2021年秋の大会

保健物理・環境科学部会セッション

大気拡散モデルの原発事故環境データによる評価とその緊急時応用

Evaluation of Atmospheric Dispersion Models Using the Environmental Data on the Nuclear Accident and their Application to Nuclear Emergency

（3）大気拡散モデルの緊急時利用法の検討

(3) Usage of Atmospheric Dispersion Models in the Nuclear Emergency Scheme

*山澤弘実[1]，大浦泰嗣[2]，森口祐一[3]，寺田宏明[4]，関山剛[5]，五藤大輔[3]，鶴田治雄[6]，佐藤陽祐[7]

[1]名大，[2]都立大，[3]国環研，[4]原子力機構，[5]気象研，[6]RESTEC，[7]北大

1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所（1F）事故の内部被ばく線量の評価では、大気中濃度実測値に基づく評価が困難であり、その代替として大気拡散モデルを用いる手法が使われてきた。しかし、1)大気中濃度の分析が未了でプルーム動態が十分解明されていないこと、2)放出源情報及びその推定方法と事故当時の気象場にデータに不確かさが残されていること、3)先端的大気拡散モデルであっても不確かさが残されていることが課題であった。また、1F 事故環境データは、点源放出物質の降水を伴う複雑地形上での約 200km 範囲の大気中動態を捉えた国内唯一のデータであり、事故影響解析に加えて、点源から放出された大気中有害物質の動態解明の基礎データとして大気拡散モデルの検証等に用いられることが期待される。

大規模自然災害に伴い発生することが危惧される原子力事故を含む有害物質大気中放出事故初期の緊急時においては、大気拡散モデル計算が唯一の迅速かつ合理的な影響評価方法となることが想定されることから、これらの 1F 事故内部被ばく評価等で残された課題の解決は、今後の原子力事故やその他の有害物質放出事故での影響及びリスクの評価の不確かさを低減する上で不可欠であることが UNSCEAR2017 年報告書にも述べられている。しかし、大気拡散モデルとその入力データの不確かさが、緊急時でのモデル利用の大きな制約となっており、モデル予測結果の不確かさの低減と不確かさを踏まえた緊急時利用法の検討が必要である。

そこで、環境研究総合推進費 1-1802「原子力事故データの総合解析による事故時の有害物質大気中動態評価法の高度化」では、大気中濃度データ等からの放出源情報推定法の改良と、データ同化を用いた気象場再現方法及び沈着過程に着目した大気拡散モデルの検証・改良を目的とした。また、1F 事故時の大気環境測定局 SPM 計ろ紙の分析及び放射線監視局データの解析による大気中濃度データ整備、複数の大気拡散モデルによる計算結果と測定値を総合化した情報提供法枠組みの提案を目的とした。本発表では、これらの研究成果全体を概観するとともに、主に大気拡散モデルの緊急時利用法についての検討結果を議論する。

2. 成果の全体概要

課題全体は、1) 未分析試料の分析等により既取得データと合わせた 1F 事故大気中濃度データの整備とプルーム動態解析、及び線量率データによるモデル検証法の検討、2)狭域から北半球規模の実測データを総合的に用いる放出源情報推定法の改良と 1 F 事故放出源情報の再推定、3)詳細な地形を計算に取り入れた気象場再現法の検討及び事故時気象場データの整備と、湿性沈着過程の詳細検討による大気拡散数値モデルの高度化、4)国際大気拡散モデル比較試験、及び 5)予測の不確かさを考慮した大気拡散モデルを用いた緊急時利用法プロトタイプ構築から構成され、6 研究機関による共同研究として実施された。これらのうち 2)及び 4)の成果については、本企画セッションの講演 1 及び 2 で取り上げられている。

---

*Hiromi Yamazawa[1], Yasuji Oura[2], Yuichi Moriguchi[3], Akihiro Terada[4], Tsuyoshi T. Sekiyama[5], Daisuke Goto[3], Haruo Tsuruta[6], Yousuke Sato[7]

[1]Nagoya Univ., [2]Tokyo Metropolitan Univ., [3]NIES, [4]JAEA, [5]MRI-JMA, [6]RESTEC, [7]Hokkaido Univ.

