

三次元形状屋根模型の突風風力計測システムの構築

高橋, 駿介

九州大学大学院人間環境学府都市共生デザイン専攻 : 修士課程

大坪, 和広

九州大学大学院人間環境学府都市共生デザイン専攻 : 博士後期課程

鶴, 則生

九州大学大学院人間環境学府

前田, 潤滋

九州大学人間環境学研究院都市・建築学部門

<https://doi.org/10.15017/1515822>

出版情報 : 都市・建築学研究. 26, pp.35-40, 2014-07-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

バージョン :

権利関係 :

三次元形状屋根模型の突風風力計測システムの構築

Wind Force Measurement System for Three-Dimensional Roof Body under a Gusty Wind

高橋駿介*, 大坪和広**, 鶴 則生***, 前田潤滋****

Shunsuke TAKAHASHI, Kazuhiro OTSUBO, Norio TSURU and Junji MAEDA

Some devices which a gusty wind tunnel test requires to measurement of a lift force on a body were reported. The effect of an instantaneous drop in a reference pressure inside of the tunnel associated with a sudden change of wind speed was able to be avoided by putting a specimen between two aerodynamic balances. This measurement system is favorable to measure the wind forces of a body in three dimensional wind flows too. Using the system, it was found that gusty wind forces on a gable roof body under a two-dimensional flow and three-dimensional flow had some differences.

Keywords: *Overshoot of wind force, Wind tunnel test, Gusty wind, Unsteady wind force, Three-dimensional model*
風力のオーバーシュート, 風洞実験, 突風, 非定常空気力, 三次元形状模型

1 序

風洞実験によって構造物の風荷重を検討する場合に、自然風の乱れを模擬した検討でも20%程度の乱れを持つ準定常流を対象にしたものがほとんどで、竜巻や台風時などに見られる風速の立ち上がり時間が非常に短い突風に対する構造物の風力特性の検討は少ない。しかしながら、角柱や楕円柱などの二次元模型での検討では、非常に短い風速の立ち上がりを有する突風は定常風力より大きな非定常風力を引き起こすことが指摘されている¹⁻⁵⁾。

一方で、後述するように突風風力の測定では突風生成に伴う風洞内の急激な圧力降下により、風洞床面や端板(後述の図1と図2)に置いた試験体の揚力を、空力天秤を用いた通常の方法で正確に計測することが難しい。大坪ら⁶⁾はこの影響を排除するために、図3に示すように、床面に見立てた疑似地面板を垂直に立て、これに試験体を隣接設置して、空力天秤の水平成分 F_Y 成分を揚力として非定常風力の計測を行った。しかしながら、この測定法は模型を支持するシャフトやこのシャフトの影響を除去するダミー模型が必要となり、また二次元試験体に限定されるので、三次元流れ場を必要とする通常の建物や

ドームのような試験体模型の風力測定に利用できない。

本論は、建物に作用する突風風力の三次元計測の実現を目的として、二つの動的空気天秤を用いた新たな計測システムを構築し、その実験検証を行う。またこの計測システムを用いて、突風風力に及ぼす二次元流と三次元流の影響について検証する。

2 風洞概要

実験は九州大学大学院人間環境学研究院のエッフェル型吸込式風洞を用いて行った。風洞断面内での各計測機器の配置状況を図1に示す。計測部断面寸法は1.5m×1.5m、計測部全長は3mである。本風洞は、脈動流生成装置の翼列駆動を利用することで、ステップ関数的な突風を生成するもので、脈動流生成装置の翼列を閉じることで風洞内を無風状態にし、翼列を瞬時に開放することで最短0.2秒の立ち上がりを持つ突風を生成することが可能である。また本風洞は吸い込み式であるので、翼列を閉鎖した状態での吸引部の圧力低下の回避を行うために吸引部の天井と床面に翼列を配置して、突風制御の翼列閉鎖と反転同期させている。風力は、動的空気力天秤を用いて測定し、計測位置における風洞内の風速は熱線風速計を用いて測定した。測定のサンプリング周波数は風力と風速ともに1000Hzである。

