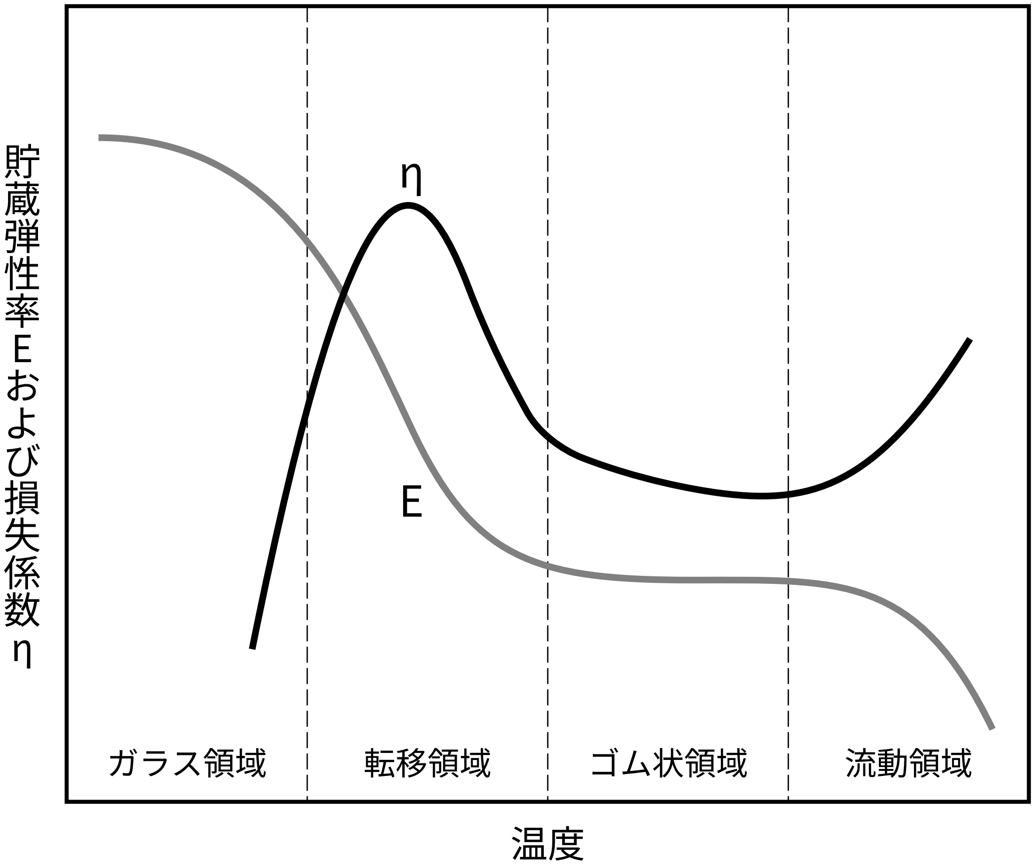
制振材料とその性能測定について



粘弾性材料の温度挙動

"VIBRATION DAMPING" Nashif Jones Henderson より

株式会社 小野測器

Revised: 2004/11/14

目次

制振

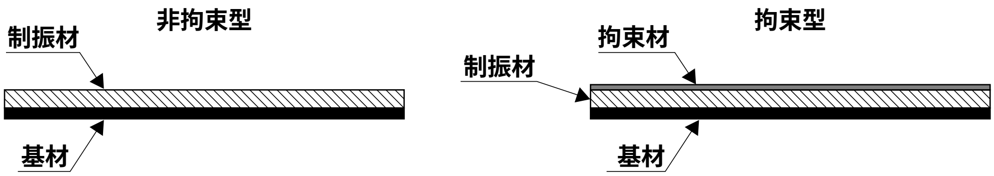
“制振”とは固体表面の振動の振動エネルギーを熱エネルギーに変換し、固体表面の振動を小さくする技術である。
これに対して“防振”は振動源と被振動源の間の振動伝達率を小さくすることで振動の遮断に相当する技術である。制振と明確に区別する必要がある。
制振は固体表面の振動を低減するばかりでなく、固体表面から放射される固体音を低減させることができる。特に振動面の共振点近傍の振動低減に効果を発揮する。この制振技術は振動対策技術として古くから研究されてきているが、最近の静穏化対策技術への応用として、最近最も注目され研究が進められる一方、制振材料の開発が活発化している。

制振材料

基材（鋼、木、コンクリート、プラスチック等）に樹脂系、ゴム系、アスファルト系、金属系等の粘弾性材料（流体の持つ流動性を示す“粘性”と固体の持つ復元性を示す“弾性”の両特性をかね持った材料を粘弾性材料という）の制振材を貼り合わせたものを制振材料と言い、その貼り合わせ方法によって“非拘束型（基材＋制振材）”と“拘束型（基材＋制振材＋拘束材）”に分けられる。

非拘束型としては制振材単品（両面テープが添付されているものもある）が市販されている。

拘束型の代表は制振鋼板とも呼ばれ市販されている。



損失係数

損失係数 η は制振材料の制振特性の評価指標の一つで、損失係数の本来の意味は振動応答系に減衰があると、その応力・歪み線図（あるいは荷重・変位線図）は図 1のように一つのヒステリシスを描く。このヒステリシス曲線から、最大変位 χ における力 $f = K_1 \chi$ と、零変位における力 $f = K_2 \chi$ を測定して $\eta = K_2 / K_1$ から損失係数 η を求めるところからきている。
また、K_1 を実数部、K_2 を虚数部で表した図２の表現方法の場合には、K' を複素弾性率、K_1 を貯蔵弾性率、K_2 を損失弾性率と呼ぶ。

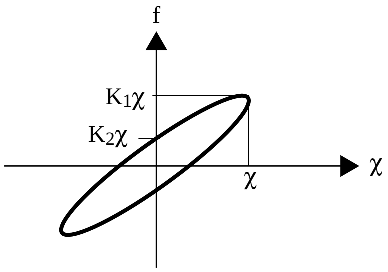


図 1

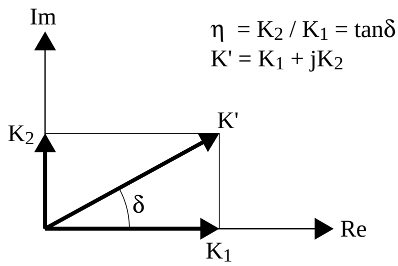


図 2

制振性能を表す量としては種々あって、電気、機械、物理などの専門分野によって使用される量が異なるが、各量の間には簡単な関係が存在する。
これらの関係は表 1のようになる。

	ζ	η	K	Δ	D	Δ f	Q	ψ
ζ	—	2ζ	$\omega_R \zeta$	$2\pi\zeta$	$a\omega_R \zeta$	$\omega_R \zeta / \pi$	$\zeta/2$	$4\pi\zeta$
η	$\eta/2$	—	$\omega_R \eta/2$	$\pi\eta$	$a\omega_R \eta/2$	$\omega_R \eta/2\pi$	$1/\eta$	$2\pi\eta$
K	K/ω_R	$2K/\omega_R$	—	$2\pi K/\omega_R$	aK	K/π	$\omega_R/2K$	$4\pi K/\omega_R$
Δ	$\Delta/2\pi$	Δ/π	$\omega_N \Delta/2\pi$	—	$a\omega_N \Delta/2\pi$	$\omega_N \Delta/2\pi$	$\pi/(\Delta - \Delta^2)$	$2(\Delta - \Delta^2)$
D	$D/a\omega_R$	$2D/a\omega_R$	D/a	$2\pi D/a\omega_N$	—	$D/a\pi$	$a\omega_R/2D$	$4\pi D/a\omega_R$
Δ f	$\pi\Delta f/\omega_R$	$2\pi\Delta f/\omega_R$	$\pi\Delta f$	$2\pi^2\Delta f/\omega_N$	$a\pi\Delta f$	—	$\omega_R 2\pi\Delta f$	$4\pi^2\Delta f/\omega_R$
Q	$1/2Q$	$1/Q$	$\omega_R/2Q$	π/Q	$a\omega_R/2Q$	$\omega_R/2\pi Q$	—	$2\pi/Q$
ψ	$\psi/4\pi$	$\psi/2\pi$	$\omega_R \psi/4\pi$	$\psi/2$	$a\omega_R \psi/4\pi$	$\omega_R \psi/4\pi^2$	$2\pi\psi$	—

$a = 20\log_{10}e = 8.68$,　$\omega_R = 2\pi f_R$,　$\omega_N^2 = \omega_R^2 - K^2$

表１

ζ　：減衰比、粘性係数Ｃと臨界粘性減衰常数＝$2\sqrt{km}$ との比

η　：損失係数、ばねと粘性抵抗を含めて弾性項を $k(1+i\eta)$ と複素表示した場合の損失を示す

K　：減衰常数、振動減衰の $\chi_0 e^{-kt}$ の k

Δ　：対数減衰率、振幅が減衰する場合、隣り合う振幅の比の自然対数

D　：減衰度、減衰振動で１秒当たりの減衰量を dB 表示したもの
残響時間（信号が60 dB減衰する時間）T=60 / Dで求められる

Δ f　：半値幅、共振付近で周波数を変化して描かれる
共振曲線最大値の $1/\sqrt{2}$ を示す周波数の幅

Q　：キュー、振動系が共振する場合、この共振の鋭さを表す量で、振動系のエネルギーと、その振動を持続するため、外部から与えられる1サイクル当たりのエネルギーの２π倍

ψ　：固有減衰容量、振動系で失われる1サイクル当たりのエネルギーと、系に蓄えられるエネルギーとの比

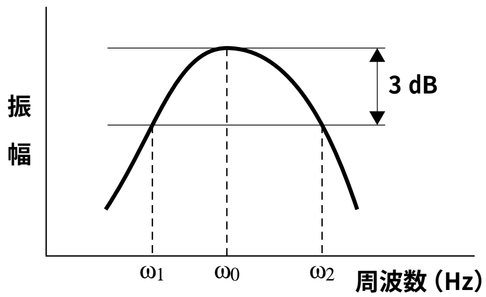
制振性能の測定法

制振性能を表す指標の中で最も一般的なのが、損失係数ηである。

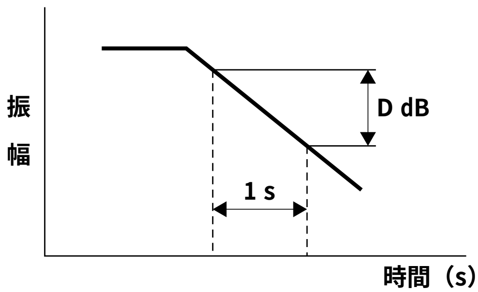
代表的な損失係数の測定法は、半値幅法、減衰率法、機械インピーダンス法がある。これらの測定法はいずれも共振周波数付近で測定する共振法であるが､一般的ではないが非共振法もある。

下記は、測定法を整理したものである。

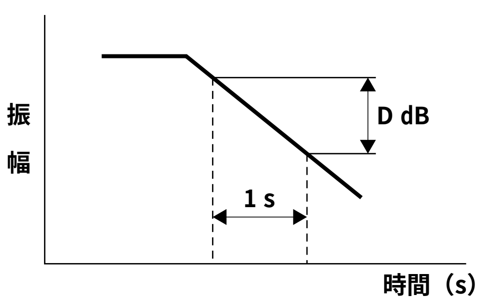
半値幅法
損失係数 ＝ $(\omega_2 - \omega_1) / \omega_0$



減衰率法（時間減衰）
損失係数 ＝ D ／（27.3 f）

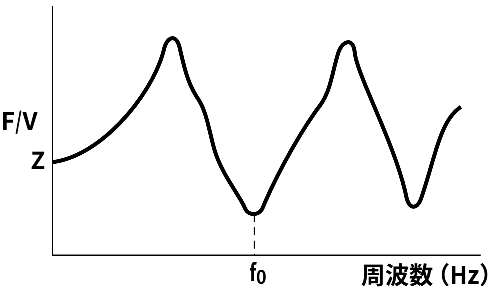


減衰率法（時間減衰）
損失係数 ＝ D ／（27.3 f）
対数減衰率 $\Delta = \log_e(X_n / X_{n+1})$
ここで X_n、X_{n+1} は減衰正弦波のある時の振幅値と次の振幅値



インピーダンス法

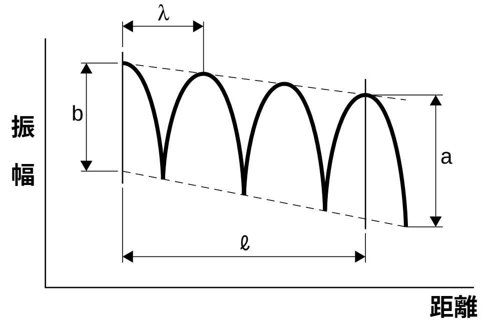
損失係数 ＝ Z ／（$2\pi m f_0$）



非共振法

損失係数 ＝ $D_w \lambda$ ／ 13.6

D_w ＝（a−b）／（2ℓ）



半値幅法

外力 F で振動する 1 自由度系の周波数応答関数 H (j ω) は、その変位量を X、動バネ定数を K、粘性減衰係数を c 、質量を m とすると

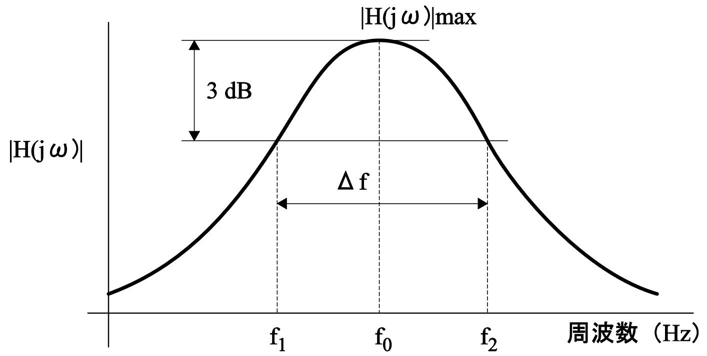
$$H(j\omega) = X(j\omega)/F(j\omega) = 1/\{(k - m\omega^2) - jc\omega\}$$

となる。

この周波数応答関数の振幅の最大値を｜ H ｜^{2}max 、この時の角振動数をω_0 とし、ω_0 付近で振幅が｜ H ｜^{2}max の 1/2 （ 振幅のパワーが半分） となる点の振動数をω_1 、ω_2 とすると、損失係数は次式で示される。

$$\eta = 2\zeta = (\omega_2 - \omega_1)/\omega_0$$

実際の試験では, 周波数応答関数のピーク値から 3 dB 小さい点の周波数f_1、f_2を読み取り、また共振周波数f_0 から制振性能を求める方法が一般的である。



従って、実用的には次の式を使う

$$\eta = \frac{f_2 - f_1}{f_0}$$

また、f_0を使わない式として次の式を使う

$$\eta = \frac{2(f_2 - f_1)}{f_2 + f_1}$$

※半値幅法以外に、n dB 幅法を採用してもよい。この場合の補正値 K は、n dB 幅を採用した場合

$$K = \frac{1}{\sqrt{(10^{n/10}) - 1}}$$

となる。ちなみに 1dB の K は 1.9652、2 dB の K は 1.3076 である。

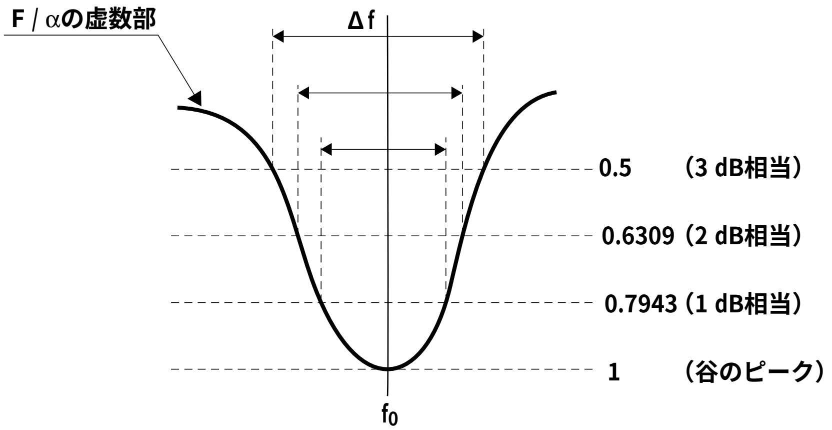
※周波数応答関数の虚数部から半値幅法で損失係数を求める方法

アパレントマス（力／加速度）の虚数部の半値幅（1 / $\sqrt{2}$で　はなく 1 / 2）から上の（$\eta = K(f_2 - f_1) / f_0$）の式から求める。

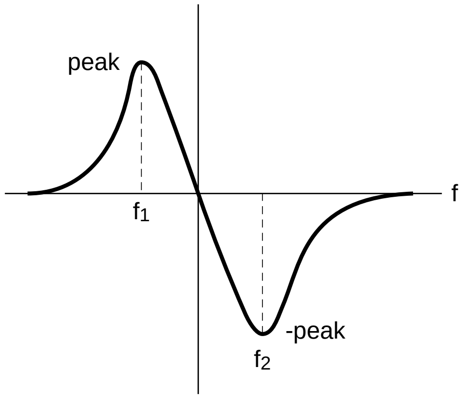
ただし、F / αの虚数部は全て“負”の値を持ち FFT の CHA に加速度、CHB に入力して、その谷（信号を逆に入力して α / Fの山から測定しても良さそうであるが、この両者の虚数部は全く異なるものでひっくり返しても一致しない）の値を－X とすると、f_1、f_2 は次の値になる位置で求める。

	補正値
－X / 1.259の時（A ＝ 1dB相当）	K ＝ 1.965
－X / 1.585の時（A ＝ 2dB相当）	K ＝ 1.308
－X / 2　の時（A ＝ 3dB相当）	K ＝ 1.000

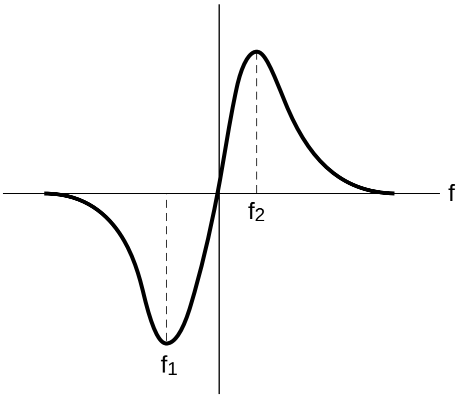
（倍率は異なるが周波数応答関数の MAG の時と同じ補正値である）



※周波数応答関数の実数部から半値幅法で損失係数を求める方法



アパレントマス（F / α）の実数部



スティフネス（F / X）の実数部

上記いずれの場合も

$$損失係数\ \eta = \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_2^2 + f_1^2}$$

の式で計算を行う。

減衰率法

1自由度系が外力を受けて定常振動している場合、この外力がなくなると、振動は徐々に減衰してゆくが、このときの振動振幅の包絡線は、

$$a_0 \times \exp(-\omega_0 \zeta t)$$

で表される。a_0は初期条件により決まる定数である。

この包絡線の 1秒あたりの減衰量 D (dB / sec) は、

$$D = 8.686 \omega_0 \zeta$$

となる。したがって、

$$\eta = 2\zeta = D / (27.3 f_0)$$

より、損失係数を求めることができる。

ただし、$\omega_0 = 2\pi f_0$である。

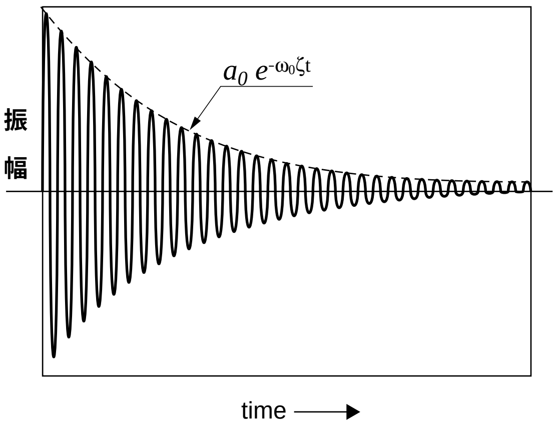
同様の考え方で , 振動が 60 dB減衰するのに要する時間 T_{60}を測定して

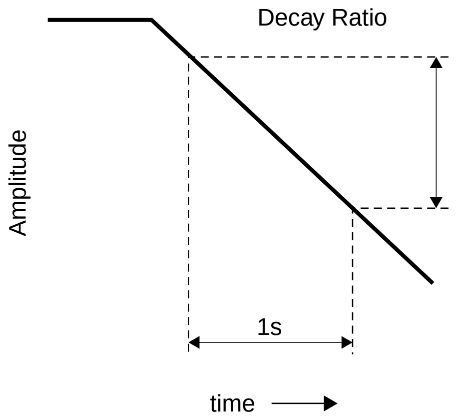
$$\eta = 2.2 / (T_{60} f_0)$$

より、損失係数を求めることもできる。

この方法は , 残響時間法と呼ばれている。これらの方法は、一般的には減衰が小さい場合に利用され、振動減衰波形をレベルレコーダのような対数アンプを通して表示すると包絡線に比例した直線がえられるので , この直線の傾きから減衰率を測定する。

また、ヒルベルト変換を利用して減衰率を測定する方法も有効である。

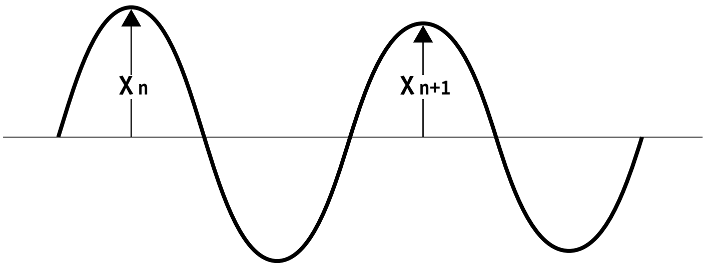




減衰波形から、損失係数を求める場合減衰開始直後や減衰後半の波形が一定値に漸近していく点の傾きを採用してはならない。また、減衰波形が低次の振動モード等の影響を受けて、きれいな直線にならない場合は、フィルタリングを行う。

また、減衰正弦波のある時の振幅値と次の振幅値をχ_n、χ_{n+1}としてその自然対数値を対数減衰率と言い、金属材料の減衰能を表す値としてよく使われる。

対数減衰率　$\Delta = \log_e(\chi_n / \chi_{n+1})$



インピーダンス法

減衰の大きな材料の損失係数を測定する場合、半値幅法では精度のよい半値幅の測定が行えない場合があり、この場合はインピーダンス法が有効な手法とされている。強制振動をしている1自由度系の機械インピーダンス(F/V)の振幅を｜ z ｜とすると、共振点では $\omega=\omega_0=\sqrt{k/m}$ より、｜ z ｜＝c となり、インピーダンスは粘性減衰係数を表すことになる。 ただし、V は振動速度を表す。したがって、損失係数は次式より求めることができる。

$$\eta = 2\zeta = |z| / (2\pi f_0 m)$$

なお、質量 m は, 厳密には $\mu \int W_i^2 dx$ (μ は単位長さ当たりの質量 W_i は i 次の振動モードの基準関数) から求める。また、同様な方法として, 機械コンプライアンス（X / F）から損失係数を求めることができる。1自由度系が強制力（$f= f_0 e^{jwt}$） を受けて振動している場合、ばねを g（1+ η j) としてコンプライアンスを表すと

$$X / F = 1 / (g - m\omega^2 + jg\eta)$$

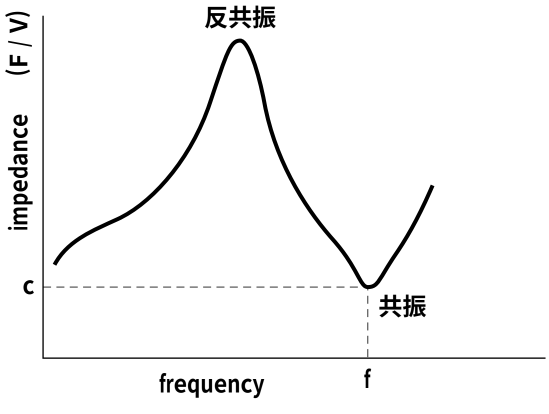
となる。

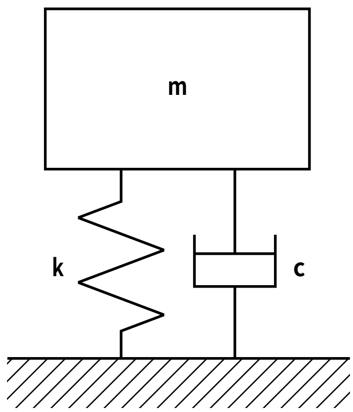
ここで式の実部、虚部をそれぞれ R、I とすると g および η は

$$g = m\omega^2 + R/(R^2+I^2)$$

$$\eta = -I / \{ m\omega^2 (R^2+I^2) + R \}$$

より計算できる。





$$m\ddot{x} + c\dot{x} + k = f$$

インピーダンス

$$z=\sqrt{c^2 + (\omega_m - k/\omega)^2}$$

$(\omega m - k/\omega)^2=0$・・・resonantfrequency

$Z=c$, $\eta = 2c / c_c$, $c_c = 2\sqrt{mk}$

実用的には下記のシステムの場合次の式が用いられる。

$$\text{ヤング率}\qquad E=\frac{f_0{}^2\times4\pi^2\times M\times H}{A}$$

で計算する。

ここで

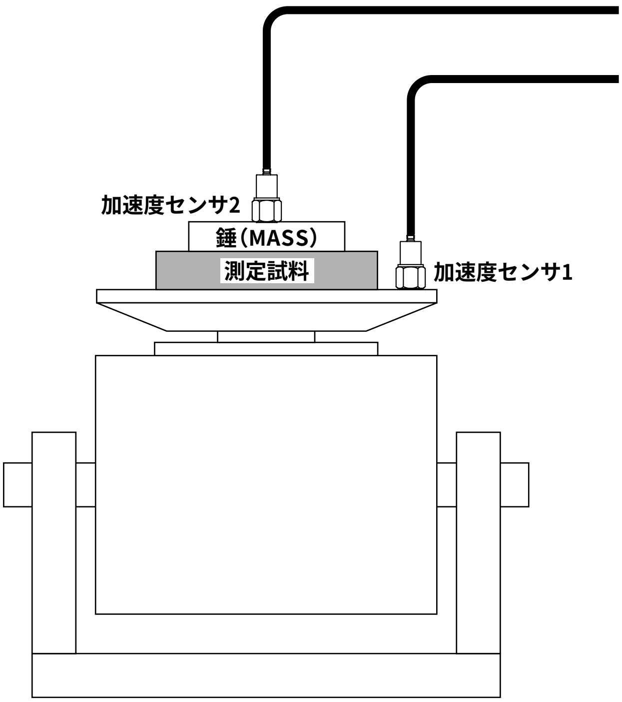
f_0　：共振周波数（Hz）

M　：試料重量（錘下）＋上部錘重量（kg）

h　：試料の厚み（m）

A　：試料面積（m²）（錘下）

E　：ヤング率（N/m²）



加振器

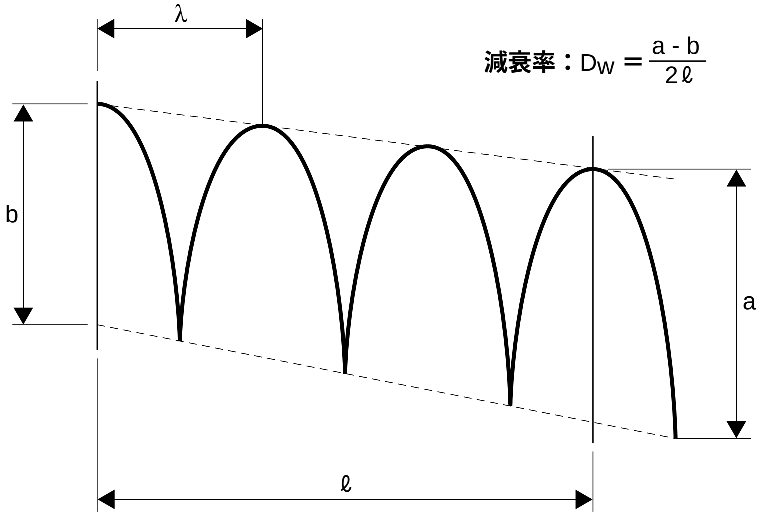
損失係数は加速度センサ１、２の比（振動伝達率）を通常使用し、半値幅法で計算する。

