

報告番号	※ 甲 第 10614 号
------	---------------

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 原子力事故時における放射性物質の大気拡散  
予測に関する研究

氏 名 寺田 宏明

### 論 文 内 容 の 要 旨

アジア域をはじめとする世界的な原子力施設の増加に加えて、非原子力施設における放射性物質の放出を伴う事故に見られる原子力事故の多様化、近隣国による地下核実験の実施に至る国際情勢の緊張等を背景に、放射性物質の大気放出の潜在的な可能性は増大している。大気中に放出された放射性物質の環境中の濃度及び線量の分布を正確に把握し、将来の変化を迅速かつ的確に予測することは、公衆の被ばく低減化を目的とする防護対策を計画、実施する際に重要である。放射性物質の環境中分布の現状把握においては、緊急時モニタリングが正確性の面で優位であるが、試料採取・分析及び実施体制の整備に時間を要すること、時空間分解能と測定範囲に限界があること等の問題がある。これに対して、大気拡散予測モデルによる数値計算は、放出された放射性物質の環境中分布の現状及び将来予測に関する情報を迅速に得ることが可能な有用な手段である。原子力事故対応のための大気拡散予測モデルは、迅速性と精度が同時に保持されている必要があり、その予測精度と適用限界が客観的に評価され明らかにされている必要がある。また、大気拡散計算による濃度・線量の絶対値評価には放出率が必要であるが、事故直後に入手できる場合は少ないため、環境モニタリングデータと合わせて用いることで放出率の逆推定に適用できることも重要である。

これまでに開発された世界版緊急時環境線量情報予測システム WSPEEDI の初版 (WSPEEDI-I) の大気拡散予測モデルには、大気境界層乱流と降水に関する詳細な情報が得られないため乱流拡散及び湿性沈着計算の精度が低下する、気象場の精度が入力気象データの精度及び解像度に依存する、高解像度計算時に計算コストが増大する、という課題があった。そこで本研究では、これらの課題を解決し、地球上の任意地点の事故により大気放出された放射性物質の数 10 km から数 1000 km の水平空間スケールの大気拡散を実時間予測することを目的とした。この目的のため、(1) メソスケール気象現象を考慮し、対象スケールに必要な解像度で効率的に計算することが可能な WSPEEDI 第 2 版 (WSPEEDI-II) 大気拡散予測モデルの開発、(2) 実放出データによるモデルの性能評価、(3) モデルの適用による福島第一原子力発電所事故の放出率推定と大気拡散解析を行った。

大気拡散予測モデルの開発では、気象場の迅速かつ高精度な予測のため大気力学モデル MM5 を導入し、放射性物質の大気拡散計算の精度向上のため WSPEEDI-I のラグランジュ型粒子拡散モデル GEARN を改良した。MM5 で計算した 3 次元風速場と鉛直拡散係数を GEARN に取り込み、これらに基づき移流及び拡散項を計算することで、従来モデルでは考慮されなかった、海陸風、山谷風等の局地循環を反映した気流場と大気境界層乱流の時空間変動の考慮を実現した。また、MM5 で計算した対流性及び非対流性降水量と 3 次元計算セルの雨、雪、あられの混合比及び雲量に基づく洗浄係数を計算することで、降水の種類（対流性・非対流性）ごとに降水強度と 3 次元分布を考慮した湿性沈着計算を可能とした。これにより、低層雲等による降水が発生している場所で、放射性物質が雲頂高度より上空を輸送される場合に降水による除去が過大評価される問題を解決した。さらに、MM5 のネスティング計算による広域低解像度気象場と狭域高解像度気象場に基づく各領域の大気拡散を、領域間の物質の流入・流出を考慮しながら同時に計算するネスティング拡散計算機能を開発して GEARN に追加した。この機能を用いて両領域で整合的な大気拡散を行うことで、放射性物質の広域からの再流入を考慮した放出点周辺域の効率的な高解像度大気拡散計算を可能とした。

この WSPEEDI-II 大気拡散予測モデルを実放出ケースに適用することにより、妥当性の検証を行った。まず、チェルノブイリ原子炉事故データを用いて、大気中濃度及び地表沈着量の再現性を評価した。本研究で開発したネスティング拡散計算機能を用いて、欧州 6000 km 四方領域の広域と、放出点を含む 1720 km 四方の狭域で放射性物質の流入・流出を考慮した計算を行った。両領域の計算において、降水量測定データを用いた WSPEEDI-I の計算結果と比較してもより詳細で実測に近い沈着分布を再現できることが示された。狭域では、MM5 の雲物理モデルにより降水の局地的な分布が計算されたことで、WSPEEDI-I では再現できなかった放出点周辺の詳細な沈着分布を再現できることが示された。ネスティング拡散計算機能により、モデル計算時間は広域全体を高解像度計算するのに比べて 1/5 程度に短縮され、緊急時の大気拡散予測に必要な迅速性の向上が可能であることが示された。

