

市街地上空における気流性状の数値計算

その2 建物の密度変化に伴う平均風速および乱れの強さの変化

NUMERICAL SIMULATION OF WIND FLOW OVER URBAN AREA

Part 2 Variation of mean wind speed and turbulence intensity
due to the density of buildings and houses

丸山 敬*

Takashi MARUYAMA

Using the numerical simulation of the turbulent boundary layer over rough surfaces with a refined $k-\epsilon$ turbulence model presented previous paper, a series of calculations were done on the characterized model cities. The change of the mean wind speed and the turbulence intensity due to the configuration of surface roughness was investigated. The variation of the thickness of the boundary layer, the profile of the mean wind speed and the intensity of turbulence against the density of surface roughness, i.e. buildings and houses, was obtained for the wind resistant design.

Keywords : numerical simulation, urban area, mean wind profile, turbulence intensity, density of roughness, refined $k-\epsilon$ turbulence model

数値計算, 市街地, 風速分布, 乱れの強さ, 建物密度, $k-\epsilon$ 乱流モデル

1. はじめに

前報その1¹⁾では, 市街地のような複雑な粗面上において $k-\epsilon$ 型の2方程式乱流モデル²⁾を用いた強風中立時の気流性状の計算手法を示し, 実際の市街地上空における計算結果と観測結果の比較によりその有効性および適用範囲の検証を行った。その結果, 風速や乱れのエネルギーの時空間平均値は, 建物の最高高さの約1.5~3倍以上で観測値をはば再現することが示された。

さて, 近年ドップラーソーダ等による風速分布の観測が都市域においても盛んに行われるようになっており^{3, 4)}, データも蓄積されつつあるが, 観測された自然風の気流性状は種々の要因により変化する。実際, 10分間平均風速をみても, 同一地点・同一風向でも様々な鉛直分布が観測されており, 風速分布形状が安定するには数時間程度とかなり長時間の平均操作が必要であるとの報告もある⁴⁾。これは, 10分を越える長時間スケールの大気の影響や, 短時間の風向変化によって異なる粗度あるいは地形の影響が入ってくるためと考えられる。このうち地表面粗度の影響に限ってみても, 風上側の粗度分布の空間的な変化, さらに粗度形状が一般的な分布をもつ場合の吹送距離方向の変化等複雑で, 実際の市街地における地表面粗度形状の影響に関しては不明な点が多い。

本報では市街地における地表面粗度形状, すなわち建物形状が気流性状に及ぼす影響に着目し, 前報その1で示した手法を用いて吹送距離方向の変化を計算し, 市街地の建物構成および建物密度の変化が平均風速および乱れの強さに及ぼす影響を明らかにする。

2. 粗度形状

市街地における粗度形状の定量的な評価には種々の値が考えられるが, ここでは建物密度が平均風速および乱れの強さにどのような影響を及ぼすかを数値シミュレーションによって調べる。このとき, 文献5)に示したように市街地にも種々の建物構成が存在し, それぞれに粗度形状も異なる。ここでは, 市街地における粗度形状として以下の3つの場所を代表的な地域として選び, その建物形状をもとに仮想的なモデル市街地の粗度形状を作り出す。

モデル市街地1: 小松川のデータをもとにした住宅を中心とする低層住宅街(図1a)

モデル市街地2: 福岡のデータをもとにした低層だけでなく中層建物も混在する地域(図1b)

モデル市街地3: 日本橋のデータをもとにした中層建物を中心とするオフィスビル街(図1c)

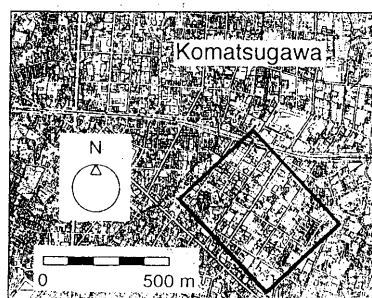
建物の形状データを求めるにあたっては文献5)と同じく縮尺2万5千分の1の地図を用い, 東京都江戸川区小松川付近の $0.4 \times 0.5 \text{ km}^2$, 福岡市大濠公園付近の $0.7 \times 2.5 \text{ km}^2$ および東京都中央区日本橋付近の $0.4 \times 0.4 \text{ km}^2$ の範囲からデジタイザーによって建物の水平断面形状を読み取り, 建物の階数および屋根形状は航空写真と現地調査により調べた。屋根形状は陸屋根と勾配屋根に分類して読み込んだ。これらの建物データをもとに, モデル市街地における粗度形状を以下のようなルール(a~i)に従って作り出す。

