

小地形上の気流のシミュレーションについて

佐々木 嘉和・樋口 宗彦・邊田 有理江・光田 寧

NUMERICAL SIMULATION OF WIND FIELD OVER THE COMPLEX TERRAIN

By *Yoshikazu SASAKI, Munehiko HIGUCHI, Yurie HETA*
and *Yasushi MITSUTA*

Synopsis

The 3-Dimensional MASCON (Mass Consistent) model with z^* coordinate system is applied to wind fields over a small scale complex topography. The topography under study is a deep strait valley flowing into the sea. A wind field around the valley is simulated by using the AMeDAS wind data over the area of about 10^4 km^2 and then the detailed wind distribution is computed from the results. The simulated field agrees qualitatively with an observed wind field, but not so well quantitatively.

1. はじめに

現在我々は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。余部橋梁付近を研究対象に選び、過去に於ける観測、及び、一昨年より新たに開始され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データについて調べ、余部橋梁付近での風は周囲に比べて強く、又、橋梁上（全長約 300 メートル）においても風速に局所的な分布の生じることが明かとなっている。これらは主に地形の影響によるものと考えられる。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ことを目的として、三次元 MASCON (Mass-Consistent) モデルを用いた風速場の推算法の開発に着手した。

昨年度（光田他（1989）¹⁾ 参照）は既存の、主に広領域での風速場の推算に用いることを目的として開発されたモデルによる推算風速場をポテンシャル流の解析解と比較することによりモデルの特性を調べることを行った。その結果、このモデルは、1) 山の上で下層ほど過大な風速を与えること、及び、2) 山の風上側と風下側に偽の循環流を生じることが明かとなった。Ross & Smith (1985)²⁾ の同種の実験との比較から、我々の用いたモデルによる推算結果と解析解との相違は主に、変分方程式をデカルト座標系ではなく地形上に展開された Z^* 座標系上で構築したことによると考えられる。しかし、同じく昨年度行った、余部付近の地形を単純化したモデル地形上での風速場の推算実験では、橋梁に相当する部分での風速の水平分布、及び、一般場の風向の変化に対する橋梁上での風向の応答の 2 点に関して、実測風の統計解析結果と定性的に類似した結果が得られている。

そこで今回は、同じモデルを用いて、地形図から読み取った実験の地形格子上で風速場の推算を試み、また、実際の事例での風場を再現する方法の一つとして、100 km 四方程度の広い領域に於て AMeDAS の風向風速のデータ及び高層観測記録から内外挿して得られた風場を MASCON 解析し、その結果から

内挿して得られた場を基に余部付近を中心とする 3 km 四方形程度の狭い領域に於て再度 MASCON 解析を実施すると言う手法を試みた。

2. 一様流による実地形上での気流推算

2.1 推算に用いたモデル

昨年度に行ったモデルの特性試験の結果に基づいて、橋梁梁設高度（地上約40メートル）付近でのモデルの精度を良くするために 1)下層部でのモデルの鉛直格子間隔を密にする, 2)モデル上端高度を高く設定する, 3)計算時間や計算機容量の制約から鉛直格子数を小さくする, という3つの条件を同時に満足するために, モデルの鉛直格子間隔を下層で密に, 上層へ行くほど疎になるように設定する方法をとった。また, 計算上端高度は, 付近の地形の最大標高が 600 メートルであること, さらに, 将来初期風速場の推定に 850 mb 等圧面（高度約1500メートル）の風速の観測値を用いることを考慮して高度2000メートルに設定した。

地形データは, 国土地理院発行の縮尺1:25,000の地形図「余部」から, 橋梁上での風向風速観測点の位置に対応する点を含む東西・南北共に50メートル間隔の格子点での標高値を1メートルの精度で読み取った値を用いた。格子点化した標高の等値線図を Fig. 1 に示す。

