

令和元年6月26日現在

機関番号：16401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H02994

研究課題名(和文) 気流構造の解明に基づくノンスーパーセル竜巻の発生予測の高精度化

研究課題名(英文) Improving accuracy of prediction of non-supercell tornado genesis based on clarification of flow structure

研究代表者

佐々 浩司 (Koji, Sassa)

高知大学・教育研究部自然科学系理工学部門・教授

研究者番号：50263968

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,200,000円

研究成果の概要(和文)：レーダー解析により期間中10個の竜巻をもたらした親雲の構造を明らかにした。このうち、2個はスーパーセルタイプの親雲で、一つは通常のスーパーセルタイプとは異なりリアインフローにより強化される特異な構造であることを明らかにした。深層学習により監視カメラ画像から竜巻漏斗雲の自動検出を可能とした。また、検出された漏斗雲画像を用いて強度評価も行われた。室内実験により竜巻状渦の形成に最適な気流条件として一般流と冷気外出流、上昇流の関係を明らかにした。また、形成された竜巻状渦内には下降流域も存在することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

レーダーにより捉えた竜巻親雲の渦の存在や監視カメラにより自動検出される漏斗雲の様子は、すぐにでも実装して竜巻注意情報の高精度化に寄与できる成果である。日中であれば、効果なレーダーの観測対象地域外であっても監視カメラと自動検出アルゴリズムの実装により、海上から接近する竜巻に対して十分な注意喚起を行うことができる。また、通常とは異なる配置のスーパーセルが発見されたことは気象学上の意義が大きく、その形成環境を明らかにするなど当該分野の発展が期待できる。室内実験の成果は竜巻発生予測に新たな環境指標を与える可能性を持つ知見として、今後活用が期待される。

研究成果の概要(英文)：Structures of parent clouds caused 10 tornadoes were investigated by using radar analysis. 2 parent clouds of them were supercell type. One of them was found to have peculiar structure that was intensified by rear inflow.

Automatic detection of funnel cloud from the picture observed by surveillance cameras was realized by using deep learning method. We also evaluated the intensity of tornadoes from the pictures. We clarified the relevant condition for non-supercell tornado genesis with the laboratory experiments. The condition was the relationship among the environmental flow, cold outflow and updraft. We also confirmed that the tornado-like vortices had not only updraft region but also downdraft region.

研究分野：気象学、流体力学

キーワード：竜巻 レーダー観測 漏斗雲 深層学習 発生環境

1. 研究開始当初の背景

近年我が国でも竜巻が重大な気象災害の一つとして認知され、気象庁が竜巻注意情報を提供するようになった。しかし、我が国の竜巻の多くは積乱雲と同時に発生するノンスーパーセル竜巻(Niino et al. 1997)であり、竜巻注意情報の精度向上には、ノンスーパーセル竜巻の発生機構を明らかにすることが重要である。高知県は1991年～2013年の竜巻発生数が29件(気象庁竜巻等突風データベース)と全国屈指である。特に高知市から安芸市にかけての海岸線付近は100km×100km四方の年間発生数が32におよぶ世界有数の多発地域(Sassa et al. 2011)である。そこで代表者らはレーダー解析により、高知県のノンスーパーセル竜巻の8割は土佐湾海上で発生し、レーダーで捕捉した渦により注意情報を出すことができれば10分以上のリードタイムを確保しつつ的中率を45%程度まで向上可能であることを示した(杉村・佐々 2013)。

一方、分担者の宮城を中心として強度や規模を評価できない海上竜巻の特性を画像から求める方法が開発(宮城・鈴木 2008, 宮城・佐々 2014, 宮城ら 2013)されつつある。画像による竜巻の強度自動推定アルゴリズムを開発すれば、レーダー観測範囲から遠い地域や内陸部で発生する竜巻に対しても画像による注意喚起が可能となるものと期待できる。

さらに、代表者はノンスーパーセル竜巻の再現実験に世界で初めて成功(Sassa et al. 2009)し、その後制御可能な冷氣外出流再現装置によりノンスーパーセル竜巻の発生条件を明らかにする実験(Minekawa & Sassa 2012, 湯浅・佐々 2014)を可能としてきた。また、宮崎大学のマルチファン風洞を用いたガストフロント再現実験(Sassa et al. 2009)などにより、鉛直シアを有した一般風環境下における竜巻発生再現実験も可能な環境にある。

