

観測記録に基づく突風の統計特性と切妻屋根形状物体に作用するオーバーシュート風圧力の推計

野方, 香里
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

友清, 衣利子
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

前田, 潤滋
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

<https://doi.org/10.15017/26765>

出版情報：都市・建築学研究. 22, pp.39-44, 2012-07-15. 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：

観測記録に基づく突風の統計特性と 切妻屋根形状物体に作用するオーバーシュート風圧力の推計

Statistics of Short-time-rising Gusty Winds based on Wind Observation
and Estimation of Unsteady Pressure acting on Gabled Roof

野方香里*, 友清衣利子**, 前田潤滋**

Kaori NOGATA, Eriko TOMOKIYO and Junji MAEDA

The mechanism of unsteady aerodynamic force on structures related to gusty winds has been investigated. However, there is very little observation of gusty winds which damage structures and so their actual features haven't been clear yet. In this paper, we analyzed the statistical information of gusty winds to estimate unsteady wind pressures acting on actual structures. We matched the selected gusty winds with experimental results and calculated wind speeds equivalent to generate estimated unsteady wind pressures on actual structures. Then the equivalent wind speeds were compared with observed values. Our results showed that the estimated wind pressures were approximated with probability density function and the equivalent wind speeds generating wind pressures associated with return period of 10 years are stronger than observed wind speeds.

Keywords: Short-time-rising gust, Non-dimensional rise time, Overshoot of wind pressure, NeWMeK
立ち上がり時間の短い突風, 無次元立ち上がり時間, 風圧力のオーバーシュート, NeWMeK

1. 序

近年竜巻などの突風により, 死傷者が出るなどの重大な被害が発生した¹⁾ことから, 突風によって電車などに作用する非定常空気力の影響が注目されている。風洞実験²⁾や数値流体解析³⁾でそのような非定常空気力の解明は進められているが, 突風が風速記録として残された事例は少なく, 実際の性状は明らかになっていない。

1998年3月19日福岡市西区今宿地域で, 突風による電車の脱線事故が発生し⁴⁾, 事故現場に近接するNeWMeK(九州電力(株)広域高密度風観測システム)⁵⁾の風観測点では急激に風速が増加する立ち上がり時間の短い突風が観測された。著者ら^{6,7)}は, NeWMeKで蓄積された1996年から2003年までの観測記録から立ち上がり時間の短い突風を選出し, その特徴をまとめたが, さらに多くの観測記録をもとに突風情報を整理する必要性を指摘している。

本論では, 既報⁷⁾の選出方法を用いて1996年から2010年までのNeWMeKの観測記録から突風を選出し, その特徴をまとめる。また, 突風風洞実験と無次元パラメータの等しい実際の突風によって, 切妻屋根形状物体に作用する可能性のあるオーバーシュート風圧力の算定例を

示すとともに, 算定した風圧力を発生させるために相当する風速と観測突風風速との比較を行う。

2. 立ち上がり時間の短い突風の選出

気象庁⁸⁾では「突風」とは「急に吹く強い風で継続時間の短いもの」と定義しており, 立ち上がり時間や風速値の大きさなどの定量的な値は定められていない。小林ら^{9,10)}は1分平均風速値をもとに北陸沿岸地域での冬季季節風に伴う突風の選出を試みており, 著者らはその手法を参考に, 以下のような立ち上がり時間の短い突風の選出手順を提案⁷⁾している。ここでは1996年から2010年までにNeWMeKで観測された1秒平均風速記録を用いた。

- (1) 任意の時刻 t_0 までの6秒間の移動平均風速 W_{ave} と時刻 t_0 からの6秒間の移動平均風速 W_{+ave} を求める。
- (2) 移動平均風速 W_{ave} と W_{+ave} との風速差が10m/s以上となる記録を選出する。
- (3) 任意の時刻 t_0 を中心とした12秒間(前後各6秒間)での1秒平均風速の極大値 U_{max} と極小値 U_{min} を求める。
- (4) 1秒平均風速の極大値 U_{max} が20m/s以上で, 風速差 $U_f=U_{max}-U_{min}$ が15m/s以上となる風速の時刻歴波形を12秒間選出する。

上記では2006年9月に宮崎県延岡市で発生した竜巻¹⁾が, 被害長さ約7.5kmを約5分で吹き走し(速さ約25m/s), その被害幅は約150mであることから, 突風の影響を受

* 都市共生デザイン専攻修士課程

** 都市・建築学部門

ける平均化時間を6秒とした。また、手順(4)では風速の極大値および風速差の閾値を1998年の電車脱線事故⁴⁾発生時に観測された立ち上がり時間の短い突風が選出されるような値とした。

