

ソフトウェア的な2つの原理を組み合わせた ドップラー速度データの折り返し補正方法

山田 芳 則*・藤 吉 康 志**・新 井 健一郎***

要 旨

PPI (Plan Position Indicator) モード上の比較的狭い方位角幅に存在するドップラー速度データに適切なナイキスト数を割り当てるために、異なるアルゴリズムのソフトウェア的な2つの折り返し補正方法を組み合わせた新しい方法を開発した。この方法では、Hennington (1981) の方法と Yamada and Chong (1999) の方法を逐次適用する。このような方法を用いることで、適切なナイキスト数を割り当てることだけでなく、質の悪い速度データを除去するための処理も同時に行うことができる。新しく開発した方法を熱帯域の深い対流性降水システムについて観測されたドップラー速度データに適用した結果、良好に動作することを確認した。

1. はじめに

パルス型ドップラーレーダーではドップラー速度の折り返しがあるため、観測された速度データの解析の前に、すべてのドップラー速度に対して適切なナイキスト数を割り当てなければならない。これを折り返し補正という。ナイキスト数を割り当てる方法には、ソフトウェア的またはハードウェア的に処理するものがある。しかし、どのようなドップラー速度データに対しても折り返し補正を完璧に行える方法は存在しないのが現状であるといえる。

ドップラー速度データの折り返し補正処理では、ナイキスト数を割り当てるだけでなく、速度分散や観測可能な最小の受信強度に基づいては除去できないような質の悪いデータを取り除くことも非常に重要である。このような処理は、複数のドップラーレーダーを用いて空間的に高分解能で風速成分を精度よく算出す

るためには特に必要である。

ソフトウェア的にナイキスト数を割り当てる方法の中で最も簡単な方法は、ドップラー速度データの連続性に基づくものである。その中でも Yamada and Chong (1999) (以後、YC99と記す) は、PPI (Plan Position Indicator) や COPLAN モードで観測された速度データの補正方法として、VAD (Velocity Azimuth Display) 及び方位角方向と動径方向におけるドップラー速度の連続性に基礎を置くナイキスト数の決定方法を提案した。YC99の方法の大きな利点は、補助的な風のデータを必要としないこと、品質の悪い速度データを除去するアルゴリズムを取り入れていること、さらに補正できるドップラー速度の範囲には制限がないことである。しかし、YC99の方法が適用できるのは、連続性に基づいてナイキスト数を割り当てられた速度データが比較的広い方位角幅 (少なくとも 160° 以上、非線形性の成分が小さい場合には少なくとも 130° 以上) の中に存在することが必要という制約がある。

一方、Hennington (1981) (以後、HE81と記す) の方法では、あらかじめ与えた水平風の高度分布から各レンジゲートでの動径速度成分を計算し、この成分とドップラー速度とを比較することによってナイキスト数を割り当てる。与える水平風の鉛直分布は近似的

* 気象大学校 (現: 気象庁気象研究所). yyamada@mri-jma.go.jp

** 北海道大学低温科学研究所.

*** 北海道大学低温科学研究所 (現: 気象庁気象研究所).

—2009年2月4日受領—

—2009年6月1日受理—

なものでよい点は好都合である。この方法は、データの存在する方位角方向の広がり程度にかかわらず、ほとんどすべてのデータに適用可能である。しかし、各レンジゲート上の速度データにナイキスト数を割り当てただけでは、質の悪いデータを除去することはできない。

現在でもドップラーレーダーが降水システムの研究等で必要不可欠な測器の一つとして利用されていることや観測されるデータ量が大きいこと、また複数のパルス繰り返し周波数を用いてハードウェア的にナイキスト数を決定する方法（たとえば、Joe and May 2003；Yamauchi *et al.* 2006）を利用できるレーダーが限定されていることを考慮すると、簡単なアルゴリズムでありながら高性能かつ高速のソフトウェア的な折り返し補正方法を開発することが必要である。とりわけ、狭い方位角幅に存在するような速度データに対してもナイキスト数の割り当てや質の悪い速度データの除去を適切に処理できる方法の開発は特に重要である。対流雲は水平方向の空間スケールが小さいので、得られる速度分布も狭い方位角幅の中に限られてしまう場合がよくあるためである。そこで本研究では、より狭い方位角幅に存在するドップラー速度データに対してもYC99の方法を用いて処理することができるように、アルゴリズムの異なるHE81の方法と組み合わせた効率的な新しい方法を開発した。ここでは、その原理と観測データへの適用例について報告する。

