

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

眞田 幸尚（原子力機構）

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¹、河川敷のモニタリング² 及び除染前後のモニタリング³ などが挙げられる。さらに、福島第一原発周辺のモニタリングデータを詳細に解析し、放射性セシウムの比（セシウム134/セシウム137）の分布を明らかにすることにより、汚染の起源となった原子炉の推定を行っている⁴。

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¹。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するよう約 5 km 圏内についてモニタリングすることとした。過去 7 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、空間線量率が高く帰還困難区域に設定されていることから、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、近年除染後の廃棄物の中間貯蔵施設の建設、高速道路・鉄道の整備及び除染作業などが開始され、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から、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 28 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、本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。

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（5 km 圏内）のモニタリングを平成 28 年 9 月 1 日～10 月 13 日に 1 回実施した。これまで実施してきたモニタリングとその期間を表-1 に示す。

¹ Y. Sanada and T. Torii, Aerial radiation monitoring around the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant using an unmanned helicopter. J. Environ. Radioact., 139, 294-299, 2015.

² Y. Sanada et al., Radiation monitoring using an unmanned helicopter in the evacuation zone around the Fukushima daiichi nuclear power plant., Explor. Geophys., 45, 3-7, 2014.

³ 眞田幸尚, 原子力発電所事故後の無人ヘリコプターを用いた放射線測定, JAEA-Research 2013-049, 2013.

⁴ Y. Nishizawa et al., Distribution of the ¹³⁴Cs/¹³⁷Cs ratio around the Fukushima Daiichi nuclear power plant using an unmanned helicopter radiation monitoring system, J. Nucl. Sci. Tech., DOI:10.1080/00223131.2015.1071721, 2015.

(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 γ 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 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ (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-1 参照)。

(3) 無人ヘリによる測定データの取得方法

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⁵。無人ヘリの軌跡幅 (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 DGPS⁶ (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。フライトの測線を図-2 に示す。

(4) 無人ヘリ測定データの地上 1 m 高さ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 1 m 高さでの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長径 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: cps/ $\mu\text{Sv/h}$) 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 により測位した海拔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度を差し引くことにより求めた。実際に使用した CD 及び AF の数値を表-2 に示す。このデータは、平成 24 年度に取得した約 30 箇所のキャリブレーションデータの平均値である。

(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. 結果と考察

第8回モニタリングの結果を、図-3 に空間線量率マップとして示す。比較的高い空間線量率の分布が、北西、西北西、西、南方向に広がっていることがわかる。

⁵ 真田ら、平成 27 年度福島第一原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Research 2015-006, 2015, 95p

⁶ 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精度を高める技術。

(1) 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 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にして図-4に示す。散布図を見ると傾きは1付近であり、今回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。一方、整合の良くない場所が複数点ある。この要因について、Appendix-1で考察する。考察の結果、整合が良くない地点を詳しく調べると、地上の空間線量率分布が局所的に急激に変化しており、不整合の原因は測定機器の系統的な誤差等ではなく、無人ヘリと地上測定とで測定高度により測定対象範囲が異なることが原因であることが明らかになった。

(2) 過去の測定データとの比較

今回の測定と過去第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-5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。

過去のモニタリング結果を比較するために、モニタリングした区域を5 mメッシュに分割し、メッシュごとに第1回モニタリングの空間線量率測定結果と今回の空間線量率測定結果の比（相対減衰率）を求めた。今回の測定と第1回モニタリングの測定結果を比較した散布図及びヒストグラムを図-6に示す。散布図は良い相関関係を示し、相対偏差のヒストグラムはガウス分布に近い。ヒストグラムの平均値を基に得られた相対減衰率は、全体の傾向として空間線量率は、第1回モニタリングの実施された平成24年10月20日時点と100%とすると40%となっている。このように、メッシュごとに相対減衰率を算出して過去の無人ヘリでの測定結果と今回の結果を比較すると、発電所周辺の空間線量率の減少傾向を定量的に理解できる。

今回の結果と過去7回の結果を第1回の測定結果を基準とし、事故からの経過日数と相対減衰率を図-7にプロットした。プロットした相対減衰率は図-6で示したヒストグラムの平均値とし、各メッシュでの比較結果の標準偏差を誤差棒として表示した。また、図-7の赤線は重量緩衝深度を一定として、放射性セシウムの半減期を基に計算した理論的な減衰曲線を示している。青線は重量緩衝深度の変化を考慮した曲線であり導出方法及び考察については後述する。まず無人ヘリによる測定結果のプロットと赤線で示した理論的な減衰曲線を比較すると、無人ヘリの測定結果は理論曲線を下回っており、空間線量率は放射性セシウムの壊変よりも多く減少していることを示唆している。この要因は、放射性セシウムが移動しているか放射性セシウムから放出される放射線が遮蔽されていることが考えられる。この要因を推定するために考察を行った。

事故後、継続的にスクレーパープレートを用いて土壤中の放射性セシウムの深度分布を調査した結果⁷を見ると、事故後から継時的に放射性セシウムの土壤中での深度方向への分布が深くなってきていることが報告されている。そこで、この調査結果を利用して重量緩衝深度の変化を加味し理論的な空間線量率の減衰曲線を計算することを試みた。図-8に調査された重量緩衝深度の平均値と事故からの経過日数の関係を示す⁴⁾。この結果から、重量緩衝深度が経過時間と一次関数の関係にあると考えられる。この近似式を元に、過去

⁷ 日本原子力研究開発機構, “平成26年度放射性物質測定調査委託費（東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約及び移行モデルの開発）事業,” 成果報告書, page. 80, (平成27年3月).

