

Large Eddy Simulationによる街区周辺の流れ場の解析

Numerical Prediction of Air Flow around Building Blocks by means of Large Eddy Simulation

村 上 周 三*・持 田 灯*・日 比 一 喜**
Shuzo MURAKAMI, Akashi MOCHIDA and Kazuki HIBI

立方体で構成される均等街区周辺の流れ場をLarge Eddy Simulationで解析し、風洞実験と比較した結果を示す。数値シミュレーション結果は、街区周辺の平均風速分布、風速変動の性状、建物壁面の静圧分布をよく再現している。また、数値シミュレーション結果をComputer Graphicsにより可視化した結果は、建物から放出される渦のパターンを的確に表している。

1. は じ め に

筆者らは従来、Large Eddy Simulation (LES)を用いた立方体モデル周辺の流れ場の解析を行ってきた^{1,2)}。本報では、LESを用いて街区の乱流場の解析を行い、風洞実験と比較するとともに、Computer Graphicsにより数値シミュレーション結果の可視化を行った結果について報告する。

2. 数値シミュレーションの概要³⁾

図1に示すような、立方体で構成される均等街区を対象として、表1の基礎方程式により解析。本研究では表2に示す3種類の差分メッシュを用いているが、乱流統計量の風洞実験との比較は主にMesh No.1の結果を用いている。図2にMesh No.1のメッシュ分割(39(x)×36(y)×31(z))を示す。従来の立方体周辺気流の計算^{1,2)}に比較して流れの主流、および横方向の長さが鉛直方向に比較して短く、また建物に接する計算格子の幅が小さい。境界条件は以下のとおり。

- ①流れの主流方向、横方向は周期境界条件。ただし主流方向には圧力損失 ($\Delta \bar{p}/\rho \langle \bar{u}_b^2 \rangle = 0.011$) を与えている。
- ②建物壁面、地上面は1/2乗の風速勾配に従う。

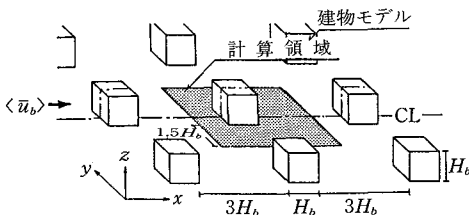


図1 街区モデル

- ③上空面の風速の条件はfree-slip。

差分スキームは時間にAdams-Bashforth, 空間に2次の中心差分を使用。

3. 風洞実験の概要

模型スケールは75mm, 模型高さ H_b と棟高における風

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
- u_b : 流入側境界の建物高さの風速
- P : 圧力, P_0 : 基準静圧
- $\langle f \rangle$: 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'' , f' : 平均からのずれ $f'' = f - \bar{f}$, $f' = f - \langle f \rangle$
- Δ : 格子スケール ($\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$), Δ はメッシュ幅
- C_s : Smagorinsky定数
- ν_{sgs} : 格子スケール(subgrid scale)の渦粘性
- H_b : 建物高さ, u_b : 建物高さにおける風速
- k : 乱流エネルギー, $k = \frac{1}{2} \langle u'_i u'_i + \overline{u''_i u''_i} \rangle$
- ω_i : 渦度ベクトルの3成分, $\omega_x = \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial y} - \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right)$,
 $\omega_y = \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right)$, $\omega_z = \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right)$
- C_p : 風圧係数, $C_p = (\langle \bar{P} \rangle - \langle \bar{P}_0 \rangle) / \rho \langle \bar{u}_b \rangle^2 / 2$
- n : 周波数 (1/t)
- t^* : 無次元時間, $t^* = t \times \langle \bar{u}_b \rangle / H_b$

表1 LESの基礎式

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

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

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

$$e_{ij} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}, \quad C_s = 0.1.$$

*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㈱)

速 $\langle u_b \rangle$ によるレイノルズ数は 2.5×10^4 .

