

福島県内の空間線量率トレンドの解析 — 環境半減期、積雪の影響 —

三枝 純*、依田 朋之、村上 晃洋、武石 稔

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門 (〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2-4)

Analysis of Ambient-dose-rate Trends in Fukushima — Ecological Half-life, Effect of Snow Covering —

Jun SAEGUSA*, Tomoyuki YODA, Mitsuhiro MURAKAMI, and Minoru TAKEISHI

Sector of Fukushima Research and Development, Japan Atomic Energy Agency
(2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195, Japan)

Summary

After the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (NPP) accident in March 2011, environmental radiation monitoring works have been continuously conducted throughout the Fukushima prefecture of Japan. In this study, five-year transitions of ambient dose rates at 15 locations 20–60 km away from the NPPs were precisely analyzed to investigate their chronological change. Measured dose rates were successfully fitted into a function consisting of a factor reflecting the physical decay of radiocesium and the other component such as the weathering effect. The ecological half-lives derived from the function ranged from 3 to 27 years (average 10 years). The radiation shielding effect by snow covering was also studied with the obtained functions. Due to the effect, dose rates were lowered by 15–50% by 20-cm-deep snow covering, and the ambient doses integrated over the five years were found to decrease by up to 7% compared to those without the snow covering that can be predicted from the fit function.

Key Words: Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, Radiation monitoring, Radiocesium, Ecological half-life, Decontamination, Snow covering

1. はじめに

2011年3月に発生した東日本大震災のうち、東京電力福島第一原子力発電所の事故では、環境中に大量の放射性物質が放出され、社会に多大な影響を与えた。これに対処するため、事故の直後から政府関係府庁、地方公共団体、原子力事業者、大学や民間、個人レベルによる多岐・多層に亘る放射線モニタリングが行われてきた。政府は2011年8月に「きめ細か」で、「抜け落ちのない」モニタリングを展開すべく、原子力災害対策本部の下にモニタリング調整会議を設置し、総合モニタリング計画を策定した。この計画では、測定実施及び測定情報の集約に関する主体(役割分担)の明確化、種々の対象ごとの実施計画と、結果の蓄積・整理及びび利活用の在り方等に関する留意事項が示されている。以降、総合モニタリング計画は数度の改定が行われ、現在(2016年10月)に至るまでこの計画に基づいた放射線モニタリングが途切れなく実施されている¹⁾。

日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)は原子力災害対策基本法が定める指定公共機関であり、地震発生から程なくして文部科学省から専門家の現地派遣要請を受け、3月12日の早朝より福島県大熊町を起点とした放射線モニタリング活動を開始した。この活動は当初福島県の地域防災計画(原子力災害対策編)に基づく緊急時放射線モニタリングの支援を中心に展開されたが、現在では前述の総合モニタリング計画の中で、原子力規制委員会が県内各地で実施する「サーベイメータ等による空間線量率の定点測定及び積算線量計による積算線量の定点測定の実施」の技術的支援としての位置づけで継続されている。

総合モニタリング計画では、モニタリングポストによる空間線量率の定点測定のほか、航空機モニタリングや自動車を利用した連続走行サーベイによる空間線量率マップの作成についても記載されている。走行サーベイを利用した結果について

*Corresponding author: TEL & FAX: 029-282-6144, E-mail: saegusa.jun@jaea.go.jp

は、空間線量率のこれまでの時間変化を基にして、長期的将来にわたる線量率変化を予測するための詳細な解析が実施されている^{2,3)}。この解析は県内の広範なエリアを対象としており、土地利用区分ごとに線量率の将来予測がされているほか、区分に応じた線量率の変動傾向(環境半減期等)が評価されており、地域ごとの除染計画の策定や住民帰還のための判断材料として重要である。一方、走行サーバイの特性上、まとまった範囲(約100 mメッシュ)で平均化した空間線量率の各々を解析対象としていることや、同一メッシュについて得られるデータ数(測定頻度や時期)に制約がある。したがって、1地点(数メートル程度の狭い範囲)で得られる多くの時系列データ(線量率トレンド)を基に線量率の変動傾向を詳細に検討しておくことも必要である。着目する範囲を狭くすることにより、線量率の変動に関係するその地点の特徴(ウェザリングのされやすさ等)が個別に確認できる可能性もある。

サーバイメータによる空間線量率測定は、モニタリングポストによる測定に比べて検出器周辺の汚染や温度変動の影響を受けにくく、測定条件が明確である。データの経時的連続性の面ではモニタリングポストに及ばないが、事故から5年以上が経過して、多くの線量率データが蓄積され、その変動割合

は小さくなってきている。そこで本研究ではサーバイメータ及び積算線量計による空間線量率(周辺線量当量率)の定点測定について、2016年10月までに公開されたデータを改めて詳細に見てみることで、地点ごとの線量率の変動傾向を、空間線量率の環境半減期や、積雪による低減効果の観点で調べた。また、変動傾向を現場の状況と地点ごとに照らし合わせ、関係性を考察した。

2. 評価対象及び方法

(1) 評価対象

福島県内におけるサーバイメータ等を用いた空間線量率の定点測定は、2015年11月現在、原子力規制委員会により103地点、福島県により41地点で実施されているほか、各市町村や東京電力等によっても行われている。本解析では原子力規制委員会のデータのうち、福島第一原子力発電所から20 kmから60 kmにある15地点を選定し、評価対象とした。これら地点の選定は、事故の初期(2011年5月頃)から現在まで連続して測定が行われていることに加え、原子力機構のスタッフが測定を実施又は同行して現場の状況がよく把握されていることを基準に行った。対象地点を図1及び表1に示す。これらの

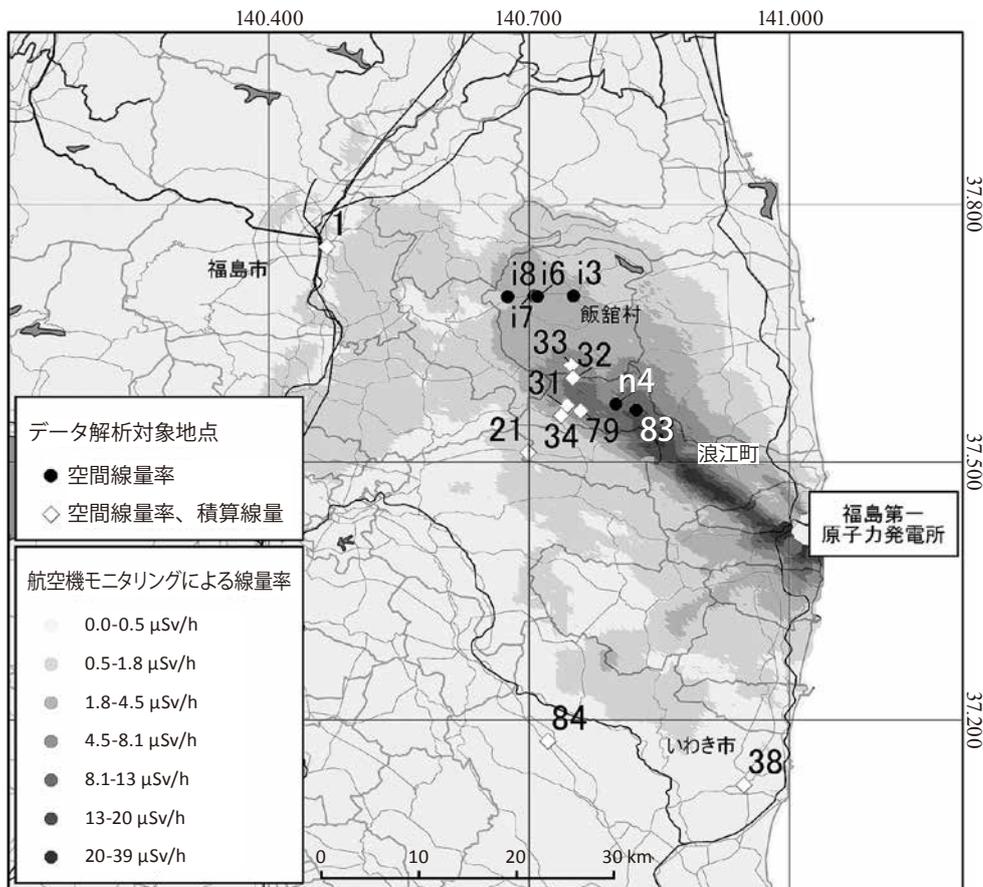


図1 本解析で対象とした空間線量率の測定地点

(国土地理院地球地図 日本第2.1版の地形データ及び航空機モニタリングにより得られた線量率データ(2013年11月19日換算値)⁴⁾を基にQGIS2.12.1で作成。)

