

平成 30 年 5 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04071

研究課題名(和文) 非定常ダウンバーストシミュレータの開発とその建築物風荷重・耐風性能評価への応用

研究課題名(英文) Development of a downburst simulator and its application to wind resistant design of buildings

研究代表者

植松 康 (Uematsu, Yasushi)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：60151833

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：フロア(直径0.6m)を一定速度(最大2m/s)で移動させながら指定した場所で瞬発的噴を発生させることができるダウンバーストシミュレータを完成させた。これにより、静止した状態で瞬発的噴流を発生させる「噴流ダウンバースト」、定常的な噴流が一定速度で移動する「移動ダウンバースト」、送風機が一定速度で移動しながら瞬発的な噴流を発生させる「移動・噴流ダウンバースト」を再現することが可能となった。これを用い、3種類のダウンバーストによって生じる地表面近傍の最大瞬間風速分布や建物に作用する非定常風圧の分布特性を把握した。

また、それらを再現できるCFDモデルの開発を行い、詳細な分布特性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)： Downburst wind field and downburst-induced wind loads on a flat-roofed low-rise building have been investigated experimentally by using a downburst simulator that we developed. The downburst simulator consists of a blower of 0.6 m diameter that can move horizontally at a constant speed up to 2 m/s and a shutter-type opening installed above the outlet of the blower. The simulator can generate a pulsed jet and a moving draft either separately or simultaneously. Using this simulator, the flow structure in the downburst were first measured under various conditions. Then, non-stationary wind pressures and wind forces acting on the building were measured. The results indicate that they are significantly different from those of turbulent boundary layers.

A CFD model that can reproduce the wind field of downburst has been developed. Using this CFD model, we can investigate the downburst-induced flow fields and pressures on buildings in detail.

研究分野：建築構造学

キーワード：ダウンバースト シミュレーター 風荷重 非定常 実験 数値流体計算

1. 研究開始当初の背景

近年、我が国では竜巻やダウンバースト(発達した積乱雲の下に発生する下降流で、局地的・短時間に上空から地上に吹く極端に強いもの)など突風による災害が頻発し、多くの被害を引き起こしている。2012年つくば市(F3)や2013年越谷市(F2)で発生した竜巻による甚大な被害は記憶に新しく、つくば市では1870棟以上の建物等が被害を受け、国内過去最大規模の突風災害となった。

突風による被害は建物や工作物、樹木などの自然物、更には車両など広範囲に及ぶ。突風の性状とそれにより構造物に作用する風圧・風力の性状を把握し、適切な耐風設計を行うことは被害低減を図る上で重要である。突風被害は、風圧による直接的な損傷・破壊の他に、破壊物が飛散物となって新たな被害をもたらす「被害の連鎖」を引き起こす。強風被害の殆どを占める外装材は軽く見られがちであるが、その耐風性を高めることは地域全体としての被害低減に大きく寄与する。

2006年9月延岡市や同年11月佐呂間町の竜巻災害を受け、竜巻の発生予測や竜巻による風荷重に関する研究は、気象学や風工学分野で盛んに行われ、大きな成果が得られている。最近では、原子力発電所建屋に関して竜巻対策が検討され始めた。一方、ダウンバースト(以下、DB)に関しては、海外においてCFDを用いた研究が近年試みられているが、CFD等の数値解析には実測・実験データに基づく妥当性の検証が必須である。しかし、突風発生の不規則性により実測データの取得は困難であり、検証用データは十分ではない。唯一利用可能なデータは、米国テキサス州Lubbockで2002年に発生したDBの実測データのみである。

地球温暖化の影響で台風の大型化、竜巻やDBの大型化・頻発化を指摘する気象学者も多い。しかし、上述のようにDBの研究は世界的にも緒についたばかりである。特に、DB内に置かれた建築物に作用する非定常風圧・風力については、殆ど解明されていない。現行の耐風設計で対象としているのは台風のような数百km規模の気圧場により形成される大きなスケールの定常的な風(Synoptic windと呼ばれる)である。これと数km規模の気圧場により形成されるDBでは、その性状が大きく異なる。DBの発生は局所的ではあるが、竜巻以上に強い非定常性を示すため、台風より大きな風圧を建物に作用させることは容易に予想され、耐風設計上重要である。従って、DBに対して建築物の安全性を定量的に評価できる知見の蓄積が求められる。

