

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：13701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820072

研究課題名(和文)CFRPと金属の接着部の疲労耐久性を予測するための有限要素モデルの構築

研究課題名(英文)Modeling to predict dynamic characteristic of CFRP-steel bonded structure.

研究代表者

古屋 耕平(FURUYA, KOHEI)

岐阜大学・工学部・助教

研究者番号：40580056

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではCFRPと金属の接着構造物の動特性を設計段階で予測することを目的に下記の検討を行った。

- ・減衰を考慮したCFRPのモデル化。異方性を有するCFRPの減衰を複素弾性率で表現することで、ハット型試験片のモード毎に異なるモード減衰比を定性的に予測可能であることを、複数の積層構成の試験片で示した。
- ・接着のモデル化。ハット型CFRP、金属平板をシェル要素、接着剤をソリッド要素でモデル化する方法で、低次の固有振動数を相対誤差5%以下で予測可能であり、減衰も定性的に予測可能であることを示した。また接着剤の物性値よりも、接着幅など接着剤の形状が動特性に与える影響が大きいことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this research, to predict dynamic characteristic of CFRP-steel bonded structure by finite element method, CFRP and bonding were modeled including damping property.

- ・Modeling of CFRP. The modal damping ratio of CFRP depends on the mode shape and laminate configuration, and the phenomenon is called as anisotropic damping. The anisotropic damping was expressed a complex longitudinal elasticity and transverse elasticity, and it was shown that the anisotropic damping of CFRP hat-section frames which have different laminate configuration can be estimated qualitatively.
- ・Modeling of bonding. The accuracy of bonded structure model consisted of shell and solid elements which express CFRP, steel and glue was investigated. Consequently, it was shown that the natural frequencies can be predicted with errors less than 5%, also modal damping can be predicted qualitatively. Moreover, it was shown that influence of bonding width is greater than viscoelastic material property of glue.

研究分野：振動騒音・CAE

キーワード：CFRP 接着構造物 動特性 周波数応答関数 モード減衰比 有限要素解析

1. 研究開始当初の背景

航空機や自動車など輸送機械の分野では、省エネルギー化の観点から、軽量で比剛性が高い炭素繊維強化プラスチック (以下、CFRP) が活用され始めている。CFRP は炭素繊維を母材樹脂で複合化した材料で、剛性、減衰に異方性を持つ。減衰比は金属と比較して大きいので、振動低減、動応力の低減による疲労耐久性能の向上など、軽量化以外のメリットも大きい。強度など他の性能要求から、CFRP と金属が併用されることが多い。その際、ボルト締結などと比較して軽量な接着工法、具体的にはエポキシなどの樹脂で CFRP と金属を接着する工法が注目されている (文献[1])。

CFRP と金属の接着構造物の研究は、剛性や強度など静的な問題に関連したものが多く、本研究で着目する接着構造物の動的問題、特に減衰特性に着目した報告は少ない。文献[2]にはガラス繊維強化プラスチックの減衰が異方性を有し、減衰比が振動モード (変形) に依存すること、文献[3]には金属同士を樹脂で接着したはりの減衰比も変形に依存することが報告されている。よって減衰の異方性を有する CFRP と減衰が小さな金属の接着構造物では、減衰の変形依存性が強く表れ、減衰が小さなモードが接着部の疲労耐久性能に悪影響を及ぼし、最悪の場合、接着部が剥がれるなどの問題が生じる。また CFRP が減衰の異方性を有すること、接着樹脂が粘弾性挙動を示すことから、減衰特性の予測は難しく、現状では構造物を試作して実験的に振動騒音特性、疲労耐久性能を評価する必要があり、開発期間が長期に及んでいる。

2. 研究の目的

そこで本研究では、CFRP と金属の接着構造物の振動騒音特性、接着部の疲労耐久性能を設計段階で予測するために不可欠な、CFRP 接着部の有限要素モデル、(1) 特に減衰に着目した CFRP の異方性減衰のモデル化と、(2) 接着剤のモデル化、(3) 接着剤の粘弾性特性が系全体に与える影響の検証を行い、接着構造物の振動モードごとに異なる減衰比を有限要素解析で予測する手法の開発を目的とする。

