

騒音伝搬に及ぼす風の影響評価法

Wind Effects on Outdoor Sound Propagation

技術本部 大倉 清*¹ 泉山 和男*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未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し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予測、対策の必要性が高まりつつある。本研究では風の影響を評価できる簡便な予測式を作成することを目的に理論検討とフィールド実験を実施した。その結果、風上については A. D. Pierce の理論式をベースとした減衰量の簡便予測式を導き、実験結果との良好な対応を確認した。また、風下減衰量についてはフィールド実験結果をベースとした予測式を作成した。

It is well known that wind has important effects on out-door sound propagation, but at present there are no methods for its estimation of wind effects that are simple, reliable and can be applicable to the actual noise assessment of a power plant. Because of this, an estimation code for practical use is required to be developed. In this paper, a simplified equation for upwind propagation based on A. D. Pierce's theory is reduced, which can explain the field test results well. For downwind propagation, an experimental equation based on the field tests is given.

1. ま え が き

屋外の騒音伝搬ではエネルギー拡散による減衰（距離減衰）に加えて地表面吸収、空気吸収、障壁による回折、及び気象の影響による減衰が大きく、これらの評価いかんが騒音の予測結果を左右する。この中で気象以外の影響についてはある程度まで定量的な評価が可能となっている。しかし、気象、特に風の影響については古くから多くの研究がなされているにもかかわらず、いまだ実用的な評価法が確立されていない。

実験を主体とした研究では P. H. Parkin & W. E. Scholes⁽¹⁾等の報告が広く知られ、国内では石井、橋、吉久⁽²⁾が系統的な実験を実施し予測式の作成を試みているが未完である。理論的には音の伝搬を幾何学的に表現する音線法と波動方程式を直接扱うものがあるが、音線法は定量評価が困難で、周波数依存性が表現できないため実用上不適と言え、波動方程式を扱うものは解析を容易にするため非現実的な仮定が設けられている場合が多く、また、結果も複雑で騒音アセスメントへの適用の観点からは実用的でない。このような背景の下で、筆者らは約3か月にわたるフィールドテストと理論検討をベースに風による減衰量の簡便予測式の作成を試みた。

2. 理 論 検 討

2.1 A. D. Pierce の風上式

A. D. Pierce は音速分布を線形近似し、音速こう配が負となる風上においてシャドーゾーン内の音圧 p を次式で与えている⁽³⁾。

$$p = \left(\frac{1}{2 k_0 r t^2} \right)^{1/2} \frac{1}{K} \left(\frac{t}{h_s} \right)^{1/4} \left(\frac{t}{h_r} \right)^{1/4} \cdot \exp(-\alpha \Delta r) \cdot \exp(j\omega \Delta \tau) \quad (1)$$

$$k_0 = \omega / c_0$$

$$t = (R/2 k_0^2)^{1/3}$$

$$R = c / (dc/dz)$$

$$\Delta r = r - (2 R h_s)^{1/2} - (2 R h_r)^{1/2}$$

$$\Delta \tau = \tau(h_s) + \Delta r/v + \tau(h_r)$$

ここに

h_s : 音源高さ
 h_r : 受音点高さ
 ω : 角周波数
 c : 音速
 r : 音源と受音点間の水平距離
 $\tau(h_s)$: 音源側円弧に沿う伝搬時間遅れ
 $\tau(h_r)$: 受音点側円弧に沿う伝搬時間遅れ
 v : Creeping wave の伝搬速度 (ω/k_r)
 添字 0 : 地表面 ($z=0$) の値を示す

$$\left. \begin{aligned} 1/K &= e^{j\pi/12}/1.04 \\ \alpha &= 0.699 (k_0/R^2)^{1/3} \\ k_r &= k_0 + 0.40 (k_0/R^2)^{1/3} \end{aligned} \right\} \text{剛境界}$$

$$\left. \begin{aligned} 1/K &= e^{j\pi/12}/1.74 \\ \alpha &= 1.607 (k_0/R^2)^{1/3} \\ k_r &= k_0 + 0.93 (k_0/R^2)^{1/3} \end{aligned} \right\} \text{自由境界}$$

