

# 浮力を持つガスの拡散性状予測手法の検討

## Study on prediction method of buoyant gas diffusion

- 小野 梓, 清水建設株式会社, 東京都江東区越中島 3-4-17, E-mail: ono.azusa@shimz.co.jp
- 佐々木 澄, 清水建設株式会社, 東京都江東区越中島 3-4-17, E-mail: k\_sasaki@shimz.co.jp
- 野津 剛, 清水建設株式会社, 東京都江東区越中島 3-4-17, E-mail: nozu@shimz.co.jp

Azusa ONO, Institute of Technology, Shimizu Corporation, 3-4-17 Etchujima, Koto-ku, Tokyo  
Kiyoshi SASAKI, Institute of Technology, Shimizu Corporation, 3-4-17 Etchujima, Koto-ku, Tokyo  
Tsuyoshi NOZU, Institute of Technology, Shimizu Corporation, 3-4-17 Etchujima, Koto-ku, Tokyo

The prediction accuracy of RANS model for the dispersion of neutral gas and buoyant gas around a building model were examined. Numerical results were compared with the wind tunnel data. In this study, 2 RANS models, standard k-ε model and Realizable k-ε model, provided inadequate results for concentration field of neutral gas. The dispersion of buoyant gas predicted by Realizable k-ε model agreed well with that of experiment. For calculations with various turbulent Schmidt numbers,  $S_{Ct}$ , the result of neutral gas with  $S_{Ct} = 0.5$  gave better agreement with experimental data than those with  $S_{Ct} = 0.7$  and 0.9. On the other hand, optimal value for dispersion of buoyant gas was  $S_{Ct} = 0.7$  in this study. It was confirmed that the influence of turbulent Schmidt number on the concentration field varies with flow structure.

### 1. はじめに

市街地の風環境予測手法として CFD が広く用いられるようになってきており、最近では、熱汚染や大気汚染などの様々な都市環境問題に対する CFD の利用拡大も期待され、その予測精度に関する基礎データの蓄積が進められている<sup>(1)</sup>。近年では、計算機能力の向上により、前述のような問題の予測に LES を適用する研究例が増えてきたが、実務などでは、計算負荷の低さから RANS モデルが選択される場合も多い。RANS モデルによる濃度場の予測においては、建物後流の流れ場の予測精度が悪く<sup>(2)</sup>、この領域の濃度分布の予測にも問題が生じることが明らかとなっている<sup>(3)</sup>。また、濃度輸送方程式において、乱流濃度フラックスを勾配拡散近似を用いてモデル化する際に、渦動粘性係数と渦拡散係数の比として乱流シュミット数  $S_{Ct}$  が用いられる。乱流シュミット数は経験的に 0.7 あるいは 1.0 で与えられることが多いが、単体建物周辺のガス拡散では、これより小さな値を用いると風洞実験結果に近づくことが報告されている<sup>(3),(4)</sup>。しかし、この値が適用できる範囲は十分に明らかになっていない。

拡散現象は、対象とする問題や着目すべき領域によりクライテリアが様々であり、要求される予測精度も異なってくる。よって乱流モデルやパラメータ等計算条件の違いが予測結果に及ぼす影響を検討し、適用範囲を明確にしておく必要がある。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等、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ている。RANS モデルによる濃度場の予測において、乱流モデルや計算条件の違いが予測結果に及ぼす影響について検討した既往の研究は、空気と等密度の気体の拡散を対象としたものが多く、浮力を持つ気体の拡散予測手法については検討例が少ない。

本研究では、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<sup>(5)</sup>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。

