風洞実験によるかわらの振動と飛散現象の研究*

(第2報, かわらの飛散に及ぼす振動の影響)

難波礼治^{*1}, 岡本 寛^{*2}
奥田昭博^{*1}, 芝尾宜秀^{*3}Researches on Vibration and Scattering of Roof Tiles
by Wind Tunnel Test

(2nd Report, Effect of Vibration on Scattering of Roof Tiles)

Reiji NANBA, Satoru OKAMOTO^{*4},

Akihiro OKUDA and Yoshihide SHIBAO

^{*4} Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University,
1060 Nishikawatsu-machi, Matsue-shi, Shimane, 690-8504 Japan

This study has investigated the nature and source of the vibrating and scattering behavior of roof tiles with the aim of providing a better insight to the mechanism. The 100 roof tiles were set up on 10 lines and 10 lows on the pitched roof in the downstream of the flow from the wind tunnel. These experiments were followed by series of tests where the slope angle of the roof tiles was changed. The vibrations of the roof tiles were simultaneously measured by the two accelerometers, and the motions of the vibration and scattering were observed by the high-speed video camera. The frequency response function and coherence function of roof tile were measured by impact hammer test under no flow condition. Just before scattering of the roof tiles, both vibrations of higher frequency mode and vibrations of lower frequency mode appeared simultaneously in roof tiles. The values of the higher frequencies were corresponding to the values of resonant frequencies of the roof tiles. It was thought that the scattering of roof tiles was influenced by the vibration of the lower frequency mode. The frequencies of the vibration were measured by the high-speed video camera system. The values of the lower frequencies were 10 Hz~20 Hz. The mechanism of scattering of roof tiles could be understood by means of the information from the accelerations and the images of roof tiles.

Key Words: Wind Tunnel Test, Flow Induced Vibration, Roof Tiles, Vibration and Scattering, High-Speed Video Camera

1. 結 言

1,400年以上の歴史を持つかわら屋根はこれまで、多くの先人たちの知恵と工夫が経験的に蓄積、継承され、今日の形状デザインや施工方法などに結実している。また、近年の建築基準法の改正により、かわらの耐風性能も力学に基礎をおいた性能規定中心の体系に改められるようになった。しかし、このガイドラインでは、各地の基準風速を静的な風圧力に単純に換算した現場即応型の施工を主目的としたマニュアルである。標準の試験方法も、耐風圧力に対応したかわらの静的引張試験のみで、例えば、かわらの外形に起因する流体抵抗や揚力などの流体力学的な要因は全く考慮されていない。さらに、かわらの上面と下面に作用する静的な圧力のアンバランスによりかわらの飛散の有無、すなわち耐風性能が評価されてきたが、飛散する直前ではかわらが特有の振動をすることが報告されている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。

本研究では、従来考慮されてこなかった動的な視点、すなわち、かわらが風の影響を受けて飛散する前兆現象に現われる動揺(がたつき、振動)に着目し、それらの原因を探索して有効な防災対策に反映させることを目的に研究を進めてきた。

本研究では前報⁽¹⁾に引き続き、かわらが飛散する前兆現象である振動に着目し、各々のかわらの詳細な運動機構や振動の特性を明確にするために、加速度センサと高速度カメラによる同時計測を行った。実際の暴風の風速に相当する最大風速約40m/sの風洞実験装置と実物かわらを用いて実験を行った。主に使用した計測機器として、2個の加速度センサを2枚の実物かわらの裏面へそれぞれ取り付け、加速度波形の時間変化を測定した。同時に高速度カメラによるかわらの振動および飛散現象を撮影し、映像と加速度波形の関連付けを試みた。その結果、風速増加により、加速度波形が顕著に変化する様子が観察された。前回の報告⁽¹⁾で述べた飛散直前に出現するかわらの固有振動数の他に、かわらの飛散現象に最も大きな影響を及ぼすと考えられる比較的大きな振幅で低周波数の振動を同定し、かわらに作用している力のメカニズムを明らかにすることが出来た。