本研究では図 1 に示すハット型 CFRP とステンレス平板 (SUS 平板) の接着フレーム構造物を対象に、実験と有限要素解析の比較を行いながら、予測精度に対する影響度が大きい因子を明らかにする。

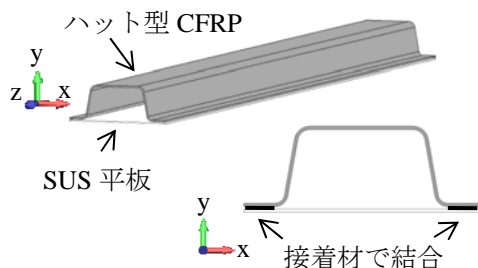


図 1 対象とする接着構造物

3. 研究の方法

(1) CFRP 異方性減衰のモデル化

図 2 に示すような短冊試験片を対象に CFRP の異方性減衰の同定とモデル化を行う。CFRP は東レ T700-12K の綾織、樹脂は熱硬化性樹脂で繊維体積含有率 $V_f=50.4\%$ 、プライ厚 0.44mm のクロスプライ-プリプレグを 3 層積層したもので、積層構成は 4 種類 (000, 444, 404, 400 積層, 0 は $0^\circ/90^\circ$, 4 は $45^\circ/-45^\circ$ の積層を表す)、試験片数 $N=6$ 用意した。減衰モデルは構造減衰モデルを採用し、縦弾性係数 E 、横弾性係数 G を複素弾性係数 $(1+j\eta_E)E$ 、 $(1+j\eta_G)G$ で表し、構造減衰係数 η_E 、 η_G を同定する。

同定は 000, 444 積層の短冊試験片を対象に、図 3 に示す非接触試験機 (日本テクノプラス社の JEG シリーズ自由共振式ヤング率、剛性率および内部摩擦測定装置) で行う。試験機は非接触の加振、計測が可能で、センサーなどの付加質量の影響を受けずに固有振動数、モード減衰比が測定できる。非接触試験機で計測した試験片の曲げモード、ねじりモードの固有振動数、モード減衰比から弾性係数 E 、 G 、構造減衰係数 η_E 、 η_G を同定する。また図 2 に示すステンレスと接着剤の弾性係数、構造減衰係数も同定する。



図 2 短冊試験片

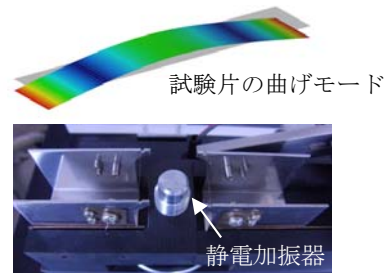


図 3 非接触試験機

(2) CFRP 異方性減衰モデルの検証

CFRP の減衰を複素弾性係数 $(1+j\eta_E)E$ 、 $(1+j\eta_G)G$ でモデル化することで、CFRP の異方性減衰を表現できるか検証する。検証では図 4 に示すハット型 CFRP を対象にし、異方性減衰モデルを採用した有限要素解析と実験の比較を行い、振動モード毎に異なるモード減衰比を予測可能か検証する。ハット型 CFRP は、異なる 3 種類の積層構成 (0000, 4444, 4004 積層) のものを試験片数 $N=2$ 用意する。