* 都市共生デザイン専攻修士課程

** 都市共生デザイン専攻博士後期課程

*** 人間環境学府

**** 都市・建築学部門

3 二つの空力天秤を用いた計測システムの構築

3.1 通常の揚力測定に及ぼす静圧変動の影響

図2(a)に示すように、試験体を設置していない状態で、無風時から立ち上がる所定の風速（以下、目標風速 U_t ）が 4m/s で、目標風速までの立ち上がりに要する時間（以下、立ち上がり時間 t_r ）が 0.2 秒のステップ関数的突風を発生させた場合に、空力天秤が出力した端板上での風力 (F_x , F_y , F_z) の波形を図2(b)に示す。図2(a)に示す F_x , F_y , F_z の出力成分のうち、 F_x と F_y はほとんど 0 であるが、 F_z に大きなパルスが生じている。このパルスは風速の急激な変化によって風洞内の静圧が瞬間的に大きく降下したために端板上に風洞内方向の力が作用したことを示す。試験体を端板に直接設置した場合、揚力計測に使用する空力天秤の F_z 出力値が圧力降下の影響を含むために試験体に作用する揚力を正確に測定することができない。

3.2 二つの空力天秤を用いた実験装置

静圧変動の影響を回避するために、二つの空力天秤を用いて F_z 成分を使用しない計測システムを図4のように構築した。シャフトを介して試験体に作用する風力を左右の二つの空力天秤に分けて測定する。このように各器具を設置することで静圧変動に起因する揚力方向への影響を回避でき、かつ三次元模型を設置できる。なお、試験体下部に 1mm の隙間を開けて疑似床板を設置する。

3.3 試験体及び流入風の概要

上記計測システムを用いて、切妻屋根模型(桁行長さ 300mm 、梁間長さ 150mm 、軒高 150mm の直方体模型の上部に勾配 $1/2$ 屋根を設置)の突風時の風力を測定した。実験変数を目標風速 U_t と立ち上がり時間 t_r として、目標風速を $2\sim 8\text{m/s}$ で、風速の立ち上がり時間に対応する翼列の開放時間を $0.2\sim 0.8$ 秒までの 0.2 秒刻みに変化させた4ケースで実施した。なお、それぞれのケースについて3回ずつ測定した。また、二次元流れの実験の場合には、図4(c)のように試験体の左右にシャフトを覆うように試験体と同寸法のダミー模型を設置し、同様に計測を行った。なお、試験体とダミー模型の間には 1mm の隙間を設けている。

3.4 データ処理

空力天秤を二つ用いているため、各種ノイズの影響は空力天秤を一つだけ用いる既往の実験に比べ相対的に大きくなる。計測時刻歴波形への混入ノイズ処理のため、各目標風速と立ち上がり時間毎に、風速と風力の時刻歴波形に対しアンサンブル平均を行った。しかしながら、アンサンブル平均は不規則変動するノイズ処理には有効であるが、風速立ち上がり開始時に発生する翼列による振動など、毎回同じ時刻に発生するノイズには効果

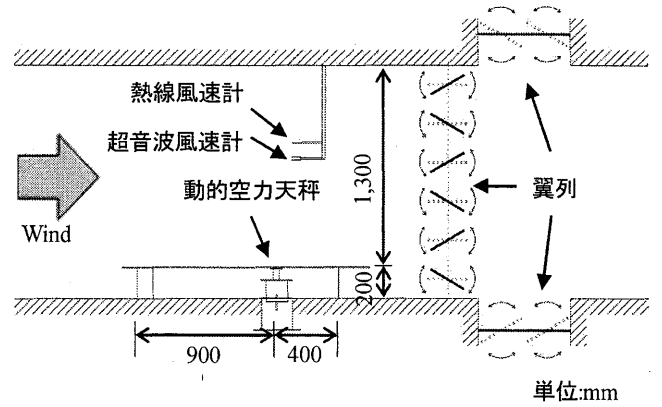
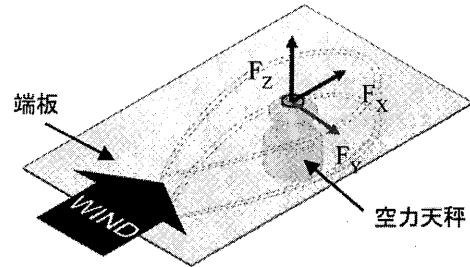
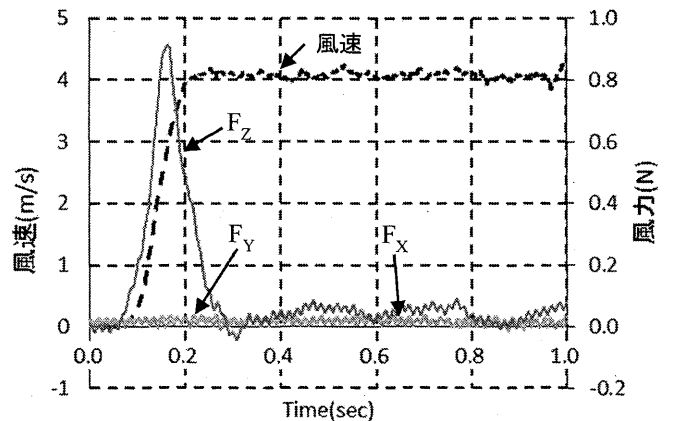


