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 - 福島復興に向けた市街地・森林等の 環境中空間線量率分布の推定 – Present Status and Future Perspective of R&D for 3D-ADRES (3-Dimensional Air Dose Rate Evaluation System) - Evaluation Scheme for Air Dose Rate Distributions in City and Forest Areas towards Fukushima's revitalization -

> 日本原子力研究開発機構 金 敏植、Alex Malins、町田 昌彦、吉村 和也、斎藤 公明

> > 東北大学大学院薬学研究科 吉田 浩子

高度情報科学技術研究機構 柳 秀明、吉田 亨、長谷川 幸弘

キーワード:福島の復興、空間線量率3次元分布、福島第一原子力発電所事故、放射性セシウム、3D-ADRES、PHITS、家屋、市街地、森林

福島第一原子力発電所事故により環境中に放出された放射性セシウムの一部は陸域に降下した。放射性セシウムは土壌表層に留まる性質を有するため、土壌表面は主たる放射線源となった他、道路、家屋の壁・屋根、森林内の樹木樹皮等にも一部残存し、市街地や森林等環境中の放射線量は複雑な分布を示すことが知られている。その上、それらの放射線源から発する放射線は複雑な環境構造物に吸収・散乱されるため、放射線量の詳細な分布を知ることは容易ではない。しかし、その環境中にて生活する住民にとって、大半の時間を過ごす家屋及びその近縁、職場等の生活空間における空間線量率の分布は重要な関心事である。本報告では、この環境中での複雑な放射線量の3次元的分布を可能な限り高精度に推定するため、研究開発を行ってきた3D-ADRESの現状を報告すると同時に、3D-ADRESを活用することで得られる成果の一端を示し今後の展望についても記す。

1. はじめに

2011年に発生した東京電力ホールディン グス(株)・福島第一原子力発電所(以下 1F)事故により、放射性セシウムが環境中 に放出され、その一部は陸地へと降着した。 放射性セシウムは、土壌表層の粘土鉱物粒子 に強く吸着される性質を有するため、降着量 の多い地域では、高い放射線量が計測され、 多くの住民が避難する事態となった。避難を 余儀なくされた住民にとって、かつて居住し ていた地域の空間線量率の分布や経時変化は 重大な関心事である他、放射線量が比較的低 く、居住を続ける住民にとっても、周囲の放 射線量の分布とその変化は、生活上の被ばく を自ら知り、管理するための欠かせない情報 源となる。

1F事故後、国・自治体は、居住する住民の 被ばくを低減するため、各地で除染を行い、 その結果、放射線量は低減したが、その実施 は平地からなる市街地や家屋周辺等に限定さ れ、福島県の凡そ7割を占める山林の多くは 除染未実施のまま残されている<sup>文献[1]</sup>。従って、 除染実施の有無、降着量の違い、そして環境 中での放射性セシウムの移動等により、空間 線量率の分布は不均一となり、場所により異 なる分布を示すことが知られている<sup>文献[2]</sup>。

一方、空間線量率の経時変化に目を向ける と、現在、事故後10年余りが経過し、環境 中の空間線量率の減少は予想を上回り、特に 人間の生活に密接に関係する環境の空間線量 率は顕著に速く減少している<sup>文献[3]</sup>。このよ うな環境中での変化を理解するには、放射性 セシウムの動態を十分に理解する必要がある。

以上の背景の下、住民帰還や福島の復興に 向け、重要となる情報は、生活圏内の空間 線量率の分布及びその経時変化となる。こ の情報を提供すべく、日本原子力研究開発 機構(JAEA)と高度情報科学技術研究機構 (RIST) は、最新の計算科学技術を活用し、 図1に示すように福島の現地にある家屋・森 林環境・線源分布を可能な限りリアルにモデ ル化した上で、そのモデルを用いて空間線量 率の3次元分布の推定を可能にするシステ ム (以下、3D-ADRES (3-Dimensional Air Dose Rate Evaluation System))の研究開 発を進めてきた。本報告では、3D-ADRES 研究開発の現状と、それを用いた成果の一端 を報告すると同時に、今後の研究開発の展望 についても報告する。

