

局所域高分解能大気拡散・線量評価システム LHADDAS —建物を考慮した詳細な放射性物 質の拡散計算に基づく線量評価を初めて実現—

中山 浩成
Nakayama Hiromasa

小野寺直幸
Onodera Naoyuki

佐藤 大樹
Satoh Daiki

1. はじめに

原子力施設の運転時や事故時、あるいは都市市街地でのテロ等により放射性物質が大気放出された場合の放出源近傍における影響評価においては、個々の建物や構造物によって引き起こされる複雑な風の流れを想定した放射性物質の大気拡散シミュレーションが必要となる。また、空間線量率を評価する際には、放射性物質の不均一な濃度分布及び沈着分布を放射線源とし、建物による遮蔽効果を考慮した3次元放射線輸送計算を行う必要がある。

日本原子力研究開発機構は、これまで緊急時環境線量情報予測システム SPEEDI を開発してきた。SPEEDI は、原子力施設からの放射性物質の放出に対する周辺環境への影響や住民の被ばく線量評価を目的としており、数10~100 kmの領域を数100 m程度の粗い計算格子で分割して地表面形状を考慮した風の流れを考慮して大気拡散計算を行う。しかし、原子力施設内や都市域の建物の影響を受けた複雑な風の流れを再現できず、それらを反映した大気拡散計算による複雑な放射性物質分布や建物遮蔽を考慮した詳細な線量評価は行えない。

近年、原子力事故時における放射性物質の大気放出に対する施設内作業員の被ばく線量評価や、都市域での放射性物質拡散テロに対する汚染状況の把握と住民及び対応要員の被ばく線量評価の必要性が認識されてきている。また、原子力施設の建設時には、施設周辺を対象とした風洞実験を実施して、地形と建物の影響を考慮した拡散解析による安全審査を実施している。これに対して、風洞実験に要する労力

と時間を削減すると共に、風洞実験では考慮できない実際の気象条件を取り込んだより現実的かつ合理的な拡散評価が新たに求められている。更に、迅速な計算結果の提供が要求される都市市街地拡散テロ時等に適用していくためには、短時間で計算が可能な大気拡散の計算コードも必要になる。

局所域大気拡散事象の様々な課題に対応できるようにするためには、建物を表現できる数m程度の高分解能計算格子で、建物近傍で問題となる複雑な風の流れ、すなわち、乱流をシミュレーションし、その結果に基づく詳細な線量評価を実施可能な計算コード及び都市大気拡散を即時解析できる計算コードを統合した新たな解析システムが不可欠であった。

2. LHADDAS の概要

個々の建物影響を考慮した高分解能大気拡散計算と建物の遮蔽効果を考慮した線量評価及び都市大気拡散の高速計算が可能な、局所域高分解能大気拡散・線量評価システム LHADDAS (Local-scale High-resolution Atmospheric Dispersion and Dose Assessment System) を開発した¹⁾ (図1)。

このシステムは、以下の3つの計算コードより構成される。

- ①局所域高分解能大気拡散計算コード LOHDIMLES (Local-scale High-resolution Atmospheric Dispersion Model using Large-Eddy Simulation)
- ②都市大気拡散高速計算コード CityLBM (Real-time dispersion simulation model based on a lattice Boltzmann method)

