

実走行を台上にシミュレーションした サスペンションブッシュ耐久性評価法

Durability Evaluation Method on Suspension Bushing
by Simulating Actual Vehicle Suspension Behavior to Test Rig

宮本 康生*
Yasuo MIYAMOTO

山本 敏文**
Toshifumi YAMAMOTO

川崎 聡志*
Satoshi KAWASAKI

安保 剛将***
Takayuki ANBO

要 旨

サスペンションブッシュの耐久性を台上試験で精度よく評価する手法を開発した。実走耐久試験でのサスペンションへの複合入力、非正方マトリクスを使った制御により3軸油圧加振機でサスペンションアセンブリに負荷し、ブッシュのダメージについて多次元の頻度解析と評価を行った。これよりサスペンションブッシュに求められる耐久性を、長時間の実走試験を要せず、それと同等の精度で短い期間で評価する事が可能となった。

ABSTRACT

The developed process accurately determines the durability of suspension bushing by rig test. The multi axial forces, which will be loaded to suspension during vehicle endurance test, are applied to the suspension assembly to be tested, using the hydraulic three-axis road simulator controlled with non-square matrix. The damages of bushing are analyzed with the multi-dimension histogram and evaluated. It is possible to evaluate the durability of suspension bushing in shorter time with the accuracy equal to that being gotten in long term vehicle test.

1. まえがき

サスペンションに使われるゴムブッシュは操縦安定性、乗心地に直接影響する部品であり、その特性を実車の商品性目標に合致するようにチューニングする事は重要である。しかしブッシュの特性と耐久性は相反する関係にある事が多く、相互の機能を満足させるには多くの試行錯誤が必要であった。

また従来の単体耐久評価は、実走耐久試験の再現を目標として試験条件を設定するが、Fig.1のようにサスペンションブッシュ単体に正弦波入力を一方向に荷重を加える試験で行っているため、サスペンションがストロークする際のジオメトリ変化による影響や実走時のタイヤホイールセンタに6分力(Fig.2)によって発生するブッシュの複雑な入力負荷(Fig.3)を再現する事ができない。そのため実走耐久試験と相関の高い単体耐久試験を実施する事は困難であった。

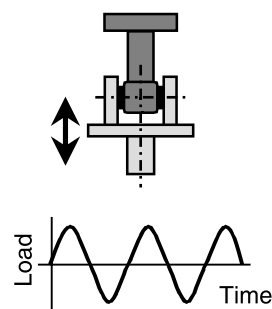


Fig.1 Bush rig test

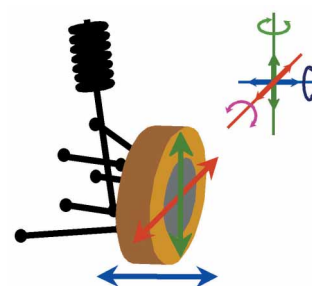


Fig.2 Three prime forces at wheel center

* 栃木研究所

** 本田技研工業(株)(山下ゴム(株)へ派遣)

***山下ゴム(株)

一方、完成車の走行耐久試験を台上において再現するシミュレーション耐久装置が、4柱加振機(Fig.4)や多軸加振機(Fig.5)など油圧アクチュエータを用いて実用化され、自動車産業においては、主に車両メーカーが導入してきた。前者はタイヤを介して荷重を加えるのに対し、後者はダミーホイールを用いて直接スピンドルセンタに入力する。実車の車体の評価には4柱加振機が、またサスペンションと車体の取り付け部の評価には上記の3方向の多軸荷重試験が多く使われてきた。しかし、これらの台上耐久試験機はサスペンションブッシュの耐久評価には使用されなかった。

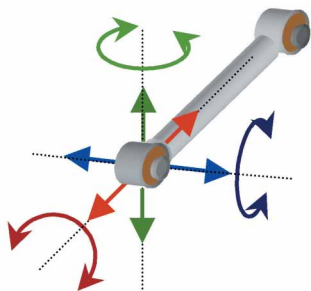


Fig.3 Share force at bush



Fig.4 4 Poster system



Fig.5 16channel road simulator system

このようなブッシュ耐久性評価手法の問題点に対し、単体では再現困難なジオメトリ変化にはサスペンションアッセンブリ単位で負荷試験することで対応し、接地点3軸入力負荷には、コンピュータ制御の3軸油圧試験機を用いる事で対応した。これにより実走と同様の複数の荷重負荷と時間履歴を再現させ、実走時と等価なサスペンションブッシュへのダメージ与え、サスペンションブッシュの耐久性評価に適した試験条件を構築した。加えて複合荷重負荷が入る場合のダメージ評価法を改良し、耐久寿命の評価精度を向上した。この技術により、多様なサスペンション形式のブッシュについて耐久性を台上で精度良く評価することが可能となり、新しいサスペンションの開発に適用したので報告する。