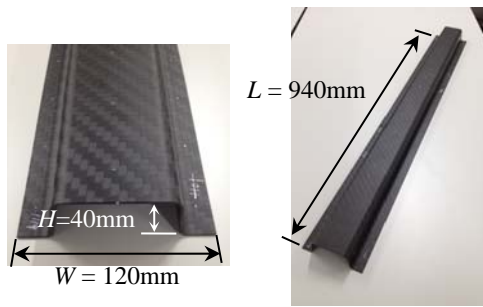


図4 ハット型 CFRP 試験片

(3)接着のモデル化方法の検証

接着を有限要素法でモデル化する方法として図5に示すように CFRP, SUS をシェル要素でモデル化し, 接着剤をソリッド要素でモデル化した場合の予測精度を検証する. このようにモデル化した理由は, CFRP, SUS をソリッド要素でモデル化した場合, 計算に多くの時間を要するためであり, せん断変形が生じると予想される接着剤のみソリッド要素でモデル化することで実際の設計現場でも利用できるモデルとするためである. 図5のモデルはシェル要素とソリッド要素を剛体要素で結合している. 図5のモデルと図6に示す CFRP と SUS を接着した試験片の曲げモードとねじりモードの固有振動数, モード減衰比を比較し, 接着のモデル化を検証する.

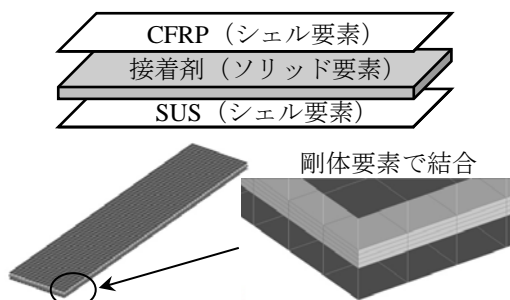


図5 接着のモデル化

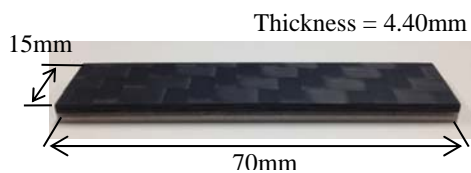


図6 短冊形接着試験片

(4)接着構造物の動特性の予測精度の検証

構築した CFRP 単体のモデル, 接着のモデル化方法を利用して, 図7に示すハット型接着フレーム構造物の動特性を予測する. 接着剤は常温硬化のアクリル系接着剤 (PLEXUS MA422) を利用する. 試験片は, 図4に示したハット型 CFRP と SUS 平板を接着剤で接着したもので, CFRP の積層構成は 0000 のものを試験片数 $N=2$ 用意する. そして有限要素解析で, 接着構造物の固有振動数, モード減衰比を予測可能か検証する.

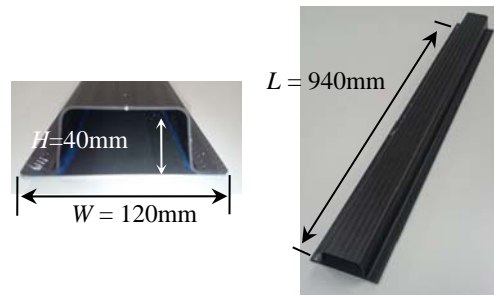


図7 ハット型接着フレーム

(5)接着材の周波数依存性の確認

樹脂など接着剤は周波数依存性を有することが知られており, 本研究で利用する接着剤にも周波数依存性が存在するか動的粘弾性測定装置で確認する.

4. 研究成果

(1)CFRP 異方性減衰のモデル化

図3に示した非接触試験機を利用し, 000, 444 積層の短冊形試験片から CFRP の弾性係数 $E=51.7\text{GPa}$, $G=3.9\text{GPa}$, 構造減衰係数 $\eta_E=2.47 \times 10^{-3}$, $\eta_G=1.15 \times 10^{-2}$ と同定した. 同定結果を検証するために有限要素解析で 000, 400, 404, 444 積層の短冊形試験片のモード減衰比を予測した. 図8に実験で同定したモード減衰比を灰色で示し, 有限要素解析で求めたモード減衰比の η_E の成分を青色, η_G の成分を赤色で示す. 解析で予測した各モードのモード減衰比は, η_E の成分と η_G の成分の和で表される. 図8に示すように同定した η_E , η_G で, η_E , η_G の同定に利用していない 400 積層, 404 積層のモード減衰比を予測出来ており, 本研究で示した η_E , η_G の同定方法が妥当であることを確認した.

