

Appendix 3.4-2： 走行サーベイによる空間線量率測定とガンマ線成分の同時測定

1) 概要

平成 23 年 12 月から開催された走行サーベイにおいて、KURAMA システムを利用した原子力機構中心の走行サーベイチームに同行し、放医研のモニタリングカー（以下、モニター）に計測機器を搭載し、測定を行った。主として午前中は KURAMA システムによる走行サーベイチーム（以下、「KURAMA チーム」という。）の直後を走行し、同じ道路上を計測した。午後になると、KURAMA チームとは分かれて、適切な地点においてモニターを停止させて車内および車外の長時間（一般に各 30 分）計測を実施した。これにより、車内外の γ 線環境を計測し、校正等に役立てた。

今回、使用した計測機器は、福島原発事故後に放医研で開発されたラジプローブと呼ばれるシステムであり、各種の γ 線スペクトロメータ（プローブとよぶ）のエネルギースペクトルを単位時間（一般に 5 秒ごと）に、無線通信を通してノートコンピュータ（以下、「ノート PC」という）で収集し、記録した。また、このノート PC は、GPS により正確な位置を記録し、さらに、車両前方に向けたカメラにより走行箇所の静止画像を単位時間毎に記録した。また、モバイル通信機により、ネットワークに接続でき、単位時間毎に、遠方にあるコンピューターサーバーにデータをアップロードすることができた。これにより、遠隔地においても、ラジプローブにより取得されている、リアルタイムの情報が複数のクライアントにより参照されることができた。元来、ラジプローブは緊急事態において、放射線スペクトルを取得し、安全の確保に役立てると共に、遠隔地からラジプローブを通して指示を与えるために開発されたものである。このため、モバイル通信には、衛星回線も利用可としている。

2) 測定装置

現在、プローブとしては、Mirion Technology 社製 HDS-100GN CsI(Tl) スペクトロメータおよび Canberra 社製 Falcon5000 電子冷却式可搬型 Ge スペクトロメータが利用可能である。HDS-100GN は、約 3 インチ直径の円筒形の CsI(Tl) を内包し、30 keV \sim 3 MeV の X 線・ γ 線のエネルギースペクトルを取得する。なお、空間線量率のデータも取得可能であるので、この HDS-100GN の空間線量率データをその時の空間線量率とした。メーカーの仕様によれば空間線量率 0.01 μ Sv/h から 100 μ Sv/h で計測可能である。一方、Falcon 5000 は、直径 60mm、厚さ 30mm の HP-Ge 検出器を持ち、その相対効率約 18% である。計測可能エネルギー領域は、20keV \sim 3.0MeV で、MCA は最高 8192 チャンネルのレンジを持つ。

それぞれのスペクトロメータは、無線データ通信が可能であり、ラジプローブのノート PC から離れた場所に wireless で設置可能である。（図 3.4.2-1、図 3.4.2-2、図 3.4.2-3）

3) 計測方法

平成 23 年 12 月 12 日に、モニターにより福島市へ移動し、そこで KURAMA チームと合流、翌 13 日より 12 月 23 日まで、KURAMA チームと共に、拠点を移動させながら、上述の走行サーベイを実施した。他の走行サーベイチームと同様に、走行サーベイを開始する前には、各拠点で設置されていた校正ポイントにおいて、空間線量率の計測を行った。また、単独での定点計測

の際には、広く平坦な場所を探して、モニター内外の γ 線エネルギースペクトルを各30分間計測した。

検出器の設置場所については、モニターの車中では、各検出器は後部荷物室のシート上に固定した。検出部の高さは約1.5mであった。車外においては、ちょうど検出部の高さが1mになるようアルミ製（厚さ1mm程度）の作業台の上に設置し、計測を行った。車外での計測時には、モニターは10m以上離れた場所に移動させ、車内と同じ場所（高さ1m）に検出部が来るように設定した。

