

II-41

ドップラーレーダーによる風速場の観測

北海道開発局開発土木研究所 正 員 中津川誠
 北海道開発局開発土木研究所 正 員 西村 豊
 (財)日本気象協会北海道本部 宮下孝治

1. はじめに

本報告では、ドップラーレーダーによって風の観測と解析をおこなった結果を示す。降水現象は風の状態に強く左右されるので、その把握や予測を的確におこなうため、風の場の広域的な観測、推定が望まれる。しかるに、地上の風速計では設置密度が低く、地表面の点情報を得るに過ぎず、また、ゾンデは降水の短時間予報に用いるには観測時間間隔が長すぎる。したがって流域スケールの空間的な風場を連続的に観測できるドップラーレーダーの利用が期待される。一台のドップラーレーダーから得られる情報は、レーダーサイトに対するドップラー速度であるが、これに VAD 法を適用して水平風速、風向、鉛直風速を推定した。VAD 法とはドップラー速度と電波の位置から風のベクトルや収束、発散を求める方法である。なお、ドップラーレーダーによって鉛直方向の風速成分を観測し、これとの比較により、VAD 法によって推定した風速成分の妥当性を検証している。ところで、上層の風は、典型的な流域スケール(メソβ)ではほぼ一様とみなせるが、下層(大気境界層)の風は、地形や地表の摩擦に影響を受け局地性が強くなり、レーダーの観測範囲の関係上、直接観測は難しい。そこで、ドップラーレーダーの観測から得られた上層の風を境界条件に、Kao model を適用して大気境界層の風を推定した。

2. 観測の概要

今回、風の観測に用いたレーダーは、北海道大学低温科学研究所が所有する通称3次元ドップラーレーダー(写真-1)である。このレーダーは、アンテナの走査によって PPI、RHI、ASI(仰角を変え CAPPI 走査をおこなうもの)などの観測モードが選択でき、雨雪域の3次元構造が観測できるほか、VAD(Velocity Azimuth Display)モードや RHV モードによっては、送信と受信電波のドップラー効果を利用して、任意仰角や鉛直断面内での雨雪域のドップラー速度を観測することも可能である^{1),2)}。なお、以下しばしば出てくる VAD モードというのは、一定仰角でアンテナの方位角を変えながらドップラー風速を測定する方式のことをいう。レーダー送信電波の波長は3cm波(Xバンド)で、建設省レーダーのCバンドと比べ減衰が大きいので、観測範囲は半径64km(後者は120km)となっており、方位方向に1°、動径方向に250mの空間分解能を有している。

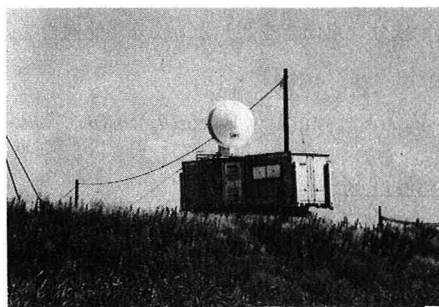


写真-1 ドップラーレーダーの概形

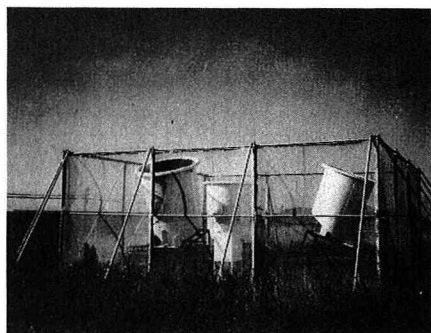


写真-2 ドップラーソーダーの概形

一方、ドップラーソーダーは写真-2のような音波送受信用パラボラにより、発射した音波パルスの上空からの後方散乱波を受信する測器である。これによって各高度からの受信信号のFFT処理によりドップラー周波数偏移を検出し、風速、風向、鉛直流、およびそれらの標準偏差を演算処理できる。なお、3台のパラボラで

Observation of Wind Field using the Doppler Radar

by Makoto NAKATSUGAWA, Yutaka NISHIMURA and Kohji MIYASHITA

方向別に音波信号を受信することで風の3成分が観測できる。今回用いたドップラーソーダーは、性能的には上空1,000mまでの観測が可能であるが、境界層の状態によって観測域が変わる。

