

# レーダーネットワークを活用した統合防災システムの構築

山中 稔\*・佐々浩司\*\*・橋本 学\*\*\*・中川 一\*\*\*・川池健司\*\*\*  
・張 浩\*\*・森 牧人\*\*・村田文絵\*\*・寺尾 徹\*

\* 香川大学

\*\* 高知大学自然科学系

\*\*\* 京都大学防災研究所

## 要 旨

本研究は、災害につながるような極端気象が頻発する高知県をフィールドとして5台のMPドップラーレーダーと地上観測ネットワーク、GPS可降水量データの利用などからなる大雨や突風などに対する統合的な気象防災システムを構築することを目的とするものである。2年間でレーダーネットワーク、地上観測ネットワークおよび水位計などによる観測体制を確立し、レーダーネットワークによる降水量評価、河川氾濫対応操作、GPS可降水量による降雨予測などを行ってきた。ここでは、レーダーネットワークに関連する成果を中心として紹介する。

## 1. はじめに

太平洋に面する高知県は、年間降水量が2500mmを超過時間雨量50mmを超える強雨も多発する突出した豪雨地域であり、四国の瀬戸内海側に面する他県とは明瞭な気候学的な違いが見られる。2018年7月の西日本豪雨(気象庁 2018)においても対象期間に最も多くの降水量を記録したのは高知県内の魚梁瀬であった。また、高知市から安芸市にかけての海岸線沿いの地域はほぼ毎年1回は竜巻被害が発生する竜巻地域(Sassa et al. 2011)でもある。

本研究は、このような風水害の危険性が高い高知県において、高知大学が運用しているMPドップラーレーダーネットワーク(図-1)を用いて、1~2分程度のタイムラグで大雨、洪水、突風などに関連する情報を提供するとともに、GPS可降水量データも用いた統合的な防災システムを構築し、その有効性を検証することを目的とするものである。2016年度からの2年間に地上気象観測ネットワークを構築して高知大学のMPドップラーレーダーの降水量評価の検証(西井, 佐々 2017, 2018, 村田, 佐々 2017, Murata & Sassa 2017)や、レーダーネットワーク表示アルゴリズムの作成(西井, 佐々 2018)を行ってきた。また、レーダー降水量を関連づけた内水外水氾濫予測の関連調査として2014年豪雨で氾濫のあった高知市北部の久万川、紅水川に水位計観測網を構築し、排水ボ

ンプ稼働に伴う降雨量と水位の遷移関係を調査(Zhang et al. 2017, 坂東ら 2017)するとともに、マンホール内の水の挙動に関する実験(Zhnag et al. 2017, 2018, 松田ら 2017)も行ってきた。さらに、GPS可降水量を用いた大雨予測指標の評価(森ら 2016, 2018, 坂出ら 2017, Mori et al. 2017)を行い、統合防災システムとしてのパーツを築き上げてきた。ここでは、これらのうちレーダーを主体とした研究成果のみについて紹介する。

## 2. 降雨観測精度の評価

### 2.1 雨量評価手法

本レーダーネットワークにおける各レーダーは図-1に示す朝倉レーダーのみ探査範囲80km、それ以外は30kmのXバンドMPレーダーである。観測モードは現在は朝倉レーダーが3~5度の低仰角を1分毎、5分で高仰角までボリュームスキャンを行い、他のレーダーは3度~16度の5仰角を1分毎にボリュームスキャンしている。これらのレーダーの降雨量推定は、 $Kdp$  [deg/km]および水平反射因子 $Z$  [mm<sup>6</sup>/m<sup>3</sup>]を以下の式で降雨強度 $R$  (mm/h)に換算することにより行った。

・  $Kdp$ - $R$ 関係式( $Z > 30$  dBかつ $Kdp > 0.3$  deg./kmの場合適用)

$$R = \alpha \times 19.6 \times Kdp^{0.825} \quad (1)$$

・  $Z$ - $R$ 関係式(上記の場合以外に適用)