2. 折り返し補正方法の原理

新たに開発した方法では、HE81とYC99の方法を逐次適用する。まず最初にHE81の方法によって、観測されたドップラー速度データすべてにナイキスト数を割り当てる。この時に必要となる水平風の高度分布は、観測時刻に近いゾンデ観測データあるいは人為的に作成したデータである。この分布は、処理の対象としているドップラー速度の場に近いほうが有利であろう。HE81の方法を適用するとき、ドップラー速度データの存在しないレンジゲートには与えた水平風の分布から計算した動径速度成分を一時的に格納しておく。このような速度データを以後「一時データ」と呼ぶことにする。次に、ナイキスト数を割り当てられたドップラー速度と一時データ全体に対してYC99の方法を適用する。YC99による処理での一時データは、あるゲート上で適切なVAD曲線が計算されるように補助的に使用するものである。実際、最初に決定する

2次のオーダーのフーリエ展開は、有効な観測データを最も多く含むゲートにおいて、一時データも使用して計算する。このようにすれば、方位角方向全周に存在する速度データを用いることができるので、適切なフーリエ係数を算出できる。以上のようにしてVAD曲線を導出した後の処理はYC99の方法に準ずる。

3. 実際の観測データへの適用例

新たに開発した折り返し補正方法の有効性を調べるために、エコー頂高度が10~11 kmと深い対流性降水システムに適用した例を以下に紹介する。用いたデータは、インドネシア共和国スマトラ島の沿岸部に位置するTikuにおいて北海道大学・低温科学研究所のXバンドドップラーレーダーで2006年11月19日に観測されたものである。このドップラーレーダーの設置地点や主な諸元を第1表に示す。レーダー設置地点の北西から北東、南東にかけては陸地であり、設置点から北東に約20 kmの距離からはスマトラ島を東西に隔てる標高500~2500 m程度の山岳域となっている。一方、観測地点は北西から南西、南東にかけて海に面している。このレーダー設置点に南東~東南東からの10~17 m s⁻¹の強風をもたらした降水システムについての3次元走査データに対して、新たに開発した方法を適用して折り返し補正を行った。1つの3次元走査は仰角が0.5°~50°までの18仰角のPPIから構成されている。この3次元走査データへの適用結果の中から、今回開発した方法の特徴をよく示している仰角2.4°と14.5°のPPIデータの折り返し補正例を紹介し、新しい方法が比較的狭い方位角幅に含まれる速度データに対して有効であることを示す。

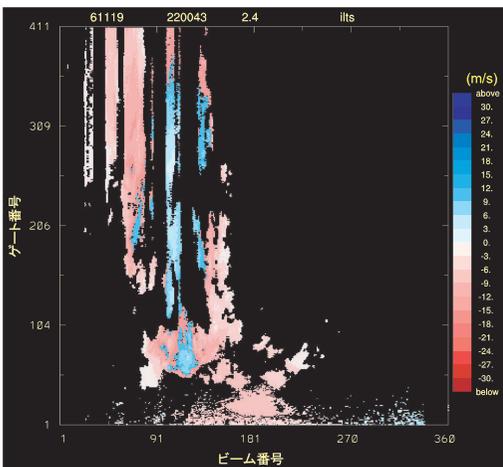
第1図は、折り返し補正前の仰角2.4°におけるPPIデータであり、YC99の方法では折り返し補正が行えなかった事例である。反射強度が5 dBZ以下のレン

