船殻用鋼及び CFRP 板の振動減衰特性に及ぼす エラストマーコーティングの効果に関する実験的研究*

倉 野 重 光^{*1}

Experimental Study on Effects of Elastomer Coating on the Vibration-Damping Property of Steel and CFRP Plates for Ship's Hull

Shigemitsu KURANO^{*2}

^{*2} 5th Research Center Technical Research & Development Institute Japan Defense Agency,
3-13-1 Nagase, Yokosuka-shi, Kanagawa, 239-0826 Japan

Vibration-damping properties have been studied for steel and CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) plates coated with viscoelastic elastomer which are applied for ship's hull materials with the aim of reducing the vibration noise. In the present study, vibration loss factor of the coated materials and original components have been measured by the standard method as determined in JIS G 0602. The loss factor and the Young's modulus of the elastomer in a range of the frequency of the decrease object for reducing the vibration noise have been computed by the conversion frequency nomogram. In this calculation, the temperature-frequency conversion rule is used, which is obtained from the measurement of the loss factor and the resonance frequency characteristics. As a result of above experiments and calculations, a method for reducing the radiation noise by coating hull with elastomer is proposed.

Key Words: Carbon Fiber Reinforced Plastics, Elastomer, Vibration-Damping, Viscoelastic, Loss Factor

1. 結 論

エラストマーは、極めてゴムに近い性質を有しながら粘弾性により振動エネルギーの熱エネルギーへの変換効率が高く振動損失係数の高い材料である⁽¹⁾。

そこで本研究において、航走体の振動雑音を低減するため CFRP 板等にエラストマーをコーティングした複合材の振動損失係数の解明を試みた。

すなわち、エラストマー⁽²⁾を制振材、基板材を鉄鋼板及び CFRP 板とした 2 層型試験片を作成し、日本工業標準調査会による制振鋼板の振動減衰特性試験方法 (JIS G 0602)⁽³⁾⁽⁴⁾により試験片の振動損失係数を計測した。さらに、その損失係数と共振周波数の測定結果から、温度・周波数換算則による粘弾性材換算周波数ノモグラムを算出し、エラストマー単体の損失係数とヤング率を求めた⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

その結果、低減対象周波数範囲(250Hz~2.5kHz)でのエラストマーの損失係数が明らかになり複合材船殻による航走体放射雑音低減方式の可能性を得た。

2. 振動損失特性の求め方⁽⁸⁾

材料の振動減衰性能とは、材料に加えられた振動エネルギーを材料が吸収し、熱エネルギーに変換する能力である。材料の損失係数 η は、次式で定義される。

$$\text{損失係数 } \eta = \frac{\Delta E}{2 \pi E} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、E: 1 サイクルの振動エネルギー

ΔE : 1 サイクルの振動で吸収されるエネルギー

損失係数の測定法には、幾つかあるが本研究では、半値幅法(周波数領域)を用いた。

2.1 試験装置

(1) 加振装置及び振動応答検出装置

本試験は、試験片を加振して共振させる加振装置と加振応答検出装置から成る中央支持定常加振法を用いた。図 1 に中央支持定常加振法概要図を示す。図中に振動応答検出装置及び伝達関数解析装置を示す。本装置での加振は電磁加振器によりインピーダンスヘッドを介して試験片を加振する。

* 原稿受付 2004 年 6 月 28 日。

^{*1} 正員、防衛庁技術研究本部第 5 研究所(〒239-0826 横須賀市長瀬 3-13-1)。

E-mail: kurano@jda-trdi.go.jp

Fig. 1 Center support stationary excitation method

加振周波数は、先端の材質を変えて調節した。振動応答速度は、試験片に取り付けられたフォースゲージと速度計が一体となったインピーダンスヘッドにより入力された力に比例する電圧出力を発生させ、そしてチャージ増幅器を介して振動応答検出装置により計測した。

