

## 2008年7月に発生した敦賀市の突風による大型テントの被害

西村宏昭\*・丸山敬・河井宏允

\* 財団法人日本建築総合試験所

### 要 旨

2008年7月27日12時50分頃、福井県敦賀市敦賀湾に面した浜辺で突風が発生し、イベント用大型テントが吹き飛ばされ、死者1名、負傷者9名の被害が発生した。この突風は日本海で発達した低気圧の通過に伴うガストフロントが原因であると推測された。吹き飛ばされたテントは幅40m×奥行き10m×高さ約3.5mで、海に面した壁面以外の3面がテント生地で塞がれていた。テントには約4,800kgの重石が繋がれていたが、海から吹いてきた風がテントの中に入ると、テントが重石とともに約10m吹き飛ばされた。風洞実験を行ってテントの風力係数を求め、その結果を用いてテントの飛散風速を推測した。重石が繋がれ、3面が塞がれたテントは、瞬間風速約10m/sで転倒することがわかった。全壁面を開放したテントでは、重石がなければテントは約8m/sで転倒すると予測された。

**キーワード:** 大型テント, 強風被害, 被害者, 持ち上がり, 開口部

### 1. はじめに

2008年7月27日12時50分頃、福井県敦賀市敦賀湾に面した浜辺で突風が発生し、イベント用大型テントが吹き飛ばされ、死者1名、負傷者9名の被害が発生した(福井气象台, 2008, 西村ら, 2009)。テントは幅10m×奥行き10m×高さ約3mの大きさのモジュールを4つ並べて紐で互いに緊結して幅40m×奥行き10mにしたもので、海に面した西側の1壁面が開放され、他の3面はテント生地で塞がれていた。テントは、質量約300kgのコンクリート製重石16個に繋がれ、風による浮き上がりに抵抗するはずであった。被災箇所の近くの気象観測所での風速の記録は最大瞬間風速29.7m/sを示した。海からの突風によってテントが浮き上がり、風下側に約10m移動した。一部のコンクリート製重石はテントとともに浮き上がった。

この重石付きテントの総質量は約5,000kgであるが、簡単な試算では、風速30m/sのときのこのテントの浮き上がり力は200kN以上になり得る。テントの屋根の平面積は400m<sup>2</sup>であるので、単位面積あたりの質量は約12kgにしか過ぎず、極めて軽量の構造物であった。これほどの大きい風力を重石の重量で抵抗するのは無理で、地面に固定するとともに過大な風力が掛からないようにテントの壁を塞がない配慮が必

要である。

テントが強風で吹き飛ばされる事故は過去にも幾度か発生している。耐風設計された建築物とは異なり、これらのテントに十分な強度があるはずがないことを認識することが、この種の被害で人身事故を防ぐ第一歩であるべきである

本研究報告では、敦賀市で起きた被害の状況を述べ、風洞実験で得られた当該テントの風力係数から浮き上がり開始風速を推定した。その結果に基づいて、大型イベントテントの設置についての注意点を考察した。

### 2. 被害の状況

被害のあった場所をFig.1に示す。被災当日、前線が日本海西部から北陸地方を通り、東北地方南部に達していた。この前線に向かって南から湿った空気が入り、不安定な大気の状態であった。敦賀市で突風が発生した時間帯には、活発な積乱雲が被災地付近を通過中であった(福井气象台, 2008)。被害発生時刻のレーダー・エコーの強度図をFig.2に示す。上空では積乱雲が比較的広い範囲で発達していることがわかる。この日、強風による被害が各地で発生した。13時頃越前市で2名が負傷、13時40分頃大野市で

2名が負傷、また12時50分頃彦根市で3名が負傷した。

現地に近い敦賀特別地域気象観測所のデータを Fig.3に示す。福井地方気象台の報告書では、「12時50分頃、風速の急激な上昇とその緩やかな減少、気温の急降下、気圧の急上昇が見られ、風速のピーク後には雨が強まっている」とし、この突風はガストフロントで、強度は藤田スケールでF0と推定した。

被害を受けたテントは、イベント用に設置された幅10m×奥行き10m×軒高さ2.9m（頂部高さ5.9m）のモジュールを4つ並べて互いのテント柱を紐で繋結した幅40mの大型テントである。壁の1面は西側の海に向かって開放されたが、残りの3面はテント生地で覆われ、その生地は紐で柱に結び付けられていた。これは主に雨の吹き込みを防止するために付けられたものであると思われる。被害を受けたテントの大きさを Fig.4に示す。

テントが設置された地面は舗装されていたためテントの固定には杭が使用できず、質量約300kgの50cm立方のコンクリート製の重石がテントの周りに16個置かれ、テントはこれに鎖で固定されていた（Photo1）。これらの重石とテントの総質量は約5,000kgであった。

西側の海の方からの突風（ガストフロント）を受けて、Fig.5に示すように、テントが風下側に移動した。4つのテント・モジュールのうち中の2つは裏返しになり、端の2つは上下そのままの姿勢で移動した（Photo2, 3）。一部の風上側に位置していたと考えられるコンクリート塊は裏返しになったテントの上になり（Photo3の丸印）、テントが吹き飛ばされた勢いでこれらも飛ばされたものと思われる。



Fig.1 Site of damage to a tent structure due to gusty wind (Tsuruga, Fukui Prefecture).

