

平成 20 年 6 月 12 日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19560584
 研究課題名（和文） 竜巻などの突風による建造物の内圧変動を考慮した強風災害発生メカニズムの解明
 研究課題名（英文） Effects of structural internal pressures to wind damage mechanisms due to gust winds like tornadoes
 研究代表者
 松井 正宏（MATSUI MASAHIRO）
 東京工芸大学・工学部建築学科・教授
 研究者番号：60350576

研究成果の概要：竜巻等の突風時の被害として特徴的な、建築物の屋根飛散被害等を分析するため、建築物の内圧に関する風洞実験結果を実施し、内圧の非定常性、室内間の空気力学的抵抗等の影響について明らかにした。また、電磁石とロードセルを組み合わせたリアルタイムに制御する実験システムを開発した。このシステムを用いて、建築物本体との結合力を再現し、設定した荷重が作用した場合に当該部材との結合が切れる状況を再現することに成功した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
19年度	1,600,000	480,000	2,080,000
20年度	1,800,000	540,000	2,340,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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：荷重論・耐風構造，屋根ふき材，風荷重，内圧，飛散物，風力センサー，電磁石

1. 研究開始当初の背景

グローバルな環境の変化は気象災害の発生にも大きな影響を与えている。2004年は日本列島への台風上陸数が10件と過去最高を記録した。台風だけではなく、2005年末には北日本海側において突風による羽越線脱線事故が発生し死者5名、負傷者30余名がでたが、この際、周辺において突風による家屋への被害が確認された。また、台風に伴い竜巻などが発生することが知られており、2006年9月には台風13号に伴う積乱雲下において宮崎県延岡市等で竜巻が発生し、死者

3名、住家への被害1800余を数えた。突風被害の発生件数だけではなく、災害そのものも深刻化、大規模化している。この傾向は、日本だけではなく、2005年のカトリーナに代表されるアメリカ合衆国湾岸におけるハリケーンの発生数、被害は想像を絶するものとなっている。

このような気象災害では強風により大きな被害を受ける建築物が後を絶たない。特に、ニューオリンズにおけるスーパードームの様に、避難所となっていながら強風被害を受け、その機能を果たせないことは非常に問題

がある。体育館、公民館、スタジアム等は公共性が高い建築物で、これらは非常時には避難施設としての役割が期待されている。このような大空間建築物は、構造設計においても近代的な耐風設計がおこなわれているはずであるが極限状況における自然現象、物理現象は、通常見込まれる荷重や部材応力状態と整合しないものとなっている可能性がある。

例えば、近年の建築物における強風災害をみると、強風により発生した飛来物により建築物の壁面、屋根、窓ガラス、サッシ等において損傷が発生し、その損傷部分から外気が室内に流入することによる内圧の上昇を伴い、屋根や全体の構造骨組に対する被害へ結びついていくものが少なくない。従来の規基準に示された耐風設計方法では、閉鎖型建築物に対しては、外殻に作用する風圧力(外圧)の評価が主であり、内圧については、閉鎖型であることを前提に若干の通気性を考慮した内圧係数が設定されているにすぎず、実際の被害状況を反映した耐風設計法が、建築構造あるいは防災の見地からも求められているといえる。

一方、被害による損失の様相にも変化がみられる。建築物の強風被害による損害を考えると、従来は建築物そのものを保全することが重要と考えられてきたが、経済の発展に伴い、建築物の収容物の財産保全が重要となってきている。損害保険の支払い対象も、建築物そのものに比べ、収容物の価値が相対的に高くなってきている。このような状況において、建築構造に求められるのは、特に風水害に対しては、台風などの気象条件下でのシェルターとして、収容する人間、財産を保護することであり、降雨をとともなう状況での外装材、屋根などの被害は、今後深刻な問題となっていくことが予想される。近年の強風被害を受けている建築物には、体育館などが多く、これらは地域の避難所としての役割を期待される建築物であるため、十分な耐風性を有することが絶対に必要である。

2. 研究の目的

本研究では、近年に発生した竜巻などの強風被害事例から、建物の内圧上昇あるいは、内圧変動を伴って発生したと考えられる事例を抽出し、その被害発生メカニズムを明らかにするとともに、現象の数理モデルを構築する。この数理モデルから、数値計算による被害予測手法を構築するとともに、風洞実験モデルの理論的な相似則を導出し、実施例の非常に少ない内圧変動に関する風洞実験の実現方法を明らかにする。これらの数理モデルおよび風洞実験結果から、モデル化の妥当性を示す。また、室内圧の非定常性に加えて構造物の動的な特性を考慮することにより、風荷重がどのような性質を示すかを明らか