非共振法

半値幅法および減衰率法等は､いずれも共振点または共振点付近で損失係数を測定するもので共振法とも呼ばれているが、ここで示す手法は任意の周波数で損失係数を求めることができる。

この試験法は､長いはりの試験片の一端を砂に埋め､他方を加振器で加振して､はりに生ずる定在波または進行波より波長 λ (m) および振動減衰 D (dB/m)を測定し , 次式より損失係数を求める方法である。

$$\eta = (D_w \cdot \lambda)/13.6$$



制振性能試験法に関する規格

主な規格として，日本では、JIS K6394やJASO M306、M329といった規格があり、外国では、ASTM E756、BS AU125、DIN 53440、MIL P22581、SAE J671および国際規格としてISO 2856がよく知られた規格である。

最近では、1992年に米国でSAE規格が一部改正され、日本で1994年に制振鋼板に関するJIS G0602が制定された。

これらの規格では、試験対象となる粘弾性材料の違いや取り扱う試験片の大きさの違いにより、制振性能を評価するための様々な試験法が提案もしくは推奨されている。

このうち，代表的な試験法は片持ち梁法で、ASTM、DINおよびJASO規格で採用されており、短冊型と呼ばれる細長い長方形の試験片を使用し、基本的には半値幅を測定し制振性能を評価する方法である。

また、BS規格のように、短冊型の試験片の両端をナイフエッジで支持する二点支持法により振動減衰率を測定する方法、MILやSAE規格のように、試験用パネルをインパクト加振や単一周波数加振を行って振動減衰率を測定する方法、さらに日本でよく使用される試験法として、試験片の中央部を正弦波加振やランダム加振を行い、駆動点等でインピーダンスを測定し制振性能を評価するインピーダンス法がある。

この他には、粘弾性材料が示す緩和現象を利用して制振性能を把握する試験装置も市販されている。

ただし、これらの装置の測定周波数範囲は百数十Hzとなっている。

① ASTM E756-83（米国）

金属、ゴム、プラスチック、エナメル材、エポキシ複合材、木材

短冊型試験片

片持ち梁法（一端固定）→半値幅法→損失係数、弾性率

② DIN 53440（第１～第３分冊）（独）

制振用積層材、プラスチック

短冊型試験片

片持ち梁法（一端固定）→半値幅法→損失係数、弾性率

③ ISO 2856（国際規格）

エラストマ（合成ゴム、弾性プラスチック）

適宜決定

インパクト加振法、自由減衰振動法、共振法、非共振法

④ B.S. AU125-1966（英国）

自動車ボディコーティング用制振材

はり状試験片（588× 63× 6.4）

二点支持法（両端自由）→振動減衰率

⑤ SAE J671（米国）

制振材、アンダーボディコーティング材

パネル型試験片（500× 500× 6）

弾性支持（周辺支持）→振動減衰率

片持ち梁法（一端固定）→バンド幅法→損失係数

（1992年　SAE920406にて推奨する）

⑥ MIL P-22581A（米国）

制振材、プラスチックシート

円形試験片（φ 76～φ 203、10 t ）

中央吊り（周辺自由）→振動減衰率

⑦ JASO M306、M329（日本）

アンダーボディコーティング材、アスファルトシート

短冊型試験片

片持ち梁法（一端固定）→半値幅法→損失係数、弾性率

⑧ JIS K6394（日本）

加硫ゴム

円筒形試験片

共振法、非共振法→荷重－たわみ線図→損失係数、弾性率

⑨ JIS G0602（日本）

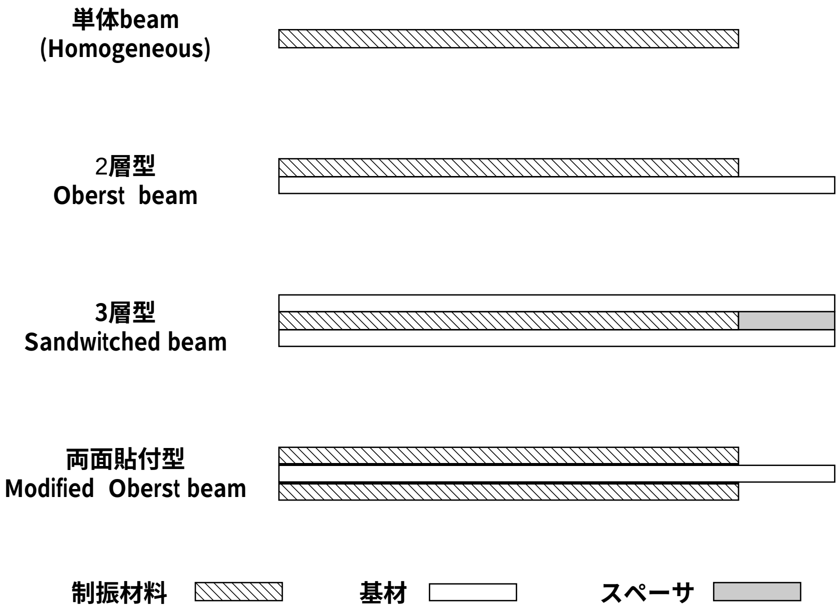
「制振鋼板の振動減衰特性試験方法」

両端自由はり、片持ちはりの曲げ振動に対する振動減衰特性測定試験

共振法→半値幅法、減衰法→損失係数

制振性能の試験法

片持ち梁法、中央加振法、二点吊り、二点支持法が代表的な損失係数試験法である。これらの試験法で使用されている試験片は、2層型（貼り付け型）や3層型（サンドイッチ型）が多い。ここでは、片持ち梁法と中央加振法の一般的な特徴、試験システム、試験時の誤差要因、損失係数測定結果等について示す。



試験片の主な特徴

Oberst beam	：試験片の作製が比較的。簡単データが比較的安定。
Sandwitch beam	：試験片の作製が難しい。スペーサが必要。 共振周波数がばらつき易い。
Modified Oberst beam	：試験片の作製が難しい(製作誤差が大きい)。 データがばらつき易い。

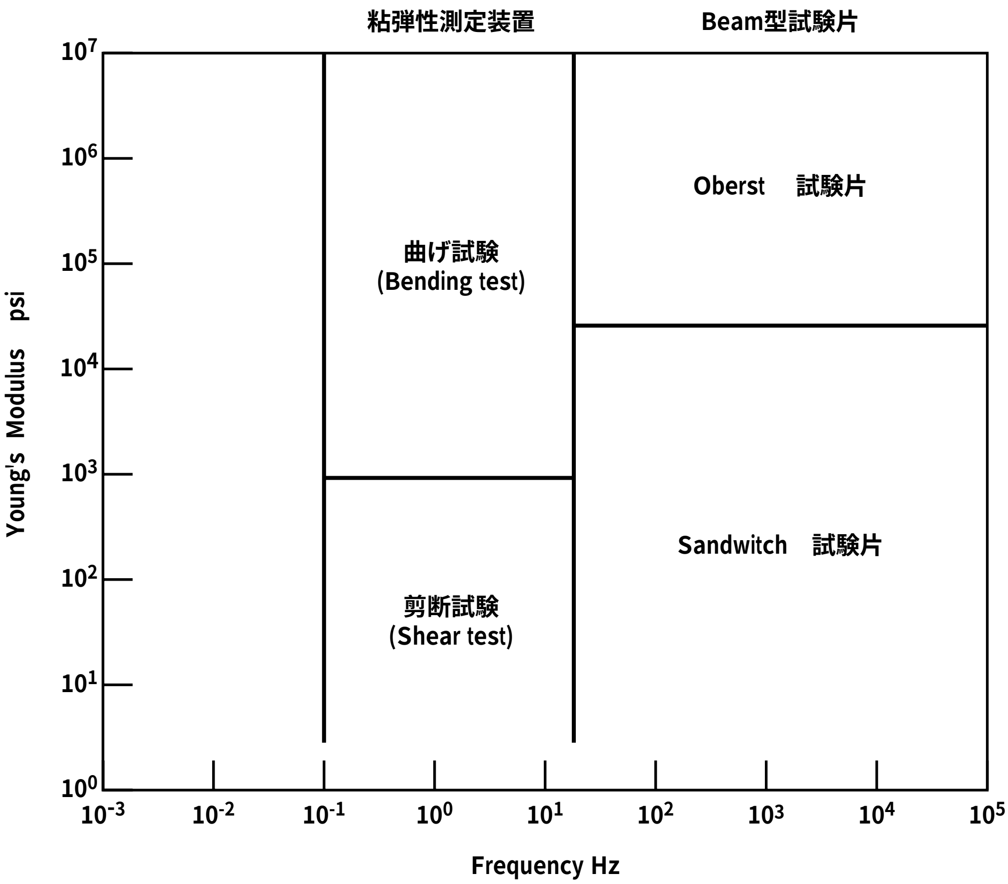
片持ち梁法

DIN 規格、ASTM 規格、JASO 規格、JIS 規格で採用 SAE で推奨された試験法である。

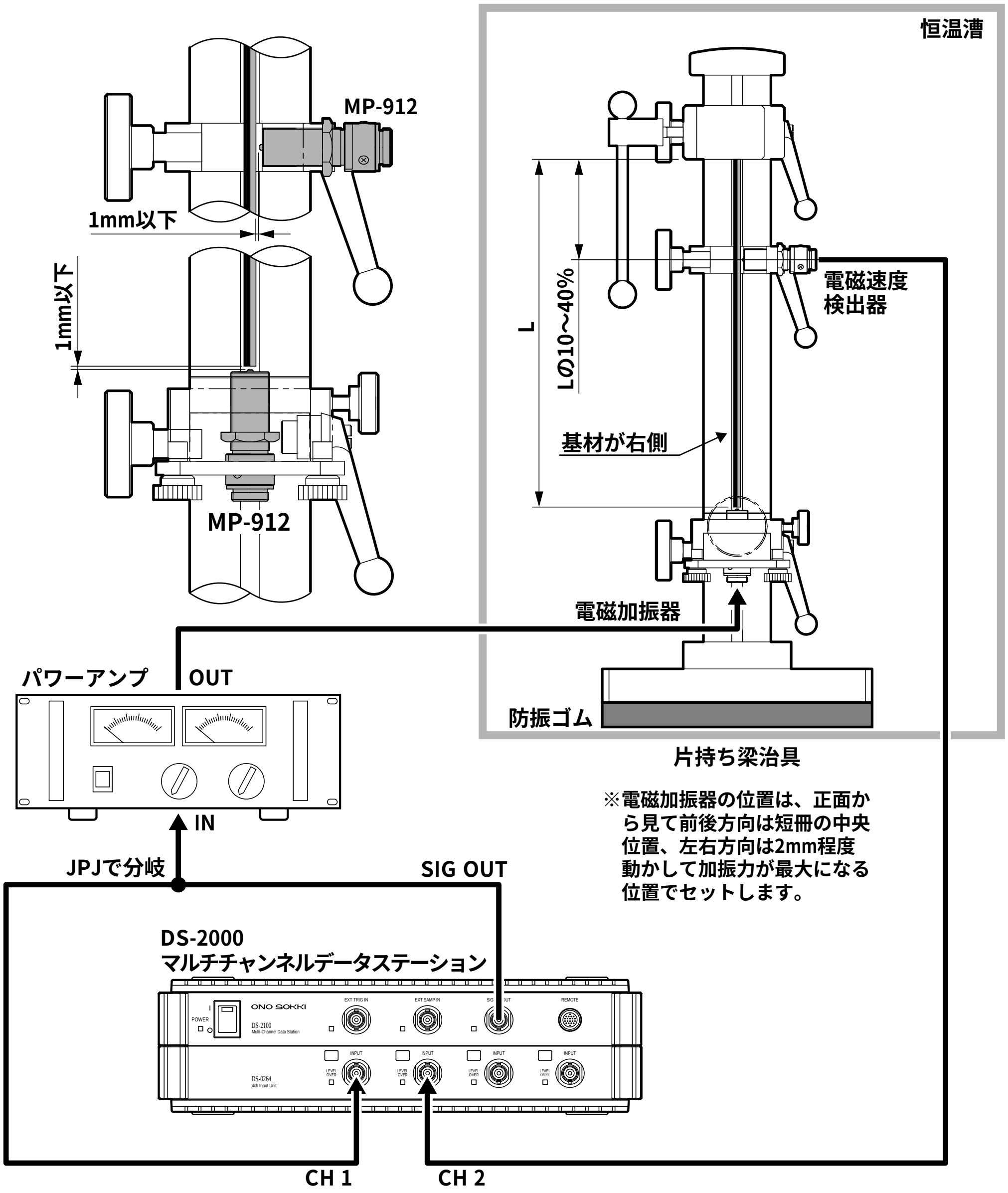
1. 試験片の選定

一般的には、制振材料のヤング率の大きさの違いにより、どのような試験片を使用すればよいかを決める。

これらの制振材料のヤング率と試験片の測定可能周波数帯との関係を一意的に決めることはできないが、概略的に考えると下図のようになる。



２．片持ち梁法ブロック図例

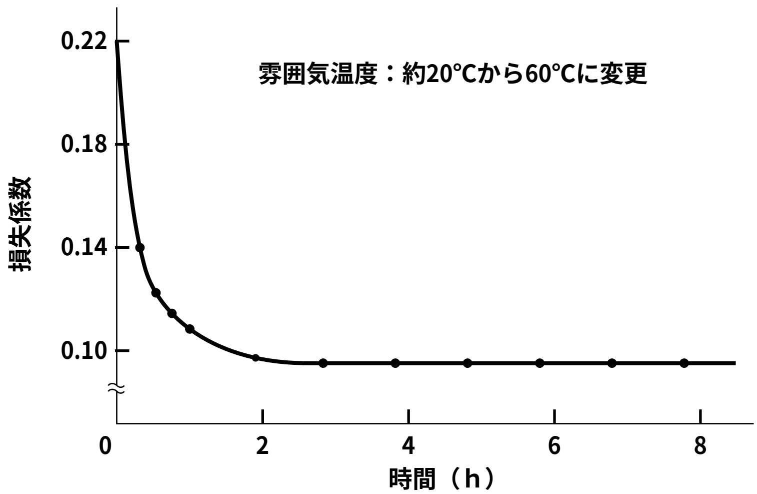


※電磁加振器の位置は、正面から見て前後方向は短冊の中央位置、左右方向は2mm程度動かして加振力が最大になる位置でセットします。

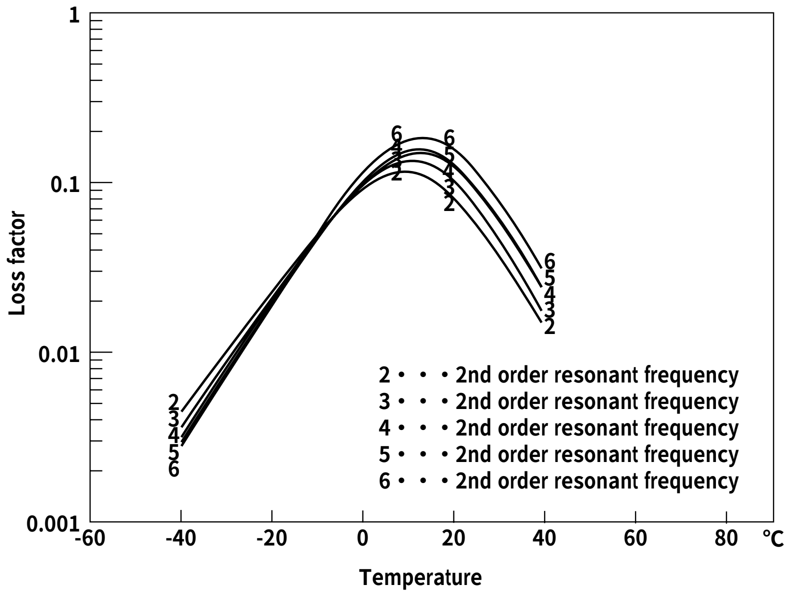
3. 片持ち梁法の損失係数測定精度

損失係数測定は大変デリケートな試験であり、注意深く制作した試験片を使用しても、損失係数や共振周波数がやや異なる場合が多々ある。これは、試験に使用する制振材料や基材の微妙な物性の違いや、試験片制作誤差等によると考えられる。このため、これらの誤差を極力避けるために、3本程度の試験片を使用して試験を行い、得られた損失係数や共振周波数の平均値を求める方法が有効となる。

下図は、損失係数の時間変化を示す。図のように、温度を変えた直後は試験片全体が測定温度になっていないため、損失係数は安定しないことがわかる。この制振材料の場合は、約2時間で安定している。下図は、片持ち梁法により求めた試験片の損失係数と温度及び損失係数と周波数の関係を示す。



損失係数の時間変化



4. 片持ち梁法の注意事項

① 試験片寸法は縦横比が 20：1以上あることが望ましい。

② 接着不良。接着面の空気の混入。
接着材の厚みは 0.05 ㎜以下で , 弾性率は制振材の 10倍以上とする。

③ 試験片不良。寸法精度。厚みの不均一さ。
純粋な曲げ振動だけを生じさせる。

④ 固定端不良。すべり。
固定端の摩擦損失による減衰の増加、固定不良、非線型現象等の影響は、試験片の一次の振動モードに最も影響する。したがって、一次共振データは採用しないほうがよい。
固定端は確実に固定する。

⑤ 温度管理。十分に放置時間。試験片の温度分布の不均一。
温度は　± 1 ℃に調整する。

⑥ 共振周波数測定誤差。適切なスイープ速度。
周波数は、弾性係数を計算する時に 2 乗で影響するため、± 1%の精度が必要。
非線形領域での加振をしない。（特に基材単体の場合）（線形範囲：振幅は周期的な応力と伸びが比例する範囲）

⑦ ダンピング測定誤差。
モードが近接しない。固定端のダンピングの影響をなくす。
非線形によるダンピング付加を避ける。

⑧ 計算誤差。

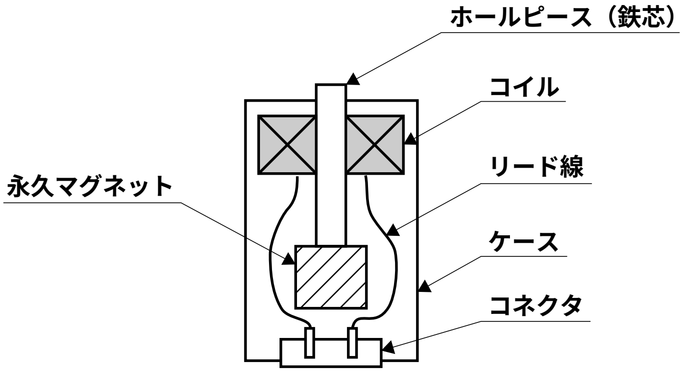
⑨ 受信器、加振器の調整。
電磁型受信器と電磁型加振器の距離は、電磁漏洩によるクロストークの影響をさけるために、80 ㎜以上間隔をあける。
（伝達関数にピークの鋭いひげが等間隔に生じる）
短い試験片の試験は , 電磁型加振器と容量型受信器を使用する圧電型の場合、ピックアップの質量の影響、ケーブル振動の影響に十分注意する。

⑩ 周波数分解能の影響。
半値幅内に測定点が 20個以上あることが望ましい。

5. 片持ち梁法に使用する機器の選択

① 非接触電磁加振器

非接触電磁加振器は主に片持ち梁法の時に使用されるが構造は次のような物である。



コイルは比較的太い線（0.1 mmφ 程度）を少なく巻くのが良く（1000回程度）、これ以上巻いても直流抵抗値を増やすのとリアクタンス分が増えて、高い周波数まで加振できないので意味がない。市販のオーディオアンプを使用することを考えて直流抵抗 100Ω 程度を目安にコイルを巻くことを目安にすると良い。この場合のリアクタンスは 20 mH程度になると予想される。

また、永久マグネットは電磁加振器の使用交流磁界内の最大値である必要があり、非接触電磁加振器の最大能力を発生させる場合、直流磁界が不足する場合が考えられ、また、小型軽量の被試験片を加振する場合、直流磁界が強すぎる場合があるので、このそれぞれの場合は永久マグネットを電磁石（コイルをもう一組巻く）にし、直流電圧をかける方法が考えられる。

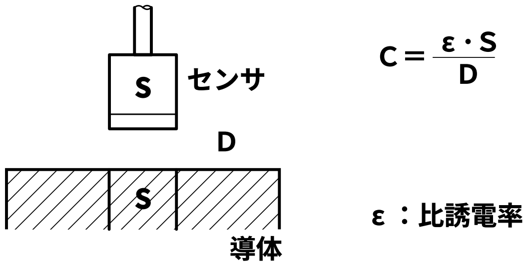
② 非接触電磁速度センサ

構造的には非接触電磁加振器全く同じである。コイルの巻き数、線材等も全く同じがよい。特にこの信号をアンプを使わずにダイレクトにFFTアナライザ等に入力する場合には、出力インピーダンスが小さい方が良く、非接触電磁加振器のところで述べたように、細い線をたくさん巻くのは無意味である。

センサとして出力が速度比例型のため、高い周波数まで測定可能なため、使いやすいセンサである。ただし、まれに非接触電磁加振器と干渉を起こす場合があるので、近づけて使用する場合には注意が必要である。

③ 静電容量センサ

動作原理は次の通りである。



センサーターゲット間の精度は0.1 %程度と非常によいが、センサ直径（ターゲット寸法）と感度のある距離との比率が約 10：1 （1 mmのセンサ寸法・ターゲット寸法は 10 mm程度必要）と使いにくい要素がある。
また、ターゲットが強誘電体（金属等）である必要がある。
また、原理的に変位センサであるために、高い周波数が測定しにくいという欠点がある。
長所としては電磁加振器と干渉を起こさないことである。

④ 加速度センサ

加速度センサで広く使われるのは、ピエゾ効果を利用した圧電型加速度センサである。
特に高い周波数まで測定する必要がある場合は、現状では圧電型加速度センサを使う必要がある。
各種振動センサの中で最も使いやすい物であるが、その重量が問題になる場合が多い。試験片と加速度センサの重量比率は、損失係数・ヤング率計測の場合は100：1以下であることが望ましい。
また、リード線の処理に気を使う必要があり、リード線がダンピングにならないように注意する必要がある。また、取付方法（接着等）の接触共振が発生するので注意を要する。
小型のセンサは感度の低い物が多く、S/N比が悪くなる可能性がある。少なくとも電荷感度型では 1 pC/ms^2 以上、電圧感度型では 1 mV/ms^2 以上であることが望ましい。

⑤ レーザーバイブロメーター

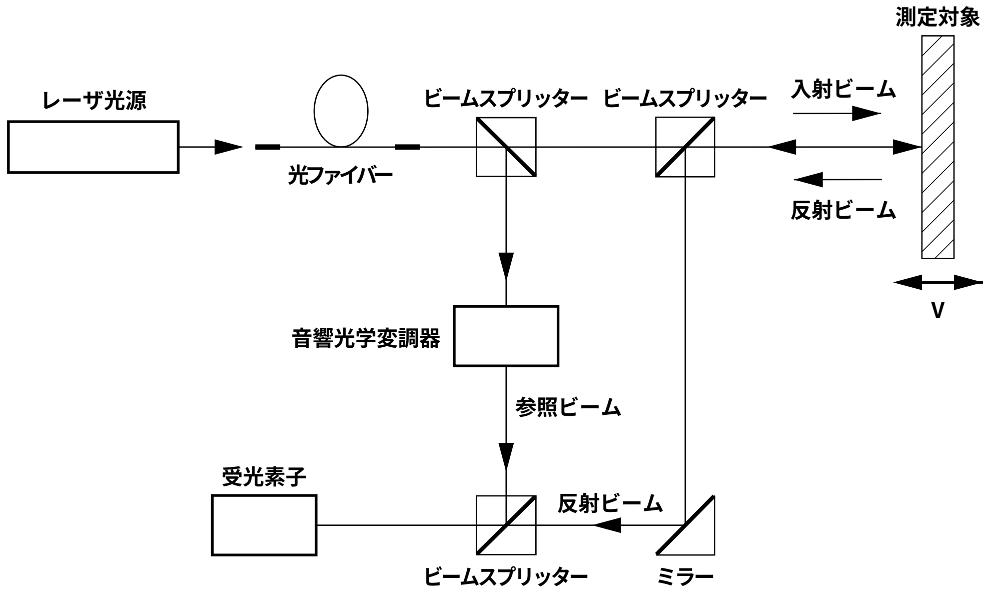
現状最も優れた応答センサである。ターゲットセンサ間は 100 mm以上とれるし、変位精度は 10^{11}m、速度精度は 10^{6}m/s、周波数は1 MHz 以上に達する。ターゲットが完全透過の場合を除き、ほとんどの試料をカバーする。

