Vol.12, No.2, pp.39-53, 2024 / 環境放射能除染学会誌

報　文

除染・耕作活動による空間線量率の低減効果：3D-ADRESを用いたPHITSシミュレーションによる詳細評価†

金 敏植[1*]、 吉村 和也[2]、 佐久間 一幸[3]、 メイリンズ アレックス[4]、
阿部 智久[2]、 中間 茂雄[2]、 町田 昌彦[5]、 斎藤 公明[1]

【要　約】 東京電力福島第一原子力発電所事故から10年以上が経過し、帰還困難区域では、住民帰還の促進を目的として、特定復興再生拠点区域が定められ、重点的なインフラ整備や除染が実施されている。この現状に対し、本研究では、除染及び耕作活動などによる空間線量率の低減効果を定量的に評価するため、福島県大熊町に位置する実エリアに対し、環境中の構造物と線源分布を詳細に再現するモデルを構築し、放射線量の詳細分布の推定計算を行った。その際、環境中詳細モデルの構築を可能とする3D-ADRESを用い、放射線のモンテカルロシミュレーション（PHITS利用）を実施した。構築したモデルでは、観測に基づいた現実的な放射性Csの分布が反映された他、その経時変化も考慮された。その結果、対象エリアに対し、地上100 cm空間線量率の空間線量率分布が計算され、実測値を良く再現できることが確認された他、除染・耕作活動などに応じた影響も容易に且つ詳細に評価可能であることが確認された。これらの結果から、3D-ADRESは、未だ立ち入りなどが制限される帰還困難区域などにおける線量率低減に向け、除染などの対策を評価する際、極めて有効なシステムであると結論づけられる。

キーワード：放射性Cs、空間線量率、詳細環境モデル、モンテカルロシミュレーション、除染

1. はじめに

土壌に沈着した放射性Csは、粘土鉱物粒子に強く吸着される性質[1-3]を有するため、土壌浸食や流亡による移動がない限り、大半の放射性Csは土壌の表層に留まることが知られている[4-6]。従って、放射性Csの沈着量が多く空間線量率の高い場所で、土壌表層を除染することは営農再開や周辺の空間線量率低減に有効[7]であると考えられ、帰還困難区域に定められた高濃度の農地などでは、人間活動の再開に向け重点的に上記の除染が施されてきた。今後も、帰還困難区域では、避難指示解除を目指し、継続的な除染活動が見込まれている。しかし、除染を効率的に行うには、様々な環境条件や除染手法による除染効果の違いとその特徴について十分に把握しておくことが必須であり、実証試験のみならず、異なる条件を設定したシミュレーションにより除染効果を詳しく分析し、その知見を蓄積することが有効と考えられる。

International Atomic Energy Agency（IAEA）では、これまでに原子力災害を受けた地域での知見に基づき環境修復するための技術[8]をまとめている。除染については、放射線源の除去方法により大きく、①生物的な除去、②化学的な除去、③物理的な除去の3つの方法に分けて定義している[9]。これらの中でも、「③物理的な除去方法」が最も除染効果が大きく効果的であることが、これまでの知見から明らかにされている[10-15]。

東京電力福島第一原子力発電所事故（以下、福島事故と記載）後は、農地除染対策実証事業が実施され（a）表土の削り取り・（b）反転耕・（c）水による土壌撹拌・除去の方法を用いた実証試験が行われた[7, 16-22]。その結果、（a）表土の削り取りが最も除染効果が大きいことが確認され、広い範囲で適用されて来た一方、（b）反転耕については、

2023年12月7日受付　　2024年4月17日受理
† 本会第12回研究発表会（令和5年8月31日）において一部発表（P2-02）
*Corresponding author: E-mail: kim.minsik@jaea.go.jp
[1] 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構　システム計算科学センター（〒277-0871 千葉県柏市若柴178-4-4）
[2] 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構　廃炉環境国際共同研究センター（〒975-0036 福島県南相馬市原町区萱浜字巣掛場45-169）
[3] 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構　廃炉環境国際共同研究センター（〒963-7700 福島県田村郡三春町深作10-2）
[4] クラーケンテクノロジーズジャパン（〒103-0015 東京都中央区日本橋箱崎町41-12）
[5] 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構　システム計算科学センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2-4）

汚染土壌を直接に除去しないことから、線量が比較的低い地域に適用されて来た。今後の除染対象は、帰還困難区域であることを考慮すると、放射線源の除去の観点からは「③物理的な除去方法」、特に(a)表土削り取りが最も有効であると予測される。

環境中に分布した放射性核種からのγ線に対する放射線防護の定量的な指標として、地上から高さ1 mの空間線量率(正確には、周辺線量当量率$\dot{H}^{*}(10)$、単位; μSv/h)が一般的に用いられてきた[23-26]。実際、事故後の空間線量率を評価するため、実測とモデルによる上記空間線量率の定量的な推定・評価が多数行われてきた。中でも、除染対策の影響などを考慮し推定・評価を行う代表的システムとして、チョルノービリ原子力発電所事故(以下、チョルノービリ事故と記載)後の経験により、EUが共同開発した居住地域モデルERMIN(European Model for Inhabited Areas)[27-28]が広く知られてきた一方、福島事故後は、除染効果評価システムCDE(Calculation system for Decontamination Effect)[29-30]や除染活動支援システムRESET(Restoration Support System for Environment)[31-32]、空間線量率の変化が計算可能な線量率評価モデルADRET(Air Dose Rate Evaluation Tool)[33-34]が開発され、様々な場面で活用されてきた。しかしながら、これらのモデルは、放射線源の沈着状況を一様分布に仮定するか、あるいは地形および建物や樹木といった地物を具体的に考慮しないことから、除染効果の詳細な分析を実施するには限界があることが知られている。従って、除染効果を詳細に評価するには、環境中における放射性Csの動態に注意する他、地形・建物・樹木といった環境構造物をリアルに構築できる詳細環境モデルを用いて、放射線源の沈着分布状況を再現した上で、γ線のシミュレーション解析することが望ましい。また、除染などの作業内容に応じて変化する放射性Csの分布の他、樹木の伐採、家屋の解体などの環境構造物の変化も、環境モデルに反映しシミュレーションすることで、除染作業などの効果をより広く且つ現実的に予測・評価することが可能になると考えられる。

上記の考察を踏まえ、著者らは、被ばく線量の低減に対し、放射性Csの環境動態による分布の変化や様々な除染活動などの効果について、現実的に予測・評価することを目的に、3次元空間線量率分布解析システム3D-ADRES(3D-Air Dose Rate Evaluation System)[34-37]を開発してきた。当システムは、リモートセンシングにより取得された地理情報データを基に実環境に近い詳細な環境モデルの構築が可能な上、放射性Csの動態に着目し、放射線源の3次元分布を柔軟に再現できるため、実際の複雑な環境中での放射線場をリアルに表現できるのが特徴である。また、作成された環境モデルは、放射線挙動を正確に模擬する計算コードのPHITS(Particle and Heavy Ion Transport code System)[38]と連携可能であり、モンテカルロ法による空間線量率のシミュレーション解析が可能となっている。

以上、本研究では、除染や耕作活動などによる放射性セシウムの分布の変化が、空間線量率の分布や経時変化に及ぼす影響を定量的に予測・評価することを目的に、大熊町において特定の地域を選定し、3D-ADRESにより詳細な環境モデルおよび線源分布を作成し、PHITSによるシミュレーション解析を実施した。先ず、対象地域内の詳細なCs分布を再現し、空間線量率の観測結果を凡そ再現できることを示し、その上で、上記の様々な除染方法による線量率低減効果を、環境モデルの様々な地点で推定し、各除染方法の効果を定量的に比較評価した。

2. 方法

(1) 3次元空間線量率分布解析システム(3D-ADRES)の概要

3D-ADRESは、詳細な環境モデルを構築可能とするGUI(Graphical User Interface)プログラムと構築モデルをPHITSの入力形式に変換する変換プログラムで構成されている。3D-ADRESの概要および計算の流れをFig. 1に示す。地面モデルは、土地利用状況が詳細に作成可能となるよう、任意形状の三角形を組み合わせる非規則三角メッシュを用いて作成される。建物モデルはFuruta[39]らの福島県における建物モデルをベースに、樹木モデルについては、Imamura[40]らの実測調査の結果による樹木モデルをベースに地理情報に基づいて大きさや配置などが適切に調整され、モデル化される。放射線源は、実際の沈着状況に基づき環境媒体毎に設定することが可能である。

(2) 対象地域の選定

対象地域として、福島第一原子力発電所から南西方向に約4 km離れた帰還困難区域の大熊町に位置する200 m × 200 m範囲を選定した。当エリアは、中心に道路がある居住地域で、地形はほぼ平坦である。地面上の被覆状況は非舗装面が80%、舗装面が20%の割合を占めている。非舗装面の大半は田畑であり、道路を中心に北部には2階建ての集合住宅などが存在し、南部には日本家屋が存在する典型的な郊外居住地である。対象地域と福島第一原子力発電所からの位置関係を示した地図をFig. 2(a)に、対象地域の衛星画像に地形・建物・樹木モデルをオーバーラップした図をFig. 2(b)にそれぞれ示す。

