

# 騒音伝搬に対する風の影響の予測法

## Prediction of Wind Effects on Outdoor Sound Propagation

技術本部 大倉 清\*1 泉山 和雄\*2

屋外の騒音伝搬特性を大きく左右する風の影響を定量的に評価する手法はまだ確立されておらず、現状の騒音アセスメントでは風の影響は無視されている。しかし、風下では無風時に比べかなりの騒音レベルの増加が予想され、環境問題に対する住民意識が高まる中、風向、風速を考慮した騒音伝搬予測、対策検討の必要性がいわれつつある。本研究では風の影響を評価できる実用的、かつ簡便な予測式の作成を目的に K. B. Rasmussen の積分式の簡略化を行った。簡略化は被積分関数を解析的に積分可能な式に近似し、積分することで音圧を直接計算可能な近似式にまとめたものであり、フィールドテスト結果との対応も良好であることを確認した。

It is well known that wind has important effects on out-door sound propagation, but the lack of ways to estimate the wind effects in assessing simply, reliably, and efficiently actual power plants noise made it necessary to develop a practical estimation code. We simplified K. B. Rasmussen's integral equation to provide simple equations on wind effects on sound propagation. The new equations were obtained by expanding the complex integrand to integratable approximate equations. We confirmed that the equations explain field test results well.

### 1. ま え が き

屋外の騒音伝搬において気象、特に風の影響が非常に大きいことは経験的に良く知られており数多くの研究がなされている。しかし、環境アセスメント等の実用的見地からはまだ予測手法が確立されているとはいえない。このような背景の下で筆者らは理論、フィールドテストの両面から実用的な予測法の検討を進めてきたが、従来の検討結果では下記課題が残されていた<sup>(1)</sup>。

- (1) 風下減衰量の理論的裏付け
- (2) 風と地表面との相互作用の影響評価

そこで、今回は K. B. Rasmussen の積分式の簡略化により、地表面の影響を含め、風上、風下の減衰量を統一的に扱える予測式の導出を試みた<sup>(2)(3)</sup>。

### 2. 理論 検 討

#### 2.1 Rasmussen の積分式

K. B. Rasmussen は Rayleigh 積分の展開により、線形の音速こう配を有する半自由場内の点音源による音圧  $p$  を式(1)の積分式で与えている<sup>(4)</sup>。

$$p = -r \sqrt{2\pi k_0} \frac{e^{-\pi/4}}{4\pi} \int_0^\infty \left\{ \frac{e^{ik(z/2)(R_1+R_3)}}{R_1 R_3^3 (R_1+R_3)^{1/2}} + Q_2 \frac{e^{ik(z/2)(R_1+R_4)}}{R_1 R_4^3 (R_1+R_4)^{1/2}} + Q_1 \frac{e^{ik(z/2)(R_2+R_3)}}{R_2 R_3^3 (R_2+R_3)^{1/2}} + Q_1 Q_2 \frac{e^{ik(z/2)(R_1+R_4)}}{R_2 R_4^3 (R_2+R_4)^{1/2}} \right\} dz \quad (1)$$

$$k_0 = \omega / c_0$$

$$k(z) = \omega / c(z) = k_0(1 - \gamma z)$$

$$\gamma = (1/c_0) dc/dz$$

ここに、

$\omega$  : 角周波数

$c(z)$  : 高さ  $z$  における音速

$R_i$  : 図 1 に示す距離 ( $i = 1 \sim 4$ )

$Q_j$  : 地表面の等価反射率 ( $j = 1 \sim 2$ )

$r$  : 音源、受音点間の水平距離

添字 0 : 地表面上の値を示す

式(1)において、積分は図 1 に示すような音源、受音点を含む垂直面内で、かつ音源、受音点間の任意位置に設定された垂直線上で高さ  $z$  に対して行われるものである。

なお、ここでは簡単のため垂直線の位置を音源と受音点の間点に設定し、Rasmussen の式において音源、及び受音点から垂直線までの距離  $x_s, x_r$  を  $x_s = x_r = r/2$  としている。

