

小地形上での気流の数値的シミュレーションについて

光田 寧・山田 道夫・堀口 光章・樋口 宗彦

NUMERICAL SIMULATION OF WIND FIELD OVER THE TERRAIN WITH COMPLEX TOPOGRAPHY

By Yasushi MITSUTA, Michio YAMADA, Mitsuaki HORIGUCHI and Munehiko HIGUCHI

Synopsis

Wind field over the terrain with complex topography has been studied, when strong wind is expected from synoptic condition. The wind field is mainly determined by mechanical conditions, and 3-dimensional MASCON (mass-consistent) model is effective. In this paper, as the first step, the character of the solution of the model was compared with the solution of potential flow model. Both solutions correspond each other fairly well. Then, with this model, simulation was made on the wind field over the simplified topography that resembles the real topography to study. In this calculation, we attempted to take account of thermal stability of air flow as the ratio of modification coefficient between horizontal and vertical wind velocities. Under two conditions (stable and neutral) the results corresponding to the observed wind data qualitatively were obtained.

1. はじめに

現在我々は兵庫県北部の余部橋梁付近において、1986年12月に発生した鉄道事故に関連して、複雑な地形上での強風の性質についての総合的な研究を行っている。過去の観測、及び新たに開始した橋梁上及び周辺観測点での実測により現在までに得られた強風時の風データから、余部付近での風は周囲に比べて強く、又、橋梁上(全長約 300 m)に於いても、場所に依って風速に局所的な分布の生じることが明らかとなった。これは主に、地形の影響によるものであると考えられる。この、地形による風の一般場の変形の実態を定量的に解明する為には現場付近に展開した空間的に密な観測網に依るのが最も望ましいが、それは事実上不可能であり、次善の策として、周辺観測点の実測値と、地上天気図から得られる気圧場を用いた風の一般場の推算値から現地の気流を内挿・推算するという方法を取らざるを得ない。その際、質量保存則を用いて内挿場を修正(MASCON モデル)する事により、推算された場の信頼性の向上が期待される。今後、余部橋梁付近の程度の規模の地形に適した MASCON モデルの開発と、それを用いた風の場の研究とを進めて行く予定であるが、今回は、現在開発中の MASCON モデルについて、ポテンシャル流を用いた特性試験、及び、余部付近に似たモデル地形を用いた気流推算とを行ってみた。

2. MASCON モデルの概要

3次元 MASCON モデルは、質量保存則を満たし、且つ、初期内挿風場 $u_0 = (u_0, v_0, w_0)$ に最も近い修正場

$\mathbf{u} = (u, v, w)$ を求めるものである。修正場は、次の汎関数

$$I = \int [\alpha_h^2 \{(u - u_0)^2 + (v - v_0)^2\} + \alpha_v^2 (w - w_0)^2 + \lambda \nabla \cdot (\rho \mathbf{u})] dV \quad (1)$$

を最小にする変分問題の解として与えられる。ここで、 ρ は大気密度、 λ は Lagrange の未定乗数、又、 α_h 、 α_v はそれぞれ水平・鉛直の修正係数である。実際には(1)式を極小とする、即ち、 $\Delta I = 0$ の条件から求まる Euler 方程式

$$u = u_0 + \frac{1}{2\alpha_h^2} \frac{\partial \lambda}{\partial x} \quad (2)$$

$$v = v_0 + \frac{1}{2\alpha_h^2} \frac{\partial \lambda}{\partial y} \quad (3)$$

$$w = w_0 + \frac{1}{2\alpha_v^2} \frac{\partial \lambda}{\partial z} \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

に於いて、(2), (3), (4)を(5)に代入して得られる λ に関するポワッソン方程式

$$\frac{\partial^2 \lambda}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \lambda}{\partial y^2} + \frac{\alpha_h^2}{\alpha_v^2} \frac{\partial^2 \lambda}{\partial z^2} = -2\alpha_h^2 \nabla \cdot \mathbf{u}_0 \quad (6)$$

を境界条件

$$\lambda(u - u_0) = 0 \text{ on } x\text{-boundaries}$$

$$\lambda(v - v_0) = 0 \text{ on } y\text{-boundaries}$$

$$\lambda(w - w_0) = 0 \text{ on } z\text{-boundaries}$$

の下に解けばよい。今回用いたモデルは、鉛直座標に Z^* 系、即ち、

$$Z^* = H(Z - Z_s) / (H - Z_s) \quad (7)$$

H : 上端高度

Z_s : 地形標高

Z : 鉛直高度

を用いる (Fig. 1.) ことで地形効果を取入れているので、(6)式は、新しく定義された速度成分

$$\bar{U} = (\epsilon \rho u, \epsilon \rho v, \epsilon \rho w) = (\bar{u}, \bar{v}, \bar{w})$$

$$\bar{U}_0 = (\epsilon \rho u_0, \epsilon \rho v_0, \epsilon \rho w_0) = (\bar{u}_0, \bar{v}_0, \bar{w}_0)$$

$$\text{但し、} \epsilon = 1 - Z_s / H$$

を用いて、

$$\frac{\partial^2 \lambda}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \lambda}{\partial y^2} + \frac{\alpha_h^2}{\alpha_v^2} \frac{\partial^2 \lambda}{\partial z^{*2}} = -2\alpha_h^2 \left(\frac{\partial \bar{u}_0}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}_0}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}_0}{\partial z^*} \right) \quad (8)$$

