

解説

受賞技術－19

鉄道車両の振動制御装置 アクティブサスペンション

Active Suspension System for Railway Vehicles

日鉄住金テクノロジー（株）
尼崎事業所 数値解析ソリューション部
（元 新日鐵住金株式会社 技術開発本部）
専門主幹

石原広一郎
Koichiro Ishihara

新日鐵住金（株）
交通産機品事業部 製鋼所
輪軸製造部 部長

小泉智志
Satoshi Koizumi

新日鐵住金（株）
交通産機品事業部 製鋼所
鉄道台車製造部 第一台車設計室 主幹

後藤 修
Osamu Goto

1 はじめに

当社の交通産機品事業部では、国内の鉄道車両品として、鉄道台車のシェアでは新幹線で約20%、公営・民鉄で約50%、鉄道輪軸のシェアでは100%を占めている。そのシェアを維持しつつ、さらなる性能向上を狙って、さまざまな研究開発を技術開発本部とともに行い、高付加価値のある鉄道車両品の実用化を達成してきている。例えば、以下である。

- (1) 鉄道車両の高速化に伴い、軌道の不整のみならず空力的な動揺に対応し、さらには高級な車両に快適な乗り心地を提供する、車体の左右の揺れを抑えて乗り心地を向上させるアクティブサスペンション。
- (2) 曲線通過時に鉄道台車の左右にある空気ばねを給排気して内軌側に2度傾斜し、走行速度を10～15km/h向上して時分短縮と乗り心地を向上させる空気ばね式車体傾斜制御装置。

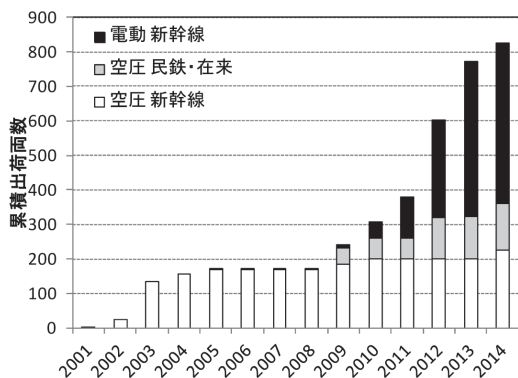


図1 振動制御装置の累積出荷両数

- (3) 曲線で車輪軸を操舵することで、車輪とレール間の騒音が少なく、滑らかに曲線を通過することができる操舵機能付き台車。
- (4) 営業運転しながら走行安全性の指標である横圧と輪重を連続的に測定し、軌道の状態を監視できるPQモニタリング台車。

本稿では、図1に示すこれまで800両近くに及ぶ実用化を達成した振動制御装置アクティブサスペンションについて解説する。

2 アクティブサスペンションの概要

左右方向のアクティブサスペンションの概要を図2をもとに説明する。従来のバンプ系の乗り心地を良くするために

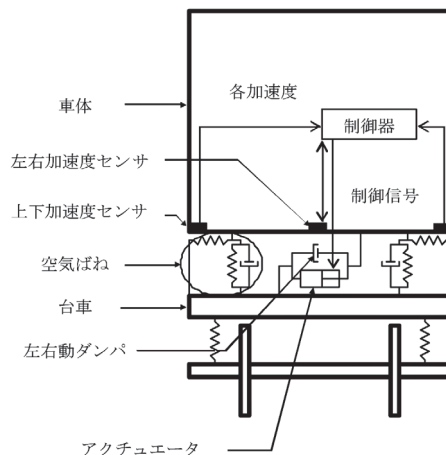


図2 アクティブサスペンションの概要図

は、車体と台車間の左右動ダンパの減衰、空気ばねの各剛性・上下の減衰を調整していたが、最適値にたどり着くことは困難であり、ある程度トレードオフのもとに諸元を決定していた。そこで、当社では1988年からこのパッシブな台車に対して、最適な乗り心地を実現すべく、電子制御技術を利用して新たな付加価値を生み出す研究開発に着手した。その中で、すでに自動車などで研究開発が進んでいたアクティブサスペンションに着目し、鉄道車両の乗り心地への関与が大きい左右方向のアクティブサスペンションの開発に取り組んだ。

