

3. 発電所周辺の空間線量率測定

3.1. 調査目的

原子力機構では、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³⁾、河川敷のモニタリング⁴⁾及び除染前後のモニタリング⁵⁾などが挙げられる。

事故以来、福島第一原発から3 km 圏内については、航空法による飛行制限区域（平成25年2月5日までは飛行禁止区域）となっており、有人ヘリコプターによる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⁶⁾。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9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、放射性セシウムの物理的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。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年後の避難指示解除をめざして除染が加速されるなど、環境が変化している。本地域での面的及び継続的なデータの取得により、放射性物質の環境動態や人為的活動の影響について知見を得ることが可能と考えられる。

ここでは、平成30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、平成30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。

3.2. 調査手法

3.2.1. 調査場所・期間

調査場所は、福島第一原発周辺（5 km 圏内）を設定した。

調査期間：平成30年7月10日～10月16日

合計測定距離：788 km

3.2.2. 調査機器

測定にあたっては、ヤマハ発動機（株）自律飛行型無人ヘリ 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ガンマ線エネルギースペクトルを1秒間に1回連続測定した。また、放射線検出器は LaBr₃ (Ce) (Lanthanum Bromide) シンチレー

ション検出器（1.5” Φ×1.5” ×3 本）を用いた（図 3-1 参照）。



図 3-1 無人ヘリの仕様

3.2.3. データ取得方法

無人ヘリの飛行高度は、安全面及び測定データの信頼性を考慮し、対地高度で 80 m を目安とした。上空で測定される放射線は、無人ヘリ下部の直径約 200 m 程度の円内のガンマ線量を平均化したものである⁷⁾。無人ヘリの飛行軌跡幅（測線間隔）は 80～100 m、無人ヘリの飛行速度は 8 m/s (= 28.8 km/h) 程度とした。取得データは、放射線検出器で測定される 1 秒ごとのガンマ線のデータ（計数率）とエネルギースペクトル及びそれに対応する DGPS（差分全地球測位システム：Differential Global Positioning System）による位置情報である。データ取得のためのフライト条件は測定結果の比較を容易にするため、第 3 回以降は全く同じとしている。フライトの飛行軌跡を図 3-2 に示す。