2. 台上耐久試験機の概要

再現の目標とする実車耐久テストは何か月もの長時間を要する試験であり、時間短縮のため、路面の凹凸が比較的大きな悪路を走行する。走行路面が非舗装路で路面の摩擦係数が低く、加減速の少ない、定速走行を組み合わせたモード走行をするため、スピンドルの上下・前後方向とタイヤ接地点左右方向の三つの荷重がサスペンションへの主要な入力となる。

Fig.6に今回使用した油圧耐久試験機の外観を示す。油圧アクチュエータはFig.7に示すように上下、左右、前後のロッドを介してダミーホイールに3方向の荷重を負荷する。前後力は、Fig.8に示すように、もう一つのロッドを結合することでタイヤ回転方向の自由度を設定できる。今回はロッドを追加し、タイヤ回転の自由度を与えて使用した。これにより前後方向のアクチュエータの荷重はスピンドル部での前後軸方向の入力となる。逆にロッドを外し、サスペンションにタイヤ回転の拘束を加えると、車軸まわりのモーメント荷重を負荷することができる。ダミーホールとサスペンションの位置関係をFig.9に示す。

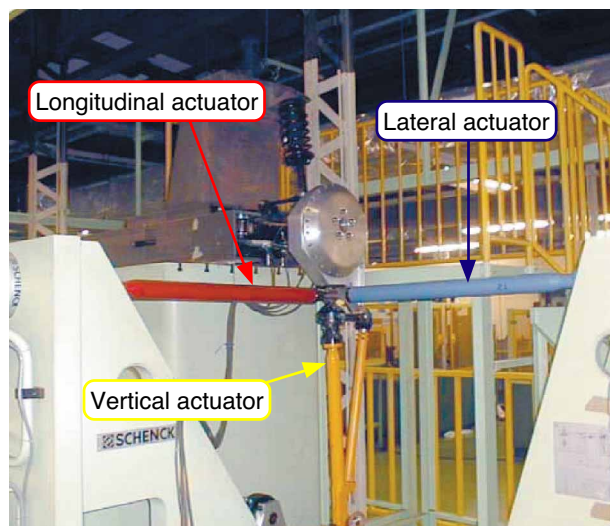


Fig.6 Three axial road simulator

Fig.10に走行時の入力を制御するシステムの概要と信号のフローを示す。システムは解析計算を行うワークステーション部分と信号制御を実行する油圧アクチュエータ部分からなる。車両とサスペンションの荷重応答信号は、構成するサスペンションアームに取り付けられた荷重センサから収集する。実車と台上テストでは同じ部位で荷重測定を行う。各アームの荷重応答信号が目標となる実走行の荷重信号と同じになるようにシステムで解析し、制御する。応答信号の解析と油圧アクチュエータの信号制御は専用のプロセスコントローラーでリアルタイムに処理される。



Fig.9 Suspension and rig

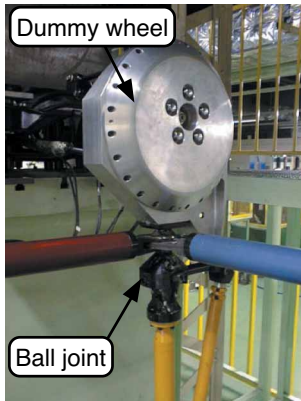


Fig.7 Dummy wheel and joint

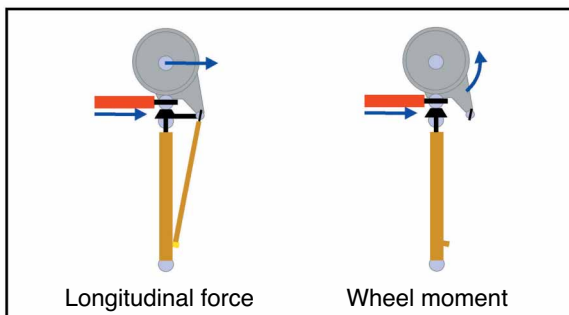


Fig.8 Load control by attachment

3. 台上耐久試験の概要

3. 1. 台上耐久試験のプロセス

台上耐久テストのプロセスは下記からなる。

- ・荷重センサの取り付けと校正
- ・荷重センサの適合性の検証
- ・実車走行の入力測定
- ・台上での波形再現
- ・再現結果の検証
- ・台上耐久テスト

3. 1. 1. センサの取り付けと校正

Fig.11のようにアームにひずみゲージをはり、荷重センサとして用いる。これによりナックルやアームの慣性力による影響を排除し、ブッシュへの入力を直接精度良く計測できる。アームにかかる荷重は、Fig.12のようにアーム単体におけるひずみと軸力の関係から静的に校正した。