これらを北海道開発局開発土木研究所の石狩水理実験場（緯度 43°12'46.7"、経度 141°23'47.8"）内に設置し、夏期の降雨と冬期の降雪時に集中的に観測を実施した。観測範囲には図-1に示すとおり、北海道中心部の石狩や札幌地方がカバーされている。これらの地域では、過去に石狩川の氾濫による被害を受けているほか、冬期には日本海から押し寄せる雪雲によって時折大雪にみまわれ、的確な降雨雪情報を必要としている。

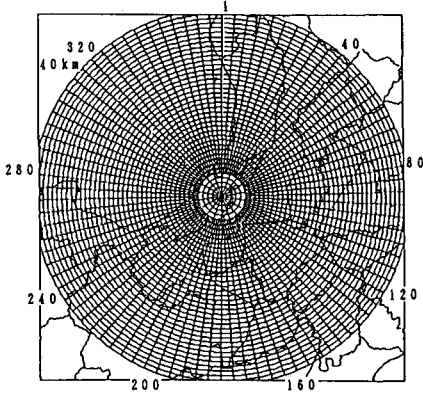


図-1 ドップラーレーダーの観測範囲

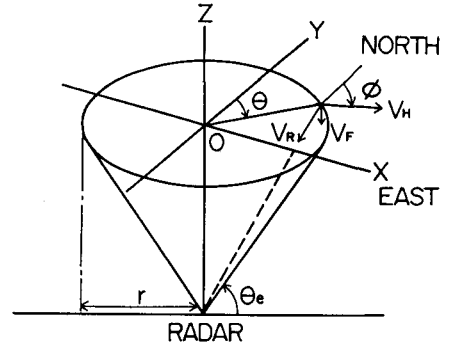


図-2 VAD 観測の模式図

3. VAD 法の概要

VAD 法は、模式的に図-2に示すような領域において VAD モードで観測されたドップラー風速から、レーダー上の水平風の風向・風速、水平発散などを得る手法である³⁾。なお、水平発散を積分することにより鉛直流の速度も得ることができる。ところで、風の3成分を厳密に測定するために、原理的には3台のドップラーレーダーが必要だが、この VAD 法は1台のレーダーからそれらを推定でき、実用的な意味できわめて価値の高い手法といえる。

ドップラー速度 $V_R(\theta)$ は風向 ϕ 、レーダーの方位角 θ (ϕ , θ は真北を基準に時計回りに与えた角度) から次のように与えられる。

$$V_R(\theta) = -V_H \cos(\theta_e) \cos(\phi - \theta) + V_F \sin(\theta_e) \quad (1)$$

ここで、 V_H は水平風速、 V_F は降水粒子の平均落下速度、 θ_e は仰角を示す。この場合、 $V_R(\theta)$ はレーダーに向かう方向を正としてある。雨滴の平均落下速度 V_i は雨滴粒径に関係するとして、 $V_i = 3.8Z^{0.0714}$ (Z はレーダー反射因子) によって求めることができる。上式は、水平風速を x 成分 (東向きを正) と y 成分 (北向きを正) に分解するなどして、次のようにあらわすことができる。

$$\begin{aligned} V_R(\theta) = & -\frac{1}{2}r\cos(\theta_e) \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) + V_F \cos(\theta_e) - V_{x_0} \cos(\theta_e) \sin(\theta) - V_{y_0} \cos(\theta_e) \cos(\theta) \\ & -\frac{1}{2}r\cos(\theta_e) \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) \sin(2\theta) - \frac{1}{2}r\cos(\theta_e) \left(\frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{\partial V_x}{\partial x} \right) \cos(2\theta) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 V_x および V_y は、 V_H の x および y 成分、 V_{x_0} および V_{y_0} は、原点における V_H の x および y 成分、 r は走査円の半径をあらわす。一方、 $V_R(\theta)$ を次のような関数で近似することを考える。

$$V_R(\theta) = A_1 + A_2 \sin(\theta) + A_3 \cos(\theta) + A_4 \sin(2\theta) + A_5 \cos(2\theta) \quad (3)$$

ここで、係数 $A_1 \sim A_5$ を最小自乗法によって実測データから求める。式 (2) と式 (3) を比較すると、次のように水平発散 $\text{Div } V_H$ 、水平風速 V_H 、風向 ϕ 等が求められる。

$$\text{Div } V_H = \frac{2}{r} V_F \tan(\theta_e) - \frac{2}{r} A_1 / \cos(\theta_e) \quad (4)$$

$$V_H = (A_2^2 + A_3^2) / \cos(\theta_e) \quad (5)$$

$$\begin{aligned}\phi &= \tan^{-1}(A_2/A_3) & A_3 > 0 \\ &\tan^{-1}(A_2/A_3) + \pi & A_3 < 0\end{aligned}\quad (6)$$

