3.　無人ヘリによる発電所周辺の空間線量率測定

3.1.　調査目的

原子力機構では、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。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。なお、過去 9 回の測定におけるデータの解析から、無人ヘリサーベイで確認した空間線量率の減衰傾向は、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。

ここでは、令和元年度に 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、令和元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：令和元年 6 月 13 日～12 月 1 日

フライト範囲: 74.8 km^2

合計測定距離：890 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 $LaBr_3$ (Ce)（Lanthanum Bromide）シンチレーション検出器（1.5” Φ×1.5” ×3 本）を用いた（図 3-1 参照)。

図 3-1 無人ヘリの仕様

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。

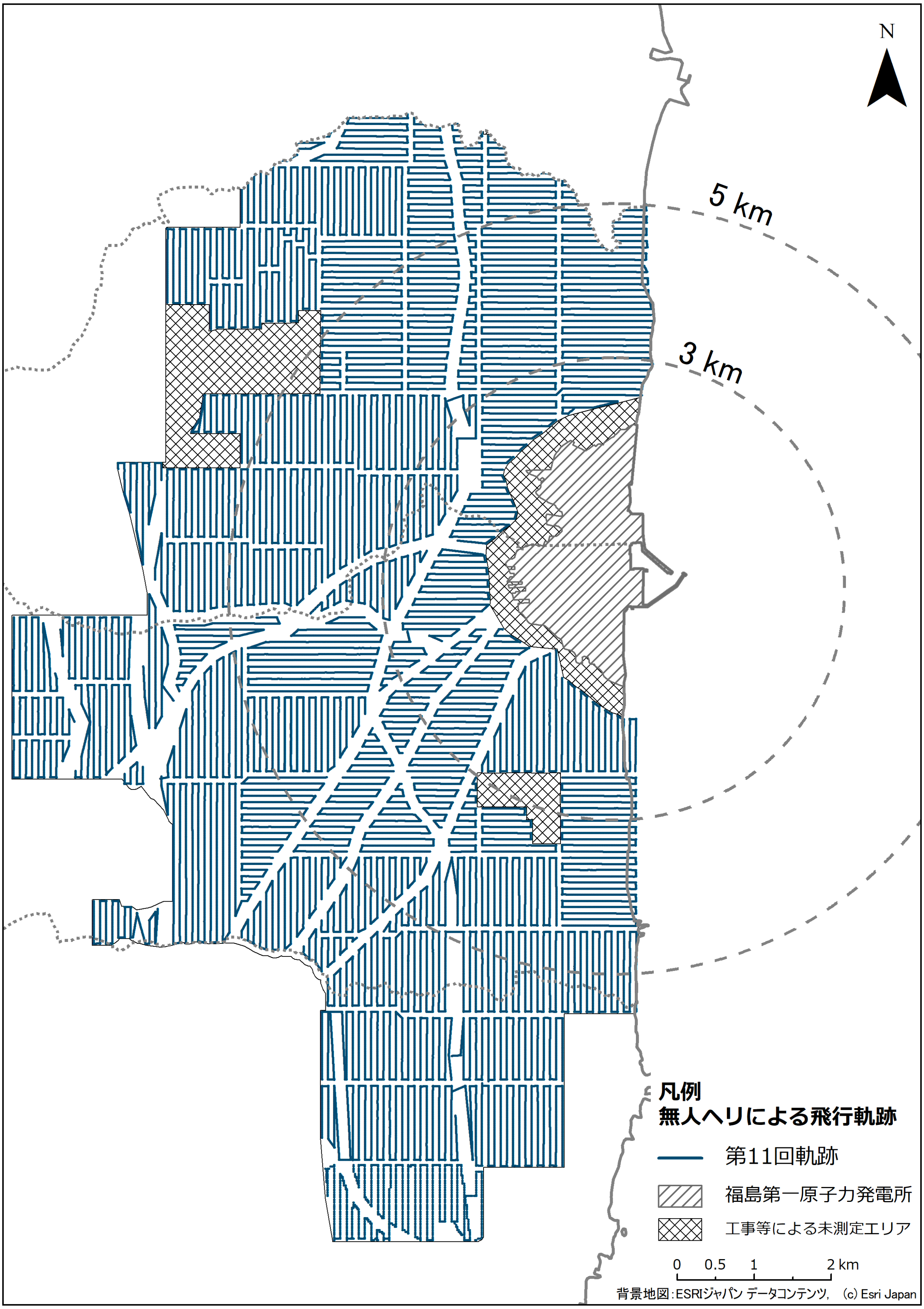


図 3-2 令和元年度無人ヘリサーベイの飛行軌跡

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(Tl)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: μSv/h /cps ）を算出した。さらに、テストサイト上空を対地高度 10 m から 100 m まで 10 m ごとにホバリングし、各高度におけるガンマ線計数率を測定し、高度ごとのガンマ線計数率から対地高度とガンマ線計数率との関係式を求め、高度補正係数（AF: Attenuation Factor: m^{-1}）を算出した。

