

車両が揺れる原因を探り対策する



菅原 能生
Yoshiki Sugahara
車両技術研究部
車両振動研究室
特別研究員



中出 孝次
Koji Nakade
鉄道力学研究部
計算力学研究室長



松本 麻美
Mami Matsumoto
軌道技術研究部
軌道管理研究室
主任研究員

はじめに

交通機関を利用するときに、「できるだけ振動(揺れ)が少ない快適な環境で移動したい」と誰でも考えると思います。特に高速かつ長距離(長時間)の移動を伴う新幹線や、クルーズトレインや観光特急列車など「移動を楽しむ」列車を利用する際には、その期待はさらに高まって不思議ではありません。この期待に応えるため、車両に制振制御システムが搭載されるケースがあります。本記事では、制振制御システムが導入されるきっかけになった車両の振動

について、その原因と対策を紹介したいと思います。

トンネル走行時の高速列車の振動の原因と対策

振動の原因

1986年の東海道・山陽新幹線の速度向上にともない車両の左右動揺が増加し、**乗り心地**[®]向上が求められるようになりました。新幹線(0系・100系など)を対象に車体の左右振動加速度を測定した結果、トンネル区間では明かり区間より動揺が大きく、特に後尾車両で顕著であることが明らかになりました。この周波数は列車速度に依存し、速度300km/hでは約2Hzになることが後の走行試験結果でわかりました。

トンネル区間での車両動揺の要因として、「**軌道変位**[®]」と「空気力」が検討され、軌道変位との相関は明かり区間で高い一方、トンネル区間では低く、主因ではないことが示されました。これに対し、空気力との相関はトンネル区間で高く、車両側面に作用する空気力が車両動揺の主因であることが判明しました。

車体側面に加わる変動空気力を調べるために、さまざまな新幹線車両を用いた走行試験が10年以上にわたり実施され、トンネル壁近接側の

乗り心地

「乗り心地」とは、「走行中の車両に乗客が乗った際のあらゆる感覚によって支配される快適さ」とされています。本記事では、主に「振動」に起因する快-不快の感覚を指すものとします(「振動乗り心地」と呼ばれます)。人間の振動の感じやすさには周波数依存性があることが知られています。日本では、この周波数特性を考慮する際、「乗り心地フィルター」と呼ばれる周波数重み関数を用いるケースが多いです。左右方向では2Hzより低い周波数帯、上下方向では4~8Hzの周波数帯の重みが最も大きく、この周波数帯、ないしその近傍の振動が顕著になると、乗り心地が良くないと感じやすくなります。

