

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25年 5月 10日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360230

研究課題名（和文） 台風・竜巻等のスーパー突風による建物の風荷重の増大インパクト

研究課題名（英文） Impact of wind load increasing due to super gusty wind related with typhoon and tornado on buildings

研究代表者

前田 潤滋（MAEDA JUNJI）

九州大学・人間環境学研究院・教授

研究者番号：40128088

研究成果の概要（和文）：

ゆっくり立ち上がる突風を受ける構造物に比べて、短時間に立ち上がる突風を受ける構造物に、より大きな風力が発生する「風力のオーバーシュート現象」を特殊な装置を持つ風洞で再現し、いくつかの形状の試験体について、通常の風力との比較をオーバーシュート係数として整理した。風洞実験結果の数値流体解析シミュレーションで、オーバーシュート風力の発生メカニズムを追跡するとともに、強風観測記録の分析から、オーバーシュート風力が突風被害の拡大要因の一つになっていることを論証した。

研究成果の概要（英文）：

Compared with a case under a slowly rising gust, bigger wind force acting on a structure is generated under a short-rise-time gust. This is called the overshoot of wind force. The overshoot phenomenon was reproduced using a specially-equipped wind tunnel test and the overshoot force on several specimen of simple shape was compared with an usual wind force by the overshoot coefficient. The mechanism of the overshoot force was revealed by numerical simulation of the experimental results and it was proved that overshoot of wind force was one of the factors of gust damage expansion from analysis of strong wind observation record.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	7,900,000	2,370,000	10,270,000
2011年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2012年度	2,900,000	870,000	3,770,000
年度			
年度			
総計	13,700,000	4,110,000	17,810,000

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，風荷重，耐風工学

1. 研究開始当初の背景

構造物の耐風設計での風荷重は20%程度の乱れを含む一定の強風を対象にしており、台風や竜巻などに見られる単時間内で急激に変化する突風（図1）を想定していない。

福岡市(1998)、山形県庄内町(2005)、延岡市(2006)での突風による列車転覆事故など、建築物以外でも、竜巻等による急激な風速の変化がもたらす被害事例は多い。短時間で流速が急変する非定常流を受ける物体には、定常

流の場合の数倍の流体力の発生が 1970 年代の種子田定俊他の研究などで指摘されているが、強風下での「突風特有の非定常風荷重」のメカニズムは国内外でほとんど解明されていない。その理由は、突風を再現する装置の実現性に難点があり、従来の研究では水槽を利用したものが大半であったからである。

本研究開始時では、吸い込み式エッフェル型風洞の吸い込み口でシャッター板を回転させて突風を生成する事例があるが、風洞断面サイズが小さくて十分な大きさの模型が設置できず、また、シャッター板の回転速度が固定されていて、突風の立ち上がり時間の影響を検証することができなかった。

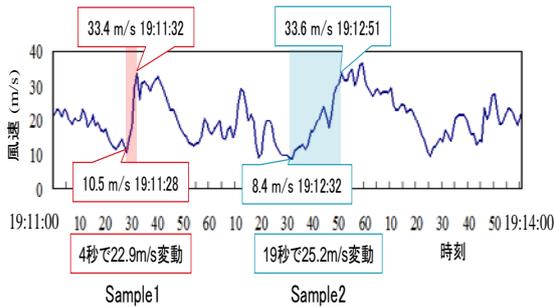


図1 電車脱線時の突風記録（福岡市 1998）
4秒間で23m/sの風速増加が見られる

2. 研究の目的

一定の風を受ける場合に比べて、台風、寒冷前線、竜巻などの通過時に見られる同じ風速レベルまで急激に立ち上がる突風を受ける建物に、短時間ではあるが、極めて大きな風力（オーバーシュート風力、図2～図4）が発生する現象を実験的に系統化して、その発生パターンを解明し、もって建物本体や外装材の適切な対突風強度の確保に寄与しようとするのが本研究の目的である。さらに、九州全域で集積した強風観測風速記録の立ち上がり時間の統計分析を行って、自然風中で

