

集合化アルゴリズムを用いた境界層レーダーの 風速推定精度の改善

笹岡 雅宏*

要旨

境界層レーダー観測において、風速推定の妨げとなる不特定のクラッターを除去する目的で、観測されたドップラースペクトルのモーメントを推定する新しい手法を開発した。この手法は格子モデルに基づいて、ドップラースペクトルから大気エコーによる信号を抽出して視線速度を推定するものである。実際に観測されたクラッターが混在するドップラースペクトルデータに、この手法を適用して非常に滑らかな視線速度の鉛直プロファイルを得た。この視線速度から算出した水平風の風向風速は、標準的なモーメントから計算するよりも、空間的にも時間的にも連続に変化し、かつ風向シアが存在する場合にはそれを明瞭に示した。更に、高層ゾンデデータと比較した境界層レーダーの風向風速の検証では良い結果を得た。

1. はじめに

ウィンドプロファイラーは装置真上の風の鉛直プロファイル測定するドップラーレーダーである。UHF帯ウィンドプロファイラーの中でも1.3 GHz ウィンドプロファイラーは特に、境界層レーダーと呼ばれる。気象庁は、2001年度からこのウィンドプロファイラーを全国25地点に展開した WINDAS と呼ばれるプロファイラー観測網を現業的に運用し、その観測値は数値予報モデルに反映されるなど多方面で利用に供されているところである。境界層レーダーは、通常のドップラーレーダーと違い晴天時にも測定可能な全天候型レーダーであることから、降雨(降雪)時前後の風を観測することができる利点があるため様々な研究プロジェクトでも使用され、気象擾乱の解析などに利用されている。

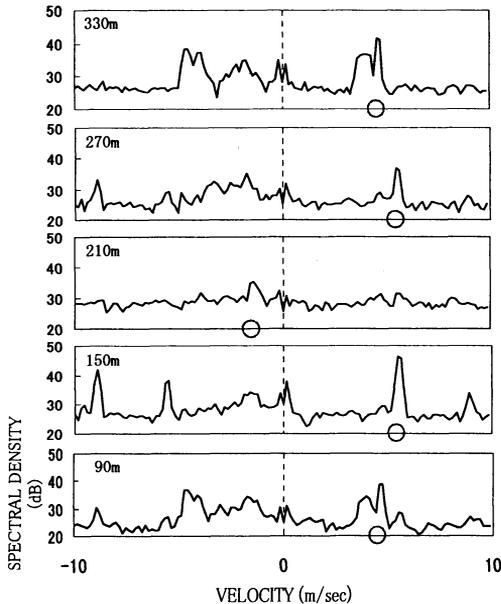
ウィンドプロファイラーの観測では、レーダービーム(パルス状の電波)を鉛直及び、鉛直から7~15°程度傾けた2または4方向に発射し、乱流に起因する大気屈折率変動部分から散乱された電波を受信し、その大気スペクトルのピークのドップラーシフトからピー

ム方向の視線速度を推定する。風の水平成分は、鉛直方向を含む3方向ないし鉛直方向を除く他4方向の視線速度から算出する。しかし大気からの散乱電波は非常に弱いために、複数のパルスの反射信号を積算する。このように時間で積算した時系列データは高速フーリエ変換により周波数領域に変換され、更にこの領域でも積算される。また積算された受信信号は、大気からの散乱波のみならず機器ノイズ、銀河ノイズ等様々な原因によるノイズを含んでいる。その上、地表面から反射してくるグラウンドクラッター、また海面からのシークラッター、或いは鳥、車、飛行機等の移動物体からのクラッターさえもが大気信号と混ざって観測されることがある。このため、大気信号のピークを検出することが非常に困難な場合がある。種々の原因に起因する信号の中でも、特に一般のレーダー観測でも馴染み深いグラウンドクラッターは、ドップラースペクトルの速度ゼロ付近に局在し、観測の精度を悪くする信号として知られている。グラウンドクラッターの影響を除去するために、フェンスでアンテナを囲むなどのハードウェア面での改善(Russel and Jordan, 1991)はもとより、ドップラースペクトルの速度ゼロ付近領域のスペクトル密度を周辺の値で線形補間したり、V字型の特性を持つ帯域制限フィルターを用いるなどの方法がよく適用される。また、グラウンドクラッターは

* 気象研究所気象衛星・観測システム研究部。

—2002年7月22日受領—

—2003年1月21日受理—



第1図 5高度分のドップラースペクトル。丸印は算出された視線速度を示す。210 mの視線速度のみ大気のみピークであり、他はクラッターの影響を受けたと推定される。方向：南西，日時：2001.8.17 20：40，場所：つくば。

速度ゼロに対して対称性が良いので、周波数領域を半々に分け互いに差分を取ることでその影響を軽減することができる (Passarelli *et al.*, 1981)。他には信号の時系列データにフィルターを用いることが試みられている (May and Strauch, 1998)。

モーメント計算で大気ピークの検出に失敗した場合、高度或いは時間方向に不連続なデータ (以下「不良値」と呼ぶ) が取得される。第1図は、境界層レーダーの5高度分のドップラースペクトルであり、クラッターが観測値に影響を及ぼした例である。この例では、V字型の特性を持つ帯域制限フィルターによりグランドクラッターの影響は概ね除去しているが、境界層レーダーのアンプの電源部等にトラブルが発生してオペレーションの調子が悪くなり大気ピークよりも大きいクラッターが出現したので、高度210 mのデータを除いて視線速度の推定は大気ピーク以外にクラッターの影響を受けたと推察される。このような不良値の取得が無視できないためウィンドプロファイラーの観測値は、30分或いは1時間程度の時間区間毎に数個の視線速度のセットから不良値を除去した後、その時間区間の代表値を決定するというコンセンサスアルゴ

リズム等 (Weber *et al.*, 1993; Miller *et al.*, 1994) を用いて、慣例的に平均の水平風として算出される。しかし、このコンセンサスアルゴリズム等は不良値を除去することはできても、ドップラースペクトルから大気ピークを検出するように改善することはできない。また観測値が平均される時間毎にしか取得されないなどの制限がある。

一方、時間的に連続な観測値が取得できるように、ドップラースペクトルから他の信号と区別して大気信号のピークを抽出する研究がなされている。これらの研究では、専ら周波数に関するスペクトルのモーメントを計算する方法を改良することを行っている。1次モーメントの値はスペクトルの重心として求められるため、大気ピーク以外にクラッターが存在するときには重心が大気ピークの位置からずれることが知られている。出現頻度の低いクラッターの除去については、ドップラースペクトルの時系列から統計的にスペクトルポイント (FFT points) のスクリーニング処理を行いスペクトルの平均を求める方法 (Merritt, 1995; Pekour and Coulter, 1999) でも対応できるが、継続して出現するクラッターに対しては限界がある。このため、経験的に知られる大気信号や個々のクラッターの特徴 (例えば、スペクトルピークの大きさの程度等) をスペクトルの形状から検出することにより、それぞれの信号の分離を行う方法が研究されている。これらには、ニューラルネットワークの学習アルゴリズムの1つであるバックプロパゲーションを応用した方法 (Clothiaux *et al.*, 1994)、ファジィロジックによるテクニックを発展させた方法 (Cornman *et al.*, 1998; Morse *et al.*, 2002) 等がある。但しこれらの方法は、大気信号等のピークやその信号の特徴を検出し易くするために、スペクトルの時系列データを用いてスペクトルを平滑化するなどのデータ処理を必要とする。或いは高速フーリエ変換によるスペクトルを算出する前に、受信信号の時系列データからウェーブレット変換による解析によりグランドクラッターや飛行機のエコーを除去する研究もなされている (Jordan *et al.*, 1997; Boisse *et al.*, 1999)。この方法では、やはり経験的に知られる時系列データに含まれる特徴を検出することにより信号の分離が行われる。しかしクラッターの時系列データの特徴を予め解析して知識を得ておかなければならないので、特定のクラッターのみを対象にした除去には効果的であるが予想外のクラッターが混在した場合には対応できない。また、時系列