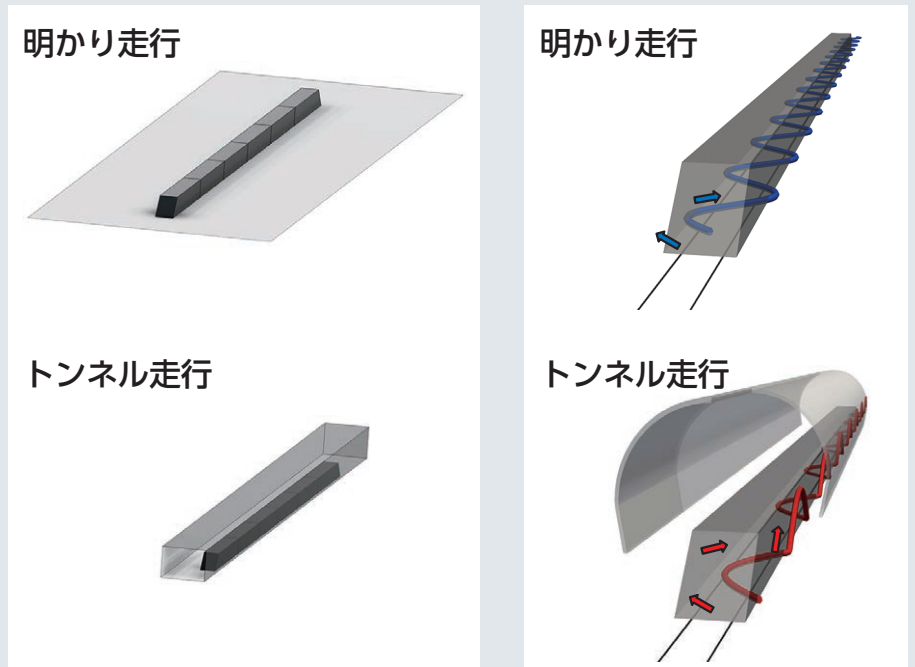
軌道変位

レールの長手方向や左右方向の形状の変化によって生じる歪みの大きさを軌道変位といいます。軌道変位が大きくなると、列車の円滑な走行が阻害され、乗り心地の悪化や安全性の低下につながります。

車体側面には大きな圧力変動が生じること、およびその特性が走行試験で明らかになりました。この圧力変動の発生メカニズムはスーパーコンピュータを用いた大規模数値シミュレーションによって解明されました(図1)¹⁾²⁾。明かり走行時には車両床下で左右方向の蛇行流れが生じること、トンネル走行時には車両床下の蛇行流れがトンネル壁近接側の車両側面にまで拡がること、そして、この蛇行流れによって圧力変動が生じることが明らかになりました。なお、流体シミュレーションによって示唆された蛇行流れの存在は風洞実験および走行試験によって検証されました。

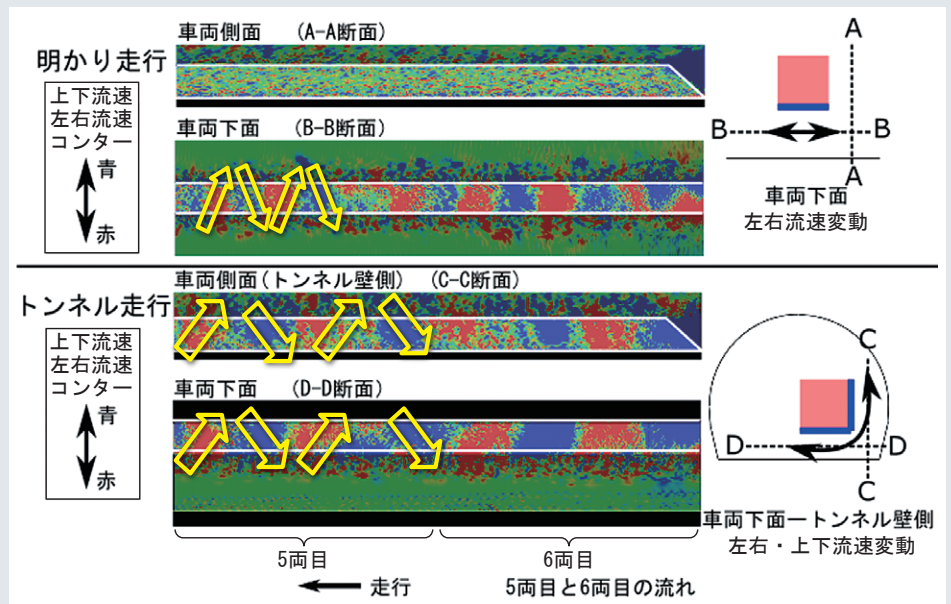
振動低減策の導入

トンネル区間での車両動揺の低減には、地上設備側ないし車両側での対策が考えられます。前者として、例えばトンネル断面を十分拡大してトンネル壁面から車両までの距離を離して空気力による影響を軽減する方法が考えられますが、費用面で現実的とは言えません。車両側での振動低減策のうち最もシンプルな方法は、台車-車体間の左右動ダンパー^④の減衰を大きくして、車体の振動を



(a) 計算モデル(6両編成車両)