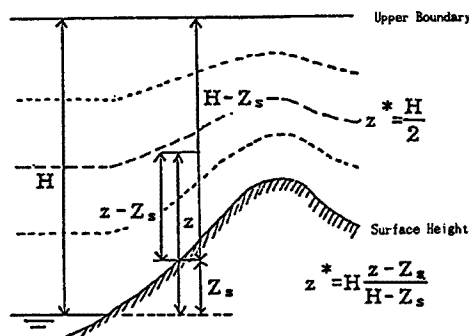


Fig. 1. Z^* co-ordinate.

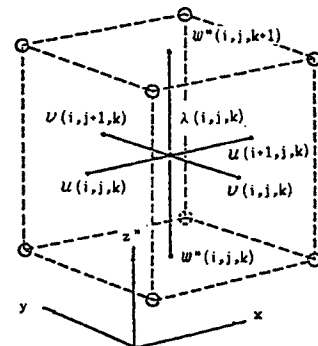


Fig. 2. Staggered scheme.

となり、このポワソン方程式を境界条件

$$\lambda(\bar{u} - \bar{u}_0) = 0 \text{ on } x\text{-boundaries}$$

$$\lambda(\bar{v} - \bar{v}_0) = 0 \text{ on } y\text{-boundaries}$$

$$\lambda(\bar{w} - \bar{w}_0) = 0 \text{ on } z\text{-boundaries}$$

の下に数値的に解くことになる。差分計算にはスタガード・スキーム (Fig. 2) を用い、過緩和法によって、拘束条件(5)を満たす λ の収束解を求めると言う方法を取った。

ところで、式(1)からもわかる通り、修正係数は互いの比 $\alpha = \alpha_v / \alpha_n$ (α 比) が問題となるが、従来は、水平、及び、鉛直風速の比に相当するものであるとして、 $\alpha = 10 \sim 100$ の値を適当に与えたり、又、数値解の最

も収束しやすい α の値をモデルを実際に走らせて決定する、等の方法が取られてきた。最近になって、流体がその流線に沿ってエネルギーの総和を保存するというベルヌイの法則を用いて、 α 比と大気安定度とを関係付ける試みが Ross & Smith¹⁾ によって行われている。これは理論と実験とを組み合わせたもので、未だ完成された方法とはいえないが、現時点では大気成層状態を α に反映させる唯一の方法であるので、今回はこの方法により α 比を決定する手法を用いることにした。

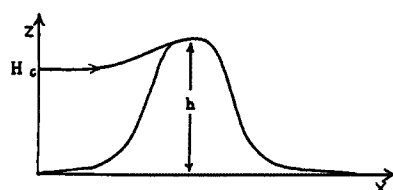
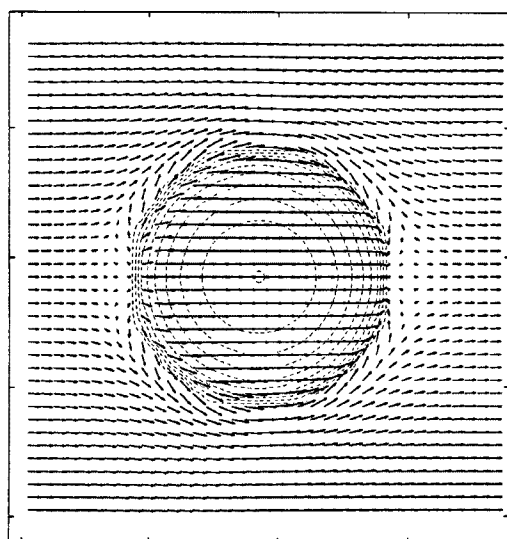


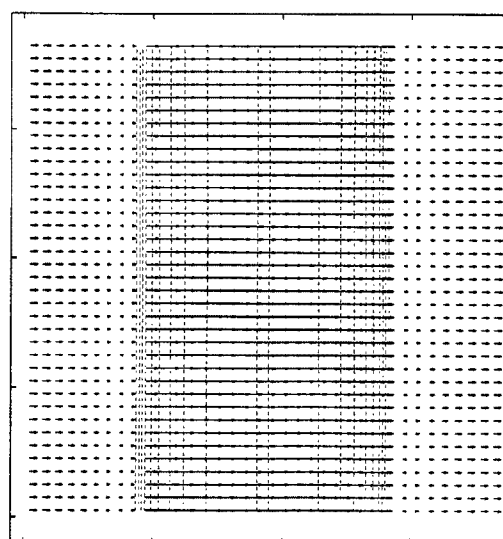
Fig. 3. Notation for flow over a polynomial hill.