4. 風速変動の波形, スペクトル (図3, 図4)

建物前方 H_b の高さ $H_b/2$ (図2, point 1) における風速の主流方向成分の波形を図3に, スペクトルを図4に示す. 実験と計算のスペクトルピークはよく一致するが, 計算のスペクトルの高周波側にやや卓越するピークがみられる. なお, これらは無次元時間で53~135 (180,000 step~320,000step) の結果を用いている. また, 風洞実験におけるデータのサンプリング間隔は10ms, point 1の u 成分を用いて長さスケールに換算すると, 10msはpoint 1のメッシュの格子スケールの約2.5倍となる.

5. 風速の鉛直分布 (図5, 図6)

図5に建物間の面内平均風速の鉛直分布を示す. 面内平均風速の鉛直分布を指標とする限り, 無次元時間53 (約180,000step) 以降の解析はほぼ定常とみなすことができる. 図6に建物前方 H_b における風速の主流方向成分の鉛直分布を示す. 高さ $1/4H_b$ 以下の領域では計算のほうが速度欠損が大きい³⁾, おおむねよい一致を示す.

6. 風速ベクトル, スカラー風速の分布 (図7, 図8)

1) 鉛直断面 (図7(1), 図8(1))

単一建物の場合の結果に比較して, 屋上面の剝離の大きさが小さい点, 建物後流の渦中心がやや建物上部よりになる点など前体的傾向は計算と実験でよく一致する (図7(1)). しかし計算における建物後流渦のスケールが実験に比較してやや大きくなる傾向がある. また, スカラー風速の等値線図の全体的な一致は非常によい (図8(1)).

2) 水平断面 (図7(2), 図8(2))

風速ベクトルの計算結果では建物前面の逆流が実験と比較してやや大きい (図7(2)), スカラー風速の値は実験と計算でよく一致している (図8(2)).

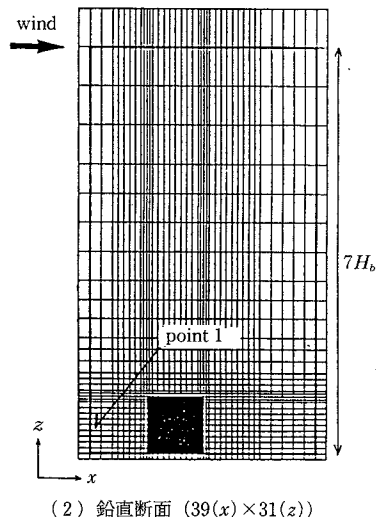
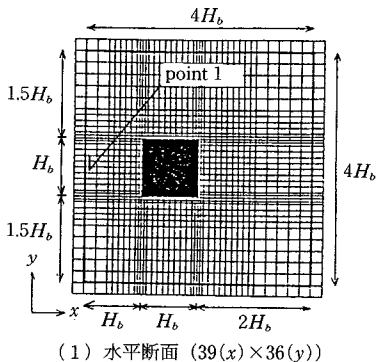


図2 メッシュ分割 (Mesh No. 1, 周期境界条件を使用)

7. 細かいメッシュ分割による計算 (図9, 図10)

図9にMesh No. 2 (メッシュ数約14万) を用いた場合の風上側角部周辺の風速のベクトルを, また, 図10にMesh No. 3 (メッシュ数約20万) により計算された瞬間風速ベクトルを示す. 図10の場合, 建物隅角部付近のメッシュ幅がかなり細かく ($h = H_b/160$), 壁面に接するメッシュの幅は粘性底層の厚さと等オーダーと予想されるので, 壁面で速度にno-slipの条件を用いている. 図9, 図10の結果では, Mesh No. 1 (メッシュ数約4万) の計算では明確に分解できなかった屋上面や側面の剝離渦がよく捉えられている.

