

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

NUMERICAL SIMULATION OF WIND FLOW OVER URBAN AREA

Part 1 Examination of simulation method by case study of a real urban city

丸山 敬

Takashi MARUYAMA

Numerical simulations of the turbulent boundary layer over rough surfaces in the wind tunnel was performed using a refined $k-\epsilon$ turbulence model which can introduce the effect of roughness configuration and volume change of the roughness element. A series of calculations were done on the city models using the optimized drag coefficient and the length scale (termed roughness parameters in this study) for staggered arrayed cubic blocks. Simulated flows showed good agreement with experimental data. Finally, a three-dimensional simulation of wind flow over a real urban city where wind data were observed was carried out. The effectiveness of the simulation method was examined by comparing the calculated result with the field data.

Keywords : numerical simulation, urban area, wind flow, refined $k-\epsilon$ turbulence model数値計算, 市街地, 気流性状, $k-\epsilon$ 乱流モデル

1. はじめに

都市への人口集中に伴って市街地は拡大を続け、中心部においてはオフィスビルだけではなくマンションやアパート等、常時人々が生活する建物の高密度、高層化が進んでいる。その結果、超高層建物の耐風設計だけでなく、中高層建物の風による振動、建物敷地周辺の風環境に及ぼす影響等、風に関連した問題がますます増加している。これらの問題を解決するにあたっては、過去の同様な事例を参考にしたり、風洞実験あるいは数値計算によって建設後の状況を予測し、対策を立てるのが一般的であるが、その際、建設予定地の風上側の気流性状をどのように設定するかは予測結果に影響を与える重要な問題の一つである。ある場所における気流性状は過去の観測値があればそれに基づいて予測することができる。しかし、通常ほとんどの場所で過去の観測記録は期待できないので、付近の気象官署等における観測結果を使って気流性状を推定することになる。このとき、気流性状を決定する主な要因としては、問題としている地点の気候や周囲の状況が挙げられ、とくに地表面粗度形状は地上付近の風速分布を左右するので重要である。

風による問題が予想されるような建築構造物は都市部に建設される場合が圧倒的に多いので、ここでは市街地における気流性状について検討する。市街地における地表面の主たる粗度要素は建築物であり、気流性状に及ぼす影響も最も大きい。実際の市街地では地表面粗度形状が広範囲にわたって一様であることはめったになく、また、もし一様であったとしても吹送距離方向に気流性状は変化する¹⁾ので、実際の風速分布にはかなりのばらつきがある。したがって、詳しい予測を行いたい場合には、周囲の地表面粗度形状を考慮した風速分布を与えるべきで、風洞実験等では周囲の建物形状をある程度の範囲まで再現して風上側の気流性状を作り出している。しかし、風上側の再現ができない場合や、数値計算で流入条件として風速変動成分のより詳しいデータが必要なときに、地表面粗度形状の影響をどのように取り込むかという問題が生じる。本報ではこれらの問題に答えるため、耐風設計に際して必要となる市街地上空における強風中立時の気流性状を計算で予測する方法を示し、実際の市街地上での観測値との比較を行って、その有効性と適応範囲を明らかにする。

本論文は参考文献5, 14, 15)に加筆・修正を加えたものである。
京都大学防災研究所 助手・博士(工学)

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

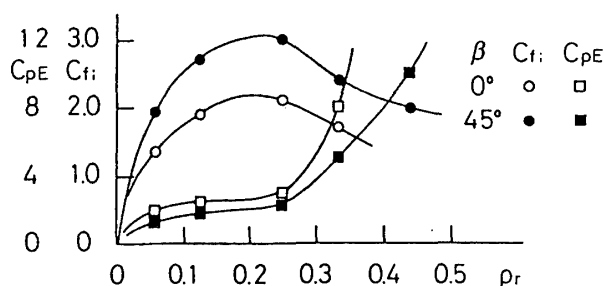


図1 千鳥状配列立方体粗度ブロックに対する粗度体積密度（単位空間あたりの建物体積） ρ_r とラフネスパラメータ C_{fi} , C_{pe} の関係、 β は粗度要素と主流風向がなす角度

2. 計算概要

今回用いた予測手法では、市街地上空における強風中立時の風速および乱れのエネルギーの時空間平均値を予測することを目的とし、粗度要素の形状と体積変化を取り込むことのできる $k-\epsilon$ 型の2方程式乱流モデル²⁾を用いて、文献1,3)と同様な手法で計算を行った。乱流モデルにおいて、粗度形状を計算に取り込むラフネスパラメータ C_{fi} , C_{pe} の値は、図1に示すように、千鳥状配列立方体粗度ブロックに対してその最適値が求められている⁴⁾。しかし、複雑な形状をもつ市街地に対してそれらの値をどのように用いればよいかは判っていないので、まずはじめにそれを検討する。

