

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 5 月 24 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01527

研究課題名(和文) 風による飛来物の飛翔挙動と衝撃力の評価を目的とする数値解析法の開発と風洞実験

研究課題名(英文) Development of numerical method and wind tunnel experiment to evaluate flying behavior and impact force of wind-borne debris

研究代表者

野村 卓史 (NOMURA, Takashi)

日本大学・理工学部・特任教授

研究者番号：50126281

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,000,000円

研究成果の概要(和文)：強風災害では風の力の直接的作用による被害のほかに、飛来物による被害が甚大である。本研究は、任意形状物体の回転運動をともなう飛翔挙動を、動的空気力を評価しながら予測し、飛来物による衝撃力を評価するための構造流体相関解析法および風洞実験方法の開発を目的として推進した。解析法では、長距離に及ぶ飛来物の飛翔を解析するために、飛来物とともに解析領域が移動する手法とした。その解析領域内に飛来物とともに回転する球状内部領域を設け、球面状界面における接続条件の開発を推進した。また、衝撃力を評価するための独自のアルゴリズムの開発を行った。風洞実験法では、飛来物による衝撃力を測定するための手法の開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発することを目的とした解析手法は、さらに改良をすべきところはあるが、この方法はその学術的・社会的意義として、風災害の低減に関わる次のような活用が期待される。(1) 竜巻、突風などの小規模な気象現象では災害発生時の風速が分からないことが多いが、被災地における飛来物の飛翔状況を推定することにより風速の推定が可能になる。(2) 被災地で見つかった飛来物の衝撃力を推定することにより、家屋や構造物の衝撃力に対する安全対策に有用な知見が得られる。

研究成果の概要(英文)：In wind-induced disasters, flying debris cause serious damages in addition to direct forces of wind. The present study had promoted to develop a numerical fluid-structure interaction method as well as a wind tunnel experimental method to evaluate impact forces of flying debris. In order to take into account the dynamic fluid forces of a rotating arbitrary configuration of flying object and long flight path, the numerical domain travels with the flying object. The numerical domain contains a spherical interior domain which rotates with the flying object. The interface condition between the interior and exterior domains has been investigated. A numerical algorithm to evaluate impact force by the object has also been developed. In the wind tunnel experimental method, a strategy to measure impact forces has been developed.

研究分野：風工学 計算力学 土木工学

キーワード：風災害 飛来物 衝撃力 数値流体解析 風洞実験

### 1. 研究開始当初の背景

我が国では台風や竜巻の勢力が増す傾向にあり、強風による被害が甚大化している。強風災害では風の力の直接的な作用による被害のほかに、飛来物による被害がある。飛来物による破壊は新たな飛来物を生じ、連鎖的に被害範囲を拡大する。したがって飛来物の飛翔速度、飛翔範囲および衝撃力を評価することは、強風災害の発生状況を分析し被害を低減するために重要である。

近年の国内外の研究では、平板や球、棒などの基本的な形状の物体について、定常気流による風洞実験で得られた空気力係数を用いて剛体の運動方程式を解く飛翔解析が行われている。しかし飛来物はさまざまな形状と重量バランスを有する物体であり、それぞれについて風洞実験で空気力測定をすることは現実的でない。また飛来物は飛翔時に回転運動してさまざまな姿勢をとる。空気力は風向によって変わる上、風速が非定常に変化する時の空気力は通常の風洞で測定される定常空気力と異なるという知見が近年蓄積されている。つまり回転運動をとる飛来物の飛翔挙動解析のために、基本的形状の物体に限ったとしても事前に空気力係数を風洞実験等で用意することは不可能であり、定常・準定常空気力に基づいた飛翔解析は不十分である。

以上のことから、複雑形状物体の回転運動をとる飛翔挙動を時々刻々変化する空気力を評価しながら予測し、その飛来物による衝撃力を評価する方法の開発が求められている。

### 2. 研究の目的

以上の背景のもと、次の3つの研究目的を設定した。

- (1) 回転運動を伴う複雑形状物体の飛翔挙動を予測する解析法の開発
- (2) 飛来物が地物に衝突したときの衝撃力を評価する解析法の開発
- (3) 解析法の信頼性を検証するための風洞実験方法の開発

