九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

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風力特性に及ぼす屋根勾配の影響

大坪，和広

友清，衣利子

鶴，則生

前田，潤滋

https://doi.org/10.15017/1397766

出版情報：都市・建築学研究. 23, pp.21-26, 2013-01-15. 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：

都市・建築学研究　九州大学大学院人間環境学研究院紀要　第23号，2013年1月
J. of Architecture and Urban Design, Kyushu University, No.23, pp. 21～26, Jan. 2013

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風力特性に及ぼす屋根勾配の影響

Acting Effects of Roof Pitch of a Gabled Structure on Wind Force on under a Short-rise-time Gust

大坪和広*，友清衣利子**，鶴　則生***，前田潤滋**
Kazuhiro OTSUBO, Eriko TOMOKIYO, Norio TSURU and Junji MAEDA

A wind force acting on a structure under a gusty wind with a very short rise time, which occurs in high winds associated with typhoons and tornadoes, occasionally reaches a large value not seen in a steady wind flow. We call it "overshoot phenomenon of wind force". Several reports of the unsteady pressure distributions around a gable roof structure under a short-rise-time gust are known. However, the effects of its roof pitch on drag and lift forces acting on such a structure under a short-rise-time gust have not been systematically studied. In this study, the properties of unsteady wind force on gabled structures with different size of roof pitch were investigated using gusty wind tunnel test. It was found that the overshoot coefficients of drag and lift forces acting on a 1/4 roof pitch gable become bigger than a 1/2 roof pitch gable.

Keywords: *Unsteady aerodynamic force, Short-rise-time gust, Overshoot of wind force, Gable roof body*
非定常空気力，立ち上がり時間の短い突風，風力のオーバーシュート，切妻屋根形状物体

1　序

竜巻などの突風または台風や季節風などの強風下では，風速が短時間で増加する場合がある。風速が急激に変化する立ち上がる時間が短い突風が作用した場合，定常的な風と比較して非常に大きな風力が構造物に発生することがある。このような「オーバーシュート現象」についてはこれまでにも多くの報告[1-3]がなされている。竹内[4]らは風洞実験を用いて，無風または一定風速から短時間で立ち上がる突風が楕円柱に及ぼす風力を検証し，風力のピーク値と定常値の比をオーバーシュート係数と定義し，受風物体の代表長さをパラメータとして持つ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報告している。しかしながら，構造物に生じる風力のオーバーシュート現象は受風物体の代表長さや形状によって異なるため，立ち上がり時間の短い突風によって実際の住宅のような物体にどのようなオーバーシュート風力が作用するかは，まだ解明されていない。

中村ら[5]は立ち上がり時間の短い突風が作用する切妻屋根形状の物体の風圧力のオーバーシュート現象について報告するとともに抗力のオーバーシュート現象にも言及しているが，後述するように突風風洞実験では揚力計測に工夫が必要となるため，揚力の実験は行われていない。また，屋根の勾配は風力に強い影響を及ぼすと考えられるが，報告は屋根勾配 1/2 の実験結果の報告に留まっている。

本論は切妻屋根建物を模擬した試験体に作用するオーバーシュート風力の特性を突風風洞実験で検証することを目的とし，切妻屋根勾配が風力のオーバーシュート現象に及ぼす影響を報告する。また，このような風力計測実験では実験模型の質量による影響が生じる可能性があるため，質量の異なる模型による確認実験をあわせて行った。

2　風洞実験概要

2．1　実験装置概要

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器の配置を図 1 に示す。測定部断面寸法は 1.5m×1.5m，計測部全長は 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できる。その状態から翼列を回転することで測定部内に風が通り，短時間で風速が立ち上がる突風を生成することができる。風速の立ち上がり時間は翼列の回転時間で制御し，翼列の回転時間は 0.2～5.0 秒の間で調整ができる。