にする。また、内圧の影響を受けて損傷した建物の一部が飛散することによる飛散物発生と、それに伴う2次的被害についても検討を加える。

3. 研究の方法

室内圧のモデル化

基本となる室内圧振動は Holmes によれば開口部にある空気塊の振動(ヘルムホルツモデル)として説明される。

$$\rho_0 A \ell_e \ddot{x} + \frac{\rho_0 A}{2k^2} \dot{x} |\dot{x}| + \frac{\gamma P_0}{V_0} x = A \Delta P_e(t) \quad (1)$$

$$= -(P_e - P_0)A$$

ここで ρ_0 は密度、 A は開口面積、 ℓ_e は空気塊の有功長さ、 x は空気塊の変位、 k はオリフィスの流量係数(0.6)、 γ は比熱比(=1.4)、 V_0 は室内容積を表している。また、開口部における流速は \dot{x} 、加速度は \ddot{x} と表せる。風圧力は大気圧 P_0 、密度 ρ_0 、風速 \bar{U} を用いて無次元化し、時間は開口部の代表長さ \sqrt{A} 、風速 \bar{U} を用いて無次元化する。無次元化された風圧を内圧係数 C_{pi} 、外圧係数 C_{pe} と表し、無次元化された時間を t^* と表わすと、(1)式は次式のように表される。これは、 C_{pi} に関する振動方程式をあらわしており、内圧の振動性を考察する上で基本となるものである。

$$\rho_0 A \ell_e \frac{d^2}{dt^{*2}} C_{pi} + \frac{\rho_0 A}{2k^2} \frac{d}{dt^*} C_{pi} \left| \frac{d}{dt^*} C_{pi} \right| + \frac{\gamma P_0}{V_0} C_{pi} = \frac{A \rho_0 \bar{U}^2}{2} C_{pe} \quad (2)$$

本研究では、このヘルムホルツモデルを多室の場合に拡張する。

$$M \ddot{\bar{v}} + C |\dot{\bar{v}}| \dot{\bar{v}} + K \int \bar{v} dt = \bar{F} \quad (3)$$

ここで、 M, C, K は、空気塊の質量、開口における損失、室内圧のバランスによる復元力係数に相当する行列で、3室の場合は次式のように表わされる。

$$M = \begin{bmatrix} \rho_{e1} A_1 & 0 & 0 \\ 0 & \rho_{e2} A_2 & 0 \\ 0 & 0 & \rho_{e3} A_3 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} \rho_{e1} A_1 / 2k_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \rho_{e2} A_2 / 2k_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \rho_{e3} A_3 / 2k_3^2 \end{bmatrix}$$

$$\frac{K}{P_0} = \begin{bmatrix} \frac{A_1^2}{V_1} & -\frac{A_1 A_2}{V_1} & 0 \\ -\frac{A_1 A_2}{V_1} & A_2^2 \left(\frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2} \right) & -\frac{A_2 A_3}{V_2} \\ 0 & -\frac{A_2 A_3}{V_2} & A_3^2 \left(\frac{1}{V_2} + \frac{1}{V_3} \right) \end{bmatrix}$$

風洞実験のスケージング

支配パラメータを解明する。物理現象の考察を行う。前出の(2)式を元に実験スケール(添え字m)と実物スケール(添え字f)の関係を検討する。(2)式の各項の無次元化された係数が、実物スケールと実験スケールで等しい条件より、空気密度、オリフィスの流量係数(0.6)、比熱(1.4)、大気圧が同じならば、以下の式が成り立つ。

$$\left[\frac{\bar{U}^2 V_0 \ell_e}{A^2} \right]_f = \left[\frac{\bar{U}^2 V_0 \ell_e}{A^2} \right]_m \quad (5)$$

(3)式は次のように変換される。

$$\frac{[V_0]_m}{[V_0]_f} = \frac{[A]_{2m}^3 [\bar{U}]_f^2}{[A]_{2f}^3 [\bar{U}]_m^2} = \frac{[L]_m^3 [\bar{U}]_f^2}{[L]_f^3 [\bar{U}]_m^2} \quad (6)$$