2.1 市街地模型によるラフネスパラメータの検討

一般に市街地のような複雑な形状をもつ粗面では、粗度形状や粗度要素の体積が一樣ではなく空間的に変化する。種々の市街地に対するラフネスパラメータの値をそれぞれ実験的に求めることは困難である。しかし、文献5)で示したように、地面境界における剪断応力の大きさをみると、市街地模型は立方体粗度ブロックを千鳥状に配置した粗面の場合とほぼ同様な変化をするので、市街地のような複雑な粗度形状に対しても、千鳥状配列立方体粗度ブロックによる実験結果の応用が期待できる。そこで、千鳥状配列立方体粗度ブロックに対して求められたラフネスパラメータの最適値を市街地模型に対して適用し、気流性状の計算を行って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調べる。

対象となる市街地模型の形状は図2に示すように、不規則な街路を持つ場合case A、格子状の街路を持ち、街路が風向と45°で交わる場合case B、格子状の街路を持ち、街路が風向に直交する場合case Cの3ケースについて、それぞれ建物の密度を3種類（1:密, 2:並, 3:疎）ずつ変化させた合計9種類である。なお、市街地模型の詳細については文献5)を参照されたい。これらの模型について、千鳥状配列立方体粗度ブロックに対して求められたラフネスパラメータの最適値を用いた計算を行った。計

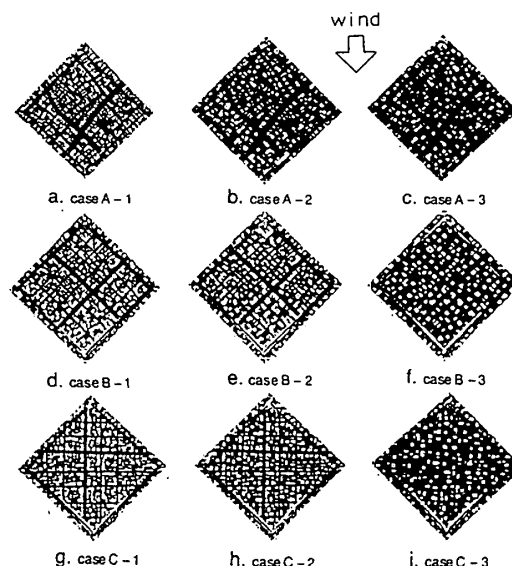


図2 市街地模型の形状

算に際して用いられる各種パラメータに関して、形状パラメータ a_x, a_y : x, y 軸方向の粗度表面積密度=粗度要素の壁面面積の4分の1/流体体積, G : 有効体積=単位空間あたりの流体体積, L : 粗度形状を代表する長さスケール=粗度要素の水平断面における平均周長の4分の1の各値は、各模型の粗度形状に対応した値を高さ方向に変化させて与え、 a_z : 鉛直方向の粗度表面積密度は0.0とした。ラフネスパラメータ C_{fi} , C_{pe} はそれぞれ、乱れのエネルギーおよびエネルギー消散率の輸送方程式において、粗度要素が存在することによって生じる生成項をモデル化する際に用いるモデル定数で、粗度形状を反映する。 C_{fi} は粗度要素の風向方向の抵抗係数に、 C_{pe} は乱れの代表スケールと粗度要素の代表スケールとの比に相当する値である。計算は、立方体粗度ブロックに対する風向角 $\beta=0^\circ$ および 45° の値について、各計算点における粗度体積密度 $\rho_r=1-G$ に対応する値を用いて行った。解析は図3に示すように市街地模型を含む風洞内について2次元計算を行い、計算と実験結果の比較は主流方向の時空間平均風速 U および乱れのエネルギーの時空間平均 K の分布および床面抗力係数 C_f について以下のように行った。

計算結果の一例をcase A-3について図3に、 U と K の分布の実験値との比較を図4に示す。図3,4において、 U および K は境界層の外側の主流風速 U_0 で無次元化してある。また、測定位置は図3中に示す。図4に示すように $\beta=45^\circ$ の結果は $\beta=0^\circ$ の場合よりも下層部で U の値が小さく、 K の値が大きくなるが、上層部では殆ど差がなかった。この比較において、計算値は時空間平均を求めているので、対応する実験結果も各点における時空間平均を測定しなければならない。このとき、気流性状は地面に近くなるほど流れの3次元性が強くなって、空間的な変化が大きくなるので、計算値との比較を行うには各高さにおける