図1 風洞断面図



(a) 空力天秤の各成分の定義



(b) 突風時の計測波形

図2 試験体未設置状態で突風生成時に空力天秤が計測する力

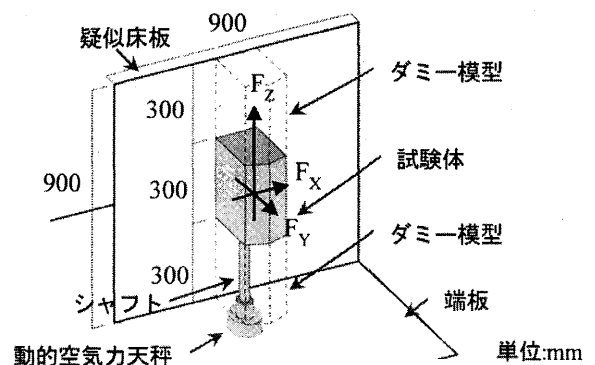


図3 大坪らによる疑似床板を用いた風力測定実験装置

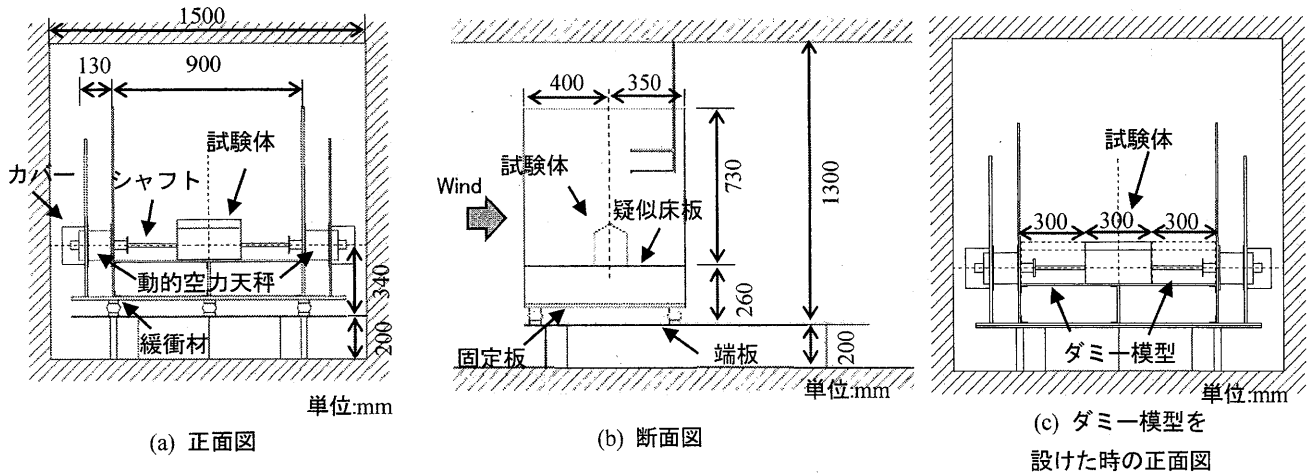


図4 2つの空力天秤を用いた突風時の風力測定システム図

が薄い。その影響を抑制するために次式 (1) で定義される加重移動平均 \bar{P} を用いた。

$$\bar{P}_M = \frac{nP_M + \sum_{j=1}^n (n-j)(P_{M+j} + P_{M-j})}{n + 2\sum_{j=1}^n (n-j)} \quad (1)$$

ここで n は平均化個数, P_M は M 番目のサンプル, \bar{P}_M は加重移動平均の処理を行った M 番目のサンプルである。本報告では平均化個数 n を 30 とした。

