高層集合住宅の風騒音に関する実測調査と基礎的考察

FULL-SCALE MEASUREMENT AND BASIC STUDY ON WIND NOISE IN HIGH-RISE APARTMENTS

吉岡 清*, 須田 健一**
Kiyoshi YOSHIOKA and Kenichi SUDA

Precedent research on wind induced noise in buildings can hardly be found, so that its physical characteristics and effects on residential amenity still remain uncertain. Authors conducted full-scale measurements on wind noise in four high-rise apartments and discussed on the subjects as follows, 1) relation between Leq of wind noise and mean windspeed, 2) effectiveness of gust factor and wind direction on the relationship between Leq and windspeed, 3) difference in wind noise among rooms and buildings. Also definitions of "Effective Windspeed V_e ", "Control Windspeed V_c ", and " N -value Equivalent Windspeed V_{N-**} " are presented as quantitative parameters to evaluate its effect on amenity.

Keywords : wind noise, high-rise apartment, sound environment, living amenity, aerodynamic noise
風騒音, 高層集合住宅, 音環境, 居住性, 空力音

1. はじめに

建築物まわりの気流（風）によって発生する音が、その内部、あるいは、周辺に居住する人々に及ぼす影響を明らかにし、その制御法を知ろうという問題設定は、これまであまり明確には行われていない。建築史上も、おそらく風によって発生する音に注目し、それに対処したという記録は、近年の高層化建築の出現以前では、見だし難いものと思われる。これは、かつて我々が確保してきた住環境が、風によって発生する音が問題となるほど、厳しい条件下にはなかった、ということであろう。しかし、近年、都市の高密化が進められた結果、住宅の高層化、海岸際への展開と、風環境的に非常に厳しい領域への居住域の拡大が余儀なくされる状況にあり、この風騒音の問題も、しだいに顕在化してきているようである。最近のアンケート調査¹⁾では、高層住宅における風騒音の居住性障害を、上位にランクづけるものも表われてきており、その存在については徐々に知られてきている。しかし、実際の障害程度について、公表された例は見あたらず、特異的な事例、あるいは、強風時には一部で避けられない要因と考えられてきたようである。

既往の研究事例としては、類似した問題設定をしているものに、Berhault の報告²⁾があり、主要な風騒音の音源を列挙してその周波数特性を明らかにした点や、風速

と騒音との比例関係（6乗則）を指摘した点などが、注目される。しかし、対象建屋が2棟と少なく、近年の我が国の住宅とは異なる設計条件下での実測値であり、そのまま参考にはすることはできない。また、風や音の変動性を考慮せず、瞬間値で比較している点などに問題を残した。板本³⁾、十倉⁴⁾、西村⁵⁾は、それぞれ、ルーバーやバルコニー手すりなど、特定部位を対象として風に起因する発生音の物理性状を明らかにしている。しかし、それら以外の部位からの発生を含めた風騒音全般に対する、それらの位置づけについては、明らかにされていない。

本研究は、住環境の調整に関連する要因としての「風騒音」の位置づけを明確にし、その影響程度や、重要性を明らかにすることを第一の目的とし、対策が必要な場合には、その低減・防止方法を明らかにすることをめざしている。上記したように、これまでの研究例は極めて少なく、既存の実験的、理論的研究手法が、そのまま、この目的のために適用されるとは考えられない。したがって、まず実測的手法により、風騒音の居住性障害要因としての実態が明らかにされ、その物理的特徴に関する概略的知見がまとめられたうえで、効果的な研究手法が検討されるべきといえる。本報は、このような考えから、これまで筆者らが実施してきた4つの高層集合住宅

* 佐藤工業中央技術研究所

** 佐藤工業中央技術研究所 主席研究員・博士(工学)

Engineering Research Institute, Sato Kogyo

Senior Research Eng., Engineering Research Institute, Sato Kogyo
Dr. Eng.

における風騒音の実測調査結果についてまとめ、これまでほとんど知られていない風騒音の物理的特徴の概要についてまず考察する。ついで、居住性に及ぼす風騒音の影響評価をめざした試みとして、風騒音の影響範囲を定量化するための指標を検討し、実測結果に適用してその意義を考察する。

なお、「風騒音」という語は、これまで明確に定義されていないが、ここでは、風と建築物との関係において発生する音の総称として用いるものとする。従来、「風切り音」「笛吹き音」などの語が、発生原理や部位を特定して用いられてきたが、上記のような問題設定をしたときに、それらを総称する概念が必要と考えたからである。また、居住環境に影響する要因としてのとらえ方を示すため、騒音という語を付して定義する。

ただし、本報の内容は、風を主因とする空力音、気流音に限定することにする。したがって、風の影響によって副次的に発生する「きしみ音」や各種固体衝突音などの音（空力音以外の音）は「2次的発生音」として扱い、本報でいう「風騒音」とは区別することとする。これは、2次的発生音が、それぞれ独自の解決方法を持ち、本報で設定した問題の解決とは関連性が薄いと考えられることによっている。しかし、「2次的発生音」であっても、風とのあいだに強い因果性を持っていたり、「風騒音」と同様のアプローチが必要な場合なども考えられ、広義の風騒音の中には、それらを含むものである。本報で述べる実測調査は、2次的発生音や、ある特定部位からの発生音が卓越することはなく、発生源が容易に特定できない場合のものとした。上記した定義に基づけば、狭義の風騒音といえる。特定部位からの発生音が卓越した場合のデータは、本報には含んでいない。

