

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

ーリモートセンシング情報の活用と各環境因子

(地形・土壌・建物・樹木等)の影響評価ー

Development of an air dose rate evaluation system (3D-ADRES) for complex real environments in Fukushima Prefecture

- Using remote sensing data and evaluating the influence of different features (topography, soil, buildings, trees, etc.) -

¹日本原子力研究開発機構、²高度情報科学技術研究機構
金 敏植¹、Alex Malins¹、佐久間一幸¹、北村 哲浩¹、町田 昌彦¹
長谷川幸弘²、柳 秀明²

キーワード：空間線量率、3次元構造物モデル、リモートセンシング、
福島第一原子力発電所事故、放射線輸送モンテカルロシミュレーション、
PHITSコード

環境中に放出された放射線源による空間線量率の正確な分布は、住民の被ばく量を評価し、それを可能な限り低減するための必須な情報となる。しかし、市街地・森林等は複雑な構造物や樹木が存立する他、地形も平坦ではなく放射線の散乱や遮蔽が頻繁に起こるため、空間線量率の分布は非一様となる。加えて放射線源の不均質な分布は更にそれを複雑なものとするため、正確な空間線量率の分布を知ることは容易ではない。そこで、日本原子力研究開発機構・システム計算科学センターは、福島環境安全センターと連携し、福島県内の市街地や森林等の複雑な環境中の地形・樹木・建物等の3次元のリアルな構造物モデルを構築し、更に不均質な放射性セシウムの線源分布を取り込むことを可能とすることで、空間線量率の3次元分布が計算可能なシステム(3D-Air Dose Rate Evaluation System: 略称3D-ADRES)を開発した。3D-ADRESでは、人工衛星画像等のリモートセンシング情報や種々の地理情報等を最大限に活用し、構造物を認識(一部自動化済み)した後、その構造をリアルにモデル化し、モンテカルロ計算コードPHITS用フォーマットに変換することで、シミュレーションによる詳細な空間線量率分布を取得可能とする。本稿では、そのシステムの概要について記し、実際の計算例を示す他、今後の課題についても記す。

1. はじめに

原子力発電所事故による放射能汚染地域において、住民の被ばく量を評価し可能な限りその被ばく量を低減するためには、生活環境中の放射線レベルを正確に知ることが必須と

なる。環境中の放射線レベルを定量的に評価する際、これまで、地面からの高さ1mの空間線量率(正確には、周辺線量当量率(\dot{H}^* (10), 単位; $\mu\text{Sv/h}$))が一般に用いられてきた[1-4]が、それは主に環境中に沈着した放射

性核種の分布と地形・建物・植生等による放射線の散乱や遮蔽効果によって決定される[5-11]。従って、生活環境中の空間線量率を知るためには、放射性核種分布の知見が必要となる一方、地形・建物・植生等による散乱・遮蔽効果を計算可能とする環境モデルの構築とモデル内での放射線源からの γ 線輸送モンテカルロシミュレーションが有効であることが分かる。

以上の考え方に従い、空間線量率を計算・評価するため、まず、福島原発事故後に得られた放射性核種の分布の知見に着目する。放射性核種の分布は主に初期沈着量に依存するが、同じ敷地内でもかつ近距離の範囲内でサンプリングした場合でも、その結果は非一様な濃度分布を示すことがある[12-13]。

また、森林・建物・アスファルト道路及び駐車場等の舗装面・農地及び庭等の非舗装面のように異なる土地利用面に対して、系統的に沈着量が異なる[14-15]ことが報告されているが、更に、それらは土地利用面に依存した、放射性核種特有の移行により経時変化することも知られている。

実際、福島原発事故から4年後の未除染市街地の放射性セシウム分布の調査結果によると、舗装面の場合、事故初期には放射性降下物量の20%未満が平均して残存していたが、早い時期に ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の殆どが消失したとの報告がある[16]。一方、建物の外壁・窓等のような垂直外面及び屋根等の傾斜面では、降下物量の凡そ2%未満が残存し、平らな屋根や溝などの水平な面では、その残存量は凡そ10%未満との報告がある。次に森林に目を向けると、樹木については、事故から数年で ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の量が大きく減少することが報告された[19]。事故から3年後の森林においては、広葉樹及び針葉樹の両者共に、沈着 ^{137}Cs の全量に対して樹木が保持している量は2~10%のみであり、残りの ^{137}Cs はリターや土壤に移行したと報告されている[20]。こ

れらの知見を活用し、更に現地環境条件を十分に加味すれば、原理的には妥当な放射線源分布モデルを任意の環境で構築することが可能となる。

次に、地形・建物・植生等による散乱・遮蔽効果に対して、これまでに得られた知見を記す。地形については幾つかの研究報告[29]があり、モデル化とシミュレーションによる評価は比較的容易であるが、その効果は無視できない。一方、比較的複雑な構造を呈する建物に対しても、福島県の汚染被害地にて木造住宅を詳細に調べた報告がある。そこで提示された周囲の空間線量率に対する住宅内の空間線量率の低減係数0.38~0.55[18]には、住宅による遮蔽の他、建物直下の土壤が汚染されていない効果(un-contaminated effect)[17]が主たる寄与として含まれることが指摘されている。従って、コンクリート建物の場合に得られた更に大きな低減係数0.1~0.19[18]には、建物直下の土壤が汚染されていない効果(un-contaminated effect)[17]に加えてコンクリート壁が示す大きな遮蔽効果も効いていることが分かる。市街地から森林に転じると、主要構造物である樹木の散乱・遮蔽効果は無視できない寄与があることが推定される。その定量的な計算や評価については、Gonzeらや他の研究報告を参照されたい[10, 30-31]。

上記のように、基本となる対象構造物に対して詳細評価を実施した報告の他、環境中での放射線レベルを推定評価する試みは、これまでに多数報告されている。例えば、Jacobらはモンテカルロシミュレーションを用い、典型的なヨーロッパの都市や地方において、芝生・樹木・建物・舗装面のように異なる環境面の汚染分布が周りの空間線量率にどのように影響を与えているかを調べた[5]。また、Kisらは工業地域について同様のモンテカルロシミュレーションを実施した結果を報告している[21]。更に、Egedらは、都市にお

