

風の場合計算のための擬似ポテンシャル流モデルの開発

THE DEVELOPMENT OF A QUASI-POTENTIAL FLOW MODEL FOR CALCULATING WIND FIELDS

市川陽一*・四方 浩**

By Yoichi ICHIKAWA and Hiroshi SHIKATA

A three-dimensional potential flow model was formerly developed to predict wind fields in complex terrain. In the potential flow model, wind vectors and air flows are estimated from a velocity potential function obtained by combining two or three-dimensional doublets and a uniform stream. In this paper, the validity of the potential flow model was examined through comparison against wind tunnel experiments and field model experiments. The calculated wind direction with the potential flow model can be considered mostly appropriate excluding wake district. The calculated wind velocities closely agree with the observed ones at a distance from the ground but are overestimated near the ground. This is due to potential flow which cannot accommodate viscous effects. To introduce viscous effects, a quasi-potential flow model was developed. This model is a simple method to modify wind fields of the potential flow model with only velocity distribution of inflow boundary conditions. The results of the quasi-potential flow model agree relatively well with the observed velocities even near the ground.

1. 緒 論

わが国の地形は複雑であり、工場排ガスなど大気汚染物質の挙動を扱ううえで地形影響を無視することはできない。大気汚染物質の移流、拡散に及ぼす地形影響を評価する方法としては、風洞によるアナログ的なシミュレーションがよく用いられている。一方、近年の計算技術の進歩により、数値モデルで地形影響を評価する方法も開発されつつある。これら両手法は評価の対象に応じてそれぞれの有効性を發揮し、相補って利用されることが望ましい。数値モデルについていえば、風洞実験と比べて、風向、風速等の評価条件の多様性に対応しやすく、また風の場合、濃度場の現況解析を実時間で行う場合には有効であるという利点をもつ。著者ら¹⁾は、複雑な地形が存在する場合に、大気拡散場を支配する流れ場や乱れの発生を評価する方法として三次元ポテンシャル流モデルを提案した。本論文では、このポテンシャル流モデルの妥当性を風洞や野外での模型実験の結果と比較を行うことによって検討した。さらにその結果をもとにポテンシャル流モデルの改良を行った。

2. 風洞、野外模型実験

開発した数値モデルの妥当性および問題点の検討を行うため、風洞実験の結果²⁾および野外模型実験の結果を利用する。両実験の内容を以下に示す。

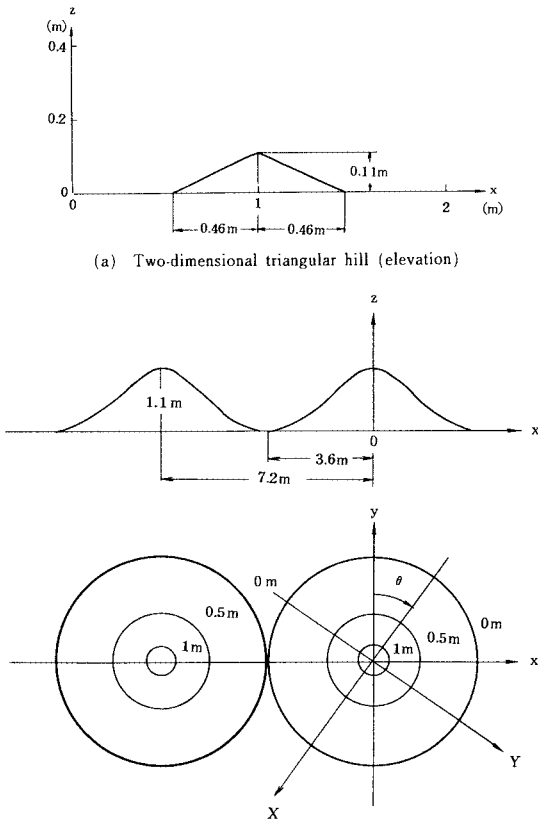
風洞実験で対象とした地形は、Fig. 1 (a) に示すような頂部に丸みをもつ二次元三角形断面地形である。この模型を長さ 10 m × 高さ 1.5 m × 幅 3 m の測定部をもつ水平吹き出しエッフェル型風洞内に一般流の方向に直角に置き、模型上空および風上、風下で風速の鉛直分布を測定した。最も下の測定点は風洞床面または模型上 5 mm である。測定には I 型熱線風速計を用い、得られた風速は縦方向の成分 (u 成分) である。

二次元地形を対象に二次元的な流れ場を求める場合、実験の実施しやすさという面で風洞実験が最も適している。しかし、実大気の風の場合を模擬するという点で、風洞実験では自然風にみられる水平方向の変動を再現する合理的な方法が開発されていない、風洞設備の制約土地形模型の縮率に制限が生じ、地表近くの風を評価しにくいという問題がある。そこで、本論文では、風洞で用いるより大きな地形模型を対象に野外の自然風の中で風の場を求める実験を行った。

野外模型実験で対象とした地形は、(i) 2つ並んだ

* 正会員 工修 (財) 電力中央研究所主査研究員 環境部
(〒201 東京都泊江市岩戸北 2-11-1)

** 工修 (財) 電力中央研究所部長 環境部 (同上)



(b) Double Gaussian mountains model (upper : elevation, lower : plan)

(c) Actual terrain model

Fig.1 Topographic configuration and coordinate systems.