表1 評価地点の一覧及び関数適合で得られた環境半減期等

地点	特徴	測定項目 ^{*1}	a_1	T_1 (年)	T_2 (年)	備考 ^{*2}
1 (福島市杉妻町 2-16 (福島県庁))	タイル張り、近傍にコン クリート壁あり、道路か ら離れている	ASI	0.74	0.11	2.8	
		EPD	0.020	3.3	3.3	
		GB	1.1	1.8	2.8	
21 (双葉郡葛尾村上 野川仲迫 78)	アスファルト舗装道路 上、畑地との境界付近	ASI	0.58	0.079	7.7	●関数適合使用データ：～2013年5月 ●2013年5月に周辺除染作業 ●2013年6月に除染土袋仮置き ●2013年7月に除染土袋撤去 ●2013年9月に付近の側溝の泥の除去及 び道路補修
		EPD	0.32	0.34	-	
		GB	0.14	0.67	4.6	
31 (双葉郡浪江町津 島下谷津 70-3)	側溝蓋上、近傍に樹木 あり	ASI	0.23	0.36	11	
		EPD	0.69	0.033	19	
		GB	0.00	0.62	8.8	
32 (双葉郡浪江町赤 宇木手七郎 252)	アスファルト舗装道路 上、近傍に未整備の土 手あり、頭上に樹木の 張出しあり	ASI	0.12	0.17	6.9	●2015年9月に大雨、土砂崩れによる表 土の剥離、周辺土手の草刈り
		EPD	0.47	0.045	9.4	
		GB	0.81	0.044	5.7	
33 (相馬郡飯館村長 泥長泥 982)	アスファルト舗装道路 上、畑地との境界付近	ASI	0.38	0.45	27	●2015年9月、測定日前日まで大雨
		EPD	0.63	0.048	9.0	
		GB	0.44	0.11	6.3	
34 (双葉郡浪江町津 島大高木 38)	アスファルト舗装道路 上、畑地との境界付近	ASI	0.096	0.13	7.8	
		EPD	0.45	0.054	7.1	
		GB	0.57	2.6	9.6	
38 (いわき市四倉町 中島大久保 51-4)	舗装駐車場端の縁石 上、近傍に整地された 芝生及び生垣	ASI	1.0	0.00	6.1	
		GB	0.10	0.0071	6.5	
79 (双葉郡浪江町下 津島萱深 47-2)	アスファルト舗装駐車 場上、近傍に金属製 フェンスあり	ASI	0.34	0.24	4.6	
		EPD	0.60	0.057	5.5	
		GB	0.024	0.19	3.8	
83 (双葉郡浪江町赤 宇木柵平 1-53)	木製ベンチ上、周辺未 舗装、川縁の未整備土 手との境界付近	ASI	0.33	0.066	13	
84 (いわき市三和町 差塩館下 12)	コンクリート上、整地さ れた芝生との境界付近	ASI	1.0	0.0052	6.0	
		EPD	0.10	0.0071	8.5	
		GB	0.11	0.0071	13	
n4 (双葉郡浪江町赤 宇木塩浸 29)	アスファルト舗装道路 上、近傍に側溝あり	ASI	0.36	0.088	13	●関数適合使用データ：～2014年9月 ●2014年9月に周囲の除染(未確認)
i3 (相馬郡飯館村草 野向押 5)	コンクリート土留め上、 近傍に未舗装の土手、 消火用設備あり	ASI	0.60	0.41	14	●関数適合使用データ：～2014年8月 ●2014年9月に周囲の除染
i6 (相馬郡飯館村関 根谷地向 148)	アスファルト舗装道路 上、畑地との境界付近	ASI	0.88	0.033	3.5	●関数適合使用データ：～2014年10月 ●2014年11月に周囲の空地の除染 ●2015年1月に周囲のフレコンバッグ撤去
i7 (相馬郡飯館村白 石町 25)	アスファルト舗装道路 上、未舗装土手との境 界付近	ASI	0.51	0.073	6.9	●関数適合使用データ：～2013年8月 ●2013年9月に周囲の除染(表土の剥ぎ 取り) ●2014年6月に道路脇の堆積物除去及び 周囲の草刈り
i8 (相馬郡飯館村二 枚橋町 106)	側溝蓋上、近傍にガー ドレールあり、未舗装 駐車場との境界付近	ASI	0.59	0.063	7.2	●関数適合使用データ：～2013年5月 ●2013年6月に周囲の除染(表土の剥ぎ 取り) ●2013年7月に周囲の除染(表土の入れ 替え)

*1 ASI: サーベイメータによる空間線量率、EPD: シリコン半導体検出器による積算線量、GB: ガラスバッジによる積算線量。

*2 除染状況等については事実関係が確認できたもののみを記載している。

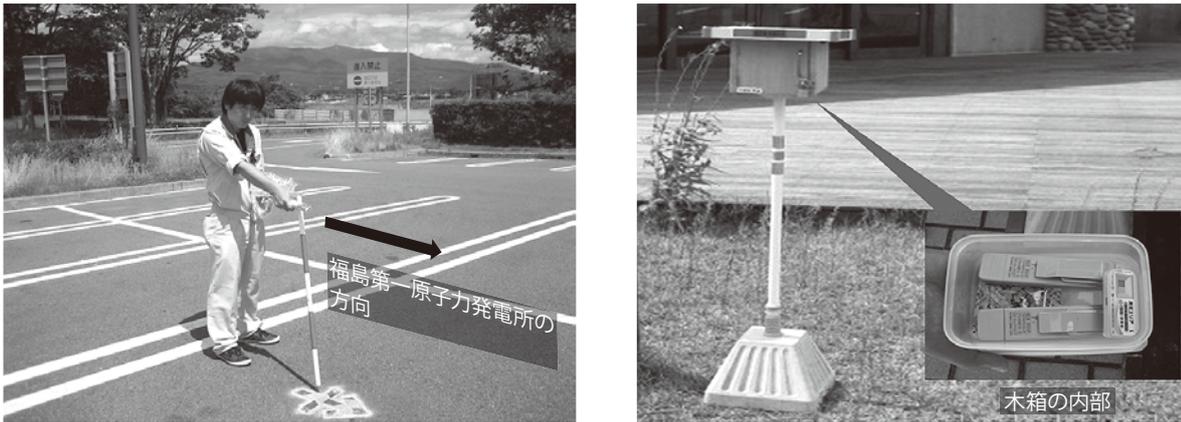


図2 対象としたデータの取得に用いられたサーベイメータ及び積算線量計の設置状況
 (左: サーベイメータによる空間線量率測定の様子、右: 積算線量計設置の様子)

表2 対象としたデータの取得に用いられたサーベイメータ及び積算線量計の仕様等⁵⁻⁸⁾

	メーカー・型式	検出器、素子	仕様等
サーベイメータ	日立アロカメディカル株式会社 ICS-323C	円筒型電離箱	測定線種: X線、γ線、β線 (β線は先端のキャップを取り外して測定); エネルギー特性: 30 keV ~ 2 MeV (¹³⁷ Csの校正定数に対する比が0.85 ~ 1.15); 1 cm 線量当量率測定範囲: 1 μSv/h ~ 300 mSv/h
	日立アロカメディカル株式会社 TCS-172B	NaI (Tl)シンチレーション検出器	測定線種: γ線; エネルギー範囲線量率について: 50 keV ~ 3 MeV (3 MeV カットなし); 1 cm 線量当量率測定範囲: バックグラウンド ~ 30 μSv/h
積算線量計	富士電機株式会社 CPXANRFA-30 (DOSE i-γ)	シリコン半導体検出器	測定線種: X線、γ線; エネルギー範囲: 35 keV ~ 3 MeV; 線量範囲: 0.001 mSv ~ 999.9 mSv; 線量率範囲: 0.001 mSv/h ~ 999.9 mSv/h; データ保持件数: 600 件
	株式会社千代田テクノ ES, GV (環境タイプ)	ガラスバッジ	測定線種: X線、γ線、β線; エネルギー範囲: β線 130 keV ~ 3 MeV、X線、γ線 10 keV ~ 10 MeV; 線量範囲: 0.1 mSv ~ 10 Sv

地点では放射線サーベイメータを用いて空間線量率を測っている箇所と、サーベイメータでの測定に加えて積算線量を測っている箇所がある。評価には 2011年 5月から 2016年 3月又は 6月の測定データ (時期は地点及び測定方法により若干異なる)を用いた。

サーベイメータを用いた空間線量率の測定は、線量率が 30 μSv/h 以上 (2013年 4月以降は 25 μSv/h 以上) の場合、日立アロカメディカル株式会社 (現・株式会社日立製作所) 製の電離箱式サーベイメータ ICS-323C⁵⁾により、それ未満の地点では同社製 NaI(Tl) シンチレーション式サーベイメータ TCS-172B⁶⁾を用いて定期的に行われている。図 2(左)に示すように、いずれの地点においてもサーベイメータ検出部の実効中心が地上高さ 1 m になるよう測量用ポールを用いて正確に位置合わせをして測定が行われている (一部の時期を除く)。また、測定者の立つ位置を各回の測定で揃えるため、サーベイメータ検出部の前面又はプローブ先端が福島第一原子力発電所の方向に向くよう測定条件を統一している。線量率は数値の安定後、10秒毎に 5回読み取り、5回の平均値を記録している。