a) 建物の断面形状は高さ方向に変化しない。

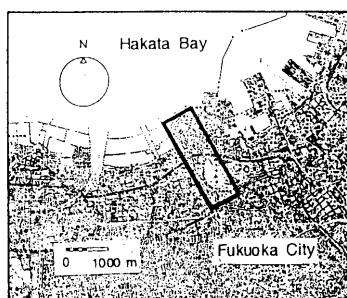
本論文の一部は文献7, 8)に発表した。

* 京大防災研究所 助教授・博士(工学)

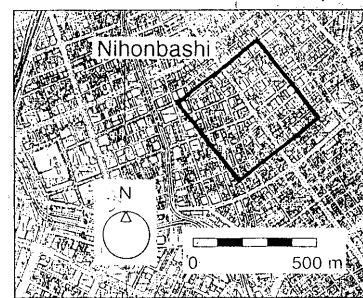
Assoc. Prof., Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Dr. Eng.



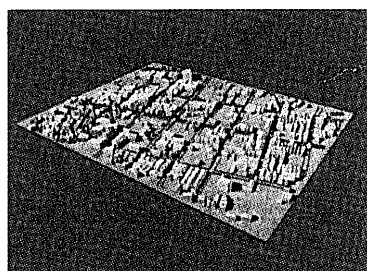
読み込み範囲



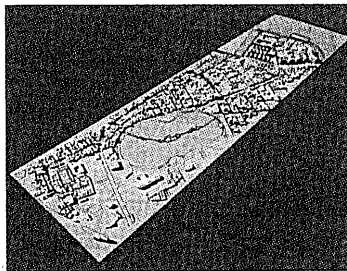
読み込み範囲



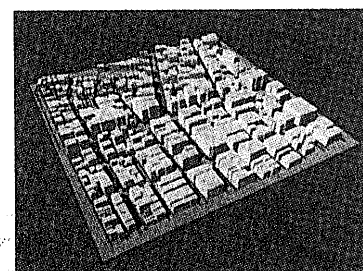
読み込み範囲



南から北方向を眺める
a. 小松川付近

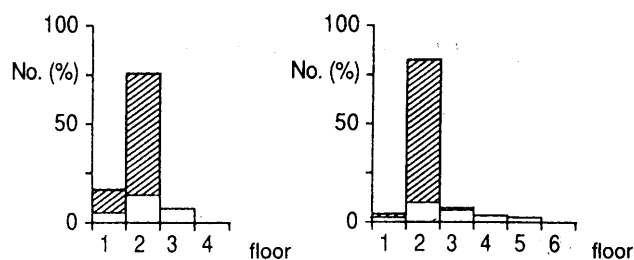


東から西方向を眺める
b. 福岡付近

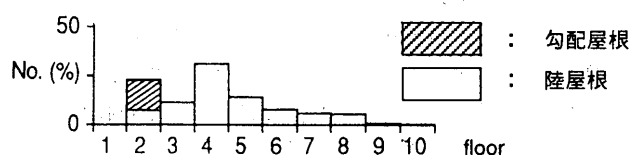


東から西方向を眺める
c. 日本橋付近

図1 建物形状データ



a. モデル市街地1 (住宅を中心とする低層住宅街) b. モデル市街地2 (低中層建物の混在する地域)



c. モデル市街地3 (中層建物中心のオフィスビル街)

