

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-460

音圧反射係数の測定法と地面反射補正について

渡 辺 実 ・ 武 田 克 己

小 竹 進

1976 年 6 月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

音圧反射係数の測定法と地面反射補正について*

渡辺 実**・武田 克己**
小竹 進***

Measurement Method for Pressure Reflection Coefficients and Ground Reflection Correction

By Minoru WATANABE, Katsumi TAKEDA
and Susumu KOTAKE

ABSTRACT

This study was made to establish a practical method of correcting the effects of ground reflection on acoustic measurements of jet engine noise.

The pressure reflection coefficient of the reflecting plane was estimated to correct the effects of ground reflection on acoustic radiation field through measurement of the distance-attenuation of a pure tone influenced by ground reflection.

Examples of ground reflection correction for jet engine noise were demonstrated with reasonable results showing the practicality of the proposed procedure.

1. まえがき

ジェットエンジンの騒音測定の場合のように、近くに建物などの音の反射物体のない十分広い屋外で、遠距離場での音圧を測定して、音源の指向性、音響出力及びその周波数スペクトルなどを求めようとするときは、その測定値から地面反射の影響をとり除いて、自由音場での値を推定する必要がある。

M. E. Delany と E. N. Bazley⁽¹⁾⁽²⁾ は、吸音性の反射面が存在するときの点音源による音場の解析及び実験を行ない、平面波音圧反射係数を用いた音響映像法が、反射面のごく近くを除いては、非常に有効であることを示している。一般の指向性音源は、点音源の分布と考えることができるから、平面波音圧反射係数と点音源の分布が与えられれば、この場合の音場も明かにすることができる。しかし、実際には、この両方共与えられているもの

ではない。平面波音圧反射係数は、反射面の局所作用性を仮定できる場合には入射角に依存しない媒質の音響インピーダンスと入射角から計算できるが、局所作用性を仮定できない場合には、第2媒質中での音の減衰も考慮する必要があり、多孔質吸音材の他は計算できる資料がない。

本報告では、まず反射面の音響的性質を反映して生ずる音の距離減衰を測定することにより、逆に反射面の音響的性質である音圧反射係数を直接求め、さらにその結果を用いて、地面反射の影響を補正する方法を示した。この場合、反射面に対する局所作用性の仮定は必要としない。

コンクリート面の音圧反射係数の実測値から、コンクリート面といえども、大きい入射角においては、かなりの吸音性を示すことがわかった。

又、この実測値を用いて、実際のジェットエンジン騒音に対して、地面反射の補正を試みた結果、補正後のスペクトルから、この補正方法がかなり妥当性のあることが認められた。

* 昭和51年4月22日 受付

** 原動機部

*** 東大宇宙航空研究所

2. 記号

- c : 音速
- ω : 音の角周波数
- f : 音の周波数
- k : 音の波数
- t : 時間
- p : 複素音圧
- v : 複素粒子速度
- ρ : 密度又は半径
- α : 音源面上の角
- β : 反射面上の角
- r : 音波の入射角
- θ : エンジン回転軸からの角
- a : 円形音源面の半径
- d : 距離
- r : 音波の行路
- h : 音源の反射面からの高さ
- H : 受音点の反射面からの高さ
- R : 反射面上での距離
- SPL : 音圧レベル
- ζ : 音響インピーダンス
- ζ_e : 有効音響インピーダンス
- Q : 音圧反射係数
- $R_e\{ \}$: 複素数の実数部
- $I_m\{ \}$: 複素数の虚数部
- dL : 補正量 (dB)
- τ : 時間遅れ $\frac{\tau_2 - \tau_1}{c}$

添字

- 1 : 第1媒質 (空気) 又は実音源
- 2 : 第2媒質 (反射面を構成する媒質) 又は映像音源
- P : 平面波
- S : 反射面のある場合又は球面波
- R : 反射面のない場合又は複素数の実数部
- I : 複素数の虚数部

