

環境中空間線量率 3次元分布計算システム (3D-ADRES) の研究開発 —PHITS とリモートセンシングの融合による環境放射線量の推定—

金 敏植*¹, Alex Malins*¹, 佐久間一幸*², 北村 哲浩*², 町田 昌彦*¹,
長谷川幸弘*³, 柳 秀明*³

Kim Minsik, Alex Malins, Sakuma Kazuyuki, Kitamura Akihiro, Machida Masahiko, Hasegawa Yukihiko, Yanagi Hideaki

1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所（福島第一原発）事故により放出された放射性物質の一部は陸域へと沈着し、空間線量率が顕著に増大した地域が現れ、多くの住民が避難する事態となった。しかし、その後実施された除染や環境中での放射性物質の移動により、空間線量率は多くの地点で放射性物質（主に¹³⁴Cs及び¹³⁷Cs）の物理半減期より速く減衰している¹⁾。こうして、福島第一原発事故以降、環境に放出された放射性物質の動態が重要課題となり、詳細に調査分析されてきた一方、放射線による住民の被ばくを適正（正確）に評価するという課題も存在し、様々な研究が行われてきた。本稿では、上記課題に対し、放射線源の分布情報を基に複雑な環境中での空間線量率の3次元分布を明らかにするという目的の下、著者らが取り組んできた研究開発成果の一端を紹介する。

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を知ることは、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重要な情報源となる。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、それを更に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極めて困難な課題と考えられてきた。しかし、その課題の社会的重要性から、著者らは市街地や森林等の複雑な地形・樹木・建物等を可能な限りリアルにモデル化し、不均質な放射性セシウムの線源分布情報を取り込む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）の研究開発に取り組んできた²⁾。

3D-ADRES（現在も開発継続中）では、人工衛星等のリモートセンシング（**図1**参照）により得られる種々の地理情報を活用し、地形・構造物を認識（一部自動化）した後、作成したモデルを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³⁾、 γ 線輸送計算が実施され詳細な空間線量率の3次元分布が取得可能となる。本稿ではその研究開発の概略を報告した後、実環境（福島）への適用計算例を示し、精度向上に向けた課題と今後の開発の方向性について記す。

2. 3D-ADRES の概要

環境中、最も主要な放射線源となるのは地面だが、3D-ADRES ではそれを三角格子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。建物モデルは Furuta ら⁴⁾のモデルを用い、現実の寸法情報に合わせて拡大・縮小等の処理によりモデル化する一方、

