

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 1 日現在

機関番号：16401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22310112

研究課題名（和文） 太平洋岸に竜巻をもたらすシビアストームの研究

研究課題名（英文） Study on severe storms causing tornadoes at Pacific coast of Japan

研究代表者

佐々 浩司 (SASSA KOJI)

高知大学・教育研究部自然科学系・教授

研究者番号：50263968

研究成果の概要（和文）：竜巻発生環境を再現する実験装置を確立し、メソサイクロン高度に依存して竜巻発生状況が異なることや竜巻の詳細構造を示した。この知見は竜巻予測精度向上に寄与すると期待される。また、レーダー観測により竜巻発生件数の多い高知県において積乱雲中の渦の8割が土佐湾海上で発生することと、福岡竜巻の事例についてメソサイクロンと竜巻渦との関係を示した。モデル解析においては非スーパーセル竜巻事例の発達過程を示した。

研究成果の概要（英文）：We developed the experimental simulator reproducing the environment of tornado outbreak and demonstrated that various tornadoes were spawn depending on the height and rotation of mesocyclone. This fact will contribute to improvement of the prediction of tornado outbreak. We also showed the detailed structures of tornado-like vortices. We found that 80 % of mesocyclones observed by radars arose in Tosa Bay. The relationship between Fukuoka tornado and mesocyclone was also shown by radar observation. We demonstrated the developing process of non-supercell tornado with a meteorological model simulation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	8,100,000	2,430,000	10,530,000
2011年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2012年度	2,900,000	870,000	3,770,000
年度			
年度			
総計	13,700,000	4,110,000	17,810,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・自然災害科学

キーワード：気象災害，竜巻

1. 研究開始当初の背景

2006年に相次いで死者を出した延岡、佐呂間の竜巻をきっかけとして日本でも竜巻注意情報が出されるようになったが、竜巻発生メカニズムはいまだに不明であり、予測精度の向上には、観測事実の蓄積だけでなく多角的な面からその解明が望まれる。代表者らは竜巻発生メカニズムについて流体力学的

側面から調べる室内実験を進め、竜巻発生環境を再現できる模擬装置の開発に成功した。一方、暖候期に竜巻発生が多い日本の太平洋岸の中でも高知県は極めて竜巻発生頻度が高く、観測に最も適したフィールドの一つであるとともに、災害調査や観測情報を提供して広く伝えることは地域貢献にも寄与する。

2. 研究の目的

竜巻などの気象災害をもたらすシビアストームの観測・室内実験・モデル解析・環境場評価・災害調査を通じて太平洋岸で多発する竜巻などの特性を明らかにするとともに、竜巻のナウキャストに向けた発生環境や観測指標を解明することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究は以下の5つの手法を平行して行うことで進めた。

(1) 観測

Xバンドドップラーレーダー（視線方向分解能 75m、方位角分解能 2.2° ）を高知大学朝倉キャンパス上に設置し観測を行うとともに、竜巻注意情報が発令された時間帯前後の気象庁室戸ドップラーレーダー（視線方向分解能 500m、方位角分解能 1° ）のデータを取得し、積乱雲中の渦を捉えた。又、福岡の事例については気象庁レーダーの他、空港レーダーのデータも取得して解析を行った。

(2) 室内実験

図1に示すスーパーセル模擬装置を用いて、メソサイクロン内の気流の回転強さを表すスワール比 S とメソサイクロン底面の高度 z をパラメータとして竜巻再現実験を行い、可視化観測するとともに、高速度カメラにより 1000fps で撮影した画像を DPIV 解析し、速度場を求めた。また、図2に示す冷気外出流模擬装置を新たに製作し、再現された冷気