3. 地面反射のある場合の音源

3.1 点音源の場合

図1のように S_1 なる点音源が、反射面の近くに存在する場合に、任意の点Pの音場を考えると、 S_1 から直接到達した音波と S_1 から出て一度反射面で反射されてきた音波との合成として表わされる。一度反射面で反射して来る音波は、みかけ上反射面に対する S_1 の映像の位置にある S_2 から来るものと考えることができる。この音響映像 S_2 の強さ及び位相は、反射面の音響的性質によって決る

ものである。反射面の球面波音圧反射係数を Q_S とすると、P点の音圧 (p_S) は、次の形で与えられる。

$$p_S = \frac{e}{r_1} e^{i\omega(t-\frac{r_1}{c})} + Q_S \frac{e}{r_2} e^{i\omega(t-\frac{r_2}{c})} \quad (1)$$

M. E. Delany⁽¹⁾⁽²⁾ らは、通常の吸音性反射面について、音源又は受音点の反射面からの高さが半波長より大きければ、球面波音圧反射係数 Q_S の代わりに、平面波音圧反射係数 Q_p を用いた(1)式が、実用上非常に良い近似を与えることを示している。

平面波音圧反射係数 Q_p は、反射面を構成する媒質の音響的性質が与えられると次式のより求められる⁽³⁾

$$Q_p = \frac{\zeta_e \cos \tau_1 - 1}{\zeta_e \cos \tau_1 + 1} \quad (2)$$

ζ_e は有効音響インピーダンス (effective specific impedance) で

$$\zeta_e = \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} \left\{ 1 - \left(\frac{c_2}{c_1} \sin \tau_1 \right)^2 \right\}^{-1/2} \quad (3)$$

で与えられるものである。

反射面が局所作用性 ($|c_2| \ll c_1$) のとき、 ζ_e は入射角 τ_1 に依存しない反射面の音響インピーダンス ζ (specific point impedance) になる。即ち

$$\zeta_e \doteq \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} = \frac{p/v}{\rho_1 c_1} = \zeta \quad (4)$$

である。

3.2 分布音源の場合

図2のような円形面音源について考え、 xz 面を音圧反射係数Qの反射面とし、実音源面内の微小面積を dS_1 、 dS_1 でのこれに垂直な粒子速度を $v_x(t)$ 、 dS_1 の映像を dS_2 とすると、 dS_1 、 dS_2 による受音点Pでの音圧 dp_S は

$$dp_S = \frac{\rho_1}{2\pi r_1'} \frac{\partial v_x(t-\frac{r_1'}{c})}{\partial t} dS_1 + Q \frac{\rho_1}{2\pi r_2'} \frac{\partial v_x(t-\frac{r_2'}{c})}{\partial t} dS_2 \quad (5)$$

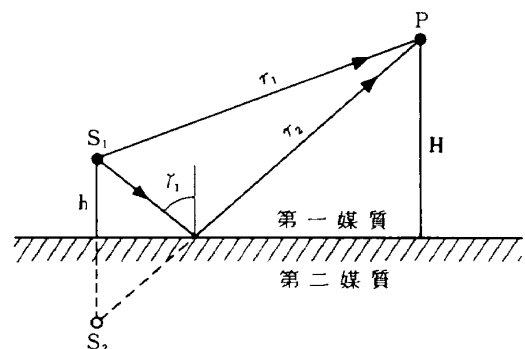


図1. 反射面がある場合の音場 (点音源)

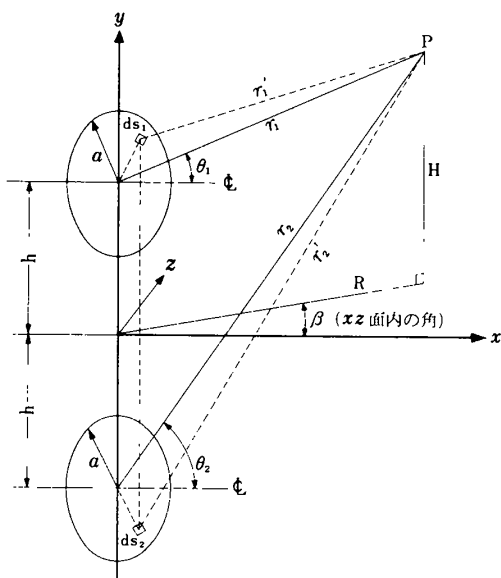


図2. 反射面がある場合の音源(分布音源)

