

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 8 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26282112

研究課題名(和文) 竜巻通過時に急変する風速と気圧降下との相乗効果による建物の破損プロセス

研究課題名(英文) Damage process of buildings due to the synergistic effect of the rapidly changing wind speed and atmospheric pressure drop caused by a tornado

研究代表者

前田 潤滋 (MAEDA, Junji)

九州大学・人間・環境学研究科(研究院)・名誉教授

研究者番号：40128088

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：急変する大気圧降下を再現する新たな実験システムを構築し、建物内外の差圧力が竜巻被害のメカニズムに及ぼす影響の解明に取り組んだ。突風による風力のオーバーシュートは建物との風向で変化するが、気圧急降下による建物差圧力とともに数値流体解析での再現が可能になった。その手順を実際の竜巻被害に適用して建物破損メカニズムを追跡し、推定した竜巻風速の評価値がこれまでより低い値になることを示した。さらに強風観測記録の統計分析から、オーバーシュート風力の発生の確率モデルを論証した。

研究成果の概要(英文)：A new experimental system to make a sudden drop of atmospheric pressure was constructed and the influence of a pressure difference between the inside and outside of a building on the mechanism of tornado damage was clarified. The magnitude of the differential pressure is affected by the descent speed of the outside pressure and the sealing degree of the building, and the sealing degree is governed by the ratio of the building volume and the clearance area. The differential pressure force on the building due to the rapid pressure drop as well as a overshoot wind force caused by gusts can be reproduced by a numerical fluid analysis. The procedure was applied to actual tornado damage to trace the damage mechanism of the building and showed that the estimated value of the tornado wind speed becomes lower than before. Furthermore, by a statistical analysis of strong wind observation records, the probabilistic model of the occurrence of the overshoot wind force was demonstrated.

研究分野：耐風工学

キーワード：竜巻被害 気圧急変 突風の非正常性 風力のオーバーシュート 竜巻外力

1. 研究開始当初の背景

(1) 竜巻の強さの指標に用いられる「藤田スケール」は主に建物の被害程度に対応する風速を推定する。米国では2007年からより実態に近いとされる改良版のFujita scaleが使われており、わが国でも気象学や風工学の知見の基に「日本版改良藤田スケール」の準備が進められ、2016年4月の運用を目指した。

(2) 「日本版改良藤田スケール」では建物破損のシナリオに準定常状態に相当する水平風速のみを当てはめており、竜巻通過時に数十秒で立ち上がる風速増加による風力のオーバーシュート現象や急変する大気圧降下による室内外の差圧力を考慮していない。被害状況が竜巻の高風速による風力や風圧力だけでは説明できないことが少なからず存在し、2012年の茨城・栃木両県や2013年9月の埼玉・千葉・栃木・群馬県などでは、竜巻が直撃する瞬間の状況を捉えた動画がその証左として携帯ビデオや防犯ビデオ等で多数残された。

(3) 風速と気圧の急激な変化を竜巻の強さの評価に取り入れ難い実態は竜巻風速や竜巻中心気圧の観測データの取得の難しさに理由があるが、このような急激な変化の再現実験への着想の欠如も関係している。竜巻による気圧降下は50hPa程度と言われるが、海外では十数秒内で100hPaの気圧降下の観測が僅かながら報告されており、米国では、原子力関連施設の設計に200hPaの気圧差による力を想定した検討の必要性が示されている。

2. 研究の目的

竜巻通過時の急変する突風風速と周辺大気圧の急激な降下との相乗現象を風洞実験と数値流体解析で時系列的に明らかにし、建物壁面外装材や屋根部、さらに建物本体の破損プロセスのシナリオを新たな“竜巻外力の評価手順”で組み立てることによって、都市や建物への竜巻被害の軽減施策に寄与しようとするものである。(図1)

3. 研究の方法

(1) 急変する突風発生時での住家模型室内外の気圧変化を模型の風力と共に実験計測を行い、測定値を数値流体解析での再現精度の検討データとして活用し、実験状況以外での建物の風力と周辺気圧の相互作用を検証できる体制を構築する。

(2) 移動式竜巻シミュレータ(風洞実験)と竜巻モデル解析(数値流体解析)によって竜巻の時空間情報(風速分布と気圧分布の時系列情報)を整理し、竜巻移動時の突風風力と気圧差力が及ぼす突風風力の影響を明らかにする。

