

# 建物周辺気流の数値解析

—風速分布・壁面風圧分布・濃度分布の数値シミュレーションと風洞実験の比較—

Numerical Simulation of Air Flow around Building Model

—Correspondence between Numerical Simulation and Wind Tunnel Experiment—

Concerned with Wind Velocity, Wall Pressure and Gas Concentration

村上 周三\*・持田 灯\*\*・日比 一喜\*\*\*

Shuzo MURAKAMI, Akashi MOCHIDA and Kazuki HIBI

## 1. 序

建物周辺の気流性状を数値シミュレーションにより予測しようとする試みはすでに数例報告されているが、<sup>1-9)</sup> 現段階ではその実用性は風洞実験には及んでいない。

本報では、既往の研究例に比べて建物近傍の空間差分間隔を細かく取り、トレーサガスの排出速度も考慮した上で行った計算により得られた建物周辺の風速分布、壁面の風圧分布、建物周辺の濃度分布を風洞実験の結果と比較検討する。又、建物壁面の境界条件を系統的に変化させることにより、壁面境界条件が壁面風圧に及ぼす影響についても検討する。

## 2. 数値シミュレーションの概要

### 2.1 建物モデルとトレーサガスの排出条件

図1に示す建物モデルの屋上面中央の煙突より一定の排出速度 ( $W_s/U_b=0.5$ ) でガスが排出される。

### 2.2 計算モデル (表1参照)

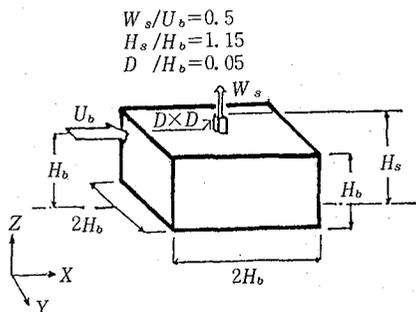


図1 建物モデルと排出条件

### 2.3 差分格子

差分格子は異形メッシュを用いている。<sup>10)</sup> 風圧係数の予測に際しては、建物隅角部付近の分割を細かくした差分格子 (図2参照) を、濃度の予測に際しては煙突排出口付近の分割を細かくした差分格子を用いている。

### 2.4 境界条件

#### ①風上側境界

平均風速  $\bar{U}$  は  $\bar{U} \propto Z^{1/4}$  に従うものとして与え、無次元化された乱流エネルギー  $q/U_b^2$  は高さ方向に一定値 0.1 を与えた。また、 $l = C_b^{1/4} \kappa Z$  を与え、 $\nu_t = q^{1/2} l$  より  $\nu_t$  を、 $\epsilon = C_D q^{3/2} / l$  より  $\epsilon$  を与えた。

#### ②対称面境界

法線方向の速度成分を零、接線方向の速度成分を free slip とし、乱流統計量  $q, \epsilon$  および  $C$  は法線方向の勾配を零とした。

#### ③上空面、風下面、側面境界

接線方向の風速を free slip とした上で、法線方向の速度成分は連続の式を満たすように決め、乱流統計量  $q, \epsilon$  および  $C$  は法線方向の勾配を零とし、境界外の圧力  $P$  は零とした。

#### ④地上面境界

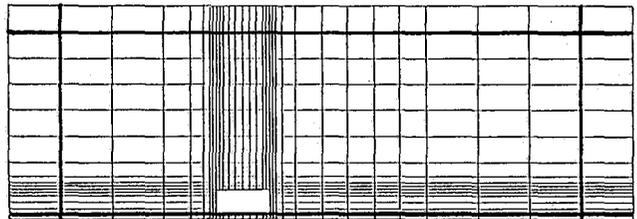


図2 異形メッシュによる計算領域 (鉛直断面)

\* 東京大学生産技術研究所 付属計測技術開発センター 兼第5部

\*\* 東京大学大学院

\*\*\* 清水建設研究所

表 1 計算に使用したモデル

$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0$	—① 連続式
$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\bar{P}}{\rho} + \frac{2}{3} q \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu_t \left( \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \right\}$	—② 運動方程式
$\frac{\partial q}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial q}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_1} \frac{\partial q}{\partial x_j} \right) + \nu_t S - \varepsilon$	—③ 乱流エネルギー $q$ の輸送方程式
$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + c_1 \frac{\varepsilon}{q} \nu_t S - c_2 \frac{q \varepsilon}{\nu_t}$	—④ $q$ の散逸 $\varepsilon$ の輸送方程式
$\nu_t = C_D \frac{q^2}{\varepsilon}$	—⑤ $\nu_t$ と $q, \varepsilon$ の関係式
$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_3} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} \right)$	—⑥ 平均濃度 $\bar{C}$ の輸送方程式

