

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

# 車両の運動制御と振動抑制に関する取り組み



石毛 真  
Makoto Ishige  
車両構造技術研究部 部長  
[専門分野] 台車構造

鉄道車両はレール上を走行し、それにともない車体各部に振動や音が発生します。振動や音は車内の快適性に影響を及ぼすため、できるだけ小さいことが望まれます。鉄道においては安全性の確保が最重要課題であり、万が一にも故障などで不安全な状況に至らないよう、振動減衰要素には外部からの力を加えないパッシブなものが使用されてきました。しかし、最近ではより効果的な対策としてアクティブ制御技術も用いられるようになってきています。ここでは、車両の運動制御や振動低減、音の分析に関する取り組みについて紹介します。

## はじめに

鉄道車両において、「運動」は「レール上を走行していくこと」、「振動」は「走行にともなって車両の各部位が揺れること」といえます。

もし仮にレールにまったくゆがみ（軌道変位）がなければ、車両は揺れずに滑らかに走行することができますが、実際には軌道変位が存在します。軌道からの影響のほかに、曲線での遠心力や、横から吹いてくる風の力、トンネル内で発生する空気力などが車体に直接働くことで、車両の運動に影響を及ぼしたり、振動を生じさせたりします。また、鉄道車両に特有の蛇行動

とよばれる現象もあります。さらに、車両が運動または振動することでさまざまな音が発生し、その大きさ、音質によっては騒音となります。

今回は、車両の運動と、それとともなって発生する振動、音について、その制御方法、低減手法、測定方法についての取り組みを紹介します。

なお、車両の運動の自由度は、前後、上下、左右、ローリング、ヨーイング、ピッチングの6つがあります（図1）が、たとえば左右とローリングのように互

いに影響し合うものもあるため、ここでは前後系、左右系、上下系に分けます。

## 前後系の運動

車両は、力行、惰行、制動を繰り返しながら走行します。列車を加速、減速させる力は、通常車輪・レール間の粘着力によるので、駆動力、制動力が粘着力の最大値を上回ると車輪の空転や滑走が発生します。加減速性能を良くするために、駆動力、制動力を適切に制御し、粘着力を最大限に利用しま

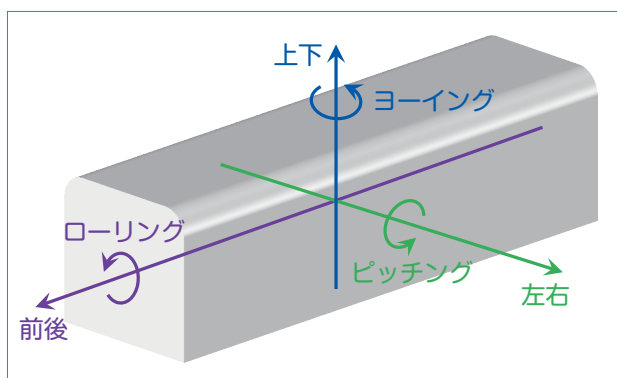


図1 車両の運動の自由度

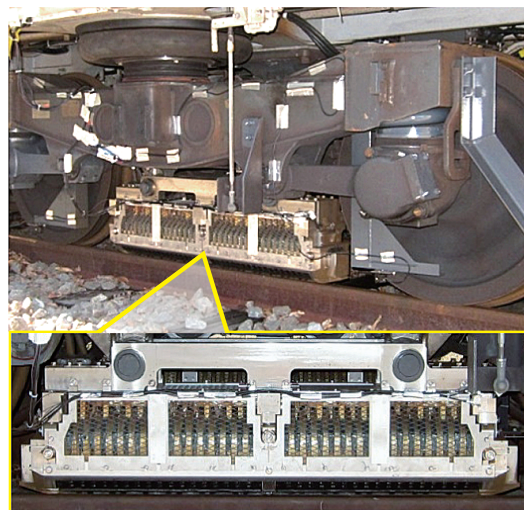


図2 レールブレーキ

すが、空転、滑走が生じると、駆動力、制動力の絞り込みが行われます。これを再粘着制御といいます。力行時の空転再粘着制御に関する取り組みについては特集記事「車輪空転状態を早期に把握して加速性能を向上する」で紹介いたします。制動については、滑走中の粘着状態を推定することで、粘着を有効に利用し、減速度を向上させる滑走制御手法の開発が行われています<sup>1)</sup>。