(3) 突風の観測記録の統計分析を行い、実構造物のための実験結果の実スケール化を無次元パラメータによる相似則を用いて行う。

(4) 竜巻被害の実例を選出し、突風風力と大気圧急変の相乗効果の観点に基づく竜巻外力による被害建物の破損プロセスの解明に

利用できる突風風力の評価手順を提示する。

4. 研究成果

(1) 気圧急変システムの構築とこれを使った気圧差力の検討

突風風洞装置を利用して、無風時環境下で気圧の急変を実現するシステム(図2)を完成した。突風風洞内に建物模型を覆う防風箱を作成して(図3)、この内部に置いた建物模型の容積に対する隙間の割合(開口率)を変えて、発生する差圧力の性状を調べ、以下の所見を得た。

① 開口率が小さくなると最大瞬間差圧力は大きくなる。

② 模型容積と開口面積を変化させても、開口率が同じであれば、模型内圧の変動はほとんど変化せず、内圧変動の大きさは開口率で定まると考えられる。

③ 開口率の影響を再現する数値計算モデルを構築し、実験結果を再現した。(図4)

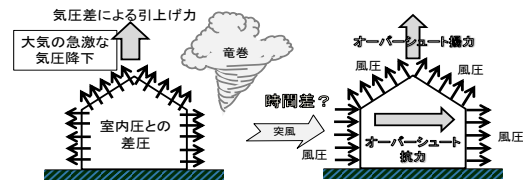


図1 急激な風速変化と大気圧降下

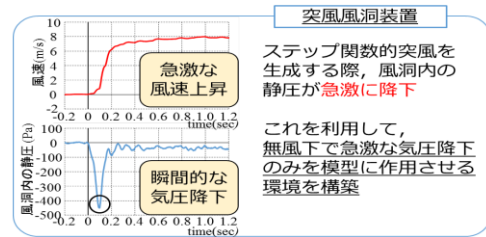


図2 突風生成時の気圧変化

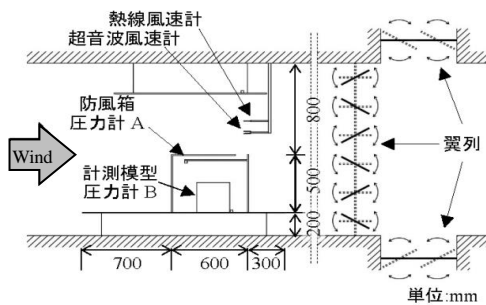


図3 気圧降下生成のための模型装置

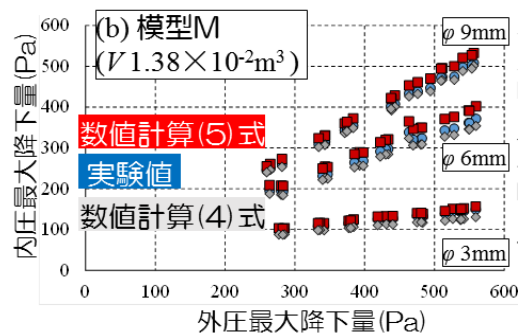


図4 外圧降下に対する内圧最大降下量

(2) 竜巻シミュレータと竜巻モデル解析による空間構造のモデル化とその影響の検討
 移動式竜巻シミュレータと LES 解析とによって、移動状態の竜巻状流れを最大接線風速とコア半径およびスワール比に注目して以下の知見を得た。
 ① 地表付近の渦中心は竜巻の移動方向の反対方向に移動し、台風の危険半円に相当する、静止竜巻の風速場+移動速度以上の風速が発生している。
 ② 上昇流孔半径の違いが1セル型と2セル型の竜巻状流れの発現を左右している。
 ③ 竜巻通過時の地表付近の任意の点における風速・圧力の時刻歴変化を求めることができるようになった。
 ④ 竜巻シミュレータおよび LES 解析による突風風速の再現を行い、周辺気圧分布と突風風速成分を考慮した竜巻の内部構造のモデル化を検討した。(図 5)
 ④ 一例として、送電鉄塔に接近通過する竜巻の時刻歴応答のパラメータスタディを行い、同じ最大風速を有していても、竜巻風速分布の数学モデルが鉄塔の変形量に強く影響することを示した。(図 6)

