ダンピング測定に及ぼすモード連成の影響について*

(周波数応答関数の絶対値, 実数部, 虚数部による減衰測定)

浅見 敏彦^{*1}, 村上 惇^{*2}

On the Effect of Modal Coupling on the Measurement of Damping

(Measurement from Magnitude, Real or Imaginary Part of FRF)

Toshihiko ASAMI and Atsushi MURAKAMI

Damping is usually inferred from the response parameters measured in vibration tests, because it can hardly be measured directly. The accuracy of the inference is dependent on the mathematical model representing the behavior of the damping material and the structural dynamics. The simplest mathematical model is a single-degree-of-freedom system with viscous damping. This model is probably a close approximation to actual vibratory system with light damping. As the amount of damping is increased, however, the accuracy of the inference based on the single-degree-of-freedom system becomes poor. One of the reason is considered that the so-called "half-power bandwidth" of the resonant response peak is influenced by the another resonant peaks (called modal coupling), since most vibratory systems have many resonant response peaks in the frequency range. So in this paper, we will discuss the effect of modal coupling on the measurement of damping. Three methods of determining the damping are compared with each other: determination from the magnitude, real or imaginary part of the frequency response function. The theoretical results are compared with the experimental ones.

Key Words: Damping, Measurement, Damping Material, Identification, Modal Coupling, Damping Ratio, Loss Factor, Frequency Response Function, Coincident Quadrature Plot, Mass Cancellation

1. 緒 言

ダンピング(減衰)は, 固有振動数と並んで機械構造物の動特性同定における主要な測定パラメータであるが, その正確な測定は必ずしも容易ではない。最近のFFTアナライザには, 半値幅法や対数減衰率法, あるいは曲線適合による減衰測定システムが組み込まれていて, だれでも簡単に減衰が測定できるようになってきた。FFTアナライザの画面上に減衰比もしくは損失係数の値が表示されると, 我々はついその値を信用しがちであるが, 実はその最初の数字ですら怪しい場合がある。最近, 同一材料・形状の制振鋼板を様々な企業や公共の研究機関および大学に送って減衰を測定してもらい, その測定値を比較するというラウンドロビンテストが行われている。その結果, 測定法によって, また同じ測定法でも研究機関によってかなりの差異が生じていることが明らかになってきた。このデータのばらつきを少なくするために, 二つの方向で検討が行われてきた。一つは(財)大阪科学技術センター付属のニューマテリアルセンターが中心となって行っ

ているJIS規格化への方向であり⁽¹⁾, もう一つは制振材料研究会がまとめた損失係数測定解説書である⁽²⁾。前者は標準的な減衰測定の方法と最低限守らなければならない注意が記されており, 後者はさらに細部に及ぶ注意点が記述されている。ところが, 両者とも減衰測定に伴う誤差の発生原因に関する理論的アプローチが不足しており, 本質的な問題解決には至っていない。

このような現状において, 本研究は減衰の測定誤差の発生原因の理論的解明を目的として始めたものである。減衰測定の理論は一般に1自由度線形振動系モデルに基づいて構築される。ところが, 測定対象は通常無限の自由度を持っていることが多く, 減衰が大きくなるに従って, 隣接するモードの影響を受けてその測定精度が悪くなることが当然予想される。そこで, 本研究ではこのモード連成の影響によるダンピングの測定誤差の評価を行い, 実験による検証を試みた。また減衰のモデルとしては, 粘性とヒステリシスの2種類の減衰について検討を行った。

実験は中央支持定常加振法により行い, 周波数応答関数(FRF)の絶対値, 実数部および虚数部を利用して減衰を測定した。こうして測定された減衰は, モード連成の影響によって生じると予想される理論上の誤差と比較した。

* 原稿受付 1997年7月7日。

^{*1} 正員, 姫路工業大学 (〒671-2201 姫路市書写2167)。^{*2} 姫路工業大学。

2. 1 自由度振動系に基づく減衰測定の理論

図1は中央加振法による減衰測定システムの一般的配置図を示している。短冊状に成形された試験片がインピーダンスヘッドを介して小型加振器上に取り付けられ、恒温槽内で加振される。この中央加振法は便利な測定法であるが、減衰を正確に測定するためには質量除去(マスキャンセル)という操作をしなければならないという欠点がある。一般に試験片とインピーダンスヘッドの間にコンタクトチップと呼ばれる治具が取り付けられるが、測定された周波数応答関数からこの治具の質量を除去する必要がある。厳密に言えば、たとえコンタクトチップを用いなくても、インピーダンスヘッドの力検出部(圧電素子)の上にはプラットフォームと呼ばれる平坦部を有する質量が載っていて、この質量補正を行う必要がある。この煩わしい作業を軽減するために、一部のメーカーからはマスキャンセルアンプなるものも販売されている。