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（μSv/h）に換算した。なお、対地高度は GPS により測位した高度から国土地理院が作成した 10 m メッシュの数値標高モデル DEM（Digital Elevation Model）データ及びジオイド高（地球を仮想的に表した楕円体表面から、平均海面を仮想的に陸地へ延長した面までの高さ）を差し引くことにより求めた。

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

令和元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、令和元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、第 2 章の定点サーベイによる測定結果とした。無人ヘリの測定結果と同地点における地上での測定結果を比較した散布図及び式(2)に示したような 2 測定間の相対偏差を図 3-5 に示す。散布図を見ると良い相関関係（決定係数 R^2=0.71）を示しており、相対偏差の平均は 0 に近い。よって、令和元年度の結果は概ね地上の測定結果を再現できていたと考えられる。なお、1 μSv/h 以下の低線量域において無人ヘリサーベイによる測定値が過大評価になる傾向があり、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30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30年度と令和元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、令和元年度は平成30年度から14%減少したことが分かる。

図 3-7に平成30年度の空間線量率測定結果と令和元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影響が表れているものと考えられる。

3.3.4. 天然放射性核種による空間線量率マップ

無人ヘリサーベイではガンマ線スペクトルを測定できるため、平成25年度に確立したガンマ線スペクトル情報から放射性核種ごとに評価する手法[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節に示す結果からβ_{eff}=3.67 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 3-9より、天然の放射性核種による空気カーマ率は、0.03～0.06 μGy/h程度であることが分かった。

3.3.5. 福島第一原発から約5 km圏内の放射性セシウム沈着量評価

無人ヘリによる上空からの放射線測定結果を基に福島第一原発周辺（半径5 km程度）の放射性セシウム沈着量を求めた。沈着量評価には、平成25年度に確立したガンマ線スペクトル情報から放射性核種ごとに評価する手法[8]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β_{eff}の設定が必要であるが、4.1.節に示す結果からβ_{eff}=3.67 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 3-10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^{2}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^{2}以下のエリアも存在する。