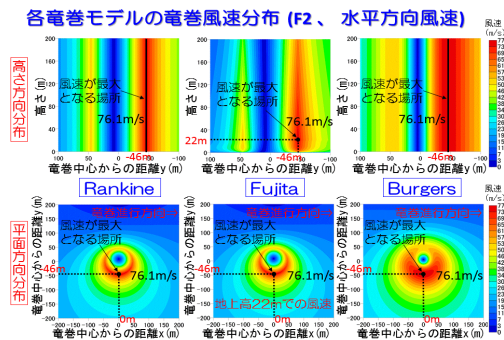


図 5 モデル別の竜巻の内部構造

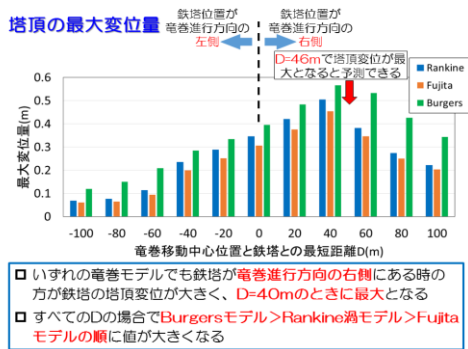


図 6 送電鉄塔の竜巻に対する変形算定例

(3) 実観測に見るオーバーシュート風力の発生状況
 九州に配置された風観測システム NeWMeK (図 7) での、2009 年から 2013 年までの 1 秒観測記録から幅 3m 程度の車両形状物体にオーバーシュート風力を発生させる立ち上がり時間の短い突風を選出し、その統計的特徴を分析して以下の所見を得た。

① 非定常風力を作用させる可能性は突風発生回数の 0.25% 程度、発生頻度は Fechet 分布で表される。
 ② 確率密度分布からオーバーシュート風力を求め、同じ風速であっても定常風力の 1.1 倍となる。
 ③ 同期間の気象官署、アメダスでの 10 分間観測記録の特徴を整理し、NeWMeK での観測値との比較結果をもとに観測点が全国にある気象官署等での 10 分間観測記録から突風を選出できる可能性を示した。

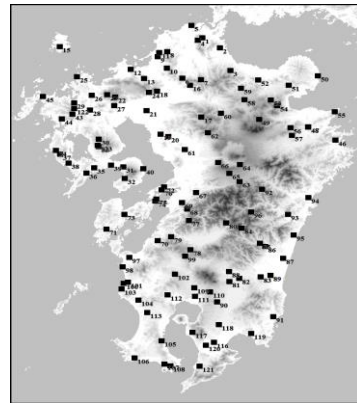


図 7 NeWMeK 観測点配置

(4) 竜巻通過時の突風風力と建物破損プロセスに影響する竜巻外力形成の検討
 ① 突風風速の風向角に注目して、立ち上がり時間の短い突風を受ける物体周りの非定常流れの数値計算を行い、LES モデルを用いた計算結果が風洞実験に見られるオーバーシュート風力を再現することを確認した。
 ② 建物周りの流れの発達過程を調べ、非定常風力の発生メカニズムの解明を行った。
 ③ 建物に対する風向角に着目して実験と数値解析を行い、主として棟方向に対する 45° の風向の時にオーバーシュート現象が顕著になることがわかった。
 ④ 「気圧差力」を考慮した竜巻被害風速の算定例を、2012 年のつくば市竜巻被害で見られた木造家屋の転倒風速の算定に適用し、急変する気圧降下の経時変化の算定例(図 8)を示し、被害風速の評価値と竜巻の強さの判定(藤田スケール)に強く影響することを示した。

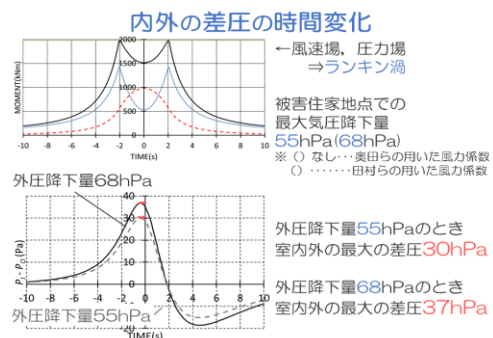


図 8 竜巻通過時の建物内外の差圧変化の例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計29件)

