

# アクティブマスダンパを用いた車体弾性振動低減法

車両構造技術研究部 車両振動研究室

研究員 秋山 裕喜

## 1. はじめに

鉄道車両の車体は人間が上下振動加速度に比較的敏感とされる周波数である 10Hz 前後に複数の弾性振動の固有振動モードを持ち<sup>(1)</sup>、それらが乗り心地に影響を与えていることが知られている。筆者らは、車体にばね支持された錘（以下、振動体）を付加して、それをアクチュエータで加振するときの慣性反力を用いて制振するアクティブマスダンパ（AMD）を 2 台用いて複数モードの車体弾性振動を同時に低減する手法を提案し、実用的な装置の開発に取り組んできた<sup>(2)</sup>。本稿では、開発した AMD による多モード制振効果を確認するために実施した車両試験台での定置加振試験と、本システムによる乗り心地向上効果を実証するために実施した本線走行試験の結果について紹介する。

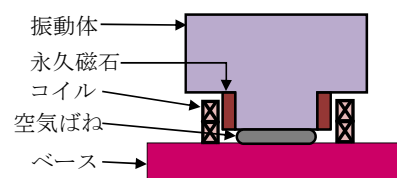
## 2. AMD の概要

開発した AMD の外観と概略図を図 1 に示す。この装置は空気ばねで支持された振動体とそれを上下に駆動するための永久磁石を用いたリニアアクチュエータで構成されている。振動体の質量は 58kg、総質量 70kg であり、高さは 226mm である。今回はこの装置を 2 台用いて多モード制振を行った。

AMD を制御するための機器の構成を図 2 に示す。車体床面に設置した加速度センサからセンサアンプ、アンチエイリアスフィルタ、AD 変換ボードを通してデジタル信号としてデジタルシグナルプロセッサ (DSP) に加速度信号を入力する。DSP では制御指令用 PC で生成した制御則に従い制御信号を生成し、DSP の DA 変換ボードでアナログ信号に変換し、AMD のドライバを通じて 2 台の AMD に指令を入力する。



(a) 外観



(b) 概略図

図 1 AMD の外観と概略図

## 3. 車両試験台試験

### 3.1 試験概要

開発した AMD による多モード制振効果を確認するために、車両試験台における定置加振試験を実施した。供試車両は図 3 に示す新幹線形試験車両とした。この車両はアルミニウム合金製のダブルスキン構体をもつほか営業で用いられるものとほぼ同等の車体構造を

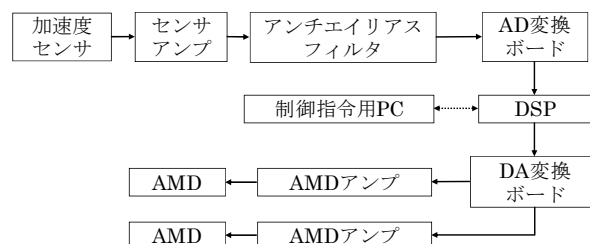
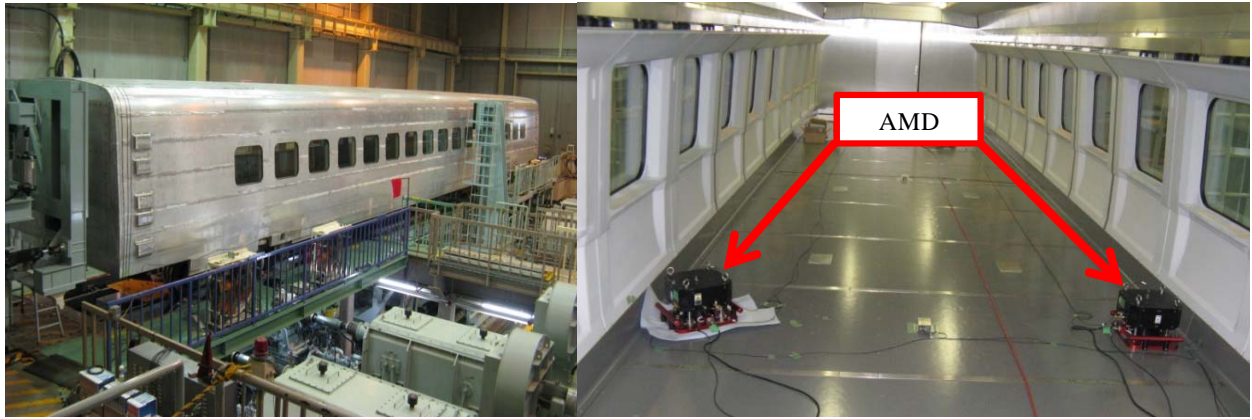


