

繊維強化プラスチック材料の振動減衰同定に及ぼす大気圧の影響*

座古 勝^{*1}, 松本 金矢^{*2}
倉敷 哲生^{*1}, 中西 康雅^{*2}An Influence of Atmosphere on Identification Method of Vibration
Damping Parameters for Fiber Reinforced PlasticsMasaru ZAKO^{*3}, Kin'ya MATSUMOTO,
Tetsusei KURASHIKI and Yasumasa NAKANISHI^{*3} Department of Management of Industry and Technology, Osaka University,
2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka, 565-0871 Japan

An effect of the air on the material damping of fiber reinforced plastics has been investigated. As the most of vibration tests are carried out in the atmosphere, however, the material damping has not been evaluated with accuracy. The vibration tests of CFRP plates have been carried out in the atmospheric pressure and in the low-pressure conditions, respectively. Comparing the both of experimental results, the effects of an atmosphere on the natural frequency and damping have been discussed. From these experimental results, it is revealed that the aerodynamic force has a great influence on the damping ratio and the test at below 10^3 Pa needs to obtain the real damping ratio. On the other hand, there is little effect of the air on the natural frequency. The damping parameters of CFRP are also identified by the experimental result. These results show that it is important to take the effect of the air on the damping into consideration.

Key Words: Vibration, Damping, Composite Materials, Identification, Vacuum

1. 緒 言

繊維強化複合材料は軽量で、比剛性、比強度に優れており、材料設計が可能であることから多くの工業分野で利用されている。特に宇宙空間において構造物の振動を抑制する必要性から、高減衰特性を有する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る。構造物の振動制御を行うためには、繊維強化複合材料自体の振動減衰特性を把握し、それらを考慮した材料・構造設計が重要である。

これに対し、繊維強化複合材料の振動減衰性能を評価する目的で多くの研究が行われてきた^{(1)~(11)}。その中で、振動減衰特性評価に最もよく用いられるのが Adams らのひずみエネルギー理論である。Adams らはひずみエネルギー理論を用い、解析結果と試験結果が一致することを示している⁽²⁾⁽³⁾。また有限要素法をもとにした振動減衰モデルの定式化を行い、積層板に適用し、その有効性を示している⁽⁴⁾。この振動減衰モデルによれば、繊維強化複合材料積層板を構成するラミナの減衰定数を用いて、積層板および繊維強化複合材料構造

物の振動減衰特性を評価することができる。この Adams らの振動減衰に関する研究をもとに、青木らは CF/PEEK 積層材の振動試験を行い、減衰能を算出している⁽⁵⁾。足立らは自由支持法と片持ち梁法で振動試験を行い、ひずみエネルギー理論は自由支持法の試験結果に近いことを示している⁽⁶⁾。上田らは一方繊維強化複合材料に対し、動的設計を行うための簡易計算法を提案し、ひずみエネルギー理論と比較することで、その有効性を示している⁽⁷⁾⁽⁸⁾。著者らもひずみエネルギー理論をもとに減衰定数を同定する手法を提案し、その有効性を明らかにしてきた⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。ひずみエネルギー理論により減衰定数を求めるためには、振動試験により得られた振動減衰特性から減衰定数を決定するため、振動試験から材料そのものの振動減衰特性を正確に把握する必要があることは言及するまでもない。すなわち、軽量を特徴としている繊維強化複合材料の材料そのものによるエネルギー損失を得るには、空気などの影響を十分に考慮する必要がある。しかしながら、複合材料の振動減衰に及ぼす影響を定量的に評価した研究がほとんど行われておらず、正確な材料減衰の測定がなされていないのが現状である。

このような背景から、大気圧中と低真空中で振動試験を行い、空気が振動特性に及ぼす影響を調査するこ

* 原稿受付 2004年3月30日。

^{*1} 正員, 大阪大学大学院工学研究科(☎565-0871 吹田市山田丘2-1)。^{*2} 正員, 三重大学教育学部(☎514-8507 津市上浜町1515).
E-mail: zako@mapse.eng.osaka-u.ac.jp

