



境界層レーダーを用いた対流性降雨発生前後の鉛直風速観測

澤田, 眞子
大石, 哲

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 25:119-127

(Issue Date)

2021-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/81013290>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81013290>



境界層レーダーを用いた 対流性降雨発生前後の鉛直風速観測

Study on vertical wind profile before and after
convective rain by using Boundary Layer Radar

澤田 眞子¹⁾
Mako SAWADA
大石 哲²⁾
Satoru OISHI

概要：本研究の目的は積乱雲発達以前の上昇流の観測を目指し、高度3km以下の風速場を直接観測できるとされる境界層レーダーでの風速観測を実施した。

キーワード：境界層レーダー, 鉛直風速, プロファイル

1. はじめに

近年、局地的大雨や集中豪雨の発生頻度が増加傾向にある。気象庁によると、局地的大雨は「急に強く降り、数十分の短時間に狭い範囲に数十 mm 程度の雨量をもたらす雨」と定義されている。集中豪雨には明確な定義はないが、「同じような場所で数時間にわたり強く降り、100mm から数百 mm の雨量をもたらす雨」とされている。このように突発的かつ短時間に局所的な降水をもたらす豪雨は、低地の浸水や道路の冠水、さらには土砂災害や河川の反乱などによる災害をもたらす。

局地的大雨による災害の特徴は、急激な強い雨のために短時間に発生し、急激な状況変化を引き起こすことである。具体例として兵庫県神戸市灘区の都賀川で発生した水難事故を挙げる¹⁾。都賀川水難事故は 2008 年 7 月 28 日午後 2 時 40 分ごろ、活発化した前線の影響により発生した豪雨災害である。発生間近の 14 時ごろまで晴天であり、複数人が河川敷で水遊びなどしていた。その後、事故発生のおよそ 50 分前には大雨洪水警報が発令されていたが、河川敷の人々はそのことに気づかなかった。実際に雨が降り始めたのは 14 時 36 分ごろで、わずか 8 分後の 14 時 44 分には 1.3m 程度の水位上昇が起こった。これにより都賀川の遊歩道は冠水し、5 名の尊い命が失われている。

局地的大雨が起こす水害による事故の防止及び被害の軽減のために、一分一秒でも早い大雨の予測技術の確立が必要とされている。その中で局地的大雨の予測に関する既往研究について述べる。

中北ら(2010)²⁾は、先述の 2008 年 7 月 28 日都賀川水難事故をもたらした積乱雲を解析した。これにより降雨に先行する積乱雲の発達段階で上空の雲粒の集まりがレーダーで探知されることを発見し、初期段階で得られるエコーを「ゲリラ豪雨のタマゴ」と命名した。「ゲリラ豪雨」は専門用語ではないが、「短時間」かつ「局地的」さらに「人命にかかわる」という視点を意識するべく、この研究では局地的大雨をゲリラ豪雨と呼ぶ。

また、中北ら(2013)³⁾はゲリラ豪雨のタマゴ内部の鉛直渦度に着目し、積乱雲の発達と渦度の関係を発見し、渦度による危険性予測手法を開発した。中北ら(2016)⁴⁾は、発達初期段階のゲリラ豪雨の内部に鉛直渦管の立ち上がりを確認し、これはスーパーセル初期にみられる上昇流による渦管の立ち上がり現象と類似していることが分かった。さらに、この立ち上がりはレーダー反射因子差を用いた上昇流の推定から、上昇流によるものであることが判明した。

この研究により 1 事例ではあるが、ゲリラ豪雨をもたらす積乱雲の内部に上昇流により立ち上がった鉛直渦管が発達初期段階で観測された。この研究では高度 2000m 以上で初めて反射強度が発見された時刻から 3

分後以降にレーダーで確認された渦管構造についての解析を行っていた。予測精度の向上という観点から、渦管構造を形成する以前の渦度と上昇流との関係を解析することが必要とされていた。