そこで、対象とする鉄道車両の左右方向の振動を運動方程式で記述すると、鉛直軸周りのヨーイング振動と、それとは独立し左右動と進行方向軸周りのローリング振動が連成する振動の3つのモードとなる(図3)。

これら3つの振動モードを制御するシステムのハードとしては、車体と台車間に左右動ダンパが艤装されている同じ高さにアクチュエータを追加設置する(なお、アクチュエータには空圧式と電動式があり、後述する)。さらに制御対象である車体の揺れを計測するため前後に2つの左右加速度センサ、左右に2つの上下加速度センサを設置する。なお、その後の試験を通して、2つの上下加速度センサを設置せずとも、2つの左右加速度センサだけで左右動+ローリング振動を制御できることがわかったので、左右加速度センサ2個のシステムもある一方、鉄道事業者殿の上下加速度も監視しておきたいという要望によって上下加速度センサを残しているシステムもある。そして、その車体の振動加速度を入力とし、アクチュエータへの指令値を出力とする制御器を車体に艤装する。一方、ソフトとしては、鉄道車両の左右系の振動伝達特性が比較的線形なモデルであり、乗り心地の評価が周波数に依存するため、周波数領域における要求仕様を制御設計指標に取り込み易い H^∞ 制御理論を適用する。

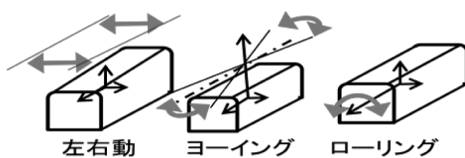


図3 各振動モード

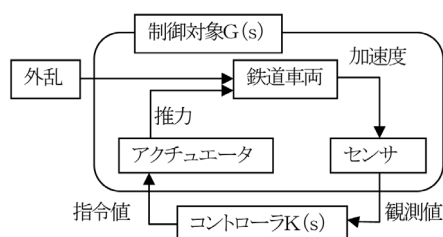


図4 制御対象とコントローラのブロック図

そこで、入力をアクチュエータへの指令推力とし、出力をセンサで観測された各振動モードの加速度とした鉄道車両を含む制御対象を伝達関数 $G(s)$ で表現する(図4)ために、制御用のアクチュエータを用いて一定振幅の指令推力で0.2Hzから10Hzまでスイープさせながら車体を加振して、同定を行う。このとき、車体・台車間のあらゆる結合部分の剛性・減衰を等価的に空気ばねと左右動ダンパに置き換えるため、各設計諸元値と実際に同定から得られる値は一致しないのが常である。図5に示すのが、例えばヨーイング方向に加振した場合のアクチュエータへの指令値から車体ヨーイング加速度までの周波数特性であり、丸印の試験結果と運動方程式に基づいた実線が良く一致するように諸元を同定する。

最後に、コントローラ $K(s)$ を H^∞ 制御理論で扱う複数の重み関数 $W(s)$ を調整しながら設計する(図6)。この重み関数の調整には長年の経験とノウハウが必要であり、いかなる走行環境においても良い乗り心地を実現するためには、単一のコントローラではなく、走行状況に応じてコントローラを切り替えるのが良い。例えば、以下である。

- (1) 運転台モニター装置からの地点情報と事前に記憶している情報を照合して、空力的な動揺が大きくなるトンネル区間と明かり区間を切り替える。
- (2) 運転台モニター装置からの速度情報に応じて、低速区間と高速区間を切り替える。

