

FE モデルによるサスペンション振動解析

Analysis of Vibration in Suspension System Using Finite Element Model

神 山 洋 一*

Youichi KAMIYAMA

要 旨

ロードノイズ性能向上を目的としたサスペンション振動予測技術の開発をおこなった。本技術は中周波領域におけるサスペンション振動を予測するために、単体パーツの形状や部品構成を忠実に再現するためのモデル化定義をおこない、次にパーツモデルのアッセンブリーに関する技術を構築した。また実験状態のサスペンション振動を予測するために、路面からサスペンションに与えられる起振力を実験的に同定する手法も構築した。そして上記予測技術と実測値の相関を確認するため、実測値との比較検証をおこなった。更に本技術を用いて現有サスペンションの振動入力低減検討をおこない、実機検証することで本技術の性能向上検討に対する有効性を確認した。

ABSTRACT

A technique enabling the level of vibration in a suspension to be predicted has been developed to improve road noise performance. Individual parts were defined and modeled to faithfully reproduce their shape and structure, and a method of assembling the parts models was then formulated to enable mid-frequency vibrations to be predicted. In addition, to enable the prediction of vibration in a running suspension, a method of experimental identifying the force transmitted to the suspension by the road surface to initiate vibration was developed. Measured values and predicted values were compared to verify the accuracy of the prediction technique. In addition, the technique was employed to study the reduction of vibration in an actual suspension, confirming its effectiveness in predicting the effects of structural change.

1. まえがき

近年、開発期間の短縮要求により、試作車を製作する以前の図面段階で完成車性能を予測し、対策検討を実施する事により、図面精度を向上させる技術が求められている。衝突性能及び車体の振動騒音領域における動特性解析については、実用段階にあり実施事例⁽¹⁾、⁽²⁾も報告されているが、ロードノイズを対象としたサスペンション全体システムに対する FEM による振動解析に関しては、まだ実施事例が少ない⁽³⁾。

特に中周波(200 - 300Hz)の領域に関してタイヤの気柱共鳴とサスペンション全体系の共振が一致して問題となる場合が多いにも関わらず、解析としては部品単体パーツでの検討⁽⁴⁾が主体となっており、サスペンション全体システムを対象とした解析事例を殆ど見ることがない。

本研究では中周波領域におけるサスペンションを構成する部品の FE モデル化技術を構築し、その技術を使ってサ

スペンションからの車体入力を予測し、サスペンション全体システムを対象とした振動入力低減対策に結びつける技術構築をおこなう。

2. サスペンション振動予測技術の概要

2.1. モデリングの考え方

サスペンション系のモデルを効率良く作成するために考慮すべき内容としては、ターゲットとする周波数領域での各構成部品や結合法のモデル化定義を定めることである。例えば低周波のドラミング領域を解析する場合は比較的小規模の FE モデルで解析が可能であることが確認されている (Fig. 1)。しかし中周波領域の解析には、質量や剛性分布を忠実にモデル化することが精度向上の観点から不可欠である。本研究では全サスペンション部品の 3 次元図面形状を忠実に再現した大規模弾性体 FE モデル (Fig. 2) とすることで、中周波領域でのサスペンション振動予測を可能にする。

2.2. パーツモデリング技術

各部品別のモデリング手法としては、形状と質量と剛性の忠実な再現を第一に考えて、各パーツに対して以下のようなモデル定義をおこなう (Table 1)。

Table 1 Elements list of FE model

Component	Parts	FE model	Component	Parts	FE model
Damper	Rod	CBAR, CSHELL, CONM, CELAS, CDAMP	Arm	Arm Collar Bracket	CBAR, CSHELL, CTETRA, CONM
	Outer pipe			Coil spring	
	Inner pipe		Spring	Seat rubber	CBEND, CELAS
	Rod guide			Rubber	
Drum brake	Valve	CSHELL, CTETRA, CONM, CELAS	Bush	Outer collar	CONM, CELAS
	Oil			Inner collar	
	Gas		Ball joint	Stud	CBAR, CTETRA, CONM, CELAS
	Drum			Outer case	
Hub & bearing & spindle	Pad	CBAR, CSHELL, CTETRA, CONM, CELAS	Stabilizer	Ball	CBAR, CSHELL, CTETRA, CONM, CELAS
	Base plate			Rink ball Holder	
	Other parts		Subframe	Holder bush	CSHELL, CTETRA, CONM
	Spring			Body Bracket Collar	
Wheel	Contact area	CSHELL, CTETRA			
	Hub				
	Bearing				
	Spindle				
	Rim				
	Disk				

