

サスペンション耐久条件設定のための 路面入力予測技術の構築

Development of Road Input Prediction Technology for Setting of Suspension Durability Conditions

下 平 貴 政*

Takamasa SHIMODAIRA

森 理 史*

Masafumi MORI

片 岡 俊 介*

Shunsuke KATAOKA

横 山 真 吾*

Shingo YOKOYAMA

要 旨

従来、サスペンションの耐久性能試験では、実車走行により取得したホイール入力を元に耐久入力条件を設定していた。本テーマでは、機構解析によるフルビークルシミュレーションにより、実車走行なしで耐久入力条件設定に必要なホイール入力を予測する技術を構築した。走行モードは悪路、縁石、ワインディング、フルブレーキ、ポットホールブレーキを対象とし、走行モードの再現のためにデジタル路面の整備と ABS 制御のモデルへの適用をおこなった。また、重力を負荷した状態を想定した車両セットアップをおこなうことにより精度を向上できることを検証し、一つのモデルで対象とする全ての走行モードにおいて良好な精度を得ることができた。この技術により、実車走行なしでのサスペンションの耐久条件設定を可能とした。

ABSTRACT

Conventionally, durability input conditions for suspension durability performance tests have been set based on wheel input data obtained from actual vehicles. The research discussed in this paper developed a technology for the prediction of the wheel input data necessary for setting durability input conditions without using actual vehicles by means of full vehicle analysis using multi-body simulation. Rough road, curb stone road, winding road, panic braking and pot hole braking were set as the target driving modes, and digital roads were created and an ABS control model was incorporated in order to reproduce the driving modes. In addition, the fact that performing the vehicle set-up assuming the loading of gravity increased accuracy was verified, and it was possible to realize good accuracy in all the target driving modes using a single model. The developed technology makes it possible to set suspension durability conditions without using an actual vehicle.

1. はじめに

お客様のニーズに即応するための開発期間短縮や、開発費用削減のため、機構解析を用いた完成車シミュレーションがさまざまな分野で利用されている⁽¹⁾⁻⁽⁸⁾。完成車シミュレーションを用いて、開発時の試作車を削減するには、実車テストで取得しなければならない全ての項目を計算により算出する技術が必要である。車体の耐久性評価対象部品の中で、サスペンションの耐久性評価フローは次に示す通りである。試作車を用いてホイール中心に発生する荷重を測定し、そこから各部品に発生する分担荷重を計算

する。次に、その分担荷重を入力荷重として台上試験装置を用い、単品部品評価、組み付け状態の評価をおこなうフローになっている (Fig. 1)。このようにホイール中心に入る荷重の把握にのみ実車テストを必要としていることから、この実車テストによる入力測定をシミュレーションに

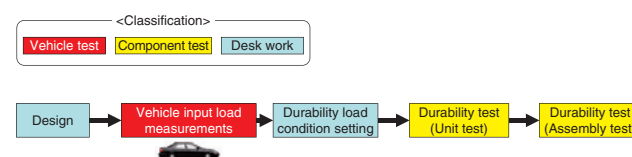


Fig. 1 Suspension development flow for durability

*四輪 R&D センター

置き換えることで、実車を用いない開発フローが達成できることがわかる。そこで、本テーマでは、機構解析による完成車シミュレーション技術を構築するために、走行モードの再現、精度向上に向けた車両パラメータ調整とツール化、精度検証をおこない、実車テスト置き換えのための十分な結果を得られたので報告する。

2. 完成車シミュレーションの概要

路面走行により発生する入力を把握するために、機構解析を用いたフルビークルモデルを構築した (Fig. 2)。

2008 年モデル FIT, 1.5 L エンジン, CVT 車のモデルを作成し検証をおこなった。悪路、縁石走行用に構築されてきた手法を参考にした⁽¹⁾⁻⁽³⁾。ボデー、サスペンションアーム、ナックル、ハブ等は剛体でモデル化し、トーションビームに対し弾性体の適用をおこなった。荷重評価用にホイール中心に 6 分力計相当のモデルを作成した。

