

ブレーキジャダ発生時における 車両全体の振動挙動解析

Analysis of Vibration Behavior of Full Vehicle during Brake Judder

山口 哲也*

Tetsuya YAMAGUCHI

要 旨

ブレーキジャダには、車両全体の多岐にわたる部品、装置が関与している。これまでブレーキ、サスペンションに関しては様々な報告がなされているが、振動の伝達系となるステアリングシステム、サブフレーム、ボデーの振動挙動とブレーキジャダの関係については報告事例が少なかった。

本研究では、それら伝達系の解析のため、台上試験装置を用いた実走状態の再現テストにより、車両全体の振動を計測し、現象の可視化による挙動分析をおこなう。この分析により、特にステアリングシステム、サブフレーム、ボデーの振動挙動を把握し、車両全体としてのブレーキジャダの基本メカニズムを提案する。

また、伝達系における影響因子を抽出し、それぞれの寄与度についての解析事例を示す。

ABSTRACT

A variety of components and systems in a vehicle are involved in brake judder. Up to the present, many papers have explored the roles of the brake and suspension in judder, but quite few have taken up the analysis of the vibration behavior of transfer systems, such as the steering system, subframe and body, from a viewpoint of their impact to brake judder.

This study employed bench tests to reproduce driving conditions. In order to analyze the transfer system, vibration of the entire vehicle was measured and behavior analysis was performed by visualization of vibration phenomena. Much was learned about the vibration behavior of the steering system, subframe and body, and the basic mechanism of brake judder involving the entire vehicle was proposed.

In addition, the influential factors in the transfer system were identified, and the contribution of each was analyzed.

1. はじめに

これまで、ブレーキジャダについての研究事例としては、振動の起振源となるブレーキ、共振系となるサスペンションに関する研究が数多く報告されている^{(1)~(6)}。しかしながら、振動の伝達系となるステアリングシステム、サブフレーム、ボデーについての影響を解析した事例は少ない。

実験解析手法を用いて伝達系を含めた車両全体の振動メカニズムを分析するためには、車両各点における振動挙動を計測することが必要となり、その総計測点数は100点に達することもある。このため実走テストにて必要となる全点数のデータを一度に計測することは、おおがかりな計測機器が必要となり実験そのものが難しかった。一方、数回に分けて計測をおこなう方法では、繰返しテストにおいて同一の振動現象を安定的に発生させることが難しく、こちらも解析精度上の課題がある。

また、台上テストとしてはシャシーダイナモを用いた実施例はあるものの、依然、起振源はブレーキの摩擦材特性に依存したトルク変動であるため、現象を安定的に発生させるという点において大きな改善は得られない。

本研究では、これらの問題点を解決するために現象の再現性が高く、実走テストに比べて繰返しテストにおいても同一の振動現象を安定的に発生させることが可能で、質の高い振動データの取得ができる台上テスト手法の検討をおこなう。

次に、ブレーキジャダの基本メカニズムを把握するため、このテスト手法を用いて各回毎に計測したデータを一括で分析処理することにより車両全体の振動モードを可視化し、挙動分析をおこなう。

この車両挙動分析と実走テストの結果から、伝達系における影響因子の抽出とそれぞれの寄与度について解析した事例もあわせて報告する。

*栃木研究所

2. 台上テスト

2.1. 試験装置の選定

台上テスト手法の検討にあたっては、試験装置として次の二つの装置について比較をおこなう。

(1) シャシーダイナモ (Fig. 1)

(2) Tire Patch Exciters (以下 TPE, Fig. 2)

前者は一般的なブレーキ試験などに使用され、広く知られている。後者のTPEは、二つの加振機とエアベアリングを用いて車両の前側左右輪を加振する MTS 社製の試験装置である。



