

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：16401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04034

研究課題名(和文) 移動竜巻の流れ場の時空間構造解明と画像による竜巻特性値同定手法の確立

研究課題名(英文) Elucidation of Transient Structure of Flow Field of Moving Tornado and Establishment of Identification Method of Tornado Characteristic Value by Images

研究代表者

野田 稔 (Noda, Minoru)

高知大学・教育研究部自然科学系理学部門・教授

研究者番号：30283972

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：近年の都市近郊における竜巻被害発生の増加を鑑み、竜巻状旋回上昇流の流れ場の性状を精緻に検討するために、移動竜巻状旋回上昇流の再現を目指した移動床付マルチファン・マルチベーン式竜巻シミュレータを開発した。3D-PIVによる測定より1セル、2セル、多重渦の3種類の竜巻状旋回上昇流が安定的に生成され、移動状態も再現できることを確認した。一方、LESで生成した竜巻状旋回上昇流の流れ場を用いて、飛散物の飛行解析を実施し、到達半径や最大接線速度等の発現頻度は正規分布に従い、超過確率に基づく衝突速度の設定が可能であることを示した。さらに、漏斗雲の形状と竜巻の強さや規模との間に一定の関係があることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In order to investigate the properties of the flow field of a tornado-like flow, a tornado simulator with multi-fan, multi-vane and moving belt was developed to reproduce the moving state. As results of measurement by 3D-PIV, it was confirmed that three types of tornado-like flow of one cell, two cells and multi vortexes were stably generated, and the moving state can be reproduced. In addition, as a result of the flight analysis of debris in tornado-like flow generated by LES, it was found that the frequencies of occurrence of the arrival radius, the maximum tangential velocity, and so on, are similar to the normal distribution. This result says that the collision speed of debris in tornado-like flow can be set based on the exceedance probability. Furthermore, it was clarified that there is a certain relationship between the shape and scale of funnel cloud and the strength and scale of tornado.

研究分野：構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：竜巻シミュレータ 竜巻状流れ デブリ雲 漏斗雲 強風災害 竜巻災害 PIV

1. 研究開始当初の背景

国内では、年平均 25 個程度の竜巻が陸上で発生しており、アメリカの年間平均発生数 880 個より極めて少ないが、アメリカの 70% 程度に相当する日本の面積当たりの竜巻発生数は決して少なくない。またアメリカの約 10 倍である日本の平均人口密度は、国民が竜巻に遭遇する可能性は日本の方がアメリカよりもはるかに高いことを意味し、事実、図 1 に示すように海岸線付近の平野部に集中している竜巻の発生個所は人口密集地と重なっており、人命や家屋、社会基盤が竜巻の被害を受ける確率はアメリカと同等かそれ以上であると考えることができる。

最近の多発する都市部での竜巻被害によって、2006 年度に内閣府の竜巻等突風対策検討会が組織され、ドップラーレーダー観測網の整備とともに、突風災害の調査体制の確立や竜巻注意情報の導入などが気象庁を中心に進められている。しかし、被害の痕跡から竜巻の強さを推定するフジタスケールでは竜巻の強さや規模を正しく評価できない場合も多く、被害の痕跡に基づかない竜巻強さの客観的評価方法の必要性が高まっているが、竜巻中心付近の風速場の構造や構造物に作用する空気力などの工学的問題についても不明な点が多く、学術的な説明は喫緊の課題である。

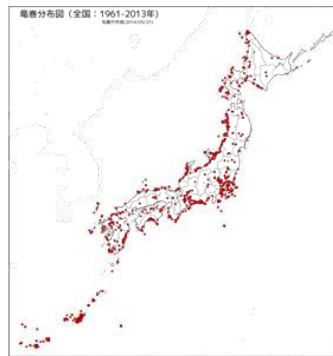


図 1 日本国内で発生が確認された竜巻の分布 (1961~2013 年)

2. 研究の目的

以上の背景に基づいて、本研究では、竜巻のような局所的な旋回上昇流を実験的および数値流体的に再現し、工学的見地に立って竜巻中心における流れ場の時空間構造と竜巻による空気力の特性を明らかにするとともに、竜巻内で生じる飛散物の挙動、移動の効果による竜巻の特性の変化などの情報提供を行って、防災・減災対策に寄与することを目指し、①移動床付マルチファン・マルチベーン式竜巻シミュレータを開発・実用化して、②移動する竜巻状旋回上昇流の時空間構造を明らかにし、③この竜巻状旋回上昇流中での飛散物の飛行情報を収集すること、および④漏斗雲や飛散物で可視化された竜巻の映像から、竜巻構造の基本パラメータを同定する技術を確認すること、を目的として研究を進めていった。

