



局所地形の影響を考慮した強風マップの作成

大熊武司* 岡田 創** 片桐純治** 丸川比佐夫** 野田 博***

Design wind speed map considering with effect of topography

Takeshi OHKUMA* Hajime OKADA** Junji KATAGIRI** Hisao MARUKAWA** Hiroshi NODA***

1. はじめに

建築基準法及び建築物荷重指針⁽¹⁾の風荷重算定では、地域ごとに与えられた基本風速 V_0 に建設場所の周辺状況に応じた風速鉛直分布係数 E を乗じて設計風速を定める。このとき地形の影響を受けると考えられる場合は、その効果を考慮して設計風速を定める必要がある。局所的な地形の影響を考慮して設計風速を定めるには、1つの方法として指針に示される小地形による風速の割増係数を設計風速に乗じることが考えられる。

しかしながら、実際の地形は複雑であり指針に示される適用範囲を超えるものも多い。その一例として、山と山の間の谷間に沿って風が吹くような地形で、指針で考慮していない効果により風が強まり被害が生じた可能性が考えられる被害例⁽²⁾もある。故に、現実の地形の影響を反映して風速を推定する実用可能な手法の開発が必要である。

近傍に気象官署等が無い地点において風速統計量を推定する場合、台風の襲来傾度をモンテカルロ法を用いた台風シミュレーション^(3~7 等)により推定して統計処理することが行われる。台風シミュレーションでは、中心気圧低下量、台風進路、移動速度などのパラメータを統計量としてモデル化し、モンテカルロ法により任意の期間の台風をシミュレートすることにより、風速統計量を得る。台風シミュレーションより得られる風速統計量は上空の傾度風に関するものであり、これから地上の風速を推定するためには地表面の粗度や地形の影響を考慮する必要がある。

台風シミュレーションにより得られた結果から地上の風速を推定する手法として、領域気象モデル（メソスケールモデル）^(8,9)を用いた数値流体解析を行うことが考えられる⁽¹⁰⁾。メソスケールモデルを用いた解析では、解析領域を $1,000 \times 1,000 \text{ km}$ 程度の広さとし、ネスティング計算により最終的に格子間隔が $1 \sim 2 \text{ km}$ 程度の解像度の領域を解析する^(10 等)。さらに細かい小規模な地形の影響を考慮するために、乱流モデルとして $k-\epsilon$ モデルを用いた解析を組み合わせることも行われている^(12,13)。しかし、風速統計量を得るためには膨大な期間の解析を行う必要があり、メソスケールモデルを用いた解析により地上の風速を推定することは現時点では困難と考えられる。

孟・松井他^(14~17)は、ナビエ・ストークス方程式を傾度風に関する方程式と地表面の摩擦による成分に関する方程式に分け、傾度風速と地表面の摩擦による風速成分の近似式を得た。この方程式を台風 9119 号に適用し、台風時の風速の鉛直方向分布をべき数を粗度長の関数とした指数関数で近似できることを示した。この粗度長は、周辺の地形による影響を考慮した相当粗度長⁽¹³⁾を用いるが、風洞実験などにより全風向について相当粗度長を同定する必要がある。

風洞実験により上空風速と地上高さの風速の関係を定める場合、風洞内に納める地形模型の再現範囲が問題となる。十分な精度で地形を再現できるように大きな縮尺率で模型化した場合、模型化範囲の外側の地形の影響を反映するように流入気流を何らかの形で仮定する必要がある。一方、模型化範囲を大きくした場合、地形を再現する精度を考えると局所的な地形の影響を評価して風速を測定することは困難である。また、いずれの場合も情報が得られる地点は風速の測定を行う点に限られる。

上述のように、現時点では台風シミュレーションによって得られた傾度風速から地形の影響を考慮して地上高

*名誉教授、客員教授、工学研究所

Professor Emeritus, Visiting Professor, Research Institute for Engineering

** 泉創建エンジニアリング

Izumisohken Engineering Co., Ltd.

*** 三井住友建設

Sumitomo Mitsui Construction Co., Ltd.

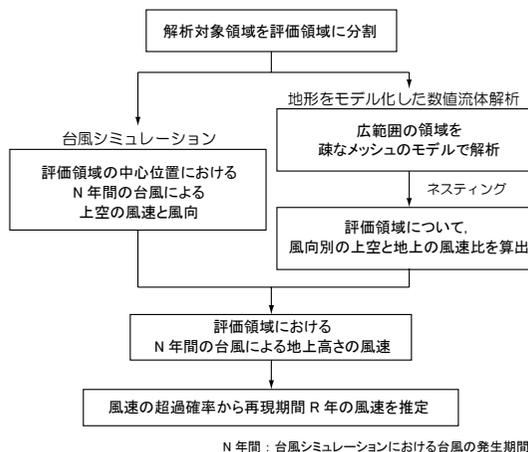


図1 地形による影響を考慮した任意の再現期間年の風速算出要領

さにおける風速を推定するには困難を伴う。そこで、本研究では、上空と地上の風速の関係を標準 $k-\epsilon$ モデルを用いた数値流体解析により求め、地形の影響を考慮して任意の再現期間の風速を推定する手法について検討を行う。広範囲の地形をモデル化して標準 $k-\epsilon$ モデルを用いた数値流体解析を行うことにより、検討対象地点の風上側の地形の影響を考慮して上空と地上の風速の関係をマップとして得ることが比較的容易に出来る。さらに、提案した手法に基づいて地形の影響を考慮した強風マップの作成を行う。以下に本研究の構成を述べる。

2章では、本研究における地形の影響を考慮した任意の再現期間の風速を推定する手法の概要を示す。併せて、同手法で用いる数値流体解析と台風シミュレーションの手法について示す。数値流体解析による複雑地形の流れの解析については、実際の複雑地形を対象とした風洞実験と比較検討した研究例^(18,19,20)はあるものの、広範囲の地形を模型化した風洞実験と比較した例は見当たらない。そこで、3章では神奈川県中央部を対象として地形模型を用いた風洞実験を行い、数値流体解析結果の精度の検討を行う。4章では、対象領域を神奈川県内の2箇所のエリアとして本研究で提案する任意の再現期間の風速を推定する手法を適用し、強風マップの作成を行う。5章では、検討結果についてまとめる。

2. 解析手法の概要

2.1 地形の影響を考慮した任意の再現期間の風速の推定方法

本研究では、解析対象領域を評価領域に分割し、各評価領域について台風シミュレーション及び数値流体解析

結果を組み合わせ地形の影響を考慮して任意の再現期間の風速の推定を行う。図1に算出要領のフローを示す。

台風シミュレーションでは、各評価領域の中心位置における上空の風向と風速を推定する。台風シミュレーションによる台風の発生期間は、任意の再現期間 R 年の超過確率を統計的に十分に得られる N 年間とする。

数値流体解析では、評価領域の上空と地上高さの風速の関係を風向別に求める。評価領域の流入条件として風上側の地形の影響を十分に考慮できるように、広範囲の地形を疎な格子間隔でモデル化した1次領域の解析を行い、ネスティングを行うことにより局所的な地形の影響を考慮できる格子間隔のモデルで評価領域を含む領域を解析する。

台風シミュレーションから得られた N 年間の台風による上空の風速に、数値流体解析より得られた上空風速と地上高さの風速の比を風向に応じて乗じることにより、評価領域内の各点について地上高さにおける N 年間の台風によって生じる風速を推定する。

任意の再現期間 R 年の風速は、評価領域内の各点について得られた N 年間の台風による風速から年最大風速の超過確率を算出して推定する。

2.2 数値流体解析手法の概要

数値流体解析は、標準 $k-\epsilon$ モデルを用いたレイノルズ平均 NS 方程式によるシミュレーションにより行う⁽²¹⁾。

非圧縮性の流体现象は、下に示す連続の式と NS 方程式で記述される。

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

ここで、 U_i は瞬間速度ベクトルの各成分、 P は圧力、 ρ は流体の密度、 ν は動粘性係数である。速度及び圧力は、次のように平均部分と変動部分に分解される（レイノルズ分解）。

$$U_i = \bar{U}_i + u_i, \quad P_i = \bar{P}_i + p_i \quad (3)$$

式(3)を式(1)ならびに(2)に代入し、両者にレイノルズ平均を施すことにより次式が得られる。

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_i u_j}) \quad (5)$$

右辺の $\overline{u_i u_j}$ はレイノルズ応力である。レイノルズ応力を線形渦粘性型モデルで近似すると次式で与えられる（Boussinesqの渦粘性近似）。

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}, \quad \nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

ここで、 k は乱流エネルギー、 ε はエネルギー散逸率、 ν_t は渦動粘性係数、 δ_{ij} はクロネッカーの δ である。本研究で用いている標準型 k - ε モデルでは $C_\mu=0.09$ とする。乱流エネルギー k の輸送方程式は、次式で与えられる。

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{U}_i \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu_t \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + P_k - \varepsilon \quad (7)$$

ここで標準型 k - ε モデルでは $\sigma_k=1.0$ とする。また、 P_k はせん断力による k の生成項で、次式で与えられる。

$$P_k = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \quad (8)$$

また、エネルギー散逸率 ε の輸送方程式は、次式で与えられる。

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{U}_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{e1} P_k - C_{e2} \varepsilon) \quad (9)$$

本研究で用いた標準型 k - ε モデルでは $\sigma_\varepsilon=1.3$ 、 $C_{e1}=1.44$ 、 $C_{e2}=1.92$ とする。

本研究では、支配方程式の離散化は差分法を用いる。空間微分の差分近似は移流項については3次風上差分、その他の空間差分は2次中心差分とする。時間微分の差分近似はAdams-Bashforth法⁽²²⁾（2次陽解法）を用いる。差分近似した運動方程式を連続の式を満足するように時間進行させるための計算アルゴリズムはHSMAC法⁽²³⁾を用いる。計算格子は不等間隔の直交スタaggerド格子を用いる。