となる。(バッフル板を考えているので、 4π ではなく 2π となる)

一般に、ファンエンジンの騒音は、音源面に垂直な粒子速度 v_x が半径方向に n 個の節をもち、周方向に m 個のローブをもつ回転モードから成る場合が多いから

$$v_x(t, \rho, \alpha, \omega) = \sum_{m,n} V_{mn} J_m(k_{mn} \rho) e^{i(m\alpha - \omega t)} \quad (6)$$

但し ρ : 音源面内での中心からの距離

α : 音源面内で ρ が基準半径方向となす角

J_m : 第1種 m 次ベッセル関数

k_{mn} : 音響的な境界条件から決る (m, n) モードの波数

V_{mn} : (m, n) モードに対する定数

を考えると、遠距離場の仮定を用いて、反射面がある場合の P 点における円形面音源による音圧 $p_S(\omega)$ は、次のように表わされる。

$$p_S(\omega) = A(\theta_1) \frac{e^{i\omega(t - \frac{r_1}{c})}}{r_1} + Q \cdot A(\theta_2) \frac{e^{i\omega(t - \frac{r_2}{c})}}{r_2} \quad (7)$$

但し

$$A(\theta) = \sum_{m,n} \frac{U_{mn} a^2}{(k_{mn} a)^2 - (k a \sin \theta)^2} \times \left\{ k_{mn} a J_m(k a \sin \theta) J_{m+1}(k_{mn} a) - k a \sin \theta \cdot J_m(k_{mn} a) J_{m+1}(k a \sin \theta) \right\} \quad (8)$$

U_{mn} : (m, n) モードに対する定数

従って、

$$|p_S(\omega)|^2 = \frac{|A(\theta_1)|^2}{r_1^2} + \frac{|Q \cdot A(\theta_2)|^2}{r_2^2} + 2 \frac{|A(\theta_1)|^2}{r_1 r_2} \left[R_e \left\{ Q \frac{A(\theta_2)}{A(\theta_1)} \right\} \cos \omega \tau + I_m \left\{ Q \frac{A(\theta_2)}{A(\theta_1)} \right\} \sin \omega \tau \right] \quad (9)$$

反射面がないときの P 点における音圧 $p_R(\omega)$ は(7)式の第1項だけで

$$|p_R(\omega)|^2 = \frac{|A(\theta)|^2}{r_1^2} \quad (10)$$

となる。

従って(9)(10)式を用いて、反射面の存在のもとで測定された音圧レベル(SPL_S)から、反射面がない場合の放射場の音圧レベル(SPL_R)を推定することができる。

すなわち

$$SPL_R = SPL_S - \Delta L \quad (11)$$

但し

$$\Delta L = 10 \log \frac{|p_S(\omega)|^2}{|p_R(\omega)|^2} = 10 \log \left(1 + 2 \frac{r_1}{r_2} \left[R_e \left\{ Q \frac{A(\theta_2)}{A(\theta_1)} \right\} \cos \omega \tau + I_m \left\{ Q \frac{A(\theta_2)}{A(\theta_1)} \right\} \sin \omega \tau \right] + \frac{r_1^2}{r_2^2} \left| Q \frac{A(\theta_2)}{A(\theta_1)} \right|^2 \right) \quad (12)$$

$$\frac{r_1}{r_2} = \left\{ \frac{R^2 + (H-h)^2}{R^2 + (H+h)^2} \right\}^{1/2}$$

$$\theta_1 = \sin^{-1} \left\{ \frac{R^2 \sin^2 \beta + (H-h)^2}{R^2 + (H-h)^2} \right\}^{1/2}$$

