

多様な気流を発生させる 「マルチファン型非定常気流風洞装置」 “Multi-fan Unsteady Flow Wind Tunnel” that Generates Various Types of Air Flows

飯田 有未
染川 大輔
後藤 暁

Yumi Iida
Daisuke Somekawa
Satoru Goto

1. はじめに

近年、大型台風が複数発生し、多くの外装材の強風被害が報告されている。外装材被害は、瞬間的に生じる風圧によって生じる可能性が指摘されている¹⁾。しかし、時間的、空間的に変化の大きい、すなわち非定常な風力変動が外装材の風荷重に与える影響について検討している研究は少ない。外装材被害の原因を明らかにするため、まずは、このような非定常な風力変動の風荷重への影響を把握することが重要と考える。

さらに、近年、台風のみではなく、竜巻・ダウンバーストなどの突風による被害(Photo 1)や観測事例が増加している。たとえば、2012年の茨城県つくば市等で発生した3つの竜巻による災害では、死傷者50人以上の人的被害、2000棟以上の建物被害が生じた²⁾。こういった被害が増加傾向にあることから、その対策の検討が急務である。そのためにも、これら突風の基本性状を明らかにすることが重要である。

こうした背景から、非定常な風力変動を再現する「マルチファン型非定常気流風洞装置」を導入した。本報告では、各実験装置の概要とその性能を紹介する。

2. マルチファン型非定常気流風洞装置の概要

2.1 マルチファン型非定常気流風洞装置

マルチファン型非定常気流風洞装置をPhoto 2とFig. 1に示す。この装置は、時間的・空間的に大きな変化を伴う瞬間的な風の再現を可能とした「マルチファン風洞装置」、竜巻状およびダウンバースト状気流を再現する「竜巻発生装置」、「ダウンバースト発生装置」の3種類の装置によって構成される世界初の風洞装置である。

風路の断面寸法は1.5m×1.5mであり、風路の長さは10mである。風路上部に沿ってレールが設置されており、竜巻発生装置およびダウンバースト発生装置を取り付け、自走させることが可能であり、自走範囲は風路中央から約±3.7mの範囲であり、最大2m/sの速さで移動させることができる。

2.2 マルチファン風洞装置

マルチファン風洞装置は複数の小型ファンと風路によって構成される(Fig. 2, Photo 3)。直径240mmの小型ファンを、縦方向と横方向に9台ずつ、計81台配置して



Photo 1 竜巻による被害(2006年北海道佐呂間町)
Damage Caused by Tornado



Photo 2 マルチファン型非定常気流風洞装置
Multi-fan Unsteady Flow Wind Tunnel

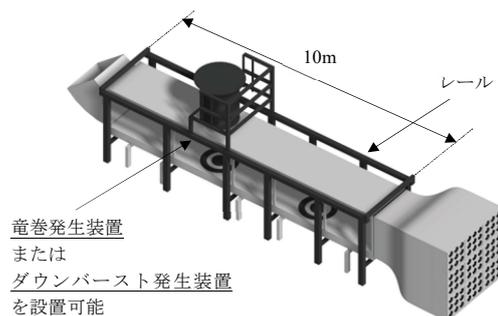


Fig. 1 マルチファン型非定常気流風洞装置
Multi-fan Unsteady Flow Wind Tunnel

いる。小型ファンの制御回転数(以下、ファン回転数)は0～50Hzであり、正方向あるいは逆方向に回転することができる。最大風速は約10m/sである。各ファンの回転数をそれぞれ独立して制御することが可能なため、風路内に時間的・空間的に変化する気流を発生させることができる。

