

スーパーコンピュータによる超高層建物周辺の気流解析

川口 彰久 表 佑太郎

Numerical Simulations of Wind Flows around Tall Building by Super Computer

Akihisa Kawaguchi Yutaro Omote

Abstract

Strong winds around tall buildings have caused such problems as gusting against pedestrians and scattering of goods displayed in shops. Such problems were mostly studied in the past by means of mechanical wind tunnels in attempting to explain the phenomena and to assess wind environments around buildings. With the installation of a super computer in 1988, simulations of wind flows around a tall building 140 m in height were switched to numerical wind tunnels. Four types of models were used in combinations for the building with and without pilotis and void floors at intermediate levels.

As a result of analyses, it was shown that a void at an intermediate story reduced the effects of wind at the ground level. As for pilotis, however, they showed a tendency to induce downward currents and increase wind speeds over a wide area. Numerical simulations made it possible to obtain enormous amounts of information rapidly, as well as to visualize the information for ease in assessment of results.

概 要

超高層建築物の周辺では時として「ビル風」と呼ばれるような強い風が吹き、日常的な快適性を損なったり、歩行障害などの社会問題を発生させることがある。従来、この種の問題に対しては、風洞実験により対応することが多かったが、スーパーコンピュータの導入を機会に、建物周辺の気流分布（ビル風）の調査を数値シミュレーションにより試みたので、その結果について報告する。解析は汎用三次元熱流体解析ソフト「STREAM」を用い、高さ140 mの超高層建物を対象として、1階にピロティーや中層階に吹き抜けがある場合などについて、その効果を明らかにした。解析の結果、1階にピロティーがあると周辺の地上付近で風速の高くなる区域が広くなり、中層に吹き抜け階を設けると影響を弱める効果があることなどを確認した。また、数値シミュレーションでは膨大な情報を短時間で得ることができるとともに、ビジュアル化することで結果の評価が容易であることも示した。

1. はじめに

超高層建築物などの高い構造物の周辺では、上空の強い風が壁面にそって吹き降ろし、時として商店の物品を飛散させたり、路上や建物入り口付近の歩行人に歩行障害や不快感を与えるなどの社会問題が発生することがある。このような建物周辺で発生する強い風の現象を、我が国では「ビル風」、このビル風に伴う影響を「ビル風害」と呼んで、台風や春一番などの気象的な要因による強い風と区別している。1979年台風20号の影響による東京都新宿区西新宿における被害は、林立する超高層建築物群におけるビル風害の典型として、まだ記憶に新しいものである。

このような問題は、我が国においては超高層建築物が出現した昭和45年（1970）頃からクローズアップされ、以来、現象の解明、原因の追及、対策の立案、予測手法の確立、影響評価等々について、実測や風洞実験等により研究を積み重ね、一連の成果を上げてきた¹⁾。そして現在では、建物の企画設計段階で既存資料や風洞実験を参考にして、このような問題が再発することのないように、配置や形状などに配慮している。

一方、最近におけるコンピュータ性能の著しい向上と数

値解析手法の研究開発は、従来の模型を用いた風洞と異なる数値シミュレーションによる風洞実験の適応性を模索する新たなアプローチとなっている²⁾。

そこで本報では、建物回りの気流分布の調査を数値シミュレーションにより試みたので、その結果について報告することとした。利用した計算機は、1989年6月に大林組技術研究所に導入したスーパーコンピュータ(SX-1EA、日本電気、写真-1、性能諸元は表-1)である。これは技術計算専用が開発されたもので、従来の汎用コンピュータと比べて演算速度が極めて早い。解析に使用したソフトは、汎用三次元熱流体解析ソフト「STREAM ver. 2.3」とポスト処理ソフト「Atrac」（いずれもソフトウェア・クレイドル社製）³⁾、および自社開発のポスト処理ソフトである。

2. 解析対象

解析は、あるプロジェクトにおいて、1階にピロティーと中層部に中空化階を設ける超高層建築物(高さ140 m, 32階建て)が検討されていたことを参考にして、これらの影響が地上レベルにどのような形となって表れるかを調べることから始まった。

解析対象のモデルは、次の4ケースである(図-1)。

- ①モデルA：基本モデル
(正方形断面、高さ140m、幅、奥行39m)
- ②モデルB：1階にピロティーのある場合
(ピロティーの高さは地上10m)
- ③モデルC：中層に吹き抜けのある場合
(吹き抜けの高さは地上40~50mの位置)
- ④モデルD：1階ピロティーと中層に吹き抜けのある場合
(モデルBとCの組み合わせ)

