J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 155, p. 9 ～ 24 (2023)

放射性物質特集
論　文
Original Paper

全天球写真を用いた農地除染の空間線量低減効果の簡易分析

吉田修一郎 [1]

Simple analysis of the effect of farmland decontamination on the dose rate reduction by 360-degree photos

Shuichiro YOSHIDA[1]

Abstract: The effect of decontamination of radiocesium on the air dose rate reduction in farmlands depends on the landscape around the observing point. This study aimed to develop a simple method to estimate the reduction of dose rate from the change in the field of view, or solid angle of the contaminated landscape by decontamination around the observing points. To validate the methods, the ratios of the measured air dose rates after the decontamination work to those before the work were calculated for the data provided by Iitate Village, Fukushima Pref. The change in the fields of view of the contaminated landscape were analyzed by taking a 360-degree photo at the observing points by the village. In the analyses, main grounds of paddies were regarded as being subject to the decontamination, while the bunds and slopes around the paddies and forests were not. The virtual contaminated slopes and horizontal ground, in which the dose rates had been simulated by 3-dimensional particle transport code, were also used to test the applicability of the methods.

The proposed method could predict the reduction rate of air dose by the decontamination of the virtual slope and horizontal ground. However, the application to the real landscapes only partially succeeded. This is possibly because the horizontal and vertical distribution of radiocesium was not so uniform that the particular hotspot in the view could affect the measured air dose rate although the method assumes uniform distribution over the landscape in the 360-degree photos.

Key Words: radioesium, accident of nuclear power station, decontamination, solid angle, air dose rate

1. はじめに

東日本大震災に伴い発生した福島第一原子力発電所の事故により拡散した放射性セシウムは，宅地，道路，工業用地，農地，森林，河川や湖面など，多様な利用下にある土地に降下した．このうち，舗装面や屋根などに降水とともに降下した放射性セシウムの多くは，水と一緒に流去し，河川やため池などの水系に移動したが，農地や森林などでは，地中への雨水の浸透とその間の土壌による強い吸着により，系外への流出は相対的に少なかった（塩沢, 2016; Yoshida et al., 2019）．このような放射性セシウムに特徴的な挙動は，農地や森林の多い地域における水系汚染への影響を小さくしたが，一方で，時間が経過しても，放射性セシウムは農地や森林に留まり続けることになった．空間放射線量や農産物の安全性の観点から，放射性セシウムが吸着した表層の土壌を持ち出す除染が広範囲で行われた（環境省, 2022）．このうち，農地の表土の削り取り除染は，作物への移行率を考慮して，事故直後の作土（15 cm 深さまで）の平均放射性セシウム濃度が 5000 Bq kg^{-1} 乾土を超える農地で実施することが基本とされた（農林水産省, 2013）．また，事故後 1 年間の積算線量が 20 mSv を超えるおそれがあるとされた「計画的避難区域」と，東京電力福島第一原子力発電所から半径 20 km 圏内の「警戒区域」が，「除染特別地域」に指定され，これらについては，国が除染の計画を策定し，農地・宅地に対する除染事業を進める地域となった（環境省, 2022）．計画的避難区域に指定された福島県相馬郡飯舘村（最南部の長泥地区を除く）の農地除染は，2016 年までに完了している．飯舘村除染検証委員会（2017）によれば，除染前の農地の平均の空間線量率が 2.3 μSv h^{-1} であったのに対し，除染後は 1.1 μSv h^{-1} に低下したとされる．つまり，除染により空間線量率平均で 53 %低減している．一方で，効果のバラツキや要因については，この報告書では言及されていない．例えば，水田の畦畔，水路や道路の法面，宅地に近接する森林のように，表面の土壌（鉱物層）を削り取ることが難しい部分の除染は，行われたとしてもリターの除去程度である．さらに，住宅から離れた森林のリターや葉や樹皮の汚染などは，除染が行われないまま，残存している（Tajima et al., 2021）．その結果，農地の除染が空間線量低減に及ぼす効果は，その周囲の土地利用状況により影響を受ける．正確な空間線量率の推定は，周囲の「全ての汚染面の 3 次元的な汚染状況」を把握して，そ

[1]Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, 1-1-1, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, Japan. Corresponding author. 吉田修一郎, 東京大学大学院農学生命科学研究科
2023 年 1 月 16 日受稿　2023 年 7 月 24 日受理

の結果を用いて専門家が計算コードを用いて解析すれば可能ではある．しかし，観測点周囲の景観は，多様な要素で構成されており，例えば樹木の汚染状況は，幹，枝，葉などの部位や位置により異なるし，未除染斜面については，傾斜，凹凸，方角，斜面の上部下部などにより濃度分布に違いがあると考えられる．そのため，真の汚染分布を知ることは，いかなる調査をもってしても不可能であり，解析方法がいくら厳密でも，推定される結果の信頼性を高めることには限界がある．

そこで，本研究では，全天球カメラを用いて，空間線量観測点周囲の土地利用状況を記録し，そこから除染前後の汚染部の視野角の変化を算出することにより，除染による空間線量の低減効果を推定する簡易な手法を提案することを目的とした．具体的には，福島県飯舘村が，定点で継続的に測定している除染前後の空間線量率のデータや，三次元輸送計算コード（MCNP）により周囲の空間線量率が厳密に計算されているモデル汚染面を対象として，提案する手法の適用性を検証した．

2. 方法

2.1 分析対象としたデータと測定点周囲の情報

飯舘村が事故直後の 2011 年 4 月 6 日から 2 週間に 1 回，村内の 20 点の農地で計測を続けている空間線量率のデータを分析の対象とした．このデータは，「広報いいたてお知らせ版（飯舘村, 2023）」として村のホームページで公開されてきた．また，測定点周囲の状況については，2017 年 6 月 15 日（原発事故発生から 2287 日目）に，飯舘村の測定業務に同行して，各測点において全天球カメラ（THETA SC, RICOH）による周囲景観の撮影を行った．撮影高さは空間線量率の計測と同じ高さ（1 m）とした．全天球カメラとは，撮影点の周囲の球面状の視野全体を一枚の写真に収めるカメラで，360 度カメラとも呼ばれる．本機種の標準フォーマットでは，撮影された情報は，正距円筒図法による 2 次元平面上へ投影された画像として保存される．

2.2 空間線量率の経時変化データの分析方法

Fig. 1 に，空間線量率の経時変化データの分析手順を模式的に示した．分析に際しては，事故後から除染完了後までの空間線量率の経時変化から，不連続に線量率が低下している点を観測点毎に見つけ出し，その前後の低減曲線を数式でそれぞれ近似することを最初に考える．

^{134}Cs と ^{137}Cs の濃度は，それぞれの半減期に従って低下する（物理減衰）が，これらに起因する空間での線量率は，両同位体をあわせた全 Cs 濃度の減衰より速く進む．これは，^{134}Cs と ^{137}Cs の単位ベクレルの線源が放出するエネルギーが異なることに起因する（吉田, 2015）．さらに，実際の空間線量率の低下は，線源の物理減衰により説明できる低下より速く進むことが知られており（e.g., Sanada et al., 2018; Kato et al., 2018; Ando et al., 2018），この現象を表すために，Kinase et al.（2017）は，「環境半減期」を用いた低減項を物理減衰項に乗じたモデルを提示している．このような，物理減衰以外の減衰（環境減衰）は，事故後半年の間が特に顕著で，浸透のないコンクリート面等に比べ，土壌面では著しいと報告されている（Kakamu et al., 2012）．これは，土壌において，時間の経過とともに放射性セシウムが徐々に深部へ移動し，自己遮蔽効果が強く働くようになることで説明できる．事故直後から数年間の空間線量率の変化全体を数式で近似するならば，このような環境減衰効果を表せるモデルを用いることで全期間を通じた誤差を少なくできる．しかし，このようなモデルは，パラメータが多く，複雑であるため，事故から 3 年以上が経過した除染前後の変化量の定量に対しては，つぎのような単純な対数関数により，空間線量の変化傾向を近似した．

$$D = -\ln(t) + D_0 \tag{1}$$

D は空間線量率（μSv h^{-1}），t は 2011 年 3 月 12 日を 0 日目としたときの連続経過日数，D_0 は定数である．なお，除染前のデータとしては，2013 年 4 月 4 日以降のものを用い，除染後のデータとしては，2017 年 8 月 6 日までのものを用いた．前掲の資料には空間線量率とともに，除染実施の有無に関する情報も掲載されているので，不連続な低下が，除染によるものであることを，この記述からあわせて確認した．積雪期間は除染作業が行われず，また，積雪はその遮蔽効果により空間線量率を下げる．そのため，近似曲線を定めるためのデータから積雪期間は除外し，除染が行われた年度内の無積雪期間のデータのみを分析に利用した．

線量計測点周囲全体の除染が完了するためには日数が必要であり，除染開始直前と除染完了直後を直接比較すると，その間の自然減衰の影響（除染以外の影響）も含まれてしまう．そこで，除染前とみなせる最後の点と，除染後とみなせる最初の点のちょうど中間に位置する日(除染途中に相当する）を定め，両近似曲線によりその日の空間線量率の外挿値 (D_{before} と D_{after}) を計算した．そして，これらの差を空間線量率の低減量とみなして，前後の比 $D_{\mathrm{after}}/D_{\mathrm{before}}$ を算定した．

