

地形風の数值予測のための領域設定と境界処理

COMPUTATIONAL DOMAIN SETTINGS AND BOUNDARY TREATMENTS
FOR THE NUMERICAL SIMULATION OF FLOW OVER TERRAIN山口 敦¹⁾ 石原 孟²⁾ 藤野 陽三³⁾
Atsushi YAMAGUCHI¹⁾ Takeshi ISHIHARA²⁾ and Yozo FUJINO³⁾

ABSTRACT

Computational domain size required for the numerical prediction of flow over two dimensional ridge and three dimensional hill was investigated by changing the computational domain heights and widths and the distances between the terrain and inlet boundary. It was found that the computational domain heights should be decided so that the blockage is less than 5%, the width of the computational domain should be wider than the length ten times as long as the hill height and inlet boundary should be set so that the distances between the inlet boundary and the terrain center is longer than the length twenty times as long as the terrain height for the two dimensional ridge and ten times for the three dimensional hill. For the analysis of flow over continuous terrain, new boundary treatments were proposed in which the volume of the terrain is maintained. This method shows better result than the conventional one. An additional domain was also introduced at the windward of the analytical domain so that the effect of the upwind terrain was taken into account.

Key Words: local wind prediction, non-linear model, computational domain setting, boundary treatment

1. はじめに

複雑地形上の風は地形の影響を受けて局所的に大きく変化する。構造物の風荷重や風力発電量は風速の2~3乗に比例するため、複雑地形上に建設される構造物の風荷重や風力発電量を正確に評価するためには、風速を精度よく予測する必要がある。緩やかな地形の場合には流れの剥離を伴わないため、地形の存在が元の乱流境界層に与える影響を微少擾乱と考え、流れの支配方程式を線形化することができる。この考えに基づく近似解法としては、Jackson and Hunt (1975)¹⁾により提案された線形モデルが最も有名である。しかし、地形の勾配が大きくなると線形モデルの予測精度は悪くなる。流れの支配方程式を線形化せずに数値的に解く手法も研究されており^{2)~12)}、この手法は前述の線形モデルに対して非線形モデルと呼ばれている。非線形モデルでは地形の勾配に対しての制限はなく、剥離を含む流れを再現することができるが、いくつかの問題点が残されている。

まず、非線形モデルは境界の影響を敏感に受けるため、非線形モデルを用いて地形上の風の流れを解析する際には、計算領域の設定が問題となる。例えば計算領域の高さが低い場合は流れ場は上面境界の影響、計算領域の幅が狭い場合は側面境界の影響を受ける。これはいわゆる閉塞率の問題である。風洞実験では閉塞率を5%以下に設定することを推奨している¹³⁾。これ以外に、上流境界の問題もある。一般に風洞実験では境界層を発達させるために、地形の上流側に長い助走領域が設けられ、上流境界が流れ場に影響を与えることは殆どない。一方、数値解析においては計算格子数を節約するために上流境界の位置は地形になるべく近い場所に設置する傾向が見られる。従って、解析領域の設定が流れ場の予測に悪影響を与えないように考慮する必要がある。しかし、計算領域の設定方法に関しては系統的に行った研究例は殆ど見当たらない。

また、非線形モデルを実際の地形上の流れに適用する際の境界の処理手法についても問題が残されている。Hewer (1998)⁷⁾は $k-l$ モデルに基づく非線形モデルを用いて、単純な形をした実地形上の流れを計算した。境界条件としては周期境界条件を採用したが、周期境界条件は一般の複雑地形上の流れの解析に使用することはできない。串岡ほか (1994)⁴⁾は標準 $k-\epsilon$ モデルに基づく非線形モデルを用いて実地形上の流れを解析した。境界条件としては対称面境界条件を採用した。単純に対称面境界条件を使用した場合には計算領域内の流れ場に影響を与える恐れがある。Maurizi et al. (1998)⁶⁾も標準 $k-\epsilon$ モデルに基づく非線形モデルを用いて実地形上の流れを解析した。境界処理手法としては、計算領域境界近傍

^{1),2),3)} 東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 大学院生, 助教授, 教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