MASCON モデルに特有の, 水平風速及び鉛直風速の修正係数 (α_h, α_v) の比である α 比 ($\alpha = \alpha_v/\alpha_h$) は, これを大気安定度と結び付ける事ができ, Ross & Smith (1985)²⁾の方法に従えば, 米子の高層観測点での 800 mb 等圧面及び松江の地上観測点における気温の年平均値（それぞれ3.8℃及び14.4℃）から, 無限遠上流風速 10 m/s, 領域最大標高 400 m として約1.4となる。しかし, 実際には, α 比としてこの値を用いた場合モデルの数値解は収束しない。従って, 今回は, 解の収束性から α 比を2.5と定めた。推算水平風場は $\alpha=1.4$ の時と比べて地

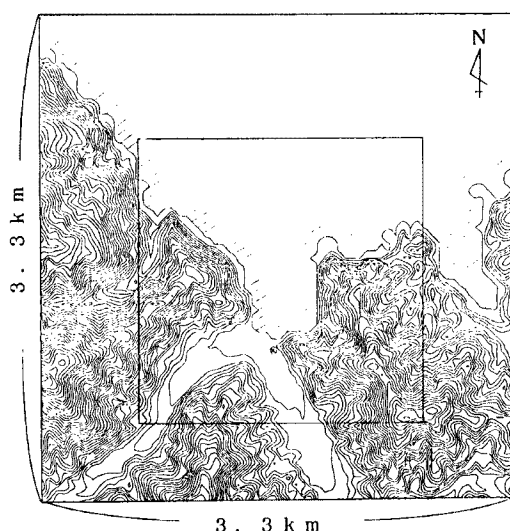


Fig. 1. Map of topography for the uniform wind model. Contour interval is 10 m. The rectangle on this map indicates the area displayed in Fig. 2. The place marked by ⊗ is the grid point corresponds to the wind observation point.

Table 1. Constants given for the MASCON model

Number of horizontal grid points	: 67 × 67
Number of vertical layers	: 8
Horizontal grid interval	: 50 m
Vertical layer thickness	: 14 m, 16 m, 30 m, 60 m, 120 m, 260 m, 500 m, 1000 m (upward)
Upper boundary condition	: H=2000 m
Upper limit of calculation region	: fixed (inversion layer/non vertical flow)
Lower boundary condition	: fixed (topography/non cross surface flow)
Initial wind field	: horizontal and uniform, velocity U=10 m/s
Initial wind directions	: 300°, 320°, 330°, 340°, 350°, 0°, 10°, 20°, 30°, 40°, 60°
Modification coefficient	: $\alpha = \alpha_v/\alpha_h = 2.5$

形の影響をより大きく受けることになる。その他、モデルの原理及び計算手法については前年度¹⁾に述べられている。使用した諸パラメータを **Table 1** に示す。

2.2 実験の方法及び結果

余部地区は、北に日本海を望む入り江の奥に位置しており、また、入り江から南南東の方向に深さ 100 m 以上、幅約 300 m の比較的深い谷が発達し、橋梁はその谷の入口付近に架設されている。そこで、日本海からこの谷に向かって吹き込む北よりの風が地形によりどのような影響を受けるかに着目し、真北 (0°) を中心として 300° から 60° まで 10° ないし 20° 間隔で 11 風向の水平一様風 (10 m/s) を初期場としてモデルに与えた場合の推算風場を調べた。

結果の一例として、初期風向 300° を与えたときの推算場の橋梁周辺での拡大図を **Fig. 2** に示す。海上での北西風が入り江付近の地形により変形を受け、谷の入り口部では北よりの風になっているが、風速は目立った強化を受けていないようである。こうした風向風速場の変形を、実測点に相当する谷の入口部の地上から約 45 m の地点に於て各初期風向間で比較したのが **Fig. 3** である。グラフ上に示した初期風向に対し地形を考慮した推算風向 (横軸) は北よりに変形を受けており、変形の度合は初期風向の北からのずれが大きいほど大きくなっている。また、風速の強化率 (推算風速/初期風速, 縦軸) は、初期 (推算) 風向が北に近くなるほど大きく、逆に 30° 以上はなれると風は弱くなっている。これらの結果と、谷 (入り江) の走行がこの付近ではほぼ南北であることから、余部地区に吹き込む風は谷の軸に向かって収束を受け、風向が谷の走行に平行になるほど風速が強化されることがわかる。

