

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月13日現在

機関番号：32503

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2012

課題番号：22656056

研究課題名（和文） 粘弾性／圧電フィルム層ユニットを有するCFRP積層材の制振／耐損傷性能評価

研究課題名（英文） Vibration Damping and Toughness Evaluations of CFRP Laminates with Smart Units Using Viscoelastic and Piezoelectric Films

研究代表者

鈴木 浩治（SUZUKI KOHJI）

千葉工業大学・工学部・教授

研究者番号：70322427

研究成果の概要（和文）：本研究では、粘弾性フィルムと圧電素材を組み合わせた層ユニットを導入することによるCFRP積層材の制振/耐損傷性能向上のメカニズムについて、主にモードビームエネルギー法のアプローチを採りながら、FEM数値解析から詳しく探究した。さらに、ダンピングシートを挿入したCFRP積層材を実際に成形し、インパクトハンマ加振試験および落錘衝撃試験をそれぞれ実施し、本研究で提唱する積層構造材料技術の有効性を実験的に評価する目的をつけた。

研究成果の概要（英文）：In this study, improvement mechanism of vibration damping and toughness of CFRP laminates with so-called smart units using viscoelastic and piezoelectric films were investigated in detail by using FEM numerical analysis mainly with the aid of the modal strain energy approach. In addition, actual CFRP laminates with damping sheets inserted between the plies were prepared and then impact hammering and drop weight tests were carried out to the specimens, which certainly showed feasibility for experimentally evaluating a validity of the present laminated structural technology.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,000,000	0	2,000,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	360,000	3,560,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：ダンピング，耐損傷設計，粘弾性，圧電フィルム，複合材料，CFRP，FEM

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 厚さ約150 $\mu$ mのシート状プリプレグを積層し、真空加圧・加熱して成形される炭素繊維強化プラスチック(Carbon fiber Reinforced Plastics: CFRP)は、アルミ合金よりもさらに軽量・高強度で、かつ圧延鋼板と同程度の剛性を有し、一体成形性にも優れており、今日では、航空機・高速鉄道車両・自動車などに革新的な軽量化を施して省エネ・エ

コ化を図るために、もはや欠くべからざる構造材料となっている。

(2) ところで、このCFRP積層材は、軽量・高強度かつ高剛性という特性を生かした薄肉・長スパン構造が強度設計上可能でありながら、その一方で、曲げ/ねじり剛性の増加に伴う共振点の高周波数側シフトや高分子系素材のわりには貧弱な振動減衰能を持つこ

となど、制振特性に問題を抱えている。また、層内樹脂割れ(負荷方向と繊維方向とが一致しない層内に生じる割れ・マトリックスクラック)や層間はく離(文字通り、層間の割れ・デラミネーション)といった積層材特有の損傷の発生・進展をどう防ぐかという耐損傷設計も重要であり、今後のさらなる普及に向けて、CFRP 積層材の制振/耐損傷性能の向上や機能化/知能化を図る材料技術の開発が望まれている。

(3) ところで、熱可塑性高分子系素材である粘弾性層は、大きな材料損失正接(つまり大きな減衰能)を有するだけでなく、破壊靱性値(き裂の進展に対する抵抗値)も非常に高いため、それを積層材中に挿入することで、臨界ひずみエネルギー解放率で測ることのできる、構造材全体としての耐損傷性能が確実にアップする。さらに、粘弾性層には、その面外垂直ひずみエネルギーを介したショック・アブソーバ(文字通り、衝撃吸収)機能、またはクラック・アレスタ(き裂など損傷の進展を補足)機能も期待できよう。また、粘弾性層に新たに圧電フィルムを組み合わせた粘弾性/圧電フィルム層というユニットをCFRP 積層材に組み込むようなアイデアはこれまでなかった。

