

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、西澤 幸康、石田 睦司（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 6 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 27 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。

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 27 年 9 月 2 日～10 月 22 日までに 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 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-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、無人ヘリ下部の半径 100 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半径 100 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/ μ 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た。測定された高度ごと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、高度補正係数(AF: Attenuation factor: m^{-1})を算出した。

これらの計数を用いて、実際のフライトで取得されたガンマ線計数率を空間線量率(μ Sv/h)に換算するとともに、実際のフライトにおける対地高度と基準高度のずれを AF により補正した。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7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、放射性セシウムの沈着量はゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定にて測定した。無人ヘリの測定結果と同地点における地上の測定値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、散布図におけるばらつきの原因は上空と地上の測定対象の違いにある。すなわち、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下向き約 45° の円錐の底面積に該当する直径 200 m ほどの円が範囲となる。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、ばらつきの要因となっていると考えられる。特に、除染を行った場所やアスファルト上など比較的周辺より空間線量率の低い場所で地上の測定を実施した箇所では、無人ヘリの測定結果が過大評価となる。

(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、相対減衰率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から、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 日を 100% とすると 48% 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。

今回も含めて過去 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 の赤線は緩衝深度を 1 とし、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。プロットと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、空間線量率の減少傾向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

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)。

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。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、無人ヘリによる測定日から過去 7 回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半減期だけでなく、土壤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、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。

4. まとめ

- 平成 27 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 48% 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壤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として土壤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。
- 今後、空間線量率の減少に伴い、天然の放射性核種の影響が無視できなくなると考えられる。より高精度化するため、 γ 線スペクトルから天然の放射性核種の影響を除去する方法の検討を行った。その結果を Appendix-1 に示す。

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

表-2 使用したパラメータと検出下限値

	Parameter*	n
高度補正係数 (AF) (m ⁻¹)	-0.0061 ± 0.00067	32
空間線量率換算係数 (CD) (cps/μSv/h)	4140 ± 370	33
検出下限値		
線量率 (μSv/h)	0.050	
放射性セシウム沈着量 (kBq/m ²)	4.0	