2. 風騒音の実測方法

2.1 実測対象建屋

実測対象は、以下の条件を満たすものを選んだ。

- ① 高層集合住宅（軒高が約25 m以上）であること。
- ② 周囲に風の障害物となる高層構造物がないこと。
- ③ 交通騒音や工場騒音などの環境騒音レベルがあまり大きくないこと。
- ④ 一般的な建築設計規準に基づいていること。

本報では、図-1、表-1にまとめた4つの建屋における実測調査結果について述べる。

「建屋A」は、周囲が低層住宅地となっている郊外の10階建て集合住宅で、図-1のように、雁行型のプランを持つ。実測時の平均風向は図-1に示すが、最上階は、風上側にあたる一住戸分がセットバックしている。「建屋B」は、周囲に開けた草地が続く13階建ての集合住宅で、「建屋A」に類似した雁行型の平面を持っている。「建屋C」は、やはり、周囲が低層住宅地となっている

図-1 4つの実測対象建屋の概要

11階建ての集合住宅で、2住戸分ずつ雁行した平面形となっている。立面的には、強風時の風上側（西側）で最上階一住戸分、東側では、8階レベルより2住戸分ずつ、セットバックしている。「建屋D」は、海岸線より約50 m離れた位置にある14階建ての集合住宅であるが、地盤面の高さが変化しているため、強風時の実測を行った南面の軒高は約29 m程度となっている。

いずれの建屋でも、居室に面してバルコニーがあることや、アルミ製サッシ（JIS A 4706に基づく気密性2等級を満たすもの）を用いていること、外壁には空調配管用や換気用のスリーブがあること（実測時には閉鎖

表-1 実測建屋の概要

建屋	階数	軒高 (m)	風速計 高さ(m)	計測住戸
A	10	25	9.4*	9階
B	13	39	46	13階
C	11	32	38	7階(701号室) 9階(901号室) 10階(1001号室)
D	14	29	40	10階(1001,1004号室) 14階(1401,1404号室)

*) 建屋頂部高さ (27m) に補正して使用。

状態とした) など類似点がある一方で、室内の細部や窓面積、バルコニーの詳細など、建屋ごとで異なった条件となっているものもある。「建屋A」と「建屋B」では、図-1の各1室を測定対象とした。「建屋C」の3つの対象住戸は、平面的に同一の位置にあり、サッシの気密性や室内の仕上げなど、建築仕様が同一である。「建屋D」の4つの対象住戸は、サッシの気密性と室内の仕上げは同一であるが、室の大きさは異なる。

2.2 風向・風速の実測

「建屋A」では、建屋から南西の方向約1kmにある消防署屋上に設置されたプロペラ型風向風速計の記録を用いた。このときの測定高さは約9.4mであるが、風速の鉛直分布にべき乗則(べき指数0.3)を仮定して、建屋頂部高さ(27m)の平均風速に換算した。消防署付近も低層住宅地であり、このデータによって、代表流れが把握されているものと判断した。「建屋B」では、ペントハウス上部に熱線式流速計(リオン製AM-20)を設置して風速をデータレコーダに収録した。センサーの位置は、建屋の最高高さ点(ペントハウス上端)から約2mの高さとした。この実測では、強風時にのみデータを収集したが、その間に風向の変化はほとんど無かった。「建屋C」と「建屋D」では、ペントハウス上部に、光電式風向風速計(牧野応用測器製VF 216およびAF 860)を設置し、評価時間内の平均風向・風速、瞬間最大風速およびそのときの風向を記録した。センサー部は、最高高さ点(ペントハウス上端)より約1.5m上部に位置するようにした。なお、以下の結果では、測定住戸の高さが異なる場合も、風速の高さ補正はせず、上記した建屋頂部での風向・風速で表わしている。

2.3 風騒音の実測

様々な部位からの発生音が重畳された総量的な騒音としての風騒音の特性把握を目的とし、その時間平均的な性状までを対象としたため、主として居住域内、すなわち、居間や寝室内で騒音を測定した。強風時の風騒音の

影響が顕著と考えられる住戸(風上側の最上階の住戸など)を選定し、風向側の室の中央に騒音計を設置して測定した。マイクロホン高さは1.3mとした。

「建屋A」では、騒音計(リオン製NL-01)の自動測定機能により、毎正時10分ごとの等価騒音エネルギーレベル L_{eq} 、時間率騒音レベルおよび最大・最小騒音レベルを計測した。いずれもA特性での値とした。「建屋B」では、騒音計の出力を流速計の出力とともにデータレコーダーに収録した。「建屋C」と「建屋D」では、オクターブバンドの実時間分析機能つき騒音計(リオン製NA-29)を用いて、10分間ごとのオクターブバンド L_{eq} (31.5~8000Hz)およびA特性、平坦特性の全帯域 L_{eq} を連続記録した。