流入境界はべき数 α の指数分布の境界層乱流を設定する。流入におけるエネルギー散逸率 ε は乱流エネルギー k の生産と散逸がほぼ釣り合っているものとして与える。

$$u(z) = u_0 (z/z_0)^\alpha \quad (10.a)$$

$$k(z) = 1/1.2 \cdot \sigma_u(z)^2 \quad (10.b)^{(24)}$$

$$\varepsilon(z) = C_\mu^{1/2} k(z) \frac{\partial u(z)}{\partial z} \quad (10.c)$$

$$\sigma_u(z) = 0.1u(z)/(z/z_G)^{(-\alpha-0.05)} \quad (10.d)$$

流出境界は平均流速の勾配0の条件、側面及び上面の境界についてはslip条件を与える。また、地表面（壁面）の境界については、粗面対数則分布を仮定する。

$$u = \frac{u^*}{\kappa} \ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) \quad (11.a)$$

$$k = \frac{u^{*2}}{\sqrt{C_\mu}} \quad (11.b)$$

$$\varepsilon = \frac{u^{*3}}{\kappa z} \quad (11.c)$$

ここで、 $C_\mu=0.09$ 、 d :ゼロ面変位、 z_0 :粗度長、 z :物体面からの距離、 u^* :摩擦速度である。

2.3 台風シミュレーション概要

本研究では、上空風の風速統計量を安井・大熊他^(5,7)の研究に基づくモンテカルロ法を利用した台風シミュレーションにより算出する。安井・大熊他^(5,7)の研究では、台風の再現に関わるパラメータを解析領域、台風発生域での特性（発生頻度、移動速度、中心気圧低下量）、台風の移動特性（移動速度、中心気圧低下量）としている。モデルを作成する際に用いた台風の資料は、1951年から1995年の間に発生した台風の内、中心気圧が980hPaより低下した台風である。

図2に台風シミュレーションを行う解析領域と区画を示す。各区画内の数値は、1951年から1995年に各区画を通過した台風の個数を示すものである。風速の推定値

域を日本全域としたことにより、解析領域は北緯 $24^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 、東経 $113^{\circ} \sim 152^{\circ}$ としている。

解析上の台風を発生させる領域は、北緯 $24^{\circ} \sim 26^{\circ}$ の区画とし、各区画における1年ごとの台風の出現個数の確率分布を Poisson 分布と仮定し、各区画で台風を出現させる。また、出現区画における台風の移動速度及び中心気圧低下量の確率分布は、正規分布としている。

台風移動時の移動速度と中心気圧低下量の統計的性質は、現時点の値から6時間後の値を次式の関係により推定する。

$$X_{new} = a \cdot X_{old} + b + \varepsilon \quad (12)$$

ここで、 X_{new} : 6時間後の値、 X_{old} : 当該時点での値、 a, b : 回帰係数、 ε : 誤差で平均値0の正規分布に従う。気圧分布は次式に示す Schloemer⁽²⁵⁾の気圧分布式を用いる。

$$P = P_c + \Delta P \cdot \exp(-r_m / r) \quad (13)$$

ここで、 P : 観測点の海面気圧、 P_c : 中心気圧、 ΔP : 中心気圧低下量、 r_m : 最大旋衡風速半径、 r : 観測点と台風中心との距離である。

安井・大熊他は1991年から1996年に発生した台風について(13)式を用いて最大旋衡風速半径 r_m を求めた。解析結果に基づけば、最大旋衡風速半径 r_m の統計量はほぼ正規分布で表され、その平均値と中心気圧低下量の関係は(14)式の関係にある。なお、 ΔP の値が小さいほど r_m のばらつきは大きくなることから、 $\Delta P < 33$ (hPa)の台風については r_m を一定の値とした。

$$\bar{r}_m = 2.06 \times 10^4 \cdot \Delta P^{-1.27} \quad (14)$$

ここで、 \bar{r}_m : 最大旋衡風速半径の平均
傾度風速は、光田・藤井⁽⁴⁾と同様に次式で求める。

$$V_g = \frac{C \sin \theta_r - f \cdot r}{2} + \sqrt{\left(\frac{C \sin \theta_r - f \cdot r}{2} \right)^2 + \frac{r}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r}} \quad (15)$$

ここで、 C : 台風の移動速度、 f : コリオリパラメータ、 ρ : 空気密度、 θ_r : 台風中心から見た台風進行方向と観測点がなす反時計回りの角度である。

安井・大熊他は、台風シミュレーションによる風速推定値と各気象官署における観測値に3時間程度の移動平均を施した値が一致した傾向を示すことを示した。さらに連続した10分間平均風速の観測結果から、3時間移動平均値周りの10分間平均値の偏差はほぼ正規分布に従い、変動係数(移動平均値で除した時系列の標準偏差)は概ね0.1であることを示している。

本研究では、6時間毎に得られる台風経路を10分間間隔のデータに補間し、傾度風速はばらつきを考慮して10分間平均風速に相当する値に変換する。このとき、変動係数の値はやや大きめの0.15とした。

3. 数値流体解析による複雑地形上の流れの解析結果の検証

3.1 検証の目的

数値流体解析により複雑地形上の流れの解析を行うためには、検討対象とする領域の風上側の地形の影響を反映した流入条件を与える必要がある。1つの方法として、風上側に十分長い解析領域を取ることにより、対象領域

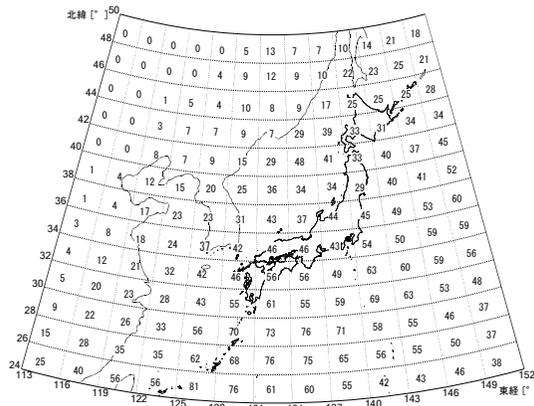


図2 台風シミュレーションにおける解析区画と台風通過数⁽⁵⁾

付近で風上側の地形の影響を反映した風速分布を得ることが考えられる。計算容量を考えると局所的な地形の影響を反映できる格子間隔で十分に広い領域の解析を行うことは困難であり、ネスティングによる解析を行う必要がある。しかし、先に述べたように広範囲の地形をモデル化した風洞実験と数値流体解析結果を比較した例は見当たらず、数値流体解析による解析結果の精度は十分に検証されたものとはいえない。そこで本研究では、神奈川県中央部を対象として縮尺 1/2500 の地形モデルを用いた風洞実験と数値流体解析を行い、数値流体解析による解析結果の精度の検証を行う。地形モデルは建物等の構造物はモデル化せずに一様粗度を貼り付け、地形が風速に及ぼす影響について着目する。

精度の検証は次の手順で行う。まず、地形モデルと等しい一様粗度を貼り付けた平板上を発達する乱流境界層を風洞実験により測定する。これと数値流体解析結果を比較し、数値流体解析で与える壁面境界の条件を定める。

次いで、神奈川県中央部を対象とした地形モデル上の気流を風洞実験により測定する。測定結果と数値流体解析による解析結果を比較することにより、解析時の格子間隔、ネスティングによる解析結果の精度を検討する。

図3に地形モデルのモデル化範囲を示す。

3.2 平板上の乱流境界層における検討

検討対象は、地形モデルに貼り付けたものと同じ 4mm 角のラフネスブロックを 30mm 間隔で流れ方向 5.4m、横方向 1.8m の範囲の平板に貼り付けた平板である。

実験風洞は、幅 2.2m、高さ 1.8m、測定部長さ 20m の

室内回流式エッフェル型風洞で行った。

風洞実験における風速の測定は、X型プローブの熱線風速計を用いて測定した。数値流体解析の流入境界はラフネスブロックの風上端部における風洞実験による測定結果を用いた。また、格子間隔は、表1に示す地形モデルの解析で用いる3種類の格子とした。

図4に風洞実験より得られた風上から 5.2m の位置における風速の鉛直方向分布を示す。このラフネスブロックにより発達する境界層は、べき法則に近似した場合べき数 α は $\alpha=0.2$ となる。また、対数則で近似した場合、ゼロ面変位 d をラフネスブロック高さの 0.6 倍の 2.4mm とした場合に床面近傍の風速勾配は粗度長 $z_0=0.02\text{mm}$ の分布で近似できる。そこで、数値解析における床面境界は、粗度長 $z_0=0.02\text{mm}$ の壁面対数則として与えた。

図5に風上から 5.2m の位置における実験結果と解析結果の比較を示す。Case1 の格子 B と Case2 の解析結果は、実験結果とよく一致している。Case1 の格子 A の解析結果は、60mm 以上の上空では他の解析結果と一致しているが、床面付近ではやや大きめの風速となっている。

図には、Case2 の格子で床面对数則に於ける z_0 を、大熊・丸川他⁽²⁰⁾に基づいてラフネス密度より求めた $z_0=0.04\text{mm}$ 、 $d=1.5\text{mm}$ とした場合、及び Counihan⁽²⁷⁾ よりべき数 α を用いて求めた $z_0=0.14\text{mm}$ (縮尺 1/2500 として換算) とした場合の解析結果を併せて示した。大熊他による d と z_0 を用いた解析結果は、実験値よりやや小さいが概ね一致しており、Counihan による z_0 を用いた解析結果は実験値より風速が低くなっている。これらと比較して d と z_0 を各々 2.4mm 及び 0.02mm とした解析結果は実