放医研走行サーベイチームが走行した場所は、福島県、宮城県、岩手県、新潟県、群馬県、茨城県、長野県、東京都そして千葉県の大範囲に及んだが、新潟県では積雪があった。

4) 解析方法

得られた単位時間毎の γ 線スペクトルの解析は以下のように、文部科学省放射能測定法シリーズ7 “ゲルマニウム半導体検出器による γ 線スペクトロメトリー”、シリーズ33 “ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定” を参考にし、以下の条件・手順で行われた。

1. Cs-134、Cs-137 及び K-40 の γ 線の光電ピークを2次微分法により見つけ出し、MCAのチャンネル値をエネルギーに変換する。低空間線量率地域での単位時間のデータでは、統計誤差等により、ピークが判別しがたいために、前後15分のデータを積分し、ピークサーチを行った。
2. 光電ピークの値は、周辺環境の温度変化による検出器の応答の変化、あるいは、供給電源の不安定性に伴い、変動しているため、Cs-134 および K-40 等の主要な光電ピークを利用して、補正を行った。
3. K-40 のピークに対して、FWHMを決定し、そのFWHMの値をその計測点での仮のエネルギー分解能と定義した。
4. その他の γ 線ピークに対して、上記の仮のFWHMの2.5倍分をプラスおよびマイナスした値を各ピークの拡がりの上下の境界とし、直線近似することでピークの位置でのバックグラウンドの値を決定する。次に、そのピークの拡がりの真のFWHMを計算し、その1.4倍の領域を新たなピークの拡がりの境界として、バックグラウンドも上下にFWHMの1.4倍の領域の面積とする、コベル法により各ピークの面積（ γ 線の個数）を計算した。（ $u' = 1.4 \times \text{FWHM}$ ）
5. Cs-134 の796keV と802keV のピークについては、今回使用した可搬型Ge検出器の分解能では重なってしまうので、それぞれの放出比から各面積を計算した。
6. 各光電ピークの個数から、土壌沈着量（ Bq/cm^2 ）を計算する。この際、以下の仮定により計算を行った。
 - (ア) 無限平面上の表面が汚染されているとし、放射性セシウム濃度が表面から深さ方向に指数関数で減少し、表層の平均 $1\text{g}/\text{cm}^2$ に汚染が広がっている。また自然放射性元素の場合は深さ方向に対し一様に分布している。
 - (イ) Ge検出器は等方的な感度を持つ。
 - (ウ) 車体の減衰率および車体の汚染について、後述の校正係数を利用。

この時、土壌沈着量の計算は、以下の式で表される。

$$C = \frac{N_E - b_E t}{k_E s_E \eta_E \pi r_{eff}^2 \epsilon_E \gamma_E t}$$

ここで、 N_E は正味のピーク計数、 b_E はバックグラウンド計数率、 t は計測時間、 k_E は幾何係数、 s_E は車体の透過率、 η_E はモニカー内外での計測高さ補正係数、 πr_{eff}^2 はGe 検出器の有効面積、 ϵ_E は検出効率、 γ_E は γ 線放出比、 E は γ 線のエネルギー。

7. Cs-134 と Cs-137 の土壌沈着量を推定する際には、それぞれ 796keV の γ 線と 662keV の γ 線の光電ピークを利用した。(表 3.4.2-1)

5) 車両による遮蔽と車両の汚染によるバックグラウンドの補正

モニカーの筐体による遮蔽、または、設置位置(高さ)の違いのために、車内での計測結果は、車外 1m 高さの計測結果とは異なっている。このために、車両内外における γ 線スペクトルの各光電ピークの計数値を比較し、各 γ 線エネルギーにおける遮蔽の効果を推定した。

また、今回使用したモニカーは、福島第一原発の水素爆発の直前から、旧オフサイトセンター近辺で活動し、タイヤハウス等の汚染が残っていることが確認されていた。しかしながら、可搬型 Ge 検出器を利用したラジプローブでは、電源として高出力の 100V 電源が必要であり、放医研が所有する唯一の適合した車両であったために、本モニカーを使用した。このために、車両のタイヤボックス等の汚染に起因する γ 線(主としてCs-134 及びCs-137 による)の影響がみられた。このために、上記の遮蔽の効果と同様に、各光電ピークに対する車両汚染の影響も推定した。