ただし  $S = \left( \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j}$ ,  $\sigma_1 = 1.0, \sigma_2 = 1.3, \sigma_3 = 1.0, C_D = 0.09, c_1 = 1.59, c_2 = 0.18$

地上面近くの風速が 1/4 乗の分布に従うものとして、境界内仮想セルの接線方向の速度成分を与え、法線方向の速度成分は零とした。ε に関しては、 $\varepsilon = C_D^{3/4} q^{3/2} / \kappa Z$  で与え、 $q$  および  $C$  については法線方向の勾配を零とした。

⑤ 壁面境界 (図 3 参照)

模型壁面の境界条件は風圧係数の計算結果に大きな影響を及ぼすと考えられるので、i) 仮想セル内の風速成分を零とする条件 ii) 建物近傍で 1/4 乗の風速分布を考慮して仮想セル内の接線方向の風速成分を与える条件 iii) 建物近傍で 1/7 乗の風速分布を考慮して仮想セル内の風速成分を与える条件の 3 種類について考え、壁面境界条件と風圧係数の関係を検討した。 $\bar{U} \propto Z^{1/4}$  や  $\bar{U} \propto Z^{1/7}$  で仮想セル内の風速成分を与える場合、端部においては図 3 のように、風上側鉛直壁面の法線方向の風速成分  $\bar{U}_2 = 0$  の条件と相互する。これを解決するために、屋上面の端部に限っては仮想セル内の風速を与えることはせず屋上面 (壁面境界上) の位置の速度勾配 (1/4 乗、1/7 に対応する) を直接与える方法を用いた。また、乱流統計量  $q, \varepsilon$  および  $C$  については、地上面境界と同様とした。

⑥ 煙突セル付近の境界条件の与え方 (図 4 参照)

今回行った濃度の計算では、建物内に設けた仮想セル内の風速成分を零とする条件を用い、煙突の鉛直下のセルの風速の  $W$  成分についてのみ一定値  $W_s (W_s = 0.5U_0)$  を与えた。

2.5 風圧係数の算出方法

風圧係数を求める際の壁面圧力は、① 図 3 の壁面に接するセル内の圧力  $P_2$  を用いる場合 ② 壁面に接するセ

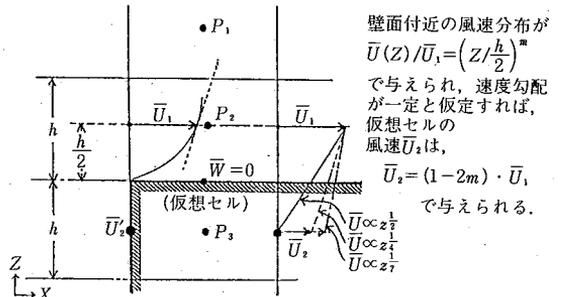


図 3 壁面境界条件 (風上側隅角部)

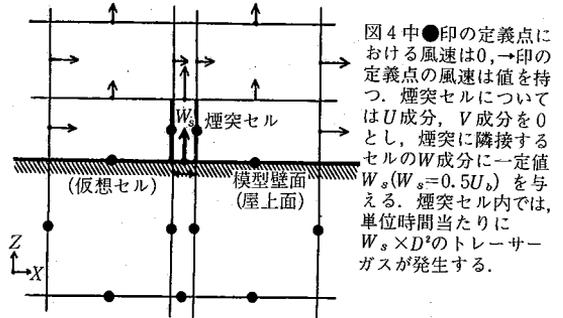


図 4 煙突セル付近の境界条件の与え方

ル内の圧力  $P_2$  とその一つの外側のセルの圧力  $P_1$  から外挿により壁面上の圧力を求める場合、③ 壁面に接するセルの圧力  $P_2$  と仮想セル内の圧力  $P_3$  (壁面境界上で成り立つ N-S 方程式より求められる) から内挿により求める場合、の三者を比較した結果、差異がなかったため、壁面に接するセル中心の圧力  $P_2$  を壁面圧力と等しいと考えた。今回の計算では、特に壁面付近の差分格子を細かくしてあるので問題はないと考えられる。