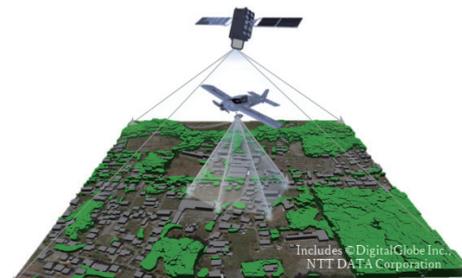


図1 リモートセンシング（人工衛星等）情報の活用（地表面や地物の高さ及び構造物の情報等を取得）

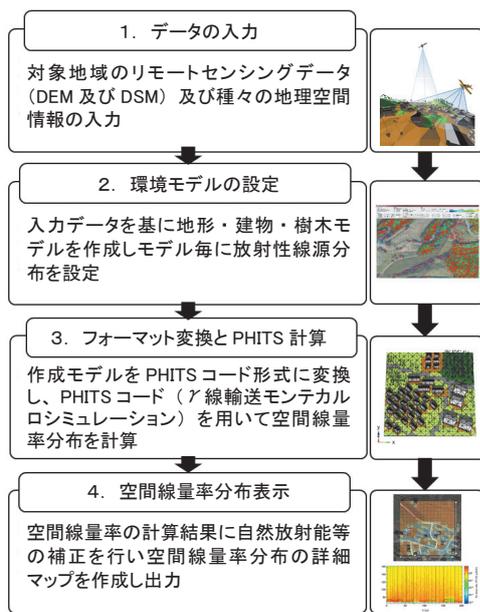


図2 3D-ADRESの処理(計算)の流れ

樹木モデルは Imamura ら⁵⁾の実測調査結果に基づきモデルを拡大・縮小し作成する。その際、数値標高モデル (DEM; Digital Elevation Model) より地形モデルを作成した後、オルソ画像及び数値表層モデル (DSM; Digital Surface Model) より、建物や樹木の種類を選択し寸法の調整及び配置を半自動的に行う。その後の¹³⁴Cs及び¹³⁷Csの線源設定では、測定データと環境面分布情報に基づき異なる環境面毎に各々設定する。こうして、対象とする地区に即した地形・建物・樹木モデルの作成と線源分布設定の後、PHITS用フォーマットの3次元モデルが出力され、PHITSによる γ 線輸送モンテカルロシミュレーションを通して空間線量率の3次元分布が得られる(3D-ADRESを用いた計算の流れは図2参照)。

3. 福島県実環境(帰還困難区域一地点)への適用

本節では開発した3D-ADRESを福島県の実環境に適用し、その性能及び精度について検証分析した結果を報告する。対象地区は福島第一原発付近の帰還困難区域内の未除染の一地区で、森林や田畑が隣接した宅地(図3参照)とし、かつ測定データがある場所とした。なお、選定した地区の北方向には田畑があり、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、その南方に木造平屋建ての集合住宅があ

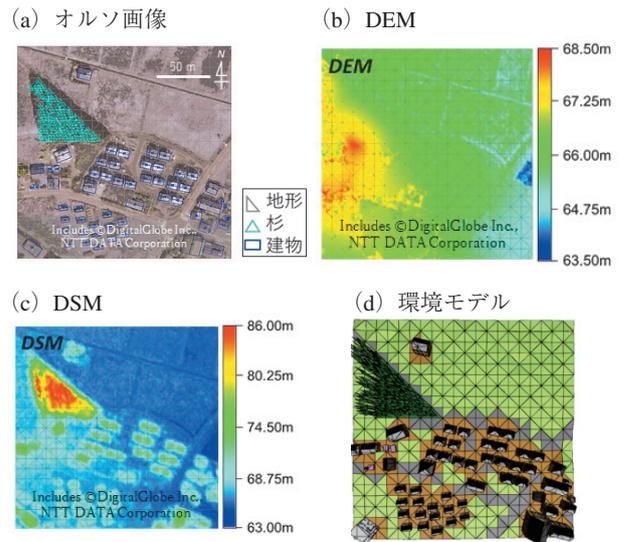


図3 対象地区のリモートセンシング情報

る。更にその西方向にはコンクリート住宅、東方向にはやや広い住宅がある。なお、この地区の平均標高は66mであり、ほぼ平坦な地形(図3(a))で、アスファルト道路のような舗装面は少なく、田畑や森林等の非舗装面が全面積の半分以上を占める典型的な日本の地方住宅地である。対象地区のモデルを作成するため、RESTEC⁶⁾提供の空間解像度0.5mの人工衛星データを使用した(図3(a)-(c)参照)。地形モデルは、そのDEMデータ(図3(b))により10mの三角格子を用いて作成し、各格子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DSMデータ(図3(c))とオルソ画像(図3(a))に基づき調整した。作成したモデルは図3(d)に示した。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結果を基に行った⁷⁾。地表面・建物・樹木の各々の表面に対し一定の面密度でCsを分布させるが、その設定方法の詳細は以下のとおりである。

- ・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。
- ・森林や田畑等の非舗装面は舗装面と非舗装面との比率(0.18⁷⁾)を採用し設定。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/cm²⁷⁾とし、表面から8つの層に分画し設定。森林におけるリター及び土壌層、樹木についてはImamuraら⁵⁾の測定値を用いて付与。

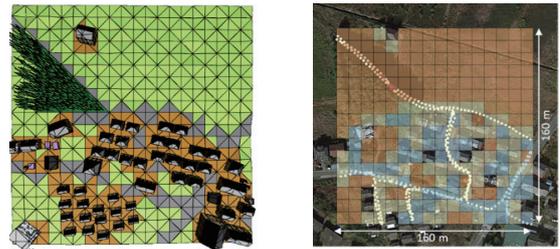
・建物の外壁面・窓・屋根の¹³⁷Cs残存量は建物外面と舗装面の比率0.012/0.18⁷⁾を用い付与。

