

# 曲線を滑らかに曲がる台車をつくる

石田 弘明  
鉄道力学研究部  
(部長)

鴨下 庄吾  
車両構造技術研究部  
(車両振動 主任研究員)

石毛 真  
同  
(走り装置 主任研究員)



いしだ ひろあき



かもした しょうご



いしげ まこと

鉄道車両には、左右の車輪が車軸に固定された一体輪軸が使われています。また、車輪は円筒形でなく、円錐台の形をしています(図1)。この輪軸がレールの上を転がる様子を想像してみてください。例えば、この輪軸が左に寄ると、左側の車輪の方が大きな半径で回転するようになります。左右の車輪は一緒に回っていますから、半径の大きい左車輪が右車輪より前に進みます。つまり、横に寄った輪軸は自分で転がる向きを変え、軌道中心(左右レールの真ん中)へ戻ろうとするのです。これを輪軸の自己操舵(かじ取り)機能といいます。曲線では、輪軸は外側に寄り、外側の車輪の方がたくさん前に進むので、自分で曲線路に沿って転がって行きます。運転席に自動車のようなハンドルがなくても、電車がちゃんと線路の上を走るのは、

この輪軸の自己操舵機能をうまく利用しているからなのです。ただし、左に寄ったので自分で軌道中心に戻って行った輪軸が、反対側へ行きすぎると、今度は右に寄り過ぎて自分で左へ戻ろうとします。このような動きを繰り返すのが、蛇行動と呼ばれる不安定な振動現象です(図1)。

鉄道車両では一般に、2対の輪軸を台車枠にばねで固定した2軸台車を使っています。このばねは、軸箱の部分で輪軸を前後・左右に押さえ、蛇行動を防いでいるのです。4箇所(2軸×2箇所)の軸箱位置をばねで押さえた2輪軸の動きは、曲げとせん断という二つに置き換えて考えることができます。この動きを抑えるばねの硬さを、それぞれ曲げ剛性、せん断剛性と呼びます(図2)。両者を硬くすると蛇行動が起きにくくなりますが、曲線をうまく通過できなくなります。曲線を滑らかに走るには、2対の輪軸が「ハの字」になるような曲げ剛性を柔らかくすれば良いということがすぐにお分かりいただけるでしょう。曲げ剛性は軸箱を前後に支えるばねの硬さで決まります。