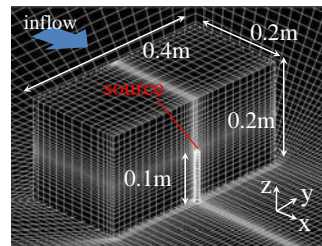


Fig. 1 Mesh around the building model

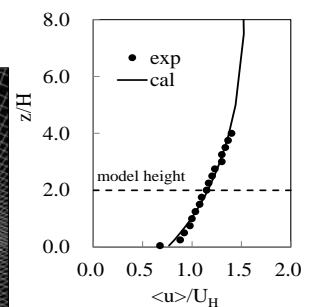


Fig. 2 Vertical distribution of wind velocity at inflow boundary

### 2. 解析条件

**2.1 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 $0.1\text{m}$ の位置に内径 $10\text{mm}$ 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 $0.42\text{m/s}$ 、流れ方向乱流強度は $14\%$ であり、ガス排出速度 $V$ は $0.21\text{m/s}$ である(排出速度比 $V/U_H=0.5$ )。ガス濃度は炭化水素計を用いて測定した。

**2.2 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。

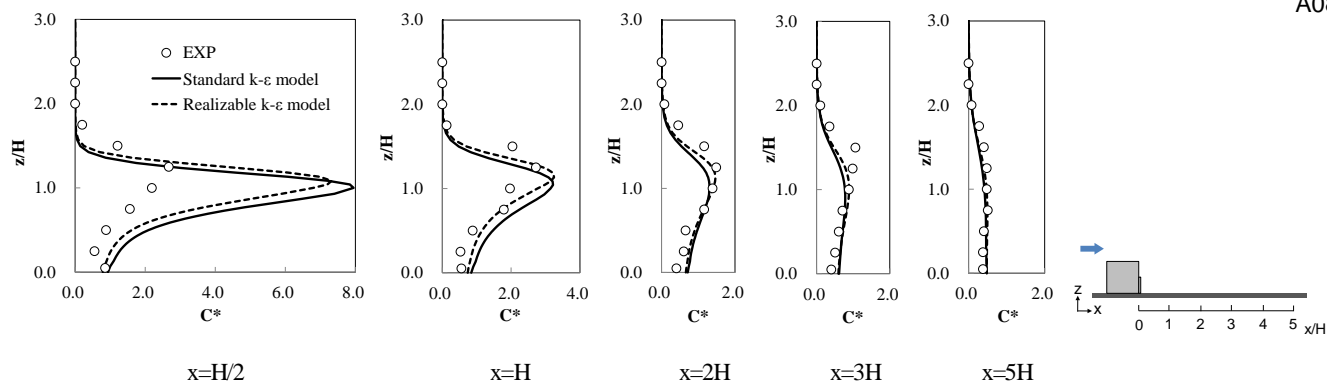


Fig. 3 Vertical distributions of normalized concentration  $C^*$  with neutral gas (center line)

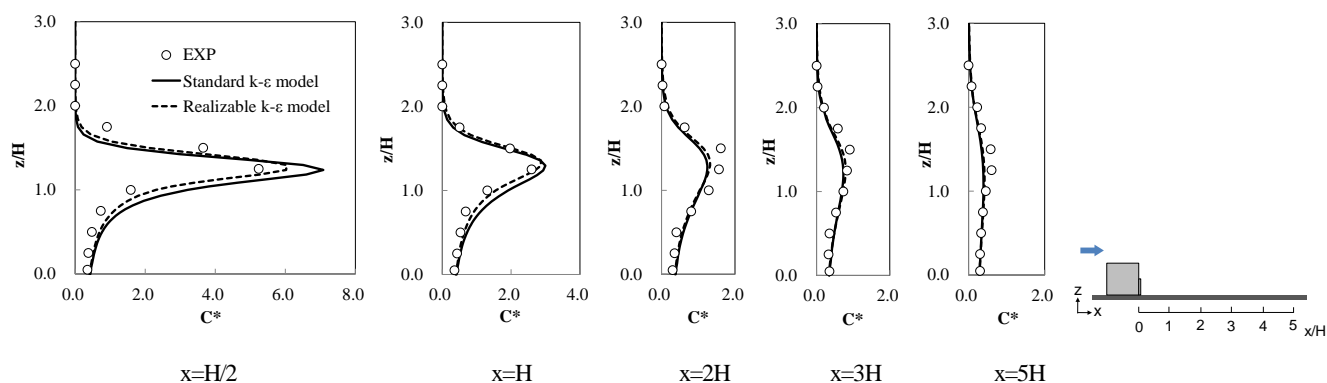


Fig. 4 Vertical distributions of normalized concentration  $C^*$  with buoyant gas (center line)

