

2台のドップラーレーダーを用いた東北地方 における雷雨観測と風速場の空間特性

DUAL-DOPPLER OBSERVATION OF A THUNDERSTORM IN TOHOKU DISTRICT AND SPATIAL FEATURES OF WIND FIELD

杉本聡一郎¹・内田幸志²・村里浩司³

Soichiro SUGIMOTO, Yukimoto UCHIDA and Koji MURASATO

¹正会員 工修 (財)電力中央研究所 流体科学部 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

²正会員 高専卒 東北電力株式会社 土木建築部 (〒980-8550 宮城県仙台市青葉区本町1-7-1)

³高専卒 東北電力株式会社 会津ダム管理センター (〒965-8505 福島県会津若松市東栄町3-38)

The interest of this study is twofold for a thunderstorm occurred in Tohoku district of Japan. The one is to investigate kinematic features of a multi-cellular line associated with heavy rainfall. Dual-Doppler radar data by 3-cm wavelength research radar are used. The 3-D wind fields derived from dual-Doppler analysis indicate that the pronounced low-level convergence coincident with the upward air motion is consistent with the formation of the line.

An extended version of the Volume Velocity Processing (EVVP) is proposed for single-Doppler retrieval of horizontal wind field. The results of application demonstrate that there is a discrepancy of scales between dual-Doppler derived wind field and EVVP-derived one. Overall, some improvements involved in the EVVP method could provide reliable estimation even when actual wind field is more complicated than the model of wind field.

Key Words: Doppler radar, thunderstorm, wind field, extended VVP method, dual-Doppler analysis

1. はじめに

メソスケールの降雨場を定量的に推定し、予測することは洪水防御にとって重要な課題である。特に、わが国では、特有な地形が降雨の発達・衰弱に影響することに伴い、降雨予測問題がさらに複雑になっている。

一方、降雨場やその変化が風速場と相互に関連していることについて、これまで多くのドップラーレーダー観測と解析からそのメカニズムの一部は明らかにされてきた。しかし、地形の複雑な山岳域を対象とした研究は依然として少ない。

杉本ら(2001)¹⁾、Sugimoto *et al.* (2001)²⁾、ならびに Sugimoto (2002)³⁾ は、九州山岳域で生じた雷雨に対して1台のドップラーレーダーによる観測と解析を行い、比較的下層の水平風速の収束とその伝播が、降雨域の局所性と持続性に関連しており、地形がその収束のトリガーになっていることを示した。その際、1台のドップラー速度情報を用いた水平風速場の推定手法の一つであるVVP (Volume Velocity Processing) 法の弱点を補完する拡

張VVP法を提案している。わが国で配備されているドップラーレーダーの数が少ないことを考えれば、1台のレーダー情報から降雨場と風速場の関連性が広域に推定できることには意義がある。ただし、推定した風速場の定量的な検証が課題として残っている。

本研究では、東北地方で生じた雷雨を2台のドップラーレーダーを同期させて観測し、そのデータを用いて以下のことを行った。まず、2台のドップラー速度情報を用いた3次元風速場の推定(以下、Dual-Doppler解析)を行い、降雨場と風速場の関連性や空間特性を論じる。さらに、拡張VVP法がDual-Doppler解析による風速場をどの程度表現できるかという観点のもと、雷雨事例での適用可能性を検証する。

2. 本研究で用いる風速場の推定手法

(1) 拡張VVP法

VVP法は、推定したい格子点周りに設定した解析領域(図-1)内で風速場を線形的にモデル化し、解析領

域に含まれるドップラー速度を用いて風速場のモデルパラメータを最小二乗的に同定（以下、VVP 推定）する手法である。具体的には、解析領域内でモデル化した風速をビーム方向に射影した速度を観測されたドップラー速度と比較した時、解析領域における差の総和が最小になるようにパラメータ推定する。

水平風速 (u, v) の推定には解析領域内で一様風を仮定し（以下、2-parameter VVP）、水平風速の収発散量の推定には u 、および v の空間微分を含めた線形風速場（以下、7-parameter VVP）を仮定すれば、解析領域内の平均場としての風速や運動学的量を推定できる（Koscielny *et al.* 1982⁴⁾）。しかし、風速場を線形的にモデル化するため、前線付近に存在する風のシアに代表された非線形性の強い領域が解析領域内で卓越した際に、推定誤差の大きくなることが懸念される。

