

新幹線車両の振動を制御する

菅原 能生

車両構造技術研究部
(車両振動 主任研究員)

中川 千鶴

人間科学研究部
(人間工学 主任研究員)



すがはら よしき



なかがわ ちづる

はじめに

“鉄道は高速化へのたゆまぬ努力によって発展してきた”といっても過言ではありません。日本の新幹線を例にとると、1964年の開業当初は210km/hで営業運転を開始しましたが、その後1997年には300km/h運転が、そして数年先には320km/hでの営業運転が予定されています。

このような車両の高速化(速達化)を行う際には、単に“車両の走行性能として速く走れる”ということだけではなく、沿線環境の保全(沿線の騒音・振動など)、車両の走行安全性・安定性の維持など、様々な点を考慮する必要があります。そして、そのうちの一つに、車内快適性があります。

列車の車内快適性は、振動、騒音、温度、車窓の眺望、座席の座り心地などの様々な要因が影響すると考えられています(図1)。鉄道工学の分野では、主に振動に起因して生じる快-不快の評価を“狭義の乗り心地”、または“振動乗り心地”と呼んでいます。この“振動乗り心地”は列車の車内快適性に特に大きな影響を与える因子の一つであることが明らかにされており、様々な対策が検討されてきています。

一般に、車両の振動は走行速度が速くなるほど増加する傾向があるため、最近の新幹線は、高速化と振動乗り

心地の両立を図るために、様々な工夫がなされています。その結果、前記のように以前の新幹線と比べ走行速度が100km/h近く向上したにもかかわらず、振動乗り心地はこれまでと同様か、むしろ向上している場合すらあります。

本稿では、高速化と乗り心地向上を両立させるために車両に制御技術が導入された事例について、導入の経緯とその技術の概要、および現在の技術開発の状況を紹介します。併せて、乗り心地の評価法についても、これまでの評価基準と最近の研究内容について紹介します。なお、ここでは単に“乗り心地”と記した場合は、“振動乗り心地”を指すものとします。

振動に対する人間の感じやすさ

振動に対する人間の感じやすさには、周波数依存性があることが知られています¹⁾。その感度を表すものとして、日本では国鉄時代から「乗り心地フィルタ」が用いられています。図2において、重みづけ(倍率)の値が大きいほどその周波数の振動に対して人間が感じやすいことを意味します。

図2から、左右では2Hz以下、上下では4~8Hzの振動に対して人間が比較的感じやすいことがわかります。したがって、このような周波数帯の振動を極力小さくすることが乗り心地向上のポイントになります。

