

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 —

日比一喜
(技術研究所)

村上周三
(東大生産技術研究所)

持田灯
(東京大学)

§ 1. はじめに

建物周辺の気流性状を数値的に予想する試みは既に数例報告されているが^{1)~9)}、现阶段ではその実用性は風洞実験には及んでいない。現在まで各研究所、各社の風洞では、各種の風環境問題、耐風設計の問題を実在建物の縮小模型を製作し、風洞内で実験を実施することにより問題解決を行なってきた。

これらの問題は、構造解析と同様に計算機によるシミュレーションによって多くのパラメータ・スタディーを行ない、最後に模型実験を確認のために行なうことができれば、より詳細な情報がより短時間で得られる可能性が考えられる。しかし現実には、流れを支配する方程式の非線形性に起因する膨大な計算量のため、実用的とはいえない。しかし、多くの数値解析の研究者の努力と計算機の能力向上により、比較的簡単な問題では風洞実験と対応が可能となってきた。

これらの問題について、風洞実験および数値実験で多くの実績を持つ東大生産技術研究所村上研究室を中心に「乱流拡散現象の数値予測に関する研究委員会」^{注)}が発足し、建設各社も参加して活動が開始された。当社も今後増加し続ける風洞実験に対処するため、計算機による数値実験を援用した総合的なシステムが必要と判断し、

注) 乱流拡散現象の数値計算による予測方法の開発に関する研究委員会 (昭和56年~昭和58年)

委員長	村上周三	東京大学生産技術研究所助教授
委員	小林敏雄	同上 助教授
	吉沢 徹	同上 助教授
	加藤信介	同上 助手
	狩野正徳	同上
	持田 灯	同上
	田中俊彦	東京電力株式会社
	真田早敏	鹿島建設機軸研究所
	高橋紀行	竹中工務店技術研究所
	日比一喜	清水建設機軸研究所
	石田義洋	鹿島建設機軸電子計算センター

共同研究を行なうこととなった。

本報では、建物周辺気流の問題に対する数値シミュレーションの可能性を検討するため、東大生研の風洞で実施された実験と汚染物質拡散の数値シミュレーションに併せて、建物壁面の風圧に関する数値シミュレーションおよび実験を行ない比較検討したので報告する。

ここでは、既往の研究例と比べて建物近傍の空間差分間隔を細かく取り、建物の屋上の煙突から排出されるトレーサガスの排出速度も考慮した上で行な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。また、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に示すような低層建物モデルの屋上面中央の煙突より、一定の排出速度 ($W_s/U_b=0.5$) でガスが放出される。

2.2 計算モデル

表-1に示すように、非圧縮性3次元ナビエ・ストークス方程式連続式に、 $q-\epsilon$ 型2方程式乱流モデルおよび濃度の輸送方程式を連成させ、差分法により計算を行な

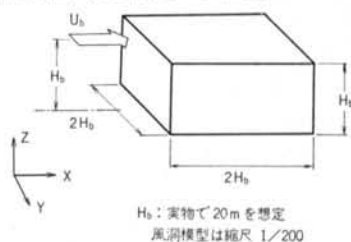


図-1 建物モデル

$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0$	—① 連続式
$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{P}{\rho} + \frac{2}{3} q \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \right\}$	—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 ε の輸送方程式
$\nu_t = C_D \frac{q^2}{\varepsilon}$	—⑤ ν_t と q, ε の関係式
$\frac{\partial C}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial C}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_3} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right)$	—⑥ 平均濃度 C の輸送方程式
ただし, $S = \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j}$, $\sigma_1 = 1.0, \sigma_2 = 1.3, \sigma_3 = 1.0$ $C_D = 0.09, C_1 = 1.59, C_2 = 0.18$	

