

損失係数算出ソフトウェアの開発

(第1報 損失係数算出法の定式化と数値計算結果)

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

(1st Report, Formulation for Determining the Loss factor and Numerical Computational Results)

箕輪 晃男* 中西 隆**
Akio Minowa Takashi Nakanishi

To determine the wide range of the loss factor from the damped free vibration, the equation and algorithm in the two methods are formulated. These methods are based on the energy method and phase plane analysis. The former method is computed the loss factor from the energies in the half cycles, and the latter method is computed the loss factor from the radius vectors which are transformed from the wave amplitude. From the results of numerical computation, the loss factors in $8 \times 10^{-5} \sim 1.8$ are computed in high accuracy for the natural frequency 100~1500Hz.

1. まえがき

近年、製品の軽薄短小化、高速化、高精度化、高付加価値化、ならびに宇宙や海洋などへの製品の多様化にともなって、素材ならびに構造における動的挙動により発生する振動・音響の制御が重要視され、素材や構造の振動減衰特性が注目されている。

例えば、洗濯機、クーラー、冷蔵庫などの家電製品^{1)~2)}ならびにプリンター、プロッタ³⁾などのOA機器などでは、低振動化・低騒音化を図ることにより、「人にやさしい」製品づくり、すなわち、音環境の快適化⁴⁾をめざした製品の高付加価値化のための開発研究が活発に行われている。一方、基礎研究では損失係数に関する研究^{5)~10)}、制振材の研究^{11)~19)}ならびに、制振処理技術と評価に関する研究および応用研究^{20)~22)}が各方面で行なわれ、また、日本工業規格では損失係数や制振材料の用語²³⁾ならびに測定法関連の統一規格の制定、検討が進められている。

一般に、振動減衰特性は対数減衰率、減衰比、損失係数などで表わされるが、最近では損失係数で表わされる傾

向にあり、その算出法^{24)~26)}には減衰自由振動法および強制振動法などがある。しかし、これらは損失係数の大きさによって算出精度に優劣があるので、損失係数が小さい場合は減衰自由振動法で、損失係数が大きい場合は強制振動法でというように、損失係数の大きさに応じて使い分ける必要がある²⁷⁾ため、これらの欠点を補い広い範囲の損失係数を高精度に算出できる方法が強く望まれている。

本報では、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する。次に、パソコンを用いてサンプリング周波数や設定損失係数などをパラメータとして数値計算を行い、本損失係数算出ソフトウェアが広い範囲の損失係数を高精度で算出できることを述べる。

2. 理論

(1) EN法

粘性減衰力が作用する1自由度系の減衰自由振動を考える。ばね定数をk、粘性減衰係数をc、質量をm、変位をxとすると運動方程式は次式で表わされる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (1)$$

ここで、時刻 $t = 0$ のときの変位および速度を各々 x_0 ,

* 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

v_0 とし、 $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ (不減衰固有振動数)、 $c_c = 2\sqrt{mk}$ (臨界減衰係数)、 $\zeta = c/c_c$ (減衰比) とおくと、ラプラス変換などにより (1) 式の解は $\zeta < 1$ の場合、次式で表わされる²⁸⁾。

$$x = x_0 \exp(-\zeta \omega_0 t) \left\{ \cos(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_0 t) + \frac{\zeta + (v_0/\omega_0 x_0)}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_0 t) \right\} \quad (2)$$

この式は変位が時間とともに減少する減衰自由振動を表しており、 $q = \omega_0 \sqrt{1-\zeta^2}$ (減衰固有振動数)、 $\alpha = \zeta/\sqrt{1-\zeta^2}$ 、 $\theta_0 =$ 初期位相とにおいて変換すると、

$$x = x_0 \exp(-\alpha q t) \sin(qt + \theta_0) \quad (3)$$

となる。

ここで、この減衰自由振動の最初の半サイクルが有する振動のエネルギー EA_1 を求めると、(3) 式の振動変位の二乗を半周期 (半サイクル) 積分することにより

$$EA_1 = \int_0^{\pi/q} \left\{ x_0 \exp(-\alpha q t) \sin(qt) \right\}^2 dt = \frac{x_0^2 \{1 - \exp(-2\alpha\pi)\}}{4\alpha q (\alpha^2 + 1)} \quad (4)$$

で表される。但し、 $\theta_0 = 0$ とおく。

同様に、最初の半サイクルから N 番目の半サイクルが有するエネルギー EA_N は、次式で表される。

$$EA_N = \int_{(N-1)\pi/q}^{N\pi/q} \left\{ x_0 \exp(-\alpha q t) \sin(qt) \right\}^2 dt = \frac{x_0^2 \exp\{(N-1)(-2\alpha\pi)\} \{1 - \exp(-2\alpha\pi)\}}{4\alpha q (\alpha^2 + 1)} \quad (5)$$