そこで、杉本ら (2001)¹⁾ は局所的に非線形性の強い領域の影響を極力避けるため、独自に数タイプの解析領域の形状（図-2）を考慮し、最適な推定値を与える解析領域の形状を抽出すると共に、その最適領域内に存在する非線形成分を除去するアルゴリズム（図-3）を構築した。このように領域の形状を増やすことによって、分割領域全てにシアラインが存在する可能性を少なくすることができる。また、全ての分割領域にわたってシアラインが存在する場合でも、その影響度合いが小さくなることが期待できる。

解析領域の大きさ（図-2 の DX, DY, DZ ）は、2-parameter VVP に対しては $DX = DY = 15$ km, $DZ = 500$ m, 7-parameter VVP には、 $DX = DY = 25$ km, $DZ = 1$ km としている。したがって、この拡張 VVP 法で得られる風速場のスケールはメソ $\alpha \sim \beta$ スケールである。2-parameter VVP に対しては、水平風の鉛直シアの影響を考慮して鉛直方向に薄い形にしている。また、VVP 推定には Bierman (1977)⁵⁾ の平方根情報フィルターを採用した。パラメータ同定と残差分散を少ない計算機資源で高速計算するのにこの方法は有利である。

最初のステップでは、設定した解析領域の形状のうち、推定にふさわしくない形状を除く。解析領域に含まれるドップラー速度にはランダム誤差が存在するため、速度の空間的な存在パターンによっては推定誤差に大きく寄与する場合がある。そこで、Koscielny *et al.* (1982)⁴⁾ と同様の誤差共分散解析を行う。ドップラー速度のランダム誤差を 1 m/s とし、解析領域の幾何形状のみの影響によって u, v に対してそれぞれ 1 m/s 以上の誤差を及ぼす解析領域の形状に対しては VVP 推定を行わない。

それぞれの解析領域に対して、パラメータの同定値と残差分散 S^2 が得られる。そこで、最小な残差分散を与える解析領域の形状を最適なものとみなす。しかし、最適領域内には、依然としてより小スケールの現象に反映された速度やその他の非線形成分が含まれている可能性がある。そこで、推定値の残差分散が残差分散の閾値

S_{min}^2 より小さければその推定値を信頼する。そうでない場合、Matejka and Srivastava (1991)⁶⁾ の手法を用いて推定したいスケールの風速場からの偏差が大きいドップラー速度を除去し、再度 VVP 推定を最適領域に対して行う。これを残差分散の条件を満たすまで繰り返し行う。推定パラメータから変換できるビーム方向の速度から $C \cdot S$ [m/s] (C は無次元のパラメータ) 以上乖離したドップラー速度が除去される。拡張 VVP 法では繰り返し回数に応じて C や S_{min} の値を設定した。例えば、2-parameter VVP では、最初の VVP 推定において $[C, S_{min}] = [2.0, 0.3]$ とし、繰り返し回数が増える毎に C を 0.1 小さく、 S_{min} を 0.1 大きくしている。