図2 モデル市街地における建物構成、建物数の割合と階数の関係

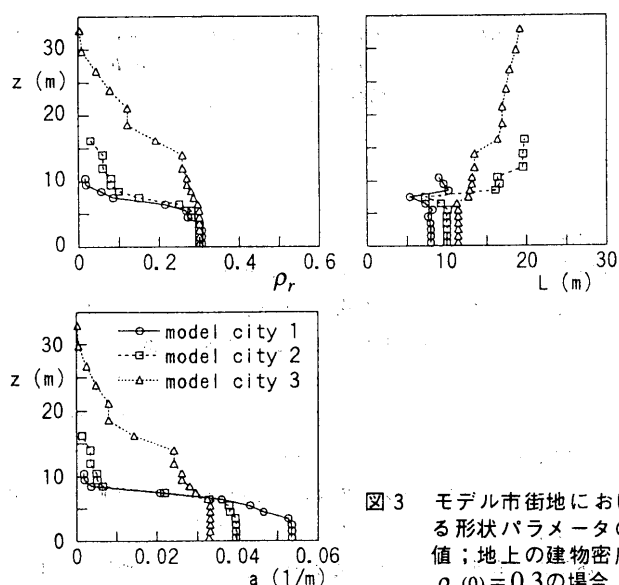


図3 モデル市街地における形状パラメータの値；地上の建物密度 $\rho_r(0)=0.3$ の場合

- b) 建物の階数と周長および建築面積は文献5)で求めた関係があるものとする。
- c) 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、階数の高い建物および読み込み数が全体の1%以下のものは除き、図2に示すような建物構成とする。
- d) 建物は住宅とオフィスビルに分け、高さ $h(m)$ を以下のように与える。
- | | | |
|--------------|---------------------------|-------------------|
| 勾配屋根 (住宅) | : $h = 0.5 + 2.75F + R$ | $1 \leq F \leq 3$ |
| 陸屋根 (住宅) | : $h = 0.5 + 2.75F + 0.5$ | $1 \leq F \leq 3$ |
| 陸屋根 (オフィスビル) | : $h = 0.5 + 3.50F$ | $2 \leq F$ |
- ここで F は階数、 R は屋根の高さで、 R = 建物の幅あるいは奥行き分の短いほうの長さ $\times$ 屋根勾配、として求める。
- e) 陸屋根の建物で1階建てのものは全て住宅とする。

- f) 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ものとする。
- g) 陸屋根の建物で4階以上のものはオフィスビルとする。
- h) 勾配屋根 (切妻、寄棟) の建物は住宅とする。
- i) 勾配屋根の屋根勾配は0.45とする。
- 以上のルールにもとづいて、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 ρ_r ^(注1)、建物の水平断面における平均周長の4分の1である L 、および粗度表面積密度 a の鉛直方向の分布の一例を図3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10m、2の低中層建物が混在する地域で約15m、3のオフィスビル街で約30mで、 ρ_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。

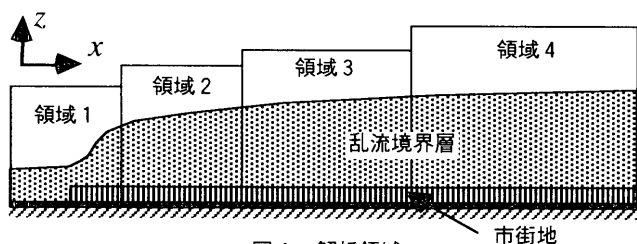
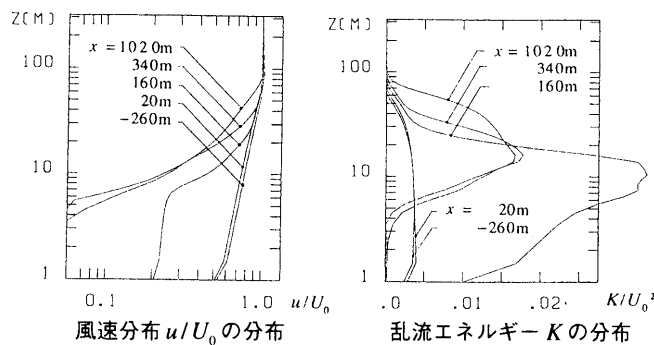


図4 解析領域

図5 平均風速 u および乱れのエネルギー K の計算結果: モデル市街地 2 (低中層建物の混在する地域), $\rho_r(0)=0.3$, 風向角 0°

3. 計算手法

計算には前報その1と同様な計算手法を用いた。図4に示すように、座標系は主流（吹送距離）方向に x 軸を、鉛直方向に z 軸をとり、計算領域は x 軸方向に19.2kmで全体を4ブロック（領域1～4）に分け、 z 軸方向には高さ約110～750mまで、乱流境界層の発達にともなって境界層上部に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領域内で等間隔にとり、吹送距離の増加にともない各領域ごとにメッシュ幅20,30,50,80m、メッシュ数90～120と段階的に増やしていった。 z 軸方向のメッシュ間隔は地面付近約10mまで1mの等間隔、それより上では不等間隔で上方ほど大きくし、メッシュ数も50～60と下流ほど増やした。計算は2次元計算で行い、 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のケースについて事前に行って、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。

