

## 繊維強化複合材料の振動減衰特性評価手法の開発

大阪大学・工・生産科学専攻 中西康雅，座古勝

### 1. はじめに

繊維強化複合材料は軽量，高剛性などの材料特性を有し，これらの特長を活かした材料設計が可能であることから，多くの工業分野で応用されている．またコンピュータの計算処理能力の向上とともに，構造解析技術も発達してきており，静的・動的問題に対する構造解析が行われている．その中でも，航空・宇宙構造物の高機能化，高精度化にともない振動解析技術の向上が望まれている<sup>(1)</sup>．

振動問題における現時点での問題点は，振動減衰特性評価手法が確立されていないことである．固有振動数，固有振動モードは，実験や数値計算で容易に把握することが出来る．しかしながら，材料減衰の数値計算モデルもいくつか提案されてはいるものの実用的ではなく，そのメカニズムはまだまだ解明されていない．また振動減衰測定法も規格化されていないのが現状である．さらに材料自体の振動減衰特性を正確に把握しようとする場合，複合材料は軽量であるため，空気による減衰の影響は無視できない．特に繊維強化複合材料は宇宙航空分野で不可欠な構造材料であり，宇宙空間において空気減衰は小さくなると考えられるが，空気減衰がモード減衰比に与える影響を定量的に評価した研究はほとんど行われていないのが現状である<sup>(2)</sup>．したがって，振動減衰メカニズムの解明とともに，実用的な振動減衰モデルの確立が振動問題を考慮した構造設計において重要であると考えられる．

このような背景から，本研究では構造材料の振動減衰特性の評価手法を確立することを目的とする．まず(i)Adamsらのひずみエネルギー理論<sup>(3),(4)</sup>を導入し，振動減衰モデルの定式化を行う．そして，この振動減衰モデルと非線形最適化手法を組み合わせることにより，減衰定数同定手法を提案する．次に，(ii)繊維強化複合材料の基本的な振動減衰特性を把握するため，CFRP単層板を用いて振動試験を行い，繊維配向角とモード減衰比の関係性を明らかにする．また，(iii)減衰定数同定手法をCFRP積層板に適用し，同定手法の有効性を明らかにする．最後に，(iv)材料の振動減衰性能を正確に評価するため真空中で加振実験を行い，空気減衰が振動減衰特性に及ぼす影響を明らかにする．また，(v)空気中と真空中で得られた実験結果から減衰定数を同定し，空気減衰が減衰定数に及ぼす影響を検討する．本年度は(i)～(iii)の項目について研究を実施した．

### 2. 減衰定数同定手法の提案

#### 2-1 ひずみエネルギー理論

本研究では Adams らのひずみエネルギー理論により，振動減衰特性を評価する．ここで，繊維強化複合材料は相対的にせん断剛性が低く，その値が固有振動数やモード減衰比に大きな影響を及ぼすため，板厚方向のせん断変形をモデル化する必要がある．そこで本研究では一次せん断変形理論を導入したシェル要素を用いて，繊維強化積層複合材料のモデル化を行う．

第  $n$  次のモード減衰比  $\zeta_n$  は，最大ひずみエネルギー  $U_n$ ，消散ひずみエネルギー  $\Delta U_n$  より次式で定義される．

$$\zeta_n = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta U_n}{U_n} \quad (1)$$

ここで最大ひずみエネルギー  $U_n$  は，要素座標系における応力-ひずみ関係マトリクス  $D$  と，ひずみベクトル  $\epsilon_n$  より次式で定義される．

$$U_n = \int_V \epsilon_n^T D \epsilon_n dV \quad (2)$$

ここで  $V$  は体積を表す．

また消散ひずみエネルギー  $\Delta U_n$  は次式のようになる．

$$\Delta U_n = \int_V \epsilon_n^T \psi D \epsilon_n dV \quad (3)$$

ただし  $\psi$  は材料座標系におけるラミナの減衰能マトリクスであり，次式のように定義することができる．

$$\psi = \begin{bmatrix} \psi_L & & & 0 \\ & \psi_T & & \\ & & \psi_{TV} & \\ & & & \psi_{VL} \\ 0 & & & & \psi_{LT} \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで  $\psi_L$ ， $\psi_T$  は面内変形に関する減衰定数， $\psi_{TV}$ ， $\psi_{VL}$ ， $\psi_{LT}$  は各座標面のせん断変形に関する減衰定数である．

