



高時間分解能鉛直風速プロファイルの時間変動特性に関する研究

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, 27:57-67

(Issue Date)

2023-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/0100482520>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100482520>



高時間分解能鉛直風速プロファイルの 時間変動特性に関する研究

Study on time variation characteristics of vertical wind velocity

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

概要：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．気象庁は局所的大雨に対する防災情報をいくつか発信しているが，現在の雨の観測による危険性の予測はせいぜい5分から10分である．一刻も早い避難のためには，より早い局地的大雨による危険性の把握が重要である．

局地的大雨の予測に関する研究として，中北ら(2016)は発達初期段階のゲリラ豪雨の内部に上昇流による鉛直渦管の立ち上がりを確認した．この研究により局所的大雨をもたらす積乱雲の発生メカニズムにおいて空気塊の上昇，すなわち上昇流は重要な要素の1つであることが明らかになった．

本研究は孤立積乱雲や局所的大雨へと繋がる前の上昇流の特徴を捉えることを目的として，晴天日において神戸市長田区で観測された鉛直風速を対象とし解析を行った．

まず，鉛直風速の時間変動特性を調べるために時系列データにウェーブレット解析を行った．その結果，高度1200mにおいて1時間の周期で変動する風が存在することを確認した．さらに鉛直風速に影響を与える要素を明らかにするため，気象要素との比較を行った．プラントバイサラ周期と元の鉛直風速の周期を比較した結果，プラントバイサラ周期の寄与が相対的に大きい場合，鉛直風速が最大で3.3倍大きくなっていた．プラントバイサラ周期が鉛直風速の振幅に影響を与える可能性が示唆された．

キーワード：鉛直風速時系列，境界層レーダー，ウェーブレット解析，プラントバイサラ周期

1. はじめに

近年，局地的大雨の発生頻度が増加傾向にある．気象庁は，局地的大雨を「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」と定義している．

加藤(2022)は，地域気象観測システム(AMeDAS)で計測された1976年から2020年の降雨量データから集中豪雨（3時間積算降雨量P3Hが130mm以上）と短時間大雨（1時間積算降雨量P1Hが68mm以上）の年間発生回数から，ともに信頼水準99%以上で統計的に有意な増加傾向を示しているとしている．局地的大雨の予測に関する既往研究として，中北ら(2010)は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．また中北ら(2013)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た．さらに渦度による危険性予測手法を開発した．中北ら(2016)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としている。

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る。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る。

局所的大雨をもたらす積乱雲の発生メカニズムにおいて空気塊の上昇、すなわち上昇流は重要な要素の 1 つである。夏季において太陽の日射や人工排熱の影響により都市部からは上昇流が多く発生する。そこで、本研究では、孤立積乱雲や局所的大雨へと繋がる前の上昇流の特徴を捉えることを目標に解析を進める。すなわち本研究では、晴天日において神戸市長田区で発生した鉛直風速の高解像度時系列の特徴を解明することを目的とする。

2. 境界層レーダー観測の概要

(1) 境界層レーダーについて

ここでは、今井(2007)を引用して境界層レーダーについて説明する。本研究で使用的是ウィンドプロファイラー（以下、WPR）のうち高度 3km 以下を観測する境界層レーダー（以下、BLR）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、WPRLQ-7）である。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: WPRL-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。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。また、WPR の写真を図 1 に示し、WPR の主要諸元を表 1 に示す。



図 1 WPRLQ-7 外観写真（今井，2007 より）

表 1 WPR LQ-7 の主要諸元（今井，2007 より抜粋）

周波数 (GHz)	1.3575 / 1.290
アンテナ	アクティブ・フェーズドアレイ
ビーム方位(°) (方位角, 俯角)	(0, 0), (0, 14), (90, 14), (180, 14), (270, 14)
パルス幅 (ns)	333, 666, 1000, 1333, 2000, 2666, 4000
パルス繰り返し周期 (μs)	50, 80, 100, 120, 150, 200
雑音指数	< 2.0dB

(2) 境界層レーダーの観測原理

BLR 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。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、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。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。

BLR 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、指標 (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，(7)補正 SNR 比，(8)観測距離，(9)補正スペクトル幅が数値として得られる。

観測高度は 300m から 3000m であり，15m ごとに上記の 8 指標が得られる．観測時間分解能はパルス幅やパルス繰り返し周期で決まり，データにする時間分解能は 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に着目した．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，負の値が上昇流，正の値が下降流を示している．

