

## 報 文

## セラミック溶射鋼板の音響特性の測定

川内職業訓練短期大学校

電子・情報システム系 原 園 正 博・福 村 秀 夫<sup>\*</sup>

機械システム系 下 土 橋 渡

## Measurement of Acoustic Characteristic of Ceramic Splayed Steel

Masahiro Harazono, Hideo Hukumura, Wataru Shimotsuchibashi

**要約** プラズマ溶射、ガス溶射によりセラミックを付着させた鋼板を試料として、一種のダンピング材を貼付したダンピングレイヤー的な観点から、振動減衰能、音響放射特性等を検討するための測定を行なった。一般に、振動減衰能を測定する場合、試料を正弦波駆動したときの共振曲線の半値幅を用いる方法、衝撃加振における減衰曲線から求める方法などがあるが、いずれも共振周波数を対象とすることから、特定のモードのみが発生したほうが好ましく、従って寸法の異なった多数の試料が必要となる。そこで、ここでは、建築音響学における残響理論に基づき、比較的大きな試料を対象として、一つの試料で広範囲の周波数帯域にわたる損失係数の測定を可能にしている。また、測定の手続きは自動化されており、減衰特性の測定、損失係数の算出、結果の表示、周波数特性のグラフ化等の一連の行程を容易に実施できるように配慮している。測定結果をみると、本来のダンピングレイヤーとして用いられる材料の減衰能と比較するとき、セラミック溶射鋼板の減衰能はそれほど高いとは言えないが、二種のセラミック溶射鋼板については顕著な差が生じており、接着強度等との相関関係を伺い知ることができる。本研究の成果は、今後のセラミック溶射鋼板の研究に際し礎となると共に、計測システムは、今後の教育及び研究に充分に貢献できるものと期待される。

## I 緒 言

固体音の伝搬、音響エネルギーの放射を極力低下させる目的のために、構造物にダンピング材を層状に貼付する方法がしばしば用いられている。例えば、船舶においては内部鋼板に振動低減を目的としてダンピング材を貼付しており、<sup>(1)</sup> また、施工法の簡便さや防食性、防錆性の特色を生かし、音の放射を低減するために振動エネルギーの吸収の著しい塗料を塗布した例等がある。<sup>(2)</sup> これらは、エポキシ系樹脂、ゴム系等の材料を主成分として、特有の充填剤を添加することにより振動減衰能を高めるように工夫されているものである。また、一般にはダンピング・レイヤーと称され、ダンピング材の貼付方法により一層型、二層型、サンドイッチ型に分類されている。

論文受付け日、1989. 3. 18

一方、主に機械加工の分野において、耐摩耗性や機械的強度を高める目的や腐食防止のために、非鉄金属系の材料皮膜を溶射形成する、いわゆる溶射加工法が広く利用されている。このような溶射皮膜については、組成的な面からだけではなく、動力学の観点にたった考察も興味のあるところであるが、生田らは、アルミニウム、亜鉛及び亜鉛-アルミニウム合金溶射部材の振動減衰特性について報告している。<sup>(3)</sup> また、振動エネルギーは構造部材と溶射皮膜との接合面減衰作用により主に消散することに着目し、溶射構造物の減衰能は溶射材の密着度と大きく関係し、それは振動周波数により異なることを明らかにしている。<sup>(4)</sup>

ところで、セラミックが有する力学的強度は、あらゆる分野において重宝されているところであるが、溶射加工についても強度や美観上の点から広く利用されるようになっており、益々その用途は拡大しつつある。そこで、セラミック溶射皮膜の様々の用途を考慮するとき、上記のような非鉄金属系溶射皮膜と同様に、各種のセラミック

\* 現在、京セラ株式会社

溶射法に対して動力的な検討も重要な要素になるものと考えられる。

そこで、本報告では、セラミックをガス溶射及びプラズマ溶射により付着させた鋼板を試料として、ダンピングレイヤーの観点に立った音響特性の測定方法、及び測定結果について記述する。特に、測定法としてはインパクトハンマリング法を用いたが、ここでは特定のモードで振動する試料を対象にせず、逆に比較的大きな試料を用いることによりランダムな振動モードを発生させ、残響理論に基づき、一つの試料で広い周波数範囲にわたる測定を実施している。これは、音場における残響時間特性の測定と等価である。また、ハンマリング以外の操作は、すべてコンピュータでコントロールされるが、測定システムは、先に構築した残響時間測定システム<sup>(6)</sup>の主に入力系統に修正を加えて転用を図ったものである。そこで、自動計測における基本アルゴリズムの概要についても記述する。また、音響特性としては、セラミック皮膜がもたらす減衰特性、及び音響放射特性の変化、さらには溶射法の違いによる差異について注目する。さらに、振動応答の分析を通して、セラミックを溶射したことによる物理定数の変化についても考慮する。