乱流モデルは、標準k-εモデルと、改良型のk-ε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-ε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。

### 3. 解析結果および考察

**3. 1 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からも確認できる。

**3. 2 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<sup>(3)(4)</sup>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

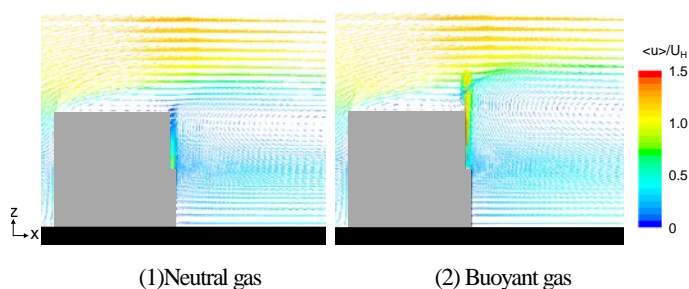


Fig. 5 Velocity vectors at central section (Realizable k-ε model)

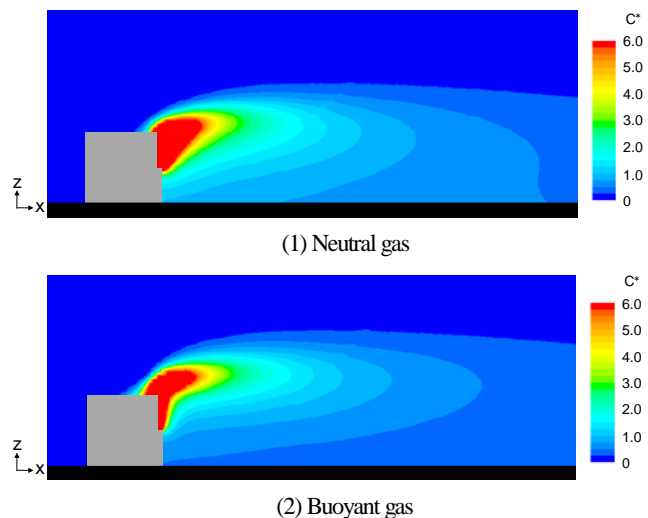


Fig. 6 Vertical distributions of normalized concentration  $C^*$  at central section (Realizable k-ε model)