に緩衝領域を設ける手法を用いた。しかし Maurizi et al. の境界処理手法では単に領域の端部の標高を水平に延ばしただけであり、緩衝領域内の地形の体積は元の地形の体積と異なるという問題がある。更に複雑地形上の流れ場を考える際には上流地形の影響を考慮しなければならないが、現時点ではこの影響を考慮した境界処理手法は提案されていない。

以上のことをふまえ、本研究では、まず計算領域の大きさが地形を越える流れ場に与える影響を調べ、流れ場の解析に必要な計算領域の大きさを明らかにする。次に、複雑地形に適用可能な、かつ内部領域に与える影響が少ない新しい境界処理手法を提案し、その手法の妥当性を検証する。なお、本研究では高低差 500m 以下の地形が風速 5m/s 以上の強い風に与える影響を対象としているため、流れは中立状態にあると仮定している。

2. 数値モデルと数値解法

複雑地形上の局所風況予測にはレイノルズ平均型モデルと空間平均型 LES (Large Eddy Simulation) モデルが用いられてきた。本研究ではレイノルズ平均モデルを用いるが、本研究の主題である計算領域の大きさの設定や境界処理手法はこれらいずれのモデルにも適用できるものである。直交座標系におけるレイノルズ平均型モデルの質量保存式と運動量方程式はそれぞれ以下のように表される。

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (2)$$

ここで、 \bar{u}_i と u'_i は物理空間での x_i 方向の速度成分の平均成分と変動成分を表わし、 \bar{p} は圧力、 ρ は流体の密度、 μ は分子粘性係数である。レイノルズ応力 $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ は乱流エネルギー k と乱流散逸 ϵ を用いて次式により評価される。

$$\overline{u'_i u'_j} = \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} - C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\epsilon} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

また、 k と ϵ は次式で表される輸送方程式により求める。

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_j \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] - C_{e1} \frac{\epsilon}{k} \rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{e2} \frac{\rho \epsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中の定数は標準 k - ϵ モデルの値を用い、 $C_{\mu} = 0.09$ 、 $\sigma_k = 1.0$ 、 $\sigma_\epsilon = 1.3$ 、 $C_{e1} = 1.44$ 、 $C_{e2} = 1.92$ とした。また乱流粘性係数 μ_t は乱流エネルギー k と乱流エネルギー散逸率 ϵ により、次式により計算される。

$$\mu_t = C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

解析はコロケート格子に基づく有限体積法を用いて行った。方程式の離散化と数値解法は Patanker¹⁴⁾ により提案された SIMPLE 法を用いた。本研究では風向に平行となるように計算領域を回転させ、境界を流入面、側面、流出面、上面、

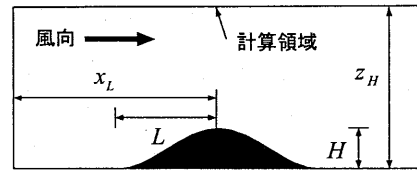


図1 計算領域と記号の定義

表1 各ケースの計算領域と計算結果

ケース	x_L	z_H	y_w	E_{top}^{EH}	閉塞率
2D-std.	$30H$	$22.5H$	—	—	4.4%
2D-z1	$30H$	$50H$	—	0.6%	2.0%
2D-z2	$30H$	$10H$	—	4.4%	10.0%
2D-z3	$30H$	$5H$	—	12.4%	20.0%
2D-x1	$20H$	$22.5H$	—	0.8%	4.4%
2D-x2	$10H$	$22.5H$	—	3.5%	4.4%
2D-x3	$5H$	$22.5H$	—	9.5%	4.4%
3D-std.	$30H$	$22.5H$	$20H$	—	0.6%
3D-z1	$30H$	$50H$	$20H$	0.4%	0.3%
3D-z2	$30H$	$10H$	$20H$	0.8%	1.3%
3D-z3	$30H$	$5H$	$20H$	1.2%	2.5%
3D-y1	$30H$	$22.5H$	$10H$	0.4%	1.1%
3D-y2	$30H$	$22.5H$	$5H$	2.1%	2.2%
3D-x1	$20H$	$22.5H$	$20H$	0.1%	0.6%
3D-x2	$10H$	$22.5H$	$20H$	0.3%	0.6%
3D-x3	$5H$	$22.5H$	$20H$	1.5%	0.6%