2.3 全方位写真データの解析

2.3.1 全天球写真を用いた地物の視野占有率の定量

立体角 Π [sr] を全方位（全球）の立体角 4π [sr] で割った値を「視野占有率:Ψ」と定義する．観測点の周りの全周景観を球面上に投影したものが全方位写真であり，その情報が正距円筒座標系に変換されて記録される．つまり，記録されている画像は，観測点の周囲の景観を Fig. 2 のような半径 1 の球面に投影し，横軸を φ ($0 \leq \varphi \leq 2\pi$)，縦軸を θ ($0 \leq \theta \leq \pi$) とする平面直角座標系に変換したものである．球面上の（φ，θ）に投影されている面積 Δs の微小部分は，この正距円筒座標系において面積が

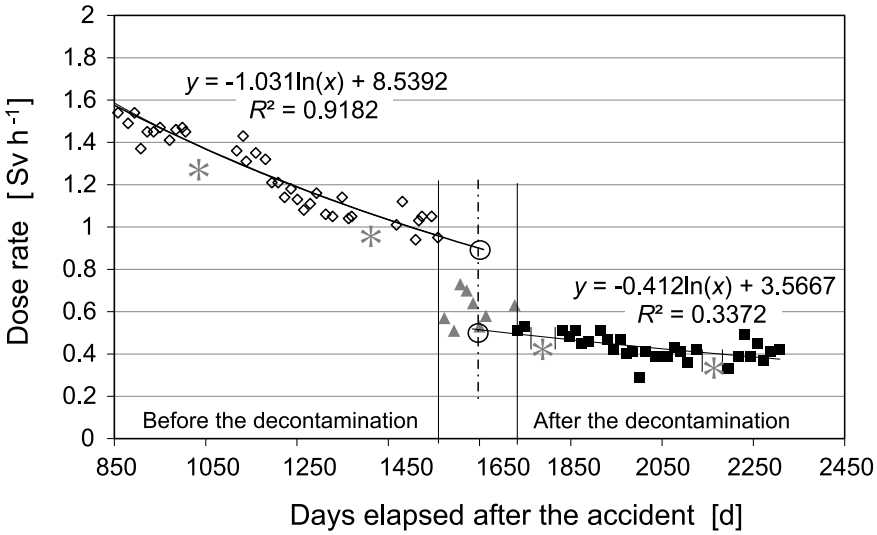


Fig. 1 除染前後での空間線量率の定点観測結果（飯舘村による観測）の推移の例.（記号「＊」は積雪の影響を受けているため，データを除外した期間を示す.）
Example of fixed-point monitoring result of dose rate before and after the decontamination work. (Symbol '＊' denotes the periods in which the data were excluded because the dose rate was affected by snow cover.)

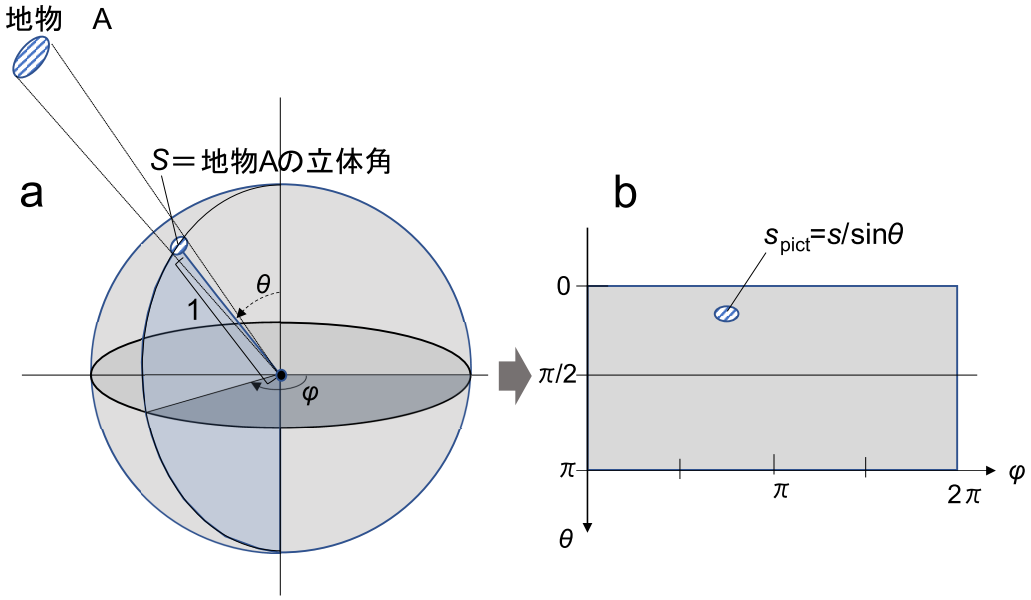


Fig. 2 全方位カメラによる周囲景観の記録とその投影方法.（a）周囲の景観要素 A の撮影,（b）正距円筒座標系へ投影された全方位写真上の景観要素 A.
Capturing surrounding landscape by 360-degree camera and the projection method. (a) Capturing surrounding landscape element A, (b) Landscape element A projected on the equidistant cylindrical coordinate system.

$\Delta s/\sin\theta$ となっている．そのため，地物 i の視野占有率 Ψ_i は，画像の総ピクセル数を N，地物 i の総ピクセル数を N_i，地物 i を構成する j 番目のピクセルの位置を（φ_j, θ_j）とすると

$$\Psi_i = \frac{1}{4\pi N_i}\sum_{j=1}^{N_i}\sin\theta_j \qquad (2)$$

によって計算できる（各点での水平方向の回転角 φ_j には依存しない）.

写真上の地物（面）を 除染による汚染残存度の差異を考慮して，次のカテゴリーに分類した．a) 水田 · 畑の本地，b) 森林，c) 水田畦畔や道路 · 水路の法面，d) 建造物，e) 除染土仮置き場のフレキシブルコンテナバック（以降「フレコン」と呼ぶ），f) 天空．このうち，農地除染によ

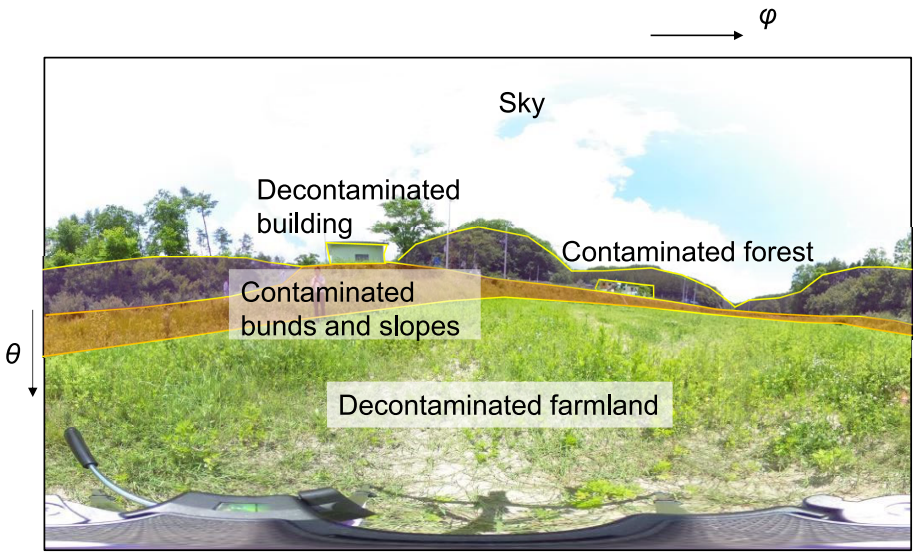


Fig. 3　土地利用による全方位写真に写る周囲景観の分離.
Classification of surrounding landscape from a 360-degree photo based on the land use.