## II ダンピングレイヤーと損失係数

### 1 ダンピングレイヤー

振動体の振動低減を計るには、振動源自体の振動特性を抜本的に抑えることが最も得策であることは言うに及ばないが、本来の機械の用途、性能を優先するとき振動・騒音の問題が付加的に生じる事実はよく遭遇するところである。このような場合、二次的な対策として振動体、あるいは伝搬経路において、振動エネルギーを吸収するための方法がいくつか考慮されている。その内、ダンピングレイヤーは、Fig. 1 に示すように、ダンピング材を振動体(基板)の上に塗布、あるいは貼付するものであり、1層

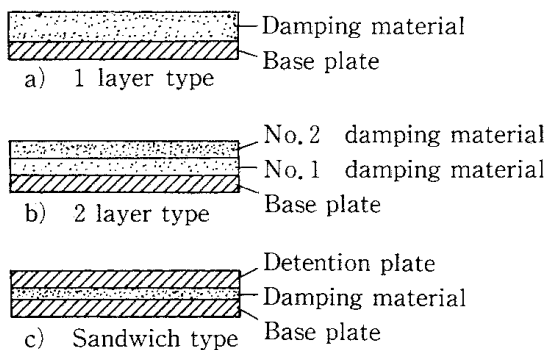


Fig. 1 Damping layer.

型のもの、性質の異なるダンピング材を2種類重ねた2層型、同一基板の間にダンピング材を挟み込んだサンドイッチ型などがある。

ダンピング材としては、エポキシ系樹脂やゴム系のものに充填剤としてマイカ粉や珪砂などを混入したものであり、これにさらに微小の鉛玉を混入することによりすぐれた振動減衰特性を持たせられることが確認されている。<sup>(6)</sup>

### 2 振動減衰特性

ダンピングレイヤーの振動減衰特性は、一般にM I L (Military Specification) 規格に定められた方法で測定されているが、その概略を Fig. 2 に示している。これ

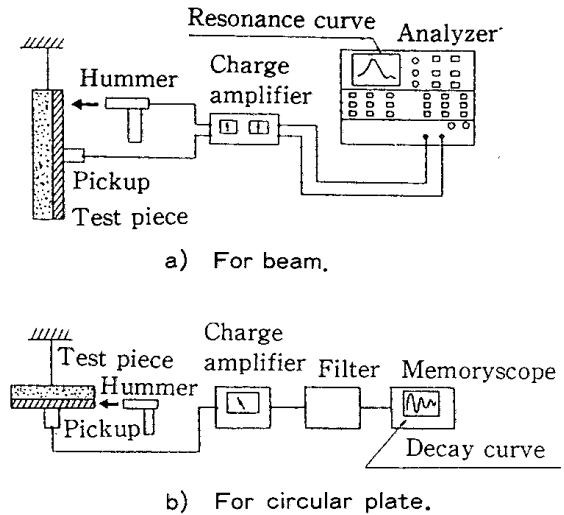


Fig. 2 General diagram of measuring decay characteristic of damping layer.

らの測定系の特徴を考慮してみると、まず試料が円板の場合については、特定の一つの振動モードを考慮することになり、振動減衰特性は明確に生じると思われるものの、広い周波数帯域にわたって測定する場合は、大きさの異なった試料がそれだけ必要になることを意味する。また、試料がビームの場合については、いくつかのモードが同時に計測されるが、それにしても離散的な周波数についてのみしか値は得られないこと、また観測上の誤差が混入し易いなどのことも考えられる。

ところで、一般に振動減衰性能は、Fig. 2 b) の測定による振動減衰特性の場合については、その包絡線が示す減衰係数により評価し、同図 a) の測定による場合には、共振曲線の半値幅を利用するのが普通である。即ち、例えば単一モードの場合として Fig. 3 に示すような振動減衰特性が得られたものとする、その時間に対する振動

