

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 24 年 6 月 12 日現在

機関番号：82115

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009 年度～2011 年度

課題番号：21360273

研究課題名（和文）

建築物の突風危険度評価に適用可能な竜巻発生装置の開発

研究課題名（英文）

Development of Tornado-like Wind Simulator Applicable to the Evaluation of Tornado-induced Wind Hazard to Buildings

研究代表者

喜々津 仁密（KIKITSU HITOMITSU）

国土技術政策総合研究所・総合技術政策研究センター・主任研究官

研究者番号：10370694

研究成果の概要（和文）：

本研究課題では、竜巻による突風危険度に関する各種の評価を行うことを目的として、屋内型の竜巻発生装置を設計・製作した。そして、同装置を活用して低層建築物を想定した風圧模型実験を行うとともに、建築物への飛来物の衝突の様子を実験的に再現した。また、実験結果に基づいて屋根に作用する突風荷重モデルを構築し、荷重の大きさと建築物側の開口条件等との関係を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

In this study, we designed and developed a tornado-like wind simulator in order to comprehensively evaluate tornado-induced hazard to buildings. Using this simulator, characteristics of wind pressure on a low-rise building model were evaluated and collision of flying debris on a building model was experimentally simulated. Tornado-induced wind force model, which illustrates relation between wind force magnitude and condition of leakage and opening, was also proposed based on the characteristics of wind pressure on the roof.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
21 年度	9,000,000	2,700,000	11,700,000
22 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
23 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
総計	12,800,000	3,840,000	16,640,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学，建築構造・材料

キーワード：竜巻，竜巻発生装置，突風危険度，風力係数

1. 研究開始当初の背景

わが国では、平成 18 年に宮崎県延岡市でフジタスケール F2、北海道佐呂間町で同スケール F3 の規模の竜巻による甚大な突風災害が相次いで発生した。これらの災害を受けて、内閣府総合科学技術会議が機動的対応を推進すべき平成 19 年度の重要政策課題の 1 つとして「竜巻等による突風災害対策に関する調査研究」を位置づけ、突風による災害低減

のための対策等が包括的に検討された。そして、平成 19 年には気象庁による竜巻注意報の発令も開始された。このように突風災害の低減に資する対策の整備及び充実が求められるとともに、一般の竜巻に対する関心も高まってきている。

2. 研究の目的

本研究では、わが国で近年相次いで発生し

た甚大な竜巻災害等の背景を踏まえて、屋内型の竜巻状気流発生装置を開発し、竜巻による突風危険度に関する各種の評価を行うことを目的とする（図 1 参照）。具体的には、同装置を活用して風圧実験を行い、竜巻通過時に建築物に作用する風力特性を把握する。そして、建築物への飛来物の衝突の様子を実験的に再現する。

今後、これらの実験的な知見は、我が国で近年相次いで発生している甚大な竜巻による建築物の被害発生メカニズムの推定に反映することができる。



図 1 竜巻通過時を想定した突風危険度の評価の内容と竜巻の突風による被害事例

3. 研究の方法

本研究では、初年度に竜巻状気流発生装置の設計・製作を行った。そして、当該装置での実験気流が、一般に竜巻の工学モデルとして用いられているランキン渦モデルに適合することを床面上の風圧実験と Particle Image Velocimetry (PIV) とよばれる気流可視化実験によって検証した。ここで、実験気流を制御する各種設定値（送風機の回転数、ベーン角度、ステージ高さ）とランキン渦モデルを構成するパラメータとの関係についても把握している。以上の知見を踏まえて、竜巻通過時に建築物に作用する風圧特性を実験的に把握するとともに、屋根に作用する突風荷重モデルの構築を試みた。

4. 研究成果

(1) 竜巻状気流発生装置の概要

竜巻状気流発生装置は、米国のアイオワ州立大学所有の装置（以下「ISU 型装置」とい

う）の機構に倣って設計・製作した。装置は送風機を内蔵した「本体」、横方向に自走可能な「自走式架台」、上下に昇降可能な「ステージ」及び「制御盤」から構成される。図 2 に装置の概観、図 3 に本体の断面図をそれぞれ示す。本体各部の寸法は ISU 型装置の約 1/3.7 であり、外径と送風機の直径はそれぞれ 1.5m、0.5m である。図 3 に示すように下降流に強制的に旋回性状を与えるガイドベーンが均等に 18 枚配置されており、法線方向に対する角度を 0~55 度の範囲で設定できる。また、装置の全高は約 2.3m、架台の自走範囲は原点に対して±1.4m（最大移動速度 0.4m/s）である。

