

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24年5月23日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360213

研究課題名（和文） 瞬発気流による構造体の過渡流体力の発生機構解明

研究課題名（英文） Clarification of Generation Mechanism for Transient Fluid-induced Forces on Bluff Body due to Gusty Wind

研究代表者

白土 博通（SHIRATO HIROMICHI）

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：70150323

研究成果の概要（和文）：瞬発気流を再現する風洞実験装置の検討，試作を行い，正方形断面柱の揚力を測定した．揚力ピーク発生とカルマン渦による揚力変動周期の間の密接な関係が一部明らかとなったが，両空気力成分の分離に課題を残した．

一方，既存の突風風洞を用いて矩形断面や5本円柱の過渡空気力を測定し，前者は上下面の剥離バブルの非対称な成長，後者は円柱間の複雑な流れの生成の重要性を明らかにした．さらに，過渡空気力のLES数値シミュレーションを実施し，カルマン渦との関係を得たほか，竜巻移動時の風速時刻歴シミュレーションにより，風速急変時の鉄道車両の安全性評価を試みた．

研究成果の概要（英文）：An experimental setup which can reproduce lateral wind was newly manufactured and was used for the measurement of transient lift force on a square prism running along a guide rail. Some relationship to Karman vortex shedding was implied. The difficulty to identify each force component was also pointed out.

Transient aerodynamic forces on a square prism and a group of 5 circular cylinders were measured by use of another existing wind tunnel which can also generate sudden increase of longitudinal wind velocity. It was found that the asymmetric generation of separation bubbles on both side surfaces was important for the mechanism of transient lift on a square prism. And the complex flow pattern around the 5 circular cylinders was found to determine the transient forces. The transient forces were well reproduced by CFD simulation which showed an evidence of relationship with Karman vortex. A simulation of time history of gusty wind due to an ideal tornado was conducted to discuss safety evaluation of a train wagon during tornado passage nearby.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
2010年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2011年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
年度			
年度			
総計	13,900,000	4,170,000	18,070,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：風工学・過渡流体力・非定常空気力・瞬発気流・突風・竜巻・矩形断面・5本円柱

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化に伴う気象現象の激化が指摘

されるなか，竜巻等の突風の予測と，構造物や走行車両に対する安全性向上が喫緊の課

題としてクローズアップされている。(平成19年度科学技術振興費調整費(以後、“科振費”と略記)重要政策課題への機動的対応の推進研究「竜巻等の実態および発生予測と対策」)本研究を含む全体の構想は、上記科振費のロードマップに掲げられている、構造物、走行車両のリスクレベル評価と安全性向上を目的とするものであり、(ア)観測データ、被害例に基づく竜巻等の突風の風速および強風域に関する確率モデルの構築、(イ)構造物、走行車両に発生する非定常空気力の発生機構の解明、(ウ)一地点、もしくは線状に広がりをもつ地域のリスクレベル評価法の構築から成る。

米国ではトルネードに対する原子力発電所のリスクレベルを10⁻⁷と規定しており、通常の強風とは別個に風荷重値、さらに飛散物の衝突、貫通に対する強度が要求されている(U.S. Nuclear Regulatory Commission, “Regulatory Guide 1.76, Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants”, March 2007)。これに対し、わが国の原子力発電所はもとより、液化天然ガス貯蔵施設、長大橋梁、高速鉄道などの重要構造物、施設であっても竜巻の影響は全く考慮されていないのが現状である。

本研究は、上記の全体構想中、(イ)に掲げた構造物、走行車両に発生する非定常空気力の発生機構の解明を目的とするものである。走行車両の空力特性についてはわが国の鉄道総合技術研究所のほか、英仏をはじめとするヨーロッパで研究が行われている。一方、竜巻に起因する飛散物やリスクレベル評価に関する研究は主に米国で実施されている(例えば、Y.K.Wen, S.L.Chu: Tornado Risks and Design Wind Speed, Proc. of ASCE, ST12, 1973, pp.2409-2421)。非定常空気力に関する研究は実施例が少なく、走行車両模型を用いた研究のほか、わが国では研究代表者等のグループの他に数機関で行われるのみであり、未着手、未解明の点も多い。

