

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

# 高速でも揺れない新幹線を —セミアクティブ制振装置の開発—

新幹線が高速走行すると、車体に作用する空気力などにより横揺れが増加します。高速走行時でも良好な乗り心地を保つため、1994年から1996年にかけて営業列車としては世界初となる振動制御装置を開発し、500系や700系新幹線車両などに採用されました。その後、一層の普及を目指してシステムを見直し、性能を向上しながら低コスト化した第二世代の装置を2000年から2002年にかけて開発しました。この装置は新幹線車両に広く用いられ、一部の在来線特急にも採用されています。これは車体の横揺れを、台車と車体の間に設けたダンパーにより制御する装置で、ここではこの開発経緯について紹介します。



佐々木 君章  
Kimiaki Sasaki  
研究開発推進部  
主管研究員  
【専門分野】 鉄道車両、  
制御

## 高速化による乗り心地への影響

新幹線の最高速度は開業から約20年間変わりませんでした。1980年代になると高速道路や航空便など他輸送機関との競争から高速化が必要になってきました。これに対して、速度向上を行うと、トンネル内で車体に大きな空気力が作用し、振動が増加して乗り心地が悪化することがわかってきました<sup>1)</sup>。

鉄道車両は図1のように台車の上にはばねを介して車体を載せた構造になっています。車両が走行すると線路の不整により台車が増振されますが、乗り心地を良くするためには、台車-車体間のばねやダンパーの利きを弱くして台車の振動を車体に伝わりにくくするのが有効です。一方、空気力は車体に直接作用するので、これによる振動を抑えるには上記と逆に台車-車体間の

抵抗力を強くしてこの力に対抗する必要があります。

これらの振動は走行速度が上がると両方とも大きくなるので、従来の防振装置では高速化によって矛盾する特性を求められるようになり、両方を抑えることが困難になります。

当時、このジレンマを解決し、良好な乗り心地を実現する方法として振動制御の導入が検討されており、筆者らは「セミアクティブ方式(図2参照)」を提案しました。

## セミアクティブ制振装置

この装置は図2のように、車体と台車間に取り付けられ、振動で双方の位置関係が変わることによって伸縮する「可変減衰ダンパー」という部品が伸び縮みに抵抗する力(以下では減衰力と呼びます)を、加速度センサーで検

### 図2 セミアクティブ方式

油圧・空気圧や電気などの外部動力を用いて積極的に制御力を加えられるようにした仕組みを「アクティブ方式」といいます。これに対して、本装置はアクティブ方式と同様の制御を行いますが、減衰力の制御だけで揺れを低減します。このような外部からエネルギーを与えず、内部パラメーターなどの操作だけで制御を行う方式を「セミアクティブ方式」と呼んでいます。