り線量率への寄与が大幅に低下するカテゴリーは a) のみとし，除染の前後を問わず，線量率への寄与が小さいカテゴリーを d), e), f)，線量率への寄与が除染後も継続しているカテゴリー（表土剥ぎ取りが行われていない除染面）を b), c) とした．道路面は，写真への写り込みがなかったため，分類に含んでいない．カテゴリー分けは目視で行い，画像処理ソフトウェア（Image J, National Institute of Health, USA）により範囲をマスクして，カテゴリーに応じた値を割り当て，その画像をテキスト形式で出力して，それぞれの視野占有率を計算した．除染前の汚染部カテゴリーの視野占有率 Ψ_{before} に対する除染後の汚染部カテゴリーの視野占有率 Ψ_{after} の割合を視野占有率比 $\Psi_{\mathrm{after}}/\Psi_{\mathrm{before}}$ と定義した．Fig. 3 は，カテゴリー分けの例である．写真の下面に黒い部分が映り込んでいるのは，カメラの三脚である．画像イメージでは，この部分の面積が大きく現れるが，写真の下部に相当する部分の θ は，π に極めて近い値であり，(2) 式の $\sin\theta$ はほぼ 0 である．そのため，写真上で広い面積を占めていても，視野占有率に与える影響は無視しうる．しかも，この部分は，農地表面であることが明らかなので，a) のカテゴリーに分類した．

2.3.2 汚染面の立体角と空間線量率の関係

観測点で観測される γ 線は，観測点を中心とする球面状に広がる領域に存在する放射線源から放射される γ 線を足しあわせたものである．観測点から直視できる汚染面 A からの直達 γ 線の寄与は，観測点と線源の間の距離 r_{A} [m] の 2 乗に反比例し，汚染面 A の面積 S_{A} [m^2] に比例する．汚染面 A の汚染密度を I_{A} [Bq m^{-2}] としたとき，この面が観測点での空間線量率に及ぼす寄与 D_{A} [μSv h^{-1}] は，

$$D_{\mathrm{A}} \propto \frac{I_{\mathrm{A}} S_{\mathrm{A}}}{{r_{\mathrm{A}}}^2} \tag{3}$$

ここで，空気による減衰は無視している．なお，汚染が表面のみに分布していると仮定できれば，(3) 式の関係は，観測点と汚染面を結ぶ直線が汚染面と直交していなくても成り立つ．これは，汚染面の向きによらず，表面に存在する汚染の絶対量により，その寄与が定まるためである．

観測点を中心としたときの汚染面 A の立体角を Π_{A} [sr] とすると（Fig. 4a），観測点と汚染面を結ぶ直線が，汚染面と直交している場合には，

$$\Pi_{\mathrm{A}} \propto \frac{S_{\mathrm{A}}}{{r_{\mathrm{A}}}^2} \tag{4}$$

また，観測点と汚染面を結ぶ直線が汚染面となす角が，κ_{A} [rad]（$0 < \kappa_{\mathrm{A}} \leq \pi/2$）の場合には，

$$\Pi_{\mathrm{A}} \propto \frac{S_{\mathrm{A}} \sin\kappa_{\mathrm{A}}}{{r_{\mathrm{A}}}^2} \tag{5}$$

よって，

$$D_{\mathrm{A}} \propto \frac{I_{\mathrm{A}} \Pi_{\mathrm{A}}}{\sin\kappa_{\mathrm{A}}} \tag{6}$$

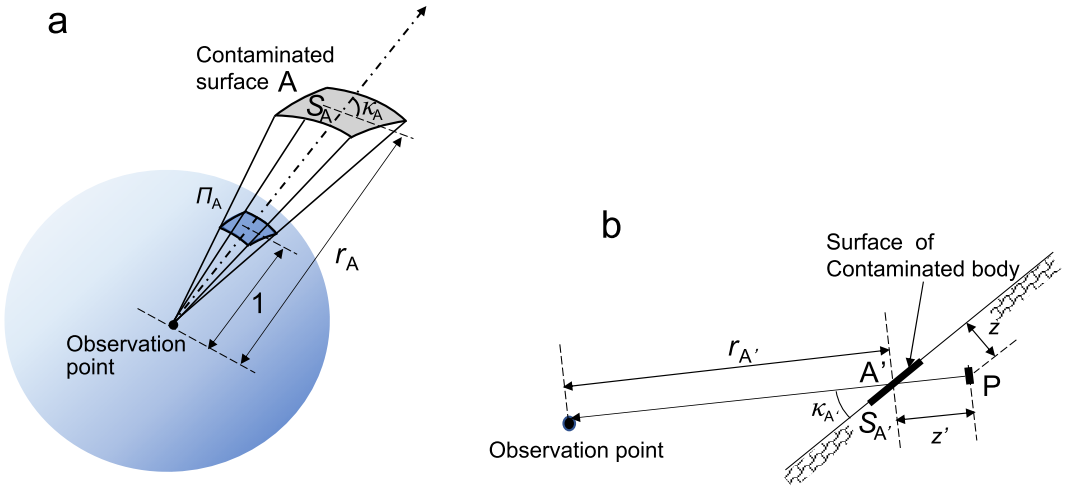


Fig. 4 （a）汚染面 A の立体角および（b）観測点と汚染土層の幾何的関係.
(a) Solid angle of contaminated surface A, (b) Geometry of the observation point and contaminated soil layer.

すなわち，汚染面 A の空間線量率への寄与は，その面の汚染密度と立体角に比例するが，κ_A が $\pi/2$ [rad] から大きく異なる汚染面については，$\sin\kappa_A$ の値の影響を無視しえない．例えば，観測点から見える汚染面が，はるか遠方にあっても，観測点に向かって直立している場合には，$\sin\kappa_A$ を 1 とみなせる．しかし，遠方の水平に近い面（例えば田面）や，遥か上方にある直立面（例えば，目の前の切り立った崖の上部），あるいは見通し方向に沿った直立面（例えば，狭小な谷の底から見える両岸の斜面）については，$\sin\kappa_A$ が 0 に近づくため，Π_A が等しくても，その寄与は相対的に大きいことになる．

ここまでの議論は，汚染が表面に分布し，その面密度が I_A [Bq m^{-2}] で表せることを前提としてきた．しかし，汚染部が土壌の場合，放射性セシウムは土層の厚み方向に一定の幅で広がりを持って分布している．チェルノブイリや福島における原発事故後の調査では，濃度ピークが地表面にある分布に加え，それが土層内部にある分布や，地表から一定の深さまで似通った濃度となるような分布も報告されている．ただ，放射線防護や遮蔽においては，地表面にピークをもつ指数関数分布を仮定し，地表面での面濃度と土層内部への広がりを 2 つのパラメータにより定義することが広く行われていることを鑑み，土層への汚染の広がりが指数関数分布で表されると仮定して，その空間線量率との関係を考える (Fig. 4b).

汚染面 A' からの深さ（表面から垂直な方向に測る）が z [m] である点 P から観測点までの直達放射線の土層内の通過距離 z' [m] は，

$$z' = \frac{z}{\sin\kappa_{A'}} \tag{7}$$

土層内での放射線の減衰を線減衰係数 λ [m^{-1}] により表すと，点 P からの放射線の減衰率 ϕ_P は，

$$\phi_P = \exp(-\lambda z') \tag{8}$$

一方，表面からの深さ z [m] での放射性セシウムの濃度を $c(z)$ [Bq m^{-3}] とした時，その鉛直分布が指数関数分布に従うとすれば，

$$c(z) = c_0 \exp\left(-\frac{z}{\beta}\right) \tag{9}$$

ここで，c_0 [Bq m^{-3}] は，土壌表面での濃度，β[m] は，土壌深部への分布の広がりを表すパラメータである．(9) 式を P から観測点に向かう放射線の土層内の通過距離 z' で表すと，

$$c(z') = c_0 \exp\left(-\frac{z'\sin\kappa_{A'}}{\beta}\right) \tag{10}$$

また，(9) 式の分布を仮定した時，(3) 式の $I_{A'}$ に対応する土壌の単位面積当たりの放射性セシウム濃度（インベントリ）は，(9) 式を $z = 0 \sim \infty$ まで積分して，

$$I_{A'} = c_0\beta \tag{11}$$

となる．点 P からの空間線量率への寄与 D_P は，直達放射線のみを考え，(8) 式と (10) 式を用いると

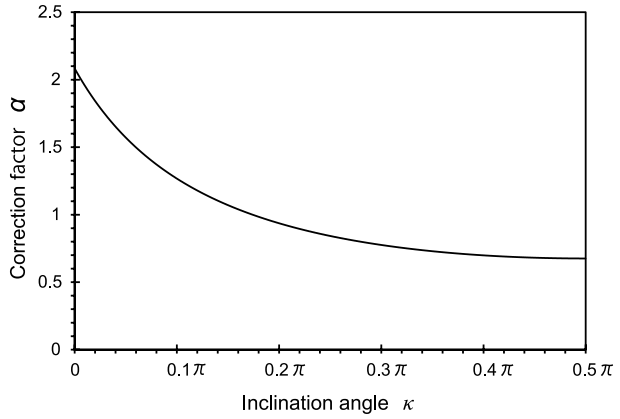


Fig. 5　補正係数 α と汚染面の傾き κ の関係．κ は，観測点から汚染面に向かうベクトルと汚染面がなす角．
Relationship between the correction factor α and inclination angle κ.

$$D_{\mathrm{P}} \propto \frac{c(z')\phi(z')}{{r_{\mathrm{A}}}^2}dz' = c_0 \exp\left(-\frac{z' \sin\kappa_{\mathrm{A}'}}{\beta + \lambda z'}\right) dz' \tag{12}$$

ここで，$r_{\mathrm{A}'} + z'$ は $r_{\mathrm{A}'}$ に等しいとみなした．さらに，面 A' を通過する観測点への直達放射線の寄与 $D_{\mathrm{A}'}$ は，

$$D_{\mathrm{A}'} \propto \frac{S_{\mathrm{A}'}}{{r_{\mathrm{A}'}}^2} \int_0^{\infty} c(z')\phi(z')dz' = -\frac{\Pi_{\mathrm{A}'} c_0 \beta}{\sin\kappa_{\mathrm{A}'} + \lambda\beta} \tag{13}$$

そして，（11）式より，（13）式は，

$$D_{\mathrm{A}'} \propto \frac{\Pi_{\mathrm{A}'} I_{\mathrm{A}'}}{\sin\kappa_{\mathrm{A}'} + \lambda\beta} \tag{14}$$