また, 図 4 (a) に示すように試験体以外の箇所に作用する風力を空力天秤が測定しないように, 天秤の一部にカバーを設けたが, シャフト部分などカバーを設けることができない箇所に作用した風力の影響を除去するため, 試験体を設置しない場合でも同一の実験変数で測定を行って両者の差をとった。

図 5 に試験体を設置しない場合での目標風速 4m/s で立ち上がり時間 0.2 秒の突風の時刻歴波形と風力波形を示す。風速の立ち上がりに伴ってわずかに風力が出力されるが, これは翼列の回転による振動の影響である。図 5 の揚力と図 3 (b) の F_z 成分と比較すると, 揚力のピーク値が抑えられており, 揚力の計測における風洞内の圧力降下の影響除去が進んだことがわかる。また, 突風生成後の定常時に生じる風力はシャフト等に作用しているものである。

試験体の有り無しのそれぞれの場合の風力の時刻歴波形にアンサンブル平均と加重移動平均を行い, 試験体を設置した場合の風力波形から, 試験体を設置しない場合の風力波形を差し引くことで, 試験体に作用した風力波形とした。なお, ダミー模型を設置した場合においてはシャフトがダミー模型に覆われるため, この処理は行わないこととした。

4 二次元流れでの既往研究との比較

二つの空力天秤を用いた新たな実験装置にダミー模型を設置して二次元流れを模擬した場合と前述した既往の実験⁹⁾結果を比較する。図 6 に目標風速 4m/s で翼列の

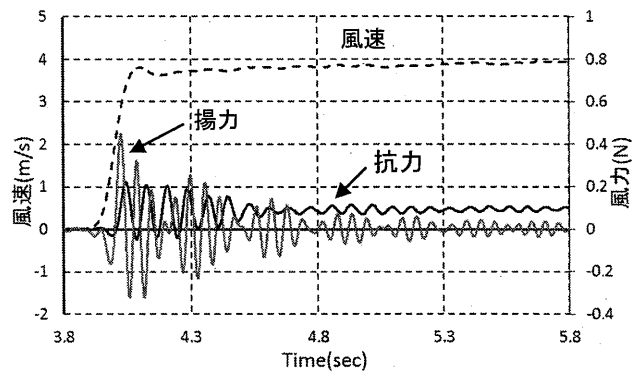


図5 試験体未設置時の風速と風力の時刻歴波形 ($U_t=4\text{m/s}$, $t_r=0.2$ 秒)

開放時間 0.2 秒の突風風速の時刻歴波形と模型に作用する風力の時刻歴変化を示す。定常時の変動振幅を見ると, 3.4 節で示した二つの平均化処理を施していない既往の実験の波形の方がより大きい, 突風立ち上がり時のピーク値はよく一致している。抗力では風速が目標風速に達する直前に定常値以上のピーク値が現れるオーバーシュート現象が発生し, その後急激に定常値に落ち着いた。揚力のオーバーシュート現象は, 抗力のオーバーシュート現象が発生した後, 風速が目標風速に達するほぼ同時刻に現れた。これらはオーバーシュート現象が発生するいずれの実験変数でも同様の傾向を示すことを確認した。

図 7 に切妻模型における無次元立ち上がり時間とオーバーシュート係数の関係を示す。オーバーシュート係数は風力のピーク値と定常値の比で定義され, 無次元立ち上がり時間 t' は次式 (2) で定義される。

$$t' = U_t \cdot t_r / d \quad (2)$$

ここで, t' は無次元立ち上がり時間, U_t は目標風速, t_r は立ち上がり時間, d は代表長さである。立ち上がり時間には翼列の開放時間を, 代表長さには模型の奥行き (梁間長さ 150mm = 0.15m) を用いた。なお, 風力のピーク値はそれぞれの試行での最大値としたため, 実際にはオーバーシュート現象が発生していないに関わらず, 定

常状態の振動の最大値でオーバーシュート係数を求めている場合も含まれる。

図7(a)に示す抗力では、無次元立ち上がり時間が10より小さい範囲で、無次元立ち上がり時間が小さくなるにつれてオーバーシュート係数が増加する傾向が見られ、既往の実験のほぼ同一直線上にプロットされることがわかる。無次元立ち上がり時間が10より大きい範囲ではオーバーシュート係数はほぼ一定の値に収束していき、その傾向は既往の実験結果とほぼ同様であった。図7(b)に示す揚力においても、無次元立ち上がり時間が10より小さい範囲で、無次元立ち上がり時間が小さくなるにつれてオーバーシュート係数が増加する傾向が見られ、既往の実験との大きな差は見られなかった。