#### 2-2 減衰定数同定手法

誤差関数  $f_i(x)$  を定義し，減衰定数同定問題を考える．ただし，減衰定数は加振実験により直接求めることはできないため，加振実験により容易に求めることのできるモード減衰比を用いて誤差関数  $f_i(x)$  を定義する．

そこで式(4)における減衰能マトリクスの対角成分を表すベクトルを  $x$  とする．また加振実験により測定された第  $i$  次モードの減衰比  $\zeta_{Ei}$  と， $x$  を用いて有限要素解析により算出された第  $i$  次モードの減衰比  $\zeta_i(x)$  の差を誤差関数  $f_i(x)$  とし，次式のように定義する．

$$f_i(x) = \frac{\zeta_i(x) - \zeta_{Ei}}{\zeta_{Ei}} \quad (5)$$

そして目的関数  $\varphi(x)$  を， $m$  個の誤差関数  $f_i(x)$  を用いて次式で定義する．

$$\varphi(x) = \sum_{i=1}^m f_i^2(x) \quad (6)$$

この目的関数  $\varphi(x)$  を最小化する減衰定数を，非線形最小二乗法により同定する．図1に減衰定数同定手法の流れを示す．

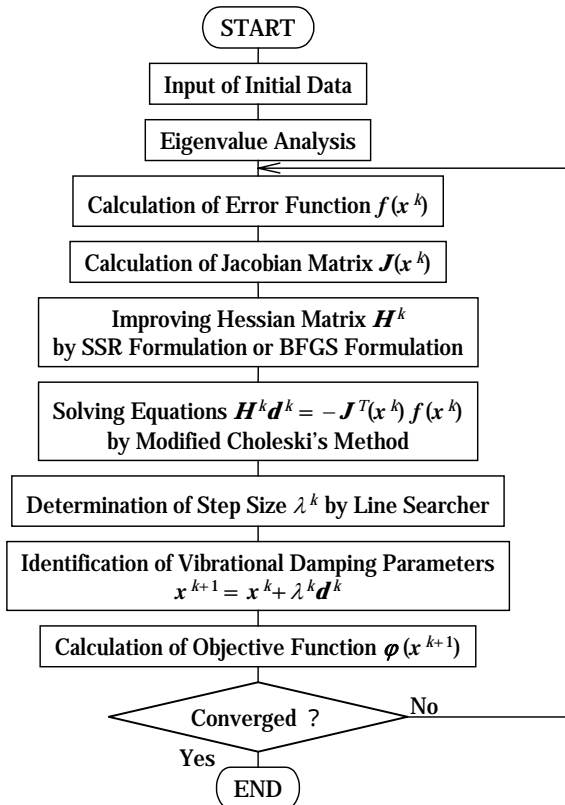


図1 減衰定数同定手法の流れ

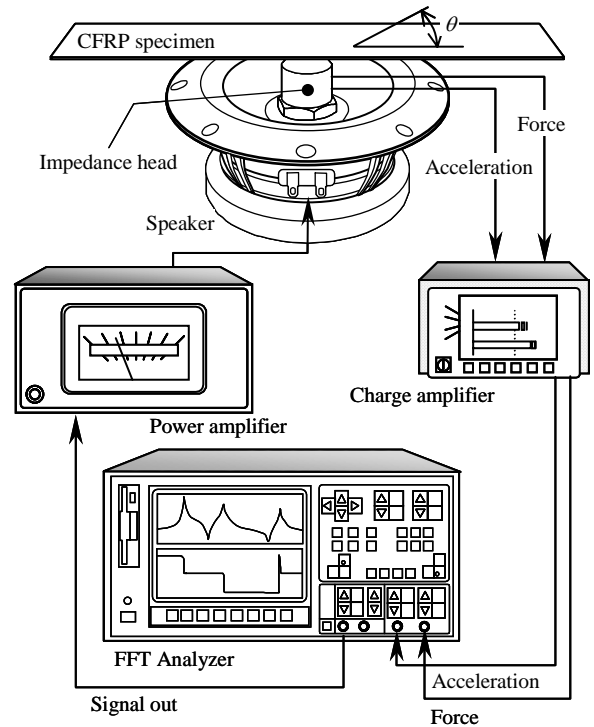


図2 加振実験の概要

### 3. CFRP 単層板の振動減衰特性

#### 3-1 加振実験の概要

加振実験には長さ 199mm，幅 25mm，板厚 1.05mm，密度 1500kg/m<sup>3</sup> の CFRP 単層板試験片を用いた。CFRP 試験片は 1 枚の供試材から繊維配向角が 0°，30°，45°，60°，90° の 5 種類を切り出した。

