風洞実験によるかわらの振動と飛散現象の研究*

難波礼治^{*1}, 岡本 寛^{*2}, 芝尾金男^{*3}
佐藤正美^{*3}, 芝尾宜秀^{*3}Researches on Vibration and Scattering of Roof Tiles
by Wind Tunnel TestReiji NANBA, Satoru OKAMOTO^{*4}, Kaneo SHIBAO,
Masami SATOU and Yoshihide SHIBAO^{*4} Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University,
1060 Nishikawatsu, Matsue-shi, Shimane, 690-8504 Japan

A series of wind tunnel tests was conducted on the vibration and scattering behavior of full-sized model of roof tiles, which were used widely for roofings of Japanese wooden dwellings. 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 roof tiles were set up on the pitched roof in the downstream of the flow from the wind tunnel. The vibration of the roof tiles was measured by the Laser Doppler Vibrometry and the accelerometer, and the practical natural frequency of the roof tiles was analyzed by the method of impulse force hammer test. The motions of the vibration and scattering were observed by the high-speed video camera. Based on the consideration on the results of the measurements, there is a basic mechanism which can lead to flow-induced vibrations of the roof tiles. This mechanism is that of the so-called fluttering instability, which appears as the self-excited oscillation in the natural mode of the structure at the certain critical flow speed. It is concluded that the values of frequencies of the forced vibration for the fluttering coincide nearly with the values of natural frequencies.

Key Words: Wind Tunnel Test, Flow Induced Vibration, Flow Measurements, Roof Tiles, Vibration and Scattering

1. 緒 言

本研究は、古くから日本家屋の屋根葺き材として広く用いられてきたかわらに関する研究で、耐風性に優れたかわらの開発や施工方法の確立を目指している。

強風によるかわらの被害は、台風等で少なからず報告されており、平成 11 年の建築基準法の改正により台風等の強風によるかわらの脱落防止が従来にも増して厳しく規制されるようになってきた。かわらの飛散に関する既往の研究では、縮尺した模型瓦を用いて行われた実験が大部分である。例えば、かわらの表面圧力の分布計測とかわらの浮き上がりに関する検討から、マクロ的に観て飛散に至る限界流速等がある程度明らかとなっている^{(1)~(3)}。しかしながら、各々のかわらが飛散に至る詳細なメカニズム、すなわちミクロな運動機構は依然として不明であり、かわらに作用する風力特性については十分解明されていない。その結果、耐風性能を著しく向上させたかわら形状の設計や施工方法には結びついていないのが現状である。

本研究では、かわらが風の影響を受けて飛散する前兆現象である瓦の動揺がたつき、ずれに着目し、それらの原因を探索して有効な対策に反映させることを目的としている。文献調査等によって、この“動揺”が、風の流れに起因して起こる“流体関連振動”の一種であることがわかっている^{(1)~(3)}。そこで実際の台風の風速に相当する最大風速約 50m/s の風洞実験装置と実物かわらを用いて実験を行った。使用した計測機器は、加速度センサ、FFT アナライザ、レーザドップラ振動計である。風洞実験の他に、かわらの固有振動数をインパルスハンマを使用したハンマリング試験により測定した。一方、振動および飛散の詳細な現象を高速度ビデオカメラで撮影した。また、熱線流速計を使用し、かわら近傍の流れの計測を行った。その結果、かわらが振動し、飛散に至るまでの一連のメカニズムがある程度明らかとなった。

