

走行時のボデー過渡変形予測技術

Prediction of Transient Body Deformation during Handling Maneuvers

久 世 正 文*
Masafumi KYUSE

梅 原 康 平*
Kohei UMEHARA

要 旨

ハンドリングに影響を与える過渡的なボデー変形を予測するために、ボデーの弾性変形を考慮した機構解析モデルを構築した。Modal Forced Response 法により同定した走行時ボデー変形との比較解析をおこなったところ、車両運動性能、ボデー過渡変形、ボデーモード寄与度に良好な相関を得た。

ABSTRACT

A multi-body dynamics model that considers elastic deformation of the body was formulated in order to predict transient body deformation, a factor that affects handling. A comparative analysis with body deformation during handling maneuvers identified using a modal forced response method was conducted, and a good correlation was obtained between vehicle dynamic performance, transient body deformation, and the body modal contribution factor.

1. ま え が き

ボデー特性が操縦安定性や乗心地、振動騒音など動的運転品質に影響を及ぼすことは良く知られている。

特に操縦安定性においては、ボデー特性をさまざまな手法を用いてモデル化し機構解析と組み合わせることで走行時のボデー変形を予測した事例が報告されている^{(1), (2)}。また、タイヤ接地点分力から機構学的にボデー骨格上のサスペンション締結点における入力を同定し、それを元にボデー変形を実験とシミュレーション上で再現した例^{(3), (4)}が報告されている。しかしながら、走行時のボデー変形を詳細に計測した事例は少ない。

本研究では、ボデー骨格上のサスペンション締結点作用力を Modal Forced Response 法を用いて同定し、モーダルモデルに入力することで走行時ボデー変形を可視化した事例を紹介する⁽⁵⁾。また、シミュレーションモデルはResidual Vector 法を用いたボデー弾性体モデルを機構解析と組み合わせ⁽⁶⁾。走行時の車両運動性能およびボデー変形同定結果と比較し本研究で適用したモデル化手法によるボデー変形についても述べる。

2. 走行時のボデー過渡変形の算出

2.1. モーダル応答法

走行時のボデー変形を同定する手法として、Modal

Forced Response 法を採用した。ボデー骨格上のサスペンション締結点近傍にひずみゲージを貼付し、走行時のボデーひずみを時系列データ $\varepsilon(t)$ として計測する。次に計測した車両から前後サスペンション部品ならびにパワープラント部品を外し(この状態をトリムドボデーと定義する)、 n 自由度を有するサスペンション締結点入力に対するひずみゲージ応答行列 $H(\omega)$ の計測をおこなう〔式(1)〕。得られた入力応答行列の逆行列 $H(\omega)^{-1}$ を求め、式(2)に示す逆FFT変換をおこない、各ひずみに対するサスペンション締結点の力応答のインパルス行列 $h(t)$ を求める。これにボデーひずみ $\varepsilon(t)$ を畳み込み演算することにより走行時のサスペンション締結点の入力 $F(t)$ を同定することができる〔式(3)〕。

一方、トリムドボデーの骨格およびパネル、サスペンション締結点に加速度ピックアップを貼付し、ボデー上の数点を電磁加振することでボデー各部の周波数応答関数を得る。これをモード解析することでトリムドボデーのモードシェイプ ψ_r と、系の m_r, c_r, k_r 行列($r=1, 2, 3, \dots, m$)を求め、各ボデーモードの寄与度 $q(t)$ を変数とする2階微分方程式を記述する〔式(4)、式(5)〕。モードシェイプとモード寄与度との積和が走行時のボデー変形となる〔式(6)〕。

$$H(\omega) = \varepsilon(\omega)/F(\omega) \quad (1)$$

$$h(t) = iFFT(H(\omega)^{-1}) \quad (2)$$

$$F(t) = h(t) \otimes \varepsilon(t) \quad (3)$$

$$m_r \ddot{q}_r(t) + c_r \dot{q}_r(t) + k_r q_r(t) = f_r(t) \quad (4)$$

$$f_r(t) = \sum \psi_{i,r}^T \cdot F_i(t) \quad (5)$$

$$X_i(t) = \sum \psi_{i,r} \cdot q_r(t) \quad (6)$$

$h(t)$: サスペンション締結点インパルス行列

$H(\omega)$: サスペンション締結点入力 ひずみゲージ応答

$F(t)$: 実車走行時のサスペンション締結点入力

$\varepsilon(t)$: 実車走行時ボデーひずみ

Ψ_r : モードシェイプ($r=1, 2, 3, \dots, m$)