3. 風洞実験の概要

実験は東大生研所属の境界層型風洞を用いて行った。風速の測定にはタンデム型熱線風速計、風圧の測定にはキャパシタンスマンメーター、濃度の測定には水素炎がスクロマトグラフを使用した。風圧係数  $C_p$  は建物高さにおける風速  $U_b$  を基準として  $C_p = \Delta P / (\rho U_b^2 / 2)$  より算出した。実験における風洞内基準風速  $U_b$  は 5.6 m/s,  $Re$  数  $\left(\frac{U_b H_b}{\nu}\right)$  は  $4 \times 10^4$  となる。

4. 風洞実験と数値シミュレーションの結果の比較

4.1 風速分布

図5に数値シミュレーションの結果を、図6に風洞実験の結果を示す。数値計算の結果は、建物背面のWakeの大きさを若干大きめに見積る傾向にあるが、建物屋上面、側面の隅角部で剥離した流れの再付着の様子や、建物背面のWake内の風速分布を比較的良く再現している。

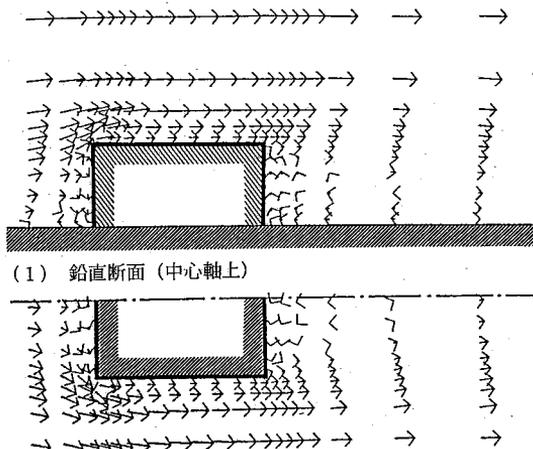


図5 風速分布—数値シミュレーション (模型壁面付近で1/4乗の風速分布を用いた場合)

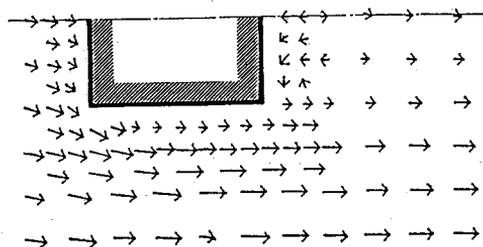


図6 風速分布—風洞実験 (水平断面  $Z = H_b/2$ ) ( $U_b = 5.6 \text{ m/s}$   $Re = 4 \times 10^4$ )

4.2 風圧係数

図7に風圧係数の分布の比較を示す。今回検討した3種類の壁面境界条件の中で、壁面近傍の風速分布を1/4乗と仮定した条件と1/7乗と仮定した条件では風圧係数の結果にほとんど差異はなかったため、ここでは、1/4乗の風速分布を仮定した条件と、模型内の仮想セルの風速成分を零とした条件の結果についてのみ示す。

いずれの条件を用いた場合でも計算結果は、風上側壁面においては、鉛直、水平両断面とも風洞実験の結果と極めて良く一致する。また、建物背面の風圧係数は、いずれの条件を用いた場合でも計算結果の方がその絶対値を大きく見積る。これは図5に示したように数値計算のほうが建物背面のWakeを多少大きく予測していることに関連するものと考えられる。建物屋上面および側面の風圧係数については、建物の風上側隅角部付近で、計算結果と風洞実験の結果に差異が見られる。また、風上側隅角部付近では壁面境界条件の相違により風圧係数がかなり異なり、模型内の風速成分を零とする条件では、1/4乗の風速分布を与えた場合と比較して風圧係数の絶対値を小さく見積る傾向にある。