以上のような手順を踏む場合、走査円内においては V_F が一様であるという仮定が必要となる。この場合、仰角を小さくすると走査円が大きくなりすぎて仮定が成り立たなくなる。一方、あまり仰角を大きくすると、水平発散を求めるときに鉛直風速の効果が無視できなくなる。そこで両者の兼ね合いから実際には仰角を 15 度から 20 度の間に設定している。また、ドップラーレーダーの測定可能な最大のドップラー速度を折り返し速度といて、これを越えるものは補正しなければならない。詳細については省くが、折り返し速度以上のドップラー速度を補正し、真のドップラー速度にする補正（折り返し補正）が自動的にできるような処理をすることができる。これらについては別途文献を参照されたい³⁾。

鉛直風速は、水平発散を積分するなどして次式から求められる。

$$w(z) = \frac{\rho_0}{\rho} w_0 - \frac{1}{\rho} \int_{z_0}^z \rho(\zeta) \text{Div } V_H(\zeta) d\zeta \quad (7)$$

ここで、 ρ_0 と w_0 はそれぞれ $z = z_0$ での大気密度と鉛直速度である。これを差分化して実際の鉛直風速を算出する。

4. VAD 法による風速成分の推定結果

1991 年 10 月 17 日 21 時前後の降雨事例を対象に、解析をおこなう。この時は図-3 に示す地上天気図からわかるように、沿海州方面に低気圧があり、それから南にのびる閉塞前線によって北海道全域は降雨にみまわれていた。風は低気圧に左回りで吹き込むように南東方向から吹く一方、上空の地衡風は等圧線に平行に南寄りとなることが類推できる。図-4 には VAD 法で推定された水平風の鉛直分布と、ゾンデで観測された水平風（10 月 17 日 21 時）を太線で示す。ゾンデは札幌から打ち上げられているが、レーダーサイトはそこから 20km 程度離れた石狩にあり、そのような違いを考慮にいれても、VAD 法がきわめてよく実際の水平風速場を再現しているといえる。特に高度 1,000m 以上の風の推定に著しく信頼性が高いことは、他の事例を検討した結果からも証明されている。よく言われているように上層の風はメソβ程度のスケール（約 100km）では一様とみなせるので、河川流域スケールを対象とした解析にはきわめて有用な情報となる。また、図-5 にはドップラーソーダーによって観測された鉛直方向の風向風速と、VAD 法の推定結果を比較している。これから風速の鉛直方向シアが VAD 法で的確に推定できていることがわかる。ところで、下層の風は、レーダーサイト近傍では図-5 に示すような観測が可能だが、一般には地表での摩擦の影響を受け、局地性が強くなる。そこで、下層風の 3 次元分布を得るには、レーダーで観測された上層風を境界条件にし、地表の摩擦を考慮できるモデルから推定していくような方法を考える必要がある。

5. 下層の風の推定について

先に述べたように、下層（大気境界層）の風については地表の摩擦の影響を受けるため、ドップラーレーダーの VAD 観測範囲外は、それが評価できるようなモデルを用いて推定していく必要がある。ここで、大気境界層というのは図-6 に示すように厚さが約 1,000m 程度のエクマン層と、地表に接する約数十 m の接地層に分類される。大気境界層以上では気圧傾度力とコリオリ力がつりあい低圧部を左にみながら等圧線に平行に風が吹いている。いわゆる地衡風である。一方、下層の摩擦の影響がある場合には、風は低圧部に吹き込むように左に曲げられる。すなわち、気圧傾度力、コリオリ力、摩擦力の 3 者だけ考えた場合、風は下から上に向かい、時計回りに転向していく。これを式で記述すると次のようになる。

$$K \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + f(v - v_g) = 0 \quad (8)$$

$$K \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} - f(u - u_g) = 0 \quad (9)$$

ここで、 u は東向き (x) の風速成分、 v は北向き (y) の風速成分、 u_g および v_g は地衡風の x 、 y 成分、 f はコリオリパラメーター、 K は鉛直方向 (z) の渦粘性係数をあらわす。上記のような基礎式で表される大気境界層の風を巧妙に与えているのが Kao model⁴⁾である。