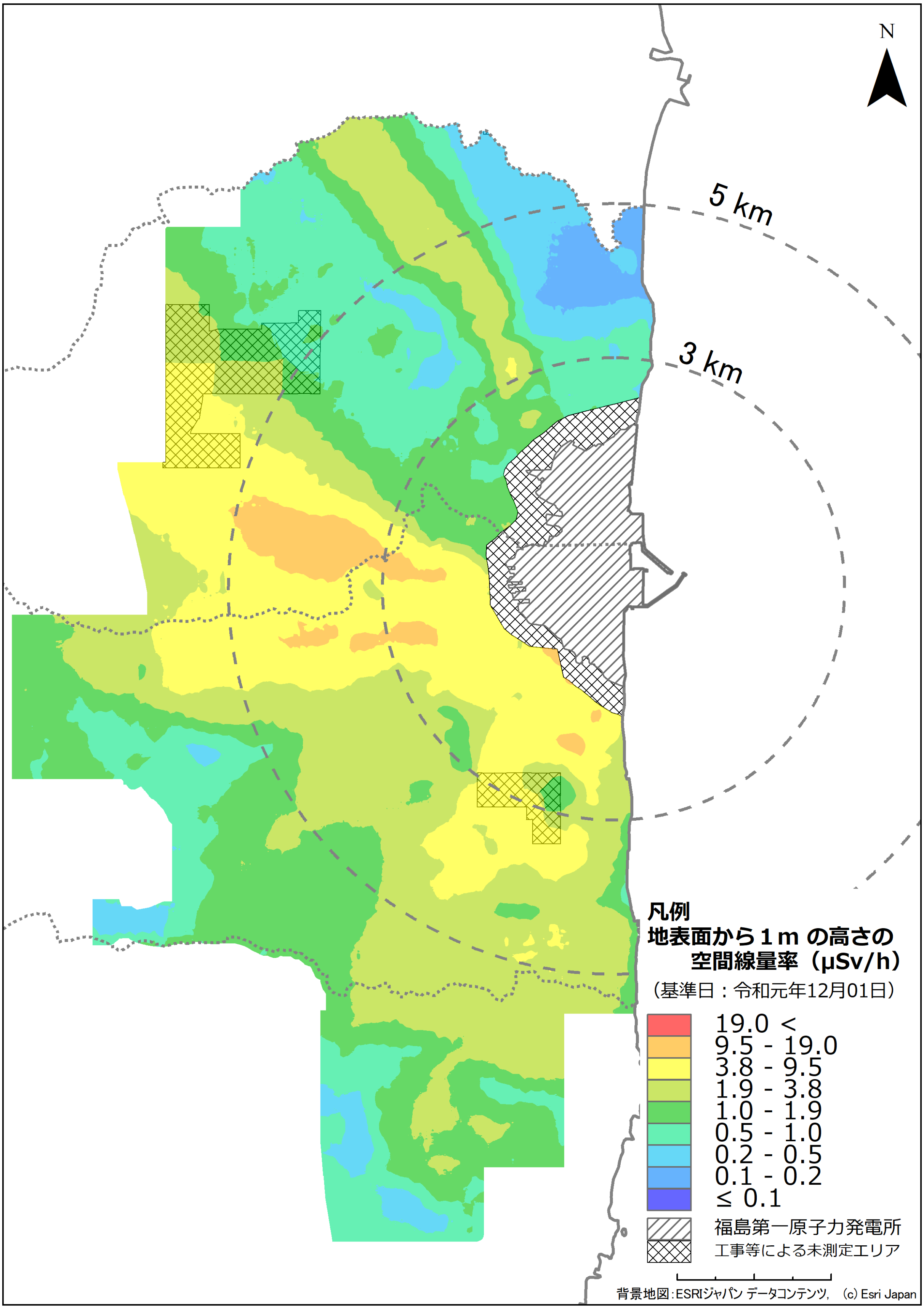


図 3-3 令和元年度無人ヘリサーベイによる空間線量率測定結果

（天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