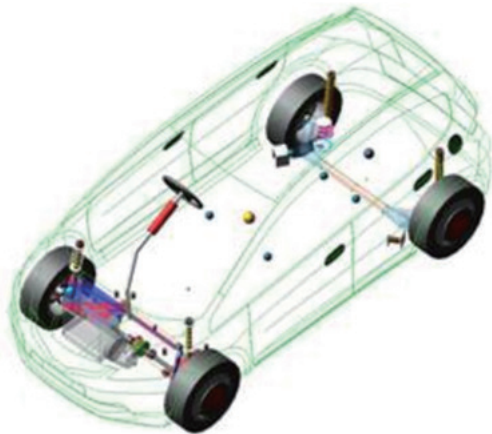


Fig. 2 Full vehicle simulation model

3. 走行再現に向けたモデル環境の整備

サスペンションには走行状態に応じてさまざまな方向の荷重が路面から入ってくる。それゆえ耐久保証のために入力方向別に走行モードが用意されている。シミュレーションで耐久条件を決めるためにはそれら全モードの走行再現が必要になる。そこで、必要な走行モードの整理、各走行モードに応じたデジタル路面の整備、タイヤモデルの選択、ブレーキ ABS 挙動再現のために、MATLAB/Simulink 制御モデルとの連成技術の適用をおこなった。

3.1. 走行モードの抽出

サスペンションの耐久条件を決めるための必要な走行モードは、ワインディング、パニックブレーキ、ポットホールブレーキ、縁石、悪路の 5 モードとなっている。走行モードと対応する目標荷重方向を Fig. 3 に示す。

3.2. デジタル路面の作成

デジタル路面を作成する代表的な手法は 3 通り存在する。手法 (A) 形状を数式で表現する。2 次元または進行方向の形状を再現した 2.5 次元路面に対し使用している。

手法 (B) 3 角形パッチを使用し形状を再現する。詳細な 3 次元形状の再現が必要な路面に使用する。アスキーフォーマットで記述されることと、路面形状の表現が複雑になることで、計算コストが増大する傾向がある (Fig. 4)。

手法 (C) 格子形状を基本とし、各交差点の高さ方向のデータにより 3 次元形状を再現させる。複雑な 3 次元形状を表現する必要がある路面に使用する。バイナリーデータを使用することと、格子の概念により路面形状の表現が簡素化され、3 次元路面を計算させることによるコスト増を最小化できる⁽⁹⁾ (Fig. 5)。

Driving mode	Target load direction
Winding	Mx
Panic braking	Fx, My
Pot hole braking	Fx
Curb stone	Fx, Fz
Rough road	Fx, Fz

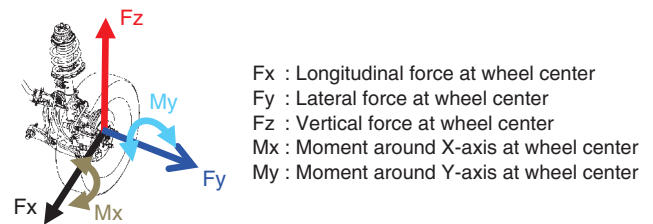


Fig. 3 Driving mode for each load direction

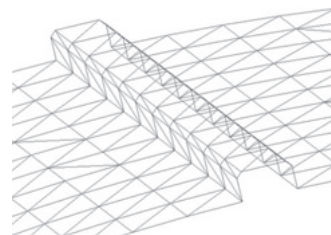


Fig. 4 Image of format (B)

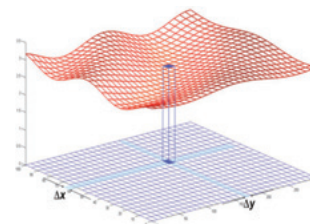


Fig. 5 Image of format (C)