橋梁の位置にほぼ対応する、谷の入口部を東西に横断する線上 (**Fig. 2** 参照) 地上 45 m での各初期風向別の推算風速の水平分布を **Fig. 4** に示す。初期風向が北から大きくずれた 300° 及び 60° の場合を除いて谷の内部での風速は東側ほど強くなっており、西端に対する東端の風速の増大は最大 39% に達している。

加藤ら (1990)³⁾ によって同じ余部地域の地形模型を用いて行われた風洞実験に於いて測定された横梁上

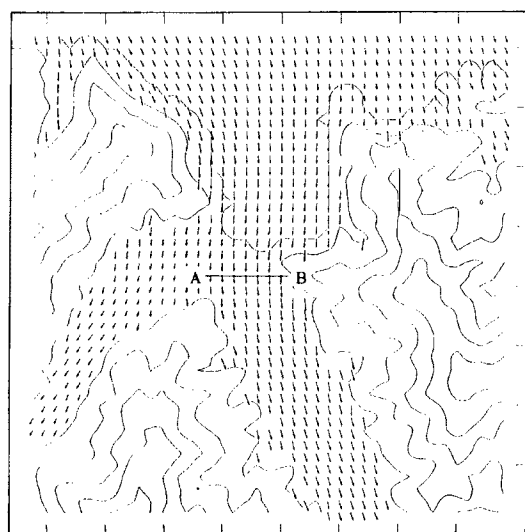


Fig. 2. An example of simulated wind field. Initial wind direction is 330° . Only the Central region of the model domain is shown. Map contour interval is 50 m. The arrow with the length same as one grid interval indicates 10 m/s .

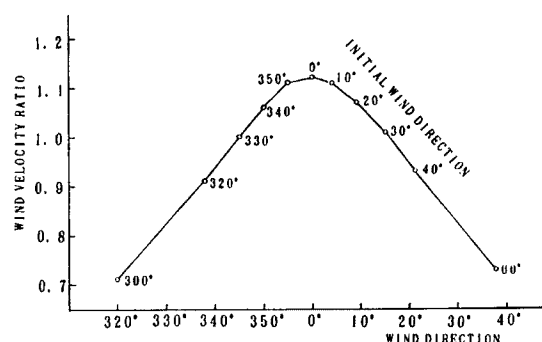


Fig. 3. Wind velocities and directions at the 'mouth' of valley (marked by $\otimes$ on Fig. 1) at an altitude of 45 m for each initial wind directions. Vertical axis means the ratio between simulated and initial wind velocity. Horizontal axis means wind direction of the result. Initial wind directions are indicated near every plotted points.

での風速分布では、一般場の風向が西北西から北北西、即ち約 $290^{\circ} \sim 340^{\circ}$ では Fig. 4 での横軸に示した A B ライン上での相対格子点番号で 6 と 7 の中間点付近で、また、一般風向が北ないし北北東、即ち $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ では 6 番付近でそれぞれ風速の極大が生じ、いずれの場合にも極大点の東側では急激に、西側では緩やかに風速は減少傾向を示すという結果が得られている。加藤らはこの結果のうち橋梁東端部で風速が弱くなっていることを谷の入口部東側の尾根状の地形によるものであるとしている。しかし、推算風速分布にはこのような特徴はみられない。これは、今回用いたモデルの地形再現性にも関係すると思われる。一方、初期風速に対する A B ライン上での最大風速の割合、即ち風速強化率は最大 12% で

あり、現地実測点と周辺観測点との風速比から推定される強化率 (40~50%) よりも小さくなっている。これは、橋梁上観測点の高度が地上 45 m で周辺気象観測点での風速測定高度 (通常地上約 7 m) よりもはるかに高く、実測値から推定した強化率は風速の鉛直分布の影響を含んでいるものであるからと考えられる。例えば、今仮に鉛直風速分布がべき乗分布で近似されるとし、そのべき指数を海岸での海よりの風の平均的な値 (塩谷, 1979)⁴⁾ である $1/9$ とすれば、地上 45 m での風速は地上 7 m での風速の 1.23 倍となる。従って、先に示した実測から推定した強化率を同高度での風で考えると約 18% となり、計算値と大きな差はない。今後、計算時に風速の高度分布をうまく再現する方法を考える必要があるようである。