7 回の各時点における重量緩衝深度を求めた。また、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⁸」には、重量緩衝深度ごとに空間線量率から放射性セシウムの沈着量への換算する係数が与えられている。図-9 に与えられている換算係数と重量緩衝深度の関係及び近似式を図示する。この近似式から、無人ヘリにより過去 7 回時点における空間線量率から放射性セシウムの沈着量への換算係数を決定し、理論的な空間線量率の減衰曲線を計算した。計算した結果を図-7 の青の点線として示す。このように、無人ヘリの測定結果と計算結果はよく一致することが分かる。この結果は、空間線量率の減衰の要因として物理壊変だけでなく、土壌中への放射性セシウムの浸透により、放射線が遮蔽される効果が寄与していることを示している。本結果は、今回の測定対象範囲の全体的な傾向として推定されるものであり、他の除染や河川を介した放射性セシウムの移動などの局所的に寄与する要因については、(3) で示したようなメッシュごとの線量率の比較や地上におけるサンプル測定等から考察されるべきである。

(3) 顕著な線量率の低下場所

今年度の測定結果（第 8 回モニタリング）と昨年度の測定結果（第 7 回モニタリング）を比較し、線量率比のマップを作成した（図-10）。線量率のマップは前述のように 5 m メッシュで作成しており、同じ位置の今年度の測定結果と昨年度の測定結果の比を計算し、コンター図として示した。全体的に 0.7-0.8 の範囲であり、0.9 を超える場所は測定による誤差の影響と考えられる。一方、測定対象範囲内に 3 ヲ所の顕著に線量率の比が小さい場所がみられた。それぞれについて、詳細な場所とその推定される原因について、図-11 及び下記に示す。

- ・中野地区、熊川地区については、除染廃棄物の仮置き場が造成されている地域であり、造成の際の土の入れ替えや事前の除染作業により、線量率が低下したものと推定される。
- ・大野小学校周辺については、2015 年 8 月 28 日から除染作業が開始されており、その影響から線量率が低下したものと推定される。

4. まとめ

- 平成 28 年度に 1 回の無人ヘリによる福島第一原発周辺のモニタリングを実施し、全体の傾向として空間線量率の減少が確認できた。
- 今回の測定結果から空間線量率は、平成 24 年 10 月 20 日を 100% とすると 40% 程度である。
- 過去のモニタリングの結果と比較すると放射性セシウムの土壌中への浸透具合を考慮した空間線量率の計算結果とよく一致し、空間線量率の減衰の要因は土壌中への放射性セシウムの浸透により放射線が遮蔽される効果が寄与していることが示唆された。ただし、この結果は今回の測定対象範囲の全体的な傾向を考察したものであり、除染などの局所的に寄与する要因については、メッシュごとの線量率の比較や地上における測定等による検討が必要である。
- 昨年度と比較して顕著に空間線量率が低下している地域が 3 か所存在したが、いずれも除染によるものであることを確認した。
- 無人ヘリと地上測定との空間線量率が大きく異なる地点に対して詳細解析を行い、不一致の原因は測定装置に起因する系統的な誤差等ではなく、測定機器により測定対象範囲が異なることが原因であることを明らかにした。

⁸ 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,” 放射能測定法シリーズ 33, (平成 20 年 3 月).

表-1 福島第一原子力発電所周辺の無人ヘリによるモニタリング

モニタリング名	測定期間	測定場所
第1回モニタリング	H24/8/30~H24/10/20	福島第一原発から3 km 圏内
第2回モニタリング	H25/1/27~H25/3/20	福島第一原発から3 km 圏内
第3回モニタリング	H25/6/6~H25/7/31	福島第一原発から概ね5 km 圏内
第4回モニタリング	H25/11/19~H26/1/7	第3回モニタリングと同一の範囲
第5回モニタリング	H26/6/23~H26/7/22	第3回モニタリングと同一の範囲
第6回モニタリング	H26/11/13~H27/1/15	第3回モニタリングと同一の範囲
第7回モニタリング	H27/9/2~H27/10/22	第3回モニタリングと同一の範囲
第8回モニタリング	H28/9/1~H28/10/13	第3回モニタリングと同一の範囲

表-2 使用したパラメータと検出下限値

	パラメータ	数値	算出方法・算出条件
換算係数	高度補正係数 (AF: m^{-1})	-0.00606	32回のテストキャリブレーション測定 of 平均値 (測定結果の標準偏差 $\sigma = 0.00067$)
	空間線量率換算係数 (CD: $cps \mu Sv^{-1}$)	4140	33回のテストキャリブレーション測定 of 平均値 (測定結果の標準偏差 $\sigma = 370$)
検出下限値	線量率 ($\mu Sv h^{-1}$)	0.050	システムのバックグラウンド計数率から算出
	放射性セシウム沈着量 ($kBq m^{-2}$)	4.0	平均的な地中の天然放射性核種起源の計数率から算出