シャドーゾーンは幾何学的な音線理論では音が到達しない領域であるが、実際には地表面に沿って伝搬する Creeping wave の形でこの領域内へも音波が到達するとされている。この様子を図1に模式的に示すが、 R は音速分布が線形の場合に音線が描く円

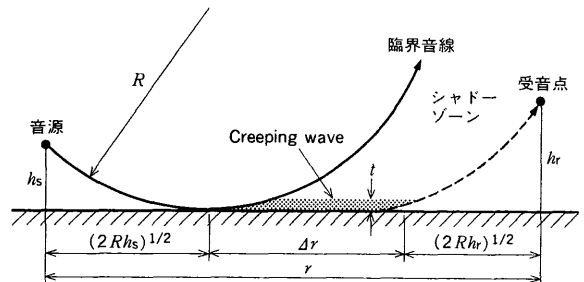


図1 シャドーゾーン内への音の伝搬 風上伝搬におけるシャドーゾーン内への Creeping wave による音の伝搬を示す模式図。
 Propagation of sound into a shadow zone by creeping wave

*¹ 高砂研究所振動・騒音研究室主務

*² 高砂研究所第二実験課

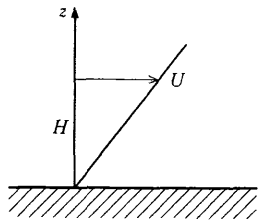


図2 風速分布 解析で用いた線形の風速分布。
Assumed wind profile

弧の曲率半径を示し、 t はCreeping waveの厚さを、 Δr はCreeping waveの伝搬距離を示している。

2.2 超過減衰量のベクトル風速表示

ここで、A. D. Pierceの式(1)を簡略化し、風による超過減衰量の形でベクトル風速表示とするため次の仮定を設ける。

- (a) 風速分布は図2のような線形である。
- (b) 風速分布が線形の場合は屈折に伴う超過減衰量は小さく、無視し得る。

このとき、風による超過減衰量 A_e は受音点がシャドーゾーンの境界上にあるときの音圧を基準にして次式のように表せる。

$$\begin{aligned} A_e &= 20 \log \left| \frac{p^*}{p} \right| = 20 \log e \cdot \alpha \Delta r - 10 \log (R^*/R)^{1/3} \\ &= \gamma (k_0/R^2)^{1/3} [r - (2Rh_s)^{1/2} - (2Rh_r)^{1/2}] \\ &\quad - 10 \log (R^*/R)^{1/3} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、*印は受音点がシャドーゾーンの境界上にある“臨界条件”を示し、右辺第一項はCreeping waveの減衰を、第二項はシャドーゾーン内での屈折による減衰を示している。記述の仮定(b)により第二項も省略すると、風上における A_e は次式のように単純化される。

$$\begin{aligned} A_e &= \gamma (k_0/R^2)^{1/3} [r - (2Rh_s)^{1/2} - (2Rh_r)^{1/2}] \\ \gamma &= 6.07 \text{ (剛境界)} \\ &= 13.96 \text{ (自由境界)} \end{aligned} \quad (3)$$

次に、式(3)に含まれる R のベクトル風速表示を考える。高さ z 方向に温度、風速分布がある場合の音速は次式で与えられる。

$$c(z) = c(T) + u(z) \cos \theta \quad (4)$$

ここに、

$c(z)$: 音速分布

$c(T)$: 無風時の音速

T : 絶対温度

$u(z)$: 風速分布

θ : 音の伝搬方向と風向との成す角度

音速 c は T の平方根に比例することから

$$\begin{aligned} \frac{dc}{dz} &= \frac{1}{2} \frac{c_0}{\sqrt{T \cdot T_0}} \frac{dT}{dz} + \frac{du}{dz} \cos \theta \\ &= \frac{c_0}{2 T_0} \frac{dT}{dz} + \frac{du}{dz} \cos \theta \end{aligned} \quad (5)$$