従って、実物風速=実験風速ならば、容積比は長さ比の3乗、つまり幾何学的縮尺模型で良いことが示される。ここで、 V_0 は室内容積、 A は面積、 \bar{U} は風速、 L は長さを表している。

一方時間 T の縮尺は次の式が成り立つ、

$$\frac{[T]_m}{[T]_f} = \frac{[L]_m [\bar{U}]_f}{[L]_f [\bar{U}]_m} \quad (7)$$

従って、実物風速=実験風速ならば時間の縮尺は長さの縮尺に等しくなる。

4. 研究成果

(1) 内圧に関する風洞実験

対象とする建築物は、中層のオフィスビルで、1階に集配施設を擁することを想定し、建物内の大空間および開口(75mm×35.5mm)を再現する。また、これに続く空間として、階段室、廊下などの容積、一般階執務室に相当する空間も再現し、チューブ($\phi=25$ mm)で連結する。チューブ間には扉等を想定した空力的抵抗要素(穴径 $\phi=5$ mm, $L=20$ mm)が挿入可能である。

1階開口部は、シャッターの様に閉鎖状態から瞬間的に開放される仕組みになっている。瞬間的な開放は、室内圧に与える影響が大きいと考えられ、また、飛来物などにより外装材に損傷が生じた場合とも関連すると考えられる。

図1,2に窓の風力係数の風向による変化を、風上の開口部が閉鎖されている場合と開放されている場合に分けて示す。風上開口が開放されている場合が、閉鎖されていない場合に比べて大きな値を示す。さらに窓部が閉鎖されている場合、風向0度から30度付近で大きな負の風力係数(-2程度、外向きを正とする)を示す。

図3に抵抗要素の有無による窓部に作用する風力の比較を示す。両者同様の傾向を示すが、抵抗要素がないケースの方が大きな値を示す場合が多い。

風上開口部が瞬時に開放される場合の実

験では幾つかのケースで図4に示されるような窓部風力の過渡的振動が見られた。このような過渡的振動の発生は、窓部に隙間があるケースではほとんど確認されなかったが、窓部が閉固定である場合に、過渡的振動が見られる場合が多かった。また、過渡的振動は、空力抵抗要素がない場合の方が顕著であった。これらは、内圧のヘルムホルツ共振と考えることが出来る。

