単体立方体モデル周辺の汚染質拡散を対象とした RANS と LES の比較

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2

COMPARISON BETWEEN RANS AND LES COMPUTATIONS ON PLUME DISPERSION
AROUND AN ISOLATED CUBIC BUILDING

Study on prediction accuracy of CFD applied to dispersion around buildings Part 2

富永 禎秀*, 黒澤 広大**

Yoshihide TOMINAGA and Koudai KUROSAWA

The purposes of this study are to confirm the accuracy of LES in modeling plume dispersion near and around a simple building model and to clarify the mechanism of the discrepancy in relation to the RANS computation. Simple LES modeling gives better results than RNG modeling of the distribution of concentration, although the difference for mean velocity is not so large. The horizontal diffusion of concentration is well reproduced by LES. This tendency is closely related to the reproduction of unsteady periodic fluctuation around the cube in LES.

Keywords : CFD, Plume dispersion, RANS, LES, Cubic Model

数値流体解析, 汚染質拡散, RANS, LES, 立方体モデル

1. はじめに

建物近傍での汚染質の拡散性状を正確に予測することは、空調設備の給排気口の設計等において重要な課題の一つである¹⁾。従来は主に風洞実験による検討が行われてきたが、今後は CFD (Computational Fluid Dynamics) の利用が期待される。また複雑な都市空間における汚染質拡散を CFD によって検討するような場合においても²⁾、基本となる単独建物近傍の流れ場・拡散場の予測精度を把握しておくことは重要である。筆者らは既報³⁾において、立方体建物モデルの屋上より、周辺空気と密度差のないガスが排出された場合の建物近傍の濃度分布に関して、各種の RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations) モデル (標準 $k-\varepsilon$ モデル及び数種の改良 $k-\varepsilon$ モデル) を用いて解析し、乱流モデルや乱流シュミット数の違いが汚染質分布の予測精度に及ぼす影響を検討した。その結果、改良 $k-\varepsilon$ モデルは、標準 $k-\varepsilon$ モデルでは再現されない排出口風上側の高濃度領域を再現し、平均濃度分布の予測精度が大幅に向上した。しかしながら、全ての RANS モデルの結果は、建物後方の循環流域や建物側面方向への濃度拡散を過少に評価しており、側面や背面の濃度分布の予測精度には問題があることが明らかになった。一方、筆者らは、RANS モデルの運動量拡散の過小評価と建物周りの周期的変動の再現性の関係について、LES (Large Eddy Simulation) との比較に基づき検討しており⁴⁾、建物周辺の周期的変動が再現される LES は、RANS モデルに比べて後方循環流の風速分布の予測精度が格段に向上することを指摘している。白澤ら⁵⁾が指摘しているように、建物後方から汚染質が排出されるような場合、この RANS と LES の違いは、平均濃度分布にも大きな違

いを引き起こす。しかしながら、文献 5 の結果では、検討対象が建物後方弱風域に限られており、また LES は、渦放出に伴う水平方向の物質輸送をやや大きめに評価するとも指摘されているため、建物近傍の拡散場予測における LES の有効性や RANS の適用範囲については、さらに多様な対象によって検討する必要があると考えられる^{注 1)}。本報では、LES (Large Eddy Simulation) によって既報³⁾と同じ流れ場を解析し、RANS と LES の比較を行った結果について報告する。なお本研究では、既往の研究で採り上げられることの少ない建物モデル壁面に対して斜め (45°) に風が流入する場合についても検討する。

2. 数値解析の概要

2.1 対象流れ場

Li and Meroney⁶⁾により詳細な濃度分布の測定結果が報告されている中立状態の乱流境界層流中におかれた立方体建物モデル周辺の拡散場の風洞実験を対象とする。建物高さ H_b と $\langle u_b \rangle$ (高さ H_b での

図1 対象とする流れ場・拡散場の概要

* 新潟工科大学工学部建築学科 教授・博士(工学)

