

2つのパルス繰り返し周波数によるデータを用いた ドップラー速度折り返し補正のための「複合アルゴリズム」*

楠 研一^{*1}・鈴木 修^{*2}・大野久雄^{*3}

要 旨

ドップラーレーダーにより観測された大気現象のドップラー速度場を折り返し補正するための新アルゴリズムを開発した。折り返しによる不連続性を検出して補正する「連続性法」に、単位セクター毎に2種類のパルス繰り返し周波数 (PRF) を切り替えて得られたドップラー速度情報をもとに折り返し補正する「単純な Dual PRF 法 (SDP法)」を組み込んだ、「複合アルゴリズム」である。

このアルゴリズムは、ドップラー速度領域のうち、SDP法では正しく折り返し補正できない領域に対する除去プロセスを施し、SDP法を連続性法に必要な Valid Data 作成ツールとして利用していることが特徴である。

従来の連続性法は、Valid Data として通常は高層データなどの風情報が必要である。それに対し当アルゴリズムはドップラー速度データだけで一連の閉じた直接処理が可能である。そのため折り返し補正の自動化に適している。更に従来の連続性法が苦手としてきた、局所的に風の変化の大きいメソスケール現象のドップラー速度場の折り返し補正が精度良くできる。

このアルゴリズムを実際の観測データに適用した結果、ドップラー速度場は自動的に完全に折り返し補正できた。

1. はじめに

ドップラー気象レーダーは現在、研究を目的としたものや航空機の安全運航に代表される防災を目的とした現業用のものが次々と展開されつつある。ほとんどのドップラー気象レーダー (以下、ドップラーレーダー) はパルス式ドップラーレーダーで、ナイキスト速度 (測定されるドップラー速度の最大値) V_{nyq} と観測レンジの最大値 R には、

$$V_{nyq} \cdot R = c\lambda/8$$

の関係がある (Doviak and Zrnić, 1993)。電波の速度 c は常数、電波の波長 λ も通常固定されているため、 V_{nyq} 、 R のうち一方の値を大きく取ろうとするともう一方の値を小さくせざるを得ず (ドップラージレンマ)、両者を自由に大きく取ることができない。気象研究所Cバンドドップラーレーダーでは V_{nyq} は 16.0 m/s である。真のドップラー速度が V_{nyq} を超えると、ドップラー速度の「折り返し」が起こり真のドップラー速度と異なる値が観測される。

さて、ダウンバースト・メソサイクロン・ガストフロント・台風などのシビアな現象は、研究上でも防災上でも興味ある観測対象として注目されているが、これらの現象は風速の大きな領域を伴う場合が多い。ドップラーレーダーで観測すると、これらの風速の大きな領域ではドップラー速度の「折り返し」が起こりやすい。そのため現象の真のドップラー速度場が得られず、解析や検出に支障が出る。現象の解析や検出を正しく行うための第1歩として、大気現象の真のドップラー速度場を得るため、折り返されたドップラー速度を真のドップラー速度に戻す、いわゆる「折り返し

* Hybrid algorithm for Doppler velocity unfolding with dual PRF data.

*¹ Kenichi Kusunoki, 気象研究所気象衛星・観測システム研究部.

*² Osamu Suzuki, 気象研究所気象衛星・観測システム研究部.

*³ Hisao Ohno, 気象研究所気象衛星・観測システム研究部 (現: 気象庁観測部).

—1995年9月8日受領—

—1996年7月31日受理—

補正」を行う必要がある。

米国の NEXRAD (NEXT generation RADar: 次世代レーダー) や TDWR (Terminal Doppler Weather Radar: 空港ドップラー気象レーダー) に採用されている折り返し補正の方法に、空間的に連続したエコーに対し、折り返しによってできたドップラー速度分布の不連続を検出、不連続が解消するようにドップラー速度の値を修正し、真のドップラー速度場を求めようとする方法がある(例: Wieler, 1991; Hondl and Eilts, 1993). この論文ではこの方法を「連続性法」と呼び、2節で詳述する。この方法には、高層データなど、ドップラー速度の値を真の値に折り返し補正するために参考となる風情報(この論文では「Valid Data」と呼ぶ)が必要である。ただし、局所的に風の変化の大きいメソスケール現象の場合は、その風場に対して適切な Valid Data を与えるのは困難であり、正しく折り返し補正されない場合がある。

一方連続性法とは別に、パルス繰り返し周波数(PRF)を、パルス毎、または一定走査角度幅(PPI: 方位角, RHI: 仰角)毎、またはスキャン毎に交互に切り替え、観測されたドップラー速度情報をもとに折り返し補正する方法が提案され、Dual PRF法、Dual PRF法、Alternative PRF法、Staggered PRF法などと言われている(Ekengren and Dahlbrg, 1984; Dazhang *et al.*, 1984; Zrnić and Mahapatra, 1985; Keeler and Passarelli, Jr., 1990; Suzuki *et al.*, 1993; Ishihara and Hata, 1995). 気象研究所Cバンドドップラーレーダーを含む複数のレーダーでは、2種類のPRFを一定方位角度幅毎に交互に切り替えて観測し(以下、Dual PRF観測と呼ぶ)、異なるPRFで観測された隣接するドップラー速度データとの差をもとに折り返し補正する方法を取っている(Ekengren and Dahlbrg, 1984; Dazhang *et al.*, 1984; Suzuki *et al.*, 1993; Ishihara and Hata, 1995). 気象研究所の場合、このPRFの切り替えは方位角分解能にあたる 1.06° 毎の角度幅(以下、この論文では単位セクターと呼ぶ)毎に行っている。この論文ではこの折り返し補正法をSimple Dual PRF法(SDP法)と呼び、3.1で詳述する。この折り返し補正法には、①現象の持つ風の強いシアのために隣接するデータとの差がある値以上大きくなる(気象研究所Cバンドドップラーレーダーの場合は差が 3.2 m/s 以上)場合、②差を取るべき隣接データがない場合、③差を取るべき隣接データが測定誤差等で異常値の場合、折り返し補