研究代表者等のグループは地下鉄東西線の横転事故、山陰本線餘部橋梁の横転、転落事故を動機に、突風を受ける車両に発生する揚力の発生機構について実験的に検討を加えているほか、円柱、角柱などの基本形状の抗力に関する非定常性についても研究を行っている(M. Matsumoto, H. Shirato, et.al.: Drag force on 2-D cylinders due to sudden increase of wind velocity, Proc. of 12th Int. Conf. on Wind Eng., 2007, pp.1727-1734)。これらは風速を急激に増加させることが可能な特殊風洞を用いた実験に基づいているが、

1) この特殊風洞で発生される気流は、風洞内の気流全体が同時に突然風下へ移動するため、実際の現象と異なる可能性があること。

2) 走行車両が突風を受ける場合、自身の走行速度による正面からの相対風速に加えて、地形、地物の影響を受ける突風が任意の風向から作用する。この状況を現行の特殊風洞で再現することが困難であること。

3) 構造物の評価のみならず、発生空気力の過渡特性を明らかにし、走行車両の突風に対するリスクレベル評価、安全性確保のためには、単に突風がもたらす風速の急激な変化のみならず、一時的にせよ定常値を大きく上回る空気力レベルの的確な評価が必要であること。

等の理由から、装置を新たに試作し、非定常空気力を計測する着想に至った。

2. 研究の目的

本研究では、

- a) 突風生成装置の試作(平成21年度)
- b) 非定常空気力の計測(平成21, 22年度)
- c) 既往の研究成果との比較(平成22, 23年度)

を通じて、より多様な条件の下で非定常空気力の特性を明らかにする。a)は、レール・台車・治具から構成されるものであり、図のように小型ファンを搭載して風洞内を風洞風速 U に等しい速度で曳航するものである。本装置は風洞天井面、もしくは風洞側壁に設置が可能な構造とすることにより、空中に配置された物体に鉛直ガストが作用する場合の非定常空気力(等価 Kuessner 問題、開床構造を有する橋梁桁上を走行する車両に相当する)、および地上を走行する車両に横風が採用する場合の非定常空気力、竜巻等の突風による地上構造物の非定常空気力を計測することがそれぞれ可能となる。

3. 研究の方法

平成21年度

前述の突風生成装置の試作に際し、留意点として

- ア) 曳航速度
 - イ) 鉛直ガスト生成用小型ファンの気流性能(風速分布、乱れ強さ)
 - ウ) 鉛直ガスト(w 成分)生成区間の全長
 - エ) 模型設置位置における主流風速(U)の均一性
 - オ) 模型設置位置における w 成分立ち上がり後の均一性
- が挙げられる。

ア)の曳航速度は、模型設置位置近傍で一定に保たれることが重要であり、合わせて過度な衝撃、振動を誘発することがない構造とする必要がある。

イ)は必要に応じて小型ファンを数台準備し、それらから発生する気流を集約する縮流洞の形状を、全高をなるべく抑え、かつファ

ンの効率を損なわないよう工夫する。ファン自体が風洞風速 U で移動するため、風洞内を流下する流体との相対速度は 0 であり、縮流洞の外形には流れの剥離等にとくに配慮する必要はないものと考えられる。

り)は鉛直ガスト (w) が生成される領域を主流 (U) 方向になるべく長く取り、少なくとも模型の断面全幅 (B) の約 3 倍 (約 1.0m) 程度とし、ステップ関数状の鉛直ガスト (sharp edge gust) の再現を目指す。

え)は w の作用する領域の端部境界面における流速が不連続となることによる流れの攪乱が懸念される。想定される対策として小型ファン吹き出し口の形状工夫が挙げられる。

わ)は小型ファンの出力の均一化を吹き出し口の流速分布や複数ファンの場合の回転数の差異を調整することにより、対応する。

なお、以上の突風生成装置の試作が、平成 21 年度内に完了しない場合には、翌 22 年度も引き続き装置の改良に取り組む。万一、所定の突風生成が困難と判断された場合には、レール・台車を風洞内から実験室床面に移設し、模型、ロードセル系を台車上に乗せ突風区間に突入させる代替装置に変更する。突風区間は既設の吹き出し式風洞の最下流部を用いる。ロードセルから伸びるケーブルは長尺のものを保有しており、台車の曳航の障害にならぬよう予め配慮する。