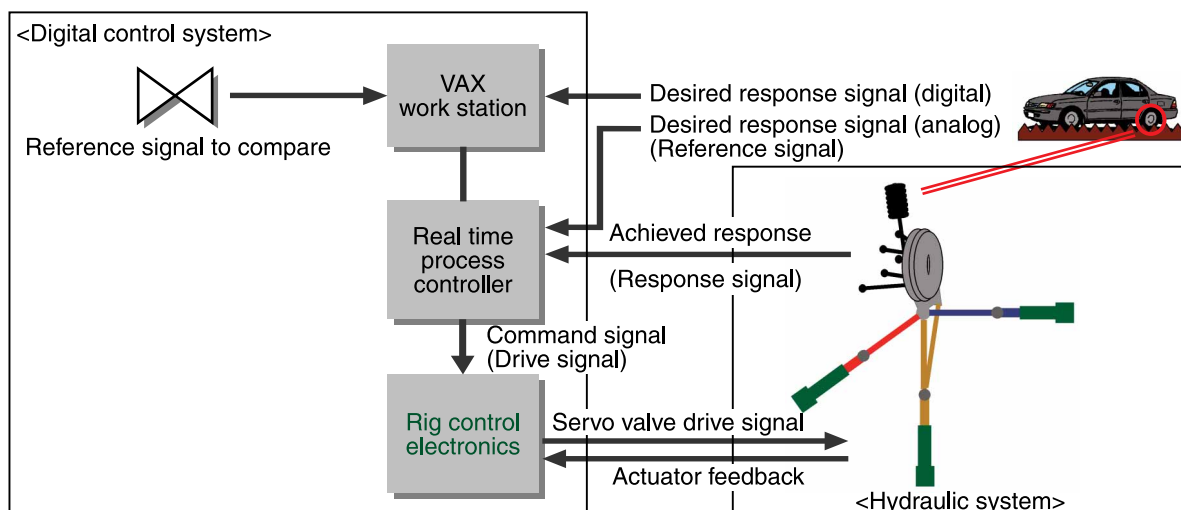


Fig.10 Simulation system

3. 1. 2. センサの適合性の検証

台上で各軸のアクチュエータからの入力に対するサスペンションアームの応答を測定した。荷重の時系列データを周波数軸データに変換し、伝達関数マトリクスと、コヒーレンス関数マトリクスを得る。検証で用いた5リンク型ダブルウィッシュボーンサスペンションでの各アーム軸力を例に、伝達関数をFig.13に、コヒーレンス関数をFig.14に示す。伝達特性の線形性が高く、コヒーレンス関数マトリクスの各アクチュエータに対する相関性の良いセンサを選択し制御チャンネルとした。

ダブルウィッシュボーンサスペンションのように入力チャンネル数よりセンサの候補となるリンクアームが多い場合は、どのリンクアームをセンサとして用いるかここで十分に検討する必要がある。この例では上下方向は良い特性のセンサが得られたが、左右と前後方向に伝達振幅と相関度の良いセンサが得られなかった。このような場合、複数のセンサを組み合わせる手法や伝達関数に非正方マトリクスを用いる手法も、この伝達特性の性質を解析する事により検討できる。

Fig.13の例では、制御対象の40Hzまで伝達振幅の変化が一定であり、位相の変化も線形的である。また、入力と応答の相関度を現すFig.14のコヒーレンス関数から、対象としている周波数域まで十分な相関度(0.7~0.8以上)を示す事が確認された。

