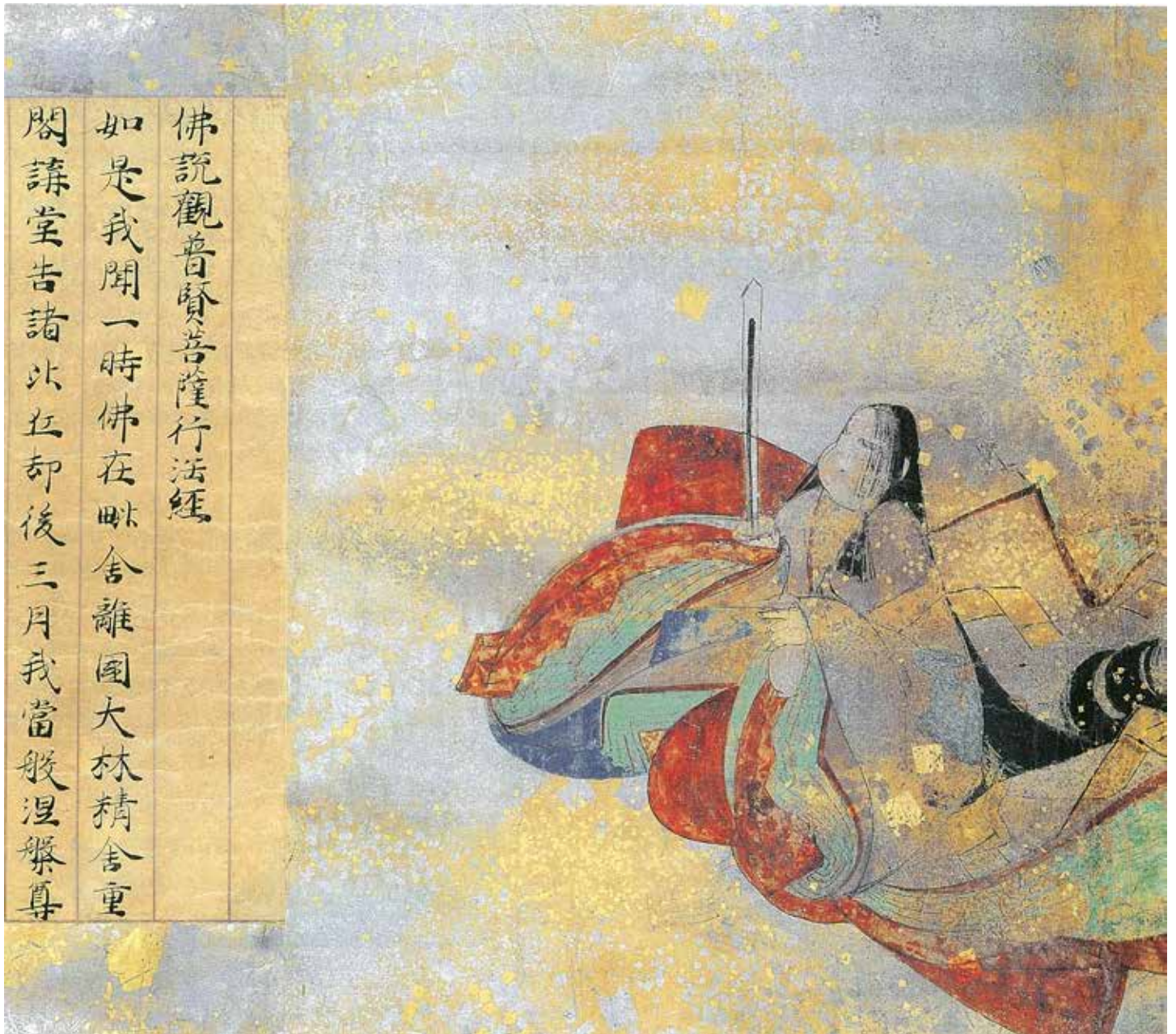


Mech D & A News

Mechanical Design & Analysis Co.

May 2006



平家納経・観普賢経, 1164.

