

# LESによる通風時の建物内外の速度・圧力場の解析

Velocity-Pressure Field of Cross Ventilation with Open Windows Analyzed by Large Eddy Simulation

加藤 信介\*・村上 周三\*\*・持田 灯\*・富永 禎秀\*  
Shinsuke KATO, Shuzo MURAKAMI, Akashi MOCHIDA and Yoshihide TOMINAGA

## 1. 序

筆者らは既報<sup>1)</sup>において接地境界層流中の立方体周辺の流れ場に対してk-εモデル, ASM, LESを適用し, 風洞実験との詳細な比較により非等方な乱流場の再現に関してLESがほかの2モデルよりも優れていることを確認した。本研究では, より現実的で複雑な流れ場におけるLESの有効性を確認する目的で, 通風時の建物を想定した種々の開口を持つ立方体内外の気流性状を解析し, 風洞実験結果と詳細に比較する。

## 2. 数値計算の概要

諸量はすべてモデル高さH<sub>b</sub>, H<sub>b</sub>における流入風速<u<sub>b</sub>>等で無次元化する。LESの基礎方程式を表1に示す。本研究ではYoshizawaによるSmagorinsky定数C<sub>s</sub>を場の関数とするモデルを採用する<sup>2)~4)</sup> (式(5)~(9))。計算領域は15.7(x<sub>1</sub>)×9.7(x<sub>2</sub>)×5.1(x<sub>3</sub>)。メッシュ分割は64(x<sub>1</sub>)×47(x<sub>2</sub>)×38(x<sub>3</sub>)=114,304。建物内部は24(x<sub>1</sub>)×21(x<sub>2</sub>)×23(x<sub>3</sub>)。開口部は5(x<sub>2</sub>)×8(x<sub>3</sub>)。最小メッシュ幅は1/50。境界条件をまとめて表2に示す。

対象とした建物モデルの概要を図2に示す。表3の5ケースについて検討を行う。開口面積は1/6×1/6で各モデル共通。Model 4, 5には室内に流入した噴流の運動エネルギーを拡散, 消散させるための遮風板を設置する。

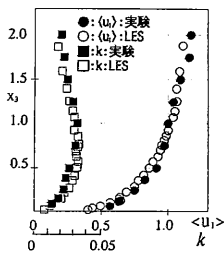


図1 流入境界条件

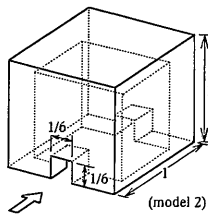


図2 対象モデルの概要

\*東京大学生産技術研究所 第5部

\*\*東京大学生産技術研究所 付属計測技術開発センター

### 記号

- x<sub>i</sub>: 空間座標の3成分 (i=1 主流方向, i=2 横方向, i=3 鉛直方向)
- u<sub>i</sub>: x<sub>i</sub>方向の風速3成分
- u<sub>in</sub>: 高さH<sub>b</sub>における流入風速のu<sub>in</sub>成分
- <f>: 変数fの時間平均, f̄: 変数fの格子平均
- f̄: 時間平均値からのずれ (f̄ = f - <f>)
- u<sub>w</sub>: 開口における法線方向風速
- <C<sub>s</sub>>: 平均風圧係数 (= (<p> - <p<sub>0</sub>>) / (ρ <u<sub>w</sub>><sup>2</sup> / 2)
- p: 静圧 (p<sub>0</sub>: 基準上空静圧)
- H<sub>b</sub>: 建物高さ (実験では18cm)
- k: 乱流エネルギー (1/2 <u<sub>i</sub>u<sub>i</sub>> + k')
- k': subgrid scaleの乱流エネルギー (= ν<sub>SGS</sub> / (C<sub>s</sub>h)<sup>2</sup>, C<sub>s</sub>=0.086)
- ν<sub>SGS</sub>: subgrid scaleの渦粘性
- ε: kの散逸 (k'の生産と等しいと仮定し ε = <ν<sub>SGS</sub> ∂u<sub>i</sub> / ∂x<sub>i</sub> ∂u<sub>i</sub> / ∂x<sub>i</sub>>)
- h: メッシュ幅のスケール (= (h<sub>1</sub>h<sub>2</sub>h<sub>3</sub>)<sup>1/3</sup>)
- h<sub>w</sub>: 壁面第一セルの壁面直交方向の幅
- (u<sub>w</sub>)<sub>x</sub>: 壁面第一セルの接線方向速度成分
- k<sub>w</sub>: 壁面第一セルのk
- Q: 通風量
- Re: レイノルズ数 (= <u<sub>w</sub>>H<sub>b</sub> / ν)

