

平成 24 年 12 月 10 日

第3次分布状況等調査進捗状況説明資料

「無人ヘリコプターを用いた福島第一原子力発電所から 3 km 圏内の空間線量率及び放射性セシウムの沈着量の分布状況の把握、及び河岸周辺における空間線量率、放射性セシウムの沈着量の分布状況の把握」

代表研究者：鳥居 建男（日本原子力研究開発機構）

1. 背景

（独）日本原子力研究開発機構は、文部科学省からの委託により、昨年の 6 月期及び 12 月期に放射性物質の分布状況調査を実施し、広範な地域における空間線量率及び放射性セシウムの沈着量の詳細な分布状況を把握してきた。

各地域における空間線量率及び放射性セシウムの沈着量の分布状況は、放射性セシウムの物理的減衰や降雨等の影響により、時間の経過とともに変化すると考えられる。

そこで、平成 24 年度から、福島第一原子力発電所から 80 km 圏内を対象に、空間線量率及び放射性セシウムの沈着量の変化傾向を把握するための調査研究を実施し、自然環境中における放射性物質の分布状況の変化モデルの作成を目指す。

2. 本調査研究の目的

（独）日本原子力研究開発機構では、空間線量率及び放射性セシウムの沈着量の変化傾向の把握に向けて、サーベイメータ等による地上の固定点における測定データ及び、走行サーベイによる道路上の連続データ、航空機モニタリングによる面的な測定データを用いて評価することを予定している。他方で、福島第一原子力発電所から 3km 圏内については、事故による放射性物質の放出源（原子炉建屋）に近く、上空からの測定の際に建屋からの直達線や散乱線の影響が考えられたことや、3km から敷地境界付近までの狭く入り組んだ地形の範囲を測定することから、低高度飛行で小回りの利く無人ヘリコプターを用いたモニタリングを実施することとした。

また、河岸周辺においては、降雨等の増水の影響により、比較的狭い範囲で空間線量率及び放射性セシウムの沈着量の分布状況が変化することが確認されているが、航空機モニタリングでは地上の直径 600 m 程度の円形の範囲からの平均的なガンマ線量を測定するため、河岸周辺の詳細な空間線量率及び放射性セシウムの沈着量の分布状況の詳細は確認できていなかった。

そこで、本調査研究では、空間線量率及び放射性セシウムの沈着量の変化傾向の詳細把握に向け、航空機モニタリングによる面的な測定データを補完することを目的に、以下の測定及び評価を実施した。

- (1) 無人ヘリコプターを活用して、福島第一原子力発電所から 3 km 圏内について 2 期にわたってモニタリングを実施し、地上 1m 高さの空間線量率及び地表面への放射性セシウムの沈着量を測定する。
- (2) 福島第一原子力発電所から 3 km 圏内における福島第一原子力発電所の施設起因の直達線や散乱線、地表面に沈着した放射性セシウム以外からのガンマ線の影響を確認し、(1) で測定した空間線量率、放射性セシウムの沈着量への影響を評価する。
- (3) (1)、(2) の結果を基に、福島第一原子力発電所から 3 km 圏内の空間線量率の分布状況を記した空間線量率マップ、放射性セシウムの沈着量の分布状況を記した放射性セシウムの沈着量マップを作成する。
- (4) 無人ヘリコプターを活用して、河岸に沿ってモニタリングを実施し、河岸周辺における地上 1 m 高さの空間線量率及び放射性セシウムの詳細な分布状況を記したマップを作成する。
- (5) (3) の結果を基に、福島第一原子力発電所から 3 km 圏内の空間線量率、放射性セシウムの沈着量の変化の状況を確認するほか、(4) の調査を今後も継続的に実施し、河岸周辺における空間線量率、放射性セシウムの沈着量の変化の状況を把握する。

なお、今回の報告は、福島第一原子力発電所から 3 km 圏内の 1 回目の測定結果（空間線量率、放射性セシウムの沈着量の分布状況）をまとめたものである。

3. 今回の調査の期間

- (1) 無人ヘリコプターを活用した、福島第一原子力発電所起因の直達線や散乱線によるガンマ線の影響の測定（平成 24 年 8 月 30 日から 9 月 1 日）
- (2) 無人ヘリコプターを活用した、福島第一原子力発電所から 3 km 圏内の空間線量率、放射性セシウムの沈着量の測定（平成 24 年 10 月 2 日から 10 月 20 日）

4. 測定機関

- (独) 日本原子力研究開発機構

5. 調査箇所

- (1) 無人ヘリコプターを活用した、福島第一原子力発電所起因の直達線や散乱線によるガンマ線の影響の測定：福島第一原子力発電所から 1 km 程度（海上）（図 1 参照）
- (2) 無人ヘリコプターを活用した福島第一原子力発電所から 3 km 圏内の空間線量率、放射性セシウムの沈着量の分布状況の評価：福島第一原子力発電所から 3 km 圏内（陸上）（図 2 参照）

測定にあたっては、ヤマハ発動機(株)自律飛行型無人ヘリコプターRMAX G1 を使用し、飛行高度は 50 - 80 m 程度、測線間隔は 80 m（一部 50 m で実施）程度で飛行しながら、地上からのガンマ線及び直達線や散乱線によるガンマ線（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。