とを本研究の目的とした。具体的には、低真空中で振動試験を行うための振動試験法を提案し、大気圧中と低真空中で振動試験を行い、大気圧が振動特性に及ぼす影響を評価する。さらに試験により得られた大気圧中、低真空中での減衰比を目標値として、減衰定数を同定することで、複合材料の減衰定数における大気圧の影響を明らかにする。

2. ひずみエネルギー理論

2.1 有限要素法に基づく定式化 第 n 次の減衰比 ζ_n は、最大ひずみエネルギー U_n 、消散ひずみエネルギー ΔU_n より次式で定義される。

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

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 \mathbf{D} と、ひずみベクトル $\boldsymbol{\varepsilon}_n$ より次式で定義される。

$$U_n = \int_V \boldsymbol{\varepsilon}_n^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}_n dV \quad (2)$$

ここで V は体積を表す。

また消散ひずみエネルギー ΔU_n は次式のようになる。

$$\Delta U_n = \int_V \boldsymbol{\varepsilon}_n^T \boldsymbol{\psi} \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}_n dV \quad (3)$$

ただし $\boldsymbol{\psi}$ 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。

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

ここで ψ_L 、 ψ_T は面内変形に関する減衰定数であり、 ψ_{TV} 、 ψ_{VL} 、 ψ_{LT} は各座標面のせん断変形に関する減衰定数である。なお、本研究では、一次せん断変形理論を考慮した板要素により振動減衰モデルの定式化を行った。

2.2 減衰定数同定手法 著者らは振動試験結果から、ひずみエネルギー理論をもとに減衰定数を同定する手法を提案し、その有効性を示してきた⁽¹⁰⁾。本節では、同定手法の詳細な説明は前報⁽⁹⁾で記述しているため、ここではその概略について述べる。

誤差関数 $f_i(\mathbf{x})$ を式 (5) により定義する減衰定数同定問題を考える。ここで \mathbf{x} は式 (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である。また振動試験により測定された第 i 次の減衰比 ζ_{Ei} と、 \mathbf{x} を用いて有限要素解析により算出された第 i 次の減衰比 $\zeta_i(\mathbf{x})$ の差を誤差関数 $f_i(\mathbf{x})$ として、次式のように定義する。

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

目的関数 $\varphi(\mathbf{x})$ を、 m 個の誤差関数 $f_i(\mathbf{x})$ を用いて次式で定義する。

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

この目的関数 $\varphi(\mathbf{x})$ 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。

3. CFRP 単層板の振動特性測定

3.1 振動試験の概要 供試材には、炭素繊維 TR30G (三菱レイヨン製) とエポキシからなるプリプレグシートを用いた。成形後の繊維体積含有率は 53.8% で、成形後の板厚は 1.05mm である。この供試材から、長さ 199mm、幅 25mm の試験片を、繊維配向角が 0° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° の 5 種類となるよう切り出した。ここで試験片の密度は 1500kg/m^3 である。

図 1 に示すように、チャンバ内に加振器を設置し、加振器上にインピーダンスヘッドを固定する。そしてインピーダンスヘッドを介して試験片を取付け、大気圧中で正弦波掃引加振を行い、周波数応答関数を計測する。次にロータリポンプによりチャンバ内を減圧し、同様に計測を行い、実験モード解析により振動特性を求めた。そして得られた振動特性を比較することにより、振動減衰に及ぼす大気圧の影響を調査する。本論文では、3 回の実験の平均値を実験結果として示す。

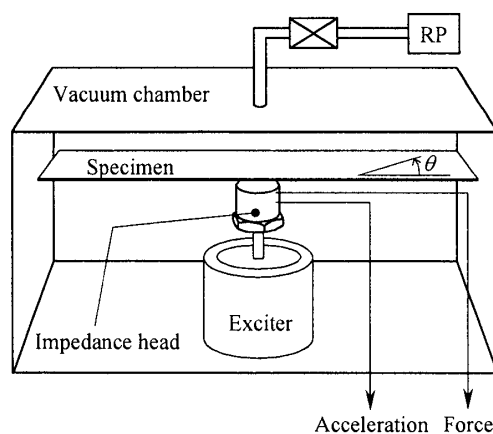


Fig. 1 Experimental setup

3.2 試験結果と考察 材料自身の減衰特性を測定する目的で、真空度が振動特性に及ぼす影響を調査した。容器内を大気圧から 25Pa まで真空度を変化させ、加振力一定の条件で振動試験を行った。試験片には、一方向 CFRP の 0° 材を用いた。

