

Large Eddy Simulation による建物周辺気流の予測(その 2) —— 風向 45°の周辺気流に関する数値解析と野外実験, 風洞実験の比較 ——

Numerical Prediction of Air Flow around Building by Means of Large Eddy Simulation

村 上 周 三*・持 田 灯**・日 比 一 喜**

Shuzo MURAKAMI, Akashi MOCHIDA and Kazuki HIBI

1. 序

Large Eddy Simulation(LES)により, 野外実験で観測された境界層の性状を予測し, その結果を初期値として, 風向角を有する場合の建物周辺気流の数値解析を行った結果について報告する. LES では通常, 周期境界条件が用いられているが, これを用いた計算ではアプローチング・ウインドの性状を境界条件として明確に規定することができない. このため計算条件が不適切であれば, 計算が進むにつれて流入側の流れの性状は, 意図したものとは全く異なってしまう可能性がある. したがって計算を行う前に, 各計算条件の設定内容と形成されるアプローチング・ウインドの性状の関係をある程度把握しておく必要があるが, 現在参考となるようなデータの数はきわめて少ない. 本報では, 最終結果に到達するまでに試みられた, 一連の数値シミュレーションの結果を失敗例も含めて報告し, シミュレートされたアプローチング・ウインドの性状に及ぼす, 計算領域の広さ, 初期値の乱れ, 床面境界条件の相違, 建物の有無等の影響について検討するとともに, 風向が建物と平行でない流れを周期境界条件を用いて解析した場合の予測結果の信頼性について調べる.

2. 数値シミュレーションの概要

2.1 LES の基礎式 表 1 に示す.

2.2 差分スキーム 時間に関しては Adams-Bashforth スキーム, 空間に関しては中心差分を用いている.

2.3 初期条件 平均値としては実験結果に対応する $\langle \bar{u} \rangle \propto Z^{1/5}$ の分布を与えた. 速度の変動成分 u', v' は一様乱数を用いて与え, w' は各セルごとに連続式を満たすように与えた. u' の変動の大きさとしては表 2 に示す 2 通りの値を用い, v' の変動の大きさは $\sqrt{\langle v'^2(z) \rangle} / \langle \bar{U}_0 \rangle = 0.05$ とした.

* 東京大学生産技術研究所 付属計測技術開発センター

** 民間等共同研究員 清水建設(株)技術研究所

記 号

- u_i : 風速の 3 成分. i (または x, u): 主流方向, j (または y, v): 横方向, k (または z, w): 鉛直方向
- $\langle f \rangle$: 変数 f のアンサンブル平均
- \bar{f} : 変数 f の格子平均 (ここでは filtering による空間平均)
- f : アンサンブル平均からのずれ $f = \bar{f} - \langle \bar{f} \rangle$
- f' : 格子平均からのずれ $f' = f - \bar{f}$
- Δ : 差分格子スケール $(\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z)^{1/3}$
- C_s : Smagorinsky 定数
- ν_{sgs} : 格子スケール以下 (subgrid scale) の渦粘性
- H_b : 建物高さ, 野外実験では $H_b = 1.8\text{m}$
- U_b : 建物高さにおける風速, 野外実験では $\langle U_b \rangle = 1.1\text{m/s}$
- s : 評価時間
- f : 周波数 (1/t) f_p : ピーク周波数 (1/t)
- λ_p : スペクトルスケール ($\langle \bar{u} \rangle / f_p$)
- k : 乱流エネルギー $k = 1/2 \langle u'_i u'_i \rangle$ または $k = 1/2 \langle \overline{u'_i u'_i} \rangle$

表 1 LES の基礎式

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\nu + \nu_{sgs}) \bar{e}_{ij} \tag{2}$$

ただし $\nu_{sgs} = (C_s \Delta)^2 \cdot \left(\frac{\bar{e}_{ij}^2}{2} \right)^{1/2}$ ③

$$e_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}, \quad C_s = 0.1, 0.2$$