3. 突風選出事例

NeWMeKの1秒平均風速が保存されている1996年から2010年までの1419日分の記録から、前述の手法を用いて突風を選出した。台風時と季節風などの非台風時では、強風範囲や風向などの特徴が異なるため、台風時と非台風時にそれぞれ別して選出突風の出現特性を論じるが、気象庁の発表する台風経路図を確認し、台風の影響を受けた強風時に選出された突風と判断されるものを台風時、その他の要因で生じた強風時に選出された突風

を非台風時とした。また、これまでの報告^{2,3,11,12)}で無次元立ち上がり時間 $t_r' (=U_r \times t_r) / D$ (D は物体の代表長さ)が小さく、風速比(目標風速に対する初期風速の比)が小さいほど、オーバーシュート現象が発生しやすいことが指摘されているので、選出突風を整理するために、突風影響スケール「 $U_r \times t_r$ 」および風速比「 U_{ratio} 」を求めた。ここで、 t_r は風速の立ち上がり時間(= $t_{max} - t_{min}$:1秒平均風速の極大値 U_{max} が発生した時刻 t_{max} と極小値 U_{min} が発生した時刻 t_{min} の差)、風速比 $U_{ratio} = U_{min} / U_{max}$ とした。選出された突風の風速の極大値及び極小値、風速差、立ち上がり時間、突風影響スケールと風速比の平均値、中央値、最頻値、標準偏差、最大値及び最小値を表1に示す。また、図1から図4には選出された突風の風速の極大値及

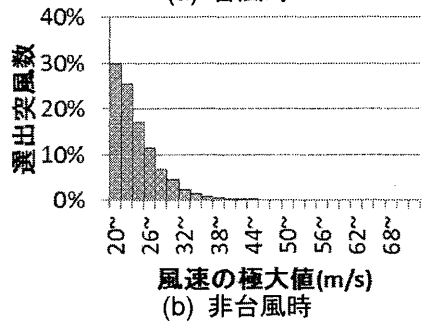
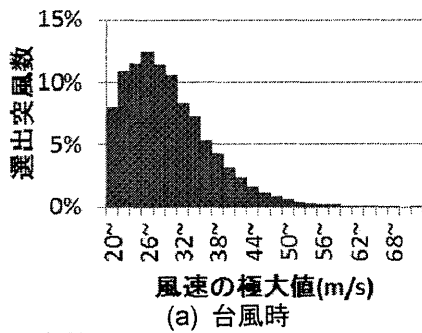


図1 風速の極大値ごとの発生頻度

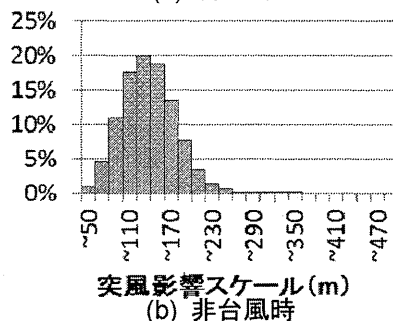
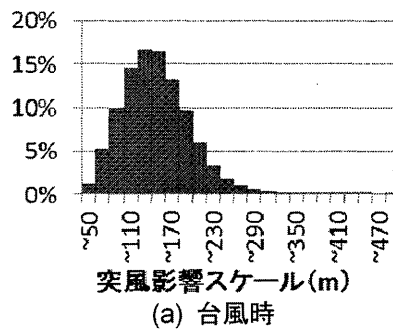


図2 突風影響スケールごとの発生頻度

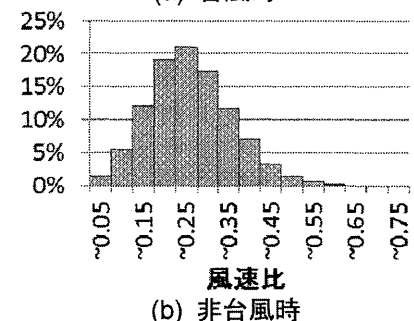
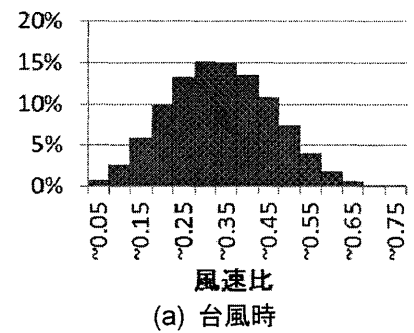