ける外部被ばく線量をシミュレートするために開発された様々なモンテカルロ計算モデルをレビューしている [22]。最近では、地理情報システム (GIS) データを用いて都市環境を現実的に再現するための開発も行われている [23-24]。

以上、空間線量率は、森林においては、樹木の遮蔽効果・地形効果そして土壌浸透等による遮蔽により決定される一方、市街地においては、建物の遮蔽効果・建物直下の非汚染効果 (un-contaminated effect) などを十分に考慮する必要があることが分かる。従って、地形を始めとして、周辺の被覆状況を再現する他、樹木・建物等を可能な限り、現実の環境を反映した3次元構造物モデルを生成し、そこでガンマ線輸送シミュレーションを行うことで、凡その空間線量率分布の推定が可能となることが分かる。

本研究開発では、福島県内の任意の複雑な実環境空間においても、空間線量率分布の評価を可能にすることを目指し、リモートセンシング情報や他の地理空間情報等を活用することで、地形・樹木・建物に対して可能な限り現実に近い環境モデルを作成し、そこでの¹³⁴Cs及び¹³⁷Csの線源分布をモデル中の様々な異なる環境面に対して、これまでに得られた知見を基に付与する他、任意に設定可能とするシステム (3D-ADRES) を構築した。3D-ADRESでは、上記のように構築した実環境中の構造物及び放射線源モデルをPHITSフォーマットに変換し、ガンマ線モンテカルロシミュレーションを実施することで空間線量率の分布が取得できる。こうして、3D-ADRESを利用すると、計算対象とする任意の地区の任意の地点 (建物内や地上直上から任意の高度) にて、空間線量率の3次元分布を得ることが可能となる。こうして得られる空間線量率の3次元分布は、航空機サーベイによるデータマップ (高空からの観測により空間平均化された分布) と比べ、現実環境

を反映した複雑な3次元分布になると考えられる。本記事にて、その例を明示するが、3-ADRESでは得られたその複雑さの要因を、付与した線源分布と環境中での放射線の遮蔽及び散乱との関係より定量的に分析できる。こうした機能は、詳細な外部被ばく線量評価や除染計画立案やその評価等に役に立つと期待できる。3D-ADRESでは、更にユーザーの利便性を図るため、福島県の希望の住所を入力すれば、取得済みデータ (DSM/DEMや地理情報) を検索し、そのデータを用いて地形・構造物モデルを構築できるツールも整備してある。

以上、本記事では上記3D-ADRESの概略を説明し、実際に福島第一原子力発電所付近の未除染地域に適用することで、建物・樹木等が空間線量率に及ぼす影響を調べた結果を報告する。環境中の建物や樹木のモデル作成に当たっては、リモートセンシング情報 (人工衛星画像情報等) やその他の地理情報に基づきモデル化し再現した。得られた計算結果によると、建物や樹木のCsの残存率が低い場合、それらは線源としての役割より、ガンマ線を遮蔽する遮蔽体としての役割を果たし、空き地に比べ空間線量率は低下することが分かった。この結果は建物や樹木を組み込んだシミュレーションと建物や樹木を撤去したシミュレーションを比較することで再確認される。更に、建物直下の土壌が汚染されていない影響に対しては、建物の直下に¹³⁴Cs及び¹³⁷Csの線源を付加することで比較評価した。このように、3D-ADRESを用いると、実環境モデル内で、任意の構造物や放射線源の変更が容易に可能となり、それらの果たす役割を簡単に抽出し比較評価できる。これは、環境中の任意の地点で、各線源からの寄与率が推定可能であることを意味し、市街地及び森林内での除染の計画立案時に役立つと考えられる。帰還困難区域を始めとする空間線量率が高い地点では、今後、詳細な除染計画が

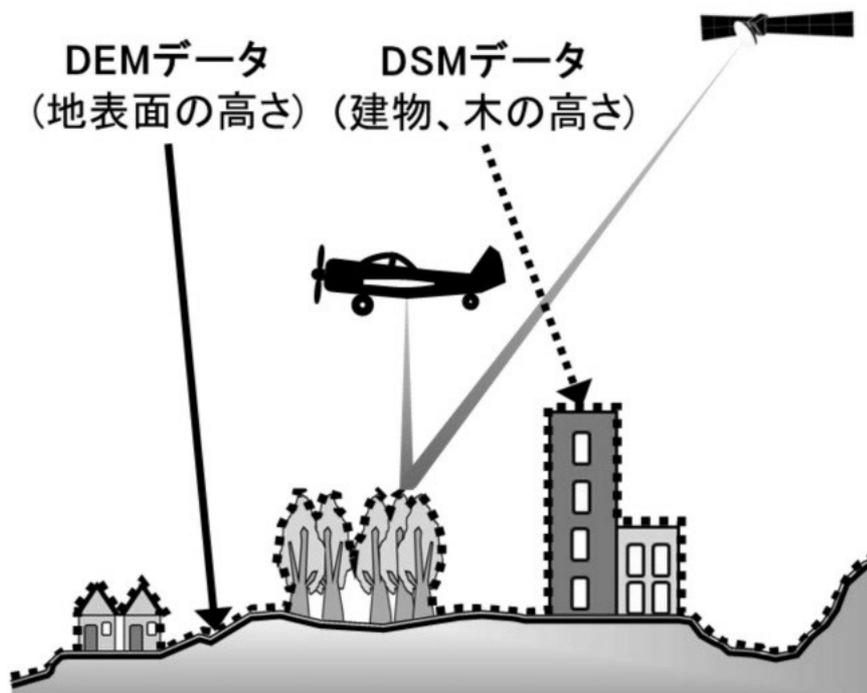


図1 リモートセンシング情報

必要になると考えられ、本システムはその計画立案そして除染後の評価に際しても重要な役割を果たせると考えている。

2. 3次元空間線量率分布解析システム (3D-ADRES) の概要

3D-ADRESは、任意の森林や市街地に対して、人工衛星や航空機等により得られるリモートセンシング情報(図1)や他の地理空間情報等を用いて、地上構造物を認識し(認識の自動化を進めている)、存立する樹木・建物等を選択し、モデル化した後、それらを地面上に配置し、放射線源をモデル上の各環境面に付与して、PHITS [25] により空間線量率分布を取得可能とする。