さらに、温度の影響を無視すると、線形の風速分布の仮定から

$$\frac{dc}{dz} = \frac{U}{H} \cos \theta = \frac{U_v}{H} \quad (6)$$

ここに、

U : 高さ H における絶対風速

H : 風速の計測高さ

U_v : ベクトル風速 ($= U \cos \theta$)

式(6)を用いて R を書き直すと次式が得られる。ただし、負のこう配を仮定していることから $U_v < 0$ であるが、簡単のため絶対値記号を省略して記述する。

$$R = \frac{c_0}{(dc/dz)_0} = \frac{c_0 H}{U_v} \quad (7)$$

式(7)、及び $k_0 = 2\pi f / c_0$ を式(3)に代入し整理すると A_e とベクトル風速の関係を示す次式が得られる。

$$\begin{aligned} A_e &= \gamma \left[\frac{2\pi}{c_0^3 H^2} \right]^{1/3} U_v^{2/3} f^{1/3} \\ &\quad \cdot \left[r - \sqrt{\frac{2c_0 H}{U_v}} (\sqrt{h_s} + \sqrt{h_r}) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)において右辺の[]内が0となるのは受音点がシャドーゾーンの境界上にあるときで、このときのベクトル風速 U_v^* は次のようになる。

$$U_v^* = [\sqrt{2c_0 H} (\sqrt{h_s} + \sqrt{h_r}) / r]^2 \quad (9)$$

以上のことから風上の風による A_e は次のようになる。

$$U_v < -U_v^*; A_e = \text{式(8)}$$

$$-U_v^* \leq U_v < 0; A_e = 0$$

3. フィールドテスト

風上における超過減衰量予測式の妥当性確認と、風下における超過減衰量の予測式を実験的に求めることを目的にフィールドテストを実施した。

3.1 試験場所・時期

テストは当社高砂製作所構内の海岸に沿った埋立て地で実施した。

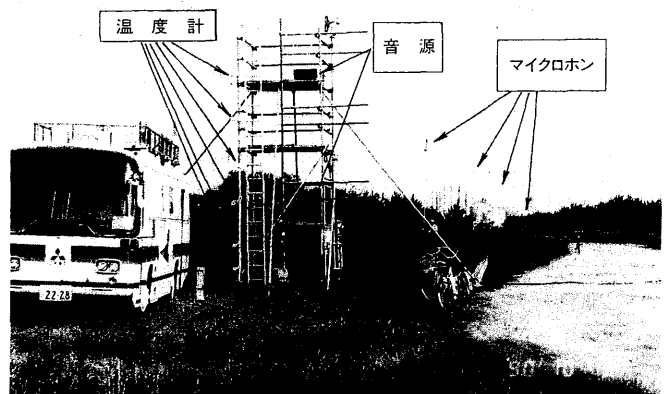


図3 試験場所 フィールドテストの実施場所の全景を示した写真。
General view of the test field

- (1) 周辺地形 図3に全景を示すが、東西に伸びる幅約50m、長さ約600mの平たん地で、南側は海、北側は高さ5m位の松などの樹木がまばらに生えている。
- (2) 地表面特性 幅約6mの砂利道の両側に50cm位の草が生い茂っている。
- (3) 実施時期 試験は平成2年10月~12月の3か月にわたって実施したが、この期間気象の状況をにらみながら風向、風速が偏らないようデータを採取したため、実質の試験日は約20日間である。

