

# 制御技術で台車の舵をきる

鴨下 庄吾

車両構造技術研究部  
(車両振動研究室 主任研究員)

石毛 真

同  
(走り装置研究室 室長)



かもした しょうご



いしげ まこと

## はじめに

制御とは、「ある目的に適合するように、対象となっているものに所要の操作を加えること」と日本工業規格では定義されています。このように、様々な対象物を人間の思うように稼働させるため、外部からの作用を適切に与える技術が制御技術です。昨今、電子回路を応用した制御装置は日常生活のいろいろな場面に浸透し、電気炊飯器や全自動洗濯機のような身近な家電製品などにもその応用範囲が広がってきました。きめ細かな機械の動作を自動的に実現して、我々の生活に大きく役立っています。このような制御機器が多方面で使われるようになった背景として、電子回路部品などの生産コストが低下したことが挙げられます。また、それら電子部品の性能は日々向上し、装置の信頼性も高まっています。コンピュータに触れたことのある方なら良くお解りだと思いますが、新型のコンピュータが季節ごとに電気店を賑わせ、それらは価格が低下しているにもかかわらず、性能は一定の期間に大きく上昇している状況が感じられると思います。

鉄道車両に関連する技術でも、乗り心地改善を目的とした制御付き振り車両や車両動揺を抑制するセミアクティブサスペンションのように実用化を果たした制御技術の導入事例が見受けられ、さらにそのための機器類の性能向上に関して研究開発が続けられています。ここでは、鉄道車両の操舵制御技術について紹介します。鉄道車両の操舵制御とは、軌道の形状に合わせて適切に車輪の舵をきり、台車が曲線を通る性能を向上させる技術です。このような操舵制御技術について、機械的な方法を使った操舵装置と、この機械的な動作を電気的な制御によって補助して、より高性能なシステムを構成する操舵制御技術について紹介します。

## 鉄道車両の曲線通過性能

操舵制御に関する説明の前に、一般的な鉄道車両の曲線通過がどのようなメカニズムで行われているのか簡単にご紹介します。鉄道車両は地上に敷設されたレールの上を転がって進む車輪に支えられて走行しています(図1)。鉄道車両用車輪は左右の車輪が車軸で一体につながられていて、左右車輪が同じ回転速度で転がりながらレールの上を進んで行きます。鉄道車両用の車輪の形は単純な円筒形ではなく、車輪の外側の半径は小さく、内側の半径が大きい円錐の一部分を切り取ったような形をしています。このような形の車輪がレールの中央を転がって行き、曲線区間に差し掛かった時、最初はレールの外側に車輪全体が寄って行くことになります。ここで、車輪の形状から曲線外側の車輪は大きな半径の位置でレールと接触し、反対に内側は小さい半径の位置でレールと接触します(図1左下枠内：この図は正面図です)。左右の車輪は同じ回転速度で回っているので、車輪が1回転あたりに進む距離は外側が長く、内側が短くなります。このように、車輪が1回転した時に輪軸が進んで行く距離が左右で異なると、自然に車輪は進行

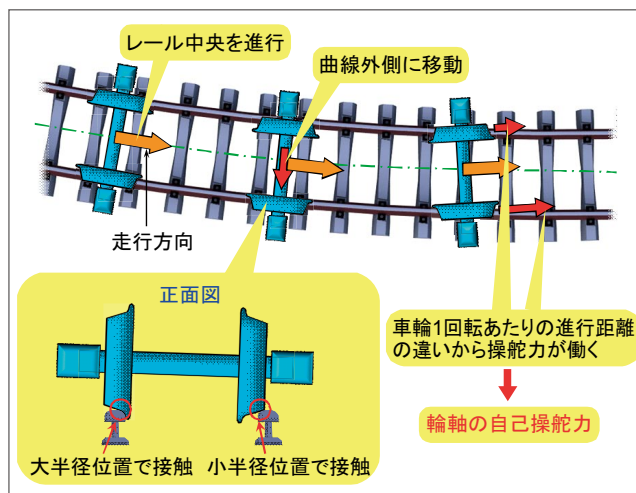


図1 鉄道車両の輪軸と蛇行動

する向きを変え、レールの中央に戻ろうとする力が働き、曲線を通ることができるようになります。このような輪軸自体の持っているレール中心方向への復元力を「自己操舵力」と呼んでいます。