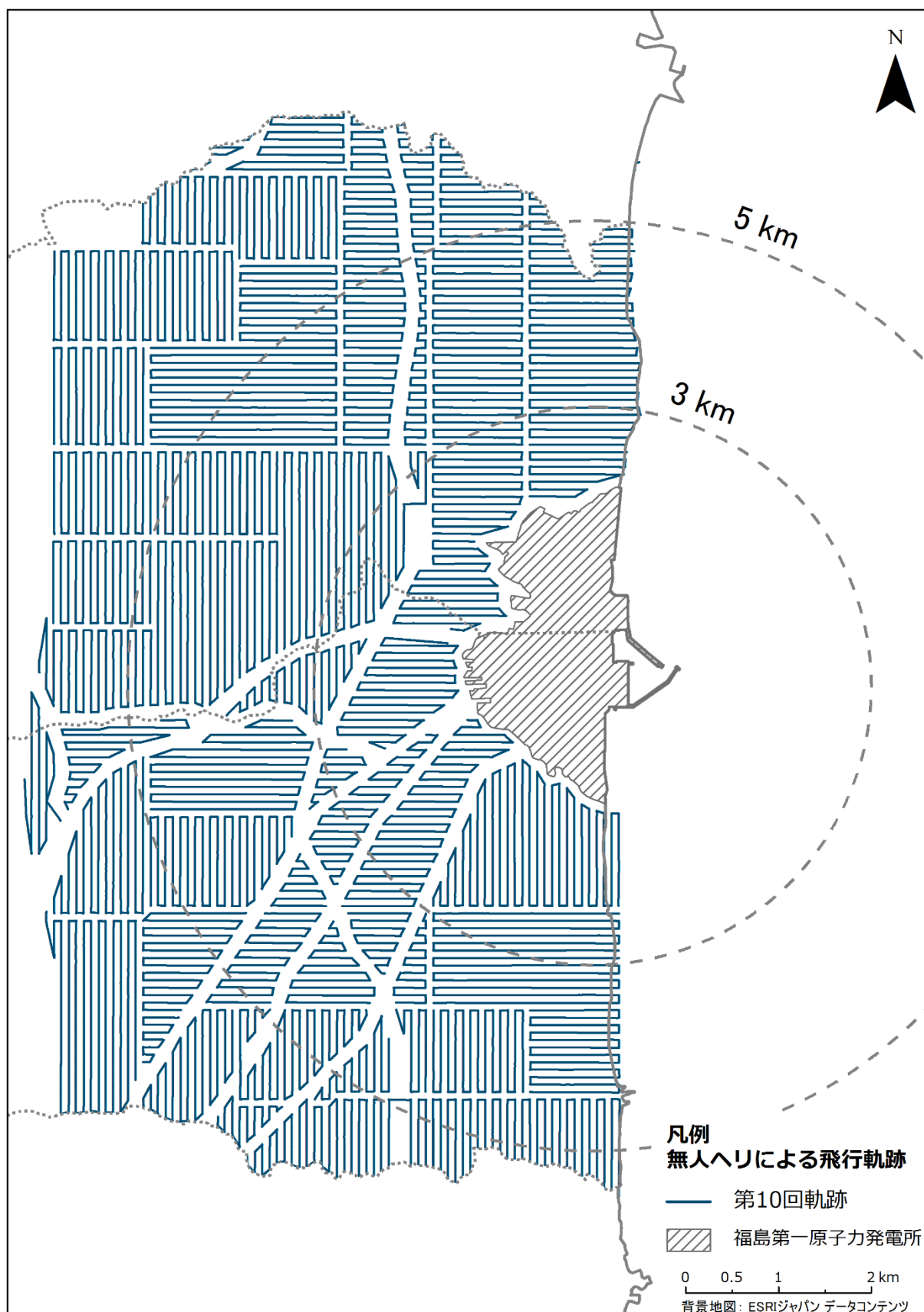


図 3-2 平成 30 年度無人ヘリサーベイの飛行軌跡
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ((c) Esri Japan)を使用。)

3.2.4. 無人ヘリ測定データの空間線量率への換算

上空で測定されたガンマ線計数率を空間線量率の値に換算するための係数を取得するために、測定地域内において比較的空間線量率が一定で平坦な場所に直径 200 m の円形のテストサイトを設定した。テストサイト内では、あらかじめ 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: $\mu\text{Sv/h /cps}$ ）を算出した。さらに、テストサイト上空を対地高度 10 m から 100 m まで 10 m ごとにホバリングし、各高度におけるガンマ線計数率を測定し、高度ごとのガンマ線計数率から対地高度とガンマ線計数率との関係式を求め、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 により測位した高度から国土地理院が作成した 10 m メッシュの数値標高モデル DEM (Digital Elevation Model) データ及びジオイド高（地球を仮想的に表した楕円体表面から、平均海面を仮想的に陸地へ延長した面までの高さ）を差し引くことにより求めた。

3.2.5. 空間線量率マップの作成

マップとして示すために、無人ヘリ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。

3.3. 調査結果

3.3.1. 空間線量率マップ

平成 30 年度実施した無人ヘリによる空間線量率マップを図 3-3 に示す。また、平成 30 年度の測定と過去第 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 3-4 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的減衰を考慮し、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。

3.3.2. 測定結果の妥当性の検証

結果の妥当性を検証するために、測定地点直下の地上で測定した結果と比較した。地上における空間線量率は NaI(Tl)シンチレーション式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及び式(2)に示したような 2 測定間の相対偏差を図 3-5 に示す。散布図を見ると良い相関関係（決定係数 $R^2=0.86$ ）を示しており、相対偏差の平均は 0 に近い。よって、平成 30 年度の結果は概ね地上の測定結果を再現できていたと考えられる。なお、 $1 \mu\text{Sv/h}$ 以下の低線量域において無人ヘリサーベイによる測定値が過大評価になる傾向があり、これにより相対偏差が 1 以上の範囲での頻度がやや大きい。この原因は、地上の測定ポイントが、除染等の理由で周辺の空間線量率と比較して局所的に低くなった場所を選択していた可能性が考えられる。今後、この不整合の理由については、歩行

サーベイ等による面的な測定結果と比較するなどの検討が必要である。

3.3.3. 平成 29 年度との比較

モニタリングした区域を 100 m メッシュに分割し、メッシュごとに平成 29 年度と平成 30 年度の空間線量率測定結果を比較した。散布図及び式(1)で定義した相対変化率を図 3-6 に示す。散布図は良い相関関係（決定係数 $R^2=0.95$ ）を示している。また、平成 30 年度は平成 29 年度から 16%減少したことが分かる。

図 3-7 に平成 29 年度の空間線量率測定結果と平成 30 年度の空間線量率の測定結果の比をマップにして示す。福島第一原発周辺の地域を中心に顕著に空間線量率の減少が確認できる場所があることが分かった。この要因を調査した結果を図 3-8 に示す。ほとんどの地域は、現在、建設中である中間貯蔵施設のエリアと一致しており、施設建設における造成作業や除染による土壌変化の影響が表れているものと考えられる。

