

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

鳥居 建男（原子力機構）

1. 調査目的

福島第一原発から 3 km 圏内については、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い。また、地上での測定結果も限られている。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、放射線分布の位置分解能は高い。

そこで、平成 25 年度は、航空機モニタリングの結果を参考として、空間線量率が比較的高い範囲を中心に測定範囲を広げ、福島第一原発から概ね 5 km の範囲を年 2 回モニタリングし、空間線量率や放射性セシウムの沈着量を測定した。

2. 調査内容

(1) 調査場所・期間

無人ヘリによる福島第一原発周辺のモニタリングは以下の 4 回実施した。

- 第 1 回モニタリング
福島第一原発から 3 km 圏内
平成 24 年 8 月 30 日～平成 24 年 10 月 20 日
- 第 2 回モニタリング
第 1 回モニタリングと同じ範囲
平成 25 年 1 月 27 日～平成 25 年 3 月 20 日
- 第 3 回モニタリング
福島第一原発から概ね 5 km 圏内（図-1 参照）
平成 25 年 6 月 6 日～平成 25 年 7 月 31 日
- 第 4 回モニタリング
第 3 回モニタリングと同一の範囲（図-1 参照）
平成 25 年 11 月 19 日～平成 26 年 1 月 7 日

各箇所の測定結果は測定日が異なるため、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半減期を考慮し、各モニタリングの最終日に換算した。

(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の全計数率と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)（ランタンブロマイド）シンチレーション検出器（1.5" Φ × 1.5" × 3 本）を用いた（図-2 参照）。

(3) 無人ヘリによる測定でのデータの取得方法

第3回モニタリングと第4回モニタリングのデータ取得のためのフライト条件は、結果の比較のため、全く同じとした。無人ヘリの飛行高度は、安全面及びデータの信頼性を考慮し、対地高度で80m程度とした。上空で測定される放射線は、無人ヘリ下部の半径80m程度の円内のガンマ線量を平均化したものである。無人ヘリの軌跡幅（測線間隔）は80m、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秒毎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DGPS¹（差分全球測位システム：Differential Global Positioning System）による位置情報である。

(4) 無人ヘリで取得された測定データの地上1m高さでの空間線量率への換算

上空で測定されたガンマ線計数率を地上1m高さでの空間線量率の値に換算するための係数を算出するため、警戒区域内において空間線量率の勾配が小さく、平坦な場所をテストサイトとして設定し、NaIサーベイメータを用いて、テストサイトを中心とした半径100mの円内における地上から1m高さの空間線量率の平均値を求めた。次に、テストサイト上空の対地高度80m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上述したテストサイト周辺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 (cps/ μ Sv/h)を算出した。その後、テストサイト上空の対地高度10mから100mまでを10m毎にホバリングし、各高度におけるガンマ線計数率を測定した。測定された高度毎のガンマ線計数率を基に、対地高度とガンマ線計数率との関係式を求め、空気によるガンマ線計数率の減弱係数 μ を算出した。

最後に、実際のフライトで取得されたガンマ線計数率を上述の空間線量率換算係数CDから空間線量率 (μ Sv/h)に換算するとともに、対地高度と空気によるガンマ線計数率の減弱係数により、高度補正を行った。なお、対地高度はGPSにより測位した海拔高度から国土地理院が作成した10mメッシュの数値標高モデルDEM (Digital Elevation Model)のデータを差し引くことにより求めた。

(5) 無人ヘリで取得された測定データの放射性セシウムの沈着量への換算

警戒区域内で原子力機構が実施したin-situ測定の結果を基に、天然放射性核種（カリウム40、ウラン系列、トリウム系列）による空間線量率の平均値 (43 ± 20 nSv/h: 誤差 = 標準偏差 σ)を評価し、前項で求めた空間線量率からこの値を差し引くことにより、放射性セシウム（セシウム134、137）のみによる空間線量率を算出した。その後、文部科学省「ゲルマニウム半導体検出器を用いたin-situ測定法」に記載されている緩衝深度 ($\beta = 1.0$ g/cm²)²の場合の地表面における放射性セシウムの沈着量と地上1m高さでの空間線量率の換算係数を使用し、地表面におけるセシウム134及びセシウム137の沈着量を算出した。

(6) 無人ヘリを活用した空間線量率及び放射性セシウムの沈着量を記したマップの作成

測定されていない地域の空間線量率及び放射性セシウムの沈着量の値は、各測定箇所

¹ 位置の判っている基準局が発信する電波を利用して、GPSの計測結果の誤差を修正して位置（決め）の精度を高める技術。

² 過去の調査から、福島第一原発から80km圏内では、緩衝深度(β)が平均1.8 g/cm²であることが確認されているが、森林や田畑等も測定範囲に含む無人ヘリモニタリングの場合は単純ではない。今回は、過去の結果との比較するため、文部科学省「ゲルマニウム半導体検出器を用いたin-situ測定法」(p.83-84)に従い、 $\beta = 1.0$ を使用した。

空間線量率及び放射性セシウムの沈着量の測定結果を基に、内挿法（クリギング法）を用いて内挿補間した。

(7) 不感時間の補正による過去の測定結果の再解析

無人ヘリを用いた放射線測定の不感時間について、照射装置を用いて評価したところ 1.8-2.0 μ s 程度の不感時間があることが分かった。数え落としの補正は $n=r/(1+rt)$ で行った。ここで、n: 観測計数率、r: 真の計数率、t: 不感時間である。不感時間による数え落としと地上値に換算した空間線量率の関係を図-3 に示す。