### 3. 研究の方法

- (1) 回転運動を伴う複雑形状物体の飛翔挙動を予測する解析法の開発

開発する解析法は次の2つの特色を有するものとする(図1)。

- ① 飛来物に対する相対風速方向に常時向く解析領域

風災害における飛来物は物体の寸法に比べてはるかに長い距離を飛翔する。飛翔範囲全体をカバーする流体解析領域を設けることは現実的ではないため、物体に作用する空気力を評価するために必要な大きさと要素分割を有する解析領域を物体とともに運動させる。この解析領域に与える上流境界条件を、物体の重心速度と場の風速から定まる相対風速とし、解析領域が常時相対風速方向を向くようダイナミックに解析領域を転回させる、という着想である。

- ② 球面状スライディングインターフェース

物体の回転を扱うために物体の重心まわりに回転する球状解析領域を設ける。球状解析領域と外部解析領域との界面において流速・圧力を接続するために球面状スライディングインターフェースを導入する。

- (2) 飛来物が地物に衝突したときの衝撃力を評価する解析法の開発

「空中を落下する球が地面に当たったときの衝撃力」を評価する解析において、構造流体連成解析過程の中に「衝突時の物体速度を瞬間的にゼロとする」独自の条件を導入する。

- (3) 解析法の信頼性を検証するための風洞実験方法の開発

飛来物の飛翔挙動と落下時の衝撃力の両方を計測することを目的とする風洞実験方法を開発する(図2)。風洞実験模型は解析モデルと同じ形状を有する模型を3Dプリンタで製作する。落下時の衝撃力の測定はアルミニウム板を圧電型ロードセルで4点支持し、4つの出力から衝撃力と落下位置を評価する評価式を求め、風洞実験方法を構築することに主眼を置く。

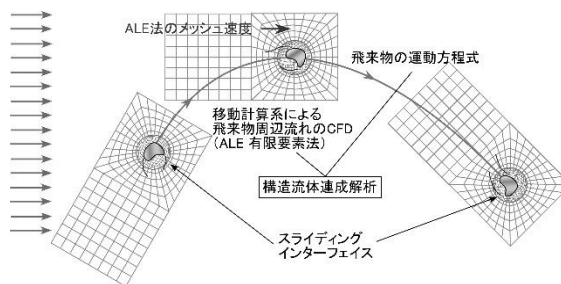


図1 飛来物とともに移動する解析メッシュ

### 4. 研究成果

- (1) 回転運動を伴う複雑形状物体の飛翔挙動を予測する解析法の開発

- ① 飛来物とともに移動・回転する解析メッシュによる解析

ALE法による流体解析と剛体の運動方程式の構造流体相関解析法を構成した。流体はVMS法、剛体運動の運動方程式はNewmark-β法で解く。解析法の基本特性に関する解析例を示す。

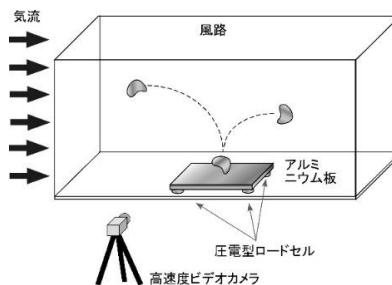


図2 風洞実験

(a) 飛翔する楕円体に対する気流の影響

直方体解析領域に楕円体を配置し、静止状態の楕円体に初速を与え、楕円体重量、初速度、初速の角度および気流（無風、追い風、向かい風）をパラメータして組み合わせた解析を行った。1例として水平の初速度で放出したときの気流の影響を図3に示す。