データは大容量になるので、多くの境界層レーダーでは積分した後のドップラスペクトルデータしか保存していないため、時系列データからクラッター除去の処理を実行することは困難である。

そこで本研究でも同様の方向性を持ちながら、モーメント推定の妨げとなるクラッターを無視してドップラスペクトルから大気信号を抽出する手法を開発した。この手法は前述した方法と同様に、ドップラスペクトルに関する経験的な知識に基づいて視線速度を推定するものである。しかしドップラスペクトルから信号の分離を行う際に、個々の信号のピークを検出することやスペクトルの形状からその信号の特徴を検出することを特に必要としない。また、特定のクラッターのみを対象にした除去処理ではないので、予め信号を解析してクラッターの知識を得ておく必要もない。本論文では、開発した手法の方法論について述べた後、デモンストレーションとしてクラッターが風観測に影響を及ぼした実際のデータを用いて、この手法により視線速度が改善されることを示す。更にその視線速度から求めた水平風の風向風速を検証する。

2. ネットワーク系の自己組織化

ここでは、具体的な視線速度推定の説明に入る前に計算方法の基本的なアイデアの背景について述べる。認知心理学や脳科学の分野で取り扱われる問題に、如何に特定の対象とその背景を区別できるのかというものがある。1つの解答としては、連続性、同一性や近接性のあるものは同一の集合と見なされ、そうでないものと区別されるというものである。このことは神経細胞に関する実験結果から得られた知見に基づいて、ニューラルネットワークの振動応答に関するモデル研究において議論されている (Malsburg and Schneider, 1986; Sompolinsky *et al.*, 1990; Sporns *et al.*, 1991)。特に応用される場合、ニューラルネットワークというバックプロパゲーションを指すことが多いので、混同を避けるために本論文中では簡単に「格子モデル」と呼ぶ。

この格子モデルは次のような3つの特徴を持つ。

- (a) 格子状の構造を持ち、各格子点には入力を受け取って閾値を越えると出力を出すユニットセルがある。
- (b) 各格子点のユニットセルは概ね2種類の相互作用の結合を持つ。2種類の内、一方が興奮性結合(正の値)で相互に出力のタイミングを計り同時に出力しようとする結合であり、もう一方が抑制性結合(負の値)であり同時に出力するのを妨げ合う効果をもたらす相互作用である。このため興奮性結合は同一の集合を形成する相互作用として働き、抑制性結合は反対に集合の形成を抑制する相互作用として働く。結合強度は格子点間距離が広がるとともに減衰する。

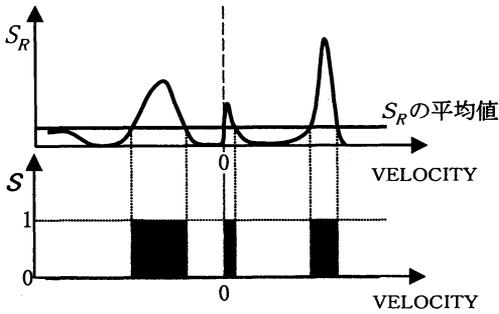
力しようとする結合であり、もう一方が抑制性結合(負の値)であり同時に出力するのを妨げ合う効果をもたらす相互作用である。このため興奮性結合は同一の集合を形成する相互作用として働き、抑制性結合は反対に集合の形成を抑制する相互作用として働く。結合強度は格子点間距離が広がるとともに減衰する。

(c) 興奮性結合は同時に出力しようとするユニットセル同士の間で強くなり、逆に同時に出力しようしないユニットセル同士の間では弱くなるように修正する規則が存在する。

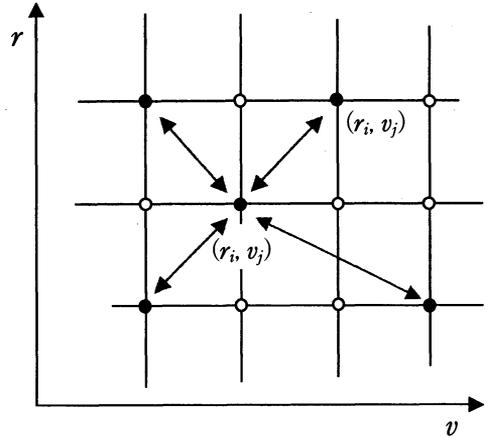
特徴cは特徴bの相互作用の効果の強調であり、入力(環境)に対する適応性を示す自己組織化の基礎である。また、この様な興奮性結合と抑制性結合による自己組織化の詳細については、Malsburg (1973) が計算機シミュレーションの実施により考察している。ところで、先に述べたバックプロパゲーションは帰納的な方法であるため、これを応用した方法では教師データを用いて、選択すべきデータの特徴を記憶させるトレーニングを行う必要がある。それに対して、自己組織化は設定された一定の規則に従うだけであるので、事前のトレーニングなどが不要である。

この振動応答に関する計算機シミュレーションでは、ユニットセル同士で同時に出力すれば同一の集合であり、同時に出力しなければ同一の集合ではないと区別できることが示されている。しかし、実際にウィンドプロファイラーの風観測に応用する上では、出力状態が変動することなく収束する方が便利である。そこで、シミュレーションの演算を収束させるために収束条件を導入することを考える。簡便的な手段として、連想記憶の研究に関するホップフィールドモデル (Hopfield, 1982) に見られるネットワーク系のエネルギー関数 (リアプノフ関数) を使い、このエネルギー関数が収束すれば演算を中止するようにする。

後に例示するように、ドップラスペクトル中の大気信号はレンジ及び周波数に対して、概ね連続的に並んでいる。このような経験的に知られる大気信号の特徴に注目して、視線速度を推定することを考える。ここでは、自己組織化のアイデアを取り入れることによりドップラスペクトルから自動的に大気信号を抽出するアルゴリズムを構築する。ドップラスペクトルのスペクトルポイントを、レンジ及び周波数の格子に対応させて2次元格子を作る。この2次元格子に対して、特徴aの格子点ユニット、特徴bの格子点間結合、



第2図 格子点ユニットの出力 S の初期値設定. 出力の初期値は, グランドクラッター対処後のドップラースペクトル S_R が S_R の平均値以上で1, それ以外では0とすることで設定される. これにより大気スペクトルの候補が選択される.



第3図 格子モデルのネットワーク. 横軸が速度, 縦軸がレンジに対応する. 黒丸は格子点ユニットの出力が1, 白丸は出力値が0, 矢印は格子点間に相互作用が働くことを模式的に示す.

並びに特徴 c の結合値の修正を設定する. これらの特徴を持つ格子モデルを適用して視線速度の推定を行う.

3. 視線速度の計算方法

2節で述べたように, 視線速度を算出するのに格子モデルを適用する. 各レンジのドップラースペクトルのスペクトルポイントに対応した格子点を持つ2次元格子を考える. 基本的には, この格子モデルを用いて1次モーメントを計算する方法を改良することで, 視線速度の推定を行う. 以下にその概略を述べる.

3.1 系の出力の初期値設定

ドップラースペクトルから格子点ユニットの出力の初期値, 即ちネットワーク系の入力を求める前に, 地表付近に出現するグランドクラッターについて対処しておく. 1節で述べたようにグランドクラッターは速度ゼロに対して対称性が良いことから, 以下のようにしてその影響を軽減する.

$$S_R(r, v) = \begin{cases} Z(S_D(r, v) - S_D(r, -v)) & (r \leq r_h) \\ S_D(r, v) & (r > r_h) \end{cases} \quad (1)$$

$$Z(x) = \begin{cases} x & (x \geq 0) \\ 0 & (x < 0) \end{cases} \quad (2)$$

ここに, S_D はドップラースペクトル, S_R はグランドクラッター対処後のドップラースペクトル, r_h はグランドクラッターに対処する高度の閾値 (=0.8 km), Z は負のデータをカットする関数である.