** 新潟工科大学大学院工学研究科 大学院生

Prof., Dept. of Architecture and Building Engineering, Niigata Institute of Technology,
Dr. Eng.
Graduate Student, Graduate School of Engineering, Niigata Institute of Technology

流入風速)で算出される Reynolds 数は 1.1×10^4 , ガス排出速度 $\langle w_s \rangle$ と $\langle u_b \rangle$ の比は 0.19 である。本報では, 風向 0° と 45° で屋上面の中央から汚染質が排出されるケースを対象とする。なお文献 7 では建物近傍の速度分布の測定結果は報告されていない。従って, 速度分布の予測精度を検証する目的で, 立方体建物モデル周辺の風速分布を測定する風洞実験を別途実施した²⁾。

2.2 解析条件

既報³⁾の検討において, 最も実験との対応がよかった RNG k- ϵ モデル (以降 RNG) と LES を比較した。RNG の場合, 乱流シュミット数は 0.7 とした。LES は, 標準 Smagorinsky モデル ($C_s=0.12$) を用いた。LES の場合, sub-grid scale (SGS) のシュミット数 S_{cSGS} は 0.5 を基本とし⁴⁾, 風向 0° のケースでは, 0.3, 0.7 とした場合も比較した。

その他の解析条件を表 1 にまとめて示す。排出口の乱れはどちらの計算においても考慮していない。LES の流入境界条件は, 片岡ら⁵⁾の方法で別途 LES によるドライバー計算を行い, 実験と平均風速と乱流変動の鉛直分布が対応する変動風の時系列データを採取することによって, 非定常の流入条件として与えた。風向 45° の解析の場合は, 倉瀬らの方法⁶⁾にならい, 風向角がついたことによる流入地点の相違を時間の相違に置き換え, ドライバー計算結果をベクトル分解して与える方法を用いた。LES で与えた流入変動風の平均風速 $\langle u_1 \rangle$ と主流方向乱れ強さ I_{x_1} の実験⁷⁾との比較を図 2 に示す。両者は概ね一致している。LES では統計量を算出するために無次元時間 $t^* (=t \times \langle u_b \rangle / H_b)$ で 132 の計算を行った。

3. 結果及び考察

3.1 風洞実験との比較に基づく流れ場の予測精度の検証

まずガス排出のない場合の RNG と LES による流れ場の比較を行

表 1 解析条件

	k- ϵ (RNG)	LES
解析領域	$21H_b(x_1) \times 13H_b(x_2) \times 6.7H_b(x_3)$	
メッシュ分割	$86(x_1) \times 76(x_2) \times 46(x_3)$ 壁面に接する最小メッシュ幅は $0.0045H_b$	
流入境界	$\langle u_1 \rangle$, k は風洞実験値を補間。 ϵ は k の生産項 $P_k - \epsilon$ を仮定し算出	別途 LES 計算により, 流入変動風を作成
側面・上空境界	法線方向の速度ゼロ。その他の諸量は法線方向の勾配ゼロ	
流出境界	諸量に対して法線方向勾配ゼロ	
壁面・地表面境界	一般化対数則 ¹⁰⁾	2 層モデル ¹¹⁾
移流項スキーム	QUICK スキーム	中心差分
計算アルゴリズム	IISMAC 法

図 2 流入境界条件 (LES と実験の比較; 文献 7 の条件の場合)

