

実物市街地に計画された中・高層建物群周辺気流の数値解析 ——周辺全体の流れ場とバルコニー内部気流について——

Numerical Simulation of Air Flow around Building Complex under Construction with Surrounding Blocks

村 上 周 三*・持 田 灯*・林 吉 彦**・佐 野 行 雄***
Shuzo MURAKAMI, Akashi MOCHIDA, Yoshihiko HAYASHI and Yukio SANO

実際の市街地に建設予定の高層建物と中層建物からなる建物群周辺や高層階バルコニー内の気流解析に $k-\epsilon$ 型2方程式モデルを適用した結果について報告する。本報で示すように、数値シミュレーション手法は、建物群周辺の全体の流れの性状を検討するうえでも、バルコニー手摺り壁のデザイン等比較的小さなスケールの流れの解析を行ううえでも非常に有効である。

1. は じ め に

密集した高層建物間のオープンスペースや歩行者デッキ下部、バルコニー内部等における3次元的な気流分布の詳細な測定は風洞実験等では困難であり、このような場所における複雑な流れ場の性状を把握するうえで数値シミュレーションは極めて有効な手段と考えられる。本報では市街地に建設予定の複雑な形状の中層・高層建物群の周辺やバルコニー内部の気流分布に関して $k-\epsilon$ 型2方程式モデルを用いた数値シミュレーションにより解析し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

2.1 解析対象と解析領域

解析対象建物群の配置を図1、写真1に示す。図中(■)の部分の4棟が建設予定の建物群である。

図2に示したRegion 1の領域を対象として、まず全体の流れ場の解析を行った。次に、Region 1における全体の流れ場のシミュレーション結果を基に、Region 2に領域を縮小し、より細かいメッシュ分割による計算を行い、最後にその結果を基に、B棟13階のバルコニー周辺(Region 3)まで領域を削減し、バルコニー内の気流分布

の解析を行った¹⁾。

なお、以下に示す諸量はC棟高さ(76.6m)のアプローチフローの風速で無次元化している。

2.2 計算種類

表1に計算種類を示す。Region 1の全体の流れ場については当該地域の卓越風である風向NNWとSSWの2ケース、高層階対象のRegion 2はB棟のバルコニーに強

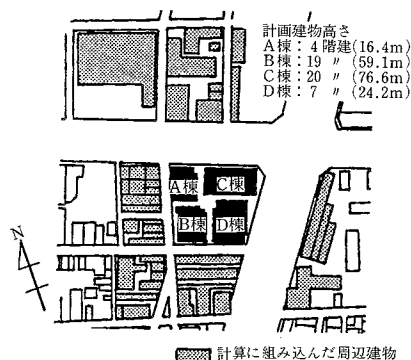


図1 解析対象建物周辺の状況

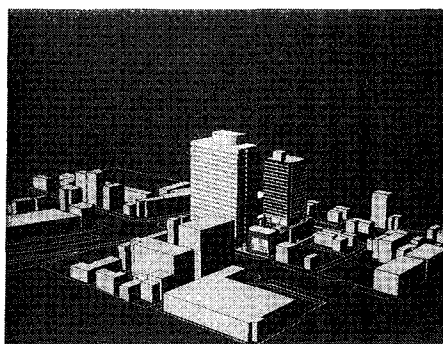


写真1 建物完成予想図

記 号	
U, V, W : 平均風速	ℓ : 乱れの長さスケール
の x, y, z , 成分	h : 壁面第1セルの幅
k : 乱流エネルギー	θ : 風向
ϵ : k の散逸	suffix n : 法線方向
ν_t : 渦動粘性係数	t : 接線方向

*東京大学生産技術研究所 付属計測技術開発センター

**東京大学大学院

***住宅・都市整備公団 試験研究所

風が発生しやすいと予測されるSSWの1ケース、バルコニー周辺のRegion 3については風向SSWで手摺り形状および遮風板の有無を組み合わせた4ケースの計算を行った。本報ではRegion 1とRegion 3の結果を示す。

2.3 計算モデル, 差分スキーム, 境界条件

$k-\epsilon$ 型2方程式モデルによりMAC法のアルゴリズムを用いて解析した²⁾⁹⁾。時間に関してはAdams-Bashforthスキーム, 空間に関しては2次の中心差分を使用した。ただし, スカラーの輸送方程式の移流項には1次の風上差分を用いた。各Regionの境界条件を表2にまとめて示す。