加振実験法には，図 2 のような材料試験法として採用されることの多い中央支持定常加振法により振動減衰を測定した。そして中央加振法により測定した周波数応答関数をもとに，実験モード解析を行い，各モードの固有振動数とモード減衰比を求めた。

#### 3-2 加振実験結果と考察

図 3 に 3 次モードまでの繊維配向角に対する固有振動数の挙動を示す。図 3 より繊維配向角 0° のとき固有振動数は最大となり，45° まで減少し，その後はほぼ一定となることが分かる。

図 4 に 3 次モードまでの繊維配向角に対するモード減衰比の変化を示す。繊維配向角が 0° から 30° までの間に減衰比が急激に大きくなり，その後はほぼ一定の値となる。また高次に向かうにしたがい，減衰比は大きくなっていることが確認できる。いいかえれば，繊維の力学的特性に依存する 0° のモード減衰比が小さく，樹脂の力学的特性に依存する 90° のモード減衰比が大きくなっていることがわかる。すなわち，振動減衰性能はマトリクスの影響が支配的であると考えられる。

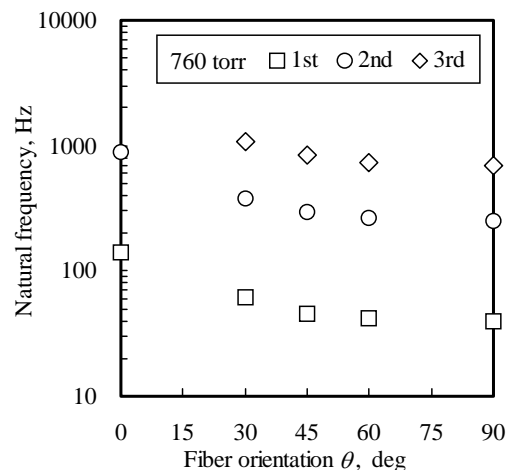


図3 繊維配向角に対する固有振動数の変化

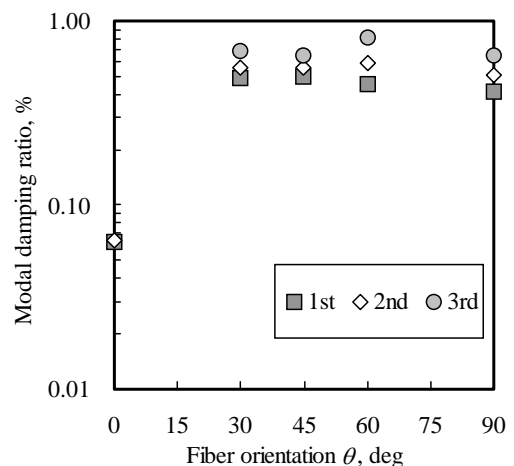


図4 繊維配向角に対するモード減衰比の変化

### 3-3 CFRP 単層板の減衰定数同定

CFRP 単層板の減衰定数を提案手法により同定する。

まず、減衰定数を同定するために、CFRP 単層板の弾性特性を同定する必要がある。そこで実験により得られた 1 次固有振動数から弾性定数  $E_L$ 、 $E_T$ 、 $G_{LT}$  を直交異方性理論により同定した。その結果を表 1 に示す。また実験と解析により得られた固有振動数を比較した結果を図 5 に示す。図 5 より、誤差は最大でも 1%以下であり、同定した弾性定数は、CFRP 単層板の弾性特性を十分表現できていると考える。