以上より、本実験システムを用いて、従来の2次元模型の突風風力と同等の測定ができることを確認した。

5 二次元流れと三次元流れでの非定常風力の比較

5.1 計測波形と定常時風力係数の比較

本測定システムで試験体のみを設置して「二次元流れ」とした場合とダミー模型を併置して「二次元流れ」とした場合での、目標風速4m/sで立ち上がり時間0.2秒の突風を熱線風速計で測定した風速の時刻歴波形と風力波形を図8に示す。抗力と揚力のいずれもピーク値が現れるタイミングはダミー模型の有無によらずほぼ一致してお

り、これはオーバーシュート現象が発生するいずれの実験変数でも同様であった。三次元流れの場合では、二次元流れの場合と比較して突風生成時のピーク値が小さくなる傾向が抗力と揚力の両方で見られた。

図9に次式(3)で表される各条件での定常時の風力係数を示す。

$$C_f = F / \frac{1}{2} \rho U_t^2 A \quad (3)$$

ここで、 C_f は風力係数、 F は定常時の風力、 ρ は空気密度(1.2kg/m³)、 U_t は目標風速、 A は計測模型の見つけ面積(m²)である。

定常時の抗力係数において、三次元流れの場合では目標風速によらずほぼ一定の値を取るが、二次元流れの場合に目標風速が大きくなるにつれて抗力係数が大きくなる傾向が見られる。しかしながらその差は±0.1程度であり、ダミー模型の有無による影響は大きくないと言える。

定常時の揚力係数では、三次元流れの場合は目標風速が大きくなるにつれてわずかに小さくなる傾向を示した。一方、二次元流れの場合は目標風速が大きくなるにつれて大きくなる傾向を示し、常に三次元流れの場合より大きくなる。

風洞実験の相似パラメータとしてレイノルズ数があり、計測模型の形状が相似でレイノルズ数が同じならば、同じ流れ場を形成しているとされるが、本実験で用いた試

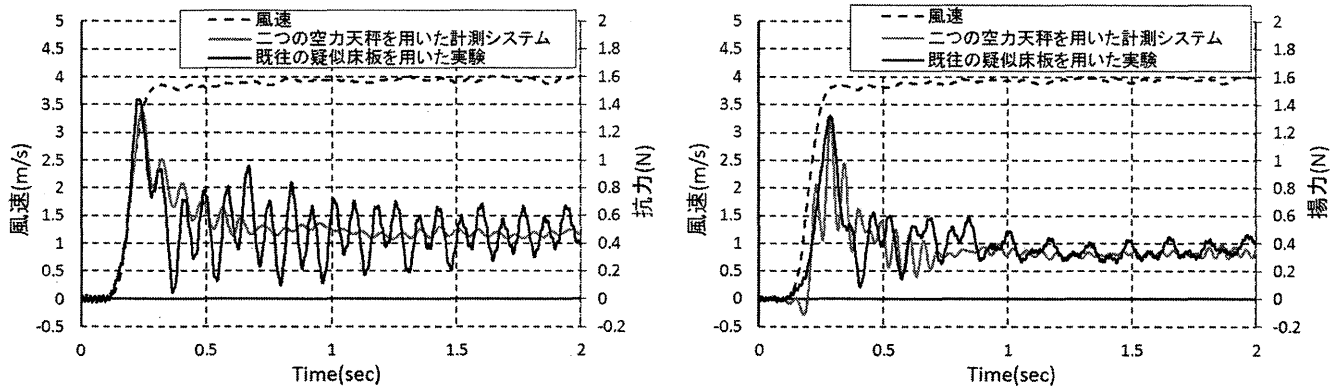


図6 風速と風力の時刻歴波形 ($U_t=4\text{m/s}$, $t_r=0.2$ 秒)