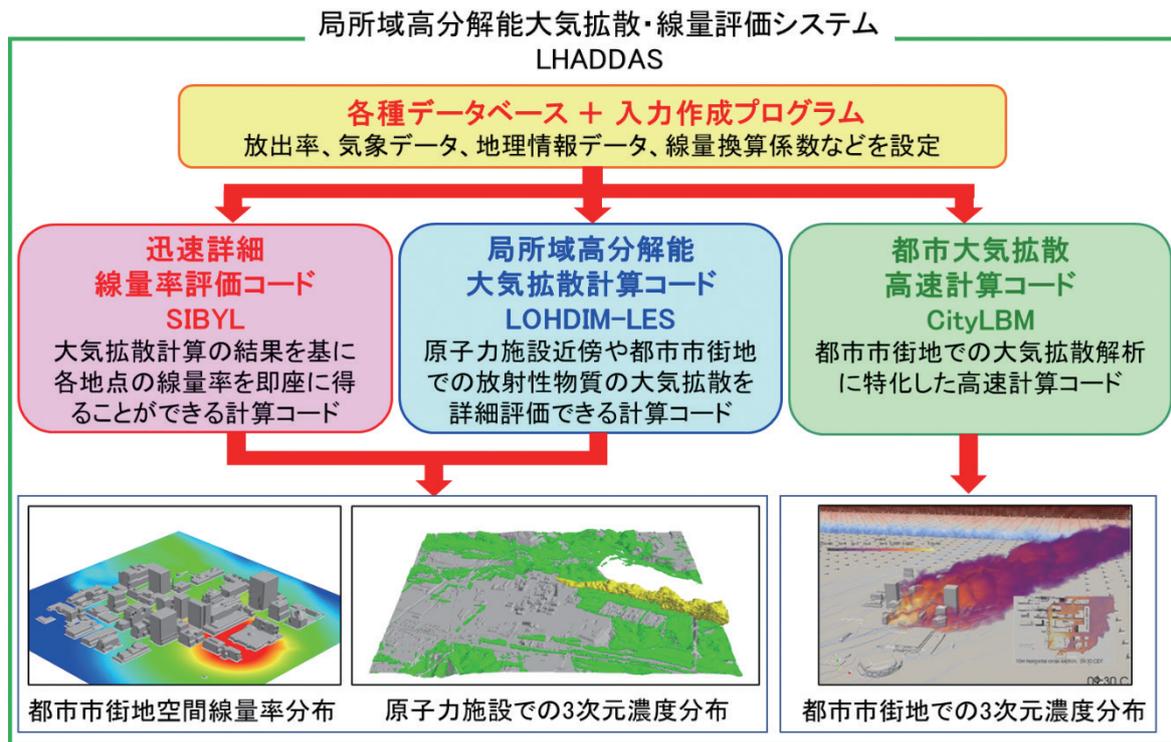


図1 LHADDAS の概念図

③ 迅速詳細線量率評価コード SIBYL (Simulation code powered BY Lattice dose-response functions)

①の LOHDIM-LES は、個々の建物を精緻に解像できる高分解能計算格子を用い、非定常乱流解析に優れた LES (Large-Eddy Simulation) 乱流モデルを導入して開発した大気拡散計算コードである。LES 乱流モデルは、計算格子サイズよりも小さい渦をモデル化し、それよりも大きい渦に直接的に乱流計算を行う。建物周辺に形成される衝突・剥離・循環等の複雑乱流を的確に捉えることができる。高分解能計算格子と LES 乱流モデルを用いることで、従来の SPEEDI や WSPEEDI の気象モデルの限界により再現することができなかった単独建物周り、複数の建屋配置、更に実在都市域のビル群での大気拡散挙動を再現できるようになった²⁻⁶⁾。これにより、風洞実験と同等に拡散事象を再現する性能を有すると共に、風洞実験では得ることができない詳細な拡散挙動の解明にも利用可能であることを実証した。

②の CityLBM は、有限個の方向を持つ速度分布関数の時間発展方程式を解くことで流体運動を記述する手法である格子ボルツマン法を導入して開発された大気拡散計算コードである。低消費電力かつ高

演算性能の画像処理プロセッサ (GPU) を搭載した最先端のスーパーコンピュータ向けに開発され、都市市街地内でのトレーサガス大気拡散に特化した高速計算コードである⁷⁾。1台の GPU には数千台の演算器が搭載されており、従来の汎用演算器である CPU と比較して演算性能が数倍以上となるため、計算時間を大幅に短縮できる。

③の SIBYL は、事前計算により整備された放射性核種による線量率寄与に関する応答関数データベースを用いることで、大気拡散計算による各計算格子の放射エネルギーに対する評価点の線量を即座に得ることができる計算コードである⁸⁾。複雑な大気中濃度分布と沈着分布に対しても、計算格子ごとに異なる濃度の放射性核種からの線量率の寄与を計算し、全計算格子からの線量率の総和を取ることによって、地上の評価点における線量率を算出することができる。また、建物による遮蔽効果については、放射線の放出地点と線量率評価地点の経路上に存在する建物を探索し、その建物を通る距離に応じた放射線の減衰を各計算格子からの線量率に対して適用する。応答関数データベースは、放射線挙動解析コード PHITS (Particle and Heavy-Ion Transport code System)⁹⁾