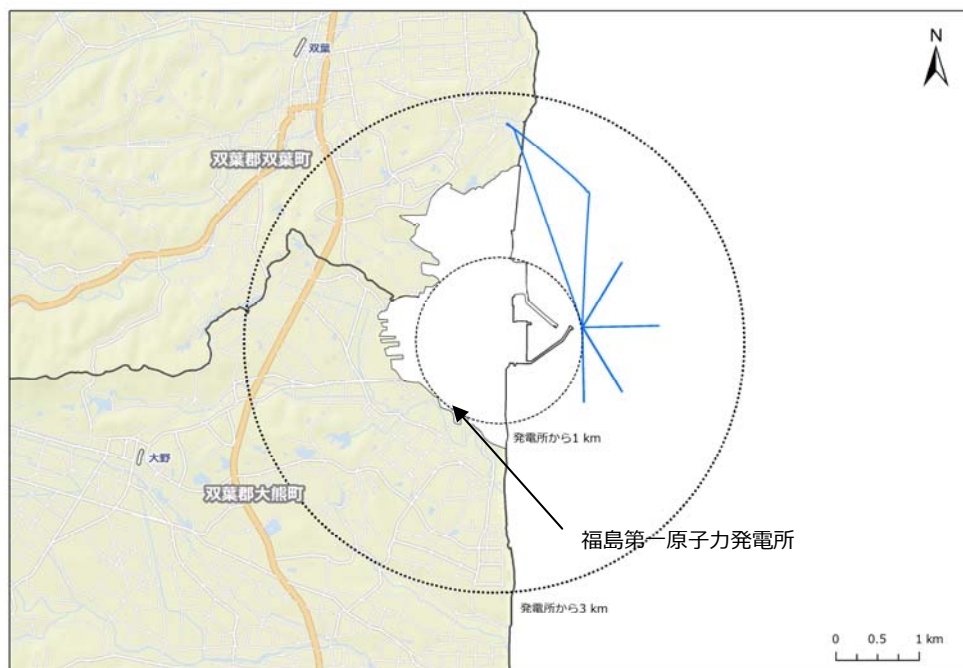


図 1 海上からの福島第一原子力発電所起因の直達線や散乱線のガンマ線量（計数率）の測定における飛行軌跡（青色）

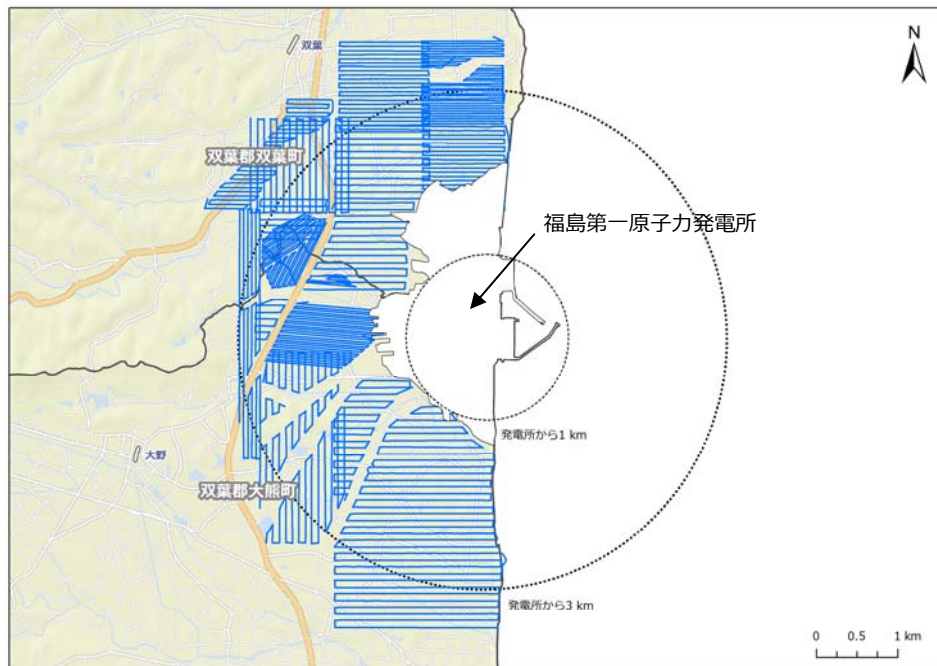


図2 福島第一原子力発電所から3 km 圏内のガンマ線量（計数率）の測定における無人ヘリコプターの飛行軌跡（青色）

6. 調査内容

無人ヘリコプターを活用した、福島第一原子力発電所から3 km 圏内の空間線量率及び放射性セシウムの沈着量の測定結果について以下に示す。

(1) 無人ヘリコプターによる測定でのデータの取得方法

- 無人ヘリコプターの飛行高度は対地高度で50～80 m程度であり、その測定値は、無人ヘリコプター下部の半径50～80 m程度（飛行高度により変化）の円内のガンマ線量を平均化したものである。
- 無人ヘリコプターの軌跡幅（測線間隔）は、50 mまたは80 mとした。
- 無人ヘリコプターの飛行速度は、8 m/s (=28.8 km/h)程度である。
- 取得データは、放射線検出器で測定される1秒毎のガンマ線量のデータ（計数率）とエネルギースペクトル及びそれに対応するGPSによる位置情報を記録した。

(2) 無人ヘリコプターで取得された測定データの空間線量率への換算

- 無人ヘリコプターを用いた空間線量率、放射性セシウムの沈着量の解析のイメージを図3に示す。
- 上空で測定されたガンマ線量を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、無人ヘリコプターで、テストサイト上空の対地高度 80 m 付近をホバリングし、この高度（基準高度）で取得されたガンマ線量（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 ($\text{cps}/\mu\text{Sv/h}$) を算出した。
- その後、テストサイト上空の対地高度 10 m から 100 m までを 10 m 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した空間線量率換算係数 CD から空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$) に換算するとともに、対地高度と空気によるガンマ線量の減弱係数 μ により、高度補正を行った。なお、対地高度は GPS により測定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) のデータを差し引いて、測定地点の対地高度を求めた。