図2は図1の部分拡大図で、インピーダンスヘッドの内部構造を示している。インピーダンスヘッドには加速度(A)と力(F)の2つの出力端子がある。これらの端子からの出力信号をFFTアナライザに入力し、その周波数応答関数から減衰を測定する。インピーダンスヘッドの頂部にはプラットフォーム(driving platform)と

Fig.1 Typical experimental setup for mechanical impedance method.

呼ばれる平坦部があり、ここに試験片を取り付ける。一般にはインピーダンスヘッドを保護する目的で、このプラットフォームにコンタクトチップと呼ばれる取り付け治具をねじ止めで固定し、このコンタクトチップに試験片を瞬間接着剤で貼り付けて使用することが多く、図2はこの状態を示している。なお、図2では試験片を1自由度の粘性減衰系でモデル化している。

まず、図2の試験片(質量 m)に関する運動方程式は

$$m\ddot{x}_1 + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_0) + k(x_1 - x_0) = 0 \quad \cdots \cdots (1)$$

次に、図中の自由体図(free-body sketch)を参照して、コンタクトチップ+プラットフォームに関する運動方程式を導くと

$$m_p\ddot{x}_0 + c(\dot{x}_0 - \dot{x}_1) + k(x_0 - x_1) = f(t) \quad \cdots \cdots (2)$$

式(1)を変形して

$$m\ddot{x}_1 + c\dot{x}_1 + kx_1 = kx_0 + c\dot{x}_0 \quad \cdots \cdots (3)$$

ここで $x_1 = X_1 e^{j\omega t}$, $x_0 = X_0 e^{j\omega t}$ とおくと

$$(k - m\omega^2 + jc\omega)x_1 = (k + jc\omega)x_0 \quad \cdots \cdots (4)$$

インピーダンスヘッドで測定されるのは変位ではなくて加速度であるから、式(4)の両辺に $-\omega^2$ を掛けて、変位 x_1 と x_0 を加速度 $-\omega^2 x_1 = a_1$, $-\omega^2 x_0 = a_0$ の項で表現すると

$$(k - m\omega^2 + jc\omega)a_1 = (k + jc\omega)a_0 \quad \cdots \cdots (5)$$

次に式(5)をフーリエ変換する。その結果は

$$(k - m\omega^2 + jc\omega)A_1(\omega) = (k + jc\omega)A(\omega) \quad \cdots \cdots (6)$$

すなわち

$$\frac{A_1(\omega)}{A(\omega)} = \frac{k + jc\omega}{k - m\omega^2 + jc\omega} = \frac{1 + 2j\zeta\lambda}{1 - \lambda^2 + 2j\zeta\lambda} \quad \cdots \cdots (7)$$

Fig.2 Sectional drawing of the impedance head.

ここで

$$A_1(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} a_1(t) e^{-j\omega t} dt \quad \cdots \cdots \cdots (8)$$

: 試験片の加速度のフーリエ変換

$$A(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} a_0(t) e^{-j\omega t} dt \quad \cdots \cdots \cdots (9)$$

: ベースの加速度のフーリエ変換

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{: 試験片の固有振動数} \quad \cdots \cdots \cdots (10)$$

$$\lambda = \frac{\omega}{\omega_n} \quad \text{: 振動数比} \quad \cdots \cdots \cdots (11)$$

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega_n} \quad \text{: 減衰比} \quad \cdots \cdots \cdots (12)$$

式(7)の絶対値 (magnitude) をとると

$$\left| \frac{A_1(\omega)}{A(\omega)} \right| = \sqrt{\frac{1 + (2\zeta\lambda)^2}{(1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}} \quad \cdots \cdots \cdots (13)$$

式(13)の右辺が測定したい周波数応答関数を表している。ところがこの式の左辺の変数のうち、インピーダンスヘッドで測定できるのはベースの加速度 $A(\omega)$ だけであり、試験片の加速度 $A_1(\omega)$ は測定できない。したがって、このままでは式(13)の周波数応答関数は測定できない。そのためインピーダンスヘッドの力検出部からの出力 $F(\omega)$ の測定値から、試験片の加速度 $A_1(\omega)$ を同定することになる。

