

数値流体計算による浮力を有するガス拡散予測手法の検討

小野 梓 佐々木 澄 野津 剛
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所)

Study on Prediction Method of Buoyant Gas Diffusion using RANS Model

Azusa Ono, Kiyoshi Sasaki and Tsuyoshi Nozu

非常用電源の運転時に排出される高温ガスや、水素関連施設の事故時に漏洩する水素ガスなど、浮力を有するガスの拡散性状予測の重要性が増している。本研究では、浮力を有するガスの建物周辺における拡散性状を RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations)モデルにより予測し、風洞実験との比較によりその精度を確認した。予測結果は既往研究で示されている予測モデルの有効性判定基準を満たすことを確認した。また、濃度場を良く再現する計算条件は、対象とする流れ場の性状によって異なることが分かった。

It is getting more important to predict the dispersion of buoyant gas, e.g. exhaust gas with high temperature from an emergency generator and leaked gas from a hydrogen supply facility in an accident. In this study, RANS model was applied to predict the dispersion of buoyant gas around a building model. The prediction accuracy was examined by comparing the numerical results with the wind tunnel results. Numerical results satisfied the quality acceptance criteria for model predictions stated in the previous research. It was confirmed that computational conditions which can reproduce the concentration field well depend on the flow structure.

1. はじめに

建物から外部に排出される汚染質や臭気の拡散性状を正確に予測することは、換気・空調設備の給排気口の設計や周辺の大気環境への配慮などの観点から重要な課題である。

近年、BCP 対策として非常用電源を備える建物が増えており、運転時に排出される高温ガスが建物や人体に影響を及ぼす恐れもあるため、拡散範囲の予測が必要となる。また、カーボンニュートラルに向けた水素社会実現のための取り組みも進められており、水素関連施設における安全性の確認のため、事故時に漏洩した水素ガスの拡散性状を正確に予測することが必要となる。これらの例は、排出されるガスの密度が空気よりも小さい、すなわちガスが浮力を有しており、空気との密度差のないガスとは異なる拡散性状を示す。このような浮力を有するガスの拡散性状を予測する場合、風洞実験は相似則の制約から現象を再現できない場合があり、数値流体計算(CFD)が有用な手段となっている。

近年は、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、熱汚染

や大気汚染などの様々な都市環境問題に対する利用拡大が進んできている。また、以前はこれらの問題の予測に、計算負荷の小さい RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations)モデルを用いるのが主流であったが、最近では計算機能力の向上により、より予測精度の高い LES (Large Eddy Simulation)を適用する事例も増加している。これらの動向を踏まえ、CFD を種々の都市環境問題の予測に適用する際の留意点をまとめたガイドライン¹⁾が 2020 年に日本建築学会より刊行されている。

実務の場においては時間的な制約があるため、計算負荷の観点から LES ではなく RANS モデルが選択される場合も依然として多い。しかし、RANS モデルでは、建物後流のような低風速域の流れ場の予測精度が悪いため、この領域の濃度分布の予測にも問題が生じることが既往の研究で指摘されている²⁾。また、乱流モデルや計算条件の違いがガス拡散の予測結果に及ぼす影響について検討した既往の研究では、空気と等密度の気体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。

拡散現象は、対象とする問題によってクリアす

るべき基準が異なり、それにより数値計算に要求される予測精度も異なってくる。よって RANS モデルにおける計算条件の違いが予測結果に及ぼす影響を検討し、適用範囲を明確にすることは有意義と考えられる。

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³⁾を対象として数値流体計算を実施した。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、乱流モデルや拡散性状に与える影響の大きい無次元量である乱流シュミット数の違い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。

2. 風洞実験³⁾

2.1 風洞実験概要

測定部が幅 2.6m、高さ 2.4m の回流式風洞に、図-1 に示す高さ $H=0.2\text{m}$ 、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 $0.1\text{m}(=H/2)$ の位置に内径 10mm のトレーサガス排出口を設け、トレーサガスとしてエタンを排出した。浮力有りのケースでは水素ガスの浮力を模擬し、ヘリウムを混合することで密度フルード数を相似させた。環境空気の密度を基準流体密度 ρ_0 とすると、浮力有りのケースの排出ガスの密度 ρ_s は、 $\rho_s=0.37\rho_0$