(c) 蛇行流れのイメージ

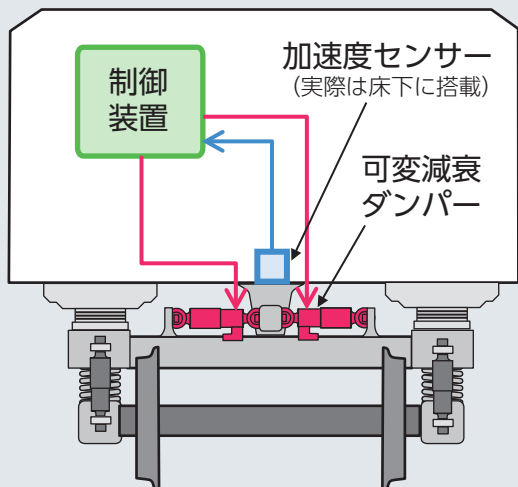


(b) 計算結果

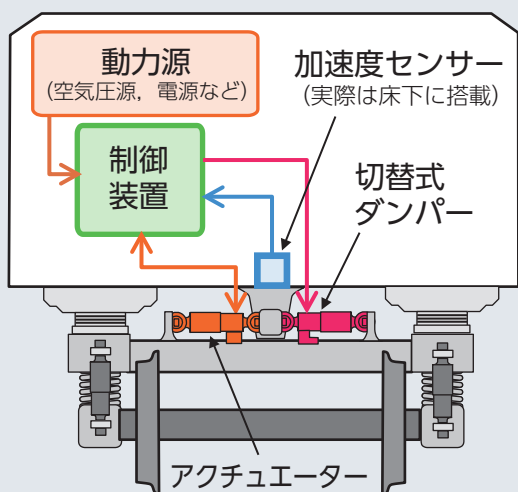
図1 流体シミュレーションによる変動空気力発生メカニズムの解明(蛇行流れ現象)¹⁾²⁾

④ 左右動ダンパー

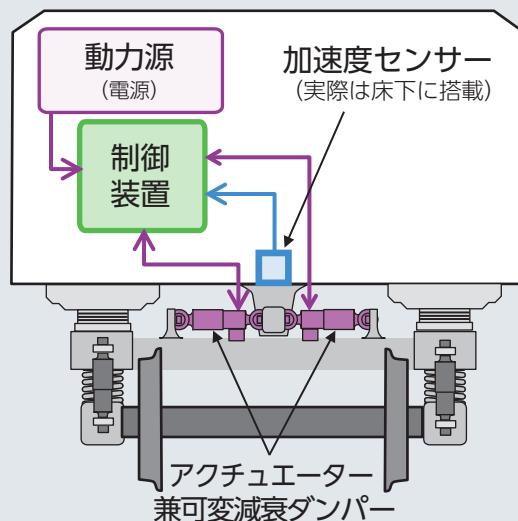
車体の左右振動を減衰させるために、車体と台車の間に左右方向に取り付けられているダンパーです。一般的にオイルダンパーが用いられ、一定レベルの車両の走行安定性や左右方向の振動乗り心地を確保するために重要な役割を果たします。



(a) セミアクティブサスペンション



(b) アクティブサスペンション
(空気圧式/電動機械式)



(c) アクティブサスペンション
(電動油圧式：アクチュエーター・ダンパー兼用)

減衰させることです。しかし、こうすると台車側の高い周波数の振動を車体に伝えやすくなってしまいます。そこで、車体に設置した左右加速度センサーなどの情報をもとに、台車-車体間に取り付けた可変減衰ダンパーやアクチュエーター^②の力を制御して車体の振動を抑制する「左右制振制御システム」(図2)が開発されました。最初に実用化されたのはセミアクティブサスペンション^③(図2(a))ですが³⁾、その後より高い制振効果が得られるアクティブサスペンション^④が開発・実用化されました⁴⁾(図2(b))。このシステムは、前述の空気

② 可変減衰ダンパーとアクチュエーター

制振制御システムにおいて、可変減衰ダンパーやアクチュエーターは、いずれも振動を抑制するための力を発生させるためのデバイスとして用いられますが、両者の働き方には差があります。可変減衰ダンパーは、外部から力を受けてダンパーが伸縮した際に、その動きを妨げる方向の力を発生し、その力の大きさを外部(通常は制御装置)からの指令で制御します。したがって、ダンパーは自発的に力を発生させることはできません。一方、アクチュエーターは、動力源からエネルギーの供給を受け、自ら力を発生させることができます。鉄道車両で用いられているアクチュエーターには、空気圧式、電動機械式(モーターのトルクを変換機構で推力に変換する)、電動油圧式の3種類があります。