3. 研究の方法

(1) 竜巻シミュレータ

図 2 に本研究で開発した移動床付マルチファン・マルチベーン式竜巻シミュレータの概略図を示す。本装置で生成された流れ場は、上昇流孔から鉛直下向きに照射されたレーザーシートを挟むように配置した高速度カメラ 2 台を使ってステレオ撮影を行い、3D-PIV による 3 成分の風速分布を計測した。

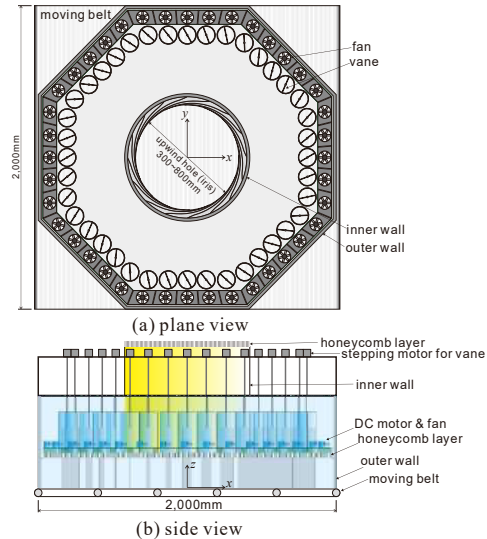


図 2 移動床付マルチファン・マルチベーン式竜巻シミュレータ

(2) LES による竜巻状旋回上昇流の再現

図 3 に直方体計算領域の一对の側面に互い違いの流速境界条件を与えることで水平シア場を生成するための解析メッシュを示す。本解析メッシュを用いて、実大スケールの竜巻状流れを生成し、漏斗雲や飛散物によって竜巻状流れがどのように可視化されるのかを検討するために用いられた。本解析には、有限解析法ベースの数値流体解析ソフトである OpenFOAM を用いて行い、LES モデルには標準 Smagorinsky モデルを用いた。

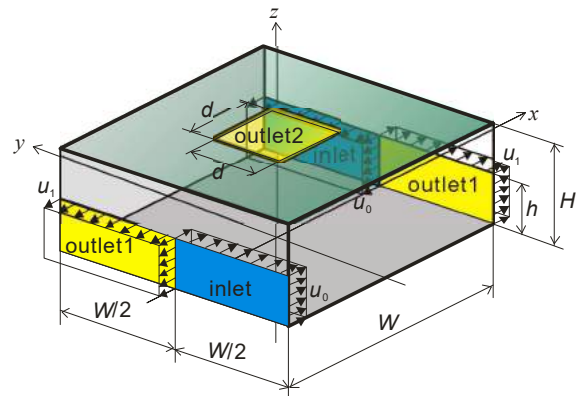


図 3 水平シアを与えて竜巻状流れを生成するための解析メッシュ

(3) 漏斗雲の生成

本研究では、(2)の方法によって生成された

竜巻状旋回上昇流の圧力場を用いて、流れ場による圧力変化と高度による圧力変化から断熱変化を前提に温度分布 $T(x,y,z)$ を求め、さらに各点での飽和水蒸気量を求めることで、流入空気の湿度 RH と気温 T_0 に対して、

$$\frac{a_0}{a} = \frac{T + 273.15}{T_0 + 273.15} \times 10^{\frac{7.5T_0}{T_0 + 237.3} - \frac{7.5T}{T + 237.3}} \times RH = 1$$

によって漏斗雲生成面を求め、漏斗雲の形について検討した。図4に再現された漏斗雲の一例を示す。



図4 生成された漏斗雲の例

(4) 飛散物の軌道計算

本研究では(2)の方法によって生成された流れ場を用いて、球状飛散物の三自由度飛散軌道解析を実施した。ここでは、

$$m\ddot{\mathbf{x}} = \frac{\rho C_D A}{2} |\mathbf{U} - \dot{\mathbf{x}}| (\mathbf{U} - \dot{\mathbf{x}}) + m\mathbf{G}$$

