

## 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

##### 1) 調査内容サンプル採取・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：平成 30 年 9 月 13 日～10 月 11 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 29 年度と同じ採取地点（005S025、020N030 及び 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）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 の放射能の定量を行った。

##### 2) 重量緩衝深度の解析方法

採取した各層の土壌試料の定量分析で得られた放射性セシウムの単位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/cm<sup>2</sup>）とした深度分布の図を作成した（典型的な例は図 4-2 参照）。このとき、各層の重量深度（湿潤）は、地表面（0 cm）から土壌を採取した層の間までの深度として、地表面から当該層の間までの土壌の重量及び土壌を採取した面積（スクレーパープレートによる土壌採取で

使用した枠の大きさは、 $15(\text{cm}) \times 30(\text{cm}) = 450(\text{cm}^2)$  を用いて換算した。

放射性セシウムの深度分布は、多くの場合、その放射能濃度が重量深度に対して指数関数的に減少することが知られているため（図 4-2 (a) 参照）<sup>9)</sup>、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、式(3) に示す指数関数式<sup>10)</sup> を用いて重量緩衝深度 $\beta$  ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )を解析した。

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

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 $\beta$ は、放射能濃度が地表面の  $1/e$  ( $\approx 1/2.7$ ) となる重量深度であり、放射性セシウムの地中（深さ方向）への移行状況を表す指標となる。 $A_{m,0}$ 及び $\beta$ は、調査で得られた深度分布を基に、最小 2 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、51 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 29 年度の調査では 52 箇所（全 85 箇所中）で観測されており、全体に占める割合はほぼ変わらなかった。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<sup>11)</sup> に基づく近似式を用いて重量緩衝深度 $\beta$  を解析した。

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

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

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

ここで、 $\zeta_0$ は放射能濃度が最大となる重量深度 ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) である。 $A_{m,0}$ 、 $\zeta_0$ 及び $\beta$ は、調査で得られた深度分布を基に、反復法アルゴリズムを利用した最小二乗法により算出した。式 (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 $\beta$ あたりの放射能濃度の減少割合は  $1/e$  ( $\approx 1/2.7$ ) となる。

なお、深度分布の全体像を把握することができなかった場合、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 (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、 $\beta$ 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 $\beta$ ) で構成されており、その内の重量緩衝深度 $\beta$ を与えることで深度分布の形状を特定することができるため、in-situ 測定によって、土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（単位: Bq/cm<sup>2</sup>）（以下「沈着量」という。）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 ( $A_{m,0}$ 、 $\zeta_0$  及び $\beta$ ) で構成されているため、 $\beta$ を与えるだけでは深度分布の形状を特定することができない。したがって、このような深度分布については、指数関数的な深度分布を仮定した実用的な緩衝深度（以下「実効的な重量緩衝深度 $\beta_{\text{eff}}$ 」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高さでの空気カーマへの換算係数<sup>12)</sup>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 $\beta_{eff}$ の詳細な算出方法は、平成29年度の報告書<sup>13)</sup>を参照)。

重量緩衝深度 $\beta$  (g/cm<sup>2</sup>)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。

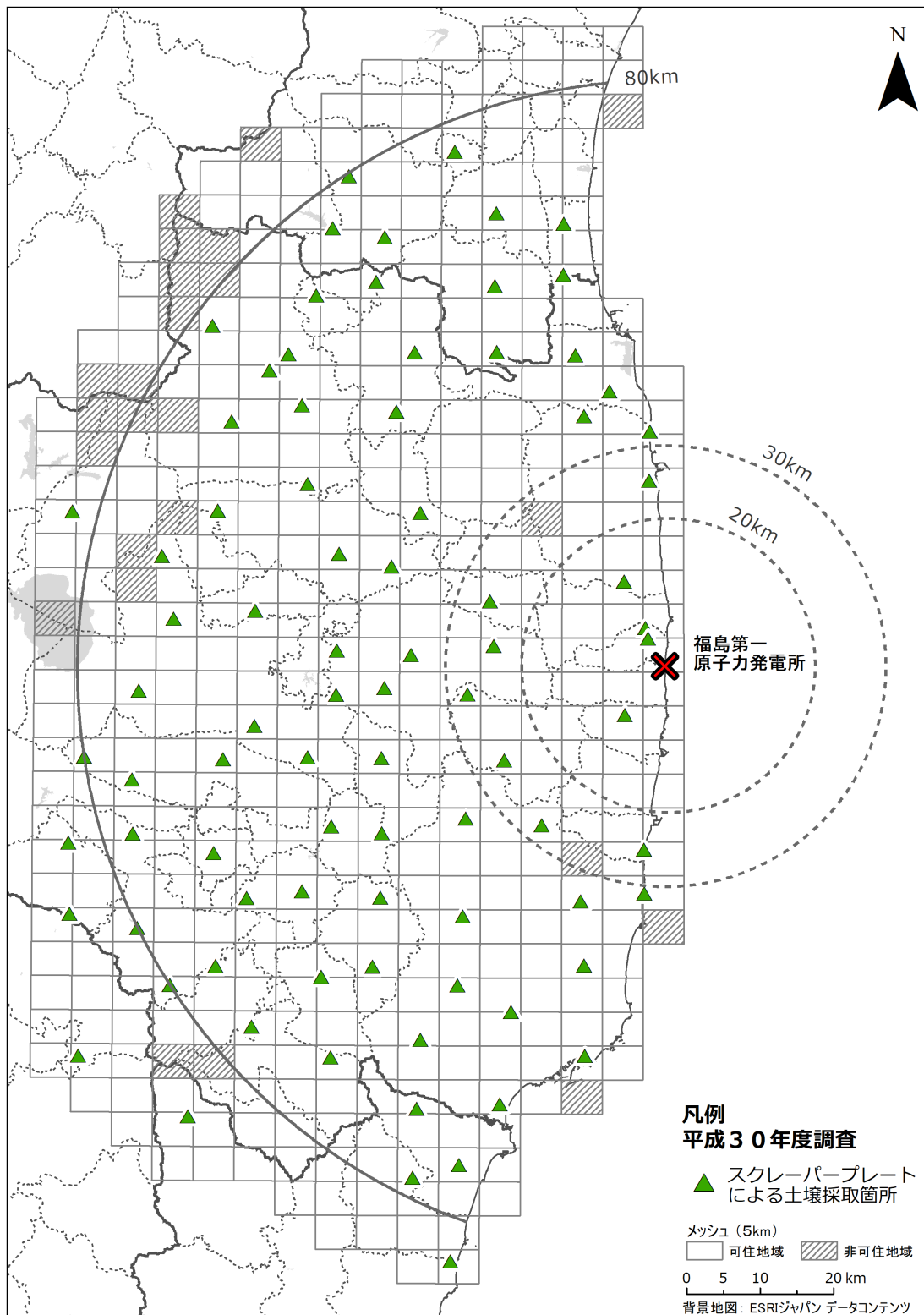


図 4-1 平成 30 年度の放射性セシウム深度分布調査での土壌採取箇所  
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ((c) Esri Japan)を使用。)

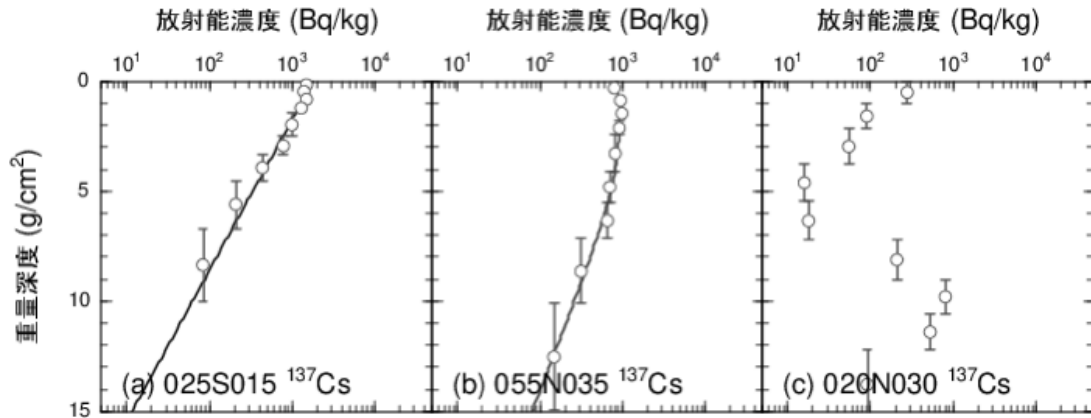


図 4-2 セシウム 137 の深度分布の典型的な例(平成 30 年度調査)

(c) 020N030 の深度分布は、地表面から 8 g/cm<sup>2</sup> 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、物理的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、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 $\beta$ の解析を行った。式 (3) を適用した深度分布は 27 箇所、式 (4) を適用した深度分布は 51 箇所であった。深度分布の全体像を把握することができなかった、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、 $\beta$ の解析を行わなかった採取箇所は、7 箇所(005S025、010S050、020N030、035S045、040S075、045S040 及び 075S030)であった。(平成 30 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、 $\beta$ 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壌中深度分布の変遷から読み取れる除染等の可能性を Appendix-1 の図中に付した。)

##### 1) 重量緩衝深度 $\beta$

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 2.67 g/cm<sup>2</sup> (n= 78)、幾何標準偏差 1.66、

最小値 0.89 g/cm<sup>2</sup>、最大値 9.46 g/cm<sup>2</sup>

##### 2) 実効的な重量緩衝深度 $\beta_{eff}$

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

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

ある。

幾何平均値  $3.83 \text{ g/cm}^2$  ( $n=78$ )、幾何標準偏差 1.70、  
最小値  $0.89 \text{ g/cm}^2$ 、最大値  $9.46 \text{ g/cm}^2$