次に、これらのエネルギー EA_1 と EA_N の比をとると、

$$EA_1/EA_N = \exp\{(N-1)2\alpha\pi\} \quad (6)$$

また、隣り合う半サイクルが有するエネルギーの比は、

$$EA_{N-1}/EA_N = \exp(2\alpha\pi) \quad (7)$$

で表される。ここで、(6) 式を自然対数変換すると、

$$\alpha = (\ln EA_1 - \ln EA_N)/(N-1)2\pi \quad (8)$$

となり、 $\alpha = \zeta/\sqrt{1-\zeta^2}$ の関係式により、損失係数 η ($= 2\zeta$) は次式から算出される。

$$\eta = 2\sqrt{\alpha^2/(1+\alpha^2)} \quad (9)$$

演算処理を簡単にするため、減衰自由振動の各半サイクルが有する波形面積から α を求める。最初の半サイクルが有する波形面積 SA_1 の絶対値 $|SA_1|$ は (3) 式の絶対値を半周期積分すると、

$$|SA_1| = \int_0^{\pi/q} |x_0 \exp(-\alpha q t) \sin(qt)| dt = \frac{x_0 \{1 + \exp(-\alpha\pi)\}}{q(\alpha^2 + 1)} \quad (10)$$

で表される。また、 N 番目の半サイクルが有する波形面積 SA_N の絶対値 $|SA_N|$ は、

$$|SA_N| = \int_{(N-1)\pi/q}^{N\pi/q} |x_0 \exp(-\alpha q t) \sin(qt)| dt = \frac{x_0 \exp\{-\alpha\pi(N-1)\} \{1 + \exp(-\alpha\pi)\}}{q(\alpha^2 + 1)} \quad (11)$$

で表される。これらの比をとり自然対数変換すると、

$$\alpha = (\ln |SA_1| - \ln |SA_N|)/(N-1)\pi \quad (12)$$

となり、これを (9) 式に代入することにより、損失係数が算出できる。

このように、減衰自由振動の各半サイクルが有する振動エネルギー、または波形面積の絶対値の比の自然対数から、損失係数を算出する方法を定式化し、これを EN 法とする。

(2) PP法

位相平面解析法^{29)~31)}により、(1) 式で $y = dx/dt$ とおくと、

$$dy/dx = -(2\zeta \omega_0 y + \omega_0^2 x)/y \quad (13)$$

となる。ここでは周期的運動のみを考えるので、 $\zeta < 1$ の条件下で (13) 式を積分すると、位相面軌道は、

$$y^2 + 2\zeta \omega_0 x y + \omega_0^2 x^2 = C \exp \left\{ \frac{2\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \tan^{-1} \frac{y + \zeta \omega_0 x}{\omega_0 x \sqrt{1-\zeta^2}} \right\} \quad (C = \text{定数}) \quad (14)$$

で表され、 $x-y$ 平面では図 1 (a) に示すような変形らせんとなる。

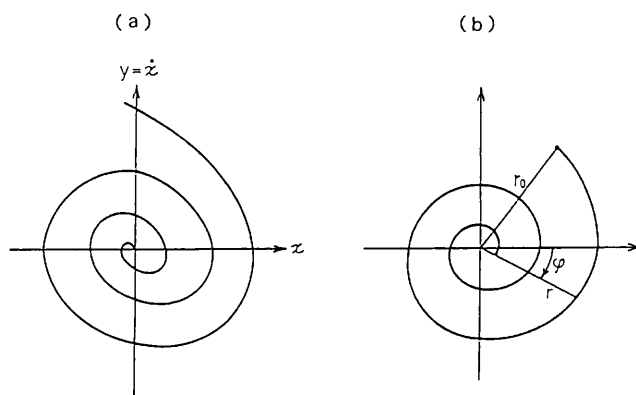


図1 位相面軌道
Phase plane trajectory

いま、(14) 式において

$$\omega_0 x \sqrt{1-\zeta^2} = r \cos \varphi (= qx) \quad (15)$$

$$y + \zeta \omega_0 x = r \sin \varphi (= y + \alpha qx) \quad (16)$$

とおき、新しい座標系 (平面極座標系) を考えると、

$$r = r_0 \exp(\zeta \varphi / \sqrt{1-\zeta^2}) = r_0 \exp(\alpha \varphi) \quad (17)$$

(ここで、 r は動径、 r_0 は定数、 φ は傾角)

となって、位相面軌道は図 1 (b) に示すような対数らせんとなる。この (17) 式は片対数グラフ上で直線となる。

この対数らせんの傾角 φ は、初期値を Φ とすると、

$$\varphi = -qt + \Phi \quad (18)$$

で表される直線式となる。この初期値 Φ は $t = 0$, $t = \Phi/q$, $t = 2\pi/q$ の条件、および (3) 式、(15) ~ (18) 式と $\alpha = \xi/\sqrt{1-\xi^2}$ から、次式で表される。

$$\Phi = \pi/2 - \theta_0 \quad (19)$$

次に、図2に示す減衰自由振動において、任意の時刻 t_s とこの時刻から t 時間経過した時刻 t_E における変位を各々 x_s , x_E とし、この時の対数らせんの傾角ならびに動径を各々 φ_s , φ_E , r_s , r_E とすると、(17) 式と (18) 式により、各々の動径の比は、

$$\begin{cases} r_s/r_E = \exp\{\alpha(\varphi_s - \varphi_E)\} = \exp(\alpha qt) \\ \varphi_s - \varphi_E = qt \end{cases} \quad (20)$$