2. おもな記号

 θ : 屋根勾配 ϕ : 風向角 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

* 原稿受付 2004 年 10 月 13 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。

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

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。風洞の吐出口には、二種類のノズル(No.1 ノズルと No.2 ノズル)が用いられた。No.1 ノズルは、500mm×500mm で、吐出口の最大風速は約 50m/s である。また、No.2 ノズルは、1250mm×400mm で、吐出口の最大風速は約 40m/s である。流速分布はともに最大で±7%以内、乱れ強さは 0.5%以内である。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測定した。模型屋根上に敷かれた 25 枚のかわらは、風洞吐出口の下流に 5 行×5 列で配置し、図 1 に示す吐出口から最も上流の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。かわらの振動計測は、加速度センサ(ONO SOKKI NP3560, X, Y, Z 三軸同時測定可能, 10mm 角, 重量 5g), FFT アナライザ(ONO SOKKI DS-0264, 入力チャンネル数 4), およびレーザドップラ振動計(OMETRON VS 1000, レーザ出力 0.95mW)により実施した。また、別途、かわらの固有振動数をハンマリング試験によって計測した。ハンマリング試験はかわらを宙吊りにした状態とクッション材の上にかわらを設置した場合について固有振動数を計測した。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(PHOTRON, 最高フレームレート 2000fps)により撮影された。一方、風による模型屋根裏面の内部圧力の変化をモニタするために、小型圧力変換器(COPAL ELECTRONICS PA-850, 定格圧力 100kPa)を屋根

Fig.1 Experimental apparatus

裏面に取り付けた。かわら近傍の流れの測定には熱線流速計を使用した。加速度センサの写真を図 2 に、取り付け方法を図 3 にそれぞれ示す。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。X, Y, Z の三軸方向の振動を解析するために FFT アナライザにより周波数の解析を行った。その際、加速度センサは金属板によって固定されているため、かわら裏面との接触共振の可能性が懸念される。レーザドップラ振動計による計測では、模型屋根上方 1500mm に設置されたレーザによりかわら表面のほぼ中央を照射した。レーザドップラ振動計の測定精度を上げるために、対象物への照射レーザの反射強度が最大となるように光学系を調整した。高速度ビデオカメラ撮影では、飛散に至るかわらの挙動を画像により記録した。小型圧力変換器は、模型屋根裏面に穴加工を施し取り付け付けた。また、熱線流速計のプロープによりかわら近傍の流れを計測し、信号を FFT アナライザへ入力して乱れの解析を行った。

4. 実験結果および考察

4・1 かわらの振動解析 かわらの振動解析では、屋根勾配 θ を $0^\circ \sim 30^\circ$ に設定し、風向角 ϕ を $0^\circ \sim 45^\circ$ に変化させた。また、FFT アナライザのサンプリング周波数を 2048 点に設定し、分解能点数は 800 ライン、周波数レンジは 2,500Hz に設定した。平均化処理した振動波形を、風速を変化させてパソコンに記録し解析した。飛散直前のかわらの周波数解析結果を図 4(b)に示す。図 4(a)は低流速に

Fig.2 Accelerometer

Fig.3 Roof tile equipped with accelerometer

(a) Results in $U=20.0\text{m/s}$ (b) Results in $U=49.0\text{m/s}$ Fig4 Vibrational acceleration power spectrum for tile at $\theta=29^\circ, \phi=0^\circ$

おける $U=20.0\text{m/s}$ の解析結果の一例であるが、低流速においては、顕著な振動スペクトルの発生は確認されない。しかし、飛散直前の $U=49.0\text{m/s}$ における図 4(b)では、振動スペクトルのピークが顕著に現れている。特に両者を比較した場合、かわらが飛散する直前の $U=49.0\text{m/s}$ では Z 軸方向、すなわちかわら表面に垂直な方向の振動が現れ、 475Hz の明瞭な振動スペクトルのピークを記録した。その他の周波数としては、 Z 軸方向で 47Hz が出現した。なお、 X 軸(かわら表面に沿う主流方向)と Y 軸(かわら表面に沿う主流に直角方向)に関しては、 Z 軸方向に現れたような卓越した周波数のピークは出現しなかった。一方、振動振幅の計測に関しては、変位を時間で 2 回微分すれば加速度が得られる。なお、周波数が比較的高い場合には変位を計測するより加速度で測定した方が、一般的には感度よく測れることが知られている。本実験では加速度計で振動振幅を計測しており、振動振幅の大きさが周波数スペクトルのピークの高さに対応している。以上の解析結果から、かわらの表面に垂直な方向の振動が顕著に現れ、風速が増加するにつれて振動の振幅も増加する傾向が見られた。

Fig5 Impulse force hammer test for roof tile

Fig6 Frequency response function and coherence function for tiles by impulse hammer test under no flow condition