である。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 $V/U_H=0.5$)。ガス濃度は炭化水素計を用いて測定した。濃度の結果は、ガス濃度 C 、建物高さ H 、軒高風速 U_H 、トレーサガス排出量 Q により無次元化した濃度 $C^*(=CU_HH^2/Q)$ で示す。

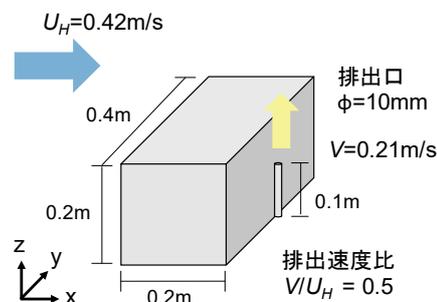


図-1 実験概要

2.2 浮力の有無による拡散性状の違い

風洞実験により得られた建物後流域の濃度について、建物中心軸の鉛直断面、地表面付近 $z=H/20$ の水平断面における分布をそれぞれ図-2、図-3 に示す。図-2 より、浮力無し・有りの場合でいずれも、建物後流域では建物高さ付近で濃度が最大値となることが確認される。この最大値の現れる高さは、浮力無しよりも浮力有りやや高く、その濃度も大きい。一方、地表面付近(図-3)では、

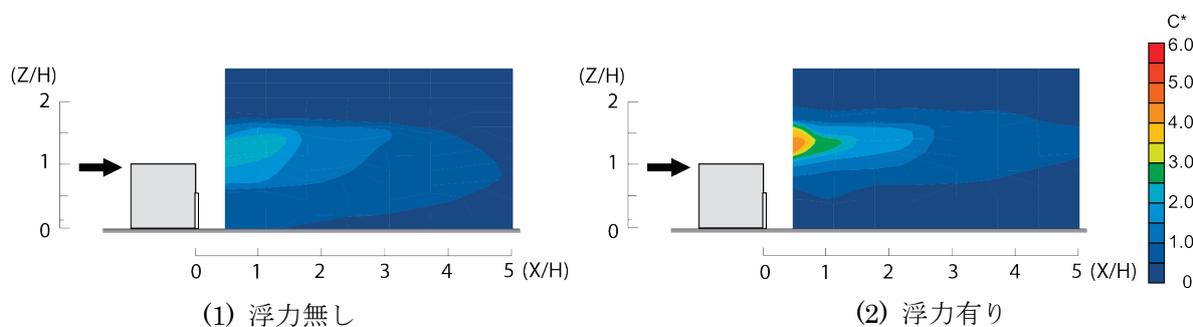


図-2 風洞実験結果($y=0$ の鉛直断面の無次元濃度分布)

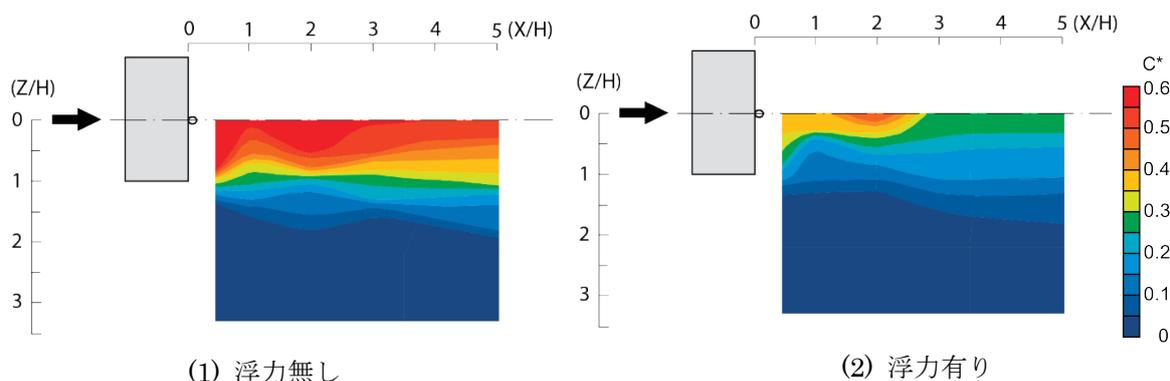


図-3 風洞実験結果($z=H/20$ の水平断面の無次元濃度分布)

浮力無しの場合には比較的高い濃度となっているのに対し、浮力有りの場合には、浮力無しの半分程度の濃度となっている。

3. 数値計算概要

3.1 数値計算手法

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。計算格子を図-4 に示す。計算領域は $25H(x) \times 13H(y) \times 12H(z)$ とした。流入風速は図-5 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⁴⁾の2通りで計算を実施した。

