

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 2 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22710051

研究課題名（和文） 有害危険物質拡散災害時の影響評価のための都市詳細拡散予測手法に関する研究

研究課題名（英文） Local-scale atmospheric dispersion modeling for emergency response to releases of hazardous materials in urban areas

研究代表者

中山 浩成（NAKAYAMA HIROMASA）

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力基礎工学研究部門・研究員

研究者番号：50535903

研究成果の概要（和文）：本研究では、気象現象の再現計算が行える領域気象モデルと非定常乱流挙動予測に優れたLarge-Eddy Simulation（LES）モデルとを融合することで、実際の気象条件の下において建物スケールで詳細に評価を行える拡散予測手法の確立を目的としている。建物群内でのガス拡散に関する風洞実験や東京都心上空の風速の観測データなどを基に比較検証をすることで、基本的性能を実証することができた。これにより、都市域での有害危険物質拡散問題や原子力災害時に適用できる見通しを得た。

研究成果の概要（英文）：Our objective is to propose an approach to predict local-scale atmospheric dispersion behaviors by coupling between numerical weather prediction (NWP) and large-eddy simulation (LES) based computational fluid dynamics (CFD) models. We validated the basic performance of our model by comparing to the wind tunnel experimental data of turbulent flows and plume dispersion in building arrays, and the observed data over the central city area of Tokyo. From the above-mentioned, it is concluded that our approach is applicable to the problems of urban dispersion by accidental and intentional release of hazardous materials and nuclear disasters.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学 環境影響評価・環境政策

キーワード：健康影響評価

1. 研究開始当初の背景

1995年3月の東京都の地下鉄での猛毒化学物質を使った無差別テロや、2001年9月の米国における同時多発テロを始めとした国内外でのテロ脅威の拡大を背景に、CBRN（化学・生物・放射性物質・核）テロ対策の重要性が国際的に高まってきている。国内では、有害危険物質放出テロの対策として、消防庁

や一部自治体ではすでにマニュアル整備が行われている。一方、国外において、例えば米国科学協会では、2002年3月の上院外交委員会でも、市街地内の10ブロックに影響を及ぼすのに必要な放射性物質の入手は容易であり、放射性物質拡散テロは十分に起こりうるテロだと証言するなど、有害危険物質の散布テロに対する対策の必要性は、国内外で

年々高まっている。

こういった背景から、人口が集中する都市域において、有害危険物質の拡散災害時の影響評価のための予測手法の開発が緊急課題として挙げられている。これまで、建物周りや市街地内での拡散予測に特化した数値モデルとして、主に RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) モデルに基づいた拡散モデルが汎用ソフトウェアとして利用されている。このモデルは、計算負荷が小さく実用的といった利点があるものの、時間平均の概念に基づいた乱流モデルであるため、建物周りでの剥離流れの予測精度は十分ではないことが知られている。一方で、計算負荷は大きいものの、近年の飛躍的な計算機能力の向上から非定常予測に優れた LES (Large-Eddy Simulation) モデルの活用が有望視されている。この乱流モデルは、計算格子より大きいスケールの渦を直接解析し、普遍的な構造を有する小さい渦スケールをモデル化し、衝突・剥離・循環といった複雑乱流挙動を的確に捉えることができる。この LES モデルに基づいた拡散予測手法の構築により、有害危険物質拡散災害時の被害範囲の把握・救助活動・避難誘導といった防災上の観点から都市形態に応じた気流特性や濃度拡散分布パターンの把握および危険度評価の観点からピーク濃度の出現予測も可能である。また、環境・防災といった市民の安全・安心に資するための情報発信源として応用研究への道が拓けることも期待される。

2. 研究の目的

都市域において、化学物質や放射性物質などの有害危険物質が漏洩事故やテロなどにより拡散された場合の災害対策の立案が緊急課題として挙げられている。有害危険性の拡散物質が人間に与える影響評価として、平均濃度に加え、ピーク濃度予測も重要な指標となる。都市の地表面形状は建築構造物が多様に構成配置されているために著しく局所性の強い乱流場が形成され、そういった複雑な流れ場の中においても拡散物質の非定常挙動を的確に捉えられ、かつ、濃度分布を建物スケールにおいて詳細に評価できる局所域拡散予測手法の開発が急務である。