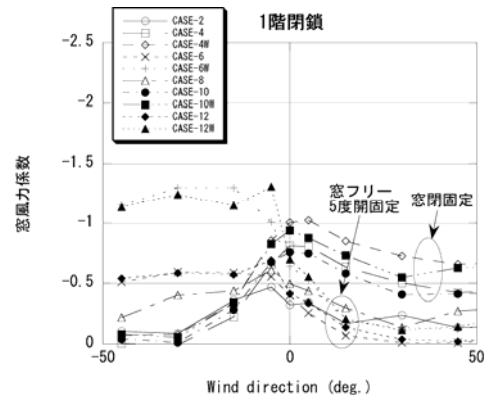


図1 風上開口部閉鎖時の窓に作用する最小風力係数

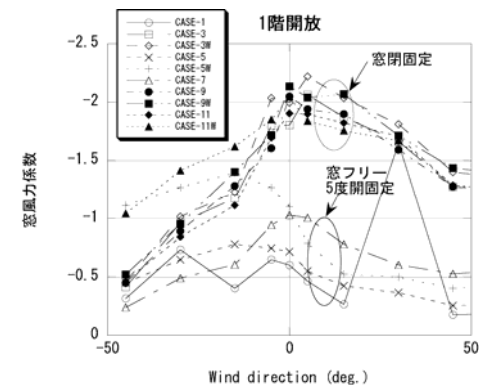


図2 風上開口部開放時の窓に作用する最小風力係数

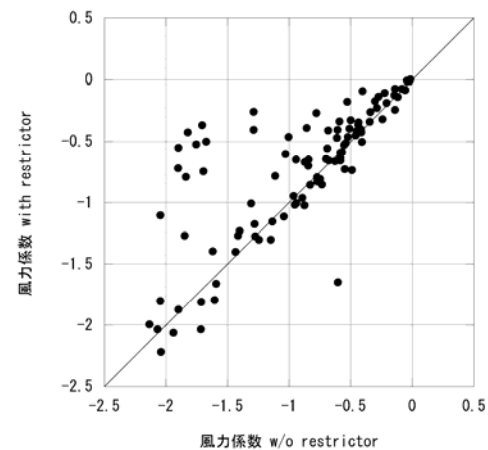


図3 空力抵抗要素の有無による窓部風力係数の比較

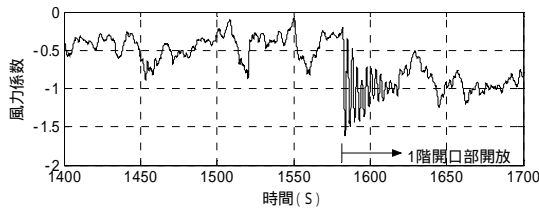


図4 風上開口部の瞬間的開放によって窓部に発生する風力過渡振動

(2) 電磁解放式風力センサの開発

強風による被害は特に屋根葺材，あるいは屋根構造全体に及ぶものが多く，被害を受けた屋根葺材は飛散する。屋根などに作用する風圧力は通常剛体模型表面に圧力測定孔を分布させて計測される。隅角部等に発生する局所的な風圧は非常に変化が激しいので，圧力測定点を非常に密に配置しなければならない。このためには非常に多くの圧力センサ等が必要になる。被害によっては屋根部材が遠くまで飛散し，その飛散物による二次災害も懸念される。そのため，飛散物に関する研究も行われている。この様な目的で行われた風洞実験に関する研究はあまり多くない。Lin等は，電磁石を単にONからOFFにすることにより物体を解放する実験を行った。Brent等は切妻屋根の屋根葺材の飛散実験を行った。そこでは接合部を与えるために電磁石が用いられた。しかし，電磁石に作用する風力等の計測や，解放の制御等は行われていない。実際の建築物の屋根部材等は，躯体にボルト，釘等で接合されており，これらの接合強度等を正しく反映させることが必要と考えられる。

図5に電磁解放式風力センサの概要を示す。センサは部材の結合を管理する電磁石と部材に作用する風力を測定するロードセルから構成されている。電磁石はPCによってON/OFF可能なデジタルスイッチを介して電源に接続されている。ロードセルの出力もPCに接続されており，PCでは1/100秒の非常に短い時間間隔で風力をモニタし，設定荷重に達した場合に電磁石への電源供給を停止する自動制御プログラムを使用している。このフローを図6に示した。

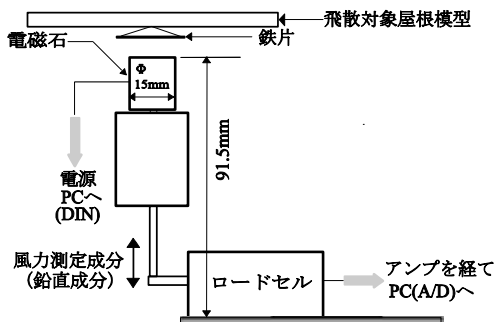


図5 電磁開放式風力センサの概要

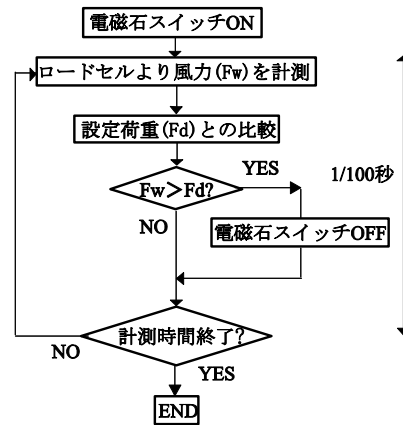


図6 自動制御プログラムのフローチャート

開発したセンサが所定の性能を発揮することを予備実験により確認した。まず解放荷重を0.196N(20gf)に設定し，計測制御を開始する。この状態から電磁石に引き付けられている鉄片に上向きの力を加えた。ロードセルに作用しているの力と電磁石の制御状態からロードセルにより作用している力がモニタされ，設定された解放荷重に達した時点で電磁石への電源の供給が止まり，鉄片が切り離されると同時にロードセルに作用する力も小さくなっている様子が示され，開発したセンサが目的通りに動作していることが確認された。

開発した電磁解放風力センサの風洞実験への適応性を示すため，図7に示す屋根飛散実験を実施した。

風洞は東京工芸大学，風工学研究センターのエッフェル型風洞を用いた。風洞気流は風路に粗度要素を配置していない乱れの小さい状態とした。模型は幅240mm，奥行き360mmを共通とし，高さを小型L(90mm)，中型M(180mm)，大型H(270mm)と異なる3種類をアクリル板で作成した。また，屋根は380mm×136mm，厚さ3mm，質量は鉄板ぶきモデルU(31g)，石綿スレートぶきモデルS(46g)，瓦ぶきモデルK(113g)の3種類をスチレンボードで作成した。開発された電磁解放式風力センサは模型内部に図8の様に設置した。屋根の4隅でセンサと飛散対象屋根を接続し，模型サイズ(3種類)×屋根(3種類)×風向(5方向)，図9)において実験した。