となる．（14）式の分母

$$\alpha = \frac{1}{\sin\kappa_{\mathrm{A}'} + \lambda\beta} \tag{15}$$

は，観測点からみた任意の汚染面（A' という添え字を除いて表現する）の傾きが空間線量へ及ぼす影響を補正する係数である．Fig. 5 に示す通り，汚染面と観測点のなす角 $\kappa_{\mathrm{A}'}$ が非常に小さくなると，α は大きな値をとる．

2.4 三次元輸送計算コードを用いた計算例との比較

上記の視野占有率による除染効果の簡易な評価方法が，より厳密な計算と比べてどの程度の精度をもつのかを示すため，三次元輸送計算コードを用いた研究例との比較を行った．具体的には，森林除染による空間線量率の低減効果を検討している邉見ら（2017）の解析結果と，観測点の周囲に無限に広がる水平な汚染面における観測点からの距離とその空間線量への寄与割合の関係を示した Miller（1997）の 2 つの事例を比較の対象とした．

2.4.1 斜面の除染による空間線量の低減率の計算に関する比較

邉見ら（2017）は，住宅の背後にある斜面の除染範囲が空間線量率の低減にどのような影響を及ぼすのかを明らかにするため，三次元輸送コード MCNP5（X-5 Monte Carlo Team, 2003）を用いた空間線量率の計算を行った．このうち，本研究では，Fig. 6 に示すような上方への距離 600 m，傾斜 30 度の平面状の均一に汚染された斜面を部分的に除染するケース（邉見ら（2017）の均一汚染ケース（a））について検証する．条件の組み合わせは，邉見ら（2017）の計算結果に対応させるために，除染は，斜面の最下部から D（= 5，10，20，40 m）まで（x 方向は ±600 m の間全て）行われるとし，観測点は，斜面最下部からの距離 l（= 0，5，10 m），地表面からの高さ h（= 1 m）とした（邉見ら（2017）において，IA1，IB1，IC1 として示されている状況）．

それぞれのケースについて，観測点を中心とした 3 次元の極座標に地物の座標を変換することにより，斜面全体やその除染部の視野占有率を計算した．この部分の詳細は，付録 1 に示す．

比較の対象とした邉見ら（2017）の想定 (a) では，3 cm 厚の A_0 層（堆積有機物層：乾燥密度 $\rho_{\mathrm{d0}} = 240$ kg m^{-3}）とその下の 2 cm 厚の A_1 層（乾燥密度 $\rho_{\mathrm{d1}} = 990$ kg m^{-3}）からなる汚染土層があり，除染では A_0 層のみ完全に取り去るというものである．両層の単位質量当たりの濃度 C_m [Bq kg^{-1}] は等しく，^{134}Cs と ^{137}Cs の比は 0.42 : 1 としている．また斜面の樹木の影響は，完全に無視している．この除染により，単位面積当たりの放射能（インベントリ）は除染前の 73 % に低下する．地表面にすべての放射性物質が存在し，それが 73 % に減少するのであれば，この汚染面に起因する γ 線フルエンス（球体に入射する粒子の数もしくはエネルギーをその球の大円の断面積で除したもの）も 73 % に減少する．しかし，上記のような想定では，地中からの γ 線が自己遮蔽される効果が含まれるので，これを考慮する必要がある．土の線減衰係数は，固相の組成，乾燥密度，水分に依存す

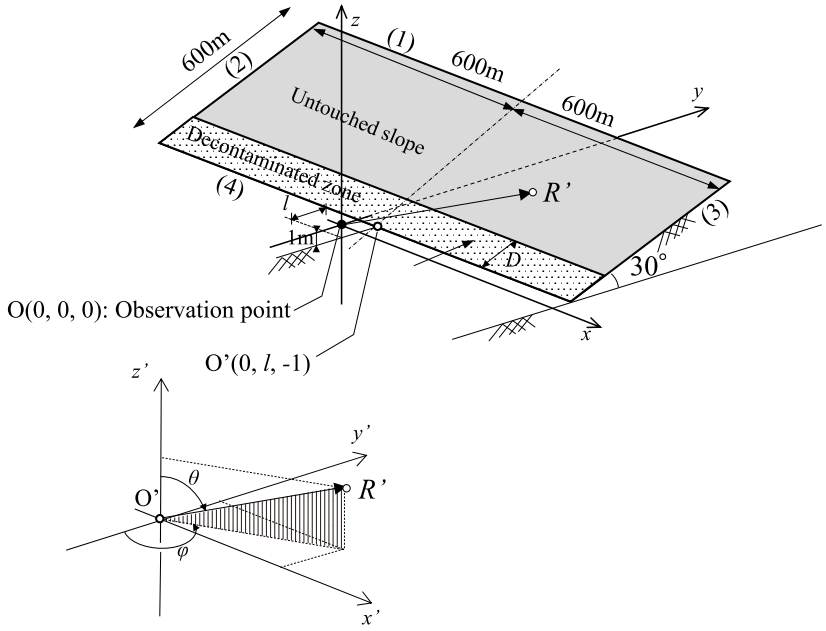


Fig. 6 除染による空間線量の低減効果の評価のための仮想斜面と計算のための座標系.
* 邉見ら（2017）の計算で用いられた斜面.
Virtual slope and coordinate system for evaluating the effect of decontamination on dose rate reduction.
*This slope is same as that in IB1 and IC1 of Hemmi et al. (2017) .

る（吉田ら, 2016）が，乾燥密度依存性のみここでは考慮して，A_0 層の線減衰係数を $\lambda_0 = 1.85\ m^{-1}$，A_1 層を $\lambda_1 = 10.25\ m^{-1}$ とする．なお，γ 線のエネルギーは ^{137}Cs ($^{137}Ba^m$) の 662 keV で代表させた（^{134}Cs の各エネルギーについて平均値をとっても大きな違いはない.）．ガンマ線の土中での減衰が，(8) 式に従うとすると，除染前の斜面部分に起因するある観測点での γ 線のフルエンス率 Φ_0 は，斜面と観測点の距離を r として，

$$\Phi_0 = \frac{C_m \rho_{d0}}{r^2} \int_0^{0.03} \exp(-\lambda_0 z) dz + \frac{C_m \rho_{d1}}{r^2} \int_{0.03}^{0.05} \exp\{-0.03\lambda_0 - \lambda_1 (z - 0.03)\} dz \quad (16)$$

と表される．右辺第 1 項は A_0 層にある放射性セシウムの寄与を積算したもの，第 2 項は，A_1 層にある放射性セシウムの寄与を積算したものである．

また，除染後の γ 線のフルエンス率 Φ_0 は，A_0 層が完全に取り除かれた状況となるので，

$$\Phi_1 = \frac{C_m \rho_{d1}}{r^2} \int_0^{0.02} \exp(-\lambda_1 z) dz \quad (17)$$

となる．

これらの比 Φ_1/Φ_0 を計算すると, 0.75 となった．よって，除染された面の面積当たりの寄与を，除染されていない面の 75 % として評価することにより，このシナリオが想定している除染効果を表すことにした．なお，この Φ_1/Φ_0 の値は，前述の除染前後のインベントリの比 0.73 に近い値となった．その理由としては，剥ぎ取る想定となっている A_0 層の密度が非常に小さく，A_1 層からの放射線に対して A_0 層での減衰がほとんど起こらないためである．

観測点から汚染面に向かうベクトルと汚染面のなす角は，観測点から左右あるいは上遠方に離れると，浅くなり，前述の α による補正が必要と考えられるが，この分析では，計算が複雑になるため考慮しない．

2.4.2 観測点の周囲に無限に広がる水平な汚染面における観測点からの距離とその寄与割合の関係

Miller（1997）は，^{137}Cs が土壌中に指数分布（下方への分布の広がりを表すパラメータ $\beta = 4.8\ g\ cm^{-1}$）している場合の地上 1 m での γ 線フルエンスの周囲からの寄与を示している（Fig. 7）．観測点からの距離（斜距離）が R' 以内の水平面の立体角 $\Psi(R')$ は，

$$\Psi(R') = 2\pi \left(1 - \frac{1}{R'}\right) \quad (18)$$

で表され，無限に広がる水平汚染面の立体角は，半球に相当する 2π に収束する．これらを比較することにより，水田の田面のように汚染面が水平に広がっているところの除染効果が除染面の視野占有率により，どの程度近似できるかが検証できる．

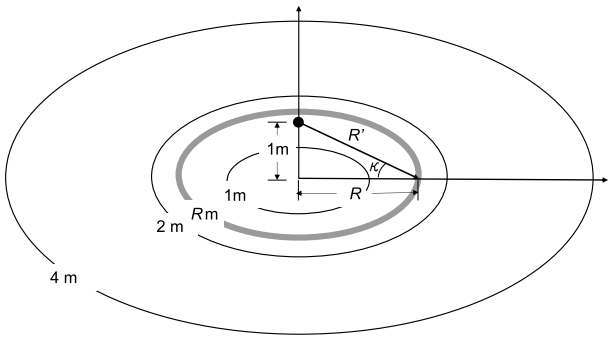


Fig. 7 周囲に広がる水平な汚染面と観測点との関係.
Associated geometry of the contaminated horizontal ground around the observation point.

