

平塚市上空の風速分布の数値シミュレーション

丸山 敬

要 旨

ドップラーソーダを用いた観測が行われている平塚市において、粗度形状の影響を取り込むことのできる $k-\epsilon$ 2 方程式型の乱流モデルを用いて、市街地上空の気流性状の数値計算を行った。強風時の観測データをもとに計算で発生させた流入境界条件を用いた計算結果は、実測結果と良い対応を示し、建物が密集している地域での風速の減少と乱れの増加、川筋にそった強風域を再現した。

キーワード：市街地、 $k-\epsilon$ 型乱流モデル、風速分布、数値シミュレーション

1. はじめに

筆者ら（平岡ら1989,1990）は市街地のような複雑な粗面上において、 $k-\epsilon$ 型の2方程式乱流モデルを用いた強風中立時の気流性状の計算手法の開発を進めてきた。これまで、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（丸山,1995）が、その際比較の対象となった観測値は上空80mまでのもので、最大風速も約6m/sと低風速時のデータであった。

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り、観測データが蓄積されつつある（石橋ら, 1997）。平塚市においても田村らのグループによってドップラーソーダを用いた2地点での同時観測が行われ、強風時の観測データを含む流れ方向に約7km離れた異なる2地点での同時観測データが得られている。その記録によると、高度約400mまでの風速分布が観測され、平均風速も上空で約20m/sと強風中立時の観測データが得られている。

ここでは、上述の観測地点を含む平塚市に計算領域を設定し、実際の建物形状データを読み込んで、観測データとの比較による気流性状の再現性の検討を目標に、上空の気流性状の3次元計算を行った。

2. 計算手法

計算方法は丸山（1995）と同様に、植物および都市キャノピー内で粗度形状を体積変化の影響を含めてモデル化した $k-\epsilon$ 2 方程式型の乱流モデル（平岡ら, 1989; 平岡ら, 1990）を用いた。計算領域はFig. 1 に示す平塚市と茅ヶ崎市にまたがる範囲で、ドップラーソーダによる観測地点を含む。領域内の地表面粗度形状はFig. 2, 3 に示すように住宅地図、航空写真および現地調査により建物の水平断面形状と階高を数値データとして読み込み込んだ。計算領域の南には相模湾が広がり、南からは海上を吹いてきた風が流入する。海岸線の道路に沿っては松の防風林が広がるが、計算に必要なパラメータが不明なので、樹木の影響は考慮していない。なお、各種樹木の影響は建物に比べてその影響は少ないと考え、その他、計算領域に含まれる公園や河原に生える各種樹木の影響も今回の計算では無視した。このようにしても、地面付近で、樹木の密度が高い部分を除いては、計算結果に大きな違いはないと考える。Fig. 2, 3, 4に示すように、建物の形状データを読み込んだ領域は平塚市の市街地を含み、JR平塚駅を中心とした中高層ビル街および住宅街、北側の工場地区の大規模な建物群、さらに北側の農耕地および、平塚市の東に流れる相模