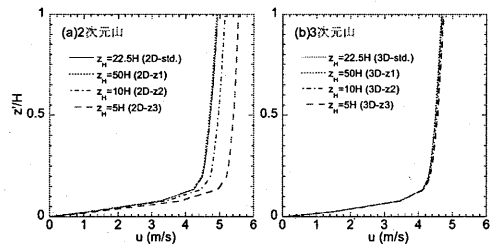


図2 計算領域の高さによる山頂での平均風速の鉛直分布の違い

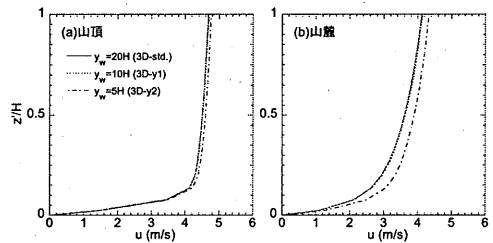


図3 計算領域の幅による3次元孤立峰を越える流れの平均風速鉛直分布の違い

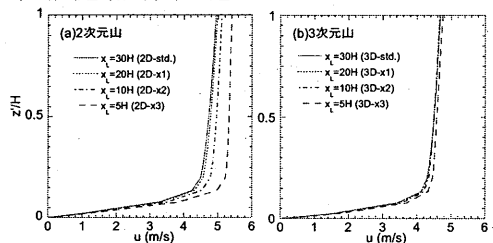


図4 流入境界面の位置による山頂での平均風速の鉛直分布の違い

地表面の5種類に分ける。流入面境界条件として風洞実験から求めた平均風速 u と乱流エネルギー k を与え、上面境界条件としては流入面の値を用い、流出面境界条件としては自由流出境界条件を与えた。具体的な座標変換、離散化、数値解法、境界条件については石原と日比¹²⁾に基づく。

3. 計算領域の設定

非線形モデルを用いて地形上の流れを計算する際には、まず計算領域の大きさを決定しなければならない。計算領域を広くとれば、実際の流れ場に近い流れを再現できるが、計算コストは増大する。解析領域の大きさが地形上の流れ場に与える影響を明らかにするため、本研究では2種類の地形を例として用いた。

1つは余弦の2乗の断面形状を持つ2次元尾根、もう一つは同じ断面形状を持つ3次元孤立峰である。図1には計算領域の中心位置での xz 断面を示す。山の高さ H は40m、山の中心から麓までの距離 L は100mとした。また、山頂から流入境界までの距離を x_L 、計算領域の高さを z_H とし、計算領域の風直角方向の幅を y_W とする(図1)。

本研究ではこれらの2次元尾根と3次元孤立峰に対し、 $x_L=30H$ (=1200m)、 $z_H=22.5H$ (=900m)、 $y_W=20H$ (=800m)のケースを標準ケース(2D-std., 3D-std.)とし、表1に示すように計算領域を変化させ、計16ケースの計算を行い、計算領域の大きさが流れ場に与える影響を明らかにした。また、山頂での地面から H の高さにおける各ケースの平均風速(U)の標準ケース(U_{std})に対する差($E_{top}^H = \left| \frac{U_{std} - U}{U_{std}} \right| \times 100$)を計算し、計算領域断面積に対する地形の断面積の割合(閉塞率)とあわせて表1に示した。

3.1 計算領域の高さの影響

計算領域の高さは、計算領域上面の境界が地形上の流れ場に影響を与えないように設定する必要がある。風洞実験では閉塞率が5%以下であれば地形上の流れ場が境界の影響を殆ど受けないとされている。本研究の2次元標準ケースでは閉塞率が4.4%となっており、この条件を満たしているため閉塞率の影響は殆どないと予想される。このことを確かめるために、計算領域の高さを $50H$ としたケース(2D-z1)との比較を行った。また、閉塞率を標準ケースより大きくしたときに、流れ場がどのような影響を受けるかを調べるために、計算領域の高さを $10H$ 、 $5H$ としたケース(2D-z2, 2D-z3)の計算も行った。