2.4 計算時間

本計算は東京大学生産技術研究所のVP-100を用いて行った。Region 1の全体の流れ場の解析では, 各風向と

も $\Delta t = 1 \times 10^{-4}$ として約5万stepまで計算を実行した。cpu timeは1風向につき約30時間を要した。Region 2は $\Delta t = 1 \times 10^{-4}$ として約2万stepまで計算を実行し, cpu timeは約8時間を要した。Region 3は $\Delta t = 1 \times 10^{-4}$ として約2万stepまで計算を実行し, cpu timeは約7時間を要した。

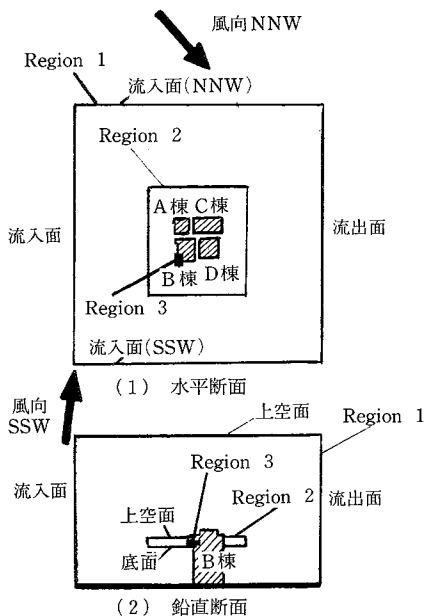


図2 Region 1~3の解析領域

表1 計算種類

CASE	解析範囲	風 向	バルコニータイプ
1	Region 1	NNW	—
2	Region 1	SSW	—
3	Region 2	SSW	—
4	Region 3	SSW	Type 1
5	Region 3	SSW	Type 2
6	Region 3	SSW	Type 3
7	Region 3	SSW	Type 4

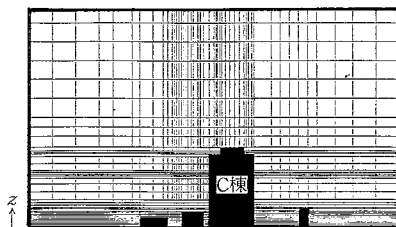
注)

Type 1: バルコニー全体に手摺り壁がある場合

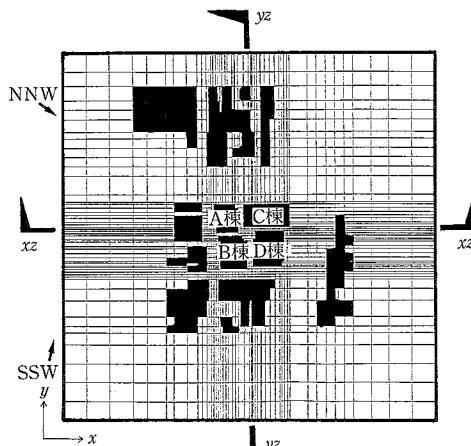
Type 2: 建物コーナー部にみに手摺り壁がある場合

Type 3: 建物コーナー部にみに手摺り壁があり, それが天井まで立ち上がっている場合

Type 4: Type 3の建物コーナー部に床から天井までの遮風板がある場合



(1) 鉛直断面



(2) 水平断面

図3 Region 1のメッシュ分割

表2 境界条件

Region 1	流入面	$U(z) = U_0(z) \cos \theta, V(z) = U_0(z) \sin \theta, U_0(z) = z^{1/4}, W(z) = 0, k(z) = 0.025, \ell(z) = C_D^{1/4} \kappa z, \nu_t(z) = k(z)^{1/2} \ell(z), \epsilon(z) = C_D^{3/4} k(z)^{3/2} / \kappa z$
	流出面	境界外の圧力 $P = 0$
	上空面	U_t, k, ϵ : free slip
	壁面	$U_t \propto z^{1/4}, U_n = 0, k$: free slip $\epsilon(h/2) = C_D^{3/4} k(h/2)^{3/2} / (\kappa h/2)$
Region 2 Region 3	流入面	風速3成分, k, ϵ : 前のRegionからの補間値
	上空面	
	底面	
	流出面	境界外の圧力は前のRegionからの補間値 U_t, k, ϵ : free slip
	壁面	$U_t \propto z^{1/4}, U_n = 0, k$: free slip $\epsilon(h/2) = C_D^{3/4} k(h/2)^{3/2} / (\kappa h/2)$

(C棟の棟高風速とC棟高さで無次元化)

3. 建物群周辺の気流分布の解析 (Region 1の解析)

3.1 計算の概要

図2に示したRegion 1の領域を対象として、建物群周辺の解析を行った。Region 1の解析領域は、 $350\text{m}(x) \times 370\text{m}(y) \times 215\text{m}(z)$ 、メッシュ分割数は $52(x) \times 55(y) \times 42(z)=120,120$ である(図3)。対象とする4棟周辺の高、中、低層建物についても解析領域に組み込んでいる(図1の■の部分)。また、対象4棟間に存在する歩行者デッキも考慮しており、かなり細かいところまで再現されたメッシュ分割を用いて計算を行った(図4)。

