

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560583

研究課題名(和文) 実験及び数値流体解析に基づく竜巻状旋回上昇流の制御方法に関する研究

研究課題名(英文) Study on Control method of Tornado-like flow by Experiment and CFD

研究代表者

野田 稔(NODA, MINORU)

徳島大学・ソシオテクノサイエンス研究部・准教授

研究者番号：30283972

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：近年の竜巻被害の発生数の増加傾向を鑑み、竜巻状旋回上昇流の流れ場の性状を検討するために開発した実験装置、マルチファン・マルチベーン式トルネードシミュレータを用い、3D-PIV法によって流れの性状を調べた。その結果、設定したスワール比に応じて竜巻状流れ場の性状が1セル型から2セル型に移行していることを確認した。また、LESによって生成された竜巻k分をも用いて平板上飛散物の運動を検討し、飛散物の挙動に立川数が強く影響していることを示した。一方で、LESによって生成された竜巻状流れ場を用いて、漏斗雲の生成を試み、漏斗雲や飛散物によって可視化された竜巻の特強さや規模の推定が可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：The flow fields in the tornado-like flow simulator with multi-fan and multi-vane were investigated by 3D PIV method. On the other hand, it was clarified that debris flying in Tornado formed debris cloud by the equilibrium of aerodynamic forces, centrifugal force and gravity in radius-height plane. Moreover, it was indicated that strength and scale of tornado flows could be estimated from their photo and movies by investigation of relationships between characteristics of tornado flows and shapes of their funnel clouds and of their debris clouds.

研究分野：工学

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

## 1. 研究開始当初の背景

図1に1961年～2010年に日本国内で発生が確認された竜巻の分布を示す。これらの統計に基づくと、日本では年間平均20個程度の竜巻が陸上で発生しており、アメリカ合衆国の年間平均発生数880個に比べれば絶対数では少ないが、国土面積の違いを考慮すれば日本の竜巻発生数はアメリカ合衆国のおよそ60%程度であり、決して少ない数字とは言えない。さらに日本における竜巻発生箇所は海岸線付近の平野部に集中しており、人口密集地と重なっていることが、人命や家屋、社会基盤構造物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と考えられる。

この事実から2006年度には内閣府に竜巻など突風対策検討会が組織され、ドップラレーダー観測網の整備など、突風災害への対策が始まった。研究代表者らも四国内で発生した竜巻被災地の現地調査に取り組んでおり、局所的にきわめて大きな被害をもたらす竜巻の存在を重視していた。しかし、竜巻を対象とした突風災害への対策は始まったばかりであり、竜巻によって生じる家屋や社会基盤構造物への影響といった工学的な情報については明らかにされておらず、学術的な検討に取り組むことが急務であった。そのためには、竜巻のような局所的な旋回上昇流を実験的に再現し、工学的見地に立って竜巻中心における流れ場の構造や、圧力分布、大小さまざまな建築構造物や橋梁、鉄塔などの社会基盤構造物に竜巻がもたらす空気力の実態を明らかにする必要がある。



図1 日本国内で発生が確認された竜巻の分布（1961～2010年）

## 2. 研究の目的

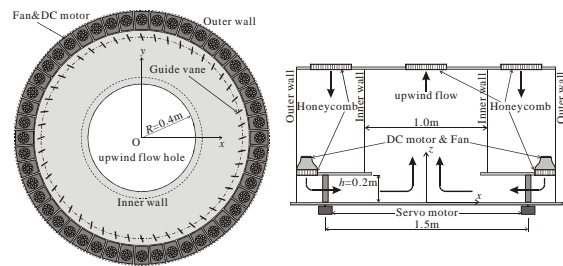
本研究の以上の背景に基づいて、本研究では、耐風設計のフィールドに竜巻状旋回上昇流に関する情報を提供することを最終的な目標と見据えて、これまでに開発したマルチファン・マルチベーン式竜巻シミュレータおよび数値流体解析を用いて、流入境界条件による竜巻状旋回上昇流の制御則の確立、竜巻状流れ場内における三次元物体の六自由度飛散軌道解析手法の確立、竜巻状旋回上昇流中の飛散物の飛行特性の検討、飛散

物および漏斗雲の見え方と竜巻状流れ場の特性の関係の検討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にこれまでに開発したマルチファン・マルチベーン式竜巻シミュレータの概略図を示す。本装置は、収束層中央部分の床面が透明になっており、この部分からレーザーシートを照射し、高速度カメラ2台を用いたステレオ撮影を行って、3D-PIVによる三成分の風速分布を計測した。