3. 境界層レーダー観測の概要



図 2 境界層レーダーの観測地点

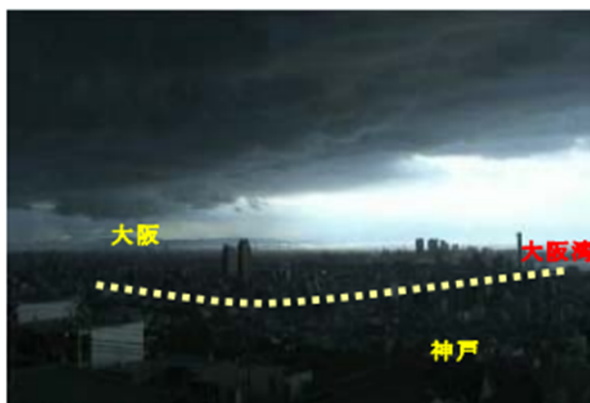


図 3 神戸市上空で発生した積乱雲の様子
藤田 (2009) より

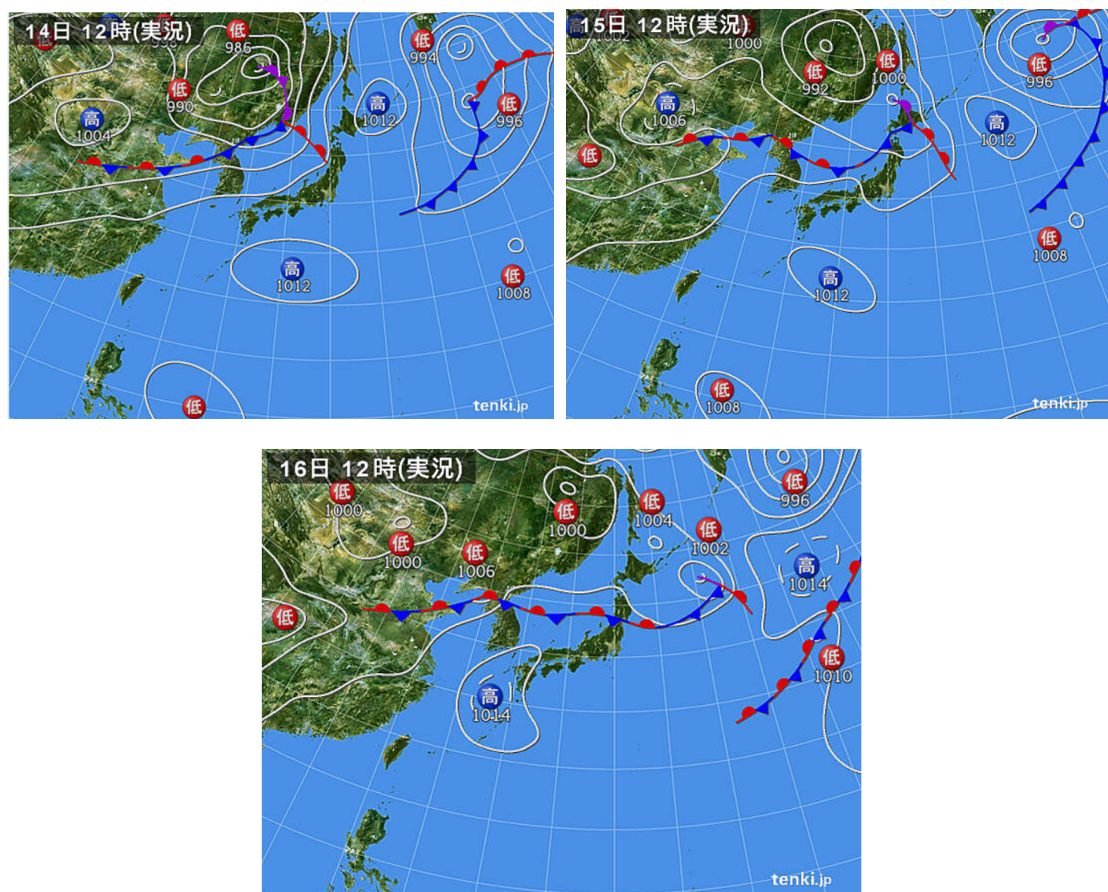


図 4 2020 年 8 月 14 日 12 時，15 日 12 時，16 日 12 時の日本付近の実況天気図
日本気象協会 WEB より転載

(1) 観測地点と観測対象日時

兵庫県神戸市長田区に位置する神戸常磐大学(N34.67, E135.14)敷地内に設置された WPR を使用して鉛直風速の観測を行った。本研究で利用した WPR の設置点を図 2 に示す。本地点は大阪湾からの暖湿流が六甲山により持ち上げられ積乱雲が発達しやすい地域である。本観測地点付近における積乱雲の発達事例を図 3 に示す。

事例解析では、(1)2020 年 8 月 14 日、(2)2020 年 8 月 15 日、(3)2020 年 8 月 16 日の 3 日間で解析を行った。図 4 に 3 日間の 12 時における実況天気図を示す。3 日間ともに太平洋高気圧が大きく広がった典型的な夏の日の気圧配置であった。また 3 日間とも降雨はみられなかった。

(2) アメダスデータによる 3 日間の気象変化

気圧、水平風速、日照時間の 3 日間の変化を比較するために、図 5 に日中のデータを示す。気圧の変化に着目すると 8 月 16 日のみ平均して 1hPa 高かった。以上より、水平風速の変化、日照時間の変化に明確な差はみられなかった。