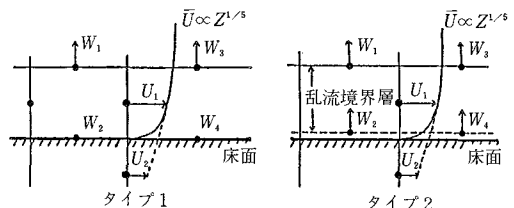


図 1 床面境界における W 成分の取扱

(タイプ 1) 床面上で $W=0$ 今までのシミュレーションで通例用いられている方法 床面で $\bar{u}_i \cdot \bar{u}_j = 0$	(タイプ 2) 床面上の W 成分を 1 つ上のセルの値に等しいと置く これは壁面近くの運動量拡散が不当に小さく予測されるのを防ぐためである したがって床面で $\bar{u}_i \cdot \bar{u}_j = 0$ ただしこの考え方は移流項に対してのみ適用する
---	---

2.4 境界条件

- (1) 流入・流出および側面 周期境界条件を用いた,
- (2) 上空面 free slip とした,
- (3) 床面 図 1 に示す 2 つのタイプを用いた,
- (4) 建物壁面 建物内に存在する仮想セルの速度成分を零とした。今回用いた差分メッシュでは、このことは壁面付近で 1/2 乗の分布に従う風速勾配を仮定したことに等しい。

2.5 差分メッシュおよび計算領域 表 2 に示すように計算領域の広さの異なる 2 種類のメッシュ系を用いた。21×19×13 のメッシュ系 (計算 No. 1) の計算領域は x 方向に $9.5H_b$, y 方向に $5H_b$, z 方向に $2.5H_b$ となり, $44 \times 44 \times 21$ のメッシュ系 (計算 No. 2~No. 6) の計算領域は, x 方向に $15H_b$, y 方向に $15H_b$, z 方向に $5.67H_b$ となる。図 2 に $44 \times 44 \times 21$ の場合のメッシュ図を示す。平板境界層の計算では図 2 の point 2 の位置において, 建物周辺気流の計算では point 1 の位置において時系列データをサンプリングした。

2.6 計算種類 表 2 に示す。計算領域, 初期値の乱れ, 床面境界条件, Smagorinsky 定数 C_s 等の異なる 5 種類の平板境界層流れの計算 (No. 1~5) と風向 45° の建物周辺気流の計算 (No. 6) を行った。

2.7 風向角 θ の入力方法 平板境界層流れ (No. 5) の最終結果の流れ場を 45° 回転させることにより $\theta = 45^\circ$ の流れ場を作成した。次にこの値を初期値として建物無し of 計算を無次元時間で約 20 の間行った後に, 建物を定義して計算 No. 6 を開始した。

3. 野外実験の概要²⁾

測定場所は神奈川県厚木市の東京工芸大学のグラウンド。測定用マストの高さ 2, 4, 6, 8, 10 m に 3 杯型風速計を設置し, 接地境界層内の風速の鉛直分布を測定。また, 測定高さ 1.8 m における風速を 3 次元超音波風速計で測定。平均風速の測定結果はべき指数約 1/5 の分布を示し, 高さ 1.8 m の平均風速 $\langle U_b \rangle$ は 1.1 m/s, 乱れの強さは 26%, スペクトルスケールは約 23 m であった。

表 2 計算種類

計算No	図中の記号	差分点数 (x) × (y) × (z)	初期値		床面境界	Smagorinsky 定数	建物の有無	風向 θ	スペクトル スケール注)	備考
			平均値	乱れ						
1	○	21×19×13	$\langle \bar{U} \rangle \propto Z^{1/5}$	$\sqrt{\langle u'^2 \rangle} = 0.26 \langle \bar{U}_b \rangle$	タイプ 2	0.1	無	0°	1.0	平板境界層の シミュレーション
2	△	44×44×21	〃	〃	〃	〃	〃	〃	4.4	
3	■	〃	〃	〃	タイプ 1	〃	〃	〃	5.8	
4	●	〃	〃	=0.13	〃	〃	〃	〃	—	
5	▲	〃	〃	=0.26	タイプ 2	0.2	〃	〃	8.7	
6	□	〃	〃	〃	〃	〃	有	45°	15.6	建物周辺気流

