

環境修復に向けた除染作業を支援する 除染効果評価システム CDE の開発 — 除染作業の効果を視覚的に表現するソフトウェア —

佐藤 大樹
Satoh Daiki

1. はじめに

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う東京電力(株)福島第一原子力発電所の事故により、大量の放射性物質が環境中に放出された。これらは広範囲にわたって土壌表面に沈着し、地表面近傍における空間線量率を上昇させている。これを受け政府は、福島第一原子力発電所の半径 20 km 以内を警戒区域及び 1 年間の積算線量が 20 mSv を超える可能性がある半径 20 km 以遠の地域を計画的避難区域と設定し、住民の避難、退去を進めた¹⁾。現在、当該区域内に居住していた方々は、避難地において不便で不安な生活を強いられている。空間線量率の低減をはじめとした安全性の確保に基づく避難解除²⁾と、その後の住民帰還及び復興のためには、汚染環境に対する効率的な除染作業の実施が喫緊の課題である。

独立行政法人日本原子力研究開発機構(JAEA)の原子力基礎工学研究部門では、放射性物質による汚染環境の修復に向けた除染計画の立案に資するため、想定した区画での除染作業前後における空間線量率の計算から除染効果を評価するソフトウェア CDE (Calculation system for Decontamination Effect) を開発した。CDE は、JAEA のホームページ上で平成 23 年 11 月 2 日から公開されており、登録ユーザーに対して無償提供される³⁾。除染作業において限られた予算から最大限の効果を上げるためには、除染対象地域ごとに最適化された除染計画が必要になる。CDE は、独自の線量推定アル

ゴリズムに基づき除染効果を評価し、除染対象地域の地図上にその効果を可視化して表示することで、効率的な計画の立案を支援する。本稿では、CDE の概要及び線量評価手法を紹介するとともに、モデル地域を対象とした精度検証の結果を示す。また、平成 24 年 1 月時点における CDE の利用状況についても報告する。

2. 除染効果評価システム CDE の概要

1) 開発の目的

CDE は、学校等の公共施設、民家、農地又は森林等を含む広範囲な領域を対象とした除染作業の方法や手順の検討を支援する目的で開発された。この目的のため、CDE は以下の点に留意して設計されている。

- ①使い勝手を重視し、汎用の表計算ソフトである Microsoft® Excel® 上で動作する
- ②グラフィカル・ユーザー・インターフェース (GUI) を備え、操作の大部分をマウスによって実行する
- ③入力データには、ユーザーがインターネットなどを介して容易に入手可能な情報を採用する
- ④1 回の評価計算は数秒程度で完了する
- ⑤評価結果は可視化され、除染の効果を視覚的に捉えられるようにする
- ⑥計算精度は、学術分野で利用されている放射線の挙動を精密に解析するプログラムと同程度にする

GUI を含めたソフトウェア本体は、Microsoft®

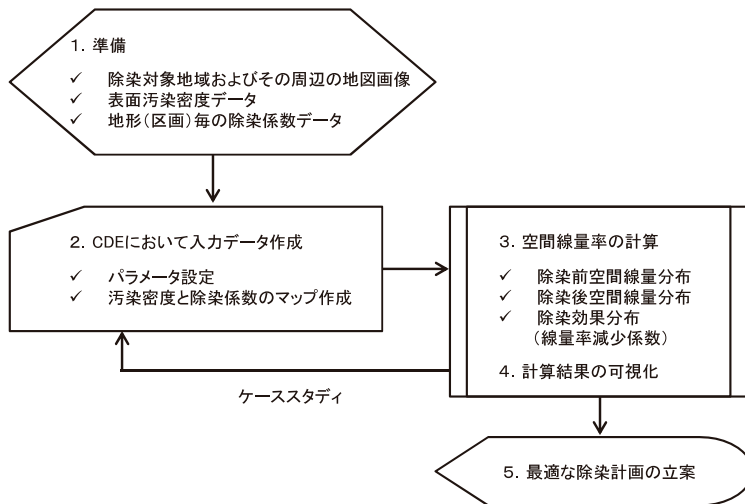


図1 CDEを利用した除染計画の検討の流れ

Excel®のマクロであるVBA (Visual Basic for Applications) で記述された。ファイルの保存や数値のコピーなどの基本操作はExcelの機能を使用するので、実際に除染計画の立案に携わる人々にとってExcelの使用経験があれば、馴染みのある操作で利用できる。線量計算部分のプログラムは、計算を高速で行うためFortranで作られた。ソフトウェアはソースコードも含め無償で公開されており、利用規約への合意の下で改変及び再配布が可能である³⁾。

