

305 音響相反原理を用いた制振材料の音響放射率の測定法

Method for the measurement of acoustic radiation efficiency of
the damping material by the vibro-acoustic reciprocity

○正 武捨 貴昭 (防衛庁技本)

Takaaki MUSHA, TRDI, Japan Defense Agency, 3-13-1, Nagase, Yokosuka 239-0826

The vibro-acoustic reciprocity is a useful tool for measuring the sound transfer functions of large structures like ships. In this report, the application of the reciprocity for evaluating the acoustic radiation efficiency for the damping material is described. The measured result for a high damping polymer is also presented.

Key words : Vibro-acoustic reciprocity, Acoustic radiation efficiency

1 まえがき

音響相反原理⁽¹⁾とは構造体の振動と放射音の関係が相反的であることを主張するものであるが、近年、これを用いた船体等の音響測定が行われている⁽²⁻⁹⁾。筆者は本原理を用いて制振材料の音響放射率を測定する装置を作成してその有効性について検討するとともに、実際の制振材料の測定例を示した。

2 音響相反原理による音響放射率の測定

2.1 音響放射率の計算

面音源から垂直に距離 ε 離れた点の音圧と振動との関係は

$$\bar{p}^2 = \frac{\rho^2 c^2 \sigma}{2\pi} \int \frac{\bar{v}^2 dS}{x^2 + y^2 + \varepsilon^2} \quad (1)$$

で表される。なお、 ρc は媒質の音響インピーダンス、 σ は音響放射率、 v は音源の表面速度である。音源が平面的であり、また距離 ε が波長に比べて十分小さいとき

$$\bar{p}^2 = \frac{\rho^2 c^2 \sigma}{2\pi} \bar{v}^2 \int \frac{D \cdot dx dy}{x^2 + y^2 + \varepsilon^2} \quad (2)$$

となる。ここで D は音源の指向性である。指向性はダイポール特性を有するとして $D = \cos^2 \theta$ とすると

$$\bar{p}^2 = \rho^2 c^2 \sigma \frac{\bar{v}^2}{2} \quad (3)$$

となるから、よって近距離音場の音響放射効率は直接加振の場合

$$\sigma \approx \frac{2}{\rho^2 c^2} \left(\frac{\bar{p}^2}{\bar{v}^2} \right) \quad (4)$$

と表せる。加振点の機械インピーダンスの定義 $Z = F/v$ (F :加振力, v :表面振動速度)より $\bar{v}^2 = \bar{F}^2 / Z^2$ であるから、式(4)を用いて

$$\sigma = \frac{2Z^2}{\rho^2 c^2} \left(\frac{\bar{p}^2}{\bar{F}^2} \right) \quad (5)$$

が得られる。ここで音響加振を行う管の体積を u 、開口端の音圧を p' 、 U を体積速度とすると

$$p' = \frac{\rho c^2}{u} \int U dt \quad (6)$$

であるから⁽¹⁰⁾,従って体積速度は

$$U = \frac{j\omega u}{\rho c^2} p' \quad (7)$$

で求められる。 p を加振音源の音圧, U を音源の体積速度とすると, 直接加振と音響加振の場合における音響相反原理

$$\left(\frac{p}{F}\right)_{U=0} = \left(\frac{v}{U}\right)_{F=0} \quad (8)$$

から

$$\sigma = \frac{2Z^2}{\rho^2 c^2} \left(\frac{\bar{p}^2}{\bar{F}^2}\right) = \frac{2Z^2}{\rho^2 c^2} \left(\frac{\bar{v}^2}{\bar{U}^2}\right) \quad (9)$$

が求められる。これから音響相反原理による音響放射率を σ' とすると Fig.1 に示す音響相反原理による2つの等価システム(A), (B)の(B)において

$$\sigma' = \frac{2c^2 Z^2}{\omega^2 u^2} \left(\frac{\bar{v}^2}{\bar{p}^2}\right) \quad (10)$$

が成立する。これから音響加振による板振動の変位を ξ とすると, $j\omega\xi = v$ より

$$\begin{aligned} \sigma' &= \frac{2c^2 Z^2}{u^2} \left(\frac{\bar{\xi}^2}{\bar{p}^2}\right) = \frac{2c^2 Z^2}{u^2} \left(\frac{\bar{p}^2}{\bar{p}^2}\right) \left(\frac{\bar{\xi}^2}{\bar{p}^2}\right) \quad (11) \\ &= \frac{2c^2}{u^2} Z^2 H^2 / S^2 \end{aligned}$$

が得られる。なお, $H = \xi / p$, $S = p' / p$ とした。

2.2 機械インピーダンスの計算

機械インピーダンス Z は電磁加振の場合, g_0 を振動板と磁極間の空隙の実効長, S を磁極の実効面積, U_0 を磁極の起磁力, n をコイルの巻数, μ_0 を透磁率, X を変位の実効値, I を電流の実効値とすると F は

$$F = \frac{\mu_0 S U_0^2}{g_0^2} \left(\frac{nI}{U_0} + \frac{X}{g_0} \right) \quad (12)$$