正が正しくできないという限界がある(以上、3.2で詳述)。

我々は、上記の2つの折り返し補正法の欠点を克服するため、連続性法にSDP法を組み込んだ新しい折り返し補正アルゴリズム「複合アルゴリズム」を開発した。当アルゴリズムは、従来の連続性法が苦手としてきた、局所的に風の変化の大きいメソスケール現象のドップラー速度場の自動的な折り返し補正が精度良くできる。また、SDP法の欠点として述べた①、②、③も克服されている。このような長所を持つことから、当アルゴリズムは1995年に利用が開始された我が国の空港気象ドップラーレーダーに組み込まれ、運用されている。

次章以下で、当アルゴリズム中で用いる2つの折り返し補正法である連続性法・SDP法、そしてこれらを組み込んだ複合アルゴリズムの概要を説明する。さらに実際の大気現象へ適用して折り返し補正が自動的に完全に行われたことを示す。

2. 連続性法

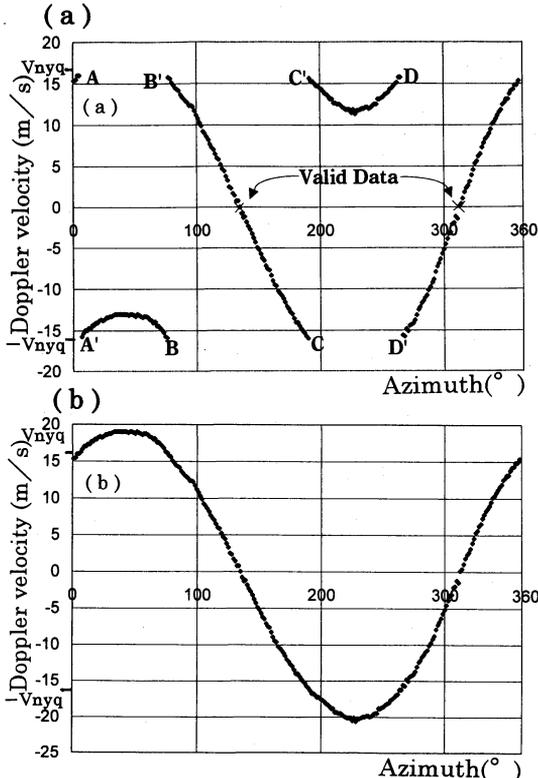
2.1 原理

ドップラーレーダー固有のナイキスト速度を V_{nyq} とする。真のドップラー速度が V_{nyq} を超えるとドップラー速度の折り返しが起こり、観測されるドップラー速度は真の値に対して $2V_{nyq}$ の整数倍($2nV_{nyq}$)だけ足したり引いたりされた、 $-V_{nyq} \sim V_{nyq}$ の範囲内の値になる。例えば、真のドップラー速度を Vt 、観測されるドップラー速度を Vo とすると、 $V_{nyq} < Vt < 3V_{nyq}$ の場合、

$$Vo = Vt - 2V_{nyq}$$

となる。このように、折り返しが起こるとドップラー速度場はその部分で $2nV_{nyq}$ 不連続に跳ぶ分布になる。

このような折り返されたドップラー速度データを補正する「連続性法」について説明する。ドップラー速度場のある領域にValid Dataが与えられているものとする。Valid Dataに隣接する1点を考え、この点で観測されたドップラー速度の値がValid Dataの値に比べてほぼ $2nV_{nyq}$ 不連続に跳んでいるなら、この不連続はドップラー速度の折り返しによって起こったものとする。そして、この不連続な値をデータの周囲のドップラー速度と最も近くなるように、 $2nV_{nyq}$ 足し引きする事によってドップラー速度分布の不連続性を解消する、という操作を行う。この操作を施した値



2045 JST March 13, 1989 EL = 23.6° Range = 64 km

第1図 (a) 気象研究所Cバンドドップラーレーダーにより観測されたドップラー速度場 (1989年3月13日20時45分) のVAD. 横軸は方位角, 縦軸はドップラー速度. (-) がレーダーに近づくドップラー速度, (+) がレーダーから遠ざかるドップラー速度を表す. A-A', B-B', C-C', D-D' に折り返しによる値の不連続がみられる. A'-B, C'-D が折り返しの起こっている領域. ×印 (ドップラー速度 0 m/s) が本事例の Valid Data. (b) 連続性法により折り返し補正された結果.

を新たな Valid Data とし, 同様に隣接する点にこの操作を行う. この一連の操作を空間的につながつているドップラー速度場全体に対して行う. このように, Valid Data をもとに, それを与えられた領域から出発して全体のドップラー速度の分布の不連続性を全て解消してドップラー速度場の分布を連続的にすることで, 折り返し補正が行われた, と考える.