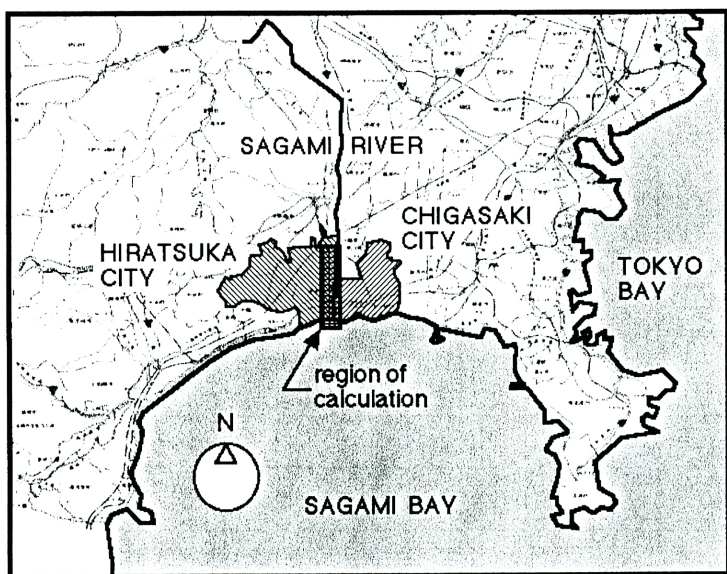


Fig. 1 Region of calculation

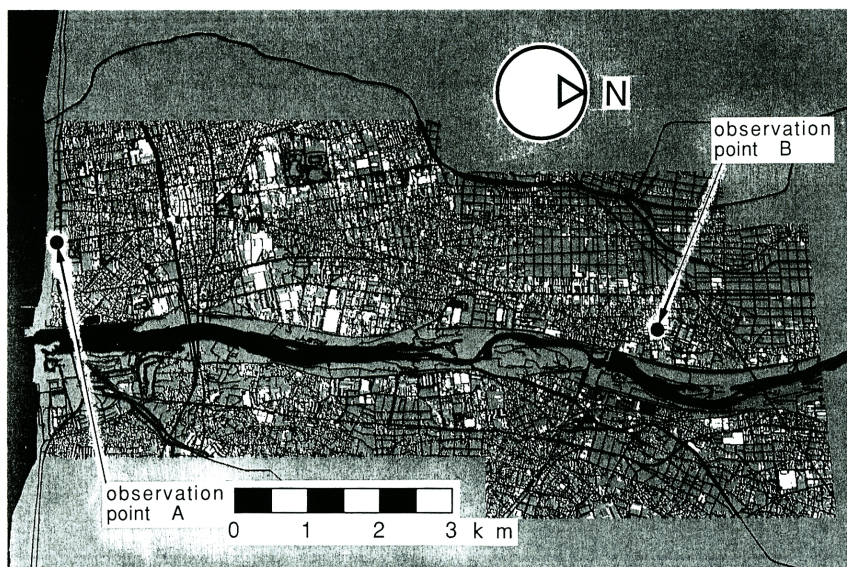
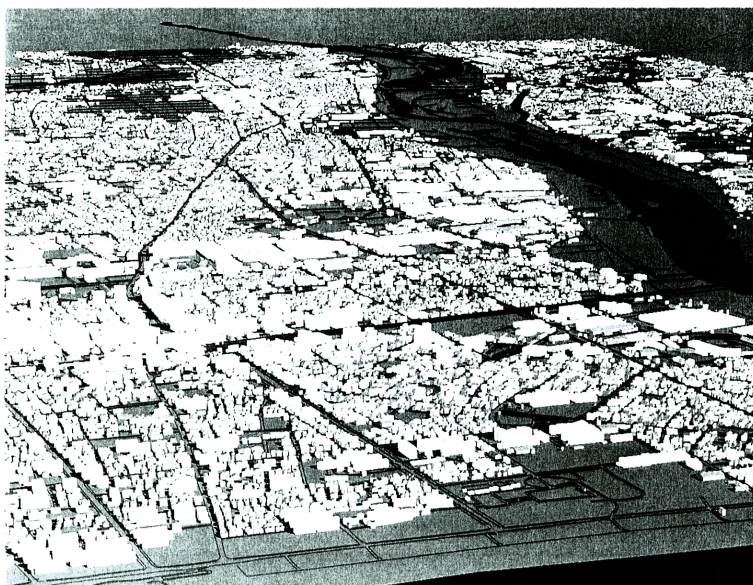
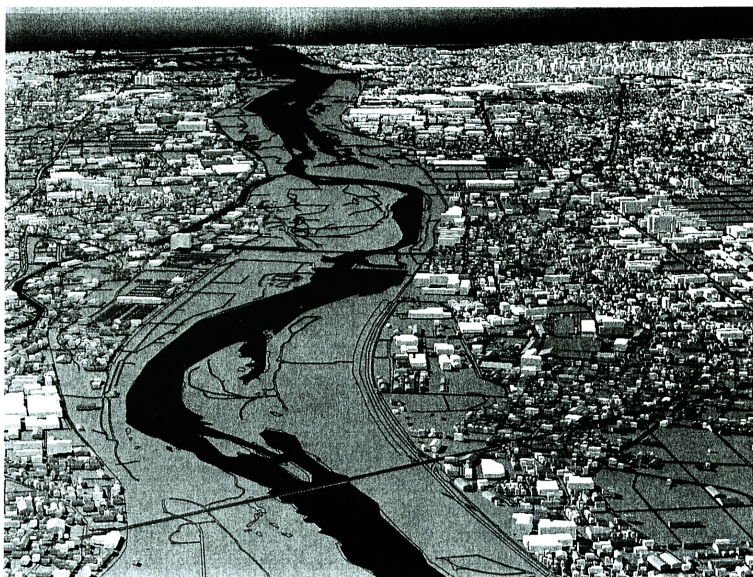