である。コイルに対する印可電圧を E とすると, L をコイルのインダクタンスとした場合

$$I = \frac{E}{\omega L} \quad (13)$$

であり, また力を加える材料が硬い場合, $X \approx 0$ とできるから

$$Z^2 = \bar{F}^2 / \bar{v}^2 = \frac{\mu_0^2 S^2 U_0^2 n^2}{g_0^4 \omega^2 L^2} \left(\frac{\bar{E}^2}{\bar{v}^2} \right) \quad (14)$$

となる。以上整理すると $j\omega\xi' = v$ より

$$Z^2 = \frac{\mu_0^2 S^2 U_0^2 n^2}{g_0^4 \omega^2 L^2} \left(\frac{\bar{E}^2}{\bar{\xi}'^2} \right) \quad (15)$$

であり, 印可電圧と板の振動速度から機械インピーダンスが決定できる。

3 音響相反原理を用いた計測結果

Fig.2 に示す構成の音響加振装置を作成し制振材料の音響放射率の計測を行った。図においてスピーカの加振音をマイクで計測し, また音響加振による試料の振動はギャップセンサーを用いて変位を計測した。これからFFTアナライザーにより音響-振動伝達関数を求め, あらかじめ計測しておいた機械インピーダンス Z , 及びスピーカ対マイクの伝達関数 S より音響放射率を求めた。

Fig.4 にこの計測装置の写真を示した。制振材は0.5mmの鉄板に貼り付けて計測を実施した。

4 音響放射率の計測結果

音響放射率の計測結果を Fig.4~Fig.6 に示した。Fig.4 は制振材を付加していない場合の H, S, Z のそれぞれの計測値を示したものである。これらの計測結果を用いて制振材がない場合の直接計測及び相反原理による計測結果を Fig.5 に示した。ここ直接加振の場合は板の変位を ξ とすると式(4)より

$$\sigma \approx \frac{2}{\rho^2 c^2 \omega^2} \left(\frac{\bar{p}^2}{\xi^2} \right) \quad (16)$$

である。なお、太線は前後のデータを平均して求めたカーブである。この結果から概ね直接計測と相反原理による計測値は一致していることが分かった。なお、400Hz付近で特性が反対になっている部分は反共振が発生している部分である。これから制振材のない場合と制振材を貼り付けた鉄板の音響放射率を比較すると Fig.6 のようになることが分かった。すなわち、制振材により音響放射率の低減は殆どなく、その特性がずれていることが確認された。

5 まとめ

以上、相反原理を用いて実施した音響加振による制振材の音響放射率の測定について実際に装置を作成して検討を実施した。

検討の結果、直接方式と概ね合致した音響放射率が計測可能であることが分かった。また、この方法により制振材を貼り付けた鉄板と貼り付けていない鉄板の音響放射率を計測して比較した結果、音響放射率は殆ど変化せずその特性カーブがずれているだけであることが判明した。

参考文献

- (1) Lord Rayleigh, "On the application of the principle of reciprocity to acoustics", Proc.R.Soc.25118-122(1876)
- (2) J.G.van akel and H.F.Steenhoek, "On recent ship noise transmission experiments using the reciprocity method", Tech.Univ.Delft Publ.,TNO Institute of Applied Physics, 297-303 (1982)
- (3) H.F.Steenhoek and T.ten Wolde, "The reciprocal measurement of mechanical-acoustical transfer functions", Acoustica,23,301-305(1970)
- (4) T.ten Wolde, "Reciprocity experiments on the transmission of sound in ships", Ph.D.Thesis, Tech.Univ.Delft Publ. Hooglund & Waltman, Delft(1973)
- (5) T.ten Wolde, "On the validity and application of reciprocity in acoustical ,mechano-acoustical and other systems, Acoustica 28,23-32(1973)
- (6) T.ten Wolde,J.W.Verheij and H.F.Steenhoek, "Reciprocity method for the measurement of mechano-acoustical transfer functions", J.Sound Vib.42, 49-55(1975)
- (7) T.Musha,I.Abe,A.Shinohara and M.Takashima, "Evaluation of acoustic radiation efficiency for hull plate using the reciprocity method", JSME Int.J.Ser.C37,612-615(1994)
- (8) T.Musha and T.Kikuchi, "Validity of the vibro-acoustic reciprocity method for the measurement of the mechano-acoustical transfer function", J.Acoust. Soc.Jpn.(E)19,2,151-153(1998)
- (9) T.Musha,"Evaluation of the acoustic radiation efficiency for ship structures Using the reciprocity method",Acoust. Sci & Tech.22,1,41-43(2001)
- (10) L.E.Kinsler,A.R.Frey,A.B.Coppens and J.V.Sanders,"Fundamentals of Acoustics", Third Edition, John Wiley & Sons,Inc, New York(1982)