推定値の算出はある水平面に対して 4 km 間隔で行い、

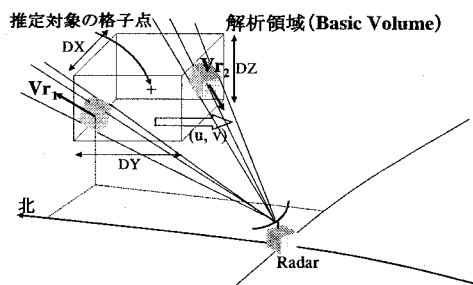


図-1 VVP 法の概念図。

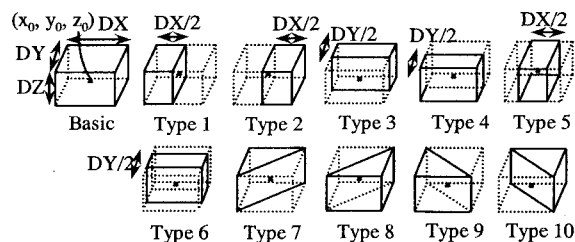


図-2 拡張 VVP 法で用いる解析領域の形状。

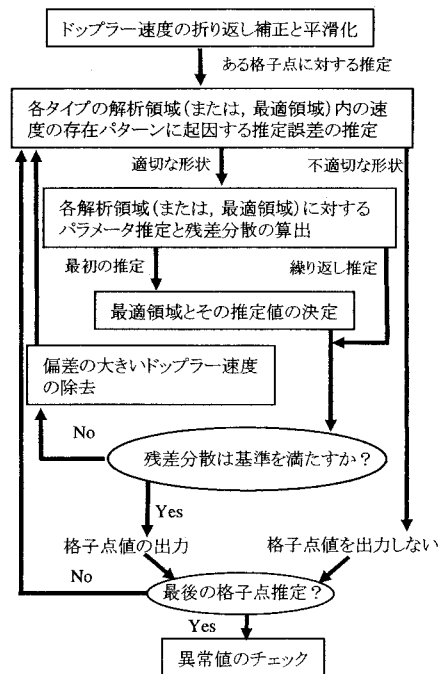


図-3 拡張 VVP 法のアルゴリズムのフロー。

すべての格子点値が求まった後、周辺の推定風速との乖離が大きい風速を異常値として除去するチェックを行う。

(2) Dual-Doppler 解析

本研究では、広く用いられている NCAR (National Center for Atmospheric Research) の CEDRIC パッケージ (Mohr *et al.* 1986⁷⁾) と同様の手法を用いた。ここでは、非弾性の連続式の境界条件をいかに決めたかなど工夫した点を中心としてその概要を述べる。

Dual-Doppler 解析を行うには、観測した仰角データを 3 次元直交座標系に内挿・変換しなければならない。本研究は Cressman フィルター (1959)⁸⁾ を用いる。水平方向のグリッド間隔が 800 m、鉛直方向の間隔が 500 m の直交座標系に対して、水平方向の軸半径 1.2 km、鉛直方向の半径 1.0 km の楕円体を内挿したい格子点周りに考え、楕円体に入るデータをデータと格子点間の距離に関連した重み付け関数とともに内挿に用いる。

あるボリュームスキャンの中間時刻に対してデータは内挿されるが、その際、中間時刻と各仰角の観測時刻の違いに伴う移流の影響を考慮している。また、風速場の推定には、データとレーダーサイト間の相対的な位置関係が関数の一つであり、これについても Gal-Chen (1982)⁹⁾ と同様の方法で考慮している。このようにして得られる直交座標系のデータのうち、レーダーのビームの交差角が $30 \sim 150^\circ$ となる領域に対して Dual-Doppler 解析を行う。

3 次元風速場 (u, v, w) は、1) 仮の w (初期値は例えば 0 m/s) に対する u, v の推定、2) 非弾性の連続式の下向き積分による w の推定、3) O'Brien (1970)¹⁰⁾ を用いた下端境界で $w = 0 \text{ m/s}$ になるような修正、4) w の変化による u, v の再計算、といった一連の過程を収束するまで繰り返し計算することにより求められる。しかし、複雑地形下では下端の境界条件を設定するのが難しい。また X バンドの波長帯を用いるレーダーの場合、降雨による電波減衰により本来の雲頂高度 (上端境界) までビームが届かない場合もあるため、境界条件の設定に工夫が求められる。本研究では、Nelson and Brown (1987)¹¹⁾ の手法を参考にして上下端の境界高度を水平方向のグリッドごとに設定した。まず、上端に対しては、エコー頂高度より一つ上のグリッド高度で $w = 0$ とし、上端とエコー頂との間の発散量はエコー頂のそれと同じとした。下端に対しては、エコー底高度より一つ下のグリッド高度、ないしはそのグリッド高度が標高よりも低い場合は地表面高度で境界条件を設定し、エコー底～下端までの間の発散量はエコー底と同じとした。