図-3 に示すように、平成 24 年度の結果は、20 μ Sv/h 以上の区域において 8%以上低く評価していた。そこで、今回、不感時間を補正して、再解析を行いマップ化した。補正前及び補正後のマップの変化について図-4 に示す。

3. 結果と考察

第 3 回及び第 4 回モニタリングの結果を、図-5 に空間線量率、図-6 にセシウム 137、セシウム 134 の沈着量マップとして示す。比較的高い空間放射線量率と放射性セシウムの沈着が、北西、西北西、西、南方向に広がっていることが分かる。

(1) 妥当性の検証

これらの結果の妥当性を検証するために、測定地点下の地上で測定した結果と比較した。地上における空間放射線量率は NaI サーベイメータで、放射性セシウムの沈着量は in-situ 測定にて測定した。この測定値を比較した結果の散布図を図-7 に示す。散布図は、0.5~2.0 の範囲でばらついている。地上での測定は人間が測定するため、測定の範囲が検出器を中心とした狭い範囲であるのに対し、無人ヘリは対地高度 80 m の高さから測定するので、直径 160 m の円の平均値となる。よって、線量率の分布が大きい場所での測定値は必ずしも一致しないと考えられるが、散布図を見ると傾きは 1 付近であることから、無人ヘリの結果は概ね地上の測定結果を再現できていたと考える。

(2) 過去の測定データとの比較

今回の測定と過去の測定結果のマップを図-8 に示す。ここでは、各モニタリング日の最終日に減衰補正しているが、線量の高い暖色系のエリアが小さくなっている。

今回の測定と過去の測定結果を比較した散布図及び相対減衰率を図-9~図-11 に示す。相対減衰率のヒストグラムはガウス分布に近い。

また、モニタリング間の結果を比較するために、モニタリング区域を 5 m メッシュに分割し、第 1 回モニタリングとの相対減衰率を算出した。図-12 に、相対減衰率の平均値と事故からの経過日数の関係及び物理半減期による線量率の減少を示す。このように、経過日数が長くなるにつれて、物理半減期による減少よりも無人ヘリによる実測値は減少していた。

(3) 航空機モニタリングによる測定結果との比較

事故直後より、有人ヘリを用いた航空機モニタリングが実施されている。航空機モニタリングは、発電所から 3 km 圏内が飛行制限区域となっているためデータが取得されていない。ここでは、最新の航空機モニタリング結果（平成 25 年 11 月 19 日時点;原子力規制庁 HP http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/9000/8909/24/362_20140307.pdf ; 以下、8 次モニタリングと表記）と第 4 回モニタリング測定結果を比較した。図-13 に比較し

た線量率マップを示す。図-13に示すように、各々のモニタリングの測線間隔が異なるために、若干のずれは生じているものの、航空機モニタリングと無人ヘリモニタリングの線量率マップの傾向はよく一致していることがわかる。なお、両結果は、第4回の無人ヘリモニタリングの最終日である平成26年1月7日に減衰補正を行っている。