【特集】 粘弾性解析における諸問題

(その4 粘弾性計測とFEMによる制振性能の直接評価)

*FEM Consulting Services for Engineering Practice
Find Innovation in Tradition 2008-2019*

【1】はじめに

樹脂材料はプラスチックという名前が示すように、その可塑性に特徴がありますが、同時に常用の温度域においても粘弾性の性質を示します。粘弾性という特性を簡潔に言えば、その弾性率が時間あるいは周波数に対して変化する材料です。従来、樹脂材料は金属の代替材料としての面が強調されてきましたが、今日では塑性と粘弾性の多様な組み合わせの下で、樹脂特有の機能性が注目されるようになってきています。

弊社では、樹脂材料の粘弾性特性に注目し、その実用的な計測と汎用 FEM への適用について数年にわたって開発を続けてきました^{(1)~(3)}。今回は高減衰の制振樹脂を貼り付けた鋼板の振動特性について実験と解析を行い、粘弾性 FEM によってその特性を直接的に評価できるように試みた例を報告します。

【2】制振材料と減衰性能の評価

粘弾性材料は入力に対して時間的な応答の遅れを与えるため、力学的には減衰の作用を示します。モバイル機器の耐衝撃設計や自動車の静音設計の分野では、剛性を保ちつつ減衰を付与するために、鋼板と粘弾性材料を組み合わせるような方策が用いられます。本格的な工業材料としては制振鋼板と呼ばれる特殊鋼板が製造されていますが、より簡易な市販品として、Fig.1 に示すような積層構造をもった制振材が開発されています^{(4) (5)}。

Fig.1(a)に示す拘束型と呼ばれるタイプは、拘束層と基板の間に薄い粘弾性樹脂の層を置いた構造です。この構造に曲げ変形を加えると、樹脂層に比べて上下の板の剛性が大きいため、拘束層と基板はそれぞれ独立に変形します。この結果、図に示すように樹脂層にはせん断変形がもたらされますが、樹脂層は薄いため発生するせん断ひずみは大きく、したがって大きな減衰効果が得られるとされています。

一方、Fig.1(b)に示す非拘束型と呼ばれるタイプは、単に樹脂層が基板の上に貼り合せられた構造となっています。この構造に曲げ変形を加えると、樹脂層は基板の表面に発生している伸びに追随して変形します。すなわち、図に示すように単純な伸びひずみによる変形となります。一般に、基板の曲げによる表面の伸びひずみは微小であるため、樹脂層の変形も小さく、高い減衰効果を得ることは難しいとされています。

この種の制振材の減衰性能を評価するにあたっては、実験的に損失係数を求めることが主流であったと見られ⁽⁶⁾、JIS にも規格が定められています^{(7) (8)}。この規格では、細長い板状の試験片の寸法（長さ 250mm 程度、幅 10~25mm、厚さ 0.8~3.2mm）を大まかに定め、吊下げ、単純支持、片端固定などの境界条件の下で、モード減衰を損失係数のかたちで評価することになっています。

しかしこれらの方法では、観測されたそれぞれの固有振動モードにおいて、その固有の損失係数を知ることはできても、粘弾性樹脂がどのように変形し減衰の効果を発現しているのかを知ることはできません。また鋼板に発生している曲率の分布も一様ではないため、減衰の大きさを損失係数としてマクロにとらえることはできても、どの領域の樹脂が効果的に

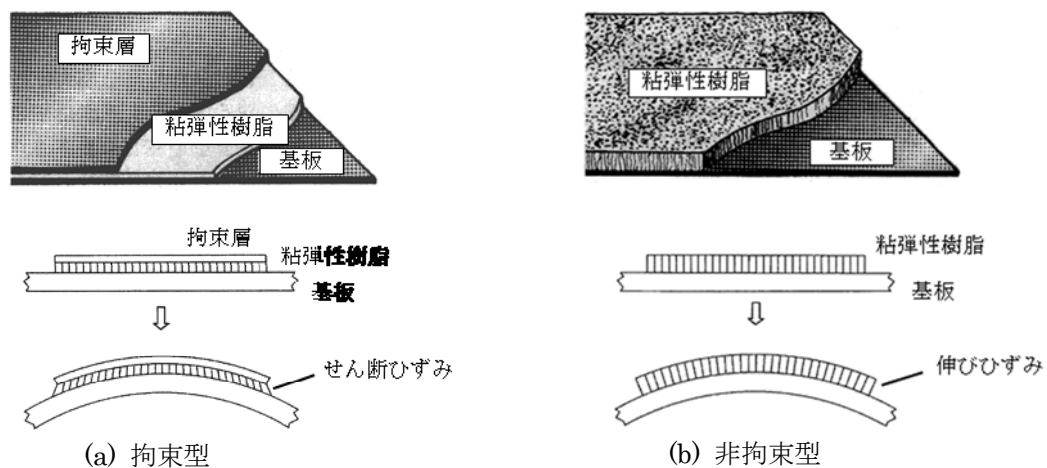


Fig.1 代表的な制振材の構造と曲げによる変形（参考文献(5), 4.6.3, 新田より引用）

作用しているかといった細部にわたる評価は困難でした。したがって、たとえ樹脂の粘弾性特性が計測されていたとしても、それを鋼板の振動モードとの相関において明瞭に言及することが非常に難しかったと言えます。

