

## 市街地における建物の密度変化に伴う風速の鉛直分布形状の 変化について

丸 山 敬

### ON THE VARIATION OF WIND PROFILES WITH THE DENSITY OF BUILDINGS AND HOUSES IN URBAN AREAS

By *Takashi* MARUYAMA

#### Synopsis

Configurations of buildings and houses in real urban cities were obtained from maps and aerial photographs. The relation of the number, the scale and the volume of houses and buildings against the number of stories were evaluate from these data. Using these results, three model cities which have different characteristics of roughness configuration in the composition of number of stories were generated virtually. The first model city mainly consists of low rise houses up to 3 storied. The second one consists of low rise houses and middle rise buildings up to 5 storied. The third consists of middle and high rise buildings up to 10 storied. Numerical simulations of wind flows under neutral, strong wind condition over these model cities were carried out. Variations of wind characteristics of turbulent boundary layer with the building density were estimated. The calculated values showed that the mean wind speed decreases, the intensity of turbulence and the vertical gradient of mean wind speed increase when the building density increaes. The variation of these results becomes the largest in case of the second model city which consists of low rise houses and middle rise buildings. Finally predicted values of power law exponent  $\alpha$  of the wind speed profiles for the wind resistant design were presented against the variation of the building density of these three model cities.

#### 1. はじめに

耐風設計用の基準風速の鉛直分布形状は、一般に境界層の厚さやべき指数、粗度長、零面変位等のパラメータで表され、その値は荷重評価基準や指針において、地表面の粗度区分ごとに与えられることが多い。しかし、市街地における粗度形状は一様であることは少なく、複雑な粗度形状をもつことが多い。また、もし粗度形状が一様であったとしても、吹送距離が短いときには流れ方向の気流性状の変化も大きい。このような市街地上空の気流性状を知るために、文献<sup>1)</sup>では粗面上に発達する乱流境界層の3次元計算手法を示し、実際の市街地の建物形状を用いた計算結果と自然風中で測定された観測値との比較を行って、予測手法の有効性を検証し、適用範囲を明らかにした。

本報では、市街地上空の気流性状が地表面上の粗度要素である建物形状、とくに、建物の密度によってどのように変化するかを知るために、強風中立時の数値シミュレーションを行った。計算は文献<sup>2)</sup>で示した数

値計算手法を用い、実際の市街地から読み込んだ建物データを参考に建物構成の異なる3つの市街地の地表面粗度を仮想的に作り出し、地表面における建物密度（ここでは、地表面積に対する建物の水平断面面積の割合とする）の違いによって気流性状がどのように変化するかを調べた。

## 2. 粗度形状

### 2.1. 建物形状の読み込み

計算に用いる地表面粗度形状は、建物構成にそれぞれ異なる特徴を持った市街地を代表する場所として、**Fig. 1**に示す東京都江戸川区小松川付近の $0.4 \times 0.5 \text{ km}^2$ の範囲、**Fig. 2**に示す福岡市大濠公園付近の約 $0.7 \times 2.5 \text{ km}^2$ の範囲および**Fig. 3**に示す東京都中央区日本橋付近の $0.4 \times 0.4 \text{ km}^2$ の範囲を選び、縮尺1/2500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、読み込みの際には以下のルールに従った。

- 1) 建物の屋根形状は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小松川付近で765軒、大濠公園付近で2843軒、日本橋付近で496軒で、**Photo. 1,2,3**にその出力結果を出す。

これらの地域の地表面粗度形状は、それぞれ以下のような特徴を持っている。

- 1) 小松川は中高層のビルはなく、若干の工場、農地を含む住宅街で、読み込んだ範囲内では1～3階建ての一戸建住宅を中心とする低層建物ばかりの地域である。
- 2) 福岡は市の中心部から少し離れた場所で、住宅地、団地、商店街、公園等を含む1～15階建ての低中層建物が混在する地域である。
- 3) 日本橋はわずかに一戸建住宅などを含むが、主に2～10階建ての中層オフィスビルが中心の地域である。

### 2.2. 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、ここでは文献<sup>1)</sup>と同様に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、とく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。以下、建物を屋根形状で2種類、階高で2種類、その組合せで合計4種類に分類し、それぞれ階数と建物数、階数と建物規模の関係を調べてみる。

#### (1) 階数と建物数

各分類ごとの階数と読み込んだ建物数の関係を**Fig. 4**に示す。

小松川 (**Fig. 4.a**): 建物はすべて3階建て以下で、2階建てがもっとも多い。とくに勾配屋根で階高が普通の場合に2階建てが多く全体の約59%を占めている。

福岡 (**Fig. 4.b**): 陸屋根、勾配屋根ともに2階建てがもっとも多く、建物は2階以上で階数の増加とともに減少する。陸屋根で陸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階建ての数が非常に多い。

日本橋 (**Fig. 4.c**): 階高の高い建物は無く、普通の階高をもった建物だけである。陸屋根では4階まで階数が増えるにしたがって建物数も増加し、それ以上では減少する。勾配屋根は2階建てのみで、全体の15%ほどしかなく、住宅が中心となる小松川との違いが表れている。

#### (2) 階数と建物規模

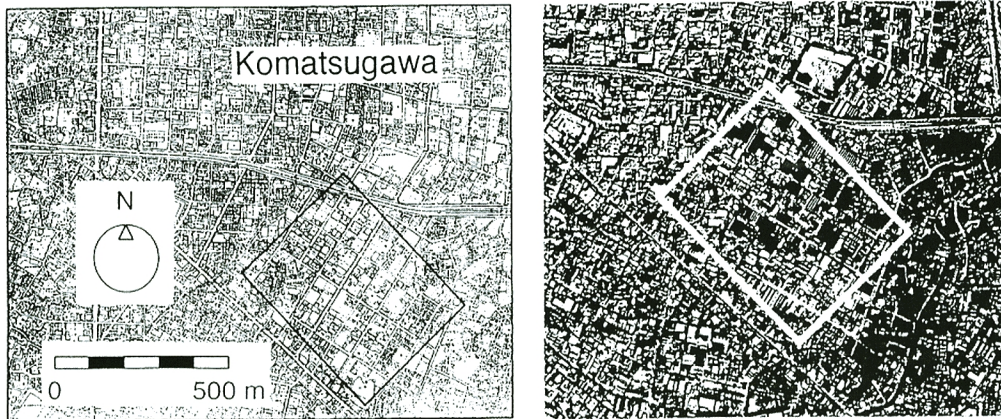


Fig. 1. Region where the configurations of buildings and houses were obtained from the maps and the aerial photographs (Komatsugawa).

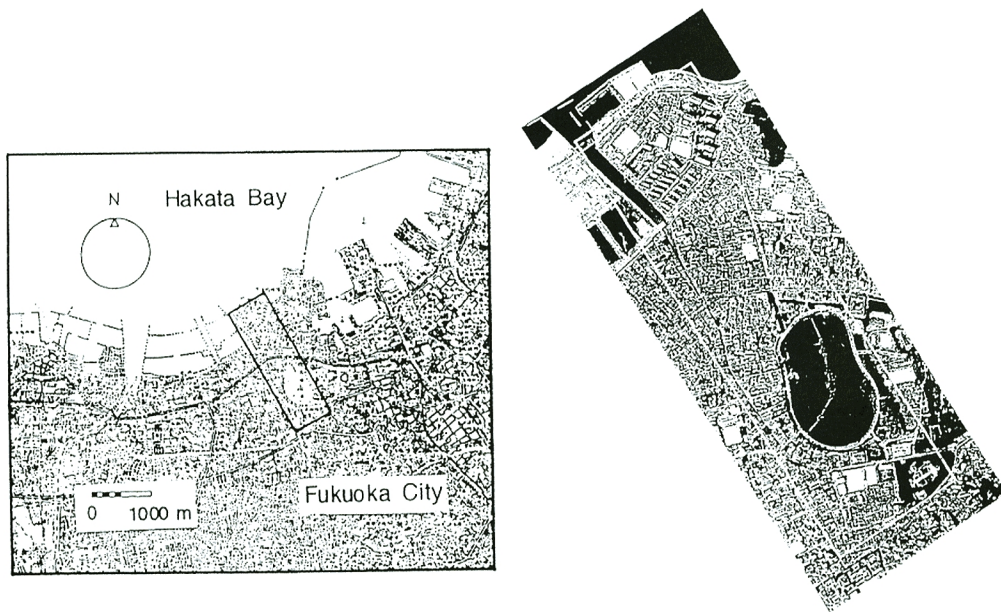


Fig. 2. Region where the configurations of buildings and houses were obtained from the maps and the aerial photographs (Fukuoka).