図3 風速比ごとの発生頻度

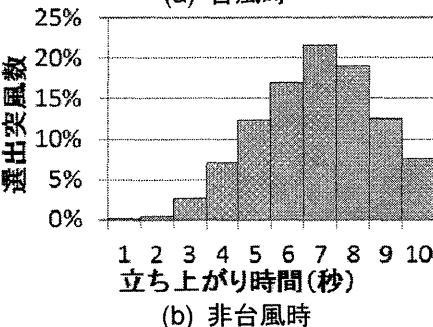
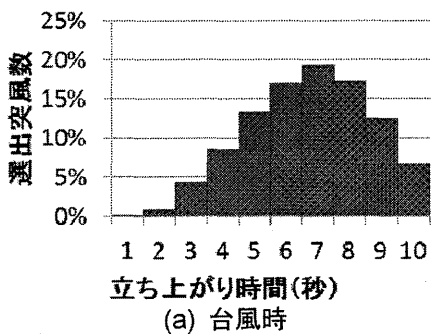


図4 立ち上がり時間ごとの発生頻度

表1 台風時、非台風時の選出パラメータの平均値、中央値、最頻値、標準偏差、最大値及び最小値の比較

		風速の極大値 (m/s)	風速の極小値 (m/s)	風速差 (m/s)	立ち上がり時間(秒)	突風影響スケール (m)	風速比
台風時	平均値	30.5	10.1	20.4	6.7	137.2	0.31
	中央値	29.2	8.9	19.6	7.0	133.0	0.31
	最頻値	28.2	5.0	18.0	7.0	134.4	0.25
	標準偏差	7.1	5.7	3.8	1.9	48.6	0.12
	最大値	72.2	42.6	49.0	10.0	490.0	0.72
	最小値	20.0	0.0	15.0	1.0	16.5	0.00
非台風時	平均値	24.4	5.9	18.5	6.9	128.0	0.24
	中央値	23.5	5.4	18.0	7.0	126.0	0.23
	最頻値	20.8	4.5	18.0	7.0	123.2	0.25
	標準偏差	3.7	3.1	2.5	1.8	38.5	0.09
	最大値	44.6	24.7	38.4	10.0	347.0	0.59
	最小値	20.0	0.0	15.0	1.0	17.0	0.00

び突風影響スケール、風速比と立ち上がり時間ごとの突風発生頻度を示す。図5と図6には突風影響スケールに対する風速の極大値及び風速比ごとの突風発生頻度を示す。図7は突風選出地点とその数である。図1から図7までの各図(a)に台風時、図(b)に非台風時の結果を示した。

3.1 台風時

台風9606号から台風1004号まで28台風の観測記録から、69861の突風が選出された。表1と図1(a)より、風速の極大値は平均値よりも最頻値が小さく、右裾の長い左寄りの頻度分布となる。図3(a)と図4(a)より風速比及び立ち上がり時間はほぼ左右対称の分布で、風速比及び立ち上がり時間の平均値、中央値、最頻値の値は約0.3と約7秒でほぼ等しい。一方、図2(a)より、突風影響スケールの中央値及び最頻値は約134mで平均値はこれらをわずかに上回る137.2mとなる。数は少ないものの突風影響スケール260mを超える突風が選出されたため、平均値が大きくなったと考えられる。図1(a)より台風時には最大瞬間風速が60m/sを超える突風が複数選出され、表1より最小瞬間風速の最大値は40m/sを超えている。台風時に選出される突風は風速値が高い場合が多いと言える。図5(a)及び図6(a)より突風影響スケールが小さくなると選出突風数は減少するが、風速の極大値及び風速比ごとの突風発生頻度は同じような分布となる。図7(a)

より1996年から2010年にかけて台風による強風が吹いた南九州に台風時の突風の発生数の多い観測点が偏っている。これはこの地域で選出条件の閾値20m/sを超える高風速が多く観測されたためである。20km程度離れた隣接した観測点では選出突風数には違いが見られ、台風経路や観測点周辺地形が選出数に影響を与えらる。

3.2 非台風時

1996年から2010年にかけて台風以外の要因で強風が観測された238日間の記録から、非台風時には7606の突風が選出された。表1及び図1(a)と図1(b)を比較すると、非台風時の突風は台風時に比べて風速が低い場合が多い。図1(b)の風速の極大値ごとの発生頻度は左端をピークに右肩下がりの分布となる。これは風速の極大値20m/sを選出条件の閾値としているためである。図2(b)と図3(b)より、非台風時には立ち上がり時間の中央値は約7秒、風速比の中央値は0.23で、ほぼ左右対称の分布となる。表1より台風時と比べると、非台風時の風速の極大値と極小値の標準偏差は約3m/sと台風時のほぼ半分で、選出突風の風速のばらつきが小さい。図5(b)及び図6(b)より台風時と同様に突風影響スケールが小さくなると選出突風数は減少するが、風速の極大値及び風速比ごとの突風発生頻度は同じような分布形状になる。図7(b)の非台風