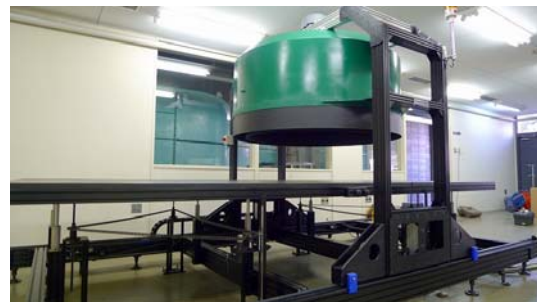


図 2 竜巻状気流発生装置の概観

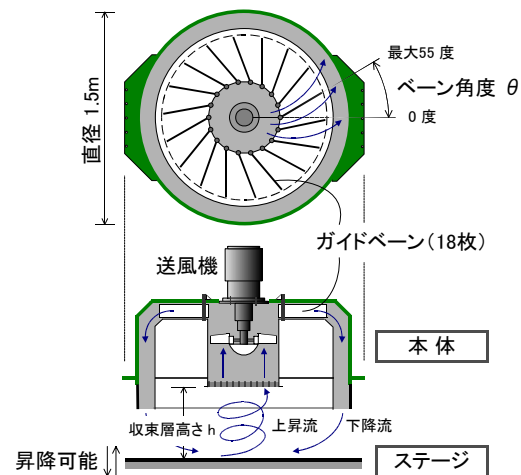


図 3 竜巻状気流発生装置本体の断面図

(2) 竜巻状気流発生装置による気流の特性

竜巻の工学モデルとしてランキン渦モデルが一般に用いられている。そこで本装置による実験気流の同モデルへの適合性を確認するため、水平面内の風速分布を PIV 実験、ステージ床面上の圧力降下を風圧実験からそれぞれ把握した。

図 4, 5 はこれらの測定結果の一例を示したものである。接線風速 V と圧力降下量 P のいずれもランキン渦モデルに適合していることがわかる。ただし、ベーン角度が 15 度以下では中心から離れた点での平均圧力が正圧となる場合があり、同モデルに適合しない傾向が認められた。

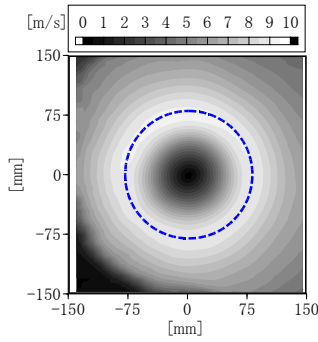
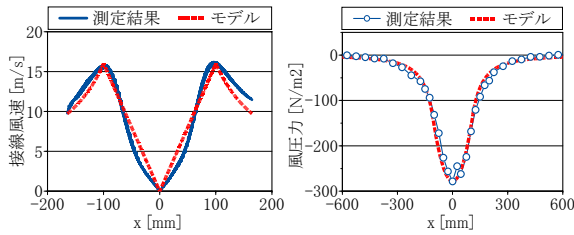


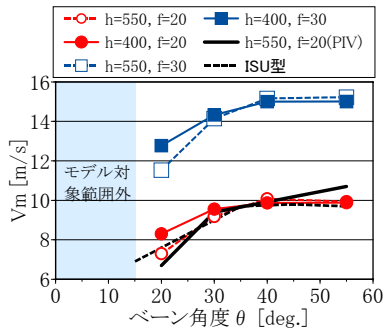
図4 PIV測定で得た平均流速場の例
(青線は旋回流の最大接線風速が作用する範囲)



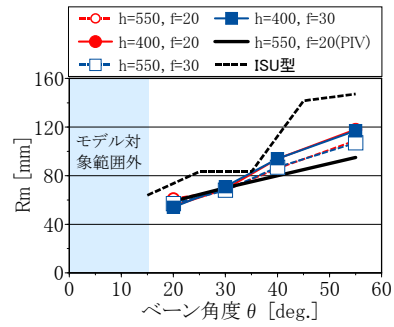
(a) 接線風速分布 (b) 圧力分布
図5 ランキン渦モデルとの比較結果の例

次に、実験気流を制御する各種設定値（送風機の回転数制御周波数 f [Hz]、ベーン角度 θ [deg]及び収束層高さ h [mm]）とランキン渦モデルを規定する数値（最大接線風速 V_m 、コア半径 R_m 及び最小風圧 P_{min} ）との関係を図6に整理した。