2. 研究の目的

ノンスーパーセル竜巻の発生予測の高精度化に関し、次の4段階を具体的目標とする。

- (1) レーダーの高速スキャンによる海上で発生する竜巻親雲の早期発見
- (2) 漏斗雲の画像・映像を用いた竜巻強度や進行速度などの即時評価システムの確立
- (3) ノンスーパーセル竜巻発生環境を再現する室内実験による新たな竜巻発生指標の確立
- (4) 高解像度気象モデルを用いた雲解像スケールにおける竜巻発生指標の評価

3. 研究の方法

本研究では①レーダー観測・解析、②竜巻画像等の解析、③室内実験による竜巻発生環境の評価、④気象モデルによる竜巻発生環境の評価の4つの研究手法により、目的に掲げた上記4項目の達成を目指して以下を実施した。

①気象庁室戸レーダーおよび高知大学 X バンド二重偏波レーダーの解析(佐々)

竜巻発生事例について各レーダーデータにより、親雲の構造と特性や、渦の特性などを明らかにする。

②竜巻画像・映像による自動検出と解析評価による竜巻強度推定(宮城、本田)

レーダーサイトに設置されている監視カメラ画像を用いてパターン検出や機械学習などにより漏斗雲の自動抽出を行うとともに、漏斗雲や水しぶきなど飛散物の飛散状況により竜巻の強度推定を行う。

③ノンスーパーセル竜巻の室内再現実験による竜巻構造の解析と竜巻発生環境の気流構造評価(佐々、宮城)

温度速度を制御できる冷氣外出流模擬装置を用いてノンスーパーセル竜巻再現実験を行い、どのような気流環境が竜巻発生に適するのかを明らかにする。

④気象モデルによる竜巻発生時の再現実験と発生指標の評価

申請時に予定していた研究協力者が参加不可能となり予定されていた期間には実施できなかった。

4. 研究成果

①竜巻親雲のレーダー解析

本研究申請時の2014年の事例を含めて2017年までに10個の竜巻を観測した。このうち、3つは2つのスーパーセルによる竜巻であった。発生環境はいずれも台風環境下であったが、2014年7月10日の事例が台風8号のアウトアーレンバンド上であったのに対し、2016年10月5日の事例は温低化しつつある台風16号の暖域における収束線上であった。2014年7月10日の事例については、図1に示すように下層に竜巻に相当する渦2個(mc1, mc2)が認められるがmc1を囲むようにメソサイクロン mc3 も認められた。一方、リアフランクガストフロントに相当するような線状エコーも mc1 と mc2 の間から南

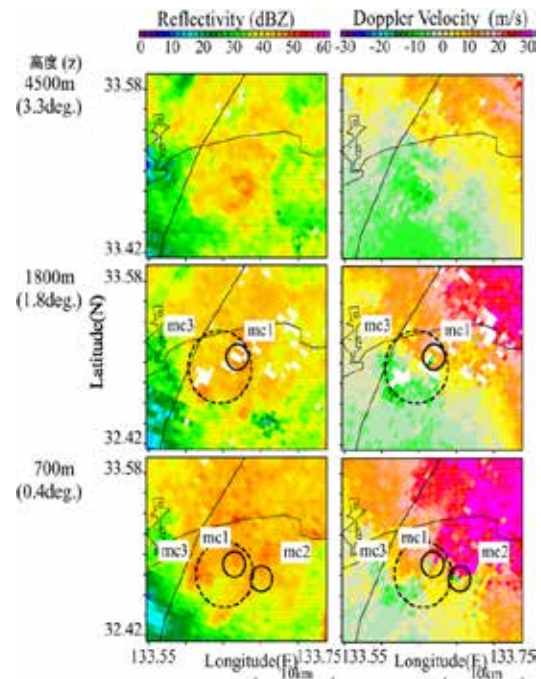


図1 室戸レーダーにより観測された2014年7月10日に発生した竜巻親雲の反射強度(左)とドップラー速度(右)