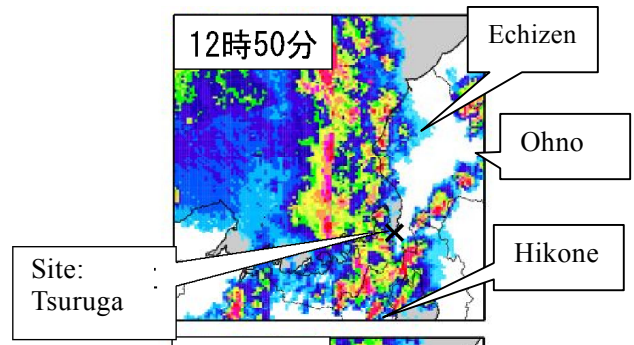


Fig.2 Intensity diagram of radar echo when damage to tent structure occurred.

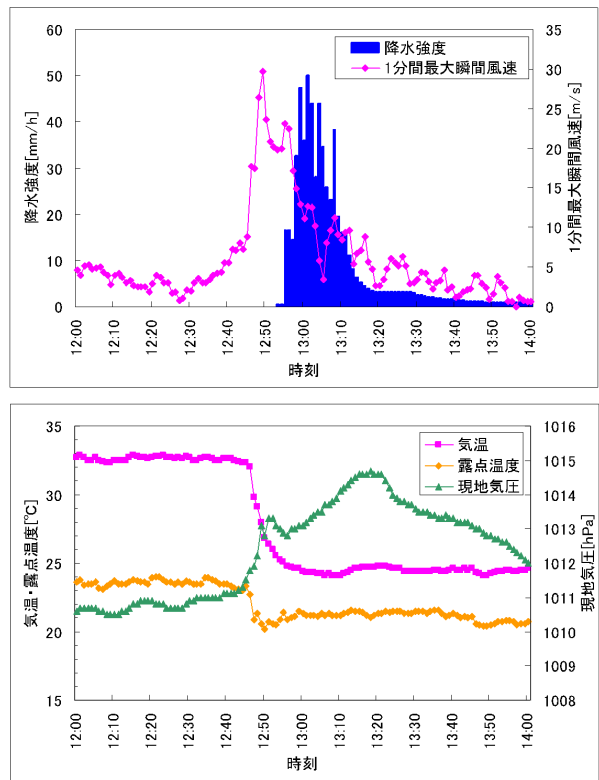


Fig.3 Observed climate data at 27 July 2008 (Tsuruga City).



Photo 1 A concrete mass of 300kg to resist wind induces lift.

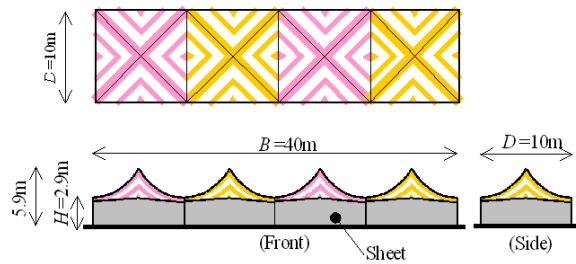


Fig.4 Dimension of the damaged tent.

三方の壁が塞がったテントに開放面から風が吹き込んだ場合のテントの浮き上がり風力係数を後述の風洞実験結果から1.1と仮定すると、瞬間風速約14m/sで重石付きテントの重量が風荷重と釣り合う。しかし、中央の2張りのテントが裏返しになっていることから、テントがそのままの姿勢で浮き上がったとは考えにくい。裏返しになった中央のテントは両端のテントに比べて重石による拘束が小さく、これらが先行して浮き上がり、裏返しになって両端のテントを引張るようにして風下側に飛んだと考えられる。そこで、中央の柱に注目して、浮き上がり力に抵抗するのは風上側中央の1個のコンクリート製重石だけとすると、モーメントの釣り合いから、浮き上がりが生じるのは瞬間風速約10m/s程度であると推測される。テントの風上側の柱が風圧で持ち上がると、風を受ける面がさらに大きくなるので、風力は増加してテントは不安定になるであろう。

### 3. 風洞実験方法

ダウンバーストまたはガストフロントなどの突風の地表面近くにおける風速プロファイルはあまりよく分かっておらず、特にこのテントは高さの低いことから鉛直方向の風速分布の影響をあまり受けないと考えられること、またテントは瞬間的な突風によって被害を受けているため風の変動の効果は瞬間ピーク値として扱うことが適切であると考えられることから、実験気流は一樣流とした。この場合、風洞風速は実際の瞬間風速に対応すると考えられるので実験で得られる風力係数は時間平均値とした。

実験模型は縮尺1/100で作られ、幅 $B=40\text{cm}$ 、奥行き $D=10\text{cm}$ 、地面からテントの軒までの高さを $H=3\text{cm}$ とした。壁の一面は開放し（壁がない）、その他の3面の壁は取り外しができるようになっている。風下側の壁の閉塞度を $W_R$ 、側壁の閉塞度を $W_S$ で表し、 $W_R$  ( $W_S$ ) = 1 (全閉), 0.5 (上半分閉鎖), 0 (全開)の状態を再現した。壁の閉塞効果を調べるための実験模型の組み合わせはTable1, Fig.6のとおりとした。

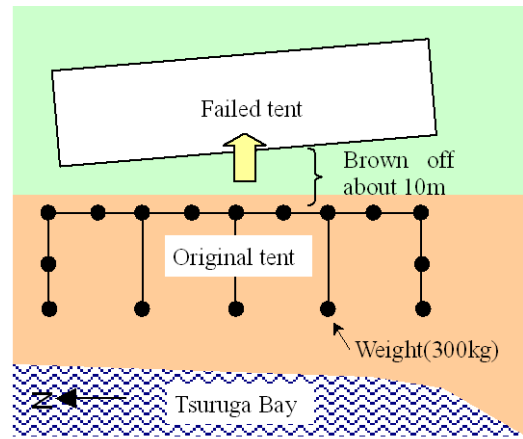


Fig.5 Trace of damaged tent structure (Courtesy of Fukui Local Observatory).