最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、図5の $x=-260\text{m}$ の結果に示すように、境界層厚が約70mになったときの値を用いた。このとき、平均風速 u (注2) の分布はべき指数で約 $1/7$ の勾配をもち、境界層上部の主流風速 U_0 により無次元化された乱流エネルギー K/U_0^2 は地面付近で約0.035であった。以下、風下側の計算領域における流入境界条件にはそれより風上側の計算結果を用いた。また、市街地は $x=100\text{m}$ 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。なお、粗度が存在しない部分の地面境界では壁面境界条件、すなわち、地面第一セルで、水平方向風速分布に関してはべき法則（べき指数 $1/7$ ）が成り立つとし、エネルギーの消散率 $\varepsilon = K^{3/2} C_D^{3/4} / \kappa z_1$ とした。ここで、 $C_D=0.09$, $\kappa=0.4$, z_1 は地面第一セルの中心高さである。また、変数はMAC法に基づくスタッガード配置を用い、計算領域外部の仮想セル上で $\partial u / \partial \varepsilon$ がべき法則をみたすように、また、 W は地面境界上で 0 , $\partial K / \partial \varepsilon = \partial \varepsilon / \partial \varepsilon = 0$ となるように与えてある。上方および下流の境界は自由流出条件、上方境

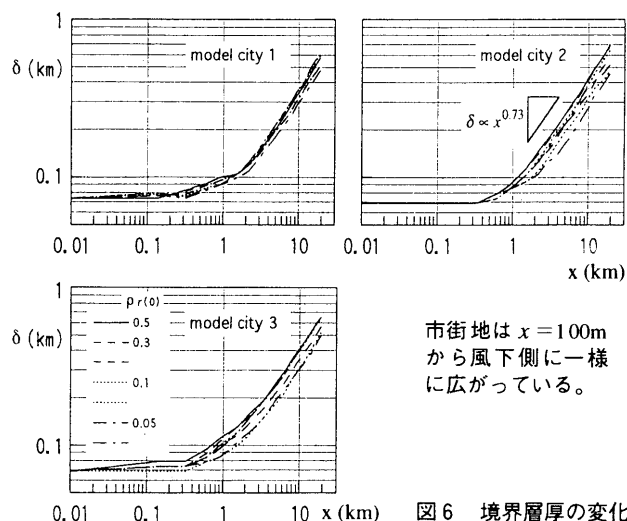


図6 境界層厚の変化

界における流れ方向の圧力勾配は0とした。各計算点で計算に用いる建物の形状パラメータ $G=1-\rho_r$ および a は前節に示した方法で作出したものを使う。また、ラフネスパラメータ C_{fi} , C_{pE} の値は ρ_r の値から前報その1に示した関係を使って求めた。

4. 計算結果

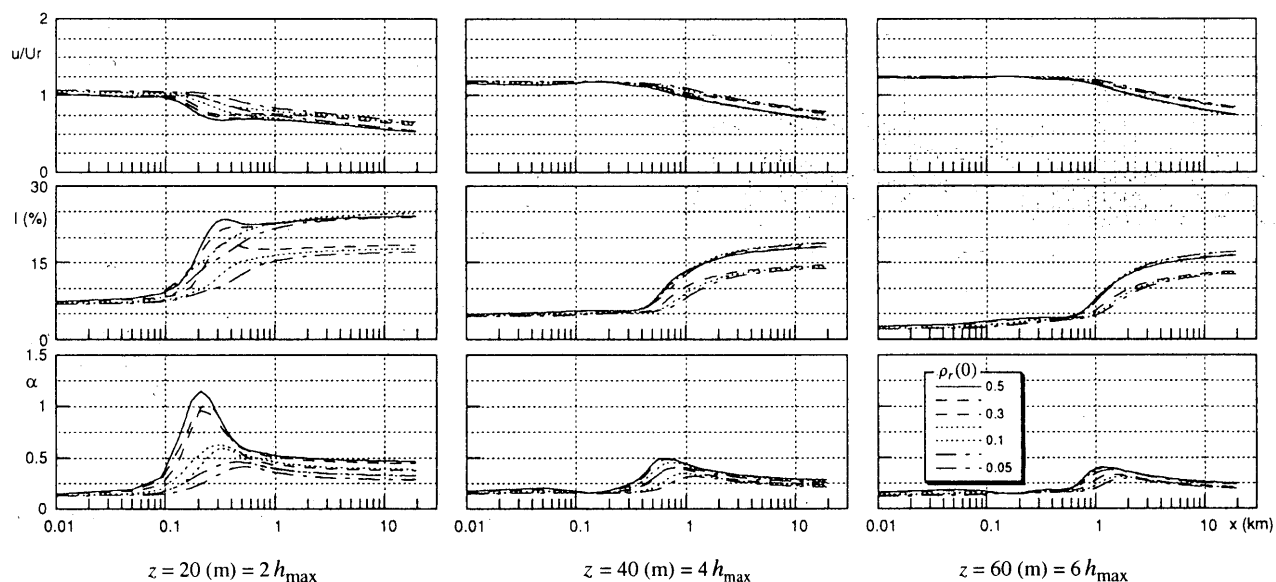
粗度形状の違いによる気流性状の変化を知るため、3つのモデル市街地において地表面における建物密度 $\rho_r(0)$ を変化させ、 $\rho_r(0)=0.05, 0.1, 0.3, 0.5$ の4種類について気流性状のシミュレーションを行った。なお、計算は風向角 0° と 45° のラフネスパラメータの値について行った。これは前報その1に示したように、建物に対する風向角が一定でない実際の市街地上空の気流性状は、風向角が 0° と 45° のラフネスパラメータの値を用いた計算結果の間にあると考えられるからである。