次に、加振実験により得られたモード減衰比を用いて、CFRP 単層板の減衰定数  $\psi_L$ 、 $\psi_T$ 、 $\psi_{LT}$  を 1 次モードの減衰比を目標値として同定した。ただし強化繊維方向の特性より  $\psi_{TV} = \psi_{VL} = \psi_{LT}$  とした。

減衰定数同定手法により得られた結果を表 2 に示す。また図 6 に加振実験により測定されたモード減衰比と、同定した減衰定数を用いて有限要素解析により算出した減衰比の比較を示す。これより繊維配向角  $0^\circ$ 、 $30^\circ$  でやや誤差が大きくなっているものの、各繊維配向角に対するモード減衰比の変化が正しく解析されていることが確認できる。また表 2 より、繊維方向の減衰定数  $\psi_L$  に比して、繊維直角方向、面内せん断の減衰定数  $\psi_T$ 、 $\psi_{LT}$  が大きい。すなわち、弾性特性においては繊維の力学的特性が支配的であるのに対し、振動減衰特性はマトリクスの影響が支配的であることを表している。これは 3-2 で考察した内容とも一致する。このことから、本同定手法が繊維強化複合材料の減衰定数同定に有効であることが確認できたと考える。

表 1 同定した弾性定数

$E_L$	$E_T$	$G_{LT}$
112	8.62	4.59

表 2 同定した減衰定数

$\psi_L$	$\psi_T$	$\psi_{LT}$
0.99	5.2	7.3

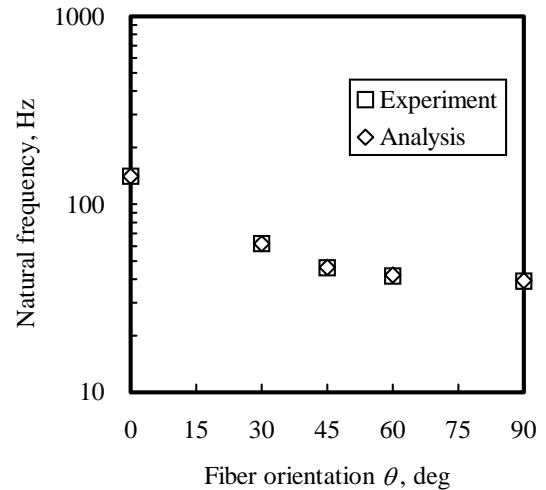


図 5 加振実験と解析により得られた固有振動数の比較

## 4. CFRP 積層平板の減衰定数同定

### 4-1 目的

提案手法を繊維強化積層複合材料に適用し、積層構成によらず提案手法が有効であることを明らかにする。

そこで、同種材料からなる CFRP 対称積層板と逆対称積層板を用い、加振実験により振動特性を明らかにする。そして CFRP 対称積層板の実験結果から、CFRP ラミナの減衰定数を同定する。次に、同定したラミナの減衰定数を用いて、積層構成の異なる逆対称積層板の有限要素解析を行い、モード減衰比を算出する。最後に逆対称積層板の加振実験結果と比較することにより、提案手法の有効性を示す。

### 4-2 対称積層板の減衰定数同定

提案手法を用いて CFRP 積層平板の減衰定数を同定した。試験片は、プリプレグシートをオートクレーブ成形により 8 層積層した CFRP を用いた。寸法  $200 \times 200 \times 1.56\text{mm}$ 、密度  $1535\text{kg/m}^3$  で、積層構成  $[-30_2/30_2/30_2/-30_2]$  の CFRP 対称積層板である。弾性定数を表 3 に示す。