一方、積算線量は富士電機株式会社製電子式個人線量計 (DOSE i-γ)CPXANRFA-30 (検出器:シリコン半導体検出器)⁷⁾及び株式会社千代田テクノ社製の広範囲用ガラスバッジ環境タイプ ES (装着ケースGV)⁸⁾により測定されており、前者は線量を基本的に週 1回の頻度で現地にて読み取り、後者は 1か月に 1回交換し、素子をメーカーに返送後、線量が評価されている。これらの線量計は図 2(右)に示したプラスチック容器に乾燥剤とともに封入後、地上 1 m 高さになるよう設置した木箱に収納されている。

これらのサーベイメータ及び積算線量計の仕様等を表 2 にまとめた。なお、今回解析対象としたデータは原子力規制委員会及び原子力機構によって取得されており、結果は原子力規制委員会のホームページで公開されている⁹⁾。

(2) 評価方法

a) 積雪がないときの変動傾向

対象としたすべての地点について線量率は時間とともに減少しているため、まず、積雪時 (積雪の有無の判断については後

述)のデータを除外した上で、個々の線量率データを(1)、(2)式に関数適合することで減衰の傾向を解析し、適合結果から半減期等のパラメータを求めた。関数適合にはMicrosoft Office Excelのソルバー機能(GRG非線形)を用いた。線量率データは1日おきに取られていた時期や、1週間或いは1月

おきにとられたものが混在しているため、(2)式を用いてデータ取得間隔に応じた重みづけをした上で関数適合した^{A)}。測定地点周辺における大規模な除染活動の実施が確認されている場合(表1の備考欄に記載)は、その前の時点までを環境半減期等の解析対象とした。

$$F(t) = D_0 \left\{ f_{134} \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{134}} t\right) + (1-f_{134}) \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{137}} t\right) \right\} \left\{ a_1 \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_1} t\right) + (1-a_1) \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_2} t\right) \right\} + D_{BKG} \dots\dots\dots (1)$$

$$J = \sum_{i=1}^n W(D_i^* - F_i(t))^2 \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $F(t)$: 経過日 t における線量率、 D_0 : 基準日(2011年3月15日)の線量率、 f_{134} : 基準日における¹³⁴Cs線量寄与割合、 T_{134} 、 T_{137} : ¹³⁴Cs、¹³⁷Csの物理学的半減期、 a_1 : 成分1の割合、 T_1 、 T_2 : 成分1、2の(環境)半減期、 D_{BKG} : バックグラウンド線量率、 J : 重みつき残差の平方和、 W : 荷重係数(前回測定日から次測定日までの日数)、 D_i^* : 空間線量率の実測値、 $F_i(t)$: (1)式で求まる経過日 t における線量率である。

b) 積雪による線量率の低減効果

前項で関数適合に用いなかった積雪時の線量率データを対象とし、積雪の深さ(積雪深)と線量率の関係を調べ、積雪遮蔽ファクタを求めた。対象とした期間に冬季は5シーズン含まれ、線量率は時間とともに減少しているため、(1)式による減衰補正後の線量率 $F(t)$ と、観測された線量率 D_i^* の比 $(F(t)/D_i^*)$ を積雪遮蔽ファクタとして定義した。なお、積雪の有無の判断は、線量率測定に関しては現地で1 cm以上の積雪を観測したときに積雪有りとしている。また、積算線量については線量の読取又は線量計交換時のみの観測に基づいてその有無と積雪深が判断されており、降雪や融雪の状況によっては線量計の設置期間にわたって平均された積雪状況と異なる場合がある。

この $F(t)$ は、基準日の線量率 D_0 が、放射性セシウムの壊変による物理的減衰と、その他の要因による減衰で減少していくことをモデル化したものである。チェルノブイリ原子力発電所事故等に関する過去の環境中の放射性物質の移行に関する研究では、1成分の指数関数モデルでは指標の減少傾向を適切に反映できず、このような2つの指数関数を用いて移行係数や放射能濃度の経時変化を表わすことが少なくない^{10,11)}。上式では、物理的要因以外の減衰項は、早い成分、遅い成分に別けて考えており、それぞれの半減期を T_1 、 T_2 、早い成分(成分1)の割合を a_1 として定義している。上記に列挙したパラメータのうち、下線を付したものを関数適合で導出し、その他のパラメータは初期値として固定の値を用いた。具体的には、¹³⁷Csに対する¹³⁴Csの線量寄与割合 f_{134} については、地点32及び83で採取した18の土壌試料の¹³⁴Cs/¹³⁷Cs放射能濃度比(基準日に減衰補正)に対し、IAEAの技術文書¹²⁾に示されたこれら核種に対する線量率/沈着面密度比(¹³⁴Cs: 5.4×10^{-6} (mSv/h) / (kBq/m²), ¹³⁷Cs: 2.6×10^{-6} (mSv/h) / (kBq/m²)) を乗じて算出した。これ以外の地点については線量率の測定地点直近で土壌放射能濃度が評価されていない場合があることや、今回対象とした地点全体にわたり基準日に減衰補正した¹³⁴Cs/¹³⁷Cs比が安定しているため¹³⁾、一律に $f_{134} = 0.72$ とした。¹³⁴Csと¹³⁷Csの物理学的半減期は各々2.0644年、30.05年を用いた¹⁴⁾。バックグラウンド線量率については、事故前(2010年)における福島県内の平常の変動幅が30~71 nGy/hと報告されていること¹⁵⁾を参考に、 $D_{BKG} = 0.05 \mu\text{Sv/h}$ と設定した。

3. 結果と考察

(1) サーベイメータで測定された空間線量率のトレンド

サーベイメータで測定された空間線量率の推移の例を図3に示す。地点83(双葉郡浪江町、福島第一原子力発電所から北西に約24 km地点)では2011年4月に測定が開始され、当初50~70 $\mu\text{Sv/h}$ 程度あった線量率が5年後に約10 $\mu\text{Sv/h}$ まで減少する。毎年冬季には10~55 cmの積雪があり、この影響で線量率が最大40%程度減少する。この地点では2011年12月末までは土日を含め毎日測定が行われ、以後2013年3月末まで1週間おき、その後は約1か月おきにデータが取得されている。2012年1月頃までの線量率はそれ以降に比べばらつきが大きい、これは位置決め用の測量用ポールを使用しない時期があり、地面からプローブまでの距離にばらつきがあったことや、2台のサーベイメータで測定員が2人並んで測定する場合と1人ずつ交互に測定する場合があったため、人体等による遮蔽効果の違いでばらついたものと思われる。地点i8(相馬郡飯館村、発電所から北西約44 km)では、当初3 $\mu\text{Sv/h}$ 程度あった線量率が5年後には0.2 $\mu\text{Sv/h}$ 程度まで下がっている。この地点では2013年6月から7月にかけて

^{A)} 2016年4月以降、サーベイメータによる線量率の測定頻度は1年に一度、ガラスバッジの交換頻度は3か月に1回となっている。また、シリコン半導体検出器による積算線量の測定は2016年3月で終了している。

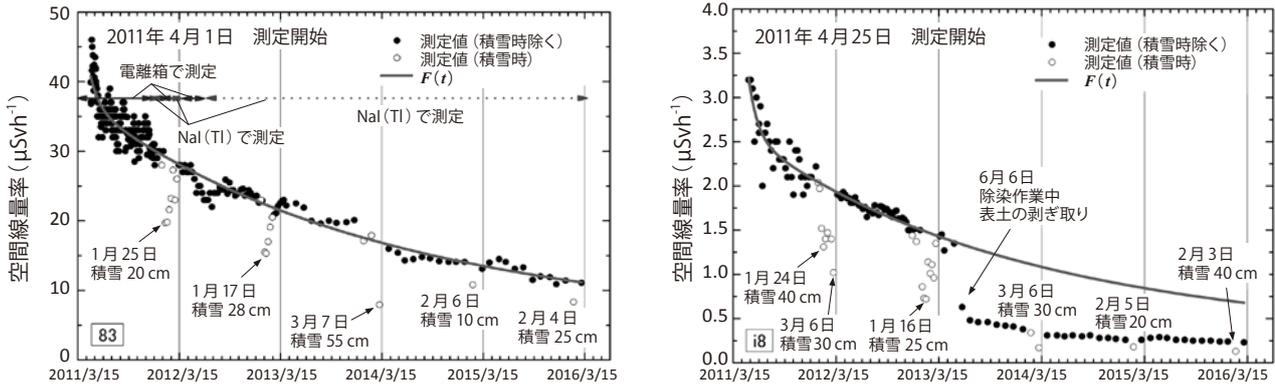


図3 サーベイメータにより測定された空間線量率の推移の例
(左: 地点 83、右: 地点 i8)



