

市街地上空の乱流境界層のシミュレーション

丸 山 敬

SIMULATION OF TURBULENT BOUNDARY LAYER OVER AN URBAN AREA

By *Takashi* MARUYAMA

Synopsis

The calculation method of three-dimensional flows over rough surfaces was shown. The simulated results were compared with the experimental data in the wind tunnel and the applicability was examined. The configurations of buildings and houses in a real urban city were obtained from a map and an aerial photograph. Numerical calculations of turbulent boundary layer over this urban area were carried out using the three-dimensional simulation method. The calculated values were compared with the observed data at some points in the city. The applicability and the adaptable range were examined by comparing the calculated values with the observed data at some points in the city. Finally the predicted values of wind speed for the wind resistant design were presented using the simulated results and the observed data.

1. はじめに

文献1)では、千鳥状配列立方体粗度ブロックについて、種々の粗度形状に対するラフネスパラメータの値を計算結果と実験値の比較により最適化し、その関係を市街地のような複雑な粗度形状に用いる場合の問題点を検討した。その結果、千鳥状配列立方体粗度ブロックに対するラフネスパラメータの値を用いることによって、市街地上空の気流性状をある程度予測することができることが分かった。

本報では、市街地上空における気流性状の3次元的な計算を行うために、文献1)で示した数値計算手法を3次元に拡張し、風洞内の気流性状について3次元計算を行った。計算結果は実験結果および2次元の計算結果と比較を行い、3次元計算手法の妥当性を確かめた。さらに、実際の市街地に対して読み込んだ建物形状を用いた3次元計算を行い、市街地上空の気流性状の予測を行った。計算結果は自然風中で測定された観測値と比較し、本研究で示した予測手法の有効性を検証して適用範囲を明らかにし、また、本予測手法の応用例として、耐風設計用風速の鉛直分布を求める方法を示した。

2. 3次元計算手法

実際の市街地では、地表面の粗度形状が3次元的に変化するので、気流性状の予測を行うためには3次元計算を行わなければならない。文献1)では、2次元計算しか示さなかったため、ここでは計算手法を3次元に拡張し、市街地上空の計算に先立って風洞内の計算を行い、計算手法の有効性を確認する。

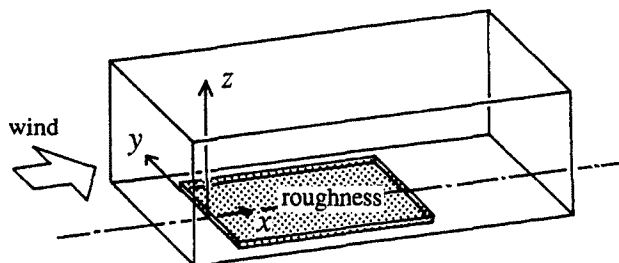


Fig. 1. Domain of calculation.

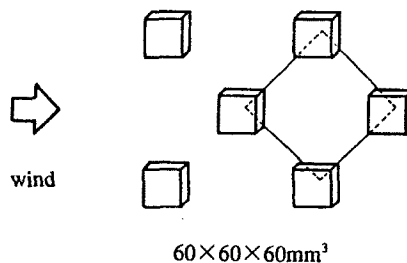


Fig. 2. Configuration of roughness.

2.1 計算手法

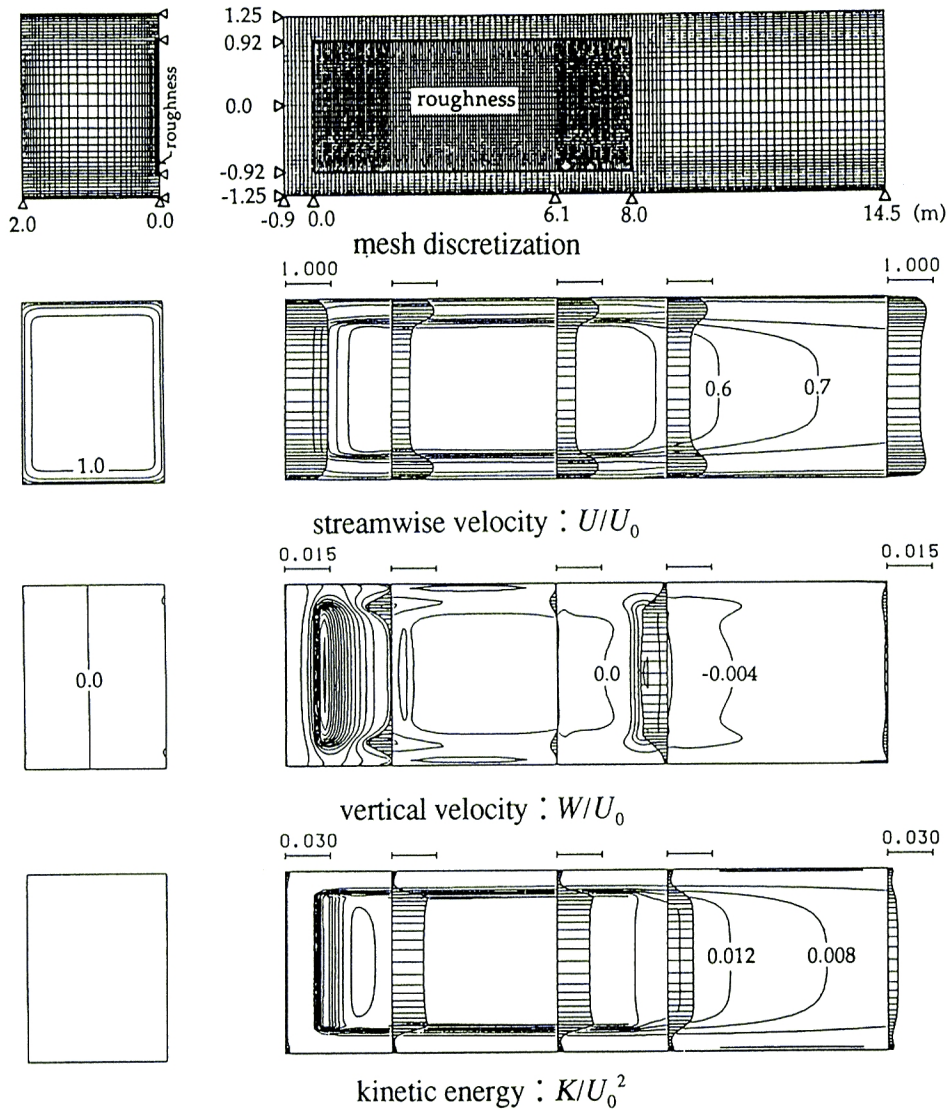
解析領域は文献1)で2次元計算と比較を行った風洞実験と同じである。Fig. 1に示すように測定室内全域に対して3次元計算を行い、ラフネス上に発達する乱流境界層内の気流性状を求めた。座標系は図に示す通りで、乱流モデル、境界条件は文献1)の2次元計算と同じである。計算にはABMAC法、時間に関してEulerスキーム^{注1}、空間に関して2次精度の中心差分(ただし、乱流エネルギー K 、エネルギー消散率 ϵ に関して移流項は風上差分)を用い、3次元計算に拡張したものである。実際の計算に際しては、風洞中央部 $x-z$ 平面($y=0$)において対称条件($\partial/\partial y=0$)を設定し、半分の領域で計算している。変数配置はstaggered mesh系を用い、メッシュ分割はFig. 3に示すように、2次元計算よりも粗く、 x -軸方向は112分割でラフネスの前、後縁付近でメッシュ分割を細かくしてある。 y 軸方向については38分割($x-z$ 平面における対称性により実際の計算では19分割、不等間隔)、 z 軸方向は34分割(不等間隔)で、壁面、床面および天井付近でメッシュ間隔を細かくしてある。なお、Fig. 2に示すラフネスに対して、 x 、 y および z 軸方向の分割幅を半分にした詳細な計算を事前に行い、計算結果を比較した。それによると、両者の差は小さく、全体の流れのパターンもほぼ同じであった。これより、使用したメッシュ分割が妥当であると判断した。

