

損失係数算出ソフトウェアの開発

(第2報 実測データにもとづく損失係数算出結果と従来法との比較)

Development of some Computer Softwares for Determining the Loss Factor in the Damped Free Vibration

(2nd Report, The Result of Loss Factor Computed by Measuring Data and Comparison with Conventional Methods)

箕輪 晃男*

Akio Minowa

中西 隆**

Takashi Nakanishi

In the conventional method determining the loss factor by using the extreme value and the decay rate, the low accuracy which caused by the sampling errors of A/D converter and the limit of the writing speed of the level recorder are examined first. Then these methods are improved in high accuracy by formulating the new algorithm and proposing the method of determining the upper limit of the decay rate. Using these methods and the method of the 1st report, the loss factor are determined from the damped free vibration which is generated by exciting the square plate in the free-free boundary condition, and the true values of the loss factor are discussed by comparing with these results. The superiority of these softwares and measurement system are confirmed by the evaluated result of the loss factor in high accuracy.

1. まえがき

前報¹⁾において、エネルギー法ならびに位相平面解析法を適用して、減衰自由振動から損失係数を算出する基礎式およびアルゴリズムを定式化してEN法とPP法とし、数値計算の結果から、これらの損失係数算出ソフトウェアは広い範囲の損失係数を高精度で算出できることを報告した。

従来、減衰自由振動から損失係数を算出する方法としては、極値から算出する方法²⁾、ならびにレベルレコーダで対数変換した記録から得られる減衰率(減衰度)から算出する方法³⁾などがある。

前者では損失係数が小さい場合はサンプリング誤差に

より、また損失係数が大きい場合は減衰自由振動が短時間でゼロに収束するので、極値の数が少ないことにより損失係数の算出精度は低い。この方法は中程度の損失係数に対して算出精度は高いが、小さい損失係数を高精度に算出した実測例は見当らない。一方、後者では損失係数が小さい場合は前者に比べて損失係数の算出精度は高く、ほぼ真値を与えると評価できるが、損失係数が大きい場合は減衰自由振動の減衰が早いので、レベルレコーダの記録速度が正確に追従できないために真の減衰率が得られないことから、損失係数の算出精度は低い。しかし、真値を与える減衰率の上限値の決定法が確立できれば、高精度に算出できる損失係数の上限が明確になるが、それに関する文献は見当らない。

一般に、損失係数の真値は理論から求められないので、損失係数の真値を推定する場合は、損失係数の大小の各領域を高精度に算出できると評価される複数の損失係数

* 評価技術部 信頼性研究室

** システム技術部 情報システム研究室

算出法、および損失係数測定法を用いて同一試料の損失係数を算出し、比較する方法がとられる。

本報では、まず、従来の極値から算出する方法において、損失係数が小さい場合の算出精度が低い原因を検討して高精度化を図るアルゴリズムを定式化してMAX法とする。また、減衰率から算出する方法(LR法)においては、真値を与える減衰率の上限値を決定する方法を提案し、高精度に算出できる損失係数の範囲を明確にする。さらに、前報¹⁾のPP法の高精度化を図るために、アルゴリズムの一部を変更してPP法(2)とし、未変更の算出法をPP法(1)とする。

次に、正方形板状試料の境界条件を自由-自由とする損失係数測定法で1次振動モードの減衰自由振動を生成し、上記と前報¹⁾の5算出法を用いて実測データから損失係数を算出して、その結果を比較することにより、各損失係数算出法の算出精度を検証する。

これにより、開発した損失係数算出ソフトウェアのEN法、PP法、MAX法の損失係数算出精度、ならびに本損失係数測定法の測定精度の優れた点を述べる。

2. 損失係数算出法

(1) MAX法

粘性減衰力が作用する1自由度系の減衰振動の解は、次式で表される。

$$x = x_0 \exp(-\alpha t) \sin(\omega t + \theta_0) \quad (1)$$

$$\alpha = \zeta / \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2)$$

ここで、 x_0 は時刻 $t=0$ のときの変位、 ζ は減衰比(= c/c_c)、 ω は減衰固有振動数(= $\omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2}$)、 θ_0 は初期位相である。

(1)式は図1(a)に示すように、 $2\pi/q$ を周期として変位の極大値および極小値が交互に起こることを示している。ここで、相続く極値 x_N と x_{N+1} の絶対値の和を最大値 P_N とし、隣り合う最大値の比を取ると、(1)式から、

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{P_2}{P_3} = \dots = \frac{P_N}{P_{N+1}} = \exp\left(\frac{\zeta \pi}{\sqrt{1 - \zeta^2}}\right) = \exp(\alpha \pi) = \exp(\delta) \quad (3)$$

となって、隣り合う最大値は一定の比を持って減少する。この比の自然対数をとると、これは対数減衰率 δ であり、

$$\delta = \ln(P_N/P_{N+1}) = \pi \zeta / \sqrt{1 - \zeta^2} = \alpha \pi \quad (4)$$

で表される。なお、この式の P_N を x_N とおいても同一式となる。

従来は直接、(4)式から対数減衰率、減衰比、損失係数などを算出するか、あるいは P_N を縦軸に、 P_{N+1} を横軸とする座標に、各々の P_N 、 P_{N+1} をプロットすると、理論上はこれらの点は直線になるので、この直線の傾き角を回帰式から求めて、間接的に損失係数を算出する方法²⁾な

