

論文・解説

## 26 車両機能と材料特性をつなぐマルチスケール解析技術の研究

### Research on Multiscale Analysis Technology that Connects Vehicle Functions and Material Properties

西田 健二<sup>\*1</sup> 氷室 雄也<sup>\*2</sup> 河村 力<sup>\*3</sup>  
Kenji Nishida Katsuya Himuro Chikara Kawamura  
本田 正徳<sup>\*4</sup> 藤元 伸悦<sup>\*5</sup>  
Masanori Honda Shin-etsu Fujimoto

#### 要約

低燃費のための車体軽量化と、クルマの商品性向上のための操縦安定性能や乗り心地性能の両立が求められている。これら要求を同時に満足するには、材料・部品・車体の各スケールをつないで材料と構造の両面で機能を最大限に引き出すことが必要である。しかしながら、現状は、材料と構造の個々のモデルは存在しているが、それぞれのモデルをつなぐ方法論は確立されていない。そこで、車体性能からバックキャストして革新的な材料技術を創出することをねらい、材料モデルから車両の構造モデルまでをつなぐ技術開発に着手した。今回、樹脂複合材による車体性能の向上を題材に、材料から車体モデルまでのインプットとアウトプットをつなぐ手法を構築した。これにより、材料特性から車体性能を予測する順解析と、車体性能を満足するための構造・材料の指針を導出する逆解析を行うことが可能となった。本稿ではその取り組みについて報告する。

#### Abstract

It is required to achieve both weight reduction for low-fuel consumption and maneuvering stability performance and ride comfort performance for improvement of the productivity of cars. In order to achieve both these requirements, it is necessary to maximize the functions of both materials and structures beyond each scale of materials, parts, and car bodies. However, at present, individual models of materials and structures exist, but the methodology for connecting each model has not been established. Then, the technology development which connects the objects, ranging from the material model to the structural model of the vehicle has started with the aim of creating the innovative material technology by backcasting from the body performance. This time, aiming at the improvement of the body performance with the resin composite material, the technique which connects INPUT and OUTPUT information of the objects, ranging from the material to the car body model was constructed. This model technology enables us to do forward analysis that predicts vehicle body performance from material properties and reverse analysis that derives guidelines for structures and materials to satisfy vehicle body performance. This paper reports on these efforts.

**Key words :** Driving stability, Body structure, Weight reduction, Design optimization, Body material, Vibration, Optimization technique, Modal analysis, Composite material, Stiffness

#### 1. はじめに

マツダは、2017年に、2030年を見据えた技術開発の長期ビジョン「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言2030」を公表し、車のもつ魅力である「走る歓び」によって、「地球」、「社会」、「人」のそれぞれの問題解決を

目指している。近年、CO<sub>2</sub>排出量低減に向けて、さらなる車両の軽量化が必須となる一方、「走る歓び」につながる車両の性能の向上が求められている。これらの要求を達成するためには、クルマの性能からバックキャストし、クルマの価値を向上することのできる材料を実現するとともに、その材料の性能を最大限活用できる構造の実現

\*1~4 技術研究所  
Technical Research Center

\*5 日鉄ケミカル&マテリアル(株)  
NIPPON STEEL Chemical & Material Co., Ltd.

が必要になる。

一方、大幅な軽量化を実現するため車体のマルチマテリアル化の検討が進められており、軽量高性能材料として、繊維強化樹脂が注目されている。さまざまな材料や、材料内部の性能を質量効率よく利用するためには、材料と構造を同時に開発し、それぞれの性能を最大限に発揮させることが必須である。しかし、現状は、材料と構造の個々のモデルは存在しているが、それぞれのモデルをつなぐ方法論は確立されていない。そこで、メカニズムに基づき機能をモデル化することで、多性能・高機能を実現する考えを基に、モデルの検討を進めた。具体的には、CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) のもつ異方性の活用による、車体の剛性と減衰性の向上を題材として、材料と車体性能をつなぐモデルの技術開発を行った<sup>(1)</sup>。

## 2. 材料と車体性能をつなぐモデルの構築

### 2.1 異なるスケールのモデルをつなぐ方法

材料と構造を同時に開発するためには、材料特性が車体性能に与える影響を予測する順解析と、車体性能目標から目標を満足するために必要な、構造や材料の要件を算出する逆解析ができる状態にすることが課題である。