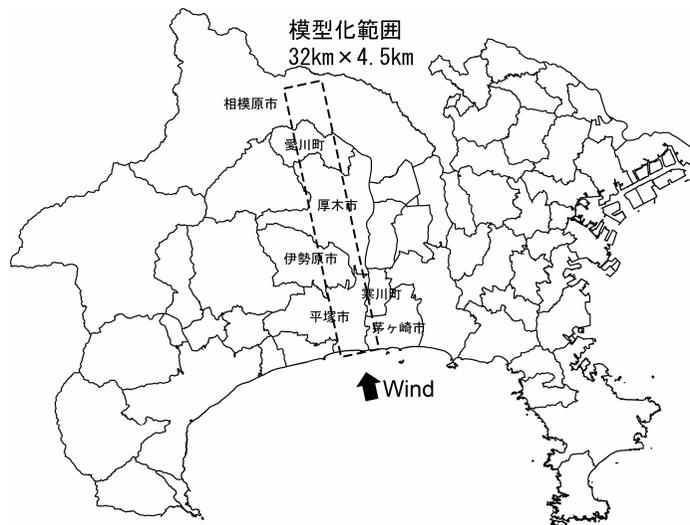


図3 地形モデルのモデル化範囲

験値とより一致しており、これらの値を用いることが妥当なものと考えられる。

3.3 地形模型を用いた風洞実験の概要

実験模型は、図3に示す神奈川県平塚市の海岸から相模原市津久井湖周辺までの幅4.5km、長さ32km（模型スケールで幅1.8m、長さ12.8m）の地形を縮尺1/2500で模型化したものである。地形の模型化は、厚さ4mmのベニヤ板（海岸付近では厚さ2mm）を縮尺1/2500の地形図に基づいて10m毎（模型上4mm）の等高線でカットし、これを積み上げることで作成した。地形模型と風洞壁面の隙間には、模型端部と同じ高さにカットしたステンレナボードを設置した。対象領域及び風速測定点を図6、実験模型の設置状況を図7に示す。建物などの構造物は模型化していないが、地表面の粗度として模型表面に4mm角のラフネスブロックを30mm間隔で山岳地と水面上を除き千鳥に貼り付けた。実験風速は、X=-8.5km地点の高さ1.2mにおいて約10m/sとした。

実験風向は、図6に示すように海側からの風とした。風速の測定は、同図に●で示す15箇所で鉛直方向の平均風速を測定した。また、風下側のX=-8.25~0km、Y=-2~2kmの範囲では、水平方向250m間隔で地上からの高さ25m（模型上10mm）の平均風速の測定を行った。

図6に示すX=-16.5kmより風上側では、縦型のI型プロープの熱線風速計を風洞床下より手動で測定高さに設置して測定した。X=-8.5kmより風下側では、X型プロープの熱線風速計をトラバース装置で測定位置に移動して測定した。X型プロープではu-wおよびu-v成分の測定を行った。風速の測定時間は30秒とした。なお、●で示す測定位置の高さ12mmにタフトを設置し、全ての測定位置において逆流が生じていないことを目視で確認して

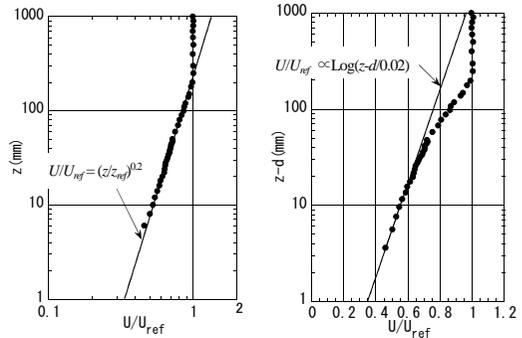


図4 模型に貼り付けたラフネスブロックにより平板上を発達する風速分布の測定結果

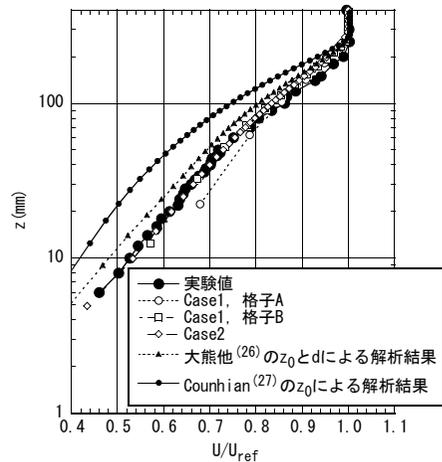


図5 平板境界層の解析結果

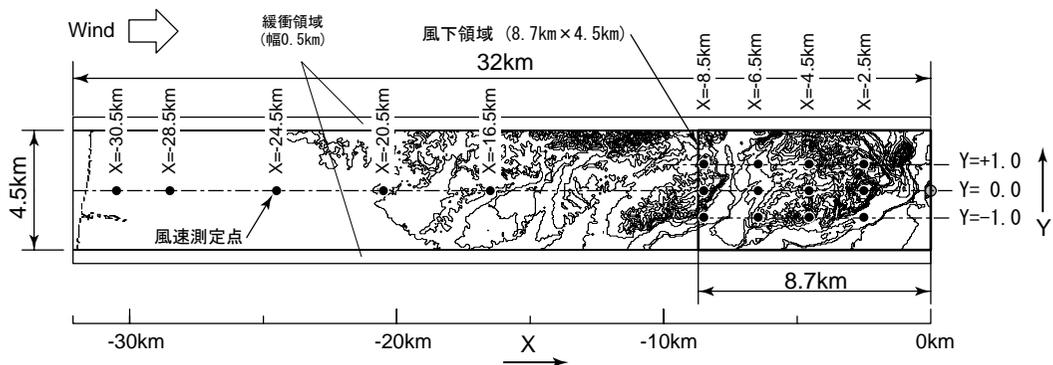


図6 対象領域及び風速測定点

いる。

3.4 数値流体解析方法概要

数値流体解析は、風洞模型全体を対象とした場合（以下、Case1）と風下の8.5kmの領域を対象とした場合（以下、Case2，風下領域）の2ケースについて行った。表1に示すように計算格子間隔は、Case1では100km四方程度の領域の解析を想定した水平方向に400m，地表面付近の鉛直方向に100mの格子（以下、格子A）と50km四方程度の領域の解析を想定した水平方向に100m，地表面付近の鉛直方向に50mの格子（以下、格子B）の2種類とし、Case2では10km四方程度の領域を解析することを想定して水平方向に50m，地表面付近の鉛直方向に25mの格子とした。地形の数値データは、Case1では数値地図50mメッシュ（国土地理院），Case2では10mメッシュ地形図（北海道地図(株)）を用いた。図8にCase1で格子Bを用いた解析モデル、及びCase2の解析モデルを示す。格子節点数は、Case1の格子Aでは $81 \times 15 \times 23 = 27,945$ ，格子Bでは $321 \times 51 \times 42 = 687,582$ ，Case2では $175 \times 91 \times 49 = 780,325$ である。Case2の領域においては、水平方向に25m，鉛直方向に12.5mの格子を用いた解析も行ったが、Case2の解析結果と大きな差が見られ

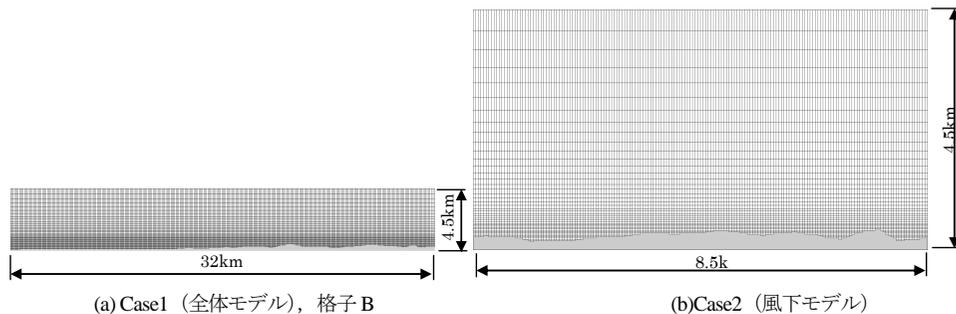


図7 地形模型設置状況（風下側より撮影）

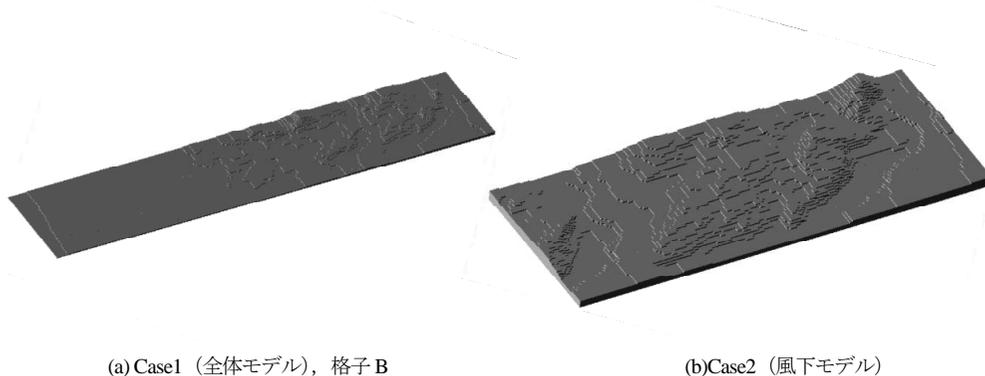
表1 地形模型 計算格子間隔

		X方向	Y方向	Z方向 最小間隔
Case1	格子A	400m(81)	400m(81)	100m(23)
	格子B	100m(321)	100m(51)	50m(42)
Case2		50m(175)	50m(91m)	25m(49)

カッコ内は格子節点数



(1) 計算格子 (x-z 断面, Y=0km)



(2)モデル鳥瞰図

図8 地形模型解析モデル

なかったため、本論文では Case2 での解析結果を示す。

複雑地形の解析では、一般座標系や非構造格子あるいは構造格子に FAVOR 法⁽²⁸⁾や IBM 法^(29,30)を適用するなどして解析精度を上げることが考えられるが、本研究では乱流モデルや解析モデルを変えての精度の向上に関する検討は今後の課題とし、最も基本的な乱流モデルである標準 $k-\epsilon$ モデルによる風況予測精度の検証を行った。

流入境界及び解析初期値は、Case1 では実験模型風上端部中央の測定結果に基づいて平均風速及び乱流エネルギー k の鉛直分布を流入境界として与え、初期値はこれと同じものを解析領域全体に一樣に与えた。Case2 では、Case1 の格子 B による解析値を補間して流入境界及び初期

期値とした。

地表面境界は、粗度長 $z_0=0.5\text{m}$ (模型上 0.02mm)、ゼロ面変位 $d=6\text{m}$ (模型上 2.4mm) の壁面対数則を与え、つ側壁面及び天井面の境界はスリップ条件、流出は自由流出条件とした。