西に伸びていたが、ドップラー速度の分布はこの積乱雲に右前方から流入する気流の存在は認められず、左後方から回り込む気流だけが認められた。この様子から、2つの竜巻をもたらした親雲はスーパーセルではあるが、一般的なものと異なり、後方からのインフローによって強化される特異な形態を持つものであることを示した。一方、図2に示すように2016年10月5日の事例には、フックエコーを伴うメソサイクロンとリアフランクガストフロントが明瞭に認められ、典型的なミニスーパーセルであることがわかった。このミニスーパーセルは強い鉛直シア環境下において、メソサイクロンがダウンシア方向に傾斜していく過程で竜巻をもたらした。

ノンスーパーセル竜巻においては、図3に示すように比較的小規模な積雲や積乱雲によるものでありながら、図3に示すように明瞭なフックエコーが認められたものや、ドップラー速度に渦の存在を示すダイポール分布が認められるものもあったが、漏斗雲が認識されているにもかかわらずレーダーによってほとんど観測されない小さな降水粒子で構成された積雲による事例(2017年9月11日)も見られた。

②画像による竜巻画像の自動検出と強度推定

漏斗雲の自動検出については、畳み込みニューラルネットワークによる深層学習を用いることにした。このうち、YOLO(You only look once)の公開アルゴリズムは画像サイズが448×448ピクセルに限定され

表1 深層学習の交差検定結果

ケース	再現率	精度	F 尺度
1	0.714	0.936	0.811
2	0.714	0.882	0.790
3	0.905	1.000	0.950
4	0.810	1.000	0.895
5	0.955	1.000	0.977
平均	0.820	0.964	0.884

ているものの、取り扱いが容易なため、過去に蓄積してきた竜巻事例の写真・動画やインターネット上に公開されている100種類の漏斗雲画像を用いて80画像を教師データとして5回交差検定を行なった結果、表1に示すように再現率がやや低く30%程度漏斗雲を見逃す可能性があるものの、抽出したものは9割以上が正しいという高い精度で検出可能であることがわかった。これらの解析にはGPGPUを用いて事前学習に15時間を要したものの、学習後の一画像の検出時間は2.6秒程度であり、準リアルタイムに画像から漏斗雲を認識できる可能性が確認された。

同じアルゴリズムを用いて2017年9月11日にレーダーサイトに設置された監視カメラに捕らえられた漏斗雲の抽出を試みた結果、遠方にある小さな漏斗雲画像を見逃す問題はあるものの、図4に示すように漏斗雲画像を捕捉できることを確かめた。この事例は先述したレーダーで捕捉できなかった事例であり、監視カメラとレーダーが竜巻捕捉について相互補完できる可能性も示した。

③竜巻発生環境を調べる再現実験

図5に代表されるような実験装置を用いて実験を行なった。図中の左手が冷気外出流模擬装置で、装置上部に取り付けられたペルティエ素子により最大-10℃まで気流温度を下げることもできるとともに、任意の風速設定が可能である。図右の装置は一般流を再現する風洞で、これがない場合は、冷気外出流側面の混合層領域、一般流に対して、冷気外出流が貫入する状況下では、形成される局地前線上にそれぞれ上昇流ファンにおいて竜巻状渦を形成させたところ、最適条件下では図6に示すように赤丸で示す上昇流ファンの下に安定的な竜巻状渦が形成できた。一般流流速 U_g と冷気外出流流速 U_c を変化させて安定的に竜巻状渦が形成される条件を調べたところ、表2に示すように一般流よりわずかに冷気外出流が速い環境で竜巻状渦が安定的に形成されることがわかった。また、一般流のない環境下

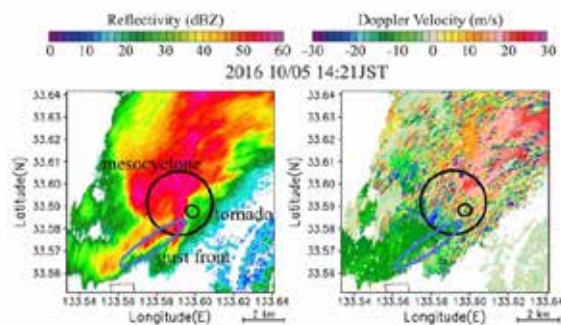


図2 物部レーダーにより観測された2016年10月5日に発生した竜巻親雲の反射強度(左)とドップラー速度(右)