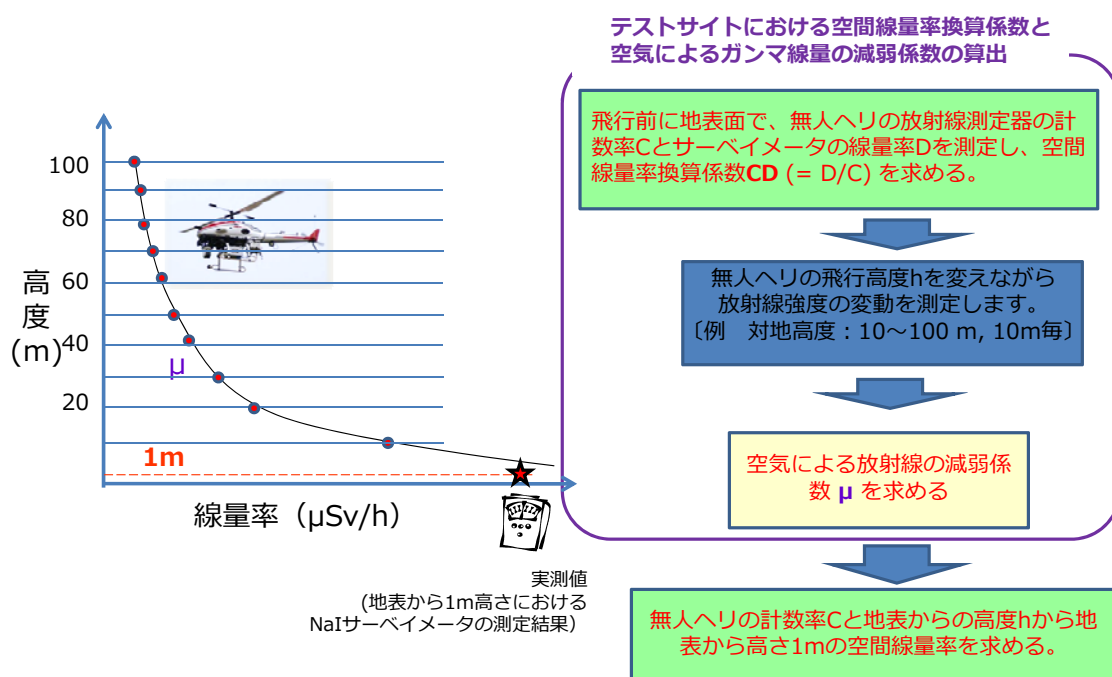


図3 無人ヘリコプターで取得されたガンマ線量（計数率）を
地上 1m 高さの空間線量率への換算する際のイメージ図

(3) 無人ヘリコプター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

- 警戒区域内で日本原子力研究開発機構がゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定の結果を基に、天然放射性核種 (K-40、U 系列、Th 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、②で求められた空間線量率から、この値を差し引くことにより、放射性セシウム (Cs-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」(p. 83-84) に記載されている緩衝深度 ($\beta = 1.0 \text{ g/cm}^*$) 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。無人ヘリコプターの検出器で測定されたガンマ線のエネルギースペクトルの例を図 4 に示す。

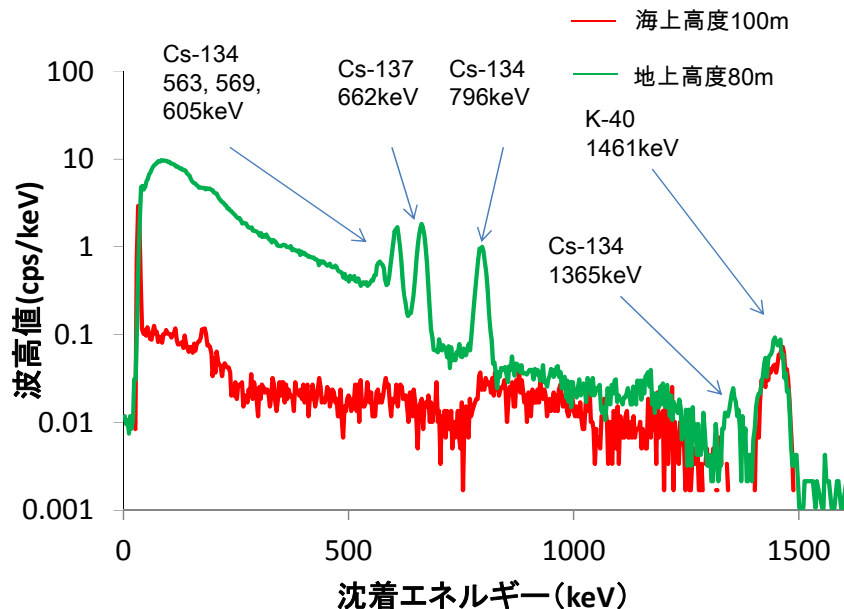


図 4 無人ヘリコプターの検出器で測定されるガンマ線のエネルギースペクトルの事例 (赤: 海上でのデータ; 緑: 3 km 圏内の地上でのデータ)

* 第 2 次分布状況等調査の結果から、福島第一原子力発電所から 80km 圏内では、緩衝深度 (β) が平均 1.2 g/cm^2 であることが確認されているが、 $\beta = 1.0$ を $\beta = 1.2$ にした際の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 ($(\mu \text{ Gy/h}) / (\text{kBq/m}^2)$) は、Cs-137、134 とともに 1.5~1.8 % 程度の差しかないため、本調査では、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」に従い、航空機モニタリングの換算方法と同様に、 $\beta = 1.0$ を使用することとした。

(4) 空間線量率及び放射性セシウムの沈着量の測定結果の一定時点への換算（減衰補正）

- 各地点の測定結果は測定日が異なるため、各測定地点における地上 1 m 高さの空間線量率及び地表面へ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、今回の福島第一原子力発電所から 3 km 圏内の無人ヘリコプターの測定最終日である平成 24 年 10 月 20 日の値に換算した。

(5) 無人ヘリコプターを活用した、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、各測定地点の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。
- 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にあたっては、補間したデータを含め、文部科学省が実施している航空機モニタリングの空間線量率及び放射性セシウムの沈着量の大きさごとに色分けしてマップングした。