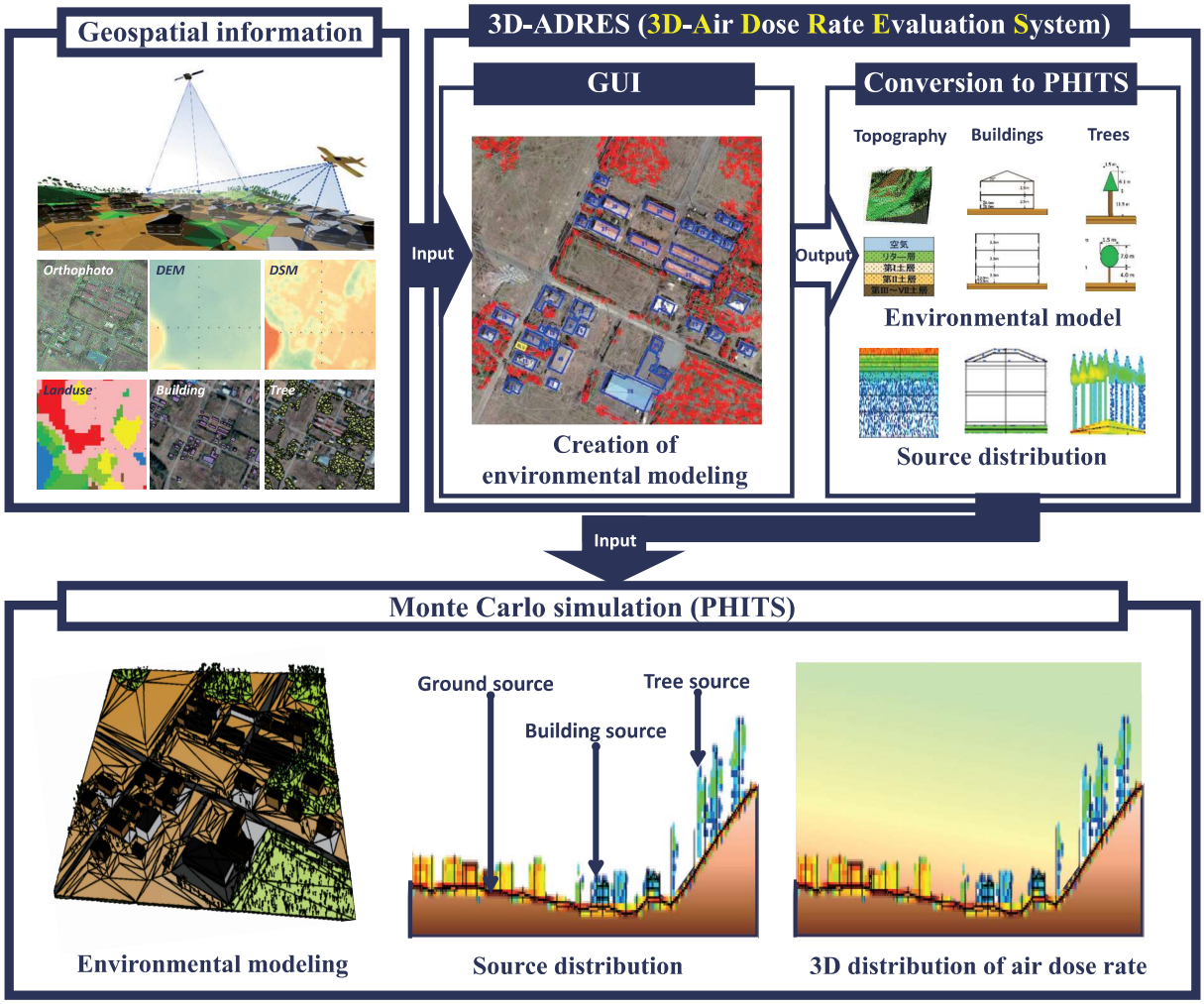

Fig. 1 Overview and calculation flow of 3D-ADRES[34-37]

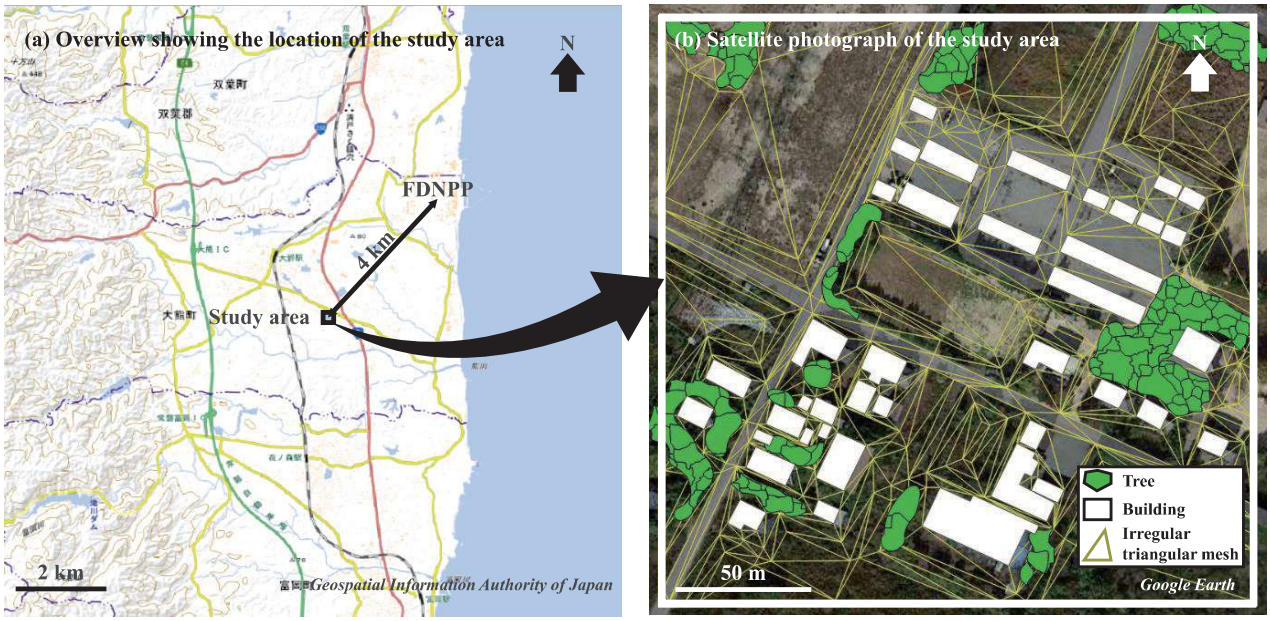

Fig. 2 (a) Overview showing the location of the modelled site in Fukushima Prefecture in the proximity of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant (This map is based on the Digital Map (Basic Geospatial Information) published by Geospatial Information Authority of Japan.)
(b) Satellite photograph showing the 200 × 200 m square areas of land modelled at study area.
(Imagery ©2023 Google. Map data ©2023 Maxar Technologies, Planet.com.)

(3) 対象地域のモデル作成

a) 地面モデル

福島事故後、放射性Csは地面被覆が非舗装面より舗装面で速やかに減少することが確認されている[41]。従って、地面モデル作成において、地面の被覆状況を反映することが重要となる。本研究では、GISプログラムを利用し、Fig. 2 (b) で示した衛星画像に基づき、非規則三角メッシュにより地面モデルを作成した。これにより、土地被覆状況に加え建物周囲の軒下や道路、駐車場のような整備された舗装面と庭や田畑などの非舗装面が交わる境界部分も現実に近い形で再現された。また、地形については、数値標高モデルDEMデータに基づき再現した。なお、非舗装面の耕作地における土壌の密度は1.6 g/cm^{3}とした[35]。

b) 建物モデルおよび樹木モデル

建物および樹木は、人工衛星によるAW3D[42-43]の建物モデルおよび樹木モデルを基に作成した。AW3Dは、複数の人工衛星により複数の視点で捉えた衛星画像データを3次元のモデルに作成するマルチビューステレオ処理技術により作成されたデジタル3D地図で、これらをFig. 1に示す3D-ADRESのGUIに入力することで、対象地域における実物に近いモデルを作成した。

(4) 線源設定

a) 初期値における線源設定

i) 空間線量率の測定

放射線源の沈着状況が複雑な場合、狭い範囲内でも空間線量率は大きく変動する。従って、解析対象地域の全体的な沈着量分布を取得することが望ましく、シミュレーション解析の入力値として重要な情報となる。しかし、対象範囲において沈着量を連続的に測定することは容易ではなく、多量の試料を採取し、放射性セシウム濃度の測定を実施することは、相当の労力と時間を要する。これらの点を踏まえ、本研究では、比較的、簡易に測れる地表面の空間線量率を測定した後、換算係数[24]を用いて沈着量に換算する手法を採択した。空間線量率の測定においては、連続かつ面的な分布が取得可能なガンマプロッター[44-45]を用いた。ガンマプロッターは、除染作業を支援するため、空間線量率の測定を迅速かつ効率的に行うことを目的に開発された測定機器である。棒状の支持装置の5 cmと100 cmの高さにプラスチックシンチレータが搭載され、地上5 cmと100 cmの空間線量率が同時に測定できる。また、GPSセンサーも有するため測定位置の情報も同時に取得可能である。測定は2021年1月20日に時定数を3秒に設定し、対象地域の全範囲を歩行し実施された。なお、立ち入りなどが困難で一部の測定が不可能な場所においては、汎用的な空間統計解析法であるクリギング法[46]を用いて補完した。測定された地上5 cmの空間線量率を地面の非規則三角メッシュ内で平均した結果をFig. 3 (a) に示す。空間線量率の測定結果から見て取れるように、道路などの舗装面は田畑や庭などの非舗装面に比べて相対的に低い空間線量率を示している (Fig. 2 (b) およびFig. 3 (a))。その他、計算精度の確認を行うため舗装面6点、非舗装面6点の計12点 (Fig. 5 (a)) において、空間線量率が得られるTCS-172Bサーベイメータを用いて、比較検証のための追加測定を行った。ガンマプロッターおよびTCS-172Bの測定装置と測定法の概要をTable 1に示す。ガンマプロッターの測定精度については、NaIシンチレーションサーベイメータと比較し平均値で±20%以内で一致するのが確認されている[52]。