3.2 試験方法

試験方法を図4に示すが、概要は次のとおりである。

- (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 風向、風速、及び温度分布を音源位置で計測した。

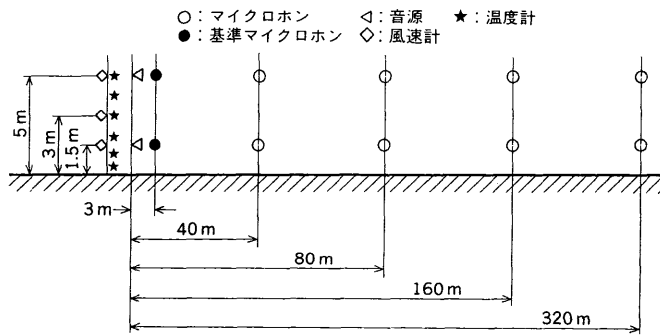


図4 試験方法 計測点、計測器の配置
Arrangement of field test equipments

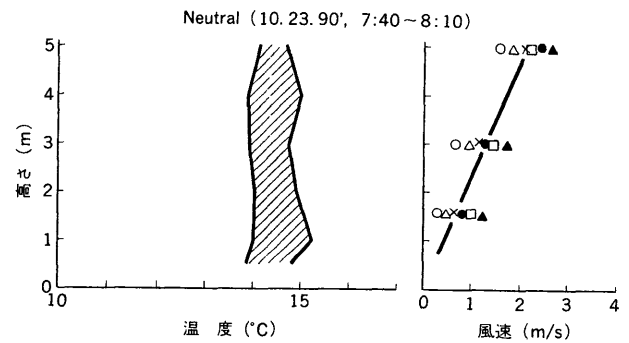


図5 風速、温度分布計測例 試験時の風速、温度分布の計測例。
Wind and temperature distribution

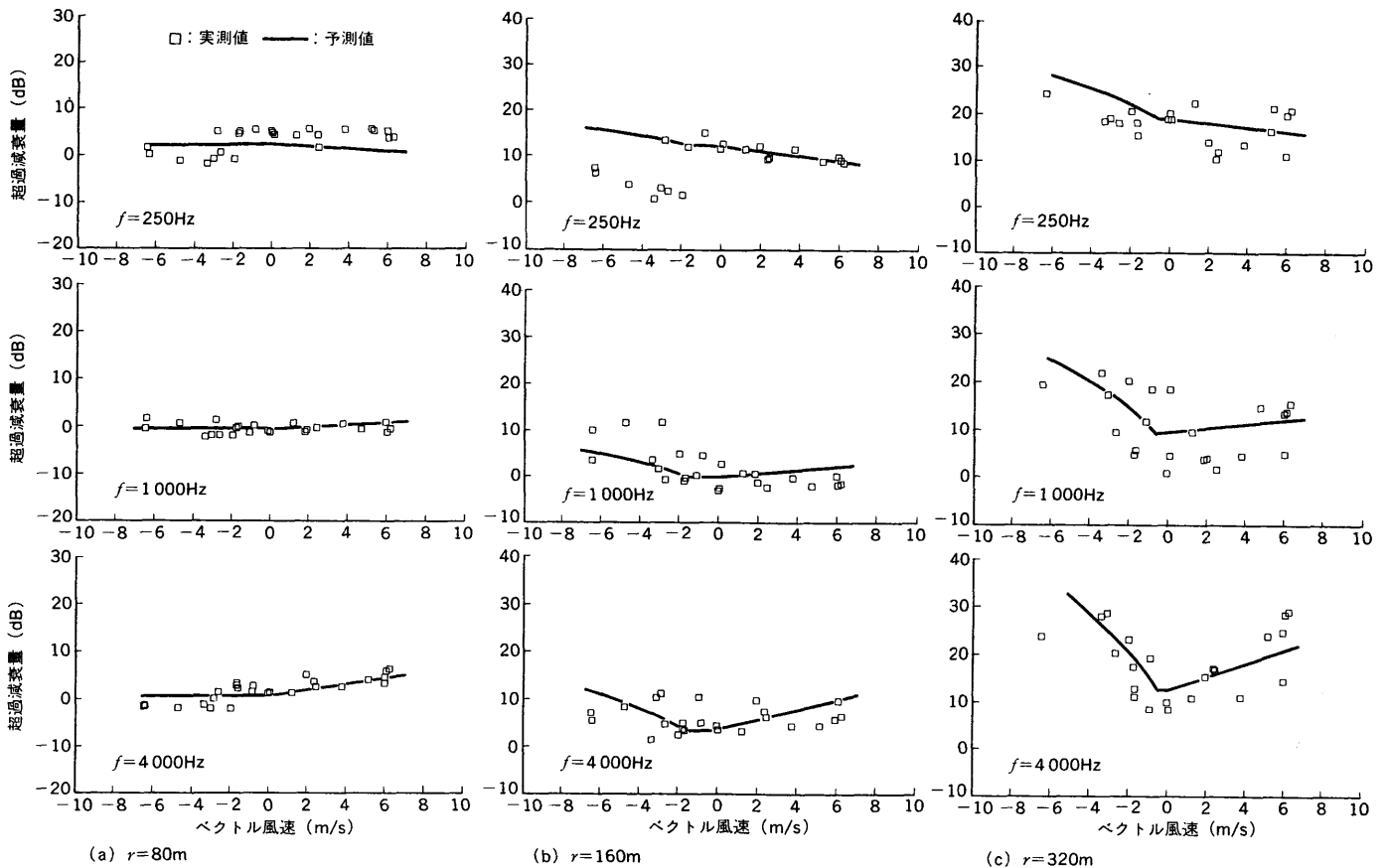


図6 超過減衰量の実測例と予測式との比較 (Neutral; $h_s=5\text{ m}$, $h_r=1.5\text{ m}$) 超過減衰量の実測例、及び予測式との対応を比較した図。
Comparison of measured and predicted excess attenuation by wind

(3) 計測時間帯 計測時間帯は 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。

3.3 試験結果

3.3.1 風速分布

風速分布の計測例を図5に示すが、ばらつきはあるものの5m以下の計測範囲内では記述の理論展開で仮定したようにほぼ線形となっている。なお、図中数点のデータは一回の計測(125 Hz ~ 8 kHz) 時間約 40 min 間の風速の変動に対応している。

3.3.2 超過減衰量