これに対して今回の手法では、まず樹脂の特性を動的粘弾性計測によって実測し、これを材料モデルとして入力した FEM によって周波数応答解析を行います。この結果、樹脂の材料特性から制振鋼板の減衰を直接的に評価することが可能となりました。一方、実際の試験体に対してはインパルスハンマによるモーダル実験を行い、伝達関数を求めました。FEM によるシミュレーションの結果は、この実験結果と良好な一致を示し、今回の解析手法が妥当なものであることを確認することができました。

【3】 粘弾性の基礎事項

3.1. 粘弾性材料の一般化マクスウェルモデル⁽¹⁾

粘弾性特性のモデル化は、一般化マクスウェルモデルを適用するのが一般的です。このモデルは、複数の単純マクスウェルモデルを並列に配置し、広範囲にわたる材料の時間特性を近似的に表現することを意図しており、次式のように定義されます。

$$E_r(\tau) = E_e + \sum_{i=1}^N E_i \exp(-\tau/\tau_i) \quad \dots (1)$$

ここで $E_r(\tau)$ は緩和弾性率と呼ばれ、ひずみを一定に保った応力緩和の条件下で定義される弾性率です。 E_i , τ_i , E_e は、マクスウェルモデルを構成するばねとダッシュポットの係数であり、 N はその項数です。また τ は時間であり、時間によって $E_r(\tau)$ が減衰する挙動が表現されます。

3.2. 粘弾性の動的特性⁽¹⁾

粘弾性材料は、時間に対してだけではなく周波数に対しても異なる弾性率を示します。動的粘弾性の特性は、次式で定義されます。

$$E^*(\omega) = \frac{\sigma^*}{\epsilon^*} E'(\omega) + iE''(\omega) \quad \dots (2)$$

$E^*(\omega)$ は複素弾性率と呼ばれ、周期関数であるひずみ ϵ^* に対する応力 σ^* の比によって与えられます。 E' , E'' , $\tan\delta$ はそれぞれ貯蔵弾性率、損失弾性率及び損失正接と呼ばれ、貯蔵弾性率は弾性的な性質を、損失弾性率や損失正接は粘性的なエネルギー損失を示します。複素弾性率は角周波数に対する関数であるので、一般化マクスウェルモデルのような緩和形式のモデルに帰着させるためには、周波数と時間の変換を行う必要があります。結果だけを示すと、(2)式における E' , E'' を、(1)式の一般化マクスウェルモデルの係数で表すと以下ようになります。

$$\begin{aligned} \text{貯蔵弾性率} \quad E'(\omega) &= E_e + \sum_{i=1}^N \frac{\omega^2 \tau_i^2}{1 + \omega^2 \tau_i^2} E_i & \text{損失弾性率} \quad E''(\omega) &= \sum_{i=1}^N \frac{\omega \tau_i}{1 + \omega^2 \tau_i^2} E_i \\ \text{損失正接} \quad \tan\delta &= \frac{E''(\omega)}{E'(\omega)} & & \dots (3) \end{aligned}$$

3.3. 時間-温度換算則⁽²⁾

高分子材料は、一般に非常に強い温度依存性をもち、ガラス転移点と呼ばれる特定の温度領域では、数千倍におよぶ弾性率の変化を示します。このような特性に現実的に対処するために、例えば温度を上げることが緩和挙動を速めることに等しい、あるいは逆に温度を下げることで緩和挙動を遅くすることに等しいという仮定の下に、以下のような簡単な式を用いて温度と時間を換算する試みが行われてきました。このような仮定を熱レオロジー的に単純と呼び、多くの高分子材料に適用可能であることが知られています。

$$\alpha_T = t/t' \quad \dots (4)$$

ここで t は任意の温度 T [K] における時間, t' は基準温度 T_0 [K] における時間です. すなわち, 熱レオロジー的に単純な材料の変形は全ての時間領域で同一の温度依存性を持ち, 温度が基準温度 T_0 から任意の温度 T に変わると, その緩和時間は一律に T_0 における緩和時間の α_T 倍になることを意味しています. α_T を時間-温度換算因子と呼びます.

この関係を利用すれば, 異なる温度条件の下で観測された挙動を, ある特定の基準温度での挙動に書き直すことが可能となります. この特定の基準温度下での挙動をマスターカーブと呼びます. 時間-温度換算則の具体的な例として, WLF 式を以下に示しましょう.

$$\log \alpha_T = \frac{C_1(T - T_R)}{C_2 + (T - T_R)} \quad \dots (5)$$

ここで, $T_R = T_g + 50$, $C_1 = 8.86$, $C_2 = 101.6$

ここで T_g はガラス転移温度, すなわちガラス状の弾性応答から粘弾性応答へ材料が遷移する温度です. いま T_g よりも 50K 高い温度を T_R として採用すると, 非晶性の高分子材料に対して C_1 と C_2 はおよそ(5)式に示すような値を有することが知られています.