2次元尾根を越える流れに対し、計算領域の高さ z_H を変化した場合の山頂での平均風速の鉛直分布を図2(a)に示す。実線が計算領域の高さを $22.5H$ 、点線が $50H$ 、一点鎖線が $10H$ 、鎖線が $5H$ とした場合の計算結果を示す。各ケースの閉塞率はそれぞれ、4.4%、2.0%、10.0%、20.0%となっている。計算領域の高さを $22.5H$ としたケースと $50H$ としたケースの間にはほとんど差が見られない。一方、計算領域の高さを $10H$ や $5H$ としたケースでは、標準ケースに対しそれぞれ風速を4.4%と12.4%過大評価している。図2(b)には3次元孤立峰を越える流れに対し、山頂での平均風速の鉛直分布を示す。各ケースの間に顕著な差は見られず、地面から $1H$ の高さにおける平均風速の差は最大で1.2%である。これは、3次元孤立峰を越える流れ場の場合には閉塞率は2次元山に比べ小さいためである。本研究の各ケースでの閉塞率はそれぞれ、0.6%、0.3%、1.3%、2.5%であり、全てのケースで5%以下となっていることが分かる。

以上の結果から、地形風を数値解析により予測する場合は風洞実験と同様に閉塞率を5%以下とすることが望ましい。

3.2 計算領域の幅の影響

3次元孤立峰に対しては、風直角方向の計算領域の幅(y_W)も流れ場に影響を与える。本研究では3次元孤立峰を越える流れ場に対し、計算領域の幅を $20H$ としたケースを標準ケースとし、計算領域の幅を縮めて $10H$ 、 $5H$ としたケースについて解析を行った。最後のケースでは計算領域の幅と山の幅が等しい。

図3に計算領域の幅を変化させたときの3次元孤立峰の山頂(a)と側面の麓(b)での平均風速の鉛直分布を示す。実線が計算領域の幅を $20H$ 、点線が $10H$ 、一点鎖線が $5H$ としたときの結果を表す。計算領域の幅を $20H$ とした場合と $10H$ とした場合には、顕著な差は見られない。しかし、計算領域の幅を $5H$ としたときには平均風速の過大評価が見られる。特に、山麓ではこの傾向が顕著である。計算領域の幅を $5H$ としたときの山麓で地面からの $1H$ の高さでの平均風速の過大評価は標準ケースに対して5.1%に達する。このケースの閉塞率は2.2%に過ぎないが、計算領域の幅が狭いと流れ場は境界の影響を強く受けることがわかる。実際、対称面条件を側面境界に適用した場合、あたかも計算領域の外側に同様な地形が存在することになる。この場合は計算領域の幅が狭いと、仮想的な地形との干渉が発生し、流れの収束が生じる。

このことから、3次元地形上の流れを予測する際には閉塞率に関係なく計算領域の幅を広くとる必要がある。

3.3 上流境界の位置の影響

計算格子数を節約するために上流境界の位置は地形になるべく近い場所に設置する傾向がある。しかし、上流境界が地形に近すぎると圧力の反射により、流れ場が上流境界の影響を受けてしまうことがある。本研究では流入境界までの距離として十分に長い距離($30H$)をとったケースを標準とし、流入境界までの距離を短くして $20H$ としたケース、 $10H$

としたケース, 5Hとしたケースについて解析を行い, 上流境界の設置場所の影響を検討した。

図4(a)に, 2次元尾根を越える流れについて, 流入境界までの距離 x_H を変化させたときの山頂での平均風速の鉛直分布を示す. 実線が流入境界までの距離を $30H$, 点線が $20H$, 一点鎖線が $10H$, 鎖線が $5H$ としたケースの計算結果を示す. 最初の2つのケースの間には大きな差が見られないことから, 流入境界を $20H$ の位置に設置しても境界の影響は殆どないことがわかる. これに対し, 流入境界までの距離が $10H$ 以下となると, 流れは流入境界の影響を強く受けることがわかる. 流入境界までの距離 $5H$ のケースでは平均風速の誤差は 9.3% に達する. このことから, 2次元尾根を越える流れを解析する際には閉塞率に関係なく, 上流の境界は山の高さの少なくとも 20 倍離れた位置に設置する必要があることがわかる.