### 2. 福島での空間線量率の分布と経時変化

1F事故後の福島における詳細な空間線量

率の3次元分布をシミュレーションするに は、先ず事故初期における放射性核種の沈着 分布を把握する必要がある。次に、「環境面」 と定義する放射性物質が沈着した環境中の表 面において、放射性核種がどのような動きを 示し、空間線量率がどのように変化するかを 環境動態の観点から理解する必要がある。

この観点に対し、吉村らは<sup>文献[4]</sup>、1F事 故後初期に福島県内を広域でかつ高頻度に環 境モニタリングを実施した。その結果、空間 線量率を<sup>137</sup>Cs沈着量で除した正規化線量率 の減少速度は放射性崩壊よりも速やかであ り、その要因として、放射性核種の深度方向 への移行や水平方向への流失が考えられると 報告している。さらに、その減少速度は土地 利用形態により、異なると報告している。

また、1F事故後、大規模にCsの分布を調 **査するため、国の方針として放射線量等分布** マップ<sup>文献 [5,6]</sup>の作成が行われ、航空機に よる上空のモニタリングの他、地上でのモ ニタリングが実施された。原子力機構では、 他研究機関との協力を得て1Fから半径80km 圏内及び福島県内にある土壌面に対して、 2011年6月から数多くのモニタリングを行 い、沈着土壌濃度マップを作成した(2011 年6月から約2200地点、2012年から2016年 にかけては、測定地点を約6500地点に増や し沈着量及び空間線量率のモニタリングを実 施)。この結果を基に、三上ら<sup>文献[7]</sup>は、1F 事故後の初期から中期にかけてのモニタリ ング結果から、2016年の平均空間線量率は、 セシウム134 (134Cs、半減期:2.06年)の崩 壊と共に放射性セシウムが土壌に浸透する影 響で、初期の約30%程度の減少が見られたと 報告した。また、未除染地域における土壌で は、放射性崩壊から予想される速度で<sup>134</sup>Cs 及び<sup>137</sup>Csの平均沈着量は減少し、放射性セ シウムの水平方向の移動は比較的小さい一 方、除染等が実施された地域のモニタリング 結果をみると、定量的な分析は難しいものの、

平均空間線量率は約20%程度減少し、除染等 の効果が明らかになったと報告している。こ れに加え、中間ら<sup>文献[8]</sup>による長期モニタ リングデータの結果でも、空間線量率は放射 性セシウムの放射性崩壊による減衰速度以上 に早く減少し、特に非舗装面より、アスファ ルト道路の舗装面の方が早く減少したと報告 している。一方、森林においては、減少速度 は小さく、市街地からの距離が近くなるほど、 減少速度は増大するとの報告があった。これ らの結果を踏まえ、Malinsら<sup>文献[9]</sup>は森林 内の空間線量率を決める要因について、放射 性物質の存在位置と空間線量率の関係を明ら かにするため、放射線輸送シミュレーション を行った。その結果、事故後初期の林内の空 間線量率は、樹冠・リター層からの影響が比 較的大きい一方、2015年以降は、殆どが土 壌の上部5 cm以内に達した放射性物質による ものと報告している。

以上、1F事故後の初期・中期・そして最 近の放射性セシウムの沈着状況と、さらには 土地利用形態や除染、人間活動等が、その場 の空間線量率の分布に強く影響することが分 かる<sup>文献[10]</sup>。このような現状を踏まえ、放射 性セシウムの複雑な分布による3次元の空間 線量率分布の定量的推定とその可視化を目指



図1 空間線量率3次元分布計算システム(3D-ADRES)の概要と計算の流れ。市街地や森林等に おいて、地理空間情報データから地形・建物・樹木モデルを作成し、線源分布を設定した後、 PHITSを用いたモンテカルロシミュレーションを行い、空間線量率3次元分布を評価する。

し、私たちは、3D-ADRESをこれまでに開 発してきた。3章では、上記の背景を踏まえ、 開発を進めてきた内容の中でも重要なポイン トについて、その概略を紹介する。