放射性セシウムの土壌中深度分布の経時的な変化として、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。本調査を開始した平成 23 年 12 月から現在（平成 30 年 9 月）までの実効的な重量緩衝深度  $\beta_{eff}$  の幾何平均値の経時的な変化は、およそ一次関数的な増加を示している（図中の点線）。放射性セシウムの土壌中深度分布の変化の度合いは降雨量等による影響を受けるため、年度や季節といった任意の時間間隔で見た場合に  $\beta_{eff}$  の増加傾向に偏りが存在し、今後も一次関数的な増加が予想されるというわけではない。一方で、放射性セシウムの土壌中深度分布の変化の度合いは、土壌特性等による影響を受けるため採取箇所により異なっている。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わずかずつ増加（深さ方向に移動）してきており、平成 30 年 9 月時点での  $L_{90\%}$  の幾何平均値は 5.1 cm であった。

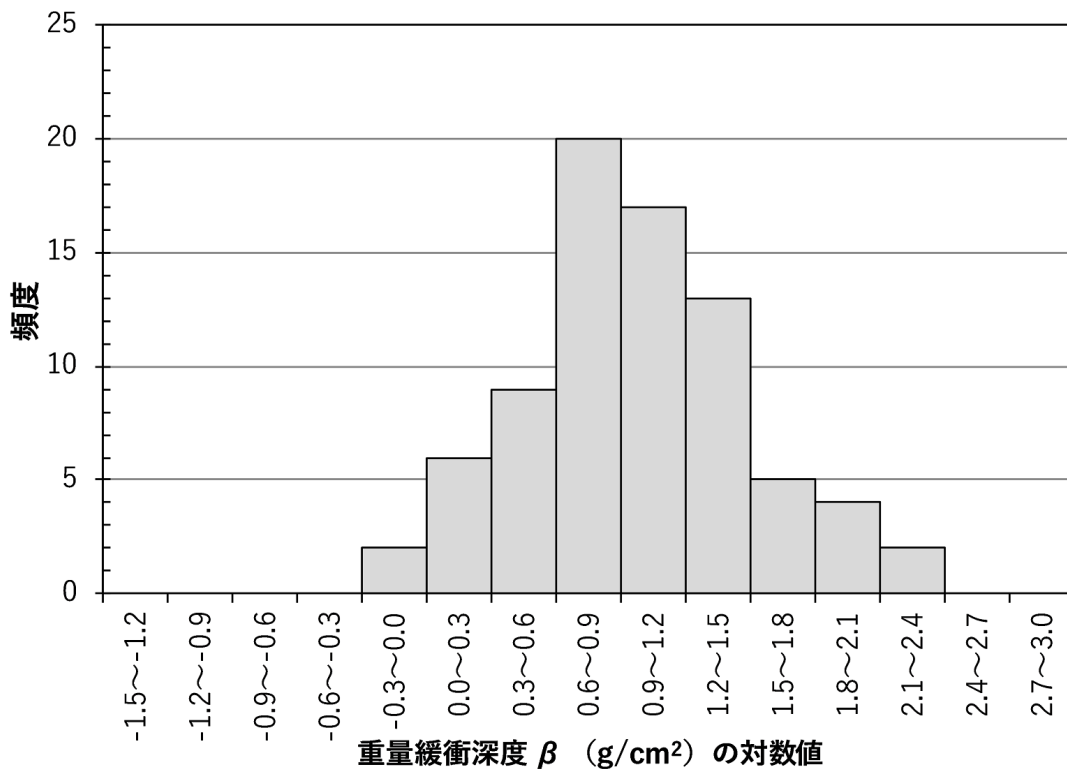


図 4-3 平成 30 年度の深度分布調査による重量緩衝深度  $\beta$  の自然対数値の頻度分布

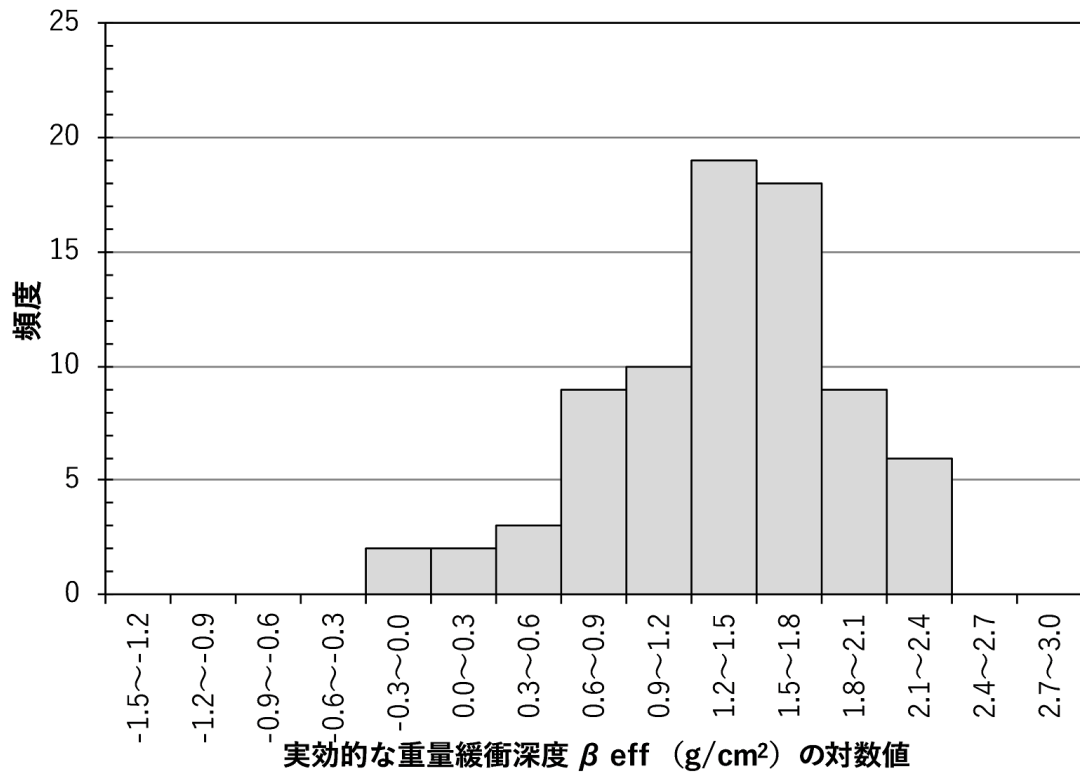


図 4-4 平成 30 年度の深度分布調査による実効的な重量緩衝深度  $\beta_{\text{eff}}$  の自然対数値の頻度分布

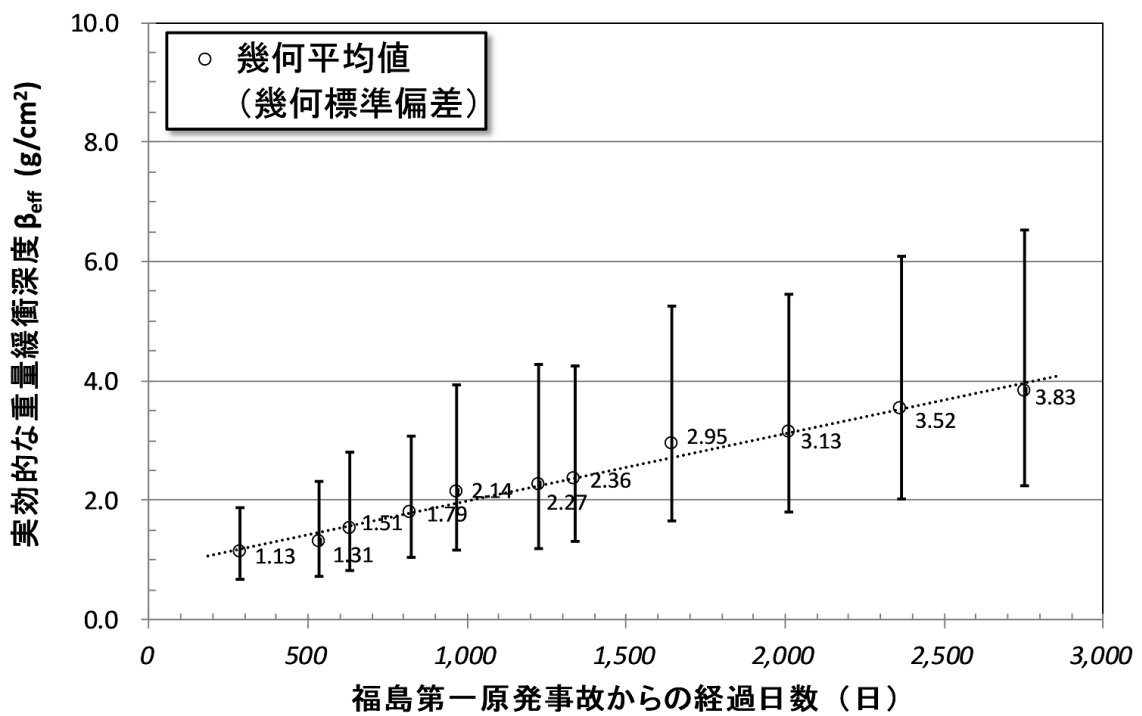


図 4-5 平成 23 年 12 月からの実効的な重量緩衝深度  $\beta_{\text{eff}}$  の経時的な変化  
(誤差棒は幾何標準偏差を示す)