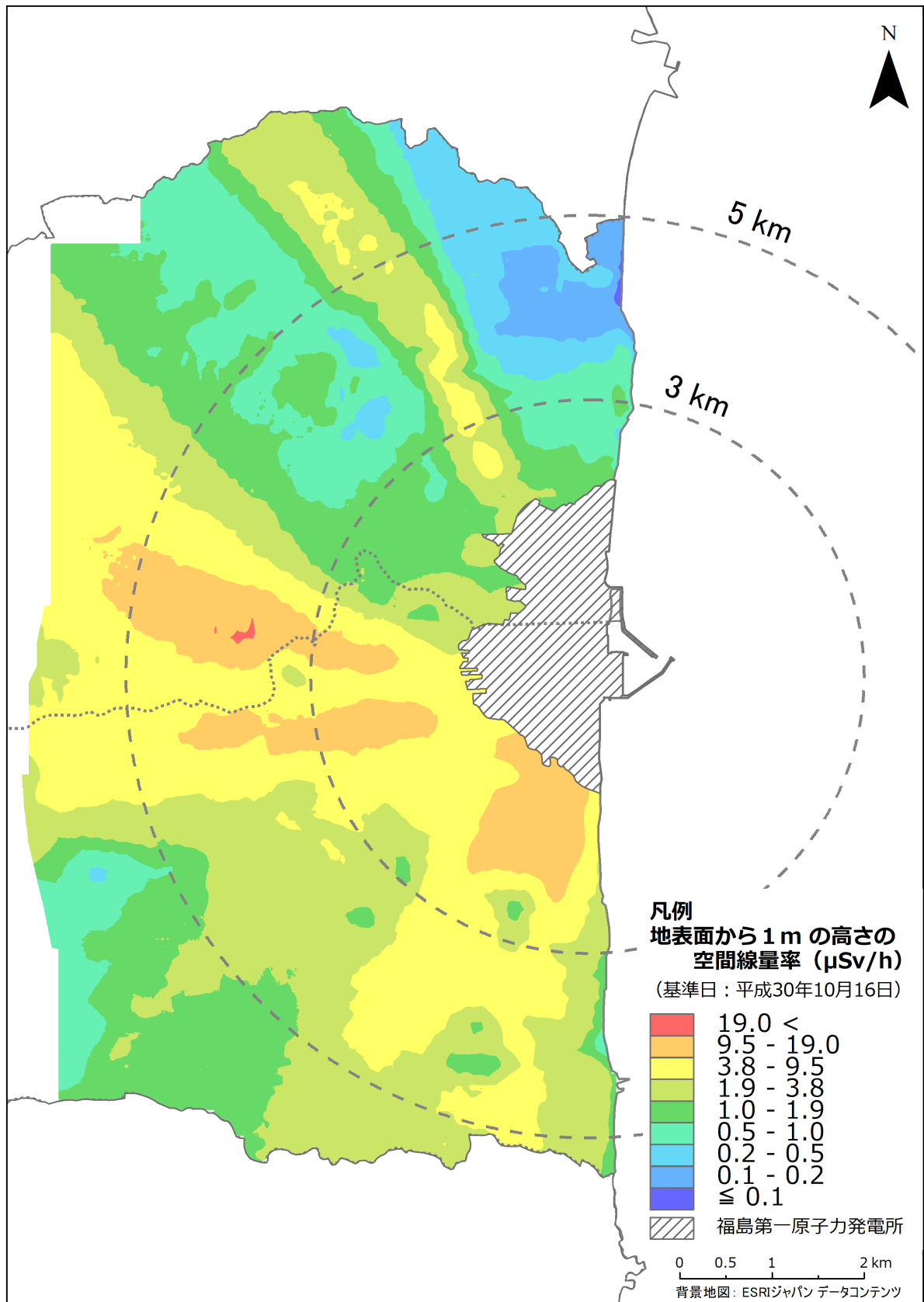


図 3-3 平成 30 年度無人ヘリサーベイによる空間線量率測定結果

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

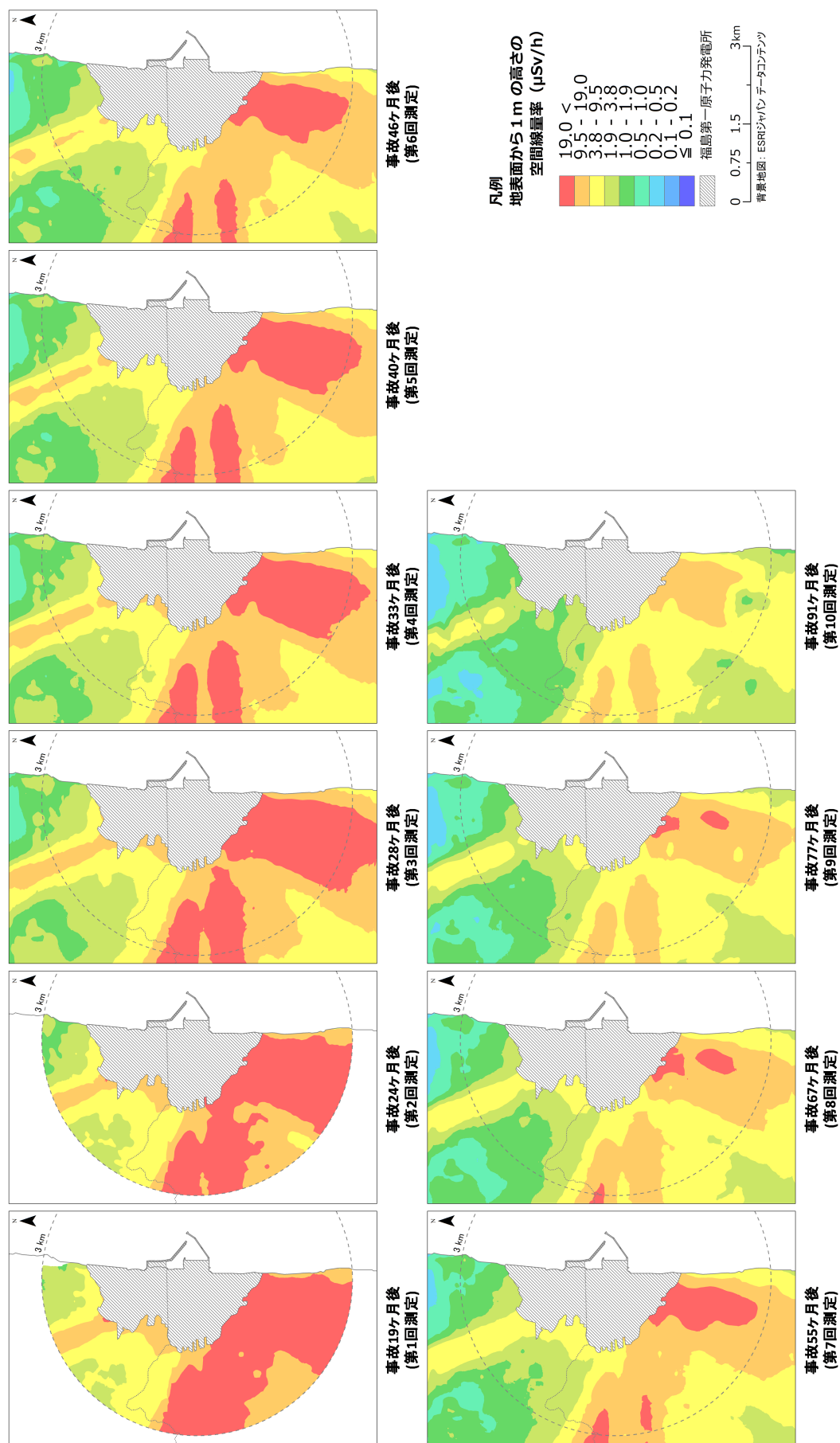


図 3-4 平成 24 年度以降の無人ヘリサーベイによる空間線量率マップの変化
(天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ(c) Esri Japan)を使用。)