突風発生装置の試作が完了した時点で、非定常空気力の計測を開始する。

平成 22 年度

次の各状態における非定常空気力の計測を実施する。

ア) 中空の 2 次元剛体模型に作用する非定常空気力の計測 (等価 Kuessner 問題)

イ) 地上の走行車両模型に作用する非定常空気力の計測

ア)はまず平板を対象に非定常揚力の計測を行い、Kuessner 関数との対比を行うことにより、本装置の精度を検証する。計測に際しては曳航速度 (= 風洞風速) を増減し、sharp edge gust に突入する無次元時間を変化させ、各々の状況下で計測する。予め模型近傍に設置された風速計により主流、鉛直両風速成分を同時計測し、解析的に得られる過渡揚力と、計測値を比較する。次いで各断面辺長比を有する矩形断面、円柱、等の基本形状を対象に揚力、ピッチングモーメントを計測する。

イ)では地上走行車両に突風が水平に作用する状況を風洞内に再現させるため、レールを風洞側壁上に設置し、小型ファンより水平風を発生させる。車両模型を風洞床面上に先頭を上流側へ向けて設置し、床下にセットされたロードセルにより横力 (車両長手直角方向の水平分力)、抗力 (車両長手方向の水平分力) をそれぞれ計測する。主流風速 (U) および水平風速 (v) をそれぞれ調節すること

により、相対風向を変化させ、各条対における先頭車両、中間車両の非定常空気力を計測する。また突風の車両掃引時間 (先頭車両 1 両が突風に晒される時間) による非定常空気力の変化を調査するため、 U をパラメータに各空気力成分を計測する。

ア)およびイ)それぞれ、模型表面の非定常圧力の計測も併せて実施し、突風作用時の物体周囲の流れの状況を考察する。

平成 23 年度

一連の非定常空気力測定結果より、突風の立ち上がり時間と、非定常空気力の最大値 (定常値で基準化) の関係を物体の形状ごとに明らかにする。これより列車走行速度の規制値に対する目安を見いだすと共に、突風を受ける構造物や空中の物体に発生する過渡空気力緩和のための空力対策について検討を加える。本研究の最終年度にあたるため、研究成果のとりまとめを行う。

4. 研究成果

平成 21 年度は小型ファンを風洞内で曳航する形式の詳細設計を検討するとともに、突風生成装置を試作するための予備実験として、風洞内に開閉式の簡易シャッターを設置し、人力による急開時の風洞内風速変化を計測し、突風立ち上がり時間を短縮するための装置改作に取り組んだ。その結果、吹き出し式風洞では、シャッター閉塞時のファン駆動用モータ過負荷がシャッター急開により解放され、ファンの回転数が徐々に増加することにより、風速が本来の定常値に達するまでに時間遅れがあること、閉塞時のモータ過負荷を軽減するために側壁に開口部を設け閉塞時の気流を風洞外に逃がす形式に代えても上記の時間遅れの解決には至らないことが明らかとなった。この時間遅れは吹き出し式風洞のもつ本質的課題であり、抜本的な解決には相当の検討を要するものと考えられる。このため予備実験を断念し、続いて実験室内のレール上を台車が移動し、横風区間に突入する装置を試作するため、台車駆動用のエアシリンダを購入し、平成 22 年度の装置試作に継続する準備を整えた。また、小型ファンの風洞内曳航は、高速かつ一定の曳航速度の制御が困難であると結論し、上記のレール・台車式の装置の試作を急ぐこととした。

一方、既存の突風風洞を用いて、突風作用時の矩形断面の過渡揚力発生機構について、空気力および表面圧力計測ならびに流れの可視化を行い、断面側面の剥離バブルが風速増加中に一時的に形成され、これが過渡揚力の特徴づけることが明らかとなった。(図-1、図-2 参照)

