特集

円錐渦と局部負圧

Conical Vortex and Local Peak Suction

河井宏允*

Hiromasa KAWAI

1. はじめに

筆者が、陸屋根の風上側軒近傍に作用する大きな局部負圧と陸屋根上の円錐渦の研究を行ったのは、今から15年ほど前のことである。研究の契機は、建築学会の風荷重小委員会で流体数値計算との比較ために行った幅が高さの倍の正方形の屋根面(1:1:0.5モデル)の風圧測定であった。同時風圧測定、可視化実験、陸屋根上の風速測定、風上の風速変動と陸屋根の風圧変動の相関測定など、かなり幅広い測定を7年ほど行ったが、平成12年に筆者が東京電機大学から京都大学に移ったのを契機に研究は終了した。そのときに発見した事柄、即ち、一様流中での流れ場のスイッチング現象に伴う圧力場の変化、乱流中での強い局部負圧発生条件などが、その後、多数の研究者によって行われた風洞実験、自然風中での模型実験やLESによる詳細な数値計算等によって確認されるとともに、円錐渦の構造もより明確になった^{1,2,3,4)}。

本稿では、既往の研究から、円錐渦の構造と特性、それに伴う風圧などについて筆者なりに整理し解釈するとともに、残されたデータの再解析を行った。その結果、これまでの論文では明確には語られなかった新たな事実を発見した。これらのいくつかは、15年前から関心を持っていたが、十分な時間を掛けて検討をすることなく時が過ぎてしまったものである。

2. 一様流中にある陸屋根上の円錐渦と局部負圧

一様流中にある陸屋根に流れが45度から当たる場合、陸屋根上には一対の円錐渦が形成される。この一対

図1 流れ場のスイッチング現象

図2 渦の強さのアンバランスによる流れの引き込み現象、左側の渦が強い場合

の円錐渦は、一方が強く他方が弱いという非対称な状態を呈するが、この状態は安定せず、0.5秒から3秒程度の周期で強い渦と弱い渦が入れ代わるスイッチングという状態を呈する。図1は、流れの可視化によって、スイッチング状況における流脈を観察したものである。左側の渦に流れが引き込まれた準安定で非対称な流れ場は、

* 京都大学防災研究所 教授

Professor, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

図3 流れのスイッチングに伴う圧力場の変化

図4 流れ場のスイッチングに伴う風圧変動のスイッチング現象

ある時に不安定となり、右側へと引き込まれる。

流れの引き込みは、左右の渦のアンバランスによって引き起こされる。図2の渦点モデルによる流速ベクトル図に示したように、片側の渦がわずかでも強くなった場合、流れは強い渦の方に引き込まれ、その結果、よどみ点が引き込まれた渦とは反対側に移動する。LESによる数値計算によれば、よどみ点の移動に伴い、屋根面上には鉛直に軸をもつ渦が生じ、これが円錐渦と干渉し円錐渦のアンバランスをさらに助長させ、非対称で準安定な流れ場を作り出す⁴⁾。

準安定非対称流れ場は、強い方の円錐渦の渦度が弱まることによって、不安定となり、反対側の渦の強さが上回れば、図1に示したように反対側に流れがスイッチングする。円錐渦の渦度が弱まる原因としては、後流の不安定による屋根面の渦の崩壊、放出が考えられる。屋根の高さが低い場合にはスイッチングは生じないが、これは屋根の後流における流れ場の不安定が屋根面にまで影響しないことが原因ではないかと考えられる。

流れ場のスイッチングに伴って、図3に示したように、陸屋根上の圧力は強い渦が生じている側で低くなる。流れ場のスイッチングに伴って圧力場もスイッチングし、図4に示したように、ある点での風圧は、高い負圧から低い負圧へ、あるいは低い負圧から高い負圧へと不規則にジャンプする。

以上が、これまでの研究結果に基づくスイッチング現象に関する私の解釈である。

しかし、今回、実験結果を再検討・再解析した結果、スイッチング現象に加えて、以下の興味深い発見があった。後に述べるように、スイッチング現象は、一様流でしかも流れが45度から近づく場合に限って観察されるが、以下の事柄は境界層乱流中でも観察される、いわば陸屋根上の円錐渦については普遍的な現象であると考えられる。

第一の発見は、円錐渦は、メガホンのような単純な円錐形状ではなく、直径が異なる複数の円筒形からなる多重構造を持つというものである。その意味からは、円錐渦という表現は必ずしも正しいとは言えない。