3.2 Case 1 (Region 1, 風向NNW)の結果

(1) 平均風速ベクトル

①水平(x-y)断面(図5, 図6)

$z=1.5\text{m}$ の水平断面の風速ベクトルを図5に、対象4棟周辺の拡大図を図6に示す。B棟南西側隅角部やC棟東北側隅角部で剝離による高風速が発生しており、A棟、B棟西側の道路上や4棟に囲まれたオープンスペースで

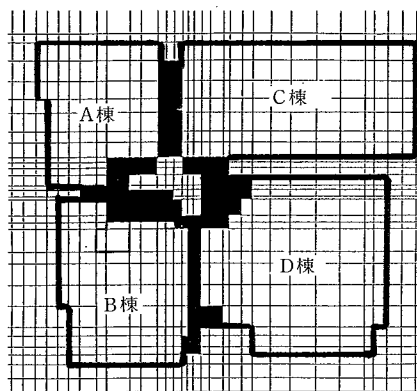


図4 対象建物群周辺のメッシュ分割
(Region 1, ■は歩行者デッキ)

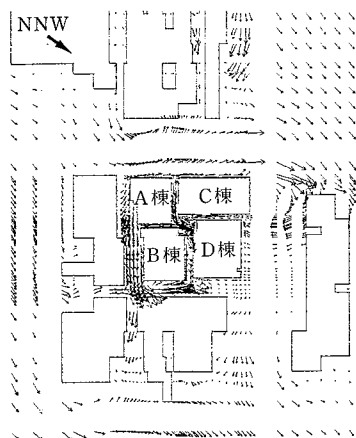


図5 平均風速ベクトルの分布(風向NNW, $z=1.5\text{m}$)

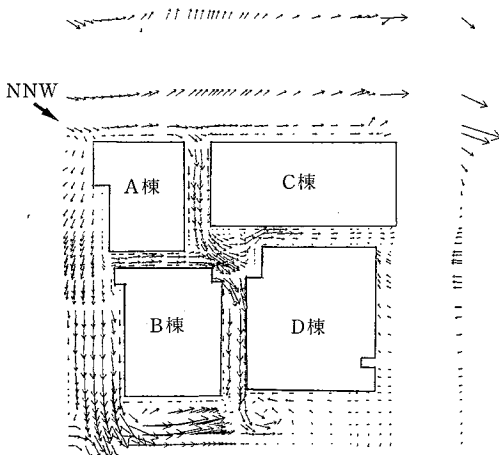


図6 平均風速ベクトルの分布(風向NNW, $z=1.5\text{m}$)

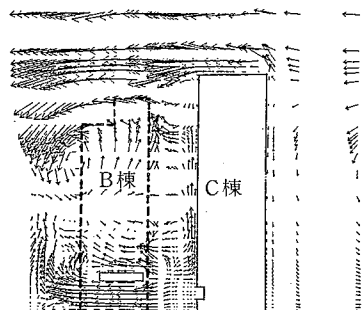


図7 平均風速ベクトルの分布(風向NNW, y-z断面拡大図)

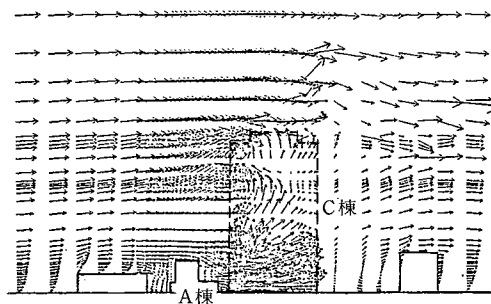


図8 平均風速ベクトルの分布(風向NNW, x-z断面)

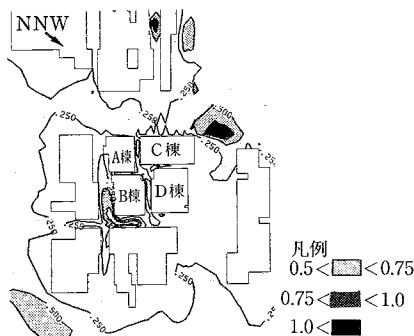


図9 スカラー風速(風向NNW, $z=1.5\text{m}$)

も高風速が発生している。また、D棟の南側で循環流が発生している。

②鉛直 (y-z) 断面 (図7)

y-z断面の表示位置を図3に示す。この断面では、C棟屋上風上角で高速の剝離流が発生しており、C棟上層階にぶつかった風が地表面付近に吹き降ろし、対象建物群とその風上側低層建物との間で循環流が発生している。また、C棟の風下側の地上付近のオープンスペースで風速が比較的高く、高層部分では上昇・下降流が発生するなどかなり複雑な流れ場となっている。