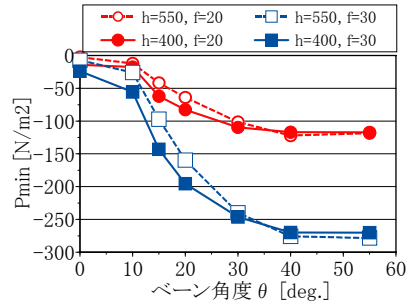
ベーン角度 θ を大きく設定するほど旋回性状の形成が強制的になることから、モデルを規定するいずれの数値（ P_{min} の場合はその絶対値）も、角度の増大とともに大きくなる傾向を示している。ただし、 $\theta > 40$ 度の範囲では V_m と P_{min} の絶対値の変化の程度は小さい。そして、 $\theta < 30$ 度の範囲での V_m と P_{min} の絶対値は、収束層高さ h が高いほど小さくなる傾向を示す。また V_m と R_m の結果は、点線で併記したISU型装置での結果とベーン角度に対する変化の傾向が同様であることが確認できた。



(a) 最大接線風速 V_m



(b) コア半径 R_m



(c) 最小風圧 P_{min}

図6 実験気流を制御する各種設定値とランキン渦モデルを規定する数値との関係

(3) 竜巻通過時に建築物に作用する風圧の評価

図7に示す低層建築物を想定した風圧モデルを用いて、竜巻が当該建築物の真上を通過する状況を再現した風圧実験を行った。距離、風速及び内容積の縮尺率 λ_L 、 λ_{vel} 、 λ_{vol} はそれぞれ次式で設定した。建築物形状は梁間方向24.4m、桁行方向38.1m、軒高12.2mを想定し、開口条件に関しては、各壁面に一樣なすき間（当該壁面積に対する面積比0.13%）と1か所ずつ矩形の卓越開口（同3.3%）を設けている。

$$\lambda_L = \frac{1}{350} \quad \lambda_{vel} = \frac{1}{10} \quad \lambda_{vol} = \frac{\lambda_L^3}{\lambda_{vel}^2} = \frac{1}{428,750}$$

外圧測定点は屋根面が計10点、壁面が計26点である。以下に掲げる風力・風圧係数は、風圧値を V_m から得られる速度圧 $1/2 \cdot \rho V_m^2$ （ ρ : 空気密度）で規準化して得たものであり、それぞれの実験ケースについて10回のアンサンブル平均結果を掲げている。

装置側の設定に関しては、回転数制御周波数 $f=20$ Hz、ベーン角度 $\theta=55$ degとし、移動速度 V_T は0.06、0.20、0.36m/sの3通りとした。これらの条件に基づけば、図6より最大接線風速 $V_m=9.8$ m/s、コア半径 $R_m=0.12$ mなので、上の縮尺率に当てはめれば実スケールで $V_m=98$ m/s、 $R_m=42$ mとなる。

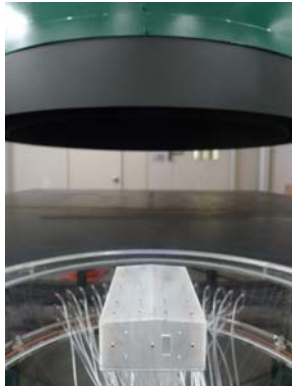
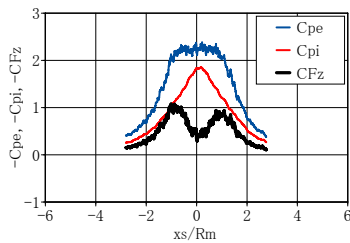


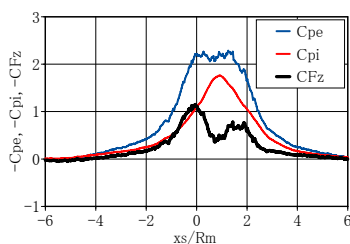
図7 風圧模型の設置状況

図8,9に移動時における屋根面の風力・風圧係数の結果をそれぞれ示す. 各図の横軸は, 模型中心(原点)に対する装置の中心位置の座標 x_s を旋回流のコア半径 R_m で規準化した数値である. 両者の図を比較すると, 一壁面に卓越開口がある場合はない場合よりも, 風力係数の絶対値が大きくなる傾向が認められる.

