

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 1 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02232

研究課題名（和文）巨大台風来襲時代の到来に向けた構造物の耐風安定性照査法に関する研究

研究課題名（英文）Verification of wind-induced instabilities of structures against future super typhoons

研究代表者

八木 知己 (Yagi, Tomomi)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：30293905

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,600,000 円

研究成果の概要（和文）：将来の気候変動に伴って想定外の強風が構造物に作用する可能性を考え、安全性を検証する方法として従来の風洞実験に代わる数値風洞実験の実用化に向けた検討、ならびに未知の高風速下における構造物の応答挙動について現象解明と照査方法の検討を行った。前者においては、高欄を始めとする構造物の微細部のモデル化が最大の課題であり、簡易的な多孔質体に置き換える現実的な方法を提案した。併せて、微細部が各種空力振動現象に及ぼす影響についても新しい知見が得られた。後者においては、風洞内で構造物を回転させた状態における空気力を測定し、相対迎角速度の効果を加味した新しい空気力を定式化、さらには応答振幅の評価方法を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

長大構造物の耐風安定性を数値流体解析によって照査することは、既に技術的には可能であるが、構造物の微細部を再現すると計算コストがまだ高いのが現状である。本研究では、気流の剥離点付近の微細部を簡易なモデルで置き換えることで、数値風洞を耐風設計に利用する可能性を提案した。また、構造微細部の空気学的影響を調査し、種々の空力振動現象に関する新しい知見を得ることができた。さらに、従来の耐風安定性の照査においては、照査風速において構造物に不適切な振動現象が発生するかしないかの判断のみであったが、照査風速を超える想定外の風速において、大振幅の応答評価ならびに現象解明が可能な方法を提案することに成功した。

研究成果の概要（英文）：Considering the possibility of unexpected strong winds acting on structures due to climate change in the future, we have studied the practical application of numerical wind tunnel experiments as an alternative to conventional wind tunnel experiments as a method of verifying safety, as well as the clarification of phenomena and verification methods for the response behavior of structures under unknown high wind velocity conditions. In the former case, modeling the small details of structures such as railings is the most important issue, and we proposed a realistic method to replace them with simple porous medias. New knowledge was also obtained on the effects of small details on various aerodynamic vibration phenomena. In the latter case, we measured the aerodynamic forces of structures rotating in a wind tunnel, formulated new aerodynamic forces that takes into account the effect of relative angular velocity of attack, and established a method for evaluating the response amplitude.

研究分野：耐風工学

キーワード：耐風安定性 空力振動 風洞実験 数値風洞実験 渦励振 フラッター 橋梁 高欄

1. 研究開始当初の背景

将来の気候変動に伴って、台風が巨大化し想定外の強風が構造物に作用する状況が予想される。新規構造物のみならず既存構造物においても、より精緻な耐風安定性の照査を実施する必要性が高まると考えられ、大掛かりな実験施設を必要としない数値風洞実験法の確立が急務の課題である。橋梁分野においては、数値風洞を用いた耐風設計は未だ実施されておらず、従来の風洞実験の精度までには至っていないという認識である。研究開始後の2023年に土木学会から「橋梁の耐風設計における数値流体解析ガイドライン」が発刊され、技術的には数値風洞を用いた耐風設計は可能であるが、まだまだ計算コストが高すぎるため、構造物の微細部のモデル化が急務の課題である。さらに、この微細部が構造物の耐風性に及ぼす影響についても未だ不明な点が多く、各種空力現象自身のさらなる解明が必要である。さらには、従来の耐風設計においては、照査風速において構造物に破壊に至る振動現象が発生するかしないかの判断のみであったが、照査風速を超える想定外の風速が構造物に作用する事態を考えると、各種空力振動現象の発現風速よりも高風速域での応答挙動を把握する必要がある。従って、来る巨大台風来襲時代に向けて、橋梁構造物におけるより合理的で精度の高い耐風性照査法を確立すること、ならびに想定外の強風が作用した際の空力振動現象の解明が必要となる。