## 2. 研究の目的

本研究では、厚さ約 20~50  $\mu\text{m}$  のポリフッ化ビニリデン(PVDF)樹脂フィルム(圧電フィルム)に着目する。圧電フィルムは、優れた圧電特性(機械的な負荷変形により材料内部に電位差を生じ、また逆に電圧印加されることで変形を生じる性質)を有しており、これを用いた粘弾性/圧電フィルム層ユニットを新たに考案して、粘弾性層のポテンシャルを最大限引き出すことで、CFRP 積層材の制振/耐損傷性能の飛躍的な向上、さらにはその機能化や知能化を目指す。

具体的には、粘弾性/圧電フィルム層ユニットのCFRP 積層材内への挿入位置や数により、供試体の(減衰)固有振動数や(等価粘性)減衰比など制振性能、および臨界エネルギー解放率など耐損傷性能がどのように変化するのかを主に FEM 数値解析から定量的に明らかにしてゆく。さら、供試体の制振/耐損傷性能の発現メカニズムを、主にモードひずみエネルギー(MSE)法のアプローチから解明していく。また、さらに、ダンピングシートを挿入したCFRP 積層材を実際に成形し、インパクトハンマ加振試験および落錘衝撃試験をそれぞれ実施し、本研究で提唱する積層構造材料技術の有効性を実験的に評価する。

## 3. 研究の方法

(1) 本研究は、CFRP 積層材の制振性能と

耐損傷性能を向上させる目的で、層間に粘弾性樹脂フィルムを挿入するというアイデアから出発している。ここで、図1に示すように、剛なCFRP層に挟まれた柔粘弾性層が十分な制振性能や耐損傷性能を発現できるかどうかは、粘弾性層をいかにして著しく面外せん断変形させることができるかにかかっている。この方式には、過去に制振鋼板や免震積層ゴムという成功例が存在する。外部から積層材に与えられる振動や衝撃などの運動エネルギーを、粘弾性層の面外せん断ひずみエネルギーとして集め、その内部減衰を利用して熱に変換し外部に散逸させる機構であり、粘弾性層を最適に配置するための検討とは、例えば、動吸振器の最適設計に似た側面を持つ。



図1 粘弾性層導入の利点

(2) 圧電フィルムの剛性と密度は、粘弾性フィルムとCFRPのちょうど中間ぐらいであるため、CFRP/粘弾性フィルム/圧電フィルムの3種からなるハイブリッド積層構造は、うまく力学設計してやれば、粘弾性層の面外せん断変形を介した減衰機構を効果的に高めることができるかもしれない。つまり、圧電フィルムを追加したことによる設計自由度向上効果を狙える。また、圧電フィルムを導入することで、新たな減衰機構を手にすることができる。つまり、圧電フィルム層に可変抵抗回路を組み込むことで、圧電フィルムの軸伸張 → 圧電フィルム上下電位差上昇 → 可変抵抗部でのジュール熱発生、という機構による、ジュール熱ダンパとしての可能性である。

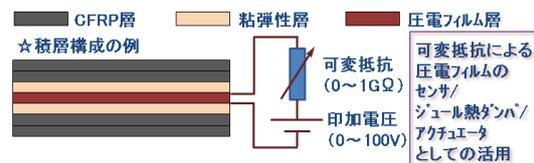


図2 圧電フィルム層による効果

### (3) 供試体の製作

(a)CFRP 層(PAN 系高強度炭素繊維強化エポキシ樹脂プリプレグシート), (b)粘弾性層(PIEZON: 木曾興業株式会社)および(c)圧電フィルム層(電極被覆 PVDF シート: 東京セチ)を積層構成に基づき積み重ね、真空引きの状態ですべてオープン加熱(135°C 2時間)し、粘弾性/圧電フィルム層を導入した CFRP 積層板を真空バック成形する。

### (4) FEM 数値解析

汎用有限要素法(FEM)解析ソフト(ANSYS ED 10: サイバネットシステム)による FEM 数値構造解析を実施し、本供試体の(a)CFRP 層、(b)(c)粘弾性層/圧電フィルム層ユニットの組合せと積層構成を検討する。(c)圧電フィルム層の圧電効果を考慮した構造-圧電連成問題として解析モデルを構築する。また、モードひずみエネルギー(MSE)法による供試体減衰特性評価を実施する。なお、FEM 数値解析に必要な材料特性(剛性・強度・密度・材料減衰比・圧電ひずみ定数など)は実測値またはカタログ値を用いる。