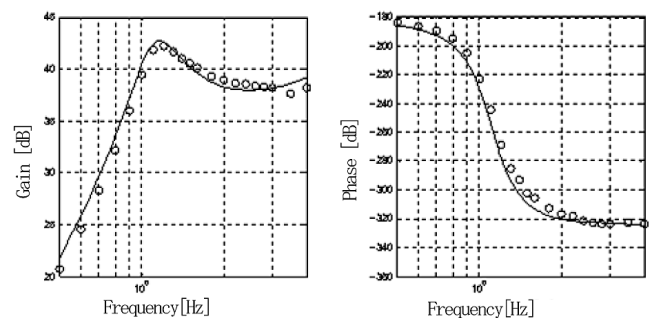
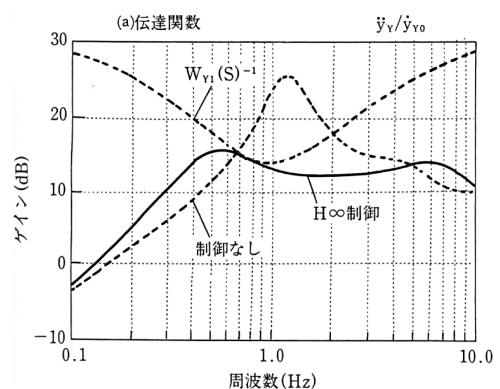


図5 ヨーイング振動の周波数特性


図6 重み関数 $W(s)$ による周波数整形例

- (3) 運転台モニター装置からの号車情報に応じて、先頭号車と最後尾号車を切り替える。
- (4) 車体の左右振動加速度をフィルタリングして定常加速度を導出して直線区間と曲線区間を切り替える。

③ アクティブサスペンションの検証

本装置の妥当性を検証する方法として、数値シミュレーションよりも一歩進んだツールが必要と考えた。特に、自動車業界のように自動車メーカーがテストコースを持って自社内で完璧な実態で評価できるものではなく、鉄道業界では、実態の車両・軌道で試験するには営業時間が終わった終車後に線路を封鎖する必要がある、かなり大掛かりとなり、装置はほぼ完成形でないと評価はできない。なお、昨年このような課題を克服するために、三菱重工工業殿が総合交通システム検証システムを完成し、他の企業や団体に門戸を開いて運用を開始している。

一方、当社としては、1990年初頭より縮小模型ではなく、実物大にこだわり、公営・民鉄車両と同程度の前後台車間距離13.8mの設備(図7 以降、一車両モデル試験機と称す)を導入した。これにより、鉄道事業者殿の実軌道を走行する前に、設計開発者がいつでも社内で試験でき、さまざまな効果を評価し、さらに各種フェール状態の影響を確認することができた。本設備は、今回のアクティブサスペンションだけでなく、車体傾斜制御装置、輪重調整装置、応荷重差圧弁、アンチローリング装置など、さまざまな装置・部品の開発にも役立っている。

アクティブサスペンションの一車両モデル試験機での検証は以下となる。まず、実軌道を走行するパッシブな鉄道車両のヨーイング振動加速度と左右動加速度を入手し(図8上段)、一車両モデル試験機自身の伝達特性(入力:加振装置、出力:車体加速度)の逆モデルから、加振装置への指令値(図8下段)を求める。その結果、No.1台車とNo.2台車にそれぞれ個別の加振を行えば、図9に示す通り、現車で測定した車体振動加速度の各振動モードのPSDを精度よく再現す

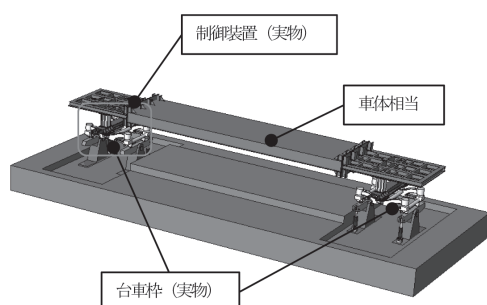


図7 一車両モデル試験機

ることができる(図9)。この技術により、実際にアクティブサスペンションを採用した場合の期待効果が評価できる。したがって、鉄道事業者殿が採用可否を検討するのに、従来までは高コストをかけて台車・車体を一時改造して現車試験を行っていたものが、当社製鋼所に来所頂ければ、事前にアクティブサスペンションの効果を体感で確認できるようになった。また、空圧式アクチュエータと電動式アクチュエータの違いによる性能差も評価でき、例えば図10に示すように、空圧式で6dB程度乗り心地レベルを低下するところ、電動式で10dB程度低下させることができる。特に応答性の違いから59秒付近の単発の振動にも、電動式である程度対応できていることがわかる。

