

液封ブッシュによるハーシュネスとロードノイズの低減技術の研究

Study of Hydro Bush for Reduction of Harshness and Road Noise

宮 本 康 生*
Yasuo MIYAMOTO

中 村 聡*
Sou NAKAMURA

要 旨

液封構造を持つ防振ゴム部品は低い動的バネと高い減衰を持ち、特性設定の自由度も高い。その利点をサスペンションのブッシュで活かし、乗心地とロードノイズを向上する手法を検討した。

段差を持つ路面を走行する場合のハーシュネスでは多くの場合、タイヤへの入力が左右で同位相である。これに着目し、左右で異なる特性を持つ液封コンプライアンスブッシュを用いて車体への伝達力の位相差を発生させる事により、左右の伝達力を打ち消し合わせる手法を開発した。この手法により段差路面における車体への伝達力を従来に対して低減した。

舗装の粗い路面を走行する場合のタイヤの振動はサスペンションを通じて室内に伝達される。ロードノイズの周波数域ではサスペンションのゴムブッシュはバネ要素、減衰要素として作用し、アームは剛体要素、弾性要素として作用し、ロードノイズに関してこれらの寄与が高い事を見出した。この知見を元に液封ブッシュの特性を最適化し、ロードノイズの向上を達成した。

ABSTRACT

Isolation rubber parts with hydro structures have low dynamic stiffness and high damping, and also allow high degrees of freedom in setting the required characteristics. The project discussed in this paper studied the methods of utilizing these advantages in suspension bushes in order to improve ride comfort and reduce road noise.

With regard to the harshness experienced when driving on a stepped road, the inputs are in phase for the left and right tires in the majority of cases, and this phenomenon formed the focus of this study. Hydro bushes with different characteristics for the right and left sides were used to generate phase differences in the transmission powers to the chassis, enabling the development of a method of countering the transmission powers on the left and right sides. This method has enabled the transmission powers in the chassis on stepped road to be reduced.

Tire vibration when driving on rough paved road is transmitted to the cabin through the suspension. It was discovered that considerations of the rubber bush in the suspension system as a spring element and a damping element, and of the arm as a rigid body element and a elastic element, were important factors in the reduction of road noise. Optimization of the hydro bushes on this basis enabled the level of road noise experienced in the cabin to be reduced.

1. まえがき

段差路面を通過する時のハーシュネスや粗い舗装路面でのロードノイズは搭乗者に不快感を与え、商品性に大きな影響を与える。これらの振動と音を低減する事は車の開発で重要な課題であり、ボディ系、サスペンション系を含め多方面に渡る研究が行われている^{(1), (2)}。

しかしボディ系におけるロードノイズの対策手法は車体の質量増加により燃費や運動性能の悪化につながる場合が

多く、サスペンションにおけるハーシュネスとロードノイズの対策手法はタイヤとブッシュの剛性低下により操縦安定性とのトレードオフとなる場合が多く、いずれも充分には適用できなかった。

一方、液封構造を持つ防振ゴム部品は動的バネと減衰を高次元で両立でき、特性の設定自由度が高い事からエンジン支持システムを中心に広く使われ、乗心地と NV で飛躍的な性能向上が達成されている。その技術をサスペンションに適用した場合にエンジン支持システムと同様に飛躍的

に商品性を向上できる可能性を持っていると考えられる。

本稿では前後ともダブルウィッシュボーン形式のサスペンション(Fig. 1)を持つセダン型の車両にてハーシュネス路面とロードノイズ路面でのサスペンションと車体の挙動を解析し、液封ブッシュの特性をどの様に設定すればハーシュネスとロードノイズに対し高い実機効果が得られるかを研究した。

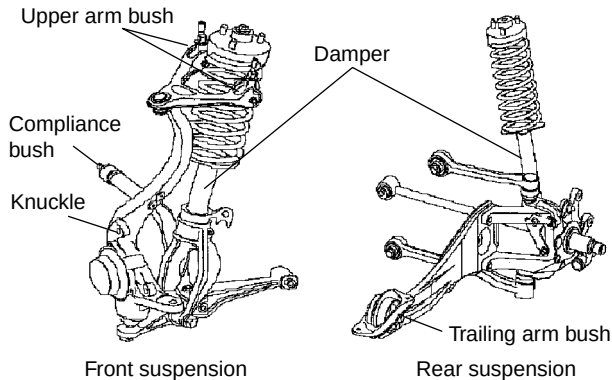


Fig. 1 Double wishbone type suspension

2. ハーシュネス低減手法の検討

2.1. 解析路面と速度の設定

ハーシュネスを感じる路面は種々の形態を持っている。大きく分類すると

- (1) ランダムな形状の路面(悪路等)
- (2) 規則的な周期を持つ路面
(USフリーウェイのチョッピー路⁽³⁾等)
- (3) 一つの段差または十分に長い周期の段差を持つ路面
(橋や陸橋のジョイント部や舗装の補修部等)

