

論文・解説

46

構造接着を用いた車体振動減衰技術の開発

Development of Damping Technology for Car Body Using Structural Adhesive Bonding

山本 研一*1 中川 興也*2 氷室 雄也*3 渡邊 重昭*4 小橋 正信*5
 Kenichi Yamamoto Kohya Nakagawa Katsuya Himuro Shigeaki Watanabe Masanobu Kobashi
 吉田 智也*6 三好 雄二*7 伊藤 司*8 鍵元 皇樹*9 八巻 悟*10
 Tomoya Yoshida Yuji Miyoshi Tsukasa Ito Koki Kagimoto Satoru Yamaki
 片岡 伸介*11
 Shinsuke Kataoka

要 約

車両の軽量化と乗心地の向上，ロードノイズ低減との両立をねらい，振動の伝達系にあたる車体フレームを対象とした減衰制御構造（減衰節構造，減衰ウェルドボンド接合），及び本構造に使用する振動減衰性に優れた構造用接着剤を新たに開発した。減衰節構造について，同等質量の簡易フレームを用いて基礎検証した結果，剛性に加えて減衰性が向上し，高い質量効率で振動が低減することを確認した。実車を用いた効果検証では，車体の振動が低減したとともに，100km/h走行時のロードノイズが運転席で最大5dB低減することを確認した。

Summary

Aiming at weight reduction, ride comfort and less road noise, damping control structures (damping stiffener and damping weld-bonding) and structural adhesive with high damping property applied for body frames have been newly developed. From the result of basic verification of test frame using this structure, it has confirmed that vibration of test frame decreased in effect of improvement of not only stiffness but damping. In addition, from the result of verification using car body and test car, it has confirmed that vibration of body decreased, and that road noise decreased up to 5 dB at driver position during driving at 100 km/h.

Key words : Vibration, Noise, and Ride Comfort, Body Structure, Adhesive, Joining, Damping

1. はじめに

近年，CO₂排出量低減に向けて，更なる車両の軽量化が必須となる一方，商品力向上のため，操縦安定性や乗心地の向上，ロードノイズの低減が求められている。

従来，上記の性能向上につながる車体の振動抑制には，補強部材の追加や板厚増などの剛性向上の手法が用いられてきたが，質量が増加するデメリットがあった。そこで，振動の制御因子である剛性に加えて減衰性に着目し，これを車体に積極的に付与することで，振動低減の質量効率を高めることを考えた。減衰性の活用はこれまで，振動の応答系である車体パネルを対象に，制振材の施工

位置やパネル形状を研究した報告がなされている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。これに対し今回，より起振源に近く振動の伝達系である車体フレームを対象とした減衰制御構造（減衰節構造，減衰ウェルドボンド接合），及び本構造に使用する振動減衰性に優れた構造用接着剤（減衰接着剤）を開発し，新型MAZDA3に採用した（Fig. 1）。

減衰制御構造のひとつである減衰節構造をFig. 2に示す。本構造は，車体フレームの断面変形を抑制し剛性を向上すると同時に，断面変形部位に高減衰材料（減衰接着剤）を配置しそこに歪を集中させ，振動を低減するものである。

*1~3 技術研究所
 Technical Research Center

*9~11 技術本部
 Production Engineering Div.

*4~8 車両開発本部
 Vehicle Development Div.



Fig. 1 Body-in-white of Mazda3 with Damping Control Structures Using Structural Adhesive (light blue line)