3. 気象官署の資料を用いた小地形上の風の推算

実際の事例に対してこの MASCON モデルを用いて小地形上での気流場の推算を行う場合、問題としている地域には十分な現地観測網がないため、まずその周辺の風の分布を数 10 km 間隔で分布している AM eDAS 地上観測点の風向風速データ及び数 100 km 間隔で分布する高層気象観測点の記録から荷重平均内挿により 3 次元的に求め、それを初期場として推算を実行する方法をとることにした。このとき、中国山地などの大規模な地形の効果をモデルに取り入れるためには少なくとも一辺 100 km 程度の矩形計算領域を設定することが必要であるが、計算能力からして 2 km 程度の格子間隔しかとれない。従って、この結果 (広領域) を余部地区周辺に展開する密な格子点上に内挿して再度 MASCON 解析 (狭領域) を実施するという方法を考えた。

3.1 広領域 MASCON 解析

(1) 推算に用いたモデル

モデルの原理、計算手法は 2 章で用いたものと同じである。計算領域は、中国山地と鳥取県から丹後半島に至る海岸線が含まれる東経 $133^{\circ}45' \sim 135^{\circ}15'$ 、北緯 $35^{\circ} \sim 36^{\circ}$ の東西約 136 km × 南北約 111 km の範囲とし、格子間隔は経緯度にして東西 1 分 30 秒 (2266 m) × 南北 1 分 (1849 m) に設定した。鉛直格子は 8 層で格子間隔は 2. と同じく下層ほど密になるように設定し、上端高度は 2000 m で鉛直風 0 m/s (逆転層) とした。

地形データには、国土地理院作成の国土数値情報磁気テープファイルの 1 つである「傾斜度・高度データファイル」から読みだした東西間隔 11.25 秒 × 南北間隔 7.5 秒の格子点上における標高値を、モデルの格子点

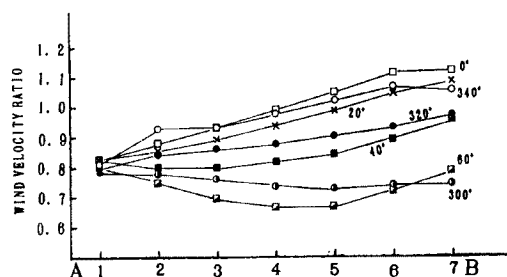


Fig. 4. Horizontal wind profiles on the AB-line (cf. Fig. 2) at an altitude of 45 m. Horizontal axis means the place on the AB-line. Vertical axis means the ratio between simulated and initial wind velocity. Numbers on (beneath) each line show initial wind directions.

Table 2. Constants given for the MASCON model with vast calculation region

Number of horizontal grid points	: 60×60
Number of vertical layers	: 8
Horizontal grid interval	: 1'30" (lon., =2266 m) × 1' (lat., =1849 m)
Vertical layer thickness	: 14 m, 16 m, 30 m, 60 m, 120 m, 260 m, 500 m, 1000 m (upward)
Upper limit of calculation region	: H=2000 m
Upper boundary condition	: fixed (inversion layer/non vertical flow)
Lower boundary condition	: fixed (topography/non cross surface flow)
Interpolation factors	: $\beta=2.2 \times 10^{-9}$ (bottom layer), $\beta=2.2 \times 10^{-11}$ (top layer)
Observatory num. for interpolation	: N=4 (bottom layer), N=3 (top layer)
Modification coefficient	: $\alpha=\alpha_v/\alpha_h=10.0$

を中心として東西方向8個×南北方向8個の計64個ずつ平均したものをを用いた。このデータに於ける領域内最大標高は約1400 mである。各パラメータをTable 2にまとめた。

α 比は、今回取り上げた事例における気温・風の高層観測データから前述のように計算すると $\alpha=1.8$ となるが、モデルの解の収束性から $\alpha=10.0$ を用いた。