まず、最も主要な放射線源となるのは地面であるが、3D-ADRESでは、それを三角メッシュの地形モデルで表現し、その上に日本の典型的な建物モデルや針葉樹及び広葉樹の樹木モデルを配置する。建物モデルについては、

Furutaら [26] のモデルを用いて、現実の寸法に合わせて拡大・縮小等の処理により作成される一方、樹木モデルについてはImamuraら [20] の実測調査の結果に基づきモデルを拡大・縮小し作成する。その際、現実的なモデルを作成するため、数値標高モデル (DEM; Digital Elevation Model) に基づき地形モデルが作成された後、オルソ画像及び数値表層モデル (DSM; Digital Surface Mode) に基づき、建物や樹木の種類を選択した後、寸法の調整及び配置が半自動的に行われる。その後の ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の線源設定では、測定データに基づき、異なる環境面毎に設定する。こうして、対象地区に適した地形・建物・樹木モデルの作成及び線源の設定完了と共にPHITS用フォーマットの3次元モデルが出力され、PHITSによるガンマ線輸送モンテカルロシミュレーションが行われる。3D-ADRESを用いた計算の流れを図2に示す。

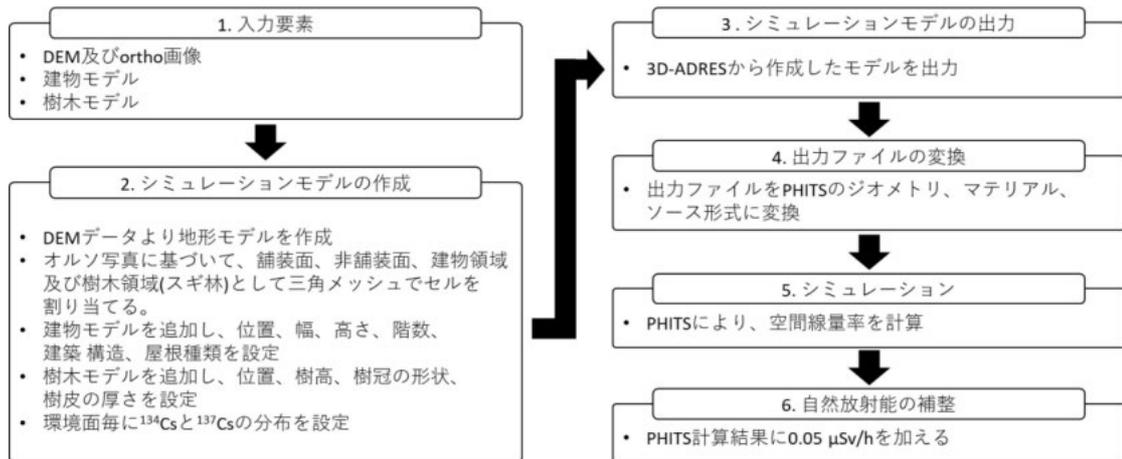


図2 3D-ADRESを用いた空間線量率分布計算の流れ



図3 計算対象地区 [27]

3. 福島県・実環境への適用評価

3.1 対象地域の選定

福島第一原子力発電所付近の帰還困難区域内で、未除染の森林や田畑が隣接した宅地とし、且つ公開測定データがある場所とした(図3参照)。選定した地区は、北方向に田畑があり、北西方向には20m程度の高さの杉から成る林がある。中央部には2階建ての木造住宅が隣接併存しており、その南方には木造平屋建ての集合住宅がある。更に、その西方向には、コンクリート住宅が、東方向には、やや広い住宅がある。この地区の平均標高は66mであり、ほぼ平坦な地形(図4(b))から成り、比較的、アスファルト道路のような舗

装面は少なく、田畑や森林などの非舗装面が全体面積の半分以上を占めているような典型的な日本(福島)の地方の住宅地である。

3.2 対象地区のモデル作成

対象地区のモデルを作成するため、RESTEC [28] 提供の空間解像度0.5mの人工衛星データを使用した(図4)。地形モデルはDEMデータ(図4(b))に基づき、10mの三角メッシュにて作成し、各地面のメッシュを土地利用毎に分け、その上に建物モデル及び樹木モデルを配置・作成した。建物及び樹木の配置や寸法・大きさ等は、オルソ画像に基づいて調整した。その様子が図4(a)に示