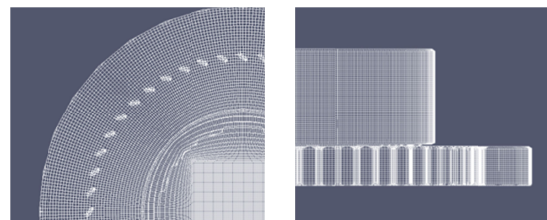
(a) 平面図

(b) 側面図

図2 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にマルチファン・マルチベーン式竜巻シミュレータを模した解析メッシュを示す。収束層天井の外縁付近に実物と同じく48に分割された流入境界を設け、流入量分布、流入角ともに実物と同様の条件を再現できるようにした。本メッシュは、図2の内部流れを検討するために使用した。



(a) 平面図

(b) 側面図

図3 マルチファン・マルチベーン式竜巻シミュレータを模した解析メッシュ

一方で、実スケール相当の竜巻状旋回上昇流を生成するために、図4に示すような、平面形が1辺12kmの正方形の収束層を有する解析メッシュを使用した。本メッシュは、竜巻状旋回上昇流が漏斗雲や飛散物によってどのように可視化されるかを検討する際に用いた。

いずれの解析メッシュにおいても、有限解析法ベースの数値流体解析ソフトであるOpenFOAMを用いて解析を行い、LESモデルは標準 Smagorinsky モデルを用いた。

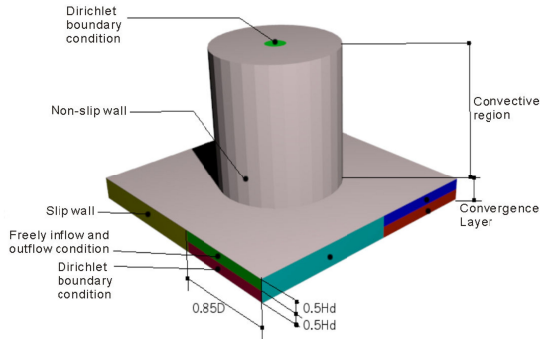


図4 実大竜巻状流れを再現するために用いた解析メッシュ

(3) 三次元物体の六自由度飛散軌道解析

本研究では、LESを用いた数値流体解析によって得られた竜巻状旋回上昇流の流れ場を用いて、平板状飛散物の六自由度飛散軌道解析を実施した。ここでは、

$$m\ddot{\mathbf{x}} = \frac{1}{2} \rho |\mathbf{U} - \dot{\mathbf{x}}| (\mathbf{U} - \dot{\mathbf{x}}) \mathbf{C}_F(\phi, \psi) A + m\mathbf{G}$$

$$\mathbf{J}\dot{\theta} = \frac{1}{2} \rho |\mathbf{U} - \dot{\mathbf{x}}| (\mathbf{U} - \dot{\mathbf{x}}) \mathbf{C}_M(\phi, \psi) A l$$

で示される六自由度運動方程式に、過去に実測した空気力係数  $\mathbf{C}_F, \mathbf{C}_M$  を与えて、時々刻々の飛散物の飛行軌道を計算した。図5に本研究で確立した飛行解析の一例を示す。また、実大スケールの竜巻状旋回上昇流について飛散物の運動を解析する際には、抗力のみによる三自由度運動解析を行い、竜巻状旋回上昇流の地表付近に発生するデブリクラウドの形状の検討を行った。

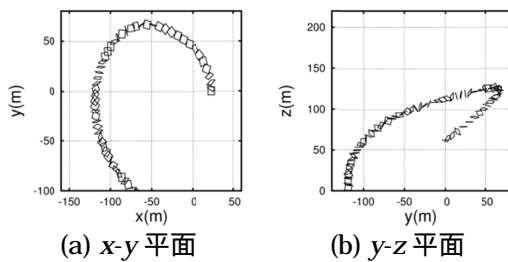


図5 竜巻状旋回上昇流中における平板上飛散物の飛行解析結果の一例

(4) 漏斗雲の生成

実大スケールの竜巻状旋回上昇流の圧力場を基に、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6に再現された漏斗雲の一例を示す。