③ セミアクティブサスペンションと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やアクティブサスペンションは、いずれも振動を抑制するためのシステムです。車体に振動を検出するセンサー(主に加速度センサーが使用される)を搭載し、それから得られる情報をもとにオンラインで制振に必要な力を計算し、制御デバイスに力を発するように指令します。両者の違いは制御デバイスの違いで、セミアクティブサスペンションの場合は可変減衰ダンパー、アクティブサスペンションの場合はアクチュエーターが用いられます。アクチュエーターを用いるアクティブサスペンションは、制御デバイスの伸縮方向によらず(定格性能内の)任意の力を任意のタイミングで発生できるため、一般的にセミアクティブサスペンションより制振性能が優れています。ただし、セミアクティブサスペンションに比べて、コストは高くなります。

図2 左右制振制御システムの主な構成例

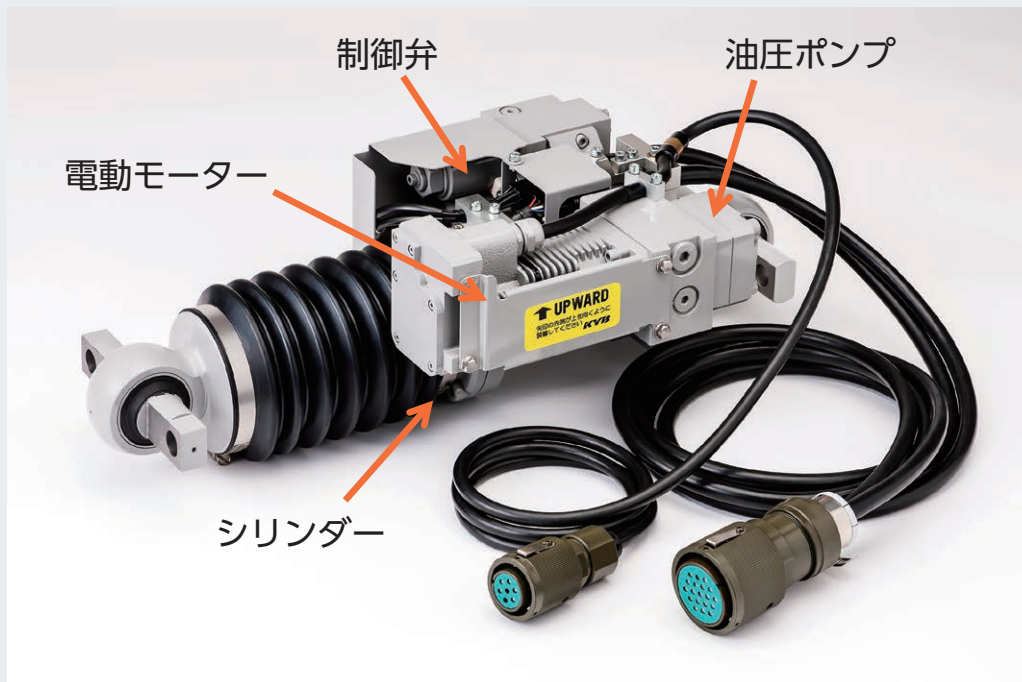


図3 電動油圧式左右アクティブサスペンションのアクチュエーター（写真提供：カヤバ株式会社）

力に起因する振動だけでなく、軌道変位に起因する振動の低減にも効果があります。最も新しい方式は、電動油圧式アクチュエーター（図3）を用いたアクティブサスペンション（図2(c)）です⁵⁾。このアクチュエーターは電源を切ると通常の油圧ダンパーと同様に機能し、電源を投入し制御を行うと油圧ポンプ・制御弁・シリンダーが一体となった電動アクチュエーターとして機能するため、1本で2つの役割を兼ねられます。小田急ロマンスカーやN700S新幹線電車などで使用されています⁵⁾⁶⁾。