本研究は環境研究総合推進費 JPMEERF20181002 による。

大気中濃度データの整備では、SPM ろ紙の放射性セシウム分析により、既存結果と合わせて関東地方に到達した主なプルームの詳細な空間構造と輸送経路を明らかにし、2011 年 3 月 29-31 日に福島県東部・関東地方にこれまで知られていなかったプルームが存在したこととその輸送過程を解明し、原発から約 400km までの東北地方・中部地方を対象にプルームの長距離輸送過程を明らかにした。これにより、SPM ろ紙が保存されていなかった関東地方北部を除く我が国の陸地に 2011 年 3 月中に影響を与えた主要プルームの全てを把握できた。図 1 に示した例では、プルーム 9 が関東平野から東京湾に抜けていく様子が明瞭に捉えられている。1F 事故による放射性物質放出開始の 3 月 12 日から 31 日までに全部で 27 個のプルームが東日本に運ばれたことがわかった。その中で、本課題によりこれまで分析されていなかった 3 月 28 日から 31 日に比較的高濃度の 8 つのプルームが存在したことが新たに発見された。また、SPM 測定データが得られていない茨城県中央部について、放射線監視局のγ線スペクトルデータから希ガス、^{131}I を含む複数核種の 10 分毎の大気中濃度データを解析し、3 月 15 日に南下したプルーム動態の詳細が明らかとなった。また、大気中濃度が得られない地点・時刻について線量率データを用いた大気拡散計算結果の検証法を検討し、線量率データによるモデル検証が可能であることを示した。

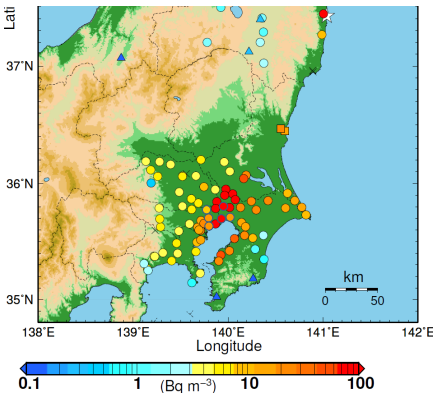

図 1　SPM ろ紙分析で得られた 2011 年 3 月 21 日 10 時の ^{137}Cs 地上濃度分布。

気象場の再現では、水平解像度 1 km と 0.25 km で地形・土地利用を再現し高解像度気象場解析値（2011 年 3 月東日本域）を作成した。この計算では、アンサンブルカルマンフィルタを用いた最新のデータ同化システムと気象予報モデルの組み合わせにより AMeDAS 地上気象観測データを同化し、モデル内で詳細に再現された地形を反映した気象場を得た。図 2 の例では、1 km 格子の気象場計算により、従来の 3 km 格子では十分再現されなかった中通りでのプルーム南下が良好に再現されている。さらに、湿性沈着再現で必要となる山岳域での雲（霧）及び降水の発生の再現のためには、従来の 3-5 km 程度の格子では不十分であること、原発が立地する海岸複雑地形での気流場再現では 1 km 格子かさらに詳細な地形再現が必要であること等の重要な知見が得られた。また、これまで大気拡散モデルの最大の誤差要因とされてきた湿性沈着過程の解析により、沈着モデルのスキーム（形式）が最も重要であり、雲・降水再現のための雲微物理過程のモデル化の違いは結果にほとんど影響しないこと等のモデル改良のための指針が明確になった。