図4 地点 i8 における表土剥ぎ取りの状況(2013年 6月撮影)

て除染を目的とした表土の剥ぎ取りと入れ替えが実施されている。測定位置は県道 12号原町川俣線と非舗装部分(花壇を含む)に挟まれた側溝の蓋上に設定されており、同時期に除染が実施されたのは非舗装部分約 550 m² と思われる(図4)。この影響により除染の直近前後で線量率が約 65% 下がり、2011年 5月 1日から 2016年 3月 14日までの積算線量は除染が無かったと仮定した場合に比べて 29%、2015年 3月 15日から 2016年 3月 14日までの積算線量は 67% 低減している。

(2) サーベイメータの測定データから得た環境半減期

図 5 に地点 79 (双葉郡浪江町、発電所から北西約 29 km) にて取得された空間線量率のトレンドと、このうち積雪がない時のデータについて (1)、(2) 式で関数適合した例を示す。モデル式 $F(t)$ は線量率トレンドを精度よく再現しており、成分 1 すなわち早い成分の半減期は 0.24 年、成分 2 の半減期は 4.6 年に、また、成分 1 の寄与割合は約 30% に収束した。 $F(t)$ はトレンドを早い成分と遅い成分に分けるため、関数適合に用いる期間、特に開始時点が異なれば、各パラメータも異なる

値に収束することが考えられた。そこで期間を変えて関数適合を行って得られた収束値を比較した。その結果、地点 79 の場合、表 3 に示すように 2011年 5月 1日を起点とすれば、3 か月程度開始時点が異なっても a_1 、 T_1 、 T_2 、 D_0 は大きく異なるが、それ以上異なると初期の部分において適合関数が実測データから大きく乖離する傾向を示した。このことは 2011年後半以降に取得されたデータを使用し、過去の線量率を遡って予測するのは難しいことを意味する。

(1) 式により $F(t)$ は物理的減衰(図 5 の破線)と、その他の要因による減衰(一点鎖線)に分けることができる。また、約 30% ある成分 1 の $F(t)$ への寄与は 2012年 3月以前が支配的であるが、この成分 1 は、ウェザリング等により放射性セシウムが減っていく減衰に加え、それ以外の核種の減衰(物理的減衰を含む)による寄与をある程度含んでいると考えられる。関数適合に用いたデータは 2011年 5月 1日以降であり、この時点において主要な線量率寄与核種であった ¹³¹I は 2011年 3月中旬を基準とすると約 6 半減期経過し、当初の 1% 程度まで減衰している。一方、4.6 年の半減期で減衰する成分 2

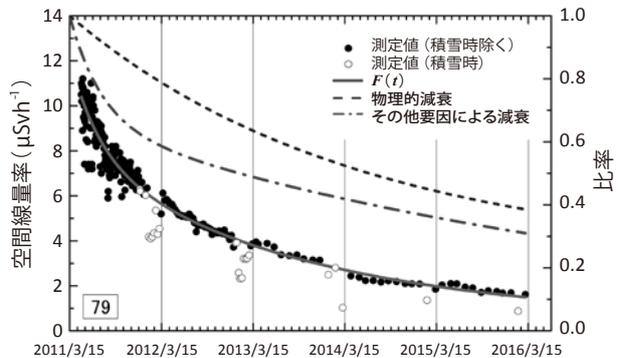


図5 サーベイメータにより測定された空間線量率とその関数適合状況並びに減衰比率の例(地点 79)

表3 サーベイメータにより測定された線量率データに対し期間を変えて関数適合を行って得られたパラメータの一覧(地点79)

適合に用いた期間* ¹	a_1	T_1 (年)	T_2 (年)	D_0 ($\mu\text{Sv/h}$)
2011年5月1日～2016年3月4日	0.34	0.24	4.6	12
2011年5月16日～2016年3月4日	0.33	0.26	4.6	12
2011年6月1日～2016年3月4日	0.38	0.20	4.5	13
2011年7月1日～2016年3月4日	0.32	0.28	4.7	12
2011年9月1日～2016年3月4日	0.36	0.26	4.7	12
2011年12月1日～2016年3月4日	0.88	0.11	4.5	68
2012年4月4日～2016年3月4日	0.82	0.17	4.6	43
2013年4月5日～2016年3月4日	0.90	0.45	19	51
2015年4月7日～2016年3月4日	0.32	0.19	3.9	12

*¹ 積雪時のデータを除く。

は、ウェザリング(地中方向への核種の移行を含む)¹⁶⁾等を捉えた環境半減期に相当する。2012年4月以降のみについて対象とすると、実効的な半減期は約1.9年、そのうち物理的減衰の半減期が約3.7年、その他の要因による減衰(環境半減期)が約3.9年と評価され、物理的要因と環境の要因がおよそ1:1で減衰している。

これ以外の地点(図3、図6)については、今回解析した15地点のうち13地点で、(1)式への関数適合ができ、各パラメータについて収束値を得た(表1)。一方、地点38(いわき市四倉町)及び地点84(いわき市三和町)では、関数適合はできたものの2成分に分離できなかった。これらの地点では元々の線量率が高くなく(2011年5月時点の線量率が $1\mu\text{Sv/h}$ 以下)、関数適合の際にバックグラウンド線量率として固定の値($D_{BKG} = 0.05\mu\text{Sv/h}$)を用いたことや、2011年夏ごろにかけて精度よく指示値の読み取りができていなかったことがその原因として考えられる。

地点38及び地点84を除く13地点についてみると、成分1の割合(a_1)は最小0.096～最大0.88(平均0.41)、成分1、2の(環境)半減期(T_1 、 T_2)は各々12～160日(平均64日)、2.8～27年(平均9.6年)となり、いずれのパラメータについてもばらつきが大きい(なお、除染が早期に行われた地点21、i7、i8を除いても平均値やばらつきの傾向はほとんど変わらない)。このうち、環境半減期 T_2 については、将来の線量率の変動傾向を予測する上で重要なパラメータであり、地点の特徴と T_2 値との関係性を注意深く観察したが、明確な関連は見いだせなかった。ただし、図7(左)に示したように、アスファルト舗装の上など土粒子や雨水が流れ出やすそうなところで半減期は比較的短く、逆に舗装道路から土粒子や雨水等が流入し、道端の非舗装部分でトラップされ得る箇所(図7(右))で長くなる、と解釈可能な場合もあった。岩元ら¹⁷⁾は¹³⁷Csにより汚染されたエリアについて除染領域と線量低減効果を計算し、

地上高さ1mを線量率評価点とすると除染半径10mで約5割、20mで約6割線量率が低減することを報告している。このことは、サーベイメータで測定される線量率は測定地点から半径数10mの範囲をみていることを示す。したがって地点の局所的状況によって線量率の値そのものが空間的に変化し、環境半減期についても比較的狭いスポットの特徴を反映し、値がばらつくものと推察される。また一般に、線量率の定期モニタリング地点の多くは車両等でアクセスしやすい場所に設定されており、今回解析対象とした15地点についても、ほとんどが舗装道路やその近傍の土地及び両者の境界付近にある。このため、地点の特徴(土地利用状況)が明確でなく、 T_2 値との間に一般的傾向が見られない要因となっている。

(3) 積算線量計で得られた線量率のトレンドと環境半減期

図8にガラスバジ(GB)及びシリコン半導体検出器(EPD)により測定された積算線量を経過時間で除すことにより得た線量率の推移を示す。図にはサーベイメータ(ASI)により得られた空間線量率の関数適合結果を併せて示した。測定に用いられたEPDは元来電子式個人被ばく線量計として放射線業務従事者等の被ばく管理に用いられている。また、GBについては環境タイプとされているものの、あくまで線量の監視レベルを補間する目的で設計されている。したがって、積算線量計の指示値を換算し線量率として解釈することは必ずしも適当ではないが、5年間のトレンドを全体として見る限り、サーベイメータにより得られた空間線量率の減衰傾向を再現し、積雪や除染の効果も明確に捉えている。

2種の積算線量計から得た線量率とサーベイメータで得たそれを比較すると、地点によりその大小関係が異なる。これは、線量計の特性や校正条件の違いによるところもあるが、積算線量計の設置位置とサーベイメータの測定位置が同一地点においても実際には数メートル離れている(図7参照)ためである。