図4(b)に3次元孤立峰を越える流れの結果を示す. 2次元尾根に比べ, 3次元孤立峰では流入境界の影響が小さい. 3次元孤立峰を越える流れの場合, どのケースにも顕著な差は見られない. 流入境界までの距離を $10H$ としたケースでは, 地面からの $1H$ の高さでの平均風速の標準ケースに対する差は 0.3% である. これらのことから3次元孤立峰型の地形に対しては上流境界の位置は山の高さの 10 倍以上離れた位置に設置すればよいことがわかる.

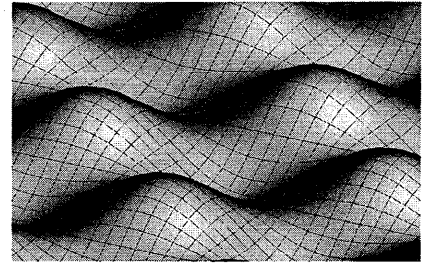


図5 対象地形の拡大図

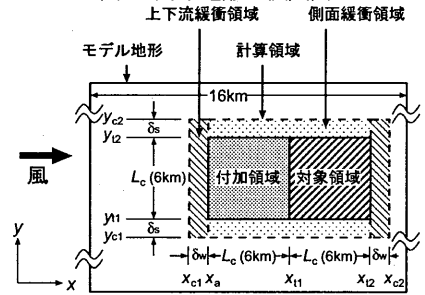


図6 解析の対象とする各領域の定義

4. 境界の処理

前章では, 流れ場の解析に必要な計算領域の大きさについて明らかにした. しかし, 単純地形と異なり, 実地形上の流れを解析する場合には, 連続と連なる実地形の一部を取り出して計算する必要がある. その際に, 取り出した計算領域の境界をどのように処理するのが問題となる. 本章では実地形上の流れの解析に適用できる境界処理手法について述べる.

4.1 地形のモデル化

実際の地形は千差万別であり, 一つの地形で代表させることは難しい. そこで本研究では二重余弦波の形状を持つ3次元地形をモデル地形として用いた. この地形の表面形状 $h(x, y)$ は次の式で表される.

$$h(x, y) = \frac{H}{2} + \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \cos\left(\frac{2\pi y}{L}\right) \quad (7)$$

ここで, $H/2$ は波高, L は波長である. x, y はそれぞれ風方向, 風直角方向とし, z は鉛直方向を表す. また, 地面からの高さは z' と定義する. 本研究では, $H=200\text{m}$, $L=1000\text{m}$ とした急峻な地形を例として用いた. 図5にはモデル地形の拡大図を示す. この地形は y 方向には無限に連なり, x 方向には 16km の広がりを持っている. また, y が L の整数倍に等しい鉛直断面 ($x-z$ 断面) は風に対して対称面となる.

図6には解析の対象とする各領域を示し, 図中に斜線で示す正方形 (一辺の長さ 6km) が風況予測の対称領域, その上流に付加領域, さらにその周囲に緩衝領域がある. 計算領域はこれら全ての領域を含む領域で, 図に点線で示す. 本研究では対象領域の中心に原点をとり, また各領域の大きさを表す記号を図6に併記した.

4.2 境界の処理

境界の影響が対象領域に伝わらないように境界付近に緩衝領域を設ける方法がこれまで用いられてきた. Maurizi et al.⁶⁾ は対象領域の端点の標高をそのまま水平方向に延長し, 緩衝領域とした. また風洞実験¹³⁾ では, 対象領域の端点から, 標高 0 の高さ, すなわち風洞床面の高さまで地形を直線的に下げ, この直線部分と風洞の側面までの床面とを合わせて緩衝領域としている. 本研究ではこれらの二つの方法をそれぞれ従来手法 (I), 従来手法 (II) と呼ぶこととする. これらの方法で作成された緩衝領域を用いる場合, 境界処理前後で緩衝領域内の地形の断面積や体積が変化し, 結果的に対象領域内の平均風速が変化するという問題がある. そこで本研究では処理前後での地形の断面積または体積を一定とする手法を提案する.