図5に風向角 0° の場合の平均風速 u および乱れのエネルギー K の鉛直分布の吹送距離方向の変化の一例を示す。図に示すように、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が大きくなる。また、鉛直方向の風速勾配は地面付近、とくに建物高さ以下で最も大きくなり、それより上空では高度が上が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吹送距離方向に大きくなるが、一旦最大値をとった後、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最も大きくなり、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。

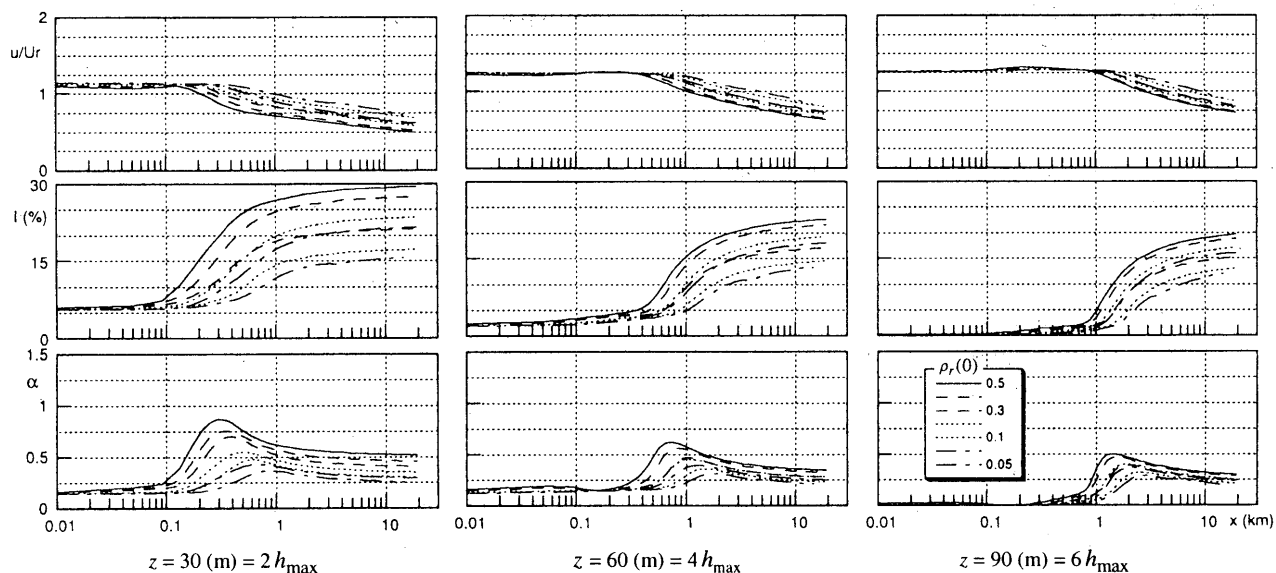
これらの変化を、耐風設計用の基準風速を求める場合に重要となる境界層の厚さや平均風速、乱れの強さ、べき指数の吹送距離方向の変化として求め、それらの値が粗度形状の違いによってどのように変化するかを調べる。なお、風向角の違いによる計算結果の違いは、吹送距離が短い間は大きく、下流に行くにしたがって小さくなり、その差は以下に示すように建物の構成や密度によって異なる。