$X_i(t)$: 走行時サスペンション締結点変位($i=1, 2, 3, \dots, m$)

$q_r(t)$: ボデーモード寄与度($r=1, 2, 3, \dots, m$)

m_r : トリムドボデーモード等価質量($r=1, 2, 3, \dots, m$)

c_r : トリムドボデーモード等価減衰($r=1, 2, 3, \dots, m$)

k_r : トリムドボデーモード等価剛性($r=1, 2, 3, \dots, m$)

m : トリムドボデーモード数

n : サスペンション締結点自由度数

2.2. ひずみゲージ貼付点の検討

サスペンション入力を同定するためにサスペンションのボデー側締結点近傍にひずみゲージを貼付する。走行時にひずみ量が十分に出力される箇所を選定するため、台上面にてハンマリング加振によるひずみ応答テストをおこなう。また、当該ボデーの有限要素モデルを有している場合には、ひずみ応答解析をおこない、貼付点の目安とする。Fig. 1では、スプリングダンパ締結点近傍にひずみゲージを数点貼付し、ハンマリング試験をおこない、ひずみ応答を計測している。この場合では、ひずみゲージの4および6番の応答が高い。また、Fig. 2では有限要素モデルにおいても同様の試

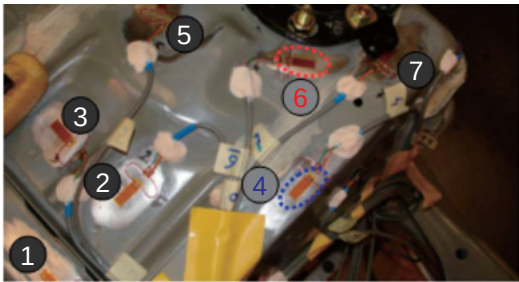


Fig. 1 Pretest for determination of strain gauge setting

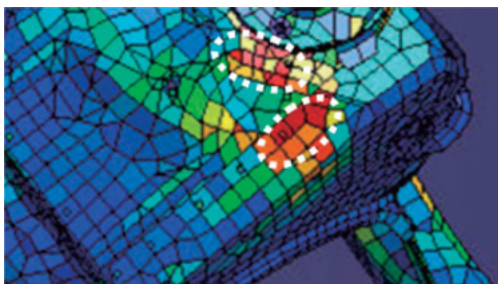


Fig. 2 Result of strain sensitivity simulation

験をおこなった結果を示している。実験でひずみ応答の高い箇所がモデル上でも高い結果であることがわかる。以上のようにひずみゲージ貼付点を決定した。

2.3. ひずみ応答マトリクススクリーニング

前項にて入念に決定したひずみゲージ貼付点での計測であっても、複数のサスペンション締結点からの入力応答がノンコヒーレントな結果となる場合がある。Fig. 3に示すのは横軸に入力点、縦軸にひずみゲージ貼付点をとったひずみ応答マトリクスである。この応答マトリクスを用いて前側左右輪のスプリングダンパ締結点入力を同定すると Fig. 4に示す結果となる。本来左右で入力値が同等であるべきであるが、ほぼ2から4倍の結果となった。

そこでコヒーレンスの閾値を設定し、それ以下の結果についてはノイズ成分と判断し、該当するひずみ応答の削除をおこなう。この応答マトリクスを用いて再び同定すると Fig. 5に示す結果となった。左右の入力値がほぼ同等とな