片持ち梁法の応答センサとして最も便利するが、中央加振法のインピーダンスヘッドの加速度センサの替わりにもなる。

使用する上での注意点は、測定原理がセンサ／ターゲットの相対速度の測定であるから、センサの固定はしっかりした土台に固定する必要がある。

恒温漕で使用する場合の注意点は、温度上限に注意すること。急激な温度変化による結露で測定不能になることがあるということである。

レーザバイブロのもう一つの欠点は価格が高いことである。低価格化が望まれる。



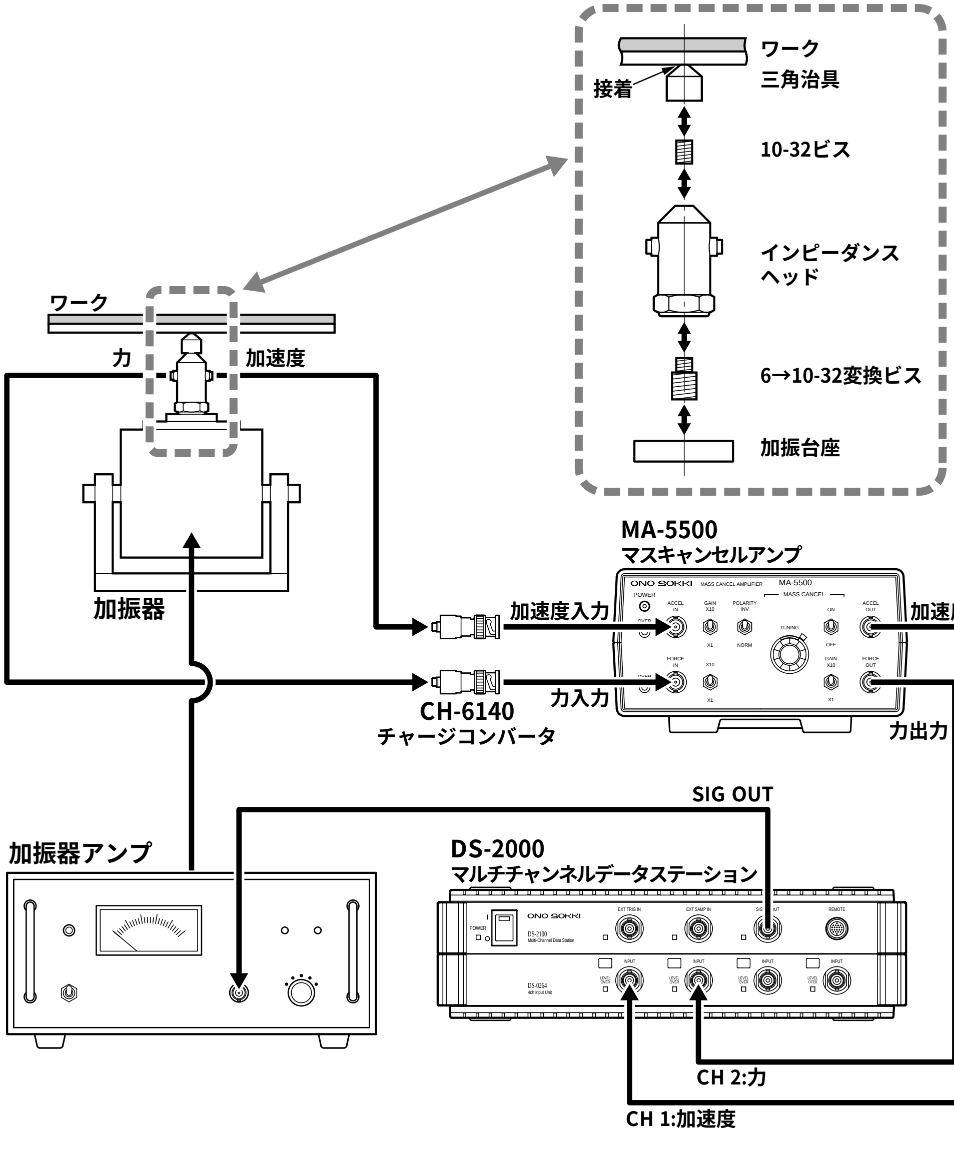
ヘテロダイン方式光学系

レーザバイブロメータ原理図

中央加振法

この試験法は、日本では別名機械インピーダンス法ともよく呼ばれ、前述の制振鋼板のJIS規格で採用されているが、欧州や米国では、こういう試験法は一般的ではない。

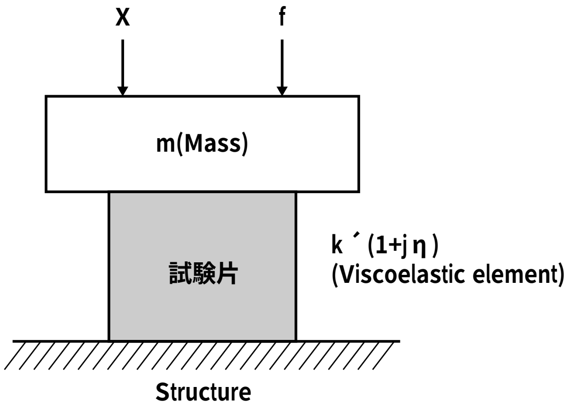
下図上は、片持ち梁法と同様、日本で一般的な中央加振法の損失係数測定システムを示す。



※機械インピーダンス（反共振）測定の配線方法
イナータンス（共振側）で測定する場合は配線
を逆にする

中央加振法の測定ブロック図例

なお､米国でインピーダンス法というと､次図に示すようにブロック状の制振材料を用いてインピーダンスを測定して損失係数を求める方法をさしている。



インピーダンス法

最近では、SAE 920406に中央加振法が紹介されている。

1. 中央加振法の特徴

＊ 長所

① 高い周波数帯まで測定可能。

② 片持ち梁法に比較して、試験片の寸法の自由度が高い。

＊ 短所

① 試験装置が複雑。

② 支持部の影響が不明。

＊ 試験片

① 短冊状、ブロック状。

＊ 試験手順

① サインまたはランダム加振、サイン加振のスイープはゆっくり。

② 応答は、周波数応答解析器、FFT アナライザ、レベルレコーダに記録。
周波数分解能、トランケーション、読み取り誤差等に注意

＊ 試験時の仮定、注意

① 試験片寸法は縦横比が 20：1以上あることが望ましい。

② 試験は線型範囲内で実施。加振振幅に注意。
目視で振動しているのがみえない程度が望ましい。

③ 加振力は、常に一定。

④ 曲げ加振がねじり加振にならないよう注意。

⑤ 測定は、共振周波数付近に限定すべき。→　fc / 10の範囲
半値幅内に、測定ポイントが 20点以上あることが望ましい。

⑥ ナイフエッジの接着幅は理想的には“零”が良いが、試料長の 1/200以下（100 mmの試験片では 0.5 mm以下）が望ましい。

⑦ ロードセルのマスキャンセル。
試験片の損失係数が 0.03以下になるとマスキャンセルの有無の影響が大きくなる。

⑧ ズーム解析は必ず実施する。
試験片の損失係数が 0.03以下になるとズーム解析の有無の影響が極端に大きくなる。

2. インピーダンスヘッド

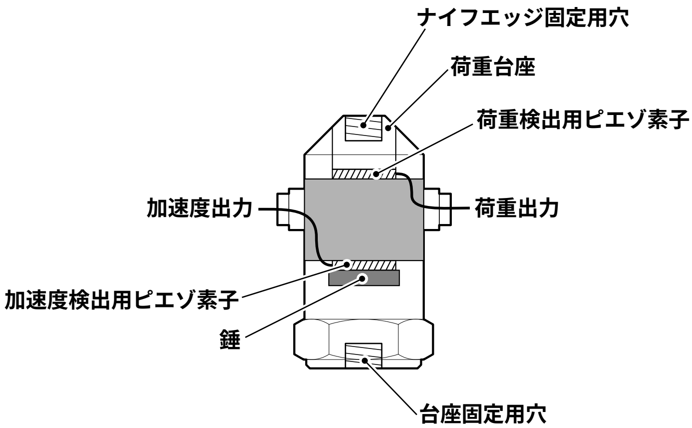
構造的には荷重検出器と加速度検出器の2組のセンサーを1つに組み込んだものと考えて良い。中央加振法用の検出器としてなくてはならないものである。加振器の上に固定しインピーダンスヘッドを介して測定試料を加振し、その加振点インピーダンスを測定する。

インピーダンスヘッドは恒温漕の中に入れることを考慮して、電荷感度型が望ましい。

力センサ・加速度センサーの感度は被試験材料の重量が高々100 g程度であること、加振力は高々10 N程度であることを考慮して、それぞれ100 pC/N以上、1 pC/ms^{2}以上であることが望ましい。

電圧感度型を使用する場合は、使用温度上限に注意をし、力センサ・加速度センサーの感度はそれぞれ100 mV/N以上、1 mV/ms^{2}以上であることが望ましい。

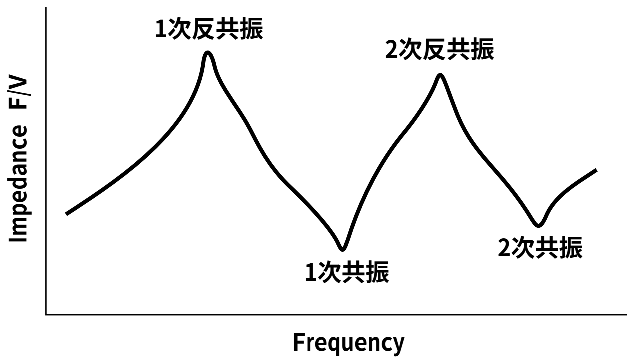
また倒れモードが発生することがあるので、インピーダンスヘッドの高さはなるべく低い方が良く、前後左右のバランスを考えてリード線の引き出しは対称で、コネクタの短い物が望ましい。



インピーダンスヘッドの構造

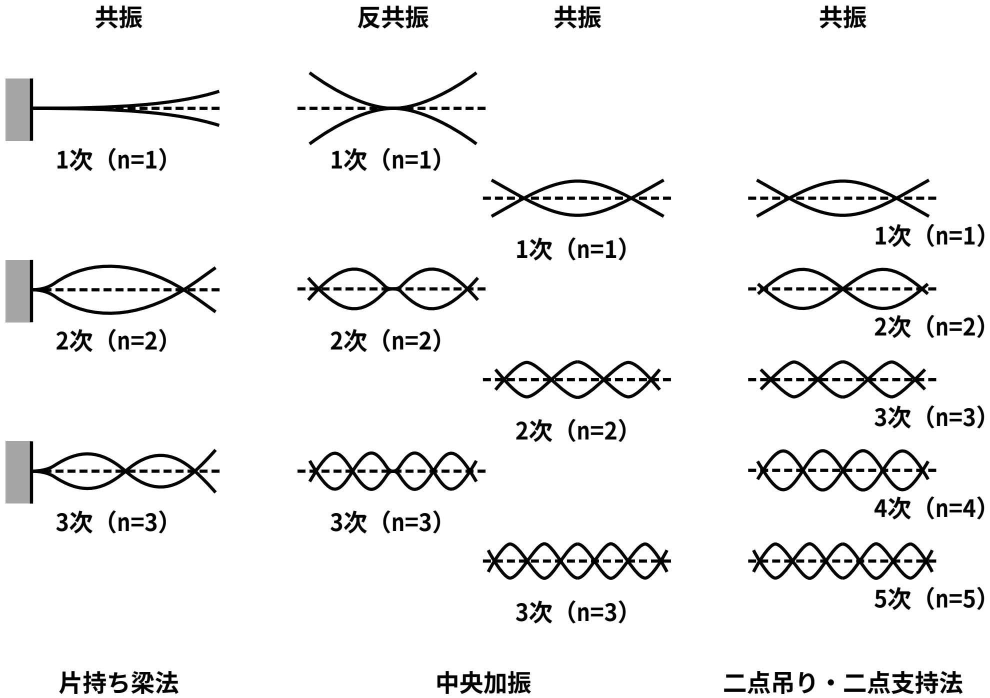
3. 中央加振法の共振、反共振

中央加振法において、インピーダンス（F〔力〕／V〔速度〕）を測定すると、下図に示すように、共振周波数と反共振周波数が交互にあらわれる。共振周波数では加振力は大変小さく、試験片は大きく振動しているという状態であり、一方、反共振周波数では加振力は大きいが、試験片はほとんど振動していないという状態にある。



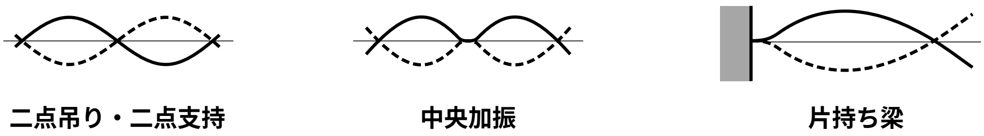
共振周波数、反共振周波数

振動モードをみると、次図に示すようになる。
このように、共振周波数と反共振周波数では、振動モードは全く異なっている。

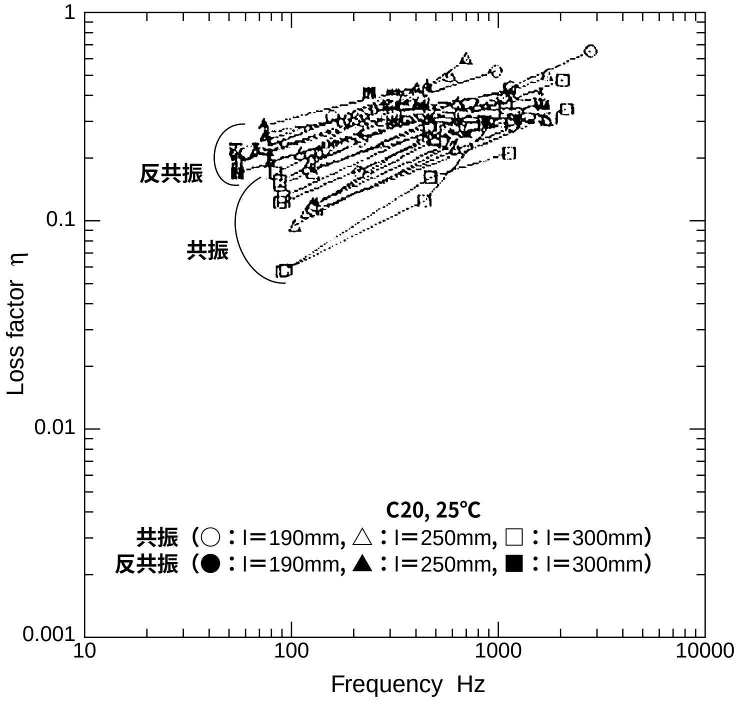


試験法と振動モードの関係

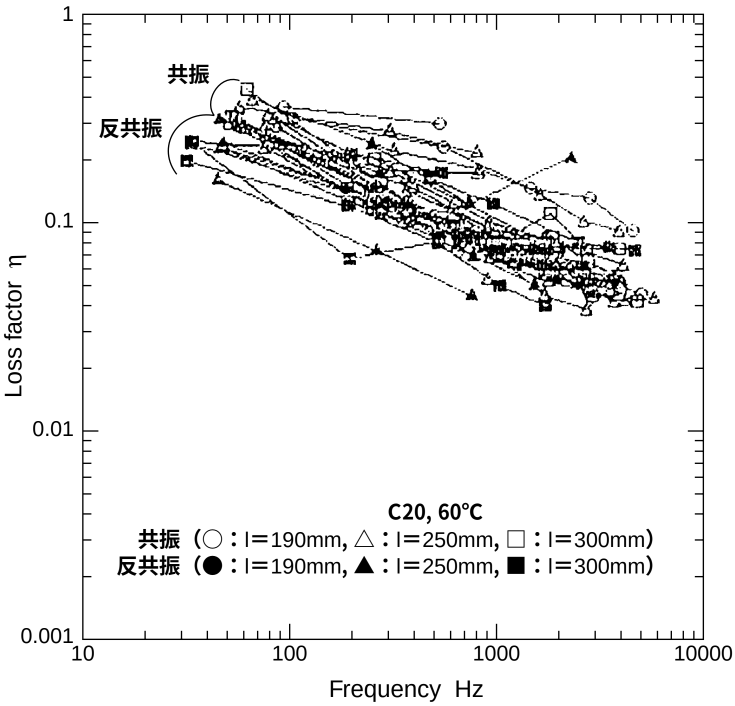
なお、中央加振の反共振の例えば2次の中央位置は、二点吊りの2次の共振のモードは境界条件が異なり、似ているようでも全く違うものであり、片持ちの倍の長さの共振モードと同じ境界条件である。



下図は、制振鋼板の損失係数測定結果であり、試験片の長さと試験温度が異なる場合を表している。
図のように、共振周波数と反共振周波数では、異なることがわかる。



中央加振法の共振、反共振周波数で測定した制振鋼板の損失係数



中央加振法の共振、反共振周波数で測定した制振鋼板の損失係数

図のように周波数依存性の右上がりのものは反共振側が大きく、右下がりのものは共振側が大きく測定される。

また、2層型（Oberst beam）にはこの現象は見られない。

4.中央加振法の誤差要因

① 試験片製作上の問題→物性の不揃い、寸法誤差、接着不良による

② 接着材の種類→接着材の厚さに注意、温度変化に鈍感なものがある

③ 温度制御→試験片内の温度分布の均一性に留意

④ 解析器の誤差→応答信号のノイズ除去、スイープ速度等

⑤ 支持部のエネルギーロスを小さくする必要がある

片持ち梁法と中央加振法の選択

片持ち梁法と中央加振法では使用上で下記の特徴を持つので、注意が必要である。

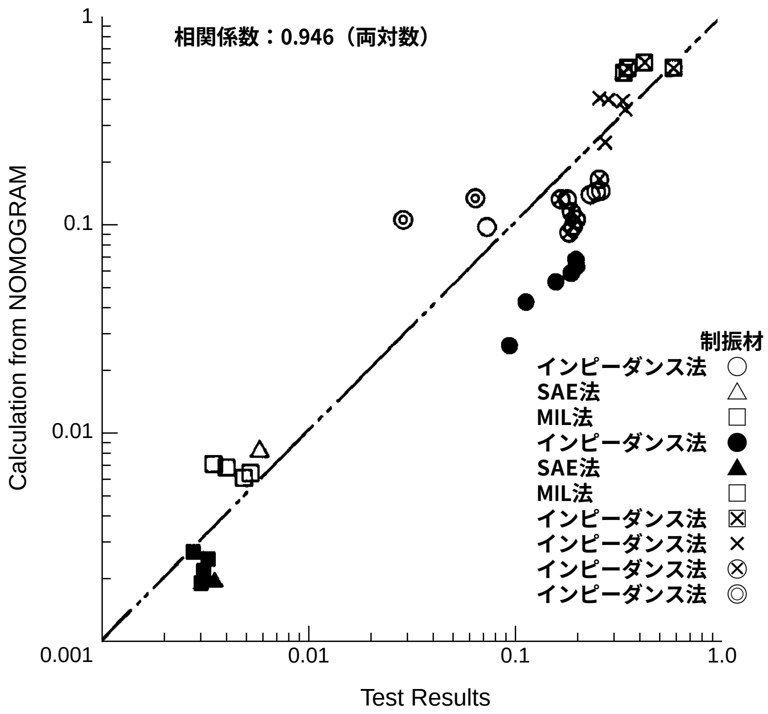
	片持ち梁	中央加振
温度試験の簡便さ	○	△
特に高温の時の対応	×	ﾊﾞｲﾌﾞﾛﾁｬﾝﾊﾞｰで可能
クランプ部の問題	有り	無し
1次モードの測定	不可	可
高次モードの測定	難しい	簡単
マスキャンセル	不要	要
柔らかい材料単品の測定	可	不可
反共振側の測定	難しい	容易
価　　格	○	×

各試験法より求めた損失係数の比較

片持ち梁法より求めた試験片のデータを使用して､制振材料の損失係数とヤング率を換算周波数ノモグラムの形で求め、この換算周波数ノモグラムを使用して、インピーダンス法、SAE法、MIL 法の試験片の損失係数を推定した。

下図は、このようにして推定した損失係数を縦軸にとり、インピーダンス法､SAE 法､MIL 法で求めた損失係数実験値を横軸にとって、両者の関係をプロットしたものである。

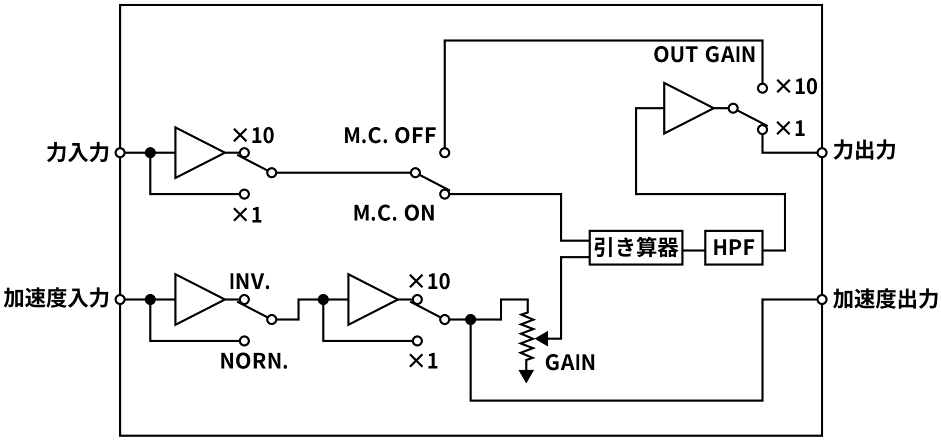
図より、両者の相関係数は 0.946であり、片持ち梁法で求めた損失係数とインピーダンス法、SAE 法、MIL 法で求めた損失係数は、かなり良く一致していることがわかる。



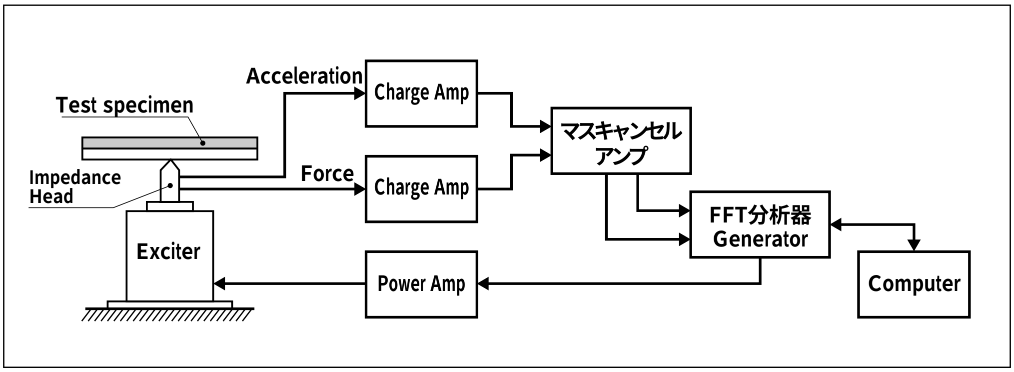
片持ち梁法と各種試験法により求めた損失係数の比較

マスキャンセル

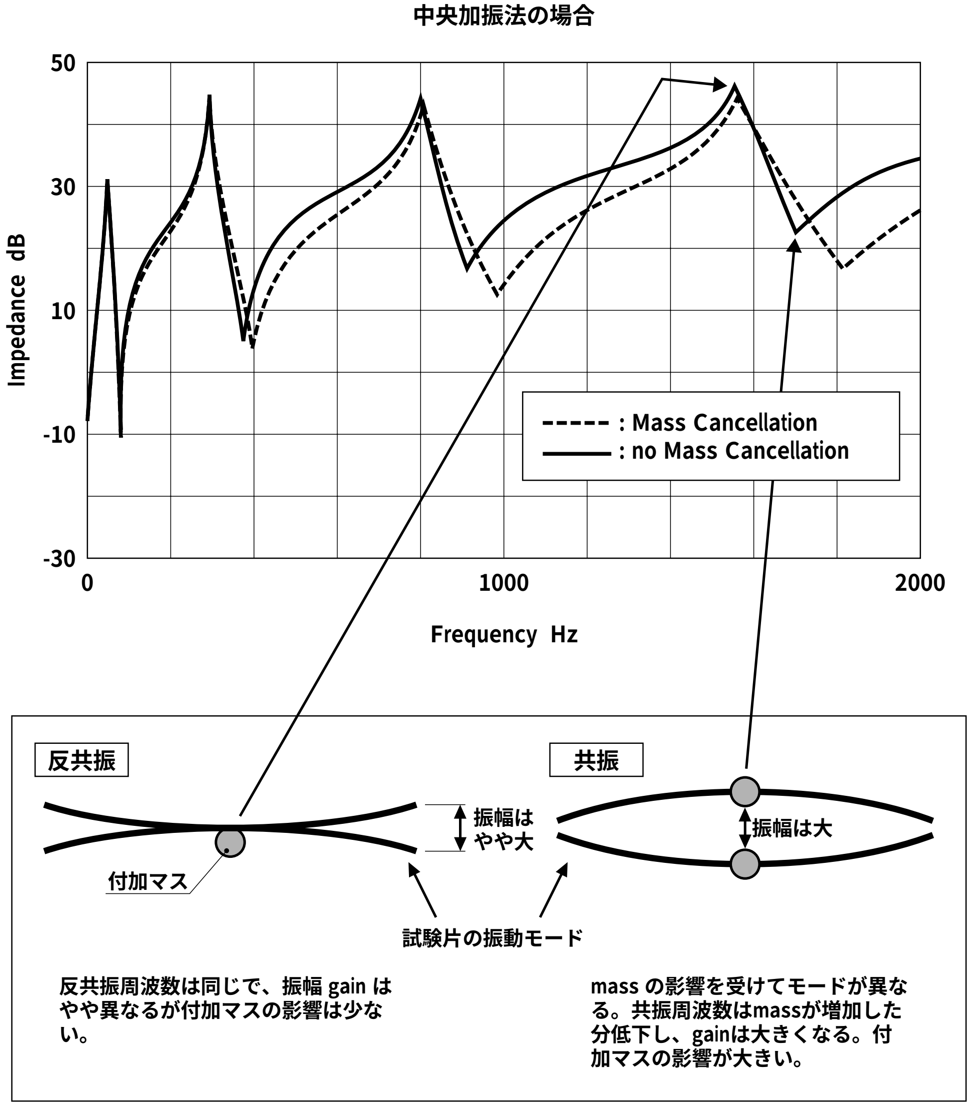
中央加振法で試験を行う場合、一般的にはインピーダンスヘッドを使用して駆動点インピーダンスやモビリティ等を測定して損失係数を測定する。この場合、インピーダンスヘッド自体が加速度を測定するためのマス（質量）を持っており、これが力ゼロの場合でも、実際はこのマス分だけ力センサーで計測されることになる。したがって、試験片の重さプラスこの質量分が測定されるため、インピーダンスが正しく計測されないことになる。
このため試験をする場合には、あらかじめこの付加質量分を補正する必要がある。
この操作を一般的には、マスキャンセルと呼んでいる。