④ 空圧式アクチュエータの変遷

開発当初は、アクチュエータに使用するエネルギーは、鉄道車両として空気ばね・ブレーキ・戸締め・トイレなどで使用され、受け入れやすく、扱いやすい既存の圧縮空気とした。

次に、まずは測定できる状態量はすべて測定するという考

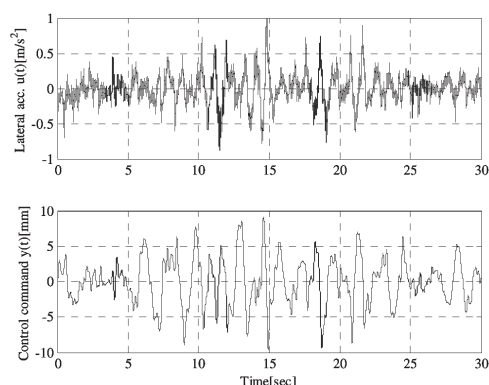


図8 左右振動加速度再現のための加振指令波形

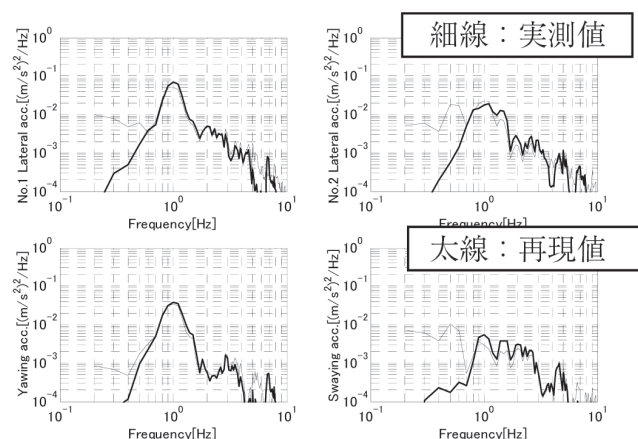


図9 振動加速度実測値(細線)と再現値(太線)

えで、図11に示す初代の空圧式アクチュエータでは、シリンダストローク、シリンダのロッド側・ヘッド側圧力の3個のセンサを装備し、各シリンダの圧力を制御するのにそれぞれ給気弁2個、排気弁2個を設けたものだった。この当時は、車体振動加速度を低減する制御ループと、シリンダ内圧力を指令値どおりに追従させる制御ループと2つあり、複雑な制御を行っていた。

そして、開発から13年後の2001年、JR東日本E2系新幹線電車にて世界で初めての実用化したときには、アクチュエータからセンサは一切無くなり、制御弁は機械的にサーボ補償が得られる圧力サーボ弁1個にまで削減され、制御ループも前記一つに単純化された。

さらに6年後には、ロッドの外径は強度上理由から従来のまま35mmとし、シリンダの内径を100mmから80mmまで小型化し、最大推力は0.64倍に落ちたものの、応答性を1.56倍に向上させたアクチュエータを開発した。付随効果として空気消費量も多少低減することができ、本小型空圧式アクチュエータは、京成AE形に量産搭載されて以降、現在最新鋭のJR東日本E7系・JR西日本W7系新幹線電車にも