表-1 計算に使用したモデル

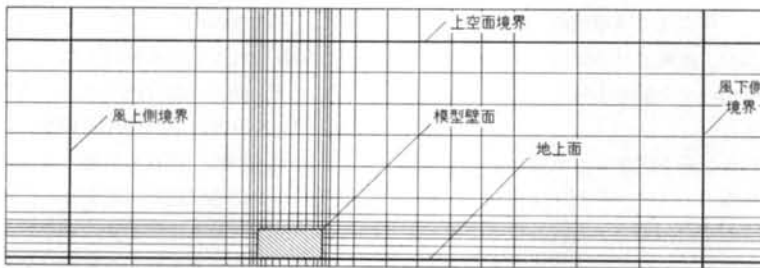


図-2 建物壁面条件計算用差分格子
 った。

2.3 差分格子

差分格子は異形メッシュを用いている。異形メッシュを用いた場合の誤差の検討は、野村・松尾・加藤らによる文献¹⁰⁾に詳しい。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(図-3参照)を用いている。

2.4 境界条件

1) 風上側境界条件

流入側の平均風速 \bar{U} は $\bar{U} \propto Z^{\frac{1}{4}}$ 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_0^3 は高さ方向に一定値0.1を与えた。また、乱れのスケールは $l = C_D^{\frac{1}{2}} kZ$ を与え ($k=0.4$: カルマン定数), 渦動粘性係数は $\nu_t = q^{1/2} l$ により, エネルギー逸散率は $\varepsilon = C_D q^{3/2} l$ により与えた。図-4に数値実験における流入側境界条件を, 図-5に風洞実験で設定された流入側の条件との比較を示す。

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 (境界面をはさんだ両側の接線方向速度成分を等しく置く方法) とし, 乱流統計量 q, ε および濃度 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, ε および濃度 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

地上面近くの風速が $1/4$ 乗の分布に従うものとして, 仮想セル内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 $\varepsilon = C_D^{3/4} q^{3/2} / kZ$ で与え (z : 地上面からの鉛直方向距離), 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-7に示す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接線方向の風速成分を与える条件

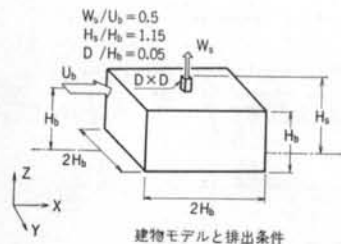
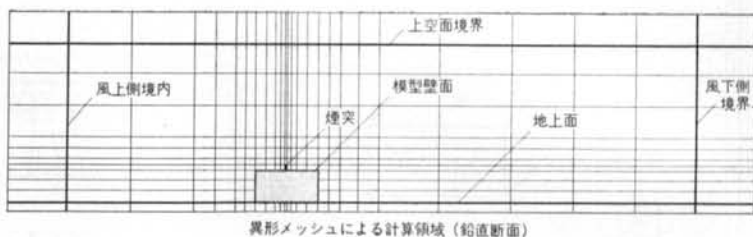


図-3 濃度分布計算用差分格子



異形メッシュによる計算領域(鉛直断面)

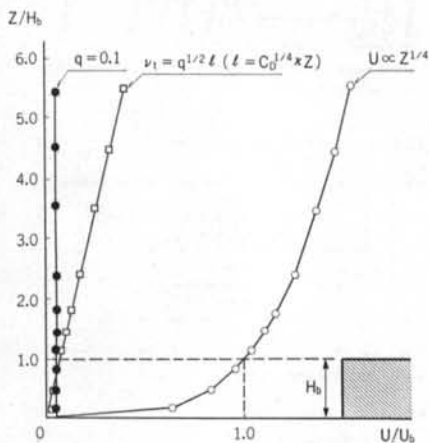
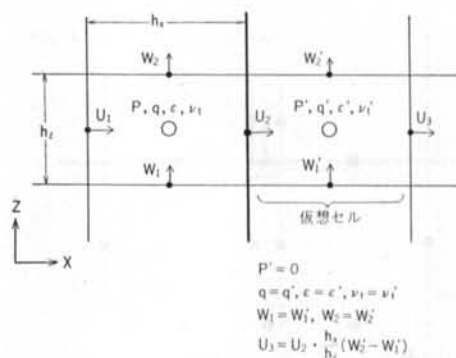