また音速こう配  $\gamma = 0$  のときの受音点における音圧の厳密解が球面波に対する等価反射率  $Q$  を用いて式(2)で与えられることは良く知られている<sup>(5)</sup>。

$$p = \frac{e^{ikR_d}}{R_d} + Q \frac{e^{ikR_r}}{R_r} \quad (2)$$

式(2)において右辺第 1 項は直接波、第 2 項は反射波の寄与を示しており、 $Q$  は式(3)で与えられる。

$$Q = R(\theta) + [1 - R(\theta)] \cdot F(\rho)$$

$$R(\theta) = \frac{\cos \theta - \beta}{\cos \theta + \beta}$$

$$F(\rho) = 1 + i\sqrt{\pi\rho} \cdot \exp(-\rho^2) \cdot \text{erfc}(-i\rho) \quad (3)$$

$$\rho = \sqrt{\frac{1}{2}} ikR_r (\cos \theta + \beta)$$

ここに、

$\theta$  : 入射角 (図 1 参照)

$\beta$  : 地表面の比音響アドミッタンス ( $=1/\zeta$ )

$\zeta$  : 地表面の比音響インピーダンス

$R_d$  : 直接音の伝搬経路長

$R_r$  : 反射音の伝搬経路長

ただし、式(1)において  $Q_1, Q_2$  は各々図 1 の経路  $R_2, R_4$  に対して計算される値である。

#### 2.2 積分式の簡略化

式(1)での被積分関数に現れる距離  $R_1$  は、音源高さ  $H_s$ 、受音点高さ  $H_r$  及び高さ  $z$  の関数である。ここで、 $x = z/r, h_s = H_s/r,$

\*1 高砂研究所振動・騒音研究室主査

\*2 高砂研究所振動・騒音研究室

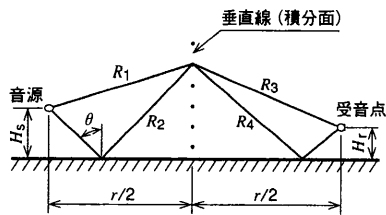


図1 計算モデル Rasmussenの積分式における計算モデルを示す。  
Calculation model of Rasmussen's integration equation

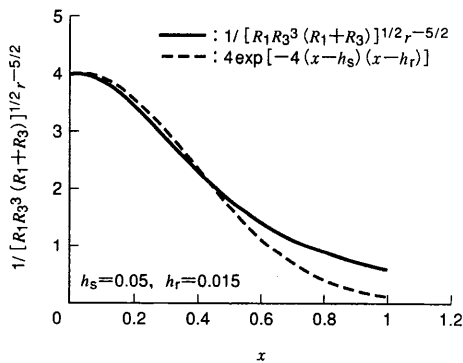
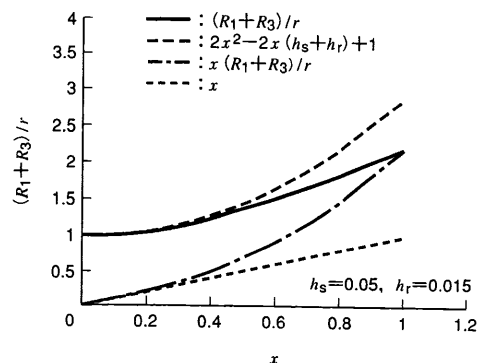


図2 被積分関数の近似精度 Rasmussenの積分式の被積分関数の厳密式と近似式の比較を示す。  
Comparison of integrand in Rasmussen's integral equation between exact and approximate equation



$h_r = H_r/r$  と置き、 $x \ll 1$ ,  $h_s \ll 1$ ,  $h_r \ll 1$  を仮定すると被積分関数の各項の分母は次式で近似される。

$$\begin{aligned} 1/[R_1R_3^3(R_1+R_3)]^{1/2} &\cong 4\exp[-4(x-h_s)(x-h_r)]/r^{5/2} \\ 1/[R_1R_4^3(R_1+R_4)]^{1/2} &\cong 4\exp[-4(x-h_s)(x+h_r)]/r^{5/2} \\ 1/[R_2R_3^3(R_2+R_3)]^{1/2} &\cong 4\exp[-4(x+h_s)(x-h_r)]/r^{5/2} \\ 1/[R_2R_4^3(R_2+R_4)]^{1/2} &\cong 4\exp[-4(x+h_s)(x+h_r)]/r^{5/2} \end{aligned} \quad (4)$$

