

ブレーキジャダ低減に関する サスペンション動特性の研究

Study of the Suspension Dynamic Characteristics for Brake Judder Reduction

山口 哲也* 小林 清志*
Tetsuya YAMAGUCHI Kiyoshi KOBAYASHI

要 旨

ブレーキジャダ低減のためには振動の共振系として大きな影響があるサスペンション動特性の適正化が必要となる。

サスペンションのコンポーネントモデルを用いて、その振動モードと周波数特性を算出することにより、主要要因であるサスペンションジオメトリ、ブッシュ特性、部品重量等の影響について、シミュレーションによって比較検討した。その結果、計算による予測値と実測結果が良好に一致し、ブレーキジャダ低減にコンプライアンスステアが重要な役割を果たしていることが確認できた。

ABSTRACT

The reduction of brake judder requires proper tuning of the dynamic characteristics in the suspension, which as an oscillatory system has a great influence on brake judder. Here, a component model of the suspension is used to calculate its vibration mode and frequency characteristics. This makes it possible to conduct a comparative examination of the influence of the suspension geometry (the main factor in brake judder), bushing characteristics, parts weight, and other such factors by means of simulation. As a result, the values predicted by calculation have been found to correspond closely with the actual measurements, and compliance steering has been confirmed to play a significant role in reducing brake judder.

1. はじめに

高速走行時のブレーキジャダはドライバーにとって単なる不快感だけでなく機械的トラブルを連想するなどの不安要素となることがある。

ブレーキジャダの原因はディスクロータの偏摩耗やさびによる制動トルク変動が起振源となることが知られている。この対策としてディスクロータの振れ低減や摩擦材の研磨特性の改良などが行われてきたが、現在でもブレーキジャダの解消には至っていない。

現象の起振源がブレーキであるのに対して、共振系にはサスペンション、伝達系にはボデー、ステアリングシステムがあり、多くの部品が現象に関与しているため発生メカニズムが複雑なものとなっている。このため、実験解析的なアプローチでは現象を把握するにとどまり、改善の指針となりにくい点で問題解決を難しくさせてきた。

共振系であるサスペンションについて考えてみると、ブレーキジャダ発生時の支配的モードはサスペンションのコンプライアンス振動と呼ばれる、タイヤが前後に動くモードであることが知られている。

このコンプライアンスは乗り心地の向上などに重要な役割を果たすが、その一次振動はステアリングシミーやブレーキジャダといった振動の主要因となるという相反する特性を持っている。

本研究の着目点は、サスペンションのコンプライアンス振動がなぜステアリング系を起振するかを解明することである。そのためのアプローチとして、実車での振動実験と併せて、FEMシミュレーションによるサスペンション取付点の配置やブッシュ特性に関するパラメータスタディを実施した。その結果、サスペンションの伝達感度を低減し、ステアリング系への入力をより小さくすることが実車のブレーキジャダ低減に対しても有効であることが確認できたのでその内容を紹介する。

2. 現象の把握

ブレーキジャダ発生時のサスペンション挙動を把握するため実走状態でステアリングホイール上の円周方向加速度とサスペンション各点における加速度を計測し、周波数分析を行った。この結果、おおよそ 15Hz 付近に大

きな成分を持っていることがわかった。代表例として Fig.1 にステアリングホイールでの時刻歴データと周波数分析結果を示す。

Fig.2はこの時のサスペンション挙動を確認するためピークゲインが発生している周波数での振動モードを抽出したものである。これによりブレーキジャダ発生時にはサスペンションの前後振動、いわゆるコンプライアンス振動が支配的な挙動となっていることがわかる。

コンプライアンス振動によりサスペンション、ブレーキの各部品が励起され、その慣性力が主にキングピン軸周りのモーメントとして発生する。これを支える反力としてタイロッドに軸力が発生し、ステアリングギアボックスを通じてステアリングホイールの回転振動となる。