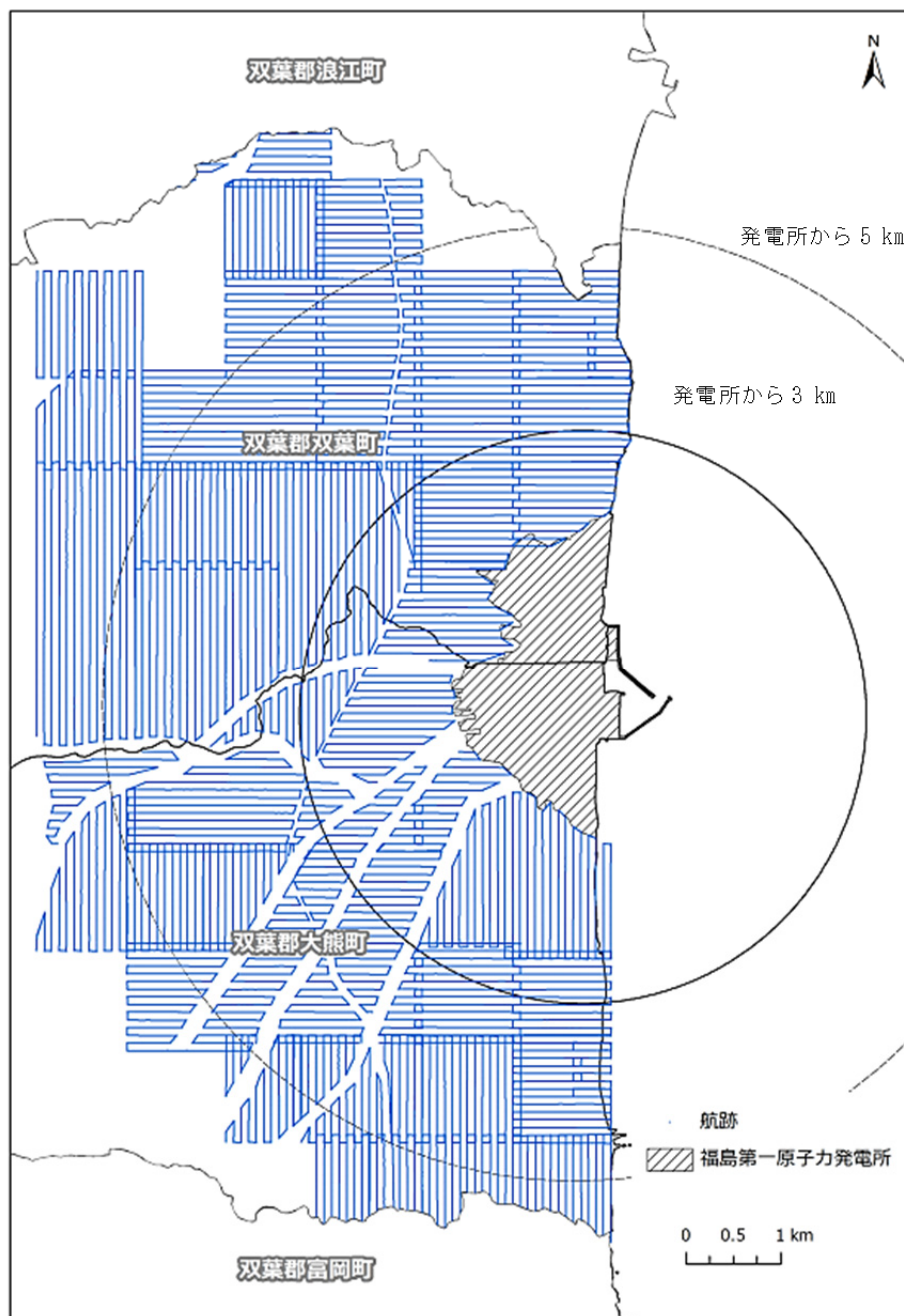


図-1 無人ヘリの飛行軌跡



図-2 無人ヘリの仕様

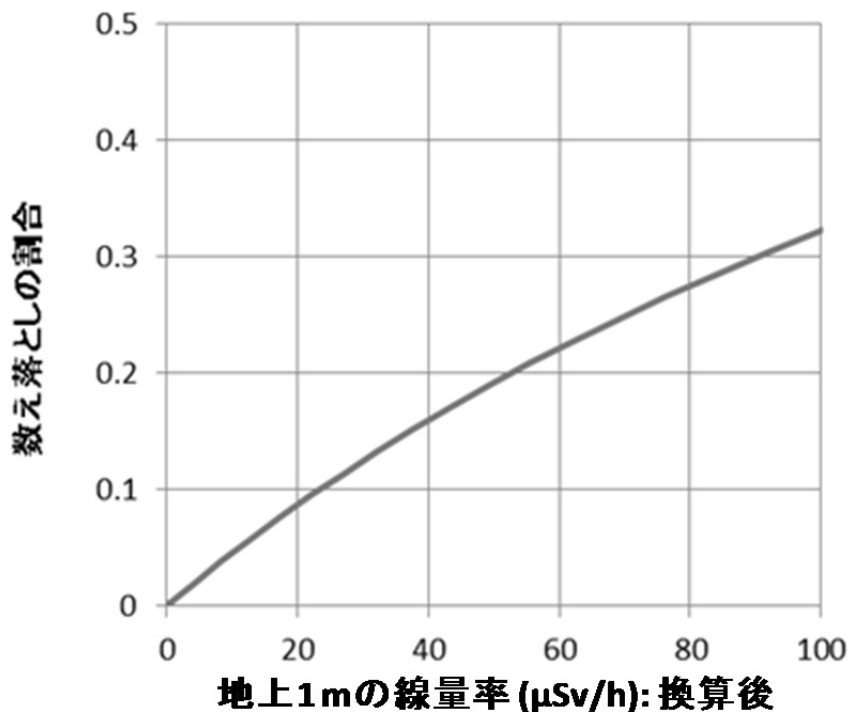


図-3 無人ヘリ換算後の線量率を数え落としの割合

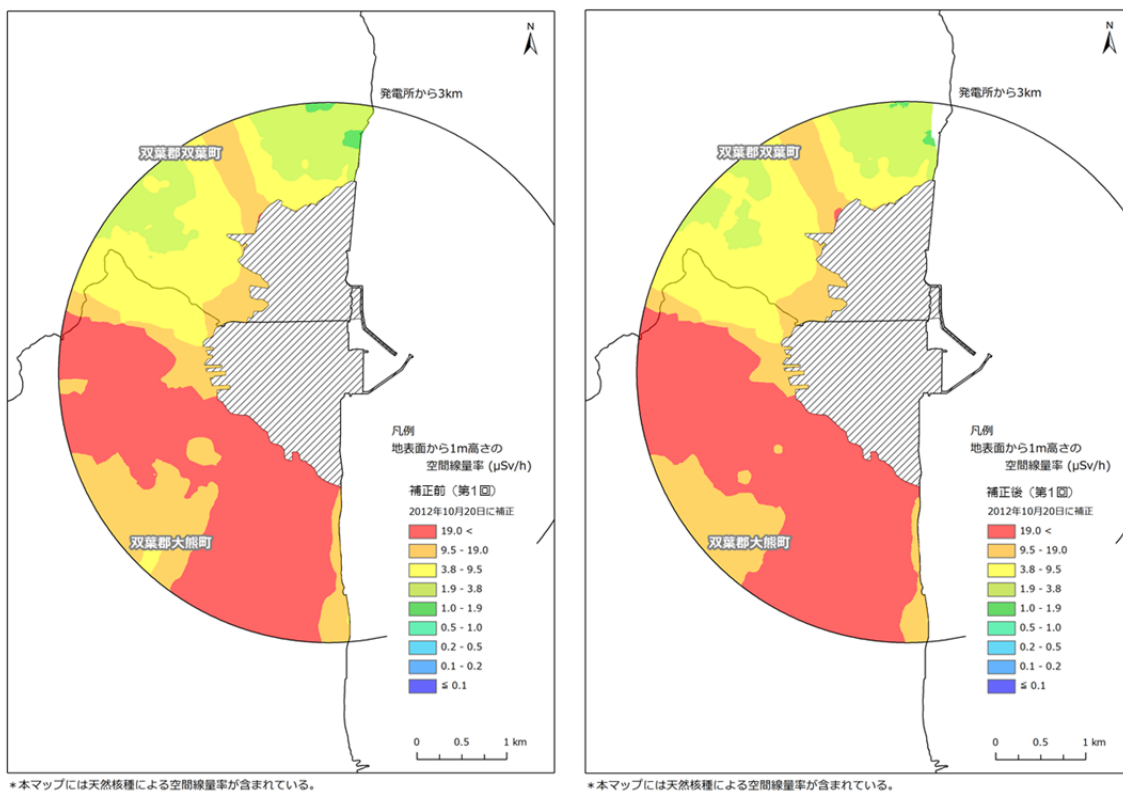


図-4 無人ヘリ第1回モニタリングの結果における不感時間補正前後の線量率マップの変化(左:補正前、右:補正後)