図-1 無人ヘリの仕様

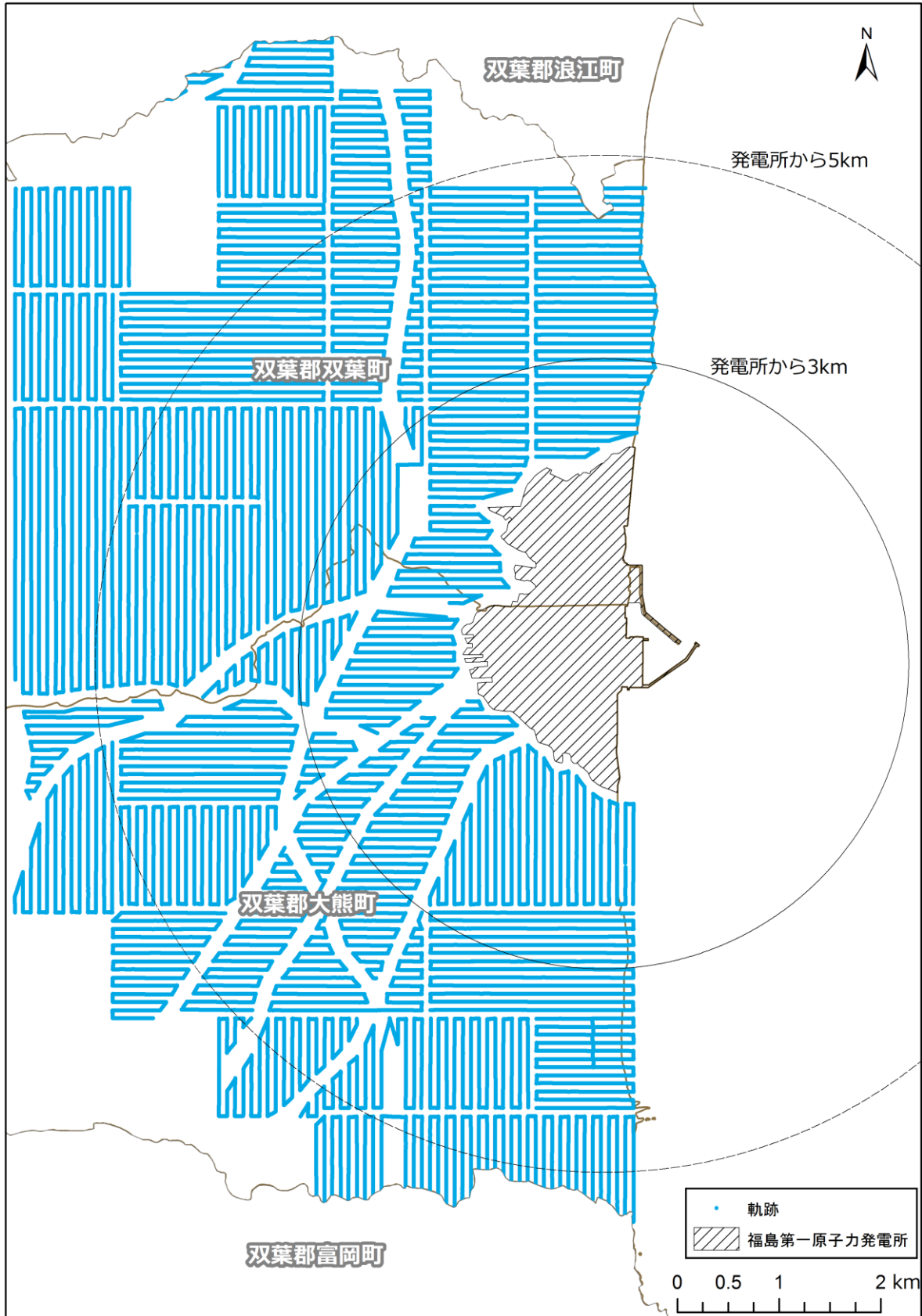
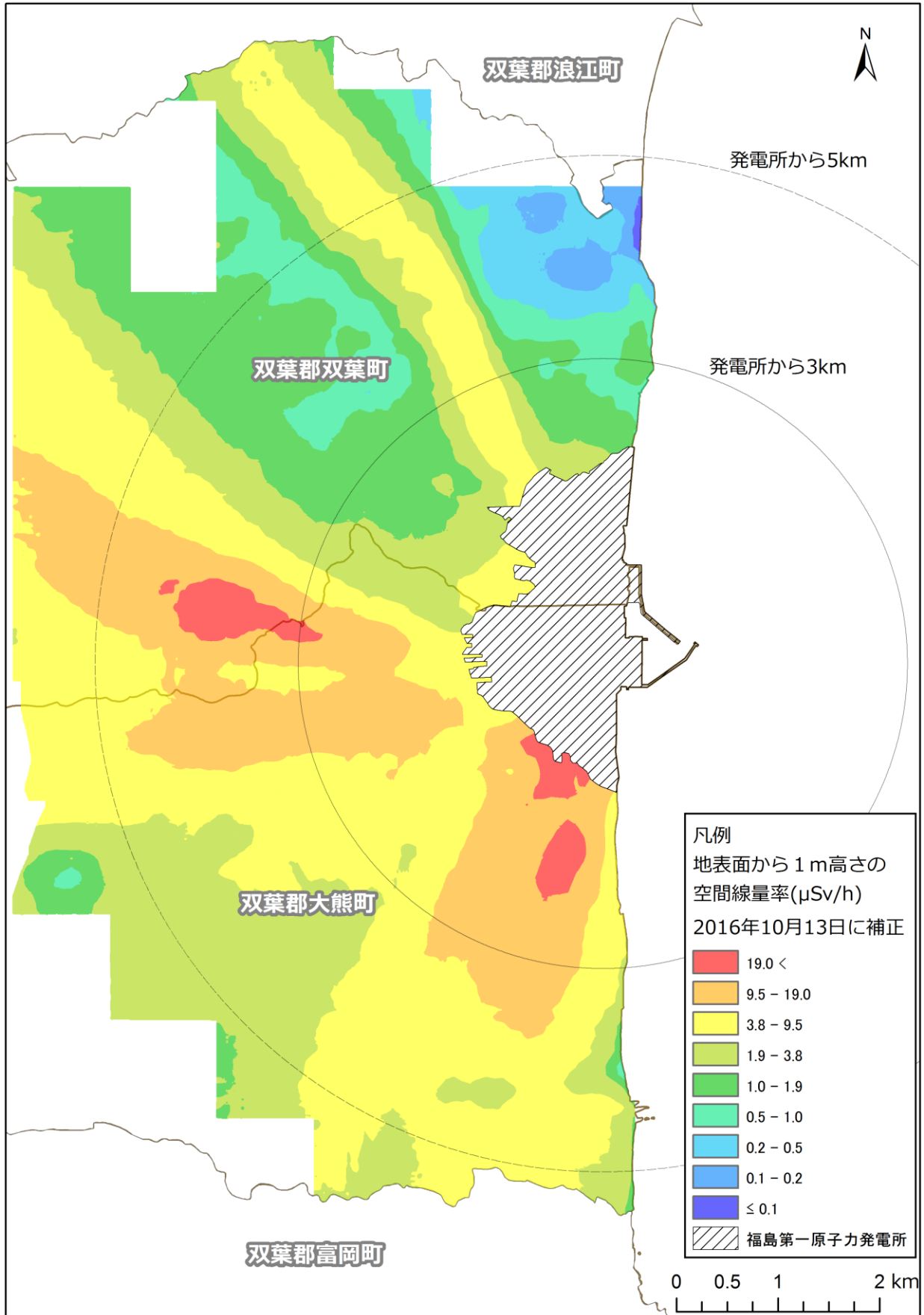


図-2 無人ヘリの飛行軌跡

(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)