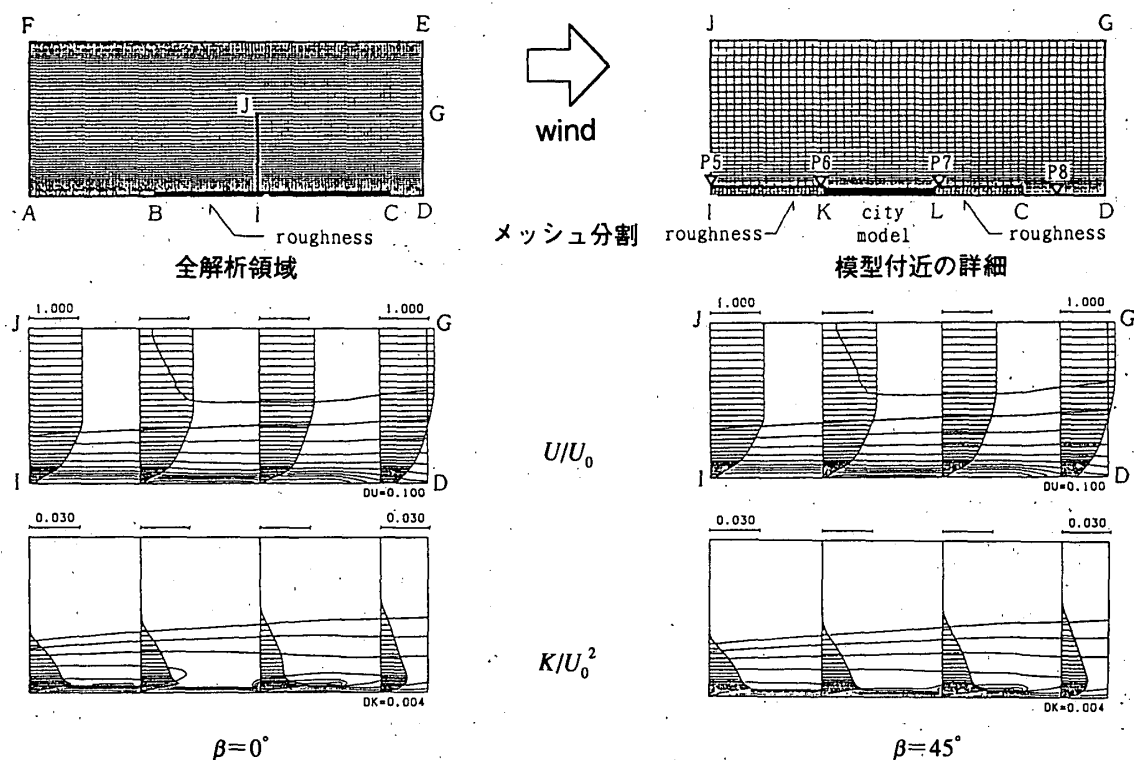


図 3 解析領域および計算結果 (市街地模型 case A-3: 等高線の間隔は U/U_0 が 0.1, K/U_0^2 が 0.004)

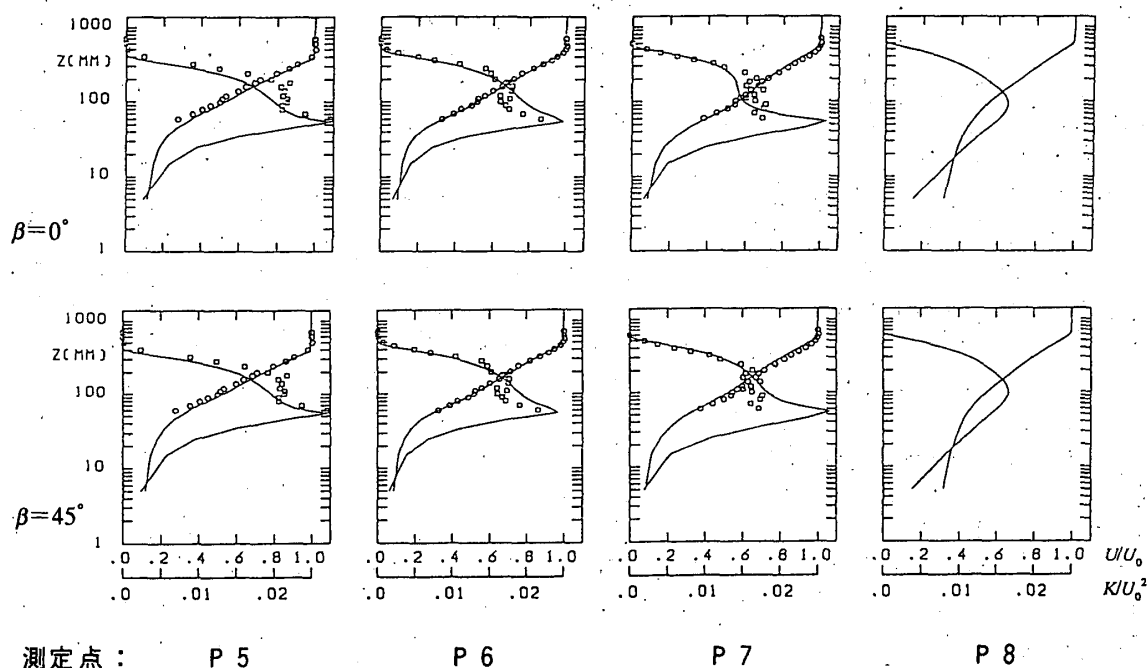


図 4 計算結果と実験値の比較 (市街地模型 case A-3: 実験値, $\circ, U$; $\square, K$; 計算結果, —)

代表点を十分多くとらないと誤差が大きくなる。図4の実験結果は粗度高さ (60mm) 付近では各高さにおいて代表点を何点かとして、その平均値を求めてあるが、粗度高さ以下で計算値に対応する値を測定から求めることはセンサーの特性上不可能であり (詳細は文献1,2,3参照)