となる、これらから α は、

$$\alpha = (\ln r_s - \ln r_E)/qt \quad (21)$$

また、(15) 式と (20) 式から、次式で表される。

$$\alpha = (1/qt) \ln \{(x_s/x_E) (\cos \varphi_E / \cos \varphi_s)\} \quad (22)$$

損失係数はこの α を (9) 式に代入することにより算出できる。

従って、位相面軌道の対数らせんの動径および傾角を求めれば、これらから損失係数が算出できることになる。

これらの傾角と動径を求める方法にはいくつかあるが、本方法では図2に示すように減衰自由振動波形を一定の時間間隔 Δt でサンプリングしたと仮定し、変位がゼロとなるゼロクロス点に注目して傾角と動径を求める。

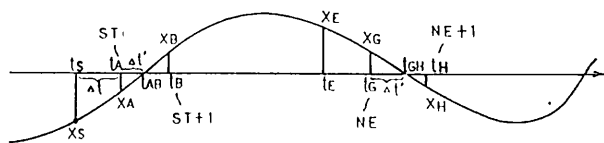


図2 減衰自由振動
Damped free vibration

まず、図において減衰自由振動の変位がゼロクロス点付近で増加する部分について考える。ゼロクロス点の時刻 t_{AH} の前後のデータ点の時刻を各々 t_A , t_B とし ($t_{AB} = t_A + \Delta t$, $t_B = t_A + \Delta t$, $\Delta t < \Delta t$)、その変位を各々 x_A , x_B 、この時の対数らせんの傾角と動径を各々 φ_A , φ_B , r_A , r_B とする。また、ゼロクロス点の傾角と動径を各々 φ_{AB} , r_{AB} とすると、傾角 φ_{AB} は次式で表される。

$$\varphi_{AB} = (1-4m)\pi/2 \quad (m=0, 1, 2, \dots) \quad (23)$$

従って、時刻 t_A における傾角 φ_A および動径 r_A は、

$$\varphi_A = (1-4m)\pi/2 + qt' = \varphi_{AB} + q\Delta t' \quad (24)$$

$$r_A = qx_A / (-\sin q\Delta t') \quad (25)$$

同様に、時刻 t_B における傾角 φ_B および動径 r_B は、

$$\begin{aligned} \varphi_B &= (1-4m)\pi/2 + q\Delta t' - q\Delta t \\ &= \varphi_{AB} + q\Delta t' - q\Delta t = \varphi_A - q\Delta t \end{aligned} \quad (26)$$

$$r_B = qx_B / \sin(q\Delta t - q\Delta t') \quad (27)$$

で表される。

次に、時刻 t_A から $N\Delta t$ 時間経過した時刻 t_N における変位を x_N 、このときの対数らせんの傾角と動径を各々 φ_N , r_N とすると、これらは次式で表される。

$$\begin{aligned} \varphi_N &= (1-4m)\pi/2 + q\Delta t' - Nq\Delta t \\ &= \varphi_{AB} + q\Delta t' - Nq\Delta t \end{aligned} \quad (28)$$

$$r_N = qx_N / \sin(Nq\Delta t - q\Delta t') \quad (29)$$

また、変位がゼロクロス点付近で減少する部分についても同様にして、半サイクルのゼロクロス点直前の時刻 t_G から $N\Delta t$ 時間経過した時刻 t_N における変位を x_N 、このときの傾角と動径を各々 φ_N , r_N とすると、これらは $t_G = t_{GH} - \Delta t$, $t_H = t_G + \Delta t$ の関係から、次式で表される。

$$\begin{aligned} \varphi_N &= (3-4m)\pi/2 + q\Delta t' - Nq\Delta t \\ &= \varphi_{GH} + q\Delta t' - Nq\Delta t \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} r_N &= qx_N / \sin(Nq\Delta t' - q\Delta t) \\ &= -qx_N / \sin(Nq\Delta t - q\Delta t') \end{aligned} \quad (31)$$