各ユニットの出力値は0か1の2値を取るものと

し, その初期値はスペクトル密度を0か1にデジタル化することにより決定する. 簡単のために各レンジで S_R の平均値を求めて, これを基準に出力の初期値を0か1に分類する. 従って, 各レンジで基準値が異なる. 出力の初期値は, 各レンジで S_R の平均値より S_R が大きいと1, 小さいと0を選択する(第2図参照). これにより, 各レンジのドップラースペクトルから大気信号の候補となるスペクトルポイントを選択し, ネットワーク処理によって大気信号のスペクトルポイントを抽出する.

3.2 モデルの概要

各格子点には入力に対して出力を出すユニットがあり, ユニット間には相互作用の結合がある. このネットワーク構造の概略図を第3図に示す. 第3図の縦軸はレンジゲートに対応するレンジ (r) であり, 横軸はドップラースペクトルの周波数に対応する速度 (v) である. 但し表記上, 格子点 (r_i, v_j) は (i, j) と同等とする.

各ユニットの出力は閾値によって0か1に制御される2値関数である. ここで格子点 (r_i, v_j) におけるユニットのポテンシャル (H) を, ホップフィールドモデルにおけるリアプノフ関数を基に, 次式のように定義する.

$$H_{s+1}(r_i, v_j) = -E_{s+1}(r_i, v_j) - I_{s+1}(r_i, v_j) \quad (3)$$

$$E_{s+1}(r_i, v_j) = \sum_{k=i-r_E}^{i+r_E} \sum_{l=j-v_E}^{j+v_E} C_s(r_i, v_j) \cdot \mathcal{F}(r_i, r_k, v_j, v_l) \cdot S_s(r_i, v_j) \cdot S_s(r_k, v_l) \quad (4)$$

$$I_{s+1}(r_i, v_j) = \sum_{k=i-r_I}^{i+r_I} \sum_{l=j-v_I}^{j+v_I} \mathcal{J}(r_i, r_k, v_j, v_l) \cdot S_s(r_i, v_j) \cdot S_s(r_k, v_l) \quad (5)$$

ここに、下添字 s は演算のステップ数、 E は興奮性結合によるポテンシャルの寄与、 I は抑制性結合によるポテンシャルの寄与、 \mathcal{F} は興奮性結合強度、 \mathcal{J} は抑制性結合強度、 C は興奮性結合の係数 (≥ 0)、 S はユニットの出力である。また2節のモデルの特徴 b により相互作用の結合値は、距離的にも速度的にも近接しているときにユニット間の相互作用が大きくなり、離れるに従いユニット間の相互作用が小さくなるように設定する。ここでは、 $\mathcal{F}(i, k, j, l) = 10 \exp[-(i-k)^2/16 - (j-l)^2/9]$ 、 $\mathcal{J}(i, k, j, l) = -\exp[-(i-k)^2/64 - (j-l)^2/36]$ と与え、(4)と(5)式の加算は $r_E = 4$ 、 $r_I = 6$ 、 $v_E = 8$ 、 $v_I = 12$ とする。(3)~(5)式より格子点 (r_i, v_j) の出力が0のとき、次のステップで格子点のポテンシャルは0となる。一方、格子点 (r_i, v_j) の出力が1のとき $|k-i| \leq r_E$ かつ $|l-j| \leq v_E$ の範囲に、出力が1の格子点 (r_k, v_l) が多いと、(3)と(4)式により E はこの格子点のポテンシャルを小さくし、 $|k-i| \leq r_I$ かつ $|l-j| \leq v_I$ の範囲に出力が1の格子点 (r_k, v_l) が多いと、(3)と(5)式により I はこの格子点のポテンシャルを大きくすると考えられる。ここでは(5)式の加算の範囲は(4)式の加算の範囲を含むようにしているので、例えば(5)式の加算の範囲に出力が1の格子点が存在しても、(4)式の加算の範囲に全く存在しない場合は、格子点 (r_i, v_j) のポテンシャルは抑制性結合による寄与しか受けなくなる。この(5)式の加算の範囲内で抑制性結合は、2節の格子モデルの特徴 b による集合の形成を抑制する相互作用として働く結果、主に大気信号に近接するクラッター等の不要信号を除去する効果があるものと考えられる。

一方ユニットの出力値は、慣例的な閾値制御により次のようにして求める。

$$S_s(r_i, v_j) = \Theta(H_s(r_i, v_j)) \quad (6)$$

$$\Theta(H_s(r_i, v_j)) = \begin{cases} 1 & (H_s(r_i, v_j) \leq h(r_i)) \\ 0 & (H_s(r_i, v_j) > h(r_i)) \end{cases} \quad (7)$$

ここに、 Θ は出力関数であり、 $h(r_i)$ はレンジ r_i の各ユニットの出力値を決める際の閾値である。ここでは閾値 (h) は、次式のようにポテンシャルの平均値とする。

$$h(r_i) = \frac{1}{M} \sum_{f=1}^M H_s(r_i, v_j) \quad (8)$$

ここに、 M はFFTポイント数である。通常閾値は定数として設定されるが、ここでは(8)式を用いて閾値の値を一定にしなくてもよいことにする。従って、各レンジで閾値が異なる。

更に、(4)式の興奮性結合の係数 (C) は、全てのユニットに対して初期値を1とし、ユニットの出力状態により以下の規則で修正する。

$$C_{s+1}(r_i, v_j) = (1 - \gamma) \cdot C_s(r_i, v_j) + \delta \cdot \phi(U(r_i, v_j)) \cdot S_s(r_i, v_j) \quad (9)$$

$$U(r_i, v_j) = -\frac{H_s(r_i, v_j) - \beta(r_i)}{\alpha(r_i) - \beta(r_i)} \quad (10)$$

$$\phi(x) = \frac{1}{1 + e^{-(x-\mu)/\sigma}} \quad (11)$$

ここに、 γ は減衰係数 ($=0.2$)、 δ は増加因子 ($=0.2$) である。特に減衰係数と増加因子を等しい値にした場合、興奮性結合の係数は1を上限値とすることになる。 $U(r_i, v_j)$ は、各レンジで速度領域での $H_s(r_i, v_j)$ の最小値を-1に規格化したポテンシャル ($-1 \leq U \leq 0$) であり、 $\alpha(r_i)$ 、 $\beta(r_i)$ はそれぞれ各レンジの $H_s(r_i, v_j)$ の速度領域での最小値、最大値である。 $\phi(0 < \phi < 1)$ はバックプロパゲーションなどで連続値を持つユニットの出力関数としてよく用いられるシグモイド関数と呼ばれるものである。 μ は関数が中間値 (0.5) になるときの値 ($=-0.3$) であり、 σ は関数の傾きに関する定数 ($=-0.1$) である。2節の格子モデルの特徴 c で述べた通り、興奮性結合の修正はユニット同士の出力状態によって決定されるが、ここでは修正の計算を簡単にするため、各レンジでポテンシャルが大きいユニットに対しては興奮性結合の係数が小さくなるようにした。即ち、ユニットのポテンシャルが大きいと(10)と(11)式により、(9)式の右辺第2項は小さくなり、興奮性結合の係数が減衰する。そして、(3)と(4)式により興奮性結合のポテンシャルへの寄与は小さくなり、(6)~(8)式によりこのユニットの出力値は0になる傾向が生じるものと考えら

れる。反対に、各レンジでポテンシャルが小さいユニットの出力値は1になる傾向が生じるものと考えられる。このようにして2節のネットワーク系の自己組織化を実現する。また後に例示するように、大気信号に対応する格子点のポテンシャルは、ほとんどのクラッター等不要信号に対応する格子点のポテンシャルより小さいので、この興奮性結合の係数の修正は、大部分の不要な出力値を除去する効果があると考えられる。

そして、系のエネルギー関数(ξ)はホップフィールドモデルにおける系のエネルギー関数を基に、(3)式を用いて次式のように求める。

$$\xi_s = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M H_s(r_i, v_j) \quad (12)$$