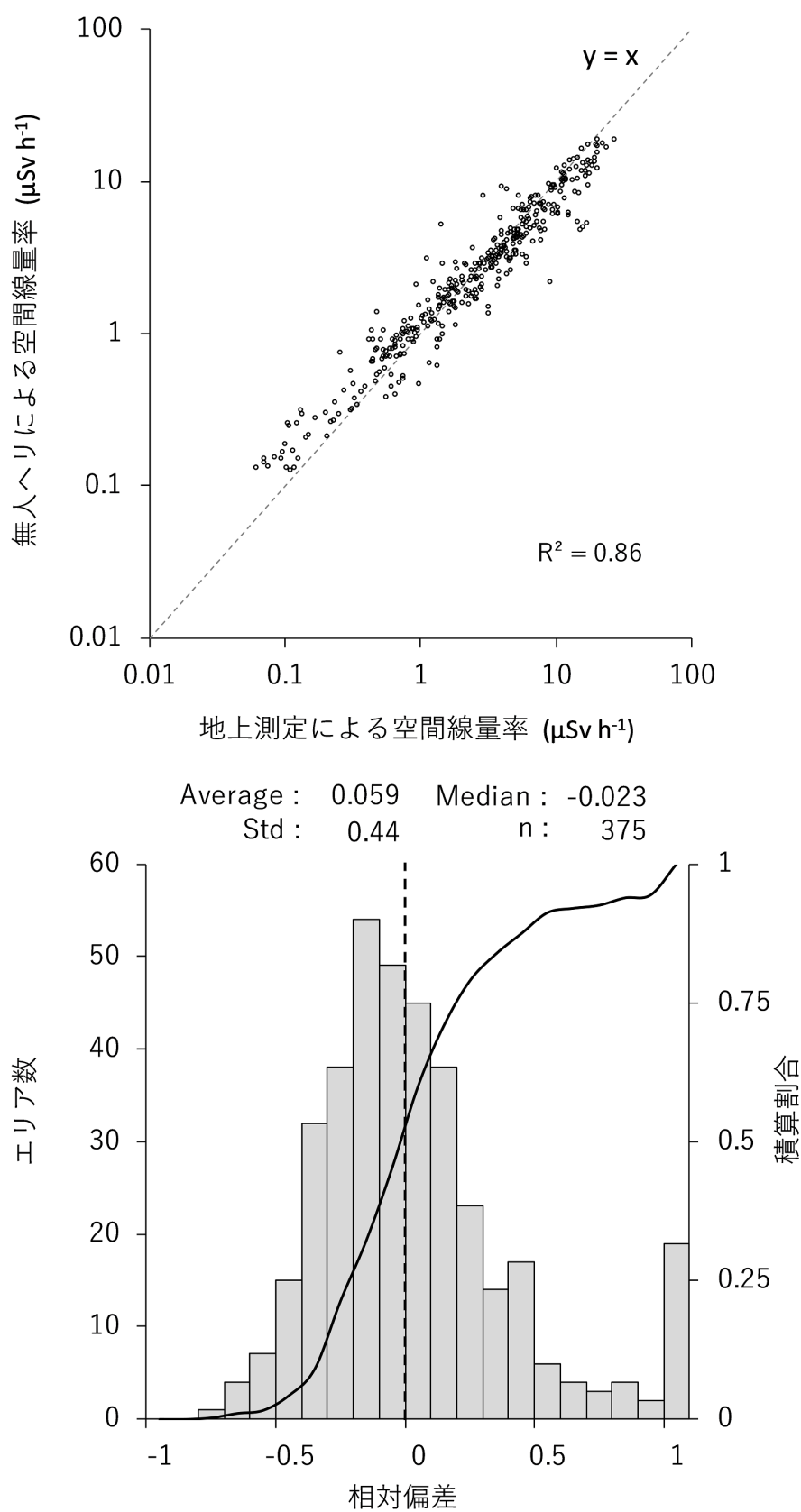


図 3-5 平成 30 年度の無人ヘリサーベイと地上測定による空間線量率の比較