3.5 Case1 の解析結果と実験結果の比較

以下では、測定結果及び解析結果について、流れ方向成分風速 U 、流れ直角方向成分風速 V 、鉛直方向成分風速 W を境界層風速 U_{ref} で規準化した風速比で示す。

図9に中央部 ($Y=0\text{km}$) の流れ方向の測定点における Case1 の格子 A 及び B による解析結果と実験結果の比較

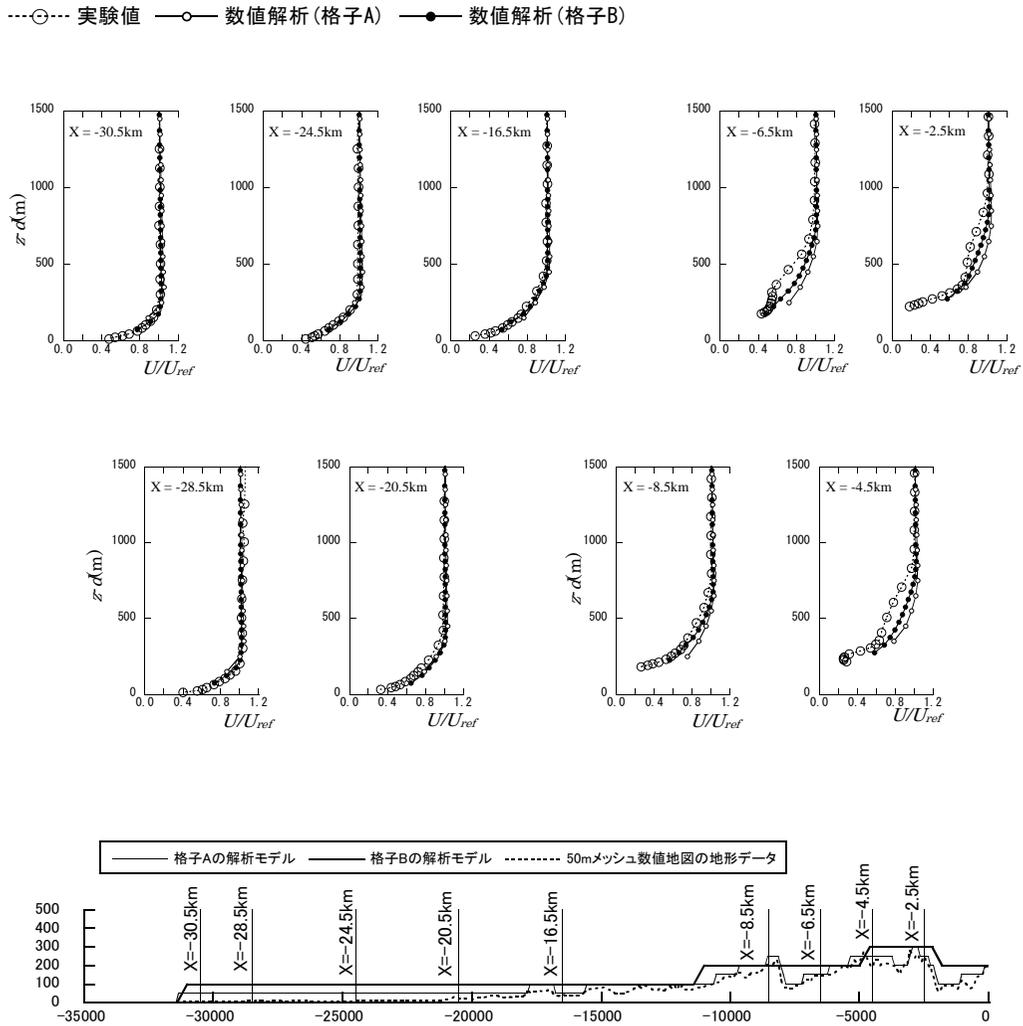


図9 Case1 の解析結果及び実験結果 ($Y=0\text{km}$)

を示す。

$X=-8.5\text{km}$ 地点より風上では、格子 A の $X=-8.5\text{km}$ 地点を除き格子 A 及び B 共に風速分布、境界層高さのいずれも解析結果と実験結果は一致しており、風上から境界層が発達する様子が得られている。 $X=-6.5\text{km}$ より風下側についてみると、境界層高さは実験値と解析結果は一致しているが、風速分布は実験値に見られる風速低下の状況が格子 A と格子 B のいずれの解析値についても一致していない。これは、格子 A, B 共に地形の凹凸が十分に再現されていないためと考えられる。また、 $X=-8.5\text{km}$ より風下での格子 A の解析結果は、地表面付近の風速は格子 B よりも大きくなる結果が得られている。

3.6 Case2 の解析結果と実験結果の比較

図 10 に風下領域における地上 25m 高さにおける水平成分の風速絶対値 $\sqrt{U^2 + V^2}$ について実験結果と Case2 の解析結果の比較を示す。

Case2 の解析結果では、 $X=-8.5\text{km}$ 付近の地形の影響が比較的風下側まで現れているが、実験結果と数値流体解析結果は概ね良い対応をしているといえる。

図 11 に風下領域における U 成分及び V 成分の鉛直方向分布の Case2 の解析結果と実験結果の比較を示す。

Case2 の U 成分の解析結果は、中央部 ($Y=0\text{km}$) と風下の $X=-2.5\text{km}$ 地点を除き地表面付近まで一致している。中央部の測定点について風速分布をみると、流入に近い $X=-8.5\text{km}$ 地点では実験値とほぼ一致した結果が得られているが、 $X=-6.5\text{km}$ より風下側では実験値と差が見られる。これは、 $X=-8\text{km}$ 付近にある起伏からの剥離流が Case2 において十分に表されていないためと考えられる。

また、 $X=-2.5\text{km}$, $Y=\pm 1\text{km}$ 地点はいずれも崖状地形の風下となっているが、これらの地点では地表面付近の解析値は実験結果と比較して小さめの値を示す。

V 成分の解析結果は、中央部 ($Y=0\text{km}$) の $X=-6.5\text{km}$ 地点では明瞭な差が見られるものの、その他の地点では地表面の近傍を除き定性的傾向は一致した結果が得られている。

図 12 に中央部 ($Y=0\text{km}$) における W (鉛直方向) 成分の実験結果と解析結果の比較を示す。 W 成分の解析結果は、 V 成分と同様に地表面付近において実験値と異なるものの定性的傾向は一致した結果が得られている。

以上、数値流体解析による複雑地形周りの予測精度の検証のために、縮尺 1/2500 で地形を風洞全体にモデル化した風洞実験とこれを対象に標準 $k-\epsilon$ モデルを用いた数値流体解析結果の比較検討を行った。風洞実験結果と数値流体解析結果は、起伏が激しい一部の領域を除き概ね良い一致を示す。起伏の激しい地形の後流域では、数値流体解析結果と風洞実験結果では風速の分布に差が見られる。この原因として、解析モデルの格子間隔が粗く地形を十分に再現できていないことが考えられる。また、 $k-\epsilon$ モデルを用いた解析では乱流エネルギー k の過大評価によって剥離や逆流の再現性が悪くなることが知られている⁽³¹⁾。これらの影響を受ける範囲は限られていると考えられるが、数値解析により風速を評価する場合、解析精度を考慮して地表面境界から適宜離れた高さで評価する必要がある。

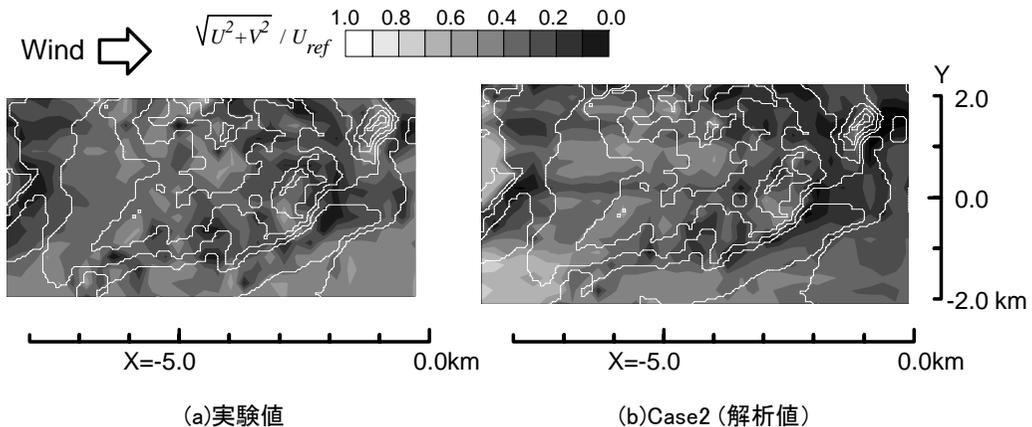


図 10 地上高さ 25m における風速比の比較 (風下領域)