ii) 放射性Csのインベントリ値の推定

各環境面における線源設定を行うため、平坦地に対するSaitoらによる換算係数[24]を用いて、地上5 cmの空間

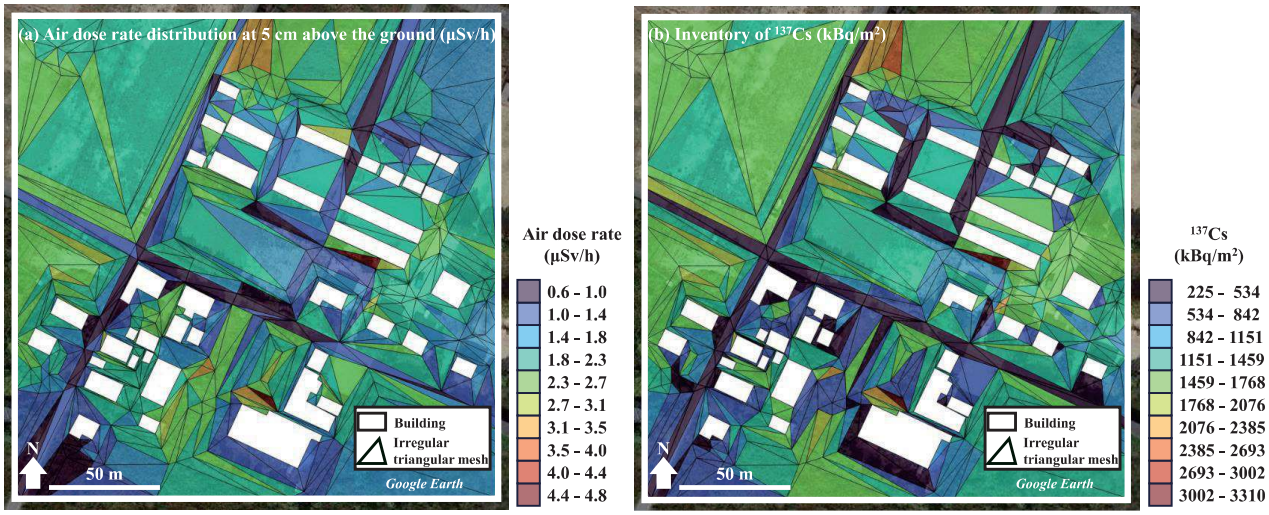

Fig. 3 Results of air dose rate measurements and inventory estimates in the study area

(a) Air dose rate distribution at 5 cm above the ground (μSv/h), (b) Inventory of ^{137}Cs (kBq/m^2)

Table 1　Overview of measurements performed

Measuring instruments	Gamma plotter H	TCS-172B
Detector type	20φ × 40 mm, Plastic scintillation detector	25.4φ × 25.4 mm, NaI(Tl) scintillation detector
Measurement item	Air dose rate (μSv/h)	Air dose rate (μSv/h)
Measurement interval	3 seconds	4 directions, 10 seconds each
Measuring height	5 cm above the surface, 100 cm above the surface	100 cm above the surface

線量率から^{137}Csのインベントリを算出した。換算係数を用いた算出の際には、放射性Csの深度分布を表す実効重量緩衝深度(β_{eff})を、舗装面には0.1 (g/cm^2)[35, 49-50]を非舗装面(土壌)には4.12 (g/cm^2)[48]と想定して計算した。その結果をFig. 3(b)に示す。基準となる初期の線源分布は、空間線量率を測定した2021年1月20日にあわせて設定した。なお、計算に際しては対象領域の空間線量率はかなり高いことから、天然鉱物などに由来するバックグラウンド空間線量率の影響を考慮せず、空間線量率は全て放射性Csに起因すると仮定してインベントリの設定とシミュレーション計算を行った。福島の事故発生日における^{134}Csと^{137}Csの濃度比が等しいと仮定し、シミュレーション対象日に当たる^{134}Csと^{137}Csの比率を想定したうえで^{134}Csと^{137}Csそれぞれのインベントリ値(kBq/m^2)を推定した。シミュレーション対象日における空間線量率の寄与率は、事故から約10年が経過しているところから、^{134}Csの寄与は少なくほとんどが^{137}Csによるものである。

iii) 各環境面における線源設定

土壌面におけるインベントリ値を基準とし、建物の屋根には0.02%、壁には0.01%のインベントリ値を与えた[35, 47]。また、土壌におけるb_{eff}は4.12 (g/cm^2)[48]とし、この深度分布を模擬できるように8層の土壌に放射性Cs濃度を与えた[35]。舗装面については、b_{eff}として0.1 (g/cm^2)を想定し、2つの層に対して放射性Cs濃度を与えた[35, 49-50]。土壌層モデルの概要をTable 2に示す。森林におけるb_{eff}は実測調査を基に2 (g/cm^2)[51]と仮定し、森林における部位毎の放射性Csの相対的な存在割合についても、文献値を基に樹冠2%、樹幹3%、リター層10%、土壌層85%と仮定した[51]。

b) 除染および耕作活動を想定した線源設定

対象地域において土地被覆が土壌で、土地利用状況が田畑になっている場所に対し、除染および耕作活動の予測解析を行う。

i) 除染活動の線源設定

除染活動を想定した予測解析では、空間線量率および土壌中放射性Cs濃度の低減効果が最も大きいと思われる表土削り取りと客土を行った場合のシミュレーション解析を実施する。表土削り取りは、解析のターゲット日における放射性Csの深度分布を考慮し、初期の線源分布の状況の表土(Fig. 4(a))から深さ5 cmまで削り取ることを想定しシミュレーションを実施する(Fig. 4(b))。客土については、表土削り取りにより削られた5 cmに相当する土壌の表層部分に、汚染されていない土を運び入れることを想定してシミュレーションを実施する(Fig. 4(c))。

ii) 耕作の線源設定

耕作を想定した予測解析では、耕作地において、攪拌を想定して線源分布の設定を行う[52]。攪拌の解析は、初期の線源分布そのままの状況(Fig. 4(a))から攪拌した場合を想定したシミュレーション解析(Fig. 4(d))と、初期の線源分布の状況に前述した5 cmの表土削り取りおよび

Table 2　Soil layer model

Paved area		
Layer	Thickness (cm)	Density (g/cm3)
1	0.1	2.4
2	9.9	1.6
Unpaved area		
Layer	Thickness (cm)	Density (g/cm3)
1	0.5	1.6
2	0.5	1.6
3	0.5	1.6
4	0.5	1.6
5	1	1.6
6	2	1.6
7	2	1.6
8	3	1.6