8. 乱流エネルギーの分布 (図11, 図12)

従来筆者らのLESの計算²⁾では, 乱流エネルギー k の値が低めに推定される傾向が強かった. 今回の計算では図11に示すように, k の値のレベルは実験と計算の間でよく一致している. これは,

- ①従来と比較して格子分割が細かいこと,
- ②今回のように建物群を対象としている場合には, 建物自体の作り出す乱れが卓越し, 壁面境界で作られる乱れの寄与が少なく, 境界条件設定の仕方のよし悪しの影響が現れにくいことの二つが原因と考えられる. しかし,

表2 メッシュ分割

Mesh No	メッシュ数	最小メッシュ幅
Mesh No. 1	$39(x) \times 36(y) \times 21(z) = 43,524$	$H_b/20$
Mesh No. 2	$60(x) \times 51(y) \times 46(z) = 140,760$	$H_b/40$
Mesh No. 3	$64(x) \times 59(y) \times 52(z) = 196,532$	$H_b/160$

k の分布の形状に関して、Mesh No. 1の計算では建物隅角部の風上面と屋上面で大きな値を示すのに対し(図11(2)),実験では屋上面剥離域の中で大きな値を示しており(図11(1)),実験と計算の間でやや相違が見られる。これは、約4万メッシュの分割(Mesh No. 1, 図2)では屋上面の剥離渦付近の分割が十分でないことや、出隅部分の境界条件の取り扱いが適切でないことなどが理由として考えられる。これに対してMesh No. 2(メッシュ数約14万)の結果(図12)では、 k の分布はかなり実験と近づき改善されている。

9. 建物表面の風圧係数(図13)

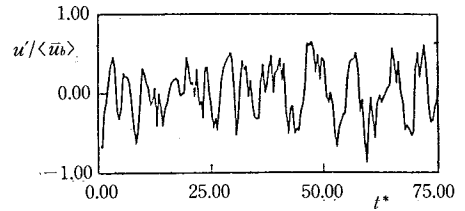
風上面は計算が実験よりやや大きめの値を示し、側面、背面では計算がやや低めの値を示しているが、全体的な傾向はよく一致している。

10. 建物周辺の流跡線図(図14)

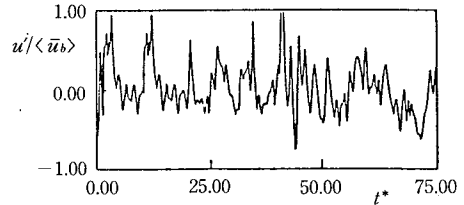
図14はMesh No. 2の計算の建物側面の隅角部近傍、および屋上表面(表面に接するセル内)からマーカーを発生させた場合の流跡線図を示している。側面隅角部の屋根面近くで一度風上側へ逆流する流れや、渦の中で一回転する流れが観察される。しかし、地面に近い位置から発生した粒子は建物側面ではあまり複雑な挙動を示していない。

11. 圧力, スカラー風速, 渦度の瞬時値の空間分布(図15~図17)

Mesh No. 3を用いて計算された $t^*=90$ の圧力, 風速, 渦度の分布を図15~17に示す。これらの分布を実験で測定するのは大変困難であり、ほとんど不可能と考えられる。図15の圧力の瞬時値の分布を見ると建物隅角部に等圧線の集中する部分があり、側面には建物から放出され



(1) experiment (Murakami et al.)



(2) numerical simulation

図3 風速変動の波形(u 成分, point 1, Mesh No. 1)

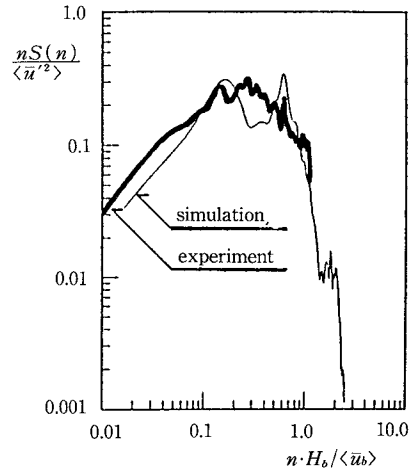


図4 変動風速のスペクトル(u 成分, point 1)