3. 2 台のレーダーによる雷雨観測

2001 年 9 月 14 日に東北会津地方で生じた雷雨を 2

台の研究用 X バンドドップラーレーダー (以下、電中研レーダー、東北電レーダー) で同期観測し、そのデータを本研究の解析に用いる。観測域周辺の地形を図-4 に示した。14 時から 20 時にかけて、電中研レーダーの南西の領域で次々と雷雨セルが発生・発達し、それらが電中研レーダーサイトの方へ到来し、飯豊山地を越えたあたりから衰弱するという状態が続いた。図-5 は 14 ~ 20 時における 6 時間積算雨量を気象庁のレーダーアメダス解析雨量をもとに算出したものである。南西～北東に延びる降雨バンドは上記状況の結果生じたものであるが、雷雨時の降雨セルの寿命が短いことから想像できるように、比較的短時間に豪雨がもたらされ、1 時間雨量で 40 mm を越える領域も報告されている。

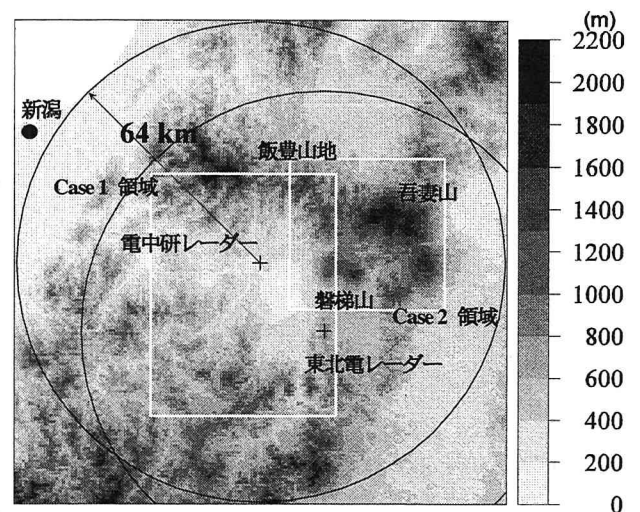


図-4 レーダー観測域周辺の地形。

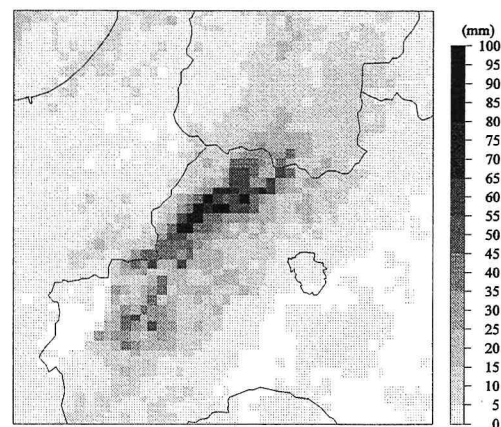


図-5 レーダーアメダス解析雨量から算定した 6 時間積算雨量 (2001 年 9 月 14 日 14 時 ~ 20 時)。

本研究では、発達の特性が風速場といかに関連しているかを Dual-Doppler 解析を通して示し、拡張 VVP 法がその際の水平風速場をいかに推定できるかについて検証する。非線形性の強い現象に弱点のある VVP 法に対して、拡張手法がどれだけのパフォーマンスをもつかを調べるにはこの雷雨事例は好例である。

レーダー観測において、電中研レーダーは仰角 2.3

～ 31° を 12 仰角, 東北電レーダーは 1.0 ～ 23.5° を 10 仰角で一つのボリュームスキャンを行い, それが 5 分間で行われるようにセッティングされている. 風速場の解析前に, ノイズ除去とドップラー速度の折り返し補正を杉本ら (2001)¹⁾ の手法により行っている.

4. Dual-Doppler 解析の結果から見た風速場と降雨場との関連性, および拡張 VVP 法の検証

(1) 17 時 30 分開始のボリュームデータ解析 (Case 1)

まず, 17 時 30 分 ～ 35 分のボリュームデータを用いた解析結果を議論する. この時間帯は, 図-5 におけるレインバンドの形成において, 発生・発達期にあたる. 図-6 は高度 3 km における降雨分布と Dual-Doppler 解析によって得られた風速場を示したものである. 水平グリッド間隔は 800 m で, 水平風速は 1.6 km おきにプロットされている. レインバンドはマルチセル型の降雨場を呈しており, その水平スケールは数百 m ～ 5 km 程度となっている. レインバンド南西部 (A - A' 付近) から発達しながら北東進した降雨域が, バンド北東部 (B - B' 付近) で成熟し, 衰弱し始めるというライフサイクルによりこのレインバンドが数時間維持されていた (時系列図略). また, レインバンド南西部では, 風速の収束・発散域が多く存在しているのがわかる.