風速測定には超音波風速計と熱線風速計を併用し，模型に作用する力の測定には動的空気力天秤を用いた。サ

*　都市共生デザイン専攻修士課程
**　都市・建築学部門
***　人間環境学府

ンプリング周波数はともに1000Hzである。

2．2　試験体概要

図2 a) に計測模型の配置を，図2のb) に計測模型のアクソメ図を示す。図2 a) に示すように，動的空気力天秤の計測方向は風流れ方向 Fx，流れ直交方向 Fy，鉛直方向 Fz であるが，突風風洞実験では突風の発生時に風洞内に急激な風速変化によって静圧変動が生じるため，動的空力天秤の F_Z 方向には瞬間的に大きな信号が発生する[6, 7]。そのため，計測模型の下面を端版に設置をすると計測模型に作用する揚力が突風による静圧変動の影響を受けて正確に測定できない。そこで，竹内らの行った突風を受ける車両形状模型の揚力測定実験手法[6]を参考に，端板に垂直に立てて固定した疑似床面に近接させ，垂直方向に計測模型を立てて設置し，静圧変動の影響を受けない風流れ方向 Fx を抗力，流れ直交方向 F_Y の力を揚力とした。また二次元流れを模擬するため，計測模型の上下にダミー模型を設置した。ダミー模型と計測模型の間は 2mm，疑似床板（厚さ 4mm）と計測模型下面との間は 1mm の隙間をあけた。計測模型に作用する抗力，揚力の向きは図2 b) に示す。

表1に計測模型の寸法を示す。計測模型は小模型（幅 300mm×奥行 75mm×軒高 75mm）と大模型（幅 300mm×奥行 150mm×軒高 150mm）の2種類である。受風物体の代表長さをパラメータとする無次元立ち上がり時間（定義は後述）を広い範囲で検討するため，大きさの異なる模型を用意した。それぞれの模型に対し 1/2 勾配と 1/4 勾配の切妻屋根を設置した。模型質量の影響を検討するため，小模型はアクリル製とバルサ製の2種を用いた。大模型はアクリル製のみである。模型は板材を隙間なく箱状に組み合わせ作成した。表2に模型質量を示すが，バルサ製の模型の質量はアクリル製の 1/10 程度である。

2．3　実験変数

翼列解放後の定常状態での風速を目標風速 U_t とし，目標風速と翼列の回転時間を実験変数とした。本実験での目標風速は 2～7 m/s で，1m/s 刻みで6ケースである。翼列の回転時間は 0.2 秒から 1.0 秒まで 0.2 秒刻みで5ケースとした。ただし，風速の立ち上がり時間は翼列の回転時間と必ずしも一致しないため，本論では立ち上がり時間の短い風速の時刻歴波形を3次関数で近似する方法[7]で風速の立ち上がり時間を算定した。熱線風速計で計測した風速波形から目標風速 U_t を求め，目標風速の U_t の 20%と 80%に達した時の時刻 t_{20} と t_{80} を得る。図3のように風速 $U(t)$ が式(1)に示す3次式で近似できると仮定し，t_{20} と t_{80} の差から立ち上がり時間 t_r を式(2)から算出した。

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

$$t_r = 2.348\,(t_{80} - t_{20}) \qquad (2)$$

本実験での立ち上がり時間は t_r=0.15～1.0 秒となる。無風状態から測定を始め，約6秒後に翼列を開放してス

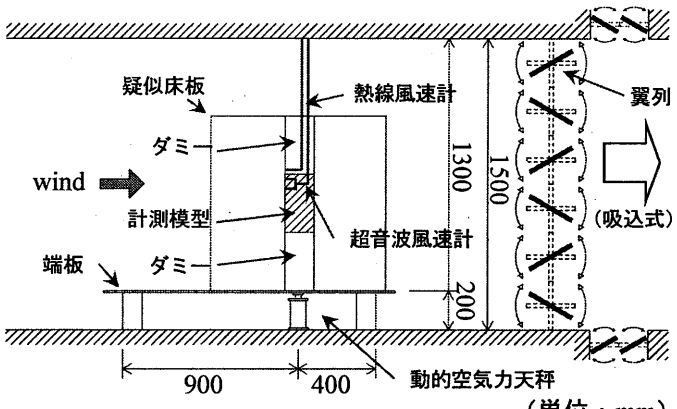


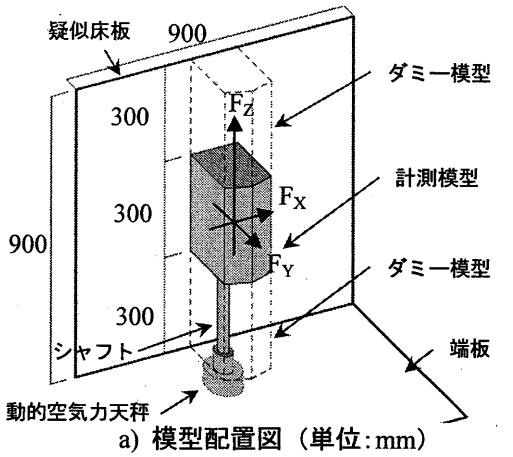
図1 風洞実験配置図

表1 計測模型の寸法

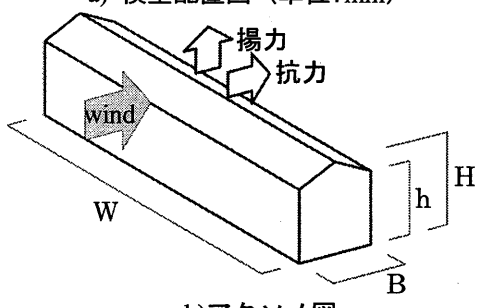
	勾配	幅 W(mm)	奥行 B(mm)	軒高 h(mm)	高さ H(mm)
小模型	1/2	300	75	75	94
	1/4				84
大模型	1/2	300	150	150	188
	1/4				169