また、系の収束条件は次の通りとする。

$$\left| \frac{\xi_{s+1} - \xi_s}{\xi_s} \right| \leq \varepsilon \quad (13)$$

ここに、 N はレンジゲート数、 ε はエネルギー関数の収束条件の閾値(=0.01)である。実際に視線速度を求めるアルゴリズムでは、出力を再度入力とすることにより、エネルギー関数が収束条件(13)式を満たすまで系のユニットの出力値が繰り返し計算される。そして、最終的にユニットの出力が1の格子点に対応する速度領域を大気スペクトルの領域として特定する。従って系の出力値が更新される度に出力が1である集合の選別が行われることになり、この集合が殆ど変わらなくなったときに収束条件(13)式は満たされるものと考えられる。また、設定された系の自己組織化により、各レンジで小さいポテンシャルを持つユニットが必ず選択されるので、最終的に一定の集合が形成される結果、系の収束条件は常に満たされるものと考えられる。

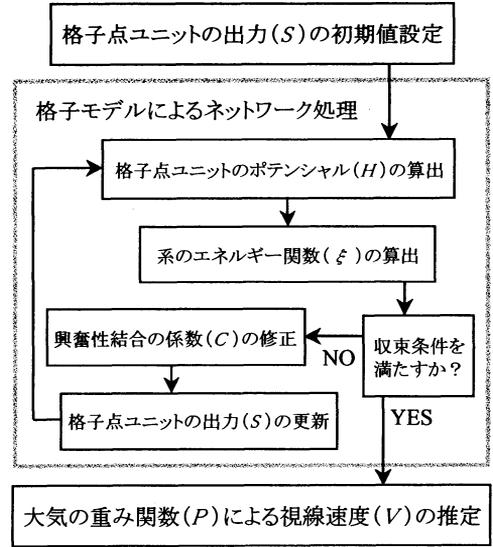
3.3 視線速度の推定

視線速度(V)は、各レンジに対応するポテンシャルから次式を用いて推定する。

$$P(r, v) = \exp(-U(r, v)) / \int_{v_1}^{v_M} \exp(-U(r, v)) dv \quad (14)$$

$$V(r) = \int_{v_1}^{v_M} v \cdot P(r, v) dv \quad (15)$$

ここに、 P は大気信号の重みを評価する関数として定義されるが、 U から P への変換は単に形式的なも



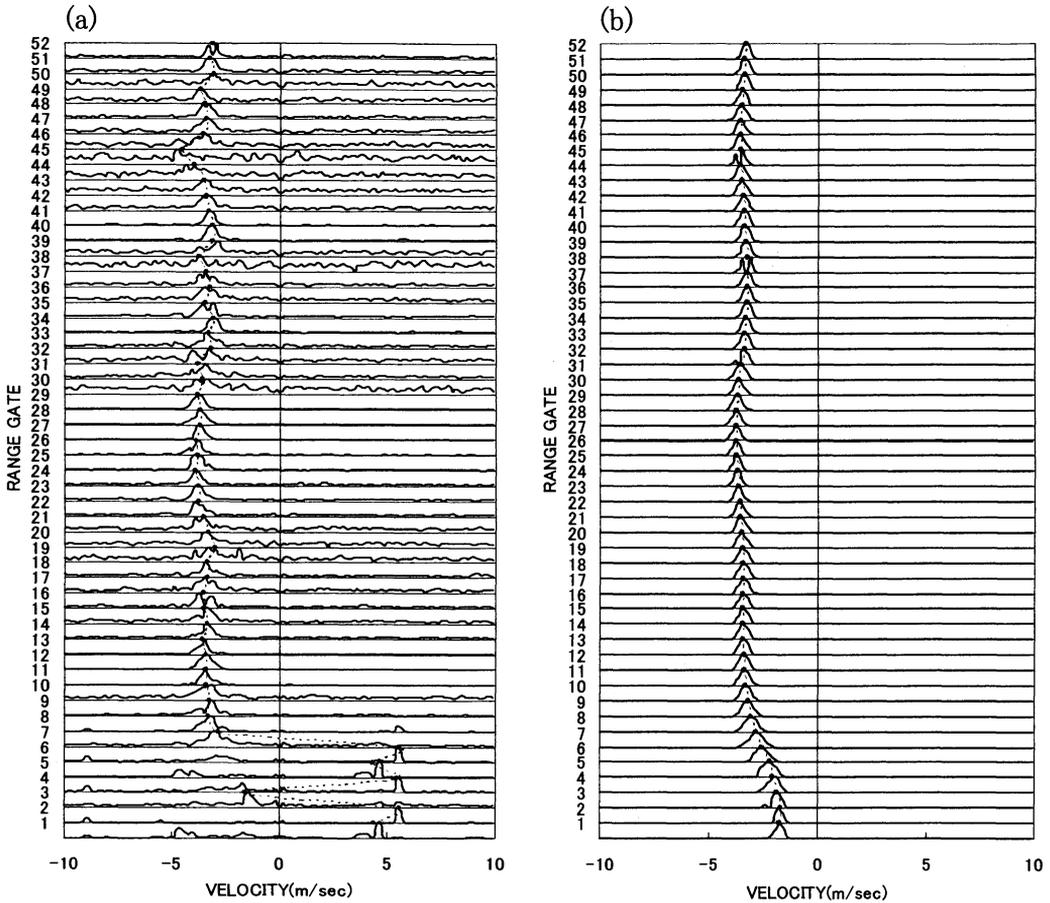
第4図 視線速度算出のフロー。

のである。この大気信号の重み関数の1次モーメントを視線速度として算出する。

以上の視線速度算出アルゴリズムの計算手順を第4図に示す。また本論文ではこの計算手法を、2節の背景に依拠していることから「集合化アルゴリズム」と呼ぶ。尚計算に用いられる変数の決定は、1節で述べた他の方法と同様、経験的な試行により行われたものである。

4. 結果

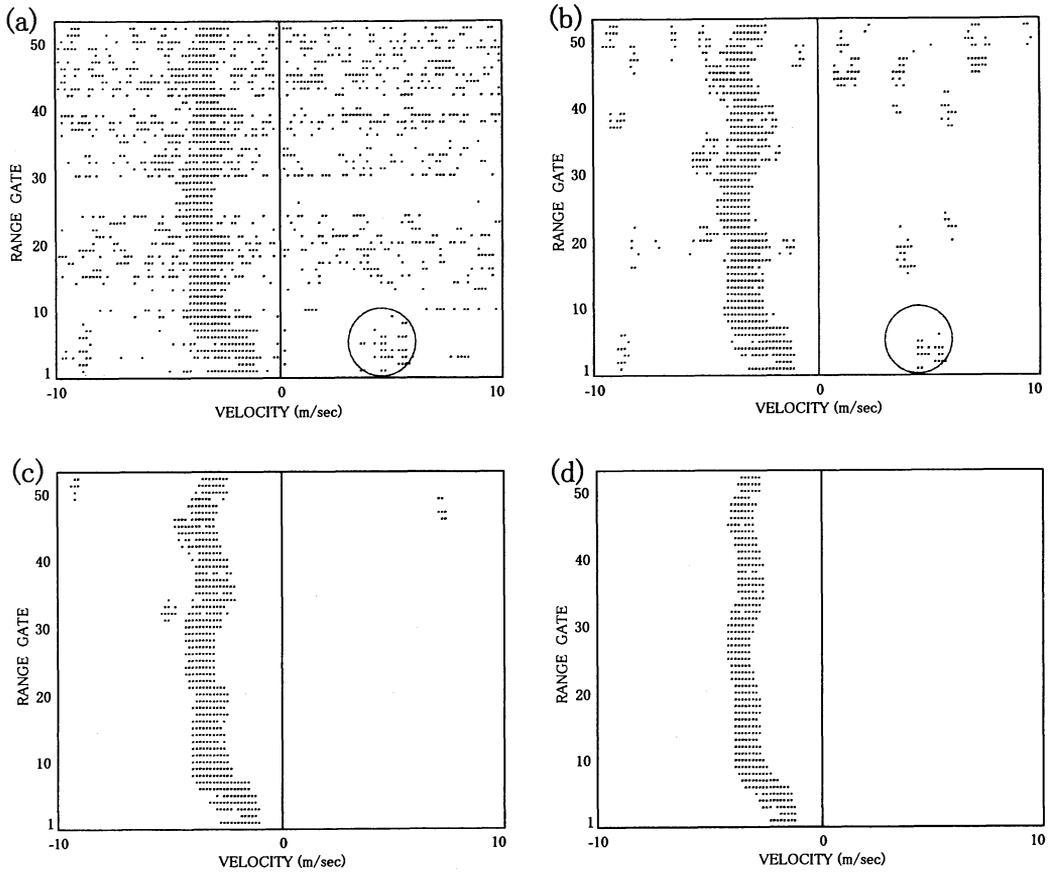
集合化アルゴリズムを適用するデータには、境界層レーダーで観測されたドップラースペクトルを用いた。境界層レーダーは、高高度モードと低高度モードの観測を交互に繰り返し、それぞれのモードで30分に1方向につき6個のデータを得るように設定されている。計算には低高度モードの最低高度90 m、60 m分解能、レンジゲート数が52、FFTポイント数が128、折り返し速度が10 m/secのデータを使用した。第5図aは各レンジゲートで規格化したドップラースペクトルとその速度領域に関する標準的な1次モーメントのプロファイルである。特に6番目のレンジゲート(高度390 m)以下の接地境界層で1次モーメントが不連続になり、その結果、視線速度としては不良値を取得している(第1図と同一データを使用)。このことから、クラッターの存在がモーメント計算に影響を及ぼしている様子が分かる。この標準的な1次モーメントは、境