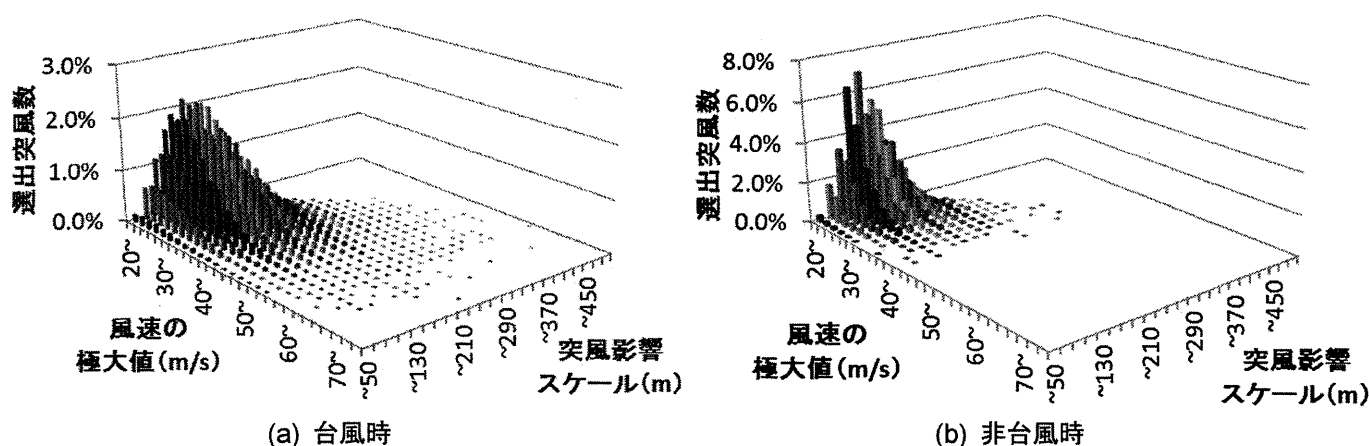


図5 突風影響スケールに対する風速の極大値ごとの突風発生頻度

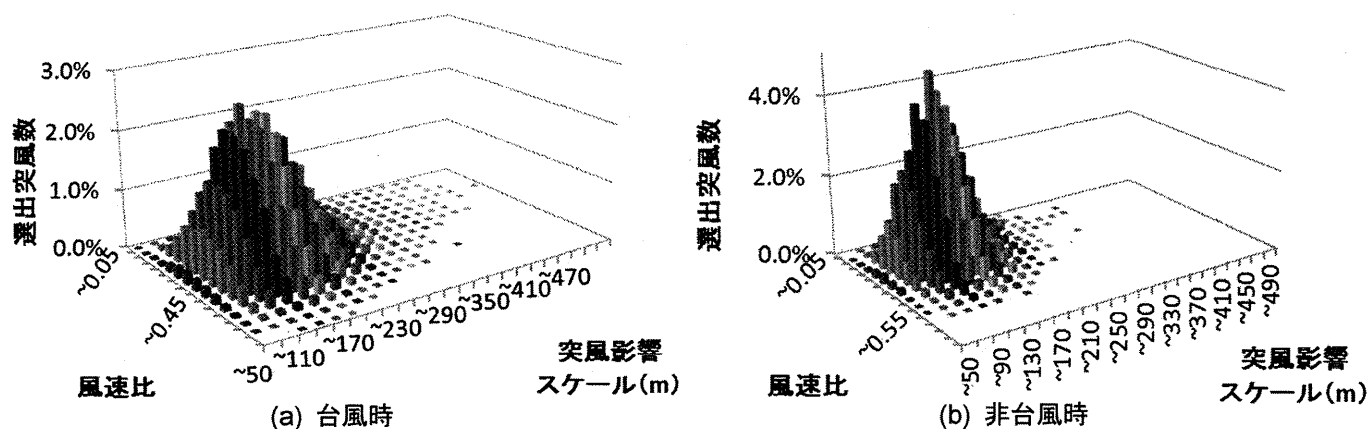


図6 突風影響スケールに対する風速比ごとの突風発生頻度

時には一部の観測点で多数の突風が選出されたが、ほとんどの観測点での選出突風数は200以下で、突風が選出されなかった観測点も12ヶ所あった。20km程度離れた隣接した観測点では選出突風数に大きな差があることから、非台風時は特に観測点固有の条件が選出数に影響を与えると考えられる。

4. オーバーシュート風圧力の推計

4.1 突風風洞実験と風観測記録との対応

中村ら¹¹⁾は突風風洞実験で切妻屋根形状模型の平面(棟と平行な面)を正面とした非定常風圧力の測定を行い、風下屋根面に特に大きなオーバーシュート風圧力が生じることを報告している。本論ではそれらの風洞実験結果と観測突風との対応を検討し、実規模の切妻屋根形状物体に生じるオーバーシュート風圧力の算定を試みた。