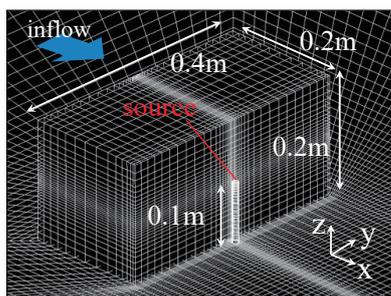


図-4 計算格子

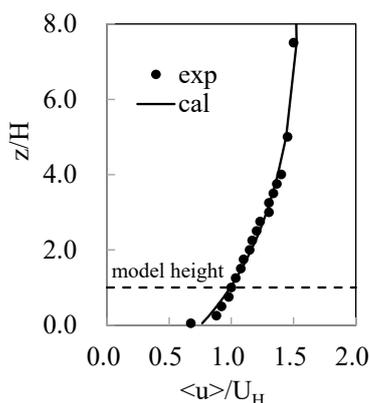


図-5 流入気流

なお RANS モデルでは、乱流濃度フラックス $-(u_i'c')$ を勾配拡散近似によりモデル化し、乱流シュミット数 Sc_t を用いて式(1)のように表現する。

$$-(u_i'c') = \frac{\nu_t}{Sc_t} \frac{\partial(c)}{\partial x_i} \quad (1)$$

ここで、 u_i は風速の i 成分 ($i=1\sim 3$)、 c は濃度、 ν_t は渦動粘性係数である。 $\langle f \rangle$ は物理量 f のアンサンブル平均値であり、 $f' = f - \langle f \rangle$ と表記される。

本研究における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。

3.2 予測精度の定量評価指標

本研究では、各計算条件で再現される拡散性状の比較を行うとともに、数値計算の精度検証のための Metric⁵⁾により、各計算結果の予測精度の定量評価を行った。Metrics として、予測値が実験値の倍半分の範囲に入っているデータの割合を表す Factor of two (FAC2)、予測値と実験値との平均的な差を、予測値と実験値の全てのデータの平均値で基準化して示す Fractional bias (FB)、二乗誤差の平均を予測値と実験値それぞれの平均値の積で基準化して示す Normalized mean square error (NMSE) の3つを用いた。それぞれの指標を式(2)~(4)に示す。

$$FAC2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i$$

$$\text{with } n_i = \begin{cases} 1 & \text{if } 0.5 \leq \frac{P_i}{O_i} \leq 2.0 \\ 1 & \text{if } O_i \leq W \text{ and } P_i \leq W \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

$$FB = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)}{0.5 \sum_{i=1}^N (O_i + P_i)} \quad (3)$$

$$NMSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2 / \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i \right) \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i \right) \quad (4)$$

ここで、 O は実験値、 P は予測値、添え字の i は比較するデータ点番号を表す。 N は総データ数、 n_i は 0 か 1 の判定値である。 W は測定下限などが相当し、本研究では $W=0.01$ とした。各指標の理想値(予測値と実験値が一致する場合)は、FAC2 は 1、FB と NMSE は 0 である。FB は正のとき予測モデルが過小評価傾向、負のとき過大評価傾向であることを意味する。

都市の風通しや汚染物質輸送の予測精度の向上や品質保証を目的として欧州で実施された研究プ

プロジェクトである COST Action 732⁵⁾では、建物周辺の濃度場を対象とした場合の予測モデルの有効性を評価する判定基準例として、全点濃度で $FAC2 > 0.54$ 、煙軸濃度で $FAC2 > 0.89$ を挙げており、FB に対しては $|FB| < 0.5$ が許容範囲であるとしている。また、Chang and Hanna⁶⁾は、 $|FB| < 0.3$ を一つの目安としている。

本研究では、建物中心断面上の 55 点、高さ $z = H/20$ の平面上の 65 点の計 120 点の実験結果と数値計算結果を用いて Metrics を算出した。