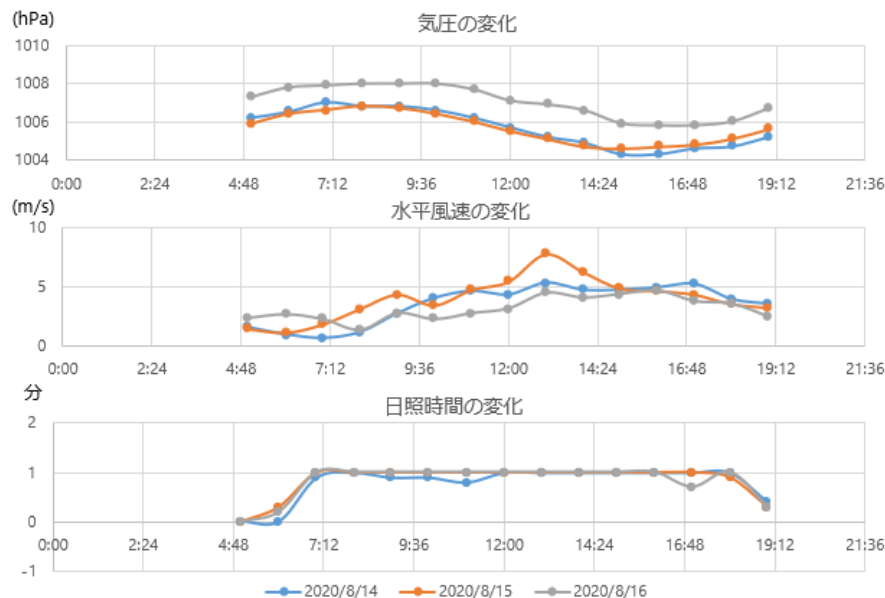


図 5 2020 年 8 月 14 日、15 日、16 日における気圧、水平風速、日照時間の変化 (7)

4. 境界層レーダーによる鉛直風速観測結果

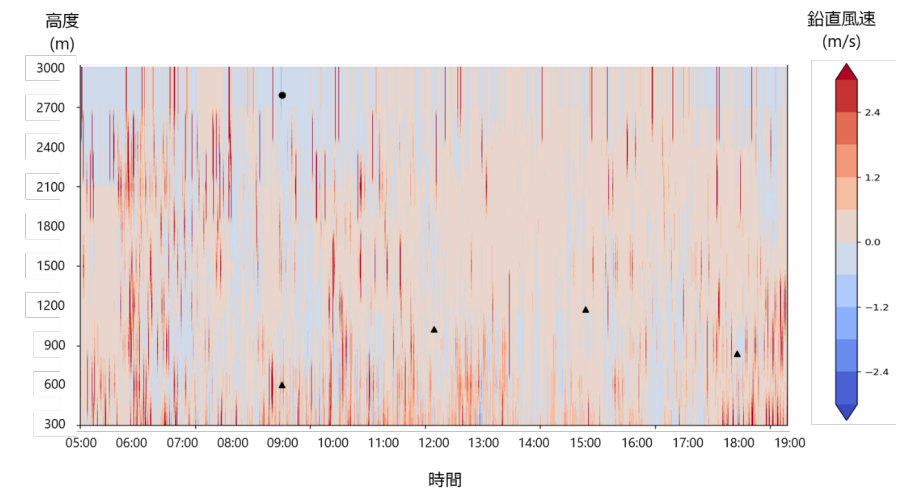
(1) 鉛直風速プロファイルの時間変化とそのウェーブレット解析

高度 3km 以下の鉛直風速プロファイルの時間変化を示す。図中に気象庁メソスケールモデル解析値（以下 MSM）から算出した、9, 12, 15, 18JST における LCL と LFC(▲:LCL, ●:LFC)を記載した。

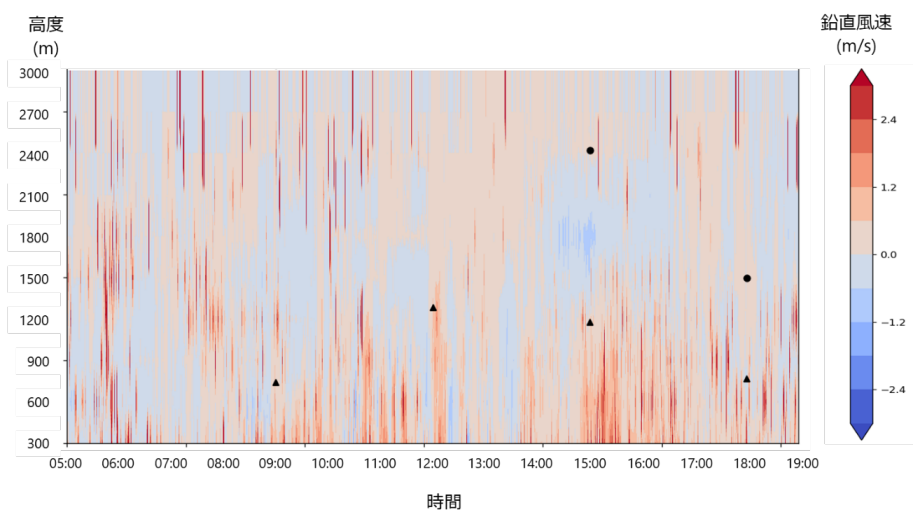
また高度 1200m における鉛直風速に対して、Torrence and Compo(1998)の方法でウェーブレット解析を実施した結果を図 6 に示す。3 日間に共通して 4096 秒(約 68 分)周期の風が 8:00~17:00 の間にみられた。また、2048 秒(約 34 分)周期の風に着目すると 8 月 15 日、8 月 16 日では継続して発生していたのに対し、8 月 14 日では不連続であった。

