

# 竜巻状気流中の建物の風荷重に関する実験的研究

飯田 有未 染川 大輔 小野 佳之  
後藤 暁 大塚 清敏

## Experimental Study on Wind Loads Subjected to Buildings in Tornado-Like Flow

Yumi Iida Daisuke Somekawa Yoshiyuki Ono  
Satoru Goto Kiyotoshi Otsuka

### Abstract

Damages caused by gusts, such as tornados and downbursts, have increased in Japan. However, wind loads on buildings in a tornado flow are unknown. It is important to consider a tornado that produces the highest wind load according to the target building geometry because tornadoes found in nature vary in size and translation speed. Wind pressure measurement experiments were conducted using a tornado generator to clarify the effects of tornado-to-building scale ratio, swirl ratio, and tornado translation speed on wind loads. Based on the experimental results, a proposal for tornado experiments and a numerical analysis of real buildings are presented.

### 概要

近年、竜巻などの突風による被害や観測事例が増加しており防災への関心が高まっている。しかし、竜巻気流中の建物の風荷重に関する知見は少ない。自然界で見られる竜巻は大きさや移動速度などが様々であるため、対象建物形状に応じて、どのような竜巻が最も大きな風荷重を生じさせるか検討することが重要である。竜巻と建物のスケールの比、スワール比、および竜巻の移動速度が風荷重に及ぼす影響を明らかにするため、竜巻状気流発生装置を用いた風圧測定実験を行った。実験結果から、実設計建物を対象とする実験や数値流体解析により、安全側に風荷重を設定する場合に参考となる竜巻の性状を示した。

### 1. はじめに

近年、竜巻などの突風による被害の報告件数や観測事例が増加している。2012年の茨城県つくば市等で発生した竜巻による災害では、死傷者50人以上の人的被害、1900棟以上の建物被害が生じた<sup>1)</sup>。近年では2019年の千葉県市原市、宮崎県延岡市で台風に伴い生じた竜巻により人的被害、建物被害が生じている<sup>2)</sup>。このように竜巻による災害が頻発していることから、竜巻に対する防災への関心が高まっている。

気象分野では、竜巻の風速の把握をより正確なものとするため、2015年より強風被害状況から風速を推定する手法である藤田スケールを改良した日本版改良藤田スケール (JEF)<sup>3)</sup>が導入され、観測データが収集されている。しかしながら、竜巻に対する建物の耐風設計をどのように行うべきかについてはその知見が非常に少ない。竜巻は発生や通過経路が極めて局所的で、ある1つの建物が突風被害を受ける確率が極めて低いため、現行基準<sup>4)</sup>では考慮されていない。設計風速に下限値が設けられており、竜巻等突風の一部をカバーしているとみることができ、竜巻の性質を積極的に考慮した評価とはなっていない。米国の耐風設計基準ASCE7-16<sup>5)</sup>でも竜巻による風荷重は考慮されていないが、2017年にASCE7-16コメントリーにおいて竜巻荷重の算定式が示された。この算定式は、被災時に災害対策センターや病院などの運営が

持続可能であるよう、構造物の損壊の低減や建物内の所有物 (例えば医療機器や設備) の保護などの観点から、竜巻に対する耐風設計を必要とする場合に用いることが想定されている。このように算定式が提案されているものの、参照された実験データは限定的であり、研究データの蓄積が必要である。

竜巻は主に発達した積乱雲に伴う強い上昇気流の中に発生する激しい空気の渦巻きであり、台風や寒冷前線、低気圧などの気象擾乱に伴って発生するものが多い。1年間当たりの竜巻発生確認数は平均で23件 (2007~2017年、海上竜巻を除く) である。発生しやすい季節 (台風の影響の多い9月、10月)、時間帯 (10-11時、15-16時)、あるいは地形的には山間よりも海岸近くや平野で発生しやすいというややはっきりとした傾向はあるものの、豊橋の竜巻 (1969年12月)、茂原の竜巻 (1991年12月)、酒田の竜巻 (2005年12月)、佐呂間町の竜巻 (2006年11月) のように大被害を起こしたものが寒候期に発生しており、むしろ年間を通じて、どこでも発生するととらえる必要がある<sup>6)</sup>。

気象分野では、観測データの解析や数値解析により、竜巻の発生メカニズムや発生予測に関する研究が行われている<sup>7)8)</sup>。風工学の分野では、シンプルな渦モデルを用いた実験及び数値解析が行われている。Ward<sup>9)</sup>、Chruch<sup>10)</sup>、Haan<sup>11)</sup>は竜巻様渦を生成する風洞装置を開発した。同様のメカニズムの装置を用い、松井<sup>12)</sup>や喜々津

ら<sup>13)</sup>は、地表面近傍の流れ場や渦構造について検討を行い、さらに、建物に生じる風圧についても様々な建物形状について実験を行った。数値解析では、丸山<sup>14)</sup>、フックラ<sup>15)</sup>、Ishihara<sup>16)</sup>、片岡<sup>17)</sup>によって、LES解析により、シンプルな渦モデルを再現することで、竜巻渦の性質、建物回りの流れ場や地形の影響について検討が行われた。Kawaguchi<sup>18)</sup>は、気象モデル・工学LESハイブリッド解析によって、実際の竜巻および被害状況を再現することで建築物被害推定を行った。これらの研究では、ある一つの竜巻により、ある一つ建物に生じる風圧や建物周辺の流れ場に注目した研究が多く、様々な竜巻および形状の建物を用いて体系的に風荷重を検討した研究は少ない。また、竜巻状気流の気流性状（上昇流の強さに対する収束流の回転の強さの比であるスワール比）の違いや竜巻の移動速度が建物に生じる風圧力に及ぼす影響は明らかではない。