(2) 伝達関数解析装置

損失係数の算出にあたっては、加振力と応答変位、応答速度又は、応答加速度の2信号間の伝達関数についてその半値幅を求める必要がある。従って、応答信号から周波数応答関数を算出する周波数応答関数測定装置（2チャンネルFFT分析器）と減衰波形記録装置から構成される伝達関数解析装置を用いた。

本研究では周波数応答関数の共振ピークの左右対称性を考慮して、機械インピーダンス又はモビリティ応答信号検出に最適な速度信号を計測した。

(3) 試験片

試験片は、基板材として短冊型の鉄鋼板と短冊型の円筒周方向 CFRP 板及び円筒軸方向 CFRP 板の3種類を用いた。CFRP 板は、円筒型に製作した材料を圧縮して作った板から切り出したものである。従って、切り出した方向により弾性係数が異なる。

さらに、各基板材に制振材としてエラストマーフィルムを2mmと4mmにコーティングした2層構造の短冊型試験片^①についても損失係数を計測した。

図2に本研究で用いた短冊型試験片の概要を示す。

Fig. 2 Laminated coating plate test sample

a CFRP 板材

炭素繊維は、T700-12kでマトリックス樹脂は、SR75 エポキシ樹脂である^②。

層構成は、 $90^\circ / \pm 30^\circ / 90^\circ / \pm 30^\circ / 90^\circ$

$= 0.6 / 0.3 / 0.3 / 0.3 / 0.6\text{mm}$,

物性は、円筒周方向弾性率：61.6 GPa、せん断強度：49 MPa、密度：1.5 g/cm³、ただし、円筒中心軸を 0° 、円筒周方向角度 90° とする。

図3に炭素繊維の方向と試験片切り出し方向を示す。そこで円筒軸方向に長く切り出した試験片を円筒軸方向 CFRP 板、円筒周方向に長く切り出した試験片を円筒周方向 CFRP 板とした。

Fig. 3 Construction of CFRP plate test sample

b. コーティング用エラストマー

本試験で用いたエラストマーは、エステル系ポリマーアロイ型材料（エスジェ ED3321）^②である。特徴としては、極めてゴムに近い性質を有しながら粘弾性により振動エネルギーの熱エネルギーへの変換効率が高く振動損失係数の高い複合材料を作ることが出来るものである。表1に本研究で用いたエラストマーの物性表^③を示す。

JIS G0602で規定された標準的試験片の寸法は、幅10mm、長さ250mm、厚さ2mm～7mmとされており、試験片切断面は、滑らかな平面を保ち2層の試験片にずれ、はがれ、ばり、接着用樹脂のはみ出しは無いものとした。

(4) 振動モード

本試験では中央支持方式を用いたので両端自由はりの曲げ振動モードとした。

(5) 測定温度

損失係数測定時の恒温槽内温度の精度を、 $\pm 1^\circ\text{C}$ とするため、試験片全体が所定の温度に達するまで恒温槽内環境を長時間保持した後、測定を行った。

Table 1 Elastomer properties (Era-stage ED3321) ^②

Items	Properties	Test
Specific gravity	1.18	JISK7112
Duro-meter hardness A	34	JISK6253
Tensile strength	5.0 [MPa] (500mm/分)	
Elongation	330 [%]	JISK6301
100%ML	1.6 [MPa]	
Compressive permanent set	4.6 [%] (70°C, 22hr)	JISK6301
Repulsion factor	9 [%]	JISK6301
Volume resistivity	$1.1 \times 10^8 \Omega \cdot m$	JISK6911

(6) 接着剤

本試験において接着剤は、高弾性のエポキシ系接着剤を用いた。従って、制振基板材とエラストマーフィルムの貼り付け後、エポキシ系接着剤の弾性特性が安定し制振材の弾性率よりも十分大きく成るまで硬化時間を取った。

2.2 試験片の損失係数と換算周波数ノモグラム

一般に船殻等での制振材料の低減対象とする振動周波数範囲は1000Hz以上で、使用温度も種々変化するもので、損失係数を実験的に実測することは極めて困難である。

そこで、制振材料と基板材により構成された複合材料試験片の損失係数と共振周波数の測定結果から、粘弾性材料の特性である温度・周波数換算則を用いて、任意の温度・任意の周波数での制振材料単体の損失係数とヤング率に関する動特性を理論的に求めた^③。理論解析には数値解析プログラム(Mathematica)を用いた。