ここで、式(2)に式(1)の関係をを用いると

$$m_p \ddot{x}_0 + m \ddot{x}_1 = f(t) \quad \cdots \cdots \cdots (14)$$

ここでも加速度 $\ddot{x}_0$ と $\ddot{x}_1$ をそれぞれ $a_0(t)$ と $a_1(t)$ で置き換えると

$$m_p a_0(t) + m a_1(t) = f(t) \quad \cdots \cdots \cdots (15)$$

式(15)の両辺をフーリエ変換すると

$$m_p A(\omega) + m A_1(\omega) = F(\omega) \quad \cdots \cdots \cdots (16)$$

ここで

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad \cdots \cdots \cdots (17)$$

: 加振力のフーリエ変換

式(16)に式(7)を代入して $A_1(\omega)$ を消去すると

$$\frac{F(\omega)}{A(\omega)} = m \frac{1 + 2j\zeta\lambda}{1 - \lambda^2 + 2j\zeta\lambda} + m_p \quad (\text{kg}) \quad \cdots \cdots \cdots (18)$$

この周波数応答関数 (FRF) は質量の次元を持っている。これを以下のように無次元表示する。

$$\frac{F(\omega)}{mA(\omega)} = \frac{1 + 2j\zeta\lambda}{1 - \lambda^2 + 2j\zeta\lambda} + \mu \quad \cdots \cdots \cdots (19)$$

$$m = m_p / m \quad \text{: 質量比} \quad \cdots \cdots \cdots (20)$$

式(19)の右辺第1項が測定したい周波数応答関数 (FRF) を表している。ところが右辺第2項により、FRF は試験片以外の質量の影響を受けることになる。この余分な項を取り除くために、コンタクトチップ上の試験片を取り外して再度測定を行うと

$$\frac{F_0(\omega)}{mA_0(\omega)} = \mu \quad \cdots \cdots \cdots (21)$$

式(19)の辺々から式(21)を引き算すると

$$\frac{1}{m} \left(\frac{F(\omega)}{A(\omega)} - \frac{F_0(\omega)}{A_0(\omega)} \right) = \frac{1 + 2j\zeta\lambda}{1 - \lambda^2 + 2j\zeta\lambda} \quad \cdots \cdots \cdots (22)$$

式(22)の操作を俗にマスキャンセル (mass cancellation) と呼んでいる。この FRF の絶対値

$$\frac{1}{m} \left| \frac{F(\omega)}{A(\omega)} - \frac{F_0(\omega)}{A_0(\omega)} \right| = \sqrt{\frac{1 + (2\zeta\lambda)^2}{(1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}} \quad \cdots \cdots (23)$$

の半値幅を図3(a)の方法で測定すれば、減衰比 ζ が同定できることになる。このアパレントマス (F/A) と呼ばれる FRF は、共振点近傍で曲線が左右対称にならず、これが減衰の測定精度に悪い影響を及ぼす。一般には、この関数を微分して得られる機械インピーダンス

$$\frac{1}{\sqrt{mk}} \left| \frac{F(\omega)}{V(\omega)} - \frac{F_0(\omega)}{V_0(\omega)} \right| = \lambda \sqrt{\frac{1 + (2\zeta\lambda)^2}{(1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}} \quad (24)$$

から減衰を測定する方が精度が良いと言われている。

以上のように、FRF の絶対値を用いて減衰を測定する方法は、マスキャンセルをする必要があるが、FRF の実数部または虚数部を用いて減衰を測定すれば、マスキャンセルの必要がなくなる。実際、式(19)の実数部と虚数部を計算すると、以下ようになる。

$$\text{Re} \left[\frac{F(\omega)}{mA(\omega)} \right] = \frac{1 - \lambda^2 + (2\zeta\lambda)^2}{(1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2} + \mu \quad \cdots \cdots (25)$$

$$\text{Im} \left[\frac{F(\omega)}{mA(\omega)} \right] = -\frac{2\zeta\lambda^3}{(1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2} \quad \cdots \cdots (26)$$

実数部には質量比 μ が含まれているが、図3(b)の方法で減衰を測定すれば μ の存在はその測定値に影響しないことがわかる。また、虚数部には質量比 μ が含まれず、同図(c)の方法で減衰が測定できる。

図4(a)は、上記の式(23)～(26)による減衰測定において生じる理論上の誤差を、減衰比 ζ を横軸として表示したものである。減衰比が大きくなるに従って、測定誤差が増加していくようすがわかる。通常の減衰測定で対象となる材料の減衰比は0.2以下と考えられるので、この範囲で各測定法に伴う理論上の誤差を比較すると、式(25)による測定が最も精度が高く(誤差零)、式(23)のように F/A の絶対値による測定が最も精度が悪いことがわかる。しかしながら、その場合でも

(a) From magnitude of FRF

(b) From real part of FRF

(c) From imaginary part of FRF

Fig.3 Methods for determination of damping from FRF.