このような伝達経路により制動トルク変動がステアリング振動となることが実験結果から確認できた。

3. シミュレーションによる解析

前述の実走テストの結果から、共振系としてはサスペン

ションのコンプライアンス振動が大きな影響を持っていることが明らかになったので、シミュレーションモデルはこれらの現象を再現できるモデル化が必要となる。

モデル化の対象はサスペンション及びブレーキを構成する各部品の重量とボデー取付け点のブッシュ特性、ボデーの取付け点剛性、サスペンションリンク機構を構成する各点の位置などで、これらの情報から Fig.3 に示す計算モデルを作成した。

なお、各装置を構成するブッシュを除くサスペンション部品の弾性変形による影響は微小であると考え、剛体要素を使用しモデル化を行っている。また、部品重量は集中質量を各部品の代表点に分散配置している。これにより入手が難しい慣性モーメントも簡易的に表現させている。

このモデルを使用して汎用 FEM ソルバ NASTRAN で周波数応答解析を行うことにより、コンプライアンス振動時の振動モードとタイヤ接地点からラックエンドまでの伝達特性を算出し、それらの結果について比較検討を行うことにより各影響因子の変更に対する相対的な評価が可能となる。

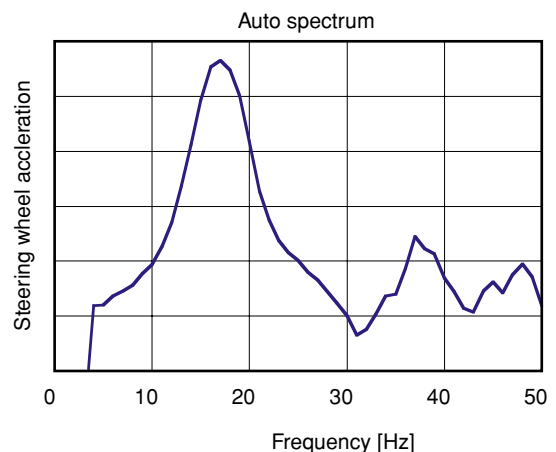
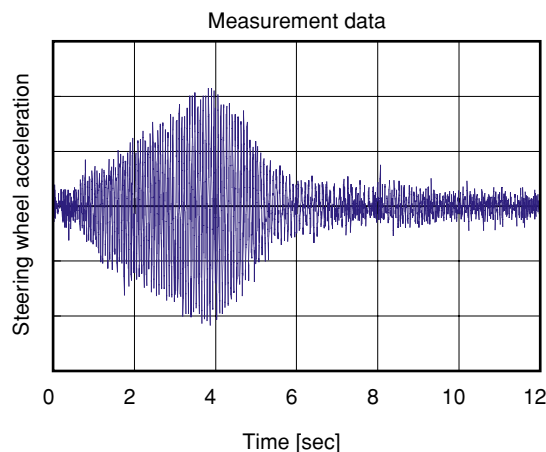


Fig.1 Example for steering wheel acceleration

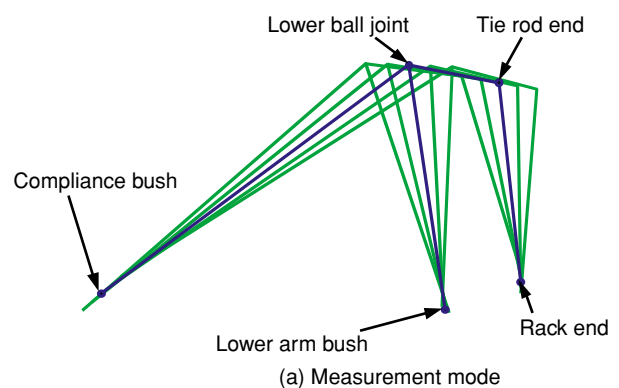
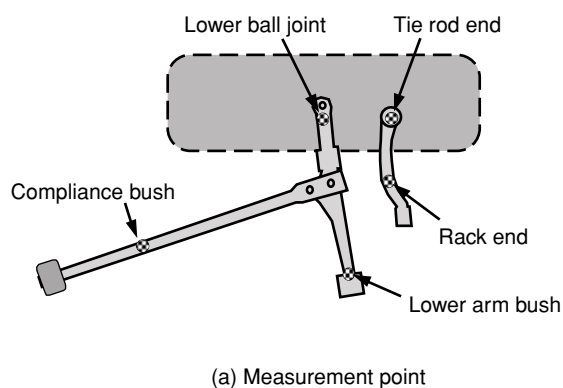