*本マップには天然核種による空間線量率が含まれている。

図-3 第8回モニタリングの空間線量率マップ

(背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

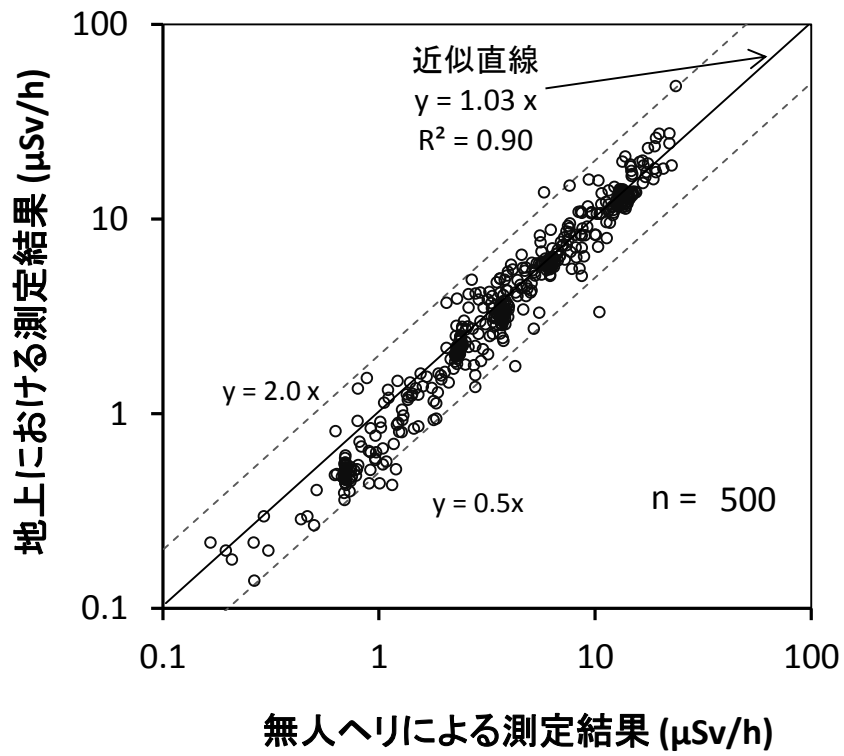


図-4 地上の空間線量率測定結果と無人ヘリによる測定結果の比較

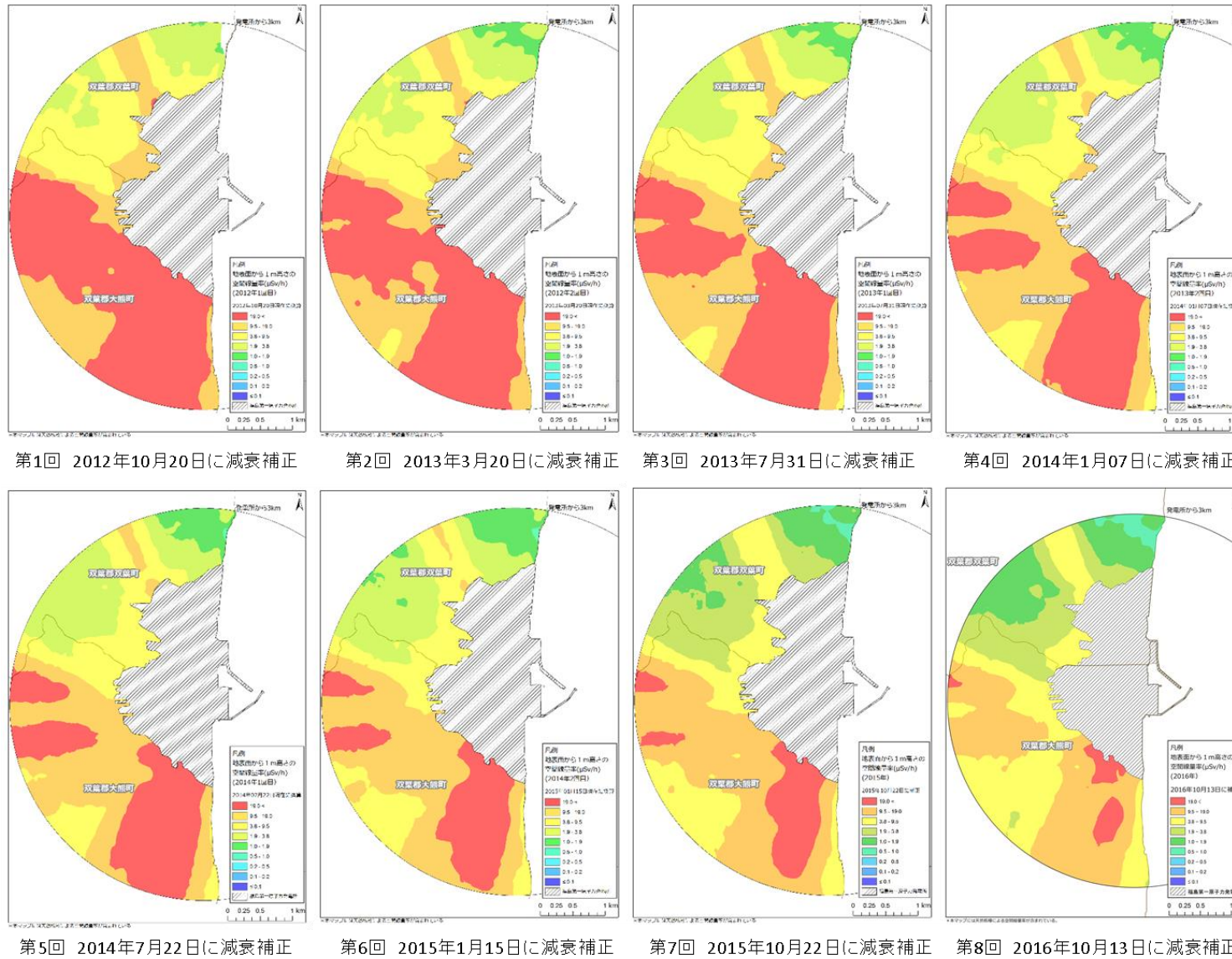


図-5 過去の無人ヘリによる空間線量率測定結果の比較
 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