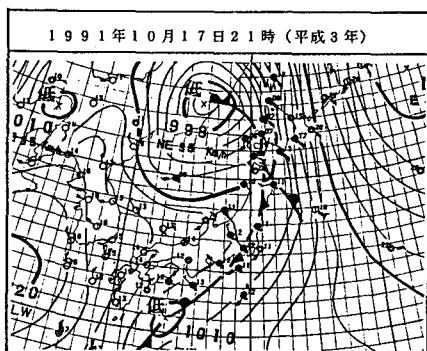
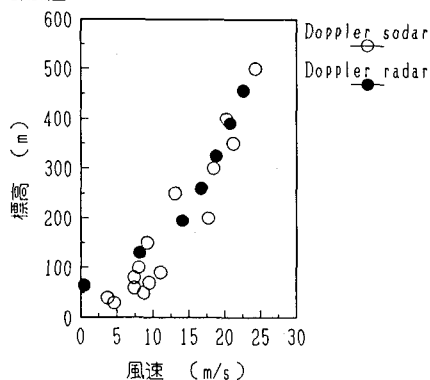


図-3 天気図 (1991年10月17日21時)

a) 風速



b) 風向

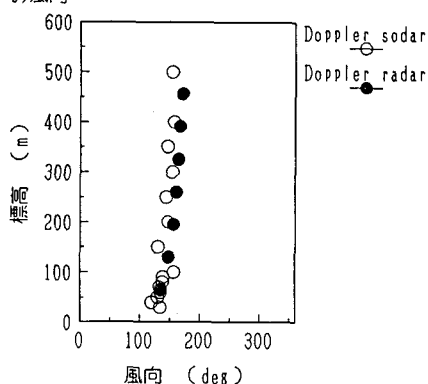


図-5 ドップラーレーダーとドップラーソーダーによる風速成分観測結果の比較

Time-Altitude Cross Section : Horizontal wind
Period : 1991.10.17.19h - 24h

Sapporo

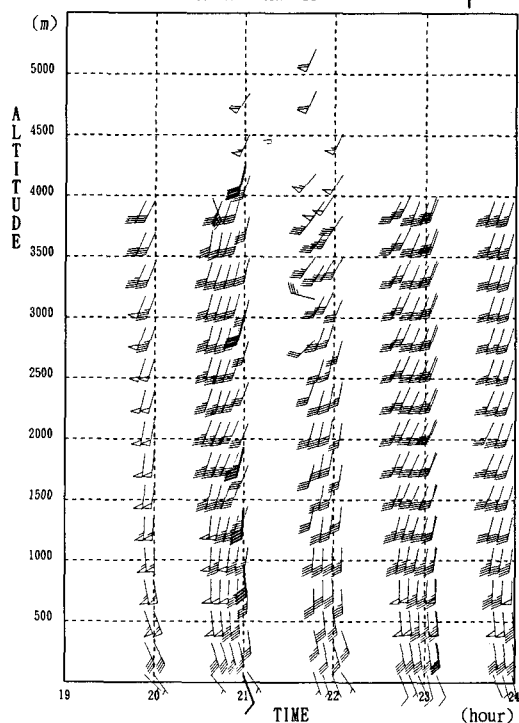


図-4 VAD 解析で推定された水平風速
(太線はゾンデデータ)

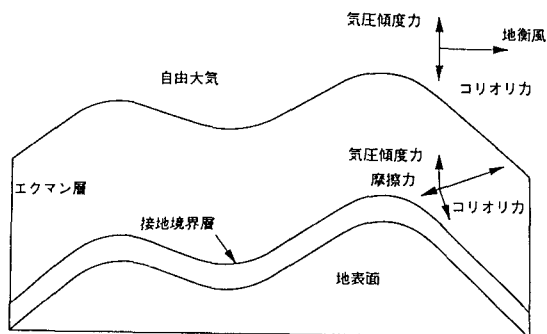


図-6 大気境界層の模式図

モデルでは上空の地衡風を与えた場合、次のような境界条件から上式が解かれる。

- 1) 地表面で風速は0とする。
- 2) 上端境界面で地衡風にすりつく。
- 3) 接地境界層とエクマン境界層の境界面で風向と応力の向きが一致する。

この結果、エクマン層の水平風速成分は次のように表せる。

$$u = u_g - \exp\{-\nu[z - h(x, y) - h_s]\} \{u_g \cos \nu[z - h(x, y) - h_s] + v_g \sin \nu[z - h(x, y) - h_s] - [u_g(\cos \alpha - \sin \alpha) + v_g(\cos \alpha + \sin \alpha)] \cos[\nu[z - h(x, y) - h_s] - \alpha]\} \quad (10)$$

