

| |
|-------|
| 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 |

車内の振動を低減する

最近の鉄道車両は、これまで以上に高いレベルで車内快適性が求められるようになりました。車内快適性は、振動、騒音、温度、車窓の眺望、座席の座り心地などのさまざまな要因の影響を受けることが知られており、とくに車両の振動は車内快適性に大きな影響を与えます。そのため、これまでにさまざまな振動低減のための取り組みが行われてきました。ここでは、その一つである、車両側に制御技術を導入し車体の振動を低減する手法について、最近の研究開発事例から実用化されたものを中心に紹介します。



菅原 能生
Yoshiki Sugahara
車両構造技術研究部
走り装置研究室
主任研究員(上級)
【専門分野】制御技術とその応用



小島 崇
Takashi Kojima
車両構造技術研究部
走り装置研究室
副主任研究員
【専門分野】車両のダイナミクス・異常検知

はじめに

車両の振動は車内快適性に比較的大きな影響を与えることが以前より知られています¹⁾。したがって、これまでの鉄道の研究開発において、振動の低減は常に大きな課題のひとつでした。

車体側に搭載された回転機器(例えば、ディーゼルカーのエンジンなど)による上下振動や、車両の急な加減速などによる前後振動を除くと、車両の振動は、車両が地上設備側からなんらかの力を受けたことによるものがほとんどです。この振動を低減するための対策は、「走行する側」である車両での対策、および「支える側」である地上設備での対策、のそれぞれが考えられます。

ここでは、車両での対策、とくに制振制御技術を導入することによって大幅に振動を低減する技術について、導入の背景と最近の実用化事例を中心に紹介したいと思います。

高速化に伴う左右振動の増加

日本の新幹線は、1964年の開業当初は210km/hで営業運転が開始されましたが、2013年にはこれが320km/hに達するなど、開業当初よりはるかに

高速化が進みました。

一般に、車両の振動は走行速度が高くなるほど増加し、乗り心地が悪くなる傾向があります。高速化にあたり、乗り心地の観点で最も問題になったのは、トンネル内を高速で走行する際には、1~2Hzの左右振動が大きくなり、とくに最後尾車両で乗り心地が非常に悪くなるということでした。

通常、鉄道車両の振動の主な原因は、軌道の不整により台車が加振され、その振動が車体に伝わることにあります(図1)。それに対し、このトンネル内の振動は、高速でトンネル内を走行する際に、列車側面下部の空気の流れが乱れることにより発生する空気力が、車体を直接加振することが原因とわかりました(図1)²⁾。「支える側」である地上設備でこの振動を軽減するとしたら、トンネルを無くする(ないし非常に大きい断面のトンネルにする)くらいしか方法がありませんが、これは現実的ではありません。そこで、車両側で振動を低減する装置が新たに開発されました。

左右制振制御システムの構成

実用化されている左右制振制御シス

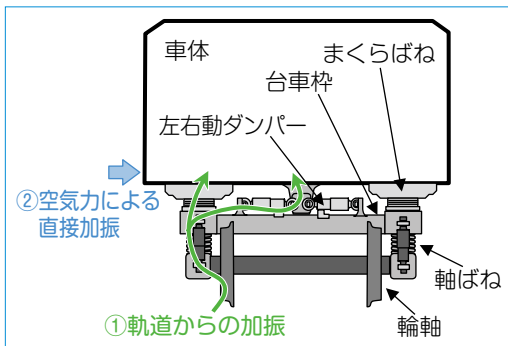


図1 左右振動が車体へ伝わる主な経路

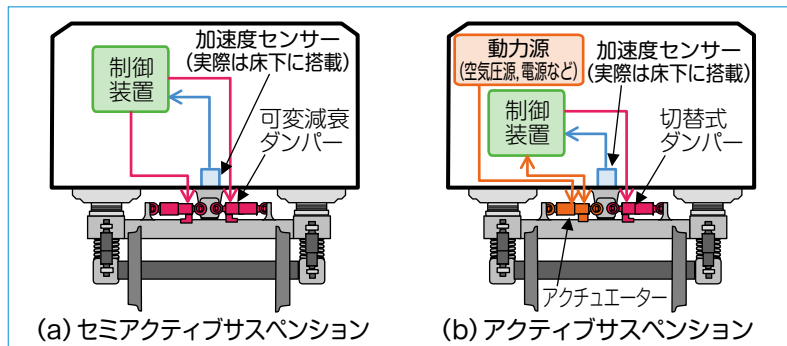


図2 左右の制振制御システムの構成例

テムの構成例を図2に示します。車体に搭載された加速度センサーで左右振動加速度を測定し、制振に必要な力を制御装置で計算します。そして、セミアクティブ方式(図2(a))の場合は可変減衰ダンパー(減衰力を電流値の大きさと制御できるダンパー)で、アクティブ方式(図2(b))の場合はアクチュエーター(電気、油圧、空気圧などのエネルギーを物理的運動に変換する装置)で力を発生させます。