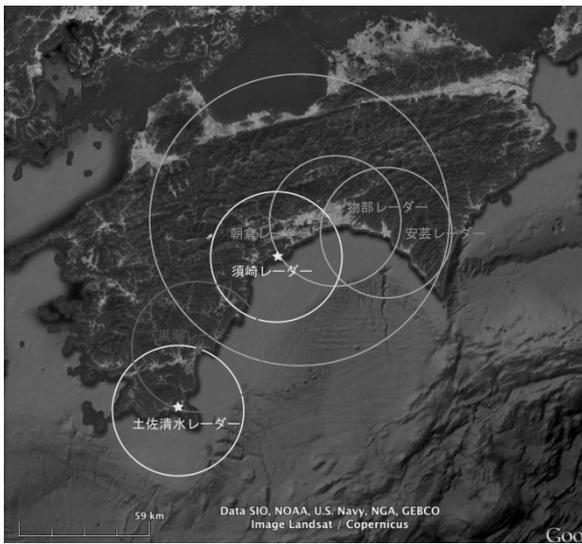


図-1 各レーダーの観測範囲 緑は既存、黄色は2018年4月より稼働、赤は2018年10月設置予定

$$Z=BR^\beta \quad (2)$$

$Kdp$ - $R$ 関係式に関してはMaki et al. (2005)の式を基にしているが、本レーダーにおいて $K_{DP}$ - $R$ 関係式の過小評価が確認されていることからXRAINを参考に補正係数 $\alpha=1.3$ を導入している(Maesaka et al., 2011)。 $Kdp$ は降雨減衰の影響を受けない一方で、弱雨においてはノイズの影響が大きくなることから、強雨(約9.4 mm/h以上)と弱雨で関係式を切り替えている。 $Z$ - $R$ 関係式に関しては降水の特性以外にもレーダーの較正や個体差によって関係式が異なることから、後の節で紹介するように、それぞれの反射強度 $Z$ と雨量データ $R$ の散布図により回帰線を求めてレーダー毎に係数 $B$ 、 $\beta$ を決定した。係数の決定にあたっては $Z=20\sim 30$  dBZにおける1 dBZ毎の層別平均値を用いた。

## 2.2 レーダーデータの品質管理

各レーダーは地形クラッタ除去のためのMTI処理を行っているが、晴天時エコーなどには地形クラッタが目立つほど十分な除去はできていない。朝倉レーダーについてはMTI処理前後における受信電力の比較ができることから、MTI処理前後の受信電力の差が5 dBZ以上のメッシュはクラッタの影響が大きいとみなし欠測とした。他のレーダーに関してはMTI処理後のデータのみ提供されているため、晴天時観測により恒常的に強いエコーが出ている個所をマッピングすることで地形クラッタの除去を図った。また、地形クラッタの影響がないレーダーデータについても偏波間関係係数 $\rho_{hv}$ が0.6未満のメッシュについては昆虫や煤煙など非降水由来のエコーであるとみなし除去を行った。一方、地形により一部電波が遮蔽されるような領域では信号が大きく減衰するた

め、このような領域には各仰角ごとにマスクをかけて解析対象から除去する処理を行った。

## 2.3 降雨量推定の検証

本ネットワークのうち、観測期間の長い朝倉、物部、安芸の3つのレーダーによる降雨量推定の精度を検証するために、地上雨量計との比較を行った。

降雨量推定の検証に用いた降雨事例は、2017年に観測された下記の4つの降水イベントである。(時刻はすべてJST)

5月12日 18:00～5月13日 9:00

6月20日 17:00～6月21日 8:00

8月6日 10:00 JST～8月7日 16:00

9月16日 23:00 JST～9月17日 23:00

いずれも1時間に20 mm以上の強い降水が観測された事例を評価に用いている。比較に用いた地上雨量計は、探査範囲内に分布しているアメダス12地点及び本共同研究により設置した5地点を含むPOTEKA NET 17地点の地上雨量計である。図-2に各観測地点の分布を示す。地上雨量計はいずれも1転倒雨量0.5 mmの転倒ます型雨量計であり、比較には10分間降水量のデータを使用した。