そこで、本研究では、領域気象モデルと非定常予測に優れた LES モデルとを融合解析することで、実際の気象条件の下で都市域での有害危険物質の濃度分布やピーク濃度を建物スケールにて詳細に評価できる拡散予測手法の確立を目的とするものである。本研究で提案する詳細拡散予測手法とは、まず、領域気象モデルを用いて気象スケールでの実際の風況場の数値シミュレーションを行い、そこで得られた風速データを LES モデルの入力条件として与え、汚染分布の状況を建物ス

ケールにて詳細に評価のできる手法のことを意味するものとしている。

3. 研究の方法

実際の気象条件下で災害地域における有害危険物の濃度分布を建物スケールで詳細に評価できる拡散予測手法を確立していくために、拡散風洞実験データや観測データを用いて精度検証を行いながら研究開発を進めた。その研究方法ならびに手順を以下に示す。

(1) 建物群内での LES 拡散計算

個々の建物が整形配列された簡易地表面形状の建物群内で点源放出された有害危険物拡散の LES 解析を実行する。実際の都市・市街地の建物平面密度 (λ_p : 地表面積に対する建物水平断面積の割合) は 0.1~0.6 程度の値を示すことが知られている。そのため、対象とする建物モデルの配列形態については、本研究では、 $\lambda_p=0.16, 0.25, 0.33$ の建物群内で放出されたガス拡散に関する拡散風洞実験を対象に LES 拡散計算を行った。実験データは、チェコ熱流体力学研究所 Bezpalcova 氏より提供して頂き、それぞれのケースにおいて、平均・変動濃度特性ならびに瞬間高濃度の出現特性について比較検証をした。

(2) 実在都市域での拡散計算

(1) で構築した LES 拡散モデルを実在都市へ適用した。ここでは、(a) 低層建物密集市街地、(b) ストリートキャニオン地域、(c) 高層建物地域、(d) 低層高層建物混在地域の 4 つの特徴的な地表面形態を呈する都市市街地を対象にした。都市地表面形状の再現にあたり、地理情報システムデータを用いて解像した。それぞれのケースでの計算結果から相互比較を行い、都市市街地形状が濃度分布パターンに及ぼす影響範囲を定量的に調べた。

(3) 気象モデルと LES モデルとの融合計算

(2) で構築した LES 拡散モデルを現実の場へ展開する。気象モデルで得られる風速は平均的風速であり、乱流スケールの小さな風速変動は含んでいない。そのため、recycling 手法を用いて、気象モデルの風速から乱流変動成分を作り出し、それを LES モデルの流入境界条件に与えた気象モデルの風速データに加えた。また、気象モデルの 3 次元風速変動データを LES モデルへ入力条件として与え、初期時刻の 3 次元風速データを初期条件とした。このアプローチの有効性を吟味するために、2009 年 10 月 8 日 8-9 時の台風通過時を対象に融合計算を行い、風速変動パターンを観測値と比較した。

さらに都市域での拡散実験に対し、本モデルを適用した。ここでは、米国オクラホマシティを対象に、試験計算として一定気象場の

条件のもとで拡散実験データと比較検証した。実験データはハンブルク大学気象研究所 Leitl 氏より提供して頂いた。

4. 研究成果

(1) 拡散風洞実験との比較

図 1 に $\lambda_p=0.25$ の建物群内の地表近傍における平均濃度の水平分布を示す。風洞実験結果と比較するとほぼ一致した分布を示している。図 2 は鉛直方向の平均濃度分布を示している。なお、個々の建物高さは 28m である。実験結果と比較すると、建物高さ内ではほぼ一定の分布を示し、それより上空では減少する傾向などは定量的にも一致しているのが分かる。これらの傾向は、 $\lambda_p=0.16$ と 0.33 のケースも同様であった。さらに、各ケースでの瞬間高濃度を実験結果と比較した。ここで、 C_{99} 、 C_{95} 、 C_{90} は、変動濃度の出現頻度が上位 1%、5%、10% の値と定義している。いずれのケースにおいても、実験結果と良好に対応しているのが分かる。