図 2 制御機器の構成



(a) 新幹線形試験車両

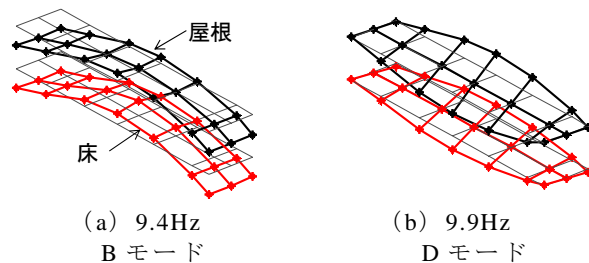
(b) AMD 設置状況

図3 車両試験台における定置加振試験の様子

有しており、床・天井・側の内装パネルも設置されている。ただし、腰掛けは省略されており、床下機器はデッドウェイトで模擬している。

後述する四軸同相加振を行った時に、車体床面加速度のパワースペクトル密度 (PSD) に顕著なピークが見られた供試車両の振動モード形状と固有振動数を図4示す。以下、はりの一次曲げ振動に近い形状で振動する 9.4Hz のモードを B モード (Bending mode), 車体断面がせん断変形を伴う 9.9Hz のモードを D モード (Diagonal distortion mode) と呼ぶこととし、これら2つを AMD による多モード制振の対象とする。

AMD は対象とする弾性振動の腹にあたる場所に設置することで最大の制振効果が期待できる。そこで図5に示すように、BモードとDモードのいずれについても振動の腹となる、車体長手方向中央の左右側寄り (窓直下) に振り分けて設置した。また、加速度の測定点は図5に示す床面21点とした。加振条件は車体の固有振動モードに対応した加速度 PSD のピークが顕著に見られるように全ての輪軸を上下とロール方向に同位相で加振する四軸同相加振とした。加振信号は2~30Hz のバンドパスフィルタを通したランダム波を用いた。



(a) 9.4Hz Bモード

(b) 9.9Hz Dモード

図4 新幹線形試験車両の振動モード形状と固有振動数

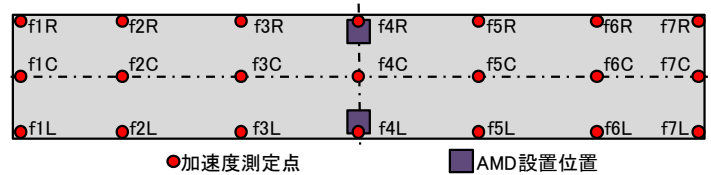


図5 加速度測定点とAMD設置位置 (車両試験台試験)

### 3.2 制御則

AMD の制御則は加速度 PSD のピークを抑える減衰付与効果を期待できる速度フィードバック制御とし、床面4点 (図5の f1C, f4R, f4L, f7C) の測定点で測定された加速度 (それぞれ, A\_f1C, A\_f4R, A\_f4L, A\_f7C と記述する) を入力として用いた。制御則のブロック線図を図6に示す。空間的な特性を用いて測定された加速度から BモードとDモードの成分を分離する信