誤差は10%以下であり、実用上はほとんど問題ないといえる。したがって $\zeta=0.2$ までの範囲では、いずれの方法で減衰を測定してもその誤差はほとんど問題とならない。

同様にヒステリシス減衰の場合についても測定誤差を計算してみると、同図(b)のようになる。ここで、測定誤差が負になるということは、減衰が小さめに測定されることを意味している。ヒステリシス減衰は損失係数 η で評価され、減衰比 ζ との間には固有振動数 $\lambda=1$ において次の関係がある。

$$\eta = 2\zeta \quad \dots\dots\dots (27)$$

(a) Viscous damping

(b) Hysteretic damping

Fig.4 Theoretical error of determination of damping (without modal coupling).

図4(a)と(b)を比較すると、誤差の現れ方に若干の相違はあるものの、減衰が小さい限りは減衰の測定誤差は極めて小さく、ほとんど問題とならないことがわかる(減衰比で0.2以下、損失係数で0.4以下の減衰において誤差は10%以下)。ところが実際には、測定法の違いによる測定値のばらつきはこれらの図から予想される値よりもはるかに大きくなる。それは次の章で述べるモード連成の影響による誤差と考えられる。

3. 減衰の測定精度に及ぼすモード連成の影響

減衰の測定対象は一般に多くの次元を有している。これを1自由度系と見なすことは、注目しているモード以外の振動モードの影響を無視したことになる。本章では、このモード連成の影響による減衰の測定誤差の大きさについて検討する。

n 自由度線形振動系の周波数応答関数は、1自由度系の式(22)を重ね合わせることによって、以下のように表現される。

$$\frac{F(\omega)}{mA(\omega)} = \sum_{i=1}^n \frac{1+2j\zeta_i(\omega/\omega_i)}{1-(\omega/\omega_i)^2+2j\zeta_i(\omega/\omega_i)} \quad \dots\dots\dots (28)$$

これはマスキャンセル実行後のFRFであるが、左辺の表現法は簡略化している。この式において、 ω_i と ζ_i は

それぞれ i 次モードにおける系の固有角振動数とモード減衰比を表している。いま、簡単のために、モード減衰比はすべて等しい ($\zeta_i = \zeta$) とする。また振動数比を

$$\frac{\omega}{\omega_i} = \frac{\omega_1}{\omega_i} \cdot \frac{\omega}{\omega_1} = \frac{\lambda}{r_i} \quad \dots\dots\dots (29)$$

とおく。ここで

$$\left. \begin{array}{l} \lambda = \omega/\omega_1 : \text{振動数比} \\ r_i = \omega_i/\omega_1 : \text{固有振動数比} \end{array} \right\} \quad \dots\dots\dots (30)$$

である。式 (29) を式 (28) に代入して

$$\frac{F(\omega)}{mA(\omega)} = \sum_{i=1}^n \frac{1+2j\zeta(\lambda/r_i)}{1-(\lambda/r_i)^2+2j\zeta(\lambda/r_i)} \quad \dots\dots\dots (31)$$

これを機械インピーダンスで表現すると

$$\frac{F(\omega)}{m\omega_1 V(\omega)} = \sum_{i=1}^n j \frac{\lambda}{r_i} \cdot \frac{1+2j\zeta(\lambda/r_i)}{1-(\lambda/r_i)^2+2j\zeta(\lambda/r_i)} \quad \dots\dots\dots (32)$$

モード連成の仕方は振動系の構造によって異なる。ここでは図 9 に示すような短冊状試験片の場合についてモード連成の影響を調べる。これは試験片の中心を固定端とする片持ち梁と考えられ、その固有振動数 ω_i は以下の方程式の解として与えられる⁽⁴⁾。

$$\cosh \beta_i l \cdot \cos \beta_i l = -1 \quad \dots\dots\dots (33)$$

ここで

$$\beta_i^4 = \frac{m\omega_i^2}{EI} \quad \dots\dots\dots (34)$$

で、 m と l はそれぞれ片持ち梁の質量と長さ (共に試験

(a) Magnitude of FRF (F/V)

(b) Real part of FRF (F/A)

(c) Imaginary part of FRF (F/A)

Fig.5 FRF of a clamped-free uniform bar ($\zeta = 0.05$).