ダンパーは、運動に対してあらがう力を出すことができますが、運動を助長する力を出すことができません。したがって、制振に必要な力が得られるかどうかは、その時のダンパーの伸縮するスピード、向き、指令力との関係に依存します。一方、アクチュエーターは、その性能の範囲内であれば任意の力を任意のタイミングで発生させることができます。そのため、アクチュエーターを用いるアクティブ方式の方が一般には制振性能が高くなります。

しかし、アクティブ方式の場合、アクチュエーターを動かすために、比較的容量の大きい動力源が必要になります。これに対し、セミアクティブ方式の場合は動力源を必要とせず、構成がシンプルになります。そのため、インシヤル・ランニングコストの面でアクティブ方式より有利です。

左右制振制御システムの実用化

最初の実用化例はセミアクティブ方

式で、JR西日本の500系新幹線電車で採用され、1997年に営業運転が開始されました。その後、新幹線電車で幅広く採用されています³⁾。

アクティブ方式は、2001年に営業運転を開始したJR東日本のE2系新幹線電車(1000番代)のグリーン車と先頭車で採用されました⁴⁾。この空気圧アクチュエーター方式のアクティブサスペンションは、空気消費量の関係から、編成の全号車に搭載することは困難でした。また、2編成を併結して走行する新幹線電車では(例えば図3)、併結部の後方車両で左右振動が大きくなることもあり、これらの制振には応答性と発生力がより高い方が有利です。

そこで、空気圧ではなくモーターとローラースクリューを用い、応答性・発生力がともに高い電動式のアクチュエーターを用いたアクティブサスペンションが開発されました⁵⁾。このシステムは、320km/hで営業運転を開始したJR東日本のE5・E6系新幹線電車(図3)の全車両に搭載されています。

新幹線電車での実績をふまえ、同様の技術が在来線車両にも適用されるようになりました。とくに、近畿日本鉄道の50000系電車「しまかぜ」では、空気圧縮機の増強と、空気消費量を低減したシステムの採用により、全ての



図3 電動機械式左右アクティブサスペンション搭載車両例:JR東日本E6系(前方)・E5系(後方)【写真提供:JR東日本】

車両への左右アクティブサスペンション搭載を実現しています。

ローカル線に優等列車が走る

当初、制御による振動低減策が取り入れられたのは、これまで紹介したように、主に主要都市を結ぶ新幹線ないし在来線の幹線を高速走行する列車のみでした。しかし、ここ数年で異なる事例がみられるようになりました。

最近になって、観光特急列車やクルーズトレインなどと称される、「乗ること自体が旅行の目的となるような優等列車」が目目されるようになってきました。このような列車は、観光名所を目的地とすることが多く、走行ルートが幹線だけではなく、ローカル線に至ることも少なくありません。

車両の振動は、走行する区間の軌道状態によって異なります。具体例として、在来線を走行したときの車両の上下・左右振動の実波形を図4に示します。図4(a)は特急が比較的頻繁に運

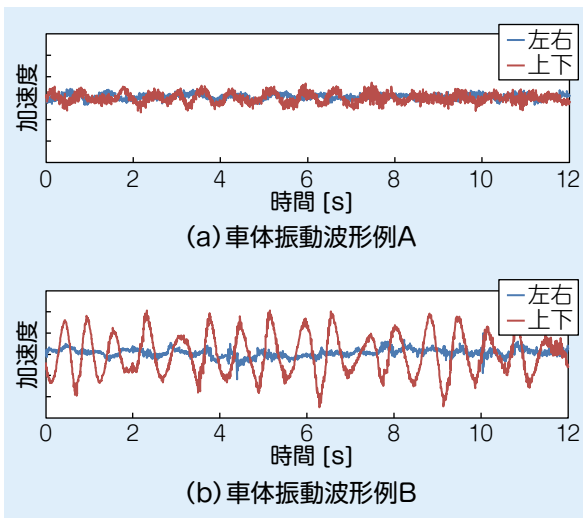


図4 走行する区間による車両振動の相違

行されている区間を速度105km/hで走行した場合、図4 (b) は図4 (a) の区間よりも輸送密度が低い区間を速度60km/hで走行した場合です。両者を比較すると、図4 (b) の方が低速で走行しているにもかかわらず、上下方向の振動が大きいことがわかります。

この上下振動の原因は、図5に示すようなレールの“継目落ち”と呼ばれる現象によるものです。“継目落ち”は、道床の支持力が低下し、周囲に比べて沈下した状態になるものです。このような軌道上を列車が走行すると、継目を通過するたびに上下に加振され、車両が上下に振動する原因になります。