で示される三自由度運動方程式に、従来の研究で得られている空力パラメータを適用し、地表面から鉛直方向に初速度を与える形で飛行解析を実施し、時々刻々の飛散物の飛行軌道を計算した。解析は、数値流体解析ソフト OpenFOAM に含まれる DEM 解析コードにより実施した。図5に飛行解析結果の一例を示す。

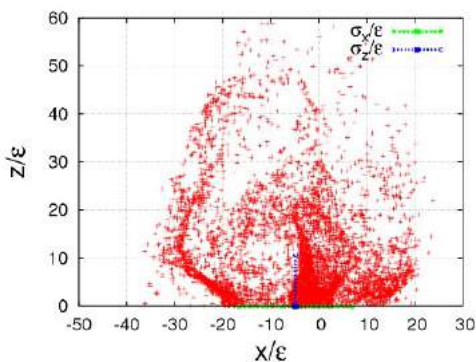


図5 竜巻状旋回上昇流中における球状飛散物の飛行解析結果の一例

4. 研究成果

(1) 移動床付マルチファン・マルチベーン式竜巻シミュレータの開発

本研究によって開発された移動床付マルチファン・マルチベーン式竜巻シミュレータは図6に示す。本シミュレータには床部分にムービングベルトが備えられているほか、昇降可

能な収束層、拡張可能な上昇流孔が備えられており、竜巻シミュレータにおいて検討すべきすべての影響因子について検討可能となった。また、開発された本装置において3D-PIVによって計測された流れ場を検討した結果、図7に示すような風速分布の変化が認められ、設定スワール比によって1セル型、2セル型、多重渦型の3種類の竜巻状旋回上昇流が安定的に生成できることが確認された。



図6 開発された移動床付マルチファン・マルチベーン式竜巻シミュレータ

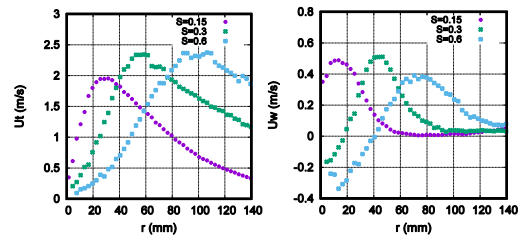


図7 接線風速分布と鉛直風速分布に対する設定スワール比の影響

(2) 移動床付マルチファン・マルチベーン式竜巻シミュレータにおける移動竜巻状旋回上昇流の流れ場の計測

図8にムービングベルトを稼働させない静止竜巻状態と、同じスワール比でムービングベルトを稼働させた移動竜巻状態において3D-PIVによって測定した水平面内の接線、半径、鉛直の3方向成分の風速分布を示す。上段の静止状態の速度分布がほぼ同心円状の分布をしているのに対して、下段の移動状態の風速分布では対称性が崩れていることがわかる。このことは、従来原子力発電所の対竜巻設計に用いるような竜巻モデルで静止竜巻の風速分布に移動速度を重ね合わせる方法が現実の流れに即していないことを示している。

また、各高さにおける渦中心を求めてつないだ渦軸の形状を図9に示す。左が移動方向直角方向から見た渦軸であり、右はその渦軸の鉛直方向の傾きと移動速度の関係を示したものである。この結果より、移動速度の増加に合わせて渦軸はほぼ直線を保ったまま傾いていく様子が認められ、ムービングベルトによって移動状態の竜巻状旋回上昇流が再現できていることが確認できる。