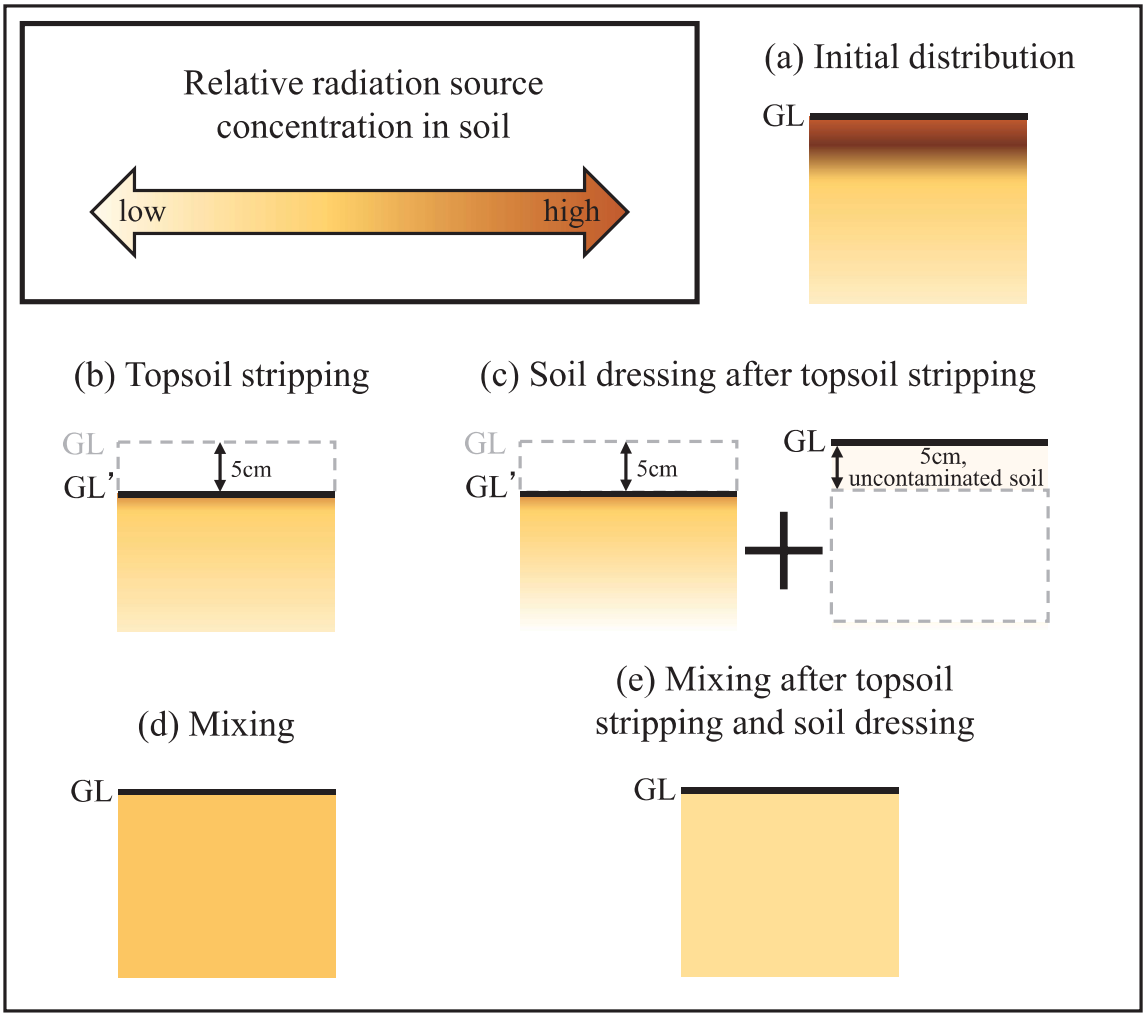

Fig. 4　Image of relative source strength in soil according to each situation
(Initial situation; (a), decontamination activities; (b), (c), farming; (d), (e))

客土を行った後に攪拌した場合を想定した解析を行う(Fig. 4 (e))。攪拌においては、30 cmの深度までに存在する放射性線源の濃度が一様になるように混合が行われた状況を想定した。

(5) モンテカルロ放射線輸送シミュレーション

3D-ADRESにより構築された詳細な環境モデルを用い、モンテカルロ放射線輸送コードPHITS (version 3.20)により、対象地域内の放射線挙動をシミュレーションする。モンテカルロシミュレーションでは光子の反応過程として光電効果・コンプトン散乱・電子対生成・干渉性散乱を考慮し、光子の反応で生じる二次電子は、生成地点でその全てのエネルギーを付与すると仮定した。シミュレーションは、メッシュを10m x 10mとし、構築された環境モデルに対し、任意にモデルや線源分布を編集可能とするシナリオ機能を活用し、環境面毎の線源分布を次のように設定して実施する。①環境面全体の線源を考慮する、②舗装面の線源のみを考慮する、③非舗装面の線源のみを考慮する各ケースに分け、シミュレーションを行う。計算には、大型計算機(HPE SGI8600)[53]が用いられ、バッチ毎のヒストリー数400万、バッチ数85回で統計処理を行う。出力された粒子フルエンスについては、ICRP 1997, Publ.74[54]の換算係数(pSv cm^2)を用いて、空間線量率($\dot{H}^*(10)$ (μSv/h))に換算される。

3.　結果および考察

(1) 詳細な環境モデルの妥当性検討

除染および耕作活動による予測・評価に当たり、まず、3D-ADRESで構築された詳細な環境モデルが妥当であるかを検討した(Fig. 5)。前述のように、モデル検証を行うためTCS-172Bサーベイメータを用いて12地点で測定した地上100 cm空間線量率と、同地点におけるシミュレーション解析結果との比較を行った。その結果、Factor 2の範囲内で全ての結果は一致し、二乗平均平方根誤差(RMSE)は0.3 μSv/h、回帰係数は0.94、決定係数は0.96となった。計算値と測定値が良い一致(高い相関)を示すことから、作成されたモデルは十分に妥当である考えられる。さらに、比較地点を舗装の有無で分けてみると舗装

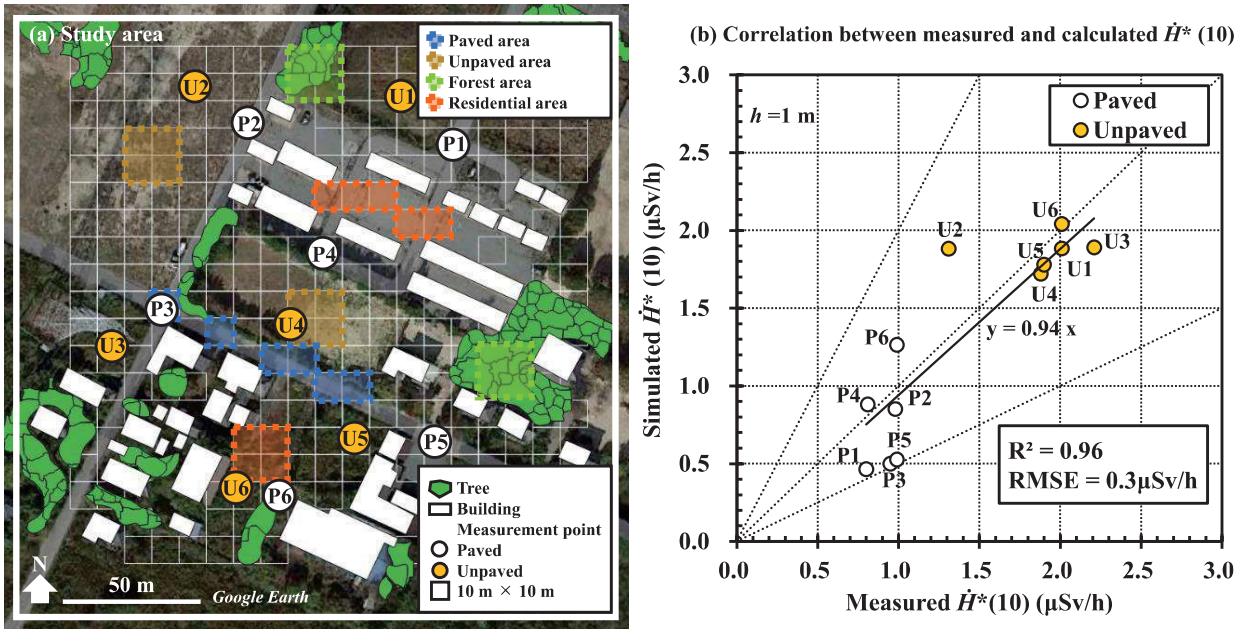

Fig. 5　Locations where air dose rates were measured by TCS-172B (a) and scatter plots showing correlation between measured and simulated $\dot{H}^*(10)$ in the study area at 1 m heights above the ground surface (b)

面の場合は、二乗平均平方根誤差（RMSE）が0.32 μSv/h、回帰係数が0.81、決定係数が0.88であった。非舗装面の場合は、二乗平均平方根誤差（RMSE）が0.28 μSv/h、回帰係数が0.97、決定係数が0.98であり、舗装面に比べ非舗装面の方が僅かに誤差の少ない結果になっている。しかし、今回は比較した数が少なく限定されるため、より多くの点数で比較し傾向をみる必要がある。

（2）除染・耕作活動による空間線量率の低減効果

対象地域の面的な空間線量率分布をFig. 6に示す。耕作地において、除染・耕作活動による空間線量率の低減効果を定量的に評価するため、対象領域内にて、非舗装面上に存在する放射性Csのみを考慮し、シミュレーションを行った（Fig. 6（a））。また非舗装面の内、樹木のある場所において、線源分布は変化しないと仮定し、耕作地において、各作業に対応し、異なる線源分布を設定するシミュレーションを行った（Fig. 6（b）–（e））。対象領域内にてサイズ10 m × 10 mのメッシュを用い、全面にわたって空間線量率を計算した後、対象領域の端部においては、計算対象領域外からのγ線が考慮される必要性があることから、端から内方向に向けて20 mに相当する範囲の空間線量率計算結果を除去した（Fig. 6（a）参照）。また屋内の空間線量率は対象外であるため、建物内の計算結果も除去した。表土の削り取りや、削り取り後の客土、除染後の攪拌を想定した予測結果を見ると、森林が存在する一部の領域を除けば、放射性Csに起因する空間線量率は、ほとんど0.5μSv/h以下に減少している（Fig. 6（b）、（c）、（e））。攪拌を想定した解析では、初期の分布に比べると、空間線量率は低くなったが、線源そのものを除去していないこともあり、他の作業よりは全体的に高い線量率を示した（Fig. 6（d））。

また、Fig. 6の中で白色の点線で囲った部分を対象に、各作業が行われた後の空間線量率を図の上部からの距離の関数としてFig. 7に示した。この結果を見ると、前述の各作業による空間線量率の違いがより顕著に確認できる。表土の削り取りや、削り取り後の客土、除染後の攪拌を想定した場合においては、森林からの影響を除けば、空間線量率が大きく減少することが分かる。

領域全体の空間線量率の平均値を用いて、除染・耕作活動による低減効果を評価した結果（Fig. 8）、削り取りによる空間線量率の低減効果は約79％、さらに削り取り後に客土をすることで約86％の低減効果があると評価された。一方で耕作による空間線量率低減効果は、初期の状況から攪拌をした場合は、約33％の低減効果があり、削り取り・客土した後に攪拌すると、約83％の空間線量率の低減効果が推定される。

土地利用状況毎の空間線量率低減効果を調べるために、領域の中から典型的な舗装エリア（アスファルト道路）、非舗装エリア（耕作地）、森林エリア、居住エリアを選択した。選択した各エリアをFig. 5（a）に色の違う破線で示した。エリア毎に除染・耕作活動による空間線量率の低減効果を評価した（Fig. 9）。森林エリアは、森林内の除染が実施されていないことから、分類されたエリアの中で最も空間線量率が高いものの、周りの耕作地での除染などを行った場合、9％～23％の低減率を示した。非舗装エリア（耕作地）においては、36％～94％の低減率を示し、