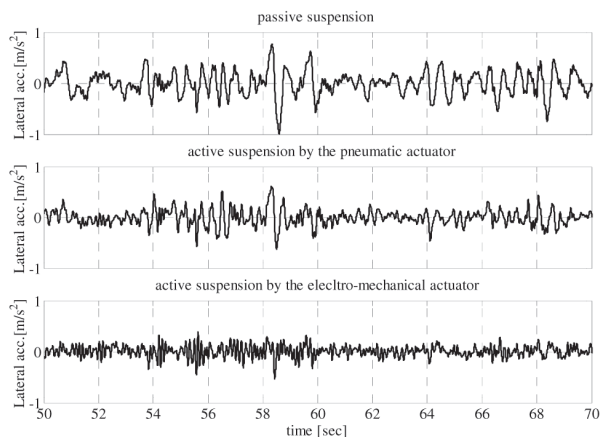


図10 制御時(空圧:中,電動:下)の振動波形

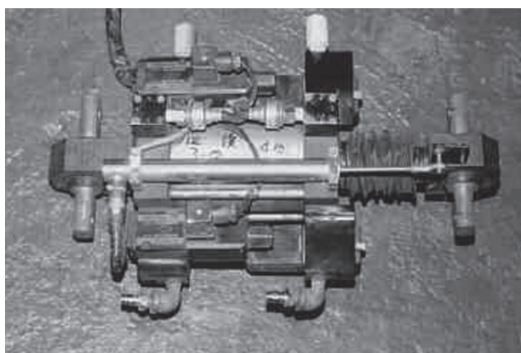


図11 初代空圧式アクチュエータ

搭載されている(図12)。

以上よりシステムの構成は、試験開発時から量産へ進む過程でスリム化することが重要であり、鉄道業界では、実用化するのに10年程度の開発期間を要する。

5 アクチュエータの電動化

ここ数年、鉄道車両の300km/h超の高速化の要求が高まる中では、空圧式アクティブサスペンションではその要求に応えられない面が明らかになってきた。

まず、同じ軌道の通り狂いに対して、走行速度が上がるといことは、外乱となる周波数が増えることとなり、車体の抑えるべき周波数も上がり、アクチュエータに要求される応答性も高まる。

つぎに、良い乗り心地を実現するには、アクティブサスペンション以外に、曲線通過時の定常加速度を低減する車体傾斜制御装置が必要になる。この車体傾斜制御装置が動作することとは、車体と台車間が従来以上に偏倚することになり、同じ車体と台車間に設置されるアクチュエータに要求される必要ストロークが増加する。したがって空圧式アクチュエータにとっては、圧縮空気を出し入れする容積が増えるため、必然的に応答性が下がる。

さらに、この2つの装置のエネルギー源に何をを使うかという課題については、求められるアクチュエータの応答性から解が見いだせる。車体傾斜制御装置は曲線通過時の準静的な動作のため0.5Hz以下であるのに対し、アクティブサスペンションは1~3Hz程度である。必然的に、圧縮空気は車体傾斜に使用され、アクティブサスペンションは電動化が求められた。

一方、当社は1998年にボールスクリュを用いた電動式アクチュエータを使用した車体傾斜制御装置の試験を実施していたが、耐久性の課題が残っていた³⁾。それから数年後の上記のように市場が動いた^{1,2)}とき、当社も電動式アクチュエータの開発を深度化させた。

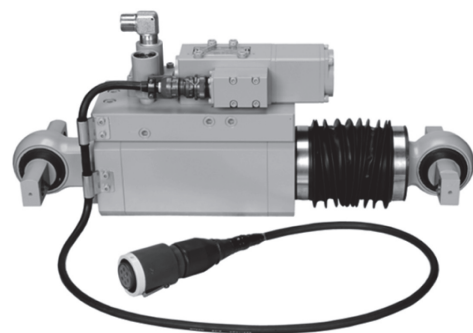


図12 最新空圧式アクチュエータ

まず、市場動向を知る上でLSM (Linear synchronous motor) 方式の電動式アクチュエータを試作した (図13)。最大推力は3.6kN、質量68kg、最大外径 ϕ 178mmと、推力の割に体格が大きく、強力な希土類が出現し、モータ技術に革命が起きない限り、小さく、軽く、大出力のものはできないのではないかと考えた。