がある。ランダムな形状を持つ路面や規則的な周期を持つ路面はパワースペクトル解析を行うには適しているが、一つの入力に由来するサスペンションの振動が収れんする前

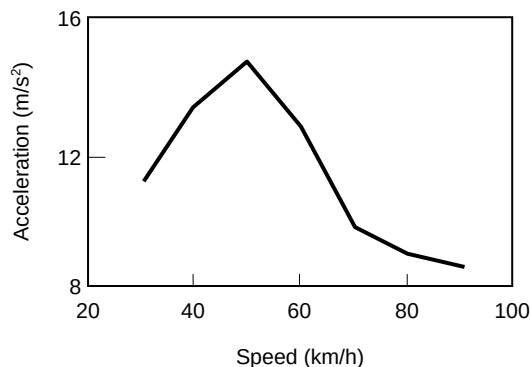


Fig. 2 Relation of speed and longitudinal body acceleration

に次の入力があるために時系列解析が困難になる。時系列解析に適した路面は一つの段差または十分に長い周期の段差を持つ路面である。そこでテストコースに設置されている一つの段差のみを持つ路面でサスペンションと車体の挙動を解析した。

この段差路面での速度と車体前後加速度のピーク値との関係を Fig. 2 に示す。最大の加速度が発生する 50km/h を解析に用いる速度とした。

2.2. 解析結果

段差路面を 50km/h で通過した時の車体の加速度の時系列波形を Fig. 3 に示す。タイヤのエンベローピングによる加速度成分と周期性を持つ加速度成分から構成されている。

0.2sec までの区間はフロントサスペンションからの伝達の影響であり、0.2sec 以降はリアサスペンションからの伝達の影響が含まれる。したがって Fig. 3 ではフロントサスペンションの影響のみを示している。

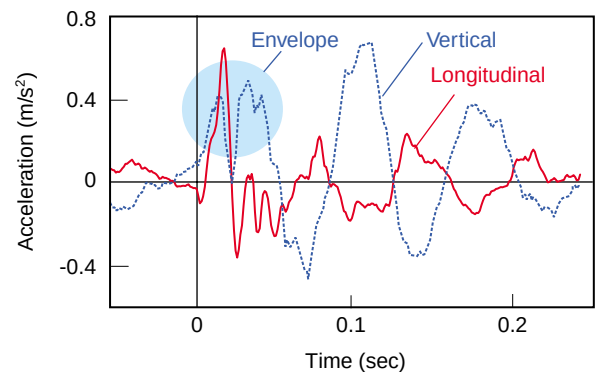


Fig. 3 Acceleration of body on stepped road (time series)

この波形の 0sec から 0.2sec の間のパワースペクトル密度を解析したところ、Fig. 4 の結果を得た。

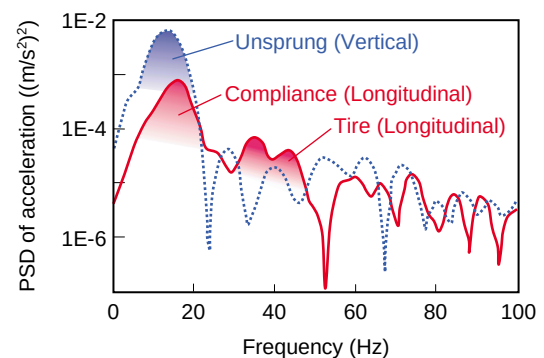


Fig. 4 Acceleration of body between 0sec and 0.2sec

この加速度のパワースペクトル密度を見ると、前後方向は 16Hz, 35Hz と 43Hz にピークを持ち、上下方向は 13Hz にピークを持つ。実車の台上テストとタイヤ単体テスト結

果との比較から、前後方向の 16Hz 成分はバネ下のコンプライアンス共振、43Hz成分はタイヤの前後共振、上下方向の 13Hz 成分はバネ下の上下共振であると考えられる。

突起衝突後の最初の 1 サイクルの周期が 0.028sec であり 35Hz に相当する。突起衝突から加速度ピークまでの時間が 0.013sec であり、タイヤ前後共振の 4 分の 1 サイクルの周期 (0.006sec) よりも長い。この周期はコンプライアンスブッシュがコンプライアンス方向に変位する過程と考えられ、タイヤの特性とブッシュの特性の影響を受けると考えられる。この周期の長さがタイヤ前後共振 (43Hz) よりも低い周波数成分 (35Hz) を生じさせていると考えられる。

これらの振動はサスペンション形式によらず発生するため普遍的に重要である。車体上下方向への振動伝達を低減するためにはタイヤの半径方向の動的バネの低減と高減衰化、ダンパーの減衰力の低減、ダンパマウントの動的バネの低減等の手法が考えられる。しかし、それらの手法は操縦安定性および燃費等、広範囲の商品性に影響を与える。そこで、車体の前後方向への振動伝達の低減を目標とした。

