

KYBグループにおける自動車用電制サスペンション開発

太田 康洋

1 はじめに

自動車の生産台数予測では自家用車の市場は成長が鈍化する見込みである一方で、電子制御サスペンションの搭載割合は増加傾向にある。車種別の割合でみれば世界的にSUVが増加しており、車体重心が高いことや対応する路面などの条件・状況範囲の広さから電子技術を適用したサスペンションがSUVに適した解と言えるであろう。

当社グループ内においても電子技術を組み込んだ製品は重要な位置づけであり、自動車向けの電子制御サスペンション（以下、電制サス）を量産している。

2016年末より比例ソレノイドによる減衰力可変機構を備えたショックアブソーバの量産を開始し、続いて2017年10月、Tier1として、ショックアブソーバ単体だけでなくソフトウェアなどを含めたサスペンションシステムとして供給を開始した。本報では、近年の当社グループにおける自動車用電制サスの開発状況を通じて、今後の方向性などについても紹介する。

2 電制サスの位置づけ

まずは、一般的な自動車のサスペンションの基本的な役割から振り返ってみる。自動車のサスペンションは、主に、アーム、リンク機構、ばね、ショックアブソーバで構成され、車輪の上下振動を緩和、吸収して、振動が車体に直接伝達されること防止する。さらに、タイヤと路面間の接地荷重変動を抑え、駆動力、制動力を有効に作用させ、走行性能を高める働きがある。また、上下には緩衝作用を働かせながら動きを許容し、前後、左右方向には動きを規制、位置決めをして「走る」、「曲がる」、「止まる」という自動車の基本機能を実現している。

サスペンションは乗る人の感性にも大きく影響を与え、車両に対する印象をも変える要素を持っており、その評価指標として、快適性は、振動・乗心地

として評価され、基本機能の「走る」、「曲がる」、「止まる」については、操縦性・安定性（以下、操安性）として評価される。

ここで、振動と乗心地について、サスペンションの形式の違いは問わずに簡略化して、1輪のみを対象に上下方向1自由度でモデル化した場合を考えてみる。

一般的なばね上の上下加速度で評価される振動解析は、例えば路面からの振動伝達特性を周波数領域で計算¹⁾（数値シミュレーション）して影響を見る。

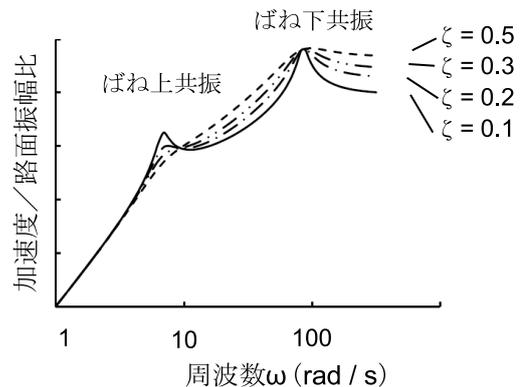


図1 伝達比特性 減衰係数比の影響

図1は、路面からの入力振幅に対するばね上加速度応答の伝達比を示しており、小さい方が乗心地が良いことを意味する。減衰係数比 ζ は、車体のばね上共振点近傍では大きい方が良いが、それ以外の周波数では小さくした方が、乗心地が良いことが分かる。

一方、接地性に目を向けると、車の走行時に駆動力、制動力、横力が発生する部分はタイヤと路面との間である。その大きさを決める主要なファクタは垂直荷重であり、これが接地力となる。接地性を確保するには車輪の路面への追従性を良くすることが必要であり、これに対してはばね下の共振を抑え込むことが重要になる。減衰係数比 ζ が小さいほど接地力変動が急激に悪化することが計算からも分かっている¹⁾（図2）。

接地力が負の値をとるような場合はタイヤが路面から浮き上がる現象が生じることになるので、減衰係数比 ζ は乗心地の観点だけでなく、接地力も考慮して選定されなければならない。