Fig. 1 Chassis dynamometer

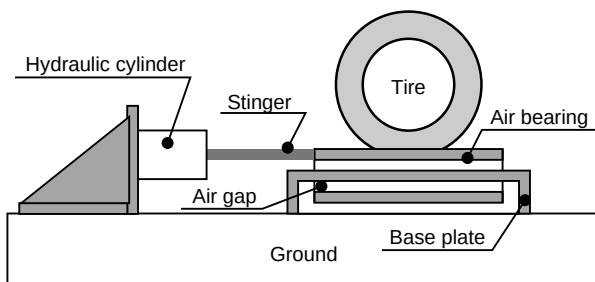


Fig. 2 Tire Patch Exciters

シャシーダイナモを使用した試験では、実走テストをそのまま台上に置換したテスト手法を用いることができるため実走テストに対する現象の再現性は非常に高いが、起振源も実走テストと同様に摩擦材特性に依存したブレーキのトルク変動によるため、繰返しテストにおいて同一の振動現象を安定的に発生させるという点では同様の問題が残ってしまう。

また、振動励起のためブレーキによる制動が必要となることにより、各回の計測間でブレーキ部品の冷却時間待ちが発生してしまう。これは、多点計測、及び、発生現象の安定性の低さを補うための繰返し試験が必要とされる条件下では膨大な試験時間を要する原因となってしまう、開発期間の短縮や試作車の削減が求められる商品開発においては、その作業の時間効率の悪さから検討手法とは成り難い。

これらの問題点を解決するために、次にTPEについて検討する。起振源の入力を安定させるために加振機による振動励起方法を用いることで現象を安定的に繰返し発生させることが可能となり、かつ、ブレーキによる制動が不要となることから各回の計測間におけるブレーキ部品の冷却時間待ちの問題も無くなる。

以上の理由により、本研究ではTPEを試験装置として選定した。

2.2. TPE による台上テスト手法

実走テストに対する現象の再現性を確保するため入力条件としては、厚さ不同が生成されたディスクロータを装着した際の平均的なブレーキのトルク変動が再現されるように加振機を制御することが必要となる。Fig. 3にシングルダイナモ試験より得られた平均的なブレーキのトルク変動を

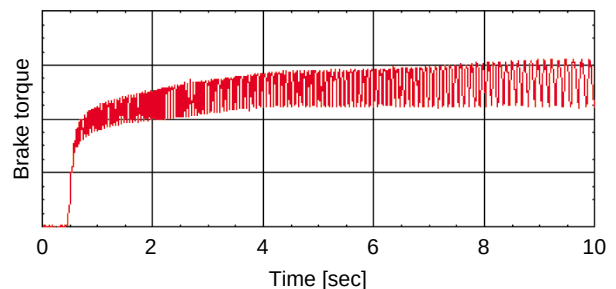


Fig. 3 Measurement data: brake torque variation (single dynamometer)

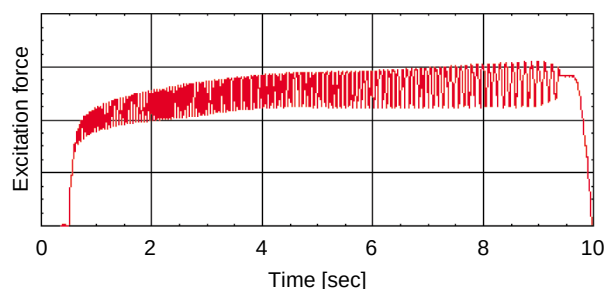


Fig. 4 Excitation force: Tire Patch Exciters

示す。このトルク変動特性をタイヤ接地点における前後力変動に換算し入力データとする。これをTPEにて再現した結果を Fig. 4 に示す。両者は良好に一致しており入力の再現性は十分である。

Fig. 5 に実走テストでの 10 回の繰返しテストにおけるステアリング回転振動の加速度(ステアリングホイール外周上の接線方向成分)の計測結果と TPE を用いた台上テストの計測結果を示す。なお、ここでは時刻層における振幅の移り変わりを各一波長毎のピーク値のみをプロットすることによりグラフ化している(Fig. 6)。二つの結果を比較すると、台上テストにおけるステアリング回転振動は、実走テストの平均的な値を示すとともに時系列における振動が収斂する傾向も良好に再現していることがわかる。

従って、これにより実走テストに対する現象の再現性が高く、台上テストにおいて同一の振動現象を安定的に発生させることができるテスト手法が確立できたものと判断し、本手法を用いて多点計測をおこない、車両挙動分析を実施する。