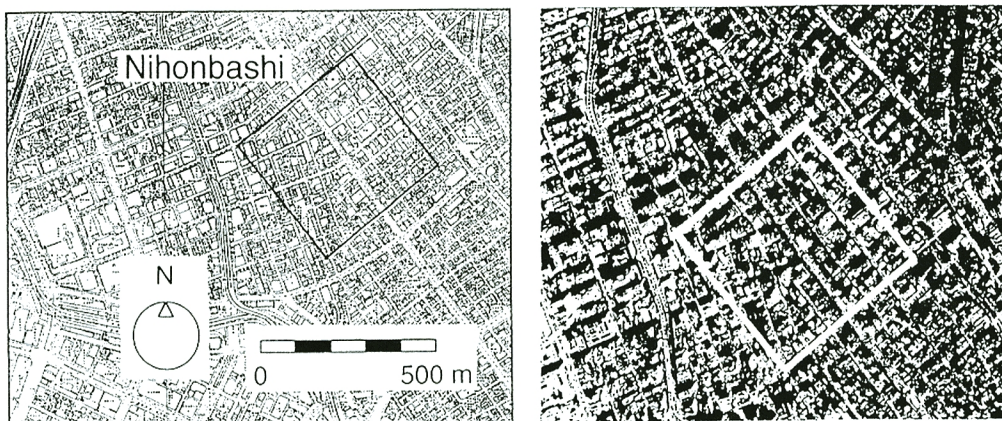
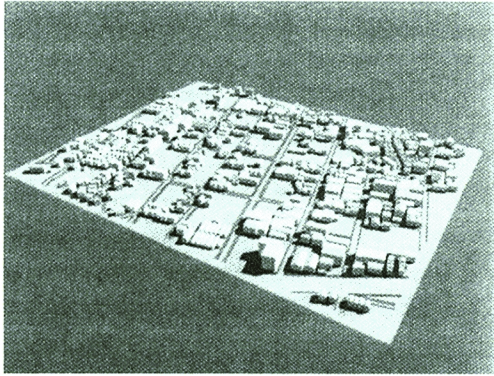
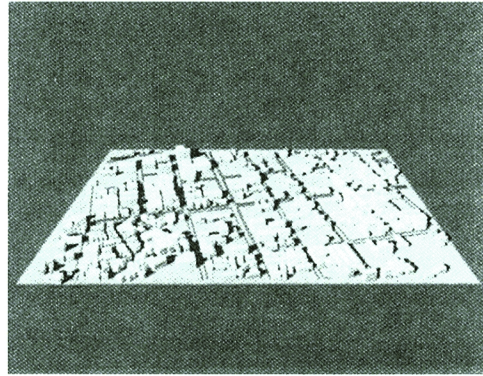


Fig. 3. Region where the configurations of buildings and houses were obtained from the maps and the aerial photographs (Nihonbashi).

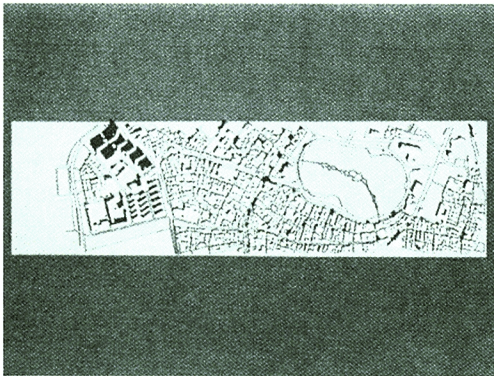


Looking at south direction

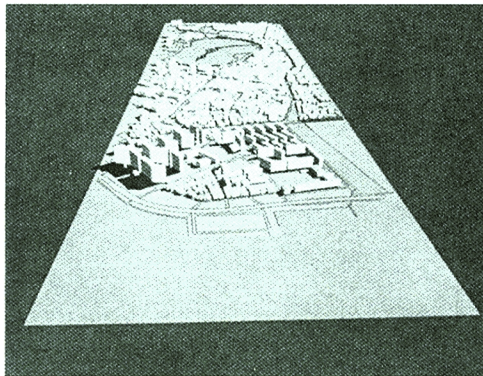


Looking at north east direction

Photo. 1. Output of the data of configuration of buildings and houses (Komatsugawa).

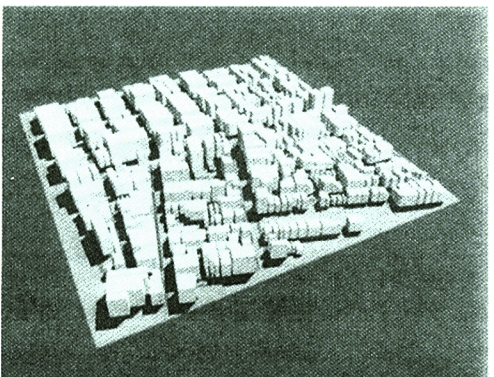


Over view

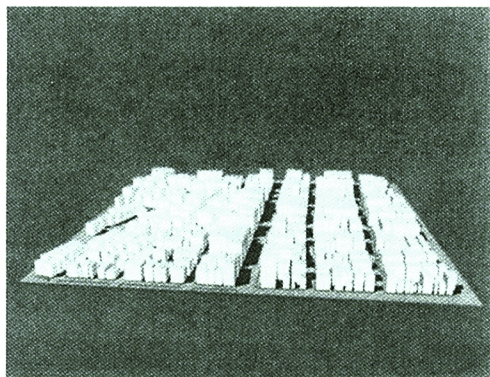


Looking at south east direction

Photo. 2. Output of the data of configuration of buildings and houses (Fukuoka).



Looking at east direction



Looking at north west direction

Photo. 3. Output of the data of configuration of buildings and houses (Nihonbashi).

ここでは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( $=\sqrt{Sf}$ )によって建物の規模を評価する。階数と $L$ および $\sqrt{Sf}$ の関係をそれぞれ Fig. 5,6 に示す。

図をみると、データ数が少ない場合には各関係のばらつきが大きい、全般的な傾向としては階数が増えるにしたがって規模が大きくなり、 $L$ および $\sqrt{Sf}$ の値も大きくなる。階高が普通の建物については、階数

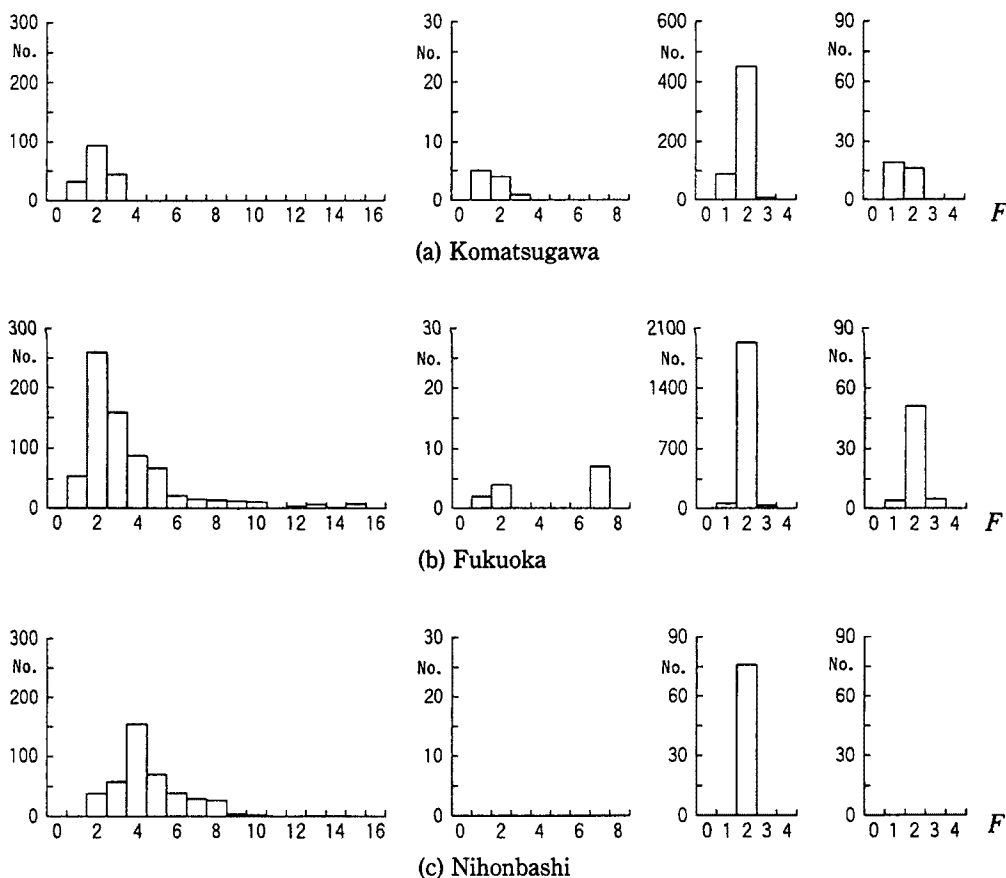


Fig. 4. Variation of the numbers of buildings and houses against the number of stories.

と  $L, \sqrt{Sr}$  の関係を図中の実線のように直線近似することができる。一方、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。さらに、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  $L, \sqrt{Sr}$  の値との間に明瞭な関係を見いだすのが難しい場合がある。階数と  $L, \sqrt{Sr}$  の関係を直線近似することができる場合についてその関係を以下のように求め、図中には実線で示した。

小松川 (Fig. 5.a, 6.a)