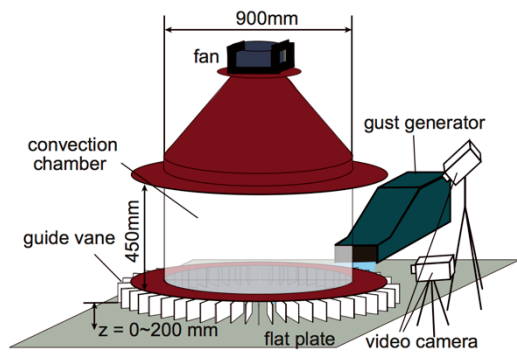


図1 スーパーセル模擬装置

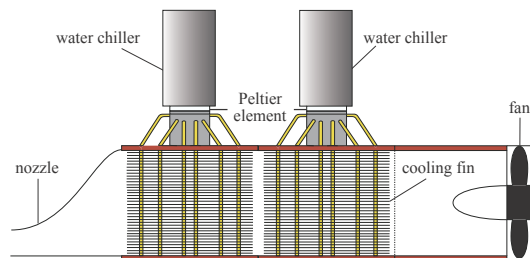


図2 冷気外出流模擬装置

外出流の特性を計測するとともに、ノンスーパーセル竜巻の再現実験を行った。

(3) モデル解析

気象庁非静力学モデルNHMを利用して2006年7月5日の高知竜巻の事例を解析するとともに、2012年7月および8月の事例についてWRFを用いた解析を行った。

(4) 環境場評価

台風に伴って発生する竜巻についてメソ数値予報モデル初期値を用いて発生環境の指標を評価し、特にアウターレインバンドで発生する竜巻について、適切な指標を求めた。

(5) 災害調査

高知県で発生した突風災害を中心に被害強度や風向分布などの評価を行うとともに、レーダーで捉えられた渦との対応関係を調べた。調査した事例は2010年8月11日、2011年10月21日、2012年7月12日、8月14日、9月3日、10月23日の6事例である。

4. 研究成果

(1) レーダー観測

図3に2008年から2012年の間に竜巻注意情報発令時を中心としてレーダーにより観測された上空の渦の軌跡を示す。総計50個が観測されたが、そのうちの8割にあたる41個は土佐湾の海上で発生しており、竜巻として被害をもたらしたもの（図中の赤線）は一例をのぞき全てが海上で発生して上陸したものであることがわかった。

上陸したものだけで渦径と渦度を比較すると、竜巻をもたらしたものは図4の破線で示す双曲線の内側にあり、上空の渦が一定程度の循環を持たない場合は被害を与えないことがわかった。また、上陸した渦の6割は図5に示すように地表面摩擦の影響で上陸直後に一端渦が収束して強化されることが確認された。

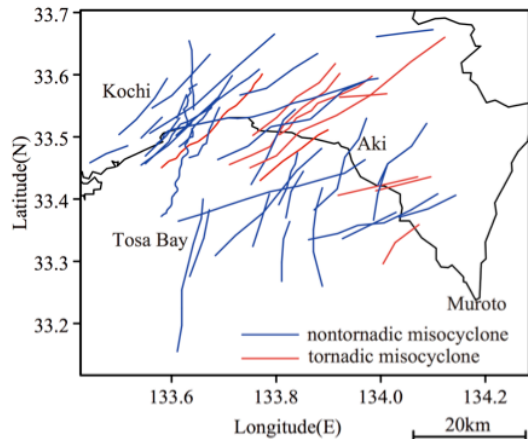


図3 土佐湾で観測された渦の軌跡

2010年8月11日の事例については、上空の渦が2個観測され、そのうちの一方が竜巻をもたらしたことが確認されたが、地上観測により、北側の成熟した積乱雲からの降水に伴う冷気外出流が形成したガストフロントの水平シアに伴う鉛直渦度を南側にある発達中の積乱雲の上昇気流が引き上げて竜巻が生成されたことを示した。

2011年8月21日の福岡竜巻については、国内で数少ないスーパーセル竜巻であったことを示し、国内のレーダー観測では代表者の知る限り初めてメソサイクロンと竜巻渦の関係を図6のように明示した。メソサイクロン下には2つのマイソサイクロンが観測されたが、竜巻と連動したものは、メソサイクロンの進行方向後ろ側にあたる西側のマイソサイクロンであった。また、この竜巻は多重渦竜巻であったことが映像から確認されている。