第1表 北海道大学・低温科学研究所 X-バンドドップラーレーダーの設置地点と主な諸元。

設置地点	東経99.92°、 南緯0.40°
ビーム幅	1.1°
最大探知距離	83 km
距離分解能	200 m
ナイキスト速度	14.3 m s ⁻¹
動径方向のゲート数	411
1 PPI スキャンに含まれるビーム数	360

ジゲートでの速度データはノイズと見なして除去して示す。このPPI上では連続性に基づいて方位角方向へナイキスト数を割り当てることができるデータは約 $100^{\circ}\sim 160^{\circ}$ と比較的狭い方位角幅に含まれている。ビーム番号81~141程度の範囲に、折り返されたドップラー速度が青色で示されている。このデータに、HE81の方法でナイキスト数を割り当てた結果が第2図である。このときに用いた水平風の高度分布は、Tikuの南東約70 kmの距離にあって沿岸部の平地に位置するTabing(東経 100.35° 、南緯 0.88°)でのゾンデ観測データ(第3図)を参考にして作成した。このとき、第1図や地上観測データを考慮して高度0.2 kmから2.0 kmまでは風速 15 m s^{-1} の南東の風が吹いていると仮定した。第2図は、HE81の方法による処理では、比較的適切にナイキスト数が割り当てられていることを示している。しかし、緑色の破線で囲んだ領域内には、周囲とは値の大きく異なっている速度

データが点在する。これらのデータは、適切なナイキスト数が割り当てられていないか、あるいは品質の悪いデータであるかのいずれかであると考えられる。このデータにYC99の方法を適用した結果が第4図である。この場合、方位角方向と動径方向の連続性に基づいてナイキスト数を割り当てる過程では、割り当てた後のドップラー速度と基準とした速度データの差の大きさが方位角方向と動径方向に、それぞれ 8 m s^{-1} 、 7 m s^{-1} より大きい場合にはデータの質が悪いと判断し、これを削除した。これらの閾値は、現象やデータの質などを考慮して決める。VAD曲線は、有効な観測データ数が最も多く含まれている79番目のゲート(レーダー設置地点から0.66 km上空)上で計算した。このようなゲートの探索は、レーダーに近い方から30~300番目に位置するゲートの中から行った。これは、レーダー近傍のドップラー速度には地表面等の影響などによって誤差が多く含まれる場合があること、またレーダーから十分に離れたゲート上では速度データ数が少なくなってしまうことがあるためである。第2図に含まれていた質の悪いと考えられるデータの多くは、YC99の方法による処理で適切に補正あるいは削除されている。また、質の悪いデータを除去するためのアルゴリズムによる処理によって、良質と考えられるデータが不自然に削除されてしまっている様子はほとんど見られない(第5図)。第4図のように狭い方位角の範囲に含まれるデータの折り返し補正が良好に処理できたのは、観測データと一時データを合わせてフーリエ展開することで、選択されたゲートが位置する高度でのレーダー周辺の水平風の場合をよく近似するようなVAD曲線が得られたことによる。このようなVAD曲線は動径方向への折り返し補正の基準となりうる。このため、HE81の方法を適用するときと与える水平風の鉛直分布は、レーダー近傍の平均的な水平風の場合に近い方がYC99の処理で有効であろう。VAD曲線(フーリエ級数の直流成分を用いてナイキスト数を割り当てた後のもの)から計算される動径方向の水平風速成分は、一時データの効果によって全方位角の範囲で約 $-13\sim 15\text{ m s}^{-1}$ であった。これに対してYC99の方法のみで折り返し補正を行ったときには、同じゲート上でのVAD曲線の直流成分は曲線全体に対して正しいナイキスト数を割り当てていたが、このナイキスト数で補正された後の曲線自体はレーダーの周囲の平均的な水平風の近似となっていないことを確認した。実際、フーリエ展開の計算で用いた観

