

LESによる街区周辺のガス拡散の数値解析 (その1) ——等温のガス濃度分布に関する風洞実験との比較とComputer Graphics——

Numerical Simulation of Diffusion Field around Cubes by means of LES (Part 1)

村 上 周 三*・日 比 一 喜**・持 田 灯*

Shuzo MURAKAMI, Kazuki HIBI and Akashi MOCHIDA

1. は じ め に

本報では街区周辺の流れ場のガス拡散に関する数値シミュレーションを行い,建物後流側1Hbの地上面から等温のガスが排出された場合のガス拡散に関して,風洞実験との比較を行った。また,建物屋上からガスが排出された場合について計算を行い,ガスの排出速度の変化がガス拡散に及ぼす影響を調べた。

従来,屋外の濃度拡散の数値シミュレーション結果の可視化についてはほとんど試みられていなかったため,実験と計算との比較検討を行ったうえで,粒子追跡による方法,等値線図による方法などのいくつか可視化の試みを行ったのでこれらの結果も併せて示す。

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。ただしSmagorinsky定数 $C_s=0.1$, Eddy Schmidt Numberは文献2),3)と同様に0.5としている。

2.2 計算対象 写真-1に示すように立方体形状の建物が隣棟間隔3Hbで隣接した街区を対象としている。

2.3 計算メッシュ 図-1に示す2種類のメッシュを用いた。屋根面排出の場合は地上面排出の場合に比較して建物上部のメッシュ分割を細かくしている。

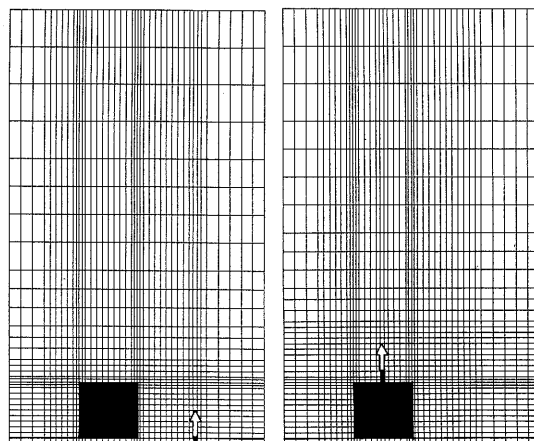
2.4 差分スキーム 時間に関してAdames-Bashforthスキーム,空間に関しては中心差分を用いている。ただし,濃度の輸送方程式の移流項は濃度の解に局部的な振動が発生した場合は,一時的にそのセルとそれに接する6セルについて一次精度風上差分としている⁹⁾。

2.5 境界条件 壁面,地上面は指数1/2に従うべき乗則,上空面はFree-slip,流入,流出面および側面は速度,圧力については周期境界条件,濃度についてはFree-slipとしている。

2.6 計算ケース 表-2に示す3ケース。ただし実験と

*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㈱)



(1) 地上面排出(case-1) (2) 屋根面排出(case-2,3)

図-1 計算メッシュ

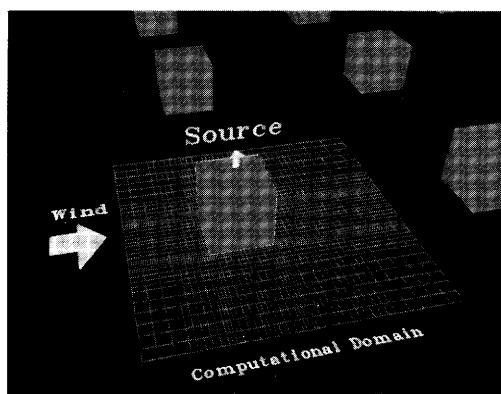


写真-1 計算対象

研 究 速 報

の比較はケース 1 だけについて行っている。case-1 は建物風下側後縁より $1 Hb$ の建物中心軸上の地上面よりガスが排出される。また case-2, case-3 は建物屋根面の中央に設置された高さ $0.2 Hb$ の煙突よりガスが排出される。

3. 風洞実験の概要

実験は東大生研の境界層風洞を用い、建物モデルの高さ $Hb=7.5\text{cm}$ 、排出速度比 $\langle W_s/U_b \rangle = 0.1$ 、基準風速 $\langle U_b \rangle = 0.5\text{m/s}$ ($Re=2600$)、面積 $= (Hb/15)^2$ の排出口より空気とほぼ等密度のガス (C_2H_4) を発生させ、水素炎