されている。ここで作成したモデルは、PHITSのフォーマットに変換される。作成完

了後の計算用モデルを示したのが図5である。

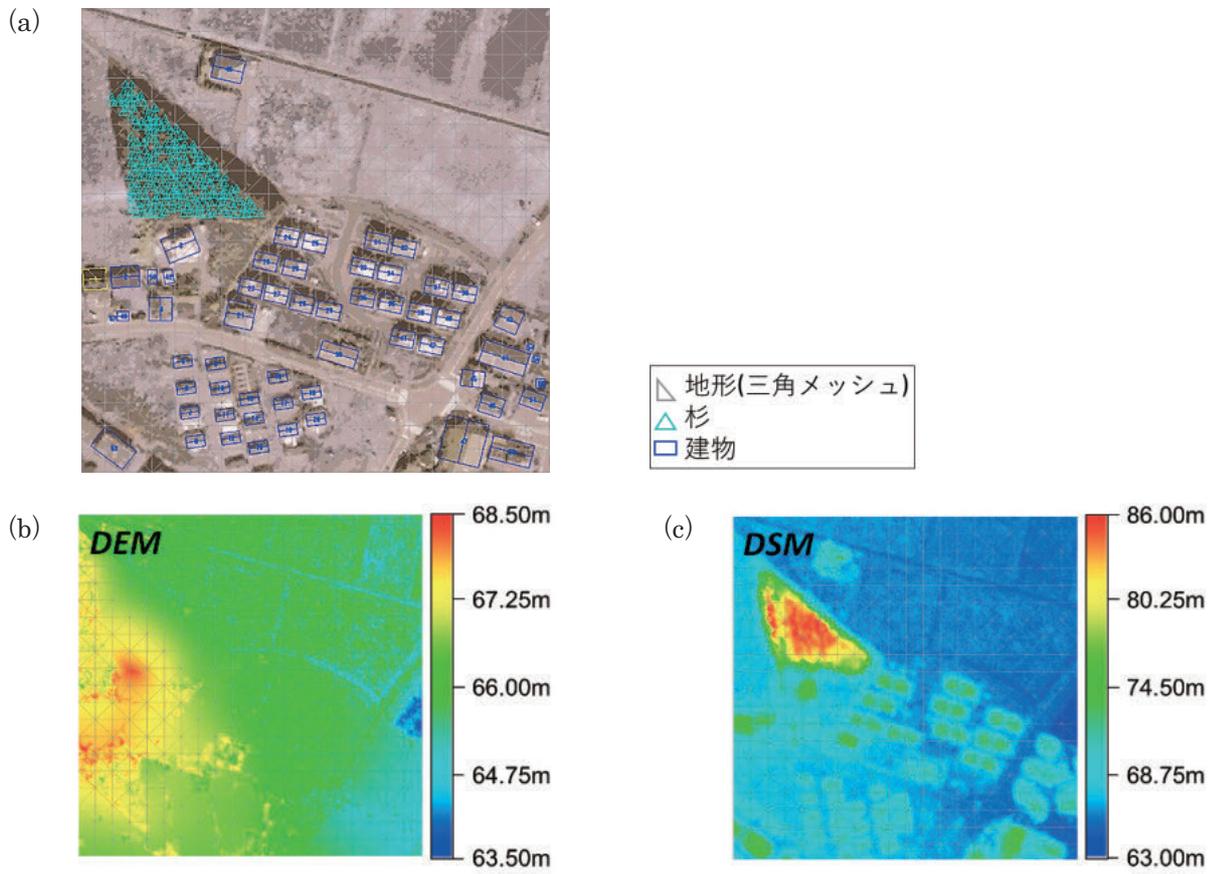


図4 対象地区のリモートセンシング情報 (a)オルソ画像 (モデルの作成様子)、(b)DEM、(c)DSM

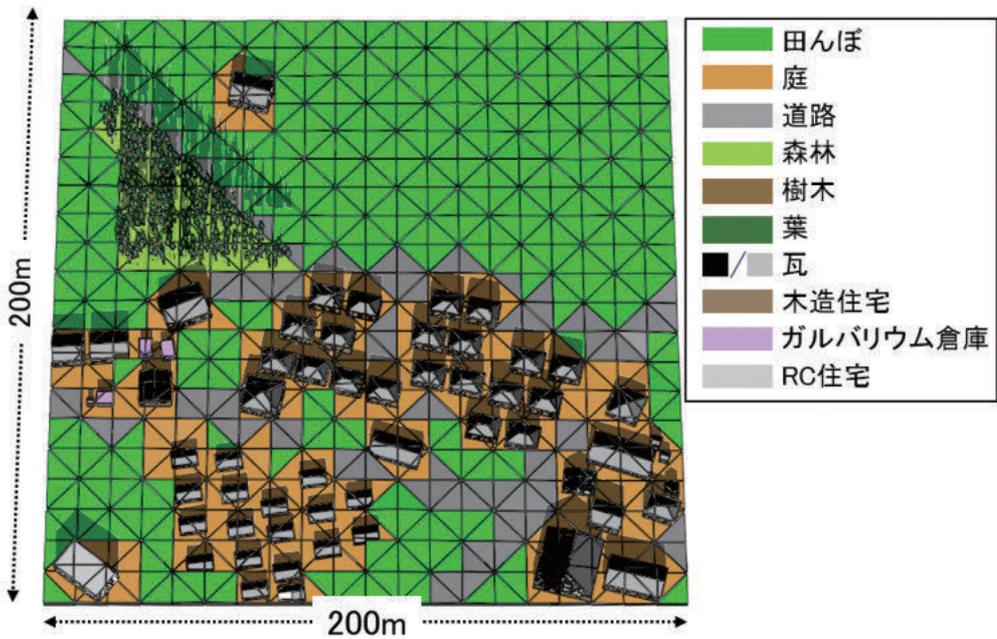


図5 対象地区のモデル作成結果

3.3 対象地区の線源設定

線源設定については、Yoshimuraらのin-situ測定により得られた測定値を基に行った [16]。3.2にて記したように、それらを土地利用区分毎に分け、土壌、建物、樹木の各々表面に一定のCs量を分布させた。その手法の詳細は以下の通りである。

- ・アスファルト道路のような舗装面は、in-situ測定により得られた測定（代表）値を基に2015年1月に減衰補正を行った値を使用した。
- ・森林や田んぼ等の非舗装面に対しては、舗装面と非舗装面との0.18 [16] 比率を採用し設定した。非舗装面の¹³⁷Csの深度分布については重量緩衝深度値として2.86g/cm² [16] とし、表面から8つの層に分画し設定した。林におけるリター及び土壌層、樹木についてはImamuraら [20] の測定値を用いて付与した。
- ・建物の外壁面・窓・屋根の¹³⁷Cs残存量については、建物外面と舗装面の比率0.012/0.18 [16] を用いて付与した。

3.4 空間線量率の計算

3D-ADRESを用いて図5のようにモデルを作成し、PHITSによるシミュレーションを実施した。その際、3つのケースを比較し、

線源分布と構造物遮蔽等の空間線量率分布に与える影響を各々調査した。ケース1は地形・建物・樹木を全てリアルなモデルで再現し、ケース2は建物と樹木による遮蔽効果を調べるため、建物・樹木を撤去し地形のみを再現し、ケース3は建物直下の土壌の非汚染効果（Un-contaminated effect）効果を調べるため、地形は再現する一方、建物直下には線源を付与したシミュレーションを実施した（表1）。計算領域は200×200mであり、地面からの高さ1mでの空間線量率を求めるため、10×10mのタリーにより計算を行った。更に開発ツールを用いてのPHITSによる計算結果が、どれぐらいの精度であるかを確認するため、ケース4として完全平坦地での単純計算を行った。