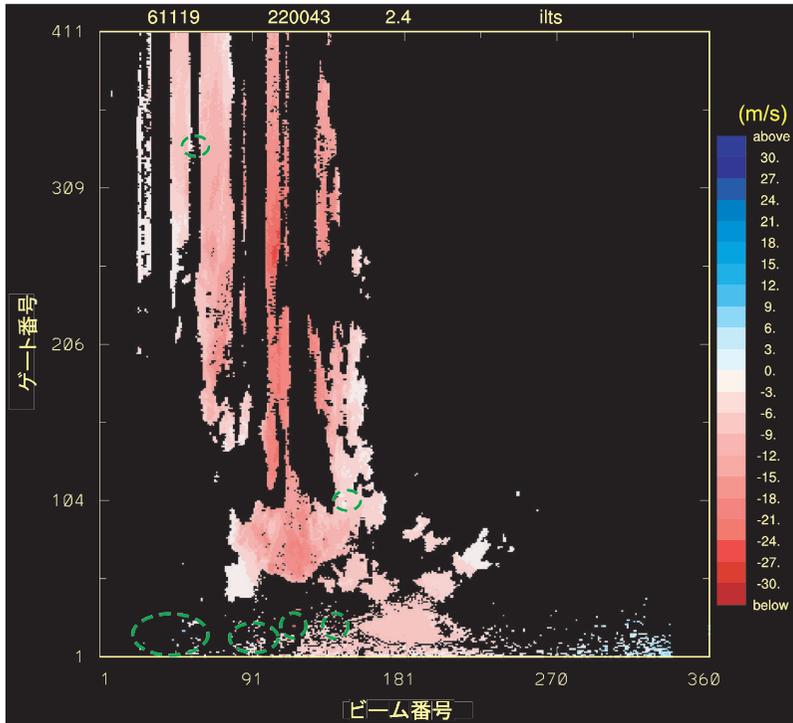


第1図 2006年11月19日2200 LST(時刻は現地時間:LST=UTC+7時間)に仰角 2.4° のPPIモードで観測された、折り返し補正前のドップラー速度データ(レーダーに近づく成分が負)。ビームごとに各レンジゲート上のドップラー速度を表示した図。横軸はビーム番号(最初に記録されたビームを1番目とする)、縦軸はゲート番号(レーダーに最も近いゲートを1番目とする)。1番目のビームは方位角 0° (真北)であり、360番目のビーム(方位角 359°)まで方位角 1° ごとに時計回りに記録されたデータである。ビーム番号から1を引いた値が、このビームの方位角(単位は度)に相当する。

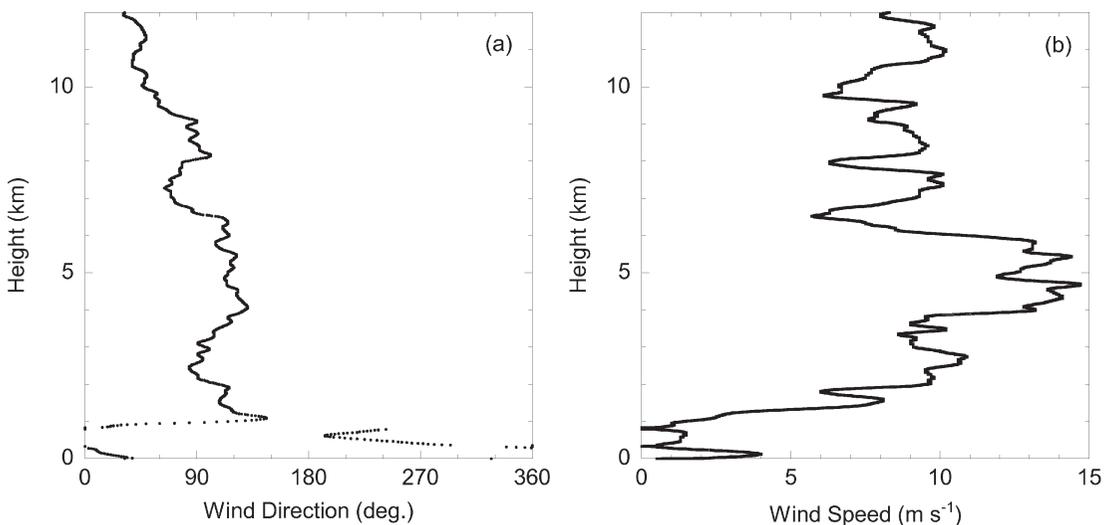
測データを含む方位角の範囲 [75°~206°] では、この曲線は観測データのよい近似となっていたが、方位