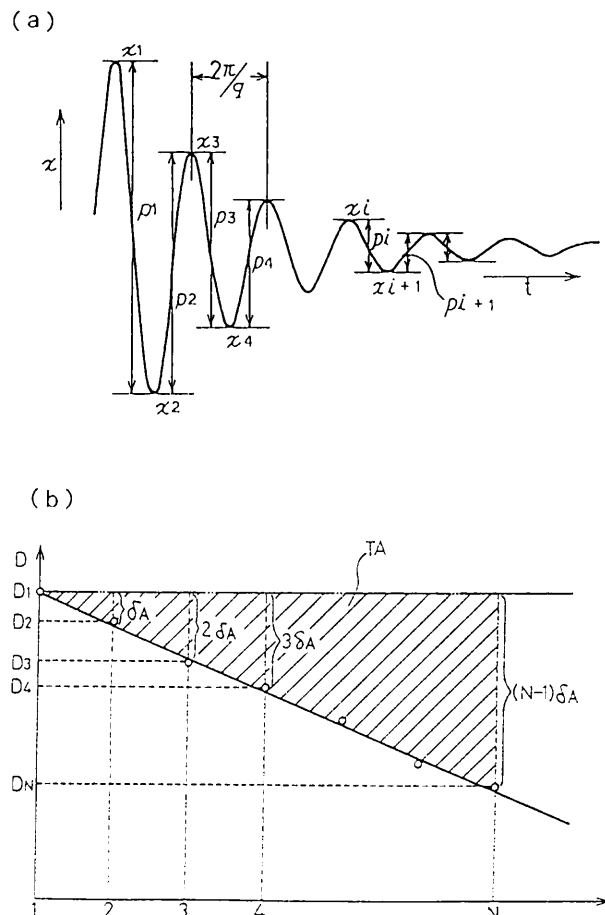


図1 MAX法
MAX-method

どが、一般的に行なわれている。この傾き角 θ は次式で表される。

$$\theta = \tan^{-1} \{ \exp(\pi \zeta / \sqrt{1 - \zeta^2}) - 1 \} \quad (5)$$

これから、損失係数 η (= 2ζ)は次式で算出できる。

$$\eta = 2 [\{ \pi / \ln(\tan \theta) \}^2 + 1]^{-1/2} \approx 2 \ln(\tan \theta) / \pi \quad (6)$$

特に、小さい損失係数を精度よく算出する場合は、

$$\Delta P_N = P_N - P_{N+1} = \{ \exp(\pi \zeta / \sqrt{1 - \zeta^2}) - 1 \} P_{N+1} \quad (7)$$

の関係を用いて、 ΔP_N を縦軸に、 P_{N+1} を横軸とする座標に、 ΔP_N と P_{N+1} をプロットすると、理論上は直線になるので、この直線の傾き角 θ' は次式で表される。

$$\theta' = \tan^{-1} \{ \exp(\pi \zeta / \sqrt{1 - \zeta^2}) - 1 \} \quad (8)$$

ゆえに、損失係数は次式で算出できる。

$$\eta = 2 [\{ \pi / \ln(\tan \theta' + 1) \}^2 + 1]^{-1/2} \approx 2 \tan \theta' / \pi \quad (9)$$

しかし、損失係数が小さい場合、損失係数を(4)式から直接算出すると、ばらつきが大きいため、また、(6)式と(9)式からでは傾き角 θ と θ' の精度が十分とれないために、損失係数の算出精度は低い。

そこで、(6)式と(9)式を用いて損失係数を算出した場合の算出精度が低い原因を調べるために、直線の傾き角 θ 、 θ' に対する勾配 $\tan \theta$ 、 $\tan \theta'$ および損失係数の関係を調べた結果を表1に示す。これを見ると、 P_N と P_{N+1}

表1 傾き角と損失係数
Inclination versus loss factor

θ (degree)	$\tan \theta$	η (52)式	θ' (degree)	$\tan \theta'$	η (54)式
45	1.000	0	0	0	0
45.001	1.0000349	2.222×10^{-5}	0.001	1.745×10^{-5}	1.111×10^{-5}
45.002	1.0000698	4.444×10^{-5}	0.002	3.491×10^{-5}	2.222×10^{-5}
45.01	1.000349	2.222×10^{-4}	0.01	1.745×10^{-4}	1.111×10^{-4}
45.02	1.000698	4.444×10^{-4}	0.02	3.491×10^{-4}	2.222×10^{-4}
45.1	1.00350	2.222×10^{-3}	0.1	1.745×10^{-3}	1.110×10^{-3}
45.2	1.00706	4.444×10^{-3}	0.2	3.491×10^{-3}	2.218×10^{-3}
46	1.0355	2.223×10^{-2}	1.0	1.746×10^{-2}	1.102×10^{-2}
47	1.0724	4.447×10^{-2}	2.0	3.492×10^{-2}	2.185×10^{-2}
50	1.192	1.115×10^{-1}	5.0	8.749×10^{-2}	5.337×10^{-2}
55	1.428	2.254×10^{-1}	10	1.763×10^{-1}	1.032×10^{-1}
60	1.732	3.445×10^{-1}	20	3.640×10^{-1}	1.966×10^{-1}
70	2.747	6.125×10^{-1}	40	8.391×10^{-1}	3.808×10^{-1}
80	5.671	9.671×10^{-1}	80	5.671	1.034
89.9	572.96	1.793	89.9	572.96	1.793