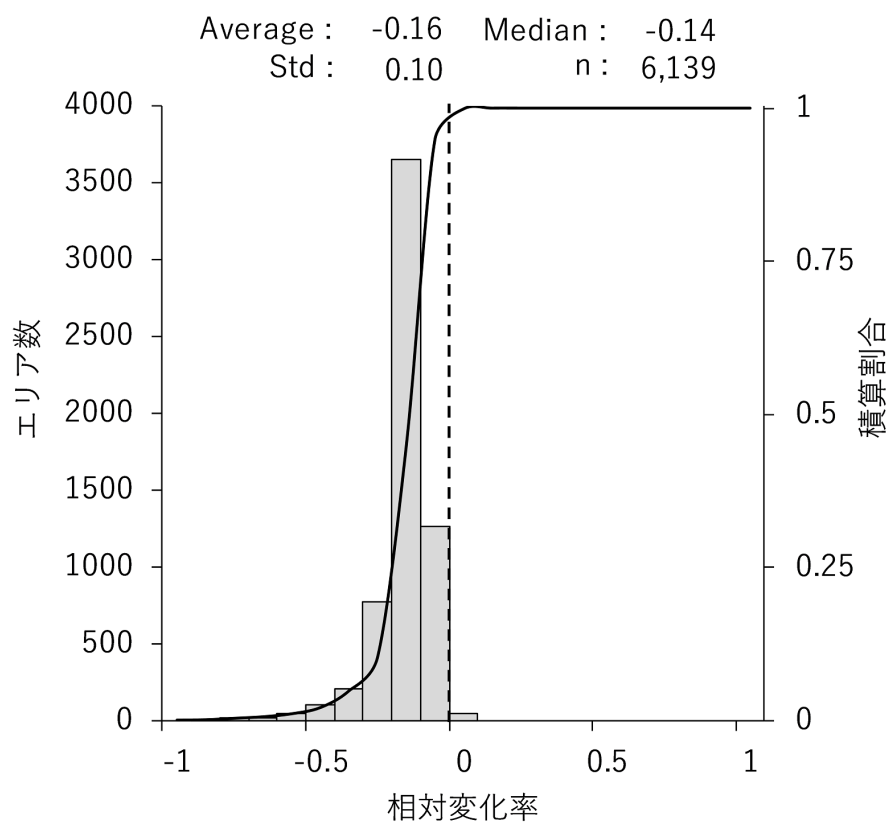
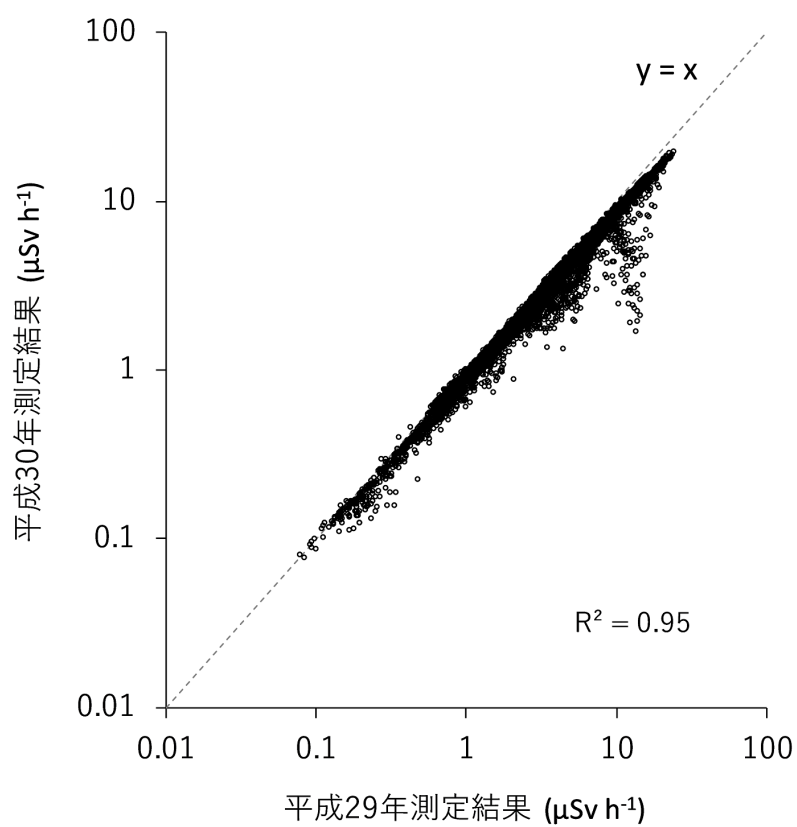