三次元ガウス分布型地形、(ii) 実地形模型 (縮尺率 1/400) である。それぞれの形状を Fig.1 (b), (c) に示す。実験は昭和 57 年 7 月～8 月に海岸線から内陸へ数 100 m 入った比較的平坦な場所で行った。模型は平坦なコンクリートの基礎の上に設置し、白色のペンキを塗り日射による表面温度の上昇を抑えた。実験中の天候は一般に曇りがちで、模型表面 (5 mm 以下) と模型上

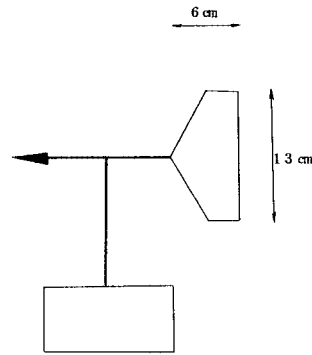


Fig.2 Wind vane used to measure wind direction.

方 1 m の温度差は 1～4°C であった。風は比較的弱く 1～2 m/s であった。模型まわりの流れ場の測定は、風向については Fig.2 に示すような矢羽根式風向計、風速については白金線定温度型アネモマスター (日本科学工業製) を用いた。風向計は、風速 0.2 m/s 以上で流れの方向を向くことを風洞内で検定した。流れ場の評価には 1 min 平均値を用いる。

3. ポテンシャル流モデル

(1) モデルの概要

ポテンシャル流の流速成分 u, v, w は速度ポテンシャル関数 Φ によって次式で定義される。

$$(u, v, w) = \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x}, \frac{\partial \Phi}{\partial y}, \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) \dots \dots \dots (1)$$

流れ場を求める 1 つの方法は、式 (1) を連続の式に代入して得られるラプラス方程式を適当な境界条件のもとに解くものである。連続の式、ラプラス方程式は、それぞれ次の式 (2), (3) で表わせる。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \dots \dots \dots (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) = 0 \dots \dots \dots (3)$$

別の方法は、地形などの境界条件を満たすような速度ポテンシャル関数 Φ を半経験的に決め、式 (1) から直接流れ場を求めるものである。本論文では、この方法を前者の方法と区別するため IPFM とよぶ。これは式 (1) から直接 (immediate) 風速成分が得られるポテンシャル流モデル (Potential Flow Model) という意味である。IPFM は前者の方法に比べて、(i) 格子点だけでなく任意の点の風速成分が得られる、(ii) 代数計算で容易に風場が求まるといった利点をもつ。著者らは複雑地形上空の流れ場の推定に IPFM を用いた。本章では、この方法による風場計算結果の妥当性について検討する。

IPFM によって風場を計算するには、まず速度ポ

テンシャル関数を決めなければならない。速度ポテンシャル関数は、その速度ポテンシャル関数によって求まる流線からなる曲面の1つが対象地形を模擬するように決める必要がある。模擬された地形が対象地形をよく近似していれば、対象地形上空の風の場合は模擬地形上空のポテンシャル流の流れ場から求めることができる。以下に Fig. 1 で示した地形を対象に速度ポテンシャル関数の求め方について述べる。

a) 二次元三角形断面地形 二次元地形の場合には、一樣流と二次元複源を合成した速度ポテンシャル関数によって地形境界模擬および上空の風場が推定できる。Fig. 1 (a) の模型を対象とした場合の速度ポテンシャル関数 Φ は次式で与えられる。

$$\Phi = u_0 \left[x + \frac{(x-x_i)a^2}{(x-x_i)^2 + (z-z_i)^2} \right] \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 u_0 は地形の影響を受けない上空の一般流の風速、 a は複源強さ、 (x_i, z_i) は複源位置である。 $a=0.15$ 、 $(x_i, z_i)=(1.0, -0.1)$ のとき、地形の影響を受けない上流境界で $z=0$ を通る流線は対象地形をよく模擬した。模擬結果を Fig. 3 (a) に示す。

b) 2つ並んだ三次元ガウス分布型地形 Fig. 1 (b) のように単純な三次元地形が2つある場合には、一樣流と2つの三次元複源を合成した速度ポテンシャル関数によって地形境界模擬および上空の風場の推定ができる。速度ポテンシャル関数 Φ は図に示す $X-Y-z$ 座標系で次式で与えられる。

$$\Phi = u_0 \left[X + \sum_{i=1}^2 \frac{(X-X_i)a^3}{2\{(X-X_i)^2 + (Y-Y_i)^2 + (z-z_i)^2\}^{3/2}} \right] \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 u_0, a は式 (4) と同じ記号である。 (X_i, Y_i, z_i) は複源位置で、これは $x-y-z$ 座標系での複源位置 (x_i, y_i, z_i) と次の関係がある。

$$(X_i, Y_i, z_i) = (-x_i \sin \theta - y_i \cos \theta, x_i \cos \theta - y_i \sin \theta, z_i) \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 θ は一般流の風向である。 $a=2.0$ 、 $(x_1, y_1, z_1)=(0, 0, -1.25)$ 、 $(x_2, y_2, z_2)=(-7.2, 0, -1.25)$ のとき、地形の影響を受けない上流境界で $z=0$ を通る流線群は対象地形をよく模擬した。模擬結果を Fig. 3 (b) に示す。