2.3. 液封コンプライアンスブッシュ特性の検討

車体への前後方向の入力を低減する手法としてタイヤの剛性やブッシュの静的バネを低減する手法がある。しかしこれらの手法は操縦安定性の低下を伴う。ハーシュネス以外の商品性項目とのトレードオフを伴わない現実的な手法はコンプライアンスブッシュを液封構造とする事により、静的バネを変更せずにその動的特性を調整する事であると考へた。課題となっている周波数は 16Hz (コンプライアンス共振) の加速度成分と 35Hz の加速度成分および 43Hz (タイヤ前後共振) の加速度成分である。これらの振動成分をコンプライアンスブッシュで減衰する事、およびコンプライアンスブッシュを経由して伝達する振動を低減する事が重要であると考えられる。

まずどの周波数成分をより重視するべきかの検討を行った。フロントサスペンションのコンプライアンスブッシュ

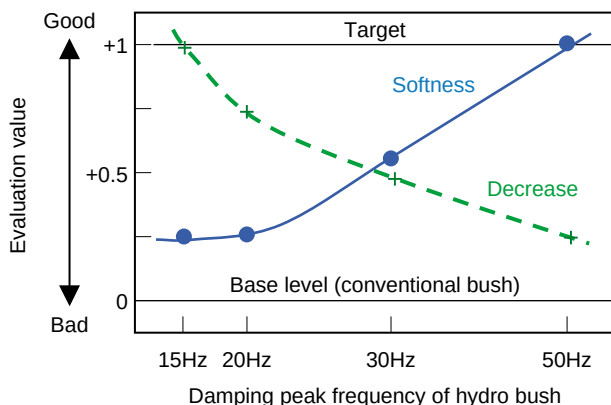


Fig. 5 Sensory analysis of harshness

を液封ブッシュ (損失係数ピーク値が約 0.6) に変更し、減衰ピーク周波数を 4 水準に振り、段差路面 50km/h におけるブッシュの減衰のピーク周波数と実車官能評価結果の関係を調査した。(Fig. 5)

ブッシュの減衰のピーク周波数をタイヤの前後共振周波数付近に設定した場合にソフト感 (Softness) が良く、ブッシュの減衰のピーク周波数をコンプライアンス共振付近に設定した場合に収れん感 (Decrease) が良好であった。ソフト感と収れん感の関係はトレードオフであり、減衰ピークを 30Hz 付近に設定するとソフト感と収れん感のバランスが良い事が確認できた。

液封構造を持たないコンベンショナルなブッシュの車体前後加速度を Fig. 6 に、30Hz に減衰ピークを設定した液封ブッシュの車体前後加速度を Fig. 7 に示す。

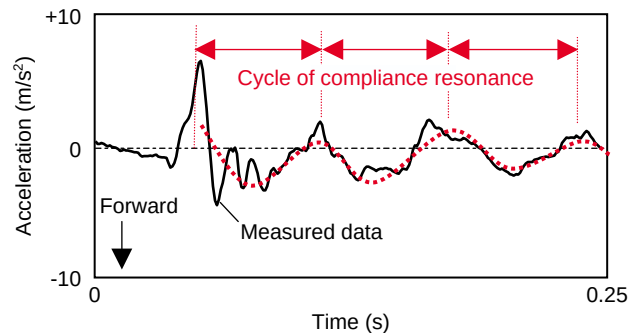


Fig. 6 Longitudinal body acceleration at conventional bush

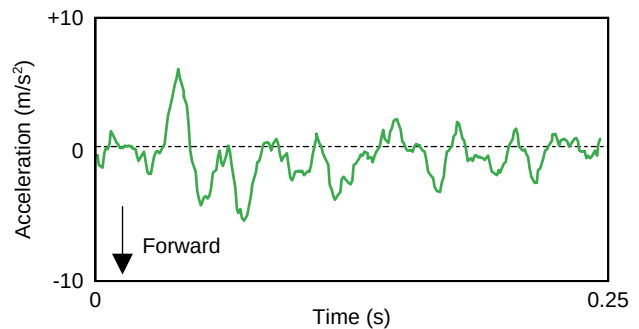


Fig. 7 Longitudinal body acceleration at hydro compliance bush (same phase)

コンベンショナルなブッシュではコンプライアンス共振の収れんが悪く、高周波成分と重なり車体の前後加速度の時系列波形は尖った形を持っている。一方、減衰ピーク周波数を 30Hz に設定した液封ブッシュでは車体の前後加速度のピーク値が低減され、コンプライアンス共振の収れんも向上している。

しかしソフト感と収れん感の絶対レベルから見て効果は充分でなく、新たな手法を検討する必要があった。

2.4. 位相制御の検討

市場で見られる多くの段差路面は進行方向に対して直角方向に継ぎ目が延びている(例えば橋梁のジョイント部やUS フリーウェイのチョッピー路等)。この段差路面を通過する場合に左右輪が同時に段差に接触し、左右輪に発生した力がサスペンションを経由して同時に車体に伝達されるため、車体の加速度が高くなると考えられる。