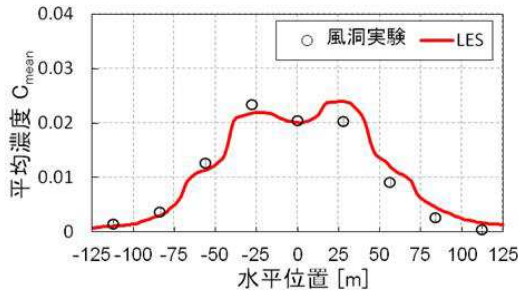


図 1 平均濃度の水平分布

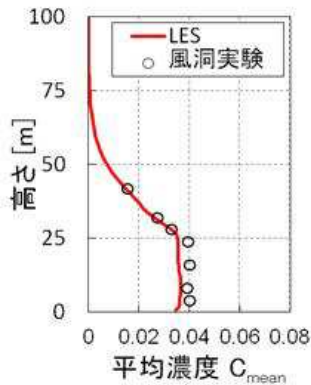


図 2 平均濃度の鉛直分布

Obstacle density	Peak concentration ratio	Central street canyon position		Crossing position	
		LES	Experiment	LES	Experiment
$\lambda_f = 0.16$	C_{90}/C_{mean}	1.3	1.4	1.7	1.7
	C_{95}/C_{mean}	1.4	1.5	1.8	1.9
	C_{99}/C_{mean}	1.5	1.7	2.2	2.2
$\lambda_f = 0.25$	C_{90}/C_{mean}	1.4	1.4	1.8	1.8
	C_{95}/C_{mean}	1.5	1.5	2.1	2.1
	C_{99}/C_{mean}	1.7	1.8	3.0	3.3
$\lambda_f = 0.33$	C_{90}/C_{mean}	1.4	1.5	1.6	1.7
	C_{95}/C_{mean}	1.5	1.6	1.8	2.0
	C_{99}/C_{mean}	1.7	1.7	2.2	2.7

表 1 各種建物群内におけるピーク濃度

(2) 実在都市域での拡散特性

図 3 に、(a)低層建物密集市街地、(b)ストリートキャニオン地域、(c)高層建物地域、(d)低層高層建物混在地域における地表近傍の平均濃度の空間分布を示す。風は左から右に向かって吹いているものとしている。

低層建物密集市街地では、個々の建物の影響はあまり強くなく、風下に向かうにしたがい徐々に広がってゆく分布形状を示している。ストリートキャニオン地域では、幹線道路上で高濃度領域が形成され、その後徐々に広がっていくのが分かる。高層建物地域や低層高層建物混在地域では、特に高層建物がガス拡散に与える影響はかなり大きく、煙源付近で急速に拡散のスケールが大きくなっているのが分かる。また、高層建物が密集している所では、汚染物質は滞留しやすく濃度が比較的高いことなども分かる。

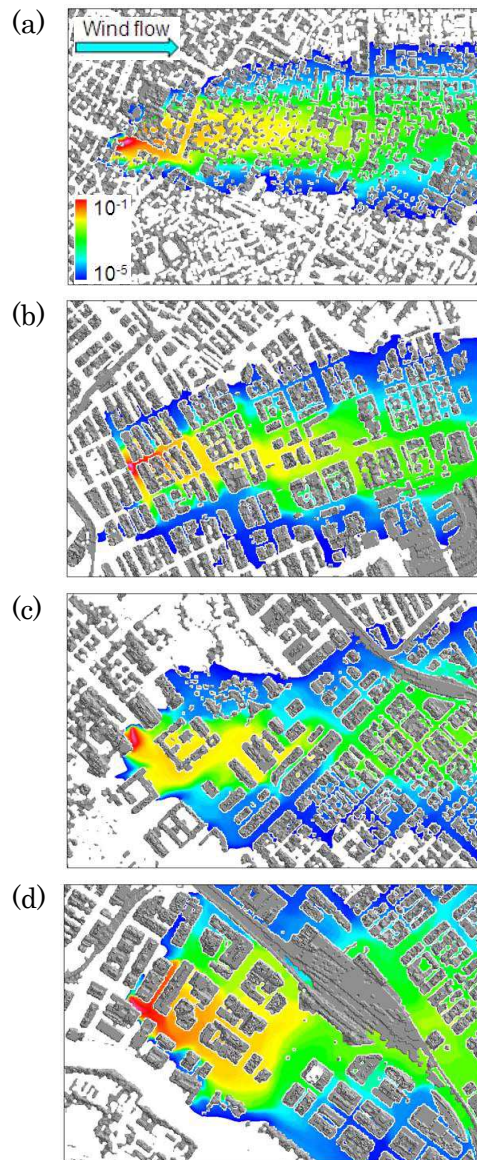


図 3 平均濃度の空間分布

次に、図4に煙源から流れ方向への平均濃度の分布を示す。低層建物密集市街地やストリートキャニオン地域では、風下に向かうにしたがい徐々に減少していくのが分かる。一方、高層建物地域や低層高層建物混在地域では、高層建物の存在による局所性の強い乱流域の影響により、風下1000m程度までは変化の大きい分布を示している。しかしながら、各地域での平均濃度分布を相互比較すると、煙源より1000m離れるとそれらの差異は小さくなり、収束していくのが分かる。この相互比較解析から、都市市街地形状がプルーム拡散の濃度分布パターンに及ぼす影響範囲は1km程度と推測できる。

