

京大・衛生工 藤木 修* (正)、高木興一 (正)、山本剛夫 (正)

1. はしがき 近年、空港等の立地に関連して、騒音の長距離伝搬に対する気象の影響を事前に予測する必要が高まっている。従来、音の伝搬に対する風速或は気温分布の効果を計算するために、ひろく音線的手法が用いられてきたが、音線理論は、音の周波数による伝搬特性の相違が説明できないなど、不満足な点が多い。本稿では、大気中の風速と気温の鉛直プロファイルによる音圧レベル分布の変化を、波動方程式に基づく音波散乱理論の立場から定量的に把握する新しい手法を提案し、この方法の適合性を風洞実験によって検証する。

2. 音波散乱理論 移動する媒体中を伝搬する音波についての波動方程式は、通常

$$\frac{1}{C^2} \left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \right)^2 p = \nabla^2 p \quad \text{----- (1)}$$

と表される。¹⁾ $\mathbf{v}$ は媒体の速度、 C は媒体に対する音速である。媒体の非圧縮性の条件 ($\nabla \cdot \mathbf{v}$) = 0 を加味し、更に $p = E e^{-i\omega t}$ とおくと、(1) 式は近似的に

$$(\nabla^2 + k^2) E + \frac{2ik}{C} (\mathbf{v} \cdot \nabla E) \simeq 0 \quad \text{ただし } k \equiv \omega/C \quad \text{----- (2)}$$

となる。位置 $\mathbf{r}$ における媒体の温度 T (°K) を、基準点における温度 T_0 とそれよりの偏差 ΔT (K) により、 $T(\mathbf{r}) = T_0 + \Delta T(\mathbf{r})$ と表す。 $\Delta T/T \ll 1$ 、 $|\mathbf{v}|/C \ll 1$ と仮定し、大気中では $C \propto \sqrt{T}$ であることを考慮すれば (3) 式より

$$(\nabla^2 + k_0^2) E \simeq k_0^2 \left(\frac{\Delta T}{T_0} \right) E - 2ik_0 \left(\frac{\mathbf{v}}{C_0} \cdot \nabla E \right) \quad \text{----- (3)}$$

を得る。V. I. Tatarski²⁾ にならい、(3) 式に対して摂動法を適用すると微小量 $\Delta T/T_0$ 、又は $\mathbf{v}/C_0$ の 0 次及び 1 次のオーダーの項 E_0 、 E_1 について以下の関係が導かれる。

$$(\nabla^2 + k_0^2) E_0 = 0 \quad \text{----- (4)} \quad (\nabla^2 + k_0^2) E_1 = k_0^2 \left(\frac{\Delta T}{T_0} \right) E_0 - 2ik_0 \left(\frac{\mathbf{v}}{C_0} \cdot \nabla E_0 \right) \quad \text{----- (5)}$$

完全吸音性の地表面を仮定し、 $E_0 = A_0 e^{ik_0 r}/r$ とおく。ここに A_0 は定数である。 $k_0 r \gg 1$ の場合、非斉次の Helmholtz の方程式 (5) の解は、輻射条件 $\lim_{r \rightarrow \infty} [r (\partial E_1 / \partial r - ik_0 E_1)] = 0$ の下で

$$E_1 = -\frac{A_0}{4\pi} k_0^2 \int_V \left[\left(\frac{\Delta T}{T_0} \right) + 2 \left(\frac{\mathbf{v}}{C_0} \cdot \nabla \right) \right] \frac{e^{ik_0(r+\rho)}}{r\rho} dV \simeq -\frac{A_0}{4\pi} k_0^2 \int_V \left[\left(\frac{\Delta T}{T_0} \right) + 2 \left(\frac{\mathbf{v}}{C_0} \cdot \nabla \right) \right] \frac{e^{ik_0(r+\rho)}}{r\rho} dV \quad \text{----- (6)}$$

と表される。ただし、 r 、 ρ はそれぞれ音源、受音点から体積素 dV までの距離、 $\mathbf{v}$ は流体速度 $\mathbf{v}$ の音源-受音点方向の成分である。今、音源、受音点共に地表面上にあり、気温 T と風速 $\mathbf{v}$ の鉛直プロファイルが、高さ z と r 、 ρ の関数として次のように与えられるものとしよう。

$$T = T_0 + e^{-\varepsilon(r+\rho)} \sum_{j=1}^{\ell} T_j z^{V_j} \quad \text{--- (7)} \quad \mathbf{v} = \mathbf{v}_i e^{-\varepsilon(r+\rho)} (z/Z_i)^{V_{2i+1}} \quad \text{--- (8)}$$

この時、(6) 式は $E_1 = -\frac{A_0}{4\pi} k_0^2 \sum_{j=1}^{\ell} T_j I_j$ --- (9) $I_j \equiv \int_V z^{V_j} \frac{e^{-(\varepsilon - ik_0)(r+\rho)}}{r\rho} dV$ ----- (10)

となる。ただし、 ε は前述の輻射条件を満たすために導入されたもので、十分小さな正数であり、積分領域 V は地表面より上の半無限空間を示す。また、 $V_j \equiv T_j/T_0$ ($1 \leq j \leq \ell$)、 $V_{2i+1} \equiv 2V_i/(C_0 Z_i^{V_{2i+1}})$ となっている。局長回転楕円体座標 (Prolate Spheroidal Coordinates) を用いて (10) 式の積分を実行すると、音源、受音点間の距離 R が十分大きい場合、