上図は、マスキャンセルの方法の一例を示しており、下図は実際にマスキャンセルを行うための試験システムの一例を示している。



下図は、このシステムを使用して測定したインピーダンスの一例を示す。マスキャンセルの有無により、特に共振周波数側が異なってくることがわかる。



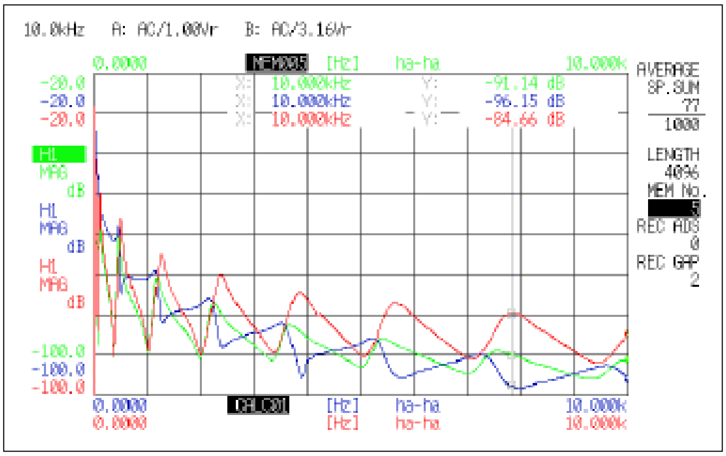
マスキャンセルの有無とインピーダンス関数の関係

マスキャンセルを FFT の計算で行う場合の計算式

赤：緑：マスキャンセルなしのモビリティー

青：計算 1 ［(V ／ F) − (V ／ F_0)］によって求めたマスキャンセル後のモビリティー

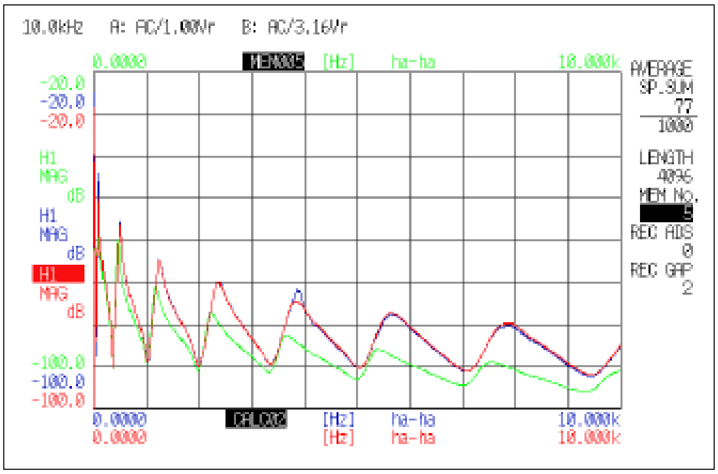
赤：マスキャンセルアンプを用いたマスキャンセル後のモビリティー



赤：緑：マスキャンセルなしのモビリティー

青：計算 2 ［(V ／ F) (1 ／ H) − (V ／ F_0) (1 ／ H)］(1 ／ H) によって求めたマスキャンセル後のモビリティー

赤：マスキャンセルアンプを用いたマスキャンセル後のモビリティー



機械インピーダンスの波形は省略するが FFT 等の計算でマスキャンセルを行う場合

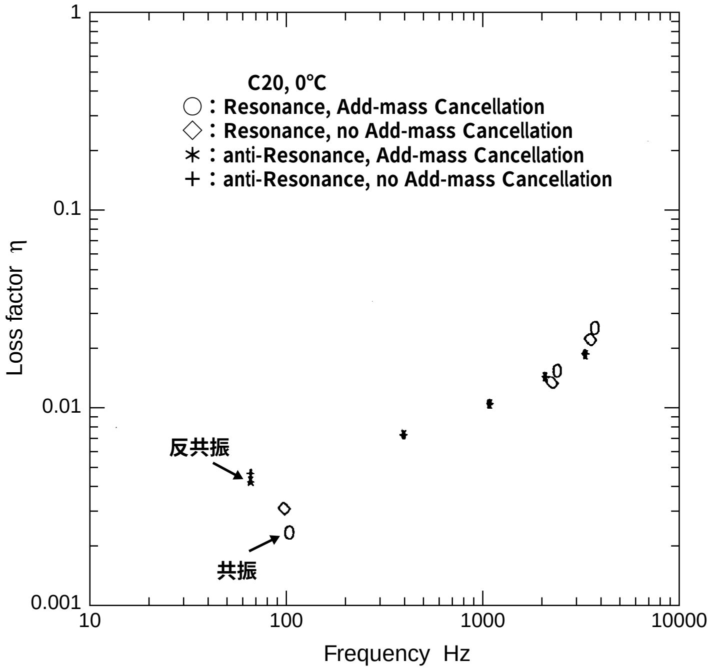
① 分子が F の関数（機械インピーダンス等）は（F ／ V）−（F_0 ／ V）の様にそのまま引き算して良い。

② 分母がＦの関数（モビリティー等）を使用する場合は一旦周波数応答関数の逆計算（1／H）でＦを分子に持ってきて、付加マス分も逆数計算をして引き算をし、さらに逆数計算をして元の分母がＦの関数に戻す必要がある。

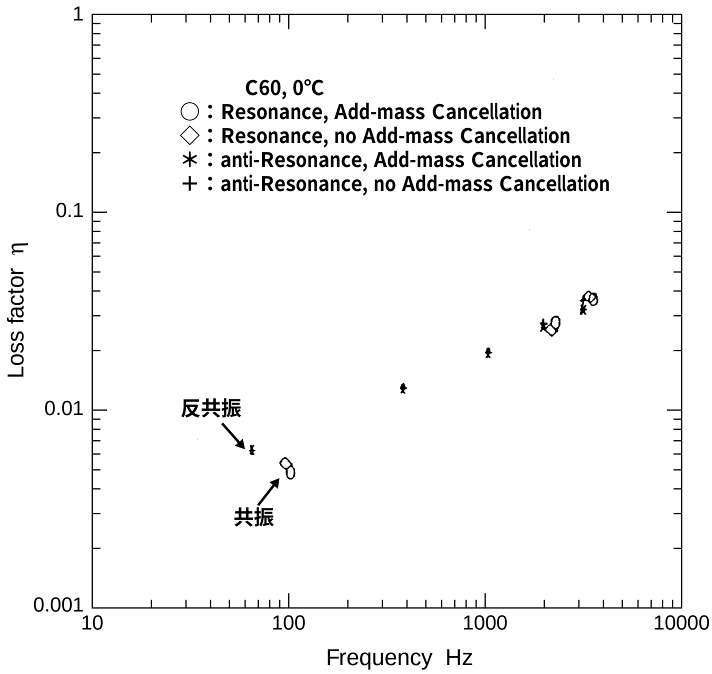
実際の計算式はワークなしの周波数応答関数を FRF1、ワークを載せたマスキャンセルなしの周波数応答関数を FRF2、マスキャンセル後の周波数応答関数を FRF3 とすると

FRF3 ＝ 1/((1/FRF2)－(1/FRF1))　　である。

また、中央加振法の場合のマスキャンセルの有無と損失係数の関係を示す。
下図より、損失係数が0.01より小さい場合は、マスキャンセルの有無により損失係数がやや異なることがわかる。



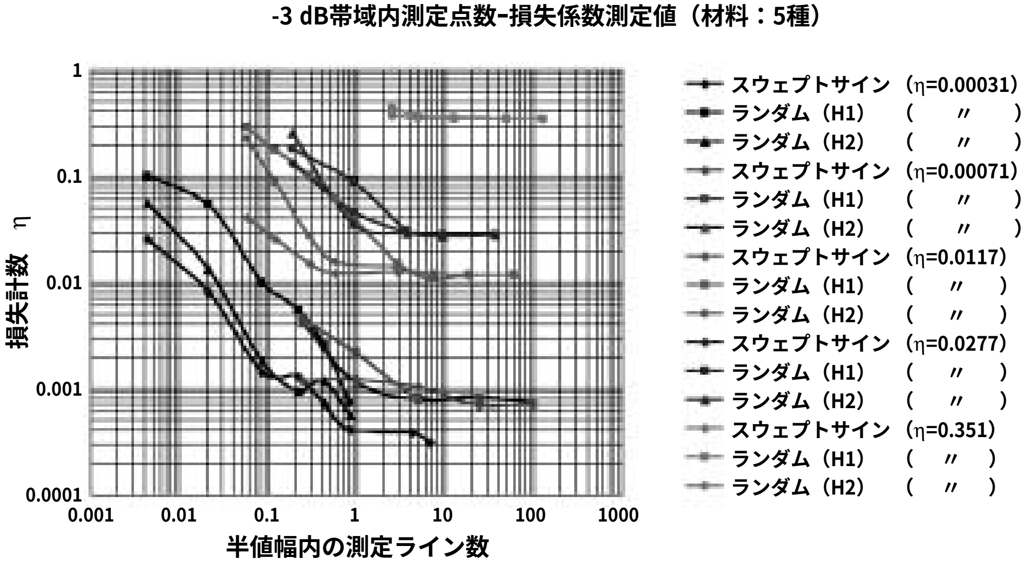
中央加振法の場合のマスキャンセルの有無と損失係数の関係

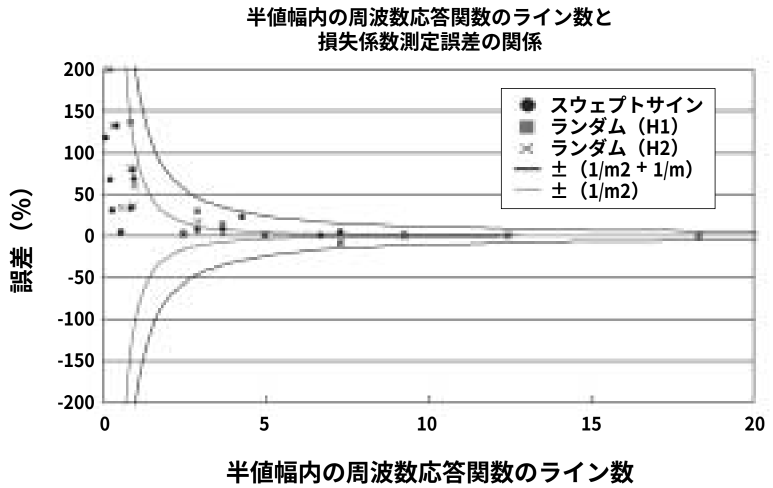


中央加振法の場合のマスキャンセルの有無と損失係数の関係

FFT のズーム分析の必要性

下図上は5種類の損失係数の異なる材料を、FFT アナライザで、ズーム分析を行い、周波数分解能を変えて測定したグラフである。横軸は半値幅法言う -3 dB内 ($f_2 - f_1$) にある、FFT の測定点の点数である。このようにズーム倍率を上げていくと、段々測定される η は、ほぼ一定の値に収束する。この値を真値として誤差を計算して一緒に書き直したグラフが下の図である。





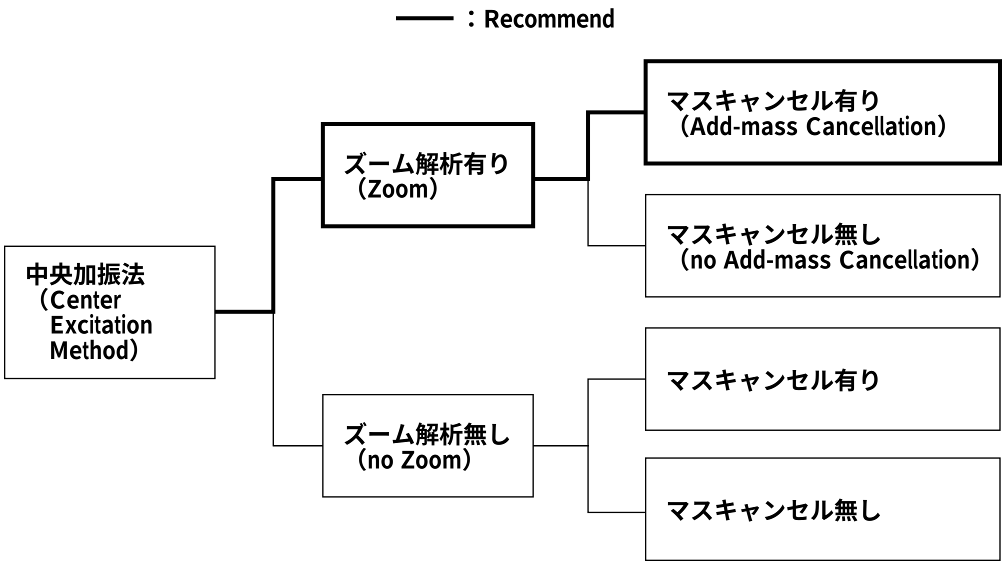
このグラフから言えることは半値幅内に存在するFFT の分解能点が、ほぼ15点あれば、損失係数の測定精度は 1 %程度に収まるといえる。

このグラフから損失係数が小さい場合、ズーム分析は不可欠である。

ズーム解析とマスキャンセル

下図は、ズーム解析の有無およびマスキャンセルの有無による損失係数測定誤差の影響を示している。

ズーム解析を行い、かつマスキャンセルを行った場合の損失係数測定誤差が最も小さくなる。特に、損失係数が0.01以下の場合は、ズーム解析の有無およびマスキャンセルの有無による損失係数の違いが顕著に現れるので注意する。



中央加振法の損失係数測定誤差

なお、損失係数に与える影響は、ズーム解析の有無の方がマスキャンセルの有無の場合よりも、かなり大きい。

極零モデルを用いたカーブフィットによる損失係数の測定

（現状、損失係数測定において最も優秀なカーブフィット手法と考えるられるため、千葉工業大学　鈴木英男教授の承認を得て、その論文を原文のまま掲載する）

１．はじめに

最近の制振材料の製造技術の進歩に伴い損失係数の大きな材料の実用化が進んでいる。しかしながら、規格化された損失係数の測定方法としてはISOを含めても昔ながらの半値幅法しか存在ない。ここで、半値幅法とは、加振力に対する振幅、速度、加速度等の振動応答特性から求められる共振周波数 f_0 と、共振周波数におけるレベルが３ dB低下する周波数 f1 と f2から η =（f2- f1）/ f_0 で求める方法である。ところが、最近では共振と反共振のレベル差が３ dBもない材料も開発されており、このような材料に対して半値幅法は全く役に立たない。

さらに、最近の技術動向として、共振周波数における特性の鋭さとともに、反共振における特性の鋭さから損失係数を求める試みも行なわれている。たとえば、〔速度 /力〕から求めた周波数応答関数の山（共振）の代わりに、谷（反共振）の特性から損失係数に対応する値を求めようとするものである。反共振の鋭さとその周波数での損失係数の値との関連は明確でないが、共振ならびに反共振の特性を含めてフィットすることは、山と谷のレベル差が少なくない材料の場合はどうしても必要なことである。

以上の目的から、共振および反共振の特性をフィットするために極零モデルを用いて〔速度 / 力〕または〔力 /速度〕の特性にカーブフィットを行い損失係数を測定する方法が提案されている。ここでは、その概要を説明する。

２．極零モデル

極零モデルとは、加振点での応答特性を下記の式で表現する特性である。

$$X(\omega)=\frac{j\omega H\left(\omega_2{}^2-\omega^2+j\omega_2\eta_2\omega\right)\bullet\bullet\bullet\left(\omega_{2N}{}^2-\omega^2+j\omega_{2N}\eta_{2N}\omega\right)}{\left(\omega_1{}^2-\omega^2+j\omega_1\eta_1\omega\right)\bullet\bullet\bullet\left(\omega_{2N\pm1}{}^2-\omega^2+j\omega_{2N\pm1}\eta_{2N\pm1}\omega\right)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1)$$

または

$$X(\omega)=\frac{H\left(\omega_1{}^2-\omega^2+j\omega_1\eta_1\omega\right)\bullet\bullet\bullet\left(\omega_{2N\pm1}{}^2-\omega^2+j\omega_{2N\pm1}\eta_{2N\pm1}\omega\right)}{j\omega\left(\omega_2{}^2-\omega^2+j\omega_2\eta_2\omega\right)\bullet\bullet\bullet\left(\omega_{2N}{}^2-\omega^2+j\omega_{2N}\eta_{2N}\omega\right)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2)$$

ここで、η_nはそれぞれの共振および反共振での特性の鈍さを表すものである（共振の場合は損失係数)。ω_nは共振または反共振周波数、Hは定数（正の実数）である。式（1）および式（2）はインピーダンス（〔力/速度〕）もモビリティ（〔速度/力〕）も表現することができるが、ここではモビリティを表すものとする。片持梁および両端自由梁のモビリティはそれぞれ周波数がゼロに近づくに従って増大および減少するので、片持梁のモビリティは式（2）に、両端自由梁のモビリティは式（1）に対応する。インピーダンス特性に対してフィットするときは逆数をとればよいので、それぞれ式を入れ替えて適用すればよい。

極零モデルの最大の特長は、損失係数（反共振の場合も便宜上損失係数と呼ぶことにする）が陽な形で入っていることであり、山と谷の特性の鋭さを独立に定義できることである。参考のために、モード解析でよく用いられる数式モデルは以下のように表される。ここでは共振での損失係数のみが陽な形で入力できる。

$$X(\omega)=\sum_{n=1}^{N}\frac{\left(j\omega/m_n\right)}{\left[-\omega^2+j\left(\omega_n\eta_n\right)\omega+\omega_n{}^2\right]}+\frac{1}{j\omega m_0}+\frac{j\omega}{k_0} \quad \cdots\cdots \quad (3)$$

３．カーブフィットに用いる誤差関数

山と谷の特性を同等の誤差でフィットしようとすると、実測データとモデル特性の差の大きさを表現する誤差関数に工夫が必要である。従来からよく用いられる誤差関数λは

$$\lambda=\sum_{m=1}^{M}\left|A\left(\omega_m\right)-X\left(\omega_m\right)\right|^2 \quad \cdots\cdots \quad (4)$$

である。ここで、A（ω m）は実測の特性、X（ω m）はモデルの特性である。共振では数字が大きいので同じ％の誤差でも大きく寄与し、反共振での特性の誤差は軽視される。この問題を解決すｒために、2つの誤差関数が提案されている。

$$\lambda_{\mathrm{dB}}=\sum_{m=1}^{M}\left|A_{\mathrm{dB}}\left(\omega_m\right)-X_{\mathrm{dB}}\left(\omega_m\right)\right|^2 \quad \cdots\cdots \quad (5)$$

$$\lambda_{\mathrm{norm}}=\sum_{m=1}^{M}\left|A\left(\omega_m\right)-X\left(\omega_m\right)\right|^2 / \left|A\left(\omega_m\right)\right|^2 \quad \cdots\cdots \quad (6)$$

式（5）は周波数応答関数をデシベルで表現した特性をフィットに用いる方法である。式（6）は実測の特性で正規化することにより、山と谷での同じ誤差率がλに同じ大きさで寄与するようにしたものである。これにより、これらの誤差関数を用いることにより共振と反共振の特性を同時にフィットすることが可能となる。

４．モデルデータへの適用

式（1）または（2）から特性を計算し、それを実測データとみなしてフィットを行い、真値にどの程度近い値が得られるかを確認し、アルゴリズムの正しさを検証することができる。図1はその結果を示したものである。4つの極と零を有する細い実線は、図-1のタイプＢの極零モデルの共振、反共振周波数と対応する損失係数を与えて計算したもので、フィットの対象となる特性である。共振、反共振周波数は短冊形の中央加振の時の周波数分布となるような値を用いた。損失係数は0.1、0.2および0.3の値を適当に各共振、反共振に割り振った。太線は共振、反共振周波数にプラスまたはマイナス10％の誤差をランダムに持たせ、損失係数は一律に0.15の初期値を与えて計算したものである。

デシベル型の誤差関数を与えて計算したものである。デシベル型の誤差関数を用いてフィット行うと、フィット後に得られるパラメータの値は、8桁以上の精度で正しい値が求められた（収束後の曲線は細線と重なっている）。カーブフィットによって損失係数を求めることの利点は、測定するときの周波数分解能が半値幅法よりもはるかに粗くてもよいことである。図-1のグラフでも、低域では折れ線グラフのように見えるほど粗くてもフィットが可能であることである。

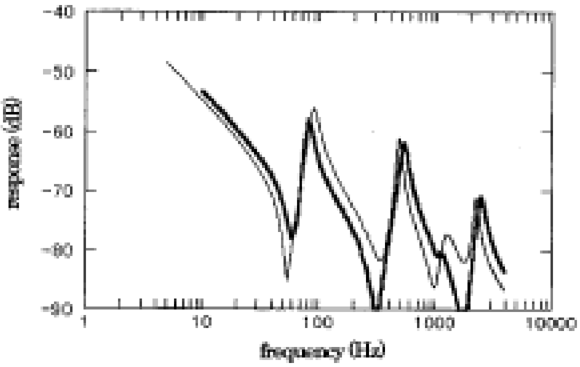
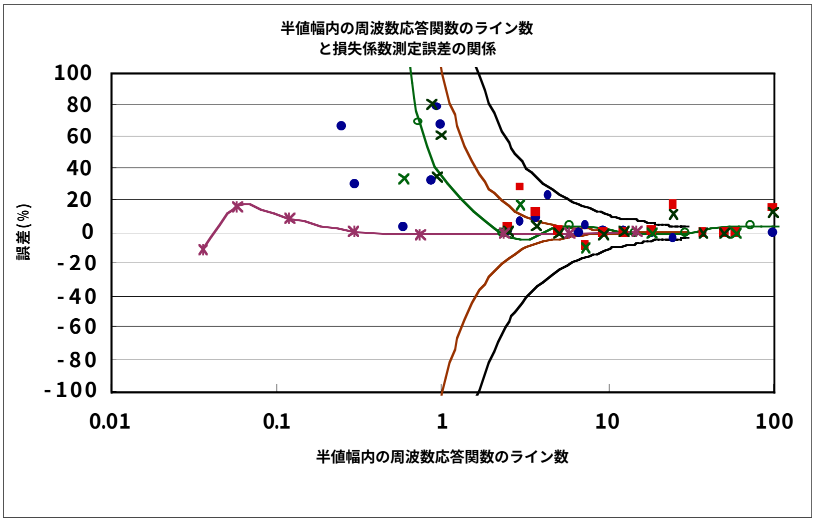


図 -1
真のパラメータを有する周波数応答関数（細線）と
初期値を用いて計算した特性（太線）

５．当カーブフィット手法での実測例

① 小さな損失係数への対応

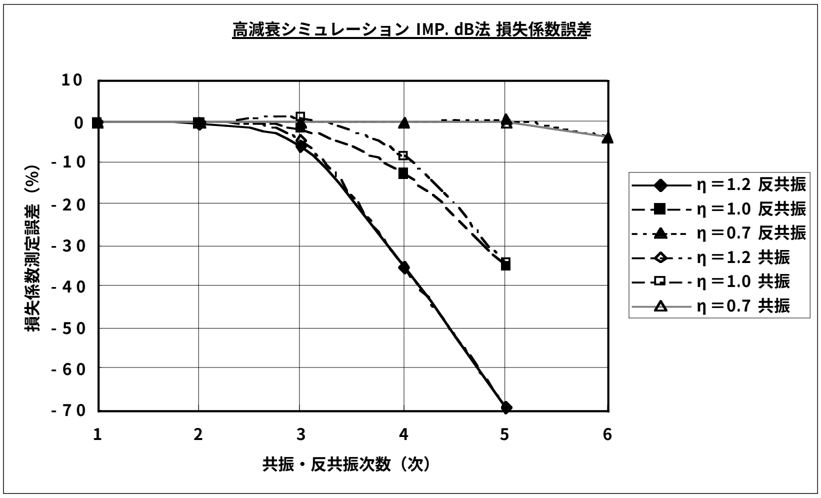
FFTのズーム分析の必要性のところで記載した半値幅内に必要な測定点数のグラフに重ね合わせると下図のようになり、当カーブフィット手法では半値幅内に0.3ポイント程度の測定点があれば、数％程度の誤差に収まる。



黒線：半値幅法の±（$1/m^2+1/m$）のライン、赤線：半値幅法の±（$1/m^2$）のライン、紫：当カーブフィット手法で必要なライン数

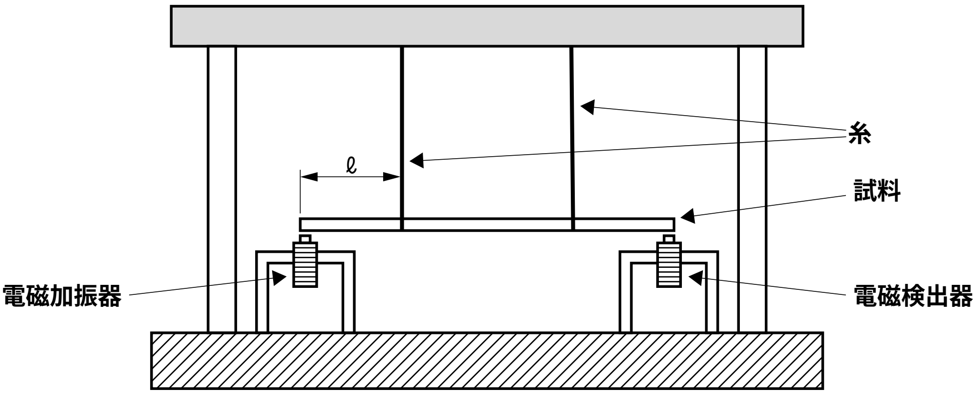
② 大きな損失係数への対応

シミュレーションで η = 0.7, 1.0, 1.2 という半値幅法では測定不可能な周波数応答関数を作成してこれをdB法でカーブフィットした結果である。0.7程度の損失係数では6次の共振次数まで、1.0, 1.2 程度の損失係数では３次の共振次数まで、高精度で測定できることがわかる。



二点吊り法

各振動モード毎の節を吊る方法である。動かない位置を吊ることから、従来から最も小さな損失係数から測定できるとされることから金属単品の損失係数測定に多用される。当方法での欠点としては各モード毎に、吊る位置を変えなければならないとされる点である。加振は非接触の電磁加振器を使用し、応答は同じ加振器を電磁速度センサーとして使用するのが一般的である。（電磁加振器／検出器については片持ち梁法で使用する機器を参照のこと）



ℓの位置について

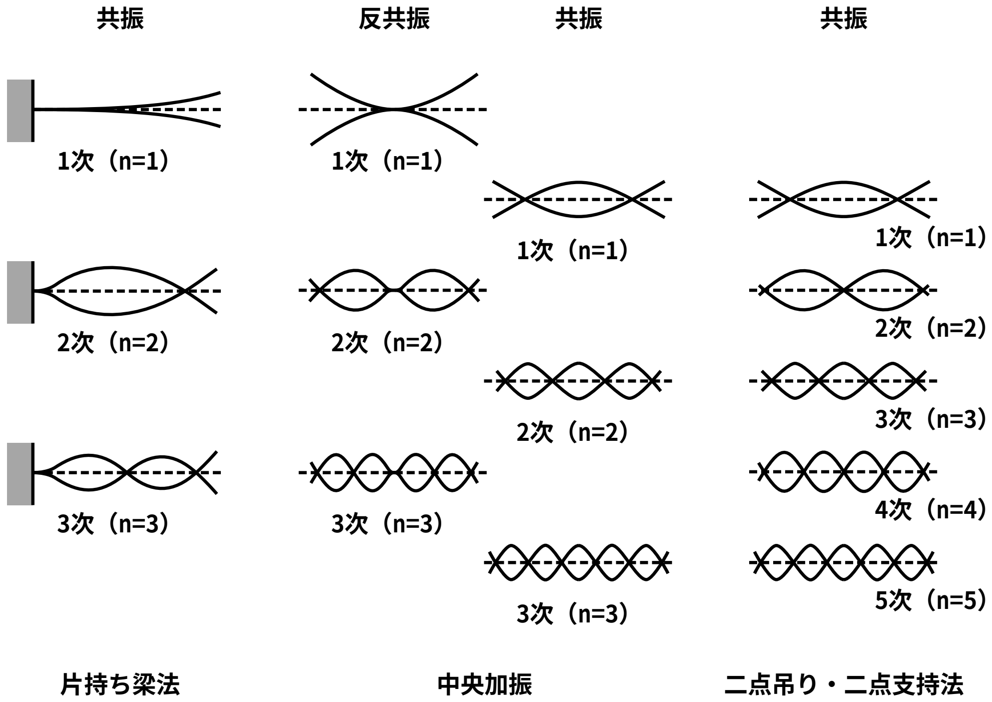
［単位％］

次数	1	2	3	4	5
節の位置	22.42	13.21 50.00 86.79	9.44 35.58 64.42 90.56	7.35 27.68 50.00 72.32 92.65	6.01 22.65 40.91 59.09 77.35 93.99

