

KYBのアクティブサスペンションの開発

稲満和隆・堀 匡利

1 はじめに

アクティブサスペンションは究極のサスペンションと呼ばれ、乗心地と操縦安定性を高いレベルで両立できるシステムである。KYBは日産自動車株式会社と共同で hidroニューマチック^{注1)}をベースとした油圧アクティブサスペンションを開発し、1989年に発売したINFINITI Q45^{注2)}に搭載された(写真1)。しかし、日本において自動車は高性能を追及する時代から、環境性能や経済性、使い勝手を重視する時代へと移り変わっていき、2000年代初頭を最後に採用が見送られた。



写真1 (左) INFINITI Q45
(右) KYB製油圧アクティブサスペンション

一方、欧州では1999年にDaimler社がアクティブサスペンションをフラッグシップ車両に搭載し、以降さらに進化させて継続して採用している。またそれ以外にも車両が曲がる時に発生するロール現象を抑えることに特化したアクティブスタビライザ等のシステムが実用化されている。

他方、セミアクティブサスペンションと呼ばれるアクティブサスペンションの機能を抑えて、性能とコストを両立させたシステムが欧州を中心にD～Cセグメント^{注3)}(アッパーミディアム～ローミディアムクラス)にまで普及している。

現在は、セミアクティブサスペンションをベースにして、それにエネルギー源を追加することでアクティブサスペンション化するシステムや、サスペンションの減衰エネルギーを回収してアクティブサ

スペンションの消費電力を節約するシステム等も考案されている。また、油圧を使わずモータを動力源として採用した電動アクティブサスペンションはすでに実用化されており、時代がまたアクティブサスペンションに回帰しつつある。

油圧アクティブサスペンション開発以降、再び究極のサスペンションであるアクティブサスペンションを実現することは、当社技術部門の30余年の宿題でもある。本報では原理試作として考案したアクティブサスペンションシステムを紹介する。

注1) hidroニューマチックとは油圧を力の伝達媒体として、ガスの圧縮性をばね作用として用いたサスペンション装置である(ガスをばねとして利用するため、細かい振動がばね上(主に車体を指す)に伝わりにくく、一般的に乗心地が良いとされる)。

注2) 「INFINITI Q45」は日産自動車株式会社の商標である。

注3) セグメントとは乗用車を車格等で分類したものである。

2 アクティブサスペンションとは

本題の前に、サスペンションのことを簡単に紹介する。サスペンションの主な構成要素はアーム、懸架ばね、ショックアブソーバである。これらの要素はばね上とばね下(主にホイールを指す)の相対運動で動き、路面からの入力懸架ばねで吸収され、ショックアブソーバによってその懸架ばねの振動エネルギーを減衰(ダンピング)させる。もっとも一般的なショックアブソーバを搭載した構成をパッシブサスペンションと呼ぶ。

パッシブサスペンションはショックアブソーバの減衰力特性が入力速度によって一意的に決まっており、車両開発の段階で乗り味はバランスを見ながら作りこまれる。

セミアクティブサスペンションはショックアブソーバに減衰力調整機構が盛り込まれており、車両

走行状態に応じて減衰力特性を変化させることができる。

アクティブサスペンションは上記サスペンションのように路面からの入力に対して、受動的に力が出力されるシステムではなく、独自にエネルギー源を

持って能動的に力を出力する機構を備えたサスペンションである。車両の動きに対して、各サスペンションがどのような特性を取りうるか、簡潔に示したものが図1である。

		区間1	区間2	区間3	区間4	区間5	区間6	区間7	区間8	
ばね上変位		無	上	上	下	下	上	下	無	
ショックアブソーバ速度方向		-	圧	伸	伸	圧	伸	圧	-	
パッシブ	力の大きさと方向	-	↑	↓	↓	↑	↓	↑	-	一意的な減衰力
セミアクティブ		-	↑	↓	↓	↑	↓	↑	-	減衰力の強弱を調整
アクティブ		-	↓	↓	↑	↑	↓	↑	-	能動的な力で制振

