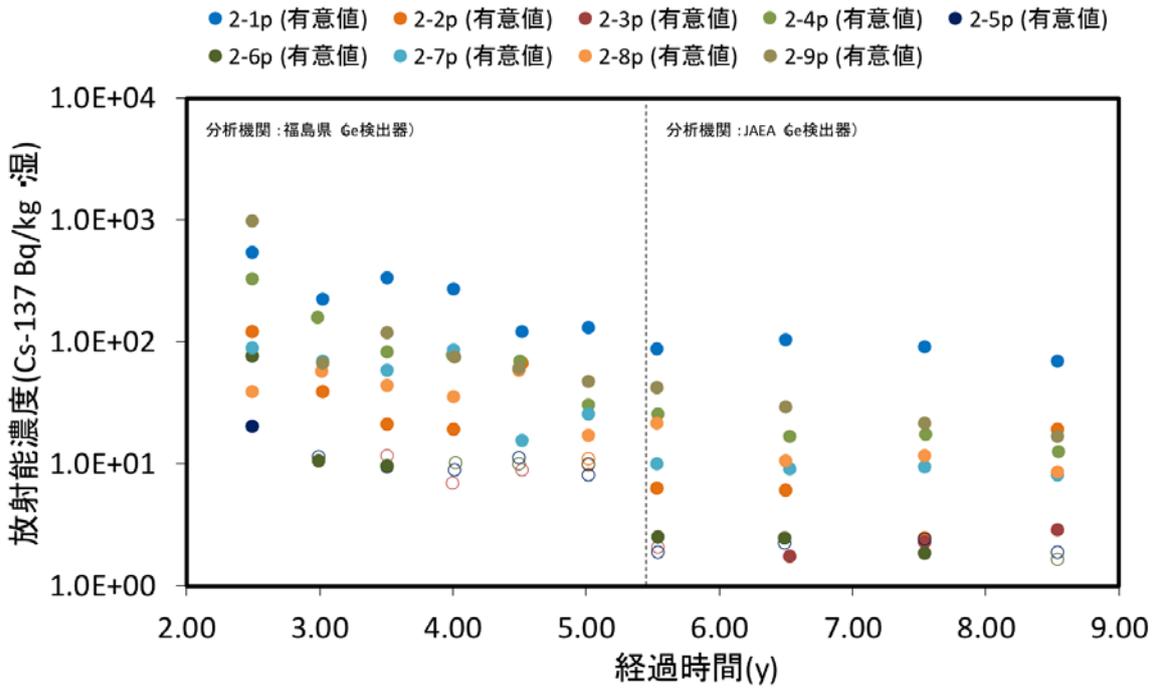
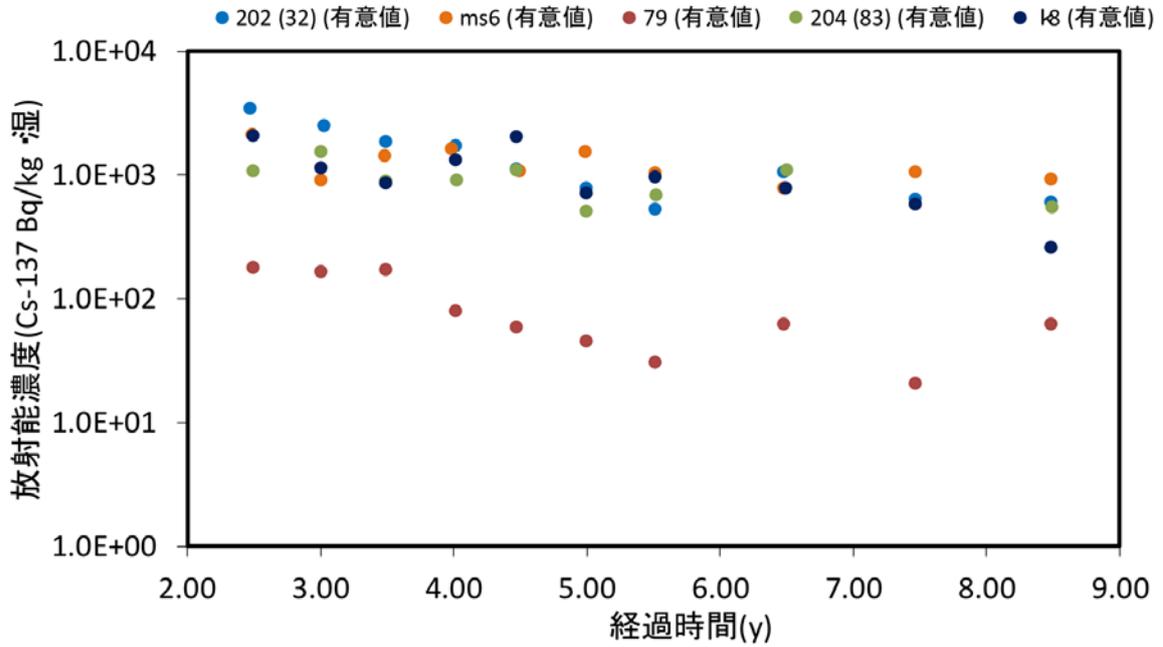


図 9-6 松葉中セシウム 137 濃度の経時変化
(白抜きは検出下限値以下)