以上のことを, 1989年3月13日20時45分に気象研究所Cバンドドップラーレーダーで観測されたドップラー速度場をもとに説明する. 第1図aに観測されたドップラー速度のVADを示す. 図中に矢印で示した

ドップラー速度 0 m/s の点が, 本事例の Valid Data である. A-A', B-B', C-C', D-D' に, 各々 $2V_{nyq}$ ($V_{nyq} = 16.0$ m/s), 値が不連続に跳んでいる部分が見られる. A'-B, C'-D が折り返しの起こっている領域である. Valid Data を出発点とし, 不連続な値をデータの周囲のドップラー速度と最も近くなるように, $2nV_{nyq}$ を足し引きする事によって, ドップラー速度分布の不連続性を解消する, という操作を全体に行った結果が第1図bである. 観測されたドップラー速度場が折り返し補正されたことがわかる.

2.2 連続性法による折り返し補正の限界

Valid Data として用いられるものには, ①ゾンデやVAD法で求めた高層風データ, ②レーダーサイト近傍で正負が切り替わる境目のドップラー速度0の値 (サイトを覆っているエコーに限る) など, がある. レーダーサイトを覆っていないエコーには②がないため, ①の風情報を与える必要がある. しかし①についても, ダウンバースト・メソサイクロン・局地前線のように局所的に変化の大きい風系を持つ現象に対しては, ゾンデによる細かい観測データが得られことは少なく, VAD法により求めた高層風にも誤差が多いため (Hondl and Eilts, 1993), 風系を代表する Valid Data を与えるのは困難であり, 正しく折り返し補正されない場合がある.

3. SDP 法

3.1 原理

2種類の異なるパルス繰り返し周波数 (PRF 1, PRF 2 とする) で, ある運動体のドップラー速度を観測したとする. 観測されるドップラー速度を各々 V_1 (PRF 1 で観測), V_2 (PRF 2 で観測) とする. PRF 1, PRF 2 の比を $N_1 : N_2$ (N_1, N_2 は整数) とすると, 各々のナイキスト速度は,

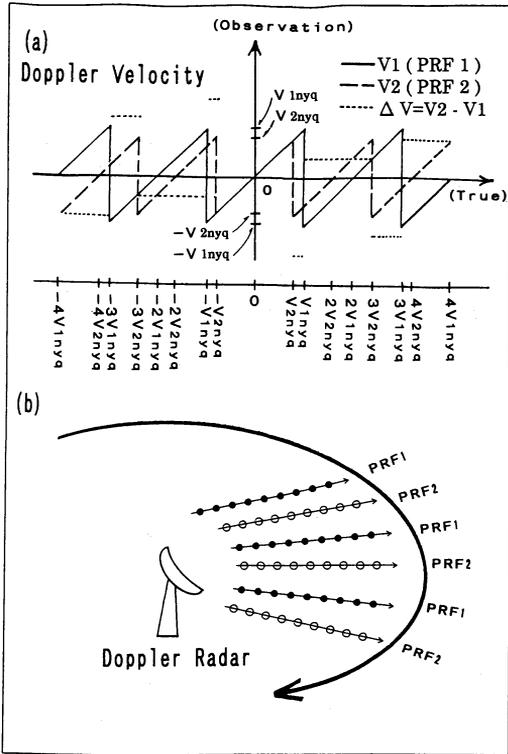
$$V_{1nyq} = \text{PRF} 1 \cdot \lambda / 4$$

$$V_{2nyq} = \text{PRF} 2 \cdot \lambda / 4$$

である. 第2図aに, 真のドップラー速度と観測されるドップラー速度との関係を示す. 真のドップラー速度が $\pm V_{1nyq}$ や $\pm V_{2nyq}$ の範囲を超えると折り返しが発生する. ここで, ある真のドップラー速度につき, V_{1nyq} と V_{2nyq} が異なることから, 観測されるドップラー速度 V_1 と V_2 は各々異なり, 差

$$\Delta V = V_2 - V_1$$

が生じる. ここで ΔV は,



第2図 (a) 真のドップラー速度(横軸)と、2種類の異なるパルス繰り返し周波数 (PRF 1, PRF 2) で観測されるドップラー速度(縦軸)の関係。 V_1 は PRF 1 で観測されるドップラー速度(実線), V_2 は PRF 2 で観測されるドップラー速度(破線), ΔV は差 $V_2 - V_1$ (点線) を各々示す。(b) 2種類の異なるパルス繰り返し周波数 (PRF 1, PRF 2) での大気現象の観測の方法。単位セクター毎に PRF 1, PRF 2 を交互に切り替える。矢印付きの細い線分は PRF 1, PRF 2 と交互に切り替えられた単位セクターを表し、単位セクター上のデータを各々● (PRF 1 でのデータ), ○ (PRF 2 でのデータ) で模式的に示す。

$$\Delta V_0 = 2 V_{1nyq} / N_1 = 2 V_{2nyq} / N_2 \tag{1}$$

で表される最小単位 ΔV_0 の整数倍の値となる。

さて、あるドップラー速度範囲内 ($-V_{max} \sim V_{max}$) では、ある1つの ΔV に対し、1つの真のドップラー速度の領域が対応している。すなわちこの範囲内 ($-V_{max} \sim V_{max}$) では、 ΔV は折り返しの情報を含んでいるから、得られた V_1 と ΔV , あるいは V_2 と ΔV から、 $-V_{max} \sim V_{max}$ の範囲内でドップラー速度を決定