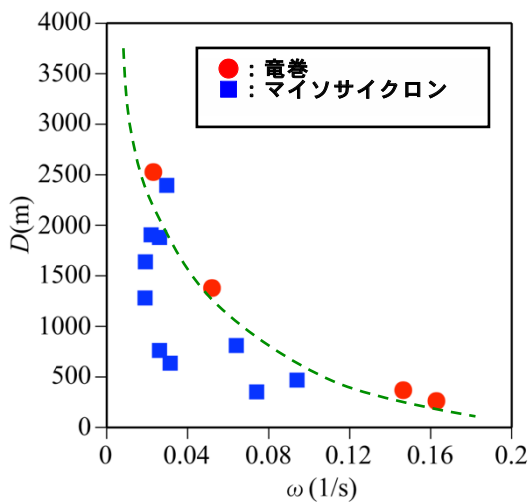


図4 上陸した渦の渦径と渦度の分布

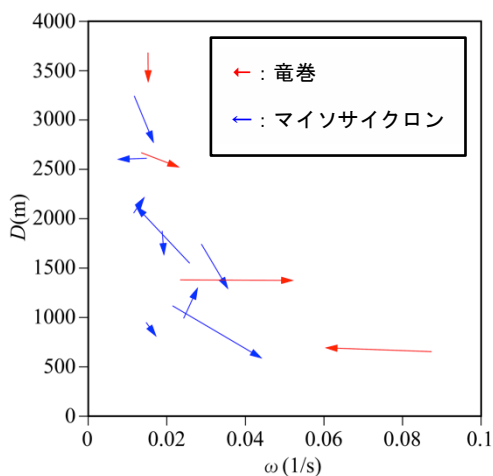


図5 上陸前後の渦径と渦度の変化

(2) 室内実験

スーパーセル模擬装置の条件設定により、図7に示すような3パターンの竜巻が発生することを示すとともに、メソサイクロンがあっても竜巻が発生しない条件があることを確かめた。この結果は、将来レーダー観測の解釈に寄与し、スーパーセル竜巻の予測精度を高めるものと期待される。多重渦竜巻については、吸い込み渦が2～4個まで同時に存在する事例が認められたが、2個または3個

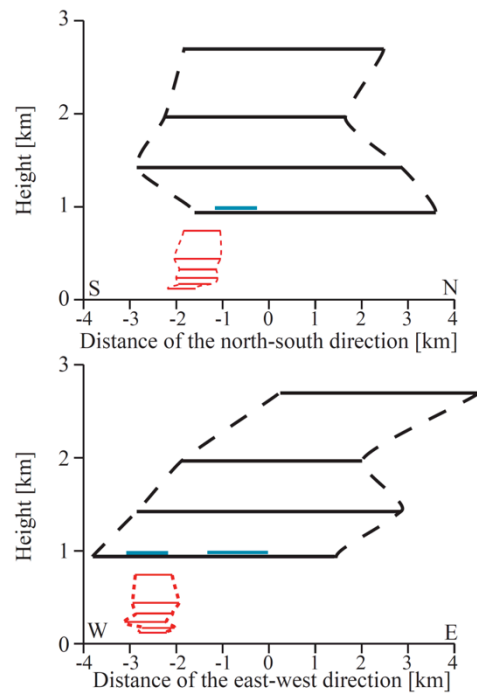


図6 福岡竜巻におけるメソサイクロンと竜巻渦の位置関係。緑線は気象庁レーダーに捉えられたマイソサイクロンの外径、赤線は空港レーダーに捉えられた竜巻渦

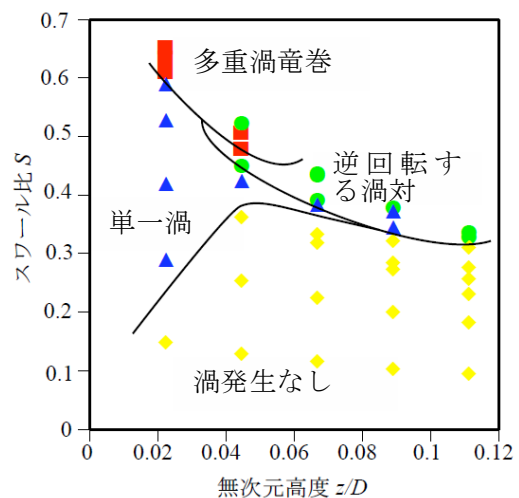


図7 スーパーセル竜巻の発生レジーム

がそれぞれ47%の存在確率であった。これらを統計処理して主渦との関係を調べ、図8に示すような多重渦竜巻のモデル図を完成させることができた。

一方、逆回転する渦対は、その発生自体が竜巻渦の回転がメソサイクロンの回転に依存するものではないことを明らかにしたものであるが、循環は上層ほどメソサイクロンの回転と同じものが強くなる傾向を示した。

ペルティエ素子を用いた冷気外出流模擬装置は流速を200~600mm/sまで可変でき、温度低下を2~10℃まで可変できることが確認された。なお、これらの状況は2時間以上安定して設定可能であることも確かめられた。これを用いてノンスーパーセル竜巻の実験を行ったところ、図9に示すように冷気外出流外縁の水平シアの強度に比例して形成される竜巻状渦の循環が強くなることがわかったが、あまり冷気外出流が速くなって渦が下流に流される場合は、安定して渦が形

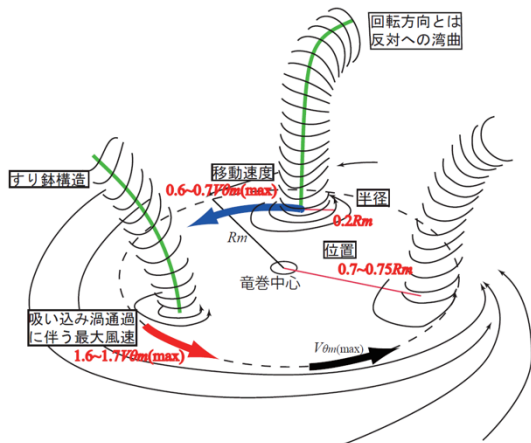


図8 多重渦竜巻のモデル図

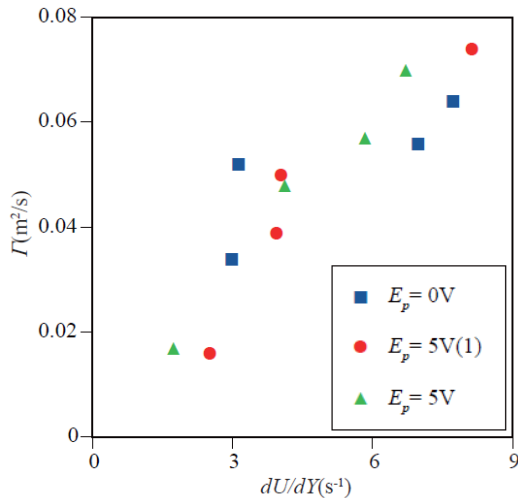


図9 冷気外出流の水平シアと竜巻渦の循環の関係

成されないことも確認された。この条件はノンスーパーセル竜巻における下層の水平シアと上空の積乱雲の相対速度とに関連して発生に適する環境があることを示している。ノンスーパーセル竜巻発生の源となる渦度生成について冷気外出流外縁の渦度の状況を調べたところ、鉛直渦度のストレッチングによる寄与が大半であることがわかった。

なお、竜巻状渦の渦度収支については、図10に示すように収束流における水平渦の寄与はわずか8%しかなく、8割が収束流内の水平シアに伴う鉛直渦度が集められて形成されていることがわかった。