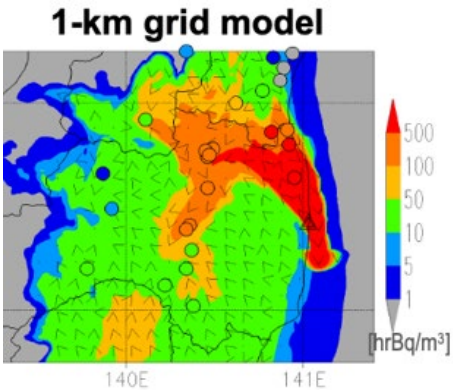

図 2　2011 年 3 月 20 日 15 時－21 時の福島県におけるモデル計算による ^{137}Cs 地上濃度積算値。○印は測定値（SPM ろ紙分析）。

以上より、本研究により現在の先端的大気拡散数値モデルの性能が明らかとなり、改善が必要な部分についての改良指針が得られた。応用面では、大気拡散モデルを用いた放出源情報推定法が検討され、1 F 事故放出源情報の不確かさがが検討された。また、大気拡散モデルの緊急時利用法が検討され（次節）、原子力に加え他の有害物質大気放出時を含めた緊急時の大気拡散利用の技術基盤が整備され、実用化研究の段階に至った。これらの一連の研究では、1F 事故初期（2011 年 3 月末まで）の大気環境データセットが整備された。この中には、中部、関東、東北地方 SPM 局での大気中濃度データ（^{137}Cs, ^{134}Cs, 1 時間値）、及び茨城県中央部放射線監視局での大気中濃度（^{133}Xe, ^{131}I, ^{132}I, ^{133}I, ^{132}Te, ^{134}Cs, ^{136}Cs, ^{137}Cs, 10 分値）の実測値に加え、東日本域をカバーする 3, 1, 0.25 km 格子気象場（1 時間毎）及び ^{137}Cs, ^{131}I 放出源情報（1 時間毎）の解析値と、国内外の先端的大気拡散モデル計算値（1 km 格子 9 モデル、3 km 格子 12 モデル、1 時間毎）が収録されている。これらのデータは、気象・大気環境・環境放射能分野の学術的資料としてのみならず、事故の影響検証のためのファクトデータとして事故後 10 年を経過した現時点において世界で最も完成度の高いものである。

3. 緊急時利用法の検討

3-1. 全体概要

原子力規制委員会の原災指針の事態分類に従ったモデル利用法とした（図 3）。警戒事態及び一部の施設敷地緊急事態においては、放出は起こっておらず炉内情報からの放出量等の放出源情報推定は不確かさが極めて大きく実質的に不可能である。従って、この段階では放出源情報がないものとして、最新の気象庁広域数値予報 GPV データ(1 日 2 回更新、264 時間先までの予報)を用いて、単位量放出が連続すると仮定した計算を 72 時間分の大気拡散予測計算を実施する。この段階の予測は単位放出仮定であるため、濃度・線量といった定量的予測ではなく、「もし放出された場合のプルーム飛来の有無及び時間帯の予測」とする。プルーム飛来の有無のみの予測であっても、図 3 の四角枠内に示すとおり、緊急時モニタリング計画立案や屋内退避等の防護対策に極めて有用な情報となる。