う。この場合, 比較対象は筆者らが行った風洞実験結果²⁾であり, 流入境界条件もそれに合わせた計算を, 拡散場比較用の計算とは別に行っている。

表 2 に建物屋上及び後方の再付着距離の比較を示す。風向 0° の場合, 屋上面の再付着距離 X_R は, 両モデルとも実験と比較的に近い値となっているが, LES の方がより実験に近い。一方, 背面の再付着距離 X_F は, かねてから指摘されているように⁸⁾, RNG では実験に比べて過大に評価されている。そしてこの問題は, LES では改善されており, 実験よりやや長くなるものの実験に近い値を示す。一方, 風向 45° の場合, 実験においては屋上面中心軸上での再付着は発生せず, これは RNG, LES でも同様であった。建物背面の再付着距離 X_F は, RNG では実験よりかなり大きくなり, それが LES では改善される。しかしながら, LES の再付着距離は風洞実験よりも短くなり, 風向 0° の場合とは傾向が異なる³⁾。図 3, 4 は各風向の建物中心軸上における風速主流方向成分の鉛直分布を比較したものである。風向 0° の場合 (図 3), 全体に RNG は循環流の風速をやや大きめに評価しているものの, 両者の差は比較的小さい。一方, 風向 45° の場合 (図 4), 屋上面においても比較的大きな差が現れており, RNG の方が LES よりも主流方向風速が過大に評価されている。建物背面では, 風向 0° の場合と同様に, LES は RNG に比べて循環流が弱く, 実験とよく一致している。

風向	0°		45°
	X_R	X_F	X_F
RNG	$0.87H_b$	$2.46H_b$	$2.10H_b$
LES	$0.79H_b$	$1.54H_b$	$1.29H_b$
風洞実験 (筆者ら)	$0.64H_b$	$1.33H_b$	$1.59H_b$

図 3 建物中心軸上における風速主流方向成分の鉛直分布の比較 (風向 0°)

図 4 建物中心軸上における風速主流方向成分の鉛直分布の比較 (風向 45°)

(1) RNG
図5 建物表面近傍の風速ベクトル（風向 0°）

(1) RNG
図6 建物表面近傍の風速ベクトル（風向 45°）

(1) RNG
図7 建物表面近傍の乱流エネルギーkの分布（風向 0°）

(1) RNG
図8 建物表面近傍の乱流エネルギーkの分布（風向 45°）

(2) LES
図9 建物表面近傍の平均無次元濃度 K の分布（風向 0°）

(2) LES
図10 建物表面近傍の平均無次元濃度 K の分布（風向 45°）

3.2 拡散計算の条件に対応した解析における流れ場の比較

(1) 風速ベクトル分布

図5, 6は, 各風向における建物表面近傍における風速ベクトル分布を示したものである。風向 0° の場合 (図5), RNG モデルで

は, 排出口付近において風向が中心軸付近に集中する傾向にあり, LES とは分布がやや異なる。すなわち LES の方が, この領域でより大きな乱流拡散が生じていることを示している。一方, 風向 45° の場合 (図6) も同様であり, 排出口風下側で比較すると, RNG

図 11 建物中心軸上の平均無次元濃度 K の比較 (風向 0°)

図 12 建物中心軸上の平均無次元濃度 K の比較 (風向 45°)

図 13 後方循環流における平均無次元濃度 K の分布 (風向 0° ; $x_1/H_b=1.0$)

の結果は LES に比べてベクトルが中心軸付近に集中しており、屋上面両端部で見られる逆流もやや RNG の方が強い。

(2) 乱流エネルギー分布

図 7, 8 に建物表面近傍の乱流エネルギー k の分布の比較を示す。2つのモデルの分布の傾向はかなり異なる。風向 0° の場合 (図 7), RNG の k のピークは屋根面の風上側端部付近で発生しているのに対して、LES では、2つの対称のピークが屋上風上側の循環流の渦の中心付近 (図 5 参照) に生じている。風向 45° の場合も同様に (図 8), RNG では屋上の風上端部付近で大きな値を示すのに対して、LES では、屋上面両端部の逆流の中心付近で値が大きい。