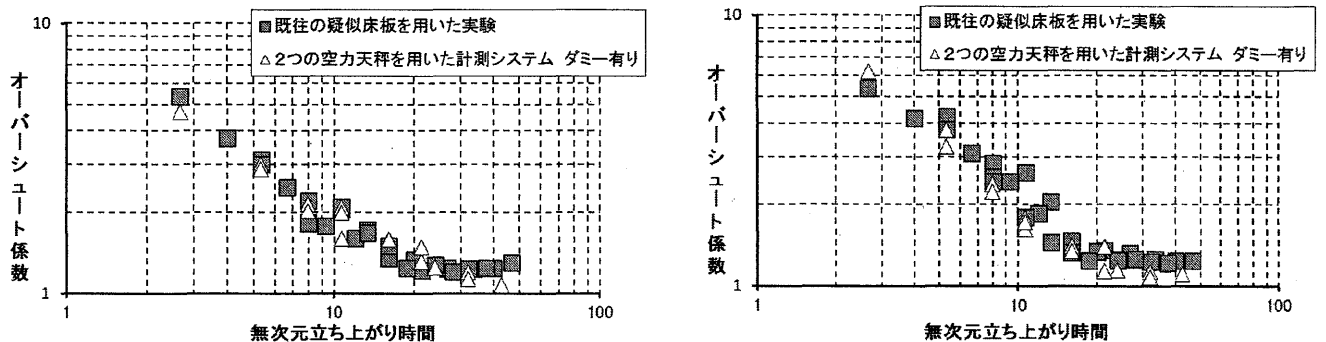


図7 無次元立ち上がり時間とオーバーシュート係数の関係

験体のようなブラフボディ周りの流れは広いレイノルズ数の範囲で大きく変化しないと言われており⁸⁾、各条件でそれぞれ一定の値を取るべきだと考えられる。しかしながら特に揚力においては、三次元流れと二次元流れの場合とで、目標風速によって定常時の風力係数に差異が生じており、数値流体解析などを用いての検討が必要だと考えられる。

5. 2 無次元立ち上がり時間とオーバーシュート係数の関係

図 10 に三次元流れと二次元流れの場合での、無次元立ち上がり時間とオーバーシュート係数の関係を示す。図 10(a) に示す抗力ではダミー模型の有無によってプロ

ットに開きが見られる。定常時の抗力係数はダミー模型の有無による影響を大きく受けないが、ダミー模型を外すことでピーク値は小さくなるため、計測模型のみを設置した場合の方がオーバーシュート係数は小さな値をとっている。また、三次元流れの場合では無次元立ち上がり時間が 10 程度からオーバーシュート係数が一定の値を取り始めるのに対し、二次元流れの場合では無次元立ち上がり時間が 20 程度から一定の値を取り始める。しかしながらダミー模型の有無に関わらず、無次元立ち上がり時間が 10 より小さい範囲では、無次元立ち上がり時間が小さくなるにつれてオーバーシュート係数が大きくなり、無次元立ち上がり時間が大きい範囲では一定

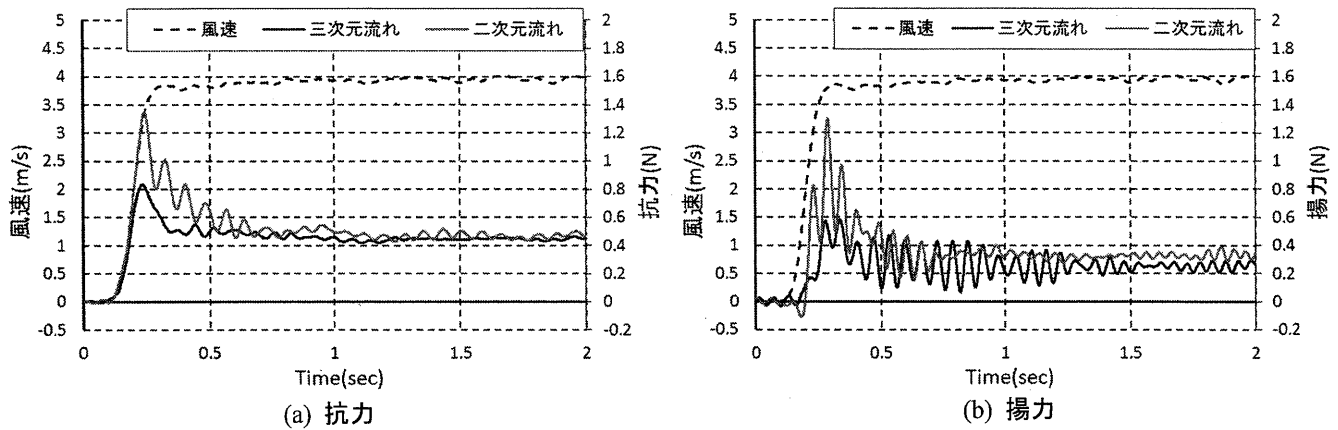


図 8 風速と風力の時刻歴波形 ($U_t 4\text{m/s}$, $t_r 0.2$ 秒)