③鉛直 (x-z) 断面 (図8)

x-z断面 (図3参照) ではA棟の風下 (C棟とD棟の間) で比較的高風速が生じている。また、建物群上部でかなり高風速が生じている。これはB棟とC棟の間を吹き抜ける高風速による。

(2) 風速の等値線

図9に $z=1.5\text{m}$ の水平断面のスカラ風速 ($\sqrt{U^2+V^2+W^2}$) を示す。B棟の南西側とC棟の北東側でスカラ風速0.75 (C棟棟高風速に対する比較) 以上の高風速領域が発生しており、4棟の建物に囲まれたオープンスペースやプラザ内部では、スカラ風速0.25~0.5程度の値を示している。

3.3 Case 2 (Region 1, 風向SSW) の結果

(1) 平均風速ベクトル

①水平 (x-y) 断面 (図10, 11)

$z=1.5\text{m}$ の分布では、対象建物群の風上側の建物の影響で風がさえぎられ、風向NNWの場合よりも風速は全般的に小さくなっている。ただし、B棟とD棟間モールやA棟とB棟間モールを高風速で風が吹き抜けている。また、B棟南西側やD棟の南東側で剝離による高風速が発生している。B棟とA棟の西側の道路上もかなり高風速となっている。

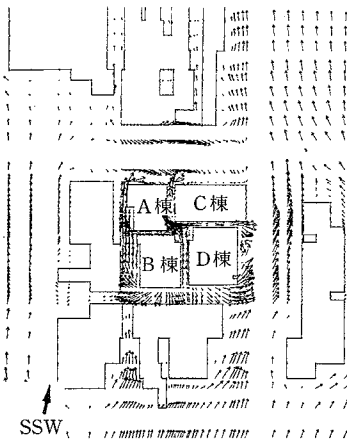


図10 平均風速ベクトルの分布 (風向SSW, $z=1.5\text{m}$)

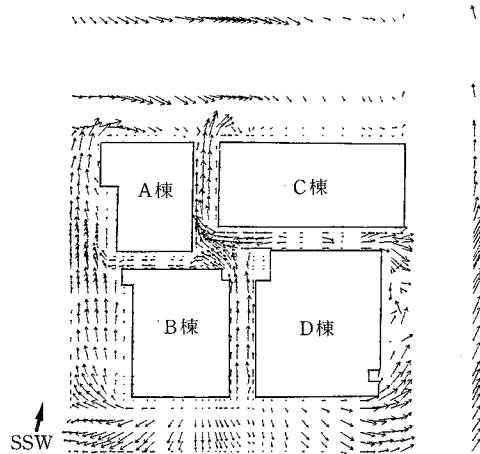


図11 平均風速ベクトルの分布 (風向SSW, $z=1.5\text{m}$)

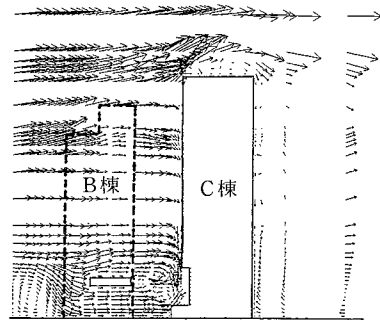


図12 平均風速ベクトルの分布 (風向SSW, y-z断面)

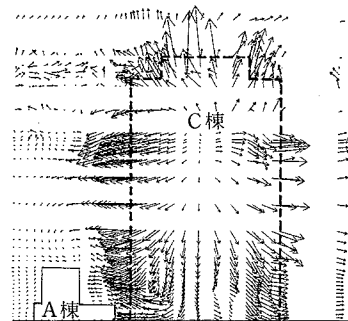


図13 平均風速ベクトルの分布 (風向SSW, x-z断面)

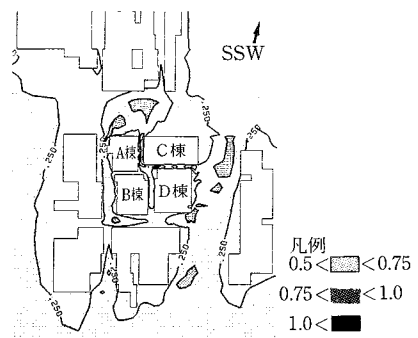


図14 スカラ風速 (風向SSW, $z=1.5\text{m}$)

②鉛直 ($y-z$) 断面 (図12)