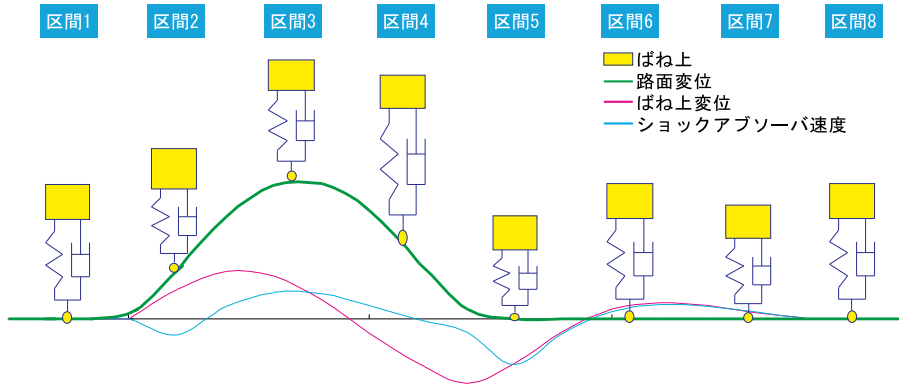


図1 各サスペンションの走行時の特性

区間2, 4に着目すると、パッシブサスペンションに対して、セミアクティブサスペンションは力の大きさを変えてばね上が動かないように制振している。アクティブサスペンションの場合、ショックアブソーバの伸縮に関係なく、制御対象であるばね上の動きのみに着目し、力の大きさと方向を変え、路面変位に対するばね上変位の比率（伝達特性）を激減させることができる。それにより、セミアクティブサスペンションのように“制振”ではなく限りなく“静止”に近づけることが可能な技術である。

この特性をショックアブソーバ単体の性能として示したものが図2である。路面入力に起因するばね上とばね下の相対速度に対して発生する力（抵抗力、加振力）で表現したものであり、特にオレンジで示した領域についてはアクティブサスペンションのみが持つ特性である。

各サスペンションの力の特性を簡単に表にまとめると表1のようになり、アクティブサスペンションが力の大きさや方向を任意に与えることができるのが分かる。

また、各サスペンションの力を使ってどれだけ振

動を抑えられるか、伝達特性について示しているのが図3である。セミアクティブサスペンションは、ばね上共振付近において路面変位以下（図3で示す1以下）に抑えることはできないが、アクティブサスペンションならそれが達成可能である。

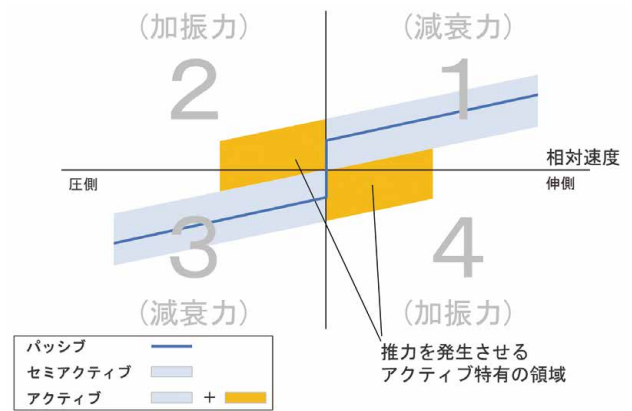


図2 各ショックアブソーバが発生させる力

表1 各サスペンションの力の特性

種類	力の大きさ	力の方向
パッシブ	一意的	一定(抵抗力)
セミアクティブ	可変	一定(抵抗力)
アクティブ	可変	可変(抵抗力, 加振力)



写真2 アクティブサスペンション搭載実験車両

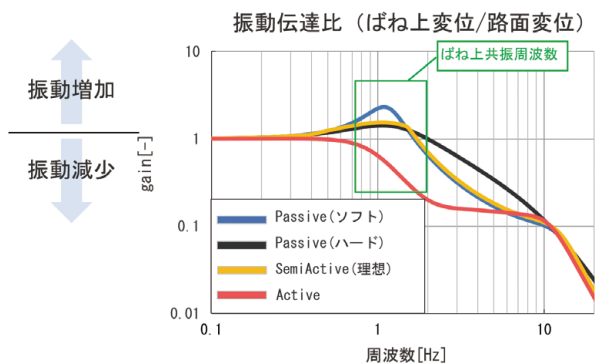


図3 各サスペンションの路面伝達例

3 開発の狙い

このようにアクティブサスペンションはばね上を自在にコントロール出来るため、車両を制御する上でばね上をどのように動かすか考える必要がある。まったく揺れないことが正しいのか、逆にそれが違和感につながるのか、車両目線で考えたときにシミュレーション結果だけでは判断できなかった。そのため、どういう制御をするとどういうフィーリングになるのか体感できる仕組みを作る必要があり、実験車両を構築することとした。

4 実験車両の概要

4.1 実験車両について

実験車両のベース車として、

- ①モータを駆動させるための高電圧バッテリーを搭載
- ②セミアクティブサスペンションを搭載

を要件とし、Eセグメント(エグゼクティブクラス)ハイブリッド車両を選定した(写真2)。また本車両は応答性に優れた高性能なセミアクティブサスペンションを搭載しており、性能を比較するにあたり適切と判断した。

