# 外部階段用ルーバーの風騒音検討

## 中山昌尚 佐々木康人

#### 概 要

外部階段用のアルミルーバー(5cmx6cm、t=0.2cm、間隔 10cm)を対象として風洞実験により発生音圧およびルーバー加 速度の計測を行った。ルーバーのタイプは、2種類:ルーバースパン1.26m(タイプ A)とルーバースパン(2.52m)の2種 類であり、風速2-20m/s、風向0、15、30度の範囲で実施した。得られた知見を以下に示す。(1)発生音は低周波数成分 (200Hz 以下):とりわけ渦発生に伴うストローハル数成分が支配的であった。(2)ルーバー結束部材の有無により、測定範囲 では、発生音に顕著な差は見られなかった。(3)既往のベランダ手摺の実験結果と比較した結果、今回の試験体は特に風 騒音の点で問題はないと判断された。(4) 上記の主原因として ルーバーの減衰定数が大きい(1次約4%,2次約1. 7%)ことが考えられた。(5)今回の試験体の第1ストローハル数は、約0.18であり、桟 1 本の場合の約1.5倍の値であっ た。

# A Wind Tunnel Study on Wind-Induced Noise on Louvers for External Staircases

# Abstract

Noise caused by wind on louver , of the type used in external staircases, is investigated through wind tunnel test.

Two types of louver are tested; one has a span of other 1.26m(Type-A)) and the other 2.56m(type-B. Type-A is identical to Type-B, except for the existence of an aluminum bar (L: 50x50x6) ,which connects louver bars at the mid-span. The louver bar is schematically an aluminum tube( 50x60x0.2mm(t)). Not only sound pressure level (SPL) but also acceleration of louver bars are simultaneously measured under wind velocity of 2 to 20m/s, and azimuth angle of 0 to 30 degree. Major findings are follows;

- 1) The dominant frequency of the observed noise is low-frequency (less than 200Hz) and is attributed to vortex shedding from louver bars.
- 2) SPL caused from type-A and B are almost same level.
- 3) It is concluded that tested louvers don't cause unpleasant noise within the tested range of wind velocity and azimuth angle, compared with the existing experimental results of several types of balustrade.
- 4) It is speculated that afore-mentioned result is attributed to the relatively high damping of the first and second modal vibrations, which are 4% (first) and 1.7%(second).
- 5) The first Strouhal number for tested multi-louver bars is 0.18, that is 1.5 times of that for the single louver bar.

キーワード: 風騒音,ルーバー,風洞実験, 渦励振,共振

#### §1.はじめに

高層集合住宅の居住性を阻害する要因のひとつとして 強風時に発生する風騒音が挙げられる。風騒音の発生 部位としては,バルコニー,外部階段の手摺やルーバー などが考えられ,風洞実験による騒音評価が行われてい る。我々も,これまでバルコニーの手摺の風騒音計測を 行っており,結果として,騒音が主として手摺子(桟)から の発生する渦による渦励振により発生すること,手摺の断 面形状,減衰定数、端部固定方法の影響が大きいことを 確認している<sup>1)</sup>。今回,外部階段のルーバーの風騒音を 風洞実験によって検討する機会を得た。本報ではその実 験概要および結果について示し、結果を渦励振の観点 から分析する。

#### §2. 実験概要

実験は(株)フジタ技術センター所属の大型境界層風 洞(断面 3m\*1.8m、吹送距離 22m、定格風速 25m/s)で 実施した。

図1から図2に試験体形状を示す。試験体は実大であり、 境界条件(支持条件)は実物と同じである。ただし、ルー バーの本数は風洞断面の制約上減らしている。対象とし たルーバーは,鉛直方向に外部階段に縦方向に固定さ れるものである。ルーバー断面は図2に示すように概ね 50mmx60mmのアルミパイプ(厚さ2mm)である。

試験体はルーバー7本(上から ~ )のユニットとし, ルーバースパンが2520mm(Bタイプ)のものと、スパン中 間に結合部材(アルミL:50X50X6)を設けたもの(Aタイ プ)の2種類とした。Aタイプは,ルーバー1本の固有振動 数を変えることを期待したものである。なお、ルーバーの アルミアングルへの固定はいずれもバネ座金を介したボ ルト1本締めである。