2.3 片面に制振処理をした試験片の複素弾性率^④

ISO 10112に記述された理論を展開して本研究対象である船殻用CFRP板及び鉄鋼板を短冊型基板材としその片面に制振材用エラストマーをコーティングした複合材試験片の複素弾性係数と損失係数を算出する。

図2に示した試験片において、基板材の厚さを d_1 、制振材の厚さを d_2 とする。y方向の原点は、複合材試験片の中立面とする。各常数及び変数の添字は1が基板材、2が制振材のもの、添字のないものは複合材のものとする。常数の記号 E_i がヤング率、 d_i は厚さ、 η_i は損失係数を表す。ただし、 $\eta_1=0$ とする。

いま、試験片が振動数 ω で微小な定常振動をしているものとする。xにおける変位をu、振動速度をv、角速度をw、変形しているはりの曲率をc、とすると曲げモーメントMと曲げ剛性Bは、次式の関係がある。

$$M = c B = \frac{B}{j \omega} \frac{\partial w}{\partial x} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

$$B = B_1 \frac{1 + 2a(2\xi + 3\xi^2 + 2\xi^3) + a^2\xi^4}{1 + a\xi} \dots\dots (3)$$

$$\xi = d_2/d_1$$

$$a = E_2/E_1$$

いま制振層は、ダンピングを持っており、この場合(2)式のBは B 、 E_2 は E_2 、 a は a と複素数で表示される。ここで、 $B = B(1 + j\eta)$ 、 $E_2 = E_2(1 + j\eta_2)$ とおき、 $B/B_1 = (B/B_1)(1 + j\eta) = (B/B_1) + j(B/B_1)\eta$ 、及び $a = E_2/E_1 = (E_2/E_1)(1 + j\eta_2) = a(1 + j\eta_2)$ として、(2)式を実数部と虚数部に分けて、それぞれを等しいとすれば、次式が得られる。

$$\frac{B}{B_1} = \frac{1 + 2a(2\xi + 3\xi^2 + 2\xi^3) + a^2\xi^4}{1 + a\xi} \dots\dots (4)$$

$$\frac{\eta}{\eta_2} = \frac{a\xi}{1 + a\xi} \frac{3 + 6\xi + 4\xi^2 + 2a\xi^3 + a^2\xi^4}{1 + 2a(2\xi + 3\xi^2 + 2\xi^3) + a^2\xi^4} \dots\dots (5)$$

ただし、 η_2^2 以上の項は微小であるから0とする。

上記(4)、(5)式で、基板材の片面に制振材を付加した時の、複合材の曲げ剛性と損失係数を計算することができ、さらに、複合材試験片で行った試験から、付加した制振材単体のヤング率と損失係数を、(4)、(5)式を逆に解き求めることも出来る。

いま複合材試験片の共振周波数を f_c 、基板材単体の同じ振動モードの共振周波数を f_1 とすると複合材試験片の平均密度は、 $(\rho_1 d_1 + \rho_2 d_2) / (d_1 + d_2)$ となるので、

$$f_c^2 = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 \frac{\lambda_c^4}{L^4} \frac{B}{\rho_1 d_1 + \rho_2 d_2} \dots\dots\dots (6)$$

$$f_1^2 = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 \frac{\lambda_c^4}{L^4} \frac{B_1}{\rho_1 d_1} \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 ρ_1 、 ρ_2 は、基板材と制振材の密度、 L は試験片の自由長、 λ_c は振動数方程式の解を表す。従って、

$$\frac{B}{B_1} = \left(\frac{f_c}{f_1}\right)^2 \left(1 + \frac{\rho_2}{\rho_1} \xi\right) \dots\dots\dots (8)$$