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
 p : 圧力, P_0 : 基準静圧
 C : 濃度
 $\langle f \rangle$: 変数 f の時間平均 (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 $(\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/2}$, Δ_i はメッシュ幅
 C_s : Smagorinsky 定数, (ここでは $C_s = 0.1$)
 ν_{sGS} : 格子スケール (subgrid scale) の渦粘性
 ν : 分子粘性
 α_{sGS} : 格子スケール (subgrid scale) の渦拡散係数
 α : 拡散係数
 σ_c : エディシユミット数 (ν_{sGS}/α_{sGS})
 Hb : 建物高さ, u_b : 建物高さにおける風速
 W_s : 排出速度, C_0 : 基準濃度 ($q/U_b H_b^2$)
 q : ガス排出量

諸量は $\langle u_b \rangle$ と Hb で無次元化されている。

表-1 基礎方程式

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

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

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{C} \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha + \alpha_{sGS}) \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} \quad (3)$$

$$\nu_{sGS} = (C_s \Delta)^2 \cdot \left(\frac{\bar{e}_{ij}^2}{2} \right)^{1/2} \quad (4)$$

$$\alpha_{sGS} = \frac{\nu_{sGS}}{\sigma_c} \quad (5), \quad e_{ij} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \quad (6)$$

$$C_s = 0.1, \sigma_c = 0.5$$

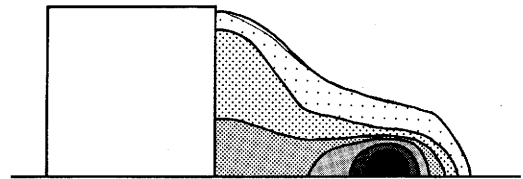
表-2 計算ケース

計算ケース	排出位置	$\overline{W_s/U_b}$
case-1	地上面	0.1
case-2	屋根面	0.5
case-3	屋根面	3.0

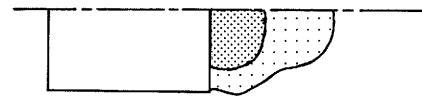
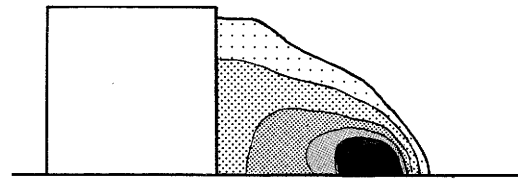
ガスクロマトグラフで濃度分布を測定した。ガス排出口位置は建物風下側後縁より $1 Hb$ の建物中心軸上の地上面。

4. 風洞実験と計算の比較(地上面排出, 図-2, 図-3)

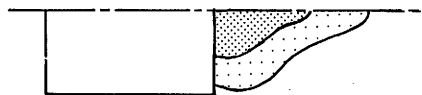
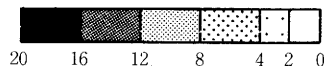
建物中心軸上の鉛直断面と $Z = Hb/2$ の高さの水平断面において風洞実験と計算の比較を行った。排出源近傍の高濃度領域は実験と計算でよい一致をしている。建物背面の壁面近傍は実験とやや傾向が異なっている。 $Z = Hb/2$ の水平断面上の低濃度の領域の両者の一致もよい。



(1) 鉛直断面 (建物中心軸上)

(2) 水平断面 ($Z = Hb/2$)図-2 平均濃度 $\langle C/C_0 \rangle$ の分布
(風洞実験)

(1) 鉛直断面 (建物中心軸上)

(2) 水平断面 ($Z = Hb/2$)図-3 平均濃度 $\langle \bar{C}/C_0 \rangle$ の分布
(計算, case-1, 地上面排出)

5. 地上面排出の瞬時濃度分布 (写真-2)

この計算では排出口が建物後流渦の地上面への再付着点より風上側に位置しているためガスは排出口より建物背面に向かって拡散していることがわかる。このような瞬時濃度分布は実験で測定することは不可能である。紙面で示すことは不可能であるが、連続した動画像で見ると高濃度の流体塊が断続的に移動していく様子が明瞭に観察される。

6. 地上面排出のマーカの軌跡 (写真-3, 写真-4)

前節と同様の計算条件で排出口近傍から発生させたマーカの軌跡を可視化している。写真-3 の場合は排出口の直上 $0.00667Hb$ の位置より50個のマーカを無次元時間間隔 $(\Delta t < \bar{U}_b) / Hb) 0.25$ で発生させている。マーカの寿命時間 (発生から消滅までの時間) は無次元時間で50としている。