このように、建屋ごとで異なる計測法を用いたのは、風騒音の実測のために確立された方法がなく、初期の実測(建屋A、B)で用いた方法を改善する形で、計測法を検討する必要があったことによっている。

なお、実測は、建物の新築工事期間中の最終時期、すなわち、建屋の内装を含めたすべての工事がほぼ終了し、各住戸の居住者が入居する前の状態を利用して行った。したがって、住戸内には家具などは設置されておらず、計測中に、隣戸や上下階の発生音、あるいは、居住者自らが発する音などの影響は含まれない。また、このような実測期間の制限があったため、各建屋での実測時の風向は、限られたものでり、本報で示すデータは、図-1に示した風向のものである。

3. 風騒音の実測結果と考察

3.1 風騒音の存在

図-2は、「建屋C」の10階住戸(1001号室)における室内騒音と、建屋頂部風速の時間変化を示したものである。騒音は、北側のコンクリート手すりつきバルコニーに面した室内で計測した平均時間10分のA特性および平坦特性の L_{eq} で表示している。風速は、同じ平均時間の平均風速 V_{mean} 、および瞬間最大風速 V_{max} を表示している。約3日間にわたる連続計測の結果であるが、この中には、ほぼ北を中心として風向が一定した強風の部

図-2 室内騒音と風速の時間変動の測定例(建屋C, 10階住戸)

図-3 室内騒音と平均風速の関係 (建屋C, 10階住戸)

分が含まれている。また、交通騒音や住戸近辺の人為的騒音もそのまま含まれている。

これを見ただけでも、風速の増減にともなって、 L_{eq} が増減する部分が認められ、両者の強い相関、すなわち、風によって発生していると考えられる騒音の存在が確認できる。これをもっと詳しく検討するため、この実測値のすべてを、横軸に平均風速 V_{mean} の対数、縦軸に L_{eq} をとった散布図の上にプロットすると図-3のようになった。図-3では、 L_{eq} と V_{mean} との間に相関のある部分 (高風速域) とそうでない部分 (低風速域) が区別でき、前者は風によって発生する音、すなわち風騒音をプロットしたものであり、後者は、それ以外の音、すなわち、この室における交通騒音などの暗騒音をプロットしたものと考えられる。

以上のような風騒音の存在を示す測定結果は、4つの建屋のすべてにおいて確認された。風騒音の大きさは、風速とともに増大するが、図-3では、平均風速 15 m/s のとき、45 dB(A) を越える大きなものとなっている。

3.2 室内の風騒音と平均風速の関係

(1) 風騒音の L_{eq} と平均風速の関係に関する実測結果

図-4は、「建屋D」におけるオクターブバンドごとの L_{eq} と V_{mean} の関係を示したものである。10分平均風速が8~25 m/sの強風時のデータに限定して示している。図-3よりも非常にデータの相関がよく、 $E \propto V_{mean}^{\alpha}$ (E : 室内騒音の音響エネルギー密度) の関係、すなわち、「べき乗則」が確認できる。べき指数 α は、平坦特性で4室ともほぼ5.5、A特性ではそれより大きく、6~7となっている。また、参考として、オクターブバンドごとの α をみると、5~6の値を中心として、4~6の範囲にばらつく結果となっている。ただし、4室とも2 kHzではほぼ7、4 kHzでは8~9の大きな値と

31.5 (□)、63 (+)、125 (△)、250 (×)、500Hz-5dB (○)
1kHz-10dB (+)、2kHz-15dB (△)、4kHz-20dB (×)

図-4 強風時の風騒音と平均風速の関係 (建屋D)

なっている。

強風時の風騒音におけるこのような「べき乗則」は、4つの建屋のすべてにおいて確認されたが、A特性および平坦特性でのべき指数の観測値は、建屋・室ごとで異なり、3~7の値となった。

また、1001号室の250 Hzや500 Hzなど、べき乗則

に対する回帰直線の定数項がある風速値の前後で変わる場合が認められる。これに類似した風騒音のやや複雑な変動性状は、Berhault の報告にもみられるが、以下では、概略的な傾向をつかむため、上記した「べき乗則」に注目して回帰直線を求め、考察を進めている。

(2) 風騒音の平均方法

風騒音は、風の条件に対応して変動する騒音であるため、その物理性状を評価するためには、時間軸上の平均操作が不可欠となる。これまで、風騒音を風との関係において平均するための適当な方法とその裏付けについて検討された例はない。ここでは、風と風騒音の時間平均を代表する値として、何が適当かについて検討する。