平成 22 年度は、レール・台車を実験室床面に設置し、模型、ロードセル系を台車上に

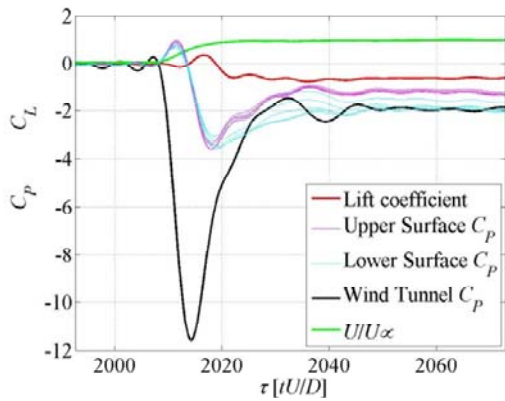


図-1 風速急変時の揚力，表面圧力変化
(正方形断面，迎角 $\alpha=10[\text{deg}]$ ， $U_\infty=4.0[\text{m/s}]$)

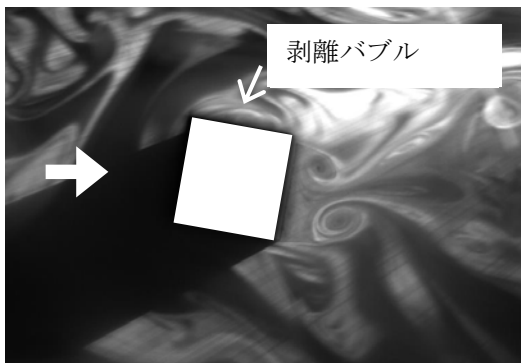


図-2 風速急変による揚力ピーク発生時の流れのパターン
(正方形断面，迎角 $\alpha=10[\text{deg}]$ ， $U_\infty=4.0[\text{m/s}]$)

乗せ突風区間に突入させる装置を試作した。突風区間は既設の吹き出し式風洞の最下流部を用い，ひずみゲージを用いた横力検出器を2次元剛体模型内部に装備した。模型断面は正方形であり，模型走行速度は約5m/s，走行直角方向の横風風速は約1m/sとした。この状態では，風の相対入射角は 11.3° であり，同一の角度で一定の風速を受ける場合には横力の作用方向は横風方向の上流側を向くのにに対し，横風区間突入直後に横風方向下流側を示した後に前述の定常状態の方向へ変化する過渡特性を示した。(図-3 参照) このことより，定性的には等価 Kuessner 問題が再現されたものと判断されたが，横風突入前にすでにカルマン渦による揚力変動が大きく，上述の過渡揚力変動を明確に分離して計測することが困難であった。仮に走行速度や横風風速をより高く設定しても，揚力変動の周期とともに過渡揚力変動が生じる時間も同時に短くなるため，両者個々の制御が本質的に不可能であり，過渡特性とカルマン渦の間に密接な関係が存在することが明らかとなった。

一方，既設の吸い込み式突風発生風洞を用い，原子力発電所内の排気煙突を単純化した

近接5本円柱を対象に，過渡空気力および表面圧力計測，流れの可視化実験を行った。5本円柱全体では特徴的な過渡空気力は発生しないものの，表面圧力計測より各円柱個々の空気力は単独円柱とは大きく異なり，上流方向の抗力を一時的に生じる場合もあることが見出され，円柱間を流れるジェットと円柱外側の剥離せん断流れが複雑な過渡空気力を決定することが明らかとなった。(図-4，図-5 参照)