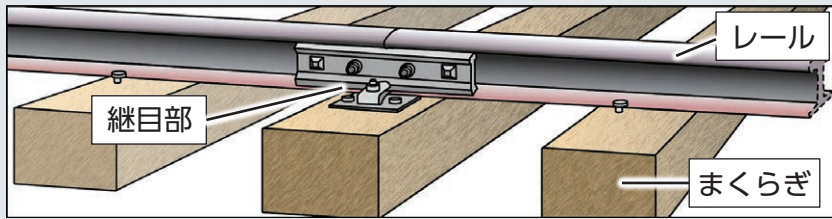
ローカル線における振動の原因と対策

振動の原因

在来線の多くは、レールとまくらぎの下に砂利を敷いた「バラスト軌道」を採用しており、この構造は全国の線路延長のおよそ84%を占めています⁷⁾。バラスト軌道は列車の繰り返し走行によって軌道変位が生じやすく、特にレールのつなぎ目である継目部では、図4(a)～(c)に示すように局所的にレールが沈下する「継目落ち」⁸⁾が生じます。継目はレールの一般的な

単位延長である25mごとに設置されているため（図4(d)）、電車の走行音が「ガタンゴトン」と表現されるのは、この継目部を列車が通過する際の衝撃音によるものと考えられます。

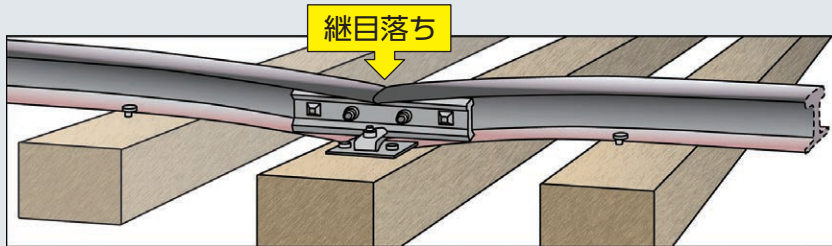
こうした大きな軌道変位は、列車走行時の振動を増大させると共に、車両や線路設備への負担を大きくします。またさらに軌道変位を悪化させ、列車の走行安全性にも影響を及ぼします。そこで鉄道事業者は、軌道変位に対して超えてはならない管理値を定め、限られた予算の中で保守を実施します。軌道保守には大きく「軌道変位保守」と「軌道材料保守」があります。軌道変位保守では、まくらぎ下にバラストを押し込んでレール位置を整える「つき固め」を、手作業またはMTT（マルチプルタイタンパー）と呼ばれる大型機械により行います。一方、つき固めだけでは解消できない継目落ちを根本的に解消するためには、レールや道床などの材料交換を行う必要があります。しかし、材料交換は軌道変位保守に比べて費用が高額で、実施にあたっては経済性の検討が欠かせません。特にローカル線では、利用者数や収入が少ないため、