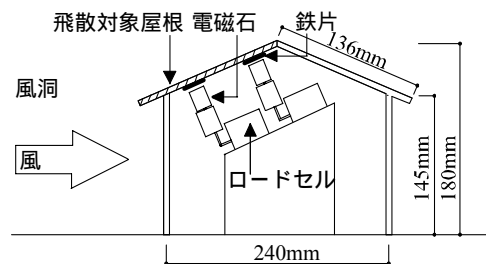


図7 実験装置図の概要



図8 電磁解放式風力センサの取り付け状況

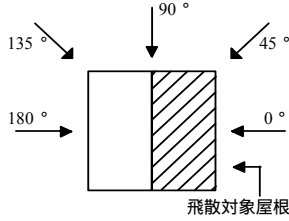


図9 実験風向図

各模型，屋根材，風向において風速が上昇するほど，飛散をさせないための設定荷重が増加するという実験結果が得られた。また，模型Hを例にすると図10より，風向135°の場合に最も大きな引き上げの力が屋根に作用することがわかった。

最も屋根が飛散しやすかったのは，風向135°のケースであった。このケースでは屋根材に抑える正の風圧が小さく，ロードセル4に大きな引き上げられる負の風圧が掛かり，解放された屋根が一部浮くことによって他のロードセルもほぼ同時に解放されたと図11からも示される。また風向0°は屋根材を抑える正の風圧が大きく引き上げられる負の風圧が小さい為，解放されにくい事が図12から示された。これは設定荷重が小さいとき大きな風圧力により解放以前に屋根材に隙間が発生し，ロードセルに違う風圧力が作用した為だと考えられる。このような状態は実際の被害建築物でも想定されることから，本センサ等を用いれば従来検討できなかったより複雑な状況にも対応した実験が可能になると考えられる。

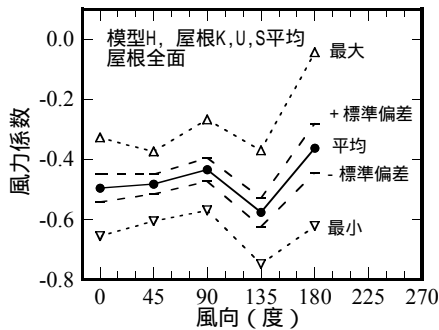
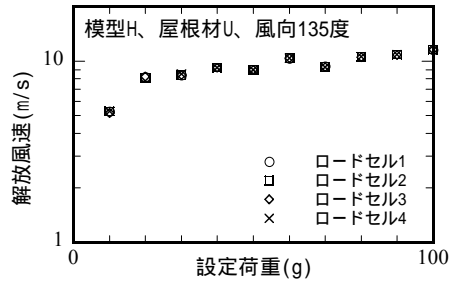
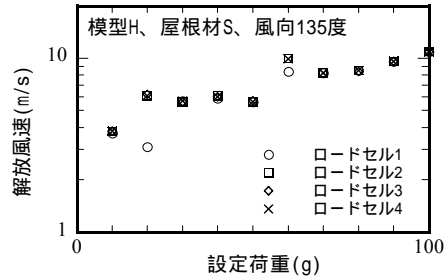