Fig.2 Compliance vibration: experimental mode

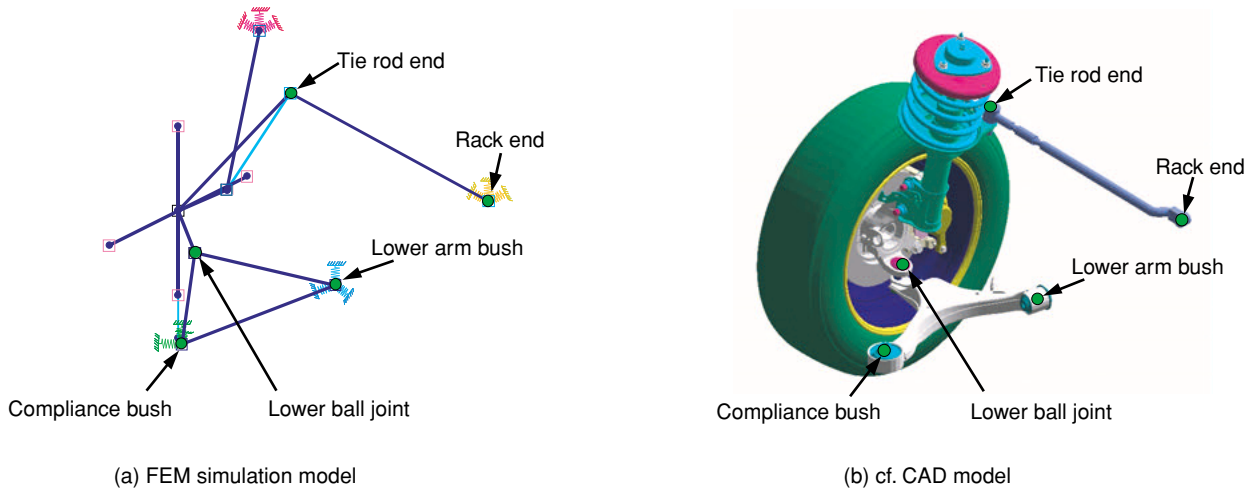


Fig.3 Suspension component model

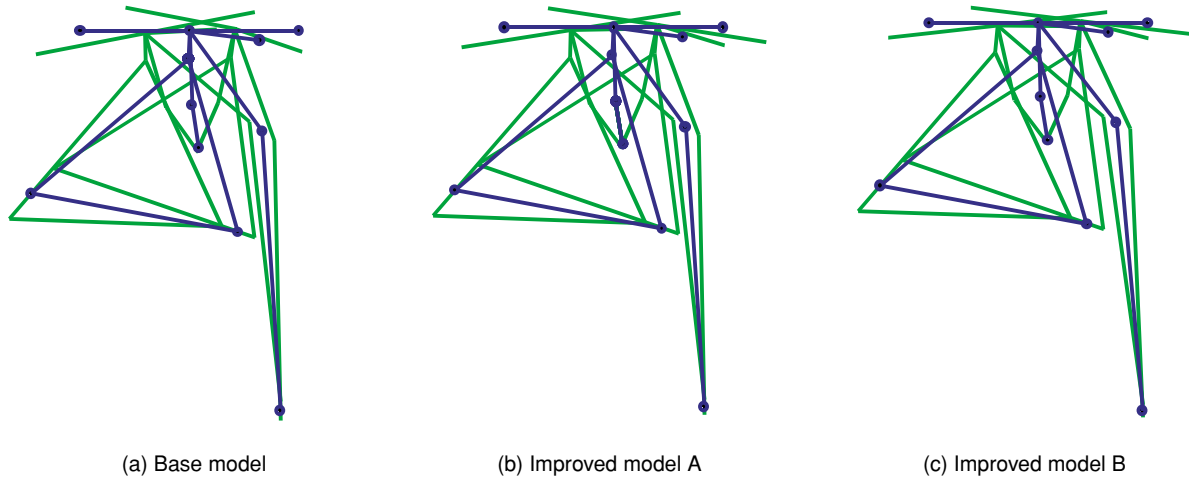


Fig.4 Simulation result: natural frequency mode

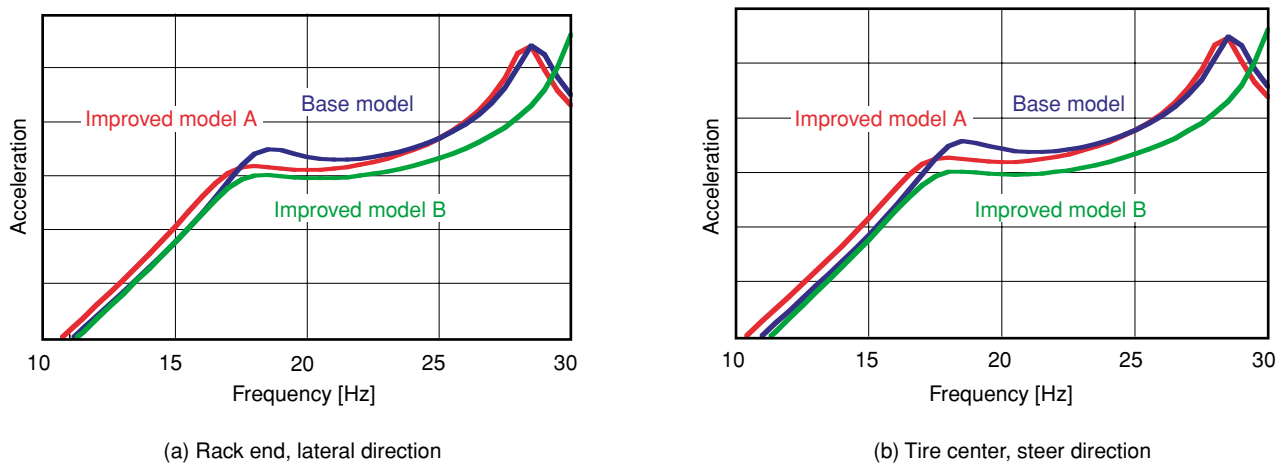


Fig.5 Simulation result: auto spectrum

4. 開発への適用事例

実際の開発への適用事例を次に示す。ベース仕様に対して対策案としてA, B二案についての検討を行った。A案はベースの仕様に対してコンプライアンスブッシュのバネ定数の低減と減衰特性の向上を行った仕様であり、B案はA案に対し更にラックエンドの位置を後方へ変更した仕様である。これらの仕様により計算を行った結果をFig.4, Fig.5に示す。

A案では、ブッシュ特性の変更でコンプライアンスブッシュによる振動エネルギーの散逸効果がより向上し、ピークゲインの減少に効果を示している。

また、A案、B案ともに振動モードに着目してみると、各対策項目の追加によりベース仕様に比べて前後振動に伴うタイヤのトー方向における回転運動、いわゆるコンプライアンスステアが段階的に減少していることが分かる。このことは Fig.5(b) のタイヤセンタでのステア方向ゲインの減少からも確認することができる。

キングピン軸廻りに発生するモーメントについて考えてみると、タイヤやホイール及びそれらに付随して回転運動を行う部品の慣性力により発生するモーメントは振動励起の大きな要因となっている。これが直接的に減少することでサスペンションの伝達感度低減に非常に有効となっている。