表1 LESの基礎式

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1), \quad \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_i}{\partial x_i} = - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{p}{\rho} + \frac{2}{3} k' \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ (\nu + \nu_{SGS}) \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right\} \quad (2)$$

$$\nu_{SGS} = (C_s h)^2 S \quad (3), \quad S = \left[ \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$\frac{C_s}{C_{s0}} = 1 - C_A \frac{DS/Dt}{S^2} \quad (5), \quad \frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \bar{u}_i \left( \frac{\partial}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

$$C_{s0} = 0.16, \quad C_A = 1.8 \quad (7)$$

$$C_{smin} < C_s < C_{smax}, \quad C_{smin} = 0.0, \quad C_{smax} = 0.27 \quad (8)$$

$$C_s^{(i,j,k)} = \frac{\sum \sum C_s^{(i,j,k)}}{27} \quad (9)$$

表2 境界条件

流入面	チャンネル流計算の各時刻の結果 <sup>1)</sup> (図1) <u <sub>w</sub> >を実験値と一致するように補正	流出面	$\bar{u}_1, \bar{u}_2, \bar{u}_3 : \frac{\partial}{\partial x_i} = 0$
上空間面	$\bar{u}_1, \bar{u}_2 : \partial/\partial x_3 = 0, \bar{u}_3 = 0$	側面	$\bar{u}_1, \bar{u}_2 : \partial/\partial x_2 = 0, \bar{u}_3 = 0$
床面	$\tau_w = \langle \tau_w \rangle \times \frac{\langle u_w \rangle}{\langle u_w \rangle} \quad (10)$ <p>ここで&lt;τ<sub>w</sub>&gt;はその時刻以前の計算結果より&lt;u<sub>w</sub>&gt;, k<sub>w</sub>を用いて(11)式より与える。</p> $\frac{\langle u_w \rangle}{\langle \tau_w \rangle} = \frac{1}{C_s \nu} \ln \left( \frac{E \cdot 1/2 h_w (C_s^2 h_w)^{1/2}}{\nu} \right) \quad (11)$ <p>C<sub>s</sub> = 0.09, κ = 0.4, E = 9.0</p>		
壁面			

表3 解析ケース

Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5
流入開口(前面)1/6×1/6で流出開口をタクトで接続したモデル	厚さ1/6の開口を持ち内部に壁を持つモデル	厚さ1/60の開口を持ち内部に壁を持つモデル	model 2に流入開口から1/6だけ風下側に遮風板を設置したモデル	model 3にモデル4と同様の遮風板を設置したモデル

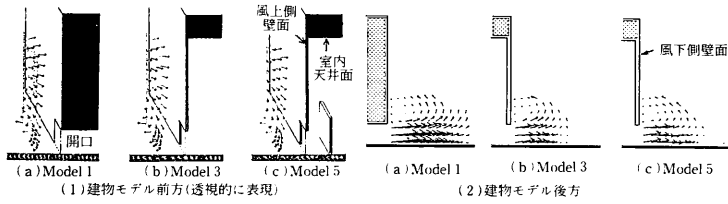


図 3 平均風速ベクトル (風洞実験)

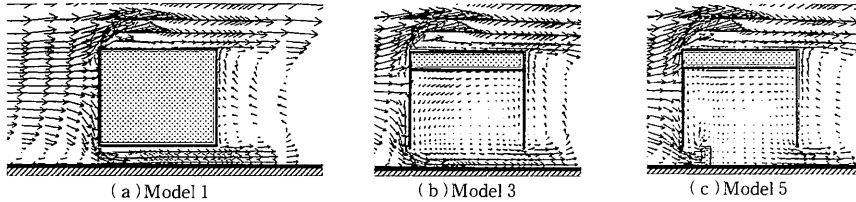


図 4 平均風速ベクトル (モデル中心鉛直断面, LES)

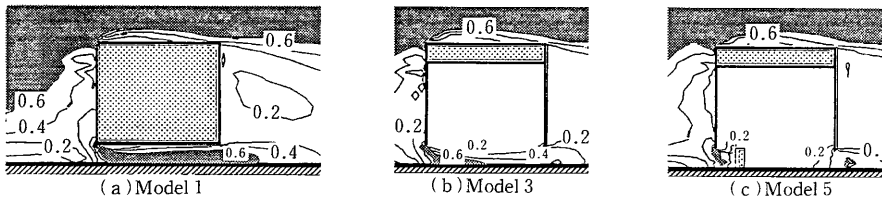


図 5 平均スカラー風速 (モデル中心鉛直断面, LES)