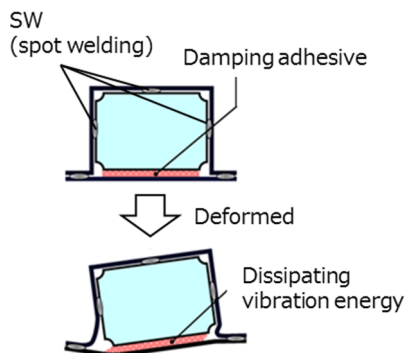


Fig. 2 Schematic Diagram of Damping Stiffener

本報では、減衰節構造の構造設計の考え方とその検証結果、及び減衰接着剤の開発に加え⁽⁴⁾⁽⁵⁾、本構造を実現する生産技術について報告する。

2. 減衰制御構造の開発

2.1 構造設計の考え方

車体フレームの断面変形を考えた場合、剛性向上にはFig. 2のように断面に節（隔壁）を設けて節の面内力で変形を抑制することが有効である。従来、節とフレームとの接合はスポット溶接（以下、SW）であるが、断面変形時には節とSW部で歪エネルギーを分担することになる。そこで、構造体全体の減衰性を向上させるため、SW部を高減衰材料（減衰接着剤）に置き換え、その歪エネルギー分担率を高めることができれば、剛性に加えて減衰性を向上できると考えた。

2.2 簡易フレームを用いた効果検証

減衰節構造の簡易フレームを用い、剛性向上と減衰性向上の効果を検証した。ここで、試作した簡易フレームは質量同等であるため、剛性の代用特性として共振周波数を用いた。試作した簡易フレームの形状・寸法をFig. 3に示す。簡易フレームの板厚は1.2mm、SWピッチ40mmとし、2枚の節の板厚は0.7mm、位置はフレーム中央から60mmとした。

計測システムをFig. 4に示す。簡易フレームを弾性支持し、フレーム端部を電磁加振機で上下に加振して、加

振点での加振力とフレーム各点の加速度を計測した。共振周波数とモード減衰比は、フレームの20点（前後、左右、上下）のイナータンスを用いてモード解析で同定した。今回の検証では、フレームの断面変形が生じるモードとして、Fig. 5に示す1次ねじりモードを対象とした。

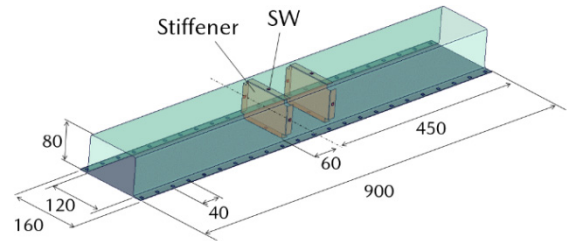


Fig. 3 Test Frame (unit: mm)

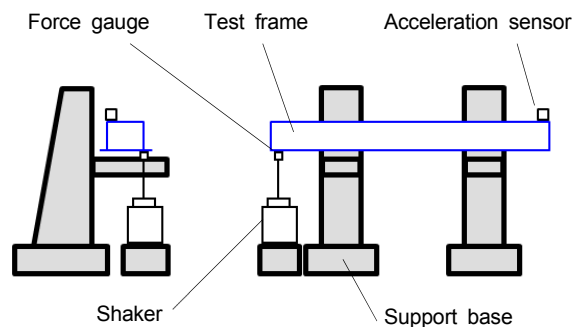


Fig. 4 Measuring System

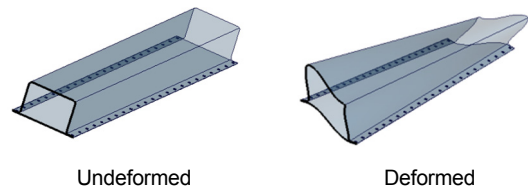


Fig. 5 Mode Shape of 1st Torsion Mode

評価した簡易フレームの節の仕様をTable 1に、節とフレームとを接合した接着剤の特性をTable 2に示す。節による剛性向上の検証として、(a)と(b)、(c)を比較、節を減衰接着剤で接合することによる減衰性向上の検証として、(b)と(c)を比較、高い減衰特性の接着剤を用いることによる減衰性向上の検証として、(d)と(e)を比較する。

Table 1 Specification of Stiffener in Test Frame

(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
	SW Stiffener	Adhesive Type A	Adhesive Type A	Adhesive Type B

Table 2 Properties of Structural Adhesives (20°C, 20Hz)

	Loss factor (-)	Storage modulus (MPa)
Adhesive Type A	0.45	564
Adhesive Type B	0.04	2279