以上の先行研究を踏まえ、本研究の目的は積乱雲発達以前の上昇流の観測を目指し、高度 3km 以下の風速場を直接観測できるとされる境界層レーダー⁵⁾での風速観測可能性を調べることにする。

2. 境界層レーダーについて

(1) 境界層レーダーの観測原理

本研究では境界層レーダーで観測された風速データを使用する。境界層レーダーはウィンドプロファイラー(以下、WPR と示す)の一種である。以下に WPR の観測原理を示す⁶⁾。

WPR は鉛直上向き、鉛直から 14 度北東及び北西に傾いた方向にパルス状の電波を断続的に順次発射する。図 1 にその概念図を示す。発射された電波は、大気乱流に伴う屈折率の揺らぎにより、きわめて微弱であるが散乱される。その散乱波(以下、エコーと称す)が戻ってくるまでの時間から測定を行った高度を求めることができ、高度別の風速データを得られる。また、乱流は風(大気の流れ)に乗って移動するため、エコーはドップラー効果により、散乱点における風速に比例した周波数偏移(以下、ドップラーシフトと称す)を受ける。ドップラーシフトは、受信エコーの時系列データを平均してフーリエ変換することで得られる。

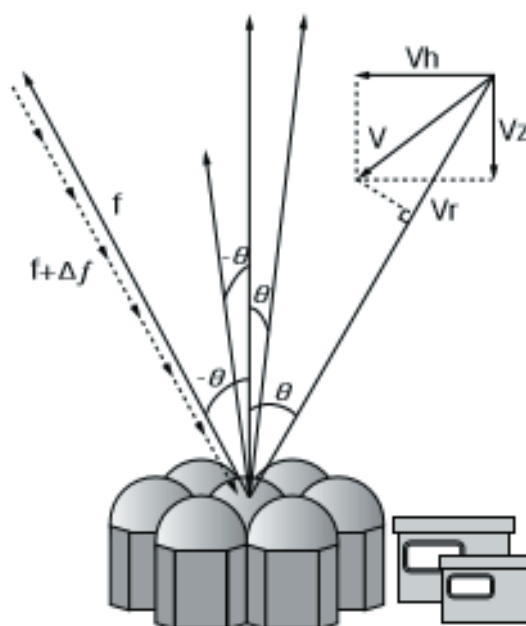


図 1 WPR の原理図 (SEI テクニカルレビュー 第 170 号 p50)

(2) 境界層レーダー

今回使用したのは、ウィンドプロファイラーのうち高度 3km 以下を観測する境界層レーダーである。2019 年度より神戸市長田区に設置されているもので、名称は電波レンズ搭載型対流圏ウィンドプロファイラレーダー(以下、WPR LQ-7)である⁶⁾。(図 2)

これは、2002 年に住友電工により開発された現業用の対流圏 WPR (型番: WPR L-28) をモデルチェンジしたものである。WPR の汎用化に伴い、さらなる観測高度の向上と低廉化の必要性が高まったことにより再開発された。表 1 に示すように新モデルの特徴としては、WPR のアンテナ部にルネベルグレンズと呼ばれる電波レンズを搭載することにより、従来の 40% 減の大幅な低廉化と観測高度向上、機械の長寿命化、メンテナンス性の向上が実現された。