第二の発見は、スイッチング後の準安定非対称流れ場が存在する時、圧力は周期的に変動するというものである。圧力変動の周波数は、屋根の幅を基準とした無次元周波数 $nD/U = 0.6$ 程度である。この周波数は、奥行きが長く剥離流が再付着をする角柱の場合の渦発生（エッジトーン型渦）の周波数と等しい。この準周期的な圧力変動は、風上から風下へとほぼ一般流の流速で伝わる。

図5 準安定非対称状況における風圧係数の等値線図、左側の渦が下側よりも強い場合

図6 準安定非対称状況の風圧係数と平均風圧係数との差、網かけ部分が負、左側の渦が強い場合

図5は、風向45度において、図の左側の軒付近に強い渦ができていたときの風圧係数の平均値の等値線図を示したものである。流れ場は非対称ではあるが、等値線図には非対称性は明確に表れない。この点は、後述する境界層乱流場における圧力分布と大きく異なるところである。

注目すべきは、等値線が軒線とほぼ平行であり、下流へ行くにしたがって段階的に中央へとジャンプしていることである。この等値線から推察すると、流れ場は多重の構造を持っていると考えられる。即ち、陸屋根上の渦は単純な円錐構造ではなく、複数の円筒形渦から構成されている多重円筒構造であると考えられる。図6は、左側に強い渦ができていた時の風圧係数(図5)と平均風圧係数の差の等値線図を示したものである。図6では、差が負となった場所のみに網かけをしている。図6には、等値線図に明瞭な山や谷がいくつも認められる。山群や谷群は2種類あり、一つの群は多重円筒状渦の中心付近

図7 圧力変動のパワースペクトル(一様流)

と思われる軒に近い部分に、他の一つの群は多重円筒渦の外側の異なる円筒渦の境に位置する。最初の群の中心間の間隔は下流に行く程大きくなる。

図7は渦中心近傍の風圧変動のパワースペクトル密度を示したものである。風圧変動のスペクトルには、鋭くはないが明瞭なピークが認められる。即ち、陸屋根上の風圧変動は準周期的に変動する。スペクトルピークの無次元周波数は、風上から中央までの1から3までは $nD/U = 0.6$ であり、その後は風下に行くにしたがって高周波数へと移動する。また、スペクトルピークは風下へ向かうにしたがってなだらかになる。なお、3のスペクトルには $nD/U = 0.01$ 付近になだらかなピークが認められるが、このピークは流れ場のスイッチングに伴う風圧の変化(約1秒)を反映したものである。

準周期的な変動圧力は、図8の相互相関が示すように風上から風下へとほぼ一般流の流速で伝搬する。また、図9に示したように、一対の渦の中央点での圧力変動の相互相関が示すように、スイッチングに伴う負の相互相関を差し引いた、 $nD/U = 0.6$ に対応した高周波数領域の風圧変動の相関は正となり、高周波の風圧変動は左右の領域を同じ位相で同時に伝わるのが分かる。風圧変動の伝搬速度とスペクトルピークの無次元周波数から推測すると、1周期の間に風圧はほぼ陸屋根上を風上から風下へと伝搬する。この状況は、辺長比の大きい角柱側面上の圧力変動と類似している。したがって、多重円筒状の渦においても、同様の機構による渦の形成と移動

図8 圧力変動の時空間相互相関係数

が行われているのではないかと推察される。即ち、流れが斜めからあたっても、流れは軒に直角に剥離し、下流への向かうにつれて階層的に剥離流の再付着位置が中央へと向かうと考えられる。また、角柱の場合と同様に、剥離と再付着との干渉によって、準周期的な渦発生が生じると思われる。次節で述べる境界層乱流の場合には、風上の乱れによって流れ場は常に不安定となるが、基本的な流れ場の構造は同じである。