4.1 境界層厚の変化

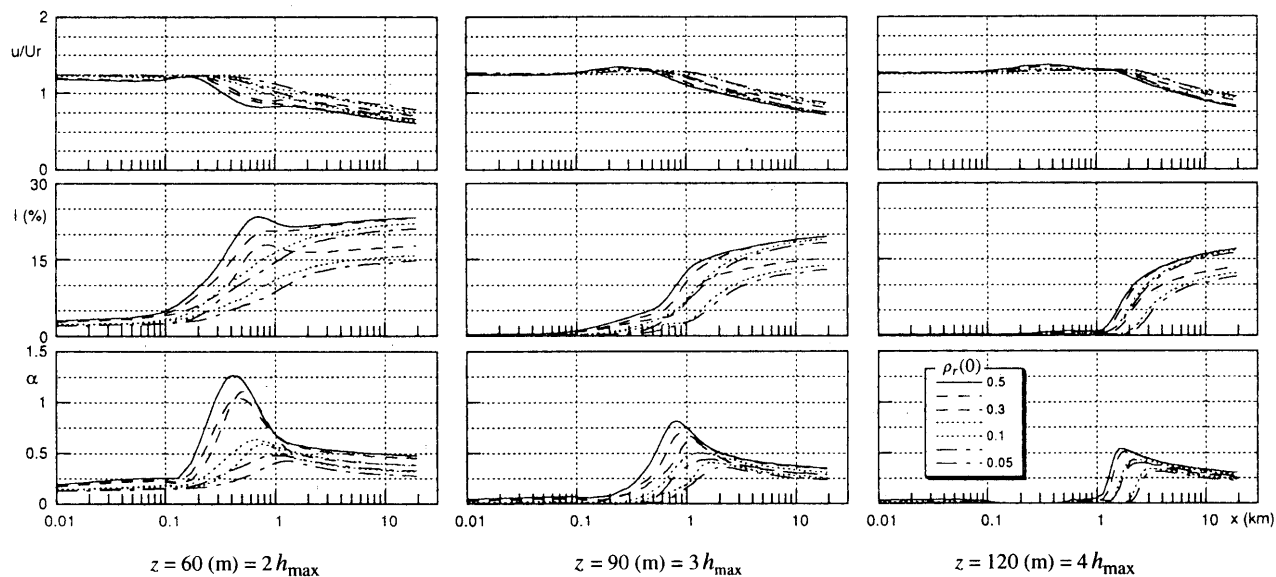
境界層厚の吹送距離方向の変化を図6に示す。図の縦軸には境界層厚 $\delta(\text{km})$ （ここでは、平均風速が境界層上部の主流風速 U_0 の99%に達する高さとして定義する）を、横軸には吹送距離 $x(\text{km})$ を、と



a、モデル市街地1；住宅を中心とする低層住宅



b、モデル市街地2；低中層建物の混在する地域



c、モデル市街地3；中層建物中心のオフィスビル街

図7 各高さにおける建物密度による平均風速 u/U_r 、乱れの強さ I 、べき指数 α の変化

もに対数目盛りでとってある。なお、市街地は $x=0.1\text{km}$ から始まっている。計算は風向角 0° と 45° のラフネスパラメータの値について行っている。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° と 45° の2つの計算結果があり、その両方を示してある。このとき前報その1で示したように、実際の市街地における値は風向角 0° と 45° に対するラフネスパラメータを用いた計算結果の間にあると考えられる。ただし、風向角 0° 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° についてのみ示し、そのときのラフネスパラメータの値は前報の結果より $\rho_r(0)=0.45$ 以下の値を用いて外挿した。

図6より、境界層厚は建物構成によらず 0.3km 付近から増えはじめ、約 $2\sim 3\text{km}$ 以上では両対数グラフ上でほぼ直線近似できるようになる。モデル市街地1, 2, 3ともに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も厚くなる。 $\rho_r(0)$ 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が最も大きく、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。このとき境界層厚 δ は吹送距離 x の 0.73 乗に比例して増加する。