DBシミュレータの開発において重要な点は、1)DBシミュレータの移動可能性(親雲の移動に伴いDBも移動する)、2)瞬発的噴流を伴う風速場の再現、3)建物模型を用いた風圧測定である。これまで、個々の検討は為されているが、これら全てを考慮した総合的検討は未だ行われていない。

2. 研究の目的

本研究では、非定常性の強いDBによる流れ場を再現できる「ダウンバーストシミュレータ」(物理試験装置)並びにComputational Fluid Dynamicsモデル(数値モデル)を開発して、DB内の気流分布特性とDB内に置かれた建物に作用する風圧分布特性を明らかにし、建築物の耐ダウンバースト設計の指針を示す。本研究で開発するDBシミュレータは、DBが有する「瞬発的噴流」と「親雲に伴う移動」に起因する流れ場や圧力場の非定常性を再現する点が大きな特長であり、台風等大規模な気圧場に形成される定常的な境界層乱流を対象とする従来の耐風設計では考慮していないオーバーシュート現象など、未解明の現象を把握することができる。これにより、局所的突風を考慮した建築物の合理的な耐風設計法の提案が可能となる。

3. 研究の方法

先ず、親雲に伴う移動と瞬発的噴流という2つの非定常性を再現できるDBシミュレータの開発を行う。DB内の風速分布を測定し、既往の実験・実測結果と比較することで再現性を確認する。次に、実験では再現困難なパラメータの影響を検討するため、CFDモデルの開発も行う。建築物の縮尺模型を用いた実験によりDBによる風圧・風力の特性を明らかにする。また、これらの結果を従来の境界層乱流を用いた実験結果との比較により違いを明らかにするとともに、DBに対して合理的な耐風設計手法を提案する。

4. 研究成果

(1) DBシミュレータの開発

DBシミュレータのアイデア

本研究で開発するDBシミュレータは以下に示す3つの特徴をもつ。1つ目は、天地を逆さにしたこと、2つ目は吹き出し口にシャッター機構の開閉装置を採用したこと、3つ目は台車により噴流装置を移動させることである。

天地を逆さにすることで、DBの吹き下ろしは吹上げとして再現される。すなわち、台車に載せた噴流装置を床に敷設されたレール上を移動させることで、大がかりな架構が不要となり、かつ送風機の高速移動も容易となる。また、送風機吹き出し口上部に取り付けたシャッター開閉装置により、瞬間的に噴出するDBの性質を再現することができる。

DBシミュレータの構成

DBシミュレータは送風機、天井板、移動機構、シャッター機構より成る(図1)。寸法を図2に示す。天地を逆にし、ファンによるジェットが天井板に衝突することで、地表に衝突するDBの下降噴流を模擬する。天井板は2.5m×2.5mおよび2.5m×1.25mの集成材を用いて製作されたものであり、天井板と送風口の距離(以下、天井高さ)は0.65mから1.25m

まで 50mm ピッチで変えることができる。また噴流を発生させるファンはインバータの制御周波数(以下,ファン回転数)を 0~60Hz まで 1Hz ずつ変えることができる。