3.3 平均濃度分布の比較

図 9, 10 は、各風向における建物表面近傍の無次元濃度 K の分布を比較したものである。無次元濃度 K は、 $K=\langle c \rangle / \langle c_0 \rangle$ と定義される。ここで $\langle c_0 \rangle = Q_e / H_b^2 \langle u_0 \rangle$ ($\langle c \rangle$: 平均濃度, Q_e : 排出ガスの流量) である。風向 0° の場合 (図 9), 屋上面では、RNG の場合、排出口の風上側に高濃度の領域 ($K > 100$) が LES や実験よりも広く現れる。全般的に、RNG は主流直交方向の濃度拡散が小さい。これは、既報³⁾において、小さな乱流シュミット数が濃度分布に関してよい予測結果を与えていたことと対応している。一方、LES においては、濃度分布はより広く水平方向に広がっている。LES によって得られた全体的な濃度の分布は、文献 5 の結果と同様にやや拡散が大きくなる傾向はあるものの、実験とよく一致している。また側面及び背面においては、2つのモデルの濃度分布の傾向は全く異なる。特に側面では、RNG の濃度は、LES に比べると小さい。風速ベクトルから判断すると (図 5), RNG における側面の高濃度は、主として風下側から循環流によって運ばれてきたものである。しかしながら、LES においては、実験と同様に側面の濃度は屋上面から輸送されている。屋上面の濃度拡散性状の違いについては、3.5 節で乱流拡散フラックスの違いから考察する。風向 45° の場合、モデ

図 14 Sc_{SGS} の違いによる平均無次元濃度 K の比較 (風向 0°)

ルによる濃度分布の差は風向 0° の場合よりも小さいが同様の傾向を示している。すなわち、排出口から下流方向に広がる高濃度領域は、RNG の方が実験や LES よりも下流側に長く伸びている。そして排出口と屋上面両端部の間において、RNG では濃度分布が殆ど見られないのに対して、LES や実験では、低いながらも濃度が存在し、乱流拡散による濃度の輸送が行われているものと考えられる。

図 11, 12 に、建物中心軸上の屋上面及び背面における K の分布を示す。風向 0° の場合 (図 11), 主流方向においては、LES の濃度は RNG よりも小さい値となっている。しかしながら、主流直交方向に関しては、LES の結果は RNG の値よりも大きく実験とよく一致している。すなわち、LES では RNG に比べて主流直交方向の乱流拡散が大きく、かつ正しく予測されていることが分かる。全般的に LES により得られた濃度は、実験とよい一致を示している。風向 45° の場合 (図 12) も同様に、RNG は建物背面の濃度を実験や LES に比べて高めに評価しているが、屋上面の排出口側方の濃度が極端に低く、実験と大きく異なる。

図 13 に後方循環流域内における風向と直交する断面の無次元濃度 K の分布を示す ($x_1/H_b=1.0$)。ここでは、文献 7 に実験結果が示されている風向 0° の場合のみを比較する。RNG の結果は、実験と比較して中央に高濃度域が出現し、水平方向の広がりが小さい。しか

しながら、LES では鉛直方向の拡散がやや大きめに評価されているものの、実験で建物高さ付近に見られる水平方向の濃度の広がりがよく再現されている。

3.4 平均濃度分布における SGS のシュミット数の影響

SGS のシュミット数 Sc_{SGS} の違いが平均濃度分布に及ぼす影響を検討する。図 14 は、 Sc_{SGS} を 0.3, 0.5, 0.7 と変化させた場合の建物表面近傍の無次元濃度 K の分布を比較したものである。 Sc_{SGS} の違いによる平均濃度の違いは比較的小さいものの、 $Sc_{SGS}=0.3$ とした場合、側面や背面の濃度がやや小さくなり実験に近づく。これは Sc_{SGS} が小さくなることで、SGS の乱流拡散フラックスが大きめに評価され、Grid scale の乱流拡散がやや減少したものと考えられる。

3.5 濃度フラックスの比較

濃度フラックスは、移流フラックス $\langle u_i \rangle \langle c \rangle$ と乱流拡散フラックス $\langle u_i' c' \rangle$ から成る。前者は、平均風速 $\langle u_i \rangle$ と平均濃度 $\langle c \rangle$ によって評価される。後者は、LES では直接評価されるが、RNG（すなわち一般的な RANS モデル）の場合は、勾配拡散近似によって以下のようにモデル化される。