のプロット点を結ぶ直線の傾き角は45°以上をとるが、損失係数が 10^{-1} 以下であれば、傾き角と勾配は各々45.005°, 1.0001745以下となり、もし、傾き角と勾配の分解能が各々0.01°, 3.49×10^{-4} であれば損失係数の分解能は 2.2×10^{-4} となることからわかる。また、損失係数が小さい場合は、損失係数の算出精度の向上のために、 ΔP_N と P_N のプロット点を結ぶ直線の傾き角から求めるが、上述と同じ傾き角と勾配の分解能に対して損失係数の分解能は表から2倍ほど高精度化することがわかる。しかし、実測の ΔP_N と P_N のプロット点はA/D変換器の分解能により、かなりばらつくので最小自乗法などから求める回帰式の勾配は、上述の様な高分解能で得られない。

従って、(6)式と(9)式から損失係数を算出しても算出精度は低く、今までの実測結果では傾き角と勾配の分解能は各々、0.1°と 3×10^{-3} 付近であり、損失係数の最小分解能が 10^{-3} 程度になる理由が解明できた。

そこで、損失係数が小さい場合の算出精度を向上させるために、まず、最大値は正、負の極値付近の複数のサンプル値から2次曲線に基づく補間計算により求める。

次に、図1(b)に示すように、最初の最大値 P_1 の自然対数を D_1 とし、この値と2番目以降、N番目の最大値の自然対数 D_N との差の累積値Sを求めると、(4)式から次式で表される。

$$S = \{N(N-1)/2\} \delta = \{N(N-1)/2\} a\pi \quad (10)$$

ここで、 D_N を縦軸が最大値の自然対数D、横軸が最大値の数Nのグラフにプロットすると、理論上 D_N は勾配が δ の直線にのる。そこで、実測結果から得られる δ を δ_A とすると、 P_1 と P_N の差は(4)式で表され、この量の累積値がSに対応する。また、 $N(N-1)/2 = TN$ とおくと、TN

は図中の三角形TAの領域内に含まれる δ_A の数に対応する。

従って、 α_A は(10)式から

$$\alpha_A = S/TN \cdot \pi = \delta_A/\pi \quad (11)$$

となる。損失係数は(2)式から

$$\eta = 2\sqrt{\alpha^2/(1+\alpha^2)} \quad (12)$$

と書けるので、(11)式の α_A を(12)式に代入することにより算出できる。

なお、試料の粘性が線形であり、しかも測定の設定アップが理想的であれば、 D_N の各プロット点は理論上直線にのるので、CRT上に表示した実測結果のプロット点が直線上にのるかを確かめることにより、粘性の特性や測定の設定アップの良否、ならびに損失係数算出のためのデータの抽出領域の選定などの判断や評価ができるようになっている。

このように、従来法を改良して損失係数が小さい場合の算出精度の高精度化を図ったアルゴリズムを定式化し、これをMAX法とする。

(2) LR法

減衰自由振動のアナログ信号をレベルレコーダで対数変換して減衰直線を記録させ、この減衰直線の傾きから変位レベル L_N の単位時間当りの減少割合を表わす減衰率 $D(=dL_N/dt)$ を求める。このDと固有振動数fから、損失係数は次式で算出する。

$$D = 27.3f\eta/\sqrt{1-(\eta/2)^2} \approx 27.3f\eta \quad (13)$$

このように、レベルレコーダを用いて、減衰率から損失係数を算出する方法をLR法とする。

レベルレコーダは従来から多用されており、損失係数が小さく、減衰率も小さい場合はレベルレコーダの記録速度WS(mm/sec)⁵⁾は減衰自由振動の減衰に十分追従で

きるので正確な減衰率を与えるが、一方、損失係数が大きく、減衰率がある値以上に大きくなると記録速度が正確に追従できなくなるために、計測した減衰率は真値よりも小さくなり、しかも、その限界が不明という性能上の欠点がある。このように、真値を与える減衰率の上限値がわからないこととパーソナルコンピュータの出現により損失係数の算出がコンピュータ化⁶⁾されたことなどによって、最近では使用例が少なくなっているが、減衰直線のパターンが一目でわかることと、損失係数が小さい場合は損失係数の算出精度が高く、真値を与えることなどの利点がある。そこで、信頼できる減衰率の上限値が明確にできれば、各損失係数算出ソフトウェアの算出精度の検証に活用できると考えて、各記録速度の追従可能な減衰率の上限の限界値を求め、それをもとに、真値を与える減衰率の上限値を求めた。まず、各記録速度の限界値は発信器からの正弦波の定常状態から停止までをレベルレコーダに記録させて、得られた減衰直線の傾きから求めた。その結果を図2 (a)のULで示しているが、図中の表に示す各入力周波数 F_{in} (Hz)のいずれにおいても、ほぼ同様の曲線が得られた。但し、各下限周波数LLF(Hz)によって決まる記録速度の最大値付近では記録速度の限界値は多少ばらつくので、測定値の

最小値を限界値とした。次に、図3に示す損失係数測定装置を用いて、表2に示す試料No.3, 4, 7, 8の1次の振動モードにおける減衰率を記録速度を変化させて計測した結果を図2 (a)~(c)に示す。

これらを見ると、試料No.3, 4, 8の減衰率は記録速度が小さいときは記録速度の限界値の曲線に沿って、ほぼ同じ値をとりながら記録速度の上昇とともに増加するが、ある記録速度以上になると減衰率は一定値に近づく傾向を示す。特に、試料No.8の減衰率は一定値を示す記録速度の幅が狭いので、減衰率の上限値に近い値を示していると考えられる。一方、試料No.7の減衰率は記録速度が小さいときは前記と同様であり、ある記録速度以上では記録速度の限界値よりも小さい値をとりながら増加するが、一定値に近づかないことがわかる。もし、減衰率が計測可能な記録速度の範囲内のある記録速度以上で、