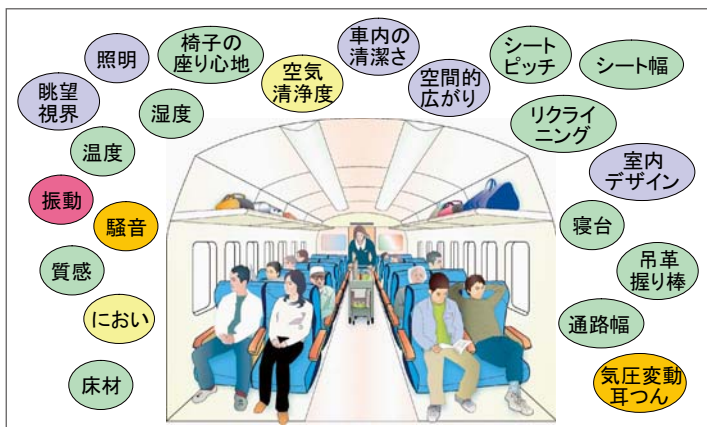


図1 車内快適性に影響を与える因子の例

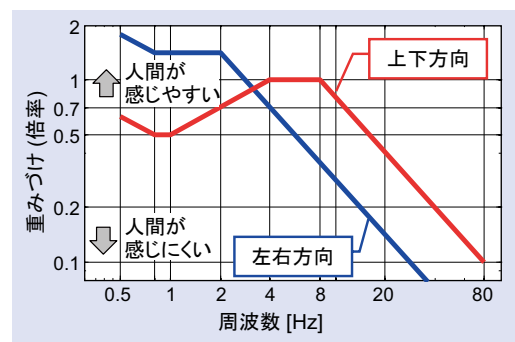


図2 乗り心地フィルタの周波数特性

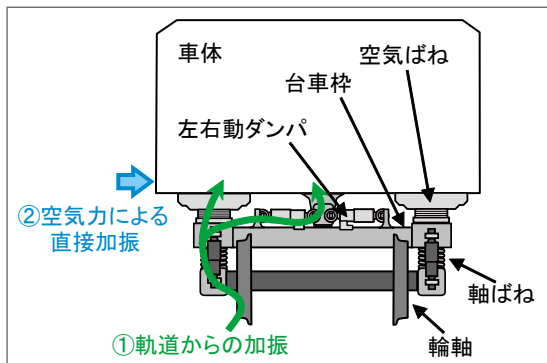


図3 左右振動が車体へ伝わる主な経路

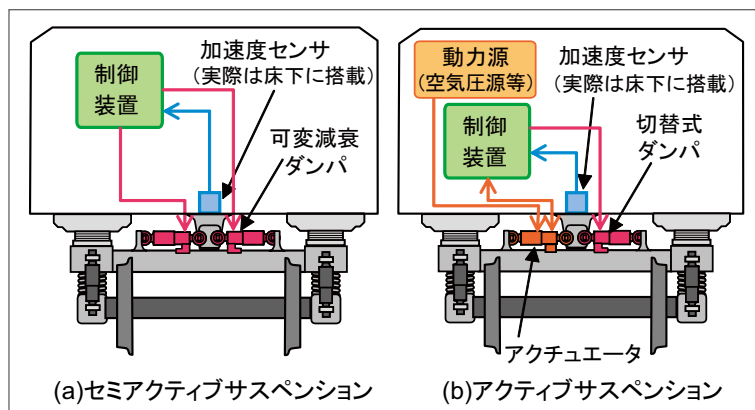


図4 左右の振動制御システムの構成例

これまでに実用化された制御技術

振動制御技術の研究開発経緯～上下よりもまず左右～

鉄道車両の場合、上下方向よりも左右方向の振動が乗り心地の面で問題となることが多かったため、早い時期から制御技術の導入による左右振動の低減が検討・試験されていました。特に日本は、ヨーロッパなどと比べて地盤が弱い。トンネル・橋梁などの構造物や曲線区間が多い軌道上を走行するため、車両が揺れやすい傾向があります。

新幹線電車については、1990年代になってから、本格的な振動制御技術の研究開発が行われるようになりました。当時、JR旅客会社は300km/h以上の営業速度で走行することを目指して各社が試験用の新幹線電車を製作し、走行試験を行っていました。

その際、車両の乗り心地という観点で最も問題になったのは、高速でトンネル内を走行する際に、1～2Hzの左右振動が大きくなり、特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、鉄道車両の揺れの主な原因は、軌道の不整により台車に加振され、その振動が車体に伝わることにあります(図3の①)。それに対し、このトンネル内の振動は、トンネル内を高速走行する際に、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3の②)²⁾。この空気力は、速度とともに増大するため、高速化に伴って問題が顕在化してきたのです。

それまでの左右振動低減策としては、空気ばねやダンパの発生力を、車両の走行安定性を損ねない範囲で極力柔らかくすることにより、レール→輪軸→台車枠→車体という経路で伝わってくる振動を極力小さくすることが有効でした。ところが、空気力による振動は、空気力が直接車体を加振するため、これまでの方策のようにばね系を柔らかくすると車体がかえって揺れやすくなってしまいます。だからといって、ばね系を硬くしてしまうと、軌道側からの振動が車体に伝わりやすくなってしまいます。このように、

高速化に伴って単にばね系の硬さの変更だけではない新たな方策が必要となったのです。

左右の振動制御システムの構成

～アクティブサスペンションとセミアクティブサスペンション～

軌道側からの加振力が働いた場合は、その力を車体側にできるだけ伝えないようにし、かつ、車体が揺れた場合はその揺れをできるだけ止めるような力を車体に加えることができれば、前記の問題を解決できます。そこで、ばね系で発生する力を連続的に制御することによってこの問題の解決を図ったのが、アクティブ、ないしセミアクティブサスペンションと呼ばれる振動制御技術です。この両者はどのように違うのかを、新幹線向けのシステム構成を例にとって説明します。

セミアクティブサスペンション(図4(a))、アクティブサスペンション(図4(b))いずれについても、車体の振動を加速度センサで測定し、車体に加えたい制振力を制御装置で計算するところまでの構成は同じです。違うのは、その力を何によって発生させるのか、ということです。セミアクティブサスペンションの場合は、電流値により減衰力を制御できる可変減衰ダンパによって力を発生させます。一方、アクティブサスペンションでは、油圧、空気圧、電動式などのアクチュエータによって力を発生させます。

ダンパは、運動に対して抗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。簡単に言うと、ダンパが止まっている、ないし伸びている最中に、さらに伸びる力を自力で発生させることはできません。しかし、アクチュエータの場合は、アクチュエータの性能の範囲内で任意の力をいつでも発生させることができます。したがって、アクチュエータを使用するアクティブサスペンションの方が、制振性能が高いことが一般的です。