本テーマでは、計算コストと路面形状の再現必要性の観点から、次のようにモデル化手法を選択し、デジタル路面化をおこなった (Fig. 6)。

フラットな平面で計算可能なパニックブレーキは手法 (A) を適用した。詳細な 3 次元路面形状が必要であるが、連続的には凹凸が存在しないモードとなっている縁石、ポットホールブレーキ、ワインディングモードは手法 (B) を採用した。複雑な凹凸が連続的に発生し、かつ高精度に形状を再現することが必要な悪路路面は、手法 (B) では計算コストの増大が著しく、計算実行に支障がでるため、形状再現性が手法 (B) より少し劣るが耐久性評価に十分な再現性が得られ、計算コストが実用的である手法 (C) を採用した。

縁石、悪路路面モデルを作成するための元データは従来の取り組みでおこなった路面計測データを使用した。ポットホールブレーキは図面データを使用した。ワインディング路面は路面計測を実施しデジタル化をおこなった。

3.3. タイヤモデルの選択

本テーマでは機構解析用タイヤモデルの中から、使用している機構ソフトとの相性や導入コストを考慮し、FTire⁽⁹⁾ または Magic Formula タイヤを選定した。その 2 種類のタイヤモデルを走行モードの特徴に応じて適用した。Magic Formula は、横力や前後力等のタイヤに発生する力を、数式を用いてタイヤモデルとして表現しており、計算コストを抑えられることが特徴となっている。一般的に車両運動解析を検討するために使用されている。一方、FTire はタイヤのスチールベルトをメッシュで表現することで、タイヤのエンベロープ特性を再現できるようにしたモデルである。そのためタイヤ接地面周辺の挙動を詳細に表現できることが計算コストが増大する。タイヤが小突起を包み込む特性であるエンベロープ特性を高精度で再現で

Table 1 Varieties of tire model

Driving mode	Tire model	
	FTire	Magic Formula
Winding		✓
Panic braking		✓
Pothole braking	✓	
Curb stone	✓	
Rough road	✓	

きるため、本取り組みのような強度耐久領域の計算から乗り心地領域の計算に使用されている。

タイヤモデル選択する上で、各走行モードにおけるエンベロープ特性の精度の必要性に着目した。ワインディング、パニックブレーキは路面の高低差や横方向の勾配を考慮する必要があるが、比較的分フラットな路面を走行するモードになっている。そのためエンベロープ特性精度の必要性は低いと考え Magic Formula タイヤモデルを選択した。一方ポットホールブレーキ、縁石、悪路は大小の突起物をタイヤが乗り越すモードになっており、突起物の形状、タイヤの状態に応じて反力が異なってくることから、高いタイヤのエンベロープ特性精度が必要になってくると考えられる。よって、FTire モデルを選択した (Table 1)。

3.4. 機構と制御モデルの連成解析技術の適用

パニックブレーキやポットホールブレーキモードでは、ABS 特性の再現が重要になる。そこで ABS 特性がモデル化された MATLAB/Simulink モデルとの連成技術を適用した。モデル概要を Fig. 7 に示す。

機構-制御連成計算は MATLAB/Simulink 上でおこなった。Simulink モデルの構成は機構解析モデルを S-Function 化した機構モデルブロック、ABS 制御としてブレーキピストンの On と Off を制御するコントローラブロック、油圧量を制御するハイドロリックユニットブロックとなっている。車体挙動を機構解析モデルから取得しそれぞれのブロックで計算をおこない、各車輪に発生するブレーキピストン圧を算出することで ABS 挙動を再現した。