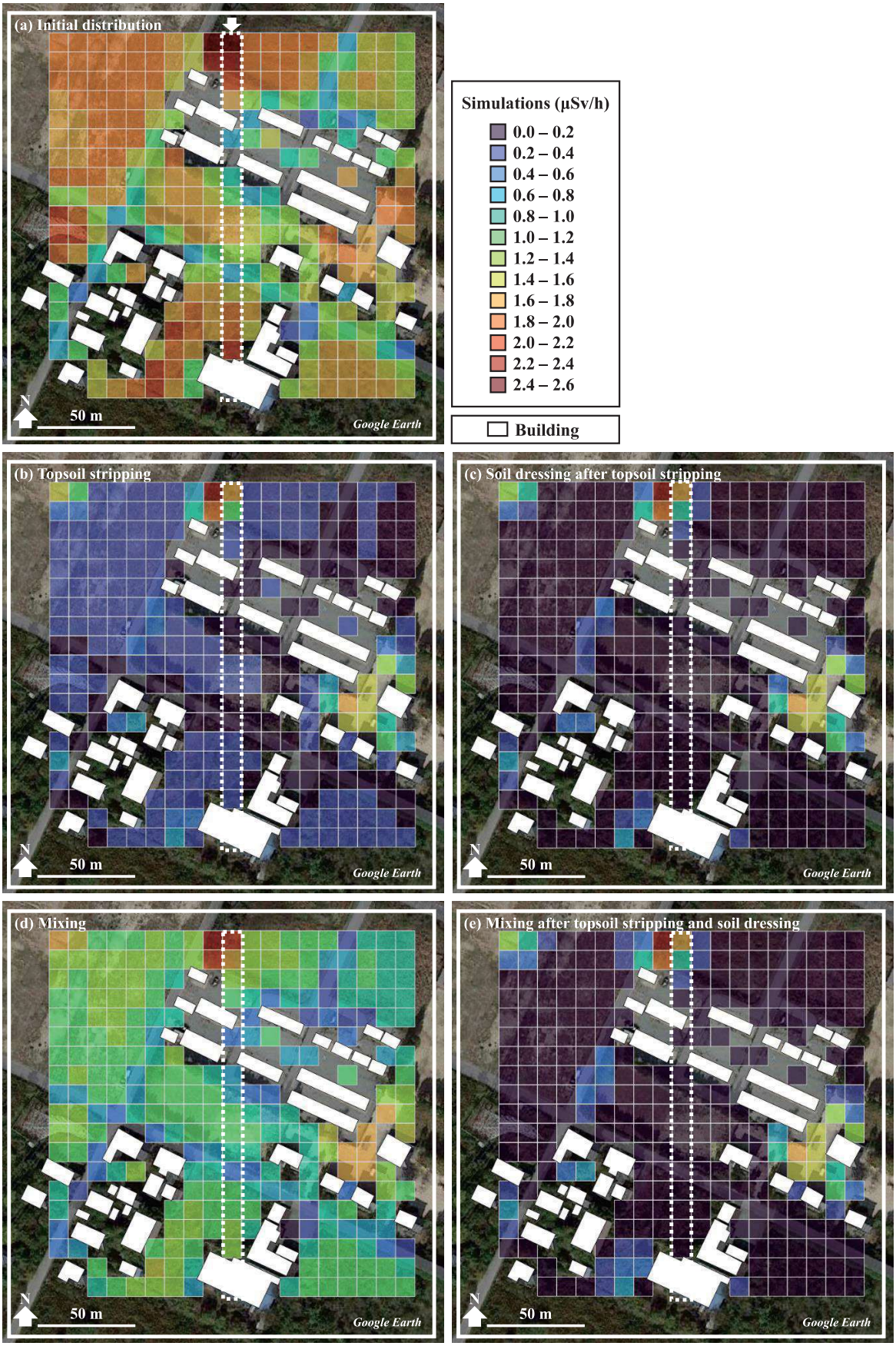

Fig. 6 Distribution of $\dot{H}^*(10)$ at 1 m above ground from radiocesium on unpaved areas

(a) Initial distribution, (b) Topsoil stripping, (c) Soil dressing after topsoil stripping, (d) Mixing, (e) Mixing after topsoil stripping and soil dressing. Results for 10 × 10 m tally regions with more than 50% overlap by area with building structures are excluded from the analysis. Satellite imagery ©2023 Google.

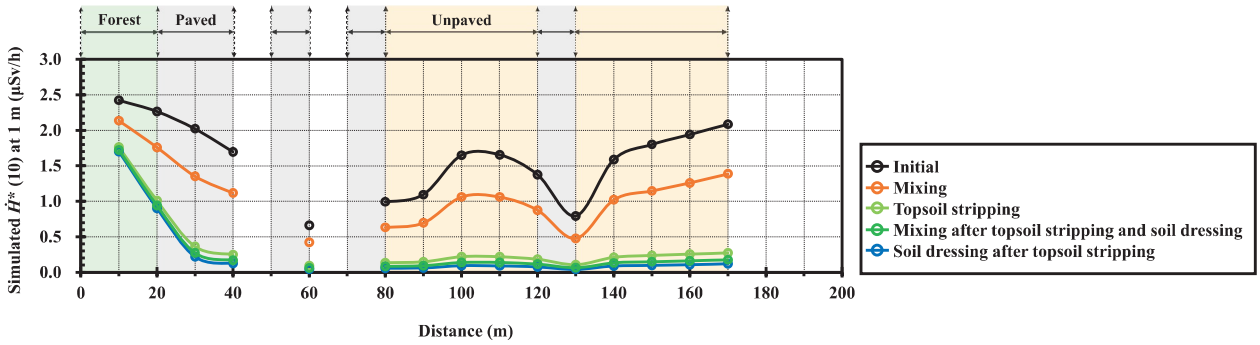

Fig. 7 Variation of $\dot{H}^*(10)$ at 1 m height from radiocesium along the north-south direction in the strip-shaped area indicated with a broken white line in Fig. 6

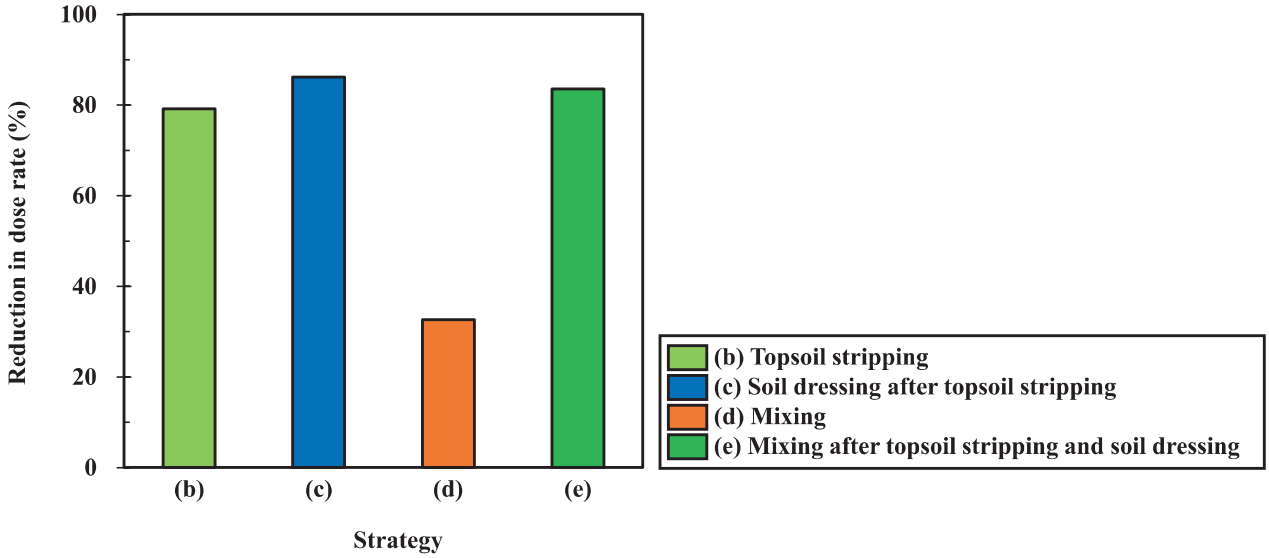

Fig. 8 Reduction in air dose rates due to decontamination activities and farming

(b) Topsoil stripping, (c) Soil dressing after topsoil stripping, (d) Mixing, (e) Mixing after topsoil stripping and soil dressing

Table 3 The percentage reduction in the air dose rate after remediation of farmland soils by different methods

Remediation method	Observed results	Simulation results
Topsoil stripping	40 - 70%[20] (removed soil thickness: 2 - 5 cm)	79% (removed soil thickness: 5 cm)
Soil dressing after topsoil stripping	–	86%
Mixing	–	33%
Soil agitation with water	30%[55]	–
Mixing after topsoil stripping	–	84%

空間線量率の大きな減少が見られた。その他、舗装エリア（アスファルト道路）と居住エリアは、共に非舗装エリア（耕作地）と同じ程度の低減率を示した。これは前述した対象地域の地面の被覆特徴（非舗装面80％、舗装面20％）からも理解できるが、何よりも放射性Csの残存量が圧倒的に耕作地に多く、本研究の対象地域のような農地が優占する環境下では、舗装面上の空間線量率も、非舗装エリアに存在する放射性Csからのγ線の寄与でほぼ決まることを示している。