# 3. 3D-ADRESの開発コンセプトと開発の 現状

3D-ADRESでは、環境における空間線量 率の分布を解析するため、放射線の挙動を核 反応モデルや核データ等を用いて模擬するモ ンテカルロ計算コード: Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) <sup>文献 [11]</sup> を用いて計算する。PHITSは、現在、地面・ 家屋・樹木・線源分布等の複雑な環境を簡 易にモデル化するGraphical User Interface (GUI)を備えたツールを持たないため、環 境モデルを作成するには大きな手間がかか る。この状況を克服するため、JAEA・シス テム計算科学センターは、RISTと連携し、 JAEA・福島研究開発部門の支援の下、実環 境における空間線量率の3次元分布が計算可 能なシステム3D-ADRES<sup>文献[12]</sup>を開発して きた。3D-ADRESを用いると、地形・樹木・ 建物等のリアルな3次元モデルの構築と不均 質な放射性セシウムの線源分布の取り込みが 可能となり、福島県における市街地や森林等 のような複雑な環境モデルを再現できる。

しかし、市街地、森林・農地等では、土地 利用が複雑に入り組んだ環境となり、それに 応じて沈着の度合いも変化する一方、除染等 を含めた人間活動等を考慮し、且つ、家屋内 への各環境面からの影響を評価するには、地 面モデルの解像度の向上、実家屋モデルの構 築、家屋室内空間のモデル化、各環境面にお ける線源分布の細かな設定というモデル構築 上の限界を広げる必要があった。更には、数 多くの複雑な環境モデルが設定されると、計 算負荷が高まる等の課題があり、効率的計算 を行うための工夫も必要となっていた。

以上、より詳細でリアルな環境モデルを構

築し、放射線場を効率的にシミュレーション 可能とすることを目標に、3D-ADRESを開 発してきた。以下では、既存手法の限界等の 課題を挙げ、改良を重ねてきた点を中心に報 告する。

# 3.1. 家屋を中心とするリアルな屋内・屋外 環境空間を再現するモデルの開発

前述のように、3D-ADRESの開発により、 環境中に存在する複雑な地形・家屋・樹木等 が3次元モデルとして再現可能となった。し かし、「解析対象」や「解析目的」に応じて、 線量率の分布を評価するには、分布の細部に 渡る再現性という観点で限界があった。例え ば、図2に示すように、帰還住民等が最も長 い時間滞在する家屋の室内空間における空間 線量率をシミュレーションするには、①対象 家屋の近場にある線源が重要となるため、近 場の土地利用状況を細かく設定し、再現性 を高める必要がある<sup>文献[13]</sup>。②さらには、建 物直下の土壌が汚染されていない効果<sup>文献[14]</sup> (家屋直下に線源がないことが重要な効果を もたらす、un-contaminated effect) が重要 となるため、家屋の形状に合わせて家屋真下 等の未汚染形状の再現性を高める必要があ る。しかしながら、①の場合、計算コスト等 の問題で既存の地面格子は10mが限界であ り、比較的、線源密度の高い庭及び周囲の草 地等の存在は表現されず、家屋内外の空間線 量率分布を詳細にシミュレートするには適切 とは言えない限界があった。②の場合は、当 初、採用した家屋の形状が四角形のみで、縮 尺だけを考慮し、縦横高さのスケール変換の みで対応したため、家屋の真下等の未汚染形 状の設定に限界があった。また、住民にとっ て、家屋内の空間線量率の分布は重要だが、 その空間線量率がどの屋外の「環境面」から 影響を受けているかを詳細に知りたいという ニーズがあった。これは、測定結果だけから 推定することは難しく、「環境面 | 単位での

シミュレーションが必要となる。

以上の課題やニーズを受け、現在の 3D-ADRESでは、環境モデルのリアリティー を向上させ、PHITSシミュレーションを通 して屋内空間における空間線量率の由来がど のような家屋周辺の放射性物質の分布に起因 するかを明らかにするため、以下のような研 究開発を行い改良を加えた。

# 3.1.1. 不規則メッシュの開発

福島県における様々な測定結果を見ると、 空間線量率の低減効果は、土地利用により大 きく異なっている。例えば、舗装面の場合、 非舗装面よりも比較的、速やかに減少するこ とが確認されている<sup>文献[15]</sup>。従って、正確な 空間線量率分布を解析するには、地面メッ シュを土地利用毎に詳細に分け作成すること が望ましい。しかし、通常利用されている GISデータや既存の地面メッシュは、解像度