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

文献 5 と同様に、これらの濃度フラックスの成分毎の比較を行う。図 15 は、建物中心軸上における屋上面近傍の濃度フラックスの主流方向成分（移流フラックス $\langle u_1 \rangle \langle c \rangle$ と乱流拡散フラックス $\langle u_1' c' \rangle$ ）を比較したものである。なおここでは風向 0° の場合のみ示すが、風向 45° においても同様の傾向であることを確認している。排出口の風上側で RNG の移流フラックス $\langle u_1 \rangle \langle c \rangle$ は、LES と比較して非常に大きな負値を示す。これは図 5 に示すように、この付近の RNG の逆流が LES よりも強いためである。一方、同じ場所の乱流拡散フラックス $\langle u_1' c' \rangle$ は、絶対値は移流フラックスよりも小さ

いものの、LES の方が RNG よりも大きな値を示している。また排出口の風下側で LES は大きなピークを示している。次に、濃度フラックスの主流直交方向成分（移流フラックス $\langle u_2 \rangle \langle c \rangle$ と乱流拡散フラックス $\langle u_2' c' \rangle$ ）の分布を図 16 に示す。排出口の両側に見られる移流フラックス $\langle u_2 \rangle \langle c \rangle$ のピークは、両モデルで符号が異なる。これは、この部分で両モデルの風向が異なるためである（図 5 参照）。さらに乱流拡散フラックス $\langle u_2' c' \rangle$ の分布形状には大きな違いが生じている。すなわち、RNG モデルの場合、排出口付近に生じる乱流拡散フラックスは、移流フラックスと逆符号であり、両者は相殺する方向に働いている。これに対して、LES では、RNG に比べて乱流拡散フラックスがより広い範囲で値を有しており、かつ移流フラックスと同符号である。以上のような濃度フラックスの評価の違いが、図 9 に示されるような平均濃度分布の違いを生じたものと考えられる。

3.6 濃度変動の分布

建物周辺の汚染質の濃度変動性状は、汚染質の短期被曝に係わる環境影響評価のために重要であるが、建物近傍の濃度変動を調べた例は実験的にも数少ない¹⁴⁾。これらの濃度変動に関する統計量がモデル化なしに求められる点は LES の大きな利点である。風向 0° の場合の建物表面近傍の濃度分布の時系列変化を図 17 に示す。その分布形状は平均濃度分布（図 9）とは大きく異なり、排出口からの plume は時刻によって大きくその形状を変えていることが見て取れる。本節では、建物近傍の濃度変動の r.m.s. 値の分布性状について検討する。文献 15 にない、濃度変動の r.m.s. 値に対して 2 種類の基準化を行い、濃度変動強度を local intensity ($I_c = \sqrt{\langle c'^2 \rangle} / \langle c \rangle$) と absolute intensity ($I_{cabs} = \sqrt{\langle c'^2 \rangle} / \langle c_0 \rangle$) として示す。図 18 は、建物後方循環流域内の local intensity の鉛直分布を実験¹⁵⁾と比較したものである^{注 4)}。地表面近傍で LES の結果がやや大きめであるが、両者はよく対応している。図 19(1)は、

図 17 建物表面近傍の濃度分布の時系列変化（風向 0°）

LES によって得られた建物表面近傍の local intensity I_c の分布を示したものである。屋根中央よりも風上側及び側面端部において、非常に大きい値が観察される。これは、この場所においては、平均濃度は低いものの（図 9）、図 17 に示すような非定常な plume の挙動により、瞬間的に非常に高い濃度が出現することを示している。一方、図 19(2)の absolute intensity I_{cabs} は I_c とは異なる分布の傾向を示している。 I_{cabs} の分布は、排出口付近ではやや水平方向に広がっているものの、平均濃度の分布形状（図 9）に近い¹⁴⁾。