2.2 計算結果と実験値の比較

Fig. 2に示すラフネスに対して行った計算結果をFig. 3に示す。図において、 x 軸方向の時空間平均風速 U 、乱流エネルギー K は境界層の外側($z=0.7$ m)の主流風速 U_0 および U_0^2 で無次元化してある。図より風洞内の乱流境界層の発達の様子がわかり、ラフネスの風上端では風速の鉛直上方成分が増加し、また多くの乱流エネルギーが生じている。乱流エネルギーは境界層の発達とともに上方に拡散し、上空の乱れが増加してゆく。ラフネスの風下側では床面の抗力が小さくなるので、風速の鉛直下方成分がラフネスの風下側で増加し、また床面付近の x 軸方向成分が下流に行くにしたがって大きくなる。ラフネスは風洞側壁まで敷き詰められていないので、床面両隅のラフネスが無い部分では風速が中心部よりも大きくなっている。

計算結果の妥当性を検討するために、風洞実験結果との比較を行った。Fig. 4に実験値および2次元計算結果と共に3次元の計算結果を示す。計算および実験結果は風洞中心面上($y=0$ m)の値を比較した。ラフネスパラメータの値は、床面抗力の比較により最適化を行った2次元の計算結果と同じ値を用いた。図より、3次元の計算結果は実験結果を良く再現している。2次元の計算結果とは少し差があるが、2次元と3次元の差および計算方法、メッシュ分割の違いがでていると考えられる。その他、ここで示したラフネス以外の粗度形状に対しても、2次元計算と3次元計算および実験結果の比較を行ったが、大きな差は生じなかった。これより、2次元計算の結果から得られたラフネスパラメータの値を用いて3次元計算ができると

注1 2次元計算と同じSMAC法、Adams Bashforceスキームを用いると3次元計算では収束が遅くなり、場合によっては発散する場合があった。その原因については現在のところはっきりしていないが、ここに示すような計算方法を用いるかぎり計算を安定して行うことができ、収束も早かった。次節に示すように2次元と3次元計算結果に大きな差はなかったため、3次元計算ではABMAC法、時間に関してEulerスキームを用いた。



z - y plane, $x = -0.9\text{m}$

x - y plane, $z = 0.35\text{m}$

Fig. 3a. Distributions and profiles of simulated values in z - y and x - y planes.

考え、以下の計算に用いた。

3. 市街地における建物形状

3.1 建物データの読み込み

市街地における粗度形状の定量的な評価を行うために、実際の市街地における建物形状を読み込む。地表面にある粗度要素としては、建物以外にも植物や自動車等が挙げられるが、これらは季節や時刻によって変化し、それを評価するのは難しい。また、建物の体積は植物や自動車に比べるとはるかに大きく、気流性状に及ぼす影響も大きいと考えられるので、今回は建物形状だけを読み込みの対象とした。読み込む領域は Fig. 5 に示す福岡市大濠公園付近の約 $0.7 \times 2.5 \text{ km}^2$ の範囲である。ここは福岡市の中心から少し離れた場所、住宅地、団地、商店街、公園等を含み、都市周辺部の平均的な市街地を代表する粗度形状を含んでい

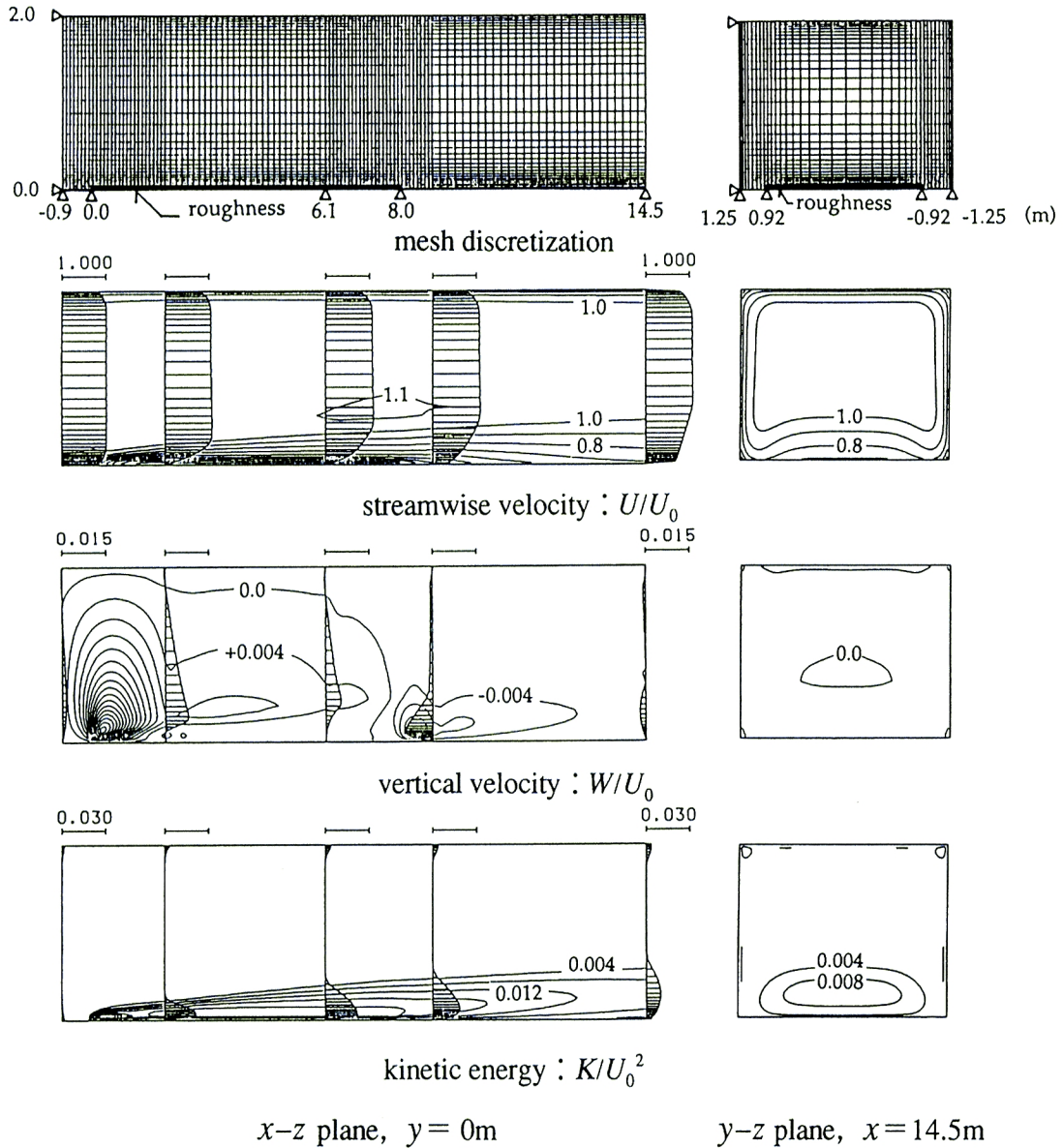


Fig. 3b. Distributions and profiles of simulated values in x-z and y-z planes.