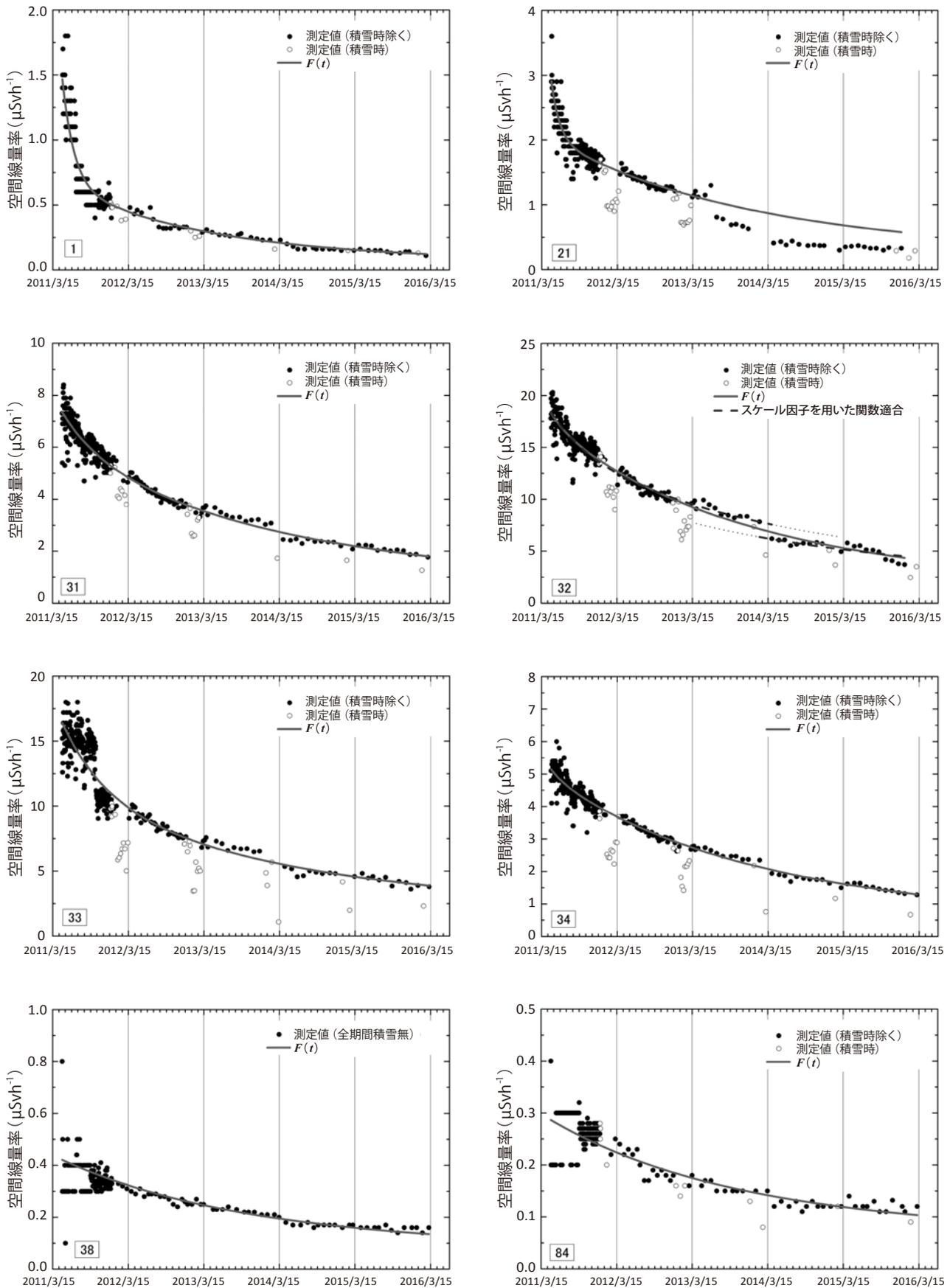


図6 サーベイメータにより測定された各地点における空間線量率の推移
各グラフ左下の囲み数字は地点番号を示す。

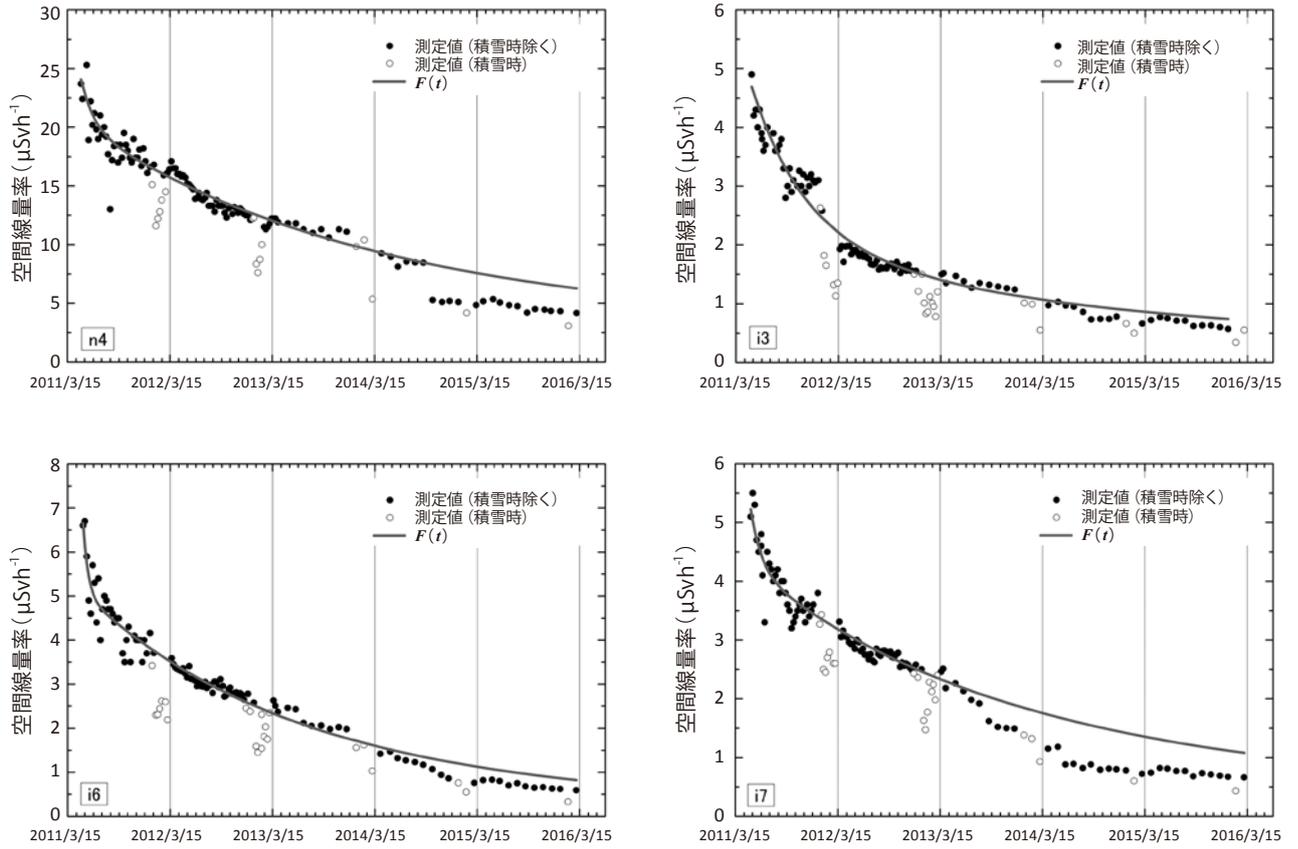


図6 サーベイメータにより測定された各地点における空間線量率の推移(続き)
各グラフ左下の囲み数字は地点番号を示す。



図7 空間線量率測定地点の様子

(左: 地点79 (2015年6月5日撮影)、成分2の半減期 $T_2 = 4.6$ 年、右: 地点33 (2015年6月10日撮影)、 $T_2 = 27$ 年)。
測定者の立っている位置から数メートル離れた位置に積算線量計収納用の木箱が設置されている。