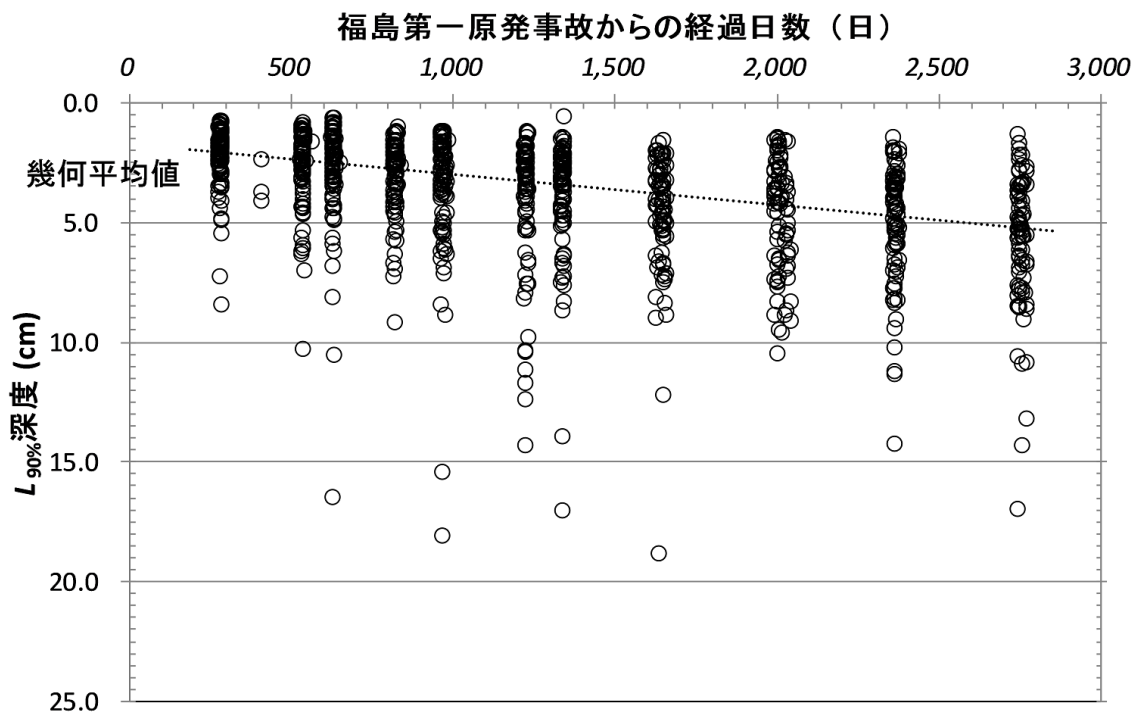


図 4-6 平成 23 年 12 月からの 90%深度  $L_{90\%}$ の経時的な変化及びその幾何平均値

## 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を用いた in-situ 測定を行い、現在の放射性セシウム沈着量の詳細な分布状況を把握するとともに、過去の測定結果との比較により沈着量の経時的変化を解析した。

### 4.2.2. 調査内容

#### 1) 測定方法

測定箇所については、80 km 圏内（福島県東部、宮城県南部及び茨城県北部）の地域を 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。また、5 km × 5 km のメッシュに 1 箇所以外に福島第一原発から約 5km 圏内の 30 箇所において、無人ヘリによる上空からの測定値を地上 1m での値に換算する目的のため、地上 1m 高さで可搬型ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定を行った<sup>2</sup>。測定予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 1 箇所を除いた合計 413 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。

<sup>2</sup> 福島第一原発から約 5km 圏内における無人ヘリサーベイの校正目的の in-situ 測定は、過去の分布状況調査においても継続的に実施されてきた。本報告書では、これらの測定点についても含めて分布マップに示すことにした。



平成 30 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。測定期間は平成 30 年 8 月 10 日～10 月 25 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  $\text{Bq/m}^2$ ）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<sup>14)</sup>に基づき実施し、解析の基礎データは国際放射線単位測定委員会のレポート(ICRU Report 53)<sup>10)</sup>を参照した。また、in-situ 測定によるデータ解析で使用する重量緩衝深度には、4.1.節に示した土壌深度分布調査によって導出した実効的な重量緩衝深度 $\beta_{eff}$ の幾何平均値 ( $3.83 \text{ g/cm}^2$ ) を用いた。

## 2) 測定結果の信頼性の確認

放射性セシウム沈着量の測定結果については、使用した一部の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の測定を行い、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、同一箇所での 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 53<sup>10)</sup>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。

## 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。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、1) で作成した放射性セシウムの土壌沈着量分布マップを細密化し、80km 圏内全体の放射性セシウム沈着量の可視化を行った。

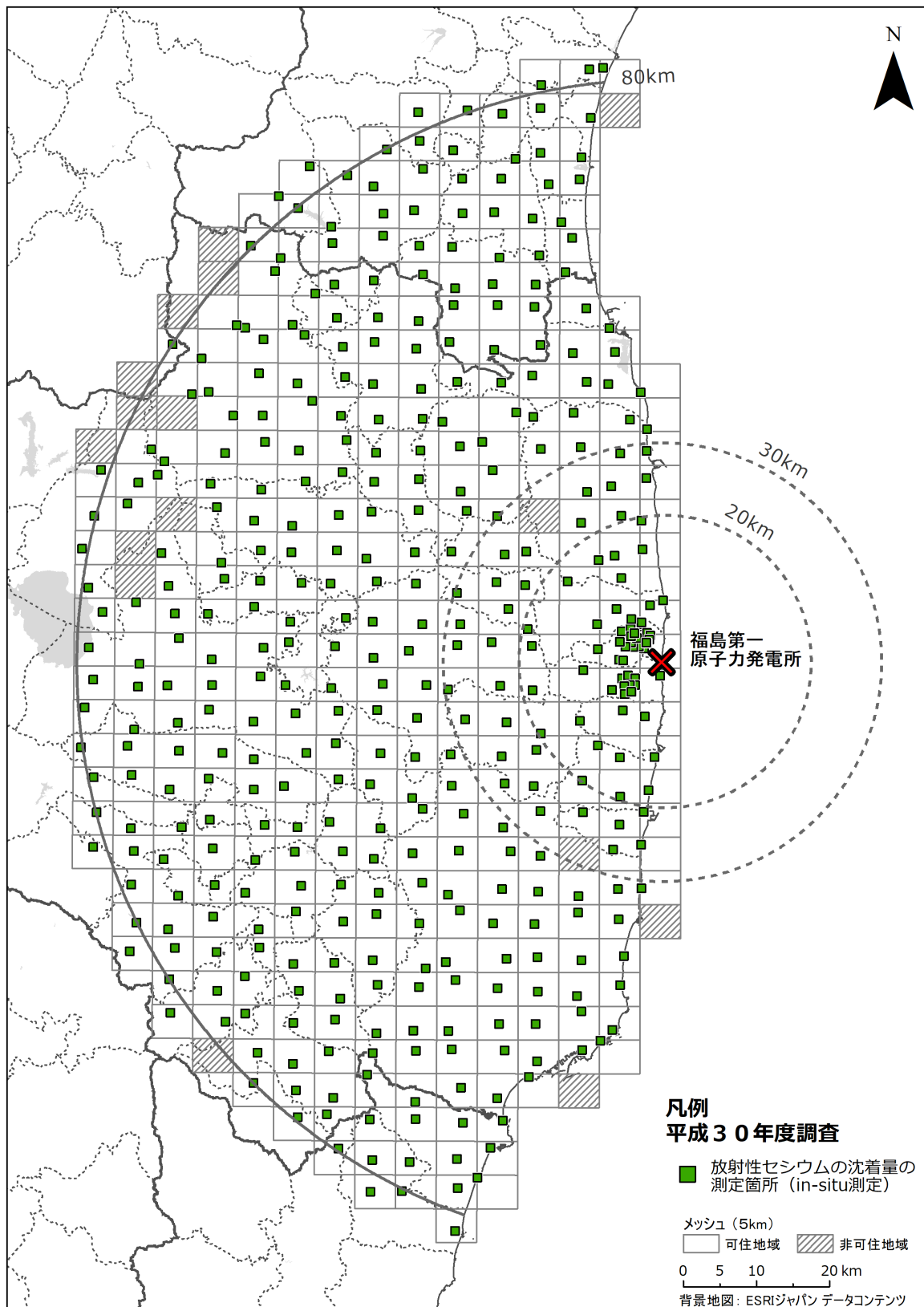
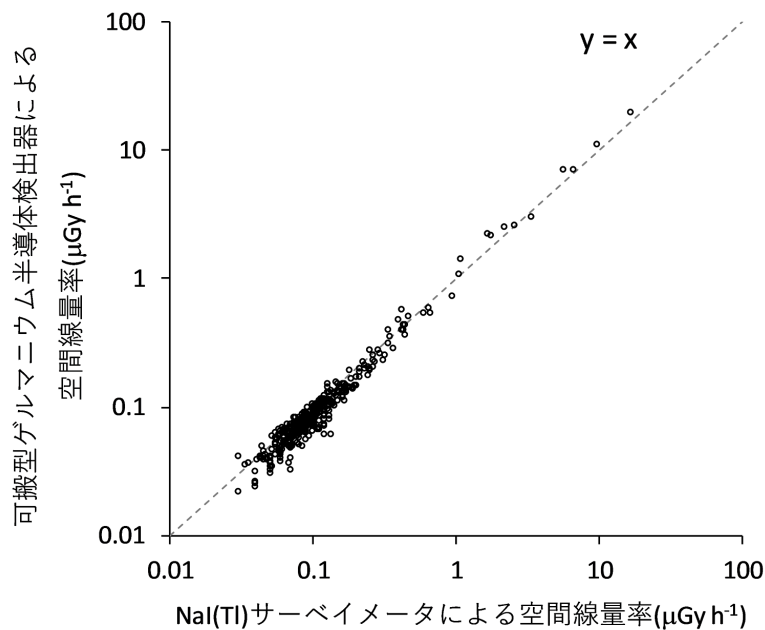


図 4-7 平成 30 年度の可搬型ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定等による放射性セシウム沈着量の測定箇所(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ((c) Esri Japan)を使用。)



**図 4-8 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( $\mu\text{Gy/h}$ )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 (平成 30 年 9 月 13 日～10 月 25 日に測定)**

#### 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 、 平 成 30 年 度 調 査 に つ い て は 同 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に起因する沈着量評価値の不確かさは最大約 44% (90%信頼区間) 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、平成 30 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 413 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。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。空間線量率と放射性セシウム沈着量の相関関係を定点サーベイにより 6,549 箇所 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 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 に よ り 直 接 求 め た 沈 着 量 に 加 え て 記 し た 土 壌 沈 着 量 分 布 マ ッ プ を 図 4-11 に 示 す 。