a) 上下流緩衝領域

図7は各種の上流境界処理手法による地形の $x-z$ 断面図を示す. ここでは $x_{c1}=-11\text{km}$ の地点が計算領域の端部を表し, $x_a=-9\text{km}$ の地点が緩衝領域と付加領域の境界を示す. このケースでは緩衝領域の広さは対象領域の $1/3$ とした. 図中の実線がモデル地形, 鎖線が従来手法 (I) による地形, 一点鎖線が従来手法 (II) による地形を示す. 従来手法 (I) と (II) により作成された地形の断面積は元の地形の断面積と異なる. 緩衝領域全体で考えた場合は地形の体積が変化

することとなる。そこで本研究では上流緩衝領域内の地形の体積が元の地形の体積と同じになるような境界処理方法を提案する。上流緩衝領域の上流側半分では風方向にも風直角方向にも一定の標高 (H_{wb}) とし、残り半分では対象領域の標高と直線で結ぶ。境界処理後の地形 $\hat{h}(x, y)$ は次のように表される。

$$\hat{h}(x, y) = \begin{cases} H_{wb} & (x_{c1} \leq x < x_{m1}) \\ H_{wb} + \frac{2(x - x_{m1})}{\delta_w} [h(x_a, y) - H_{wb}] & (x_{m1} \leq x < x_a) \end{cases} \quad (8)$$

ここで x_{m1} は x_a と x_{c1} の中点である。また H_{wb} は地形処理前後で緩衝領域内の地形の体積が一定となるように次式から求める。

$$H_{wb} = \frac{1}{3\Delta y} \int_{y_{c1}}^{y_{c2}} \left[\frac{4}{\delta_w} \int_{x_{c1}}^{x_a} h(x, y) dx - h(x_a, y) \right] dy \quad (9)$$

ここで、 $\Delta y (= y_{c1} - y_{c2})$ は緩衝領域の幅、 $\delta_w (= x_a - x_{c1})$ は緩衝領域の奥行きである。下流緩衝領域も上流と同じ方法で求める。

b) 側面緩衝領域

図8には y - z 断面におけるモデル地形と各種の境界処理手法によって作られた地形を示す。領域が対称であるため、図8には領域全体の半分を示す。ここでは $y_{c1} = -5\text{km}$ の地点が計算領域の端部を表し、 $y_{t1} = -3\text{km}$ の地点が対象領域と緩衝領域の境界を示す。このケースでは緩衝領域の広さは対象領域の1/3とした。図中の実線がモデル地形、鎖線が従来の手法 (I) による地形、一点鎖線が従来の手法 (II) による地形を示す。また、本研究で提案する手法による地形を点線を示す。ここでは緩衝領域外側での標高を $H_{sb}(x)$ とする。この高さは緩衝領域の半分のところまで一定とし、そこから対象領域境界での標高 ($h(x, y_{t1})$) まで直線で結ぶ。境界境界処理後の地形 $\hat{h}(x, y)$ は次のように表される。

$$\hat{h}(x, y) = \begin{cases} H_{sb}(x) & (y_{c1} \leq y \leq y_{m1}) \\ H_{sb}(x) + \frac{2(y - y_{m1})}{\delta_s} [h(x, y_{t1}) - H_{sb}(x)] & (y_{m1} \leq y \leq y_{t1}) \end{cases} \quad (10)$$

ここで y_{m1} は y_{c1} と y_{t1} の中点である。また、高さ $H_{sb}(x)$ は、元地形と断面積が等しくなるように、次式により求める。

$$H_{sb}(x) = \frac{1}{3} \left[\frac{4}{\delta_s} \int_{y_{c1}}^{y_{t1}} h(x, y) dy - h(x, y_{t1}) \right] \quad (11)$$

4.3 各種境界処理手法の比較

本研究で提案した手法の有効性を示すため、側面境界を例に各種の境界処理手法を用いて地形上の流れを計算し、元の地形を用いた場合の計算結果 (参照値) と比較する。元の地形は周期的な地形であるため、計算領域の境界面に対称面境界条件を用いることにより、参照値を求める。