c) 実地形模型 Fig. 1 (c) に示した実地形の場合に、地形境界を模擬し、上空の風場を推定する方法の詳細は文献1) で述べたため、ここでは簡単に説明する。速度ポテンシャル関数 Φ は一樣流と水平面に格子状に配列した強さの異なる三次元複源の合成によって得られる。Fig. 1 (c) の X, Y 軸と鉛直上向きにとった z 軸からなる座標系では次式で与えられる。

$$\Phi = u_0 \left[X + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{(X-X_{i,j})a_{i,j}^3}{2\{(X-X_{i,j})^2 + (Y-Y_{i,j})^2 + z^2\}^{3/2}} \right] \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 u_0, a は式 (4) と同じ記号である。 m, n は $x-y-z$ 座標系で x 方向、 y 方向に配置する複源の個数、添字 i, j は $x-y-z$ 座標系で複源が配置される格子点を表す。 $X-Y-z$ 座標系における複源位置は $(X_{i,j}, Y_{i,j}, 0)$ で、これは $x-y-z$ 座標系における複源位置 $(x_i, y_j, 0)$ と次の関係がある。

$$(X_{i,j}, Y_{i,j}, 0) = (-x_i \sin \theta - y_j \cos \theta, x_i \cos \theta - y_j \sin \theta, 0) \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 θ は一般流の風向である。格子点に配置する複源強さ $a_{i,j}$ は、その格子点の地形標高と複源配置の格子間隔からほぼ決定できる。すなわち、

$$a_{i,j} = c_{i,j} \left(\frac{3 \gamma \Delta x \cdot \Delta y \cdot z_{i,j}}{2 \pi} \right)^{1/3} \dots\dots\dots (9)$$

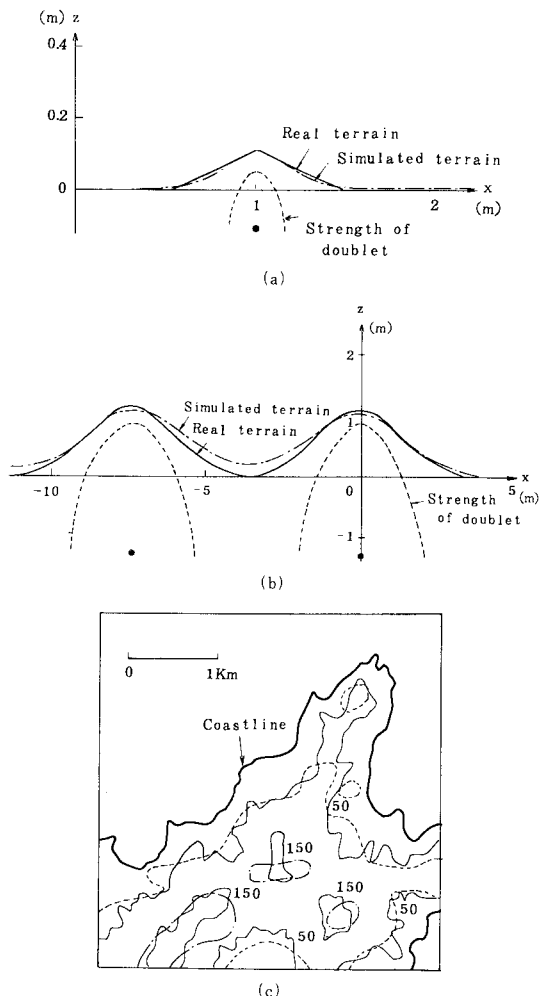


Fig. 3 Comparison of real terrain and simulated terrain.

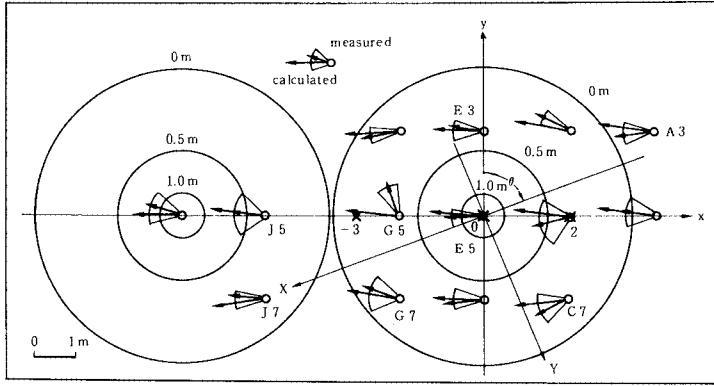


Fig. 4 Comparison of calculated and measured wind directions.