となり、(6)、(7)式から、次式を得る。

$$z^2 = \left(1 + \frac{\rho^2}{\rho_1} \xi\right) \left(\frac{f_c}{f_1}\right)^2$$

$$= \frac{1 + 2a(2\xi + 3\xi^2 + 2\xi^3) + a^2\xi^4}{1 + a\xi} \dots\dots\dots (9)$$

ここで、(9)式の第1式と第2式の関係から z^2 を算出する。次に第1式と第3式の関係から、

$$a = \{-(4+6\xi + 4\xi^2 - z^2)\xi + [(4+6\xi + 4\xi^2 - z^2)^2\xi^2 + 4\xi^4(z^2 - 1)]^{1/2}\} / (2\xi^4) \dots\dots\dots (10)$$

となり、 $E_2 = a E_1$ から制振材のヤング率が、(5)式から η / η_2 が求まり、最終的に制振材エラストマーの損失係数 η_2 を得る。

2.4 換算周波数ノモグラムの作成手順

- (1) 特定の温度 T においてCFRP板又は鉄鋼板とエラストマーから構成された複合材試験片の損失係数、共振周波数を測定する。
- (2) (2)～(10)式により、特定の温度における制振材エラストマー単体の動特性（損失係数一周波数曲線とヤング率一周波数曲線）を算出する。
- (3) 温度・周波数換算則(11)、(12)式を用いて制振材エラストマー単体の換算周波数特性（損失係数・ヤング率—換算周波数曲線）に変換する⁷⁾。

$$\log \alpha_1 = \frac{-C_1(T - T_g)}{C_2 + (T - T_g)} \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 $C_1=17, C_2=52$,

T_g : 基準温度、 α_1 : シフトファクター

$$\text{換算周波数 } f_r = \alpha_1 \cdot f_c \dots\dots\dots (12)$$

- (4) (1)から(3)の処理を温度 T_1 から T_n について実施する。
- (5) 右側の縦軸に共振周波数、上側の横軸に温度をとってノモグラムを作る。

3. 試験結果及び考察

3.1 鉄鋼板試験片とCFRP板試験片の損失係数

図4(a)、図5(a)及び図6(a)に鉄鋼板試験片、円筒周方向CFRP板試験片及び円筒軸CFRP板方向試験片の損失係数測定結果を示す。各図の測定値は、試験片の温度-10, 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70℃毎に各次モード共振周波数の損失係数を測定した結果である。図4(b)、図5(b)、図6(b)は、図4(a)、図5(a)、図6(a)の測定結果を試験片の各次モード共振周波数毎に温度を-10℃から70℃ま

で10℃毎に変化させた時の損失係数に整理し直したものである。それらの結果から試験片の1次、2次、3次モード共振周波数及び温度範囲-10～70℃において損失係数の大きい順番は、円筒軸方向CFRP板>鉄鋼板>円筒周方向CFRP板の順であり、その値は、0.002から0.01の範囲にある。円筒軸方向CFRP板の損失係数が大きい理由は、炭素繊維を構成する糸が短冊型試験片の長辺に対し30°と90°の角度を成して編まれているため、円筒周方向CFRP板と比較して曲げ強度が小さくなり、振動による試験片の長辺方向の曲げ応力に対する炭素繊維の曲げ抑制効果が小さくなることから弾性係数が大きくなるものと考えられる。従って、試験片を同じ振動エネルギー E で加振した場合、試験片の変位量が大きくなり熱エネルギーに変換され外部に放出される振動エネルギーも大きくなる。よって、円筒軸方向CFRP板試験片の吸収振動エネルギー ΔE は、鉄鋼板及び円筒周方向試験片と比較して弾性係数が大きい損失係数は大きくなると考察される。反面、円筒周方向CFRP板の損失係数が小さい理由は、炭素繊維を構成する糸が短冊型試験片の長辺に対し0°と60°の角度を成して編まれているため、円筒軸方向CFRP板と比較して曲げ強度が大きくなり、振動による試験片の長辺方向の曲げ応力に対する炭素繊維の曲げ抑制効果が大きくなることから、弾性係数は小さくなるものと考えられる。従って、試験片を同じ振動エネルギー E で加振しても試験片の変位量が小さく熱エネルギーに変換される吸収振動エネルギー ΔE は、他の試験片と比較して小さくなるため損失係数は小さくなる。なお、曲げ強度が大きく弾性係数の小さな円筒周方向CFRP板試験片は、4次と5次モード共振周波数の損失係数測定値が小さすぎてバラツキが生じるため計測は不可能であった。