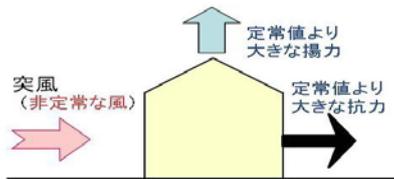


図2 構造物が突風を受けて生じる風力

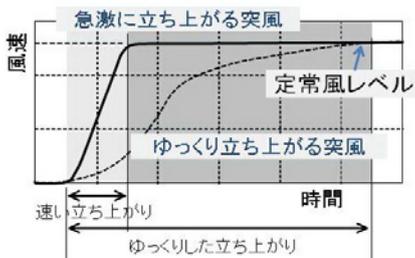


図3 突風の立ち上がり状況

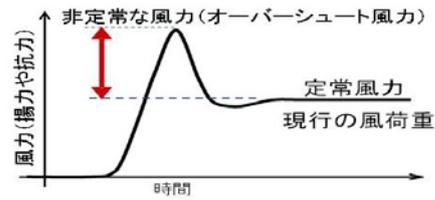


図4 突風による風力のオーバーシュート

の突風発生状況の統計特性を明らかにし、突風による風荷重の増大効果を実規模で検証する。

3. 研究の方法

(1) 無風時あるいは一定風速からの突風生成の実現

現有の風洞装置（測定部断面サイズ：1.5m × 1.5m）でステップ関数的突風を生成するために、脈動流生成用の翼列の回転を高速制御できるシステムを構築し、無風時からあるいは一定風速からの立ち上がり時間が 0.1～5 秒程度の突風を実現する。（図5、図6）

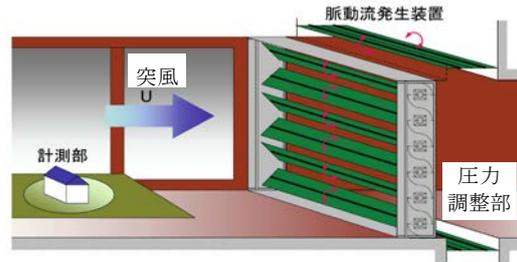


図5 翼列の回転を利用した突風生成

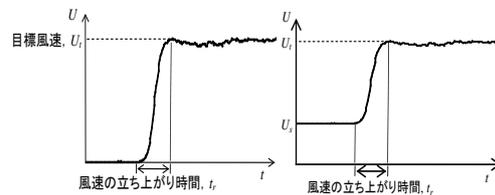


図6 ステップ関数的突風の生成例
（無風時からと一定風速からの突風）

(2) 突風風速を受ける試験体に作用する突風風力（抗力と揚力あるいは横力）および試験体表面圧力分布の高精度計測システム構築

高精度動的空気力天秤に設置した試験体に作用する突風風力の時系列信号を 1kHz スキャンで連続計測することで、風力のオーバーシュート現象を捉える。

(3) 突風下での風力および風圧力を正確に捉えるための新たな工夫

① 使用した風洞は吸い込み式のエッフェル型であるが、突風の立ち上がり時には風洞内の静圧が瞬間的に負圧側に変化する。そのため空力天秤の鉛直成分 (F_z 成分) に不要な信号が混入して試験体の揚力成分の計測精度を大幅に低下させる。これを避けるために風洞