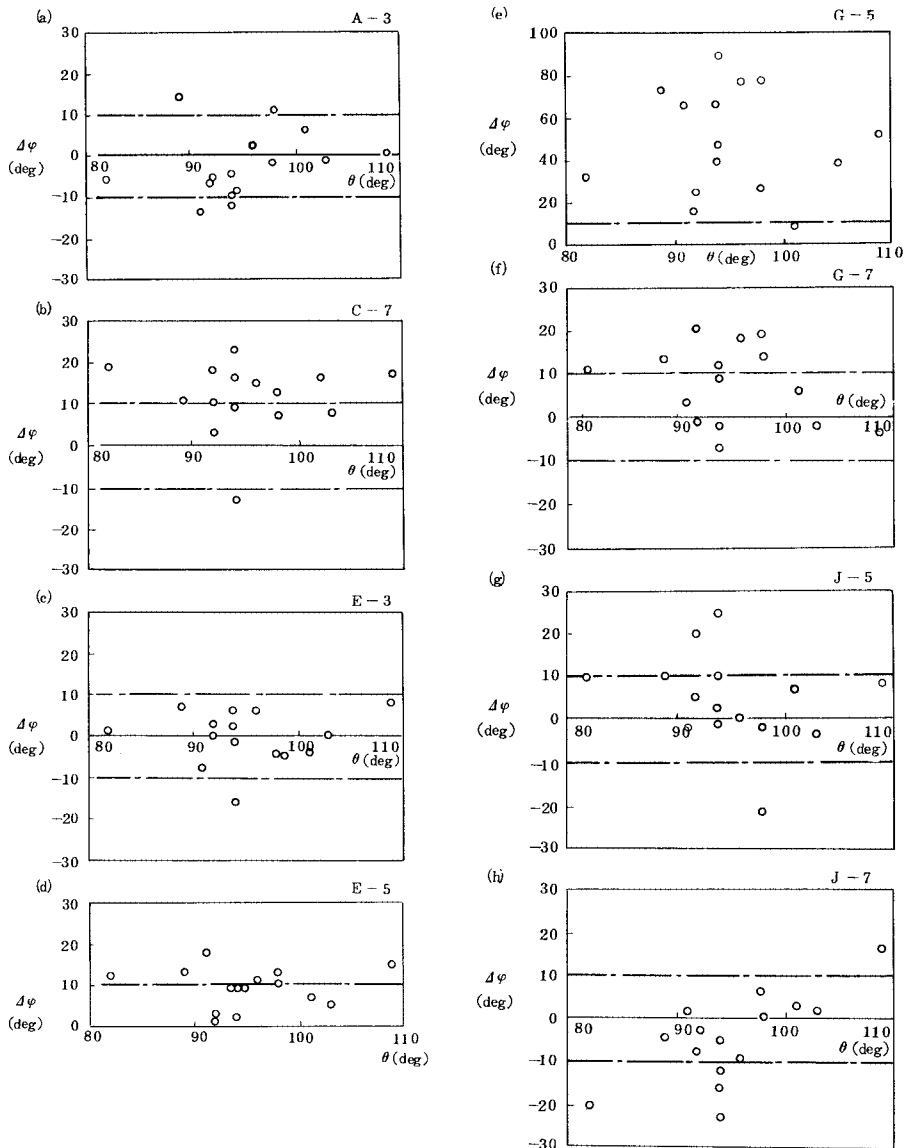


Fig. 5 Difference between calculated wind direction by IPFM and measured ones.

ここに、 Δx , Δy は複源配置の格子間隔、 z_t は地形標高、 γ は Δx , Δy , z_t の関数、 c は 1.0 に近い補正係数である。式 (9) は複源強さを半径とする半球の体積と格子間隔、地形標高からなる直方体の体積の比から得られた。式 (7) をもとに地形境界を模擬した結果を Fig. 3(c) に示す。図中、破線、一点鎖線が模擬地形である。

(2) 計算結果と実験結果の比較

a) 風向 2つ並んだ三次元ガウス分布型地形を対象に、IPFM による計算結果と実験結果を比較した。この地形により、山の前方地点、山腹地点、頂上地点、山の背後地点、谷間地点での比較が可能となる。実験では風向計を模型表面上 0.1 m に矢羽根の中心がくるように配置した。Fig. 4 に計算結果と実験結果の比較例を示す。図中短い矢印は測定値で変動幅が円弧で示されている。長い矢印が IPFM による計算結果である。図中地点番号を付けた点について、一般流の風向 θ が変化したときの計算値の測定値からの偏差を求めた。結果を Fig. 5 に示す。縦軸の偏差 $\Delta\phi$ は、Fig. 6 に示すように地形の影響をより受ける方向に計算値が偏る場合を負にとっている。計算値と測定値の偏差は山の背後 (G5 地点) を除き 10~15 度に収まり、両者はほぼ一致している。G5 地点の計算値と測定値の偏差の中には、山の背後のきわめて低い風速による風向測定誤差が含まれているものの、その差は大きい。C7, G7 地点では、計算値の

方が測定値より地形の影響による気流の変化は小さい。他の地点ではそのような傾向は明白でない。

b) 風速 二次元三角形断面地形を対象としたときの IPFM による計算結果と実験結果の比較を Fig. 7 に示す。図中実線は風洞実験で測定されている風速の鉛直分布、破線が IPFM による計算結果を示す。なお、丸印は次章で IPFM を改良することによって開発した擬似ポテンシャル流モデル IQPFM の計算結果を示している。IPFM による計算の上流境界条件は、鉛直方向に一律で $u_0=2$ m/s である。この値は風洞実験で測定されている境界層の外側の風速に等しい。風速の鉛直分布の下端に示されている実線、一点鎖線はそれぞれ模型地形境界、IPFM で模擬した地形境界を表わしている。全般的にみて、風洞床面または模型表面から 0.05~0.1 m より低いところでは、IPFM の計算結果は測定値より高い値を示している。