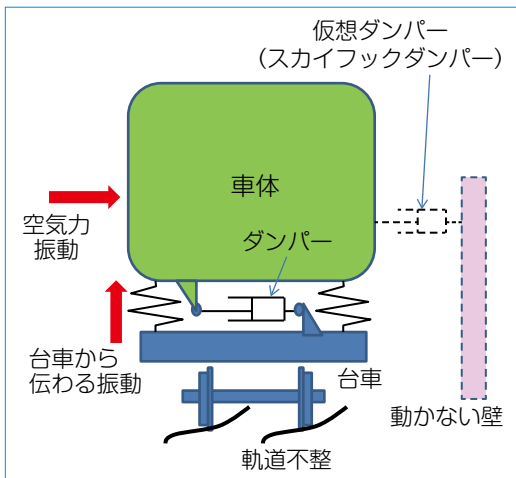


図1 車体に伝わる振動とスカイフック制御

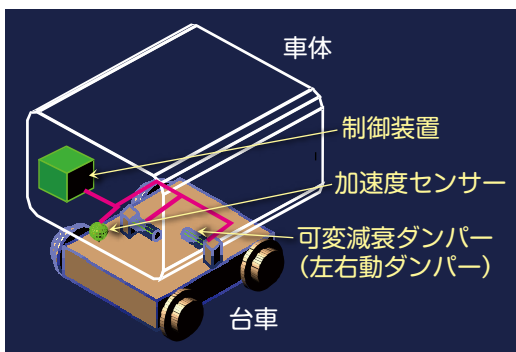


図2 セミアクティブ制振装置

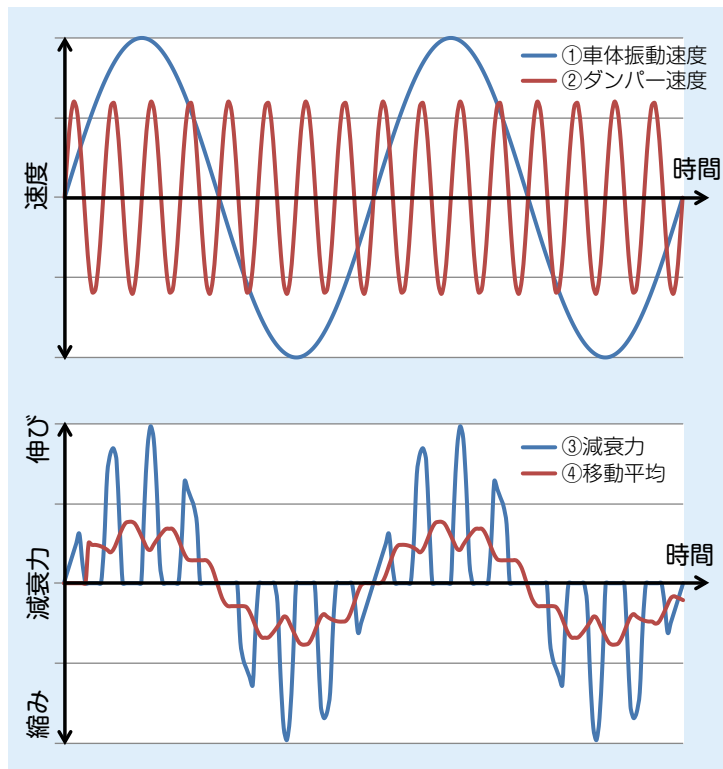


図3 可変減衰ダンパーによる近似的なスカイフック制御のイメージ

知した車体の揺れに合わせて制御することで車体の横揺れを抑える装置です。

### 第一世代装置 (多段絞り方式) の開発

開発開始当時の状況として、この装置の開発には次の問題がありました。

- ①搭載予定車両の導入スケジュールから、開発期間が極めて短かった(提案から最初の走行試験まで約9カ月)。
- ②営業列車の振動制御は世界的にも先行例がなく、装置の異常や故障に対して安全を確保する仕組みを新たに考える必要がある。

このような失敗(手戻り)の許されない状況のため、開発は以下の方針で行うことにしました。

- ①故障時に通常のダンパーと同特性になるフェールセーフ機能を持たせる。

②実績のある部品、技術を組み合わせることでシステムを構成する。

③改良を行いやすいシンプルなシステムとする。

この実現手段として「セミアクティブ方式によるスカイフック制御」という構成を選びました。

図1右側のように車体のそばに動かない壁があるものとし、壁と車体間に仮想的なダンパーが設置されているものと仮定します。このダンパーは台車につながっていないので、台車振動が車体に伝わりません。したがって、原理的にはダンパーの減衰力を大きくするほど車体振動が小さくなります。

現実にはこのような壁を作ることも、これにダンパーを取り付けることも不可能ですが、車体が振動したときに壁に取り付けた仮想ダンパーが発生するはずの減衰力は、車体加速度を測定して計算で求めることができます。その

力を車体-台車間に設置された実際のダンパーで発生させれば、車体については仮想ダンパーがあるのと同じことになります。この仮想ダンパーを「スカイフックダンパー」と呼び、この動作を実現する制御をスカイフック制御といいます。