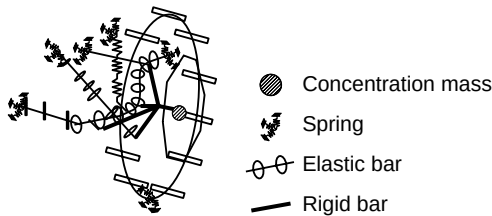


Fig. 1 Low frequency FE model

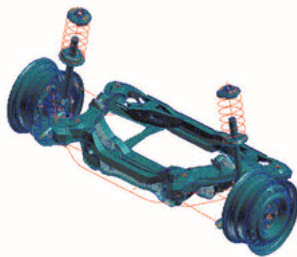


Fig. 2 Mid frequency FE model

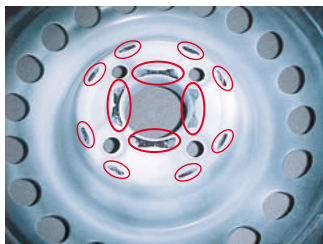


Fig. 3 Contact area of wheel disk and hub

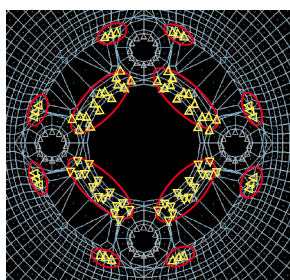


Fig. 4 Connection area of wheel disk and hub in model

2.3. パーツアッセンブリー技術

各部材の結合に関しては、ブッシュやジョイントについては実験的に求めた動バネ特性を6自由度のスカラーバネ要素で表現し、それ以外の直接特性を把握しにくい結合部や締結/接触部などの部位については、モデルに仮定のパネ要素を与え、計算と実験モーダルより求めた固有値及びモードシェイプが一致するように、そのバネ要素についてモデルアップデートをおこなうことで結合特性を同定する。

締結/接触部については、Fig. 3 のホイール締結の事例に示すように、実機の静的な接触境界面の位置や寸法を正確に把握し、Fig. 4に示すようにモデル上での結合境界面をその接触境界面と同一となるよう忠実に再現させ、そこをバネ要素で結合することによりモデル精度を向上させる。

2.4. 起振力同定技術

路面からサスペンションに与えられる起振力について、着力点を何処に定めるかが実験状態のサスペンション振動予測の精度を向上させる上で非常に重要である。

路面変位や起振力をタイヤ接地面に与えた事例^{(5), (6)}が既に発表されているが、高精度なタイヤモデルを必要としたり、あるいは複雑な解析処理を必要とすることから、上記手法を車両開発にそのまま適用するのは、あまり実用的であるとは言い難い。そこで本稿ではタイヤモデルを必要としないホイールを着力点として、実験的に同定した起振力を与える手法を用いる。ロードノイズ路面走行時の実験状態におけるサスペンション振動を測定し、同一参照点でのホイール加振時における伝達関数を用いることにより、式(1)に示す最小二乗法による逆マトリクス法で路面からサスペンションに与えられる起振力を同定する。

$$\{F_j\} = [H_{ij}]^{-1} \{x_i\} \quad (1)$$

F_j : 設定した着力点にて同定された起振力ベクトル

H_{ij} : 着力点から参照点までの伝達関数行列

x_i : 参照点での実験動振動応答ベクトル

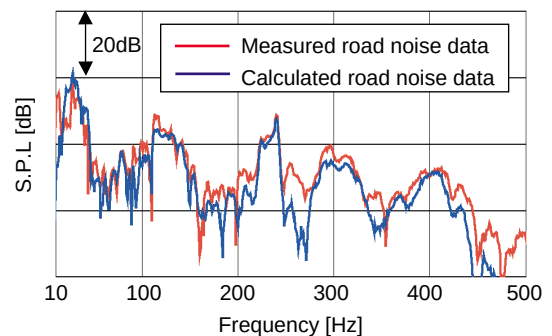


Fig. 5 Precision verification of force identification

なお着力点の設定は3並進力と仮定し、タイヤ転動方向を除く2方向のモーメント成分まで表現できるようオフセットを与える。

同定した起振力の精度を確認するため、ロードノイズ室内音の実測音圧と同定した起振力から演算した合成音圧の検証結果を Fig. 5 に示す。450Hz 位までは精度良く同定されていることがわかる。