ただし、ピロティーや吹き抜け階では四隅の柱以外の障害物はすべて省略し、完全に風が吹き抜けるようにモデル化した。また、吹き付ける風の向きはモデル壁面に対して直角な場合を想定したので、解析領域は片側半分だけとした。

解析領域の格子間隔は、解析の精度を高めるためにモデル近傍では細かくし、モデルから離れると次第に粗くなる不等メッシュを採用した(図-2)。最小メッシュ幅は1mで、要素の数は $52 \times 25 \times 54 = 70,200$ である。解析領域の断面積に対する対象建物モデルの見付け面積の占める割合は、4%である。

3. 基礎式と計算条件

基礎式は以下に示すが、流れ場の乱れを $k-\epsilon$ 二方程式によりモデル化しているの、平均的な流れ場を対象にしたシミュレーションということになる。

① 質量保存式

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

② 運動量保存式

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + (\nu + \nu_t) \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad \dots\dots\dots(2)$$

③ 乱流エネルギー・乱流消失率の式 ($k-\epsilon$ 方程式)

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial u_i k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_s - \epsilon \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial u_i \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \frac{\epsilon}{k} G_s - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ただし、

$$\nu_t = C_t \frac{k^2}{\epsilon}$$

$$G_s = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

$$C_t = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92$$

ここで、記号は以下のとおりである。式中のサフィックスはアインシュタインの総和規約を適用する。

- x_i : 座標, ν : 分子動粘性係数
- u_i : 流体速度, ν_t : 渦動粘性係数
- t : 時間, k : 乱流エネルギー
- ρ : 流体密度, ϵ : 乱流消失率
- p : 流体圧力

本プログラムではこれらの基礎式を、対流項は1次精度



写真-1 スーパーコンピュータ (SX-1EA)