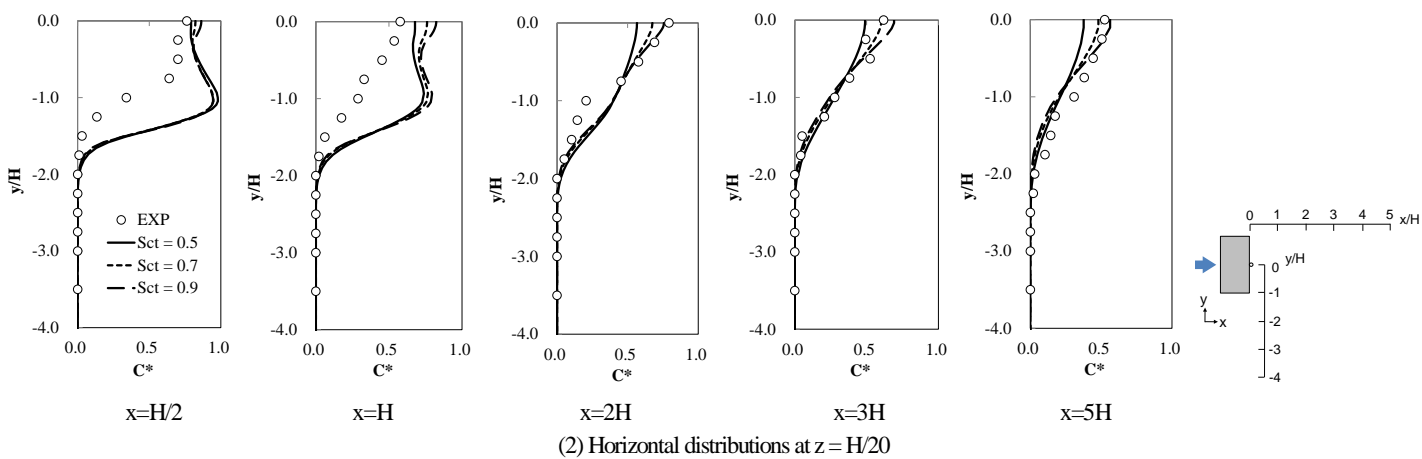
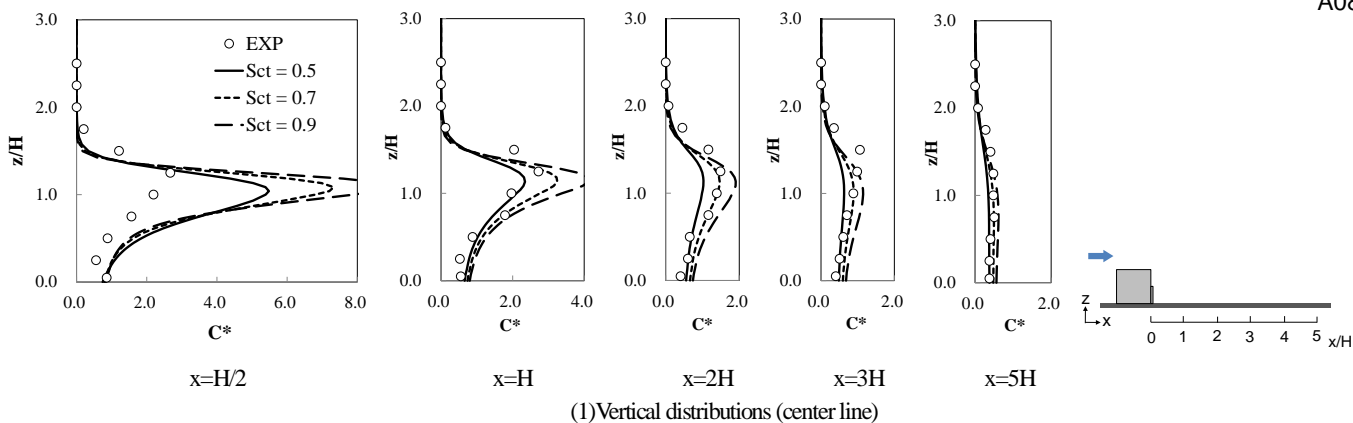