3. 基本メカニズム

台上テストにおける計測点は、現象発生時の実稼動モードを作成するために各部品、装置毎に十分な点数を配置した。これらの計測点におけるデータから作成した時刻層での実稼動モードを Fig. 7, Fig. 8 に示す。この実稼動モードを分析することにより、Fig. 9 に示すブレーキジャダ発生

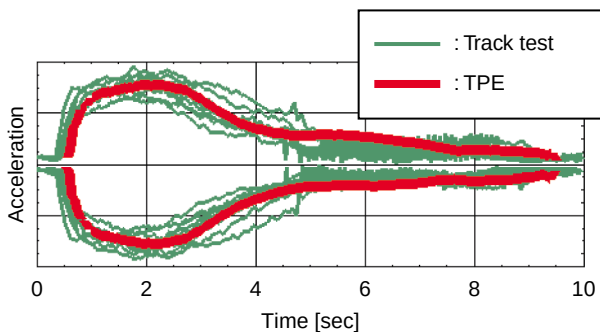


Fig. 5 Rotational acceleration: steering wheel comparison between track test and TPE

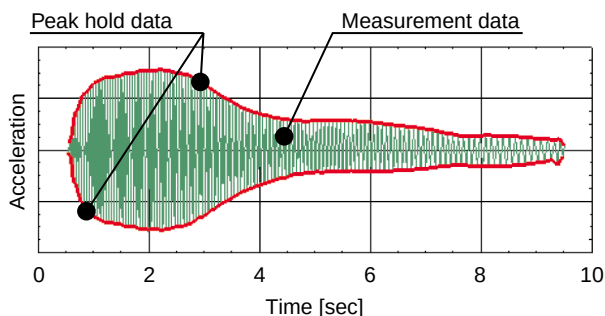


Fig. 6 Steering wheel acceleration: peak hold data

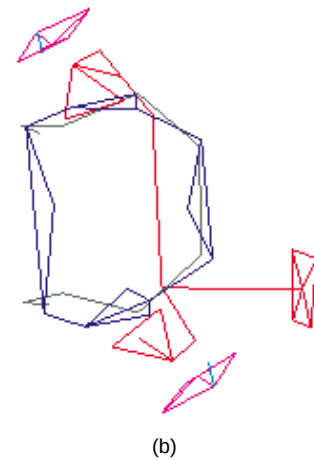
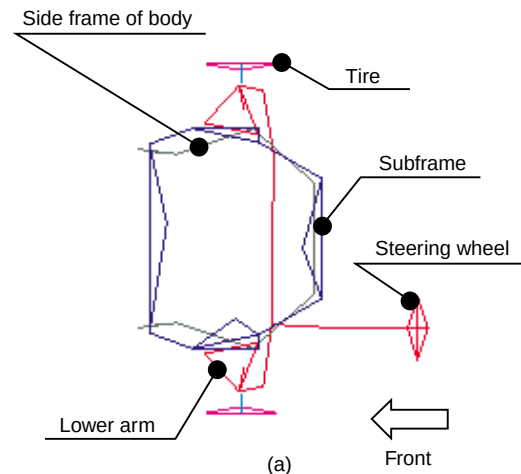


Fig. 7 Operational deflection shape at TPE (suspension, steering, subframe and side frame of body)

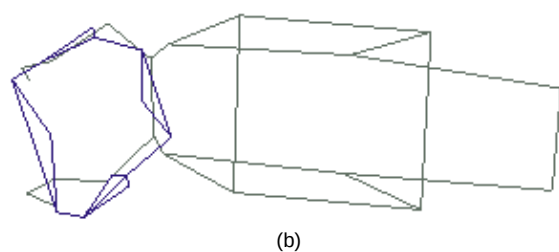
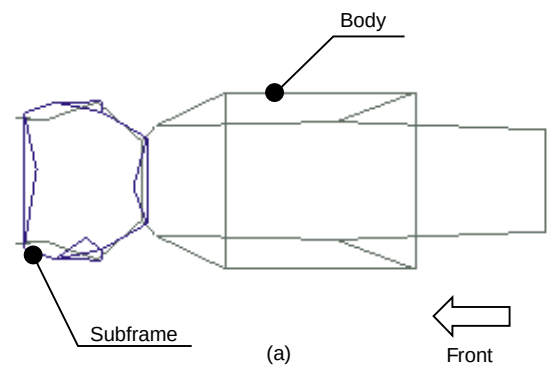