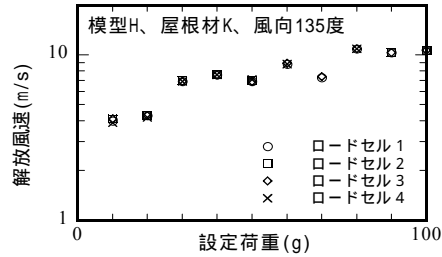
図10 風向と風力係数の関係



(a) 模型H，屋根U，風向135度

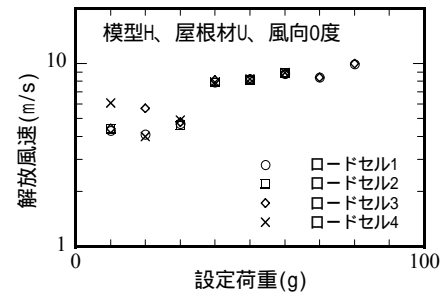


(b) 模型H，屋根S，風向135度

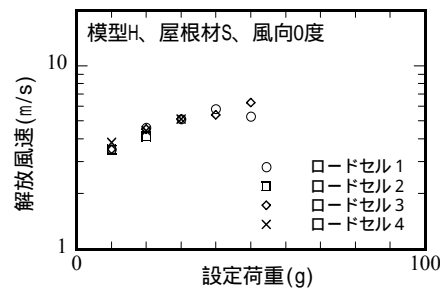


(c) 模型H，屋根K，風向135度

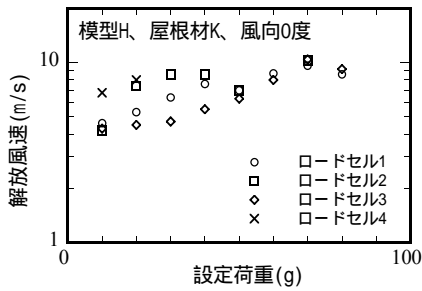
図11 各屋根と風向135°に関する設定荷重と解放風速の関係(模型H)



(a) 模型H，屋根U，風向0度



(b) 模型H，屋根S，風向0度



(c) 模型 H, 屋根 K, 風向 0 度

図 12 各屋根と風向 0 度に関する設定荷重と解放風速の関係(模型 H)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

小林文明, 菅原祐也, 今井真希, 松井正宏, 吉田昭仁, 田村幸雄, 2004 年 4 月 20 日に発生した藤沢竜巻の被害特性, 日本風工学会誌, Vol.32, No.2, 2007, pp.265-272

松井正宏, 田村幸雄, 流れ場の状態が竜巻状旋回流の形成に与える影響, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, 2007, No.1012

松井正宏, 田村幸雄, 吉田昭仁, 風上開口を有する建築物における室内圧の影響を考慮した外装材風力に関する風洞実験, 日本建築学会 2007 年度大会(九州) 学術講演梗概集 B-1 分冊, 2007, pp.113-114

Masahiro Matsui, Yukio Tamura, Akihito Yoshida, Wind tunnel experiment for unsteady internal pressure in building, International Colloquium on Bluff Bodies Aerodynamics & Applications (BBAA-VI), 2008, pp.20-24

堀江貴行, 松井正宏, 田村幸雄, 電磁解放式風力センサの開発, 日本建築学会大会(中国)学術講演梗概集 B-1, 2008, pp.181-182

松井正宏, 田村幸雄, 風応答による構造部材の累積疲労損傷特性, 日本建築学会大会(中国)学術講演梗概集 B-1, 2008, pp.277-278

〔学会発表〕(計 5 件)

松井正宏, 田村幸雄, 流れ場の状態が竜巻状旋回流の形成に与える影響, 日本機械学会流体工学部門講演会, 2007 年 11 月 17 日, 広島大学

松井正宏, 田村幸雄, 吉田昭仁, 風上開口を有する建築物における室内圧の影響を考慮した外装材風力に関する風洞実験, 日本建築学会 2007 年度大会, 2007 年 8 月 30 日, 福岡大学

Masahiro Matsui, Wind tunnel experiments to evaluate wind induced damage to buildings, Tokyo Polytechnic University and Tamkang University Wind Engineering Joint Workshop, 2008.8.27,

Atsugi, Kanagawa

堀江貴行, 松井正宏, 田村幸雄, 電磁解放式風力センサの開発, 日本建築学会大会(中国)学術講演, 2008.9.19, 広島大学

松井正宏, 田村幸雄, 風応答による構造部材の累積疲労損傷特性, 日本建築学会大会(中国)学術講演, 2008.9.20, 広島大学

〔図書〕(計 1 件)

日本風工学会 編, 朝倉書店, 風工学ハンドブック 構造・防災・環境・エネルギー, 2007, p.440

〔産業財産権〕

特に無し

〔その他〕

特に無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松井 正宏 (MATSUI MASAHIRO)

東京工芸大学・工学部建築学科・教授

研究者番号: 60350576

(2) 研究分担者

田村 幸雄 (TAMURA YUKIO)

東京工芸大学・工学部建築学科・教授

研究者番号: 70163699

(3) 研究分担者

吉田 昭仁 (YOSHIDA AKIHITO)

東京工芸大学・工学部建築学科・准教授

研究者番号: 90329219