

建築物に作用する局部負圧と円錐渦

河井宏允

要 旨

建築物に作用する大きな局部負圧は屋根面あるいは側面に形成される強い円錐に伴って生じる。本論文では、強い円錐渦が生じる条件とそれに伴う局部負圧の発生機構を、屋根面乗の風圧と風速場の同時測定結果より検討した。その結果、どの平均風向の場合でも、陸屋根の場合には、屋根の4～5倍以上の大きさを持つ突風が、軒に対して 25° の角度から当たる時に、このような強い円錐渦が形成され大きな局部負圧が発生すること、大きな局部負圧発生時には、局部負圧が発生する側の風圧全体が大きく低下すること、及び局部負圧発生時の風圧分布は平均風向の影響を受けずほぼ相似となること等が明らかとなった。

キーワード：局部負圧、円錐渦、突風、陸屋根

1. はじめに

建築物の耐風安全設計にとって、屋根葺材を含む外装材の耐風性能の確保は非常に重要である。特に、屋根葺材の飛散は強風による建物被害の80%以上を占め、その飛散メカニズムの解明は被害低減の切り札といって良い。その為には、まず屋根葺材がどのような条件の時に飛散し、その原因がなんであるのかを知らなければ

ならない。Fig. 1 は、台風時に被害を受けた屋根瓦の飛散状況を示したものである(立川, 1986)。黒く塗りつぶした部分が飛散した瓦を表しているが、飛散した瓦の多くは屋根の軒あるいは棟の付近に位置していることが分かる。

軒や棟の近くでの屋根瓦の飛散は、この付近に大きな負圧が作用することが原因である。Fig. 2 は乱流境界層流中にある陸屋根模型に斜めから風が当たった場合

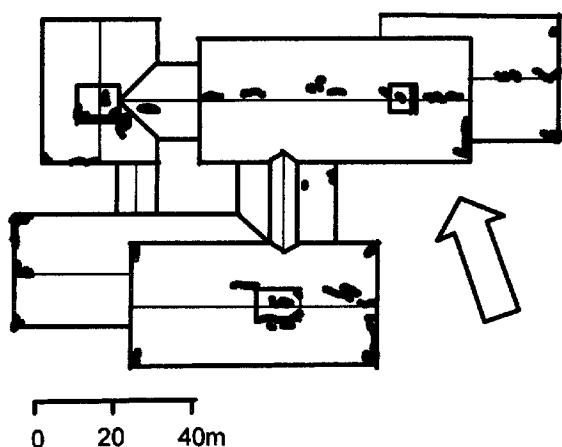


Fig.1 Scattering of roof tiles in the typhoon

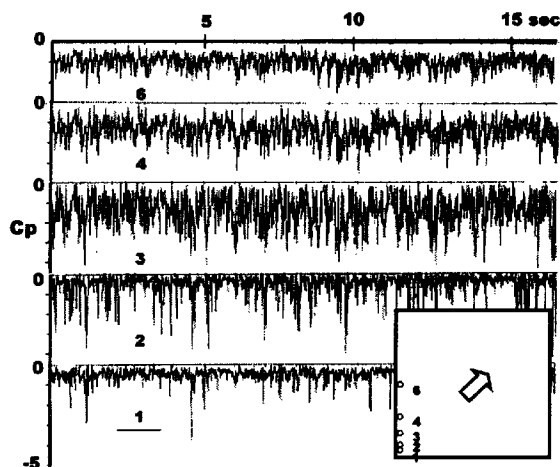


Fig.2 Time history of pressure fluctuation near an eave

における軒付近に作用する風圧力の時間履歴を示したものである(河井, 1996)。この付近では、平均的にも大きな負圧が作用することが従来から知られているが、図より分かるように負圧は大きく変動し、時折平均負圧の数倍にも達する大きなパルス状の負圧が不規則に生じることが分かる。特に、角近くの軒付近 (Fig. 2 の測定点 2 付近) におけるパルス状の負圧は極めて大きく、平均速度圧の 5 倍程度に達している。なお、自然風中ではこのようなパルス状の負圧は更に大きく、平均速度圧の 20 倍にも達することがあることが、TTU (テキサス工科大学) で行われた自然風中にある実物大低層建物による実測結果から明らかになっている (Wu et al 1999)。

このような大きな負圧が風が斜めから当たる時に観測されることから、その発生要因として陸屋根上には、三角翼上にできる一対の円錐渦と同様な渦が形成されそれに伴って大きな圧力低下が生じるのではないかと考えられてきた。しかし、三角翼上の円錐渦は比較的安定し翼に作用する圧力もあまり大きく変動しないのに対して、乱流中で陸屋根上に形成される円錐渦は非常に不安定であり、Fig.3 に示したように不規則に増大消長を絶えず繰り返す結果、風圧力は時間的に激しく変動することになると考えられる (Kawai, 1997)。