(3) モデル解析

2006年7月5日4時半頃に香美市で発生したF1の竜巻について、最大解像度50mのNHMにより解析した結果、スーパーセル竜巻とは異なり、ボトムアップ型の渦度の成長が認められた。これらは海上のシアライン上で発生した渦であったが、強い竜巻として成長する際には、図11に示すように前面で上昇流と下降流のペアが接近するとともに後面側の

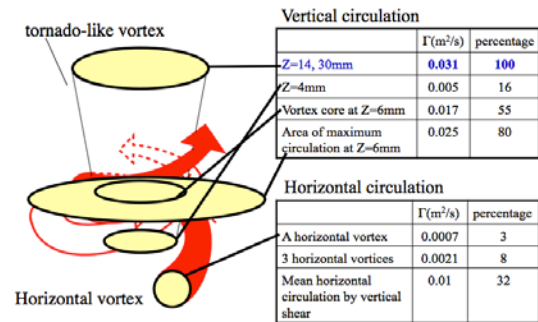


図10 竜巻渦の循環の形成要因

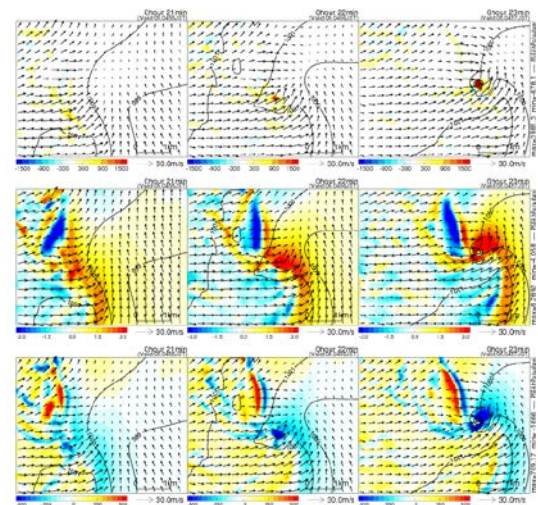


図11 竜巻の発生過程、上段より高度10mの鉛直渦度、高度94mの鉛直流、高度10mの収束発散、時刻は左より4:55, 4:56, 4:57.

下降流に伴う外出流の強化によって収束が強化される様子が確認され、単にシア不安定だけでなく、他の要因を伴って発生していることがわかった。一方、2012年8月14日のモデル解析（解像度500m）では、図12に示すように海上に明瞭な収束線が認められ、海上で積乱雲が発達しやすい環境が形成されることがわかった。

(4) 環境場解析

台風に伴う竜巻は、その7割がアウターレインバンドにおいて発生することを示した。そこでの竜巻発生指標を調べた結果、通常用いられるCAPEとSReHの積であるEHIは図13に示すようにアウターレインバンドで竜巻発生が多い事を示す指標としては不適切であることを示した。さらに、新たに提案したCAPEと鉛直温度の積であるEVIが図12に示すようにアウターレインバンドにおいてのみ高い値となり、竜巻発生の指標として適していることがわかった。