表2 計測模型の質量

サイズ	材質	屋根勾配 1/2	屋根勾配 1/4
小模型	アクリル	333.8g	321.1g
	バルサ	35.4g	32.6g
大模型	アクリル	1316.0g	1268.4g



a) 模型配置図（単位:mm）



b)アクソメ図

図2 試験体概要

テップ関数的突風を生成し，風速が定常状態に安定したとみなせる20秒後まで風洞内の風速と計測模型に作用する風力を測定した。

3　実験結果

3．1　模型質量の影響

模型質量がオーバーシュート風力の計測に及ぼす影響を調べるため，質量の異なるバルサ製とアクリル製の小模型（1/4屋根勾配）の実験結果を比較した。

図4に目標風速3.0m/s，立ち上がり時間0.15秒のステップ関数的突風の熱線風速計で測定した風速の時刻歴波形と，その突風を受けるアクリル製とバルサ製の小模型（1/4屋根勾配）の抗力と揚力の測定波形を示す。バルサ製模型での実験では立ち上がり時間は0.13秒，立ち上がり直後の風速は3.06m/s，アクリル製模型では立ち上がり時間0.15秒，風速は3.02m/sであった。図4 a) の風速波形を見ると，バルサ製模型とアクリル製模型で行った実験ではほぼ同じ立ち上がり時間と目標風速の突風が生成できたことが確認できる。図4 b) の抗力波形ではピーク値は模型質量にかかわらずほぼ同じ値をとなった。ピークを越えた計測時刻約0.2秒以降では，アクリル製模型の抗力波形はバルサ製のものよりも大きく振動しているが，定常状態での平均抗力はバルサ製で0.13 N，アクリル製で0.12Nでほぼ一致した。ここでは一例として風速3m/s，風速の立ち上がり時間約0.15秒の結果を示したが，その他の実験ケースでも同様の傾向が確認されたことから，模型材料の違いによって模型の振動特性が変化し，ピーク後や定常時の抗力波形には違いが見られたが，抗力のピーク値および平均値への影響はほとんどなかった。模型材料の違いによる，突風立ち上がり後の定常状態での特性には差が見られ，模型層表面の粗度や質量の違いが定常時の風力変動に差が生じたと考えられる。図4 c) の揚力波形も抗力と同様にピーク値と定常時の平均揚力はほぼ同じ値となった。定常時の平均揚力はバルサ製模型で0.10N，アクリル製模型で0.09Nだった。

図5に小模型（1/4屋根勾配）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5 a-1)，図5 a-2)がアクリル製模型での揚力と抗力，図5 b-1)，図5 b-2)がバルサ製模型の揚力と抗力との関係である。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(3)で定義される[6,7]。

$$t' = U_t \cdot t_r / d \qquad (3)$$

ここで 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。代表長さには切妻屋根模型の奥行の長さを用いた。無次元立ち上がり時間を用いて，模型の質量や材質の違いを検証した。