$y(t)$  は、振幅を  $A_0$ 、角振動周波数を  $\omega$ 、減衰係数を  $\gamma$ 、初期位相を  $\theta$  とするとき、次のように表わすことができる。

$$y(t) = A_0 \exp(-\gamma t) \sin(\omega t + \theta) \quad (1)$$

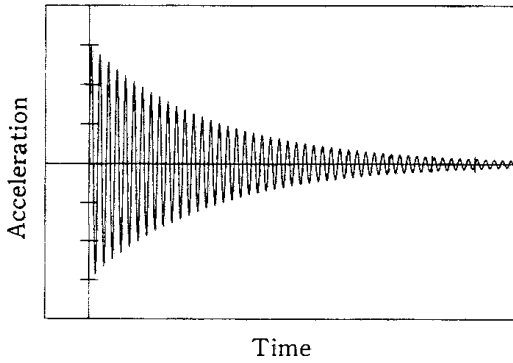


Fig. 3 Sample decay curve of impacted damping layer.

また、強制振動に対する周波数応答を測定するならば、同一の振動体に対して、Fig. 4 に示すような共振特性が得られるものと考えられる。

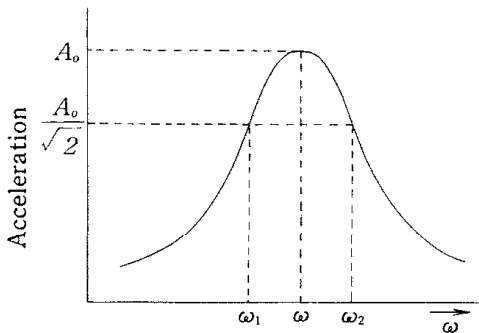


Fig. 4 Vibration response of single mode damping layer.

このような場合、振動体の減衰性能は、まず減衰係数  $\gamma$  で評価できることになるが、この他に一周毎の最大振幅の比の自然対数をとった、次の対数減衰率が用いられている。

$$\begin{aligned} \delta &= -\ln \frac{A_0 \exp\{-\gamma(t_1 + 2\pi/\omega)\}}{A_0 \exp(-\gamma t_1)} \\ &= \ln \{\exp(-2\pi\gamma/\omega)\} \\ &= 2\pi\gamma/\omega \end{aligned} \quad (2)$$

また、共振時において、一周りに消費されるエネルギーと最大のポテンシャルエネルギー  $E_{max}$  との比をダンピング容量と称しており、次の関係で表わされる。

$$\Psi = \frac{2\pi\omega r}{E_{max}} = 2\delta = 4\pi\gamma/\omega \quad (3)$$

さらに、ダンピング容量の1ラジアンについての値を損失係数と称し、一般に次のように  $\eta$  でもって表わされる。

$$\eta = \Psi/2\pi = \delta/\pi = 2\gamma/\omega \quad (4)$$

次に、Fig. 4 に示す共振曲線において、共振角周波数  $\omega$  に対し、振動エネルギーが共振周波数での値の1/2になる角周波数を  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  とおくと、共振の鋭さを表わす指数である共振鋭度  $Q$  が、次のように表わされる。

$$Q = \frac{\omega}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{1}{\eta} \quad (5)$$