空力音響学によれば、気流の湧き出し、変動力、内部粘性応力に対応して、音響単極子、双極子、四重極子が形成され、代表流速 V とそれぞれの音響出力 W_m , W_d , W_q との間に、次のべき乗則が成立する⁶⁾。

$$W_m \propto \rho V^4 L^2 / c \quad (1a)$$

$$W_d \propto \rho V^6 L^2 / c^3 \quad (1b)$$

$$W_q \propto \rho V^8 L^2 / c^5 \quad (1c)$$

ここに、 ρ は流体の密度、 L は代表長さ、 c は音速である。

しかし、本報でいう風騒音は、単一の音源だけを対象とするのではなく、様々な部位で様々な発生機構で発生する音が重畳されたものを対象としていることから、発生機構に応じたべき指数を持つべき乗則を仮定することは適当ではなく、(1a)~(1c) 式のような単純な関係は成り立たないと考えられる。しかし、前述のように、風騒音の実測値は、ほぼべき乗則に従っているものと見られる。そこで、各瞬間における室内の音響エネルギー密度 $E(t)$ と代表流速 $V(t)$ との間に、(2) 式の関係が成り立つものと仮定して、 E と V の時間平均値の間に成り立つ関係について考察する。

$$E(t) = K \cdot V(t)^\alpha \quad (2)$$

ここに、比例定数 K は、発生音の強度、受音点までの伝搬性状を総合的に表す係数で、建屋や室、あるいは、風の条件などの関数と考えられる。

E の時間平均値として、 L_{eq} を用いると、(3) 式となる。

$$\begin{aligned} L_{eq}(t) &= 10 \log \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} E(\tau) / E_0 d\tau \\ &= 10 \log \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} K \cdot V^\alpha(\tau) / E_0 d\tau \quad (3) \end{aligned}$$

$V(t)$ にはエルゴード性が仮定できるとすると、

$$= 10 \log \int_{v_1}^{v_2} P(V) \cdot K \cdot V^\alpha / E_0 dV \quad (4)$$

となる。ここに、 T は平均時間、 $E_0 = 10^{-12} (W)$, (v_1 , v_2) は、 $P(V)$ の定義域である。また、 $P(V)$ は、風速が V となる確率密度を表わし、自然風ではある程度大きな T に対して、(5) 式のガウス分布に従うと仮定してよ

い⁷⁾。

$$P(V) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(V-\mu)^2/2\sigma^2} \quad (-\infty < V < \infty) \quad (5)$$

(5) 式を用いて (4) 式を計算すると、

$$\begin{aligned} L_{eq} &= 10 \log \int_{-\infty}^{\infty} \frac{K}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{-x^2/2\sigma^2} \cdot (x+\mu)^\alpha / E_0 \cdot dx \\ &= 10 \log \mu + L_k + L_{cor} \quad (6) \end{aligned}$$

$$L_k \equiv 10 \log K / E_0 \quad (7)$$

$$L_{cor} \equiv 10 \log \left[1 + \left(\frac{\alpha}{2} \right) \left(\frac{\sigma}{\mu} \right)^2 + 3 \left(\frac{\alpha}{4} \right) \left(\frac{\sigma}{\mu} \right)^4 + \dots \right] \quad (8)$$

となる。ここで、 $\alpha \in \text{Natural}$ とした。(6) 式の第1項および第2項は、 V の集合平均 μ と L_{eq} との間のべき乗則を示しているが、これに、第3項、(8) 式に示すような修正項がついていることに注意を要する。以降、(6)~(8) 式の μ (集合平均) を V_{mean} (時間平均) に置き換えて用いる ($V(t)$ のエルゴード性より)。

(8) 式の L_{cor} は、風速の乱れの強さ (σ/V_{mean}) および α の関数であり、このことから、風騒音の L_{eq} は変動風の乱れの強さの関数ともなっていることが分かる。 σ/V_{mean} が V_{mean} に依存せず一定と考えられる場合には、修正項 L_{cor} の V_{mean} に対する依存性がなくなり、べき乗則の定数項 L_k と、観測上区別がつかなくなる。このとき、 L_{eq} と平均風速とのあいだには、 α をべき指数とし $L_k + L_{cor}$ を定数項としたべき乗則が成立する。

自然風に関する既往の研究によると、 σ/V_{mean} の値は、低風速域では多少大きめの値になるが、風による様々な影響が生じ始める高風速域では、地表面の粗度や観測高さによって、ほぼ一定した値になることが知られている⁷⁾。通常の建物が建設される粗度や高さにおいては、 $T=600 \text{ sec}$ の場合、 $\sigma/V_{mean}=0.1 \sim 0.3$ 程度の値になるとされているため⁷⁾、 L_{cor} の値は、図-5 のようになる。以上より、(2) 式が仮定できるとき、変動風の代表値として平均風速を用い、風騒音を L_{eq} で評価すれば、時間平均に対してもべき乗則が成り立つことが分かる。このとき、べき乗則のべき指数 α と定数項 $L_k + L_{cor}$ に

図-5 べき乗則に対する補正項 L_{cor} の値

よって、風騒音と風速の関係が整理できることになる。 α は風騒音の発生機構に関連するパラメータであり、定数項は、発生源の数や強度、あるいは伝搬経路上の減衰性状を総合的に表わした L_k と、風の乱れの強さに応じた値を持つ L_{cor} の和となっている。