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定点サーベイによる空間線量率から評価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。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及び  $C$  は in-situ 測定による放射性セシウムの沈着量である。

図 4-12 (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、評価値が測定値の 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 4-12 (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。今後は、地域ごと、又は地点ごとの天然放射性核種由来の空間線量率を減算する方法についても検討したい。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、80km 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、80km 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。

平成 23 年度調査から平成 30 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 91 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顕著ではない。

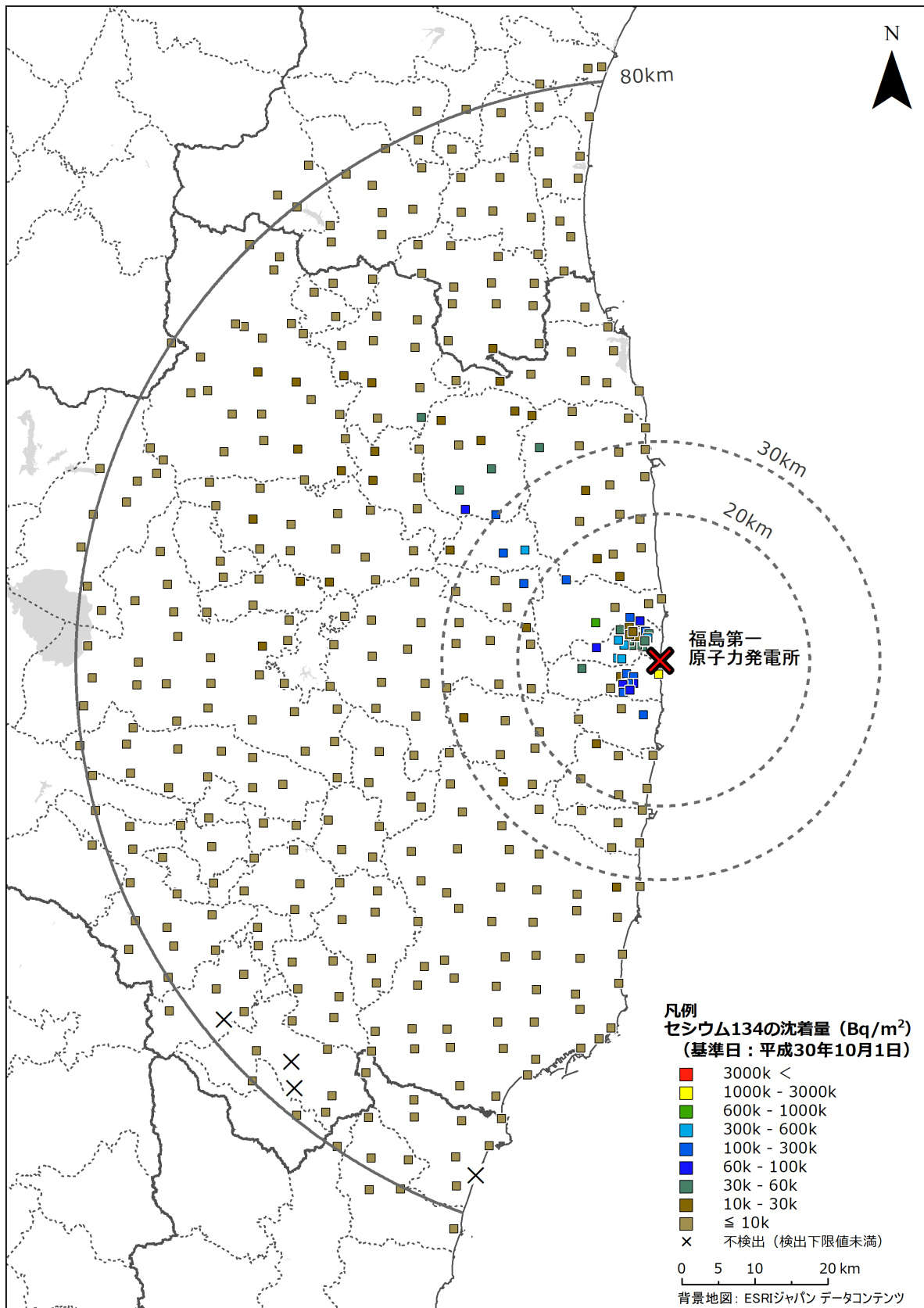


図 4-9 平成 30 年度調査における可搬型ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定による放射性セシウムの沈着量分布マップ (a) セシウム 134 (実効的な緩衝深度  $\beta_{\text{eff}} = 3.83 \text{ g/cm}^2$  を用いた解析結果。背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ((c) Esri Japan)を使用。)

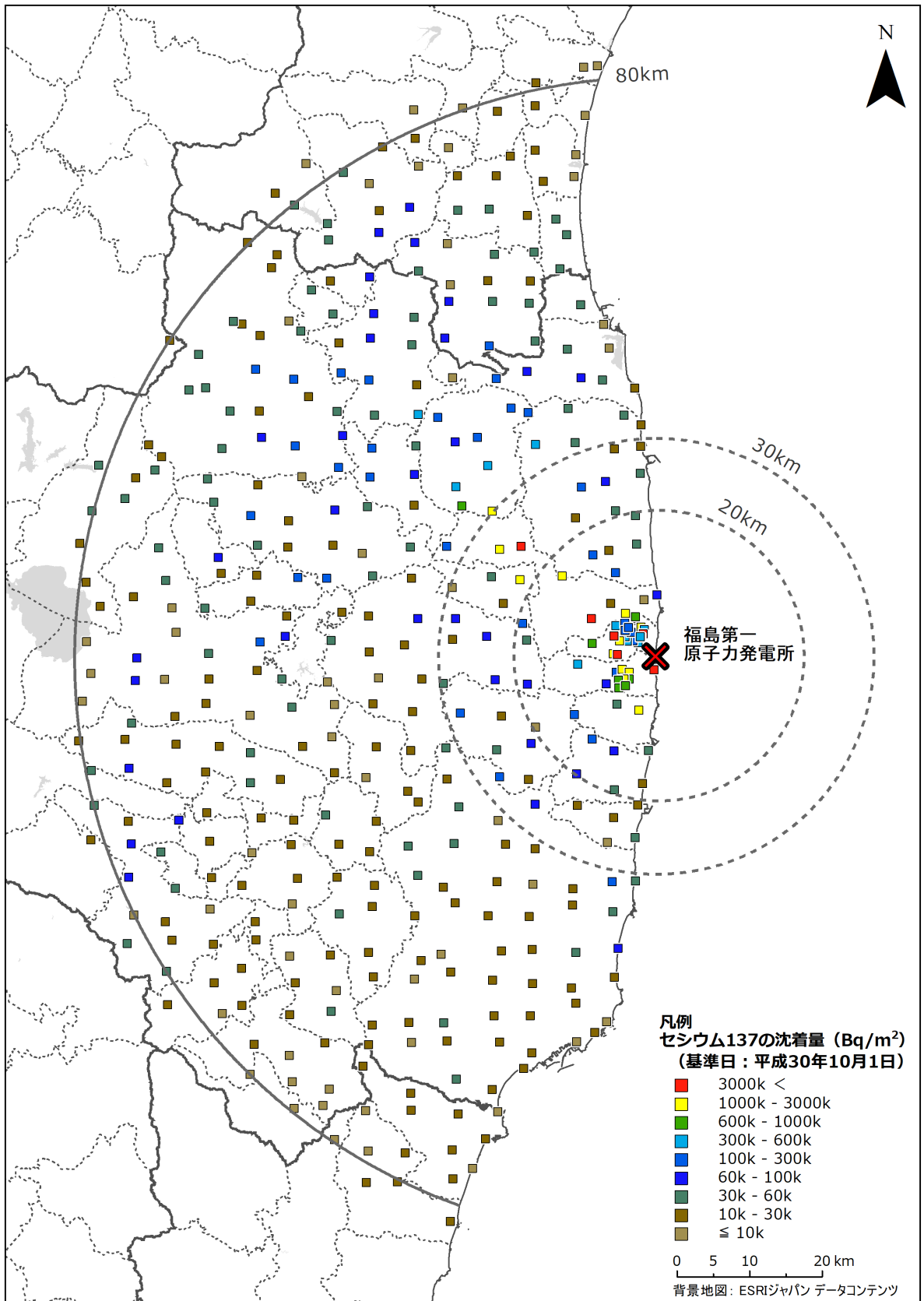


図 4-9 平成 30 年度調査における可搬型ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定による放射性セシウムの沈着量分布マップ (b) セシウム 137 (実効的な緩衝深度  $\beta_{\text{eff}}= 3.83 \text{ g/cm}^2$ を用いた解析結果。背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ((c) Esri Japan)を使用。)