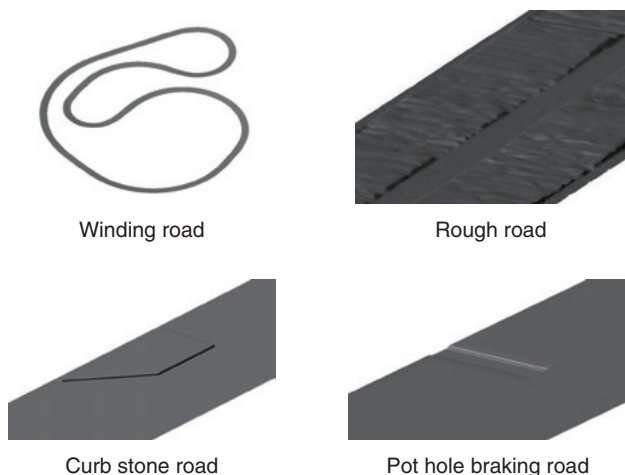


Fig. 6 Road shape for each driving mode

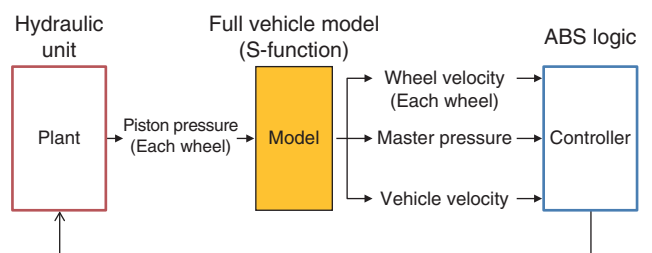


Fig. 7 Co-simulation flow in MATLAB/Simulink

4. モデルパラメータの調整

4.1. 定常円走行による精度検証

既出の論文⁽¹⁾⁻⁽³⁾で悪路、縁石の精度検証はおこなっているのですが、ワインディング、パニックブレーキ、ポットホールブレーキに焦点を合わせ、定常円走行を用いてパラメータ調整項目の絞り込みをおこなった (Fig. 8)。

旋回時の車体ロールによる外輪側フロント荷重変化を比較した結果を Fig. 9 に示す。

定常円旋回という走行モードの単純さと、目標とする走行モードの複雑さや最終的に得たい精度目標から、目標精度を 5% 以内に設定し、精度向上に取り組んだ。

4.2. 精度向上に向けた寄与度解析

精度向上に向けてモデル改良をおこなうパラメータを絞り込むために寄与度解析を実施した。下記に示すパラメータに対し実施した。その結果を Fig. 10 に示す。

- (1) 完成車質量、重心高、慣性モーメント
- (2) イニシャルトー、イニシャルキャンバ
- (3) ダンパ減衰、スプリング剛性、

バンプストップ剛性、スタビライザ剛性

- (4) プッシュ剛性、減衰

完成車質量、イニシャルキャンバ、重心高、イニシャルトーの寄与度が高い結果になった。この結果から、車両の

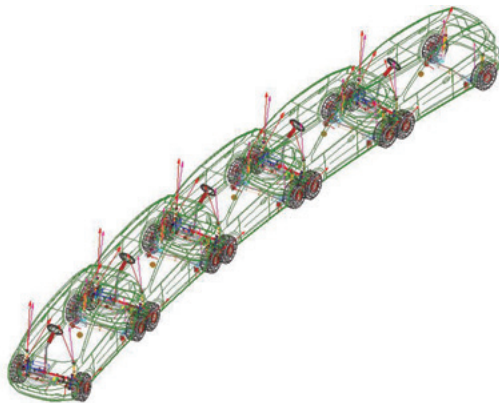


Fig. 8 Constant radius cornering

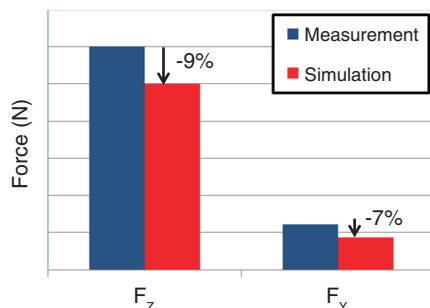


Fig. 9 Comparison of front wheel load at wheel center

初期状態を定義する車両セッティングパラメータが高寄与度であることがわかる。その次にリヤバンプストップ剛性・フロントスタビライザ剛性等の部品剛性項目が高寄与度パラメータとなった。本テーマでは、リヤバンプストップ剛性は特性計測結果を適用し、フロントスタビライザ剛性は解析で使った仕様と同部品を実車に組み込み計測をおこなう等、誤差を最小限に抑える取り組みをおこなっている。以上の理由から、高精度化に向け、車両初期状態の再現性に着目し検証をおこなった。

