

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 22 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360234

研究課題名(和文)ブラフボディ後流の乱流散逸と汚染排出特性

研究課題名(英文)Turbulent dissipation and pollution emission of bluff body slipstream

研究代表者

加藤 信介(KATO, SHINSUKE)

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：00142240

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、有害危険物質による健康被害の可能性を、居住空間のスケールから都市空間規模のスケールまでにおいて横断的にかつ一貫的に評価する手法を構築することである。

申請者は、流れ場の一特性である乱流状態が空気の混合促進作用を持つことに着目する。時間定常な空気環境にて障害物が移動する場合、障害物境界における流れの剥離により後流が乱流遷移する。申請者はこの現象が、障害物が空気へ及ぼす仕事率(もしくは仮想的な仕事率)が、ほぼ等しく乱流へのエネルギー注入に費やされるという観点にのっとり乱流場を評価し、関係式を組み立てる。

研究成果の概要(英文)：Methods to evaluate risk of health hazards by hazardous substances is developed in a cross sectional way from human scale to landscape scale. Air mixing promotion of turbulence condition which is one of characteristics in flow field is focused. Slipstream changes turbulent transition by exfoliation on the moving bluff body boundary in a steady condition. Relational expression to evaluate a turbulence field is developed from the viewpoint of assuming that bluff body virtual work rate equals to energy converted.

研究分野：流体工学

キーワード：流体工学 流体 抗力

1. 研究開始当初の背景

(1) 居住空間スケールでの拡散問題

近年、建物内のスペース内でのシックハウス、重症急性呼吸器症候群(SARS)、鳥インフルエンザなどの空気感染もしくは飛沫核感染や室内汚染質に関わる問題が注目を浴びている。室内の汚染質の拡散は換気による室内気流のみならず、人の動きを考慮すべきと思われる。研究代表者らも含め、室内での人の動きが気流や汚染質の拡散に及ぼす影響を実験で解析した例や、病室での人の動きと汚染質濃度分布が、実験と CFD により解析、報告されている。しかしそれらの研究は、主に室形状や換気システムが特定される事例研究が多く、様々な室形状や換気システムに適応できる、一般化された指標によって影響を定量的に評価する研究は少ない。

(2) 都市空間スケールでの拡散問題

都市空間内での拡散は、汚染源の性状、都市空間の形状の多様性にかかわる大気境界層の性状の影響を受ける。すなわち汚染源の位置や強度の任意性と、その場の風による汚染物質の排出性能と希釈性能を評価する必要がある。都市空間の形状の多様性、汚染質の移流、拡散にかかわる風、すなわち気象条件の多様性は、一般論としての汎用的な拡散現象の理解、予測を困難とし、個別の都市空間の形態や気象条件に基づくシミュレーション解析に頼らざるを得ない。CFD や風洞模型実験によるシミュレーション解析が活用される所以である。研究代表者は、このような都市空間の汚染質の排出性能を、年間の都市空間のローカルな評価対象空間に対して、その換気回数と風の空間平均運動エネルギーの累積確率頻度で評価する手法を開発し、その有用性を示している。しかしながら、突発的な汚染源の性状を明らかにする検討に関しては未だ十分でない。最近、巨大地震を契機とした原子力発電上における重大

事故が発生し、放射性物質など想定外の危険物質放散に関し、その放散性状が不明のため危険物質の濃度予測ができず、実質的にシミュレーション予測が役立たない事象が生じた。都市スケールの拡散では、このような突発的な汚染源の性状を濃度観測から逆に推定することが、特に重要であることが認識された。

2. 研究の目的

本研究の目的は、有害危険物質による健康被害の可能性を、居住空間のスケールから都市空間規模のスケールまでにおいて横断的にかつ一貫的に評価する手法を構築することである。

(1) 居住空間スケールの拡散評価

室内空間での拡散に関して、CFD シミュレーションの妥当性を検証し、一般化した仮定条件で人の動きにより汚染物質の拡散への影響を具体的に評価し、換気システムにより汚染物質の拡散に対する抑制効果を評価し、将来には伝染病を防止するため、新たな換気方式の改善策を提案することを目標としている。