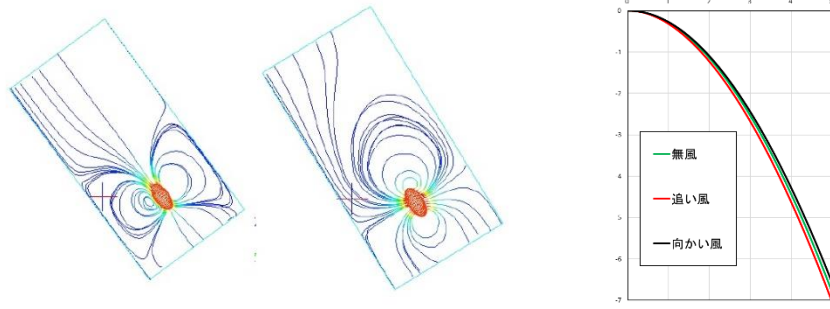


図3(a) 無風時の流線 (b) 追い風時の流線 (c) 飛翔軌跡

(b) 飛翔する立方体に対する回転の影響

球形解析領域に立方体を配置し、水平の初速と初期回転を与える解析を行った。例として鉛直面内の回転を与えた場合を図4に示す。

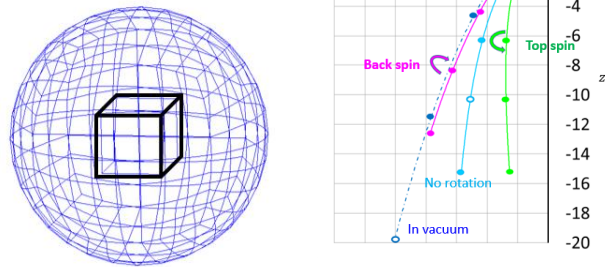


図4(a) 球形の解析領域 (b) 飛翔軌跡

② 球面状スライディングインターフェース

(a) 球面マッピング

図1に示したように、本研究では飛来物とともに移動する流体解析領域（以後、外部領域と称する）内に球状の解析領域（以後、内部領域と称する）を設け、この内部領域が飛来物とともに回転する解析を行う。外部領域と内部領域の界面で流速、圧力を接続する球面状スライディングインターフェースにおいて外部界面と内部界面との間で変数のマッピングが必要になり、効率のよいマッピング方法を開発した。その方法は以下のとおりである。

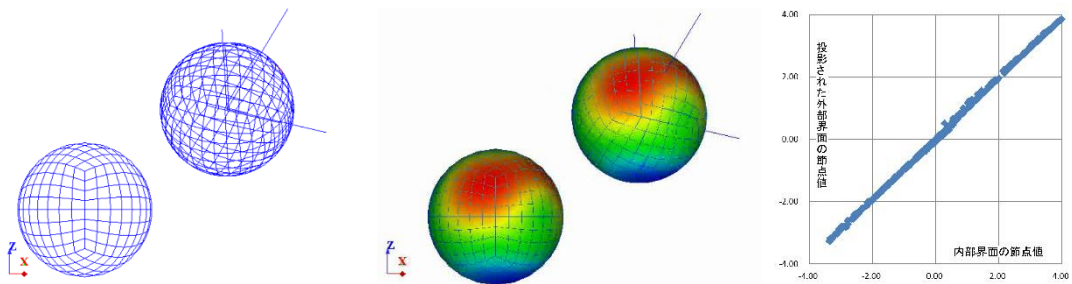


図5 外部界面（左）と内部界面 図6 内部界面から外部界面への投影 図7 投影値の比較

図5は外部界面と回転する内部界面の例で、4節点双線形要素を用いている。図5のように2つの界面が同じ要素分割であっても内部領域が回転するので一般に節点どうしは一致しない。外部界面の節点位置における内部界面の要素内の位置を探索し、その値を外部界面の節点に  $L_2$  マッピングする。この探索は2段階で、まず [Step1] 外部界面の節点位置を含む内部界面の要素を探索し、次に [Step2] その要素内位置の参照座標値を求める。Step2は非線形計算であるが簡単な反復計算で早く収束解が求まる。Step1の探索をまともに実行すると図5のような400要素程度でも膨大な時間を要する。そこで2つの球面状界面のそれぞれに固有の球面座標系に基づく象限を設定し、象限に含まれる節点と要素のリストを作成した。Step1の探索において、節点や要素がどの象限に含まれるか特定し、その象限内に絞って探索をする。これによって探索に要する時間を大幅に縮減することができた。図6は開発した球面マッピング法に基づく投影結果の1例、図7は投影された値と元の値の比較であり、妥当な結果が得られている。