るとみなせる。また、この場所では1985年に風速および気温の鉛直分布が観測されているので、読み込んだ建物データを数値計算に用いることにより、実測と計算値の比較が可能である。建物形状は縮尺 1/25000 の地図からデジタイザーを用いて読み込んだ。用いた地図は1987年撮影の航空写真により制作され、建物の階数は1988年の現地調査により表示されている。なお、読み込みに際しては以下のルールに従った。

- 1) 建物の屋根形状は1987年撮影の航空写真を参考にし、陸屋根、切妻、寄棟の3種類に分類する。その際、片流れ屋根は陸屋根に、入母屋は寄棟に分類する。
- 2) 建物の水平断面形状は地図より求め、陸屋根は多角形で、切妻、寄棟は長方形で近似する。
- 3) 建物の階数は地図の表示および航空写真を参考にして決定する。

読み込んだ建物総数は2843軒で、Photo. 1, 2 にその出力結果を示す。

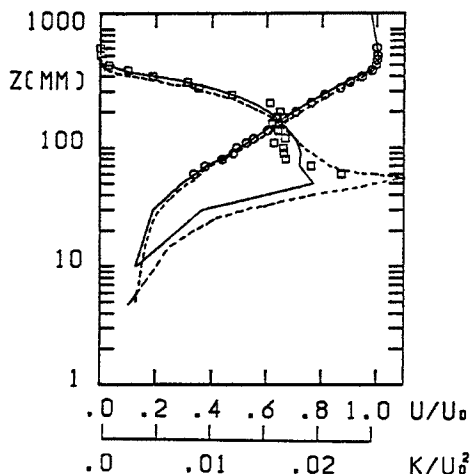


Fig. 4. Comparison of three-dimensional and two-dimensional calculated values with experimental data at $x=7.44$ (m), $y=0.0$ (m): experimental data, \circ , U ; \square , K ; calculated values, three-dimension, —; two-dimension, \cdots , $G=0.875$, $C_{fx}=1.90$, $\alpha_x=2.38$ (1/m), $C_{fz}=0.0$, $\alpha_z=0.0$ (1/m), $C_{pE}=0.40$.

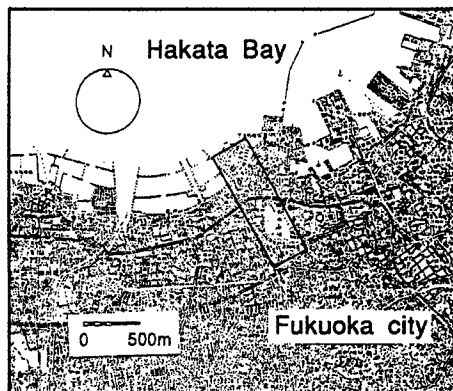


Fig. 5. Region where the configurations of buildings and houses were read from the maps and the aerial photographs.

3.2 建物形状

建物は用途や構造等によって形状が変化するが、ここでは屋根形状と建物の階高による分類を行う。屋根形状は陸屋根と勾配屋根（切妻と寄棟）に分類し、階高は美術館、体育館、講堂、神社仏閣の本堂等、特に建物の規模が大きく階高の高い建物と通常の階高の建物に分類した。

(1) 階数

Fig. 6 に各分類における階数と読み込んだ建物数を示す。陸屋根、勾配屋根ともに2階建が最も多く、建物数は2階以上で階数の増加とともに減少する。陸屋根で階高が普通の建物では、6階以上で建物数が急に少なくなり、建物数の変化も小さくなる。勾配屋根の建物はすべて3階以下であり、2階建の数が非常に多い。

(2) 階数と建物規模

建物の水平断面における周長の4分の1、 L と建築面積の平方根、 $\sqrt{S_r}$ によって建物の規模を評価し、階数との関係を分類別にそれぞれ Fig. 7, 8 に示す。データ数が少ない部分でばらつきが大きく、はっきりとした傾向を示さないが、陸屋根、勾配屋根ともに3階以下では L , $\sqrt{S_r}$ の値が階数とともに増加している。屋根形状によって変化の割合が異なるのは、建物規模の違いが屋根形状に反映されているためと考えられる。また、陸屋根で階高が普通の建物では、 L , $\sqrt{S_r}$ の変化が4階以上で3階以下の場合と異なる。これは、3階以上の建物にオフィスビル、商店、アパート等、規模が大きい建物が多いためと考えられる。一方、3階以下の建物には一戸建住宅が多いと考えられ、 L , $\sqrt{S_r}$ ともに似たような変化をすると考えられる。これらの変化は階数が多い部分でばらつきが大きいが、平均的な変化は階数とともに増加すると見なせる。規模が大きく階高の高い建物は特殊な用途に用いられるものが多く、建物形状にもばらつきが多い。また、階高が普通の建物に比べると読み込んだ件数も少ないので、階数と L , $\sqrt{S_r}$ の値との間に明瞭な関係を見いだすのは難しい。ここでは大多数を占める階高が普通の建物について、階数と L , $\sqrt{S_r}$ の関係を図中に示すように直線近似すると、式(1)~(6)のようになった。

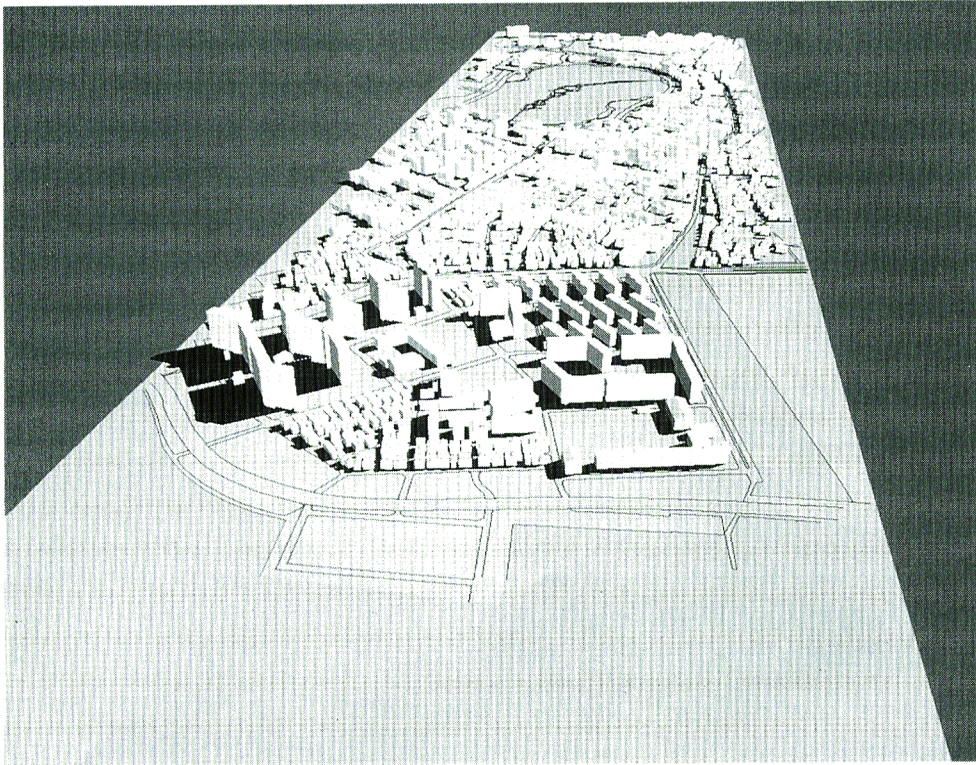


Photo. 1. Output of the data of configuration of buildings and houses. (Looking at south east direction from the sea).