(a) Magnitude of FRF (F/V)

(b) Real part of FRF (F/A)

(c) Imaginary part of FRF (F/A)

Fig.6 FRF of a clamped-free uniform bar ($\zeta = 0.1$).

(a) $\zeta = 0.05$ (b) $\zeta = 0.1$

Fig.7 Theoretical error of determination of damping (with modal coupling; viscous damping).

(a) $\eta = 0.1$ (b) $\eta = 0.2$

Fig.8 Theoretical error of determination of damping (with modal coupling; hysteretic damping).

Table 1 Natural frequency ratios of the cantilever.

i	$\beta_i l$	$r_i = (\beta_i / \beta_1)^2$
1	1.87510	1
2	4.69409	6.26689
3	7.85476	17.5475
4	10.9955	34.3861
5	14.1372	56.8426
6	17.2788	84.9130
7	20.4204	118.598
8	23.5619	157.896
9	26.7035	202.809
10	29.8451	253.336
11	32.9867	309.476
12	36.1283	371.231

片の質量と長さの 1/2), EI は曲げ剛性を表している。式 (33) を解き, 式 (30) で定義される固有振動数比 r_i を計算すると, 表 1 のようになる。

図 5 と図 6 は, それぞれ減衰比が $\zeta = 0.05$ と $\zeta = 0.1$ の場合について, 表 1 で与えられる r_i の値を式 (31) と (32) に代入して計算された周波数応答関数 (FRF) を表している。各図の (a) は式 (32) から計算される機械インピーダンス (F/V) を表していて, 破線は実数部, 細い実線は虚数部, そして太い実線が絶対値を表している。また, 各図の (b) と (c) はそれぞれ式 (31) から計算されるアパレントマス (F/A) の実数部と虚数部を表している。これらの図において, 細い実線は重ね合わせをする前の FRF で, 太い実線は 1 自由度の FRF を 9 個重ね合わせた結果を表している。これらの図から明らかのように, モード連成の影響によって周波数応答関数の形が歪み, 減衰の同定精度が悪くなることが推定される。次に, これらの図から図 3 に示した方法で減衰を測定した結果を図 7 に示す。

図 7(a) と (b) は, それぞれ減衰比が $\zeta = 0.05$ と $\zeta = 0.1$ の場合における減衰比の測定誤差を示している。正確さを期すために, 図 7 では 12 次までのモードを重ね合わせた場合に生じる誤差を示している。これらの図より, 減衰比が大きくなるに従って測定誤差が増加し, また高次モードほど誤差が大きくなるのがわかる。このことから, 高次モードほどモード連成の影響を受けやすいといえる。さらに, FRF の虚数部による測定では減衰が大きめに測定され, 逆に FRF の実数部による測定では減衰が小さめに測定されることもわかる。また, この中では機械インピーダンス (F/V) の絶対値による減衰測定が最も精度が良かった。ただし F/V の絶対値による測定では, 式 (24) のようにマスキャンセルによる補正が必要である。この図 7 から, FRF の実数部と虚数部による測定値を平均すれば, 最も精度の高い測定値が得られるのではないかと推定される。

同様に、図8はヒステリシス減衰系における減衰の測定誤差を示している。この場合も粘性減衰系とはほぼ同様の結果が得られている。

モード連成の影響を考慮した場合の減衰の測定誤差を示した図7と8を、その影響を無視した場合の図4と比較すると、誤差が非常に大きくなっている。このことから、1自由度振動系に基づく減衰測定の理論には限界があることがわかる。特に高次モードにおける減衰測定はモード連成の影響を強く受け、 $\zeta=0.1$ 以上(η では0.2以上)の減衰測定では20%を超える大きな誤差を生じることが予想される。

4. 実験

図9に示すような非拘束形制振鋼板($m=71.72$ gram)の減衰比を中央支持定常加振法によって測定した。実験装置の構成は図1に示す通りであるが、マスキャンセルアンプは使わず、質量除去はFFTアナライザ上の演算によって行った。また実験は恒温槽の中で行い、周囲温度を 20°C の一定値に保った状態で測定した。