本論文は、境界層流中に設置した低層陸屋根模型に作用する風圧変動と、模型の風上及び屋根面上での風速変動の同時測定結果から、パルス状の大きな負圧の特性とその発生要因・発生機構を検討したものである。本論文では、条件付きデータ抽出法により、陸屋根上に大きな負圧が生じた時の円錐渦の状態や、風上の風速・風向との関係を詳細に検討した。特に Kawai et al.(1996)によって明らかにされている風向変動と風圧変動との高い相関に着目し、負圧発生時の瞬間風向と負圧発生との関係を検討した結果、どのような平均風向でもパルス状の大きな負圧は突風が軒に対して 25° の角度から当たる場合に生じ、その時屋根面の片側のみに大きく強い円錐渦が発達し、これが大きな負圧発生を促していることが明らかになった。

2. 実験概要

風圧変動と風速変動の同時測定は、前田建設技術研究所の境界層風洞に行った(河井他, 1998, Kawai et al., 1999)。この風洞は測定断面が $2.3\text{m} \times 2.0\text{m}$ 、測定部長 20.62m の回流型風洞である。実験には、 $12\text{cm} \times 12\text{cm}$ の正方形の陸屋根を持つ高さ 6cm の低層陸屋根模型を使用した。模型は厚さ 3mm 及び 2mm のプラスチック板で製作され十分に剛である。実験では、Fig.4 に示した屋根面 121 点、壁面 68 点における風圧変動を同時測

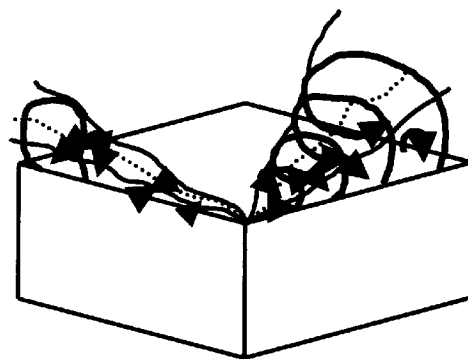


Fig.3 Conical vortices on a flat roof

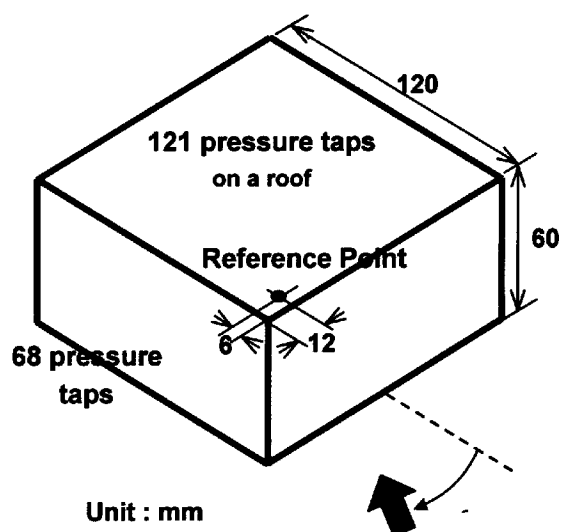


Fig.4 Model with a flat roof and reference point for conditional sampling

定した。軒から最も近い屋根面の測定点と軒との距離は屋根幅の $1/20(6\text{mm})$ である。風圧の測定には、スキヤニバルブ社の ZOC23B を、風速の測定には司測研の HC30 を用いた。実験は、都市郊外の風の状態を模擬した境界層乱流中で行った。実験時の風速の鉛直分布はべき法則に良く適合し、その時にべき指数は $1/5$ であった。模型頂部での平均風速は 10.8m/sec 、乱れ強さは 20% であった。また、実験時の風向は軒に風が直角にあたる場合を 0° として 45° まで 5° 間隔で測定した。

陸屋根上の流れ場(風速変動)と風圧変動の測定は、東京電機大学理工学部の境界層風洞で行った。この風洞は、測定断面が $1.2\text{m} \times 1.2\text{m}$ 、測定部長 10m の回流型風洞である。実験には、風圧測定と同じ模型を用いた。実験では、風向 25° 、 45° の場合について、陸屋根の風上側の角から 4cm 及び 6cm の位置で、対角線と直角な断面において X ワイヤプローブによって、風向方向の水平成分と鉛直成分を測定した。陸屋根上の風圧変動

は、豊田工機製の半導体圧力変換器 PD104 を使用した。

実験データは全て平均風速を基準とした速度圧で除した風圧係数の形でまとめた。また、角付近の軒に大きな負圧が発生した時の風圧分布や流れ場の状態を調べるため、Fig.4 に示した軒から 6mm、角から 12mm の点を基準点として、風圧及び風速を同時サンプリングする条件付きデータ抽出法を使用した。課した条件は、多点風圧・風速同時測定では基準点での風圧係数が-3.5 以下となった時、陸屋根上の流れ場の測定では風圧係数が-3 以下となった時とした。