自然界で見られる竜巻は大きさや移動速度など様々であるため、建物に作用する風荷重を評価するには、対象建物の大きさや形状に応じて、どのような竜巻が最も大きな風荷重を生じさせるか検討することが重要である。大林組では、竜巻による建物の風荷重の確認を目的とし、竜巻状気流発生装置（以下、竜巻装置）を導入した<sup>19)</sup> (Fig. 1)。竜巻装置では、ファンによって吸気口に吸い上げられた気流が、角度を持ったペーンにより回転成分を与えられた状態で下方に還流し、吸気口直下に回転成分を持つ収束流として流れ込むことで、竜巻状の渦を持つ気流が生じる。竜巻装置の吸気口高さ（収束層高さ） $h_0$ とガイドペーン角度 $\theta$ を変えることで性質の異なる竜巻状気流を作成でき、付属のガイドレールに沿って竜巻装置を移動させ (Fig. 1のx方向)、竜巻状気流の移動を再現できる。本研究では、竜巻装置を用い、スワール比の異なる4種の竜巻状気流それぞれを、7段階の速度（移動なしを含む）で移動させることで実験用の気流を作成し、3種の大きさの建物模型に対し、風圧測定実験を行った。実験結果より、竜巻と建物のスケールの比、スワール比、および竜巻の移動速度が風荷重に及ぼす影響を明らかにする。さらに、実設計建物を対象とする実験や数値流体解析により、安全側に風荷重を設定する場合に参考となる竜巻の性状を示す。

## 2. 竜巻発生装置の性能確認実験

### 2.1 実験概要

風荷重に関する実験に先立ち、竜巻装置の性能確認のための実験を実施した。以下にその概要を示す。

**2.1.1 竜巻装置の設定パラメータ** 竜巻状気流の性質の把握のため、床面の圧力分布を測定した。竜巻装置の設定パラメータは、吸気口の半径 $r_0=0.25\text{m}$ 、収束層高さ $h_0=0.4\text{m}$ 、ガイドペーン角度 $\theta=20, 35, 50, 70^\circ$  (Fig. 1)とし、スワール比 $S$ の異なる4種類の気流（順に気流1～4）を検討した (Table. 1)。スワール比 $S$ とは、竜巻状渦

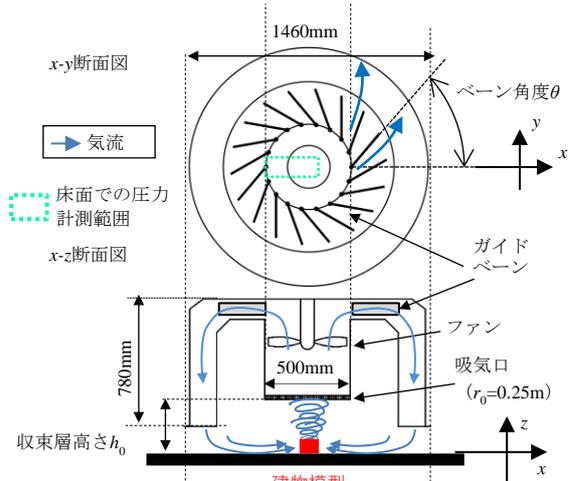


Fig. 1 竜巻発生装置 断面図  
Cross Section of Tornado Simulator

の強さに大きく関係する無次元数で、実験では、装置の設定パラメータを用いて式(1)から求められる。

$$S = \frac{\text{接線風速}V}{\text{上昇気流風速}W} = \frac{\pi r_0^2 W}{2\pi r_0 h_0} \tan \theta \times \frac{1}{W} = \frac{r_0 \tan \theta}{2h_0} \quad (1)$$

これより、気流1～気流4のスワール比はそれぞれ $S=0.11, 0.22, 0.37, 0.86$ となる。竜巻装置中心の初期位置を $(x, y)=(0, 0)$ とした。竜巻装置を移動させないケース（移動なし）では、竜巻装置中心を $(x, y)=(0, 0)$ に静止させた状態で、竜巻装置を移動させるケース（移動あり）では、移動速度 $V_T$ を0.1, 0.25, 0.5, 1, 1.5, 2 m/sと変化させ、x軸方向に竜巻装置を移動させることで計測を行った。

**2.1.2 床面の風圧測定条件** 床面には $y=-60 \sim 60\text{mm}$ 、 $x=-250 \sim 50\text{mm}$ の範囲に10mm～15mmピッチで計286点の測定点を設けた。基準静圧は風の影響のない位置における大気圧を用いた。計測ではサンプリング周波数を1,000 Hz、計測時間を60秒とし、それぞれ10回ずつ計測を行った。

## 2.2 実験結果

**2.2.1 竜巻のコア半径 $R_m$ の算定** 移動なしでの、床面x軸上 ( $y=0\text{mm}$ ) の平均風圧分布とその分布のランキン渦モデル (式(2),  $P_{\min}$ は負値) による近似曲線をFig. 2に示す。

$$P = \begin{cases} \frac{1}{2} P_{\min} \left( 2 - \frac{x^2}{R_m^2} \right) & (x \leq R_m) \\ \frac{1}{2} P_{\min} \frac{R_m^2}{x^2} & (R_m \leq x) \end{cases} \quad (2)$$

いずれの風圧分布も概ねモデル式でよく近似されている。松井<sup>12)</sup>、喜々津<sup>13)</sup>にならない、モデル式より求めたコア半径 $R_m$  (ランキン渦近似で半径方向の圧力勾配が最大となる位置) の値をTable 1に示す。表中の最大接線風速 $V_m$ は、半径方向の圧力勾配が最大となる位置における圧力勾配と遠心力との釣り合いの条件から、最小風圧値

$P_{min}$ と空気密度 $\rho$ より $V_m = \sqrt{|P_{min}|/\rho}$ として求められたものである。参考値として、生成された竜巻の流れ場から得られた $V_m$ と上昇気流風速 $W$ を式(1)中の $V$ 、 $W$ に代入することで求めたスワール比 $S'$ をTable 1に示す。 $W$ は、別途、 $(x, y, z) = (-130, 0, 350)$ (mm)の位置にサーミスタを設置し、計測した60秒間平均風速とした。

**2.2.2 圧力の分布** 移動なしでの、0.3秒間の床の圧力の瞬間値(0.1秒間隔で4コマ)の分布をFig. 3に示す。コア半径 $R_m$ による円を点線で示している。最も濃い青で示される低圧部分が渦中心に相当する。気流1では単一の渦が半径 $R_m$ 円内で大きく動いている。気流4では半径 $R_m$ 円内で複数の小さい渦(吸上げ渦)が発生し、かつそれらを含み全体として回転している主渦(親渦ともいう)の中心の周りを円周方向に移動している。また渦中心(主要渦の中心)の揺動は気流1と比べて小さい。なお、他の気流について、気流2では、単一の渦の揺動は少なくなり、複数の渦がみられるようになり、気流3は気流4とほぼ同じ分布となった。