1) 階数  $F$  と建物の周長の 4 分の 1 ( $=L$ ) の関係

陸屋根で階高が普通の建物の場合

$$L = 6.6 + 1.3F(m) \dots\dots\dots (1)$$

陸屋根で階高が高い建物の場合

$$L = 11.9 + 4.3F(m) \dots\dots\dots (2)$$

勾配屋根で階高が普通の建物の場合

$$L = 5.7 + 1.0F(m) \dots\dots\dots (3)$$

勾配屋根で階高が高い建物の場合

$$L = 9.2 + 3.1F(m) \dots\dots\dots (4)$$

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

陸屋根で階高が普通の建物の場合

$$\sqrt{Sr} = 6.5 + 1.4F(m) \dots\dots\dots (5)$$

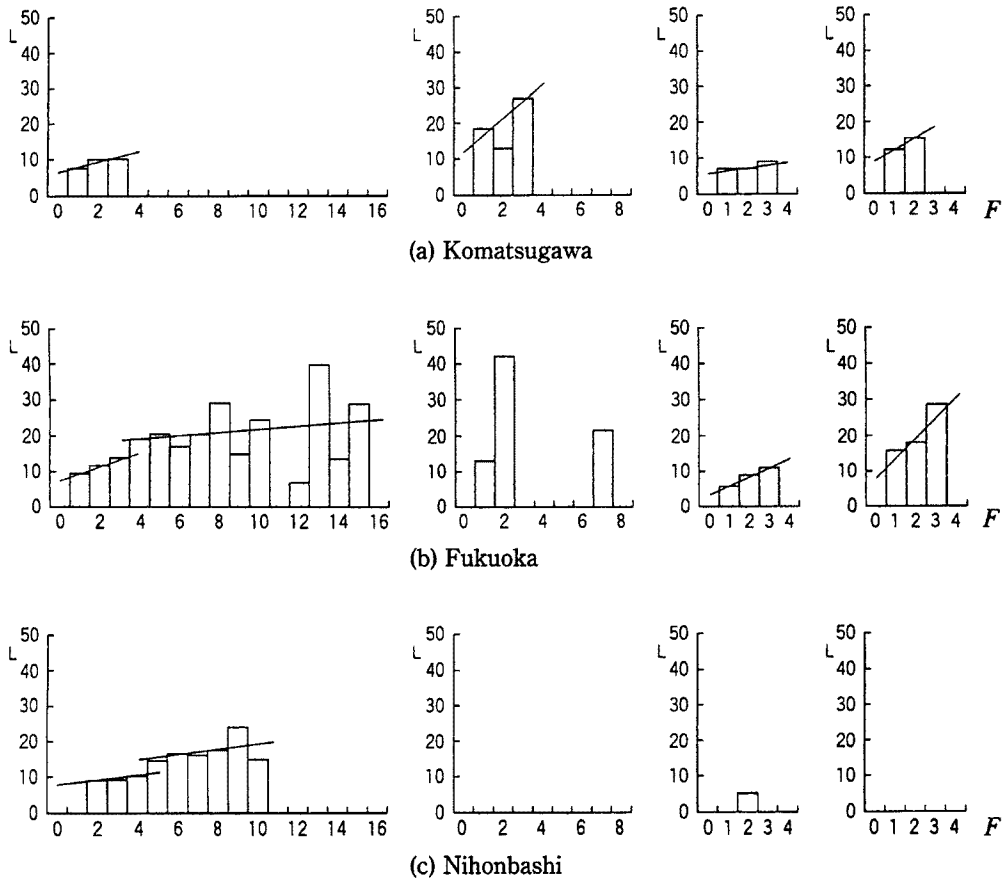


Fig. 5. Variation of  $L$  (the averaged quarter length of buildings and houses) against the number of stories.

陸屋根で階高が高い建物の場合

$$\sqrt{Sr} = 13.3 + 2.7F(m) \dots\dots\dots (6)$$

勾配屋根で階高が普通の建物の場合

$$\sqrt{Sr} = 3.6 + 2.5F(m) \dots\dots\dots (7)$$

勾配屋根で階高が高い建物の場合

$$\sqrt{Sr} = 10.0 + 2.4F(m) \dots\dots\dots (8)$$

福岡 (Fig. 5.b, 6.b)

陸屋根の階高が高い建物については建物のデータ数も少なく、階数と規模の関係を見だしにくいので、階高が普通の建物についてのみ、その関係を求めた。さらに、陸屋根で階高が普通の建物では規模の変化が3階以下と4階以上で異なっているので、この二つを分けて考えた。

1) 階数  $F$  と建物の周長の4分の1 ( $=L$ ) の関係

陸屋根で階高が普通の建物 (3階以下) の場合

$$L = 7.5 + 2.1F(m) \dots\dots\dots (9)$$

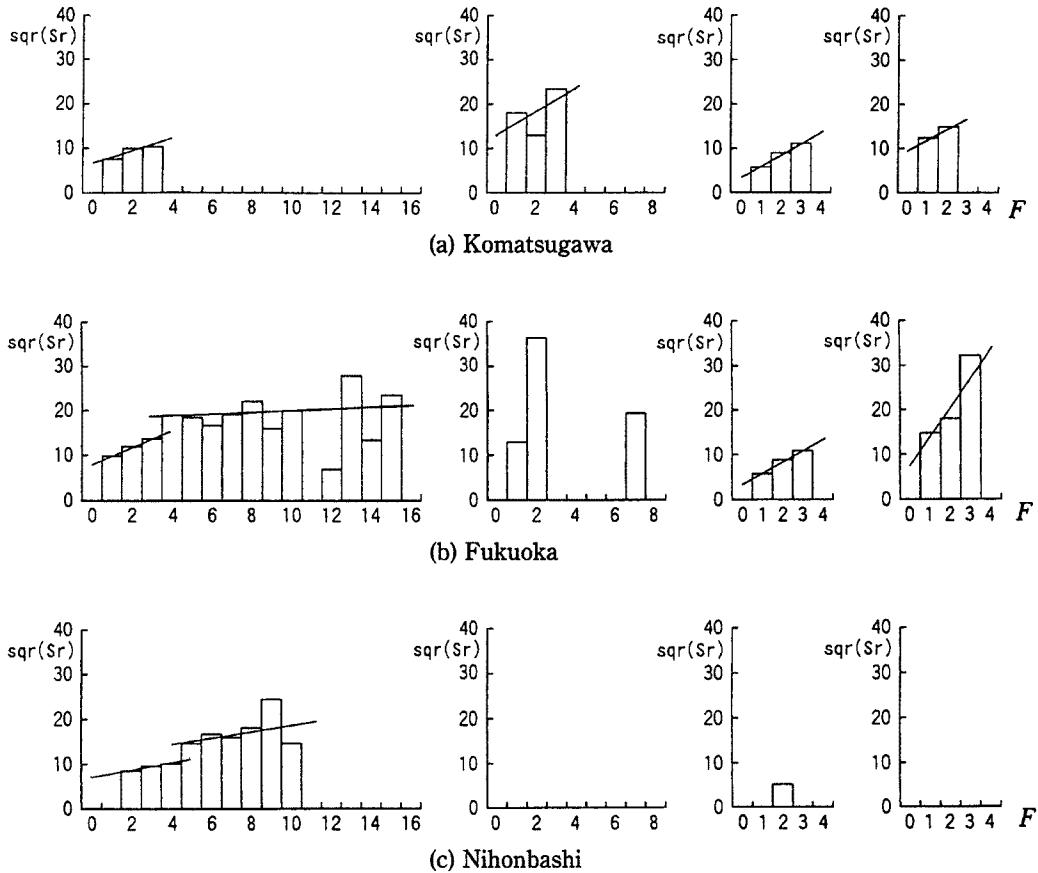
陸屋根で階高が普通の建物 (4階以上) の場合

$$L = 18.0 + 0.4F(m) \dots\dots\dots (10)$$

勾配屋根で階高が普通の建物の場合

$$L = 3.2 + 2.8F(m) \dots\dots\dots (11)$$

勾配屋根で階高が高い建物の場合

Fig. 6. Variation of  $\sqrt{Sr}$  (the square root of the building area) against the number of stories.

$$L = 7.9 + 6.5F(m) \dots\dots\dots (12)$$

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

陸屋根で階高が普通の建物 (3階以下) の場合

$$\sqrt{Sr} = 8.0 + 1.9F(m) \dots\dots\dots (13)$$

陸屋根で階高が普通の建物 (4階以上) の場合

$$\sqrt{Sr} = 18.5 + 0.2F(m) \dots\dots\dots (14)$$

勾配屋根で階高が普通の建物の場合

$$\sqrt{Sr} = 3.6 + 2.5F(m) \dots\dots\dots (15)$$

勾配屋根で階高が高い建物の場合

$$\sqrt{Sr} = 7.9 + 6.5F(m) \dots\dots\dots (16)$$

## 日本橋 (Fig. 5.c, 6.c)

陸屋根で階高が普通の建物では階数の増加にともなって規模が大きくなっているが、4以下と5階以上ではその増え方が異なっているので、この二つを分けて考えた。

1) 階数  $F$  と建物の周長の4分の1 ( $=L$ ) の関係

陸屋根で階高が普通の建物 (4階以下) の場合

$$L = 7.8 + 0.6F(m) \dots\dots\dots (17)$$

陸屋根で階高が普通の建物 (5階以上) の場合

$$L = 11.9 + 0.7F(m) \dots\dots\dots (18)$$

勾配屋根で階高が普通の建物の場合 (2階建てのみ)  
 $L = 5.3(m) \dots\dots\dots (19)$

2) 階数  $F$  と建築面積の平方根 ( $=\sqrt{Sr}$ ) の関係  
 陸屋根で階高が普通の建物 (4階以上) の場合  
 $\sqrt{Sr} = 7.1 + 0.8F(m) \dots\dots\dots (20)$

陸屋根で階高が普通の建物 (5階以上) の場合  
 $\sqrt{Sr} = 12.0 + 0.7F(m) \dots\dots\dots (21)$

勾配屋根で階高が普通の建物の場合 (2階建てのみ)  
 $\sqrt{Sr} = 5.3(m) \dots\dots\dots (22)$

2.3. モデル市街地における地表面粗度形状

前節で得られた建物形状データをもとに、以下のような3つのモデル市街地における地表面粗度形状を仮想的に作り出す。

- モデル市街地 1 : 小松川のデータを基にした、住宅を中心とする低層住宅街
  - モデル市街地 2 : 福岡のデータを基にした、低層から中層建物が混在する地域
  - モデル市街地 3 : 日本橋のデータを基にした、中層建物を中心とするオフィスビル街
- このとき、モデル市街地における粗度形状は以下のようなルールに従って作り出す。

- a) 建物形状の種類構成は読み込んだデータとほぼ同じ割合とする。このとき、階高の高い建物および全読み込み件数の1%以下のものについては影響が少ないとして除き、Fig. 7 に示すような建物構成とする。
- b) 建物の階数と周長および建築面積の関係は式(1)~(22)で表されるとする。
- c) 建物の断面形状は高さ方向に変化しない。
- d) 陸屋根の建物で1階建てのものは住宅とする。
- e) 2, 3階の陸屋根の建物は住宅とオフィスビルが半数づつあるとする。
- f) 陸屋根の建物で4階以上のものはオフィスビルとする。
- g) 勾配屋根 (切妻, 寄棟) の建物は住宅とする。
- h) 勾配屋根の屋根勾配は0.45とする。