- ① Takashi TAKEUCHI, Junji MAEDA, Ryota KAWAKAMI, Naohiro TAKEUCHI, Effects of Wind Direction and Roof Shape on Unsteady Wind Pressure on a Low Rise Building under a Short-rise-time Gust, Proceedings of 8th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications, 査読有, 2016, 9pages, DOI および URL 無
- ② Minoru Noda, Minoru Hachiya, Fumiaki Nagao, Visualization of Tornadoes by Funnel and Debris Clouds, Proceedings of 28th Conference on Severe Local Storms, 査読有, 2016, 4 pages, DOI および URL 無
- ③ Takashi TAKEUCHI, Junji MAEDA, Ryota KAWAKAMI, Kazuhiro OTSUBO, Naohiro TAKEUCHI, Unsteady Wind Pressure on A Low Rise Building Under A Short-Rise-Time Gust, Proceedings of 6th U.S.-Japan Workshop on Wind Engineering, 査読無, 2016, 10 pages, DOI および URL 無
- ④ 友清衣利子, 前田潤滋, NeWMeK で選出された立ち上がり時間の短い突風の特性を利用したアメダスおよび気象官署観測記録から同様の突風を選出する試み, 第24回風工学シンポジウム論文集, 査読有, 2016, pp.1-6, DOI および URL 無
- ⑤ 野田稔, 八谷実, 長尾文明, 漏斗雲の見え方と竜巻パラメータとの関係性について, 第24回風工学シンポジウム論文集, 査読有, 2016, pp.93-102, DOI および URL 無
- ⑥ 川上綾太, 大坪和広, 前田潤滋, 竹内崇, 友清衣利子, 建物のオーバーシュート風圧力に及ぼす風向角の影響に関する実験的研究, 第24回風工学シンポジウム論文集, 査読有, 2016, pp.199-204, DOI および URL 無
- ⑦ 泉知宏, 高橋駿介, 友清衣利子, 前田潤滋, 急激な気圧効果による建物内外の気圧差力に及ぼす建物密閉度の影響, 第24回風工学シンポジウム論文集, 査読有, 2016, pp.205-210, DOI および URL 無
- ⑧ 野田稔, 八谷実, 長尾文明, 竜巻状流れの幾何学的スケールが飛散物の飛行特性に及ぼす影響, 第24回風工学シンポジウム論文集, 査読有, 2016, pp.259-264, DOI および URL 無
- ⑨ 大坪和広, 前田潤滋, 風速急変に因る切妻屋根建物のオーバーシュート風力と圧力分布の関係, 日本風工学会論文集第40巻第3号(通号第144号), 査読有, 2015, pp.74-81, DOI および URL 無
- ⑩ Takashi Takeuchi, Junji Maeda, EFFECTS OF WIND DIRECTION ON PROPERTIES OF UNSTEADY WIND PRESSURE ON A GABLE ROOF BODY UNDER A SHORT-RISE-TIME GUST, Proceedings of 14th International Conference on Wind Engineering, 査読有, 2015, 9 pages, DOI および URL 無
- ⑪ Minoru Noda, Rikiya Okamoto, Daisuke Yamanaka, Kenji Hosoya, Fumiaki Nagao, Visualization of Tornadoes Based on Characteristics of Funnel Clouds and Flying Debris, Proceedings of 14th International Conference on Wind Engineering, 査読有, 2015, 10 pages, DOI および URL 無
- ⑫ 高橋駿介, 美並浩成, 大坪和広, 鶴則生, 前田潤滋, 竜巻による急激な気圧低下が及ぼす建物室内外の非定常な気圧差力, 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28号, 査読有, 2015, pp.41-46, DOI および URL 無
- ⑬ 石崎翔, 田村直哉, 竹村明人, 石田伸幸, 森本康幸, 前田潤滋, 台風時の強風域内で発生する竜巻に対する送電鉄塔の応答に及ぼす架渉線の影響, 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28号, 査読有, 2015, pp.35-40, DOI および URL 無
- ⑭ 前田潤滋, 丸山敬, 野田稔 (7番目), 友清衣利子 (9番目), 竹内崇 (10番目), 建物等構造要素毎の被害評価による竜巻等の突風風速推定指標の策定 京都大学防災研究所年報 第58号B, 査読無, 2015, pp.211-220
- ⑮ Tomikiyo Eriko, Maeda Junji, Tamura Naoya, Takemura Akito, CFD analysis of local winds associated with typhoon around mountainous terrain considering potential temperature gradient, Proceedings of 6th International Symposium on Computational Wind Engineering, 査読有, 2014, 8pages
- ⑯ Kazuhiro Otsubo, Junji Maeda, Takashi Takeuchi, Effects of roof-pitch on the overshoot wind force acting on a gable roof structure under a