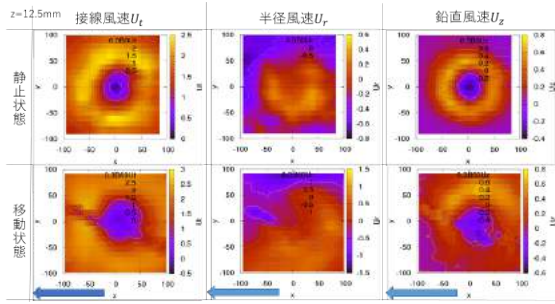


図 8 竜巻状旋回上昇流の接線方向、半径方向、鉛直方向の水平面内風速分布に対する移動効果

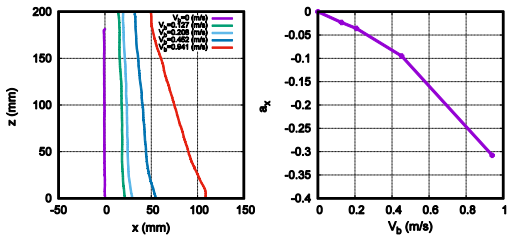


図 9 竜巻状旋回上昇流の渦軸に対する移動速度の影響

(3) LES により生成された竜巻状旋回上昇流中における飛散物の飛行特性の統計的評価

LES によって生成した水平シアに生じる竜巻状旋回上昇流を用いて、飛散物の飛行解析を行った結果、地表面から鉛直上向きに飛散物を打ち出し、放物線運動に要する時間以上飛行したものを対象に、その飛散物の到達半径や到達高度、最大接線速度など飛散物の飛行特性を表すパラメータの発現分布を求めると、図 10 および 11 に示すように、飛散物の到達半径や最大接線速度の発現頻度が 2 つの異なるグループに分かれ、いずれも正規分布に近い発現分布を示すことが明らかとなった。このことは、従来の対竜巻設計において唯一の衝突速度を示す方法から、超過確率を想定した適切な衝突速度の算出が可能となることを示しており、将来的に確率モデルを使った対竜巻設計が可能となることを示唆している。

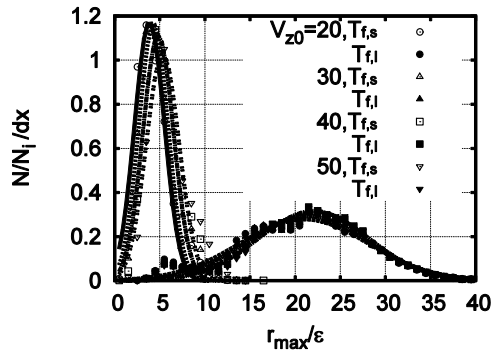


図 10 飛散物の到達半径の発現頻度分布

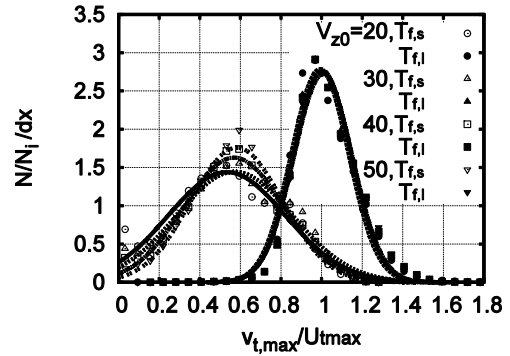


図 11 飛散物の最大接線速度の発現頻度分布

(4) 漏斗雲の形状と竜巻状旋回上昇流の特性値との関係性

本研究では、LES によって生成された水平シアに生じる竜巻状旋回上昇流の圧力場を使って任意の強さや規模に対応する漏斗雲を生成し、その強さと漏斗雲の形の関係について主に検討した。その結果、図 12 に示すように、竜巻状旋回上昇流の最大接線風速の二乗と漏斗雲の長さとの間に明確な線形関係が存在し、その関係は相対湿度の影響をほとんど受けないことを確認した。このことは、漏斗雲の画像から竜巻の強さを推定可能であることを示している。また、図 13 に示すように、最大接線風速とコア半径に対する漏斗雲の中間幅の比と最大接線風速の間にも規則的な関係が認められ、詳しい分析を行えば、漏斗雲の画像から竜巻の規模についても推定可能であることが明らかとなった。

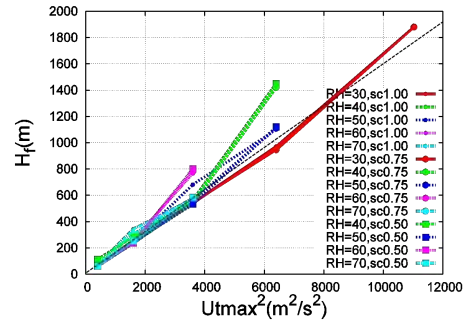


図 12 竜巻状旋回上昇流の最大接線風速と漏斗雲高さの関係

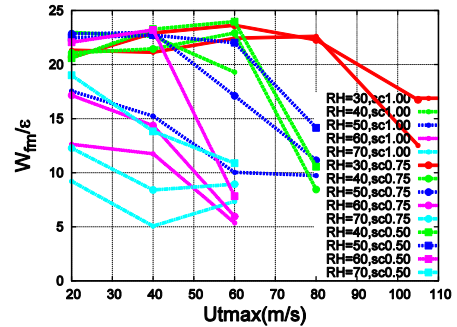


図 13 竜巻状旋回上昇流の最大接線風速とコア半径に対する漏斗雲中間幅の比との関係

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 12 件)