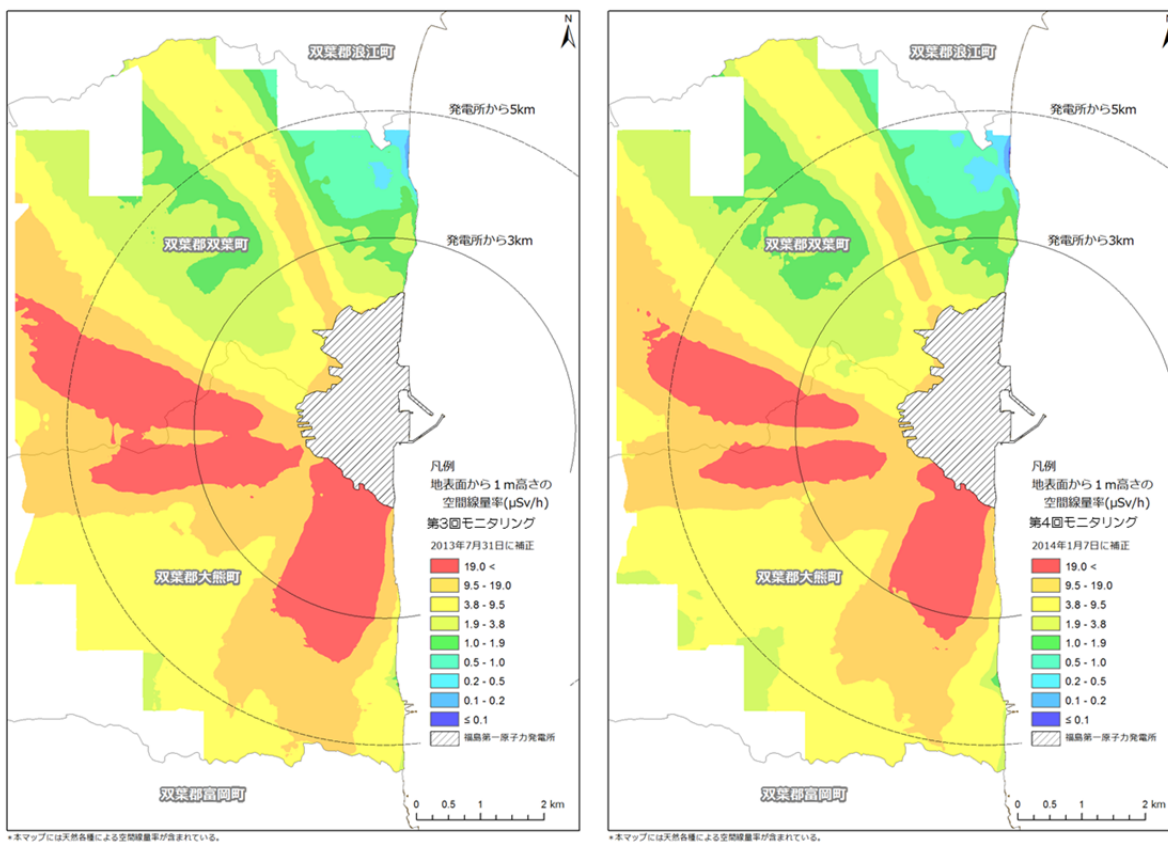


図-5 第3回モニタリング及び第4回モニタリングの線量率マップ

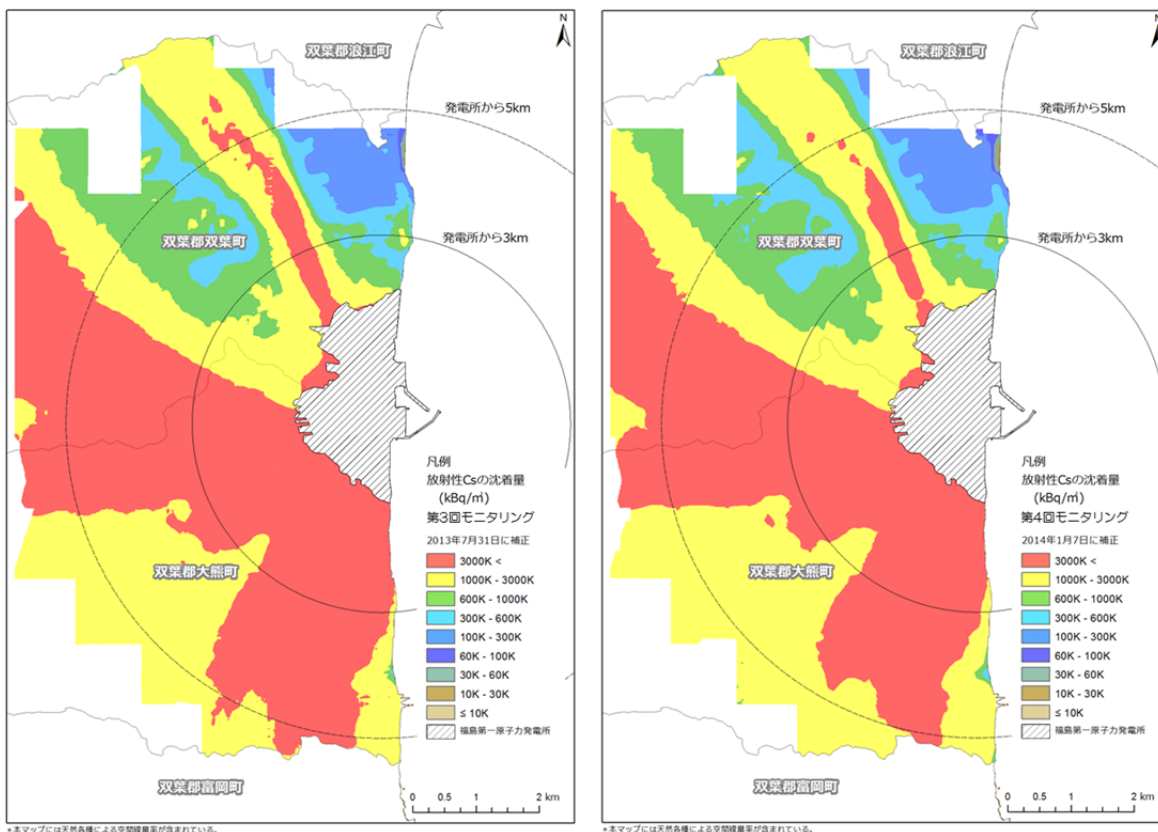


図-6 第3回モニタリング及び第4回モニタリングのセシウム134 + セシウム137 沈着量マップ

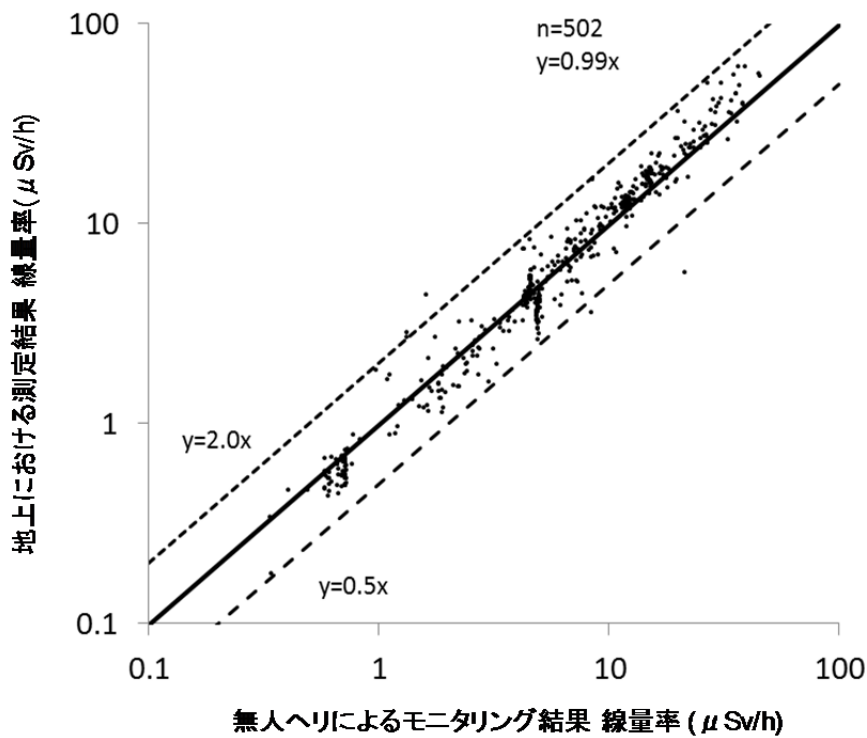
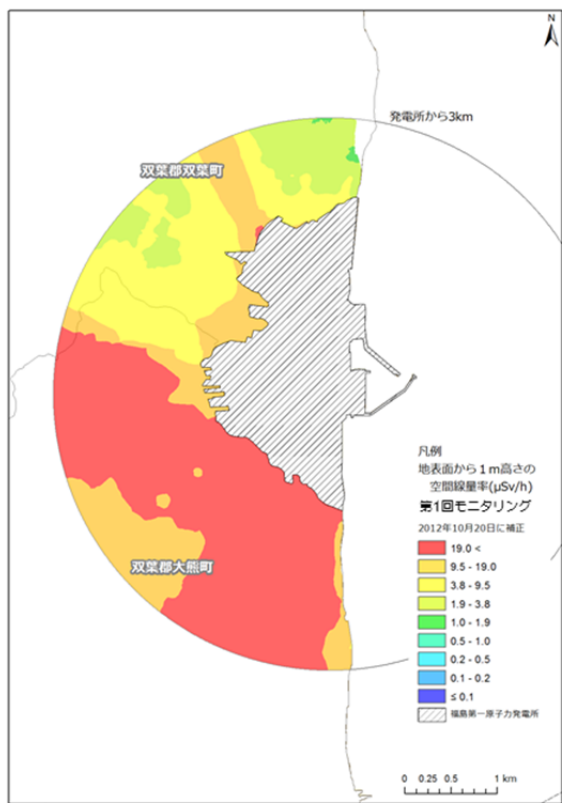
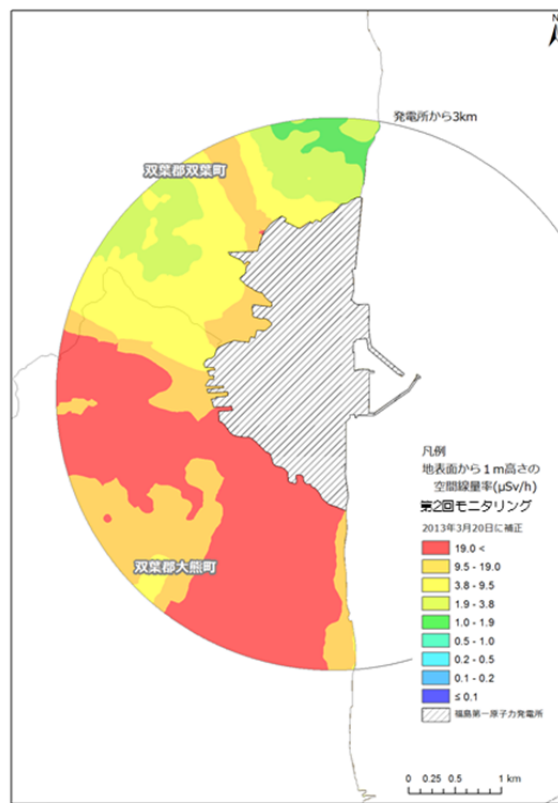