かわらの固有振動数を求めるため、ハンマリング試験を行った。かわらを吊るした状態とクッション材の上に置いた状態の測定結果は、固有振動数がともに一致し、両者の差異は認められなかった。吊るした状態の実験方法の概略を図 5 に示す。宙吊りに設置したかわらの中央部にインパルスハンマに打撃を加える。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⁽⁴⁾を求めた。ハンマリング試験結果の一例を図 6 に示す。周波数応答関数では 478Hz の周波数でピークが出現し、その他、 1.52kHz の周波数の発生も測定された。その時のコヒレンス関数には高い相関が見られた。図 4(b)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わかった。

本実験で得られた加速度センサによる振動解析の結果を検証するために、レーザドップラ振動計により周波数計測を実施した。その結果、測定誤差の範囲内では有意差は見られなかった。レーザドップラ振動計による計測のメリットは、非接触の計測が可能であること、ならびに加速度センサ自身による付加的な質量の影響を除去出来ることである。また、

デメリットとしては、かわらが振動を開始し、徐々に振幅が増大して口開け現象を起こすために、レーザの照射位置が大幅にずれ、反射光の信号を正確に受光出来なくなることである。一方、加速度センサでは振動体に直接接触させて測定するために、接触共振の問題を考慮する必要がある。本計測で得られた 475Hz, 47Hz の卓越周波数は、センサ固有の接触共振周波数(数 kHz)に比較して極めて低い周波数であった。なお、センサの取り付け器具の共振の可能性も含めて、今後詳細な検討が必要である。

4・2 かわら近傍の流れ かわら近傍の流れ、とりわけ、かわらのエッジの影響を調べるために、真横からの風、すなわち風向角が 90° で模型屋根

Fig.7 Vibrational acceleration and turbulence power spectrum for roof tiles at $\theta=0^\circ$, $\phi=90^\circ$ and $U=40.0\text{m/s}$

Fig.8 Turbulence power spectrum for a roof tile at $\theta=0^\circ$, $\phi=90^\circ$ and $U=40.0\text{m/s}$

勾配を 0° に設定した。本実験に限り風洞吐出口の下流には 5 行×6 列で実物かわらを配置した。加速度センサと熱線プローブの測定位置、ならびに計測の結果を図 7 に示す。また、かわら表面から熱線プローブ先端までの距離は 2mm から 20mm の範囲で距離を変化させて計測を行った。低流速の流れでは、加速度センサの振動波形と熱線流速計の出力波形は共に微弱である。風速が増加するにしたがい加速度センサには顕著なピーク周波数が発生するが(図 4(b)), 熱線流速計の周波数スペクトルには特定のピーク周波数は認められず、低周波域から高周波域にかけて多数のランダムなスペクトルが出現し、風洞吐出口の一樣流れと比較して極めて乱れた流れとなっていることがわかる。また、風洞吐出口の下流に、実物かわら 1 枚を別途設置し($\theta=0^\circ$, $\phi=90^\circ$), 熱線プローブによりかわら表面上の流れを計測した(図 8)。計測位置については、エッジ後方 40mm, 熱線プローブとかわら表面との距離は 2mm に設定した。図 7 で得られた結果と同様に、熱線流速計の周波数スペクトルには特定のピーク周波数の発生は認められず、低周波域から高周波域にかけて多数のスペクトルが発生し、風洞吐出口の一樣流れと比較して極めて乱れた流れとなっていることがわかった。

加速度センサの測定結果から、風速変動の作用によってかわらが強制振動現象(バフェティング)を起こし、風速と乱れの強さに依存して顕著なピーク周波数となって現れた。一方、風の流れによりかわらから渦が流出している。この渦流出の周波数は風速に比例する形で表され、理論上は断面形状のストローハル数で表現される。一方、かわらの振動と渦の関係は、かわらが流れの中に置かれた時、かわらの振動の固有周波数と渦発生周波数が一致すると共振を起こし、さらに大きな振動を引き起こすと予測される。しかし、実験で使用した実物かわらはエッジ部分において湾曲した独特の形状と鈍頭の断面を有しているために、流れがエッジ表面で剥離すると考えられる。エッジを含むかわら形状全体から考察すれば、エッジ表面で剥がれた流れがかわらに再びぶつかる再付着型の流れが形成されていると考えられる。再付着型の流れでは、再付着する流れに物体(かわら)の影響、特に振動している場合にはかわらの運動の影響が顕著に現れる。流れが物体に再付着する現象は振動によって促進されたり、また、崩壊して下流に流出するために、エッジ部分とかわら表面上には複雑な流れの場が形成されていると考えら

