陸屋根面上の円錐渦による変動風圧特性

谷口徹郎○(大阪市立大学), 谷池義人(大阪市立大学), 池内淳子(大阪市立大学)

Fluctuating Wind Pressures due to the Conical Vortices on Flat Roofs

Tetsuro TANIGUCHI, Yoshihito TANIKE and Junko IKEUCHI

ABSTRACT

When an incident flow attacks to structures with a flat roof at an oblique angle, conical vortices are produced on the roof. The severe suction is appeared near the windward vertex by the conical vortices. In the case of the delta wing, the steady suction occurs because of the stability of the conical vortices. However, the wind pressures on the roof of the box-type structures are fluctuating, differently from the case of the delta wing. This paper presents the flow patterns on the flat roof of several models with a square section by means of a flow visualization with a laser sheet and a strobe light. The characteristics of the fluctuating wind pressures are also investigated by Proper Orthogonal Decomposition(POD). Based on the results of the flow visualization and the POD analysis, the relations of the conical vortices and the fluctuating wind pressures are studied.

Keywords: Flow visualization, Conical vortex, Wind tunnel experiment, Flat roof

1. はじめに

陸屋根面の対角線方向に風が当たる場合、屋根面の風上側隅角部付近に強い負圧が作用する。これは、デルタウィングと同様に、屋根面上に形成される安定した一対の円錐渦によってもたらされると考えられてきた^{1),2)}。しかし、Katsura³⁾は立方体模型を用いた風洞実験により、負圧が強い軸対称な2点に作用する変動風圧について調べ、幾何学的に対称な条件の下でも、風圧は瞬間的には対称に作用せず、ほぼ逆の位相をもって変動することを示している。これは、デルタウィングの場合とは現象が異なることを示唆したものである。河井ら⁴⁾は高さが一辺の1/2の模型を用いた風洞実験により、Katsuraと同様の結果を示すと同時に、屋根面に加わる風圧の時系列データを用いた詳細な解析から、風圧が対称に作用しない原因として、両側の円錐渦が一対となって振動する、いわゆる'ゆらぎ'という現象があると指摘している。

本研究では、正方形平面をもつ模型に対して、屋根面対角線方向に風が当たる場合について、ストロボ装置およびレーザーシートを用いた可視化風洞実験により、屋根面上の流れの様子、特に円錐渦の挙動について調べる。この際、屋根勾配を変化させてその影響についても示す。また、可視化風洞実験と同形状の模型を用いた風圧測定実験を一樣流および勾配流中において行い、屋根勾配とともに接

流の違いによる風圧特性の変化についても調べる。最後に、両実験結果を比較することにより、円錐渦の挙動と接近流との関係や、円錐渦が屋根面の変動風圧に及ぼす影響について考察する。

2. 可視化風洞実験

2.1 実験方法

実験は、大阪市立大学工学部の吹き出し型小型風洞装置(断面:幅 300mm×高さ 680mm)を用いて行った。気流は風速1 m/sの一樣流を用いた。なお、床面および側面に発達する境界層厚さは、ともに1.5cm程度であり、今回の実験におよぼす影響は無視できると考えられる。

実験はFig.1に示す4種類の模型を用いて行った。Model-Aは、一辺100mmの立方体であり、壁面はアルミ製の角パイプ、屋根面にはアクリル板を用い、表面はアクリルラッカー(艶消し黒)で塗装を施した。Model-B, Model-CはModel-Aと同じ平面形状で、それぞれ風下、風上側が低くなっている。Model-Dは一辺100mm、厚さ5mmの平板状で、4mmの真鍮角材と厚さ0.5mmの真鍮薄板を用いて制作した。各模型の内部は、煙溜(Mist Box)とつながっており、屋根面の風上側稜線部付近に、幅1.5mmのスリットを設けた。なお、模型の一辺の長さを代表長さとした場合のレイノルズ数は、 6.85×10^3 である。

次に、実験方法についてFig.2をもとに以下に示す。まず、

ミスト発生装置(Mist Generator)を用いて、脱イオン水・プロピレングリコールおよびグリセリンからなる専用リキッドを加熱することによりミストを発生させる。ミストを煙溜に送り込み、一定時間後にミスト発生装置を煙溜から離す。煙溜と模型内部に溜まったミストは、模型屋根面に加わる負圧により、模型に設けたスリットから風洞内に吸い出される。これによって屋根面上の流れの様子を観察する。