- 実験同定したモード減衰比
- モード減衰比の予測値(η_E の成分)
- モード減衰比の予測値(η_G の成分)

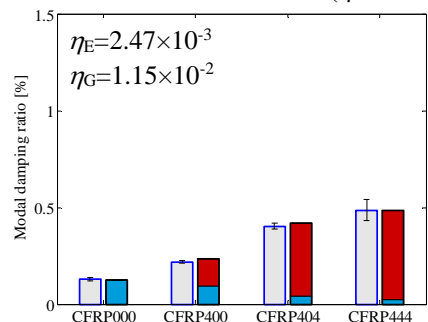


図8 短冊試験片の曲げモード減衰比の予測精度の確認

(2)CFRP 異方性減衰モデルの検証

CFRP の減衰を複素弾性係数 $(1+j\eta_E)E$, $(1+j\eta_G)G$ で表現し, 同定した E , G , η_E , η_G でハット型 CFRP の周波数応答関数, モード減衰比を予測した. ハット型 CFRP はシェル要素でモデル化した (図 9).

図 10, 11 に 0000 積層, 図 12, 13 に 4444 積層, 図 14, 15 に 4004 積層の試験片の周波数応答関数とモード減衰比の実験結果と予測結果を示す. 各試験片で周波数応答関数, モード毎に異なるモード減衰比を予測可能であることが確認でき, 本研究で示した異方性減衰のモデル化手法が妥当であることを示した. また, 図 15 に示した疑似等方積層の 4004 積層のモード減衰比を観察すると, 0000 積層, 4444 積層と比較してモード減衰比が各モードで一定となっており, 疑似等方積層の場合, 等方性材料と同様にモード減衰比が, 各モードでほぼ等しい値となることを実験で示した.

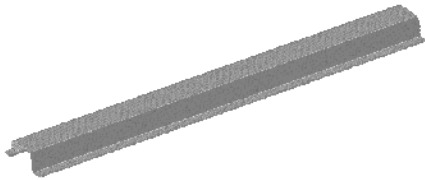


図 9 シェル要素モデル

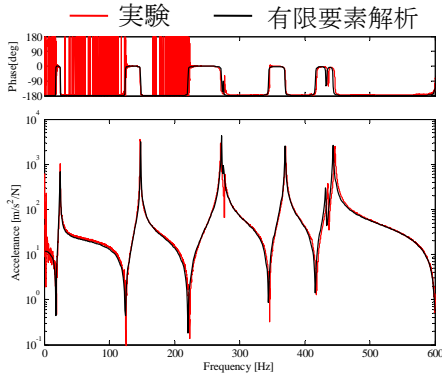


図 10 積層構成 0000 周波数応答関数

■ 実験同定したモード減衰比
 ■ モード減衰比の予測値(η_E の成分)
 ■ モード減衰比の予測値(η_G の成分)