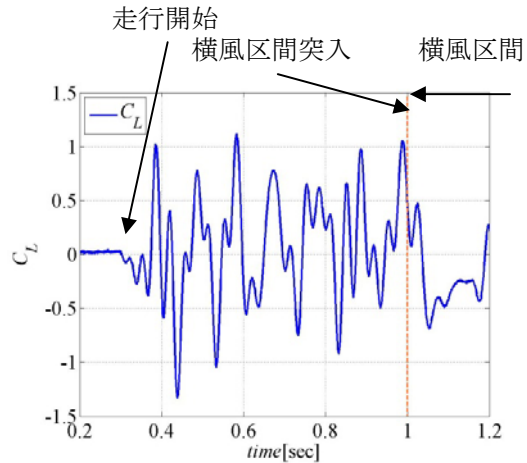
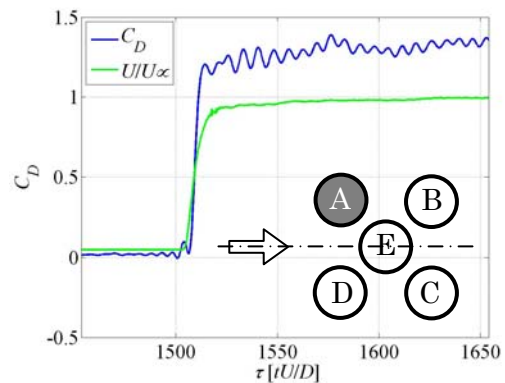
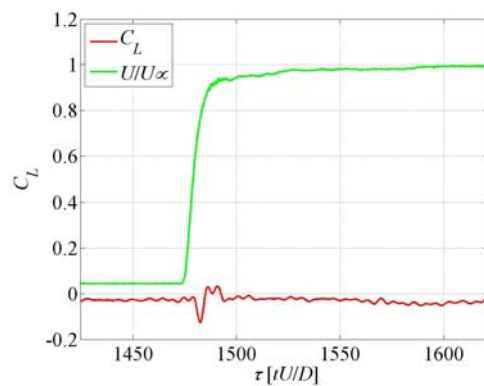


図-3 横風区間突入時の揚力変化(正方形断面，走行速度 $U=5[\text{m/s}]$ ，風洞風速 $w=1[\text{m/s}]$)



(a) 抗力



(b) 揚力

図-4 風速急変時の空気力時間変化
(5本円柱全体，迎角 $\alpha=0[\text{deg}]$ ， $U_\infty=3.0[\text{m/s}]$)

平成 23 年度は、前年度の横風区間突入実験で指摘された非定常空気力とカルマン渦の関係に焦点を当て、数値シミュレーションによる非定常空気力の発生機構とカルマン渦との関連について研究を実施したほか、竜巻移動時の風速時刻歴について新たに検討を加えた。さらに、5 本円柱の非定常空気力について昨年度に引き続き検討を加えた。

- ア) 風速急変時に 2 次元矩形柱に作用する非定常空気力の数値シミュレーション (等価 Kuessner 問題)
- イ) 竜巻移動時の風速時刻歴のシミュレーション
- ウ) 風速急変時に 5 本円柱に作用する非定常空気力の計測

ア) は風速急増時の 2 次元矩形柱周囲の流れの時間変化を数値シミュレーション (3 次元 LES) により再現し、矩形柱に作用する非定常空気力を求めた。その際、風速一定のときのカルマン渦放出周期を基準に風速立ち上がり時間を種々変化させ、風速の立ち上がり開始から揚力のピークが発生するまでの時間 t_L と風速が定常値に達するまでに要する時間 t_U との関係を示した。その結果、揚力ピーク、抗力ピーク発生時の流れのパターンは t_U に依存せず常に同一のパターンであること (図-6 参照)、および t_L と t_U はほぼ線形関係にあること、揚力ピーク発生時の風速 $U(t_L)$ で無次元化した場合、 t_L とカルマン渦放出周期 ($1/St$) の関係が見られる結果が得られた。とくに t_L と $1/St$ の関係は、断面比 B/D によって t_L 増加に伴い漸近する t_L が異なることが明らかとなり、いずれも $1/St$ の整数倍という興味深い結果が得られた。

(図-7 参照) このメカニズムについては今後の課題としたい。また、 t_U の変化による揚力ピーク値の変化は、既に報告されている通り t_U の低下に伴い指数関数的にピーク値が増加する傾向も数値計算結果から確認された。今後、数値シミュレーションと風洞実験結果との整合性を空気力、表面圧力からも確認するとともに、他の断面比 (断面幅/断面高さ) で同様の検討を加えることにより、非定常空気力発生機構の解明にさらに迫ることが可能と考えられる。