4.3. 車両初期状態の再現性検証

フルビークルモデルが構築された状態から走行計算をおこなうための計算プロセスを Fig. 11 に示す。

Step 1: モデル構築時の状態で計算対象とする車両特性に合うよう車両セットアップパラメータを調整する。

Step 2: $1g$ ($1g = 9.8 \text{ m/s}^2$) 重力を与え静的な釣り合い計算をおこなう。この状態を $1g$ 重力による車両安定化状態 ($1g$ condition) と定義する。

Step 3: Step 2 の車両状態で目的の走行モードを計算する。

通常は Step 1 で車両初期状態を再現させるための車両セットアップパラメータの調整をおこなっている。しかし本来、実際の車両には $1g$ 重力が常に作用している状態であることを考慮すると、合わせるべき初期状態は Step 2 ($1g$ condition) であると考えられる。そこで Step 1 から Step 2 において $1g$ 重力を負荷したことによる車両セットアップパラメータ変化量の確認をおこなった。その結果を Table 2 に示す。

Fig. 10 の結果から注目すべき車両セットアップパラメータを重心高、イニシャルキャンバ、イニシャルトーと

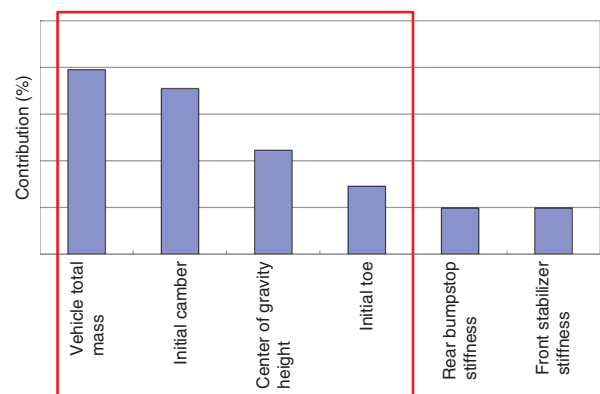


Fig. 10 Results for contribution of parameters

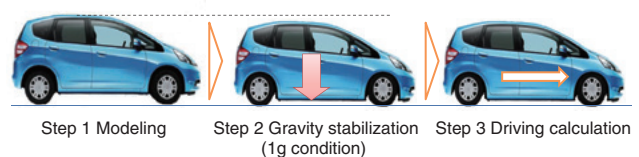


Fig. 11 Process for driving calculation

Table 2 Variation in set parameters due to 1g load

Set parameter		Modeling (Step 1)	1g condition (Step 2)	Error
Center of gravity height (mm)		494	449	-45
Initial toe (deg)	Front	0.00	0.01	+0.01
	Rear	0.10	0.34	+0.24
Initial camber (deg)	Front	0.00	-0.56	-0.56
	Rear	-1.00	-1.39	-0.39

選定した。寄与度が最も高かった車両質量は1g重力では変化しないため検討項目から除外した。

1g重力の負荷により車体セットアップパラメータが、モデル構築状態(Step 1)で設定した車両特性のねらい値から変化していることが確認できた。特に重心高やイニシャルキャンバは大幅に変化していることが確認でき、解析の高精度化に向けて改良すべき項目であることが確認できた。これは、図面情報を参照してモデル化をおこなっているが、そこで想定されている車両状態と耐久性評価に使用している車両状態が異なることが原因と考えられる。

4.4. 車両特性再現手法の改良

走行解析を高精度化させるためにはモデル構築時ではなく、1g conditionで調整する必要があると考えた。しかし、1g conditionは静的な釣り合い計算の結果であるため、それに対してモデルパラメータの調整を直接おこなうことはできない。1g conditionで大きな差が確認できた重心高に対して、Fig. 12に示す方法で1g重力の負荷による変化量を考慮して初期値を再設定した。