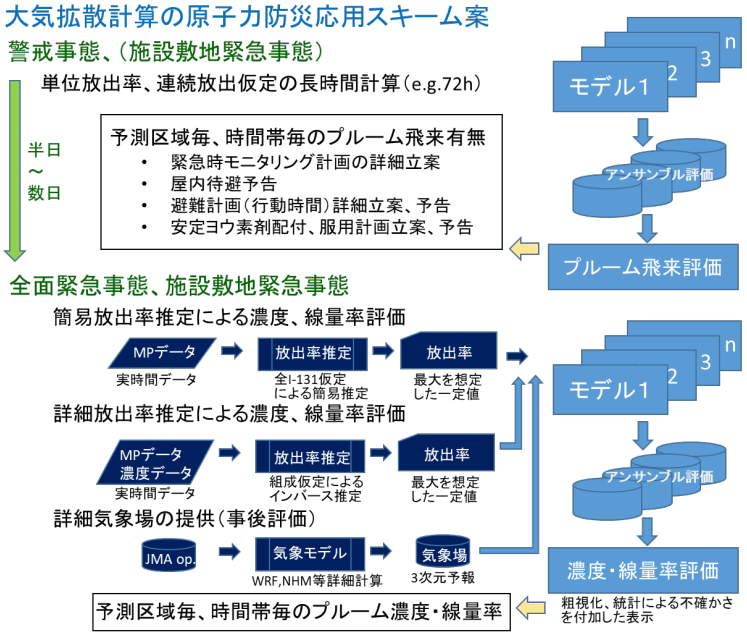

図 3　大気拡散計算の原子力防災への応用スキーム。

施設敷地緊急事態及び全面緊急事態では放出が始まっており、空間線量率あるいは大気中濃度等の実測データが入手されるため、放出源情報推定が可能である。但し、最も確実にかつ多数入手されると想定される空間線量率は大気中放射性核種の組成が分からない限り各核種の大気中濃度の把握はできない。第 1 段階として最も被ばく線量寄与が大きい ^{131}I のみによって構成されるプルームを仮定して、保守的な(被ばく線量が大きくなる安全側の)放出率の簡易推定を行う。大気中放射性核種濃度を測定するための大気モニターデータが得られた場合は、講演 2 の放出源情報推定手法を利用した詳細推定が可能である。

1F 事故の経験から、モデル出力として従来の地図上のコンター図表示のみでは、防護措置の意思決定者が使用する資料として十分でない。そこで、時間・空間的粗視化して提示する方法とする。空間的に粗視化の単位は防護措置発令単位として想定される区域単位と対応させ、学区単位、あるいは事故サイトからの距離に応じて、市町村等の行政区単位、県(支庁区)単位とする。また、時間に関する粗視化の単位は、モデル比較評価で示されたプルーム飛来時刻計算結果の不確かさ 2，3 時間をふまえ、3 時間を最小単位とする。

3-2. プルーム飛来予測

プルーム飛来予測は、もし放出がある場合に対象地点へのプルーム飛来の有無を現時点から将来に予測するもので、濃度値は評価対象外である。プルーム飛来有りが予測された場合は、極力屋外活動を控え、逆に飛来なしが予測された時間帯に、必要に応じて屋外活動を行う時間を設定できる（図 3 枠内）。

前述のデータセットの 1F 事故対象の大気拡散計算結果（1 km 格子、9 モデル）のアンサンブルを用いて、1F から 30 km 圏内のモニタリングポスト 4 地点でのプルーム飛来状況（モデル予測）を解析し、実測線量率から解析されたプルーム飛来状況（観測値）と比較した結果を表 1 に示す。この結果では、モデルでプルーム飛来が予測された時間帯の前後 3 時間にも飛来の可能性があると仮定して得たしたものである（安全裕度時間を設定）。実際にプルーム飛来があったのに来ないと予測した時間割合は 0.5%(実際に飛来があった時間帯に対する見逃し率 2.7%)と低い値であるが、見逃しを完全に回避できていない。空間的粗視化の考え方を導入することにより見逃し率の低減が図れるものと考える。一方、実際にプルーム来なかった時間帯については、半分以上を飛来有りと予測しているものの、正しく飛来なしと予測できている時間帯も十分確保でき

ている。飛来なし予測により UPZ 内での屋内退避期間中の屋外活動(一時移転、安定ヨウ素剤配布、食料調達等のその他の生活活動)時間を設定することができるが、この予測では解析対象の 138 時間中約 50 時間の屋外活動時間を確保することができ、現行防災スキームでの予測情報が全くない状態での屋内退避を継続しなければならない状況に比べれば、現実的な防護行動が可能となる。