* 原稿受付 2006年5月8日。

^{*1} 正員、島根大学大学院(☎690-8504 松江市西川津町1060)。^{*2} 正員、島根大学総合理工学部。^{*3} (株)シバオ(☎694-0303 大田市水上町白環658-1)。

E-mail: okamoto@cis.shimane-u.ac.jp

2. おもな記号

f : 周波数 Hz

m : 質量 kg

t : 時間 s

U : 風速 m/s

X : かわら表面に沿う主流方向の座標軸

Y : かわら表面に沿う主流と直角の方向の座標軸

Z : かわらの表面に垂直な方向の座標軸

α : 加速度 m/s^2

θ : 屋根勾配 $^\circ$

ϕ : 風向角 $^\circ$

3. 実験装置および方法

実験装置と計測機器の概略を図1に示す。風洞の全長は6000mmで、軸流送風機は55kWの三相誘導電動機駆動である。風洞の吐出口は、1250mm×400mmのノズルを使用し、吐出口の最大風速は約40m/sである。流速分布は最大で±7%以内、乱れ強さは1~2%である。前回⁽¹⁾までの風洞実験では、模型屋根上に合計25枚(5行×5列)のかわらを敷き、かわらの挙動を記録し解析を行ってきたが、今回の実験では、模型屋根端部の影響(境界条件)を極力排除する目的で、合計100枚(10行×10列)の実物かわらを模型屋根上に敷いた。なお、模型屋根表面の流れの一意性や左右対称性がある程度確保されている領域を事前に特定し、以下に述べる実験を実施した。

風洞実験では、風速を低流速から段階的に増加させ、風速増加に伴うかわらの挙動を計測した。図1に示す吐出口に最も接近したかわらまでの距離は265mmであり、実験内容によってある程度変化させた。かわらはシール材によって屋根地との隙間が密封されている。かわら1枚の重量は約2.8kgである。かわらの加速度計測および振動周波数の計測は、加速度センサ(ONO SOKKI NP3560, X , Y , Z 三軸同

Fig.1 Experimental apparatus

時測定可能, 10mm 角, 重量 5g)とレコーダ兼 FFT アナライザ(ONO SOKKI DS-0264, 入力チャンネル数4)により行った。かわらが振動し飛散に至るまでの過程は、高速度ビデオカメラ(NAC 社, 最高フレームレート 1000fps)により撮影された。各計測機器を風洞始動から実験終了まで同期させてデータを取得した。加速度センサの取り付け方法を図2に示す。かわら中央部の裏面に穴加工を施し、金属板とボルトによって固定した。 Z 軸方向(かわら表面に対して垂直方向)の加速度を計測するためにレコーダ機能を持つFFTアナライザへ接続し、加速度波形の解析を行った。入力チャンネル数は2で2個の加速度センサを同時に使用した。一様流速の風にさらされたかわらのうち、あらかじめ振動が顕著に見られるかわらを特定した後に、模型屋根上の隣接するかわら2枚に加速度センサを取り付けた(図3)。また、高速度ビデオカメラ撮影を同時に行い、LEDのマーカ1個をかわらエッジに取り付け(モーションキャプチャ)、実験開始から終了までをフレームレート 500fpsにて撮影を行った。加速度センサを取り付けたかわらを中心に画像を記録し、かわらの口開け現象による振動周波数の解析を行った。

4. 実験結果および考察

4.1 かわらの加速度計測 かわらの加速度計測および振動解析では、屋根勾配 θ を 19° , 24° , 29° に設定し、風向角 ϕ は 0° (正面からの風)に限定した。

Fig.2 Roof tile equipped with accelerometer

Fig.3 Positions of roof tiles equipped with accelerometers

(a) Effect of slope angle of roof on critical velocity lifting up tiles

(b) Observation of vibration in roof tiles due to wind action by high-speed video camera in $\theta=24^\circ$, $U=40.0\text{m/s}$

Fig.4 Vibrations which lift up roof tiles

Fig.5 Effect of slope angle of roof on vibration of roof tiles

また、加速度センサからの波形の解析は、風洞の始動から、風速を段階的に増加させ、最終的にはノズルの最大流速、または、飛散に至る流速までを記録し、加速度の時間変化をパソコンに収録した。