## 2.4 降雨量推定の検証

図-3は、弱い雨に対するレーダー反射強度と降水量との関係に対数プロットしたものである。図中の係数は式(2)の係数で、 $Z=20\sim 30$  dBZにおける1 dBZ毎の層別平均値を用い、回帰線の係数を定めた。いずれのレーダーも気象庁で用いられている式とは係数が大きく異なっている。

図-4に式(1)(2)合わせてレーダー雨量の精度を評価した結果を示す。朝倉、安芸レーダーに若干の過小

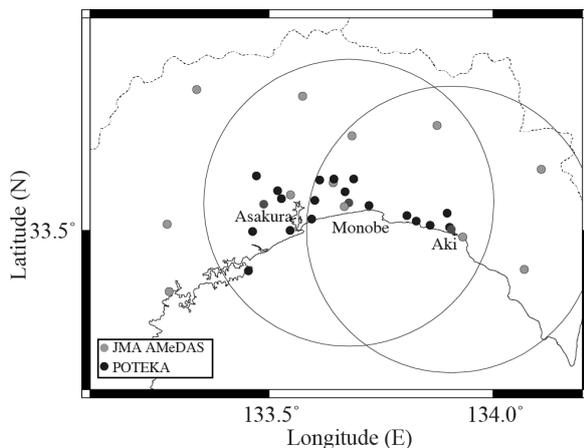


図-2 降雨量評価の検証に用いた地上雨量観測地点の分布。赤点は各レーダーの設置位置、青丸は物部レーダーと安芸レーダーの観測範囲を示す。

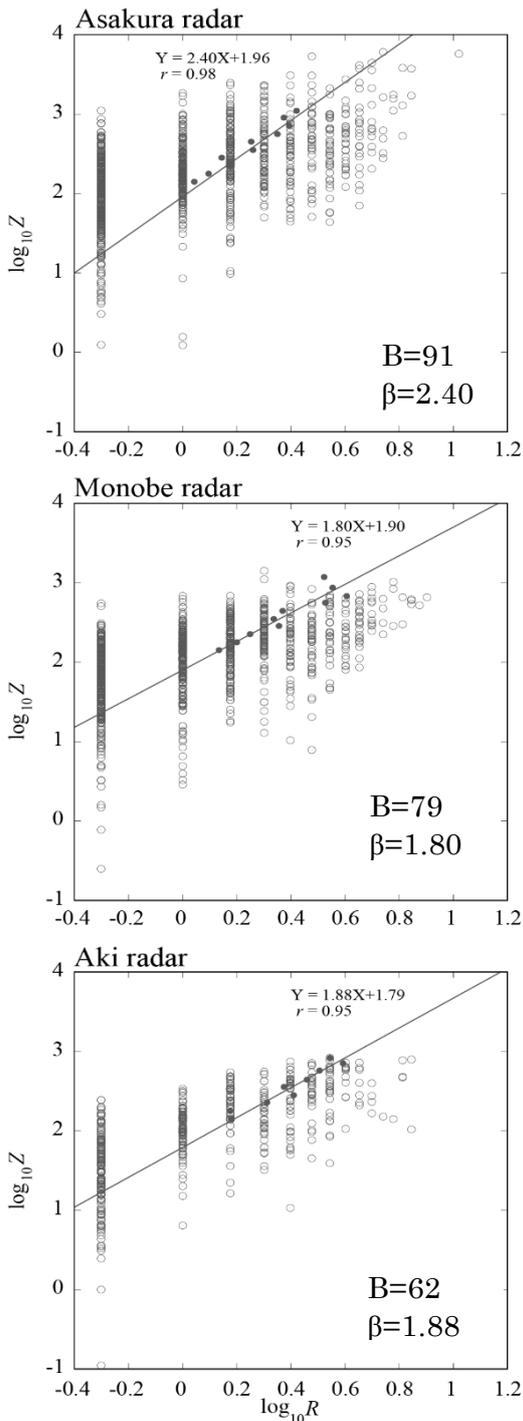


図-3 各レーダーのZ-R関係