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left\{ \frac{R^2 \sin^2 \beta + (H+h)^2}{R^2 + (H+h)^2} \right\}^{1/2}$$

(12)式において $A(\theta_2)/A(\theta_1) \div 1$ のときは、点音源としての補正が可能になるが、単一のモードのみを考えると、 θ_1 と θ_2 の相違による $A(\theta_1)$ と $A(\theta_2)$ の相違は大きく、特に高周波数ではその傾向が著しい。

しかし実際のファンエンジンでは、複数モードの重ね合せやその他の不確定要素を考え、 $A(\theta_1) \div A(\theta_2)$ として点音源補正が可能ないように θ_1 と θ_2 の相違を小さくすることが望ましい。

当所におけるジェットエンジン屋外騒音測定では、平面波音圧反射係数を用いても球面波音圧反射係数を用いてもよいように、音源及び受音点の地面からの高さ $h = H = 1.5$ 又は 2.5 m, 測定半径 $R = 50$ mとしている。この場合、 $\cos \theta_1 / \cos \theta_2 = \sqrt{1 + (2H/R)^2}$ の関係から、角度差 $\theta_2 - \theta_1$ を計算すると

$\theta_2 - \theta_1 < 3.5^\circ$ ($h = H = 1.5$ m), 5.8° ($h = H = 2.5$ m)となる。この程度の角度差では $A(\theta_1)/A(\theta_2) \div 1$

とで、点音源としての補正が可能である。

4. 音圧反射係数の測定法と地面反射の補正法

図1のP点における音圧として実際に計測される量は、

(1)式から

$$|p_S|^2 = \frac{1}{\tau_1^2} \left\{ 1 + 2 \frac{\tau_1}{\tau_2} (Q_R \cos \omega \tau + Q_I \sin \omega \tau) + \left(\frac{\tau_1}{\tau_2} \right)^2 |Q|^2 \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= 10 \log_{10} \frac{\left(\frac{1}{d_2} \right)^2 + \frac{2}{d_2 d_2'} (Q_R \cos \omega \tau_2 + Q_I \sin \omega \tau_2) + \left(\frac{1}{d_2'} \right)^2 (Q_R^2 + Q_I^2)}{\left(\frac{1}{d_1} \right)^2 + \frac{2}{d_1 d_1'} (Q_R \cos \omega \tau_1 + Q_I \sin \omega \tau_1) + \left(\frac{1}{d_1'} \right)^2 (Q_R^2 + Q_I^2)} \\ L_2 &= 10 \log_{10} \frac{\left(\frac{1}{d_3} \right)^2 + \frac{2}{d_3 d_3'} (Q_R \cos \omega \tau_3 + Q_I \sin \omega \tau_3) + \left(\frac{1}{d_3'} \right)^2 (Q_R^2 + Q_I^2)}{\left(\frac{1}{d_2} \right)^2 + \frac{2}{d_2 d_2'} (Q_R \cos \omega \tau_2 + Q_I \sin \omega \tau_2) + \left(\frac{1}{d_2'} \right)^2 (Q_R^2 + Q_I^2)} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

但し、 $d_i' = (4H^2 + d_i^2)^{1/2}$
 $\tau_i = (d_i' - d_i) / c \quad i = 1, 2, 3$

従って、Qは距離 d_i ($i = 1, 2, 3$)、音源及び受音点の高さH、レベル差 L_1, L_2 から次のように求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} Q_R &= \frac{-M \pm \sqrt{M^2 - LN}}{L} \\ Q_I &= -\frac{B_1 - B_2}{C_1 - C_2} Q_R - \frac{A_1 - A_2}{C_1 - C_2} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