Fig. 2 Area where the configuration of buildings and houses are obtained from maps and areal photos



A View from the sea to the north



B View from the north to the south

Fig. 3 Configuration of surface roughnesses : buildings and houses

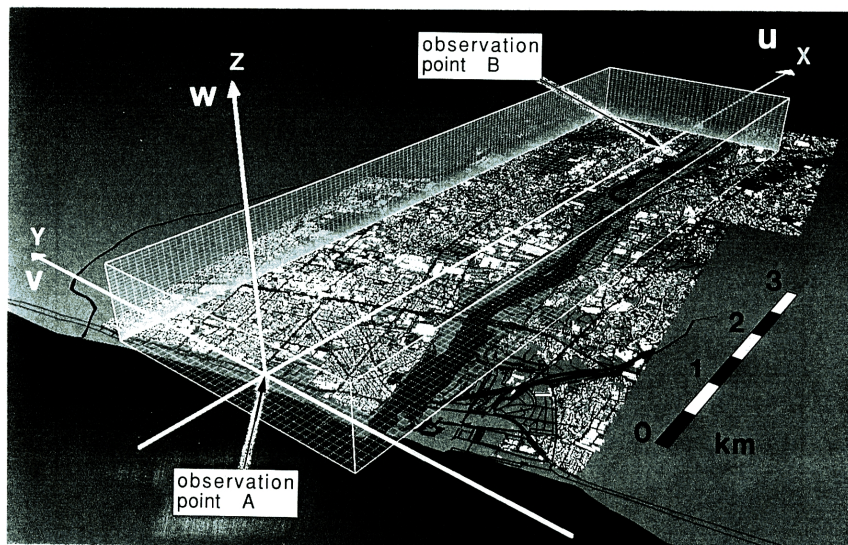


Fig. 4 Mesh discretization and coordinate system

川を越えて、茅ヶ崎市・寒川町の一部を含む。

上記のデータにより、計算に必要となる粗度の体積密度、表面積密度、抵抗係数および乱れの長さスケールの値を丸山（1995）と同様な方法で各計算格子点において求めた。なお、水面、河原、農耕地等建物の存在しない地面境界面に関しては、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 $\varepsilon = K^{3/2} C_D^{3/4} / K z_0$ とした。ここで、 $C_D = 0.09$ 、 $\kappa = 0.4$ 、 z_0 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aggerド配置を用い、計算領域外部の仮想セル上で $\partial u / \partial x$ がべき法則をみたすように、また、 w は地面境界上で 0 、 $\partial K / \partial z = \partial \varepsilon / \partial z = 0$ となるように与えてある。

計算領域はFig. 1, 4に示すように、南北方向に細長い $x \times y \times z = 8.9 \times 2.8 \times 0.7 \text{ km}^3$ の範囲で、南北方向に x 軸を、東西方向に y 軸を、鉛直方向に z 軸をとった。ドップラーソーダによる観測地点はFig. 2, 4に示すように、海側（観測点A）と陸側（観測点B）の合計2ヶ所である。計算格子の大きさは、丸山（1995）より、水平面内の平均化面積を一边が70mの正方形とし、水平方向に等間隔とした。鉛直方向の分割幅は、丸山（1992）の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、鉛直方向には地面付近で一边3.5m、上方にいくほど格子幅が大きくなる不等間隔格子を用いた。

格子点は x, y, z 軸方向に $127 \times 40 \times 39$ 、合計198,120点である。地面付近の粗度形状の影響は粗度の体積密度、表面積密度、抵抗係数および乱れの長さスケ-

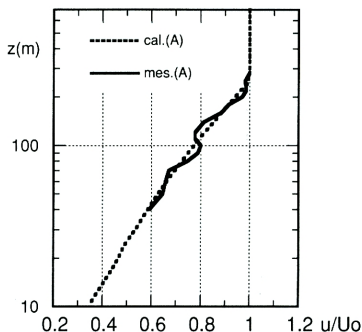


Fig. 5 Mean wind speed profile at observation point A, calculated, $\circ$; measured, $\bullet$