評価の傾向があるものの、相関はいずれも0.8程度であり、おおむね正確にレーダーが地上の降水量を的確に評価していることがわかった。強雨においてはほとんどの場合図中の緑プロットに示すようにKdp-R関係による算出が5割以上となっており、Kdp-R関係が正確な降雨量推定に寄与していることが示された。一方、レーダーからの距離別に降雨量評価精度を調べると、表-1に示すようにレーダーからの距離が遠くなるほど過小評価の傾向がみられる

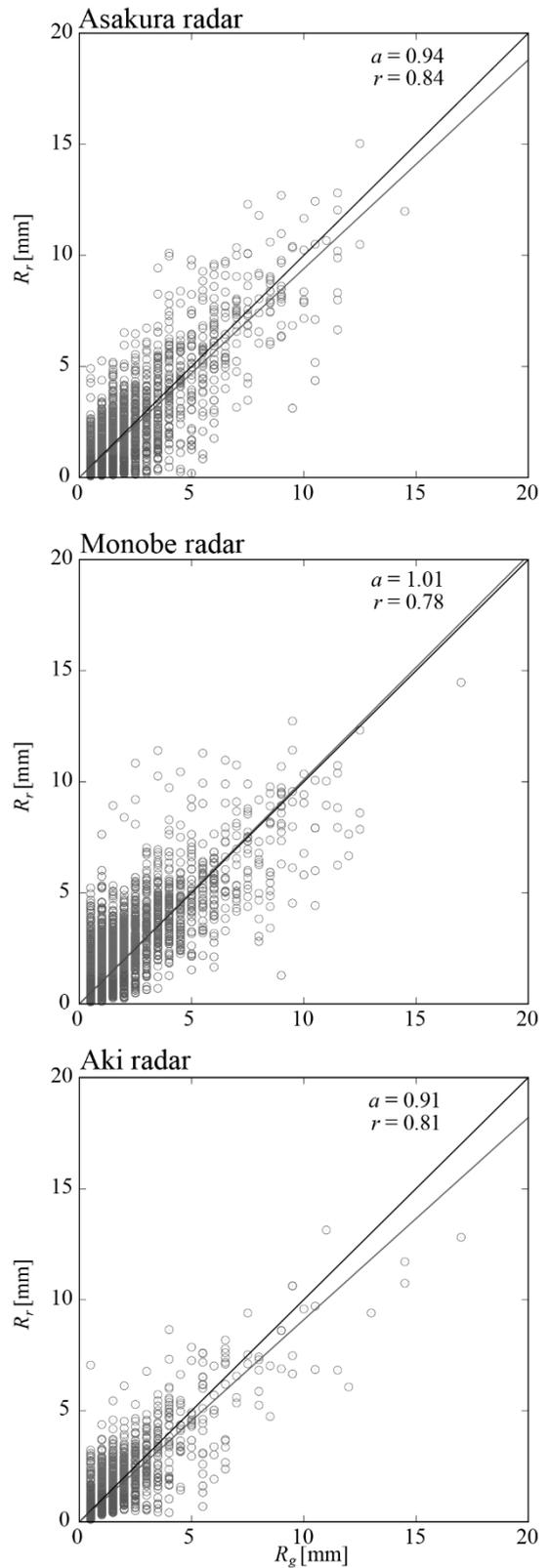


図-4 各レーダー降水量と地上降水量との比較

ことがわかった。これは、遠方ほどビーム幅が広がって分解能が低下することや、観測高度が高くなっていく影響が関与しているものと思われる。これらの課題はレーダーネットワークとして複数のレーダ