床面 $x$ 軸上( $y=0$ mm)の風圧の平均値と変動係数(標準偏差/平均値)の分布をFig. 4に示す。測定位置はコア半径 $R_m$ で、圧力は $|P_{min}|$ で無次元化している。平均値は、気流1~4で概ね似た分布を示しているが、変動係数は気流1で

より大きな値を示している。さらに、 $-2 < x/R_m < -1$ の範囲で、気流2~4では0.2以下の値を示すが、気流1ではそれらより大きく0.4以上の値を示している。これは、Fig. 3(1)に見られた単一の渦の揺動によって気流2~4より大きくなっていると考えられる。以下では、これを渦中心の揺動による変動と呼ぶ。

**2.2.3 移動の影響** 全ての移動速度の結果の代表として、移動速度 $V_T = 1$ m/sにおける、気流1と気流4の最小ピーク風圧(各測定点における圧力時系列の中の最小風圧値)の分布(ある1回の計測結果の分布)をFig. 5に示す。 $V_T = 1$ m/sでは、装置は $x = -1,000 \sim 1,440$ mmの範囲において一定速度で移動する。気流1、4両方で渦が装置の移動(図で左から右へ)に伴って $x$ 軸上で移動していることが分かる。気流1では渦中心の揺動により渦の移動経路が揺らいでおり、Fig. 5(1)にみられるような、渦中心が $(x, y) = (0, 0)$ 近傍を通過しないケースが10回の計測のうち5回ほど生じた。一方、気流4では複数の渦を伴う竜巻の通過によって $(x, y) = (0, 0)$ を含む広い範囲で、生成消滅しながら複数の渦が移動する様子が認められた。

竜巻状気流中の渦を定量的に比較するため、圧力のラプラシアン $\nabla^2 p$ に着目する。一般に流体中で旋回運動を伴う管状渦構造を抽出、可視化するとき $\nabla^2 p$ の値が用い

Table 1 実験気流の作成条件および気流の性状  
Conditions of Tornado-like Winds

	$r_0$ (m)	$h_0$ (m)	$\theta$ ( $^\circ$ )	$S$	$V_m$ (m/s)	$R_m$ (mm)	$W$ (m/s)	$S'$
気流1	0.25	0.4	20	0.11	7.0	58	6.5	1.07
気流2			35	0.22	7.5	90	6.5	1.15
気流3			50	0.37	7.5	114	5.1	1.46
気流4			70	0.86	7.0	125	3.7	1.87

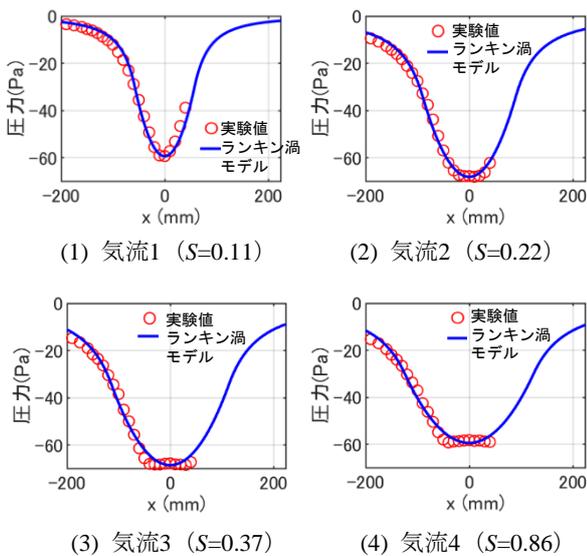


Fig. 2 床面の圧力分布  
Pressure Distribution on the Floor

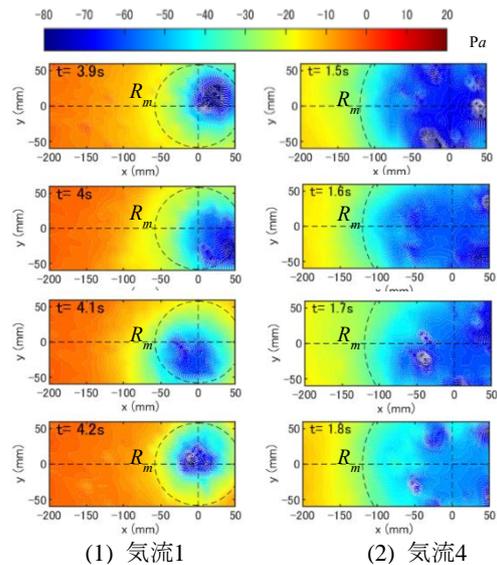


Fig. 3 床の圧力の瞬間値の分布  
Distribution of the Instantaneous Values of Pressure

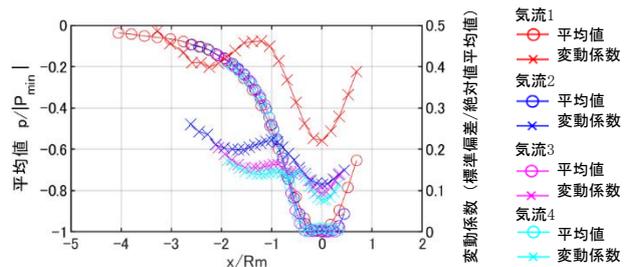


Fig. 4 風圧の平均値・変動係数  
Mean and Coefficient of Variation of the Wind Pressure

られる。 $|\nabla^2 p|$ が大きい位置には渦管が存在していると考え、本節では、計測範囲内の $|\nabla^2 p|$ の総量に着目する。 $\nabla^2 p$ は次式で表され、床面の測定点の作る格子上で中心差分により離散化を行い、各測定点における $\nabla^2 p$ の値を求めた。

$$\nabla^2 p = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \quad (3)$$

気流2~4では渦が計測範囲の境界 ( $y=\pm 60\text{mm}$ ) を超えて存在しているため (Fig. 3(2), Fig. 5(2)参照), 本検討では各気流について $|\nabla^2 p|$ の総量の竜巻の移動ありとなしとの比較のみを行うことにする。

Fig. 6に、気流3における、 $|\nabla^2 p|$ の総量の時間変化を示す。 $t=0\text{s}$ は装置の移動開始時刻である。装置の移動範囲は、加速時と減速時の移動距離を含め $x=-2,000\sim 2,280\text{mm}$ である。移動なしでは、竜巻装置中心の位置を $(x, y)=(0, 0)$ とした。各移動速度において、ラプラシアン総量が最大になるとと思われる測定範囲の中央 ( $x=-75\text{mm}$ ) まで約 $1,925\text{mm}$ 程度移動した後の時刻 (たとえば $V_T=0.1\text{m/s}$ であれば、 $t=19\text{s}$ ) にピークが生じている。また、移動速度が大きくなると、ピーク値が小さくなっている。図示はしないが、これは気流1, 2および4でも同様の傾向を示す。