Table 1. Constants given for the 3-dimensional MASCON model

Number of horizontal grid points	: 37×37
Horizontal grid interval	: 50 m
Boundary conditions (sides & upper)	: free
Boundary conditions (lower)	: fixed (topography)
Topography	: hemisphere/half-cylinder, radius 500 m
Initial wind field	: horizontal and uniform, 1.0 m/s



(a) for a hemisphere,



(b) for a half-cylinder.

Fig. 4. Near-surface u, v wind field calculated with MASCON : ($\Delta Z^* = 50$ m, $N_z = 30$, $H = 1550$)

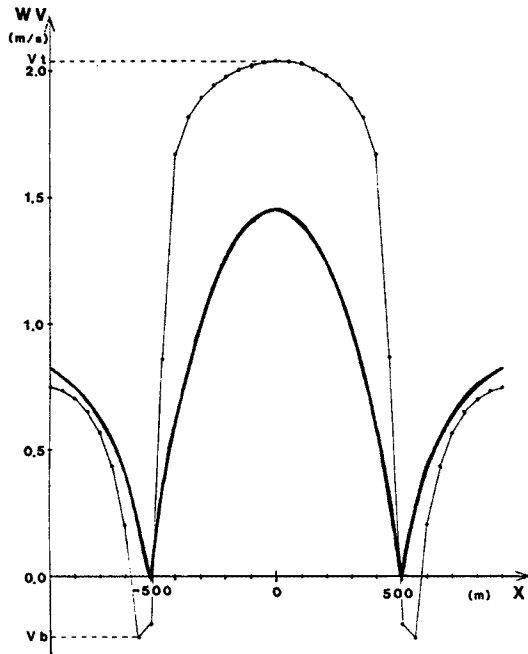


Fig. 5.(a) Wind speed profile for a hemisphere along the long-wind horizontal axis: theoretical solution (thick line); calculated solution using MASCON (thin line).

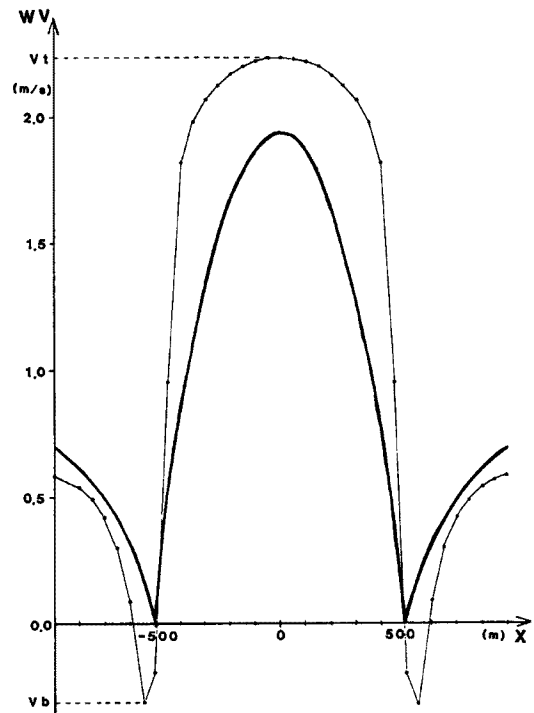


Fig. 5.(b) Same as (a), except for a half-cylinder.

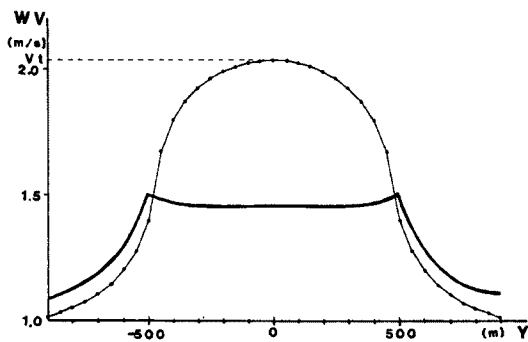


Fig. 5.(c) Same as (a), except along the crosswind axis.

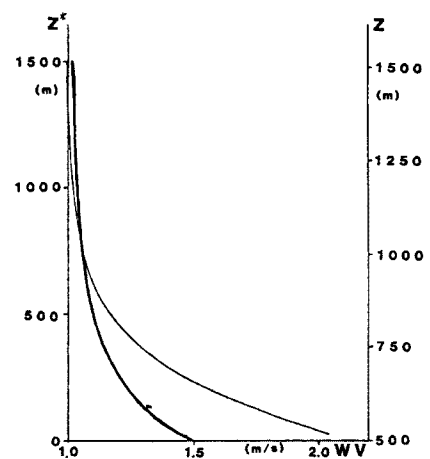


Fig. 5.(d) Vertical profile of horizontal wind speed above the summit for a hemisphere.