かわらが飛散に至る最終段階で発生する口開け現象に着目して、屋根勾配の変化に伴う影響の有無を検証した(図 4(a))。模型屋根装置の最大傾斜 29° の勾配では、勾配の低い屋根よりもかわらの微少振動が低流速で発生し、口開け現象は風速 38m/s 付近で発生した。勾配が 24° の屋根の場合には、微少振動の発生は勾配が 29° の場合よりも遅れ、口開け現象は 40m/s 付近で確認された。屋根勾配の最も緩やかな 19° の勾配では口開け現象には至らず、振動の発生する風速も他の勾配に比べより高いことがわかった。 29° の勾配と 24° の勾配では、隣接するかわらの押さえとビス止めによる効果により飛散には至らなかった。口開け現象は、かわらに発生する振動現象の中でも比較的大きな振幅で振動し、図 4(b)に示すように、かわらが野地板より十分浮き上がり、屋根地がろ出される時、口開け現象として見なす。

口開け現象の出現はかわらが飛散に至る最終的な局面の 1 つと考えられる。緩やかな勾配では口開け現象には至らず、その結果、振動や飛散に比較的強いが、勾配が急になるに従って振動の発生が早まり、口開けを引き起こす限界流速も低下して飛散し易いことがわかった。かわら近傍(表面上)の流れを調査するために油膜法による可視化を別途行った。その結果、屋根勾配が増加するにつれて、かわら表面には、流れが剥離したと考えられる領域が多数出現することがわかった。緩やかな勾配では模型屋根上を流れる風が概ねかわら表面に沿って流れるが、勾配が急になるに従い、かわらの表面やかわらのエッジに直接風が衝突する状態となる。衝突した流れはかわらのエッジ方向へ流入し、その一部はエッジを越えて極めて乱れた流れとなり¹⁾剥離領域を形成すると考えられる。剥離領域(渦)の出現は、外部圧力の著しい低下を意味し、内部圧力を上昇させる結果、かわらの浮上(口開け現象)をもたらすものと考えられる。特に、 $\theta=29^\circ$ の勾配ではかわらが Y 軸方向(左右方向)に大きくずれる現象も確認されており、口開

Fig.6 Acceleration wave forms of roof tiles

けを引き起こす限界流速の低下の要因として考えられる。

屋根勾配を変化させた場合におけるかわらの挙動を図5に示す。最大傾斜 29° の勾配(図5(a))では微小振動するかわら、ならびに口開け現象を引き起こすかわらの枚数は最も多く、結果として飛散に至る5枚のかわらが確認された。勾配が 24° の屋根の場合は(図5(b))、飛散には至らないが、 29° の屋根勾配と同様に、微小振動するかわらが見られ、加速度センサを取り付けたかわらを中心にその周囲の6枚のかわらが口開け現象を起した。最も傾斜の緩やかな 19° の勾配(図5(c))では風洞の最大流速が 40m/s でも口開け現象には至らず、微小振動の発生するかわらの枚数も少なかった。

また、口開け現象の確認された 29° と 24° の勾配の加速度波形には共通点が見られた。屋根勾配が 24° と 29° の場合における加速度の時間変化の一例を図6に示す。二種類の勾配では、比較的低流速における加速度は、センサ No.1, No.2 共に微小な振幅の値を示した。しかし、風速が増加した場合には、瞬間的に 50m/s^2 を超える値を示した。加速度波形の変化とピークの様相をまとめると、風速が比較的低い状態では加速度の値も微弱であるが、風速の増加

に伴い加速度の値も増大する傾向が見られる。さらに、加速度の値ならびに振幅の様相は屋根勾配の影響に起因した口開けに伴う限界流速とも密接な関係がある。 24° の勾配では、風速 40m/s にかけて加速度の値は増大し振幅も増加する(図6(a), 図6(b))。また、 24° の勾配で比較的高い流速で出現した加速度値および振幅が、 29° の勾配ではより低流速で出現する傾向が見られた(図6(c), 図6(d))。