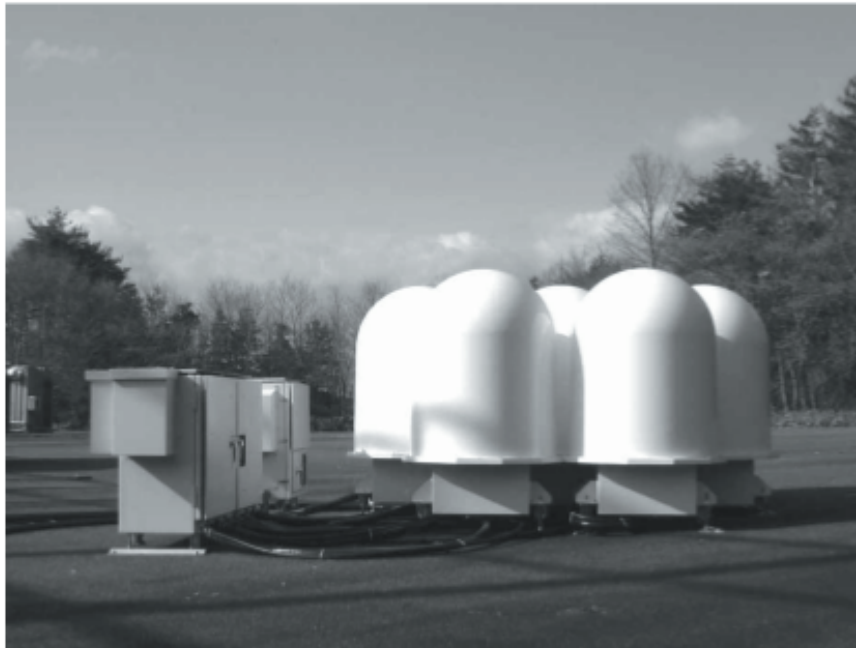


図 2 WPR LQ-7 外観写真

表 1 WPR LQ-7 主要緒元 (SEI テクニカルレビュー 第 170 号 p51)

周波数 (Operational Frequency)	1.3575GHz / 1.290GHz
アンテナ (Antenna)	アクティブ・フェーズド・アレイ (Active Phased Array)
アンテナ利得 (Antenna Gain)	> 30dBi
ビーム方位 (Beam Directions)	$(Az, Ze) = (0^\circ, 0^\circ), (0^\circ, 14^\circ),$ $(90^\circ, 14^\circ), (180^\circ, 14^\circ), (270^\circ, 14^\circ)$
偏波 (Polarization)	直線 (Linear)
ピーク電力 (Peak Power)	> 2000W
平均電力 (Average Power)	> 700W
パルス幅 (Pulse Length)	333ns, 666ns, 1000ns, 1333ns, 2000ns, 2666ns, 4000ns
パルス繰り返し周期 (IPP)	50, 80, 100, 120, 150, 200 μ s
パルス圧縮 (Pulse Compression)	(1), 2, 4, 8, 16 bits (Optimum Complementary codes)
雑音指数 (Noise Figure)	< 2.0dB
ダイナミックレンジ (Dynamic Range)	> 60dB
コヒーレント積分 (Coherent Integration)	可変 Variable (< 200)
FFT 点数 (FFT Points)	64, 128, 256 (default), 512
電源 (Power Supply)	1 ϕ -200V
動作温度 (Operational Temp.)	-30 $^\circ$ C ~ 50 $^\circ$ C (屋外装置 (Outdoor unit))
耐風性 (Wind Durability)	> 90m/s (瞬間 (moment))

3. データ解析

(1) 観測データについて

BLR(Boundary Layer Radar)では、天頂方向、北方向、天頂方向、東方向の順に繰り返し観測を行っており、次の指標が数値として得られる。1. 観測距離 2. エコー強度 3. ドップラー風速 4. スペクトル幅 5. SNR 比 6. 補正エコー強度 6. 補正 SNR 比 7. 観測距離 8. 補正スペクトル幅

観測高度は 300m から 870m であり、15m ごとに上記の 8 指標が得られる。時間分解能は 8 秒である。本研究では鉛直風速の解析を目的としているため、天頂方向にビームを発射した際のデータを使用した。観測距離は観測高度と一致する。風速の値を調べるにあたり、観測されたドップラー風速と補正スペクトル幅に着目した。ここで負の風速はレーダーから遠ざかる方向、正の方向はレーダーに近づく方向を表すため 7)、負の値が上昇流、正の値が下降流を示している。