図 2, 3 は 0° 材の 3 次モードまでの圧力と固有振動数, 減衰比の関係である。図 2, 3 より固有振動数は圧力にかかわらずほぼ一定値を示すのに対し, 減衰比は大気圧から 10^3 Pa まで減少し, その後はほぼ一定になることがわかる。ここで, 大気圧から 25Pa までの変化率を 100%とすると, 10^3 Pa における減衰比の変化率は, 1 次から 3 次モードまでそれぞれ 99%, 94%, 91%であった。このことから, 減衰比に対する空気の影響を取り除くには, 10^3 Pa 以下で測定する必要があることが明らかになった。

次に, 繊維配向角が振動特性に及ぼす影響を調査した。3 次モードまでの繊維配向角に対する固有振動数の測定結果を図 4 に示す。図 4 より繊維配向角 0° の

とき固有振動数が最大となり, 45° 材まで減少し, その後はほぼ一定となることがわかる。固有振動数は弾性定数に依存するので, 一方向材の繊維配向角が弾性定数に及ぼす影響と同一であることから, これらの結果となったことは理解できる。

一方, 図 5, 6 は 3 次モードまでの繊維配向角に対する減衰比の変化を示したものである。大気圧, 40.0Pa 中とも繊維配向角が 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。これは 0° 材では繊維が応力を負担するのに対し, 30° 材以降では, 振動減衰能の大きい樹脂が応力を負担するためであると考ええる。また次数増加とともに, 減衰比は大きくなり, せん断の影響が出現していることが確認できる。また, 高次モードほど配向角の影響が少なくなっている。振動減衰性能はマトリクスの影響が支配的であることから, このような結果となったと考える。

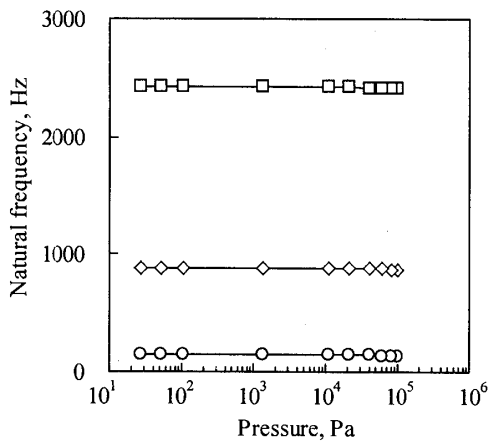


Fig. 2 The effect of pressure in test chamber on natural frequencies ($\theta = 0^\circ$)

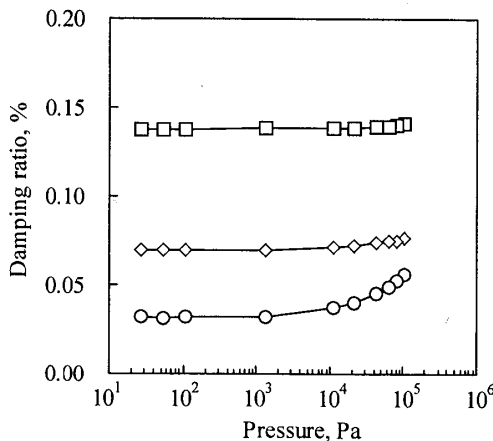


Fig. 3 The effect of pressure in test chamber on the damping ratio ($\theta = 0^\circ$)