以上のような値を用いることにより振動減衰特性は評価できるが、本報告では損失係数  $\eta$  を主体に用いるものとする。

### 3 ダンピングレイヤーの設計

Fig. 5 には、広域周波数にわたり良好な減衰性能を有するダンピングレイヤーの一例を参考として示している。

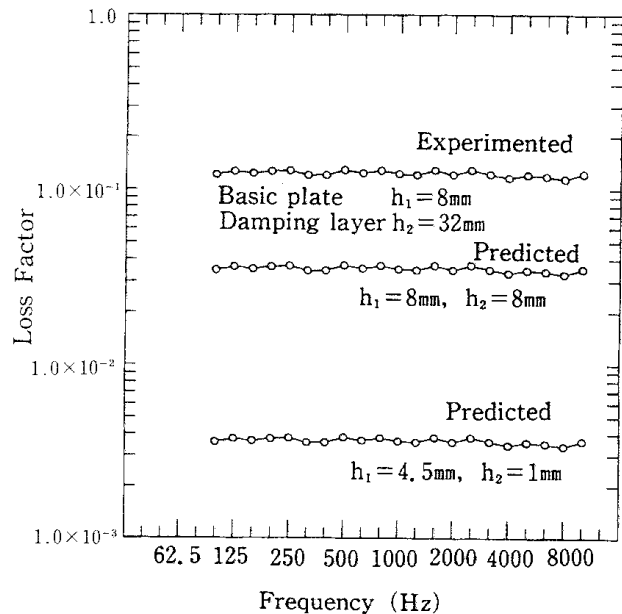


Fig. 5 Experimented and predicted loss factor of typical damping layer.

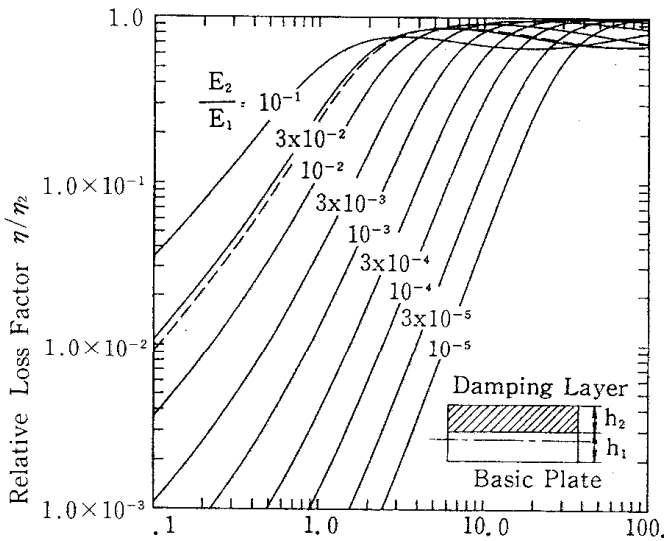
母材を 548×436×8 mm の鋼板として、厚さ 32mm のダンピング材を貼付したものである。ダンピングレイヤーの理論によると、母材と損失係数  $\eta_2$  のダンピング材のヤング率を  $E_1, E_2$ 、厚さを  $h_1, h_2$  とし、次のような変数の置き換えを行なうものとする

$$\begin{aligned} k &= E_2 h_2 / E_1 h_1 \\ r_1 &= h_1 / \sqrt{12} \\ r_2 &= h_2 / \sqrt{12} \\ H &= (h_1 + h_2) / 2 \end{aligned} \tag{6}$$

全体の損失係数  $\eta$  と  $\eta_2$  との関係は次のように与えられる。(7)

$$\eta = k \frac{1 + (\frac{r_2}{H})^2 \{ (1+k)^2 + (\eta_2 k)^2 \}}{k [1 + (\frac{r_2}{H})^2 \{ (1+k)^2 + (\eta_2 k)^2 \}] + k^2 (1 + \eta_2^2) + (\frac{r_2}{H})^2 \{ (1+k)^2 + (\eta_2 k)^2 \}} \tag{7}$$

これらの関係は、母材とダンピング材のヤング率の比をパラメータとして、Fig. 6 のように表わすことができ、これを基に実際的な設計が可能となる。



Thickness Ratio of Steel and Damping Layer,  $h_2/h_1$   
 Fig. 6 Composite Loss Factor of Steel and Damping Layer.

### III 試料と測定システム

#### 1 セラミック溶射鋼板

本報告で対象とした試料は、548×436×4.5mm の鋼板を母材として、 $Al_2O_3$  を主成分とするセラミックスを厚さ 1 mm プラズマ溶射及びガス溶射により付着させたものである。この寸法については、後述するようになるべくランダ

ムな振動場を形成するように考慮されたものであり、既存の鋼板やダンピングレイヤーとの比較検討を行なう目的も含めて選択している。また、2種類の溶射方法の採用については、損失係数の測定結果から溶着強度に関する検討に資することを目的としたものである。

### 2 測定システム

本報告で用いた計測システムの概要を Fig. 7 に示す。基本的には、先に報告した残響時間測定システム<sup>(5)</sup>の入力部を振動加速度計用に換え、インパクトハンマリング法に適用できるようにプログラムを修正したものである。試料は、振動エネルギーの流出を防ぐ目的で柔軟な紐で三脚に吊されており、ハンマリングされることにより励