図9に、各境界処理手法を用いて求めた A、B 各点 (図8) での平均風速の鉛直分布を示す。黒丸は参照値、鎖線は従来の手法 (I)、一点鎖線は従来の手法 (II)、実線は今回提案した境界処理手法により計算した平均風速を示す。境界処理手法によって、対象領域内の平均風速が大きく異なる。従来の手法 (I) を用いたケースでは風速が参照値に比べ過大に評価されている。一方、従来の手法 (II) を用いたケースでは風速が過小に評価されている。これは緩衝領域上の流量が過小または過大に評価されているためである。それに対し、今回提案した境界処理手法により計算した平均風速は参照値とほぼ同じ値を示す。

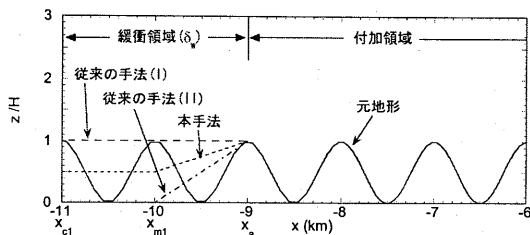


図7 各種の上流緩衝領域の比較

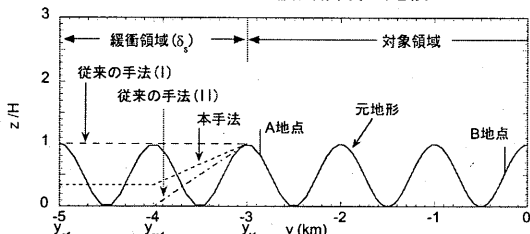


図8 各種の側面緩衝領域の比較

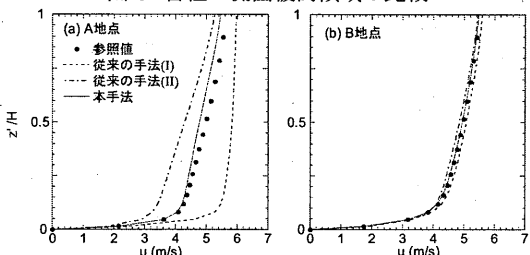


図9 A地点とB地点での平均風速の鉛直分布

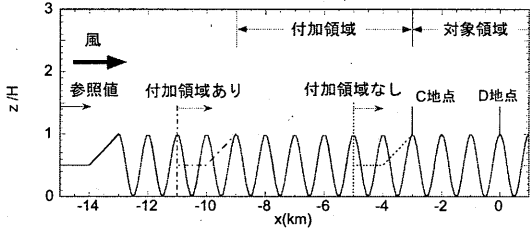


図10 各種計算領域の定義

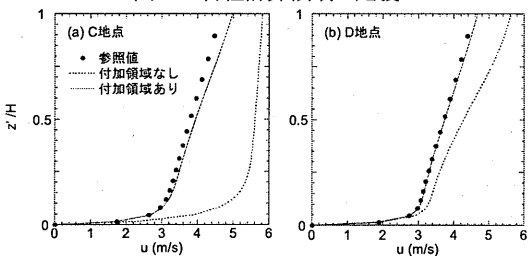


図11 C地点とD地点での風速の鉛直分布

5. 上流地形の考慮

一般に対象領域内の流れ場はその上流の地形の影響を強く受けるため、上流境界に緩衝領域を設けるだけでは上流の地形の影響を正確に反映することができない。そこで本研究では図6に示すように対象領域の上流に付加領域を設けることを提案する。第2章で述べたように本研究では計算領域を風向に平行となるように回転させるため、対象領域の上流側のみ付加領域を設ければ、上流の地形の影響を考慮に入れることができる。

付加領域の効果を調べるために、上流に対象領域と同じ大きさの付加領域を設けたケースと上流に付加領域を設けなかったケースを対象に解析を行い、モデル地形全領域を考慮して解析した結果(参照値)との比較を行った。図10には $x-z$ 断面内のモデル地形とそれぞれのケースの計算領域を示す。実線がモデル地形、一点鎖線が上流に付加領域を設けたケース、点線が上流に付加領域を設けなかったケースの計算領域を示す。それぞれのケースの計算結果から得られた、C点、D点(図10)での平均風速の鉛直分布をそれぞれ、図11(a), (b)に示す。黒丸は参照値、点線は上流に付加領域を設けなかったケース、実線は付加領域を設けたケースにより求められた平均風速を表す。付加領域を設けたケースでは参照値とほぼ同じ値を示す一方、付加領域を設けなかったケースでは参照値と大きく異なる。また、その差は上流境界に近い方が大きいことがわかる。以上のことから上流地形の影響を正しく反映するために、対象領域の上流に付加領域を設ける必要があり、本研究のケースでは付加領域は対象領域と同じ程度であれば十分であることがわかる。