この解決のアプローチとして、順解析は、各スケールのモデルにおけるインプットとアウトプットをメカニズムに基づいて整理し、モデル間でつなぎ合わせることで対応する。また、逆解析のためには、スケール間を跨ぐ大規模な数値探索が必要となるため、各スケールのシミュレーションモデルを、計算コストが極めて小さなサロゲートモデルに置き換えることで対応する。このサロゲートモデルの構築には機械学習を活用する。具体的には、少ないデータでサロゲートモデルの精度を確保するため、実験計画法に基づいた各スケールのシミュレーションでデータ群を取得し、それを学習データとして応答局面モデルを構築した。今回は、ESTECO 社製 modeFRONTIER で実装されている応答曲面法を用いた。

以上により、材料、部品、車体構造の各スケールのインプット（制御因子）とアウトプット（目的関数）の関係を解くモデルを開発した。モデルの全体像を Fig. 1 に示す。

### 2.2 各スケールのモデル

#### (1) 材料モデル

産学連携プロジェクトで開発されたマルチスケールシミュレーションプラットフォーム OCTA に含まれる粗視化分子動力学シミュレーター COGNAC を用いて、炭素繊維とエポキシ樹脂のモデル化を行った (Fig. 2)。モデルで扱う制御因子は、樹脂の剛性、繊維の剛性、樹脂同士の相互作用、繊維同士の相互作用、繊維と樹脂の相互作用の 5 因子とした。樹脂同士の相互作用は、樹脂の分

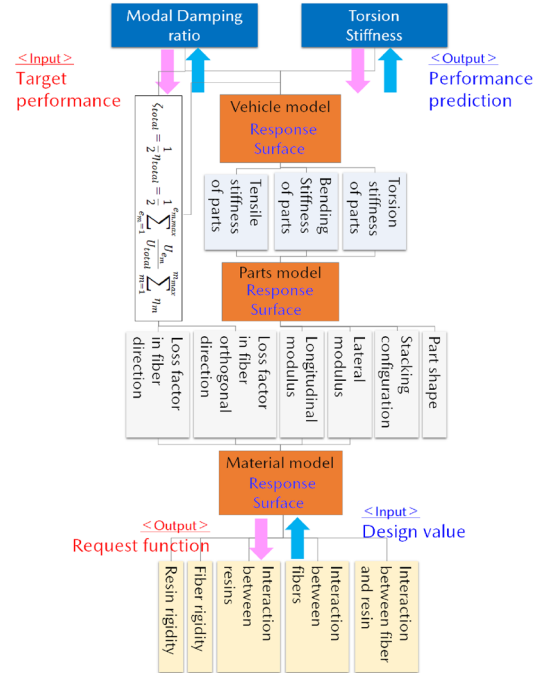


Fig. 1 Overview of the Model

子鎖の絡み合い度合い、繊維同士の相互作用は繊維の分散度合い、繊維と樹脂の相互作用は繊維と樹脂の密着度合いと解釈し解析を実施した。モデルの振動解析により得られるヒステリシス曲線 (Fig. 3) から、繊維方向と、繊維直交方向の弾性率と、損失係数を算出した。