3. 1. 3. 実車での入力測定

荷重センサを付けたサスペンションアームを実車に組み込み、耐久試験路を走行し、目標となる荷重の時系列データ(Reference signal)を収録した。

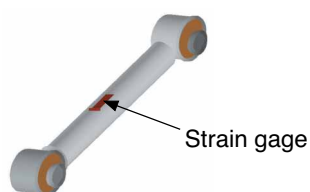


Fig.11 Load sensor

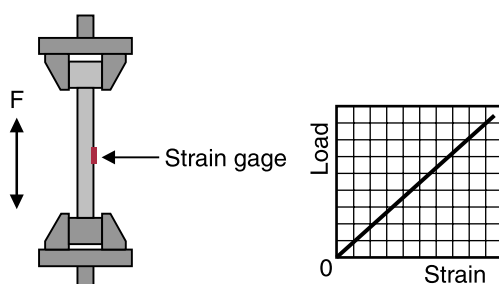


Fig.12 Calibration test

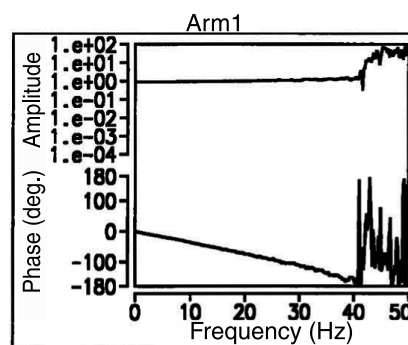


Fig.13 Transfer matrix

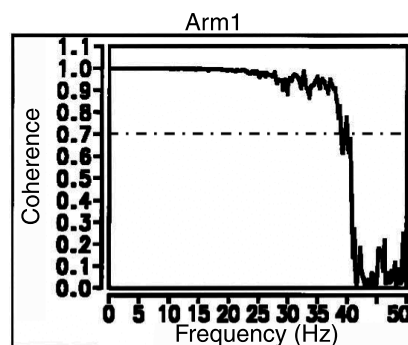


Fig.14 Coherence matrix

3. 1. 4. 台上加振波形の作成

次に実車での入力測定に使用したサスペンションを台上に組み付け、実車の挙動を再現するアクチュエータ制御信号を求める。Fig.15に信号波形作成のプロセスを示す。本試験では、3. 1. 2で述べたように非正方マトリクスの伝達関数を用いた。誤差修正のイタレーション過程は、正方マトリクスの場合と同じであるが、正方マトリクスの対角項以外のフィードバック成分が過大にならないように伝達関数を同定した。

本テストで用いた装置では3本のアクチュエータを最大8個のセンサ信号を入力として制御することができる。センサの感度検定を行った5リンク型ダブルウィッシュボーンサスペンションのシミュレーションの場合には8行×3列の非正方マトリクスを用いた。この逆マトリクスを解くことにより制御信号を求めた。

3. 1. 5. 再現精度の検証

波形再現性は最大誤差(Fig.16)、二乗平均(RMS)誤差(Fig.17)、重み付け誤差(Fig.18)、周波数誤差、および時系列誤差で評価する。重み付け誤差は最大誤差とRMS誤差から計算で求めた。重み付け誤差から、イタレーションにより複数のサスペンションアームの誤差が収束し、波形再現性が向上したことが分かる。

Fig.19に周波数誤差を示す。油圧加振機で制御できる周波数まで精度よい応答出力が得られている。応答出力の例

として5リンク型ダブルウィッシュボーンサスペンション
 での各アーム荷重軸力の波形再現結果をFig.20に示す。実
 走入力波形と台上再現波形の間に良い相関が得られた。