* 誤差は標準偏差(σ)で表記



図-1 無人ヘリの仕様

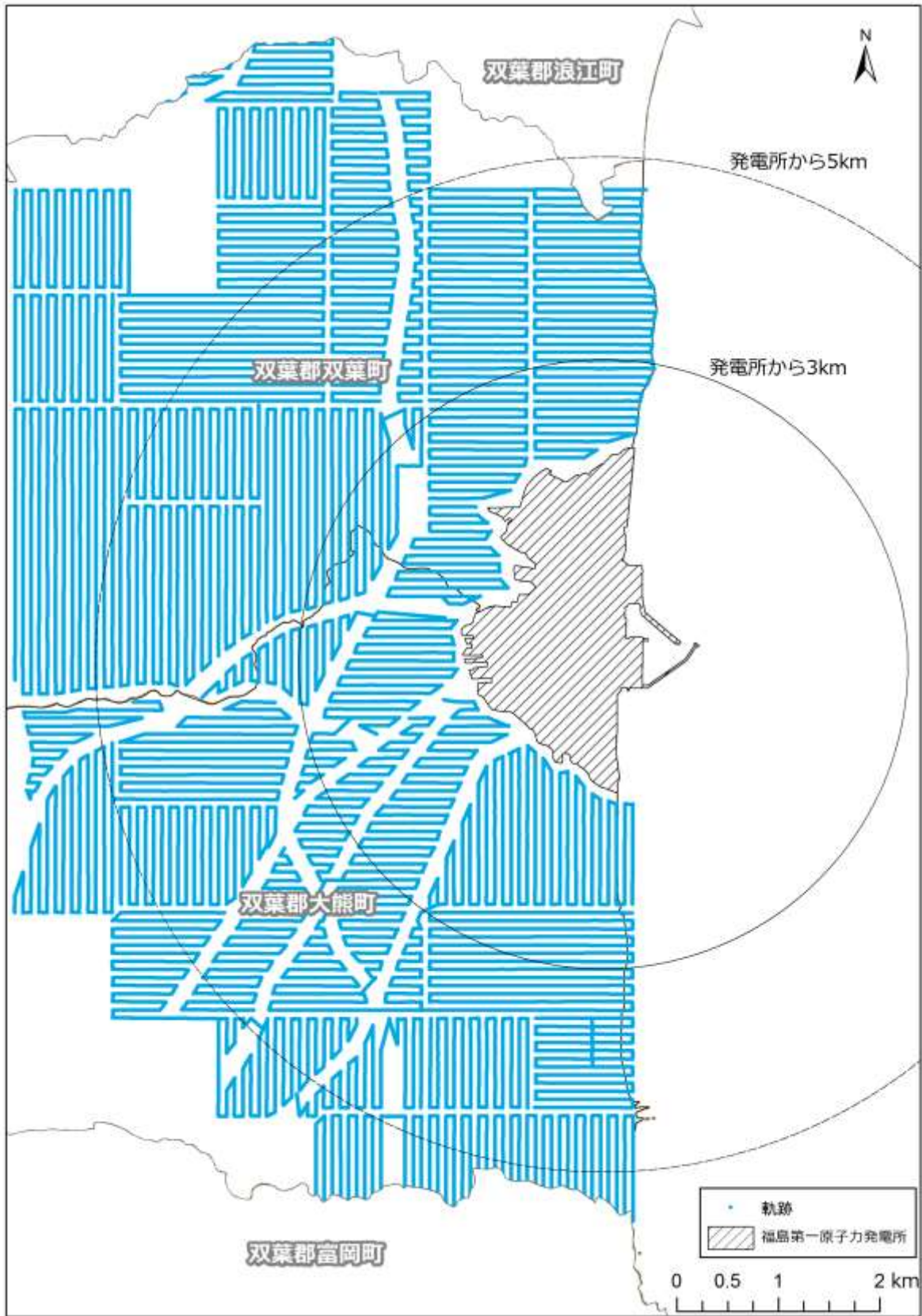


図-2 無人ヘリの飛行軌跡

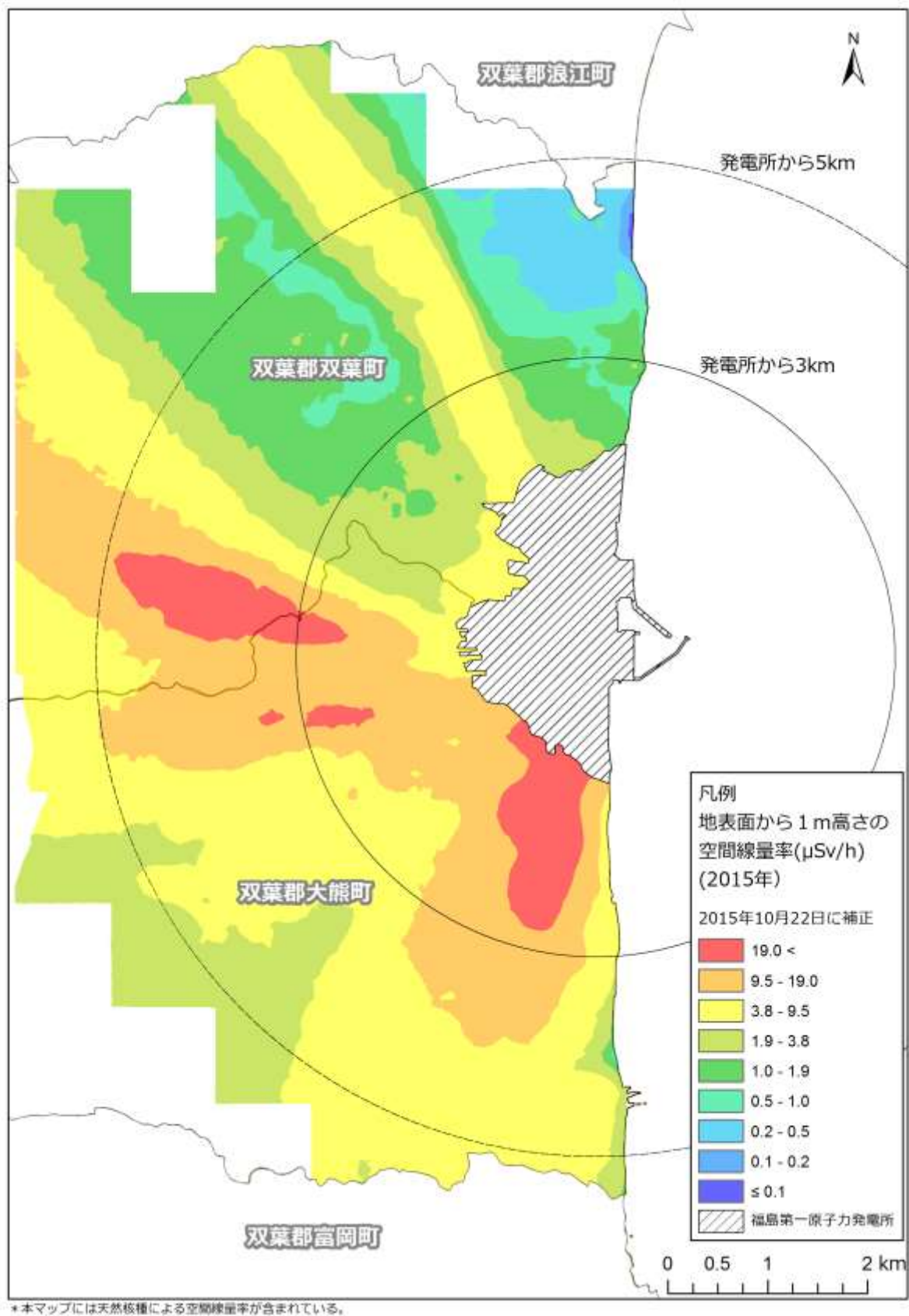


図-3 第7回モニタリングの空間線量率マップ