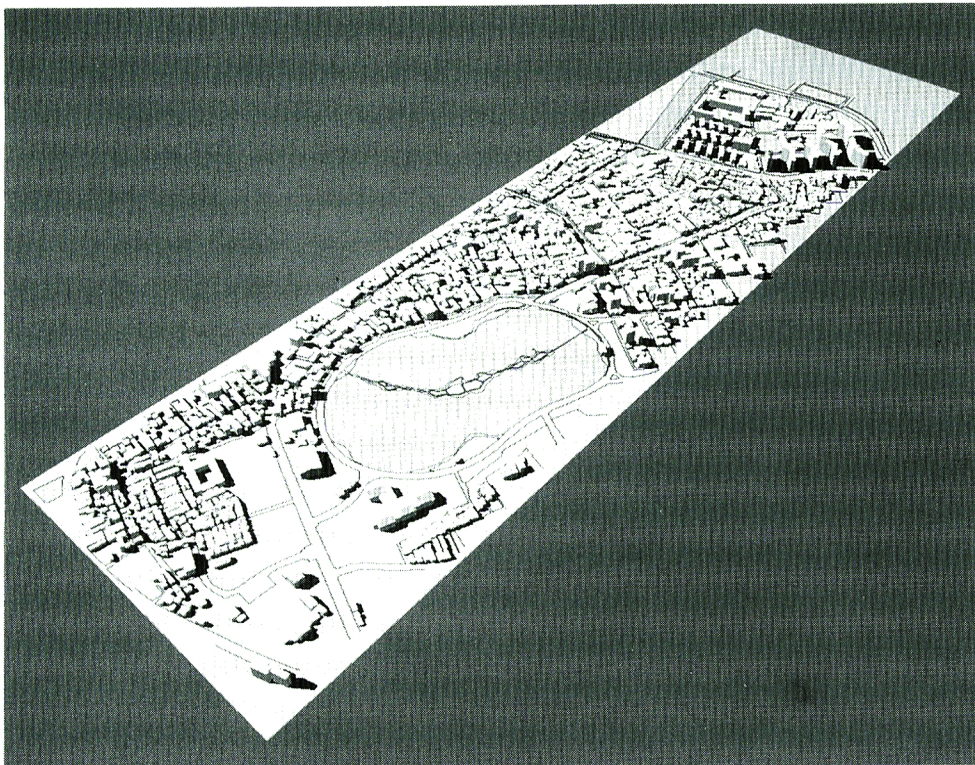


Photo. 2. Output of the data of configuration of buildings and houses. (Looking at west direction from the city side).

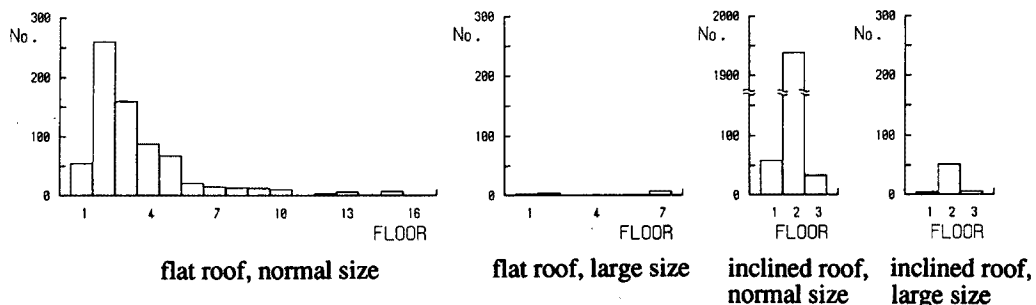


Fig. 6. Variation of the numbers of buildings and houses against the number of stories.

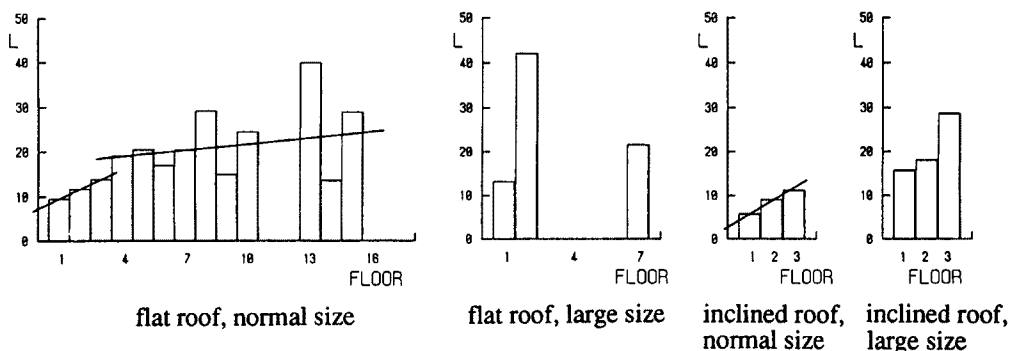


Fig. 7. Variation of L (the averaged quarter length of buildings and houses) against the number of stories.

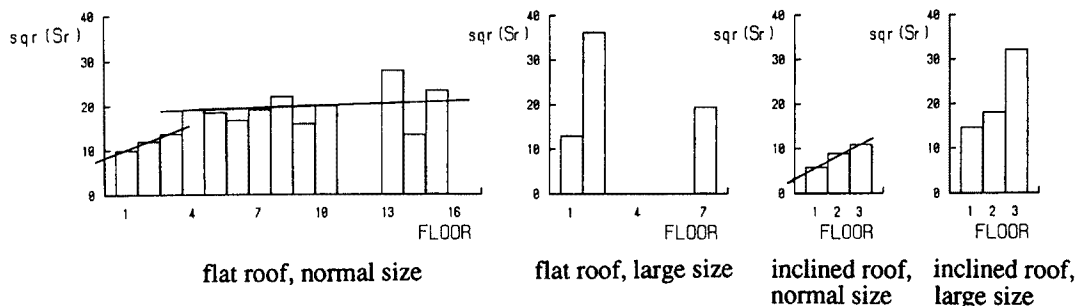


Fig. 8. Variation of $\sqrt{S_r}$ (the square root of the building area) against the number of stories.

1) 階数 F と建物の周長の4分の1, L (m) の関係

陸屋根で階高が普通の建物 (3階以下) の場合

$$L = 7.5 + 2.1F \dots\dots\dots (1)$$

陸屋根で階高が普通の建物 (4階以上) の場合

$$L = 18.0 + 0.35F \dots\dots\dots (2)$$

勾配屋根の場合

$$L = 3.2 + 2.8F \dots\dots\dots (3)$$

2) 階数 F と建築面積の平方根, $\sqrt{S_r}$ (m) の関係

陸屋根で階高が普通の建物 (3階以下) の場合

$$\sqrt{S_r} = 8.0 + 1.9F \dots\dots\dots (4)$$

陸屋根で階高が普通の建物 (4階以上) の場合

$$\sqrt{S_r} = 18.5 + 0.15F \dots\dots\dots (5)$$

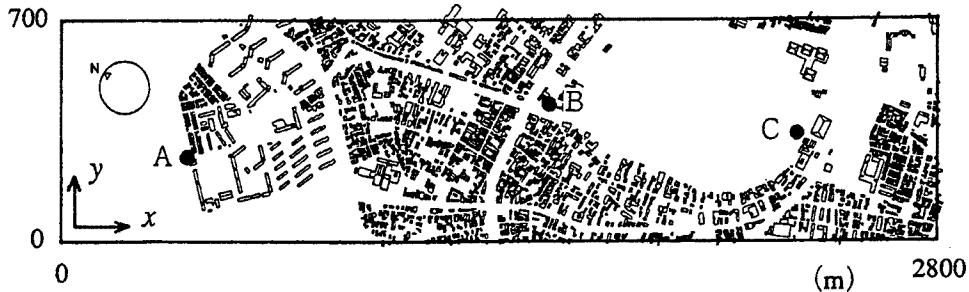


Fig. 9. Output of the configurations of the buildings and houses in the domain of the simulation.