角が [0°~42°] と [283°~359°] の範囲では、この VAD 曲線上の値は25~60 m s^{-1} と、第3図のゾンデデータと比較しても大きな正の値であった。このような VAD 曲線が動径方向への折り返し補正の基準となったため、第1図で方位角0°~70°程度の範囲ではほぼすべてのビーム上で正しくないナイキスト数が割り当てられ、速度データが正の値に変換される結果となった(図には示さない)。

新しい方法が有効であることを示すもう1つの例を紹介する。第6図aは、仰角14.5°のPPIデータをHE81の方法で処理した結果である。296番目のゲートまでの表示にしているのは、このゲート以遠ではドップラー速度データが存在しないためである。ビーム番号90~140の範囲に、緑色の破線で囲んだ領域内に、周囲とは値の大きく異



第2図 第1図と同じ。ただし、HE81の方法でナイキスト数を割り当てた結果。一時データを除いてドップラー速度を表示したもの。



第3図 11月20日0000 LSTにおけるTabingでのゾンデ観測で得られた風向(a)と風速(b)の高度分布。

なっている正の大きな値の速度データが、小さな円状や楕円状に存在していることが明瞭である。これらの

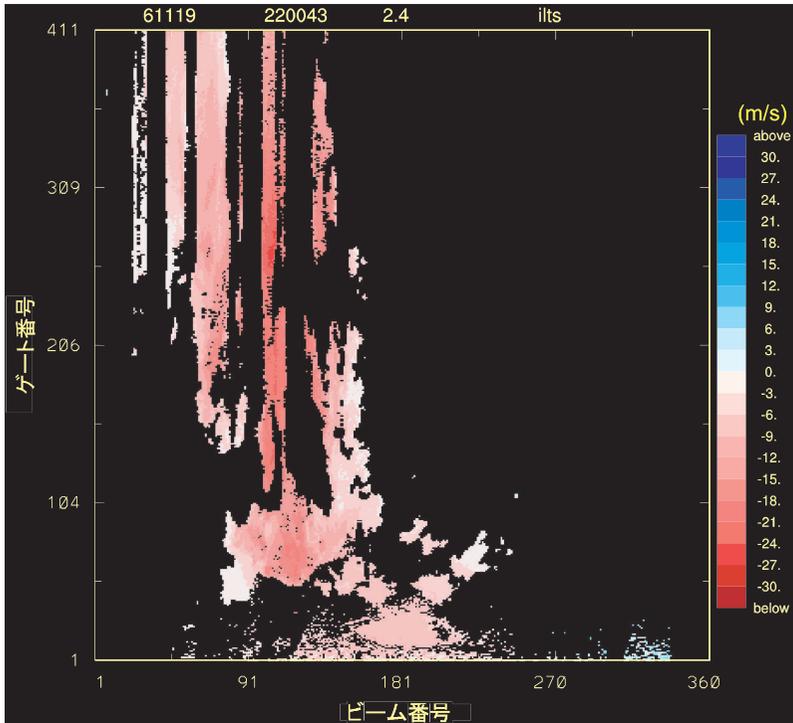
データは、適切なナイキスト数が割り当てられていないか、あるいは品質の悪いデータであるかのいずれかであろう。参照した水平風の鉛直分布の一部が適切でなかった可能性もある。この事例は、HE81の方法だけでは折り返し補正が適切に実行できない場合があることを示している。しかし、これらのデータは、YC99の方法によって適切に処理されていることが明らかである（第6図b）。