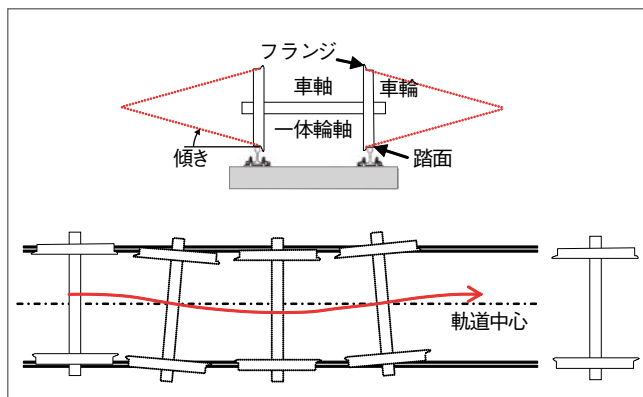


図1 鉄道車両の輪軸と蛇行動

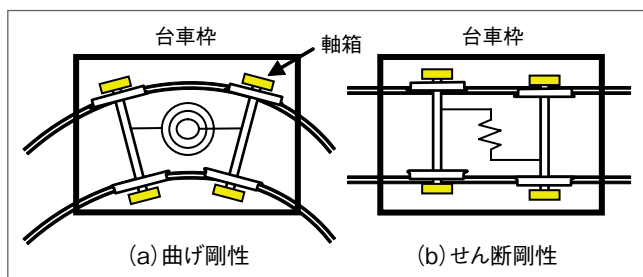


図2 2軸台車内輪軸の曲げとせん断

## 操舵台車(かじ取り台車)

4箇所(2軸×2箇所)の軸箱を同じばねで支えた通常の2軸台車と少し違う構造を採用して、曲線を滑らかに通過できるよう工夫した台車を操舵台車(かじ取り台車)といいます。明確な区別があるわけではありませんが、前に述べた輪軸の自己操舵機能を最大限発揮できるように曲げ剛性を柔らかくした台車を自己操舵台車、外から力を加えて曲線で2対の輪軸を「ハの字」にするものを強制操舵台車と呼んでいます。自己操舵台車では一般に、曲線で左右車輪の回転半径差が大きくなる円弧踏面車輪(車輪の断面が単純な円錐形でなく、複数の円弧が組み合わされた踏面形状の車輪)が用いられますが、前後の輪軸をアンカやリンクでつなぐ等、特別な構造を付加し、せん断剛性を通常台車より大きくして蛇行動の発生を防いでいます。

国内では、1983年から1986年にかけて、旧国鉄が

表1 DT953試作台車の操舵装置と構造

方式	機構概要	構造
油圧強制操舵方式 ① 輪軸 ② 台車枠 ① + ②	曲線部で油圧シリンダにより①輪軸、②台車枠、①②両方を強制操舵する	
油圧結合自己操舵方式	台車枠と軸箱を結合した対角の油圧シリンダを静油圧で結合	
ボギー角リンク方式 (強制操舵)	前後軸をZリンクで結合し曲線でのボギー角に比例した操舵角を輪軸に与える	
変形Zリンクによる輪軸間結合自己操舵方式	Zリンクで蛇行動を防止、輪軸の自己操舵性で曲線通過	上図の操舵ワクが中心ピン回りに自由に回転する (前後軸をリンクで結合)
操舵腕による輪軸間結合自己操舵方式	前後の操舵腕を台車中心でピン結合し操舵腕を吊りリンクで台車枠から支持	
軸ばねの傾斜取付による操舵方式	軸ばねを斜めに取り付け、曲線での超過遠心力による内外軌のばね撓み差を利用	

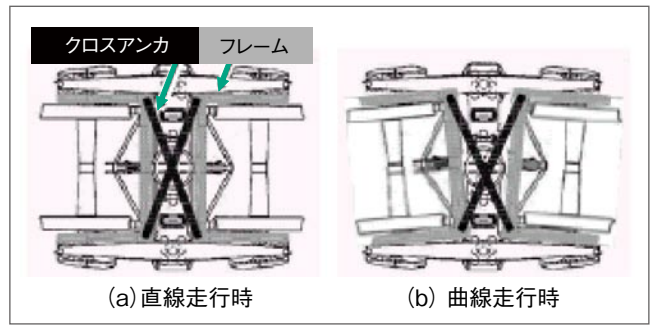


図3 クロスアンカ式貨車用自己操舵台車

かじ取り効果が顕著で、曲線通過時の横圧が大幅に減少しました。ボギー角リンク方式の操舵機構は、その後実用化研究が進められ、振り・操舵台車として、1997年からJR北海道の283系特急形気動車に使用されています。

図3に示したクロスアンカ式の貨車用自己操舵台車は、この検討の当時からすでに南アフリカで実際に使われていました。しかし、スリーピース構造と呼ばれるガタの多い貨車用台車にクロスアンカを取り付けたTR909は、曲線通過時の横圧を1/2～1/3程度に減少させるものの、軽い貨車に履かせて走ったとき、高い速度で激しい車体蛇行動を起こしました。蛇行動の防止には、さらに車体・台車間の回転を抑制する装置、例えばダンパなどを付加する必要があります。

以上の他にも通常台車と異なるものとして、台車の進行方向前側と後側で、軸箱を支持するばねの硬さを変えた前後非対称台車があります<sup>1)</sup>。これは、曲線に沿って曲がりにくい前軸の曲げ剛性を柔らかくし、硬く支持した後軸で台車の蛇行動を起こしにくくするもので、自己操舵台車的一种と言って良いでしょう。振り機構も備えたこの方式の台車は、1995年からJR東海の383系特急形電車に使用されています。