注) スペクトルスケールの値はシミュレーション結果であり H_b で無次元化されている

4. 数値シミュレーションと野外実験,
風洞実験との比較

4.1 アプローチング・ウィンドの比較

ここでは計算条件の相違がシミュレートされたアプローチング・ウィンドの性状に及ぼす影響について述べる。1) 計算領域の広さの相違の影響 (図 3, 4) $21 \times 19 \times 13$ の計算メッシュを用いた計算 No. 1 の結果 (○) では, 乱れの大きさはほぼ野外実験の値に対応するが, 平均風速, 乱れの強さの鉛直分布は不規則な形状を示す。 $44 \times 44 \times 21$ の計算メッシュを用いた計算 No. 2~No. 6 の乱れの強さは, 初期値の乱れの大小, 床面境界条件の相違, 建物の有無にかかわらず全般的に野外実験の結果よりも小さい。

2) C_s の相違の影響 (図 3, 図 4) $C_s = 0.2$ の計算 No. 5 の結果 (▲) は $C_s = 0.1$ の計算 No. 3 (■) に比べ, 床面付近の速度欠損が大きくなり, スペクトルピークも低周波側に移動する。

3) 建物の有無の影響 (図 3, 図 4, 図 5) 計算領域内に建物が存在する計算 No. 6 の場合の平均風速の鉛直分

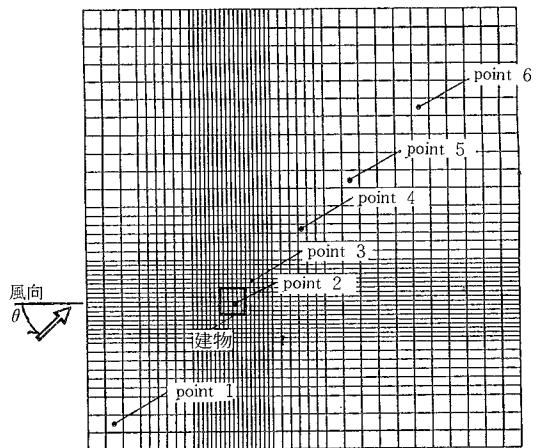


図 2 不等間隔メッシュによる計算領域
(水平断面, 計算 No. 2~6 の場合)

研 究 速 報

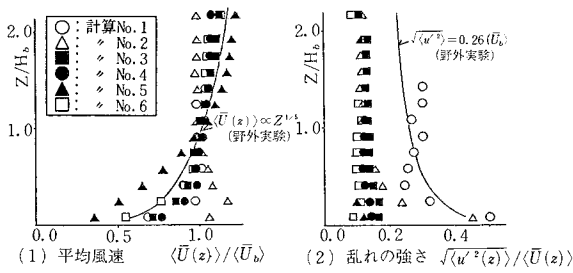


図 3 アプローチング・ウインドの鉛直分布

布を図5(1)に示す。測定点の位置は図2に示されている。建物背面の point 3 (□) で顕著な速度欠損は、流入側の point 1 (○) ではほとんど見られず、point 1 における平均風速分布は野外実験とよく一致している。また、図4を見ると、計算領域内に建物が存在する計算 No. 6 のスペクトルは、建物の無い場合と比べてピークの位置が低周波側に移動し、スペクトル形状が評価時間1秒~2秒の野外実験の結果とよく一致していることがわかる。

4) subgrid scale の乱れの寄与 (図5(2)) 図中○印のプロットは grid scale 以上の変動の乱れの強さを示しており、●印のプロットは subgrid scale の乱れの寄与分も考慮している。subgrid scale の乱れは Deardorff に従って、 $1/2 \overline{u_i'' u_i''} = \nu_{sgs}^2 / (C_s \Delta)^2$ より算出した¹⁾。 C_s の値は $C_s = 0.1$ の場合 0.094、 $C_s = 0.2$ の場合 0.237 とした³⁾⁴⁾。また、ここでは $\overline{u''^2} = 1/3 \overline{u_i'' u_i''}$ という仮定を用いている。図を見ると、subgrid scale の乱れの影響は床面付近で比較的顕著であるが、これを考慮しても計算結果は野外実験値と比べて小さい。

4.2 建物周辺の平均風速ベクトルの比較 (図6)

野外実験において計算結果と比較できるような詳細な風速測定を行うことは非常に困難であるので、ここでは野外実験で測定された境界層の性状を正確に風洞内で再現して行った風洞実験の結果と比較する。風洞実験ではアプローチング・ウインドの相似条件として ① 平均風速、② 乱れの強さ、③ 風速変動のスペクトルの3つのパラメータについて考慮しており、 Re 数 $\langle U_b \rangle \cdot H_b / \nu$ は 2×10^4 である。また、風速の測定にはタンデム型熱線風速計を用いている。計算結果は建物後流の wake の大きさを多少広く見積もる傾向にあるものの、建物周辺の全体的な流れの様子をよく再現している。計算結果が wake の大きさを多少広く見積もる傾向は既往の計算結果と同様であり³⁾、この点については今後さらに検討する必要がある。

4.3 乱流エネルギーの分布 (図7(1), (2))

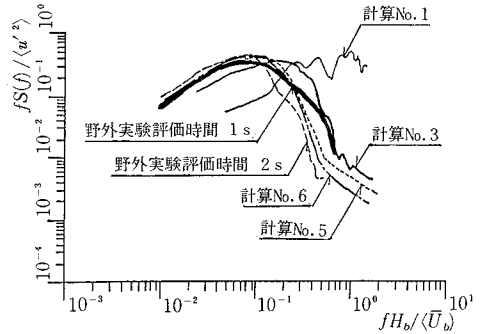
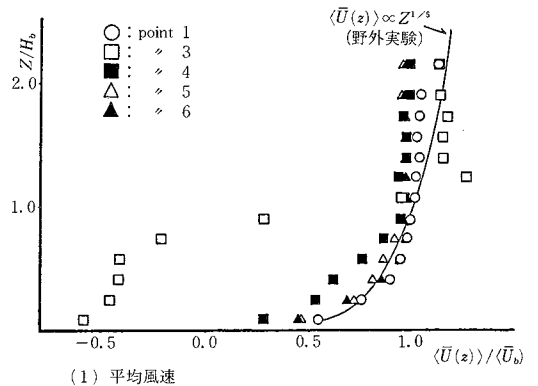
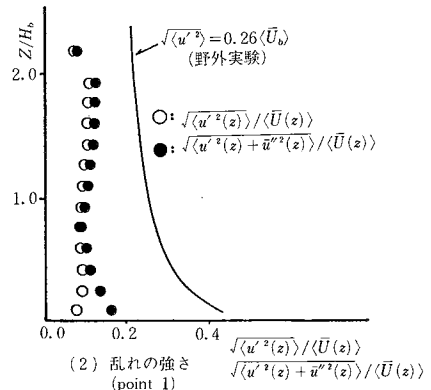


図 4 アプローチング・ウインドの風速変動のスペクトル ($Z = H_b$)

(1)は計算より算出した grid scale 以上の乱流エネルギーの分布を示し、(2)はこれに subgrid scale の乱れの寄与分を追加した数値の分布を示している。subgrid scale の乱れの寄与分を考慮すれば乱流エネルギーは全体的に増加するが、その変化はあまり大きくなく、分布の傾向は両者ともほぼ同様である。図7を見ると、乱流エネルギーの計算結果は建物背後で大きな値を示してい