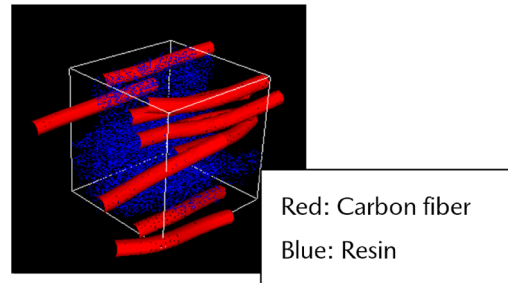


Fig. 2 Material Model

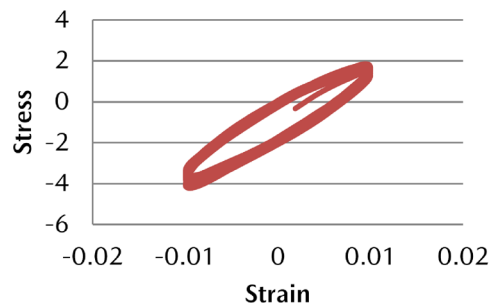


Fig. 3 Hysteresis Curves

#### (2) 部品モデル

対象とする補強部材を梁要素でモデル化し (Fig. 4)、車体フロアのトンネル部に取り付けた。部品構造の制御

因子として、梁部分の断面高さ、断面幅、高さ方向の板厚、幅方向の板厚とした。材料物性の制御因子として縦弾性率、横弾性率、繊維方向の損失係数、繊維直交方向の損失係数とし、構造と材料の各因子の数値を制御することにより部品の機能検討を行った。なお、繊維配向は、CFRPの異方性の特性を最大限に利用できる、梁要素長手方向への一方向性材とした。

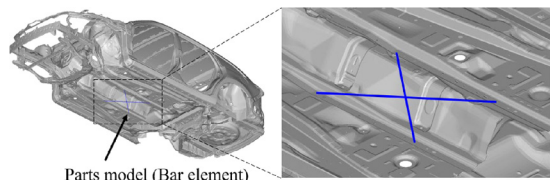


Fig. 4 Parts Model

(3) 車体モデル

シェル要素で構成された車体構造 (Fig. 5) に対し、NASTRAN を用いた静解析、及び、固有値解析を実施した。

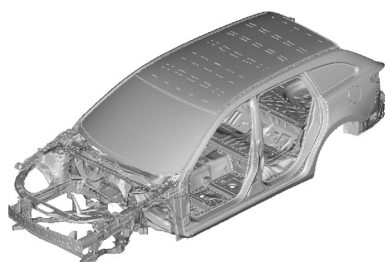


Fig. 5 Car body Model

対象とする性能は、車体ねじり変形時 (Fig. 6) の剛性 (以下、車体ねじり剛性) と、フロア振動モード (Fig. 7) でのモード減衰比の変化で評価した。フロア振動モードのモード減衰比は、車体の総ひずみエネルギーと、部品のひずみエネルギーから算出されるエネルギー分担率と、部品の損失係数を用いて、式 (1) によりモード減衰比を算出した。

$$\zeta_{total} = \frac{1}{2} \eta_{total} = \frac{1}{2} \sum_{e_m=1}^{e_{m,max}} \frac{U_{e_m}}{U_{total}} \sum_{m=1}^{m_{max}} \eta_m \quad (1)$$

$\zeta_{total}$  はモード減衰比、 $\eta_{total}$  は損失係数、 $U_{total}$  は車体のひずみエネルギー、 $U_{e_m}$  は部品のひずみエネルギー、 $\eta_m$  は部品を構成する減衰材料の損失係数である。

3. モデルを用いた解析の実施

3.1 最適解の探索

順解析を行った結果を Fig. 8 に示す。材料と構造の特性の制御により車体性能がどのように変化するかを解析結果が得られることを確認している。また、応答曲面を用いた多目的最適化 (逆解析) 計算を行うことで、設定

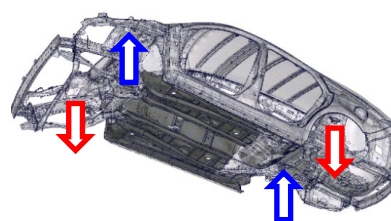


Fig. 6 Car Body Torsion Mode

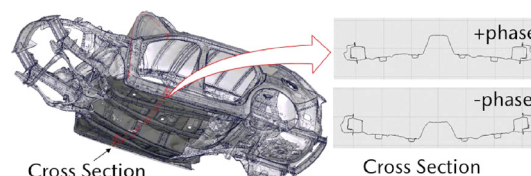


Fig. 7 Car Body Floor Vibration Mode

した設計空間での車体ねじり剛性と、フロア振動モードのモード減衰比の最適解の集合を示すパレート解を算出することが可能である。多目的最適化においては、これらパレート解の中から、目的にあった解を選択することで、最適解を得ることが可能となる。