また、式(5)が成立つことから、式(1)第1項の分子に現れる  $\exp$  関数の指数部は式(6)で近似される。

$$\begin{aligned} (R_1+R_3) &\cong r[2x^2-2x(h_s+h_r)+1] \\ x(R_1+R_3) &\cong rx \\ k(z/2)(R_1+R_3) &= k_0(R_1+R_3) - k_0\gamma \cdot r/2 \cdot x(R_1+R_3) \\ &\cong r_0r[2x^2-2x(h_s+h_r)+1] - x \cdot k_0\gamma \cdot r^2/2 \end{aligned} \quad (5), (6)$$

第2項以降の分子についても分母と同様に  $h_s$ ,  $h_r$  の符号のみを変えた形で近似式が得られる。近似式(4), (5)を対応する厳密式と比較したものを図2に示すが、いずれも  $0 \leq x < 0.5$  の範囲では良い一致を示している。

一方、等価反射率  $Q$  は  $k(z)$ , すなわち音速こう配の影響を含む複雑な関数であるが、ここでは簡単のため  $Q \cong R(\theta)$  を仮定すると、地表面が比較的剛な場合には  $Q_1$  は式(7)で与えられる。

$$Q_1 \cong \frac{\cos\theta - \beta}{\cos\theta + \beta} \cong \frac{2(x+h_s) - \beta}{2(x+h_s) + \beta} = 1 - \frac{2\beta}{2x+2h_s+\beta} \quad (7)$$

$Q_2$  も同様の形で与えられることから、式(1)の積分を解析的に可能とするため、 $Q$  を定数  $a$ ,  $b$  を含む次式(8)の形で近似する。

$$Q_i = 1 - a_i \cdot \exp(b_i x) \quad (i=1, 2) \quad (8)$$

ここで、 $x=0$ ,  $x=h_s$  (及び  $h_r$ ) において式(7), 式(8)が一致

するように定数  $a$ ,  $b$  を求めると次のようになる。

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{2\beta}{(2h_s+\beta)}, \quad b_1 = \frac{1}{h_s} \ln\left(\frac{2h_s+\beta}{4h_s+\beta}\right) \\ a_2 &= \frac{2\beta}{(2h_r+\beta)}, \quad b_2 = \frac{1}{h_r} \ln\left(\frac{2h_r+\beta}{4h_r+\beta}\right) \end{aligned} \quad (9)$$

式(3)で与えられる  $Q$  の厳密解と式(8), (9)の近似解を比較したものを図3に示す。

なお、図3の計算に当っては地表面の比音響インピーダンスとして式(10)を採用している。

$$\zeta = 1 + 9.08\left(\frac{f}{\sigma}\right)^{-0.75} + i \cdot 11.9\left(\frac{f}{\sigma}\right)^{-0.73} \quad (10)$$

ここに、

- $f$ : 周波数
- $\sigma$ : 地表面の流れ抵抗
- (図3の計算では  $\sigma=200$ )

なお、流れ抵抗  $\sigma$  は代表的な地表面性状に対して概略表1のような値になる。

既述の近似式(4)~(9)を採用することにより式(1)は解析的に積分可能となる。積分は非常に煩雑であり詳細は省略するが結果は着目する音速こう配  $\gamma$  の関数として式(11)で与えられる。

$$\begin{aligned} p(\gamma) &= \frac{\sqrt{2\pi k_0 r}}{r} \frac{e^{-\gamma r/4}}{4\pi} \left[ \sum_{j=1}^4 \exp(ik_0 r - \phi_j^2) \cdot \operatorname{erfc}(i\phi_j) + \Delta \right] \\ \phi_1 &= \frac{\sqrt{ik_0 r}}{2} (h_s + h_r + \frac{\gamma \cdot r}{4}), \quad \phi_2 = \frac{\sqrt{ik_0 r}}{2} (h_s - h_r + \frac{\gamma \cdot r}{4}) \\ \phi_3 &= \frac{\sqrt{ik_0 r}}{2} (-h_s + h_r + \frac{\gamma \cdot r}{4}), \quad \phi_4 = \frac{\sqrt{ik_0 r}}{2} (-h_s - h_r + \frac{\gamma \cdot r}{4}) \end{aligned}$$