表 3.4.2-1 車両の透過率(s)と汚染によるバックグラウンド(b)の推定。Cs-137 の 662keV の光電ピークと Cs-134 の 796keV の光電ピークの場合。ここで η は 662keV に対して 0.903, 796keV に対して 0.904 として透過率を計算した。

| | 662 keV | 796 keV |
|---------------------|-----------|-----------|
| 透過率 s (%) | 41.8±4.8 | 44.6±5.7 |
| バックグラウンド計数率 b (cps) | 2.58±0.55 | 2.13±0.51 |

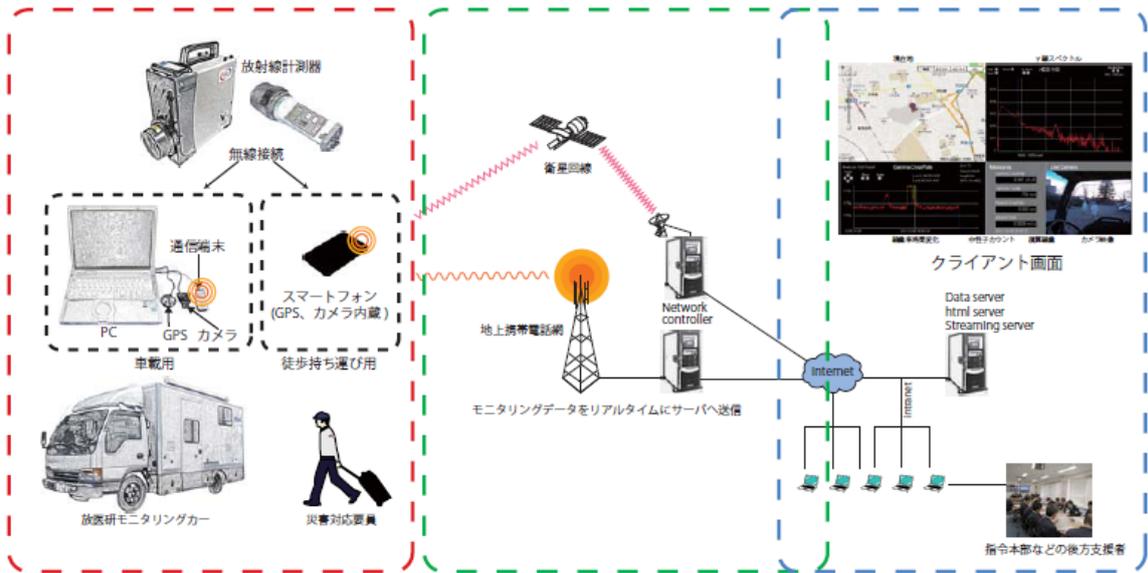


図 3. 4. 2-1 ラジプロープの概要



図 3. 4. 2-2 ラジプロープの可搬型 Ge 検出器 Falcon5000 (左図) および助手席に設置されたノート PC、USB カメラ、GPS、モバイル通信機 (右図)。検出器から無線ネットワークでノート PC がデータを受け取っている。



図 3. 4. 2-3 ラジプロブの画面表示。左上のパネルで地図上での位置、および、各地点の空間線量率をカラー表示し、また、右上のパネルで Falcon5000 もしくは HDS-100GN で計測された γ 線スペクトラムを前後 15 分間積分して表示、左下のパネルには HDS-100GN による空間線量率、右下のパネルにはその地点での車両前方の静止面を表示している。静止面には定点計測の様子が写っている。可搬型 Ge 検出器は車外でアルミ製の作業台の上に設置されている。