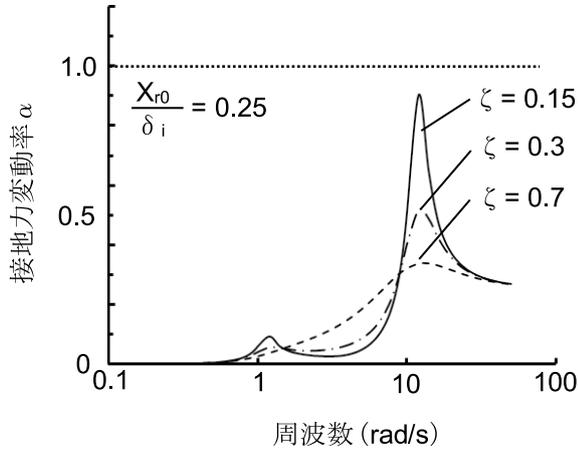


図2 接地荷重変動率 減衰係数比の影響

このように簡単な理論解析だけでも、実現したい特性を両立させる難しさは理解いただけると思う。基本的には適合させるショックアブソーバの特性は固定（パッシブサスペンションと呼ばれ、一度特性が決まれば切り替わらない）であるため、達成できる性能には限界がある。

また、操安性について考えると、ドライバのアクセル・ブレーキ操作やハンドル操作、さらには横風などの外乱から車体に働く慣性力によって生じる車体姿勢変化は操安性に影響を及ぼすことになる。これは、サスペンションのリンク構成によりキャンバやトーなどアライメントが変化するため、この動きを抑制するばねやショックアブソーバは操安性を高めるのに重要な役割を担う。

乗心地、接地性、操安性では相反する特性が多いことから、パッシブサスペンションを超えたより高い領域でこれらの特性を両立させるため、電子制御によって様々なシーン、路面状況や運転状況に応じて特性を変化させることが一つの解となる。

電制サスについては、減衰力可変、ばね特性可変および車高可変など、要求に応じて様々な機構があり、制御設計とシステム構成上からはアクティブサスペンション、セミアクティブサスペンションの切り分けになる。

ここで、セミアクティブサスペンションについて触れておく。考え方の起点はアクティブサスペンションが元になっており、アクティブとパッシブの中間的な存在、という意味で名付けられたもので、アクティブサスペンションが外部動力源を用いて能動的

に力を発生させるのに対し、セミアクティブサスペンションはパッシブサスペンションのパラメータ（減衰係数やばね定数）を変化させて振動を制御するものである。アクティブサスペンションで必要と定義された制御力を、減衰力可変ショックアブソーバで近似的に制御するサスペンションをセミアクティブサスペンションと呼ぶのが通例になっている。

以降は、セミアクティブサスペンションを前提とした減衰力可変機構を備えたショックアブソーバからなる電制サスシステムに的を絞って言及していく。

3 システム・アーキテクチャ

3.1 システム構成

KYBの電制サスシステムは、ECU(ECUに搭載されるオペレーティングシステムなどからなるベーシックソフトウェア、および特定の機能を果たす制御ロジックなどからなるアプリケーションソフトウェアを含む)、センサ、比例ソレノイド制御弁による減衰力可変機構を搭載したショックアブソーバ(KYBではソレノイド減衰力調整ショックアブソーバと呼ぶ。以下、ソレノイド減調SA)から構成される(図3)。

システムの動作は、認知>判断>操作 という3つのステップで説明できる。ストロークセンサは車体と車輪の相対変位を測定する。加速度センサは、車体のフロントに2つとリアに1つ取り付けられ、垂直加速度を測定している。CANから参照できる多くの情報(車両速度、ステアリングホイール舵角、前後左右の加速度、ブレーキ状態など)と搭載されたセンサからの信号が制御の入力となる。これらの入力信号を読み取り、周期的に演算することで車両の状態を分析する。ECUはソレノイド減調SAへ指令を送信し、各々の減衰力を必要に応じて変化させ、車体の姿勢や振動を修正・調整する。