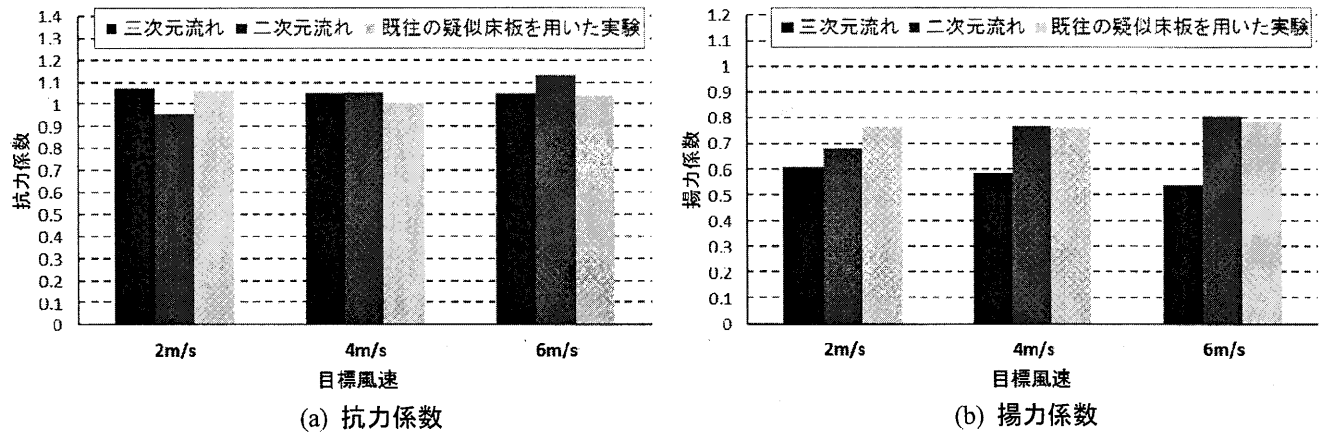


図 9 定常状態での風力係数

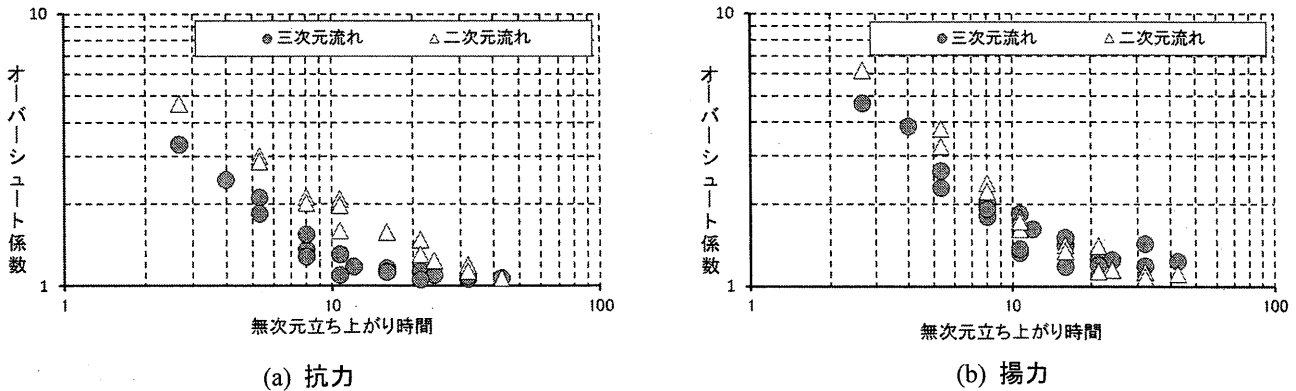


図 10 無次元立ち上がり時間とオーバーシュート係数の関係

の値に収束していくという同様の傾向が見られた。図 10 (b) に示す揚力においては、抗力のような大きな差は見られなかった。定常時の揚力係数では三次元流れの方が小さな値になったが、同様にピーク値も三次元流れの場合に小さくなる。そのため、ダミー模型の有無による無次元立ち上がり時間とオーバーシュート係数の関係への大きな影響は生じなかったと考えられる。