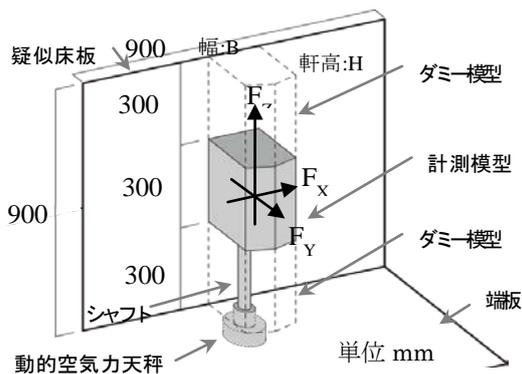


図7 疑似床板上に設置した住家模型



図8 多点ピトー孔アレー板

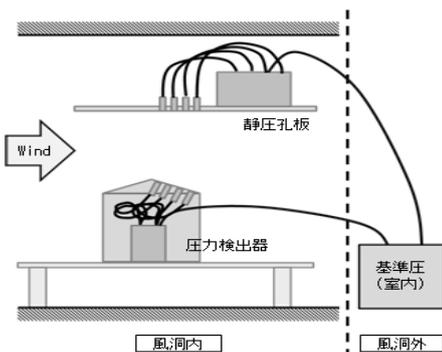


図9 多点圧力孔アレー板(静圧孔板)を利用した突風圧力の測定

床面に垂直に配置した疑似床板上に試験体を設置して、試験体の揚力成分を空力天秤の横力信号(F_y 成分)で計測できるように工夫する。(図7)

②突風立ち上がり時に風洞内の静圧勾配が発生するので、定常風速に対する表面圧力の通常の計測方法が使用できない。新たに、模型表面の圧力孔位置の直上に対峙するピトー孔を多数列配置した「多点ピトー孔アレー板」を開発して、静圧勾配が発生する瞬時での模型表面圧力を精度よく計測する。(図8, 図9)

(4) 上記システムを使用した無風時および一定の初期風速からの突風に対する、風力のオーバーシュート現象の実験計測とその分析

(5) 突風を受ける試験体表面の圧力分布のオーバーシュート現象の実験計測とその分析

(6) 上記実験では、円形・矩形の基本断面柱に加えて、車両模型や切妻屋根模型の抗力、揚

力(横力)、表面圧力を対象に測定データを集積し、それぞれのオーバーシュート現象をパターン化して、試験体寸法や突風風速の特性で構成した無次元パラメータで計測結果を整理分析する。また一定風速からの突風を受ける試験体の表面圧を測定し、一定風速からのオーバーシュート風圧力に関する実験結果を、無風時からの突風による風力増大現象と比較分析する。

(7) 突風風速場での試験体周りの流れ場と圧力場の数値流体解析を行い、風洞実験結果との比較検証によって、オーバーシュート現象の再現シミュレーションの精度を確認して、オーバーシュート発生メカニズムを検証する。

(8) 強風観測記録から高突風率の風速記録の選別と、風速値と風速立ち上がり時間に関する突風情報の分類整理

研究代表者は所管の電力会社との共同研究において九州地区の広域風観測ネットワーク(NeWMeK, 図10)を1995年から運用している。これまで蓄積された台風や季節風による強風記録から、自然風中での急変する風速変化の立ち上がり時間に関する定量的分類・分析を行って実際の強風下での風力のオーバーシュート現象発生の可能性を明らかにする。

(9) 以上の成果を再整理して、本研究を総括し、突風による建物被害の発生に及ぼす風力のオーバーシュート現象の関連度を検証する。

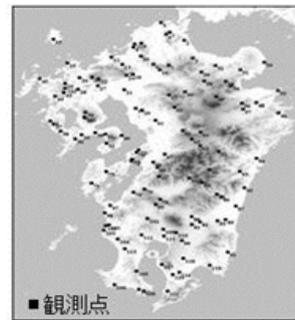


図10 NeWMeK観測点の配置

4. 研究成果

(1) 現有風洞装置を改良して、無風時から0.2~5秒程度で立ち上がるステップ関数型の突風を生成できること、また一定風速からの立ち上がりも同様の仕様を実現できることを確認した。

(2) 疑似床板を使用することによって風洞内の静圧変動の影響を回避し、試験体の揚力を空力天秤の F_y 信号から高精度に測定できることを確認した。

(3) 突風時に風洞内に発生する圧力勾配に対処するために開発した「ピトー孔アレー板(静圧孔板)」の圧力孔を試験体表面測定点の直上に配列することによって、突風下での試験