今回解析を行ったのは 2020 年 7 月 24 日の午前 1 時から午前 2 時の約 1 時間における鉛直風速である。図 4 を参照すると、この日は九州北部で猛烈な雨が降っており、前線や低気圧の影響で西日本から東日本にかけて曇りや雨であったことが分かる。雨が降っているとき WPR が観測するのは雨粒の落下速度になるため、風速を正確に測ることができない。このことから BLR 上空に雨雲がない状態で観測されたデータを解析する必要がある。図 5 は 2020 年 7 月 24 日午前 1 時の神戸市上空の雨雲レーダーの画像¹⁰⁾である。図中に赤丸で示した BLR 設置点(神戸市長田区)上空に雨雲が存在しないことを確認した。また、表 2 に 2020 年 7 月 24 日午前 1 時の神戸市の 10 分ごとの降水量の記録を示す。降水が記録されておらず、雨が降っていなかったことが分かり、風速を正確に観測できる可能性を見出した。

BLR 上空に雨雲がみられないという条件より、7 月 24 日午前 1 時 0 分 6 秒から午前 1 時 59 分 54 秒のデータを選定した。本研究では、1 時間のデータを表 3 のように 6 つのグループに分け解析を行った。

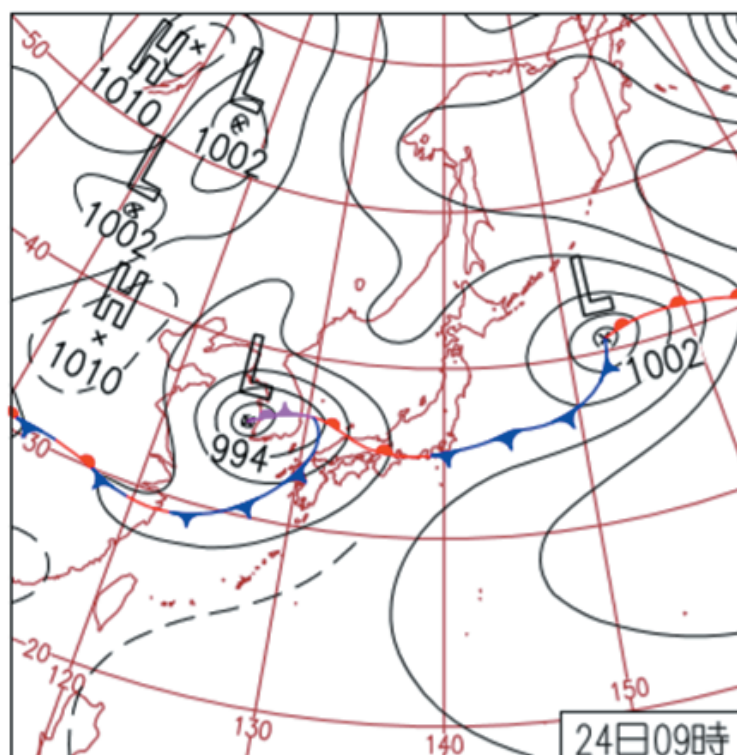


図 4 2020 年 7 月 24 日(金)午前 9 時の天気図

(気象庁 大気海洋部予報課 日々の天気図 No222)



図 5 2020 年 7 月 24 日午前 1 時の雨雲レーダー画像

表 2. 2020 年 7 月 24 日 神戸市の降水量(mm) (気象庁)

時分	降水量 (mm)
1:00	—
1:10	—
1:20	0.0
1:30	0.0
1:40	—
1:50	—

表 3. 解析対象のグループ化

グループ	時間	データ数
1	1:00:06～1:10:04	74
2	1:10:12～1:20:02	73
3	1:20:10～1:30:00	73
4	1:30:08～1:40:06	74
5	1:40:14～1:50:04	68
6	1:50:12～1:59:54	72
合計		434

3.3.1. ドップラー風速の分散と補正スペクトル幅の比較

初めに、表 3 の 6 つのグループごとに高度別のドップラー風速の分散とスペクトル幅の平均を求め、図 6(a) (b) の棒グラフに示した。各図の左列は縦軸に高度、横軸に各グループにおける風速の分散を示している。右列は縦軸に高度、横軸に各グループにおける平均スペクトル幅を示している。