Photo 2 Failure of the large tent structure due to severe gusty wind (circles indicate concrete mass of 300kg). A man was killed by the impact of failed Tent.



Photo 3 Turned inside out tents together with concrete weights due to severe gusty wind.

被害を受けたテントはケース2に相当し、前面だけが開放されている。背面側にも側壁側にも壁がないケース1の状態が通常のテントの使用状態である。ケース6は、テントが風を受けて風上側の軒が持ち上がった状態を想定したもので、テントの柱が重石や杭に余裕なく緊結されていればこの状態は生じないが、地面に置かれた重石にテントを鎖で結んだこの被害では風上側の軒が持ち上がる状態が生じ得る。軒の持ち上げ距離は10mmと20mmの2種類とした。この場合、屋根の傾き $\alpha$ はそれぞれ1/10と1/5になり、それらをケース6-1, 6-2と表す。

実験模型は、Fig.7に示すように、風洞床面から20cm持ち上げた新たな地面板上に設置され、風洞床面上に自然に発達する境界層の影響をできる限り除いた気流(Fig.8)を当てて模型に作用する風力を測定した。テント模型の柱は実際のテントよりも長く作られ、新たな地面板の下で風洞天秤に接続され、柱と地面板とは接触しないように約1mmのクリアランスを設けた。また、地面板の下の模型および風洞天秤に風が当たらないように覆いを付けた。なお、背面と側面にシートを付けたテント模型の場合にも、シート模型が床面に接触しないように、約1mmのクリアランスを設けた。これにより、その隙間から空気が漏れ、風力が若干小さく検出される可能性がある。風力の測定には6分力風洞天秤を用い、風方向風力 $F_x$ 、鉛直上方向風力 $F_z$ および風方向への転倒モーメント $M_y$ を測定した。得られた風力はテントの軒高さでの速度圧で除し、次の風力係数に変換した。

$$C_{Fx} = F_x / (qBD) \quad (1)$$

$$C_{Fz} = F_z / (qBD) \quad (2)$$

$$C_{My} = M_y / (qBDH) \quad (3)$$

ここで、 $q$ はテント軒高さでの平均速度圧、 $C_{Fx}$ は風方向、 $C_{Fz}$ は鉛直上方向の平均風力係数、 $C_{My}$ はテント床中心点回りの風方向への平均転倒モーメント係数である。 $C_{Fx}$ は $C_{Fz}$ と同様に、テントの平面積で無次元化されていることに注意する必要がある。

実験風向は、正面からの風向の他、ケース2,4および5では背面からの風向についても風力の測定を行った。ここで、正面からの風向は開放された面に垂直に風が当たる風向、したがって風がテント内部に吹き込む風向である。実験風速はテント軒高さで約6m/sとした。

Table 1 Experimental Cases.

実験ケース	$W_R$	$W_S$	備考
ケース1	0	0	壁がない状態
ケース2	1	1	側壁と後壁を閉鎖（被害を受けた状態）
ケース3	0	1	側壁だけが閉塞
ケース4	1	0	後壁だけが閉塞
ケース5	0.5	0.5	上半分が閉塞された状態
ケース6	1	1	風上軒を持ち上げた状態

備考： $W_R$ は風下壁の閉塞度、 $W_S$ は側壁の閉塞度

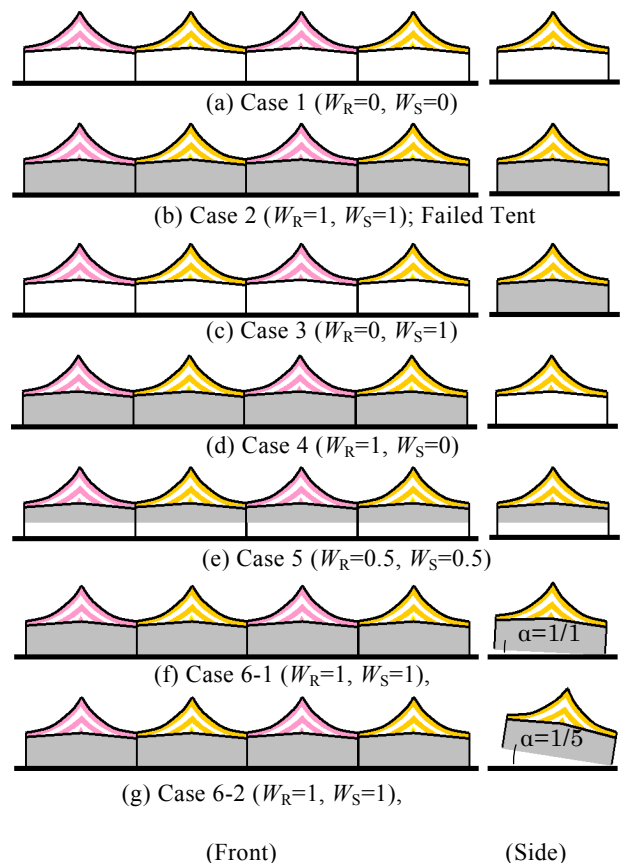


Fig.6 Models of experimental cases.