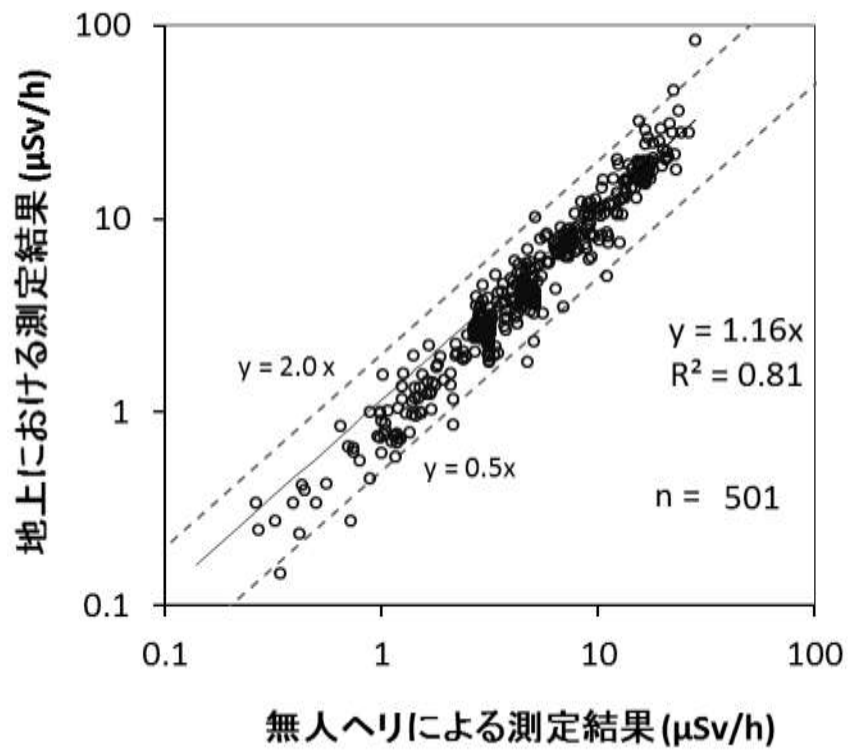


図-4 地上の測定結果との比較

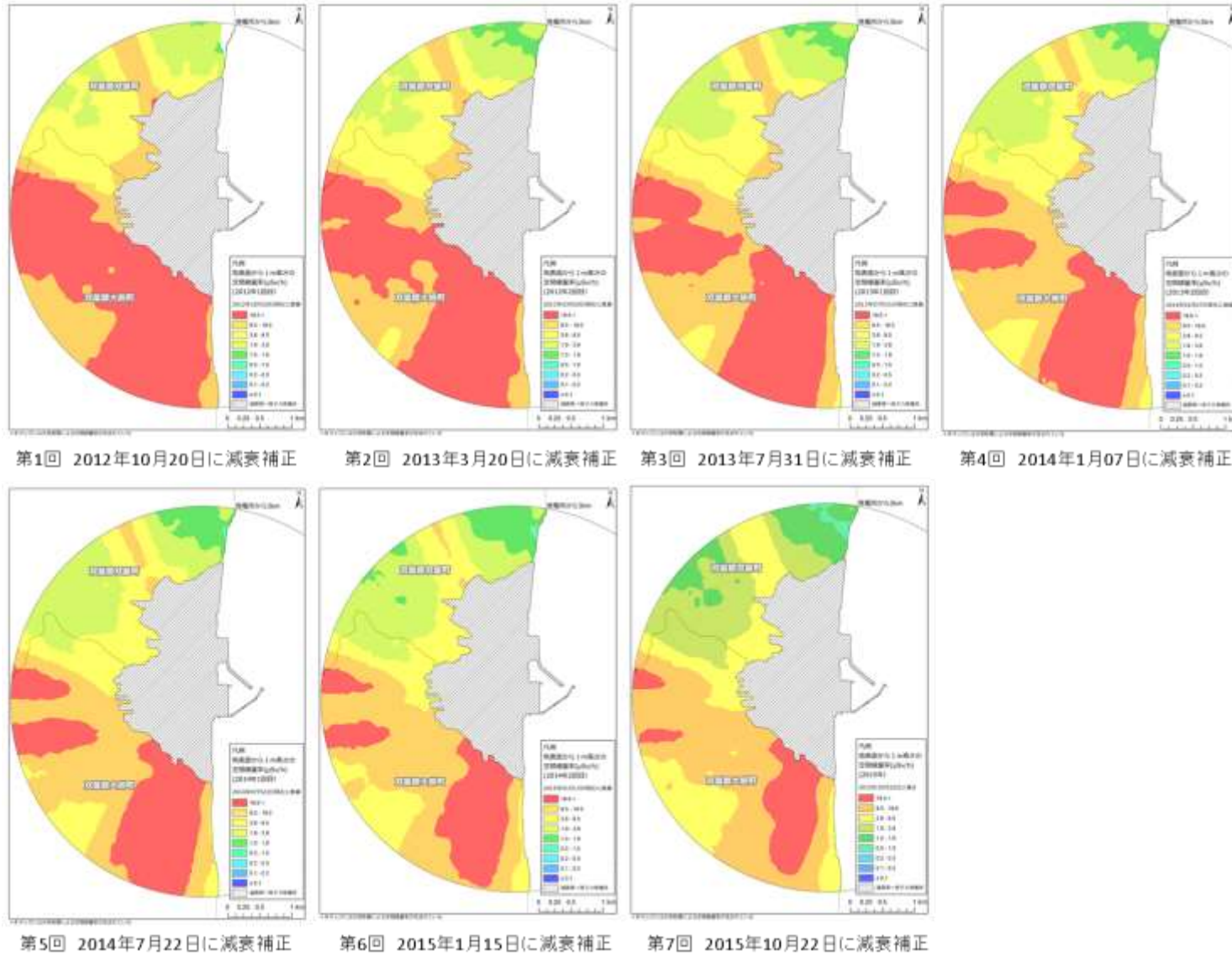


図-5 過去の無人ヘリによる空間線量率測定結果の比較

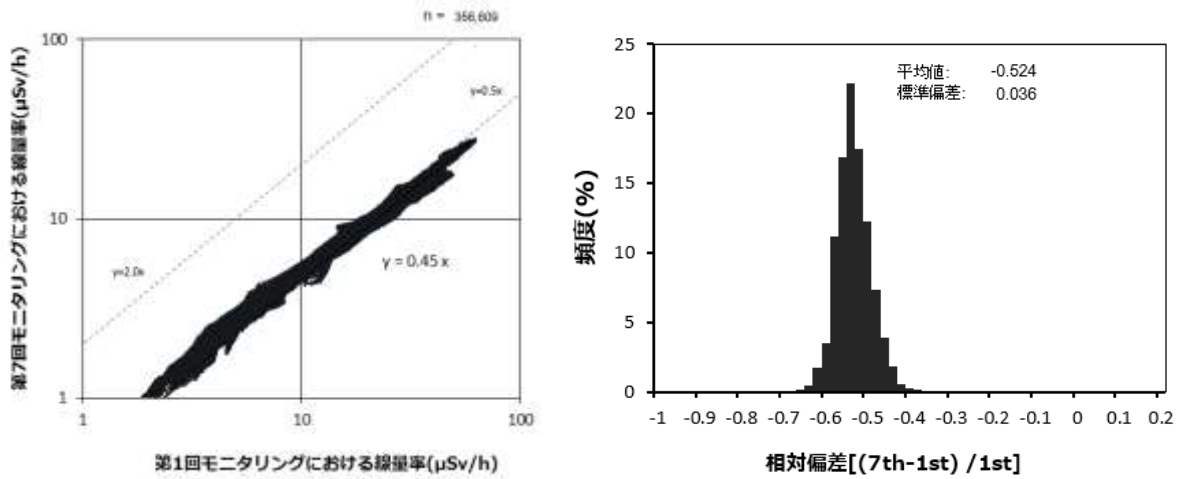