但し、 $|Q| \leq 1$

$$L = 1 + \left(\frac{B_1 - B_2}{C_1 - C_2} \right)^2$$

$$M = \frac{(A_1 - A_2)(B_1 - B_2)}{(C_1 - C_2)^2} - C_1 \frac{B_1 - B_2}{C_1 - C_2} + B_1$$

$$N = \left(\frac{A_1 - A_2}{C_1 - C_2} \right)^2 - 2C_1 \frac{A_1 - A_2}{C_1 - C_2} + 2A_1$$

$$\left. \begin{aligned} A_i &= \frac{1}{2} \cdot \frac{\left(\frac{1}{d_{i+1}} \right)^2 - 10^{\frac{L_i}{10}} \cdot \left(\frac{1}{d_i} \right)^2}{\left(\frac{1}{d_{i+1}'} \right)^2 - 10^{\frac{L_i}{10}} \cdot \left(\frac{1}{d_i'} \right)^2} \\ B_i &= \frac{\frac{\cos \omega \tau_{i+1}}{d_{i+1} d_{i+1}'} - 10^{\frac{L_i}{10}} \cdot \left(\frac{\cos \omega \tau_i}{d_i d_i'} \right)}{\left(\frac{1}{d_{i+1}} \right)^2 - 10^{\frac{L_i}{10}} \cdot \left(\frac{1}{d_i} \right)^2} \\ C_i &= \frac{\frac{\sin \omega \tau_{i+1}}{d_{i+1} d_{i+1}'} - 10^{\frac{L_i}{10}} \cdot \left(\frac{\sin \omega \tau_i}{d_i d_i'} \right)}{\left(\frac{1}{d_{i+1}'} \right)^2 - 10^{\frac{L_i}{10}} \cdot \left(\frac{1}{d_i'} \right)^2} \end{aligned} \right\} \quad i = 1, 2$$

で与えられる。ただし $Q_S = Q_R + i Q_I$ とした。

今、図1において $h = H = \text{一定}$ として受音点 S_2 を移動し、点音源 S_1 による音の距離減衰を測定し、図3のような距離減衰曲線が得られ、互に近い3点 ($\tau_1 = d_1, d_2, d_3$) で、 d_2 と d_1 での音圧レベル差が L_1 (dB)、 d_3 と d_2 での音圧レベル差が、 L_2 (dB) であるとする。これらの3点では近似的に Q_S を一定と考えれば、 Q_R, Q_I に関する次の連立2次方程式が得られる。

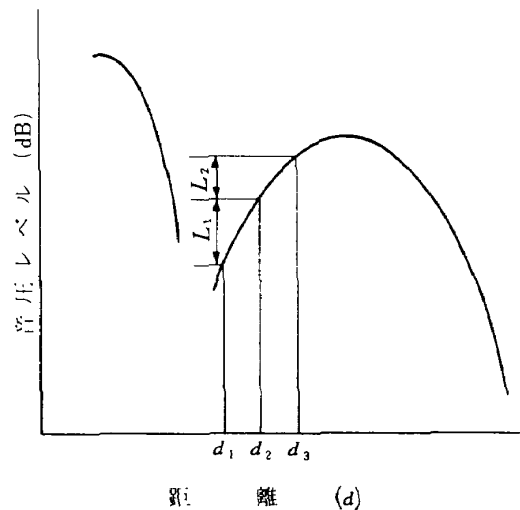


図3. 距離減衰曲線

この Q_R, Q_I を用いて(2)式より地面の有効音響インピーダンス ζ_e を求めることができる。さらに ζ_e を用いて入射角が異なる場合の音圧反射係数を(2)式から求めると、地面反射のある場合の音圧レベル (SPL_S) を次のように補正して自由音場の音圧レベル (SPL_R) を求めることができる。

$$SPL_R = SPL_S - 10 \log_{10} \left\{ 1 + 2 \frac{\tau_1}{\tau_2} (Q_R \cos \omega \tau + Q_I \sin \omega \tau) + \left(\frac{\tau_1}{\tau_2} |Q| \right)^2 \right\} \quad (16)$$