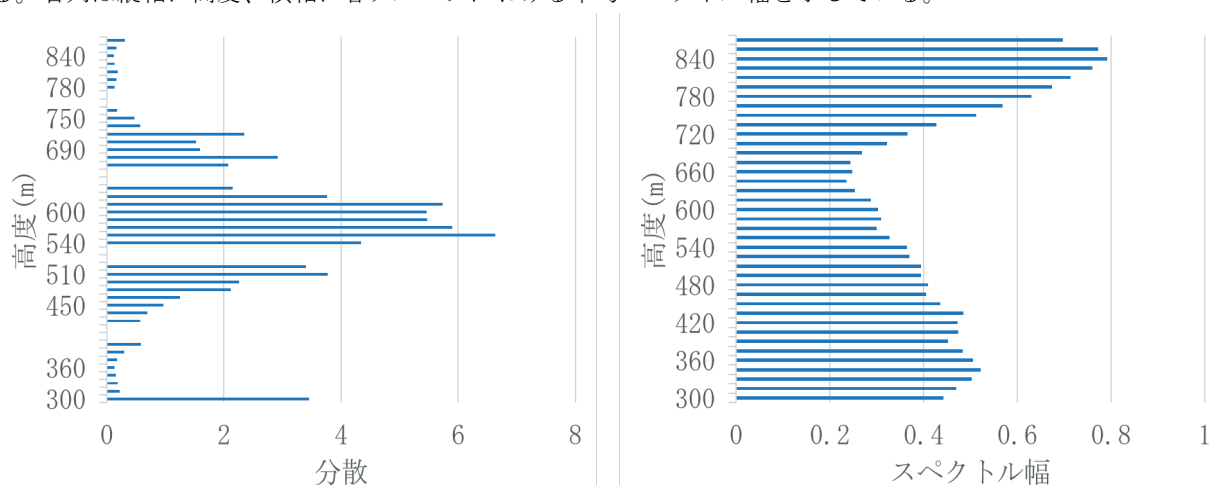


図 6-(a) 1:00:06~1:10:04

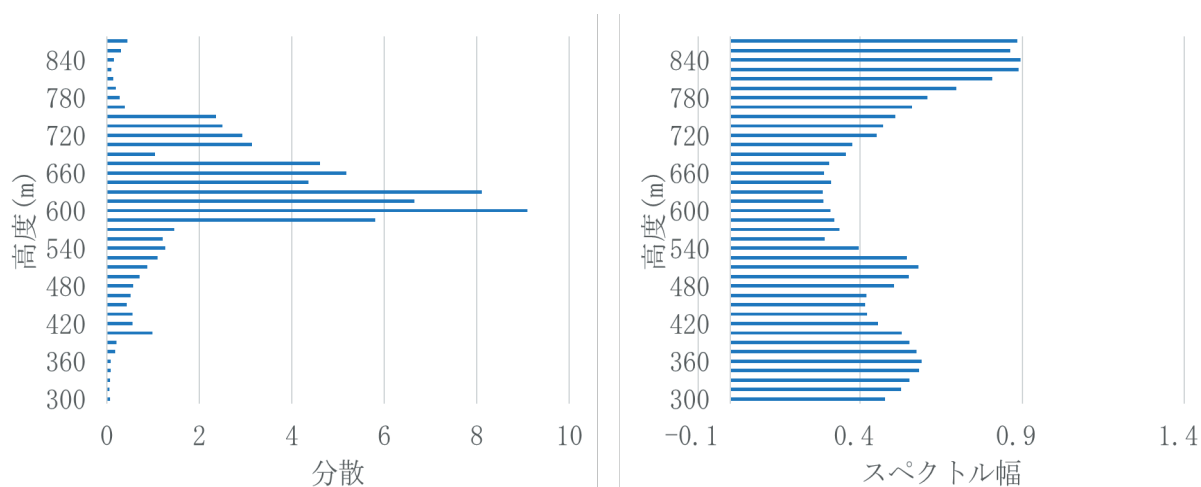


図 6-(b) 1:10:12~1:20:02

観測結果を比較すると、ドップラー風速の分散とスペクトル幅の大きさの間に明確な関係はみられなかった。各指標のピークに注目してもそのことは明らかである。例えば 2020 年 7 月 24 日午前 1 時 10 分 12 秒から 1 時 20 分 2 秒において、分散は高度 600m で最大値 9.1 をとっているのに対し、スペクトル幅は高度 840m で最大値 0.89 をとっている。