Fig. 8 Operational deflection shape at TPE (subframe and body)

時の基本メカニズムがわかった。

図中左側に示す振動の伝達経路(1)は、ブレーキジャダの主要因のひとつであるサスペンションの前後振動がキングピン軸を中心とした回転振動となりタイロッドを經由してステアリング振動となる従来から知られている伝達経路である。

これに対して、図中、中央及び右側に示す振動の伝達経路(2)、(3)は本研究により新たに判明したサブフレーム、ボデーの振動にかかわる伝達経路である。サスペンションの前後振動の発生により、これを支持するサブフレームがロアアームブッシュ取付け点で左右方向に、コンプライアンスブッシュ取付け点で左右及び前後方向に加振される。これによりサブフレームは車両上下方向の軸まわりに若干の回転を伴いながら左右に振動する。この時、サブフレームに搭載されているギヤボックスのハウジング部もサブフレームとほぼ一体で左右に振動することによりラック軸との相対変位が発生しステアリングの回転振動となるのが伝達経路(2)である。

また、サブフレームの振動は、それを支持するボデーにも伝わり、キャビンから前方での横曲げを伴いながらボデー自体も左右に振動する。これが伝達経路(3)であり、ブレーキジャダ発生時のボデー振動のメカニズムとなる。

以上のように、多点計測による車両挙動分析をおこなう

ことで、ステアリングの回転振動を発生する伝達経路は2系統存在することが明らかとなるとともに、ボデー振動を発生するメカニズムも把握することができた。

更に、フロントサスペンションの形式違いを含む複数の車両に対して同様に車両挙動分析をおこない、前述のブレーキジャダの基本メカニズムには変化が無いことも確認した。

4. 伝達系における影響因子

4.1. サブフレーム、ボデーの改善案検討

改善案の検討に際しても、Fig. 7, Fig. 8の実稼動モードから大きな変形、振動が発生している部位に着目することにより、改善案の指針を得ることができる。ここでは、サブフレームのマウントブッシュの変形とボデー前端部の横曲げ変形に着目する。

サブフレームマウント部の変形を抑えるためには、リジットマウント相当となる補強パッチの追加、ボデー前端部の横曲げ変形の抑制にはボデー各部材への補強パッチの追加を実施した。なお、補強パッチの形状検討に際しては、有限要素法(FEM)を用いて横曲げ変形に対する各部材の感度解析をおこない補強部位を決定した。この補強によるサブフレームを取り除いたボデーのみで補強レベルを比較した結果を Fig. 10 に示す。ボデーの補強により横曲げの変