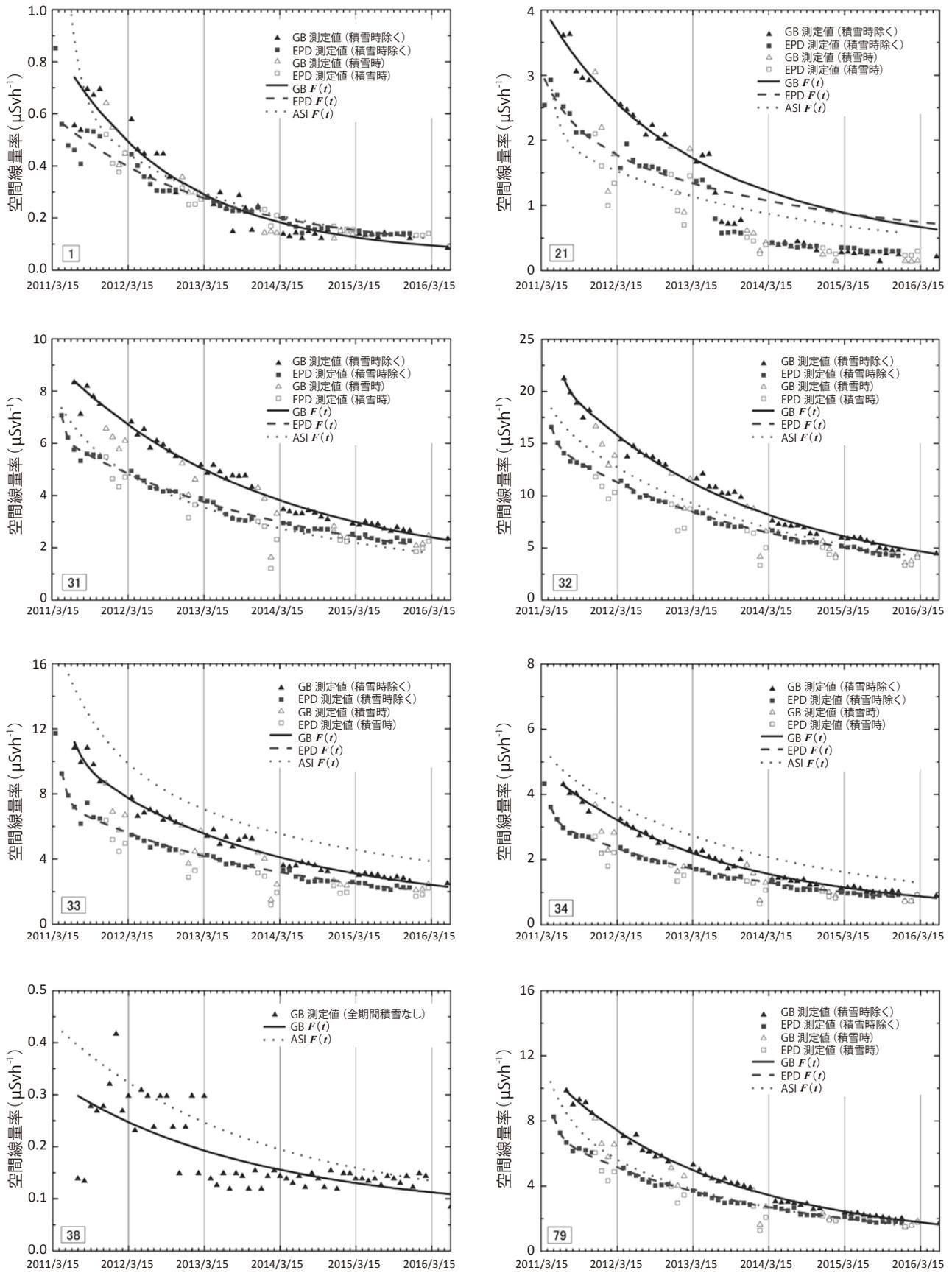


図8 積算線量計 (GB: ガラスバッジ、EPD: シリコン半導体検出器) により測定された積算線量を換算して得た線量率の推移
各グラフ左下の囲み数字は地点番号を示す。
サーベイメータ (ASI) により得られた空間線量率の関数適合結果を併せて示す。

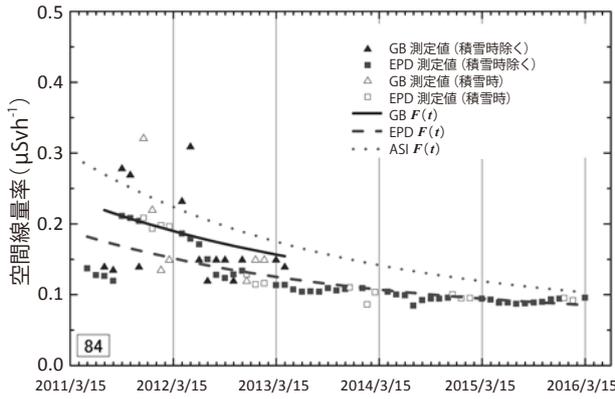


図8 積算線量計(GB: ガラスバッジ、EPD: シリコン半導体検出器)により測定された積算線量を換算して得た線量率の推移(続き)
各グラフ左下の囲み数字は地点番号を示す。
サーバイメータ(ASI)により得られた空間線量率の関数適合結果を併せて示す。

一方、2種の積算線量計の値を比較すると、GBによる線量率は、対象としたほぼすべての地点においてEPDによる線量率を上回っており、20～50%の差異がある(線量の低い地点1及び84を除く)。この原因の一つとして、GBは線量計の校正時に¹³⁷Csのフリーエア照射で周辺線量当量が値付けされているのに対し、EPDは¹³⁷Csフリーエア照射で得た値に対し、アクリルファントムに装着して照射(オンファントムで照射)された指示値(I_{Op})とフリーエア照射された指示値(I_{FA})の比で決まる変換係数 $p(=I_{Op}/I_{FA})$ を乗じて個人線量当量として値付けされていることが挙げられる¹⁸⁾。ただし、DOSE i- γ の場合 p は1.07～1.10とされており、差異を説明できる方向ではあるが20～50%に比べれば小さい^{B)}。各々の線量計の方向特性は公表されていないが、EPDをファントムに装着しない状態での方向依存性は装着した場合に比べて小さいと推測されること²⁰⁾や、EPDとGBで方向依存性の傾向(正面入射>側方入射)に大差はないと考えられることから、この影響は小さいと思われる。また、各線量計は木箱及びプラスチック容器に入られていることや、地上1 mにおけるベータ線/ガンマ線の線量比が0.06～0.6と計算されていること²¹⁾を考慮すると、ベータ線の影響はほとんどないと考えられる。一方、上述のように通常、各線量計は基準線源(¹³⁷Cs)を用いて校正されており、一般環境での光子スペクトルと異なる(¹³⁴Csの存在や散乱線の影響)ため、線量計のエネルギー特性の違いにより、実際の線量との間に差異が生じる要因となる²²⁾。図9に示すように、地点84を除けば時間の経過とともにGBによる線量率とEPDによるそれとの比(GB/EPD)が低下していることか

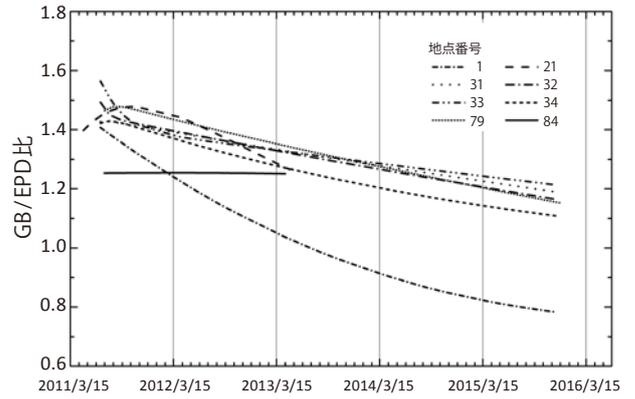


図9 2種の積算線量計(GB: ガラスバッジ、EPD: シリコン半導体検出器)を用いて得られた線量率比の経時的変化

ら、環境中の¹³⁴Cs/¹³⁷Cs比の時間的変化や放射性セシウムの地中への移行により光子スペクトルが変化し、両者の差が生じた可能性がある。

次に、線量率の(1)、(2)式への関数適合の状況を見ると、パラメータは収束したものの、各地点において異なる線量計(ASIを含む)で得られた a_1 や T_1 のばらつきが大きく(表1)、その差異は10倍以上に及ぶ場合がある(例えば、地点34、79)。これは、ASIでの測定に比べて初期の測定間隔が長いことや、GBでは関数適合に用いたデータが2か月程度遅いこと、EPDでは観測した線量(率)に季節的な変動が見られ(3、(5)参照)、2011年春季の急激な線量率下落を反映して関数が適合されたこと(地点31、32、33、34、79)等が影響していると考えられる。この場合、 a_1 や T_1 は比較的初期のデータに大きく左右され、信頼性は低いといえる。一方、環境半減期に相当する T_2 については、除染のため適合に用いたデータ数の少ない地点21のEPDによる値を除いて3.3年～19年の範囲で収束した。各地点において異なる線量計で評価された T_2 は概ね2年程度異なることが多いことから、得られた環境半減期もこの程度の不確かさを有していると考えられる。

(4) 積雪による線量率の低減

線量率トレンドのうち関数適合に用いなかった積雪時のデータ D_i^* と、適合結果である $F(t)$ とを比較することにより、各地点における積雪遮蔽ファクタを求め、 D_i^* 取得時の積雪深と比較した。この結果を図10に示す。地点ごと、また同じ地点であっても時期ごとに積雪遮蔽ファクタはばらつくが、全体としては両者に関係性が認められ、積雪深が概ね5 cm以上ある場合、積雪深の増加とともに積雪遮蔽ファクタは減少し、20 cmの積雪により線量率は15%から50%低下する傾向がある。