車輪・レール間の粘着力に頼らないブレーキ方式もあります。屋根上に搭載した開閉式の空力抵抗板による空気抵抗で制動する空力ブレーキ装置<sup>2)</sup>、台車に取り付けた電磁コイルとレールとの間の電磁誘導により制動する非接触のレールブレーキ(図2)<sup>3)</sup>の開発が進められています。

### 前後系の振動

空転、滑走時の再粘着制御により断続的に加速あるいは減速を繰り返すと前後振動を生じることがあります。空転時の前後振動を抑える観点でも空転再粘着制御方法の開発が行われています。

車体に前後振動が発生すると、連結装置を介して前後の車両にも伝わります。連結装置の緩衝器のエネルギー吸収特性を改良することで前後振動を抑える取り組みも進めています<sup>4)</sup>。

### 左右系の運動

#### (1) 操舵制御

鉄道車両の輪軸は、踏面勾配をもつ左右車輪が一体となって回転することで、直線においては中立位置への復元機能と、曲線においてはスムーズに曲がる自己操舵機能をもっています(図3)。ただし、輪軸は台車枠に対して硬いばねで固定されているので、車輪は曲線においてレールの接線方向に対して角度(アタック角)をもって転がります。アタック角をもつことで車

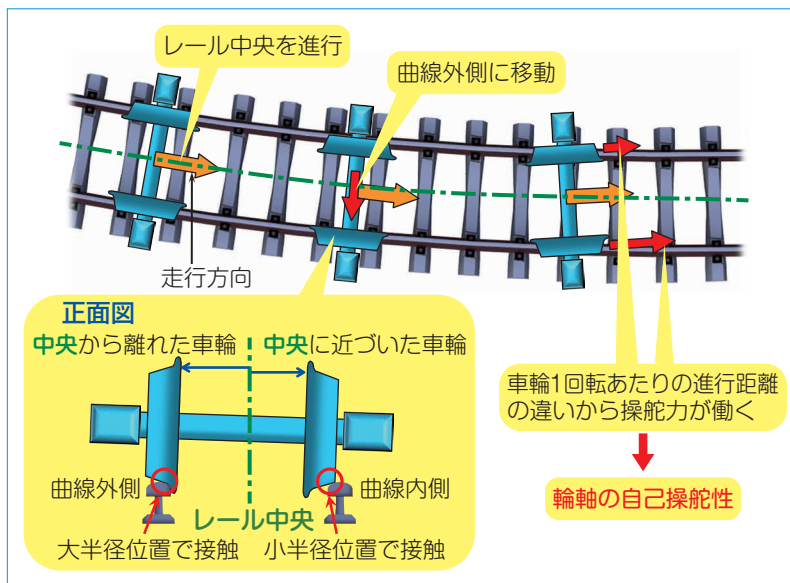


図3 輪軸の自己操舵性能

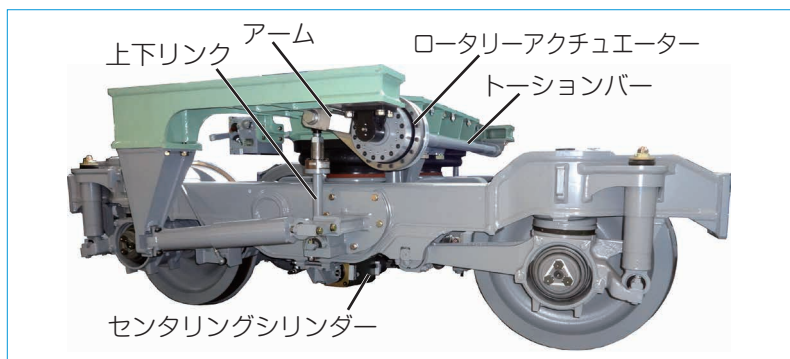


図4 アンチローリング装置式車体傾斜台車

輪がレールを横方向に押す力(横圧<sup>おうあつ</sup>)が発生します。横圧は小さい方が走行安全性もよく、軌道を痛めにくくなるので、急曲線を走行する車両において、アタック角を小さくする工夫がされる場合があります。それが操舵台車です。曲線で車体と台車の間に生じる相対的な角度(ボギー角)を、アクチュエーターを使って制御するボギー角操舵台車の開発について、特集記事「アクティブ操舵技術を用いて曲線通過性能を向上する」で紹介いたします。なお、操舵台車は横圧を減らすだけでなく、曲線区間で車輪から発生するきしり音を減らす効果もあります。