ここで、(28) 式と (30) 式から傾角は $\pi/2$ 変化し、(29) 式と (31) 式から動径は正を満足する。

以上のことから、半サイクルのゼロクロス点直前の時刻から、 $N\Delta t$ 時間経過した時刻における動径を半サイクル毎に求めるとすると、動径は (31) 式から計算して絶対値をとれば正となるから、次式で表される。

$$|r_N| = q |x_N| / \sin(Nq\Delta t - q\Delta t') \quad (32)$$

従って、(20) 式において、 $t' = N\Delta t$ とおくと、

$$r_s/r_E = \exp(\alpha q N \Delta t) \quad (33)$$

ゆえに、基準とする1番目の動径を R_1 、基準から N 番目の動径を R_N として、各々の絶対値の比をとると、(33) 式は、次式で表される。

$$|R_1| / |R_N| = \exp\{(N-1)\alpha q \Delta t\} \quad (34)$$

上式を自然対数をとると、次式となる。

$$\ln |R_1| - \ln |R_N| = (N-1)\alpha q \Delta t \quad (35)$$

これから、 α は

$$\alpha = (\ln |R_1| - \ln |R_N|) / (N-1)q \Delta t \quad (36)$$

となり、これを (9) 式に代入することにより損失係数が算出できる。

このように、減衰自由振動の波形そのものが有する情報、すなわち変位を位相平面解析法により動径に変換し、この動径の絶対値の比の自然対数から損失係数を算出する方法を定式化して、これをPP法とする。

3. 演算方法

損失係数は減衰自由振動の変位信号波形をA/D変換器によりサンプリングして、前述の各方法により演算処理して算出する。そのためには、まず初めに半サイクルの前後のゼロクロス点を検出する。次に、ゼロクロス点とゼロクロス点直前のデータ点との位相差を求めて、サン

プリング間隔の単位位相差を求める。このようにして、半サイクルの範囲が確定すると、各半サイクルの振動エネルギー、すなわち波形面積ならびに動径を演算することによって、損失係数が算出できる。

(1) ゼロクロス点

変位がゼロとなるゼロクロス点は、隣接するサンプル値の積を順次求めて、この積が負になる時、両データ点間に存在するとする。ここで、図3の(a), (b)に示すように、A/D変換器の分解能などによって、ゼロクロス点付近に単数または複数のゼロ値が生ずる場合には、積が初めてゼロとなる手前のデータ点のサンプリング番号をゼロクロス点直前のサンプリング番号ST(またはNE)とする。

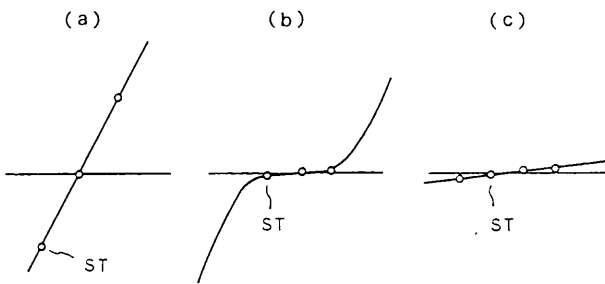


図3 ゼロクロス点
Point of zero-cross

(2) ゼロクロス点とST (NE) 間の位相差の補間

次に、 β_1 と β_2 を正整数とし、サンプリング番号STとST+ β_1 の両サンプル値、およびサンプリング番号NEとNE+ β_2 の両サンプル値から、半サイクル前後のゼロクロス点とSTまたはNEとの位相差(または時間差)を補間により求める。ここで、サンプリング番号ST+ β_1 (NE+ β_2)は、このサンプル値とST(NE)のサンプル値との積が初めて負となるサンプリング番号である。例えば、 $\beta_1=1$ の場合、図2に示すように、サンプリング番号STとST+1のサンプル値を各々、 x_A , x_B とすると、ゼロクロス点とST間の時間差 $\Delta t'$ は、サンプリング間隔を Δt とすると、三角補間により次式で表される。

$$\Delta t' = \frac{|x_B|}{|x_A| + |x_B|} \Delta t \tag{37}$$

同様にして、ゼロクロス点とNE間の時間差も求まる。

なお、(37)式の他に、(3)式や正弦関数に基づく補間式を作り、数値計算により補間の精度を調べた結果、(37)式の補間の精度は他の方法に比べて劣っているが、実測データでは最も精度が高かった。

また、ゼロクロス点とST間の位相差は $q \Delta t'$ 、またサンプリング1間隔の単位位相差は $q \Delta t$ であるので、

$$D1 = \Delta t' / \Delta t = |x_B| / (|x_A| + |x_B|) \tag{38}$$

$$DP = q \Delta t \tag{39}$$

とくと、ゼロクロス点とST間の位相差は次式となる。

$$q \Delta t' = D1 \cdot DP \tag{40}$$

同様にして、ゼロクロス点とNE間の位相差も求まるので、半サイクルの前後の2つのD1とST, NE間のサンプル数から、半サイクル内のサンプル数NPTが求まる。

これにより(39)式は、次式で表される。

$$DP = \pi / NPT \tag{41}$$

(3) 半サイクルのエネルギーならびに動径

半サイクルのエネルギー、すなわち半サイクルの波形面積は、前述の半サイクルの前後の $\Delta t'$ 、サンプリング間隔 Δt および半サイクル内のサンプル数とサンプル値から(11)式により求める。