3. 実験結果

3.1 ピーク負圧時の風圧分布

Fig.5 は風向が 45° の場合の基準点の風圧変動履歴を示したものである。この記録には、計測開始から約 5 秒後に非常に大きなパルス状の負圧（以降このような負圧をピーク負圧と呼ぶことにする）が観測された。Fig.5 の下の図は、ピーク負圧が生じた時の風圧変動の状態を示したものである。最大ピーク負圧が生じた (b) 時点の約 20ms の前における負圧の大きさは風圧係数にして約-0.5 程度で、20ms の間に圧力は一気に平均速度圧の 5 倍程度も低下する。

Fig.6 はピーク負圧発生時前後の瞬間風圧分布を示したものである。ピーク負圧発生前後の(a)及び(d)時点では、屋根面に作用する風圧力は全体的に小さいが、基準点でのピーク負圧の発生 ((b)及び(c)時点)に伴って、基準点のある側の圧力が全体的に低下し、強い負圧領域が屋根面の片側全体に広がる。このことは、基準点でのピーク負圧発生時には、流れ場が屋根面全体にわたって大きく変化していることを暗示している。

Fig.7 は、基準点の風圧係数が-3.5 以下になった時の、風圧分布のアンサンブル平均を示したものである。図中、濃く網かけした部分は風圧係数が-1.0 以下の領域

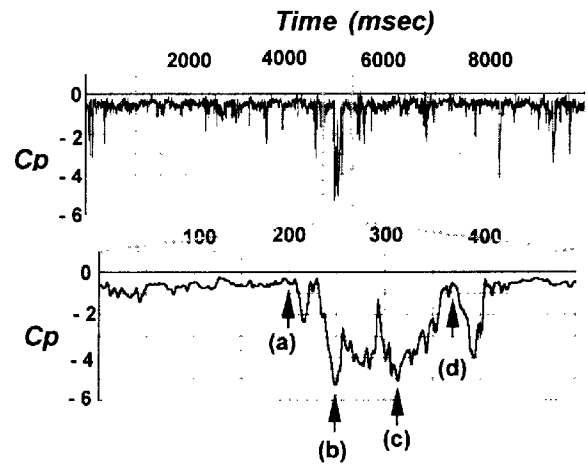


Fig. 5 Time history of pressure fluctuation on the occurrence of peak suction

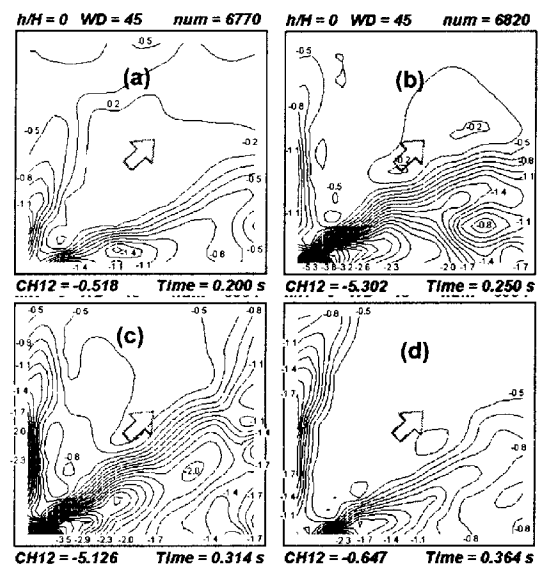


Fig.6 Contour maps of instantaneous pressure coefficient

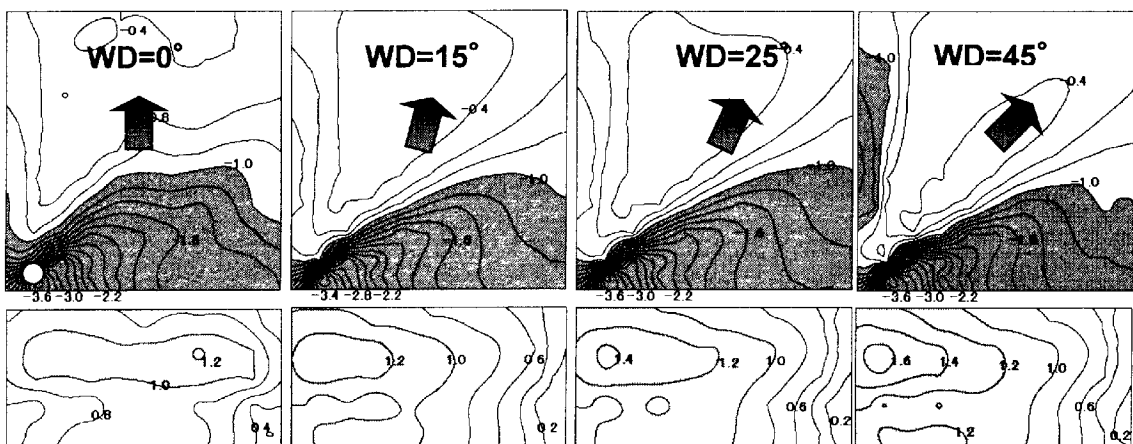


Fig.7 Contour maps of conditional pressure coefficient on the occurrence of peak suction