求めている。さらに、 K については粗度高さに近い所では誤差が大きいため、計算値と実験値の比較自体に問題がある。そこで、地表面粗度によって発生する乱れによるせん断力が床面抗力とバランスすることから、床面抗力係数 C_f によって地面付近の乱れを評価してみる。

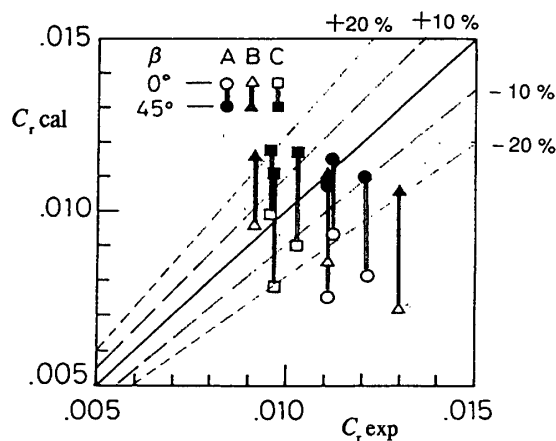


図5 市街地模型に対する抗力係数の比較、
計算値： $C_{r,cal}$ 、実験値： $C_{r,exp}$

床面抗力は風洞床面に設置したフロート上に市街地模型を設置し、フロートに加わる抗力を直接測定して求め、模型上流の境界層上空の基準風速と空気密度によって床面抗力係数を求めた⁶⁾。図5に計算で求めた抗力係数 $C_{r,cal}$ と実験値 $C_{r,exp}$ を比較する。風向角 $\beta=0^\circ$ の計算結果は白抜きのシンボルで、風向角 $\beta=45^\circ$ の結果は黒塗りのシンボルでそれぞれ表してあり、計算結果について $\beta=0^\circ, 45^\circ$ 以外の風向角をもった場合の床面抗力は $\beta=0^\circ$ と 45° の間（図中実線で結んである）にある。図より、風向角 $\beta=45^\circ$ の結果は $\beta=0^\circ$ の場合よりも $C_{r,cal}$ の値が大きくなるのがわかる。また、 $C_{r,cal}$ と $C_{r,exp}$ の対応は、case Cの場合には $\beta=0^\circ$ の方が $\beta=45^\circ$ よりも良いが、全体的にみると $\beta=45^\circ$ の方が良い対応を示すようである。ただし、風向角 $\beta=0^\circ$ と 45° でカバーする範囲と市街地模型の結果を比較すると、case Bの1ケースを除いて、 $C_{r,cal}$ は $C_{r,exp}$ を $\pm 10\%$ 以内で再現できることがわかる。

理想的には、計算と実験結果で U 、 K の分布や C_r の値が一致するのが望ましいが、不規則な形状を持つ市街地模型に規則的に配置された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のであるから、計算結果が完全に一致することは期待できない。そこで、立方体粗度ブロックに対して求められたラフネスパラメータを、市街地模型に対してどの程度適用できるかを検討するために、以下のような基準を設定して、計算結果と実験値の適合度を調べた。すなわち、

- 1) U の分布については、計算結果と実験値の差が U_0 の1.5%以内になる割合（図4において、測定値を示す丸印の半径は U_0 の1.5%となるように描いてある）を調べ、90%以上の測定点で計算結果と実験値の差が U_0 の1.5%以内になる場合を○、70%以上の測定点で1.5%以内になる場合を△、それ以上の差がある場合を×とする。

表1 計算結果の実験値に対する適合度

case	β	1:密		2:並		3:疎	
		U	C_r	U	C_r	U	C_r
A	0°	×	△	×	×	○	×
	45°	○	○	○	○	○	○
B	0°	○	○	○	×	○	×
	45°	△	×	○	○	△	△
C	0°	○	○	○	△	△	×
	45°	△	×	○	△	○	△

- 2) 床面抗力係数 C_r については、計算値と実験値の差が実験値の何%以内になるかを調べ、10%以内になる場合を○、20%以内の場合を△、それ以上の差がある場合を×とする。

U の分布および C_r について、得られた適合度を表1にまとめる。表に示すように、case Aでは風向角 45° の結果が、case B, Cでは粗度の密度が大きいときには風向角 0° の結果が適合度がよく、密度が小さくなると風向角 45° の結果の方が良いことがわかる。また、case Cの場合を例に詳しくみると、風向角 0° では密度2, 3で U の分布がそれぞれ○と△、 C_r がそれぞれ△と×になるが、風向角 45° の値を使えば、密度2, 3では U の分布がそれぞれ○と○、 C_r がそれぞれ△と△となり改善される。このように、各ケースについて風向角 0° あるいは 45° の値を使うことによって、上記の基準で計算結果と実験結果の対応を○か△とすることができる。すなわち、 U の分布については、計算結果と実験値の差が主流風速 U_0 の1.5%以内になる割合を70%以上に、床面抗力係数 C_r については、計算値と実験値の差が実験値の20%以内になるように計算で再現することが出来る。