上記のシミュレーション解析による予測結果（Fig. 8）について参考になる実証試験の実験結果をTable 3に示す。表土削り取り実証試験は、水田・畑を対象に薄層表土を削り取りする除染手法で、土壌の表土に固化剤を散布した後、3日間の養生後に固化土壌分離回収機により表土を削り取る。削り取る土壌の厚さは2 - 5 cmで、空間線量率の低減効果は40 - 70％[20]であった。前述したようにFig. 8に示す条件（b）のシミュレーション解析では表土5 cmを削り取り条件で、除染結果として79％の低減効果が得られるという結果に対して、条件は違うが同じ表土削り取り方法によるTable 3に示した除染実証試験の結

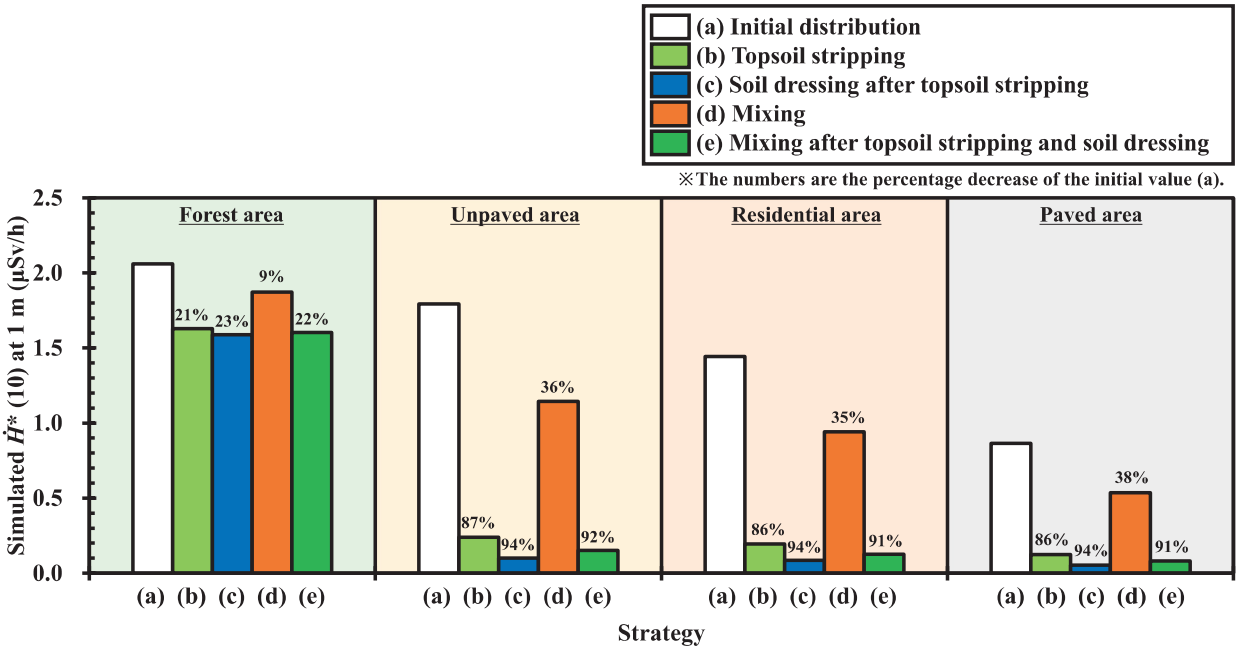

Fig. 9 Reduction in air dose rates in each area due to decontamination activities and farming

果が40－70％となっていることから、モデルによる解析結果は妥当な範囲であると考えられる。土壌攪拌の実証試験は、作土層が薄く礫が作土直下に多いなど、反転耕や深耕の除染作業が困難な耕作地を対象に水による土壌攪拌・除去により、比較的放射性Csの濃度が高い粘土成分を排出する作業である。除染条件が完全に同じではなく、参考結果となるが、実証試験で空間線量率は30％の低減効果[55]が見られたのに対し、解析結果では33％と、ほぼ同程度の低減効果が得られた。以上、解析結果は、実証試験を妥当な範囲で再現し、除染・耕作活動を想定したシミュレーション解析に3D-ADRESを用いることが有効であることが確認できた。

さらに、解析で得られた削り取りによる79％の低減効果により、福島事故後、約10年が経過した2021年時点においても、表土5 cmの削り取りは空間線量率を大きく低減するのに有効であることが分かる。これは、後述する実測調査における放射性Csの土壌中浸透速度も含めて評価される必要がある。チョルノービリ事故後の実測調査では、事故から8年後に土壌層毎の放射性Csを測定した結果、放射性Csの土壌中浸透速度は1～10 mm/yで非常に遅く[56-57]、放射性Csのほとんどが、表土5 cmの部位に存在すると報告された。一方、福島事故後の調査によると、関東における^{137}Csの移行速度は0.6 mm/y[58]と推定され、福島事故後に表層土壌に浸透した雨水で^{137}Csによる地下水の汚染が発生する可能性は低いと報告された[8]。即ち、土壌に降着した放射性Csは、粘土鉱物粒子に強く吸着される性質があり、土壌中浸透速度が非常に遅いため、時間が経過しても放射性Cs土壌が表層に留まることとなり[59]、耕作地において、空間線量率の低減を目的とした除染活動は、事故から相当の時間が経過した後でも、表土の削り取りは有効であると結論づけられる。しかしながら、表土の削り取りの場合は廃棄物を発生させるため、後の廃棄物管理や最終処分場の問題があること、また、廃棄物処理のコストも高くなること[60]を踏まえて十分な検討が必要である。

以上のように、本モデルを用いれば除染前・後における空間線量を面的に見積もることが可能であるため、除染の効果が詳細に予想でき、除染実施後の帰還された住民などの被ばく量の算定をより正確にできる。

(3) 将来における除染・耕作活動による空間線量率の低減効果の予測

(2) では、事故後約10年が経過した測定当時を基準にし、除染・耕作活動による空間線量率の低減効果を調べた。ここでは、事故から約15年後に除染･耕作活動を行い、さらに、その5年後の（事故から約20年後）将来における空間線量率の低減効果を調べた（Fig. 10）。放射性Csの動態については、物理減衰および土壌の実測調査から得られた深度分布[48]の経時変化を近似する経験式を使用し、それぞれの時点における深度分布を与えた。但し、除染・耕作活動を行ってからの深度分布については、何も行わなかった場合の事故後約15年から20年と同程度の変化をするとの仮定の基に補正した。

将来における空間線量率の予測解析で、物理減衰および深度分布の経時変化のみを考慮した場合、基準の事故後10年に対し、空間線量率の低減率は15年後24％で、

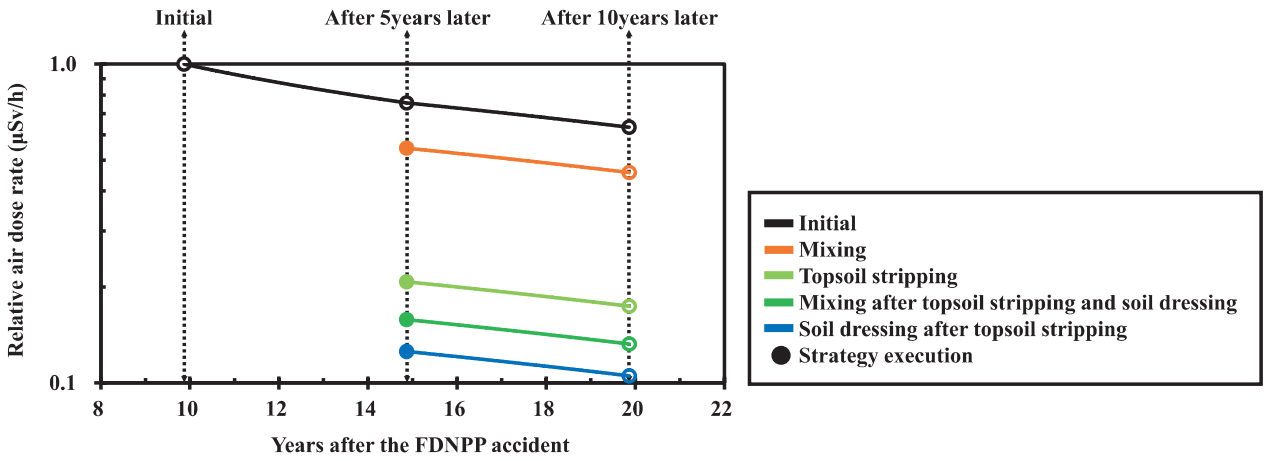

Fig. 10　Effects of reducing air dose rates in the near future

(Each strategy is to be executed after 5 years from the initial. And after strategy, depth distribution and physical decay were considered.)