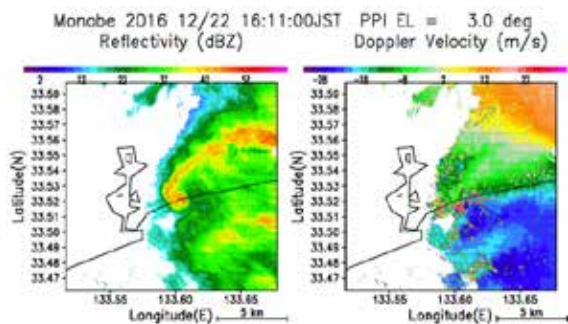


図3 物部レーダーにより観測された2016年12月22日に発生した竜巻親雲の反射強度(左)とドップラー速度(右)



図4 抽出された漏斗雲画

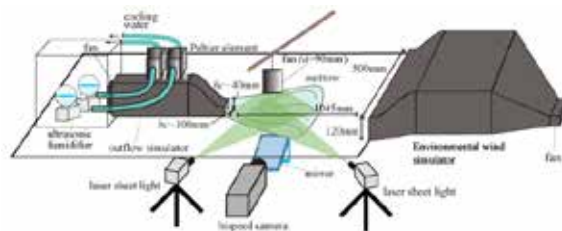


図5 ノンスーパーセル竜巻の再現実験概略図

で上昇流の流速 U_f と冷気外出流の温度を変えて実験を行なったところ、図7に示すように冷気外出流と外気との温度差があまり大きくない方が竜巻状渦が形成されやすいことがわかった。また、形成される竜巻状渦の循環は U_g 、 U_o ともに大きくなるほど大きくなることがわかった。図8はステレオ PIV により水平断面内の3次元速度分布を示したもので、下段に示す冷気外出流の温度低下-10℃の場合(P2)に対して-2℃の場合(NP)の方が渦が上層までより強くなっている様子が明確に認められる。また、(b)に顕著に認められるように、竜巻状渦全域が上昇流域ではなく、下降流となっている領域も存在することがわかった。この原因としては渦の傾斜や水平渦の巻きつきなどの効果が考えられる。

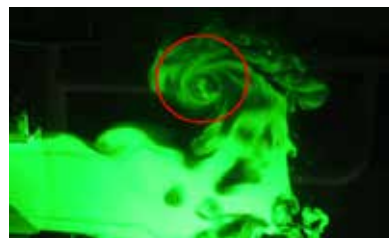


図6 竜巻状渦の様子

表2 U_g と U_o の違いによる竜巻状渦の状態変化

U_o	U_g	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0.2	Stable	Stable	Stable	Unstable	None	None
0.3	Stable	Stable	Stable	Stable	None	None
0.4	Unstable	Stable	Stable	Stable	None	None
0.5	Unstable	Unstable	Stable	Stable	Stable	None