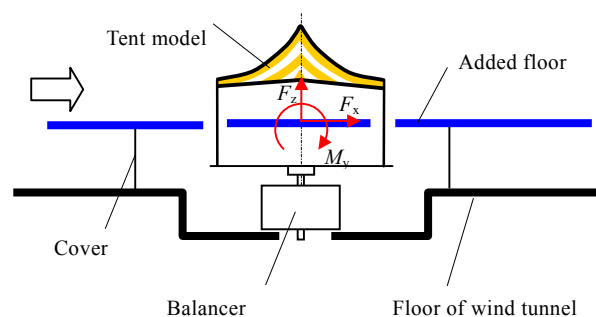


Fig.7 Arrangement of wind force measurement on a tent model.

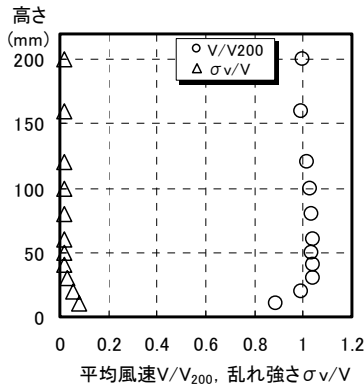


Fig. 8 Wind profile above the added floor.

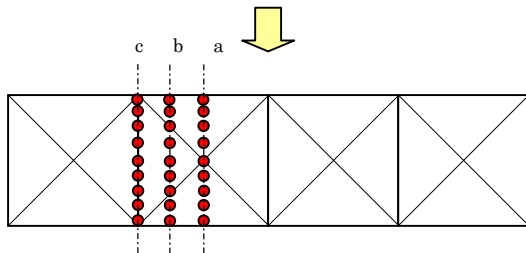


Fig. 9 Arrangement of pressure taps.

また、ケース1とケース2については、同じ模型を用いてテントの屋根上・下面それぞれの平均風圧係数を簡易的に測定した。測定点はFig.9に示す風に平行な3列 (a, bおよびc) の合計27点である。この測定では、圧力伝達用の外径2.5mmのビニルチューブが模型の外に出ており、それらは模型表面近くの流れを乱し、測定される風圧係数の値に影響を与えるかもしれない。圧力測定はテントの上面と下面とでチューブを入れ替えて行った。Fig.9の測定点の配置からわかるように、a, b, c各列の受風面積はテント屋根全体の面積に対する割合は互いに異なり、平面積の比で1:2:1となる。

#### 4. 実験結果

平均風力係数の測定結果をFig.10に示す。ケース1の場合 (通常、壁のない状態) では浮き上がり風力係数は $C_{Fz}=0.2$ で、全ケースの中で最も小さい値を示す。後述するように、テントの上面には、主に負圧が作用するが、テントの下面にも負圧が作用し、結果的に浮き上がり力は小さくなったものと思われる。三方に壁があるケース2では $C_{Fz}=1.1$ になり、それは通常のテントの使用状態に比べてテントの浮き上がり荷重が実に5倍以上にも増加することを意味する。

ケース3は側壁だけを塞いだケースで、正面から風を受けるとケース1と同じ見付け面しか現れないの

で風力係数はケース1のものとはほとんど変わらない。ケース4は背面だけを塞いだケースで、 $C_{Fz}$ はケース2よりは若干小さいが、ケース1の4.5倍程度に増加し、背面を塞ぐだけでも大きい風力が作用することがわかる。ケース5は背面と側面の上半分だけを塞いだ状態で、浮き上がり力係数は $C_{Fz}=0.7$ 程度を示す。ケース2よりも浮き上がり力は小さいが、ケース1に比べると風力は3倍以上に増加し、風が壁の下部から抜け出るとしても、風力を増加させる効果は大きいと言える。

ケース6はケース2の模型の風上側軒を持ち上げ、屋根を傾けた結果である。ケース6-1の結果はケース2よりわずかに浮き上がり力係数 $C_{Fz}$ が増加する程度であるが、風方向の風力係数 $C_{Fx}$ が増加し、結果的に転倒モーメント係数 $C_{My}$ が増加する。ケース6-2では、 $C_{Fz}$ はケース2よりも小さくなるが、見付け面積の増加により $C_{Fx}$ の増加が顕著で、 $C_{My}$ はすべてのケースの中で最大値を示す。実際に風を受けて風上側の軒が浮き上がったテントでは、この実験で求めた静的な風力にテントの瞬間的な傾きに伴って慣性力が加わるので、さらに転倒しやすくなると考えられる。