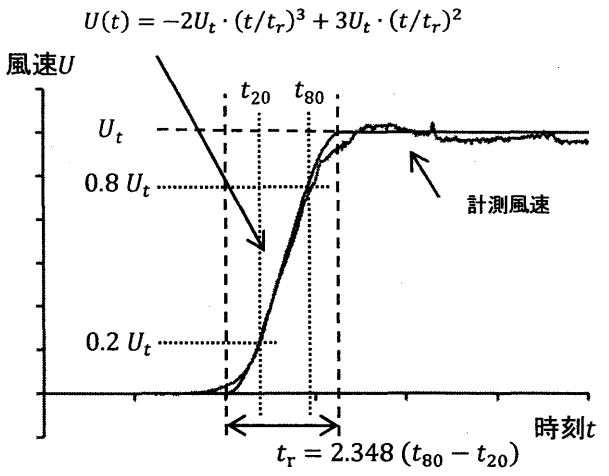
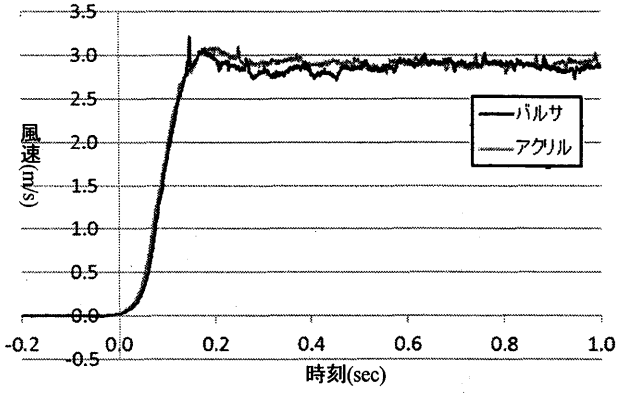
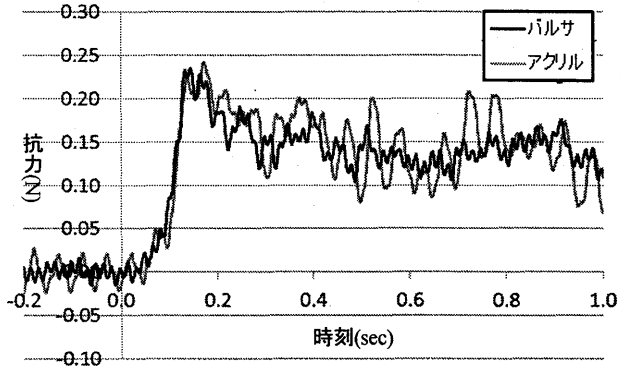


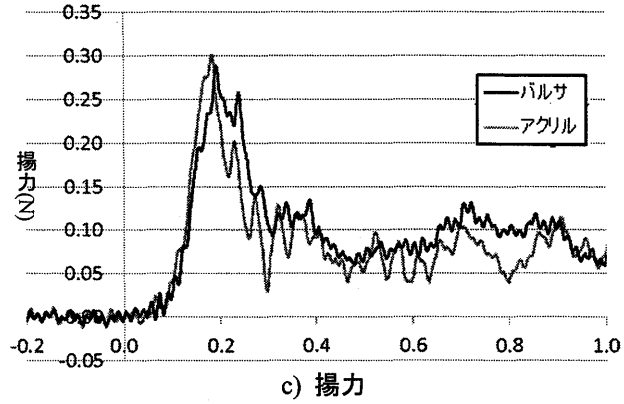
図3 ステップ関数的突風の風速波形



a) 風速

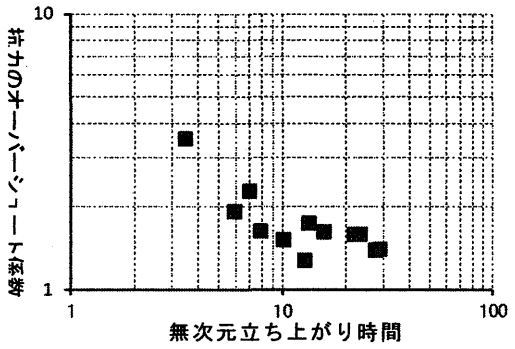


b) 抗力

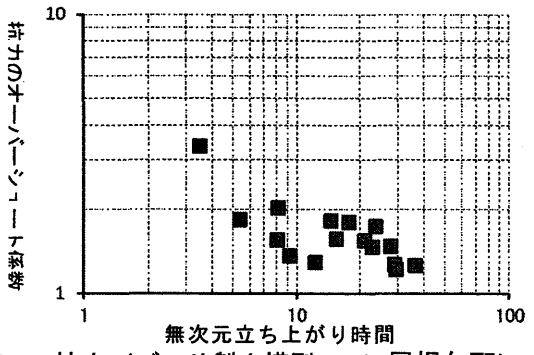


c) 揚力

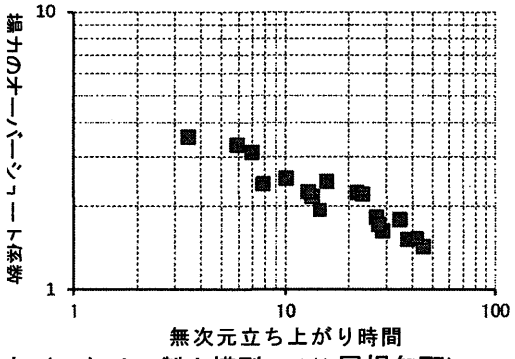
図4 突風時の風速と風力の時刻歴波形比較
（小模型，1/4屋根勾配，U_t= 3.0m/s，t_r=0.15秒）