第5図 標準的な1次モーメントと集合化アルゴリズムによる1次モーメントの比較。(a) ドップラースペクトル(実線)とその1次モーメント(点線), (b) 大気重み関数(実線)とその1次モーメント(点線)。方向:南西, 日時:2001.8.17 20:40, 場所:つくば。

界層レーダー本体に付属するソフトウェアで計算されたものであり、ノイズレベルを算出してグランドクラッターに対してV字型の特性を持つ帯域制限フィルターを用いた後、全速度領域で積分した値である。この帯域制限フィルターを用いた後のドップラースペクトルが観測データとして保存されたので、集合化アルゴリズムを同スペクトルデータに適用した。第5図bは同図aと同じスペクトルデータに対して集合化アルゴリズムにより求めた大気信号の重み関数とその1次モーメントである。レンジに沿って連続な視線速度が推定されている様子が分かる。次に系の出力状態の変化を見る。第6図aは、第5図aと同じスペクトルに対する格子モデルの各ユニット出力の初期パターンである。第6図bは5回目、同図cは10回目の出力パターンであり共に演算の途中経過を示し、同図dは29

回目でありその最終パターンである。第6図aで見られたクラッターなど不要信号による格子点の出力が、同図dでは消えている様子が分かる。出力パターンではスペクトル密度の情報が排除されるため、出力値を見るだけでは不要信号のスペクトル密度が分からない。このため第6図aを見る限りでは、1次モーメントにあまり影響していない高度の方がむしろ不要信号の影響を受けているように見える。これは3.1小節で述べたように、出力の初期値を決定する基準に、各レンジでスペクトル S_R の平均値を用いたので、観測高度と共に SNR (signal-to-noise ratio) が悪化してくると、スペクトル S_R の平均値がノイズレベル (Hildebrand and Sekhon, 1974) に接近してくるために起こることである。第7図aは第5図aと同じスペクトルに対するエネルギー関数について、系の収束条件 (11) 式を

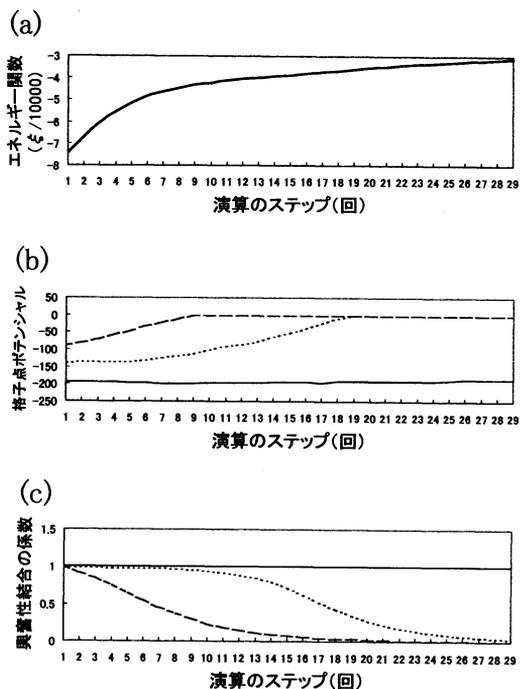


第6図 集合化アルゴリズムにおける格子点の出力パターン. (a) 格子点出力の初期パターン, (b) 5回目の出力パターン, (c) 10回目の出力パターン, (d) 29回目の最終パターン. 図中では, ユニットの出力が1のときには*, 0のときにはブラंकを使用している. 図aと図bの丸印は観測値に影響するクラッターによる出力を示す. 方向: 南西, 日時: 2001.8.17 20:40, 場所: つくば.

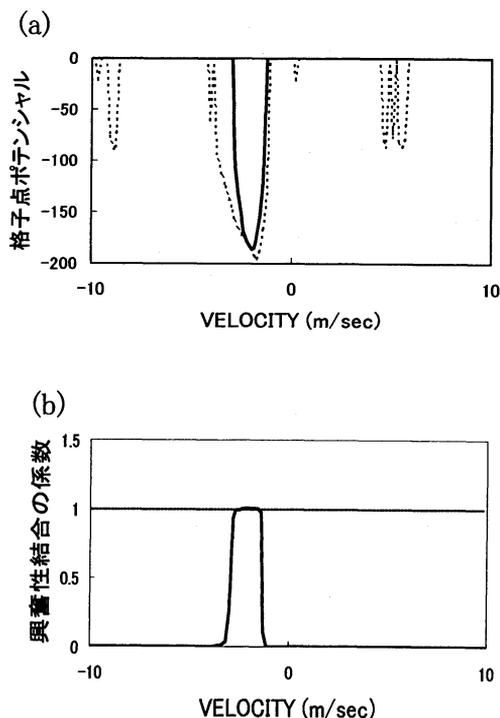
満たすまでステップ毎にプロットしたものである. 10回目までは急に上がりそれ以降は比較的緩やかに変化していく様子が示されている. これは第6図aからdまでの変化に対応している. 同様に第7図bは格子点ポテンシャル, 同図cは興奮性結合の係数の変化についてそれぞれ示す. 第7図bとcには共に, 4番目のレンジゲート(高度270 m)で, 大気信号に対応するスペクトルポイントと推察される格子点(270 m, -1.9 m/sec)(実線), 並びにクラッターに対応するスペクトルポイントと推察される2点の格子点(270 m, -3.1 m/sec)(点線), (270 m, 5.5 m/sec)(鎖線)の計3点についてプロットしてある. 格子点ポテンシャルの変化傾向と興奮性結合の係数の変化傾向はよく対応していることが示されている. それらが収束するに伴い系のエネルギー関数も収束していることが分かる. 第

8図aは, 第7図bで示した4番目のレンジゲートでの格子点ポテンシャルの1回目の値(点線)と系の収束後の29回目の値(実線)についてプロットしたものである. 第8図bは, 同様に4番目のレンジゲートでの興奮性結合の係数の初期値(点線)と系の収束後の値(実線)についてプロットしたものである. 系の収束後, 格子点ポテンシャルが0になっている速度領域では興奮性結合の係数も1から0に減衰していることが分かる. 第9図a~dは鉛直を除く4方向での2種類の1次モーメントの比較である. 集合化アルゴリズムにより求めた1次モーメント(実線)は標準的な1次モーメント(鎖線)に見られるクラッターなどの不要信号の影響を排除して視線速度を推定することに成功している.