6. まとめ

本研究では非線形風況予測モデルを用いて実地形上の流れ場を解析する際に必要となる計算領域の大きさについての検討を行った。また、実地形上の流れ場を解析するための新たな境界処理手法を提案した。その結果以下の結論を得た。

- 1) 地形上の流れ場を解析する際には地形による閉塞率が5%以内となるように計算領域の高さを設定する必要がある。ただし、計算領域の幅は閉塞率に関係なく、十分に広くとる必要がある。上流境界は、2次元尾根の場合には山の高さの20倍以上、3次元孤立峰の場合には山の高さの10倍以上離れた位置に設置する必要がある。
- 2) 実地形の一部を取り出して解析する場合に対象領域の側面と上下流に緩衝領域を設置し、緩衝領域内での地形の体積を一定とする境界処理手法を提案した。従来の手法に比べ、提案した手法を用いる場合、元の地形上の流れ場に近い流れ場が再現され、従来の手法による風速の過大または過小評価が解消された。
- 3) 上流の地形の影響を考慮するため、対象領域の上流側の境界には緩衝領域の他に付加領域の設置を提案した。対象領域と同じ大きさの付加領域を設けることにより上流の地形の影響を考慮でき、対象領域内の流れ場の予測精度が向上することがわかった。

謝辞

本研究は一部(財)東電記念科学技術研究所の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Jackson, P. S. and Hunt, J. C. R.: Turbulent wind flow over a low hill. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, Vol. 101, pp. 929-955, 1975. 2) 清水幸丸, 前田太佳夫, 遠藤剛, 山岸英明, 大野寛之: 地形と風速分布の関係。第16回風力エネルギーシンポジウム, pp. 29-32, 1994. 3) 佐藤沢, 田村哲朗, 桑原邦郎: 鐘状丘陵周辺非定常流れのシミュレーション結果に対する定量的検討。日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 267-268, 1994. 4) 串岡清則, 斎藤通, 本田明弘: 複雑地形まわり流れへの流動解析の適用。第13回風工学シンポジウム, pp. 579-584, 1994. 5) 山口敏, 清水仁, 榎山和男: 地形風大規模解析のための並列有限要素解析システム。第12回数値流体力学シンポジウム, pp. 535-536, 1998. 6) Maurizi, A., Palma, J. M. L. M. and Castro, F. A.: Numerical simulation of the atmospheric flow in a mountainous region of the north of Portugal. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 74-76, pp. 219-228, 1998. 7) Hewer, F. E: Non-linear numerical model predictions of flow over an isolated hill of moderate slope. *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol. 87, pp. 381-408, 1998. 8) 中山昭彦, 岸修士郎: ラージ・エディター・シミュレーションによる実地形上気流の予測。応用力学論文集, Vol. 3, pp. 737-744, 2000. 9) Lun, Y. F., Mochida, A., Murakami, S., Yoshino, H. and Shirasawa, T.: Numerical simulation of flow over topographic features by revised $k-\epsilon$ models. *J. of Wind Engineering*, No. 89, pp. 205-208, 2001. 10) 飯塚悟, 近藤裕昭: 各種SGSモデルによる山岳地形上流のLES。日本流体力学会年会2002, pp. 338-339, 2002. 11) 内田孝紀, 大屋裕二: ネストグリッドを用いた複雑地形上の風況予測シミュレーション。日本風工学会論文集, No. 92, pp. 135-144, 2002. 12) 石原孟, 日比一喜: 急峻な山を越える乱流場の数値予測。日本風工学会誌, Vol. 83, pp. 175-188, 2000. 13) 建築物風洞実験ガイドブック, 日本建築センター, 1995. 14) Patanker, S. V.: コンピュータによる熱移動と流れの数値解析。森北出版, 1980.