2.3 竜巻発生装置

竜巻の風速分布モデルとして一般的なランキン渦モデルを再現するアイオワ州立大学の竜巻状気流発生装置(以下、ISU型装置³⁾)と同様の機構の装置を導入した。竜巻発生装置の概観を Photo 4(a)に、本体の断面図と座標軸の定義を Fig. 3 に示す。外形と送風機の直径はそれぞれ約 1.5m, 0.5m である。ファンによって起こされる気流は青い曲線の矢印のように流れる。ガイドベーンは 18 枚配置され、0~70°の範囲で設定可能である。これにより、下降流には強制的に旋回性状が与えられる。旋回性状が与えられた気流がファンによって吸い上げられることで竜巻状の気流を再現する。吸込口から床面までの距離である収束層 h_0 は 175mm~1,860mm の範囲である。収束層とは積乱雲直下の地表付近を示し、この範囲に竜巻が再現される。ファンの回転数は 1~3,000rpm の範囲で変えることができる。最大風速は約 10m/s である。なお、本装置によって縮尺率 1/100 程度の竜巻を再現できる。また検討の対象とする竜巻の風速は最大風速 80m/s 程度(藤田スケール 3 程度)を想定している。

2.4 ダウンバースト発生装置

ダウンバースト発生装置の概観を Photo 4(b)に、本体の断面図と座標軸の定義を Fig. 4 に示す。ファンによる強

い気流が送風口から吹き降ろされ、風路の床面に衝突することで、地表に衝突するダウンバーストの下降噴流が模擬される。送風口の直径は 1m である。ファンの回転数は 1~2000rpm の範囲で、送風口から床面までの距離は 10mm から 1,883mm まで変えることができる。最大風速は約 10m/s である。なお、本装置によって縮尺率 1/1000 程度のダウンバーストを再現できる。また検討の対象とするダウンバーストの風速は最大風速 66m/s 程度(藤田スケール 2 程度)を想定している。

3. 実験装置の性能

3.1 マルチファン風洞装置を用いた実験

3.1.1 実験概要 全てのファンの回転数を正弦波状に時間変化させたときの風速変化を検討する。ファン回転数は 0~50Hz の範囲で正弦波状に変化させた。計測には熱線風速計(I型プローブ)を用いた。風路の風上端部を $x=0$ (Fig. 2)とし、風速計の設置位置を $x=2,700$ mm, 高さ 200mm とした。サンプリング周波数は 500Hz, 計測時間は 60 秒とした。

3.1.2 実験結果 風速 V とファンが実際に稼働した回転数の時系列データを Fig. 5 に示す。これより、風路上で計測した風速はファン回転数の増加・減少に概ね対