上記の考え方で車両セッティングパラメータを調整したモデルによる荷重比較をFig. 13に示す。

F_z 荷重差で5%、F_y 荷重差で2%と荷重移動の改善とそ

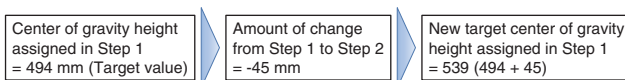


Fig. 12 Flow of adjustment of target value

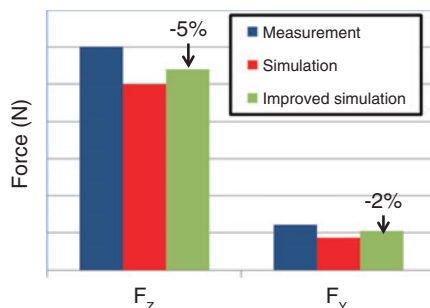


Fig. 13 Reevaluation of front wheel load at wheel center

れに伴う横力精度向上を確認でき、目標とする精度を再現できた。

4.5. 自動化ツールの作成

精度向上には、1g conditionで車両特性の調整をおこなうことが不可欠であることがわかった。

本テーマでは、できるだけ解析精度を上げるため、実車テストで管理すべき車両セッティング全項目を1g conditionでおこなうことをめざした。車両セッティングパラメータとして車高、バンプストップクリアランス、イニシャルトー、イニシャルキャンバ、重心高、重心点まわりの慣性モーメントを選択した。その中でも車高やバンプストップクリアランス、重心高は、お互いに干渉するパラメータのため収束計算のような繰り返し計算をする必要がある。それにより4.4.節でおこなった簡易的手法がとれず、調整時の作業工数が膨大となり自動車開発において対応ができなくなる。

よって、時間短縮を目的に、1g conditionを維持しながら車両セッティングパラメータ調整作業を自動でおこなうツールを開発した。その結果、調整工数を削減し自動車開発に適用可能にした。

5. 対象走行モードにおける精度検証

精度向上をおこなったモデルを使用し、対象となる走行モードにおける精度確認をおこなった。その結果をFig. 14からFig. 20に示す。

(a) Winding

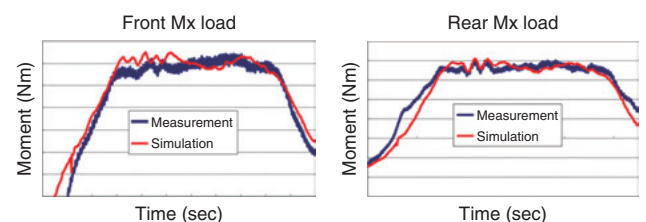


Fig. 14 Moment around X-axis at front and rear wheel center

(b) Panic braking (ABS control)

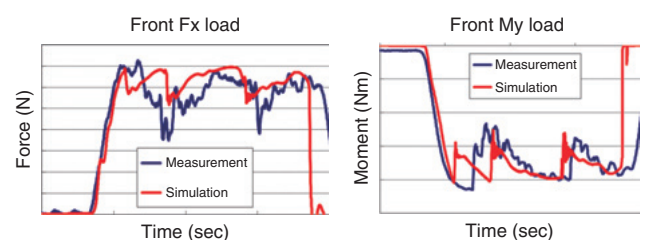


Fig. 15 Longitudinal force and moment around Y-axis at front wheel center

(c) Pot hole braking (ABS control)