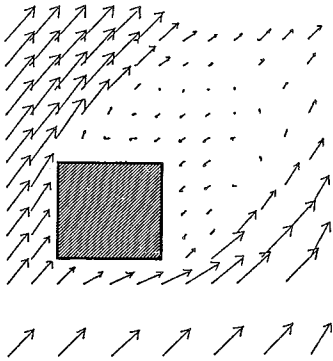


(1) 平均風速

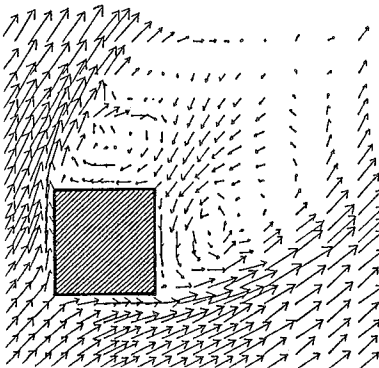


(2) 乱れの強さ (point 1)

図 5 平均風速、乱れの強さの鉛直分布 (計算 No. 6)

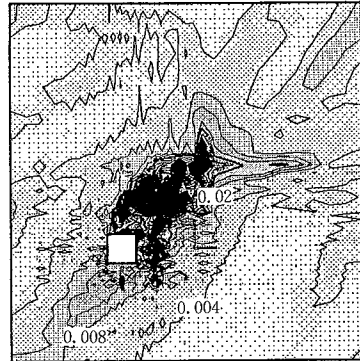


(1) 風洞実験

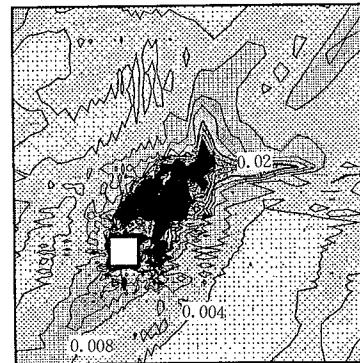


(2) 数値計算

図 6 平均風速ベクトルの比較
(風向 $\theta=45^\circ$, 水平断面 $Z=1/2H_0$)



(1) $\frac{1}{2} \langle u_i' u_i' \rangle / \langle \bar{U}_0^3 \rangle$



(2) $\frac{1}{2} \langle u_i' u_i' + u_i'' u_i'' \rangle / \langle \bar{U}_0^3 \rangle$

図 7 乱流エネルギー k の空間分布
(風向 $\theta=45^\circ$, 水平断面 $Z=1/2H_0$)

ることがわかる。

5. 結 論

(1) 周期境界条件を用いた LES の計算によりシミュレートされ、アプローチ・ウインドの性状に及ぼす、計算領域の広さ、Smagorinsky 定数 C_s 、建物の有無等の影響等について検討した。

(2) 風向が建物と平行でない場合でも、周期境界条件を用いた LES の計算によりアプローチ・ウインドの性状および建物周辺の気流性状をおおむね予測し得ることを、野外実験、風洞実験の対応を調べることにより確認した。しかし、計算におけるアプローチ・ウインドの乱れの強さが野外実験値よりも小さい点、また、建物後流の wake の大きさを計算では多少広く予測している点等については、今後さらに検討する必要がある。

謝 辞

本研究を行うにあたり、東京大学生産技術研究所に設けられた NST (乱流数値シミュレーション) 研究グルー

プ内の討論により多くの示唆を得た。吉沢徹助教授、小林敏雄助教授、加藤信介講師、堀内潔助手をはじめとするメンバー各位に謝意を表す。なお、本研究の一部は東京大学生産技術研究所選定研究費によっていることを付記する。
(1985年10月30日受理)

参 考 文 献

- 1) J. W. Deardorff [A Numerical Study of Three-Dimensional Turbulent Channel Flow at Large Reynolds Numbers] Journal of Fluid Mechanics, vol. 41, 1970
- 2) 持田, 村上, 日比, 大場「建物周辺のガスの拡散に関する風洞実験(その7)」昭和60年度 日本建築学会関東支部研究報告集
- 3) 村上, 日比, 持田「建物周辺気流の数値シミュレーション—Large Eddy Simulation と風洞実験の比較—」生産研究 第36巻 第12号 昭和59年12月
- 4) S. A. Murakami, Mochida, and K. Hibi [Numerical Simulation of Air Flow around Cubic Model] International Symposium on Computational Fluid Dynamics Tokyo, 1985. 9