$|\nabla^2 p|$ 総量の最大ピーク値の10セットのアンサンブル平均値をFig. 7に示す。 $V_T=0.1\sim 1\text{m/s}$ では、気流1では同程度の値を示し、気流2~4では移動速度が大きくなるにつれて小さくなっている。 $V_T>1\text{m/s}$ では、大きく減少し $V_T=2\text{m/s}$ ではどの気流でも類似した値を示している。いずれのケースでも、 $V_T>1\text{m/s}$ では $|\nabla^2 p|$ が急激に減少することから、竜巻の移動によって渦の形成が阻まれていると考えられる。吸気口が移動することで竜巻の渦管の長さが引き延ばされる (収束層高さが大きくなる) ことで渦が形成されにくくなると考えられる。

### 3. 竜巻状気流中の建物の風荷重に関する実験

#### 3.1 実験概要

3.1.1 実験気流 Table 1に示す気流1~気流4の4種類の気流を用い、建物模型 (風圧測定模型) に生じる風圧の測定を行った。

3.1.2 建物の風圧測定模型 建物模型は、Table 2, Fig. 8に示す大きさの異なる3つの模型とした。模型は内圧変化を考慮するため、外側模型と内側模型とからなり、外側模型の表面と内側模型の内部側に測定点を設けた。また、外側模型と内側模型とをつなぐパイプにより建物の隙間を再現し、壁面積に対する隙間面積の割合を $0.13\sim 0.14\%$  (中気密の建物に相当) とした。各模型に設けた隙間数をTable 2に示す。幾何縮尺 $\lambda_L$ を $1/350$ 、速度縮尺 $\lambda_{vel}$ を $1/11.4$ とし、内容積の縮尺 $\lambda_{vol}=\lambda_L^3/\lambda_{vel}^2=1/329,909$ に概ね従うよう<sup>20)</sup>、模型1~3に対し、それぞれ $20\text{cm}$ 角、 $30\text{cm}$ 角および $40\text{cm}$ 角の立方体の空気溜めの箱を用意した。各々の箱を内側模型と連結し風路下に設置した (Fig. 9)。

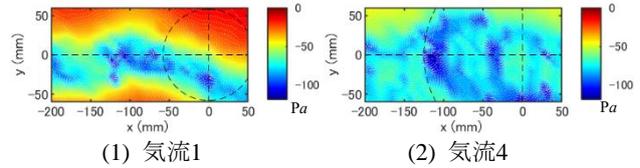


Fig. 5 最小ピーク風圧の分布  
Distribution of the Minimum Peak Pressure

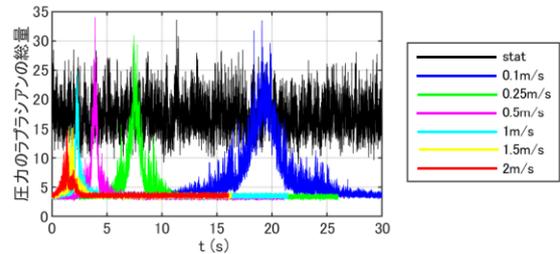


Fig. 6  $\nabla^2 p$ の総量の時間変化  
Time Variation of the Total Amount of  $\nabla^2 p$

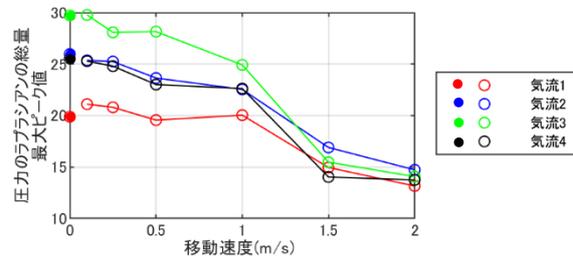


Fig. 7  $\nabla^2 p$ の総量の最大ピーク値  
Maximum Peak Value of the Total Amount of  $\nabla^2 p$

Table 2 風圧実験模型のパラメータ  
Parameters of Experimental Models

	幅B 奥行D (mm)	高さH (mm)	測定点	隙間
模型1	50	25	外側：1壁面20点 (計80点) 屋根面25点 内側：1壁面3点 (計12点) 天井面4点	1壁面 内径2mmパイプ 1か所 (計4か所)
模型2	75	37.5		1壁面 内径2mmパイプ 2か所 (計8か所)
模型3	100	50		1壁面 内径2mmパイプ 4か所 (計16か所)

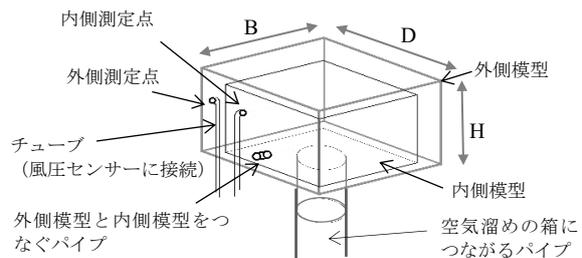


Fig. 8 建物模型 (風圧測定模型)  
Building Model (Wind Pressure Measurement Model)

建物模型は(x, y)=(0, 0)に設置した。計測は、サンプリング周波数を1,000 Hz, 計測時間を30秒とし、同一条件下で10回行った。竜巻装置を移動させないケース（移動なし）では、竜巻装置をx=0~300mmの範囲で10mmずつ動かす、各位置で計測を行った。竜巻装置を移動させるケース（移動あり）では、移動速度 $V_T$ を0.1, 0.25, 0.5, 1, 1.5, 2 m/sと変化させ計測を行った。装置の移動範囲は、x=-2,000~2,280mmであり、その範囲において、加速し、一定速度で計測部を通過、その後、減速する。 $V_T$ によって最大速度に到達する時間が異なるため、一定速度の範囲が異なる。たとえば、 $V_T=2\text{m/s}$ ではx=-2,000~-1,000 mmの範囲で加速し、一定風速の範囲はx=-1,000~1,280mm（距離2,280m）となる。移動速度が遅くなると、加速に必要な距離が短くなるため、一定風速の範囲は2,280mより長くなる。