以上のように、新しい方法は、YC99の方法のみでは処理が困難であるような狭い方位角幅に含まれる速度データの折り返し補正と質の悪いデータの除去を適切に行えることがわかった。ただし、質の悪いデータを取り除く処理では、品質判断アルゴリズムの基礎となっている、ナイキスト数の割り当て後のドップラー速度と基準とした速度との差の大きさの閾値を適切な値に設定することが必要である。図には示さないが、用いた3次元走査データを構成する他の仰角のPPIデータに対しても良好に折り返し補正が行われていること、特に観測された速度データの含まれる方位角幅が最大で約90°と狭い範囲に限定されているようなPPIデータについても新しく開発した方法が良好に動作することを確認した。ここに示す方法が、どの程度狭い方位角幅内に含まれる速度データに適用できるかについては、対象とする現象や速度データの分布、データの質などに依存して変化すると考えられる。

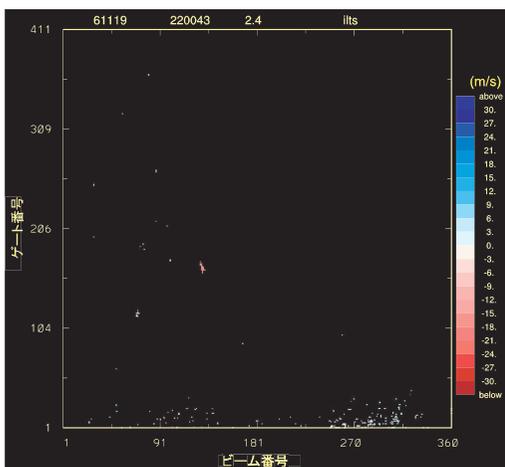
新しいアルゴリズムでは手順が2つに増えるが、処理に要するプログラムの実行時間が短いことも利点の1つである。

4. 結論

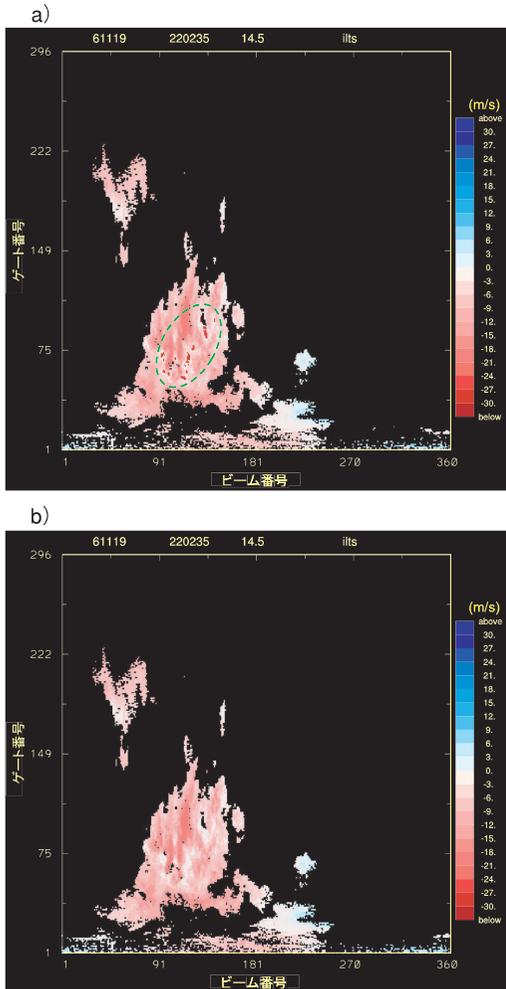
比較的狭い方位角幅に存在するドップラー速度デー



第4図 第1図と同じ。ただし、第2図の結果にYC99の方法を適用した結果。



第5図 第1図と同じ。ただし、第2図からYC99の方法による処理によって削除された速度データを示す。



第6図 (a) 第2図と同じ。ただし、仰角14.5°のPPIデータ。(b) 第4図と同じ。ただし、仰角14.5°のPPIデータ。

データの折り返し補正と質の悪いデータの除去を行うために、折り返し補正原理が異なるソフトウェア的な2つの方法を逐次適用することに基づく新しい方法を開発した。この方法では、あらかじめ与えた水平風の分布を用いてHE81の方法によってナイキスト数を割り当て、この結果にYC99の方法を適用する。HE81の方法を用いる時には、速度データの存在しないレンジ