一により

表-1 降雨量回帰直線におけるレーダーからの距離依存性

| Distance from Radar [km] | Asakura  |          | Monobe   |          | Aki      |          |
|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                          | <i>a</i> | <i>r</i> | <i>a</i> | <i>r</i> | <i>a</i> | <i>r</i> |
| 0-10                     | 1.07     | 0.88     | 1.01     | 0.81     | 0.95     | 0.87     |
| 10-20                    | 0.88     | 0.84     | 1.04     | 0.79     | 1.31     | 0.78     |
| 20-30                    | 0.81     | 0.75     | 0.99     | 0.7      | 0.78     | 0.56     |
| 30-                      | 0.72     | 0.68     | -        | -        | -        | -        |

観測領域を相互補完することにより、解消されることが期待されている。

### 3. レーダーネットワーク

レーダーネットワーク構築にあたっては、1分毎の各レーダーの観測値をサーバーに蓄積後、すぐに降水強度  $R$ [mm/h]のCAPPIデータ(高度1km)を作成している。現時点では観測後1分程度の準リアルタイムで図-5に示すようなネットワーク降雨強度合成データを提供することが可能となっている。CAPPIデータ作成にあたっては、各PPIスキャンにおけるデータを水平方向 $0.01r+0.1$  km( $r$ はレーダーからの距離[km])、鉛直方向 $0.75$  km(朝倉レーダーのみ水平方向 $0.02r+0.2$  km, 鉛直方向 $2.5$  km)の影響円を考慮したクレスマン補間により内挿し、 $150$  mメッシュの格子点データを作成した。気象庁レーダーネットワークによる高度 $2$  kmの降雨情報と異なり $1$  kmとしたのは、より下層で直接降雨に関係する情報を得ることと、暖かい雨などあまり上層まで発達しない雨雲の様子を捉えることを想定したものである。図-5は2018年7月初旬の西日本豪雨時のものである。時間帯によっては各レーダーの減衰補正が遠方で過度に現れて、各レーダーの観測範囲が明確に読み取れるような合成画像もみられるが、ここでは一部線状に組織化した降水帯の様子がネットワークデータとしてよく表現されている。

### 4. 気象庁レーダーによる渦の検出

#### 4.1 解析手法

本研究では、高知大学MPレーダーネットワークに渦の自動検出アルゴリズムも組み込み、竜巻に対する早期警戒システムとすることも検討している。ここでは、その前段階として、そもそも国内でどれだ

けの渦が大気中で検出されるか、どの地域で渦の発

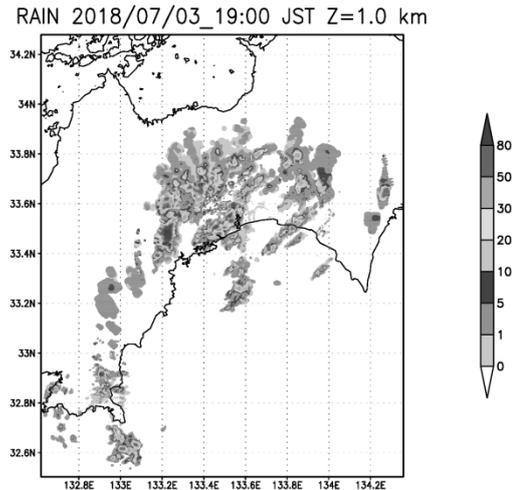


図-5 2018年7月3日19JSTにおける降水システムの様子

生が多いのか気候学的な特性を把握することを目的として、気象庁の全国20箇所のドップラーレーダーを用いて渦の発生状況を調べた。これらの結果は気象庁竜巻等突風データベースと異なり、人口バイアスなどの影響を受けることなく竜巻発生状況を客観的に評価する一つの指標となり得る。解析期間は2013年の季節を代表する3,6,9,12月の4ヶ月間であるが、名瀬のレーダーはドップラー速度の欠測が多かったことから19地点の解析とした。