(2) 移動平均

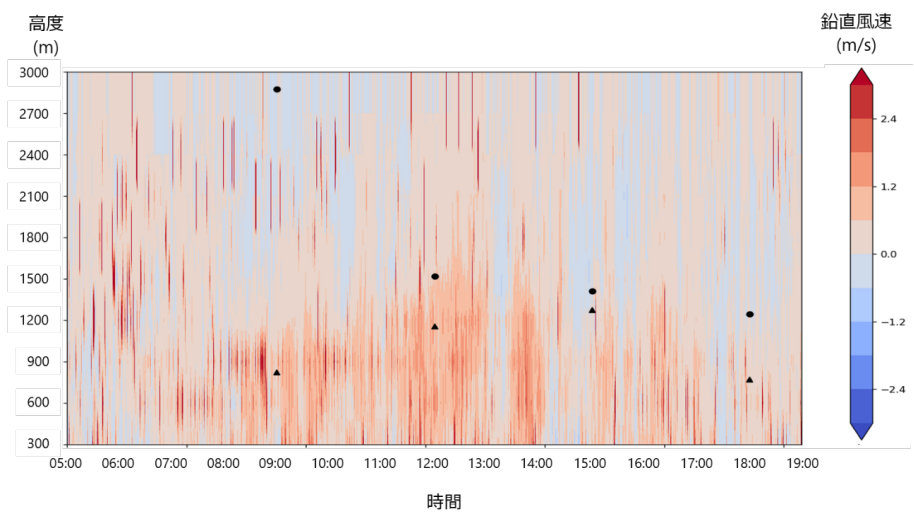
次に高度 1200m において 3 日間で共通して観測された 4096 秒周期の風を抽出するために、元の時系列データに対し 2048 秒で移動平均をとった。さらにウェーブレット解析の結果との比較を行った。その結果 8 月 16 日 11:30~12:30、12:30~13:30 に 1 時間周期の風が発生していた。他の 2 日と異なり正の上昇流のみ継続して発生していた。