体表面圧力を高精度に計測する実験手法を確立した。

(4) 試験体表面圧の測定に使用する圧カバルブのチューブ長さによって風圧力のピーク値が変化し、チューブ長さ 2000mm では約 10%程度、風圧力のピーク値を過小に評価することがわかった。実験計測の周辺状況を考慮してチューブ長さ 2000mm で実験を実施し、チューブ長さの影響を最終評価に反映させた。

(5) 突風風速、立ち上がり時間、試験体寸法などを組み合わせた突風条件下で軒先に丸みを与えた陸屋根形状試験体（車両形状模型）の揚力と抗力の測定を行い、以下の知見を得た。（図 11）

① 突風風速と立ち上がり時間の組合せによっては、抗力と揚力がともに瞬間的に定常時の数倍の風力値を示す。

② 突風時の最大風力は定常値の倍数「オーバーシュート係数」で整理できる。

③ 試験体寸法と突風風速および立ち上がり時間で構成した「無次元立ち上がり時間」でオーバーシュート係数を体系化できる。

④ 「風力のオーバーシュート」は、10~20 以下の無次元立ち上がり時間に相当する突風下で発生するが、揚力の方がより大きなオーバーシュート係数を示す。

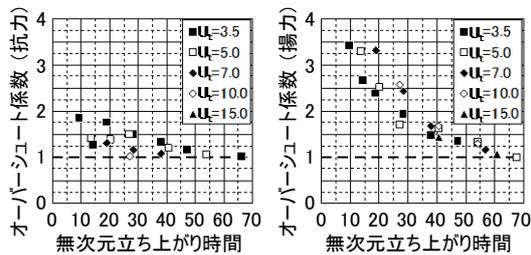


図 11 陸屋根模型の風力のオーバーシュート係数

(6) 円形・矩形の基本断面柱の突風下の抗力のオーバーシュート現象を確認し、無次元立ち上がり時間で整理したオーバーシュート係数は、ほぼ同一パターンを示すが、形状によってその値が変化することがわかった。（図 12）

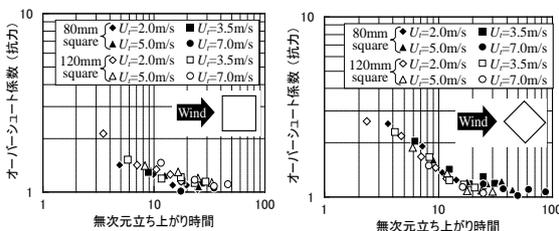


図 12 基本断面柱のオーバーシュート係数

(7) 風力と同様に、突風下での切妻屋根試験体の局部風圧力にもオーバーシュート現象が現れることを確認し、以下の知見を得た。

① 突風風力の整理に用いた無次元量「オーバーシュート係数」の風圧力への拡張は定常風圧力が小さい場合には不具合があり、オーバーシュート風圧力を定常速度圧で除した「オーバーシュート風圧係数」が適している。

② 表面圧力のオーバーシュートは試験体表面の部位で異なり、各部位の最大風圧力の発現時刻が異なる場合がある。

③ 試験体の風上正面壁の正のピーク風圧と風下背面壁の負のピーク風圧の相乗効果が大きなオーバーシュート風力の発生理由である。

④ 切妻屋根試験体では、平壁面から突風を受ける場合の方が、屋根面の風圧力のオーバーシュート現象がより顕著である。

(8) 一定風速からの楕円断面柱の風力のオーバーシュート現象を無次元立ち上がり時間で精査したところ、抗力では突風風速の 50% ぐらいまでの開始(初期)風速で、また揚力では突風風速の 20% ぐらいまでの開始(初期)風速で、無風時からの状態と大きな差がない。（図 13）

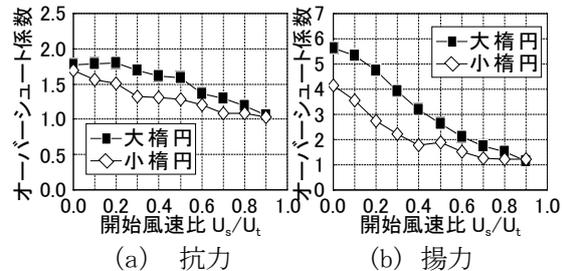


図 13 開始風速比によるオーバーシュート係数の変化

(9) 試験体周りの数値流体解析を行い、以下の知見を得た。（図 14, 図 15）

① 1 以下の無次元立ち上がり時間の突風下では、流体の慣性力が風力増大の大きな要因になるが、自然界の突風の無次元立ち上がり時間(10~20 程度)では、物体の後流域に発生する渦発生の時間差の影響が強い。