車両を「支える側」である軌道の工事を行ってこの“継目落ち”を無くすことにより、車両の振動を軽減することができます。しかし、工事には多額のコストがかかることが多く、本数の少ない優等列車のためだけにそのような工事を行うことは一般には困難です。そこで、車両側に新たな対策を導入し、上下振動を低減する取り組みが行われるようになりました。

上下制振制御システムの構成

このような上下振動を車両側で軽減するために開発されたのが、可変減衰上下動ダンパーを用いた制振制御システムです⁶⁾(図6)。

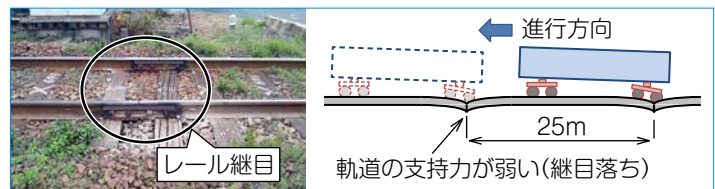


図5 レールの継目落ち

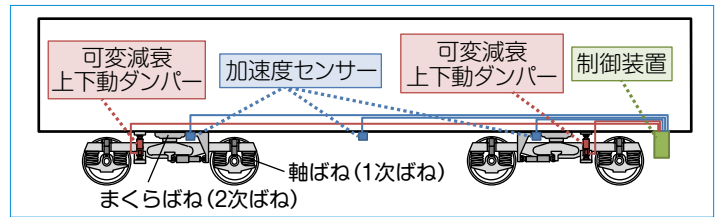


図6 上下制振制御システムの全体構成

車体と台車の間に設けられたまくらばね(2次ばね)と並列に、可変減衰ダンパーを取り付け、車体に取り付けた加速度センサーからの情報に基づいて、

この力を制御して車体の振動を低減するシステムです⁷⁾。

上下振動の原因は、ほぼ軌道側からの加振によるものです。ただ、その加振には左右と比べて高周波成分が多く含まれ、振幅も大きいため、ダンパーなどの制御系の応答が遅いと高周波振動が増加し、“ゴツゴツ”した感じになってしまいます。また、上下方向は車体の変形を伴う振動(弾性振動)が発生しやすく、その振動は人間が敏感に感じる周波数(4~8Hz)に近いことが多いため、このような振動への対策も必要になるなど、左右系とは異なる難しさがあります。

開発した可変減衰上下動ダンパーの例を図7に示します。比較的古いタイプの車両では、車体を支えるまくらばねとしてコイルばねが用いられている車両があり、その車両向けのものが図7 (a)、空気ばねが用いられている

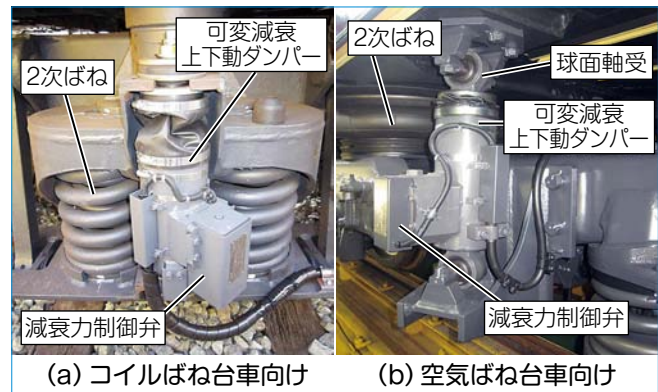


図7 可変減衰上下動ダンパー

最近の車両向けのものが図7 (b) です。いずれの可変減衰上下動ダンパーも、減衰力を制御する弁がダンパーに取り付けられていて、制御装置から供給される電流の大きさに応じて、減衰力を制御できるようになっています。両者の主な違いは、台車構造の相違に対応して取付部の構造を変更していること、および比較的新しい空気ばね車両向けの方が減衰力の制御性能(応答性)を向上している点です。

加速度センサーは、図8 (a) に示すように、車体の床下に取り付けます。車両に取り付ける位置はさまざまなパターンが考えられますが、現状は図8 (b) に示す2パターンのいずれかです。図8 (b) (1) は、車体の剛体振動(車体の上下並進、ピッチング、ローリング振動)⁸⁾のみを対象とした場合、図8 (b) (2) はこれらに加えて車体の1次曲げ振動⁸⁾も対象に加えた場合です。