ゲートには与えた水平風の分布から計算した動径成分を一時データとして埋め込み、YC99の方法では、これらの一時データと有効な観測データを合わせて2次のオーダーのVAD曲線を計算する。新しく開発された方法を熱帯域で観測された深い対流性降水システムについての観測データに適用した結果、良好に動作することを確認した。新しい方法は、比較的狭い方位角幅に含まれるドップラー速度データの折り返し補正や質の悪いデータを除去する上で有効な方法の一つであると考えられる。

折り返し補正や質の悪いデータの除去を行うための効率よい方法を今後も継続して開発することが必要であろう。

謝辞

担当編集委員と2名の査読者の方から有益なコメントをいただきました。ここに感謝いたします。

本研究で用いたデータは、地球観測システム構築推進プラン「海大陸レーダーネットワーク構築 (HAR-IMAU)」(代表：山中大 海洋研究開発機構主任研究員)で取得したものである。

この研究は、平成19年度の北海道大学・低温科学研究所との共同研究(「ドップラーレーダーとドップラーライダーデータから風場を算出するための解析手法の開発」, 採択番号No.07-46)による成果である。

参考文献

- Hennington, L., 1981: Reducing the effects of Doppler radar ambiguities. *J. Appl. Meteor.*, **20**, 1543-1546.
- Joe, P. and P. T. May, 2003: Correction of dual PRF velocity errors for operational Doppler weather radars. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **20**, 429-442.
- Yamada, Y. and M. Chong, 1999: VAD-based determination of the Nyquist interval number of Doppler velocity aliasing without wind information. *J. Meteor. Soc. Japan*, **77**, 447-457.
- Yamauchi, Y., O. Suzuki and K. Akaeda, 2006: A hybrid multi-PRI method to dealias Doppler velocities. *SOLA*, **2**, 92-95.

Dealiasing of Doppler Radar Velocities Based on the Successive Application of Software-Based Two Different Algorithms

Yoshinori YAMADA*, Yasushi FUJIYOSHI**
and Ken-ichiro ARAI***

* (Corresponding author) *Meteorological College, Asahi-cho, 7-4-81, Kashiwa, Chiba, 277-0852, Japan (Present Affiliation : Meteorological Research Institute, Nagamine 1-1, Tsukuba, 305-0052, Japan).*

** *Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Kita-19, Nishi-8, Kita-ku, Sapporo, 060-0819, Japan.*

*** *Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Kita-19, Nishi-8, Kita-ku, Sapporo, 060-0819, Japan (Present Affiliation : Meteorological Research Institute, Nagamine 1-1, Tsukuba, 305-0052, Japan).*

(Received 4 February 2009 ; Accepted 1 June 2009)

Abstract

A new method was developed for dealiasing Doppler velocities confined to in narrower azimuthal intervals collected in PPI (Plan Position Indicator) mode by a successive application of software-based two different algorithms proposed by Hennington (1981) and Yamada and Chong (1999). At first, the method of Hennington (1981) is employed to assign a Nyquist interval number to each valid velocity datum using a given vertical profile of horizontal winds. Each range bin without valid velocity datum is filled with a radial wind component computed from the wind profile, as a temporary datum. The dealiased velocities in the first step are subject to the correction by the algorithm of Yamada and Chong (1999) in order to mainly perform a quality control of Doppler velocities. In this second step, the essence is to derive a second-order Fourier development from the valid and temporary data ensemble in order to ensure the appropriate estimation of the Fourier coefficients at least at a gate which contains maximum number of valid velocity data. The performance of the newly developed method has been demonstrated by the application of this new technique to observed data collected for a deep tropical convective system.