。）

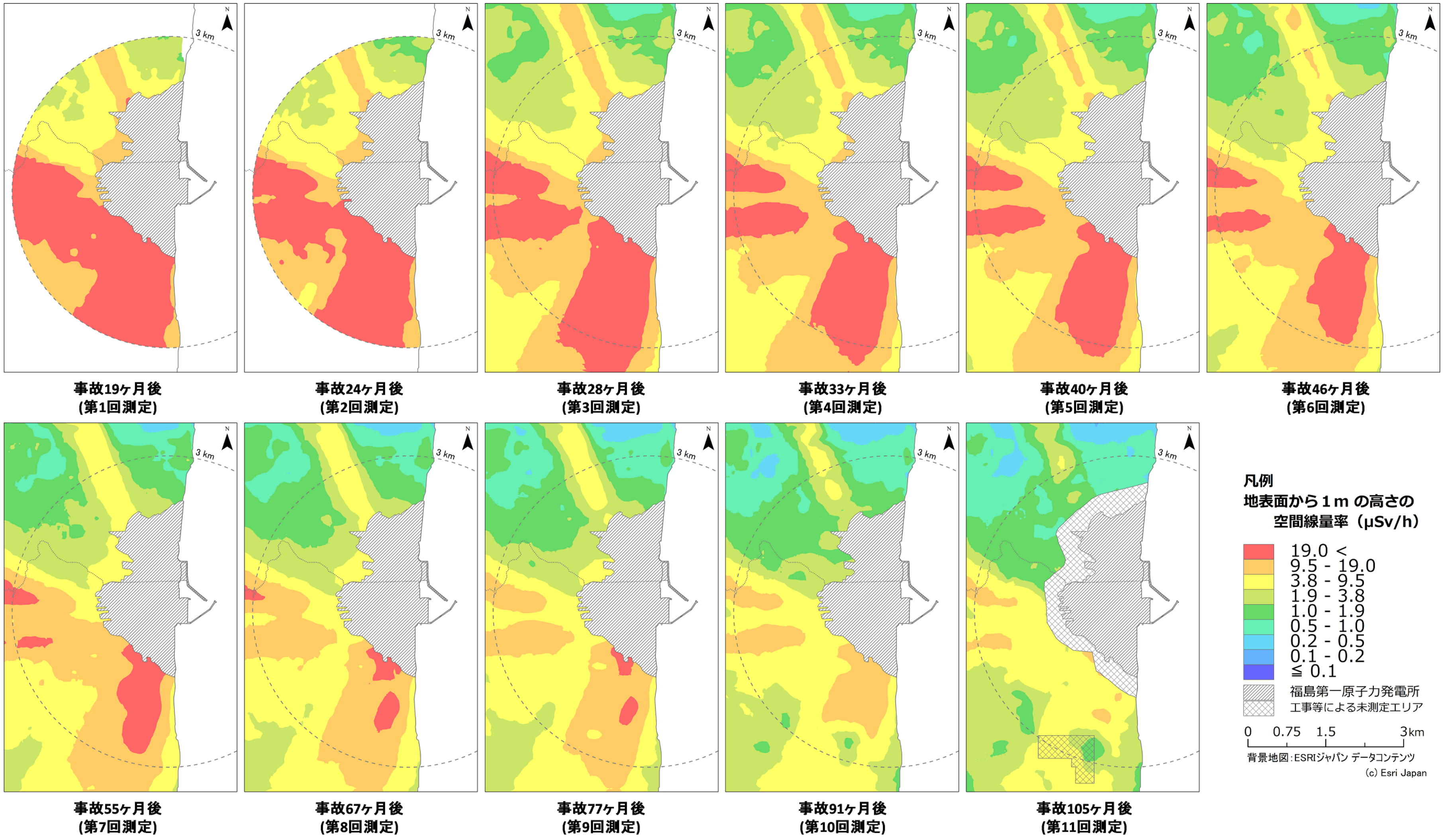
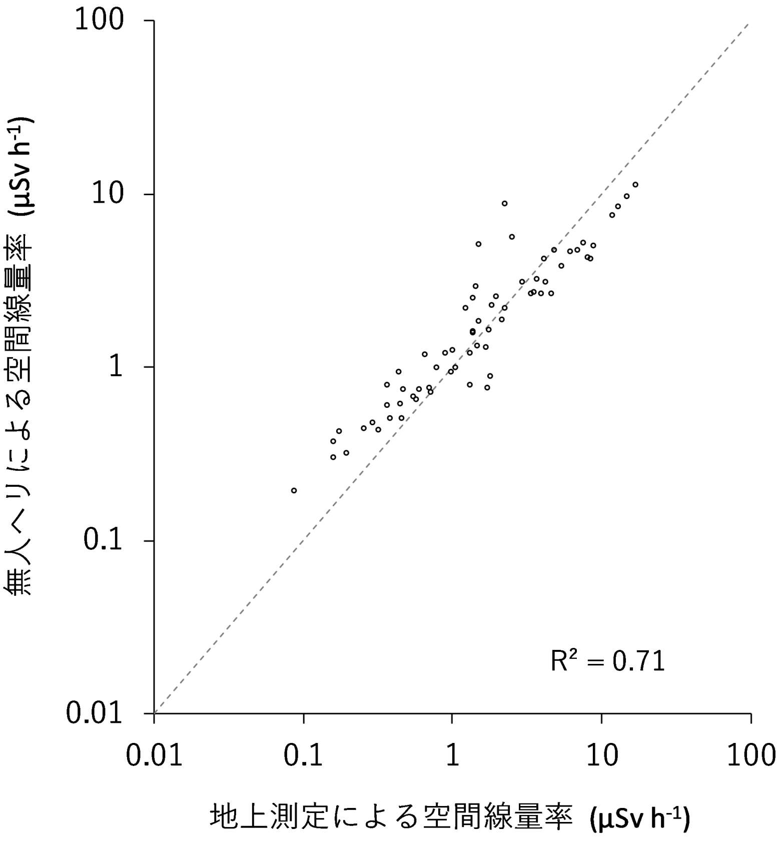