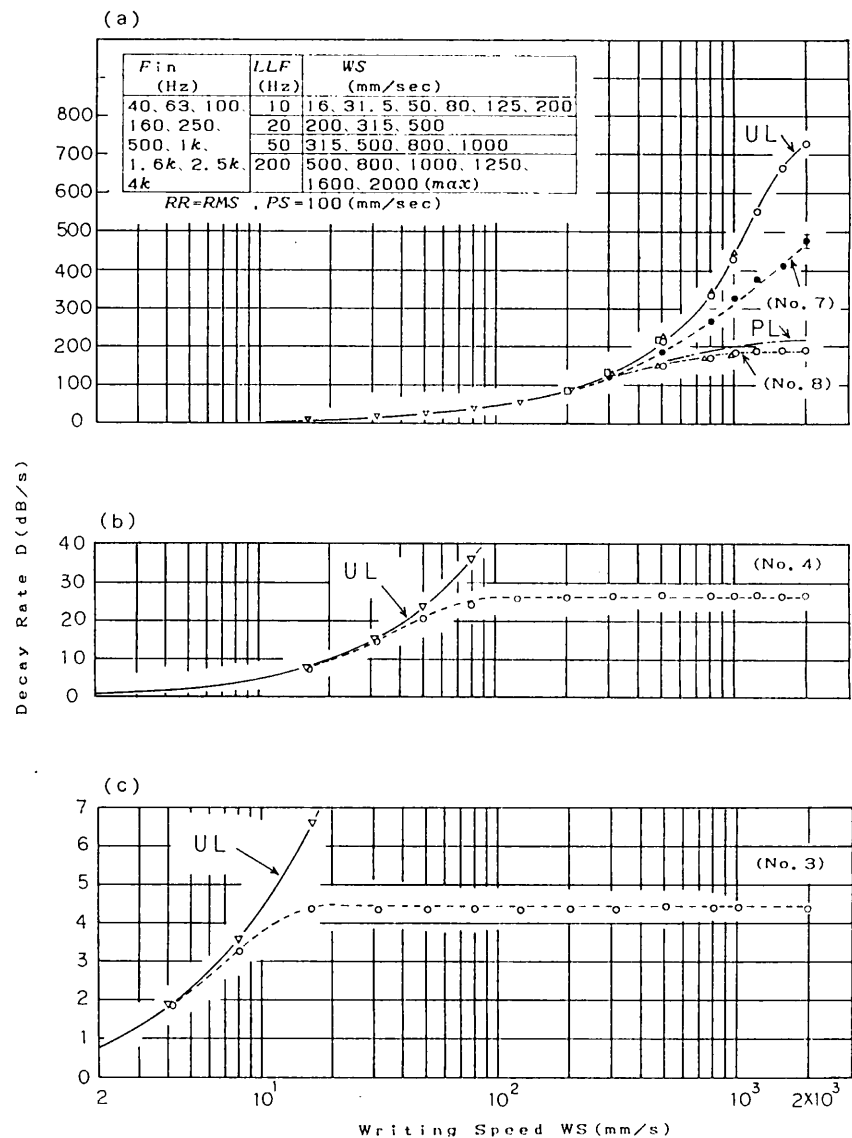


図2 (a)(b)(c) レベルレコーダの記録速度に対する減衰率
Writing speed of level recorder versus decay rate

一定値となるならば、その値は真値を示すと考えられるから、試料No.7の減衰率は最高の記録速度で求めたとしても真値よりも小さい値を示すことがわかる。しかし、もっと早い記録速度が可能であれば、いずれは一定値を示すので、その値が真の減衰率を与える。

以上のことから、減衰率が記録速度の増加に伴って増加し、ある記録速度以上で一定値をとるならば、その値は真値を与えるが、一定値が存在しなければ、最高の記録速度で測定した値であっても真値よりも低い値を与えられ、本実験で使用したレベルレコーダ (Type 2305, B&K)⁵⁾の真値を与える減衰率の上限は試料No.8の減衰率の曲線から類推すると、図2 (a)に示すPLの曲線で表され、下限周波数を200Hz、記録速度を2000mm/secに設定したときの減衰率の上限値は220dB/secであり、この値以下の減衰率は真値を与えると考えられる。

このようにして、LR法における減衰率の真値を与える上限値の決定法を提案し、この上限値以下の減衰率から算出した損失係数は真値として、高精度に算出できる損失係数の範囲を定義した。これをもとに、各損失係数算出ソフトウェアの損失係数算出精度を検証する。

(3) PP法 (2)

前報¹⁾で述べたPP法の損失係数算出精度の高精度化を図るために、アルゴリズムの一部を変更してPP法 (2) とし、前報¹⁾の算出法をPP (1) とする。

動径Rを求める式

$$R = q \cdot X(LS) / \sin(\theta) (DN - D1) DP \quad (14)$$

において、分母がゼロに近づくゼロクロス点前後のある一定量の動径は誤差が大きいため、演算対象から除外するが、その方法として、PP法 (2) では、ある閾値以上のサンプル値のみから動径を求めるようにした。また、基準とする動径は、この閾値を越えた最初の点とし、半サイクル毎に設けることにした。