図-6 第7回モニタリングと第1回モニタリングの変化傾向

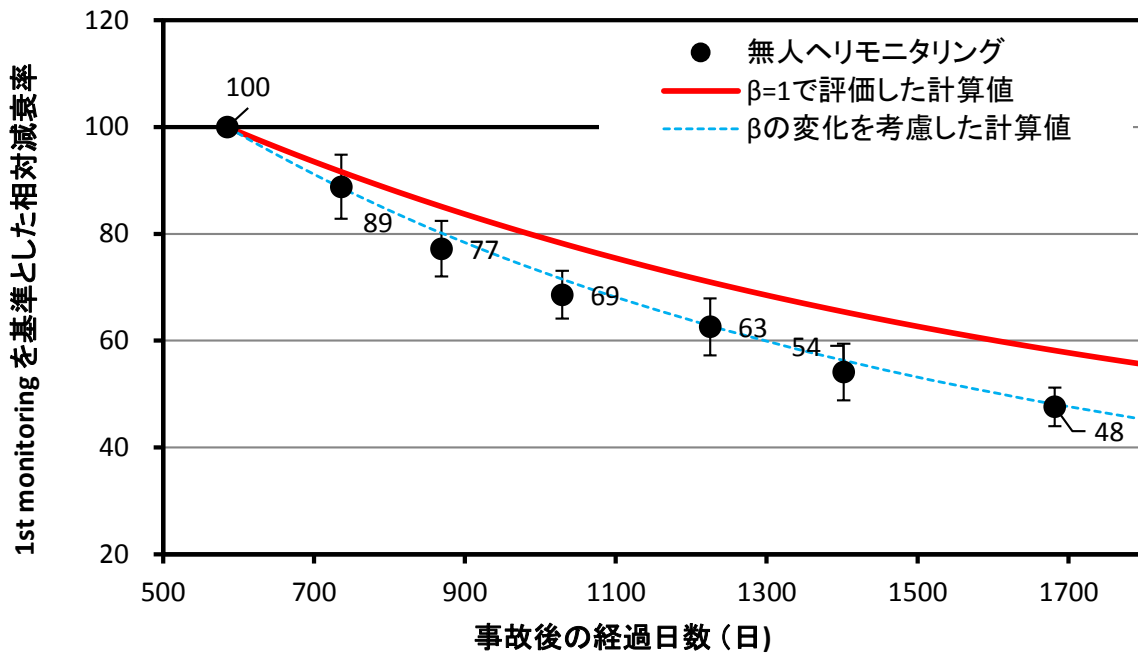


図-7 第1回モニタリングデータを1とした場合のモニタリング時期と空間線量率の比較 (図-6で示したヒストグラムの平均値をプロットし、標準偏差を誤差棒として表示)