口開け現象の確認された 24° と 29° のそれぞれの勾配において、口開け発生直前で最大加速度が出現する傾向が見られた。また、両者がそれぞれ口開け現象に至ると加速度値の値も低下する傾向が判明した。口開け現象に至り屋根地内部の内圧とかわら表面に作用する外圧がバランスする結果、加速度センサの値が低下したと考えられる。なお、振動現象が発生する風速では稀にかわらとかわらが接触し衝撃による突発的な加速度信号が現われることもあった。このように、加速度情報を解析することにより、前回の報告⁽¹⁾で述べたかわらの飛散に影響を及ぼす屋根勾配の影響が裏付けられることがわかった。

一連の風洞実験では模型屋根勾配を種々変更して、隣接したかわらに加速度センサを取り付け、加速度波形の時間変化をリアルタイムで取得し解析した。

微小振動の発生が確認されたすべての実験条件において、振動の発生時よりたびたび出現した興味深い加速度波形の一例を図7に示す。図7(a)は、屋根勾配 24° で風速 40m/s にて記録された加速度波形と100枚のかわらが敷かれた模型屋根上のかわらの挙動を示す。あらかじめ振動し易いかわらを特定した後に、模型屋根上の隣接するかわら2枚に加速度センサをそれぞれ取り付け付けた(図中①と②)。模型屋根装置が前報⁽¹⁾よりスケールアップされた本実験においても、前報⁽¹⁾で述べた振動や飛散を引き起こし易いかわらは局所的に限定され、屋根下流の右端に集中していることが確認された。一般的なかわらの施工方法は、かわらとかわらを重ね合わせて上下左右のかわらの自重によりかわらを押さえ、敷き詰めて行く。屋根下流の右端部は周囲のかわらからの押さ

えが最も少ない場所であることが最大の要因であると考えられる。図7(a)下図の記号Aで示される波形は両センサの信号に約半周期の位相のずれがある波形である。また、図7(a)下図の記号Bで示される波形はセンサNo.1とセンサNo.2の信号がほぼ同期した波形である。図7は任意の時間変化で生じる加速度の値を力の作用した時間として表現している。この結果、センサの取り付け位置が隣接しているにもかかわらず、両かわらに作用する加速度の値に差異が生じたり、発生時期がずれたりすることがわかった。すなわち、模型屋根上の隣接するかわらに作用する力が、2枚のかわらにほぼ同時に作用したり、また、一方のかわらに力が作用していないときでも他方(重なりのある関係にある周囲)のかわらに対して力が作用している変則的な状況を表わしていると考えられる。ここでは、①のかわらを②のかわらが押さえ、①のかわら自身に力が作用していない場合でも、②のかわらにより力が及ぼされる。また、②のかわらに力が作用していないときでも、①のかわらに対して力が働き、②のかわらに力が及ぼされる(記号A)。加速度の発生時期がほぼ同時刻に出現した記号Bでは、かわらがほぼ同時に振動する様子を実験中に観察することが出来た。上記の結果より、押さえられているかわら自体が振動する結果、他方のかわら(重なりのある関係にある周囲)に対して反作用の力を及ぼしていると考えられる。かわら被害でたびたび報告されている「かわらの波うち現象」に起因する可能性が示唆出来る(図7(b))。

4・2 高速度カメラによる映像解析との関連付け
かわらが飛散に至るまでの過程は、微小振動の発生の後、振動の振幅が風速の増加によって促進され、口開け現象を伴う振動を引き起こした後に最終的には飛散に至る。ここでは、かわらの飛散に直接的な影響を及ぼしていると考えられている口開け現象を伴った比較的大きな振幅の振動に着目し、高速度カメラ撮影による画像解析によってその振動周波数の同定を行った。かわらはあくまでも単一の振動周波数で振動してはいない。複数の振動周波数がかわらには作用し、複雑な様相を呈しているのでタイムレコードからランダムにいくつかの振動パターンを抽出して解析の対象とした。結果として実験中に観察出来るかわらの振動は微小振動や固有振動⁽¹⁾と比較して振幅が大きく、比較的低い周波数である約 10Hz – 20Hz であることがわかった。