#### (2) 車体傾斜制御

高速で曲線を走行するときに乗客にかかる遠心力を減らして乗り心地を良くするため、車体傾斜技術が用いられ

ます。遠心力で車体を傾ける自然振子方式、振り遅れによる乗り心地の悪化を防ぐために制御機能を付加した制御付自然振子方式、空気ばねの伸びにより車体を強制的に傾斜させる空気ばね車体傾斜方式があります。曲線形状にあわせてきめ細かく車体傾斜制御を行うために、正確に車両の走行位置を検知する手法の高機能化などに取り組んでいます。詳細は特集記事「曲線中の走行位置にあわせた車体傾斜で乗り心地を向上する」で紹介いたします。また、振子方式並みの車体傾斜性能と、空気ばね車体傾斜方式並みの簡素な台車構造をあわせもつアンチローリング装置式車体傾斜台車(図4)の開発<sup>5)</sup>にも取り組んでいます。

高速で曲線を走行すると、車体の左右変位が大きくなり、左右動ストッ

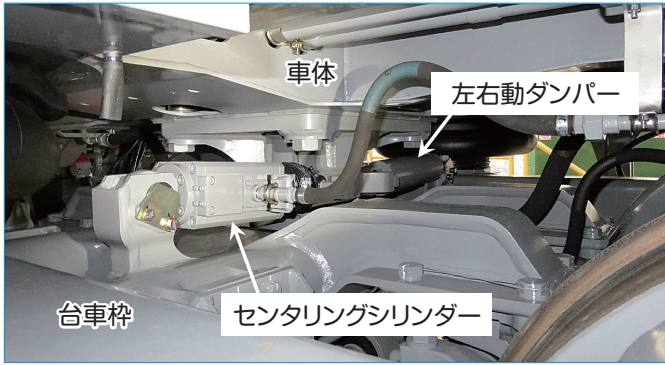


図5 センタリングシリンダー

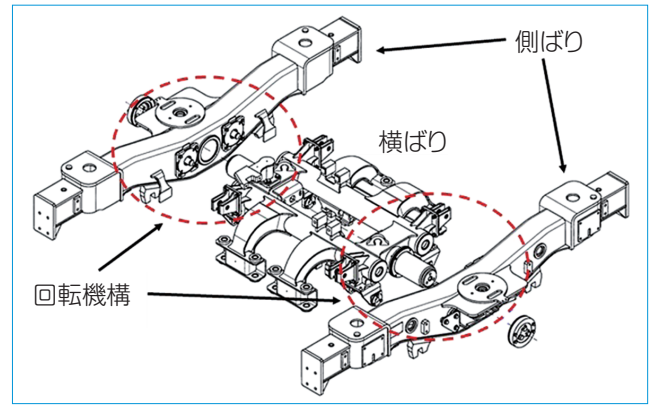


図6 輪重減少抑制台車の台車枠

パーが当たって乗り心地が悪くなる場合があります。そこで、車体の中立位置への復元力を増す左右センタリングシリンダー(図5)を開発しました。空気ばね車体傾斜車両で用いられています<sup>6)</sup>。

### 左右系の振動

左右系では軌道変位により左右、ヨーイング、ローリングの振動が生じるほか、車両の走行エネルギーを取り込んで自ら振動を起こす蛇行動や、トンネル走行時の空気力による振動が発生します。車両各部に設置されているオイルダンパーなどの振動減衰装置によってそれらの振動は抑制されますが、より積極的に振動を抑える装置として、左右セミアクティブサスペンション<sup>7)</sup>があります。これはその時々振動の状況(大きさ、周波数)に応じて、適切な減衰係数に切り替える可変減衰ダンパーによるもので、新幹線を中心に採用されています。さらに振動を抑制するものとしては、能動的に力を発生させるアクティブサスペンション<sup>7)</sup>があります。力の発生機構としては、空気圧アクチュエーターや電動アクチュエーターが用いられ、新幹線や在来線、民鉄の優等列車を中心に採用が広がってきています。