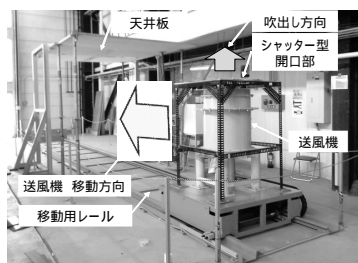


図 1 DB シミュレータの構成

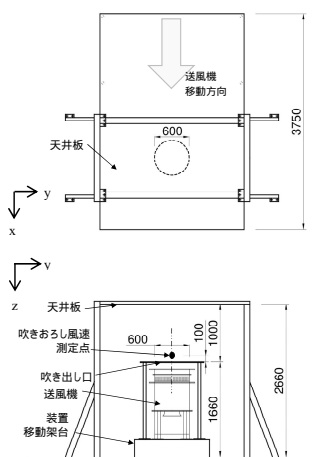


図 2 DB シミュレータの寸法

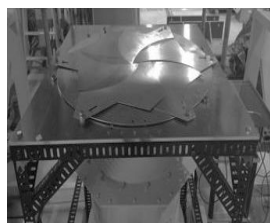


図 3 吹き出し口のシャッター

この送風機の上に取り付けられているシャッター(図 3)は、瞬時に発生し下降する DB の噴流を再現するための装置であり、カメラのシャッターの原理を応用して設計されたものである。閉じた状態から完全に開くまでの時間(以下,シャッタースピード)は 0.2 秒, 0.25 秒, 0.3 秒の 3 段階に変化させることができる。DB の移動を再現するため,送風機が直線上を移動できるように移動装置を製作した。移動速度 V_{tr} は最速約 2m/s であり,移動用のモーターのパワーを調整することで 0.5m/s ~ 2m/s の範囲で任意の値に設定することができる。DB 装置の移動は加速域,定速域,減速域で構成され,測定部となる天井板の下は定速域となっている(図 4)。

移動しながら急激な噴出が発生する DB を再現するために,レール上にスイッチを設け,台車とその点を通じた時にシャッターが開き噴流が発生するように設計した。このス

イッチはレール上の任意の位置に移動可能である。天井板の中心を $x=0$ とし,進行方向が正となるように x 軸を設定すると,測定位置から最も離れたシャッター解放位置は $x=-1800$ mm である。噴流発生位置の設定例として, $x=-600 \sim -1800$ mm の範囲について,ピッチ 200mm 間隔で設けたシャッター解放位置を図 5 に丸印で示した。



図 4 送風機の移動速度の変化

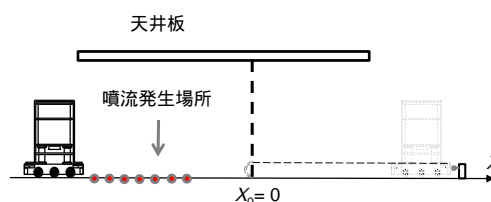


図 5 噴流発生位置の設定箇所

実際の DB との比較

Hjelmfelt による米国での観測記録によれば DB の平均吹き出し径は 1500m である。一方,日本における DB の突風被害の記録では,被害幅の平均値が 1000m 程度である。実験装置の吹き出し口の直径 $D=0.6$ m,風圧測定実験の基本モデルとして用いた建物モデル ($4\text{cm}^B \times 4\text{cm}^D \times 2\text{cm}^H$) の縮尺率との整合性を考慮し, DB の吹き出し径を 1200m と仮定すると,幾何学的縮尺率は 1 : 2000 となる。

過去に発生した DB のうち最大風速は Fujita らの実測で観測された 66.9m/s である。しかし,日本の突風被害の記録(1975 ~ 2015 年)より,記録の内(同一時間帯・同一場所で複数回発生した記録を含む)53%が藤田スケール F0(約 15 秒間平均推定風速 32m/s 以下)であり,43%が F0~F1 または F1~F2(約 10 秒平均の推定風速 32 ~ 49m/s)となっている。これより,実際の DB の最大瞬間風速を 50m/s と仮定する。DB 発生装置によって発生する地表付近の最大瞬間風速が 10m/s 程度であることから,風速の縮尺率は 1/5 程度となる。

本装置で再現することができる 4 種類の DB について,実測値との比較を示す。ここで,4 種類の DB とは,一定の風速で吹き続ける噴流を再現した「定常 DB」,急激な噴出をシャッターにより再現した「噴流 DB」,移動する DB を再現した「移動 DB」,移動を伴う噴出を再現した「移動噴流 DB」である。

Hjelmfelt がドップラーレーダーによって捉えた DB 中の風速の鉛直プロファイルと,本装置で計測した風速の鉛直プロファイルの比較を図 6 に示す。また,このときの実験条件を表 1 に示す。実験では, I 型プローブを用い,プローブ先端を天井板から 5mm ずつ z 方向(下向き)に移動させて測定を行った。

プローブのワイヤは天井板に水平に設置し、 x 軸方向と y 軸方向の風速の合成成分を計測した。同一条件で計 10 回の測定を行い、各風速時系列データから得られた最大ピーク風速のアンサンブル平均を求めた。この時、比較に用いた実測値はドップラーレーダーによる観測値であり、2.5~5 分毎に計測された結果であることより、実スケール 2.5 分に相当する実験スケールの時間 ($t=0.375$ 秒) を用いて、時系列データに移動平均をかけた。これより、4 種の DB が、実測値と同様の傾向を示すことが分かる。