図 3-4　平成 24 年度以降の無人ヘリサーベイによる空間線量率マップの変化

（天然放射性核種による空間線量率寄与を含んでいる。）



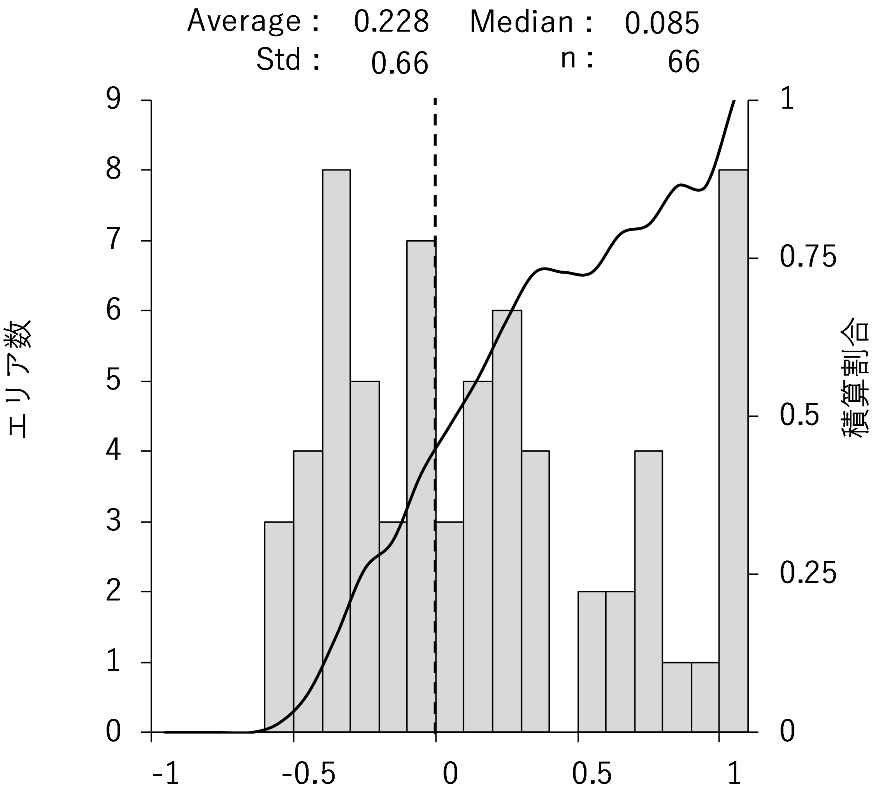
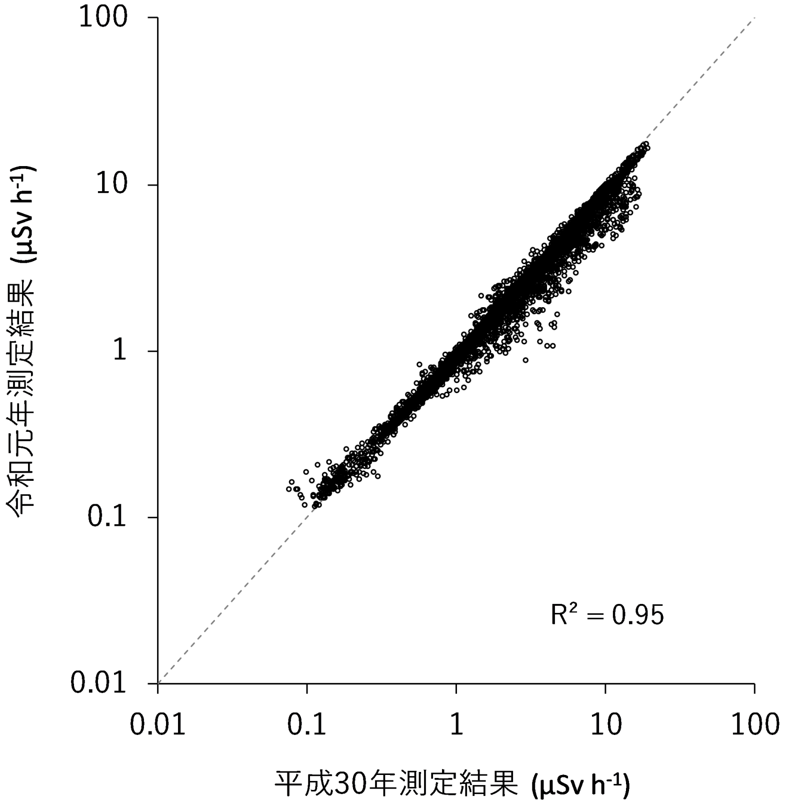