PHITSによる計算は2.67GHz・12コアのIntel Xeonを使用し、1ケース当たり凡そ18時間程かかる。計算は32百万のヒストリーとし、タリーの相対誤差は2%以下である。計算領域は200×200mとしたが、200×200mの範囲外に存在する放射性セシウムから放出されたガンマ線のシミュレートが十分に考慮できないため、計算結果から周囲を切り捨て160×160mに加工した領域にて評価を行う [9, 29]。最後に、計算結果に0.05μSv/hを加えて自然放射能の補正を行う。

表1 各ケースの説明

開発システムを用いてのPHITSによる計算					
ケース	目的	地形の再現	建物の再現	樹木の再現	建物真下の線源有無
1	現状の把握	○	○	○	×
2	建物、樹木の遮蔽効果	○	×	×	×
3	建物直下の土壌の非汚染効果	○	×	×	○
平地での単純計算					
4	計算精度の比較	×	×	×	○

4. 計算結果と考察

4.1 計算精度の確認

(1) 歩行サーベイによる測定値との比較

3D-ADRESを用いた現実環境モデル作成とPHITSを用いた計算結果を検証するため、実環境モデルでの計算即ち、ケース1のシミュレーション結果と歩行サーベイによる実際の測定結果との比較を行った。両者の相関関係を示したのが図6であり、計算結果はFactor 2の範囲内で測定値と良い一致を示した。尚、平均二乗偏差は $1.7 \mu\text{Sv/h}$ で、平均絶対誤差率は21%の結果となった。測定値と計算値がずれる主な理由としては、対象地区内の線源強度に分布がある（土地利用毎に一定と仮定した強度には不確実性がある）と考えられる。その他、3D-ADRESで用いるリモートセンシングデータの粗さとメッシュの大きさが10m間隔という点が挙げられよう。実際、この粗さで表現すると、比較的Cs濃度の高い宅地の庭のブッシュ等は表現され難しく、日本の住宅を考えると、10m単位での面の分割設定は多少粗い可能性がある。3D-ADRESでは、このような設定の解像度を調整することは可能だが、データ作成に時間がかかるというデメリットが生じてしまう。このような課題については、3D-ADRESを実際に活用し、様々な知見を蓄積することでより良い解決策を模索して行く必要がある。

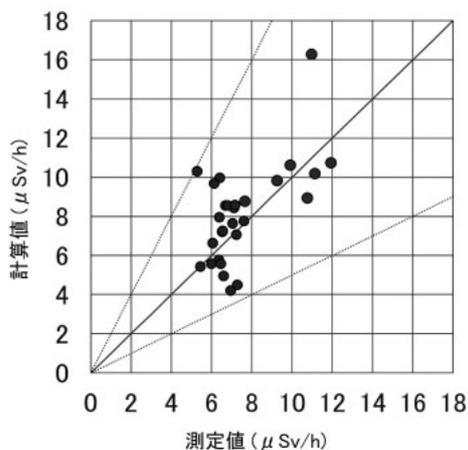


図6 計算値と測定値との比較

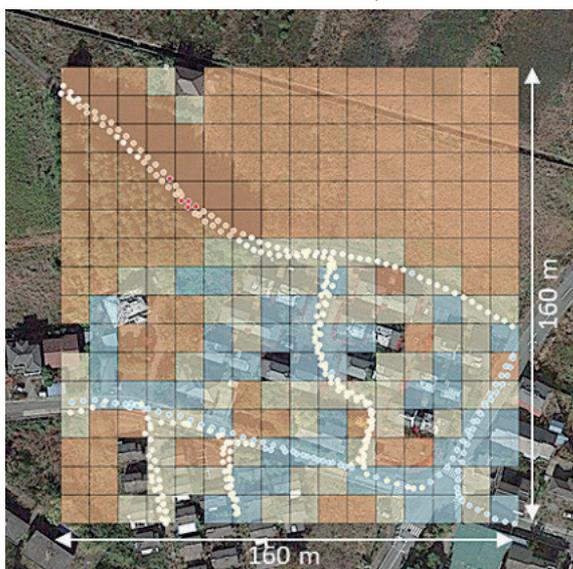
(2) 平坦地での単純計算との比較

次に対象地区において、構造物を撤去し且つ平坦地で計算を行い、ケース1（リアルなモデル）との比較を行った（図7(d)）。この結果、平坦地での単純計算では、地形効果及び建物と木による遮蔽効果を考慮した計算に比べ、72%もの空間線量率の過大評価となった。この結果から、空間線量率の計算を行う際、市街地のような複雑な実環境空間においては、明らかに線源の分布と地形・建物・樹木による遮蔽効果を考慮する計算の重要性が分かる。このように、沈着量から推定した空間線量率と実際の測定値との差は大きく、実環境における詳細な空間線量率分布を知ること、そして、実測値に対して各放射線源からの寄与率を知ることが、極めて重要であると考えられる。