写真-4 の場合は排出口の直上 $0.05Hb$ の位置より9個のマーカを無次元時間間隔0.25で発生させている。マーカの寿命時間は無次元時間で500としている。写真-3 の場合は発生位置が低過ぎること、およびマーカの寿命時間が短過ぎることにより建物の後流渦全体に拡散する前にマーカが消滅している。写真-4 のようにマーカの寿命時間を長くすることにより後流渦の中から建物の剥離せん断層を経由して後方に移流される過程を観察することが可能となる。連続した動画像を見るとマーカは建物背面に沿って上昇し、屋根面の高速の流体とともに後方に拡散していくことがよく理解される。

7. 屋根面排出の瞬時濃度分布 (写真-5)

排出速度比 $\langle W_s / U_b \rangle = 0.5$ の計算を示す。粒子追跡による可視化 (写真-6) に比較するとガスの噴流の幅が広がっているのが観察される。

8. 屋根面排出のマーカの追跡 (写真-6, 写真-7)

写真-6, 写真-7 の両者とも煙突の直上 $0.00667Hb$ の位置より50個のマーカを無次元時間間隔0.25で発生させている。マーカの寿命時間 (発生から消滅までの時間) は無次元時間で50としている。写真-6 は排出速度比 $\langle W_s / U_b \rangle = 0.5$ の計算でマーカはあまり拡散せずに高速の流体と共に移流している。写真-7 は排出速度比 $\langle W_s / U_b \rangle = 3.0$ の計算でマーカの軌跡はかなり蛇行し、一部は建物後流渦の中へ巻き込まれるマーカも観察される。

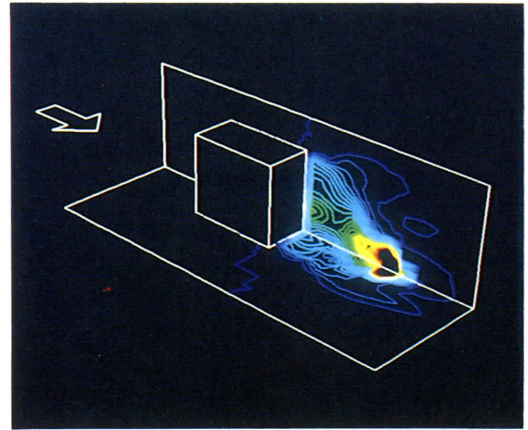


写真-2 瞬時濃度 \bar{C}/C_0 分布
(case-1, 地上面排出)

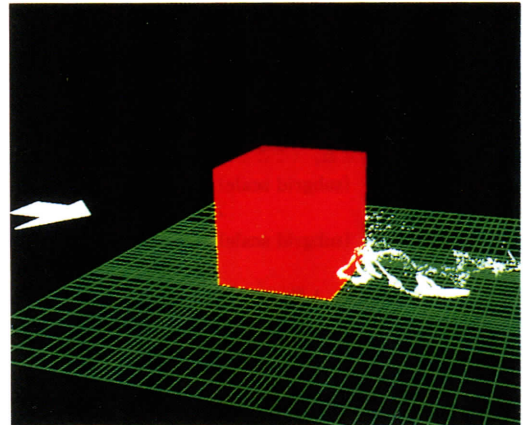


写真-3 マーカの軌跡
(case-1, 地上面排出, 排出高さ $Z = Hb/100$)

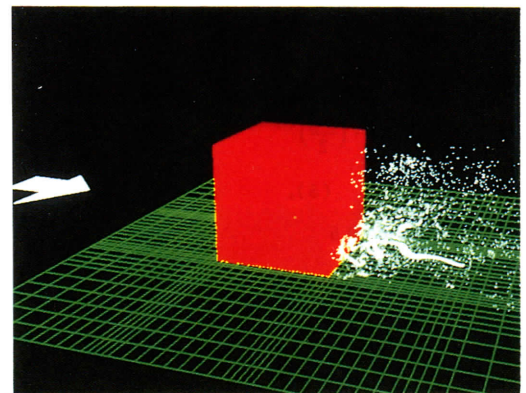


写真-4 マーカの軌跡
(case-1, 地上面排出, 排出高さ $Z = Hb/20$)

9. 結 論

- 1) 地上面排出の等温ガスの濃度分布の実験と計算の一致は比較的よい。
- 2) 等値線図による瞬時値の可視化により高濃度の流体塊の間欠的な発生、移動が観察された。
- 3) 粒子追跡の手法を用いることにより排出源近傍からのスカラー等の経路をわかりやすく可視化することができる。