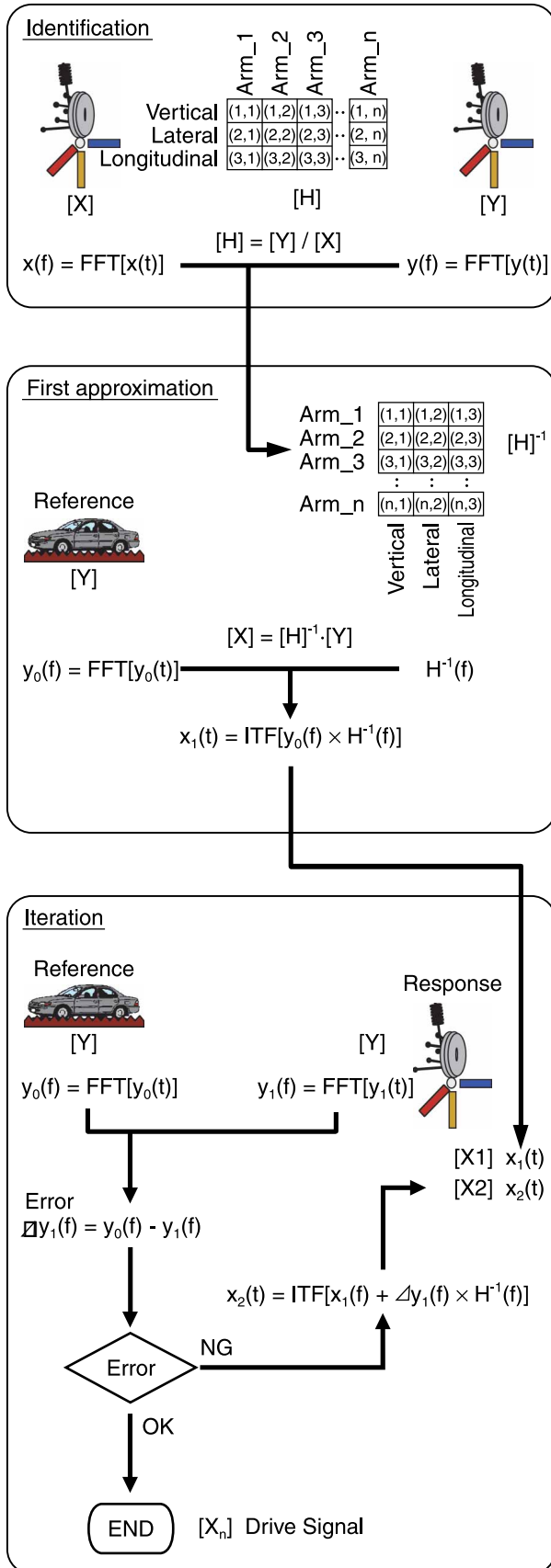


Fig.15 Iteration

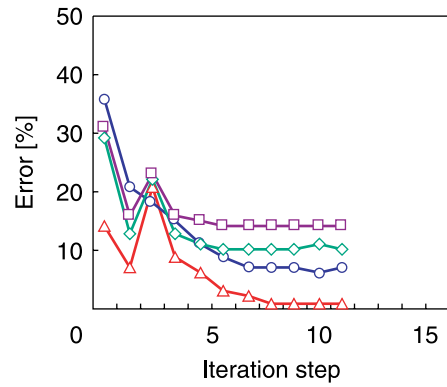


Fig.16 Maximum error

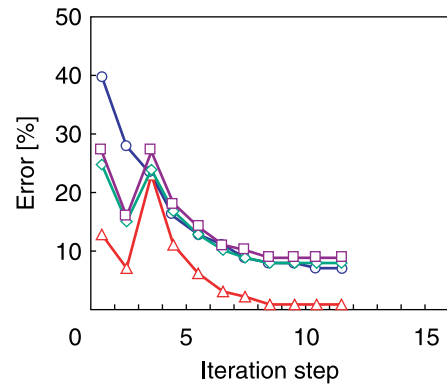


Fig.17 RMS error

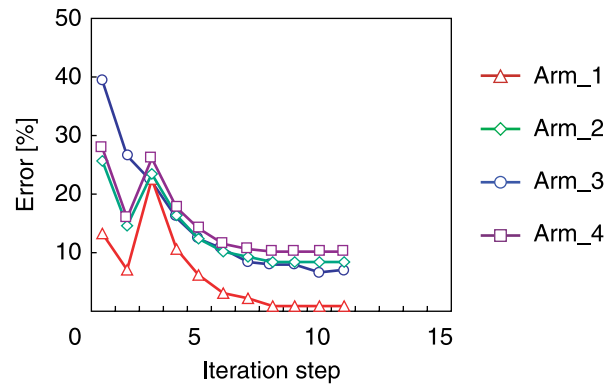


Fig.18 Weighted error

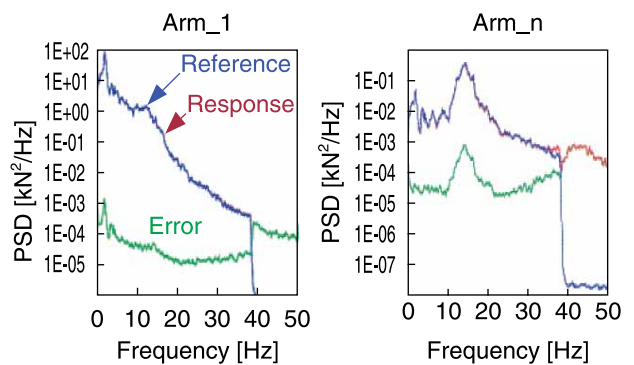


Fig.19 Frequency error

4. ブッシュの疲労ダメージの評価

先に述べたように、実走では6軸の荷重が入るのに対し、台上試験では3軸の荷重で行っている点と、試験機の周波数応答特性から、実走でのダメージと台上試験でのダメージの間にはわずかな誤差が生じる。サスペンションブッシュのように精度良く寿命を評価する必要がある場合は、このわずかな誤差もできるだけ小さくしたい。そこで台上試験の時間の補正とダメージ計算手法の改良をおこなった。

4. 1. 台上試験時間の補正

試験条件と実走試験の疲労ダメージの比較を行った。目標荷重信号(Reference)と台上の再現荷重信号(Response)の頻度解析を行う。サスペンションアームの負荷をFig.21のようにアーム軸力とブッシュ回転方向に分け、両者の頻度解析を行った。ゴムブッシュでは入力負荷によって表面形状が大きく変化し、応力場が入力に対して非常に大きな非線形性を有する事から、表面応力を測定して解析評価する事は困難であるため、評価因子として応力ではなく機能システムとしての耐久性で部品単体を評価する。サスペンションブッシュ単体での耐久テストから、Fig.22のように荷重負荷と回数の疲労強度特性図(S-N線図)を作成し、実走での荷重頻度と比較した。