水平面については，観測点からの距離の増加に伴い，観測点から汚染面に向かうベクトルとなす角 κ が浅くなるため，前述の（15）式で表される α による補正が必須である．α の値は，観測点から汚染面上の点までの水平距離を R，観測点の高さを 1 m として，

$$\tan\kappa = \frac{1}{R} \tag{19}$$

の関係から計算した．

3. 結果および考察

3.1 汚染状況が既知の面を対象とした空間線量率の厳密計算結果との比較

3.1.1 汚染斜面の部分的な除染による空間線量率の低下を解析した事例による検証

Table 1 は，遣見ら（2017）による仮想の斜面の除染に対して，除染前後の視野占有率の比から計算した空間線量率の低減率と，三次元輸送コードで計算された空間線量率の低減率（遣見ら, 2017）を比較したものである．全体的に，遣見ら（2017）の計算結果と視野占有率による結果は，近い値にはなっているが，視野占有率から算出した方が，低減率は大きめの値となっている．40 m 除染した時 ($D = 40$ m) の空間線量率の低下を斜面下端 ($l = 0$ m）で観測するケースでは，除染部の視野が，斜面全体の視野の 100 % に近くなる．そのため，視野占有率から計算された空間線量の低減率は，「方法」において述べた Φ_1/Φ_0 である 0.75 に対応する低減率 0.25 にほぼ等しい値（24.2 %）となっている．この時の遣見ら（2017）の計算値は，21 % であるから，すべての除染部に共通の値として乗じている除染部での低減率の値が，全体に影響したと考えられる．

この影響を取り除くために，除染部の幅が 5 m のときの空間線量の低減率を基準として，除染部の幅を広げたときの両方法による計算値を Table 2 で比較した．除染部の幅の増加の影響は，遣見ら（2017）の計算結果と視野占有率による推定結果の間で，ほとんど差がみられなかった．つまり，除染部が占有する視野の増大にほぼ比例して，空間線量率が低下することをこの比較結果は示している．

3.1.2 観測点の周囲に無限に均一に広がる水平な汚染面の空間線量率への寄与を解析した事例による検証

Table 3 では，^{137}Cs が土壌中に指数分布（下方への分布の広がりを表すパラメータ $\beta = 4.8$ g cm^{-1}）している

Table 1 空間線量率の低減率の計算値の比較（単位 %）.
上段：三次元輸送コードでの計算値（遣見ら（2017））; 下段：視野占有率に基づく推定値.
Comparison of reduction percentage of dose rate between the calculation by MCNP-5 (Hemmi et al., 2017) and estimates by field of view.
Upper columns with brackets: by MCNP-5 ; Lower columns: by field of view.

斜面下端から観測点までの距離 l (m)	除染部の幅 D (m)			
	5	10	20	40
0	(18) 22.1	(19) 23.3	(20) 23.9	(21) 24.2
5	(8.6) 12.2	(12.0) 16.6	(14.0) 20.1	(16.0) 22.4
10	(6.6) 8.2	(9.4) 12.6	(13.0) 17.0	(16.0) 20.4

Table 2 除染部の幅 D の増加による、空間線量率の低減率の（$D = 5$ m のときを基準とした）増加割合の比較．上段 三次元輸送コードでの計算値（遣見ら（2017））; 下段 視野占有率に基づく推定値.
Comparison of reduction percentage ratios of dose rate by an increase in decontamination area. Upper columns with brackets: by MCNP-5 ; Lower columns: by field of view.

斜面下端から観測点までの距離 l (m)	除染部の幅 D (m)			
	5（基準）(Reference)	10	20	40
0	(1.00) 1.00	(1.06) 1.05	(1.11) 1.08	(1.17) 1.10
5	(1.00) 1.00	(1.40) 1.36	(1.63) 1.65	(1.86) 1.84
10	(1.00) 1.00	(1.42) 1.54	(1.97) 2.07	(2.42) 2.49

Table 3 観測点の周囲からの寄与割合に関する比較.
Contribution ratio of surrounding zone around the observation point to the dose rate and field of view.

距離 R (m) Distance from the observation point R (m)	当該範囲の寄与割合（Miller, 1997） Contribution of the domain to dose rate	汚染面全体の視野に対する当該範囲の視野占有率 $\Psi(R)$ Rate of field of view within the distance R to that in the whole contaminated ground $\Psi(R)$	α による補正後の視野占有率 Field of view corrected by α
$<$ 1	19 %	29 %	19 %
$<$ 2	42 %	55 %	40 %
$<$ 4	65 %	76 %	62 %
$<$ 10	85 %	90 %	82 %

Table 4 観測点での除染前後の空間線量率.
Dose rate at the observation points before and after the decontamination.

圃場 No.	除染前 Before the decontamination (μSv h^{-1})	除染後 After the decontamination (μSv h^{-1})	除染後 / 除染前 After/ Before
1	0.99	0.47	0.48
2	1.08	0.51	0.47
3	1.77	0.48	0.27
4	0.90	0.51	0.56
5	0.49	0.30	0.62
6	0.85	0.34	0.40
7	1.44	0.25	0.17
8	1.47	0.77	0.52
9	1.69	0.70	0.44
10	2.15	0.75	0.35
11	0.96	0.32	0.33
12	1.63	1.02	0.63
13	1.49	0.24	0.16
14	1.91	0.59	0.31
平均 Mean	1.34	0.52	0.41

場合の地上 1 m での γ 線フルエンスの周囲からの寄与を示している（Miller, 1997）．一方，観測点からの距離が R となる範囲の立体角が，汚染部全体の立体角に占める割合，すなわち視野占有率を，高さ 1 m の観測点において計算した結果をあわせて同表（Table 3）に示した．α による補正を行わないときの視野占有率は，Miller（1997）に比べ全体的に高い値となっているが，距離範囲を 4 m まで広げると，その相対的な誤差は 17 % 程度，10 m まで広げると，6 % に収まる．

次に，Miller（1997）で想定している放射性セシウムの鉛直分布を仮定した時の α を求めて，視野占有率の補正を行った場合の比較を行った（Table 3 の最右列）．補正を行うことにより，Miller（1997）の示す値に近づいた．このことから，汚染面が観測点に対し傾斜している場合（観測点に向かう直線と汚染面のなす角が 90 度から著しく離れている場合）には，その影響を考慮することで，除染部分の視野占有率により空間線量率をおおよそ推定できることを示している．なお，補正により逆に若干過小評価となっている原因としては，直達線以外の散乱線の影響を考慮していないためと考えられる．この影響は，土壌中のような減衰の大きな区間での通過距離が長くなると顕著に現れるため，遠方の浅い角度となる面で特に差が大きくなったと考えられる．

3.2 観測点周囲の景観と除染による汚染面の視野占有率の低下の関係

Table 4 に除染前後の空間線量率とその比率（除染後／

Table 5　カテゴリー毎の視野占有率と除染前後の汚染部視野占有率の比（α による補正なし）.
Rate of field of view in each land use categories.

	Ψ：視野占有率						
	a 農地（本地） Farmland	b 森林 Forest	c 畦畔 / 法面 Bunds/ Slopes	d 建造物 Building	e フレコン Flexible bag	f 空 Sky	除染後汚染部／除染前汚染部 $\Psi_{after}/\Psi_{before}$
圃場 No.	剥ぎ取り除染 Contamination removed	汚染残存 Contamination remains	汚染残存 Contamination remains	非線源			
1	0.466	0.041	0.020	0.009	0.013	0.427	0.116
2	0.468	0.035	0.023	0.034	0.000	0.433	0.110
3	0.500	0.057	0.006	0.011	0.000	0.423	0.112
4	0.460	0.105	0.064	0.009	0.000	0.361	0.268
5	0.362	0.066	0.099	0.011	0.099	0.357	0.263
6	0.415	0.094	0.077	0.000	0.000	0.399	0.283
7	0.491	0.060	0.010	0.012	0.000	0.425	0.124
8	0.466	0.051	0.037	0.000	0.000	0.444	0.159
9	0.477	0.031	0.000	0.000	0.092	0.400	0.061
10	0.492	0.097	0.000	0.000	0.022	0.391	0.165
11	0.455	0.064	0.024	0.005	0.000	0.428	0.163
12	0.356	0.031	0.102	0.000	0.068	0.440	0.272
13	0.482	0.043	0.017	0.006	0.000	0.456	0.111
14	0.494	0.072	0.014	0.004	0.000	0.412	0.149
平均 Mean	0.456	0.061	0.035	0.007	0.021	0.414	0.172

除染前）を示した．飯舘村が観測を続けている農地は，20 点あったが，そのうち 6 点は，土地利用が顕著に変わってしまっており，除染による効果を評価するのが困難であると判断した．そのため，14 点を解析の対象にした．除染後の空間線量率は，除染前の 0.17 ～ 0.63 倍，平均では 0.41 倍に低下していた．

Table 5 に，土地利用カテゴリーごとの視野占有率の算定結果を示した．なお，各点で撮影された全天球写真は，付録 2 として Fig. A2-1 ～ 14 に示した．