2. 研究の目的

研究当初は、将来の気候変動によって、想定外の強風が構造物に作用する状態を考慮し、新規ならびに既存構造物の耐風安定性の照査を行うために必要な、より合理的な数値実験法と風洞実験法の確立を目指し、構造物の微細部のモデル化とその再現性が振動応答に及ぼす効果を明らかにすることが本研究の目的であった。併せて、照査風速以上の高風速域における各種空力不安定現象の機構解明を行うことが第二の目的であった。より具体的な各研究の目的は以下の通りである。

- (1) 橋梁構造物の微細部として、高欄部に着目し、その高欄の形状が空力振動に及ぼす影響について解明すること。ただし、数値風洞実験や通常の風洞実験においても、気流の剥離点となる高欄最上段部材と地覆部は詳細に再現することになるため、両者の間の高欄中間部における各部材の空気力学的な影響を解明することとした。
- (2) 橋梁構造物の耐風性を数値風洞によって照査することを目標に、高欄中間部を多孔質媒体といった簡易的なモデルで置き換えることが可能かどうか解明すること。
- (3) 各種空力振動現象が発現風速以上の高風速域において、いかなる挙動を示すのか、またどのような空気力学的モデルを用いれば現象を再現できるのかを解明すること。さらに、これらの結果から新しい耐風性の照査方法を提案すること。
- (4) 上記の研究を開始した中で、構造物の微細部が耐風性に影響を及ぼす効果が極めて大きいことから、微細部そのものの空力的効果を解明することに加えて、微細部を意図的に変化させることで、構造物周りの流れ場を変化させ、各種空力現象における未解明なメカニズムの検討を追加した。

3. 研究の方法

上記の研究全てにおいて、京都大学大学院工学研究科に設置された風洞実験施設を用いて、ばね支持自由振動実験、静的空気力測定実験、強制加振時の非正常空気力測定実験等の風洞実験を実施した。研究(2)においては、京都大学学術情報メディアセンターのスーパーコンピュータを使用して、LESを用いた数値流体解析を実施した。研究(3)においては、一般財団法人電力中央研究所の風洞設備を用いて、3自由度の大振幅応答実験、強制回転時の非正常空気力測定実験等を実施した上で、時間領域応答解析を行った。

4. 研究成果

以下の通り、研究項目毎に研究成果を示す。

(1) 高欄中間部が空力振動特性に及ぼす影響

本研究で対象とした橋梁桁断面は、断面辺長比 $B/D=5.5$ (B : 桁幅, D : 桁高) の六角形箱桁断面と $B/D=10.3$ の端2箱桁断面、さらには高欄の設置されていない下面側の影響を排除する目的で、 $B/D=5$ の矩形断面の上下面に高欄設置した上下対象断面を用いて検討を行った。図1に高欄の一例を示す。高欄には大きく分けて、一般の高欄を模擬した非格子状高欄と数値流体解析における中間部のモデルをイメージした格子状高欄の2種類について、充実率や部材の幅等を様々に変化させて検討を行った。図2に一例として、端2箱桁断



図1 高欄の一例
左図：非格子状高欄，右図：格子状高欄

面における渦励振応答振幅の風速による変化を示している。充実率を合わせた両断面では応答がほぼ同様になっていることがわかる。様々な高欄で検討した結果、以下のような知見が得られた。

- 非格子状高欄と格子状高欄について、高欄中間部の形状が渦励振応答に及ぼす影響を風洞実験により検討した結果、両高欄共、空隙率が大きくなると、渦励振応答振幅は減少する。
- 実橋の高欄に近い非格子状高欄において、中間部の水平材の本数が増加すると応答振幅が減少するが、水平材の位置や鉛直材の本数は応答には影響を及ぼさないこと、水平材断面を扁平にすると制振できる可能性があること等が明らかとなった。したがって、橋梁における高欄の設計においては、空隙率に加えて、水平材や鉛直材を適切に配置することで渦励振応答を低減できる可能性がある。
- 風上側の高欄は前縁における流れの剥離点となり渦生成ならびにその強度に影響を及ぼし、風下側の高欄は橋梁上面における渦の形成と流下を妨げる効果があることが明らかとなった。したがって、もし風向が固定されている場合であれば、風上側の高欄の空隙率を大きくし、風下側の高欄を格子状もしくは充実高欄（壁高欄）とすることで、渦励振応答振幅を大幅に低減させることが可能である。