3 次元風速場における二つの鉛直断面図を示したのが図-7 である. ただし, 水平成分については, 降雨の動きと相対的な量としており, 1.6 km 間隔でプロットさ

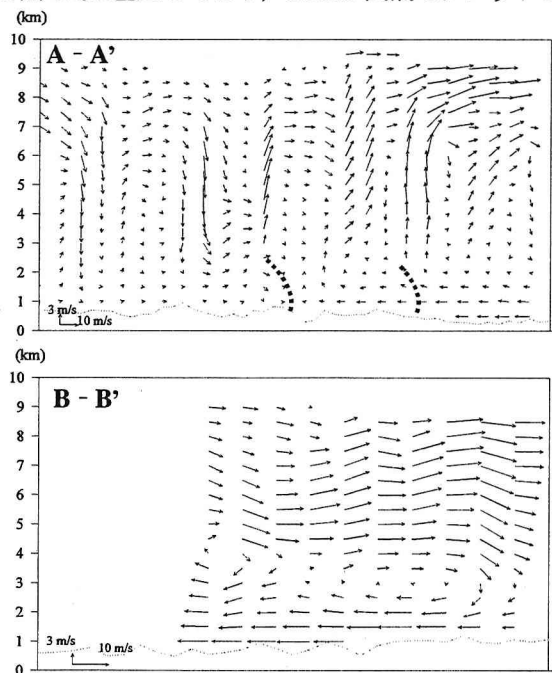


図-7 Dual-Doppler 解析による 3 次元風速場の鉛直断面図 (上: A - A', B - B', 図-6 における記号). 水平風速は降雨の動きに相対的な風速.

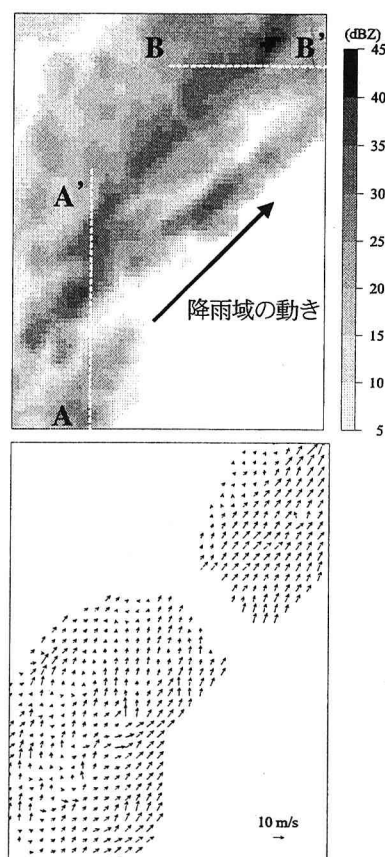


図-6 高度 3 km におけるレーダー反射因子 (東北電レーダー) と Dual-Doppler 解析による水平風速場. 表示領域は図-4 における Case 1 領域.

