

# 突風を受ける切妻屋根建物の非定常風荷重に関する研究

大坪 和広

## 1. 序

台風や竜巻突風などの強風下では風速が短時間に増速することがある。そのような突風下では、定常流時と比較し非常に大きな風力が建物に作用する『風力のオーバーシュート現象』が発生することが報告されている<sup>1-4)</sup>。種田ら<sup>1)</sup>は水槽実験により、停止状態から急発進する楕円柱に作用する揚力を測定し、運動開始直後の揚力には衝撃的な高い値が現れ、すぐに減少した後、再度大きな値が生じてから、定常状態に落ち着くことを示した。竹内ら<sup>4)</sup>は特殊な設備を施した風洞や数値流体計算をもちいて、無風からや一定風速から短時間で立ち上がる突風下での楕円柱に作用する非定常風力の発生メカニズムを報告した。しかしながら、これらの報告は楕円柱や角柱に関するものがほとんどで、地表に接した住宅などの構造物を対象とした報告は少ない。地表面に接した構造物に関する研究の一つで、中村ら<sup>5)</sup>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した。その中で、抗力のオーバーシュート現象には言及しているが、揚力の実験は行われていない。

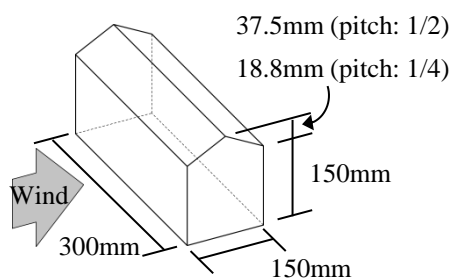


図1 切妻屋根建物寸法

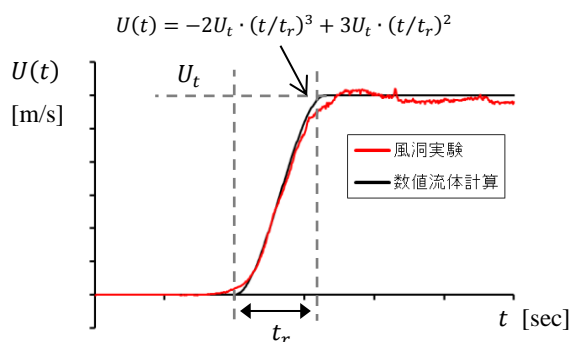


図2 風洞実験と数値流体計算での流入風速

後述のように、中村らが行った突風風洞実験では揚力計測に工夫が必要となるためである。また、竹内ら<sup>4)</sup>の研究より、オーバーシュート風力の発生には物体の大きさや形状が影響を及ぼすことが指摘されており、屋根模型の勾配もまた、オーバーシュート風力の発生に強い影響を及ぼすと考えられるが、中村らの報告は屋根勾配 1/2 での実験に留まっている。

本研究では、急変する突風下で地表面に接する構造物に生じるオーバーシュート現象に着目する。切妻屋根形状模型を用い、その屋根勾配の違いが建物に作用する非定常風力に及ぼす影響を解明することを目的とする。その中で、突風生成可能な風洞を用いた風力測定実験、風圧力測定実験と数値流体計算の3通りのアプローチを試みた。本報ではそのうちの2つ、勾配の異なる2種類の切妻屋根建物での風力測定実験と数値流体計算で得られた結果を比較検証する。風力測定実験では風力のオーバーシュート特性に及ぼす屋根勾配の影響を検証し、数値流体計算では建物周りの圧力分布からその原因を考察する。

## 2. 切妻屋根建物とステップ関数的突風の概要

図1に本研究で検討対象とした切妻屋根建物を示す。各辺の比は(梁間):(桁行):(軒高) = 1:2:1で、そのうえに1/2勾配と1/4勾配の切妻屋根を載せている。本研究では梁間長さを150mmとし、実験模型や数値計算モデルを作成した。

図2に風洞実験と数値計算で用いた流入風速の時刻歴波形を示す。流入風はステップ関数的突風を用い、風速が立ち上がるのに要した時間を立ち上がり時間、立ち上った後の平均風速を目標風速とし、この2つのパラメータを2~8m/s, 0.2~1.0秒で変えながら実験および計算を行った。本研究では開始風速は無風、風向は梁間方向から固定している。風洞実験では後述の翼列の回転により流入風を生成し、数値計算では実験で生成した流入風を、以下の三次式で近似して用いている。