4. 2 気流性状の変化

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 $z=20\text{m}$ の値を基準風速 U_r とし、 U_r に対する平均風速の比 u/U_r として求めた。乱れの強さは計算で求められた乱れのエネルギーをもとに、文献6)から $\overline{u'^2} : \overline{v'^2} : \overline{w'^2} = 16 : 9 : 4$ として $I = \sqrt{\overline{u'^2}}/u$ の値を求めた。べき指数 α 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図7に示す。ここでは地表面における建物密度 $\rho_r(0)$ による違いを高さ別に比較する。平均風速、乱れの強さおよびべき指数の変化は高さによって異なるが、前報その1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 $1.5\sim 3$ 倍以上で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 $h_{\max}$ はモデル市街地1で約 10m 、2で約 15m 、3で約 30m なので、それぞれ建物の最高高さの2倍である 20m 以上、 30m 以上、 60m 以上で比較を行う。

図7より各高度での平均風速はある吹送距離に達すると大きく変化し始め、 u/U_r 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。

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、風速の極小値に対応している。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。各高度で建物密度の増加

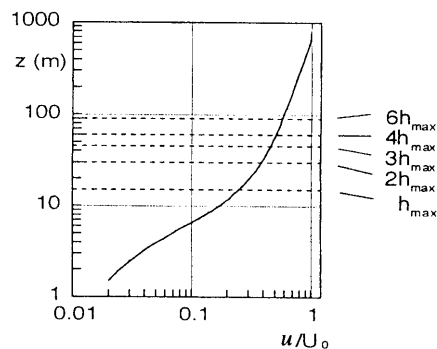


図8 平均風速の鉛直分布：モデル市街地2（低中層建物の混在する地域）、 $\rho_r(0)=0.3$, $x=19.2\text{ km}$, 風向角 0°

とともに平均風速の減少量、乱れの強さの増加量、べき指数の増加量は大き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、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、建物密度の違いによる平均風速、乱れの強さおよびべき指数の値自体の差も小さくなっていく。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で最も大きく、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

前節の計算結果を参考にして、耐風設計上最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。図7をみると、建物構成や密度によらず吹送距離が 10km を越えるとき、べき指数および乱れの強さの変化はかなり小さくなり、 19.2km における値との差はほとんどない。日本の市街地において吹送距離が 10km 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。平均風速の鉛直分布の一例として、モデル市街地2、 $\rho_r(0)=0.3$, $x=19.2\text{km}$, 風向角 0° の場合を図8に示す。この位置で乱流境界層はかなり発達し約 700m に達している。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、前報に示したように、観測値との比較においても計算結果は $h_{\max}$ の $1.5\sim 3$ 倍以上ではほぼ一致し、それより下では気流性状が地表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。

以上の考察をもとに、吹送距離 $x=19.2\text{km}$ におけるべき指数 α および乱れの強さ I の値を $z=4h_{\max}$ において求め、建物構成（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表1にまとめた。表中、矢印は風向角 0° と 45° 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1 建物構成および地表面における建物密度の違いによるべき指数および乱れの強さの変化

1/n α	1/5 0.2	1/4 0.3	1/3
model city 1 $z = 4h_{max} = 40m$	← .05 → ← 0.1 → ← 0.3 → $\rho_r(0) = 0.5$ →		
model city 2 $z = 4h_{max} = 60m$	← .05 → ← 0.1 → ← 0.3 → $\rho_r(0) = 0.5$ →		
model city 3 $z = 4h_{max} = 120m$	← .05 → ← 0.1 → ← 0.3 → $\rho_r(0) = 0.5$ →		
$x = 19.2km$			

I (%)	10	20
model city 1 $z = 4h_{max} = 40m$	← .05 → ← 0.1 → ← 0.3 → $\rho_r(0) = 0.5$ →	
model city 2 $z = 4h_{max} = 60m$	← .05 → ← 0.1 → ← 0.3 → $\rho_r(0) = 0.5$ →	
model city 3 $z = 4h_{max} = 120m$	← .05 → ← 0.1 → ← 0.3 → $\rho_r(0) = 0.5$ →	
$x = 19.2km$		