- i) 建物の高さ  $h$  (m) は以下のように決める。  
 勾配屋根 (住宅) :  $0.5 + 2.75F + \text{屋根の高さ}$   $1 \leq F \leq 3$   
 陸屋根 (住宅) :  $0.5 + 2.75F + 0.5$   $1 \leq F \leq 3$   
 陸屋根 (オフィスビル) :  $0.5 + 3.5F$   $2 \leq F$

ここで、 $F$  は階数、屋根の高さは建物の幅あるいは奥行きの方の長さ×屋根勾配として求める。

以上のルールに基づいて、3種類のモデル市街地における粗度形状を作り出した。数値計算に必要な形状パラメータである建物密度、 $\rho_r$  (ここでは、地表面積に対する建物の水平断面積の割合とする)、建物の水平断面における平均周長の4分の1、( $=L$ ) および  $x$  軸方向の粗度表面積密度  $a$  の鉛直方向の分布の1例を Fig. 8 に示す。建物の最高高さはモデル市街地 1 の低層住宅街で約 10 m, 2 の低中高層建物が混在する地域で約 15 m, 3 のオフィスビル街で約 30 m で、 $\rho_r$  および  $a$  は高さとともに小さくなる。 $L$  は高くなるほど大きくなり、高い建物ほど規模が大きく周長が長くなることを示している。

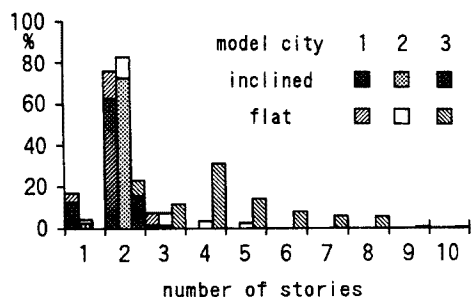


Fig. 7. Composition of the number of stories for three model cities.



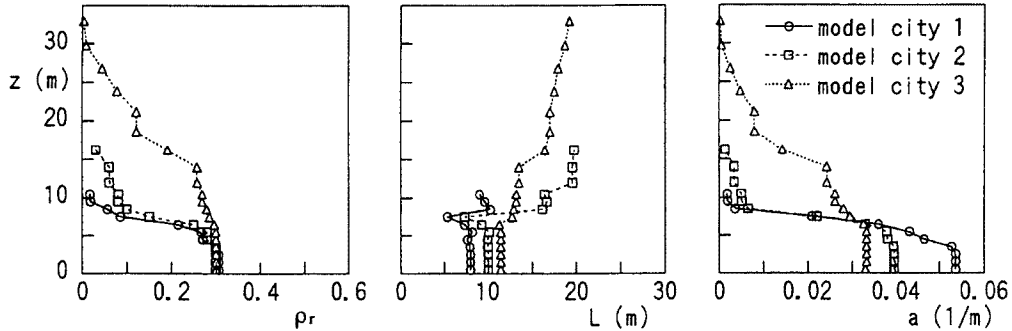


Fig. 8. Vertical variation of  $\rho_r$  (the building density),  $L$  (the averaged quarter length of buildings) and  $a$  (the roughness area density) in case of  $\rho_r(0)=0.3$ .

### 3. 計算手法および解析範囲

#### 3.1. 計算手法

計算には文献<sup>2)</sup>と同様な計算手法を用いた。この方法は市街地上空に発達する乱流境界層内の気流性状を計算する際に、建物形状を地表面粗度として取り込み、各計算点における風速や乱れのエネルギーの時空間平均値を求めることができる。乱流モデル、境界条件は文献<sup>2)</sup>の2次元計算と同じである。計算にはSMAC法、時間に関して二次精度のAdams Bashforceスキーム、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 $\epsilon$ に関して移流項は風上差分)、変数配置はstaggered mesh系を用いた。座標系は主流(吹送距離)方向に $x$ 軸を、鉛直方向に $z$ をとり、計算領域は $x$ 軸方向に約19 kmで全体を4ブロックに分けた。 $z$ 軸方向に最大約750 mの大きさを持ち、高さは約110~750 mまで、吹送距離が長くなるにつれて段階的に高くなるようにとった。 $x$ 軸方向のメッシュ分割は各ブロック内で等間隔にとり、吹送距離の増加にともない各ブロックごとに20~80 mと段階的に増やしていった。 $z$ 軸方向のメッシュ間隔は不等間隔にとり、地面付近でを細かくしてある。 $x$ および $z$ 軸方向の分割幅を半分にした詳細な計算をモデル市街地2の1ケース( $\rho_r(0)=0.3$ の場合)について事前に行い、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。もっとも風上側の流入境界条件としては、滑面上に乱流境界層を計算により発達させ、境界層厚が約60 mになったときの値を用いた。以下、風下側の計算はそれより風上側の各ブロックにおける計算結果を用いた。また、市街地は $x=100$  mから風下側に一様に広がっていると想定し、地表面粗度形状は $x$ 軸方向に一定とした。上方および下流の境界は自由流出条件、上方境界における流れの方向の圧力勾配は零とした。

#### 3.2. モデル市街地におけるラフネスパラメータの値

計算に用いる各高度での建物の形状パラメータ $G(z)=1-\rho_r(z)$ および $a_r(z)$ は2.3.に示した方法で作ったものを使う。また、ラフネスパラメータ $C_{fi}$ 、 $C_{pe}$ の値は $G(z)$ の値から文献<sup>2)</sup>に示した関係を使って求めた。

### 4. モデル市街地における気流性状の計算結果

地表面における粗度形状による気流性状の変化を知るため、3つのモデル市街地において地表面における建物密度 $\rho_r(0)$ を変化させ、 $\rho_r(0)=0.05, 0.1, 0.3, 0.5$ の4種類について気流性状のシミュレーションを行った。また、計算は風向角 $0^\circ$ と $45^\circ$ のラフネスパラメータの値について行った。これは文献<sup>2)</sup>に示したように、

建物に対する風向角が一定でない実際の市街地上空の気流性状は、風向角が  $0^\circ$  と  $45^\circ$  のラフネスパラメータの値を用いた計算結果の間にあると考えられるからである。

モデル市街地2,  $\rho_r(0)=0.3$  の場合について Fig. 9 に風速  $u$  および乱れのエネルギー  $K$  の計算例を, Fig. 10 に  $u$  および  $K$  の鉛直分布の吹送距離方向の変化を示す。図に示されるように、地面付近の風速は粗度による摩擦によって吹送方向に減速し、境界層は厚くなって、鉛直方向の風速勾配は大きくなる。また、鉛直方向の風速勾配は地面付近、とくに、建物の最高高さ以下でもっとも大きくなり、それより上空では高度が高くなるにしたがって小さくなる。ただし、鉛直方向の風速勾配は吹送距離方向に一旦最大値をとった後、小さくなる。乱れのエネルギーもはじめは大きくなるが、一旦最大値をとった後、吹送距離方向に小さくなる。このとき、各位置における乱れのエネルギーは建物の最高高さ付近でもっとも大きくなり、乱れのエネルギーの大きな領域は吹送距離とともに上空に広がっていく。

これらの変化を、耐風設計用の基準風速を求める場合に重要となる境界層の暑さや平均風速、乱れの強さ、べき指数の吹送距離方向の変化として求め、粗度形状の違いによってどのように変化するかを調べてみる。

4.1. 境界層厚の変化

境界層厚の吹送距離方向の変化を Fig. 11 に示す。図の縦軸には境界層厚  $\delta$  (ここでは、境界層上部の自由流  $U_0$  の99%に達する高さとして定義する) を、横軸には吹送距離  $x$  を、共に対数目盛りでとってある。なお、市街地は  $x=0.1$  (km) から始まっている。計算は風向角  $0^\circ$  と  $45^\circ$  のラフネスパラメータの値について

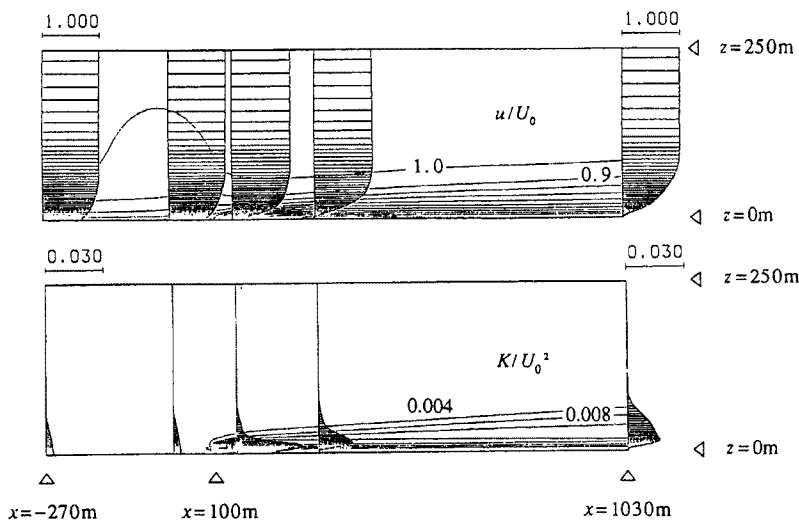


Fig. 9. Distributions and profiles of simulated values of  $U$  (mean wind speed) and  $K$  (kinetic energy) in  $x$ - $z$  plane.

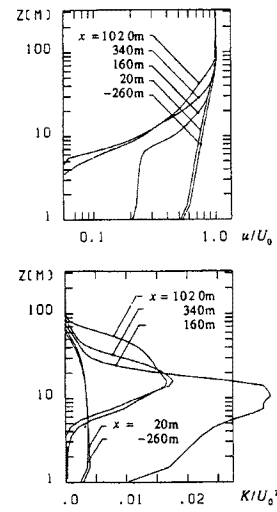


Fig. 10. Variation of  $U$  (mean wind speed) and  $K$  (kinetic energy) profiles with fetch  $x$ .