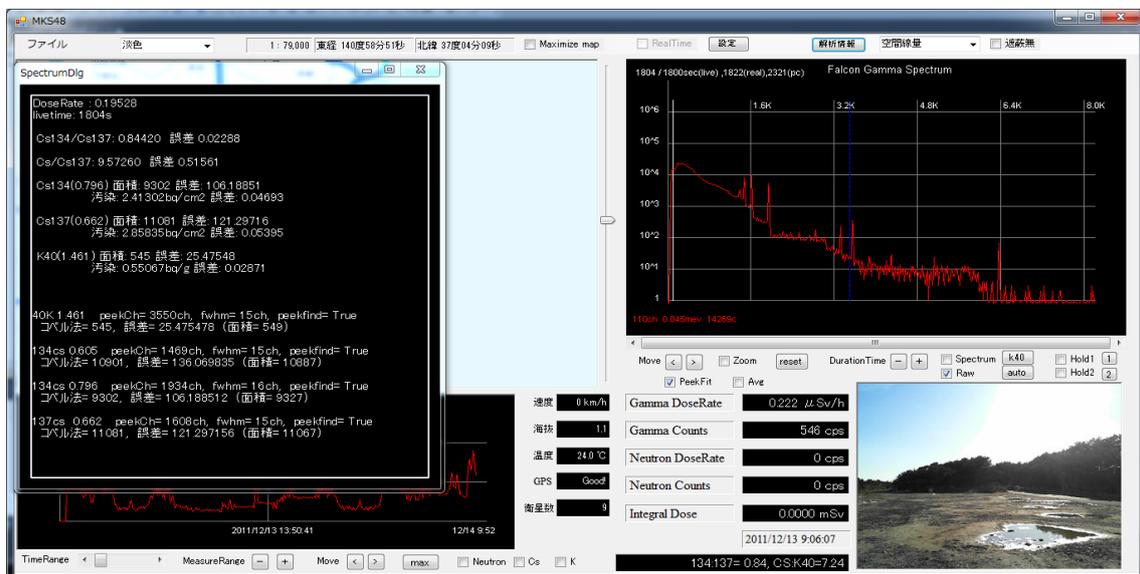


図 3. 4. 2-4 土壌沈着量を計算するために解析されたパラメータなどの表示

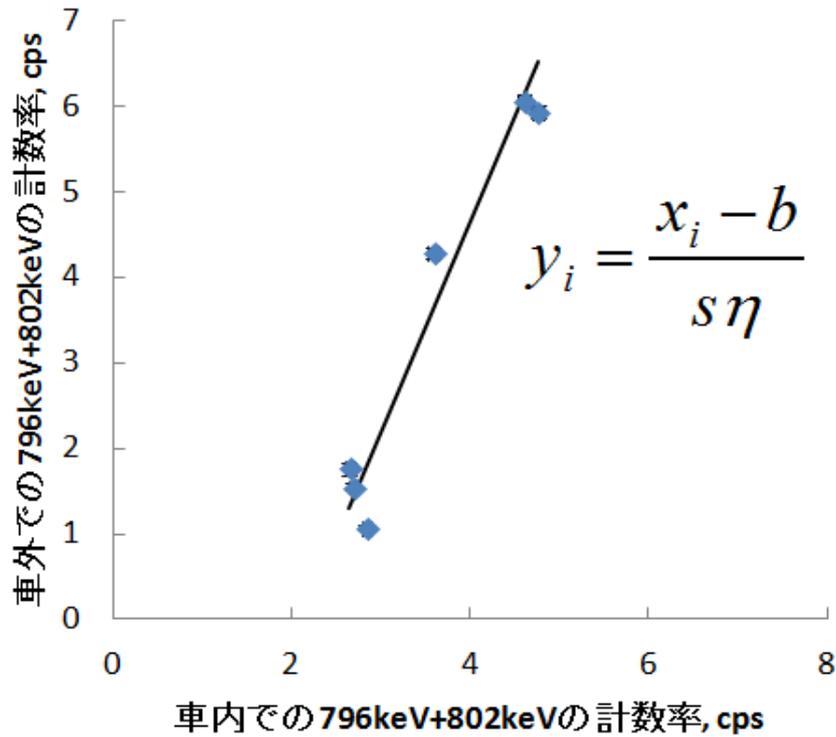


図 3.4.2-5 車両による遮蔽率 (s) と汚染によるバックグラウンド (b) の推定。
セシウム 134 の 796keV の光電ピークの場合。

6) ラジプローブによる走行サーベイの計測結果

各走行地点、あるいは、停止中の計測地点における、HDS-100GN による空間線量率を図 3.4.2-6 に表示し、その際の Cs-137 と Cs-134 の土壌沈着量の比を図 3.4.2-7 に示す。また、図 3.4.2-8 に時系列で空間線量率と土壌沈着量比を示す。福島第一原発事故由来の Cs-137 および Cs-134 の土壌沈着量は、空間線量率と比例していることが予想される。Cs-137 の土壌沈着量と空間線量率の関係を図 3.4.2-9 に示した。