4. 結論

境界層流中の立方体建物モデルの屋根面中央から汚染質が発生する場合の建物表面近傍の汚染質拡散性状に着目して、風洞実験と LES, RANS モデルの比較を行った。

- 1) 単純な Smagorinsky モデルに基づく LES と RNG $k-\varepsilon$ モデルの結果を比較したところ、平均風速分布に見られる差異に比べて、平均濃度分布に大きな違いが現れ、LES の方が RNG よりも実験とよく対応する結果を示した。
- 2) これは、LES では建物近傍の非定常な変動に伴う plume の挙動が再現されることによって、濃度の水平方向の乱流拡散が正しく再現されたためである。それに対して、これが再現されない RNG モデルは建物周辺の濃度の乱流拡散を過小に評価している。
- 3) 風向 45° の場合も、風向 0° の場合と基本的に同様な分布を示したが、建物側面の濃度分布等に見られる差は、風向 0° の場合よりも小さかった。
- 4) LES は、濃度変動に関する統計量をモデル化なしに求めることができる点が大きな利点であり、今回の LES の結果は、濃度変動強度の分布についても類似の実験とよい対応を示した。建物屋上面中央で汚染質が発生した場合、local intensity は建物風上端で大きな値を示し、平均濃度分布とは異なった分布形状を示す。それに対して absolute intensity は平均濃度分布と同様な分布形状となる。
- 5) 今回の LES の結果は、実験に比べるとやや拡散が大きめとなっており、建物後流域から汚染質拡散を扱った文献 5 の結果と同様

図 18 濃度変動強度 I_c の比較（LES；風向 0°）

(1) $I_c (= \sqrt{\langle c'^2 \rangle} / \langle c \rangle)$ (2) $I_{cabs} (= \sqrt{\langle c'^2 \rangle} / \langle c_0 \rangle)$

図 19 建物表面近傍の濃度変動の分布（LES；風向 0°）

の傾向であった。この点は、SGS モデルとして用いた Smagorinsky モデルの問題点と考えられ、今後さらに検討したい。

謝辞

本研究の実施にあたり Concordia 大学 Ted Stathopoulos 教授から貴重なご指導・ご意見を頂いた。記して謝意を表します。

主な記号

- x_i : 空間座標の 3 成分 ($i=1$:主流方向, $i=2$:主流直交方向, $i=3$:鉛直方向)
- u_i : 平均ベクトルの i 成分
- k : 乱流エネルギー
- ε : 粘性消散率
- f : 変数 f の瞬時値
- $\langle f \rangle$: 変数 f の時間平均値
- f' : 時間平均値からのずれ ($=f - \langle f \rangle$)
- H_b : 建物高さ（立方体一辺の長さ）
- $\langle u_b \rangle$: 高さ H_b における流入風
- c : 濃度
- K : 無次元濃度 ($=\langle c \rangle / \langle c_0 \rangle$)
- $\langle c_0 \rangle$: 基準濃度 ($=Q_e / H_b^2 \langle u_b \rangle$)
- Q_e : 排出ガスの流量

注

- 注1) 筆者らは、文献 6 において、Dynamic SGS モデル型の LES を用いて建物周辺の汚染質拡散の予測精度と SGS モデルの関係について検討しているが、同論文も、建物後方の循環流内の濃度分布のみを検討対象としている。
- 注2) 実験は新潟工科大学所有の風洞実験装置を使用して行われた。 H_b と $\langle u_b \rangle$ に基づく Reynolds 数は 6.4×10^4 。流入風の鉛直プロファイルはべき指数約 0.25 のべき乗則に従い、 H_b における乱れの強さは文献 7 の実験と概ね同レベルである。風速は逆流の検出できる Split Fibre Probe (DANTEC 55R55) を用いて計測した。両者の風洞実験条件をそれぞれ与えた CFD 解析の結果を比較し、流れ場の構造には殆ど変化がないことを確認している。
- 注3) Smagorinsky モデルを用いた LES では、建物後方の Free shear layer の乱流エネルギー k が実験に比べてやや大きめに評価されることが報告されている¹²⁾。風向 45° の場合、建物後方において、この影響がより顕