表 1　1F 近傍 30km 圏内 MP での飛来予測性能の評価結果。表中の数値は解析対象時間に対する割合（安全裕度時間 3 時間）。

観測結果	モデル予測（アンサンブル）	
	飛来あり	飛来なし
飛来あり	0.180	0.005
飛来なし	0.452	0.363

3-3. アンサンブルメンバー数の検討

講演 1 のモデル評価結果では、複数の 1F プルームに対して大気中濃度再現性が常に高いモデルは存在しないことと、モデルアンサンブル（大気中濃度の複数モデルの単純平均）が各プルームに対して再現性の高いモデルと同等の性能を常に示すことが明らかとなった。そこで、一定程度の予測精度を確保するために必要なモデル数の検討を行った。12 モデルの結果が得られている 3 km 格子計算結果から、ランダムにモデルを選択して多数のアンサンブルを形成し、その予測結果を評価した結果（詳細省略）、8 個のモデルを用いることで 12 モデル全てを用いた場合と同等の予測結果が得られることが示された。また、12 モデルの中には全体的に予測精度の低いモデルが 2，3 モデル含まれており、それを除いた場合は、5，6 モデル程度でも良好な予測結果が得られるものと考えられる。

3-4. 粗視化による予測情報提供

時間的・空間的な粗視化は、モデル計算結果で不可避の不確かさの影響を緩和することに加え、緊急時防護策の意思決定者及び住民に不確かさを含んだ分かりやすい情報を提供することを目的とする。モデルアンサンブルの大気中濃度を用いる場合、行政区等の空間的粗視化単位内には、複数モデルの複数格子点の濃度計算値が存在し、その平均値はその粗視化単位の濃度の期待値と考えることができる。また、濃度計算値のばらつきの大きさは、その粗視化単位内の実際の濃度水平分布、モデルそれぞれの内部要因による不確かさ及び入力気象場の不確かさが反映されたものであり、濃度期待値の不確かさの大きさを表す指標と考えることができる。そこで、各粗視化単位毎に濃度期待値及びばらつきの大きさを提示することを本研究の提案とする。

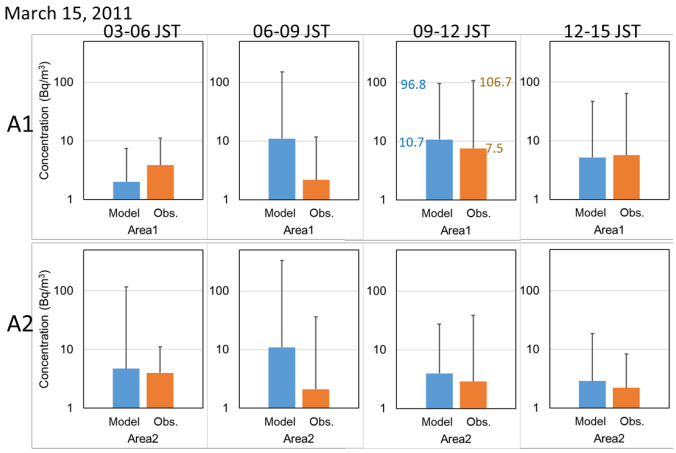

図 4　首都圏の大気中濃度を対象とした予測情報提示法による大気中濃度計算値との実測との比較。

この提示法の詳細は省略するが、首都圏に設定した 50 km 四方の 2 つの領域について、モデル予測と実測（SPM 地点の濃度）の比較検証結果を図 4 に示す。例えば、実測濃度が最も高かった領域 A1 の 2011 年 3 月 15 日 9-12 時については、モデル予測から「A1 地域では 9-12 時に平均濃度約 10 Bq/m^3 のプルーム飛来し、濃度が高い（上位 5%程度の）地点あるいは時刻では約 100 Bq/m^3 となると予想される」という予測情報を出すことになる。この予測情報は実測の状況を良好に再現している。他の地点・遅刻では実測と多少のずれがあるものの、概ね良好な予測結果となっている。

4. まとめ

本研究により、事故当事国の当該研究分野の責務として将来に残すべきデータとして、1F 事故初期の大気環境データセットが整備された。このデータを用いて、国内外の先端的な大気拡散数値モデルの性能評価が行われ、その過程でモデルの性能が向上し、現状のモデルの到達点及び不確かさが把握された（講演 1）。これらの大気拡散モデル群（アンサンブル）及び放出源情報推定法（講演 2）を用いた緊急時利用法のプロトタイプが構築され、今後、実用化のための研究が見込まれる。