旧国鉄が行ったDT953試作台車の工場構内走行試験時に、顕著なかじ取り効果を発揮したのが、曲線に応じて油圧シリンダを動かし、車体・台車間、台車枠・輪軸間を強制的に回転させる油圧強制操舵方式でした。ただし、今から20年以上前の試験当時、操舵制御系の信頼性に疑問が残ったため、残念ながら本線での走行試験は行われませんでした。万が一、曲線で逆方向にかじを切ったときに、脱線する危険性が高くなると考えられたためです。

### アシスト操舵システム

これまで説明してきたように、外部から力を加えて輪軸を直接操舵させる強制操舵制御システムは、これまで国内では実用化されていませんでした。そこで、このような背景を考慮して輪軸が本来持っている自己操舵機能を維持し

DT953高速電動操舵台車を試作し、工場構内線や本線での走行試験を行いました。この台車は、表1に示すような各種操舵方式が実現できる試験用台車です。また同時期に、クロスアンカ式貨車用自己操舵台車(図3、通称: シェツフェル台車) TR909の本線走行試験も行っています。

表1の中で、軸ばね傾斜取付方式は、曲線通過時の横圧(車輪がレールを横に押す力)が通常台車とほとんど変わりありませんでしたが、他の方式は程度の差こそあれ、かじ取り効果が発揮されていることが確認されました。特に、油圧強制操舵方式やボギー角リンク方式(ボギー角: 曲線を曲がる際の台車と車体間の回転角)などの強制操舵台車は

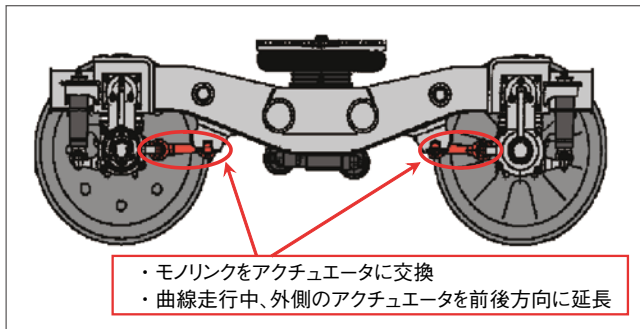


図4 試験台車の側面図

つつ、曲線区間で補助的な制御力を与えて操舵性能を向上させる方法を考案しました。このようなシステムをアシスト操舵システムと呼ぶことにしました。

台車枠と軸箱の間に操舵力を与えるためのアクチュエータ（外部からのエネルギーによって機械的な仕事を行う装置）を、図4の赤丸で示す部品と交換して取り付けます。曲線区間を走行しているときには曲線外軌側（曲線の外側）のアクチュエータを伸ばす制御を行います。反対の曲線内軌側アクチュエータは元の長さを維持します。従って、輪軸は曲線の接線の方向に向かって動かされ、輪軸が「ハの字」になるように動作します（図2（a））。すると、曲線中で車輪とレールの向きが揃うため、外軌側で発生する横圧が小さくなって、曲線を滑らかに曲ることができます。

アシスト操舵システムを取り付ける台車は、モノリンク式と呼ばれる軸箱を支持する形式の台車です。モノリンク式の台車では軸箱と台車枠間に上下・前後・左右の3方向の力を支持するばね要素が入っています。各ばね要素は軸箱の動きを適切な硬さで固定し、台車の運動特性を決める大切な働きをします。モノリンクとは3つの方向のうち、軸箱前後方向の硬さを決める部品です。モノリンクにはリンクの両端にゴムの部品が入れてあり、そのゴムによってばねの硬さが決まります。軸箱を前後方向に支持する硬さは台車の操舵性能に最も影響の大きい要素で、軸箱前後の動きによって輪軸の向きが決まることになります。