頻度とS-N線からマイナー則式(1)により実走と台上におけるサスペンションブッシュのダメージをFig.23のように算出した。実車のダメージを1として、台上とのダメージ率を算出し、式(2)より台上耐久の試験時間を算出した。

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

D : 累積ダメージ

n_i : 頻度

N_i : 破壊繰り返し回数

$$\text{台上耐久時間} = \frac{\text{実車耐久時間}}{\text{ダメージ率}} \quad (2)$$

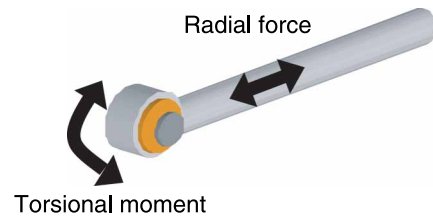


Fig.21 Prime load at bush

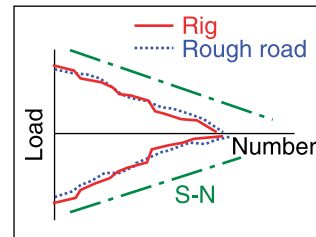


Fig.22 Histogram analysis

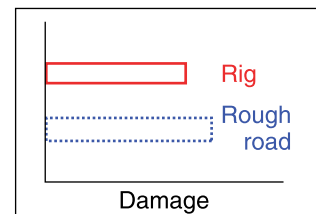


Fig.23 Damage analysis

4. 2. 複合荷重負荷を考慮したダメージ計算手法の改良

複合荷重負荷による耐久試験を評価するために、耐久性評価の新しい手法として、複合入力のダメージを評価する方法を検討した。

一例として2つの異なる形式のサスペンションを比較する。形式の差異により、実走でのブッシュへの入力負荷形態に特徴があらわれる。トレーリングアーム型ダブルウィッシュボーンサスペンション(Fig.24)と5リンク型ダブルウィッシュボーンサスペンション(Fig.25)のトレーリングアームブッシュへの入力をねじり角と軸力荷重であらわすとFig.26および27のようになる。トレーリングアーム

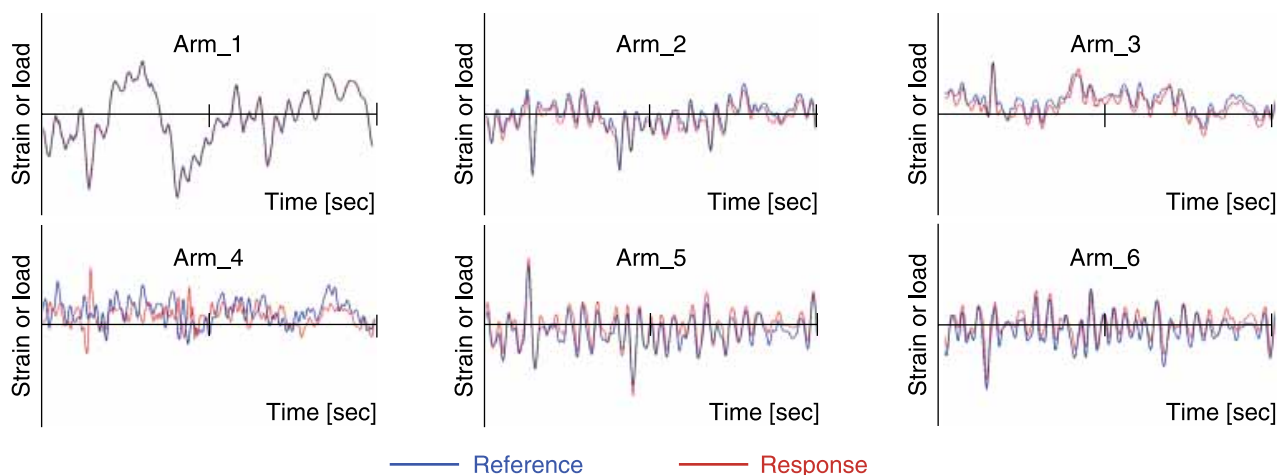


Fig.20 Reference and response signal

型では、ねじり角度と軸力荷重は、線形の相関がみられ、最大角度で最大軸力が発生するのに対し、5リンク型では、最大軸力が特定のねじり角と関係していない。

このようにサスペンション形式によりブッシュに加わる入力分布の形が異なることは、ねじり角と軸力の相関性を考慮した頻度とダメージ解析が、評価の精度上、重要であることを意味する。サスペンションの形式によらず精度良くダメージを算出するために、ねじり角と軸直荷重の耐久性への影響を考慮した二次元でのダメージ算出が必要となる。得られたねじり角と軸力荷重の二次元頻度から、両者の相関を考慮したダメージを算出するため、ねじり角、軸力、回数の三次元での考察を行う。先ず三次元S-N面を作成する。ねじり角度ごとにFig. 28に示すような単体軸力耐久テストを行い、Fig. 29のようにねじり角ごとのS-N線を得る。