飯舘村による観測点は，いずれも農地の内部に設けられている．そのため，農地のうち畦畔を除いた「本地」の視野占有率は，平均で 46 % と高かった．また，観測点での写真撮影の際には，フレコンに詰められた汚染土の一時貯留施設として利用されていた場所が複数あった．このフレコンの視野占有率は，No. 5，9，12 でそれぞれ，9.9，9.2，6.8 % であった．フレコンが置かれたのは，除染が行われた後であることは確かだが，置かれた時期は正確には把握できなかった．また，除染後には不連続な空間線量率の変化は No. 9 以外では認められなかった．そのため，フレコンが占める視野については，除染前も除染後も線源とみなさないことにした．仮に写真撮影の際にフレコンが占める視野の大半が，除染前には水田の未除染面であった場合，除染により線源として寄与が消滅する部分の視野を過小評価したことになる．しかし，例えば No. 5 では，フレコンの視野占有率 0.099 を除染前の農地土壌面として加えると，除染前後の汚染面の視野占有率の比は，0.263 となり，フレコンの陰にある農地の除染の影響を考慮しないとき（Table 2）との差は 0.04 と小さかった．

Fig. 8a は，除染前後の汚染面の視野占有率の比 $\Psi_{after}/\Psi_{before}$ と除染前後の空間線量率の比 D_{after}/D_{before} を比較したものである．農地の本地部は除染により完全に汚染が取り除かれていることを仮定した場合の比較である．調査点 No. 6，7，13 は，両者の一致度が高く，また，No. 3，10，11，14 は，視野占有率がやや過小評価，その他は，大幅な過小評価となった．

Fig. 8b は，5 cm の表層土の削り取りにより放射性セシウムの 90 % が取り除かれるような鉛直分布（$\beta = 0.037$ m）を仮定し，その時の α（乾燥密度を 1.0 Mg m^{-3}; 体積含水率を 0.3 m^3 m^{-3} とした土壌の ^{137}Cs についての線減衰係数を仮定）を用いて水田本地部（除染面）のみ視野占有率の比を補正した場合の結果である（水田以外の面については，傾斜が不明であるため，α による補正は行わない.）．除染後の農地の本地部は，削り取り後の

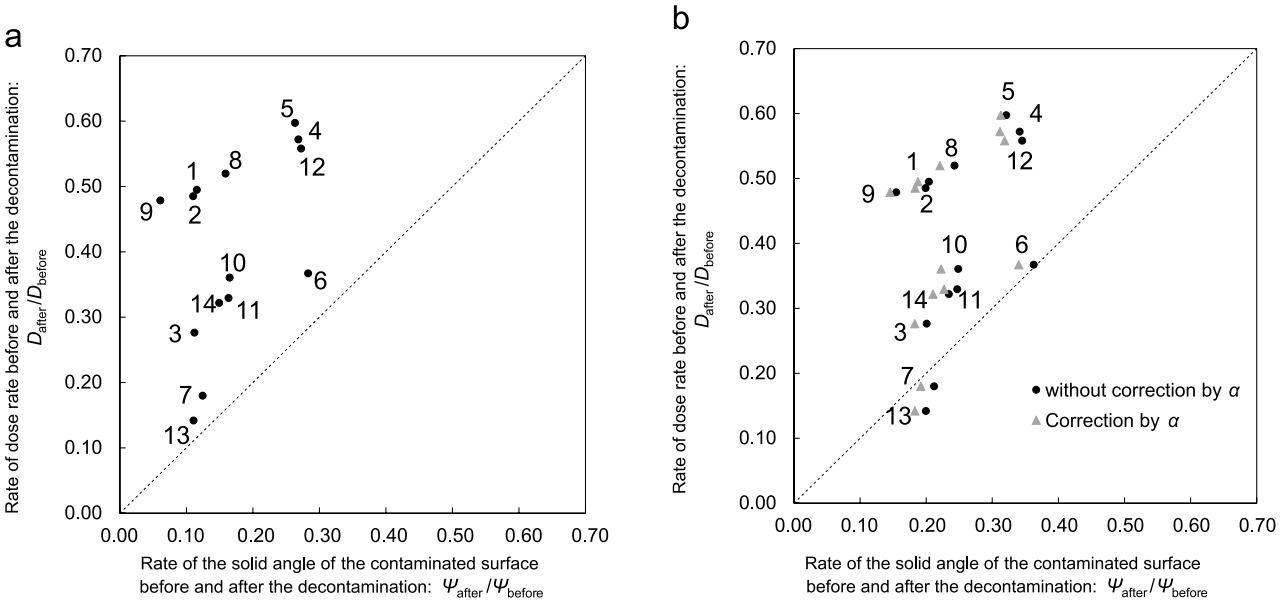


Fig. 8 $\Psi_{after}/\Psi_{before}$ と D_{after}/D_{before} の関係．(a) 農地のカテゴリーから汚染が完全に除去されたと仮定した場合：$\beta \to 0$，(b) 農地のカテゴリーの汚染が，除染前の 10 %残存していると仮定した場合：$\beta = 0.048$ m.
Relationship between $\Psi_{after}/\Psi_{before}$ and D_{after}/D_{before}. (a) Contamination is assumed to be completely removed from the farmland category: $\beta \to 0$, (b) 10 % of contamination is assumed to remained in the farmland category: $\beta = 0.048$ m.

放射性セシウムの残存率に相当する 10 % が空間線量に寄与すると考え，視野占有率に 0.1 を乗じた値として評価した．調査点 No. 6，7，13 は，補正後も両者の一致度が高く，また，No. 3，10，11，14 は，補正により一致度が高まった．しかし，その他は，依然として大幅な過小評価となった．

3.3 除染による空間線量率の低下率と残存汚染部の視野占有率の関係

周囲の状況を簡素化したモデルケースでは，除染部の視野占有率の割合が，空間線量率の低減率に近い値をとることを **3.1** で確認した．このことから，除染による空間線量の低減率を除染前後の汚染部の視野占有率の変化から予測することは，一定の誤差を許容すれば現実的であると言える．一方で，**3.2** で示した実際の現場においては，この関係が認められる場所もあれば，大きく外れる場所も多数あった．これらの場所については，観測点から見た汚染面の向きの影響の補正を行っても，顕著な改善が見られなかったことから，不一致の原因を他に求める必要があると考えられる．具体的には，除染により汚染の残存が 10 %程度であると仮定している農地の除染状況の不確実性が考えられる．除染済かどうかの判断は，空間線量率の不連続な低下とデータに示された除染済かどうかの情報に依っている．除染済かどうかは，あくまで観測の対象としている圃場に関する情報であって，観測点が除染された時期とその周囲が完全に除染された時期に違いがある場合や，未除染の耕作放棄地などが周辺にある場合などは，これらの寄与が疑われる．Fig. 1 の縦軸に示した除染前後の空間線量率の比は，写真撮影日までのデータのみを用いて算出したものである．No. 8 と No. 9 の空間線量率の変化を写真撮影後の期間まで示したのが Fig. 9 である．これらの観測点では，空間線量率の比 D_{after}/D_{before} が，視野占有率の比 $\Psi_{after}/\Psi_{before}$ から大きく乖離している．

No. 8 では，事故から 1860 日経過した頃に，空間線量率の不連続な低下がみられる．低下後は，増減傾向が不明確であるが，除染（1550 日）からこの時期（1860 日）までの低下のトレンドは，この時点で急に変わっていることを考えると，当該圃場の除染後に周囲の空間線量率がさらに低下する何らかの原因があったことが示唆される．

No. 9 では，写真撮影（2287 日）の少し前の計測から，急激な線量率の低下が起こっており，その後 2 年間にわたりこの減少分はもとに戻らず 同じ傾向が続いている．低下量は 0.25 μSv h^{-1} である．この低下量を，周囲の除染によるものとして，Table 4 に示した除染後の空間線量率から差し引くと，除染前を基準とした除染後の空間線量率は 0.27 となり，Table 4 に示した 0.42 より大幅に小さくなる．写真撮影の時点で，この観測点は，除染によ