(a) 2020 年 8 月 14 日

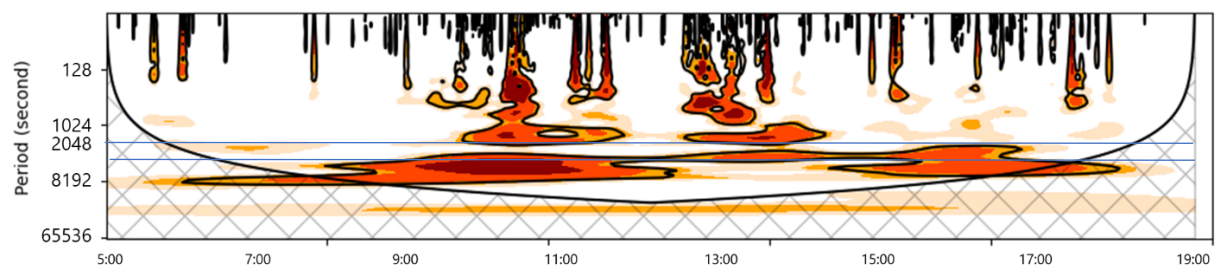


(b) 2020 年 8 月 15 日

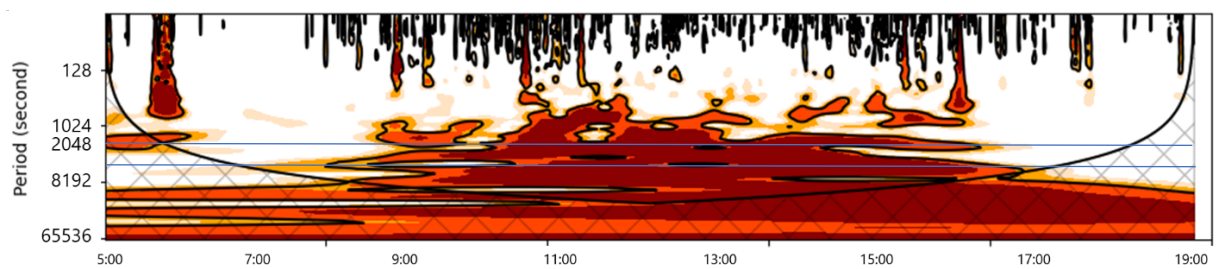


(c) 2020 年 8 月 16 日

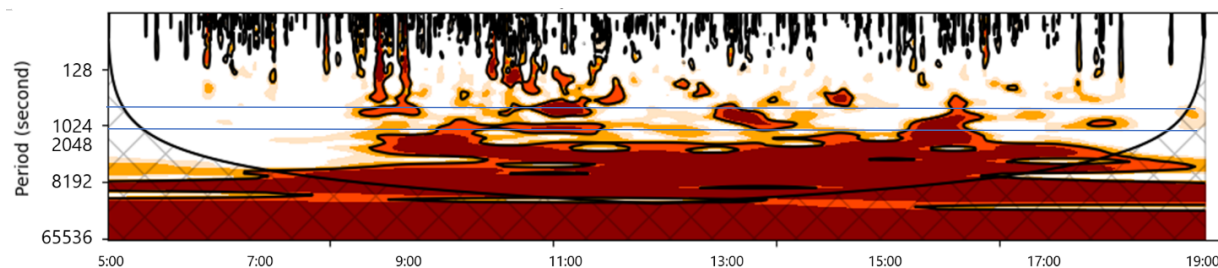
図 6 鉛直風速プロファイルの時間変化



(a) 2020 年 8 月 14 日

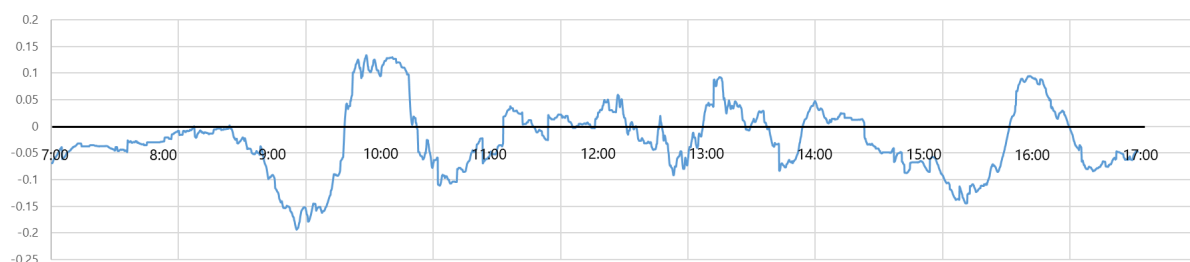


(b) 2020 年 8 月 15 日

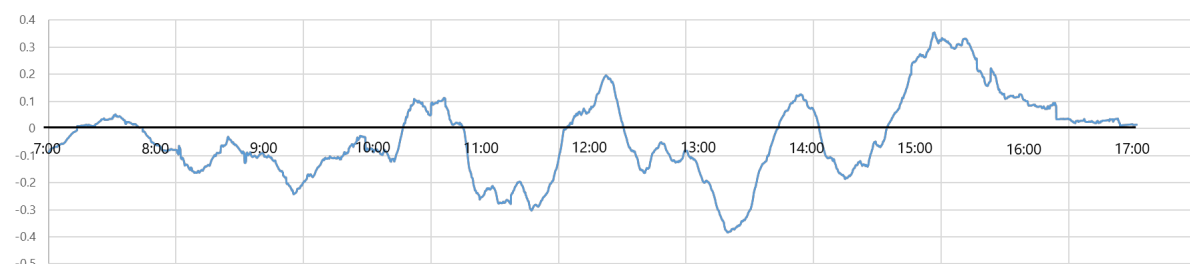


(c) 2020 年 8 月 16 日

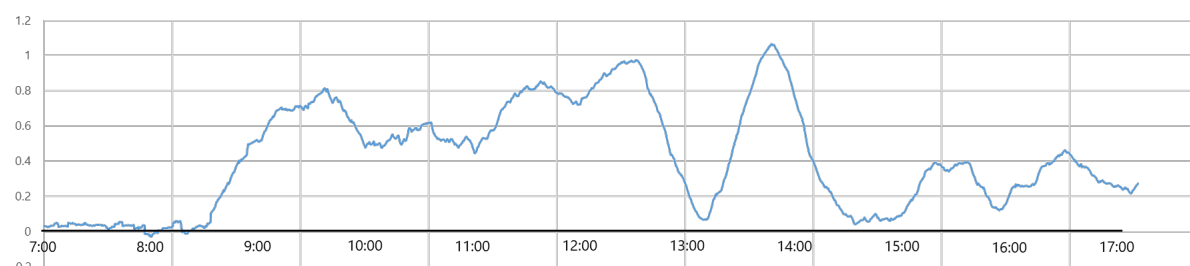
図 7 高度 1200m の鉛直風速の時系列にウェーブレット解析を行った結果
赤く塗った部分が有意な波長帯を表す