一方、動径は次のように求める。まず、最初の半サイクル内で最大のサンプル値を与えるサンプリング番号をCSTとし、一般性を持たせるためにLS=CSTと設定し直して、このLSとSTとの差をDNとする。次に、このDN、ゼロクロス点とSTとの間隔D1、およびサンプリング番号LSのサンプル値をX(LS)とすると、(32)式から、LSの動径Rは次式で表される。

$$|R| = q |X(LS) / \sin^2(DN - D1) DP| \tag{42}$$

但し、上式において、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。この除外の方法としては、正整数の m_1 と m_2 から、NSFをST+ m_1 、NEFをNE- m_2 として、これらのサンプリング番号間のサンプル値のみから動径を求めることにし、 m_1 , m_2 の大きさは半サイクル内のサンプル数の多少により調節して、算出精度の高精度化を行う。

(4) 損失係数算出法

(4) - 1 EN法による損失係数の計算

相続く半サイクルの波形面積から、損失係数を算出する方法にはいくつかあるが、本方法は図4に示すように最初の半サイクルの波形面積の絶対値 $|SA_1|$ の自然対数を $LA_1=SLA$ とし、この値と2番目以降のN番目の波形面積の絶対値 $|SA_N|$ の自然対数 LA_N との差の累積値TLAから損失係数を算出する。

まず、対数SLAとN番目の対数 LA_N の差、つまり減少量を DLA_N とくと、これは(12)式から、次式で表される。

$$DLA_N = SLA - LA_N = (N-1) \alpha \pi \tag{43}$$

従って、累積値TLAは(43)式から、次式となる。

$$TLA = (SLA - LA_2) + (SLA - LA_3) + \dots + (SLA - LA_N) = \{N(N-1)/2\} \alpha \pi \tag{44}$$

ここで、対数 LA_N を図4(b)に示すように、縦軸に波形面積の絶対値の自然対数 LA 、横軸に半サイクルの数Nをとるグラフにプロットすると、 LA_N は理論上勾配が $\alpha \pi$ の直線にのる。そこで、実測結果から得られる α を α_A とすると、 DLA_N は $(N-1) \alpha_A \pi$ で表わされ、この累積値がTLAに、また、 $N(N-1)/2 = NST$ とくと、NSTは三角形TAの領域内に含まれる $\alpha_A \pi$ の数に対応する。

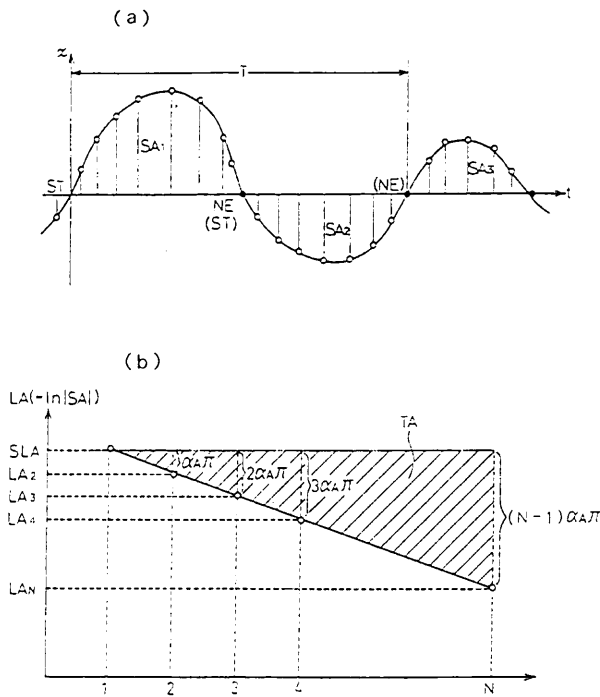


図4 EN法
EN-method

ゆえに、 α_N は(44)式から、次式で表される、

$$\alpha_N = TLA \cdot (\pi \cdot NST) \quad (45)$$

α_N が求まると、(9)式から損失係数が算出できる。

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、 LA_N の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認することにより、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いる。このことは、後述のPP法にも共通していえる。

(4) - 2 PP法による損失係数の計算

相続く動径から損失係数を算出する方法にはいくつかあるが、本方法は図5に示すように最初の半サイクル内の極値の動径の絶対値 $|R_1|$ の自然対数をSLRとし、この極値のサンプリング番号CSTからN番目の動径の絶対値 R_N の自然対数を LR_N として、SLRと LR_N との差の累積値TLRから損失係数を算出する。

まず、対数SLRとN番目の対数 LR_N の差、つまり、減少量を DLR_N とすると、これは(35)式と(39)式から次式で表される。

$$DLR_N = SLR - LR_N = (N-1)\alpha DP \quad (46)$$

次に、累積値TLRは(46)式から、次式となる。

$$\begin{aligned} TLR &= (SLR - LR_2) + (SLR - LR_3) + \dots + (SLR - LR_N) \\ &= \{N(N-1)/2\} \alpha DP \quad (47) \end{aligned}$$