次に、長距離スケールから中距離スケール（水平空間スケールで数 1000 km から数 100 km 程度）における地上大気中濃度の再現性を評価するため、六ヶ所再処理施設起源  $^{85}\text{Kr}$  の広域拡散データによる検証を実施した。放出点から 230 km 離れた札幌と 1200 km 離れた太宰府で週平均地上大気中濃度の測定値が上昇した 2 ケースの大気拡散の再現計算を行った。Gifford (1982) の水平拡散パラメータ（以降、GIFFORD）を用いた計算は、両ケースの全測定地点で週平均地上大気中濃度を測定値のファクター 2 程度の不確かさで再現したが、水平格子解像度が 6 km と比較的高い計算では、放出点からの距離が数 100 km 程度の地点の濃度を過小評価した。GIFFORD を用いた濃度計算値の水平格子解像度への依存性を調べるため、仮想放出条件を用いて、2 km から 54 km までの格子解像度に対する地上大気中濃度の感度解析を行った結果、格子解像度が高くなるほど大気中濃度が低下する傾向が示された。これは、水平格子解像度が高くなると、格子解像スケールの平均風の変動で表現される拡散と、GIFFORD で表現される拡散により、拡散を重複して考慮することで大気中濃度のピーク値を過小評価するためと考えられることから、上記の感度解析結果を基に GIFFORD の式を経験的に修正することで、格子解像度に応じた水平拡散係数を計算する方法を考案した。この方法を用いることで、およそ 5 km 程度より低い格子解像度の計算の場合、有意

な再現性の向上がみられることが示された。

本研究で開発した WSPEEDI-II 大気拡散予測モデルを、2011 年に発生した福島第一原子力発電所事故に適用し、事故発生当初不明であった大気中に放出された放射性物質の放出率の逆推定と事故初期の大気拡散状況の再現計算を行った。放出率の推定では、SPEEDI 及び WSPEEDI-II 大気拡散予測モデルによる単位放出 ( $1 \text{ Bq h}^{-1}$ ) を仮定した大気拡散計算と環境モニタリングデータを組み合わせた逆推定法により、 $^{131}\text{I}$  と  $^{137}\text{Cs}$  の放出率を推定した。 $^{131}\text{I}$  の放出率は、3 月 12 日 10 時から  $10^{13}\sim 10^{14} \text{ Bq h}^{-1}$  が続いた後、3 月 15 日に  $10^{16} \text{ Bq h}^{-1}$  の大量放出が発生し、3 月 16 日～24 日は  $10^{14} \text{ Bq h}^{-1}$  程度となり、4 月初めには  $10^{11}\sim 10^{12} \text{ Bq h}^{-1}$  まで減少するという時間変化が推定された。また、3 月 12 日 10 時から 4 月 6 日 0 時までの  $^{131}\text{I}$  と  $^{137}\text{Cs}$  の総放出量は、それぞれ  $1.5\times 10^{17} \text{ Bq}$  及び  $1.3\times 10^{16} \text{ Bq}$  と推定された。これらの値は我が国の公式な評価値として採用され、IAEA 会合等へ国際的に公表された。

大気拡散状況の再現では、WSPEEDI-II 大気拡散予測モデルを用いた 4 月末までの  $^{131}\text{I}$  と  $^{137}\text{Cs}$  の東日本域大気拡散計算により、上記放出率及びその後追加公表された環境モニタリングデータを用いて再推定された 3 月 12～15 日の放出率の妥当性を検証した。3 月 18 日以降の日降下量測定値と計算値の比較により、事故初期段階で推定された放出率の一部を修正する必要があることが示された。この修正により、日降下量分布の再現性が向上し、 $^{131}\text{I}$  の FA10 (測定値の  $1/10\sim 10$  倍の範囲に入る計算値の割合) は 68.6%、相関係数は 0.77、 $^{137}\text{Cs}$  の FA10 は 62.6%、相関係数は 0.74 を示した。これより、3 月 18 日以降にブルームが主に陸上に輸送され地表に沈着した期間 (3 月 20 日、21～23 日、25 日、及び 30 日) の放出率は、日降下量をファクター 10 程度の不確かさで再現できる程度の妥当性を持つことが確認できた。3 月中の積算沈着量計算値と、月間降下量及び航空機モニタリング測定値の比較では、一部地域で大気拡散及び地表沈着計算の誤差に起因すると考えられる測定との差異が見られたが、広域の沈着分布の特徴が良好に計算された。この地表沈着量の計算と測定との差異は、主に 3 月 15 日頃の沈着イベントによるものと推察されたことから、3 月 17 日以前のうち 3 月 15 日頃を除く期間の推定放出率に、広域沈着分布に影響するような大きな過大・過小評価はないことが示唆された。修正した放出率を用いた大気拡散計算結果の解析より、航空機モニタリングで測定された  $^{137}\text{Cs}$  地表沈着分布は、主に、3 月 12 日の宮城県北東沿岸域における乾性沈着、3 月 15～16 日の福島県及び関東地方北部における湿性及び乾性沈着、3 月 20 日の岩手県南部から宮城県北西部における湿性沈着、3 月 21～23 日の関東地方における湿性沈着により形成されたことが分かった。また、発電所から遠方ではほとんどの地域で全沈着量に対して湿性沈着量の割合が高かったが、近傍だけでなく宮城県北東沿岸部、茨城県北部等の遠方においても乾性沈着量の割合が湿性沈着量と同等以上の場所が見られ、寄与した沈着イベントにより大きく異なっていることが示された。

本研究により、原子力事故時に放出された放射性物質の大気拡散予測モデルが高度化され、環境中分布の現状把握及び将来予測が重要となる公衆の被ばく線量評価の高精度化に資することができた。また、事故直後に放出データが得られない場合も、本研究で開発したような大気拡散予測モデルと環境モニタリングデータの融合利用により、1 か月を超える長期間の放出率の推移を推定でき、それを用いて大気拡散・沈着過程の再構築と解析が可能であることが実証された。