測定された周波数応答関数の一例を図10に示している。インピーダンスヘッドからの力信号(F)と加速度信号(A)のいずれをFRFの分母側にとっても減衰が測定できるが、本報では理論解析で示したように、加速度信号を分母側にとってFRFを測定した。図10(a)はそのアパレントマスと呼ばれるFRFの絶対値を示し、その中で一点鎖線で示された直線(C_c)はコンタクトチップのみを加振したときのFRFである。その値は周波数に関係なくほぼ一定で、 $m_p=20.6$ gramという値を示している。この値は実測値20.8 gram(コンタクトチップと埋込ボルトの質量18.6 gramとインピーダンスヘッドのプラットフォームの質量2.2 gramの和)とほぼ一致する。試験片のFRF(C_c+T_p)は、このコンタクトチップの質量の影響を受けて上方にシフトし、マスキャンセルを実行することにより、破線(T_p)で示された正確なFRFが得られる。実際には、このFRFを微分して得られる同図(b)の機械インピーダンス(F/V)により減衰を測定した。また同図(c)と(d)は、(a)のFRFの実数部と虚数部を示している。理論解析から予測されたように、FRFの虚数部はコンタクトチップの質量の影響を受けていないことがわかる。

Fig.9 Oberst beam specimen (unit: mm).

(a) Magnitude (apparent mass F/A)

(b) Magnitude (mechanical impedance F/V)

(c) Real part

(d) Imaginary part

Fig.10 Examples of measured FRF of an Oberst beam specimen.

これらの FRF から、図 3 に示す 3 種類の方法で減衰を測定し、その結果を図 11 に示している。理論解析から予想されたように、高次モードほど測定法の違いによる測定値のばらつきが大きくなっている。減衰の真の値が分からないので、仮に FRF の実数部による測定値と虚数部による測定値の平均を真値とすれば、その測定誤差は図 12 のようになる。これを例えば図 7 (b) と比較すると、両者が定性的にも定量的にもよく一致していることがわかる。このことから、この試験片の減衰比の測定結果はモード連成の影響をかなり強く受けていることが推定できる。

5. 結 言

実験によると、短冊状試験片のような連続体の減衰測定に伴う誤差は、1 自由度振動系に基づく理論から予想されるよりもはるかに大きくなる。例えば、今回の実験で用いた試験片のモード減衰比は 7 % から 10 % の範囲にある (図 11 の $\text{Mag}[F/V]$ による測定結果) が、この程度の減衰比の場合には、図 4 に示すように、1 自由度振動系に基づく理論によると測定誤差は $\pm 3\%$ 以内に収まると予想される。ところが実際に測定を行ってみると、図 12 に示すように、測定法によって測定値には $\pm 20\%$ ものばらつきが生じている。我々はその原因をモードの連成に求め、理論的に検討した結果、以下の知見を得た。

- (1) 周波数応答関数 (FRF) の実数部または虚数部を用いて減衰測定を行えば、試験片以外の質量の影響が自動的に除去できることを確認した。
- (2) モード連成の影響により、実数部による減衰測定では減衰は小さめに見積もられ、逆に虚数部による減衰測定では減衰は大きめに見積もられる。また、高次モードほどモード連成の影響を強く受ける。
- (3) モード連成の影響を考慮すると、減衰を測定できる減衰比 ζ または損失係数 η の上限値は、例えば文献 (3) に示されている値よりもずっと小さくなる。
- (4) 今のところ、質量除去 (mass cancellation) を実施した機械インピーダンス (F/V) による減衰測定が、最もモード連成の影響を受け難く、したがって測定精度がよいという結論に達した。
- (5) 減衰のモデルとして、粘性減衰とヒステリシス減衰の 2 種類のモデルによりモード連成の影響を計算した結果、減衰の同定誤差に大差はなかった。

ただし、以上の結論は力信号 (F) を FRF の分子側にとった場合 (F/A , F/V など) についてのものであり、力信号を分母側にとる FRF (A/F , V/F など) については未

Fig.11 Measured values of damping ratio for various FRF.

Fig.12 Experimental error of determination of damping.

確認である。

最後に本研究を行うにあたり貴重なご助言を与えて頂いた東京工業大学の長松昭男教授に深甚なる謝意を表する。

文 献

- (1) 岩壺卓三, 制振鋼板の減衰特性測定のための JIS 規格化について, 機論, **59**-566, C(1993), 2921-2925.
- (2) 制振材料研究会編, 損失係数測定解説書, (1997).
- (3) Nashif, A. D., Jones D. G. and Henderson, J. P., *Vibration Damping*, (1985), 142, John Wiley & Sons.
- (4) Meirovitch, L., *Elements of Vibration Analysis*, (1986), 227, McGraw-Hill.