この式は周波数 $f (= \omega / 2\pi)$ の純音についてのものであるが、幅 $\Delta f (= f_b - f_a)$ のバンドノイズの場合には、

音圧反射係数を Δf の中では一定と考えると
 $Q_R \cos \omega \tau + Q_I \sin \omega \tau$

$$\frac{\sin(\pi\tau(f_b - f_a))}{\pi\tau(f_b - f_a)} \{Q_R \cos(\pi\tau(f_b + f_a)) + Q_I \sin(\pi\tau(f_b + f_a))\} \quad (17)$$

で置きかえれば良い。

5. コンクリート面の音圧反射係数の測定

ジェットエンジンの騒音測定に適用するため、当所角田支所実験場のコンクリート面の音圧反射係数を前節の方法に従って実測した。

音源としては直径 200mm のコーンスピーカー（コンクリート面上 1.25m）を用い、1 KHz から 8 KHz の純音を 1/3 オクターブ毎に発生させた。受音は、固定マイクロホン（モニター用）と移動マイクロホンを用い、両者のレベル差を測定して距離減衰を求めた。移動マイクロホンはスピーカーから 10 m ~ 30 m の間で 1 m おきに移動させ、出力は高調波による波形歪みを除くため 1/3 オクターブバンドパスフィルターを通し、レベルレコーダーにより約 20 秒間 1 点でのレベル変動を観測し、その平均レベルを読み取った。測定器の配置を図 4 に、測定例として 2.5 KHz に対する距離減衰を図 5 に示す。曲線は

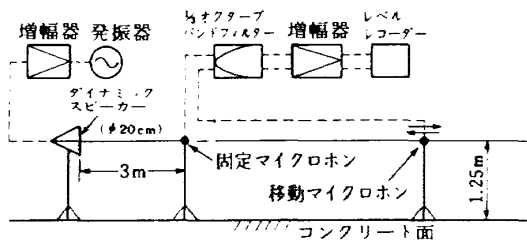


図 4. 測定器の配置

測定データから滑らかに描いたもので、計算に当っては、この曲線上の 1 m おきの 3 点を使用した。中間点の距離に対し、(15)式から求めた Q_R 及び Q_I を図 6 に示す。こ