(2) 初期風速場の作成

気象庁のAMeDAS観測点(四要素)は約20 km 間隔に分布し、風向は16方位で、風速は1 m/s 単位で地上約7 m に設置されたプロペラ型風向風速計で、気温は0.1℃単位でそれぞれ毎正時に観測される。一方、気象ゾンデによる高層気象観測は1日2回、09時及び21時に行われ、各指定気圧面及び任意の気温・風速の特異点に於て風向は5°単位で、風速は1 kt (約2 m/s) 単位で、気温は0.2℃単位で観測される。8層のうち、最下層(地上7 m)の水平風の格子点値は近傍4点のAMeDAS観測点に於ける風向風速の観測値からDickersonに従って次の内挿式を用いて求めた。

$$A = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i \exp(-\beta \gamma_i^2)}{\sum_{i=1}^N \exp(-\beta \gamma_i^2)} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 A ；内挿された風速のベクトル成分、 α_i ；観測点 i の風速成分、 γ_i ；格子点から観測点 i までの距離、 N ；内挿に使用する近傍観測点数(ここでは $N=4$)、 β ；内挿ファクターである。

Fig. 5に中国・近畿地方のAMeDAS風データの一例を示す。これから解るように、地上風の分布にはかなり局地性があり、隣接した観測点の間でも風向風速に大きな違いがみられる。今回の研究の目的はこうした風の局地的な分布の様子を解明することにあるので、内挿に使用する観測点数は可能な限り小さくする必要がある。ただ、領域内には面積にして1/3程度の海洋が含まれており、 $N=3$ とすると海上で風速場に不連続が目立つので、今回は全領域に対して $N=4$ を用いることにした。一方、 β は格子点値 A に対する観測値 α の寄与率と γ との関係を決める係数で、 β を小さくとると内挿場はな

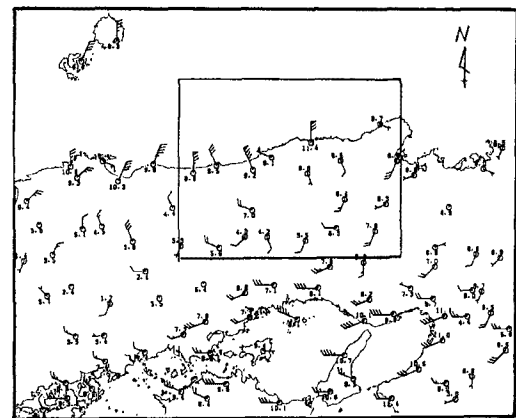


Fig. 5. An example of AMeDAS wind/temperature data plotted. Time of observation is 22:00JST, 18 Nov. 1988. The rectangle on this map indicates the calculating domain for the vast region wind field simulation.

めらかとなる。数種類の β で内挿を実行した結果、今回は、領域面積を AMeDAS 観測点数で割ることに
よって r^2 の平均値を求め、その逆数を β とすることとし、表に示す値をとった。

水平風の最上層（第8層）の格子は 1500 m の高度に設定されており、850 mb 指定気圧面の高度が通常
1400 m から 1600 m の間であることから、最上層の水平初期風場として米子・潮岬・輪島の高層気象観測
点での 850 mb 面に於ける風向風速観測値から(1)式により内挿したものを用いた。内挿ファクター β の決
定は上に述べた地上風の内挿時の方法に従った。観測時（09時、21時）以外の時間については、観測点毎に
その前後の観測時に於ける 850 mb 面での風速ベクトルから直線内挿によって推定値を求め、それを観測値
として(1)式により各格子点上に内挿した。第2層から第7層の初期水平風速の格子点値は、最下層の最上層
の格子点値の間に高度に関して直線内挿することにより求めた。

鉛直風の格子点は、計算に Staggered-Scheme を用いているため、地表面から上端面までの9層ある。鉛
直風速の初期値は、地表面に対応する第1層では最下層での水平風速に対して地表面に直交する風速成分が
0 となるように設定し、その他の層では 0 m/s とした。

(3) 推算結果

山陰沿岸を Polar Low が東進するのに伴って余部橋梁に於いて観測期間中最も強い平均風速 27 m/s の北
風を記録した1988年11月18日22時のデータについて推算を行った。地上 7 m に於ける初期内挿風場と MAS
CON 解析実施後の風速場を比較したものを Fig. 6 に示す。図中標高コンターは 200 m 毎に施し、矢羽根
は AMeDAS 観測点に於ける風向風速観測値を示す。MASCON 解析実施後の風速推算場を Fig. 6(b) に示
す。領域中央部から南西部に延びる山地の稜線上では初期場に比べ大きく風速が増大し、平地上、特に山地
の風上側では逆に風速がやや減少している。余部付近（⊗印）は南北に延びた低い山地の北端部に当たって
おり、風はこの山地を迂回するように変形されると共に風速はむしろ減少している。