実験を行った建物模型と使用気流の組み合わせによる、竜巻と建物のスケールの比 $R_r = \sqrt{BD/\pi R_m^2}$ （建物模型平面積/竜巻水平方向の断面積）をTable 3に示す。

### 3.2 実験結果

**3.2.1 風力係数の評価** 本論文では、外装材の設計に寄与するピーク差圧係数 $\hat{C}_f$ と屋根面の構造骨組みの設計に寄与する風力係数 $C_{Fz}$ に着目した。それぞれの定義を①, ②に示す。なお, ①, ②に現れる風圧係数 $C_p$ は $C_p=(p-p_s)/q$ で定義される。ここで、 $p$ は計測で得られる風圧である。 $q$ は基準速度圧で、接線最大風速 $V_m$ , 空気密度 $\rho$ を用いて $1/2\rho V_m^2$ より求めた。また、基準静圧には風の影響のない位置における大気圧 $p_s$ を用いた。

①最小ピーク差圧係数 $\hat{C}_f$ ：差圧係数は $C_f=C_{pe}-C_{pi}$ で定義され、壁および屋根に外側から作用する圧力と内側から作用する圧力との差、すなわち壁に作用する正味の力を示す。 $C_{pe}$ は外側測定点で得られた風圧係数である。 $C_{pi}$ は内側測定点であるが、そのうち、対象の外側測定点に最も近い測定点の値とした（内圧の測定点の方が少ないため）。移動平均を施さない $C_f$ の生の時系列のうちの最小値に対し、計測回数10回についてアンサンブル平均をとり、得られた全測定点の最小ピーク値のうち、最も小さい値を最小ピーク差圧係数 $\hat{C}_f$ として定義する。竜巻状気流中の建物には負に大きな風圧（壁を引きはがそうとするような力）が生じる<sup>21)22)</sup>ため、本節では最小値のみに着目する。

②風力係数 $C_{Fz}$ ： $C_{Fz}$ は屋根面で得られた差圧係数 $C_f$ を測定点の支配面積の重みづけで積分し、屋根面積で除して得られる係数として定義される。計測時間中の $C_{Fz}$ の最小値を計測回数10回についてアンサンブル平均したものを $\hat{C}_{Fz}$ と表す。屋根を持ち上げようとする力を表している。

**3.2.2 竜巻と建物のスケールの比 $R_r$ の差圧係数・風力係数に対する影響** 竜巻と建物のスケールの比 $R_r$ により風荷重が変化することが知られている<sup>13)</sup>。移動なしのケースにおける、 $R_r$ 毎の最小ピーク差圧係数 $\hat{C}_f$ と最小風力係数 $\hat{C}_{Fz}$ をFig. 10に示す。 $\hat{C}_{Fz}$ は $R_r>0.5$ で負圧レベルが

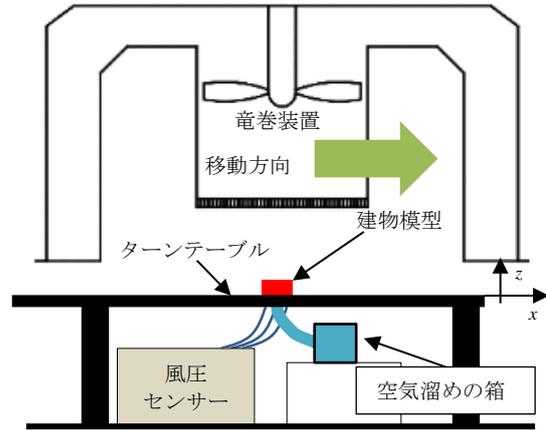


Fig. 9 建物模型の設置状況  
Installation of the Building Model

Table 3 竜巻と建物のスケールの比 $R_r$   
Tornado-to-building Scale Ratio  $R_r$

	気流1	気流2	気流3	気流4
模型1	0.49	-	0.25	0.23
模型2	0.73	0.47	0.37	0.34
模型3	0.97	-	0.49	0.45

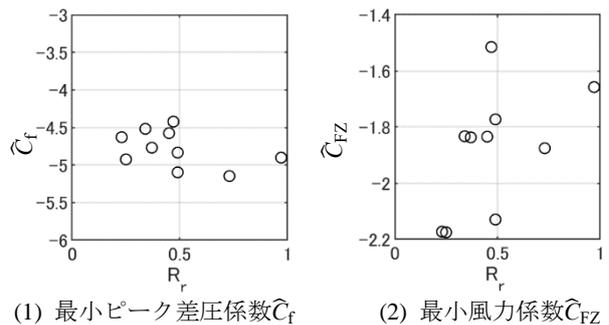


Fig. 10  $R_r$ 毎の最小ピーク差圧係数 $\hat{C}_f$ と  
最小風力係数 $\hat{C}_{Fz}$

Minimum Peak Pressure Difference Coefficient  $\hat{C}_f$  and  
Wind Force Coefficient  $C_{Fz}$  for Each  $R_r$

小さくなっている。既往研究<sup>13)</sup>においても竜巻に対して建物面積が大きくなると ( $R_r>0.45$ ), 屋根に作用する風力が低減されることが知られており、本研究でも同様の傾向を示している。一方、 $\hat{C}_f$ は $R_r$ によらず-4.5~-5程度の値を示している。竜巻に対する建物の大きさの違いによる、局所的に作用する風圧力への影響は小さいと言える。

**3.2.3 スワール比** スワール比のみの風圧力への影響を検討するため、類似した $R_r$ 条件のケースの結果を比較する。Table 3より $R_r=0.45\sim 0.49$ となる、気流1と模型1, 気流2と模型2, および気流3, 4と模型3の結果を述べる。

(1) 移動なし 移動なしでの最小ピーク差圧係数 $\hat{C}_f$ をFig. 11に示す。図中 $x_s$ は計測時の竜巻装置の位置を示す。いずれの気流においても $x_s/R_m \approx 1$ で最小値を示している。図中のイラストのように最大接線風速が生じるコ

ア半径部分が建物の中心を横切るためと考えられる。 $S=0.22\sim 0.86$ (気流2~4)では類似した分布を示し, $S=0.11$ (気流1)では、装置がどの位置にあっても負圧レベルが大きい。これは、Fig. 4で見られたように渦中心の揺動による圧力変動のためと考えられる。