2.5. 実機とのコリレーション結果

計算と実機のホイールを加振した時のサスペンションの伝達関数比較を Fig. 6 に、モードシェイプの相関性を示す MAC (Mode Assurance Criteria) 値の比較を Fig. 7 に示す。約 300Hz まで伝達関数がほぼ一致し、MAC 値も良好な値を示すことが確認され、本予測技術がタイヤ気柱共鳴領域 (200 - 300Hz) の解析に適用可能であることがわかる。

3. サスペンション振動予測解析の適用事例

量産車のリヤサスペンションを題材に本技術を適用し、性能向上の検討を実施した事例について報告する。

3.1. 注目モード解析結果

タイヤ気柱共鳴領域のサスペンション伝達特性を FE モデルで解析した結果、気柱共鳴入力と連成するモードは

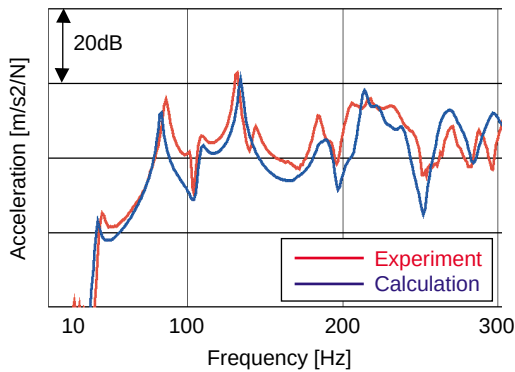


Fig. 6 Precision verification of FRF

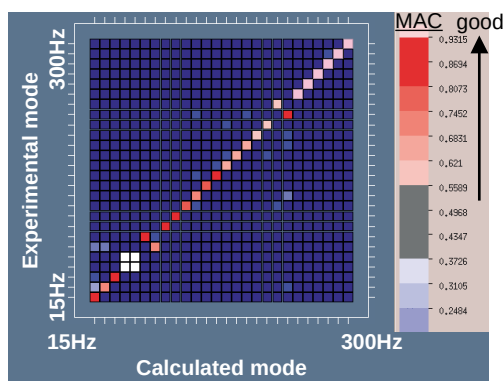


Fig. 7 Precision verification of MAC

Fig. 8, 9 に示すようにホイールのディスク部が曲げ変形を起して倒れ、それに伴いハブ&ナックルが逆位相で倒れを起すモード (以下キャンバーモード) が主要因であることがわかる。

3.2. 部品単体パーツによる性能向上

キャンバーモードの固有値に対して、サスペンションを構成する部品単体パーツでの性能向上検討をおこなう。キャンバーモード時のひずみエネルギーが最大であるホイールのディスク部に着目して、タイヤ気柱共鳴入力との非連成化を狙い、ディスク剛性を向上させた場合のサスペンション伝達特性の変化を予測する (Fig. 10)。