各ケースでの中央断面における合成された風力係数の作用ベクトルをFig.11に示す。ここで、合成風力係数の大きさ $C_F$ と傾き $\beta$ は式(4)と(5)および図12で定義され、テント中心からの偏心距離 $l$ は式(6)で定義される。図中のベクトルの始点は正確ではなく、ベクトルがその線上にあることを示している。図中の壁の表記は、実線が背面の壁、点線が側面の壁を意味している。なお、これらの図はテントの頂部を通る断面を模式的に示しているが、Fig.4に示すように、実際の屋根面はほぼ水平となる面積の方が広いことに注意する必要がある。

$$C_F = (C_{Fx}^2 + C_{Fz}^2)^{1/2} \quad (4)$$

$$\beta = \tan^{-1}(C_{Fz} / C_{Fx}) \quad (5)$$

$$l = C_{My} / C_F \cdot H \quad (6)$$

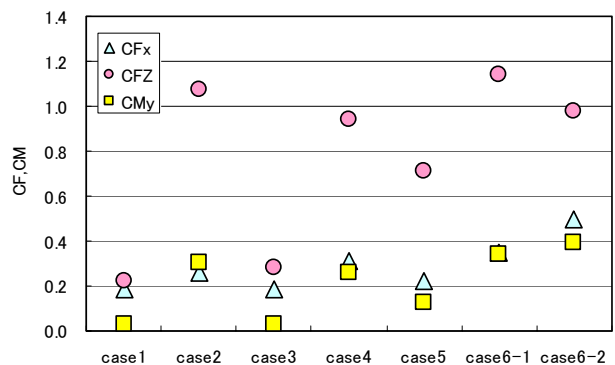


Fig. 10 Mean force coefficients (Wind direction; normal to front face).

ケース1とケース3では $C_{Fx}$ と $C_{Fz}$ の大きさの差は小さく、合成風力係数のベクトルの傾きは $45^\circ$ に近いが、それ以外の多くのケースでは $C_{Fz}$ の大きさが $C_{Fx}$ の数倍であるので、合成風力係数の傾きは大きく、合成風力は鉛直上方向に近い方向に作用する。またそのベクトルの作用位置はテントの中心から風上側に $0.1H \sim 0.3H$ に偏心した位置にある。このことはテント屋根の風上側に強い負圧が作用していることを意味しており、転倒が生じやすい状況にあることを示している。

ケース2, 4および5の背面方向からの風向の場合(それぞれ、ケース2r, 4rおよび5rと表記した)の $C_F$ をそれぞれFig.11の(h), (i)および(j)に示す。これらの $C_F$ は小さく、正面からの風向がクリティカルであることを示している。ケース5rの場合は $C_F$ は鉛直成分をほとんどたず、テントの上面の負圧と下面の負圧がほぼ釣り合っていることを示している。

突風によって被害を受けた敦賀の大型テントは4つのモジュールのうち真中の2つが裏返しになって飛散した。つまり、これらのテントは風力によるモーメントによってテントの風上軒端部が浮き上がって転倒したことを示唆している。テント風上側柱脚部には質量300kgの重石が付けられており (Fig.5参照), これと真中の一つのテント・モジュールに作用する風力によるテント風下側柱脚部周りのモーメントの釣り合いから、テント風上側柱脚が浮き上がる風速を式(7)で求めることができる。

$$V = \sqrt{\frac{m_t g D / 2 + m_w g D}{1/2 \cdot \rho b D C_F (\ell + D/2 \cdot \sin \beta)}} \quad (7)$$

ここで、 $V$ はテントの風上側柱脚が浮き上がる瞬間風速、 $m_t$ はテントの質量で100kgと仮定した。 $m_w$ は重石の質量(=300kg)、 $g$ は重力の加速度、 $\rho$ は空気密度、 $b$ はテントの一つのモジュールの幅(=10m)である。 $C_F$ はテント全体で測定された風力係数であるので、真中のテントの風力係数とは若干異なると思われるが、ここでは等しいと仮定した。これらより計算される重石の付いたテントの飛散瞬間風速をFig.13に示す。ケース2, すなわち事故発生時のテントの状況におけるテント飛散風速は約10m/sである。これは背面側の壁を塞いだ状態のケース4, および風上側柱脚と重石の緊結に余裕があり、少し浮き上がった状態を想定したケース6-1, 6-2の状態でもあまり変化はない。通常の使用状態でのテントでは飛散風速は約22m/sであり、ケース2の2倍以上の風速までテントは転倒・飛散しないものと考えられる。

この計算はテントの風上側柱脚部に質量300kgの重石を接続した場合である。それでもなおかつ通常状態(ケース1)の、つまり壁を塞がない状態のテントでさえ、瞬間風速22m/s程度でテントは飛散する。地面に固定されない大型テントが風に対して極めて脆弱であることを改めて知ることができる。ちなみに、重石のない、置かれただけの通常使用のテント(ケース1)の推定飛散風速は8.2m/sである。

