

一方向繊維強化熱可塑性樹脂の複素弾性率に関する研究

日大生産工 ○染宮 聖人 平山 紀夫

1. 緒言

繊維強化熱可塑性樹脂（以下、FRTP）は高い比強度・比弾性係数と優れた振動減衰性を兼ね備えた構造材料であり、静粛性と燃費向上が求められる自動車等の車体材料への要求が高まっている。その要求に答えるためには、高減衰、低騒音を目指したFRTPの設計初期の段階で、FRTPの振動減衰性を簡便に予測し、評価する必要がある。

FRTPの振動減衰性の計測・評価方法としては、振動試験から減衰比を直接計測する方法や動的粘弹性試験からFRTPの損失正接値を計測して、減衰比を推定する方法が一般的である。しかし、FRTPの材料設計を行う際の設計因子は、強化繊維やマトリックス樹脂の種類、繊維体積含有率など数多く存在する。そのため、これらの設計因子の組み合わせを考慮して試験片を用意し、実物試験を行うことは現実的ではない。

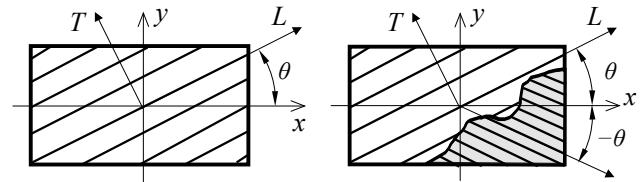
そこで本研究では、既存の線形複合則と古典積層理論（CLT；Classical laminated plate theory）に粘弹性理論を適用することで、FRTPの振動減衰性を予測することを試みた。本報告では、はじめに、既存の線形複合則を複素数に拡張して、一方向繊維強化熱可塑性樹脂（以下、UD-FRTP）の異方性の複素弾性係数を求める式を提案した。次に、CLTを複素数に拡張した積層理論により、任意の配向角の組み合わせを有するFRTPの振動減衰性を予測することを試みた。提案した積層理論の有用性については、有限要素法解析（以下、FEM解析）で得られたFRTP積層板の異方性粘弹性特性と比較することで評価した。

2. UD-FRTPの異方性粘弹性特性の予測

2.1 複素数に拡張した線形複合則の定式化

UD-FRTPの独立な直交異方性弾性係数は5つである。この異方性弾性係数を予測するためには様々な複合則が提案されている。本研究では、UD-FRTPの異方性粘弹性特性を予測するため

に、Hashinが提案した線形複合則（RMH；Rule of mixture of Hashin）を採用した。なお本研究では、UD-FRTPの主軸方向に加えて、繊維方向（L方向）を任意の方向へ配向させたUD-FRTP（以下、Off-axis UD-FRTP）を対象とする。ここで、Off-axis UD-FRTPの模式図をFig.1(a)に示す。Fig.1(a)に示すように、繊維方向と繊維直交方向の座標系（L-T座標）と繊維配向角 θ だけ座標系を回転させたときのx-y座標系の2つの座標系を定義した。



(a) Off-axis UD-FRTP (b) Laminated plates
Fig.1 Orthogonal coordinate system of UD-FRTP.

2.2 複素数に拡張したRMHの定式化

RMHは大きさのまばらな強化繊維がランダムに配置され、その周りにマトリックス樹脂が完全に接着していると仮定した線形複合則である。ここで、UD-FRTPの繊維方向および繊維直交方向における面内の複素弾性係数は次式から求められる。

$$E_L^* = E_{fL} V_f + E_m^* V_m + V_f V_m \left(4(V_{fLT} - V_m^*)^2 \right) \left(\frac{V_m}{K_{fT}} + \frac{V_f}{K_m} + \frac{1}{G_m^*} \right)^{-1} \quad (1)$$

$$E_T^* = 4 \left(\frac{1}{K_T} + \frac{4V_{LT}^{*2}}{E_L^*} + \frac{1}{G_{TZ}^*} \right)^{-1} \quad (2)$$

$$V_{LT}^* = V_{fLT} V_f + V_m^* V_m + V_f V_m (V_{fLT} - V_m^*) \left(\frac{1}{K_m} - \frac{1}{K_{fT}} \right)^{-1} \left(\frac{V_m}{K_{fT}} + \frac{V_f}{K_m} + \frac{1}{G_m^*} \right)^{-1} \quad (3)$$

また、x方向の損失正接 $\tan\delta$ は、次式に示す複素コンプライアンス行列の実部に対する虚部の比で求められる。

$$\tan\delta = \bar{S}_{11}'' / \bar{S}_{11}' \quad (4)$$

2.3 複素数に拡張したCLTの定式化

UD-FRTTPを構造材料として適用した製品の多くが、プリプレグシートを様々な角度で積層したFRTTP積層板である。そのため、UD-FRTTPの粘弾性特性を用いて、FRTTP積層板の異方性粘弾性特性を予測する必要がある。本研究では、FRTTP積層板の弾性理論としてよく用いられるCLTを採用し、次式のように複素数へ拡張した

$$A_{ij}^* = \sum_{k=1}^n \left(\bar{Q}_{ij}^* \right)_k (z_k - z_{k-1}) \quad (5)$$

$$B_{ij}^* = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \left(\bar{Q}_{ij}^* \right)_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \quad (6)$$

$$D_{ij}^* = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n \left(\bar{Q}_{ij}^* \right)_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad (7)$$

