論文

風速急変に因る切妻屋根建物のオーバーシュート風力と圧力分布の関係 Relationship of Overshoot Wind Forces Acting on Gable Roof Structures to Pressure Distributions Caused by Sudden-Changes of Wind Velocity

大坪和広^{*1}

前田潤滋^{*2}

Kazuhiro OTSUBO, Junji MAEDA

SUMMARY

To investigate the overshoot phenomenon of wind force caused by sudden changes of wind velocity, we measured wind forces acting on gable roof structures by a gust wind tunnel test and simulated the experimental results using CFD analysis. Our result showed that although the occurrence time of an overshoot peak drag force was different from that of a lift force, the bigger peak of drag and lift forces were generated by a gust wind with a shorter non-dimensional rise time. It was found that the first peak drag force appeared during an increasing gust wind velocity and a peak lift force followed after the gust reached a target wind velocity.

key words: unsteady wind force, short-rise-time gust, gable roof body

1. まえがき

非定常な流速の急変は、“流体力のオーバーシュート現象”を発生させることが知られている^{1~4)}。例えば、静止流体中から急に動き出す楕円柱に作用する流体力や物体周りの急変する流れに対する抗力係数が定常流時のそれより大きくなることを水槽実験で検証した Taneda¹⁾や Sarpkaya^{2,3)}、あるいは、突風生成風洞でステップ関数的突風に対する抗力のオーバーシュート現象の発生を示した松本⁴⁾と竹内⁵⁾の報告、さらに無風あるいは一定風速から短時間で立ち上がる風速急変での非定常風力の数

値流体計算に関する野村⁶⁾や竹内⁷⁾の報告などが挙げられる。しかしながら、これらの報告の多くは楕円柱や角柱などの基本断面形状に関するもので、車両形状模型の突風時風力を検討した竹内⁸⁾の報告を除いて、実際の建物のように地表面に接する構造物を対象とした報告は少ない。地面に立地する構造物を対象にした報告では、中村⁹⁾らの切妻屋根模型での非定常風圧力測定が挙げられる。そこでは非定常な風圧力を測定するための新たな工夫を取り入れて、切妻屋根模型での“風圧力”のオーバーシュート現象を報告しているが、“風力”について

*1 九州大学大学院 人間環境学府博士後期課程

Graduate Student, Graduate School of Human-environment Studies, Kyushu University

*2 九州大学 人間環境学研究院 教授

Professor, Faculty of Human-environment, Kyushu University

(原稿受理年月日: 2015年1月9日, 採用決定年月日: 2015年5月26日)

は十分に検討されていない。これらの報告はいずれも、模型周辺を取り巻く風速場が同時に急変する環境を作成し、自然風での突風が建物に作用する状況には必ずしも一致しないが、非定常な風力の基礎情報を提供している。

本報告では、切妻屋根形状物体を取り巻く風速場がステップ関数的に急変した状況下での非定常風力を測定した実験結果^{10,11)}を、風力（抗力と揚力）のピークが発生した時刻に着目して、切妻屋根勾配の影響を比較検討し、さらに数値流体計算で再現した切妻屋根模型周りの圧力分布の経時変化を追跡することによって、オーバーシュート現象発生メカニズムと非定常風力に及ぼす屋根勾配の影響を論じる。

2. 切妻屋根模型とステップ関数的突風の概要

図1に示すように、切妻屋根建物の模型躯体各辺の比を（梁間）：（桁行）：（軒高）＝1：2：1とし、これに1/2勾配と1/4勾配の切妻屋根を載せた。ここでは梁間長さが150mmの模型を使用した。

図2に風洞実験で用いた流入風速の時刻歴波形を示す。前述のように、流入風は模型周辺で同時に急変するステップ関数的突風であり、風速が立ち上がるのに要した時間を立ち上がり時間 t_r 、立ち上った後の平均風速を目標風速 U_t とし、立ち上がり時間を0.2～1.0秒で0.2秒刻み、目標風速を2～7m/sの範囲で1m/s刻みの計30通りの組み合