このように、立方体粗度ブロックに対して求められたラフネスパラメータを用いた計算結果は、前述のような適合度をもって、市街地模型による実験結果を再現できる。したがって、前述のような適合度のもとで、市街地への応用が可能であると考えられる。ただし、実際の市街地では、地表面において街路の向きや建物の配列形状が広範囲にわたって一定であることは少なく、風向も変化することが多い。また、市街地模型に対する計算結果をみると、街路の向きや建物の配列形状によって計算結果の適合度は変化するので、実際の市街地への応用を考えた場合には、風向角 45° と 0° の両方に対するラフネスパラメータの値を用いて計算し、用途に応じて両者の平均値、あるいは安全側の計算結果を用いる、等の配慮が必要になると考えられる。

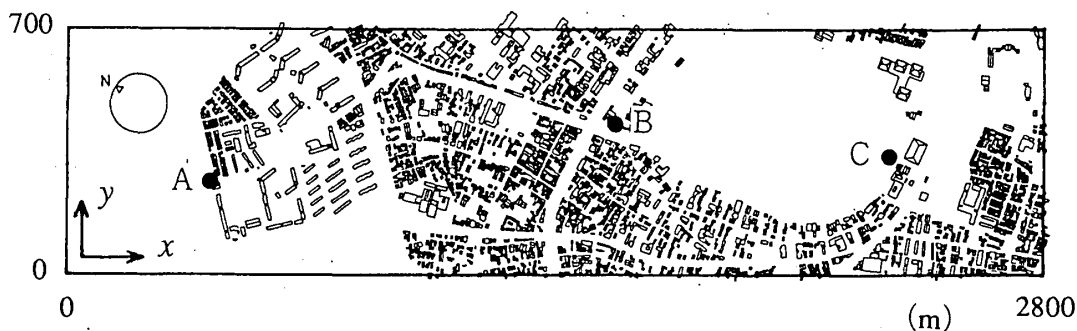


図6 解析領域

2.2 実際の市街地形状に対する適用

自然風中での観測値が得られている福岡大濠公園付近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行う。

(1) 解析領域および境界条件

解析領域は図6に示すように、 x 軸方向に2800m、 y 軸方向に700mの範囲で、 z （鉛直）軸方向に200mとった。建物形状は縮尺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。読み込みの詳細は文献7)を参照されたい。

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。図の左側は海なので、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A点において観測結果とほぼ同じになるような計算結果を用いる。流出、側方および上方境界面では境界面で変数の法線方向の勾配が0 ($\partial/\partial n=0.0$:ここで n は法線方向ベクトルを表す) となるように解析領域の外側の仮想セルの値を与える。また、側方および上方境界面で

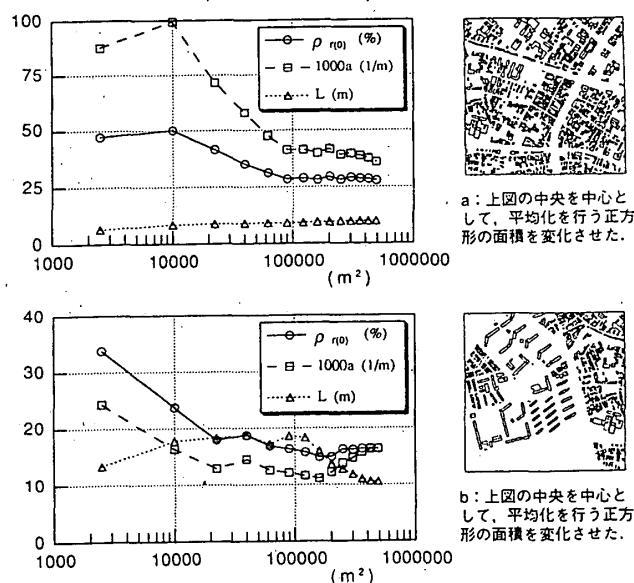
の接線方向の圧力勾配は零とした。水面は滑面とみなし、建物が存在する地面境界では文献1,3,4)と同じく粗面における境界条件を用いている。

(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 より図1で示した関係を使って決定し、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。とく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 ρ_r 、粗度表面積密度 a および建物の代表長さスケール 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図7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なってくると、その変化も小さくなる。図7a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。図7bに示す例では、平均化面積が約20000 m^2 から200000 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がると、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）等を含むようになって、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、分解能を上げるためには平均化面積を小さくする方がよく、ここに示した例の場合には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