図 3-5 令和元年度の無人ヘリサーベイと地上測定による空間線量率の比較



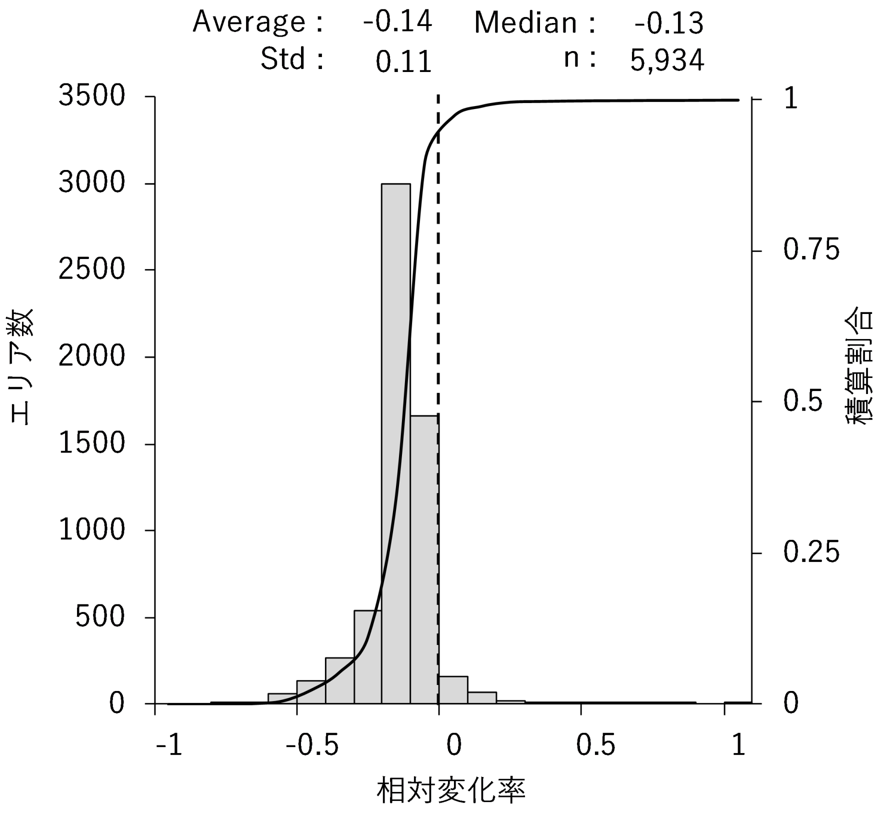


図 3-6 平成 30 年度と令和元年度の無人ヘリサーベイによる空間線量率測定結果の比較

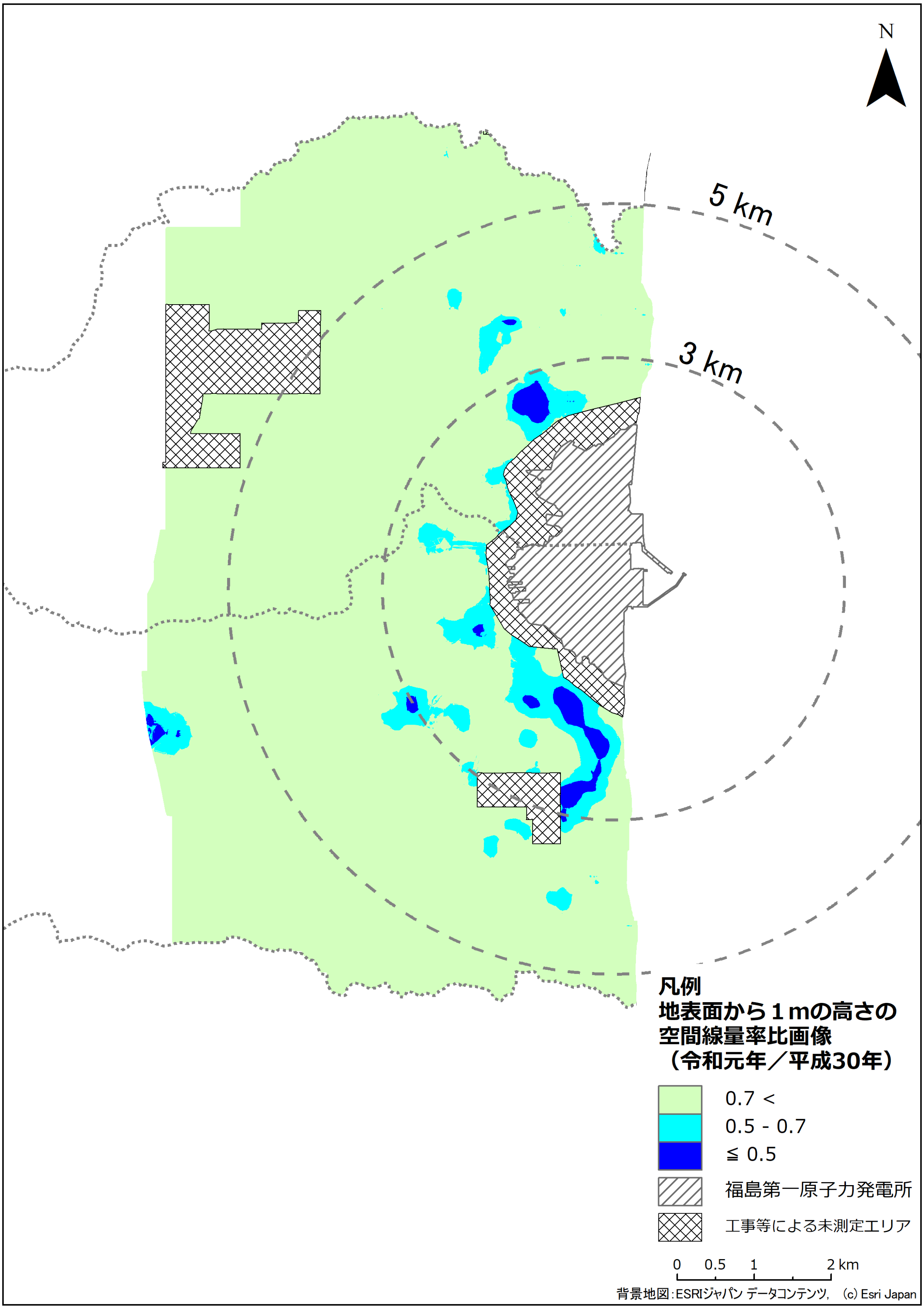


図 3-7 平成 30 年度に対する令和元年度の無人ヘリサーベイによる空間線量率測定結果の比の分布

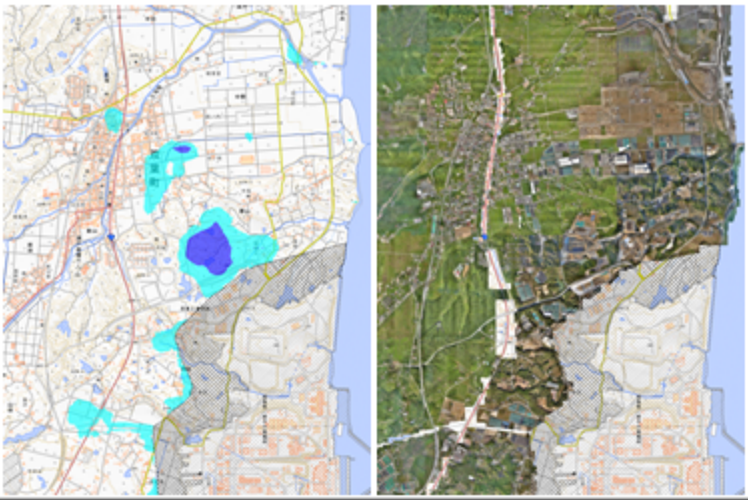
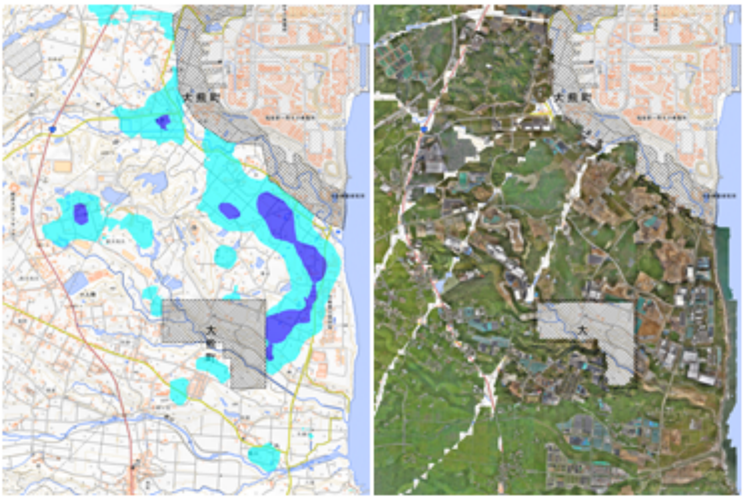
	[双葉町福島第一原発周辺] 中間貯蔵施設などの造成・建設作業が進行中であることが確認された。 なお、著しく減少した場所では平成30年には造成工事などは行われていない。
	[大熊町福島第一原発周辺] 中間貯蔵施設などの造成・建設作業が進行中であることが確認された。 なお、著しく減少した場所では平成30年には造成工事などは行われていない。
	[大熊町下野上地区] 当地区は復興再生拠点エリアであり、土壌表面を除去する除染作業がエリア内で進行中である。 平成30年までは県道166号線付近が主であったが、今回は常磐道付近からさらに西側へ作業が進行している。