※試験片の長さを 100 %とした場合の左右端からの位置を％で表したものである。
　多数ある場合はどこを吊っても良い。

損失係数の振動モード依存性

下図の試験法と振動モードの関係をみると、片持ち梁法の試験片の長さが中央加振法の試験片の長さの1/2の場合、片持ち梁法の共振と中央加振法反共振の振動モードは同じであることが判る。また、二点吊り法、二点支持法の共振と中央加振法共振の振動モードは同じであることが判る。



試験法と振動モードの関係

次の4つの図は、①片持ち梁法の共振と中央加振法反共振、②二点吊り法、二点支持法の共振と中央加振法共振での両者の損失係数を比較したものである。

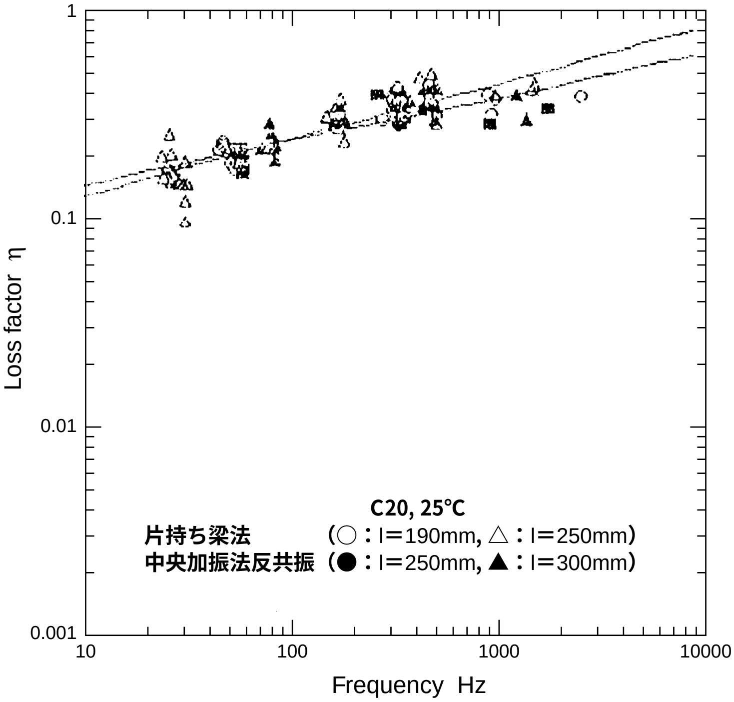
これらより、以下のことがいえる。

片持ち梁法　　　中央加振法（反共振）

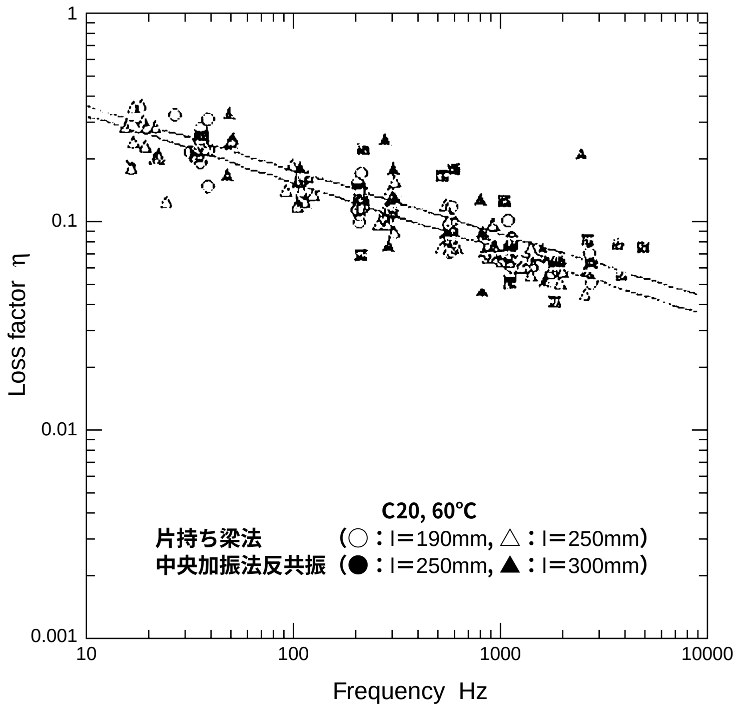
二点吊り、二点支持法　　　中央加振法（共振）

有効試験片長

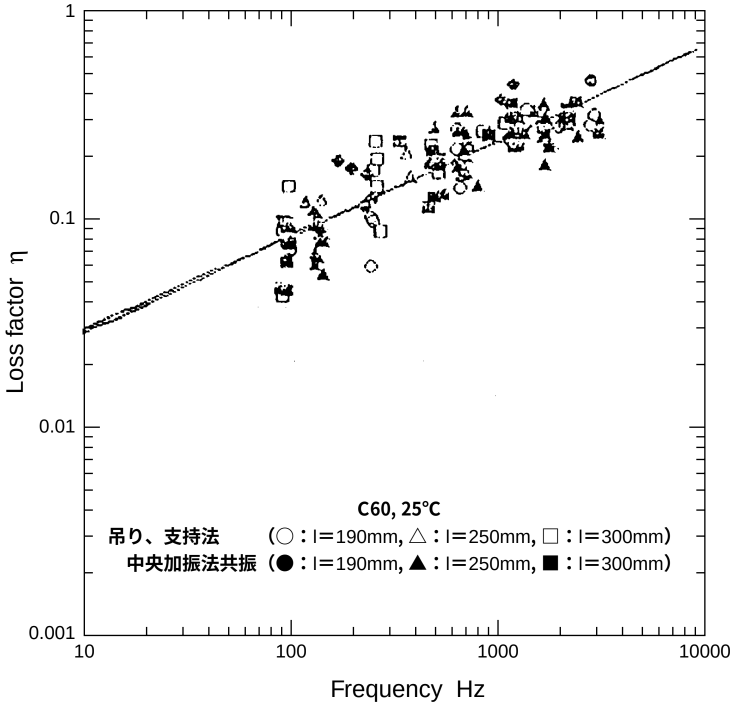
片持ち梁の２倍＝中央加振法



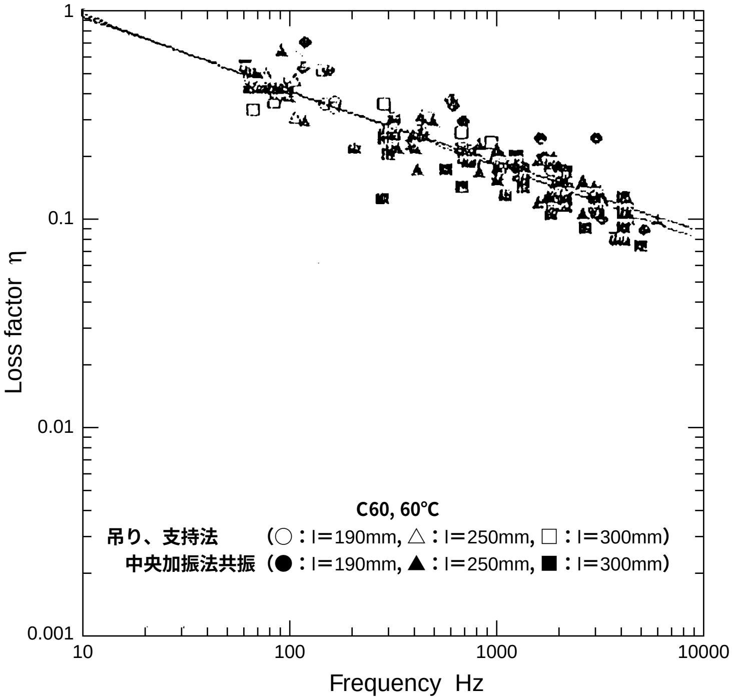
周波数と損失係数の関係
(片持ち梁法と中央加振法反共振の場合)



周波数と損失係数の関係
(片持ち梁法と中央加振法反共振の場合)



周波数と損失係数の関係
（吊り・支持法と中央加振法共振の場合）



周波数と損失係数の関係
（吊り・支持法と中央加振法共振の場合）

正確な周波数応答関数を得るために

FFT アナライザを使用する場合の注意事項

① まず始めに減衰法で振幅依存性が無いかどうか検証する。

有る場合は、測定は全て減衰率法で測定する。振幅依存性が有る場合は、周波数応答関数が変形し左右対称にならない場合が多い。

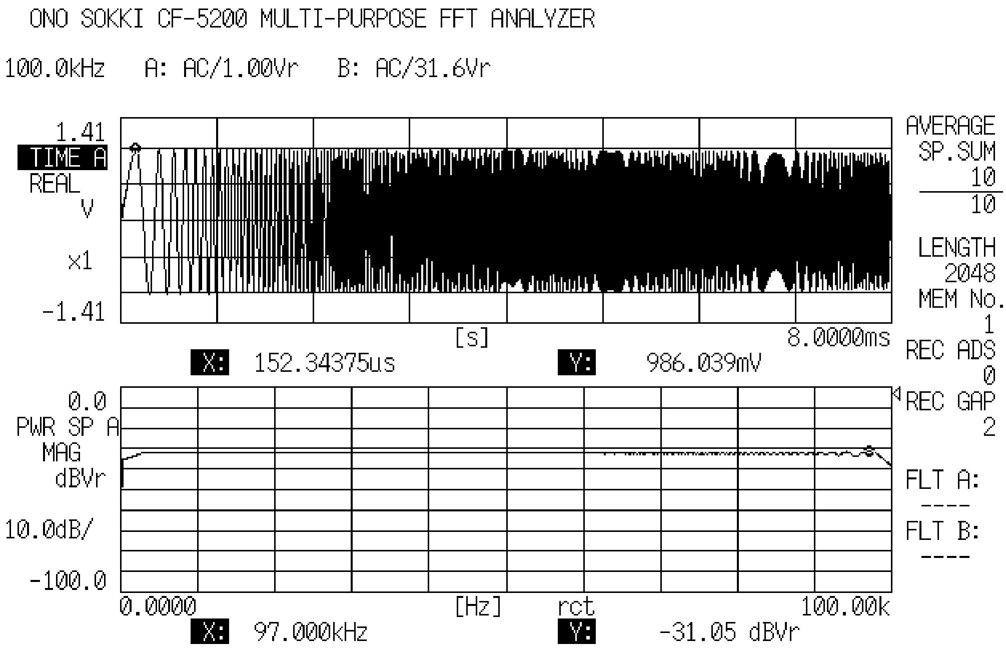
② 加振器への入力信号は同期した sin sweep を最良とする。

FFT の電圧レンジを自動化し、入出力の電圧レンジを最適化し、その電圧レンジ分も周波数応答関数のゲインの計算に反映させる、いわゆるオートレンジ機能があることが望ましい。

また、周波数応答関数のゲインによって、信号出力レベルを変える機能があるとなお良い。

③ sin sweep で測定に時間がかかる場合には、次図のような特徴を持った信号を使用すると良い。

(1) スェプトサイン信号



特　徴

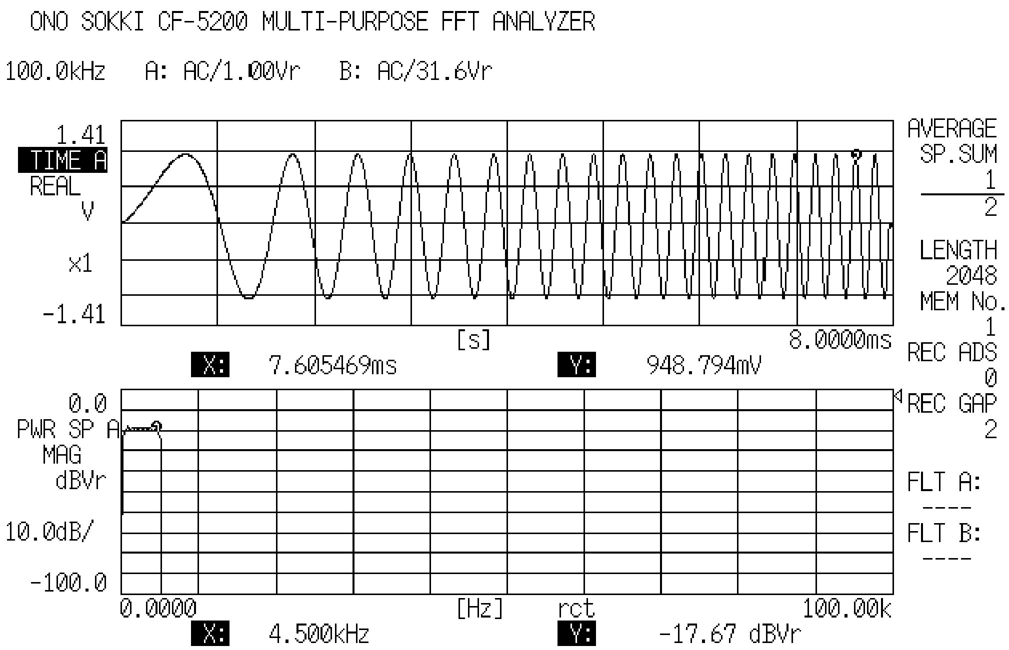
○ 高速正弦波帯引信号である。クレストファクター（最大値／実効値）は1.4と非常に低く、信号の集中する度合いは非常に高い。

○ FFTの解析フレームと同期がとれ、窓関数にレキュタンギュラ窓が使用できるため、リケージエラーが発生しない。

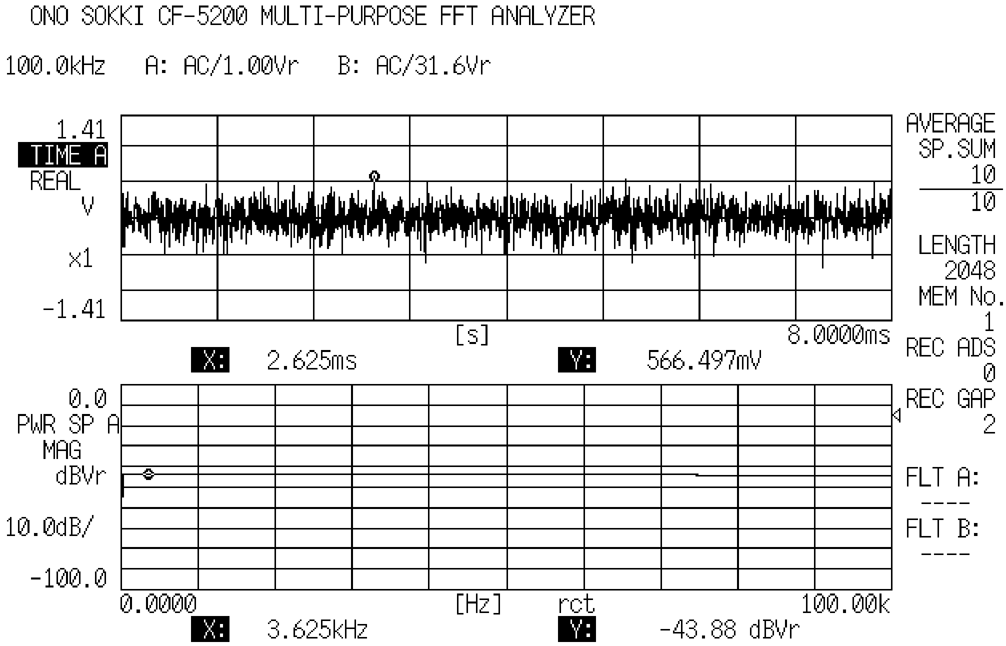
○ 常時同じ信号のため、加算の効果はないが、短時間に正確な周波数応答関数の測定が可能のため、近年では多く使用される。

○ 周波数ズームで信号同期、帯域制限、分解能変更が行える機器では、見かけ上狭い帯域での制限帯引信号になり、ズーム分析によりS/Nの向上が期待できる。

次の図は帯域制限したスェプトサイン信号である。



（2）マルチサイン信号



特　徴

○ 正弦波を全ての分解能点に等しいレベルを持つ多重正弦波である。クレストファクターは約３である。信号の集中する度合いはほどほどである。

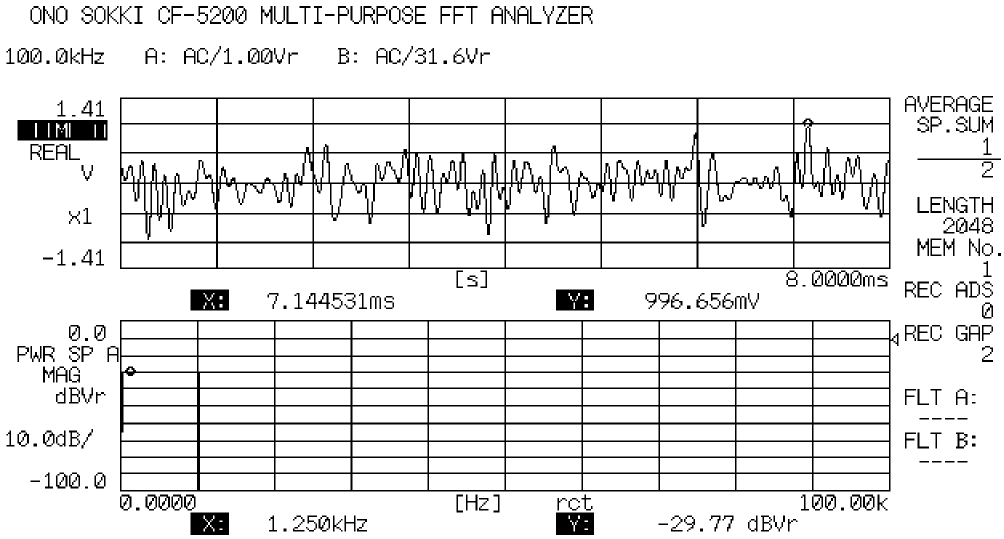
○ FFT の解析フレームと同期がとれ、窓関数にレキュタンギュラ窓が使用できるため、リケージエラーが発生しない。

○ 常時同じ信号のため、加算の効果はないが、短時間に正確な周波数応答関数の測定が可能のため、近年では多く使用される。

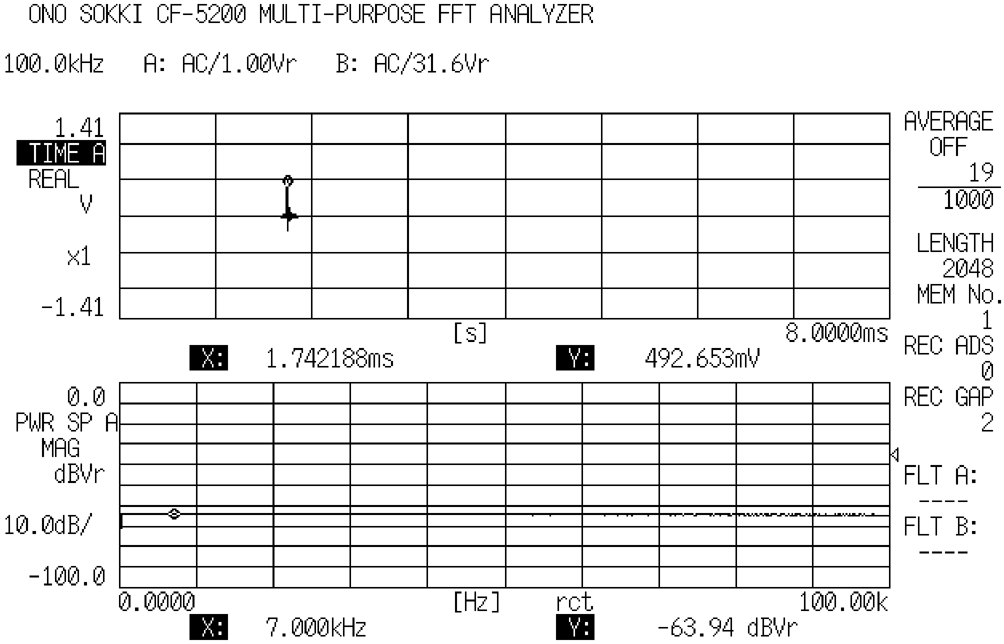
○ 周波数ズームで信号同期、帯域制限、分解能変更が行える機器では、ズーム分析によりＳ／Ｎの向上が期待できる。

○ 正弦波を対数間隔に並べることにより、対数分解能が得られ、FFT 側で対数分解能周波数を選択して表示することにより、対数分解能測定が可能になる。

次の図は帯域制限したマルチサイン信号である。



(3) 合成インパルス



特　徴

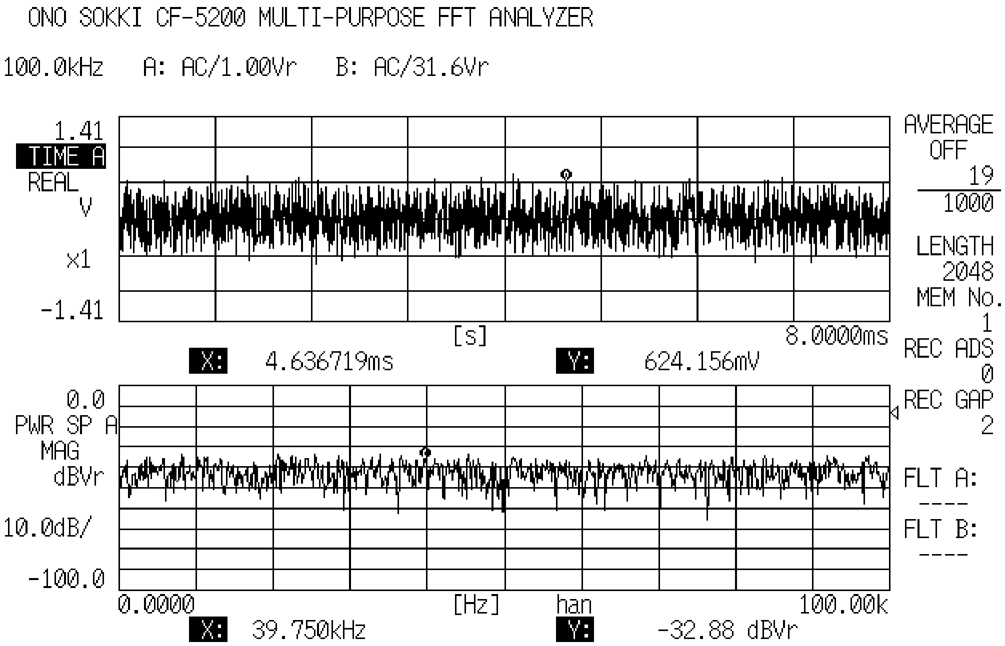
○ 正弦波の1波をピーク位置を合わせて合成した信号である。クレストファクターは約30である。

○ 通常のインパルスと比較して、ズーム分析への対応が簡単である特徴を持つ。

○ 当然の事ながら始めと終わりが“零”であり、FFTの解析フレームと同期がとれ、窓関数にレキュタンギュラ窓が使用できるため、リケージエラーが発生しない。

○ 減衰率法での加振器への入力信号として使用できる。

（4）ランダム信号



特　徴

○ 通常Ｍ系列信号が使用され、クレストファクタは約３である。信号の集中する度合いは小さい。

○ あらゆる周波数の信号を持っているのでズーム分析でも使用可能である。

○ FFT の解析フレームと同期がとれないため、通常ハニング窓を使用するが、後述のように損失係数を測定する場合に限って、レキュタンギュラ窓が良い。
ハニング窓を使用する場合はリケージエラーに注意すると共に、後述のようにハニング窓には損失係数の測定下限が有ることに注意して使用する必要がある。

○ これも帯域制限は可能なのでズーム分析の時は、ズーム帯域で帯域制限出きることが望ましい。

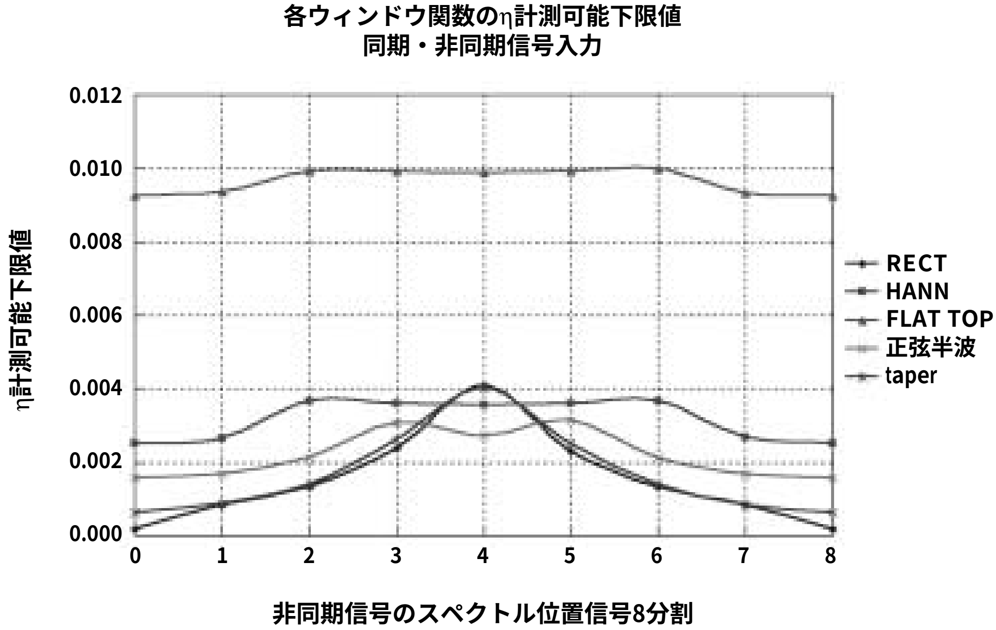
○ 加算の効果が非常にあり、上図のように瞬時瞬時には、欠落している周波数が多いので加算は充分する必要がある。