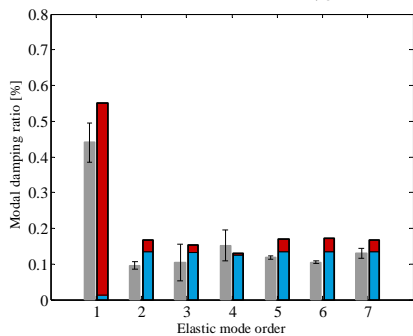


図 11 積層構成 0000 モード減衰比

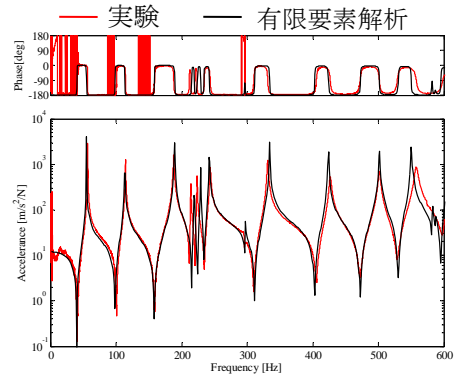


図 12 積層構成 4444 周波数応答関数

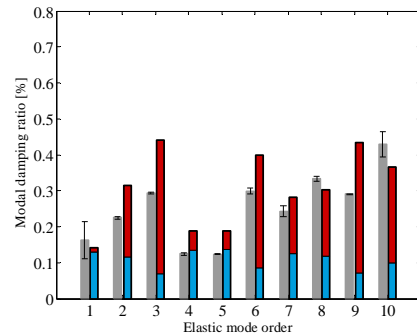


図 13 積層構成 4444 モード減衰比

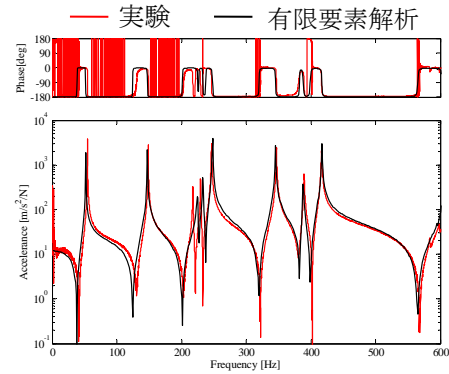


図 14 積層構成 4004 周波数応答関数

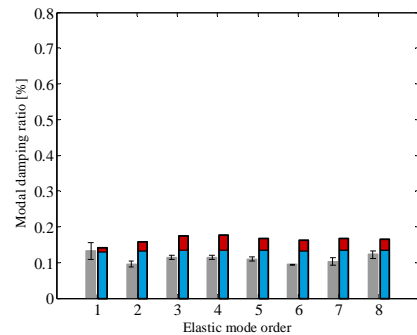


図 15 積層構成 4004 モード減衰比

(3)接着のモデル化方法の検証

図6に示したCFRPとSUSを接着した短冊形試験片の固有振動数、モード減衰比を図5に示したモデルで予測し、モデル化方法の検証を行った。表1に曲げモード、ねじりモードの固有振動数の実験と解析の比較結果、表2にモード減衰比の比較結果を示す。固有振動数の予測では、各積層構成で相対誤差は5%以下であった。またモード減衰の予測でも、ねじりモードが曲げモードと比較して減衰が大きくなる傾向を予測できており、CFRP、SUSをシェル要素でモデル化し、接着剤をソリッド要素でモデル化する方法の妥当性を示した。

表1. 接着試験片の固有振動数の予測精度

		実験 [Hz]	解析 [Hz]	誤差 [%]
SUS × CFRP0000	曲げ	3777	3852	2.0
	ねじり	5235	5358	2.3
SUS × CFRP4004	曲げ	3462	3500	1.1
	ねじり	7067	7249	2.6

表2. 接着試験片のモード減衰比 ζ の予測精度

		実験 $\times 10^{-3}$	解析 $\times 10^{-3}$	誤差 [%]
SUS × CFRP0000	曲げ	2.17	2.40	10.8
	ねじり	9.15	5.58	-39.1
SUS × CFRP4004	曲げ	2.62	2.17	-17.0
	ねじり	7.90	7.81	-1.1

(4)接着構造物の動特性の予測精度の検証

①接着ハットフレームの予測精度の検証

構築したCFRP単体のモデル、接着のモデル化方法を利用して、図7に示すハット型接着フレーム構造物(積層構成0000)の動特性を予測した。図16に実験で計測した周波数応答関数と、有限要素解析で予測した周波数応答関数の比較結果を示す。また1次から4次モードの固有振動数の比較結果を表3に示し、モード減衰比の比較結果を図17に示す。解析で予測したモード減衰比は、図17に示すCFRPの η_E , η_G , SUSの η , 接着剤の η の寄与の和で表される。

図16に示すように構築した接着モデルで1kHz以下の接着ハットフレームの周波数特性を予測できていることが確認できる。また表3に示したように4次モードの固有振動数まで相対誤差5%以下で予測可能であり、モード減衰比は図17に示したように減衰が大きい2次モードを把握可能であり、モード減衰比の定性的な予測が可能であることを確認した。