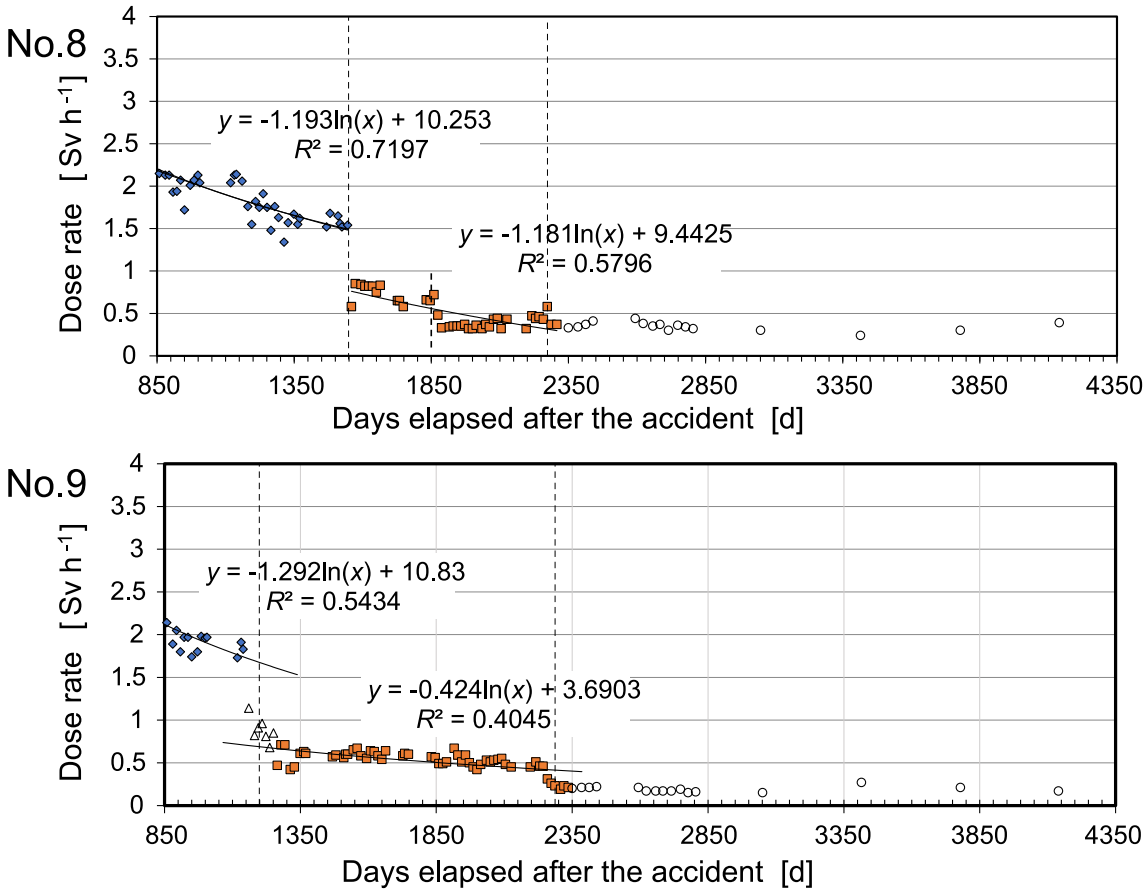


Fig. 9 空間線量率の定点観測結果（飯舘村による観測）.
Observed time change of dose rate at the monitoring point No. 8 and No. 9.

り発生した汚染土のフレコンの一時保管場所となっていたが，一時保管の際には，汚染土のフレコンの外側に清浄土のフレコンを置き，汚染土からの放射線を遮蔽することになっていることから，この一時保管による影響も考えられる．

除染後の実際の空間線量率が，視野占有率から予想される効果と比べ著しく高い残りの 5 点については，除染後の線量率に特に不連続な変化はみられず，除染は観測点の近傍の環境全体において，一時期に全て完了したと考えられた．除染前後の空間線量率の比と，汚染部の視野占有率の比の間に大きな乖離がみられた原因については以下のように考察できる．

本手法では，汚染面からの直達放射線のみを考えることにより，視野占有率と空間線量率を関係づけているが，厳密には視野に入らぬ面も空間線量に寄与する．例えば，「遮蔽壁」の反対側にある直視できない線源からの放射線は，スカイシャインと呼ばれ，放射線防護においては考慮される．しかし，特定の高濃度の汚染源が観測点の周囲に存在することは，汚染農地においては考えにくく，この影響は限定的と考えられる．また，本稿で引用した邉見ら（2017）のシミュレーションで，この影響は考慮されているが，視野占有率による推定と顕著な差はみられなかったことを踏まえると，スカイシャインが，ここで問題にしているような大きな誤差の原因になっているとは考えにくい．

本手法では，観測点周囲への放射性セシウムのフォールアウトは，土地利用によらずすべての面で等しいことを仮定している．また，降下後の放射性セシウムの流出や浸透挙動の違いについては考慮していない．そのため，地域全体で見れば同じ降下量だとしても，空間線量への寄与が大きくなるような表面に集中した分布をしている場所が，除染の対象になっていない場合には，視野占有率のみからの推定よる除染効果は過大に（除染前を基準にした線量率が低く）評価される可能性がある．非除染部は畦畔や法面，山のような傾斜している面が多く，これらの面での放射性セシウムの分布は，水平面の分布と明らかに異なると考えられる．しかし，この分布が，水平な面と比べ空間線量率に対しどのように影響するのかを定量的に検討するための十分な情報はないため，この違いが関係しているかどうか言及することは難しい．

この問題は，写真のみから写し取られている面の除染の有無や程度を正確に判別することが難しい，という手法の限界による部分が大きい．そのため，写真撮影とあわせて周囲の地表近傍の空間線量率を計測するなど，情報不足を補足することにより，より正確な推定が可能になると考えられる．これは，三次元輸送コードを用いる厳密計算においても，同様である．ただ，汚染の詳細な空間分布の測定を要するなら，本手法を提案する意味が薄弱になる．よって，簡易な方法により，実態との顕著な不一致が起こらないようにする工夫が，本手法を応用する上で今後検討するべき課題と言える．

4. まとめ

被災自治体が，原発事故後 2 週間に 1 度，定期的に定点で測定している空間線量率のデータにより，除染前後の空間線量率の比を算定するとともに，その観測点において撮影した全方位写真から，除染前後の汚染部の視野占有率の比を算出して，これらの関係を調べた．あわせて，単純なモデル斜面や水平面を対象にした三次元輸送コードによるシミュレーション結果と汚染面の視野占有率による推定結果を比較した．

その結果，以下の結論を得た．

1. 除染部と非除染部が明確に区別でき，除染部の放射性セシウムの残存率（空間線量率への残存寄与率）が既知であれば，除染による空間線量の低減率を除染前後の汚染部の視野占有率の変化から予測することが可能である．
2. 現場での写真のみから除染部 · 非除染部を正確に判定することは難しく，また，現場により除染部の放射性セシウム残存率には幅があるため，除染による空間線量率の低減を，汚染部の視野占有率から正確に予測するためには，観測点周囲の除染後の状況に関する追加の情報が必要である．

謝辞

飯舘村内の空間線量率定点観測点での全天球写真撮影においては，飯舘村役場の高橋由文氏，三浦 盛氏にご高配を賜わりましたことを記して感謝します．

付録 1

斜面の中央下端から発する位置ベクトルを (x',y',z') とすると，観測点を原点とした xyz 座標系において，その終点の座標は $(x', y'+l, z'-1)$ と表される．当該斜面を囲む領域の方程式は，xyz 座標系では，

$$\left.\begin{aligned} &-600 \le x \le 600 \quad ; \\ &y = 600\cos\left(\frac{\pi}{6}\right) + l \quad ; \\ &z = 600\sin\left(\frac{\pi}{6}\right) - h \end{aligned}\right\} \qquad \text{(A1a：上辺)}$$

$$\left.\begin{aligned} &-600 \le x \le 600 \quad ; \\ &y = l \quad ; \\ &z = -1 \end{aligned}\right\} \qquad \text{(A1b：底辺)}$$

$$\left.\begin{aligned} &x = \pm 600 \quad ; \\ &y = (z+1)\cot\left(\frac{\pi}{6}\right) + l \quad ; \\ &-1 \le z \le 600\sin\left(\frac{\pi}{6}\right) - 1 \end{aligned}\right\} \qquad \text{(A1c：左右端)}$$

と与えることができる．また，除染部と非除染部の境界線は，

$$\left.\begin{aligned} &-600 \le x \le 600 \quad ; \\ &y = D\cos\left(\frac{\pi}{6}\right) + l \quad ; \\ &z = D\sin\left(\frac{\pi}{6}\right) - 1 \end{aligned}\right\} \qquad \text{(A1d：除染部境界)}$$

と表される．

一方，xyz 座標系の点 (x,y,z) は，Fig. 4 のような極座標系では，

$$\varphi = \arccos\frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}} \qquad \text{(A2)}$$

$$\theta = \arccos\frac{z}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}} \qquad \text{(A3)}$$

と表される．よって，各境界部の方程式（A1a）～（A1d）を，（A2），（A3）式に代入することにより，領域の境界となる直線を，観測点を中心とする球面に投影した像を φ–θ 平面上に数値的に描くことができる（Fig. A1）．描かれた図は，全方位カメラの画像と同じく観測点から想定する斜面を写し取った画像を正距円筒座標系で表したものに他ならないので，斜面全体の視野占有率 Ψ_{all} およ

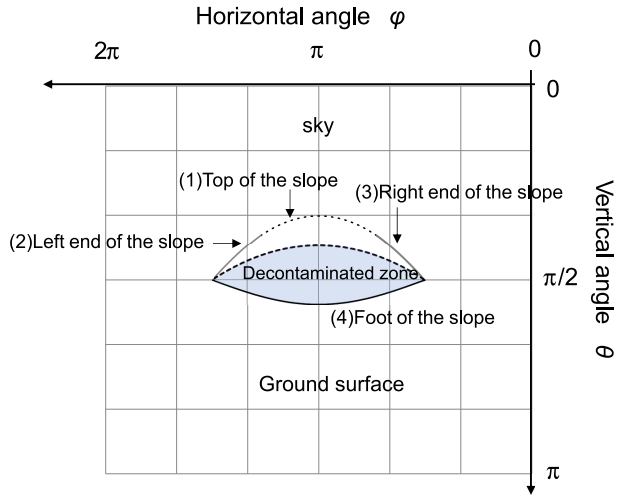


Fig. A1　斜面除染部の視野占有率を計算するための正距円筒座標系への仮想の投影全天空画像（D =10 m; H = 1 m; l = 54 m の場合の例）.
Projected image of a virtual decontaminated slope captured by a 360-degree camera on an equidistant cylindrical coordinate system (D = 10 m; H = 1 m; l = 5 m) .