することができる。 V_{max} は、

$$V_{max} = N_2 \cdot V_{1nyq} = N_1 \cdot V_{2nyq} \tag{2}$$

で与えられる。すなわち、本来は各々ドップラー速度 V_{1nyq} , V_{2nyq} までしか観測できないものを組み合わせることで、観測されるドップラー速度の測定可能最大値を V_{max} に拡張することが可能となる。 V_{max} が運動体の真のドップラー速度に比べ大きいならば、折り返し補正が行われたのと同じことになる。

以上のことを用い、大気現象のドップラー速度場を折り返し補正する SDP 法について説明する。まず、2種類の PRF を単位セクター毎に交互に切り替えてドップラー速度を観測する(第2図b)。隣り合う単位セクター間では、真のドップラー速度に大きな差はないと考え、隣接するデータの間で観測されたドップラー速度の差を取り、これを上記 ΔV と考え、上で述べた関係を使ってドップラー速度を計算することで、観測最大値を拡大することができる。気象研究所Cバンドドップラーレーダーの場合、

$$\begin{aligned} \text{PRF 1 : PRF 2} &= 1120 \text{ (Hz) : } 896 \text{ (Hz)} \\ &= N_1 : N_2 = 5 : 4 \end{aligned}$$

$$V_{1nyq} = 16.0 \text{ m/s}, \quad V_{2nyq} = 12.8 \text{ m/s}$$

なので、

$$V_{max} = 64.0 \text{ m/s}, \quad \Delta V_0 = 6.4 \text{ m/s}$$

となる。すなわち、観測されるドップラー速度の測定可能最大値を 64.0 m/s に拡大することが基本的に可能となり、折り返し補正が行われたのと同じことになる。

3.2 SDP 法による折り返し補正の限界

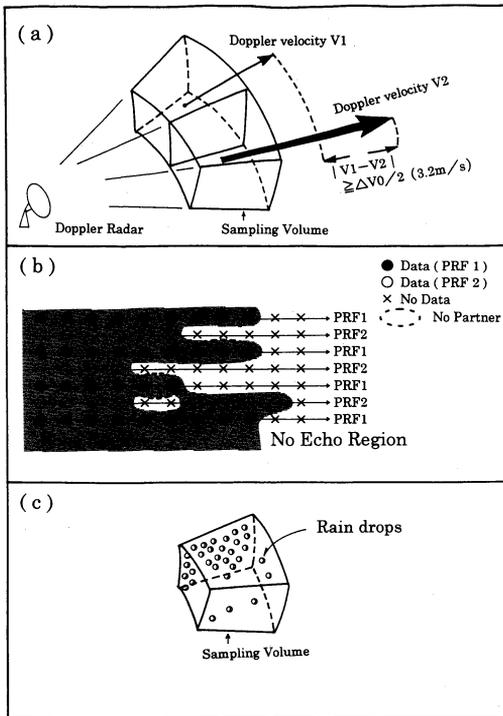
観測されるドップラー速度のうち、SDP 法により正しく折り返し補正されない場合が3通りある。

(1) 現象が強い風のシア (Strong Shear) を持つため、隣接する単位セクターのデータの真のドップラー速度の差が、最小単位 ΔV_0 の1/2より大きくなってしまう場合。シアによるドップラー速度の差と折り返しによって生じる差との区別がつかなくなるため、折り返し補正のための差 ΔV の正しい情報が得られなくなり、正しい折り返し補正ができない。気象研究所Cバンドドップラーレーダーではその値は、

$$\Delta V_0 / 2 = 3.2 \text{ m/s}$$

である(第3図a)。

これを防ぐには、 ΔV_0 を大きく取れば良い。そのためには2つの PRF (比 $N_1 : N_2$, $N_1 > N_2$) を選択する際に、式(1)から例えば N_1 を小さく取ればよいが、



第3図 SDP法で折り返し補正されない原因。
 (a) 現象の持つ風の強いシアのために隣接するデータとの差が、ある値以上大きくなる（気象研究所Cバンドドップラーレーダーの場合は差が3.2 m/s以上ある）場合、2本の矢印がサンプリング体積（2つの箱で表示、各々の単位セクター上のデータに対応）のドップラー速度データを示す。(b) 差を取る隣接データがない場合、矢印付きの細い線分はPRF1、PRF2と交互に切り替えられた単位セクターを表し、単位セクター上のデータを各々●（PRF1でのデータ）、○（PRF2でのデータ）、×（データ無し）で示す。ハッチ領域がデータのある、すなわちエコー領域である。隣接データがない領域を破線で囲む。(c) 差を取るべき隣接データが、異常値の場合、サンプリング体積（2つの箱で表示、各々の単位セクター上のデータに対応）の内部に降水粒子が偏在していることを示す。

その場合は式(2)から V_{\max} が小さくなる。すなわち、 ΔV_0 、 V_{\max} のうち一方の値を大きく取ろうとするともう一方の値を小さくせざるを得ず、両者を自由に大きく取ることができない。このことから Suzuki *et al.* (1993) は、ドップラーレーダーに Dual PRF 機能を付加し、強い風のシアを持つ現象の折り返し補正を

Dual PRF 法で行う場合、観測上受け入れられる範囲内で V_{\max} をなるべく小さく取り、その分 ΔV_0 をなるべく大きく取ることが望ましい、と主張している。