(5) 災害調査

実際に調査した6事例のうち、一つは海上竜巻であり、被害はもたらさなかった。残りの事例はいずれもF0にランクされるもので、被害幅と長さ、走向などの特徴をまとめた。

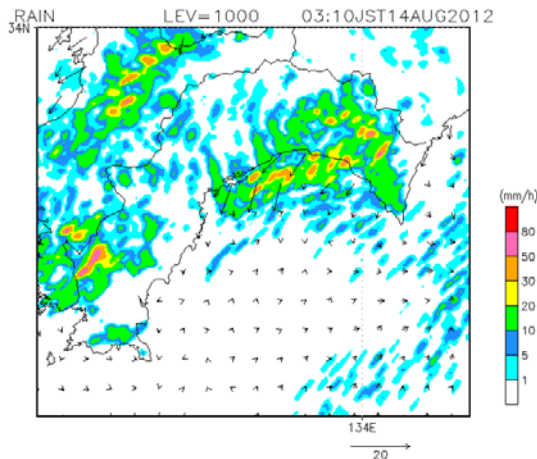


図12 土佐湾海上風を差し引いた風の分布と雲水量分布（2012年8月14日の事例）

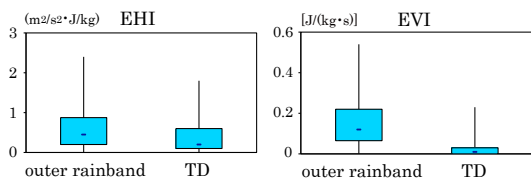


図13 台風のアウトターレインバンドとそれ以外の領域における指標の比較、左：EHI、右：EVI

これらのうち、レーダー観測結果が同時に得られた5事例については上空の渦と竜巻渦との対応関係を調べたが、竜巻として地上付近で確認されたものは各々1個であるものの、上空の渦は複数同時に発生していた事例が4事例も見られた。

(6) 総合評価

これらの成果については2013年3月25日に京都大学防災研究所で研究会を開催し、前気象研究所衛星観測部長で現京都大学特任教員の石原正仁氏から竜巻に関する総合的な研究として高い評価を得た。また、成果の一部は公開講演や報道などを通じて一般向けにも紹介されている。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計7件）

- ① 佐々浩司, 鈴木修, 小林文明, 竜巻の発生環境と生成メカニズム, 日本風工学会誌, 37-2, 査読無 2012, 108-117.
- ② 谷本早紀, 佐々浩司, 竜巻下層における飛散物挙動の実験的解明, 第22回風工学シンポジウム論文集, 査読有 2012, 91-96.
- ③ 佐々浩司, 竜巻の発生環境を再現する実験, ながれ 30-5 査読無 2011, 395-400.
- ④ Sassa, K. and Takemura, S., Vorticity budget of a tornado-like vortex, J. of Physics: Conference Series, 318 査読有 2011, 6pages.
- ⑤ 佐々浩司, 堀場晃平, 台風に伴う竜巻 大正時代の高知竜巻から現代まで, 京都大学防災研究所研究集会 台風災害の歴史と教訓 -伊勢湾台風から50年-, 査読無 2010, 96-97.
- ⑥ 竹村早紀, 山崎麻未, 佐々浩司, メソサイクロン模擬装置下で再現される竜巻, 京都大学防災研究所研究集会 台風災害の歴史と教訓 -伊勢湾台風から50年-, 査読無 2010, 39-42.

〔学会発表〕（計25件）

- ① 杉村昌俊, 佐々浩司, 2012年夏季に高知県東部で発生した3事例の竜巻, 日本気象学会関西支部第2回例会, 2012, 12, 15, 高知
- ② Horiba, K., Sassa, K., Environmental parameters for forecasting tornado outbreak on the outer rainband of typhoon, 26th Conference on severe