表-1 数値計算の検討ケース

case	浮力の有無	乱流モデル	乱流シュミット数 Sc_t	Metrics		
				FAC2	FB	NMSE
NS07	無	標準 $k-\epsilon$ モデル	0.7	0.77	-0.21	2.20
NR05		Realizable $k-\epsilon$ モデル	0.5	0.73	-0.07	1.08
NR07			0.7	0.78	-0.21	1.44
NR09			0.9	0.76	-0.31	1.95
BS07	有	標準 $k-\epsilon$ モデル	0.7	0.83	-0.04	0.85
BR05		Realizable $k-\epsilon$ モデル	0.5	0.77	0.07	0.68
BR07			0.7	0.78	-0.03	0.36
BR09			0.9	0.80	-0.10	0.52

4. 計算結果

4.1 予測精度評価

表-1 に検討ケースと精度評価の Metrics の結果を示す。すべてのケースで FAC2 が 0.54 を上回っており、 $|FB|$ が 0.3 の範囲を超えるのは NR09 のみであった。これより、今回の検討ではほとんどのケースの予測結果が、COST Action 732⁵⁾が示した予測モデルの有効性判定基準を満たすことを確認した。

一方で、多くのケースで FB が負の値となっていることから、数値計算による予測値が過大評価傾向であると言える。各ケースを比較すると、すべての Metrics において、浮力無しの場合よりも浮力有りの場合の方が成績は高い。また、浮力無し・有りの場合でいずれも、標準 $k-\epsilon$ モデルよりも Realizable $k-\epsilon$ モデルの方が成績はやや高い傾向にある。乱流シュミット数 Sc_t の異なるケースを比較すると、浮力無しの場合、FB および NMSE の成績は $Sc_t=0.5$ で最も良いが、浮力有りの場合は、 $Sc_t=0.7$ で最も成績が良い。

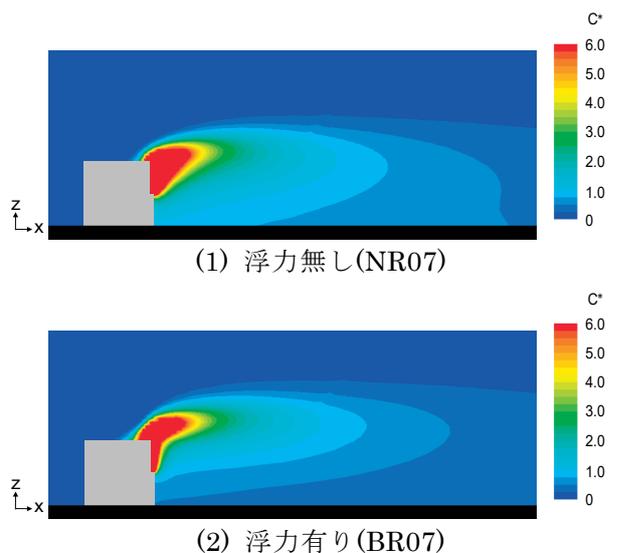


図-6 建物中心断面における無次元濃度分布

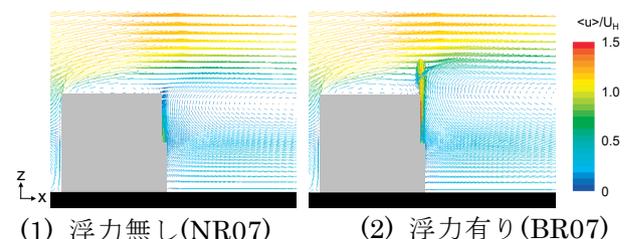


図-7 排出口付近の風速ベクトル

4.2 浮力の有無による流れ場と拡散性状の差異

Realizable $k-\epsilon$ による建物中心断面における濃度分布の予測結果を図-6 に、排出口付近の風速ベクトルを図-7 に示す。図-7 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、浮力無しの場合に比べてガスが高い位置まで運ばれていることが図-6 から確認できる。

4.3 乱流モデルが拡散性状の予測精度に及ぼす影響

図-8 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風洞実験の結果の比較を示す。浮力無しの

場合、どちらの乱流モデルでも $x = H/2$ における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く評価されている。濃度ピークの高さは Realizable $k-\epsilon$ モデルの方が標準 $k-\epsilon$ モデルよりもやや高い。Realizable $k-\epsilon$ モデルでは、標準 $k-\epsilon$ 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⁷⁾が改善され、そこでの剥離域が比較的広くなるために、濃度ピーク位置も高くなると考えられる。しかし、実験に対しては剥離域を過小評価しており、濃度ピーク位置に実験との差が生じる。さらに、既往研究^{1), 2)}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