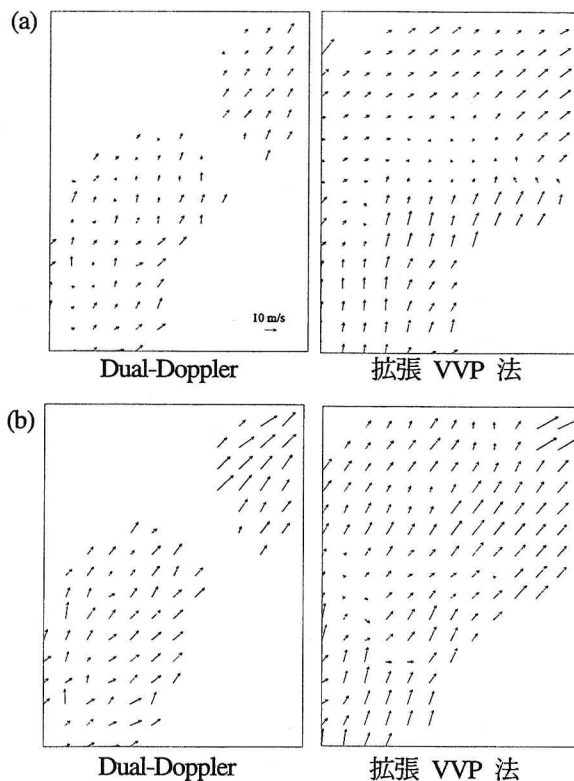


図-8 Dual-Doppler 解析と拡張 VVP 法による高度 (a) 3 km, (b) 5 km における水平風速場. 表示領域は図-6 と同じ.

れている。A - A' 断面付近のそれぞれのセルは非常に強い上昇・下降流を伴っており、その下降流が上昇流を誘起して他のセルの発達に寄与していると見られる前線部分（図-7 の点線部）も見られる。また、図-7 の B - B' 断面において、強い鉛直シアの存在により降雨の発達が抑制される傾向を示唆しているのは、前述の降雨域のライフサイクルと合致している。

図-8 は、拡張 VVP 法による水平風速場を Dual-Doppler 解析による風速場と比較したものである。ドップラー速度は東北電レーダーによるものを用いている。図の南半分領域では、風の収束域を推定できている部分もあるが、南北成分が Dual-Doppler 解析によるものよりやや大きい。それに対して、北半分領域では非常に合致している。南北成分のバイアスについては、図-7 において示した鉛直構造にも見られるように、水平スケールの非常に小さい鉛直流が多数存在していることが関連していると考えられる。

しかし、拡張 VVP 法の対象とする空間スケールを考えれば、Dual-Doppler 解析による風速場ほど小さなスケールで推定することはできないが、非線形性の非常に強い降雨事例に対しても全体的に合致した推定を行え、降雨の運動学的特性を的確に示せる面でこの拡張手法の適用性は高いといえる。

(2) 19 時 55 分開始のボリュームデータ解析 (Case 2)

次に、レインバンドの成熟・衰弱期にあたる時間帯での解析結果を示す。図-9 に示している降雨分布にも見られるように、全体的にレインバンドがその形を崩して広がりを見せているものの、X バンドレーダーの降雨

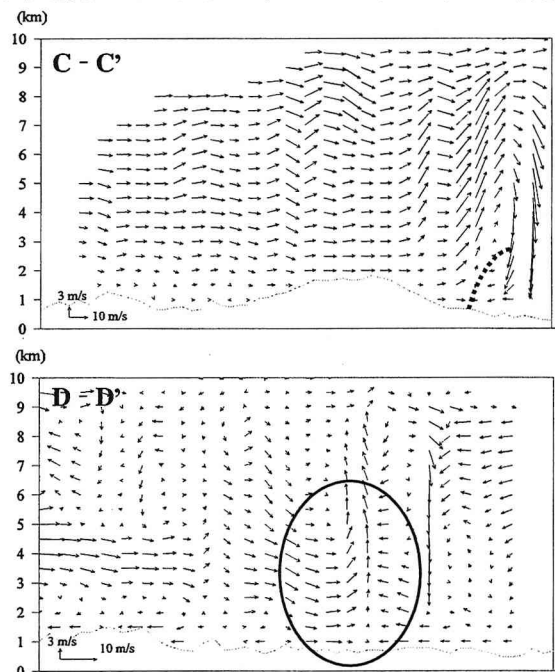


図-10 Dual-Doppler 解析による 3 次元風速場の鉛直断面図（上：C - C'、D - D'、図-9 における記号）。水平風速は降雨の動きに相対的な風速。

減衰を考えれば依然として強い降雨セル、降雨域が存在している。

図-10 は図-9 に示した二つの鉛直断面を風速分布に関してプロットしたものであるが、小スケールの鉛直流は Case 1 より多くは存在しない。しかし、降雨セルの下降流がトリガーとなって上昇流が誘起され（C - C' 断面の点線部）、図-9 において円で囲まれた強雨域がその強さを維持しているのが示唆されている。また、D - D' 断面において、下層の強い収束に伴う上昇流によってこの強雨域がもたらされたことが明瞭に示されている（図-10 において円で囲まれた領域）。