操舵力を与えるアクチュエータには空気圧方式を使いました。車上に持っている圧縮空気を、制御バルブを通してアクチュエータに込めて、モノリンクの全長を伸ばします。また、操舵制御を行わないときには、台車の蛇行動を抑えるため、軸箱前後方向の支持ばねを一定の硬さに保つことが必要です。ここで、制御を行わないときのばね定数を普通の台車並みに維持できれば、万一制御装置が故障した場合やアクチュエータが作動できなくなったときなどでも蛇行動に対する安定性を確保できます。このような、故障し

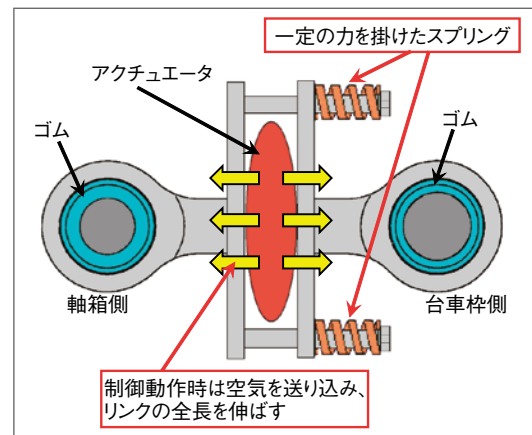


図5 アクチュエータの概念図

たときに安全側に機能する性質をフェイルセーフ性と呼び、安全性を第一とする鉄道技術においてはたいへん重要視される事柄のひとつです。

フェイルセーフ機能を実現するため、空気アクチュエータと並列にスプリングを取り付けたアクチュエータ付きモノリンクを開発しました。このスプリングにあらかじめ一定の力を掛けておき、制御をしない状態ではアクチュエータが縮みきって、リンク両端のゴムがばねとして働くように設計しています。アクチュエータとして動作するときには、空気圧でスプリングをさらに圧縮し、リンク全体の長さを伸ばします。アクチュエータ付きモノリンクの構成イメージを図5に示します。試験で用いた空気圧アクチュエータには、ゴムベローズと呼ばれるゴムの風船のような部品（図5の赤色部分）を用いています。

アシスト操舵制御は、走行中の車両が曲線区間にさしかかったかどうかを判断して輪軸の向きを変えます。同様の制御を行う振り車両では、曲線位置などの軌道データと走行位置で曲線を判定して車体傾斜を制御しますが、アシスト操舵システムではより簡便でコストの掛からないシステムをめざして、振り制御システムとは異なる方向で構成の検討を進めました。

曲線区間を走行しているときには、車体のヨー方向（上から見て車体を旋回させる方向）に角速度（回転する速度）が発生します。この角速度をジャイロセンサ（角速度を計測するセンサ）で計測して、さらに車両の走行速度と合わせて、現在車両がどの程度急な曲線を走行しているか判断することにしました。走行している曲線のきつさに応じてアクチュエータに込める空気の圧力を制御して、きつい曲線ほど大きく舵をきるようにアクチュエータを動作させます。さらに、コントローラはアクチュエータの動きの遅れを考慮して、動作遅れが少なくなるような構成を考案しました。この結果、簡便で遅れの少ない操舵制御が可能となりました。