各仕様の1次ねじりモードの共振周波数をFig. 6に、モード減衰比をFig. 7に示す。Fig. 6から、節を設定していない(a)に対し、節を設定した(b)と(c)で共振周波数が高く、剛性が向上していることが分かる。またFig. 7から、(a)と(b)に対し、損失係数が高い接着剤Aで接合した(c)のモード減衰比が大幅に高く、減衰性が向上していることが分かる。加えて(d)と(e)の比較から、接着剤の損失係数が高いほどモード減衰比が高いことが分かる。

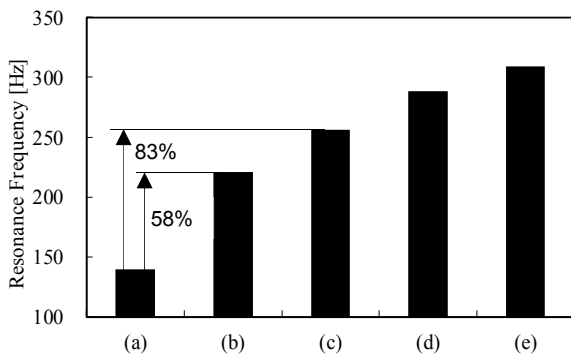


Fig. 6 Resonance Frequency of Test Frames

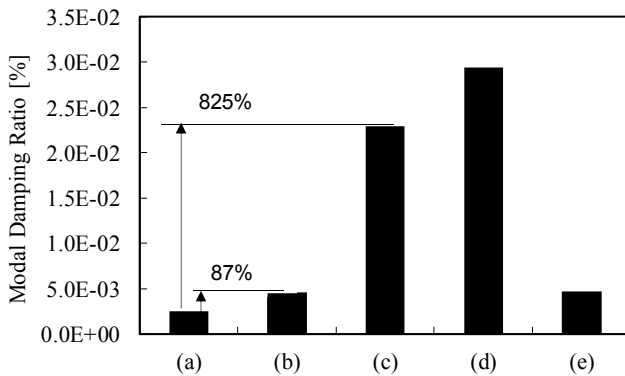


Fig. 7 Modal Damping Ratio of Test Frames

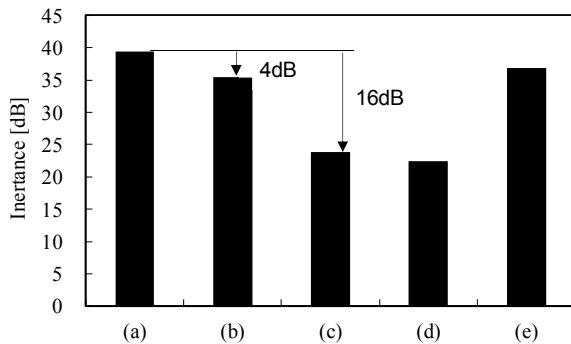


Fig. 8 Inertance of Test Frames

1次ねじりモードにおけるイナータンスをFig. 8に示す。節を設定していない(a)に対し、減衰性の高い接着剤Aで接合した(c)と(d)は大幅にイナータンスが低減する。ここで、(a)に対する低減量は(b)が4dB, (c)が16dBである。(b)と(c)は同等質量であるため、剛性と減衰性を向上させた(c)は高い質量効率で振動を低減することが分かる。

2.3 実車を用いた効果検証

減衰節構造を実車のフレームへ適用し、車体フレームの断面変形モードを伴う振動モードにおいて、車体の剛性向上と振動低減効果、更に車両でのロードノイズ低減効果を調べた。今回は、減衰節構造を配置しない車体と配置した車体で比較した。Fig. 9に、減衰節構造を配置した例を示す(赤塗りの部位)。接着剤は、Table 2に示したタイプAと同等特性である。



Fig. 9 Applied Location of Damping Stiffener (red painted)

(1) 車体を用いた検証

車体のフロントフレーム先端を加振したときのフロア各点(車体全体の70点)のイナータンスを計測し、周波数ごとに合計した値をFig. 10に示す。主要な共振ピークで共振周波数が約3Hz高くなるとともに、イナータンスが約6dB低減することが分かる。