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

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。

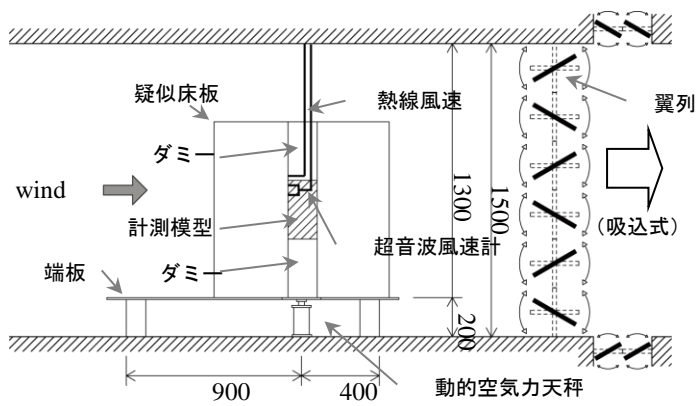


図3 風洞実験配置図 (単位: mm)

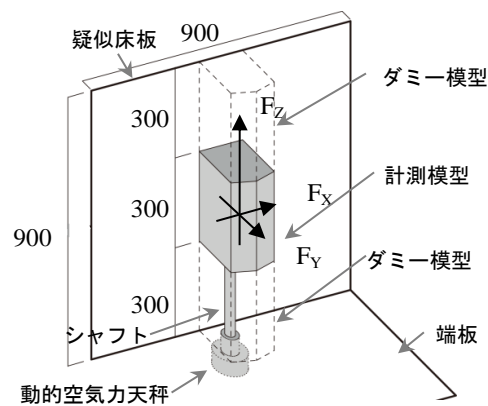


図4 模型配置図 (単位: mm)

### 3. 突風風洞を用いた風力測定実験

#### 3. 1 実験装置概要

図3に風力測定実験での風洞配置図を示す。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3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する。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。サンプリング周波数はともに1000Hzである。図4に計測模型の配置を示す。動的空気力天秤の計測方向は風流れ方向  $F_x$ 、流れ直交方向  $F_y$ 、鉛直方向  $F_z$  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、動的空気天秤の  $F_z$  方向には瞬間的に大きな信号が発生する。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<sup>6,7)</sup>を参考に、端版に垂直に立てて疑似床面を固定した。計測模型は垂直方向に立て、疑似床板に近接させて、静圧変動の影響を受けない風流れ方向  $F_x$  を抗力、流れ直交方向  $F_y$  の力を揚力とした。

#### 3. 2 実験結果

図5に風速と風力の時刻歴波形を示す。模型は1/2勾配の切妻屋根で目標風速4m/s、立ち上がり時間0.2秒での結果である。図5に示すように抗力、揚力とも

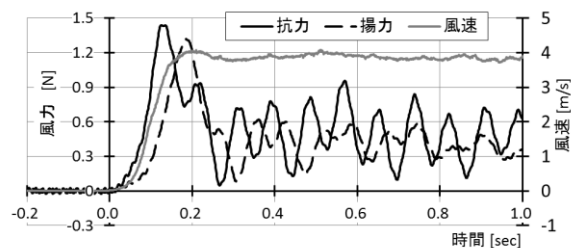


図5 風洞実験で測定した風力・風速波形(1/2勾配)

に風力のオーバーシュート現象が確認できる。しかしながら抗力と揚力ではピークの発生のタイミングは異なり、抗力は風速が立ち上がっている途中で、揚力は風速が立ち上がり終えた付近で発生している。

図6に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を示し、1/2勾配と1/4勾配屋根の実験結果の比較を行う。オーバーシュート係数とは風力のピーク値定常値の比であり、無次元立ち上がり時間： $t'_r$ とは以下のように定義される<sup>7)</sup>。

$$t'_r = \frac{U_t \cdot t_r}{d} \quad (2)$$

ここで、 $d$ ：代表長さ [mm]である。

図6(a)抗力のオーバーシュート係数の関係を見るとオーバーシュート係数は無次元立ち上がり時間によって一つのパターンで整理でき、両勾配とも無次元立ち上がり時間が増加するとオーバーシュート係数が減少する傾向が見られる。図6(b)揚力でもその傾向は同様であるが、無次元立ち上がり時間10～20の範囲では、1/4勾配屋根のオーバーシュート係数は変化せず横ばいになっており、屋根勾配の違いがオーバーシュート係数の減少率に影響を与えることが分かる。

### 4. 数値流体計算

#### 4. 1 計算条件

図7に数値計算の解析領域と各壁面の境界条件を示す。計算には市販の数値流体計算ソフトを用い、非定

常計算を行った。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、図 2 に示す流入風速は 100step 目から立ち上げた。差分法は 2 次精度多次元差分スキーム (MARS 法) とした。セルは建物付近を 1 辺 5mm のトリムセルとし、建物表面は厚さ 1mm の層を 5 層重ねている。風洞実験では模擬床面との干渉を避けるため模型との間にわずかな隙間を設けたが、数値計算モデルでは模型と地表面の隙間は再現していない。