この方法は簡単ですが、スカイフックダンパーは車体の振動速度に比例する力を発生しようとするのに対して、実際のダンパーの減衰力は台車と車体の振動速度の差(伸縮速度)に依存するので、スカイフックダンパーと逆方向の力しか出せない場合があります。したがって、厳密には自由に力を発生できるアクティブ方式でないとスカイフック制御を実現できません。

しかし、図3のように台車の振動周波数が車体のそれよりも高いことを利用し、逆方向の減衰力が必要な状況では減衰力を0とすることで、セミアク

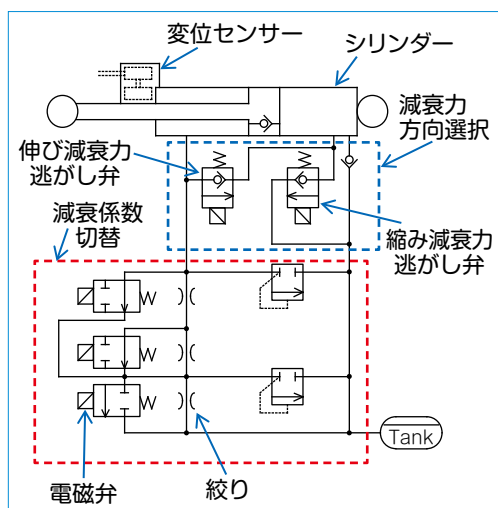


図4 第一世代の可変減衰ダンパー

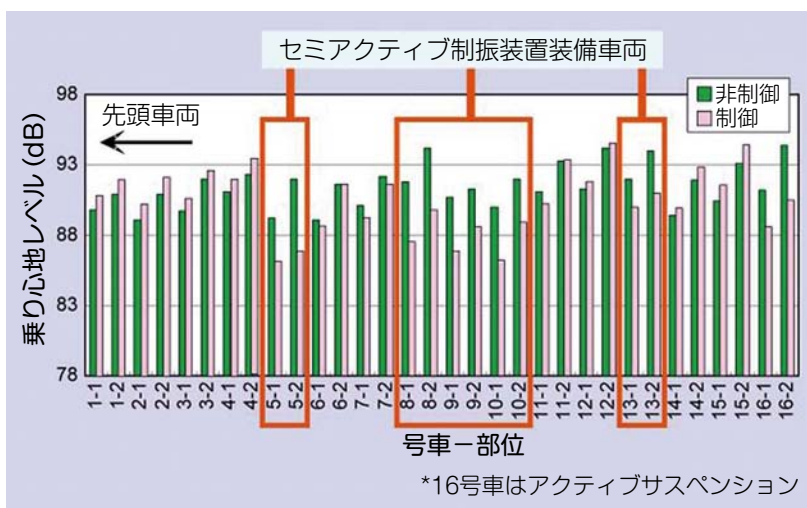


図5 走行試験結果 (300km/hトンネル内走行)

タイプ方式でも近似的なスカイフック制御を実現できます。このとき、ダンパーの減衰力は櫛の歯のように間欠的に発生することになりますが、平均減衰力はスカイフックダンパーの発生力(車体振動速度に比例)に近くなります。

また、櫛の歯の抜けている部分の力は見掛け上負の減衰力として作用する分、うまく使えば台車からの振動の絶縁に非常に有効ですが、反面、制御の安定性を下げる作用があり、異常時の安定性の保証が難しくなります。これに対してセミアクティブ方式はこの部分の減衰力が発生しない(できない)という特徴を持ちます。また、装置に不具合が発生した場合に、電源を切るだけで通常のダンパーと同特性になるフェールセーフな油圧回路の構成が可能です。

以上の検討から、次のような制振システムの構造を提案しました。

- ①車体に設置した加速度センサーを用いてスカイフック制御を行う。
- ②減衰力の方向を电磁弁で選択し、不要な方向の力を逃がす油圧回路とする。
- ③高速电磁弁で絞りの組み合わせを変え、変位センサーで測定した現在の伸縮速度に対して最もスカイ