この結果から、ベースに対してそれぞれの対策がともに改善方向にあることが確認できたので、これらの仕様について実車テストで確認を行った。

ステアリングホイールの回転方向加速度の実測結果とシミュレーションとの比較結果を Fig.6 に示す。計算と実測の間に良好な比例関係が成立していることから、本手法の有効性が確認できた。

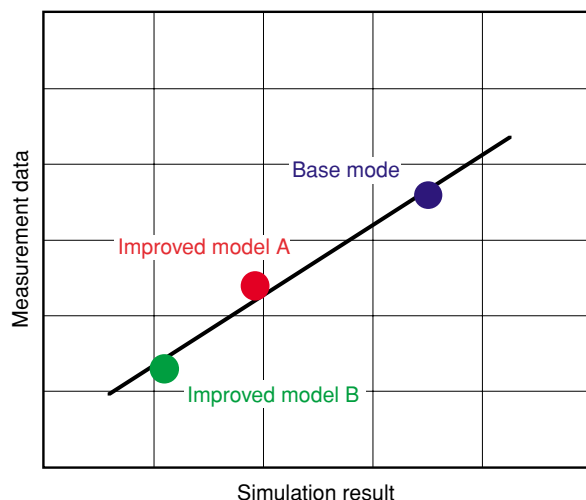


Fig.6 Acceleration comparison: simulation result and measurement data

5. 要因寄与度分析

サスペンションに関する種々の仕様は多数の車両性能へ影響するものが大部分を占めているため、各性能のバランスを取った特性とすることが必要となる。従って、各因子がそれぞれの性能に対してどの程度の影響度を持っているかを知ることは非常に重要である。

そこで、ブレーキジャダへの影響が大きいと思われるいくつかの特性に関してパラメータスタディを行い、それぞれの要因について寄与度分析を行った。ベースモデルの計算結果を基準に各パラメータの変更による特性変化分として、タイヤ接地点からラックエンドまでの伝達特性とタイヤセンタにおけるステア方向ゲインを Fig.7 に示す。

検討因子の中ではコンプライアンスブッシュ特性の影響が最も大きいことがわかる。4章で述べたように、これは単にバネ定数の低減と減衰特性の向上による振動エネルギーの散逸効果だけではなく、バネ定数の変更によるコンプライアンスステアの減少による効果も少なくない。各スタディの結果においてもコンプライアンスステアとの関係は密接であり、サスペンションの伝達感度に対して大きな寄与を持っていることがわかる。

今回のスタディでは、振動モードの変更に対してもコンプライアンスブッシュ特性の影響が大きいという結果になってはいるが、各因子を自由に變更できる段階では、サスペンション取付点の配置が最も影響が大きい。

しかしながら、サスペンションジオメトリは多くの性能に影響を与える基本特性を有して、コンセプト段階より幾度となく繰り返し検討が行われるため、一度仕様が決定的な変更が難しい場合が多い。従って、開発初期段階より基本特性の一つとしてコンプライアンスステアの適正化を行うことが重要である。

6. まとめ

ブレーキジャダ発生時のメカニズムを分析し、その現象を再現したFEMモデルによる机上検討を行ったことで、以下の結果が得られた。

- (1) 振動の共振系であるサスペンションのコンプライアンス振動時の伝達感度を低減することによりブレーキジャダの改善が可能となる。
- (2) コンプライアンス振動時の伝達感度にはサスペンションジオメトリ、及び、コンプライアンスブッシュ特性が最も大きな影響を与えている。
- (3) 振動モードの影響としては、コンプライアンスステアが重要な役割を果たしている。
- (4) 本シミュレーションが実際の開発においても、有効な手法であることが確認できた。