そこで、欧州の車体傾斜制御装置でも使用されていて、ボールスクリュよりも耐久性に優れたローラスクリュを用いた電動式アクチュエータ (EMA: Electro Mechanical Actuator) を試作した。試作品の最大推力は8.5kN、質量29kg、最大外形 $\square$ 141mmと適切なものであった。だが、これだけでは、アクティブサスペンションとしての実用には耐えず、空圧式アクチュエータを開発した当時以上のさまざまな意地悪試験、車体台車間のインタフェイス部の開発、各故障モードに対する対策を実施した。その結果、最高速度320km/hで営業されるJR東日本E5・E6系新幹線電車用としての量産化初の電動式アクチュエータを完成させた⁴⁾ (図14)。

今後、電動式アクチュエータの進むべき道は空圧式と同じくして、小型化・センサレス化が重要と考える。

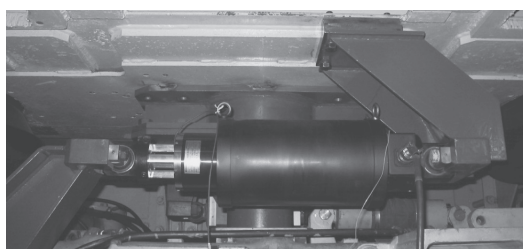


図13 一車両モデル試験機へのLSM艤装

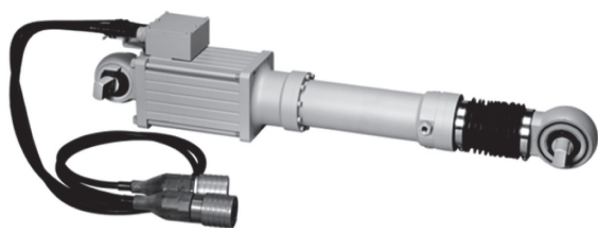


図14 量産化した電動式アクチュエータ

6 おわりに

このアクティブサスペンションの開発から実用化・普及までの20年以上の長きに渡る過程において、

- (1) 新幹線の320km/h、在来線160km/h等の車両の高速化に寄与した。
- (2) 優等車両への装備により、高付加価値を支える基礎技術となり、豪華観光列車など新たな観光ソースの誕生と発展に貢献した。
- (3) 現在、独自技術であるため、我国の鉄道技術レベルの国際的なPRに寄与した。
- (4) 継続してさらなる技術開発に努めており、将来の我国の鉄道技術の発展に不可欠な重要技術となると予想する。
- (5) 多くの路線へ広く普及させることを目指し、乗客の皆様により良い乗り心地を提供することが最終目標です。

以上の開発実用化に対して、日本鉄鋼協会殿からご推薦して頂き、新技術開発財団殿から第46回市村産業賞「貢献賞」を、当社の交通産機品事業として初めて受賞しました。ここに、今日までの普及にご支援頂きました鉄道事業者殿、外注メーカ殿、ほかの皆さまに深く感謝の意を表します。

今後も、扱いやすい空圧式、優れた乗り心地の電動式と両者の長所短所を見極めながらさらなる普及、開発を進めていきたいと考えています。

参考文献

- 1) 牧野和宏, 赤見裕介, 柴原和晶, 岩波健, 江戸義博: 電動リニアアクチュエータを用いた鉄道車両用動揺防止制御装置の開発, 日本機械学会第13回鉄道技術連合シンポジウム, (2006) 6-52, 519.
- 2) 岩波健, 江戸義博, 河野行伸, 加賀谷博昭, 江崎秀明, 寺井淳一, 磯村一雄: 電磁アクチュエータを用いた鉄道車両用アクティブサスペンションの開発, 日本機械学会第13回鉄道技術連合シンポジウム, (2006) 6-52, 523.
- 3) 針山隆史, 島宗亮平, 根来尚志, 丸山佳之, 佐藤與志, 山野敏世: 電動式車体傾斜制御装置の開発, 日本機械学会第6回鉄道技術連合シンポジウム, (1999), 157.
- 4) 後藤修: 新日鐵住金技報, (2013) 395, 48.

(2015年7月7日受付)