3. 風洞実験の概要<sup>5)</sup>

東大生研所属の境界層風洞。接近流は1/4乗則に従う(図1)。風速はタンデム型熱線風速計により測定。通風量はトレーサガス法により測定。Re数は約 $8 \times 10^4$ 。

4. 計算結果と実験結果の比較<sup>1)</sup>

1) 平均風速ベクトル (図3, 4): いずれのモデルにおいても前方の循環流の影響で流入時に著しい下降流が観察される点は、実験結果と良く対応している。Model 3では流入風速はほとんど保存されそのまま流出し、室内では循環流が形成される。Model 5では遮風板による運動エネルギーの拡散、および流出時の縮流が明瞭に観察される。各モデルで流出開口からの気流は後方循環流と相互に干渉し上向きとなり、その方向、大きさとも計算結果と実験結果はほぼ対応している。

2) 平均スカラー風速 (図5): モデル前方ではモデルごとの差はほとんどない。モデル内部ではModel 1, 3では床面に沿って高風速域が形成され風下開口で大きく縮流することなく流出している。これに対しModel 5では遮風板により運動量が拡散し後方での風速値は小さい。

3) 開口近傍風速 (図6): 開口近傍における平均風速の鉛直分布を詳細に説明すると風上開口直前の  $\langle u_1 \rangle$ ,  $\langle u_3 \rangle$  は実験結果ときわめて良く一致している。しかし流

出側では  $\langle u_1 \rangle$  に若干の差が見られる。また室内におけるスカラー風速分布は、各モデルでおおむね計算値と実験値は一致しているが、床面近傍で (Model 1では上壁面でも) やや異なる<sup>2)</sup>。

4) 壁面風圧係数 (図7-(1)): 実験結果によるとモデルごとの差異はほとんどなく、計算結果も同様の結果を示しているためModel 1のみを示す。風上側壁面では実験と一致するが、風下側では負圧を多少大きめに見積る傾向が見られる。参考までに開口無しの場合の風圧係数の分布を示す (図7-(2)<sup>6)</sup>)。開口のある場合と同様の分布であり、風下側の負圧を多少大きめに見積るといふ傾向も共通である<sup>3)</sup>。

5) 床面風圧係数 (図8): 建物外部ではモデルごとの差はなく建物内を通過する気流の駆動力が各モデルで等しいことがわかる。しかし内部では遮風板および開口部での縮流等の影響によりモデルごとにその分布は大きく異なる。Model 1では、流入開口室内上部の剥離の影響で大きな負圧のピークが観察される。室内圧はModel 1, 2では負圧であるがModel 3~5では正圧となる。Model 1, 2では前述したように室内で動圧が保存されそのまま風下開口を通過するため、風下側開口部で縮流による静圧降下がほとんど生じない。そのため室内圧は建物背後の静圧と同じレベルになっている。一方Model 4, 5では遮風板によりエネルギー消極的に動圧が減少するため風

研究速報

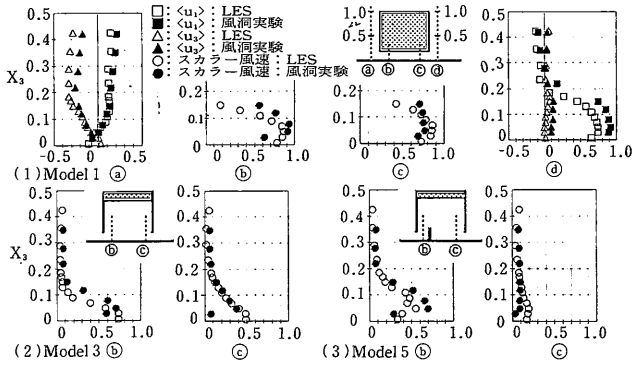


図6 開口部近傍風速の鉛直分布(モデル中心軸上)

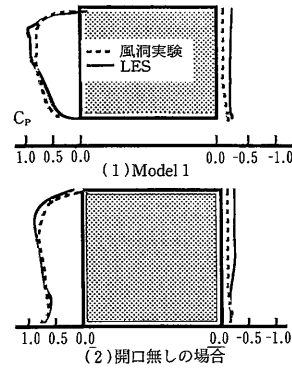


図7 壁面風圧係数&ltltmath>\langle C\_p \rangle</math>(モデル中心軸上)