$$v = v_g - \exp\{-\nu[z - h(x, y) - h_s]\} \{-u_g \sin \nu[z - h(x, y) - h_s] + v_g \cos \nu[z - h(x, y) - h_s] - [u_g(\cos \alpha - \sin \alpha) + v_g(\cos \alpha + \sin \alpha)] \sin(\nu[z - h(x, y) - h_s] - \alpha)\} \quad (11)$$

また、鉛直風速 w は地形の影響によって次のように算出される。

$$w = u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} \quad (12)$$

ここで、 $h(x, y)$ は標高、 h_s は接地境界層の厚さ、 ν はパラメータで $\sqrt{f/2K}$ である。また、 α は地衡風と接地境界層の風がなす角度で次のように表せる。

$$\alpha = \nu(h_E - h(x, y) - h_s) - \frac{3}{4}\pi \quad (13)$$

ここで、 h_E は大気境界層の厚さを示す。なお、接地境界層内の風速は、地表面の抵抗に応じ、対数則により得られるとしている。

Topography of Yubari

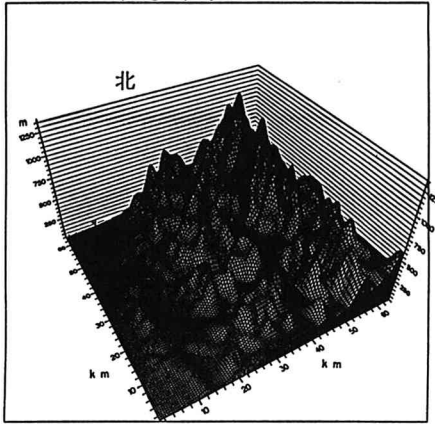


図-7 夕張岳周辺の地形

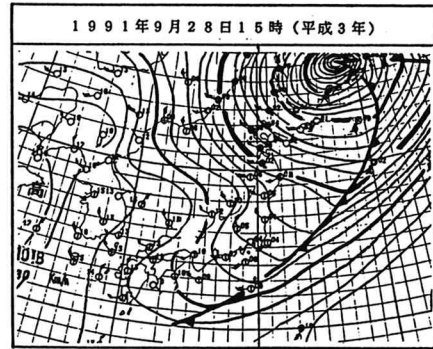
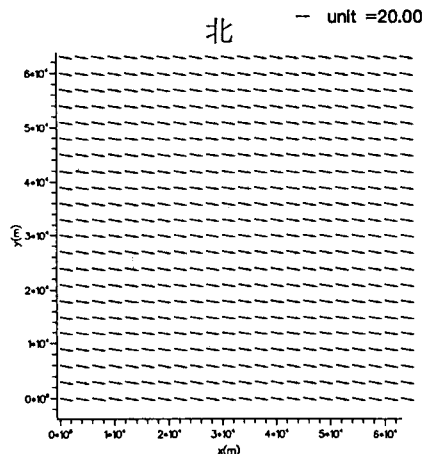


図-8 天気図(1991年9月28日15時)

次に実際に境界層風速を算出した例を示す。検討の対象としたのは、これまで地形性降雨の観測と解析をおこなってきた夕張岳(標高1,667m)近辺の63km×63kmの領域であり、地形の鳥瞰図を図-7に示す。計算条件として、メッシュサイズは水平方向に1,000m、鉛直方向に200mとし、モデルのパラメーターについては既往文献を引用し⁵⁾、接地境界層の厚さ h_s は20m、渦粘性係数 K は5m²/sとした。また、この領域は、石狩と同じメソβ場にあると考え、上層ではドップラーレーダーで観測されたものと同様な風が吹いているとした。以上の条件をもとに1991年9月28日の降雨事例を対象として計算をおこなった。この日の19時30分のドップラーレーダーのVAD解析からは、700mb面(約3,000m)で19m/s、方位角280°(西北西)の風が得られており、これはゾンデデータでも検証されている。モデルではこれを地衡風として与えた。なお、この日の概況としては図-8の天気図にあるように、北海道で台風19号の通過があり、夕張周辺でも40~50mmの降雨量があった。この日の21時の天気図からVAD解析で得られたように西北西の風が吹いていることが類推できる。図-9に高度3,000mと1,000mでの水平風速ベクトル図を示す。また、図-10には夕張市街とその近傍を含むメッシュにおいて計算された水平風速成分を高度毎に示している。ここには気象庁の風向風速観測所があり、そのデータ(9月28日21時)も示してある。これから、上空へ時計回りに転向するエクマンスパイラルがモデルによって再現されているほか、下層では実測値に近い風向風速が算出されていることがわかる。ただし、モデル計算の結果は基本的にはこのようなエクマンスパイラルで特徴づけられるが、パラメーターの設定によっては再現される風は地形の影響で複雑な状況となる。これは主に K (渦粘性係数) に依存し、 K が大きくなるほど摩擦の効果が卓越してくるので、地形に敏感に影響するようになる。