フックダンパーに近い減衰力になるように制御する。

- ④電源オフで閉じる电磁弁と開く电磁弁を組み合わせ、電源を切ると通常のダンパーに近い減衰力特性になるフェールセーフな油圧回路を構成する。

図4に開発した可変減衰ダンパーの構成を示します<sup>2)</sup>。ダンパーは伸縮動作によってシリンダーから押し出された作動油が、絞りを流れるときの抵抗で減衰力を発生する構造です。本ダンパーは赤枠の中のように絞りを複数個用意しておき、电磁弁で切り替えることにより、スカイフックダンパーに最も近い減衰力を発生する組み合わせを選択します。また、青い枠の2個の电磁弁は、ダンパーがそれぞれ伸び方向または縮み方向に動く時の減衰力を逃がす役をし、車体の振動速度の正負に応じて対応する电磁弁を開いてやれば、図3のような減衰力を選択動作が自動的に実現されます。

開発にあたり、油圧機器メーカーに協力をお願いしましたが、開発期間短縮のため、メーカーにはダンパーの開発に専念してもらい、制御装置・プログラムは鉄道総研が開発して、最後に組み合わせることにしました。

組み合わせ調整はメーカーの研究所で行いましたが、何日も泊まり込んでの作業となってしまいました。鉄道総研の作業服を着て、真夜中に一人で作業している私を見て、巡回の警備員が怪訝な顔をしていたのを覚えています。ようやく完成した機材を走行試験先にトラックで送ったところ、運転手が道を間違えてしまい、機材が届かずに走行試験ができなくなるのではないかと関係者一同で肝を冷やす事件もありました。

トンネル内における走行試験結果の例を図5に示します。制振装置を取り付けた車両では乗り心地が大きく改善されています。

開発中のトラブルは数え切れないほどありましたが、関係者一丸となっての人海戦術が功を奏し、期待通りの性能が得られた時には、本当にホッとしました。この装置は500系新幹線車両や700系新幹線車両に採用され、営業列車では世界初の振動制御システムとなりました。

## 第二世代装置 (比例弁方式) の開発

上記のシステムが軌道に乗ってくると、普及拡大のため、性能を落とさず

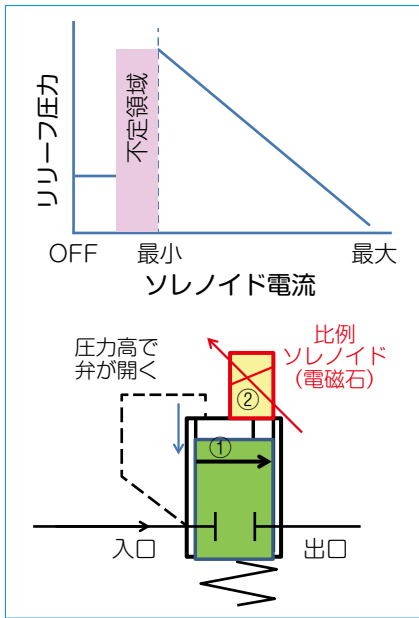


図6 電磁比例リリース弁の仕組みと特性

に低コスト化することが必要になってきました。このため、第一世代では開発期間の制約から取り組めなかった新機軸を取り入れ、コストパフォーマンスを大きく改善する第二世代システムの開発に取り組みました<sup>3)</sup>。

第一世代に対する大きな改良点は次の通りです。

#### ①可変減衰ダンパー

第一世代ではダンパーの伸縮速度に対応して電磁弁で絞りの組み合わせを変えて減衰力を制御していました。これに対して、第二世代では「電磁比例リリース弁」という弁を開発し、可変減衰ダンパーの構造を大幅に単純化しました。