口開け現象の認められた実験結果から加速度波形の時間変化と高速度カメラの映像解析結果を関連付

(a) Acceleration wave forms of roof tiles

(b) Wave motion of roof tiles

Fig.7 Acceleration wave forms from accelerometers 1 and 2 in $\theta=24^\circ$, $U=40.0\text{m/s}$

けた一例を図8に示す。屋根勾配は 24° で風速 40m/s における口開け現象による振動を解析した結果である。風洞始動時から、風速を段階的に増加させ、最終的にはノズルの最大流速までを加速度測定と高速度カメラ撮影とを同期させて計測した。かわらの振動周波数に応じてサンプリング周波数(FFTの時間窓長になる解析時間長)を2048点に設定し、分解能点数を800ラインとして、周波数レンジ(周波数を分析する上限)を 5kHz と設定した。加速度波形(センサNo.1)を図8(a)に示す。加速度センサより得られた信号は時間経過に対する加速度の値で構成されており、r.m.s. (2乗平均平方根)で表わした。得られたデータに多項式近似を施した波形は、かわらの1サイクルに対応する加速度の時間変化を示していると考え

(a) Acceleration wave forms of roof tile

(b) Vibration frequencies of roof tile

(c) Image analysis of vibrating roof tile

Fig.8 Acceleration wave forms and vibration cycles of roof tiles in $\theta=24^\circ$, $U=40.0\text{m/s}$

られる。センサ No.1 における最大平均加速度の値(最大振幅)と振動周波数を算出した結果(図 8(b)上図), 最大加速度は約 11m/s^2 であり, その時の振動周波数は約 14Hz であった。振動周波数の算出は高速度カメラによる映像解析で口開け現象の1サイクルの出発点(かわら上昇)と終点(再び上昇)の画像情報を用いて, 同時に計測された加速度センサの波形を処理して算出し, 振動の周期が 0.07 秒であることがわかった。この値は FFT 解析結果(図 8(b)下図)とほぼ一致した。また, FFT 解析では, 前回の報告⁽¹⁾で述べた飛散直前に出現するかわらの固有振動数である約 470Hz のピーク周波数も捕らえることが出来た。FFT 解析結果はサンプリングの時間に影響される可能性があるため, サンプリングの記録時間を十分に与えて, FFT 周波数解析を別途行った。その結果, 固有振動数が現われた比較的高い周波数をはじめ, 比較的低い周波数の出現も確認することが出来た。

センサ No.1 から得られた加速度波形と高速度カメラの映像を対応させた結果を図 8(b)と(c)のそれぞれ①から⑤の番号で示す。振動の映像においてかわらが最も上昇したポイント①では最大の加速度は約 11m/s^2 を示し, 次に③の下降した状態では加速度値も低下する傾向がわかる。再度上昇する⑤において加速度の増加が認められ, かわらの振動の1サイクルにおける詳細な加速度の変化が映像との対応により明らかにされた。口開け現象に至ったかわらの運動は, その振動によって固定用のビスを持ち上げ破損しながらも飛散に至ることや, 隣接するかわらを押し上げて新たな口開け現象やかわらのズレを誘発することなどが風洞実験を通して観察されている。言い換えればその瞬間はかわらの振動の1サイクル中で最も振幅が大きく, 最大のエネルギーが生じた瞬間であると考えられる。力学的な考察より, ニュートンの第2法則から, かわら自体に作用している力を算出することが出来る。加速度(α)が 11m/s^2 で質量(m)はかわらの質量の約 2.8kg とすれば, 作用している力は 30.8N となることがわかった。

一方, かわらの固有振動数を求めるため, ハンマリング試験を事前に行った。宙吊りに設置したかわらの中央部にインパルスハンマで打撃を加える。固有振動数の解析には, 周波数応答関数とコヒレンス関数を求めた。その結果, 周波数応答関数では 478Hz の周波数でピークが出現し測定された。その時のコヒレンス関数には高い相関が見られた⁽¹⁾。図 8(b)の下図で示された飛散直前に発生する卓越周波数とハンマリング試験により得られたかわらの固有振動数