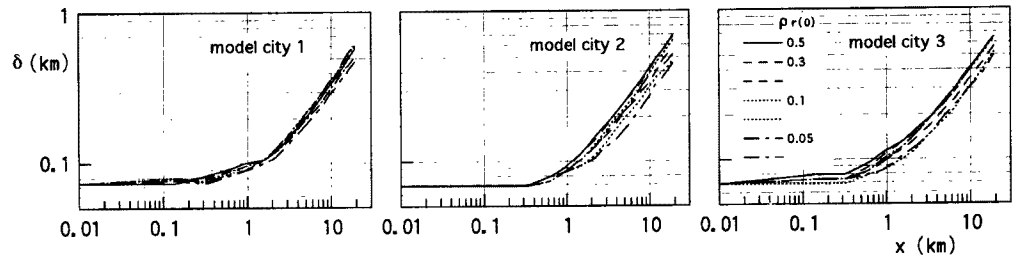


Fig. 11. Variation of the thickness of turbulent boundary layer  $\delta$  with fetch  $x$ .

行っているため、各モデル市街地において地表面における建物密度  $\rho_r(0)$  それぞれについて風向角  $0^\circ$  と  $45^\circ$  の2つの計算結果があり、その両方を示してある。ただし、文献<sup>2)</sup>に示したように、風向角  $0^\circ$  に対するラフネスパラメータの値は建物密度が0.33より大きいときには求められないので  $\rho_r(0)=0.5$  についての計算は行っていない。したがって、 $\rho_r(0)=0.5$  についての計算結果は風向角  $45^\circ$  についてのみ示す。なお、風向角  $45^\circ$  に対するラフネスパラメータの値は文献<sup>2)</sup>の結果より  $\rho_r(0)=0.45$  における値を用いて外挿した。このとき、建物に対する風向角が一定でない実際の市街地における値は、風向角  $0^\circ$  と  $45^\circ$  の計算結果の間にあると考えて考察を進める。なお、平均風速、乱れの強さ、べき指数の吹送距離方向の変化についても同様である。

図より、境界層厚は建物構成によらず0.3 km 付近から増えはじめ、約1.5~2 km 以上ではグラフ上ではほぼ直線近似ができるようになる。モデル市街地1, 2, 3ともほぼ同様な変化をし、地表面における建物密度  $\rho_r(0)$  が大きくなるほど境界層は厚くなる。 $\rho_r(0)$  によるばらつきは低層建物と中層建物が混在しているモデル市街地2がもっとも大きく、以下、中層建物が中心のモデル市街地3、低層建物が中心のモデル市街地1の順に小さくなる。

#### 4.2. 気流性状の変化

計算結果より平均風速  $u$ 、乱れの強さ  $I(\equiv \sqrt{u'^2}/u)$ 、べき指数  $\alpha$  を求め、粗度形状の違いによる変化を調べる。計算結果をまとめるにあたり、平均風速については流入境界における高さ  $z=10$  m の平均風速を基準風速  $U_r$  とし、 $U_r$  に対する平均風速の割合  $u/U_r$  として求めた。乱れの強さは、計算で求めた乱れのエネルギーをもとに、文献<sup>3)</sup>から  $u^2:v^2:w^2:=16:9:4$  として  $I=\sqrt{u'^2}/u$  の値を求めた。べき指数  $\alpha$  に関しては、平均風速  $u$  の鉛直方向の勾配が高さによって変化するので、鉛直分布形状をグラフにプロットしたときの各高度における接線の勾配として求めた。各モデル市街地における計算結果を Fig. 12, 13 に示す。

##### (1) 高さによる変化

各モデル市街地において地表面における建物密度  $\rho_r(0)$  別に気流性状の変化の様子を Fig. 12 に示す。図より各高度における平均風速はある吹送距離に達すると大きく変化し始め、鉛直方向の  $u/U_r$  の比も上流の値と異なり始める。同様なことが乱れの強さ、べき指数の吹送距離方向の変化にもいえるが、これは市街地上の乱流境界層が流入気流に対して内部境界層として発達し、気流性状の変化が始まる位置までその影響が及んできたことを示している。この位置は高さによって異なり、高度が上がるにしたがって風下側に移動する。

一般に平均風速は吹送距離方向に減少するが、大きく減少し始めるまえに一旦わずかに増加する。この増加量は建物構成や密度によって変わるが、高度が高いほど、 $\rho_r(0)$  が大きいほど、また、モデル市街地2, 3のように高い建物の割合が増加するほど大きくなる傾向がある。さらに、モデル市街地1, 3では低いところで風速が一旦回復するのがみられ、この回復量も  $\rho_r(0)$  が大きいほど大きい。乱れの強さおよびべき指数も平均風速が大きく減少し始める位置で増加し始める。このとき、乱れの強さは始めのうち急激に増加するが吹送距離とともに増加量は小さくなっていく。モデル市街地1,3では低い高度で極大値をとるのがみられ、風速の低い高度での回復に対応している。べき指数は吹送距離方向に一旦増加し、最大値をとった後、減少する。この最大値をとる位置は、平均風速および乱れの強さの変化が大きいところに対応している。以後、平均風速、乱れの強さ、べき指数の変化は吹送距離とともに小さくなり、鉛直方向の変化も小さくなって、乱流境界層は平衡状態に近づいていく。

##### (2) 地表面における建物密度 $\rho_r(0)$ による変化

次に  $\rho_r(0)$  による違いを高さ別にみてもみる。前述のように平均風速、乱れの強さ、べき指数の値は高さによって異なるが、文献<sup>1)</sup>によると、平均風速の鉛直分布形状に関しては最高建物高さの約1.5~3倍以上で位置によらず観測値とほぼ一致することがわかっている。計算に用いた建物の最高高さは、モデル市街地1で約10 m、2で約15 m、3で約30 m なので、それぞれ20 m 以上、30 m 以上、40 m 以上で比較を行う。Fig. 13 より各高度で建物密度の増加とともに平均風速の減少量、乱れの増加量、べき指数の増加量は大き

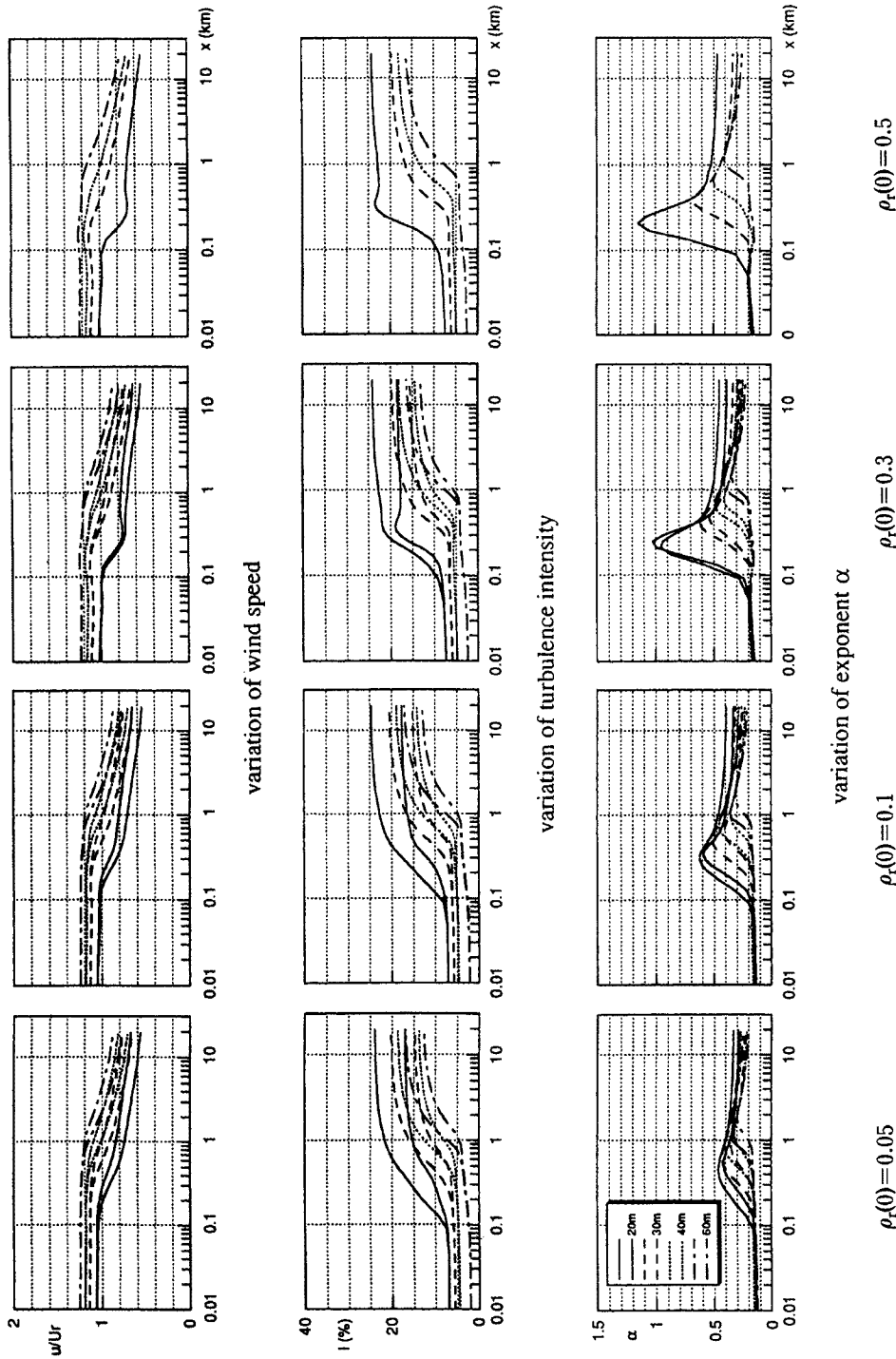


Fig. 12.a. Variation of simulated values with the building density  $\rho_r(0)$  over model city 1.