### (5) インパクトハンマ加振試験

複数の低次側振動モードをインパクトハンマにより励振させ、応答として加速度ピックアップセンサーからのたわみ加速度を用いた伝達関数を、FFT アナライザにより取得する。先の FEM 数値解析結果とも直接比較し、粘弾性単体や粘弾性/圧電フィルム層ユニットの導入による制振性能向上メカニズムについて考察する。

### (6) 落錘衝撃試験

ASTM D3763-08 を参考に落錘衝撃試験機を自作し、ダンピングシートによる耐衝撃特性の向上について検討する。特に粘弾性フィルムの導入による衝撃時吸収エネルギーの変化について定量的に調査する。

## 4. 研究成果

### (1)有限要素法(FEM)による数値解析

本研究では、粘弾性/圧電フィルム層ユニット導入による FRP 積層材の制振/耐損傷性能向上の定量的な評価およびそのメカニズムの解明を目指し、圧電層の圧電ひずみ効果に伴う初期応力剛性を考慮した実固有振動モード解析の有限要素法(FEM)による実施例を示した。図3に本研究にて得られた解析結果の一例を示す。解析には、汎用有限要素法解析コード ANSYS ED ver.10 を用いた。さらにモードひずみエネルギー(MSE)法による積層材損失係数評価から粘弾性層の面外せん断変形による積層材損失係数の大幅な向上が認められた。本研究結果により今後、現実的な大きさの電圧を PVDF 圧電層に印加

することによる減衰特性の向上を達成させるための最適化設計を実施してゆくことが可能となった。

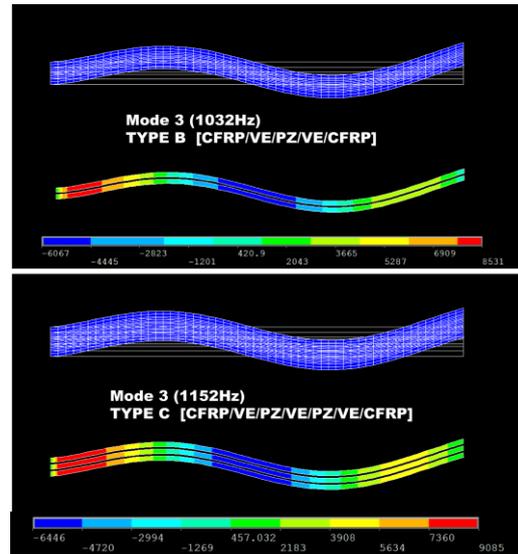


図3 FEM 数値解析の一例

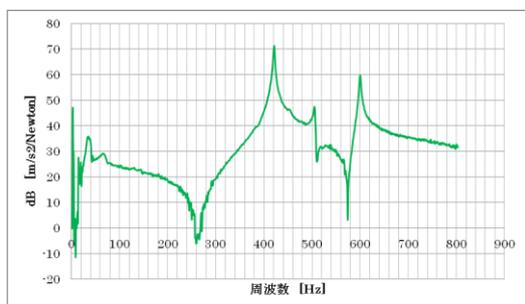
### (2)インパクトハンマ加振試験

150mm×150mm 正方形形状、厚さ約 2.0mm (8層)の CFRP 積層板およびその中央層間に粘弾性ダンピングフィルム(PIEZON: 木曾興業株式会社)を導入したものを真空バック成形法により作成した。積層構成は1方向材[0<sub>8</sub>]、クロスプライ積層材[0/90/0/90]<sub>2S</sub>、擬似等方積層材[0/45/90/-45]<sub>2S</sub>の3種類とした。図4に試験結果の一例として、クロスプライ積層材の伝達関数測定結果を示す。図4(a)がダンピングシートなしで図4(b)は中央層間にダンピングシートを挿入した場合である。ダンピングシート挿入により共振周波数の変化と、共振点におけるピークの鋭さの低下から、減衰特性の向上が確認できる。