とはほぼ一致することが確認された。また別途、模型屋根上に敷かれたかわらに対して直接ハンマリング試験を行った。結果、宙吊りにした場合の結果に対してやや低い430Hz~460Hzの固有振動数を得る結果となった。図8(b)より、かわらの飛散直前ではかわら単体の固有振動数が発生している。また、模型屋根上にかわらを配置し、模型屋根裏面の中央部において、風による模型屋根全体の振動周波数を測定した結果、口開けの振動数や、かわらの固有振動数とは異なる振動数が発生することが確認されている。

以上をまとめると、約14Hzの振動周波数については、高速度ビデオカメラの映像を解析して求めた振動周波数にほぼ一致する結果となった。なお、加速度情報と映像解析結果を総括し口開け現象による振動の特徴点を挙げれば、第一に10Hz~20Hzの低周波数の発生が認められる。次に飛散直前に出現するかわらの固有振動数のピーク周波数が際立って出現している。すなわち、比較的低周波数の振動が飛散に主要な影響を及ぼすと考えられるが、飛散の直前にはかわらに固有の比較的高周波数の振動が顕著に現われることから、この固有振動数の出現は飛散の目安となり得ることがわかる。最後に、本報告で着目したかわらの飛散現象に最も大きな影響を及ぼす比較的大きな振幅を持つ低周波数の振動発生メカニズムについては、かわらの浮き上がりのメカニズム⁽¹⁾に帰着させることが出来る。すなわち、かわらの自重および屋根面上の流れによる外部圧力を加えた力と、内部圧力(かわらと屋根地の間の空間)とのバランス(大小関係)により、かわらのダイナミクスが記述される。おもに外部圧力と内部圧力が変動する結果、絶えず力の均衡を変化させ、極めて不安定な状態に陥ることによって、かわらに口開け振動が発生することになる。比較的低周波数の振動数は飛散現象に最も大きな影響を及ぼすと同時に、かわらの挙動を支配する主要要因と考えられる。

5. 結 言

本研究では、風速を静的な風圧力に換算した従来の研究に対して、かわらの飛散の前兆現象である動的な振動に着目して行ったものである。すなわち、

風洞実験により、かわらの飛散に最も大きな影響を及ぼすと考えられる比較的低周波数の振動発生メカニズムを明らかにした。具体的には、以下のことがわかった。

(1) 前回の報告⁽¹⁾で述べたかわらの飛散に影響を及ぼす屋根勾配の影響は、勾配が急になるにつれて、加速度の絶対値および変動の振幅も増加する傾向が新たに判明し、加速度情報を解析することにより屋根勾配の影響を再度確認することが出来た。

(2) 飛散直前に現われるかわらの波うち現象が観察でき、隣接する2枚のかわらに作用する力が同期したり、位相がずれたりする現象を解析することが出来た。

(3) 高速度ビデオカメラの映像解析により、飛散現象に最も大きな影響を及ぼす低周波数の振動数を同定することができ、かわらの挙動を支配する主要因(外部圧力と内部圧力とのバランス)を明らかにすることが出来た。また、かわらに作用する力の発生メカニズムも明らかとなった。

文 献

- (1) Nanba,R.,Okamoto,S.,Shibao,K.,Satou,M.,and Shibao,Y., Researchs on Vibration and Scattering of Roof Tiles, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.71, No.710(2005), pp.2407-2413.
- (2) Kawai,H.,Nishimura,G., Characteristics of fluctuating suction and conical vortices on a flat roof in oblique flow, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.60 (1996), pp.211-225.
- (3) Hazelwood,R.A., Principles of wind loading on tiled roofs and their application in the British standard BS5534, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.6 (1980), pp.113-124.
- (4) Kramer,C.and Gerhardt,H.J., Wind loads on permeable roofing systems, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.13 (1983), pp.347-358.