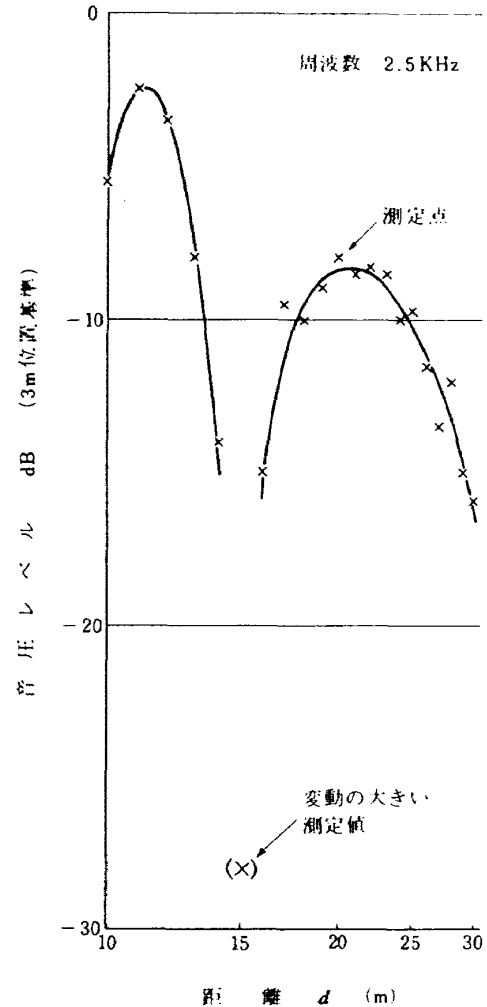


図 5. 距離減衰の測定例

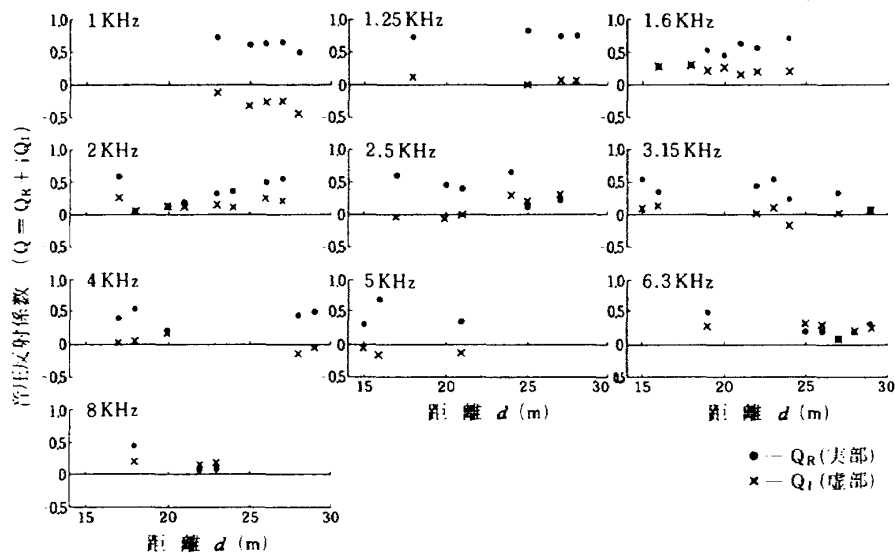


図 6. コンクリート面の音圧反射係数

れより、距離 25m* での値を推定し、周波数に対しプロットすると図 7 のようになる。これは入射角 $\theta_1 = 84.3$ 度における音圧反射係数である。これを平面波音圧反射係数とみなして、これに対応するコンクリート面の有効音響インピーダンス ζ_e を(2)式の関係から求めたものを図 8 に示す。

コンクリート面が局所作用的であるとみなせる場合は有効音響インピーダンス ζ_e は、単に反射面の音響インピーダンス ζ に等しく、入射角 θ_1 に依存せず一定であるが、局所作用的とみなせない場合でも、 τ_1 が 90 度近くでは、 ζ_e の τ_1 の変化に対する依存性が小さいことが(3)式から明らかである。

従っていずれにしても、図 8 に示す有効音響インピー

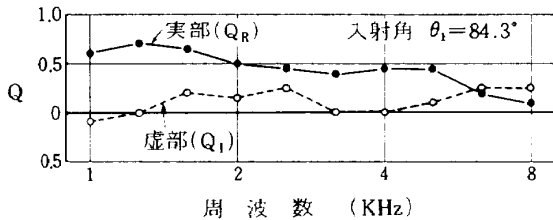


図 7. コンクリート面の音圧反射係数 (Q)

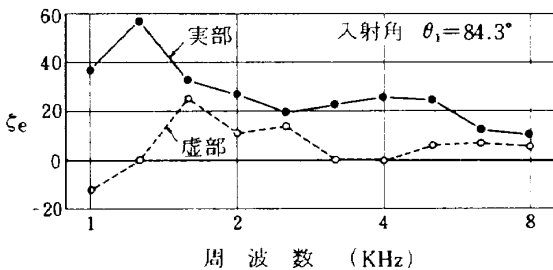


図 8. コンクリート面の有効音響インピーダンス (ζ_e)