平均時間 T は、 $P(V)$ の分布や乱れの強さに影響する因子として位置づけられる。風騒音の実測にあたり、適当な平均時間を設定せねばならないが、本報では $T=600$ secを標準的なものと考えたことにした。その理由は、わが国の気象官署による風観測において、この平均時間が一般的に用いられており、多くのデータの蓄積があること、および、音環境の評価時間としても適当な長さを持っていること、さらに、この時間内において風速が(5)式で表わされるガウス確率過程に従うと考えられていること、などである。もちろん、音環境評価という観点から、より長時間にわたる L_{eq} や他の指標に変換することが有効になる場合も考えられる。

なお、(1)式のべき乗則は、音の全帯域値について成り立つものであり、オクターブバンドごとには成立しない。これは、ある特定の発生機構にのみ注目すれば、風速が変わることにより卓越周波数がバンド間を移動する現象が生じるためである。一方、音環境計画の観点からは、周波数帯域別の音場の把握は必須の条件であり、風騒音の物理性状も、オクターブバンドごとで評価されることが望ましい。このような観点から図-4の結果を見ると、各オクターブバンドごとでも、上記したべき乗則が十分精度良く成立していることが分かる。これは、本報でいう風騒音が、単一の発生源によるものではなく、多数の音源からの寄与が重畳された音場であると考えられることを示すものである。

3.3 風騒音におよぼす変動風パラメータの影響

風騒音の L_{eq} と平均風速 V_{mean} のあいだには、(6)式のべき乗則が成り立ち、実測結果も、これに基づいて整理されることが分かった。ここでは、実測結果への(6)式の適用性をより詳しく知るため、実測結果に含まれる平均風速以外の、乱れの強さなどの風の変動性の影響がどれほどであるかの検討を行った。

まず、風の乱れの強さより、より一般的に観測されている評価時間内の瞬間最大風速 V_{max} を用いたパラメータのガストファクタ G

$$G = V_{max}/V_{mean}$$

を求めて、風の乱れの影響に関する考察を進める。 G の集合平均は、風の乱れの強さ σ/V_{mean} の集合平均と、一義的關係にあると考えられる⁷⁾。また、観測時間内の風向の分散のようなパラメータも、風の変動に関連して、重要と考えられるが、あまり一般的に計測されていないため、ここでは、平均風向 D の卓越風向(測定期間中の最頻風向)からのずれを用いて、風騒音に及ぼす影響

図-6 風騒音の回帰式の残差とガストファクタ、平均風向の関係(建屋C, 10階住戸)

を検討した。平均風向が大きく異なれば、当然風騒音は変化すると考えられるため、ここでは、測定期間中の最頻風向付近の風のみを対象としたときの、最頻風向からのわずかな風向の偏差が、風の変動性を代表して風騒音に関係するかを検討することとした。したがって、平均風向 D は、測定期間中の最頻風向を0とし、時計方向に正の数値を与える方法で数値化し、 $-\pi/8 \sim \pi/8$ にはいるデータのみを対象として解析した。なお、実測建屋の周辺状況は、方位によって同一とみなせるため、 G は D に対して独立な変数と考えた。

実測値の L_{eq} と V_{mean} の間には、図-3, 4に示したようなべき乗則が観測され、散布図上に(6)式と同じ形をした回帰直線

$$L_{eq} = c_0 + c_1 \cdot \log V_{mean} \dots \dots \dots (9)$$

が引けるが、これと各データとの残差を、 G および D をパラメータとして表示すると、図-6のようになった。これより、残差は、まだランダムとなっておらず、 G や D に対する依存性が認められる。これを確認するため、重回帰分析により、目的変数 L_{eq} に対する説明変数として、 V_{mean} 以外に G や D を加えることが有効かどうかの検定を行った。このとき、重回帰式として、(10)式を用いた。

$$L_{eq} = c_0 + c_1 \cdot \log V_{mean} + c_2 \cdot G + c_3 \cdot D \dots \dots (10)$$

G や D の有効性が、周波数帯域や、平均時間、室位置などによって、どう異なるかを見るため、オクターブバンドごとの L_{eq} を対象とし、「建屋C」における7, 9, 10階の風上側住戸での測定値を用いた。

表—2 ガストファクタの有効性の検定結果

室番号	平均時間	オクターブバンド中心周波数 (Hz)							
		31.5	63	125	250	500	1k	2k	AP dB(A)
1001	10分	○	○	○	○	○	○	○	○
1001	2分	○	○	○	○	○	○	○	○
1001	1	—	—	—	○	—	—	—	○
901	10	○	○	○	○	○	○	○	○
701	2	—	—	○	○	—	—	—	○
701	1	—	—	—	—	—	—	—	—

○ 有意水準5%で有意

表—3 風向の有効性の検定結果

室番号	平均時間	オクターブバンド中心周波数 (Hz)							
		31.5	63	125	250	500	1k	2k	AP dB(A)
1001	10分	○	○	○	○	○	○	○	○
1001	2分	—	○	○	○	○	○	○	○
1001	1	—	○	○	○	○	○	—	○
901	10	○	○	○	○	○	○	○	○
701	2	—	—	○	○	○	○	○	○
701	1	—	○	○	○	○	○	○	○