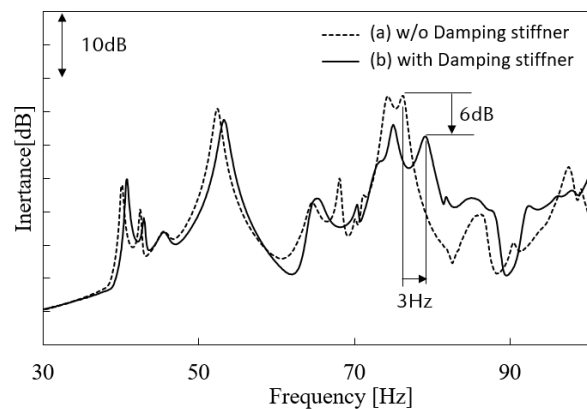


Fig. 10 Floor Inertance of Body in Panel

(2) 車両を用いた検証

ロードノイズは、荒れた路面を走行中に発生するゴーという音であり、代表的な車内騒音である。タイヤで発

生じた振動がサスペンションを介し、車体のフレームを伝ばして、キャビン内に音として放射されることで発生する。伝達系である車体フレームの振動特性を改善することはロードノイズ改善において有効であり、今回の減衰節構造による効果を確認できると考えた。

まず、台上加振での評価を実施した。ロードノイズの主要経路をなすサスペンション取付け点での音響感度をFig. 11に示す。減衰節のない車両(a)に対して、減衰節を入れた車両(b)は、ロードノイズ域での音響感度のピークが低減している。

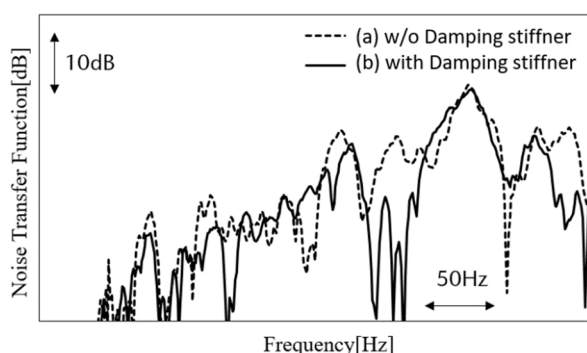


Fig. 11 Comparison of Noise Transfer Function by Suspension at Driver Position of Test Cars

次に、100km/h走行時での運転席の音圧レベルをFig. 12に示す。減衰節構造を配置することで、音圧レベルが最大で5dB低減できることが確認できた。

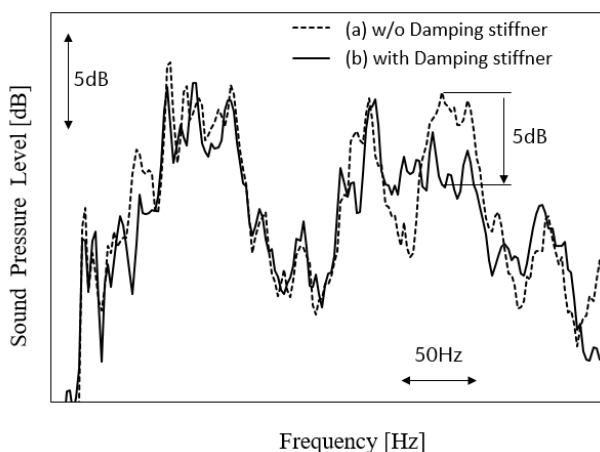


Fig. 12 Comparison of Road Noise of Test Cars

3. 減衰接着剤の開発

3.1 接着剤の開発目標

(1) ヤング率

2章の結果から、減衰節構造はフレームと節の3面をSW、残りの1面を減衰接着剤で接着する構造とした (Fig. 2参照)。したがって接着剤の剛性の目標は、フレームの静ねじり剛性が、フレームと節の4面をSWした場合と同等となるときのヤング率の値とした。Fig. 13に、

フレームと節の4面をSWした場合のフレームの静ねじり剛性と接着剤のヤング率との関係をFEM解析した結果を示す。接着剤のヤング率が100MPaあれば、節の4面をSWした場合の静ねじり剛性と等価であることが分かる。このことから、接着剤のヤング率の目標値を100MPaとした。