この方法の特徴は、模型内部を煙溜の一部として使用した点である。従来の可視化実験では、模型外部からミストを風洞に送り込む方法、あるいは模型表面に薬品を塗布し化学反応によりミストを発生させる方法等が用いられてきた。これらの方法では、注目する部分以外にもミストが流れ、現象がとらえにくい場合がある。本論文で対象としたような、流れが剥離する箇所が決まっている現象の場合、今回示した一定の箇所からミストが流出する方法は有効であると考えられる。また、コンプレッサー等を用いず、屋根面に加わる負圧によってミストを流出させるため、風洞流を乱すことなく実験が行える。さらに、煙溜を設けたことにより、比較的長い時間の観察が行えることも特徴の一つであるといえる。今回用いた煙溜の大きさでは、ストロボ光やレーザーシートを用いた場合で 10 分程度、通常の室内光のもとでも 5 分程度の継続した可視化が可能である。

記録システムをFig.3に示す。Video Camera により撮影したビデオ画面毎に Frame Counter によって番号を記録し、Video Recorder で録画した。なお、Frame Counter によるカウントは 1/60 秒間隔で、Video Recorder も 1/60 秒間隔でのコマ送り再生が可能である。

実験は、ストロボ装置およびレーザーシートをそれぞれ用いて行った。ストロボ装置は模型の斜め前方の屋根面よりやや高い位置に設置し、ビデオのコマ送りに合わせて約 60Hz で発光させた。光量が、ピーク値の 1/2 に達してから 1/2 に落ちるまでの時間(閃光時間)は、35 μ sec 以下である。

2.2 実験結果

Fig.4に Model-A の結果を示す。図の上段はストロボ装置を用いた屋根面上の流れを、下段はレーザーシートを用いた流れの断面を示している。なお、上・下段の図は同時に得られたものではなく、それぞれの場合に対応すると考えられる図を選んだ。

左上段の図では、風下からみて左側(写真の下側)に風上側頂点からのびる円錐渦がみられる。風上側頂点付近に注目すると、渦の中心線に対しミストが螺旋状に巻き込まれている様子が確認できる。下段の断面をみると、片側にのみ円錐渦が存在することがわかる。やがて中央の図に示す対称な状態(平衡状態)となる。この状態は過渡的なもので、すぐに元の状態、もしくは右の図に示すように円錐渦が反対側に現れる状態となる。これらの現象は、おおむね交互に起こっているが、明確な周期性はみられなかった。以後、この現象を"スイッチング現象"と呼ぶ。

Fig.4の左右の断面を比較すると、それぞれの円錐渦の状態は異なっている。すなわち、左図では、円錐渦は緩やかに

Fig.1 Visualization model

Fig.2 Visualization setup

Fig.3 Recording system

Fig.4 Flow pattern on the roof(Model-A)

巻き込まれており、その中心位置は風上側稜線から遠い位置にある。右図では、円錐渦の半径は小さく、またその中心位置も風上側稜線に近づく。右上段の図からも、円錐渦が風下方向に引き延ばされている様子がうかがえる。ランキン渦を仮定すれば、循環が一定である場合、渦の中心圧は半径の2乗に反比例して下がることから⁵⁾、円錐渦が引き延ばされ、その半径が小さくなることにより、屋根面の圧力も降下するものと考えられる。

Fig.5に Model-B,C,D の結果を示す。なお、レーザーシート
トの位置は Model-A と同様である。 Model-B は、風上側
が高く、立方体(Model-A)の場合と同様に、円錐渦はスイ
ッチング現象を示す。ただし、円錐渦は屋根面からやや離れ
た位置にみられる。 Model-C は、風上側が低いため、稜
線部ではく離れた流れが屋根面に再付着し、一対の円錐渦が
みられる。ただし、これらの渦は左右に小さく振動しており、
河井ら⁴⁾の指摘した'ゆらぎ'という現象ではないかと考えられ
る。 Model-D は屋根面のみの場合であり、角度はやや小
さいものの、 Model-B と同様風上側が高い。しかし、稜線
ではく離れた流れは屋根面に再付着し、一対の円錐渦を形成す
る。ただし、 Model-B と異なり、この円錐渦は安定している。

3. 多点同時風圧測定実験

3.1 実験方法

実験は、大阪市立大学工学部のエッフェル型風洞(断面:
幅 1,000mm × 高さ 1,000mm)を用いて行った。実験気流
には、風速 10m/sec の一様流と勾配流を用いた。

模型は、可視化風洞実験に用いた Model-A および
Model-C と同形状であり、各模型には、屋根面 34 点、風上
側側面各 27 点、および風下側側面各4点の計 96 点の風
圧測定孔を設けた。

実験では、模型頂部相当高さの風速とともに、模型に作
用する風圧を、風洞内に設置したピトー静圧管による静圧と
の差圧として測定した。サンプリング周波数は 500Hz で、デ
ータ個数は 8,192(16.384 秒)である。

3.2 固有直交関数展開(POD解析)

変動風圧の組織的な構造を調べる場合、固有直交関数
展開(POD 解析⁶⁾)は有効である。POD 解析では、各点に
作用する変動風圧を要素とする時系列ベクトルを、空間相関
行列を用いた固有値解析により得られたモードを用いて展
開する。このとき、特に低次のモードは、全体の変動エネル
ギーに対する寄与率が高いことから、何らかの物理的な意味
を持つことが期待される。

Fig.6に一樣流の場合の各模型についての1次および2次
の固有モードを示す。図では負の値は面の色で示し、正の
値については等値線で示した。なお、図中の数値は全体の
変動風圧のエネルギーに対する各モードの寄与率である。

図の示す意味について、立方体模型 Model-A の2次モ
ードを用いて説明する。このモードは、風上側壁面がほぼ一
様に正であり、屋根面は負の値を示す。これは、風上側壁面
の風圧が増加する場合、屋根面の風圧が低下する風圧変動
を示している。したがって、このモードは接近流速の変動に
伴う、準静的な風圧変動を表しているものと考えられる。ま
た、屋根面の分布形状から、円錐渦の影響を読みとることが
できる。

本研究で対象とする円錐渦の挙動に伴う変動風圧を考え
る場合、1次モードの方が興味深い。このモードは、屋根面
および風上側壁面において、風向方向の対角線にほぼ逆
対称な分布を示す。また、風上側壁面の係数の絶対値が屋

Fig.5 Flow pattern on the roof(Model-B,C,D)

Fig.6 Eigenvectors of pressures(smooth flow)

根面に比べて小さいことも特徴的である。

風上側が低い Model-C の場合、1次モードは準静的な成
分を表している。また、2次モードは円錐渦の影響による成
分であると考えられるが、 Model-A の1次モードに対して、
屋根面と壁面との関係に以下のような違いがみられる。この
モードを詳細にみると、 Model-C の右側壁面の風圧が増加
する場合、屋根面右側の風上側稜線部付近の風圧が低下
する。 Model-A の場合、右側壁面の風圧が増加する場合、
図では明確ではないが、屋根面右側の風上側稜線部近傍
の風圧は増加し、反対に左側の稜線部付近の風圧が低下
する。可視化風洞実験によれば、 Model-A の場合には、円
錐渦が1つだけ形成され、スイッチング現象がみられた。一
方、風上側が低い Model-C の場合には、1対の円錐渦が形
成され左右に振動する、ゆらぎという現象がみられ、変動風
圧場の違いは、それぞれの場合における、円錐渦の性状の
違いに起因するものと考えられる。この点について、次節で
詳しく考察する。

Fig.7に、勾配流の場合の固有モードを示す。これらは、模型の形状に関わらず、1次モードは屋根面および風上側壁面で、風向方向の対角線にはほぼ逆対称であり、勾配流中における Model-C の場合とほぼ同様の分布形状を示す。また、ここでは示していないが、模型の形状によらず、2次モードは準静的な変動成分を表していた。

4. 円錐渦と変動風圧の関係

POD 解析により得られた、円錐渦の挙動に伴う変動風圧成分は、Fig.8の2つのタイプに分類できる。この図では、黒い部分と白い部分が互いに逆位相で変動していることを示している。Type-A は、一様流中における立方体模型 Model-A の場合にみられたモードであり、Type-B は、一様流中の Model-C および勾配流中での両模型についてみられたモードを示している。それぞれについて、可視化風洞実験結果を含めて考察し、屋根面上に形成される円錐渦による変動風圧特性について示す。

4.1 円錐渦のスイッチング現象による風圧変動

Type-A は、右側壁面 A2 の圧力が上昇する場合には、左側壁面 A1 と屋根面 A3,A5 の部分の圧力が低下するモードである。ここでは示せなかったが、このモードに対応する規準座標は、その長周期成分が卓越しており、大規模な流れの変化、すなわち円錐渦のスイッチング現象による風圧変動を示していると考えられる。可視化風洞実験結果から、右側壁面 A2 の圧力が上昇する場合には、円錐渦は屋根面 A5 上部に存在し、この部分の圧力低下は円錐渦によってもたらされると考えられる。このとき、円錐渦は、左側稜線からの剥離流を引き込む。そのため、剥離流の流速が増加し屋根面 A3 部分の圧力も低下するものと考えられる。また、左側壁面 A1 の圧力が上昇する場合には、円錐渦は A4 の上部に移り、屋根面 A4 および A6 部分の圧力が低下すると考えられる。

4.2 一対の円錐渦による風圧変動

Type-B も、Type-A と同様に屋根面が4つのエリアに分かれるモードである。ただし、壁面と屋根面の関係が Type-A とは異なり、右側壁面 B2 の圧力が上昇する場合には、左側壁面 B1 と屋根面 B4,B6 部分の圧力が低下する。このモードは、一様流中での風上側が低い Model-C で高い寄与率を示す。この場合、可視化風洞実験から、一対の円錐渦が、B4 および B6 の上部に存在すると考えられ、これらの部分の圧力低下は円錐渦によってもたらされたと考えられる。また、勾配流中では模型によらず、このモードが高い寄与率を示しているが、これは接近流の乱れにより、はく離流が再付着しやすくなり、立方体模型 Model-A の場合にも、一対の円錐渦が形成されるためであると考えられる。

右側壁面 B2 の圧力が上昇すると、屋根面 B6 上の円錐渦の強度は増し、その中心圧力は低下し、その影響で屋根面 B6 部分の圧力が低下する。また、渦の半径が小さくなる場合、中心圧力も低下していると考えられるが、可視化風洞実験ではこのような場合、円錐渦が風上側稜線方向に引き

(a) Model-A(1st 29.9%) (b) Model-C(1st 36.1%)
Fig.7 Eigenvectors of pressures(turbulent flow)

Type-A Type-B
Fig.8 Fluctuated pressure pattern

寄せられることが確認された。その結果、再付着位置も風上側に移動し、屋根面 B5 の圧力が上昇すると考えられる。

5. おわりに

正方形平面をもつ陸屋根構造物が、対角線方向に風を受ける場合、屋根面上には円錐渦が形成される。本研究では、屋根勾配の異なる模型を用いた可視化風洞実験により、屋根面上の円錐渦がどちらか片方にだけ存在し、交互にその位置を変える、スイッチング現象について示した。また、風圧測定実験を基に、変動風圧の組織的な構造を POD 解析により調べ、スイッチング現象を含む円錐渦の性状と、それに伴う屋根面の変動風圧特性の関係について示した。

参考文献

- 1) Prenel,J.P.,Porcar,R., El Rhassouli,A.: Three Dimensional Flow Analysis by Means of Sequential and Volumic Laser Sheet Illumination, Experiments in Fluids, Vol.7, pp.133-137, 1989.
- 2) Kramer,C., Gerhardt,H.J.: Wind Pressures on Roofs of Very Low and Very Large Industrial Buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.38, pp.285-295,1991.
- 3) Katsura,J.: A Wind Tunnel Test of Pressure Distributions on Box-Shaped Models, Proc. of USA-Japan Research Seminar Wind Loads on Structures, pp.97-108,1970.
- 4) 河井宏允,西村元吾,草柳拓人:陸屋根上の円錐渦と負圧変動について,第13回風工学シンポジウム論文集, pp.149-154, 1994.
- 5) 日野幹雄:流体力学,朝倉書店,1992.
- 6) 田村幸雄:固有直交関数展開のランダム変動場への応用のすすめ,日本風工学会誌, No.65, pp.33-41, 1995.10
- 7) Bienkiewicz,B.: Proper orthogonal decomposition of roof pressure, Proceedings of Bluff Body Aerodynamics, 1992.