4.3 濃度分布

図8に濃度分布の比較を示す。風洞実験と比べて数値シミュレーションのほうが高濃度域を多少広く見積る傾向にあるものの、両者の分布は良く対応している。また、

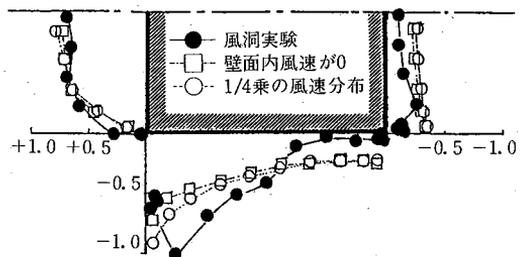
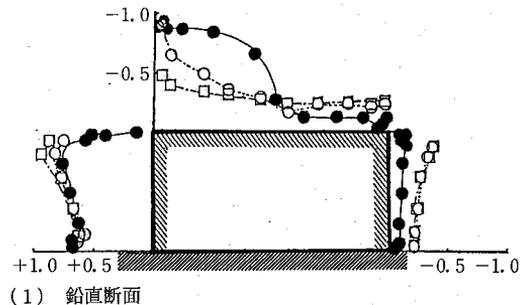
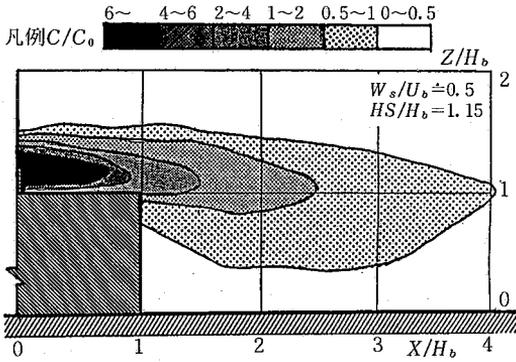
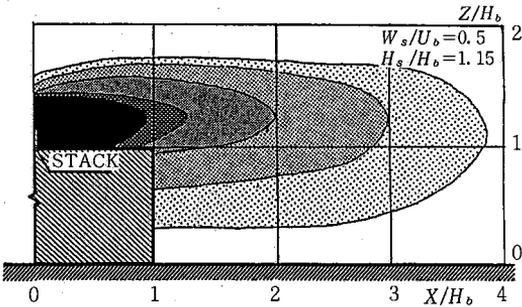


図7 風圧係数の比較 ( $U_b = 5.6 \text{ m/s}$   $Re = 4 \times 10^4$ )

研究速報



(1) 風洞実験 ( $U_0=5.6 \text{ m/s}$   $Re=4 \times 10^4$ )



(2) 数値シミュレーション

図8  $C/C_0$ の分布の比較(中心軸上の鉛直断面)

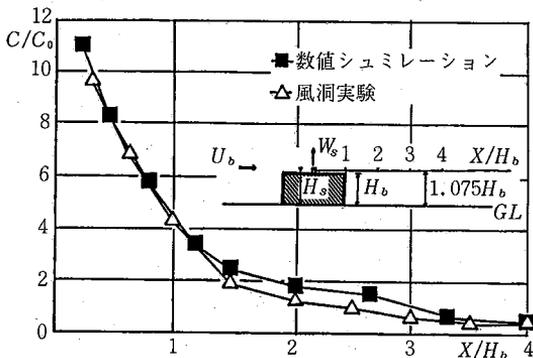


図9 中心軸上の屋根高さにおける  $C/C_0$  の比較  
(測定高さ  $1.075H_0$ )

図9の煙突風下側の屋上面付近の濃度分布を見ると、従来の計算例ではあまり良く再現されていなかった排出口のごく近傍まで両者は良く一致している。

5. 結論

①建物近傍の空間分割を細かく取った差分格子を用いれば  $q-\epsilon$  型2方程式乱流モデルにより、建物周辺の気流性状をかなり精度良く予測することが可能である。

②建物壁面の境界条件は、風圧係数の分布にかなり大きな影響を与え、建物壁面近傍においても地上面と同様に、 $1/4$  乗あるいは  $1/7$  乗の風速分布を与えた条件のほうが、建物内の風速成分を零と与えた条件よりも、実験結果と良く対応する。

③煙突やその近傍の幾何学的形状、排出速度等排出に関する条件を適切に考慮すれば、建物近傍の濃度分布も  $q-\epsilon$  型2方程式乱流モデルにより、かなり正確に予測することが可能である。

④今後、さらに数値シミュレーションの予測精度を向上させるためには、Incident Flowの乱れの強さ、建物隅角部における境界条件の与え方等について、検討が必要であると考えられる。

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行われたものであることを付記します。

(1983年5月26日受理)

参考文献

- 1) 野村・松尾・貝塚・鎌田・竹倉：乱流の数値解析と風洞実験，日本建築学会論文報告集 第252号 昭52
- 2~5) 鎌田・野村・小林・藤田：建物近傍の気流構造と汚染物拡散に関する研究(1)~(4)，日本建築学会大会術講演梗概集 昭54, 55, 56
- 6~9) 藤本・大熊・赤木：角柱周辺の気流および風圧力に関する数値解析的研究(1)~(4)，日本建築学会論文集 第213, 241, 264, 325号 昭48, 51, 53, 58
- 10) 野村・松尾・加藤：MAC法の空間差分間隔に関する考察，日本建築学会論文集 第292号 昭55
- 11) 田中・村上：室内濃度分布の数値解析と模型実験の比較，環境工学論文集 昭57