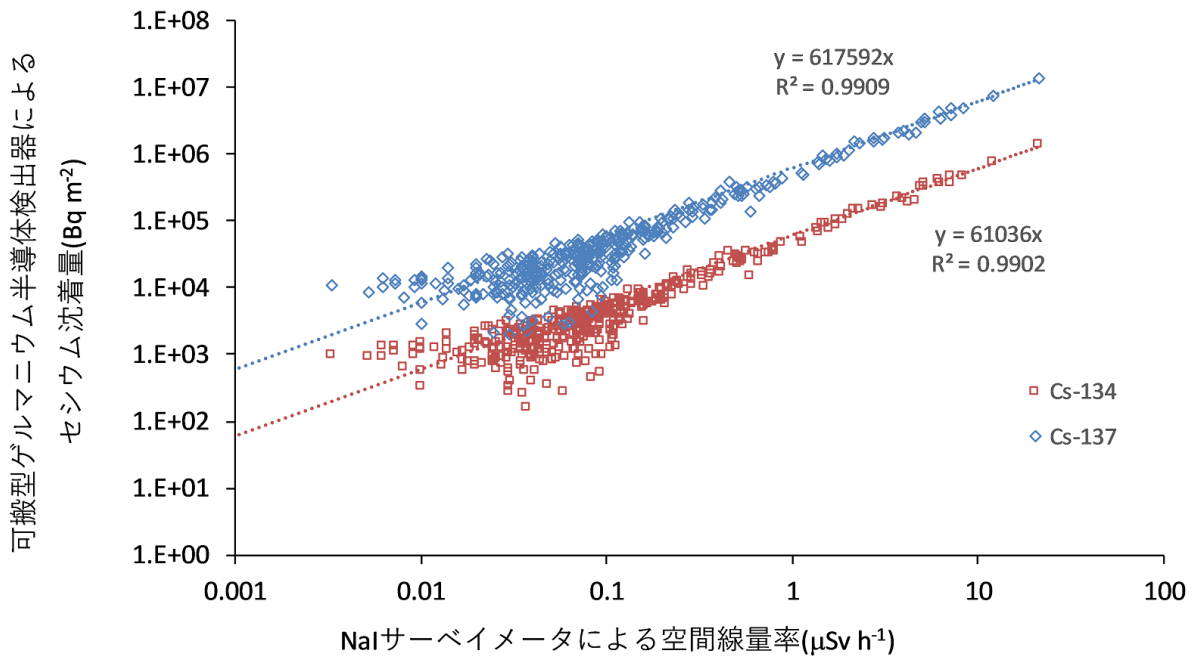


図 4-10 サーベイメータによる地表面から 1 m 高さの空間線量率と放射性セシウム沈着量の相関  
 (赤口: セシウム 134 との相関(データ数 n= 409)、青◇: 空間線量率とセシウム 137 との相関(データ数 n= 413)  
 を示す。実効的な緩衝深度  $\beta_{\text{eff}} = 3.83 \text{ g/cm}^2$  を用いた解析結果。平成 30 年 8 月 10 日～10 月 25 日に測定)

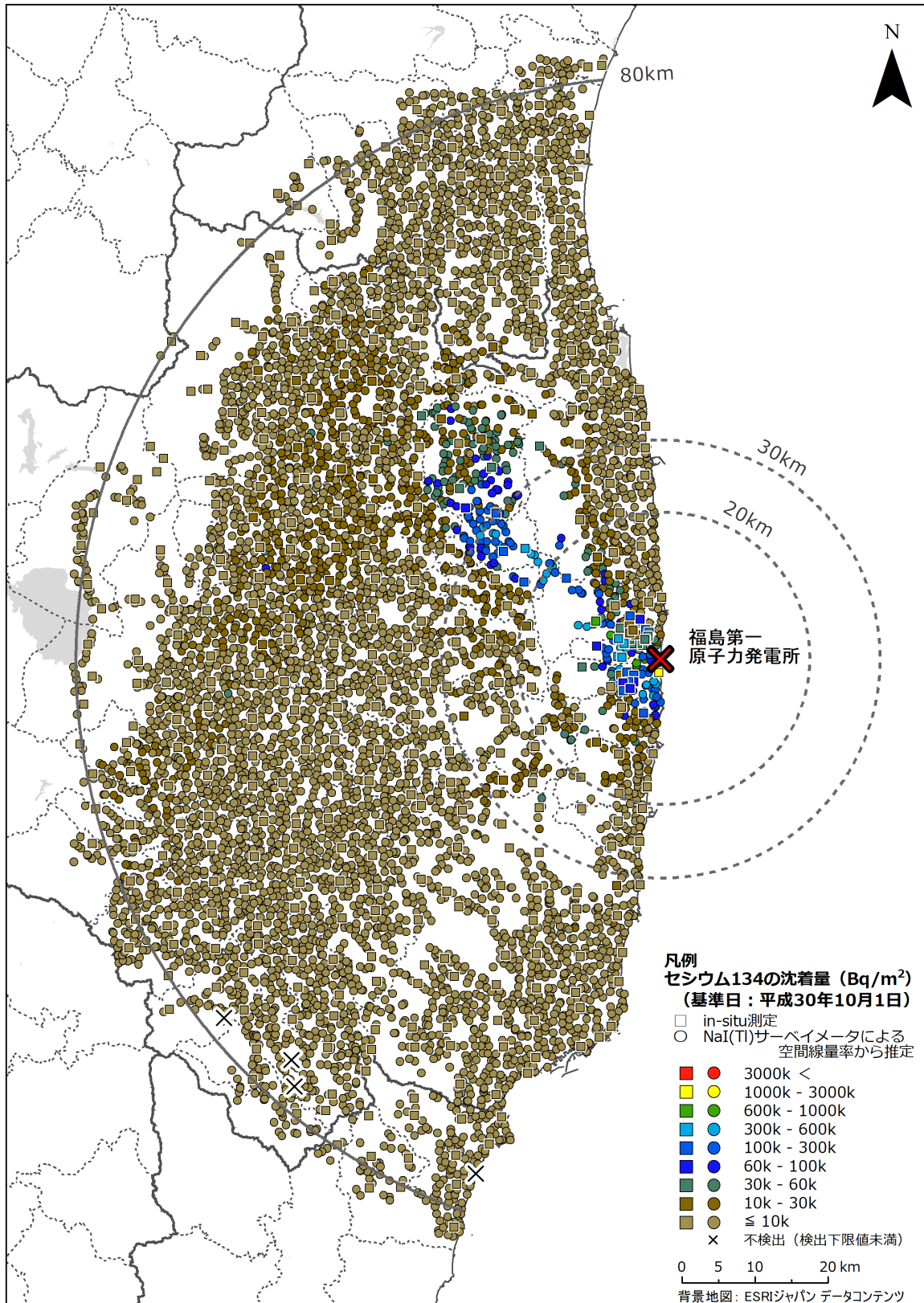


図 4-11 平成 30 年度調査における放射性セシウムの土壌沈着量分布マップ (a) セシウム 134  
(in-situ 測定により測定した沈着量(□)に空間線量率と放射性セシウム沈着量の相関関係を基に評価した沈着量の評価値(○)を追加。実効的な緩衝深度  $\beta_{\text{eff}} = 3.83 \text{ g/cm}^2$  を用いた解析結果。背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)



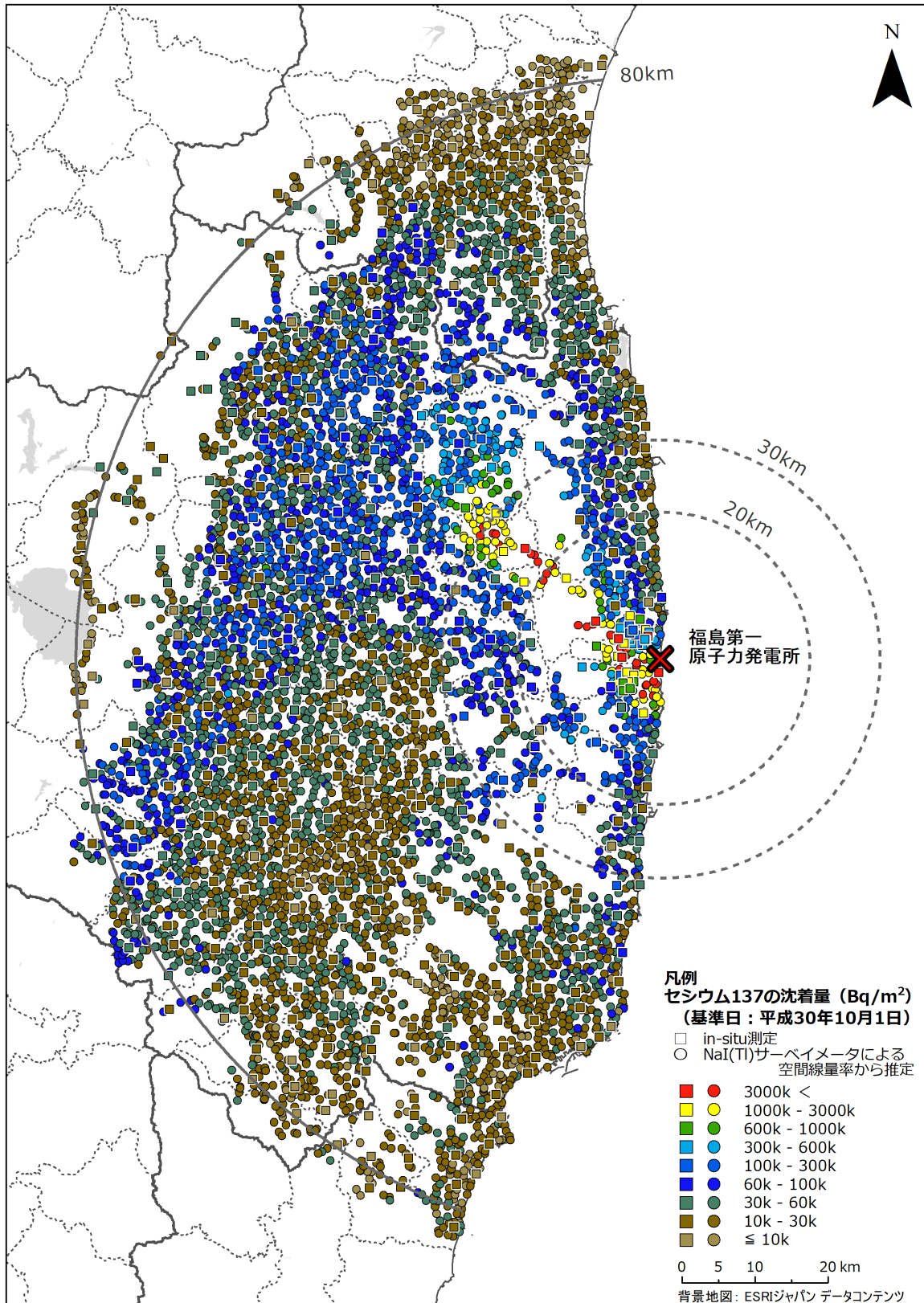


図 4-11 平成 30 年度調査における放射性セシウムの土壌沈着量分布マップ (b) セシウム 137  
(in-situ 測定により測定した沈着量(□)に空間線量率と放射性セシウム沈着量の相関関係を基に評価した沈着量の評価値(○)を追加。実効的な緩衝深度  $\beta_{\text{eff}} = 3.83 \text{ g/cm}^2$  を用いた解析結果。背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