3.2 狭領域 MASCON 解析

(1) 推算に用いたモデル

モデルの原理、計算手法は 3.1 に述べた広領域モデルと同じである。計算領域は余部橋梁上の風向風速観
測点をほぼ中心とする東西 3.3 km × 南北 3.3 km の領域で、水平格子間隔 50 m、地形標高は2. と同じく
1:25,000の地形図から 1 m 単位で読み取った格子点値を用いた。領域内最大標高は約 400 m である。上端

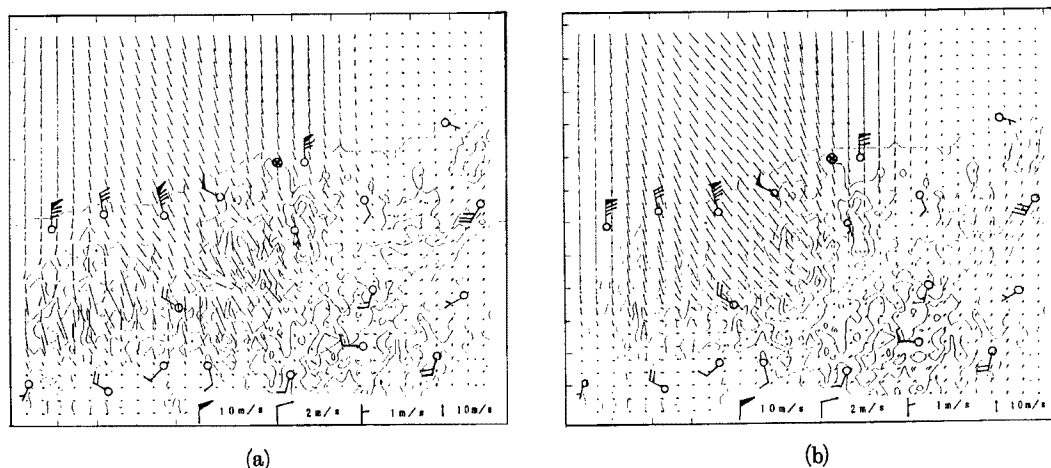


Fig. 6. (a) Initial interpolated wind field at the bottom layer (7 m). AMeDAS wind data are superimposed. ⊗ shows the place of Amarube district. Contour interval of the map is 200 m.
(b) Simulated wind field at the bottom layer. Other notations are same as Fig. 6. (a).

Table 3. Constants given for the MASCON model with small calculation region

Number of horizontal grid points	: 67×67
Number of vertical layers	: 8
Horizontal grid interval	: 50 m
Vertical layer thickness	: 14 m, 16 m, 30 m, 60 m, 120 m, 260 m, 500 m, 1000 m (upward)
Upper limit of calculation region	: $H=2000$ m
Upper boundary condition	: fixed (inversion layer/non vertical flow)
Lower boundary condition	: fixed (topography/non cross surface flow)
Modification coefficient	: $\alpha = \alpha_v / \alpha_h = 2.5$

高度及び鉛直格子間隔は広領域モデルと同じとした。 α 比は上述の方法で計算すると $\alpha=1.3$ となるが、数値解の収束性の問題から $\alpha=2.5$ とした。領域の標高の格子点値の等高線図を Fig. 7 に示し、又、各パラメータを Table 3 にまとめた。

(2) 初期場の作成

モデルの上端高度の設定を広領域モデルのものと同じにしたため、両モデルの Z^* 座標は共通であると考え、各層毎に広領域推算結果の風速ベクトルの格子点値を成分別に等 Z^* 面上で直線内挿することにより狭領域モデルの格子点値を求めた。その後、最下層に於いて地表面に直交する風速成分が 0 となるように $Z^*=0$ での鉛直風速のみを再設定した。最下層での初期水平風速場のベクトル図を Fig. 8(a) に示す。