7. 今回の調査の結果及び考察

(1) 福島第一原子力発電所から 3 km 圏内における福島第一原子力発電所起因の直達線や散乱線によるガンマ線の影響の測定結果

福島第一原子力発電所近傍において、空間線量率及び地表面への放射性セシウムの沈着量を精度良く評価するためには、施設から放出されるガンマ線（直達線、散乱線）の影響を評価する必要がある。

そこで、陸上側と海上側でこの影響が大きく変わらないという仮定のもと、無人ヘリコプターを用いて海上から福島第一原子力発電所近傍に飛行することで福島第一原子力発電所近傍のガンマ線（直達線、散乱線）の計数率（1 秒毎の計数）の測定を行った。測定にあたっては、地上からのガンマ線の影響がなく、福島第一原子力発電所施設起因のガンマ線（直達線、散乱線）による影響だけが測定可能な海上において、距離及び対地高度を変えて、その影響を測定した。

その結果、ガンマ線（直達線、散乱線）による影響について以下の内容が確認された。

- 図 5 に示すように、福島第一原子力発電所の東側正面の海上で最も計数率が高い。
- この計数率の大きさは高度によるバラツキはあるにしろ、図 6 に示すように、対地高度が高くなるにつれて、ガンマ線（直達線、散乱線）の計数率は増加する傾向にある。今回の結果では、対地高度が 120 m 以下の高度でのガンマ線（直達線、散乱線）の影響は小さいと考えられる。
- 測定地点におけるバラツキはあるにしろ、図 7 に示すように発電所からの距離が離れるにつれてガンマ線（直達線、散乱線）の計数率は減少する傾向にある。
- 図 8 に示すように、海上で測定されたガンマ線のエネルギースペクトルから放射性

セシウムのピーク（662keV、796keV 等）が見られず、低エネルギー成分（数 10 keV - 500 keV）の計数率が大きいことから、海上で測定されたガンマ線は、放射性セシウムの直達線ではなく、建物、地面及び大気により多数回の散乱を経た散乱線である。

- 今回の海上における調査で最大の計数率を示した場所は、福島第一原子力発電所から最も直線距離で近接した場所（約 1 km）であり、その計数率は機体のバックグラウンドを差し引いて計算すると、約 600 cps 程度（図 7 の最大値、1 km 地点での計数率）である。福島第一原子力発電所から 3 km 圏内の無人ヘリコプターの測定において、高度 80 m でこの計数率（600 cps）を計数したと仮定すると、地上 1m 高さの空間線量率の値に換算すると約 $0.2 \mu\text{Sv/h}$ になる。

上記の結果から、福島第一原子力発電所の 3 km 圏内の無人ヘリコプターの測定結果に対する、福島第一原子力発電所起因の直達線や散乱線によるガンマ線の影響としては以下のことが言える。

- 今回の福島第一原子力発電所の 3 km 圏内の無人ヘリコプターの測定は、フライト高度は高くても対地高度で 80 m 程度であり、原子炉建屋から水平距離で 1 km 程度以遠において測定している。この範囲において、若干の福島第一原子力発電所起因の直達線や散乱線によるガンマ線の影響は考えられる。
- 他方で、今回の調査から直達線や散乱線によるガンマ線の影響は距離が離れるほど、対地高度が低くなるほど小さくなることが確認されている。
- また、原子炉建屋から直線距離で 1 km 以遠の位置で無人ヘリコプターを活用して空間線量率を測定した場合、直達線や散乱線によるガンマ線を計測するため、地上 1m 高さの空間線量率の値に換算して、最大で約 $0.2 \mu\text{Sv/h}$ 高めに測定されているものと考えられる。福島第一原子力発電所から 3 km 圏内での無人ヘリコプターによる空間線量率の測定結果の最小値は $1.4 \mu\text{Sv/h}$ であったことから、福島第一原子力発電所起因の直達線や散乱線によるガンマ線の影響は測定誤差の範囲内であると言える。
- このため、今回の無人ヘリコプターを活用した福島第一原子力発電所から 3 km 圏内の空間線量率、放射性セシウムの沈着量の測定結果をマップ化するにあたっては、発電所施設起因のガンマ線（直達線、散乱線）の影響を無視して考えることとした。