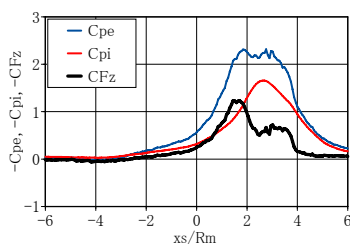
また, 模型付近の渦中心を外圧係数のピーク中心に対応するとみなすと, V_T が大きくなるにつれて, 装置中心と模型付近の渦中心との間の距離が大きくなる傾向が認められる. これは, 移動速度が速いほど渦が移動方向に対して前傾する傾向が大きくなるからであると考えられ, 既往の竜巻の模擬実験結果とも合致している.



(a) $V_T=0.06\text{m/s}$ の場合

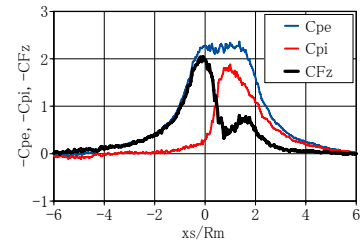


(b) $V_T=0.20\text{m/s}$ の場合



(c) $V_T=0.36\text{m/s}$ の場合

図8 移動時における屋根面の風力・風圧係数(壁面に一樣なすき間のみを有する場合)



$V_T=0.20\text{m/s}$ の場合

図9 移動時における屋根面の風力・風圧係数(壁面に一樣なすき間, 一壁面に卓越開口を有する場合)

(4) 竜巻通過時に作用する突風荷重のモデル化

竜巻の突風によって建築物に作用する風力は, 通過時の気圧降下や旋回流の接線風速がその主要因として挙げられ, 通常の乱流境界層風洞での実験で評価される風力特性と大きく異なる. しかし, 竜巻による風力特性に関する実験的知見は未だ十分に蓄積されていないのが現状である. このような背景を踏まえ本研究では, 竜巻状気流発生装置を活用した風圧実験で得た風力係数をランキン渦モデルに基づいて記述することを試み, 竜巻通過時に低層建築物の屋根に作用する突風荷重モデルを提案した.

一般に竜巻通過時に屋根に作用する風力 F_Z は, 式(1)のように急激な気圧降下による風力 F_a と旋回流の直接作用による風力 F_w との和で表される. そして, 最大接線風速 V_m で速度圧を定義すれば, 風力係数 C_{Fz} は上記の各風力に対応する風力係数をそれぞれ C_a, C_w として式(2)で表される.

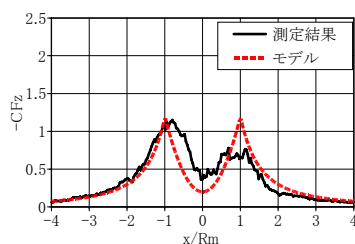
ここで, ρ : 空気密度, x : 建物中心に対する竜巻の位置座標, R_m : 竜巻のコア半径, C_{ae} : 竜巻通過時の急激な気圧降下に対応した外圧係数, C_{we} : 旋回流の直接作用に対応した外圧係数, C_i : 内圧係数, α_i : 一樣な隙間を通過する気流が内圧として寄与する割合, ε_r : 内圧係数 C_{ai} の最小値の外圧係数 C_{ae} の最小値に対する比率である.

$$F_Z(x) = F_a(x) + F_w(x) = \frac{1}{2} \rho V_m^2 C_{Fz}(x) \quad (1)$$

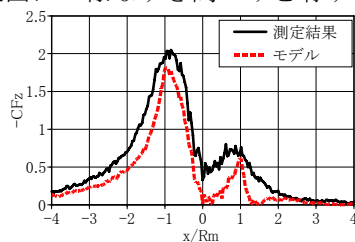
$$\begin{aligned} C_{Fz}(x) &= C_a(x) + C_w(x) \\ &= C_{ae}(x) + C_{we}(x) - C_i(\alpha_i, x) \\ &= \begin{cases} \frac{x^2}{R_m^2} (C_{we}^* - \alpha_i \varepsilon_r + 1) - 2(1 - \alpha_i \varepsilon_r) - (1 - \alpha_i) C_{wi}(x) & (|x| \leq R_m) \\ \frac{R_m^2}{x^2} (C_{we}^* + \alpha_i \varepsilon_r - 1) - (1 - \alpha_i) C_{wi}(x) & (|x| > R_m) \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

