特集

風と音

風が建物屋内での音響計測にあたえる影響について

Influence of Wind Noise on the Acoustic Measurement in the Room

丸山勇祐^{*1}

藤橋克己^{*1}

島村亜紀子^{*2}

Yusuke MARUYAMA, Katsumi FUJIHASHI, Akiko SHIMAMURA

1. はじめに

高架橋、風力発電施設、ダム放水といったものから発生する低周波音の問題が取り上げられるようになってきているが、低周波音の測定結果について明確に報告されている例は少ない。その要因のひとつとして低周波領域の音圧と風の中に含まれる乱れ成分に伴う圧力変動の区別ができないことが上げられる。一方、低周波音（特に20Hz以下の超低周波音）の被害は長期暴露によって生じるといわれており、屋内においても生じるといわれている。屋外を吹く風は一般に乱れを含んでいるため、建物外壁に風が当たると乱れに応じた壁面圧力の変動が生じ、それが直接壁を伝わって室内に入り込むことが考えられる。よって、屋内において低周波音を含む音響計測を行う場合においても、風の影響を考慮する必要があるといえる。室内における音響計測においては、耳に聞こえるレベルで無ければ屋外の風の影響について注意を払われることがほとんどないが、外の風の変動とともに騒音計の音圧レベル（特に低周波音領域）が変動することが指摘¹⁾されており、特に低周波領域においては重大な影響を与える可能性があるといえる。これらのことから建物屋内における音響計測への風の影響を明確にする必要があると考えられる。筆者らは、比較的風の強い地域に建つ一般的な2階建ての建物の居室において低周波

音レベル計と精密騒音計による暗騒音（耳に聞こえる音が無く風の影響を含むもの）の計測を長期間実施した。計測結果に基づいて、室内の音響計測における風の影響について検討した結果を報告する。

2. 計測概要

計測を行った建物周辺の状況を図1に示す。日本海に面する平野部にあり、海岸線からおおよそ1.5km程度の2階建ての建物の2階の1室において計測を行った。建物が建っている場所は、比較的大きな建物が少ない集落の端で、北側及び東側には農地が広がっており、西側には数件の建物が散在している。写真1に計測を行った建物を北東側から撮影したものを示す。計測室は、2階の北向きの部屋で行い、計測中は常時、窓・ドアを閉めた状態とした。計測はこの部屋に置かれた、低周波音レベル計（NA-18A：リオン）及び精密騒音計（NA-28：リオン）にて行った。騒音計の設置状況を写真2に示す。サンプリングは騒音計の L_{eq} 出力を1秒毎に保存した。風の計測については建物脇に立てたポールで地上10mの高さで行った。10分毎に、平均風速・風向と風速の標準偏差を保存した。農村であるため、周辺での暗騒音の発生がほとんどない夜22時～朝5時の計測データを対象とし、欠落データを除いて3ヶ月～半年の長期計測を実施した。

*1 前田建設工業（株）技術研究所
Technical Research Institute, Maeda Corporation

*2 前田建設工業（株）東北支店
Tohoku Office, Maeda Corporation

図1 計測建物周辺の状況

写真1 計測建物

写真2 計測状況

3. 計測結果

3. 1 計測地点の風の状況

図2に騒音計測時の風配図、図3に風向別平均風速を示す。南西寄りと東北東寄りの風の頻度が高くなっている。平均風速は南西寄りの風が高くなっており、西南西の風が一番強い。図4に10分間平均風速と風速の標準偏差の関係を示す。風速が低い時にはデータがばらつくため、10分間平均風速が4m/sを超えるデータについてプロットしている。標準偏差はほぼ風速に比例した分布にな

っているといえるが、傾きの異なるデータが含まれているように見える。なお、図中の直線は、10%、20%、30%の乱流強度の傾きを表す。

図2 風配図 (%)

図3 風向別平均風速 (m/s)

図4 平均風速と乱流強度の関係

乱流強度と風向の関係を図5に示す。発生頻度が風向ごとに異なり、あまり発生していない風向もあるが、発生頻度の高い風向で比較しても風向による乱流強度の違いが顕著である。風向 NE, ENE, E (45~90°) の乱流強度

は小さく 10～25%程度である。風向 SSW, SW, W (202.5～225°, 270° 付近) の乱流強度は大きく 30%前後の値となっている。風向 WSW では、乱流強度の大きい SW, W の間となっているが、乱流強度が小さくなっており、20%程度となっている。風上に農地が広がる北東側で小さく、集落が広がる南西側で大きくなっていると考えられる。この地点の風の特徴として顕著なのは風向により乱流強度が異なることである。ここから後の議論は、乱流強度の小さい風向のグループ (NE, ENE, E) と乱流強度の大きい風向のグループ (SSW, SW, W) に分けて考察を進める。

図5 乱流強度と風向の関係

3. 2 平均風速が及ぼす影響

図6, 図7に10分間平均風速と室内で計測された風の影響による等価音圧レベルの関係を、FLAT 特性およびG特性について示す。なお、図中のプロットは前章に示した乱流強度により2つの風向群に分類している。

図6 平均風速と風の音圧レベルへの影響の関係 (G)