このソフトウェアを使用することにより、目標とする値まで空間線量率を低減するために必要な除染の範囲や放射性物質の除去割合について、様々なケーススタディを短期間に行うことができる。

2) 計算の流れ

CDEは、除染対象地域（一部の周囲の非除染領域も含む）の地図上に設定したメッシュに対して入力した表面汚染密度と除染係数から、除染前後の空間線量率及び線量率減少係数をメッシュごとに計算して表示する。ここで、空間線量率は地表1 m高さにおける周辺線量当量 $H^*(10)$ を表す。図1にCDEを使った除染計画の検討の流れを示す。

事前準備として、除染対象地域及びその周辺の地図画像、表面汚染密度データ及び除染係数データを用意する。これらすべての情報は、インターネットを介して比較的容易に入手可能である。地図画像は、市販の電子地図データはもちろん、Google Maps™のようなインターネット上の地図サービスも利用できる^{*1}。表面汚染密度は $[Bq/cm^2]$ 単位で与えられ、文部科学省が行った航空機モニタリングの結果⁴⁾が利用できる。また、除染対象地域においてサーベイメータを用いて測定した1 cm高さ及び1 m高さの空間線量率 $[\mu Sv/h]$ も、表面汚染密度の入力値として利用可能であり、空間線量率から表面汚染密度への換算はプログラム内で行われる。除染係数は、汚染の原因となっている放射性物質が除去される割合を示す指標であり、除染作業において採用した除染技術に依存する。CDEでは、典型的な除染技術に対応した除染係数の値を内蔵しているほか、日本原子力学会クリーンアップ分科会で検討され公開されている値⁵⁾を直接入力することもできる。

*1 利用に当たっては各サービスの定める利用規約への準拠を要する。

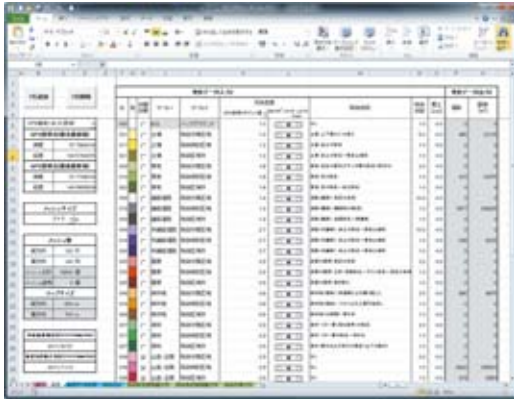


図2 パラメータの設定画面



図3 地形データ分布の作成画面

CDEにおける入力パラメータの設定画面を図2に示す。ここで、地形ごとに与えられた表面汚染密度と除染係数の組に対して、ID番号とID色を割り振る。CDEに取り込んだ地図画像上に設定したメッシュをID色で塗ることにより、除染対象地域における汚染密度と除染係数のマップを作成する。図3にマップ作成画面の例を示す。設定画面で作成したIDテーブルが、入力補助としてパレットに表示されている。マップも含めたCDEの入力データ作成には、除染対象地域の地形の複雑さにも依存するが、通常2~4時間程度掛かる。

計算結果としては、除染前空間線量率分布、除染後空間線量率分布及び除染効果を表す線量率減少係数分布の3つが出力される。それぞれの計算手法については次章にて解説する。計算

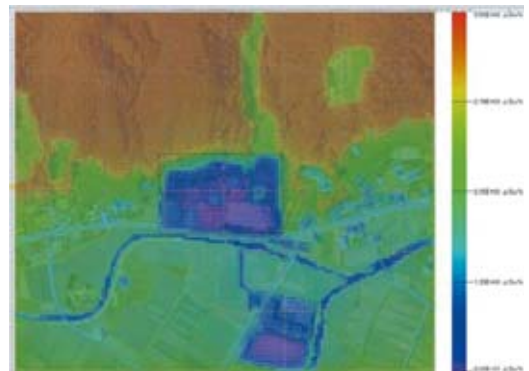
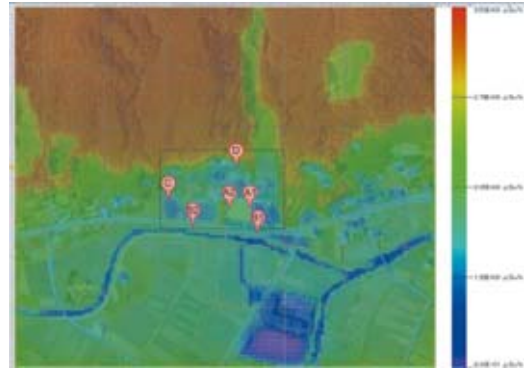