- local storms, 2012, 11, 5, Nashville, 米国
- ③ Minekawa, Y., Sassa, K., Controllable outflow generator for the experiment of a non-supercell tornado, 26th Conference on severe local storms, 2012, 11, 5, Nashville, 米国
- ④ Sassa, K., Hamada, I., The structure of a multiple-vortex type tornado realized in a supercell simulator, 26th Conference on severe local storms, 2012, 11, 5 Nashville, 米国
- ⑤ 田代吉満, 宮城弘守, 佐々浩司, スーパーセル模擬装置により再現された竜巻状渦の速度場, 日本流体力学会年会 2012, 2012, 9, 16, 高知
- ⑥ 小林哲也, 佐々浩司, 2011年8月に福岡市で発生した竜巻とメソサイクロンの関係, 日本流体力学会年会 2012, 2012, 9, 16, 高知
- ⑦ 峯川勇太, 佐々浩司, 冷氣外流出模擬装置を用いた竜巻再現実験, 日本流体力学会年会 2012, 2012, 9, 16, 高知
- ⑧ 小林哲也, 佐々浩司, 2011年8月に福岡市で発生した多重竜巻の解析, 日本気象学会 2012年度春季大会, 2012, 5, 27, つくば
- ⑨ 濱田一平, 佐々浩司, スーパーセルシミュレーターにより再現された多重竜巻の構造, 日本気象学会 2012年度春季大会, 2012, 5, 28, つくば
- ⑩ 堀場晃平, 佐々浩司, 台風に伴って発生する竜巻の環境パラメータ, 日本気象学会 関西支部第3回例会, 2012, 1, 26, 大阪
- ⑪ 小林哲也, 佐々浩司, 2011年8月21日に福岡市で発生した竜巻環境場の解析, 日本気象学会関西支部第2回例会, 2011, 12, 17, 高松
- ⑫ Sassa K., Hamada I., Hamaguchi Y. and Hayashi T., Characteristics of mesocyclones observed on Tosa Bay in Japan, 6th European Conference on Severe Storms, 2011, 10, 3 Palma de Mallorca, スペイン
- ⑬ 濱田一平, 佐々浩司, スーパーセル模擬装置で再現された多重竜巻の構造, 日本流体力学会年会 2011, 2011, 9, 7, 八王子
- ⑭ 峯川勇太, 佐々浩司, ペルティエ素子を用いた冷氣外流出模擬装置の開発, 日本流体力学会年会 2011, 2011, 9, 7, 八王子
- ⑮ Sassa, K. and Takemura, S. Vorticity budget of a tornado-like vortex, 13th European Turbulence Conference, 2011, 9, 5, Warsaw, ポーランド
- ⑯ 濱口祥輝, 濱田一平, 佐々浩司, 土佐湾で発生した渦のレーダー解析, 日本気象学会 2011年度春季大会, 2011, 5, 20, 東京
- ⑰ 堀場晃平, 佐々浩司, 台風に伴う竜巻の統計解析, 日本気象学会 2010年度秋季大会, 2010, 10, 27, 京都
- ⑱ 山崎麻未, 竹村早紀, 佐々浩司, 新しいスーパーセル竜巻の模擬実験, 日本気象学会 2010年度秋季大会, 2010, 10, 27, 京都
- ⑲ Sassa, K., Takemura, S. and Yamasaki, S., A New Tornado Simulator Reproducing Flow Fields under Supercell, The 25th Conference on Severe Local Storms, 2010, 10, 12, Denver, 米国
- ⑳ 山崎麻未, 濱田一平, 佐々浩司, スーパーセル竜巻模擬装置の改良, 日本流体力学会年会 2010, 2010, 9, 10, 札幌
- [その他]
- ①報道「多重渦竜巻の実験紹介」, NHK クローズアップ現代 2013, 5, 23
- ②一般向け講演「実験でみる竜巻の不思議」, 気象サイエンスカフェ, 日本気象学会北海道支部, 2012, 10, 6 札幌
- ③報道「スーパーセル竜巻発生の予測可能性を高める実験の紹介」, NHK サイエンス zero 2012, 8, 26
- ④一般向け講演「大気のうずまき -高知県を脅かす台風と竜巻-」, 黒潮からのメッセージ関連講座, 2012, 7, 28, 高知
- ⑤一般向け講演「竜巻のしくみと宮崎の竜巻発生状況」, 自然災害フォーラム, 日本風工学会、2010, 11, 23, 延岡
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
佐々 浩司 (SASSA KOJI)
高知大学・教育研究部自然科学系・教授
研究者番号：50263968
- (2) 研究分担者
林 泰一 (HAYASHI TAIICHI)
京都大学・防災研究所・准教授
研究者番号：10111981
- 村田 文絵 (MURATA FUMIE)
高知大学・教育研究部自然科学系・講師
研究者番号：60399326
- (3) 連携研究者
益子 渉 (MASHIKO WATARU)
気象庁気象研究所・台風研究部・主任研究員
研究者番号：30354476
- 橋口浩之 (HASIGUCHI HIROYUKI)
京都大学・生存圏研究所・准教授
研究者番号：90293943