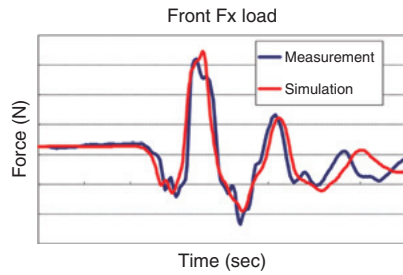


Fig. 16 Longitudinal force at front wheel center

(d) Curb stone

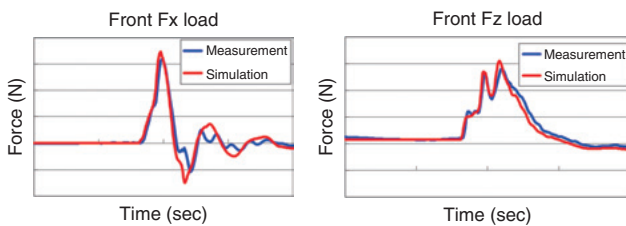


Fig. 17 Longitudinal and vertical force at front wheel center

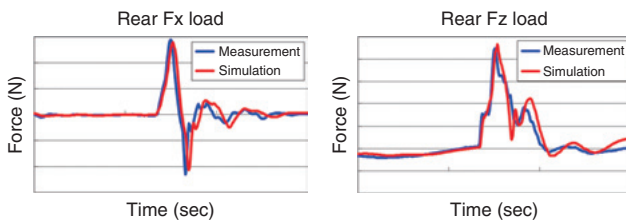


Fig. 18 Longitudinal and vertical force at rear wheel center

(e) Rough road

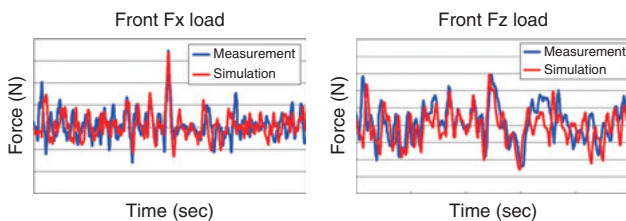


Fig. 19 Longitudinal and vertical force at front wheel center

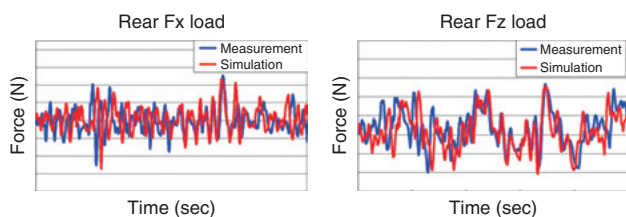


Fig. 20 Longitudinal and vertical force at rear wheel center

対象となる全走行モードにおいて対象となる荷重に関し、実車テストとの良好な相関を確認できた。これにより実車テスト置き換えに必要な精度を有しているものと考えた。

6. まとめ

サスペンション耐久条件決定のための実車入力測定テスト置き換え技術として以下の技術構築をおこない、自動車開発に適用可能にした。

- (1) 実車入力測定テストに必要な全走行モードを一つのモデルを用いた機構解析により再現させるために、デジタル路面の整備とタイヤモデルの選定をおこなった。
- (2) 精度向上のために 1g condition での車体セットアップ調整の重要性和効果を確認し、調整時間短縮のためのツール化をおこなった。
- (3) 精度検証をおこない、実車テストの置き換えに向け十分な精度を確保していることを確認できた。

参考文献

- (1) 芳賀齊:弾性体を含む機構解析による路面入力予測の精度検証、一タイヤモデルを使った耐久性入力予測一、自動車技術会学術講演会前刷集, No.21-06, p.9-12(2006)
- (2) 芳賀齊:弾性体を含む機構解析による路面入力予測の精度検証(第2報)、一タイヤモデルを使った耐久性入力予測一、自動車技術会学術講演会前刷集, No.136-06, p.11-14(2006)
- (3) 芳賀齊:完成車悪路走行入力予測シミュレーションの精度検証(第2報)、一タイヤモデルを使った耐久性入力予測一、自動車技術会学術講演会前刷集, No.123-08, p.23-26(2008)
- (4) 二宮祐貴, 澤紀彦, 本間和正, 井坪孝文:サスペンション制御を考慮した悪路走行時の入力負荷予測手法の開発、自動車技術会学術講演会前刷集, No.116-09, p.9-14(2009)
- (5) 勝野雅之, 佐野雅人, 立川勝次郎:縁石衝突時の入力予測手法の開発、自動車技術会学術講演会前刷集, No.944, p.145-148(1994)
- (6) 坂井英児, 富永秀和, 加藤益久, 山本典史, 松本大樹:悪路耐久走行時のサスペンション入力予測技術開発、三菱自動車テクニカルレビュー, No.17, p.45-48(2005)
- (7) Hauke, M.: Simulation of Full Vehicle Misuse Behavior, SAE Technical Paper, No. 2004-01-0192(2004)

- (8) <http://www.mscsoftware.com/events/vpd2006/na/presentations/53.pdf>
- (9) <http://www.cosin.eu/literature>

■ 著 者 ■



下平 貴政



片岡 俊介



森 理史



横山 真吾