入力頻度の二次元解析結果の例をFig. 30に示す。頻度は等高線で表している。中心部分の紫色の部分は頻度の高い部分を、青色の部分は頻度が低い部分を示している。次にFig. 29に示すS-NとFig. 30で示す頻度を重ね合わせ、Fig. 31に示すように二次元頻度ダメージを算出した。従来手法の一次元頻度のダメージと二次元頻度のダメージの比較をFig. 32に示した。一次元解析で相関性を示さない現象も、二次元頻度解析ダメージでは非常によい相関を示した。検証のために行った耐久試験においてもFig. 33に示すように同様の相関性を得た。従来手法の一方の台上試験と一次元頻度解析方法の試験評価から、二次元頻度解析によるダメージ評価方法と多軸油圧加振機による評価へ改良する事により、さらに精度の高い試験評価体系が構築できることが確認された。

Trailing arm bush

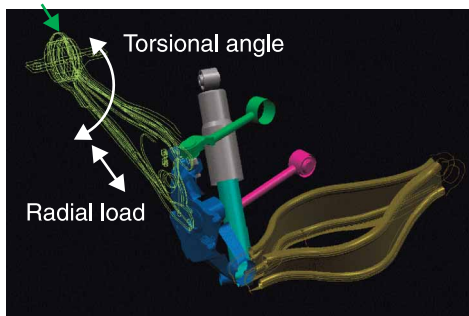


Fig.24 Trailing arm typed double wishbone suspension

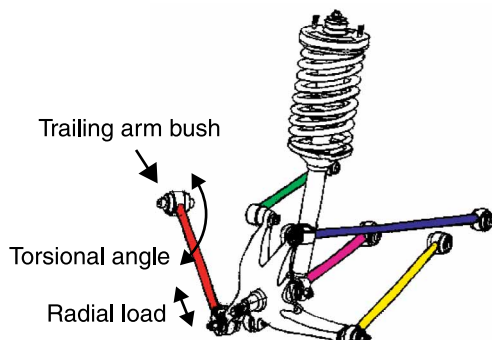


Fig.25 Five links typed double wishbone suspension

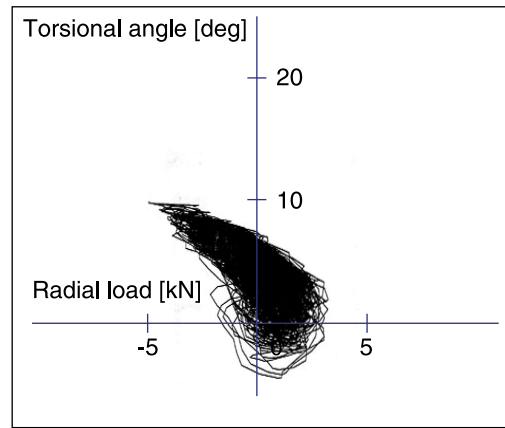


Fig.26 Load locus at trailing arm bush in trailing arm typed double wishbone suspension

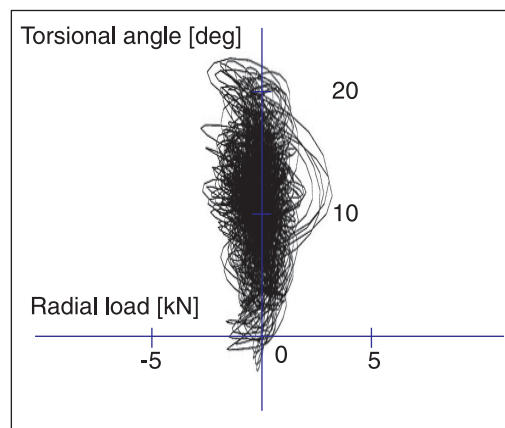


Fig.27 Load locus at trailing arm bush in five links typed double wishbone suspension



Radial load durability test
(constant torsional angle)