イ) では竜巻を単一のランキン渦と仮定し、場の風により移動する竜巻周囲の各位置で観測される風速の時刻歴を数値的に求めた。さらに、鉄道車両の断面を $4m \times 4m$ の正方形と仮定し、前述の風速時刻歴より、各地点に車両があるときに想定される最大揚力を求めた。この方法は、風速急変時の鉄道車両の安全性評価に必要な情報を与えるものであり、本研究で仮定した値のみならず、より広範なケーススタディを今後実施する必要性が見出された。

ウ) では、22 年度に 5 本円柱を対象に測定を行ったところ、風速一定のもとでは発生しない突風作用時固有の空気力 (負の抗力) が発生するケースの存在が見出されたため、圧力と空気力の対比や各円柱の非定常空気力の同時計測を実施した。その結果、模型サイズ等、測定精度に本質的な問題があることが明らかとなった。十分な精度を有する実験を行うためには大型の実験装置が必要となるため、今後既存の風洞の改良を継続して試みる予定である。

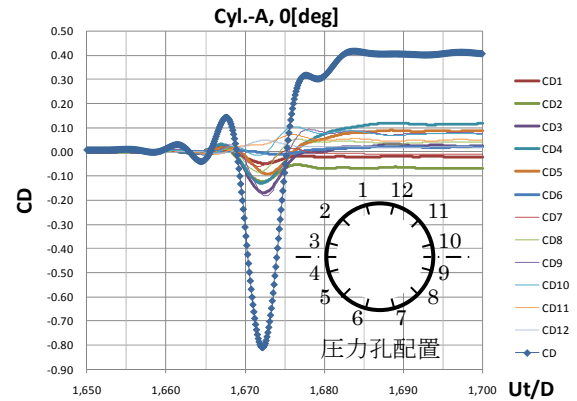


図-5 風速急変時の表面圧力変化 (円柱 A, 迎角 $\alpha=0[\text{deg}]$, $U_\infty=3.0[\text{m/s}]$)

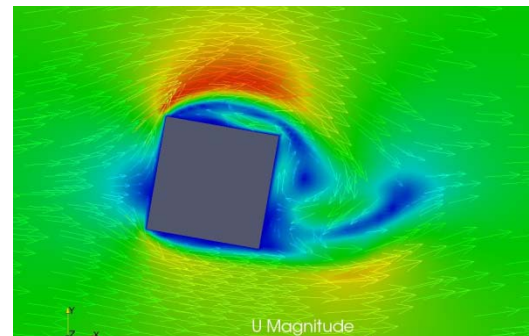
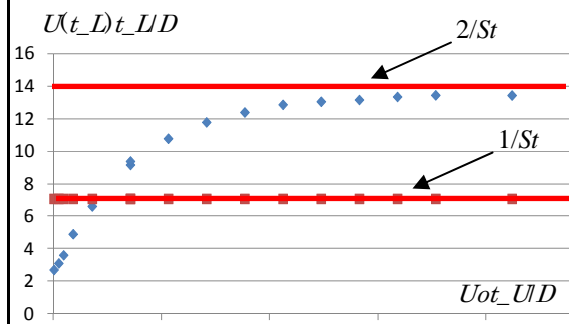
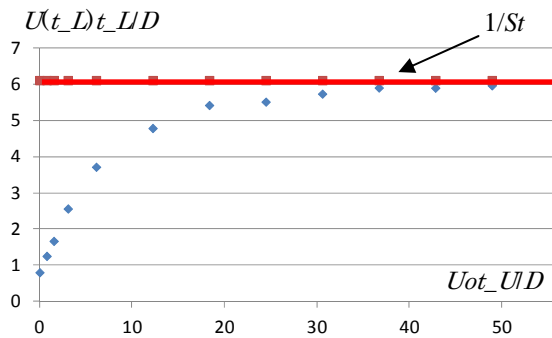


図-6 LES による風速急変に伴う揚力ピーク発生時の流れのパターン (正方形断面, 迎角 $\alpha=10[\text{deg}]$, $U_\infty=3.0[\text{m/s}]$, 風速立ち上がり時間 $t_U=0.0706[\text{sec}]$)