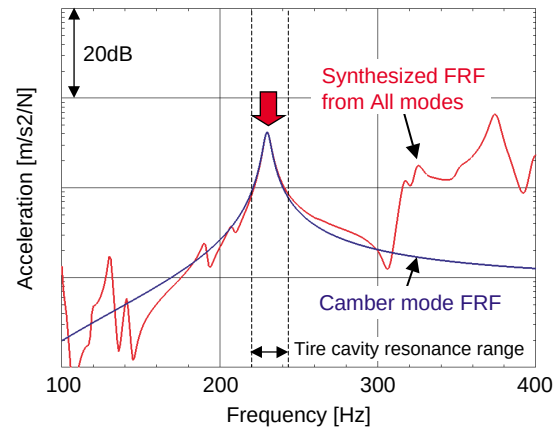


Fig. 8 Mode contribution of target point FRF

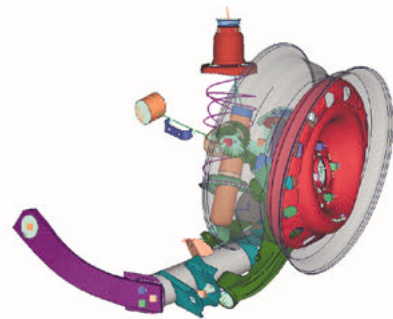


Fig. 9 Mode shape of Camber mode

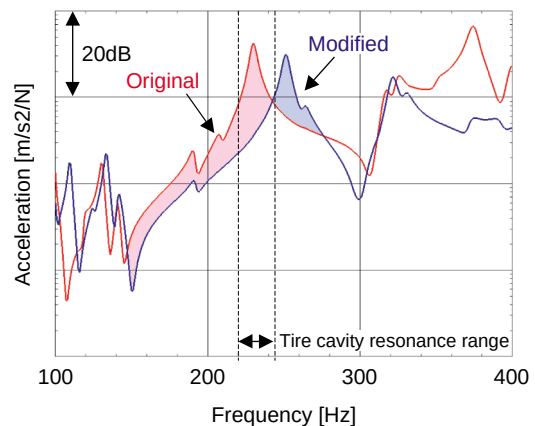


Fig. 10 Improvement of camber mode by increased wheel disk stiffness

その結果、タイヤ気柱共鳴領域での低減効果は十分認められるものの、少し高い周波数に移動したキャンバーモードによる伝達特性のピークは依然として残るため、中周波領域トータルで見た場合の抜本的な対策にはなっていないことがわかる。

3.3. サスペンション全体システムによる性能向上

キャンバーモードピークの抜本的な対策を狙い、モード振幅の低減を目的としたサスペンション全コンポーネントに対する、剛性とマスについての寄与解析をおこなう。その結果、ナックル剛性とトレーリングアーム後端部マスの寄与が非常に高いことがわかる (Fig. 11)。

そこでサスペンション重量増を伴わない制約下での改善として、ナックルのジオメトリー及び形状の変更とトレー

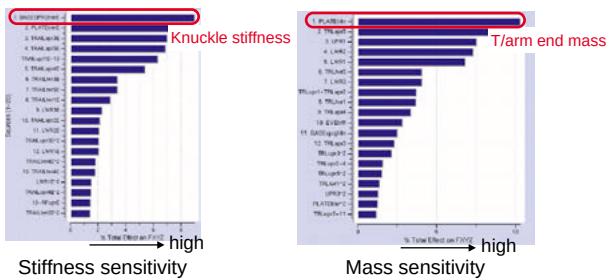


Fig. 11 Sensitivity of suspension components to changes in stiffness and mass

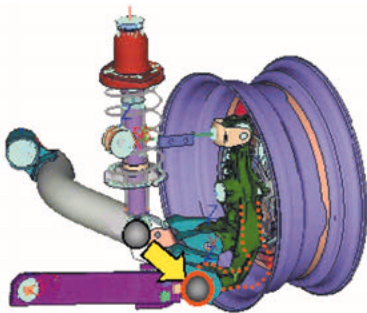


Fig. 12 Case of structure change for improvement of road noise

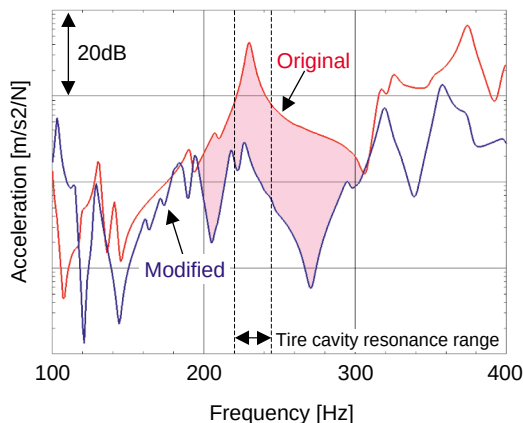


Fig. 13 Improvement of camber mode by optimization of stiffness and modal mass

リングアーム後端のマスを増加させるために、ショックアブソーバの配置をトレーリングアーム中央から後端に変更する構造変更を試みる (Fig. 12)。

その時のサスペンション伝達特性の変化を予測した結果、マス効率が向上するモードシェイプへの変換とモーダルマスの増加に伴い、キャンバーモードの振幅が大幅に低減し、振動入力が大幅に低減できる可能性が期待できる (Fig. 13)。