自己操舵力の作用を細かく見てみると、レール中心側に進行方向を変えた車輪は、反対側に少し行き過ぎて同じ様に戻される動きを繰り返して、全体としてレールに沿って走行しています。走行速度がある速度以上になると、この行き過ぎが徐々に拡大して運動が不安定になります。このような輪軸の不安定な動きを蛇行動と呼び、鉄道車両の高速化を阻む要因の一つとなっています。

一般的な鉄道車両用台車は1つの台車あたり2つの輪軸を持ち、それぞれの輪軸の両端はばねによって台車枠と接続されています。輪軸と台車枠を結合するばねの硬さは、蛇行動が発生する速度を決める重要な設計要素の一つです。基本的にばねを硬くすれば蛇行動が発生する速度は高くなりますが、その反面曲線通過性能は悪化する傾向があります。従って、ばねの硬さを調整することだけで蛇行動の速度と曲線通過性能を同時に満足させることには限界があります。

ばねを硬く設定すると、自己操舵力によって舵をきる性能が妨げられ、結果的に車輪がレールの接線方向を向きにくくなります。車輪がレールの接線方向を向いていない状態では、車輪の回転につれてレールを横方向に押し広げる力が働きます。このような横方向の力を横圧と呼び、大きな横圧の発生は車輪やレールの摩耗を増加させ、非常に大きな横圧は脱線の原因となることがあります。ばね硬さの違いによる自己操舵状態、横圧発生状況のイメージを図2に示します。

都市部以外の線区を走る特急列車では、比較的急な曲線が多く連続する線区で運用されている事例が多く、曲線通過性能の向上は特急列車の到達時間を短縮する重要な技術の一つとなっています。先に紹介したように曲線通過性能の向上だけに配慮すると、高速で走行した時の安定性に問題が起きてしまいます。そこで、操舵制御技術を鉄道車両に導入して、高速安定性を確保した上で曲線通過性能を高める技術が目玉されます。