が10m程度であり、且つモデル作成上の簡単 さのため、規則格子を用いると、実際の福島 の家屋周辺の土地利用分布を詳細に再現する ことが困難となるケースが多いことが分かっ た。特に家屋周囲の軒下や駐車場のような整 備された舗装面と家屋周囲の庭や畑等の非舗 装面が交わる境界部分や、家屋に繋がる細い 私道のような舗装面の表現は難しく、線源分 布を再現性よく設定するには限界があった。 これらを考慮するため、新しい3D-ADRES では、既存の規則メッシュに加えて不規則三 角メッシュを開発した。尚、3D-ADRESの GUIでは、直接、不規則三角メッシュを作成 できないが、GISプログラムを利用すること で、その不規則三角メッシュを3D-ADRES に入力可能とすることで課題を解決した。図 3は、規則三角メッシュと不規則三角メッ シュを用いて家屋周囲のメッシュを作成した 場合の違いを示した。図3より、明らかに不



図2 周囲に林が隣接する典型的な福島の家屋環境:屋内の中心位置(床上1m)に対し、周囲の環境 から来るガンマ線の挙動イメージ図

規則三角メッシュの方が規則三角メッシュと 比べ、現実に沿う形で詳細に土地利用分布を 再現できることが分かる。また、不規則三角 メッシュの特徴として、メッシュ一つ一つの サイズを変えることも可能であり、図3の家 屋周囲の細い私道等を凡そ正確にモデル化で きることも分かる。図4に不規則三角メッ シュを使用し、作成した家屋環境モデルの例 を示す。さらに、不規則三角メッシュは設定 する位置も自由に設定できるため、家屋から 予め距離・環境面毎に、不規則三角メッシュ を作成することで、調査対象とする家屋の室 内において、どの環境面からの影響が最も大 きいかを調べることも可能となる(図3)。 この機能については、3.1.3.シナリオ機能の 開発で追記する。

# 3.1.2. 形状リアリティーを再現可能とする 建物モデルの開発

### ①多様な建物モデルの形状の再現

建物の形状は単純ではなく建築工法も様々 である上に、家屋周囲の線源分布は不均質で あるため、建物内外の空間線量率分布は複雑 な3次元分布を示す。中でも、建物内の空間 線量率や建物周囲の空間線量率は、当然建物 周りの放射性セシウムの沈着分布に強く依



図3 家屋(灰色で示したエリア)とその周囲を規則三角メッシュでモデル化した場合(a)と不規則 三角メッシュを用いた場合(b)の違い



図4 不規則三角メッシュを使用した家屋環境モデルの作成例(現行3D-ADRESにより作成した環境 モデルをPHITSにより出力)

存する。松田らによると<sup>文献[14]</sup>、建物がその 場の放射線場に及ぼす影響として、建物によ る遮蔽効果の他、建物直下が汚染されていな い効果があると報告している。従って、建 物直下が汚染されていない効果を考慮したリ アルな線源分布を再現するには、建物の立つ 地面をリアルに再現することは勿論、建物 形状も反映させる必要がある。これまでの 3D-ADRESでは、既存の古田ら<sup>文献[16]</sup>が用 いた四角形の家屋を参考にした簡易モデルを 用いてきたが、実環境を反映し多様な形状の 建物モデルを構築可能とすることが望まし い。その一方、PHITSでは、複雑な三次元 体系を容易に構築するため、ポリゴン体系で ある四面体メッシュ体系の作成機能が、最近 導入された<sup>文献[17, 18]</sup>。四面体メッシュ体系 はシンプルで且つ自由に複雑な三次元体系が 作成可能である。こうして、柔軟に様々な形 状表現が可能になる四面体メッシュ体系を用 いることで、複雑な家屋モデルの作成が可能 となった。

以上、上記のニーズの下、建物形状を四面 体メッシュ体系で構成し、多様な形状の建物 モデル作成を可能とした(図5)。四面体メッ シュの活用により、図5で示したコ型、セッ トバック型、雁行型、L型の他、ほぼ任意形 状の建物モデルが作成可能となった。