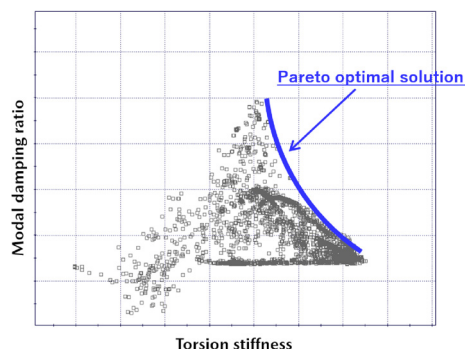


Fig. 8 Analysis Results of Car Body Performance

3.2 データマイニングによる設計指針の導出

車体ねじり剛性と、フロア振動モードのモード減衰比を向上させる汎用的な設計指針を得るために、最適化計算で得られた多量のデザイン群に対して主成分分析を行った。今回対象としている車体ねじり剛性と、フロア振動モードのモード減衰比を、目的関数として赤色の矢印で示している。材料の制御因子は①樹脂の剛性、②繊維の剛性、③樹脂同士の相互作用、④繊維同士の相互作用、⑤繊維と樹脂の相互作用としている。構造の制御因子は、⑥断面高さ、⑦断面幅、⑧高さ方向の板厚、⑨幅方向の板厚としており、材料と構造の各制御因子は青色の矢印で示している。

赤色の矢印のベクトルに対し、青色の矢印のベクトルの内積の大きい因子ほど、目的関数である車体性能への寄与が高くなることを示している。また、矢印の方向に

より、正の相関があるか負の相関があるかを示している。

車体性能と材料特性の関係性を示した結果を Fig. 9 に示す。この結果から、樹脂と繊維間の相互作用、繊維剛性は車体ねじり剛性のみ寄与することが分かり、樹脂間の相互作用は、フロア振動モード時のモード減衰比向上に寄与することが分かる。また、樹脂の剛性に関しては、車体性能に対し、負の相関があることが分かる。このことから、これらの因子は、車体ねじり剛性とフロア振動モードのモード減衰比の向上に有効であることが分かる。一方で、繊維間の相互作用に関しては、ねじり剛性には正の相関があり、フロア振動モード時のモード減衰比には負の相関がある。このことから、繊維間の相互作用では、車体ねじり剛性とフロア振動モードのモード減衰比の両立が困難であると推測できる。

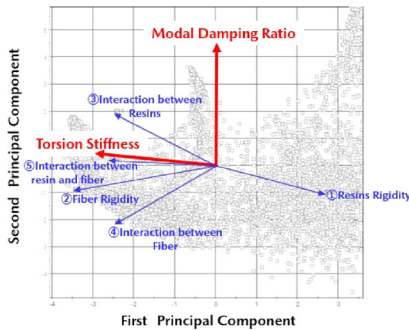


Fig. 9 Result of Principal Component Analysis (Car Body Performance and Material Properties)

車体性能と構造因子の関係性を示した結果を Fig. 10 に示す。この結果から、部品の断面高さに関する因子は、車体ねじり剛性とフロア振動モードのモード減衰比に対し正の相関にあり、部品の断面幅に関する因子は負の相関にあることが分かる。このことから、部品性能としては、高さ方向の曲げ剛性の確保が必要であることが分かる。また、部品の幅方向の因子は負の相関性があることが分かる。このことから、部品の高さとのアスペクト比が影響するねじり剛性に関しては、下げる方向へ制御する必要があると推測することができる。

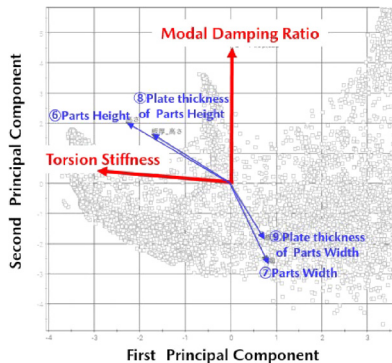


Fig. 10 Result of Principal Component Analysis (Car Body Performance and Structural Properties)

以上から、構築した解析技術によって、車体性能を確保するために必要な材料の制御指針と、構造の制御指針を導出することが可能である。

#### 4. 解析結果の検証

##### 4.1 材料因子の制御指針の妥当性検証

材料の剛性については、複合則などの古典理論から妥当性を理解できることから、今回は、モード減衰比の制御因子について、減衰発現メカニズムを基に検証した。

##### (1) 減衰性向上因子の制御指針

逆解析の結果、樹脂間の相互作用の向上、つまり樹脂の分子鎖の絡み合い度合いを高くすることで、減衰性能が向上することを示唆している。これは、減衰発現メカニズムとして、材料内部の分子鎖間摩擦による熱エネルギー変換と散逸によるものと考えられる。樹脂の分子鎖の絡み合い度合いが高くなれば、分子鎖間摩擦が発生する箇所が多くなることから、減衰性能が向上するものと考えられる。