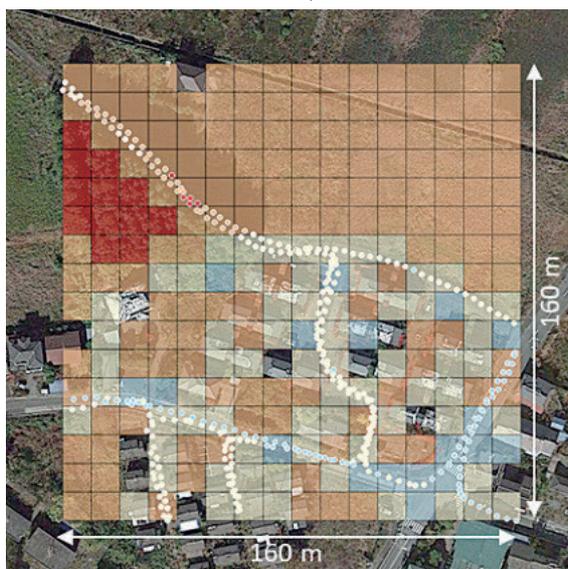
4.2 各ケースの計算結果

前述3.3の表1に記した各々のケースのシミュレーション結果のまとめを図7に示す。ケース毎に記した空間線量率は、測定点のある場所に対するシミュレーション結果の平均値で、ケース1の結果は $7.3 \mu\text{Sv/h}$ となる一方、一般に非舗装面で高く、建物が存立する近くでは低くなる傾向が見られる。また、建物と樹木による遮蔽効果を比較するために実施したケース2は $7.9 \mu\text{Sv/h}$ となり、建物と樹木がある場合に比べ、空間線量率が7.5%程増加することが分かる。これらは屋外での結果であり、建物及び樹木の近くでの差は更に大きいと考えられる。更に、ケース3の建物直下に線源を付与し、Un-contaminated効果を調べた結果は、 $8.9 \mu\text{Sv/h}$ となり、空間線量率は22%程増加することが分かった。以上、これらの差が生じることは、一般的に理解できるが、実際の差は実環境に強く依存しているため、本システム（3D-ADRES）による実地の計算が有効であることを指摘したい。

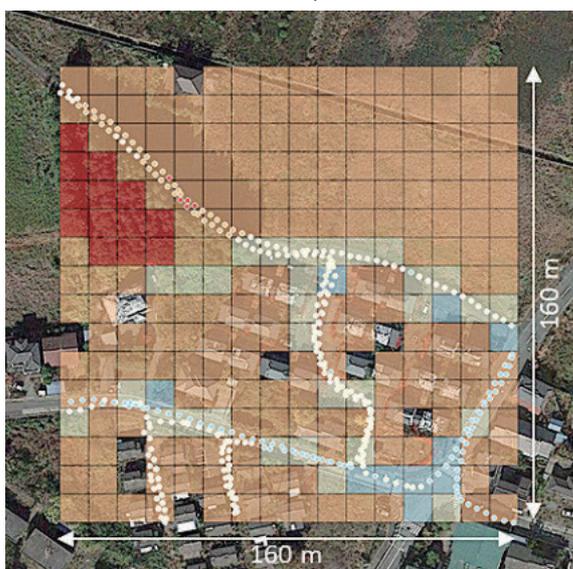
(a) ケース 1 : $7.3 \mu\text{Sv/h}$



(b) ケース 2 : $7.9 \mu\text{Sv/h}$ (+7.5%)



(c) ケース 3 : $8.9 \mu\text{Sv/h}$ (+22%)



(d) ケース 4 : $12.6 \mu\text{Sv/h}$ (+72%)

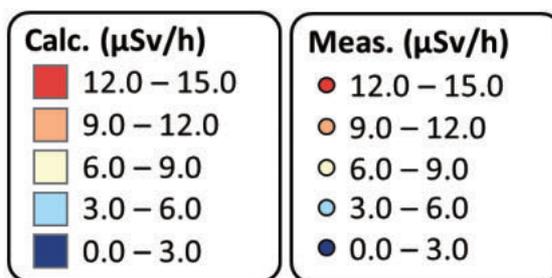


図7 各ケースの計算結果

5. まとめ

福島県内の市街地や森林等の複雑な実環境空間において、モンテカルロ計算コードPHITSを用いて空間線量率分布の計算及び評価を詳細に実施することを目標に、3次元構造物モデルの作成と放射線源を環境面に付与するシステム(3D-ADRES)を開発した。このシステムの特徴としては、現地の地形・建物・樹木等の環境をリモートセンシング情報や他の地理情報に基づきリアルなモデルとして再現できること、更にモデル上の異なる環境面にて、異なるCs線源分布が付与可能であり、 ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の線源分布が場所毎に詳細設定が可能である(均一に付与することも、もちろん可)。従って、3D-ADRESを活用すると、以下の評価が実施できる。

- ①現実の実環境中の複雑な構造物の3次元モデルを通して、実際の構造物による遮蔽効果
- ②地面(非舗装面や舗装面)や構造物の様々な面等、異なる各環境面に沈着した放射性セシウムからの空間線量率に対する相対的な寄与率
- ③環境中での異なる各環境面に沈着した放射線源分布の経時変化を考慮することで、空間線量率分布の将来予測と各面の寄与率の経時変化

以上、本記事では、3D-ADRESを福島第一原子力発電所の付近の帰還困難区域に適用し、地形・樹木・建物をモデル化し、各面線源を入力した後、3次元モデルでの空間線量率の計算が有効に機能することを確認した。実際、PHITSによる空間線量率の計算値と測定値を比較した所、凡そ良い一致が得られたが、被ばく評価のためには、更なる誤差の低減が求められる。その一方、各環境面からの放射線源が空間線量率分布に与える影響を詳細に取得可能であることが示されたことは、外部被ばく評価や除染計画の立案など、様々

な場面での活用が期待できる。

今後は、広域計算を目指して建物、樹木などの構造物の自動認識及び作成機能を強化し、モデル作成を迅速化するための開発作業を加速する一方、更なる空間線量率分布の知見(特に放射性核種の分布の経時変化を反映した場合に得られる知見)を取得することで、空間線量率分布の将来予測も目指していく。また、住民の被ばく評価や除染計画の立案・評価に役立てる等、更なる利活用を目指して計算例を増やすと同時に得られる知見をまとめ、マニュアル類等の整備も併せて進めたい。現時点では未公開であるが、システムの利活用その他については、3D-ADRES@jaea.go.jpによる問い合わせを受けている。

謝辞

本開発システム評価のため、福島実環境への適用においては、福島県大熊町より使用許可をいただきました。ここに関係者に深く感謝致します。一般財団法人リモート・センシング技術センターよりリモートセンシングデータ(当該地の人工衛星データとその利活用方法)を提供いただきました。ここに感謝致します。原子力機構・福島環境安全センターの吉村和也氏からは、線量率の測定データをいただきました。ここに感謝致します。更に原子力緊急時支援・研修センターの斎藤公明氏、原子力機構・福島環境安全センターの宮原要センター長、飯島和毅氏、眞田幸尚氏、新里忠史氏、操上広志氏には、研究開発に当り、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、モデル作成・シミュレーションに当たり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は感謝いたします(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江角亜矢子氏の支援に感謝致します)。最後

