

- 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

アクティブ操舵技術を用いて 曲線通過性能を向上する

鉄道車両の台車は、車体の荷重を支持する、振動を吸収する、駆動・制動する、レールに沿って旋回するなどの重要な役割を担っています。さらに走行に関しては、高速走行時に不安定な動きをしない安定性（走行安定性）と曲線をスムーズに通過する性能（曲線通過性能）のトレードオフな関係にある両方の性能が求められます。そこで、これら2つの性能を高いレベルで両立できるボギー角操舵システムを開発しました。ここでは、本システムの概要と所内試験線で実施した曲線通過性能試験結果について紹介します。



梅原 康宏
Yasuhiro Umehara
車両構造技術研究部
走り装置研究室
主任研究員
【専門分野】 台車構造



小島 崇
Takashi Kojima
車両構造技術研究部
走り装置研究室
副主任研究員
【専門分野】 制御技術、
状態監視技術



鴨下 庄吾
Shogo Kamoshita
車両構造技術研究部
車両振動研究室
上席研究員
【専門分野】 制御技術、
振動解析



本堂 貴敏
Takatoshi Hondo
鉄道力学研究部
車両力学研究室
副主任研究員
【専門分野】 車両運動

はじめに

鉄道車両の台車には、高速で走行する際にも不安定な動きをしない「走行安定性」と、曲線に沿ってスムーズに曲ることができる「曲線通過性能」の両立が求められます。しかし、それらは相反する性能であるため、台車の基本諸元である車輪踏面勾配や軸距、軸箱支持剛性（☞参照）などを慎重に決定しています（図1）。

走行安定性と曲線通過性能を高いレベルで両立する車両の例として、新幹線と在来線を直通する（新在直通）車両があります¹⁾。この新在直通車両では、ヨーダンパー（☞参照）を並列に片側2本装備し、そのうち1本は減衰力特性を切り替え可能なヨーダンパー

としています。新幹線区間において減衰力を大きくすることで走行安定性を確保し、在来線区間において減衰力を小さくすることで曲線通過性能の向上

☞ 車輪踏面勾配

車輪のレールと接する面に設けられた勾配。これにより、曲線では左右車輪の回転半径差が生じ、滑らかに通過することができます。この勾配が大きいほど曲線通過性能が向上し、小さいほど走行安定性が向上します。

☞ 軸距

台車の前後輪軸間の水平距離で、短いほど曲線通過性能が向上し、長いほど走行安定性が向上します。

☞ 軸箱支持剛性

輪軸を台車枠に支持する固さで、この剛性が小さいほど曲線通過性能が向上し、大きいほど走行安定性が向上します。

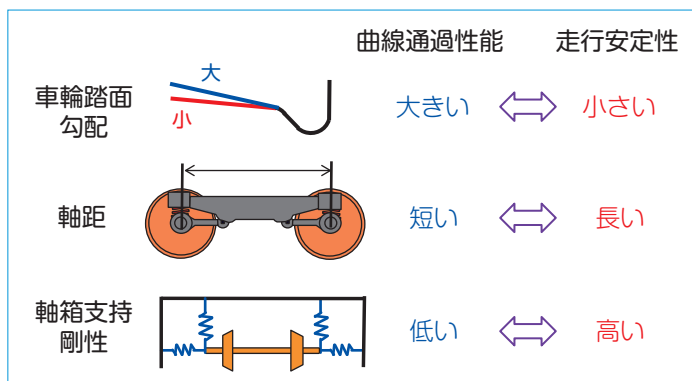


図1 曲線通過性能と走行安定性の相反関係

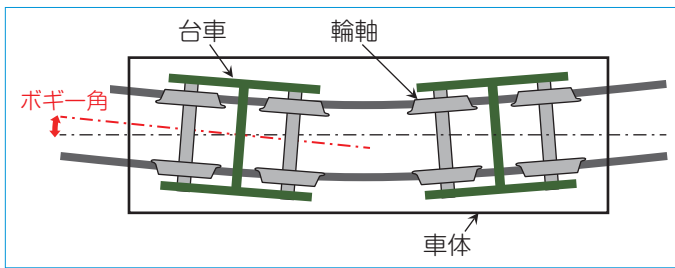


図2 曲線通過時に発生するボギー角

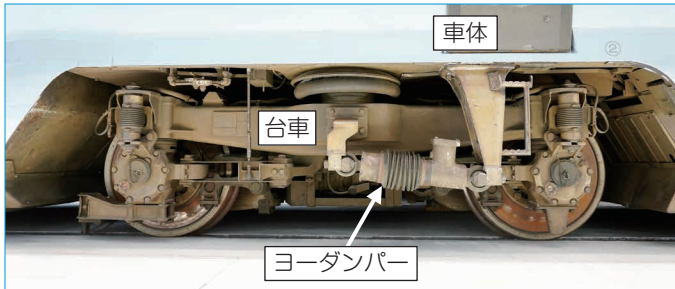


図3 ヨーダンパーの例 (撮影協力：鉄道博物館)