Fig.9 Vibrational acceleration power spectrum for roof tiles at $\theta=29^\circ$, $\phi=0^\circ$ and $U=39.0\text{m/s}$

Fig.11 Vibrational acceleration power spectrum for roof tiles at $\theta=27^\circ$, $\phi=20^\circ$ and $U=35.0\text{m/s}$

Fig.10 Vibrational acceleration power spectrum for roof tiles at $\theta=27^\circ$, $\phi=13^\circ$ and $U=40.0\text{m/s}$

れる。かわら表面上やエッジで生じる流れの詳細な様相と加速度センサより得られた卓越周波数との関連に関しては、今後より精密な解析を行う予定である。

4・3 かわらの振動と飛散の挙動 一連の風洞実験では、模型屋根の勾配を 0° から 30° に、また、風洞吐出口からの風向角を 0° から 45° まで変化させ

て実験を行った。図 9 には、異なる 2 箇所の位置に設置されたかわらの振動周波数を各々の加速度センサ(図中の①と②)で同時に測定した結果の一例を示す。屋根下流の 5 枚のかわらにはビス止め加工を施し、ビス止めの有無による耐風性の確認を別途行った。1 本のビス止めのみでは、かわら自体に多少のガタがあるために不安定で、風速の増加によって振動が発生する。実験では風速が 39.0m/s の時、かわらの先端部が上下に大きく振動する口開け現象(フラッタリング)が発生した(図 9 上図の縦縞)。また、2 個の加速度センサでは 490Hz と 475Hz の周波数の発生が確認できた(図 9 下図)。

風向角を変化させた場合の実験結果の一例を図 10 と図 11 にそれぞれ示す。この時の屋根勾配は共に 27° に設定した。ここでは、合計 9 枚のかわらにビス止め加工を施した。図 10 には、風向角を 13° に設定した時の結果を示す。最初微小な振動が発生し、口開け現象を起した後に、 40.0m/s で 2 枚のかわらが飛散した(図 10 上図の格子模様)。振動のパワースペクトルでは、Z 軸方向では 491Hz のピーク周波数の他に 69Hz , 1.5kHz の振動周波数が認められ、Y 軸方向では 443Hz の振動周波数が見られた。図 11 には、風向角が 20° におけるかわらの挙動を示す。局所的に見た場合、着目している特定のかわらは、その前列および両隣りのかわらから発生した渦や乱れの影響を受けて、かわら表面近傍の流れは極めて変動した流れになっていることが熱線流速計の計測から

Fig. 12 Effect of angle of flow direction ϕ on critical velocity of scattering for roof tiles

Fig. 13 Effect of slope angle of roof θ on critical velocity of scattering for roof tiles

わかっている。模型屋根上に敷かれたかわらは、最初ずれが生じ、次いで風速変動による微小な振動現象(バフェティング)が認められ、その後、フラッターリングを起こして、風速が 35.0m/s で飛散した。また、振動周波数は、Z 軸方向においては 483Hz のピーク周波数、Y 軸方向でも 275Hz のピーク周波数が見られた。風向角の影響としては、13° の時 40.0m/s で飛散し(図 10)、風向角を 20° に増加した時には、より低流速の 35.0m/s で飛散した(図 11)。また、これらの実験結果より振動や飛散を引き起こし易いかわらは、屋根下流の右端に局部的に集中していることがわかった。ビス止めの効果については、特に振動や飛散に弱いと考えられる屋根下流の右端のかわらに施工することが有効であると考えられる。この理由として、かわら形状の左右の非対称性、および模型屋根上におけるかわらの葺き方に起因することが考えられる。すなわち、風向角を 20° に傾けた場合には、隣接する上下、左右のかわらとの重なり具合により、風がかわらとかわらの隙間から屋根内部に侵入する。その結果、屋根裏面と野地板との間の空間の内部圧力を上昇させてかわらを押し上げる力として働くために、かわらが飛散しやすくなると考えられる。逆に、風向角が-20° の場合には、かわらの重なり具合により、隙間が流れに面してはいないために、上記のような現象は避けることが出来る。