(a) 2020 年 8 月 14 日



(b) 2020 年 8 月 15 日



(c) 2020 年 8 月 16 日

図 8 高度 1200m の鉛直風速の時系列に移動平均処理をした時系列

5. ブラントバイサラ振動数が鉛直風速に与える影響を与える分析

ここでは MSM から算出したブラントバイサラ振動数の逆数を取り周期として鉛直風速との関係について調べた。各時刻それぞれのブラントバイサラ周期(秒)を表 2 に示す。メソスケールモデルから得られるのは 9:00, 12:00, 15:00 の値なので 10:00, 11:00, 13:00, 14:00 の値は線形補完して算出した。

表 2 各時刻におけるブラントバイサラ周期(秒)

	8月14日	8月15日	8月16日
9:00	462.5	458.5	435.2
10:00	395.3	499.5	505.4
11:00	477.4	540.5	575.5
12:00	484.9	581.5	645.7
13:00	474.6	570.7	779.7
14:00	464.4	559.9	913.6
15:00	454.1	549.1	1047.6

次に 8 秒ごとの鉛直風速の時系列データにバンドパスフィルタをかけることで、ブラントバイサラ周期との関係を調べた。ブラントバイサラ周期と鉛直風速の周期が一致、または近似するとき鉛直風速に共鳴してブラントバイサラ周期に相当する振幅が大きくなると仮定した。

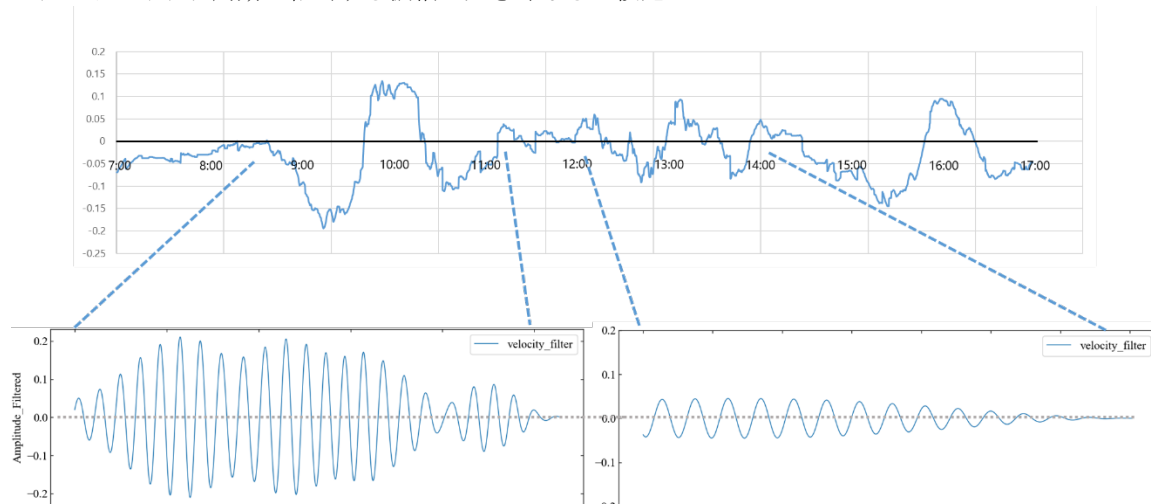


図 9 2020 年 8 月 14 日における高度 1200m の鉛直風速の時系列に 2048 秒の移動平均をかけたもの（上）
ブラントバイサラ周期でバンドパスフィルタをかけたもの（下）

表 3 2020 年 8 月 14 日移動平均後の高度 1200m の鉛直風速の振幅とブラントバイサラ周期の関係

	9:00~11:00	12:00~14:00
(1)移動平均後の振幅	0.17	0.10
(2)ブラントバイサラ周期抽出後の振幅	0.20	0.05
(2)/(1)*100	117.65	50.00

2020 年 8 月 14 日 9:00~11:00, 12:00~14:00 の分析結果を図 9 に示す。上段の図は 7:00~17:00 における鉛直風速の観測結果に 2048 秒で移動平均をとったものである。下段の左図は 9:00, 11:00 のブラントバイサラ周期を通過領域に設定しバンドパスフィルタをかけた結果である。下段の右図は 12:00, 14:00 のブラントバイサラ周期を通過領域に設定しバンドパスフィルタをかけた結果である。下段のそれぞれのブラントバイサラ周期でのバンドパスフィルタ通過後の(1)移動平均後の振幅、(2)ブラントバイサラ周期抽出後の振幅、(1)に対する(2)の割合を表 3 に示す。両者を比較するとブラントバイサラ周期の寄与が 118%であった 9:00~11:00 の波が 50%であった 12:00~14:00 の波より、振幅が 1.7 倍大きくなっていた。