表1 地表面性状と流れ抵抗  
Relation between characteristics of ground surface and flow resistivity

地表面性状	流れ抵抗 $\sigma$ (kPa·s/m <sup>2</sup> )
コンクリート	20 000
アスファルト	20 000
硬い土壌	5 000
柔らかい土壌	1 250
芝生	300
砂利	150
雪(厚さ2~3 cm)	15~75

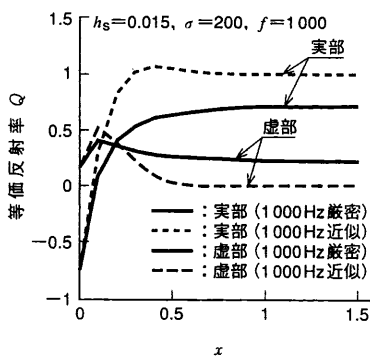


図3 Qの近似式 等価反射率  $Q$  の厳密式と近似式の比較を示す。  
Comparison of equivalent reflection coefficient  $Q$  between exact and approximate equation

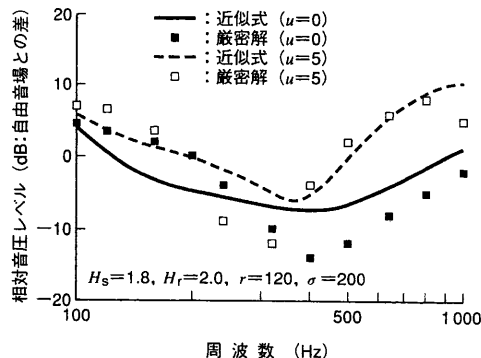


図4 近似予測式の精度 風がある場合の音圧の厳密解と近似解の比較を示す。  
Comparison of sound pressure level affected by wind between exact and approximate equation

$$\begin{aligned} \Delta = & -a_2 \exp[ik_0 r - \phi_2^2 + \frac{b_2}{2} (h_s - h_r + \frac{\gamma \cdot r}{4})] \cdot \operatorname{erfc}(i\phi_2 - \frac{b_2}{2} \sqrt{\frac{i}{2k_0 r}}) \\ & - a_1 \exp[ik_0 r - \phi_3^2 + \frac{b_1}{2} (-h_s + h_r + \frac{\gamma \cdot r}{4})] \cdot \operatorname{erfc}(i\phi_3 - \frac{b_1}{2} \sqrt{\frac{i}{2k_0 r}}) \\ & - a_2 \exp[ik_0 r - \phi_4^2 + \frac{b_2}{2} (-h_s - h_r + \frac{\gamma \cdot r}{4})] \cdot \operatorname{erfc}(i\phi_4 - \frac{b_2}{2} \sqrt{\frac{i}{2k_0 r}}) \quad (11) \\ & - a_1 \exp[ik_0 r - \phi_4^2 + \frac{b_1}{2} (-h_s - h_r + \frac{\gamma \cdot r}{4})] \cdot \operatorname{erfc}(i\phi_4 - \frac{b_1}{2} \sqrt{\frac{i}{2k_0 r}}) \\ & + a_1 a_2 \exp[ik_0 r - \phi_4^2 + \frac{(b_1 + b_2)}{2} (-h_s - h_r + \frac{\gamma \cdot r}{4})] \\ & \times \operatorname{erfc}[i\phi_4 - \frac{(b_1 + b_2)}{2} \sqrt{\frac{i}{2k_0 r}}] \end{aligned}$$