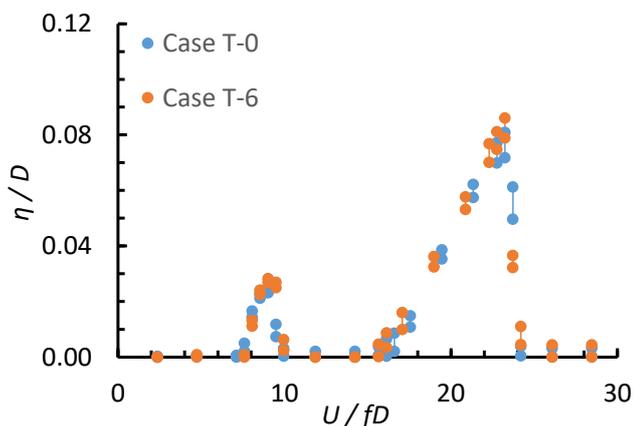


図2 風速 - 応答図の一例
横軸：無次元風速，縦軸：無次元振幅

(2) 数値流体解析における高欄中間部のモデル化

高欄部の圧力欠損を数値解析により求め、高欄中間部を多孔質媒体でモデル化することを試みた。以下に得られた知見を示す。

- 高欄部の圧力欠損は中間部の空隙率が重要なパラメータとなること、最上段水平材と地覆部において空気の流れが剥離するために圧力損失に影響を及ぼすことから、数値流体解析において高欄をモデル化するには、最上段水平材と地覆部は厳密に再現し、中間部を多孔質媒体で置き換えることを提案する。(図3参照)

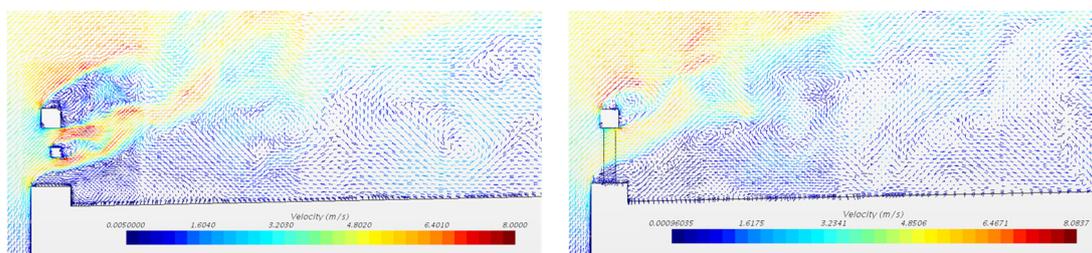


図3 数値流体解析による瞬間速度分布の一例
左図：標準高欄，右図：多孔質媒体でモデル化した高欄

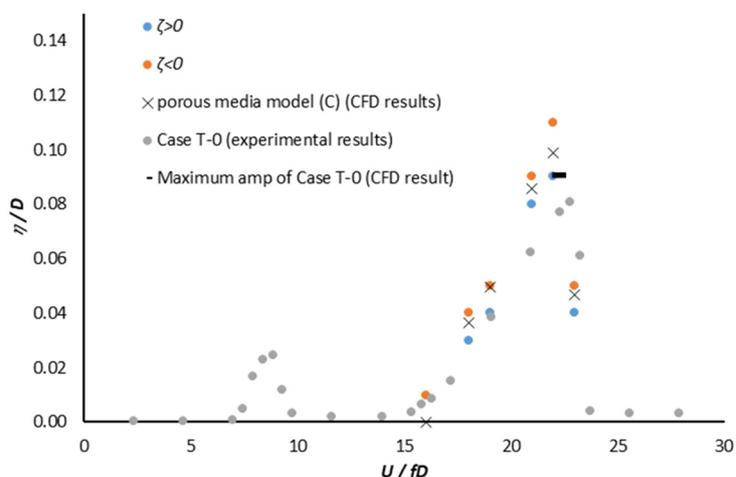


図4 数値流体解析による風速 - 応答振幅図の一例 (×：数値解析結果)