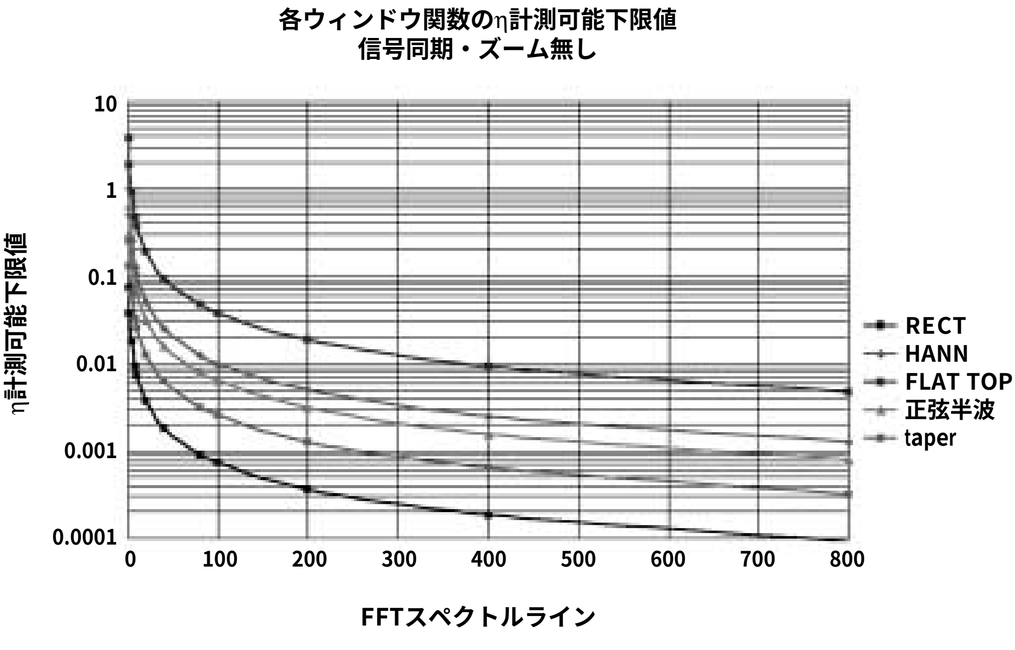
○ 非線形要素を持った機器の測定には、バーストランダムを使用する。

損失係数測定の際使用する窓関数について

窓関数によって損失係数測定の際に、周波数応答関数が変形すると予想される。

下図は各窓関数をかけたときの損失係数の測定下限値を示す。





前図から次のことがいえる

① FLAT-TOP ウインドウは損失係数測定には向いていない。

② 方形波ウインドウがワーストケースの分解能と分解能の中央位置に信号が入力された場合を除いて、損失係数測定には最適である。

③ 従来「信号が非同期の場合には、ウィンドウ関数はハニングを使え」と言われてきたが、損失係数測定時（ピークから -13 dBよりも大きな値で η を求める場合）に限り、方形波ウインドウが最も小さな損失係数まで精度良く測定できる。
ただし、矩形窓を使用してコヒレンスが低下する場合は、テーパー窓を使用する。

④ 共振点がFFT画面の左側に近づけば近づくほど、ウインドウ関数の影響が大きい。例としてズームを使用しないでハニングウインドウ使用の場合の、FFT10ライン目の測定下限は $\eta = 0.15$ である。

⑤ 周波数応答関数波形の山が画面の左側にあるということは、低い周波数の共振・反共振を高い周波数レンジで測定したことであり、山を右側に移動するということは（1）周波数レンジを下げる。（2）周波数ズームを行うことであるから、ここでもズーム分析の必要性が確認された。

⑥ ズーム分析の別の効用として、ズーム分析は時間フレームを長くすることなので、インパルスレスポンスのはみ出し変形も減少する。
さらにズーム分析は周波数分解能を上げることになるため、この部分での誤差の減少も期待できる。
また、FFT 点数を増やすことによっても同様の効果があると考えられる。
最近では65,536点のFFTで25,600ラインのスペクトルを計算するものまで出現して、ある程度損失係数が大きい（η ：0.01程度）場合にはズーム分析が不要なものが使いやすい。

ヤング率等の計算

無垢材料の測定からヤング率を求める計算式、及び RKU (Ross, Kerwin, Unger)方程式を用いた複合型（2 層型・3 層型）で測定した損失係数・ヤング率から制振材単品の損失係数・ヤング率を求める計算式を示す。

■ 無垢材料

共振周波数をf_n（Hz）、半値幅をΔf_n（Hz）、試料片の長さをl（m）、試料片の厚さ h （m）、試料片の平均密度をρ（kg/m^3）とすると。

$$E = \frac{48\pi^2 \ell^4 \rho \left(f_n^2 + \frac{1}{8} \Delta f_n^2 \right)}{h^2 \theta_n^4} \qquad (N/m^2)$$

ダンピングが小さい場合は $1/8\,\Delta f_n^2$ を無視し

$$E' = \frac{48\pi^2 \ell^4 \rho f_n^2}{h^2 \theta_n^4}$$

$$E'' = \frac{48\pi^2 \ell^4 \rho f_n \Delta f_n}{h^2 \theta_n^4}$$

また、損出係数ηは

$$\eta = \frac{E''}{E'} = \frac{\Delta f_n}{f_n}$$

ここで

① 片持ち梁法と中央加振法反共振使用の場合

次数 n	θ_n	θ_n^4
1	1.87510	12.36
2	4.69409	485.5
3	7.85476	3806.6
4	10.99554	14617.3
5	14.13717	39943.8
6	17.27876	89135.4
7	20.42035	173881.2
8	23.56194	308208.2

以下＋π

但し片持ち梁の場合は（1）式の ℓ に全長からつかみしろを除いた長さを入力。

中央加振反共振を使用する場合は（1）式の ℓ に ℓ/2 を入力する。

② 中央加振で共振を使用する場合は共振周波数を求めて、θ nに下記値を使用する。

次数 n	θ_n	θ_n^4
1	4.73004	500.56
2	10.99561	14617.6
3	17.27876	89135.4
4	23.56194	308208.2
5	29.84513	793403.1
6	36.12831	1703690.0
7	42.41150	3235448.8
8	48.69468	5622456.0

以下＋２π

ℓ は、全長を入力

③ 両端自由で２点吊り（支持）法の場合

次数 n	θ_n	θ_n^4
1	4.73004	500.56
2	7.85320	3803.5
3	10.99561	14617.6
4	14.13717	33943.8
5	17.27876	89135.4
6	20.42035	173881.2
7	23.56194	308208.2

以下＋π

ℓ は全長を入力

また高次では θ_{n+1} と θ_n の差はほとんど π と一致することから

$$\mathrm{En} = \frac{12\ell^4 \left(f_{n+1} - f_{n-1}\right)^2}{\pi^2 h^3}$$

となり次数のファクター θ_n 及び密度 ρ が消去されたこの式が、次数がわからない場合に有用な式である。

■ ２層型複合板の場合

複合試験片の損失係数　：η_c

共振周波数　：f_c ［Hz］

自由長の長さ　：ℓ ［m］

基材の損失係数　：η_1 ＝０と置く

共振周波数　：f_i ［Hz］

厚み　：d_1 ［m］

密度　：ρ_1 ［kg/㎥］

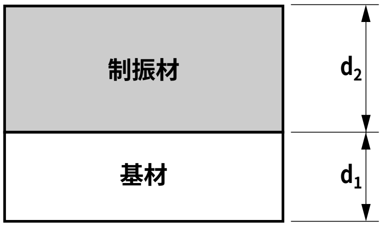
ヤング率　：E_1 ［N/㎡］

制振材単品の損失係数　：η_2

厚み　：d_2 ［m］

密度　：ρ_2 ［kg/㎥］

ヤング率　：E_2 ［N/㎡］



さらにヤング率比E_2/E_1＝M、厚み比d_2/d_1＝T、密度比ρ_2/ρ_1＝Dと置くと、制振材単品の損失係数及びヤング率は、基材自身のデータと複合試験片のデータから次式により計算できる。

$$E_2 = \frac{\left\{(\alpha-\beta)+\sqrt{(\alpha-\beta)^2-4T^2(1-\alpha)}\right\}}{2T^3}\cdot E_1$$

$$\eta_2 = \frac{(1+MT)\left(1+4MT+6MT^2+4MT^3+M^2T^4\right)}{MT\left(3+6T+4T^2+2MT^3+M^2T^4\right)}\cdot \eta_c$$

ただし、ここで、

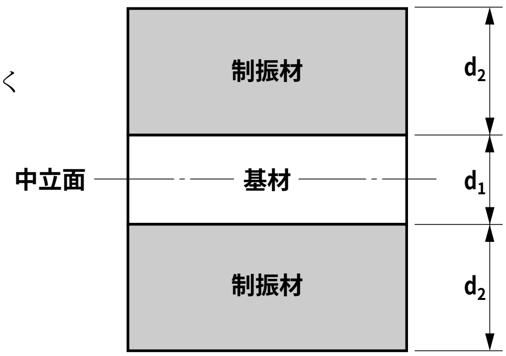
$\alpha = (fc/fi)^2 \cdot (1+DT)$

$\beta = 4+6T+4T^2$　である。

ただし、$\alpha \geqq 1.1$の時に成り立つ。

■両面貼り複合板（上下同一制振材使用）

複合試験片の損失係数	：η_c
共振周波数	：f_c ［Hz］
自由長の長さ	：ℓ ［m］
基材の損失係数	：$\eta_1 = 0$ と置く
共振周波数	：f_i ［Hz］
厚み	：d_1 ［m］
密度	：ρ_1 ［kg/m³］
ヤング率	：E_1 ［N/m²］
制振材単品の損失係数	：η_2
厚み	：d_2 ［m］
密度	：ρ_2 ［kg/m³］
ヤング率	：E_2 ［N/m²］



さらに厚み比d_2 / d_1＝T、密度比ρ_2 / ρ_1＝Dと置くと、制振材単品の損失係数及びヤング率は、基材自身のデータと複合試験片のデータから次式により計算できる。

$$E_2 = \frac{\left\{\left(f_c / f_i\right)^2 (1+2DT)-1\right\}}{6T+12T^2+8T^3} \cdot E_1$$

ここで$(f_c / f_i)^2 (1＋2DT)＝\alpha$と置いて

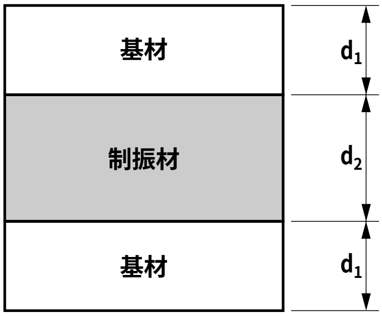
$$\eta_2 = \frac{\alpha}{(\alpha-1)} \cdot \eta_c$$

ただし、ここで、

$\alpha＝(f_c / f_i)^2 (1＋2DT) \geqq 1.1$

の時に成り立つ。

■サンドイッチ型複合板（制振鋼板）の剪断弾性率と損失係数



複合試験片の損失係数　：η_c

　　共振周波数　：f_c ［Hz］

　　自由長の長さ　：ℓ ［m］

基材の損失係数　：η_1 ＝０と置く

　　共振周波数　：f_i ［Hz］

　　厚み　：d_1 ［m］

　　密度　：ρ_1 ［kg/m³］

　　ヤング率　：E_1 ［N/m²］

制振材単品の損失係数　：η_2

　　厚み　：d_2 ［m］

　　密度　：ρ_2 ［kg/m³］

　　剪断弾性率　：G　［N/m²］

さらに厚み比 d_2/d_1＝T、密度比 ρ_2/ρ_1＝D と置くと、制振材単品の損失係数及び剪断弾性率は、基材自身のデータと複合試験片のデータから次式により計算できる。

$$G = \frac{(\alpha-\beta)-2(\alpha-\beta)^2-2(\alpha\eta_c)^2}{(1-2\alpha+2\beta)^2+4(\alpha\eta_c)^2}\cdot\frac{2\pi C_n E_1 d_1 d_2}{\ell^2}$$

$$\eta_2 = \frac{\alpha\eta_c}{(\alpha-\beta)-2(\alpha-\beta)^2+2(\alpha\eta_c)^2}$$

ここで

$\alpha = (f_c / f_1)^2 \cdot (2 + DT) \cdot (\beta / 2)$

$\beta = 1 / \{6(1 + T)^2\}$

C_n：定数（$= \theta_n^2 / 2\pi$）

ただし、

$$\frac{1}{2}(f_c / f_i)^2 \cdot (2 + DT) \geqq 1.1$$

のときに限る。

粘弾性材料の物理特性

高分子材料は各々の分子鎖がランダムに絡み合いながら結晶部と非晶部が混在した状態で存在しており、温度・周波数依存性は分子の粘弾性に依存する。これらの材料の分子鎖はさまざまな運動モードを有しており、モードごとに特定の温度、特定の周波数でエネルギーを解放する。制振性能はこの分子運動が活発になる転移領域で最大となる．ガラス領域での材料分子の主鎖の局所的運動は、転移領域では主鎖のミクロブラウン運動に変わり、これにより最も大きな損失を与える。また温度 - 周波数換算式である、W.L.F. （Williams、Landel、Ferry） 式も、この転移領域で成立する。ここで、基礎的な概念として重要なのは、図 1 に示す粘弾性材料の弾性率の温度特性をもとに、温度と周波数を入れ換える（温度・周波数換算則 : 合成曲線 （Master Curve） を使用する）ことにより、周波数に対しても同様な弾性率特性を表すことが出来る点である。

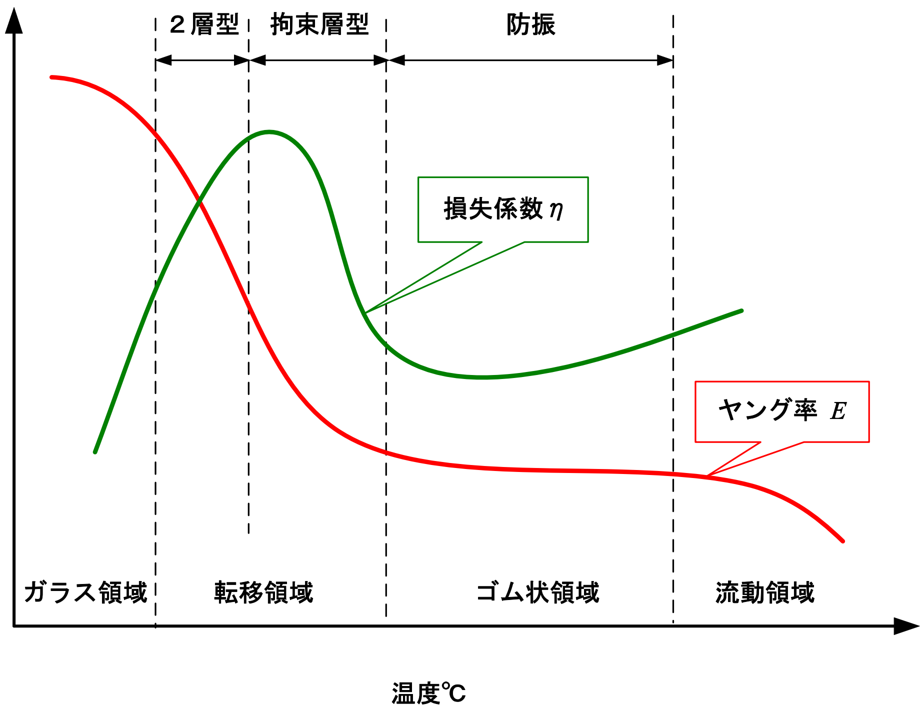


図 1　粘弾性材料の温度特性

１．温度周波数換算則

制振材料として用いられる高分子材料やゴムなどの粘弾性体の複素弾性係数（縦弾性、横弾性とも）は、温度 T と周波数 f の関数である。ある温度 T_0 を規準温度に設定し、温度 T_1 における複素弾性係数を縦軸に、周波数を横軸（対数軸）にとり、これを横軸方向に平行移動すると、基準温度 T_0 における複素弾性係数と一致することが知られている。これは、温度を高くすることが周波数を低く（時間を長く）することと対応し、温度を低くすることが周波数を高く（時間を短く）することに対応することを意味している。このように温度の変化を周波数の変化に換算できることを温度周波数換算則と呼ぶ。

制振材料の制振特性（動特性）は温度と周波数の両方に依存するため、弾性率や損失係数をこの両パラメータについて表わそうとすると３次元表示が必要となる。ここで重要なのが温度-周波数換算則である。温度 - 周波数換算則は粘弾性材料（特にガラス転移領域）において良く成立し、温度の変化を周波数の変化に置き換える（換算周波数）ことによって、制振材料の動特性を２次元で表現することができる。

このことは、弾性率や損失係数の両特性値に対して、同時に満足するような温度-周波数換算則を見いだすことを意味する。つまり、温度が T だけ変化すると、周波数が f だけ変化したことと等価になるという法則を、広い温度と周波数範囲において、しかも弾性率と損失係数の両方に、同時に適用できるような形で見いだすことになる。

この温度 - 周波数換算則に関する研究は、高分子材料のレオロジーの分野で行われており、もっとも有名なものが、多くの高分子について求めたシフトファクター α_T の温度依存性を示した WLF 方程式である。

2. WLF 方程式

シフトファクター　α_T と温度 T の関係は、様々な粘弾性材料について分析され、Williams-Landel-Ferry（WLF）の式として、次式のように整理されたものが一般に用いられている。

$$log[\alpha_T] = \frac{-C_2(T - T_0)}{C_1 + T - T_0} \qquad \text{1 式}$$

C_1 、C_2 は定数であり、前項で求めたシフトファクター　α_T と［T － T_0］との関係と一致するように選ぶ。

2-1 WLF 方程式の導出

非晶質高分子（結晶性ではない）が緩和現象を示すとき、セグメントの動きうる空間、すなわち自由体積がセグメントの移動性、つまり内部粘性を支配していると考えられる。
自由体積概念に基づく Doolittle　の粘度式から

$$\eta = Ae^{B/f} \qquad \text{2 式}$$

自然対数を取って、

$$\ln\eta = \ln A + \frac{B}{f} \qquad \text{3 式}$$

これは分子論的立場から粘性率 η と自由体積の関係を示す。f は自由体積分率。 B はほぼ 1 である。このとき、Doolittle の式は以下のようになる。

$$\ln\eta = \ln A + \frac{1}{f} \qquad \text{4 式}$$

ここで任意の温度 T における粘性率 η_T　と、ガラス転移点 T_g　における粘性率　η_{T_g} とを比較する。この二つの温度のおける粘性率は、

$$\begin{aligned} \ln\eta_T &= \ln A + \frac{1}{f} \\ \ln\eta_{T_g} &= \ln A + \frac{1}{f_g} \end{aligned} \qquad \text{5 式}$$

ここで f 、f_g は T と T_g　における自由体積分率である。緩和時間 τ の温度依存性もまた Doolittle 型であると考えると次式のようになる。

$$\ln a_T = \ln \frac{\eta_T}{\eta_{T_g}} = \frac{1}{f} - \frac{1}{f_g}$$ 6 式

次に自由体積分率 f の温度依存性をどのように表すかが問題となる。比容と温度の関係ではガラス状態の熱膨張係数は結晶の場合とあまり変わらないが、T_g 以上になると急増する。f の温度依存性もおおむねこれと同様であるとすると、

$$\begin{aligned} f &= f_g & T &\le T_g \\ f &= f_g + \alpha_f (T - T_g) & T &> T_g \end{aligned}$$ 7 式

α_f は、T_g 以上での自由体積分率差の係数となり、

$$\ln a_T = \frac{f_g - f}{f \cdot f_g} = -\frac{1}{f_g} \cdot \frac{T - T_g}{(f_g / \alpha_f) + T - T_g}$$ 8 式

常用対数変換

$$\log a_T = -\frac{1}{2.203 f_g} \cdot \frac{T - T_g}{(f_g / \alpha_f) + T - T_g}$$ 9 式

この式は、先の WLF 式（式 1）と同じ形をしており、係数部を比べることで、WLF 式中の係数 C_1 および C_2 が以下となることがわかる。

WLF 式

$$\log \alpha_T = -\frac{C1(T - T_0)}{C2 + (T - T_0)}$$ （1 式）

$$C_1 = \frac{1}{2.203 f_g} C$$ 10 式

$$C_2 = \frac{f_g}{\alpha_f}$$ 11 式

C_1 、C_2 ： 定数（Constant） $(C_1 = 17.44, C_2 = 51.6)$
T_g ： 基準温度
α_T ： シフトファクター（Shift Factor）

換算周波数（Reduced Frequency）f_r は、シフトファクターと測定周波数の積で表される。

$$f_r = \alpha_t \cdot f_n$$ 12 式

図 2 にシフトファクター（α_T ：移動係数）と WLF 式の関係を、図 3 に WLF 式の $C_1 = 17.44$、$C_2 = 51.6$ とし、T_g をパラメータにした、温度対シフトファクター（log α_T ）のグラフを示す。

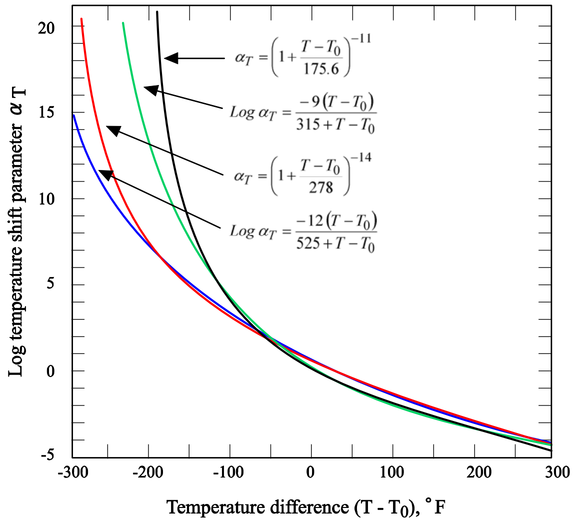


図 2 合成曲線の比較

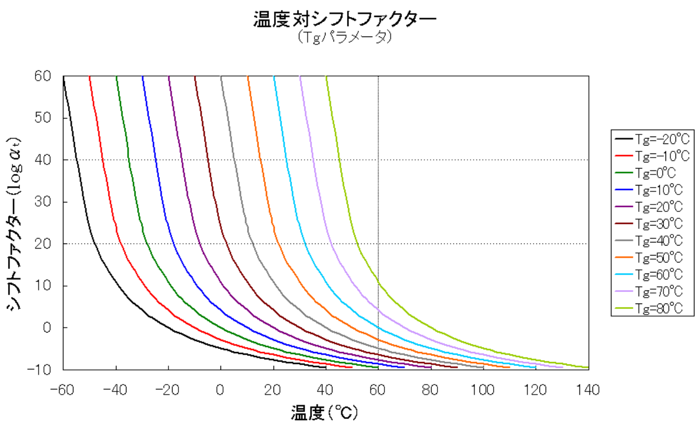


図 3 WLF 式のシフトパラメータ

3. 換算周波数ノモグラム

様々な温度、周波数における複素弾性係数の測定値を、横軸（対数）に換算周波数 f_r 、左縦軸に複素弾性係数をとった合成曲線として整理しておく。次に、同じ図中に代表的な温度・・、T_{-2}、T_{-1}、T_0、T_1、T_2、・・・におけるシフトファクター α_T を比例係数とする直線（ $f_r = \alpha_T \cdot f$ ）を、横軸に換算周波数 f_r 、右縦軸に周波数 f をとって描くことにより、任意の温度［T］と周波数［f］における複素弾性係数と損失係数の値を合成曲線から直接読み取ることができる。

このようにして整理された図を換算周波数ノモグラムと呼ぶ。換算周波数ノモグラムは、国際規格である ISO 10112 において、制振材料の複素弾性率のグラフ表示として推奨されている。

図 4 換算周波数ノモグラムの一例

3-1 換算周波数ノモグラムの作成

3-1-1 基材の影響の除去：

制振材料を片面に貼った２層型梁などでは、測定した損失係数は制振材と基材からなる複合体としての特性となる。ノモグラム解析に必要な材料単体の特性(損失係数、弾性率) は梁の理論である“RKU 基礎方程式”（ヤング率等の計算参照）によって基材の影響を計算上取り除く。

3-1-2 温度 - 周波数換算則の適用：

制振材料の制振特性（動特性）は温度と周波数の両方に依存するため、弾性率や損失係数をこの両パラメータについて表わそうとすると３次元表示が必要となる。ここで重要なのが温度 - 周波数換算則である。温度 - 周波数換算則は粘弾性材料（特にガラス転移領域）において良く成立し、温度の変化を周波数の変化に置き換える（換算周波数）ことによって、制振材料の動特性を２次元で表現することができる。

基準温度 T_0 をガラス転移温度 T_g にとると、WLF 式（１式）はほぼ $C_1 = 17.44$、 $C_2 = 51.6$ となる。 WLF は非晶性高分子に対してよく成立する。 一方、結晶性分子やフィラーが入ると誤差が増し、 ガラス転移温度 T_g 以下では誤差が大きいといわれている。

3-1-3 マスターカーブ（合成曲線）:

温度 - 周波数換算則を適用し､複数の温度データを連続した１本のマスターカーブに合成する。換算周波数ノモグラムは、こうして得られた制振材料単体の損失係数とヤング率を換算周波数軸上にプロットすれば完成する。また、この複雑な特性を取扱い易くする目的で、あらかじめ用意した粘弾性特性のモデル式にカーブフィットさせ、粘弾性特性を幾つかのパラメータで表すことも行われている。

3-2 ノモグラムの作成手順

前述の RKU 式を使って求めた制振特性単体の特定の温度（T_{-2} ～ T_{+2} ）における弾性率(ヤング率)を図 5 に、損失係数を図 6 に一例として示す。

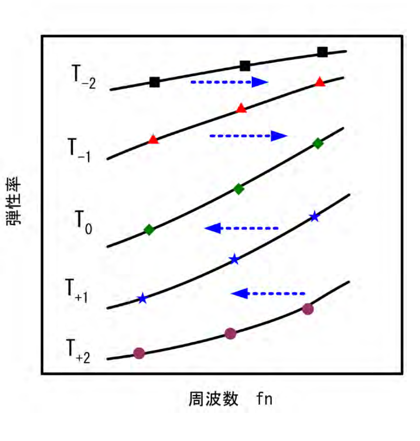


図 5 周波数 対 弾性率

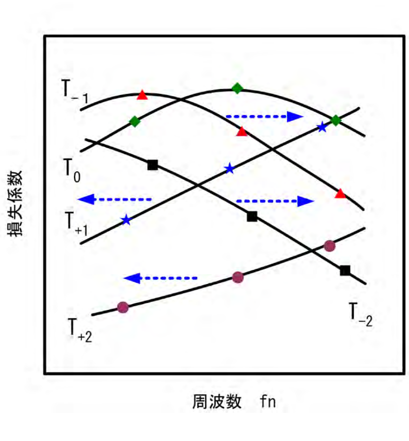


図 6 周波数 対 損失係数

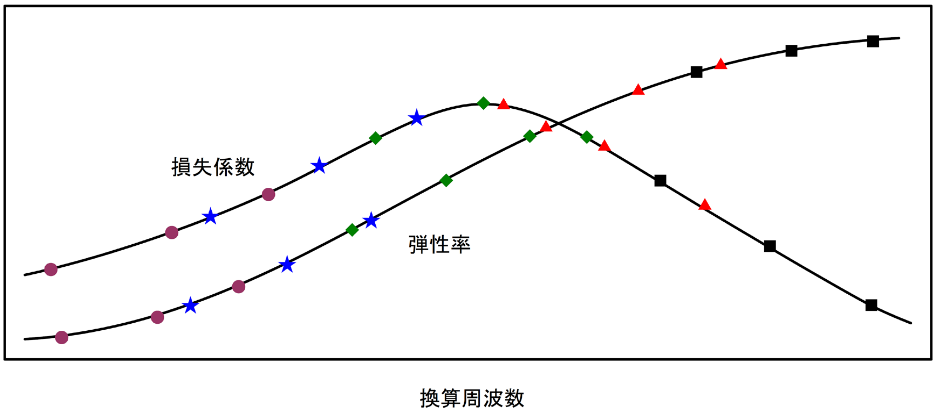


図 7 換算周波数 対 弾性率・損失係数

ここで、図 5、6 に示す粘弾性材料の対温度挙動を考慮する。この図からガラス転移温度を適切に推定し、温度 - 周波数換算側の基準温度 （ T_0 ） を T_g の近傍として、以下により決定する。