(2) 隣接するデータ同士で差を取るため、ドップラー速度場の分布が途切れて差を取るべき隣接データがない場合 (No Partner) は折り返し補正できない (第3図b)。

(3) 隣接データが測定誤差等により異常値である場合、正しい差の情報 ΔV は得られなくなり、折り返し補正できない。この原因としては、サンプリング体積内に降水粒子が偏在している領域や降水粒子の少ない領域など、S/N比の低下などによるドップラー速度測定誤差が考えられる。これらはエコーの縁 (Echo Boundary) に存在することが多い (第3図c)。

このように、SDP法では正しく折り返し補正されない領域が残ってしまうという限界がある。

4. 複合アルゴリズム

4.1 概要

複合アルゴリズムのフローチャートを第4図に示す。Dual PRF 観測されたドップラー速度データ (第4図 Start) につき、

(1) SDP法による Valid Data の作成 (第4図 (1))

(2) 作成された Valid Data を用いた連続性法による折り返し補正 (第4図 (2))

という2つの処理を行い、折り返し補正されたドップラー速度データ (第4図 Goal) を得るという流れになっている。SDP法、連続性法2つの折り返し補正法を用いる複合構造を持つことが特徴である。以下で (1)、(2) について説明する。

(1) SDP法による Valid Data の作成 (第4図 (1))

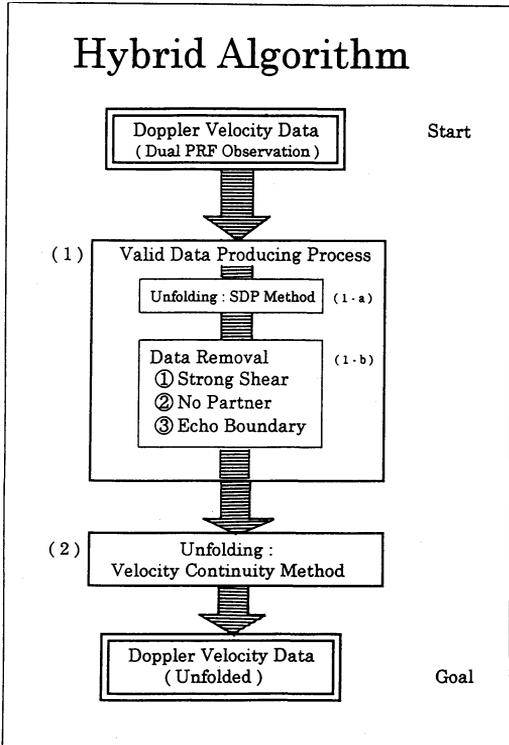
まず最初に、Dual PRF 観測されたドップラー速度データ (第4図 Start) を SDP法で折り返し補正する (第4図 (1-a))。

次に、3.2で述べた SDP法で折り返し補正が正しくできない領域を除去する (第4図 (1-b))。これらの領域を第5図に示す。すなわち、

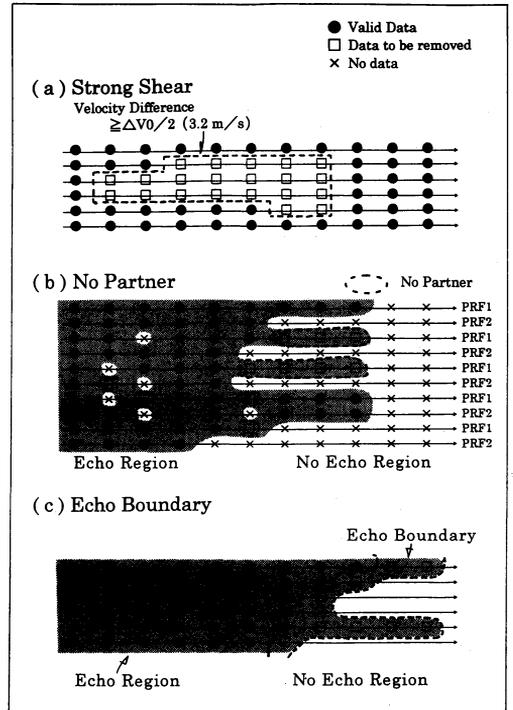
① Strong Shear : 現象の持つ風の強いシアのために隣接するデータとの差が、ある値以上大きくなる (気象研究所Cバンドドップラーレーダーの場合は、差が3.2 m/s以上) 領域 (第5図a)。

② No Partner : 差を取るべき隣接データがない領域 (第5図b)。

③ Echo Boundary : エコーの縁の領域 (第5図c)。



第4図 複合アルゴリズムのフローチャート. 観測されたドップラー速度データ (Start) から, (1)SDP 法による Valid Data の作成, (2)連続性法による折り返し補正という2つの処理により, 折り返し補正されたドップラー速度データを得る (Goal).



第5図 Valid Data を作成するために除去する領域. 矢印付きの細い線分は単位セクター, ●は Valid Data, □は除去データを表す. □を囲んだ破線の領域が除去される. (a)現象の持つ風の強いシアのために隣接するデータとの差が, ある値以上大きくなる (気象研究所Cバンドドップラーレーダーの場合は差が 3.2 m/s 以上) 領域. (b) 両隣に差を取るべきデータがない領域. (c) 異常値の場合が多く見られるエコーの縁の領域 (破線で挟まれた領域).

隣接データが測定誤差等で異常値となることが多いため, 本当に異常値かどうかはともかくエコーの縁のデータはすべて除去している.