- 本研究で提案する解析手法で得られた渦励振応答振幅は、風洞を用いた自由振動応答実験結果と比較して、多少大きな値を示しているが安全側の評価となっていることから、工学的には許容できる範囲であるといえる。(図4参照)

(3) 高風速下における大振幅自励振動に関する研究

断面辺長比 $B/D=1, 2, 5, 15$ の矩形断面を対象として、弾性ひもで模型を吊るし水平・鉛直・ねじれ 3 自由度の大振幅応答を確認すると共に、強制加振時の非定常空気力を測定した。さらに、大振幅振動時に物体に作用する空気力を相対迎角ならびに相対迎角速度で定式化することを試み、模型を一定速度で回転させた状態で空気力を測定することで、各相対迎角ならびに各相対迎角速度における空気力を算出した(図5参照)。その結果を従来の強制加振時の非定常空気力と比較したものが図6となり、比較的良い一致が見られる。さらに、時刻歴応答解析を実施し、本手法により耐風安定性の議論が可能かどうかを検討した。

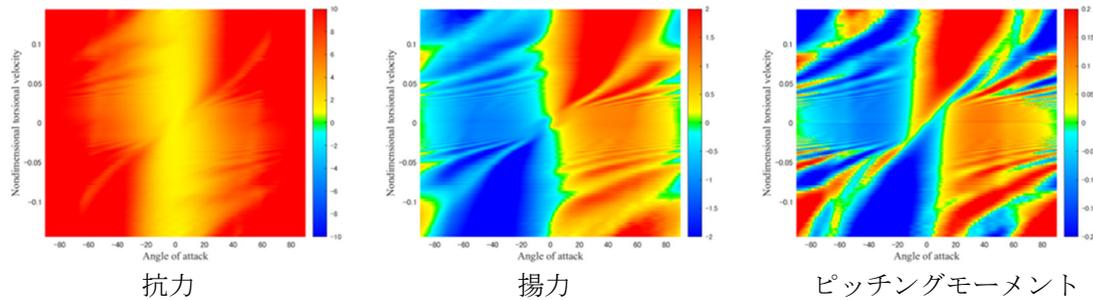


図5 一定速度回転による空気力の一例 ($B/D=5$)

各横軸：相対迎角，各縦軸：相対迎角速度

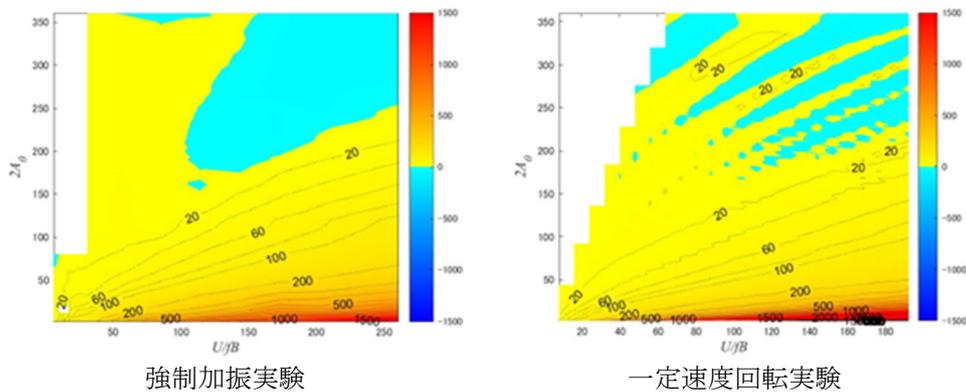


図6 強制加振実験と一定速度回転実験によるねじれ速度に関する非定常空気力の比較 ($B/D=5$)，各横軸：無次元風速，各縦軸：ねじれ倍振幅

以下に得られた知見を示す。

- $B/D=1, 2$ 矩形断面のギャロッピング、 $B/D=2, 5, 15$ 矩形断面のねじれフラッターは、高無次元風速域で大振幅定常応答を示す。
- 一定速度回転時に計測した相対迎角速度を考慮した空気力から、鉛直 1 自由度ならびにねじれ 1 自由度の振動時における非定常空気力係数を算出することが可能となった。低無次元風速の振動では、正弦波振動の履歴の影響が大きい振動もあるが、高無次元風速域の振動では振動中の各瞬間の空気力もおおよそ一致する。
- 相対迎角速度を考慮した空気力により、3 自由度の大振幅応答を簡易的に予想できる可能性があり、新しい耐風安定性の評価手法として使用できる可能性が示唆された。