図6 走行試験の様子

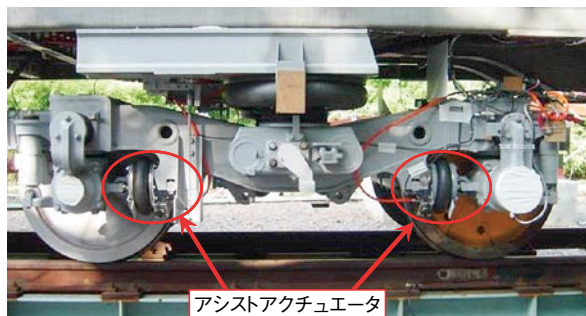


図7 アシスト操舵試験台車

## 走行試験の結果

アシスト操舵システム一式を車両に組み込んで走行試験を行いました。走行試験の様子、アシスト操舵台車の外観を図6、図7に示します。試験車両は動力を持たないため、牽引車を連結して走行しました。走行試験は鉄道総研構内にあるループ線で行いました。ループ線の制約によって最高速度は20km/h程度で、半径100mの急な曲線を通過した場合のアシスト操舵による効果を調べました。操舵制御の効果は、曲線区間で発生した外軌側横圧で評価しました。図8に制御の有無による発生横圧の違い、アクチュエータの動作状況を掲載しています。上段から外軌側の発生横圧、内軌側の発生横圧、アクチュエータに込められた空気圧で、横軸は距離で表示しています。青線はアシスト操舵制御なし、赤線は操舵制御ありのデータです。曲線に相当する部分は、図中の薄赤で塗っている部分です。アシスト操舵制御を行うと制御を行わない場合に比べて、発生する横圧が全体に低くなっていることがわかります。操舵制御なしでは外軌側と内軌側でつっぱり合う力が働いて横圧を増しているのに対し、アシスト操舵によって輪軸が曲線中で適切な方向を向くため、内軌側横圧が減少し、その分だけ外軌側横圧が低下します。ただし、ところどころで横圧が低下していない部分がありますが、これは軌道に滑らかでない箇所があり、その影響を受けているためと考えられます。操舵制御によってアクチュエータを伸ばした長さは10mm程度で、わずかなアクチュエータ動作で、大きく台車の挙動が変化することがわかります。曲線区間で発生した横圧の平均値を求めたところ、制御を行わない状態からアシスト操舵を行うと、およそ30%の横圧低減効果があることがわかりました。

## まとめ

鉄道車両の目的地までの所要時間を短縮するためには、曲線を走行する速度を高く保つことが重要です。曲線通過

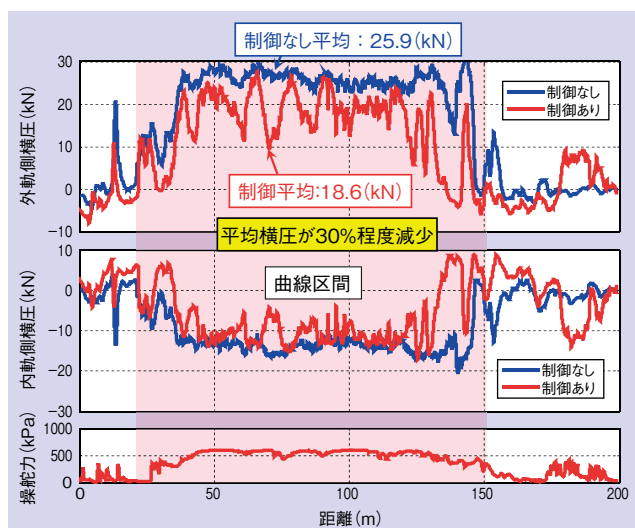


図8 走行試験の結果

速度を上昇させるためには、速度の上昇に伴って増加する横圧の対策が必要になります。横圧の増加は脱線の危険性を増加させ、車輪の摩耗や軌道の破壊を招きます。このような横圧を低減させる方法について、これまで様々な形で試験が行われてきましたが、アクチュエータ技術を応用した強制的な輪軸の操舵制御は、鉄道の持つ安全性への影響が大きいと考えられていたため、これまで思うように実用化に結びついていませんでした。昨今の電子回路技術の発展は目を見張るものがあり、より低コストで多機能の装置が続々と開発されています。また、それらの信頼性も年々向上してきています。このような進化した電子回路技術を積極的に鉄道車両の操舵制御技術に導入し、フェイルセーフ性が高く、より高機能で優れた鉄道車両開発に向けて今後も取り組んでいきたいと考えています。[RRR]

## 文献

- 1) 須田義大ほか：前後非対称台車の走行安定性と操舵性能，日本機械学会論文集C編，pp.2633-2639，1991.8