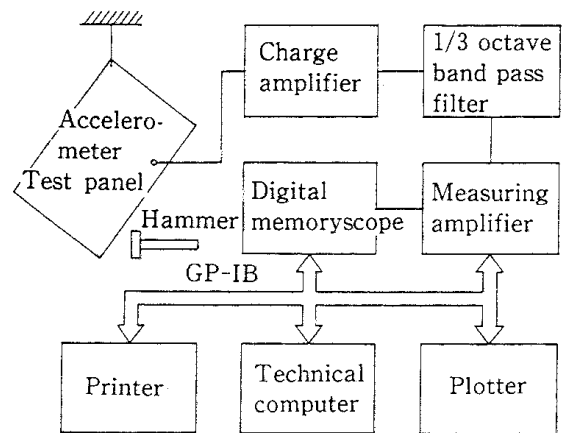


Fig. 7 Measuring system of loss factor.

起された試料の振動は、小型の振動加速度計により電気信号に変換される。その後、1/3 オクターブのバンドパスフィルターを通過した信号は、計測用増幅器で適当なゲインに調整され、シングル・トリガモードに設定されたデジタルメモリスコープに取り込まれる。ここで、メモリスコープは、高速な A/D 変換器の役割と共に、減衰特

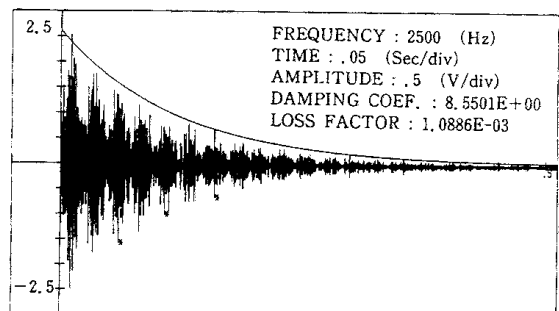


Fig. 8 Sample of measured decay curve of ceramic splayed steel.

性データのメモリ機能を有し、サンプリング終了後データはすぐさまコンピュータに転送され、CRTに表示される。測定結果の一例を Fig. 8 に示している。オペレータは、このような減衰波形の詳細を判断し、最適な指数曲線のエンベロープを描かせるために、減衰波形の任意区間の最大値を与えるデータの標本化を行う。Fig. 8 では、測定された減衰特性を10区間に別け2~5区間を一区間おきに最大値をとるように指示したものであり、求められたデータが負側に\*で示してある。これを基に、最小自乗法により最適な指数曲線を求める。Fig. 8 には、これらの最終結果も同時に示している。

### 3 ランダム振動における減衰性能の評価

ところで、前述のように本稿では、なるだけ多くのモードをランダムに発生させ、建築音響学における残響理論と等価な考え方により、振動減衰特性を評価することを述べた。ここでは、残響理論そのものについての言及は割愛するが、複数のモードが同時に存在する場合の減衰性能の考え方について考慮してみる。例えば、特定の周波数帯域を通過した信号の中に、 $N$  個のモードが存在するものとするとき、フィルターの出力波形  $y(t)$  は、それぞれの振幅を  $A_i$ 、減衰係数を  $r_i$ 、角周波数を  $\omega_i$  とするとき次のように考えることができる。

$$y(t) = \sum_{i=1}^N A_i \exp\{-(\gamma_i - j\omega_i)t\} \quad (8)$$

そこで、便宜上  $i=1$  の振幅が最も大きいものとする

$$y(t) = A_1 \exp\{-(\gamma_1 - j\omega_1)t\} [1 + \sum_{i=2}^N \frac{A_i}{A_1} \exp\{-(r_i - r_1)\} \exp\{j(\omega_i - \omega_1)t\}] \quad (9)$$

と考えることができる。さらに、この測定周波数帯域を小さく取るものとする、この帯域内において各減衰定数は殆ど等しいと考えることができ、上式は次のように記すことができる。

$$y(t) = A_1 \exp\{-(\gamma_1 - j\omega_1)t\} \times [1 + \sum_{i=2}^N \frac{A_i}{A_1} \exp\{j\Delta\omega_i t\}] \quad (10)$$