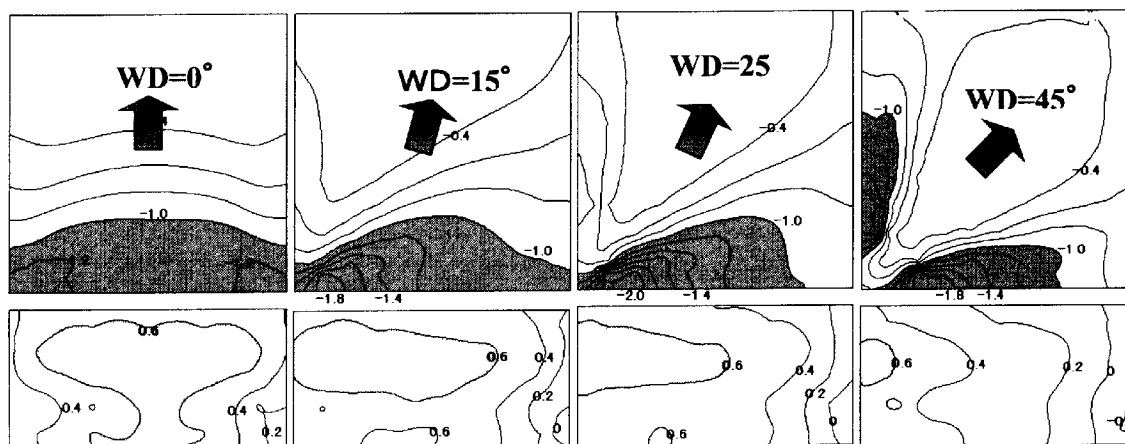


Fig.8 Contour maps of mean pressure coefficient

を示している。また、薄く網かけした部分は、風圧係数が1.0以上の領域を示している。図に示したように、基準点でピーク負圧が発生する時の屋根面及び風上壁面の風圧分布は、風向に係わらずほぼ相似となる。したがって、ピーク負圧の発生時の流れ場は平均風向によらず、似たような状況となっているのではないかと考えられる。

一方平均風圧分布は、Fig.8に示したように風向の影響を大きく受け、風向が増すにつれて負圧が大きく低下する領域（図中の濃い網かけ部分）が屋根面の角近くの軒付近に限定される一方、最大平均負圧が大きくなる。このように、ピーク負圧時の風圧分布と平均風圧分布とは大きく異なる。このことは、ピーク負圧時の風圧力の評価には単純なガスト影響係数法を使うことができないことを意味している。

ピーク負圧時の風圧分布がどの風向の平均風圧分布と最もよく類似しているかを、ピーク風圧時の風圧と平均風圧との相関によって検討したところ、風向が25°の場合の平均風圧が最もピーク風圧との相関が良いことが分かった。Fig.9は風向25°の場合について、ピーク風圧時の風圧と平均風圧の関係を散布図によって示したものである。基準点などピーク負圧時に極めて大きく圧力が低下する風上側の角の軒付近の数を除けば、他の測定点ではピーク負圧時の風圧係数と平均風圧係数の相関は極めて良好で、どの風向におけるピーク負圧時の風圧も、風向25°での平均風圧のほぼ1.5倍程度となる。

3.2 ピーク負圧時の流れ場

前節で示したように、基準点でピーク負圧が生じる時には、屋根面の片側全体で圧力が低下する。このことは、ピーク負圧をもたらす流れ場が、基準点近傍にとどまる局所的なものではなく、屋根面全体の覆うスケールを持っていることを示している。ピーク負圧時

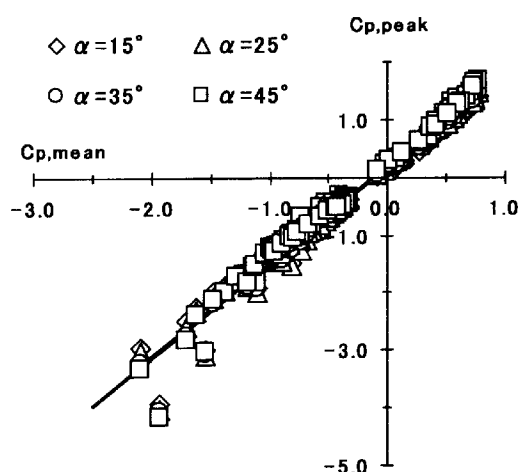


Fig.9 Conditional pressure coefficient on the occurrence of peak suction for various wind directions versus mean pressure coefficient for the wind direction of 25°

に屋根面上でどのような流れ場が生じるかを調べるため、風速計をトラバースしながら、ピーク負圧発生時の風速値をサンプリングし、それらのアンサンプル平均をとることにより、ピーク負圧時の流れ場の様子を検討した。

Fig.10は風向45°と25°の場合について、屋根の対角線と直角な断面における平均風速ベクトルとピーク負圧発生時の風速ベクトルを示したものである。風向45°の場合、平均風速ベクトルには一対の円錐が認められる。ピーク負圧発生時には円錐渦は右側にしか認められず、流れは断面内を右から左へと移動する。一方風向25°の場合には、平均風速ベクトル及びピーク負圧発生時の風速ベクトルは大きさはかなり異なるが同じパターンを示す。即ち、屋根の右側で円錐渦が大きく発達する一方、屋根の左側では渦は小さく弱い。