3.3.2 平均ドップラー風速と最大ドップラー風速

次に、観測されたドップラー風速とスペクトル幅から、任意の地点において考えられうるドップラー風速の最大値を計算した。ドップラー風速が正の場合、すなわちレーダーに近づく方向で下降流の場合、ドップラー風速にスペクトル幅を足し合わせた。反対に、ドップラー風速が負の値で観測された場合、すなわちレーダーから遠ざかる向きで上昇流の場合はドップラー風速からスペクトル幅を引いて求めた。

表 3 の 6 つのグループにおける結果を図 7 に示す。左列は縦軸が高度、横軸が観測されたドップラー風速を示している。また、右列は縦軸が高度、横軸が本研究で計算した観測されうる最大のドップラー風速を示している。

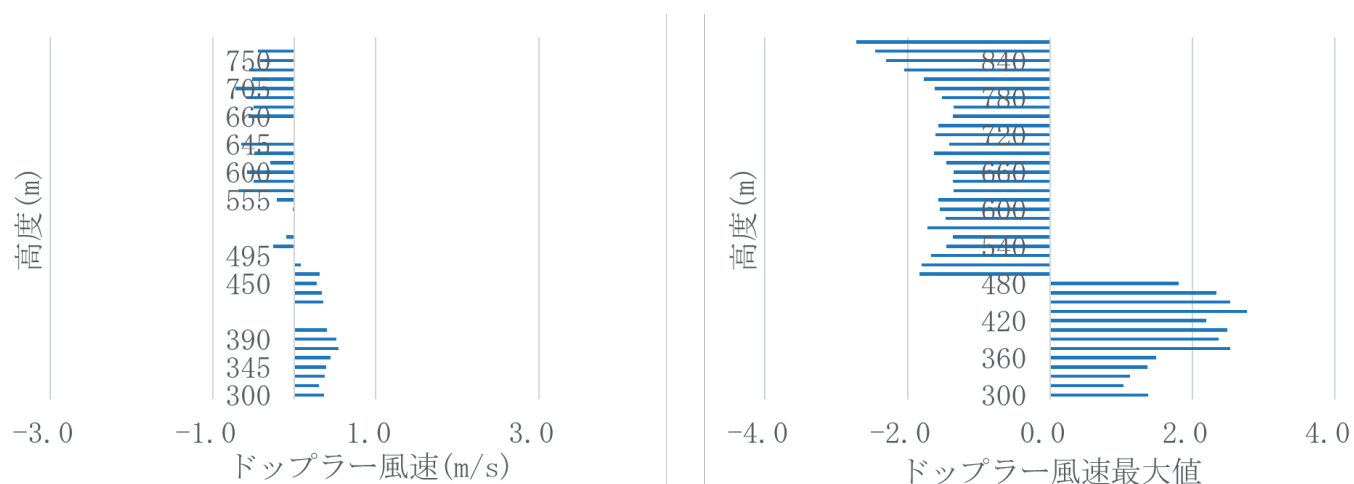