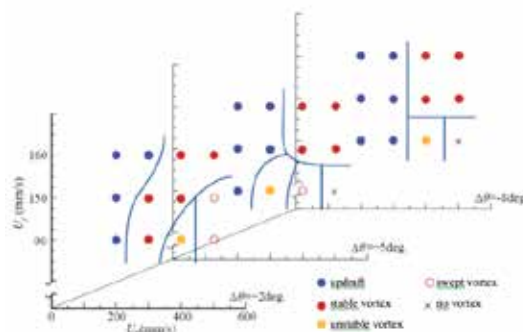


図7 冷気外出流流速と上昇流流速、冷気外出流温度低下量に依存する竜巻状渦形成レジーム図

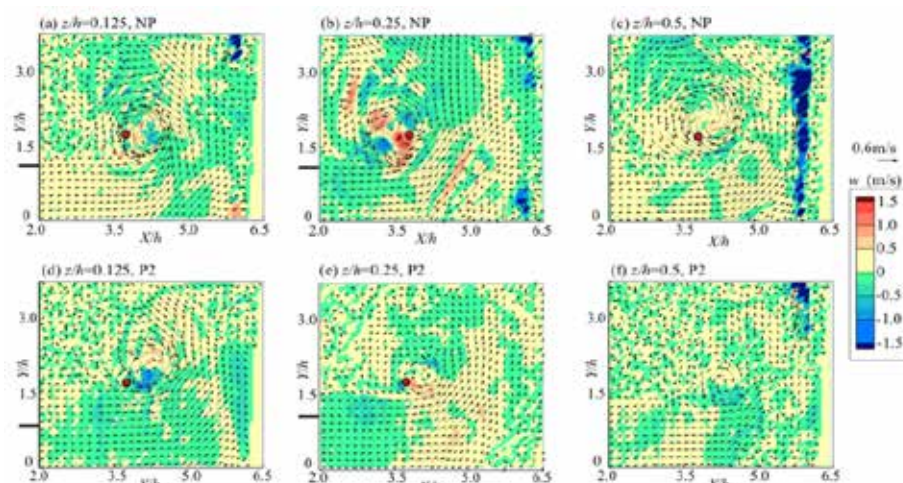


図8 竜巻状渦の各高度断面 $z/h=0.125, 0.25, 0.5$ における竜巻状渦の速度場

④まとめと展望

実験により、ノンスーパーセル竜巻発生環境については一般流と冷気外出流の相対関係など気流条件が明確になった。今後これらの成果と観測における実環境とを比較することにより竜巻発生条件を明らかにできると期待される。また、画像を用いた漏斗雲の深層学習による自動抽出はほぼ実用レベルに到達し、今後実装が期待される。観測においては、研究フィールドである高知県でノンスーパーセル竜巻のみが捕捉されると考えられていたが、期間中に2個のスーパーセルタイプの親雲が捕捉され、改めてスーパーセル竜巻についても研究対象とすべきであることが認識された。一方、気象庁の竜巻等突風データベースは認知された竜巻のみが記録されているため、客観的統計情報に基づく各地域の竜巻発生状況を調べることも重要である。これらの課題を解決するため、4年計画で進行していた本研究課題を発展させて、新たな研究課題として2018年度より「日本における竜巻発生環境の再評価に基づいた竜巻発生予測の高精度化」を開始し、レーダーによる客観的な竜巻統計を開始しつつ、室内実験ではノンスーパーセル竜巻の発生環境に加えてスーパーセル竜巻の発生環境を明らかにする実験の準備を進めている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](8件)

1. 佐々浩司, 西井章, 長野陽菜, “斜めに貫入する冷気外出流境界における竜巻生成の実験,” 第25回風工学シンポジウム論文集, vol. 25, 37-42, (2018) (査読有).
2. 藤井祐貴, 檜垣啓汰, 中山慎也, 本田理恵, 佐々浩司, “ネットワークカメラを用いた災害情報マイニングの試みー深層学習による竜巻とその前兆状態の検出ー,” DEIM Forum 2018, 1-8, (2018) (査読無).

3. K. Sassa, M. Komatsubara, “Laboratory Experiment of Non-Supercell Tornado Genesis on Local Front,” Proc. of The 9th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, 1-4, (2017) (査読無).
4. 湯浅惣一郎, 佐々浩司, “台風 201616 号に伴う高知の多重渦竜巻,” 京都大学防災研究所台風研究会講演論文集, 28K-05, 78-81, (2017) (査読無).
5. K. Sassa, H. Watanabe, “Laboratory Experiment on the Environment for Non-supercell Tornado genesis,” Proc. of the 11th International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements, 1-6, (2016) (査読無).
6. 宮城弘守, 佐々浩司, “マルチファン型風洞による竜巻発生環境の実験,” 第 24 回風工学シンポジウム論文集, vol. 24, 133-138, (2016) (査読有).
7. 湯浅惣一郎, 佐々浩司, “台風 201408 号のアウトターレインバンド内で発生した竜巻,” 第 24 回風工学シンポジウム論文集, vol. 24, 109-114, (2016) (査読有).
8. 湯浅惣一郎, 佐々浩司, “2014 年台風 8 号のアウトターレインバンドで発生した竜巻のレーダー解析,” 京都大学防災研究所研究集会台風研究会 複合系台風災害のメカニズムに関する研究集会 27K-03, 33-36 (2016) (査読無).