○ 有意水準5%で有意

表—2, 3 に解析結果を示す。これより、ガストファクタは平均時間により有効性が変わり、 $T=60$ sec 程度の短い平均時間では有効でないのに対して、 $T=600$ sec 程度の平均時間では有効であることが分かる。ただし、特定の建屋（特定の地点に立つ建築物）を対象とした場合は、実現される G の範囲が限定されるため、本例のように、 $G=1.7\sim 2.2$ （実測値の 80% が入る範囲に相当）まで変化したとしても、ガストファクタの影響度は、2 dB 以下の差異が生ずるだけの小さなものとなっている。また、「建屋 D」における実測結果でも、ガストファクタの影響程度は最大 2 dB 程度となった。

一方、平均風向 D は、31.5 Hz などの低音域で有効でない結果を与える場合がみられるほか、ほぼどの条件でも説明変数として有効という結果である。平均風向の影響程度は、 $D=0\sim\pi/8$ まで変化しても 2 dB の差異が生ずるだけの小さなものとなっている。「建屋 D」では、強風時の風向は一定していたため、この分析は行わなかった。

以上より、実測結果からも風の変動性状が風騒音に影響することが確認された。ただし、その影響程度は、特定建屋を対象とした場合には、あまり大きなものではないことが示され、風騒音の評価上風の変動性状をどこまで詳しく把握しておくべきかに対する示唆を与えている。すなわち、建築的条件を含めた他の要因による効果を精度良く予測可能となった時点で、これらの変動風パラメータを考慮すれば良いものと考えられる。このような主旨から、以降では G や D の効果を考慮しない単回帰式（(9) 式）で実測結果を代表するものとする。

3.4 同一建屋内の室位置による風騒音の差異

風騒音に及ぼす建築側の条件の影響を見るため、まず、同一建屋内の異なる室における風騒音の比較を行う。図—7 は、「建屋 C」の 3 室の L_{eq} を比較したものである。

F : 平坦特性 A : A 特性

図—7 同一建屋内の室位置による風騒音の差異（建屋 C）

F : 平坦特性 A : A 特性

図—8 同一建屋内の室位置による風騒音の差異（建屋 D）

3.2, 3.3 で述べたオクターブバンド L_{eq} と V_{mean} の回帰式を、それぞれの室で求め $V_{mean}=20$ m/s を代入したときに得られたものである。図—8 は、同様の比較を「建屋 D」の 4 室で行ったものである。

図—7 をみると、1001 号室と 901 号室では差異は小さく、701 号室は、これらと比較して、250 Hz と 500 Hz で約 6 dB の差異があるほかは、3 dB 以下の差異になっている。図—8 では、東側端部住戸の 1001 号室および 1401 号室の結果が、高さが異なるにもかかわらず、ほぼ同等になっており、最大でも 2 dB 以下の差異になっている。建屋端部の最上階より下層 4 階程度では、あまり大きな差異が生じないことがわかる。

3.5 建屋による風騒音の差異の概略的傾向

図—9 は、「建屋 A」から「建屋 D」における実測結果を比較したもので、A 特性と平坦特性のべき乗則を仮

図—9 風騒音の建屋による差異の比較（建屋Cは1001号室，建屋Dは1401号室）

定した回帰直線（(9)式）で表示している。「建屋A」は、平坦特性での実測を行わなかったため、A特性の結果のみ示している。同一建屋で複数の室の実測を行った場合には、最上階風上側などの最も風騒音が大きくなった測定結果で建屋の代表とした。すなわち「建屋C」は1001号室、「建屋D」は1404号室で代表した。また参考として、Berhaultの実測値²⁾（平坦特性）も併せて示した。各建屋とも、強風時の単一の風向に対する実測結果であり、建屋と風向との関係はそれぞれで異なっている。

これを見ると、 $V_{\text{mean}}=10 \text{ m/s}$ の場合に、最大のものと最小のものとの、平坦特性で 18 dB、A 特性で 14 dB (A) の差異となっている。

これらの結果は、風騒音の発生側の条件（風の条件および建築配置、外形など）と音の伝搬上の条件（建築外皮の遮音性や室内の吸音性など）のそれぞれに基づいて生じた風騒音の差異を、総合してその総和として比較したものであり、個々のどの条件によるものであるかは、ここでは判別できない。しかし、これらの条件が変わることによる風騒音の差異が、実際にどれほどのものであるかの一端を示している。

4. 風騒音の居住性におよぼす影響評価のための指標

4.1 風騒音の影響風速と支配風速

風騒音の居住性におよぼす影響を示し評価するためには、強風時におけるその物理性状を知ることが重要であるが、風騒音の影響がおよぶ範囲や条件を明らかにすることも、これと等しく重要な課題と考える。したがって、前章で示したように、べき乗則のべき指数や定数項により強風時の風騒音を定量化することに加えて、適当な指標を用いて、風騒音の影響範囲や程度を定量化することも課題になる。