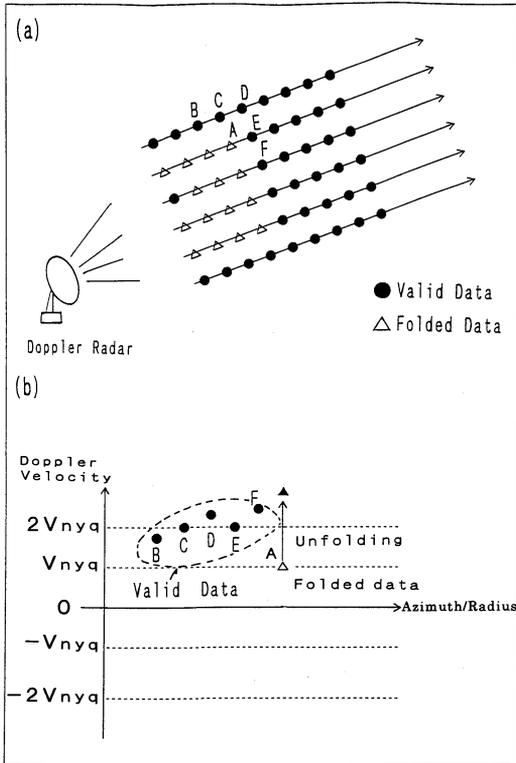
①, ②, ③を除去して正しく折り返し補正できたとと思われる領域のみを抽出し, その領域の値を Valid Data とする.

(2) 作成された Valid Data を用いた, 連続性法による折り返し補正 (第4図 (2))

(1) で作成した Valid Data を用い, (1) で除去されたドップラー速度データを連続性法により補正する. その方法を第6図に示す. 折り返しの起こっている1点Aを, Aの周りの Valid Data (B~F) をもとに折り返し補正することを考える (第6図a). 点Aのドップラー速度の値が, Valid Data (B~F) のドップラー速度の平均値に比べ, $2 V_{nyq}$ のほぼ整数倍不連続に跳んでいるなら, この不連続はドップラー速度の折

り返しによって起こったものとする. ここで V_{nyq} は, このビームのナイキスト速度である. 次に, この不連続な値をその周囲の Valid Data の値と最も近くなるように, $2 V_{nyq}$ の整数倍の値を足し引きする事によってドップラー速度分布の不連続性を解消する, という操作を行う (第6図b). この一連の操作をドップラー速度場全体に対して行う. その結果, 折り返し補正されたドップラー速度データを得る (第4図 Goal).

以上が複合アルゴリズムの概要である. 一般の折り返し補正法の1つとして用いられてきた SDP 法を, 正しく折り返し補正されない領域 (①, ②, ③) の除去プロセスを施すことにより, 連続性法に用いる Valid Data 作成ツールとして利用していることが特



第6図 複合アルゴリズムで用いる連続性法。
(a) 矢印つきの細い線分は単位セクター、●は Valid Data, △は折り返されたデータを表す。折り返されたデータAの周りの Valid Data (B, C, D, E, F) を用い、Aを折り返し補正する。(b) 横軸にデータの位置、縦軸にドップラー速度をとる。Aの周りの Valid Data (B, C, D, E, F) のドップラー速度の平均値をA近傍を代表するドップラー速度の値を考え、Aのドップラー速度をこの値に近づけるように折り返し補正する。

徴である。

4.2 実際の大気現象への適用例

複合アルゴリズムの実際の大気現象への適用例として、第7図に1993年9月4日07時36分に気象研究所Cバンドドップラーレーダーで観測されたメソサイクロンの事例を示す。(a) 観測されたドップラー速度場、(b) 作成された Valid Data, (c) 折り返し補正された結果である。

第7図aにはレーダーに近づくドップラー速度(-)を表す青色(-8 m/s~-4 m/s)や紫色(-12 m/s~-8 m/s)が交互に並んだ縞状のパターンが見られる。このパターンの領域が折り返しの起こっている領

域である。この(a) 観測されたドップラー速度場をSDP法で折り返し補正し、さらに4.1で述べた正しく折り返し補正できない領域(①, ②, ③)を除去してできたのが、第7図bである。続いて(b) Valid Dataを用い、観測されたドップラー速度場を連続性法により折り返し補正した結果が第7図cである。中央に並んだ黄色と赤色の2つの楕円形のペアがメソサイクロンのパターンである。ドップラー速度場全体に不連続はなく、正しく折り返し補正されていることがわかる。