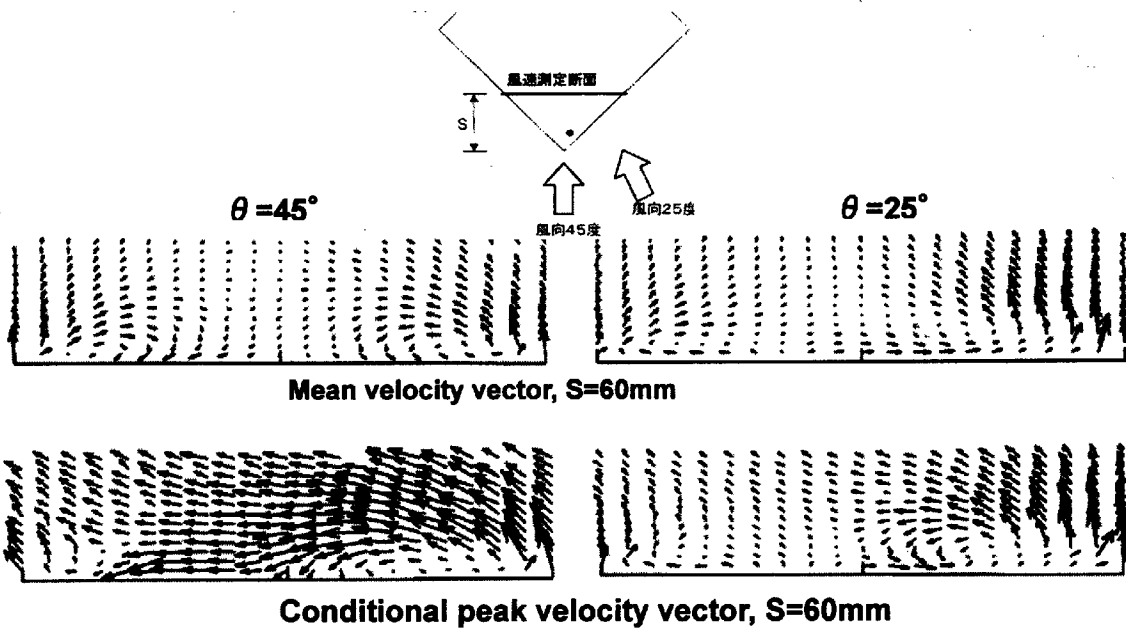


Fig.10 Mean and conditional velocity vector in the section normal to the diagonal line of the roof

風向 45° でのピーク負圧発生時の風速ベクトルの断面内の右から左への移動は、ピーク負圧が発生した瞬間には流れがこの断面に対して、斜めから流入することを示している。断面内の風速ベクトルの総和から(1)式によって流入角度を求め、これによって、風速ベクトルを補正した結果、Fig.11 の風速ベクトルが得られた。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\sum qv}{\sum qu} \right), \quad q = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (1)$$

ここに、 θ は流入角度、 u , v , w は風速の風向方向、風向直角方向及び鉛直方向成分を表している。

Fig.11 に示されているように、このような補正によって風向 45° の場合でも、風向 25° の場合と同様に、ピーク負圧発生時には、屋根の右側で円錐渦が大きく発達する一方、屋根の左側での渦は小さく弱い。

補正されたピーク負圧時の風速ベクトルと同じ断面に作用する風圧分布を風向 45° と 25° の場合について求め Fig.12 に示した。風向 45° と 25° の風圧分布と風速ベクトルはほとんど同じとなる。したがって、ピーク負圧発生時には、平均風向によらず屋根面上には同じような流れ場が出現することが分かる。即ち、屋根面の片側で円錐渦が大きく発達し、この円錐渦によって圧力が大きく低下する。

Fig.13 は、風向 45° の場合について、屋根の対角線断面内の平均風速の風向方向成分（断面直角方向成分）とピーク負圧発生時の風速の風向方向成分を比較したものである。ピーク負圧発生時には、断面内のほとんどの領域が風速が平均風速より大きく上回って