図 3-6 平成 29 年度と平成 30 年度の無人ヘリサーベイによる空間線量率測定結果の比較

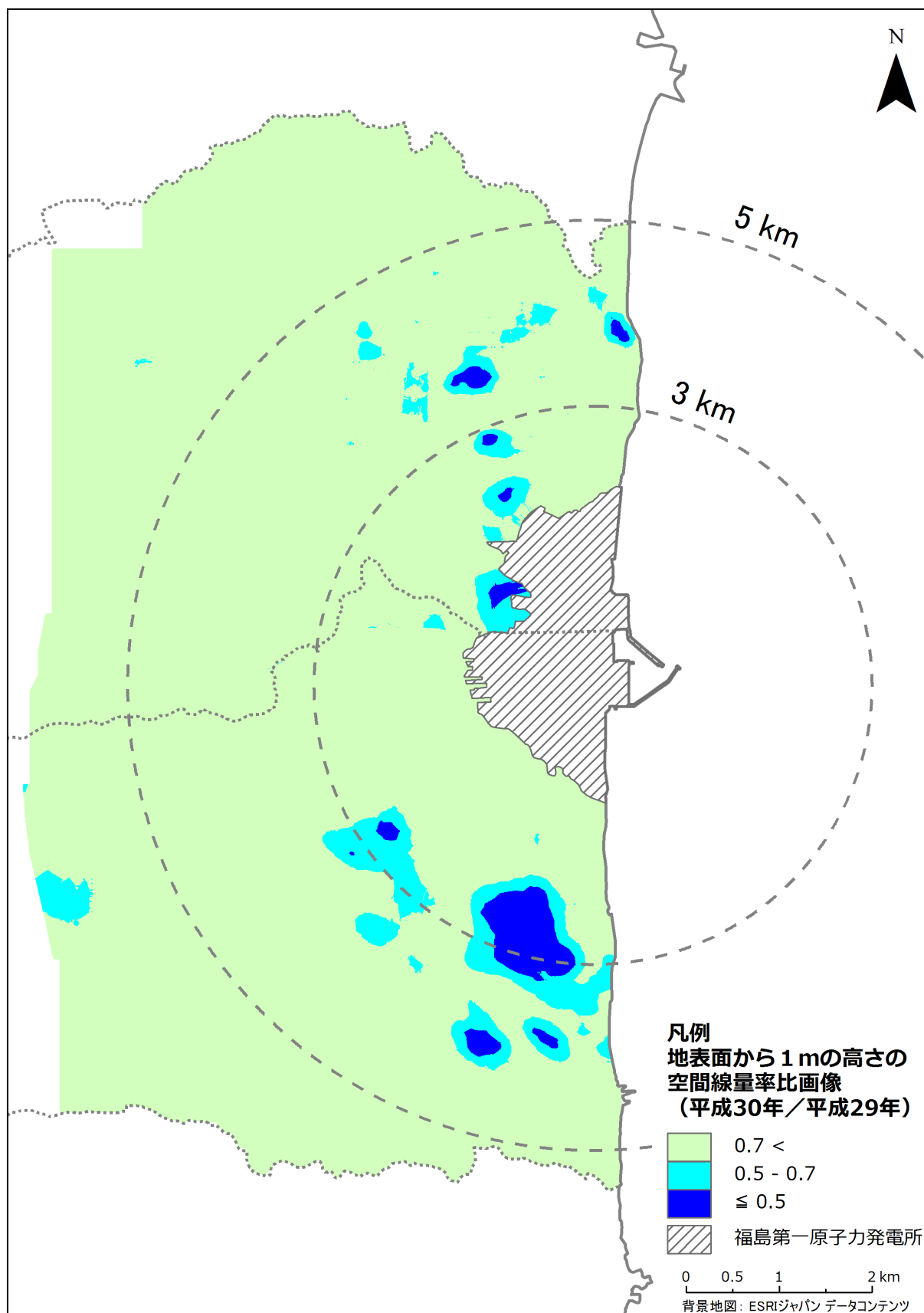


図 3-7 平成 29 年度に対する平成 30 年度の空間線量率測定結果の比の分布
 (背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ((c) Esri Japan)を使用。)