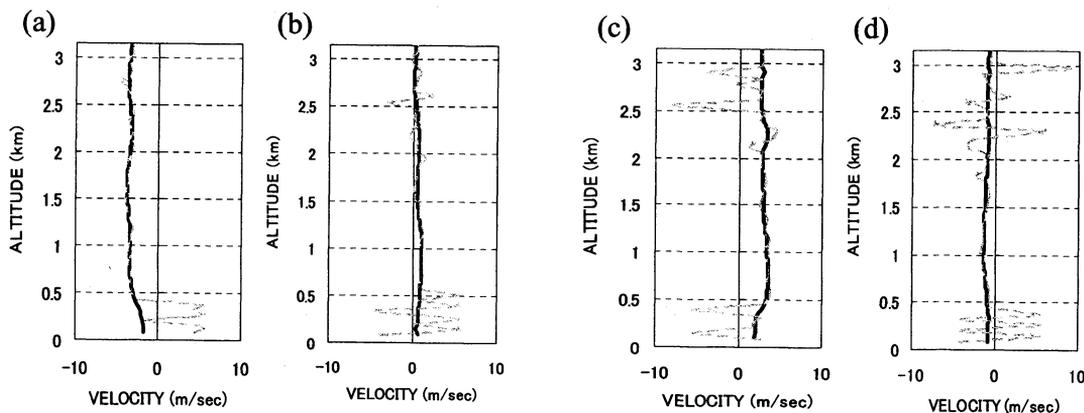
ところで, 大気の影響関数により算出された1次



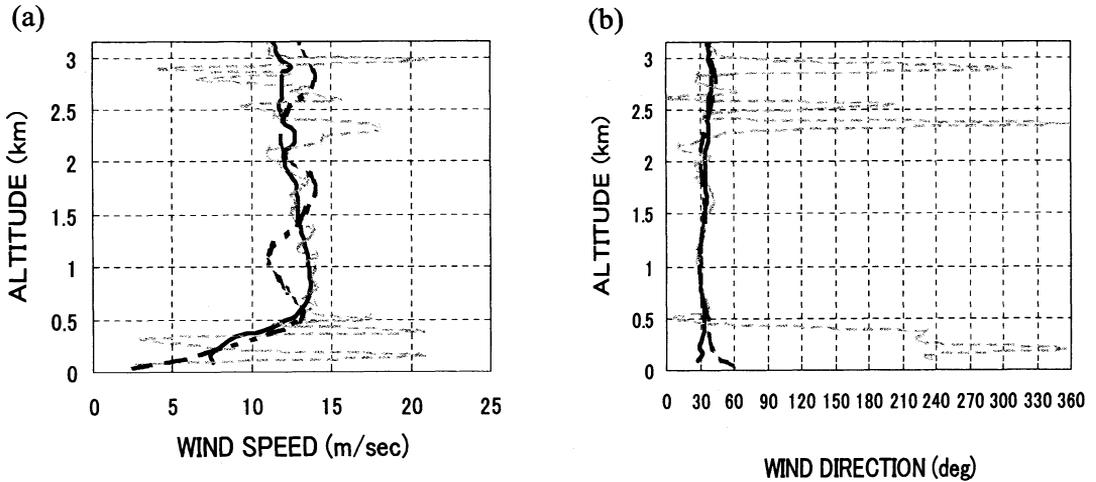
第7図 集合化アルゴリズムにおける系のエネルギー関数の収束。(a) ステップ毎のエネルギー関数, (b) 4番目のレンジゲートでのステップ毎の格子点ポテンシャル, (c) 4番目のレンジゲートでのステップ毎の興奮性結合の係数. 図bとc中には, (270 m, -1.9 m/sec) (実線), (270 m, -3.1 m/sec) (点線), (270 m, 5.5 m/sec) (鎖線) の3つの格子点についてプロットしてある. 方向: 南西, 日時: 2001.8.17 20:40, 場所: つくば.



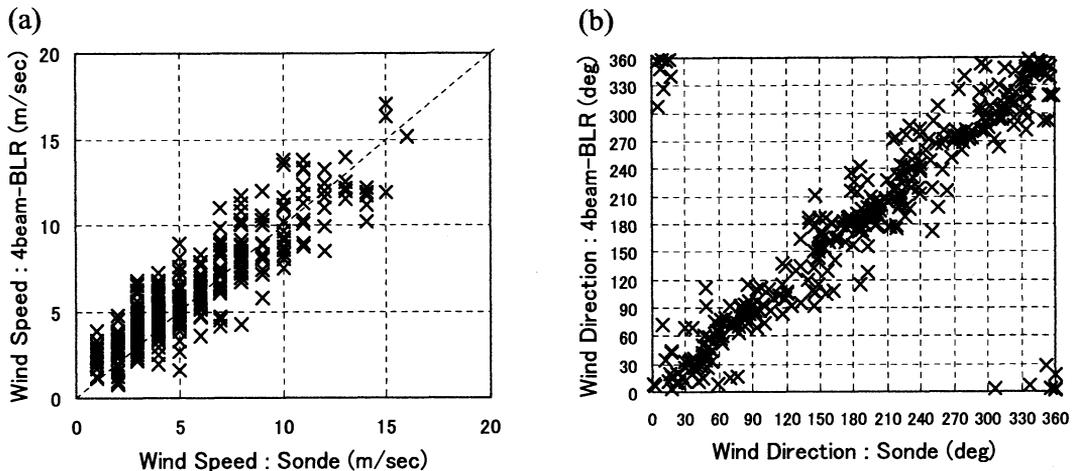
第8図 格子点ポテンシャルと興奮性結合の係数の対比。(a) 4番目のレンジゲートでの格子点ポテンシャルの1回目の値(点線)と系の収束後の値(実線), (b) 4番目のレンジゲートでの興奮性結合の係数の初期値(点線)と系の収束後の値(実線). 方向: 南西, 日時: 2001.8.17 20:40, 場所: つくば.



第9図 4方向の視線速度のプロファイル。(a) 南西, (b) 北西, (c) 北東, (d) 南東. 実線が集合化アルゴリズムを用いた1次モーメントであり, 鎖線が標準的な1次モーメントである. 日時: 2001.8.17 20:40-20:42, 場所: つくば.



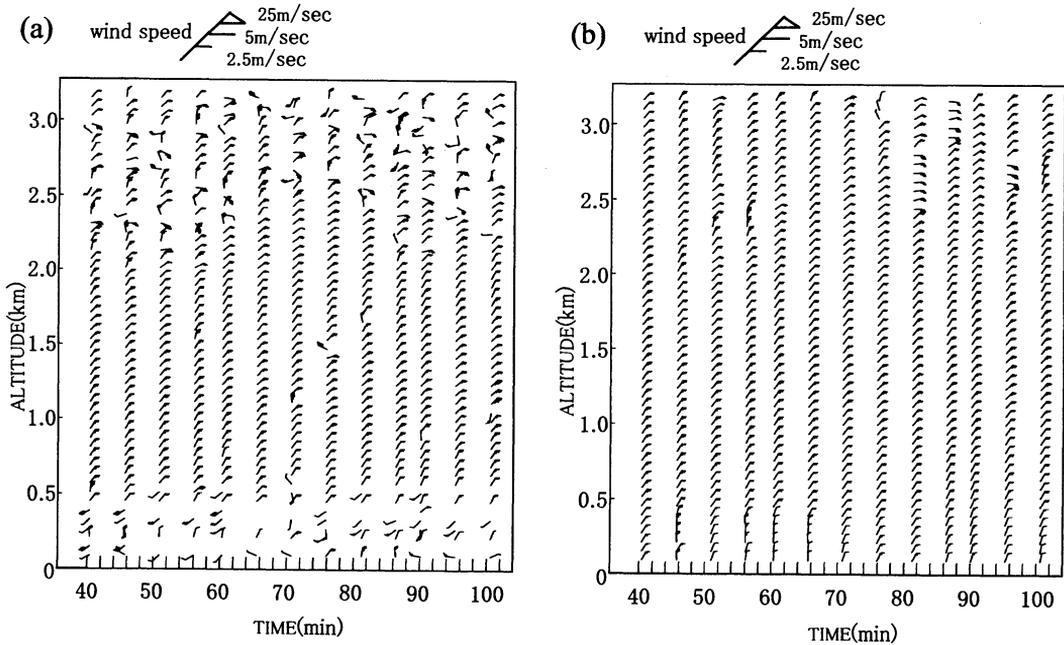
第10図 風速風向プロファイル比較. (a) 風速比較, (b) 風向比較. 実線が集合化アルゴリズムを用いた風データであり, 鎖線が標準的なモーメント法による風データであり, 一点鎖線がゾンデによる風データ (日時: 2001.8.17 20:30, 場所: 館野) である. 日時: 2001.8.17 20:40-20:42, 場所: つくば.