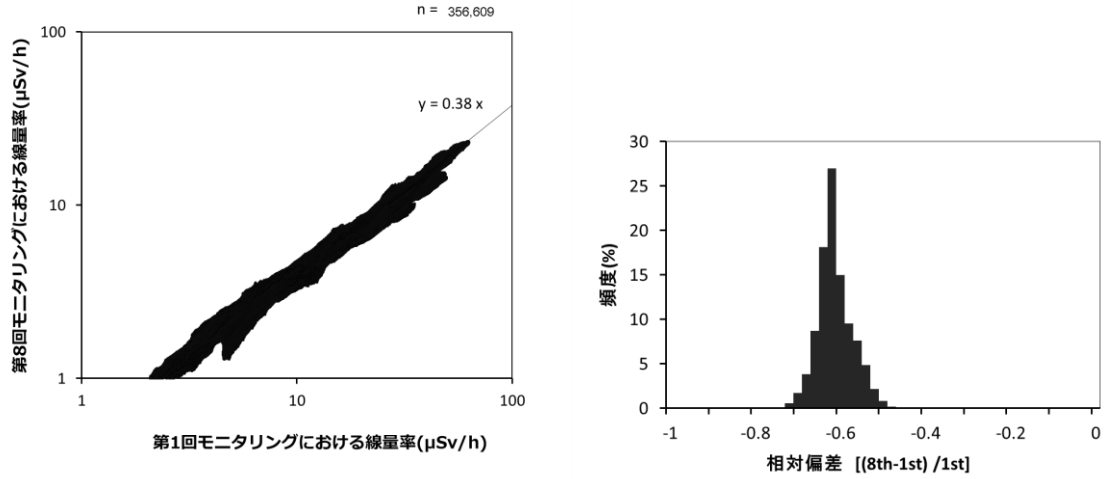


図-6 第8回モニタリングの第1回モニタリングからの変化傾向

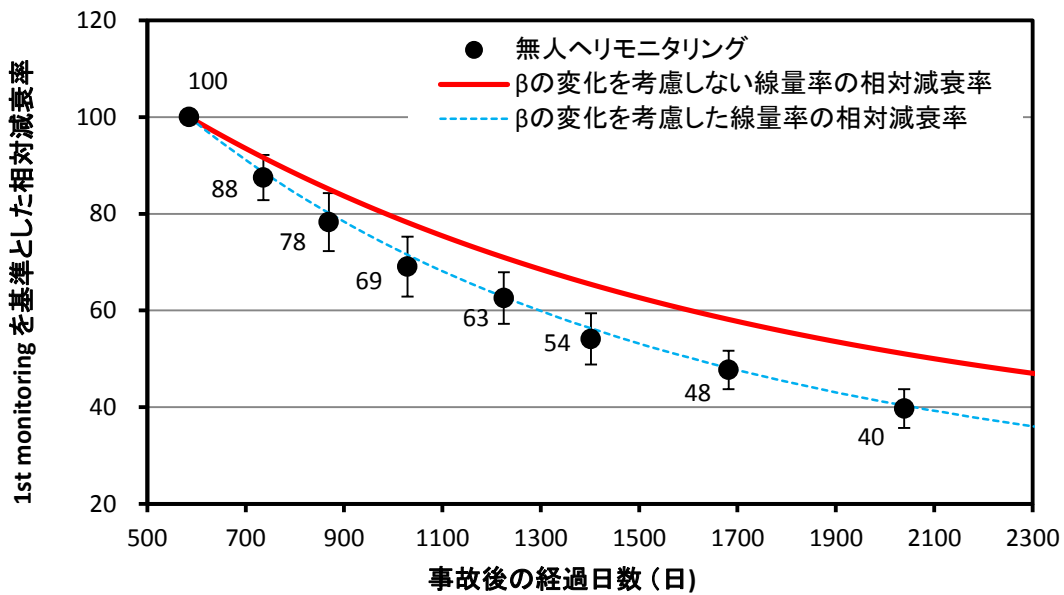


図-7 第1回モニタリングデータを基準とした場合の
モニタリング時期と空間線量率の比較

(図-6 (右) で示したヒストグラムの平均値を変化割合として求めた相対減衰率を
プロットし、標準偏差を誤差棒として表示； β ：重量緩衝深度)