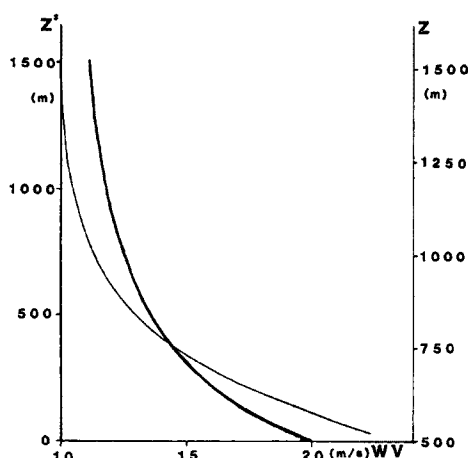


Fig. 5.(e) Same as (d), except for a half-cylinder.

結果のみを示すと、 α 比は山の高さ（立ち上がり） h ；
Brunt-Väisärä 振動数 N ；流線上無限遠での水平風速 U_∞
とすると、

$$1/\alpha^2 = \begin{cases} 1 - a/\sqrt{F_h} & ; Z > H_c \\ 0 & ; Z \leq H_c \end{cases} \quad (9)$$

$$(10)$$

$$F_h : \text{Hill Froude Number} = U_\infty / Nh$$

$$H_c \geq h(1 - F_h)$$

$$a = 0.7$$

ここで、 H_c は山の頂上に接する流線の無限遠（風上）での高さであり、これより上の流線は山を吹き越え、それ以下の流線は山を迂回する（Fig. 3）。しかし、今回のモデルでは座標系と流線は独立であり、初期（無限遠風上）流線高度によって α の値を変える事は事実上不可能であるので、全高度に於いて(9)式から得られる α の値を用いた。又、 a は有次元数であるが、ここでは定数とし、風洞実験の結果

との比較から $a=0.7$ を選んでいる。

3. ポテンシャル流を用いたモデルの特性試験

MASCON モデルは、大気が中立成層している場合には修正場としてポテンシャル流を与える。従って、これを利用して数値スキームの特性を調べる事が可能である。そこで、地形として半円筒と半球を与え、水平一様流の初期風から MASCON モデルによって修正場を求めて、それをポテンシャル流の解析解と比較する事を行った。比較に用いた諸定数を Table. 1 に示す。

解析解と MASCON による推算値の差が最も大きかった例について、最下層の風ベクトル図を Fig. 4 に、いろいろな断面での風速分布を Fig. 5 に示す。他の例についても、程度の差はあるものの、Fig. 5 と同様の分布を示し、スキーム特有の“くせ”が有る事が明らかとなった。即ち、

- 1) 地形の頂上直上では下層で過大な、上層で過小な風速を与え、従って、解析解に比べて鉛直シアアの絶対値が大きくなり (Fig. 5d), e)),
 - 2) 最下層風速において平面上では過小、地形上では過大な風速を与え (Fig. 5a), b), c)),
 - 3) 特に、最も風上側と最も風下側の地形立ち上がり部では、初期風に逆行する風を得る (Fig. 5a), b))。
 - 4) 同一条件では半円筒よりも半球の場合の方が解析解との差が大きい (Fig. 5d), e))。
- 4) の理由から、主に半球の場合について鉛直座標の取りかたを変えて1)～3)の“くせ”を表す指標として①頂上直上風速 V_t ②最下層最低風速 V_b の2つに着目して比較を行ってみた。その結果を Table. 2 に示す。

Table. 2 から明らかなように、頂上直上風速は鉛直格子数 N_z や鉛直格子間隔 ΔZ^* に対する依存性は低く、上端高度 H に大きく依存し、 H が大きくなるほど解析解との差が小さくなる傾向が顕著にみられる。又、地形立ち上がり部直上での風速は鉛直格子間隔にのみ依存し、間隔が小さい場合に最下層で逆風を与える様である。

以上の結果から、このモデルを実際に適用するに当っては、逆転層高度に相当する上端高度 H の設定を慎重に行う必要があること、さらに、急な立ち上がりを持つ地形上では下層で偽の循環流を生じる可能性があるため、特に鉛直格子間隔の小さい場合には注意が必要である事が明らかとなった。

Table 2. Comparison between numerical and theoretical solution

	N_z	Δz^*	H	V_t			V_b
				MASCON	pot. flow	diff.	
hemisphere	30	50	m	m/s	m/s	%	m/s
			1550	2.04	1.45	40.7	-0.24
			2500	1.88	1.45	29.7	-0.24
			5000	1.78	1.44	23.6	-0.24
			7500	1.75	1.44	21.5	-0.24
			10000	1.74	1.44	20.8	-0.24
	20	100	3100	1.78	1.39	28.1	+0.03
			2500	1.82	1.40	30.0	+0.03
			5000	1.73	1.39	24.5	+0.03
halfcylinder	30	50	1550	2.23	1.94	14.9	-0.31
		100	3100	1.94	1.85	4.9	-0.03
	20		2500	1.98	1.86	6.5	-0.03