以上、3D-ADRESによりモデル(図3(d))が作成され、線源が各面に付与された後、PHITSによるシミュレーションが実施される。その際、シミュレーションの利点(任意の仮想モデルの構築)を活かして3つの比較用仮想ケース(図4(b)-(d)参照)を作成し、線源分布と地上構造物による遮蔽等が空間線量率に与える影響を各々調査した。図4(a)ケース1はリアルな実環境モデル、(b)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、(c)ケース3は建物直下の土壌の非汚染の効果(Un-contaminated effect)を調べるため地形は再現する一方、建物直下にも線源を付与、(d)ケース4は完全平坦地とした。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。PHITSによる計算には2.67GHz・12コアのIntel Xeonを使用し1ケースあたりおよそ18時間程度かかる。計算は32百万のヒストリーとし、タリーの相対誤差は2%以下となる。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るγ線の影響を十分に反映できないため、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った⁸⁾。最後に計算結果に0.05μSv/hを加え自然放射能の補正を行った。

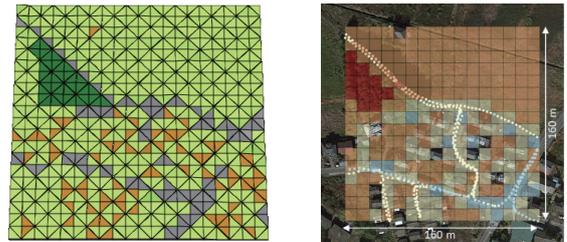
4. 適用計算結果の評価(実測値との比較検証)

3D-ADRES作成の実環境モデルでの計算(ケース1)結果と歩行サーベイによる測定結果(図4右図内の連続する点)との比較を行った。両者の相関関係を図5に示したが、計算結果はFactor 2の範囲内で測定値と良い一致を示した。なお、平均二乗偏差は1.7μSv/hで平均絶対誤差は21%となった。測定値と計算値のずれの主な理由としては、対象地区内の線源強度の不均質な分布が考えられる(モデルでは簡単のため、土地利用区分毎に一定強度を付与)。その他、3D-ADRESで用いる格子が10m間隔という点も挙げられる。実際、この解像度で表現すると比較的Cs濃度の高い宅地の庭の茂み等の表現は困難となる。日本の住宅を考えると、10m単位での分割設定は多少粗い可能性がある。しかし、

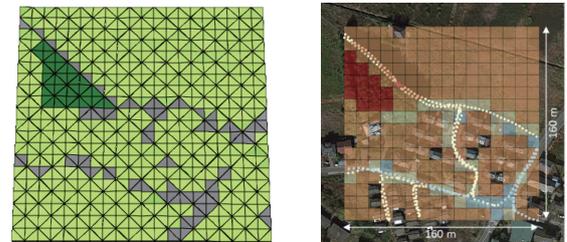
(a) ケース1 (対象地区実環境モデル)



(b) ケース2 (建物・樹木の除去)



(c) ケース3 (家屋直下の土壌汚染の追加)



(d) ケース4 (線源分布が一般的な平地での単純計算)

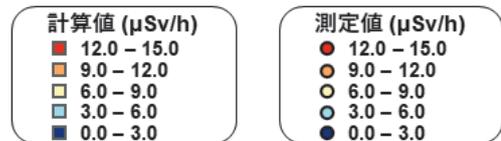
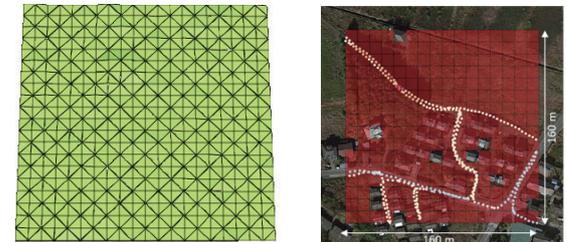


図4 モデル間比較評価(左:各モデル,右:点は歩行サーベイ観測点。点の色は測定された空間線量率,格子上的色は計算された空間線量率)

解像度を上げると詳細な分布情報が必要となり設定にも時間がかかるだけでなく、結果の分析も相当に複雑となる。こうした課題については今後、適用例を増やし様々な知見を取得することで最適な解決策を見出したい。次に仮想ケースとの比較評価を行った(図4参照)。測定点での空間線量率の平均値はケース1で7.37μSv/hだが、建物と樹木を除去し