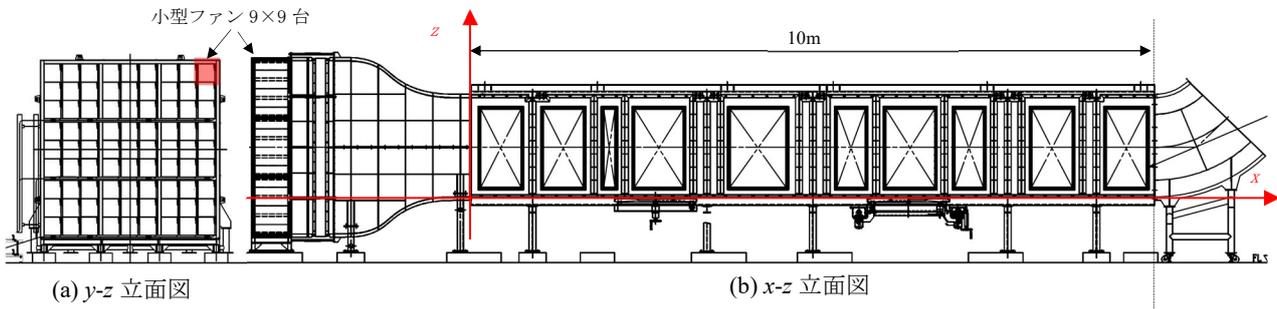


Fig. 2 マルチファン風洞装置 立面図
Cross Section of Multi-fan Wind Tunnel

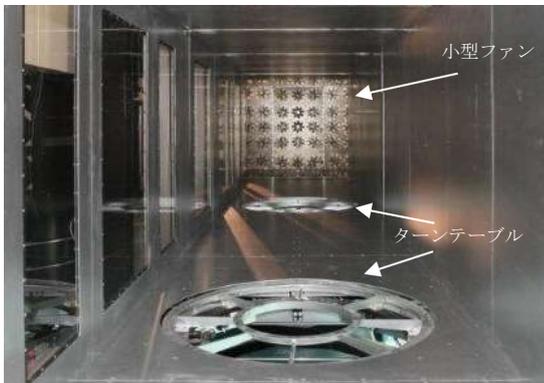


Photo 3 マルチファン風洞装置
Multi-fan Wind Tunnel



(a) 竜巻発生装置 (b) ダウンバースト発生装置

Photo 4 竜巻・ダウンバースト発生装置
Tornado and Downburst Simulator

応している。風速 V とファン回転数の時系列データの無次元パワースペクトル密度を Fig. 6 に示す。どちらのピークも目標回転数の周波数付近で生じている。これより、マルチファンにより目標とする風速変動を再現できることが確認できた。今後は本装置を用い、急激な変動を伴う気流や、実測で得られた自然風の変動の再現に取り組み予定である。

3.2 竜巻発生装置を用いた実験

3.2.1 PIVについて 一般に気流の測定に用いられる熱線風速計は測定できる風向が限定されるため、風向変化が大きな竜巻状気流の測定は難しい。そこで、3次元PIV(Particle Image Velocimetry, 散布された微細泡の動きの可視化により風速を測る装置)を導入した。ヘリウムガスを含むバブルを発生させる粒子発生装置、光源となるLEDライトと4台のハイスピードカメラをFig. 7に示す位置に設置し計測を行う。解像度 $1,024 \times 1,024$ pixel で撮影を行い、可視化範囲はFig. 7の斜線の範囲である。すなわち、最小で0.6mm毎(1pixelあたり0.6mm程度)に風速値が得られる。

3.2.2 実験概要 竜巻発生装置はガイドベーンを 50° 、収束層 h_0 を600mmと設定した。装置内のファン回転数は1,000Hzとした。測定における x, y, z 軸の定義をFig. 7に示す(z 軸は紙面の手前向き)。本節では竜巻装置中央位置を $(x, y) = (0, 0)$ とした。 x, y, z 軸方向の風速成分をそれぞれ u, v, w とする。サンプリング周波数を2kHzとし4,000枚の画像(2秒間)を取得した。これを3セット行った。

3.2.3 実験結果 各粒子の動きと移動速度のPIV結果のスナップショットをFig. 8に示す。粒子群の輪郭が漏斗状の形状となっている。得られた風速比(接線風速/最大接線風速)について既往の実験および野外観測値^{4),5)}との比較をFig. 9に示す。図中のPIV結果は $y=0$ mm(竜巻中央部)、 $z=50$ mmの x 軸上の平均速分布を示している。縦軸は接線風速の最大値、横軸は竜巻中心から最大風速発生位置までの距離 R_{max} で無次元化してある。なお、本実験の R_{max} は約100mmである。PIVによる風速比は、既往の研究の竜巻装置および実測による風速比とよく一致している。

平均風速の $y=0$ mm(竜巻中央部)における $x-z$ 断面分布をFig. 10に示す。竜巻の性状を表している風速 v と w をみると、風速 v において $x=-100$ mm と 100 mm 付近に最小(負値)・最大(正値)風速が生じていることから、気流が旋回していることが分かる。風速 w では風速 v の最小・最大の現れる $x=-100$ mm, 100 mm の上方に上昇気流が見られる。これは竜巻に類似した旋回上昇気流を表しており、旋回流の中心付近では弱い下降気流となっていることなど、竜巻に見られる特徴が表れている。これより本装置により竜巻状の上昇する旋回流が再現できると言える。