図7 ρ_r, a, L の平均化位置および平均化面積による変化

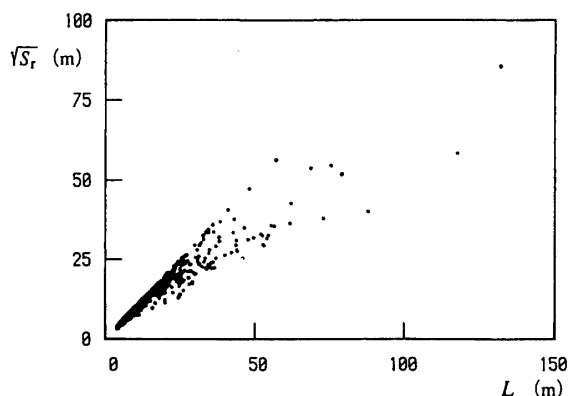


図8 読み込んだ建物に対する L と $\sqrt{S_r}$ の関係

計算される。したがって、メッシュ分割はそこ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。そこで、建物の大きさを知るために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、両者の関係を示すと図8のようになる。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くほど、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。また、図より 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、とく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50m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50m以上であることが好ましい。ただし、平均化面積が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70mの正方形とした。結局、メッシュ分割は図9に示すように x 軸方向に70m、 y 軸方向は分解能を上げるため35mの等間隔とし、各計算点を中心とした一辺70m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 軸方向の分割幅は文献3)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、地面付近で最小3.5mとし、全体の分割数が21、上方にいくにしたがって大きくなるようにした。

(3) 大きな建物の取扱い

図10に地表面における粗度体積密度 $\rho_{r(0)}$ の分布を示す。 $\rho_{r(0)}$ の値は建物の密集度に応じて変化している。また、

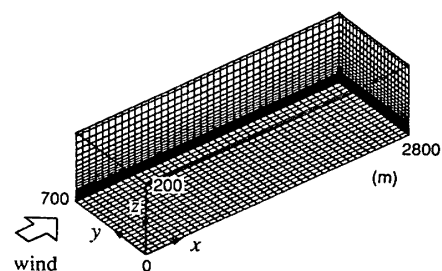


図9 解析領域内のメッシュ分割



図10 地表面における粗度体積密度 $\rho_{r(0)}$ の分布

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 $\rho_{r(0)}$ の値はとく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は図8より、 L の値で約130m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130m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50mまでなので、平均化面積の一辺の幅はそれよりやや大きく70mとした。その結果、図10に示すように $\rho_{r(0)}$ の値は数カ所で0.45を越えている。このとき、図1に示すように、風向角 $\beta=0^\circ$ 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決めることができないので、それ以上の粗度体積密度を持つ場所では便宜的に、 $\beta=0^\circ$ のとき粗度体積密度 $\rho_r=0.33$ におけるラフネスパラメータの値を、 $\beta=45^\circ$ のとき $\rho_r=0.45$ 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を越える計算点の数は計算点全体の数に比べて少ないので、問題ないと考えた。

(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⁸⁾。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

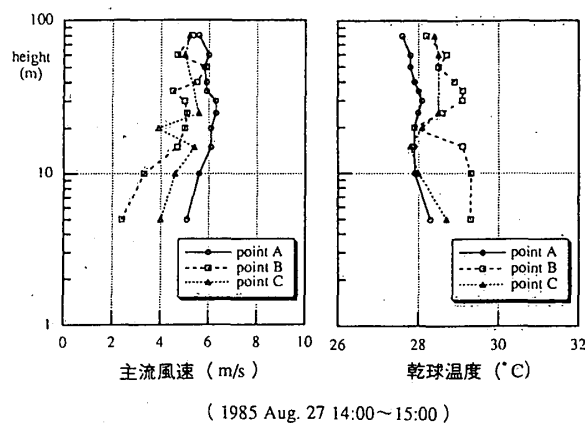


図 11 自然風中での観測結果

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よく満足するデータを図11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25m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A点において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。

3. 計算結果と観測データの比較

図12に計算結果を示す。図には風向角 $\beta=0^\circ$ 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。

図13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30m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30m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40m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60m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。

計算結果は各格子点における平均化体積内の時空間平均値なので、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ている。したがって、建物の無い、風通しのよい地点で気球を上げて測定された時間平均値である測定値に比べると、一般に小さくなる。実際、立方体粗度ブロック周りの時間平均風速の鉛直分布の測定例⁹⁾を図14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9)に示されるように、時間平均値の鉛直分布形状は粗度高さの約1.5~2.0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が、観測点B付近の建物高さは写真1aに示すようにかなり高く、最高で約30~40m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では写真1bに示すように、付近の建物の最高高さは約20mである。観測値には高度30mから50m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、地面付近で計算値が観測値よりも小さくなる理由としては、地表面の建物密度の経年変化が考えられる。建物形状の読み込みに用いた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。文献10)によれば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のが、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を表している。さらに、観測時の大気不安定度の影響が考えられる。たとえば、これまでに自然風中で行われた観測例11,12)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、ベキ指数の値は小さくなる。これは、鉛直方向に負の温度勾配が大きくなると、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従って小さくなる。崔ら¹³⁾によると、この温度勾配の影響は高さ10mにおける平均風速が5m/sを超える場合にほぼ無視できる。図11をみると、観測点B, Cにおけ