渦の探査範囲はレーダーから半径 $150$  kmとした。渦の検出については鈴木ら(2006)の開発したアルゴリズムを用いた。これは各PPIスキャンにおいてランキン渦の速度分布を仮定し、ドップラー速度の方位角方向の極大極小のペアを渦として検出するものである。本研究では極大極小のドップラー速度差の閾値を $10$  m/s, 渦径 $R$ が $0.1 \leq R \leq 10$  kmかつ、渦度が発散より大きいものを抽出した。さらに、検出された渦について時間方向と仰角方向の連続性を判定することにより誤検出の除去を図った。時間方向には最低仰角における連続する2スキャン(5分間隔)について、渦中心の距離が $6$  km以内で検出されたものを連続する渦とし、仰角方向には2仰角間の渦中心の水平方向距離が $1$  km以内のものを連続とみなした。この手法では渦が密集している場合一つの渦について複数の連続性が仮定される場合があるが、現段階では複数の候補のいずれか1つに連続性があるものとして処理した。

#### 4.2 解析結果

図-6は全国19地点のレーダーと、同様な傾向をも

つと判断された太平洋側、日本海側、南西諸島の3

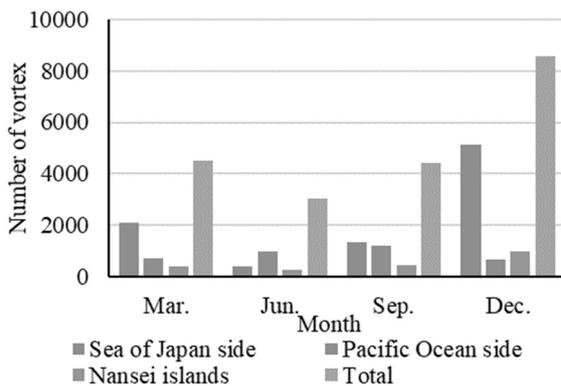


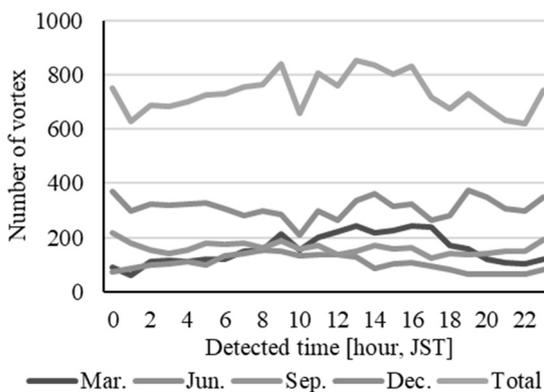
図-6 月別の渦検出数

つに区分される地域の4ヶ月の発生数を比較したものである。太平洋側に分類されたものは静岡、名古屋、大阪、室戸、広島の5地点で、日本海側は札幌、函館、秋田、新潟、福井、松江の6地点、南西諸島は沖縄と石垣島の2地点である。他のレーダーの発生状況は例えば東京はこれらと少し傾向が異なっていた。日本海側の12月における発生数が突出しており、その結果全国においても12月が最も多い結果となった。一方、竜巻等突風データベースにおいては、9月の竜巻発生認知数が最も多く、太平洋側地域の特性と似た傾向にある。

時刻別の発生数で見ると、全体では日中にやや多い傾向が見られたがほぼフラットな発生状況であった。3月は午後に多くなる竜巻等突風データベースと同様な傾向が見られたが、9月、12月はほとんど変化がなく、6月は午前中にピークが見られるなど、突風データベースと傾向が異なることがわかった。

渦の持続時間を調べた結果を図-8に示す。1時間以上持続するスーパーセル的なものも52個検出されたが、ほとんどの渦は連続性が認められた2スキャンで消滅する寿命の短いものであった。このことは、国内で発生する竜巻の9割以上がノンスーパーセルタイプであることと対応している。すなわち、積乱雲内に渦が発生してもメソサイクロンとして持続するようなものは日本ではかなり稀であるという気候学的特徴が明らかとなった。