第11図 集合化アルゴリズムによる境界層レーダーデータと65回の高層ゾンデ観測データ (場所: 館野) の比較 (370プロット). (a) 風速比較, (b) 風向比較. 期間: 2001.8.01-2001.8.31, 場所: つくば.

モーメントが適当な推定であったかどうかは, 検証されなければならない. 経験を積んだ解析者によるドップラスペクトルの大気ピークの判定と比較することも可能であるが, SNRが悪い場合には大気ピークの判定が非常に困難なこともある. そこで視線速度を比較検証するのではなく, 高層ゾンデデータ (場所: 館野) と水平風の風向風速を比較することで検証する. 一般的にウィンドプロファイラーのデータの検証では高層ゾンデとの比較がよく行われている (Fukao *et al.*,

1982; Larsen, 1983; Weber and Wuertz, 1990; May, 1993). 第10図 a は第9図の4方向の視線速度から算出した水平風の風速の鉛直プロファイルであり, 第10図 b は水平風の風向の鉛直プロファイルである. 両者は共に, 標準的な1次モーメントよりも集合化アルゴリズムにより求めた1次モーメントからの方が高層ゾンデデータと良い一致を示している. 第10図に見られる高層ゾンデデータと集合化アルゴリズムから求めた水平風とのわずかな相違は, 測定法の違い, 観測



第12図 2種類の方法による風向風速比較。(a) 標準的なモーメント法による風向風速, (b) 集合化アルゴリズムによる風向風速. 期間:2001.8.17 20:40-21:40, 場所:つくば.

時間及び場所のずれ等に起因するものと考えられる。更に、集合化アルゴリズムにおける系の収束条件がクラッター除去に相当であったかどうかを確認するために、65回分の高層ゾンデデータと境界層レーダーデータを比較した。第11図aは風速比較であり、第11図bは風向比較である（共に370プロット）。風速と風向の高層ゾンデとの差の平均（標準偏差）は、それぞれ0.4 m/sec (1.4 m/sec), 1.9 deg (23 deg)であった。約3 km以下の境界層に限定した比較であるが良い一致を示した。

第12図は、2種類の方法で算出した風向風速を比較したものである。データは約5分間隔でプロットしている。集合化アルゴリズムを用いることで、継続的に出現している不自然な風データが改善されていることが分かる。また同様に第13図は、シアを伴う風向風速の例について比較したものである。第13図aでは、0.4 km~0.6 kmにかけて不明瞭になっている風向シアが、同図bでは改善されていることが確認される。

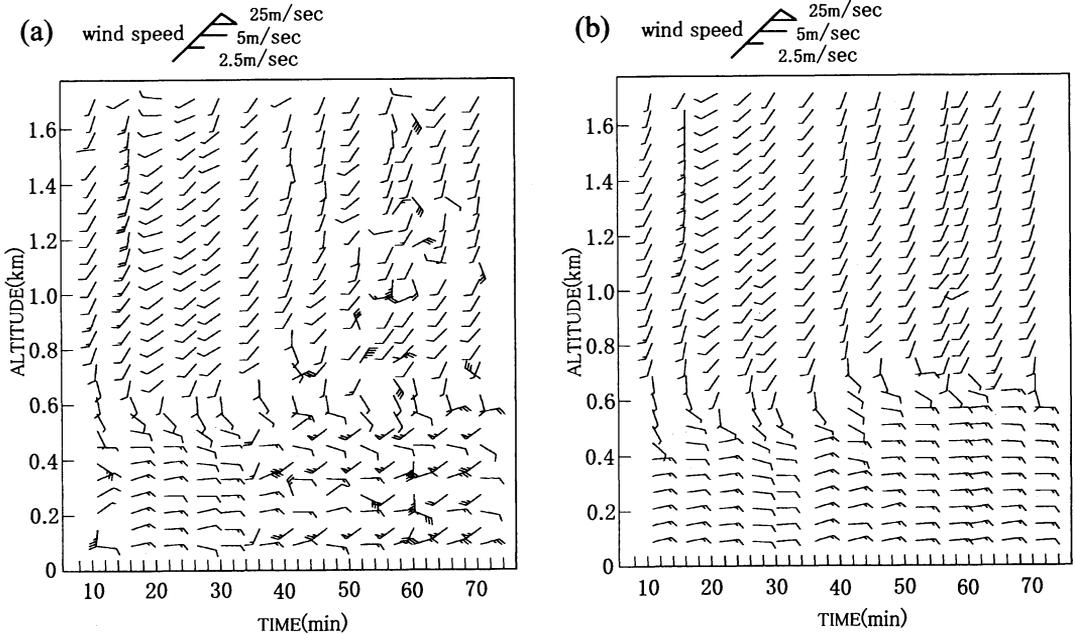
5. 考察

(1) 集合化アルゴリズムにおいて、系の収束条件を満たすまでに繰り返される演算のステップ数は、系の出力の初期値に依存し、除去されるべき不要信号の出

力値が多いほど演算にかかるステップ数は多くなると考えられる。

(2) 系の収束条件を満たした後の出力状態は、元のドップラースペクトルに対してフィルターとしても利用できる。しかし視線速度の推定で、ポテンシャルのピークに依存するモーメントを計算したのは、元のドップラースペクトルから求めるよりも連続的な風のプロファイルを取得することを目的としたからである。

(3) 本論文では、ドップラースペクトルのピーク値とスペクトル幅に関しては扱わなかったが、本手法により求められた視線速度は、それらの値を推定するためのガウス関数を元のドップラースペクトルの大気ピークにフィッティングする際のスペクトルパラメーターの初期値として使用することができる。特にクラッターが混在するドップラースペクトルに対しては、ガウス関数をフィッティングする際に質の良い初期値を用いることが必要であることは広く知られている。また実際の大気スペクトルは必ずしもきれいなガウス型分布であるとは限らないことから、例えば10 log₁₀S_Dに対して2次関数でフィッティングするのが、精度良くピーク値とスペクトル幅を推定するのに有効であると考えられている (Yamamoto *et al.*, 1988)。



第13図 シアを伴う場合の風向風速プロファイル. (a) 標準的なモーメント法による風向風速, (b) 集合化アルゴリズムによる風向風速. 期間: 2001.8.12 20:10-21:10, 場所: つくば.