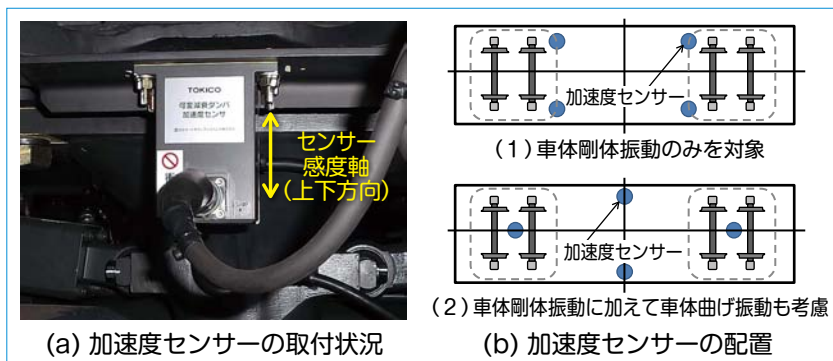


図8 加速度センサーとその配置

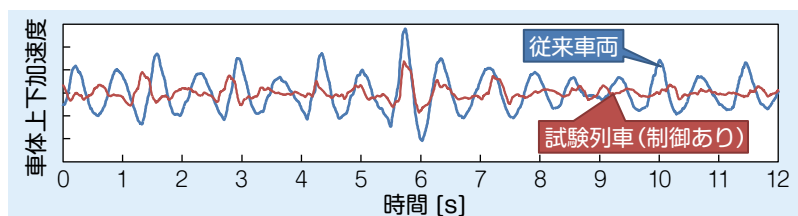


図9 車両の上下振動低減効果例(在来線走行試験結果, 速度60km/h)



図10 上下制振制御システム搭載車両例
JR九州「指宿のたまて箱」(左), 「ななつ星in九州」(右)
【写真提供: JR九州】

いずれの配置にするのかは、対象車両の振動状況によります。

在来線での走行試験結果例を図9に示します。従来車両に対し、試験車両では可変減衰上下動ダンパーを導入するとともに、その効果が最大限に発揮されるように空気ばねの上下剛性と減衰作用を極力抑えています。その結果、車体の上下振動加速度は従来車両の約半分に低減されました。

上下制振制御システムの実用化

上下制振制御システムが最初に実用化されたのは、JR九州の観光特急列車「指宿のたまて箱」(図10)で、2011年3月から営業運転が開始されました。可変減衰上下動ダンパーは

図7(a)が、センサー配置は図8(b)(1)が用いられています。その後、同じくJR九州の観光特急列車「はやとの風」や「^あ或る列車」(1号車)に本システムが採用されています。

また、2014年10月から営業運転を開始したJR九州のクルーズトレイン「ななつ星in九州」(図10)には、全客車にこのシステムが採用されています。ここでは、図7(b)のダンパー、図8(b)(2)のセンサー配置が用いられています。いずれも、車両が上下方向に揺れやすい走行区間の乗り心地向上に貢献しています。

おわりに

車内の振動を低減するための手法の

うち、とくに車両側に制御技術を導入した事例について紹介しました。

制振制御システムの導入の過程を振り返ってみると、それぞれのケースについて車両側に振動低減対策を導入する合理的な理由があることがわかります。今後、振動制御システムの低コスト化が進むと、さらに導入の機会が増えるかもしれません。

また、新幹線電車にはまだ上下制振制御システムが導入されていません。今後、さらなる高速化や乗り心地の向上が求められた場合には、導入が検討されるかもしれません。鉄道総研ではメーカーと共同で新幹線向けの上下制振制御システムの検討を行っているほか、左右・上下の制振制御システム併用時の乗り心地評価に関する検討を始めています。[RRR]

文献

- 1) 鈴木浩明：車両の快適さを測る，RRR, Vol.73, No.4, pp.4-7, 2016
- 2) 鈴木昌弘：トンネル内走行時の車両に加わる空気力，鉄道総研報告, vol.14, No.9, pp.37-43, 2000
- 3) 佐々木君章：車両の揺れを賢く押さえるーセミアクティブサスペンションー，RRR, Vol.60, No.2, pp.6-9, 2003
- 4) 遠藤知幸ほか：JR東日本E2系・E3系フルアクティブサスペンションの概要，R&M, Vol.11, No.2, pp.18-21, 2003
- 5) 名倉宏明：新日鐵住金におけるフルアクティブサスペンション技術最近の動向，鉄道車両と技術, 202, pp.7-12, 2013
- 6) 菅原能生：油圧ダンパを用いた鉄道車両用上下制振システムの開発，計測と制御, Vol.54, No.9, pp.668-671, 2015
- 7) 菅原能生ほか：輸送密度の低い線区を走行する車両の上下乗り心地を向上する，RRR, Vol.67, No.12, pp.12-15, 2010
- 8) 佐々木君章ほか：振動制御による乗り心地向上，RRR, Vol.62, No.12, pp.18-21, 2005