(2) 都市空間スケールでの拡散評価

都市空間規模のスケールの評価は、汚染物質の放散源での放散性状を拡散場の濃度の観測値から逆解析により解析し、放散特性を知って、信頼性の高い危険物質、汚染物質の拡散性状を予測、評価する技術を開発することを目指す。この放散源解析は、拡散源周囲流れ場の伝達係数から求める大気拡散物質の放出源強度の推定手法を評価するもので、この方法を組み込んだ都市域での建物周辺の汚染物質分布予測の精度と信頼性を検証することを目標とする。

3. 研究方法

研究は、居住空間スケールの拡散、都市スケールの拡散のいずれも、主に乱流の数値シミュレーション（CFD）を用いて行う。両スケールとも、乱流シミュレーションの信頼性を確保し、実現象との対応を検証するため、空間スケールの拡散では実際の室内空間での実験、都市空間スケールの拡散では、風洞実験をおこなう。両スケールとも、流れ場の一特性である乱流状態が空気の混合促進作用を持つことに着目し、障害物が空気へ及ぼす仕事率（もしくは仮想的な仕事率）が、ほぼ等しく乱流へのエネルギー注入に費やされるという観点ののっとりて乱流場を評価する。

室内スケールでの拡散では、特に室内で歩行する人体の影響に着目するため、ここでいう障害物は歩行する人体(図 1,3 に示す回転運動や直線運動)を意味している。都市スケールの拡散では、障害物は都市空間内の建物や地形を示しており、仕事率とは(人体の歩行速度×抗力)や、もしくは(周辺空気の色度×建築にかかる抗力)を意味する。

4. 研究成果

(1) 居住空間スケール

居住空間スケールにおける具体的な検討手法はSVE2を用いた。換気効率(SVE2)上周三と提案者が1986年に提案した指標の一つであり、汚染物質の平均拡散半径を表す。本研究では換気効率SVE2により、汚染質の拡散半径の結果を算出した。SVE2の定常値は乱流モデルや回転半径など関係せずに、汚染質の濃度分布だけに関われ、パルス発生源として濃度分布が均一になった際に、全てのケースにおける結果が同じである。下記の式に結果を示す。

$$SVE2(x,y,z) = (1.73, 1.73, 0.78)$$

一方、SVE2の瞬時値の変化により、汚染

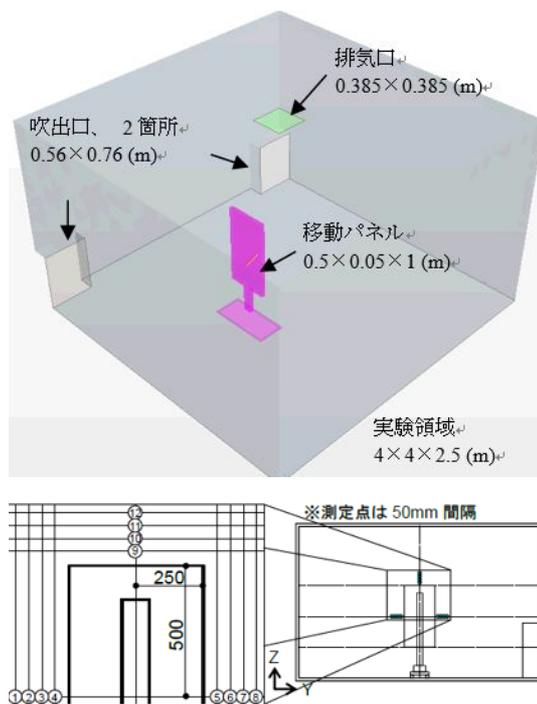


図1 既往研究実験概要と妥当性検証

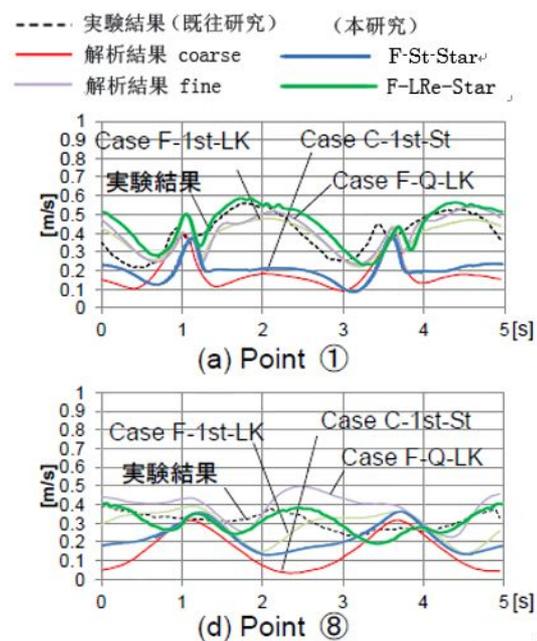


図2 妥当性の検証結果



図3 回転解析モデル

質が部屋全体へ拡散する速度を評価することができる。図4にSVE2の瞬時変化曲線を示す。その結果直方体によるSVE2の変化は円柱体より速いという結果が分かった。原因は空気へ渡す仕事率が直方体からの方が大きいためと考えられる。

人の動きによる室内汚染質の拡散への影響を具体的に検討するため、2つの運動方式を取り上げ、回転運動による混合効果と直線運動により汚染質の搬送効果をCFDにより検討した。

本論文では汚染質の拡散を抑制するための基礎研究であり、汚染質の拡散問題を人の回転運動による混合効果と人の直線移動による輸送効果をCFD解析による検討を行い、下記の結論がまとめられる。

既往研究の実験結果を利用し、本研究の数値流体シミュレーションの妥当性を検証した。標準k-モデルと低ReモデルによりCFD解析の妥当性の検証を行った。標準k-モデルでは既往研究の解析結果を良く再現している。低Reモデルでは、比較的良く実験結果を再現し、CFD解析の妥当性を検証されたと考えられる。

人の回転運動による汚染質への混合効果をCFD解析による検討した。結論として、人の回転運動により気流分布や圧力分布と汚染質濃度分布を可視化することができた。異なる人体モデルを使い解析を行った。空気取得したエネルギーが同じ場合、換気による混合効果より人の回転運動による混合効果が強いという結果が分かった。評価指標として、混合時間と換気効率SVE2を使い、混合効果や拡散することを定量的に評価することができると考えられる。

人の直線移動による汚染質への輸送効果をCFD解析による検討した。圧力、気流速度、濃度分布の時間変化を解明し、可視化することをできた。評価指標として空気輸送量を計算し、その指標を使い、人の直線移動

により輸送効果を検討した。その結果、空気が同じエネルギーを取得する場合、直線移動による輸送された空気量は換気による輸送された分の約10倍程度であった。

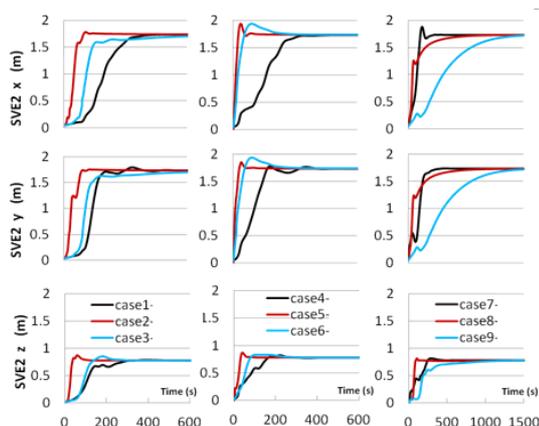


図4 歩行ケース時のSVE2の計算結果

表1 直線歩行のケース

ケース	乱流モデル	換気有無	排気速度 m/s		移動速度 m/s
			A室	B室	
case A	標準k- 乱流モデル	なし	2.2	2.2	1.2
case B		有り	2.2	2.2	0
case C			2.4	2.0	0
case D			2.2	2.2	1.2
case E			2.4	2.0	1.2
case F	低Re数 乱流モデル	有り	2.2	2.2	0