3. 損失係数測定法と実験装置

正方形板状試料の面外振動 (曲げ振動) の1次振動モードにおける損失係数測定装置の概略を図3に示す。

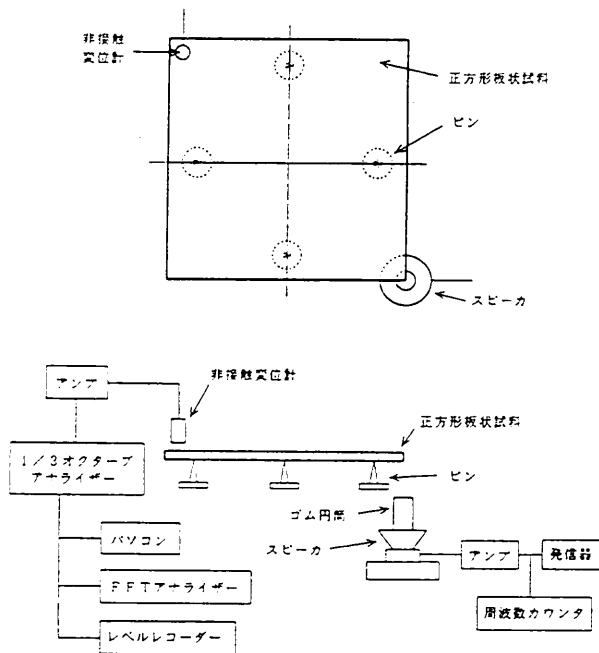


図3 測定装置概略図

Schematic block diagram of vibration-damping thin-plate test apparatus

等方・等質性の正方形薄板の境界条件が自由-自由であるならば、理論上1次振動モードの節線は正方形板の対辺の中央を結ぶ直交直線であり、腹は正方形板の角部である。すなわち、薄板の厚さ h の中立面内に直角座標 x, y をとり、点 (x, y) の面に直角方向の横変位を $z(x, y, t)$ 、板の密度を ρ 、縦弾性係数を E 、ポア

ソン比を σ 、正方形の一辺を a とすると、運動方程式は次式⁷⁾で表される。

$$\rho h \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + D \left(\frac{\partial^4 z}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 z}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 z}{\partial y^4} \right) = 0 \quad (15)$$

但し、 $D = Eh^3/12(1 - \sigma^2)$ = 板の曲げ剛さ

いま、基準座標 $Z(x, y)$ を用いて

$$Z(x, y, t) = Z(x, y)(A \sin \omega t + B \cos \omega t) \quad (16)$$

とし、これを (15) 式に代入して自由-自由の境界条件のもとで解くと、 n 次モードの固有振動数 f_n は、

$$f_n = \frac{\alpha_n}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho h}} = \frac{\alpha_n h}{4\pi a^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1 - \sigma^2)}} \quad (17)$$

で表される。ここで、 α_n は n 次モードの固有値で $\alpha_1 = 14.10$ 、 $\alpha_2 = 20.56$ 、 $\alpha_3 = 23.91$ となり、1次の振動モードの様式 $Z_1(x, y)$ は前述の通りとなる。

しかし、実際の試料は等方・等質性ではないが、理論に準拠して試料の節線をピンにて水平に支持して、腹を加振するとともに振動変位を測定する。加振は正方形板の角部の直下方位置にスピーカを設置して音響放射⁸⁾により非接触加振する。特に、損失係数が高い試料では強力な加振力が必要となるので、スピーカにゴム円筒を取付けて音波を絞る工夫を行い、さらに、振動変位が同相となる正方形板の対角の両角部の直下方位置に、同相出力のゴム円筒付スピーカを各々1個ずつ設置することによって、音圧の増大を図る加振システムを考案した。これにより、あらゆる材質の正方形板を非接触加振できる。一方、振動変位は正方形板の角部の直上方位置にうず電流型の非接触変位計を設置して、非接触測定を行うが、正方形板の材質が非磁性体の場合は、角部に2cm角のアルミ箔⁹⁾を貼るか、レーザ変位計を用いる。

正方形板の1次の減衰自由振動は、1次の固有振動数にて加振し、共振ピークの振動変位が十分に成長して、最大を示す定常状態を確認した後、加振を停止することにより得られる。次に、この減衰自由振動のアナログ信号を1/3octBPFを通した後、12bitのA/D変換器により適当なサンプリング周波数でサンプリングして、パーソナルコンピュータを用いて各損失係数算出ソフトウェアにより、また、1/3octBPF通過後のアナログ信号からLR法により損失係数を算出する。

4. 損失係数算出結果と考察

図3の実験装置により得られた正方形板の面外振動の1次の減衰自由振動から各種損失係数算出法により損失係数 η を算出した結果を表2、表3および図4に示す。表2には測定に使用した試料、各試料の1次の固有振動数 f_1 ならびに損失係数の算出に使用したデータ長 T_D を示す。表2において、ほぼ等方・等質とみなせる試料No.1と5の1次の固有振動数を $E = 1.86 \times 10^{11} \text{Pa}$ 、 $\rho = 7.9 \times 10^3 \text{kg/}$

表2 各種試料とデータ長
Samples used for experiment and length of data

	No.	1	2	3	4	5	6	7	8
試料	材質	SUS 304	ゴム	SPCC	制振材 ¹⁾	SUS 304	複合プラスチック	複合プラスチック	コンクリート
	寸法(mm)	200 ²⁾ ×1.2 ²⁾	101.5 ¹⁾ ×10.5 ¹⁾	200 ¹⁾ ×1.2 ¹⁾	200 ²⁾	100 ¹⁾ ×1.2 ¹⁾	103.5 ¹⁾ ×8.5 ¹⁾	99.3 ¹⁾ ×8.0 ¹⁾	100 ¹⁾ ×8.7 ³⁾
	質量(gr)	365	170	360	1080	95	86	85	170
	f ₁ (Hz)	96.85	120.0	176.35	233.8	388.8	555.4	627.0	1642
T _D (sec)	EN法	2.781	0.019	2.20	0.500	2.781	0.011	0.013	0.05
	MAX法	"	"	"	"	"	"	"	"
	PP法(1)	0.500	"	0.500	"	0.500	"	"	"
	PP法(2)	"	"	"	"	"	"	"	"
	LR法	75	0.05	4.0	"	20	0.04	0.07	0.07