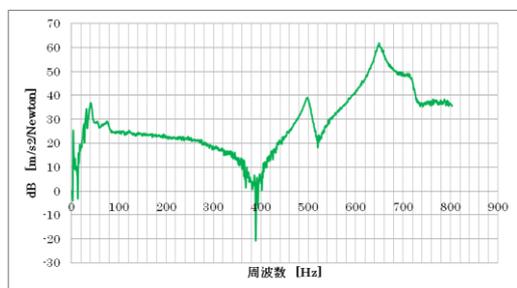
### (3)落錘衝撃試験

ASTM D3763-08 を参考に落錘衝撃試験機を自作し、ダンピングシートによる耐衝撃特性の向上について検討した。なお、衝撃試験中の力学挙動(落下中の位置や速度など)を測定する為にハイスピードカメラを用いた。試験結果の一例として図5に、ストライカーの落下高さ 100mm 時の、ダンピングシート有無による荷重-変位線図の違いを示す。本研究において実施の試験結果から、衝撃エネルギーの吸収率は一方向、クロスプライ、擬似等方の順で低くなった。一方向材やクロスプライ積層材は繊維破断によりストライカーから与えられた衝撃エネルギーが消費され、結果的にエネルギー吸収率が高くなったと考えられる。一般にダンピングシートを層

中央部に挿入することで衝撃エネルギーの吸収率は向上する傾向が明らかであった。これはダンピングシートが衝撃を受けた時に弾性変形を起こしたことにより衝撃エネルギーを散逸したため、および、ダンピングシートの粘弾性変形によるエネルギー散逸の効果が表れた結果であると考えられる。

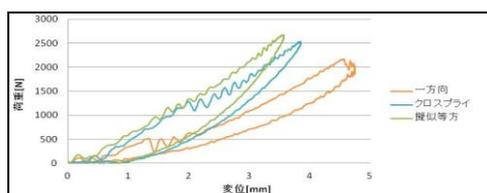


(a) ダンピングシートなし

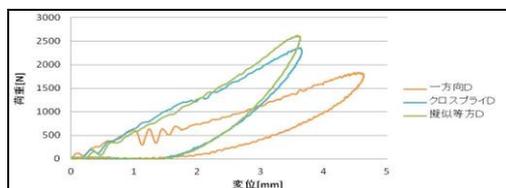


(b) 中央層間にダンピングシートを挿入

図4 周波数応答 (クロスプライ積層材)



(a) ダンピングシートなし



(b) 中央層間にダンピングシートを挿入

図5 周波数応答 (クロスプライ積層材)

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計5件)

- ① 鈴木浩治, CFRP 積層板の制振／耐衝撃特性に及ぼす積層構成や粘弾性シート挿入の影響について, 日本機械学会 D&D2013, 2013/8/26, 福岡市.
- ② 松本潤一, 鈴木浩治, 低速衝撃負荷を受ける CFRP 積層板の力学特性, 日本機械学会 2012 年次大会, 2012/9/12, 金沢.
- ③ 鈴木浩治, トランスヴァース・クラックを有する FRP 積層材の振動減衰特性, 第2 回日中板・シェル理論の基礎と応用シンポジウム, 2011/10/2, 深谷市.
- ④ 鈴木浩治, 圧電フィルムを有する FRP 積層制振材の振動減衰特性 (FEM 数値解析による検討), 日本機械学会 D&D2011, 2011/9/9, 香美市.
- ⑤ 鈴木浩治, 丸岡暁, 損傷を有する CFRP 積層構造の振動エネルギー散逸機構に関する検討, 日本機械学会 D&D2010, 2010/9/16, 京都.

[その他]

ホームページ等

<http://citmsesuzukilab.tuzikaze.com/index.html>

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

鈴木 浩治 (SUZUKI KOHJI)

千葉工業大学・工学部・教授

研究者番号：70322427

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし