

平成 27 年度 風工学研究拠点 共同研究成果報告書

研究分野：屋外環境

研究期間：H27 ～ H28

課題番号：153007

研究課題名（和文）：密度差のあるガス拡散性状予測手法検討

研究課題名（英文）：Examination of a method for predicting the diffusion of exhausted gases with buoyant force

研究代表者：佐々木 澄

交付決定額（当該年度）： 318,000 円

※平成 27 年度で終了となる研究課題は最終成果報告書となりますので、下記項目について詳細な報告をお願いします。

※ページ数の制限はありません。

※成果等の説明に図表を使用していただいて構いません。（カラーも可）

※提出して頂いた成果報告書をホームページでの公開を予定しております。

1. 研究の目的

都市空間における大気汚染や臭気の問題に対して、従来のガス濃度予測では主に中立時かつ排出される汚染質は空気と同程度の密度と想定して検討されてきた。近年は BCP の観点から非常用電源を備える建物も増え、発電時に排出される高温ガスの影響範囲の検討や、都市部に作られるコージェネレーションシステムからの排熱の影響など、排出されるガス自体が空気よりも軽い条件での予測事例も必要となってきた。また、今後建設が推進されると考えられる水素ステーションについても、万が一の事故時におけるガス漏えいの問題への対策として、浮力性のガスである水素の拡散状況の予測が重要となる。

本研究は、市街地や建物周りにおける密度差の異なるガスの拡散性状を把握し、ガスの濃度予測手法の確立に向けた検討を行うことを目的とする。

2. 研究の方法

密度差のあるガスの拡散性状に影響を与えられ、

・大気の安定度 ・排出ガスの密度 ・排出源の位置 ・ガスの排出量

等を変化させ、ガスの拡散性状に与えるそれぞれの影響について検討する。また、これらの結果を数値解析の検証用のデータとして整備する。また、これらの風洞実験結果と数値解析結果を比較することで、数値解析の予測精度や適用限界等を検証する。

また、風洞実験と並行して数値解析を用いた検討を実施する。

3. 研究成果

（※ 4 節で示す発表論文の内容についてまとめる）

● 実施内容

本年度は風洞実験に先行して、過去に実施した浮力ガスを用いた風洞実験を対象に、数値解析を実施し、密度差のあるガスの拡散性状について検討した。

本検討では、2:1:1 の単体建物風下側壁面端からガスを放出させた風洞実験を対象として数値解析を実施した。排出ガスの浮力の有無が拡散性状に及ぼす影響を検討した上で、乱流モデル、乱流シュミット数が濃度場の予測精度に及ぼす影響について検討を行った。

● 解析条件

a. 風洞実験概要

測定部が $2.4\text{m}^{\text{H}} \times 2.6\text{m}^{\text{W}} \times 15.0\text{m}^{\text{L}}$ の風洞に高さ $H=0.2\text{m}$ 、奥行き $L=0.2\text{m}$ 、幅 $W=0.4\text{m}$ の直方体建物模型を設置した。建物風下側壁面には、建物中心軸上の高さ 0.1m の位置に内径 10mm のトレーサガス排出口を設け、トレーサガス（エタン）を排出した。浮力有りのケースでは水素ガスの浮力を模擬し、ヘリウムガスを混合することでフルード数を相似させた。軒高風速 U_{H} は 0.42m/s 、流れ方向乱流強度は 14% であり、ガス排出速度 V は 0.21m/s である（排出速度比 $V/U_{\text{H}} = 0.5$ ）。ガス濃度は炭化水素計を用いて測定した。

b. 数値計算概要

3次元流体解析ソフトウェア FLUENT13.0 を用いて風洞実験を対象とした数値計算を実施した。計算格子を Fig. 1 に示す。計算領域は $25H(x) \times 13H(y) \times 12H(z)$ とした。流入風速は Fig. 2 に示すように風洞実験の流入気流の測定値を近似する関数で与えた。乱流エネルギーは、実験の主流方向の乱流強度から推定した値を用いた。地表面の速度境界条件には一般化対数則を用いた。圧力と速度の連成解法には SIMPLE 法、移流項には QUICK スキームを用いた。

乱流モデルは、標準 $k-\epsilon$ モデルと、改良型の $k-\epsilon$ モデルとして商用コードに実装されていることが多い Realizable $k-\epsilon$ モデルの 2 通りで計算を実施した。乱流シュミット数は、0.7 を基本とし、0.5, 0.9 に変化させた場合の濃度分布への影響を調べた。

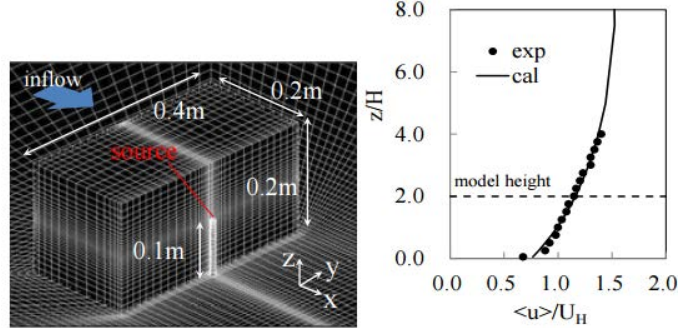


Fig.1 建物模型形状とメッシュ Fig.2 流入気流 (風速)

● 解析結果及び考察

a. 浮力の有無による拡散性状の違い

Fig. 3, 4 に、建物中心軸における建物後流域の濃度の鉛直分布について、2つの乱流モデルによる数値計算と実験結果の比較を示す。濃度は、平均濃度 C 、軒高風速 U_H とトレーサガス排出量 Q により無次元化した濃度 $C^* (=CU_H H^2/Q)$ で示す。風洞実験 (図中○印) では、浮力無し・有りいずれも鉛直方向の濃度の最大値が建物高さ付近にみられる。浮力有りの場合 (Fig. 4), 排出口付近の $x=H/2$ で、濃度の最大値が浮力無しの 2 倍程度の高い値を示している。Fig. 5 に示す数値計算の風速ベクトル図では、浮力有りの場合、ガス排出口直上で強い上昇流が発生している。この上昇流により、ガスがより高い位置まで運ばれていることが Fig. 6 から確認できる。

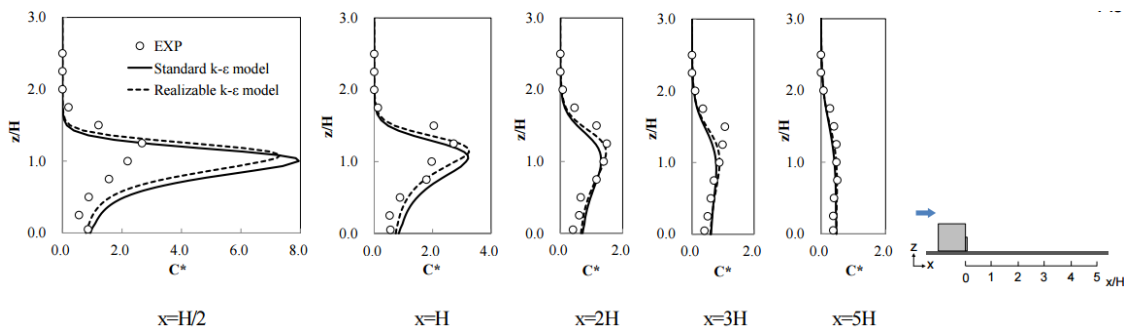


Fig.3 無次元濃度の鉛直分布 (浮力無、建物モデル中心線上)

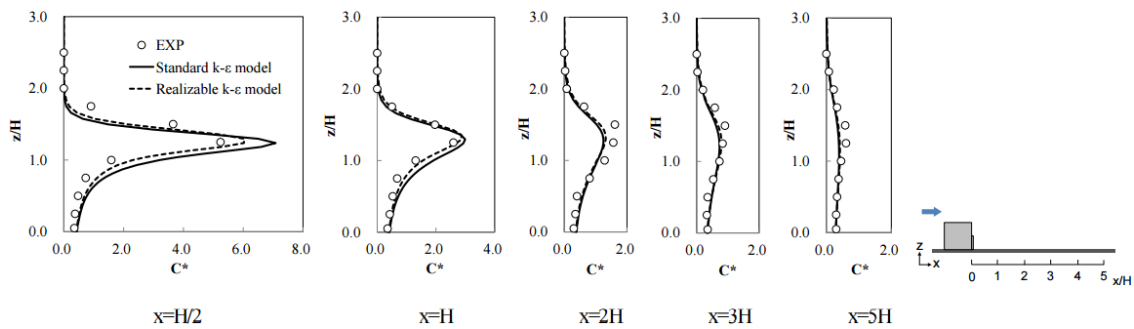


Fig.4 無次元濃度の鉛直分布 (浮力有、建物モデル中心線上)

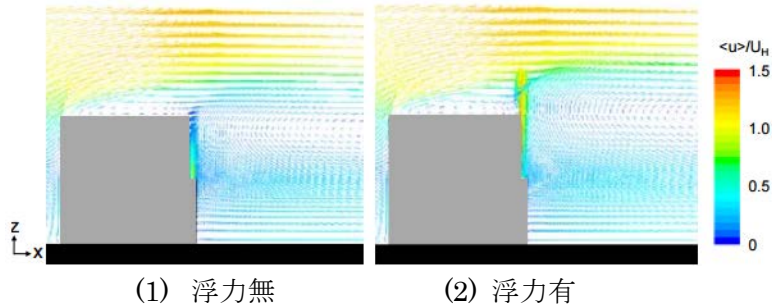


Fig.5 建物モデル中心線上の風速ベクトル (Realizable k- ϵ)

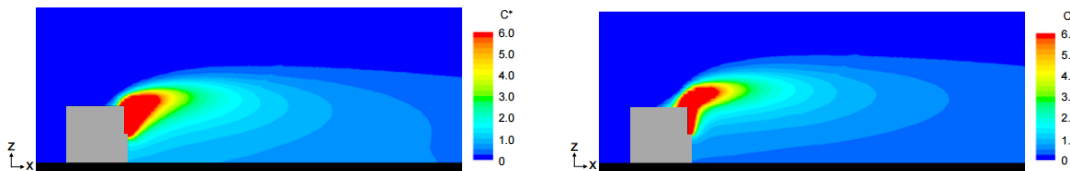


Fig.6 建物モデル中心線上の無次元濃度の鉛直分布 (Realizable k- ϵ)

b. 乱流モデルの影響

Fig. 3 に示す浮力無しの場合、どちらの乱流モデルでも $x=H/2$ での濃度のピークの位置は実験よりも低く、値は実験よりも大きめに評価されている。濃度ピークの高さは Realizable k- ϵ モデルの方が標準 k- ϵ モデルよりもやや高い。Realizable k- ϵ モデルでは、標準 k- ϵ モデルの問題とされる建物前縁部周辺の乱流エネルギーの過大生産が改善され、やや剥離が強くなるものの、実験結果を再現できていないと思われる。さらに、既往研究 (富永 (2008), 道岡ら (2012)) の指摘の通り、RANS モデルでは建物後方で発生する非定常的な変動が再現されないために、この領域における乱流拡散が過小評価され、濃度が高くなると考えられる。

Fig. 4 に示す浮力有りの場合、解析結果の濃度ピークの高さおよびその値は実験結果に近い。Realizable k- ϵ モデルでは実験結果の濃度のピークの位置と値を概ね捉えている。浮力無しの場合に比べ実験と解析結果の対応が良くなったのは、ガス排出口直上で発生する上昇流による濃度輸送が大きく、RANS モデルで乱流拡散が過小評価される領域よりも高い位置まで運ばれ、主流方向をはじめ各方向に拡散するためであると考えられる。

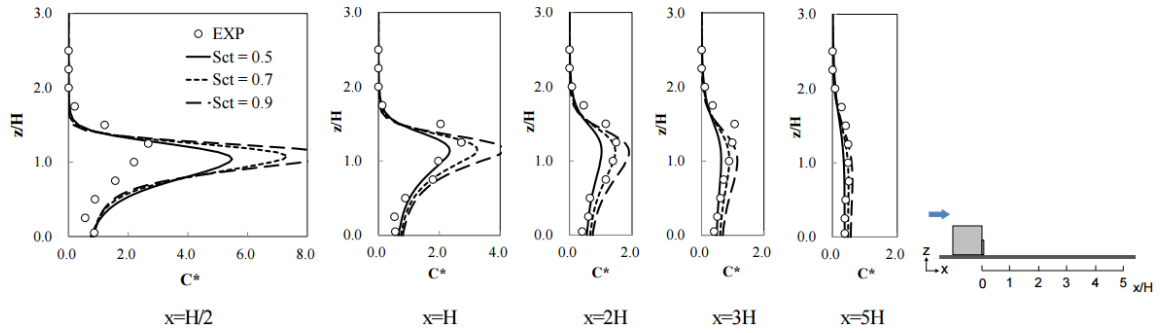
c. 乱流シュミット数の影響

Realizable k- ϵ モデルで乱流シュミット数 S_{ct} を変化させた場合の建物後流域の無次元濃度の鉛直分布を Fig. 7, 8 に示す。濃度の鉛直分布 (Fig. 7, 8 (1)) は、浮力無し・有りともに、乱流シュミット数が小さいほど濃度のピーク値は小さくなる。Fig. 9, 10 の主流直交方向断面の濃度分布 (浮力無し) から分かる通り、乱流シュミット数が小さい場合、濃度勾配の大きいガス排出口周辺の領域で、鉛直方向およびスパン方向への濃度拡散が増加し、排出口近傍 ($x=H/10$, Fig. 9) では高濃度となる領域が大きくなる。その結果、主流方向への濃度輸送が減少し、建物後流域 ($x=H/2$, Fig. 10) での濃度のピークが小さくなる。

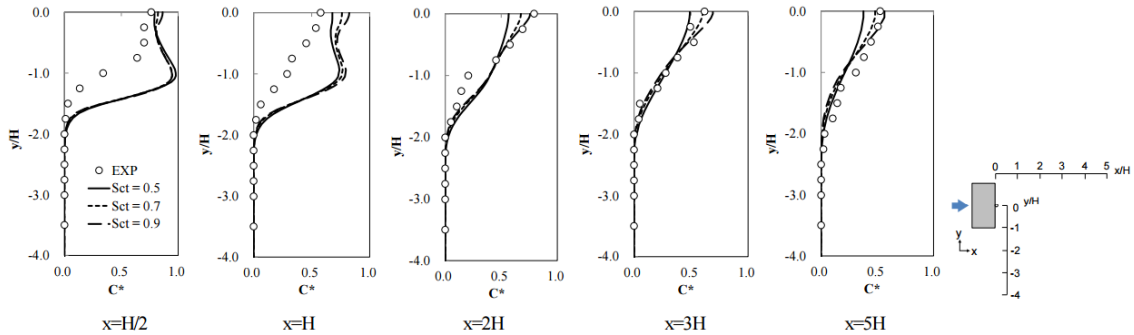
浮力無しの場合、今回の検討ケースで最も小さい乱流シュミット数 $S_{ct}=0.5$ を与えると実験との対応が良くなり、既往研究 (富永 (2008), 道岡ら (2012)) の傾向と一致するが、風下に行くにつれて実験結果からやや離れる傾向にある。富永(2008)が指摘しているように、RANS モデルの問題である建物後流域の速度場の乱流拡散の不足を、小さいシュミット数を用いることで、結果的に補っていると考えられる。一方、浮力有りの場合、経験的によく用いられる値である $S_{ct}=0.7$ が最も実験を良く再現していた。

浮力有りの場合は、浮力により乱流エネルギーの生産が促進され、排出口直上およびその近傍で乱流エネルギーが大きくなる。そのため、乱流シュミット数の変化がその領域の濃度拡散量に与える影響が大きいと考えられる。これは、Fig. 8 の排出口に近い $x=H/2$ の建物背後の領域 (1)では $z/H=0\sim 1$, (2)では $y/H=-1\sim 0$) において、乱流シュミット数の変化による濃度差が、浮力無しの場合に比べて大きいことから分かる。浮力無しでは実験と良い対応を示した $S_{ct}=0.5$ は、浮力有りの場合、排出口近傍の濃度拡散を大きめに評価し、風下側への濃度輸送は小さく評価されたために、全体として濃度

分布が実験から離れる結果となったと考えられる。以上のことから、乱流シュミット数の変化が濃度分布に及ぼす影響は流れ場の性状によって異なり、今回のような浮力を持つガスの拡散場では、乱流シュミット数が濃度分布に及ぼす影響は大きいと言える。

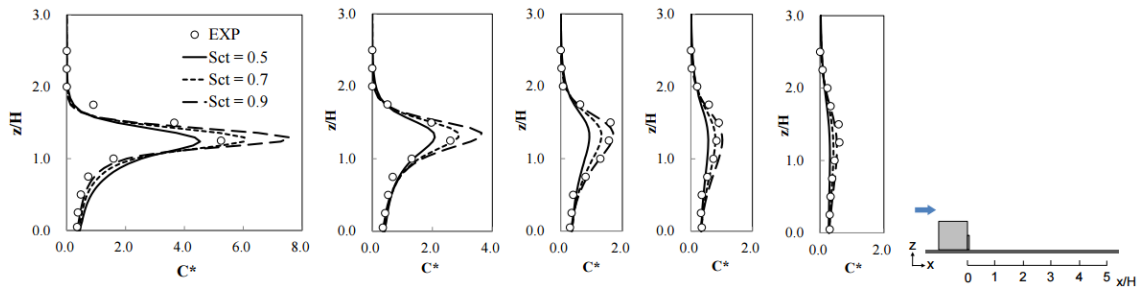


(1) 鉛直分布 (建物モデル中心線上)

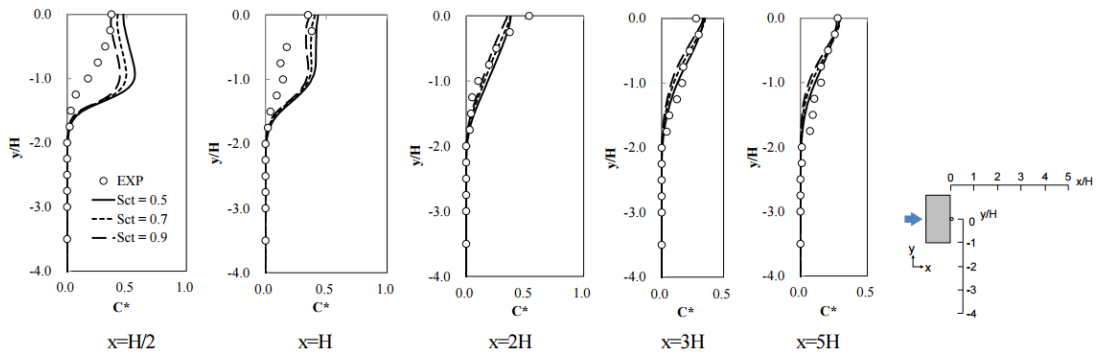


(2) 水平分布 ($z=H/20$)

Fig.7 無次元濃度分布 (Realizable $k-\epsilon$, 浮力無)

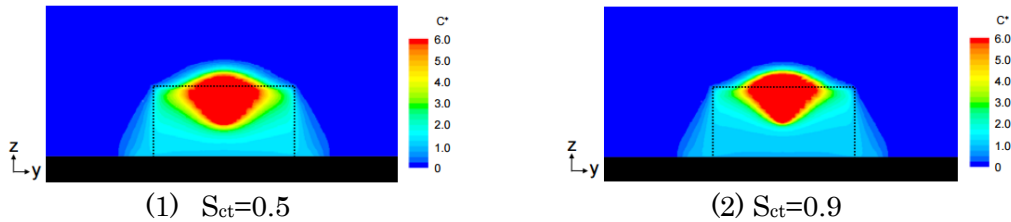


(1) 鉛直分布 (建物モデル中心線上)

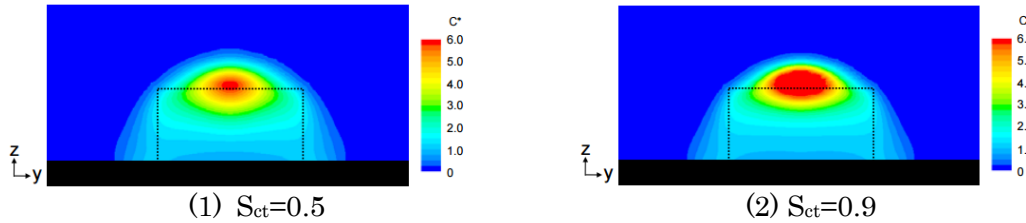


(2) 水平分布 ($z=H/20$)

Fig.8 無次元濃度分布 (Realizable $k-\epsilon$, 浮力有)



(1) $S_{ct}=0.5$ (2) $S_{ct}=0.9$
 Fig.9 y-z 平面上の無次元濃度分布 ($x=H/10$, 浮力無)



(1) $S_{ct}=0.5$ (2) $S_{ct}=0.9$
 Fig.10 y-z 平面上の無次元濃度分布 ($x=H/2$, 浮力無)

● まとめ

2:1:1 の単体建物モデルを対象として、浮力を持つガス・持たないガスの建物後流域における拡散性状を CFD により解析し、乱流モデルと乱流シュミット数の違いが濃度場の予測結果に及ぼす影響について検討を行った。

- 1) 浮力無しの場合はいずれの乱流モデルでも濃度の最大値を過大評価し、濃度最大値をとる位置を低めに評価する。これは、RANS モデルで再現される建物全縁部周辺の剥離が実験よりも小さいことと、建物後方における乱流拡散が過小評価されることによる。
- 2) 浮力有りの場合は、今回の建物形状・ガス排出位置では、排出口直上で上昇流が発生し、ガスが RANS モデルで乱流拡散が過小評価される領域よりも高い位置まで運ばれたのちに拡散するため、数値計算での予測精度が高い。
- 3) 乱流シュミット数の変化による濃度分布への影響は、浮力無しの場合、小さい乱流シュミット数を与えると実験との対応が良くなり、既往研究の傾向と概ね一致する結果となった。一方、浮力有りの場合は、浮力により排出口直上およびその近傍で乱流エネルギーが大きくなり、乱流シュミット数の変化がその領域の濃度拡散量に与える影響が大きかった。以上のことから、乱流シュミット数の変化が濃度分布に及ぼす影響は、流れ場の性状によって異なると言える。

4. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者には下線)

1. 小野 梓, 佐々木 澄, 野津 剛: 浮力を持つガスの拡散性状予測手法の検討, 数値流体力学シンポジウム梗概集, A08-3, 2015.12

[雑誌論文] (計 0 件)
 [学会発表] (計 1 件)
 [図書] (計 0 件)
 [その他]

5. 研究組織

- (1) 研究代表者
 佐々木 澄 (清水建設)
- (2) 研究分担者
 白澤 多一 (大妻女子大学)
 義江 龍一郎 (東京工芸大学)
 グェン トゥアン イン (東京工芸大学)
 立花 卓巳 (東京工芸大学)
 黄 正豊 (東京工芸大学)
 野津 剛 (清水建設)
 小野 梓 (清水建設)