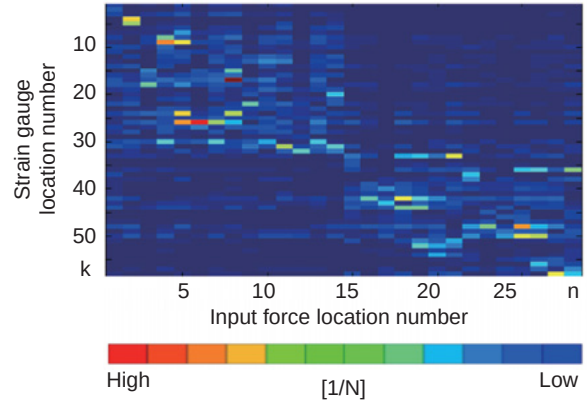


Fig. 3 Strain matrix before cleanup

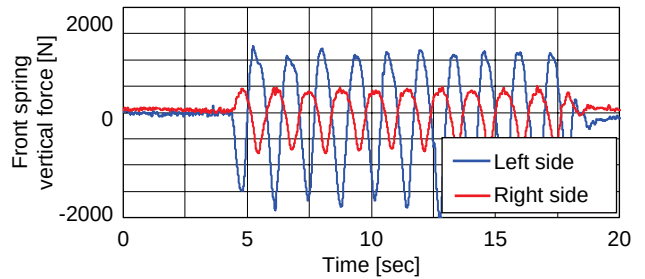


Fig. 4 Result of forced response around front spring damper connecting point before screening

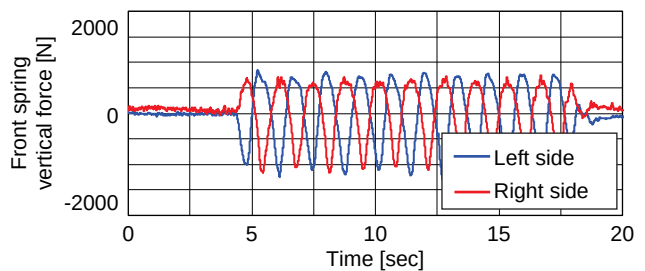


Fig. 5 Result of forced response around front spring damper connecting point after screening

り、ひずみ応答マトリクスへのスクリーニングがサスペンション入力同定の精度向上に有効であることがわかる。

3. 構造と機構連成シミュレーション

本研究ではボデー系部品については有限要素モデル、シャシ系部品については機構モデルにて構築する。走行状態でのボデー変形を予測するため、機構モデル内に縮約されたトリムドボデーモデルを取り込んで連成解析をおこなう。

3.1. ボデーモデルの縮退

有限要素法では約 70 万要素のトリムドボデーモデルを、Residual Vector 法を用いることにより、50Hz までの拘束モード、外点自由度を併せても 155 自由度まで縮退して低周波振動騒音事象の解析にも適用可能となるよう計算時間の低減をはかった。また、実車と計算モデルとのトータル重量差は、不足分の重量および慣性をトリムドボデーモデル内部に、弾性モードに影響を及ぼさないよう組み込んで一致させた(Fig. 6)。この縮退により、計算時間は約 1/15 以下となった。