4. モデル地形上の気流推算

余部橋梁付近の地形を模したモデル地形 (cf. Fig. 6) 上で、Y 軸 (一方の谷の走行に相当) に対して為す角 θ を変えた水平一様風を初期場 (一般場に相当すると考える) として与え、大気が中立成層、及び、安定成層を為す場合について、地形による風の変形の様子を前述の MASCON モデルを用いて調べた。計算に用いた諸定数を Table. 3 に示す。 $\theta=20^\circ$ の場合の最下層 ($Z^*=25$ m) の推算風を表示したものが Fig. 7 (ベクトル図) 及び、Fig. 8 (等風速線図) である。中立成層と安定成層の両者の場合共、風速は尾根上で大きく、斜面の立ち上がり部で小さくなっているが、その傾向は安定成層の場合の方により強くみられる。橋梁が架設されている谷の入り口部 (cf. Fig. 6 断面 AB) に注目すると、Fig. 9, 10 に示されるように、谷上の最下層では谷の右側 (D 側) 程強い風速を示しており、谷の左右における風速差は安定成層の場合の方が大きくなっている。又、風向については、中立時よりも安定成層の場合の方が、初期場 (一般場) の一様風向の変化に対する応答が小さく、特に谷の右側 (D 側) でその傾向が顕著に現れている。以上の結果は共通して、大気の安定度が増すほど地形の影響が著しく現れることを示している。一方、AB 断面での水平風速の鉛直分布 (Fig. 11) は、B 側の尾根上では下層ほど風速が強く、又、A 側の斜面上では逆に、下層ほど風速が弱く、谷の両側にはそれぞれ強い鉛直シアが存在する様子がみられる。これも地形効果の 1 つであると考えられるが、今回用いた MASCON モデル、及び、初期風場は何れも地面摩擦の効果を全く考慮に入れていないため、すべり境界と言う地面境界条件の下での風速場であることに留意すべきである。

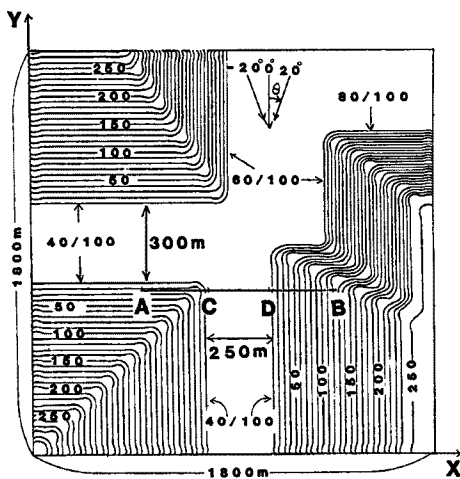


Fig. 6. Map of simplified topography. Contour interval is 10 m. Fractions indicate gradients of slopes.

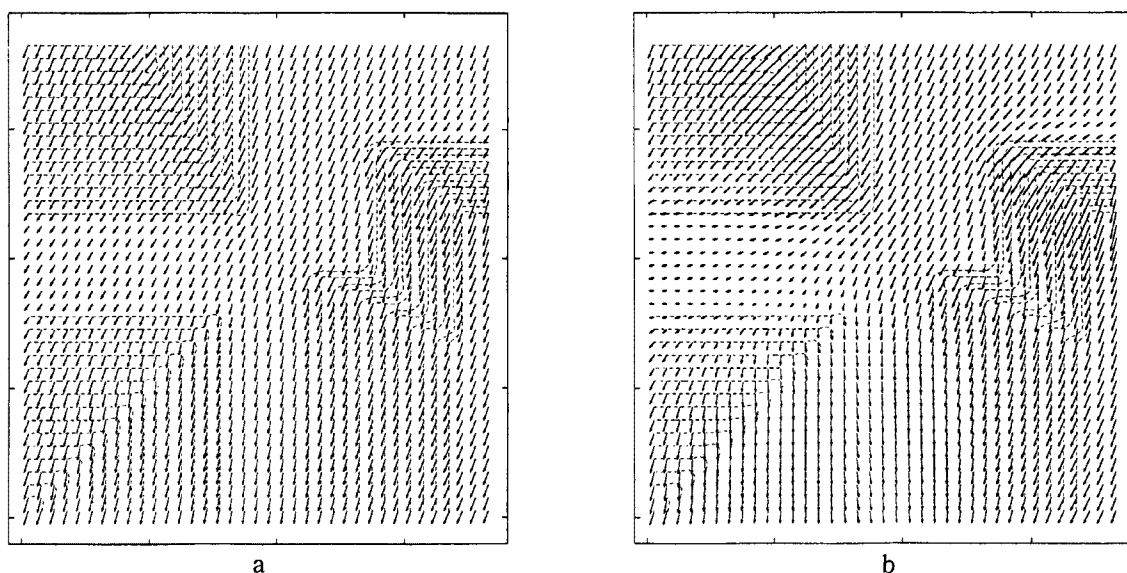
Table 3. Constants given for calculating wind fields over simplified topography with MASCON