表わす。また、 $\rho_r(0) = 0.5$ についての計算は風向角 45° 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0.2から0.35の範囲で、乱れの強さの値は12%から23%の範囲で変化する。同じ建物構成の場合には、地表面における建物密度が高くなるほどべき指数および乱れの強さの値は大きくなる。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において最も大きく、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、とくに建物密度によってどのように変化するかを知るために、数値シミュレーションによる解析を行った。建物構成が異なる3ヶ所の実在する市街地のデータをもとに、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て計算を行った。計算は、境界層厚70m、べき指数1/7の平均風速勾配をもつ乱流境界層を流入気流として用い、各モデル市街地に対して地表面における建物密度を最大0.5まで変化させ変えて行い、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。計算結果より粗度形状が流れ方向に一樣な場合の境界層厚さや平均風速、乱れの強さおよび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) 境界層厚さは地表面における建物密度が高くなるほど厚くなる。また、今回用いた流入気流条件のもとで、地表面粗度の影響が境界層上部まで達し、境界層厚さと吹送距離の関係が両対数グラフ上ではほぼ直線近似できるようになる範囲では、境界層は吹送距離の0.73乗に比例して増加する。
- 2) べき指数および乱れの強さは建物構成や建物密度、吹送距離によって変わるが、その変化は吹送距離が長くなると小さくなり、10kmを超えると工学的にみてもほぼ平衡状態になったとみなせる。
- 3) 地表面付近で建物の局所的な影響がほぼなくなる高度、すなわち建物の最高高さの約4倍におけるべき指数および乱れの強さを耐風設計用の値として求めると、それぞれ0.2から0.35、12%から23%の値をとる。これらの値は建物密度が高いほど大きく

なり、その変化は低中層建物が混在している市街地で最も大きく、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。

以上、市街地における地表面粗度形状、すなわち建物形状に着目して、それが気流性状に及ぼす影響を検討した。ただし、自然風中の観測データをみると、風速分布形状が安定するためには長時間の平均が必要であり、ここで示したのはそのような場合に対応した解析結果である。一方、長時間・大スケールの大気の擾乱や、短時間の風向変化の影響を受ける場合の気流性状の変化に関する研究等は今後の課題として残されている。

謝 辞

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。建物データの処理およびコンピュータ・グラフィックス表示の協力を得た株式会社プラス・ワンに謝意を表する。

注

- 注1) 文献5)では ρ_r を粗度体積密度と呼んでいるが、ここでは対象となる粗度要素が建物であり、単位体積あたりの建物体積を表すので以下では建物密度と呼ぶことにする。
- 注2) 通常平均風速というと、風速のアンサンブル平均あるいは時間平均値をさすことが多いが、ここでは耐風設計用の値を考えているので、ある程度の広がりをもった空間内の風速の平均値として扱う。したがって各高度における計算メッシュ内の時空間平均値である計算結果を用い、平均値とする。なお、乱れのエネルギーについても同様に時空間平均値とする。

参考文献

- 1) 丸山 敬：市街地上空における気流性状の数値計算（その1、実際の市街地をケーススタディとした計算手法の検証）、日本建築学会構造系論文報告集、第474号、pp.49-59、1995。
- 2) 丸山 敬：粗度要素の抵抗および体積変化を考慮したk-εモデルによる乱流境界層の数値計算、日本建築学会構造系論文報告集、第404号、pp.75-81、1989。
- 3) 須田健一他5名：ドップラーソーダを用いた地表付近の平均風速の鉛直分布に関する研究、第14回風工学シンポジウム、pp.7-12、1996。
- 4) 内藤玄一他4名：複数ドップラーソーダによる大都市上空の強風観測（その2）平均風速、乱れの時空間分布、第14回風工学シンポジウム、pp.25-30、1996。
- 5) 丸山 敬：市街地における粗度形状について、日本風工学会誌、No.57、pp.15-27、1993。
- 6) Counihan, J.: Adiabatic atmospheric boundary layers: A review and analysis of data from the period 1880-1972, Atmospheric Environment, Vol.9, pp.871-905, 1975。
- 7) 丸山 敬：市街地上空における気流性状の数値シミュレーション（建物構成の違いによる気流性状の変化）、日本風工学会誌、No.55、pp.95-96、1993。
- 8) 丸山 敬：市街地上空における気流性状の数値計算（その2：建物の密度変化にともなう気流性状の変化）、日本建築学会大会（関東）学術講演梗概集B構造1、pp.1157-1158、1993。

（1998年1月19日原稿受理、1998年5月8日採用決定）