図4 除染前空間線量率(上)、除染後空間線量率(中)、及び除染効果(下)の計算結果を可視化したカラーマップ

図中の点線で囲まれた領域が除染対象地域を示す

結果は、その値の大きさにより、地図上にカラーマップとして可視化される。図4にカラーマップの例を示す。赤色が高線量、青色が低線量領域を表す。図中に示された点線の内側が除染対象地域である。図より、除染を行った地域内

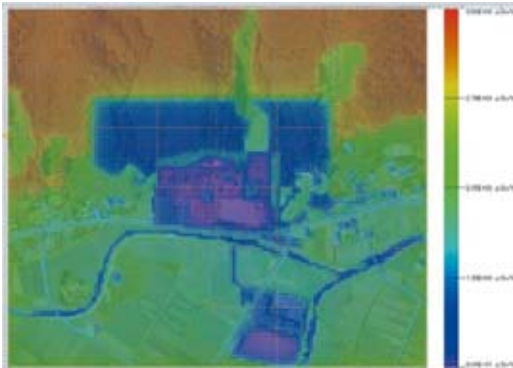


図5 除染領域を北部森林まで拡大したケースに対する除染後空間線量率の計算結果

の空間線量率が低減していることが分かる。地図上のメッシュを選択することにより、その地点における空間線量率の数値データを参照することもできる。図5に、図4における除染地域を北部森林100 m 範囲まで拡大したケースの除染後空間線量率の計算結果を示す。森林を除染することにより、森林と接している居住区域の空間線量率が減少していることが分かる。一度入力データを完成させていれば、その後のケーススタディはID テーブルのパラメータを変更することで、1 ケース当たり数秒で実行できる。このことは、様々な除染計画に対する除染効果の事前検討に役立つ。

3. 線量評価手法

CDE では、地図上に設定したメッシュに対して入力された表面汚染密度と除染係数に従い、除染前後の空間線量率及び線量率減少係数をメッシュごとに計算する。線源核種としては、現在環境に広く分布している放射性セシウム (^{134}Cs 及び ^{137}Cs) を対象としている。線量計算の基礎データとして、あるメッシュに分布した線源核種が周囲のメッシュ位置に与える単位放射能当たりの空間線量率のデータベース(以下、応答行列と呼ぶ)を核種ごとに持つ。図6に地表面での ^{137}Cs の応答行列を示す。応答行列の各要素は $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ のメッシュに対し

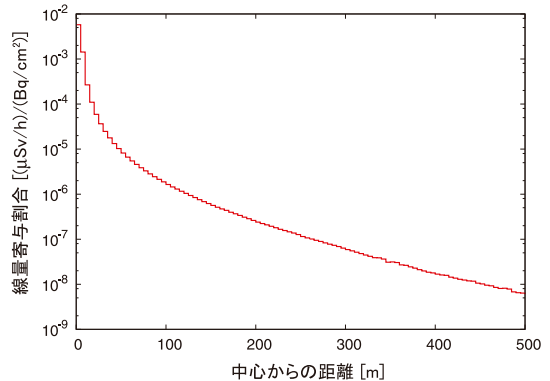


図6 地表面に分布した ^{137}Cs の応答行列

て評価したものであり、行列全体として201行201列から成る。これは、中心のメッシュから500 m 離れたメッシュまでの線量寄与を考慮していることを示し、 ^{137}Cs から放出される662 keV 光子の空気中における平均自由行程の約5倍に相当する。予備解析によって、この距離は線量寄与を考える範囲として十分であることを確認している⁶⁾。