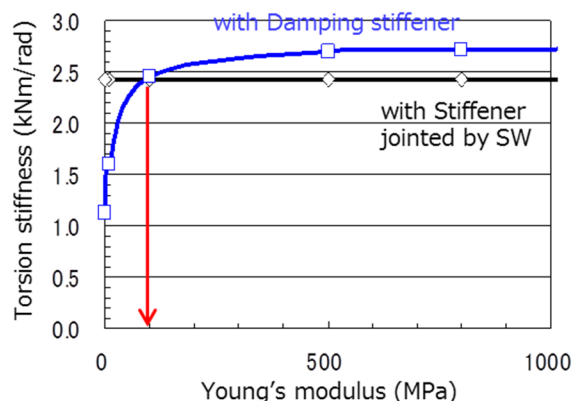


Fig. 13 Relation between Young's Modulus of Structural Adhesive and Torsion Stiffness of Frame

(2) 損失係数

接着剤の減衰性の目標値は、減衰節構造で使用したときに、フレームの1次ねじりモードの振動レベルが半減するときの損失係数の値とした。Fig. 14に、フレームの1次ねじりモードの振動レベルと接着剤の損失係数との関係をFEM解析した結果を示す。接着剤の損失係数が0.3あれば、振動レベルが半減することが分かる。このことから、接着剤の損失係数の開発目標を0.3以上とした。

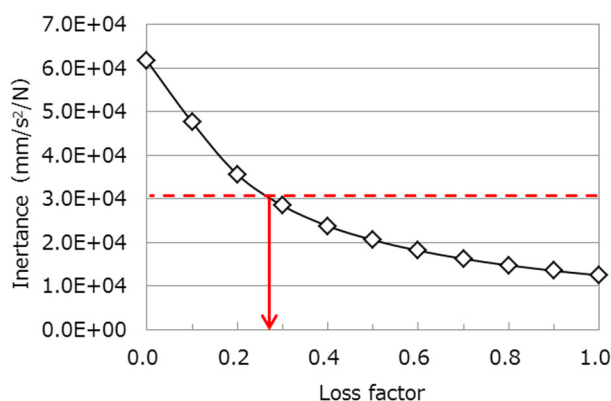


Fig. 14 Relation between Loss Factor of Structural Adhesive and Inertance of Frame

3.2 材料設計の考え方

減衰性の高い構造用接着剤を実現するための材料設計の考え方を以下に示す。一般的に、ヤング率と損失係数はトレードオフの関係にある。そこで、複数の樹脂を配合することで、幅広い温度域で減衰性を確保しつつ、フィラーの形状を選択することでヤング率を制御した。

(1) 常温域での減衰性の確保

Fig. 15に、複数の樹脂を配合した際の損失係数の違いを示す。汎用エポキシ樹脂aはガラス転移温度 (Tg) が高いため、常温域では損失係数が低く、減衰性を確保することができない。そこで、Tgが低い変性エポキシ樹脂bを使用し、常温で減衰性を発現するようにした。更に、Tgの異なる変性エポキシ樹脂cを配合し多成分系とすることで、減衰性の高い領域を拓げた。

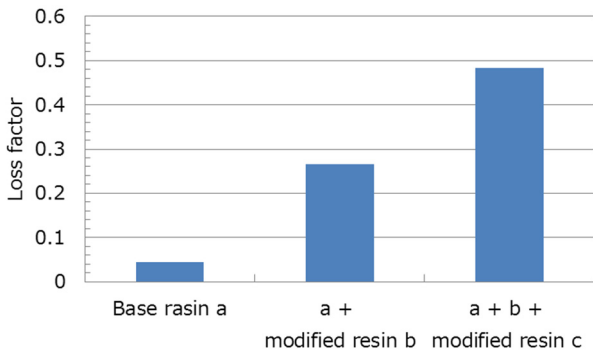


Fig. 15 Loss Factor of Developed Adhesives (20°C)