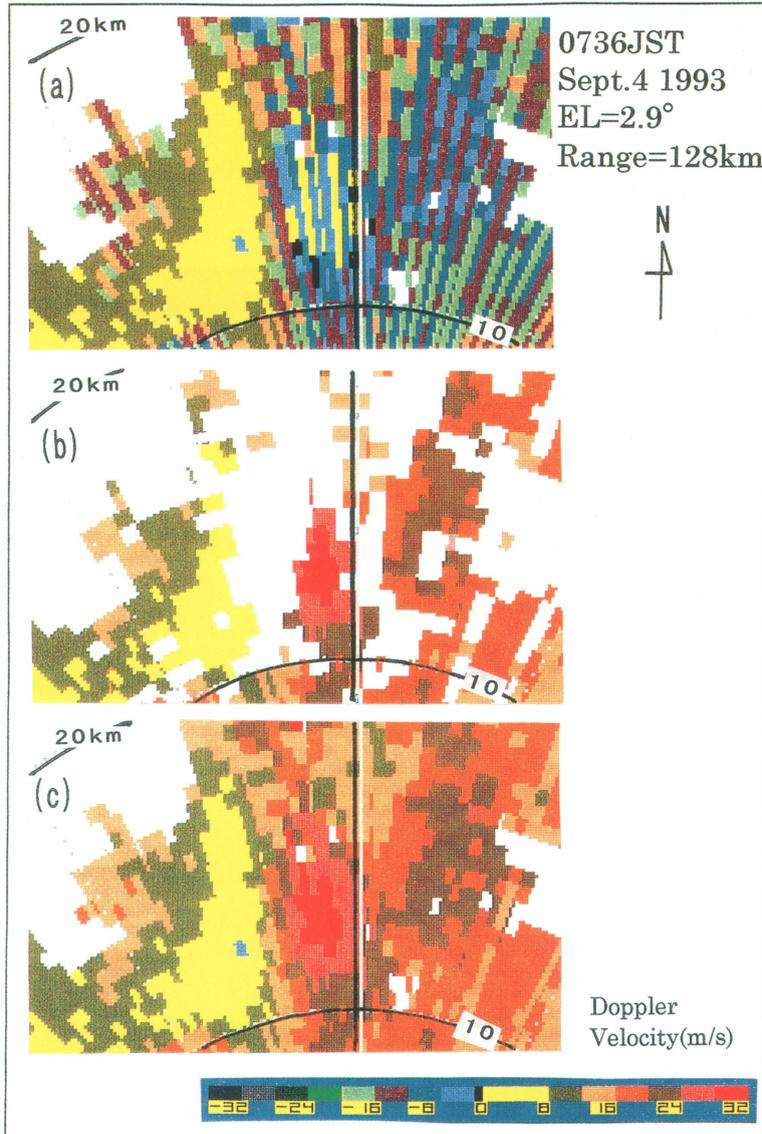
第8図に当アルゴリズムによる折り返し補正の過程を示す。折り返されているドップラー速度データ数を縦軸に、折り返し補正の過程を横軸に示す。観測されたドップラー速度データ中、折り返されているドップラー速度データは 1.2×10^4 個ある(第8図点A)。SDP法で折り返し補正した結果、折り返されているドップラー速度データは減少するものの 1.3×10^3 個残っている(第8図点B)。複合アルゴリズムによりこれらがすべて折り返し補正されたことを示す(第8図点C)。

5. 議論

4.1で述べたように、当アルゴリズムは後半部分で連続性法による折り返し補正を行う。その際、一つながりに連続しているエコーの各領域に Valid Data が少なくとも1個存在していれば、それに基づいて正しい折り返し補正が可能である。降水エコーは通常その条件を満たしているため、当アルゴリズムは局所的に風の変化の大きいメソスケール現象のドップラー速度場の折り返し補正にも極めて有効に働くことを、メソサイクロンへの適用例などを通して述べてきた。

降水を伴う現象のみならず、晴天下のガストフロント、海風前線、雷雨発生を引き金となる収束帯など、晴天下においても局所的に風の変化の大きいメソスケール現象が存在し、ドップラーレーダーで観測される晴天エコーはこれらの現象を捉えるのに有効であると報告されている(Wilson and Schreiber, 1986; Ohno and Suzuki, 1989; Wilson *et al.*, 1994)。

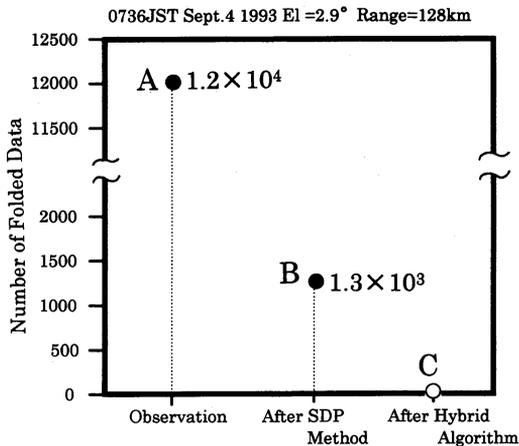
しかしながら、晴天エコーは降水エコーに比べて一般にS/N比が悪いための測定誤差などによる異常値が多く、またある程度領域が連続している降水エコーと異なり、離散的に分布する微小なエコーの集合体として観測されることが多い。そのため晴天時の局所的に風の変化の大きいメソスケール現象のドップラー速度場は、降水時のそれにも増してSDP法や従来の連続性法での折り返し補正が困難である。



第7図 複合アルゴリズムの実際の気象現象への適用例。1993年9月4日07時36分に気象研究所Cバンドドップラーレーダーで観測されたメソサイクロンの事例。距離のマーカーは10km毎。(−)がレーダーに近づくドップラー速度、(+)がレーダーから遠ざかるドップラー速度を表す。ドップラー速度(m/s)のスケールは図の下端に示す。(a)観測されたドップラー速度場。(b)Valid Data。(c)折り返し補正結果。図中央の、黄色と赤色の楕円形のペアがメソサイクロンのパターン。

先に述べたように、当アルゴリズムは晴天エコーについても、離散的な個々の微小エコー中にValid Dataが少なくとも各1個存在していれば連続性法により正しく折り返し補正できる。しかしこれらの微小エコーの中には、強いシアのある領域のデータや測定誤差な