次に、風力係数 $C_{Fz}$ の平均値(計測時間中の平均)とピーク値 $\hat{C}_{Fz}$ をFig. 12に示す。 $S=0.11$ での平均値は $x_s/R_m=0$ で最小値を示し、 $S=0.22\sim 0.86$ では $0.5 < x_s/R_m < 1$ で最小値を示している。これは、 $S=0.11$ では $x_s/R_m < 1$ で渦が屋根面を横断するように揺動するためであり、 $S=0.22\sim 0.86$ では、複数の小さな渦が半径 $R_m$ の円の内側に沿うように旋回するため、 $x_s/R_m=0$ では渦が屋根面に接近する頻度が低く、 $0.5 < x_s/R_m < 1$ ではその頻度が高くなるためと考えられる。 $x_s/R_m > 1$ では、平均値はいずれの気流中でも概ね似た傾向を示している。最小ピーク値は、他の気流と比べ、 $S=0.11$ で負に大きい値を示す。 $\hat{C}_f$ (Fig. 11)の傾向と同様に、渦中心の揺動による変動のためと考えられる。

(2) 移動あり 移動ありの最小ピーク差圧係数 $\hat{C}_f$ をFig. 13に示す。移動なしの場合のFig. 11の分布中の最小値も縦軸上に示した。 $\hat{C}_f$ は、いずれの気流でも、移動ありよりも移動なしにおいて負に大きい。 $V_T=0.25\sim 1\text{m/s}$ では同程度の値を示し、 $V_T > 1\text{m/s}$ で急激に負圧レベルが小さくなっている。これは、2.2.3項に示したよう $V_T > 1\text{m/s}$ において気流中の渦の性状が変化するためと考えられる。 $S=0.86$ の気流中での、竜巻装置の移動なし( $x_s/R_m=1.1$ ),

移動あり( $V_T=1\text{m/s}$ )における、最小ピーク差圧係数の分布をFig. 14(1), (2)にそれぞれ示す。図は10回の計測のうちの一例であるが、他ケースもおおむね似た分布を示した。移動なしでは、屋根面の展開図上側( $y > 0$ )に大きな負圧(屋根を持ち上げようとする力)が生じている。本実験において、移動なしでの実験条件では竜巻装置位置を $x \geq 0$ としたため、図中イラストに示すよう反時計回りに旋回する接近流が屋根面前端で剥離することで、屋根面の展開図上側( $y > 0$ )では、大きな負圧が生じる。竜巻装置位置を $x < 0$ とすれば、同様の負圧が展開図下側( $y < 0$ )に生じると考えられる。一方、Fig. 14(2)より、移動ありでは屋根面の展開図下側( $y < 0$ )のみに大きな負圧が生じている。10回の計測すべてで同様であった。展開図上側( $y > 0$ )では、竜巻が建物上空を通過したことで旋回渦が崩れたため接近流が減速し、負圧レベルが低下したと考えられる。

移動ありでの最小風力係数 $\hat{C}_{Fz}$ をFig. 15に示す。いずれの気流でも $V_T > 1\text{m/s}$ で急激に負圧レベルが小さくなっており、 $\hat{C}_f$ の結果(Fig. 13)と同様に、 $V_T > 1\text{m/s}$ で気流中の渦の性状が変化するためと考えられる。 $V_T=0.25\sim 1\text{m/s}$ において、 $V_T$ が大きくなると、 $S=0.22\sim 0.86$ では $\hat{C}_{Fz}$ はわずかに負に大きくなっているが、 $S=0.11$ では負圧レベルが小さくなっている。最小値の発生状況を検討するため、 $S=0.11$ と $S=0.86$ について、 $V_T=1\text{m/s}$ における $C_{Fz}$ の時系列データをFig. 16に示す。時刻0sは計測開始時刻である。

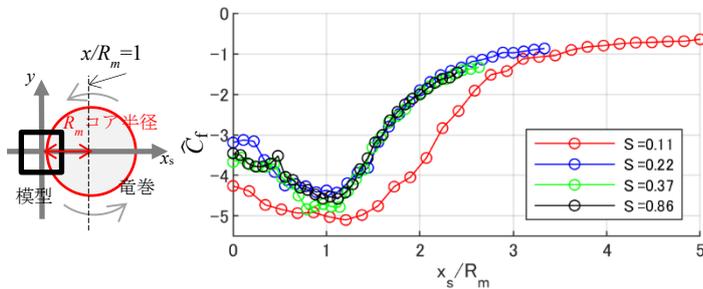


Fig. 11 移動なしケースの最小ピーク差圧係数 $\hat{C}_f$   
Minimum Peak Pressure Difference Coefficient  $\hat{C}_f$   
in the Constant Flows

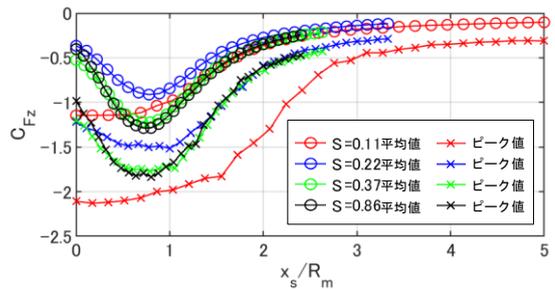


Fig. 12 移動なしケースの風力係数 $C_{Fz}$ の  
平均値( $C_{Fz}$ の時間平均)・最小ピーク値 $\hat{C}_{Fz}$   
Average and Minimum Peak Values of Wind  
Force Coefficient  $C_{Fz}$  in the Constant Flows

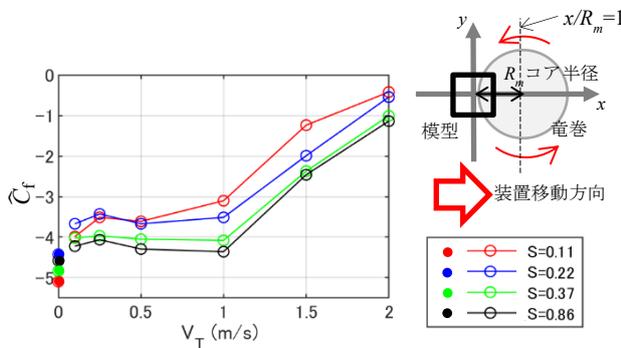
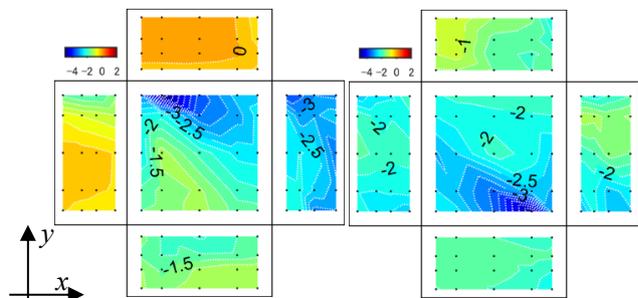