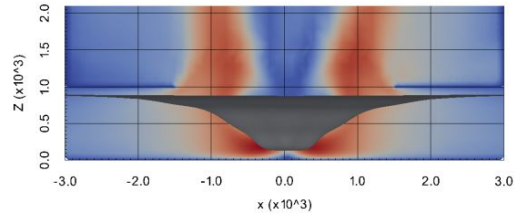


図6 竜巻状旋回上昇流に形成された漏斗雲の一例

4. 研究成果

(1) マルチファン・マルチベーン型竜巻シミュレータにおける流れ場

図7に3D-PIVを使って計測されたマルチファン・マルチベーン型竜巻シミュレータ内の流速ベクトル分布を示す。スワール比の増加で渦中心において逆流領域が形成され1セル型から2セル型への流れ場の移行が確認された。また、流入境界による渦中心の移動方向と移動量が周速域における流量差の最大方向とその量によって決まることが明らかとなった。

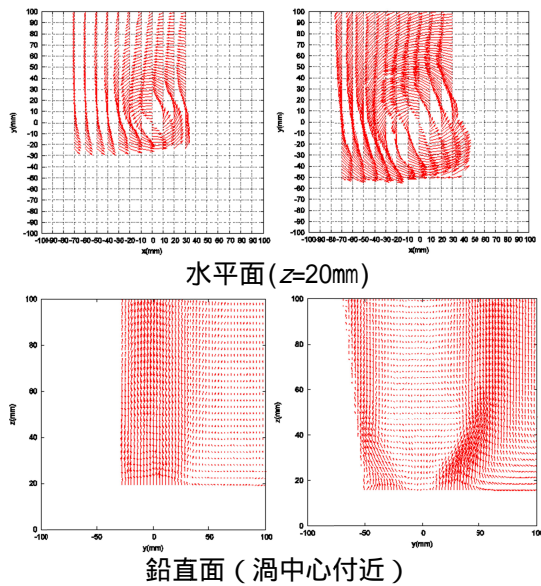


図7 マルチファン・マルチベーン型竜巻シミュレータ内の流れ場

(2) 竜巻状旋回上昇流内における飛散物の飛行解析法の確立と飛行特性の解明

LESで生成した平均流れ場を使って、竜巻状旋回上昇流中の飛散物の飛行軌道を求める六自由度飛行解析手法を確立し、飛散物の慣性力と空気力の比で定義される立川数を変化させながら、飛散物の挙動を検討した。その結果、竜巻状旋回上昇流中では遠心力と空気力、重力の三力のつり合い状態によって飛散物の挙動が決定されており、飛散物は竜巻状旋回上昇流の中心付近で上昇し、遠心力

によって外側に移動しながら鉛直速度を減じ、ある決まった半径に収束しながら下降することを明らかにした。図8には立川数の違いによる飛散物の運動方向を示しているが、慣性力に対して空気力が弱ければ上記のような運動となり、空気力が強ければ上昇し続けるという挙動が明らかとなった。また、半径方向の運動方向および鉛直方向の運動方向が転換する境界線が存在し、立川数に応じて図9に示すように変化することを明らかにした。さらに飛散物の飛散半径は立川数のほか、フルード数や竜巻の規模に支配されていることを示し、飛散物が形成するデブリクラウドから竜巻の強さや規模を読み取ることの可能性が示された。

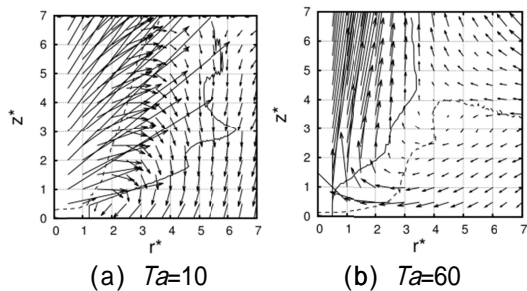


図8 立川数による半径-高さ面内における飛散物の運動方向の変化

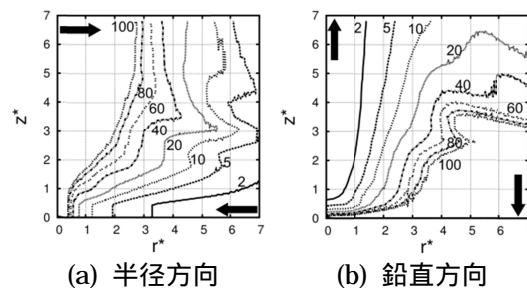


図9 飛散物の運動に関する水平方向の収束線および鉛直方向の分岐点

### (3) 竜巻状旋回上昇流の漏斗雲および飛散物による見え方の検討

実大スケールの竜巻状旋回上昇流をLESを用いた数値流体解析で生成し、その圧力分布と高さによる圧力変化に対して断熱変化による気温変化を求め、飽和水蒸気量が水蒸気量を下回る境界面を漏斗雲の形成面と考えて、竜巻状旋回上昇流に対する漏斗雲の生成を試みた。図10に求められた漏斗雲の断面形状に対する湿度の影響を示すが、湿度によって漏斗雲の形成面の位置が大きく変化することを示した。ただ、図4に示した解析メッシュでは収束層の天井の影響が大きく、十分な検討ができなかったため、実際には存在しない不自然な境界面などを排除した解析