4.2 システム構成について

システム構成を図4に示す。過去の油圧アクティブサスペンションと大きく違うポイントは、

- ①動力源をエンジンから電動(モータ)化
- ②ハイドロニューマチックを採用しないことで応

答性を拡張

③シンプルな構成で低コスト化

という点である。

また、アクティブサスペンションシステムを構築するにあたり、効率良く実験車両を作り上げるため、制御弁等は過去開発品をベースにし、またモータ等汎用部品で賄える部分については既製品を購入することで工数短縮を図った。

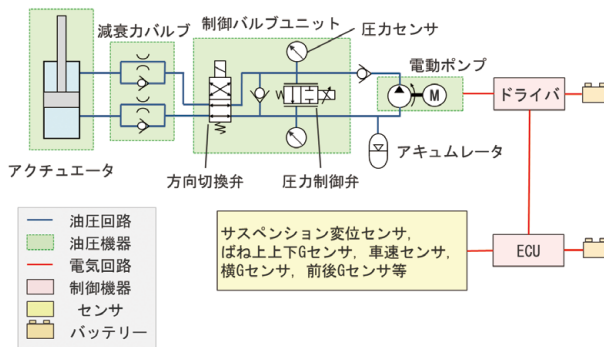


図4 システム構成

4.3 制御思想について

一般的に振動抑制のための制御則として、スカイフック制御¹⁾が従来から知られている。今回の取り組みでは従来の制御より更に制振性を向上させることを目指した。そのためには、ばね上がどのようなメカニズムで振動するのか路面入力とばね上に外力(実車で慣性力に相当)が作用する1輪モデルを考え、振動を低減する方策を検討した(図5)。

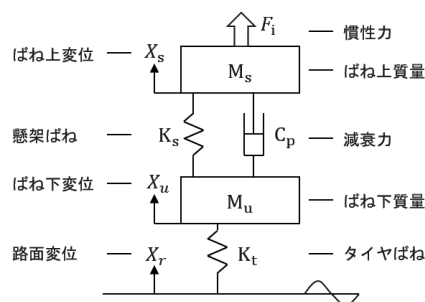


図5 1輪モデル

図5におけるばね上振動の運動方程式は、以下で示される。

$$M_s \ddot{X}_s = -C_p (\dot{X}_s - \dot{X}_u) - K_s (X_s - X_u) + F_i \quad (1)$$

(1)式の右辺第1項はショックアブソーバの減衰力、第2項は懸架ばねのばね力である。路面からの入力 X_u をばね下を介してばね上に伝わるので、(1)式について、入力をばね下変位 X_u と慣性力 F_i 、出力をばね上変位 X_s としたブロック線図で表すと図6のようになる。ここで s はラプラス演算子である。

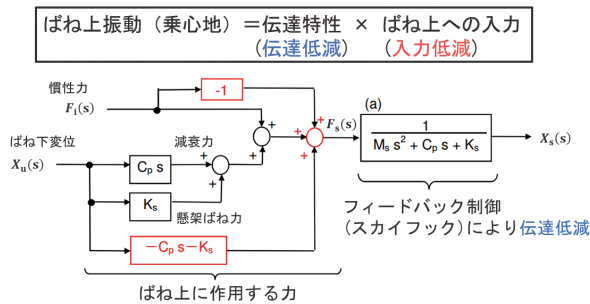


図6 ばね上の運動方程式のブロック線図

ばね上の振動を小さくするためには、(a)ブロックの減衰を大きくする(=ばね上の制振)と同時に、入力となる $C_p \dot{X}_u$ や $K_s X_u$ 、 F_i を小さくする(=ばね上への入力低減)が必要である。

これらの振動メカニズムから、ばね上の振動を小さくするためには、表2のように考えるのが有効であり、それらを満たす制御則を構築した。

表2 制御方針

No.	手 法
1	ばね上速度に依存した減衰を付加する
2	ばね下振動を入力としたショックアブソーバを介してばね上加わる力を低減する
3	ばね下振動を入力とした懸架ばねを介してばね上加わる力を低減する
4	慣性力によりばね上に作用する力を低減する

5 性能確認

5.1 シミュレーションについて

まずは車両(4輪)で考える前に、制御の効果を単純化するために図7に示すように一輪モデルで検討した。図8に1輪モデルにおけるシミュレーション結果を示す。乗心地に関する制御として表2のNo.1, 2, 3を組み込み、制御毎にデータを確認した結果、このシステムの主目的であるばね上共振周波数