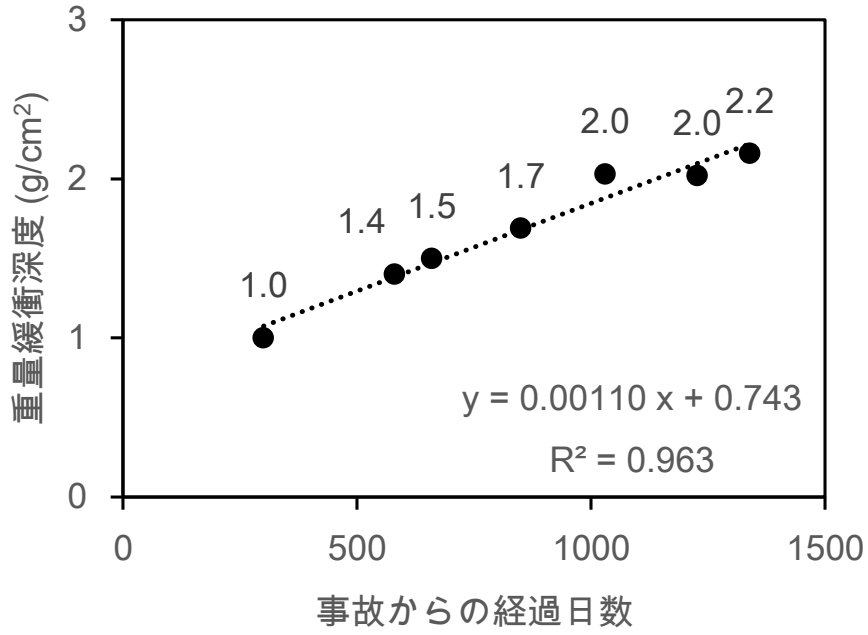


図-8 事故からの経過日数と重量緩衝深度の実測値の関係

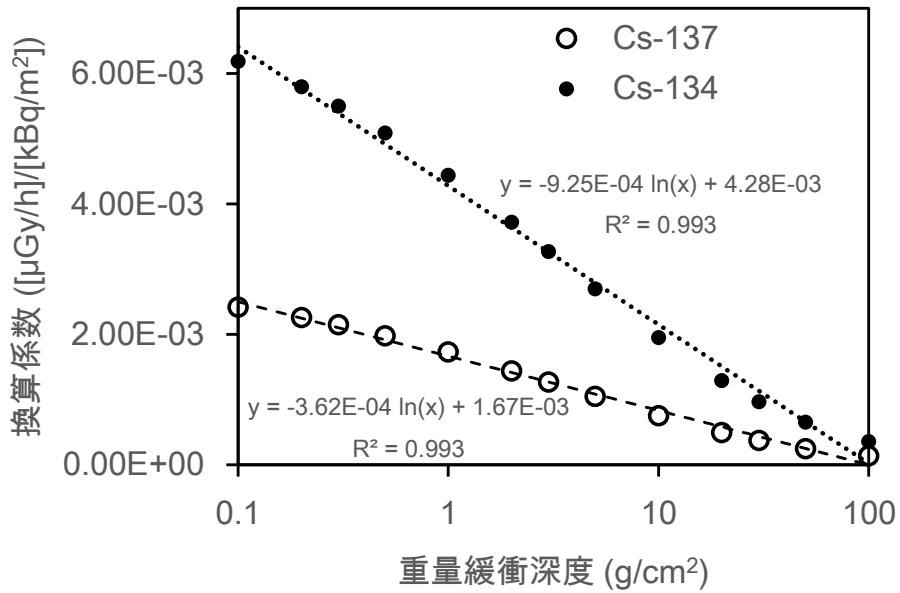


図-9 重量緩衝深度と換算係数の関係

Appendix-1

無人ヘリによる測定結果の高精度化のための γ 線スペクトルから 天然の放射性核種の影響を除去する方法の検討

事故から5年が経過し、放射性セシウムが減衰しており、天然の放射性核種の影響が無視できなくなってくると考えられる。現在の手法において放射性セシウムの沈着量の換算には、本章2.(5)に示したように無人ヘリによる測定範囲の50地点において、地上でin-situゲルマニウム検出器を用いて天然の放射性核種の線量率を実測し、その平均値を無人ヘリで測定した空間線量率の測定結果から減算した後、放射性セシウムの沈着量に換算している。一方、有人ヘリによる航空機モニタリングでは、上空で得られた γ 線のスペクトルから天然の放射性核種を減算する手法(ManMade Gross Count methods: MMGC法)が一般的である⁹。しかしながら、シンチレータの製作時にアクチニウム系列やLa-138等の放射性同位元素が含まれ(以下、検出器の自己汚染核種)、それらの放射線がバックグラウンドとなるLaBr₃(Ce)検出器に適用された例は少ない。