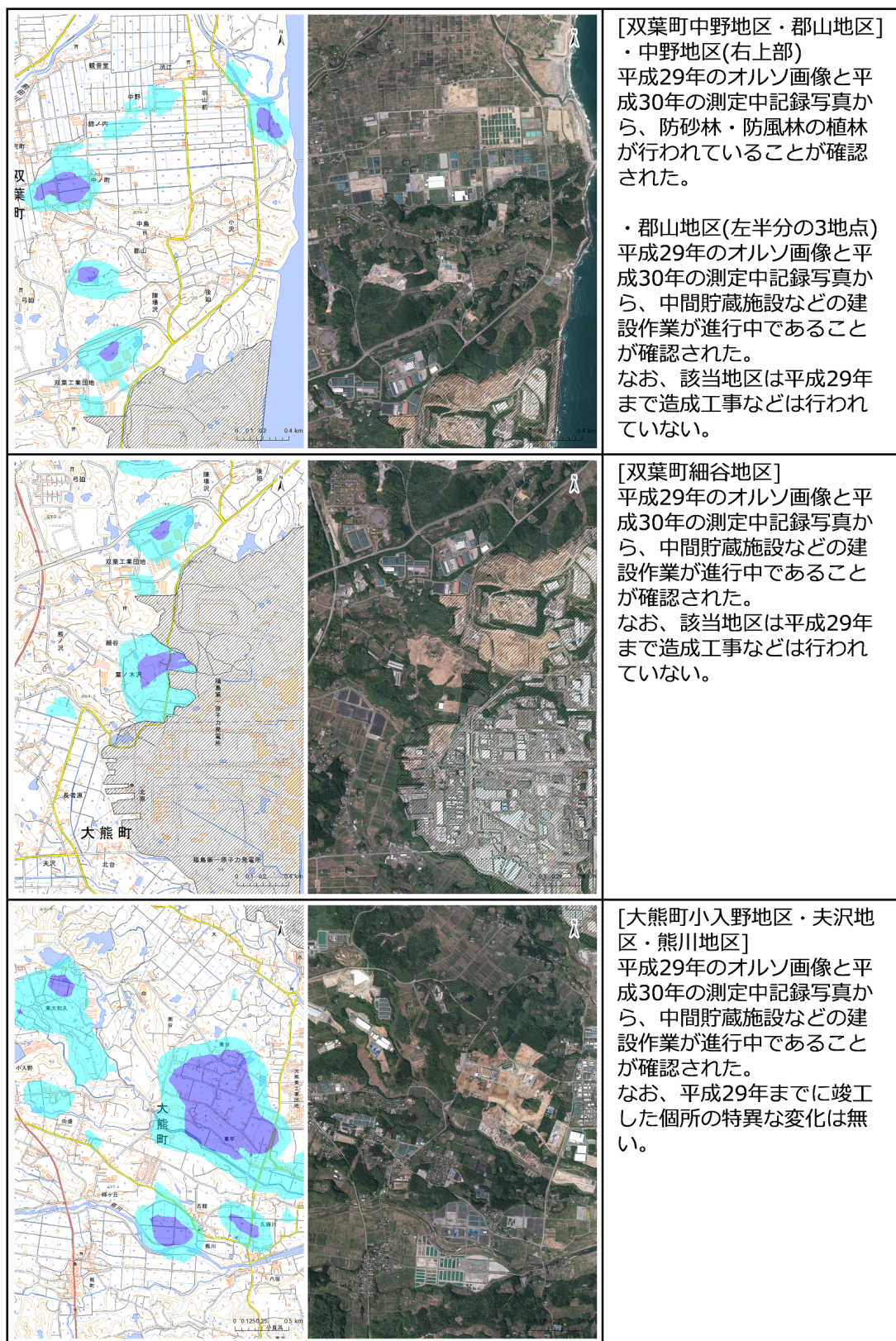


図 3-8 平成 29 年度から平成 30 年度にかけて空間線量率が顕著に減少した場所の要因調査
(図は、左から地理院タイルに線量マップを追記して掲載、国土地理院撮影の空中写真(平成 30 年撮影)。オルソ画像とは、写真上の像の位置ズレをなくし空中写真を地図と同じく、真上から見たような傾きのない、正しい大きさと位置に表示される画像に変換したものである。)