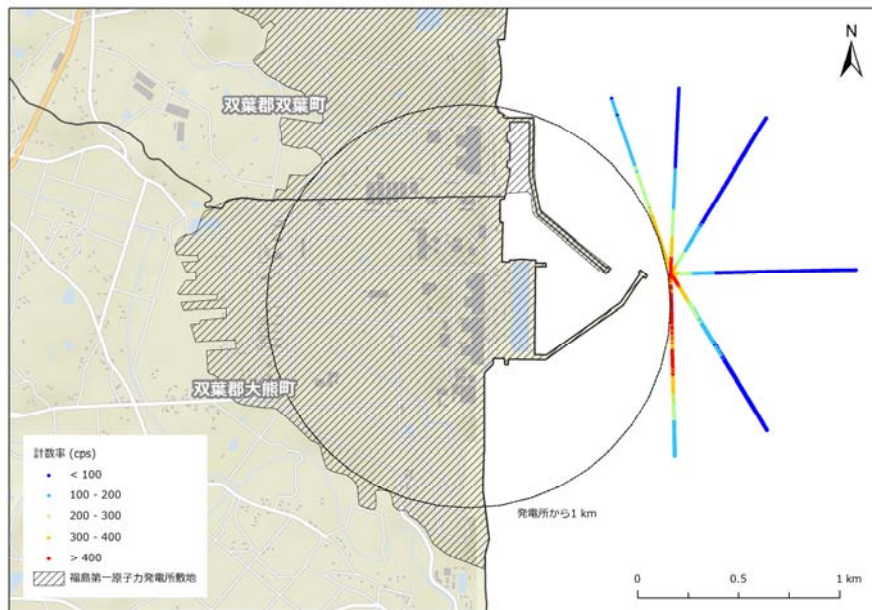


図5 海上におけるガンマ線（直達線、散乱線）の計数率(cps)の状況

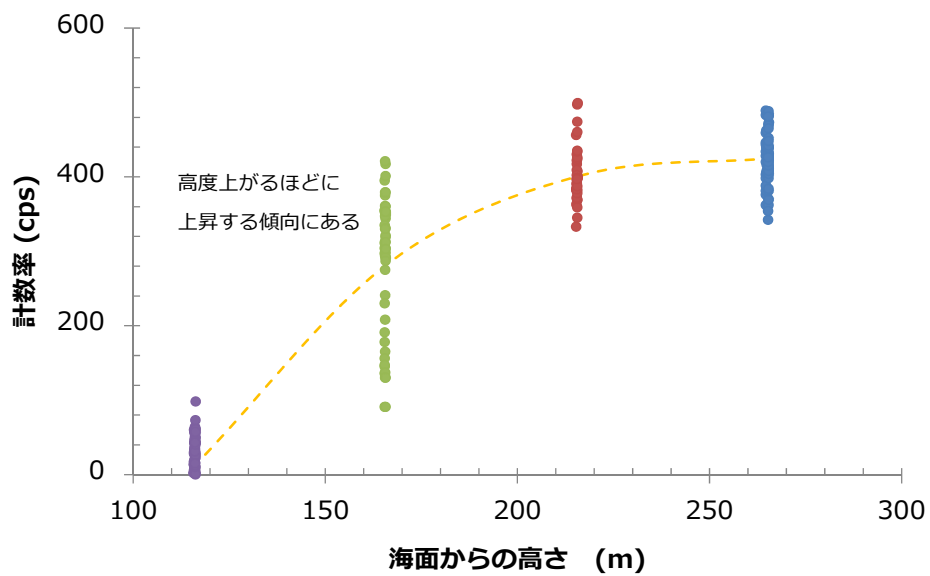


図6 上空で測定されたガンマ線（直達線、散乱線）の計数率と対地高度との関係（福島第一原子力発電所からの水平距離 1km の海上で測定）

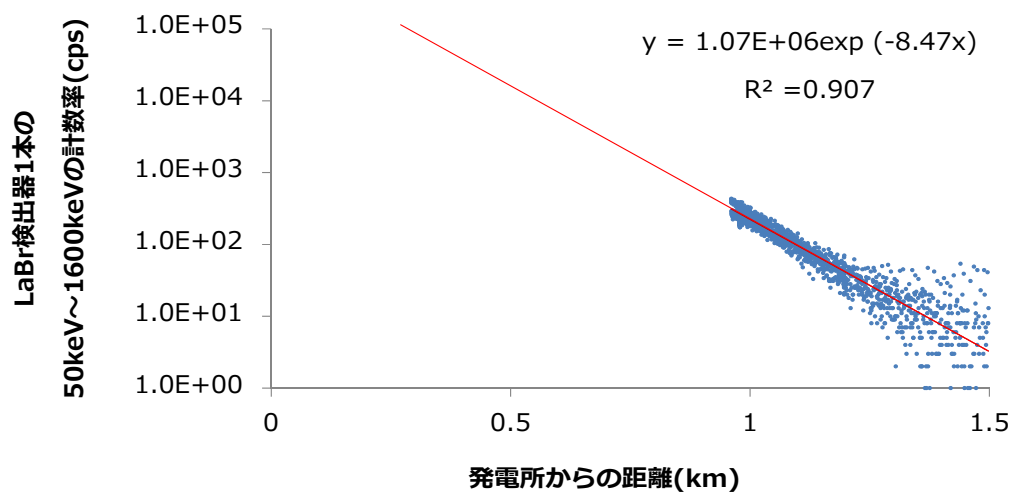


図7 上空で測定されたガンマ線（直達線、散乱線）の計数率と
福島第一原子力発電所からの直線距離との関係

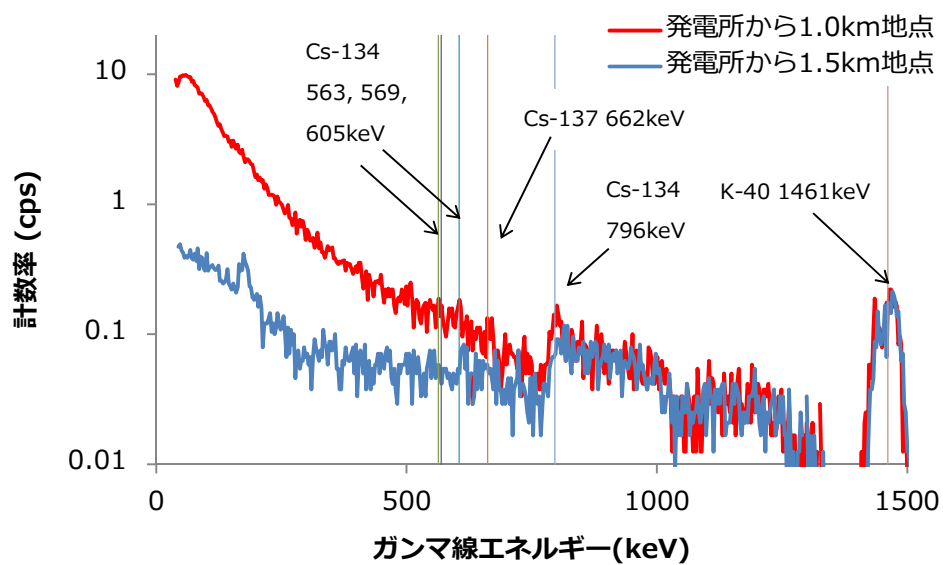
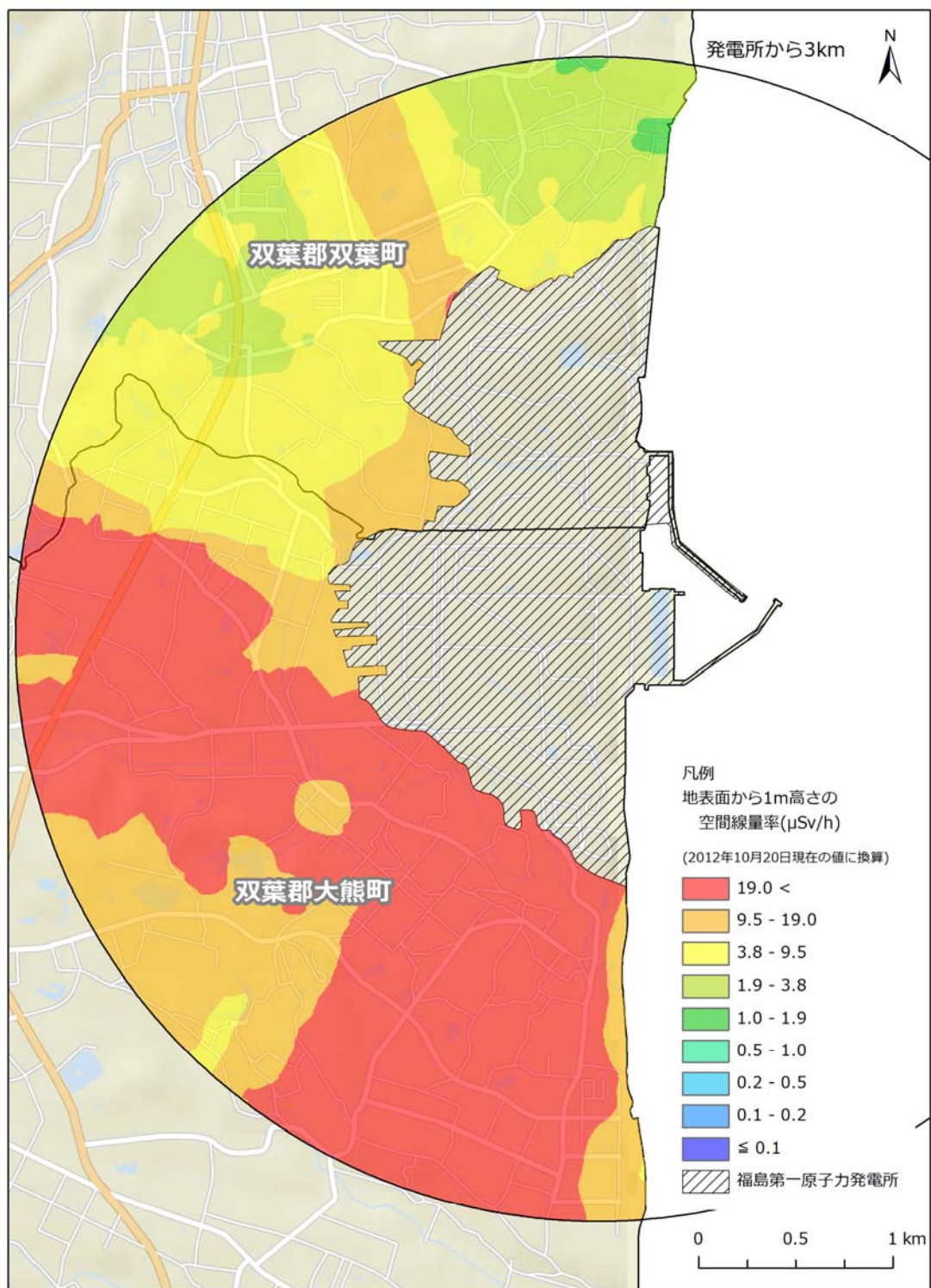


図8 福島第一原子力発電所からの距離と海上で測定されたガンマ線の
エネルギースペクトルの関係

(2) 無人ヘリコプターを活用した福島第一原子力発電所から 3 km 圏内の空間線量率、放射性セシウムの沈着量の測定結果

- 無人ヘリコプターにより測定された計数率を基に福島第一原子力発電所から 3 km 圏内の空間線量率、放射性セシウムの沈着量を求め、その結果を直接使用して福島第一原子力発電所から 3 km 圏内の空間線量率マップ、及び放射性セシウムの沈着量を記した土壌濃度マップを作成した（図 9～11 参照）[†]。
- また、上記の測定結果の妥当性を検証するため、福島第一原子力発電所から 3 km 圏内の約 100 箇所で NaI サーベイメータを用いて空間線量率を測定し、その結果と無人ヘリコプターから求められた空間線量率を比較した。その結果、図 12 に示すように、調査箇所によるバラツキは若干あるものの、地上でサーベイメータにより測定された結果と無人ヘリコプターにより測定された結果との間には良い相関があり、ほぼ一致していることが確認された。また、地上でサーベイメータにより測定された結果と無人ヘリコプターにより測定された結果がほぼ等しいことから、発電所施設起因のガンマ線（直達線、散乱線）の影響は地上においても海上と同様に小さいことが確認された。

[†] 背景地図には、ArcGIS データコレクション スタンダードパックを使用



*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9 無人ヘリコプターを活用した福島第一原子力発電所から3 km 圏内の
空間線量率の測定結果（平成24年10月20日時点）