但し、 $\Delta\omega_i = (\omega_i - \omega_1)$  とした。この結果は、例えば  $N=2$  であるとすれば、変調率  $A_2/A_1$ 、周波数  $\Delta\omega_1/2\pi$  の振幅変調、従って、唸が生じることを意味している。 $N$  が大き

くなるに従って波形は複雑さを増し、互いの振幅、位相の関係により様々な形態を取ることが予想されるが、そのエンベロープは指数関数  $\exp(-\gamma_1 t)$  に沿うことから、減衰性能の評価が可能となる。

## IV 測定結果及び考察

### 1 損失係数

上記の試料について測定された損失係数を、周波数特性として Fig. 9 に示す。図には、ガス溶射及びプラズマ

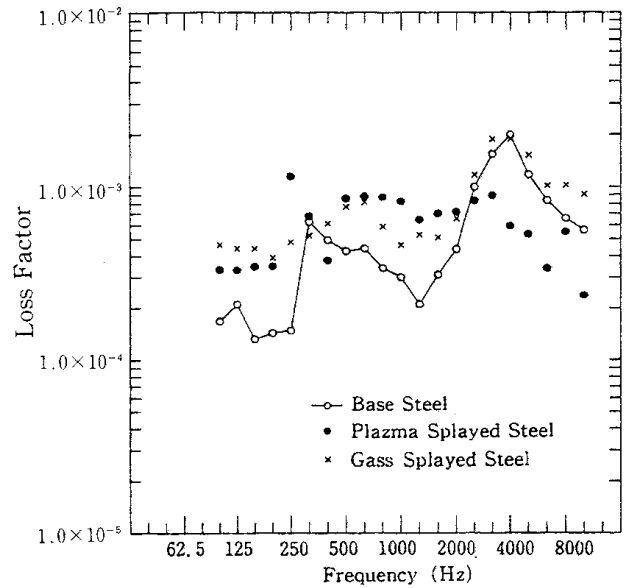


Fig. 9 Experimented Loss Factor of Ceramic Splayed Steel.

溶射によるセラミック溶射鋼板の二者に加え、特性の比較検討を行なうために、母材のみの損失係数の測定結果も同時に示している。

ところで、Fig. 5 に示したダンピング材について  $E_2 = 5.672 \times 10^9 \text{ N/m}^2$  とおき、測定結果から逆算してみると、 $\eta_2$  は約0.15程度であったことを知ることができる。Fig. 5 には、ダンピング材の厚さを8mmとした場合、及び母材の厚さを4.5mmとし、ダンピング材の厚さを1mmとしたときのダンピングレイヤーの損失係数を試算してみたものも示している。これらを見ると、もともと振動減衰を目的としたダンピングレイヤーと比較するとき、セラミック溶射板の呈する減衰能はそれほど顕著ではないことを知ることができる。しかしながら、母材の損失係数と比較すると、2000Hz以下においては両者とも減衰能を高めていることがわかる。また、この領域においてはプラズマ溶射の方が減衰能が高く、接着強度による差異<sup>(4)</sup>が現れたものと考えられる。

2 音響放射特性

Fig. 10に示したのは、厚さ1, 4.5, 8 mmの鋼板について損失係数を測定した結果である。これらを観察すると、鋼

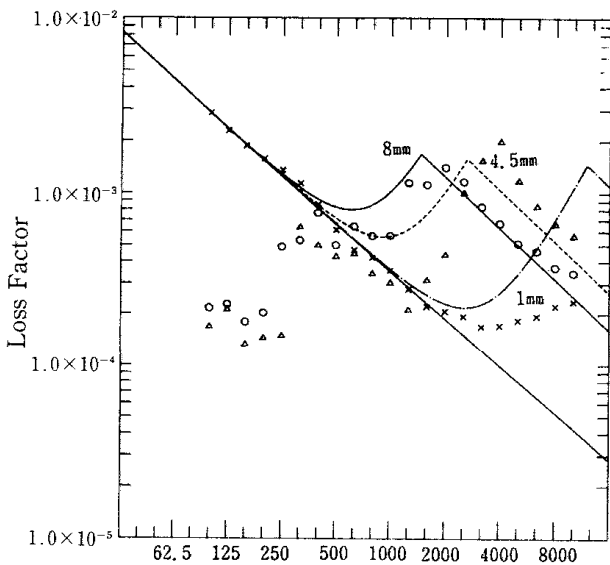


Fig. 10 Experimented Loss Factor of Steel.