今回、LaBr₃(Ce)検出器を用いている無人ヘリのデータについてMMGCを適用し、天然の放射性核種の影響を除去することによって、放射性セシウムの沈着量への換算を高精度化することを試みた。

(1) MMGC法の概要

本方法は、天然核種のみで構成される γ 線スペクトルが、放射性セシウムの放出する γ 線を含まない1,400~2,800 keVの計数率($C_{>1400\text{keV}}$)と全計数率(C_{all})の比(BG_{index})が一定であることを利用する。MMGC法で使用するスペクトルのROI(Region of Interest; 関心領域)のイメージ及び手順を図-10に示す。

- ① 海上での測定データ(検出器の自己汚染核種による計数)及び放射性セシウムの存在しない天然核種のみでの測定データを取得する。
- ② 天然核種のみでの測定データから海上での測定データを減算する。
- ③ 減算したスペクトルの計数率から全計数及び BG_{index} を算出する。
- ④ 実際の測定データの $C_{>1400\text{keV}}$ (放射性セシウムによる計数を含まない領域)に BG_{index} を掛け算し、全領域(特に、1,400 keV以下の領域)に含まれる天然核種由来の計数率を減算する。
- ⑤ 減算した計数率は放射性セシウムのみでの計数率とし、放射性セシウムの沈着量に換算する。

(2) パラメータ

LaBr₃(Ce)検出器の自己汚染を評価するために、海上で対地高度260 mのデータを取得した。また、天然核種のみでの γ 線スペクトルは、放射性セシウムの影響のない地域において、対地高度40 mで無人ヘリをホバリングすることにより取得した。これらのスペクトルから BG_{index} を設定した($BG_{\text{index}}=51.7$)。次に、実際の無人ヘリ測定データから自己汚染の計数率(C_{self})を減算し、1,400~2,800 keVの計数率($C_{>1400\text{keV}}$)から式-1により放射性セシウムのみでの計数率(C_{Cs})を算出した。放射性セシウムの沈着量は、有人のヘリを用いた航空機

⁹ Proctor, A. E., Aerial radiological surveys, DOE/NV/11718-127, 1997.

モニタリングの手法と同様に換算係数を用いて算出した¹⁰。なお、ここで換算係数は従来法との比較を目的とし、従来法及びMMGC法ともに重量緩衝深度は $\beta=1$ の数値を用いている。

$$C_{Cs} = (C_{all} - C_{self} - C_{>1400keV} \times BG_{index}) \quad (\text{式-1})$$

(3) 天然核種による空間線量率マップ

図-11 に、天然核種のみを抽出した空間線量率マップを示す。天然核種による空間線量率は $0.04 \sim 0.07 \mu\text{Sv/h}$ 程度であり、事故前のバックグラウンド空間線量率と概ね整合する¹¹。このように、MMGC法を用いると天然の放射性核種による空間線量率マップを作成することができるため、今後の空間線量率の変化傾向の考察には有効であると考えられる。

(4) 地上値との比較

本手法の妥当性を検証するため、地上で行った in-situ Ge 検出器による天然の放射性核種由来の空間線量率測定結果と MMGC 法で求めた無人ヘリによる天然の放射性核種由来の空間線量率測定結果を比較した。in-situ Ge 検出器による放射性セシウムの測定は、発電所周辺で任意の 25 地点で実施した。比較結果を図-12 に示す。散布図を見ると、ばらつきが大きいものの、一定の相関関係が認められた。天然の放射性核種の空間線量率は $0.1 \mu\text{Sv/h}$ 以下であり、上空からでは計数率が小さくなってしまふことを考え合わせると妥当な結果であると考えられるが、今後、地上での測定結果を増やす等の検討が必要である。

次に、放射性セシウムの沈着量について、地上で行った in-situ Ge 検出器による測定結果と MMGC 法で換算した無人ヘリによる測定結果を比較した。比較結果を図-13 に示す。図-13(a)には従来手法での換算結果の比較、図-13(b)には MMGC 法による換算結果の比較を示している。近似直線の傾きは、MMGC 法を適用したことにより、若干 1 に近づいているものの大きな差は見られなかった。この結果は、本地域は天然核種と比較して放射性セシウムの方が卓越しているため、違いが見えにくくなっていると考えられる。今後、放射性セシウムによる空間線量率が天然放射性核種由来の空間線量率に近い場所で評価する必要がある。また、従来法と MMGC 法で並行して解析を行い、有効性を評価していく必要がある。

¹⁰ 眞田ら、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

¹¹ 日本分析センター, 平成 22 年度 環境放射能水準調査結果 総括資料, (http://www.kankyo-hoshano.go.jp/08/soukatsu_lib/h22_suijun.pdf).