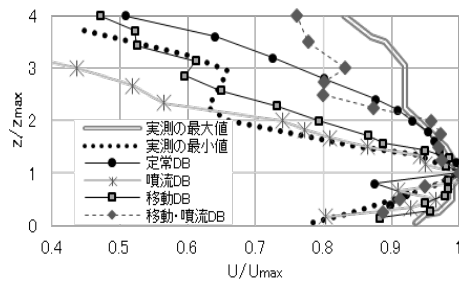


図 6 風速の鉛直プロファイルの比較

表 1 図 6 における各 DB の実験条件

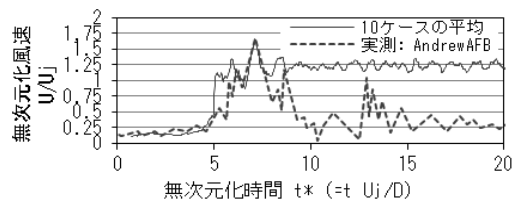
種類	測定点	移動速度	シャッター開放位置
定常 DB	$x/D=1$ $y/D=0$	-	-
噴流 DB	$x/D=1$ $y/D=0$	-	$x/D=0, y/D=0$
移動 DB	$x/D=0$ $y/D=1$	2m/s	-
移動噴流 DB	$x/D=0$ $y/D=0$	2m/s	$x/D=-1, y/D=0$

全ケース共通：ファン回転数：40Hz，天井高さ：1m，シャッタースピード：0.2s

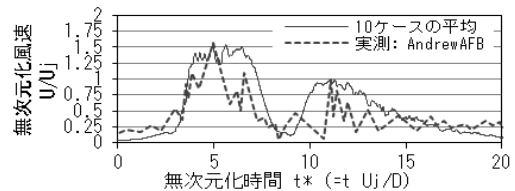
Fujita らの観測記録における風速の時系列データと本実験によって得られたデータとの比較を図 7 に示す。この観測記録は 1983 年にワシントン DC のアンドルーズ空軍基地においてプロペラ風速計で計測された記録である。観測高さは地上 5m である。雲の下部からの吹きおろしの径 D は 700m~1000m 程度と推定されている。このとき計測された最大風速は 66.9m/s であった。観測記録には、二つの風速ピーク値があり、各ピーク発生時の風向が 180° 異なっていることから、観測点上部を DB の吹きおろしが通過していると推定される。比較に用いた実験ケースの実験条件を表 2 に示した。実験は I 型プローブを用い、測定した 10 回の風速の時系列データをアンサンブル平均したものである。無次元化には、噴流の直径 D と吹きおろしの風速 U_j を用いた。実験において吹き降ろし風速 U_j は吹き出し口から 100mm 上部の位置での平均風速(噴流が吹き出し続けている状態における平均風速で $U_j=5.16\text{m/s}$ ，ファン回転数 40Hz)とした。なお、計測位置は図 2 に記載されている。また、実験と実測における最大無次元化風速 U/U_j が一致するように実測の DB の吹きおろしの風速 U_j を仮定した。

噴流 DB，移動 DB，移動噴流 DB の風速時系列をそれぞれ図 7(a)~(c)に示す。一つ目の風速ピーク値までの時系列変化は噴流 DB の結果が実測結果に最もよく一致している。しかし、噴流 DB 実験では、吹き出し口のシャッターが開放された後、開き続けた状態になるため、二つ目のピークおよび風速値の低下は再現されていない。一方、移動 DB と噴流移動 DB に関しては、二つの風速ピークとピーク後の風速低下の傾向が見られ、移動 DB における風速の時系列変化が実測結果を最もよく再現しているといえる。

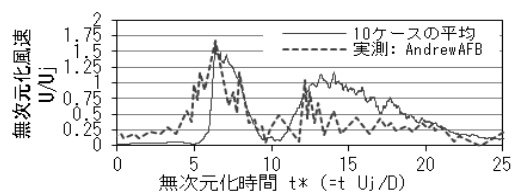
以上より、DB 実験において、実測された DB の特徴を再現可能であることが分かった。実際に DB により強風被害が発生する時、どの DB の特徴が最も影響を及ぼしているか分かっていないため、構造物の風荷重の検討においては、噴流 DB，移動 DB，移動噴流 DB の実験を行い比較することが望ましい。