(2) 都市空間スケール

都市空間のスケールにおいても室内空間と同様に建物群が市街地内での汚染物質の希釈や排出を評価することが可能である。静止している建築にかかる抗力と周辺の風速から建物が流れになす仕事を評価し、汚染物質の拡散性状の評価を行うことが可能である。しかしながら室内空間は、人によりかなりコントロールされた室内気流の下で拡散を扱うのに対し、都市スケールは統計的な扱いが不可避である風の性質を考慮してこれらの検討を行う必要がある。本研究では、こうした観点から、汚染質の発生源での性状を汚染質の濃度観測値から逆解析し、その性状を明らかにする検討に注力した。また最近、

社会に大きな影響を与えた原子力災害を考慮し、汚染物質としては放射性物質を取り扱った。本報告では、都市空間スケール拡散現象に関し、風と都市の形状で形成される汚染物質の移流、拡散あるいは希釈、排出特性よりは、より検討が急務である汚染源の性状を、汚染濃度の観測値から逆推定する方法に関して記載している。放射性物質など目に見えない危険物質が大気に放出された際には、迅速かつ信頼性の高い放射性物質の拡散性状を予測し、その放射能影響予測を行う必要がある。このためには、信頼性の高い数値気象・拡散モデル計算の開発のみならず、拡散モデル計算の逆解析による迅速な放出源強度の推定手法が必要である。しかし、従来のWRF/ChemやSPEEDIなどの数値気象・拡散モデル計算は、大型計算機で多大な計算時間が必要である。また数100kmにわたる広域を対象とするため、空間解像度が粗く、狭域(10km以内)の地形および建物影響を再現することが困難であり、発電所周辺の固定観測点(福島第一原子力発電所周辺の例)データの利用が困難である。本研究では、放出源の性状を学解析に求める手法として、拡散に関する風洞実験データに基づき、これを正規拡散式モデルに当てはめ、この正規拡散モデルとの観測値データを用いた逆解析による放出量推定手法を開発した。本研究で開発した手法は、広域観測データを利用する気象モデルに基づく既存の放出量推定技術と比較して、次のような特徴がある。 拡散風洞実験データの近似式を拡散計算に用いるので、狭域の地形および建物の影響を高精度で再現することが可能である。 気象条件(風向:16ケース×大気安定度:6ケース=96ケース)毎の拡散計算結果(伝達係数)をデータベース化しておくため、通常のPCを用いて、数分以内に放出量推定計算が可能である。なお、風洞実験データは濃度値であるが、放射性物質の空間濃度から気中の放射線

強度を換算することも可能であるため、本手法は、観測値として空間濃度のみならず、シビアアクシデント時に原子力発電所などから放出される放射性物質の発する放射線の観測データを用いて、放散源の特性を推定することも可能である。

風洞実験データ近似式を用いた検証計算

まず、最初に、風洞実験データを観測値とし、風洞実験データ近似式の濃度分布計算結果を伝達係数として、放出量推定計算を行った。風洞実験による観測値と風洞近似式による推定濃度分布の誤差評価はFAC2で行い、FAC2は(1)式で定義され、拡散モデルの濃度再現精度の指標として用いられる。

$$FAC2 = \frac{N}{n} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Ni; \quad Ni \begin{cases} 1, \text{for } 0.5 \leq \frac{Obs}{Cal} \leq 2.0 \\ 0, \text{for } else \end{cases} \quad \dots(1)$$

n :全観測点数、 Obs :観測値、 Cal :計算値
これより放出量推定結果は $Q_i = 0.97 \times \text{真値}$ であり、風洞実験による観測値と風洞近似式による推定濃度分布の誤差(FAC2)は81%であるので、十分な推定精度があることが確認された。

風向変化による不確定性の検証

風向変化による不確定性の考え方を、図5に示す。放出量推定計算における不確定性は核種組成比や放射性物質の沈着及び移行過程、拡散モデルの実現象再現精度など多数存在する。本研究では、多数存在する不確定性の中でも、特に、可能性の高い風向変化による不確定性を検証した。気象観測データの風向は16方位単位で記録されるので、最大11.25°の誤差を含み得るため、放出量推定結果の精度が低下することが考えられる。観測値に風向(N+11.25°)、伝達係数に風向Nの濃度分布を用い、3分間平均値について放出量推定を行った。同時に、この不確定性を低減させる手法も検討した。