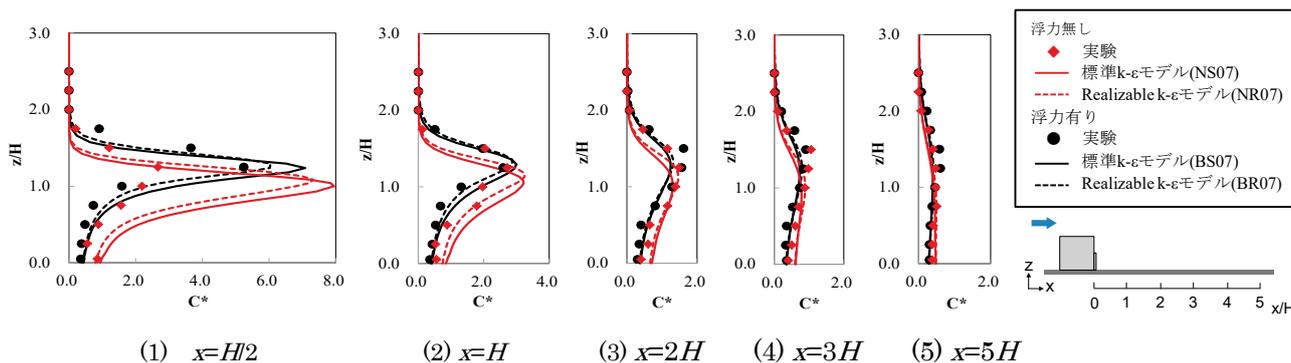


図-8 建物中心軸上の無次元濃度の鉛直分布(乱流モデルの比較)

流拡散が過小評価される。その結果、濃度が拡散しづらく、実験に比べ濃度が高くなると考えられる。

浮力有りの場合、計算結果の濃度やそのピークの位置は、浮力無しの場合に比べ実験結果に近い。図-9 に示す実験値と数値計算による予測値の比較から、浮力無しの場合よりも浮力有りの場合の方が、実験と数値計算の結果が良く対応することが確認できる。この理由として、浮力無しの場合には RANS モデルで乱流拡散が過小評価される(流れの予測精度の悪いとされる)領域にガスが排出され拡散するのに対し、浮力有りの場合はガス排

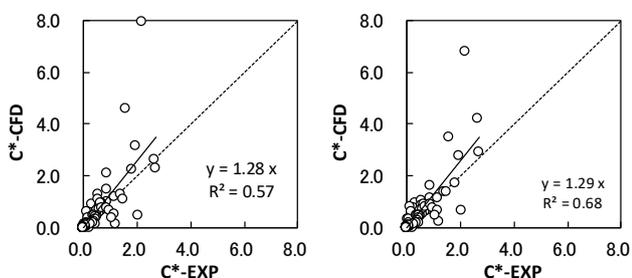
出口直上で浮力により生じる上昇流によって、RANS モデルの予測精度の悪い領域よりも高い位置までガスが運ばれ、拡散することが考えられる。

4.4 乱流シュミット数が拡散性状の予測精度に及ぼす影響

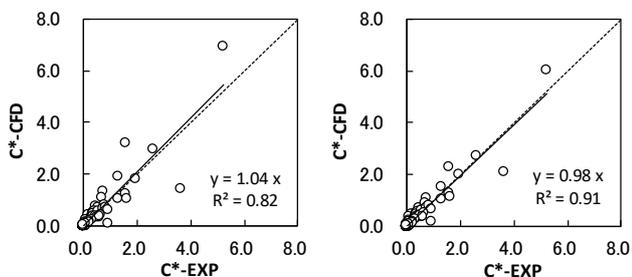
Realizable $k-\epsilon$ モデルで乱流シュミット数を変化させた場合の建物後流域の無次元濃度の鉛直分布を図-10、図-11 に示す。濃度の鉛直分布は、浮力無し・有りともに、乱流シュミット数が小さいほど濃度のピーク値は小さくなる。

図-12、図-13 には、浮力無しの場合の主流直交方向断面の濃度分布を示す。排出口近傍 $x=H/10$ (図-12)では乱流シュミット数の小さい $Sc_t=0.5$ の方が高濃度となる領域の広がり大きい。一方、その風下側の $x=H/2$ (図-13)では、乱流シュミット数の大きな $Sc_t=0.9$ の方が高濃度の領域の広がり大きい。濃度勾配の大きなガス排出口近傍では、乱流シュミット数が小さいほど、鉛直方向およびスパン方向への濃度拡散が大きくなる。その結果、主流方向への濃度輸送が減少し、風下側における濃度は小さくなると考えられる。