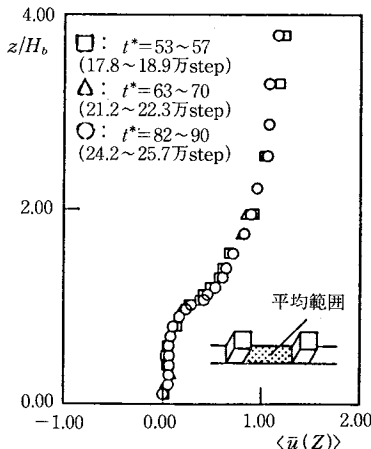


図5 面内平均風速の鉛直分布(定常性の確認, Mesh No. 1)

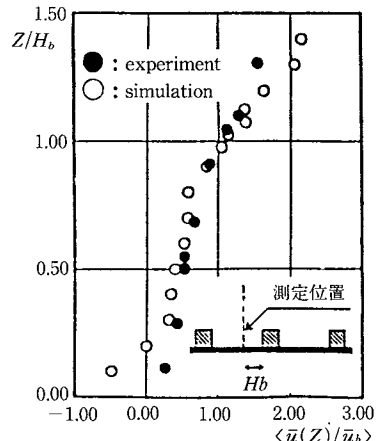
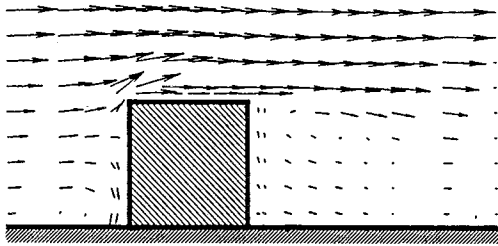
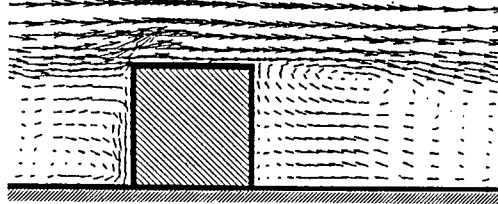


図6 平均風速の鉛直分布(Mesh No. 1)

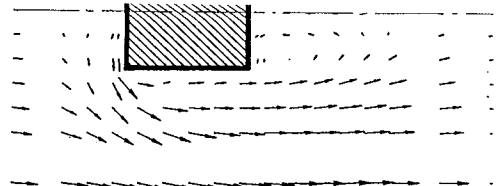


(a) experiment (Murakami et al.)

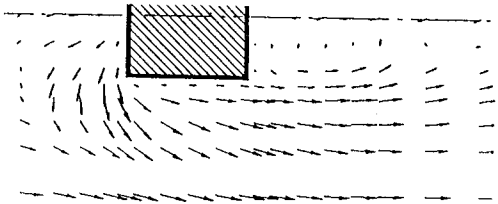


(b) numerical simulation

(1) 鉛直断面 (建物中心軸上, $\langle \bar{u} \rangle + \langle \bar{w} \rangle$)



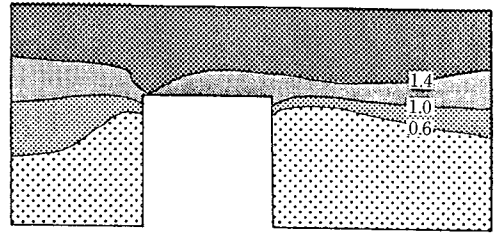
(a) experiment



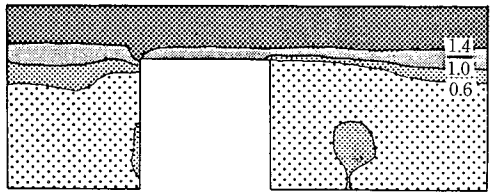
(b) numerical simulation (Mesh No. 1)

(2) 水平断面 ($Z = H_b/10, \langle \bar{u} \rangle + \langle \bar{v} \rangle$)

図 7 平均風速ベクトル図

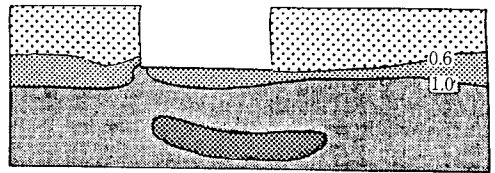


(a) experiment (Murakami et al.)