### ボギー角連動操舵台車

機械的な制御技術によって曲線通過性能を改善させた台車の一つにボギー角連動操舵台車があります。ボギー角連動操舵台車の基本的な構造を図3に示します。台車を上面

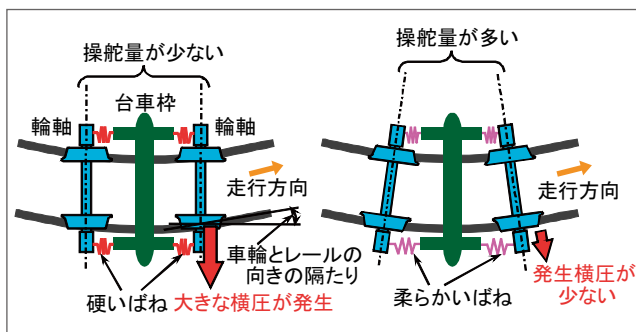


図2 ばね硬さの違いによる自己操舵状態の変化

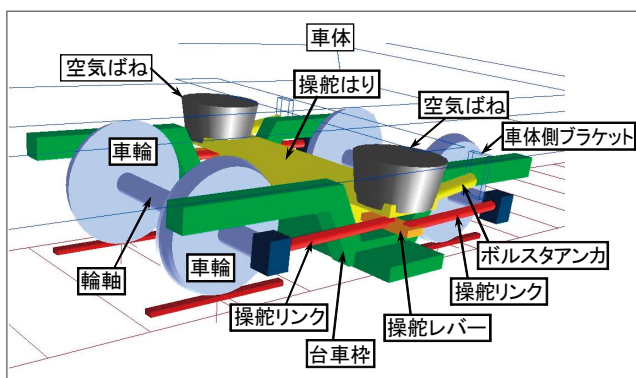


図3 ボギー角連動操舵台車の構造

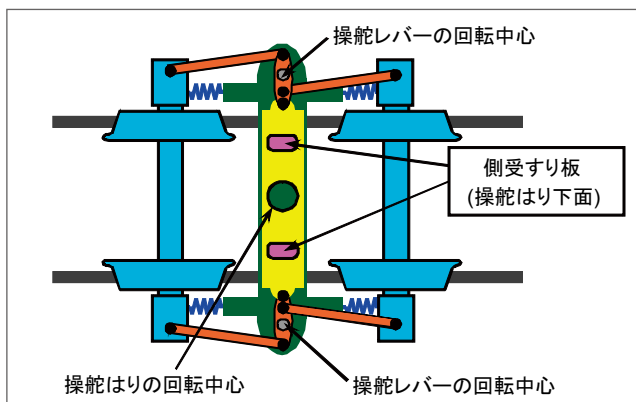


図4 直進状態のボギー角連動操舵台車

から見ると、図4のように構成されています。操舵はりは空気ばねを介して車体を支え、台車枠の上に搭載されています。操舵はりは台車の中心まわりに回転でき、台車枠との間には側受すり板が設けられています。このすり板は、あまり簡単に操舵はりが旋回してしまうと高速走行時に台車の角度が不安定になってしまうため、台車の旋回に対してある一定の抵抗力が働くようにする装備です。操舵はりの左右は車体とリンク（ボルスタアンカ）で結合されていて、上下方向の動きを除いて一体に回転動作します。このような操舵はり下側の両端と台車の左右に設けられている

操舵レバーを接続し、さらに操舵レバーはそれぞれ2本の操舵リンクにつながっています。操舵レバーは、レバー中央付近のピンで台車枠に止められており、操舵はりと同様に回転できる構造になっています。操舵リンクは輪軸両端に設けられている軸箱と、非常に硬いゴムを介して接続されています。輪軸はこのような機械リンクに保持されているため、輪軸と台車枠を接合するばねに比較的柔らかいばねを用いても、蛇行動安定性には問題を起こしません。

曲線区間に車両が進入すると、曲線の半径に応じて徐々に台車が旋回し、このような旋回動作に応じて、操舵はり、操舵レバー、操舵リンク、輪軸が連動して操舵動作することとなります。図4の直進状態から、曲線区間に差し掛かると、徐々に図5の様に変化して行きます。曲線外側では前後軸箱の間隔を拡大する方向、内側では間隔を縮小する方向となるように、操舵レバーや操舵リンクなど各部品の取り付け位置関係を構成しています。従って、台車の旋回角度に応じて輪軸を操舵して、発生する横圧を低減することができます。このような純粋に機械的なリンクの動作によって操舵制御を行う台車がボギー角連動操舵台車です。

ボギー角連動操舵台車は円曲線区間の横圧低減に非常に効果があり、台車の旋回角度に応じた適切な輪軸の操舵量を設定することによって（この設定は操舵レバーのてこ比で決まります。）、横圧の発生をほぼゼロ付近にまで低下させることも可能です。鉄道の軌道は、乗り心地を悪化させないため、直線区間と円曲線区間を滑らかに接続する緩和曲線区間と呼ばれる徐々に曲線の半径が小さくなって行く区間を設けています。走行試験の結果を見ると、ボギー角連動操舵台車は緩和曲線区間では円曲線区間ほど大幅に発生横圧を低減させることができませんでした。これは、緩和曲線区間では適切な操舵動作に必要な台車の旋回角度が不足すること、操舵はり下面のすり板の抵抗によって操舵はりの回転動作が遅れてしまうことなどが原因と考えられます。

### アシスト制御付きボギー角連動操舵台車

緩和曲線区間での横圧低減効果を改善するため、電気的な制御システムによって外部から操舵力を補助して曲線通過性能を向上させることを検討しました。操舵力補助のため、能動的な力を発生させるアクチュエータを使って台車の旋回を補助するシステムです。このような操舵力の補助による操舵制御手法を、鉄道総研ではアシスト操舵システムと呼び、現在開発に取り組んでいます。台車枠と操舵は

りの間に油圧アクチュエータを取り付け、すり板による摩擦抵抗と並列に台車旋回のための力を与える構成です。図6に示すように、操舵はりの中心にあるピンからずらした位置にアクチュエータを取り付けて、伸縮させる力を操舵はりの旋回のための力に変換して操舵を行います。