- 1) 制振材とはSPCCに鉛シートを接着したもの。
 2) SPCCと鉛シートの寸法は、各々200²⁾×2.95²⁾mm, 200²⁾×0.3²⁾mmである。
 3) コンクリート板の厚さは不均一であり、平均の厚さを示す。

表3 サンプルング周波数とデータ長に対する損失係数
Variation of loss factor for sampling frequency and data length

f _s (kHz)	T _s (msec)	T _D (msec)	$\bar{N}, \overline{CN}_1,$ \overline{CN}_2	各算出法による損失係数 $\eta (\times 10^{-3})$				
				EN法	PP法(1)-1	PP法(1)-2	PP法(2)	MAX法
25.00	20	80	$\bar{N} = 54$ $\overline{CN}_1 = 42$	3.44	3.36	3.34	3.77	3.36
		160		3.58	3.52	3.52	3.71	3.52
		320		3.52	3.46	3.46	3.60	3.50
		500		3.50	3.46	3.46	3.56	3.48
	60	320	$\overline{CN}_2 = 52$	3.58	3.56	3.56	3.58	3.52
	100	320		3.54	3.50	3.52	3.36	3.50
180	320		3.70	3.69	3.70	3.58	3.58	
20.00	20	80	$\bar{N} = 43$	3.38	3.44	3.44	3.38	3.38
		160	$\overline{CN}_1 = 31$	3.44	3.48	3.48	3.38	3.42
		320	$\overline{CN}_2 = 41$	3.48	3.50	3.50	3.42	3.46
16.66	20	80	$\bar{N} = 36$	3.38	3.44	3.42	3.46	3.57
		160	$\overline{CN}_1 = 24$	3.46	3.50	3.50	3.50	3.54
		320	$\overline{CN}_2 = 34$	3.46	3.46	3.46	3.48	3.48
10.00	20	80	$\bar{N} = 22$	3.26	3.24	3.24	3.14	6.82
		160	$\overline{CN}_1 = 10$	3.40	3.40	3.40	3.34	7.12
		320	$\overline{CN}_2 = 20$	3.52	3.50	3.50	3.54	6.72

注) データ取込み時間は f_s=25kHzのとき2.88秒, f_s=10kHzのとき7.20秒である。

注) LR法における損失係数の平均値は $\bar{\eta} = 3.50 \times 10^{-3}$ である。

m³, $\sigma = 0.25$ として(17)式から求めると、各々 97.39Hz, 389.6Hzであり、実測のf₁とよく一致する。

T_Dはサンプルング周波数f_sを25kHzとして、サンプルングしたデータから抽出しているが、減衰自由振動の減衰の程度によりその長さを変えている。すなわち、損失係数が小さい場合は損失係数の算出速度が早いEN法と半サイクルの数が多し算出精度が高く、算出速度の早いMAX法では、T_Dはできるだけ長く取って同一データから損失

係数を算出した。また、PP法(1)と(2)ではT_Dが長くなると損失係数の算出時間も長くなるので、T_Dを短くして同一のデータから損失係数を算出した。一方、損失係数が大きい場合は減衰自由振動の半サイクルの数が少ないので、各算出法に対して同一のT_Dから算出した。

なお、LR法におけるT_Dは減衰直線の直線部が占める時間長さを表す。ここで、T_Dの長さに対する損失係数の算出精度への影響を調べるために、各算出法による損失係

数がほぼ同じ値に算出された試料No. 4 を使って、 f_1 と T_D および定常状態から減衰自由振動が始まる点の時間を 0 秒とした時の T 秒後のデータ取込み開始位置（時間）をパラメータとして、LR法を除く各算出法から算出した損失係数を比較した。その結果を表3に示す。これを見ると、 f_1 が16.66kHz以上では T_D の長さや T に対する損失係数の算出精度への影響は各算出法ともに少ない。しかし、 f_1 を10kHzにすると、半サイクル内のサンプル数 N が36個以下となるので、MAX法では最大値の計算誤差が大きくなることから、 T_D を長くとっても損失係数の算出精度は悪い。一方、MAX法以外の算出法では T_D が短い場合、算出精度はわずかに低下するが、 T_D が長ければ $N < 36$ でも算出精度は高く維持できることがわかる。これは前報¹⁾で述べたように半サイクル内のサンプル数が36個以下になれば、損失係数の算出精度が低下することを立証している。また、動径の計算誤差が大きいゼロクロス点付近のサンプルを除外する量と損失係数算出精度の関係を調べるために、PP法（1）においてNSFとNEFの設定値を変えて損失係数を算出した結果も表2に示す。NSFとNEFを各々、 $ST+7$ と $NE-6$ 、ならびに $ST+2$ と $NE-1$ と設定したときの損失係数算出法を各々、PP法（1）-1、PP法（1）-2とし、この時の計算に使用したサンプル数の平均を各々、 \overline{CN}_1 、 \overline{CN}_2 とする。表2をみると、ゼロクロス点付近のサンプル値の除外する量の多少に対して損失係数はほぼ同一値を示している。しかし、ゼロクロス点付近に複数のゼロ値が存在すると、PP法（1）-2ではCRT上にプロットしたゼロクロス点付近の動径の対数変換値が直線にのらない場合が時々発生するので、ゼロクロス点付近の除外するサンプル数は前報¹⁾の数値計算結果と同じく6個とするのが良いと思われる。なお、PP法（2）では閾値の設定量を一定にして損失係数を算出しているが、PP法（1）の算出結果とほぼ同じ値を示していることから、基準とする動径の位置は半サイクルの極値付近であれば、算出精度に影響しないことがわかる。