図—2, 3 に、強風時の風騒音の部分を含んだ約 3 日間にわたる室内騒音の実測結果を示したが、これに類似した結果は、各建屋において得られた。したがって、室内における騒音の L_{eq} と風速の関係は、図—3 を一般化して示した図—10 のようになると考えられる。図—10 には、室内の音環境に対する風騒音の影響の現われ方が示されている。すなわち、室内の L_{eq} と風速との間に相関のない低風速の領域があり、これより大きな風速になると、 L_{eq} が風速に対応したある一定レベル以下に下がらないようになる。そして、さらに高風速域では、 L_{eq} と風速との間に強い相関がみられるようになり、前章で示したべき乗則が成立するようになる。これらの 3 つの領域は、図—10 の 2 つの風速値 V_e , V_c により区分できる。 V_e 以下では、風騒音の発生が弱いため、 L_{eq} は風速と無関係に分布して、室内の暗騒音の変動範囲を示しているのに対し、 V_e 以上では風騒音の発生がより強くなると考えられ、これが室内暗騒音の最低レベルを超えて影響をおよぼし始めると考えられる。さらに高風速域の V_c 以上では、風騒音が主要な音源になり、室内の音環境を支配するようになる。この意味で、 $V_e \leq V_{\text{mean}} < V_c$ の領域を風騒音の影響域、 $V_c \leq V_{\text{mean}}$ の領域を風騒音の支配域、また、 V_e , V_c を風騒音の「影響風速」、「支配風速」と呼ぶことができる。 V_e , V_c の 2 つの指標は、風騒音の居住性におよぼす影響範囲を定量的に整理してゆくために、有意義なものと考えられる。

図—10 風騒音の影響域と支配域の概念図

実測結果から V_e , V_c を求めると、「建屋C」の3室では、ほぼ $V_e=4$ m/s, $V_c=10$ m/s, 「建屋D」の4室においては、室により暗騒音の上端レベルに差異があり、 $V_c=13\sim17$ m/s となった。暗騒音の上端, 下端レベルは、 L_{eq} の5% および95% 分布統計量を用いた。「建屋D」においては、暗騒音の下端レベルが、騒音計の最低レンジ以下となり、 V_e の算出はできなかった。

4.2 風騒音の N 値相当風速

影響風速や支配風速は、室内暗騒音レベルにより変わるものであり、風騒音の影響評価のため有意義であると考えられるが、これとは別に、暗騒音レベルにはとらわれずに、風騒音を一定の規準値と比較することが必要な場合も考えられる。交通騒音や設備騒音などと同様に、風騒音の低減・防止計画をあつかうためには、室内騒音の規準値と風騒音の大小が問題になる。しかし、建築の条件を定めても、風騒音は風の条件に依存する変動性の騒音であるため、規準値との単純な比較には意味がなく、規準値を超える風騒音の発生頻度による評価が必要になる。このためには、まず、規準値を超える風の条件を求め、ついで、その条件を満たす風の発生率を推定するという手順をとることが基本となる。後者の手順に対しては、自然風に関する研究成果の適用が可能と考え、ここでは、前者の手順に対して必要な定量化のための指標について検討する。

ある規準値を超える風騒音となる風の条件は、風騒音に影響する変動風のパラメータによって定義される。このとき、3章の結果を参照すれば、最も主要なパラメータは平均風速であり、これにガストファクタあるいは乱れの強さ、および風向（卓越風向からの偏差）が、副次的なものとして加わる形となる。簡単のため、副次的な影響を無視すると、ある規準値を超える風騒音となる風の条件は、平均風速によって定義できることになる。

室内騒音の規準値として、日本建築学会規準の N 値による規定⁸⁾を参照し、これに相当する風騒音となる風速を「 N 値相当風速 V_{N-**} 」と呼ぶことにする。 N 値はオクターブバンドごとの値で規定されているため、 N 値相当風速はオクターブバンドごとで求めた V_{N-**} の最小値として定義される。これらの指標により規準値を超える風騒音となる風の条件が定量化でき、風騒音の居住性におよぼす影響評価に役立てることができる。また、オクターブバンドごとの N 値相当風速によって、風騒音の周波数ごとの影響評価が可能になり、対策を優先すべき周波数が明確に指摘できるようになる。

図-11 は、「建屋C」と「建屋D」におけるオクターブバンドごとのべき乗則を仮定した回帰直線を用いて、日本建築学会規準の1級である $N-30$ となる風速 V_{N-30} を求めて、比較したものである。「建屋C」の3室では、ほぼ $V_{N-30}=6$ m/s, 「建屋D」の4室では、 $V_{N-30}=11\sim$

図-11 オクターブバンドごとの N 値相当風速 V_{N-30} の建屋、室による差異

12 m/s となった。また、 N 値を規準とする場合、250 Hz 以下の成分が、低減・防止対策上重要になる場合は少ないようであることが分かる。また、500 Hz 以上の高音域では、同一建屋内の室による差異よりも建屋による差異が大きく表われているのに対し、これより低音域では、室による差異と建屋による差異が同程度になっていることが分かる。

本節および3.4, 3.5では、風騒音の建屋や室位置による差異の実測結果を示した。これにより、高層集合住宅における風騒音の実態の一端が知られ、その概略傾向が明らかになったものと考えられる。ただし、風騒音におよぼす建築的要因の影響を、すべて含んだ形で比較しているため、各要因の効果を定量化することが今後の課題となっている。