ここで、 A_{ij} は面内剛性、 B_{ij} はカップリング剛性、 D_{ij} は面外剛性、 \bar{Q}_{ij} は任意の角度に配向したUD-FRTTP単層の弾性係数、 z は中立面からの距離である。なお、本研究におけるFRTTP積層板の積層構造は対称積層板として計算した。ここで、FRTTP積層板の模式図をFig.1(b)に示す。また、FRTTP積層板の主軸方向における損失正接値は次式で求めた。

$$\tan \delta = A_{11}^{-1}'' / A_{11}' \quad (8)$$

2.4 UD-CFRPの計算条件

FEM解析の対象はUD-CFRTPとし、解析モデルは長さが80mm、幅が50mm、板厚が4mmのFRTTP積層板とした。また、積層数は4層とし、積層構成は鏡対称積層となるように $[+\theta, -\theta, -\theta, +\theta]$ と設定した。なお、各層の纖維配向角 θ は、 $\pm 0^\circ, \pm 20^\circ, \pm 30^\circ, \pm 45^\circ, \pm 60^\circ, \pm 70^\circ, \pm 90^\circ$ の7水準とした。境界条件は、単軸の応力場状態となるように設定し、FRTTP積層板に正弦波を与えることで、UD-CFRTPの粘弾性特性を計測した。FEM解析には、ANSYS 2023R1 Mechanical APDLおよび異方性粘弾性構成則のユーザーサブルーチンを用いて計算した。

3. 解析結果および考察

UD-CFRTPに対して、RMHBで計算した損失正接値とNMTsで計算した損失正接値をFig.2に示す。Fig.2より、マトリックス樹脂の体積弾性係数を複素数に拡張したRMHは纖維配向角が $30^\circ \sim 90^\circ$ でNMTsの結果と一致していないのに対して、マトリックス樹脂の体積弾性係数を実数とし

たRMHBは、どの纖維配向角においてもNMTsと同じ損失正接値を示すことが確認できた。以上より、マトリックス樹脂の体積弾性係数を実数とし、偏差応力成分のみで粘性が発現するように定式化する必要があるとわかった。次に、CLTで計算した対称積層板の損失正接値をFig.3に示す。Fig.3から分かるように、RMHBの損失正接値は纖維配向角が $\pm 49^\circ$ で極大値を取ることがわかった。また、RMHBとFEM解析で得られた損失正接の値を比較すると、全体的な傾向が一致しており、良好な予測精度が示された。

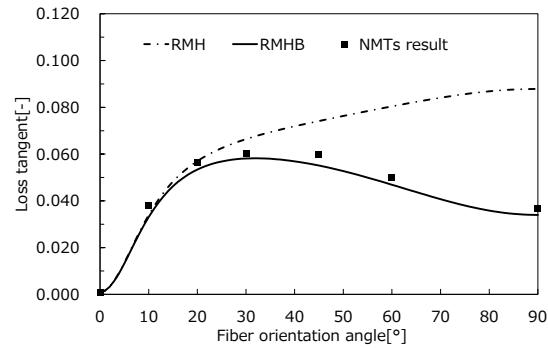


Fig.2 Comparison of off-axis UD-CFRTP between RMH and RMHB.

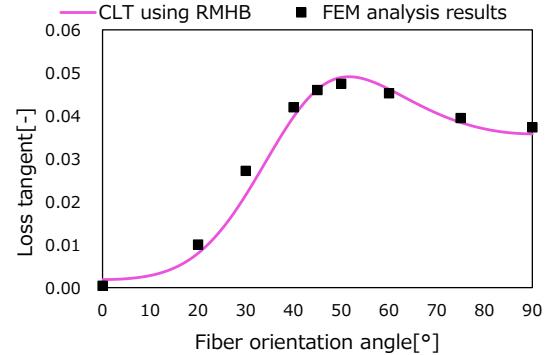


Fig.3 Loss tangent of symmetrically laminated plates using UD-CFRTP.

4. 結言

本研究では、既存の線形複合則とCLTに粘弾性論を適用し、UD-FRTTPの異方性粘弾性特性および減衰比の予測を試みた。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 複素数に拡張した線形複合則の定式化では、マトリックス樹脂の偏差応力のみで粘性が発現するように定式化したRMHBとNMTsの結果は良好な一致を示すことがわかった。
- 2) CLTで計算した対称積層板の損失正接値は、纖維配向角が $\pm 49^\circ$ のとき極大値を取ることがわかった。