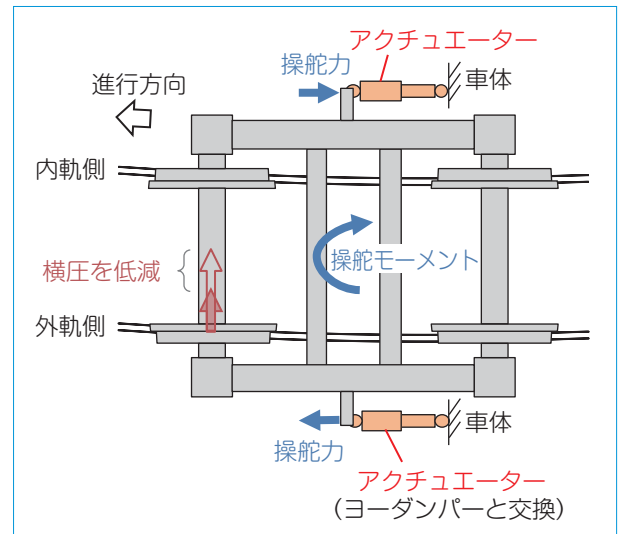


図4 ヨーダンパー位置でのアクティブ操舵力制御

を図っています。

しかし、新幹線区間でさらなる速度向上を考えると、走行安定性と曲線通過性能の両立はますます困難になっていくことが予想されます。そこで台車構造の大きな変更を伴わずに性能を両立させる手段として、ボギー角操舵システムを開発しました。

ここでは、このボギー角操舵システムの概要と鉄道総研の所内試験線で実施した曲線通過性能試験結果について紹介します。

ボギー角操舵システムの概要

ボギー角とは、図2に示すような曲線通過時などに発生する車体-台車間の相対角度(相対ヨー角)です。本システムでは、この車体-台車間に操舵力を与えることで、台車を曲線方向に旋回させ、先頭軸外軌側で発生する著大な横圧おうあつ(参照)を低減することを目的としています。

まず、操舵装置を台車に搭載するスペースが必要になりますが、台車周辺に確保できるスペースは限られています。また、操舵力を作用させる位置が台車中心から遠いほど、小さな力で大きな操舵モーメントが得られます。そ

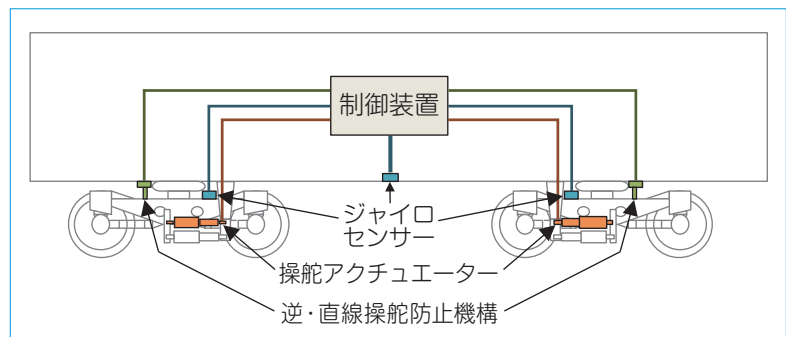


図5 ボギー角操舵システム概略図

ここで、すでに台車に装備されているヨーダンパーをアクチュエーターに置き換えて操舵することを検討しました(図4)。

アクチュエーターの動作方法について、曲線区間では車体に対して台車に操舵モーメントを与えることで曲線通過性能を向上させます。また、高速走

行区間や直線区間では操舵動作はさせずに、ヨーダンパーとして動作させることで走行安定性の確保も行います。

今回開発したボギー角操舵システムは、このアクチュエーター(操舵アクチュエーター)を中心として、ジャイロセンサーの信号から曲線を検出して操舵制御を行う操舵制御装置、ボギー

ヨウダンパー

車体と台車の間にレール方向に取り付けられるオイルダンパー(図3)。車体-台車間の相対的な旋回運動や前後運動に対して抵抗する力(減衰力)を発生させます。オイルダンパーは、ゆっくりとした挙動では発生する減衰力は小さいため、曲線通過時など比較的ゆっくり台車が旋回する運動への抵抗力としては小さく、曲線通過性能をあまり阻害しません。逆に、台車の不安定で急速な運動に対しては大きな減衰力を発生させるため、車体-台車間の運動を抑制することにより走行安定性を確保します。