ここで、 LR_N を図5(b)に示すように、縦軸に動径の絶

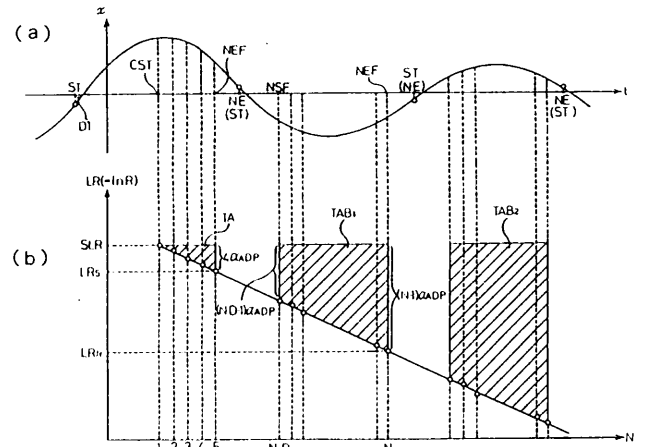


図5 PP法
PP-method

対値の自然対数LR、横軸に動径の数Nをとるグラフにプロットすると、 LR_N は理論上勾配が αDP の直線にのる。そこで、実測結果から得られる α を α_A とすると、TLRは図の斜線部分の DLR_N の累積値、すなわち、ゼロクロス点前後のある一定量の DLR_N を省いて順次加算したSTLRになる。同様に、 $N(N-1)/2$ はゼロクロス点前後のある一定量の DLR_N を省くので、図中の三角形TAおよび台形 TAB_1, TAB_2, \dots の各々の領域内に含まれる αDP の加算値TNSになる。

ゆえに、 α_A は(47)式から、次式で表される。

$$\alpha_A = STLR / (TNS \cdot DP) \quad (48)$$

α_A が求まると、(9)式から損失係数が算出できる。

4. 数値計算の結果と考察

パソコンを用いて、不減衰固有振動数 f_0 (Hz) と設定損失係数 η_T ならびにサンプリング周波数 f_s (kHz) に適当な値を与えて、理論式(3)式から減衰自由振動波形を生成し、本損失係数算出ソフトウェアのEN法およびPP法により数値計算を行い、算出損失係数 η_c を求めた。

η_T に対する η_c の算出精度をみるため、 η_c / η_T の結果を表1と表2に示す。ここで、Nは半サイクル内のサンプル数、TNは計算に使用した総サンプル数を示す。

また、PP法においてはNSFとNEFは各半サイクルの計算開始と終わりのサンプリング番号を、CNはNSFとNEFの範囲内の計算に使用したサンプル数を示す。なお、カッコ内の数字は $\eta_T = 1.8$ の場合のNとCNを示す。

EN法における η_T / η_c の数値計算結果を示す表1をみると、 $f_0 = 100 \sim 1500$ Hzにおいて、 $N \geq 20$ となる f_s であれば、広い範囲の $\eta_T = 2 \times 10^{-5} \sim 1.8$ に対して $\eta_c / \eta_T = 1$ であり、損失係数の算出精度は高いことがわかる。

一方、PP法における η_c / η_T の結果を示す表2-1をみると、 $\eta_T \geq 2 \times 10^{-3}$ の場合は $N \geq 20, CN \geq 6$ であれば、

表1 EN法における η_c/η_T の数計計算結果 (TN=500)
Results of η_c/η_T computed by En-method

f ₀ (Hz)	f _s (kHz)	N	η_T							
			2×10^{-5}	8×10^{-5}	2×10^{-4}	2×10^{-3}	2×10^{-2}	2×10^{-1}	1.8	
100	4	20(46)	0.9997	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	6	30(69)	0.9995	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	9	45(103)	0.9986	0.9999	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
389	15	20(45)	0.9954	0.9990	0.9996	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	20	27(59)	0.9975	0.9996	0.9998	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	25	33(74)	1.001	0.9999	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	30	40(89)	1.001	1.000	0.9998	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	35	46(104)	1.001	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
700	35	25(58)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	45	32(74)	1.001	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	55	39(91)	1.002	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1000	60	30(69)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	70	35(81)	0.9995	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	85	43(98)	0.9990	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1500	75	25(58)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	100	33(77)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	125	42(96)	0.9977	0.9998	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

表2-1 PP法における η_c/η_T の数計計算結果 (NSF=ST+8, NEF=NE-7, TN=300)
Results of η_c/η_T computed by PP-method