しかし、セミアクティブサスペンションにも優れた点があります。アクチュエータを使用する場合、それを動かすための動力源(空気圧、油圧、または大容量の電力源)を

表1 左右振動制御装置を搭載した新幹線車両

車両形式	所有会社	セミアクティブサスペンション搭載車両
500系	JR西日本	グリーン車 (W編成), 先頭車, パンタ車
700系	JR東海・西日本	グリーン車, 先頭車, パンタ車
E2系	JR東日本	グリーン車・先頭車以外の車両
E3系	JR東日本	先頭車以外の車両
300系の一部	JR東海・西日本	グリーン車, 先頭車, パンタ車
800系	JR九州	すべての車両
N700系	JR東海・西日本・九州	すべての車両

車両形式	所有会社	アクティブサスペンション搭載車両
E2系	JR東日本	グリーン車, 先頭車
E3系	JR東日本	先頭車
E5系	JR東日本	すべての車両 (予定)

用意する必要があります。また、その動力源をアクチュエータに供給するための配管(電線)も必要になります。しかし、セミアクティブサスペンションの場合、可変減衰ダンパと、制御装置とダンパの制御弁の間を結ぶ電線のみで力を制御できます。したがって、制御システムの構成が簡素になり、コスト的には非常に有利です。

左右の振動制御システムの実用化

左右のセミアクティブサスペンションは、鉄道総研とメーカーの共同開発により、JR西日本の500系新幹線で実用化されました³⁾。鉄道車両の振動制御装置として、世界初の実用化例です。その後、表1に示すように、多くの新幹線で標準的に採用されるようになりました。また、実用化当初から比べると、最近の制御装置は小型化、低コスト化、高性能化が進んでいます。最近の装置(可変減衰ダンパ、加速度センサ、制御装置)の例を図5に示します。

一方、左右のアクティブサスペンションは、JR東日本のE2系新幹線(先頭車とグリーン車)で実用化されました。このときのシステムでは、動力源として空気圧を用いていましたが、その後電磁アクチュエータが開発され、最新のE5系新幹線では、全車両にこの電磁アクチュエータ方式のアクティブサスペンションが装備される予定です。

このように、ここ数十年で、左右の振動制御装置は新幹線では標準的に装備されるようになり、その他の左右振動低減技術(例えば、車体間ヨーダンパなど)や、軌道整備水準の向上なども寄与して、今日の新幹線の良好な乗り心地が実現されています。

現在開発中の制御技術

左右から上下へ

最初に、“上下方向よりも左右方向の振動が乗り心地の面で問題となることが多かった”と書きました。しかし、前節で紹介したような左右系の振動制御装置が新幹線電車で標準的に装備されるようになった現在では、左右方向の



図5 左右セミアクティブサスペンションシステムの例(写真提供 KYB株式会社)

乗り心地が向上し、相対的に上下振動が大きく感じられる傾向があります。鉄道総研では、さらなる乗り心地向上を目的として、上下振動制御装置の開発に取り組んでいます。

図2に示した乗り心地フィルタの特性から、上下方向の場合には4~8Hzに近接する周波数帯の振動が乗り心地に大きな影響を与えることがわかります。最近の新幹線電車の場合、この周波数帯における代表的な振動として、車体中央の位置で振動が大きく、空気ばねの若干内側の位置で振動が小さく、前後対称な振動の仕方をする、“車体1次曲げ振動”があげられます(図6)。

振動制御によって車体の振動を台車から絶つ

この振動を低減するため、鉄道総研では新しい上下振動制御システムを開発しています。鉄道車両は、軌道(レール)から近い順に輪軸を支える軸箱、1次ばね(軸ばね・軸ダンパ)、台車枠、2次ばね(空気ばね)、そして車体で構成されています。開発中のシステム(図7)は、台車枠の上

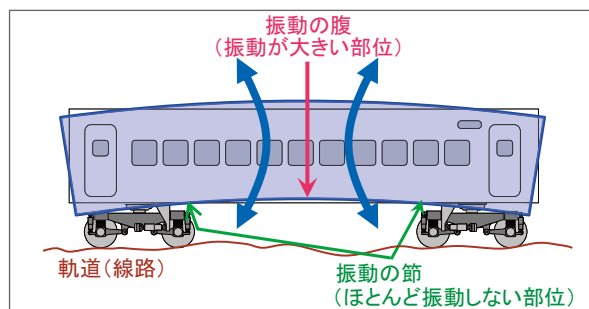


図6 車体の1次曲げモードの振動形状

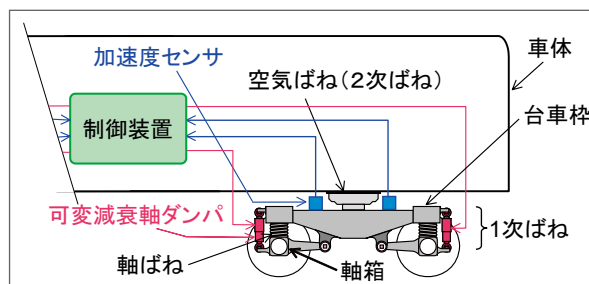


図7 1次ばね系の減衰制御による上下制振システム



図8 乗り心地評価結果と体感の差

下振動を測定し、1次ばね系の減衰要素である軸ダンパの減衰力を制御して、車体への主要な加振源である台車振動を抑制することによって車体の振動を低減するという方法を採用しました。これはいわば、“車体の振動を台車から絶つ”ことに相当します⁴⁾。