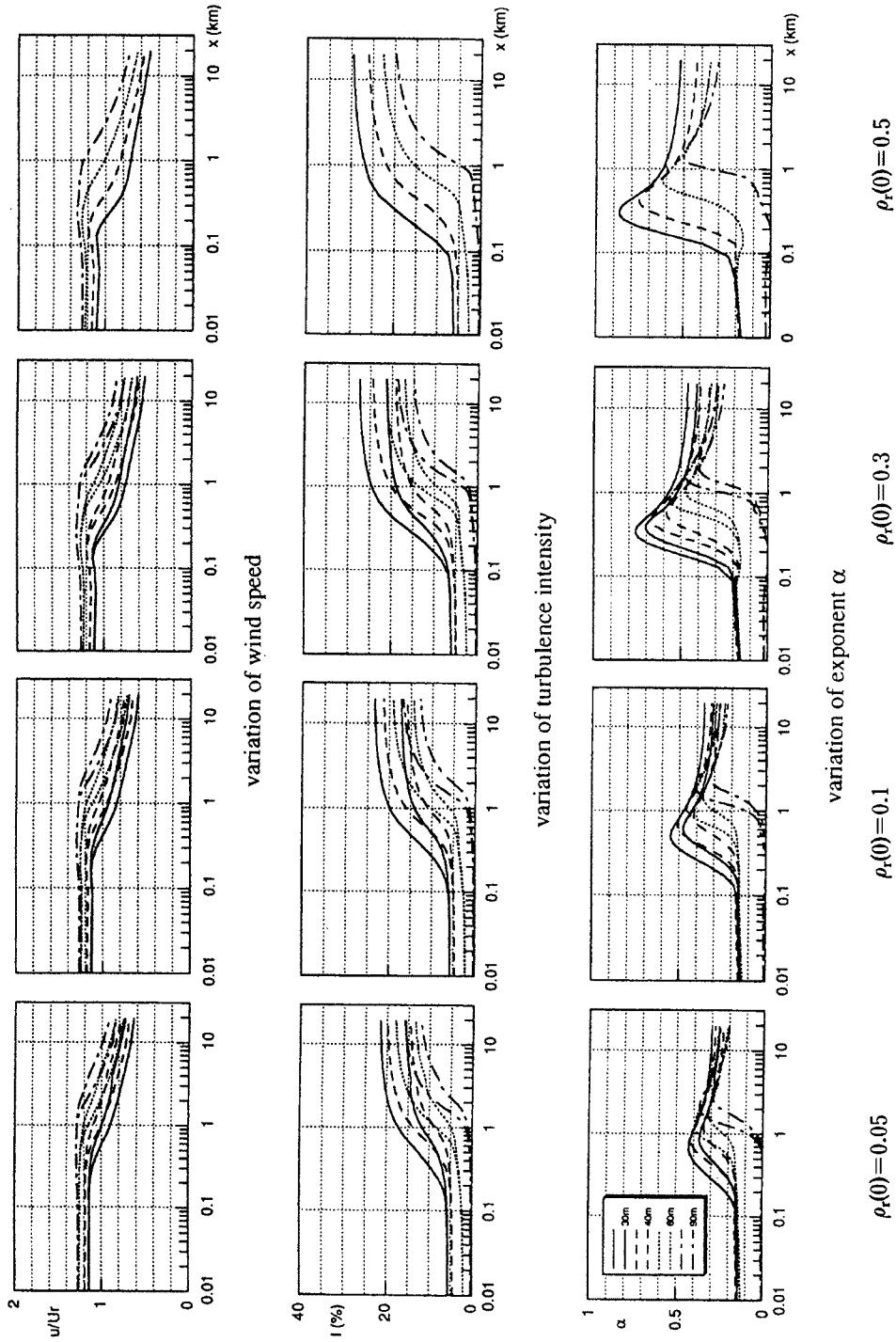


Fig. 12.b. Variation of simulated values with the building density  $\rho_t(0)$  over model city 2.

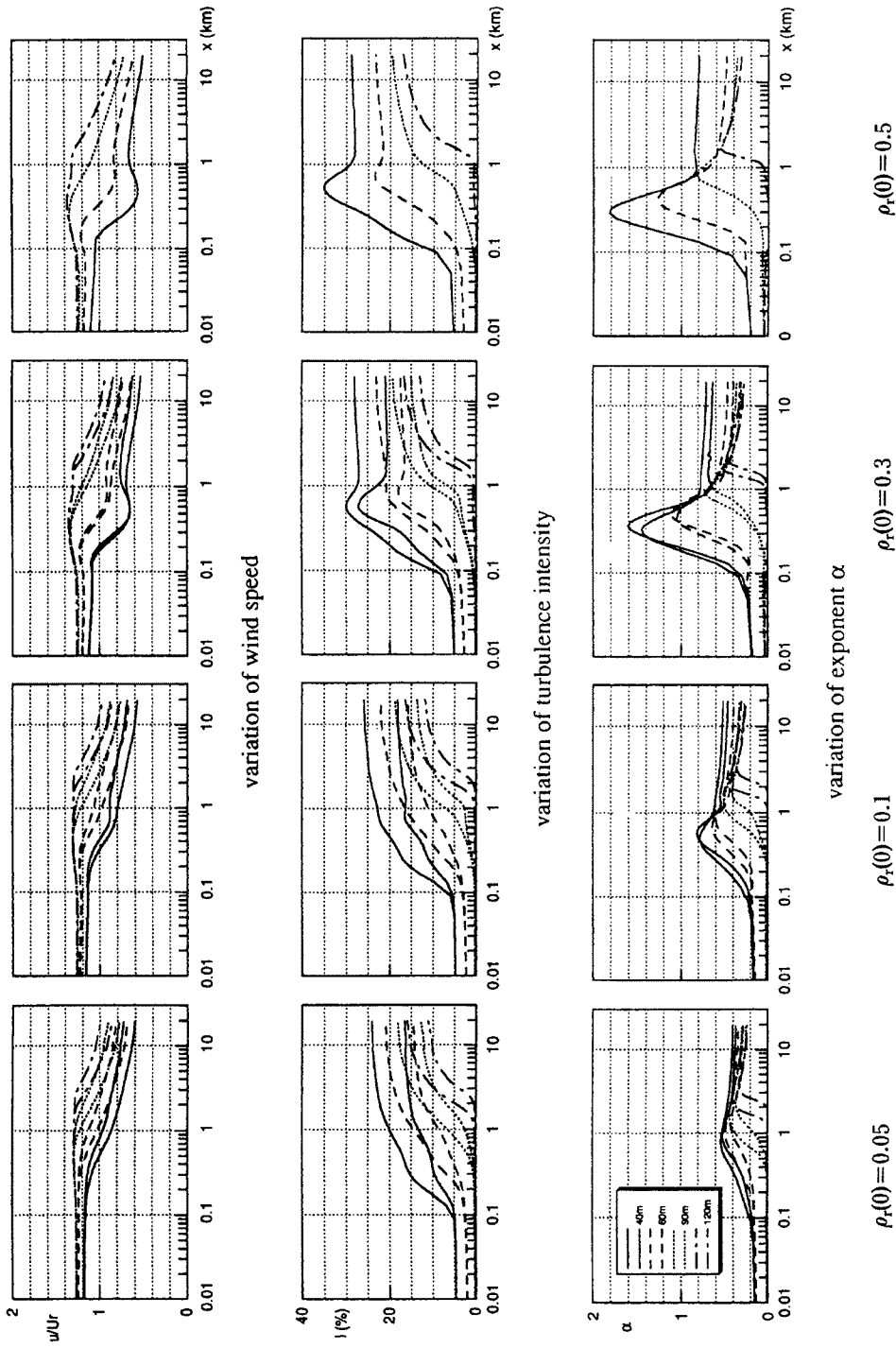
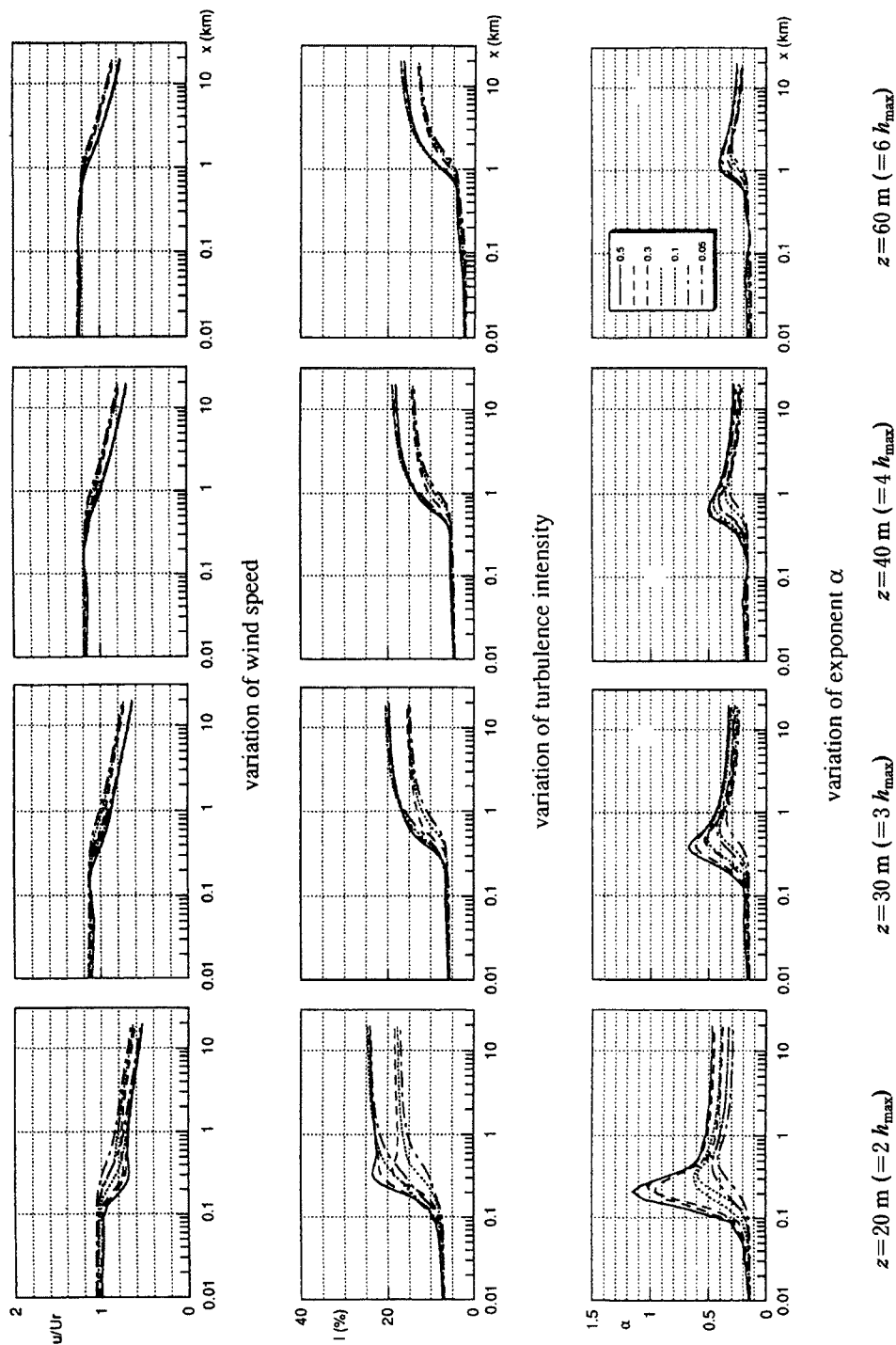