ルとして組み込まれ、計算時に必要となるパラメータの値は、各格子点における空間平均値として求められる。

側面、上面および下流面では、各物理量の空間勾配が各境界面の法線方向に零である自由流出境界条件を用いている。計算は上流が単純な粗度形状をもった海となる南風を解析対象とし、事前に滑面上に本計算と同様な手法で乱流境界層を滑面上に発達させ、平均風速の鉛直分布形状が観測結果を十分近似するようになったときの計算結果を流入境界条件として用いた。今回用いた平均風速 U 流入境界条件を Fig. 5に観測結果とともに示す。

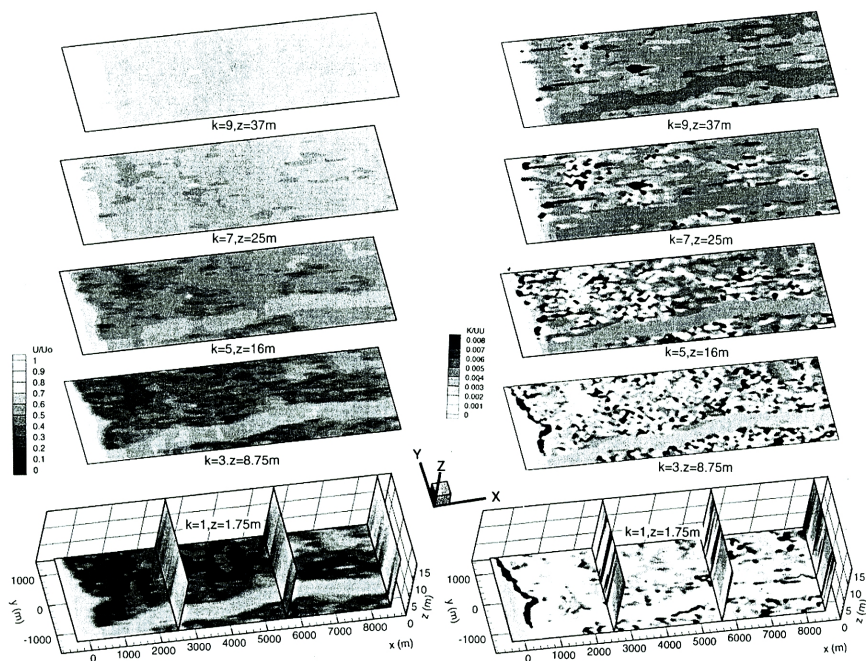


Fig. 6 Distribution of mean wind speed U and kinetic energy K at various height

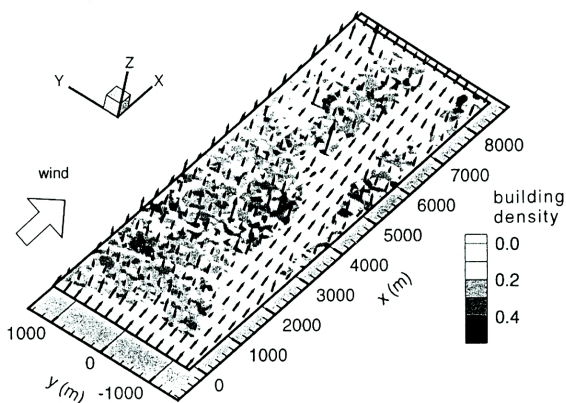


Fig. 7 Distribution of building density and the velocity vectors at near ground; $z=1.75\text{m}$

3. 計算結果

Fig. 6 に平均風速 U (x 方向成分) と乱流エネルギー K の分布を示す。図中 U および K は流入境界面中央上部の基準風速 U_0 により無次元化してある。海側から入ってきた風は海岸付近の住宅地で急激に風速が落ち、建物が高く、密度が大きい J R 平塚駅付近お

よび、工場や倉庫が立ち並ぶ解析領域中央付近に低風速域が広がっている。一方、地表面粗度の小さい川筋に沿った部分では、風速は周囲に比べて相対的に早くなっている。平均風速の分布は高さ 37m で、 x 軸方向に直角水平方向にはほぼ一様な分布を示すようになっている。J R 平塚駅付近の建物が高いところでも、最高約 30m、平均約 20m であるから、丸山