にPHITS活用にはRISTの仁井田浩二氏に感謝致します。

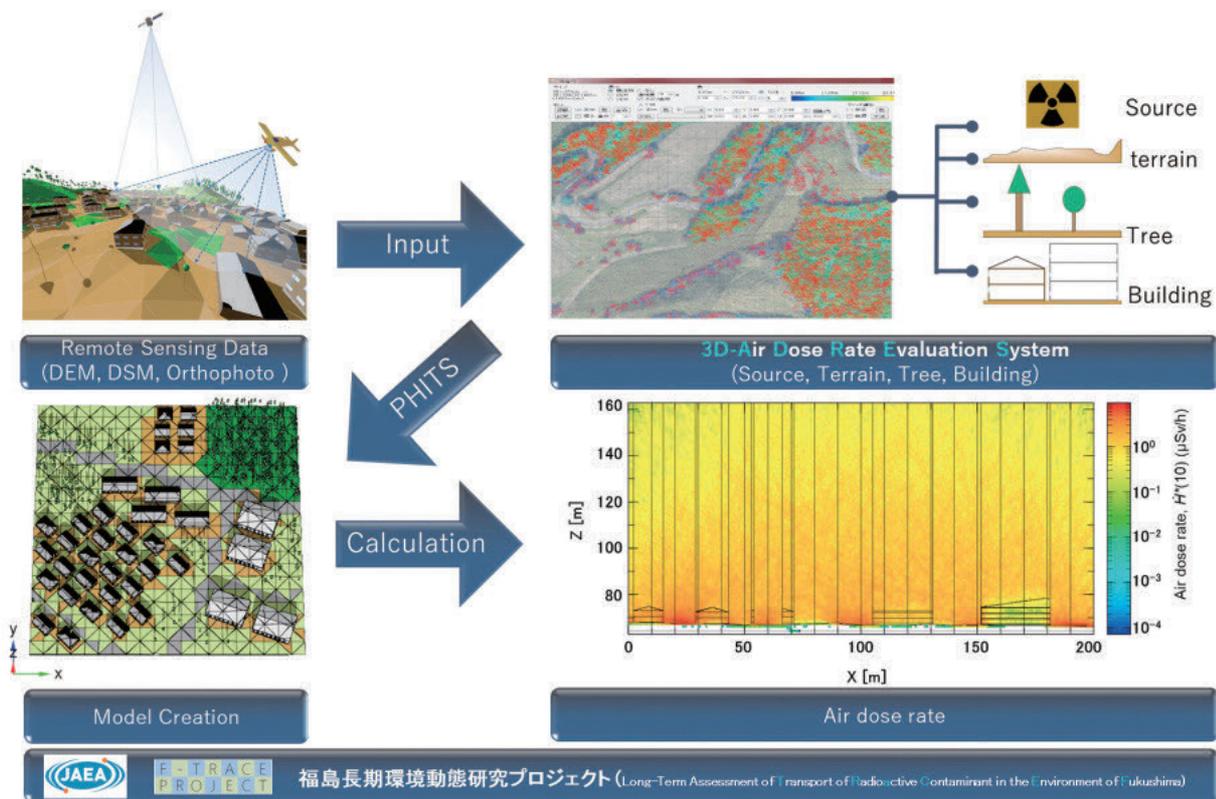
参考文献

- [1] Saito, K., Onda, Y., 2015. Outline of the national mapping projects implemented after the Fukushima accident. *J. Environ. Radioact.* 139, 240-249. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2014.10.009
- [2] Saito, K., Petoussi-Henss, N., 2014. Ambient dose equivalent conversion coefficients for radionuclides exponentially distributed in the ground. *J. Nucl. Sci. Technol.* 51, 1274-1287. DOI:10.1080/00223131
- [3] 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., 2015. 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. DOI:10.1016/j.jenvrad.2014.05.014
- [4] 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 Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant: its spatial characteristics and temporal changes until December 2012. *J. Environ. Radioact.* 139, 250-259. DOI:10.1016/j.jenvrad.2014.08.020
- [5] Jacob, P., Meckbach, R., 1987. Shielding Factors and External Dose Evaluation. *Rad. Prot. Dosim.* 21, 79-85. DOI:10.1093/oxfordjournals.rpd.a080057
- [6] ICRU, 1994. Gamma-ray spectrometry in the environment. ICRU Report 53.
- [7] Furuta, T., Takahashi, F., 2015. Study of radiation dose reduction of buildings of different sizes and materials. *J. Nucl. Sci. Technol.* 52, 897-904. DOI:10.1080/00223131.2014.990939
- [8] Malins, A., Okumura, M., Machida, M., Saito, K., 2015. Topographic Effects on Ambient Dose Equivalent Rates from Radiocesium Fallout. In *Proceedings of M&C + SNA + MC 2015*. arXiv:1502.03892v3
- [9] Malins, A., Kurikami, H., Nakama, S., Saito, T., Okumura, M., Machida, M., 2016. Evaluation of ambient dose equivalent rates influenced by vertical and horizontal distribution of radioactive cesium in soil in Fukushima Prefecture. *J. Environ. Radioact.* 151, 38-49. DOI:10.1016/j.jenvrad.2015.09.014
- [10] Gonze, M.A., Mourlon, C., Calmon, P., Manach, E., Debayle, C., Baccou, J., 2016. Modelling the dynamics of ambient dose rates induced by radiocesium in the Fukushima terrestrial environment. *J. Environ. Radioact.* 161, 22-34. DOI:10.1016/j.jenvrad.2015.06.003
- [11] Ishizaki, A., Sanada, Y., Ishida, M., Munakata, M., 2017. Application of topographical source model for air dose rates conversions in aerial radiation monitoring. *J. Environ. Radioact.* 180, 82-89. DOI:10.1016/j.jenvrad.2017.09.028