勾配屋根の場合

$$\sqrt{S_r} = 3.6 + 2.5F \dots\dots\dots (6)$$

これらの関係を、階高、屋根勾配、地表面における建築密度等と組み合わせると、各種の粗度形状を表すパラメータを計算することができ、市街地における粗度評価を定量的に行うことができる。

4. 実際の市街地形状を用いた計算

前章で読み込んだ実際の市街地における建物形状を用いて、市街地上空の気流性状のシミュレーションを以下のように行う。

4.1 解析領域および境界条件

解析領域は Fig. 9 に示すように、3章で建物形状を読み込んだ領域を海の方に約 300 m 伸ばした範囲で、 x 軸方向に 2800 m、 y 軸方向に 700 m、 z 軸方向に 200 m の大きさをもつ。この場所では後述するように、図中 A、B、C 点で風速および温度の鉛直分布の同時観測が行われている。流入境界条件としては、滑面上に乱流境界層を数値計算により発達させ、平均風速の鉛直分布形状が観測結果とほぼ同じになるような計算結果を流入境界面に与える。流出、側方および上方境界面では自由流出条件^{注2}とし、側方および上方境界面での圧力勾配は零とした。水面は滑面とみなし、建物が存在する地面境界では文献1)と同じく粗面における境界条件を用いている。

4.2 メッシュ分割

計算に用いる形状パラメータの値は、各計算点における差分メッシュ内の空間平均値として建物の形状データより求めた。ラフネスパラメータの値は、各計算点で求めた粗度体積密度 ρ_r (単位体積中に建物の占める割合) より文献1)で示した関係を使って決定し、粗度要素の一辺と主流方向のなす風向角 $\beta=0^\circ$ と 45° に対する計算を行った。

このとき、市街地では粗度要素の分布形状が一様ではないので、建物の形状パラメータの値はメッシュ分割の大きさによって変化する。特に、水平面内のメッシュ分割の大きさは形状パラメータの値を左右し、計算の精度に影響を及ぼす。計算に用いる形状パラメータ、すなわち粗度体積密度 $\rho_r (=1-G)$ 、粗度表面積密度 (単位流体体積中に存在する粗度表面積の4分の1) a および建物の水平断面における周長の1/4である L が地表面において、平均化位置および平均化面積によって変化する様子を Fig. 10 に示す。ここに示した例では、形状パラメータの変化は平均化面積が小さいときには大きく、平均化面積がある程度大きく

注2 自由流出条件：流出境界面で変数の法線方向の変化が無い、すなわち $\partial/\partial n=0.0$ となるように解析領域の外側の仮想セルの値を与える。ここで n は法線方向ベクトルを表す。

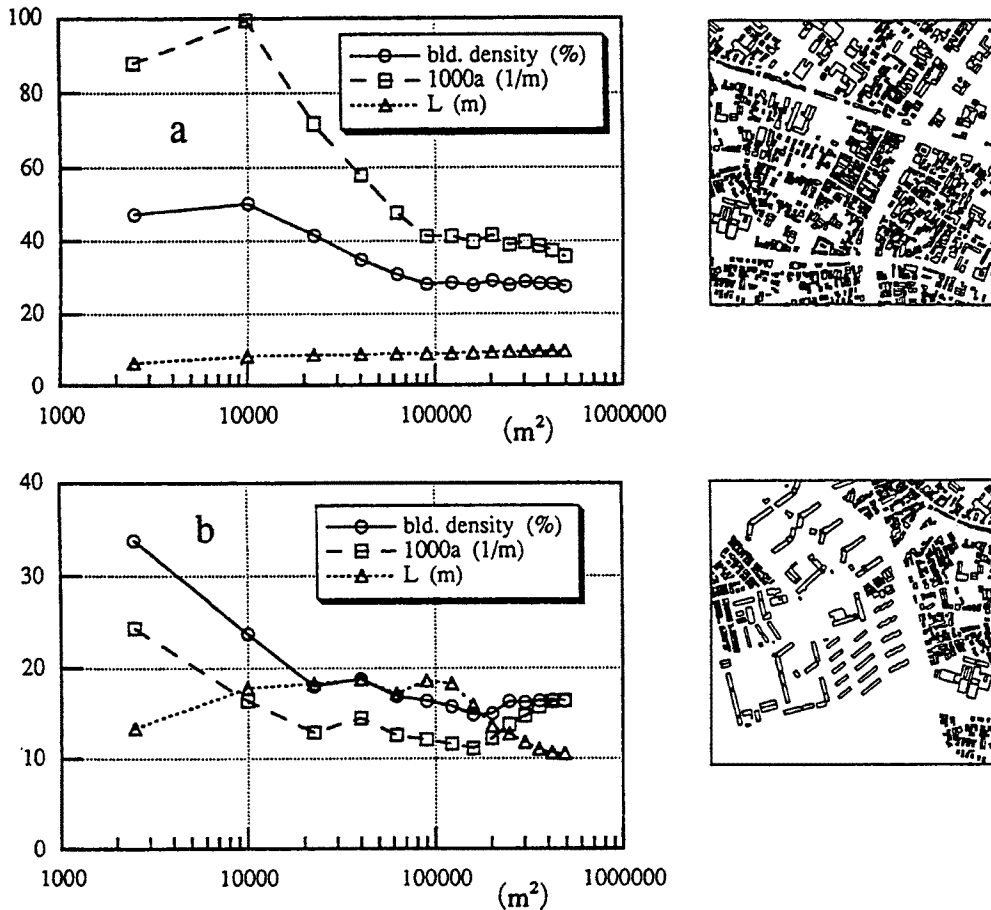


Fig. 10. Variation of ρ_r (the building density), a (the roughness area density) and L (the averaged quarter length of buildings) with the area of averaging. The centers of the averaging are located at the center of the right maps.

なってくると、その変化も小さくなる。Fig. 10a に示す例では、平均化面積が約 100000 m^2 以上で各形状パラメータの変化はほぼ無くなり、それ以上平均化面積を大きくしても平均的な粗度形状はあまり変化しない。Fig. 10b に示す例では、平均化面積が約 20000 m^2 から 2000000 m^2 の間でほぼ一定となり、さらに平均化面積が大きくなると再び変化する。これは、図に示すように、平均化の中心が比較的高いアパートからなる団地の中にあり、平均化を行う範囲が広くなると、周囲の低層住宅街、商店街、埋め立て地（空き地で建物が建っていない）等を含むようになり、平均的な粗度形状が変わってくるためと考えられる。このように、平均化面積を大きくし過ぎると、その地点の粗度形状を反映できなくなってくる。したがって、各計算点での建物形状の影響を計算結果に反映させるためには平均化面積を小さくする方が良く、ここに示した 2 例の場合には 20000 m^2 以下にすれば十分である。

一方、計算に用いた乱流モデルはナビエ・ストークス方程式に時空間平均を施して導いたものであり、各計算点における変数は差分メッシュ内の時空間平均値として計算する。したがって、メッシュ分割はその中にある程度の粗度要素を含むような大きさが必要である。言い換えると、メッシュの大きさが粗度要素、すなわち建物 1 つの大きさと同程度では、乱流モデルを用いる意味がなくなってくる。読み込まれた建物について、水平断面における周長の 4 分の 1、 L と建築面積の平方根、 $\sqrt{S_r}$ によって水平断面形状を調べてみる。全ての建物について L および $\sqrt{S_r}$ の値を求め、両者の関係をプロットすると Fig. 11 のようになる。

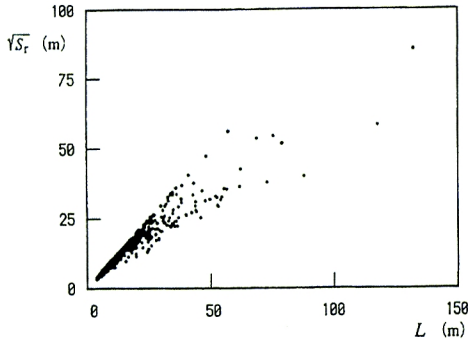


Fig. 11. Variation of $\sqrt{S_r}$ (the square root of the building area) against L (the averaged quarter length of buildings and houses).

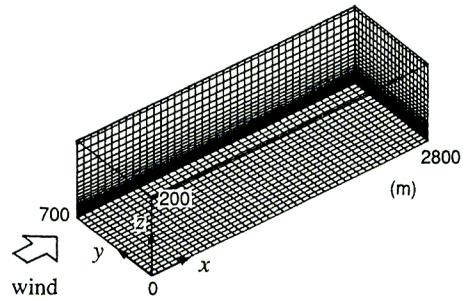


Fig. 12. Mesh discretization and coordinate system.