(b) スライディングインターフェース

スライディングインターフェースの定式化は Nitsche 法に基づいて Bazilevs らりが円筒状界面による一軸回転問題に用いた方法を適用する。開発の過程は流体の中で回転運動する立方体まわりの流れの解析で、解析モデルは図 8 に示すように、直方体外部領域内に回転する球状内部領域を配置し、その球状領域内に立方体が置かれている。内外メッシュ界面の要素分割は図 5 に示したとおりである。

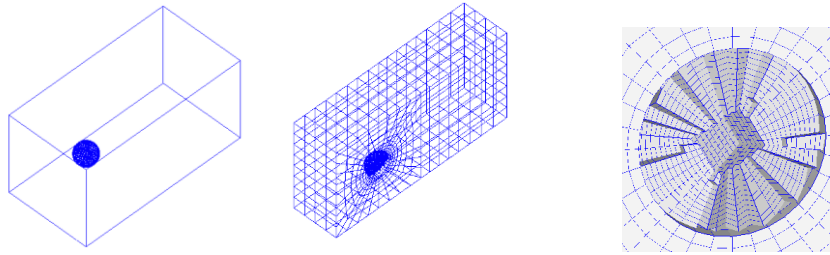


図 8 (a) 解析領域 (b) 解析メッシュの断層図 (c) 内外メッシュ断層図の拡大図

この解析モデルを用いて立方体に初期回転速度を与える解析を行った。図 9 は立方体周辺の流線で、回転する立方体からスタートする流線が、球状界面を横断して再び立方体に戻っており、界面において流れが連続していることが示されている。図 10 は外部球の界面と内部球の界面における節点トラクションを示したもので、界面上で力の連続性が得られることが示されている。

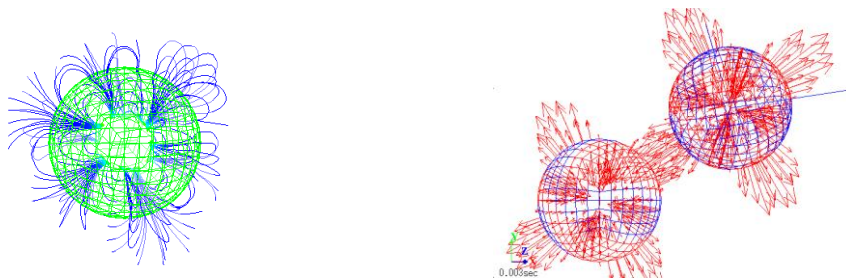


図 9 回転する立方体近傍の流線 図 10 外部界面 (左) および内部界面上の節点トラクション

(2) 飛来物が地物に衝突したときの衝撃力を評価する解析法の開発

数値解析によって衝撃力を評価するためには、弾性衝突の状況で運動量、運動エネルギーを精度よく保存できる衝突解析アルゴリズムであることが重要である。そこに空気抵抗によるエネルギー損失が加わり、さらに飛来物と衝突対象間のエネルギー損失をモデル化する。

本研究で開発した衝突解析アルゴリズムは、構造流体連成解析過程の中に「衝突時の物体速度を瞬間的にゼロとする」独自の条件を導入することにより、運動量、運動エネルギーを精度よく保存することに成功し、それによって衝撃力の値が得られる。1 例として直方体領域内で底面および側面に衝突する球のシミュレーションを図 11 に示す。

(3) 解析法の信頼性を検証するための風洞実験方法の開発

風洞実験における飛来物の飛翔挙動については、図 2 に示したように高速度ビデオカメラによる撮影、レーザーシートによる物体周辺気流の可視化、など通常の手法を適用する。独自の手法を開発すべき課題は飛来物が地表面に落下した時の衝撃力の測定方法である。本研究では以下の方法を開発した。