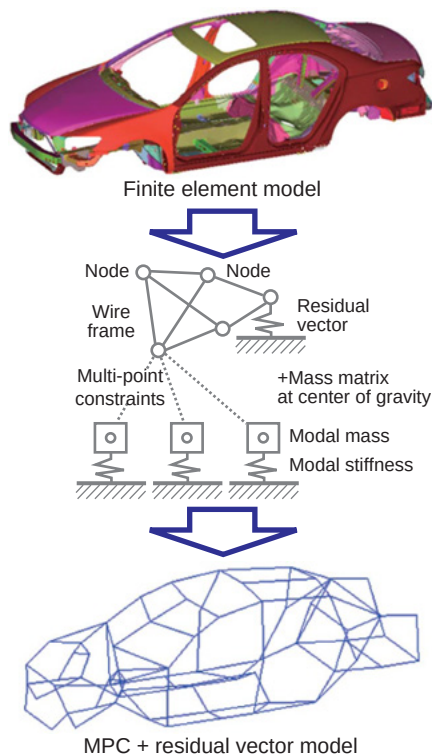


Fig. 6 Method of reduction of body model

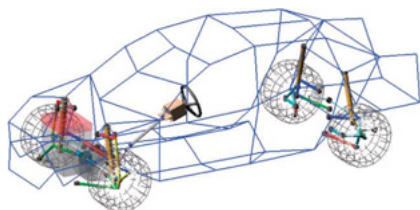


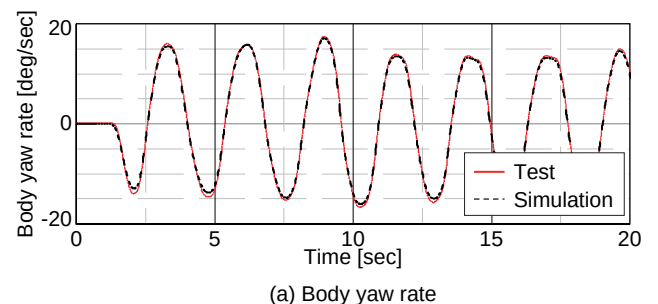
Fig. 7 Multi-body dynamics coupled with structural model

3.2. シャシ系の機構モデル化手法

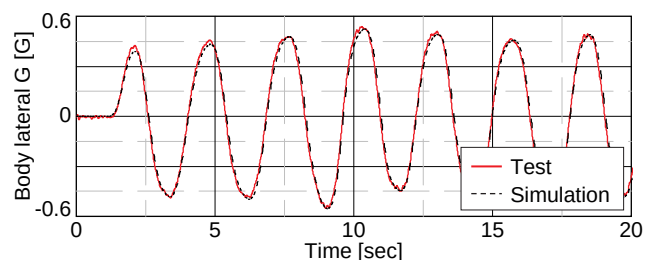
前後のサスペンション系構成部品、パワープラント系構成部品については図面情報を元に各締結点ジオメトリー、重心位置、重量および慣性項を含んだ剛体要素にてモデル化している。サスペンション部品、パワープラント部品とボデーの要素間結合特性においては、スプリング、ダンパ、ラバーブッシュの単体性能からそれらを組み込んだ実車性能まで計測結果と比較して周波数依存特性、振幅依存特性を考慮したアップデートを施している。作成したシャシモデルに対し、機構的なサスペンション特性(ホイールレート、上下動軌跡後傾角、スカッフ変化、ロール剛性、ロールステア、横力ステア)、さらにタイヤ強制加振時のパワープラント、サスペンション、ボデーの周波数特性および振動伝達率についても計測結果と比較検証した。これとボデーモデルを組み合わせた最終的な車両モデルを Fig. 7 に示す。

4. モデルの検証結果

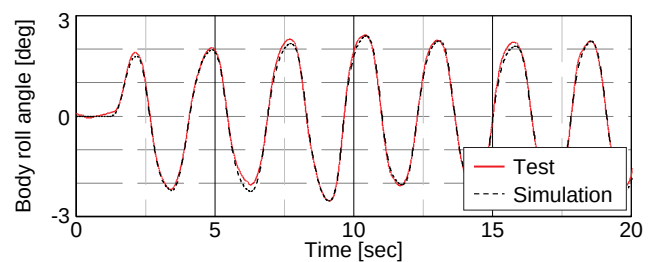
走行時のボデー変形に関して、実験結果と計算モデルとの比較をおこなった。実車計測時の走行条件としては、平坦路を時速 60km/h 一定で直進走行後、ピーク車両重心左右重力加速度(車両横G)が 0.4G となる舵角入力によるスラ



(a) Body yaw rate



(b) Body lateral G



(c) Body roll angle

Fig. 8 Vehicle dynamics during slalom maneuver

ローム走行(2.5秒/周期)をおこなった。シミュレーションでは実車操舵角および駆動力を入力し、実走行計測と条件を揃えた。

4.1. 実験とシミュレーションの車両運動性能比較

スラローム走行テストおよびシミュレーションの車両運動性能計算の結果比較を Fig. 8 に示す。車両重心上下軸周りヨー角速度、車両横G、車両重心前後軸周りロール角を比較すると時間軸上で誤差4%以内に収まり、シミュレーション上で実車の車両運動性能を精度良く再現できている。