(a) 正方形断面, 迎角 $\alpha=10[\text{deg}]$, $U_\infty=3.0[\text{m/s}]$



(b) $B/D=0.5$ 矩形断面, 迎角 $\alpha=10$ [deg], $U_\infty=3.0$ [m/s]

図-7 風速立ち上がり時間 t_U と揚力発生時間 t_L の関係

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 10 件)

- ① Hiromichi Shirato, Osamu Sasaki, Kenji Inage, “Flow Around a 2-D Bluff Body with Increasing Wind Velocity in Short Time Duration”, Proceedings of the 11th Asian Symposium on Flow Visualization, 査読有, ASV11-99-10, 2011, Compact Flash
- ② 白土博通, 佐々木治, 稲毛健至, “突風作用下の柱状構造物の非定常空気力”, 第60回理論応用力学講演会講演論文集, 査読有, OS16-07, 2011年, Compact flash
- ③ 稲毛健至, 白土博通, 八木知己, 佐々木治, “風速急変時における近接5本円柱の空力特性に関する研究”, 日本風工学会誌, 査読無, vol.36, No.2, 2011年, pp.173-174
- ④ 白土博通, 前田耕治, 加藤嘉昭, 高杉祐仁, 佐々木治, “非定常空気力特性の実験的解明—その2 2次元角柱に作用する非定常空気力特性—”, 日本風工学会誌, 査読無, 第35巻第2号, 2010年, pp.130-138
- ⑤ Hiromichi Shirato, Yuichi Sato, Osamu Sasaki, Do Van Bao, “Study on Aerodynamic Forces of Basic Structural Sections by Gusty Wind”, Proceedings of the 23rd KKCNN Symposium on Civil Engineering, 査読無, 2010, pp.229-232
- ⑥ 佐々木治, 白土博通, 加藤嘉昭, “突風発生時における構造基本断面作用する空気力に関する実験的研究”, 第21回風工学シンポジウム論文集, 査読有, 2010年, pp.191-196
- ⑦ Hiromichi Shirato, Kohji Maeta, Yoshiaki Kato and Yuji Takasugi, “Transient Drag

Force on 2-D Bluff Bodies under Gusty Wind Condition”, Proceedings of the 7th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, 査読有, 2009, pp. 258-264

[学会発表] (計 9 件)

- ① Hiromichi Shirato, Osamu Sasaki, Kenji Inage, “Transient aerodynamic forces on structural members due to sudden increase of wind velocity”, Research Seminar on Full-Scale Monitoring for Wind Disaster Mitigation, November 3, 2011, Kyoto University
- ② 稲毛健至, 白土博通, 八木知己, 佐々木治, “近接5本円柱の風速急変時における空力特性に関する研究”, 土木学会第66回年次学術講演会, 2011年9月7日, 愛媛大学
- ③ Hiromichi Shirato, Osamu Sasaki, Kenji Inage, “Transient aerodynamic forces on 2-D five circular cylinders in a group due to short-rise-time gust”, 5th International Symposium on Wind Effects on Buildings and Urban Environment Wind Hazard Resilient Cities: New Challenges, 8, March, 2011, Tokyo
- ④ 佐々木治, 白土博通, 八木知己, 加藤嘉昭, “風速急変時における構造断面に作用する過渡空気力に関する基礎的研究”, 土木学会第65回年次学術講演会, 2010年9月1日, 北海道大学
- ⑤ Hiromichi Shirato, Koji Maeta, Yoshiaki Kato, Yuji Takasugi, Osamu Sasaki, “Transient Aerodynamic Forces due to Gusty Wind”, The 3rd Asia Bridge Summit, 7, Aug., 2010, Shanghai, China
- ⑥ 加藤嘉昭, 白土博通, 前田耕治, 高杉祐仁, “突風発生時における構造基本断面のovershoot現象に関する研究”, 平成21年度日本風工学会年次研究発表会, 2009年5月27日, 日本大学理工学部

6. 研究組織

(1) 研究代表者

白土 博通 (SHIRATO HIROMICHI)
 京都大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：70150323

(2) 研究分担者

八木 知己 (YAGI TOMOMI)
 京都大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：30293905