Fig. 13 移動ありケースの最小ピーク差圧係数 $\hat{C}_f$   
Minimum Peak Pressure Difference Coefficient  $\hat{C}_f$   
in the Moving Flows



(1) 移動なし (2) 移動あり  
Fig. 14 最小ピーク差圧係数分布 ( $S=0.86$ )  
Distributions of the Minimum Peak Pressure Difference  
Coefficients in the Constant and Moving Flows ( $S=0.86$ )

それぞれの $S$ に対する10回の計測結果を示し、最小ピーク値を赤丸で示している。 $S=0.86$  (Fig. 16 (2)) ではいずれの結果でも $-1.7 \sim -2$ 程度のピーク値を示している。一方、 $S=0.11$  (Fig. 16 (1)) では、ピーク値はばらついており、その値も $S=0.86$ の値よりも小さい。 $S=0.11$ の単一の渦による竜巻は移動の影響をより大きく受け、負に大きな $C_{Fz}$ が生じる頻度が少なくなることがわかる。Fig. 5に示されるよう、 $S=0.11$ では渦の揺動が大きいため、竜巻装置が建物模型の上部を通過する時に、渦が建物模型から離れた位置にあり屋根に接近しない状況が生じることで、最小ピーク値の絶対値が小さくなったと考えられる。

$S=0.86$ の気流中での、竜巻装置の移動なし ( $x_s/R_m=0.96$ )、移動あり ( $V_T=1\text{m/s}$ ) において、風力係数 $C_{Fz}$ が最小値を示す時刻の風圧係数分布をFig. 17(1), (2)にそれぞれ示す。移動なしでは比較的大きな負圧が屋根の広い範囲に分布しているが、移動ありでは展開図屋根面の下側 ( $y < 0$ ) のみに大きな負圧が生じている。 $C_{Fz}$ は、移動なしと移動ありで、それぞれ $-1.83$ と $-1.85$ と互いに似た値を示すが、ピーク発生時の風圧の分布のしかたが異なることが分かった。

#### 4. 竜巻の設定に関する考察

本章では、3章より得られた知見から、実設計建物を対象とする実験や数値流体解析により安全側に風荷重を設定する場合に参考となる竜巻の性状について述べる。

##### 4.1 竜巻と建物のスケールの比

ピーク差圧係数 $\hat{C}_p$ は、竜巻と建物のスケール比 $R_r$ の影響はほとんど受けない。一方で、風力係数 $C_{Fz}$ は竜巻と建物のスケール比 $R_r$ が大きいほど低減されるため、 $R_r < 0.45$ となるように竜巻の規模を設定することが望ましい。

##### 4.2 スワール比と竜巻の移動速度

竜巻の移動がない場合、スワール比 $S=0.11$ において、ピーク差圧係数 $\hat{C}_p$ 、風力係数 $C_{Fz}$ 両方で、絶対値が最大の負の値を示した。しかし、竜巻が移動する場合は、他のスワール比の結果に比べ、 $S=0.11$ では $\hat{C}_p$ 、 $C_{Fz}$ の絶対値が大きく低減する。

竜巻の移動がある場合、スワール比が大きく、移動速度 $1\text{m/s}$  (移動速度 $V_T$ /接線最大風速 $V_m=0.13 \sim 0.14$ ) の条件下において、 $\hat{C}_p$ 、 $C_{Fz}$ 両方で、絶対値最大の値を示した。

##### 4.3 風荷重検討に用いる竜巻の性状

竜巻の移動ありでの $\hat{C}_p$ 、 $C_{Fz}$ の絶対値よりも、移動なしでの絶対値の方が大きくなったが、自然現象の竜巻はほとんどが移動を伴うこと、移動なしと移動ありとは風圧分布性状が異なることから、移動なしとありとの両方の竜巻を検討することが望ましい。本研究の結果より、風荷重検討の際の竜巻の設定について以下を提案する。

- 竜巻と建物のスケール比： $R_r < 0.45$

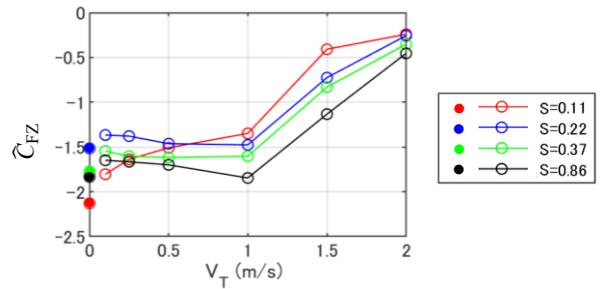


Fig. 15 移動ありケースの最小風力係数 $\hat{C}_{Fz}$   
Minimum Peak Wind Force Coefficient  $\hat{C}_{Fz}$   
in the Moving Flows

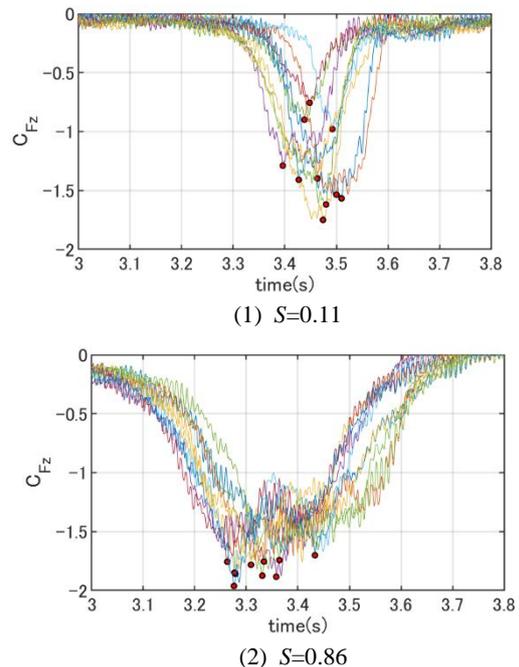


Fig. 16  $V_T=1\text{m/s}$ における  $C_{Fz}$ の時系列データ  
Time Series Data of  $C_{Fz}$  at  $V_T=1\text{m/s}$