* 現在、建設省土木研究所に勤務

$$E_1 \sim \frac{A_0}{4} \sum_{i=1}^{41} \frac{V_i \Gamma(1 + \frac{V_i}{2})}{2^{V_i/2} (1 + V_i)} R_0^{1 - \frac{V_i}{2}} R^{\frac{V_i}{2}} e^{i(\frac{V_i}{2} - \frac{1}{2})\pi} e^{ik_0 R} \quad \text{----- (11)}$$

となる。風速及び気温の鉛直プロファイルによる音圧レベルの増分 ΔL (dB) は、

$$\Delta L = 10 \log_{10} E/E_0 \sim 10 \log_{10} (E_0 + E_1)/E_0 \quad \text{----- (12)}$$

と表されるから、(11)式を代入して V_i の1次の項まで残すと

$$\Delta L \sim 10 \log_{10} (1 + \phi) \quad \text{---- (13)} \quad \text{ただし } \phi = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{41} \frac{V_i \Gamma(1 + \frac{V_i}{2})}{2^{V_i/2} (1 + V_i)} R_0^{1 - \frac{V_i}{2}} R^{1 + \frac{V_i}{2}} \sin \frac{V_i}{4} \pi \quad \text{---- (14)}$$

となる。更に高次の散乱波の効果も考慮するため、(12)式を数案して(14)式を $\Delta L = 10 \log_{10} (1 + \phi + \alpha)$ と補正する。橘、石井²⁾及び後述の著者らの風洞実験から帰納的に得られた関係 $\Delta L(V_1) + \Delta L(-V_1) \approx 0$ を一般化して $\Delta L(\phi) + \Delta L(-\phi) = 0$ とおくと、これより補正項 α は、 $\alpha = \sqrt{1 + \phi^2} - 1$ と決定される。結局(13)式の代わりに

$$\Delta L = 10 \log_{10} (\sqrt{1 + \phi^2} + \phi) \quad (15) \quad \text{を採用する。}$$

3. 風洞実験 実験に使用した風洞は、内部をグラスウールとフェルト、スポンジで簡易吸音処理した吸込式 E 型風洞(高さ1.5 m × 幅2.5 m)である。音源には無指向性ジェット・ノイズ・ノズルを、受音には1/4 in. コンデンサ型マイクを用いた。ノズルとマイクの高さは共に1.5 cmで、両者の距離は、25, 35, 50, 70, 100, 140 cmの6種類である。粗度板を用いて作った4種類の風速プロファイルを図1に示す。試験音は1/3オクターブ分析し、その中心周波数を20K, 40K, 80KHzの3種類に設定した。

4. 実験結果 橘、石井²⁾は、音の伝搬に対する風の影響を調べるため著者らに先立って既に一連の風洞実験を行なっている。Fig. 2, Fig. 3は、著者らのデータ(黒丸)と橘、石井のデータ(白丸)を、パラメータ ϕ と風による音圧レベルの増分 ΔL の関係に整理して表したものである。 ϕ の計算には(14)式を簡略化した近似式

$$\phi = \frac{\pi}{4} \frac{m(1 - 0.63m)}{1 + m} \frac{V_1}{C_0} Z_1^{-m} R_0^{1 - \frac{m}{2}} R^{1 + \frac{m}{2}} \quad \text{ただし } m \equiv \gamma_{2+1} \quad \text{---- (16)}$$

を用いている。図中の曲線は(15)式の関係を示す。風下伝搬については、著者らのデータと橘、石井のデータは共に理論曲線とよく一致しており、ばらつきは比較的小さい。しかし風上伝搬では両者のデータ間にやや傾向の相違が見られ、著者らの ΔL の方が比較的小さい値をとる。曲線は両者のデータのほぼ中間の値を示している。

5. あとがき 風洞実験について適切な助言を与えて下さった京都市衛生研究所の橋本和乎氏、東大生産技術研究所の橋本樹氏、大阪府公害監視センターの中村隆一氏、上掘松白出氏に深謝の意を表します。

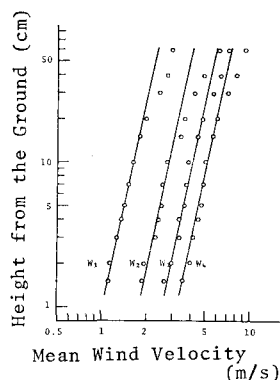


Fig.1 Profiles of Mean Wind Velocity

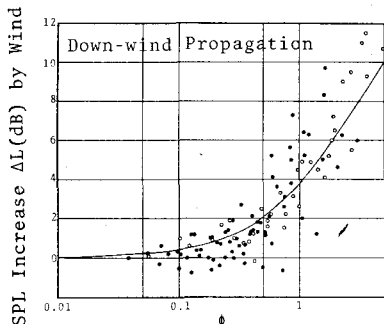


Fig.2

RELATION BETWEEN ΔL AND ϕ

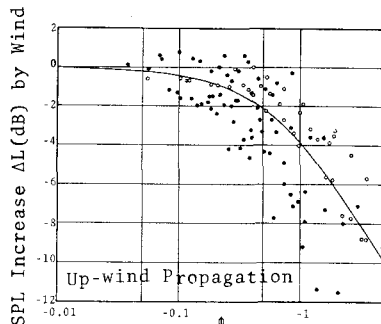


Fig.3

(文献) 1) Tatarski: Wave Propagation in a Turbulent Medium (McGraw-Hill) 2) Tachibana, Ishi: Scale Model Experiment on Outdoor Sound Propagation (ICA, Madrid, 1977)