②接着材の物性の影響

1kHz以下の各モードで接着剤の寄与率を把握するために、1kHz以下のモードひずみエネルギーを算出した(図18)。図18は各モードでのCFRPの縦弾性係数 E , 横弾性係数 G ,

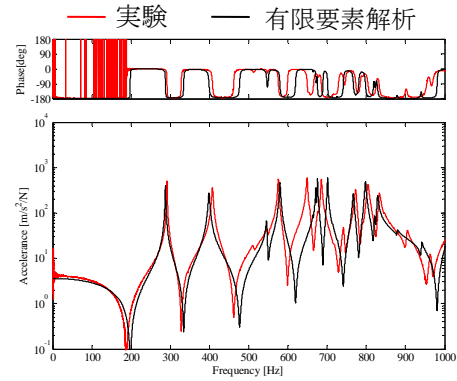


図16 接着ハットフレーム周波数応答関数

表3 接着ハットフレーム固有振動数の予測

モード	実験[Hz]	解析[Hz]	誤差[%]
1次	291	288	-1.1
2次	413	398	-3.4
3次	584	580	-0.8
4次	657	657	0.0

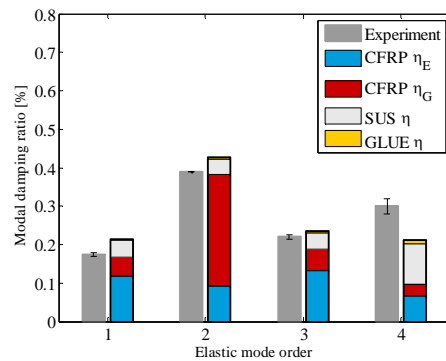


図17 接着ハットフレーム モード減衰比 ζ

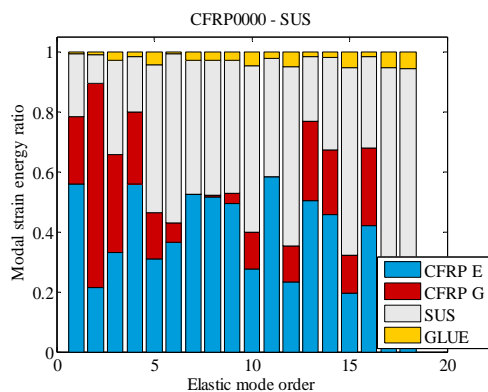


図18 ひずみエネルギー寄与率

表4 接着材の物性値を2倍にしたときの固有振動数の変化(有限要素解析)

モード	初期値[Hz]	2倍[Hz]	変化率 [%]
1次	287.5	288.2	0.2
2次	398.2	399.4	0.3

SUS の剛性、接着剤の剛性の寄与を表しており、1kHz 以下では接着剤の寄与が小さいことがわかる。その検証のために有限要素解析で接着剤の縦弾性係数を数値的に 2 倍に増加させたときと、初期値 (1 倍) としたときの 1 次、2 次固有振動数の変化を調べた (表 4)。表 4 に示したように接着剤の物性を 2 倍にした場合でも固有振動数の変化は 0.3% 程度と小さく、本試験片では接着剤の物性値の寄与は小さく、物性値の信頼性が低い場合でも、固有振動数への影響は軽微であることが分かった。

③接着材のはみ出し量の影響

図 19 に示すように作成した接着ハットフレームでは、接着剤のはみ出しが見られる。この接着剤のはみ出しが系全体に与える影響を図 20 の有限要素モデルで評価した。その結果、せん断変形が生じるモードで固有振動数の変化が大きく、図 20 左の L_0 モデルで予測したせん断モードの固有振動数は 666.5Hz、右の L_4 モデルでは 733.5Hz であり、10% 以上の差が生じた。このことから、接着ハットフレームの動特性に対する影響は接着剤の物性値よりも、接着剤のはみ出し量の方が大きく、動特性を高精度に予測するためには、はみ出し量をモデル化する必要があることを示した。