図において L と $\sqrt{S_r}$ の値が等しいとき建物の水平断面形状は正方形になる。また両者の差が大きいほど、水平断面形状は細長い、あるいは凹凸が多い複雑な形状を持った建物であるとみなせる。 L および $\sqrt{S_r}$ の値が大きい建物では両者の差が大きいものが多い。これは規模の大きい建物の多くが水平断面形状が細長い、あるいは凹凸が多い複雑な形状を持っていることを示している。読み込んだ建物のうち、美術館や体育館、神社仏閣等、特に規模の大きい建物を除くと、大多数の建物は L および $\sqrt{S_r}$ が約 50 m 以下になった。したがって、水平面内における平均化面積は少なくとも一辺が 50 m 以上であることが好ましい。ただし、平均化面積は大きくなり過ぎると分解能が悪くなるのは前述の通りである。

以上の考察により、ここでは水平面内の平均化面積を一辺が 70 m の正方形とした。結局、メッシュ分割は Fig. 12 に示すように x 軸方向に 70 m、 y 軸方向は分解能を上げるため 35 m の等間隔とし、各計算点を中心とした一辺 70 m の正方形内の平均値として、形状パラメータおよびラフネスパラメータの値を求めた。 z 軸方向の分割幅は 2 章に示した 3 次元計算で、水平方向の 1/20 まで安定して計算ができることがわかっているので、地面付近で最小 3.5 m とし、上方にいくにしたがって大きくなるようにした (分割数 21, 不等間隔)。

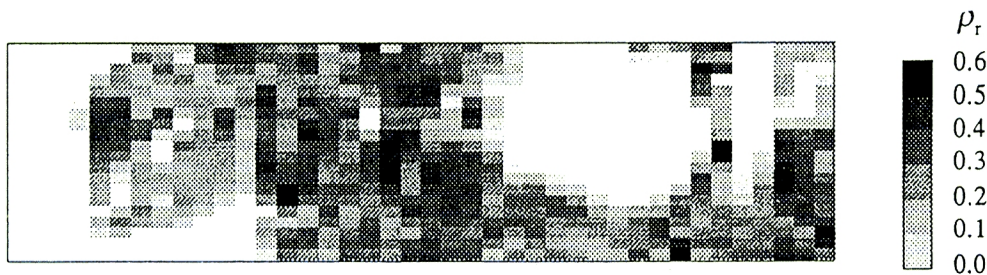


Fig. 13. Distribution of ρ_r (the building density) at the ground.

4.3 大きな建物の取扱い

Fig. 13 に地表面における粗度体積密度 ρ_r の分布を示す。 ρ_r の値は建物の密集度に応じて変化している。また、美術館や体育館、神社仏閣等、規模の大きい建物があるところではメッシュの大きさが十分ではないので ρ_r の値は特に大きくなっている。これを防ぐためにはメッシュの大きさを最も大きな建物よりも大きくしなければならない。ちなみに、今回読み込んだ建物のうちで最大のものは Fig. 11 より、 L の値で約 130 m であるから、メッシュ分割の大きさは少なくともこれ以上必要になる。しかし、メッシュ幅を 130 m

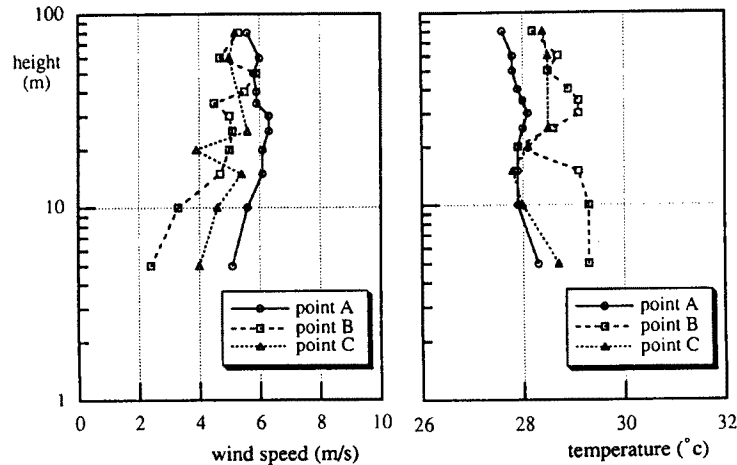


Fig. 14. Observed data of the wind speed and the temperature profiles at point A, B and C. (1985 August 27 14:00~15:00).

とすると、分割数は y 軸方向に約6分割となって、分解能が非常に悪くなり、水平方向の粗度形状の変化による気流性状の変化を予測するにはあまりにも粗くなりすぎる。前段で示したように今回の計算では、建物の大多数を占める通常の建物の大きさは一辺約 50 m までであるので、メッシュ分割幅はそれよりやや大きく 70 m とした。その結果、Fig. 13 に示すように ρ_r の値は数カ所で 0.45 を越えている。文献 1) で示したように、風方角 $\beta=0^\circ$ では粗度体積密度が 0.45 以上で、 $\beta=45^\circ$ では 0.50 以上でラフネスパラメータの値を求めることができない。そのため、それ以上の粗度体積密度を持つ場所では便宜的に、 $\beta=0^\circ$ では粗度体積密度 $\rho_r=0.33$ におけるラフネスパラメータの値を、 $\beta=45^\circ$ では $\rho_r=0.45$ における値を用いて計算を行った。このようにしても、 ρ_r の値が 0.45 を越える計算点は全体の計算点に比較して少ないので、問題は無いと考えた。

4.4 観測データ

観測点 A, B, C では、1985年の夏に風速および温度の鉛直分布形状の同時計測が Katayama らにより気球を用いて行われている²⁾。各観測点における測定は、8月27日の午前10時から翌28日の午前9時まで毎2時間毎に地面に近い方から開始され、高さ方向に11点ずつ高さを変えて行われた。各高度における測定点では5分間の平均値を求めており、高さ方向の気球の移動時間を含めて、鉛直方向の分布を求める1シリーズの測定を約1時間かけて行っている。中立強風状態を再現する計算結果との比較を考えて、1シリーズの測定期間中に次の3つの条件をできるだけ満足するデータを選んだ。

- 1) 海側からの風で、風向変化が少ないこと。
- 2) 高さ方向の温度変化が少ないこと。
- 3) 風速はできるだけ大きいこと。

観測結果のうち上記の条件を最も良く満足するデータを Fig. 14 に示す。図より、解析領域の風上側、海岸近くの観測点 A では乱流境界層は約 25 m まで発達し、境界層内の高さ方向の風速勾配は小さく、その分布形状は滑面上に発達する乱流境界層によく似ていることがわかる。そこで、流入境界の気流条件として、滑面上に乱流境界層を数値計算により発達させ、平均風速の鉛直分布形状が観測結果とほぼ同じになるような計算結果を求め、その値を流入境界面に与えることにした。