三次元ガウス分布型地形上空の風速について、IPFM の計算結果と実験結果を比較した。評価は Fig. 4 で $y=0$ m の $x=2$ m, 0 m, -3 m 地点 (図中×印) について行った。IPFM による計算の上流境界条件 u_0 は、 $x=4$ m, $y=0$ m, $z=0.8$ m における測定値に等しい。一般流の風向 θ が変化したときの計算値と測定値の比を Fig. 8 の各記号、Fig. 9 の黒丸印で示す。なお、Fig. 9 の白丸印は次章で説明する擬似ポテンシャル流モデル IQPFM の計算結果である。Fig. 8, 9 の IPFM の計算値と測定値の比から、山の頂上の $x=0$ m を除いて地表面近くでは計算値は測定値より高いことがわかる。地表面から離れた上空では計算値と測定値はよく一致している。 $x=0$ m ではすべての測定点で両者はほぼ一致している。しかし、地表面で風速が 0 m/s であると考え、地表面のごく近くでは計算値は過大評価していることになる。

実地形模型上空の風速の IPFM による計算結果と実験結果の比較例を Fig. 10 に示す。評価は Fig. 1 (c) に示す A-A' 断面で行った。Fig. 10 で破線が IPFM による計算結果、丸印が測定値を示す。なお、実線は次章で

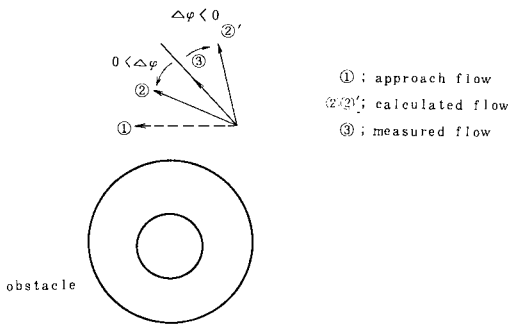


Fig. 6 Conceptual representation of the determination of $\Delta\phi$.

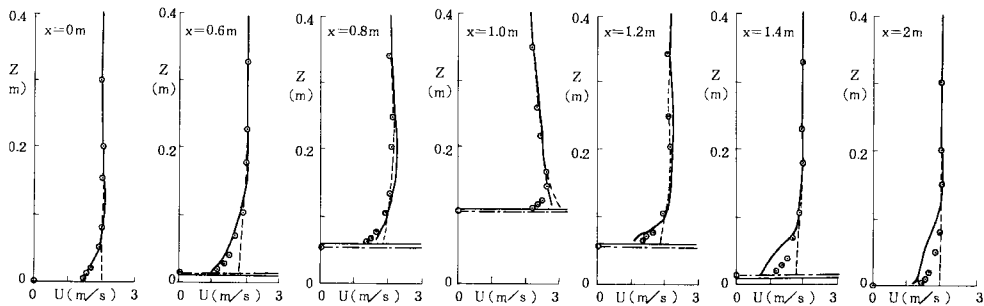


Fig. 7 Calculated and measured wind profiles over a two-dimensional triangular hill.

.....: IPFM, ●: IQPFM, —: wind tunnel experiment

説明する擬似ポテンシャル流モデル IQPFM の計算結果である。IPFM による計算の風速の上流境界条件 u_0 は、 $x=1480\text{ m}$ 、 $Z=320\text{ m}$ の測定値に等しい。一般流の風向 θ が変化したときの計算値と測定値の比較を両者の比を求めることにより行った。 $x=-560\text{ m}$ における結果を Fig. 11 に黒丸印で示す。地表面からの高さ ζ が 80 m 、 160 m では両者はほぼ一致している。地表面に近い $\zeta=40\text{ m}$ では計算値の方が 20% 程度高い値を示している。山の背後に位置する $x=-1080\text{ m}$ 、 $\zeta=40\text{ m}$ における計算値と測定値の比を Fig. 12 に黒丸印で示す。評価点が後流域に位置し、また地表面近くのため IPFM による計算値は測定値の $1.6\sim 2.0$ 倍になっている。なお、Fig. 11, 12 で白丸印は次章で説明する擬似ポテンシャル流モデル IQPFM の計算結果である。

以上 a), b) の結果から次のことがいえる。IPFM の計算結果として得られる風向は、山の背後の後流域を除いてはほぼ妥当だといえる。上流境界条件として地表面の影響を受けない上空の風速を用いた場合、地表面近くや山の背後では IPFM の風速の計算値は測定値より高

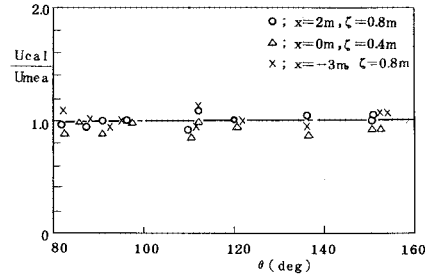


Fig. 8 Comparison of wind velocities calculated by IPFM with field experiment data in presence of double Gaussian mountains model. ζ is the height above the ground.