- [12] Tyler, A.N., Sanderson, D.C.W., Scott, E.M., Allyson, J.D., 1996. Accounting for spatial variability and fields of view in environmental gamma ray spectrometry. *J. Environ. Radioact.* 33, 213-235. DOI:10.1016/0265-931X(95)00097-T
- [13] Mishra, S., Sahoo, S.K., Arae, H., Sorimachi, A., Hosoda, M., Tokonami, S., Ishikawa, T., 2015. Variability of radiocaesium inventory in Fukushima soil cores from one site measured at different times. *Radiat. Prot. Dosim.* 167,344-347. DOI:10.1093/rpd/ncv276
- [14] Evrard, O., Laceby, J.P., Lepage, H., Onda, Y., Cerdan, O., Ayrault, S., 2015. Radiocaesium transfer from hillslopes to the Pacific Ocean after the Fukushima nuclear power plant accident: a review. *J. Environ. Radioact.* 148, 92-110. DOI:10.1016/j.jenvrad.2015.06.018
- [15] Akimoto, K., 2015. Extreme variations of air dose rates in east Fukushima. *Radiat. Prot. Dosim.* 167,336-339. DOI:10.1093/rpd/ncv274
- [16] Yoshimura, K., Saito, K., Fujiwara, K., 2017. Distribution of ^{137}Cs on components in urban area four years after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. *J. Environ. Radioact.* 178-179, 48-54. DOI:10.1016/j.jenvrad.2017.07.021
- [17] Matsuda, N., Mikami, S., Sato, T., Saito, K., 2017. Measurements of air dose rates in and around houses in the Fukushima Prefecture in Japan after the Fukushima accident. *J. Environ. Radioact.* 166, 427-435. DOI:10.1016/j.jenvrad.2016.03.012
- [18] Yoshida-Ohuchi, H., Matsuda, N., Saito, K., 2018. Review of reduction factors by buildings for gamma radiation from radiocaesium deposited on the ground due to fallout. *J. Environ. Radioact.* 187, 32-39. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2018.02.006
- [19] Gonze, M.A., Calmon, P., 2017. Meta-analysis of radiocaesium contamination data in Japanese forest trees over the period 2011-2013. *Sci. Total Environ.* 601-602, 301-316. DOI:10.1016/j.jenvrad.2017.11.021
- [20] Imamura, N., Komatsu, M., Ohashi, S., Hashimoto, S., Kajimoto, T., Kaneko S., Takano, T., 2017. Temporal changes in the radiocaesium distribution in forests over the five years after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Sci. Rep.* 7, 8179. DOI:10.1038/s41598-017-08261-x
- [21] Kis Z., Eged, K., Voigt, G., Meckbach, R., Muller, H., 2004. Modeling of an industrial environment: external dose calculations based on Monte Carlo simulations of photon transport. *Health Phys.* 86, 161-173.
- [22] Eged, K., Kis, Z., Voigt, G., 2006. Review of dynamical models for external dose calculations based on Monte Carlo simulations in urbanised areas. *J. Environ. Radioact.* 85, 330-343. DOI:10.1016/j.jenvrad.2004.04.015
- [23] Kramer, K., Li, A., Madrigal, J., Sanchez, B., Millage, K., 2013. Monte Carlo Modeling of the Initial Radiation Emitted by a Nuclear

- Device in the National Capital Region. DTRA-TR-13-045. <http://www.dtic.mil/docs/citations/ADA588161> (accessed 09.22.17)
- [24] Li, A., Lekoudis, G., Mosher, S., Evans, T., Johnson, S., 2015. Dose Estimation for Complex Urban Environments Using RUGUD, SWORD, ADVANTG and Denovo. Proceedings of M&C + SNA + MC 2015.
- [25] Sato, T., Iwamoto, Y., Hashimoto, S., Ogawa, T., Furuta, T., Abe, S., Kai, T., Tsai, P., Matsuda, N., Iwase, H., Shigyo, N., Sihver, L., Niita, K., Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02, *J. Nucl. Sci. Technol.*, 2018, <https://doi.org/10.1080/00223131.2017.1419890>
- [26] Furuta, T., Takahashi, F., 2015. Study of radiation dose reduction of buildings of different sizes and materials. *J. Nucl. Sci. Technol.* 52, 897-904. DOI:10.1080/00223131.2014.90939
- [27] Google, 2017. Street View function of Google Maps. URL:<https://www.google.co.jp/maps/>(accessed:11.14.17)
- [28] RESTEC, 2017. Remote Sensing Technology Center of Japan: Ortho and Topographic Data. <https://www.restec.or.jp/en/> (accessed: 11.14.17)
- [29] Malins, A., Okumura, M., Machida, M., Takemiya, H., Saito, K., 2015. Fields of View for Environmental Radioactivity. In Proceedings of the International Symposium on Radiological Issues for Fukushima's Revitalized Future. arXiv:1509.09125v2
- [30] Sakuma, K., Niizato, T., Kim, M., Malins, A., Machida, M., Yoshimura, K., Kurikami, H., Kitamura, A., Hosomi, M., 2018 accepted. Development of the evaluation tool for air dose rate in forest using Monte Carlo radiation transport code (PHITS). *J. Soc. Remediation Radioact. Contamin. Environ.* (in Japanese).
- [31] Cresswell, A.J., Sanderson, D.C.W., Yamaguchi, K., 2018. Assessment of the calibration of gamma spectrometry systems in forest environments. *J. Environ. Radioact.* 181, 70-77. DOI:10.1016/j.jenvrad.2017.10.019
- [32] Kim, M., Malins, A., Yoshimura, K., Sakuma, K., Kurikami, K., Kitamura, A., Machida, M., Hasegawa, Y., Yanagi, H., 2018. Simulation study of the effects of buildings and trees on ambient dose equivalent rates outdoors at three suburban sites near Fukushima Dai-ichi. *J. Environ. Radioact.* (Under Review).

付録：3次元空間線量率分布解析システム (3D-Air Dose Rate Evaluation System)



3次元空間線量率分布解析システム (3D-ADRES)：市街地や森林等において数値標高データ (DEM)・数値表層データ (DSM)・オルソ画像データから地形、樹木、建物のパーツを生成してPHITSを用いたモンテカルロシミュレーションを行い、空間線量率を評価する。