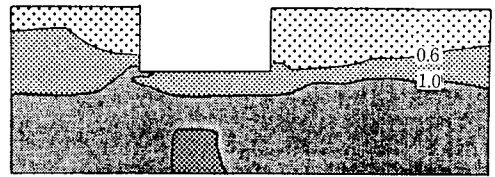


(b) numerical simulation

(1) 鉛直断面 (建物中心軸上)



(a) experiment



(b) numerical simulation (Mesh No. 1)

(2) 水平断面 ($Z = H_b/10$)

図 8 スカラー風速 ($\sqrt{\langle \bar{u}^2 \rangle + \langle \bar{v}^2 \rangle + \langle \bar{w}^2 \rangle} / \langle \bar{u}_0 \rangle$) の分布

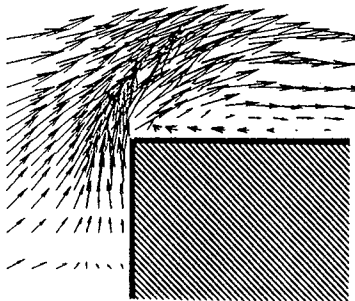


図 9 隅角部周辺の平均風速ベクトル
(Mesh No. 2, 建物中心軸上の鉛直断面)

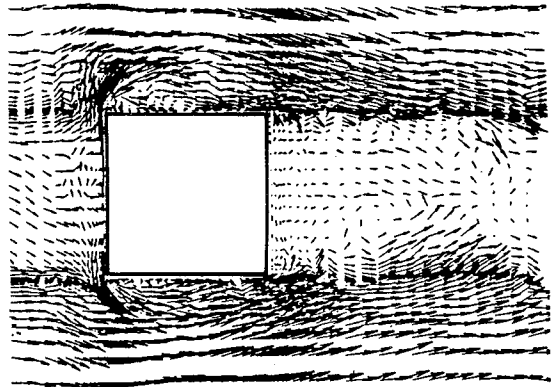
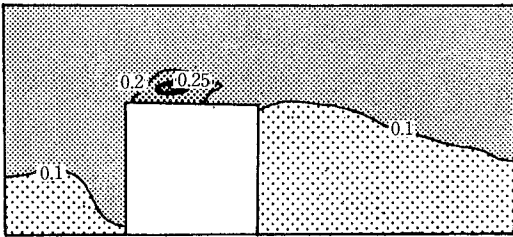
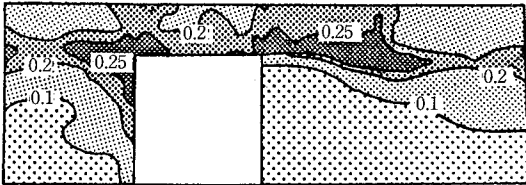


図 10 瞬間風速ベクトル ($\bar{u} + \bar{v}$)
(Mesh No. 3, 水平断面, $Z = H_b/2$)



(1) experiment (Murakami et al.)



(2) numerical simulation (Mesh No. 1)

図11 乱流エネルギー k の空間分布 ($\langle u_b \rangle^2$ で無次元化)

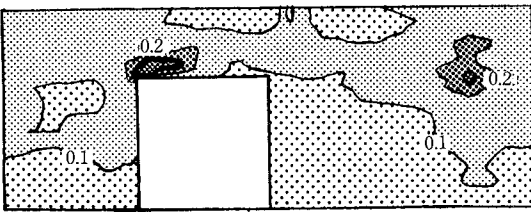


図12 乱流エネルギー k の空間分布 (Mesh No. 2)