リリース弁は図6下のように、常時は弁体(緑の部分)がばねで押し上げられ、入口と出口の間をふさいでいますが、入口側の圧力がばねと反対側に導かれており、入口側の圧力が大きくなると、ばねに打ち勝って弁体を押し下げ、ポート①が入口-出口間を接続して入口の圧力を逃がす構造の弁です。電磁比例リリース弁はこれに同図赤部分のように電磁石②を付加し、

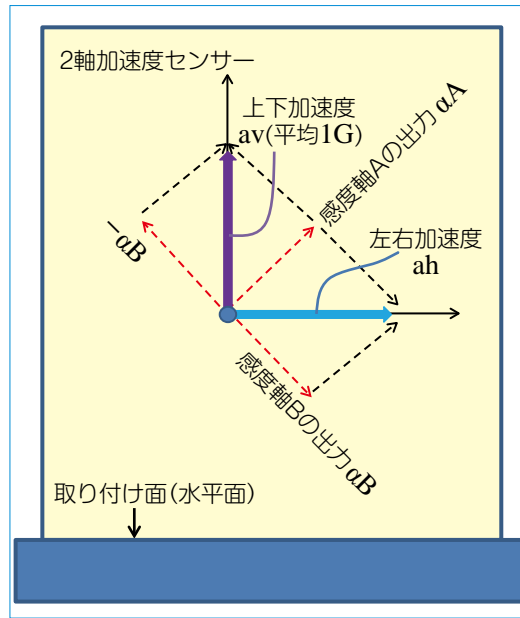


図7 加速度センサーの故障検知の原理

弁が開く圧力を電气的に変えられるようにしたものです。この弁を用いると同図上のようにダンパーの伸縮速度と無関係に減衰力の大きさを電磁石の電流で直接制御できるので、非常にシンプルな構成にすることができます。ただし、この弁はフェールセーフの観点から電源オフ時には通常のダンパーと同じ減衰力特性にする必要があるほか、通常のダンパーより大きな減衰力も小さな減衰力も両方発生できなければなりません。また、応答速度が性能に直結します。このような弁は世の中になく、この弁の開発が第二世代装置の要でした。

#### ②加速度センサー

加速度センサーが故障すると、車体が揺れていないと判断され、減衰力を発生しないため、大きな揺れを起こす危険性のあることが、第一世代装置の検討で判明していました。このため、第一世代装置では高価ですが故障検知が可能なサーボ型加速度センサーを採用しました。これに対して、第二世代装置では精度が若干下がりますが、図7のように感度軸が2つある低コス

トの加速度センサーを用いました。このセンサーを水平面に対して45度傾けて取り付けると、2つの出力の和で左右加速度を、差で上下加速度を検知できます。上下加速度の平均値は一定(1G:重力加速度)ですが、どちらかの出力が故障すると1Gにならなくなり、左右加速度も信用できなくなっていることが検知できます。

このほかにも制御装置のワンボード化などの設計の合理化を進め、第一世代と比べて、性能を下げずにコストを60%程度に抑えることがで

きました。この形式は現在も多くの新幹線車両・在来線車両で利用されています。

#### おわりに

最初の走行試験を行った試作機は、設計から基板製作・プログラムまで試行錯誤しながら手作りしました。開発から約20年の年月が流れ、このようなスタイルの仕事も昔話になりつつありますが、本装置の開発は私にとっては厳しくもあり、技術の面白さに目覚めさせてもらった仕事でもありました。知恵を絞って工夫したことが現実化していく楽しさを多少なりとも感じていただけたら望外の喜びです。RRR

#### 文献

- 1) 佐々木君章：新幹線のさらなる高速化をめざして、RRR, Vol.72, No.3, pp.4-7, 2015
- 2) 佐々木君章, 鴨下庄吾：鉄道車両用セミアクティブサスペンション, 鉄道総研報告, Vol.10, No.5, pp.25-30, 1996
- 3) 佐々木君章：新幹線用低コスト型セミアクティブサスペンションの開発, JRIL2001, 電気学会, 2001