4.5 計算結果と観測データの比較

Fig. 15 に計算結果を示す。図は風向角 $\beta=0^\circ$ と 45° に対するラフネスパラメータを用いた計算結果の平

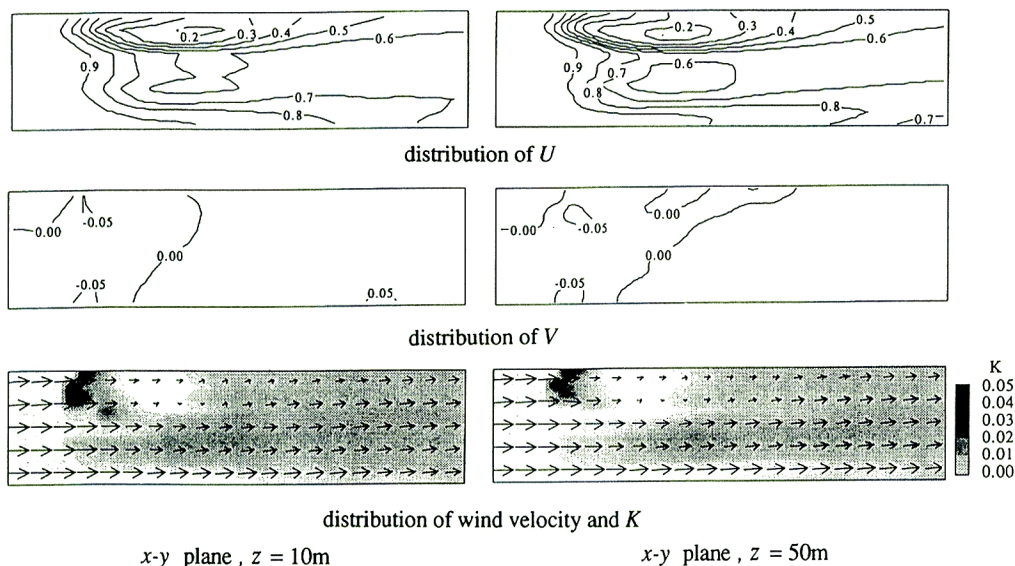


Fig. 15. Results of the simulation over an urban area.

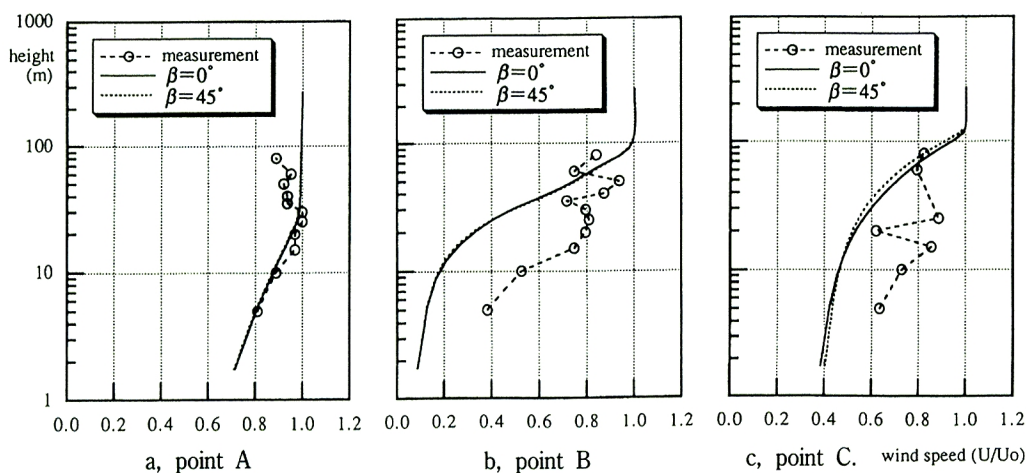


Fig. 16. Comparison of the calculated values with observed data at the point A, B and C.

均値を示してある。図より建物密度が高いところでは風速が x 軸方向に減少し、下流域で風速の値は小さくなっている。また、中央風下側の池では地表面粗度要素が無くなり、地面付近の抵抗が減るために下流にいくにしたがって上空の風速が回復してくる。乱流エネルギーは建物密度が高く、風速も早い場所、正確には空間的な風速変化の大きい場所で高い値を示す。また地面付近で発生した乱れは上方に拡散し、下流では乱れが高高度に及んでいる。

Fig. 16 に観測点 A, B, C における風速の計算結果を測定値とともに示す。図において測定風速は観測点 A における高度 30 m の測定値を U_0 として、計算結果は最も上空の計算値を U_0 としてそれぞれ無次元化してある。風上側の観測点 A においては、計算結果と測定値がほぼ一致している。建物の密集度の高い領域の風下側の観測点 B では、地面付近で風速の減少が大きく、計算結果をみると高度約 30 m までは市街地キャノピーとみなせる。池の風下側の観測点 C では地面付近の風速の回復がみられるが、高度約 40 m 以上では風上側の風速分布形状の影響が残っている。測定値は観測点 B, C ともに、地面付近で計算結果よりかなり大きな値を示し、それぞれ高度 60 m 以上で計算結果とほぼ一致する。また、ラフネスパラメータの風

向角 β の違いによる計算結果の変化は僅かである。

観測値と計算結果が異なる原因を考えてみると、まず風速のゆっくりとした時間変化が挙げられる。観測点Aの風上側には海が広がっているため、境界層内の気流性状は海面の影響だけで殆ど決まっていると考えられる。通常、強風中立状態において境界層上空では風速は高さ方向に一定と見なせるので、観測点Aにおいて高度35m以上で風速の測定値が減少するのは、風速のゆっくりとした時間変化である可能性が高い。しかし、この変化は境界層上空であり、かつ風速は減少しているため、測定値が地面付近で計算結果よりも大きくなる理由にはならないようである。

次に考えられるのは、建物の無い、風通しの良い地点で測定された時間平均値は、時空間平均値よりも大きいということである。測定は気球を上げて行っているため、測定値は建物から離れ、ある程度風通しの良い測定点における時間平均値とみなせる。したがって、平均化体積内で、建物近くの風速の小さい領域を含めた時空間平均値として

求められる計算結果に比べると、測定値は大きな値になると考えられる。実際、立方体粗度ブロック周りの時間平均風速 u の鉛直分布の一例を Fig. 17 に示すと、粗度要素の間、図中測定位置 2, 5 において時間平均風速の値は図中実線で示す時空間平均値よりも大きな値となる。また文献 3) で示したように、時間平均値の鉛直分布形状は粗度高さの約 1.8~2.0 倍で測定位置によらず時空間平均値の鉛直分布に一致する。観測点 B 付近の建物高さは Photo. 3a に示すようにかなり高く、最高で約 30~40 m あるので、時空間平均風速の鉛直分布は建物高さの約 1.5~2 倍以上で測定値とほぼ一致することになる。観測点 C では Photo. 3b に示すように、付近の建物の最高高さは約 20 m である。観測値には高度 30 m から 50 m までの間のデータが欠けているのははっきりしたことは言えないが、上空では測定値は計算結果にほぼ一致し、それは付近の建物の最高高さの約 3 倍となっている。また、3 章より、建物形状の読み込みに用いた資料（航空写真および地図）は、観測時よりも 2~3 年後のデータである。田村ら⁴⁾によると地表面の建物密度が大きくなると、地面付近の風速は小さくなる傾向がある。したがって、風速の計算結果が観測値よりも地面付近で小さくなっているため、観測時よりも建物形状を読み込んだ時点の方が建物の密度が大きくなっている可能性がある。

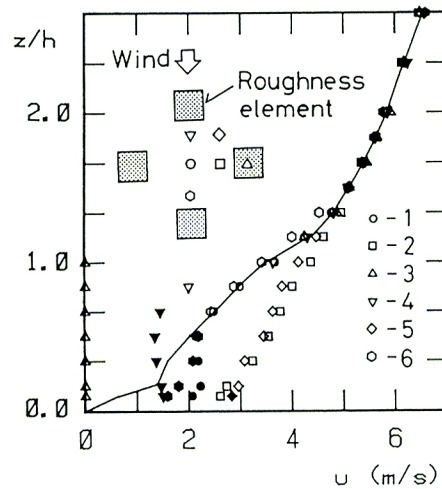
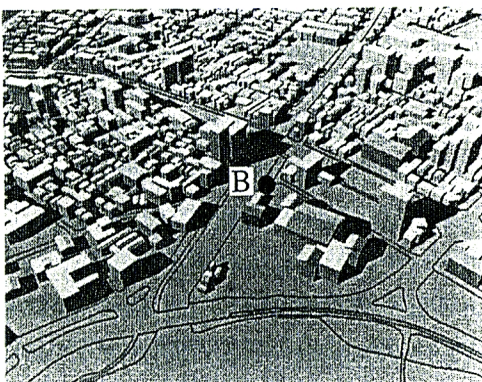
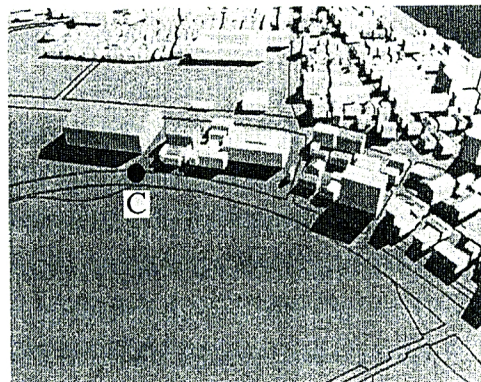


Fig. 17. Variation of the wind speed profiles near the staggered arrayed cubic blocks. — shows the space-time averaged value.



a, Looking at the point B.



b, Looking at the point C.