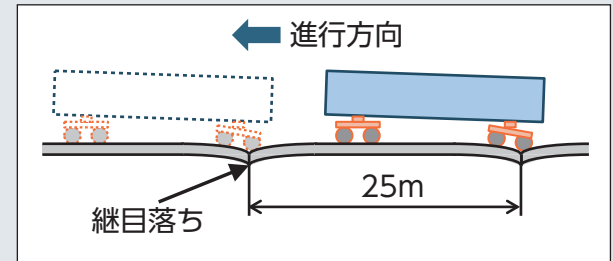
(a) 継目落ち発生前



(c) 継目落ちの例



(b) 継目落ち発生後



(d) 継目落ちの間隔

図4 レールの継目落ち

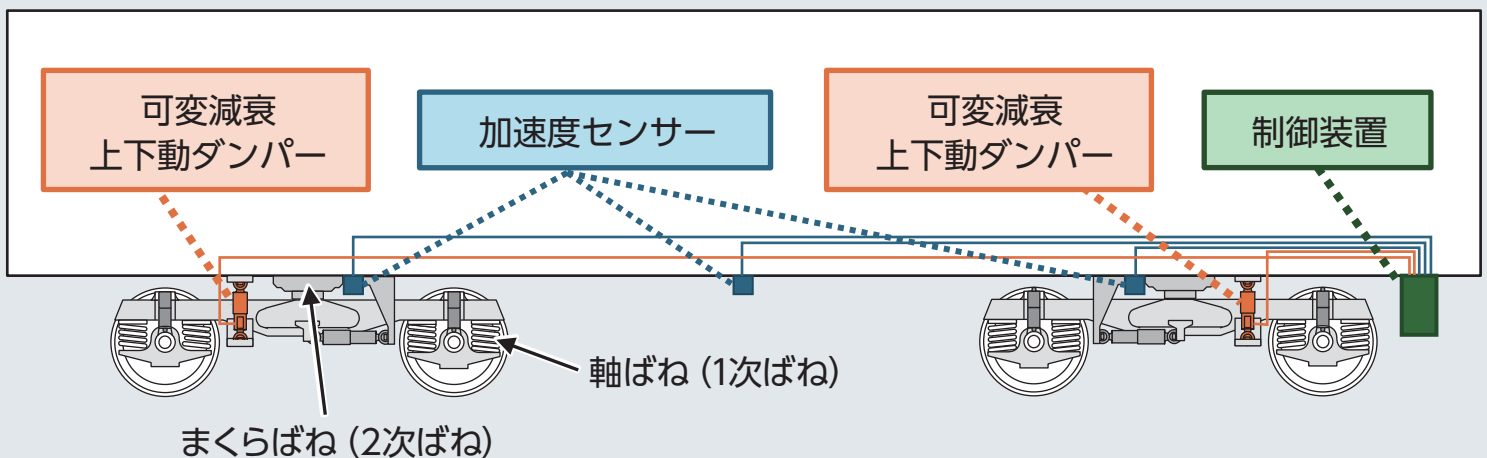
軌道保守に投入できる予算が限られてしまうのが現状です。

振動低減策の導入

継目落ちに起因する振動が車両側で発生したとしても、以前は許容されるケースがほとんどでした。しかし、2010年代になってローカル線に観光特急列車やクルーズトレインなどの付

加価値の高い列車を走らせるという、これまでにない取り組みが始まりました。これらの列車は、その性格上、走行線区によらず相応の乗り心地が求められるため、継目落ちに起因する振動をなんとかして低減する必要があります。しかし、1日(ないし週に)数本の列車のために高額な軌道保守費を投入することは現実的ではな

図5 上下制振制御システムの構成例 (セミアクティブサスペンションの場合)