10. お わ り に

本論文では濃度情報の可視化手法を中心に検討をした。今後、屋根面排出の実験との比較、濃度輸送方程式の移流項の差分近似などの検討が必要であり、また浮力の効果を取り入れた計算等を行っていく予定である。

(1988年11月14日受理)

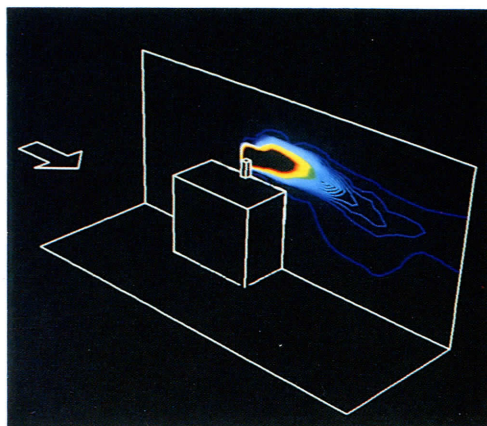


写真-5 瞬時濃度 \bar{C}/C_0 分布
(case-2, 屋根面排出, $\langle W_s/U_b \rangle = 0.5$)

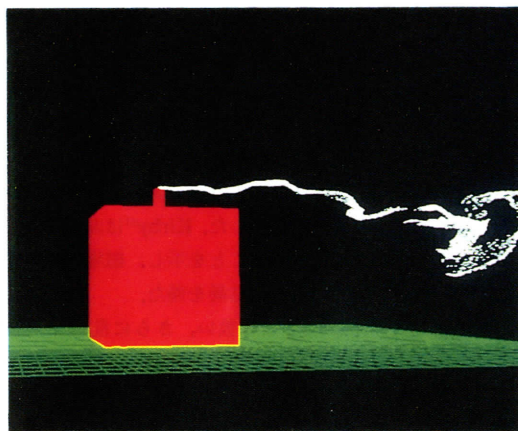


写真-6 マーカーの軌跡
(case-2, 屋根面排出, $\langle W_s/U_b \rangle = 0.5$)

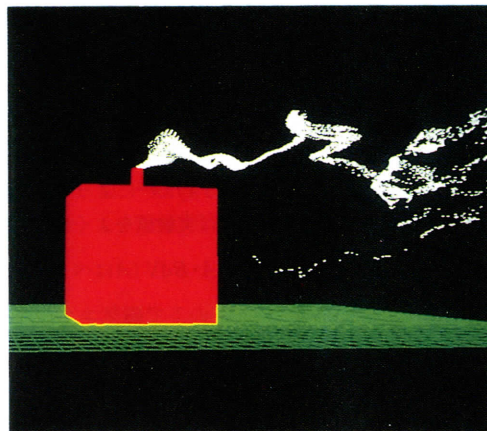


写真-7 マーカーの軌跡
(case-3, 屋根面排出, $\langle W_s/U_b \rangle = 3.0$)

参 考 文 献

- 1) Deardorff, J.W., "The Use of Subgrid Transport Equations in a Three-Dimensional Model of Atmospheric Turbulence", Journal of Fluids Engineering, 1973. 9
- 2) Antonopoulos-Domis, M., "Large-eddy simulation of a passive scalar in isotropic turbulence", J. Fluid Mech. 1981, vol. 104, pp. 55-79
- 3) 宮内, 齊藤, 谷, "乱流混合の Large Eddy Simulation", 日本機学会論文集, 1986
- 4) 宮内, 河野, 谷, 齊藤, "一様等方性乱流中の温度場の拡散 (三次精度風上差分による数値解析)" 日本機学会論文集, (B編), 53巻, 495号 (昭和62-11)
- 5) Dang, K., Morchoisne, Y.F., "Large Eddy Simulation of a Narrow Source of Passive Scalar in Homogeneous Strained Turbulence", 10th Int. Conf. Numer. Methods Fluid Dyn. 1986
- 6) 持田, 村上, "単独建物周辺のガスの拡散に関する研究 (その4)", 日本建築学会関東支部研究報告集, 昭和58年
- 7) 持田, 村上, 日比, "建物周辺気流の数値予測 (第5報) 一立方体モデル周辺の気流性状, ガス拡散性状に関する $k-\epsilon$ モデル, LESと風洞実験の比較", 日本建築学会大会, 昭和61年
- 8) Zu, J., Leschziner, M.A., "A Local Oscillation Damping Algorithm for High-Order Convection Schemes", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1987. 2