以上から、二次元流と三次元流とでは、模型周辺の風の流れ場に違いが生じるため、風力値やオーバーシュート係数の値には違いが生じるが、新しい測定システムにおいて三次元流れの場合でも同様に、突風を受ける計測模型の風力測定ができること、無次元立ち上がり時間とオーバーシュート係数には関連が見られることを確認した。

6 まとめ

本論では、三次元形状模型においても突風時に作用する風力を測定できるシステムを構築することを目的として、二つの空力天秤を用いた計測システムを作成し、実験的検証を行った。切妻屋根模型を用いて既往の疑似床板を用いた実験結果との比較を行うとともに、新しい測定システムにおいて試験体のみでの三次元流れとダミー模型を併用した二次元流れの測定結果の比較を行い、以下の所見を得た。

- 1) 構築した計測システムにより、風洞内の圧力降下の影響を除去して突風を受ける切妻模型の揚力の計測ができることを確認した。
- 2) 風力のオーバーシュート現象が発生する場合、抗力でピークが現れた後に揚力のピークが現れることを確認した。
- 3) 抗力と揚力ともに、オーバーシュート係数と無次元立ち上がり時間の関係において、既往の疑似床板を用いた実験結果と同様の傾向を示した。

二つの空力天秤を用いた計測システムにおける三次元流れと二次元流れとの相違に着目すると、

- 4) 定常時の抗力係数に大きな差は見られなかったが、三次元流れでの抗力のピーク値は小さくなり、三次元流れか二次元流れかによって無次元立ち上がり時間とオーバーシュート係数の関係には差が見られた。
- 5) 揚力においては、三次元流れの場合、目標風速が大きくなるにつれて定常時の風力係数が小さくなる傾向を示したが、二次元流れの場合では目標風速が大きくなるにつれて風力係数がわずかに大きくなり、三次元流れの場合よりその値は常に大きくなった。しかし、ピーク値も同様に大きくなるため、無次元立ち上がり時間とオーバーシュート係数の関係には三次元流れか二次元流れかによる大きな影響は見られなかった。

- 6) 三次元流れと二次元流れのいずれの場合にも、抗力揚力ともに無次元立ち上がり時間が小さい範囲ではオーバーシュート係数が大きくなり、関連があることを確認した。

謝辞

本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金「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」(H26 年度基盤研究 (B)26282112, 代表: 前田潤滋) の助成を受けました。

参考文献

- 1) S. Taneda: The Development of the Lift of an Impulsively Started Elliptic Cylinder at Incidence, Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 33, No. 6, pp.1706-1711, 1972.
- 2) N. Shiraishi, M. Matsumoto, H. Shirato: A Fundamental Study about Unsteady Aerodynamic Characteristics of Structures due to Fluctuating Wind, Proc. of JSCE, No.328, pp.19-30, 1982.
- 3) M. Matsumoto., M. Shimamura, T. Maeda, H. Shirato, T. Yagi, K. Hori, Y. Kawashima, M. Hashimoto: Drag Forces on 2-D Cylinders due to Sudden Increase of Wind Velocity, 12th International Conference on Wind Engineering, Vol.2, pp.1727-1734, 2007.
- 4) 竹内崇, 早田友彦, 前田潤滋, 川下寛正, 中村諭史, 鶴則生: 楕円中の風力特性に及ぼす突風の立ち上がり時間の影響に関する検討, 都市・建築学研究九州大学人間環境学研究院紀要, 第 15 号, pp.43-48, 2009.1
- 5) 川下寛正, 前田潤滋, 鶴則生, 森本康幸: 風力特性に及ぼすステップ関数的突風の影響 衝撃風洞実験による検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.141-142, 2007.
- 6) 大坪和広, 友清衣利子, 鶴則生, 前田潤滋: 立ち上がり時間の短い突風を受ける切妻屋根形状物体の非定常風力に及ぼす屋根勾配の影響, 都市・建築学研究九州大学人間環境学研究院紀要第 23 号, pp.21-26, 2013.1
- 7) 野田稔, 久延周平, 脇孝文, 長尾文明: 突風作用時に正方形柱に作用する非定常抗力のオーバーシュート係数, 第 22 回風工学シンポジウム論文集, pp.133-138, 2012.
- 8) 日本建築センター: 実務者のための建築物風洞実験ガイドブック, pp.64-70, 1996.6

(受理: 平成 26 年 5 月 29 日)