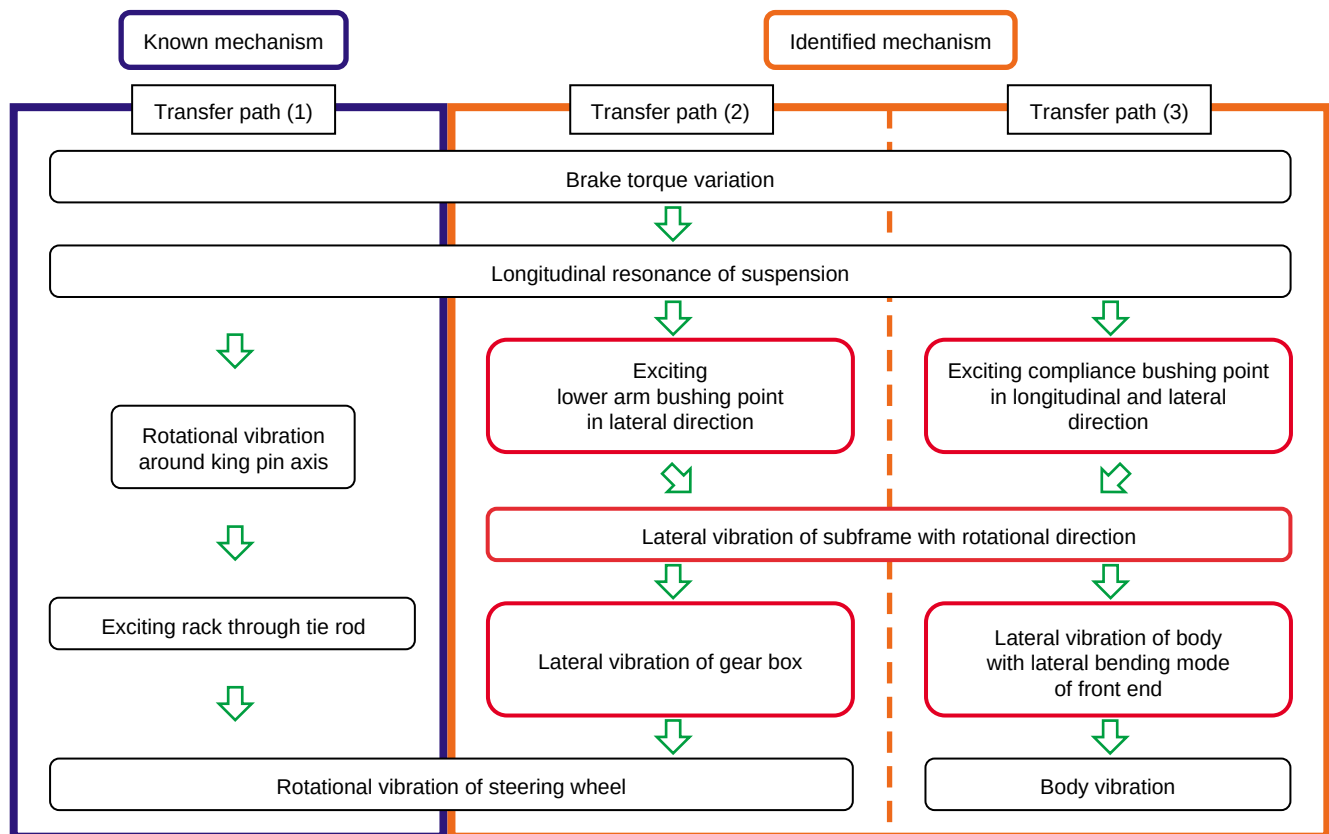


Fig. 9 Basic mechanism of brake judder

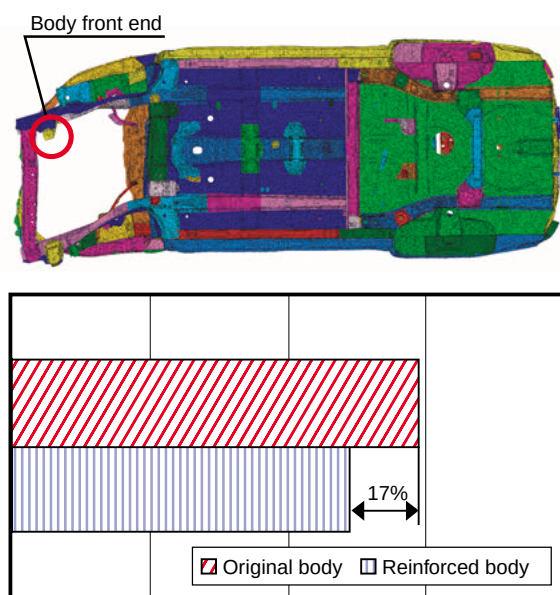
形量は 17%程度抑えられていることがわかる。

ボデーへの振動伝達としては、サブフレームのロアアーム取付け点から振動が伝達されることが車両挙動分析結果より明らかであることから、これらの補強によるブレーキジャダにかかわる剛性変化の度合いを評価するため、ロアアームブッシュ取付け点における静的な変形量を比較した。この結果を Fig. 11 に示す。ボデーのみに補強パッチを追加した仕様では、ロアアームブッシュ取付け点の剛性はほとんど変化していないのに対して、ボデーの補強パッチと併せてサブフレームマウント部へ補強パッチを追加した仕様では、64%程度変形量が抑えられている。このことからマウントブッシュを介してサブフレームが組付けられる構造を有した車両では、ボデー補強のみによるロアアームブッシュ取付け点の剛性アップ効果は低いことが確認できる。