板は厚さの違いにより、あたかも損失係数の値が異なるかのような様子を呈している。しかしながら、これらの結果には、主に二つの要因が関係している。即ち、鋼板に生じる振動形態は同一状態であれば比較対象にならず、音響放射を考慮する場合には、比較的放射効率の高い曲げ波が存在していることが前提となる。次に、曲げ波が存在している場合、鋼板上を伝搬する波の速度と音波の速度が一致するとき、著しく音響放射効率の高い状態が発生する。この周波数を臨界周波数と呼んでいる。

これらのことを前提に考慮するとき、1 mmの鋼板はその振動モードを計算しても対象周波数において十分にモードが存在することもあり、低い周波数においてもハンマリングに対して曲げ波が発生したものと予想される。これに対し、4.5mmのものについては315Hz以下、8 mmのものについては400Hz以下の低い周波数においては、振動形態を異にしているように思われる。

Fig. 10には、1 mm鋼板より予測される鋼板母材の損失係数に加え、音響エネルギー放射による損失を含めて計算した結果も示している。但し、ここで放射係数 $\sigma$ は、臨界周波数を $f_c$ として次のように仮定した。<sup>(8)</sup>

$$\sigma = \begin{cases} (f/f_c)^3 & (f < f_c) \\ 1 & (f > f_c) \end{cases} \quad (11)$$

また、このとき音響エネルギー放射による損失係数は次のように与えられる。<sup>(9)</sup>

$$\eta_a = \frac{\rho C \sigma}{\omega m'} \quad (12)$$

ここで、 $\rho$ は空気の密度、 $c$ は音速、 $m'$ は鋼板の面密度である。計算結果を見ると、8 mm鋼板については計算値が十分に測定値と一致しているが、4.5、1 mm鋼板については、必ずしも放射係数の仮定が適当ではなかったものと思われ、臨界周波数近辺において両者に大きな差異が生じている。このとき、臨界周波数は、次の式で与えられる。

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m'}{B}} \quad (13)$$

Fig. 10をみると、いずれも計算値の方が低い値となっていることがわかる。これは、曲げ波の速度を無限パネルを想定して求めていることによるものと思われる。また、臨界周波数近辺については、まず、ガス溶射による場合は音響エネルギー放射に関しては殆ど影響を見せおらず、むしろ強めている傾向にある。これに対し、プラズマ溶射の場合は音響エネルギー放射を相当に抑えていることが確認できる。

3 振動応答の分析

Fig. 11は、母材である4.5mm鋼板のハンマリングによる応答を、低周波数に注目して周波数分析した結果である。これらは、曲げ波と想定して計算してみると、明らかに異なるモードであることを知ることができる。そこで、振動周波数が次のように表わされるものと仮定してみる。

$$f_{m,n} \propto \sqrt{\frac{Eh^3}{m'}} \cdot \sqrt{\left(\frac{m}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n}{l_y}\right)^2} \quad (14)$$

ここで、 $l_x, l_y$ は試料の寸法であり、 $m, n$ はモードの次数を表わす整数である。Table 1は、同様の測定をセラミック溶射板について計測してみた結果である。また、面密度の測定値と、上式を基に求めたセラミック溶射鋼板の弾性係数も記している。これらの結果から、ガス溶射の方が

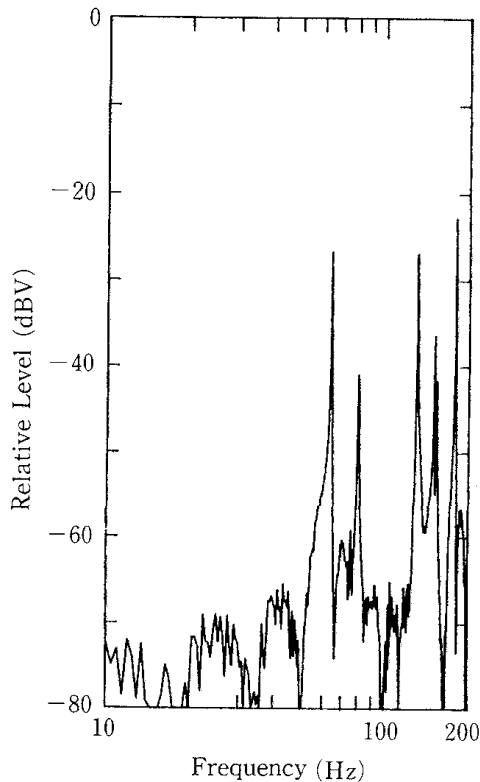


Fig.11 Vibration response of 4.5mm steel plate.