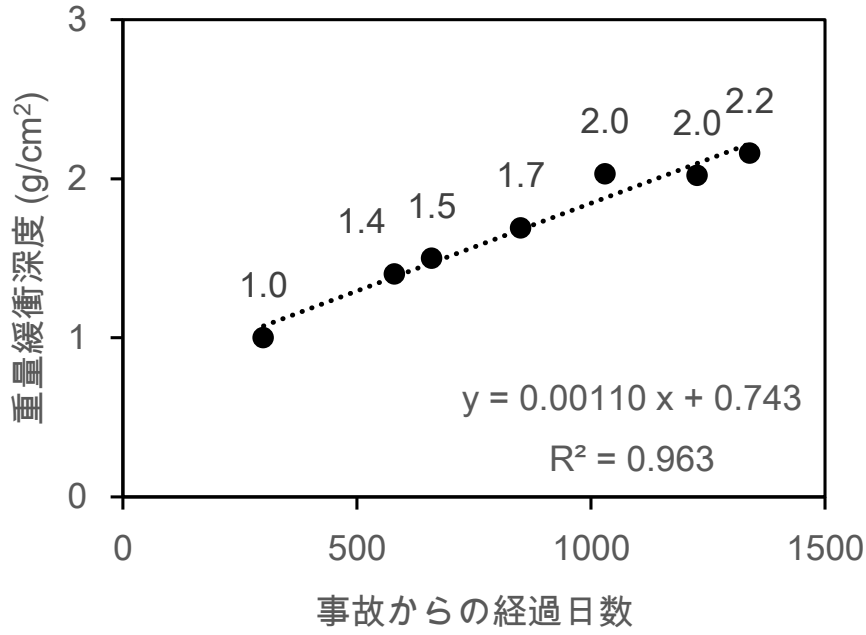


図-8 事故からの経過日数と重量緩衝深度の実測値の関係⁴

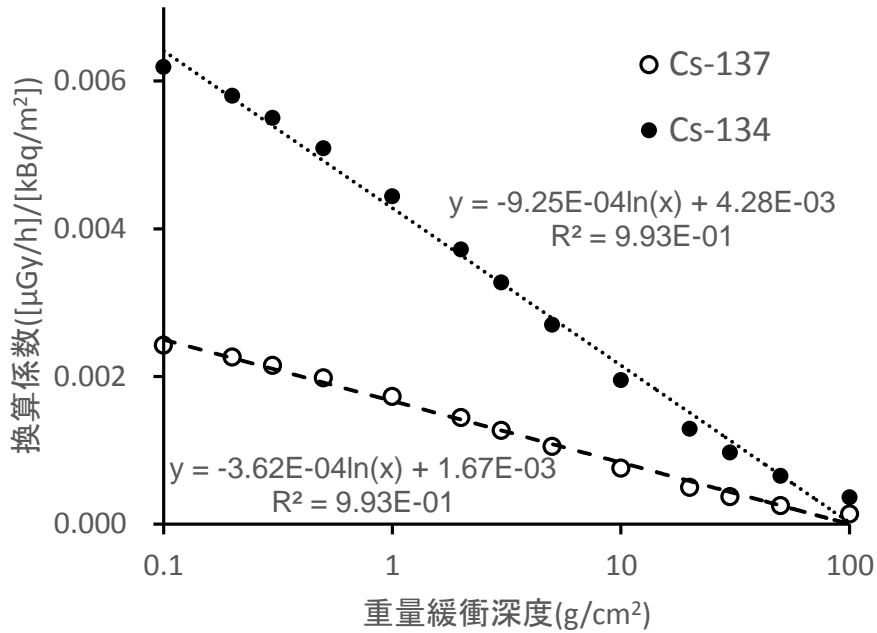


図-9 重量緩衝深度と換算係数の関係
(参考文献7に記載のある表から作図)

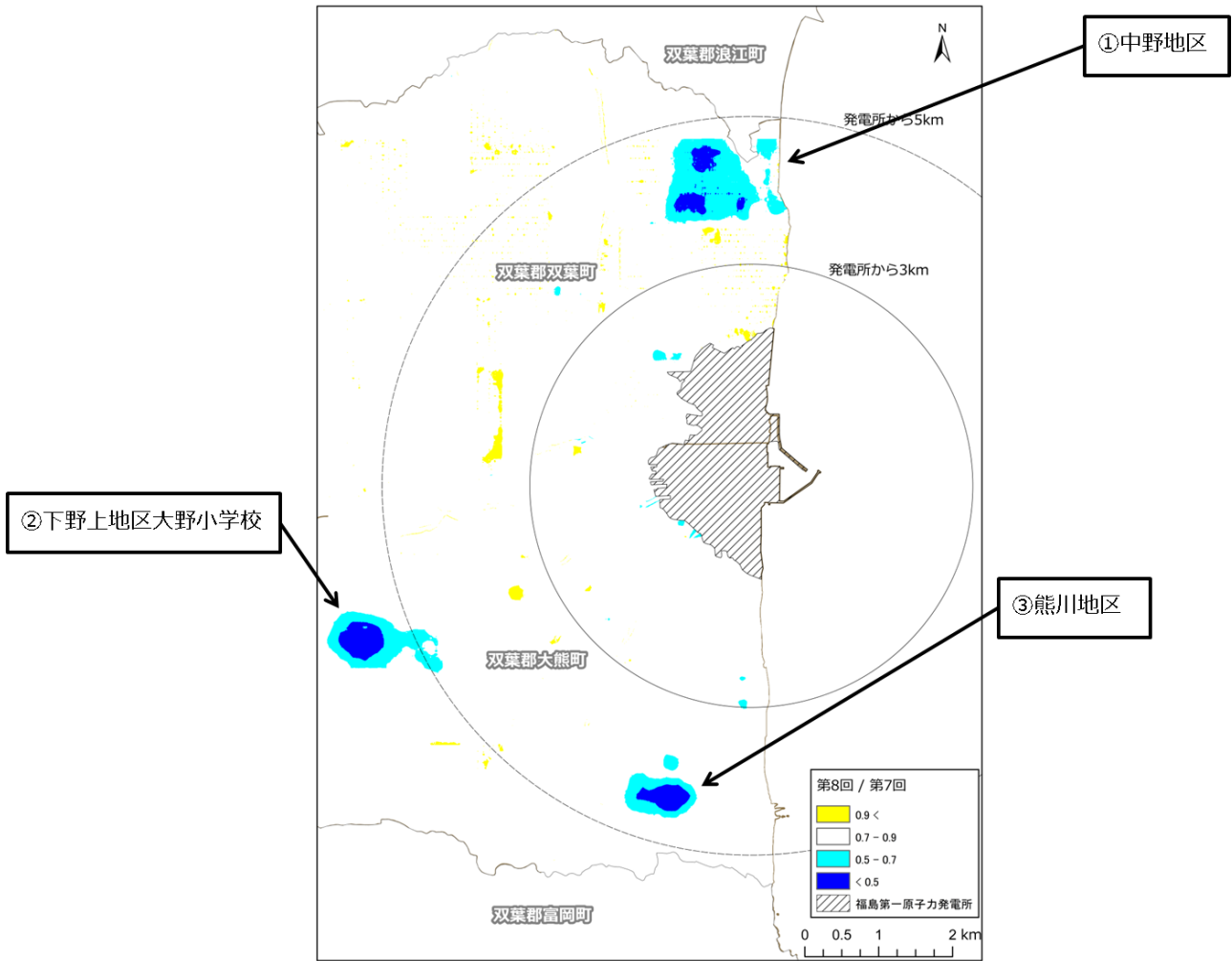


図-10 第8回無人ヘリモニタリングによる空間線量率の
 第7回無人ヘリモニタリングによる空間線量率に対する変化率
 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