3.3.4. 天然放射性核種による空間線量率マップ

無人ヘリサーベイではガンマ線スペクトルを測定できるため、平成 25 年度に確立したガンマ線スペクトル情報から放射性核種ごとに評価する手法⁸⁾を用いて天然の放射性核種による空間線量率の評価が可能である。本手法での空間線量率への換算には、重量緩衝深度 β_{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。図 3-9 に天然の放射性核種による空気カーマ率の分布を示す。図より、天然の放射性核種による空気カーマ率は、 $0.03\sim0.06\text{ }\mu\text{Gy/h}$ 程度であることが分かった。

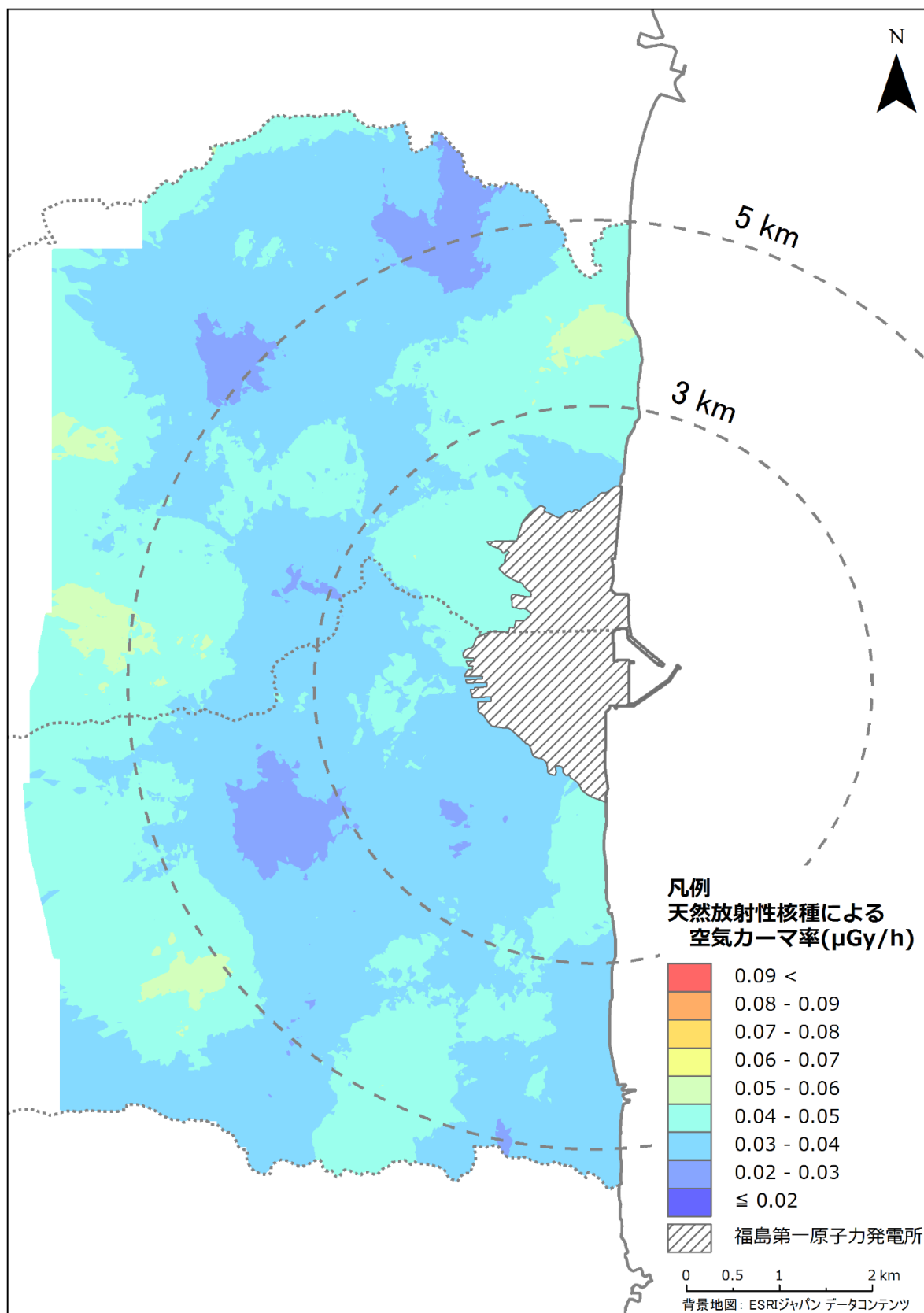


図 3-9 平成 30 年度無人ヘリサーベイによる天然放射性核種による空気カーマ率の分布測定結果
(背景地図は、ESRI ジャパン データ コンテンツ((c) Esri Japan)を使用。)