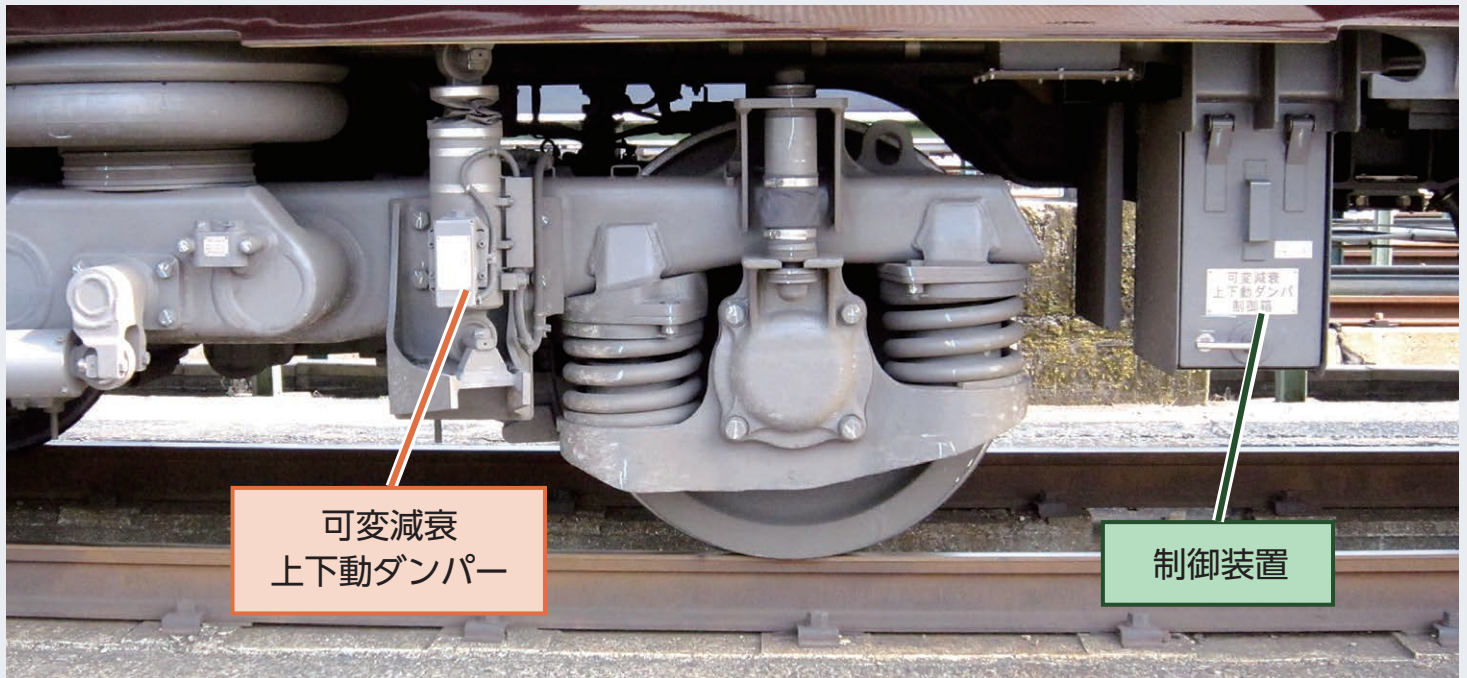


図6 上下セミアクティブサスペンションの搭載状況例 (JR九州 ななつ星in九州)

いため、車両側に制振制御システムを搭載して乗り心地を向上することになりました。現在実用化されている「上下制振制御システム」は図5に示すセミアクティブサスペンションのみで、その実例を図6に示します⁹⁾。左右方向の場合と同様に、車体に設置した加速度センサーの情報をもとに、車体一台車間に取り付けた可変減衰ダンパーの力を制御して、車体の振動を抑制します。

おわりに

本記事では、制振制御システムが導入された車両に注目して、車両振動の原因と、その対策である制振制御システムの導入事情について紹介しました。車両が揺れる原因にはさまざまな要素が関わっています。このうち、地上設備側に起因する振動は、対応する地上設備の改修によって低減できるケースが多くありますが、コスト面について十分な配慮が必要で、その結果制振制御システムを車両側に搭載する方が合理的な場合があります。ただ、昨今の物価高騰に

伴う車両価格の上昇などにより、こういった車両側の対策についても費用対効果が一段と求められるようになってきています。RRR

文献

- 1) 中出孝次：トンネル内走行時の高速列車の変動空気力，RRR，Vol.73，No.11，pp.32-35，2016
- 2) 中出孝次，佐久間豊，梶島岳夫：トンネル走行時の鉄道車両動揺に関わる変動空気力の発生メカニズム，日本機械学会論文集，Vol.87，No.893，2021，DOI: 10.1299/transjsme.20-00366
- 3) 佐々木君章：高速でも揺れない新幹線を一セミアクティブ制振装置の開発一，RRR，Vol.73，No.6，pp.20-23，2016
- 4) 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，Vol.202，pp.7-12，2013
- 5) 青木淳：小田急電鉄(株) 殿向けフルアクティブサスペンションシステム，KYB技報，Vol.60，pp.56-59，2020
- 6) 東海旅客鉄道(株)：N700Siに採用する新技術について，JR東海プレスリリース，2017，<https://jr-central.co.jp/news/release/nws002308.html>
- 7) 国土交通省：鉄道統計年報〔令和3年度〕(<https://www.mlit.go.jp/tetudo/content/001720684.xlsx>) から算出
- 8) 寺下善弘，辰己光正：レール継目部の継目落ちを改善する，RRR，Vol.69，No.6，pp.24-27，2012
- 9) 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