② 突風が試験体に作用した直後には、ポテンシャル流での圧力場が生成され、引き続いて後流域において定常時より大きな渦が生成され、これに伴う圧力域の大きさがオーバーシュート発生の主因である。

③ 数値乱流モデルでは、k-ε モデルが実験結果に良く対応するが、計算機のメモリ空間を

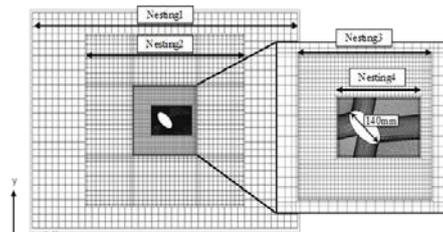


図 14 楕円断面柱周りの流体解析のメッシュ分割

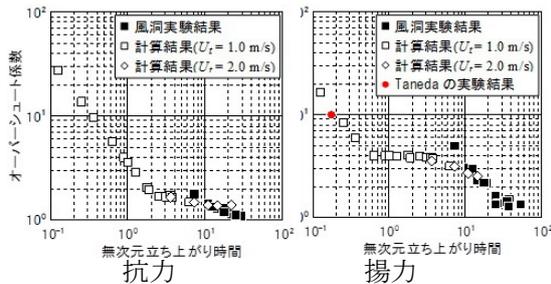


図15 楕円断面柱の数値計算結果と実験結果の比較

増大し、物体周辺流れ場の要素分割数を拡大していけば、乱流モデルによる差は小さくなり、いずれも実験結果に近づく。

(10) 九州での広域強風観測記録を利用して、台風時と非台風時での突風によるオーバーシュート風力を発生させる相当風速の統計特性を整理して、鉄道車両程度の大きさの物体のオーバーシュート風力の発生頻度を分析し、以下の所見を得た。(図 16, 図 17)

① 台風時と季節風時とで突風発生 の頻度に大きな差異はないが、低風速の突風が多い季節風時の方がオーバーシュート現象の発現回数が多い。

② 1998 年の非台風及び 2003 年台風 6 号に注目して強風時に抽出した突風の性状を比較検討したところ、非台風による突風に比べて台風に伴う突風の風速の方がより短時間に变化する傾向がある。

③ 電車車両規模の物体に作用する風力の試算式を誘導した。超過確率 10%で推定した突風風速による風力は、実風速での風力値より抵抗力で 10%程度、揚力で 20%程度の大きな突風風力を受けていることがわかった。

(11) 以上の結果から、同じ風速でも立ち上がり時間の短い突風ほど、また規模の大きな構造物ほど、より高い風速でもオーバーシュート現象の発現の可能性が高いことがわかった。木造や軽量鉄骨などの非工学的建物だけ

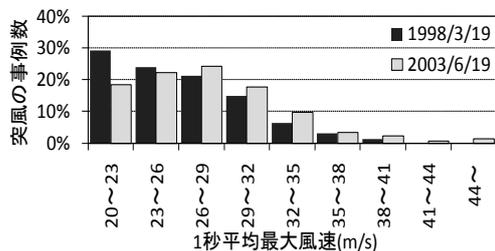


図 16 1 秒平均風速の最大値の頻度分布

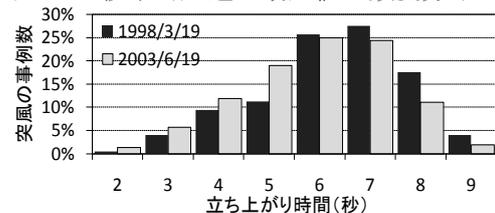


図 17 選出した突風の立ち上がり時間の頻度分布

でなく、一般建物の葺き材や外装材に突風被害を誘発している可能性が高いと言える。本研究課題の遂行中に発生した 2012 年 5 月のつくば市を中心にした竜巻による突風被害はわが国最大規模の突風風速が推定されているが、竜巻の移動速度は時速 60km 以上と言われ、竜巻に直撃された建物には立ち上がり時間が数秒の突風による風力の増大現象が発生して被害を拡大した可能性が高い。