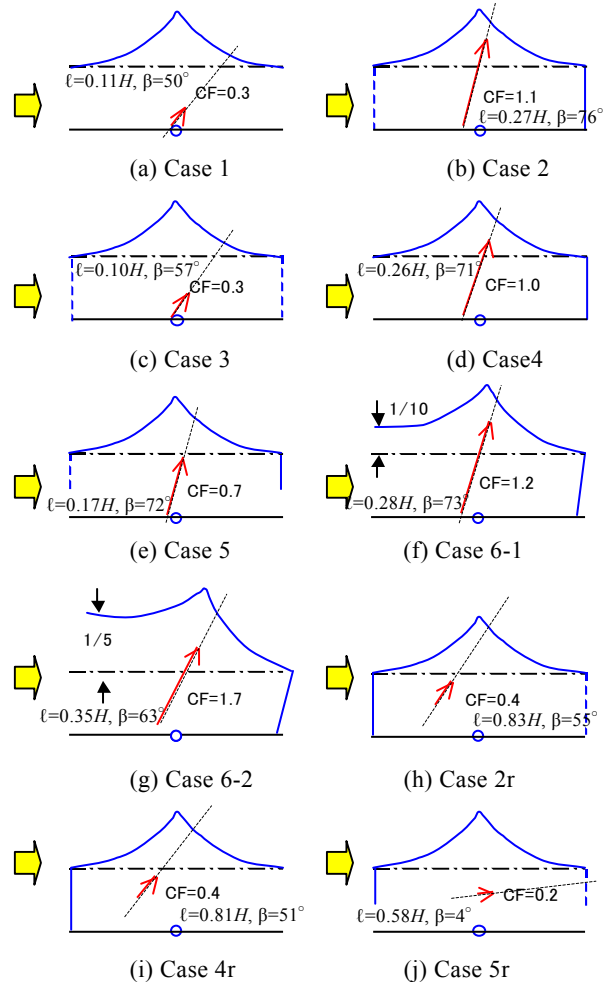


Fig.11 Combined force coefficients of the tent with various opening conditions. Solid lines on walls indicate rear wall, and dotted lines indicate sidewalls.

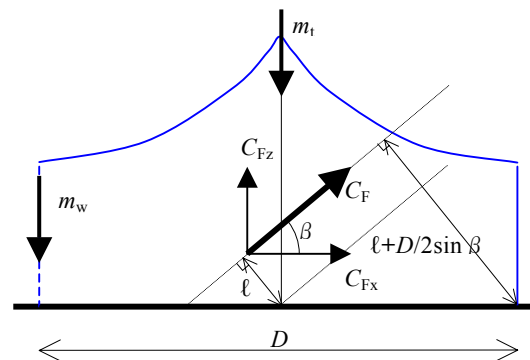


Fig. 12 Definition of wind forces.

平均風圧係数の分布をFig.14に示す。図中に代表的な値も示している。ケース1とケース2の両ケースともa列（テントの頂点を通る列）では、風上側の面で弱い正圧が生じているが、風下側の面で比較強い負圧が生じている。ケース1のテント下面の圧力はいずれの列でも風上側で負圧、風下側で正圧を示すが、いずれも弱く、結果としてテントに作用する浮き上がり力は小さい。

ケース2では、いずれの列も上面風上側端部で強い負圧が作用しており、風上側端部で流れが剥離していると思われる。ケース2のb列とc列の風圧分布をケース1の場合と比較すると、風上側端部に近いほどテント上面で負圧が強い傾向が見られる。テントの下面ではほぼ様な正圧が分布し、テントを室内から上に押し上げていることがわかる。結果として、ケース2ではテント上面の負圧が強くなるとともに下面の正圧がテントを押し上げることで上向きの風力が大きくなっている。

なお、風圧係数の面積積分値は図10に示す浮き上がり係数より15%程度小さい。これは外部に曝した圧力伝達用ビニルチューブが風圧分布に影響していることと、風直交方向に圧力が分布し、特に端部付近の上面の負圧が測定されていないことによると考えられる。

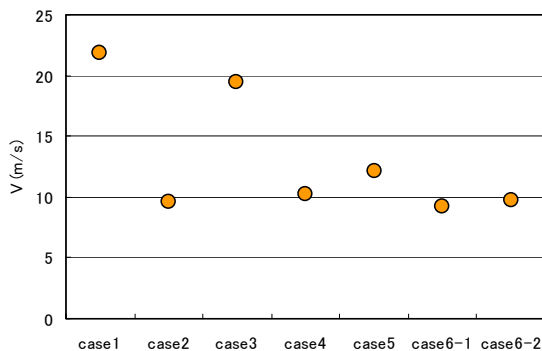


Fig.13 Estimated instantaneous release velocities of a weighted tent with various opening conditions.

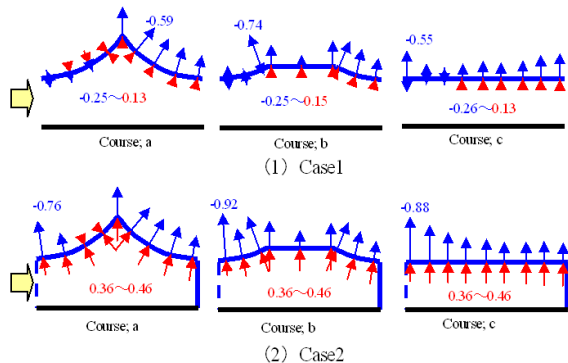


Fig.14 Mean pressure distributions.

## 5. 実験結果の実物への適用

### 5.1 被害を受けた形状のテント

背面および側面の閉塞が風力係数に及ぼす効果が確認できたので、その結果を用いて実物テントへの応用を以下に述べる。

浮き上がり力 $F_z(N)$ と風下側テント脚部を中心とした転倒モーメント $M(Nm)$ は、実験で得られた風力係数を用いて次式で計算できる。

$$F_z = 0.6V^2 C_{Fz} BD \quad (8)$$

$$M = 0.6V^2 C_F BD (\ell + D/2 \cdot \sin\beta) \quad (9)$$

ここで、各ケースの $C_F$ 、 $\ell$ および $\beta$ はFig.11中に示した値を採用する。 $V$ は実際に吹くと想定される最大瞬間風速であるが、 $V$ の値は確定的に決定できない。敦賀のテント事故の場合は約 $V=30m/s$ であったが、それを超える突風が吹く可能性は否定できない。しかし、気象状況の急変に対して避難する（テントの中に人がいない）ことを前提に、最大瞬間風速 $V=20m/s$ をテントが耐えるべき最低の風速と位置付けることを提案する。これは通常の使用状態であるケース1でこの被害例と同じだけの重石を付けると、瞬間風速 $20m/s$ までテントは飛散しないであろうという計算結果に基づいている。実際の設計では式(8)と(9)で計算される浮き上がり力と転倒モーメントの両方に対して、固定強度が大きいことを確認しなければならない。これらの式中の風力係数はテントを覆う壁の状態に応じて試験で得られた値を採用することになる。