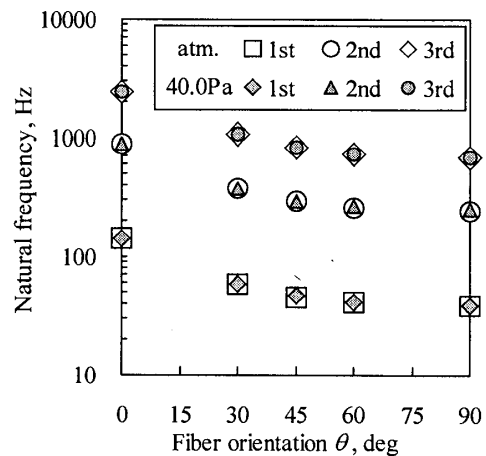


Fig. 4 Variations of natural frequency with fiber orientation

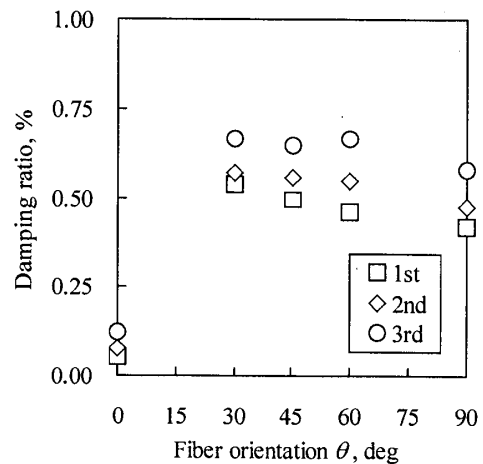


Fig. 5 Variations of damping ratio with fiber orientation (atmosphere)

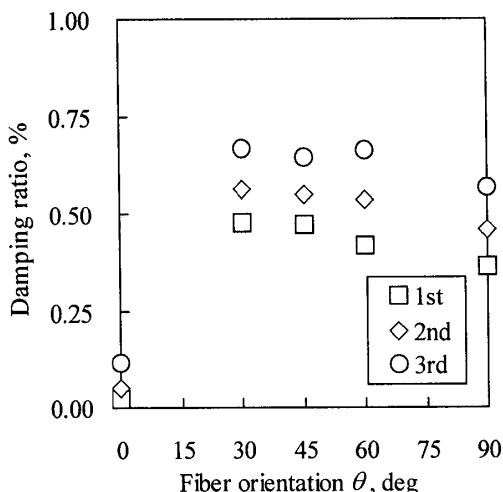


Fig. 6 Variations of damping ratio with fiber orientation (40.0 Pa)

次に圧力の影響について検討するため、大気圧中と 40.0Pa 中における第 n 次固有振動数 f_n 、減衰比 ζ_n の変化を、それぞれ振動特性変化率 $d(f)$ 、 $d(\zeta)$ として式 (7)、(8) のように定義し、その変化を求める。図 7、8 はその結果である。

$$d(f) = \frac{f_{40.0\text{Pa}} - f_{\text{atm.}}}{f_{\text{atm.}}} \quad (7)$$

$$d(\zeta) = \frac{\zeta_{40.0\text{Pa}} - \zeta_{\text{atm.}}}{\zeta_{\text{atm.}}} \quad (8)$$

図 7 より固有振動数は大気圧中よりも 40.0Pa 中において常に大きな数値を示したが、その割合は最大でも 1% 以下であることがわかる。また高次モードになるほど影響が小さくなることが確認できる。

図 8 より減衰比は高次に向かうにしたがい、振動減衰変化率 $d(\zeta)$ が減少していることがわかる。すなわち大気圧が減衰比に及ぼす影響は 1 次モードで約 60% と最も大きく、次数とともにその影響は小さくなることが確認できる。

これらのことから、大気圧は固有振動数よりも減衰比に大きな影響を及ぼすことが確認できた。またモードごとに大気圧の影響度が異なる点にも注目する必要がある。すなわち材料減衰を評価する際には各モードに対して、気圧の影響を考慮する必要があると考えられる。