B) 周辺線量当量に0.7を乗じるにより成人の個人線量が評価できるとの結果が報告されている^{19,20)}。これは個人線量計が装着される人体や校正用ファントムの存在によって正面入射以外の放射線が遮蔽されることに起因するものであり、ここでの差異を説明するものではない。

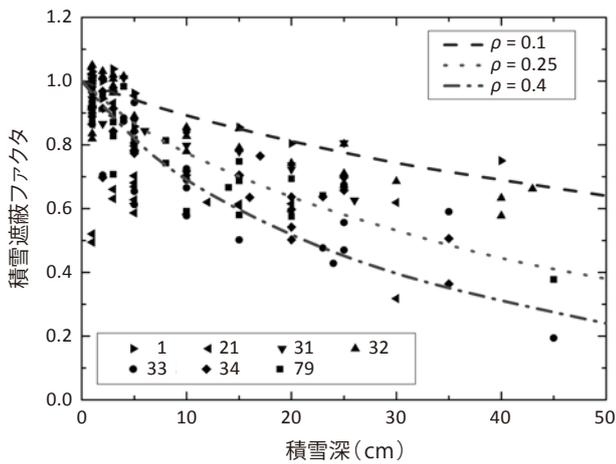


図 10 積雪深と積雪遮蔽ファクタの関係
藤元による計算値²⁴⁾を併せて示した。
 ρ は積雪の密度(g/cm^3)である。

積雪遮蔽ファクタについては長岡ら²³⁾や藤元²⁴⁾により、天然の核種を対象とした実測データやシミュレーション結果が報告されている。今回取得されたデータは主に放射性セシウムが線量に寄与しているが、これらの報告値と似た傾向がある。藤元²⁴⁾は土壤中に一様分布する⁴⁰K、²²⁶Ra、²³²Thを一次線源として積雪深と積雪遮蔽ファクタの関係を計算で評価し、これら3核種がどのような濃度をもつ場合でも結果に大差はないとしている。これに基づく、今回対象とした各地点の積雪密度 ρ はおおよそ0.1から0.4、平均すると $0.25 \text{ g}/\text{cm}^3$ に相当する。一方、積雪深が5 cm以下の場合に積雪遮蔽ファクタにばらつきが生じるのは、線量率測定地点付近での積雪深に局所的なムラがあり、線量が寄与するエリア全体を反映していないことが原因と考えられる。特に地点21(双葉郡葛尾村)はアスファルト舗装道路と木立の境目付近に位置するため、除雪や融雪の影響により積雪深が地点周囲に比べて浅くなり、値が低めにばらついているものと推察される。

過去5年間(2011年5月1日から2016年3月14日まで)に除染の行われていない地点(地点1、31、32、33、34、79、83)を対象とし、関数 $F(t)$ を単純に積分した場合と、積雪時

の線量率(サーベイメータで測定)を時間積分し $F(t)$ の単純積分値から差し引いた場合を比較すると、後者は前者に比べ1.9%~6.5%(平均4.4%)低く評価された。低減効果が最小となるのは積雪量が少ない地点1(福島市杉妻町)であり、最大は山間に位置する地点33(相馬郡飯館村)であった。これらの値は積算線量計のトレンドから得た値とも整合し、例えば地点33では、ASI: 6.5%、GB: 5.6%、EPD: 5.5%と評価された。福島では積雪の程度は毎年異なるもののその期間は1年の四分の一に及ぶ場合もあるため、長期にわたって受ける線量を評価する際には、単に線量率を関数 $F(t)$ で積分するだけでなく、積雪による低減効果を加味することで、より精度を高めることができるであろう。

(5) 2013年冬季における不連続な線量率変動

図3(左)、図5、図6を詳細にみると、2013年夏季から2014年夏季にかけて線量率の実測データが $F(t)$ とわずかに乖離し、2013年冬季(2013年の年末を含む冬)を境として実測データが不連続に変動したと見受けられる地点(地点31、32、33、34、79、83)がある。似たような傾向が積算線量計によるトレンド(図8)のうち、GBによるデータ(地点31、32、33、34、79)においても見られた。EPDではそのような傾向はなく、逆に2013年夏季を中心として低めの値で推移していた(地点31、32で顕著にみられるように、この年以外の夏季においても低めの値が観測されている。)⁹⁾

不連続が生じた原因ははっきりとしないが、これらの地点はいずれも降雪の多い地点であることや、道路から遠く離れており除染の影響を受けにくい地点1においてもわずかに不連続が見られることから、2014年2月上旬に生じた記録的な豪雪²⁶⁾により融雪時のウェザリング等が促進された可能性がある。この場合、5年間の測定データ全体を $F(t)$ に適合させると、 $F(t)$ は2013年夏季の線量率を過小に、2014年夏季は過大に線量率を見積もることになる。そこで、(1)式の右辺第1項にスケール因子 S を乗じた下記の(3)式を導入し、2013年までの線量率データは(1)、(2)式で、2014年以降は(3)、(2)式で関数適合して各パラメータを求め、全期間にわたり(1)、(2)式で適合した場合と比較した。

$$F(t) = S D_0 \left\{ f_{134} \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{134}} t\right) + (1-f_{134}) \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{137}} t\right) \right\} \left\{ a_1 \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_1} t\right) + (1-a_1) \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_2} t\right) \right\} + D_{BKG} \dots \dots \dots (3)$$

⁹⁾ このEPDのメーカーによる温度特性試験では、基準温度20℃に対し40℃で2.2%レスポンスが増加する結果が得られており²⁵⁾、今回の測定結果と相反している。

ここで、 S : 2014年以降の実測データに乗じるスケール因子であり、関数適合で求めるパラメータの1つである。

その結果、地点 32 の場合、図 6 (地点 32) に示すように 2013年冬季を境に関数式を使い分けると、実測値と適合関数はよく一致し、スケール因子 S は 0.81 に収束した。一方、環境半減期 T_2 は 6.9年から 31年へと大幅に長くなった^{D)}。その他の地点 31、33、34、79、83 についても同様に調べたところ S は 0.84 ~ 0.97 の範囲にあり、 T_2 はいずれの場合も大幅に長くなり、実質的に成分 2 の寄与がない状態で収束することが多かった。なお、 S を導入して T_2 が無限大に収束するのは、ウェザリング等 (成分 2) による線量率の変化がないことを意味する。すなわち、成分 1 の寄与のみが残った後 (3. (2) 参照) の線量率変化は、放射性セシウム物理的減衰を除けば、2013年冬季の不連続のみ起因することに相当する。

測定を継続し、より長期にわたってトレンドを解析すれば、どちらのモデルが実際の線量率変動を的確に捉えているか傾向が見出されるであろう。ただし、長期的な線量率の予測を目的として関数を使うのであれば、線量の不連続が生じる度に関数を変えては目的を達しない。また、そもそも土や水の移動に基づくウェザリングは連続的になめらかに起こっているのではなく、大きさや頻度が都度異なる自然現象の変化をドライブングフォースとしている。環境半減期 T_2 はこのような大なり小なりの変化を一括りに取り扱おうとしたものであり、今回観測された不連続性についても非常に長い期間で見れば (1) 式のような一つの関数で表現できる。一方、線量率に変化をもたらす大規模で稀有な事象 (地形の変化、大量の土砂の流出入等) が生じた場合に対してはモデルの適用はできない。

4. まとめと結論

福島第一原子力発電所の事故から 5年が経過したのを機に、福島県内の 15地点で測定された空間線量率のトレンドを整理・解析し、その変動傾向や積雪期における線量の低減について考察した。

その結果、サーベイメータや積算線量計で測定された空間線量率のトレンドは、放射性セシウム物理的減衰とその他の要因による減衰 (2成分) をコンポーネントとする関数式で概ね精度よく関数適合可能であったが、後者の減衰成分を 2つに分離できない場合や、期間の途中に不連続な変動がみられる場合もあった。後者の減衰のうち、ウェザリングを主要因とする遅い成分の半減期 T_2 (環境半減期) は、サーベイメータで測定されたデータについて 3年から 27年の範囲にあり、平均約 10年であった。表土の入れ替えによる除染により、線量

率が 6割以上低減する例も見られた。

また、関数適合で得られた $F(t)$ 式を利用して積雪遮蔽ファクタを求めることにより、冬季 5シーズンのデータについて積雪による遮蔽の影響を定量化した。積雪深と線量率との関係は、地殻からの天然核種についてこれまでも文献で報告されているが、今回の解析結果はこれらの報告値と矛盾しないものであった。各地点の積雪密度はおおよそ 0.1 ~ 0.4 g/cm³、平均で 0.25 g/cm³ と推定された。さらに、積雪のある地点で $F(t)$ を用いて 5年間の積算線量を評価したところ、積算線量は $F(t)$ を単純に積分した場合に比べて 2% から 7% 低くなることが示された。