## ②屋内空間の再現

木造家屋のような薄い木材を材料とした仕 切り壁は、家屋内の空間線量率分布に対し、 大きな影響を及ぼさないと推定されている。 しかし、工場や学校、大型施設等のコンクリー ト壁をもつ建物では、その影響は無視できな い。また、環境省の委託研究「被ばく線量に 影響を及ぼす住家内外の要因に関わる研究」 (主任研究者:吉田浩子)に参加し、室内空 間の空間線量率を実際に測定した所、家屋内 においても空間線量率の分布があること、更 には、一室の室内においてさえも分布がある ことが判明している。従って、屋内のリアル な空間を作成可能とするツールを追加し、屋 内空間の再現性を高めることが必要であるこ



図5 多様な建物モデルの形状の再現: (左:既存のボックス型モデル、右:四面体メッシュを用いた多様な建物モデルの例)

とが分かった(図6参照)。現行3D-ADRES では、上記ニーズに従い、屋内空間における 仕切り壁の作成や仕切り壁の材質の種類や厚 さ等を任意に設定可能とした。この改良によ り、屋内空間での線量率分布の解析精度が向 上することが期待される。

# 3.1.3. シナリオ機能の開発

家屋室内における空間線量率分布を分析す る際、家屋周りの環境面に分布する放射性セ シウムが、「環境面」毎に、どれ程の割合で 屋内に影響を及ぼすかを定量的に分析するこ とが求められる。もし、このような分析が可 能になると、効率的な除染作業等の計画が立 案可能となる他、家屋の解体や樹木の伐採等 による効果の事前評価も可能となり、住民や 国・自治体に対し、意思決定に当たり重要な 情報源の提供が可能となる。

このような想定されるシナリオを基に、シ ミュレーションを実施し、その影響を評価可 能とするシナリオ機能を3D-ADRESにて実 装した。この機能を使用し、実際の場面で分 析可能となる例を図7に示した。例えば、① 室内の空間線量率に対し、(1)家屋に付着 した線源が及ぼす寄与、(2)周囲の樹木線 源が及ぼす寄与、(3)地面線源が及ぼす寄 与が、各々、明確化する。次に、②除染やそ の他の人間活動に対し、(a)樹木伐採の寄与、 (b)地面除染の寄与が明確化されることで、 除染効率等の予測が可能となる。更には、(c) 家屋撤去の効果も推定可能となり、様々な計 画の妥当性が事前に検討可能となる。

# 3.2. 適合細分化格子による自動ネスト機能の開発(集落環境を対象とするモデル開発)

福島現地での空間線量率の分布を観測する と、集落毎に分布状況が異なる一方、ある一 定の特徴的分布を示すこと等が凡そ判明して いる。従って、対象とする集落をシミュレー ションするには、計算精度を可能な限り向上 させると同時に、計算コストを低減させるこ とを目的とし、解析の対象となる指定集落を 最適な細分化格子で区分するための自動ネス ト機能を開発した。一例として、格子作成前 後の画像を図8に示す。図8にて分かるよう に、中心位置と中心からの距離の設定、距 離毎の格子サイズの指定を可能としたこと で、中心座標の設定の下、半径50m、100m、 150m、200m等の領域に円を描画後、範囲毎 に指定したサイズで地形格子を生成すること が可能となった。これにより、局所的に解像 度の高い格子が作成可能となり、解析対象と する集落を中心に空間線量率分布の詳細計算 と各線源からの寄与率等の分析が可能となった。