①野田稔, 八谷実, 松浦祐樹, 長尾文明, 竜巻状渦の平均接線風速分布について、日本風工学会論文集、vol.43, No.2, 2018、査読有、pp.11-18

② Minoru Noda, Minoru Hachiya, Yuki Matsuura, Fumiaki Nagao, Statistical Characteristics of Flight of Debris in Tornado-like Vortex, Proceedings of International Workshop on Wind-Related Disasters and Mitigation, 2018, 査読有、電子媒体

③ Minoru Noda, Fumiaki Nagao, Development of a Tornado Simulator with Multi-fan, Multi-vane and Moving belt, Proceedings of the 9th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, 2017、査読有、電子媒体

④野田稔, 趙昱喬, 長尾文明, 移動床付マルチファン・マルチベーン式竜巻シミュレータで生成される竜巻状流れ、日本流体力学会年会 2017 講演論文集、査読無、電子媒体

⑤野田稔, 八谷実, 松浦祐樹, 長尾文明, 竜巻状流れ場における飛散物の飛行特性について、日本流体力学会年会 2017 講演論文集、査読無、電子媒体

⑥野田稔, 八谷実, 長尾文明, 竜巻状流れの幾何学的スケールが飛散物の飛行特性に及ぼす影響、第 24 回風工学シンポジウム論文集、2016、査読有、pp.259-264

⑦野田稔, 八谷実, 長尾文明, 漏斗雲の見え方と竜巻パラメータとの関係性について、第 24 回風工学シンポジウム論文集、2016、査読有、pp.121-126

⑧野田稔, 八谷実, 長尾文明, 竜巻状渦中の飛散物の飛行特性に対する流れ場スケールの影響、日本流体力学会年会 2016 講演論文集、査読無、2016、査読無、電子媒体

⑨野田稔, 八谷実, 長尾文明, 竜巻の強さや規模と漏斗雲の形の関係、日本流体力学会年会 2016 講演論文集、2016、査読無、電子媒体

⑩野田稔, 八谷実, 長尾文明, 前田潤滋, 水平シアに生じる竜巻状流れの漏斗雲による可視化、第 29 回数値流体力学シンポジウム講演論文集、2015、査読無、電子媒体

⑪野田稔, 八谷実, 西村公成, 長尾文明、水平シアによって生じた竜巻状流れ場の構造と漏斗雲の生成、日本流体力学会年会 2015 講演論文集、2015、査読無、電子媒体

⑫ Minoru Noda, Rikiya Okamoto, Daisuke Yamanaka, Kenji Hosoya, Fumiaki Nagao, Visualization of Tornadoes Based on Characteristics of Funnel Clouds and Flying Debris, Proceedings of 14th International Conference on Wind Engineering, 2015、査読有、電子媒体

[学会発表] (計 24 件)

①趙昱喬, 野田稔, 川畑允人, 長尾文明, 移動床付マルチファン・マルチベーン式竜巻シミュレータによる移動竜巻の再現、平成 30 年度土木学会 四国支部技術研究発表会、2018.5.19、徳島大学 (徳島県徳島市)

②野田稔, 趙昱喬, 長尾文明, 移動床付マルチファン・マルチベーン式竜巻シミュレータで生成される竜巻状流れ、日本流体力学会年会 2017、2017.8.30、東京理科大学 (東京都葛飾区)

③野田稔, 八谷実, 松浦祐樹, 長尾文明, 竜巻状流れ場における飛散物の飛行特性について、日本流体力学会年会 2017、2017.8.30、東京理科大学 (東京都葛飾区)

④野田稔, 沖本健吾, 長尾文明, 石田富士雄, 辻明典, 移動床付マルチファン・マルチベーン式竜巻シミュレータの開発、平成 29 年度日本風工学会年次研究発表会、2017.5.24、新潟工科大学 (新潟県柏崎市)

⑤野田稔, 八谷実, 長尾文明, 漏斗雲の見え方と竜巻パラメータとの関係性について、第 24 回風工学シンポジウム、2016.12.06、日本建築会館 (東京都港区)

⑥野田稔, 八谷実, 長尾文明, 竜巻状流れの幾何学的スケールが飛散物の飛行特性に及ぼす影響、第 24 回風工学シンポジウム、2016.12.06、日本建築会館 (東京都港区)

⑦野田稔, 八谷実, 長尾文明, OpenFOAM を使った竜巻状流れの再現、オープン CAE シンポジウム 2016、2016.11.26、東京大学 (東京都目黒区)