応答行列は、粒子・重イオン輸送計算コードPHITS⁷⁾を用いて、大気と土壤から成る無限平板体系における光子輸送計算によって構築した。よって、CDEの応答行列は、線源から直接到達する成分(直達成分)のほかに、大気中で散乱されたスカイシャイン成分及び土壤中散乱されたグランドシャイン成分による線量を含んでいる。

除染前の空間線量率は、表面汚染密度と応答行列を用いて、着目するメッシュの周囲のメッシュからの線量寄与をすべて積算することにより、計算される。 ^{134}Cs と ^{137}Cs の放射能は、時間とともに減衰する(それぞれの半減期は約2年と約30年)。CDEでは、設定画面において汚染密度を測定した日と線量を評価する日を入力することで、それぞれの減衰を考慮した評価日における線量率が計算される。除染後の空間線量率は、除染前の空間線量率を除染係数で除算することで計算される。線量率減少係数は、除

染前後の空間線量率の比として求まる。

CDE では、線源核種は滑らかな土壌表面上に分布していると仮定している。しかし、実際の地形は起伏に富んでおり、急峻な傾斜地からの線量寄与は平面に比べて大きくなる。この問題に対応するため、CDE では設定画面において特定の地形を傾斜地として指定し、そこからの線量寄与を平地に比べ大きく見積もるよう設計している。

4. 精度検証

除染モデル地区における除染作業前の空間線量率分布を示した図4(上)のA1~D地点におけるCDEの評価値と、同地区の地形を3次元モデルで再現したPHITS⁷⁾の計算結果、及びNaI(Tl)シンチレーション検出器による測定結果を、表1に示す。データはすべて、地表面より1m高さでの空間線量率である。まず、PHITSとの比較において、両者は最大30%以内で一致した。既に述べたようにCDEでは、基礎データである応答行列は3次元放射線輸送計算に基づいているものの、表面汚染分布は2次元で与えられる。しかし、モデル地区のような村落の居住部は平らな地形が多いため、CDEの手法でも3次元地形を正確に取り込んだPHITSの計算結果と同程度の精度で空間線量率を予測できることが分かった。なお、計算時間は、PHITSが数十時間要したのに対し、CDEは10秒程度で完了した。

測定値との比較においても、CDEは良い一致を示している。A2地点以外の5地点では、CDEの評価値と測定値は10%以内で一致した。

表1 図4(上)で示した各地点における空間線量率 [$\mu\text{Sv/h}$]

	A1	A2	B1	B2	C	D
CDE	1.1	2.1	1.6	1.9	2.0	1.8
PHITS	0.8	2.0	1.5	1.7	2.0	1.7
測定値	1.0	3.1	1.6	2.0	2.0	1.7

A2地点(グラウンドの端)では35%程度の過小評価を与えたが、この地点の付近には幾つかの樹木が植えられており、その葉に付着した放射性物質からの線量寄与があった可能性がある。計算ではこの寄与を考慮していない。CDEの汚染密度データの入力において、樹木に付着した(地表面にない)線源核種の情報を入れれば、測定値をより正確に再現できると期待される。

5. 利用状況

CDEは平成23年11月2日にホームページ³⁾上で無償外部提供を行って以来、平成24年1月現在で402件の利用申込みがある。ユーザーの所属内訳は、個人が約20%あり、次いで放射能測定及び除染事業者が約15%、さらに官公庁及び地方自治体、建設関連企業、研究機関が約10%ずつと続く。使用目的については、空間線量率の評価が約20%、除染計画の立案が約15%、研究及び調査目的が約15%となっている。ユーザーの所在地に関しては東北・関東地方が圧倒的に多いが、九州、北海道及び海外からの利用申込みも少数あった。CDEは、集落を対象とした大規模除染の計画立案に役立つことを目的としたため、主なユーザーとして地方自治体や除染事業者を想定していた。しかし、公開後の利用状況をみると、個人ユーザーが自分の居住地周辺の線量を調べるためにダウンロードすることが多いと分かった。このような個人ユーザーにも使ってもらえるようCDEも、入力データに除染係数といった専門的な量を使う代わりに、“表土の除去”など除染技術名をリストから選択することで自動的に対応する除染係数を入力するなどの改良を重ねている。

CDEに関する最新の情報は、JAEA基礎工学研究部門のホームページ³⁾及び公式ツイッター⁸⁾で発信されている。また、CDEへの要望もホームページ上で受け付けている。