Number of grid points	: 37×37 (horizontal); 30 (vertical)
grid interval	: 50 m
Inversion height	: 1550 m
Upper boundary condition	: inversion (no vertical wind)
Modification coefficient	: $\alpha = \alpha_v / \alpha_h = \begin{cases} 1.00 & (\text{neutral}) \\ 2.44 & (\text{stable, } dT/dZ = 9.8^\circ\text{C}/1 \text{ km}) \end{cases}$
Mountain height (h)	: 300 m
Layer averaged temperature	: 15.0°C
Initial wind field	: velocity $U = 10.0 \text{ m/s}$, direction $\theta = +20^\circ, 0^\circ, -20^\circ$ (horizontal and uniform)

以上の結果のうち，“谷の入り口”部での風速分布（谷の右側で風速大）と，風向の一般場の変化に対する応答の小ささは，橋梁（高さ約 40 m）上での実測風の統計解析の結果と類似しており，このように単純化したモデルによっても実際の風速分布がある程度再現されていると見て良さそうである。

5. まとめ，及び，今後の展望

今回使用した 3 次元 MASCON モデルは，水平方向に数千 km に及ぶような広領域に於いてのみ使用してきたもので，水平格子間隔が数十 m で，しかも急斜面を伴った複雑地形を持つ狭領域については使用実績がなかった。そこで現在，そのモデルの改良を進めているところであるが，今回は第一段階として，とりあえず現在のモデルをそのまま狭領域に適用することを行ってみた。鉛直座標に Z^* を用いている関係上，上端高度 H によって地形の評価が変化するため，無限の広がりを持つポテンシャル流との比較には多少無理があるが，モデルでは地形の影響が地表付近でやや極端に現れる傾向はあるものの，定性的には妥当な結果が得られることが分かった。モデル地形上での推算試験も，実測値の統計解析結果と定性的には一致する結果を

Fig. 7. Near surface horizontal wind field. $\theta = +20^\circ$.

- (a) neutral stratification,
- (b) stable stratification.

得る事ができた。

今後に残された課題としては、

- 1) 地表面摩擦の考慮
- 2) 複雑地形上での“山の高さ” h の決定

の二つが大きなもので、1)は初期（一般）風場をベキ乗則やエクマンらせんによって鉛直内外挿することで或る程度改善されようが、海上と陸上、特に山岳地帯上とを同時に扱うことは出来ないので、過去の研究例等も参考にして検討する必要がある。又、2)については、領域内の最高標高と最低標高との差よりは小さくとりべき場合も有るだろうが、それを客観的に決定するには、地形を平均化する、或いは、多項式で表される曲面で近似する等の種々の方法が考えられ、どの方法を取るかは或る程度実際の地形にも依るだろう。これも今後、実際の地形を用いて検討して行きたい。

適当なモデルが完成すれば、実際の地形・事例への適用を目指して行く事になるが、その際、計算機能力の制約から、まず水平規模数十 km～数百 km 程度の領域に対し、気圧場から推算した海上風と AMeDAS 風

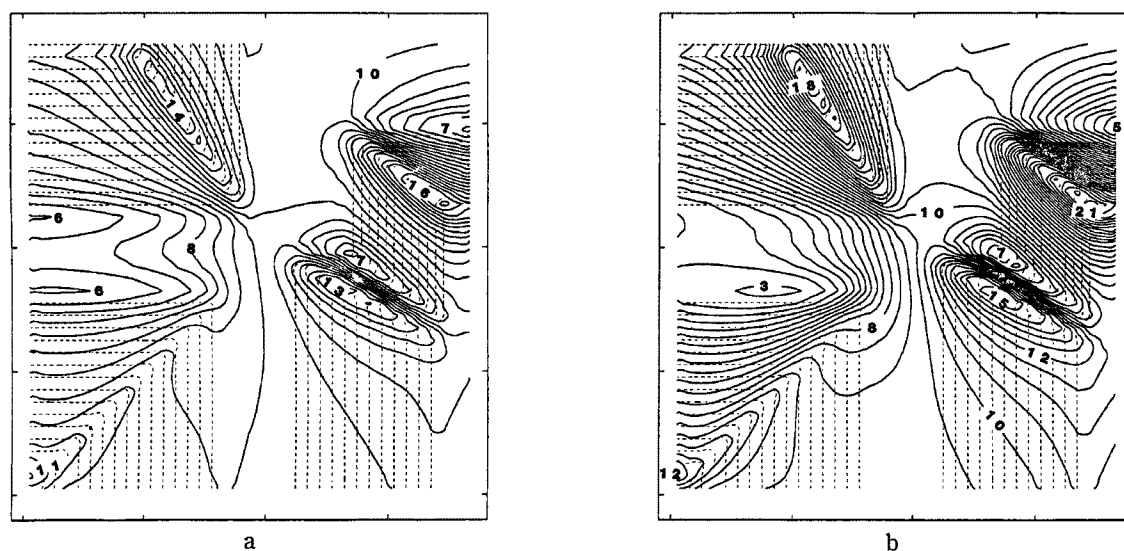


Fig. 8. Near surface horizontal wind velocity distributions. $\theta = +20^\circ$.