い値を示す。地表面から離れるにつれて両者はよく一致するようになり、IPFM による風速の計算結果も妥当となる。

4. 擬似ポテンシャル流モデル

(1) モデルの概要

3. の結果からもわかるように、ポテンシャル流モデ

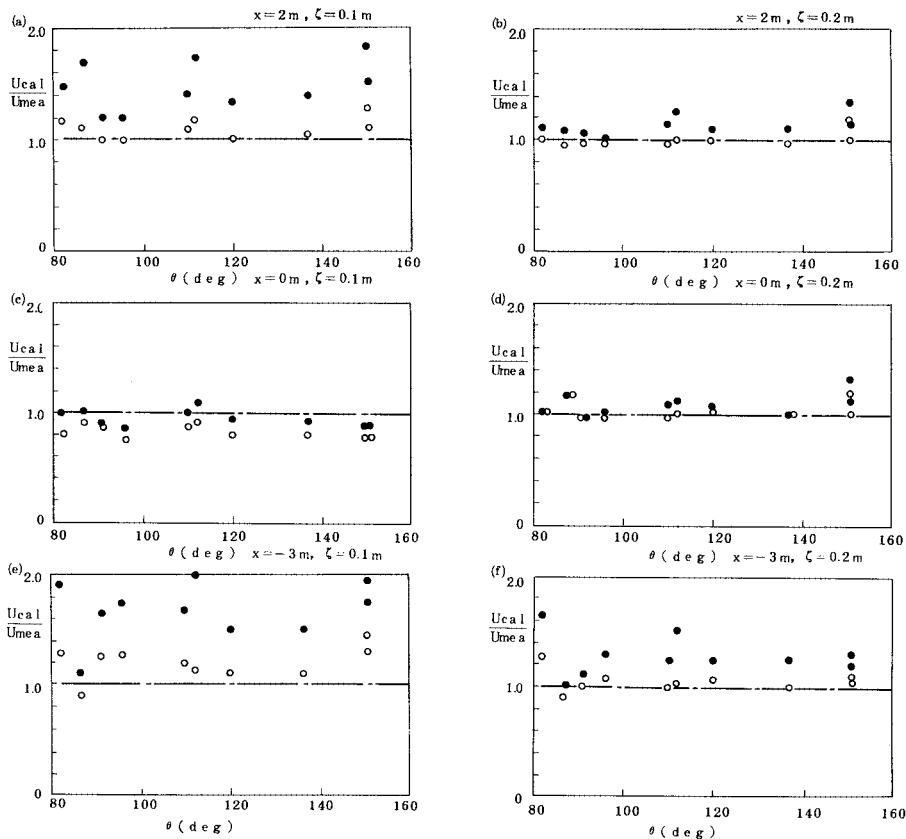


Fig. 9 Comparison of numerical calculations of wind velocities with field experiment data in presence of double Gaussian mountains model.

● : IPFM, ○ : IQPFM, ζ is the height above the ground

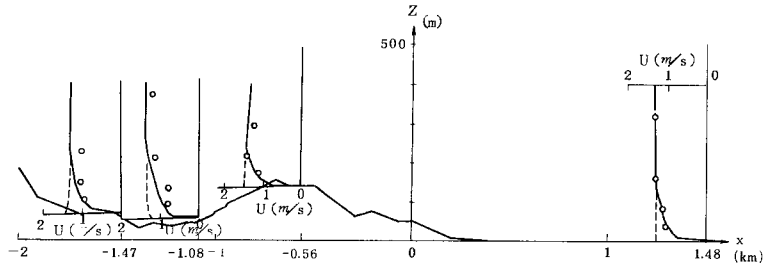


Fig. 10 Calculated and measured wind profiles over an actual terrain model.

..... : IPFM, — : IQPFM, ○ : field experiment

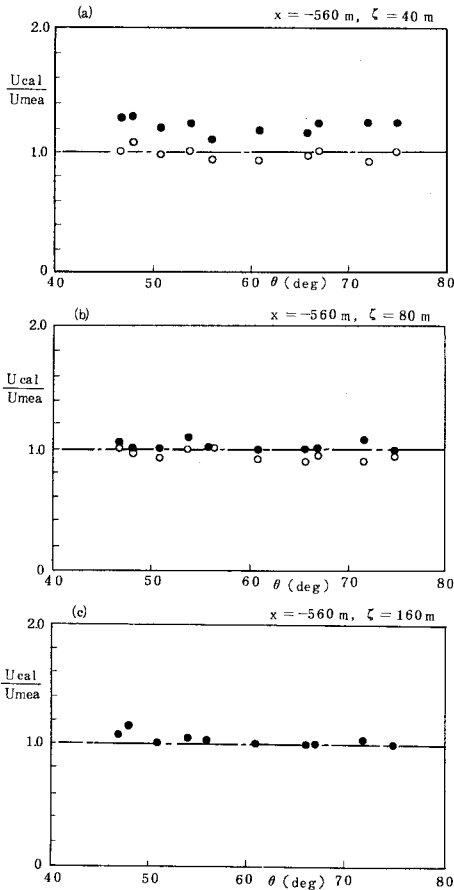


Fig. 11 Comparison of numerical calculations of wind velocities with field experiment data in presence of an actual terrain model (1).