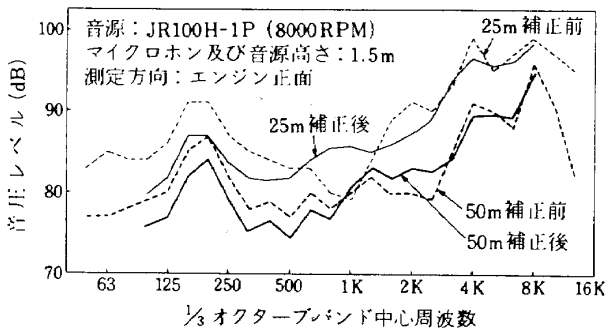


図 9. 地面反射補正例

ダンス ζ_e を用いて、少し入射角が異なる場合の音圧反射係数は(2)式から計算することができる。

6. ジェットエンジン騒音に対する地面反射補正

前節で求めた音圧反射係数によるジェットエンジン JR100H-1P に対する地面反射の補正例を図 9 に示す。図 8 に示す有効音響インピーダンス ζ_e から(2)式を用いて音圧反射係数を求め、これを(16)式の $Q_R \cos \omega \tau + Q_I \sin \omega \tau$ を(17)式で置きかえた式に適用し、1/3 オクターブバンドノイズとしての補正を行なったものである。

地面反射の影響をうけた SPL_S の測定は地面上 1.5m のエンジン回転軸上でエンジン吸入側前方 25 m と 50 m の 2 点において行なった。両者の遠距離自由場での音圧レベルは、距離減衰による 6 dB 差の類似のスペクトルになるはずのものである。

図 9 において、距離 25 m、50 m での実測されたスペクトル(点線)においては、各々 1 KHz 及び 2 KHz 近辺に地面反射の影響と思われる大きい谷が現われ、類似のスペクトルを示していないが、補正後のスペクトル(実線)は、3~8 dB のレベル差で類似のスペクトルを示している。大気条件の影響をうける屋外騒音測定値に基いた補正としては、補正結果は当を得たものであると思われる。

7. あとがき

地面などのように、反射面を構成する媒質の音響的性質が明かでないときに、現場に即して、比較的容易にその音圧反射係数を実験的に求め、さらにこれを用いて騒音測定値に対し地面反射の影響を補正する方法を示した。すなわち、点音源の音響影像理論に基いて、音の距離減衰特性を測定することにより、反射面の音圧反射係数を求め、これを用いて地面反射の補正を行なうことができる。この場合、音源として普通の小型スピーカーを用いる場合は、指向性のかからない範囲の入射角でなければならない。又測定された音圧反射係数は厳密には、球面波についてのものであるが、音源又は受音点が反射面からある程度はなれている場合に適用するときは、これを平面波反射係数とみなすことができる。Bazley⁽¹⁾ らは、繊維質吸音材について、半波長程度はなれていればよいとしており、コンクリート面のように吸音材に比べ音響的にも固いものについては、量的に明らかにするためには、実験的裏付けが必要である。

*当所におけるファンエンジン騒音測定は、音源及び受音点を高さ 2.5m、距離 50m (従って入射角 84.3 度) としており、この場合に直接適用できるように入射角を合せ、距離 25m を選んだ。

この方法により、当所角田支所屋外実験場のコンクリート面の音圧反射係数を測定し、その結果に基づき、ジェットエンジン JR100H-1P の騒音測定値に対する地面反射の補正例を示した。補正例は $1/3$ オクターブバンドノイズとしてのものであるが、ほぼ妥当な結果を得ることができた。

最後に、実験に当り五味光男、越沼威、熊谷隆生の各氏に協力いただいたことを付記します。

参 考 文 献

- 1) M. E. Delany & E. N. Bazley; Monopole Radiation in the Presence of an Absorbing Plane, J. Sound Vib., 13-3 (1970), pp. 269~279.
- 2) M. E. Delany & E. N. Bazley; A Note on the Effect of Ground Absorption in the Measurement of Aircraft Noise, J. Sound Vib., 16-3 (1971), pp. 315~322.
- 3) H. G. Jonasson; Sound Reduction by Barriers on the Ground, J. Sound Vib., 22-1 (1972), pp. 113~126.

航空宇宙技術研究所報告460号

昭和51年6月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町1880
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182

印刷所 株式会社 東京プレス
東京都板橋区桜川2-27-12