Fig. 12.c. Variation of simulated values with the building density  $\rho_r(0)$  over model city 3.



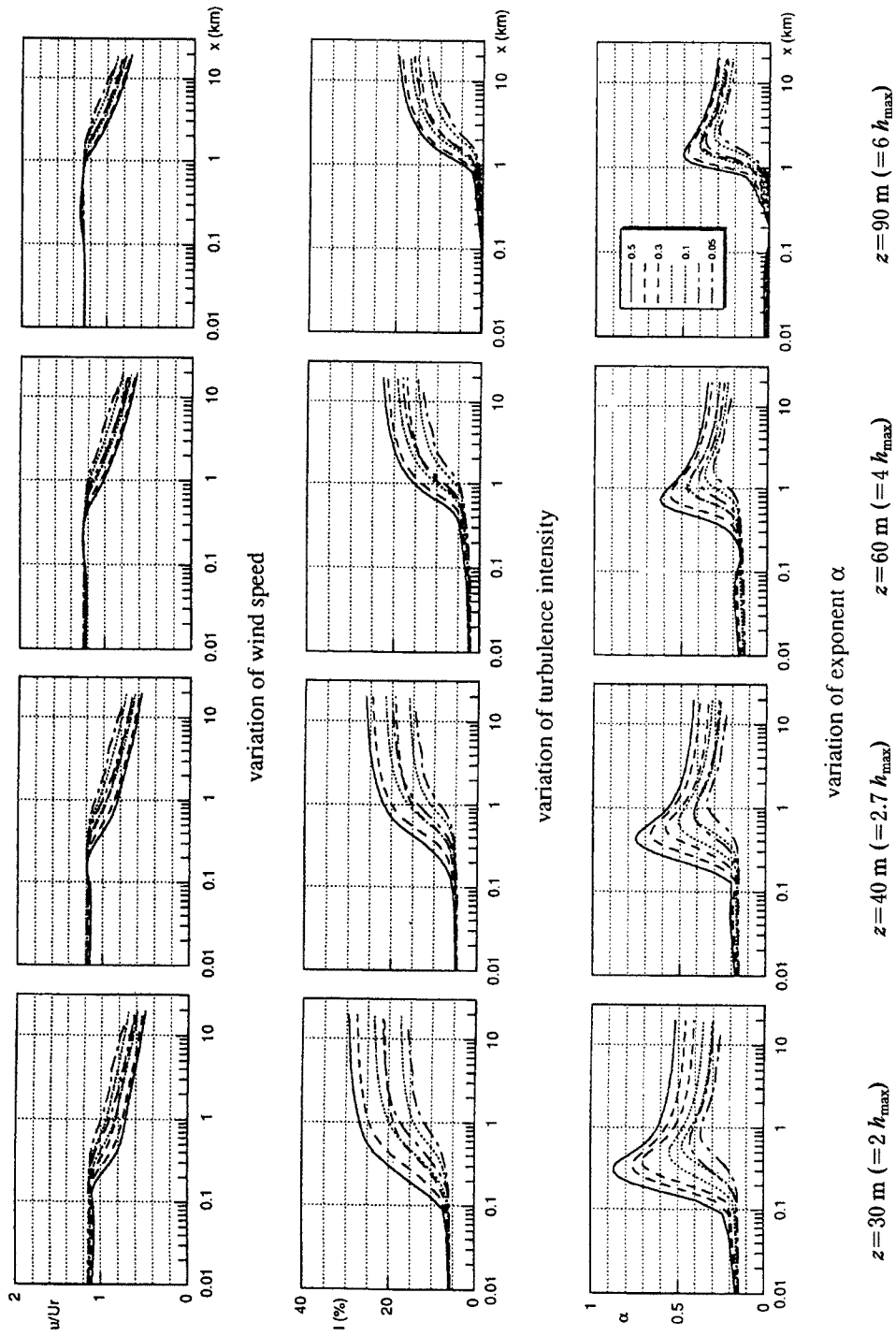


Fig. 13.b. Variation of simulated values with the height  $z$  over model city 2.



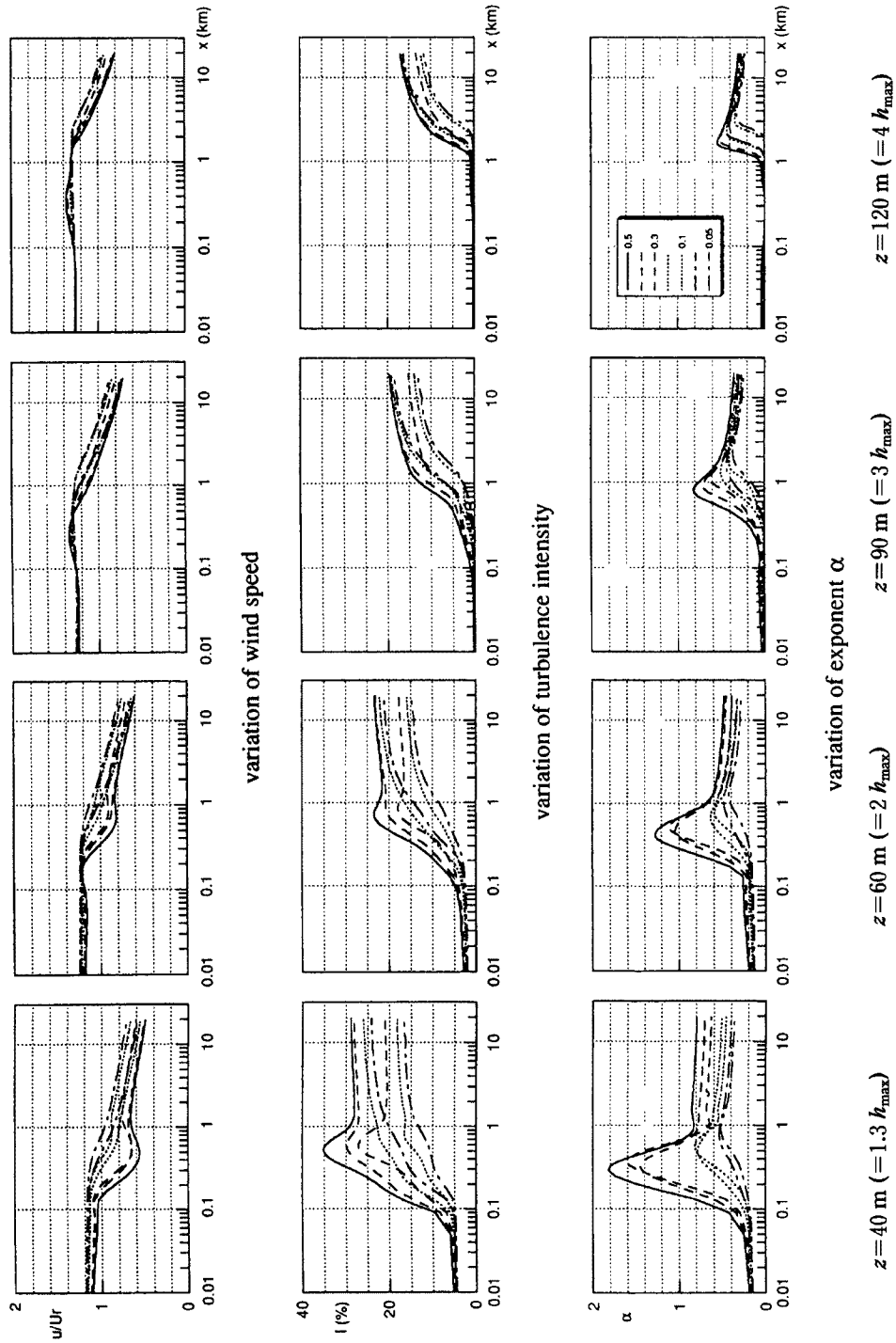


Fig. 13.c. Variation of simulated values with the height  $z$  over model city 3.