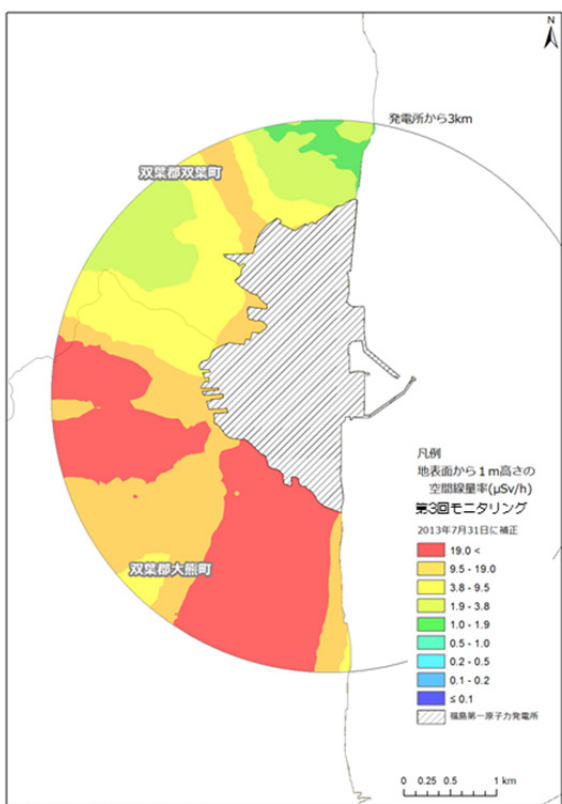
図-7 地上の測定結果との比較



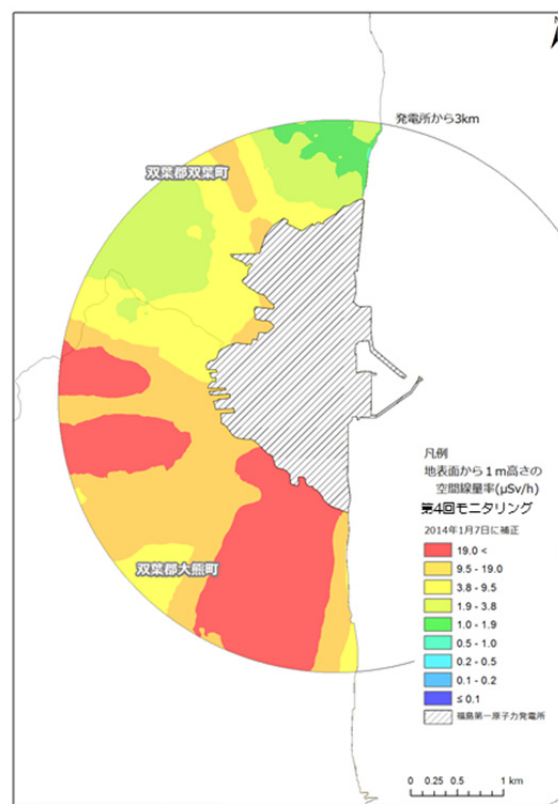
第1回 2012年10月20日に減衰補正



第2回 2013年3月20日に減衰補正



第3回 2013年7月31日に減衰補正



第4回 2014年1月07日に減衰補正

図-8 過去の無人ヘリによる線量率測定結果の比較