著に表れたため、乱流エネルギーが大きめとなり、後方の循環流の発達が抑制されたものと推察される。

注4) 文献 7 と文献 15 の風洞実験は、実験条件は殆ど同一であるが、排出速度比 $\langle w_s \rangle / \langle u_0 \rangle$ が、前者が 0.19 に対して後者が 0.46 とやや異なる。よって厳密に境界条件は一致していないが、定性的な対応の確認は可能と考えた。

参考文献

- 1) ASHRAE Applications Handbook, Chapter 43 Building Air Intake and Exhaust Design, ASHRAE, 43.1-43.10, 2002.
- 2) 田村哲郎, 中山浩成, 奥田泰雄, 実在都市における空間発達型境界層乱流中の大気拡散に関する LES 解析, 日本建築学会環境系論文集, NO.604 pp.31-38, 2006.6.
- 3) 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, NO.630, pp.991-997, 2008.8.
- 4) 富永禎秀, 持田灯, 村上周三, 佐脇哲史, LES による高層建物周辺気流の解析 (その 1) 建物後方の周期的変動と再付着距離の予測精度に関する検討, 日本建築学会環境系論文集, NO.581, pp.45-51, 2004.7.
- 5) 白澤多一, 遠藤芳信, 義江龍一郎, 持田 灯, 田中英之, 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, 2008.5.
- 6) 富永禎秀, 村上周三, 持田 灯, 複合グリッドを用いた Dynamic Mixed SGS モデルによる建物周辺のガス拡散の LES, 日本建築学会計画系論文集, NO.496, pp.53-58, 1997.6.
- 7) W. W. Li and R. N. Meroney. Gas dispersion near a cubical model building, Part I, Mean concentration measurements, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 12, pp.15-33, 1983.
- 8) 片岡浩人, 水野稔, 流入変動風を用いた三次元角柱周りの気流解析, 日本建築学会環境系論文集, NO. 523, pp.71-77, 1999.9.
- 9) 倉淵 隆, 大場正昭, 遠藤智行, 様々な風向角度の場合の通風気流に関する予測精度検証と流管分析 LES と風洞実験による建物通風気流構造の解明に関する研究 (第 2 報), 日本建築学会環境系論文集, NO.591 pp.7-13, 2005.5.
- 10) Launder, B.E., Spalding, D.B., The numerical computation of turbulent flows. Comput. Methods Appl. Mech. Eng. 3, pp.269-289. 1974.
- 11) Werner, H., Wengle, H., Large Eddy Simulation of Turbulent Flow over and around a Cube in Plane Channel. In : Proceedings of 8th Symposium on Turbulent Shear Flows, pp.155-168, 1993.
- 12) 持田灯, 村上周三, 林吉彦, 主題: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異方性の再現に関して, 日本建築学会計画系論文報告集 NO.423, pp.23-31, 1991.5.
- 13) P.J. Saathoff, T. Stathopoulos and M. Dobrescu. Effects of model scale in estimating pollutant dispersion near buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aero-dynamics, 54-55, pp.549-559. 1995.
- 14) 富永禎秀, 村上周三, 持田灯, 渋谷亜紀子, 野口康仁, 浮力のあるガスが排出された場合の建物周辺の濃度変動, 乱流拡散構造に関する風洞実験, 第 12 回風工学シンポジウム論文集, pp.119-124, 1992.12
- 15) W.W. Li and R. N. Meroney. Gas dispersion near a cubical model building. Part II. Concentration fluctuation measurements, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 12, pp.35-47. 1983.

(2009年7月10日原稿受理, 2009年9月1日採用決定)