突風風洞実験において、オーバーシュート係数 O_s はオーバーシュート風圧力 P_o と定常風圧力 P_s との比で表される。

$$O_s = P_o / P_s \quad (1)$$

$$P_s = \frac{1}{2} \rho C_p v^2 \quad (2)$$

ただし、 ρ は空気密度、 C_p は風圧係数、 v は代表風速である。

図8に突風風洞実験で用いられた切妻屋根模型の概要を示す。最も大きい負のオーバーシュート風圧力を生じたのは風下屋根面中央点で、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図9のようになる。ここで、無次元立ち上がり時間 t'_r は以下で定義し、 D は物体の代表長さ、 t_r は風速の立ち上がり時間、 U_i は立ち上がり後の風速である。

$$t'_r = \frac{U_i t_r}{D} \quad (3)$$

図9は、風速比0、すなわち無風時から立ち上がる突風に対する実験値であるが、無次元立ち上がり時間 t'_r と風圧力のオーバーシュート係数 O_s との関係は以下のように近似される。

$$O_s = 9.2 \frac{1}{t'^{0.69}} \quad (4)$$

式(1)~(4)よりオーバーシュート風圧力 P_o は以下の式で表される。

$$P_o = 9.2 \left(\frac{D}{U_i t_r} \right)^{0.69} \times \frac{1}{2} \rho C_p v^2 \quad (5)$$

ここで空気密度 $\rho=1.2\text{kg/m}^3$ 、定常時の風圧係数は風洞実験¹¹⁾より $C_p=0.6$ とした。物体の代表長さは一般住家を想定し $D=6\text{m}$ とする。 $U_i t_r$ と代表風速 v は観測突風の影響スケールと風速の極大値 u_{max} を用いる。

図9および式(4)より $O_s=1$ となる場合の無次元立ち上がり時間 t'_r は25なので、立ち上がり時間が25未満の場合に切妻屋根模型の風下屋根面でオーバーシュート現象が生じると考えられる。式(3)より物体の代表長さ $D=6\text{m}$ では、突風影響スケール $U_i t_r$ が150m未満の場合に相当する。以下では3節で選出した突風のうち、突風影響スケールが150m未満のものに着目するが、その条件に合致する選出突風は台風時で64%(44621個)、非台風時で73%(5554個)であった。

また、図9は無風状態から急激に変化する突風に対するオーバーシュート現象に関する実験結果であるが、実際に観測される突風はある程度の風速状態から風速が急変する場合がほとんどである。竹内ら¹²⁾は楕円柱模型を