3.4. 実機検証結果

予測した性能向上案の有効性を証明するため、ナックルのジオメトリー及び形状変更とショックアブソーバ相当のマスをトレーリングアーム後端に付加した試作車にて実機検証をおこなった。その結果 Fig. 14 の予測結果に対し、予測通り Fig. 15 の実験結果を得ることができ、本技術の有効性が証明された。またそれによりロードノイズ室内騒音が低減することが確認できた (Fig. 16)。

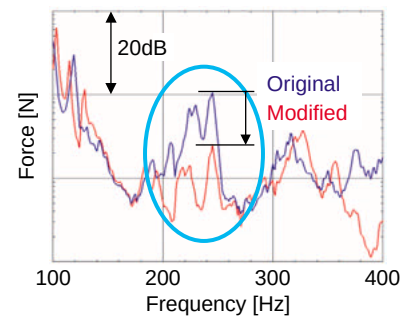


Fig. 14 Estimate of improvement using FE model

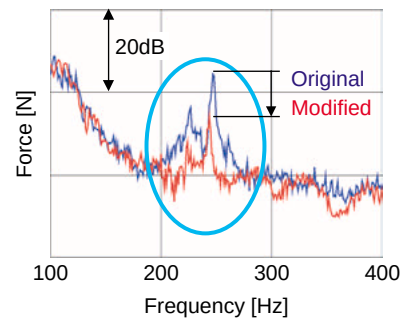


Fig. 15 Verification of improvement by experiment

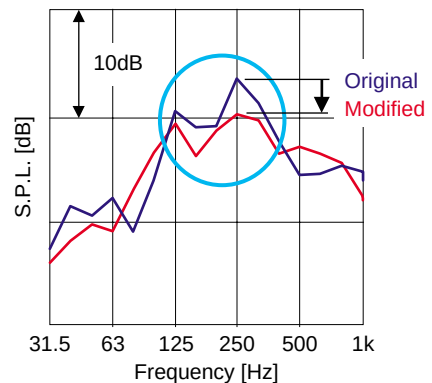


Fig. 16 Improvement of road noise by optimization of modal mass

4. モーダルマスについての考察

マス分布を変更することにより、注目モードにおけるモーダルマスを増加させ、ロードノイズに寄与の高い入力点での振動入力を低減させることが有効であることが確認された。そこでサスペンション形式違いによる振動伝達特性差について、モーダルマスの観点から考察する。

4.1. サスペンション形式とモーダルマス

サスペンション形式違いによるサスペンション振動入力の総和について、本解析技術を用いて比較すると、Fig. 17に示すようにトーションビーム形式はマルチリンク形式に対し、中周波領域における振動入力のスペクトルラインの絶対値が極めて低く、振動伝達上有利であることがわかる。