Table 1 Vibration frequencies, surface density and predicted Young's modulus of ceramic splayed steel.

モード (m, n)	(1, 0)	(0, 1)	(2, 0)	(2, 1)	(1, 2)	面密度 (kg/m <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/m <sup>2</sup> )
母材	64	80	130	150	178	35.385	$2.10 \times 10^{10}$
プラズマ溶射	62	79.5	130.5	150.5	177.5	38.046	$2.23 \times 10^{10}$
ガス溶射	64	81.5	133	154	181	39.057	$2.41 \times 10^{10}$

剛性が高いことを確認することができるが、これにより臨界周波数は低下することが予想できる。

## V 結 言

ガス溶射法、及びプラズマ溶射法によりセラミックを溶射した鋼板を試料として、その音響特性の測定を行なう自動計測システムを構築すると共に、ダンピングレイヤー的観点から損失係数を測定し、さらに、振動応答による分析により弾性係数を求めた。測定結果を要約すると、次のようなことが列挙できる。

(1) ガス溶射とプラズマ溶射では、特に 2000 Hz 以下においてプラズマ溶射の方が高い減衰能を示す。これは、プラズマ溶射の方が、接着強度が高いことに起因するものと予想される。

(2) 2000Hz以上においては、臨界周波数を中心として音響エネルギー放射による影響が関係するが、結果とし

て、ガス溶射の場合は殆ど変化は見られず、プラズマ溶射の場合は、減衰能が著しく低下する。即ち、音響エネルギーの放射が減少することを意味する。

(3) 剛性はガス溶射による方が高い。

以上の結果は、セラミック溶射鋼板の各種特性を検討するための基本試料として今後に資することは明らかであるが、接着強度等については機械的な試験結果との双方から検討する必要がある。また、本報告の音響特性の測定についても、セラミック皮膜の厚さはもとより、母材の寸法の差異による特性の検討等も行なうことにより、より明確な考察が可能になるものと思われる。

最後に、計測及び解析過程においては、昭和62年度に整備されたYHPテクニカルコンピュータをコントローラとしてフルに活用し、各種計測機器の有効活用を綿密に図っている。また、昭和63年度指定研究予算についても、周辺器具の整備において生かされており、今後の研究及び教育訓練に充分に貢献しうるシステムを構築できたことを付記し、関係各位に深甚の謝意を表わす次第である。

## 参考文献

- (1) 原圃正博、他、“ハル・ダンピング材の損失係数” 日本音響学会講演論文集、1-6-4、(1984-10) P367~368.
- (2) 藤谷俊英、“制振塗料について” 防錆管理、83-7、(1983)、P216~222.
- (3) 生田稔郎、他、“溶射皮膜を有する構造部材の振動特性に関する研究(第1報) -アルミニウム、亜鉛及び亜鉛-アルミニウム合金溶射部材の減衰能-” 日本溶射協会誌 23 (3)、(1986)、P1157~1163.
- (4) 速水 尚、他、“溶射皮膜を有する構造部材の振動特性に関する研究(第2報) -引張密着強さと減衰比の相関性-” 日本溶射協会誌 24 (2)、(1986) P1311~1317.
- (5) 原圃正博、“コンピュータを用いた残響時間計測システム” 川内職業訓練短期大学校紀要、第2号 (1987) P.29~39.
- (6) 西村 保、他、“低周波振動減衰用ハルダンピング材の開発” 昭和電線電纜技報 32 (2)、(1982)、P12~20.
- (7) D. Ross、“Mechanics of Underwater Noise” PERGAMON PRESS New York (1976).
- (8) L. Cremer and M. Heckl、“Structure-Borne Sound” Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York (1973).

- (9) G. Maidanik、 “Response of Ribbed Panels to Reverberant Acoustic Fields” J. Acoust. Soc. Am. Vol. 34 (6)、(1962) P809~826.