表-1 スーパーコンピュータの性能諸元

数値演算速度	330 MFLOPS
数値演算メモリ容量	128 MB
拡張記憶装置	1024 MB
磁気ディスク装置容量	18 GB

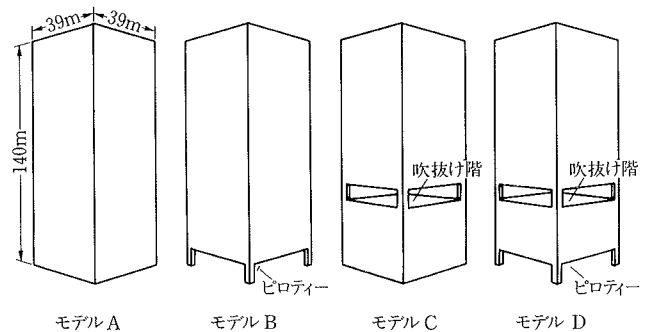


図-1 解析対象モデル

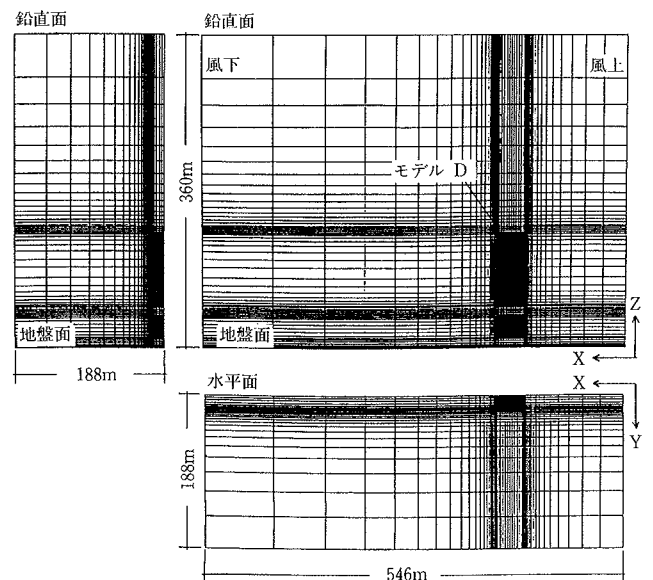


図-2 解析領域とメッシュ

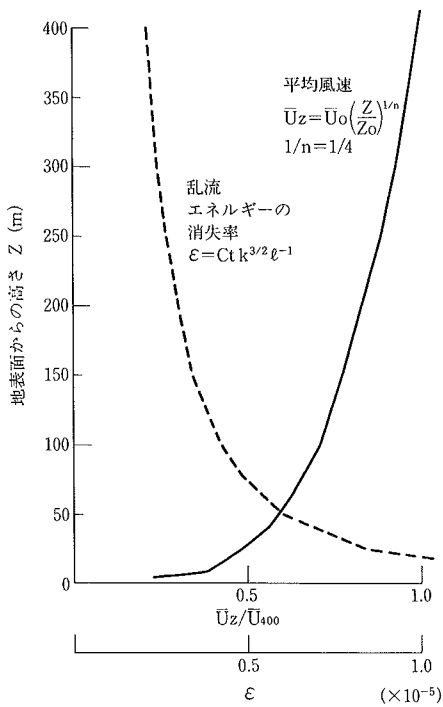


図-3 流入する風の鉛直分布

風上差分，拡散項は中心差分，時間項は単純後退差分により離散化し，SIMPLE アルゴリズムに基づいて計算を行っている。

本件の解析は，気流は温度成層の発達しにくい強風時を想定しているため，等温状態の乱流場としてシミュレーションし，温度差による浮力は無視した。

気流の物性は，質量 $\rho = 0.126 \text{ kg} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^4$ ，分子動粘性係数 $\nu = 1.42 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$ とした。

風上側の気流流入条件は，一般的な都市域を想定し以下のように与えた (図-3)。

(平均風速の鉛直分布)

$$\bar{U}_z = \bar{U}_0 \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^{1/n}$$

\bar{U}_z : 地上からの高さ Z m の平均風速 (m/s)

\bar{U}_0 : 基準高さ Z_0 m の基準風速 (m/s)

(140 m 高さで 10 m/s とした。)

1/n : 地盤の粗度状態を示す係数 (=1/4 とした)

(乱流エネルギー)

$$k = 0.03$$

(乱流エネルギーの消失率)