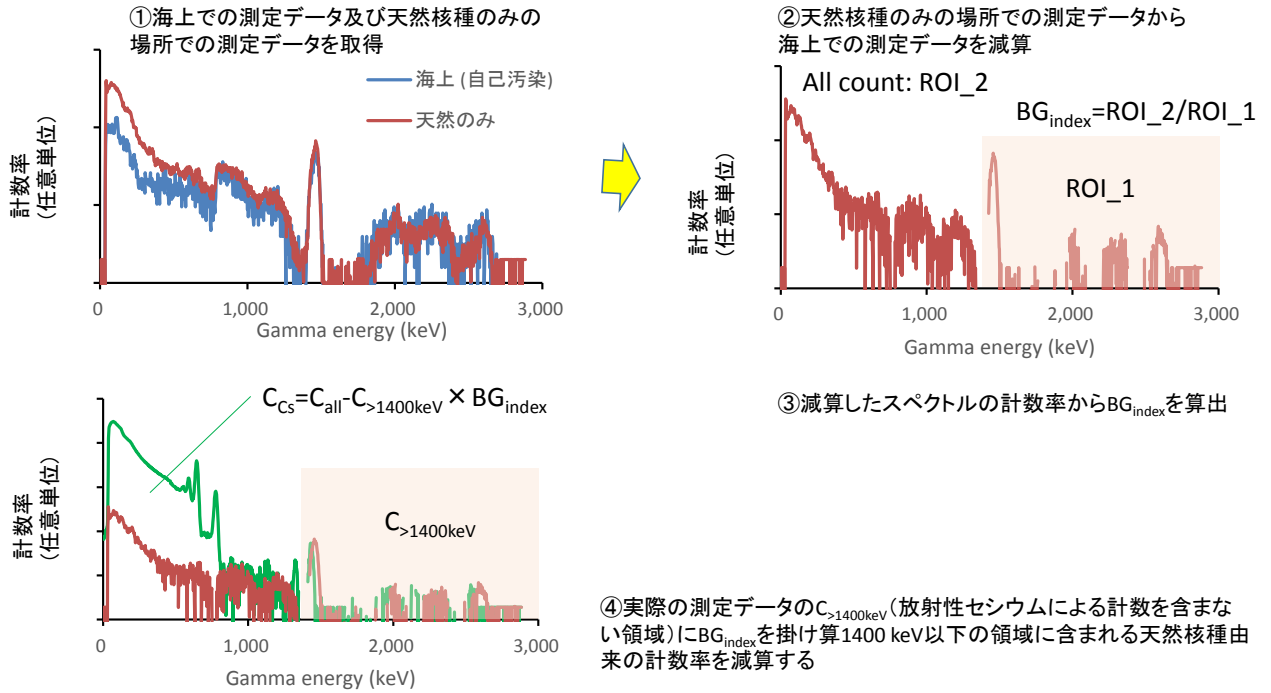


図-10 MMGC 法のイメージ

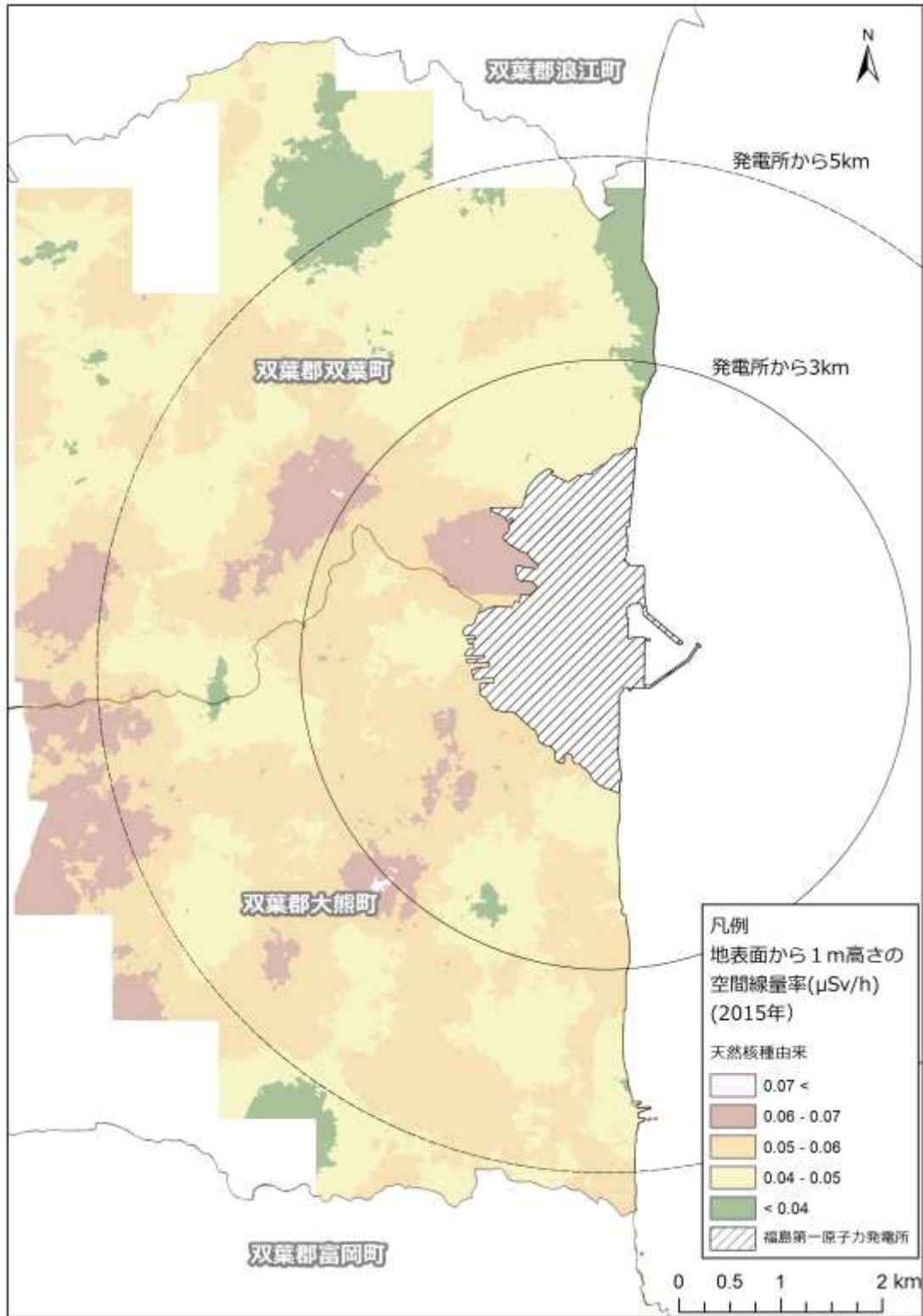


図-11 天然放射性核種による空間線量率マップ

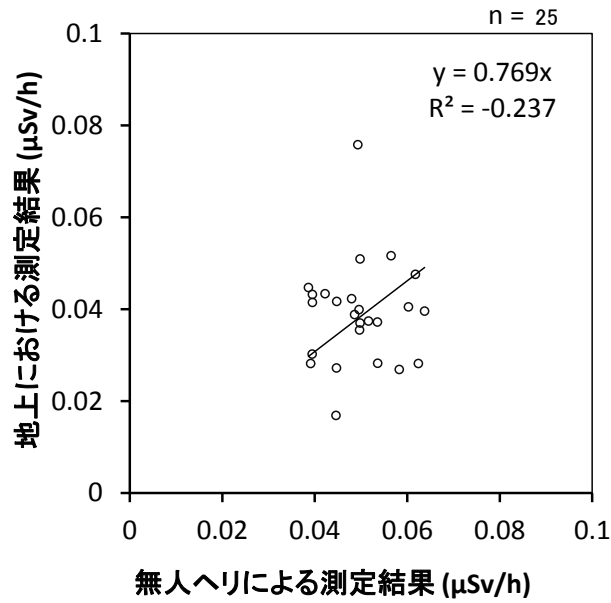