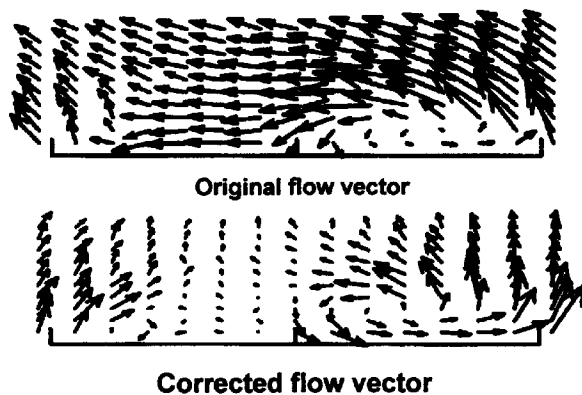


Fig.11 Conditional flow vector in the section

Top: no correction, Bottom: correction for an inflow angle

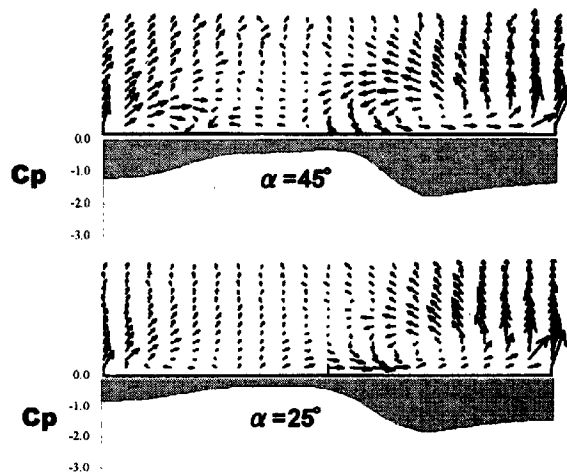


Fig.12 Velocity vector and pressure distribution on the occurrence of peak suction

いることが分かる。特に、大きな円錐渦が発達している屋根の右側においては、円錐渦の外側では流れの速度が一般流の平均流速の最大 2 倍程度にまで加速される。一方、円錐渦の内側では流れは減速されることが分かる。

4. 考察

4.1 ピーク負圧の発生原因

前章の実験結果より、どの風向であっても、ピーク負圧時には屋根面の片側で大きく円錐渦が発達し、その結果、屋根面の片側で風圧が大きく低下することが明らかとなった。また、ピーク負圧発生時の風圧分布や屋根上の風速ベクトル場が風向 25° の場合の平均風速ベクトル場と平均風圧分布と等しくなることから、ピーク負圧をもたらす流れ場は、ある瞬間に軒に対して風が 25° の角度から当たることによって生じるのではないかと推測された。本章では、この推測を更に補強するため、ピーク負圧発生時の模型風上の風速変動と基準点の風圧変動との関係を調べた。

Fig.14 は、平均風速 45° の場合について、ピーク負圧発生時前後の風圧変動履歴を風上の風速変動と風向変動とともに示したものである。ピーク負圧の発生の前から風速が徐々に上昇し、ピーク負圧発生の少し前に風速が最大に達する。一方、風向はピーク負圧発生以前には 45° 付近にあるがピーク負圧の発生の 100ms 程前に 25° 付近へとシフトし、その後ほぼ一定の状態が 100ms 程度継続する。

Fig.15 は、Fig.14 に示したピーク負圧発生時の風速と風向の変化のアンサンブル平均を、風向 15° 、 25° 、 45° について示したものである。いずれの風向の場合も、ピーク負圧発生の前には風速が徐々に上昇し、ピーク負圧発生の約 20ms 以前に最大に達する。したがって、ピーク負圧は風上から近づいてくる突風によって生じているといえる。なお、ピーク負圧発生と風速の最大値発生との時間遅れは、風速測定点と風圧基準点が一致せず、Fig.14 に示したように風速測定点が模型中心から模型幅の 2 倍風上に位置していることに起因していると考えられる。

風向変化に注目すると、平均風向 15° の場合には、風向が平均風向が正に 5° 程度ずれた方向、即ち突風が軒に対して約 20° から当たる時にピーク負圧が生じるのに対して、平均風向が 25° の場合には突風が当たる時には風向が変化せず、

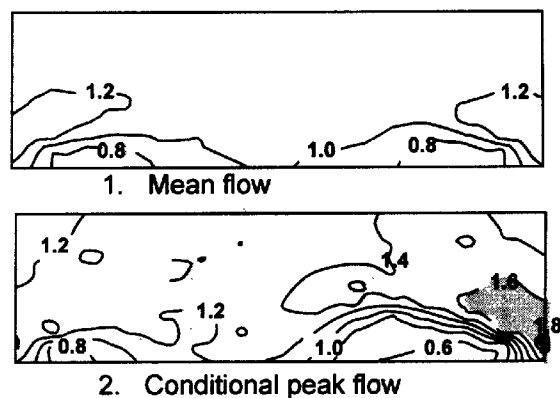


Fig.13 Contour maps of mean and condition longitudinal velocity on the occurrence of peak suction