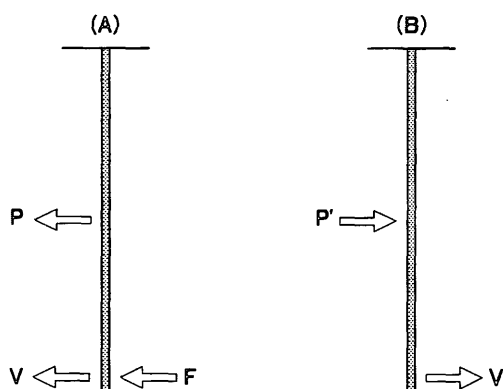


Fig.1 Two identical vibro-acoustic systems

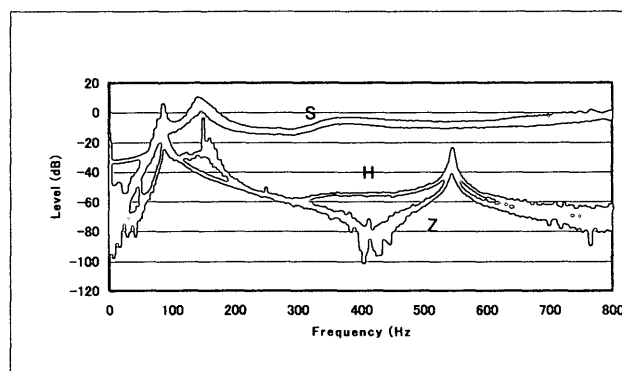


Fig.4 Measuring results by the reciprocal method

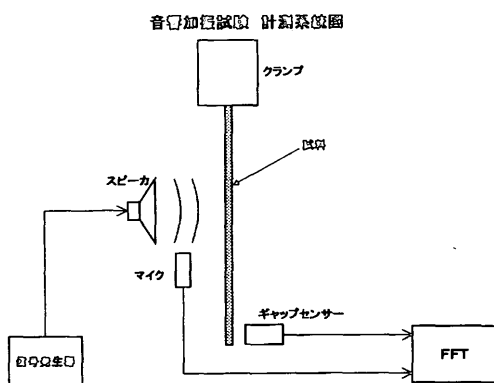


Fig.2 Diagram of the measuring devise

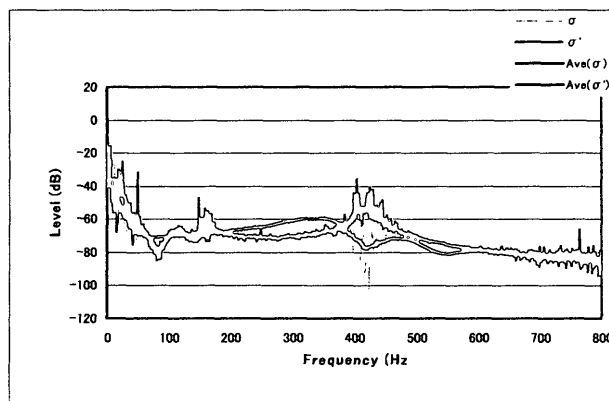


Fig.5 Direct and reciprocal results

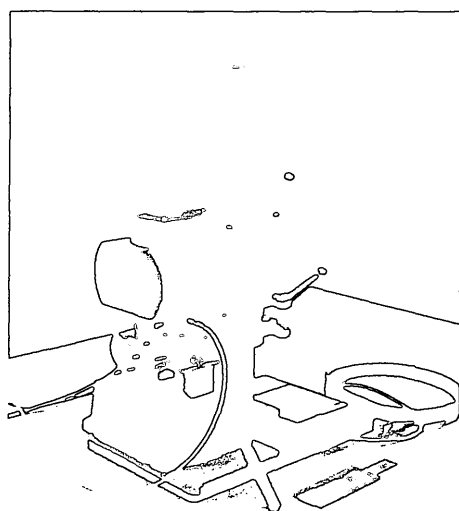


Fig.3 Photo of the measuring devise

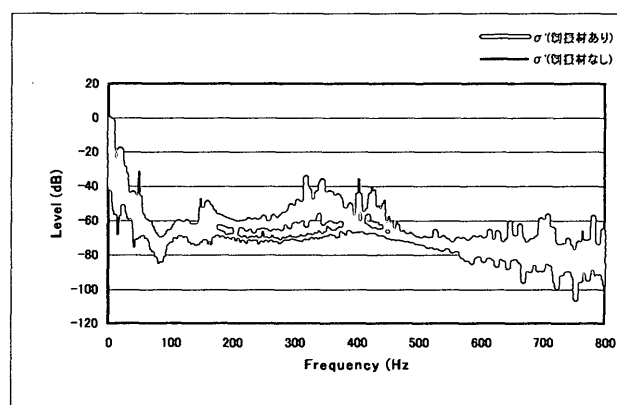


Fig.6 Measured results both for non-damping and damping case