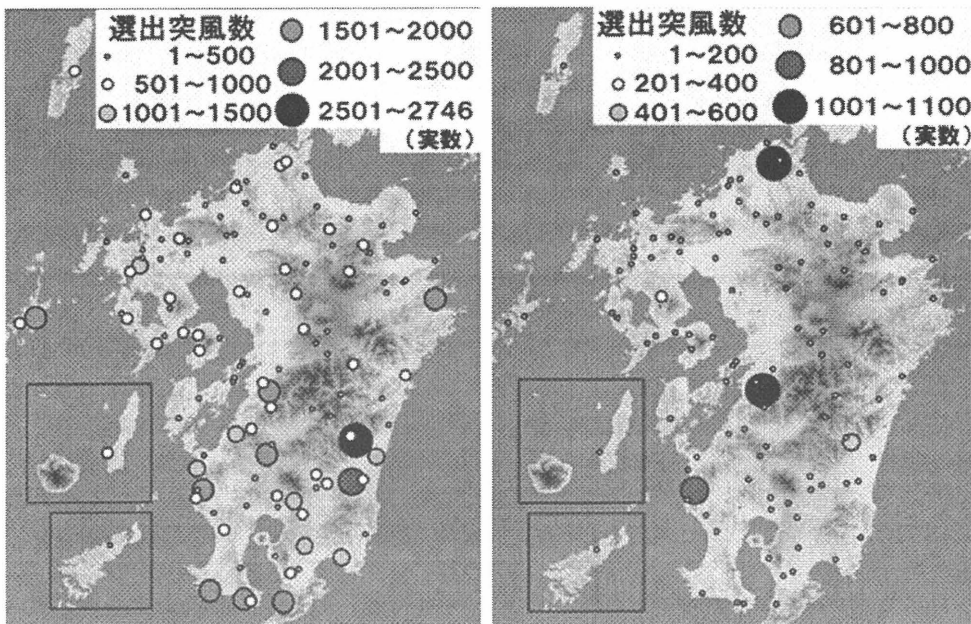


図7 突風選出地点とその数

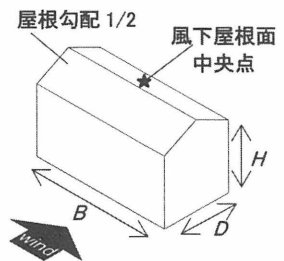


図8 風洞実験で用いた切妻屋根模型¹¹⁾

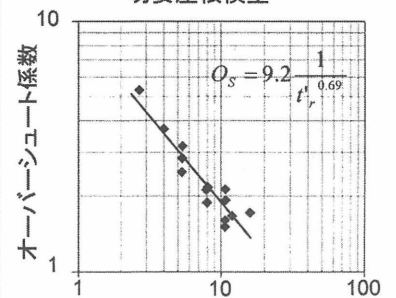


図9 無次元立ち上がり時間とオーバーシュート係数の関係(風下屋根面中央点)¹¹⁾

対象に一定風速から風速が急変した場合の突風風洞実験を行い、初期風速が 0m/s でなく初期風速と目標風速との比が大きくなると、オーバーシュート現象が生じ始める無次元立ち上がり時間が小さくなるとともに、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近似式の勾配が緩やかになることを指摘している。つまり、風速比が大きい場合にはオーバーシュート現象が生じにくく考えられる。そこで、本論では顕著なオーバーシュート現象が生じる風速比を 0.4 以下と想定した。風速比に閾値を設けない場合にはオーバーシュート現象を生じない突風も含めた検討を行うことになるが、風速比の閾値の有無によるオーバーシュート風圧力の変化を確認するため、2 つのケースでオーバーシュート風圧力の算定を行った。図 10 に突風影響スケール 150m 未満の選出突風の風速比の頻度分布を示すが、顕著なオーバーシュート現象が生じると考えられる風速比 0.4 以下の突風は、台風時で選出突風の 72%、非台風時では 94%である。

4.2 風速比による制限を行わない場合

(1) オーバーシュート風圧力の算定

式(5)に突風影響スケールと風速の極大値を代入して求めた切妻屋根風下面中央点でのオーバーシュート風圧力の累積頻度分布を図 11(a)に示す。前節で述べたように非台風時に比べて台風時の方が突風の風速が大きく、オーバーシュート風圧力の累積頻度分布には違いが見られた。図 11 中に Gumbel 分布に従う累積頻度分布をあわせて示す。ここで、オーバーシュート風圧力の累積頻度分布は以下の分布関数に従うと仮定する。

$$F(x) = \exp(-\exp(-\alpha(x - \beta))) \quad (6)$$

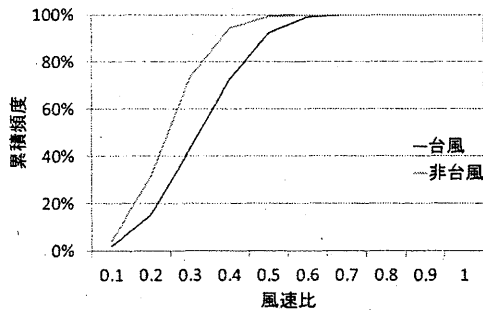


図 10 風速比に対する突風数の累積頻度 ($U_i \times t_i < 150$)

α および β は形状係数で、台風時は $\alpha=0.006$, $\beta=318.29$, 非台風時は $\alpha=0.013$, $\beta=226.08$ とした。両者は全域で一致しているとは言い難いが、累積頻度 90%以上では比較的良好に対応している。用いる確率密度関数に関してはさらなる検討を要するが、本論ではオーバーシュート風圧力が式(6)の Gumbel 分布の累積分布関数に従うと仮定した。超過確率 10%のオーバーシュート風圧力は台風時で 724.5N/m², 非台風時で 404.7N/m² となった。

(2) オーバーシュート風圧力を発生させる相当風速算定
前項で求めた超過確率 10%のオーバーシュート風圧力 P_o を作用させるための相当風速 v_{eq} を式(7)から求めた。

$$v_{eq} = \sqrt{\frac{2P_o}{\rho C_p}} \quad (7)$$

定常時とは作用時間が異なるため一概に比較することはできないが、オーバーシュート風圧力は台風時で 44.9m/s, 非台風時で 33.5m/s と同等の風速による定常風圧力に相当すると考えられる。