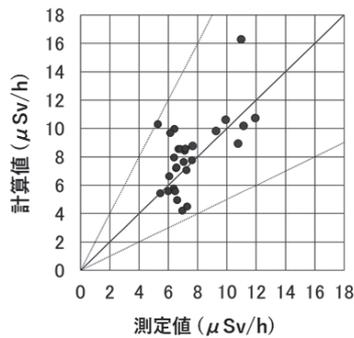


図5 空間線量率の計算値と測定値の比較

たケース2では、7.9 $\mu\text{Sv/h}$ となり、建物と樹木がある場合に比べ、空間線量率は7.5%程増加する。なお、建物及び樹木の近くでこの差は更に大きいことを指摘する。次のケース3（建物直下にも線源を付与）では8.9 $\mu\text{Sv/h}$ となり空間線量率は22%も増加する他、完全平坦地としたケース4では12.6 $\mu\text{Sv/h}$ となり、ケース1と比較すれば72%も空間線量率が過大評価となった。これらの結果から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重要性が分かる。また、これらのケース間において大きな差が生じることは容易に想像できるが、実際の差（値の違いとその分布）は実環境条件に強く依存するため、本システム（3D-ADRES）による計算は極めて有用であることが分かる。

5. まとめと今後の展望

福島県内の市街地や森林等の複雑な実環境空間に対して、詳細な空間線量率の3次元分布を計算可能とする3D-ADRESを開発した。本システムでは、地形・建物・樹木等の環境中の複雑な構造物をリモートセンシング情報（地理情報）に基づきモデル化し、モデル上の様々な環境面に異なるCs線源分布が付与可能である（ ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の線源分布が詳細に設定可能）。こうして、3D-ADRESを活用すると、以下の評価が実施可能となる。

- ①現実の環境中の複雑な構造物の3次元モデルを用いて実環境中の構造物による遮蔽効果の検証。
- ②任意の地点の空間線量率に対して、地面（非舗装面や舗装面）や構造物の様々な面に沈着した放射性セシウムが及ぼす相対的寄与率。
- ③環境中の異なる各環境面に沈着した放射線源の経

時変化情報を反映させることで空間線量率分布の将来予測。

実際、本稿では3D-ADRESを福島第一原発付近の帰還困難区域の住宅地に適用し、空間線量率分布の計算が有効に機能すること（空間線量率の計算値と測定値の比較からおよそ良い一致・図5参照）を検証した。その結果、更なる誤差低減に向けた課題が明らかとなった一方、各環境面の放射線源が空間線量率分布に与える影響を詳細に分析可能であることを示したことは、外部被ばく評価や除染計画の立案等、様々な場面での活用が期待できる。今後はより広域の計算を目指して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。また、各面に分布する線源分布情報等を更に詳しく取得しモデル化に反映したい。更に、本システムは空間線量率分布の将来予測にも利用可能であり、各面線源の経時変化情報の取り込みによる将来予測は極めて興味深い（線量率経時変化の環境依存性が分かる）。なお、本システムは現時点で未公開だが、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常時受け付けており、著者一同、社会的課題の解決に貢献するシステムとして、その役割を果たしていきたいと考えている。本稿執筆に際し、森林総研、原子力機構・福島研究開発部門、システム計算科学センター各位の支援に感謝する。

参考文献

- 1) Andoh, M., et al., *J. Environ. Radioact.*, **192**, 385-398 (2018)
- 2) Kim, et al., *J. Environ. Radioact.*, *In Press*, (2018)
- 3) Sato, T., et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, **55**, 684-690, (2018)
- 4) Furuta, T., Takahashi, F., *J. Nucl. Sci. Technol.*, **52**, 897-904, (2015)
- 5) Imamura, N., et al., *Sci. Rep.*, **7**, 8179 (2017)
- 6) RESTEC, リモート・センシング技術センター, <https://www.restec.or.jp/>
- 7) Yoshimura, K., et al., *J. Environ. Radioact.*, **178-179**, 48-54 (2017)
- 8) Malins, A., et al., *J. Environ. Radioact.*, **151**, 38-49 (2016)

(*1(国研)日本原子力研究開発機構システム計算科学センター, *2同福島環境安全センター, *3(一財)高度情報科学技術研究機構)