3.2 コーティング試験片の振動損失

鉄鋼板試験片とCFRP板試験片にエラストマーを厚さ2mmと4mmにコーティングした。そして各試験片の温度を-10℃から70℃まで10℃毎に変化させて各次共振周波数での損失係数を測定した。

3.2.1 2mmコーティング鉄鋼板の損失係数

コーティング鉄鋼板試験片の振動損失係数測定結果を図7(a)に示す。図中、最大損失係数は1次モード共振周波数200Hz、温度0℃の場合で0.095であり、最小損失係数は3次モード共振周波数1100Hz、温度70℃の場合で0.0025であった。この結果から温度により損失係数は大きく影響されることが解る。

図7(b)は、図7(a)の測定結果を各次モード共振周波数毎に温度を変化させた場合の損失係数変化に整理し

Fig. 4 Laminated steel test sample

Fig. 5 Circumference direction CFRP plate sample

Fig. 6 Axis direction CFRP plate sample

直したものである。図示された結果から各次モード共振周波数における損失係数の温度変化が明らかとなる。また、損失係数は共振周波数の増加に従って大きくなり、1次モード共振周波数については温度の上昇に従って低下することが解る。

3.2.2 2mm コーティング周方向CFRP板の損失係数

コーティング円筒周方向CFRP板の結果を図8(a)に示す。図中、最大損失係数は2次モード共振周波数1800Hz、温度0°Cの場合で0.04であり、最小損失係数は1次モード共振周波数700Hz、温度70°Cの場合で0.003であった。この結果から温度によって損失係数の値は大きく影響されることが解る。

図8(b)は、図8(a)の測定結果を各次モード共振周波数毎に温度を変化させた場合の損失係数の変化に整理した図である。図示された結果から各次モード共振周波数における損失係数の温度変化が明らかとなる。また、その図において、損失係数は共振周波数の増加に従って大きくなり、一次モード共振周波数については温度の上昇に従って低下することが解る。

3.2.3 2mm コーティング軸方向CFRP板の損失係数

コーティング円筒軸方向CFRP板の結果を図9(a)に示す。図中、最大損失係数は1次モード共振周波数100Hz、温度0°Cの場合で0.19であり、最小損失係数は1次モード共振周波数100Hz、温度70°Cの場合で

0.005であった。この結果から図8の結果と同様に温度によって損失係数の値は大きく影響されることが解る。

図9(b)は、図9(a)の測定結果を各次モード共振周波数毎に温度と損失係数の関係に整理しなおし、各次モード共振周波数での損失係数の温度変化を求めた図である。図に示す様に、損失係数は2次モード共振周波数以上では温度0°Cから20°Cの場合、損失係数が大きすぎて本試験装置では測定できなかった。

なお、1次モード共振周波数100Hzでの損失係数は温度0°Cの0.19から温度70°Cでの0.003まで温度の上昇に従って低下することが明らかとなった。

以上、3.2.1、3.2.2、3.2.3に示した測定結果より、本研究で用いたコーティング試験片の振動減衰効果の大きい順番は、温度0°Cの時の1次、2次、3次モード共振周波数で比較すると円筒軸方向CFRP板試験片>鉄鋼板試験片>円筒周方向CFRP板試験片となった。