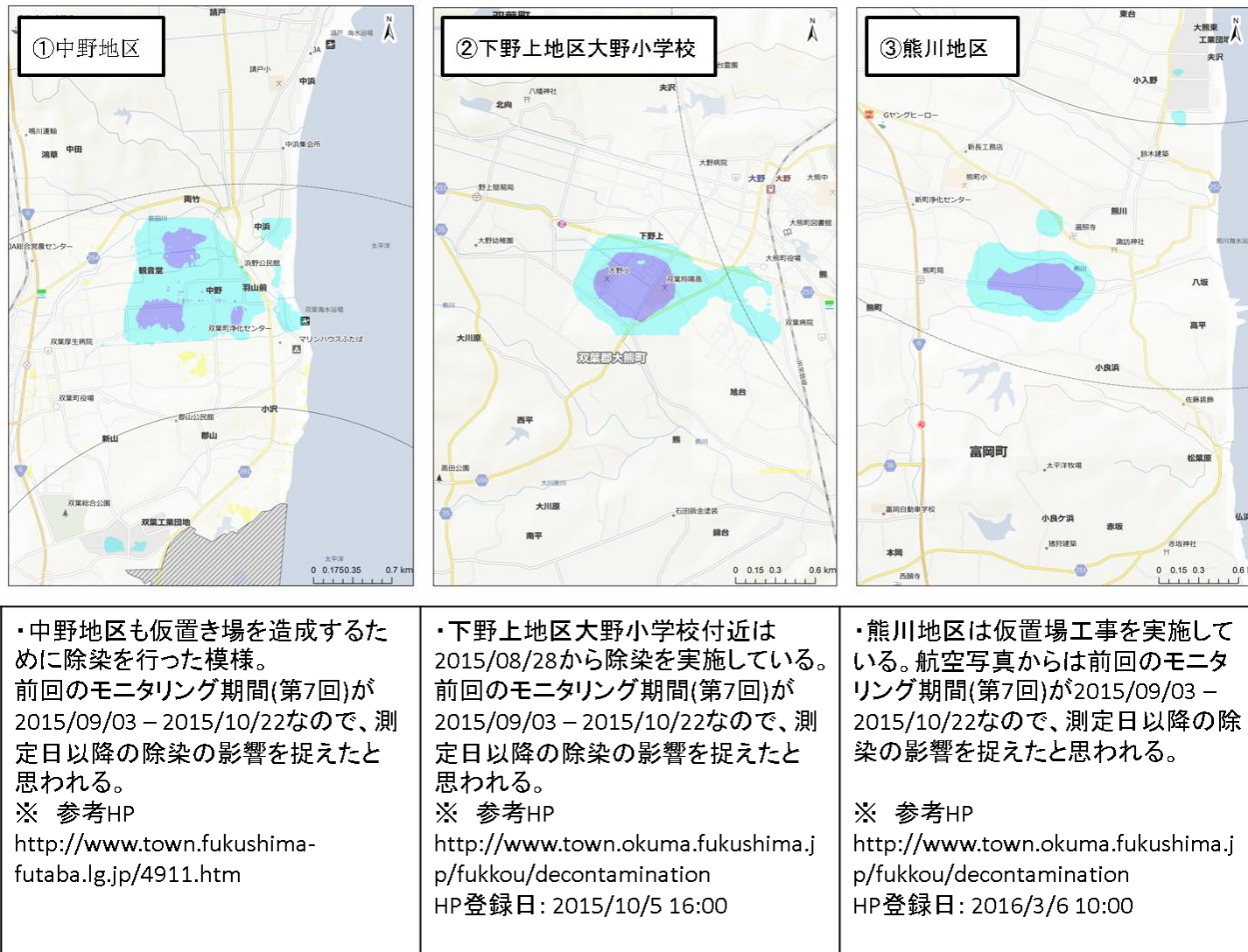


図-11 第8回無人ヘリモニタリングによる空間線量率の
 第7回無人ヘリモニタリングによる空間線量率に対する変化率に顕著に差のあった場所
 (背景地図は、ArcGIS データコレクションスタンダードパック (ESRI, Co. Ltd.) を使用)

Appendix-1

無人ヘリによる測定結果と地上の測定結果の不整合場所における考察
(地上における詳細な測定から)

図-4 で示した無人ヘリの測定値と地上測定値が顕著に乖離のあった 12 ヲ所を選定し、測定点を中心とした直径 100 m の複数の地点について地上の再測定を行った。選定した場所を図-A1 に示す。また、図-4 に示した地上における測定値を「1 ヲ所測定データ」とし、再測定した測定値は平均値及び標準偏差で示す。無人ヘリの測定値と地上測定値が顕著に乖離のあった場所は、海岸、田畑及び構造物の周辺など様々であり、地形的な共通の特徴は見られなかった。1 ヲ所測定データ及び再測定の結果と無人ヘリの比較結果を図-A2 に散布図として示す。ここでエラーバーは複数測定場所の標準偏差を示している。このように、すべての測定点で、再測定の結果は、無人ヘリの結果に近くなった。これは、1 ヲ所測定データが無人ヘリによる測定場所の平均的な線量率を測定できていないことを示している。

地上での測定は対地高度 1 m で測定するため測定される放射線の範囲が検出器を中心とした狭い範囲となるのに対し、無人ヘリは対地高度 80 m の高さから測定するため無人ヘリ直下の地上の点を中心とした直径 200 m ほどの円が測定対象範囲となる⁹。よって、局所的に除染を行った場所やホットスポットがある場所のような空間線量率分布の変動が大きい場所での測定値は上空と地上の測定結果が一致しにくくなる。

各測定場所の再測定結果と無人ヘリの比について、平均値及び標準偏差とあわせて図-A3 に示す。例えば、No. 171 地点は最大値が無人ヘリの約 4 倍、最小値が約 1 倍となっており、直径 100 m 範囲で線量率の変化が大きい場所であることが分かる。このことから、図-4 で見られた、地上の測定結果と無人ヘリの測定結果の乖離の要因は、無人ヘリの検出器の特性や地上測定箇所を選定に原因があるわけではなく、測定箇所が 1 点の地上測定結果と無人ヘリによる広範囲を平均化した測定結果が整合しにくい場所があることが要因であると考えられる(本手法の限界)。その理由はもともと放射源(福島第 1 原子力発電所)の近傍は汚染分布が不均一であること、また同地域で始められた除染や雨水によるホットスポットの形成が考えられる。本測定結果から、無人ヘリによる測定結果は地上のピンポイントにおける測定結果を示しているものではなく、地上の直径約 200 m の平均値を示しているものとして活用することが望ましい。