また、フロントサブフレーム前側締結点における左右方向の荷重変動結果を実験とシミュレーションで比較したものをFig. 9に示す。この結果から実験およびシミュレーションの入力予測がほぼ一致していることがわかる。

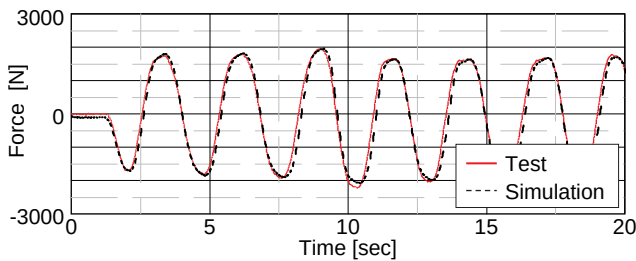


Fig. 9 Front sub-frame lateral force during slalom maneuver

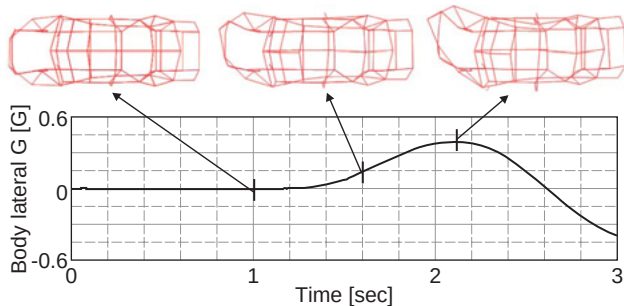


Fig. 10 Test results for body deformation

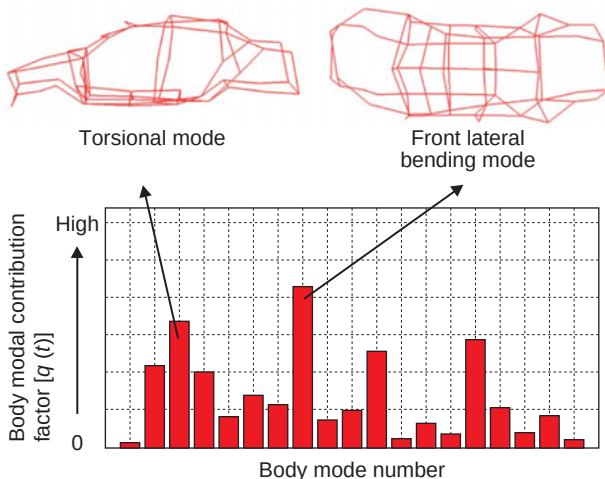


Fig. 11 Test results for body modal contribution

4.2. 走行時のボデー変形結果

走行時データから算出されたサスペンション締結点入力による、走行時のボデー変形を計算した結果を Fig. 10 に示す。時間軸でボデーの変形が過渡的に遷移している様子がわかる。

車両横Gがピークとなる時のボデーモードの寄与度を解析すると Fig. 11 のようになった。高いモード寄与度を示すのはキャビンが全体的にねじれる「ねじれモード」、前輪側のフレームが横に曲がる、「フロント首振りモード」であった。

4.3. シミュレーションによるボデー変形計算結果

弾性体ボデーを組み合わせた機構解析モデルにて実車操舵角および駆動力を入力条件としてボデー変形を計算したものを Fig. 12 に示す。スラローム走行時の各時間軸におけるボデー変形を実験結果と比較したところ、ピーク値だけでなく、過渡領域においても実験結果とシミュレーション結果でよく一致していることが確認できた。