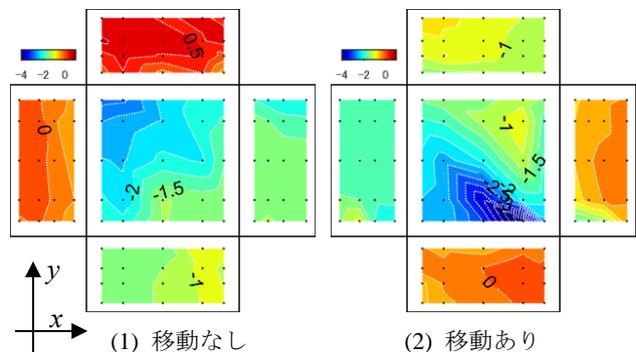


Fig. 17 風力係数 $C_{Fz}$ が最小値を示す時刻の風圧係数分布  
( $S=0.86$ )  
Wind Pressure Coefficient at the Time of Minimum Wind  
Force Coefficient  $C_{Fz}$  ( $S=0.86$ )

- ・ 移動あり，なしの両方の風圧分布を考慮して，風荷重が大きくなる部分を包含するように荷重設定をすることが望ましい。
- ・ 移動しない竜巻： $S < 0.11$
- ・ 移動する竜巻： $S > 0.86$ かつ移動速度 $V_T$ と接線最大風速 $V_m$ の比 $V_T/V_m = 0.13 \sim 0.14$

## 5. まとめ

竜巻装置を用い，4種の異なるスワール比の竜巻状気流を，それぞれ7段階の速度（移動なしを含む）で移動させることで気流を作成し，3種の大きさの建物模型に対し，風圧測定実験を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 床面の圧力分布を測定し，異なるスワール比の竜巻状気流の性状を把握した。
- 2) 竜巻と建物のスケールの比，スワール比，および竜巻の移動速度が風荷重に及ぼす影響を明らかにした。
- 3) 実設計建物を対象とする実験や数値流体解析により風荷重を検討する場合に参考となる竜巻の性状を示した。

本実験の竜巻装置では，移動速度が大きくなるほど竜巻の渦構造が崩れ，風荷重が低減したが，自然界の竜巻でも同様な現象が起こるかは不明である。気象モデル等を用いて竜巻発生メカニズムの再現も行った上で，竜巻の移動が渦構造に及ぼす影響を確認する必要がある。

## 参考文献

- 1) 内閣府，“平成24年5月に発生した突風等による被害状況等について”，防災情報のページ，2012-06-24，<https://www.bousai.go.jp/updates/h2405toppuu/pdf/h2405toppuu15.pdf>，(参照2023-07-07)
- 2) 気象庁，“突風事例一覧”，竜巻等の突風データベース，2023-06-23，<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/index.html>，(参照2023-07-07)
- 3) 気象庁，“日本版改良藤田 (JEF) スケールとは”，知識・解説，<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/toppuu/tornado1-2-2.html>，(参照2023-07-07)
- 4) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説(2015)，2015.2
- 5) American Society of Civil Engineers: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE/SEI 7-16, 2017.5
- 6) 首相官邸：“竜巻では，どのような災害が起こるのか”，<https://www.kantei.go.jp/jp/headline/bousai/tatsumaki.html>，(参照2023-07-07)
- 7) 野田暁，他：竜巻を伴う積乱雲の高解像度数値シミュレーション，日本風工学会誌，Vol. 32, No. 3, pp. 357-368, 2007.7
- 8) Mashiko, W., et al.: Super High-Resolution Simulation of the 6 May 2012 Tsukuba Supercell Tornado: Near-

Surface Structure and Its Evolution, SOLA, Vol. 13, pp. 135-139, 2017.7

- 9) Ward, N. B.: The Exploration of Certain Features of Tornado Dynamics Using a Laboratory Model, Journal of the Atmospheric Sciences, Vol. 29, pp. 1194-1204, 1972.9
- 10) Church, C. R., et al.: Characteristics of Tornado-Like Vortices as a Function of Swirl Ratio: A Laboratory Investigation, Journal of the Atmospheric Sciences, Vol. 36, pp. 1755-1776, 1979.9
- 11) Haan, F. L., et al.: Design, construction and performance of a large tornado simulator for wind engineering applications, Engineering Structures, Vol. 30, pp. 1146-1159, 2008.4
- 12) 松井正宏，他：竜巻状旋回流中におかれた立方体に作用する風圧力と移動効果による旋回流形成への影響に関する実験的研究，第20回風工学シンポジウム論文集，pp. 319-324，2008.12
- 13) 喜々津仁密，他：竜巻状の旋回流による突風荷重モデルに関する研究，その1 建築物との相対的な大小関係を考慮した鉛直方向の風力係数，AIJ 学術講演梗概集，pp. 141-142，2016.9
- 14) 丸山敬：ラージ・エディ・シミュレーションによる竜巻状の渦を作る試み，京都大学防災研究所年報，Vol. 51B, pp. 481-488，2008.6
- 15) ファム バン フック，他：竜巻状旋回流の移動効果による立方体に作用する風圧力の変化，第21回風工学シンポジウム論文集，pp. 155-160，2010.12
- 16) Ishihara, T., et al.: Numerical study on flow fields of tornado-like vortices using the LES turbulence model, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 99, pp. 239-248, 2011.6
- 17) 片岡浩人：数値シミュレーションによる竜巻状旋回流がもたらす風力の評価，大林組技術研究所報 Vol. 79, 2015
- 18) Kawaguchi, M., et al.: A numerical investigation of building damage during the 6 May 2012 Tsukuba tornado using hybrid meteorological model/engineering LES method, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 204, 104254, 2020.9
- 19) 飯田有未，他：マルチファン型非定常気流風洞装置の紹介，日本風工学会誌，Vol. 46, No. 1, pp. 40-44，2021.1
- 20) Holmes, J. D.: Mean and fluctuating internal pressures induced by wind, Wind Engineering Proceedings of the Fifth International Conference, Vol. 1, pp. 435-450，1980
- 21) 奥田泰雄，他：2012年5月6日つくば市で発生した竜巻による建築物の被害，第22回風工学シンポジウム論文集，pp. 97-102，2012.12
- 22) 飯田有未，他：竜巻状気流中の建物の外圧係数分布に関する検討，AIJ学術講演梗概集，pp. 101-102，2021.9