式(9)を用いて、被害を受けたテントの開放された面に質量 $300kg$ の複数個の重石を付けた場合の転倒が生じると予測される瞬間風速の計算結果をFig.15に示す。実際にこのような重石を付けることは不可能であると思われるが、開放された面側のテント柱

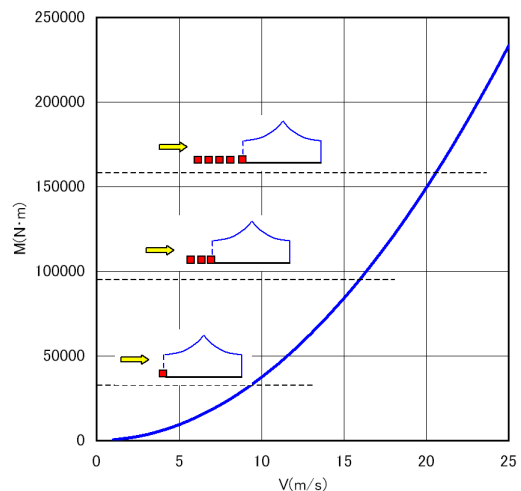


Fig.15 Wind Velocity onset failure of the tent.

脚に300kgの重石を固定したとしても瞬間風速約20m/sで転倒する計算になる。もちろん、この状況で風を受けるとテントが転倒する前にテント生地やテントの骨組が破損することも十分に考えられる。

なお、テントが最大瞬間風速20m/sまで飛散しないように固定を堅固にしたとしても、突風の急激な上昇は予測できないので、テントの使用は最大瞬間風速10m/sを超えない程度の風速の範囲に限り、人はそれ以上の強度を期待してテント内に留まるべきではないであろう。

浮き上がり力係数はいずれのケースでも正で、すなわち風による浮き上がり力がテントに作用することから、テントは地面に固定されなければならない。テントを地面に打ち込まれた杭に固定する場合、浮き上がり力に抵抗できる十分な抵抗力がなければならない。杭の極限摩擦力 $R_f$  (kN) は小規模建築物基礎設計指針（日本建築学会，2008）で次のように表されている。

$$R_f = D \cdot \tau_d \cdot L \cdot \pi \quad (10)$$

ここで、 $D$ は杭状地盤補強径（m）， $\tau_d$ は極限周面摩擦度（kN/m<sup>2</sup>）で、砂質土の場合 $\tau_d=10/3N$ である。 $N$ は地盤の $N$ 値、 $L$ は埋め込み深さ（m）である。

直径 $D=0.1m$ の木杭を $N$ 値5の地盤に深さ $L=0.5m$ だけ打ち込んだとすると、極限摩擦力は $R_f=2.5kN$ である。建設省告示第1113号によると引き抜き抵抗力は極限摩擦力の0.8倍とされており、この場合、極限引き抜き抵抗力は2kNである。実際に人力でこれより大きい $N$ 値の地盤に0.5m以上の深さに杭を打ち込むのは無理で、機械力に頼らなければ杭の引き抜き抵抗に期待することはできないであろう。

テントと杭の固定は、比較的弱い風速でテントが浮き上がったり傾いたりしないように、ルーズに固定してはならない。紐や鎖で変形に対して余裕のある固定をすると、杭自体の耐力が初期の段階では十分であっても、テントの風上側柱脚が浮き上がると風力が増大するとともに慣性力が作用して、初めに想定した荷重を上回る結果を招き、飛散の危険性が増すであろう。

地面がコンクリートやアスファルトで舗装され、杭が使用できない場合は、風の浮き上がり力に抵抗できる重量の重石を付けなければならない。この場合も杭の場合と同様に、テントの浮き上がりに変形の余裕を与えてはならない。

実験結果から壁を塞ぐと風力は著しく増大することが明らかにされたが、雨の吹き込みを防ぐために壁を覆う必要もあることは理解できる。その場合には、壁をテント支柱に固定せずに垂らしておき、風

を受けると容易に風が抜ける工夫が有効であると思われる。ただし、垂らしたテントの裾に重石を乗せたり、地面に固定したりしてはならない。

## 5.2 一般形状のパイプテント

上述のテントは強風による被害を受けた大型の特殊な形状のテントであった。一般によく見られる切妻屋根形状のパイプテントについても風力係数を測定し、転倒限界風速を計算した。

用いた実験模型は、上で述べた被害を受けたテント模型の骨組に屋根勾配30°の切妻屋根を載せた模型で、壁がないタイプと三方に壁を付けた2種類とした。風向は開口に風が垂直に当たる1風向とした。各風力係数とパラメータの定義は前述と同じである。