(3) 観測突風風速と相当風速との比較

突風影響スケール 150m 未満の観測突風風速の極大値の累積頻度分布を図 11(b)に示す。突風風速の極大値も風圧力と同様に Gumbel 分布で近似できるものと仮定すると、台風時の風速の極大値は $\alpha=0.19$, $\beta=26.3$, 非台風時は $\alpha=0.37$, $\beta=22.5$ の累積密度関数で表される。超過確率 10%の風速の極大値は、台風時で $u_{max(0.1)}=37.8$ m/s, 非台風時で $u_{max(0.1)}=28.5$ m/s で、相当風速 v_{eq} は観測突風に基づく超過確率 10%の風速の極大値の約 1.2 倍になった。

4.3 風速比 0.4 以下の突風に着目した場合

(1) オーバーシュート風圧力の算定

顕著なオーバーシュート現象が生じると考えられる

表 2 オーバーシュート風圧力及び相当風速、観測風速

選出条件		オーバーシュート風圧力 P_o (超過確率10%)	相当風速 v_{eq}	観測風速極大値 u_{max}	相当風速 / 観測風速
突風影響スケール 150未満	台風時	724.5 N/m ²	44.9 m/s	37.8 m/s	1.2
	非台風時	404.7 N/m ²	33.5 m/s	28.5 m/s	1.2
突風影響スケール 150未満 風速比0.4以下	台風時	534.8 N/m ²	38.5 m/s	32.8 m/s	1.2
	非台風時	372.5 N/m ²	32.2 m/s	27.4 m/s	1.2

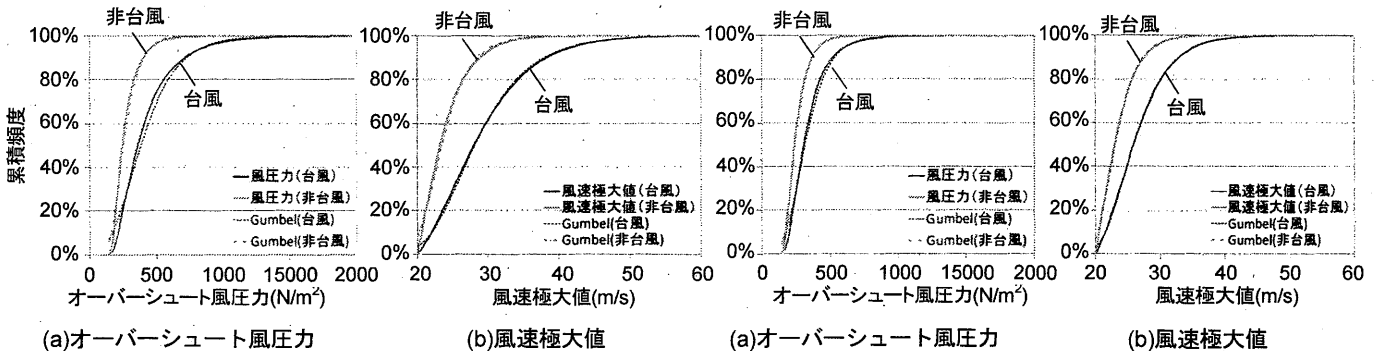


図 11 風圧力と風速の累積頻度 ($U_i \times t_i < 150$ の場合)

図 12 風圧力と風速の累積頻度 ($U_i \times t_i < 150, U_{ratio} \leq 0.4$ の場合)

風速比 0.4 以下の突風に着目し、同様に風圧力の算定を行った。式(5)よりもとめたオーバーシュート風圧力の頻度分布を図 12(a)に示す。非台風時の頻度分布形状は、風速比の制限によってほとんど変化しないが、台風時は選出される突風数が減少したため、オーバーシュート風圧力は全体的に小さくなった。式(6)の Gumbel 分布の確率密度関数を求めると、台風時の形状係数は $\alpha=0.009$, $\beta=274.84$, 非台風時は $\alpha=0.015$, $\beta=221.44$ となり、超過確率 10%のオーバーシュート風圧力は、台風時で 534.8N/m^2 , 非台風時で 372.5N/m^2 である。

(2) オーバーシュート風圧力を発生させる相当風速算定

前項と同様に風速比 0.4 以下の突風を対象に超過確率 10%のオーバーシュート風圧力 P_o を作用させるための相当風速 v_{eq} をもとめた。風速比で制限すると、オーバーシュート風圧力は台風時で 38.5m/s , 非台風時で 32.2m/s と同等の風速による定常風圧力に相当する。

(3) 観測突風風速と相当風速との比較

突風影響スケールが 150 未満で風速比が 0.4 以下の観測突風風速の極大値の累積頻度分布を図 12(b)に示す。前項と同様に Gumbel 分布の累積密度関数を求めると、台風時の風速の極大値の形状係数は $\alpha=0.27$, $\beta=24.6$, 非台風時では $\alpha=0.44$, $\beta=22.3$ となる。超過確率 10%の風速の極大値は、台風時 $u_{max(0.1)}=32.8\text{m/s}$, 非台風時 $u_{max(0.1)}=27.4\text{m/s}$ と推定される。