(4) 構造物の微細部を用いた空力振動現象の機構解明ならびに微細部を用いた制振効果の解明

塔構造物において耐風性を高めるために、塔断面の四隅に隅切り等が設けられる。この角部形状を様々に変化させることで、渦放出特性を制御することが可能であることを発見し、長年の課題であるギャロッピングと放出渦との間における空力干渉現象を解明することを試みた。以下に得られた知見を示す。

- 断面辺長比 $B/D=1.5$ の矩形断面ならびに 6 種類の角部形状を取り付けた、計 7 種類の断面模型において、角部形状を変更した場合、矩形断面と比べて、カルマン渦放出強度が低減すると共に、ストロハル数は増加することが明らかとなった。(図7参照)
- カルマン渦放出強度が低減されている断面においては、ストロハル数は増加していることから、その逆数は小さくなるため、ギャロッピング発現風速が低下することが予想されたが、実際は比較的カルマン渦放出強度が大きい断面ではギャロッピング発現風速はストロハル

数の逆数となるが、カルマン渦放出強度が小さい断面では、より高風速側で発現した。

- ギャロッピングの発現風速付近において、カルマン渦放出強度が最も大きい矩形断面では、①カルマン渦とギャロッピングが干渉し、発現風速はカルマン渦によって決定される。少しカルマン渦強度が低減された断面においては、②カルマン渦と自己励起渦が干渉する。さらに、カルマン渦がほぼ放出されていない断面においては、③自己励起渦とギャロッピングが干渉し、発現風速は自己励起渦で決定されるといった、カルマン渦放出強度に応じて3種類の空力干渉現象があることが明らかとなった。

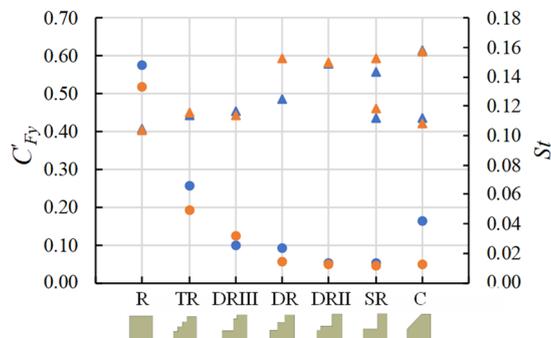


図7 様々な角部形状をもつ断面におけるカルマン渦放出強度とストロハル数
 左縦軸：変動横力係数（カルマン渦放出強度）●プロット
 右縦軸：ストロハル数（カルマン渦放出周波数）▲プロット

また、斜張橋ケーブルとして開発されたスパイラル突起付きケーブルの空力特性、特に抗力の低減効果と各種空力振動現象に対する制振効果について、現象解明を試みた。以下に得られた知見を示す。

- スパイラル突起付きケーブルにおいては、臨界レイノルズ数に達する直前の亜臨界域では、突起から流れが剥離し、非定常な剥離バブルが形成され、層流境界層から乱流境界層へ遷移することに加えて、突起が螺旋状であることから、スパン方向に剥離点が不連続に変化している。流れの非定常性と剥離点のスパン方向変化の複合的な効果により、渦放出が抑えられ、抗力低減が発生したと考えられる。さらに、臨界レイノルズ数域では、螺旋状突起が境界層を誘導するような働きをすることで、剥離点が下流側にシフトさせる働きがある。また、超臨界域では、流れのパターンが変化せず、抗力係数が低いまま維持される等が明らかとなった。(図8参照)
- スパイラル突起付きケーブルが並列状態の場合、特に近接配置において、超臨界レイノルズ数領域において、ウェイクギャロッピングは発生しない。これは後流域の幅が狭くなることで、後流域の空力干渉が抑えられ、ギャップフローも抑制されたことによる。一方、亜臨界レイノルズ数領域や臨界領域では、ウェイク振動の発現が確認されているが、実際の橋梁においては、臨界レイノルズ数領域に対応する実風速は極めて低く、耐風設計上問題にはならない。さらに、ケーブル間隔が大きくなった場合においても、渦放出が抑えられているため、上流側ケーブルから放出された渦が下流側ケーブルに衝突することもなく、2自由度連成フラッターが発現する可能性はない。以上より、スパイラル突起付きケーブルは、並列状態におけるウェイク振動に対しても制振効果が高いことが明らかとなった。