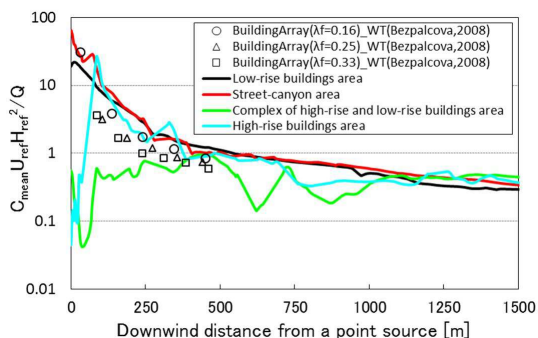


図4 平均濃度の流れ方向分布

(3) 融合計算の性能検証

領域気象モデルにより気象場を計算し、LESモデルにより都市域風速場を計算する。気象モデルでは、初期値・境界値に気象庁メソ客観解析値および海面水温MGDSSTを用い、2009年10月8日8時を初期時刻とした。計算領域は4重ネスト領域を設定し、それぞれ1800km×1900km、270km×300km、93km×93km、25km×30kmとし(図5(a)参照)、水平格子幅を4.5km/1.5km/300m/60m(鉛直レベル数43)としている。第4段階目の計算領域から得られた風速データをLESの入力条件として用いる。

一方、LESモデルでは、東京都心部の5km×2.0kmを解析対象領域とし(図5(b)参照)、その上流側に1km×2.0kmの乱流駆動領域を設けている。流入境界では、気象モデルで得られた風速データを与え、recycling手法により乱流変動風の生成を行い、解析対象領域にその変動風を流し込んでいる。水平格子幅は20m、鉛直格子幅は2.5m-64mの不等間隔としている。格子数は流れ方向に350、スパン方向に100、鉛直方向に80と設定している。タイムステップは0.05秒である。また、比較対象としているデータは、東京都千代田区北の丸公園内得られた観測値を用いた。

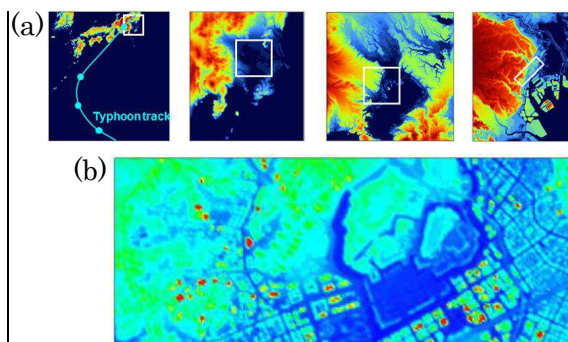


図5 解析対象領域

まず、気象モデルとLESモデルとの風速の鉛直分布を比較する(図6参照)。気象モデルでは上空にむかうにしたがい徐々に風速が増大するのが分かる。一方、LESでは、地表面から300m程度まで気象モデルの値を周辺に空間的に変動し、それより上空では気象モデルの値と一致するようになる。すなわち、気象モデルで得られた風速データをLESモデルの入力値とすることで、気象場の平均的構造を維持した乱流変動を再現していることを意味する。次に、ガストファクター(10分平均風速に対する3秒平均風速の割合)の頻度分布を算出し、観測値と比較した(図7参照)。ピーク値やガストファクターが大きい所では観測値と異なっているものの、大局的には乱流スケールの風速変動をよく再現しており、本融合解析手法が有効であることを示唆している。