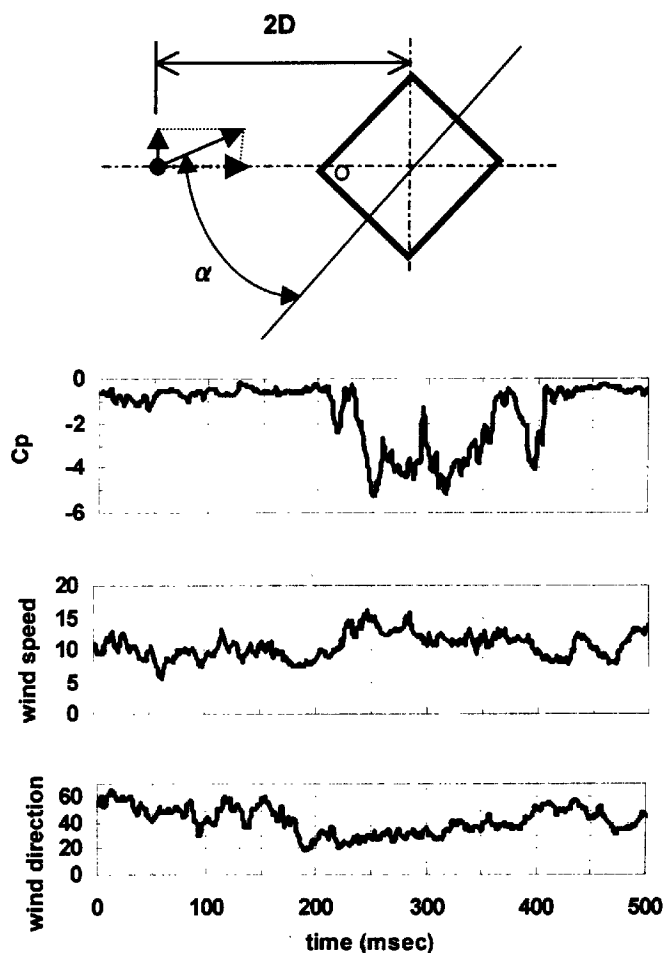


Fig.14 Time history of pressure on the reference point, wind speed and wind direction on the occurrence of peak suction

平均風向が 45° の場合には風向が負側に -15° 程度ずれた方向から、即ち突風が軒に対して約 25° の方向から当たる時にピーク負圧が発生する。このように、平

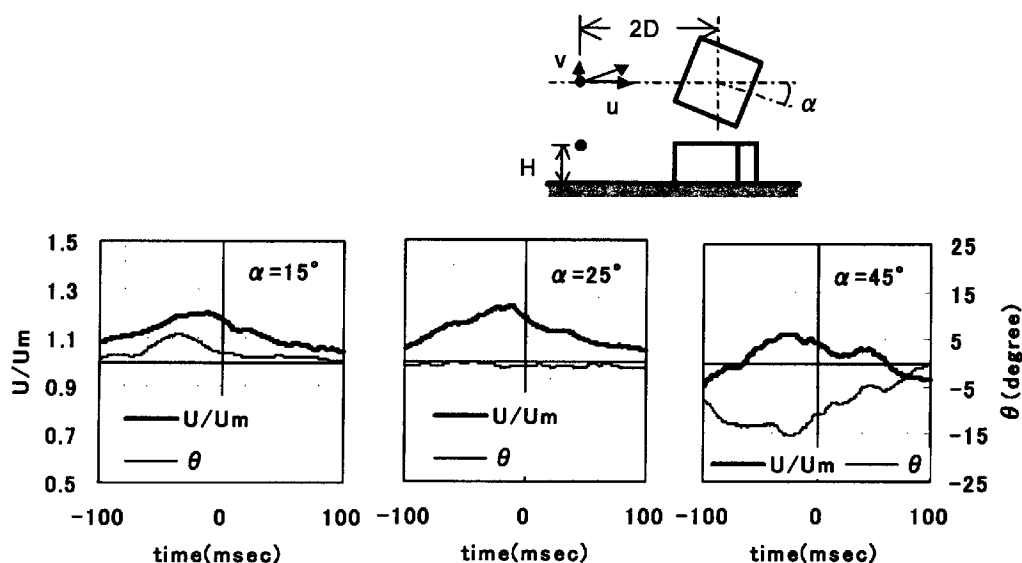


Fig.15 Time history of the ensemble average of wind speed and wind direction on the occurrence of peak suction

均風向のいかにかわらず、ピーク負圧は突風が軒に対して 20° から 25° の方向から当たる場合に生じることが分かる。また、風向の変化は突風が軒から当たるよりも $20\sim40\text{ms}$ 程先んじて生じること、及びピーク負圧の時間スケールに対して風速、風向の時間スケールが比較的大きいことが分かる。

Fig.16 は平均風向が 15° の場合について、ピーク負圧が生じた時の風速と風向の変化を、風速測定点を通る粒子の軌跡として表したものである。一つ一つの白丸は 5ms ごとに測定点を通る粒子の軌跡を示している。したがって白丸の間隔がその点の風速を表し、間隔が大きい程風速が大きい。図中のクロスを伴った黒丸は、ピーク負圧発生時の風速測定基準点を示している。黒丸より右側がピーク負圧発生時以前を、左側がピーク負圧発生以降を表している。前述したように、ピーク負圧発生以前で風向が大きく変化し風速が上昇し、突風が軒に対して約 $20^\circ \sim 25^\circ$ の角度で当たるようになる。しかし、この時点ですぐにピーク負圧が生じることはなく、その後、約 50cm 程度の距離の間突風が続いた後でピーク負圧が発生する。ピーク負圧の発生後、風向が徐々に 15° にもどり風速も減少する。このように、ピーク負圧の発生は模型幅 (12cm) の $4\sim5$ 倍程度のスケールの突風が必要である。また、ピーク負圧は突風が軒にあたっただけで生じるのではなく、ある程度の時間の時間を経て生じる。この過程は、桂が指摘した流形完成と関連があると思われる。桂 (1993) は、自然風中にあるドーム屋根に作用する風圧の観測から、突風によって物体周りに流形が完成し風圧が生じるためには、物体の $4\sim5$ 倍の大きさの流形が必要で

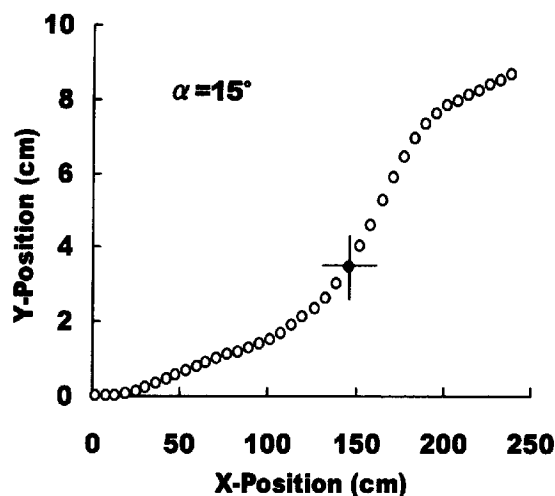


Fig.16 Fluid particle path on the occurrence of peak suction

a solid circle with a cross shows the instant of the occurrence of peak suction

あると述べている。陸屋根の場合についても同様に、屋根の $4\sim5$ 倍の大きさの突風が軒に対して約 25° の角度で当たる時に、屋根上に大きな円錐渦が発達し、大きな負圧の低下をもたらすと考えられる。

5. 結論

風が斜めから軒に当たる場合に、屋根に発生する大きなピーク負圧の特性とピーク負圧発生時の流れ場の状況を、境界層風洞流中にある陸屋根模型に作用する

風圧と風速の多点同時測定結果を、ピーク負圧発生を条件としたデータ抽出による解析結果に基づいて検討した。その結果、次の結論が得られた。

- (1) ピーク負圧は、平均風向にかかわらず、突風が軒に対して約 25° の角度から当たる場合に生じる。
- (2) ピーク負圧発生時には、屋根の片側に大きな円錐渦が発達し、それに伴って円錐渦が出来る側の圧力が大きく低下するとともに、屋根の風上側の角の軒付近に非常に大きな負圧（局部負圧）が生じる。
- (3) ピーク負圧をもたらす突風は屋根の大きさの4～5倍のスケールを持ち、突風が継続している時間、風向が軒に対して 25° を保ち続ける。これは、円錐渦が十分に発達しその流形を完成させるために、少なく屋根の4～5倍の大きさの突風が必要であることを示している。
- (4) 突風の襲来に伴って、屋根面上の流れは加速されるが、加速が特に大きいのは円錐渦の外側の軒付近である。

参考文献

桂順治 (1993) : 突風によって模型建物に生じる流形の形成について-風圧計測結果による、日本建築学会構造系論文集, No.451, pp.66-78

河井宏允 (1996) : 陸屋根に作用する風圧変動の特性について-風圧変動の同時測定結果-, 第14回風工学シンポジウム論文集, pp557-562

河井宏允, 大沼史生 (1998) : 陸屋根上のピーク負圧の特長とその要因, 第15回風工学シンポジウム論文集, pp.299-304

立川正夫他 (1986) : 台風 8513 号による建物・家屋の被害について, 鹿児島大学工学部研究報告集, pp.67-84

Kawai, H.(1996):Characteristics of fluctuating suction and conical vortices on a flat roof in oblique flow, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, No.60, pp.211-225

Kawai, H.(1998):Structure of conical vortices related with suction fluctuation on a flat roof in oblique smooth and turbulent flows, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, No.69-71, pp211-225

Kawai, H.(1999): Peak suction and conical vortex on a fat roof, Proc. 10th Int. Conf. Wind Engineering, pp.1807-1812

Wu, F., Sarkar,P.P. and Metha,K.C. (1999): Understanding the conical-vortex flow on roofs, Proc. 10th Int. Conf. Wind Engineering, pp.1877-1874

Local peak pressure and conical vortex on building

Hiromasa Kawai

Synopsis

Characteristics and cause of local peak suction on a flat roof are discussed through a relation with the conical vortex. Peak suction occurring close to windward corner of the roof is induced by the large and strong conical vortex formed on the roof when the gust attacks to a building instantly from 25° to the eave in any mean wind directions. The large scale gust is responsible for the formation of the vortex and the occurrence of the peak suction, because the development of the strong vortex takes the time at least when the fluid particle travels in 4-5 times of the roof size.

Keywords: local peak suction, conical vortex, large scale gust, flat roof