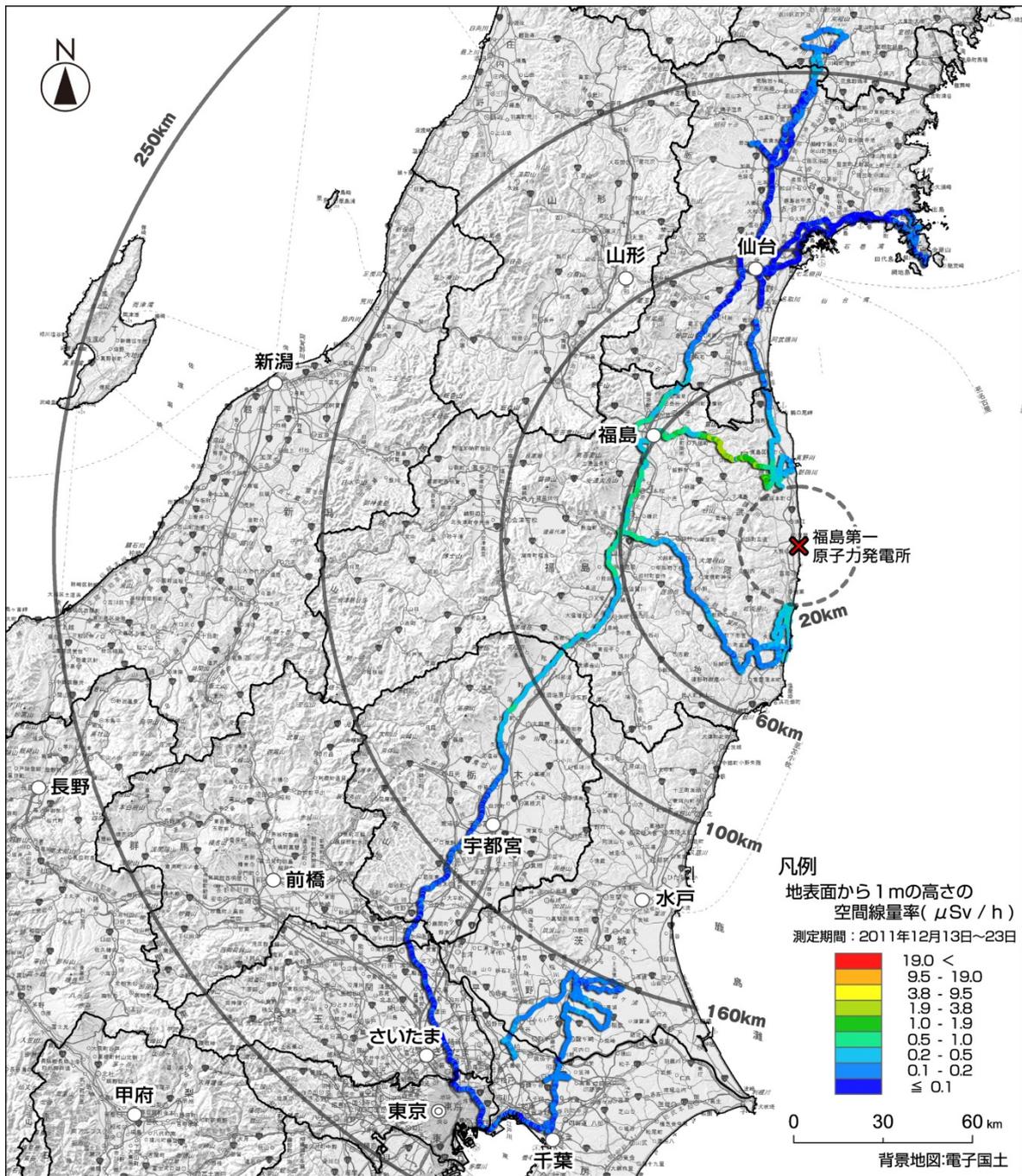


図 3.4.2-6 HDS-100GN : CsI(Tl) スペクトロメータによる空間線量率の分布

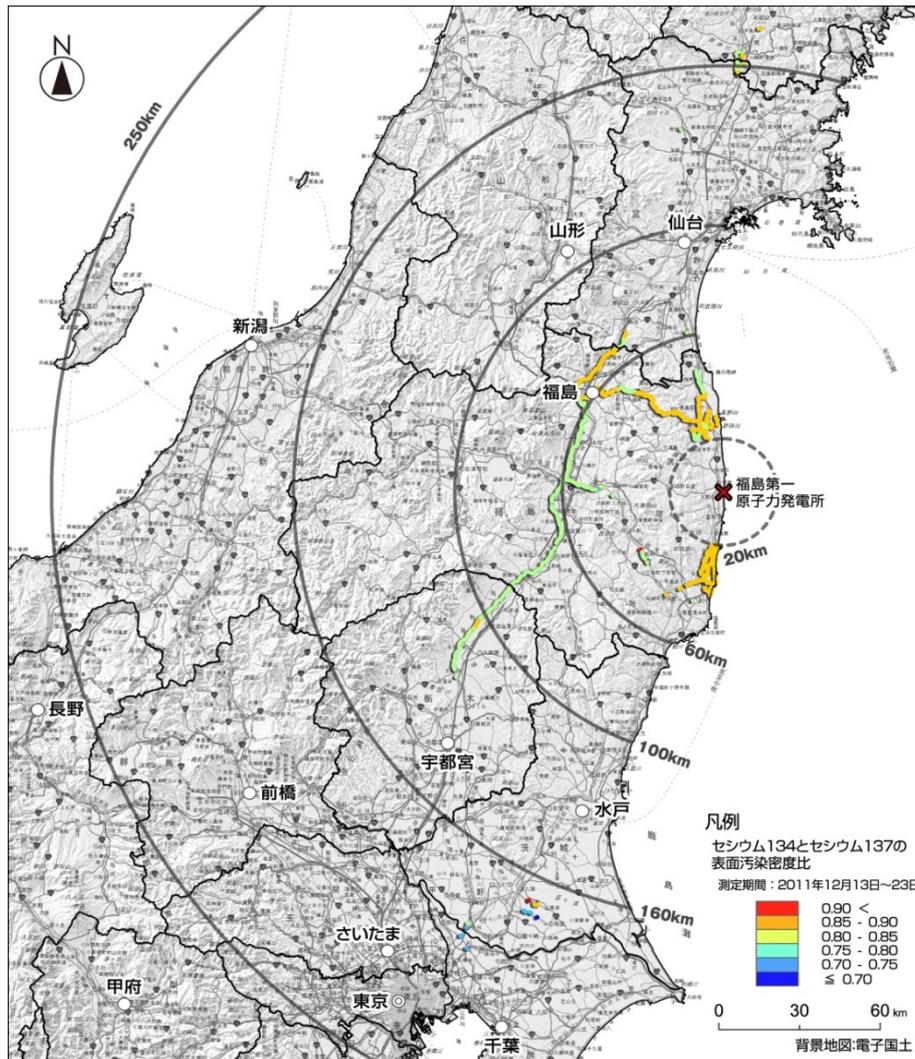


図 3. 4. 2-7 Falcon5000 によるセシウム 134 とセシウム 137 の土壌沈着量比の分布
 (セシウム 134 とセシウム 137 の表面汚染密度比の測定誤差は約 10%であり、
 統計的には一様な分布と考えられる。)