(a) 高度 3,000m



(b) 高度 1,000m

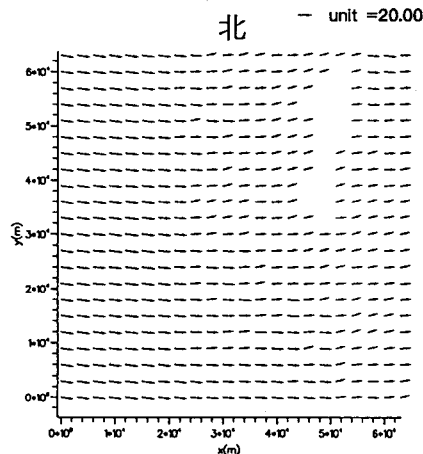


図-9 計算された水平風速ベクトル

7. おわりに

現在、わが国における現業の降雨観測レーダーでドップラーレーダーはないが、降雨現象に強く関連する要因として、広域の風の観測データの入手が望まれる。最近、流域スケールにおいても降水の物理メカニズムを記述するモデルや、それをベースにした予測手法も提案されてきている。それらへの情報を提供する意味でもドップラーレーダーによる風の観測が必要であると考えられる。本報告では、ドップラーレーダーの観測結果に VAD 法を適用して上空の風を的確に推定するとともに、Kao model によって下層での局地性の強い風速場をよく再現できることを示した。今回、的確な風の情報を与えることができたことは、降雨予測物理モデルの信頼性向上を目指すための第一歩になったと確信する。なお、ドップラーレーダーの観測やデータの解析に際し、北海道大学低温科学研究所の遠藤助教授他の方々にご協力をいただいたことに深く謝意を表す。

参考文献

- 1) 中津川誠, 吉岡紘治, 藤吉康志, 宮下孝治, 1990: 流域スケールの降雨特性の研究(その2) - レーダ雨量計の観測精度について -, 北海道開発局開発土木研究所月報 446, 19-34.
- 2) 谷昭彦, 西村豊, 中津川誠, 1992: 3次元ドップラーレーダによる降雨観測, 土木学会北海道支部論文報告集 48, 317-322.
- 3) 坪木和久, 若浜五郎, 1988: 1台のドップラーレーダーを用いた風速場の測定法-最小二乗法を用いた VAD 解析-, 低温科学物理篇 47, 73-88.
- 4) Kao, S. K., 1981: An Analytical Solution for Three-Dimensional Stationary Flows in the Atmospheric Boundary Layer over Terrain, J. Appl. Meteor., 20, 386-390.
- 5) Holton, J. R., 1977: An Introduction to Dynamic Meteorology, Academic Press.
- 6) 中津川誠, 竹本成行, 山田正, 1990: 流域スケールの降雨特性の研究(その3) - 山地における気流と降雨のシミュレーション -, 北海道開発局開発土木研究所月報 447, 20-35.

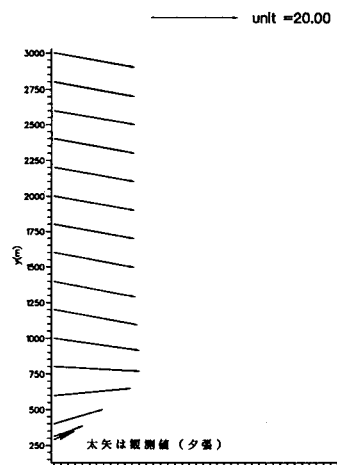


図-10 夕張上空の水平風速場