$$\epsilon = C_t k^{3/2} l^{-1}$$

ここで， $l = C_t^{-1/4} U \int R \tau d\tau$

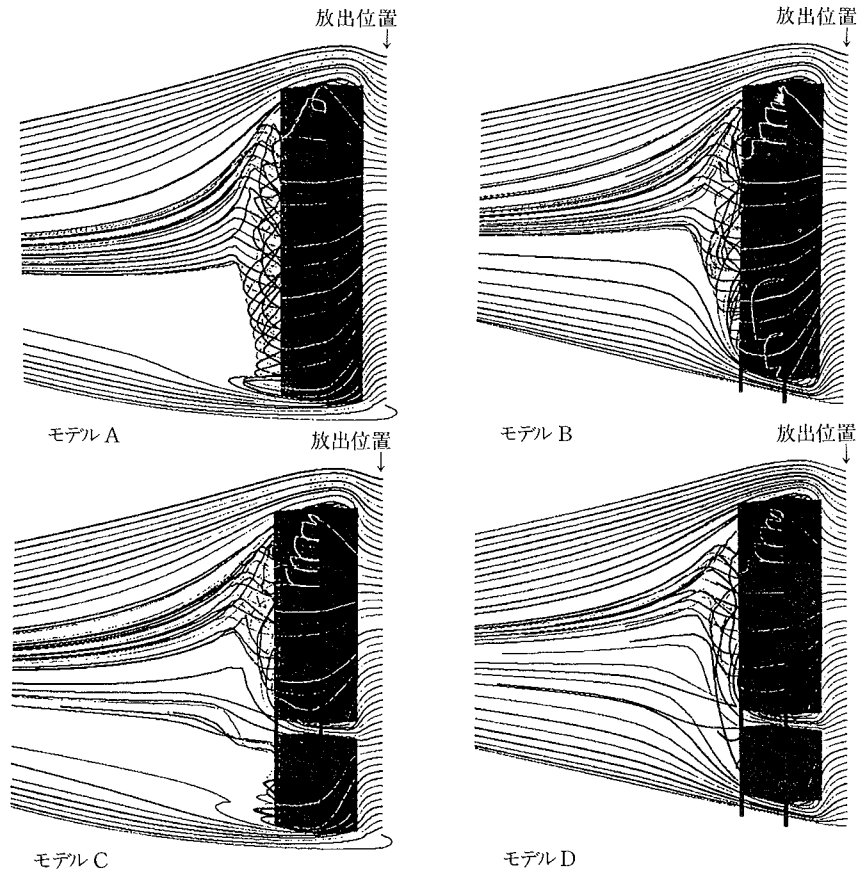


図-4 粒子軌跡による流れの可視化

$$C_t = 0.09$$

$$U \int R \tau d\tau = 20Z^{0.5} \text{ とした。}$$

また，風下側の流出条件は圧力一定とした。解析領域の側壁面の境界条件は Free slip，地面盤と建物モデルの壁面の境界条件は対数則を選択した。

解析ステップの時間刻みは $\Delta t = 0.01$ 秒，解析サイクルは 18,000 サイクルである。計算時間は各ケース約 18 時間であったが，高性能な汎用コンピュータでは約 180 時間を要する内容である。

4. 解析結果と考察

解析の結果は，エンジニアリング・ワークステーション (sun4, サンマイクロシステムズ社) により可視化した。

4.1 粒子の軌跡表示 (図-4)

この図は，建物モデルの風上側から粒子を放った時に，その粒子が飛散した軌跡を表示したものであり，風洞実験において煙や微細な粒子を放出させて流れを可視化すると同様に，数値シミュレーションでの可視化技法の一つである。これにより，流れの中に発生する渦や剥離流，下降流，吹き上げなどの位置が立体的に確認できるのである。

このケースでは，すべて同じ位置から粒子を飛ばしてい

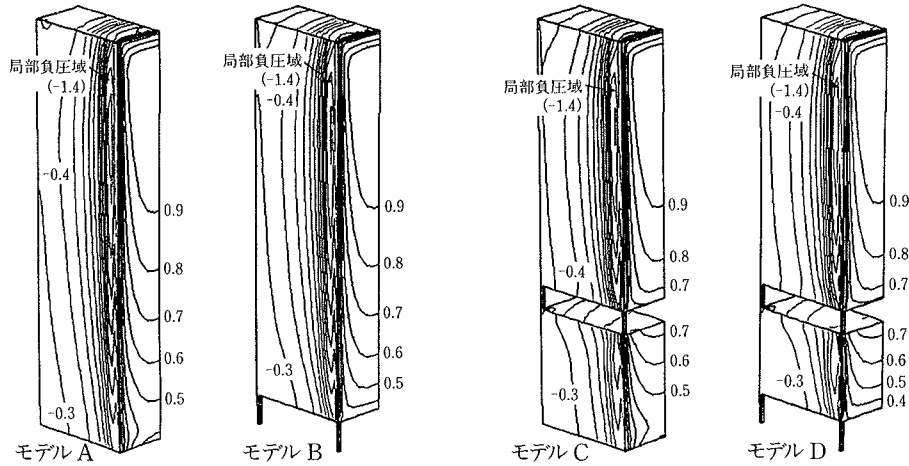


図-5 風圧分布 (数値はモデル頂部の基準速度圧に対する割合)

るので、モデルの上半分については、いずれのモデルにおいてもほぼ同様な軌跡を示している。すなわち、モデル高さの70~80%よりも高いところでは、モデルの壁面に沿って吹き上げがあり、軒先で剥離して屋根面で渦を形成し、建物モデル背後で下降している。また、横へ回った流れは、やはり風上隅角部で剥離し、後方で建物背後へと巻き込んでいる。なお、ここに示していないが、粒子の発生がさらに風上の壁面に接近した場合には、剥離した粒子は屋根面や側壁面に沿って発生する渦に巻き込まれていた。

しかし、モデル前面の壁面に沿って下降した流れは、ピロティーや吹き抜けの有無による違いを見せている。モデルAでは、下降した流れは横へ回り込んで隅角部で剥離しているが、地表面に近い最下層の流れは風上側に吹き戻されて大きく迂回して側壁側に流れている。そして、後方へ流れ込んだ流れは、背面の壁面に沿って渦を巻きながら上昇している (これは、現実に日常的に見られる、建物の近くでのごみくずの舞い上がり現象そのものである)。