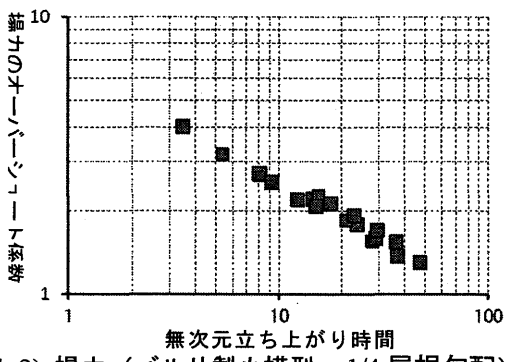
a-1) 抗力（アクリル製小模型，1/4 屋根勾配）



b-1) 抗力（バルサ製小模型，1/4 屋根勾配）



a-2) 揚力（アクリル製小模型，1/4 屋根勾配）



b-2) 揚力（バルサ製小模型，1/4 屋根勾配）

図 5 オーバーシュート係数と無次元立ち上がり時間との関係
左列：アクリル製小模型，右列：バルサ製小模型

図 5 より，模型の質量にかかわらず，無次元立ち上がり時間が小さいほど抗力，揚力ともにオーバーシュート係数が増大する傾向がみられた。図 5 a-1)と図 5 b-1)に示す抗力のオーバーシュート係数と無次元立ち上がり時間との関係は目標風速によってややばらつきが生じたが，バルサ製模型とアクリル製模型の結果とを比較すると，その関係はほぼ対応した。風力のピーク値と定常値との比で定義されるオーバーシュート係数に及ぼす模型質量の影響は小さいと考えられる。

3．2　屋根勾配の影響

アクリル製の大模型と小模型を用いて，屋根勾配 1/2 と 1/4 の切妻屋根形状物体に生じるオーバーシュート風力を比較した。

図6に一例として目標風速5.0m/s, 立ち上がり時間0.15秒の突風の熱線風速計で測定した風速の時刻歴波形と，その突風を受けるアクリル製の小模型（1/2 屋根勾配と 1/4 屋根勾配）の抗力係数と揚力係数の時刻歴変化を示す。一般に風力Fは準定常時では式(4)で定義される。

$$F = \rho C A U^2/2 \qquad (4)$$

ここでρは空気密度，Cは風力係数（抗力係数または揚力係数），Aは受風面積，Uは風速である。本実験では矩形模型の上部に勾配の異なる切妻屋根を設置したため，1/2 勾配屋根を設置した模型のほうが受風面積が大きく，測定した抗力，揚力はそのままでは比較することができない。そのため測定した抗力，揚力を空気密度と見付面積，目標風速の 2 乗で除した抗力係数と揚力係数で比較を行った。

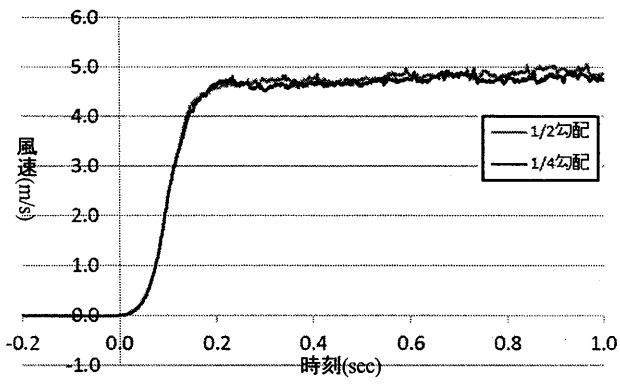
図 6 a)の風速波形から求めた立ち上がり時間t_rは 0.15 秒で，式(3)より無次元立ち上がり時間は 9.8 となった。図 6 b)の抗力係数の時刻歴変化に着目すると 1/2 屋根勾配のピーク値は 1.42 に対して，1/4 屋根勾配 1.49 でほぼ等しい。しかし，1/4 屋根勾配での抗力係数は，一度ピークが発生した約 0.3 秒後に同程度の大きさのピークが再度発生している。1/2 屋根勾配ではこのような時刻歴変化は見られなかったが，1/4 屋根勾配では無次元立ち上がり時間t'が約 10 以上で風力のオーバーシュート現象が発生した場合に着目すると，模型の大きさにかかわらずこのような 2 つのピークの出現が確認できた。図 6 c)の揚力係数の時刻歴波形では，1/4 屋根勾配のピーク値は 1.62 で，1/2 屋根勾配の揚力係数のピーク値 1.42 より大きいが，抗力でみられたように同程度の大きなピークが 2 回出現することはなかった。