(a) 噴流 DB による風速の時刻歴



(b) 移動 DB による風速の時刻歴



(c) 移動噴流 DB による風速の時刻歴

図 7 風速の時刻歴：実測結果と実験結果の比較

表 2 図 7 における各 DB の実験条件

種類	測定点	移動速度	シャッター開放位置	最大風速 (m/s)
噴流 DB	$x/D=1,$ $y/D=0,$ $z/D=0.03$	-	$x/D=0,$ $y/D=0$	9.40
移動 DB	$x/D=0,$ $y/D=0,$ $z/D=0.03$	1.5m/s	-	9.28
移動噴流 DB	$x/D=0,$ $y/D=0,$ $z/D=0.03$	1m/s	$x/D=-2,$ $y/D=0$	9.80

全ケース共通：ファン回転数：40Hz，天井高さ：1m

(2) 建築物に作用する風力・風圧分布
実験概要

DB による建築物の風荷重を評価するため風圧測定実験を行う。実験模型を図 8 に示す。模型の幅(B)×奥行(D)×高さ(H)は 40 mm×40 mm×20 mm である。測定点の数は、屋根面 25、各側面 12 の計 73 である。この模型を天井板の原点(x/D=0, y/D=0, z/D=0)に設置し、各点の風圧を同時計測する。対象とした気流は、噴流 DB、移動 DB、移動噴流 DB である。噴流 DB 実験および移動噴流 DB 実験での噴流発生位置はそれぞれ x/D=-1 および -2 とした。また、同じ模型を用い、風洞実験により境界層乱流中で建物に作用する風圧も測定し、DB による風圧係数との違いを把握する。実験気流は、ベキ指数 $\alpha = 0.21$ の境界層乱流(以下 ABL)である。

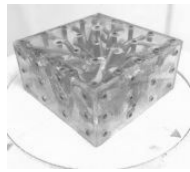


図 8 実験模型

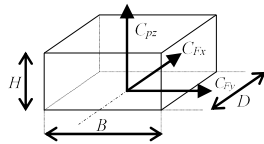


図 9 風力係数の定義

風圧係数の定義

一般に風洞実験において風圧係数を定義するとき、軒高の平均速度圧と同位置の静圧が用いられる。しかし、非定常である DB 実験の結果と直接比較するためには、瞬間速度圧を用いる必要がある。そこで、本章では風洞実験によって得られた風圧係数を瞬間値に換算するため、Durst Curve を用いて 10 分間平均風速を 3 秒間平均風速に補正を行い、これによる瞬間速度圧 \hat{q}_{hH} を用いる。基準静圧は風洞内静圧 p_{hs} を用いて風圧係数を式(1)のように定義する。

$$C_p = \frac{p - p_{hs}}{\hat{q}_{hH}} \quad (1)$$

DB 実験による風圧係数は、模型軒高の最大ピーク風速(3 秒平均値)より求まる速度圧 \hat{q}_{dH} と、風の影響のない点での大気圧 p_{ds} を基準静圧として式(2)のように定義する。

$$C_p = \frac{p - p_{ds}}{\hat{q}_{dH}} \quad (2)$$

このとき、DB の風圧係数に関しては、基準風速値への依存性と DB 特有の大気圧上昇の影響が十分検討されていないため、式(2)の風圧係数を DB の風圧係数として一般化することはできない。そのため、ここでの検討は、本実験ケースの DB に限定した比較であることに留意する。風力係数 C_{Fx} , C_{Fy} および屋根面の面平均外圧係数 C_{pz} の向きは図 9 に示すように定義する。基準化にはそれぞれの方向に対する見付面積を用いる。

測定はサンプリング周波数を 800Hz とし

10 回計測を行う。ピーク値は 10 回の測定結果のアンサンブル平均値で評価する。

結果と考察

各ケースについて、 C_{Fx} および C_{pz} の最大値および最小値を比較すると(図 10)、すべての DB において、ABL の結果に比べて、最大値では大きい値を、最小値では小さい値を示している。DB の中では、移動噴流 DB の場合に C_{Fx} が最も大きい。また、同条件で C_{pz} は最も小さくなり、屋根面に作用する正圧が大きくなるのが分かる。