びその内部にある除染部の視野占有率 Ψ_d は，本文（2）式を用いて，数値的に計算される.

付録 2

各点で撮影された全天球写真（正距円筒座標系による表示）は，Fig. A2 の通りである.

引用文献

Ando, M., Mikami, S., Tsuda, S., Yoshida, T., Matsuda, N. and Saito, K. (2018): Decreasing trend of ambient dose equivalent rates over a wide area in eastern Japan until 2016 evaluated by car-borne surveys using KURAMA systems. Journal of Environmental Radioactivity, 192: 385–398.

邉見 光, 山口徹治, 武田聖司, 木村英雄 (2017): 三次元輸送計算コード MCNP を用いた森林除染による空間線量率の低減効果の検討. 原子力バックエンド研究, 24(1): 3–14.

飯舘村 (2023): 広報いいたて　お知らせ版. https://www.vill.iitate.fukushima.jp/site/kouhou/list12.html (2023 年 1 月 10 日確認)

飯舘村除染検証委員会 (2017): 飯舘村除染検証委員会報告書. http://www.vill.iitate.fukushima.jp/uploaded/attachment/4954.pdf (2019.4.2 閲覧)

環境省 (2022): 放射性物質汚染対処特措法に関する情報（除染情報サイト）. http://josen.env.go.jp/about/tokusohou/summary.html　(参照 2022.3.09)

Kato, H., Onda, Y. and Yamaguchi, T. (2018): Temporal changes of the ambient dose rate in the forest enviromnets of Fukushima Prefecture following the Fukushima reactor accident. Journal of Environmental Radioactivity. 193–194: 20–26.

Kakamu, T., Kanda, H., Tsuji, M., Kobayashi, D., Miyake, M., Hayakawa, T., Katsuda, S., Mori, Y., Okouchi, T., Hazama, A. and Fukushima, T. (2012): Differences in rates of decrease of environmental radiation dose rates by ground surface property in Fukushima City after the Fukusihima Daiichi Nuclear Power Plant accident. Health Physics, 104(1): 102–107.

Kinase, S., Takahashi, T. and Saito, K. (2017): Long-term predictions of ambient dose equivalent rates after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident, Journal of Nuclear Science and Technology. 54: 1345–1354.

Miller, K.M. (1997): Field gamma-ray spectrometry, HASL-300, 28th edition. Environmental Measurement Laboratory, U.S. Department of Energy.

農林水産省 (2013): 農地除染対策の技術書（第 1 編 調査 · 設計編）.

Sanada, Y., Urabe, Y., Sasaki, M., Ochi, K. and Torii, T. (2018): Evaluation of ecological half-life dose rate based on airborne radiation monitoring following the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident. Journal of Environmental Radioactivity, 192: 417–425.

塩沢 昌 (2016): 放射性セシウムの土壌中の挙動と水系への流出, 水土の知: 84(6): 31–35.

Tajima, S., Yoshida, S., Fukui, T., Nihei, N. and Kobayashi, N. (2021): Cesium-137 stored on and discharged from banks of an agricultural canal in Iitate, Fukushima, J. Environmental Radioactivity. 241: 106775.

X-5 Monte Carlo Team (2003): MCNP - Version 5, Vol. I: Overview and Theory, LA-UR-03-1987.

Yoshida, S., Shiozawa, S., Nihei, N. and Nishida, K., (2019): Mobility of fallout radiocesium depending on the land use in Kasumigaura Basin, in Nakanishi, T., O-Brien, M. and Tanoi, K., (eds.) “Agricultural implications of the Fukushima nuclear accident (III) after 7 years”, Springer Open, pp. 165–176.

吉田修一郎 (2015): 土壌の放射性セシウム濃度と空間線量率. 水土の知, 83(8): 54.

吉田修一郎, 西田和弘, 安達 純 (2016): 農地の放射性セシウム鉛直分布図に基づく点減衰核法による除染前後の空間線量率の推定, 農業農村工学会論文集, 302, I_75–I_83.

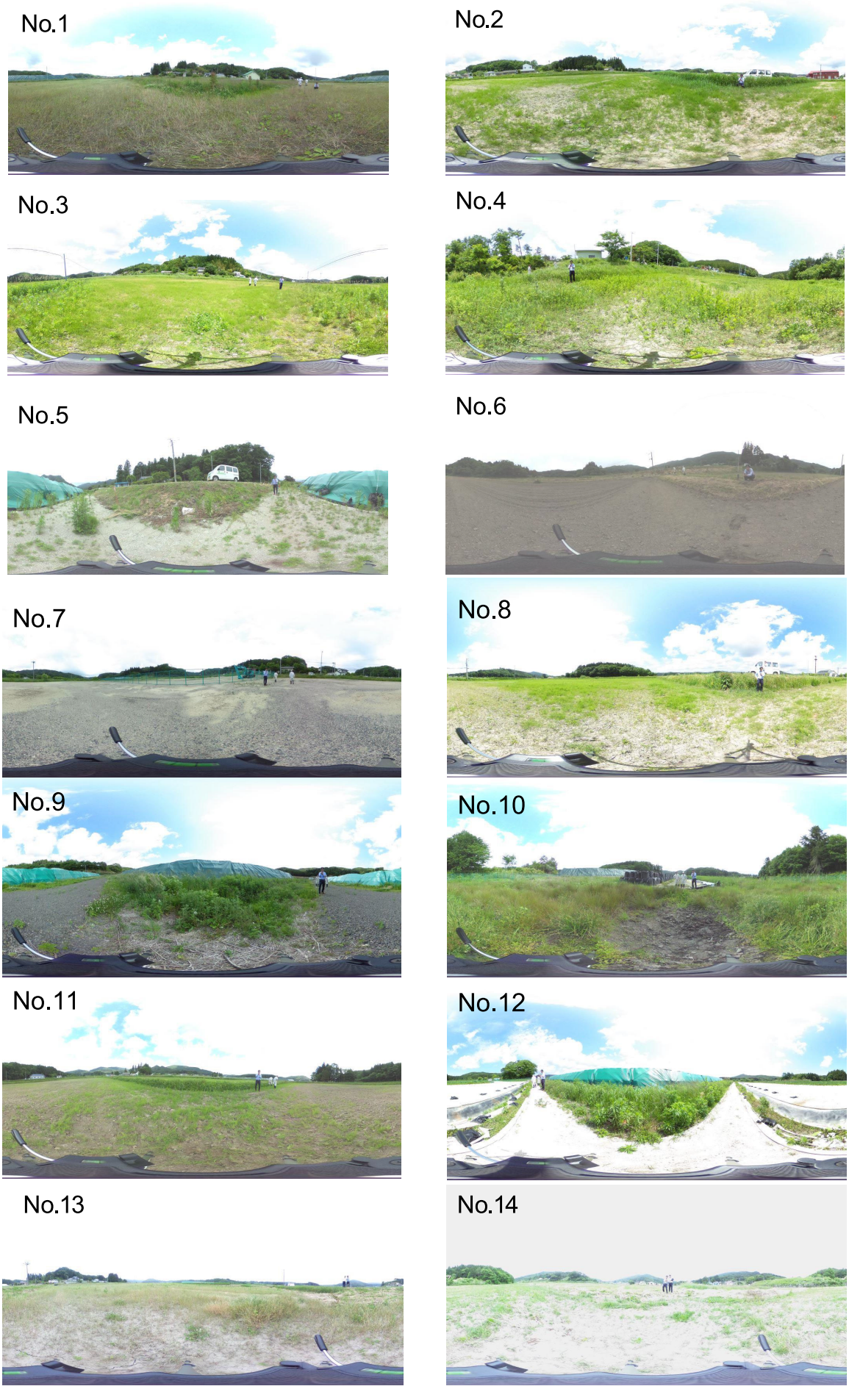


Fig. A2　観測点で撮影された全天球写真.
360-degree photos captured at the observation points.

要　　旨

福島県飯舘村が，定点で継続的に測定している空間線量率のデータから，除染前後の空間線量率の比を算定するとともに，その観測点で撮影した全方位写真から，除染前後の除染部の視野占有率の比を算出して，相互の関係を明らかにした．また，仮想斜面や水平面を対象にした空間線量の三次元輸送コードによる計算結果と視野占有率によるその推定結果を比較 · 検証した．周囲状況を簡素化した仮想ケースでは，視野占有率から推定される空間線量の低減率が，理論的に計算される低減率に近くなることを確認した．また，実際の現場では，全方位写真から推定した空間線量の低減率は，定点観測結果から求めた低減率に近い値となったところもあった．しかし，推定値が過大評価となった場所が多数あり，正確な推定には現場の汚染状況に関する追加の情報の必要性が示唆された．

キーワード：放射性セシウム，原発事故，除染，立体角，空間線量