##### (2) 減衰性向上指針の妥当性検証

汎用エポキシ樹脂と、樹脂間の相互作用を向上させた改良エポキシ樹脂を使用した一方向性 CFRP の短冊試験片を試作し、試験片端部加振による加振点応答から減衰性能を計測した。Fig. 11 に試験方法を示す。

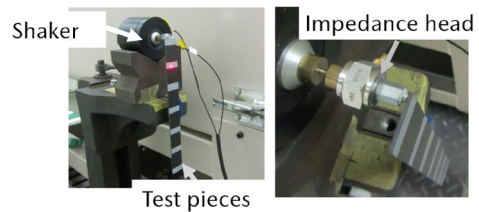


Fig. 11 Vibration Test of Test Pieces

なお、減衰性能の計測は、性能を顕著に測定できるねじりモードで実施しており、対象とするねじりモードの特定はレーザー振動計を用いた。

Fig. 12 に実験結果を示す。汎用エポキシ樹脂を使用した試験片に対し、改良樹脂を使用した試験片は、基材のエポキシ樹脂にエラストマー成分を加え、かつ、相溶性を向上させている。これにより、改良樹脂は、樹脂内の相互作用を向上させることができていると考えている。

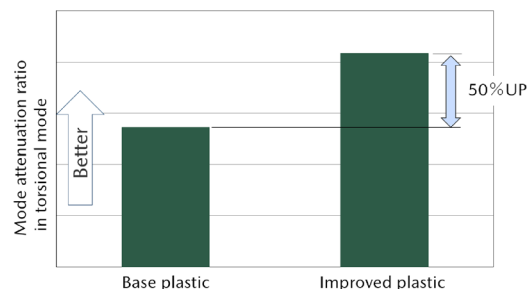


Fig. 12 Results of the Vibration Test of the Test Piece

汎用エポキシ樹脂に対し、改良樹脂は減衰性能を約50%向上させることが可能であることから、解析で得られた因子の制御指針の有効性を確認することができた。

#### 4.2 構造因子の制御指針の妥当性検証

##### (1) 車体ねじり剛性向上因子の制御指針

逆解析の結果、部品断面の高さ方向を向上させ、幅方向を減少させるように制御することで、車体性能を向上することができると示唆している。これは、車体ねじりモードに対し、今回対象とする部品が上下曲げモードのみで車体変形を抑制するためであると考えられる (Fig. 13)。部品の曲げ剛性を向上するためには、材料因子である弾性率の向上と、形状因子である断面二次モーメントの向上が必要となる。部品断面高さに関する因子は断面二次モーメント向上に有効であることから、車体性能向上に寄与する因子として抽出されたと考えられる。

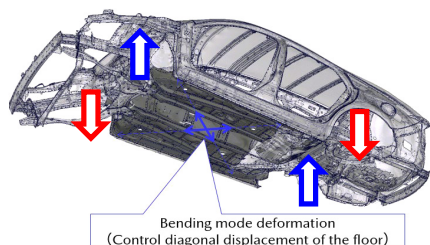


Fig. 13 Deformation Behavior of Car Body Torsion Mode

##### (2) フロア振動モードのモード減衰比向上因子の制御指針

フロア振動モードでは、Fig. 7 に示すようにフロア振動による部品取り付け面の面角度の変化に対し、斜めに横断するように部品構造を配置していることから、部品がねじりモードで変形していると考えられる (Fig. 14)。また、先行研究では、繊維強化樹脂の積層円筒で繊維配向角とねじり方向の減衰性との関係性を評価した結果、ねじり軸に対し、0°もしくは90°の一方方向性材にすることで、ねじりの減衰性能を最大化できることが分かっている<sup>(2)</sup>。よって、部品のねじり剛性の制御により、ねじりモードの変形を許容することで、一方方向性 CFRP のねじりの減衰性能を利用することを示唆していると考えられる。