● : IPFM, ○ : IQPFM, ζ is the height above the ground

ルでは地表近くの粘性効果を表すことはできない。本章ではIPFMに粘性効果を考慮できるように改良した。

ポテンシャル流の流れ場に粘性効果を考慮するため、Lantzら³⁾はポテンシャル流の修正係数 B_x, B_y, B_z を導入している。すなわち、速度成分を式(1)の代わりに次式で定義した。

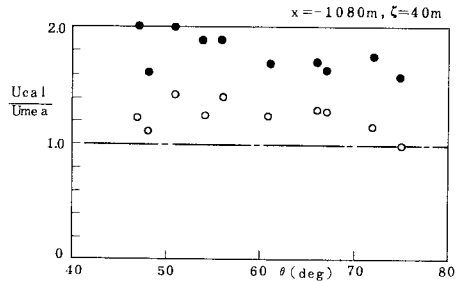


Fig. 12 Comparison of numerical calculations of wind velocities with field experiment data in presence of an actual terrain model (2).

● : IPFM, ○ : IQPFM, ζ is the height above the ground

$$(u, v, w) = (B_x \frac{\partial \Phi}{\partial x}, B_y \frac{\partial \Phi}{\partial y}, B_z \frac{\partial \Phi}{\partial z}) \dots \dots \dots (10)$$

Lantzらは式(10)を連続の式に代入して Φ について解を求める方法、すなわち3.で説明したラプラス方程式を解く方法によって風場を求めているが、本論文ではIPFMの考え方を利用した。IPFMに粘性効果を考慮できるように改良した方法をIQPFMとよぶ。これは式(10)のような速度成分の定義式から直接(immediate)風速成分が得られる擬似ポテンシャル流モデル(Quasi-Potential Flow Model)という意味である。以下にIQPFMによる風場の計算方法について説明を行う。

3.の結果は、IPFMによって得られる風向(流線)はほぼ妥当であることを示している。そのため修正係数 B_x, B_y, B_z はすべて等しいと考えてよく、それらを B で表わす。すなわち、式(10)は次のように書ける。

$$(u, v, w) = (B \frac{\partial \Phi}{\partial x}, B \frac{\partial \Phi}{\partial y}, B \frac{\partial \Phi}{\partial z}) \dots \dots \dots (11)$$

B は同一流線上の点について同じ値をとると仮定する。これにより式(11)で求まる風場は連続の式を必然的に満たす。 B の値は風速の上流境界条件によって求めることができる。IPFMで上流境界条件として使用する地形影響を受けない上空の一般流の風速を u_0 、上流

境界における実際の風速の鉛直分布を $u_B(z)$ とすると、ある流線 Ψ 上の B は次式で求まる。

$$B(\Psi) = \frac{u_B(z_\psi)}{u_0} \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 z_ψ は流線 Ψ が上流境界を通過する高さである。

(2) 計算結果と実験結果の比較

Fig. 1 に示した3つの地形を対象に IQPFM によって計算した風速分布と測定値の比較を行った。本節で比較の対象とした各測定値は、3. で IPFM の計算結果と比較した各測定値に対応している。

a) 二次元三角形断面地形 風洞実験で地形の影響を受けない上流の風速分布をべき法則(たとえば文献4)を参照)で近似する。本計算では、Fig. 1 (a) の座標系で $x=0$ m の測定値を次式で近似した。

$$\left. \begin{aligned} z \leq 0.08 \text{ m のとき} & \quad u = 2 \left(\frac{z}{0.08} \right)^{0.12} \text{ m/s} \\ z > 0.08 \text{ m のとき} & \quad u = 2 \text{ m/s} \end{aligned} \right\} \dots\dots (13)$$

式(4)の一般流の風速 u_0 を上流境界における地表面の影響を受けない風速、すなわち 2 m/s とすると $B(\Psi)$ は次式で表わせる。

$$\left. \begin{aligned} z_\psi \leq 0.08 \text{ m のとき} & \quad B(\Psi) = \left(\frac{z_\psi}{0.08} \right)^{0.12} \\ z_\psi > 0.08 \text{ m のとき} & \quad B(\Psi) = 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots (14)$$

式(4)、(11)、(14)から粘性効果が考慮された風速分布が得られる。結果を先に示した Fig. 7 に丸印で示す。全般的にみて、IQPFM による計算結果は IPFM による計算結果と比べて測定値をよく近似している。特に山のの上流では、IQPFM による計算結果と測定値は非常によく一致している。山の頂上では、IPFM による計算結果の方が測定値とよく一致しているようにみえる。しかし、IPFM による計算結果は地表境界で風速が 0 m/s という境界条件を満たしていないのに対し、IQPFM の結果はその条件を満たしている。山の背後 ($x=1.4$ m, 2 m) では、IQPFM の結果においても測定値より高い値を示しているが、その程度は IPFM の結果よりも小さい。

b) 2つ並んだ三次元ガウス分布型地形 $B(\Psi)$ の値は a) の場合と同様、上流境界における風速分布から次式で与えた。

$$\left. \begin{aligned} z_\psi \leq z_0 \text{ のとき} & \quad B(\Psi) = \left(\frac{z_\psi}{z_0} \right)^p \\ z_\psi > z_0 \text{ のとき} & \quad B(\Psi) = 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

ここに、 p はべき法則の指数、 z_0 は風速が一定となる高さである。式(5)、(11)、(15)から粘性効果を考慮した風速分布を求め測定値と比較した。結果を先に示した Fig. 9 の白丸印で示す。全般的にみて、IQPFM による計算結果は IPFM による計算結果と比べて測定値を