$y-z$ 断面 (図3参照) では、4棟に囲まれたオープンスペース内の風速は比較的高く、非常に複雑な流れとなり、B、C棟間のデッキ風下側の上下に逆向きの2つの循環流が生じている。さらに、C棟屋上南側角も高風速となっている。また、対象建物群と風上側低層建物間で循環流が発生している。

③鉛直 ($x-z$) 断面 (図13)

$x-z$ 断面 (図3参照) では、C棟にぶつかった風が建物高さの3/4の点で放射状に高風速で広がり、地表面のオープンスペース内部に吹き降りしている。

(2) 風速の等値線

図14に $z=1.5\text{m}$ の水平断面のスカラー風速 ($\sqrt{U^2+V^2+W^2}$) を示す。A棟北東隅角部でスカラー風速0.5 (C棟棟高風速に対する比較) 以上の領域が存在している。4棟のモール内のスカラー風速は0.25~0.5程度の値を示している。全体的には、スカラー風速は0.25~0.5程度の値を示しており、風向NNWの場合に存在したようなスカラー風速0.75以上の領域は発生していない。

4. B棟バルコニー周辺気流の解析 (Region 3の解析)

4.1 計算の概要

図2に示すRegion 3の解析領域を図15に示すメッシュ ($48(x) \times 47(y) \times 21(z)$) で分割し、B棟13階のバルコニー周辺の気流解析を行った結果を以下に示す。Region 3の解析では、B棟バルコニーのコーナー部で高風速の発生が予測される風速SSWの場合を対象としている。Region 3の解析に先立ってまず解析領域をRegion 1からRegion 2に縮小し高層階周辺の流れ場を解析し、次にこの結果を基にさらに領域をRegion 3まで縮小し、バルコニーの手摺り壁の形状や遮風板の有無などの条件の異なる以下の解析を行った (図2)。

Case 4 : バルコニー全体に手摺り壁 (高さ1.1m) がある場合

Case 5 : 建物コーナー部のみ手摺り壁 (高さ1.1m) がある場合

Case 6 : 建物コーナー部のみ手摺り壁があり、天井まで立ち上がっている場合

Case 7 : Case 6の建物コーナー部に床から天井までの遮風板がある場合

Region 2やRegion 3の解析を行う際の解析領域外周の境界値は、表2に示すようにそれぞれRegion 1, Region 2の結果を内挿して与えた。したがって、Region 3の解析領域の場合も外周の境界では風速の鉛直成分も考慮し、3次元解析を行っている。

図16にバルコニーの断面を示す。なお、手摺りの部分は気流が通過するため本計算モデルからは除外している。

4.2 バルコニー周辺気流の結果

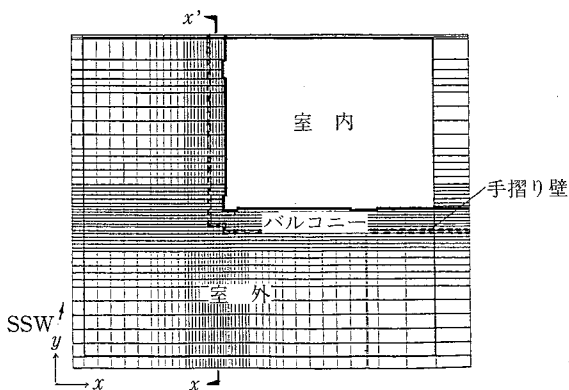
(1) 平均風速ベクトル

①床上50cmの水平断面 (z_1-z_1' 断面, 図17)

Case 4, 5は建物隅角部で循環流が発生しているのに対し、Case 6は、流れの西側への広がりが手摺り壁により遮られるために、循環流が発生せず、北側に流れが引き伸ばされている。Case 4と5を比較するとCase 5の場合、建物前面 (南側) から風がバルコニー内にやや吹き込んでいる点を除くと両者の結果に大きな相違はみられない。Case 6と遮風板のあるCase 7を比較すると、Case 7はパ



(1) 鉛直断面



(2) 水平断面

図15 Region 3のメッシュ分割

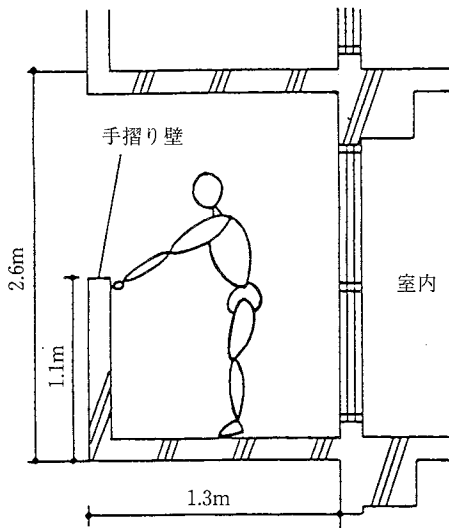


図16 バルコニー断面図

ルコニー内側の建物隅角部付近の風速が大幅に低減されており、遮風板の効果が歴然と現れている。筆者らが行った高層住宅高層階のバルコニー気流の実測では建物やバルコニーの形状が一部異なるが本解析結果と同様に遮風板による風速低減の効果が十分あったことが明らかとなっている⁴⁾。