そこで左側のコンプライアンスブッシュから車体へ伝達する振動と右側のコンプライアンスブッシュから車体へ伝達する振動に位相差を持たせ、そして互いに干渉させて打ち消す手法を考案した。このメカニズムを Fig. 8 に示す。このメカニズムを実現するためにはサスペンションから車体への加速度伝達の最初のピーク(35Hz成分)の位相を左右のブッシュで差異を持たせる必要がある。この位相制御を行うために液封ブッシュの特性設定を次のように行った。

- (1) 片方のブッシュは 35Hz 域で高い減衰を持たせ、伝達の位相角の進みを大きくする
- (2) もう一方のブッシュは35Hz域で低い減衰を持たせ、伝達の位相角の進みを小さくする

この左右の液封ブッシュの特性の非対称性はオリフィスの設計パラメーター(断面積と長さ)を変える事により実現した。また左右の液封ブッシュともコンプライアンス共振域とタイヤ前後共振域のサスペンションの前後振動を減衰する事も考慮した。そのために損失係数で0.15以上の減衰が確保できるように損失係数のピーク周波数とピーク値を設定した。この位相制御に用いた液封ブッシュの特性を Fig. 9, Fig. 10 に示す。

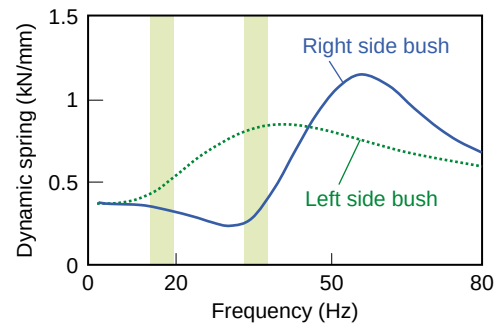


Fig. 9 Dynamic spring of hydro compliance bush

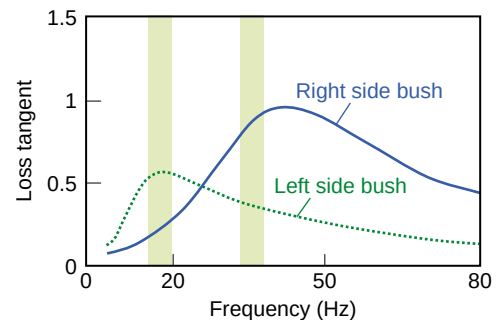


Fig. 10 Damping characteristic of hydro compliance bush

2.5. 実車効果

段差路面 50km/h で確認を行った。左右のコンプライアンスブッシュとも減衰ピークを 30Hz に設定した場合、左右のブッシュから同位相で力が車体へ伝達するためプラス側の第1ピークは尖った形を持っている。また収れんも悪い(Fig. 7)。一方, Fig. 9, Fig. 10で示した特性のブッシュ