ここで、 $\Delta$  は地表面の影響を表す補正項となっており、地表面が完全反射 ( $\beta = 0$ ) の場合には式(9)から明らかのように  $\Delta = 0$  となる。

詳細は省略するが近似式(11)は地表面が完全反射で、かつ無風の条件 ( $\beta = 0, \gamma = 0$ ) では厳密解と完全に一致する。地表面音響特性が有限で、風がある場合について近似式(11)と Rasmussen の厳密解との比較結果を図4に示す。これは受音点の音圧を自由音場における音圧とのレベル差で表示したものであるが、両者は落込みの周波数は略一致しているものの、この周波数以下では傾向が若干異なっている。これは式(8)、(9)で与えた  $Q$  の近似精度に依存しており、更なる予測精度アップのためには  $Q$  の近似式の見直しが必要である。

2.3 風による超過減衰量

温度こう配の影響を無視すると、高さ  $H$  におけるベクトル風速  $U_v$  と音速こう配の関係は  $dc/dz = U_v/H$  となることから次の関係式(12)が得られる。

$$\gamma = \frac{1}{c_0} \frac{dc}{dz} = \frac{1}{c_0} \frac{U_v}{H} \quad (12)$$

ここに、

- $H$ : 風向、風速の計測高さ
- $U_v$ : ベクトル風速 ( $= U \cdot \cos\phi$ )
- $U$ : 高さ  $H$  における絶対風速
- $\phi$ : 風向と音の伝ば方向とのなす角度

これより、風による減衰量  $A_e$  はベクトル風速の関数として式(13)で与えられる。

$$A_e = -20 \log[p(\gamma)/p(\gamma)] \quad (13)$$

3. フィールドテスト

既述の風による減衰量の簡便予測式の妥当性を確認するとともに、予測計算に当って必要となるテスト地点の地表面音響特性を求めるためのフィールドテストを実施した。なお、テスト地点は約 50 cm 高さの草が生茂った埋立地であり、風向、風速が偏らないよう夏季から冬季にかけて気象の状況をにらみながら数箇月にわたりデータ採取を行った。

3.1 風による減衰量と気象計測

試験方法を図5に示すが、概要は下記のとおりである。

- (1) 音源: 音源にはスピーカを用い、M 系列変調された 1/1 オクターブバンドノイズを発信した。
- (2) 気象計測: 高さ方向の風向、風速及び温度分布を音源位置で計測した。
- (3) 計測時間帯: 計測時間は Neutral (中立), Lapse (漸減), Inverse (逆転) の3種の温度分布のデータを均等に採取するため、昼間から夜間にわたって数回の計測を行った。

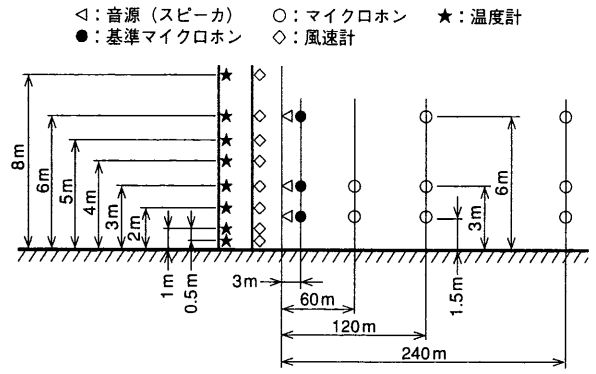


図5 試験方法 計測点、計測器の配置を示す。 Arrangement of field test equipment

3.2 地表面音響特性計測

地表面音響特性の計測は以下の方法によった。

すなわち、式(2)、(3)及び式(10)を用いて式(14)で与えられる自由空間に対する相対音圧レベルを、流れ抵抗  $\sigma$  をパラメータに周波数に対してプロットした図を作成する。

$$\Delta L_c = 20 \log \left[ 1 + Q \frac{R_d}{R_r} \exp(ikR_r - ikR_d) \right] \quad (14)$$