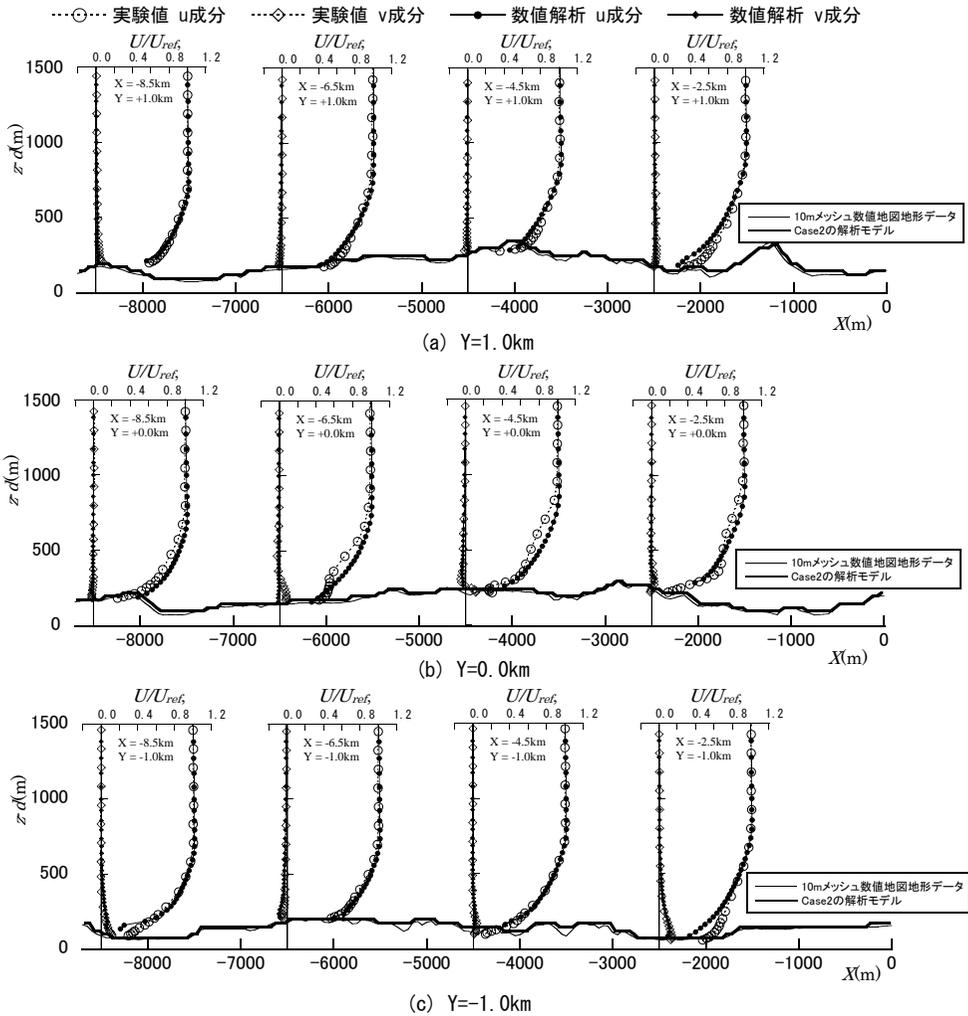


図 11 Case2のU, V成分の解析結果と実験結果の比較

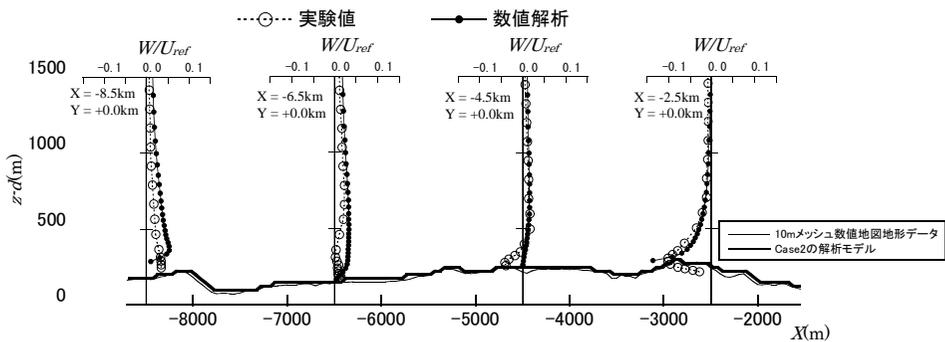


図 12 Case2のW成分の解析結果と実験結果の比較 (Y=0km)

4. 局所地形の影響を考慮した強風マップの作成

4.1 解析領域

ここでは、提案した手法に基づき神奈川県を対象に地形を考慮した再現期間 50 年の風速を求め、強風マップの作成を行う。強風マップの作成は、神奈川県全体を 2km 四方のメッシュに区分し、図 13 に示す 2 つの領域について行った。

1 つは、横浜市中心部を構成する西区、中区、神奈川区、保土ヶ谷区、南区をほぼ包含する領域（領域 A）である。領域 1 の東側は海に面して平地となっており、西側は最高地点の標高が 70m 程度の丘陵地帯となっている。領域内には、横浜地方気象台が含まれる。

もう 1 つは、三浦半島の横須賀市、葉山町、鎌倉市をほぼ包含する領域（領域 B）である。領域 B の東側と西側は海に面しており、中央部は標高が最高 240m の丘陵となっている。領域 A と比較して、領域 2 では地形の起伏が激しく、海岸線も複雑な形状となっている。

図 13 には、平成 12 年建設省告示 1454 号に基づく基準風速 V_0 を併せて示す。基準風速 V_0 の値は、領域 A では 34m/s、領域 B では 36m/s である。

4.2 解析方法概要

数値流体解析は、神奈川県全体を含む 1 次領域から風速比を評価する 3 次領域までの 3 段階のネスティングを行った。各領域の解析範囲及び最小格子間隔を表 2 に示す。1 次領域の鉛直方向の解析領域は 20km であり、現実の大気境界層と比較して大きい。解析領域が小さい場

合、境界層の発達に伴い流れ方向に圧力勾配が増加することが考えられる。このため、上面の境界で境界層の発達に伴って鉛直方向に流出させる境界を与える⁽³²⁾場合もあるが、本研究では解析領域を大きくすることにより、この影響を相対的に小さくした。また、大気境界層の上部は地表面の粗度よりも気圧傾度力やコリオリ力が大きくなるが、本研究における数値流体解析ではこれらの力を考慮せず、地上と上空の風向差は別途考慮する。

1 次領域では流入風の境界条件を平均風速がべき指数 0.15 で近似される勾配流として与え、2 次、3 次領域では上位の計算結果を補間して計算格子点に流入境界及び初期条件として与えた。地盤面の境界条件は粗度長を 0.05m、海面は粗度長を 0.005m とした対数則の壁関数を与えた。地盤面に与えた粗度長は、3 章の地形モデルの解析モデルと同じ値であり、平板上では平均風速の鉛直分布はべき指数 0.2 の指数分布の気流と良い一致を示す。

地上高さの風速は地形の他に周辺の建物や樹木等の影響を受けていることが考えられるが、これらの影響は地点によって異なっており年代と共に変化するため一律に評価することは困難である。そこで、本研究では地形以外の建物や樹木の影響は対象とする地域の状況に応じて別途考慮されるものとして数値流体解析における地表面粗度は一様とし、建物等の影響が比較的小さく局所的な地形の影響が十分に反映されると考えられる地上高さの風速の分布から上空と地上の風速比を求めた。数値流体解析結果の風速を評価する高さは、解析結果の精度を考慮して地表面から 30m 高さの風速とした。ただし、対数

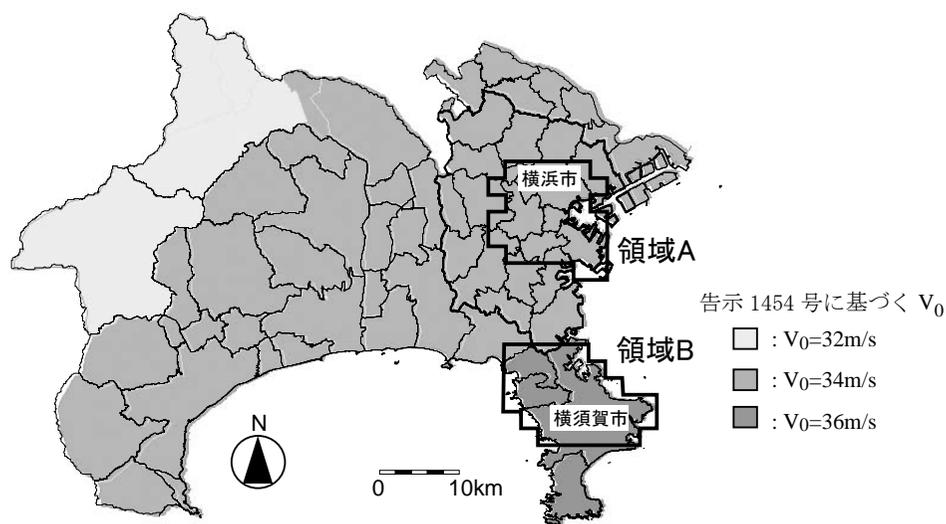


図 13 再現期間 50 年の強風マップ作成領域

則で境界条件を与えていることを考慮して実際の地盤面からの高さは解析上の高さにゼロ面補正值（中低層市街地を想定し建物平均高さ約7~8mの0.6倍⁽³³⁾程度の5m）を加えた35mである。上空と地上の風速比は、3次領域の風上から2kmと左右の側面から1kmの範囲を除く2km×2kmの解析結果に基づき算出した。

数値流体解析より得られる流速は、x,y,z方向3成分のベクトル値である。従って、崖状地形の後流など乱れ強さが大きくなっている領域では、風速スカラー値を時間平均した値と必ずしも一致しない。そこで、本研究では数値流体解析結果から得られる流速を次式により乱流エネルギーkを用いてスカラー平均風速相当の風速に補正して評価した⁽³⁴⁾。

$$U' = \sqrt{|U|^2 + 2k} \tag{16}$$

ここで、U'は補正後のスカラー風速、|U|は風速の絶

対値（ $=\sqrt{U^2 + V^2 + W^2}$ ）である。

解析風向は、45°刻みの8風向（N, NE, E, SE, S, SW, W, NW）とした。

台風シミュレーションにおける地上風向の上空風向に対する偏角は、過去に横浜地方気象台に接近した台風について、台風モデルにより推定した傾度風風向 θ_{sim} と気象台における同時刻の風向観測結果 θ_{met} を比較することにより求めた。解析対象とした台風データは、横浜地方気象台を中心とする半径500km以内に接近した中心気圧が980hPa以下の台風である。図14に台風モデルより推定した傾度風風向 θ_{sim} と気象台における同時刻の風向 θ_{met} の比較を示す。傾度風風向が $\theta_{sim} = 315^\circ$ 付近ではややばらつきが大きいものの、その他の風向では両者は良い相関を示す。本解析では、地上風向の上空風向に対する偏角は領域内で一律に時計回りに30°とした。