3. 境界層乱流中の陸屋根上の円錐渦と局部負圧

建築物の耐風設計上重要な境界層乱流中の陸屋根上の円錐渦と風圧変動は、接近流の乱れに大きく影響される。

図9 圧力変動の時空間相互相関係数

そのため、一樣流中とは大きく異なっているように思われる。境界層乱流中の陸屋根上の円錐渦は基本的には不安定で、大きさ、強さが絶えず変化するとともに、大きく揺れ動く。しかし、これまでの研究の結果、陸屋根上に大きな局部負圧が生じる時の流れ場の状態は、例えば平均風向が異なっても、ほぼ同じであることが明らかになった。このとき、陸屋根上の流れ場は著しく非対称となり、片側のみに大きく強い円錐渦が形成され、それに伴い、強い負圧領域が中央の領域にまで広がる。また、このような流れ場は、あるスケールの乱れ（ガスト）が陸屋根の風上側の軒に対して 30 度程度の傾きで当たった時に生じることも明らかになっている²⁾。

これらの発見は、風上側の軒付近の測定点で風圧が大きく低下することを条件とした場合の、風圧係数の等値線図（図 10）とそのときの風速ベクトル図（図 11）から持たされた。しかし、今回これに加えて、次のような新たな発見があった。

大きな局部負圧が生じる状況には、これまでに発見された非対称な流れ場以外に、一対の渦が対称に形成される場合がある。この場合、ガストは陸屋根に対してほぼ

図 10 風上軒で大きな負圧が観測される時の条件付き風圧係数の等値線図

図 11 大きな負圧が観測された時の円錐渦

45 度の方向から当たる。図 12 は、平均風向が 45 度と 25 度において、風上側の端に近い一対の測定点での瞬間風圧係数が -3 以下になる場合の条件付き風圧係数の等値線図である。風圧分布の形は対称であり、極めて強い局部負圧が観測される。風圧係数が最も小さくなる点は風上端からやや離れたところにある。このような対称パターンでの大きな局部負圧が観測される時、風上（陸屋根から陸屋根の幅の風上の陸屋根高さで測定した結果を風速測定点と陸屋根との距離を考慮して時刻補正したもの）の風速は平均風速の 1.35 倍（平均風向 45 度）、1.12 倍（平均風向 25 度）となり、接近流のガストが大きな負圧の要因の一つであることが分かる。ちなみに、非対

図 12 大きな負圧が観測された時の風圧係数の等値線図(パターン 2, 対称局部負圧分布)

称分布の強い負圧が観測される場合の風速も平均風速の 1.13 倍（風向 45 度）、1.23 倍（風向 25 度）であり、こ

図 13 大きな負圧が生じる時の時刻歴波形の移動平均による多重解像度時間周波数解析

図 14 大きな局部負圧が生じる時の各周波数における風圧係数の等値線図

図 15 次数 7(31Hz)における風圧分布の時間変化

れまでの研究で明らかになっているように、この場合でも接近流のガストによって大きな負圧がもたらされることが再確認された。

なお、図 12 で示されているように、風圧係数の等値線図は軒に平行になっており、境界層乱流中の場合でも、陸屋根上の円錐状渦の構造は、基本的には一様流中と同じ多重円筒構造を持つと考えられる。

第 2 の発見は、大きく強い渦が形成される時、陸屋根上の渦は周波数領域においても階層的な構造を持つ。局部負圧が生じた時の風圧変動の特性を調べるために、風圧変動の時刻歴波形に移動平均処理によって、ウェーブ

レット解析と同様な多重解像度解析を施し、時刻歴上で周波数分解を行った。なお、4 階の B スプラインウェーブレットを用いた同様の解析も行ったが、局部負圧のような不規則な変動の場合、滑らかな波で波形を分解する方法は必ずしも適していないことが分かったので、ここでは移動平均処理に基づいた結果のみを報告する。

解析は局部風圧変動の $4096=2^{12}$ 個のデータに対して行った。元波形から平均値を引いたデータを $f_{12}(t)$ と表し、このデータの移動平均値を 2, 4, 8, 16 個... と 2 の巾乗ごとに求め、これを順に $f_{11}(t), f_{10}(t), f_9(t), f_8(t) \dots$ とする。次に、 $f_j(t)$ と $f_{j-1}(t)$ の差 $g_{j-1}(t) = f_j(t) - f_{j-1}(t)$ を求め、

この時刻歴を表示する。したがって、元の波形 $f_{12}(t)$ は $f_{12}(t) = \sum g_j(t)$ のように、各次数の $g_j(t)$ の和として表される。