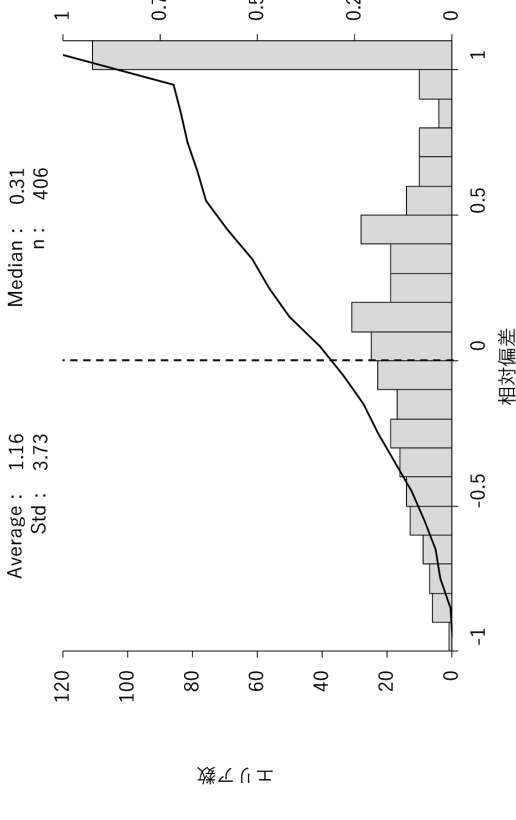
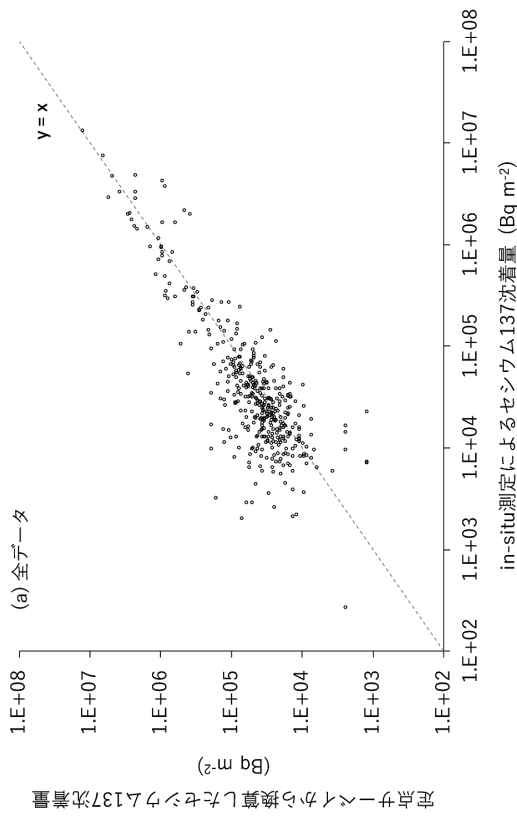
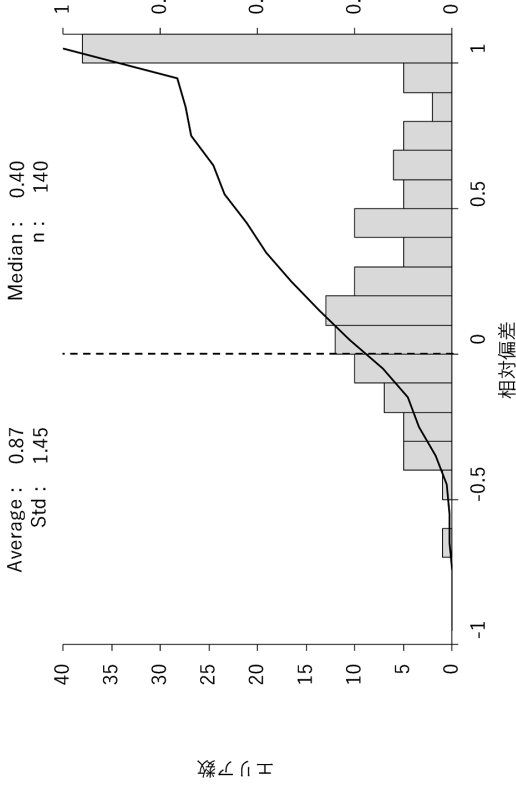
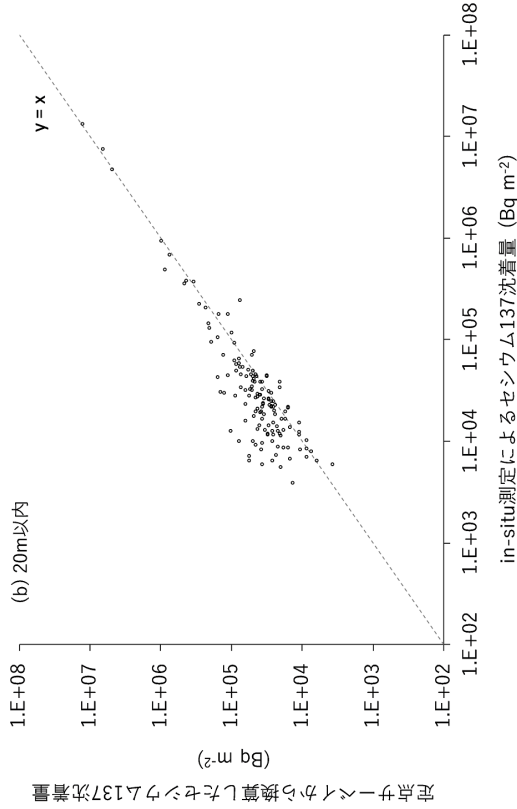
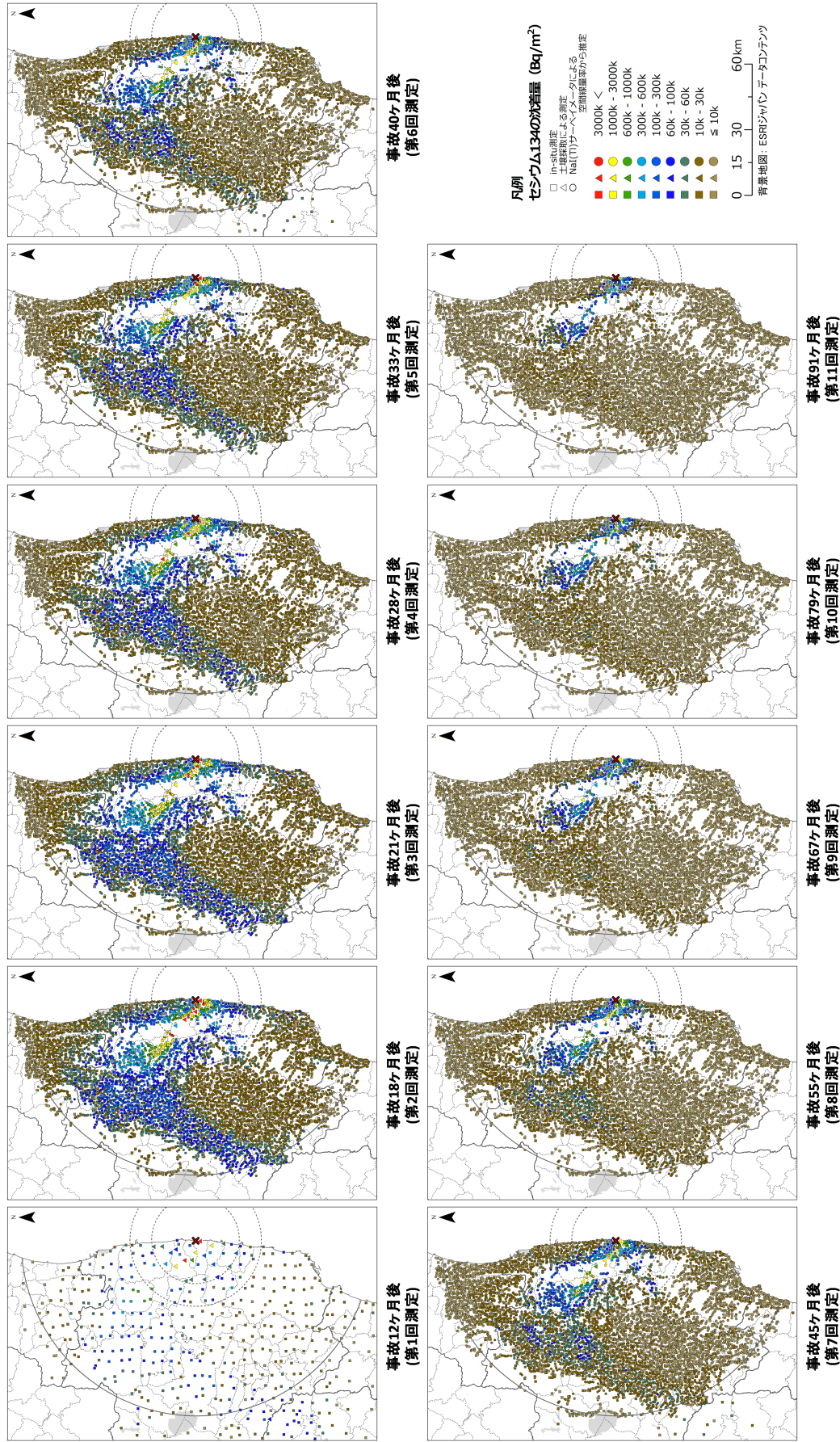
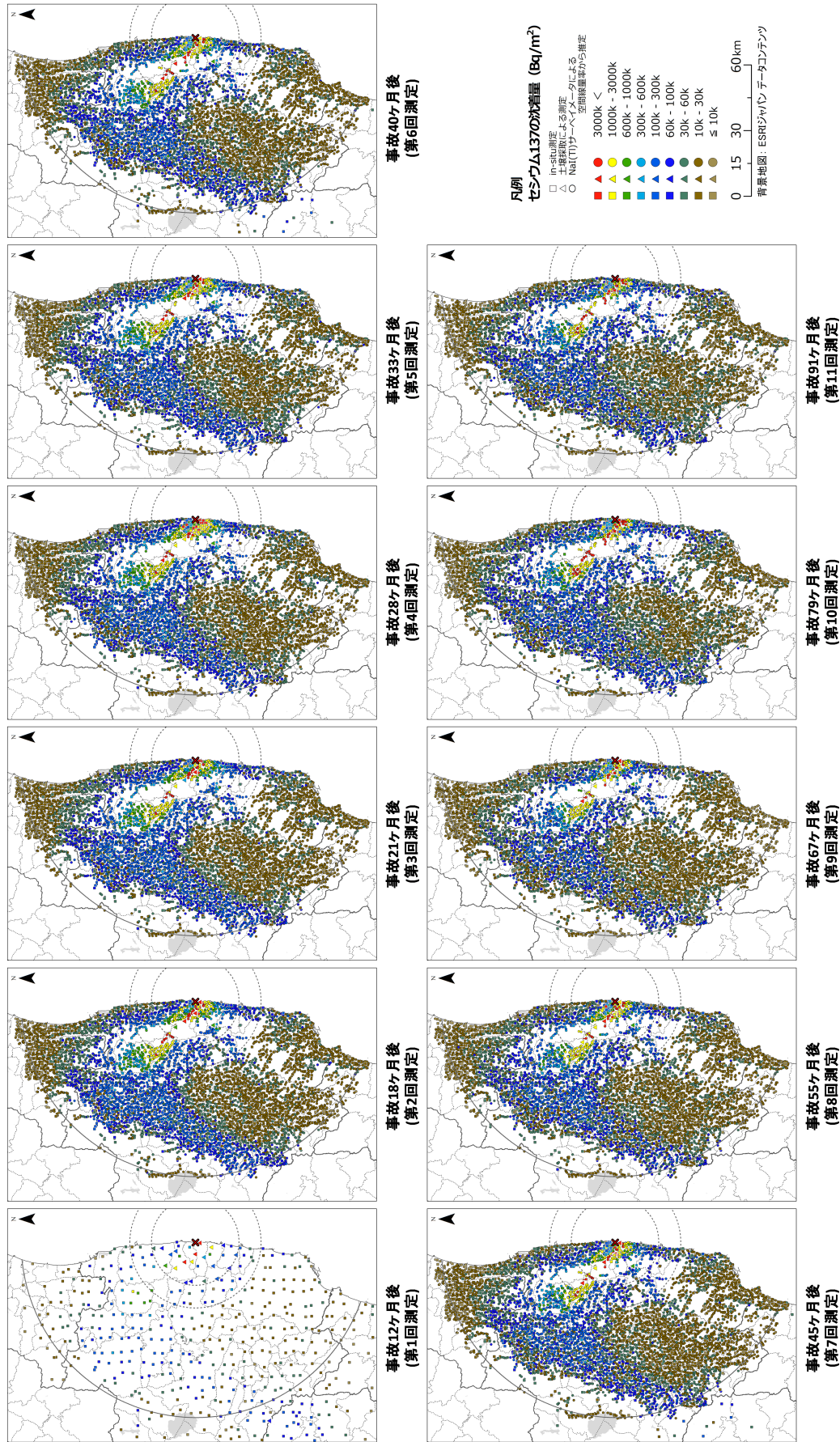