#### 4. 2 建物周りの圧力分布の時刻歴変化

図 8 と図 9 に各時刻での建物桁行方向中央位置での風圧係数分布を示す。このとき流入風には式(1)で示すような 3 次関数で近似したものをを用いた。数値計算で

求めた圧力は流れ方向風上壁面位置での静圧を基準とした差圧なので、速度圧で除すことで無次元化し風圧係数とした。図 8 が 1/2 勾配屋根での、図 9 が 1/4 勾配屋根での結果である。図 9 の 1/2 勾配屋根に着目すると、図 8 (a)の無風状態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。この静圧勾配は加速度に比例し、加速度が最大となる図 8 (b)で抗力のピークが生じる。その時、風上屋根面の軒先と棟部風下側で小さな渦が発生している。この渦は徐々に大きくなり、中心部の圧力が低下して、図 8 (c)のような圧力分布となる。1/2 勾配の場合は棟部風下側の渦が大きく、これが揚力のピークに大きな影響を及ぼすと考えられる。この渦は屋根面に沿って風下側に移動し、図

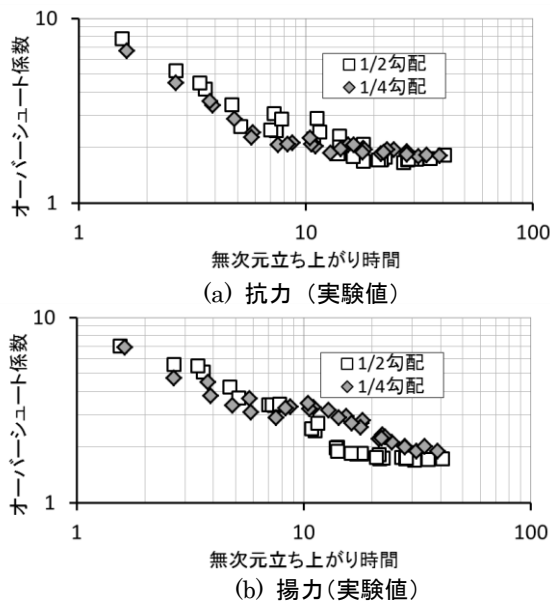


図 6 無次元立ち上がり時間とオーバーシュート係数の関係

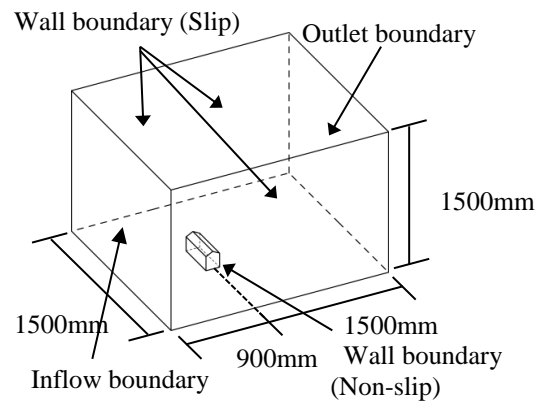


図 7 数値流体計算解析領域および境界条

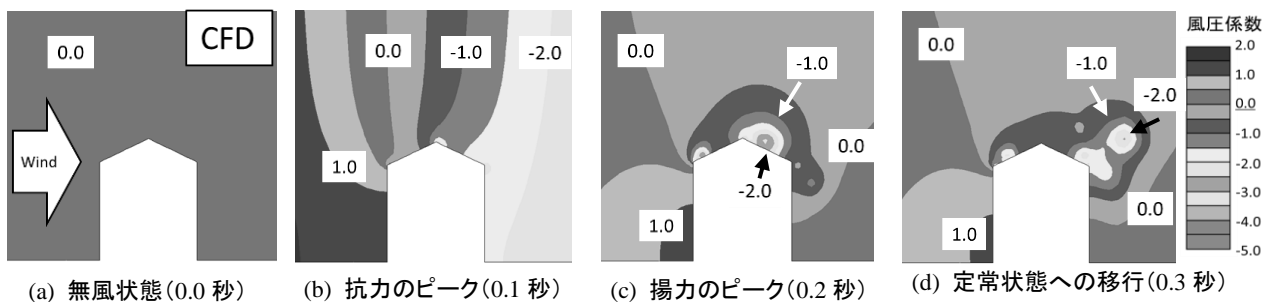


図 8 切妻屋根建物 (1/2 勾配) 周りの各時刻での風圧係数分布 (目標風速 2m/s, 立ち上がり時間 0.2 秒)