表2 数値流体解析における解析領域及び最小格子間隔

	解析範囲 (x × y × z)	x,y 方向 最小格子 間隔	z 方向 最小格子 間隔
1次領域	96km × 72km × 20km (風向: N,E,S,W) 96km × 96km × 20km (風向: NE,SE,SW,NW)	500m	100m
2次領域	24km × 24km × 4km	100m	50m
3次領域	4km × 4km × 2km	50m	11.2m

x: 流れ方向, y: 流れ直交方向, z: 高さ方向

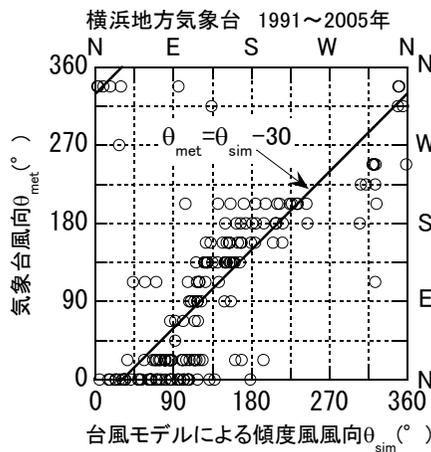


図14 台風モデルによる上空風向と気象台観測風向の比較（横浜地方気象台，1991~2005年）

4.3 台風シミュレーション結果

表3に台風シミュレーションによって得られた対象地域の再現期間50年の上空風速を示す。同表には、地上における偏角を考慮して8風向の風向別に求めた年最大風速に基づき求めた再現期間50年の風速を併せて示す。

全風向の年最大風速より推定した再現期間50年の上空風速は、領域Aと領域Bのいずれも56~57m/sであり領域内で差は小さい。年最大風速を風向別に求めて推定した場合、再現期間50年の上空風速の値は、領域Aと領域Bのいずれも風向S, SWでは52~54m/sであるのに対し、風向N, NEでは40~42m/sである。

図15にシミュレートした台風の進路の例として横浜における最大風速が上位10位までの台風の進路を示す。図に示す進路は、最接近時を中心として前後18時間ずつの位置である。図中の円は1時間毎の台風中心位置、円の

の大きさは中心気圧低下量の大きさを示す。

図に示すように上位の最大風速を示す台風の進路は概ね南西から北東への向きである。このため、解析領域における最大風速時の風向は、進路と傾度風の風向が一致する南から南西の風向となり、風向別の再現期間50年の風速はS, SWで大きくなる。

領域Aと領域Bを比較すると、再現期間50年の上空風速に大きな差は見られないが、風向別に見るとN, SW, Wの風向で領域Bのほうが若干大きい値を示す。

地表面粗度IIと仮定してべき指数 $\alpha=0.15$, $Z_0=350\text{m}$ として、台風シミュレーションより得られた再現期間50年の上空風速を地上10mの風速に換算すれば、33.0~33.5m/sとなる。この値は、領域Aの基準風速 $V_0=34\text{m/s}$ とほぼ同程度であり、領域Bの $V_0=36\text{m/s}$ と比較するとやや小さめの値である。

表3 再現期間50年の上空風速 (m/s)

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	全風向
領域A	40.5~ 41.4	40.5~ 41.1	43.4~ 44.4	47.5~ 49.8	52.1~ 53.3	51.7~ 53.0	47.2~ 48.5	45.0~ 46.3	56.3~ 57.1
領域B	41.3~ 42.4	40.9~ 41.7	43.7~ 44.4	47.6~ 48.6	52.2~ 53.3	53.2~ 53.8	48.2~ 49.3	45.2~ 46.4	56.7~ 56.9

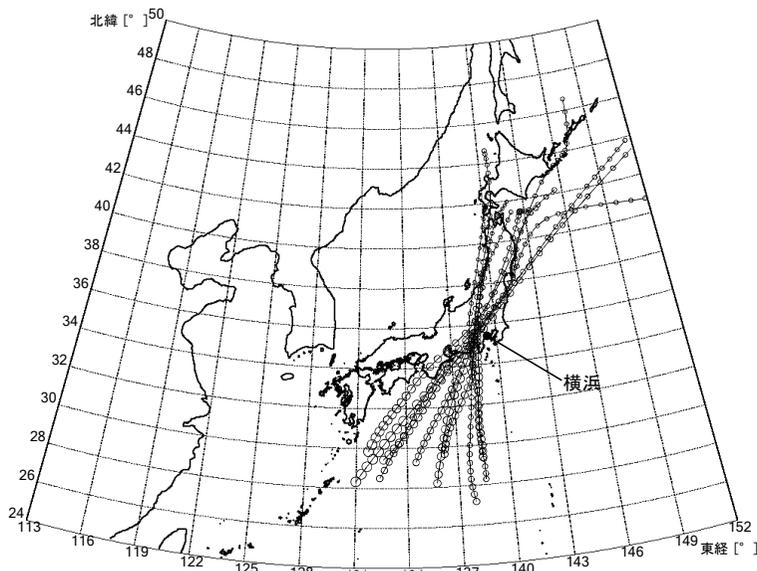


図15 横浜における最大風速が上位10位までのシミュレートした台風の進路

4.4 領域Aにおける再現期間50年の風速

(a) 上空風と地上の風速比

図16に領域Aの地形コンター図、図17に領域Aの数値流体解析結果から得られた上空と地上の風速比分布の例を示す。ここに示す風向は、風向別の上空風の再現期間50年の風速が大きな値を示す風向SWである。地形コンター図の等高線間隔は15mである。

風速比の値は、風上側の地形が急峻で標高が急に高くなる部分で大きくなっている。一方、標高が急に低くなる崖上地形の風下側では、風速比の値が小さくなっていることがわかる。

(b) 領域Aにおける再現期間50年の風速

図18に領域Aの地上高さ35mにおける再現期間50年の風速マップを示す。ここで、風速のコンターは19～39m/sの範囲を2m/sごとの階級に分けてプロットした。

図中に黒線で示す2km四方のメッシュ内部でも地形の影響を受け再現期間50年の風速が高い領域と低い領域がある。再現期間50年の風速は、海岸に近い領域と地形が急峻で小高くなっている領域で大きな値を示す。

平成12年建設省告示1454号による横浜市の基準風速 V_0 は34m/sである。これを次式で地表面粗度区分Ⅲの35m高さの風速 $V_{III}(z=35)$ に換算すると34.7m/sとなる。

$$V_{III}(z=35) = 1.7 \left(\frac{35}{450} \right)^{0.2} \cdot V_0 \quad (17)$$

対象領域内の再現期間50年の風速が告示に基づく設計風速を上回る地域はごく一部であるが急峻な傾斜地や尾根のピークに見られる。

(c) 横浜地方気象台における観測結果との比較

本解析により得られた再現期間50年の風速について妥当性を確認するために、横浜地方気象台（観測高さ19.5m）の観測結果から得られる再現期間50年の風速との比較を行った。

図19に横浜地方気象台の1961～2009年の年最大風速の観測結果から求めた年最大風速と超過確率の関係を示す。ここで、非超過確率 F_T はHazenの方法によりプロットした。これより再現期間50年 $(-\ln(-\ln(1-1/50))=3.9)$ の風速は25.0m/sとなる。

本解析より得られた気象台位置における地上高さ35mの風速は31.1m/sである。べき指数を $\alpha=0.2$ として、気象台観測高さの $z=19.5m$ の風速に換算すると27.7m/sとなり、気象台における観測結果と比べて若干高い風速である。

両者の差の原因として、気象台における観測結果が周辺の建物などの影響を受けていることが考えられる。そこで、気象台周辺を対象とした地形模型の風洞実験を行い、周辺建物が気象台における観測結果に及ぼす影響に

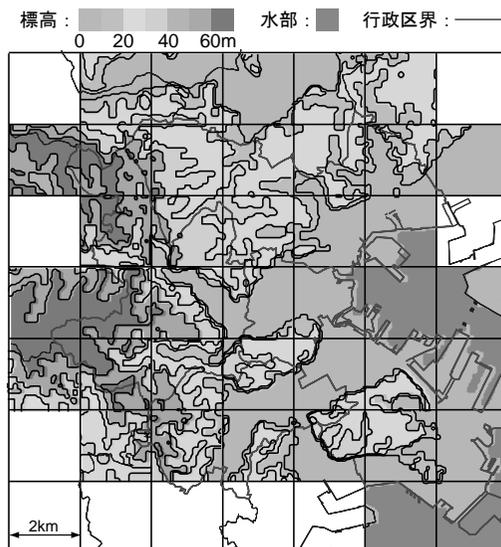


図16 解析領域の地形コンター図（領域A）

について検討した。

実験模型は横浜地方気象台を中心とした半径 500m の範囲を縮尺 1/1000 で再現したものであり、周辺の建物及び樹木をモデル化している。図 20 に実験模型を示す。

流入気流は地表面粗度区分 IV に相当する $\alpha=0.27$ で近似される境界層乱流とした。実験における流入気流の鉛

直分布は数値流体解析で想定しているべき指数 $\alpha=0.2$ の気流と異なっているが、地形模型の外側も同じ粗度が連続していると考えたものである。風速測定は、X 型プローブの熱線風速計を用いて u-v 成分を測定した。風速の平均時間は 30 秒とした。

図 21 に気象台高さ(19.5m)の風速 U_B (19.5)に対する地

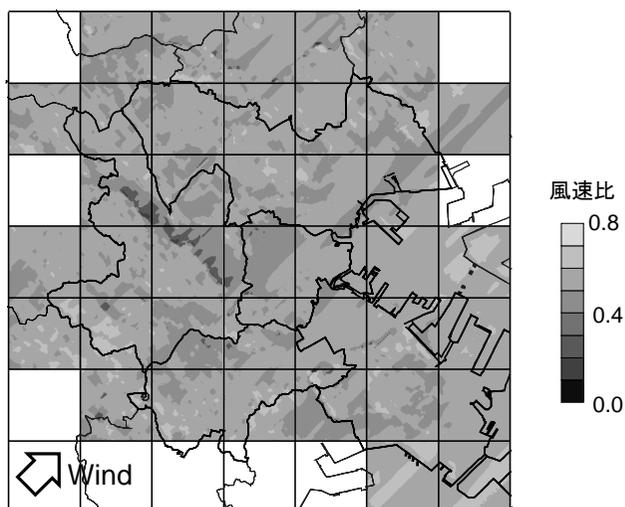


図 17 数値流体解析結果から得られた上空と地上の風速比分布の例 (領域 A, 風向 SW)