モデルBでは、下降した流れは1階のピロティーに流れ込んで、背後へと吹き抜けている。ピロティーがあることで、建物前面の下降流は強まっているようである。

モデルCでは、中層部から下降する流れが地表面まで到達することなく、吹き抜け部に流れ込んでいる。吹き抜け部より下方では、上部の吹き抜け部への流れはわずかで、多くは地上部へと下降する傾向にある。建物背面側の吹き上げ渦も、この吹き抜け部により2分割されている。

モデルDでは、モデルBとCの組み合わせであるが、吹き抜け部より下層では、流れが壁面に沿って下降する傾向をより一層強めている。

4.2 風圧分布 (図-5)

この図は、モデルの壁面に作用する風圧力の分布を、建物モデル頂上の風速を基準とした時の速度圧に対する比率 (風圧係数) に対応させて示している。従って、風圧係数-1.0から±0.0,+1.0と言うように、風圧係数にして0.1ピッチごとに区分けした (グラビアでは、青色~赤色~白色

に対応させている)。建物モデル側壁面の風上側では、高い負圧が作用していることが分かる (青色に近い色の分布区域)。この局部負圧は、矩形断面形状のモデルについての風洞実験で一般的に観測されている。ただし、その絶対値は高くまた広い区域に及んでいるので、今後さらに検討しなくてはならないと考える。建物前面では、中層部から軒先に近いところの広い区域で強い正圧が作用していることが分かる (白色の区域)。この中心が流れの淀み点 (風速がゼロの点) となって、流れが上下左右へと、等圧力線に直交する形で圧力の低い方へと、分かれていくのである。

吹き抜けのあるモデルCやDでは、吹き抜け部の下側にも圧力の中心があるが、その中心が吹き抜け部の直下であることから、吹き抜け部への吹き上げよりも、下降する流れが多くなるのである。吹き抜け部内部の圧力は負圧である (黄色からオレンジ色)。

4.3 風速ベクトル (図-6)

風の流れ場の風速ベクトルは、風の強さと風の向きを理解するのに役立ち、鉛直面について表示すると、モデル前面では淀み点を中心に風速が弱くなって、上下方向に別れていることや、軒先での強い剥離流の発生、屋根面の渦やモデル背後の後流渦の発生が明確になって表れている。また、中層部の吹き抜けや1階ピロティーを流れる風がいかにか強い風であるかということもこれにより理解できるところである。

4.4 地上の風速分布 (図-7)

図は、地盤から5m高さレベルの風の強さをコンター表示したもので、数値はモデル頂上の風速に対する割合である。従って、いずれのモデルにおいても、モデルの風上側と背後の区域においては相対的に風速が低く、側壁に沿った区域で風速が高いと言うことが理解される。そして、側壁に沿った区域の側壁に近いところでは、コンターの間隔が非常に密であり、急激な風速の変化が起きていることを示している。このような建物回りのわずかな区域の違いによる風速変化も、風速の増加現象によるビル風害に加えて、