図-14、図-15 に、実験値と数値計算による予測値の比較を示す。図-14 に示す浮力無しの場合、今回の検討ケースで最も小さい乱流シュミット数 $Sc_t=0.5$ を与えると実験との対応が良くなり、既往研究^{2), 8)}の傾向と一致する。富永²⁾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。これに対して、図-15 に示す浮力有りの場合、経験的によく用いられる値である $Sc_t=0.7$ が最も実験を良く再現していた。浮力無しで実験と良い対応を示した $Sc_t=0.5$ は、浮力有りの場合、



(1) 浮力無し、標準 $k-\epsilon$ モデル(NS07) (2) 浮力無し、Realizable $k-\epsilon$ モデル(NR07)



(3) 浮力有り、標準 $k-\epsilon$ モデル(BS07) (4) 浮力有り、Realizable $k-\epsilon$ モデル(BR07)

図-9 実験値と数値計算による予測値の比較(乱流モデルの比較)

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、全体として濃度が過小評価される結果となったと考えられる。このことから、濃度場を再現する乱流シュミット数は、流れ場の性状によって異なると考えられる。さらに、浮力無しで実験と良い対応を示す $Sc_t=0.5$ でも、風下側では濃度を過小評価する

傾向がある(図-10)。このことから、濃度場を再現する乱流シュミット数は、流れ場の性状によって空間的にも異なる可能性がある。富永ら²⁾も指摘しているように、乱流シュミット数の与え方には十分注意するとともに、今後は乱流濃度フラックスのモデル化についても検討が必要と考えられる。

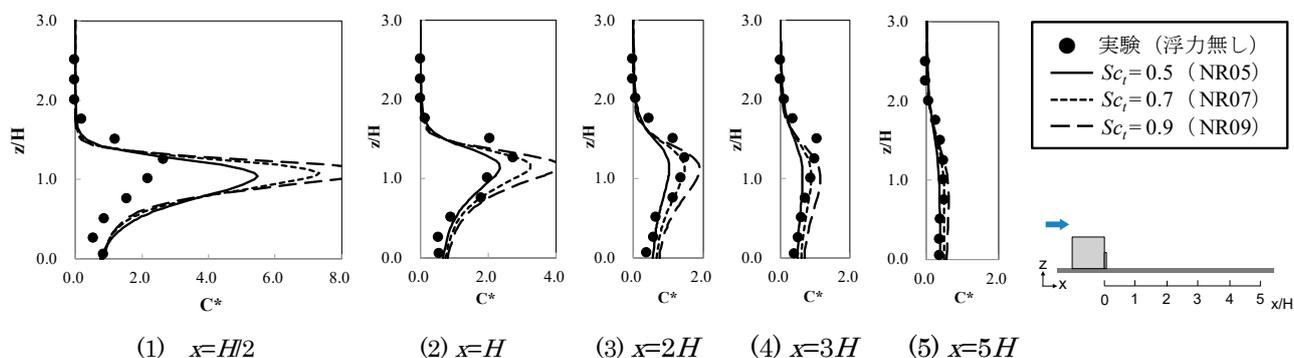


図-10 建物中心軸上の無次元濃度の鉛直分布(浮力無し、乱流シュミット数の比較)