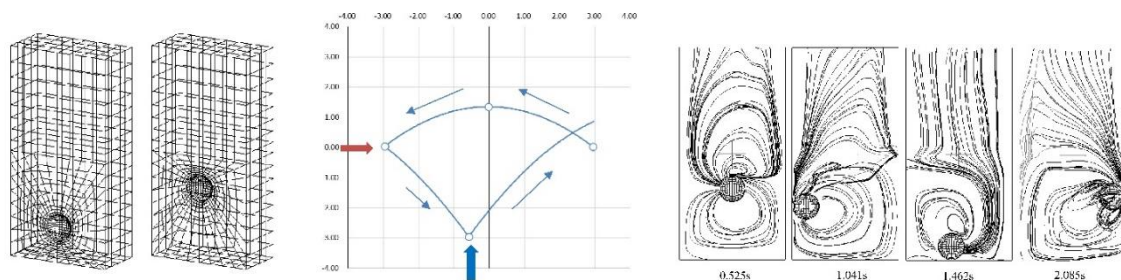


図 11 (a) 球の変位とともに変形するメッシュ (b) 球の軌跡と衝撃力が作用したタイミング (c) 球の周辺の流線

実験の飛来模型が風洞床面に落下する領域に圧電型ロードセルで4点支持したアルミ板を設置する(図2)。図12(d)にアルミ板4隅の圧電型ロードセル位置(ch1~ch4)を示す。飛来物による衝撃力をアルミ板經由で間接的に測定するので、まず、単体の圧電型ロードセルに球を落下させた計測と、同じ高さからアルミ板の中央に落下させた計測を行い、図13(a)に示す結果を得た。●は単体のロードセルの測定値で○は運動量と力積の関係による理論値であり、ほぼ一致している。■はアルミ板中央(図12(d)のK)に落下させたときの4つのロードセルの測定値の和である。この●と■のデータの相関を示したものが図13(b)でほぼ直線な関係がある。図13(b)により、アルミ板の中央に飛来物が落下した時の衝撃力の値を求めることができる。

次に飛来物がアルミ板に落下した位置を知るために、図12(d)の第4象限の各点における測定波形においてロードセル間に生じるピーク波形の時間差を求めた。それを落下点ごとに図12(a)~(c)に示す。またこれらの値をもとに最小二乗法によって求めた曲面も併せて示した。この曲面を用いて、測定された波形のピーク値の時間差から測定位置を推定する。推定結果を図14に示す。x座標はほぼ正確だが、y座標には少し誤差がある結果となった。y方向の落下点が2か所しかないためと考えられる。この点の改良が必要であるが、風洞で飛翔させた飛来物による衝撃力を測定する基本的な実験方法を開発した。

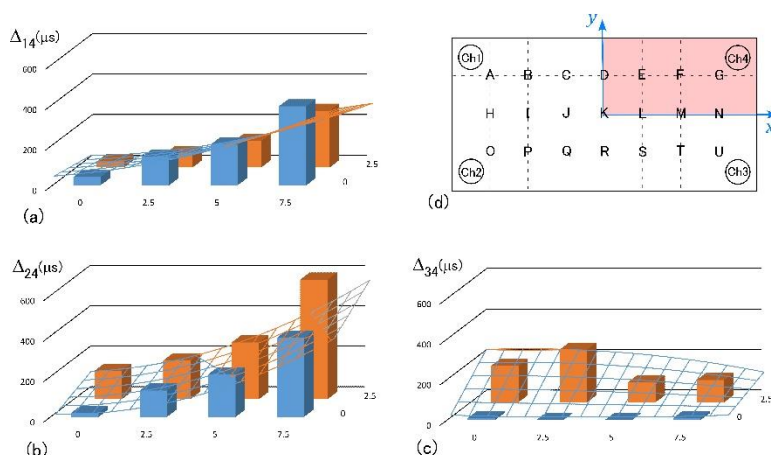


図12 アルミ板上の落下位置(d)および第4象限に落下させたときにロードセルに生じるピーク値の時間差：(a) ch1とch4の時間差、(b) ch2とch4の時間差、(c) ch3とch4の時間差

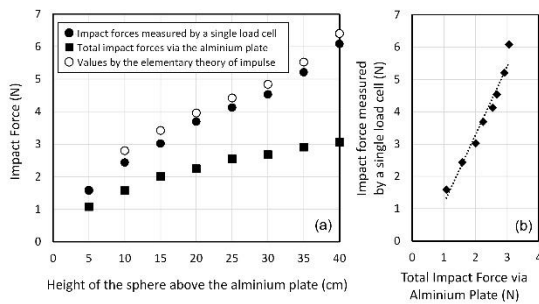


図13(a) 球体模型をロードセル単体に落下させたときの衝撃力(●)およびアルミ板中央に落下させたときの4隅のロードセルの測定値の和(■)  
(b) 図13(a)の●と■の相関関係