図7 平均風速と風の音圧レベルへの影響の関係 (F)

風速の増加とともに風の影響が大きくなっている。FLAT 特性では、風速 10m/s で 80dB を超え、風速 15m/s では 90dB を超えている。また、乱流強度の大きさにより分類した2つの風向群で、等価音圧レベルの大きさに差が見られ、乱流強度が大きなものほど音圧への風の影響が大きく、G 特性においてその傾向が顕著である。

風速と風雑音の等価音圧レベルの関係を明確にするため、例として 10Hz 帯域の 1/3 オクターブバンドのプロットに対して近似曲線を引いたものを図8に示す。なお、低い風速の時にはデータがばらつくため、10 分間平均風速が 4m/s を超えるデータについて近似する。どちらのケースにおいても、対数でよく近似できている。

図8 風速と音圧レベルの相関(10Hz 帯域)

風による音圧 P は風速の変動成分の影響を受けると考えると、式(1)のように変動成分の分散に比例するものと仮定できる。

$$P = C \times 1/2 \rho \sigma_v^2 = C \times 1/2 \rho \times I_v^2 \times v^2 \quad (1)$$

P: 音圧(Pa), v: 平均風速

C: 係数, ρ: 空気密度 (1.225kg/m³)

σ_v: 変動風速の標準偏差, I_v: 乱流強度

この音圧を音圧レベルの式に代入すると式(2)のように展開できる。

$$\begin{aligned} L_p &= 20 \log \left(\frac{P}{P_0} \right) = 20 \log(P) - 20 \log(P_0) \\ &= 20 \log(C \times 1/2 \rho \times I_v^2 \times v^2) - 20 \log(P_0) \\ &= 40 \log(v) + 20 \log(I_v^2) + 20 \log(C \times 1/2 \rho) - 20 \log(P_0) \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)の第3項, 第4項は定数項である。第2項は乱流強度に関するものであり、乱流強度が大きいほど音圧レ

ベルが大きくなる。第1項は平均風速の2乗に関する項で、近似式の定数が40の値となる場合に音圧レベルが平均風速の2乗に比例するという仮定が成立する。表1に低周波音レベル計で計測されたすべての周波数帯域の結果を式(3)の形で近似した場合の係数を示す。ばらつきはあるが概ねAの値は40に近い値となっており、どの周波数帯域においても室内で発生する風の影響による音圧は平均風速の2乗に比例するといえる。なお、風速の平均成分 $\bar{v}$ と変動成分 v' の足し合わせが風速波形だと考えると厳密には $\bar{v}v'$ の変動成分の項が卓越してくるが、この場合にも定数Aが40であれば、平均風速の2乗に比例するといえる。

$$L_p(n) = A \log(V) + B \quad (3)$$

表1 対数近似曲線の係数

風向	NE/ENE/E		S/WSW/WNW	
周波数	A	B	A	B
1Hz	43.8	34.6	39.7	41.9
1.25Hz	42.9	34.8	38.7	42.1
1.6Hz	41.9	34.2	38.6	40.9
2Hz	41.4	33.1	38.4	39.4
2.5Hz	40.0	32.5	40.1	35.9
3.15Hz	38.7	31.1	42.2	31.9
4Hz	39.0	27.0	41.4	28.8
5Hz	40.5	21.4	39.4	25.2
6.3Hz	42.4	16.9	38.1	23.1
8Hz	47.5	11.4	38.3	23.2
10Hz	47.9	14.3	40.6	24.6
12.5Hz	46.7	9.4	41.7	17.5
16Hz	45.6	6.4	43.6	12.8
20Hz	48.3	6.3	32.4	24.3
25Hz	51.8	-2.6	31.9	20.1
31.5Hz	50.1	-9.7	45.0	1.9
40Hz	46.6	-2.9	40.1	8.5
50Hz	46.1	-5.9	48.1	-2.0
63Hz	41.0	-3.9	43.9	-2.1
80Hz	27.2	2.8	34.1	1.3

3. 3 乱流強度が及ぼす影響

乱流強度の影響については式(2)の第2項に関係するが、第2項を展開すると $40 \log(I)$ と表記される。この項が足されたものが等価音圧レベルとなることから、乱流強度が大きければ大きいほど、風の影響による音圧レベルは大きくなる。

今回の計測では、図5より乱流強度の小さい風向のグループ (NE, ENE, E) の乱流強度は15~20%、乱流強度の大きい風向のグループ (SSW, SW, W) では概ね30~35%程度のとなっており、両者の比は1.5~2程度となる。1.5~2の値のlogをとり40倍すると7~12dBの差となるが、図

5をみると概ねその程度の差となっていることが確認できる。よって、乱流強度の影響により風による音圧レベルの増加が確認された。

3. 4 風が音圧に与える影響の周波数特性

風が室内の音圧に与える影響の周波数特性を調べるため、風によって発生する等価音圧レベルの周波数特性を図9に示す。等価音圧レベルはレベル計からの1秒サンプリングのデータを10分間のパワー平均で算出しているが、ここではこれらの10分のレベル値を前述の風向グループ、風速毎(間隔は3m/sピッチ)に計測期間中に得られた全データをアンサンブル平均したものを表示している。図中の直線は後述する周波数の $-5/3$ 乗で減衰する値を音圧レベルにしたものである。

図9 風による音圧レベルへの影響の周波数特性

図10 変動風速のパワースペクトル密度²⁾

風による音圧の周波数特性としていえることは、周波数とともに音圧が下がる傾向がある。このような周波数特性をもつ音圧の測定結果が屋外測定等でよく見られるが、それは風の影響によるものではないかと考えられる。この下がり方は、5Hz以下の超低周波領域ではやや緩くなるが、その他の部分では図中に示した周波数の $-5/3$ 乗の傾きと似た傾きで下がっていることが確認できる。変動風速のパワースペクトル密度は一般にKarman型等に近似される。図10は日本建築学会の建築物荷重指針²⁾に示されている風速変動のパワースペクトルを今回の測定に近い値を用いて実スケールで表したものである。音圧測定で対象としている周波数領域はコルモゴロフの $-5/3$ 乗則が成り立つ慣性小領域となっている。このことから、周波数とともに音圧が下がる傾向は風の乱れの周波数分布によるものと考えられる。

また、図9において特定の周波数に見られる小さなピークはどの風向風速の測定においてもみられることから、計測を行った建物や測定室の形状や壁の材質等により透過しやすい周波数があるのではないかと考えられる。

20Hzにピークが見られるがこの波の波長は約17mであり、この $1/4$ 波長が約4mとなり計測していた部屋の寸法に近い値となっていることから、部屋の形状により定在波が生じていたのではないかと考えられる。同様に考えると10Hzのピークは計測建物の大きさに起因するものではないかと考えられる。

上記のような測定結果から、風による音圧レベルは、平均風速・乱流強度・乱れのパワースペクトルをパラメーターとして定式化が可能であると考えられる。ここでは、式(1)に示したように変動圧は変動風速の2乗に比例すると仮定して定式化を試みる。なお、風圧の変動は平均風速×変動風速の項の影響の方が大きい³⁾、今回の測定結果では変動風速の2乗で整理した方が合いやすそうであったためそれで展開する。

$$p' = c \times 1/2 \rho u'^2 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} P(n) &= C(n) \times 1/2 \rho \times S(n) \\ &= C(n) \times 1/2 \rho \times \hat{S}(n) \sigma_u^2 / n \\ &= C(n) \times 1/2 \rho \times \hat{S}(n) / n \times I_u^2 \bar{u}^2 \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、

$P(n)$: 風の影響による音圧(Pa) p' : 変動風圧(Pa)

ρ : 空気密度(1.225kg/m³) n : 周波数(Hz)

u' : 変動風速(m/s) $\bar{u}$: 平均風速(m/s)

σ_u : 変動風速の標準偏差(m/s) I_u : 乱流強度

$S(n)$: 変動風速のパワースペクトル $c, C(n)$: 係数

$\hat{S}(n)$: 無次元パワースペクトル

風速変動のパワースペクトルを $-5/3$ 乗則に従うと考えると以下のように表される。

$$\begin{aligned} S(n) &= \hat{S}(n) \sigma_u^2 / n = \hat{S}(n) / n \times I_u^2 \bar{u}^2 \\ &= a n^{-5/3} \times I_u^2 \bar{u}^2 \end{aligned} \quad (6)$$

パワースペクトルの形状を代入し、対数を取って20倍にすることで音圧レベル $L_p(n)$ にしたものが以下の式となる。

$$\begin{aligned} L_p(n) &= 20 \log(P(n) / P_0) \\ &= 40 \log(\bar{u}) + 40 \log(I_u) \\ &\quad + 20 \log(D(n) \times a n^{-5/3}) + K \\ &= 40 \log(\bar{u}) + 40 \log(I_u) - 100/3 \log(n) \\ &\quad + 20 \log(D(n)) + K \end{aligned} \quad (7)$$

この式の最後の右辺第一項が平均風速に関する項であり、第2項は乱流強度に関するものである。第3項はパワースペクトルの形状によって決まってくる項であり風の中ではカルマン型に近似される。第4項は計測している建物・部屋の寸法・形状によって決まってくる伝達関数であり、最後のKは定数項である。

このように室内音響計測時に騒音計等音響計測機器に現れる風の影響は、平均風速および乱流強度（変動風速の標準偏差）を用いて定式化できることを示した。

4. おわりに

屋内において風が音圧に与える影響を長期計測した結果から、周波数に関係なく室内で計測される音圧は風速の2乗に比例することと、周波数とともに音圧が下がる現象は変動風速の成分により起こることを示した。

風の影響による音圧が平均風速の2乗に比例すること、乱流強度によりレベルが上がることを、周波数の $-5/3$ 乗で減衰することを組み合わせれば、風の影響を定式化することも可能だと考えられる。建物形状の影響等を伝達関数として組み込んでいく方法および定式化は今後の課題である。

参考文献

- 1) 環境省, 「低周波音の測定方法に関するマニュアル」, (2000)
- 2) 日本建築学会編, 「建築物荷重指針・同解説」, (2004)