(4) 本手法での格子モデルは、レンジ及び速度の2次元で処理しているが、時間方向を加えて3次元で扱うことも考えられる。これにより、例えば平均する時間区間のデータが1回の集合化アルゴリズムの演算で得られ、時間方向に対して更に滑らかなデータが取得されると考えられる。

(5) 本手法は大気信号がドップラースペクトル上に存在することを前提としており、大気信号のSNRが非常に悪くスペクトル S_R の平均値以上で見出されない場合には、計算された視線速度はノイズによるものとなる。即ち大気信号を扱えない場合を特に考慮していない。このため、例えば前述したコンセンサスアルゴリズム等を用いた品質管理により、このようなデータを除去することを考える必要がある。

(6) ドップラースペクトルに強い降雨エコーが含まれる場合には、本手法によると降雨のスペクトルを抽出する。弱い降雨時に各レンジゲートで大気ピークが見えたり見えなかったりする場合でも、一般的に大気ピークが相対的に降雨ピークよりスペクトル幅が小さいので、大気ピークがクラッター扱いになり除去され、降雨のスペクトルを抽出すると考えられる。この場合でも、各ビーム方向で様な風が吹き、かつ雨滴の落下速度が均一であれば、水平風の推定は良いと考

えられる。

6. まとめ

本研究で開発した集合化アルゴリズムのモーメント推定の主な特徴は、1節で述べた他のモーメント計算の改良で見られるデータ処理即ち、ドップラースペクトルを平滑化して個々の信号のピークを検出したりスペクトルの形状からこれら信号の特徴を検出する処理の必要が無いことである。境界層レーダーで観測された不特定のクラッターの存在するドップラースペクトルに、集合化アルゴリズムを適用して求めた水平風の風向風速は、標準的なモーメントから計算するよりも高層ゾンデデータと良く一致することを示した。その結果から集合化アルゴリズムは、ウィンドプロファイラーの風速推定精度の改善に資するものと考えられる。

謝辞

この研究は、科学技術振興事業団・戦略的基礎研究「メソ対流系の構造と発生・発達メカニズムの解明」から補助を受けました。高層気象台からゾンデデータの提供を受けました。境界層レーダーとゾンデとの比較では、気象研究所・小林隆久氏から有益なコメント

を頂きました。深く感謝します。

参 考 文 献

- Boisse, J. -C., V. Kaus and J. -P. Aubagnac, 1999 : A wavelet transform technique for removing airplane echoes from ST radar signals, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **16**, 334-346.
- Clothiaux, E. E., R. S. Penc, D. W. Thomson, T. P. Ackerman and S. R. Williams, 1994 : A first-guess feature-based algorithm for estimating wind speed in clear-air Doppler radar spectra, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **11**, 888-908.
- Cornman, L. B., R. K. Goodrich, C. S. Morse and W. L. Ecklund, 1998 : A fuzzy logic method for improved moment estimation from Doppler spectra, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **15**, 1287-1305.
- Fukao, S., T. Sato, N. Yamasaki, R. M. Harper and S. Kato, 1982 : Wind measured by a UHF Doppler radar and rawinsondes : Comparisons made on twenty-six days (August-September 1977) at Arecibo, Puerto Rico., *J. Appl. Meteor.*, **21**, 1357-1363.
- Hildebrand, P. H. and R. S. Sekhon, 1974 : Objective determination of the noise level in Doppler spectra, *J. Appl. Meteor.*, **13**, 808-811.
- Hopfield, J. J., 1982 : Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **79**, 2554-2558.
- Jordan, J. R., R. J. Latatits and D. A. Carter, 1997 : Removing ground and intermittent clutter contamination from wind profiler signals using wavelet transforms, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **14**, 1280-1297.
- Larsen, M. F., 1983 : Can a VHF Doppler radar provide synoptic wind data? A comparison of 30 days of radar and radiosonde data, *Mon. Wea. Rev.*, **111**, 2047-2057.
- Malsburg, C. von der, 1973 : Self-organization of orientation sensitive cells in the striate cortex, *Kybern.*, **14**, 85-100.
- Malsburg, C. von der and W. Schneider, 1986 : A neural cocktail-party processor, *Biol. Cybern.*, **54**, 29-40.
- May, P. T., 1993 : Comparison of wind-profiler and radiosonde measurements in the tropics, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **10**, 122-127.
- May, P. T. and R. G. Strauch, 1998 : Reducing the effect of ground clutter on wind profiler velocity measurements, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **15**, 579-586.
- Merritt, D. A., 1995 : A statistical averaging method for wind profiler Doppler spectra, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **12**, 985-995.
- Miller, P. A., T. W. Schlatter, D. W. van de Kamp, M. F. Barth and B. L. Weber, 1994 : An unfolding algorithm for profiler winds, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **11**, 32-41.
- Morse, C. S., R. K. Goodrich and L. B. Cornman, 2002 : The NIMA method for improved moment estimation from Doppler spectra, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **19**, 274-295.
- Passarelli, R. E., P. Romanik, S. G. Geotis and A. D. Siggia, 1981 : Ground clutter rejection in the frequency domain, *Proc. 20th Conf. On Radar Meteorology*, Boston, Amer. Meteor. Soc., 295-300.
- Pekour, M. S. and R. L. Coulter, 1999 : A technique for removing the effect of migrating birds in 915 MHz wind profiler data, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **16**, 1941-1948.
- Russel, C. A. and J. R. Jordan, 1991 : Portable clutter fence for UHF wind profiling radar, Preprint, Seventh Symposium on Meteorology Observation and Instrumentation, 1991, Jan. J152-J156.
- Sompolinsky, H., D. Golomb and D. Kleinfeld, 1990 : Global processing of visual stimuli in a neural network of coupled oscillators, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **87**, 7200-7204.
- Sporns, O., G. Tononi and G. M. Edelman, 1991 : Modeling perceptual grouping and figure-ground segregation by means of active reentrant connections, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **88**, 129-133.
- Weber, B. L. and D. B. Wuertz, 1990 : Comparison of rawinsonde and wind profiler radar measurements, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **7**, 157-174.
- Weber B. L., D. B. Wuertz and D. C. Welsh, 1993 : Quality controls for profiler measurements of winds and RASS temperatures, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **10**, 452-464.
- Yamamoto, M., T. Sato, P. T. May, T. Tsuda, S. Fukao and S. Kato, 1988 : Estimation error of spectral parameters of mesosphere-stratosphere-troposphere radars obtained by least squares fitting method and its lower bound, *Radio Sci.*, **23**, 1013-1021.

Improvement of Wind Speed Estimation with Boundary Layer Radar Using a Grouping Algorithm

Masahiro SASAOKA

*Meteorological Satellite and Observation System Research Department,
Meteorological Research Institute, Tsukuba 305-0052, Japan.
msasaoka@mri-jma.go.jp*

(Received 22 July 2002 ; Accepted 21 January 2003)

Abstract

Developed is a new method of moment estimation applied to a wind profiler that measures Doppler spectra as a function of range in order to reject some clutter noise that corrupts the wind measurements. This method is based on lattice model inspired by both self-organization and Hopfield model in the neural network field and detects atmospheric signals in Doppler spectra to estimate radial velocity. Radial velocity estimated using this method from clutter-contaminated spectral data measured by a boundary layer radar showed a very smooth change along range. It was found that (1) horizontal winds converted from the radial velocity were more continuous in space and in time than those from conventional estimates and showed wind shear clearly ; and (2) horizontal wind showed good agreement with rawinsonde-wind.



第44回科学技術映像祭入選作品発表会

年間の優秀科学映像を決める科学技術映像祭の入選作品を一挙上映。最高賞の内閣総理大臣賞には NHK が製作した『深海のバンパイア』が授賞。深さ千 m 前後の酸素がほとんどない層にすむ幻のコウモリダコの撮影に、世界で初めてハイビジョンカメラを搭載した潜水艇が挑んだ作品。他に、すばる望遠鏡建設の12年を記録した『未知への航海』（国立天文台）、『破骨細胞の一生』（旭化成）、ERATO 近藤誘導分化プロジェクト『生命が形をつくるとき』、国内外の先端機関を取材した『再生医学』（JST）、『田中耕一さんノーベル賞を

決めた新発見』（NHK）など14作品が文部科学大臣賞を受賞した。

日 程：4月17（木）・18日（金）（入場無料）

会 場：科学技術館・サイエンスホール
（千代田区北の丸公園2-1）

交 通：地下鉄竹橋駅・九段下駅徒歩7分
[問] 日本科学技術振興財団・振興部
Tel：03-3212-2454

URL：

<http://ppd.jsf.or.jp/shinko/pro/s-m/index.htm>