f ₀ (Hz)	f _s (kHz)	N	CN	η_T							
				2×10^{-5}	8×10^{-5}	2×10^{-4}	2×10^{-3}	2×10^{-2}	2×10^{-1}	1.8	
100	5	25(58)	11(44)	1.020	1.005	1.002	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	7	35(81)	21(67)	1.014	1.003	1.001	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	9	45(103)	31(89)	0.9946	0.9983	0.9994	0.9999	1.000	1.000	1.000	1.000
389	15	20(45)	6(31)	0.8320	0.9578	0.9832	0.9983	0.9999	1.000	1.000	1.000
	20	27(59)	13(45)	1.104	1.026	1.010	1.001	1.000	1.000	1.000	1.000
	25	33(74)	19(60)	1.034	1.008	1.003	1.003	1.000	1.000	1.000	1.000
	30	40(89)	26(75)	0.9562	0.9891	0.9958	0.9996	1.000	1.000	1.000	1.000
	35	46(104)	32(90)	0.9953	0.9989	0.9994	0.9999	1.000	1.000	1.000	1.000
700	40	29(66)	15(52)	0.9338	0.9834	0.9933	0.9993	0.9999	1.000	1.000	1.000
	50	36(82)	22(68)	0.9680	0.9922	0.9966	0.9997	1.000	1.000	1.000	1.000
	60	43(99)	29(85)	0.9893	0.9973	0.9989	0.9999	1.000	1.000	1.000	1.000
1000	60	30(69)	16(55)	1.015	1.004	1.001	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	70	35(81)	21(67)	1.014	1.003	1.001	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	85	43(98)	29(84)	1.028	1.007	1.003	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1500	75	25(58)	11(44)	1.021	1.005	1.002	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	100	33(77)	19(63)	1.034	1.008	1.003	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	125	42(96)	28(82)	0.9603	0.9900	0.9960	0.9996	1.000	1.000	1.000	1.000

$\eta_c/\eta_T=1$ となり、高い算出精度が得られるが、 $\eta_T \leq 2 \times 10^{-4}$ の場合、Nが少なくなる程算出精度がわずかに低下する。しかし、現在までの文献やデータでは損失係数が 2×10^{-5} となる算出例は見当らず、実測の最少値はほぼ 8×10^{-5} であることから、現実に存在する損失係数は 8×10^{-5} とす

ると、 $N \geq 36$ となる f_s でサンプリングすれば 8×10^{-5} 以上の損失係数を高精度で算出できることがわかる。次に、 $N \geq 35$ となる f_s において NSF と NEF を変化させて、ゼロクロス点付近のサンプルを除外することによる算出精度への影響を調べた結果を示す表 2-2 をみると、 $\eta_T = 8 \times$

表 2-2 PP法における η_c / η_T の数値計算結果 (TN=300)
Results of η_c / η_T computed by PP-method

f_0 (Hz)	f_s (kHz)	N	NSF	NEF	CN	η_T			
						2×10^{-5}	8×10^{-5}	2×10^{-3}	1.8
100	7	35(81)	ST+1	NE-0	35(81)	1.267	1.067	1.003	1.000
			ST+2	NE-1	33(79)	1.038	1.009	1.000	1.000
			ST+4	NE-3	29(75)	1.021	1.005	1.000	1.000
			ST+6	NE-5	25(71)	1.017	1.004	1.000	1.000
			ST+8	NE-7	21(67)	1.014	1.003	1.000	1.000
			ST+10	NE-9	17(63)	1.012	1.003	1.000	1.000
			ST+12	NE-11	13(59)	1.011	1.002	1.000	1.000
389	30	40(89)	ST+1	NE-0	40(89)	1.048	1.012	1.001	1.000
			ST+2	NE-1	38(87)	0.9657	0.9915	0.9997	1.000
			ST+4	NE-3	34(83)	0.9588	0.9900	0.9996	1.000
			ST+6	NE-5	30(79)	0.9569	0.9893	0.9996	1.000
			ST+8	NE-7	26(75)	0.9562	0.9891	0.9996	1.000
			ST+10	NE-9	22(71)	0.9557	0.9890	0.9996	1.000
			ST+12	NE-11	18(67)	0.9557	0.9890	0.9996	1.000
700	50	36(82)	ST+1	NE-0	36(82)	1.066	1.017	1.001	1.000
			ST+2	NE-1	32(80)	0.9692	0.9925	0.9997	1.000
			ST+4	NE-3	28(76)	0.9666	0.9919	0.9997	1.000
			ST+6	NE-5	24(72)	0.9675	0.9921	0.9997	1.000
			ST+8	NE-7	20(68)	0.9680	0.9922	0.9997	1.000
			ST+10	NE-9	16(64)	0.9682	0.9923	0.9997	1.000
			ST+12	NE-11	12(60)	0.9690	0.9925	0.9997	1.000
1500	125	42(96)	ST+1	NE-0	42(96)	1.057	1.014	1.001	1.000
			ST+2	NE-1	40(94)	0.9614	0.9904	0.9996	1.000
			ST+4	NE-3	36(90)	0.9601	0.9900	0.9996	1.000
			ST+6	NE-5	32(86)	0.9604	0.9906	0.9996	1.000
			ST+8	NE-7	28(82)	0.9603	0.9900	0.9996	1.000
			ST+10	NE-9	24(78)	0.9608	0.9901	0.9996	1.000
			ST+12	NE-11	20(74)	0.9608	0.9901	0.9996	1.000

10^{-3} の場合はゼロクロス点付近のサンプルを 3~6 個除外すると、一方、 $\eta_T \geq 2 \times 10^{-3}$ の場合は除外しなくても損失係数を高精度で算出できることがわかる。