わせで実験した。以下では、開始風速を無風に、また図1に示すように風向を梁間方向とした。実験では後述の翼列の回転により流入風波形を式(1)の三次式で近似し、目標風速 U_t の20%と80%の風速（それぞれ U_{20} 、 U_{80} ）に達した時刻（それぞれ t_{20} 、 t_{80} ）を用いて立ち上がり時間 t_r を式(2)で定めた。

$$U(t) = -2U_t \cdot (t/t_r)^3 + 3U_t \cdot (t/t_r)^2 \quad (1)$$

$$t_r = 2.35(t_{80} - t_{20}) \quad (2)$$

ここで、 t ：時刻(sec)、 $U(t)$ ：時刻 t での風速(m/s)、 U_t ：目標風速(m/s)、 t_r ：立ち上がり時間(sec)である。なお、使用した、後述の疑似床面上の風速分布は一様分布のみであるが、オーバーシュート風力に関わる突風の立ち上がり時間に注目するため、他の風速分布での検討は今後の課題とした。

3. 突風風洞を用いた風力測定実験

3.1 実験装置概要

実験に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た。風洞断面内での各計測器の配置を図3に示す。測定部断面寸法は1.5m×1.5m、測定部全長は3.0m、測定部前面の風速調整部は2.0mである。本風洞は測定部下流に翼列を設置し、風洞ファンを稼働

図1 切妻屋根建物寸法

Fig.1 Measurements of gable roof bodies

図3 風洞実験配置図

Fig.3 Site plan of wind tunnel

図2 ステップ関数的突風の時刻歴波形

Fig.2 Time evolution of step-function-like gust

図4 模型配置図

Fig.4 Perspective view of installed model

させた状態で翼列を閉じることで測定部内を無風状態にする。その状態から翼列を回転することで測定部内に風を通し、短時間で立ち上がる突風を生成する。また無風時に閉じた翼列に圧力が掛からないように、翼列部の下流側の天井と床面に別途翼列を配置して、突風生成時に反転同期させている。風速の立ち上がり時間を翼列の回転時間で制御するが、翼列の回転時間を 0.2～5.0 秒の間で調整する。風速測定には超音波風速計と熱線風速計を併用し、模型に作用する風力の測定には動的空気天秤を用いた。計測信号のサンプリング周波数はともに 1kHz である。

図4に示すように、計測模型を端板上に垂直に固定した“疑似床板”に近接して配置した。動的空気天秤の計測信号は風流れ方向 F_x と水平直交方向 F_y 、および鉛直方向 F_z の3成分であるが、突風発生時に風洞内に静圧降下と流れ方向の圧力勾配が一時的に生じて、これに起因する瞬間的な信号が天秤の F_z 方向成分に混入するために、風洞床面の端版にそのまま設置した計測模型では、作用する揚力を正確に測定できない。そこで、竹内ら⁸⁾ の行った車両形状模型の揚力測定法と同様に、端板に垂直に固定した“疑似床板”に建物模型を近接して配置して、静圧降下の影響を受けない風方向成分 F_x を抗力に、また風直交方向 F_y の力を揚力として計測した。ただし模型周辺の2次元流れを生成するために、図4に示すように、模型両側にダミー模型を設置した。なお、模型の計測部断面積に対する閉塞率は13%である。

3. 2 実験結果

図 5 と図 6 に、それぞれ 1/2 勾配屋根と 1/4 勾配屋根での流入風とその加速度、および抗力と揚力の時刻歴波形を示す。ただし目標風速 2m/s で立ち上がり時間 0.2 秒での結果を図 5 (a) と図 6(a) に、目標風速 6m/s で立ち上がり時間 0.6 秒での結果を図 5 (b) と図 6(b) に示した。各図のキャプションに示した t_r' は後述の無次元立ち上がり時間(4)式の値である。本報告では流入風の加速度を風速波形の中央差分で求めたが、差分によりノイズが増幅されるため、式(3)に示す線形加重移動平均による平滑化後に風速波形の差分を行った。線形加重移動平均では M 番目のデータ p_M から $\overline{p_M}$ を求める場合、以下のような処理を行った。

$$\overline{p_M} = \frac{np_M + \sum_{j=1}^{n-1}(n-j)(p_{M-j} + p_{M+j})}{n + 2 \sum_{j=1}^{n-1}(n-j)} \quad (3)$$