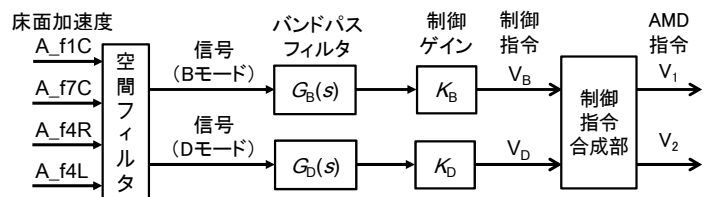


図6 制御則のブロック線図

号処理（以下、空間フィルタ）を行いそれぞれのモードに対する制御信号（ $A_B$ ,  $A_D$ ）を生成する。次に、速度フィードバック制御を行うための積分器と、バンドパスフィルタ（ $G_B$ ,  $G_D$ ）を通し、制御ゲイン（ $K_B$ ,  $K_D$ ）をかけて制御指令信号（ $V_B$ ,  $V_D$ ）を生成した。ここで、 $G_B$ ,  $G_D$  は制御対象外の低周波と高周波の影響低減に加えて、制御対象周波数で制御信号から AMD により車体床面に加えられる力に比例すると考えられる振動体の加速度までの位相を補正する役割を担っている。そして、それらの信号を制御指令合成部で合成して AMD 指令信号を生成し、2 台の AMD に入力した。

### 3.3 試験結果

床面の測定点の中から、加速度 PSD に B モードと D モードに対応したピークが顕著に見られた測定点の加速度 PSD を図 7 に示す。この図から制御なしのとき f2C では 9.4Hz に、f4L では 9.9Hz に加速度 PSD のピークが見られる。これらのピークはそれぞれ B モードと D モードに対応しているが、制御することでそれぞれ 58%、90% 低減されている。以上の結果から、開発した AMD によって B モードと D モードに対する制振効果が確認できた。

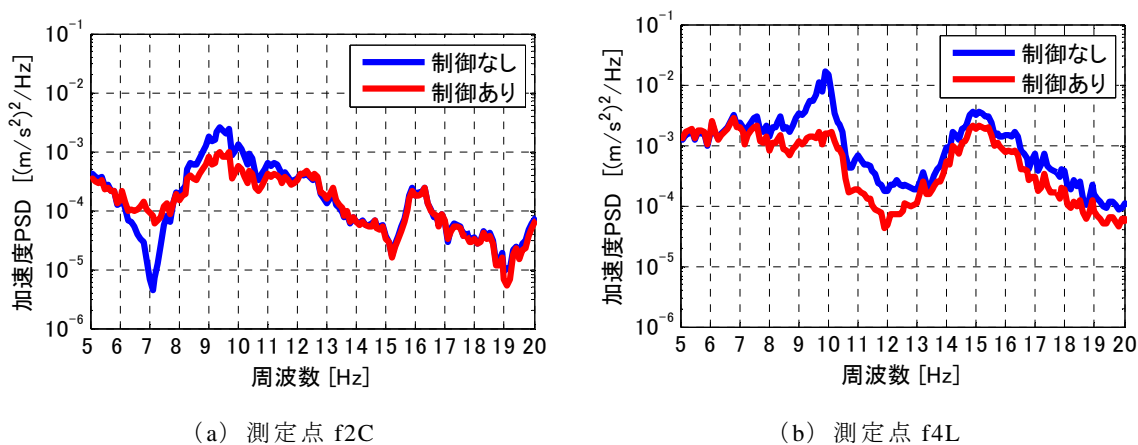


図 7 加速度 PSD の比較結果（車両試験台における四軸同相加振）

## 4. 本線走行試験

### 4.1 試験概要

AMD を用いた多モード制振による実走行時の振動乗り心地向上効果を調べるため、新幹線車両で本線走行試験を実施した。なお、この車両は前述の試験車両とは異なる車両である。制御なしと制御ありで同一の区間（約 100km）を走行速度一定（約 320km/h）で走行し、車体床面の加速度を測定した。制御則と床面の振動加速度測定点は前章で述べた車両試験台における試験と同様とした。また、AMD の設置位置もほぼ同様の位置としている。

B モードと D モードに対応した加速度 PSD のピークが顕著に見られた測定点 f4C と f4L の加速度 PSD を図 8 に示す。凡例の  $\Delta L_T$  は鉄道の乗り心地評価に一般的に用いられる乗り心地レベル ( $L_T$ ) の制御有無の差（制御ありの  $L_T$  - 制御なしの  $L_T$ ）で、数値が小さいほど乗り心地が向上したことを表す。ここでは、 $\Delta L_T$  が -1.0dB のとき、乗り心地向上効果は 1.0dB であるとする。