図 3-8 平成 30 年度から令和元年度にかけて空間線量率が顕著に減少した場所の要因調査

（左から地理院タイルに線量マップ（令和元年度/平成 30 年度）を追記して掲載、地理院タイルに測定中に撮影した写真からオルソ画像を作成して掲載。オルソ画像とは、地図と同じく写真上の像の位置ズレをなくし、真上から見たような傾きのない正しい大きさと位置に表示される画像に変換したものである。）

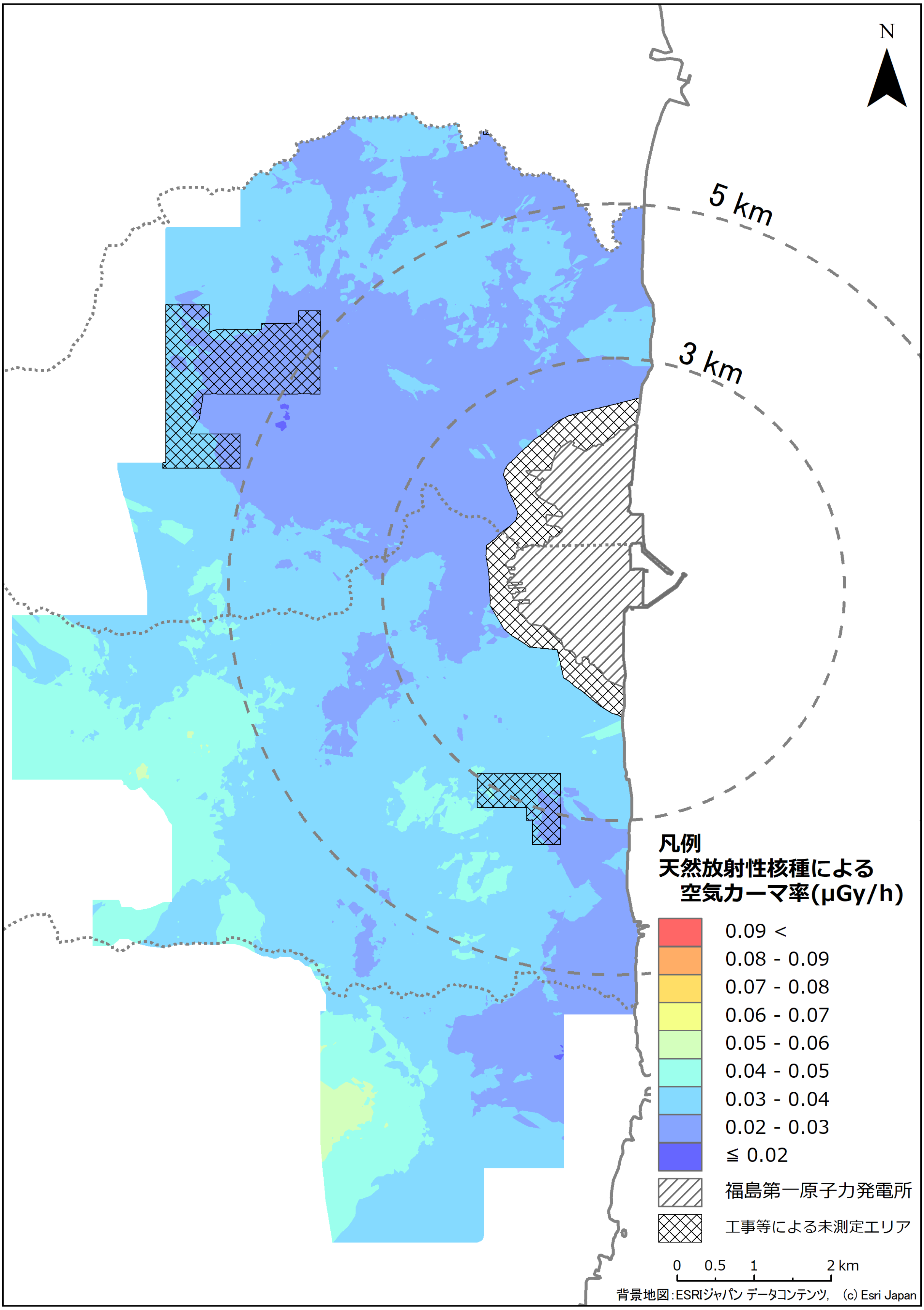


図 3-9 令和元年度無人ヘリサーベイによる天然放射性核種による空気カーマ率の分布測定結果

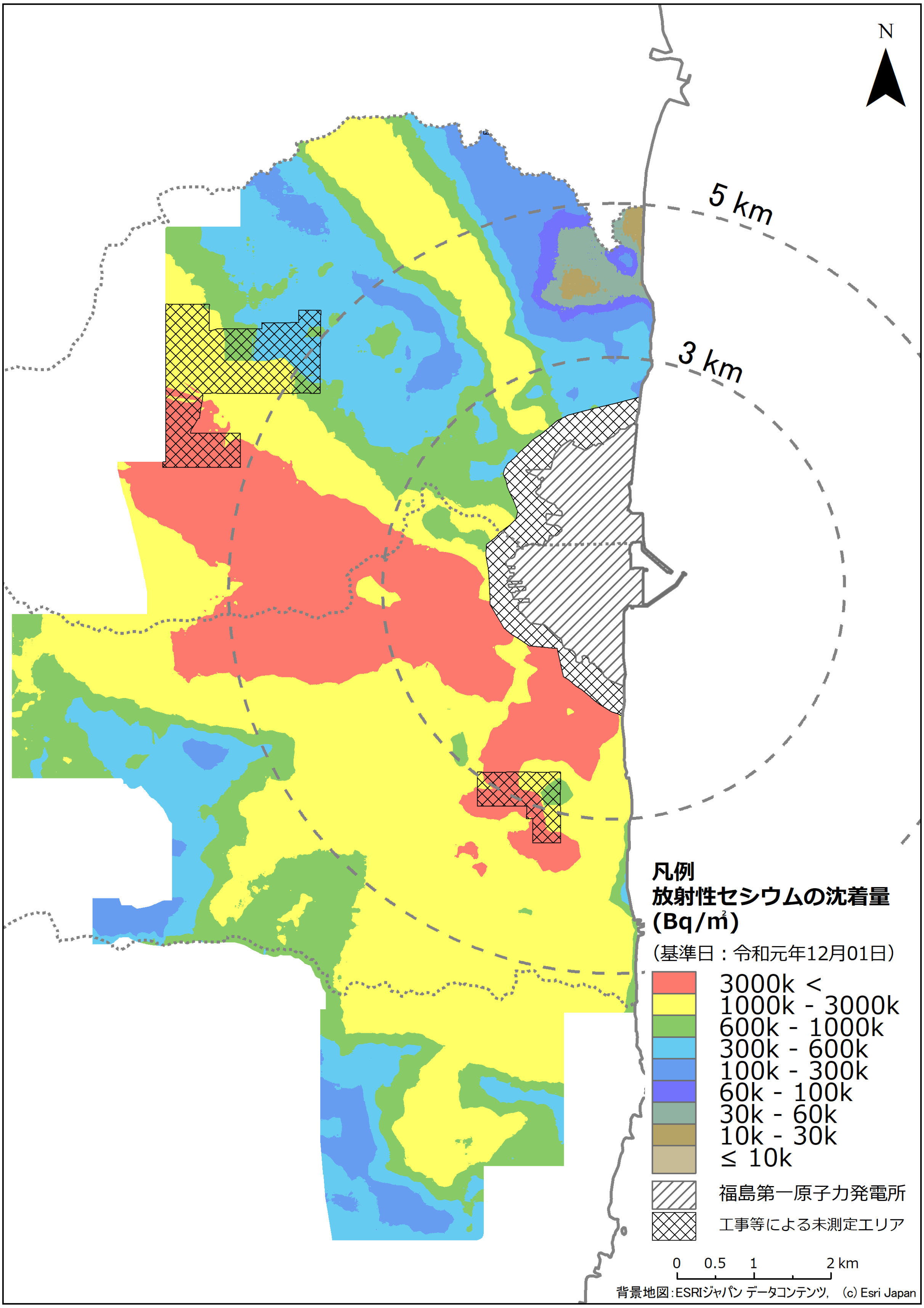


図 3-10 令和元年度無人ヘリサーベイによる放射性セシウム沈着量分布マップ