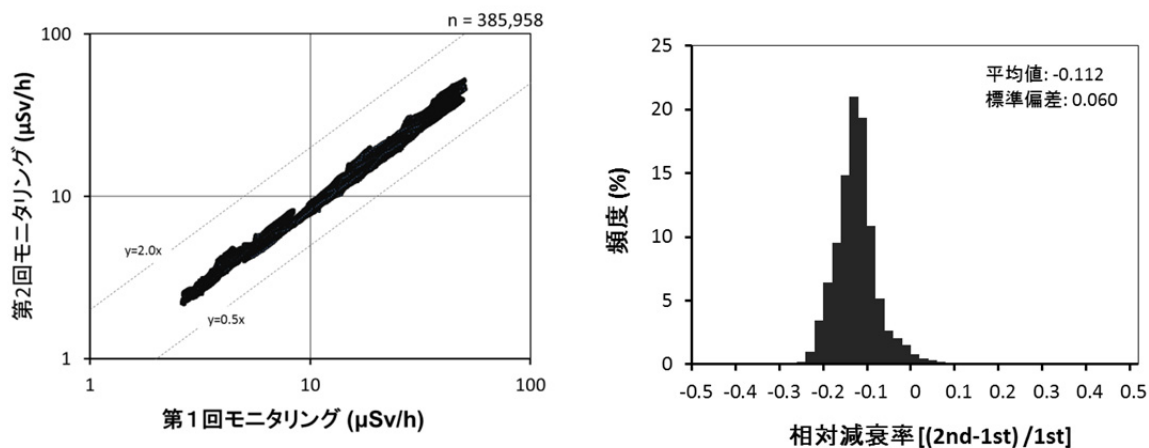


図-9 第2回モニタリングと第1回モニタリングの変化傾向

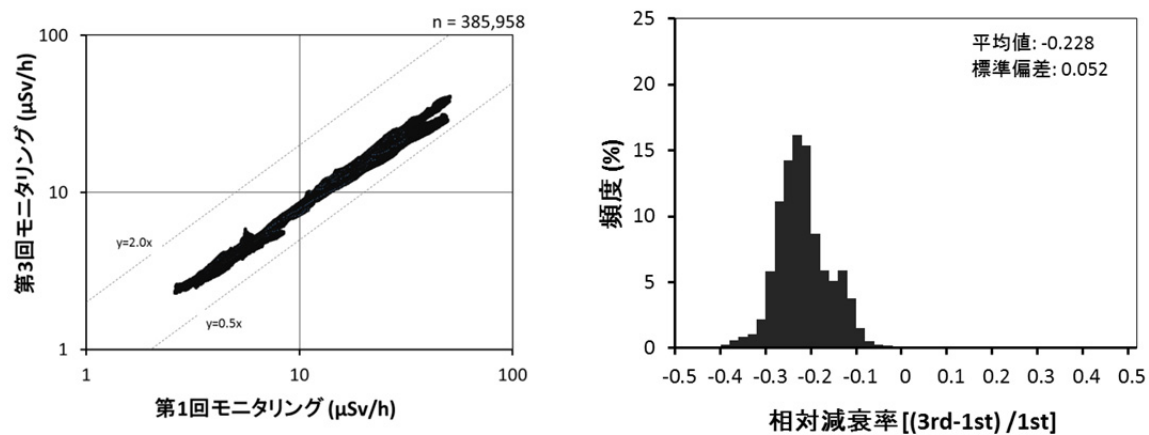


図-10 第3回モニタリングと第1回モニタリングの変化傾向

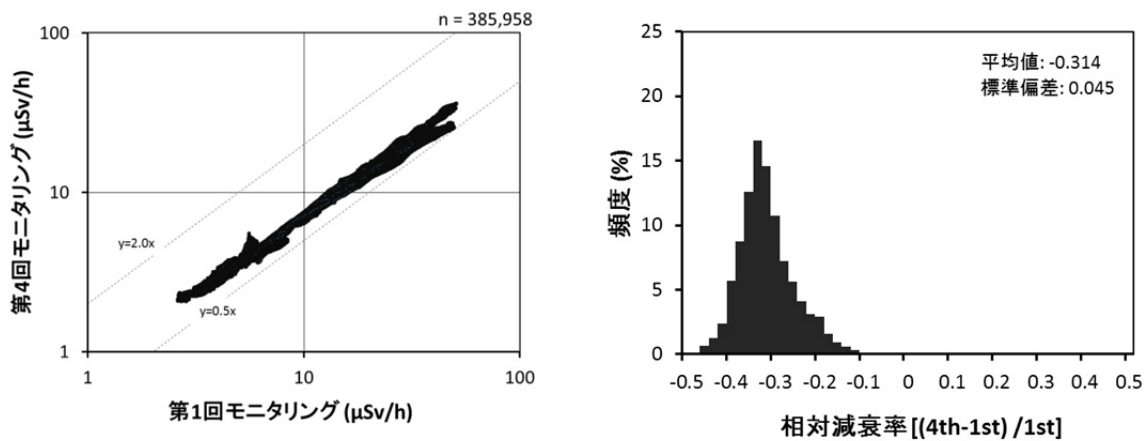


図-11 第4回モニタリングと第1回モニタリングの変化傾向