1. 特定の温度 T_1 （試験片の一個の測定温度）を決める。
2. α_T を計算する。
3. 実験で測定した試験片（温度が T_1 の場合）の共振周波数と α_T を掛け算して換算周波数 f_r を計算する。
4. 横軸に換算周波数をとり、縦軸に制振材料単体の動特性（損失係数、ヤング率）をとると T_1 における図 7 の一部が得られる。
5. この操作を他の測定温度 T_1 や T_2 等について繰り返すと、図7が完成する。もしも、この図のデータの並びが滑らかでない場合は、基準温度 T_0 を変えて再度、図 7 を作成して、データプロットが滑らかにつながるまでこの操作を繰り返す。
6. 最後に、右側の縦軸に（共振）周波数をとり、上側の横軸に温度をとると換算周波数ノモグラムが完成する。

3-3 ノモグラム作成時の注意点

ノモグラム作成時には、以下に示すような点を留意する必要がある。

1. 対象はオイラーベルヌーイ梁の２層型であるので、試験片の厚み比を大きくしない（３倍以内）。
2. ２層型の場合は、せん断（ズリ）変形が発生しないように留意する。
3. 計算式には、伸びの影響を考慮していない。
4. 鉄やアルミの損失係数は 0.001 より小さいため、基材の損失係数は 0（ゼロ）と仮定している。

5. 計算過程で測定誤差や材料誤差の影響が大きくなる。

- ヤング率を計算する場合に、周波数は２乗で影響する。
- 基材のヤング率を計算する場合、 厚みは２乗、長さは４乗で影響する。

なお、換算周波数ノモグラムを求める場合、特に、高温での測定データが使用出来ない場合が多い。この原因は、材料のノモグラムを求める時に、RKU 計算式（61 頁の上式）の √（平方根）の中が非常に小さくなるか、負になるためである。このため、計算精度を確保するのに、$\alpha \geq 1.1$ という判別を設けている。この判定条件により、ノモグラム作成時に測定データを棄却する必要がある。

このため、α の拡大方法（対策方法）の一つとして試験片の損失係数は、できるだけ $\eta > 0.01$ となるようにする。

3-4 換算周波数ノモグラムの読み方

下図８に換算周波数ノモグラムの一例を示す。左側の縦軸は、損失係数(η、●)と貯蔵弾性率(ヤング率 E'、×)、及び損失弾性率 E''、●）を表し、右側の縦軸は、 周波数 f を表す。下側の横軸は換算周波数 f_r で、物理的には意味がないが温度条件を含んだ軸である。上側の横軸は温度（℃）を表す。

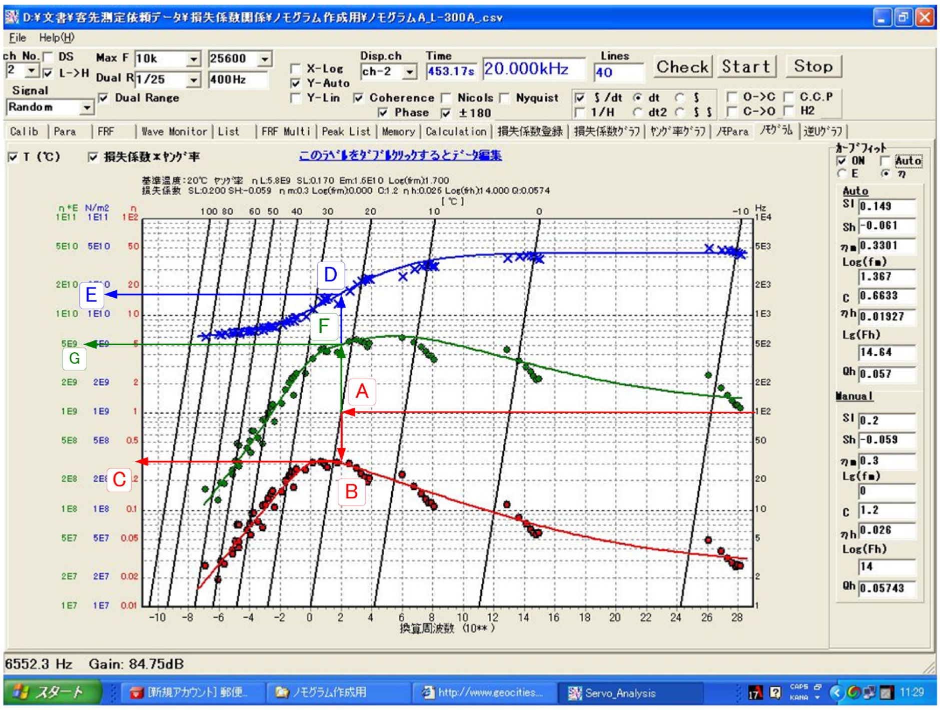


図８ 換算周波数ノモグラム例

次に、周波数が 100 Hz で温度 20℃における制振材料単体の損失係数とヤング率を求める手順を示す。

1. 右側の縦軸（周波数軸）の 100 Hz のラインを横に見る。
2. このラインと、上側の横軸（温度軸）の温度が 20℃の斜め線との交点 **A** を求める。
3. 交点 **A** から垂線を引いて、損失係数のカーブフィットラインとの交点 **B** を横に水平に移動、損失係数軸の値 **C** を読むと約 η ＝ 0.3 を得る。
4. 交点 **A** から垂線を引いて、ヤング率のカーブフィットラインとの交点 **D** を横に水平に移動、ヤング率軸の値 **E** を読むと約 E’ = 1.8E10（N/m^2） を得る。
5. 交点 **A** から垂線を引いて、損失弾性率のカーブフィットラインとの交点 **F** を横に水平に移動、損失弾性率軸の値 G を読むと約 E″ = 5.2E9（N/m^2）を得る。

4. 逆Ｕ字プロット

損失係数測定データを、横軸にヤング率、縦軸に損失係数を取ってプロットすると、アルファベットの“U”の字をさかさまにしたようにデータが並ぶ。このプロット位置は基準温度 T_0 の如何に関わらず同じで、損失係数の測定精度が良い程、逆Ｕ字上にプロット点が並ぶ。

ここで逆Ｕ字曲線は、ヤング率のカーブフィット結果をもとに描くため、カーブフィットがうまくいっていないと測定データ（プロット）との相関が悪くなる。したがって、データの読み取りは逆Ｕ字プロットからではなく、換算周波数ノモグラムを使用しなければならない。逆Ｕ字プロットはヤング率のカーブフットの精度検証や、試験片の損失係数と共振周波数の測定精度の検証に有用である。

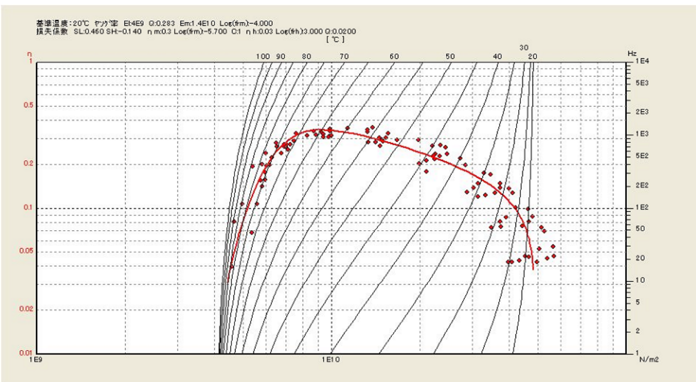


図 9 逆Ｕ字プロット

5. 損失係数の近似式

損失係数-換算周波数の近似式特性として、下図 10 に示すような曲線にカーブフィットさせる。近似式としては次式を使用する。

$$\eta_D = 10^{\kappa} + \frac{\eta_h}{1 + \left(f_h / f_r \right)^{Q_h}} \qquad \text{13 式}$$

ここで、 k は、

$$\kappa = \log \eta_m + \frac{c}{2} \left[\frac{s_\ell + s_h}{c} \log \frac{f_r}{f_m} + \left(S_\ell - S_h \right) \left\{ 1 - \sqrt{\left(\frac{1}{C} \log \frac{f_r}{f_m} \right)^2 + 1} \right\} \right] \qquad \text{14 式}$$

○損失係数パラメータ（８個）

s_ℓ	：損失係数ピークの左側の傾き
s_h	：損失係数ピークの右側の傾き
$\log \eta_m$	：損失係数の最大値の常用対数
$\log f_m$	：損失係数が最大となる換算周波数の常用対数
c	：曲率
Q_h	：損失係数の右側の折れ曲がり強度
η_h	：最大換算周波数時の損失係数
$\log f_h$	：損失係数の右側の折れ曲がり換算周波数

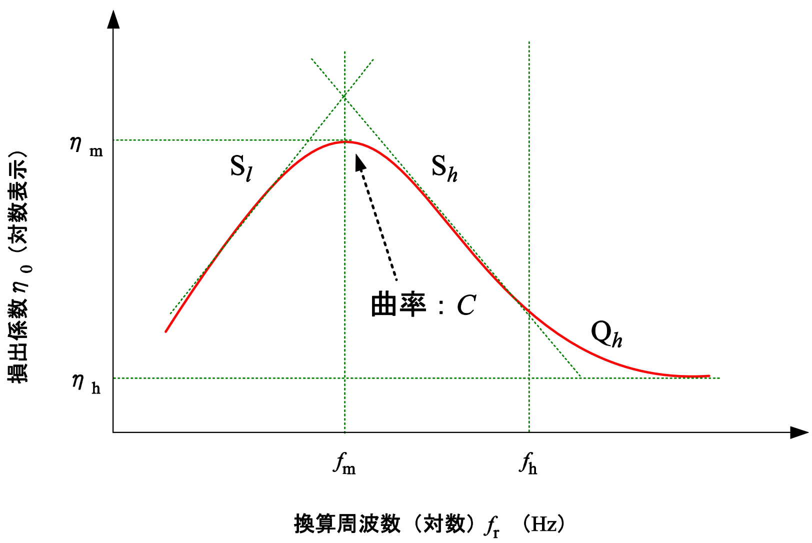


図 10 損失係数 - 換算周波数 近似式の特性

6. ヤング率の近似式

ヤング率 - 換算周波数の近似式特性として、下図 11 に示すような曲線にカーブフィットさせる。近似式としては次式を使用する。

$$\log E_D = \log E_\ell + \frac{2\log\left(\dfrac{E_m}{E_\ell}\right)}{\left(1+\dfrac{f_m}{f_r}\right)^Q} \qquad \text{15 式}$$

○ ヤング率パラメータ（4 個）

Q ： 弾性係数の中央部の傾き

E_m ： 弾性係数の中央値

f_m ： 弾性係数の中央部の換算周波数

E_ℓ ： 最小換算周波数における弾性係数

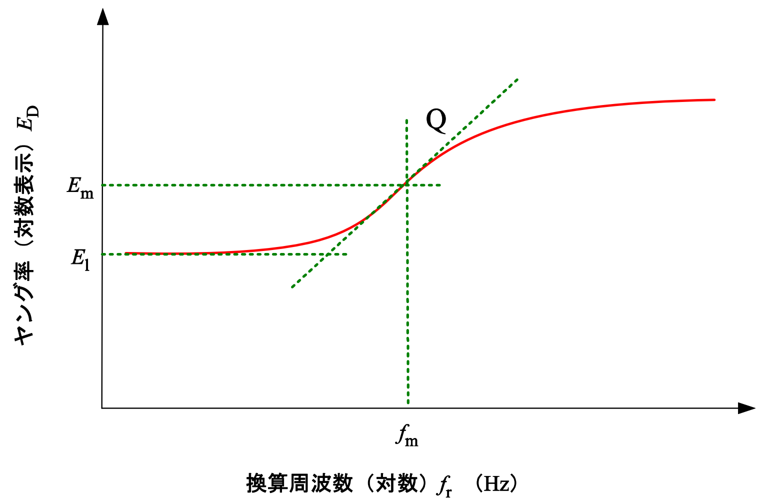


図 11 ヤング率 - 換算周波数 近似式特性

このように、損失係数（8 個）、ヤング率（4 個）のカーブフィットパラメータを求めることにより、損失係数、ヤング率が温度を含まない周波数のみの式で表せることになり、有限要素法等のシミュレーションソフトへの適応が期待できる。

制振合金の歪みに対する損失係数の測定

制振合金の損失係数測定の際には、その減衰発生メカニズムにより、振幅依存が発生する。これは振動振幅に依存しない粘弾性材料にない特徴である。

この測定のためには、中央加振の際には中央位置に歪みゲージ等を貼って、その歪み振幅をパラメータにしたグラフを作成しなければならない。また全測定試料に歪みゲージを貼るのが煩雑なのとＳ／Ｎ比の問題から、中央位置の歪み振幅と先端振幅は小振幅の場合には比例することを利用し、先端振幅（レーザー振動計等で測定）を中央位置の歪み振幅に置き換えて測定するのも得策である。

以下にその測定ブロック図を示す。

制振合金の損失係数歪み依存測定システム

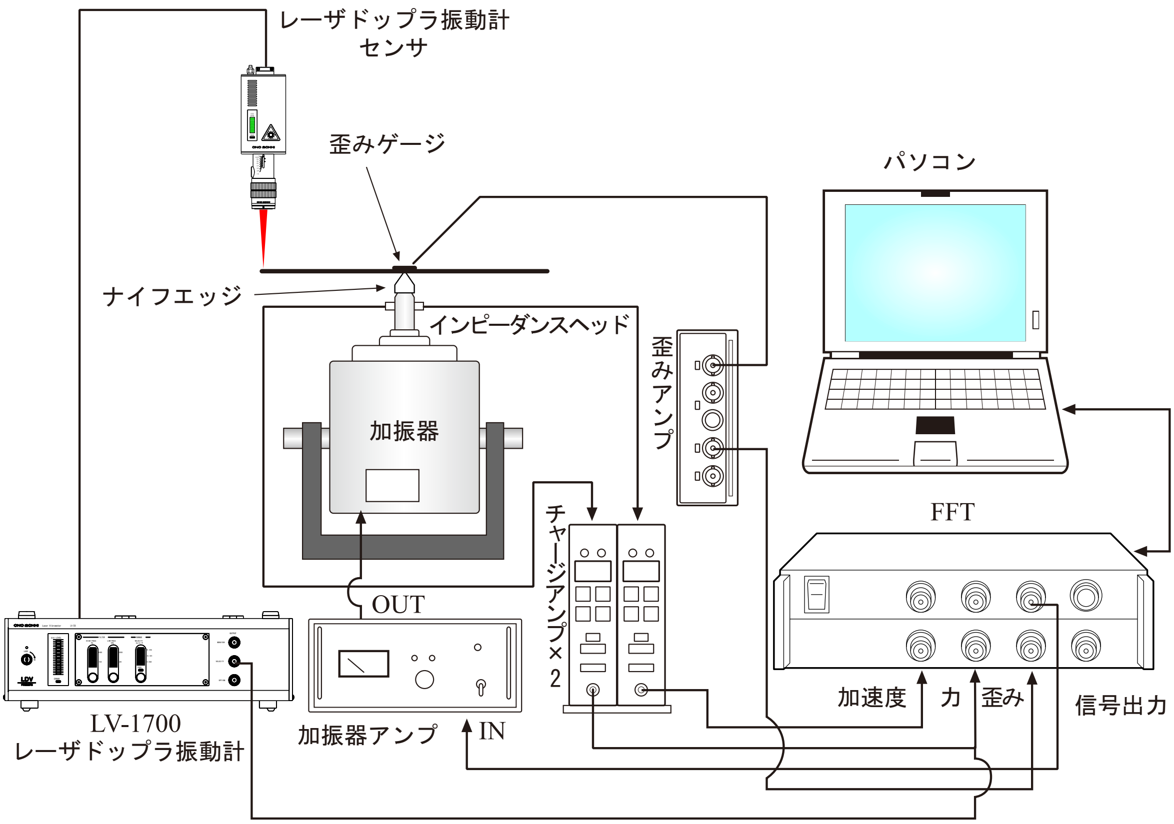


図１

下記グラフは寸法、厚み等の形状が同一のものであれば、材料のヤング率にかかわらず、同一の先端振幅ー中央歪み振幅になる様子を実験で示したものである（ヤング率の異なる７種類の材料のデータ)。

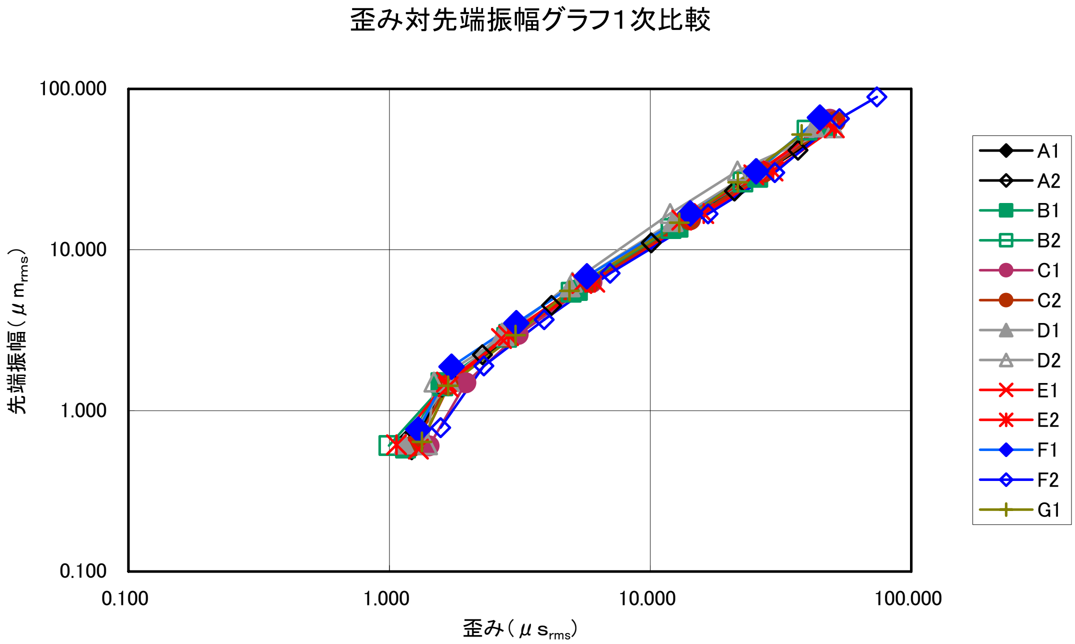


図２

損失係数の測定は；

① 振幅を徐々に変え、その加振速度対力（機械インピーダンス）の広がりから、半値幅法で求める（振幅比率は１００：１程度)。

② インパルスあるいは、共振周波数のトーンバースト波で加振して、その時間軸減衰から対数減衰率経由で、損失係数を計算する。

の２種類が考えられる。

次の２種の図は上記②の方法で求めたものである。

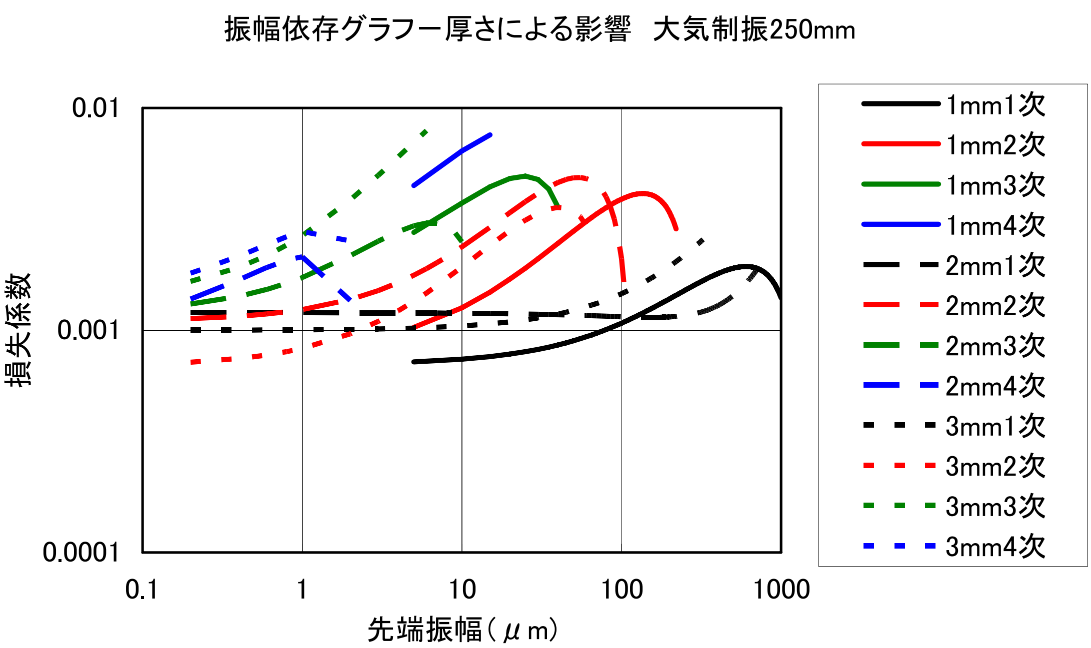


図 3

振幅依存の他に材料の厚みにも依存するようである。下記は材料比較である。

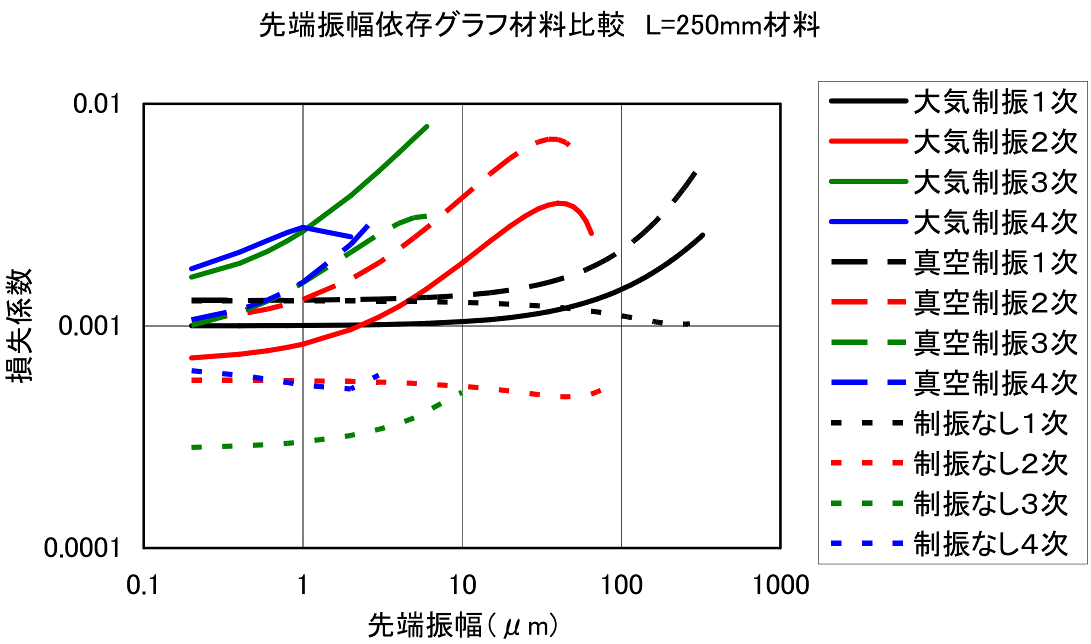


図 4

下図は横軸を歪み振幅に置き換えたグラフである（前図とは異なるデータ）。

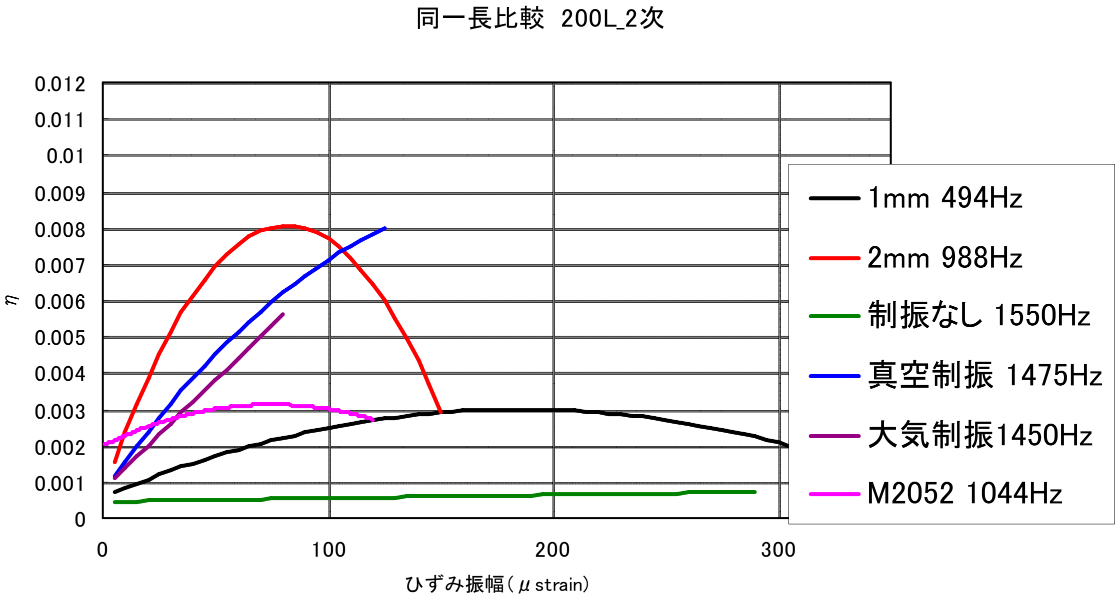


図 5

また、下図のように横が振幅歪み、縦が周波数、紙面に直角方向（Z 方向）に損失係数を表すコンター線図を書くと見やすい。

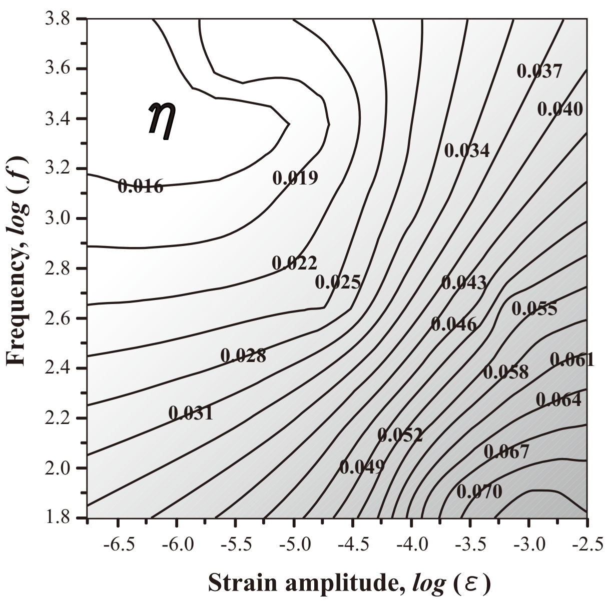


図 6

【参考文献】

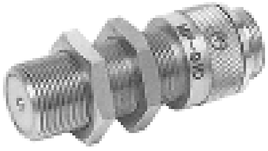
1. “制振材料の損失係数測定の際の FFT 分析器の周波数分解能及び時間窓について”
   自動車技術会　中沢　井上
2. “On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Dissrete Fourier Transform”
   PROCEEDING OF THE IEEE, VOL66, NO.1, JANUARY 1978
3. “時間窓の性質についての二，三のコメント”
   城戸健一
4. “制振特性測定の比較検討（2 層型制振材料について）”
   制振工学研究会　計測評価分科会 2 層型制振材料ラウンドロビンテスト WG 編
5. “制振材の動的特性の計測法標準化に関する研究”
   日本機械工業連合会・日本自動車研究所
6. “制振性能の測定法、試験法、評価法について”
   井上茂
7. “損失係数測定解説書”
   制振工学研究会　計測・評価分科会編
8. M.L.Williams,R.F.Landel and J.D.Ferry: J. America. Chem. Soc.,77,3701,1955
9. ISO 10112 Damping materials - Graphical presentation of the complex modulus (1991-9-15)
10. A.D.Nashif,D.I.G.Jones,J.P.Henderson: VIBRATION DAMPING, A Wiley - International publication,1985
11. ２層型制振材料の振動減衰特性試験および考察　（試験･評価方法の JIS 化に向けて）
    制振工学研究会 計測・評価技術分科会２層型制振材料 JIS 規格化検討 WG 編