次に、1/3 オクターブバンド周波数別の式(14)に対応した相対音圧レベルの計測値を式(15)で求め、これを図5中にプロットして計測値に近い  $\sigma$  を求める。

$$\begin{aligned} \Delta L_m = & (\text{受音点の音圧レベル}) - (\text{基準点の音圧レベル}) \\ & + 20 \log \frac{r}{r_0} \end{aligned} \quad (15)$$

このため、計測に当っては下記点を考慮している。

- (1) 音源: 式(14)は直接波と反射波の干渉の影響を表現していることから、発信音は M 系列変調信号ではなく連続的なホワイトノイズを用いた。
- (2) 計測時間帯: 式(14)は無風時の計算式であるため、計測は風速 1 m/s 以下の条件をねらって実施した。

図6に計測結果の一例を示すが、これよりテスト地点の地表面の流れ抵抗は略  $\sigma = 30$  であることが分かる。

4. 簡便予測式

4.1 フィールドテスト結果との対応

風による減衰量のフィールドテスト結果と前述の簡便予測式(13)による計算値をベクトル風速に対して整理、比較したものを図7

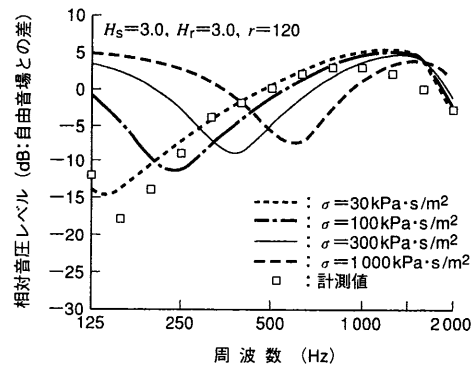


図6 地表面の音響特性 フィールドテスト地点の地表面音響特性の計測結果を示す。 Measured results of acoustic characteristics of ground surface at field test site

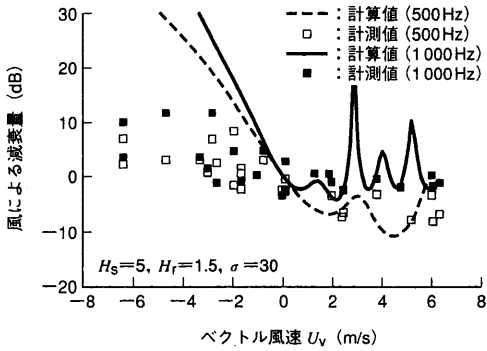


図7 近似予測式と計測値 風による減衰量の近似式による計算値と計測値の比較を示す。  
Comparison of excess attenuation by wind between calculated by approximate equation and measured values

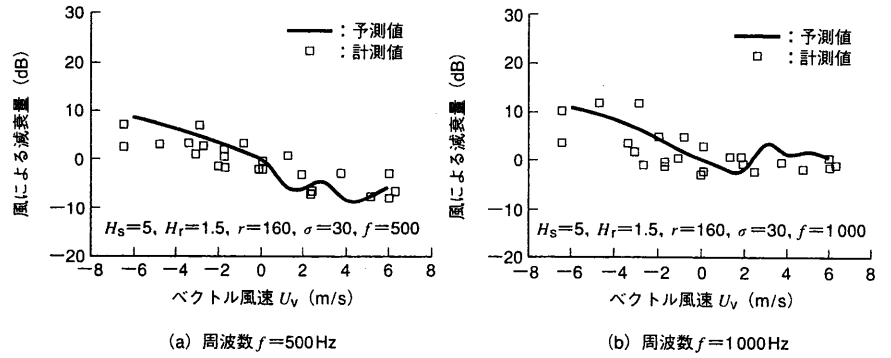


図8 予測値と計測値 補正後の予測式による計算値と計測値の比較を示す。  
Comparison of excess attenuation by wind between calculated by corrected approximate equation and measured values

に例示する。なお、計算に当たって地表面の流れ抵抗として計測値である  $\sigma=30$  を用いている。

- (1) 風上 ( $U_v < 0$ ) 減衰量はベクトル風速の絶対値に比例して増加しているが、計算値は計測値よりかなり大きな値を示している。
- (2) 風下 ( $U_v > 0$ ) 減音量の計算値はベクトル風速に対し変動しており、変動の周期は周波数とともに短くなっているが、これは直接波と反射波の干渉によるものと思われる。風下では風速に対して一様に音圧が増加する ( $A_e$  が負となる) というのが従来説であるが<sup>6)</sup>、音線法による考え方からすれば風下では減音量が風速に対して変動するのは当然の結果であろう。これに対し計測値のベクトル風速に対する変動は明りょうではない。

4.2 風上減衰量に対する補正

風上減音量については計算値が計測値を大きく上回り約4倍となっているが、この理由としては下記のことが考えられる。

- (1) 風速分布の線形からのずれの影響及び温度分布の影響
- (2) 式(11)の近似精度の影響

この差については今後さらに実測データを蓄積するとともに、理論面での検討が必要であるが、現時点での風上減衰量予測式としては式(16)を採用のこととする。

$$\text{予測値} = \frac{1}{4} [\text{式(13)による計算値}] \tag{16}$$

4.3 風下減衰量に対する補正

風下の計算値は既述のようにベクトル風速に対し大きく変動しているが、計測値の変動は顕著ではない。この要因としては下記の2つが考えられる。

- (1) 風速変動により減衰量の変動が平均化された。
- (2) 計算は特定の周波数で行っているのに対し、計測はバンドノイズを使用している。

そこで、計測時の風速変動を調べてみるとほぼ式(17)で与えられる正規分布に従っていることが分かった。

$$f(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left[-\frac{(u-\mu)^2}{2\sigma_s^2}\right] \tag{17}$$

ここに、

- $\mu$  : 平均風速
- $\sigma_s$  : 風速変動の標準偏差

風速  $u$  に対する減衰量  $A_e(u)$  を式(13)により求め、風速変動を考慮した場合の平均風速  $\mu$  に対する減衰量  $\bar{A}_e(\mu)$  を式(18)により求める。

$$\bar{A}_e(\mu) = \sum_{u=\mu-3\sigma_s}^{u=\mu+3\sigma_s} A_e(u) f(u) \Delta u \tag{18}$$

ここに、

$\Delta u$  : 数値計算時の風速計算ピッチ

4.4 簡便予測式の特徴

式(16)、(18)による補正後の計算値と計測値の比較を図8に示すが、補正後の計算値は500 Hz以上では略±5 dBの範囲で計測値と一致している。

5. む す び

屋外の騒音伝搬特性を大きく左右する風の影響について、K. B. Rasmussenの積分式の簡略化並びにフィールドテスト結果をベースに簡便予測式を作成した。本予測式の特徴は下記のとおりである。

- (1) 任意の地表面性状を考慮することができる。
- (2) 風下では風速に比例して一様に音圧が増加するとの従来説に対し、本予測式では風下の音圧は風速に対し変動するとともに、高周波数では風下でも減衰することを確認した。今後は下記課題の検討により更なる予測精度の向上を図る予定である。
- (1) 地表面の等価反射率  $Q$  の近似精度向上。
- (2) 既存のフィールドデータとの比較による本予測式の妥当性の検証と改良。

参 考 文 献

- (1) 大倉 清ほか、騒音伝搬に及ぼす風の影響評価法、三菱重工技報 Vol.31 No.1 (1994) p.1
- (2) 大倉 清ほか、騒音伝播に及ぼす風の影響評価法(その4—Rasmussen式の近似解)、日本音響学会講演論文集(1994—10) p.855
- (3) 大倉 清ほか、騒音伝播に及ぼす風の影響評価法(その5—近似解の予測精度)、日本音響学会講演論文集(1994—10) p.857
- (4) Rasmussen, K. B., Outdoor Sound Propagation under The Influence of Wind and Temperature Gradients, J. Sound Vib., 104(3) (1986) p.321
- (5) Rasmussen, K. B., Sound Propagation over Grass Covered Ground, J. Sound Vib., 78 (1981) p.247
- (6) 藤木 修ほか、音の伝播に対する風速と気温の鉛直プロファイルの影響、日本音響学会誌, 36巻 4号 (1980) p.199