(3) 推算結果

Fig. 8(b) に最下層での推算水平風速場のベクトル図を示す。北北西の風向を持つ海上風が入り江に吹き込むと北よりに変形されて収束により風速を増し、谷の入り口付近東側で更に風速が増大している。この結果の中で、谷の入り口部の橋梁上に分布する風速測定線にはほぼ一致する高度 45 m に設定した AB ライン (Fig. 7 参照) 上での風速分布を格子点値からの直線内挿により求めたものが Fig. 9 である。風速は谷の東側ほど強くなる傾向があるが、極大は東壁面より谷幅の $1/4$ 程度西側に現れている。また、ライン上での最大風速は 8.3 m/s で、同じ高さでの海上風 (約 6 m/s) に対する風速増強率は約 40% となっている。この場合、この時刻の現地橋梁上での風速 27 m/s(N) に比べると推算風速の絶対値が小さく出ているように思われるが、これは風速の高度分布を直線的と仮定した事にも起因しているのではないかと考えられる。

3.3 考察

一様風を初期場として MASCON 解析を実施した場合の結果と比べて、実測風場を基に MASCON 解析を 2 段階実施して得られた結果は、問題としている風速観測点付近での風速分布のみに注目した場合、風速の増強が生じ、また風速の極大が谷の東壁面から数 10 m 離れたところに現れるという観測で得られたのと同じ特徴がみられた。しかし、本研究の目的である定量的な解析という面からみると、風速の実測値が 27 m/s であるのに対して推算値はわずか 8.3 m/s と大きなずれがあり、好ましい結果とはいえない。このず

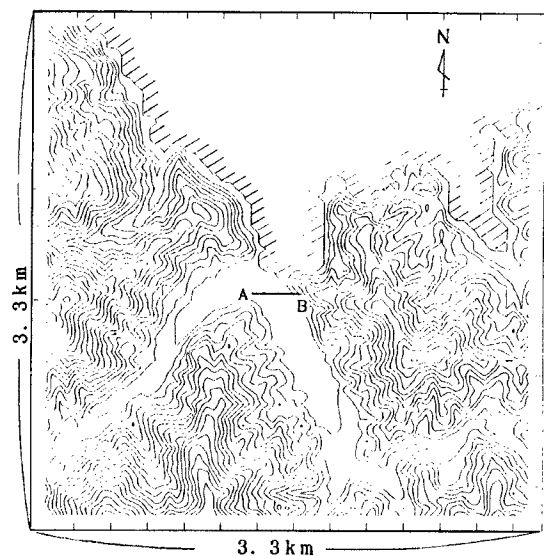


Fig. 7. Map of the topography for the small region model. Contour interval of the map is 20 m.