20年後には37%であった。除染および耕作活動を想定した予測解析では、攪拌、表土5 cm削り取り、除染後に攪拌、削り取り後客土の順に低減効果が大きくなり、基準の事故後10年から物理減衰および深度分布のみを考慮した15年後の空間線量率に対して、各作業による低減率は、攪拌が28%、表土5 cm削り取りが72%、除染後に攪拌が79%、削り取り後客土が83%であった。以上の低減率は、経時的な放射性Csの深度分布変化や物理減衰があったとしても、基準日に各作業を行った場合と数%しか違わず、低減効果は除染・耕作作業時期が事故後10年と15年で大きく変わらなかった。これらの結果から、上記除染による効果は将来でも維持されることが推定された。

4.　結論

福島事故から10年以上が経過し、環境中における放射性Csの沈着状況が事故初期とは大きく変化した。現時点の耕作地において除染・耕作活動による空間線量率の低減効果を定量的に評価することを目的に、3D-ADRESを活用し、福島県大熊町に位置する実エリアに対して詳細な環境モデルを構築し、モンテカルロシミュレーション（PHITS利用）を用いて、4種類の除染・耕作活動を想定したシミュレーション解析を行った。以下に得られた結果をまとめる。

ⅰ）3次元空間線量率分布解析システム3D-ADRESにより構築された詳細な環境モデルの妥当性の検討を行うため、地上100 cm空間線量率の測定結果と同地点における計算結果の相関関係を調べた。その結果、回帰係数は0.94、決定係数は0.96となり計算値と実測値は高い相関を示し、上記モデルの妥当性が確認された。

ⅱ）耕作地において除染･耕作活動を想定したシミュレーション解析を行い、対象地域に対し、各作業に応じた地上100 cm空間線量率の面的な予測分布が得られた。耕作地における除染・耕作活動により、耕作地のみならず付近の全ての環境面において空間線量率の低減効果が顕著に現れることが分かった。

ⅲ）事故後10年の時点における対象領域全体の空間線量率の低減効果は、削り取りが約79%、削り取り後の客土は、約86%であることがシミュレーション解析により明らかになった。また、攪拌をした場合は約33%、除染を実施し攪拌すると、低減効果は約83%であった。これらのシミュレーション結果は、条件は違うが同一な除染方法とする実証試験の結果を参考にすると、妥当な範囲で再現していることから、除染・耕作活動を想定したシミュレーション解析に3D-ADRESを活用することは有効であることが確認された。以上のように、本モデルを用いれば除染前・後における空間線量を面的に見積もることが可能であるため、除染の効果が詳細に予想でき、除染実施後の帰還された住民などの被ばく量の算定をより正確にできる。

ⅳ）放射性Csは、土壌に降着し粘土鉱物粒子に強く吸着される性質があり、土壌中浸透速度が非常に遅いため、時間が経過しても表層に留まることとなり、福島事故から10年以上が経過した現地点の耕作地においても、空間線量率の低減を目的とした5 cmの表土の削り取りは有効であることが分かった。しかしながら、表土の削り取りの場合は廃棄物を発生させるため、後の廃棄物管理や最終処分場の問題があること、また、廃棄物処理のコストも高くなること[60]を踏まえて十分な検討が必要である。

ⅴ）将来における除染・耕作活動を想定した空間線量率の予測解析では、時間経過による放射性Csの深度分布の変化に起因して除染・耕作の効果は小さくなる

傾向にあるが、各作業による効果の低減率は数％程度で大きく変わらず、有効であることが分かった。

以上の結果から、3D-ADRESを用いたシミュレーション解析手法は、まだ立ち入りが制限されている帰還困難区域において、今後さらに除染などの線量率を低減させるための対策を進めていく際、その対策を評価するに当たり、極めて有効な手法であると結論づけられる。

謝　辞

福島県大熊町での環境調査の際、住民および自治体関係者に多大なご協力を頂きました。また、現場測定の際には、（国研）日本原子力研究開発機構・廃炉環境国際共同研究センターの眞田幸尚グループリーダーをはじめとし、グループの皆様に多大なご協力を頂きました。ここに、深く感謝の意を表します。尚、本論文には「令和4年度　放射線健康管理・健康不安対策事業（放射線の健康影響に係る研究調査事業）」（主任研究者：吉村和也）において実施した結果を含みます。

文　献

1）山口紀子：土壌への放射性Cs の吸着メカニズム．土壌の物理性，**126**，11-21（2014）．

2）奥村雅彦，中村博樹，町田昌彦：粘土鉱物とゼオライトにおけるセシウムの吸着挙動：第一原理計算から見るその微視的機構．表面科学，**34**（3），135-142（2013）．

3）Q.H. Fan, M. Tanaka, K. Tanaka, A. Sakaguchi, Y. Takahashi : An EXAFS study on the effects of natural organic matter and the expandability of clay minerals on cesium adsorption and mobility. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **135**, 49-65 (2014).

4）塚田祥文：土壌中放射性セシウムの経時的な変化．日本土壌肥料学雑誌，**85**（2），77-79（2014）．

5）中尾 淳：セシウムの土壌吸着と固定．放射能除染の土壌科学 ―森・田・畑から家庭菜園まで―，**17**（10），40-45（2012）．

6）H. Tsukada, A. Takeda, A. Nakao : Vertical Distribution and Physicochemical Form of Fallout ^{137}Cs in an Allophanic Andisol Acidified by Long-term Fertilizer Application. *Pedologist*, **55**, 435-441 (2012).

7）農地除染対策実証事業の結果―農林水産省（https://www.maff.go.jp/j/nousin/seko/josen/pdf/kekka.pdf）（参照 2024年2月9日）

8）IAEA : Technologies for Remediation of Radioactively Contaminated Sites. IAEA-TECDOC-1086 (https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub1239_web.pdf)（参照 2024年2月9日）

9）IAEA : IAEA Safety Glossary, Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation protection. (2007)

10）IAEA : Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments. Technical Reports Series No. 472. (https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/trs472_web.pdf)（参照 2024年2月9日）

11）IAEA : Technologies for remediation of radioactively contaminated sites. IAEA-TECDOC-1086. (https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/trs472_web.pdf)（参照2024年2月9日）

12）IAEA : Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience. RADIOLOGICAL ASSESSMENT REPORTS SERIES. (https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub1239_web.pdf)（参照2024年2月9日）

13）EURANOS : Generic handbook for assisting in the management of contaminated food production systems in Europe following a radiological emergency. EURANOS(CAT1)-TN(09)-01 (https://www.eu-neris.net/library/handbooks/56-handbook-for-food-production-systemsversion-2pdf/file.html)（参照 2024年2月9日）

14）IAEA : Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience. RADIOLOGICAL ASSESSMENT REPORTS SERIES. (https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub1239_web.pdf)（参照 2024年2月9日）

15）RISO : Mechanical decontamination tests in areas affected by the Chernobyl accident. RISO-R-1029(EN). (https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/30/004/30004765.pdf)（参照 2024年2月9日）

16）宮下清貴：農耕地土壌の“除染”を考える ―農水省の除染技術を中心に―．射能除染の土壌科学 ―森・田・畑から家庭菜園まで―，**17**（10），46-51（2012）．

17）農地除染対策の技術書概要―農林水産省（https://www.maff.go.jp/j/nousin/seko/josen/pdf/gaiyou.pdf）（参照 2024年2月9日）

18）農地除染対策の技術書（第1編調査・設計編）―農林水産省（https://www.maff.go.jp/j/nousin/seko/josen/pdf/tyousa.pdf）（参照2024年2月9日）

19）農水省の除染マニュアルとその考え方―日本農学アカデミー（http://www.academy.nougaku.jp/sympo/pdf/20120314/20120314miyashita.pdf）（参照 2024年2月