5. まとめ

高層集合住宅における風騒音の実態を、10~14階建ての4つの建屋における実測調査により明らかにし、その大きさの程度と物理的特性の概要について検討した。

その結果をまとめると、以下ようになる。

- ① 室内における10分平均の等価騒音レベル L_{eq} と風速の時間平均を長時間にわたり連続計測した結果、平均風速 V_{mean} と L_{eq} とに強い相関のある部分が認められ、風によって発生していると考えられる騒音、すなわち風騒音の存在が確認された。
- ② 風騒音の L_{eq} と V_{mean} の間には、(6)式のべき乗則が成り立ち、風騒音の発生機構に関連したべき指数 α と、発生源の強度や伝搬系の減衰性状を表わす定数項 L_k と風の変動性の関連を表す定数項 L_{cor} により整理されることを示した。実測結果もこの傾向を示し、オクターブバンドごとの L_{eq} でも、この傾向が明瞭に現われている。
- ③ 風速変動を代表するパラメータとしてガストファクタを用い、実測結果を検討したところ、風騒音の L_{eq} に対するガストファクタの影響はあるものの、パラメータの実際的な範囲では、その影響は大きなものではないこ

とが分かった。

④ 同一建屋内での室位置による風騒音の差異に関しては、風上側最上階を含む鉛直方向では、最上階より下層4階程度を対象とした場合、風騒音に余り大きな差異が生じないことが分かった。

⑤ 4つの建屋における風騒音の実測結果を比較すると、最大のものと最小のものとで、平均風速10 m/sのときに平坦特性で18 dB、A特性で14 dB(A)の差異があった。

さらに、風騒音が居住性におよぼす影響の現われ方を、実測結果から考察し、風騒音の影響評価を行うための指標として、以下を提案した。

・「影響風速 V_e 」および「支配風速 V_c 」：風騒音が室内暗騒音の下端レベルを越え、はじめて室内に物理的影響を及ぼし始める風速 (V_e)、および、風騒音が室内騒音の主要な音源になり、室内の音環境を支配するようになる風速 (V_c)。

・「 N 値相当風速 V_{N-**} 」：風騒音が、室内騒音に関する日本建築学会の規準値と等しいレベルになる風速。

本報で示した実測結果は、建築条件が異なる4つの集合住宅での単一風向の条件下でのものである。今後さらに、風向と風騒音の関係、建築的要因の風騒音に及ぼす影響の定量化などを検討して行く必要がある。

謝 辞

本研究について、京都大学 古江嘉弘助教授よりご助言頂いたことを、ここに記して感謝いたします。

本論文に関連した既発表論文

- 1) 吉岡 清, 須田健一, 安藤 充: “高層集合住宅の風騒音に関する実測調査”, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (D), pp. 315~316, 1987
- 2) 須田健一, 吉岡 清: “高層集合住宅における風騒音の実測調査”, 日本風工学会誌 41, pp. 9~10, 1989
- 3) 吉岡 清, 須田健一: “高層集合住宅における風騒音に関する実測調査 (その2) 室内の騒音と風のパラメータの

関係について”, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (D), pp. 401~402, 1990

- 4) 吉岡 清, 須田健一: “高層集合住宅における風騒音に関する実測調査 (その3) 風騒音の影響風速と支配風速”, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (D), pp. 435~436, 1991
- 5) 吉岡 清, 須田健一: “高層集合住宅のバルコニー手すりからの風騒音発生に関する実測調査”, 騒音制御工学会技術発表会論文集, pp. 109~112, 1991
- 6) 須田健一, 吉岡 清: “高層集合住宅における風騒音の実測調査 (その2 バルコニー手すりからの風騒音の発生)”, 日本風工学会誌 47, pp. 49~50, 1991
- 7) 吉岡 清, 須田健一: “高層集合住宅における風騒音に関する実測調査 (その4) 建屋による風騒音の差異の概略的傾向”, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (D), pp. 137~138, 1992

参考文献

- 1) 村上周三ほか4名: “超高層集合住宅のバルコニーの風環境に関する住民の意識調査”, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (D), pp. 299~303, 1986
- 2) Berhault, J. P. A.: “Wind Noise in Buildings”, Wind Engineering 1(1), pp. 67~82, 1977
- 3) 板本守正: “ガラリ・手すりの風切り音”, 騒音制御 6(4), pp. 188~190, 1982
- 4) 十倉 毅, 和木孝男, 西村宏昭: “建物手すりによる風騒音の実験的検討”, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (計画系), pp. 83~84, 1984
- 5) 西村宏昭: “アルミニウム合金製手すり子の風による振動に関する風洞実験”, GBRC, 38, pp. 42~47, 1985
- 6) Lighthill, M. J.: “On sound generated aerodynamically, I. General theory”, Proc. R. Soc. London, A211, pp. 564~587, 1952
- 7) 塩谷正雄: 「強風の性質」, 開発社, 1979
- 8) 日本建築学会編: 「建築物の遮音性能規準と設計指針」, 技報堂出版, 1979

(1992年10月2日原稿受理, 1993年4月15日採用決定)