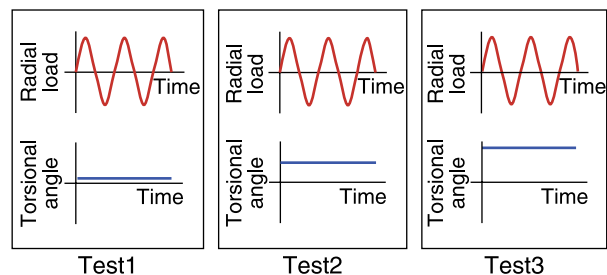


Fig.28 Durability test for S-N surface preparation

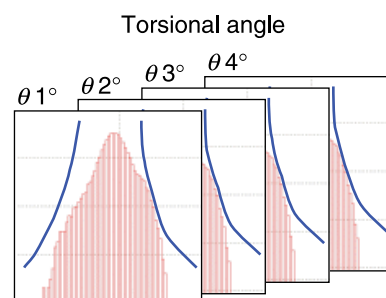


Fig.29 S-N test data of each angle

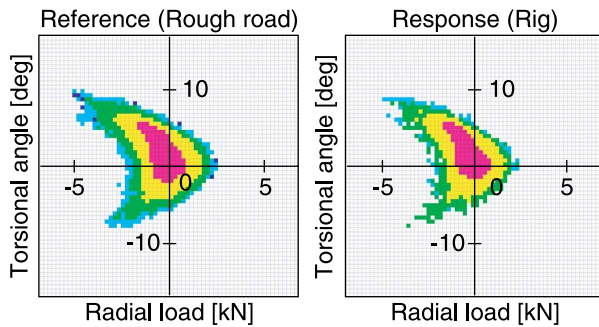


Fig.30 Histogram contour of bush load

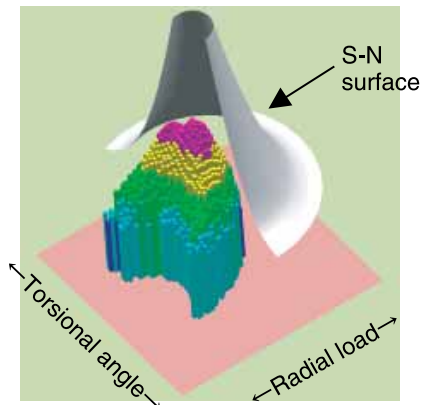


Fig.31 Damage calculation

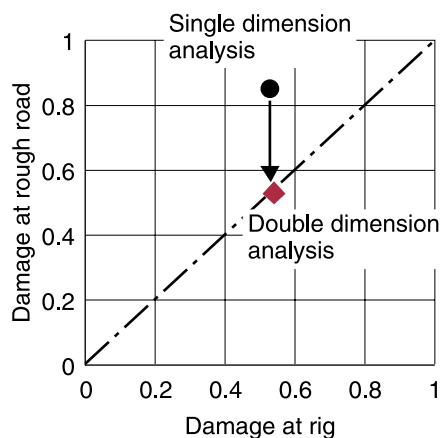


Fig.32 Correlation of damage

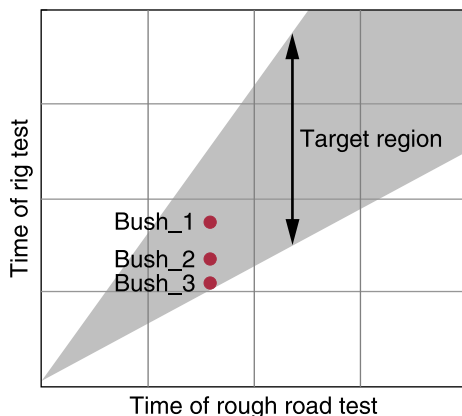


Fig.33 Correlation of time

5. まとめ

本稿では実走耐久試験でのサスペンションへの複合入力負荷を非正方マトリクスを用いた制御により台上で再現し、さらにサスペンションブッシュのダメージについて複合入力を考慮し、多次元での頻度解析と評価を行った。この技術により、多様な形式のサスペンションのブッシュに対して、精度の高い耐久評価ができるようになった。

この新しい台上試験は時間的な自由度と、実走耐久試験と同等の精度をもって行う事ができ、長期間の実走耐久試験に依存せず、サスペンションブッシュに求められる耐久性と特性を高度に両立できる開発が可能となった。

これにより、従来よりも短期間で車の商品性、特に操縦安定性と乗心地の向上をより高い水準で達成する事が可能となった。

6. あとがき

論文を執筆するにあたり、社内外の関係者の方に、貴重かつ有意義なご意見を頂きました。協力して頂いた全ての方々に、文末をお借りして感謝の意を表します。

■ 著 者 ■



宮本 康生



川崎 聡志



山本 敏文



安保 剛将