図 7-(a) 1:00:06~1:10:04

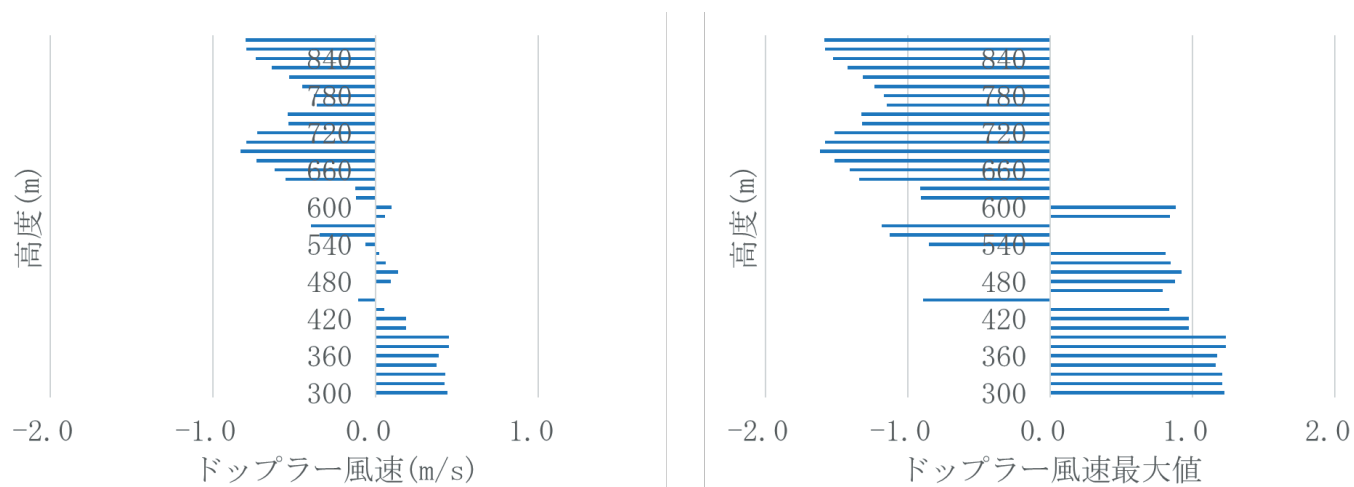


図 7-(b) 1:10:12~1:20:02

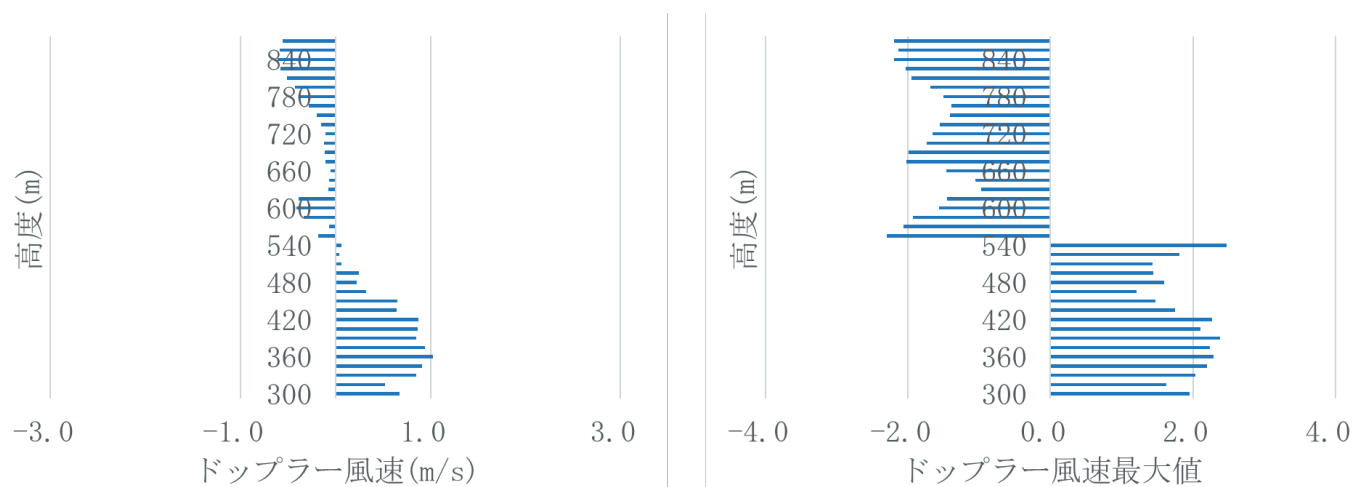


図 7-(c) 1:20:10~1:30:00

さらに、7月24日1時0分6秒から1時59分54秒において、観測された平均ドップラー風速からスペクトル幅を考慮した最大ドップラー風速への高度別の変化率の最大値を式から計算した。縦軸に高度、横軸に変化率を示している

$$\text{変化率} = \text{ドップラー風速} / (\text{ドップラー風速} + \text{スペクトル幅}) \times 100(\%)$$