図 4-12 平成 30 年度調査での in-situ 測定によるセシウム 137 沈着量と最近傍点における定点サーベイによる空間線量率から評価したセシウム 137 沈着量の比較



(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定点サーベイによる空間線量率測定からの評価による土壌沈着量分布マップの変化  
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ((c) Esri Japan)を使用。)



(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定点サーベイによる空間線量率測定からの評価による土壌沈着量分布マップの変化 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ (c) Esri Japan) を使用。)

#### 4.2.4. 天然放射性核種による空間線量率の評価

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%を占めるため<sup>12)</sup>、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。

平成 30 年度調査において in-situ 測定を実施した 413 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 369 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 53<sup>10)</sup>の Table 5.2 の換算係数を用いて採取箇所ごとに空気カーマ率を求めた結果、この 369 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<sup>15)</sup>。前述のように、平成 30 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、80km 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)<sup>16)</sup>によると、震災前の平成 22 年 4 月 1 日から平成 23 年 3 月 10 日までの期間、地上約 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。

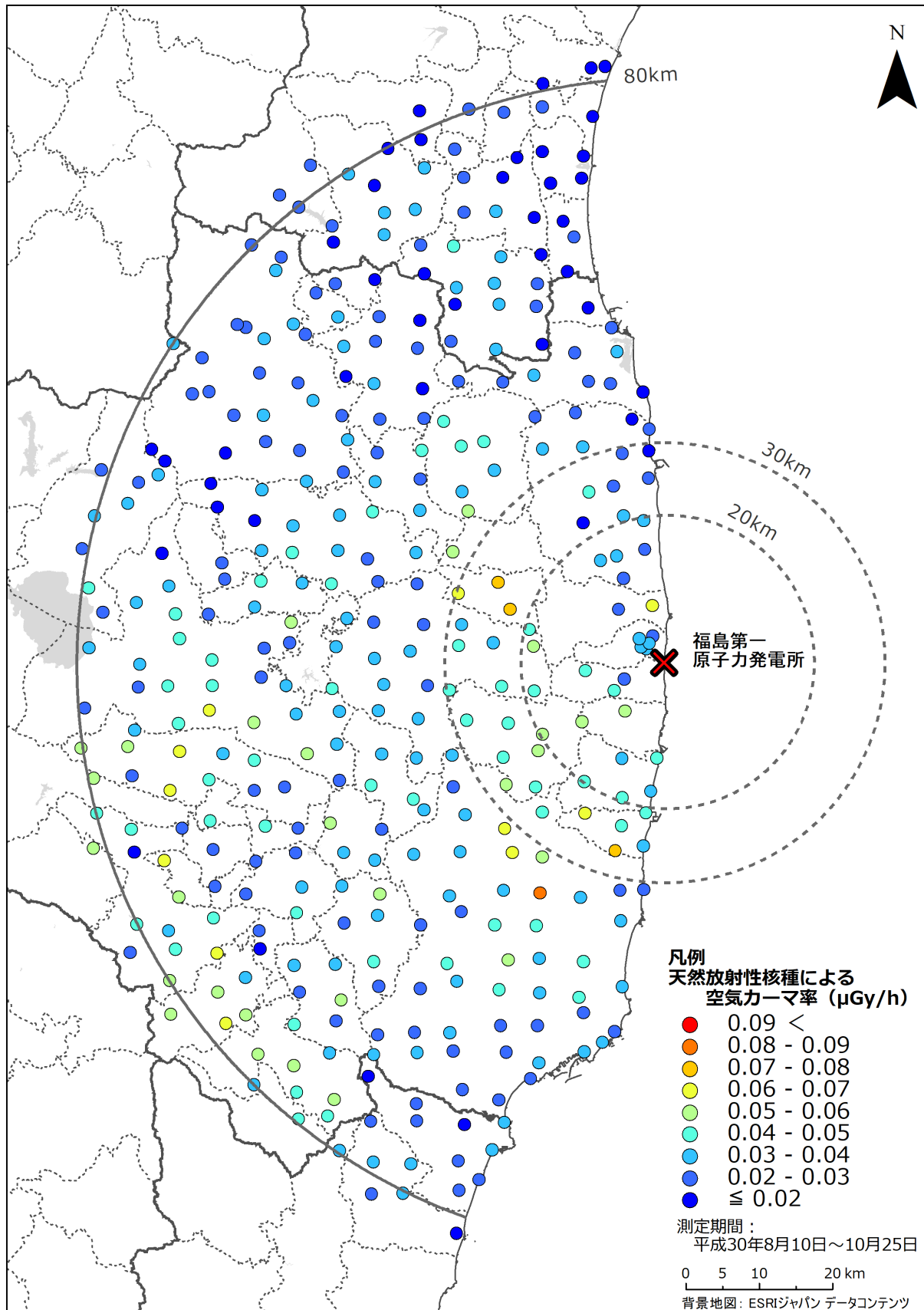


図 4-14 天然放射性核種による空気カーマ率 (μGy/h) の分布  
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ ((c) Esri Japan) を使用。)

#### 4.3. 無人ヘリサーベイによる福島第一原発から約 5km 圏内の放射性セシウム沈着量評価

第 3 章に示した無人ヘリによる上空からの放射線測定結果を基に福島第一原発周辺(半径 5km 程度)の放射性セシウム沈着量を求めた。沈着量評価には、平成 25 年度に確立したガンマ線スペクトル情報から放射性核種ごとに評価する手法<sup>8)</sup>を用いている。本手法による空間線量率への換算には、重量緩衝深度 $\beta_{eff}$ の設定が必要であるが、4.1.節に示した結果から $\beta_{eff}=3.83 \text{ g/cm}^2$ とした。換算結果を基に作成した放射性セシウムの沈着量分布マップを図 4-15 に示す。空間線量率の高かった発電所から北西部分と南部分は 3000 kBq/m<sup>2</sup>を超える比較的高いエリアが広がっていることが分かる。一方、北側の海岸沿いは、300 kBq/m<sup>2</sup>以下のエリアも存在する。