(2) ヤング率の制御

ヤング率の制御は、アスペクト比が高いため比表面積が大きい針状フィラーによる補強効果を活用した。Fig. 16に、全フィラー中の針状フィラーの配合比と、接着剤のヤング率及び損失係数との関係を示す。針状フィラーの配合で、損失係数を大きく低下させることなくヤング率を制御することができる。

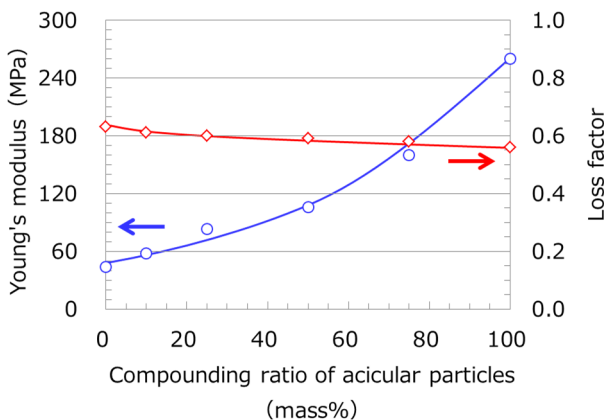


Fig. 16 Relation between Properties of Developed Adhesives and Compound Ratio of Acicular Particle in Filler Components

上記の材料設計の考え方をベースに組成開発を行い、Fig. 17に示すような、剛性と減衰性を両立し目標を満足する接着剤を開発した。なお、同時に自動車の製造ラインへの適合性を確保できるよう組成開発を行った。例えば、生産時のエネルギー低減の視点から、低温かつ短時

間の硬化特性、吐出性の視点から消費期限を考慮した粘度特性を実現している。

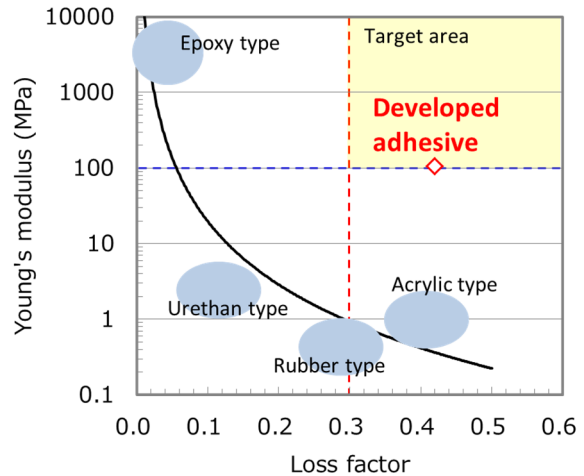


Fig. 17 Relation between Young's Modulus and Damping Factor of Developed Adhesive (20°C)

4. 生産技術開発

本開発においては、開発当初から接着剤、構造、工程、工法で量産適用するために開発、生産、製造の各部門で共創活動をしてきた。その中で、今後の接着工法の品質レベルを向上するために取り組んだ内容を紹介する。

4.1 接着剤の品質管理

接着剤は、製造メーカーから使用工場までペール缶の状態ですトラック輸送され、一時保管された後、塗布システムを用いて製品に塗布される。このプロセスで接着品質を維持するための各管理条件 (温度、湿度、接着剤の圧送期間) を、海外工場を含めて決定し、各種要件に織り込んだ。

4.2 塗布の品質保証

接着剤は、塗布された後、車体組立、車体洗浄、車体表面処理、車体電着塗装の各工程を経て、塗装乾燥炉の熱で硬化する。この一連の工程の中に、品質に及ぼすさまざまな影響因子があるが、この影響を (1) 構造要件と (2) 塗布良品条件 (塗布径、塗布高さ) に落とし込み、これを満足するための (3) 塗布システムを導入した。これら3点について取り組んだ内容を以下に示す。