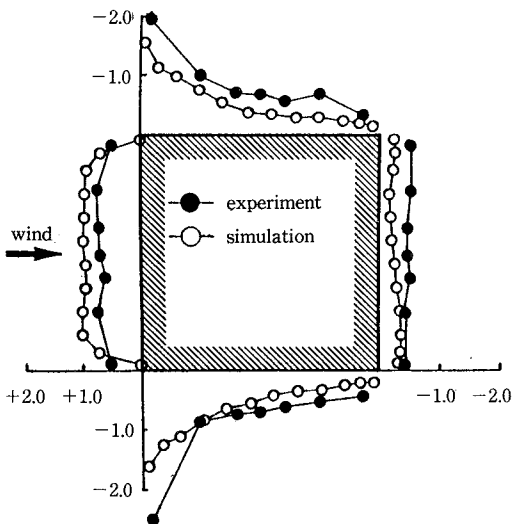


図13 風圧係数 C_p の比較

—Mesh No. 1, 水平断面, $Z = H_b/2$ —

$$C_p = \frac{\langle P \rangle - \langle P_0 \rangle}{\rho \langle u_b \rangle^2 / 2}$$

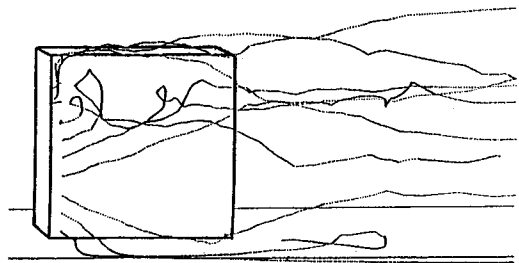
$\langle P \rangle$: 壁面圧力
 $\langle P_0 \rangle$: 建物前方 H_b , 高さ $7 H_b$ の静圧

た渦と思われる等圧力線の集中した部分が見られる。図16のスカラ風速のコンタを見てもそれに対応する部分が存在する。また、図17の過度の分布においても、圧力のコンタに見られるような等圧線の集中する部分もあるが、その位置は必ずしも一致しない。

12. ま と め

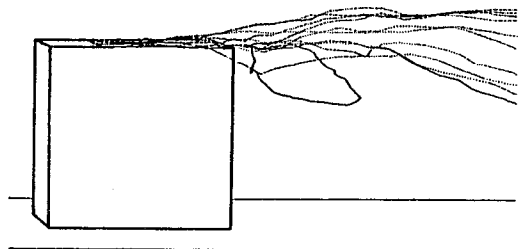
LESにより街区周辺の流れ場を解析し、以下の結論を得た。

- ①数値解析の風速変動のスペクトルピークは実験結果のスペクトルピークとよく一致する。
- ②風速ベクトルの計算結果は実験結果と全体の傾向はよく一致するが、建物後流の渦がやや大きくなる。
- ③計算のスカラ風速の分布は実験とよく一致する。
- ④メッシュ分割を細かくした計算 (Mesh No. 2, 3) では、4万メッシュの計算 (Mesh No. 1) では分解できなかった屋上面の剝離渦がよく再現されている。
- ⑤ k の値の大体のレベルは約4万メッシュの計算 (Mesh No. 1) でも実験とよく一致するが、分布は異なる傾向を示す。これに対してメッシュを細かくした約14万メッシュの計算 (Mesh No. 1) では、 k の値のレベルだけでなく分布も実験とよく一致する。
- ⑥風圧係数の計算と実験の一致は比較的良好。