図 2 にルーバーの断面形状を示す。図3、図4に風洞 内への設置状況を示す。 ルーバーは 図4で上から

と呼ぶことにする。両端のルーバー固定部材の中央 部を風洞床面に固定した治具に取り付けた。取り付け部 は鉛直面内に回転可能なようにピン支持とした。また,試 験体の剛性不足を補うため,両端のルーバー両端の支 持部材を および の位置で連結する補剛部材で連結 した。結果的に、長方形の枠にルーバーを固定したことに なっている。ルーバー以外の部位は,それ自身から不用 意な騒音が発生しないように,布およびスチレンシートで カバーした。 なお、ルーパの断面性能は次である。

断面積 4.7cm<sup>2</sup> , 断面 2 次モーメント: Iyy 17.1cm<sup>4</sup> Ixx 22.1cm<sup>4</sup>

## 見かけの単位体積当たり重量:0.423gf/cm<sup>3</sup>。

計測項目は,音圧と加速度(6点)である。音圧はマイク ロフォンを風洞床下約 10cm 位置に設置して計測した。 風洞床には約 30cm の穴が設けられている。加速度は 図 4 の三角シンボルに示す位置に圧電型加速度計6台 を設置し,風方向および風直角方向について計測した。 サンプリング周波数は一旦同時に 20000Hz で収録し音 圧についてはそのまま、加速度については 2000Hz に間 引いた。

気流は一様流とし、実験風速は 2.3~20.1m/s まで 14 段階で変化させた。風向 は図 2 中に示すように試験体 に正対する風向を 0 °として 0,15,30 °の3風向とした。 測定ケース名称はタイプA,Bに対して 00A、15A などし てタイプAの風向 0 度、タイプAの風向 15 度の意味とす る。

マイクロフォンで収録した音圧の処理にあたっては,風 洞暗騒音の影響を除去した。風洞暗騒音は,マイクロフォ ンの位置を変えずに,風洞内に何も設置しない状態で収 録した音圧とした。なお,実験時と暗騒音計測時との対応 は,同一の風洞ファン回転数の状態でとることにした。

実験に先立ち,ルーバーの基本振動特性を調べるため,ハンマリングによる自由振動実験を行なった。その際,

のルーバーのスパン約 250cm の 1/4、2/2、3/4 位置 の加速度(X 方向、Y 方向 計6成分)を検出した。



図2 ルーバーの断面形状

図3 風向角の定義



図4 試験体の風洞内への設置方法



写真1 タイプBの設置状況 風上側より見る

## §3. 実験結果

3.1 ルーバーの振動モードと固有振動数、減衰

ここでは、ハンマリング時の加速度応答から求められたy 方向(図2参照:概ね風直交方向)の固有振動数、減衰定 数、振動モード形例を示す。Aタイプの中間バーのあるも のの場合、ないBタイプのものに比べると固有振動数およ び減衰が同定し難い傾向があった。同定できた振動モー ド例を、図5.1、図5.2に示す。

中間連結材のないBタイプの場合 典型的な1次、2次 モード的形が得られているが Aタイプの場合、図5.1に 見えるように典型的な1次モード相当のモード形が同定で きなかった。 2次の固有振動数はA, Bタイプでほとんど 変わっていない。なお、ルーバーごとに固有振動数は微 妙にずれていた。ルーバーの固定度の差によるものと考 えられた。固有振動数の値そのものを見ると、同定された 固有振動数は、両端単純支持梁と両端固定梁としての計 算値のほぼ中間の値を示した。ルーバーの取り付け部分 の固定度が微妙に影響していると考えられた。

減衰定数は、4%(1次モード)、1.7%弱(2次モード)と 比較的大きい値が得られた。ルーバーの取り付け方法が 減衰定数の値に影響していることが考えられた。2次の方 が1次に比べかなり小さい。