以上のことから、半サイクル内のサンプル数が約36個以上となるサンプリング周波数でサンプリングすれば各算出法における損失係数算出精度は高精度を維持でき、しかも、損失係数が小さい減衰自由振動ではデータ長の長さやデータ取込み開始位置に対する算出損失係数のばらつきは少ないことがわかる。但し、EN法とMAX法については半サイクルの数ができるだけ多い方が損失係数の算出精度は高く維持できるので、データ長は長く取る必要がある。また、PP法については、ゼロクロス点付近の除外するサンプル数は6個となるように、NSFとNEFならびに閾値を設定すれば、損失係数の算出精度は高く維持できることがわかる。なお、半サイクル内のサンプル数の下限ならびに除外するサンプル数は数値計算の結

果とよく一致していることがわかる。

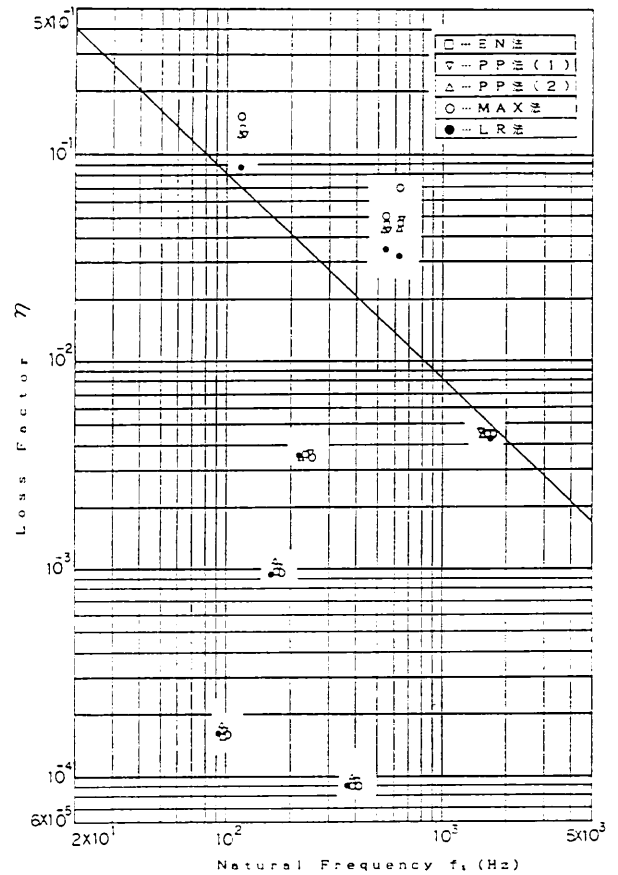


図4 各種試料の損失係数
Loss factor of some samples

次に、図4には各試料の1次の固有振動数 f_1 (Hz)に対して、各算出法から算出した損失係数 η 、ならびに前述の減衰率の上限値220dB/secから算出した損失係数を実線で示す。この実線以下の損失係数は真値とみなせるので、これを基準にして各算出法の損失係数算出精度を評価する。まず、損失係数が実線の値よりも小さい場合は、各算出法による損失係数はほぼ同一の値を示しているため、各算出法の全てが真の損失係数を算出できることがわかる。この時のエネルギー、動径、最大値の対数変換値のプロット点は直線上にのるとともに、LR法の減衰直線は約30dBのダイナミックレンジにおいて直線性を示すことから、各試料の粘性は線形であり、測定のセットアップが良好であることがわかる。一方、損失係数が実線の値よりも大きい場合は、EN法ならびにPP法（1）と（2）から算出した損失係数はほぼ同一の値を示しているが、これらの値に比べてMAX法から算出した損失係数は大きく、LR法から算出した損失係数は小さい。このような差が生ずる理由としては、MAX法では極値の数が少ないことから大きく算出され、LR法では真値を与える減衰率の上限値を越えていることから小さく算出されることが挙げられる。

従って、実線以上の大きな損失係数については、EN法ならびにPP法（1）と（2）から算出した損失係数が真値を与えると考えられる。なお、試料No.7のデータにおける損失係数算出時間は、EN法とMAX法では約1秒、PP法（1）と（2）では約3秒であった。

以上のことから、EN法とPP法（1）と（2）は、広い範囲の損失係数を高精度で自動的に算出できることが、MAX法は 10^{-1} 以下の損失係数をLR法と同程度に算出できることがわかった。