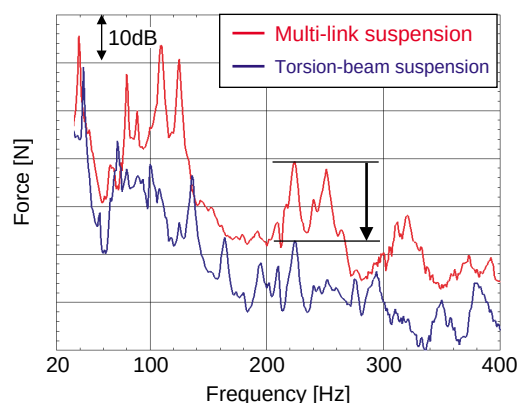


Fig. 17 Comparison of different suspension systems as calculated by FE model

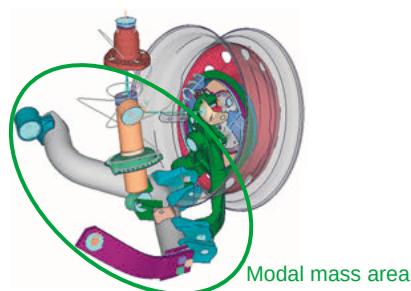


Fig. 18 Modal mass area of multi-link suspension in camber mode

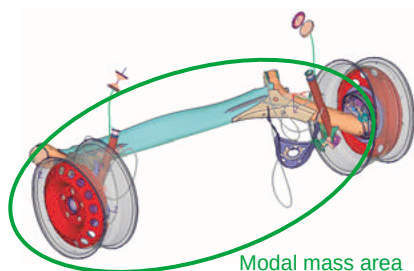


Fig. 19 Modal mass area of torsion-beam suspension in camber mode

タイヤ気柱共鳴領域の寄与モードは両形式ともキャンバーモードであり、そのモードシェイプを比較すると、Fig. 18に示すようにリヤマルチリンク形式の場合は、片輪サスペンションの一部の領域しか振動していないので、モーダルマスが小さくモード振幅が大きい。それに対して、Fig. 19に示すリヤトーションビーム形式の場合は、左右両輪の広い領域で振動しており、両輪分をマスとして活かせるので、結果的に大きなモーダルマスとなりモード振幅が小さくなっていることがわかる。

4.2. マルチリンク形式でのモーダルマス増加

モーダルマス上不利なマルチリンク形式サスペンションの場合、モーダルマスを増加させるには、前述の片輪サスペンション内でのマス分布の最適化が重要である。しかし、それのみでは両輪をマスに活用できるトーションビーム形式の性能には絶対値としてかなわない。そこでマルチリンクでも両輪マスとサブフレームを含めたパネ下マスを活かせるサブフレームフローティング化について、本解析技術を使って効果を予測する。その結果、Fig. 20に示すようにほぼトーションビーム並のサスペンション振動伝達性能が得られることがわかる。

5. まとめ

サスペンション振動予測解析技術として、下記の結果を得た。

- (1) FEMサスペンションモデル化とサスペンション起振力を実験的に同定する技術開発により、実走相当のサスペンション振動を再現できる手法を確立した。
- (2) サスペンション振動予測解析技術により、サスペンション全体系に対する解析と性能向上を予測し、実機検証により本技術の有効性を確認した。
- (3) サスペンション振動低減手法として、サスペンションシステムのモーダルマス分布を最適化することで、サ

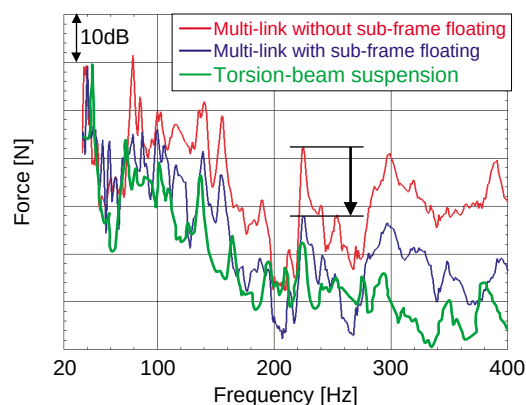


Fig. 20 Comparison between sub-frame floating and torsion-beam suspension as calculated by FE model

スペンション取付点の振動入力低減が可能であることを予測及び実機検証により示した。

- (4) サスペンション形式による振動伝達特性差をモーダルマスの観点から考察し、リヤマルチリンク形式に対するリヤトーションビーム形式の優位性を示した。

参考文献

- (1) 安木, 渡辺: 安全 自動車開発での衝突計算の応用, Toyota Technical Review, Vol.51, No.1, p.54-59(2001)
- (2) 松本, 鈴木ほか: フルビークルモデルを用いたアイドル振動解析, 自技会学術講演会前刷集, No.39-03, 182 (2003)
- (3) Kido, I., Nakamura, A., et al.: Suspension Vibration Analysis for Road Noise Using Finite Element Model, SAE, No.99-01-A1788, p.1053-1060(1999)
- (4) 山内, 秋好: タイヤ空洞共鳴音に関する理論解析と走行中の改良手法の提案, 自技会論文集, Vol.32, No.2, April 研究論文(13) p.79-84(2001)
- (5) 山田, 石山ほか: ロードノイズ予測手法の開発, 自技会学術講演会前刷, No.65-00, 292, p.1-4(2000)
- (6) 中川, 杉浦, 鶴見, 森, 浅井, 城戸: ロードノイズに関わるタイヤ入力解析法の開発, 自技会学術講演会前刷集, No.78-98, 79, p.13-16(1998)

■ 著 者 ■



神 山 洋 一