Contour interval is 0.5 m/s.

(a) neutral stratification,

(b) stable stratification.

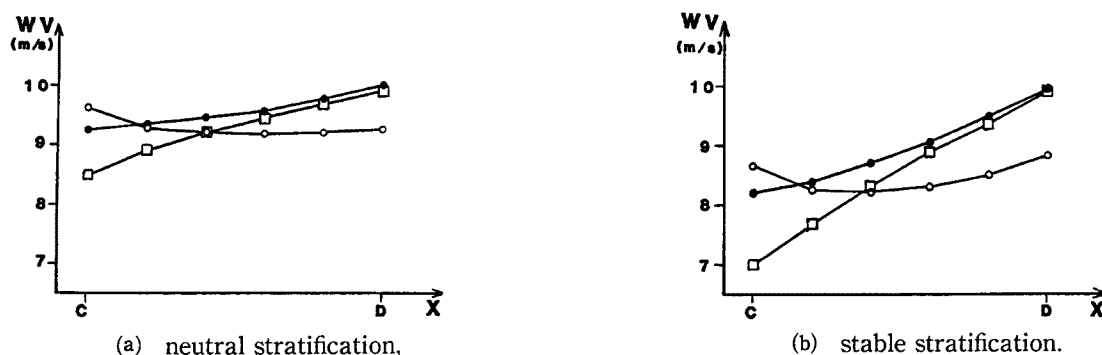


Fig. 9. Near surface horizontal wind velocity profiles above CD line.

□: $\theta = +20^\circ$, ●: $\theta = 0^\circ$, ○: $\theta = -20^\circ$.

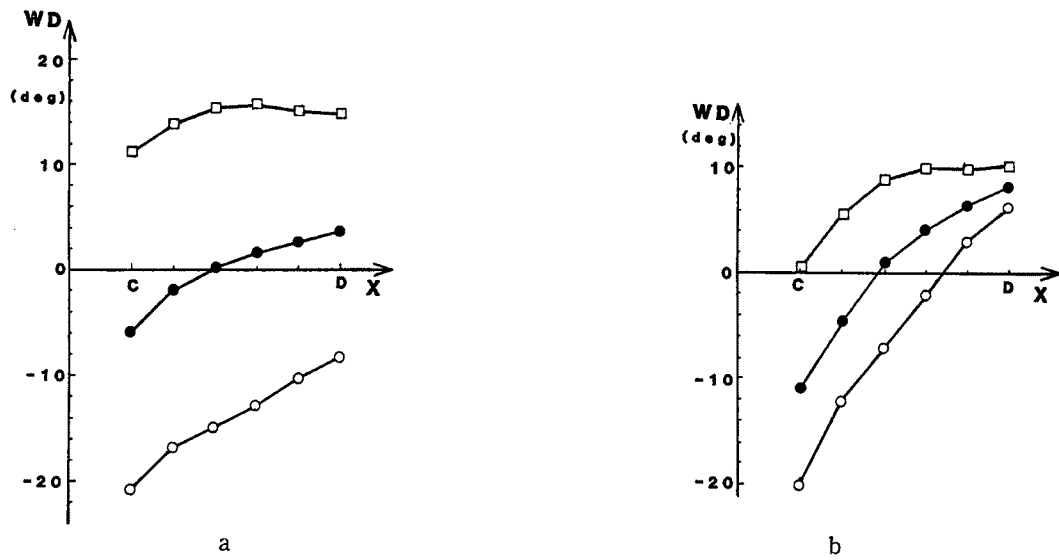
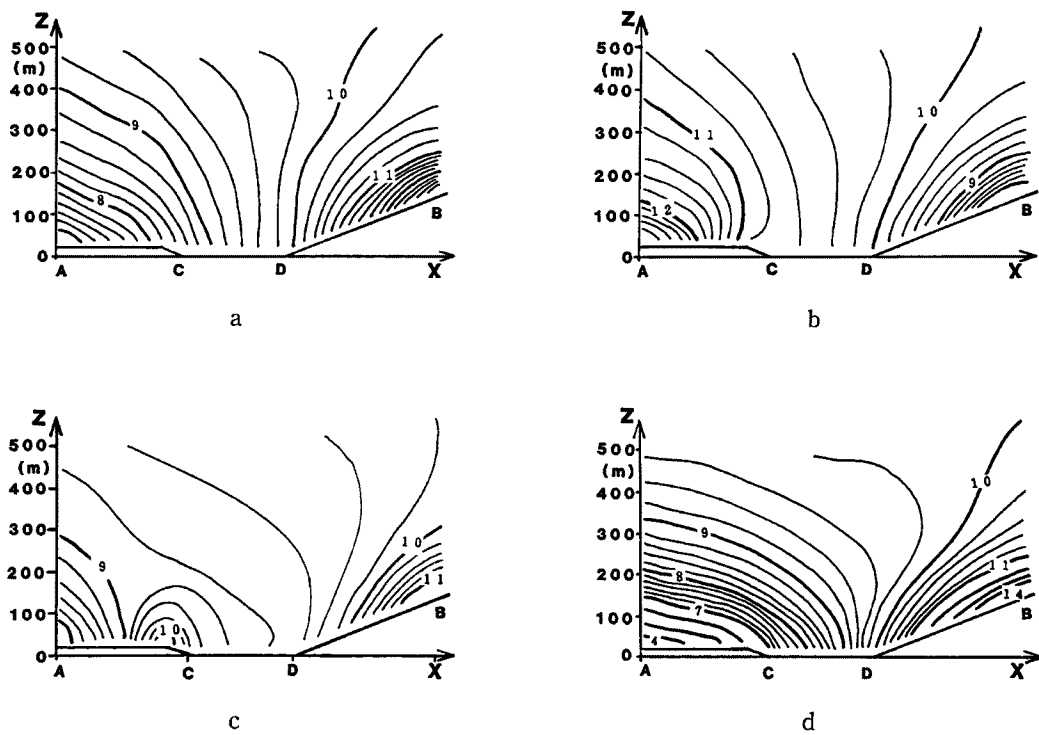