図-7 時刻別の全国の渦検出数



## 5. まとめ

本研究は謝辞に記したように、京都大学防災研究所地域防災実践型共同研究（特定）28R-01を中心として様々な研究支援のもとに高知県の気象防災システムを構築してきた。2年間の研究期間を通じて、レーダーネットワークシステムはほぼ完成するとともに、降雨評価量の精度向上についてもほぼ妥当な水準に到達した。氾濫予測システムやGPS可降水量を用いた大雨予測についても、ほぼ完成しつつある。今後これらの成果に基づき統合防災システムの構築を進めていきたい。

## 謝辞

本研究は、京都大学防災研究所地域防災実践型共同研究（特定）28R-01により進められた。また、一部は、総務省SCOPE(受付番号165009001)の委託を受けて進められ、JSPS科研費(15H02994, 18H01682)および高知大学防災推進センタープロジェクトの支援も受けた。一部のデータは高知地方気象台から提供を受けるとともに、高知県土木部河川課、高知土木事

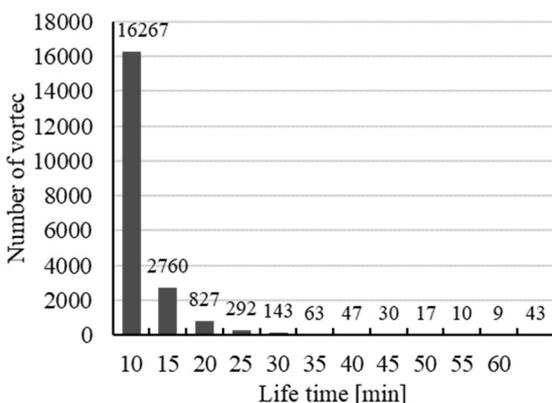


図-8 渦の持続時間

務所, 及び高知市上下水道局の多くの方々にご協力を頂いた。ここに謝意を表す。

## 参考文献

- 気象庁, 2018: 平成30年7月豪雨(前線及び台風第7号による大雨等) 53pages.
- 気象庁竜巻等の突風データベース,  
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/index.html>, 2018.07.30 参照
- 坂出知也, 森 牧人, 能島知宏, 佐々浩司, 2017: 長期GPS可降水量データを用いた高知市の大雨解析. 日本農業気象学会2017年全国大会講演要旨, pp. 80.
- 佐々浩司, 西藤大輝, 2017: ドップラーレーダーにより検出される渦の視線距離依存性, 日本流体力学会年会 2017(東京, 2017年8月30日).
- 坂東光, 張浩, 藤原 拓, 岡田将治, 松岡直明, 2017: 雨水排除過程に伴う都市放流先河川の水利特性に関する研究. 日本流体力学会年会2017(東京, 2017年8月31日).
- 鈴木ら, 2006: メソサイクロン及び局所収束・発散域の検出アルゴリズムの開発-シビア現象の危険度診断のために-, 日本気象学会2006年度秋季大会講演予稿集, 90, pp.286.
- 松田亮, 張浩, 藤原拓, 川池健司, 2017: マンホール周辺のエネルギー損失に関する実験的研究日本流体力学会年会2017(東京, 2017年8月31日).
- 山中稔, 佐々浩司, 橋本学, 中川一, 川池健司, 張浩, 森牧人, 村田文絵, 寺尾徹, 2017: レーダーネットワークを活用した統合防災システムの構築, 第54回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集, pp.53-60.
- 村田文絵, 佐々浩司, 2017: 高知大parsivelと偏波レーダーによる背が低い雨滴の特徴の解析, 日本気象学会秋季大会(札幌, 2017年10月31日).
- 西井章, 佐々浩司, 2017: 高知大MPレーダーネットワークによる雨量評価, 日本気象学会秋季大会(札幌, 2017年11月1日)
- 西井章, 佐々浩司, 2018: 高知大学MPレーダーネットワークによる降雨観測精度の検証, 平成29年度京都大学防災研究所 研究発表講演会(宇治, 2018年2月21日).
- 西藤大輝, 佐々浩司, 2018: 気象庁レーダーを用いた日本の竜巻発生可能性の分布, 平成29年度京都大学防災研究所 研究発表講演会(宇治, 2018年2月21日).
- 澤谷拓海, 張浩, 川池健司, 中川一, 2018: 都市域における小規模水利構造物に着目した雨水排水プロセスのモデル化, 平成29年度京都大学防災研究所 研究発表講演会(宇治, 2018年2月21日).
- 森 牧人, 門田晃誠, 佐々浩司, 2018: 降水効率及び標準雨量指数を用いた高知市の気候解析. 日本農業気象学会2018年全国大会(九州大学伊都キャンパス, 2018年3月15日).
- 鈴木修, 山内洋, 中里真久, 2006: メソサイクロン及び局所収束・発散域の検出アルゴリズムの開発-シビア現象の危険度診断のために-, 日本気象学会2006年度秋季大会講演予稿集, 90, pp. 286.
- 森 牧人, 坂出知也, 能島知宏, 2016: 高知市上空の水蒸気変動と大雨の関係~GPS可降水量を用いた予察的解析~. 日本気象学会関西支部2016年度第2回例会講演要旨集, 第140号, pp. 12-13.