本手法で換算した放射性セシウム沈着量と in-situ 測定による放射性セシウム沈着量とを比較した。図 4-16 に同地点における無人ヘリと in-situ 測定による測定結果の散布図及び式 (6) で求めた相対偏差  $RD3$  をヒストグラムで示した。

$$RD3 = (R_h - R_i)/R_i \quad (6)$$

ここで、 $R_h$ は無人ヘリからの換算値及び  $R_i$ は in-situ 測定 による放射性セシウムの沈着量である。相対偏差の平均値は  $0.41 \pm 0.61$  であり、ヒストグラムでも全エリア数のうち 2/3 が相対偏差が正の値を示しており、無人ヘリサーベイからの評価値は地上での in-situ 測定による値に比べ高めの値(平均値で約 4 割増)を示す傾向を確認した。散布図から、沈着量が 1 MBq/m<sup>2</sup>以上の点に限定すれば、概ね  $y=x$  の直線上に分布しており、地上での測定結果と比較的よく整合している。なお、低線領域において無人ヘリサーベイによる測定値が過大評価になる傾向は、図 3-5 に示した空間線量率についての比較と類似であり、地上測定に選定した場所が周辺より局所的に沈着量の低い可能性がある。

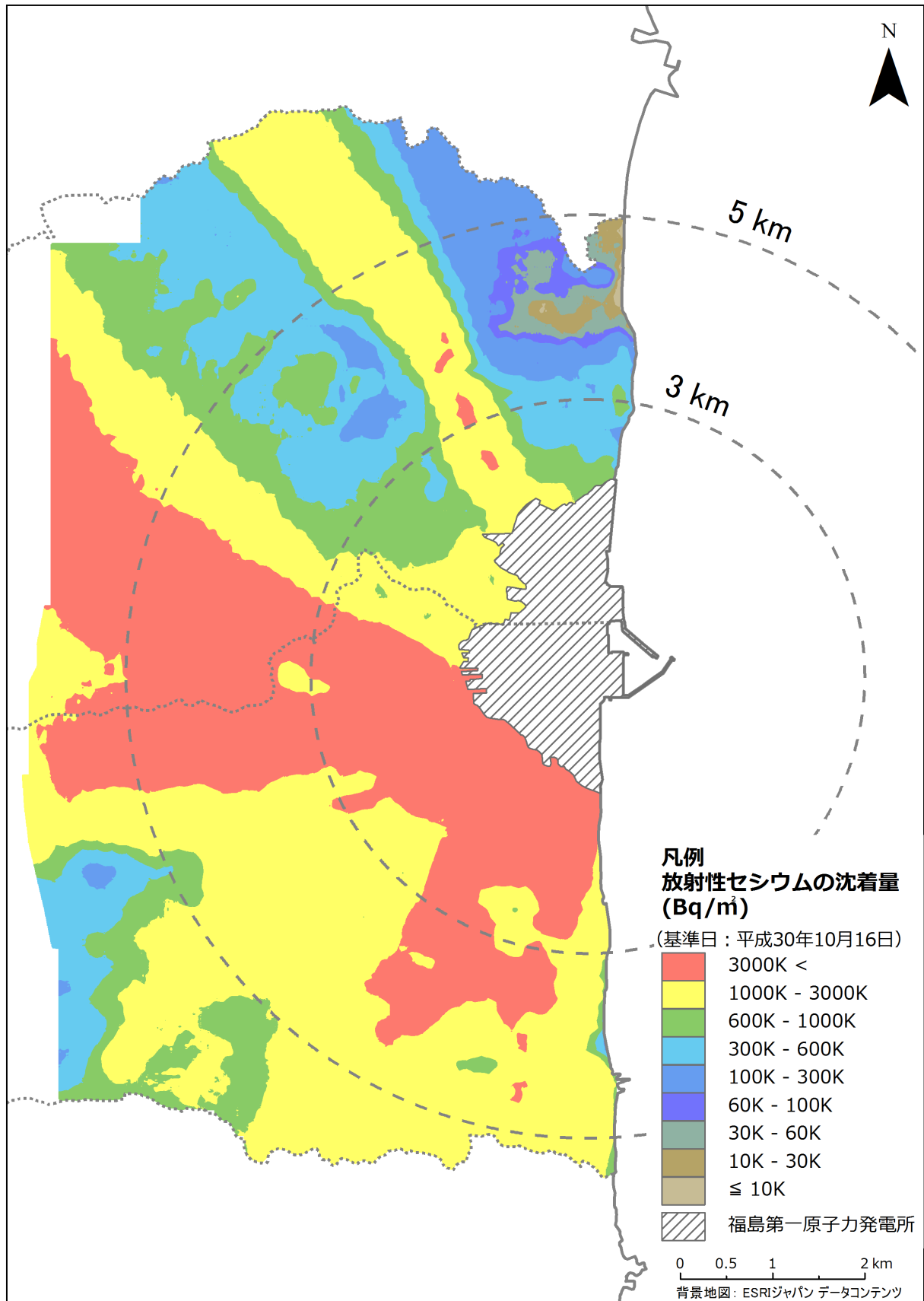


図 4-15 平成 30 年度無人ヘリサーベイによる放射性セシウム沈着量分布マップ  
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ((c) Esri Japan)を使用。)



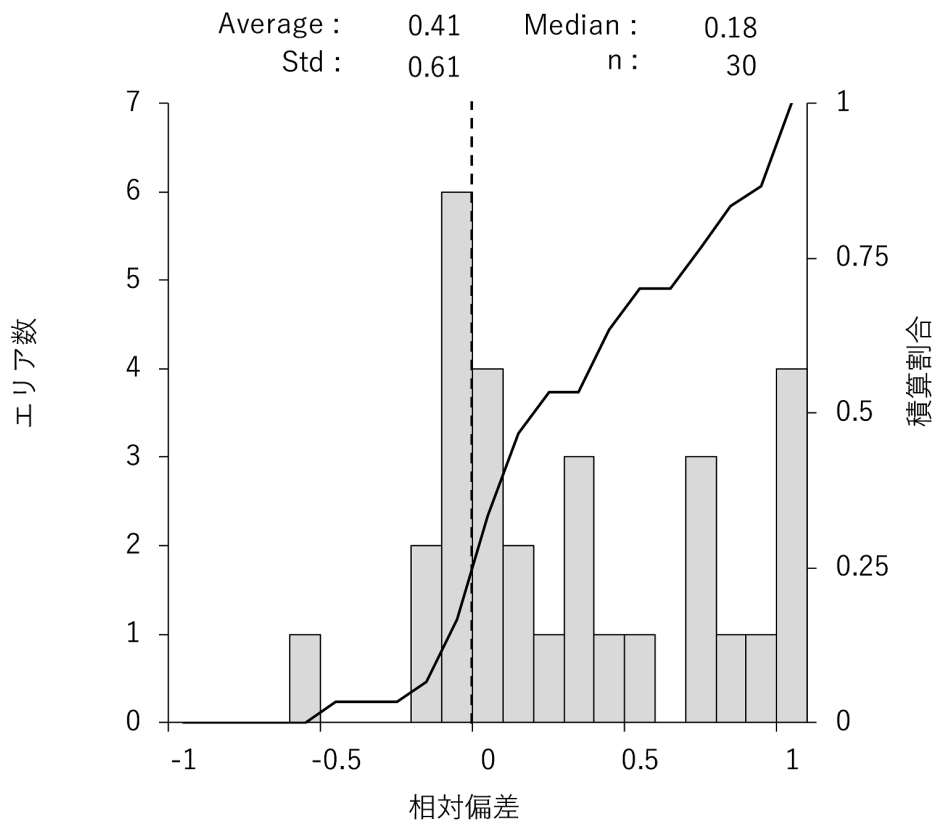
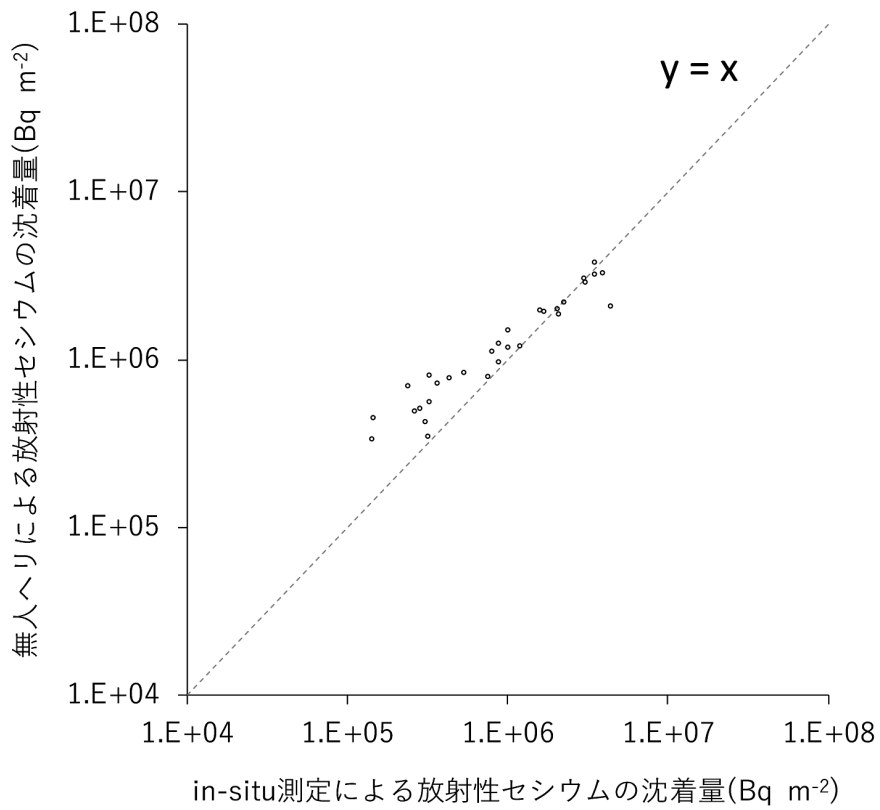


図 4-16 平成 30 年度調査での無人ヘリサーベイと in-situ 測定による放射性セシウム沈着量の比較