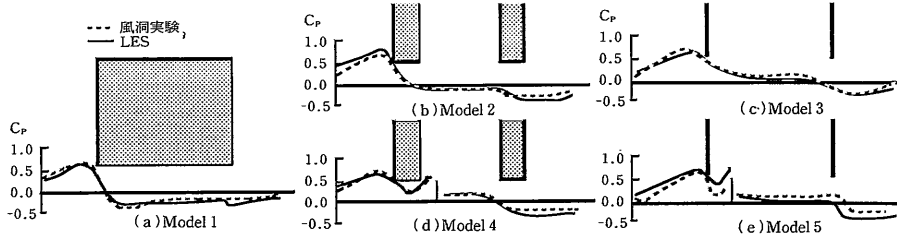


図8 床面風圧係数&ltltmath>\langle C\_p \rangle</math>(モデル中心軸上)

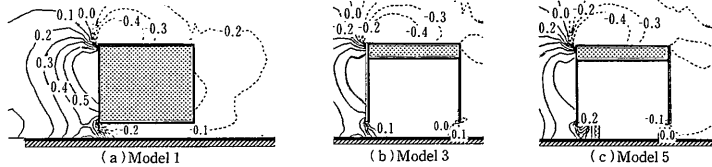


図9 空間静圧分布(モデル中心鉛直断面, LES)

下開口では縮流して通過し、室内静圧はModel 2, 3と比べて高くなる。この高い室内圧のため相対的に風上開口の前後静圧差は小さくなり流入風量はModel 2, 3に比べ少ない。各モデルとも壁面風圧係数と同様、風下側の負圧を多少大きめに見積る傾向はあるものの<sup>3)</sup>、その分布を正しくとらえている。

6) 空間静圧分布(図9): Model 1では流入開口室内上部における剥離の影響で大きな負圧のピークが生じ、この部分の後流で正の圧力勾配となっていることがわかる。また各モデルで流入出開口前後で大きな負の圧力勾配が観察されるなど、床面風圧係数の分布と対応している。

7) 通風量およびエネルギー収支(表4): 計算結果の開口部風速を積分して求めた通風量 $Q_c$ はトレーサガス法による実験値 $Q_E$ と一割程度の誤差で一致している。また計算結果の室内部分で運動エネルギー収支を調べた結果の一部を示す<sup>7)</sup>。静圧損失に見合う仕事 $\int \int U_n(p/\rho) ds/Q_c$ (表4-III)と室内のエネルギー散逸の総和 $\int \int \epsilon dv/Q_c$ (表4-IV)(全圧損失に対応)はModel 3~5では、ある程度対応する値となっているがModel 1, 2では

表4 通風量, 圧力仕事, エネルギー散逸

	I	II	III	IV
	$Q_c$ (LES)	$Q_E$ (風洞実験)	$\int \int U_n \langle (p/\rho) \rangle ds / Q_c$ (LES)	$\int \int \epsilon dv / Q_c$ (LES)
Model 1	0.021	0.023	0.05	0.14
Model 2	0.019	0.019	0.16	0.26
Model 3	0.016	0.014	0.25	0.31
Model 4	0.017	0.015	0.35	0.29
Model 5	0.011	0.012	0.18	0.27

\* I, III, IVの積分範囲はそれぞれ開口面, 室内表面(開口面を含む)および室内全容積。

かなり異なる<sup>4)</sup>。すなわち従来の通風量予測法で用いられる静圧損失を全圧損失と見なす仮定がこのような流れ場ではかならずしも成り立たず、全圧損失の把握が必要であることがわかる。

8)  $k, \epsilon$ の分布(図10, 11):  $k$ の散逸率 $\epsilon$ は上述のように全圧損失に対応する。流れの構造を検討するには $k, \epsilon$ の分布性状の把握が重要となる。 $k$ と $\epsilon$ はピークの位置が一致しており同様の分布を示している。Model 1では風上開口上端の剥離に伴いその周辺で $k, \epsilon$ が比較的大きな値を示す。室内上部では小さい。Model 3では $k, \epsilon$

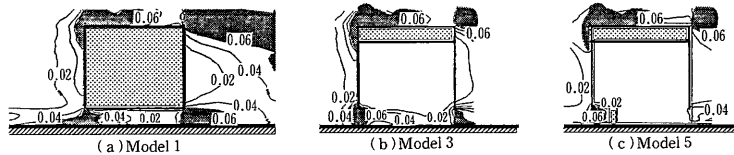


図10 kの分布 (モデル中心鉛直断面, LES)

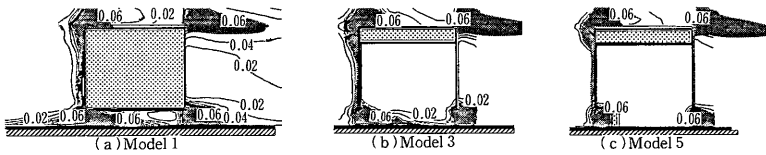


図11 εの分布 (モデル中心鉛直断面, LES)

の大きな部分が風上開口から風下開口まで達しているのに対してModel 5では遮風板後方の弱風域でk, εが小さい。風下開口直後では開口通過気流と後方弱風域との強い速度勾配によりk, εは大きめの値となる。

5. 結 論

①通風時の建物を想定した開口を有する立方体の内外気流にLESを適用し, 風洞実験結果と詳細に比較した。②その結果, 平均風速, 風圧係数, 通風量において十分な精度で一致し, この種の複雑な流れ場に対するLESの有効性を示した。③流れ場のエネルギー収支の観点から静圧, 全圧損失を考察するとともにk, εの分布性状から全圧損失の構造を検討した。(1991年11月27日受理)

- 1) Model 2, 4の結果はそれぞれModel 3, 5とほぼ同様な結果を示したので, 本報では原則的にModel 3, 5の結果のみを示す。
- 2) 本計算の場合, 床面付近や開口部のshear layerのメッシュ分割が十分とはいえない。また縮流部分では壁面近傍の長さスケールの取り扱いに関する境界条件の不適合という問題も考えられ, 今後さらに検討する。
- 3) 原因としては, 開口部(注4)と同様に, 後方循環流部分のメッシュ分割の不足や壁面境界条件の妥当性に関連する問題等が考えられる。
- 4) Model 1, 2での  $\iint \varepsilon dv / Q_c$  (表4-IV) (全圧損失) と  $\iint U_n(p/\rho) ds / Q_c$  (表4-III) (静圧損失) の差は流入出開口の風速プロファイルの変化に伴う動圧変化にほぼ対応していると考えられる。すなわち図4より各モデル出流入時の風速ベクトルは強い下向きとなる ( $|\langle u_3 \rangle| > 0$ )。また今回の条件では流入出開口の面積が等しいため  $\langle u_1 \rangle$  は流入出面で等しい。Model 3~5では流出時の縮流の影響により  $\langle u_2 \rangle, \langle u_3 \rangle$  が相対的に大きくなるため流入出の運動エネルギーの差は小さい。しかしModel 1, 2では流出時に  $\langle u_2 \rangle, \langle u_3 \rangle \approx 0$  となるため流入出間の運動エネルギーは大きく異なりエネルギー

収支における動圧の寄与が比較的大きくなるためIII, IVの差が大きくなるものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 村上周三, 持田灯, 林吉彦「立方体周辺の非等方乱流場の再現に関するk-εモデル, ASM, LESと風洞実験の比較」(生産研究, 1991. 1)
- 2) Yoshizawa, A., "Eddy-viscosity-type subgrid-scale model with a variable Smagorinsky coefficient and its relationship with the one equation model in large-eddy simulation" (Phys. Fluid, 1991)
- 3) 森西洋平, 小林敏雄「普遍的スマゴリンスキーモデルの構成」(生産研究, 1990. 1)
- 4) 水谷国男, 村上周三, 加藤信介, 持田灯「LESによる室内気流解析—Smagorinsky定数の最適化に関する検討—」(第6回NSTシンポジウム, 1991. 3)
- 5) 赤林伸一, 村上周三, 加藤信介, 水谷国男, 金永徳, 富永禎秀「住宅の換気・通風に関する実験的研究(その11)」(日本建築学会学術講演梗概集(環境工学) 1991. 9)
- 6) Murakami, S., Mochida, A., Hayashi, Y., Sakamoto, S. "Numerical Study on Velocity-Pressure Field and Wind Forces for Bluff Bodies by k-ε, ASM, LES" (8th International Conference on Wind Engineering, 1991. 7)
- 7) 加藤信介, 村上周三, 「建物内外の空気流動に関するマクロ・ミクロ解析の統合(その1)」(日本建築学会学術講演梗概集(環境工学) 1991.10)
- 8) Kato, S., Murakami, S., Mochida, A., Akabayashi, S., and Tominaga, Y., "Velocity-Pressure Field of Cross Ventilation with Open Windows Analyzed by Wind Tunnel Test and Numerical Simulation" (8th International Conference on Wind Engineering, 1991. 7)
- 9) 富永禎秀, 村上周三, 加藤信介, 持田灯「LESによる通風時の建物内外気流の解析」(第5回数値流体力学シンポジウム論文集, 1991.12)