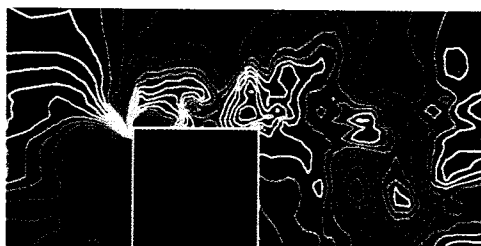
(1) 建物側面の隅角部からMarkerを発生

壁面から2セル離れた鉛直軸上の10点から発生。Markerは下半分では主流方向に流れているが、上のほうでは逆流に巻き込まれている。

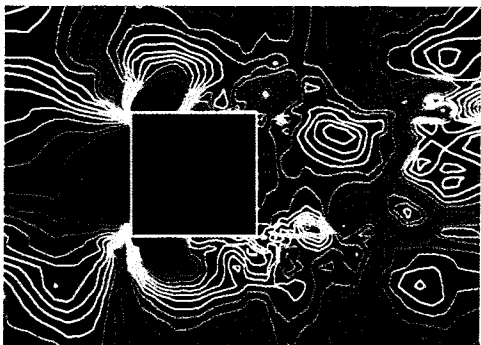


(2) 建物屋上表面からMarkerを発生

図14 立方体周辺のストリークライン

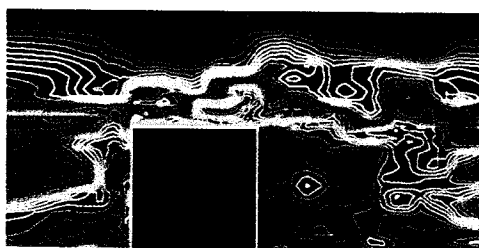


(1) 鉛直断面 (建物中心軸上)

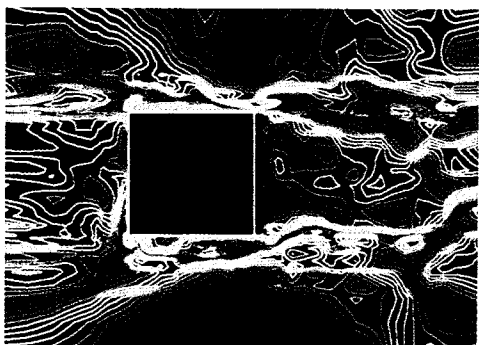


(2) 水平断面 ($Z=H_b/2$)

図15 圧力場の瞬時値 ($t^*=90, 25.7$ 万step, Mesh No. 3)



(1) 鉛直断面 ($\sqrt{\langle \bar{u}^2 \rangle + \langle \bar{v}^2 \rangle}$, 建物中心軸上)

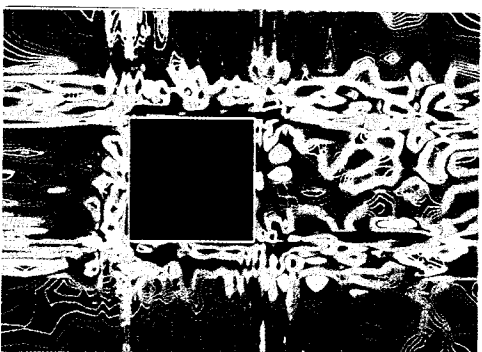


(2) 水平断面 ($\sqrt{\langle \bar{u}^2 \rangle + \langle \bar{v}^2 \rangle}$, $Z=H_b/2$)

図16 速度場の瞬時値 ($t^*=90, 25.7$ 万step, Mesh No. 3)



(1) 鉛直断面 (ω_z , 建物中心軸上)



(2) 水平断面 (ω_z , $Z=H_b/2$)

図17 渦度場の瞬時値 ($t^*=90, 25.7$ 万step, Mesh No. 3)

⑦建物角部の詳細な渦の挙動はマーカーの流跡線図でよく観察することができる。また、圧力、速度、過度の瞬時値の等値線図は建物から放出される渦のパターンを明確に表している。

謝 辞

本研究を行うにあたり、古谷千恵助手を始めとする本所電子計算機室の方々より種々の御支援を頂いた。また、風洞実験の際には本学大学院の林吉彦君に御協力頂いた。記して、謝意を表する次第である。

(1987年10月15日受理)

参 考 文 献

- 1) 村上, 持田, 日比: 「Large Eddy Simulationによる建物周辺気流の3次元解析 その1」日本建築学会計画系論文報告集, 1986, 2
- 2) 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, Vol. 36, 1984, 12
- 3) S., Murakami, A., Mochida, K., Hibi: "Numerical Prediction of Velocity and Pressure Field around Building Models" 7th International Conference on Wind Engineering, Aachen, Federal Republic of Germany, 1987, 7
- 4) 村上, 日比, 持田: 「乱流数値シミュレーションのComputer Graphics」生産研究, Vol. 38, 1986, 1