これらの二つの改善案について実走テストをおこなった結果、ロアアームブッシュ取付け点剛性の検討結果と同様にボデー補強のみでは有意な差は見られなかったのに対し、ボデー及びサブフレームマウント部を補強した仕様ではおよそ 20%程度の改善効果が得られることが確認できた。

4.2. ステアリングシステムの影響

ステアリングシステムは、ドライバーが直接ジャダを感じるステアリングホイールを有する振動伝達の最終経路であり重要な役割を担っている。しかしながら現象改善に関しては、ステアリングギヤボックスにおけるダンパやフリクションなどのラック軸の摺動抵抗を上げる対策が主となり他の要因についての研究事例はほとんど見られない。本研究では、コラムシャフトに注目し、その影響について検討する。



Displacement: body front end

Fig. 10 Body stiffness level without subframe

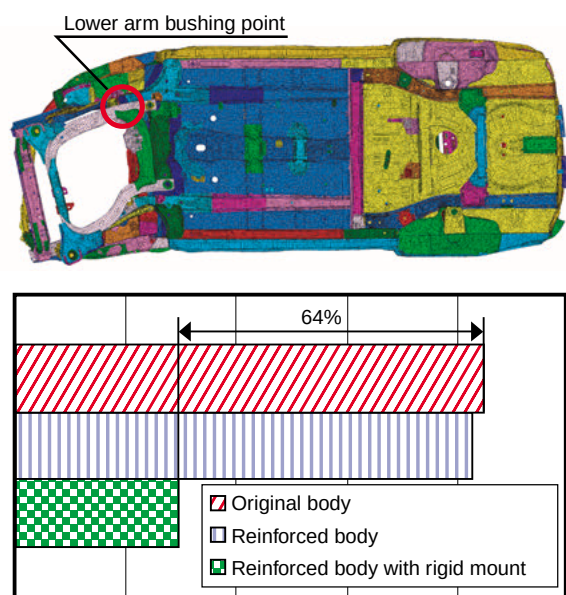
ステアリングシステムを構成するコラムシャフトには、通常、車両レイアウトの都合からヨークジョイントが使用されるが(Fig. 12)、このジョイントで結ばれるシャフトが任意の交角を持ってしまうため、回転運動を伝える際に伝達率の変動が発生する。また、ヨークジョイント部のフリクションの影響度合いも回転位置により変化するため、コラムシャフトトータルでのフリクション特性も変動する。

この特性がどのようにブレーキジャダに影響するかを確認するため、ステアリングのニュートラル位置におけるコラムシャフトのヨークジョイント位相違いによる実走テストをおこなった。計測をおこなったヨークジョイント位相とその位置における回転伝達率の変動、回転フリクションの特性を Fig. 13 に、ステアリング回転振動の比較を Fig. 14 に示す。この結果、今回の供試体では最大で 30%程度の差異が発生することが確認された。従って、ブレーキジャダに関する検討をおこなう際には、これらの特性についても十分考慮する必要があることがわかった。

なお、チルト、テレスコピック機構を有するステアリングシステムでは、ステアリングホイールの位置を変更することによりシャフト交角が変化し、これによっても回転伝達率の変動やフリクション特性が変化するため、これらの影響を受けにくいヨークジョイント位相を選択することも重要なポイントとなる。

4.3. 影響因子の寄与度

前述の解析事例を通して、ステアリングシステム、サブフレーム、ボデーなどの伝達系における影響因子の寄与度を把握することができたので、従来からステアリングの回転振動を抑制するために用いられてきたステアリングダンパとあわせて、以下に寄与度の大きいものから順に整理する。



Displacement: lower arm bushing point

Fig. 11 Body stiffness level with subframe

- (1)ヨークジョイント位相
- (2)ステアリングダンパ特性
- (3)サブフレームマウント

このように、伝達系における影響因子の抽出とその寄与度の解析をおこなうことで、起振源、共振系と合せて車両全体の多岐にわたる部品、装置でのブレーキジャダに関する改善点を把握することができた。