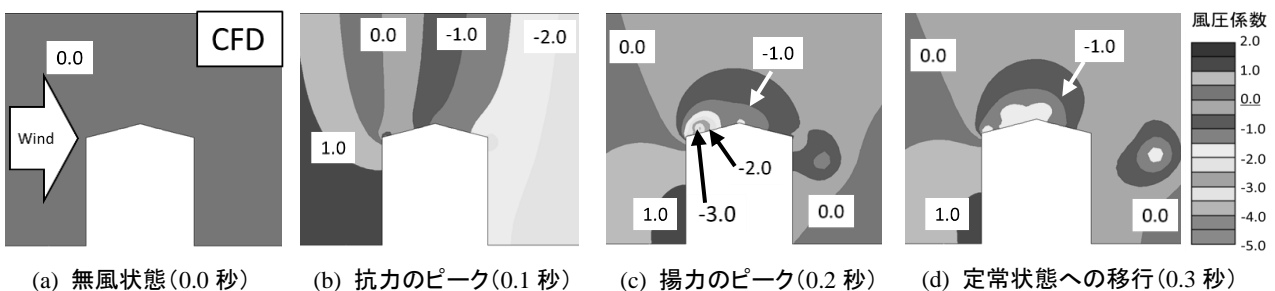
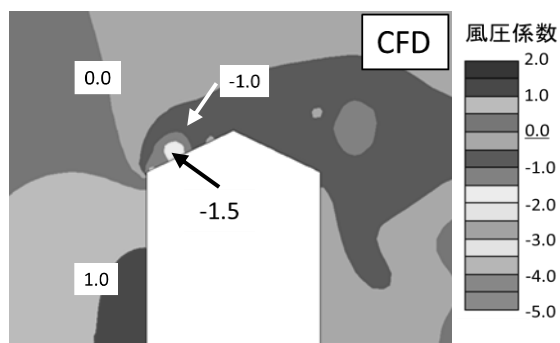
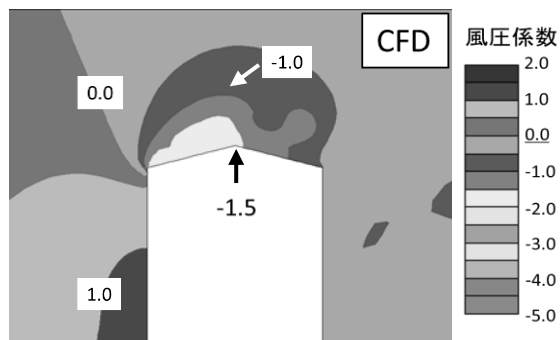


図 9 切妻屋根建物 (1/4 勾配) 周りの各時刻での圧力分布 (目標風速 2m/s, 立ち上がり時間 0.2 秒)



(a) 1/2 勾配屋根



(b) 1/4 勾配屋根

図 10 揚力のピーク時での風圧係数分布  
(目標風速 2m/s, 立ち上がり時間 0.6 秒)

8 (d)では屋根面から剥離する。一方、1/4 勾配屋根では抗力のピークが発生する図 9(b)までは図 8 と同様の風圧係数分布であるが、図 9 (c)に示すように、風上屋根面の軒先で発生する渦のサイズが大きく、中心の圧力が低い。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、図 9 (d)に示すように、風速の立ち上がりから 0.3 秒後は、形を崩しながらも屋根面に付着している。

図 10 に立ち上がり時間が 0.6 秒の揚力のピーク時の圧力分布を示す。図 10(a)に示すように立ち上がり時間が長くなると 1/2 勾配屋根の棟部の渦はあまり発達せず、軒先部にのみ渦は発生する。図 10(b)の 1/4 勾配屋根の軒先の渦は立ち上がり時間の影響は少なく立ち上がり時間が 0.2 秒と同程度の渦が発生する。図 6 (b)で示した、1/4 勾配屋根のみ揚力のオーバーシュート係数の減少率が横ばいになったのは、この渦の発生の違いのためと考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、短時間で立ち上る突風を受けて切妻屋根建物に作用する非定常風荷重の特性を明らかにする

ため、屋根勾配の違いに着目して突風生成可能な風洞を用いた風力測定実験と数値計算を行った。その結果、以下の知見が得られた。

風洞実験では、

1. 地表面に接した構造物においても、抗力と揚力のオーバーシュート現象が確認された。
2. 風力のピーク値と定常値の比であるオーバーシュート係数を無次元立ち上がり時間で整理すると、オーバーシュート係数は一つのパターンで整理できた。
3. 無次元立ち上がり時間が増加するとオーバーシュート係数は減少する傾向にあり、その減少の様子は勾配によって異なった。

数値計算では、

4. 抗力のピークは静圧勾配が最大となるタイミングで発生し、屋根勾配による影響は少ない。
5. 揚力のピークは物体の隅角部に生じる渦によって引き起こされ、渦の大小や強さは屋根勾配によって変化し、1/2 勾配よりも 1/4 勾配の方が渦の剥離がしにくく、立ち上がり時間が長くなっても発生する。

## 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, 楢田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) 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, pp197-202, 2010.
- 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