福島における放射線モニタリングは現在も継続して行われており、新規に取得したデータが妥当なものなのか、或いは以前の測定に比べて有意な差が生じたかを判断する根拠として今回の解析が一助となれば幸いである。また、今後より長い時間スケールで線量率の変動について検討する際に、この 5年間の解析結果が比較的初期の情報として活用されることを期待する。

謝 辞

本稿を執筆するにあたり、原子力規制庁 福島地方放射線モニタリング対策官事務所の石井 忠元所長及び原子力機構 福島研究開発部門の斎藤 公明特任参与に有益なご助言をいただきました。記して感謝致します。なお、本研究成果の一部は環境放射能除染学会第 4回研究発表会にて発表したものです。

参 考 文 献

- 1) 「総合モニタリング計画」原子力規制委員会 HP (<http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/204/list-1.html>), 2017年 2月閲覧。
- 2) S. Kinase, T. Takahashi, S. Sato, R. Sakamoto, K. Saito: Development of prediction models for radioactive caesium distribution within the 80-km radius of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *Radiat. Prot. Dosim.*, **160**, 318-321 (2014).
- 3) 安藤 真樹, 菅野 隆, 斎藤 公明: 福島県及び隣接県での空間線量率の経時変化に関する考察. *JAEA-Technology* 2015-060, (国研) 日本原子力研究開発機構 (2016).
- 4) 「放射性物質モニタリングデータの情報公開サイト-放射性物質の分布状況等調査による航空機モニタリング」(国

^{D)} 地点 32 の近く (南東約 400 m) においてモニタリングポストによる線量率の定点測定が行われている。この地点の線量率トレンド²⁷⁾ に不連続性は見出せなかった。ただし、線量率の季節依存性 (夏季に高めの値を示す) の影響で不連続性が見えなくなっている可能性はある。なお、2011年 7月下旬に発生した新潟・福島豪雨及び 2015年 9月上旬の関東・東北豪雨では福島県内各地で激しい雨が観測されたが、今回対象とした地点の線量率トレンドに顕著な変動は認められていない。

- 研) 日本原子力研究開発機構 HP (<http://emdb.jaea.go.jp/emdb/portals/b136/>), 2017年2月閲覧.
- 5) 「電離箱式サーベイメータ ICS-331B, ICS-323C」株式会社日立製作所 HP (<http://www.hitachi.co.jp/products/healthcare/products-support/radiation/surveymeter/ics331b323c/index.html>), 2017年2月閲覧.
 - 6) 「シンチレーションサーベイメータ TCS-171B & 172B」株式会社日立製作所 HP (<http://www.hitachi.co.jp/products/healthcare/products-support/radiation/surveymeter/tcs171b172b/index.html>), 2017年2月閲覧.
 - 7) 「警報付個人線量計 DOSE i シリーズ」富士電機株式会社 HP (http://www.fujielectric.co.jp/products/radiation/servy/dose_i/), 2017年2月閲覧.
 - 8) 「ガラスバッジ」株式会社千代田テクノ HP (http://www.c-technol.co.jp/cms/wp-content/uploads/2014/04/doc_monitoring_6_160608.pdf), 2017年2月閲覧.
 - 9) 「放射線モニタリング情報 - 空間線量率、積算線量」原子力規制委員会 HP (<http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/496/list-1.html>), 2017年2月閲覧.
 - 10) J. T. Smith, M. A. Cross, S. M. Wright: Predicting transfers of ^{137}Cs in terrestrial and aquatic environments: A whole-ecosystem approach. *Radioprotection*, **37(C1)**, 37-42 (2002).
 - 11) IAEA: "Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments", IAEA Technical Reports Series No. 472 (2010).
 - 12) IAEA: "Generic Procedures for Assessment and Response during a Radiological Emergency (Emended version)", IAEA TECDOC-1162 (2013).
 - 13) S. Mikami, T. Maeyama, Y. Hoshide, R. Sakamoto, S. Sato, N. Okuda, S. Demongeot, R. Gurriaran, Y. Uwamino, H. Kato, M. Fujiwara, T. Sato, H. Takemiya, K. Saito: Spatial distributions of radionuclides deposited onto ground soil around the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant and their temporal change until December 2012. *J. Environ. Radioactiv.*, **139**, 320-343 (2015).
 - 14) "Decay Data Evaluation Project (DDEP), Recommended data", Laboratoire National Henri Becquerel (LNHB) HP (http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata_by_A.htm), 2017年2月閲覧.
 - 15) 「原子力発電所周辺環境放射能測定結果報告書、(p. 128) 平常の変動幅について」福島県 HP (<https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/42296.pdf>), 2017年2月閲覧.
 - 16) N. Matsuda, S. Mikami, S. Shimoura, J. Takahashi, M. Nakano, K. Shimada, K. Uno, S. Hagiwara, K. Saito: Depth profiles of radioactive cesium in soil using a scraper plate over a wide area surrounding the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant, Japan. *J. Environ. Radioactiv.*, **139**, 427-434 (2015).
 - 17) 岩元 洋介, 佐藤 大樹, 遠藤 章, 坂本 幸夫, 呉田 昌俊, 久語 輝彦: 汚染土壌の除染領域と線量低減効果の検討. JAEA-Technology 2011-026, (国研) 日本原子力研究開発機構 (2011).
 - 18) 日本工業標準調査会: 「照射線量測定器, 空気カーマ測定器, 空気吸収線量測定器及び線量当量測定器の校正方法 (JIS Z4511: 2005)」, 附属書 1 (規定) 個人線量計の校正方法, pp. 19-23, 日本規格協会, 東京 (2005).
 - 19) K. Yajima, O. Kurihara, Y. Ohmachi, M. Takada, Y. Omori, K. Akahane, E. Kim, M. Torikoshi, H. Yonehara, S. Yoshida, K. Sakai, M. Akashi: Estimating annual individual doses for evacuees returning home to areas affected by the Fukushima nuclear accident. *Health Phys.*, **109**, 122-133 (2015).
 - 20) (国研) 日本原子力研究開発機構, (国研) 放射線医学総合研究所: 「東京電力(株)福島第一原子力発電所事故に係る個人線量の特性に関する調査」の追加調査 - 児童に対する個人線量の推計手法等に関する検討 - 報告書, NIRS-M-276, (国研) 放射線医学総合研究所 (2016).
 - 21) 辻村 憲雄, 吉田 忠義: 汚染された土壌における $\beta\cdot\gamma$ 線量当量率 (2) 計算. 日本保健物理学会第 44 回研究発表会要旨集, p.106 (2011).
 - 22) T. Kurosawa, H. Iwase, N. Saito: Field photon energy spectra in Fukushima after the nuclear accident. *J. Nucl. Sci. Tech.*, **51**, 730-734 (2014).
 - 23) 長岡 鋭, 坂本 隆一, 堤 正博, 斎藤 公明, 森内 茂: 積雪による地殻 γ 線線量率の減衰 (II). 保健物理, **27**, 113-121 (1997).
 - 24) 藤元 憲三: 大地からの γ 線に対する雪の遮蔽効果. 保健物理, **21**, 3-8 (1986).
 - 25) 富士電機株式会社: 私信 (2016).
 - 26) 「平成 26 年(2014 年) 豪雪について」内閣府 HP (http://www.bousai.go.jp/updates/h26_02ooyuki/pdf/h26_02ooyuki_18.pdf), 2017年2月閲覧.
 - 27) 「福島県放射能測定マップ」福島県 HP (<http://fukushima-radioactivity.jp/pc/>), HP 右側の検索画面で「手七郎集会所」と入力後、地図上のポイントをクリックして線量率トレンドを表示), 2017年2月閲覧.

2016年11月28日受付

2017年3月1日受理

和 文 要 約

2011年3月に発生した東京電力福島第一原子力発電所の事故後、福島県内各地において放射線モニタリングが継続して行われている。事故から5年が経過したのを機に、原子力発電所から20～60 kmに位置する15地点で得られた空間線量率のトレンド(2011年5月～)を解析し、線量率の減衰傾向や積雪による遮蔽効果について考察した。線量率のトレンドは放射性セシウムの物理的減衰とウェザリング等その他の要因を加味した関数に適合することができ、この結果から環境半減期は3～27年(平均10年)と評価された。また、積雪による遮蔽の影響で線量率は下がり、積雪深20 cmで15%から50%低下した。この影響により、5年間の積算線量は積雪がなかった場合に比べて最大約7%低くなることが分かった。