Photo. 3. Bird's-eye views.

その他、観測時の大気不安定度の影響が考えられる。これまでに自然風中で行われた観測例^{5),6)}をみると、鉛直方向に負の温度勾配が大きくなるほど、すなわち不安定度が大きいほど、べき指数の値は小さくなる。これは、熱による対流によって運動量の交換が促進され、鉛直方向の風速勾配が小さくなると説明できる。この温度勾配による影響は風速が大きくなって、乱れによる運動量の交換の割合が大きくなるにしたがって小さくなる。崔ら⁷⁾によると、高さ10mにおける平均風速が5m/sを超える場合にこの温度勾配の影響をほぼ無視できる。Fig. 14をみると、観測点B、Cにおける観測値は、高さ10m以上で約5m/s前後であり、高さ方向に負の温度勾配も少し存在するので、大気の状態は少し不安定とみなせ、そのために中立状態の計算結果よりも鉛直方向の速度勾配が小さくなり、地面付近で風速が大きくなっている可能性がある。

このように計算結果と観測結果の違いは、計算条件と観測時の諸条件の違いによりある程度説明することができた。したがって、本研究で示した市街地上空の気流性状の予測手法は、強風中立時の時空間平均値を求めることができ、その鉛直分布形状は付近の最高建物高さの約2~3倍以上で位置によらず時間平均風速の鉛直分布とほぼ一致するとみなすことができる。それより地面に近い部分では、位置により時間平均風速の鉛直分布形状は計算結果と異なる。特に、通常自然風中で風速の鉛直分布を求める場合には、建物からある程度離れた風通しの良い位置で測定することが多いので、観測値は計算結果よりも大きな値をとる場合が多くなると考えられる。

5. 耐風設計用風速の鉛直分布形状の予測

最後に計算結果から耐風設計用の平均風速の鉛直分布を予測する方法を考える。Fig. 16bに示す観測点Bの結果を例に考察する。観測点付近で測定された時間平均風速、たとえば付近のビルの最高高さよりも約10m高い $z=50$ mの地点の測定値を基準風速 U_r とし、計算で求めた風速の鉛直分布形状($\beta=0^\circ$ と 45° による計算結果の平均値)を当てはめると、耐風設計用の平均風速の鉛直分布形状はFig. 18の実線のようなになる。前述のように、通常測定値は計算結果よりも大きいので、このように鉛直分布形状を決めると耐風設計用の風速値は実測値よりも安全側になり、かつ風上側の粗度形状の影響を取り込んだ分布形状を持つようになる。ただし地面付近、市街地キャノピー内の風速分布形状については、場所によりかなりの変化が予想されるので、図中の破線で示すように建物高さ以下で一定値、建物高さにおける風速、とするのが良いと考えられる。

6. ま と め

本報では実際の市街地上空の乱流境界層の計算を行うため、3次元の計算手法を示し、風洞実験との比較によりその有効性を確かめた。次に、実際の市街地における建物形状を読み込み、地表面における粗度評価を定量的に行い、市街地における建物形状の特徴を明らかにした。さらに、実際の市街地における建物形状を用いた計算を行い、計算結果と自然風中での観測結果の比較を行って、本研究で開発した予測手法の有効性および適用範囲の検証を行った。最後に、本予測手法により求めた計算結果および観測結果を用いて、耐風設計用風速の鉛直分布形状を予測した。このように、自然風中での観測や実験が困難な場合に本手法は有

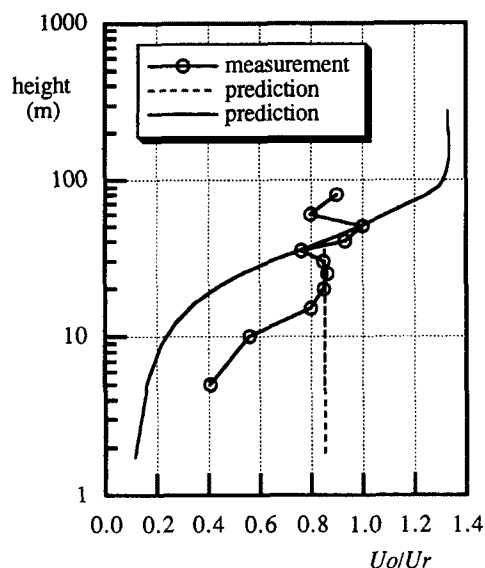


Fig. 18. Predicted wind speed profile for the wind resistant design.

効であり、その計算結果は耐風設計用風速の鉛直分布形状を予測したり、建物周辺等の詳細な気流性状を計算する場合の流入気流条件として用いることができる。

ここで、建物等、物体周りの詳細な数値実験に関しては、高次の乱流モデル、LES法や直接法等を用いることによって、より詳しい3次元流れ場の解析が期待できる。ただし、本手法を用いて予測することのできる種々の物理量は時空間平均値であるため、その結果をLES法や直接法など非定常流れ場の解析に応用するためには、何らかの統計的な手法を用いて、時系列データに変換する必要がある。その他、乱流モデルに熱の影響を取り込む、粗度体積密度が大きくなった場合の取り扱い等が今後の課題である。

謝 辞

建物の形状データを読み込むにあたって、(株)プラス・ワンの協力を得た。また、計算結果との比較のための観測データは、東和大学の堤純一郎氏から提供していただいた。ここに記して謝意を表する。なお、本研究の一部は文部省科学研究費の援助を受けて行われたものである。

参 考 文 献

- 1) 丸山 敬：複雑な粗度形状をもつ粗面の粗度評価について（その2：数値計算におけるラフネスパラメータの検討）、京大防災研年報，第34号B-1，1991，pp. 49-56.
- 2) Katayama, T., J. Tsutsumi, A. Ishii, M. Nishida and M. Hashida: Observations of Heat Flux in an Urban Area with a Large Pond by Kyoons, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 32, 1989, pp. 41-50.
- 3) 丸山 敬：市街地におけるキャノピー層内の風速分布に関する風洞実験，京大防災研年報，第30号B-1，1987，pp. 201-212.
- 4) 田村幸雄・須田健一・松井源吾：設計基準風速についての一考察（建物密度の経年変化を考慮した年最大風速の均質化），日本建築学会論文報告集，第400号，1989，pp. 101-111.
- 5) 佐藤 鑑・後藤 滋・関根 孝・関根 毅・岡 樹生・吉沢 晋他5名：環境工学における市街地風の変動とその影響に関する研究—1（市街地上の風の性状その1），日本建築学会論文報告集，第188号，1971，pp. 57-63.
- 6) Shi Feng Zhang: A Statistical Analysis of the Power Law and the Longarithmic Law Using Wind Data from a 164 m Tower, *Research Note, Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 20, 1981, pp. 117-123.
- 7) 崔 恒，神田 順：風荷重評価のための平均風速と乱れの強さの鉛直分布特性，日本風工学会誌，No. 45, 1990, pp. 23-43.