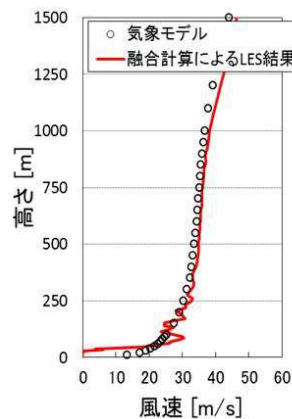


図6 風速の鉛直分布

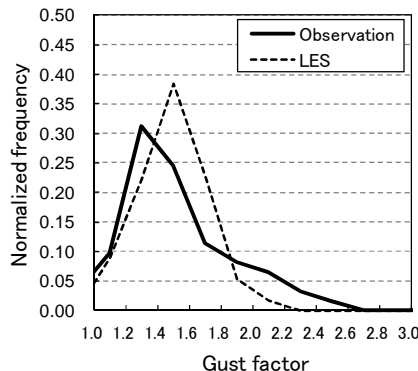


図7 ガストファクターの頻度分布

さらに、一定気象場の条件の下でオクラホマシティでの拡散実験に適用した。水平計算格子は 4m としている。図 8 は、市街地内部の幹線道路上の平均濃度分布を示している。幹線道路の幅が 30m-40m 程度であるため、十分な格子数で解像することができなかつたため、実験データのように局所的な変化までは LES モデルでは捉えることができなかった。しかしながら、全体的には濃度分布を定量的に良好に対応しているのが分かる。

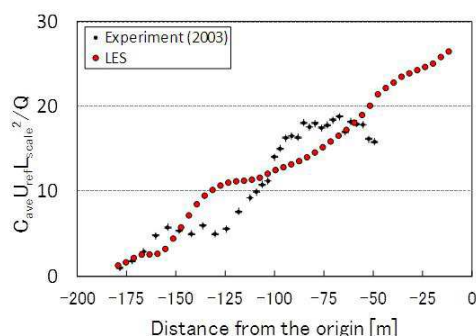


図 8 実在都市市街地内部の平均濃度分布

以上により、本研究では、建物群内でのガス拡散に関する風洞実験や都市市街地形状が濃度分布パターンに及ぼす影響範囲の推定、ならびに、東京都心上空の風速の観測データなどを基に比較検証した。その結果、LES 結果が拡散風洞実験データや観測データなどと良好に対応することで、基本的性能を実証することができた。これらにより、都市域での有害危険物拡散問題や原子力災害時に適用できる見通しを得たものと判断している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① Nakayama, H and H. Nagai (2011): LES of plume dispersion within a regular array of cubic buildings, *Progress in Nuclear Science and Technology*, **2**, 463-469. (査読有り)
- ② Nakayama, H., K. Jurcakova and H. Nagai (2011): Large-eddy simulation of plume dispersion within regular arrays of cubic buildings, *Advances in Science and Research*, **6**, 79-86. (査読有り)
- ③ Nakayama, H., T. Takemi and H. Nagai (2011): LES analysis of the aerodynamic surface properties for turbulent flows over building arrays with various geometries, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*,

50, 1692-1712. (査読有り)

- ④ Nakayama, H., T. Takemi and H. Nagai (2012): Large-eddy simulation of urban boundary-layer flows by generating turbulent inflows from mesoscale meteorological simulations, *Atmospheric Science Letters*, **13**, 180-186. (査読有り)
- ⑤ Nakayama, H., K. Jurcakova and H. Nagai (2013): Large-eddy simulation of plume dispersion within actual urban areas, *Advances in Science and Research*, **10**, 33-41. (査読有り)
- ⑥ Nakayama, H., K. Jurcakova and H. Nagai (2013): Development of Local-Scale High-Resolution Atmospheric Dispersion Model Using Large-Eddy Simulation. Part 3: Turbulent Flow and Plume Dispersion in Building Arrays, *Journal of Nuclear Science and Technology*, **50**, 503-519. (査読有り)

[学会発表] (計 3 件)

- ① Nakayama, H., T. Takemi and H. Nagai: Coupling of WRF and building - resolving urban CFD models for analysis of strong winds over an urban area, 14th Conference on Mesoscale Processes, 1-4 August 2011, Los Angeles, United States.
- ② Nakayama, H., K. Jurcakova and H. Nagai: LES of flow and plume dispersion within and over various obstacle arrays, *International Workshop on Physical Modeling of Flow and Dispersion Phenomena*, 22-24 August 2011, University of Hamburg, Germany.
- ③ Nakayama, H., B. Leitl, H. Nagai and F. Harms: LES of flow and plume dispersion in actual urban area in a spatially-developing boundary layer flow, *International Workshop on Physical Modeling of Flow and Dispersion Phenomena*, 22-24 August 2011, University of Hamburg, Germany.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中山 浩成 (NAKAYAMA HIROMASA)
 独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力基礎工学研究部門・研究員
 研究者番号: 50535903