床面全体の加速度 PSD の結果から B モードの形状に対応するピークが 11Hz、D モードの形状に対応するピークが 12Hz に存在しており、これらを対象として AMD による多モード制振を行った。なお、1Hz 付近の加速度 PSD のピークは空気ばねにより支持された車体が剛体として上下に

振動するモードに対応しており，17Hz 付近のピークは軌道から受ける強制加振によるものである。今回これらのピークについては制振対象としていない。

#### 4・2 試験結果

図 8 (a) から AMD による制御を行うことで，f4C では 11Hz に顕著に見られる B モードに対応した加速度 PSD のピークが 71% 低減されていることがわかる。また，図 8 (b) に示すように f4L では制御を行うことで 12Hz に顕著に見られる D モードのピークを 79% 低減できた。この結果から AMD による多モード制振が実走行時でも有効であることが確認できた。また，このときの乗り心地向上効果は f4C で 1.3dB，f4L で 1.0dB であった。今回の結果では  $L_T$  の差は小さいが，これは対象としていない低周波の成分が大きいことが要因である。以上の結果から，AMD を用いた多モード制振によって実走行時に振動乗り心地向上効果が得られることがわかった。

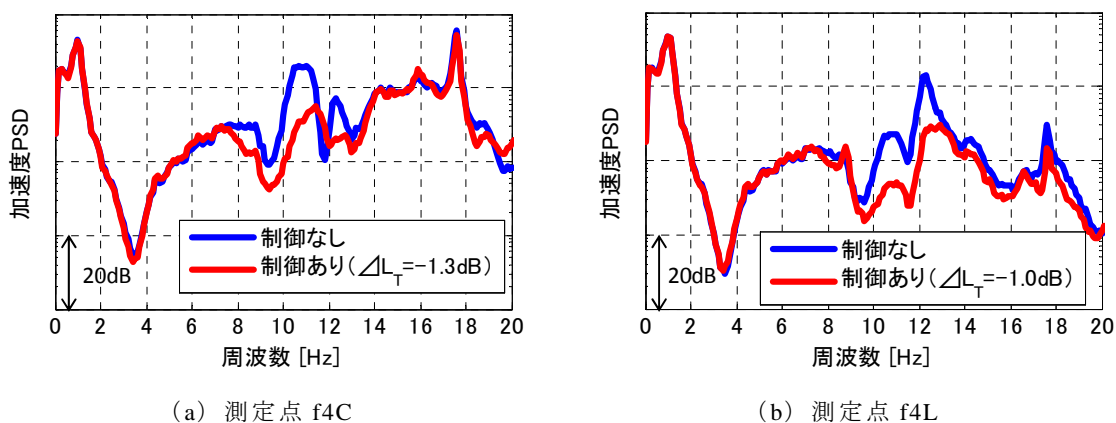


図 8 加速度 PSD の比較結果（本線走行試験）

#### 5. まとめ

新幹線形試験車両による車両試験台における加振試験，新幹線車両による本線走行試験を実施して以下の知見を得た。

- (1) 車両試験台での加振試験を行い，開発した AMD を用いて B モードと D モードに対応した加速度 PSD のピークを低減できることを示した。
- (2) 本線走行試験を行い，実際の走行状態でも B モードと D モードに対応した加速度 PSD のピークを低減できること，それにより振動乗り心地向上効果が得られることを示した。

本稿では，新幹線車両での試験結果を報告したが，通勤形車両，特急車両でも車体弾性振動の低減が必要とされており，それらの車両に対しても AMD による多モード制振の有効性を確認している。今後は，さらに大きな乗り心地向上効果を得るための制御対象周波数の広帯域化について検討を行なっていく予定である。

#### 文献

- (1) 相田健一郎，富岡隆弘，瀧上唯夫，谷口広次，今岡憲彦，“様々な鉄道車両の車体固有振動モード特性の比較”，第 17 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2010) 講演論文集，pp. 325-328.
- (2) 秋山裕喜，富岡隆弘，瀧上唯夫，“車体弾性振動低減のためのアクティブマスダンパの開発”，鉄道総研報告，Vol.27，No.5，pp17-22，2013