### 上下系の運動

軌道の勾配の変化点ではその変化を

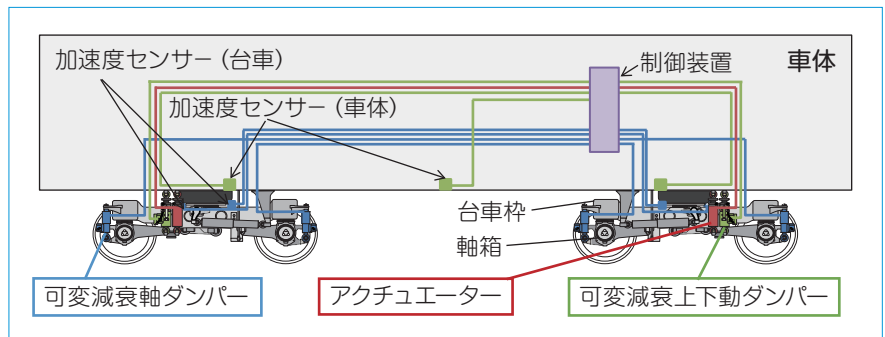


図7 上下制振制御システム

滑らかにするために縦方向の曲線(縦曲線)が設けられます。高速で走行すると、たとえば凸型の縦曲線では浮き上がるような遠心力が働き、乗り心地が悪くなります。この遠心力を小さくするには、縦曲線の半径を大きくするか、速度を下げるしかなく、制御手法による乗り心地の改善は現実的には難しいと考えられています。

曲線にはカントが設けられ、曲線の入口と出口ではカントが変化し、構造的に軌道がねじれた状態となっています。ねじれた軌道の上では1台車に4輪ある車輪が3点支持に近い状況となり、脱線に対する走行安全性が低くなる場合があります。ねじれた軌道の上でも4点支持になるように、ねじれやすい台車枠(図6)を用いた輪重減少抑制台車<sup>8)</sup>を開発しています。

### 上下系の振動

上下系においては、車体が剛体として振動する車体動揺に加えて、車体が

弾性体として振動する車体弾性振動が顕著に現れる場合があります。

車輪に質量アンバランスがあると、輪軸の前後振動あるいはヨーイングが発生し、それが車体に伝達されると車体の上下振動や弾性振動が生じます。車輪踏面が損傷すると、真円度が悪くなって回転時に車輪の上下振動を生じさせます。それが車体に伝わると、車体の上下振動あるいは弾性振動を発生させます。これらは、車輪回転周波数と車体弾性振動の固有振動数が一致すると顕著に発生します。

車両床下の空気圧縮機や気動車のエンジン、変速機などの機器そのものが振動を発生させる場合もあります。

車体の振動を抑えるためには、原因となる軌道変位、質量アンバランス、踏面損傷をなくすことが効果的ですが、現実的にはこれらを完全になくすことは困難です。そこで、対策の一手法として、上下制振制御システムの開発を進めています(図7)。軸ばねと並列に

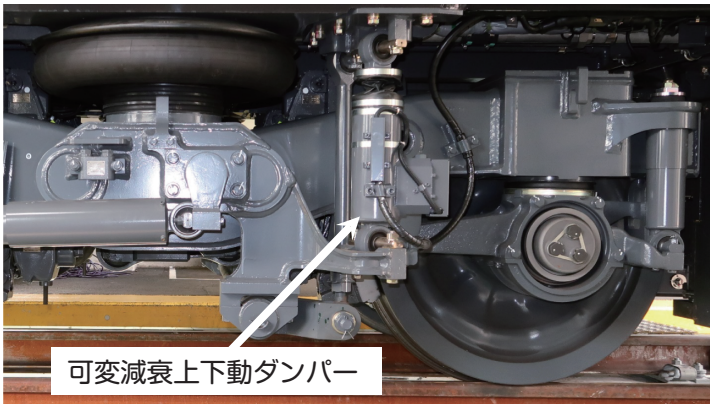


図8 可変減衰上下動ダンパー

可変減衰軸ダンパーを設置することで、台車の上下動、ピッチングを抑えて、おもに車体弾性振動を低減し、車体を支えるまくらばねと並列に可変減衰上下動ダンパー<sup>7)</sup>を設置することで、車体の振動を抑えます。さらに、リニアアクチュエーターを設置することで、さらなる振動低減を目指しています。可変減衰上下動ダンパーについてはクルーズトレインなどを中心に採用され(図8)、乗り心地の向上に貢献しています。その他の上下振動の抑制については、特集記事「車体上下振動を低減して乗り心地を向上する」で紹介し

### 車両が発する音

走行中に車両が発する音には実にさまざまなものがあります(表1)。ある音を不快に感じるかどうかは個人差がありますが、不快な音を低減するには、その音がどこで発生しどこを伝わってくるのかを把握することが対策の第一歩となります。客室内に伝わってくる音が車両のどの部分からどの程度もたらされるかを解析する手法<sup>9)</sup>を開発しています。ビームフォーミング法などの音源可視化技術を用いた騒音源解明の取り組みについては、特集記事「駆動装置から発生する騒音源を探る」で紹介し