ここではデータ個数 n を 15 とした。この線形加重移動平均は風速の加速度波形にのみ適用した。

(a) 目標風速 2m/s, 立ち上がり時間 0.2 秒 ($t_r' = 2$)

(b) 目標風速 6m/s, 立ち上がり時間 0.6 秒 ($t_r' = 22$)

図 5 1/2 勾配屋根模型の風速とその加速度
および風力の時刻歴波形

Fig. 5 Time evolutions measured in a wind tunnel test
(1/2-pitched roof)

(a) 目標風速 2m/s, 立ち上がり時間 0.2 秒 ($t_r' = 2$)

(b) 目標風速 6m/s, 立ち上がり時間 0.6 秒 ($t_r' = 22$)

図 6 1/4 勾配屋根模型の風速とその加速度
および風力の時刻歴波形

Fig. 6 Time evolutions measured in a wind tunnel test
(1/4-pitched roof)

1/2勾配の切妻屋根模型での立ち上がり時間 0.2秒で目標風速2m/sの図5 (a)では、目標風速に達する前の流入風の加速度が最大となった後に、抗力波形は1度目のピークを迎えてその後低下する。揚力は風速が目標風速に達した付近 (0.2秒) で1度目のピークを迎える。この両者の傾向は1/4勾配の切妻屋根模型での立ち上がり時間0.2秒で目標風速2m/sの図6(a)でも同様である。なお、目標風速6m/sで立ち上がり時間0.6秒の図5(b)では顕著なオーバーシュートは見られない。

図 6 に示す 1/4 勾配の切妻屋根では、立ち上がり時間 0.2 秒で目標風速 2m/s の図 6(a)の抗力と揚力の波形は図 5(a)とよく似た様相を呈し、流入風の加速度のピークや目標風速到達時刻との関係もほぼ同じであるが、抗力のピーク値は図 5(a)の 1/2 勾配の場合よりわずかに小さくなった。立ち上がり時間 0.6 秒で目標風速 6m/s の図 6 (b) では、風速が立ち上がる前に、顕著ではないが揚力にオーバーシュート現象が見られるなど、1/2 勾配屋根でオーバーシュートが見られない図 5 (b)とは異なる傾向が見られる。

文献 5)等で用いられている“オーバーシュート係数”はオーバーシュート風力を目標風速での定常風力との比で定義しているが、ここでは目標風速による速度圧を基準にした、いわば“ピーク風力係数”を風力係数の最大

値として注目した。各計測サンプルの抗力と揚力のそれぞれの最大値を目標風速の速度圧と模型の見付け面積との積で除した風力係数の最大値と、無次元立ち上がり時間との関係を図 7 に示す。無次元立ち上がり時間 t_r' は文献 5)と同じ以下で定義する⁵⁾。

$$t_r' = \frac{U_t \cdot t_r}{d} \quad (4)$$

ここで、 d は代表長さ(m)で模型の流れ方向長さとした。

1/2 勾配屋根の図 7 (a) と 1/4 勾配屋根の図 7 (b)に示すように、実験範囲では、抗力係数と揚力係数の最大値は無次元立ち上がり時間の増加に伴って風力係数の最大値は減少する。この傾向はこれまでの報告^{5,7,8,9,10)}でのオーバーシュート係数と同じであるが、無次元立ち上がり時間の範囲で様相が異なり、1/2 屋根勾配の図 7(a)では、無次元立ち上がり時間が 10 付近以下の範囲では減少量は大きい、それ以上の範囲では減少量は小さく、13 あたりでオーバーシュートが小さくなって定常値に至ることを示している。一方 1/4 屋根勾配の図 7(b)では、無次元立ち上がり時間が 5 前後で既にその様相が変化し、10 付近で一定となる抗力に対して、揚力は 20 付近でようやく定常になるなど、屋根勾配の違いが最大値の様相に影響を与えていると考えられる。