を用いて、直達成分や散乱成分を考慮して詳細な3次元放射線輸送計算を実施して作成されている。第1版として、9種類の放射性核種 (^{134}Cs , ^{136}Cs , ^{137}Cs , ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{132}Te , ^{85}Kr , ^{133}Xe) に関するデータが整備されている。

3. 性能評価

LHADDASの大気拡散計算コードLOHDIM-LESと線量評価コードSIBYLを用いて、青森県六ヶ所村の再処理工場で2006年から2008年に実施された試験運転の際のモニタリングデータを活用した総合的試験を行った。試験運転の際に管理放出された放射性希ガス (^{85}Kr) について、敷地内のモニタリングポスト (MP) で大気中濃度と空間線量率が測定されている。

この計算では、細密地理情報を用いて標高・建物・樹木分布を5mの高分解能計算格子により精緻に解像した。図2上段は、計算による ^{85}Kr の大気中濃度分布を示している。プルームはMP2とMP3の間の上空を通過している。なお、放射性核種の大気中3次元濃度分布は検出できない濃度レベルまで示しており、放射線影響が想定される範囲ではない。次に、線量率評価コードSIBYLを用いて、LOHDIM-LESによる ^{85}Kr の3次元濃度分布から建物遮蔽効果を考慮して線量率評価を行った。図2下段に示すように、MP2での滑らかな変動やMP3での鋭いピークの発生等、敷地内の異なるモニタリングポストでの空間線量率の測定値の時間変動パターンを、良好に再現することに成功した¹⁰⁾。これにより、現実

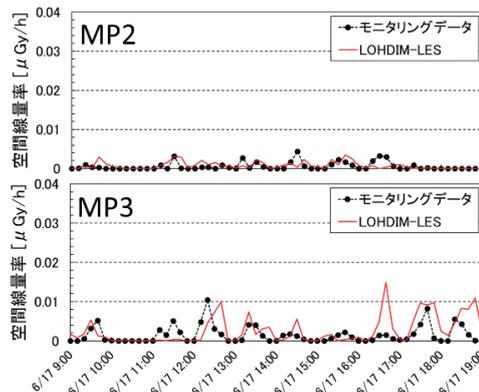
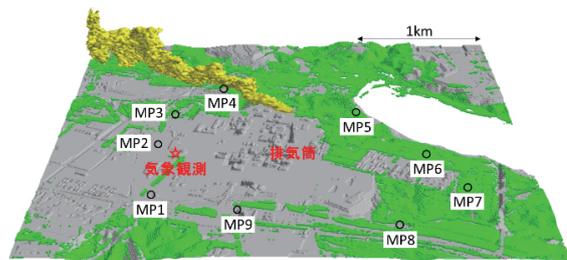


図2 六ヶ所再処理工場から放出された放射性核種の大気拡散シミュレーション結果

の事象に対する「LHADDAS」の大気拡散及び線量率評価の性能を実証した。

次に、広域スケールの気象状況を再現できる気象モデルの計算結果を用いて、都市大気拡散の試験計算を実施した。ここでは、2003年に米国オクラホマシティーで実施された野外拡散実験を対象とした。

図3に示すように、点源放出されたトレーサガスは、都市市街地内の幹線道路上を高濃度の状態を保ちながら風下に運ばれ、ビル群内にも複雑に拡散が及んでいく様子が明瞭に捉えられている。LOHDIM-LES