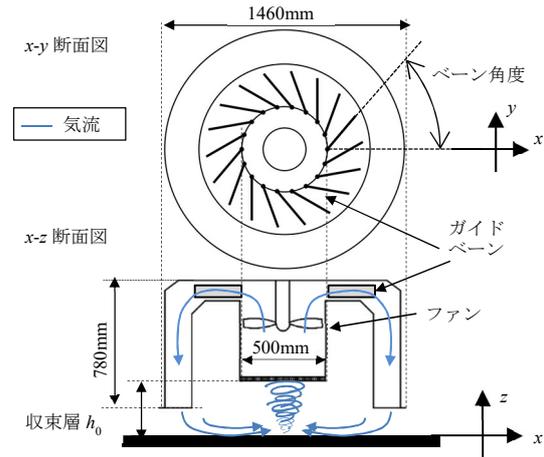


Fig. 3 竜巻発生装置 断面図
Cross Section of Tornado Simulator

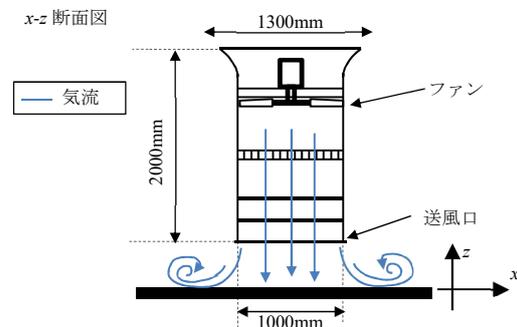


Fig. 4 ダウンバースト発生装置 断面図
Cross Section of Downburst Simulator

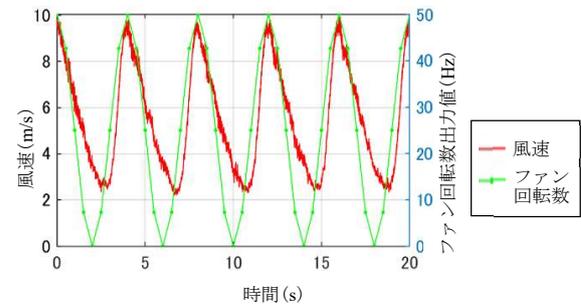


Fig. 5 風速とファン回転数出力値の時系列データ
Time Histories of the Wind Velocity and the Output Signal of Multi-fans