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 15 件)

- ① 大坪和広, 友清衣利子, 鶴則生, 前田潤滋, 立ち上がり時間の短い突風を受ける切妻屋根形状物体の風力特性に及ぼす屋根勾配の影響, 都市・建築学研究 九州大学大学院人間環境学研究院紀要, 第 23 号, 査読有, 2013, pp.21-26. DOI コード及び URL なし
- ② 友清衣利子, 前田潤滋, 野方香里, 竹内崇, 観測突風の統計的評価と車輻形状物体のオーバーシュート風力の試算, 第 22 回風工学シンポジウム論文集, 査読有, 2012, pp.13-18. DOI コード及び URL なし
- ③ 竹内崇, 前田潤滋, ステップ関数的突風を受ける物体のオーバーシュート風力-基本形状物体に作用する非定常抵抗力の実験的検討-, 日本建築学会構造系論文集, 第 77 巻第 681 号, 査読有, 2012, pp.1629-1635. DOI コード及び URL なし
- ④ Takashi Takeuchi, Junji Maeda, Kazuhiro Otsubo, Yasuyuki Shuto, Unsteady wind force on an elliptic cylinder subjected to a short-rise-time gust from steady flow, Proc. of 7th Int. Colloquium on Bluff Bodies Aerodynamics & Applications (BBAA VII), 査読有, 2012, pp.621-630. DOI コード及び URL なし
- ⑤ Eriko Tomokiyo, Kazuhiro Otsubo, Junji Maeda, Yasuyuki Shuto, CFD Prediction of gusty winds corresponding to observed values around mountainous terrain, Proc. of 7th Int. Colloquium on Bluff Bodies Aerodynamics & Applications (BBAA VII), 査読有, 2012, pp.1971-1880. DOI コード及び URL なし
- ⑥ Eriko Tomokiyo, Junji Maeda, Influencing factors on strong wind induced damage under quantified structural conditions of houses, Proceedings of 13th Int. Conf on Wind Engineering (ICWE13), 査読有, 2011, DOI コード及び URL なし
- ⑦ Takashi Takeuchi, Junji Maeda, Satoshi Nakamura, Wind pressure measurement of

a flat roof body under a rapid change of reference static pressure in a gust wind tunnel, Proc. of 13th Int. Conf. on Wind Engineering (ICWE13), 査読有, 2011, DOI コード及び URL なし

- ⑧ 友清衣利子, 前田潤滋, 竹内崇, オーバーシュート風力の発生に着目した突風性状の選別, 第21回風工学シンポジウム論文集, 査読有, 2010, pp.179-184. DOI コード及び URL なし
- ⑨ 竹内崇, 前田潤滋, ステップ関数的突風を受ける楕円柱の非定常風力特性に及ぼす流れの慣性力の影響, 第21回風工学シンポジウム論文集, 査読有, 2010, pp.185-190. DOI コード及び URL なし
- ⑩ 中村諭史, 前田潤滋, 竹内崇, 鶴則生, 突風風洞での基準静圧変動を考慮した圧力計測による切妻屋根物体の表面風圧特性, 第21回風工学シンポジウム論文集, 査読有, 2010, pp.197-202. DOI コード及び URL なし
- ⑪ Takashi Takeuchi, Junji Maeda, Effects of inertia force proportional to flow acceleration on unsteady wind forces acting on an elliptic cylinder under short-rise-time gusts, Proc. of The 5th Int. Symposium for Computational Wind Engineering (CWE), 査読有, 2010, DOI コード及び URL なし
- ⑫ (招待論文) 友清衣利子, 前田潤滋, 竹内崇, 風速の立ち上がり時間に着目した突風の性状, 日本風工学会誌, 第35巻第2号, 査読無, 2010, pp.118-123. DOI コード及び URL なし
- ⑬ (招待論文) 前田潤滋, 竹内崇, 非定常空気力特性の実験的解明—その1 突風作用時の非定常空気力特性, 日本風工学会誌, 第35巻第2号, 査読無, 2010, pp.124-129. DOI コード及び URL なし