- short-rise-time gusty wind, Proceedings of 6th International Symposium on Computational Wind Engineering, 査読有, 2014, 6pages
- ⑰ Takashi Takeuchi, Junji Maeda, Kazuhiro Otsubo, Numerical investigation of a flow development around an elliptic cylinder subjected to short-rise-time gusts, Proceedings of 6th International Symposium on Computational Wind Engineering, 査読有, 2014, 8pages
- ⑱ Minoru Noda, Masai Kazuhito, Ninomiya Megumi, Fumiaki Nagano, Behavior of flying debris in tornado-like flow, Proceedings of 6th International Symposium on Computational Wind Engineering, 査読有, 2014, 8pages
- ⑲ 石崎翔, 高橋正名, 大坪和広, 鶴則生, 前田潤滋, 一定風から立ち上がる突風による切妻屋根表面の風圧力分布特性, 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 26 号, 査読有, 2014, pp. 29-34
- ⑳ 高橋駿介, 大坪和広, 鶴則生, 前田潤滋, 三次元形状屋根模型の突風風力計測システムの構築, 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 26 号, 査読有, 2014, pp. 35-40
- 21 高瀬賢佑, 前田潤滋, 大坪和広, 被害風速に及ぼす移動が早い竜巻通過時の急激な気圧降下の影響, 第 23 回風工学シンポジウム論文集, 査読有, 2014, pp. 157-162
- 22 石崎翔, 前田潤滋, 大坪和広, 高橋正名, 一定風から立ち上がる突風下での切妻屋根建物の風圧力分布に関する風洞実験, 第 23 回風工学シンポジウム論文集, 査読有, 2014, pp. 229-234
- 23 大坪和広, 前田潤滋, 田村直哉, 高橋駿介, 友清衣利子, 切妻屋根建物の突風風圧力分布に及ぼす屋根勾配の影響, 第 23 回風工学シンポジウム論文集, 査読有, 2014, pp. 235-240
- 24 竹内崇, 前田潤滋, 立ち上がり時間の短い突風下の切妻屋根建物に作用する非定常風圧力に及ぼす風向角の影響に関する研究, 第 23 回風工学シンポジウム論文集, 査読有, 2014, pp. 247-252
- 25 野田稔, 森一樹, 長尾文明, 移動式トルネードシミュレータによる竜巻状流れ場の研究, 第 23 回風工学シンポジウム論文集, 査読有, 2014, pp. 445-450
- 26 野田稔, 二宮めぐみ, 長尾文明, マルチファン・マルチベーンを備えた竜巻シミュレータの開発, 日本風工学会論文集, 第 39 巻, 査読有, 2014, pp. 13-16
- 27 Minoru Noda, Ninomiya Megumi, Masai Kazuhito, Fumiaki Nagao, Experimental and Numerical Approach to Tornado-like Flow, Proceedings of COMPSAFE2014, Sendai, 査読有, 2014, pp. 13-16
- [学会発表] (計 4 3 件)
- ① 野田稔, 八谷実, 長尾文明, 竜巻の強さや規模と漏斗雲の形の関係, 日本流体力学会年会 2016, 2016 年 9 月 26 日～28 日, 名古屋工業大学御器所キャンパス(愛知県・名古屋市)
- ② 川上綾太, 大坪和広, 竹内崇, 友清衣利子, 前田潤滋, ステップ関数的突風を受ける住宅の非定常風圧力特性に及ぼす風向角の影響に関する研究(その 1 切妻屋根建物に対する実験的検討), 日本建築学会大会(九州), 2016 年 8 月 26 日, 福岡大学七隈キャンパス(福岡県・福岡市)
- ③ 川上綾太, 大坪和広, 竹内崇, 友清衣利子, 前田潤滋, ステップ関数的突風を受ける住宅の非定常風圧力特性に及ぼす風向角の影響に関する研究(その 2 屋根面のオーバーシュート風圧係数の分布に及ぼす風向角と屋根形状の影響), 日本建築学会大会(九州), 2016 年 8 月 26 日, 福岡大学七隈キャンパス(福岡県・福岡市)
- ④ 竹内直広, 川上綾太, 竹内崇, 大坪和広, 友清衣利子, 前田潤滋, 孫玉平, ステップ関数的突風を受ける住宅の非定常風圧力特性に及ぼす風向角の影響に関する研究(その 3 数値流体計算による検討), 日本建築学会大会(九州), 2016 年 8 月 26 日, 福岡大学七隈キャンパス(福岡県・福岡市)
- ⑤ 友清衣利子, 前田潤滋, 確率密度関数による立ち上がり時間の短い突風およびオーバーシュート風力の評価, 日本建築学会大会(九州), 2016 年 8 月 26 日, 福岡大学七隈キャンパス(福岡県・福岡市)
- ⑥ 泉知宏, 高橋駿介, 大坪和広, 友清衣利子, 前田潤滋, 急激な外気圧降下が及ぼす非定常な建物内圧変動 その 1 風洞実験による開口率の影響の検討, 日本建築学会大会(九州), 2016 年 8 月 26 日, 福