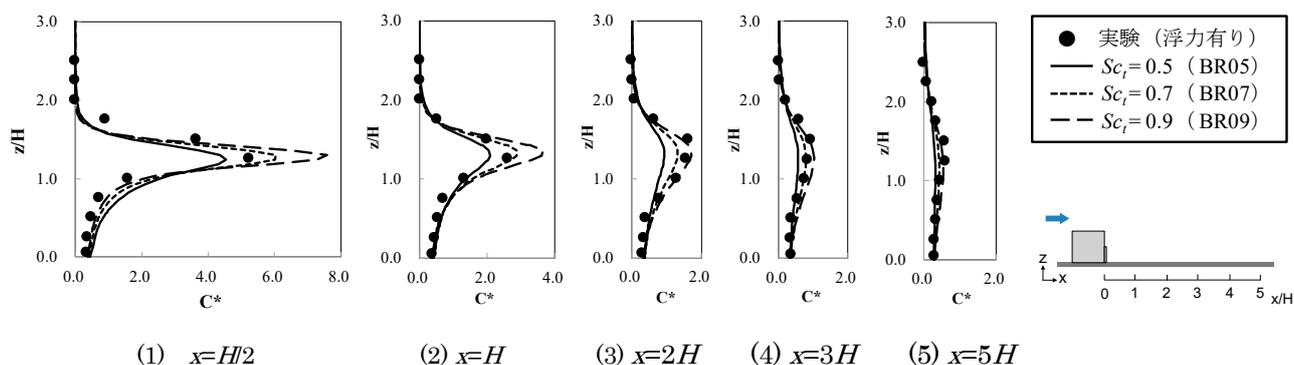


図-11 建物中心軸上の無次元濃度の鉛直分布(浮力有り、乱流シュミット数の比較)

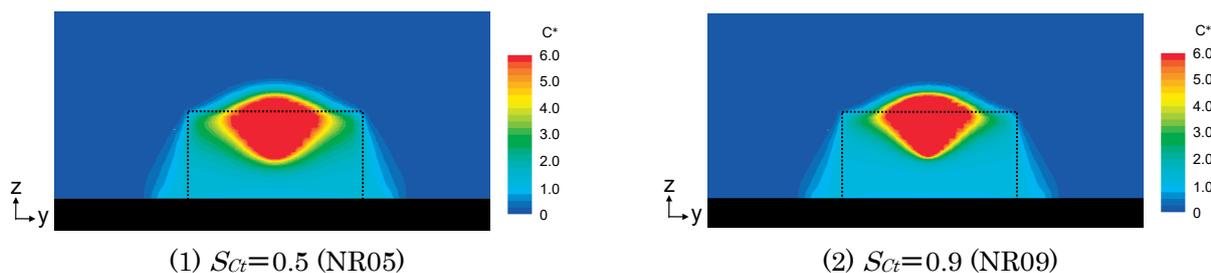


図-12 $x=H/10$ の鉛直断面における無次元濃度分布(浮力無し)

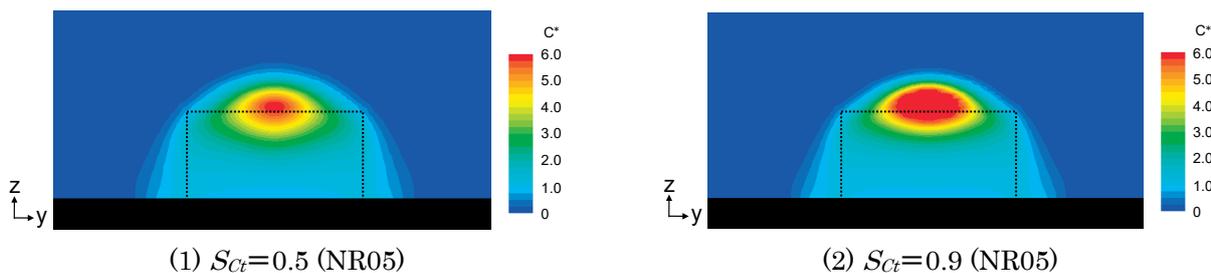
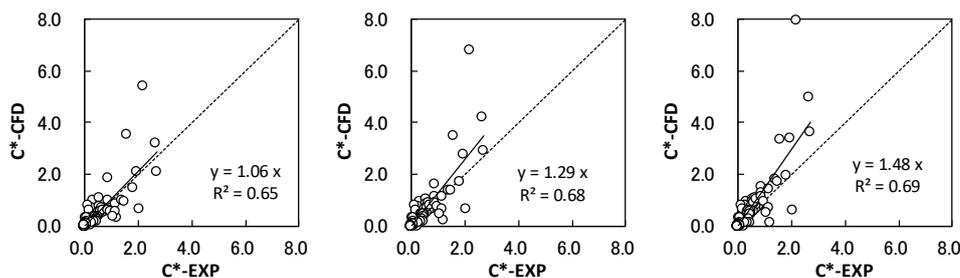
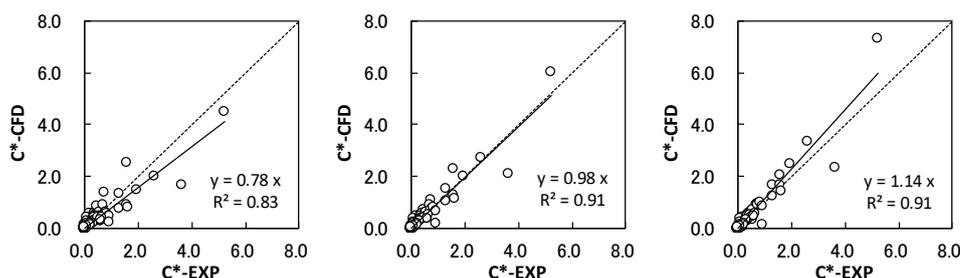