Fig. 7 Normalized concentration  $C^*$  with neutral gas

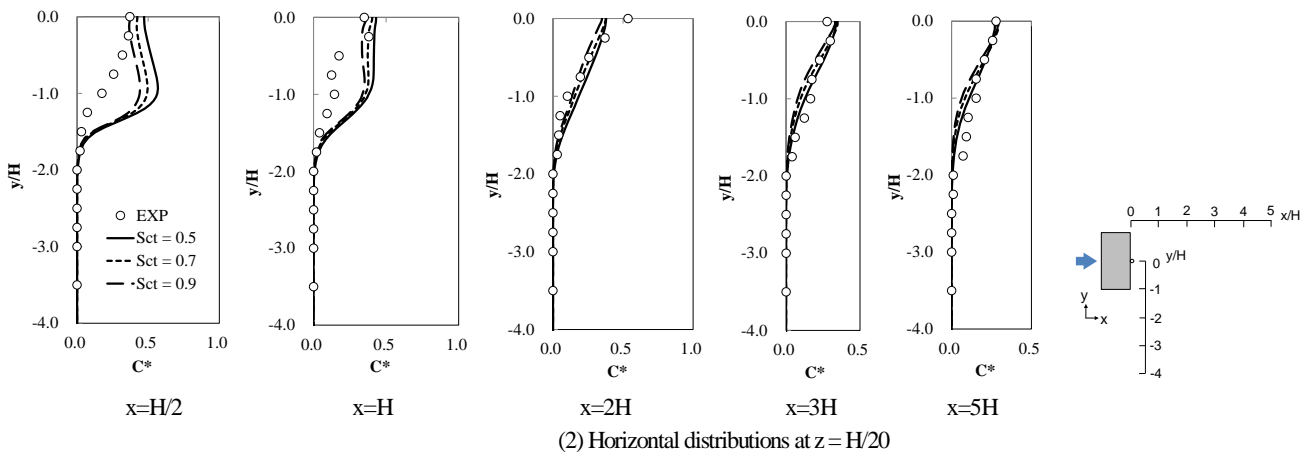
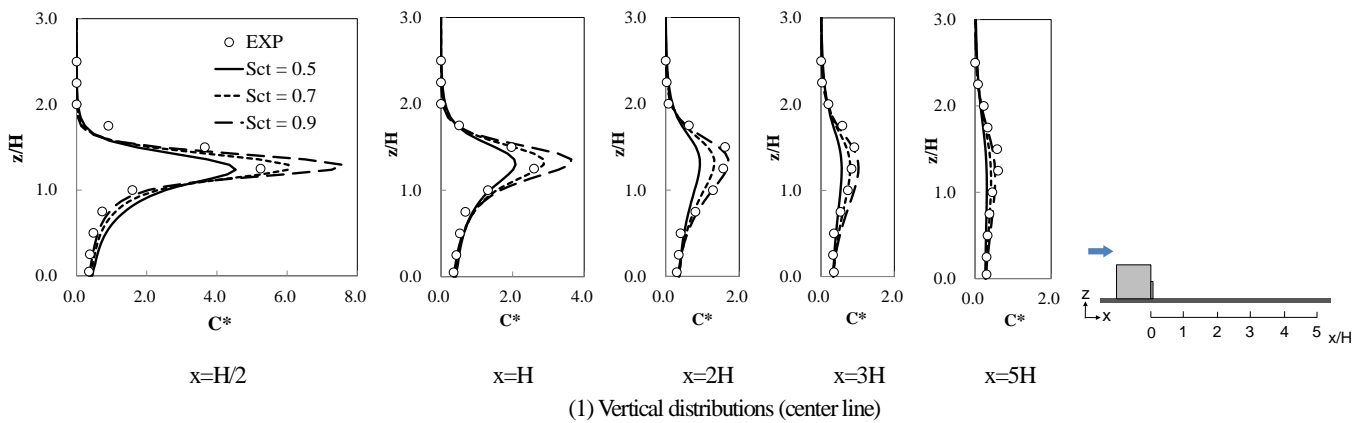


Fig. 8 Normalized concentration  $C^*$  with buoyant gas

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。

**3. 3 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  $S_{\alpha}$  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  $S_{\alpha}=0.5$  を与えると実験との対応が良くなり、既往研究<sup>(3)(4)</sup>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<sup>(3)</sup>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  $S_{\alpha}=0.7$  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  $S_{\alpha}=0.5$  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。

#### 4. 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。

#### 参考文献

- 1) 富永, 大風, 菊本, 義江, 持田, “CFD に基づく市街地の汚染質・熱拡散の予測手法に関する研究—RANS モデルにおける各種の計算条件の違いが濃度分布の予測精度に及ぼす影響—”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (2015), pp.729-732.
- 2) 日本建築学会, “市街地風環境予測のための流体数値解析ガイドブック—ガイドラインと検証用データベース—”, (2007)
- 3) 富永, “単体建物モデルを対象とした乱流モデル, 乱流シュミット数の影響の検討 CFD による建物近傍の汚染質拡散の予測精度に関する研究 その1”, 日本建築学会環境系論文集, No.630, (2008), pp.991-997.
- 4) 道岡, 佐藤, “市街地の気流・ガス拡散を対象とした数値シミュレーション”, 大気環境学会誌, 47, (2012), No.3, pp.119-126.