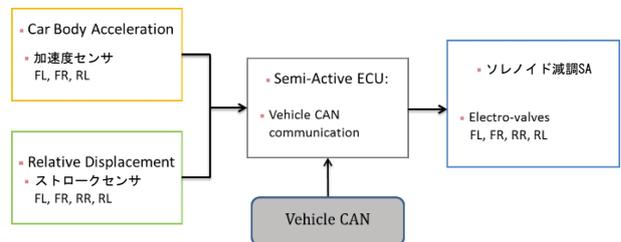


図3 システム構成概念図

3.2 システムの設計思想

KYBの電制サスシステムについて簡単に紹介する。まず、サスペンションが果たす基本的な役割の一つである「接地荷重変動の抑制」のため、ソレノイ

ド減調SAに組み込まれているパッシブ減衰力（電子制御の減衰力と並列に発生する力）が最低限の接地性を確保する。

次に、乗心地の観点では、路面からの入力を緩和・遮断する狙いで、低い減衰力の領域を基本的には使う。（低ければ良いというものでもないが、その辺りの議論は学术论文などに任せたい）。同時に、車体の振動を制御するため古典制御を用いて、必要に応じて減衰力を高める仕組みになっている。

さらに、操安性の観点では、動力源が無いため受動的にはなるが、ロールする速度を緩やかにするといった狙いで適切に減衰力を高め、車体の姿勢変化を抑えることで安定性の向上に貢献させる設計思想としている。

このような、電子制御にて実現したい役割・機能はアプリケーションソフトウェア（以下、ASW）としてECUに組み込まれている。システムの構成で重要な要素となるASWと、コア技術であるショックアブソーバについては自前で開発し、量産に際して顧客が各々の主義・思想として持っている車両の挙動・フィーリングに近づけ、他のシステムに合わせて適合・チューニングしている。

4 構成要素概略

システムの中で重要な要素であるソレノイド減調SAとASWについて説明する

4.1 ソレノイド減調SA

ソレノイド減調SAには比例ソレノイド制御弁（以下、SOL弁）をショックアブソーバの中側または外側に設置する2種類の形式があり、図4はSOL弁を外側に設置する外付け式の外観である。



図4 外付け式ソレノイド減調SA外観

外付け式ソレノイド減調SAの仕様を表1に示す。

4.1.1 3重管構造

ショックアブソーバの外側に設置したSOL弁に油

表1 外付け式ソレノイド減調SAの仕様

基本構造	3重管ユニフロー構造
制御方法	圧力制御
SOL弁部体格 (最外径×高さ)	φ39×53以下 車両搭載性に優位性を持つ
電流と減衰力の関係	低電流 ソフト 高電流 ハード
切替応答性	当社既製品 (ステッピングモータ式) に対して8倍以上に向上 ソフト⇄ハード
フェールセーフ時の減衰力	任意の減衰力に 設定可能

を導くためにシリンダ・中間パイプ・アウターシェルで構成される3重管の構造を採用した。また、伸行程と圧行程の減衰力を1つのSOL弁で調整するために、作動油の流れをユニフロー（一方向流れ）とした。図5に、3重管ユニフローの構造図と作動油の流れを示す。

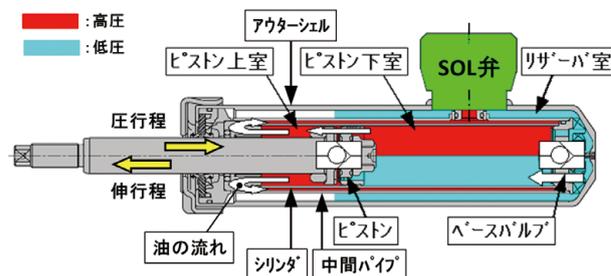


図5 3重管ユニフロー構造図

本構造では、ピストン、ベースバルブは原則チェック弁になっており、主に減衰力はSOL弁で発生させる。伸/圧行程共に、ピストン上室は高圧となりシリンダから中間パイプの間を通りSOL弁までが制御圧となる。その後、SOL弁を通過した作動油はリザーバ室へ戻り、伸行程時にはロッド移動分はベースバルブを通してピストン下室に供給する構造となっている。

4.1.2 制御方式

SOL弁には流体の圧力差を用いて弁体を駆動させるパイロット方式の電磁比例リリーフ弁を用いる。パイロット弁の制御方式には、圧力制御と開口面積制御の2種類がある。減衰力特性のイメージを図6に示す。