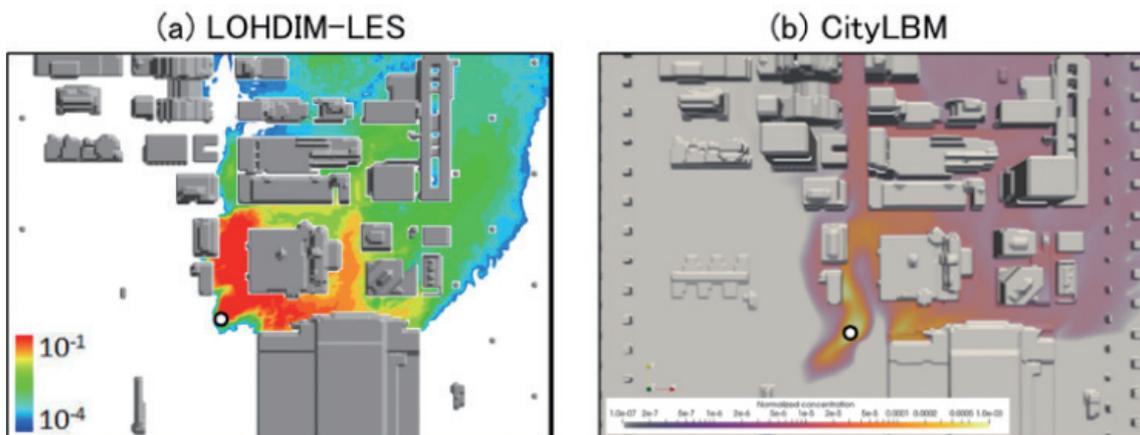


図3 LOHDIM-LES及びCityLBMによる市街地ビル群内の拡散の様子

による大気中平均濃度の計算値は、測定値の0.5倍から2倍の範囲内に収まる割合（FAC2）が42%の再現精度を示し、CityLBMのFAC2は33%であった。

局所域大気拡散の予測性能の評価指標では、FAC2は30%以上が推奨値とされていることから、LOHDIM-LES及びCityLBM共に、測定結果を良好に再現することを確認できた。更に、CityLBMの高速計算技術を活用し、放出地点付近にある植生キャノピーの配置形態を航空写真から推定して、計算パラメータとして考慮した多数ケースの計算を実施した。計算結果の比較解析から、FAC2が最大で79%となった。このように、CityLBMは測定値との誤差を調べる要因解析としても利用可能であることも実証できた。

LHADDASは、豊富な研究実績に基づく信頼性の高い高精度計算と即時対応可能な高速計算機能を併せ持ち、詳細な線量計算も可能にしたという点で、極めて有用なシステムである。この統合システムは、原子力施設の安全審査のための従来手法に代わるより現実的な拡散解析、原子力緊急時のための事前・事後解析による対策立案や影響評価、都市市街地テロ災害時における即時解析等、局所域大気拡散事象の様々な課題に応じて要求される計算時間や対象評価に対し、適切に計算コードを選択することで幅広く対応することが可能である。

4. 今後の展開

局所域大気拡散の様々な課題を解決する社会貢献に資するために、LHADDASを無償公開している。現在、警察庁科学警察研究所との共同研究を開始し、LHADDASのテロ対処訓練への活用により、テロ発生時に危険区域となる可能性の高い地点の抽出や緊急時対応要員・避難住民の被ばく線量低減のための

対策立案につなげる手法開発に取り組んでいる。

今後、LHADDASを活用し、局所域大気拡散事象の様々な課題解決に貢献すると共に、グラフィカルユーザーインターフェイスや解析結果の可視化機能等、システムの利便性を向上する機能開発を行う予定である。また、新たな研究開発として、原子力施設から放射性物質の大気放出に対して、原子力サイト内の詳細な拡散解析と放射線計測データの融合解析により、放射性物質の分布と放出量、あるいは汚染状況を逆推定する手法の開発を進めていく。これにより、原子力事故時の放射性物質の漏洩や原子力施設の解体時の放射性物質の飛散の監視と環境影響評価への活用を目指していく。

参考文献

- 1) Nakayama, H., *et al.*, *Journal of Nuclear Science and Technology*, **59**, 1314-1329 (2022)
- 2) Nakayama, H., *et al.*, *Journal of Nuclear Science and Technology*, **46**, 1170-1177 (2009)
- 3) Nakayama, H., *et al.*, *Journal of Nuclear Science and Technology*, **48**, 374-383 (2011)
- 4) Nakayama, H., *et al.*, *Journal of Nuclear Science and Technology*, **50**, 503-519 (2013)
- 5) Nakayama, H., *et al.*, *Journal of Nuclear Science and Technology*, **51**, 626-638 (2014)
- 6) Nakayama, H., *et al.*, *Journal of Nuclear Science and Technology*, **53**, 887-908 (2016)
- 7) Onodera, N., *et al.*, *Boundary-Layer Meteorology*, **179**, 187-208 (2021)
- 8) Satoh, D., *et al.*, *PLOS ONE*, doi: 10.1371/journal.pone.0245932.g011 (2021)
- 9) Sato, T., *et al.*, *Journal of Nuclear Science and Technology*, **55**, 684-690 (2018)
- 10) Nakayama, H., *et al.*, *Journal of Nuclear Science and Technology*, **58**, 949-969 (2021)

((国研) 日本原子力研究開発機構)