ここで、変化率の意味について説明する。ドップラー風速とスペクトル幅が等しいとき変化率は50%になる。また、スペクトル幅の値がドップラー風速より大きい場合、変化率は50%より小さくなる。この場合実際の風速とは正負が反対に示される可能性がある。つまり、流れの向きが反対に示される可能性がある。また、ドップラー風速がスペクトル幅より大きい場合、スペクトル幅を考慮しても正負は保持されるため、流れの向きは正しく評価されると考えた。そのため本研究では変化率50%に着目した。

その結果、グループ1では高度705mと870mで変化率が50%を超え、この2地点における平均ドップラー風速は向きを正しく評価していると考えられる。グループ2では、4地点で変化率が50%を超えることが分かった。グループ3では50%を超えた地点はみられず、全域で風速の正負が確かでないことが分かった。グループ5でも同様の結果となった。また、グループ6では375m～555mにかけて6地点で風速の正負を正しく評価していると考えられる。

4. 結論

本研究における解析により、境界層レーダーで観測された風速は実際の風速より小さく評価される可能性があることが分かった。よって、境界層レーダーで積乱雲発達以前の上昇流を観測する場合には、風速の正確性を高めるためにスペクトル幅を考慮する必要があると考えた。また、スペクトル幅による風速の誤差が上昇流の観測や渦度の解析にどの程度の影響を及ぼすのか、事例解析を進める必要がある。また、境界層レーダーで観測された風速の乱れの指標であるスペクトル幅とドップラー風速の分散には関連性がないことが判明した。これは今回解析を行った事例に特有の特徴なのか、ほかの時間帯でも解析を行うことで調べる必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会都賀川水難事故調査団：都賀川水難事故調査について、2008
- 2) 中北英一・山邊祥之・山口弘誠：ゲリラ豪雨の早期探知に関する研究，水工学論文集，第54巻，p343-348，2010
- 3) 中北英一・西脇隆太・山邊洋之・山口弘誠：ドップラー風速を用いたゲリラ豪雨のタマゴの危険性予知に関する研究，水工学論文集，第57巻，p325-330，2013
- 4) 中北英一・佐藤悠人・山口弘誠：ゲリラ豪雨をもたらす積乱雲初期における鉛直渦管形成の解析，京都大学防災研究所年報，第59号B，p249-225，2016
- 5) 今井克之・中川貴央・橋口博之：電波レンズ搭載型対流圏ウィンドプロファイラレーダー(WPR LQ-7)の開発，SEIテクニカルレビュー，第170号，p49-53，2007.
- 6) 深尾昌一郎・浜津享助：気象と大気のレーダーリモートセンシング，京都大学学術出版会，9版，p67-68，2005
- 7) tenki.jp, 兵庫県の過去の天気，2020年7月
<https://tenki.jp/past/2020/07/24/radar/6/31/>

筆者： 1) 澤田真子，工学部市民工学科，学生；
2) 大石哲，都市安全研究センター，教授

Study on vertical wind profile before and after convective rain by using Boundary Layer Radar

Mako SAWADA
Satoru OISHI

Abstract

Recently, flood by sudden rainfall is tending to increase. Sudden rainfall is brought by developed cumulonimbus cloud. In order to reduce damage of flood, there are researches on prediction of whether cumulonimbus cloud will develop or not. Nakakita et al. found that vorticity is associated with convective updraft and that is relating to development of cumulonimbus cloud. To research of relation between updraft and vorticity, it is necessary to study atmosphere before development of cumulonimbus cloud. In this study, I analyzed how the vertical velocity is observed by Boundary Layer Radar which has a possibility of capturing lower velocity.

©2021 Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, All rights reserved.