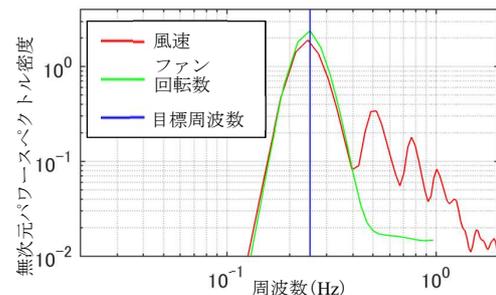


Fig. 6 無次元パワースペクトル密度
Non-dimensional Power Spectral Densities

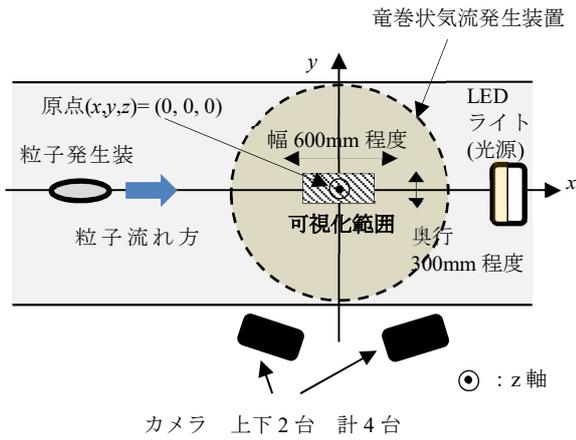


Fig. 7 PIV 計測状況
Measuring Condition for PIV

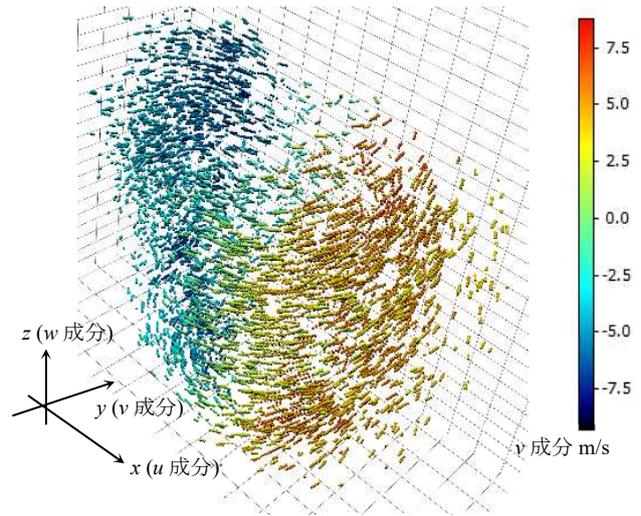


Fig. 8 PIV による風速計測結果のスナップショット
Snapshot of Wind Velocity Distribution by PIV

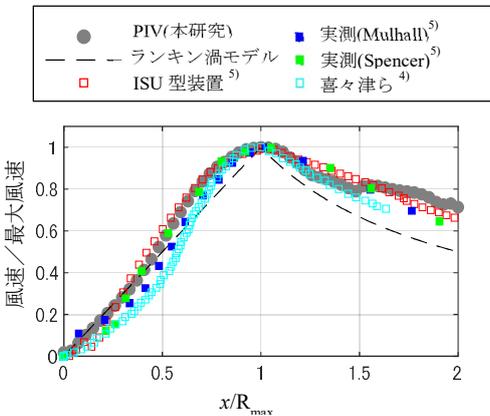


Fig. 9 既往の実験・実測の風速比との比較
Comparison of the Velocity Distributions
with the Previous Studies

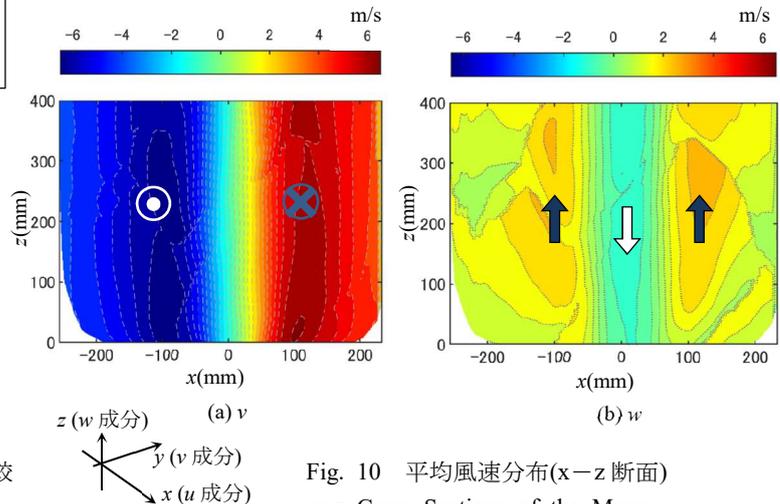


Fig. 10 平均風速分布(x-z断面)
x-z Cross Sections of the Mean
Velocity Distributions

4. おわりに

マルチファン型非定常気流風洞装置を紹介した。また「マルチファン風洞装置」と「竜巻発生装置」について基本性能の確認のための実験結果を紹介した。

「マルチファン風洞装置」により、従来の大型風洞では難しかった変動する風速の再現が行えるようになった。また、「竜巻発生装置」と「ダウンバースト発生装置」の導入により、実験的な検討が可能になったことに加え、実験データと数値解析データの比較が可能となったことより数値解析技術の向上にも寄与すると考えられる。

今後は、各装置の実験パラメータや条件を変えて検討を行い基本的な性能の確認を進めるとともに、突風の風荷重への影響を明らかにする。さらに、実際の建物への風荷重評価に活用していく予定である。

参考文献

- 1) 喜多村, 他: 構造物被害に及ぼす風速変動特性の影響, 第18回風工学シンポジウム論文集, pp 187-192, 2004
- 2) 気象庁, 竜巻等の突風データベース, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/>
- 3) P.P. Sarkar, et al.: A laboratory tornado simulator: Comparison of laboratory, numerical and full-scale measurements, 10th Americans Conference on Wind Engineering, 2005
- 4) 喜々津, 他: 竜巻通過時に低層建築物に作用する風力特性に関する実験的研究, 第22回風工学シンポジウム論文集, pp 209-214, 2012
- 5) H., Hu, et al.: Characterization of the wind loads and flow fields around a gable-roof building model in tornado-like winds, Experiments in Fluids 51(3), pp 835-851, 2011