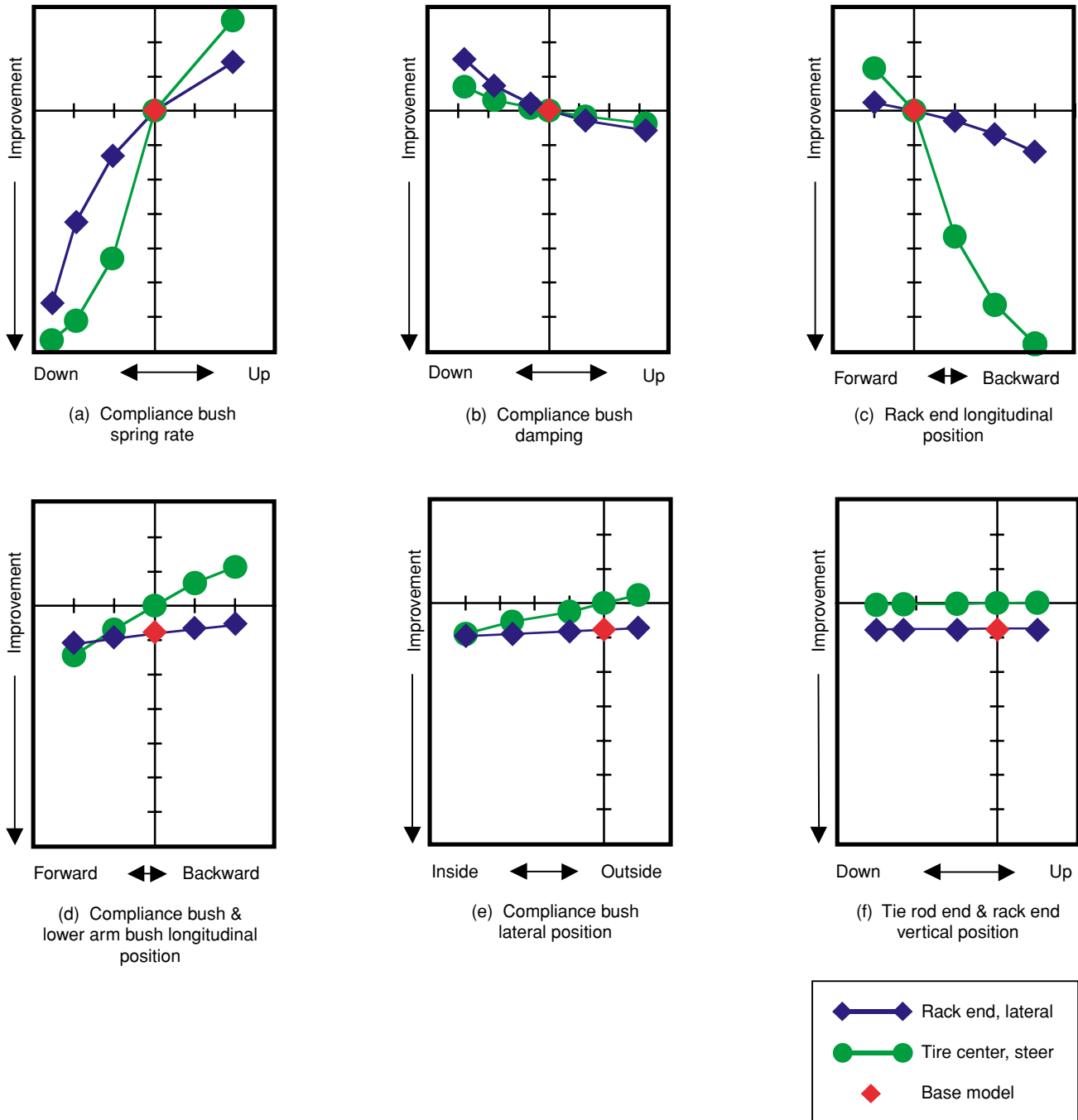


Fig.7 Parameter study result

■ 著 者 ■



山口 哲也



小林 清志