メッシュによる竜巻状旋回上昇流の再現計算が必要であるとの結論に達した。

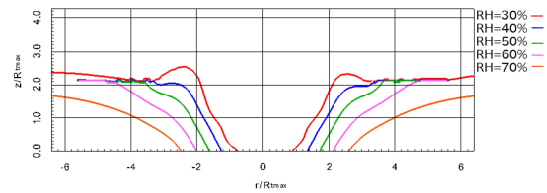


図10 漏斗雲の形状に対する湿度の影響

一方、再現された流れ場の中で抗力のみを考慮した飛散物飛行解析を実施した結果、図11に示すようなデブリクラウドを再現できることが明らかとなった。ただし、流れ場の再現については、より現実的な特性を持たせる必要があり、先に述べた不自然な境界を排除した計算領域を使った数値流体解析の実施が必要との結論に達した。

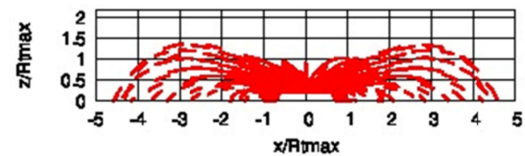


図11 竜巻状旋回上昇流に形成されるデブリクラウドの一例

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計13件)

野田稔, 岡本力也, 山中大輔, 細谷顕史, 長尾文明, 漏斗雲と飛散物による竜巻の可視化に関する研究、第23回風工学シンポジウム論文集、2014、査読有、pp.385-390

野田稔, 森一樹, 長尾文明, 移動式トルネードシミュレータによる竜巻状流れ場の研究、第23回風工学シンポジウム論文集、2014、査読有、pp.457-462

野田稔, 二宮めぐみ, 長尾文明, マルチファン・マルチベーンを備えた竜巻シミュレータの開発、日本風工学会論文集、Vol.39, No.1, 2014、査読有、pp.13-16、10.5359/jwe.39.13

野田稔, 岡本力也, 山中大輔, 細谷顕史, 長尾文明, 漏斗雲と飛散物による竜巻の可視化に関する検討、日本流体力学会年会2014講演論文集、査読無、電子媒体

Minoru Noda, Kazuhito Masai, Megumi Ninomiya, Fumiaki Nagao, Behavior of Flying Debris in Tornado-like flow, Proceedings of Computational Wind Engineering 2014, 査読有、電子媒体

Minoru Noda, Fumiaki Nagao, Wind Speed of Tornado to Make a Road Damage, Journal of Disaster Research, Vol.8, No.6, 2013, 査読有、pp.1090-1095

野田稔, 政井一仁, 二宮めぐみ, 長尾文明, 竜巻状流れ場における飛散物の挙動、日本風工学会論文集、vol.38, No.3, 2013, 査読有、pp.63-73、10.5359/jwe.38.63

野田稔, 二宮めぐみ, 長尾文明, トルネードシミュレータにおける渦生成位置への流入境界の影響、日本流体力学会年会 2013 講演論文集、査読無、電子媒体

Minoru Noda, Kazuhiro Masai, Megumi Ninomiya, Fumiaki Nagao, Estimation of Wind Speed from Road Damage by a Tornado, Proceedings of 12<sup>th</sup> Americas Conference on Wind Engineering, 2013, 査読有、電子媒体

野田稔, 二宮めぐみ, 山下翔平, 長尾文明, マルチファン・マルチベーン式竜巻シミュレータによる竜巻状流れ場の制御に関する研究、第22回風工学シンポジウム論文集、2012、査読有、pp.25-30、10.14887/kazekosymp.22.0.25.0

野田稔, 長尾文明, 竜巻によるアスファルト剥離・飛散事例からの風速推定、第22回風工学シンポジウム論文集、2012、査読有、pp.85-90、10.5359/jwe.38.101

野田稔, 政井一仁, 鹿島貴侑, 長尾文明, 竜巻状流れ場における飛散物の飛行軌道、第22回風工学シンポジウム論文集、2012、査読有、pp.121-126、10.14887/kazekosymp.22.0.121.0