②床上140cmの水平断面 (z_2-z_2' 断面, 図18)

Case 4と5は建物隅角部の循環流が発生しているのに対し、Case 6は循環流が発生していない。Case 6は、Case 4, 5に比べて西側バルコニー内の建物隅角部付近の風速が大きい。また、Case 4とCase 5を比較すると、Case 4のほうが循環流がやや小さくなり、この部分の風速が多少大きくなっている。また、この場合も遮風板を設置したCase 7ではコーナー部の高風速が大きく低減されている。

③ $x-x'$ 鉛直断面 (図19)

xx' 断面の表示位置を図15に示す。Case 4, 5, 6ともに、床面付近の風向はやや上向きになっている。Case 4, 5は建物隅角部のあたりは、手摺りに遮られた気流がバルコニー内で上昇し梁により下降しさらに上昇する逆S字型の複雑な流れが発生していることがわかる。この領域は、水平断面のベクトル図 (図17, 図18) のコーナー部風下側の西側バルコニー内で形成されていた循環流の部分に対応している。これに対し、Case 6では床から天井近くまで一様に高風速となっている。Case 4, 5, 6と7を比較すると遮風板により風速は大幅に低減されている。

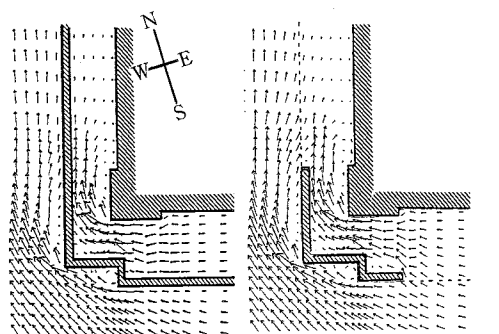
(2) 風速の等値線

①床面50cmの水平断面 (z_1-z_1' 断面, 図20)

Case 4, 5, 6のスカラー風速 ($\sqrt{U^2+V^2+W^2}$) の全体的分布の傾向はほぼ同じである。建物角から数mの範囲のみに0.75 (C棟棟高風速に対する比較) 以上の強風領域があるが、角から5m以上離れると0.25以下の弱風域となる。これは平均風速ベクトルのところで述べたように、建物角で気流が剥離し、手摺り壁の存在により流れが縮流となるためであると考えられる。これらの結果は筆者等の実測結果と一致している⁴⁾。Case 4と5を比較すると、Case 5では南側バルコニー内の建物隅角部付近の0.75の領域が広がっている。これはCase 5はコーナー部以外は手摺り壁がないため、建物前面 (南側) で、より多くの風がバルコニー内に吹き込んだ結果と考えられる。Case 5とCase 6を比較すると、Case 6は、西側バルコニー内の風下側での風速がCase 5よりも多少高くなっている。Case 7では西側バルコニー内の風速は0.5以下であり、特に遮風板の近くは0.25以下と、Case 6の3割程度である。

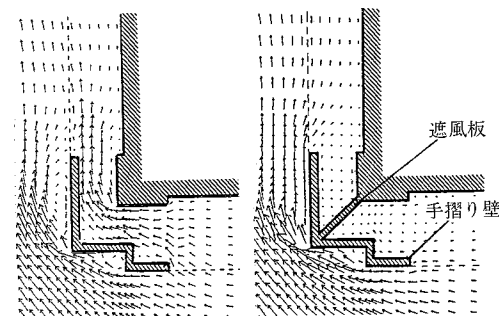
② $x-x'$ 鉛直断面 (図21)

Case 4, 5は、全体的分布の傾向は同じである。ただし、建物隅角部の床面から手摺り壁高さ程度では、Case



(1) Case 4

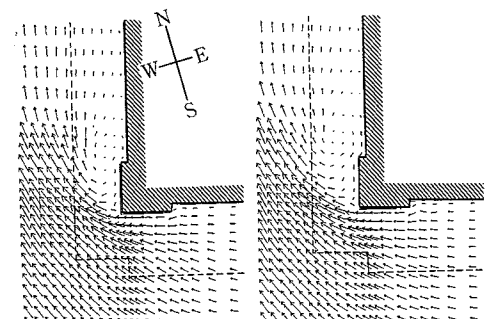
(2) Case 5



(3) Case 6

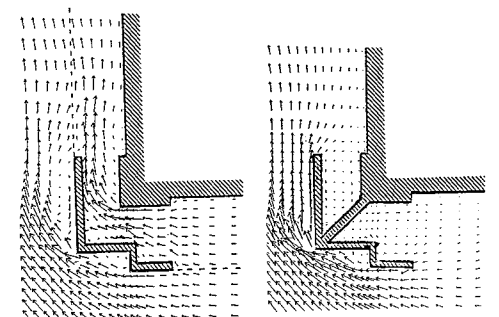
(4) Case 7

図17 水平面内の風速ベクトル (床上50cm)