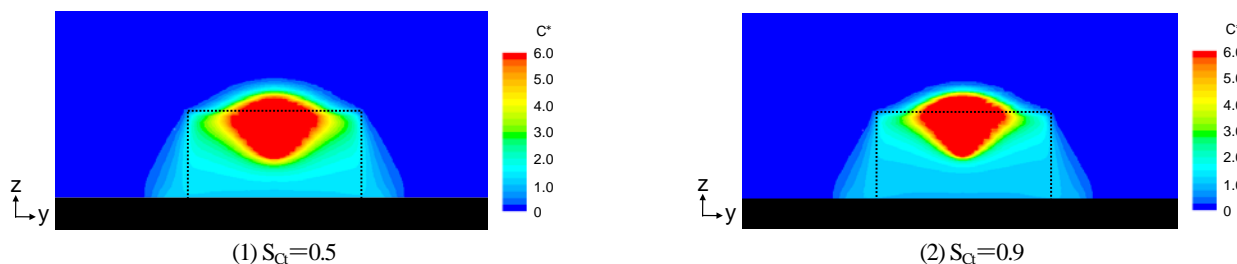


Fig. 9 Vertical distributions of normalized concentration  $C^*$  with neutral gas in  $y$ - $z$  planes ( $x=H/10$ )

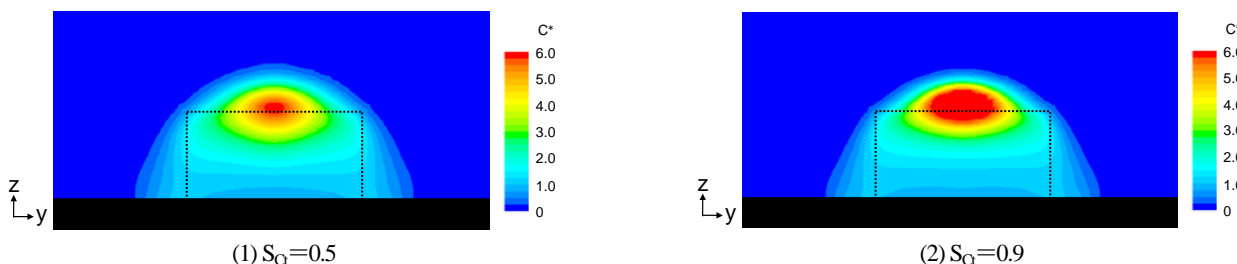


Fig. 10 Vertical distributions of normalized concentration  $C^*$  with neutral gas in  $y$ - $z$  planes ( $x=H/2$ )

- 5) 野津, 老川, 日比, 酒井, “水素スタンドの安全性に関する研究開発 (その 2) 漏洩水素ガスの拡散シミュレーション”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (2004), pp.33-34.
- 6) Tominaga, Stathopoulos, “Turbulent Schmidt numbers for CFD analysis with various types of flowfield”, Atmos.Environ, 41, (2007), pp.8091-8099.
- 7) 老川, 石原, 嶋田, 野津, “建物近傍の平均濃度予測に関する風洞実験”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (2002), pp.833-834.
- 8) 白澤, 遠藤, 義江, 持田, 田中, “高層建物後流弱風域におけるガス拡散性状に関する LES と Durbin 型  $k-\epsilon$  モデルの比較”, 日本建築学会環境系論文集, No.627, pp. 615-622.
- 9) 大気環境学会関東支部・予測計画評価部会 CFD モデル環境アセスメント適用性研究会, “CFD モデル (DiMCFD) による大気環境アセスメント手法ガイドライン”, (2013)