図6に風向変化に起因する不確定性の低減

対策を示す。野外の拡散幅(σ_y)は、観測時間中の風向変動幅(σ_θ)に比例し、観測時間が長くなるほど増加するため、濃度分布の拡散幅が増加し、その分布が平滑化され、風向変化に起因する不確実性が低減され得る。観測値に風向(N+11.25°)、伝達係数に風向 N の濃度分布を用い、1 時間平均値についても放出量推定を行った。3 分間平均濃度値を用いた場合の横風方向の濃度分布を評価した。風洞実験による観測値と風洞近似式による伝達係数計算値は、分布形状は相似であるが、煙軸は一致していない。これらを用いて放出量推定を行った結果、3 分間平均値を用いた場合、放出量推定結果は $Q_i=0.03 \times$ 真値、濃度分布計算値の推定誤差は $FAC2=3\%$ となり、推定精度が著しく低下した。風向変化による不確実性の低減対策として、1 時間平均濃度の観測値と計算値を用いて、検証計算を行った。風洞実験による観測値と風洞近似式による伝達係数の相対誤差は減少している。この結果、風向変化が存在する場合も、一時間平均濃度値を用いれば、 $Q_i=0.78 \times$ 真値、 $FAC2=62\%$ となり、放出量推定精度が改善されることが分かった。都市空間スケールに関する研究では、特に放出源での放出特性を濃度の等の観測値から特定する逆解析手法に着目し、次の成果を得た。

風洞実験による拡散データを正規拡散式に当てはめ、様々な気象条件でもその拡散性状が推定できるようモデル化した拡散性状に基づき、濃度の観測データから放出源の性状を推定する逆解析手法を検討し、その実用性を確認した。

この手法の不確実性を検証し、風向変動に起因する放出量推定精度低下を改善する対策として、1 時間平均観測データを用いることにより、精度改善が図れることを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- (1) 陳石、加藤信介、姜允敬、中尾圭佑、人

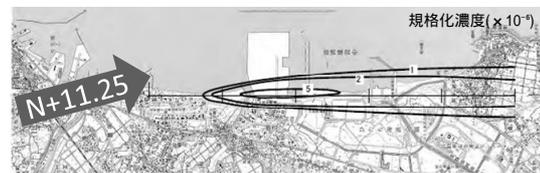


図 5. 風向変化の可能性

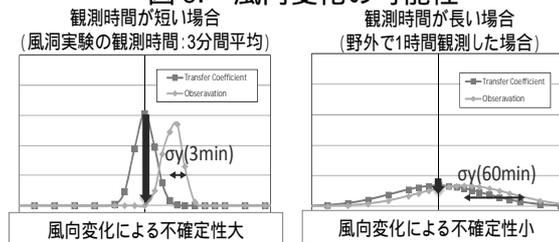


図 6. 風向変化に起因する不確実性要因の観測時間による変化(風下距離 $x=2000m$)

の直線移動による部屋間の気流に与える影響に関する CFD 解析、生産研究 65 巻 1 号、pp.7-10、2013

〔学会発表〕(計 3 件)

- (1) 陳石、加藤信介、姜允敬、中尾圭佑、人の動きによる室内汚染物質の拡散の評価に関する CFD 解析、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2、pp.673-674、2013
- (2) 陳石、加藤信介、人の直線移動による部屋間の気流の影響に関する CFD 解析(その 2)、移動による汚染物質の輸送性状の検討、日本空気調和・衛生工学会大会学術講演梗概集、第 7 巻 pp.121-124、2013
- (3) 大浦理路、金敏植、加藤信介、他 Source Term Estimation for Nuclear Accident Based on Atmospheric Dispersion Models、CWE2014、Hamburg、2014

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 信介 (KATO, Shinsuke)
 東京大学・生産技術研究所・教授
 研究者番号：00142240

(2) 研究分担者

大岡 龍三 (OOKA, Ryoza)
 東京大学・生産技術研究所・教授
 研究者番号：90251470

樋山 恭助 (HIYAMA, Kyosuke)
 山口大学・理工学研究科・准教授
 研究者番号：10533664