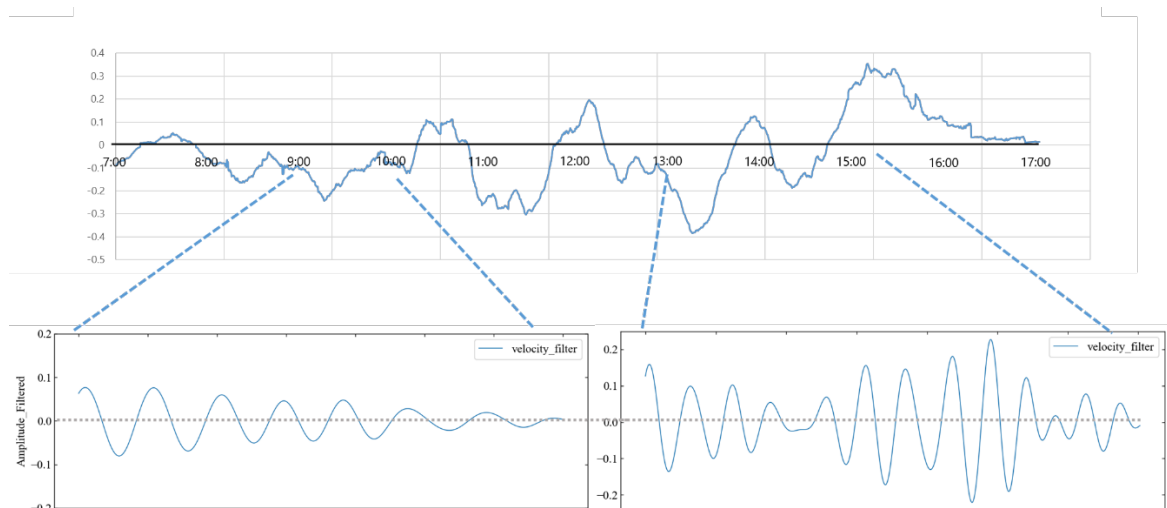


図 10 2020 年 8 月 15 日における高度 1200m の鉛直風速の時系列に 2048 秒の移動平均をかけたもの（上）
ブラントバイサラ周期でバンドパスフィルタをかけたもの（下）

表 4 2020 年 8 月 15 日における高度 1200m の鉛直風速の振幅とブラントバイサラ周期の関係

	9:00~10:00	13:00~15:00
(1)移動平均後の振幅	0.075	0.10
(2)ブラントバイサラ周期抽出後の振幅	0.08	0.28
(2)/(1)*100	106.67	280.00

2020 年 8 月 15 日 9:00~10:00, 13:00~15:00 の分析結果を図 10 に示す。上段の図は 7:00~17:00 における鉛直風速の観測結果に 2048 秒で移動平均をとったものである。下段の左図は 9:00, 10:00 のブラントバイサラ周期を通過領域に設定しバンドパスフィルタをかけた結果である。下段の右図は 13:00, 15:00 のブラントバイサラ周期を通過領域に設定しバンドパスフィルタをかけた結果である。下段のそれぞれのブラントバイサラ周期でのバンドパスフィルタ通過後の(1)移動平均後の振幅、(2)ブラントバイサラ周期抽出後の振幅の関係、(1)に対する(2)の割合を表 4 に示す。両者を比較するとブラントバイサラ周期の寄与が 280.00%であった 13:00~15:00 の波が、107%であった 9:00~10:00 の波より振幅が 1.3 倍大きくなっていた。

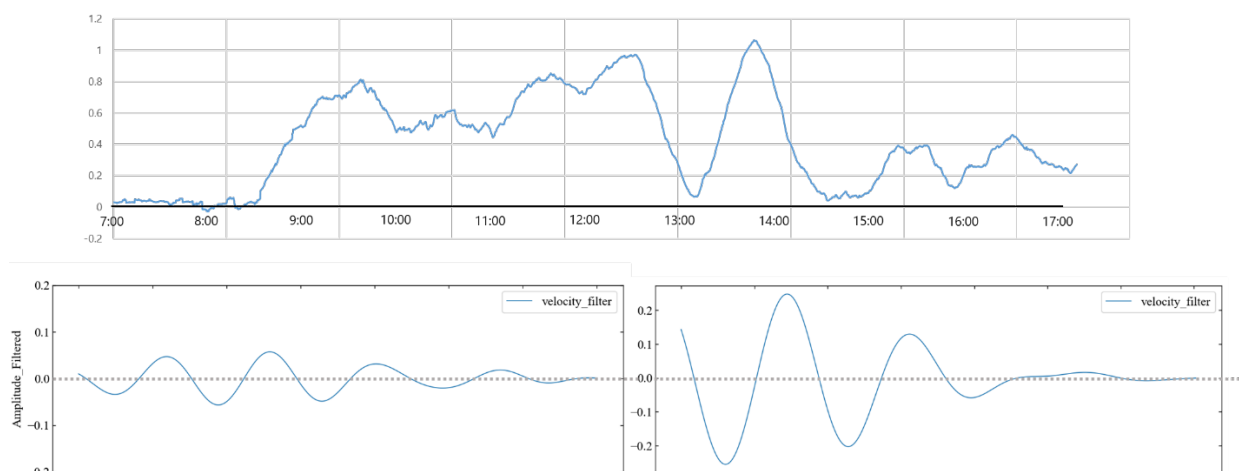


図 11 2020 年 8 月 16 日における高度 1200m の鉛直風速の時系列に 2048 秒の移動平均をかけたもの（上）
とブラントバイサラ周期でバンドパスフィルタをかけたもの（下）