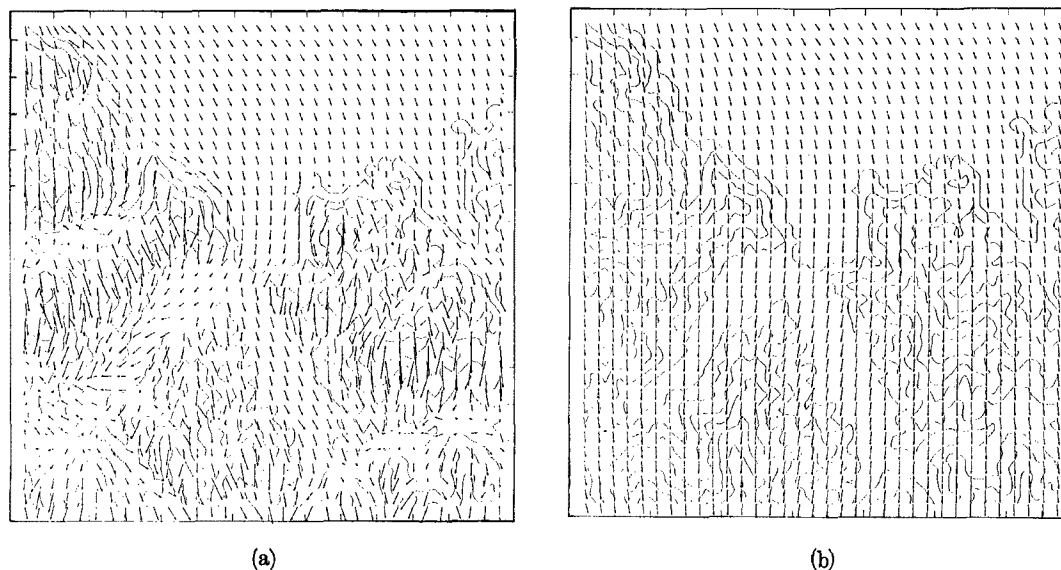


Fig. 8. (a) Initial interpolated wind field at the bottom layer (7 m) for small region model. The arrow with the length same as one grid interval indicates 10 m/s. Contour interval of the map is 50 m.
(b) Simulated bottom layer wind field. Other notations are same as Fig. 8. (a).

れを生じた原因はいろいろ考えられるが、その一つとして、今回用いた事例では問題としている余部付近で地上風速場の水平シアーが大きかったため、4つのAMeDAS観測点データから求めた内挿場が風速を過小評価してしまった事が考えられる。広領域推算の初期風速は余部の東方約5 kmにある香住AMeDAS付近で約10 m/sであり、これに対して実測値は14 m/sである。この点については、広領域推算の計算領域に占める海洋の面積の割合を減らし、内挿に用いる観測値の数 N (1式参照)を3ないし2として局地性の強い内挿場をつくることで改善が可能である。もう1つの原因としては、広領域推算に於ける初期風速の鉛直分布を全層にわたって鉛直方向の直線内挿によって求め、境界層での鉛直構造の考慮が不十分であった事が考えられる。一般に、地上数10 m~100 mの境界層内では水平風速は高さに関して平均的に対数分布あるいはべき乗分布で近似される構造を持つことが知られており、また、それは大気の安定度によって変化されると言われている。これをどのようにモデルに取り入れて行くかが今後の課題である。

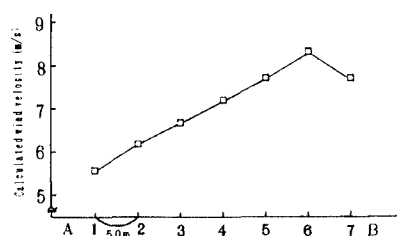


Fig. 9. Simulated horizontal wind profile on the AB-line at an altitude of 45m. The place of the AB-line is indicated in Fig. 7.

4. ま と め

一様風を初期場とする MASCON モデルを用いた小地形上での気流推算によって、谷の中では 1)一般場の風向が谷の軸に沿った方向に曲げられ、2)一般場の風向が谷の軸に平行になったとき最も風速が強くなるという結果が得られ、これは実測値の統計的な変質と矛盾しないものであった。しかし、一般場に対する風速の増強率や谷の中での風速分布の風向特性についてはうまく再現できなかった。

AMeDAS や高層観測による実測値を用いて二段階の MASCON 解析によって行った推算では、谷の内

部での風速分布特性については実測分布に定性的に類似した結果が得られたが、風速値自体は大幅な過小評価となった。この原因には、広領域推算の初期場を作成する際に、水平方向の風速分布の局所性が内挿場に反映されていなかったこと、接地境界層内での風速の鉛直分布が考慮されていなかったことが考えられる。

本研究の一部は強風の特性に関する財団法人鉄道総合研究所の委託によって行われたものである。

参 考 文 献

- 1) 光田 寧・山田道夫・堀口光章・樋口宗彦：小地形上での気流の数値的シミュレーションについて，京大防災研報，第32号 B-1，1989，pp. 389-398.
- 2) D.G. Ross, I.N. Smith, P.C. Mannis and D.C. Fox: Diagnostic Wind Field Modeling for Complex Terrain: Model Development and Testing, Journal of Applied Meteorology, Vol. 27, 1985, pp. 785-796.
- 3) 加藤真規子・萩野谷成徳・花房龍男：複雑地形上の気流の乱流特性，天気，Vol. 37, No. 3, 1990, pp. 171-183.
- 4) 塩谷正雄：強風の性質，開発社，1979，pp. 40-46.