(1 Hz付近)の制振について大きな効果があることが分かった。また、いわゆる“ぶるぶる”と言われる振動を示す周波数(10Hz)付近についても大きな悪化がなく、制御効果は良好であることが分かった。ただし、このシミュレーションは簡易的なものであり、理想的なアクチュエータとして計算している(遅れなし)。

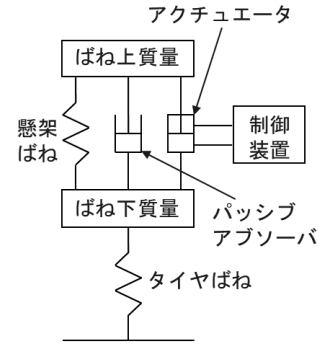


図7 アクティブサスペンション1輪モデル

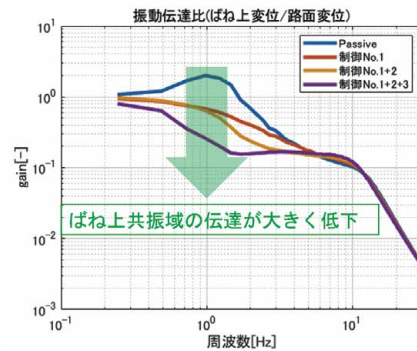


図8 シミュレーションによるばね上制振特性

5.2 台上試験について

次に1輪のみのシステムを構築し、試験機(写真3)を使い計測を実施した。結果はシミュレーションと同様の傾向が得られた(図9)。これら試験結果から、今回作製する実験車両のシステムは当初の想定通り、大幅な制振効果を確認できた。

5.3 実車試験について

5.3.1 実車構築・安全について

制御効果の確認ができたため、実験車両にシステムを搭載した。なお、実車試験前には安全を考えて無人状態で4輪加振機による疑似的な路面振動を車両に与え、システムが不安定にならないこと等を確認した。また、予期せぬトラブルが発生した際に安全にシステムを停止できるようエマージェンシースイッチを搭載し、非常時の際にモータの電源をカットできるように備えた。

5.3.2 実車計測結果について

この実験車両を当社テストコースにて走行させた



写真3 1輪加振機

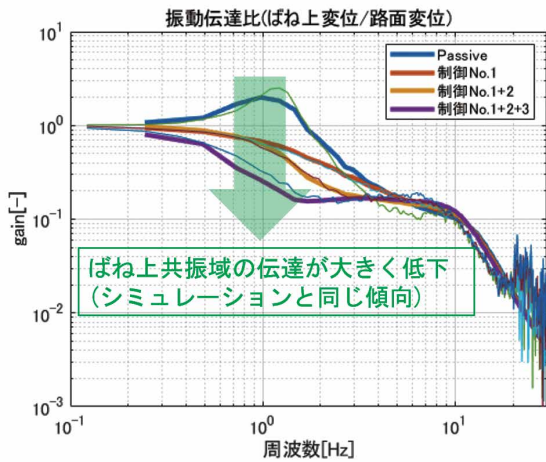


図9 1輪加振機による計測結果

(図10～図13, 写真4). 乗心地を評価するために波状路(周波数はばね上共振域を狙っている), ランダム入力路, EUカントリー路(欧州の田舎道を再現した路面)を走行し, 操縦安定性(ハンドル操作等によるばね上変位)を確認するためにレーンチェンジ走行を実施した. また比較対象として, 純正状態(セミアクティブサスペンション)でも同じ計測を実施した. 実車試験にて以下の結果が得られた.

- ①セミアクティブサスペンションに比べ, ばね上共振域の振動を大きく低減する効果が得られた.
- ②大きなうねりと細かい振動が複合するEUカントリー路面においては, 細かい振動に対する硬さが残るが大きなうねりは解消され, ばね上共振域の制振効果は得られた.
- ③ロール角を大きく軽減することで, タイヤを効果的に接地させて安定した運転に繋がる効果を得られた.

半面, 改善すべき点もあり, 荒れた路面を走った際の乗心地悪化(制御バルブの応答性等の影響で路

面振動に制御がついていかない)や, 検証のため性能に余裕があるモータを搭載した結果, モータ作動音大きい等課題も挙がっているが, 当初予定していた性能を発揮することができた.

5.3.3 実車試乗結果について

また関係者を集めた試乗会では, 試乗者から「ばね上の動きが抑えられており, セミアクティブサスペンションとは比べ物にならない程のフラットさがある」, 「頭が振られないで楽」, 「揺り戻しがなく収まる」等の感想を聞くことができた.