図-13 $x=H/2$ の鉛直断面における無次元濃度分布(浮力無し)



(1) $Sc_t=0.5$ (NR05) (2) $Sc_t=0.7$ (NR07) (3) $Sc_t=0.9$ (NR09)

図-14 実験値と数値計算による予測値の比較(浮力無し、乱流シュミット数の比較)



(1) $Sc_t=0.5$ (BR05) (2) $Sc_t=0.7$ (BR07) (3) $Sc_t=0.9$ (BR09)

図-15 実験値と数値計算による予測値の比較(浮力有り、乱流シュミット数の比較)

5. 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。これにより、以下の知見を得た。

- 1) 今回の検討では、ほとんどのケースで、既往研究で示されている予測モデルの有効性判断基準を満たしていることを確認した。
- 2) 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前縁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。
- 3) 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、結果的に数値計算の予測精度が高くなった。
- 4) 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

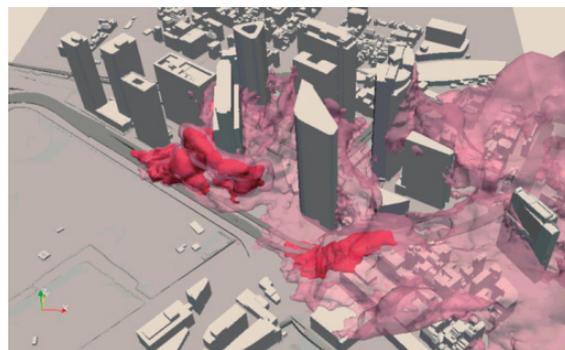


図-16 実市街地を対象としたガス拡散の予測

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、経験的によく用いられる値である乱流シュミット数 0.7 が最も実験を良く再現していた。濃度場を再現する乱流シュミット数は、流れ場の性状によって異なる可能性がある。

なお、本研究では浮力を持つガスの拡散性状に関する基礎的な検討のため、単純な単体建物周辺の流れ場や濃度場を対象とした検討を実施した。現在は複雑な形状の実市街地を対象とした空気と等密度ガスの拡散性状の予測に関して LES を用いた検討も進めている段階である(図-16)。今後は

実問題への適用に向け、浮力を持つガスの予測も含めた実市街地での拡散性状の予測に向けた解析手法を整備するための検討を実施する予定である。

<参考文献>

- 1) 日本建築学会：“都市の風環境予測のための CFD ガイドブック”，2020
- 2) 富永禎秀：“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，vol. 73，no.630，pp.991-997，2008
- 3) 野津剛，老川進，日比一喜，酒井喜則：“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，B-1，pp.33-34，2004
- 4) T.-H. Shih, W.W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, J. Zhu：“A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows”，Comput. Fluids. vol.24，pp.227-238，1995
- 5) R. Britter, M. Schatzmann：“Model evaluation guidance and protocol document”，COST Action 732，2007
- 6) J.C. Chang, S.R. Hanna：“Air quality model performance evaluation”，Meteorology and Atmospheric Physics，vol.87，pp.167-196，2004
- 7) 持田灯，村上周三，林吉彦：“立方体モデル周辺の非等方乱流場に関する $k-\epsilon$ モデルと LES の比較 乱流エネルギー生産の構造とノルマルストレスの非等方性の再現に関して”，日本建築学会計画系論文報告集. vol.423，pp.23-31，1991
- 8) 道岡武信，佐藤歩：“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，vol.47，no.3，pp.119-126，2012
- 9) Y. Tominaga, T. Stathopoulos：“Turbulent Schmidt numbers for CFD analysis with various types of flowfield”，Atmos.Environ，vol.41，pp.8091-8099，2007
- 10) 老川進，石原孟，嶋田健司，野津剛：“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，D-2，pp.833-834，2002
- 11) 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