以上のことから、半サイクル内のサンプル数は EN 法では 20 個以上に、PP 法では 36 個以上にすると、 $8 \times 10^{-5} \sim 1.8$ の広い範囲の損失係数を高精度で算出できることがわかる。しかし、EN 法と PP 法による損失係数の算出精度を比較するために、半サイクル内のサンプル数は 36 個以上必要であり、そのようにサンプリング周波数を設定すればよい。すなわち、サンプリング周波数としては不減衰固有振動数の 36 倍以上を設定する。また、ゼロクロス点付近のサンプルを除外する量は EN 法ではゼロでもよいが、PP 法では 6 個以上とすれば $8 \times 10^{-5} \sim 1.8$ の広い範囲の損失係数を高精度で算出できることがわかる。

5. まとめ

エネルギー法ならびに位相平面解析法を適用して、EN 法

と PP 法の 2 つの損失係数算出法の基礎式とアルゴリズムを定式化し、パーソナル・コンピュータを用いて数値計算を行い、損失係数の算出精度を検証した結果、次のような結論を得た。

(1) これらの損失係数算出ソフトウェアは、 $8 \times 10^{-5} \sim 1.8$ の広い範囲の損失係数を高精度に算出できる。

(2) 半サイクル内のサンプル数は 36 個以上とすれば、また、PP 法においてはゼロクロス点付近のサンプルを 6 個以上除外すれば、高精度に損失係数が算出できる。

(3) 損失係数算出ソフトウェアは減衰自由振動から損失係数を算出するが、EN 法は減衰自由振動波形の半サイクルが有するエネルギー (波形面積) を基に、半サイクルの数が 2 個以上あれば算出でき、一方、PP 法は減衰自由振動波形の動径を基に、3/4 サイクル以上のデータがあれば算出できる特徴がある。

次報では、実測データから損失係数を算出して、本損失係数算出ソフトウェアの算出精度の検証を行う。

参 考 文 献

- 1) 伊藤宏幸, 稲塚 徹, 岡本營士夫, 南端文雄, 日本騒音制御工学会平成2年度技術発表会講演論文集, 165 (1990)
- 2) 日経メカニカル, 40, 1988.12.12号, 日経BP社
- 3) 松倉宏行, 甘利 章, 日本騒音制御工学会昭和62年度技術発表会講演論文集, 97 (1987)
- 4) 宇治川正人, 日本機械学会誌, 93(863), 819 (1990)
- 5) 苗村 明, 黒崎貞之, 日本音響学会誌, 22(1), 21(1966)
- 6) 田中 治, 久我新一, 騒音制御, 3(5), 39 (1979)
- 7) 高田省一, 日本音響学会平成3年度春季研究発表会講演論文集, 551 (1991)
- 8) 高田省一, 大島 敏, 影山源一, 日本音響学会平成3年度春季研究発表会講演論文集, 553 (1991)
- 9) 立石 覚, 小白井敏明, No.900-59日本機械学会第68期全国大会学術講演会講演論文集(D), 116 (1990)
- 10) 山口道征, 高田省一, 青木忠昭, 岡田 健, 大門静史朗, 日本騒音制御工学会平成2年度技術発表会講演論文集, 309 (1990)
- 11) 杉本孝一, 金属材料, 15(11), 9 (1975)
- 12) 杉本孝一, 機械の研究, 29(1), 177 (1977)
- 13) 井形直弘, 日本機械学会第469回講習会教材, 75 (1978)
- 14) 森本庄吾, 島口 崇, 日本音響学会誌, 36(8), 419 (1980)
- 15) 坂田興亜, 碓井雄一, 昭和55年度精機学会秋季大会学術講演会論文集, 839 (1980)
- 16) 中川雅俊, 騒音制御, 17(1), 37 (1983)
- 17) 前 義治, 配管技術, 73 (1984-10)
- 18) 郡田和彦, 堺 健二, 田中俊光, 騒音制御, 10(4), 39 (1986)
- 19) 鳥阪泰憲, 機械の研究, 39(6), 1 (1987)
- 20) 川辺尚志, 桑原改造, 精密機械, 45(4), 21 (1979)
- 21) 堺 健二, 藤原治生, 日本接着協会誌, 17(9), 378 (1981)
- 22) 網島貞男, 藤井 透, 西田秀治, 日本接着協会誌, 23(4), 131 (1987)
- 23) JIS H7002, 制振材料用語, 日本規格協会 (1989)
- 24) 五十嵐寿一責任編集, 音響と振動, 392, 共立出版, (1968)
- 25) 日本音響材料協会編, 騒音対策ハンドブック, 433, 技報堂, (1974)
- 26) 小野木重治, レオロジー要論, 175, 横書店, (1980)
- 27) 25) のP.441
- 28) 例えば, 亙理 厚, 機械振動, 80, 丸善, (1979)
- 29) 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)
- 30) 28) のP.26
- 31) 編集委員会代表, 谷口 修, 振動工学ハンドブック, 382, (1976)