(1) Case 4 (全体に手摺り壁あり)

(2) Case 5 (コーナーのみ手摺り壁あり)



(3) Case 6 (手摺り壁が天井まで立ち上がっている)

(4) Case 7 (Case 6のバルコニーに遮風板を設置)

図18 水平面内の風速ベクトル (床上140cm)

5のほうが強風領域が広がっており、逆に、天井面付近はCase 4のほうが強風となっている。Case 5と6を比較すると、南側手摺り壁のすぐ北側ではCase 5は6よりも風速が高くなっている。これはCase 6は南側手摺り壁の総面積が大きく、主流方向からの吹き込みを阻止するためである。しかし、建物のコーナーより風下では、Case 6のほうが強風となっている。Case 7の風速は上下の分布はなく、弱風である。

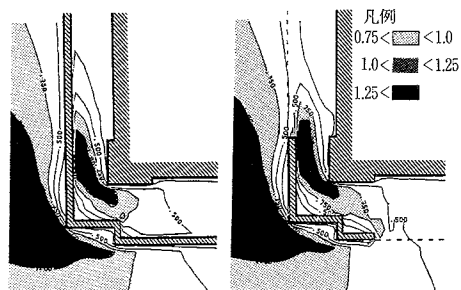
5. 結 論

実際に建設予定の4棟の高層、中層建物からなる建物群周辺の気流分布ならびに高層棟のパルコニー周辺の気流分布を $k-\epsilon$ 型2方程式モデルを用いた数値シミュレーションにより解析した。

まず、風向NNWとSSWの場合の周辺全体の流れ場を解析し、以下に示すような結果を得た。

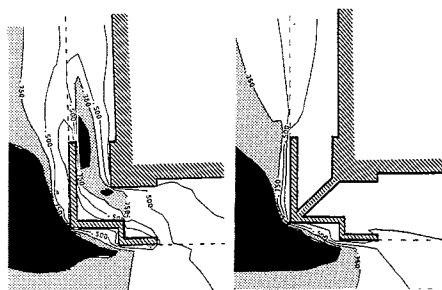
(1) 風向NNWの場合、地上付近では4棟の建物間のオープンスペース、A・B棟西側の道路上、B棟南西角、C棟北東角などで0.75(屋上風速に対する比較)以上の高風速が発生する。

(2) 風向SSWの場合、風上側建物で風が遮られ地上面付近の風速はNNWの場合と比べると比較的小さくなっている。



(1) Case 4

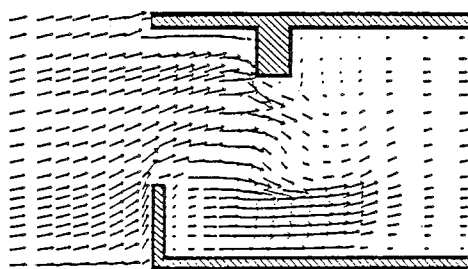
(2) Case 5



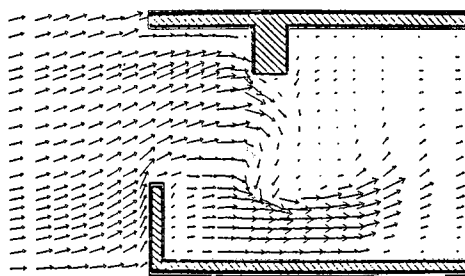
(3) Case 6

(4) Case 7

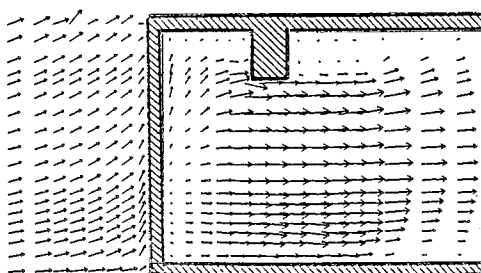
図20 水平面内のスカラー風速(床上50cm)