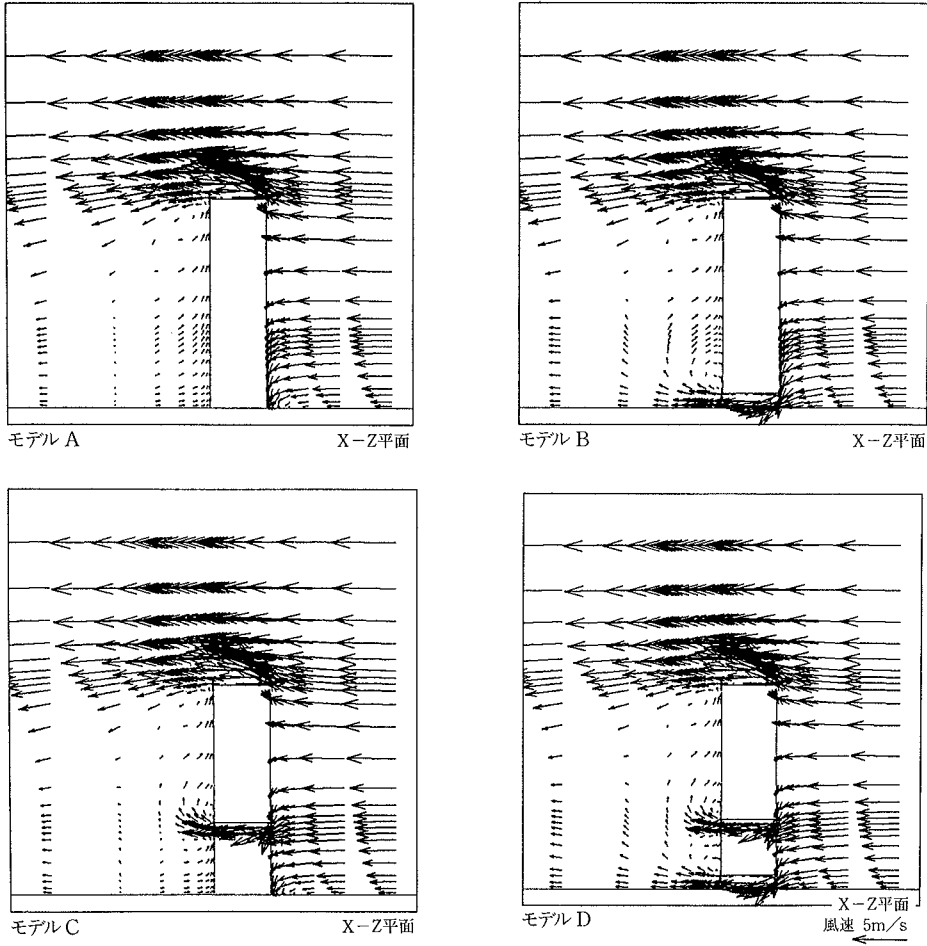


図-6 風速ベクトル
(風は右から左へ吹いている)

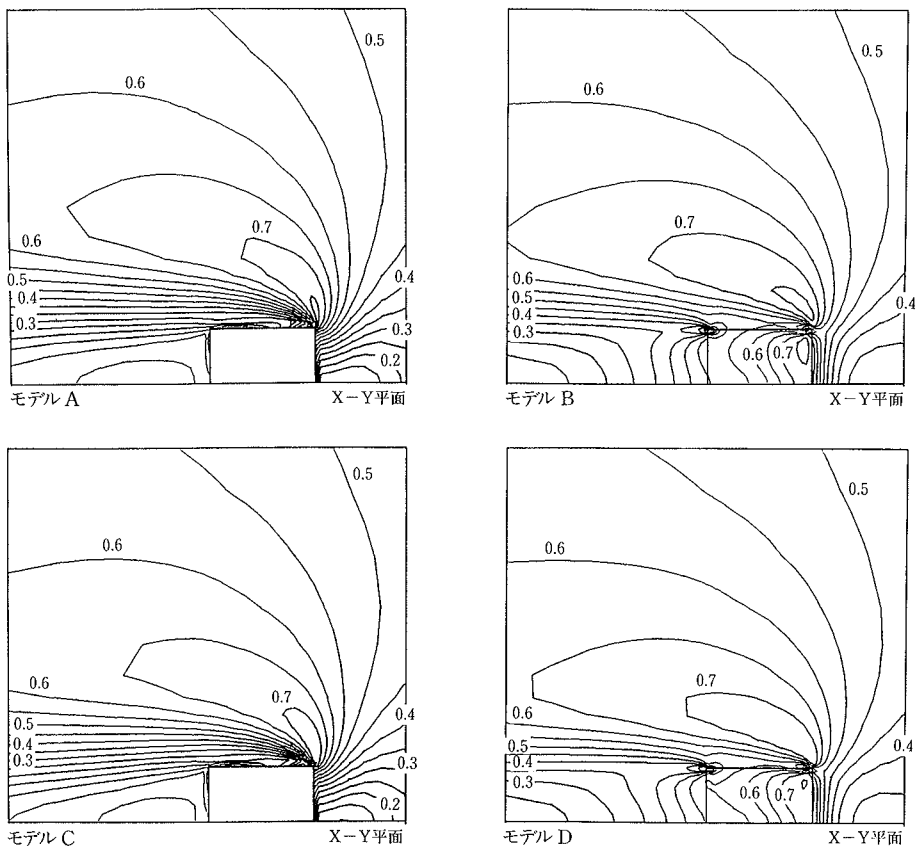


図-7 地上高さ 5 m の風速分布
(数値はモデル頂部の風速
に対する割合, 風は右から
左へ吹いている)