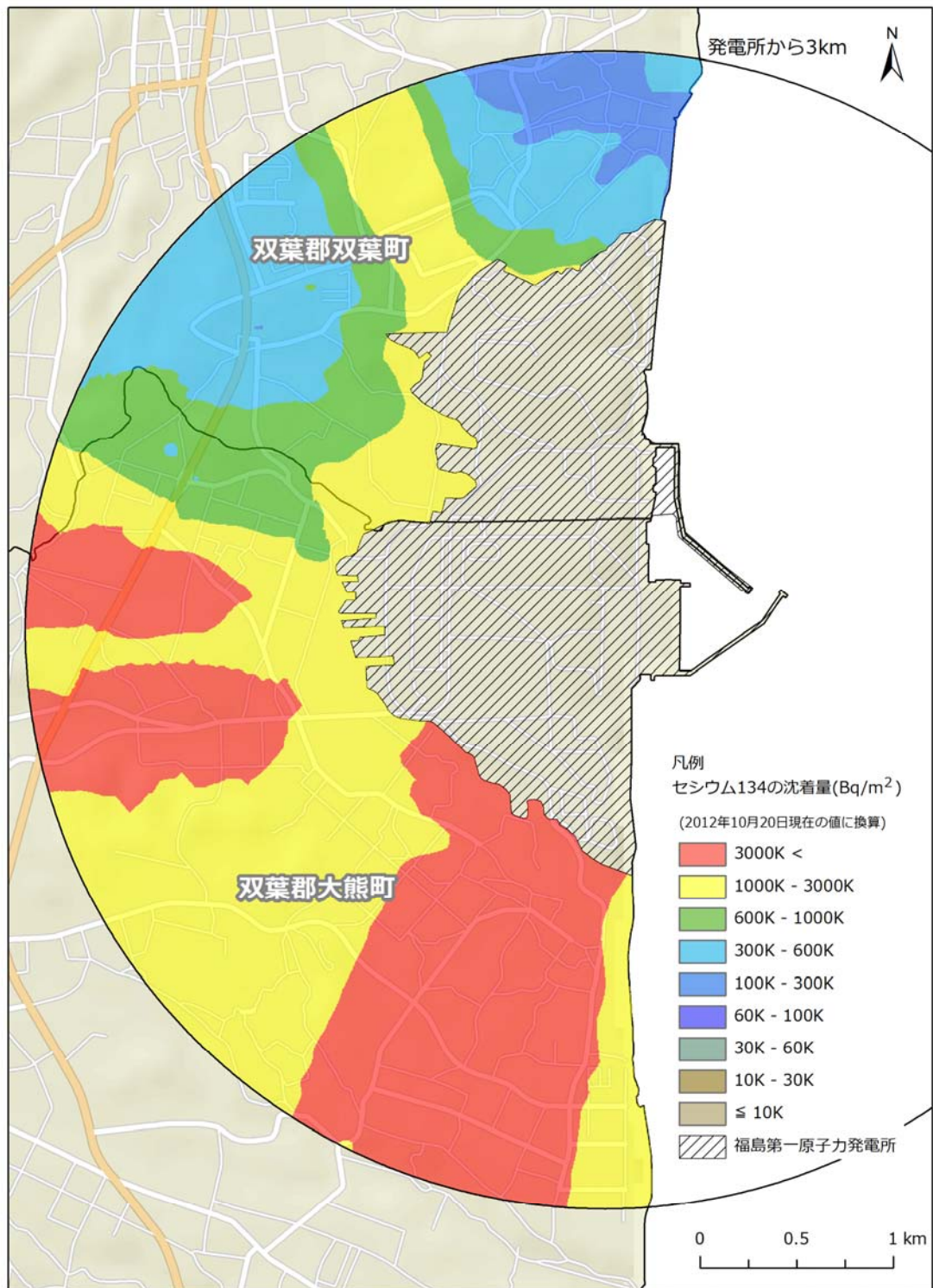


図 10 無人ヘリコプターを活用した福島第一原子力発電所から 3 km 圏内のセシウム 134 の沈着量の測定結果（平成 24 年 10 月 20 日時点）

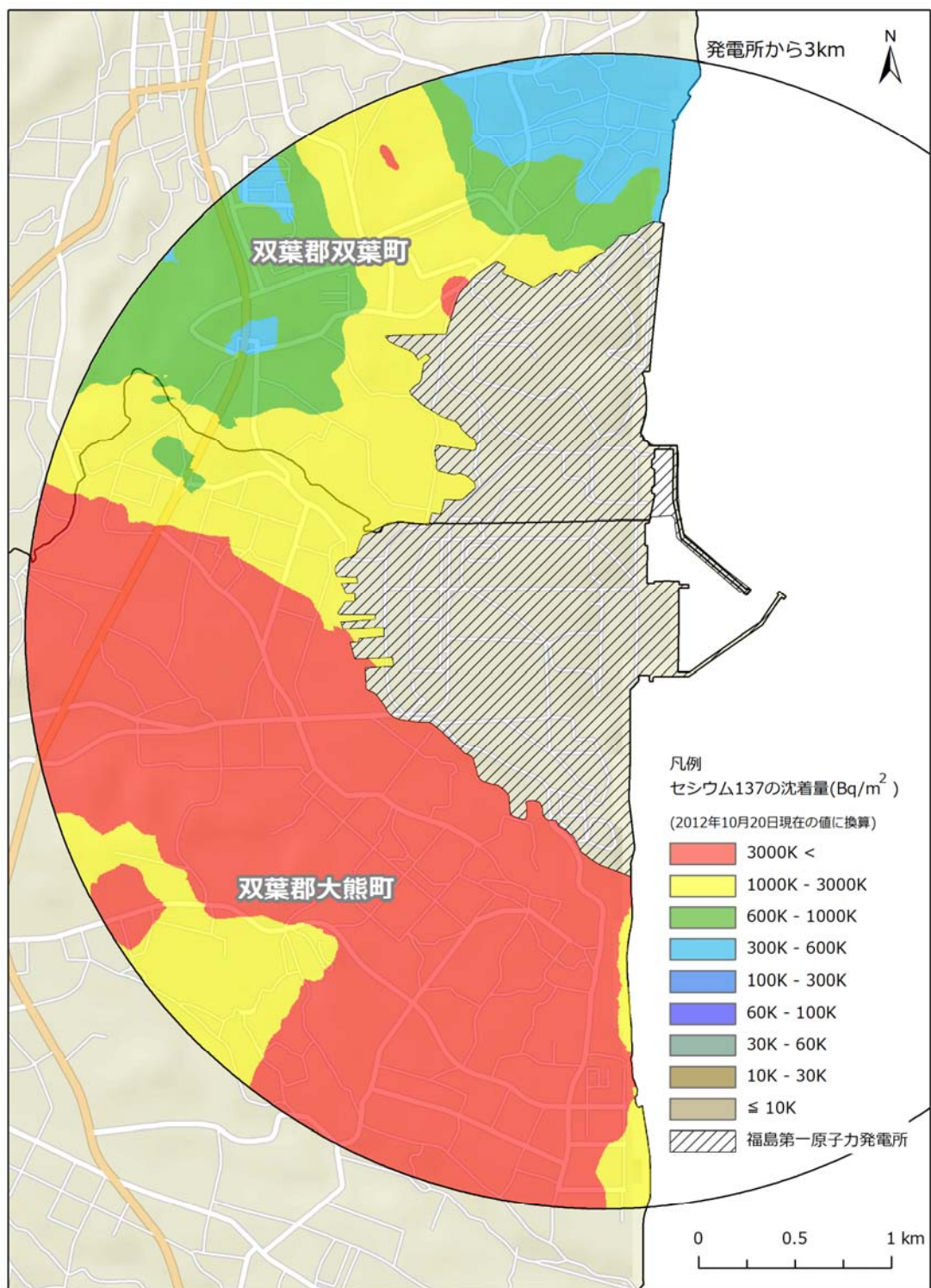
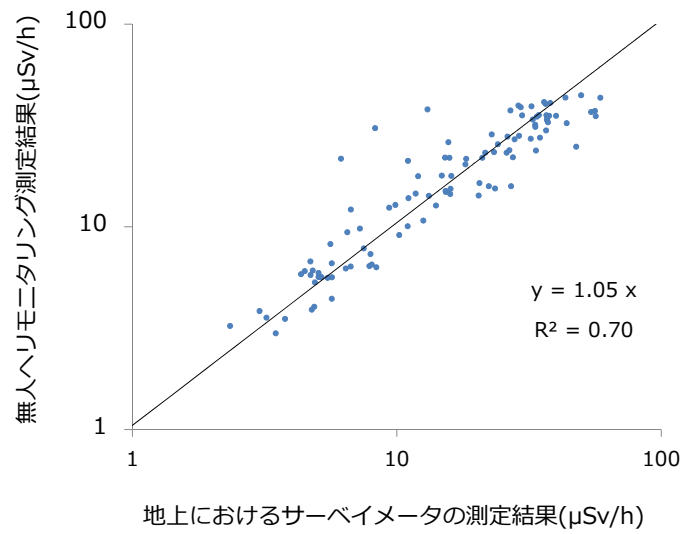
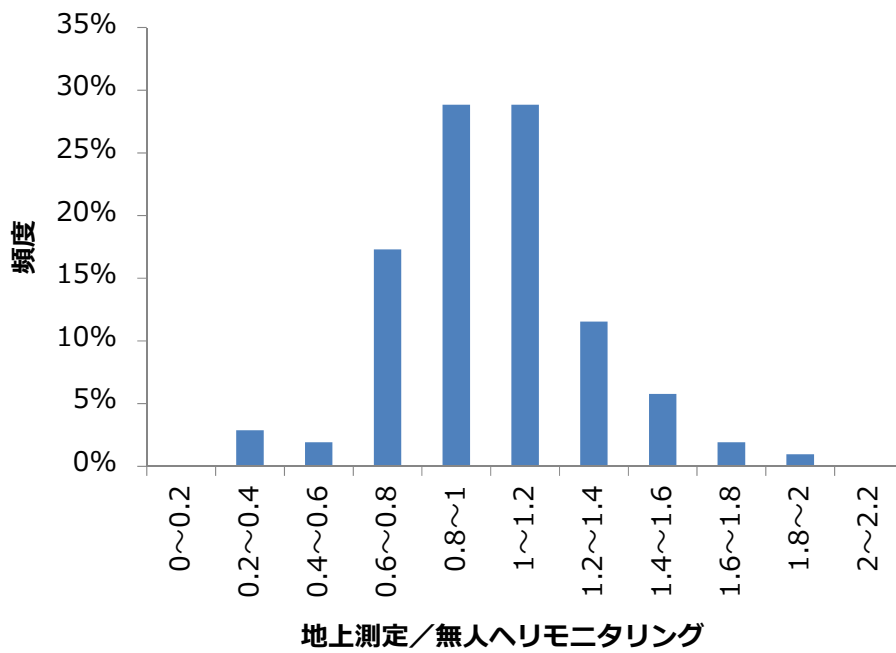


図 11 無人ヘリコプターを活用した福島第一原子力発電所から 3 km 圏内のセシウム 137 の沈着量の測定結果（平成 24 年 10 月 20 日時点）



(a) 無人ヘリコプターによる空間線量率の測定結果と地上でサーベイメータにより測定された空間線量率の相関関係



(b) 無人ヘリコプターによる空間線量率の測定結果に対する地上でサーベイメータにより測定された空間線量率の比率の分布状況

図 12 無人ヘリコプターで測定された空間線量率の結果と地上でのサーベイメータによる空間線量率の測定結果の比較

8. 今後の予定

- 福島第一原子力発電所から 3 km 圏内の測定は、2 回目を平成 25 年 1 月中旬 頃に実施し、その後、得られた測定結果を基に、空間線量率、放射性セシウムの沈着量の変化傾向を確認していく。
- また、現在、無人ヘリコプターを活用して、阿武隈川、宇多川河岸における空間線量率、放射性セシウムの沈着量の測定を実施しており、今後、河岸沿いにおける空間線量率、放射性セシウムの沈着量の詳細な分布状況を把握していく。

以上