くなることがわかる。ただし、吹送距離が大きくなると建物密度の違いによる変化の差は小さくなっていく。また、建物密度の違いによる平均風速、乱れの強さ、べき指数の値自体の差も吹送距離が大きくなる、あるいは、高度が高くなるにしたがって小さくなっていく。さらに各高度における建物密度の違いによる差は、低中層建物が混在しているモデル市街地2でもっとも大きく、以下、中層建物が中心のモデル市街地3、低層建物が中心のモデル市街地1の順に小さくなる。

5. 考 察

前章で明らかになった気流性状の変化を参考にして、耐風設計上もっとも基本となる平均風速の鉛直分布形状について考察する。

平均風速の鉛直分布形状をべき指数の値としてみると、その変化は吹送距離とともに小さくなり、鉛直方向の変化も小さくなる。Fig. 12, 13をみると、建物構成や密度によらず、吹送距離が10 kmを越えるとき、べき指数の変化はかなり小さくなる。日本の市街地において吹送距離が10 kmを越える場合はかなり多いので、この範囲の結果を用いて評価しても実用上適用範囲は広いと考えられる。一例として、モデル市街地2、 $\rho_r(0)=0.3, x=19.2$  kmの場合について Fig. 14に平均風速の鉛直分布を示す。この位置で境界層厚は約700 mに達し、乱流境界層はかなり発達している。図に示すように平均風速の鉛直方向の変化も上空では小さくなり、建物の最高高さ  $h_{max}$  の3倍以上ではグラフの傾きもほとんど一定となり、べき指数もほぼ一定値をとるようになる。また、文献<sup>1)</sup>に示した様に、観測値との比較においても計算結果は  $h_{max}$  の1.5~3倍以上ではほぼ一致し、それより下では気流性状が地面上の局所的な粗度形状に左右されて不均一になり、通常、計算値のほうが観測値よりも小さくなる。したがって、耐風設計用の風速分布は地面付近の影響が及ばなくなる高度、すなわち、建物の最高高さの3倍以上での鉛直分布形状をもって求めるのが妥当だと考えられる。

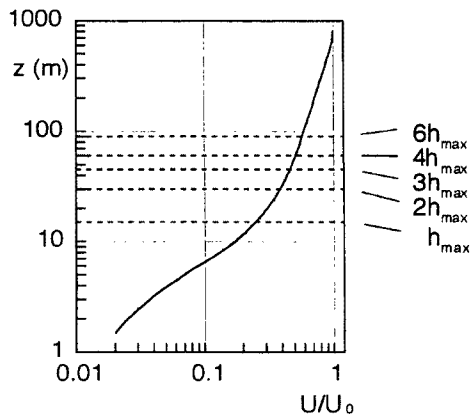


Fig. 14. Wind speed profile at  $x=19.2$  km, model city 2,  $\rho_r(0)=0.3$ .

以上の考察をもとに、吹送距離  $x=10.0$  km および  $19.2$  km におけるべき指数の値を  $z=4h_{max}$  において求め、建

	$1/n$ $\alpha$	$1/5$ 0.2	$1/4$	$1/3$
model city 1			← .05 → ← .1 → ← .3 → $\rho_r(0)=0.5$ →	
model city 2			← .05 → ← .1 → ← .3 → $\rho_r(0)=0.5$ →	
model city 3			← .05 → ← .1 → ← .3 → $\rho_r(0)=0.5$ →	
$x=10.0$ km				
	$1/n$ $\alpha$	$1/5$ 0.2	$1/4$	$1/3$
model city 1			← .05 → ← .1 → ← .3 → $\rho_r(0)=0.5$ →	
model city 2			← .05 → ← .1 → ← .3 → $\rho_r(0)=0.5$ →	
model city 3			← .05 → ← .1 → ← .3 → $\rho_r(0)=0.5$ →	
$x=19.2$ km				

Table 1. Variation of power exponent  $\alpha$

物構成（住宅を中心とする低層住宅街：モデル市街地 1，低層から中層建物が混在する地域：モデル市街地 2，中層建物が中心となるオフィスビル街：モデル市街地 3）および地表面における建物密度  $\rho_r(0)$  の違いによる変化を Table 1 にまとめた。表中、矢印は風向角  $0^\circ$  と  $45^\circ$  の計算結果の範囲を示し、実際の市街地における値はその間にあることを表わす。また、 $\rho_r(0)=0.5$  についての計算は風向角  $45^\circ$  の結果しかないので、矢印は片方しか示していない。表より、べき指数の値は大体 0.2 から 0.35 の範囲で変化する。吹送距離が短い ( $x=10.0$  km) 場合の方がべき指数の値は大きい、差はあまりない。同じ建物構成の場合には、地表面における建物密度が大きくなるほどべき指数の値は大きくなる。また、建物密度の違いによる変化は低層から中層建物が混在する市街地（モデル市街地 2）においてもっとも大きく、以下、中層建物が中心となるオフィスビル街（モデル市街地 3）、住宅を中心とする低層住宅街（モデル市街地 1）の順に小さくなる。

## 6. ま と め

本報では、市街地上空の気流性状が地表面上の粗度要素である建物形状、とくに、建物の密度によってどのように変化するかを知るために、強風中立時の数値シミュレーションを行った。計算に先立ち、建物構成が異なる 3 ヶ所の実在する市街地を選び、地図および航空写真を参考に建物データを読み込んで、それぞれの市街地における階数と建物数、階数と建物規模の関係を定量的に調べた。得られたデータをもとに、住宅を中心とする低層住宅街、低層から中層建物が混在する地域および中層建物が中心となるオフィスビル街という 3 つのモデル市街地における地表面粗度形状を仮想的に作り出し、数値シミュレーションを行った。計算は各モデル市街地に対して地表面における建物密度を変えて行い、建物密度の違いによって気流性状がどのように変化するかを調べた。計算結果より境界層の厚さや平均風速、乱れの強さ、べき指数の吹送距離方向の変化を定量的に求めた。以下に結果をまとめる。

1) 境界層厚は吹送距離方向に増加し、約 1.5~2 km 以上では境界層厚と吹送距離の関係を両対数で示したグラフ上ではほぼ直線近似できるようになる。このとき、地表面における建物密度が大きくなるほど境界層は厚くなる。また、建物密度によるばらつきは低層建物と中層建物が混在している市街地がもっとも大きく、以下、中層建物が中心の市街地、低層建物が中心の市街地の順に小さくなる。

2) 平均風速は吹送距離方向に減少する。各高度における平均風速は高さが低いほど、地表面における建物密度が大きいほど、建物の高さが高いほど小さくなる。さらに、建物密度の違いによる平均風速のばらつきは、低中層建物が混在している市街地でもっとも大きく、以下、中層建物が中心の市街地、低層建物が中心の市街地の順に小さくなる。また、平均風速の減少の割合は吹送距離とともに小さくなり、鉛直方向の変化も小さくなる。

3) 乱れの強さは吹送距離方向に増加する。各高度における乱れの強さは高さが低いほど、地表面における建物密度が大きいほど、建物の高さが高いほど大きくなる。乱れの強さの増加量は建物密度の増加とともに大きくなるが、吹送距離が大きくなると建物密度の違いによる差は小さくなる。さらに、各高度における建物密度の違いによる差は、低中層建物が混在している市街地でもっとも大きく、以下、中層建物が中心の市街地、低層建物が中心の市街地の順に小さくなる。また、増加の割合は吹送距離が短いときに大きい、吹送距離とともに小さくなる。

4) べき指数は吹送距離方向に一旦増加し、最大値をとった後、減少する。この最大値をとる位置は、平均風速および乱れの強さの変化が大きいところに対応している。各高度におけるべき指数の値は高さが低いほど、地表面における建物密度が大きいほど、建物の高さが高いほど大きくなる。べき指数の増加量は、建物密度の増加とともに大きくなるが、吹送距離が大きくなると建物密度の違いによる差は小さくなる。さらに、建物密度の違いによる差は、低中層建物が混在している市街地でもっとも大きく、以下、中層建物が中心の市街地、低層建物が中心の市街地の順に小さくなる。

これらの結果をふまえ、平均風速の鉛直分布形状をべき指数の値として評価し、実用上の適用範囲が広い

ように、乱流境界層が充分発達した場合を想定し、10 km を越える吹送る距離をもつ市街地における最高建物の4倍の高さにおけるべき指数を耐風設計用の値として求めた。その結果、

5) べき指数の値は建物構成、建物密度および吹送距離によって0.2から0.35の範囲で変化する。吹送距離が短い場合の方がべき指数の値は大きい、10.0 km から 19.2 km の範囲ではあまり差がない。同じ建物構成の場合には、地表面における建物密度が大きくなるほどべき指数の値は大きくなる。また、建物密度の違いによる変化は低層から中層建物が混在する市街地においてもっとも大きく、以下、中層建物が中心となるオフィスビル街、住宅を中心とする低層住宅街の順に小さくなることがわかった。

#### 謝 辞

建物の形状データの読み込みにあたって協力していただいた、京都大学川面賢氏、㈱プラスワンおよび㈱風工学研究所に謝意を表す。なお、本研究の一部は文部省科学研究費による補助を受けて行われたものである。

#### 参 考 文 献

- 1) 丸山 敬：市街地上空の乱流境界層のシミュレーション, 京都大学防災研究所年報, 第35号 B-1, 1992, pp. 121-135.
- 2) 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), 京都大学防災研究所年報, 第34号 B-1, 1991, pp. 49-56.
- 3) Counihan, J.: Adiabatic atmospheric boundary layers: A review and analysis of data from the period 1880-1972, Atmospheric Environment Vol. 9, 1975, pp. 871-905.