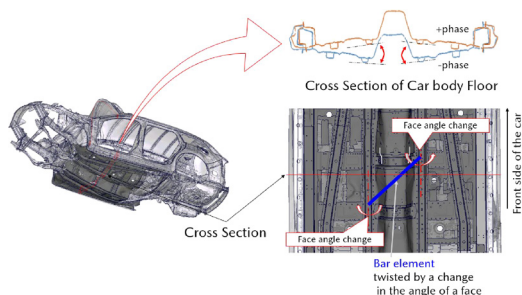


Fig. 14 Car Body Deformation Behavior and Bar Element Behavior in Floor Vibration Mode

##### (3) 車体性能向上指針の妥当性検証

構築したモデルによって導出した、材料と構造の制御指針に沿って、材料は、樹脂内の相互作用を向上させた改良樹脂を適用した。また、車体剛性向上への寄与度が高い、繊維の剛性を向上させた。構造は、部品断面高さの確保を行いつつ、ねじり剛性の制御を行った。これら性能向上指針を織り込んだ CFRP 部品を作成し、効果検証を行った。

Fig. 15 に試験方法を示す。車体の固定は、ラバーマウントを介して実施した。フロントフレームを加振し、車体に取り付けた加速度ピックアップセンサーにより振動特性を評価した。なお、車体のねじり剛性評価は、加振試験で代用している。車体ねじり剛性が向上すれば、加振試験によって得られる車体ねじりモードの共振周波数が向上することから代用指標として使用した。減衰性能は、試験によって得られる周波数応答関数から、半値幅法によりフロア振動モードのモード減衰比を算出した。

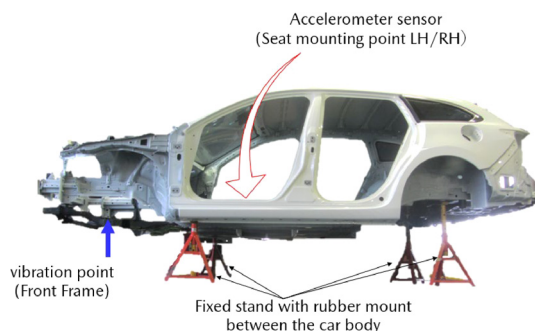


Fig. 15 Vibration Test by Car Body

実験結果を Fig. 16 に示す。逆解析で得られた構造の制御指針と、材料の制御指針を織り込むことで、部品の質量効率として、車体ねじり剛性を約 25%向上でき、フロア振動モードのモード減衰比を約 13%向上可能であることが確認できた。

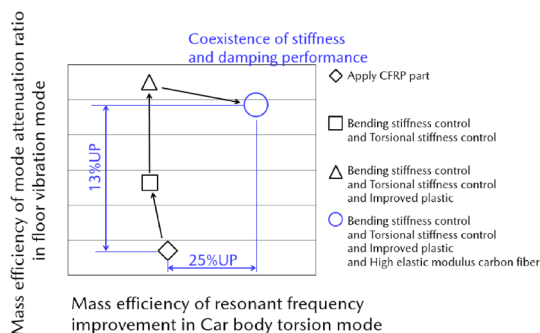


Fig. 16 Vibration Test by Car Body

## 5. おわりに

材料、部品、車体構造の各スケールのインプット（制御因子）とアウトプット（目的関数）を応答曲面法で構

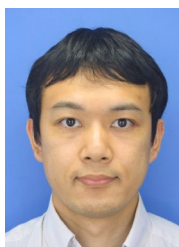
築したサロゲートモデルでつなぎ、順解析と逆解析ができる技術を開発した。これにより、材料特性が車体性能に与える影響を確認でき、目標とする車体性能を向上するために必要な部品と、材料の設計指針を導出できるようになった。

今回構築したモデルで導出した材料と構造の制御指針を参考に構造試作し、実験検証した結果、車体性能の向上が可能であると分かった。これにより、構築したモデルの有効性を確認できた。

### 参考文献

- (1) 氷室雄也ほか：モデルベースリサーチ（MBR）による車両と材料をつなぐ解析技術の開発，自動車技術会春季大会前刷集，No.37-20（2020）
- (2) 鮑力民ほか：FRP 積層円筒のねじり減衰特性，日本複合材料学会誌，Vol.28，pp.50-55（2002）

### ■著者■



西田 健二



氷室 雄也



河村 力



本田 正徳



藤元 伸悦