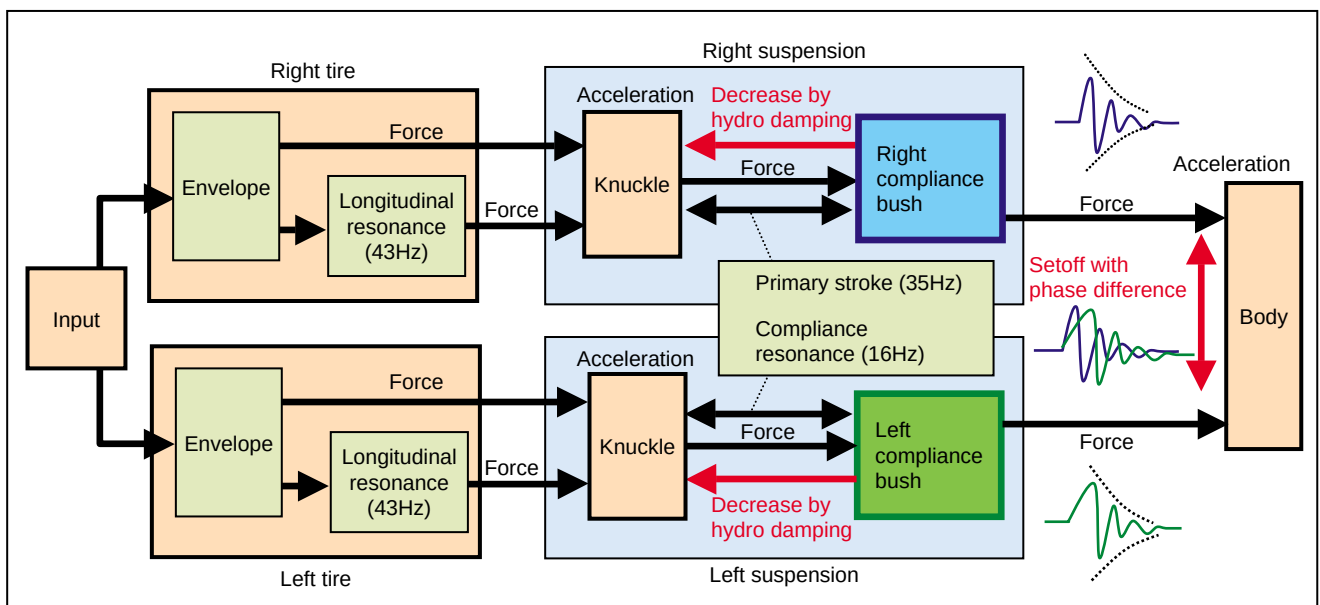


Fig. 8 Mechanism of phase control

を用いて位相制御した場合の車体の前後加速度を Fig. 11 に示す。プラス側の車体前後加速度のピークは二つに分離し、ピーク値が 30% 下がった。また第 2 ピーク以降は左右のブッシュから伝達する力が互いに打ち消し合い、取れんが良くなっている。またブッシュの動的特性の非対称性によって心配された操縦安定性についても影響は無かった。操縦安定性はブッシュの静的特性の寄与が高く、その対称性を崩していないためと考えられる。

このメカニズムによる効果は段差路面のみならず、他のハーシュネス路面でも同様に効果が確認された。USフリーウェイのチョッピー路での車体加速度を Fig. 12 に示す。

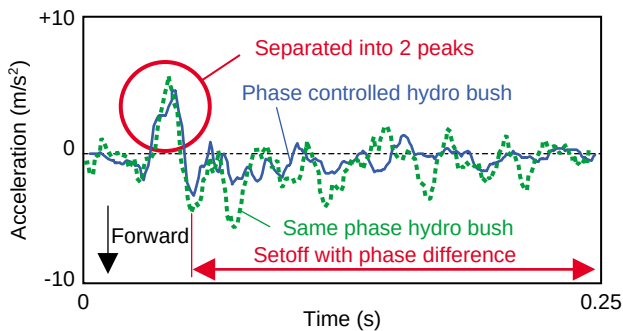


Fig. 11 Longitudinal body acceleration at hydro compliance bush (phase control)

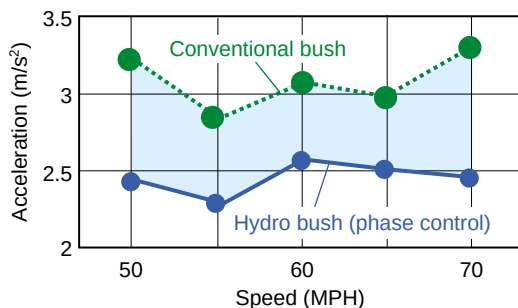


Fig. 12 Maximum longitudinal acceleration of body on choppy road

3. ロードノイズ低減手法の検討

3.1. 室内音圧の解析

ロードノイズ評価路面での室内音圧のパワースペクトル密度(1/3 オクターブバンド)を Fig. 13 に示す。250Hz 域と 500Hz 域の音圧が高い。これらの音圧を下げる事が重要と考えられる。

3.2. 250Hz 域の解析

1/3 オクターブバンドでの 250Hz 域はタイヤの持つ気柱共鳴の伝達が原因である事が知られている。ナローバンド

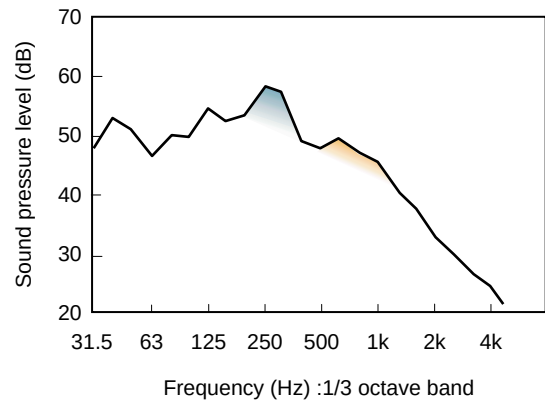


Fig. 13 Sound pressure in a cabin

で解析したところ気柱共鳴ピークは 230Hz と 240Hz だった。サスペンションの伝達経路解析を実施した結果、気柱共鳴域でトレーリングアームブッシュの上下方向の振動がサスペンション全体の中で 22% の寄与を持ち、寄与率が高い事が判った。したがって 230Hz と 240Hz でのトレーリングアームブッシュの上下方向の動的バネの低減が 250Hz 域のロードノイズの改善につながると考えられる。

3.3. 500Hz 域の解析

1/3 オクターブバンドでの 500Hz 域はサスペンションアームの持つ剛体共振であるとの仮説を立て、アームの持つ慣性質量とブッシュのバネから机上計算を行ったところ、フロントアップアームの剛体共振が寄与していると推定された。そこで動的バネを測定する試験機にてボールジョイント側を加振しブッシュ側の車体取り付け点側の荷重を測定して伝達特性を測定し、480Hz に伝達のピークを確認した(Fig. 14)。

次にフロントサスペンションのスピンドルの 3 方向ランダム加振を行い、Fig. 15 に示す 464Hz の音響感度ピークを確認した。この周波数にてサスペンションのモーダル解析を行い、Fig. 16 に示す振動モードを確認した。このモー