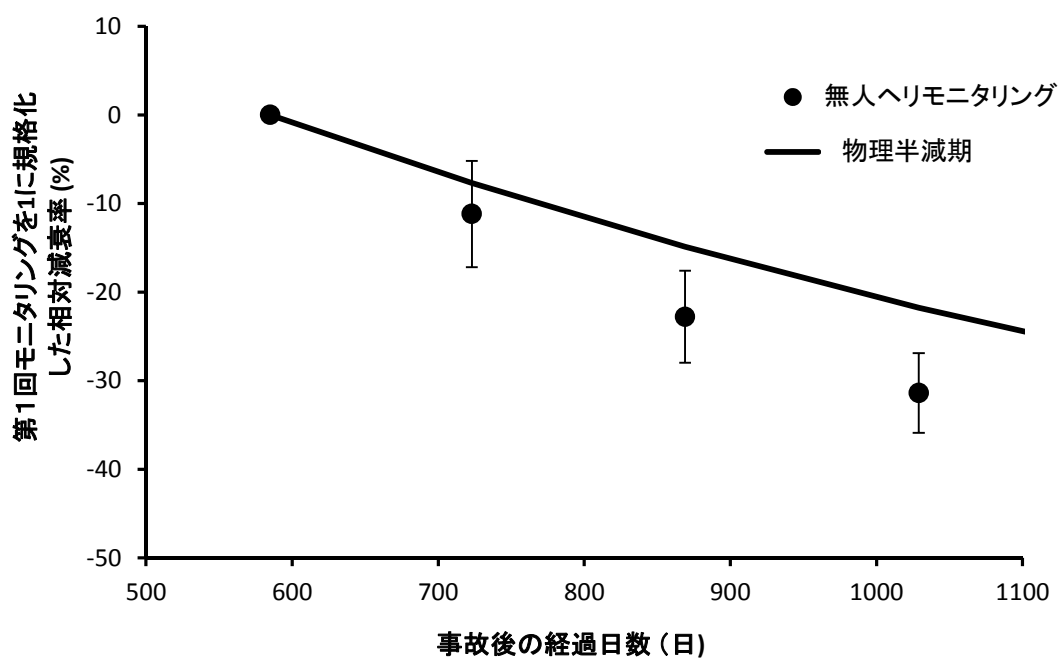


図-12 無人ヘリモニタリングによる地上1 mの線量率の相対減衰率
(誤差棒は標準偏差($\sigma=1$))

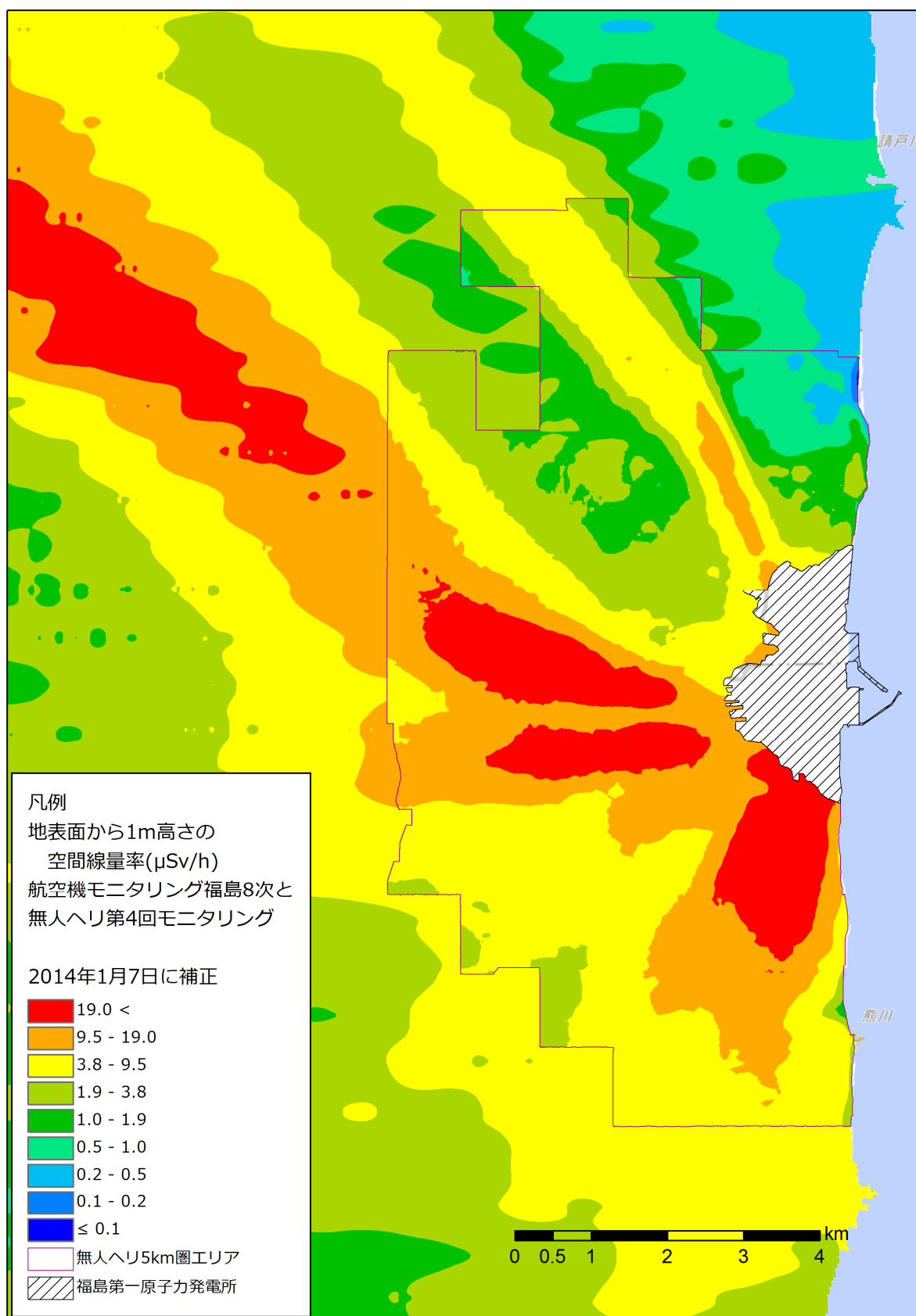


図-13 航空機モニタリングと無人ヘリによるモニタリング結果の比較
 (平成26年1月7日時点に減衰補正)