加振実験により得られた固有振動モードとモード減衰比を図 7、8 に示す。次に実験により得られた 6 次までの減衰比を目標値として、提案手法によりラミナの減衰定数を同定した。得られたラミナの減衰定数を表 4 に示す。図 8 は加振実験と減衰定数同定により得られたモード減衰比の比較を示す。図 8 より誤差は最大で 10%程度であり、従来の同定法の 50%程度の誤差と比較すれば、十分な精度の同定と考える。また表 4 より、繊維直角方向と面内せん断成分を表す減衰定数が大きくなっている。これは 3-2、3-3 で得られた結果と同様の傾向を示している。このことから、本手法を繊維強化積層複合材料に適用した場合にも、マトリクスが支配的となる振動減衰特性を正確に評価できていると考える。

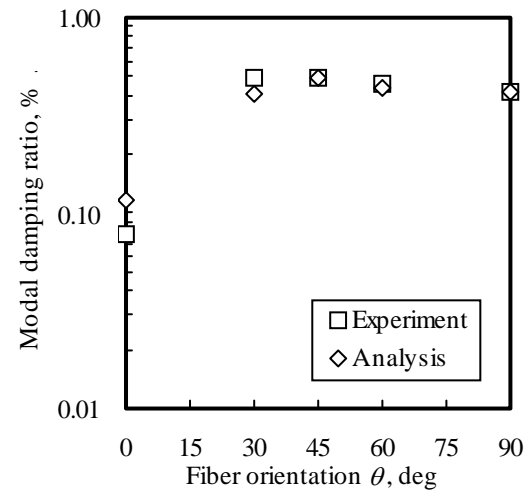


図 6 加振実験と解析により得られたモード減衰比の比較

### 4-3 逆対称積層板の減衰定数同定

4-2 で得られたラミナの減衰定数を用いて、CFRP 逆対称積層板  $[-30_2/30_2/-30_2/30_2]$  の有限要素解析を行い、加振実験結果と比較した。比較のため、同種、同成型法の CFRP を用い、加振実験をおこなった。図 9、10 に 6 次までの固有振動モードとモード減衰比を比較したグラフを示す。

図 10 より、誤差は最大でも 15%であり、比較的よく一致している。このことから本手法により同定したラミナの減衰定数が妥当であると考えられる。また本手法が積層構成に関わらず有効であることが確認できた。