図-11 は Case 2 における拡張 VVP 法の水平風速場の推定結果を Dual-Doppler 解析のそれと比較したものである。ドップラー風速は電中研レーダーで得られたものを用いた。このボリュームデータ解析に対しても、

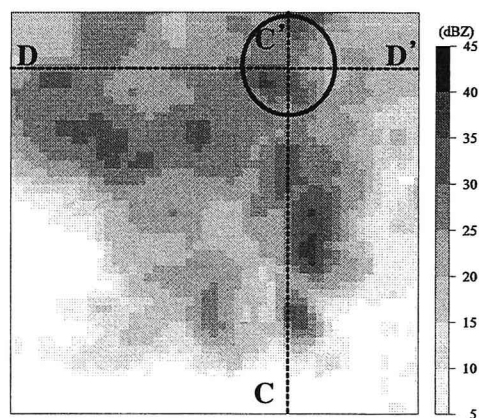


図-9 高度 3 km におけるレーダー反射因子（東北電レーダー）。表示領域は図-4 における Case 2 領域。

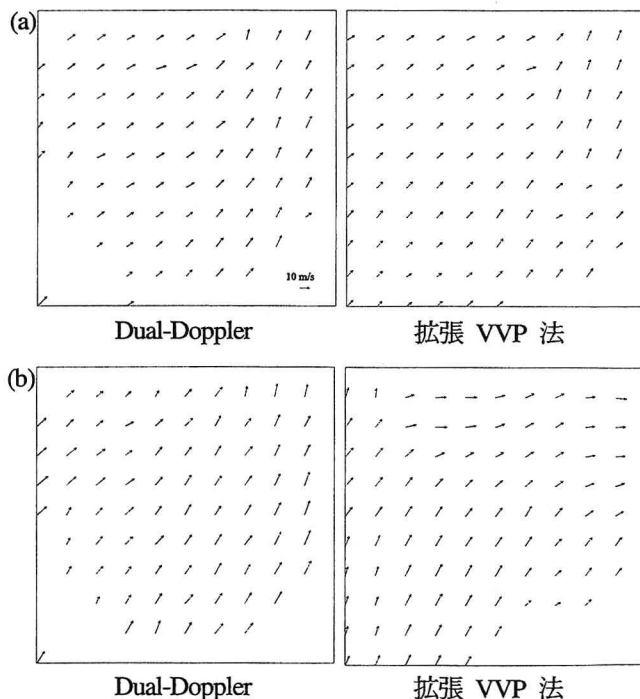


図-11 Dual-Doppler 解析と拡張 VVP 法による高度 (a) 3 km、(b) 5 km における水平風速場。表示領域は図-9 と同じ。

拡張 VVP 法は全体的に合致した推定結果を算出している。特に、高度 3 km に対する推定では、北東部における風の収束域やそれに関連した北部での東よりの風系を表現できている。ただし、C-C' ライン付近の強雨域の周辺では推定風の南北成分が若干小さい。この傾向は高度 5 km に対する推定ではより顕著になっている。また、高度 5 km において、北東端部での風の向きを拡張 VVP 法はかなり東よりに推定している。図-10 の鉛直構造が示唆するように、この周辺でも非常に強い鉛直流が存在しており、Case 1 の場合と同様、この鉛直流に影響されることで推定に差が出た可能性が高い。

そもそも、VVP 法のようなアプローチで水平風速場を推定する場合、鉛直風速は無視せざるを得ない。その理由は、鉛直風速のもつ空間スケールが、特に対流性降雨においては VVP 法で扱うスケールよりもかなり小さく、線形的なモデル化が難しいからである。鉛直風速を考慮して線形的に解析領域内の線形風速場をモデル化することは可能ではあるが、この場合、風速の水平成分のパラメータ同定に悪影響を及ぼす¹⁾。しかし、本研究で適用した事例のように非常に強い鉛直流が存在する場合、鉛直流のドップラー速度への寄与が無視できなくなること以上を結果は示唆しているといえる。