移動平均は、ローパスフィルターとして働くので、 $g_j(t)$ は次数 $f_j(t)$ と $f_{j-1}(t)$ の間の周波数成分を取り出している、即ちバンドパスフィルタを施した結果と見ることができる。なお、ウェーブレットの多重解像度解析も同様であり、移動平均処理は窓関数が矩形である1階のBスプラインウェーブレット即ち Haar のウェーブレットに相当する。ただし、Haar のウェーブレットを用いたウェーブレット解析では、 $f_j(t)$ は階段状に不連続に変化し移動平均処理のように滑らかではない。

図13は、風向45度の場合の風上端付近の測定点における風圧変動波形に対して、上記の処理を施したものである。薄く表示されているのが $f_{12}(t)$ を表す。本データでは6.8秒付近で風圧が急速に低下する状態を呈している。このデータに対して、上記の解析を施すと、この付近では、高周波数域から低周波数域まで、常に他の時間よりも大きな風圧変動が生じていること、および変動の位相がほぼそろっていることが分かる。このデータでは特に変動が大きいのは次数4及び5の変動であり、これは周波数にすると、2~4Hzに当たる。以上の解析結果は、大きな負圧は、低周波数域から高周波数域に至るまでの変動が同時に増大し同期して変動する時に生じることを示している。言い換えれば、大きな負圧を生じさせる原因となる渦は、低周波数域から高周波数域までの変動を有する階層構造であると言える。

図14は、非対称な強い負圧場が観測される時の、次数1,3,4,7における風圧係数の等値線図を示したものである。図に示されているように、いずれの場合も、片側に大きな負圧領域が広がっており、多重円筒状渦が低周波数から高周波数までを含んでいることが示されている。図15は、次数7の10msec間の3つのパターンを示したものである。この図をみると、圧力の低い場所が次々と風下の方に移っていることが分かる。したがって、周波数の高い渦が滑らかに風下に流れていくよりも、多重円筒剥離渦の強さが風上から風下の方へと受け渡されていくのではないかと考えられる。

4. 結論

(1) 一様流中における流れのスイッチングは、渦の強さのアンバランスによる流れの引き込みとそれに伴う鉛直渦度の発生による。スイッチングの原因となる渦のアンバランスの原因は、後流における流れ場の不安定性に伴う陸屋根上の渦の崩壊あるいは

放出によると考えられる。

- (2) 一様流中では、準安定非対称状態において、辺長比の大きい角柱と同様に、流れの剥離と再付着の干渉に伴う準周期的な渦形成が行われる。この渦形成の無次元周波数は $nD/U=0.6$ 程度であり、渦は平均流と同程度の速度で風下へと移動する。
- (3) 陸屋根上に形成される円錐渦の構造は、三角翼にできる定常な円錐渦のように円錐形ではなく、一様流中でも境界層乱流中でも、直径の異なる円筒が繰り込まれた多重円筒形である。
- (4) 境界層乱流中に置かれた陸屋根に大きな負圧が発生する条件は2つある。一つは、従来から観測されているように、陸屋根の片側に強い渦が発生する場合である。他の一つは、陸屋根の両側に一対の強い円錐状渦が形成される場合である。この場合、ガストは陸屋根に角に真っ直ぐ、即ち軒線に対して45度の方向から当たる。
- (5) 陸屋根の円錐渦は、周波数的にも多重構造を持っていると考えられる。即ち、大きな負圧の原因となる円錐渦は低い周波数から高い周波数までの成分を含む。言い換えれば、低い周波数成分から高い周波数成分までの変動が位相を描いて変動するとき、大きな負圧が発生する。

この論文を書くにあたって、10年以上も前のデータを引っ張りだし、新しい視点で円錐渦について考えることができ、その結果、新しい知見が得られたことは、筆者にとってこのうえない喜びであった。今回、執筆の機会を与えていただいた松本先生に心より謝意を表したい。

参考文献

1. H. Kawai and G. Nishimura : Characteristics of Fluctuating Suction and Conical Vortices on a Flat Roof in oblique Flow, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.60, pp.211-225,1996
2. H. Kawai: Local peak pressure and conical vortex on building, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, Vol.92, 251-263, 2002
3. 谷池義人, 谷口徹郎, 両角達郎, 種々陸屋根面上に形成される円錐渦のスイッチング現象解析, 第15回風工学シンポジウム論文集, 305-310, 1998
4. 小野佳之, 田村徹郎, 片岡浩人, 陸屋根上に発生する円錐渦と非定常圧力特性に関するLES解析, 建築学会構造系論文集, 第621号, 9-16, 2007