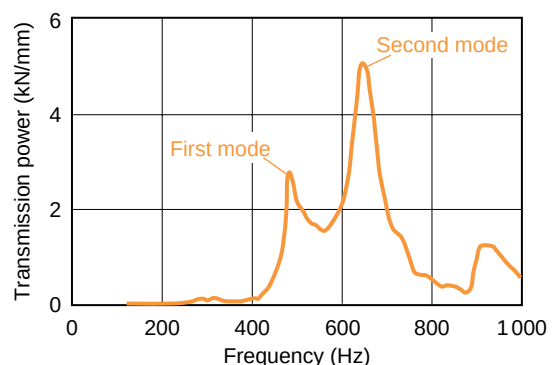


Fig. 14 Frequency response characteristics of arm assembly

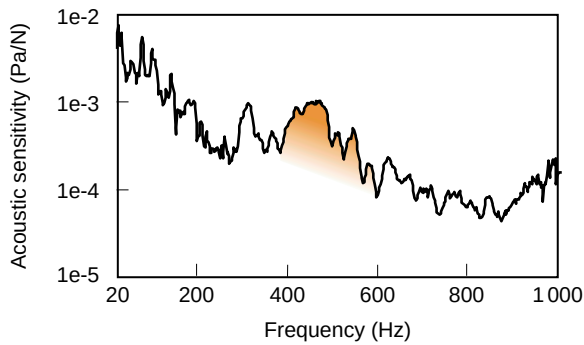


Fig. 15 Acoustic sensitivity of front wheel (random vertical excitation)

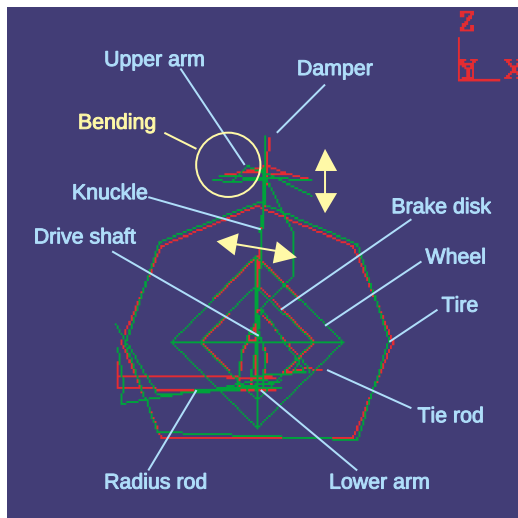


Fig. 16 Modal animation of front suspension at 464Hz (side view)

ドはナックルが前後方向に弾性変形するモードとアッパーアームがボールジョイント部を支点とし、ブッシュをバネ要素とする剛体モードとアーム自体の弾性モードから構成されている。

以上の解析からアッパーアームの剛体モードと弾性モードを抑制するためにブッシュに高い減衰を与える事、およびその振動の車体への伝達を抑制するためにブッシュに低い動的バネを与える事が500Hz域のロードノイズの改善につながると考えられる。

3.4. トレーリングアームブッシュによる低減

トレーリングアームブッシュの上下方向の動的特性は気柱共鳴域(230Hz, 240Hz)で大きな寄与を持つ事から、この周波数域での上下方向の動的バネの低減が目標となる。

液封ブッシュは単体動特性の位相角が90degに近いほどオリフィス部の液体のポンピング作用が強く働き、動的バネが低減できる。従来は液封ブッシュの内筒とストッパーの間の隙間をオリフィスとして用い、そのオリフィス内の

液体の質量と本体ゴムの拡張弾性による共振系を形成し、位相角を進める事により気柱共鳴域での動的バネを低減している。

改良手法としては従来構造に対しストッパー部に新たにオリフィスを追加し、ダブルオリフィス化した。この構造の構造モデルを Fig. 17 に示す。Fig. 17 の質量 M1 とバネ要素 K2 と K4 からなる共振系によってオリフィスの内の液体の共振が190Hzで形成され、質量 M2 とバネ要素 K3 と K4 からなる共振系によってもうひとつのオリフィスの内の液体の共振が240Hzで形成される。このふたつの共振系の存在により90degに近い位相角を得られる周波数の領域が広がり、オリフィス部の液体のポンピング作用により動的バネが低減できる周波数の領域が広がった。

これにより気柱共鳴域の動的バネをさらに低減すると同時に300Hz付近の動的バネピーク値の悪化を低減する事も可能となった。構造を Fig. 18 に特性を Fig. 19, Fig. 20 に示す。