4. CFRP 単層板の振動特性同定

大気圧中、40.0Pa 中での試験結果をもとに、CFRP 単層板の減衰定数を同定する。

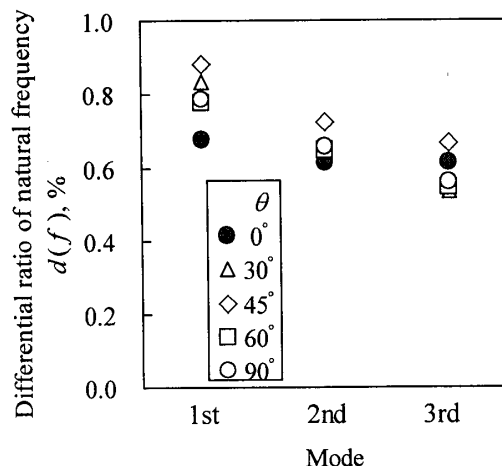


Fig. 7 Relationship between rate of change of natural frequency and fiber orientation

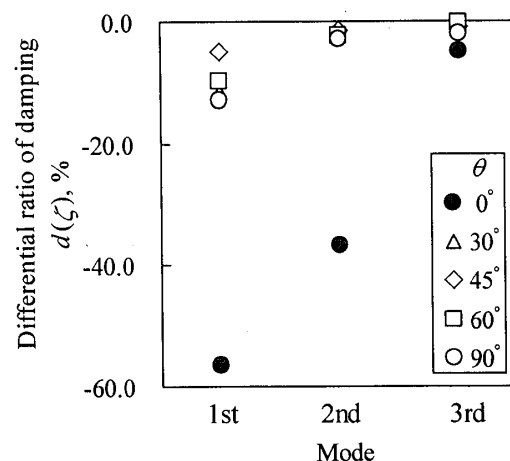


Fig. 8 Relationship between rate of change of damping and fiber orientation

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。そこで試験により得られた 1 次固有振動数から弾性定数 E_L 、 E_T 、 G_{LT} を直交異方性理論より算出した⁽¹²⁾。表 1 に示すように弾性定数に差は見られない。また試験と解析により得られた固有振動数を比較した結果、大気圧中、40.0Pa 中とも誤差は最大でも 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、振動試験により得られた 1 次モードの減衰比を目標値として、CFRP 単層板の減衰定数 ψ_L 、 ψ_T 、 ψ_{LT} を同定した。ただし繊維強化方向の特性より $\psi_{TV} = \psi_{VL} = \psi_{LT}$ とした。

図 9、10 はそれぞれ大気圧中および 40.0Pa 中の振動

試験により測定された減衰比と、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である。これより繊維配向角 0° 、 30° 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 ψ_L に比して、繊維直角方向、面内せん断の減衰定数 ψ_T 、 ψ_{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32で考察した内容とも一致する。さらに表2の同定結果より、 ψ_L 、 ψ_T は、大気圧中より40.0Pa中の方が小さい。これは、測定されたモード減衰比が40.0Pa中の方が小さいためであると考えられる。一方、 ψ_{LT} は40.0Pa中の方が大きく評価されているが、これは減衰定数同定による問題であると考えられる。このことから、大気圧が減衰定数に影響を及ぼすことは明らかであるが、減衰特性の評価にはより詳細な検討が必要と考える。

Table 1 Identified elastic parameters of CFRP lamina

	E_L	E_T	G_{LT}
atmosphere	124	8.34	3.37
40.0 Pa	124	8.34	3.37

Table 2 Identified damping parameters of CFRP lamina

	ψ_L	ψ_T	ψ_{LT}
atmosphere	0.99	5.2	7.3
40.0 Pa	0.86	4.9	8.5

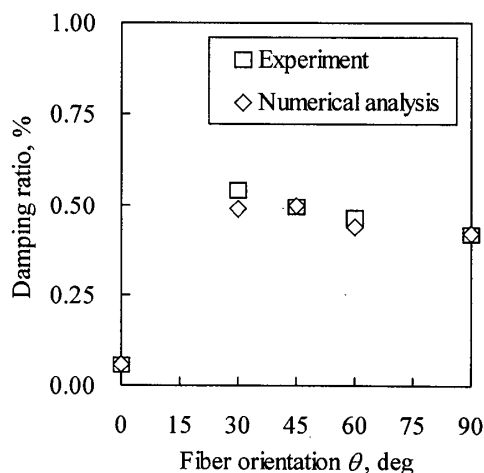


Fig. 9 Comparison of experimental results with numerical results of modal damping ratios of CFRP lamina (atmosphere)