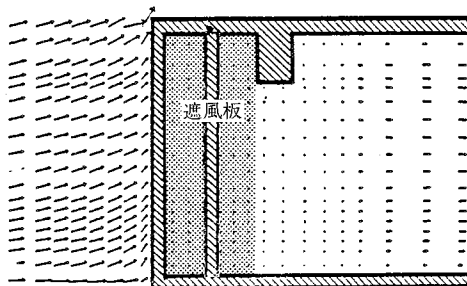
(1) Case 4 (全体に手摺り壁あり)



(2) Case 5 (コーナー部のみ手摺り壁あり)

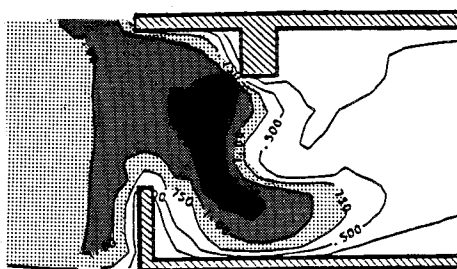


(3) Case 6 (コーナー部の手摺り壁が天井まで立ち上がっている)

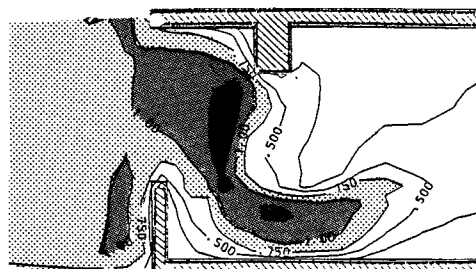


(4) Case 7 (Case 6のパルコニーに遮風板を設置)

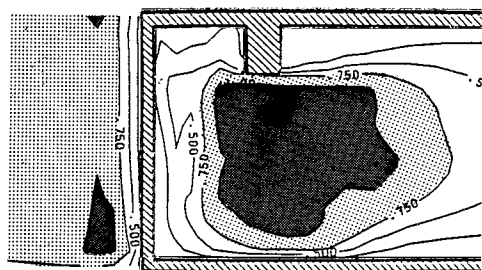
図19 鉛直面内の風速ベクトル (x-x'断面)



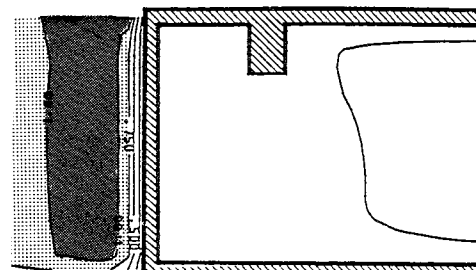
(1) Case 4 (全体に手摺り壁あり)



(2) Case 5 (コーナー部のみ手摺り壁あり)



(3) Case 6 (コーナー部の手摺り壁が天井まで立ち上がっている)



(4) Case 7 (Case 6のバルコニーに遮風板を設置)

図21 鉛直面内のスカラー風速 (x-x'断面)

(3) いずれの風向の場合も、高層階風上壁にぶつかった風が4棟間のオープンスペース内に吹き降ろされ、4棟の建物間やその周辺の気流性状は極めて複雑な様相を示す。

つぎに、風向SSWの場合のB棟13階の南西側のバルコニー周辺の気流分布に及ぼす手摺り壁形状の変化の影響を検討し、以下の結論を得た。

(4) 今回行ったCase 4～6のいずれの解析結果でもコーナー部でスカラー風速0.75以上の強風域が発生している。また、建物隅角部に遮風板を設置したCase 7の結果では、コーナー部で発生する高風速が大幅に低減されており、遮風板の設置はバルコニー内で発生する強風の防除に極めて有効である。

(5) バルコニー内のコーナー部の強風域の範囲や、遮風板による風速の低減の割合などは既往の実測結果とおおむねよく対応している。

これらの結果から、数値シミュレーションは建物群周

辺の全体の流れの性状を検討するうえでも、バルコニーの手摺りのデザイン等、比較的小さなスケールの流れの問題を検討するうえでも非常に有効であることが確認された。

(1988年5月2日受理)

参 考 文 献

- 1) 村上・持田・山村：「Adaptive Gridによる建物周辺気流の解析」生産研究，40.1，1988，1
- 2) 村上・持田・大和田・林：「建物周辺気流のシミュレーションの診断システム，差分スキーム，メッシュ分割，境界条件に関する検討」生産研究，38.12，1986，12
- 3) 村上・持田・林：「建物周辺気流シミュレーションの診断システムに関する研究（第4報）建物近傍のメッシュ分割およびεの境界条件に関する検討」生産研究，40.1，1988，1
- 4) 村上・出口・佐野・長谷川・赤林：「超高層集合住宅のバルコニーにおける強風の性状とその防止対策，その(1)～(3)」日本建築学会 大会学術講演梗概集，1985.10