【4】 制振材の動的粘弾性の計測

4.1. 制振材の構成

Fig.2 に対象とする制振材を示します. この部材は, 自動車室内の騒音低減を目的として開発された材料であり, 薄板状に加工された積層構造の製品です⁹⁾. その構成は3層からなり, 最下層は粘着性を有する接着剤です. ユーザは, この接着剤によって製品を自動車のドアパネルなどへ取り付けることができます.

また最外層のアルミニウムの板は決して厚くありませんが, 単に外表面を保護するだけでなく, 基板との間で制振樹脂をはさみ込む構造となります. すなわち Fig.1(a)に示すような拘束型の制振構造が実現されます. この結果, 簡単な構造であるにもかかわらず, 後述の解析結果に示すように明瞭な減衰性能の向上を見ることができます. なお, 間にはさまれた制振樹脂の組成は明らかにされていません.

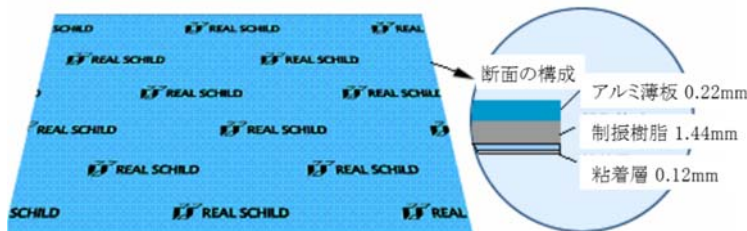


Fig.2 制振材の構成 (TMREAL SCHILD, 積水化学工業⁹⁾)

4.2. 動的粘弾性計測

制振材を構成する素材のうち, 制振樹脂と粘着層について動的粘弾性の計測を行いました. 計測装置には, ティー・エイ・インストルメンツ・ジャパン社の動的粘弾性計測装置 RSAIIIを使用しました. RSAIIIは試験片に定常的な正弦波ひずみを与えて, 応答力の振幅と位相差を計測し, E' , E'' , $\tan\delta$ を算出する機能を有します. Table1 に, 計測の条件を示します. それぞれの樹脂は, 薄板状の矩形試験片となるように製品から切り出しました. 計測にあたっては, 試験片を装置の

Table 1 動的粘弾性計測の条件

	単位	制振樹脂	粘着層 (接着剤)
試験片寸法	mm	21.9×4.15×1.44 [†]	19.9×4.15×0.12 [†]
試験温度範囲	°C	-10 ~ 25	-10 ~ 25
温度上昇率	°C/min	2	2
角周波数	rad/sec	1, 3.16, 31.6, 100	1, 3.16, 31.6, 100
ひずみ振幅	—	9.79×10 ⁻³ ~ 7.35×10 ⁻¹	7.14×10 ⁻² ~ 8.81×10 ⁻²

恒温槽内に置き、連続的に昇温しながら5種類の周波数の下で E' , E'' , $\tan\delta$ を測定します。ひずみの振幅は、線形粘弾性挙動を示す範囲となるように微小に設定しました。RSAIIIは、载荷方法として各種のモードを用意していますが、今回は最も標準的な引張りのモードによって計測しました。

4.3. 計測結果

Fig.3に、横軸に温度をとり、制振樹脂の E' , E'' , $\tan\delta$ を計測した結果を示します。図中、1, 3.16, 10, 31.6, 100 rad/secの周波数ごとに5つの曲線が得られています。測定した周波数ごとの曲線をシフトさせ、ある特定の温度場（基準温度）における E' , E'' と周波数の関係が一本の曲線、すなわちマスターカーブとなるように、(5)式の T_g を最適化計算により決定しました。マスターカーブの作成方法は、既刊の弊社ニュースレターを参照下さい⁽²⁾。

Fig.4に、横軸に周波数をとり、温度24°Cにおける制振樹脂のマスターカーブを示します。また Fig.5には、同様の手順により求めた粘着層のマスターカーブを示します。制振樹脂および粘着層の T_g はそれぞれ-27.3°Cおよび-39.9°Cでした。

Fig.4から、制振樹脂は人間の可聴範囲である20Hzから20kHzの周波数領域で $\tan\delta$ が大きくなるように設計されていることがわかります。

Fig.4と Fig.5には、自動化されたProny級数展開によるカーブフィットの結果をあわせて示しています。このカーブフィットによって汎用FEMに入力することができる一般化マックスウェルモデルの係数が同定されます。

一連の手順については、既刊の弊社ニュースレターを参照下さい⁽³⁾。

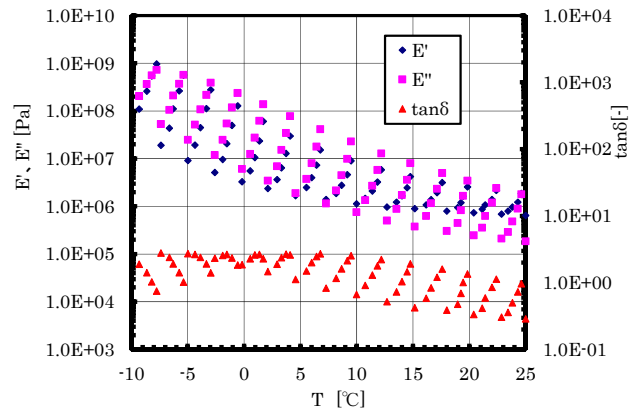


Fig.3 動的粘弾性計測の結果 (制振樹脂)

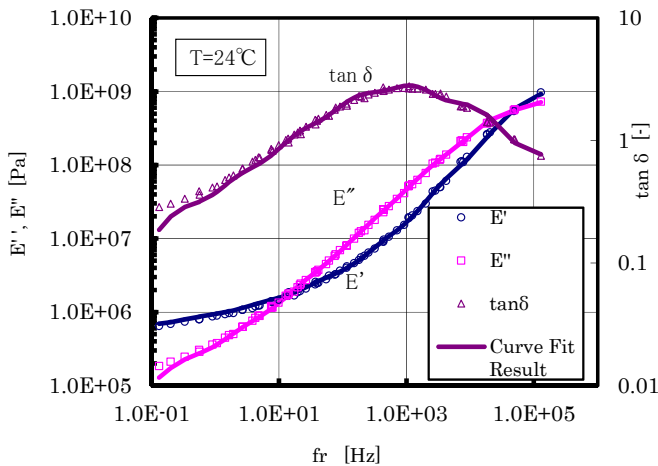


Fig.4 マスターカーブ (制振樹脂)

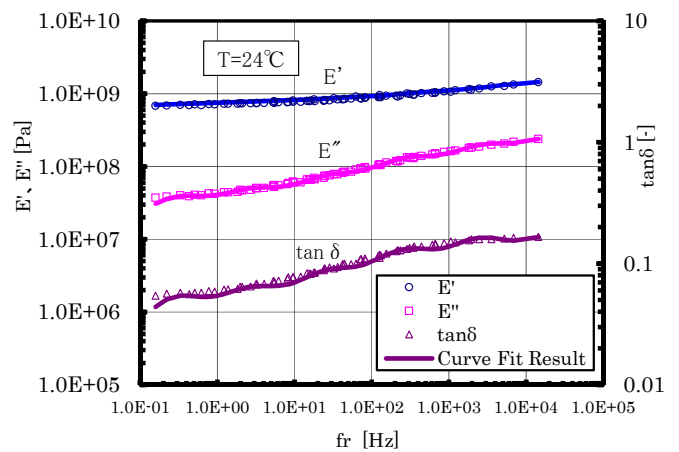


Fig.5 マスターカーブ (粘着層)

【5】 モーダル実験による伝達関数の計測

上記の制振材を表面に貼り付けた鋼板を対象として、インパルスハンマによる伝達関数の計測を行いました。Fig.6に計測の状況を示します。鋼板は炭素鋼製で200×150×5.3mmの寸法を有し、自由振動の状態が得られるように、ゴムによって上部の2ヶ所を吊り下げられています。

計測にあたっては、Fig.6に示すようにマーキングした1ヶ所に加速度センサを取り付け、その他の点を順次ハンマで打撃しました。周波数領域は0~2kHzを対象とし、ハンマの打撃力および鋼板に発生した加速度を計測しました。測定時の雰囲気温度は24°Cでした。

Fig.7 に伝達関数（加速度 / 打撃力）の計測結果を示します。 図中、鋼板のみ、また鋼板+制振材の2つのケースについて伝達関数の測定結果を示します。 制振材を貼り付けた場合、共振点近傍において伝達関数の低下が顕著にみられました。 また鋼板だけの状態における1~5次までの固有振動数として、約610、720、1310、1400、1750Hzが得られました。 Fig.8に解析による固有振動モードを示します。 実測値と良い一致が得られています。

なお制振材を取り付けた場合、固有振動数における応答倍率は約30dBであるので、対応する臨界減衰比は $\zeta=0.01$ 程度と見込まれます。（応答倍率 $A=1/(2\zeta)$ として、 $\zeta=0.01$ のとき、 $20\text{Log}A=33\text{dB}$ となります。）

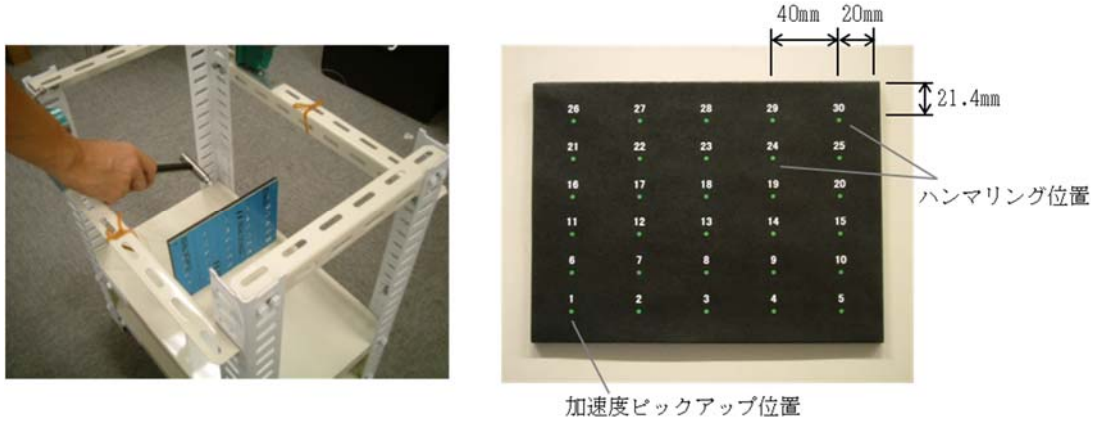


Fig.6 インパルスハンマによる伝達関数の計測

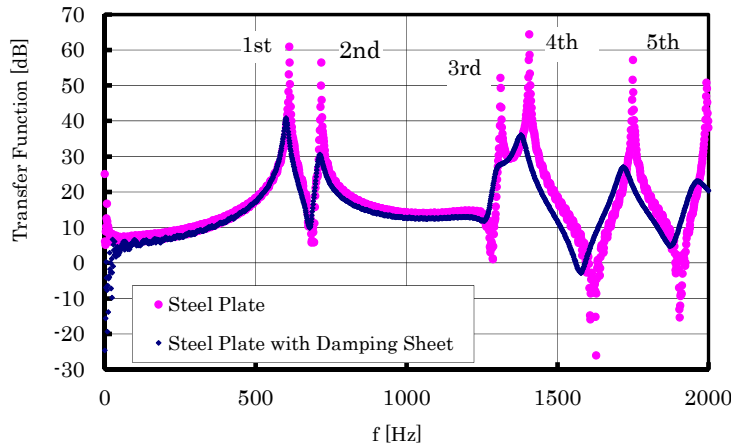


Fig.7 制振材の有無による伝達関数の比較（実験結果）

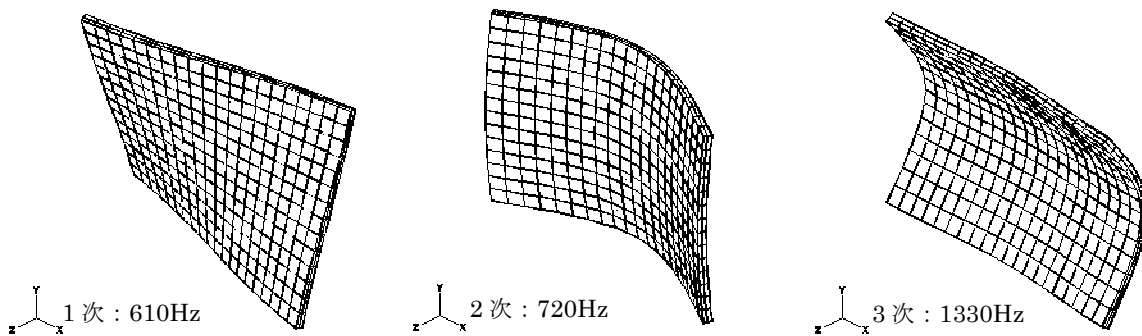


Fig.8 鋼板単位の固有振動モード（解析結果）

【6】粘弾性を考慮した周波数応答解析

6.1. 旧来の方法（臨界減衰比による解析）

上記のような加振実験を通じ、旧来の研究では固有振動モード毎の臨界減衰比（損失係数）を求め、これを調和応答解析（モーダル法による周波数応答解析、Abaqusでは*STEADY STATE DYNAMICS）に適用するような方法が主流と考えられます（例えば参考文献(5), pp.708~718）。試みに、今回の実験に用いた鋼板をFEMでモデル化し、2kHz以下の領

域で一様な臨界減衰比 $\zeta=0.01$ を仮定してモーダル法による周波数応答解析を実行した例を Fig.9 に示します。実験から推定した臨界減衰比を厳密に与えれば、解析と実験をほぼ完全に一致させることができますが、今回のような簡単な系では一様な減衰比を与えることによっても伝達関数を大まかに再現できることがわかります。

ただし与えている減衰比と材料の関係は明らかではないため、たとえ樹脂の粘弾性特性が計測されていたとしても、鋼板の振動モードとの相関を明瞭に言及することは非常に難しかったと言えます。

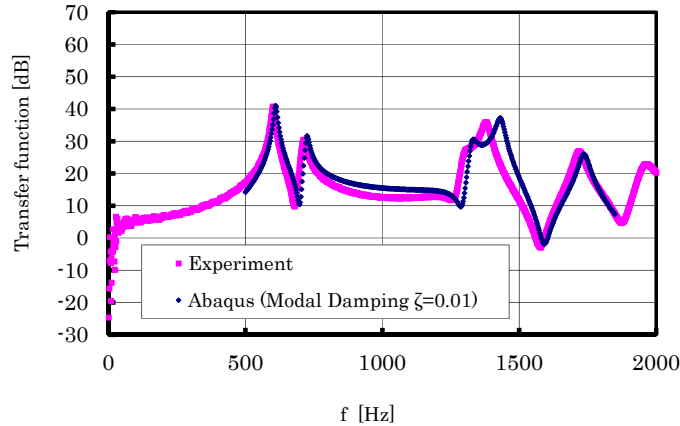


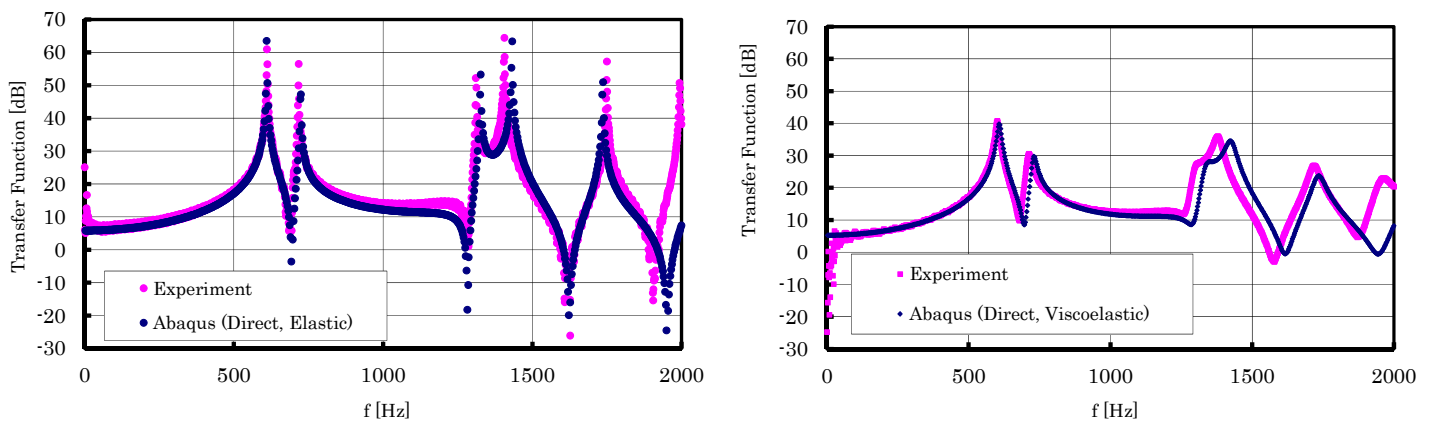
Fig.9 一様な臨界減衰を与えた解析と実験結果の比較

6.2. 今回の方法（粘弾性材料モデルによる解析）

今回の手法では、先に述べたようにまず樹脂の特性を動的粘弾性計測によって実測し、汎用 FEM の材料データとするために一般化マックスウェルモデルの係数を同定します。FEM のなかでは樹脂と鋼板をそのままメッシュ分割し、樹脂部分にはこの粘弾性の特性を与え、周波数応答解析を行います。

Abaqus では、モーダル法以外に直接法による周波数応答解析*STEADY STATE DYNAMICS,DIRECT が用意されており、粘弾性材料モデルの入力(*VISCOELASTIC, FREQUENCY=PRONY)を可能にしています。この機能を利用すると、材料の粘弾性による減衰の効果を含む応答がそのまま解析結果として出力され、損失係数を求めることができます。すなわち、損失係数はシミュレーションの結果であり、従来のように入力データとして要求される量ではないというのがこの方法の特徴です。

Fig.10 に解析結果を示します。鋼板及び制振材の最外層を構成しているアルミ薄板は弾性体とし、一般的なヤング率の値を適用しました。制振樹脂および粘着層については、Fig.4 および Fig.5 に示した粘弾性特性を材料モデルとして与えました。伝達関数に関する実測値と FEM 解析の結果は良い一致を示しており、今回の手法の妥当性が確認できました。



(a) 鋼板のみ（弾性）

(b) 鋼板制振材（粘弾性）

Fig.10 粘弾性材料モデルを与えた解析と実験結果の比較

6.3. 制振材の拘束方法の比較

次に、Fig.1 に示したような拘束型と非拘束型の制振材の減衰効果の違いを FEM によって確認することを試みました。解析モデルとしては、外表面のアルミ部分を除去し、非拘束型の制振材を代表させるものとししました。Fig.11 に、解析結果を示します。試験体の総厚さ 1.78mm に対して、除去したアルミ層の厚さはわずかに 0.22mm であったにもかかわらず、共振点における伝達関数は顕著に低下し、アルミ層による拘束の効果が大いことがわかりました。

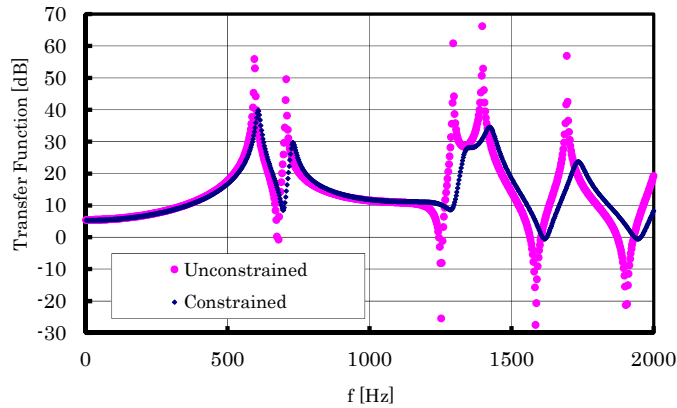


Fig.11 拘束型と非拘束型の制振性能の比較 (解析結果)

【7】 結論

制振材を貼り付けた鋼板を対象とし、樹脂の粘弾性特性から減衰を含む伝達関数を直接的に評価する手法を開発しました。粘弾性の材料モデリングについては、動的粘弾性計測装置による実験結果から汎用 FEM の入力データとする方法を既に確立している^{(10),(11)}ので、制振材料の現実的なシミュレーションが可能になったとすることができます⁽¹²⁾。

謝辞

本研究の実験モダ解析の実施にあたっては、特定非営利活動法人・非線形 CAE 協会、井戸浩登氏の御指導をいただきました。厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) 粘弾性解析における諸問題 (その 1 Maxwell モデルの基本的な性質), Mech D&A News, vol.2005-2, 株式会社メカニカルデザイン, 2005.
- (2) 粘弾性解析における諸問題 (その 2 時間-温度換算則とマスターカーブ), Mech D&A News, vol.2005-3, 株式会社メカニカルデザイン, 2005.
- (3) 粘弾性解析における諸問題 (その 3 一般化 Maxwell モデルの同定), Mech D&A News, vol.2005-4, 株式会社メカニカルデザイン, 2005.
- (4) 田中ほか, 制振材料その機能と応用, 日本規格協会, 1992.
- (5) 制振工学ハンドブック, コロナ社, 2008.
- (6) 例えば 森脇, 制振鋼板の損失係数に及ぼす振動モードの影響, 自動車技術会シンポジウムテキスト, No.16-06, p.15, 2006.
- (7) JIS G 0602(1993), 制振鋼板の振動減衰特性試験方法.
- (8) 岩壺, 制振鋼板の減衰特性測定のための JIS 規格化について, 日本機械学会論文集(C 編), 59-566, p.2921, 1993.
- (9) TMRREAL SCHILD, 積水化学工業, <http://www.sekisui.co.jp/search/detail-2758.html>
- (10) 藤川ほか, 線形粘弾性特性係数関数の実用的近似法, 日本機械学会論文集(A 編), 72-723, p.1703, 2006.
- (11) 藤川ほか, 緩和スペクトルの平滑性を考慮した貯蔵・損失モジュラスのローニ級数近似法, 材料システム, 25, p.65, 2007.
- (12) 三上ほか, 粘弾性制振素材の実験および解析的研究, 自動車技術会春季大会, 306-20085070, 2008.

表紙：平家納経・観普賢経，巖島神社，1164

株式会社 メカニカルデザイン

〒182-0024 東京都調布市布田 1-40-2 アクシス調布 2 階

TEL 042-482-1539 FAX 042-482-5106

E-mail:comm@mech-da.co.jp <http://www.mech-da.co.jp/>