[学会発表] (計 23 件)

- ① 野方香里, 友清衣利子, 前田潤滋, 風観測記録にみる立ち上がり時間の短い突風の発生統計 その1 九州域における突風の統計的特性, 日本建築学会大会(東海), 2012年9月13-14日, 名古屋大学(愛知).
- ② 友清衣利子, 野方香里, 前田潤滋, 風観測記録にみる立ち上がり時間の短い突風の発生統計 その2 切妻屋根形状物体に作用するオーバーシュート風圧力の推計, 日本建築学会大会(東海), 2012年9月13-14日, 名古屋大学(愛知).
- ③ (招待講演) 前田潤滋, 突風に特有な風力の性質, 日本風工学会, 2011年12月7日, 日本大学(東京).
- ④ 竹内崇, 石野智慎, 鶴則生, 前田潤滋, 一定風速からの風速急変場の楕円断面柱に

作用する非定常風力に関する考察—その1 風洞実験による非定常風力特性の検討, 日本建築学会大会(関東), 2011年8月24日, 早稲田大学(東京).

- ⑤ 石野智慎, 竹内崇, 鶴則生, 前田潤滋, 一定風速からの風速急変場の楕円断面柱に作用する非定常風力に関する考察—その2 数値流体計算による非定常風力の発生メカニズムの検討, 日本建築学会大会(関東), 2011年8月24日, 早稲田大学(東京).
- ⑥ Takashi Takeuchi, Junji Maeda, Unsteady wind pressure on a flat roof body under a short-rise-time gust, 5th Int Symp on Wind Effects on Buildings and urban Environment, 2011年3月8日, ホテルサンルート新宿(東京).
- ⑦ 友清衣利子, 前田潤滋, 竹内崇, オーバーシュート風力の発生に着目した無風状態からの急激な突風の性状, 台風などの強風の予測と災害発生機構の解明および低減策に関する研究集会, 2011年1月12日, 京都大学防災研究所(京都).
- ⑧ 中村諭史, 竹内崇, 前田潤滋, 鶴則生, 突風時の基準静圧変動を考慮した圧力計測による建築物の表面風圧特性 — その1 実験概要, 日本建築学会大会(北陸), 2010年9月10日, 富山大学(富山).
- ⑨ 竹内崇, 中村諭史, 前田潤滋, 鶴則生, 突風時の基準静圧変動を考慮した圧力計測による建築物の表面風圧特性 — その2 実験結果, 日本建築学会大会(北陸), 2010年9月10日, 富山大学(富山).
- ⑩ 友清衣利子, 前田潤滋, 竹内崇, 風速の立ち上がり時間に着目した突風の選定, 日本建築学会大会(北陸), 2010年9月10日, 富山大学(富山).
- ⑪ Takashi Takeuchi, Junji Maeda, Unsteady wind forces on a body subjected to short-rising gust, The 5th Korea-Japan Joint Meeting in Wind Engineering, 2010年9月6日, Soongsil University(韓国).
- ⑫ 前田潤滋, 竹内崇, 非定常空気力特性の実験的解明, その1 突風作用時の非定常空気力特性, 平成22年度日本風工学会年次研究発表会, 2010年5月20日, 東京大学(東京).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前田 潤滋 (MAEDA JUNJI)
九州大学・人間環境学研究院・教授
研究者番号: 40128088

(2) 研究分担者

友清 衣利子 (TOMOKIYO ERIKO)
九州大学・人間環境学研究院・助教
研究者番号: 30346829

(3) 連携研究者 なし