よく近似していることがわかる。特に山の風上や地表面から 0.2 m 以上上空では、IQPFM による計算結果と測定値はよく一致している。山の頂上の地表に近い測定点 ($x=0$ m, $\zeta=0.1$ m) では、むしろ IPFM による計算結果の方がよく合っている。しかし、IQPFM の計算結果は地表面で $u=0$ m/s の境界条件を満たすのに対し、IPFM ではその境界条件を満たさせることはできない。山の背後の地表面近く ($x=-3$ m, $\zeta=0.1$ m) では、IQPFM の計算結果は測定値よりやや高い値を示す。

c) 実地形模型 式(7)、(11)、(15)から粘性効果を考慮した風速分布を求めた。計算結果の例を先に示した Fig. 10 に実線で示す。一般流の風向 θ が変化したときの IQPFM による計算値と測定値の比較は Fig. 11, 12 に白丸印で示されている。 $x=-560$ m, $\zeta=160$ m の場合は、IQPFM と IPFM の結果は同じである。これらの図から実地形模型を対象とした場合も、二次元三角形断面地形や三次元ガウス分布型地形の場合と同様に、IQPFM は IPFM では考慮できない地表近くの粘性効果を表現できることがわかる。ただし、山の背後の $x=-1080$ m の地表に近い測定点では、IQPFM の計算結果でも 20~40% 高い値を示す。

以上の3種類の地形を対象とした計算結果と測定結果の比較から以下のことがいえる。IPFM では上層の風速分布はよく模擬できるが、地表に近い下層の風速分布は過大評価される。粘性効果を考慮できる IQPFM は、上流境界の風速分布だけで IPFM の風場を修正する簡単な方法であるが、地表近くの風速分布も比較的よく模擬できる。ただし、山の背後で後流が生じると思われる領域や単純地形の頂点の地表近くでは、IQPFM による計算結果の予測精度も幾分落ちる。本論文で対象とした地形の勾配は 10 数度であるが、傾きがより急になり極端に大きな勾配の地形を扱う場合、上記の領域では本章で示した計算結果の予測精度より悪くなる傾向があると思われる。

5. 結 語

複雑な地形上空の風場を予測する方法として著者らは先に三次元ポテンシャル流モデル (IPFM) を提案した。このモデルはポテンシャル流で風場を近似するものである。そのため、熱的効果が強い場合あるいは山や建物の背後の局地的な後流などを対象とする場合には適用できない。しかし、地形が存在するときの全般的な風場を評価する場合には非常に有効な方法である。IPFM では速度ポテンシャル関数から導かれた簡単な代数式で風速分布を計算する。そのため有限差分法や有限要素法などを用いて風場を求める方法に比べて安定性や収束性など数値解法上の問題を考える必要がなく、

また格子点だけでなく任意の点の風速成分が求まるという利点をもつ。本論文ではIPFMの精度についての検討を行い、山の背後の渦領域や粘性効果の働く地表面のすぐ近くを除いては妥当であることを確かめた。さらに、地表面付近の粘性効果を表わすためにIPFMを改良し、擬似ポテンシャル流モデル(IQPFM)を作成した。IQPFMは流線はポテンシャル流で求め、地表面近くの粘性効果を上流境界条件の風速分布だけによって表わす比較的簡単なモデルで、地表面でno-slipの境界条件を満たす。また、上流境界条件として与える風速の鉛直分布にある程度大気安定度も考慮できる。実験結果との比較において、IQPFMはIPFMよりよい精度をもつことを確かめた。ただし、IQPFMにおいてもポテンシャル流の流線の修正は行わないため、コリオリ力に起因する大気境界層内の風向の鉛直分布や強い温度成層の効果は考慮できない。モデルの構成面からいえば、IQPFMはIPFMよりやや複雑になるものの、先に述べたIPFMの有限差分法や有限要素法に勝る点は保持している。そのため、IQPFMもIPFMと同様大気汚染物質の追跡や大気拡散場の解析に必要な風場を比較的容易に評価することができ、複雑地形が存在するときの大

気汚染評価に役立つと思われる。特に、気象条件の短時間変動に対応させて実時間に近い状態で拡散評価を行う必要のある大気環境監視システムで実用的に使用できると考える。

なお、本研究の実施にあたって元電力中央研究所参事本間端雄氏から貴重な助言を賜った。また、野外模型実験には多数の方の協力を得た。ここに心から深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Ichikawa, Y. and Shikata, H. : A three-dimensional potential flow model for the prediction of the behavior of radioactive plumes, Nuclear Technology, Vol. 64, pp. 26~34, 1984.
- 2) 通地克三・市川陽一・駒林理一：排ガス拡散に及ぼす地形影響——2次元尾根型模型による実験的検討——，電力中央研究所研究報告 284010, 1984.
- 3) Lantz, R. B. and Coats, K. H. : A three-dimensional numerical model for calculating the spread and dilution of air pollutants, Proceedings Air Pollution, Turbulences, and Diffusion Symposium, pp. 43~49, 1971.
- 4) Sutton, O. G. : Micrometeorology, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1953.

(1984. 10. 17・受付)