横圧

車輪とレールが左右方向に押し合う力。横圧が大きいと、レールや車輪の摩耗が早くなるだけでなく、脱線の原因にもなるので、極力小さくすることが求められます。

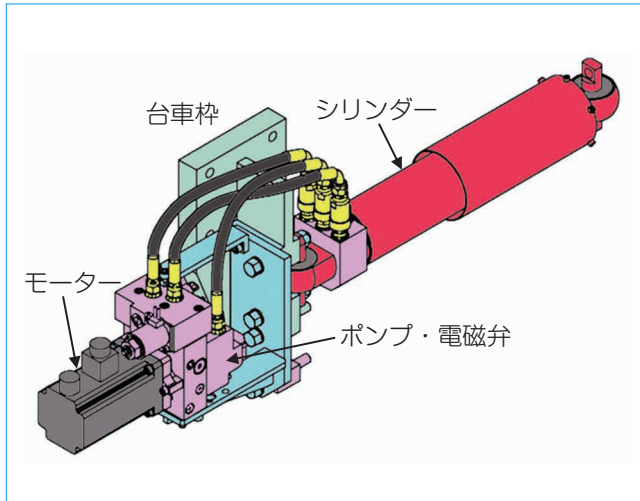


図6 操舵アクチュエーター概略図



図7 逆・直線操舵防止機構

角を機械的に検出して誤った操舵動作を防止する機構（逆・直線操舵防止機構）の3要素で構成しています（図5）。それでは、各構成要素を詳細に説明していきます。

①操舵アクチュエーター

操舵アクチュエーターの操舵力と横圧低減効果の基本的な関係を把握するため、鉄道車両の曲線通過を想定した数値シミュレーションを実施し、その結果を踏まえて、明確な横圧低減効果を得るために必要な操舵力や動作速度などの条件を満足する操舵アクチュエーターを開発しました。なお、搭載スペースを考慮して、モーターおよびポンプ・電磁弁ユニットを油圧シリンダーから分離してホースで接続する構成としています（図6）。

操舵アクチュエーターには、操舵力を発生させる機能に加えて、減衰力特性を切り替え可能なヨーダンパーの機

能をもたせました。これにより、走行区間に応じて以下の3モードを切り替えることができます。

(1) アクチュエーターモード

曲線区間において操舵制御する場合のモードです。指令に応じて伸縮する力（操舵力）を発生させます。

(2) 減衰大モード

高速走行時に走行安定性を確保する場合のモードです。伸縮時に押し出される油の流れを制限することで大きな減衰力を発生させます。

(3) 減衰小モード

低速走行時や直線区間など制御を行わない場合（非制御）のモードです。伸縮時に押し出される油の流れは制限せず、発生する減衰力は小さくなります。

②操舵制御装置

操舵制御装置は曲線を検出し、さらに曲線に応じた操舵力を決定して、操舵アクチュエーターに指令する役割を担っています。

まず、正確に曲線を検出することが重要となりますが、鉄道車両では予見制御（参照）方式またはセンサー方

式がよく用いられています。

走行線区の曲線と地点情報のデータベースを用いた予見制御方式は、曲線出入口の緩和曲線に応じた操舵制御が可能になるなどの利点があります。しかし、データベースの保守に手間や費用がかかるだけでなく、地点情報のずれによる意図しない区間での操舵制御などフェール動作が懸念されます。