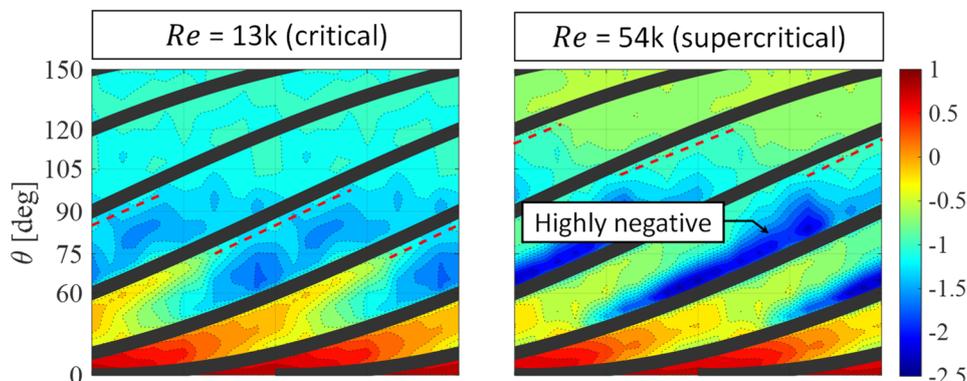


図8 スパイラル突起付きケーブルの表面圧力 (赤破線：剥離点)
 左図：臨界レイノルズ数域，右図：超臨界レイノルズ数域

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Dao Thu, Yagi Tomomi, Noguchi Kyohei, Fukushima Haruki, Mohallem Gabriel, Do Tung	4. 巻 229
2. 論文標題 Generation mechanism of wake galloping in two staggered circular cylinders in view of hysteretic flow phenomena	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics	6. 最初と最後の頁 105127 ~ 105127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jweia.2022.105127	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 -
1. 著者名 高橋 和暉、八木 知己、野口 恭平、Yan Yuxuan、伊藤 靖晃	4. 巻 27
2. 論文標題 LES による橋梁の渦励振応答評価における多孔質体を用いた高欄のモデル化	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 風工学シンポジウム講演梗概集	6. 最初と最後の頁 119 ~ 122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14887/natsympwindengproc.27.0_119	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 高田 篤史、八木 知己、野口 恭平、山本 宗一郎、宮元 鴻、王 嘉奇	4. 巻 27
2. 論文標題 物体側面開口部のスパン方向形状変化がギャロッピング不安定性に及ぼす影響	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 風工学シンポジウム講演梗概集	6. 最初と最後の頁 123 ~ 126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14887/natsympwindengproc.27.0_123	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 Yan Yuxuan, Yagi Tomomi, Noguchi Kyohei, Ito Yasuaki, Shimada Ryo	4. 巻 27
2. 論文標題 Effects of Handrail Details on Vortex-Induced Vibration for a Box-Girder Bridge	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Bridge Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001835	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 -

1. 著者名 Fukushima Haruki, Yagi Tomomi, Shimoda Takuya, Noguchi Kyohei	4. 巻 215
2. 論文標題 Wake-induced instabilities of parallel circular cylinders with tandem and staggered arrangements	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics	6. 最初と最後の頁 104697 ~ 104697
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jweia.2021.104697	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 -