超過減衰量 A_e は受音点と基準点との音圧レベル差から距離減衰を差し引いたものとし、これらをベクトル風速に対してプロットしたものの例を図6に示す。なお、ベクトル風速は5m高さの風向、風速から算出している。

(1) 中立, 漸減時のデータは逆転時のデータに比しばらつきが大きくなっているが、これは中立, 漸減時には大気不安定となり音波の散乱が生じたためと思われる。

(2) 橘等⁽²⁾の結果ではベクトル風速に対し A_e が右下がりとなっているが、本データでは 500 Hz 以下の低周波数はこの傾向を示しているものの、これより高周波数では無風時に比し風下、風上のいずれにおいても A_e は増加している。なお、ベクトル風速 0 付近の値は空気吸収、地表面吸収などの風以外の要因による A_e を示している。

4. 風による減衰量の予測式

4.1 風上予測式

風上における A_e の予測式(8)と実際のフィールドテストの間には次の相違点がある。

表1 γ の値
Measured γ values

温度分布	γ
Neutral (中立)	1.0
Lapse (漸減)	1.1
Inverse (逆転)	1.3

(a) 式(1)では音源を含む z 軸に対して軸対称場が仮定されているが、風による音速こう配は風上では負、風下では正となり軸対称ではない。

(b) フィールドテスト結果には式中に表現されていない温度分布、地表面の音響特性、及び大気の流れによる音波散乱の影響が含まれている。

このため、上記の不確定要因をすべて式(8)の係数 γ に含めて考え、フィールドテスト結果から得られた3種の温度分布に対する風上 A_e データから γ を逆推定した。この結果を表1に、また、この値を用いた予測式とテスト結果との対応を図6に示す。図中ベクトル風速0付近の一定値は $-U_v^* \leq U_v \leq 0$ における A_e データの平均値であり、風以外の要因による A_e を表している。