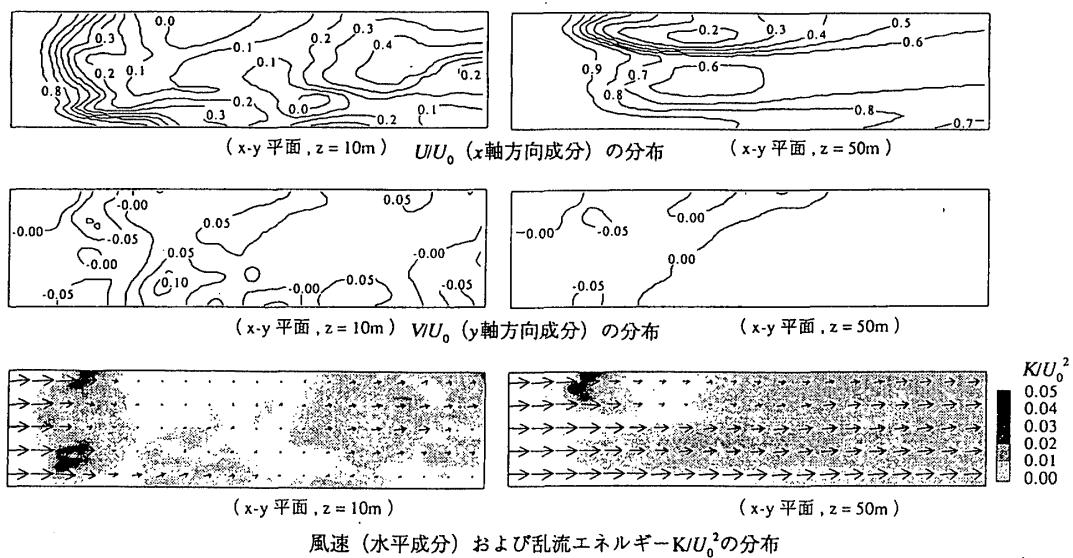


図 12 計算結果

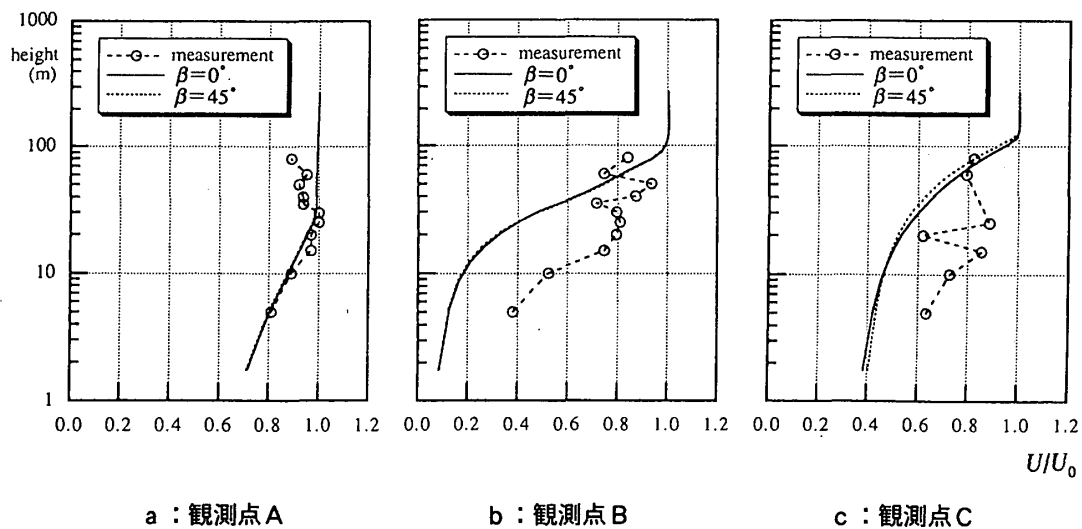
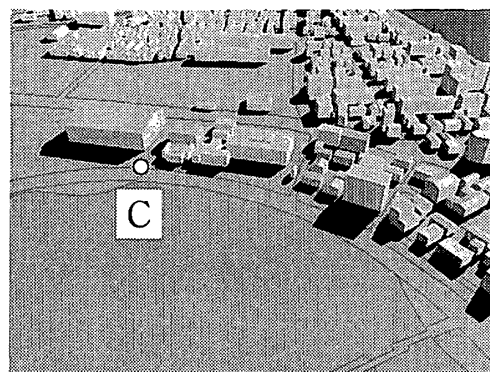
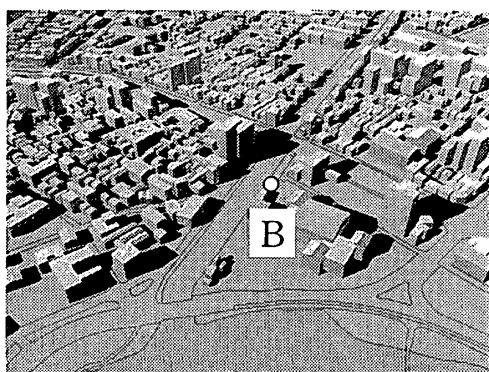