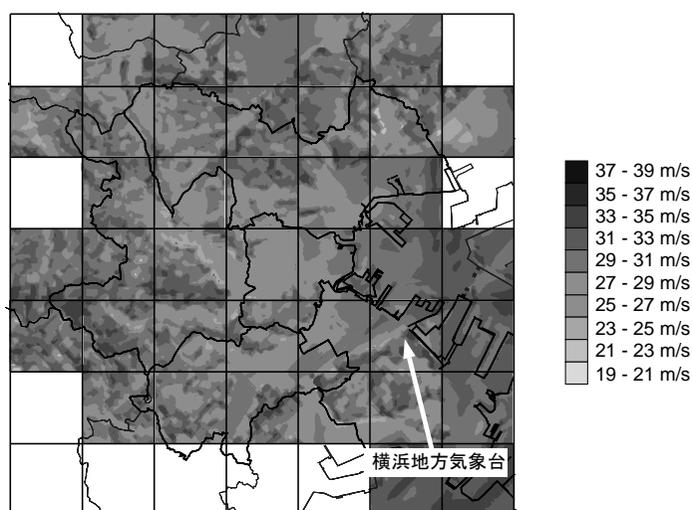


図 18 地形を考慮した再現期間 50 年の風速 (領域 A, 地上高さ 35m)

表面高さ $z=35\text{m}$ の風速 $U_B(35)$ の風速比を示す。

高さ方向の風速比 $U_B(35)/U_B(19.5)$ の値は、風向 NE を除くと 1.1~1.2 である。気象台周辺の地表面粗度を IV と考えてべき数 $\alpha=0.27$ とすると風速比の値は 1.17 であり、気象台周辺は概ね地表面粗度 IV に相当する地域であるといえる。なお、風向 NE では他の風向と比較して大きい値を示すが、1961~2009 年の観測結果では風向 NE の年最大風速は観測されていない。

高さ方向の風速比として風向 NE を除いた平均値の 1.15 を用い、本解析より得られた地上 35m 高さの風速を気象台高さの風速に換算すると 27.0m/s となる。観

測結果と比較して若干高い値であるが、両者は概ね良い対応をしているといえる。

4.5 領域 B における再現期間 50 年の風速

(a) 上空風と地上の風速比

図 22 に領域 B の解析領域における地形コンター図、図 23 に領域 B における上空と地上の風速比の例として、風向 SW の解析結果を示す。地形コンターの等高線間隔は、20m 間隔である。図には 2km 四方の領域に南北方向に A~F、東西方向に 1~9 のインデックスを付して示す。

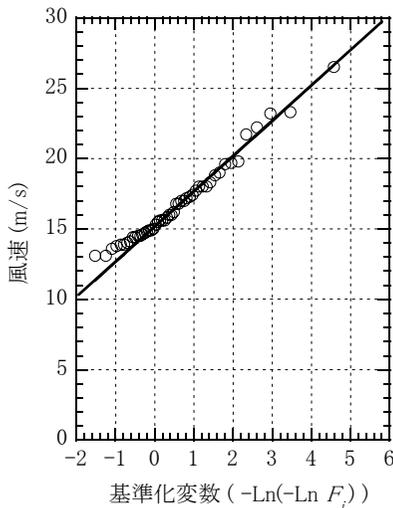


図 19 横浜地方気象台の観測結果に基づく経験的非超過確率 F_T と年最大風速の関係 (1961~2009 年)

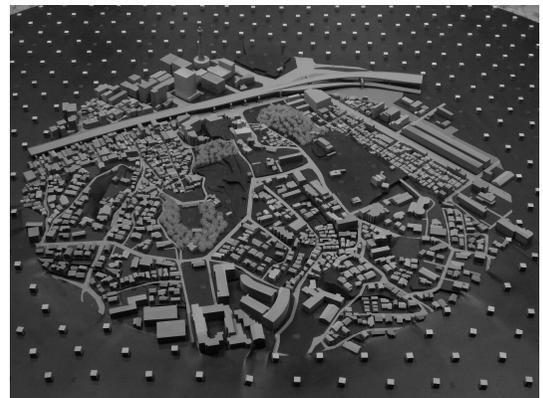
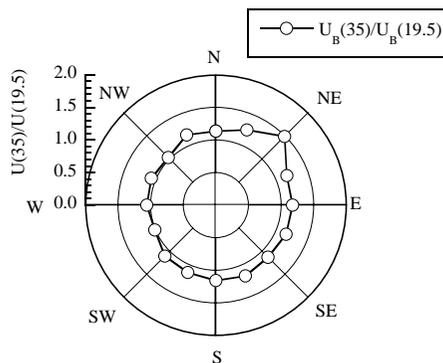


図 20 横浜地方気象台周辺地形模型



$U(19.5)$: 気象台高さ風速, $U(35)$: 35m 高さ風速

図 21 横浜地方気象台周辺地形模型 実験結果

標高が 200m 程度の山のピークでは、高い風速比の値を示す。風上側となる西側の海岸近くでは、標高が 100m 程度のピークにおいても高い風速比を示し、地形によって風速が高くなっていることがわかる（領域 D2 など）。

ここで、風速コンターは、30~44m/s の風速範囲を 2m/s 刻みで階級分けした。これは、領域 B における基準風速 $V_0=36\text{m/s}$ を式(17)より粗度区分Ⅲに於ける高さ $z=35\text{m}$ の風速に換算すると 36.7m/s となることから、告示に基づく設計風速前後の領域に着目してプロットしたものである。領域 B における再現期間 50 年の風速は、12~54m/s であり、領域 F5 の標高 204m のピークで最大値を示す。

(b)領域 B における再現期間 50 年の風速

図 24 に領域 B における再現期間 50 年の風速を示す。

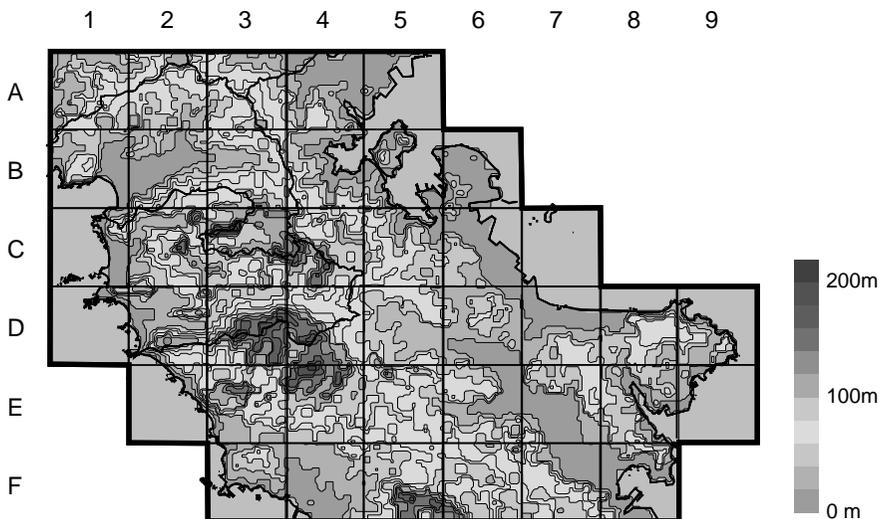


図 22 解析領域の地形コンター図（領域 B）

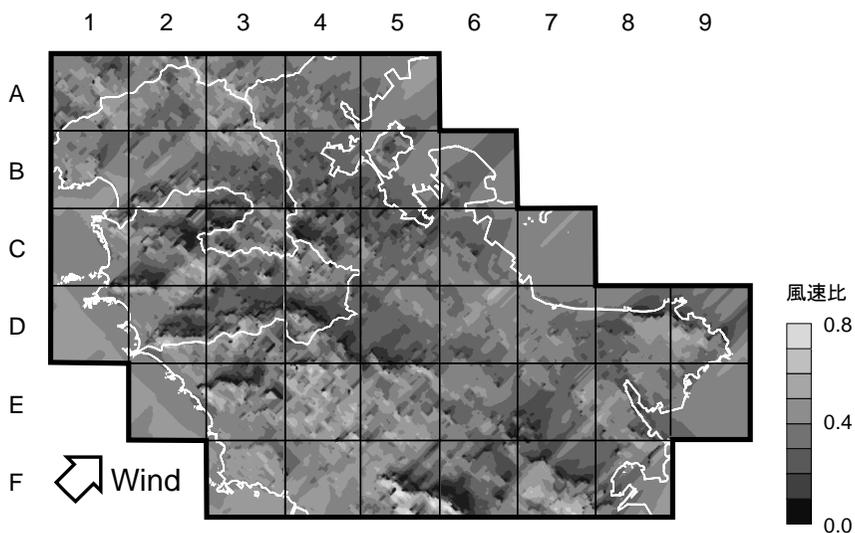


図 23 数値流体解析から得られた上空と地上の風速比分布の例（領域 B，風向 SW）

領域 B においても、急峻な山のピークでは地形を考慮した再現期間 50 年の風速は高い値を示し、標高が 200m を超える山のピーク付近では告示に基づく設計風速を上回る。また、西側の海岸近くのピーク（領域 D2, E2 と E3 の境, F3 等）や東に突出した岬の段丘の上（領域 D9）でも告示に基づく設計風速を上回る。さらに、西側の海岸近くでは、設計風速を上回らないものの低地部分（領域 F4）でも 34~36m/s の高い風速を示す。台風シミュレーションで得られる上空の再現期間 50 年の風速が領域 A と領域 B で大きな差が見られないのに係らず、領域 B では低地においても地上高さにおける再現期間 50 年の風速が基準法に基づく設計風速に近い値を示す領域がある。この理由として領域 B の西側の海岸では南西~西よりの風向で低地においても高い風速比を示し、この風向では風向別に見た台風シミュレーションから得られる上空の風速も高い値を示す。このため、この領域では、地上高さにおける再現期間 50 年の風速が高くなることが考えられる。

5. まとめ

本研究では、局地的な地形の影響を考慮した強風マップの作成を目的として、数値流体解析及び台風シミュレーションに基づき任意の再現期間の風速を推定する手法について検討した。