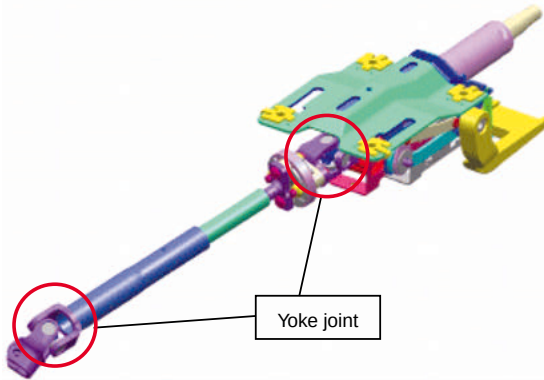


Fig. 12 Yoke joint: column shaft

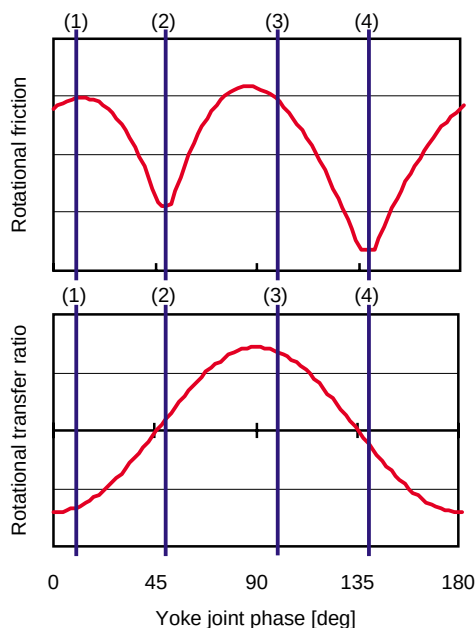


Fig. 13 Characteristics of column shaft

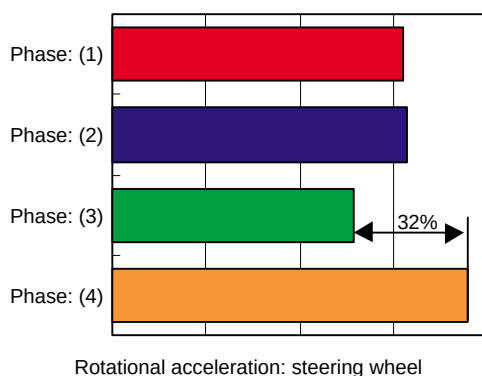


Fig. 14 Result of track test

5. まとめ

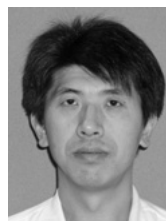
台上試験装置を用いた加振テストの実施により、ブレーキジャダについての車両挙動分析が可能となると共に、伝達系に対する寄与度解析も可能となったことで、以下の結果が得られた。

- (1) TPEを用いた台上テストにより、再現性が高く、安定的に振動現象を発生させることができるテスト手法を確立し、効率的に車両挙動分析をおこなうことが可能となった。
- (2) ブレーキジャダ発生時の振動挙動を可視化することにより、ブレーキからステアリングホイール、及び、ボデーまでの振動伝達の基本メカニズムが把握できた。
- (3) ステアリングニュートラル位置でのコラムシャフトのヨークジョイント位相やチルト、テレスコピック位置により、ステアリングホイールの回転振動に対する伝達特性が大きく変化することがわかった。
- (4) ステアリングシステム、及び、サブフレーム、ボデーの伝達系における各要因を抽出し、寄与度について解析することにより、起振源、共振系と合せて車両全体の部品、装置でのブレーキジャダに関する改善点を把握することができた。

参考文献

- (1) 土井三浩ほか：ブレーキジャダー低減技術—摩擦材配合を含むブレーキ設計技術の開発—，自動車技術会学術講演会前刷集，No.100-99，p.9-12(1999)
- (2) Abdelhamid, M. K.: Brake Judder Analysis Using Transfer Functions, SAE Paper 973018(1997)
- (3) Kim, M. G., et al. : Sensitivity Analysis of Chassis System to Improve Shimmy and Brake Judder Vibration on Steering Wheel, SAE Paper 960734(1996)
- (4) Gassmann, S., et al. : Excitation and Transfer Mechanism of Brake Judder, SAE Paper 931880(1993)
- (5) de Vries, A., et al. : The Brake Judder Phenomenon, SAE Paper 891329(1989)
- (6) 山口哲也ほか：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，Honda R&D Technical Review, Vol.13, No.1, p.99-104

■著者■



山口哲也