図-4 計算モデルの流入側境界条件



$$\begin{aligned}
 P' &= 0 \\
 q &= q', \epsilon = \epsilon', \nu_t = \nu_t' \\
 W_1 &= W_1', W_2 = W_2' \\
 U_1 &= U_2 \cdot \frac{h_1}{h_2} (W_2' - W_1')
 \end{aligned}$$

図-6 風下側境界条件

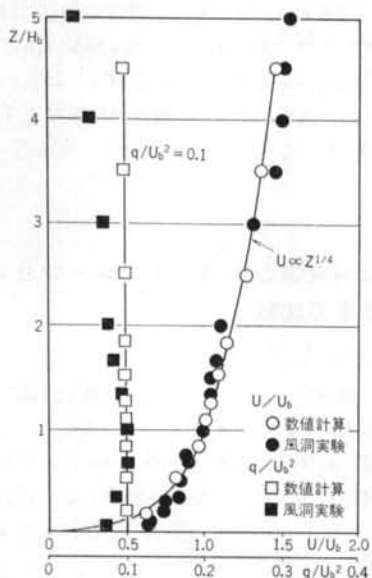
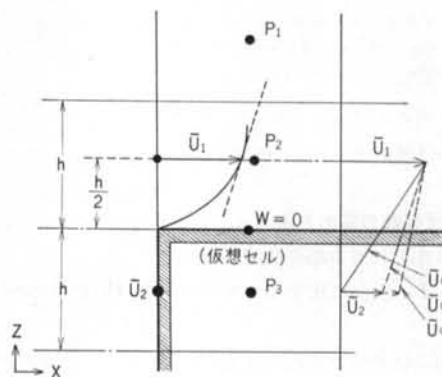


図-5 流入側境界条件の数値実験と風洞実験の比較

の以上3種類の条件を与え、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-7のように風上側鉛直壁面の法線方向の風速成分 $\bar{U}_2' = 0$ の条件と相反する。これを解決するために、屋上面の端部に限つ



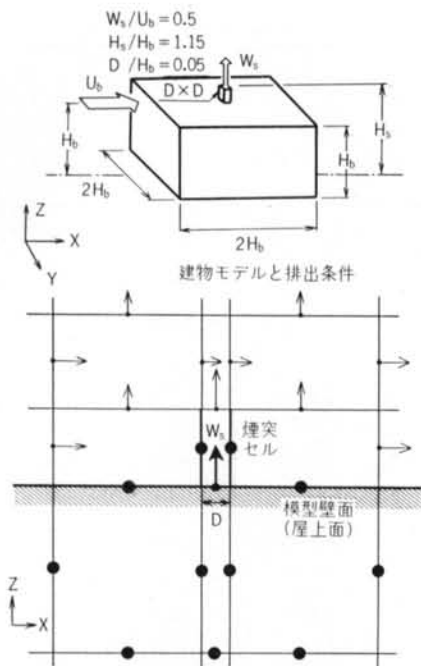
壁面付近の風速分布が $\bar{U}(Z)/\bar{U}_1 = (Z/h)^m$ で与えられ、速度勾配が一定と仮定すれば、仮想セルの風速 \bar{U}_2 は、 $\bar{U}_2 = (1 - 2m) \cdot \bar{U}_1$ で与えられる。

図-7 壁面境界条件(風上側隅角部)

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, 1/7乗に対応する)を直接与える方法を用いた。また、乱流統計量 q , ϵ および濃度 C については地上面境界と同じく法線方向の勾配を零とした。

6) 煙突セル付近の境界条件の与え方

図-8に示すように、今回行なった濃度の計算では建物内に設けた仮想セル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



図中●印の定義点における風速は0、→印の定義点の風速は値を持つ。煙突セルについてはU成分、V成分を0とし、煙突に隣接するセルのW成分に一定値 W_s ($W_s = 0.5 U_b$) を与える。煙突セル内では、単位時間当りに $W_s \times D^2$ のトレーサーガスが発生する。

図一 8 煙突セル付近の境界条件の与え方
一定値 W_s ($W_s = 0.5 U_b$) 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) 図一7の壁面に接するセル内の圧力 P_2 を用いる場合