Fig. 10. Near surface wind direction profiles above CD line. Marks are same as Fig. 9.

- (a) neutral stratification,
(b) stable stratification.



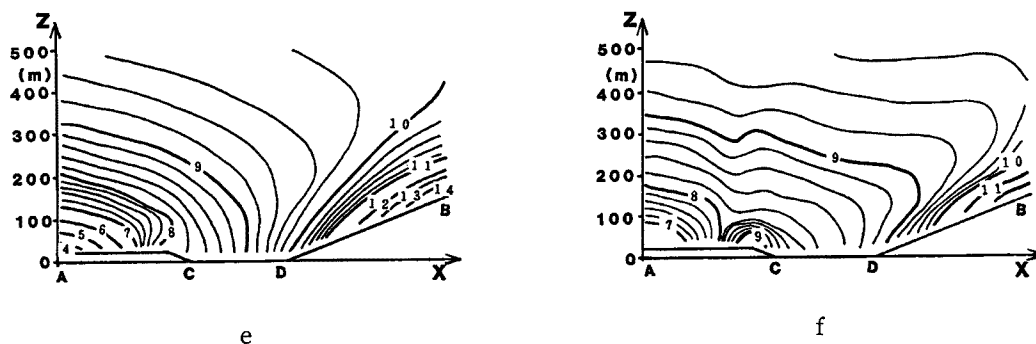


Fig. 11. x-z cross sections of horizontal wind velocity above AB line.

- (a) Neutral stratification. $\theta = +20^\circ$.
- (b) Neutral stratification. $\theta = 0^\circ$.
- (c) Neutral stratification. $\theta = -20^\circ$.
- (d) Stable stratification. $\theta = +20^\circ$.
- (e) Stable stratification. $\theta = 0^\circ$.
- (f) Stable stratification. $\theta = -20^\circ$.

観測値とを用いた内挿風場を初期値として、MASCON モデルを間隔数 km の粗い水平格子について適用し、広領域の修正風場を求め、更にその結果を用いて中領域 (数百 m)、小領域 (数十 m) へと順次領域面積を狭め、水平格子を細かくして、余部橋梁周辺の気流場の推算を実行し、地形効果の加わった強風の実態を定量的に解明して行く予定である。そして、将来に於いては、時間的な変化まで考慮に入れた四次元的な解析方法を導入し利用する事を考える必要があるものと思われる。

参 考 文 献

- 1) D. G. Ross and I. N. Smith, P. C. Manins and D. G. Fox : Diagnostic Wind Field Modeling for Complex Terrain : Model Development and Testing, Journal of Applied Meteorology, Vol. 27, 1988, pp. 785-796.
- 2) Christine A. Sherman : A Mass-Consistent Model for Wind Fields over Complex Terrain : Journal of Applied Meteorology, Vol. 17, 1978, pp. 312-319.
- 3) W. H. Snyder et al.: The structure of strongly stratified flow over hills : dividing-streamline concept, J. Fluid Mech., Vol. 152, 1985, pp. 249-288.
- 4) 関西電力㈱原子力建設部 : 「移流拡散モデル開発研究」の検討状況について (その2), 及び参考資料集, 昭和63年.
- 5) 巽友正 : 流体力学, 培風館, 1982, pp. 117-183.