野田稔, 長尾文明, 二宮めぐみ, マルチファン・マルチベーン型トルネードシミュレータによる渦の移動、日本流体力学会年会 2012 講演論文集、査読無、電子媒体

〔学会発表〕(計 19 件)

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、2015.5.28、徳島大学(徳島県徳島市)

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～漏斗雲の見え方に対する竜巻特性の影響～、平成 27 年度日本風工学会

年次研究発表会、2015.5.28、徳島大学(徳島県徳島市)

森一樹, 野田稔, 長尾文明, 竜巻流れ場に対する 3D-PIV の適用、平成 27 年度土木学会四国支部技術研究発表会土、2015.5.23、香川大学(香川県高松市)

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、平成 27 年度土木学会四国支部技術研究発表会土、2015.5.23、香川大学(香川県高松市)

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、平成 27 年度土木学会四国支部技術研究発表会土、2015.5.23、香川大学(香川県高松市)

野田稔, 岡本力也, 山中大輔, 細谷顕史, 長尾文明, 漏斗雲と飛散物による竜巻の可視化に関する研究、第 23 回風工学シンポジウム、2014.12.5、東京大学山上会館(東京都文京区)

野田稔, 森一樹, 長尾文明, 移動式トルネードシミュレータによる竜巻状流れ場の研究、第 23 回風工学シンポジウム、2014.12.5、東京大学山上会館(東京都文京区)

野田稔, 岡本力也, 山中大輔, 細谷顕史, 長尾文明, 漏斗雲と飛散物による竜巻の可視化に関する検討、日本流体力学会年会 2014、2014.9.16、東北大学(宮城県仙台市)

森一樹, 野田稔, 長尾文明, LES による IOWA 型トルネードシミュレータの再現、土木学会第 69 回年次学術講演会、2014.9.11、大阪大学(大阪府豊中市)

Minoru Noda, Kazuhiro Masai, Megumi Ninomiya, Fumiaki Nagao, Behavior of Flying Debris in Tornado-like flow, Computational Wind Engineering 2014, 2014.6.12、ハンブルク大学(ドイツ、ハンブルク市)

森一樹, 野田稔, 長尾文明, LES による移動式トルネードシミュレータの再現、平成 26 年度土木学会四国支部技術研究発表会、2014.5.31、徳島大学(徳島県徳島市)

Minoru Noda, Megumi Ninomiya, Kazuhiro Masai, Fumiaki Nagao, Experimental and Numerical Approaches to Tornado-like Flow, Computational engineering and Science for Safety and Environmental problems 2014、

2014.4.14、東北大学（宮城県仙台市）

野田稔,二宮めぐみ,長尾文明、トルネードシミュレータにおける渦生成位置への流入境界の影響、日本流体力学会年会 2013、2013.9.12、東京農工大学(東京都世田谷区)

野田稔,長尾文明、竜巻によるアスファルト剥離被害に関する考察、土木学会第 68 回年次学術講演会、2013.9.4、日本大学（千葉県習志野市）

野田稔,政井一仁,二宮めぐみ,長尾文明、竜巻状流れ場における平板上飛散物の飛行性状、平成 25 年度日本風工学会年次研究発表会、2013.5.29、徳島大学（徳島県徳島市）

鹿島貴侑,野田稔,西村篤志,長尾文明、重心の移動が平板状飛散物の運動に及ぼす影響、平成 25 年度土木学会四国支部技術研究発表会土、2013.5.11、愛媛大学（愛媛県松山市）

野田稔,二宮めぐみ,山下翔平,長尾文明、マルチファンマルチベーン式竜巻シミュレータによる竜巻状流れ場の制御に関する研究、第 22 回風工学シンポジウム、2012.12.7、東京大学山上会館（東京都文京区）

野田稔,長尾文明、竜巻によるアスファルト剥離・飛散事例からの風速推定、第 22 回風工学シンポジウム、2012.12.7、東京大学山上会館（東京都文京区）

野田稔,政井一仁,鹿島貴侑,長尾文明、竜巻状流れ場における飛散物の飛行軌道、第 22 回風工学シンポジウム、2012.12.7、東京大学山上会館（東京都文京区）

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

野田 稔 (NODA MINORU)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス  
研究部・准教授

研究者番号：30283972

### (2)研究分担者

長尾 文明 (NAGAO FUMIAKI)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス  
研究部・教授

研究者番号：40172506