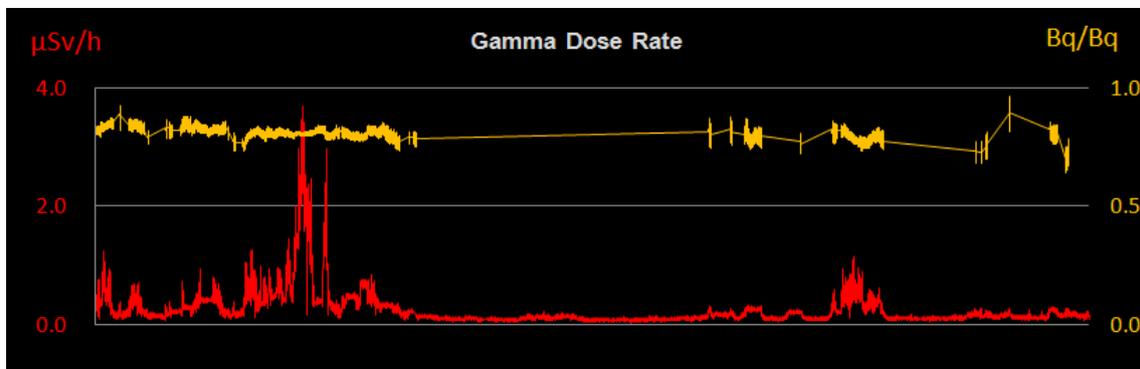


図 3. 4. 2-8 図 3. 4. 2-6 および図 3. 4. 2-7 の空間線量率と土壌沈着量比の時系列表示

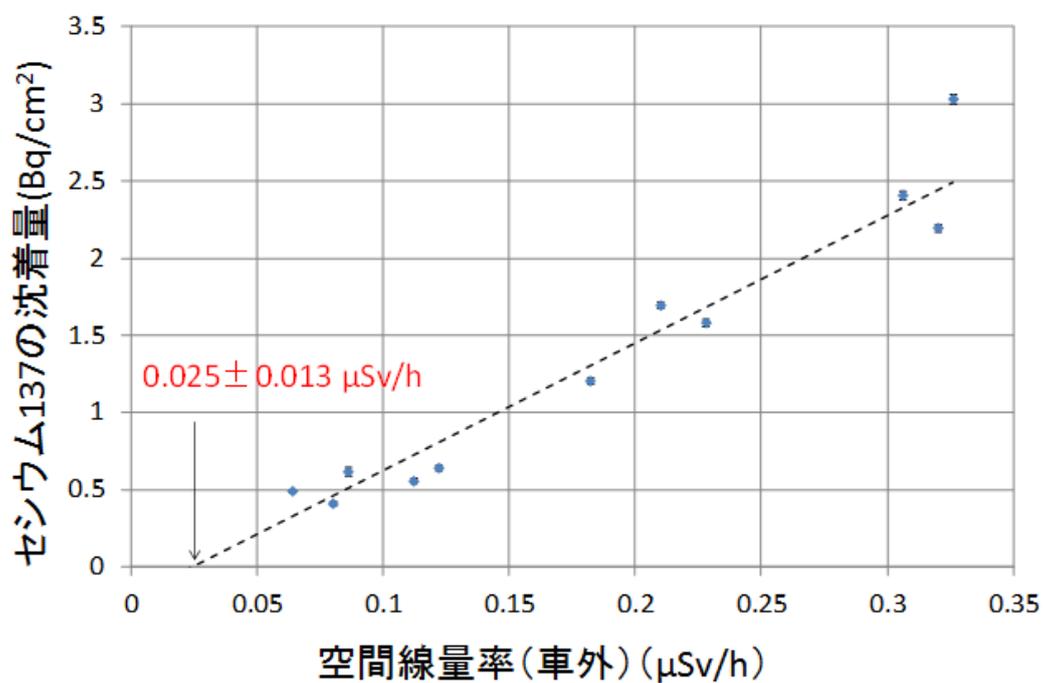


図 3.4.2-9 空間線量率とセシウム 137 の土壌沈着量との関係。セシウム 137 による汚染が無い、自然由来の γ 線による空間線量率は、 $0.025 \mu\text{Sv/h}$ と推測された。