図 10 に、既往の風圧実験で得た風力係数を式(2)による風力係数と比較した結果をまとめる。一様な隙間のみ有する場合は $\alpha_i=1$ 、卓越開口も有する場合は $\alpha_i=0$ とした。

いずれの開口条件の場合も、式(2)による結果は風圧実験結果と概ね似た傾向を示していることがわかる。ただし、風力の時間変化が最も著しい同図(b)の $x/R_m=-1.0$ 近傍では、実験結果に比べて絶対値が比較的小さい値となっている。ここでは限られた実験条件に拠ったが、風力モデル構築に当たっての今後の課題としては ①横方向の移動速度、②コア半径に対する模型代表寸法の比、③屋根勾配、④竜巻状気流のスワール比 といった各種パラメータが風力係数に与える影響について、系統的に実験を行う必要がある。



(a) 壁面に一様なすき間のみを有する場合



(b) 壁面に一様なすき間、一壁面に卓越開口を有する場合

図 10 風力係数に関する実験結果と式(2)による風力モデルとの比較

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 3 件)

1) 喜々津仁密, 奥田泰雄, 神田順, 河井宏允, P.P. サーカー: 突風危険度評価に資する竜巻状気流発生装置を活用した実験的研究の試み, GBRC, Vol. 36, No. 1, 2011, pp. 2-11.

2) 喜々津仁密, P.P. サーカー: 2008 年 5 月に米国アイオワ州で発生したトルネードによる建築物被害に関する後日調査, 日本風工学会論文誌, Vol. 35, No. 3, pp. 73-87, 2010.

3) 奥田泰雄, 喜々津仁密: 2009 年台風 18 号に伴い茨城県土浦市で発生した竜巻による建築物等の被害, 日本風工学会誌, Vol. 35, No. 3, pp. 225-232, 2010.

〔学会発表〕 (計 7 件)

1) 喜々津仁密, 奥田泰雄, 河井宏允, 神田

順: 竜巻状気流発生装置による実験気流の基本特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp. 97-98, 2011.

2) 喜々津仁密, 奥田泰雄, 河井宏允, 神田順: 竜巻状気流発生装置の概要と基本特性, 日本風工学会誌, 第 36 巻, 第 2 号, pp. 187-188, 2011.

3) H. Kikitsu, P.P. Sarkar, F.L. Haan: Experimental study on tornado-induced loads of low-rise buildings using a large tornado simulator, Proceedings of 13th International Conference on Wind Engineering, 2011. (CD-ROM)

4) H. Kikitsu, Y. Okuda, J. Kanda, H. Kawai: Fundamental Characteristics of Vortex Structure in a Laboratory-Simulated Tornado, Proceedings of 9th International Symposium on Particle Image Velocimetry-PIV' 11, 2011. (CD-ROM)

5) 喜々津仁密, P.P. サーカー, F.L. ハーン: 竜巻状気流発生装置を活用した低層建築物に作用する風力特性に関する基礎的研究, 第 21 回風工学シンポジウム論文集, pp. 149-154, 2010.

6) H. Kikitsu, P.P. Sarkar: Experimental Study on Effects of Tornado on Roofing System in Low-rise Building, Proceedings of the 5th U.S.-Japan Workshop on Wind Engineering, UJNR, pp. 208-217, 2010.

7) 喜々津仁密: 建築物の突風ハザード評価に資する竜巻状気流発生装置の開発, SAT10 周年記念 TX テクノロジー・ショーケース in ツクバ アブストラクト集, pp. 96, 2010.

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.kenken.go.jp/japanese/research/member/kikitsu.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

喜々津 仁密 (KIKITSU HITOMITSU)

国土技術政策総合研究所・総合技術政策研究センター・主任研究官

研究者番号：10370694

(2) 研究分担者

奥田 泰雄 (OKUDA YASUO)

独立行政法人建築研究所・構造研究グループ・上席研究員

研究者番号：70201994

神田 順 (KANDA JUN)

東京大学大学院・新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：80134477

河井 宏允 (KAWAI HIROMASA)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：600272282

(3) 連携研究者

なし