(1) 構造要件

実車状態で塗布面が垂直になる部位は、硬化まで密着状態を維持するため、Fig. 18に示すように接着剤を受けける構造とすることで、ロバストな接着を可能とした。

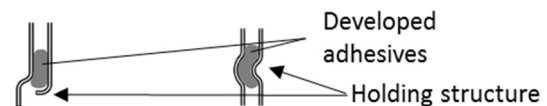


Fig.18 Cross Section of Structure of Damping Stiffener

(2) 塗布良品条件

減衰接着剤を減衰節構造と減衰ウェルドボンド接合に同一工程で塗布するため、塗布ノズルの共通化に取り組んだ。部位ごとの板間隙に応じ、塗布径や塗布高さの関係を実験検証から導くとともに、ロバストな塗布良品条件を導出した。

(3) 塗布システム

上記の塗布良品条件を保証するために、従来よりも塗布精度、及び塗布検査精度を向上したシステムを導入した。塗布精度の向上には、サーボモーターで塗布機内の接着剤をエンコーダー値で吐出量に換算する手法を用いた。塗布検査装置は、ノズル上部に取り付け、塗布しながらカメラによる塗布径を計測し、また塗布機の吐出量で高さを代用計測できるようにした。また、4.1章の接着剤品質管理の面から、Fig. 19に示すように、温調システムに加え、最短で接着剤供給できる配管長とするべく、注射器のように吸い取り、その吸い取った接着剤を塗布するドッキングシステムを採用した。

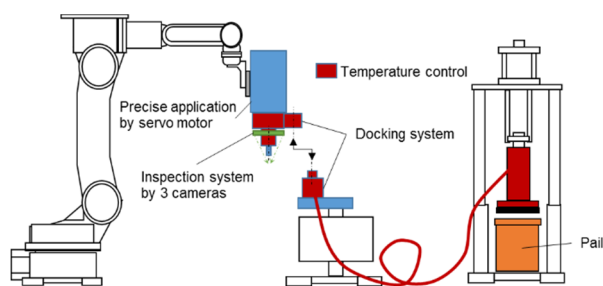


Fig.19 Schematic Diagram of Adhesive Application System

以上の取り組みに加え、接着部の定期的な全破壊検査を実施することで、高い品質を維持している。

5. おわりに

車両の軽量化と乗心地の向上、ロードノイズ低減との両立をねらい、振動の伝達系にあたる車体フレームを対象とした減衰制御構造（減衰節構造、減衰ウェルドボンド接合）、及び本構造に使用する振動減衰性に優れた構造用接着剤（減衰接着剤）を開発した。簡易フレームを用いて検証した結果、従来の剛性向上手段である節構造では4dB低減するのに対し、減衰節構造では16dB低減し、高い質量効率で振動を低減可能なことを確認した。実車を用いた検証では、車体の骨格モードの共振周波数が約3Hzシフトするとともに、振動が約6dB低減することを確認した。更に、100km/h走行時のロードノイズを最大で約5dB低減することを確認した。

最後に、減衰接着剤の共同開発先であるサンスター技研(株)に、感謝の意を表します。

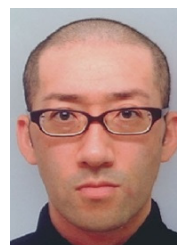
参考文献

- (1) 新田ほか：制振材の効率的な利用に関する一指針，自動車技術会学術講演会予稿集，No.69-99，pp.17-20 (1999)
- (2) 山口ほか：制振材を積層した自動車車体用パネルの減衰特性の有限要素解析，日本機械学会論文集（C編），70巻，699号，pp.76-82 (2004)
- (3) 加村ほか：パネルの放射音低減によるロードノイズの改善，自動車技術会学術講演会予稿集，No.976，pp.327-330 (1997)
- (4) 中川ほか：車体の減衰制御構造の開発，自動車技術会学術講演会予稿集，No.28-19 (2019)
- (5) 氷室ほか：減衰性に優れた構造用接着剤の開発，自動車技術会学術講演会予稿集，No.28-19 (2019)

■ 著 者 ■



山本 研一



中川 興也



氷室 雄也



渡邊 重昭



小橋 正信



吉田 智也



三好 雄二



伊藤 司



鍵元 皇樹



八巻 悟



片岡 伸介