図 12 には、かわらが飛散し始める流速におよぼす風向角の影響を示す。風向角が増すにつれ、振動や飛散を引き起こし易くなり、飛散に至る風速も低下する

Fig. 14 Measurement by the pressure transducer and its position at $\theta=29^\circ$ and $\phi=0^\circ$

傾向が見られた。一方、図 13 には、風向角が 0° の場合に、かわらの飛散流速におよぼす屋根勾配の影響を示す。屋根勾配が $\theta=13^\circ$ の時は飛散に至る限界流速は $U=47.0\text{m/s}$ で、勾配が増加した $\theta=29^\circ$ の時は $U=42.0\text{m/s}$ であった。すなわち、緩やかな勾配ではかわらは振動や飛散に比較的強く、勾配が急になるにつれ振動の発生が早まり、その結果、限界流速が低下して、飛散し易いこともわかった。屋根勾配の影響については、今後、棟を越える気流の挙動も考慮して、包括的に議論していく必要がある。

Hazelwood⁽⁵⁾ や Kramer⁽⁶⁾ のかわらの飛散に関する先行研究において、風によるかわらの浮き上がりや飛散に至るメカニズムについては、かわらと野地板との間の空間の内部圧力と、流れによりかわらに作用する外部圧力とのバランスに起因することが示されている。本実験からも、小型圧力変換器による計測結果(図 14)により、飛散に至るまでの模型屋根裏面(かわらと野地板の間の内部空間)の圧力上昇が認められた。外部圧力は、風洞から模型屋根上を流れる風により発生するが、屋根に葺いたかわらの隙間等から浸入する流れによる内部圧力の上昇により、かわらを浮き上がらせ、さらにこのかわらが外部を流れる風により飛ばされる。高速度ビデオカメラ撮影の連続写真を図 15 に示す。図 15 では、かわらが振動を開始し(写真 1)、やがて写真 2 から大きな口開け現象を起こしてフラッターリングが生じ(写真 9 まで)、写真 10 から 16 にかけて最終的に飛散に至る一連の詳細なメカニズムが明らかとなった。

Fig.15 Lifting up of roof tiles due to wind action by high-speed video camera at $\theta=29^\circ$, $\phi=0^\circ$ and $U=42.0\text{m/s}$. Images are acquired at 2,000 frames per second.

5. 結 言

本研究では、従来ほとんど注目されていなかったかわらの飛散の前兆現象である動揺(がたつき, ずれ)に着目し、風洞実験によりそれらのメカニズムを解析した。この結果、以下のことがわかった。

(1) 飛散直前のかわらの振動周波数は、ハンマリング試験で得られた固有振動数とほぼ一致した。

(2) 風向角の影響については、風向角が増すにつれ、振動や飛散を引き起こし易くなり、飛散に至る風速も低下する傾向が見られた。また、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わかった。

(3) 屋根の傾斜を変化させた場合、緩やかな勾配では振動や飛散に強く、勾配が急になるにつれて、振動の発生が早まり、その結果、飛散し易いことがわかった。

文 献

- (1) 岡田恒, 強風による屋根瓦の飛散に関する風洞実験, 日本風工学会誌, **35**(1988-4), 1-15.
- (2) 赤崎提璋・斉藤通・本田明弘・佐藤勝彦, 屋根瓦に作用する風力に関する研究, 日本風工学会誌, **58**(1994-1), 19-31.
- (3) 河井宏允・西村宏昭, 自然風中にある屋根瓦に作用する風力, 京都大学防災研究所年報, **45B-1**(2002-4).
- (4) 城戸健一, 2チャンネルFFTアナライザ活用マニュアル, (1985), 1-99, 日本プラントメンテナンス協会
- (5) Hazelwood, R.A, Principles of wind loading on tiled roofs and their application in the British standard BS5534, *J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **6**(1980), 113-124.
- (6) Kramer, C. and Gerhardt, H. J., Wind loads on permeable roofing systems, *J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **13**(1983), 347-358.