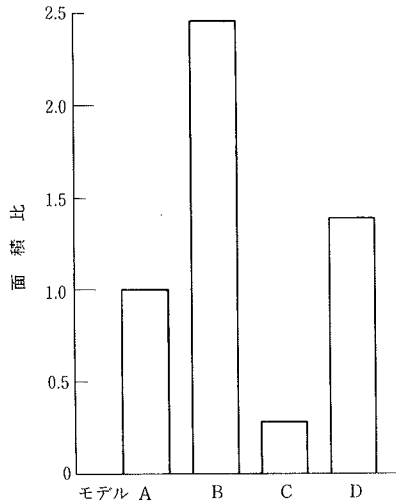


図-8 風速比が0.7以上を示す区域の比較 (モデル A に対する比)

影響をさらに大きくするのである。

1階にピロティーを有するモデル B と D では、ピロティー内の風上側において側壁側と同様に、ピロティー前後の風速と比較して、著しく高い風速を示している。ピロティー内の風速が高くなる現象については、亀井⁴⁾や村上⁵⁾によって実験的に測定され、また著者らも現実に経験しているところである。

次に、側壁に沿った区域で風速比が0.70以上（仮に、風速の著しく増加する区域とする）を示す範囲の大きさを比較すると、モデル B はモデル A の約2.5倍、モデル C は約0.2倍、モデル D では約1.5倍である（図-8）。従って、1階にピロティーを設けると、建物周辺の地上レベルの風速を高くする影響があるが、中層部に吹き抜けを設けると、風を弱める効果があるという判断ができる。

なお、横断面の風速分布を調べると、建物の側壁に沿って頂部付近までも風速の高い区域があり、ビル風の影響は地上付近に限定されたものでなく、上層部まで及んでいることが分かる（図-9）。

5. まとめ

スーパーコンピュータ (SX-1EA) 上にインストールされた汎用熱流体解析ソフト「STREAM」を用いて、超高層建物回りの気流解析を行ない、次のような結論を得た。

① 超高層建築物の地上階にピロティーを設けると、ビル風による風速の高くなる区域が広くなり、中層部に吹き抜けを設けると影響を小さくする効果がある。

② 数値シミュレーションにより超高層建築物回りの気

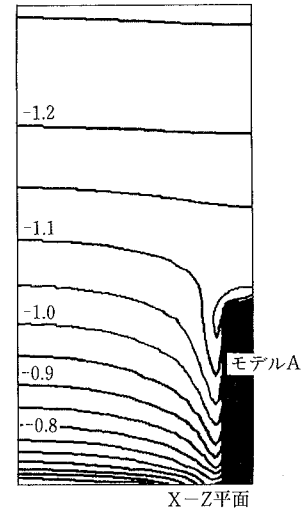


図-9 モデル風上上面近くの横断面における風速分布

〔数値はモデル頂部高さの風速に対する割合〕
〔風は手前から吹いている〕

流解析を行なうと、従来の風洞実験で得られた以上の多くの情報を短時間で得ることが可能であり、ビジュアル化することで結果の評価が容易に行なえる利点がある。

③ 数値シミュレーションの結果は、定量的には検討すべき点もあるが、定性的に現象を十分に再現しており、適切な判断のもとでさらに活用が可能である。

今後さらに実現象との対比を行ない、解析の信頼性を検証する所存である。

参考文献

- 1) 例えば、建築業協会：ビル風ハンドブック (1979. 6)・住宅・都市整備公団：高層建築物における周辺気流の影響の予測評価対策に関する指針 (試案), 建築部調査研究期報, No. 70, p. 77~98, (1982)
- 2) 例えば、東京大学生産技術研究所・NST 研究グループ：乱流の数値シミュレーション, 第5回生研 NST シンポジウム講演梗概集, (1990. 2)
- 3) ソフトウェア・クレイドル社編：三次元熱流体解析プログラム STREAM, Version 2.3 使用説明書 ソフトウェア・クレイドル社編：3次元ポストプロセッサプログラム Atrac 使用説明書
- 4) 亀井勇, 丸田栄蔵, 卯月英夫, 葉袋寿紹：ピロティ内を流れる風の性状に関する実験的研究, 建築学会大会学術講演梗概集, p. 645~646, (1974)
- 5) 出口清孝, 村上周三, 高橋岳生：超高層建物の1階ピロティー部の強風に対する防風スクリーンの効果について, 建築学会関東支部研究報告集, p. 41~44, (1982)