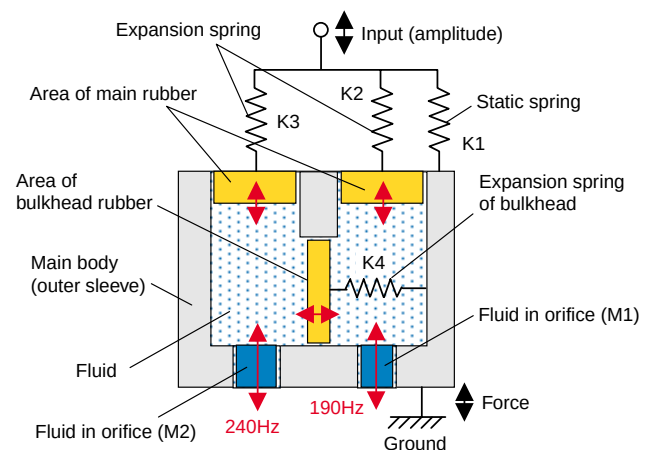


Fig. 17 Structure model of hydro trailing arm bush (double orifice type)

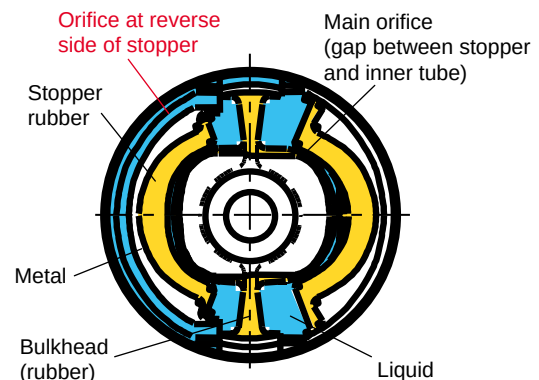


Fig. 18 Structure of hydro bush (trailing arm)

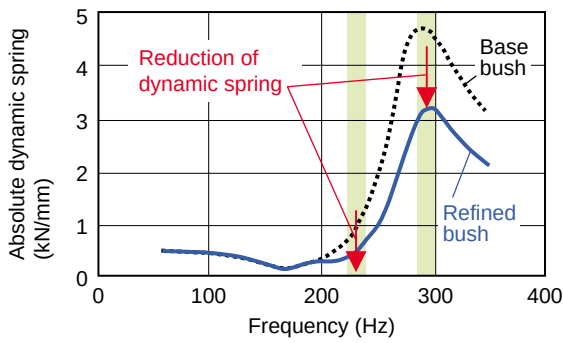


Fig. 19 Dynamic spring of hydro bush (trailing arm)

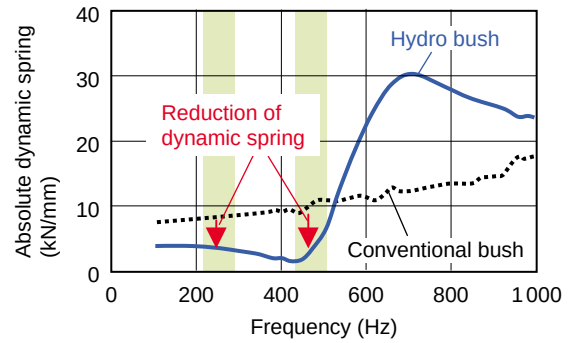


Fig. 22 Dynamic spring of front upper arm bush

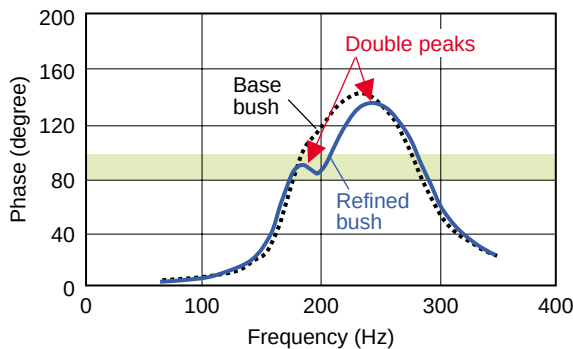


Fig. 20 Damping of hydro bush (trailing arm)

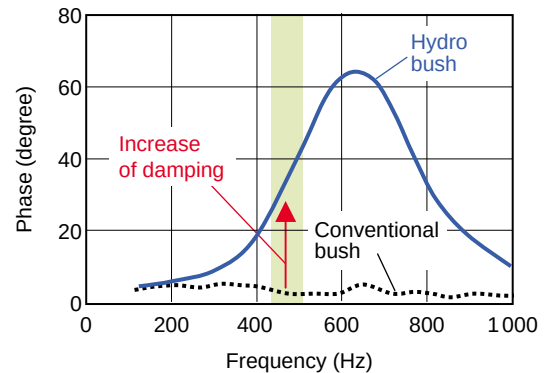


Fig. 23 Damping of front upper arm bush

3.5. フロントアッパーアームブッシュによる低減

500Hz 域のアームの共振を抑制するためにはブッシュに高い減衰を持たせる事、伝達を抑制するためには低い動的バネとする事が効果的と考えられる。

この特性を実現するためにはオリフィス部の液体の共振を600Hzに設定して、それより低い周波数域でのオリフィス部の液体のポンピング作用を利用する手法が良いと考えた。しかし通常の液封ブッシュの様に液室とオリフィスを持つ構造ではオリフィス部の液体の共振を600Hzまで高くする事ができなかった。