図 8 は風速が立ち上がり始める時刻を 0 秒として、“抗

(a) 1/2 勾配屋根

(b) 1/4 勾配屋根

図 7 無次元風力の最大値と無次元立ち上がり時間の関係

Fig.7 Relationship between maximum value of non-dimensional wind force and non-dimensional rise time

(a) 1/2 勾配屋根

(b) 1/4 勾配屋根

図 8 最大値記録時刻と立ち上がり時間の比と無次元立ち上がり時間の関係

Fig.8 Relationship between a ratio of a time when the maximum values were recorded to rise time and non-dimensional rise time

力と揚力が最大値に達した時刻 t_b と立ち上がり時間 t_r との比（以下、風力の立ち上がり時間比）”と無次元立ち上がり時間の関係を示すものである。この比が1未満であれば風速が立ち上がり中に、あるいは1を超えた場合は風速が立ち上がり終えた後に、風力が最大値に達したことを意味する。また、風速の加速度が最大になった時刻 t_a と立ち上がり時間 t_r との比（以下、ピーク加速度時間比）を▲印で図8に併記した。なお、風速のピーク加速度時間比は、図8の(a)と(b)でそのばらつき範囲が異なり0.3~0.7になったが、概ね0.5、すなわち風速が立ち上がるまでの中間位置で加速度が最大になっていることを示す。

1/2 勾配屋根の図8(a)に示す風力の立ち上がり時間比を見ると、無次元立ち上がり時間が短い範囲（概ね $t_r' \leq 4$ ）で最大値を示すのは、抗力は主に風速が増加中なのに対して、揚力は風速が立ち上がり終えた後であることがわかる。無次元立ち上がり時間が増加しても、抗力が最大値に達する時刻（風力の立ち上がり時間比）は無次元時間20付近の2、3のサンプルを除いて、大きく変化しない。一方、揚力は無次元立ち上がり時間の増加とともに立ち上がり時間比が減少するが、10を超えると立ち上がり時間比が徐々に大きくなり、より遅い時刻で最大値に達している、すなわち、オーバーシュートを見せることなく定常に至る経過に対応している。1/2 勾配屋根の図8(a)では、無次元立ち上がり時間が8~9付近で、抗力と揚力はほぼ同じ時刻に最大値に達して、その後は抗力の最大値発現時刻のばらつきが大きく、揚力との対比には言及しがたい。1/4 勾配屋根の図8(b)では、立ち上がり時間10前後で、抗力と揚力の最大値の発現時刻が明らかに逆転している。無次元立ち上がり時間が短い範囲

（ $t_r' < 10$ ）では、抗力の最大値は立ち上がり時間比0.75付近に集まり、無次元立ち上がり時間が10以降では風速の立ち上がり後に相当する立ち上がり時間比1.25付近まで急激に変化した。図7(a)と図8(a)で示した抗力の最大値に対応する抗力波形を個別に確認したところ、無次元立ち上がり時間が短い範囲（ $t_r' < 10$ ）の多くのサンプルは、図5(a)の時刻歴波形で示した風速の加速度のピークの後に見られる1度目のピークによるものであり、無次元立ち上がり時間が長い範囲（ $t_r' > 10$ ）では、図6(b)に見られるような風速が目標風速に達した付近に発生するピークによるものであった。

屋根勾配はオーバーシュート風力の発生時刻に強く影響すると言える。

4. 数値流体計算による模型周辺の圧力分布の検討

本節では、前節での実験状況での模型周辺の圧力分布を数値流体解析で追跡して、風力のオーバーシュート発現時の圧力分布を検討する。

4. 1 計算条件

図9に数値計算の解析領域と各壁面の境界条件を示す。乱流モデルにはLES/Smagorinskyモデル（ $C_s=0.1$ ）を用い、時間刻みは0.001秒で2,000step計算した。離散化手法には有限体積法、対流項と粘性項の差分法は2次精度多次元差分スキーム（MARS法）、時間差分法は陰解法時間差分スキームを用いている。表1の数値流体計算セルサイズに示すとおり、模型周辺を1辺5mm（模型流れ方向長さに対し1/30）のトリムセルとし、模型表面近傍は厚さ1mmの層を5層重ねた。合計のセル数は1/2、1/4 勾配ともに約175万セルである。計算アルゴリズムはPISO法を用いている。ただし、実験では模型を仮想地面に配置している（図4）が、数値計算では、風洞床面に設置したものとした。

模型周りの風速変化は風洞実験で測定された立ち上がり時間の短い突風波形（図2）を用いた。以下では、渦などの発達が見られ最も顕著に見られた目標風速2m/sで立ち上がり時間0.2秒での解析結果を示す。

4. 2 建物周りの圧力分布の経時変化

図10は、目標風速2m/sで立ち上がり時間0.2秒での数値流体計算で求めた建物模型桁行方向中央断面位置での建物風圧分布のベクトル和から算出した風力波形の例

図9 数値流体計算解析領域と計算条件
Fig.9 Perspective view of analytic region

表1 数値流体計算セルサイズ
Table.1 Cell size of analytic region

Region	範囲[mm]						セルサイズ[mm]		
	流れ方向		流れ直交方向		高さ方向		流れ方向	流れ直交方向	高さ方向
	min	max	min	max	min	max			
1	-900	1500	-450	1050	0	1500	40	40	40
2	-900	1000	-450	1050	0	500	20	20	20
3	-900	900	-450	1050	0	400	10	10	10
4	-100	100	-450	1050	0	1500	5	10	10
5	-100	100	-200	200	0	200	5	5	5

※模型底面中心に原点をおく

である。結果的に、抗力には最大ピークの前に別のピークや短周期成分が多く含まれることや、実験で見られた最大ピーク後の変動波形などが再現できておらず、今後の改良が必要であるが、実験結果の図 5(a)および図 6(a)と比べると、風力の最大ピークの発生時刻は実験値にほぼ対応しており、平均的値がほぼ対応している突風開始後の 0.3 秒付近までは圧力分布の経時追跡に使用できるとした。

建物周りの圧力分布を模型の風上壁面位置（風洞天井面と風洞側壁面から 300mm 離れた点）での静圧との差圧で求め、これを目標風速の速度圧で無次元化して、図 11 と図 12 に 0.1 秒刻みでその経時変化を示す。

図 13 は立ち上がり開始 0.1 秒後の風洞内の圧力分布を示すもので、風速の立ち上がり後の定常状態ではこの勾配は消失し、静圧は流れ方向位置によらず一定となる。

図 11 と図 12 はそれぞれ 1/2 勾配屋根と 1/4 勾配屋根

での結果である。1/2 勾配屋根の図 11 では、無風状態(図 11(a))から風速が立ち上がり始め、流れ方向に静圧の勾配が発生する。この静圧勾配は風速立ち上がりの加速度に比例して増大し、開始後 0.1 秒で加速度とともに最大(図 11(b), 図 13)となって、その直後に抗力のピークが生じる。風洞実験でもこの静圧勾配が発生する⁹⁾。このときの模型の風上側と風下側の静圧勾配によって定常風力に付加される非定常な抗力が図 5(a)で見られる 1 度目のピークを生み出していると考えられる。また図 11(b)で、風上屋根面の軒先(A)と棟部風下側(B)で小さな渦が発生しているが、これらの渦は風速の増速とともに徐々に発達して、中心部の圧力の低下とともに図 11(c)のような表面圧力分布となる。1/2 勾配の場合はとくに棟部風下側の渦(B)が大きく成長し、これが揚力のオーバーシュートに対応するピークに強く関わっていると考えられる。この渦は屋根面に沿って風下側に移動し、屋根面から剥

図 10 数値流体計算で算出した波形（目標風速 2m/s, 立ち上がり時間 0.2 秒, $t_r' = 2$ ）

Fig.10 Time evolutions calculated in CFD test ($U_t = 2$ m/s, $t_r = 0.2$ sec, $t_r' = 2$)

(a) 無風状態 (0.0 秒) (b) 加速度のピーク (0.1 秒) (c) 目標風速到達 (0.2 秒) (d) 定常状態への移行 (0.3 秒)

図 11 切妻屋根建物 (1/2 勾配) 周りの各時刻での風圧係数分布 (目標風速 2m/s, 立ち上がり時間 0.2 秒)

Fig.11 Distribution of wind pressure coefficients around 1/2-pitched gable roof body on each time ($U_t = 2$ m/s, $t_r = 0.2$ sec)

(a) 無風状態 (0.0 秒) (b) 加速度のピーク (0.1 秒) (c) 目標風速到達 (0.2 秒) (d) 定常状態への移行 (0.3 秒)

図 12 切妻屋根建物 (1/4 勾配) 周りの各時刻での圧力分布 (目標風速 2m/s, 立ち上がり時間 0.2 秒)

Fig.12 Distribution of wind pressure coefficients around 1/4-pitched gable roof body on each time ($U_t = 2$ m/s, $t_r = 0.2$ sec)

図 13 突風生成時に発生する静圧勾配
(目標風速 2m/s, 立ち上がり時間 0.2 秒,
立ち上がり開始 0.1 秒後)

Fig.13 Static pressure gradient seen in generating a gust
($U_t = 2 \text{ m/s}$, $t_r = 0.2 \text{ sec}$,
at 0.1sec from when wind velocity started to increase)

図 14 切妻屋根建物周りの揚力のピークでの圧力分布
(目標風速 2m/s, 立ち上がり時間 0.6 秒, $t_r' = 6$)

Fig.14 Distribution of wind pressure coefficients
around gable roof body when lift force had peak
($U_t = 2 \text{ m/s}$, $t_r = 0.6 \text{ sec}$, $t_r' = 6$)

離する(図 11 (d))。一方、1/4 勾配屋根では抗力のピークが発生する図 12(b)までは 1/2 勾配屋根(図 10(b))と同様の風圧分布であるが、その後、屋根面風上の軒先 (C) に発生する渦が 1/2 勾配より大きく発達し、中心圧力がより低くなる(図 12(c))。1/2 勾配屋根の場合と同様に、この渦は屋根面に沿って風下側へと移動するが、1/2 勾配の場合ほど早く剥離せず、風速の立ち上がりから 0.3 秒後(図 12 (d))でも、形を崩しながらも屋根面に付着している。図 14 はより長い立ち上がり時間 0.6 秒 ($t_r' = 6$) の場合の揚力のピーク時の圧力分布である。図 14(a)の 1/2 勾配は風速の立ち上がり時間が長くなると棟部風下側の渦(図 11(c)の渦 B)が見られないのに比べ、図 14(b)の 1/4 勾配の場合は立ち上がり時間 0.2 秒の渦(図 12 (c)の渦 C)から圧力は小さくなるものの、サイズはそれほど小さくならなかった。図 10 と図 11 間や図 12 (a)と図 12 (b)間でみられたような屋根勾配による渦の発達状況の違いが、図 7 で示した無次元立ち上がり時間の増加に伴う揚力の最大値の減少傾向や、図 8 の揚力の最大値発生時刻が勾配間で異なった原因と考えられる。

5. まとめ

本報告では、切妻屋根模型の周辺風速場が平屋根方向に短時間で急変する突風に曝される場合に発生する非定常風力のメカニズムとこれに及ぼす屋根勾配の影響を明らかにするため、ステップ関数的突風での風洞実験結果の検討と実験状況を模した数値流体計算を行った。その結果、以下の所見が得られた。

風洞実験により、

1. ステップ関数的突風を受けた場合、抗力は風速の加速度が最大となった後と突風が立ち上がり終えた付近のどちらか、あるいは両方で大きなピークが発生するが、揚力は主として突風が立ち上がり終えた付近でピークが発生するなど、両者には時間差が見られた。
2. 抗力と揚力の最大値は無次元立ち上がり時間で一つのパターンで整理でき、実験範囲では、無次元立ち上がり時間が小さいほどそれぞれの最大値が大きくなる傾向が見られた。
3. 無次元立ち上がり時間の増加に伴う風力の最大値の減少傾向や最大値を記録する時間は、無次元立ち上がり時間の範囲や屋根勾配によって変化した。

数値流体計算では、

4. 抗力の 1 度目のピークが目標風速に達する前の静圧勾配が最大となる直後で発生することから、この短時間内の大きな静圧勾配が抗力のピークの主たる要因と考えられるが、このピーク値に与える屋根勾配による影響は少ない。
5. 模型屋根の棟部下流側に生じる渦が最も発達するのは風速が目標風速に達した時刻付近であり、この渦が揚力のピークの主な要因として考えられる。
6. 模型屋根の棟部下流側に生じる渦の大小や強さ、および渦が最も発達する時刻などは屋根勾配によって異なり、1/2 勾配よりも 1/4 勾配の方が渦の剥離が遅れ、特に揚力では、突風の立ち上がり時間が無次元時間で 20 程度まで長くなってもオーバーシュート現象が発生する。

謝辞

本研究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)と京都大学防災研究所一般共同研究 (25G-08, 平成 25～26 年度) の助成を受けた。また本研究は 2013 年度日本風工学会優秀修士論文賞を受賞したものである。

参考文献

- 1) Taneda, S., “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) Sarpkaya, T., “Separated Flow about Lifting Bodies and Impulsive Flow about Cylinders”, *AIAA Journal*, Vol. 4, No. 3, pp. 414 - 420, (1966)
- 3) Sarpkaya, T., “An Analytical Study of Separated Flow about Circular Cylinders”, *Trans. of ASME, J. of Basic Eng.*, Vol. 90, pp. 511 - 520, (1968)
- 4) Matsumoto, M., Shimamura, M., Maeda, T., Shirato, H., Yagi, T., Hori, K., Kawashima, Y., and Hashimoto, M., “Drag forces on 2-D cylinders due to sudden increase of wind velocity”, *12th International Conference on Wind Engineering, Preprints-Vol. 2*, pp. 1727 - 1734, (2007)
- 5) 竹内 崇, 前田 潤滋, 「ステップ関数的突風を受ける物体のオーバーシュート風力ー基本形状物体に作用する非定常抗力の実験的検討ー」, *日本建築学会構造系論文集*, 第 77 巻, 第 681 号, pp. 1629-1635, (2012)
- 6) Nomura, T., Kitamura, N., and Kitagawa, T., “Characteristics of unsteady drag on a square cylinder under sudden change of wind speed”, *Proceedings of 3rd Computational Wind Engineering*, 3 - 6, (2000)
- 7) 竹内 崇, 前田 潤滋, 大坪 和広, 友清 衣利子, 「立ち上がり時間の短い突風を受ける物体に作用する非定常風圧力」, *日本建築学会構造系論文集* 第 79 巻 第 697 号, pp. 357 - 366, (2014)
- 8) 竹内 崇, 前田 潤滋, 川下 寛正, 「車両形状物体に作用する風力に及ぼす突風の立ち上がり時間の影響」, *第 20 回風工学シンポジウム論文集*, pp. 331 - 336, (2008)
- 9) 中村 論史, 前田 潤滋, 竹内 崇, 鶴 則生, 「突風風洞での基準静圧変動を考慮した圧力計測による切妻屋根物体の表面風圧特性」, *第 21 回風工学シンポジウム論文集*, pp. 197 - 202, (2010)
- 10) Otsubo, K., Takeuchi, T., and Maeda, J., “Acting effects of roof pitch of a gable structure on wind force under a short-rise-time gust”, *Proceedings of 8th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering*, USB-10 pages, (2013)
- 11) Otsubo, K., Takeuchi, T., and Maeda, J., “Effects of roof-pitch on the overshoot wind force acting on a gable roof structure under a short-rise-time gusty wind”, *Proceedings of 6th International Symposium on Computational Wind Engineering*, pp.176-177, (2014)