〔学会発表〕(計 39 件)

1. 佐々浩司, 西井章, 長野陽菜, “斜めに貫入する冷氣外出流境界における竜巻生成の実験,” 第 25 回風工学シンポジウム, 東京, (2018/12/3).
2. K. Sassa, R. Honda, Y. Fujii, “Automatic detection of funnel clouds from pictures by surveillance cameras with deep learning,” The 29th Conference on Severe Local Storms, Stowe OR, U. S. A., (2018/10/25).
3. 宮城弘守, 本田理恵, 佐々浩司, “自動検出した漏斗雲画像による竜巻の強さの推定,” 日本流体力学会年会 2018, 豊中, (2018/9/3).
4. 佐々浩司, 長野陽菜, “局所的に貫入する冷氣外出流に伴う竜巻生成過程の再現実験,” 日本流体力学会年会 2018, 豊中, (2018/9/3).
5. 佐々浩司, “斜行して貫入する冷氣外出流に伴う竜巻発生環境の再現実験,” 日本流体力学会中四国九州支部第 21 回支部講演会, 岡山, (2018/6/3).
6. 本田理恵, 佐々浩司, 檜垣啓汰, 藤井祐貴, 中山慎也, “深層学習による漏斗雲の自動検知の試み,” 日本気象学会 2018 年度春季大会, つくば, (2018/5/18).
7. K. Sassa, M. Komatsubara, “Laboratory Experiment of Non-Supercell Tornado Genesis on Local Front,” The 9th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, Auckland, New Zealand, (2017/12/5).
8. 佐々浩司, 西井章, “2017 年 9 月 11 日に高知県沿岸部で発生した複数の竜巻,” 日本気象学会関西支部第 1 回例会, 高松, (2017/12/1).
9. 佐々浩司, 本田理恵, 檜垣啓汰, 藤井祐貴, 中山慎也, “定点カメラを用いた雲画像による気流計測と竜巻自動検出の試み,” 日本流体力学会中四国九州支部第 20 回支部講演会, 大分, (2017/11/24).
10. K. Sassa, R. Honda, K. Higaki, Y. Fujii, “Photogrammetric detection of funnel clouds,” International Symposium on Earth-Science Challenges 2017, 宇治, (2017/10/2).
11. 檜垣啓汰, 藤井祐貴, 本田理恵, 佐々浩司, “気象監視カメラのための自動特徴抽出アルゴリズムの検討 -2. 漏斗雲の抽出-,” 電気関係学会四国支部連合大会, 松山, (2017/9/23).
12. 藤井祐貴, 檜垣啓汰, 本田理恵, 佐々浩司, “気象監視カメラのための自動特徴抽出アルゴリズムの検討 -1. 雲領域自動抽出-,” 電気関係学会四国支部連合大会, 松山, (2017/9/23).
13. T. Tanimoto, K. Sassa, H. Watanabe, “Measurement of the three dimensional velocity field of tornado-like vortex by the experimental study,” European Conference on Severe Storms, 2017, Pula, Croatia, (2017/9/21).
14. 佐々浩司, 西井章, “冷氣外出流の局地前線で形成される竜巻状渦,” 日本流体力学会年会 2017, 東京, (2017/8/30).
15. 湯浅惣一郎, 佐々浩司, “2016 年 10 月 5 日に高知で発生した竜巻親雲の構造,” 日本気象学会 2017 年度春季大会, 東京, (2017/5/27).
16. 佐々浩司, 小松原美沙, “冷氣外出流に伴う竜巻発生環境の再現実験,” 日本風工学会年次大会, 柏崎, (2017/5/24).
17. 佐々浩司, “竜巻をもたらす局地前線における水平シアアの再現,” 日本流体力学会中四国・九州支部第 19 回支部講演会, 徳島, (2017/5/21).
18. K. Sassa, S. Yuasa, “Radar observation of some supercell-like storms causing tornadoes in Kochi Plain,” International Workshop on Gusty Wind, Thermal Environment and Energy Saving, 厚木, (2017/3/10), (招待講演).
19. 湯浅惣一郎, 佐々浩司, “2016 年 10 月 5 日に発生した高知竜巻親雲のレーダー解析,” 日本気象学会関西支部第 2 回例会, 高知, (2016/12/10).
20. 湯浅惣一郎, 佐々浩司, “台風 201408 号のアウトターレインバンド内で発生した竜巻,” 第 24 回風工学シンポジウム, 東京, (2016/12/5).
21. 宮城弘守, 佐々浩司, “マルチファン型風洞による竜巻発生環境の実験,” 第 24 回風工学シンポジウム, 東京, (2016/12/5).