算定したオーバーシュート風圧力、相当風速および観測風速の極大値を表 2 にまとめる。風速比 0.4 以下に制限すると、台風時のオーバーシュート風圧力は約 25%、風速は約 15%減少したが、相当風速と観測風速との比は 1.2 であった。

5. まとめ

風圧力のオーバーシュート現象を発生させる視点で突風に着目し、1996 年から 2010 年までの NeWMeK での観測記録から立ち上がり時間の短い突風の選出し、その特徴をまとめた。まとめた突風の特徴をもとに実大構造物にオーバーシュート現象を生じさせる突風に着目し、突風風洞実験と無次元パラメータの一致する選出突風によって、奥行き 6m の切妻屋根形状物体に作用するオーバーシュート風圧力とそれに相当する風速の算定例を示し、観測突風風速との比較を行った。得られた所見は以下の通りである。

- 1) 台風時の選出突風は非台風時よりも数が多く、風速が大きい。
- 2) 突風影響スケール $U_t \times t_r$ の値によって選出突風数は異なるが、風速の極大値および風速比ごとの突風の累積頻度分布形状は変化しない。
- 3) 選出突風の風速比は約 0.3 の場合が多く、顕著なオーバーシュート現象が生じると考えられる風速比 0.4 以下の突風は台風時で 72%、非台風時で 94%である。

- 4) 観測突風の風速の極大値と突風影響スケールにもとづいて算定したオーバーシュート風圧力は、Gumbel 分布の確率密度関数で概ね近似できる。
- 5) 奥行き 6m の切妻屋根形状物体に超過確率 10%のオーバーシュート風圧力を作用させるために同等な風速は観測突風の約 1.2 倍となる。
- 6) 突風の風速比を 0.4 以下に制限すると、実大物体に作用するオーバーシュート風圧力小さくなるが、その値は相当する定常風速は観測突風風速の約 1.2 倍になる。

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)」、「強風被害拡大影響因子のリアルタイム情報を学習するモデルの構築と住家強風危険度判定 (基盤研究(C) 23510227 代表: 友清衣利子)」及び「風力発電及び送電拠点の分散マイクログリッド構築の実現 (挑戦的萌芽研究 24651190 代表: 前田潤滋) の助成を受けました。

参考文献

- 1) 日本風工学会風災害研究会: 2006 年台風 13 号及び同年 11 月 7 日に北海道佐呂間町で発生した竜巻による強風災害に関する調査報告書, 2007.10.
- 2) 竹内崇他: 車輻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, 2008.12.
- 3) Takashi Takeuchi, Junji Maeda: Effects of inertia force proportional to flow acceleration on unsteady wind forces acting on an elliptic cylinder under short-rise-time gusts, Proceedings of The Fifth International Symposium for Computational Wind Engineering, USB, 2010.5.
- 4) 石田伸幸他: 福岡市西部地区での強風特性に及ぼす局所地形の影響, 第 16 回風工学シンポジウム論文集, pp.7-12, 2000.11.
- 5) Eriko Tomokiyo, Junji Maeda et al.: Typhoon Damage Analysis of Transmission Towers in Mountainous Regions of Kyushu, Japan, Wind&Structures An International Journal, Vol.7, No.5, pp.345-357, 2004.6.
- 6) 友清衣利子他: 風速の立ち上がり時間に着目した突風の選定, 2010 年度日本建築学会大会 (北陸) 学術講演梗概集, pp.113-114, 2010.9.
- 7) 友清衣利子, 前田潤滋, 竹内崇: 構造物のオーバーシュート風力発生に着目した立ち上がり時間の短い突風の統計分析, 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 20 号, pp.41-46, 2011.7.
- 8) 気象庁ホームページ: 竜巻等の突風データベース, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/index.html>.
- 9) 小林文明他: 降雪雲に伴う突風の統計的特徴—北陸沿岸における観測—, 天気, vol.55, No.8, pp.17-26, 2008.8.
- 10) 小林文明, 河合克仁, 林泰一, 他: 冬期庄内平野における突風の発生頻度と環境特性, 日本風工学会論文集, Vol.37, No.1 (No.130), pp.1-10, 2012.1.
- 11) 中村諭史, 前田潤滋, 竹内崇, 他: 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, 2010.12.
- 12) 竹内崇, 石野智慎, 鶴則生, 他: 一定風速からの風速急変場の楕円断面柱に作用する非定常風力に関する考察, その 1 風洞実験による非定常風力特性の検討, 2011 年度日本建築学会大会 (関東) 学術講演梗概集, pp.43-44, 2011.8.

(受理: 平成 24 年 6 月 7 日)