圧力制御の場合、制御電流でパイロット室の圧力（パイロット圧）をコントロールするため、開弁点は

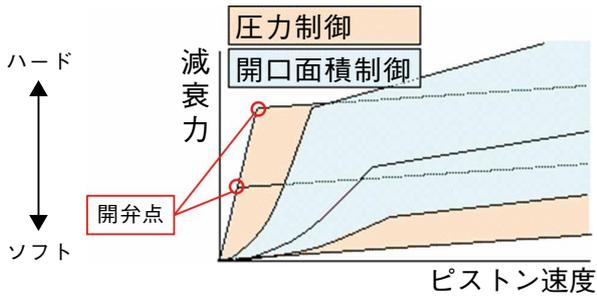


図6 圧力制御と開口面積制御の減衰力特性イメージ

変化するがソフトからハードまで減衰力の勾配はピストン速度に依存せず一定となる。そのため、低速域の減衰力可変幅で操安性を高めた時でも、中～高速域減衰力の上昇を抑えられ乗心地を悪化させない。

この勾配が一定となる特性は、接地性確保のためのパッシブ減衰力特性と制御電流にのみ依存し減衰力を発生させる減衰力可変特性を1本に集約できている特性になる(図7)。

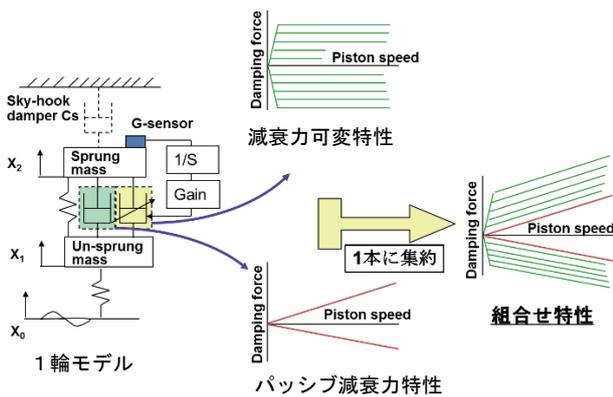


図7 圧力制御と制御性

一方、開口面積制御の場合、制御電流でパイロット弁の開口面積をコントロールするため、減衰力の勾配は制御電流ごとに変化し、減衰力は電流とピストン速度の両方で決まる。

セミアクティブで代表的に用いられるスカイフック制御¹⁾をパイロット方式の電磁比例リリーフ弁で実現させる場合、圧力制御のように減衰力を電流のみで設定できればピストン速度を検出する必要がなくなるというメリットがある。また、造りの観点では、開口面積制御の場合、部品寸法に高い精度が求められる、コストの面で難しさがある。

パイロット弁の各制御方式については、それぞれ市場において採用されている実績はあるが、KYBでは、制御性と部品精度の面から圧力制御を採用した。

4.2 アプリケーションソフトウェア (ASW)

ASWの階層や機能モジュール分割は、ソフトウェア

の効率性、信頼性、保守性、移植性を念頭に置いた。

効率性とは、メモリや処理負荷を最小限に抑え、指定された条件下(使用できるリソース量)に対応させることを指す。信頼性については、一定のパフォーマンスのレベルを維持する能力に関連し、ASW層やインターフェース内でエラーの検出・処理が堅牢であることが挙げられる。保守性については、変更を行うために必要な労力に関連し、検証や分析の面から複雑さを最小限に抑え、各コンポーネントは同じ(相似の)構造を持たせている。移植性については、ある環境から別の環境への展開に対する観点で、各種プロジェクトや顧客ごとに簡単に適応できること、機能とインターフェースに応じて容易に拡張できることを前提とした設計としている。

4.2.1 ASW内の機能モジュール

システムの設計思想でも述べたが、車体の振動や姿勢をコントロールすることは主な3つの要求目標を達成する必要があることを意味し、互いに重複する部分もある(図8)。

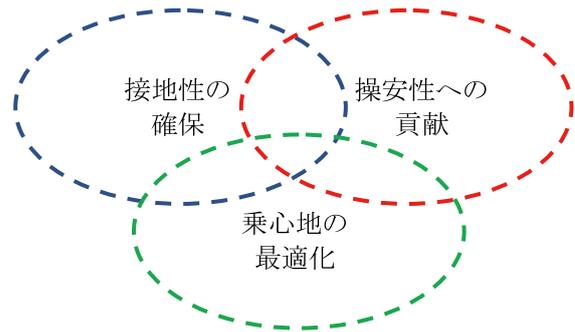


図8 システム要求概念

これらは、ドライバーによる様々な運転、多種多様な路面においても、普遍的な要求である。そのため、車両の状態、ドライバーおよび路面からの入力情報を混合して収集し、ASWの各機能があらゆる条件・状況においても要求を満たすことを狙う。