22. 湯浅惣一郎, 佐々浩司, “台風 201618 号に伴う高知の多重渦竜巻,” 平成 28 年度京都大学防災研究所共同研究集会「台風研究会」, 宇治, (2016/11/27).
23. S. Yuasa, K. Sassa, “Peculiar supercell tornadoes accompanied by Typhoon ‘Neogri’ , The 28th AMS Conference on Severe Local Storms, Portland, OR 米国, (2016/11/10).
24. 湯浅惣一郎, 佐々浩司, “アウトターレインバンド内で発生した特異なミニスーパーセル,” 日本気象学会 2016 年度秋季大会, 名古屋, (2016/10/28).
25. 宮城弘守, 佐々浩司, “マルチファン型風洞を用いた竜巻実験,” 日本流体力学会年会 2016 名古屋, (2016/9/27).
27. 佐々浩司, 小松原美沙, “対向する気流中における竜巻発生実験,” 日本流体力学会年会 2016 名古屋, (2016/9/27).
28. 湯浅惣一郎, 佐々浩司, “ドップラーレーダーによる自動渦検出の試み,” 日本流体力学会年会 2016 名古屋, (2016/9/27).
29. K. Sassa, H. Watanabe, “Laboratory Experiment on the Environment for Non- supercell Tornadogenesis,” 11th International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements, Parelmo, Italy, (2016/9/22).
30. 佐々浩司, 渡部葉奈可, “ノンスーパーセル竜巻発生環境の再現実験,” 日本流体力学会中四国・九州支部第 17 回支部講演会, 高知, (2016/6/26).
31. 湯浅惣一郎, 佐々浩司, “台風 201408 号に伴う竜巻親雲の遷移過程,” 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 千葉, (2016/5/26).
32. K. Saasa, S. Watanabe, “The statistical features of vortices in various MCSs appeared around Tosa Bay, Japan,” ICMCS-XI, 釜山, 韓国, (2016/4/27).
33. 湯浅惣一郎, 佐々浩司, “2014 年台風 8 号のアウトターレインバンドで発生した竜巻のレーダー解析,” 京都大学防災研究所台風研究会, 宇治, (2015/10/31).
34. 湯浅惣一郎, 佐々浩司, 村田文絵, “台風 201408 号に伴う竜巻の高知大 MP レーダーによる解析,” 日本気象学会 2015 年度秋季大会, 京都, (2015/10/30).
35. 渡邊伸, 佐々浩司, “高知周辺で発生する雲内の渦のレーダー解析,” 日本気象学会 2015 年度秋季大会, 京都, (2015/10/28).
36. 宮城弘守, 佐々浩司, “マルチファン型風洞による竜巻発生環境の検討,” 日本流体力学会年会 2015 東京, (2015/9/27).
37. 渡部葉奈可, 佐々浩司, “水平シア一場における竜巻生成過程の実験,” 日本流体力学会年会 2015 東京, (2015/9/27).
38. 湯浅惣一郎, 佐々浩司, “2014 年台風 8 号に伴い高知で発生した竜巻親雲のレーダー解析,” 日本流体力学会年会 2015 東京, (2015/9/27).
39. S. Yuasa, K. Sassa, “Radar analysis of two tornadoes occurred in the outer rainband of Typhoon ‘Neoguri’ ,” 8th European Conference on Severe Storms, Winer-Neustadt, Austria, (2015/9/17).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

○取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://gust.sc.kochi-u.ac.jp/asakuraR.html>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：本田 理恵

ローマ字氏名：Rie Honda

所属研究機関名：高知大学

部局名：教育研究部自然科学系理工学部門

職名：教授

研究者番号(8桁)：80253334

研究分担者氏名：宮城 弘守

ローマ字氏名：Hiromori Miyagi

所属研究機関名：宮崎大学

部局名：工学教育研究部

職名：助教

研究者番号(8桁)：90219741