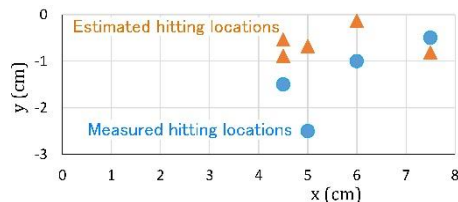


図14 落下位置の実験値(青)と図12(a)~(c)の関係を用いて求めた推定値(黄)

以上、本研究の成果の概要を示した。3つの研究目的(1)(2)(3)のそれぞれについて、核となる重要な要素に取り組み、基礎的な段階を遂行した。その上で、数値解析法については(1)(2)を統合して大規模解析を可能とする解析コードを作成することを目指し、風洞実験については解析法の検証に寄与する基本形状模型の実験から実際の被害をもたらした飛来物模型の実験に展開することを目指したが、本研究の期間内ではその途上にとどまった。研究期間終了後も引き続きこれらの課題の研究を継続する。

参考文献

1) Bazilevs, Y. and Hughes, T. J. R.: NURBS-based isogeometric analysis for the computation of flows about rotating components, Comput Mech (2008) 43:143-150

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takashi Nomura	4. 巻 1
2. 論文標題 Numerical Simulation of Flight and Impact of Windborne Debris	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Oxford Handbook of Non-Synoptic Wind Storms	6. 最初と最後の頁 1~19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/oxfordhb/9780190670252.013.12	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takashi Nomura	4. 巻 P190505
2. 論文標題 Numerical simulation of flying objects in wind	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceeindg of The 15th International Conference on Wind Engineering (ICWE15)	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 中野圭介, 三島唯, 吉田昭仁	4. 巻 1
2. 論文標題 エア遊具の付加荷重の簡易計算式の提案	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本建築学会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 1-2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 野村卓史, 田中公人, 宝田健太郎	4. 巻 44
2. 論文標題 風で飛翔する球による衝撃力の評価	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本風工学会誌	6. 最初と最後の頁 115-116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Takashi Nomura, Takumi Ohno and Hiroshi Hasebe
2. 発表標題 Simulation of a rotating cube in air based on ALE-VMS fluid-structure interaction method
3. 学会等名 14th World Congress in Computational Mechanics (WCCM) ECCOMAS Congress 2020 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 唐澤奈央子, 長谷部寛
2. 発表標題 アイソジオメトリック解析におけるはり要素の基礎検討
3. 学会等名 土木学会第48回関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takashi Nomura
2. 発表標題 Numerical simulation of flying objects in wind
3. 学会等名 The 15th International Conference on Wind Engineering (ICWE15) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中野圭介, 三島唯, 吉田昭仁
2. 発表標題 エア遊具の付加荷重の簡易計算式の提案
3. 学会等名 2020年度日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takashi Nomura
2. 発表標題 Numerical simulation of wind effects on object flight
3. 学会等名 The 14th China-Japan-Korea International Workshop on Wind Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Nomura
2. 発表標題 Fluid-structure interaction approach to flying debris and evaluation of the impact force
3. 学会等名 CWE2018 International Symposium on Computational Wind Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中野圭介, 吉田昭仁
2. 発表標題 風洞実験に基づく飛来物の衝撃力評価に関する基礎的研究
3. 学会等名 2019年度 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akihito Yoshida
2. 発表標題 Wind resistance performance and wind-induced damage of inflatable amusement products
3. 学会等名 International Workshop on High-performance Wind Energy System and Effective Operation of Wind Farms and Mitigating Wind-induced Disaster of Wind-sensitive Infrastructure (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年



〔図書〕 計1件

1. 著者名 Takashi Nomura	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Oxford University Press	5. 総ページ数 626
3. 書名 NON-SYNOPTIC WIND STORMS (hardback) eds. H. Hangan & A. Kareem : Chapter 19 Numerical Simulation of Flight and Impact of Wind-borne debris	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	吉田 昭仁 (YOSHIDA Akihito) (90329219)	東京工芸大学・工学部・教授  (32708)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	長谷部 寛 (HASEBE Hiroshi) (60366565)	日本大学・理工学部・准教授  (32665)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------