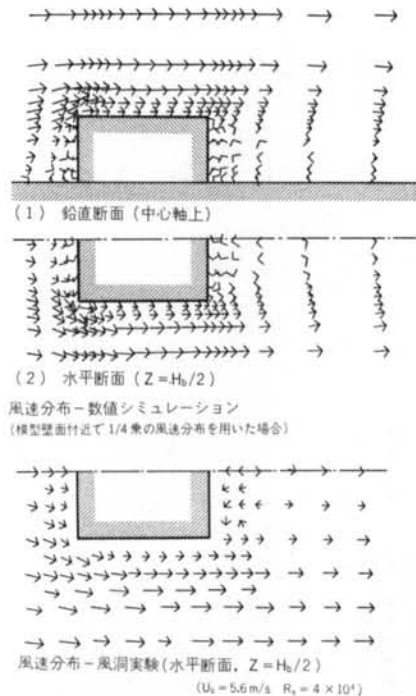
(2) 壁面に接するセル内の圧力 P_2 とその一つ外側のセルの圧力から外挿により壁面上の圧力を求める場合

(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、差異がなかったので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。

§ 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なっ



図一 9 風速分布の比較

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ノメータ、濃度の測定には水素炎ガスクロマトグラフを使用した。風圧係数 C_D は建物高さにおける風速 U_b を基準として、 $C_D = \Delta P / (\rho U_b^2 / 2)$ 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 、 R_o 数 ($U_b H_b / \nu$) は 4×10^4 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

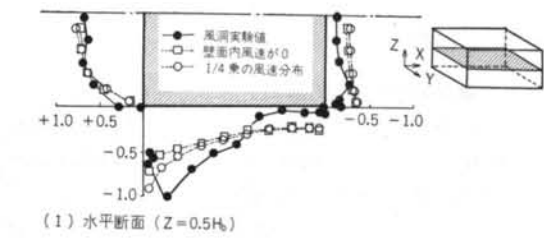
4.1 風速分布

図一9に数値シミュレーションの結果を、図一10、図一11に風洞実験の結果を示す。

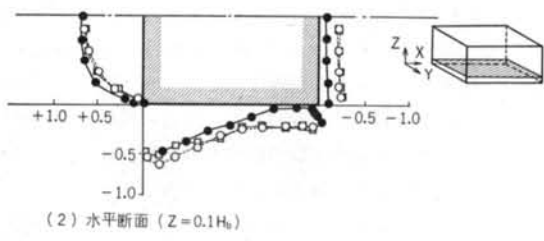
数値計算の結果は、建物背面の wake の大きさを若干大きめに見積る傾向にあるが、建物屋上面、側面の隅角部で剥離した流れの再付着の様子や建物背面の wake 内の風速分布を比較的よく再現している。

4.2 風圧係数

図一10、図一11に、建物の各断面における風圧係数の分布の風洞実験と数値実験の比較を示す。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

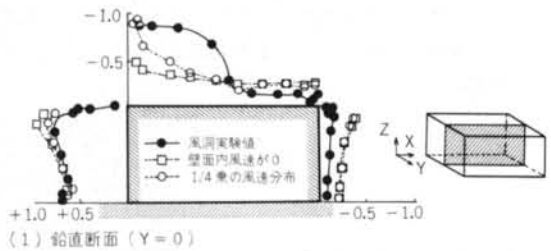


(1) 水平断面 ($Z=0.5H_b$)

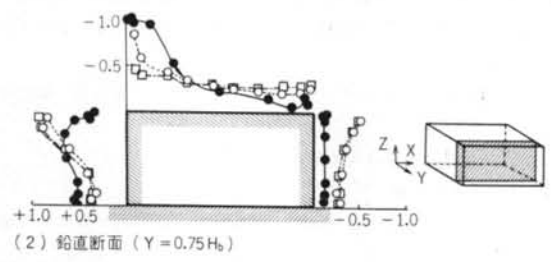


(2) 水平断面 ($Z=0.1H_b$)

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



(1) 鉛直断面 ($Y=0$)