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Rintaro Kyotani, Tomomi Yagi, Kyohei Noguchi, Thinzar Hnin, Manoj Pradhan
2. 発表標題 Investigation of the interference between galloping and vortex shedding by changing corners of the rectangular section
3. 学会等名 Proceedings of the 33rd KKHTCNN Symposium on Civil Engineering (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hnin Thinzar, 八木知己, 野口恭平, Pradhan Manoj, 京谷麟太郎
2. 発表標題 角部形状を変化させた矩形断面のギャロッピング不安定性と渦放出の関係
3. 学会等名 2022年度日本風工学会年次研究発表会梗概集 (日本風工学会誌, Vol. 47, No. 2 (No. 171))
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 後藤崇文, 八木知己, 奥西智也, 松宮央登, 野口恭平
2. 発表標題 連続回転運動中の非定常空気をを用いたねじれ振動中の空気力評価に関する研究
3. 学会等名 2022年度日本風工学会年次研究発表会梗概集 (日本風工学会誌, Vol. 47, No. 2 (No. 171))
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 京谷麟太郎, 八木知己, 野口恭平, Thinzar Hnin, Manoj Pradhan
2. 発表標題 角部の形状変化が矩形柱のギャロッピングの発現機構に及ぼす影響
3. 学会等名 2022年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋和暉, Yan Yuxuan, 八木知己, 野口恭平
2. 発表標題 橋梁の渦励振に対する高欄細部形状の影響に関する研究
3. 学会等名 土木学会第77回年次学術講演会講演概要集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 京谷麟太郎, 八木知己, 野口恭平, Thinzar Hnin, Manoj Pradhan
2. 発表標題 角部の形状変化による矩形断面のギャロッピングと渦放出への影響
3. 学会等名 土木学会第77回年次学術講演会講演概要集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Thu Dao, Tomomi Yagi, Kyohei Noguchi, Gabriel Mohallem, Tung Do
2. 発表標題 Wind-induced instabilities of two parallel cylinders with spiral protuberances in close staggered arrangement
3. 学会等名 土木学会第77回年次学術講演会講演概要集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋和暉, 八木知己, Yan Yuxuan, 野口恭平
2. 発表標題 橋梁の渦励振応答に対する高欄細部の影響に関する研究
3. 学会等名 2021年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高田篤史, 八木知己, 山本宗一郎, 宮元鴻, 野口恭平
2. 発表標題 側面に開口部を設けた矩形柱のギャロッピング不安定性に関する研究
3. 学会等名 2021年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yan Yuxuan, 八木知己, 野口恭平, 高橋和暉
2. 発表標題 橋梁桁断面の渦励振応答における高欄細部の効果
3. 学会等名 2021年度日本風工学会年次研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮元鴻, 八木知己, 野口恭平, 山本宗一郎, 高田篤史
2. 発表標題 側面の開口部形状を変化させた矩形柱の空力不安定現象に関する研究
3. 学会等名 2021年度日本風工学会年次研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Dao Minh Thu, 八木知己, 野口恭平, 福島温樹, Do Quang Tung, 桑原彰吾
2. 発表標題 スパイラル突起付き斜張橋ケーブルの空力特性に関する研究
3. 学会等名 2021年度日本風工学会年次研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 後藤崇文, 八木知己, 奥西智也, 松宮央登, 野口恭平
2. 発表標題 相対迎角速度に基づく自励振動時の矩形断面の空気力特性に関する研究
3. 学会等名 2021年度日本風工学会年次研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋和暉, 八木知己, 野口恭平, 伊藤靖晃, Yan Yuxuan
2. 発表標題 橋梁の渦励振に対する高欄細部形状の影響に関する研究
3. 学会等名 土木学会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tung Quang Do, Tomomi Yagi, Kyohei Noguchi, Haruki Fukushima, Thu Minh Dao, Shougo Kuwabara
2. 発表標題 Investigation on wake galloping of cable with spiral protuberances by pressure measurements
3. 学会等名 土木学会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高田篤史, 八木知己, 野口恭平, 王嘉奇, 山本宗一郎, 宮元鴻
2. 発表標題 側面開口部の形状変化が矩形柱のギャロッピング不安定性に及ぼす影響
3. 学会等名 土木学会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hnin Thinzar, Pradhan Manoj, Tomomi Yagi, Kyohei Noguchi
2. 発表標題 Aerodynamic characteristics of rectangular cylinder with various corner shapes
3. 学会等名 土木学会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔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	野口 恭平 (Noguchi Kyohei) (70802685)	京都大学・工学研究科・助教 (14301)	
研究分担者	松宮 央登 (Matsumiya Hisato) (70516640)	京都大学・工学研究科・准教授 (14301)	

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
---------	---------