一方、センサーにより曲線を検出する方式では、曲線の認識に遅れを伴うため緩和曲線での制御性能は劣りますが、システム構成を簡単にできる特長があります。

本システムでは、おもに円曲線を対象に曲線通過性能を向上させることを目標とし、センサー方式を用いた下記に示すシンプルな操舵制御アルゴリズムを検討しました。

(1) 操舵アクチュエーターのモード切替

走行速度に応じて、操舵アクチュエーターの3モードを切り替えます。

(2) 線路曲率の算出

曲率は、ジャイロセンサーで測定したヨー角の変化する速度を走行速度で除して、高い周波数の振動成分を除去することにより算出します。この際に

予見制御

一定時間後に通過する曲線などの未来情報を利用して、制御性能を向上させる制御方法です。

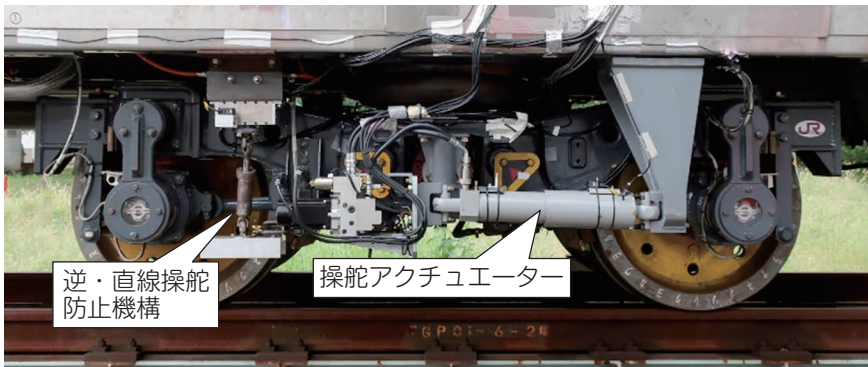


図8 試験車両に取り付けたボギー角操舵システム

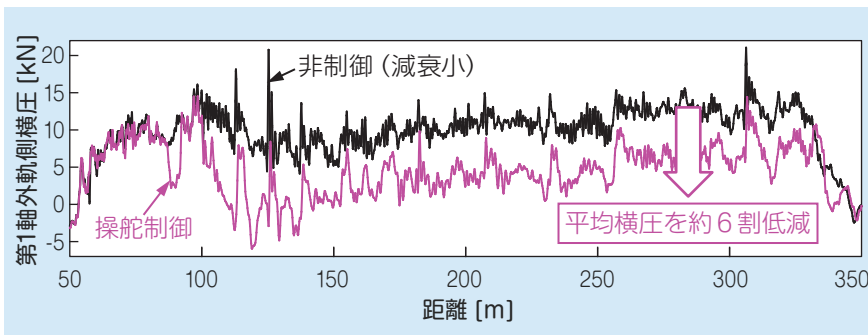


図9 試験線走行試験結果 (R160曲線区間)

設定したしきい値より曲率が大きい (曲線半径が小さい) 場合には操舵制御を行います。曲線で確実に制御するために、車体および各台車のヨー角速度から曲率を算出し、すべてがしきい値を超えた場合のみ制御を行います。

(3) 操舵力算出

必要な操舵力は曲率に比例すると仮定して、上記で算出した曲率に比例させた操舵力とします。比例定数は、走行路線に合わせて実験的に求めます。

③逆・直線操舵防止機構

ボギー角を機械的に検出することで、曲率の算出に異常が生じても逆操舵および直線区間での操舵を防止できる逆・直線操舵防止機構を設けました (図7)。ボギー角を機械的に検出するためには、走行中の車体-台車間に発生する並進および回転運動の中から、相対ヨー角のみを正確に抽出する機構が必要です。そこで、回転自由度

をもたない伸縮可能なロッドの両端にユニバーサルジョイントを接続した構造の角度検出機構²⁾を適用しています。図7に示すように機構の上端を車体底面、下端を台車枠に固定します。また、本機構は台車の旋回中心から離れた位置に取り付けられた場合にも支障なくボギー角を検出できます。

曲率の代わりに、得られたボギー角を使用して操舵力の大きさを決定する方法も考えられますが、本システムでは、急曲線 (曲線半径500~600m以下を想定) におけるボギー角で反応する接触スイッチと組み合わせ、直線・曲線の判別および曲線方向の判別に限定して使用することで逆操舵および直線での操舵防止機能を高めました。

試験線走行試験

試作したボギー角操舵システムの曲線通過性能の向上効果を評価するため、在来線試験車両に本システムを搭載し、

鉄道総研の所内試験線にて曲線通過性能試験を実施しました。試験では、操舵制御対象を1台車とし、操舵アクチュエーターおよび逆・直線操舵防止機構を1台車に搭載しました (図8)。

制御対象台車が先頭となる方向に曲線半径160mの曲線区間を最高速度30km/hで走行した際の先頭 (第1) 軸外軌側横圧の測定結果を図9に示します。操舵制御により円曲線中の横圧が低減されており、非制御時と比較して平均横圧を約6割低減できることを確認しました。

さいごに

曲線区間において台車に対して操舵モーメントを与えることで横圧を低減して曲線通過性能を向上し、直線などの高速走行区間ではヨーダンパーとして動作することで走行安定性も両立できるボギー角操舵システムと、その性能試験結果について紹介しました。

ここでは紹介できませんでしたが、高速車両試験台を用いて、走行安定性試験を実施し、本操舵アクチュエーターを装備した台車が、通常のヨーダンパーを装備した台車と同等の走行安定性を有していることを確認しています。

今後も新在直通車両や在来線特急車両への適用を目指して、耐久性の確認や操舵制御パターンの深度化など開発を進めていきます。最後に、操舵アクチュエーターの開発および性能試験にご協力いただいたKYB株式会社にご場をお借りして深く感謝します。RRR

文献

- 1) 梅田啓, 世古将之: JR東日本 E6系新幹線電車 (量産車), 車両技術, No.245, pp.4-23, 2013
- 2) 山長雄亮, 鴨下庄吾, 梅原康宏: 機械式空気圧操舵システムの機構と横圧低減効果, 鉄道総研報告, Vol.31, No.6, pp.35-40, 2017