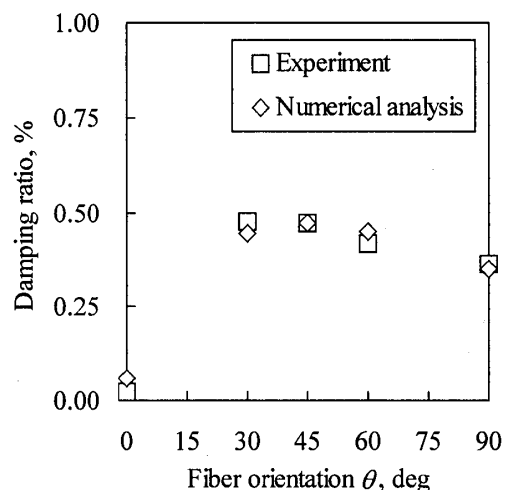


Fig. 10 Comparison of experimental results with numerical results of modal damping ratios of CFRP lamina (40.0 Pa)

5. 結 言

本研究では、空気の減衰効果が振動特性に及ぼす影響を明らかにするため、低真空中で試験を行うための振動試験方法を提案した。そして一方向 CFRP 単層材に対して大気圧中と低真空中で振動試験を行い、空気が材料減衰の測定に及ぼす影響を明らかにした。さらに CFRP 単層材の減衰定数を同定した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 空気が減衰特性に及ぼす影響を取り除くためには、 10^3 Pa 以下で振動試験を実施する必要がある。
- (2) 大気圧が固有振動数に及ぼす影響は 1%程度であるのに対し、減衰特性に及ぼす影響は最大で 60%程度である。
- (3) 大気圧の影響は、各モードで異なり、高次モードになるにつれ影響は小さくなる。

6. 参考文献

- (1) R. Chandra, S. P. Singh, K. Gupta, Damping studies in fiber-reinforced composites – a review, *Composites Structures*, **46** (1999), 41–51
- (2) R. D. Adams, Damping Properties Analysis of Composites, *Composites (Engineered Materials Handbook Volume 1)*, (1984), 206–217
- (3) D. X. Lin, R. G. Ni, and R. D. Adams, The damping and dynamic moduli of symmetric laminated composite beams – Theoretical and experimental results, *Journal of Composite Materials*, **18** (1984), 104–121

- (4) D. X. Lin, R. G. Ni, and R. D. Adams, Prediction and Measurement of the Vibrational Damping Parameters of Carbon and Glass Fibre-Reinforced Plastic Plates, *Journal of Composite Materials*, **18** (1984), 133-152
- (5) 青木義男・邊吾一・蓮見薫, CF/PEEK 積層材のダンピング解析と実験, *材料*, **41-466**, (1992), 1121-1125
- (6) 足立廣正・長谷川照夫, 一方向強化 CFRP 積層板における振動減衰能の周波数, 温度特性の評価, *日本複合材料学会誌*, **24-6**, (1998), 230-237
- (7) 上田宏樹・井上喜男, 一方向繊維強化プラスチックの減衰特性解析, *機論*, **64-619, C**(1998), 831-837
- (8) 上田宏樹・井上喜男, 一方向繊維強化プラスチックの減衰特性解析(動的設計のための簡易計算法), *機論*, **66-647, C**(2000), 2115-2121
- (9) 松本金矢・細川健治・座古勝・小林博, 積層複合材料の減衰パラメータ同定法, *機論*, **65-636, C**(1999), 3129-3134
- (10) 松本金矢・中西康雅・座古勝, 減衰定数同定による構造物の減衰比予測, 第2回ダンピングシンポジウム講演論文集, (2002), 247-250
- (11) N. Alam and T. Asnani, Vibration and Damping Analysis of Fibre Reinforced Composite Material Plates. *Journal of Composite Materials*, **20** (1986), 2-18
- (12) 藤井太一・座古勝, 複合材料の破壊と力学 (1978), 実教出版