3.2.4 4mm コーティング軸方向CFRP板の損失係数

エラストマー材コーティング厚さの振動損失係数への影響を調査するため4mmコーティング円筒軸方向CFRP板試験片の損失係数を測定した。その結果を図10(a)に示す。損失係数の値は0.37までの範囲にあり、最大損失係数は3次モード共振周波800Hz、温度10°Cでの0.37である。最小損失係数は1次モード共振周波数100Hz、温度70°Cでの0.0055であった。この結

Fig. 7 2mm coating laminated steel test sample

果から温度によって損失係数の値は大きく影響されることが解る。

図 10(b)は、図 10(a)に示した測定結果を各次モード共振周波数毎に温度と損失係数の関係に整理しなおして表した図である。再整理された結果から各次モード共振周波数における損失係数の温度変化が明らかとな

Fig. 9 2mm coating axis direction CFRP plate test sample

Fig. 8 2mm coating circumference direction CFRP plate test sample

る。図 10(b)において3次モード共振周波数より大きな周波数の損失係数は、温度 10°C から 30°C の範囲では値が大きくなり本試験装置では測定できなかった。なお、1次モード共振周波数 100Hz で損失係数は温度 0°C の最大値 0.29 から温度 60°C の最小値 0.0055 まで温度の上昇に従って低下することが解る。

Fig. 10 4mm coating axis direction CFRP plate test sample

コーティング厚さと損失係数の関係について考察するために図9(b)と図10(b)の結果を比較すると、

例えば、1次モード共振周波数では0°Cで損失係数は0.18が0.3に20°Cでは0.023が0.06に40°Cでは0.006が0.0095に60°Cでは0.0045が0.006に増加し、全モード共振周波数においてコーティング厚さが増すと損失係数も増加することが解った。

3.3 換算周波数ノモグラムの算出結果

図11に厚さ1mmの鉄鋼基板に厚さ2mmのコーティングをした試験片の損失係数測定結果(図7(a)と図7(b))から(11),(12)式を用いて計算値をプロットし換算周波数ノモグラムを算出した結果を示す。左側の縦軸は、損失係数とヤング率を表し、右側の縦軸は、周波数を表す。下側の横軸は換算周波数で、上側の横軸は、温度を表す。ここで、プロットされたデータから、任意の温度と周波数に対する損失係数とヤング率を求めるためにM. L. Drake, et al¹⁰とL. C. Rogers, et al¹⁰によって実験データに一致させた換算周波数曲線が次式として提案された。

$$\log \eta_D = \log \eta_m + \frac{c}{2} \left[\left(\frac{S_r + S_h}{c} \right) \log \left(\frac{f}{f_m} \right) + (S_r - S_h) \left\{ 1 - \left(\frac{1}{c} \log \left(\frac{f}{f_m} \right) + 1 \right)^{1/2} \right\} \right] \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$\log E_D = \log E_i + \frac{2 \log (E_m / E_i)}{1 + (f_m / f)^q} \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここで、 η_D : 換算周波数時の損失係数
 η_m : 損失係数の最大値
 E_D : 換算周波数時のヤング率
 E_m : ヤング率の最大値
 E_i : ヤング率の最小値
 q : 変曲点の接線勾配
 c : 変形しているはりの曲率
 S_r : ピーク左側の傾き
 S_h : ピーク右側の傾き
 f : 換算周波数
 f_m : 最大損失係数時の換算周波数

図11より、周波数が1000Hzで温度30°Cにおける制振材料、すなわちエラストマー単体の損失係数とヤング率を求める手順は次の通りである。

- (1) 右側の縦軸(周波数軸)の1000Hzのラインを見る。
- (2) このラインと上側の横軸(温度軸)の温度が30°Cの斜線との交点Aを求める。

- (3) 交点Aから垂線を引いて、損失係数のカーブフィットラインとの交点B、及びヤング率のカーブフィットラインとの交点Cを求める。
- (4) 交点B、交点Cから横軸に平行線を引き、左側の縦軸との交点D、交点Eの値を読む。
- (5) 交点Dは、損失係数0.22となる。また、交点Eは、ヤング率 $1.9 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ となる。