4.2 風下予測式

風下については現状、式(1)に対応するような理論展開が成されていないため、フィールドデータから実験式を求めることを試みた。風下($U_v > 0$)データはばらつきが大きい、ベクトル風速に対して直線的に変化しているものとみなし、風下減衰量として次式を仮定した。

$$A_e = A \cdot U_v + B \quad (10)$$

ここで、 A 、 B は音源高さ h_s 、受音点高さ h_r 、距離 r 、周波数 f 、及び温度分布の関数である。風下の A_e データを、これらのパラメータ別にベクトル風速に対しプロットし、最小二乗法により A 、 B を求めた結果 $B \approx 0$ となり次式が得られた⁽⁴⁾。

$$A_e = \xi [\log(r/r_0) \log(f/f_0)] \cdot U_v \quad (11)$$

ここで ξ 、 r_0 、 f_0 は表2に示す値である。式(11)と実測データとの比較例は図6中に示してある。

4.3 予測式の評価

図6に示すように予測式とフィールドテスト結果との対応は必ずしも十分とは言えないが、現状この種の予測式が皆無に近いことを考えればまずまずの結果と言える。ここで、今後の展開も含め、予測式、フィールドテスト結果についての評価を以下に整理しておく。

(1) 風上予測式について

フィールドテストから逆算した予測式の係数 γ の値は理論値6.07(剛境界)~13.96(自由境界)より一桁小さくなっているが、これは4.1節で述べた理論とフィールドテストとの相

表2 ξ 、 r_0 、 f_0 の値
Parameters obtained by field test

温度分布	ξ	r_0 (m)	f_0 (Hz)
Neutral (中立)	1.4	25	500
Lapse (漸減)	2.3	25	500
Inverse (逆転)	3.4	25	1250

違によるものと思われる。したがって、予測式をより汎用性のあるものにするためには係数 γ と地表面音響特性との関係を明確にしておく必要がある。

(2) 風下予測式について

風下についてはフィールドテスト結果の整理によりほぼ次の点が明らかとなった。

(a) 従来、風下では無風時に比し A_e が低下する、すなわち受音点の音圧レベルが増加するとされてきたが、高周波数では風下でも風上と同様に A_e が増加する。

(b) 風下の A_e は略音源からの距離、及び周波数の対数に比例する。

しかし、データ数も少ないことから音源高さ、受音点高さの影響は明確でなかった。風下 A_e のフィールドテスト結果は図6にも見られるように、風速、周波数に対して大きな変化を示しており、風上と同様の展開による理論的裏付けが望まれる。

5. む す び

騒音伝搬に及ぼす風の影響について検討し以下の結果を得た。

(1) A. D. Pierceの理論をベースに風上における超過減衰量の実用的予測式を誘導した。

(2) フィールドテストにより上記予測式の妥当性を確認するとともに、風下における超過減衰量の予測式を作成した。

今後は風下予測式の理論的裏付けと、更なるデータの蓄積により予測式の精度向上を図っていく予定である。

参 考 文 献

- (1) Parkin, P. H. et al., The horizontal propagation of sound from a jet engine close to the ground, at Radlett, J. Sound Vib. Vol.1 No.1 (1964) p.1
- (2) 橋ほか、騒音の広域伝搬に対する風の影響の実用的予測方法、日本音響学会講演論文集(昭57.10) p.395
- (3) Pierce, A. D. Acoustics; An Introduction to its physical principles and application, McGraw-Hill (1981) p.469
- (4) 大倉ほか、騒音伝搬に及ぼす風の影響評価法(その3-風下減衰量について)、日本音響学会講演論文集(平4.10) p.713