各実験で得られた最小ピーク外圧係数の分布を図 11 に示す。なお、図に示した値は各測定点におけるピーク値であり同時性はない。すべてのケースで x 軸正の方向からの風によって風上壁面軒先で流れの剥離が発生し、大きな負圧が生じている点は共通しているものの、DB では屋根面全体により広い範囲に負圧が作用しているのが分かる。

以上の結果より、風力係数および風圧係数に関して、DB のような非定常気流下では、建築物は通常の境界層乱流中とは異なる値と分布をもつことが分かった。

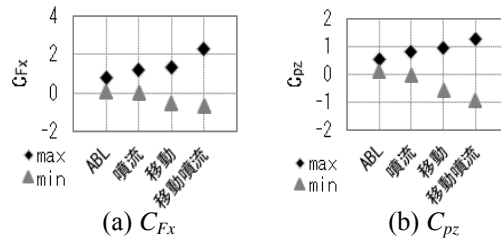


図 10 風力係数、面平均外圧係数の比較

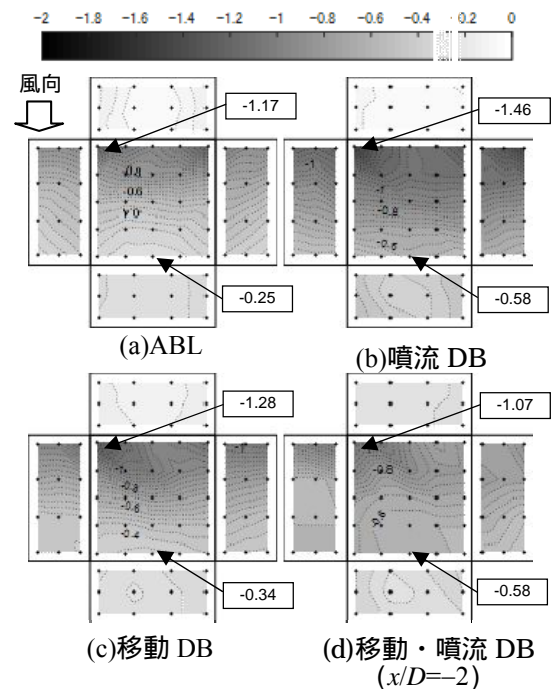


図 11 最小風圧係数分布

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 1件)

星野菜摘, 飯田有未, 植松 康: ダウンバーストの非定常性が建築物の風荷重に与える影響に関する研究, 日本風工学会論文集, 第43巻, 第1号, 2018, pp.1-13 (査読有)

<https://www.jawe.jp/ja/publications/elibrary.html>

[学会発表](計 8件)

Kazunori Asano, Yumi Iida, Yasushi Uematsu: The experimental study of wind loads on a building induced by a non-stationary downburst, International Workshop on Wind-Related Disasters and Mitigation, 2018年3月11日~14日, 東北大学(宮城県・仙台市)

Yumi Iida, Yasushi Uematsu: An empirical model of downburst of non-stationary pulsed jet, International Workshop on Wind-Related Disasters and Mitigation, 2018年3月11日~14日, 東北大学(宮城県・仙台市)

Yumi Iida, Kiyotoshi Otsuka, Yasushi Uematsu: A numerical study of wind fields near ground induced by moving downbursts, 第9回アジア・太平洋風工学会議, 2017年12月3日~7日, Auckland大学(ニュージーランド・Auckland市)

- ④飯田有未, 植松 康: ダウンバーストの移動速度が流れ場へ及ぼす影響, 日本建築学会2017年度大会(中国), 2017年8月31日~9月3日, 広島工業大学(広島県・広島市)

浅野和則, 飯田有未, 植松 康: 移動を伴うダウンバーストが建築物の風荷重に与える影響に関する研究, 日本建築学会2017年度大会(中国), 2017年8月31日~9月3日, 広島工業大学(広島県・広島市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

植松 康 (UEMATSU, Yasushi)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 60151833

(2)研究分担者

奥田 泰雄 (OKUDA, Yasuo)
国立研究開発法人建築研究所・構造研究グループ・グループ長
研究者番号: 70201994

(3)連携研究者

持田 灯 (MOCHIDA, Akashi)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 00183658

岩崎 俊樹 (IWASAKI, Toshiki)
東北大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号: 80302074

ガヴァンスキ 江梨 (GAVANSKI, Eri)
大阪市立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 00608797