図8に示した適合細分化格子を用いた試計 算の例として、細分化格子を任意の領域に配



図6 屋内空間のモデリングのリアリティーを向上させる:上記のように任意に仕切り壁(材質も選択 可)等の導入を可能とした。



図7 3D-ADRESに実装したシナリオ機能の適用例のイメージ

置させた環境モデルを作成し、PHITSによ り空間線量率の計算を行った結果を図9に示 す。図9のモデル作成では、中心からの半 径20mを3mメッシュ、半径40mを5mメッ シュ、半径60mを10mメッシュ、半径80mを 20mメッシュ、半径80m以降を40mメッシュ で作成し、Surface及びCellを合わせて2.7万 程度のメッシュ数とし、線源を分布させ計算 を行った試計算の結果を示す。試計算では、 一目で区別可能とする為、土壌の舗装面には 非舗装面の10倍程度の線源を設置した(デ モのため非現実的な設定を実施)。計算結果 より、適合細分化格子による自動ネスト機能 を用い、計算領域の地面モデルを作成するこ とで(図9(a))、計算領域の中心を詳細に 再現しながら、中心から離れるにつれ、メッ シュを大きくすることで効率的な計算が可能 となった。なお、道路等の比較的、幅が狭く、 既存の規則メッシュでは再現が不十分であっ た部分も改善され、環境モデルでの現場の環 境の再現性が向上した(図9(b))ことが分

かる。その他、PHITSにより動作確認を行っ た結果、線源分布(図9(c))や空間線量率 分布の計算結果は、(図9(d))が示す通り となり、複雑な分布の再現が十分に可能と なっていることが分かる。

# 4. 3D-ADRES開発の成果と今後の展望

# 4.1. 線量低減係数と除染・人間活動を考慮 した空間線量率の将来予測

今般、新しく開発された機能をもつ 3D-ADRESは、二つの環境省委託事業であ る放射線健康管理・健康不安対策事業等(① 「被ばく線量に影響を及ぼす住家内外の要因 に関わる研究|主任研究者:吉田浩子、②「市 街地の空間線量率の経時変化に対する人為的 な影響に関する研究」主任研究者:吉村和 也)で活用されつつある。一例として、①の 事業では、木造家屋をターゲットとし、屋内 空間における空間線量率が、家屋周りのどの 「環境面」から影響を受けるのか?という課 題について評価することを目指しているが、



(b) 格子作成後

図 8 最適な細分化格子の自動作成機能の画面(3D-ADRESのGUI画面)

不規則三角メッシュの開発より、家屋周りの 土地利用状況や線源分布が細かく再現可能と なり、精度の高い評価が可能となった。これ らの機能拡張により、家屋周りの除染効果を 予測し、住民にとって、重要な情報である家 屋線量低減係数<sup>文献[13]</sup>を、現地の情報に併 せて各家屋単位で分析することが可能になる と考えている。一方、②の事業では、被覆面 で異なる放射性セシウムの動態が、市街地に おける空間線量率の減少に及ぼす影響を定量 的に評価することを目指し、人間活動を考慮 した空間線量率の減少要因の評価や将来予測 するための研究が行われている。これについ ても、上記のように、集落単位での細分化モ デルの構築が可能となっており、着目地点毎 の詳細モデリングが有効に機能すると考えら れる。

## 4.2. 今後の課題

以上、福島の実環境を可能な限り、リアリ ティーを有するモデルで再現し、より正確で 効率的な計算を可能とするための研究開発を 行ってきたが、未だ実証及び検証が十分に行 われていない。今後は、上記で述べた研究課



図9 適合細分化格子を用いた一つの集落に対する試計算の例

(a) 計算領域

題等を通して、実測データに基づいた解析や モデルの実証及び検証を行い、3D-ADRES の有効性を示すことを予定している。その上、 シミュレーションの大きなメリットである予 測評価や実測だけでは困難な定量的分析を行 い、3D-ADRESの活用範囲を広げることを 考えている。

## 5. まとめと結論

福島の復興はいち早く実現すべき大きな日 本社会の課題であるが、その実現に向け、多 くの科学的知見が蓄積されてきたことは極め て貴重である。本報告で記した3D-ADRES は、福島事故後の環境中での空間線量率分布 を分析・考察する際、これまでに得られてき た様々な知見を基に、シミュレーションモデ ルを構築する際のエッセンスが凝集されてお り、家屋内の空間線量率に対する周囲の環境 からの影響を推定評価することが可能となっ ている他、集落単位での解析も可能となって おり、様々な活用が想定される。現在、空間 線量率の比較的低い地域での除染等による線 量率低減は一段落し、今後は帰還困難区域の 復興へと進んでいくと考えられているが、そ の際、家屋や集落単位で、リアルなモデリン グと的確な除染等の計画が費用対効果も含め て事前にシミュレーション可能となれば、復 興への貢献が期待できると考えている。