図-12 無人ヘリと地上の in-situ Ge 測定の間線量率の比較

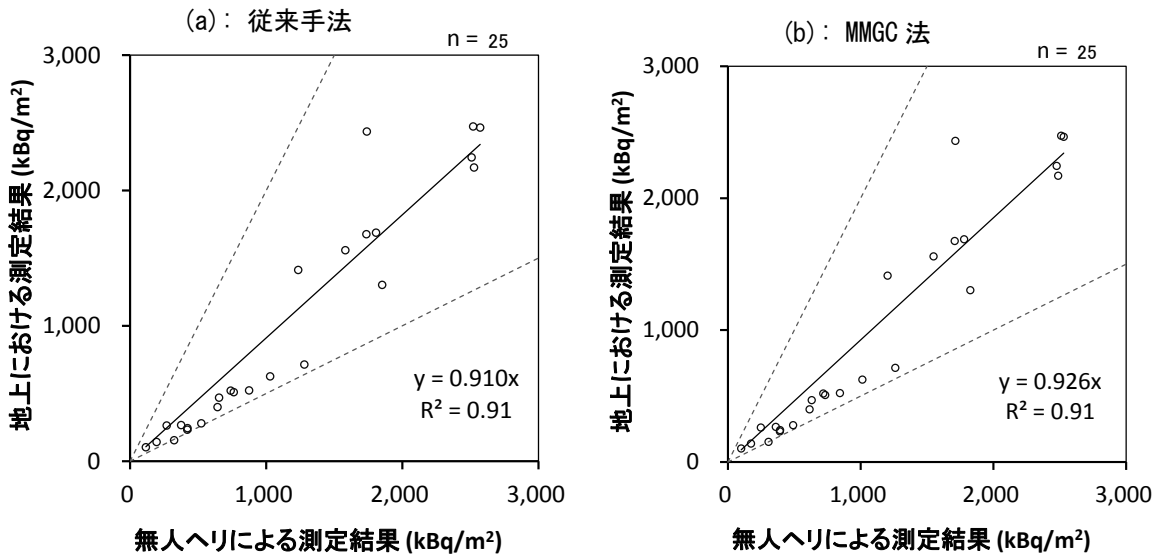


図-13 無人ヘリと地上の in-situ Ge 測定による放射性セシウムの沈着量の比較
(in-situ Ge は $\beta=1$ で評価)
(a) : 従来手法、(b) : MMGC 法