また、ボデーの「ねじれモード」、「フロント首振りモード」の寄与が他のモードと比較して大きいことがシミュレーションにおいても確認された。

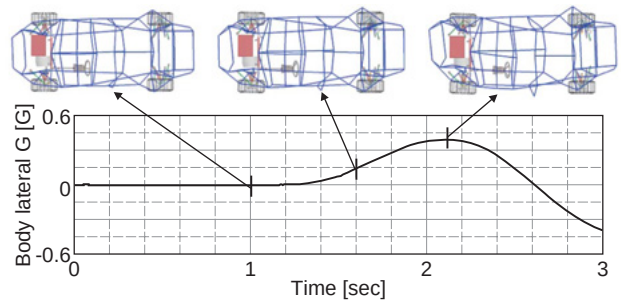
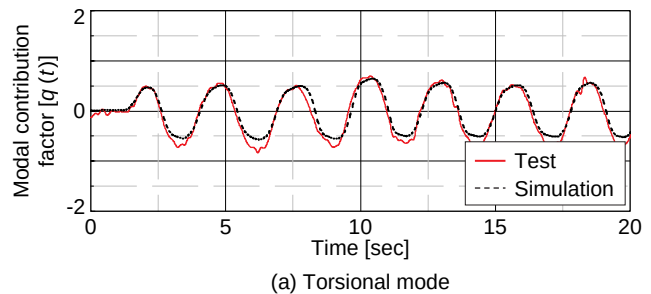
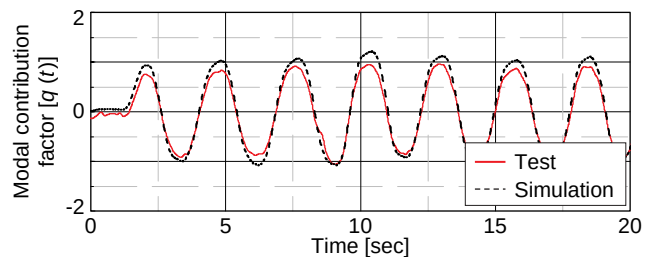


Fig. 12 Simulation results for body deformation



(a) Torsional mode



(b) Front lateral bending mode

Fig. 13 Two time domain body modal contributions

走行時の「ねじれモード」と「フロント首振りモード」の寄与度について、実験とシミュレーションで比較したものを Fig. 13 に示す。

二つのモード寄与度とともに、時間軸に対して変化をしながら推移していく。また、実験およびシミュレーション結果は良好に一致している。提案する手法によってボデー変形に影響を与えるモード寄与を実車およびシミュレーションにて時間軸による解析をすることが可能となった。

5. まとめ

ボデー骨格上のサスペンション締結点入力を Modal Forced Response法を用いて算出し、従来困難であった実走行時ボデー変形を可視化した。また、シミュレーションモデルはResidual Vectorを用いたボデー弾性体モデルを機構解析と組み合わせた。以上を用いて実車とシミュレーションによるスラローム走行テストの結果について、車両運動性能およびボデー変形に対するモード寄与度の比較をしたところ、良好な相関を示すことが確認できた。

参考文献

- (1) 小林義明, 米川隆, 本間和正, 大槻一史: モーダル手法を用いたフルビークルシミュレーション技術の開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.982, p.207-210 (1998)
- (2) 磯村吉高, 尾川敏也, 門奈博: 実験モード解析を用いた実車走行時のボデー変形予測計算技術の開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.91-00, p.5-8 (2000)
- (3) 長久真樹, 日下馨, 皆川正明: ハンドリングへのボデー弾性の影響, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.90-99, p.1-4 (1999)
- (4) 白石祐二, 青木弘文, 北村博史, 上田悦広, 牛村智也: 操縦安定性に及ぼす車体剛性寄与メカニズムの解明, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.101-04, p.1-4 (2004)
- (5) Hadjit, R., Kyuse, M., Umehara, K., Geluk, T., Mas, P.: Analysis of the contribution of body flexibility to handling and ride comfort performances, 2009 JSAE Annual Congress Proceedings, No.38-09, p.15-20 (2009)
- (6) 山崎賢二, 山本好道: Residual Vector を適用した車体弾性体モデルの機構解析への応用, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.28-02, p.17-20 (2002)

■ 著 者 ■



久世正文



梅原康平