強風マップの作成に先立ち、数値流体解析による複雑

地形上の気流解析結果と地形模型を用いた風洞実験の比較を行い、数値流体解析結果の精度を検討した。以下にまとめを示す。

- (1) 神奈川県中央部を対象として標準 $k-\epsilon$ モデルを用いた数値流体解析結果と地形模型を用いた風洞実験結果を比較した。
- (2) 数値流体解析結果と地形模型を用いた風洞実験結果は概ね良い一致を示すことが確認された。
- (3) 数値流体解析による解析精度が悪くなる要因として、解析モデルの格子が粗く地形を十分に再現できていないことのほか、標準 $k-\epsilon$ を用いた解析では剥離や逆流の再現性が悪くなることの影響が考えられる。影響を受ける領域は起伏の激しい地形の後流となる領域の一部であり、地上付近の風速の分布に数値流体解析と風洞実験の結果に差が見られる。
- (4) 数値流体解析により複雑地形上の風速を評価する場合、上述の解析精度に関する問題を考慮して地表面境界から適宜離れた高さで風速を評価する必要がある。

さらに、神奈川県内の 2 つの領域を対象として提案する手法に基づき地形の影響を考慮した再現期間 50 年の風速を推定した。解析対象とした領域は、神奈川県内の横浜市中央部と横須賀市付近の 2 領域で、告示に示される基準風速は各々 $V_0=34\text{m/s}$ と 36m/s の区域である。以下にまとめを示す。

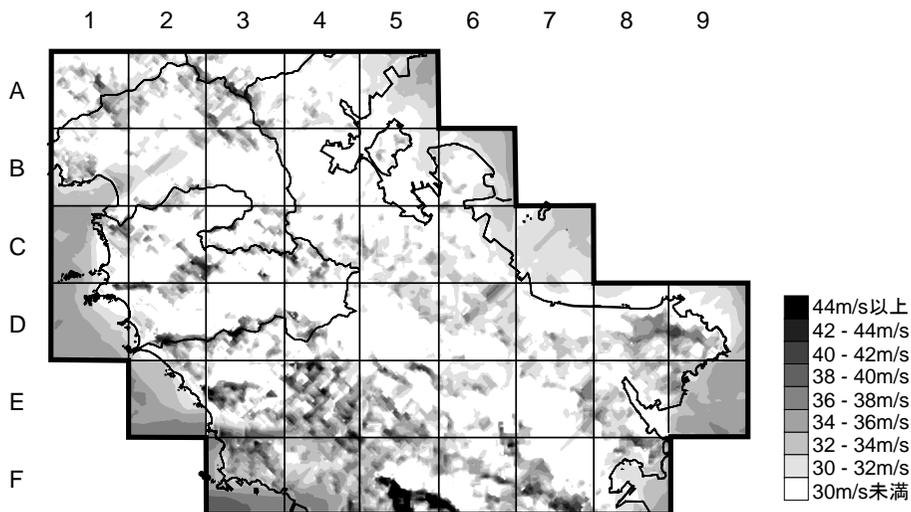


図 24 地形を考慮した再現期間 50 年の風速（領域 B, 地上高さ 35m）

- (1) 横浜地方気象台における観測結果について、周辺建物の影響を考慮して本解析より得られた再現期間 50 年の風速と比較した結果、両者は良い整合性を示す。
- (2) 2 つの領域とも、一部を除いて地形の影響を考慮して推定した再現期間 50 年の風速は、告示に示される基準風速に相当する風速と比較して小さい。
- (3) 急峻な傾斜地や尾根のピークでは、地形の影響を考慮した再現期間 50 年の風速は告示に基づく設計風速を上回る地域がある。

謝辞

本研究は、文部科学省・神奈川大学学術フロンティア推進事業「災害リスク軽減を目的としたソフト・ハード融合型リスクマネジメントシステムの構築に関する研究（平成 17-21 年）、研究代表者 荻本孝久教授」の一部として行ったものである。

本研究における風洞実験の実施では、(株)泉創建エンジニアリング鶴見俊雄氏に多大なご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- (1) “建築物荷重指針・同解説”，日本建築学会(2004)，p. 16.
- (2) 例えば “2004 年の強風被害とその教訓—強風被害が残したモノ—”，日本建築学会 (2006)
- (3) Russell, L.R., “Probability distributions for hurricane effects”, *J. Waterways, Harbors and Coastal Eng. Div.*, (1971), 97, p.139-154
- (4) 光田寧，藤井健，“日本南方洋上における台風の確率モデルの作成”，京都大学防災研究所年報，(1989)，32，p.335-348
- (5) 安井八紀，大熊武司，吉江慶祐，片桐純治，廣川雅一，“モンテカルロ法を用いた台風シミュレーションに関する研究”，第 16 回風工学シンポジウム，(2000)，p.65-70
- (6) 大熊武司，丸川比佐夫，安井八紀，“レビュー：モンテカルロ法を利用した台風シミュレーションによる強風の評価”，災害の研究，(2001)，第 32 巻，p.101-113
- (7) Hachinori Yasui, H., Ohkuma, T., Katagiri, J., Marukawa, H. “Study on evaluation time in typhoon simulation based on Monte Carlo method” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, (2002), 90, pp.1529-1540
- (8) Mellor, G.L., Yamada, T., “Development of turbulence closure model for geophysical fluid problems”, *Rev. Geophys.*

- Space Phys.*, 20, No.4 (1982), pp.851-875
- (9) Nakanishi, M., Niino, H., “An improved Mellor-Yamada Level 3 model with condensation physics: its design and verification”, *Boundary-Layer Meteorology*, 112, (2004), p.1-31
- (10) Yoshida, M., Yamamoto, M., Takagi, K., Ohkuma, T., “Prediction of typhoon wind by level 2.5 closure model”, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 96, (2008), p.2104-2120
- (11) 佐々木澄，川本陽一，山中徹，土屋直也 他，“都市気候解析のための MM5 におけるパラメタリゼーションの相互比較（その 1~4）”，日本建築学会大会学術講演梗概集，(2007)，D-1, p.781-778
- (12) 村上周三，持田灯，加藤信介，木村敦子，“局所風況予測システム LAWEPS の開発と検証”，*ながれ*，22,(2003)，p.-375-386
- (13) 山口敦，石原孟，藤野陽三，“力学統計的局所化による新しい風況予測手法の提案と実測による検証”，*土木学会論文集 A*，Vol.62 No.1，(2006)，p.110-125
- (14) 孟岩，松井正宏，日比一喜，“台風に伴う強風場を求めるための解析モデルの提案”，*日本風工学会誌*，(1993)，57，p.1-14
- (15) Meng, Y., Matsui, M., Hibi, K., “An analytical model for simulation of the wind field in a typhoon boundary layer”, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, (1995), 56, p.291-310
- (16) 孟岩，松井正宏，日比一喜，“中立時の大気境界層における強風の鉛直分布特性 その 1 非台風時の強風”，*日本風工学会誌*，(1995)，65，p.1-15
- (17) 孟岩，松井正宏，日比一喜，“中立時の大気境界層における強風の鉛直分布特性 その 2 台風時の強風”，*日本風工学会誌*，(1996)，66，p.3-14
- (18) 中西昭彦，“複雑地形のシミュレーション例と今後の課題”，*ながれ*，(2003)，22，p.397-403
- (19) 石原孟，山口敦，藤野陽三，“複雑地形における局所風況の数値予測と大型風洞実験による検証”，*土木学会論文集*，(2003)，No.731，p.195-211
- (20) 服部康男，奥田慎也，石川智己，加藤央之，“送電設備の風荷重・風応答評価技術”，*電中研レビュー*，(2008)，No.48，p.39-43
- (21) 片桐純治，大熊武司，岡田創，野田博，丸川比佐夫，“標準 $k-\epsilon$ モデルを用いた複雑地形周りの流れ解析”，第 20 回風工学シンポジウム，2008 年
- (22) Bashforth, F., Adams, J.C.: “An attempt to test the theories of capillary action: by comparing the theoretical and measured forms of drops of fluid”, Cambridge Press., (1883)
- (23) Hirt, C.W., Cook, J.L., “Calculating three-dimensional

- flows around structures and over rough terrain”, *J. Comp. Phys.*, (1972), Vol.10, p324-340
- (24) Yamaguchi, A., Ishihara, T., Fujino, Y., “Experimental study of the wind flow in a coastal region of Japan”, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, (2003), 91, p.247-264
- (25) Schloemer, R.W., “Analysis and synthesis of hurricane wind patterns over Okeechobee, Florida”, *Hydrometeorological Report, No.31*, (1954)
- (26) 大熊武司, 丸川比佐夫, 宮下康一, “市街地を対象とした乱流境界層の風洞実験による基礎的研究”, 第9回風工学シンポジウム, (1986), p.61-66
- (27) Counihan, J., “Adiabatic atmospheric boundary layers: A review and analysis of data from the period 1880–1972”, *Atmospheric environment*, (1975), 9, p.871-905
- (28) Hirt, C.W., “Volume-fraction techniques: powerful tools for wind engineering”, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, (1993), 46-47, p.327-338
- (29) Tseng, Y.H., Ferziger, J.H., “A ghost-cell immersed boundary method for flow in complex geometry”, *Journal of computational physics*, (2003), 192, p.593-623
- (30) 千秋雅信, 中山昭彦, “一般座標系を用いた流れの計算における IBM 法の適用”, 応力学会論文集, (2003), Vol.8, p.919-927
- (31) 持田灯, 村上周三, 林吉彦, “立方体モデル周辺の非等方性乱流場に関する $k-\epsilon$ モデルと LES の比較—乱流エネルギー生産の構造とノルマルストレスの非等方性に関して—”, 日本建築学会計画系論文集, (1991), 423, p.23-31
- (32) 野澤剛二郎, 田村哲郎, “ラフネス上に空間発達する乱流境界層の LES と変動風の評価”, 日本建築学会構造系論文集, (2001), 541, p.87-94
- (33) 嶋田健司, 藤永崇志, 石原孟, “風力発電のための地域気象モデルと非線形風況予測モデルを用いた風況予測”, 第19回風工学シンポジウム, (2006), p.127-132
- (34) “建築物のための流体計算ガイドブック”, 日本建築学会, (2005), p.113