切妻屋根をもつパイプテントの風力測定結果をTable2に示す。壁がない場合、 $C_{Fz}$ は負の値をもち、鉛直下方向に風力が作用する。このことは、パイプテントは強風に対して安定した形状であることを示す。したがって、この場合には水平に移動するおそれを除いて転倒する心配がない。しかし、三方に壁がある場合には $C_{Fz}$ は正の値をもち、浮き上がりまたは転倒が生じるおそれがある。重石を付けないパイプテントの場合、式(9)を用いて推測した転倒が生じる瞬間最大風速は $V=6.6m/s$ で、きわめて小さい風速である。この種のパイプテントは過去にいくつかの強風による被害が報告されており、堅固な固定が必要である。

なお、本研究で行った風洞実験（大型テントおよびパイプテントとも）では、壁のないテントの内部にモノが置かれていない、したがって風がテントの下を自由にとおり過ぎるケースを想定している。テントの内部に多くのモノが置かれて、風がテントの下を自由に通らない場合にはテントに浮き上がり力が作用することがある。

ASCE7-05 (ASCE, 2006) では勾配30°の切妻独立上屋の風上側と風下側の風力係数をそれぞれ1.3, 0.3としている（本実験と逆の符号）が、その下部を50%以上塞ぐ場合には、それぞれ-0.7と-0.7を与えている。つまり、テントの下にモノがない場合には鉛直下向きの力が作用するが、大きいモノがテントの下にある場合には上向きの力に転ずることが示唆されている。したがって、テントの設置状況に応じて、適切に固定を補強することが望ましい。

Table 2 Wind force coefficients of a pipe-tent.

Wall	$C_{Fx}$	$C_{Fz}$	$C_F$	$C_{My}$	$\ell$	$\beta$	$V$
No	0.25	-0.55	0.60	0.11	0.19	-65	-
Yes	0.80	1.08	1.34	0.19	0.13	53	6.6



## 6. おわりに

突風で大型テントが倒壊し、1名が死亡し9名が負傷した事故に関して、テントの風力係数を風洞実験で求め、これより推定される事故当時のテントの浮き上がり力がテントの固定に用いられた重石の重量を容易に上回ることを示した。当該テントは正面の壁が開放されていたが、残りの三方は壁で塞がれており、この状態では壁を塞がないテントの風による浮き上がり力の5倍以上もの風力が作用することがわかった。このテントの浮き上がりが生じる瞬間風速の推定値は約10m/sであった。

テントの設営には、次の注意が必要である。

- (1) テントは十分な重石または杭に緩みなく固定する。
- (2) 雨避けのための壁の覆いは付けないことが望ましい。壁の覆いを付ける場合でも、それらをテントの支柱に固定せず、垂らしておく。この覆いの裾に重石を乗せたり、地面に固定したりしてはならない。
- (3) 強風時にテントの浮き上がりに抵抗する強度は高くないことを認識する。人力でテントを押えることは不可能であり、無謀な行動をしない。

敦賀のテントの事故は突風が原因であるが、突風の正確な予測は難しい。気象庁は竜巻等注意情報を発令して、突風の危険性を通報しているが、正確な場所と時刻の予測は困難である。残念ながらこの事故の場合には、竜巻等注意情報の発表は事故の発生後になったが、事前に強風注意報が出されており、イベントの主催者は気象の変化に注意すべきであっ

たであろう。上に述べたテントに作用する風荷重を増加させない方法と、十分な強度をもつ杭にテントを固定する方法を採用したとしても、飛来物は容易にテントを突き破ることから、テントそのものは強風時に人命を守るほどに頑丈ではない。今後、野外でのイベントの主催者は気象状況に常に注意し、強風の発生が予想される場合にはイベントの中止や一時的避難を決断する勇気をもつ必要がある。

## 謝 辞

被害調査には福井地方気象台のご協力を得ました。また風洞試験には日本建築総合試験所中川尚大君の協力を得ました。気象研究所鈴木修室長には貴重な意見をいただきました。ここに感謝申し上げます。

## 参考文献

- 福井地方気象台 (2008) : 現地災害調査速報「平成20年7月27日に福井県敦賀市で発生した突風について」
- 西村宏昭, 丸山敬, 鈴木修 (2009) : 突風によるイベント用大型テントの被害について, 風工学年次大会論文集, No.119, pp. 141-142.
- 気象庁ホームページ (2008) : 竜巻等の突風データベース, 2008/07/27 12:50頃 福井県敦賀市で発生したガストフロント
- 日本建築学会 (2008) : 小規模建築物基礎設計指針
- ASCE (2006): Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ANSI/ASCE 7-05.

## Failure of a large test structure by a gust wind at Tsuruga City

Hiroaki NISHIMURA\*, Takeshi MARUYAMA and Hiromasa KAWAI

\* General Building Research Corporation of Japan

### Synopsis

A sudden severe storm destroyed a large tent structure connected to some concrete weight cubes, at near coast in Tsuruga City, Fukui Prefecture. High wind accompanied with the gust-front in the storm killed a man and injured nine persons. While the tent structure had an opening faced to sea, it was covered on remained walls with canvas. In this situation, when wind attacked from the open face, the tent would be easily lifted up, even though some weights might fairly resist to the lift caused by wind. This study describes the observation of damage to the tent structure and wind tunnel test results, which was carried out to quantify the wind load when the tent will be blown off in various situations of wall coverings.

**Keywords:** tent structure, gusty wind, casualty, lift, opening