3.2 音圧

音圧の処理にあたり、風洞の暗騒音を除去することに



した。使用した風洞は 風騒音測定用の仕様ではない。 そのため、問題とすべき風騒音の発生の有無についての 判定は、マイクロフォン出力の処理結果(暗騒音成分を除 去)と実験時の音の体感を組み合わせて判断することに した。発生騒音の評価指標としては、所謂 全周波数込 みの総合指標としての音圧レベル:SPL の A 特性 (dB(A))、に加えておよび個々の特定振動数での音圧レ ベルの検討(フーリエrms スペクトルの dB 表示)、1/3 オク ターブバンドスペクトル(rms、dB 表示)などを採用した。 SPLのdB(A)や1/3オクターブバンドスペクトルのみでは 周波数分解幅が大きすぎて、特定の周波数発生が特定 し難いからである。図6は 各風速での暗騒音の 1/3 オク ターブバンドスペクトルを示す。300Hz およびその2 倍の 600Hz に共通なピークが認められる。この成分は風洞の 冷却ファンから発生している。図7は、暗騒音のSPL値(A 特性)とルーバーから発生している SPL 値(A 特性)に及 ぼす風洞暗騒音の影響度合い例を示した。風洞暗騒音 は風速が高くなると大きくなる。暗騒音を除去することで, 概ね 5dB 程度 dB(A)値が低下する。





次に タイプA およびB の各風速で発生した風騒音の 音圧レベル(db(A) 暗騒音除去後)を図8.1~8.6に示 す。





図8.1~図8.6より次のことがわかる。 Aタイプ, Bタイ プとも風速8m/s 当たりで音圧がピークをとる。風向による 違いおよびタイプによる違いは顕著でない。

図9には 音圧のフーリエスペクトル(rms)例を示す。図 中約 62Hz のピークが最も卓越している。



この周波数は風速に比例している。測定した風速が 20m/s 以下の場合,音圧の高い周波数はせいぜい 200 ~300Hz 以下にあることがわかる。またこれは高い音の 発生がないという計測中に体感と一致していた。なお、図 の300Hzのピークは前述の様に風洞の冷却ファンから生 じている成分である。

次に,各風速段階で図9のように音圧のフーリエスペク トルを描いて風速に比例する周波数成分についてより詳 細に検討する。ストローハル数(St)を次式で定義する。

$$St = \frac{Bf_1}{V}$$

B:見付け幅(ここでは 5cm) fv:風速に比例する卓越 振動数(Hz) V:風速

図9のスペクトルピークの62Hz はSt=0.18になる。

図10 は音圧の風速に比例する成分に関して,卓越振 動数と風速の関係を示したものである。風速比例成分は 複数個認められる場合がありそれをも示している。風向 0°の場合,試験体AとBで約0.18に相当するストローハ ル数が共通に認められる。Bタイプでは、1 番目のものの 約1.5倍に当たるストローハル数0.29も認められた。これ らの成分は、複数本配列したルーバーからの渦の発生に 伴うものである。この値はルーバー単体(1本)の場合のス トローハル数(0.12 程度)<sup>2)</sup>よりも大きく、1.5倍程度の値 になっている。この傾向は前出<sup>1)</sup>の手摺子(奥行/見付幅 比:d/b=2)でも認められている。そこでは、単体で約0.15 のストローハル数(文献<sup>2)</sup>では0.08と0.13)がルーバー 本数13本では0.23まで増加している。

図11 は図10に示したストローハル数成分の音圧(周 波数分解能1.2Hz、rms 音圧のデシベル表示)と風速 の関係を示したものである。dB 値は風速とともに概ね単 調に増大している。ストローハル数0.18に対応する大き さは、試験体AとBではほとんど差が認められない。

図12 は計測した全ケースで求められたストローハル 数と風向の関係を示したものである。風向による違い,試 験体による違いはそれほど顕著ではない。



風向30度までの範囲ではストローハル数に大きな変化 はないが、第1、第2のストローハル数が風向角の増大とと もに収斂傾向が認められる。 なお、今回の音圧レベルの 結果については、3.3で既往の手摺での実験結果と比 較して議論する。



図11 風速比例する卓越成分の音圧フーリエ振幅 rms 周波数分解能 1.2Hz



図 12 風速比例する音圧スペクトルから求めたストローハ ル数と風向関係

3.2 ルーバーの振動

図13 にルーバーの風向直交方向の振動の大きさと 風速関係例(風向0度)を示す。振動の大きさの指標は加 速度計位置の変位の rms(10-1000Hz)である。 この量 は、加速度のフーリエスペクトルより求めている。なお、

は、ルーバーの番号である。

変位と風速関係はルーバー位置による違いはあまりなく、変位の大きさでみるとタイプAの方がかなり小さい。

タイプBの場合、約9m/sの位置にピークがあるが、これ は、1次固有振動数と渦の発生振動数の一致(f1=34 Hz、B=0.05m、St=0.184 として 共振風速 V=9.23m/s) に伴うものである。 タイプAの場合 これに相当するピー クが認められず、変位と風速との関係は単調である。