⁹ A. Malins et al., Fields of View for Environmental Radioactivity Proceedings of 2015 International Symposium on Radiological Issues for Fukushima's Revitalized Future, 30-31 May 2015, Paruse Iizaka, Fukushima, Japan

	No.18	No.19	No.21	No.62	No.70
写真					
1カ所測定データ	0.049	0.039	0.089	1.366	13.662
平均値	0.189 ±	0.120	0.115 ±	0.028	0.266 ±
			0.096	1.957 ±	0.120
				7.469 ±	0.587
	No.78	No.83	No.142	No.160	No.162
写真					
1カ所測定データ	1.752	3.320	0.438	0.517	0.438
平均値	3.203 ±	0.815	9.665 ±	2.107	1.258 ±
			0.490	1.598 ±	0.967
				0.931 ±	0.245
	No.171	No.418			
写真					
1カ所測定データ	48.206	0.430			
平均値	38.620 ±	20.206	1.407 ±	0.326	

図-A1 詳細な地上測定を行った場所

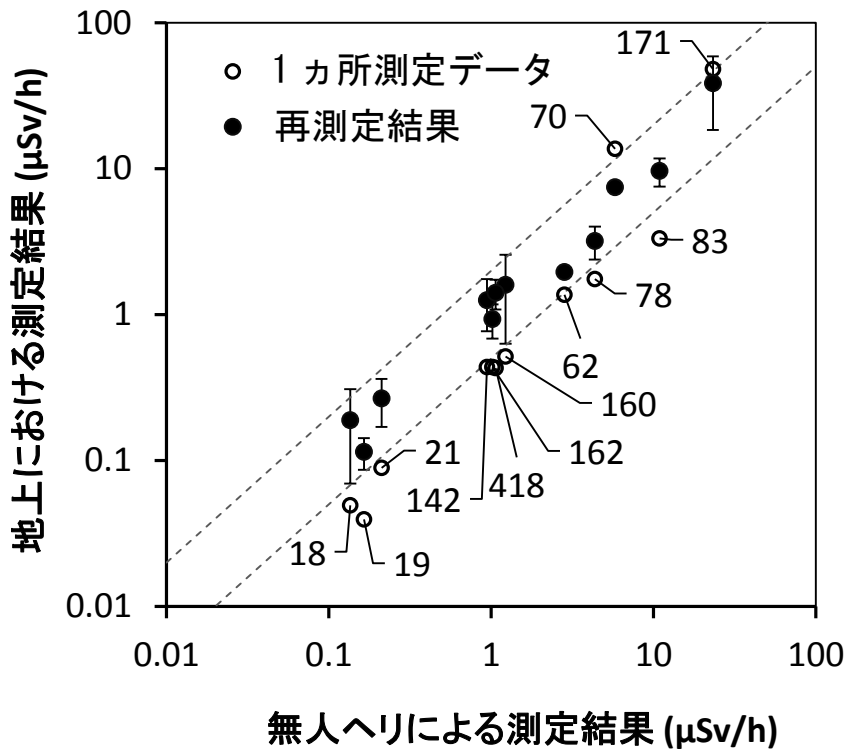


図-A2 詳細な地上測定の空間線量率測定結果と無人ヘリによる空間線量率測定結果の比較 (エラーバーは測定値の標準偏差 ($\sigma=1$)、図中番号は測定場所を示す。)

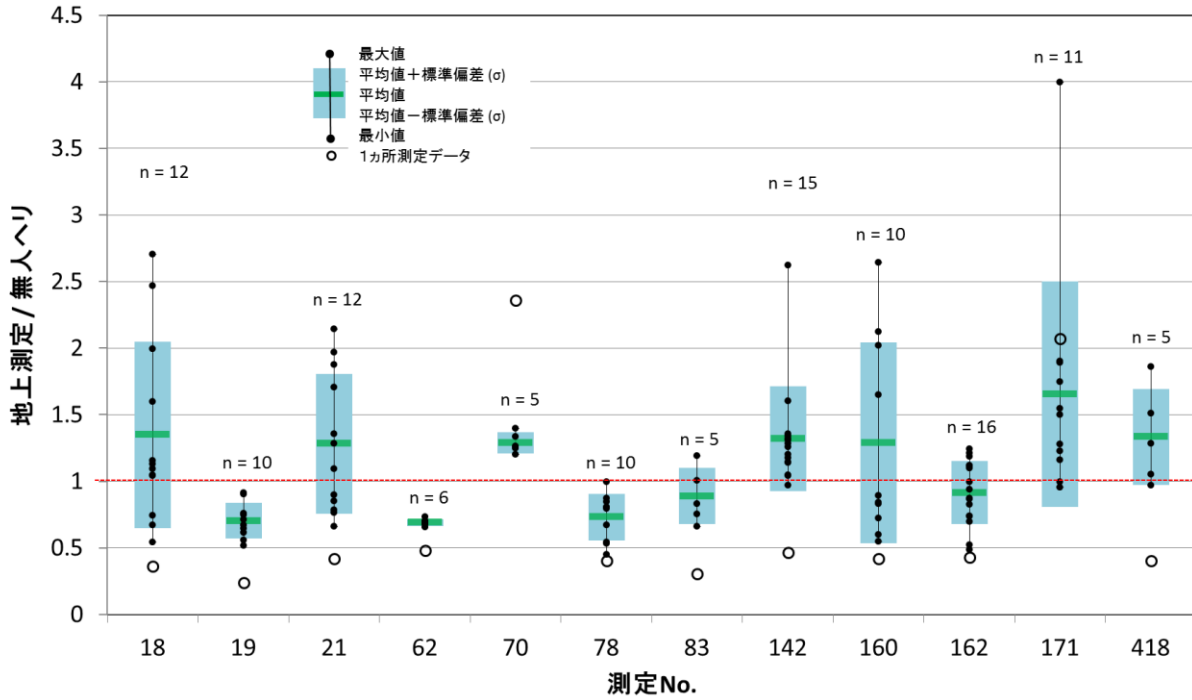


図-A3 各測定点における無人ヘリによる空間線量率測定結果と
 詳細な地上測定の空間線量率測定結果の比較
 (エラーバーは最小値及び最大値、箱は測定点の標準偏差($\sigma=1$)を示す)