6. まとめと今後の展望

福島第一原子力発電所の事故に伴う放射性物質の放出で汚染された環境の修復に向けた除染作業を支援するため、除染効果評価システム CDE を開発した。CDE は、ユーザーが比較的容易に入手可能な入力情報を基に、ユーザーフレンドリーな GUI を通して、迅速かつ高精度に除染前後の空間線量率を計算し、想定した除染計画の効果の評価ができる。ソフトウェアは、ソースコードも含めて、JAEA のホームページ上から無償ダウンロードできる。

本稿では触れなかったが、CDE のバージョン 2 以降では、新たに“GPS による位置情報付き線量データの取り込み機能”と“覆土による線量低減効果を考慮した計算機能”が追加された。GPS 機能は、GPS を搭載した無人ヘリコプターによる線量モニタリングの測定データを、CDE の表面汚染密度分布の入力値として反映することができる。この技術の導入により、表面汚染密度の測定と CDE の入力データ作成に掛かる手間を著しく軽減することができる。また、覆土機能によって CDE は、除染後に対象エリアを土で覆うことにより更なる空間線量率低減を意図した除染計画にも対応可能となった。覆土機能は、除染作業によって生じた廃棄物の土中への貯蔵における周囲への線量寄与の評価にも利用可能であると考えられる。

今後実施される除染作業の最適化に微力ながら CDE が役立ち、迅速な環境修復と住民帰還がなされることを心より願う。

【謝辞】

除染効果評価システム CDE の共同開発者であり、本稿の執筆にも多大なご協力をいただいた日本原子力研究開発機構の小嶋健介氏、大泉昭人氏、松田規宏氏、久語輝彦氏、坂本幸夫氏、遠藤章氏、岡嶋成晃氏に深く感謝いたします。また、CDE の GUI 開発及び高速化にご協力いただいた高度情報科学技術研究機構の池島智氏、中村光行氏、仁井田浩二氏に感謝いたし

ます。米国 Pacific Northwest National Laboratory の大西康夫氏には、CDE の開発方針について貴重なご意見をいただきました。深く感謝いたします。本稿で紹介した CDE の精度検証には、内閣府からの受託事業“福島第一原子力発電所事故に係る福島県除染ガイドライン作成調査業務”の成果の一部を含みます。

参考文献

- 1) 経済産業省、警戒区域、計画的避難区域及び特定避難勧奨地点がある地域の概要図、(2011)、経済産業省ホームページ、Available at : <http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/111125d.pdf>, 閲覧日 2012 年 1 月 16 日
- 2) 経済産業省、避難区域等の見直しに関する考え方について、(2011)、経済産業省ホームページ、Available at : <http://www.meti.go.jp/press/2011/08/20110809006/20110809006.html>, 閲覧日 2012 年 1 月 16 日
- 3) 日本原子力研究開発機構、除染効果評価システム、(2011)、日本原子力研究開発機構ホームページ、Available at : <http://nsed.jaea.go.jp/josen/>, 閲覧日 2012 年 1 月 16 日
- 4) 文部科学省、文部科学省（米国エネルギー省との共同を含む）による航空機モニタリング結果、(2011)、文部科学省ホームページ、Available at : http://radioactivity.mext.go.jp/ja/monitoring_around_FukushimaNPP_MEXT_DOE_airborne_monitoring/, 閲覧日 2012 年 1 月 16 日
- 5) 日本原子力学会、除染技術カタログ Ver.1.0、(2011)、日本原子力学会ホームページ、Available at : http://www.aesj.or.jp/information/fnpp201103/chousacom/cu/catalog_ver1.0_20111024.pdf, 閲覧日 2012 年 1 月 16 日
- 6) 岩本洋介, 他, 汚染土壌の除染領域と線量低減効果の検討, JAEA-Technology, 2011-026 (2011)
- 7) Niita, K., *et al.*, PHITS: Particle and Heavy Ion Transport code System, Version 2.23, JAEA-Data/Code, 2010-022 (2010)
- 8) 日本原子力研究開発機構、原子力基礎工学研究部門 (JAEA), (2012), twitter ホームページ, Available at : http://twitter.com/JAEA_nsed, 閲覧日 2012 年 1 月 16 日

(日本原子力研究開発機構
原子力基礎工学研究部門)