### 謝辞

3D-ADRESの開発に当たり、検証データ の取得等のため、福島での環境調査の際、住 民及び自治体関係者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、この研究の一部は環境省委託事業「平成 31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:吉田浩子)、「令和2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)において実施したものを含みます。 研究開発においては、原子力機構・福島研究 開発部門の宮原要所長、飯島和毅ディビジョ ン長、眞田幸尚GL、新里忠史GL、操上広志 GL、佐久間一幸研究員、阿部智久技術員に は、多くのご教示をいただきました。ここに 感謝致します。システム計算科学センターか らは、シミュレーションに当たり計算資源等 で支援いただきました。武宮博センター長を 始めとするスタッフの皆様に感謝いたします (特に、システム開発初期に参加した奥村雅 彦氏とGISデータ・衛星データ処理に関する 岩田亜矢子氏の支援に感謝致します)。最後 にPHITS活用に際してはRISTの仁井田浩二 氏に感謝致します。

## 参考文献

- [1] Kato, H. et al., Temporal changes of the ambient dose rate in the forest environments of Fukushima Prefecture following the Fukushima reactor accident, Journal of Environmental Radioactivity, vols.193-194, 2018, p.20-26
- [2] 眞田 幸尚他,避難指示区域の解除に 向けた特定復興再生拠点の放射線モニタリングと被ばく評価,日本原子 力学会和文論文誌,Vol.20,(2021), No.2, p.62-73
- [3] Andoh, M. et al., Evaluation of decreasing trend in air dose rate and ecological half-life within an 80 km range from Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, using car-borne survey data measured by KURAMA systems up to 2018, Journal of Nuclear Science and Technology, vol.57, 2020, Issue 12
- [4] Yoshimura, K. et al., Initial Decrease in the Ambient Dose Equivalent

Rate after the Fukushima Accident and Its Difference from Chernobyl, Scientific Reports, vol.10, 2020, p.3859-1-3859-9

- [5] 放射線量等分布マップ拡大サイト https://ramap.jmc.or.jp/map/
- [6] 放射性物質モニタリングデータの情報公開サイトhttps://emdb.jaea.go.jp/ emdb/
- [7] Mikami, S. et al., The Deposition Densities of Radiocesium and the Air Dose Rates in Undisturbed Fields around the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant; Their Temporal Changes for Five Years after the Accident, Journal of Environmental Radioactivity, vol.210, 2019, p.105941-112
- [8] Nakama, S. et al., 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, Journal of Environmental Radioactivity, vols.208-209, 2019, p.106013-1-106013-8
- [9] Malins et al., Calculations for ambient dose equivalent rates in nine forests in eastern Japan from 134Cs and 137Cs radioactivity measurements, Journal of Environmental Radioactivity, vol.226, 2021, p.106456-1-106456-12
- [10] Saito, K. et al., Summary of temporal changes in air dose rates and radionuclide deposition densities in the 80 km zone over five years after the Fukushima Nuclear Power Plant accident, Journal of Environmental

Radioactivity, vol.210, 2019, 105878

- [11] Sato, T. et al., Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02, J.
  Nucl. Sci. Technol. 55, 684-690 (2018)
- [12] Kim, M. et al., 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, (2019), 105803
- [13] Yoshida-Ohuchi, H. et al., Review of reduction factors by buildings for gamma radiation from radiocaesium deposited on the ground due to fallout, J. Environ. Radioact., 210, (2019), 105803
- [14] Matsuda, N. et al., Measurements of air dose rates in and around houses in the Fukushima Prefecture in Japan after the Fukushima accident, J. Environ. Radioact., 166 (2017), pp. 427-435
- [15] Yoshimura, K. et al., Distribution of 137Cs on components in urban area four years after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, J. Environ. Radioact., 178-179 (2017), pp.48-54
- [16] Furuta, T. et al., JAEA-Research 2014-003
- [17] 古田 琢哉, PHITSへの四面体メッシュ体系の導入, 第13回PHITS研究会 (2017)
- [18] Furuta, T. et al., Implementation of tetrahedral-mesh geometry in Monte Carlo radiation transport code PHITS, Phys Med Biol. 2017 Jun 21;62(12):4798-4810