- 岡大学七隈キャンパス(福岡県・福岡市)
- ⑦ 高橋駿介, 泉知宏, 大坪和広, 友清衣利子, 前田潤滋, 急激な外気圧降下が及ぼす非定常な建物内圧変動 その2 2種類の数値計算による実験内圧変動の検討, 日本建築学会大会(九州), 2016年8月26日, 福岡大学七隈キャンパス(福岡県・福岡市)
 - ⑧ 野田稔, 八谷実, 西村公成, 長尾文明, 水平シアによって生じた竜巻状流れ場の構造と漏斗雲の生成, 日本流体学会年会2015, 2015年9月27日, 東京工業大学(東京都・目黒区)
 - ⑨ 美並浩成, 高橋駿介, 大坪和広, 鶴則生, 前田潤滋, 竜巻通過時の急激な気圧降下による建物作用外力, その1 急激な気圧降下実験システムの構築, 日本建築学会大会(関東), 2015年9月5日, 東海大学湘南キャンパス(神奈川県・平塚市)
 - ⑩ 高橋駿介, 美並浩成, 大坪和広, 鶴則生, 前田潤滋, 竜巻通過時の急激な気圧降下による建物作用外力, その2 数値計算による実験内圧変動の検討, 日本建築学会大会(関東), 2015年9月5日, 東海大学湘南キャンパス(神奈川県・平塚市)
 - ⑪ 高瀬賢佑, 大坪和広, 前田潤滋, 住家の転倒風速推定に及ぼす竜巻渦モデルと風向変化の影響, 日本建築学会大会(関東), 2015年9月5日, 東海大学湘南キャンパス(神奈川県・平塚市)
 - ⑫ 竹内崇, 前田潤滋, 立ち上がり時間の短い突風下の建物に作用する非定常風圧力に及ぼす屋根形状の影響, 日本風工学会年次発表会, 2015年5月27日, 徳島大学常三島キャンパス(徳島県・徳島市)
 - ⑬ 高瀬賢佑, 大坪和広, 前田潤滋, 建物の転倒風速推定に及ぼす竜巻気圧降下の影響, 日本建築学会大会(近畿), 2014年9月12日, 神戸大学(兵庫県・神戸市)
 - ⑭ 森一樹, 野田稔, 長尾文明, LESによるIOWA型トルネードシミュレータの再現, 土木学会年次学術講演会, 2014年9月11日, 大阪大学(大阪府・吹田市)

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・名誉教授
研究者番号: 40128088

(2) 研究分担者

野田 稔 (NODA, Minoru)
徳島大学・理工学研究部・准教授
研究者番号: 30283972

友清 衣利子 (TOMOKIYO, Eriko)
熊本大学・先端科学研究部・准教授
研究者番号: 30346829

竹内 崇 (TAKEUCHI, Takashi)
神戸大学・工学研究院・助教
研究者番号: 80624395