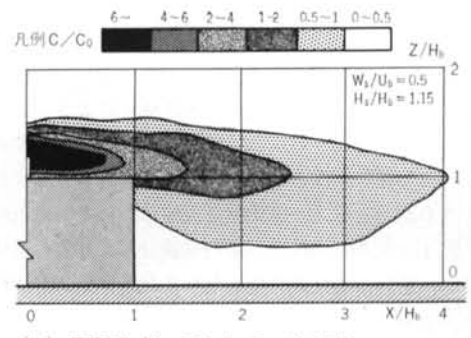


(2) 鉛直断面 ($Y=0.75H_b$)

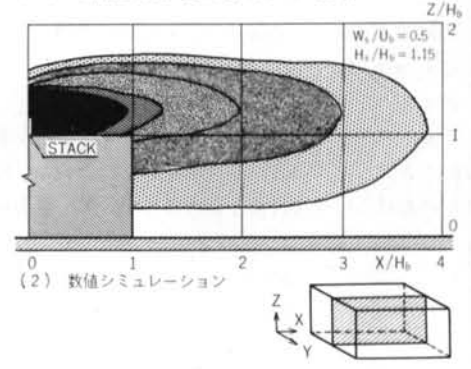
図-11 風圧係数の比較 ($U_b=5.6\text{m/s}$, $R_e=4\times 10^4$)

圧係数の結果にほとんど差異がなかったため、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よく一致する。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-10、図-11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と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



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



(2) 数値シミュレーション

図-12 C/C_0 の分布の比較 (中心軸上の鉛直断面)

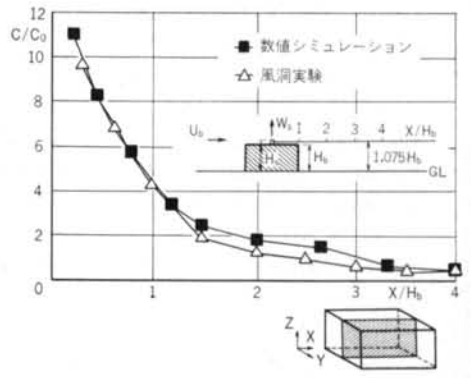


図-13 中心軸上の屋根高さにおける C/C_0 の比較 (測定点高さ: $1.075H_b$)

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-12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、両者の分布はよく対応している。また、図-13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よく一致している。

§ 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よ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、建物内風速成分を零と与えた条件よりも実験結果とよく対応する。

3) 煙突やその近傍の幾何学的形状、排出速度など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、流入風速の乱れの強さ、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。

§ 6. おわりに

計算機を援用した数値風洞はまだ実用には至っていないが、NASAのエイムズ研究センターでは、1000 MFLOPS (Mega floating point operation per second: 1秒当りの浮動小数点演算回数)の計算スピードを持つスーパー・コンピュータによる開発を進めている。日本では、昭和58年11月から使用開始となった HITAC S810による実用計算プログラムで687 MFLOPSを記録しており、実用の一歩手前の段階である。今後も乱流モデルの検討、数値計算手法の改良、並列計算に向けた算法の検討、風洞実験と数値実験の結果を比較検討するグラフィック・システム等の研究を継続して行く予定である。

なお、本研究を実施するに当って、東大生研吉沢助教、東大生研加藤氏の多大なご指導をいただいたので、ここに記して謝意を表す。また、技術研究所防風グループ藤井、大築、金子、上田の諸氏にも多大な助言をいただいた。

<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(昭和52年)
- 2)~5) 鎌田・野村・小林・藤田：“建物近傍の気流構造と汚染物質に関する研究(1)~(4)”日本建築学会大会学術講演梗概集(昭和54, 55, 56年)
- 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)”日本建築学会論文報告集 第213, 241, 264, 325号(昭和48, 51, 53, 58年)
- 10) 野村・松尾・加藤：“MAC法の空間差分間隔に関する考察”日本建築学会論文報告集 第292号(昭和55年)
- 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(昭和57年)
- 12) 村上・持田・日比：“建物周辺気流に関する数値シミュレーションと風洞実験の比較”日本風工学年次研究発表会梗概集 No. 16(昭和58年)
- 13) 村上・持田・日比：“建物周辺気流の数値解析——その1, その2”日本建築学会大会学術講演梗概集(昭和58年)