⑧ Minoru Noda, Minoru Hachiya, Fumiaki Nagao, Visualization of Tornado by Funnel and Debris Clouds, 28th Conference on Severe Local Storms, 2016.11.08, Hilton Portland & Executive Tower (アメリカ、ポートランド市)

⑨野田稔, 八谷実, 長尾文明, 竜巻状渦中の

飛散物の飛行特性に対する流れ場スケールの影響、日本流体力学会年会 2016、2016.09.26、名古屋工業大学（愛知県名古屋市）

⑩野田稔、八谷実、長尾文明、竜巻の強さや規模と漏斗雲の形の関係、日本流体力学会年会 2016、2016.09.26、名古屋工業大学（愛知県名古屋市）

⑪野田稔、漏斗雲画像による竜巻特性値の推定に関する検討、日本建築学会大会学術講演会、2016.08.24、福岡大学（福岡県福岡市）

⑫八谷実、野田稔、長尾文明、高井俊吾、水平シアに生じる竜巻状流れの漏斗雲による可視化、土木学会四国支部技術研究発表会、2016.05.28、高知工科大学（高知県香美市）

⑬野田稔、八谷実、長尾文明、前田潤滋、水平シアに生じる竜巻状流れの漏斗雲による可視化、第 29 回数値流体力学シンポジウム、2015.12.17、九州大学（福岡県春日市）

⑭野田稔、八谷実、西村公成、長尾文明、水平シアによって生じた竜巻状流れ場の構造と漏斗雲の生成、日本流体力学会年会 2015、2015.09.27、東京工業大学（東京都目黒区）

⑮森一樹、野田稔、長尾文明、数値流体解析を用いたトルネードシミュレータの再現、土木学会全国大会技術研究発表会、2015.09.16、岡山大学（岡山県岡山市）

⑯八谷実、野田稔、西村公成、長尾文明、竜巻状流れの可視化に関する研究 その 1～LES による竜巻状流れ場の生成～、土木学会全国大会技術研究発表会、2015.09.16、岡山大学（岡山県岡山市）

⑰西村公成、野田稔、八谷実、長尾文明、竜巻状流れの可視化に関する研究 その 2～漏斗雲による竜巻特性推定～、土木学会全国大会技術研究発表会、2015.09.16、岡山大学（岡山県岡山市）

⑱野田稔、LES を用いた竜巻状流れ場の水平シアによる生成と漏斗雲による可視化に関する研究、日本建築学会大会学術講演会、2015.09.06、東海大学（神奈川県平塚市）

⑲Minoru Noda, Rikiya Okamoto, Daisuke Yamanaka, Kenji Hosoya, Fumiaki Nagao, Visualization of Tornadoes Based on Characteristics of Funnel Clouds and Flying Debris, 14th International Conference on Wind Engineering, 2015.06.22. Pontificia Universidade Catolica do Rio Grande do Sul（ブラジル、ポルトアレグレ市）

⑳野田稔、八谷実、西村公成、長尾文明、竜巻状流れ場の生成と漏斗雲による可視化に関する研究～水平シアによる竜巻状流れの生成～、平成 27 年度日本風工学会年次研究発表会、2015.05.28、徳島大学（徳島県徳島市）

㉑野田稔、西村公成、八谷実、長尾文明、竜巻状流れ場の生成と漏斗雲による可視化に関する研究、平成 27 年度日本風工学会年次研究発表会、2015.05.28、徳島大学（徳島県徳島市）

㉒森一樹、野田稔、長尾文明、竜巻状流れ場に対する 3D-PIV の適用、土木学会四国支部技術研究発表会、2015.05.23、香川大学（香川県高松市）

㉓八谷実、野田稔、西村公成、長尾文明、水平シアに生じる竜巻状流れの制御因子に関する検討、土木学会四国支部技術研究発表会、2015.05.23、香川大学（香川県高松市）

㉔西村公成、野田稔、八谷実、長尾文明、竜巻の漏斗雲の見え方に関する研究、土木学会四国支部技術研究発表会、2015.05.23、香川大学（香川県高松市）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野田 稔 (NODA MINORU)
高知大学・教育研究部・教授
研究者番号：30283972

(2) 研究分担者

長尾 文明 (NAGAO FUMIAKI)
徳島大学・大学院社会産業理工学研究部・教授
研究者番号：40172506