ごによる異常データが大部分を占めていたり、少ない数のデータで構成されているなどの理由で、除去プロセスによって構成データがすべて除去されてしまいValid Dataが1つも残らない場合があり得る。従って晴天エコーのドップラー速度場では、このような微小



第8図 複合アルゴリズムによって、折り返されたデータが折り返し補正される過程。1993年9月4日07時36分に気象研究所Cバンドドップラーレーダーで観測されたメソサイクロンの事例。縦軸はドップラー速度場全体のうち折り返されているドップラー速度データの数を表す。各点は観測されたドップラー速度場(点A)、SDP法での折り返し補正後(点B)、複合アルゴリズムでの折り返し補正後(点C)の値を示す。

エコーのドップラー速度データの折り返し補正が正しく行われないう問題がある。

これは当アルゴリズムで用いているSDP法、連続性法において、折り返し補正に関する計算を主として隣接するデータ間でのみ行っていることに起因している。晴天エコーのドップラー速度場の折り返し補正をより精度良く行うためには、折り返し補正に関する計算をより広い領域で行うなどの改良を行う必要がある。

6. 結論

連続性法にSDP法を組み込んだ新しい折り返し補正アルゴリズム「複合アルゴリズム」を開発した。

SDP法は、通常の折り返し補正法の1つとして用いられてきたが、正しく折り返し補正されない領域が残るといった限界があった。当アルゴリズムは、正しく折り返し補正されない領域を除去するプロセスを採用することで、SDP法を連続性法に用いるValid Data作成ツールとして利用していることが特徴である。

従来型の連続性法では、通常はValid Dataとして高層データなどの風情報が必要である。それに対し当アルゴリズムはドップラー速度データだけで一連の閉

じた直接処理が可能である。そのため折り返し補正の自動化に適している。更に、晴天エコーのドップラー速度の折り返し補正をより精度良く行うためには改良の必要があるものの、従来の連続性法が苦手としてきた、レーダーサイトから離れた孤立したエコーで起こっているダウンバーストやメソサイクロン、ガストフロントなどの局所的に風の変化の大きいメソスケール現象のドップラー速度場に対しても自動的な折り返し補正が精度良くできる。

当アルゴリズムは1995年に利用が開始された我が国の空港気象ドップラーレーダーに組み込まれ、運用されている。

謝辞

本研究にあたり、貴重な御助言を与えて下さいました電気通信大学教授の立平良三先生に感謝いたします。

参考文献

- Dazhang, T., S. G. Geotis, and R. E. Passarelli, Jr., 84: Evaluation of alternative-PRF method for extending the range of unambiguous Doppler velocity, 22nd Conf. on Radar Meteor., 523-527.
- Doviak, R. J., and D. S. Zrnić, 1993: Considerations in the Observation of Weather, Doppler Radar and Weather Observations, Academic Press, 160-208.
- Eilts, M. D., and S. D. Smith, 1990: Efficient dealiasing of Doppler velocities using local environment constraints, J. Atmos. Ocean. Technol., 7, 118-128.
- Ekgren, B., and L. Dahlbrg, 1984: A dual-PRF Doppler radar for unambiguous velocity measurements, 22nd Conf. on Radar Meteor., 520-522.
- Hondl, K. D., and M. D. Eilts, 1993: Evaluation of Doppler velocity dealiasing techniques for low-Nyquist velocity data, 26th Conf. on Radar Meteor., 59-61.
- Ishihara, M., and K. Hata, 1995: Operational Doppler weather radar for airport in Japan, 27th Conf. on Radar Meteor., 723-724.
- Keeler, R. J. and R. Passarelli, Jr., 1990: Signal processing for atmospheric radars, Radar in Meteorology, Amer. Meteor. Soc. 199-229.
- Ohno, H. and O. Suzuki, 1993: Small-scale high wind cores enhancing low-level wind shear: Doppler radar observation of opposing wind adjacent to the sea-breeze frontal zone on 20 September 1989,

- Meteor. Atmos. Phys., 52, 147-152.
- Suzuki, O., H. Ohno, and K. Kusunoki, 1993 : On the error rate associated with the Doppler velocity extension and PRF ratio selection under the strong horizontal wind shear, 26th Conf. on Radar Meteor., 230-231.
- Suzuki, O., H. Ohno, and K. Kusunoki, 1993 : Doppler radar observations and analyses of mesoscale phenomena with damaging winds, Proc. Workshop on Observations/Forecasting of Mesoscale Severe Weather and Technology Reduction of Relevant Disasters, 53-60.
- Wieler, J. G., 1991 : Terminal Doppler Weather Radar (TDWR) velocity dealiasing algorithm, 25th Conf. on Radar Meteor., 347-353.
- Wilson, J. W., T. M. Weckwerth, J. Vivekanandan, R. M. Wakimoto and R. W. Russel, 1994 : Boundary layer clear-air radar echoes : origin of echoes and accuracy of derived winds, J. Atmos. and Ocean. Technol., 11, 1184-1206.
- Wilson, J. W., and W. E. Schreiber, 1986 : Initiation of convective storms at radar-observed boundary-layer convergence lines, Mon. Wea. Rev., 114, 2516-2536.
- Zrnić, D. S., and P. Mahapatra, 1985 : Two methods of ambiguity resolution in pulse weather radars, IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. AES-21, 470-483.