電制サスシステムにおいて、要求の実現は構成するハードウェア(ソレノイド減調SA)とソフトウェア(ASW)で互いに補完する場合もある。システム設計から一貫した役割分担に基づき、前述の3つの要求に対してASWが担う機能モジュールを大別し、それぞれ対応するモジュール名を以下に示す。

- ① 接地性の確保 → Wheel holding
- ② 乗心地の最適化 → Car Body Filter
- ③ 操安性への貢献 → Anti-Roll, Anti-Pitch

「接地性の確保」については前述で触れたようにショックアブソーバでも担うが、「Wheel holding」モジュールでインパクト入力やタイヤのばたつきに対してロバスト性を提供している。このモジュール

はタイヤのばたつきを検出し、一定期間減衰力を増加させる指令を出力している。

「乗心地の最適化」については、車体のバウンス、ピッチ、ロールの各方向の速度を演算するため加速度センサを利用している。これら各方向の速度を用いて「Car Body Filter」モジュールで、古典制御による連続的な減衰力指令を算出し、車体（客室）の振動を制御する指令を出力している。ここには、ストロークエンド近傍の異音やショックを抑える処理など付加的な機能も含まれている。

「操安性の貢献」としては、「Anti-Roll」モジュールではステアリング操舵に依存し、「Anti-Pitch」モジュールでは前後加速度やブレーキ圧に依存して減衰力を高める指令を出力している。また、ドライバ入力起因による車体の姿勢変化を規制することにより、ドライバの意図に合わせる、および安定側となる車両挙動を確保している。

5 今後の展望

以上、当社グループにおける自動車用電制サスについて紹介してきた。引き続き、市場の要望に当社の技術で適時応えていきたい。そのためには今後、当社グループ内でのグローバル連携をさらに高め、各開発拠点で役割分担や知見共有により核となる技術の発展を効率的に進めることが肝要と考える。これは、設計の領域にとどまらず、様々な協力メーカーとのより良い関係構築や造りの面からも同様に、当社グループ内でこの製品を通じた相乗効果を生み出す活動展開も必要であろう。

また、少し視野を広げて昨今の自動車産業の動向に目を向けた時、既存だけでなく変化していく要求

に対しても、その解につながる技術の大局を意識していきたい。例えば、コネクティッドカー（つながるクルマ）や自動運転を背景に、電気・電子アーキテクチャは分散型から集中型へ進むとみられる。このような状況下で、今回はサスペンションについて述べてきたが、当社グループ内には他に多くの電子製品が存在していることから、その保有技術を組み合わせた価値提供はもちろんのこと、設計力・提案力を強化させることが必要である。これは、組み込みに対する親和性を高めた設計思想を貫き、ノウハウ・知見を積み上げていくことが重要で、その適応性・拡張性に磨きをかけることが求められる。

6 おわりに

私事であるが、電制サスシステムの量産化に際してスペインに駐在し、ASW開発担当として貴重な経験を積ませてもらった。当時を思い返せば、まさにグローバルに国境を超えた量産開発は、当社グループの枠組みの賜物であり、多様性に富んだ（仏・西・独・日）協力メーカーや顧客との知見の積み上げは我々の財産であると考えている。これらをさらに発展させ、これからも安心・安全・快適さを支える技術・製品を提供していきたい。また、量産立ち上げに際して、多大なるご支援、ご協力を賜りました関係者の方々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) KYB株式会社編：自動車のサスペンション構造・理論・評価 P. 55, P. 61, P. 235 (2013)

著者



太田 康洋

2001年入社。オートモーティブコンポーネンツ事業本部 技術統轄部製品企画開発部専任課長。基盤技術研究所、製品企画開発部、KEUを経て現職。