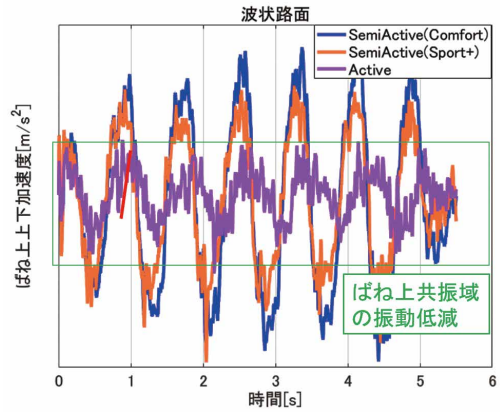


図10 波状路面

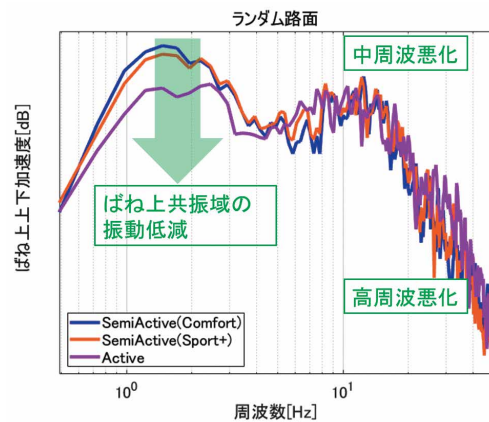


図11 ランダム路面

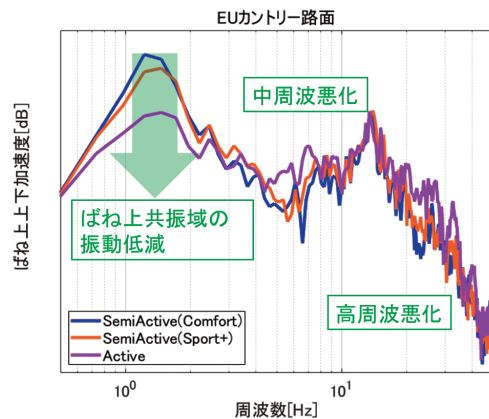


図12 EUカントリー路面

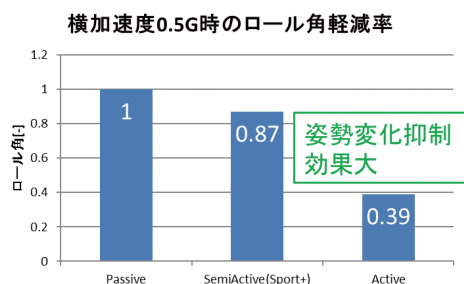


図13 レーンチェンジ走行



写真4 レーンチェンジの様子

6 まとめ

この活動を通じて、以下を実施した。

- ①アクティブサスペンションシステムを実現するための要件について検討を行い、システムを構築した。
- ②制振性向上のための制御則を構築、検証した。
- ③制御効果を確認するためのシミュレーション環境を構築した。
- ④アクティブサスペンションシステムの効果を体感するための実験車両を構築、評価した。

⑤試乗会にて幅広く意見を収集した。

特に考案した制御技術をシミュレーション上だけでなく実験車両に実装することで、幅広い人からの評価を聞ける環境が整い、アクティブサスペンションの在り方について検討していける土台ができた。

アクティブサスペンションという自在にばね上をコントロールできる製品を考えていく場合、実車という存在は質感や感性を考慮する上で非常に価値のあるものであり、今回の活動は今後につながる有意義なものになった。

また、現在当社実験部門にて実車官能評価の指標化を目指し、感性の定量化に向けた活動を開始しており、今後はチームKYBとして開発力向上を目指していきたい。

7 おわりに

自動車業界は現在100年に1度の大変革期と言われている。繋がる、自動化、シェアリング、電動化等のキーワードにより、自動車は単なる移動手段だけではなく、様々な付加価値を含んだモビリティへと進化していくことが予想される。そのような社会に貢献していくためのアイデアの1つとして、アクティブサスペンションという可能性を提案した。今後は究極のサスペンションを再び世に出すため、システム、制御、感性等に対する理解を深化させつつ、時代に即したアクティブサスペンションシステムを開発していきたい。最後に本開発にあたりご指導、ご協力を頂いた関係各位に、この場をお借りして厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Alonso Torres : Semi-Active Suspension, Extending the Limits, KYB技報第56号, (2018年4月)。

著者



稲満 和隆

2005年入社。オートモーティブコンポーネッツ事業本部技術統轄部開発センター製品開発室。ショックアブソーバの開発に従事。



堀 匡利

2015年入社。オートモーティブコンポーネッツ事業本部技術統轄部開発センター製品開発室。ショックアブソーバの開発に従事。