表 5 2020 年 8 月 16 日における高度 1200m の鉛直風速の振幅とブラントバイサラ周期の関係

	11:30~12:30	12:30~13:30
(1)移動平均後の振幅	0.15	0.50
(2)ブラントバイサラ周期抽出後の振幅	0.04	0.25
(2)/(1)*100	26.67	50.00

2020 年 8 月 16 日 11:30~12:30, 12:30~13:30 の分析結果を図 11 に示す。上段の図は 7:00~17:00 における鉛直風速の観測結果に 2048 秒で移動平均をとったものである。下段の左図は 11:30, 12:30 のブラントバイサラ周期を通過領域に設定しバンドパスフィルタをかけた結果である。下段の右図は 12:30, 13:30 のブラントバイサラ周期を通過領域に設定しバンドパスフィルタをかけた結果である。下段のそれぞれのブラントバイサラ周期でのバンドパスフィルタ通過後の(1)移動平均後の振幅, (2)ブラントバイサラ周期抽出後の振幅の関係, (1)に対する(2)の割合を表 5 に示す。両者を比較するとブラントバイサラ周期の寄与が 50.00%であった 12:30~13:30 の波が, 26.67%であった 11:30~12:30 の波より振幅が 3.3 倍大きくなっていた。

8 月 16 日の 9:00 前から鉛直上昇流が継続しているが, 11:30~12:30 の時点のブラントバイサラ周期よりも長い周期の影響によってこのような鉛直風が継続していると考えられる。同様に, 12:30~13:30 の鉛直風の 1 時間程度周期の増減はブラントバイサラ周期の振幅よりは大きい。

6. 結論

局所的大雨をもたらす積乱雲の発生メカニズムにおいて空気塊の上昇, すなわち上昇流は重要な要素の 1 つである。孤立積乱雲や局所的大雨へと繋がる前の上昇流の特徴を捉えることを目標に解析を進めた。本研究では, 晴天日において神戸市長田区で観測された鉛直風速の高解像度時系列の特徴とその生起メカニズムについて調べた。

鉛直風速の時系列データにウェーブレット解析を行った結果, 高度 1200m において 1 時間の周期で変動する風が存在することを確認した。さらに鉛直風速に影響を与える要素を明らかにするため, 気象要素との比較を行った。ブラントバイサラ周期と元の鉛直風速の周期を比較した結果, ブラントバイサラ周期の寄与が考えられるとき, 鉛直風速が最大で 3.3 倍大きくなっていた。ブラントバイサラ周期が鉛直風速の振幅に影響を与える可能性が示唆された。

謝辞: 本研究を実施するために, JSPS 科研費 21H01436 の助成を受けました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

C. Torrence and G. P. Compo, A Practical Guide to Wavelet Analysis, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol79, pp.61-78, 1998.

今井克之, 中川貴央, 橋口浩之, 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, Vol170, pp.49-53, 2007.

加藤輝之, 2022, アメダス 3 時間積算降水量でみた集中豪雨事例発生頻度の過去 45 年間の経年変化, 天気, 69 巻 5 号, pp.4-8, 2022.

中北英一, 山邊洋之, 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, pp.343-348, 2010.

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, 土木学会論文集(水工学), Vol69, N0.4, pp.325-330, 2013.

中北英一, 佐藤悠人, 山口弘誠, ゲリラ豪雨のタマゴ生成時における渦管構造の基礎的解析, 土木学会論文集(水工学), Vol72, N0.4, pp.199-204, 2016.

藤田一郎, 都賀川水難事故調査について, 平成 20 年度河川水害に関するシンポジウム, pp.1-22, 2009.

日本気象協会, 実況天気図, 日本気象協会 Web ページ (<https://tenki.jp/past/2020/08/14/chart/>) (2023/01/26 アクセス)

筆者: 1) 澤田眞子, 工学研究科市民工学専攻, 学生;
2) 大石哲, 都市安全研究センター, 教授

Study on Time Variation Characteristics of Vertical Wind Velocity

Mako SAWADA
Satoru OISHI

Abstract

The aim of this study is to capture the characteristics of the vertical wind velocity observed by the boundary layer radar. Using a wavelet transform with Morlet wavelet, we could find vertical velocity with a period of about 1 hour. Furthermore, it was suggested that the Brunt-Vaisala affects the amplitude of the vertical wind speed.

©2022 Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, All rights reserved.