図 13 計算結果と観測値の比較



a : 観測点 B を南東上空から眺める

b : 観測点 C を北西上空から眺める

写真 1 観測点付近の建物形状

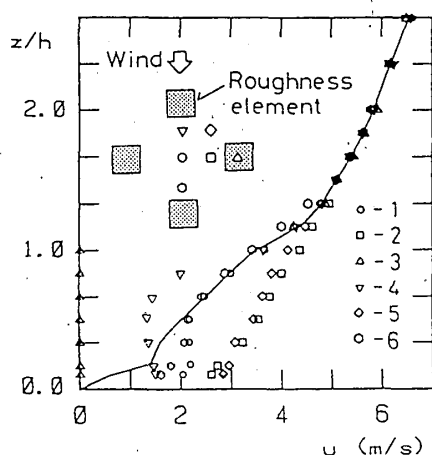


図 14 立方体粗度ブロック周りの時間平均風速の鉛直分布の測定例

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。その他、観測気球のたわみによる測定位置と計算位置の違いや樹木の影響などが考えられる。

以上、計算値と観測値の比較および考察を行い、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。時空間平均値である計算結果に対応する観測値が入手できなかったこと、気象条件が必ずしも計算と同じでなかったこと等、計算値との比較に際して条件を完全に合わせられなかったので、十分な例証が出来たとは言えないが、筆者は本研究で示した市街地上空の気流性状の予測手法は、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建物最高高さの約1.5~3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考える。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。とく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よ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。

5. まとめ

本報ではまずはじめに、計算で用いるラフネスパラメータに関して、千鳥状配列立方体粗度ブロックに対して求められた最適値を、市街地のように複雑な粗度形状に用いる場合の問題点を検討した。計算結果と実験結果を比較すると、立方体粗度ブロックに対するラフネスパラメータの最適値を用いることによって、平均風速の分布については、計算結果と実験値の差が主流風速の1.5%以内に

なる割合を70%以上に、平均的な乱れの発生量を代表する床面抗力係数については、計算値と実験値の差が実験値の20%以内になるように計算で再現することが出来ることがわかった。

次に、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との比較を行って、本研究で用いた予測手法の有効性および適用範囲の検証を行った。その結果、計算によって求められた気流性状の時空間平均値は、付近の建物の最高高さの約1.5~3倍以上で位置によらず実際の時間平均風速の鉛直分布をほぼ再現することができ、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り、観測値も計算結果より大きな値をとる場合が多いことが分かった。

最後に、近年ドップラーソーダ等による観測例が蓄積されつつあるが、いまなお市街地における観測データがきわめて少ないのが現状である。筆者自身もデータの収集に勤めたいと努力しているが、この分野における詳しい観測が今後とも継続、発展することを切望するものである。また、本報で示した手法を用いて、吹送距離方向の乱流境界層の発達の様子や風速分布の変化をある程度予測できると考えるので、次報（その2）で詳しい検討を行う予定である。

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。観測データを提供していただいた堤純一郎先生（琉球大学）、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。

参考文献

- 1) 丸山 敬：粗度要素の抵抗および体積変化を考慮したk-e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.75-81，1989.10.
- 2) 平岡久司・丸山 敬・中村泰人・桂 順治：植物群落内および都市キャンビー内の乱流モデルに関する研究（その1）乱流モデルの作成，日本建築学会計画系論文報告集第406号，pp.1-9，1989.12.
- 3) 丸山 敬：乱流境界層風洞の数値シミュレーション，日本建築学会構造系論文報告集第437号，pp.135-141，1992.7.
- 4) Maruyama, T. : Optimization of roughness parameters for staggered arrayed cubic blocks using experimental data, Journal of Wind Engineering, No.52, pp.424-429, 1992.8.
- 5) 丸山 敬：市街地模型に加わる抗力の測定，日本建築学会大会（中国）學術講演梗概集B構造I，pp.81-82，1990.10.
- 6) 丸山 敬：立方体粗度ブロックの配列形状の違いによる抗力の変化について，日本風工学会誌，1991.11，pp.15-24.
- 7) 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.15-27，1993.10.

- 8) Katayama,T, J.Tsutsumi, A.Ishii, M.Nishida and M.Hashida :
Observations of heat flux in an urban area with a large pond by
kytoons, Journal of Wind Engineering and Industrial
Aerodynamics, Vol.32, pp.41-50, 1989.
- 9) 丸山 敬・石崎澁雄：市街地キャノピー内の時空間平均風
速の鉛直分布に関する実験的研究（千鳥状に配置した立
方体粗度要素による検討），日本建築学会構造系論文報告
集第394号，pp.60- 65, 1988.12.
- 10) 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，pp.101-111,1989.6.
- 11) 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，pp.57-63,1971.
- 12) Shi Feng Zhang : A statistical analysis of the power law and the
logarithmic law using wind data from a 164m tower,Research
Note,Boundary-Layer Meteorology,Vol.20,pp.117-123,1981.
- 13) 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,pp.23-43，
1990.8.
- 14) 丸山 敬：粗面上に発達する乱流境界層の数値シミュレー
ション，日本風工学会誌，No.47, pp. 81- 82, 1991.4.
- 15) 丸山 敬：市街地上空における気流性状の数値計算，日本
建築学会大会（北陸）学術講演梗概集B構造 I,pp.29- 30,
1992.8.

（1994年11月10日原稿受理，1995年5月17日採用決定）