制御動作を行うための操舵制御のターゲットとして外部から与えられた目標値と実際に発生している力を比較して、必要に応じた適切なアクチュエータの動作を行います。こ

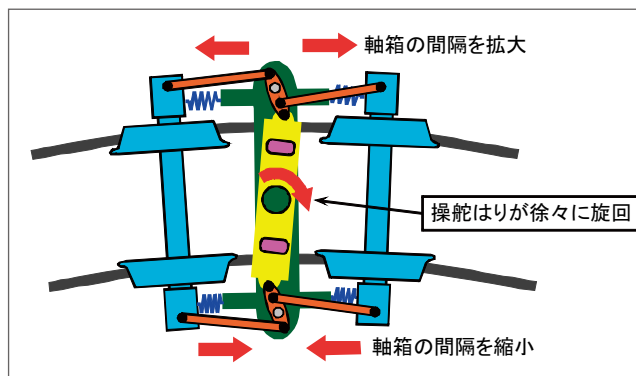


図5 曲線区間でのボギー角連動操舵台車の動作

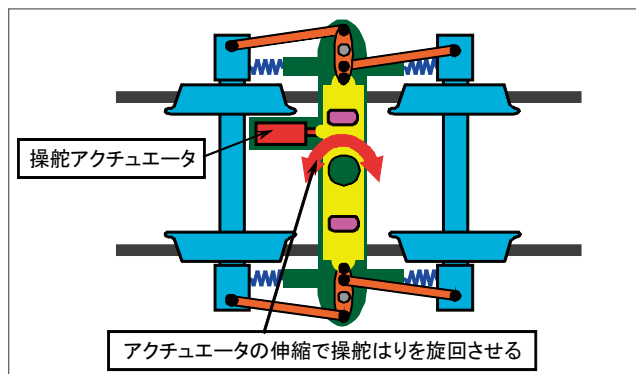


図6 アシスト制御用アクチュエータ

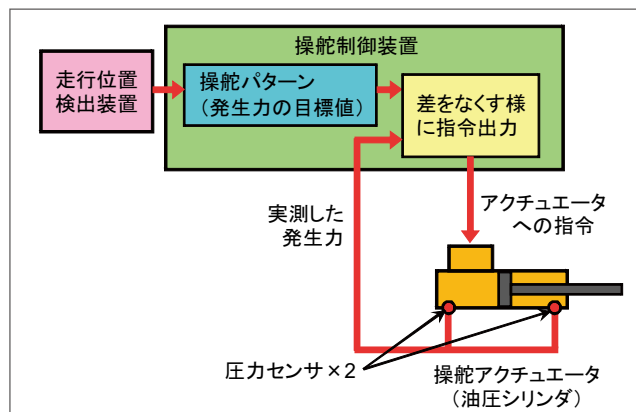


図7 アシスト操舵システムの機器構成

のシステムでは、走行位置ごとに線路の形状に合わせた操舵力の目標値を事前に作成した操舵パターンを制御装置に持たせています。さらに、現在車両が走行している位置を常に検出し、その位置で必要な操舵力の目標値と実際の発生力を比較してアクチュエータを動作させます。アクチュエータでの発生力は油圧シリンダの2か所の圧力を計測して求めます。このようなアシスト操舵システムの主要な構成機器の働きは図7のように表されます。ここで、制御装置はアクチュエータの長さではなく、台車旋回に対して与える力を目標として制御を行っています。このような制御方法を「力制御」と呼んでいます。

### 操舵制御の効果

これまで説明してきた操舵制御による横圧の低減効果について、シミュレーション結果でご紹介します。車両を構成している要素や各機器、制御装置、アクチュエータなどをモデル化してコンピュータ上で再現し、軌道や制御装置の条件などを設定して実走行時の状態を推定しました。今回は、アシスト操舵制御による効果を大まかに把握する目的で、緩和曲線区間全体に渡って一定の操舵力を与えるような操舵パターンを採用してシミュレーションを進めました。