9日）
20）平成24年6月 福島第一原子力発電所事故に係る避難区域等における除染実証業務―独立行政法人 日本原子力研究開発機構（https://fukushima.jaea.go.jp/fukushima/result/entry02.html）（参照2024 年 2 月 9日）
21）行本修：農地土壌等における放射性物質除去技術の開発．農業機械学会誌，**74**，94-98（2012）．
22）石田 聡，白旗克志，土原健雄，吉本周平：農地の除染対策について．JATAFFジャーナル，**3**，30-34（2015）．
23）Saito, K., Onda, Y., Outline of the national mapping projects implemented after the Fukushima accident. *J. Environ. Radioact*. **139**, 240-249. (2015).
24）Saito, K., Petoussi-Henss, N., Ambient dose equivalent conversion coefficients for radionuclides exponentially distributed in the ground. *J. Nucl. Sci. Technol*. **51**, 1274-1287. (2014).
25）Andoh, M., Nakahara, Y., Tsuda, S., Yoshida, T., Matsuda, N., Takahashi, F., Mikami, S., Kinouchi, N., Sato, T., Tanigaki, M., Takamiya, K., Sato, N., Okumura, R., Uchihori, Y., Saito, K., Measurement of air dose rates over a wide area around the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant through a series of car-borne surveys. *J. Environ. Radioact*. **139**, 266-280. (2015).
26）Mikami, S., Maeyama, T., Hoshide, Y., Sakamoto, R., Sato, S., Okuda, N., Sato, T., Takemiya, H., Saito, K., 2015. The air dose rate around the FukushimaDai-ichi Nuclear Power Plant: its spatial characteristics and temporal changes until December 2012. *J. Environ. Radioact*. **139**, 250- 259. (2012).
27）T. Charnock, C. Landman, D. Trybushnyi and I. Ievdin : European model for inhabited areas – ERMIN 2. *Radioprotection* **51(HS1)**, S23-S25 (2016)
28）T.W. Charnock, J.A. Jones, L.N. Singer, K.G. Andersson, J. Roed, S. Thykier-Nielsen, T. Mikkelsen, P. Astrup, J.C. Kaiser, H. Müller, G. Pröhl, W. Raskob, S.C. Hoe, L.H. Jacobsen, L. Schou-Jensen and F. Gering : Calculating the consequences of recovery, a European model for inhabited areas. *Radioprotection*, **44**(5), 407-412 (2009)
29）除染効果評価システムの開発―JAEA-Research 2012-020（https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Research-2012-020.pdf）（参照 2024年2月9日）
30）D. Satoh, K. Kojima, A. Oizumi, N. Matsuda, H. Iwamoto, T. Kugo, Y. Sakamoto, A. Endo, S. Okajima : Development of a calculation system for the estimation of decontamination effects. . *J Nucl Sci Technol*., **51**, 656-670 (2014).
31）福島県の帰還困難区域の除染シミュレーションと将来予測―JAEA-Research 2019-010（https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Research-2019-010.pdf）（参照 2024年2月9日）
32）山下卓哉：除染の効果と将来予測―現地の測定結果から見えてくる将来の姿―（2017）．（https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/332142.pdf）（参照 2024年2月9日）
33）A. Malins, H. Kurikami, S. Nakama, T. Saito, M. Okumura, M. Machida, A. Kitamura : Evaluation of air dose equivalent rates influenced by vertical and horizontal distribution of radioactive cesium in soil in Fukushima Prefecture. *J. Environ. Radioact*., **151**, 38-49 (2016).
34）福島における放射性セシウムの環境動態研究の現状（平成30年度版）―JAEA-Research 2019-002（https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Research-2019-002.pdf）（参照 2024年2月9日）
35）M. Kim, A. Malins, K. Yoshimura, K. Sakuma, H. Kurikami, A. Kitamura, M. Machida, Y. Hasegawa, H. Yanagi : Simulation study of the effects of buildings, trees and paved surfaces on ambient dose equivalent rates outdoors at three suburban sites near Fukushima Dai-ichi. *J. Environ. Radioact.,* **210**, 105803 (2019).
36）金 敏植，Alex Malins，佐久間一幸，北村哲浩，町田昌彦，長谷川幸弘，柳 秀明：福島県内を想定した複雑な実環境中での空間線量率分布解析システム（3D－ADRES）の研究開発．RISTニュース，No. 64，3-16（2018）．
37）金 敏植，Alex Malins，町田昌彦，吉村和也，斎藤公明，吉田浩子：環境中での空間線量率3 次元分布計算システム（3D-ADRES）の研究開発の現状と今後の展望．RISTニュース，No. 67，3-15（2021）．
38）T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, T. Ogawa, T. Furuta, S. Abe, T. Kai, Y. Matsuya, N. Matsuda, Y. Hirata, T. Sekikawa, L. Yao, P.E. Tsai, H.N. Hunter, H. Iwase, Y. Sakaki, K. Sugihara, N. Shigyo, L. Sihver and K. Niita, Recent improvements of the Particle and Heavy Ion Transport code System – PHITS version 3.33, J. Nucl. Sci. Technol., DOI: 10.1080/00223131.2023.2275736.
39）Furuta, T., Takahashi, F., Study of radiation dose reduction of buildings of different sizes and materials. *J. Nucl. Sci. Technol.* **52**, 897-904. (2015).
40）Imamura, N., Komatsu, M., Ohashi, S., Hashimoto, S., Kajimoto, T., Kaneko S., Takano, T., Temporal changes

in the radiocesium distribution in forests over the five years after the FukushimaDaiichi Nuclear Power Plant accident. *Sci. Rep*. **7**, 8179 (2017).

41）Nakama, S., Yoshimura, K., Fujiwara, K., Iijima, K., Temporal Decrease in Air Dose Rate in the Sub-Urban Area Affected by the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident during Four Years after Decontamination Works, *J. Environ. Radioact*. **208-209**, 106013. (2019).

42）大竹篤史：世界100カ国以上で採用！全世界デジタル3D地図AW3D ®，デジタルプラクティス，**10**，No.2（2019）.

43）筒井健：衛星3次元地図AW3D とインフラマネジメントへの適用．AI・データサイエンス論文集，**4**，42-47（2023）.

44）平成 26 年度福島県市町村除染技術支援事業 実施結果報告書―福島県生活環境部（https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/208788.pdf）（参照2024年2月9日）

45）実践現場ニーズから生まれた可搬型平面ガンマ線分布計測装置「ガンマプロッターH」―独立行政法人日本原子力研究開発機構（https://fukushima.jaea.go.jp/fukushima/introduction/pdf/gamma.pdf）（参照 2024年2月9日）

46）菅井径世，森 保宏，小川克郎：クリギング法による地震動分布推定の実用化に関する研究．日本建築学会構造系論文集，**80**，39-46（2015）.

47）K. Yoshimura, K. Saito, K. Fujiwara : Distribution of 137Cs on components in urban area four years after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. *J. Environ. Radioact*., **178–179**, 48-54. (2017)

48）令和2年度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―JAEA-Technology 2021-025（https://jopss.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Technology-2021-025.pdf）（参照 2024 年 2 月 9日）

49）ICRU : Gamma-ray spectrometry in the environment. ICRU Report, **53** (1994)

50）K. Inoue, M. Arai, M. Fujisawa, K. Saito, M. Fukushi : Detailed distribution map of absorbed dose rate in air in Tokatsu area of Chiba Prefecture, Japan, constructed by car-borne survey 4 Years after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *PLoS One*, **12**(1) Article e0171100 (2017)

51）A. Malins, N. Imamura, T. Niizato, J. Takahashi, M. Kim, K. Sakuma, Y. Shinomiya, S. Miura, M. Machida : Calculations for ambient dose equivalent rates in nine forests in eastern Japan from ^{134}Cs and ^{137}Cs radioactivity measurements. *J. Environ. Radioact*., **226**, 106456 (2021).

52）山口紀子，高田裕介，林健太郎，石川 覚，倉俣正人，江口定夫，吉川省子，坂口 敦，朝田 景，和穎朗太，牧野知之，赤羽幾子，平舘俊太郎：土壌－植物系における放射性セシウムの挙動とその変動要因．農環研報，**31**，75-129（2012）.

53）スーパーコンピュータHPE SGI8600（https://ccse.jaea.go.jp/computer/）（参照2024年2月9日）

54）ICRP : Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication 74. Ann. ICRP 26 (3-4) (1996).

55）既耕作水田における水による土壌攪拌・除去技術の除染効果―農研機構（https://www.naro.go.jp/project/results/laboratory/tarc/2012/510b0_01_03.html）（参照2024年2月9日）

56）K. Bunzl, W. Kracke, W. Schimmack, K. Auerswald. : Migration of fallout $^{239+240}$Pu, ^{241}Am and ^{137}Cs in the various horizons of a forest soil under pine. *J. Environ. Radioactiv*, **28**, 17-34 (1995).

57）K. Rosén, I. Öborn, H. Lönsjö : Migration of radiocaesium in Swedish soil profiles after the Chernobyl accident, 1987–1995. *J. Environ. Radioact*., **46**, 45-66 (1999).

58）T. Ohta, Y. Mahara, T. Kubota, S. Fukutani, K. Fujiwara, K. Takamiya, H. Yoshinaga, H. Mizuochi, T. Igarashi : Prediction of groundwater contamination with ^{137}Cs and ^{131}I from the Fukushima nuclear accident in the Kanto district. *J. Environ. Radioact*., **111**, 38-41 (2012).

59）公益社団法人 地盤工学会 委員会: 土壌中の放射性セシウムの挙動に関するレビュー 第15回環境回復検討会資料2-2（2015）.（https://www.env.go.jp/content/900484210.pdf）（参照2024年2月9日）

60）Yasutaka, T., Naito, W., Assessing cost and effectiveness of radiation decontamination in Fukushima Prefecture, Japan. *J. Environ. Radioact*. **151**, 512- 520. (2016).

Original

Simulation of Predicted Effects of Decontamination and Cultivation Activities on Reduction of Air Dose Rates using Monte Carlo method

KIM Minsik*, YOSHIMURA Kazuya, SAKUMA Kazuyuki, Alex MALINS, ABE Tomohisa, NAKAMA Shigeo, MACHIDA Masahiko and SAITO Kimiaki

• Summary • More than 10 years have passed since the accident at TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. To facilitate the return of residents, specified reconstruction and revitalization base areas have been established in areas that are difficult to return to, and intensive infrastructure development and decontamination have been carried out. Against this background, the objective of this study was to quantitatively evaluate the effect of decontamination and agricultural work on reducing ambient dose rates. Using 3D-ADRES, which enables the construction of detailed environmental models, we constructed a model that reproduces in detail the distribution of structures and radiation sources in the environment for a real area located in Okuma town, Fukushima Prefecture. In addition, we used PHITS to perform a Monte Carlo simulation of radiation and estimated the detailed distribution of radiation doses. The model reflects the realistic distribution of radioactive Cs based on observations and takes into account changes over time. As a result, the model calculated the distribution of air dose rates at 100 cm above the ground in the target area and reproduced the measured values well. It was also confirmed that the effects of decontamination and cultivation activities can be evaluated simply and in detail. From the above, it can be concluded that 3D-ADRES is an extremely effective system for evaluating dose rate reduction measures such as decontamination in difficult-to-return areas where entry is still restricted.

Key Words: radiocesium, air dose rate, detailed environmental model, Monte Carlo method, decontamination

Received December 7, 2023; Accepted April 17, 2024

*Corresponding author: Address: JAEA., *178-4 Wakashiba, Kashiwa-city, Chiba, 277-0871, Japan*
E-mail: kim.minsik@jaea.go.jp