5. 損失係数測定法の特徴

各種試料の損失係数を高精度に算出するためには、損失係数測定法も高精度でなければならない。

そこで、本測定法の測定精度に対する優位性を、損失係数が大きい場合に適用される強制振動法と比較することにより検証する。

強制振動法とは短冊状や棒状試料を正弦波掃引または不規則信号などで加振して、力と振動量のフーリエ変換から損失係数を求める方法である。これには共振曲線の半値幅から求める共振法^{10)~11)}、共振曲線の周辺を抽出して逆フーリエ変換し、ヒルベルト変換を用いてインパルス応答関数のエンベロープから求める方法⁹⁾、ならびに機械インピーダンス線図から求める機械インピーダンス法¹⁰⁾などがある。これらはいずれも、損失係数が小さい場合損失係数の算出精度が低い欠点がある。なぜならば、損失係数が小さい場合は共振ピークが成長して真値に至るには時間がかかるが、正弦波掃引加振では十分時間をかけないうちに次の加振周波数に移行すること、一方、不規則加振では試料の固有振動数と同じ加振周波数成分が不規則に変動することなどから共振ピークが真値に到達していないことにより正確な共振曲線が得られないからである。また、試料を加振するために試料を加振機に強固に固定する場合は、その取付部では試料本来の機械的特性が変化することから正確な損失係数が得られない欠点がある。例えば、取付部の試料が固定時に変形あるいは微小な亀裂などを発生すると、試料本来の機械的特性が失われるために、損失係数は本来の値よりも大きくなる場合が多く、特に、プラスチックやゴムなどでは金属に比べて軟らかいので、その影響は大きい。さらに、取付治具などによる取付部の質量増加ならびに加振機の性能、すなわち試料の共振状態を正確に維持できる能力などが影響して、損失係数の算出精度は変動する。一方、試料を電磁的に非接触加振するならば、試料は磁性体に限られるか、または非磁性体試料であれば、小片の磁性体を貼りつけて加振するので、小片の磁性体の質量が影響して算出する損失係数は試料本来の値よりも大きくなる欠点がある。また、損失係数の算出に手間と時間がか

かる。

本測定法は、3章で述べたように上述のような欠点がなく、材料本来の損失係数を高精度で測定できる長所を有する。すなわち、共振ピークは十分に成長して最大振幅を与える固有振動数を抽出でき、また、試料の節線をピンにて水平に支持するので試料本来の機械的特性を失わず、さらに、スピーカで非接触加振するため、あらゆる材質の試料を加振できるとともに、変位を非接触測定することから、損失係数を高精度で測定できる。

6. まとめ

各種損失係数算出法を定式化し、正方形板状試料の1次の減衰自由振動から、パーソナルコンピュータを用いて損失係数を算出した。また、真値を与える減衰率の決定法を提案して高精度に算出できる損失係数の範囲を明確にした。これに基づいて各種損失係数算出法の算出精度を検討し、損失係数測定法の比較を行った結果、以下の結論を得た。

（1）広範囲の損失係数を高精度で自動的に算出できるEN法とPP法の2つの損失係数算出ソフトウェアの開発ができた。90~1600Hzの固有振動数において、 $8 \times 10^{-3} \sim 0.2$ の損失係数を高精度に算出することが検証できたが、前報¹⁾の数値計算結果から損失係数が1.8の実測データに対しても、高精度に算出できると予測できる。また、極値から損失係数を算出する従来法を改良して、 10^{-1} 以下の損失係数を高精度に算出するMAX法の損失係数算出ソフトウェアが開発できた。これらの算出ソフトウェアでは半サイクル内のサンプル数が36個以上となるサンプリング周波数でサンプリングし、しかも、PP法ではゼロクロス点付近の除外するサンプル数を6個とすれば、損失係数は高精度に算出でき、算出時間はLR法や強制振動法に比べて短縮化が図れた。

（2）LR法については、真値を与える減衰率の上限値を決定する方法を提案し、これにより高精度に算出できる損失係数の範囲が明確になった。

（3）損失係数測定法については、材料固有の損失係数を高精度で測定できることを示し、損失係数が大きい場合に適用される強制振動法に対して測定精度における優位性を明らかにした。

7. あとがき

本研究で開発した損失係数算出ソフトウェアは、現在特許出願中であり、骨組ができたばかりであるので、高性能のA/D変換器、演算プロセッサ、パーソナルコンピュータなどを用いることにより、また、算出ソフトウェアを改良することにより損失係数の算出範囲の拡大、高精度化および算出時間の短縮化などの研究を今後も続ける予

定である。

最後に、本開発研究は（株）ニメックスとの受託研究により加速推進されたものであり、開発研究にご協力頂いた（株）ニメックスの栗原文雄社長、共同研究者として出向された小西康志氏、ならびに公害監視センター騒音検査課の厚井弘志課長、袋谷実前課長、松井千明技師に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 箕輪晃男, 中西 隆, 大阪府立産業技術総合研究所報告, 5, 33 (1992)
- 2) 亘理 厚, 機械振動, 84, 丸善 (1979)
- 3) HARRIS, HANDBOOK OF NOISE CONTROL, Chapter14, 9, McGRAW-HILL (1957)
- 4) 2) のP.84
- 5) Instruction and Applications, Level Recorder Type2305, BRÜEL & KJAER
- 6) 大門静史郎, 佐藤利和, 石川正臣, 日本音響学会昭和60年度秋季研究発表会講演論文集, 487 (1985)
- 7) 例えば, S.チモシエンコ, 工業振動学, 谷下市松, 渡辺 茂 訳, 60, 東京図書, (1969), 2) のP.65
- 8) 箕輪晃男, 杉井春夫, 大阪府立産業技術総合研究所報告, 1, 1 (1988)
- 9) 非接触変位計技術資料, 2, エミック(株) (1986)
- 10) 例えば, 五十嵐寿一責任編集, 音響と振動, 392, 共立出版, (1968)
- 11) 小野木重治, レオロジー要論, 175, 槇書店, (1980)