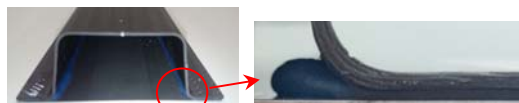


図 19 接着剤のはみ出し



図 20 はみ出し量異なる 2 つのモデル

(5)接着材の周波数依存性の確認

先の検討で明らかにしたように接着ハットフレームの動特性に対する接着材の物性の影響は小さいものの、接着材は粘弾性体で周波数依存性を有することが知られている。そこで図 21 に示す動的粘弾性測定装置 (TA instruments Q800) で接着剤の縦弾性係数 E 、構造減衰係数 η_E の周波数特性を実験で測定した。

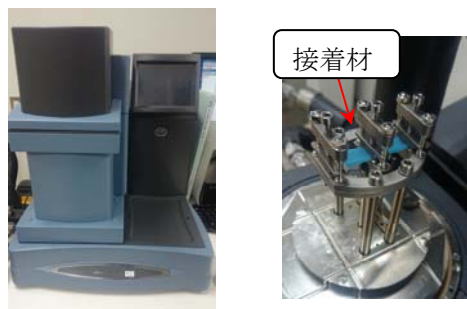


図 21 動的粘弾性測定装置

図 22 に E 、 η_E の周波数依存性を示す。測定では温度-周波数変換則に基づき、温度を変化させたときの動的粘弾性特性から、周波数依存性を求めた。図 22 に示すように、周波数が高くなるほど縦弾性係数 E は増加し、1kHz では 1Hz のときの約 2 倍の値となる。一方、 η_E は周波数が高くなるほど小さくなる傾向を持つことを確認した。

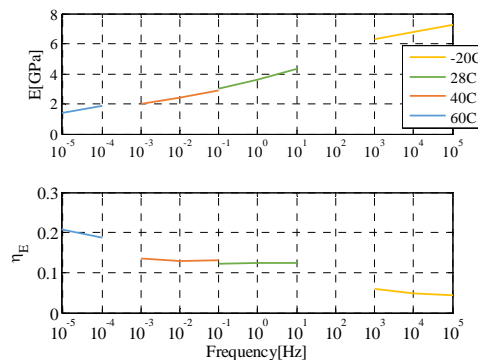


図 22 接着剤の E 、 η_E の周波数依存性

<引用文献>

- ①NEDO, 自動車軽量化炭素繊維強化複合材料の研究開発, 第 1 回分科会公開資料 5-3, 2007
- ②中西 康雅ほか, 織物複合材料の振動減衰推定法に関する研究, 機論 C, 72(719), pp.2042, 2006
- ③小林 隆志ほか, 接着接合はりの振動減衰能に与える温度の影響, 機論A, 68(673), pp1413, 2002

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)

- [雑誌論文] (計 0 件)
- [学会発表] (計 3 件)
- ①林祐樹, 古屋耕平, 松村雄一, 複合材料の動特性を高精度に予測するための曲げ剛性のモデル化手法, 日本機械学会, Dynamics & Design Conference 2015, 2015 年 8 月 25~28 日, 弘前大学 (青森県, 弘前市)
- ②吉岡琢朗, 古屋耕平, 松村雄一, CFRP と金属の接着構造物の動特性を予測するためのモデル化手法, 日本機械学会, Dynamics & Design Conference 2015, 2015 年 8 月 25~28 日, 弘前大学 (青森県, 弘前市)
- ③古屋耕平, 大橋寛之, 松村雄一, CFRP 構造物の異方性減衰を予測するモデル化手法, 日本機械学会, Dynamics & Design Conference 2014, 2014 年 8 月 26~29 日, 上智大学 (東京都, 千代田区)

[図書] (計 0 件)
[産業財産権] なし
○出願状況 (計 0 件)
[その他] なし

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
古屋 耕平 (FURUYA, Kohei)
岐阜大学・工学部・助教
研究者番号: 40580056