表 3 CFRP の弾性定数

$E_L$	$E_T$	$G_{LT}$	$\nu_{LT} = \nu_{TV}$
117	7.84	4.60	0.30

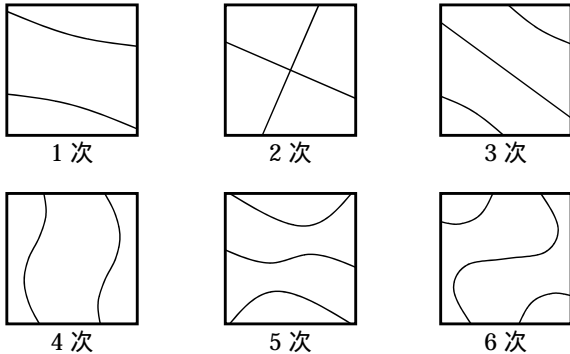


図 7 固有振動モード

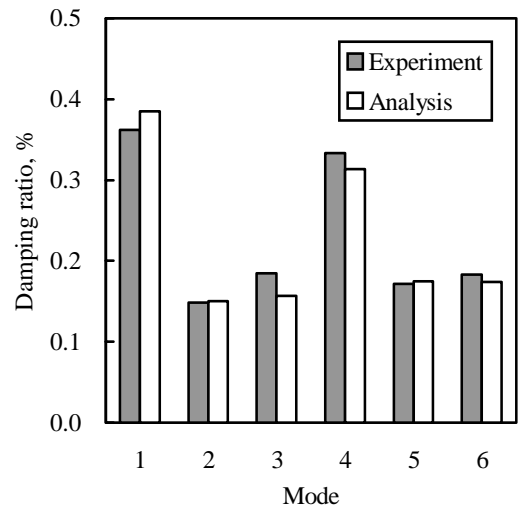


図 10 CFRP 逆対称積層板の実験値と解析値の比較

表 4 減衰定数同定結果

	$\psi_L$	$\psi_T$	$\psi_{TV}$	$\psi_{LT}$
減衰定数, %	1.24	6.33	2.46	4.35

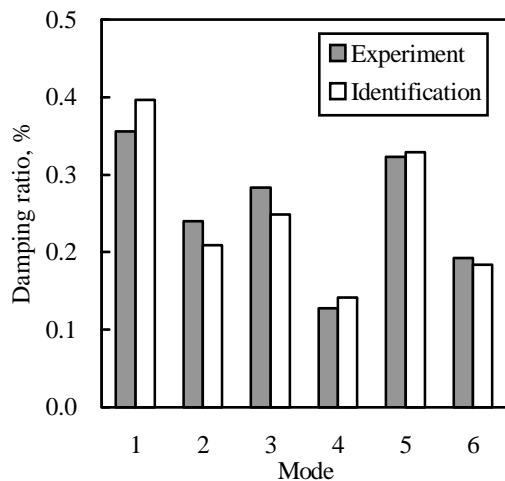


図 8 CFRP 対称積層板の実験値と解析値の比較

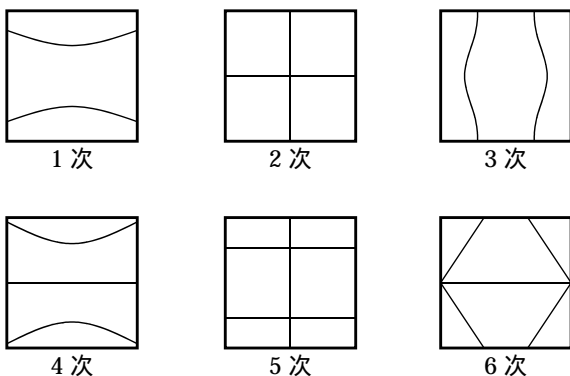


図 9 固有振動モード

### 5. おわりに

ひずみエネルギー理論と非線形最適化法を用いた減衰定数同定手法を提案した。

次に CFRP 単層板の振動試験を行い、繊維配向角に対する固有振動数、モード減衰比の変化を明らかにした。そして、実験結果に減衰定数同定手法を適用し、CFRP 単層板の減衰定数を同定した。さらに、振動試験結果と減衰定数同定結果から、繊維強化複合材料の振動減衰特性は、マトリクスの影響を大きく受けることが明らかになった。

また提案手法を CFRP 対称積層板に適用し、ラミナの減衰定数を同定した。また同定した減衰定数を用いて CFRP 逆対称積層板の有限要素解析を行い、モード減衰比を算出し、実験結果と比較した。その結果、本手法が積層板の加振実験結果から、ラミナの減衰定数を同定できることが明らかになった。また積層構成にかかわらず、本手法が有効であることを確認した。

### 6. 文献

- (1) 社団法人 日本機械学会編, 新技術融合シリーズ: 第 4 巻 振動のダンピング技術, 養賢堂, 1998
- (2) N. Alam and T. Asnani, Vibration and Damping Analysis of Fibre Reinforced Composite Material Plates. *Journal of Composite Materials*, **20** (1986), 2-18
- (3) R. D. Adams, Damping Properties Analysis of Composites, *Composites (Engineered Materials Handbook Volume 1)*, (1984), 206-217
- (4) Lin, D. X., Ni, R. G. and Adams, R. D., Prediction and Measurement of the Vibrational Damping Parameters of Carbon and Glass Fibre-Reinforced Plastic Plates, *Journal of Composite Materials*, **18** (1984), 133-152.