逆に、このようなシビアな現象に対しても、拡張手法は降雨の生成過程に重要な風の収束などを推定できており、全体的にも Dual-Doppler 解析と合致した結果を与えていた。これは、拡張したアルゴリズムの有効性を示唆するものである。ただし、解析領域の形状や大きさ、ならびに非線形成分を除去するためのパラメータには更なる改善の余地は残されている。

5. 結論

東北地方で 2 台のドップラーレーダーを用いて雷雨観測をし、2 台の情報を用いる Dual-Doppler 解析、ならびに 1 台の情報を用いる拡張 VVP 法により風速場の推定を行った。その結果、以下の知見が得られた。

(1) マルチセル型の降雨場において、それぞれの降雨セルは数百 m ~ 数 km といった小さいスケールの上昇、下降流を伴っており、あるセルの下降流が別のセルの上昇流に寄与していると思われる現象も把握できた。

(2) 小スケールの現象が卓越するこの雷雨事例に対して、拡張 VVP 法は Dual-Doppler 解析で得られるほどのスケールの小さな水平風速場を推定できないものの、全体的には合致した風速場を推定できた。この手法で対象とするスケールを考えれば、拡張の効果がみられる。

(3) ただし、鉛直流の非常に強い領域の影響を受けて誤差を生じていると考えられる領域も存在した。解析領域の形状や大きさを検討する余地はある。

(4) このような推定風速場は数値天気予報値では得ら

れないスケールを有し、ドップラーレーダーの有用性を示すものである。風速場そのものは、数値モデルによるシミュレーションや予測の評価に用いることができる。一方、モデルが示唆する力学的な知見と合わせて考えれば、ドップラー速度や風速場そのもののデータ同化とともに降雨予測の精度向上に寄与することが期待できる。

謝辞：(財) 日本気象協会新潟支店には、東北電力側の観測に際して御助力を戴きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 杉本聡一郎, 豊田康嗣, 下垣久: 気象レーダーを用いた降雨予測手法—ドップラー情報を用いた水平風速とその収発散量の推定, 電力中央研究所研究報告, U00051, 29 pp., 2001.
- 2) Sugimoto, S., Hirakuchi, H., Toyoda, Y. and Shimogaki, H.: Considerations in dealiasing of Doppler velocities and single-Doppler retrieval of horizontal wind field, *Fifth International Symposium on Hydrological Applications of Weather Radar*, pp. 123-128, 2001.
- 3) Sugimoto, S.: Kinematic properties in convective storms derived from Doppler radar observations in mountainous regions of Japan, *International Conference on Mesoscale Convective Systems and Heavy Rainfall/Snowfall in East Asia*, pp. 497-502, 2002.
- 4) Koscielny, A., Doviak, R. J. and Rabin, R.: Statistical considerations in the estimation of divergence from single-Doppler radar data and application to prestorm boundary-layer observations, *J. Appl. Meteor.*, 21, pp. 197-210, 1982.
- 5) Bierman, G. L.: Factorization methods for discrete sequential estimation, Academic Press, 241 pp., 1977.
- 6) Matejka, T. and Srivastava, R. C.: An improved version of the extended velocity-azimuth display analysis of single-Doppler radar data, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 8, pp. 452-466, 1991.
- 7) Mohr, C. G., Miller, L. J., Vaughn, R. L. and Frank, H. W.: Merger of mesoscale data sets into a common Cartesian format for efficient and systematic analysis, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 3, pp. 143-161, 1986.
- 8) Cressman, G. W.: An operational objective analysis system, *Mon. Wea. Rev.*, 87, pp. 367-374, 1959.
- 9) Gal-Chen, T.: Errors in fixed and moving frames of references: Applications for conventional and Doppler radar analysis, *J. Atmos. Sci.*, 39, pp. 2279-2300, 1982.
- 10) O'Brien, J. J.: Alternative solutions to the classical vertical velocity problem, *J. Appl. Meteor.*, 9, pp. 197-203, 1970.
- 11) Nelson, S. P. and Brown, R. A.: Error sources and accuracy of vertical velocities computed from multiple-Doppler radar measurements in deep convective storms, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 4, pp. 233-238, 1987.

(2002. 9. 30 受付)