シミュレーション結果を図8に示します。上段のチャートから、線路曲率（線路曲率とは曲線半径の逆数で、直線では0、急な曲線ほど値が大きくなります。）、台車旋回角、外側車輪の横圧、内側車輪の横圧、操舵力を、横軸は特定の位置からの走行距離の軸で表示しています。台車の条件として、通常の台車状態、ボギー角連動操舵台車の状態、さらにボギー角連動にアシスト操舵制御を付加した状態の3つの条件についてシミュレーションを行っています。軌道の情報や走行速度は、鉄道総研構内の試験線を走行する場合を想定しました。円曲線区間での台車旋回角は「通常」に比べて「ボギー角連動」「アシスト制御」がやや大きくなっており、発生横圧が内側・外側とも大幅に低減する結果となりました。「通常」条件の軸箱と台車枠間のばね硬さは、一般的な台車に比べて小さく、発生横圧が低くなると考えられる設定ですが、「ボギー角連動」による横圧低減効果には及ばず、ボギー角連動方式の優位性が示されています。さらに、アクチュエータによるアシスト操舵制御力の付加によって緩和曲線部の横圧を効果的に低減させていることがわかります。ただし、出口側緩和曲線の横圧低減に関しては、構内試験線の線路形状では与えた操舵力が大きすぎた可能性があり、「ボギー角連動」の状態が最も発生横圧

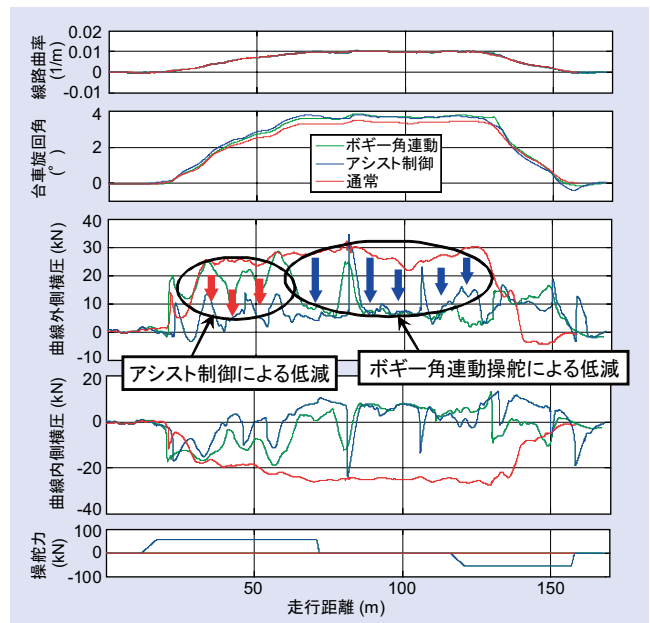


図8 操舵制御の横圧低減効果

が低い結果となりました。今後、車両の状態や線路形状を考慮して、適切な操舵パターンを生成する技術について検討する必要があると考えています。全般的に、ボギー角連動操舵機構やアシスト操舵制御のような「制御技術で台車の舵をきる」技術によって、曲線区間での発生横圧を効果的に低減できることが確認されました。

### まとめ

台車の曲線通過性能を向上するための操舵制御について、機械的な方法（ボギー角連動操舵）とアクチュエータを用いた能動的な方法（アシスト制御付きボギー角連動操舵）について紹介しました。制御によって台車の曲線通過性能を向上させる研究開発はこれまで長い間行われてきましたが、営業線で実用化された操舵台車は、残念ながら純粋な機械的操舵機能を持つ台車に限られています。能動的な制御動作は、万一逆方向に力が加えられた場合には逆に本来の性能を低下させてしまう問題を持っています。乗客の安全性が特に重要視される鉄道では、このような危険性を持つ操舵制御の導入には慎重にならざるを得ない背景があります。万一制御装置などが故障し、想定していない状態となった場合にも、その安全性を損なわないような配慮のことをフェイルセーフ性と呼んでいます。今後、アクチュエータなど周辺技術の改善によって、アシスト操舵制御のフェイルセーフ性を確保した、実用的な操舵制御システムを実現したいと考えています。[RRR]