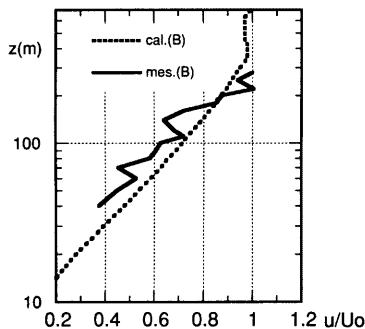


Fig.8 Mean wind speed profile at observation point B, calculated, ; measured, ——

(1995)の結果に示されるように、平均風速の分布形状は付近の建物高さの約1.5倍以上で、ほぼ一様な分布を示し、その値は付近の時空間平均風速分布を表していると考えられる。

一方、乱流エネルギーは、風速変化の激しい領域、とくに風速が急激に減少する部分で高くなり、大きな乱れが発生していることがわかる。この風速が急激に減少する部分は建物密度が流れ方向に高くなる場所に相当しており、Fig.7に示すようにそのような場所では、地面付近で平均的に上空に向かう流れが生じている。これにより、地面付近で生じた乱れが上空に運ばれ、風下に拡散することになる。このとき、平均風速の分布とちがって、かなり高高度まで不均一さがみられる。また、上空では川の上部で乱れが強くなる結果となっているが、乱流エネルギーの生成には速度勾配だけでなく、乱れにエネルギーを供給するために平均流のもつエネルギーが大きいことも必要であることがわかる。

最後に、風下側の観測点Bにおける平均風速の鉛直プロファイルの観測値との比較をFig.8に示す。観測結

果はFig.5とも、台風通過時に南風が吹いた場合のもので、10分間平均風速で、地面に最も近い観測高度40mで約12m/s、上空の最大値で22m/sであった。図中観測値は風上側観測点Aにおける上空の平均風速を基準風速 U_0 として無次元化して比較してある。観測結果の鉛直分布形状は幾分ばらつくが、風上側よりも風下側の風速は全体に低く、高さ方向の勾配が少し大きくなっている様子が再現されている。

4. まとめ

粗度形状の影響を取り込んだ $k-\varepsilon$ 2方程式型の乱流モデルを用いて、平塚市における市街地上空の気流性状の数値計算を行った。強風時の観測データをもとに計算で発生させた流入境界条件を用いた計算結果は、実測結果と良い対応を示し、建物が密集している地域での風速の減少と乱れの増加、川筋にそった強風域を再現した。また、計算結果より、複雑な粗度形状をもつ市街地での乱れの発生機構について検討した。

謝 辞

本研究は大気境界層研究会（代表：田村幸雄・東京工芸大学）の活動の一部として行われ、観測資料の提供を受けた。また、建物データの処理および表示には株式会社プラス・ワンの協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 石橋龍吉ら(1997)：ドップラーソーダーを用いた地表面粗度の異なる地点の風速鉛直分布に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造B-1，pp.147-148.
- 平岡久司・丸山 敬・中村泰人・桂 順治(1989)：植物群落内および都市キャノピー内の乱流モデルに関する研究（その1），日本建築学会論文報告集，第406号，pp.1-9.
- 平岡久司・丸山 敬・中村泰人・桂 順治(1990)：植物群落内および都市キャノピー内の乱流モデルに関する研究（その2），日本建築学会論文報告集，第416号，pp.1-8.
- 丸山 敬(1992)：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.133-141.
- 丸山敬(1995)：市街地上空における気流性状の数値計算，日本建築学会構造系論文報告集，第474号，pp.49-58.

Numerical Simulation of Flow Field over Hiratsuka City

Takashi MARUYAMA

Synopsis

A turbulent flow over a real city: Hiratsuka, was calculated by refined $k-\varepsilon$ turbulence model which incorporates the effect of surface roughness using configuration of roughness elements, i.e. buildings and houses. The calculation simulates the deceleration of wind speed and the acceleration of the generation of kinetic energy near the ground where the buildings are densely distributed. The strong wind flow along the river was also calculated.

Keywords : Urban city; $k-\varepsilon$ turbulence model; Flow field; Numerical simulation