そこで Fig. 21 に示すようにオリフィス形状を環状とし、液に圧力を加えるピストン機能とオリフィス機能を持たせた。これによりオリフィス部の液体の共振を600Hzに設定し、500Hz 域で低い動的バネと高い減衰を持つ理想的な特性を得た。また気柱共振域での動的バネの低減も可能になった(Fig. 22, Fig. 23)。

3.6. 実車効果

これらの開発した液封ブッシュを実機に組み込み、確認を行った。Fig. 24 に示すように250Hz 域と500Hz 域の音圧が低減される事を確認できた。

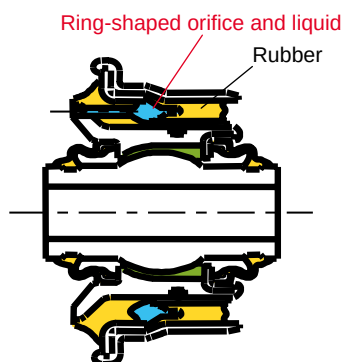


Fig. 21 Structure of hydro bush (front upper arm)

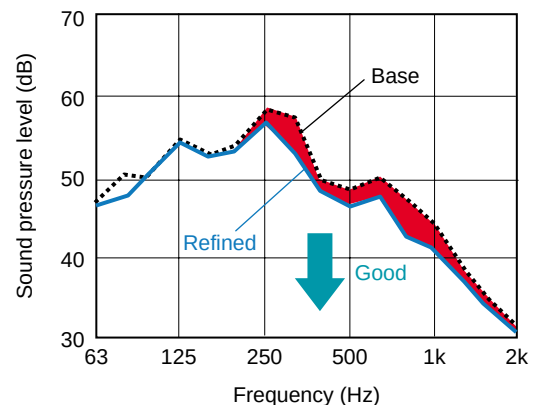


Fig. 24 Effect of road noise refine

4. まとめ

ハーシュネスとロードノイズについて、サスペンションの挙動を詳細に解析し、その結果を元に新規構造の液封ブッシュを開発する事により次の知見が得られた。

- (1) 段差路面を通過する時の車体の振動は、上下方向はバネ下の上下共振とタイヤのエンベローピング特性による影響を受け、前後方向はコンプライアンス共振とタイヤの前後共振による影響を受ける。これらの共振現象の低減と伝達の低減がハーシュネスの対策として有効である。
- (2) ロードノイズはタイヤの気柱共鳴によるサスペンションの振動とアームの剛体モード、弾性モードが寄与している。前者の対策としてはブッシュの動的バネの低減が有効であり、後者の対策としてはアームの剛体モード、弾性モードでのブッシュの高減衰化と動的バネの低減が有効である。
- (3) 液封コンプライアンスブッシュの動的特性に左右差を持たせ、伝達力の位相を制御する事により、段差路面における車体の前後方向の振動を低減でき、ハーシュネスの向上(車体の前後方向の最大加速度の低減と収れん性の向上)が可能である。
- (4) トレーリングアームとフロントアッパーアームのブッシュに新規の液封構造(ダブルオリフィス、環状オリフィス)を導入する事により、伝達力の低減とアームの共振現象の低減ができ、ロードノイズの向上が可能である。

本研究では液封ブッシュの技術をサスペンションシステムに適用した場合における NVH 商品性向上の可能性の一端を示す事ができた。

一方、サスペンションシステムでは 耐久信頼性、生産技術、スペースレイアウト等の制約が多く、液封ブッシュを量産車に適用した事例はまだ少ないのが現状である。

今後の課題として液封ブッシュの特徴を活かした使い方の研究と同様に、これらのハードウェアとしての課題を解決するための研究も必要と考えられる。液封ブッシュによる NVH 商品性向上は大きな可能性を持っており、魅力的な商品(車)を創り出すために今後も研究が拡大していくと考える。

5. 謝辞

本研究にあたり、御協力を頂きました北辰工業(株)、東海ゴム工業(株)、山下ゴム(株)および関係者の方々に紙面を借りて厚く御礼申し上げます。

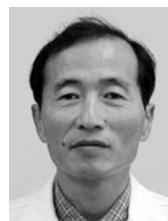
参考文献

- (1) 皆川正明ほか：路面からタイヤへの伝達力の計測手法

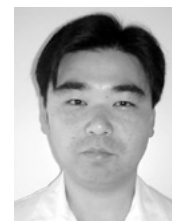
を利用した振動伝達低減技術，自動車技術，Vol.54, No.11 (2000)

- (2) 佐野久ほか：アクティブ騒音制御のための音響伝達系の低次元モデリングとフィードバック制御系の設計法，HONDA R&D Technical Review, Vol.12, No.1, p129-136 (2000)
- (3) 宮城島義正：北米のプルーピングセンターの紹介，自動車技術，Vol.54, No.6 (2000)

■ 著 者 ■



宮本 康生



中村 聡