ます。車外から車内に伝わってくる音を低減する手法として、内装材を車体にボ

表1 車両が発する音の例

|    |   |
|----|---|
| 車体 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・空気音(風切り音)</li> <li>・内装品びびり音</li> <li>・空調吹き出し音</li> </ul>  |
| 機器 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・主回路磁励音</li> <li>・エンジン回転音</li> <li>・空気圧縮機動作音</li> <li>・パンタグラフしゅう動音、空力音</li> <li>・強制風冷音</li> </ul>    |
| 台車 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・転動音(車輪/レール)</li> <li>・きしり音</li> <li>・モーター音</li> <li>・歯車装置、継手かみ合い音</li> <li>・ブレーキシゅう動音、鳴き</li> </ul> |

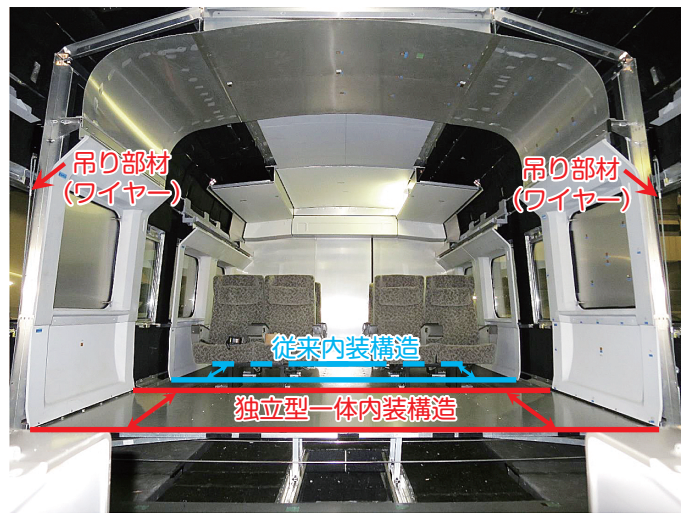


図9 独立型一体内装構造

ルトで固定するのではなく、一体型の内装を車体の側面から吊り下げる独立型一体内装構造(図9)の開発を進めています<sup>10)</sup>。

### おわりに

鉄道車両がレールに沿って走行する

ものである以上、それにとまなう振動や音の発生は避けられません。振動や音に関する快適性に対する要求は上がることはあっても下がることはないものと思われます。今後もより快適な車両を現実的なコストで実現できるよう研究開発に取り組んでいきます。RRR

### 文献

- 1) 中澤伸一：新しい滑走制御でブレーキ距離の延伸を防ぐ, RRR, Vol. 71, No. 8, pp. 20-23, 2014
- 2) 坂本泰明：リニア誘導モーターを応用したレールブレーキ, JREA, Vol. 62, No. 1, pp. 29-32, 2019
- 3) 井門敦志, 高見創：空気抵抗に関する試験に活用する, RRR, Vol. 73, No. 11, pp. 28-31, 2016
- 4) 坂本裕一郎：鉄道技術来し方行く末「連結装置」, RRR, Vol. 72, No. 5, pp. 28-31, 2015
- 5) 風戸昭人, 小島崇：アンチローリング装置を活用した車体傾斜機構, 鉄道総研報告, Vol. 33, No. 3, pp. 35-40, 2019
- 6) 石栗航太郎：乗り心地を保ちながら曲線を高速走行する, RRR, Vol. 75, No. 1, pp. 16-19, 2018
- 7) 菅原能生, 小島崇：車内の振動を低減する, RRR, Vol. 73, No. 4, pp. 8-11, 2016
- 8) 鈴木真, 本堂貴敏, 鴨下庄吾, 梅原康弘, 山長雄亮：「脱線にくい台車」で走行性能を向上する, RRR, Vol. 75, No. 5, pp. 20-23, 2018
- 9) 朝比奈峰之, 山本克也, 後藤友伯：小型スピーカと音響粒子速度センサを用いた車内騒音寄与度解析手法, 鉄道総研報告, Vol. 33, No. 10, pp. 23-28, 2019
- 10) 後藤友伯, 山本克也, 朝比奈峰之, 今岡憲彦：独立型一体内装構造による車内騒音低減手法, J-RAIL 2018, No. 18-83, 2018