図 7 は目標風速 5.0m/s，立ち上がり時間 0.42 秒の突風を受けるアクリル製の小模型（1/4 屋根勾配）の揚力係数の時刻歴変化である。この無次元立ち上がり時間は 27.4 とさらに大きいが，図 6 b)の抗力係数の場合と同様に同程度の大きさのピークが 2 回出現した。風速や立ち上がり時間が異なる実験においても，揚力の時刻歴波形に抗力と同様の 2 つのピークが生じる現象は 1/2 勾配屋根では見られず，1/4 屋根勾配の無次元立ち上がり時間が大きい場合にのみ確認された。ここで，図 6c)の 1/4 勾配屋根の揚力の時刻歴波形に着目すると，時刻 0.4 秒す

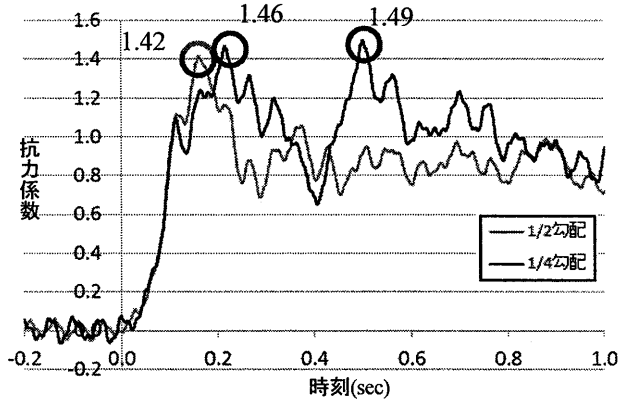
ぎにやや小さなピークが生じている。1/4 勾配屋根に生じる風力では，ピークが 2 回生じる場合が多いが無次元立ち上がり時間が小さいと最初のピーク値が 2 つめのピークよりも非常に大きくなる可能性がある。ピーク風力係数は同じ無次元立ち上がり時間であっても最大 9%程度ばらつくが，オーバーシュート現象の再現性は高く，屋根勾配の違いによって，風の流れや剥離の状況が異なることなどがこの差の要因と考えられる。屋根周辺の流れ場や圧力場の検証には，風圧測定実験や数値流体計算による検討が必要である。

図 8 に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 8 a-1)と図 8 a-2)に 1/2 屋根勾配の揚力と抗力の，図 8 b-1)と図 8 b-2)に 1/4 屋根勾配の揚力と抗力の関係を示す。図中には大模型と小模型の結果をあわせて示す。無次元立ち上がり時間とオーバーシュート係数の関係は，模型の大きさによらずほぼ一致することが報告されているが [7]，図 7 b-1)に示す 1/4 屋根勾配の抗力の場合と図 7 a-2) の 1/2 屋根勾配での揚力の場合には，同じ無次元立ち上がり時間であってもオーバーシュート係数がばらつき，小模型で目標風速が小さい 2m/s または 3m/s の時のオーバーシュート係数は，同程度の無次元立ち上がり時間での他の風速での結果に比べてやや大きい。しかし，模型が小さくても目標風速が大きい 6m/s，7m/s の場合には大模型の結果と同じ傾向を示した。模型が小さく風速が小さい場合には式(4)で示すように定常時に模型に作用する風荷重そのものが小さいため，わずかな値の変化によってオーバーシュート係数が大きく変化する可能性がある。既往の報告 [6]で用いた模型は正方形柱（80mm×80mm×500mm）や円柱（φ60mm×500mm）で，本実験で用いた小模型に比べて大きい。