タイプBでは、ストローハル数 0.288 渦に対する共振風 速として、1次に対して5.9m/s、2次 に対して19.4m/s が考えられる。前者のピークは認められないが 20m/s付 近での急増は後者に対応する可能性がある。



# 3.3 既往の手摺の実験結果<sup>1)</sup>との比較

最後に、今回のルーバーの発生騒音のレベルについ て、既往の手摺の実験結果1)と比較する。そこで扱われて いる手摺子(桟)と今回のものの特性を表1に示す。著し い発生音を生じた例としてTR - S3、および発生音が著 しく抑制された例としてTR - S4(端部にゴムシート挿入) を取り上げ、その音圧レベル(dB(A))を今回の結果と重 ね合わせて図14に示した。図14にdB(A)と風速の関係 を示す。TR-S3 では,風速 4m/s付近で1次固有固有振 動数および 16m/s付近で,2次固有振動数が卓越した騒 音が発生していた。この時、手摺子支持部でのガタツキ音 が発生していた。一方今回のルーバーでは、1 次固有振 動への共振的な現象は図13に見える様に起こってはい るがガタツキ音の発生はなく、2次固有振動への共振風 速(ストローハル数0.18)は約33m/sとかなり高い。

図14の音圧レベルから見て、本実験での結果は,音 の問題のなかった TR-S4 の結果と同等であると言える。 結局、今回のルーバーは、測定風速範囲では、TR-S4 と 同様 減衰定数が大きいために大きな騒音の発生がなか ったものと考えられる。

						単位体積			間隔		
	音発	f1	f2	h1	h2	重量	桟幅	奥行d			桟長さ
	生	Hz	Hz	%	%	gf/cm^3	b cm	cm	cm	d/b	cm
TR-S0		76	267	0.60	0.22	0.467	2.0	4.0	4.0	2	110
TR-S1		54	194	0.87	0.24	0.337	1.5	4.0	4.0	2.67	110
TR-S2		72	259	0.79	0.29	0.467	2.0	4.0	4.0	2	110
TR-S3		50	179	1.30	0.30	0.562	2.0	4.0	4.0	2	130
TR-S4		55	186	2.51	0.70	0.467	2.0	4.0	4.0	2	130
TR-S5		82	295	0.62	0.17	0.467	4.0	2.0	4.0	0.5	130
今回A917			112			0.482	5.0	6.0	10.0	1.2	252
今回B917		34,38	112	4.00	1.77	0.423	5.0	6.0	10.0	1.2	252
	·	著	·顕著	でなし	)						

表1 今回と既往の手摺1)の桟の特性の詳細

註 fi,hiはi次の風向直交方向の固有振動数と減衰定数



既往の結果<sup>1)</sup>との音圧レベル(A特性)比較 図 14

#### §5.まとめ

外部階段のルーバー(幅5cm奥行6cm、間隔10cm)を対 象として風洞実験により音圧およびルーバー振動の加速 度計測を行った。得られた知見を以下に示す。(1)発生音 は低周波数成分(200Hz 以下):とりわけ渦発生に伴う成 分(ストローハル数成分)が支配的であった。(2)ルーバー 結束部材の有無により、測定範囲では、発生音に顕著な 差は見られなかった。(3)既往の手摺の実験結果と比較 した結果、今回の試験体は特に風騒音の点で問題はな いと判断された。(4) 上記の主原因として 減衰定数が 大きい(1次約4%,2次約1.7%)ことが考えられた。(5) 今回の試験体のストローハル数は、約0.18であり、桟1 本の場合の約1.5倍の値であった。

謝 辞 本研究の計測時 技術センター主任研究員 漆戸幸雄氏の御協力をいただきました。ここに厚く感謝の 意を表します。

#### 参考文献

- 1) 北川まどか,増田圭司,小河利行,山昌尚 高層集合住宅 の風騒音発生機構,建築学会大会学術講演梗概集(関 東), No.20060、pp.119-120, 2001
- 2) 岡内,伊藤,宮田 "耐風構造",pp154,丸善,1977



#### ひとこと

昨年の鯉のぼりなどの風力係数の 検討と同様、風騒音という日常的な 現象を扱う機会が得られて興味深く 思っています。風騒音は日常的な現 象故に、微妙な境界条件が問題とな るようです。