- Maesaka, T., Maki, M., Iwanami, K., Tsuchiya, S., Kieda, K., and Hoshi, A. 2011: Operational rainfall estimation by X-band MP radar network in MLIT, Japan, Proc. of 35th Conf. on Radar Meteor, Pittsburg, PA US., 142. 8pages.
- Maki, M., Part, S.-G., and Bringi, V.N., 2005: Effect of variations in rain drop size distributions on rain rate estimations of 3 cm wavelength polarimetric radar, Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol. 83, No. 5, pp.871-893.
- Mori, M., Nojima, T., and Sai, K. 2017: Quasi-linear relationship between GPS-derived precipitable water vapor and surface vapor pressure observed on dry days in spring and autumn. A case study at Saga Plain in northern Kyushu Island, Japan. Paddy and Water Environment, 15, pp. 425-432.
- Sassa, K., Hamada, I., Hamaguchi, Y., Hayashi, T., 2011: Characteristics of mesocyclones observed on Tosa Bay in Japan, The 6th European Conference on Severe Storms, Palma de Mallorca, Spain, 2pages.
- Murata, F., Sassa, K., 2017: Observation of rain drop size distribution by Parsivel disdrometers and X-band MP radars in Kochi, Japan International Tropical Meteorology Symposium 2017, Ahmedabad, India, 8.
- Sassa, K., Nishifuji, D., Suzuki, O., 2018: Climatology of Mesocyclone Observed by Doppler Radars in Japan, Proc. of International Workshop on Wind-related Disasters and Mitigation 6pages.
- Zhang, H., Okada, S., Sassa, K., Fujiwara, T. and Bando, H., 2017: Impacts of drainage discharge on the hydraulics of receiving streams in urban areas, The Second International Top-level Forum on Engineering Science and Technology Development Strategy, October 18-20, Nanjing, China (Invited lecture).
- Zhang, H., Matsuda, T., Fujiwara, T. and Kawaike, K., 2017: Impact of sewer pipe arrangement on hydraulic

efficiency of municipal sewerage system, The 10th International Conference on Challenges in Environmental Science and Engineering, November 11-15, Kunming, China

Zhang, H., Matsuda, T., Fujiwara, T., Kawaike, K. and Sassa, K., 2018: Laboratory experiments on the three-dimensional flow in a junction manhole,平成29年度京都大学防災研究所 研究発表講演会(宇治, 2018年2月21日).