参考ページ

■DS-0256 損失係数測定ソフトウェアホームページ
■DS-0259 ノモグラムソフトウェアホームページ

片持ち梁法に使用する電磁加振器（電磁検出器）の特性について

１．電磁検出器のインピーダンス特性



測定方法

２種類（公称直流抵抗値：850 ～ 950 Ωの MP-910、公称直流抵抗値：85 ～ 105 Ωの MP-912）の電磁検出器を測定。
電磁検出器にシリーズにセメント抵抗１Ωを挿入し電流検出し、電圧との周波数応答関数を測定した。図１参照
この結果かなり大きくインピーダンスが変わることがわかった。
MP-910 と MP-912 ほぼ平行ではあるが、MP-910 を使用した場合は、インピーダンスが高いので、接続計器のインピーダンスに気をつける必要があり、電磁加振器として使用する場合は通常のパワーアンプでは、加振力不足が予想される。
高域でいずれもインピーダンスが下がっているのは、コイルの容量成分によるものと考えられる。

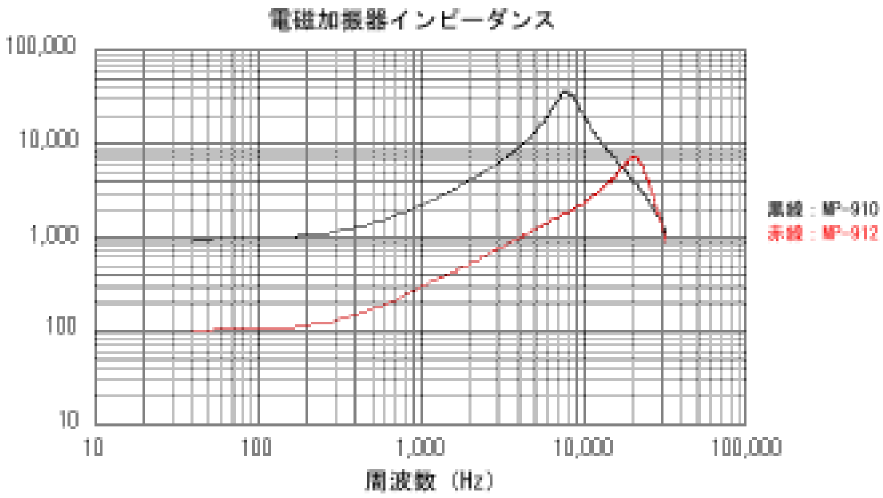


図１

２．電磁検出器の速度検出レスポンス及び直線性測定

測定ブロック図を図２に示す。

① 速度検出の周波数レスポンスを図３に示す。（レーザーバイブロとの周波数応答関数）周波数特性はかなりフラットであるが、これはセンサ性能なので（加振器として使用したのではないので）反力は起きないと判断して、弱い取付治具を使用したためと考えられる。

② その振動速度に対する直線性を図４～図７に示す。損失係数測定にはMP-910、MP-912共充分な性能であることがわかった。正規化速度とは、検出器の出力電圧が鉄片との検出距離に非常に敏感なため比較のために、各検出器で測定した最大出力を100%として正規化したものである。

電磁検出器の「振動速度」レスポンス測定ブロック図

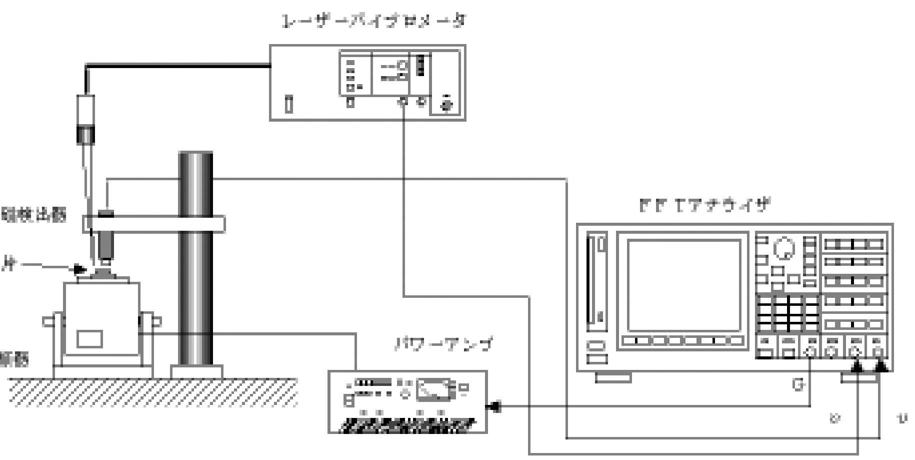
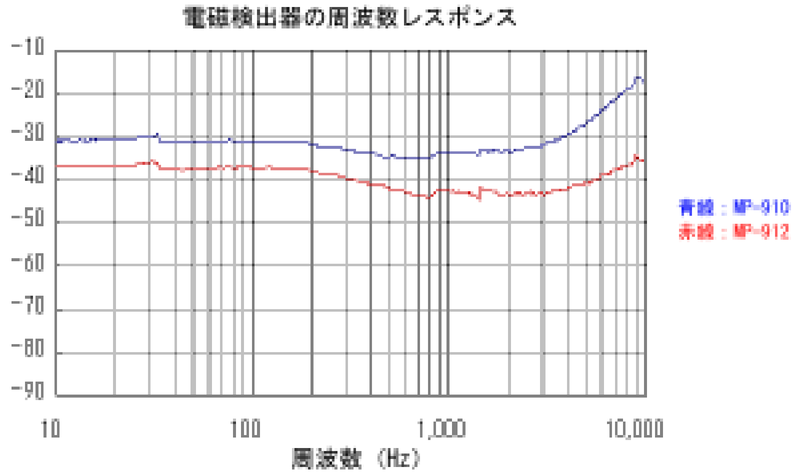
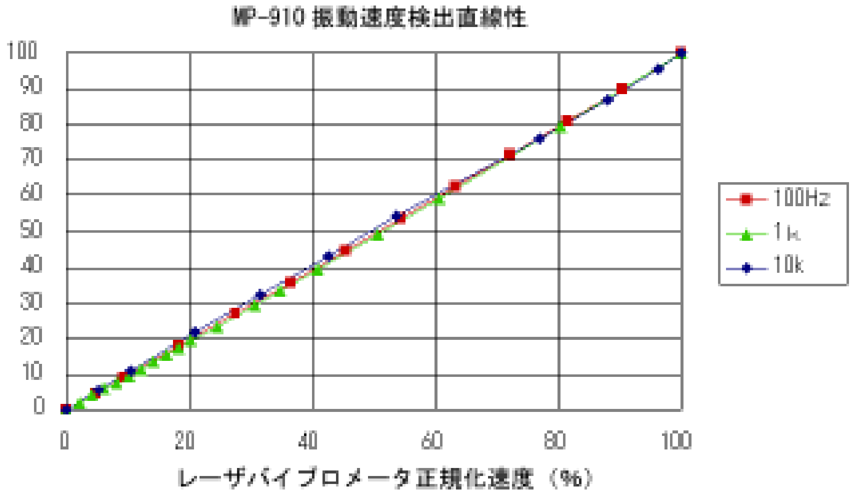


図２



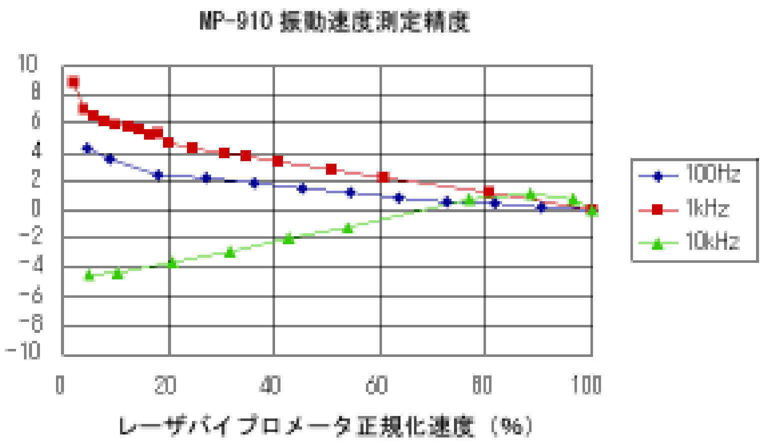
電磁検出器の周波数レスポンス
-10
-20
-30
-40
-50
-60
-70
-80
-90
10
100
1,000
10,000
周波数（Hz）
青線：MP-910
赤線：MP-912

図３



MP-910 振動速度検出直線性
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
20
40
60
80
100
レーザバイブロメータ正規化速度（%）
100Hz
10k

図４



MP-910 振動速度測定精度
10
8
6
4
2
0
-2
-4
-6
-8
-10
0
20
40
60
80
100
レーザバイブロメータ正規化速度（%）
100Hz
1kHz
10kHz

図５

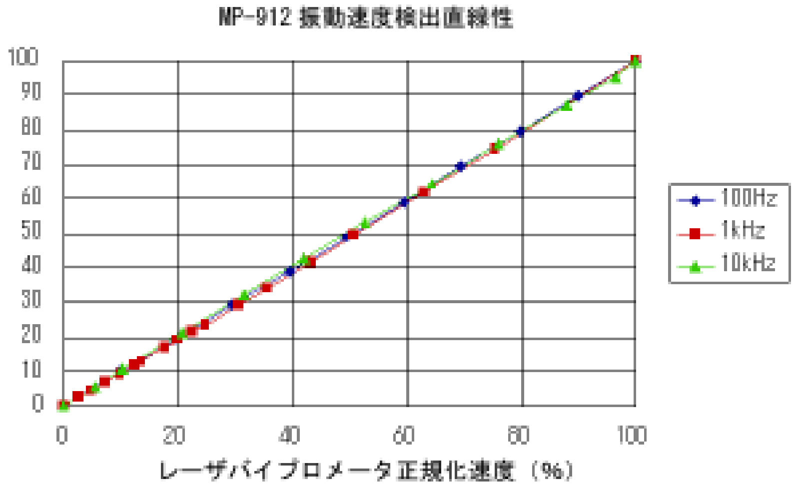

MP-912 振動速度検出直線性
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
20
40
60
80
100
100Hz
1kHz
10kHz
レーザバイブロメータ正規化速度（%）

図 6

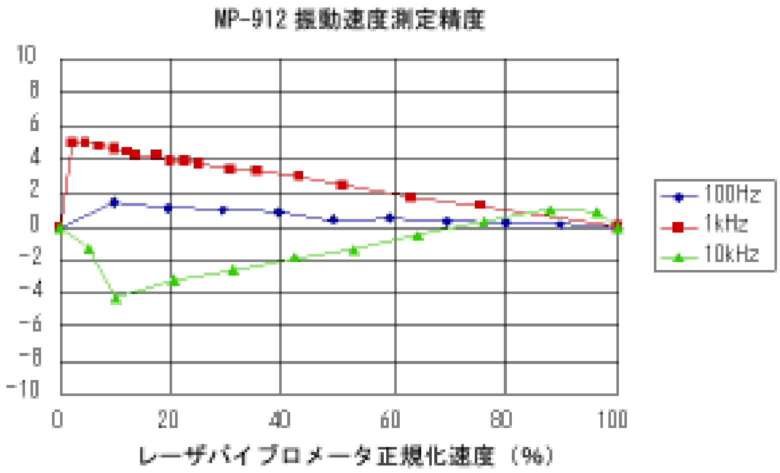

MP-912 振動速度測定精度
10
8
6
4
2
0
-2
-4
-6
-8
-10
0
20
40
60
80
100
100Hz
1kHz
10kHz
レーザバイブロメータ正規化速度（%）

図 7

３．電磁加振器の加振力レスポンス及び直線性

測定ブロック図を図８に示す。

電磁加振器の発生「力」測定ブロック図

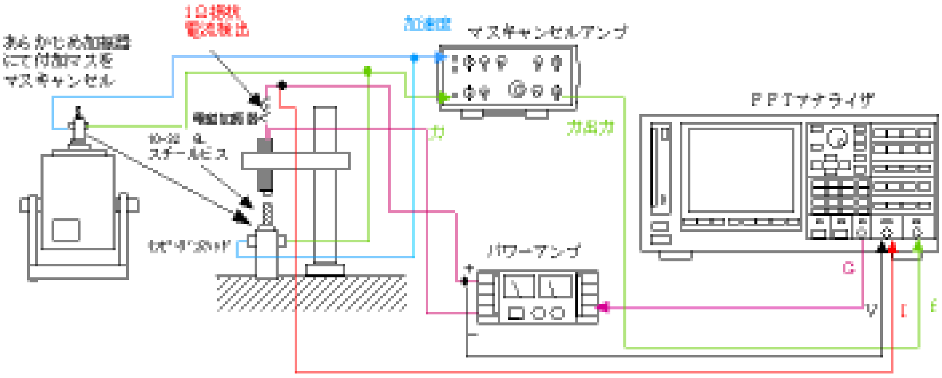


図８

あらかじめ加振器で付加マスをマスキャンセルしておき、図のように機械系を構成。
電磁検出器と同じものを使用。インピーダンスヘッドの出力、電磁検出器に流れる電流を測定。MP-910、MP-912 のギャップが異なるため発生「力」が異なる。このため加えた電圧最大値で横軸を正規化。
インピーダンスヘッドの出力最大値で正規化してある。

①　周波数特性

２種の加振器の力レスポンスを図９、電流レスポンスを図１０、電流／力の周波数応答関数を図１１に示す。

直流抵抗１ｋΩの MP-910 は自身のインピーダンスの影響を受け、力レスポンスに約８ｋＨｚの谷を持つ。このため電流／力の周波数応答関数はこの周波数に山を持つ。
これと比較して直流抵抗１００Ωの MP-912 は１０ｋＨｚの範囲では、比較的素直な特性を持つ。
この事から従来行われてきた、電磁加振器への入力電圧対応答電圧よりも電磁加振器電流対応答電圧の方が共振周波数の左右対称性が得られることがわかった。（図１２）

加振力については図からは正規化しているので読みとれないが、その加振力はいずれも 0.05N/W（att 1 mmGAP,1kHz）程度であるが、実用的な 0.5N の力を得るためには、MP-910 では約 100V、MP-912 では約 38V の電圧が必要である。

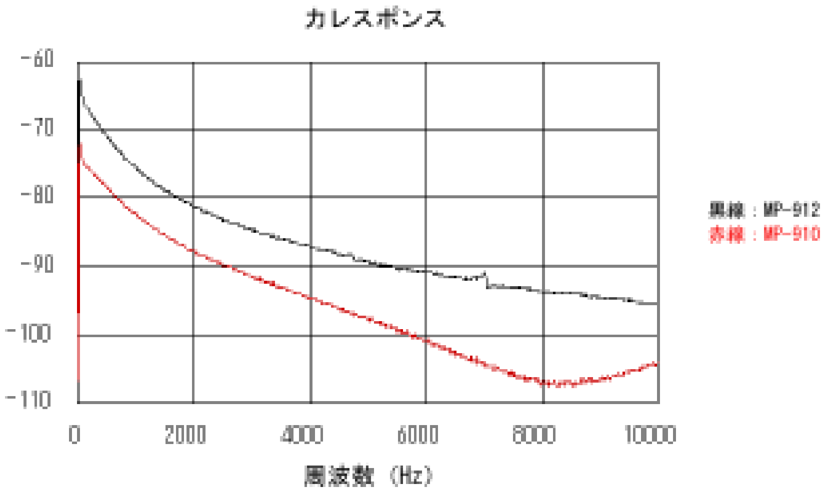

力レスポンス
-60
-70
-80
-90
-100
-110
0
2000
4000
6000
8000
10000
周波数（Hz）
黒線：MP-912
赤線：MP-910

図９

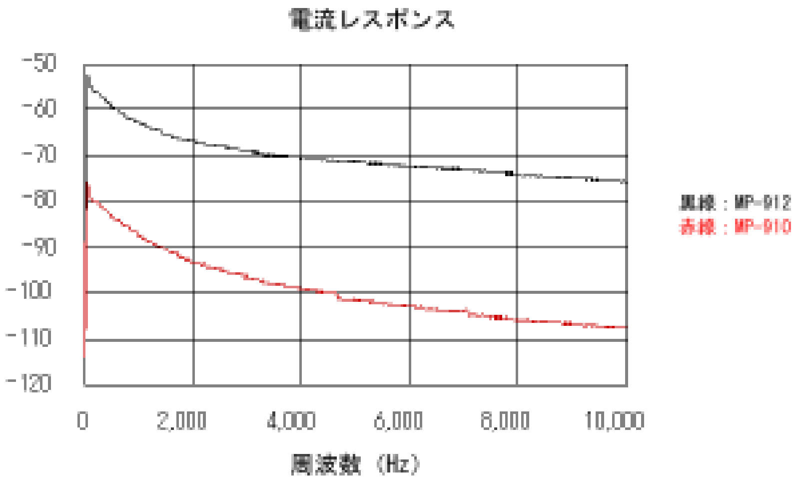

電流レスポンス
-50
-60
-70
-80
-90
-100
-110
-120
0
2,000
4,000
6,000
8,000
10,000
周波数（Hz）
黒線：MP-912
赤線：MP-910

図１０

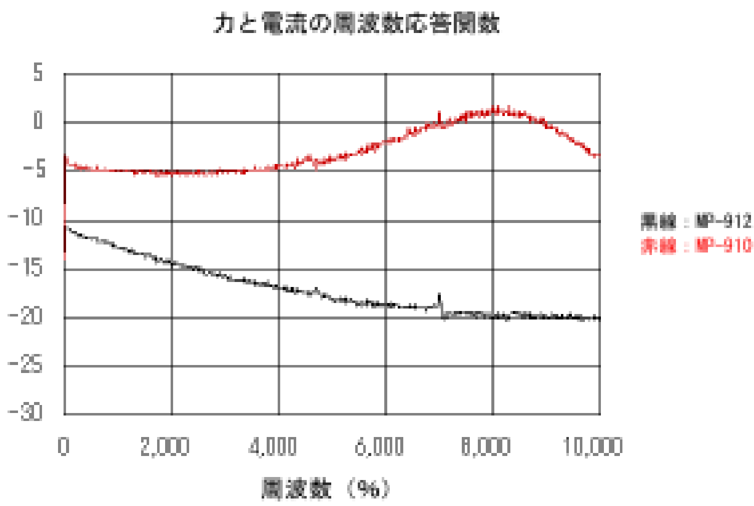

力と電流の周波数応答関数
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
-30
0
2,000
4,000
6,000
8,000
10,000
周波数（%）
黒線：MP-912
赤線：MP-910

図１１

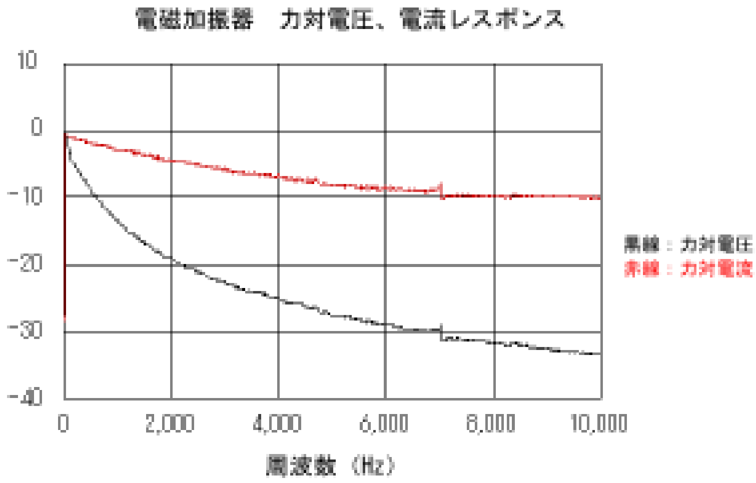


図１２

②　加振直線性

電磁加振器に加える電圧を徐々に変えてゆき、加振直線性を測定測定した。その特性を図１３～図１６に示す。かなりの直線性であることがわかる。

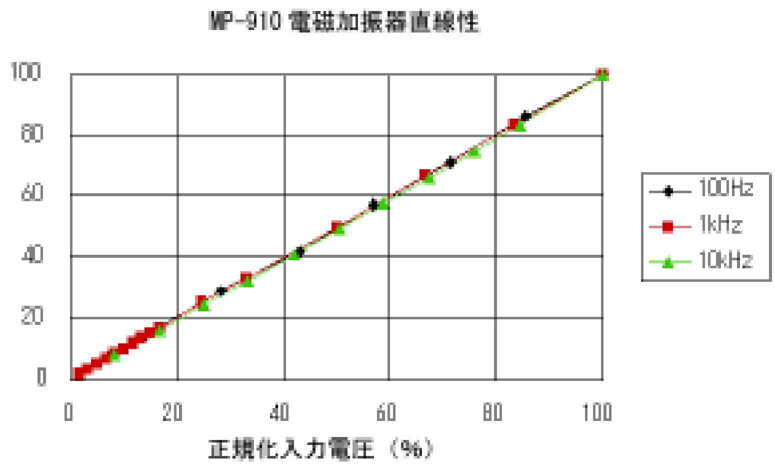


図１３

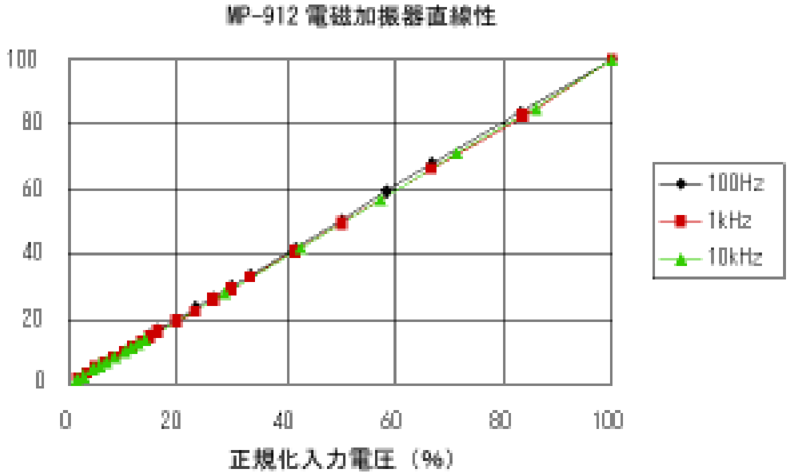

MP-912 電磁加振器直線性
100
80
60
40
20
0
0
20
40
60
80
100
正規化入力電圧（%）
100Hz
1kHz
10kHz

図１４

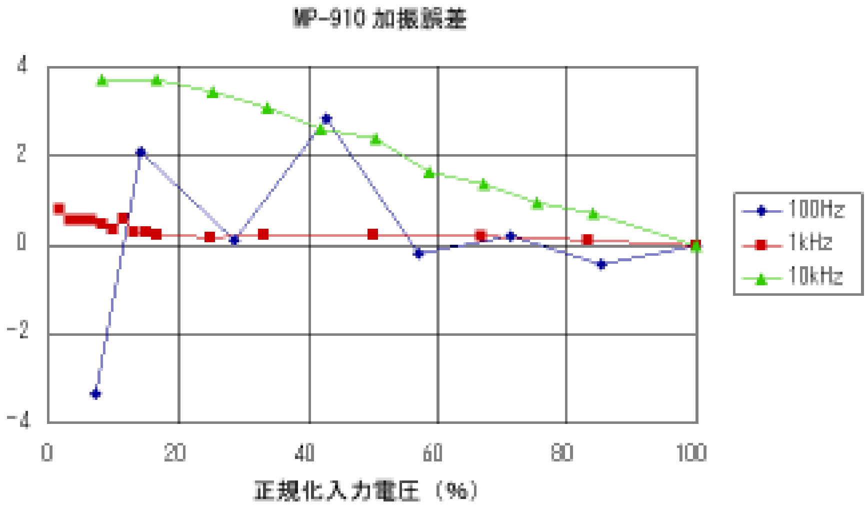

MP-910 加振誤差
4
2
0
-2
-4
0
20
40
60
80
100
正規化入力電圧（%）
100Hz
1kHz
10kHz

図１５

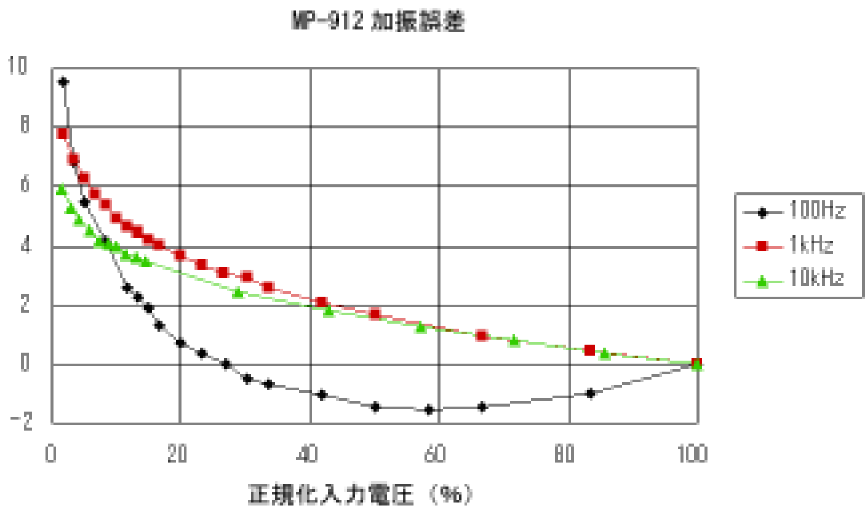

MP-912 加振誤差
10
8
6
4
2
0
-2
0
20
40
60
80
100
正規化入力電圧（%）
100Hz
1kHz
10kHz

図１６

結論

１．電磁検出器・加振器の特性は従来からあまり測定例が無く、片持ち梁法では頻繁に使用されるが、電磁加振器への入力を商にして本当に力を測っているのか、との疑問から本測定を行った。その結果電磁加振器への入力電流を測定する方が、電圧を測定するよりもより「力」に近いことがわかった。

２．速度検出精度・速度発生精度については思ったよりも高精度であることがわかった。

３．当社製の２種類の電磁検出器・加振器を測定したが、他社製のものも今後測定する予定である。

４．電磁加振器としては、コイルをたくさん巻くと大きな加振力が得られそうなものであるが、これはインピーダンスを上げてしまって、逆効果である。太い線を適量巻き（1000 回程度）直流抵抗を数十Ωにすれば良いことがわかった。

ONO SOKKI