このシステムを新幹線電車で搭載して走行試験を実施したところ、車体の1次曲げ振動が大幅に低減され、体感でもはっきりと乗り心地向上効果が確認されました。現在、実用化に向けた技術開発を進めています。

時代に合った乗り心地評価を目指した研究

これまで説明したような振動制御を行う際には、どの振動をどの程度低減すれば乗り心地が良くなるのか、ということが非常に重要です。そういう意味で、乗り心地評価法は振動制御と密接な関係があると言えます。

最近の車両では、高速化や車体の軽量化に伴いビリビリするような高い周波数の振動（以下、高周波振動と呼びます）が増え、体感乗り心地に影響する可能性がでてきます。しかし、現在最もよく使われている乗り心地評価法（例えば、図2の乗り心地フィルタなど）は、このような高周波振動がほとんど発生していなかった国鉄時代に作られたもので、高周波振動の有無が評価にほとんど反映されません。つまり、ビリビリした高周波振動があると人は乗り心地が悪いと感じるのに、乗り心地評価結果は高周波振動の有無によらず同じになるという問題があります（図8）。

効果的な乗り心地向上策は、まず“正しい物差しで測定し、評価すること”から始まります。そこで、鉄道総研では、より体感と合致した評価ができるようにするため、図2に示した“乗り心地フィルタ”を図9に示すように補正し、高周波振動が乗り心地に与える影響をより正確に反映させることを検討しています⁵⁾。この補正は、高周波振動成分のみに対して行うため、高周波成分の振動が相対的に小さい在来線に適用した場合には、現用の評価とほぼ同じにな

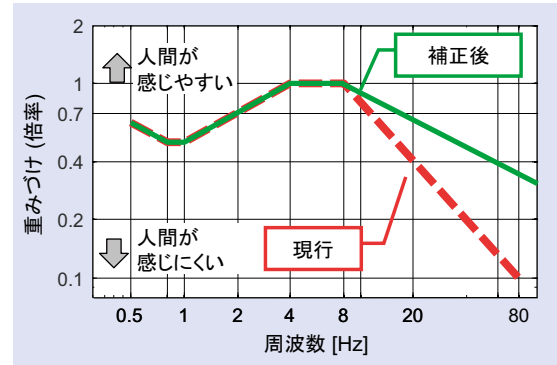


図9 提案している乗り心地フィルタ(上下)

ることがわかっています。つまり、提案する補正案によって、“高周波振動があるのに、体感より甘い評価が出ている場合”に対して、より妥当な評価を得ることができます。

おわりに

振動制御システムが初めて実用化されてから十数年が経過した現在、新幹線は振動制御システムが搭載されて当たり前な時代になりました。新幹線はつねに高速化と快適性の両立を期待されてきましたし、JR東日本のE5系グランクラスのように、これまでのグリーン車以上の高品位な車内快適性を売りものにした車両も登場しています。このような期待に応えるためには、振動制御技術もさらなる技術革新が必要です。

これに対し、鉄道総研では、上下系の振動制御装置の実用化に向けた取り組みを行っており、早期の実用化につなげたいと考えています。さらに、乗り心地評価法についても、より体感と合致するように改良を進め、乗り心地を評価する“物差し”の精度向上を図ります。そしてその“物差し”を用いて、最終的には左右・上下振動を全体としてどのように制御すれば乗り心地が良くなるのか、といったことについて今後研究を進めていく予定です。[RRR]

文献

- 1) 鈴木：人間科学からみた乗り心地の定量的評価，RRR，Vol.62，No.12，pp.6-9，2005
- 2) 鈴木：空気が列車を揺らす－空気力と車両動揺の関係について，RRR，Vol.59，No.10，pp.8-11，2002
- 3) 佐々木：車両の揺れを賢く抑える－セミアクティブサスペンション，RRR，Vol.60，No.2，pp.6-9，2003
- 4) 菅原：車体の振動を台車から絶つ，RRR，Vol.65，No.6，pp.14-17，2008
- 5) 中川：高速鉄道の乗り心地評価を考える，RRR，Vol.67，No.5，pp.18-21，2010