また、(4),(5)式から周波数を定めて温度だけを変化させて、低減対象周波数範囲におけるエラストマー単体のヤング率と損失係数の温度特性を算出した結果を図12と図13に示す。ここで、低減対象振動周波数250Hzの損失係数は、温度20°Cで0.25、2500Hzの損失係数は、温度20°Cで0.5となる。よって、低減対象周波数範囲でのエラストマー単体及びエラストマー複合材の振動損失係数が明らかとなり、従来の鉄鋼板と比較してエラストマーコーティングCFRP板の振動減衰効果の優位性が明らかになったことから複合材船殻よる航走体放射雑音低減方式の可能性を得た。

Fig. 11 Reduced frequency nomogram of elastomer

Fig. 12 Young's modulus-temperature relation of elastomer

Fig. 13 Loss factor-temperature relation of elastomer

4. 結 論

CFRP板等にエラストマーをコーティングした複合材の振動損失係数の解明を試みた結果、次の事実が明らかになった。

- (1) 鉄鋼板試験片、円筒周方向CFRP板試験片及び円筒軸方向試験片の1次、2次、3次モード共振周波数及び温度範囲-10～70℃における振動損失効果の大きい順番は、円筒軸方向CFRP板＞鉄鋼板＞円筒周方向CFRP板の順である。
- (2) エラストマーでコーティングした鉄鋼板、円筒周方向CFRP板及び円筒軸方向CFRP板は、いずれも温度10℃付近で最大の振動損失係数を示し、温度の増加に従って減少する。また、鉄鋼板、円筒周方向CFRP板及び円筒軸方向CFRP板ともコーティング厚さが増すほど損失係数は大きくなる。
- (3) コーティングによる振動損失効果の大きい順番は、温度0℃の時の1、2、3次モード共振周波数で比較すると円筒軸方向CFRP板＞鉄鋼板＞円筒周方向CFRP板の順である。
- (4) コーティング試験片の損失係数測定結果から換算周波数ノモグラムを算出し、エラストマー単体の損失係数とヤング率の温度特性を求めた結果、低減対象周波数範囲でのエラストマー単体及びエラストマー複合材の振動損失係数が明らかとなり、従来の鉄鋼板と比較してエラストマーコーティングCFRP板の振動減衰効果の優位性から複合材船殻による航走体放射雑音低減方式の可能性を得た。

5. 謝 辞

本研究を進めるに当たり、神奈川県産業技術総合研究所機械制御技術部尾崎雅亮氏、東ソー（株）ポリマ

ー事業部堤義高氏のご協力をいただきました。ここに謝意を表します。

6. 参考文献

- (1) 宮入祐夫、他、複合材料の辞典、朝倉書店
- (2) 東ソー株式会社四日市研究所ファインポリマーグループ、エラストージ技術資料（エラストージの粘弾性）、2000年5月2日発行
- (3) 日本工業規格、JIS G 0602、制振鋼板の振動減衰特性試験方法、(財)日本規格協会
- (4) 東ソー株式会社ポリマー事業部機能性ポリマー部、フレット用テストピース（社内検査成績書）、平成14年9月発行。
- (5) 制振材料研究会規格調査ワーキンググループ、損失係数測定解説書、計測評価技術分科会
- (6) 井上茂、換算周波数ノモグラムについて、(財)日本自動車研究所、2001年3月発行
- (7) ISO 10112:1991(E)、Damping materials—Graphical presentation of the complex modulus. First edition 1991-09-15.
- (8) 住友電気工業株式会社ハイブリッド製品（事）技術部：CFRP技術資料（CFRPの一般的物性と平板サンプルの寸法）、2002年3月14日
- (9) M.L.Drake, et al., Polymeric Material Testing Procedures to Determine Damping Properties and the Results of Selected Commercial Materials, AD-A094847, (1980).
- (10) L.C.Rogers, et al., Computerized Processing and Empirical Representation of Viscoelastic Material Property Data and Preliminary Constrained Layer Damping Treatment Design, Shock and Vibration Bulletin, Vol.48, (1978), 23～37.