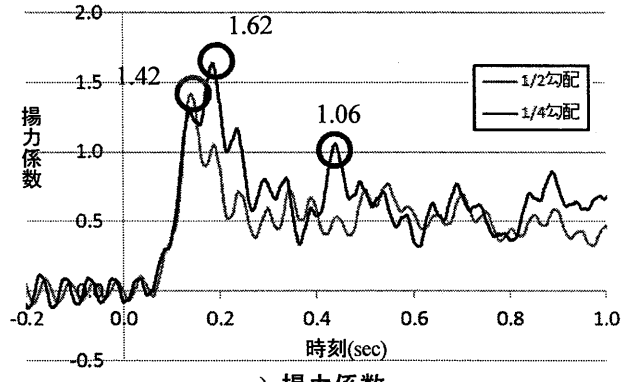
図 8 b-1)に 1/4 屋根勾配の抗力のオーバーシュート係数と無次元立ち上がり時間との関係を示すが，無次元立ち上がり時間が約 10 より大きい場合には，オーバーシュート係数は約 1.5 でほとんど変化しない。図 7a-1)に示す 1/2 屋根勾配の場合にはそのような傾向は見られず，無次元立ち上がり時間の増大に伴ってオーバーシュート係数は減少する。1/4 屋根勾配の場合には無次元立ち上がり時間が大きくなると，図 6 b)の抗力係数の時刻歴波形に示すように同程度の大きなピークが 2 回生じる場合があり，2 番目のピークによるオーバーシュート現象を捉えている可能性がある。無次元立ち上がり時間が 30 を超えると，オーバーシュート現象は確認できなくなった。図 7a-2)と b-2)に示す揚力での関係は，1/2 屋根勾配の場合に比べ 1/4 屋根勾配では無次元立ち上がり時間が約 50 と大きい値でも風力のオーバーシュート現象が発生した。また，無次元立ち上がり時間とオーバーシュート係数との関係は概ね直線で近似される傾向があるが，屋根勾配が異なるとその傾きに違いが生じ，無次元立ち上がり時



a) 風速



b) 抗力係数



c) 揚力係数

図 6 突風時の風速と風力係数の時刻歴波形
（アクリル製小模型，U_t= 5.0m/s，t_r=0.15 秒）

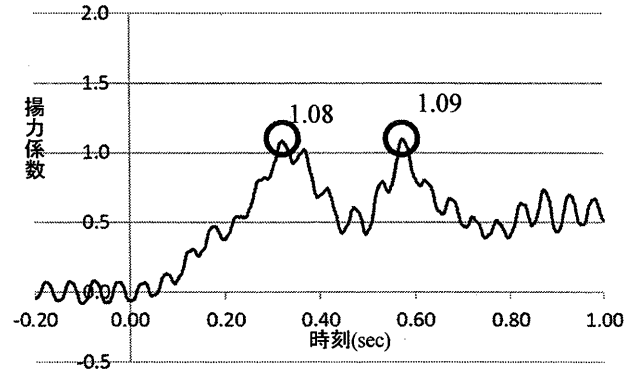


図 7 突風時の揚力係数の時刻歴波形
（アクリル製小模型，1/4 屋根勾配，
U_t= 5.0m/s，t_r=0.42 秒）

間が 5 より大きい場合には，1/2 屋根勾配のものより 1/4 屋根勾配の場合の方がオーバーシュート係数が大きい。

4．まとめ

ステップ関数的突風が生成可能な風洞を用い，模型質量と屋根勾配の違いが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風力特性に与える影響を実験で検証し，以下の所見を得た。

模型質量については，

1) 模型質量はオーバーシュート現象のピーク発生後や定常風時の風力の変動に影響を与えるが，ピーク値及び定常状態での平均風力への影響はほとんどない。
2) 1)の理由からピーク値と定常時の風力の比で定義されるオーバーシュート係数は模型質量の影響を受けない。

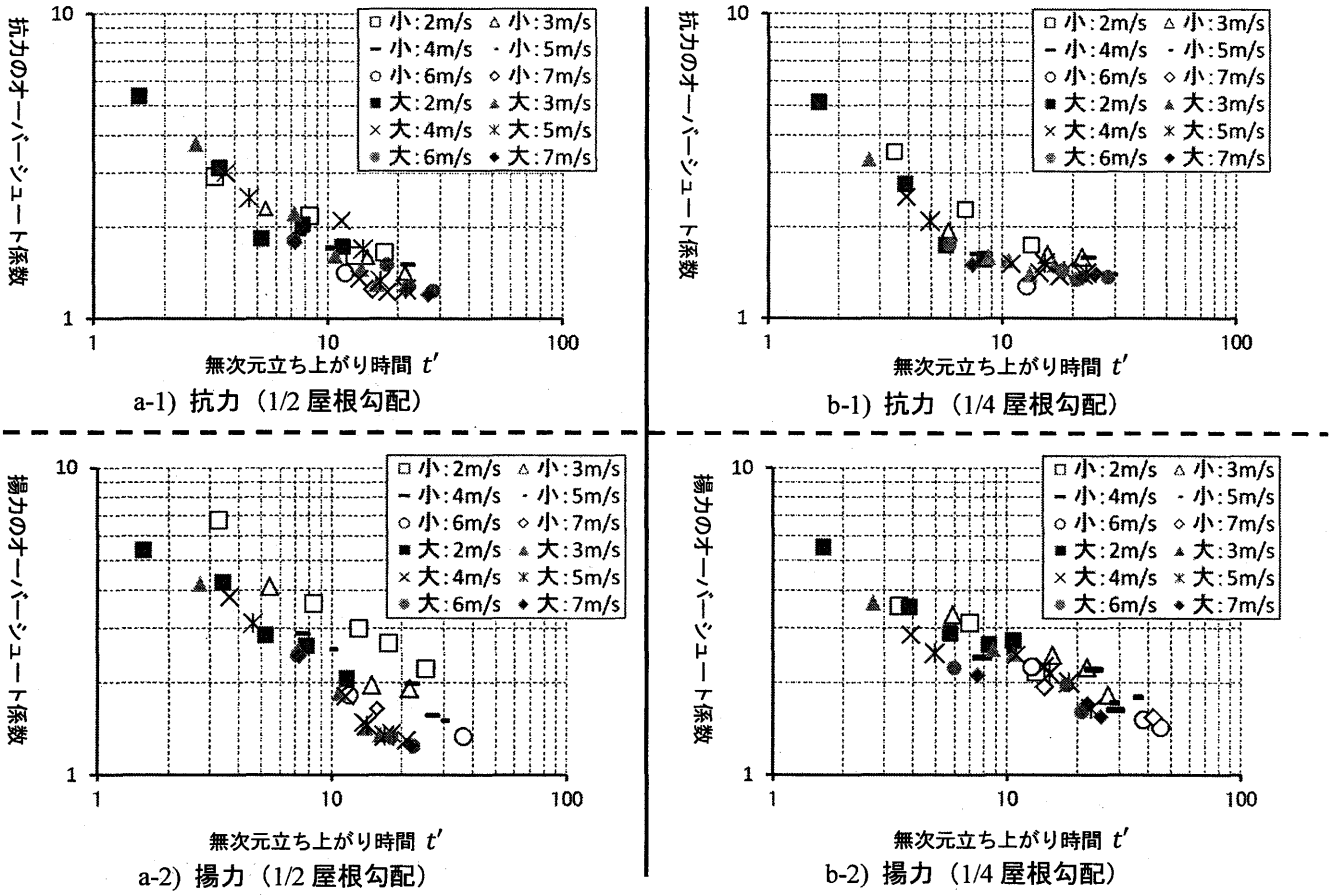
屋根勾配については，

3) 屋根勾配 1/4 の切妻屋根物体では，無次元立ち上がり時間が大きい場合，抗力と揚力ともに同程度の大きなピークが 2 回発生した。
4) 屋根勾配 1/4 の切妻屋根物体に生じる抗力では，無次元立ち上がり時間が約 10 を超えるとオーバーシュート係数が 1.5 程度で一定になる。
5) 屋根勾配 1/4 の切妻屋根物体の揚力に着目すると，1/2 勾配の場合に比べて，大きい無次元立ち上がり時間でもオーバーシュート現象が発生する。
6) 屋根勾配 1/4 の切妻屋根物体の揚力のオーバーシュート係数は，1/2 のものと比べて大きい。

謝辞　本研究の一部は科学研究費補助金「台風・竜巻等のスーパー突風による建物の風荷重の増大インパクト（基盤(B)22360230 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, pp1706-1711, 1972.
2) 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.Proceedings of 12th International Conference on Wind Engineering, pp1727-1734, 2007.
3) T. Sarpkaya, Separated Flow about Lifting Bodies and Impulsive Flow about Cylinders, AIAA Journal, Vol.4, No.3, pp414-420,1966
4) 竹内崇，早田友彦，前田潤滋，川下寛正，中村論史，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，pp43-48，2009.1
5) 川下寛正，竹内崇，鶴則生，森本康幸，前田潤滋，切妻屋根建物の風荷重に及ぼす突風の立ち上がり時間の影響に関する実験的検討，都市・建築学研究　九州大学人間環境学研究院紀要，第 13 号，pp41-48，2008.1
6) 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，pp331-336，2008.
7) 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，日本建築学会構造系論文集，第 77 巻，第 681 号，pp.1629-1635，2012.11



a-1) 抗力（1/2 屋根勾配）　b-1) 抗力（1/4 屋根勾配）

a-2) 揚力（1/2 屋根勾配）　b-2) 揚力（1/4 屋根勾配）

図 8 オーバーシュート係数と無次元立ち上がり時間との関係（アクリル製，大小模型）
左列：1/2 屋根勾配，右列：1/4 屋根勾配

（受理：平成24年11月29日）