

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

アシスト操舵で 横圧を低減させる

鉄道車両の曲線通過性能を向上させるため、アシスト操舵システムを適用した新しい操舵台車を開発しました。この操舵システムは、本来輪軸の持つ自己操舵性を補助して、機械的な動作に基づいて操舵制御を行うため、曲線の逆方向に操舵を行う危険性が低く、信頼性の高いシステムです。曲線区間の横圧低減効果に加えて、急曲線通過の際に発生する騒音を抑え、車輪摩耗を抑制する効果や走行に必要なエネルギーを無駄にしない効果があることを各種の性能確認試験により検証した結果を紹介します。



鴨下 庄吾
Shogo Kamoshita
車両構造技術研究部
車両振動研究室
主任研究員(上級)
【専門分野】制御技術応用、車両のダイナミクス



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、車両のダイナミクス



宮本 岳史
Takefumi Miyamoto
鉄道力学研究部
車両力学研究室
室長
【専門分野】車両運動、走行安全、地震時脱線



鈴木 貢
Mitsugi Suzuki
鉄道力学研究部
車両力学研究室
主任研究員
【専門分野】車両運動、走行安全、地震時脱線対策

はじめに

鉄道の軌道は主に直線区間と曲線区間で構成されていますが、目的地への到達時間を短縮するためには2つの区間をどちらも高速で走行することが必要です。直線区間の高速走行のためには、軌道の中心位置付近を安定して走行する性能が重要です。このような直線の走行安定性が十分確保できない場合には、高速走行時において蛇行動と呼ばれる左右方向の振動が発生し、脱線に至る危険性を伴います。

一方、曲線区間を高速で、なおかつ滑らかに通過するためには、適切な方向に車輪の舵を切り、レールの方向^{かし}に向ける手法が有効です。曲線通過性能が不十分な状態で曲線区間の速度向上を行うと、大きな横圧(参照)が発生して脱線する危険性が高まること、車輪やレールの摩耗量が増加すること、

横圧

軌道の上を走行する車輪とレール間に働く横方向(まくらぎの方向)に発生する力のことを指します。曲線通過速度を上昇させると遠心力にともなって横圧も上昇する傾向があります。

きしり音と呼ぶ車輪とレールの接触にともなう大きな騒音が発生することなどの悪影響が生じます。このような直線の走行安定性と曲線通過性能に影響の大きい車両の要素として、車輪の踏面形状、車輪の前後・左右方向の間隔、車輪の直径、輪軸を支える前後・左右方向の剛性などが挙げられます。これらの要素については過去に多くの研究が進められ、それぞれの車両に応じて最適化されていると言えるでしょう。ここでは、より高いレベルで直線の走行安定性と曲線通過性能を同時に実現し、横圧を低減する手法の一つである操舵台車について、最近の開発事例であるアシスト操舵システム¹⁾を含めてご紹介します。

蛇行動と曲線通過性能

鉄道車両では左右の車輪が車軸に固定された一体輪軸が一般に使われています。車輪がレールと接触する面(踏面)の形状をよく見てみると、単純な円筒形ではなく円錐の一部を切り取ったような形(円錐台^{すい})になっています。このような輪軸が軌道の上を転がりながら走行して行く状況で、中心線から

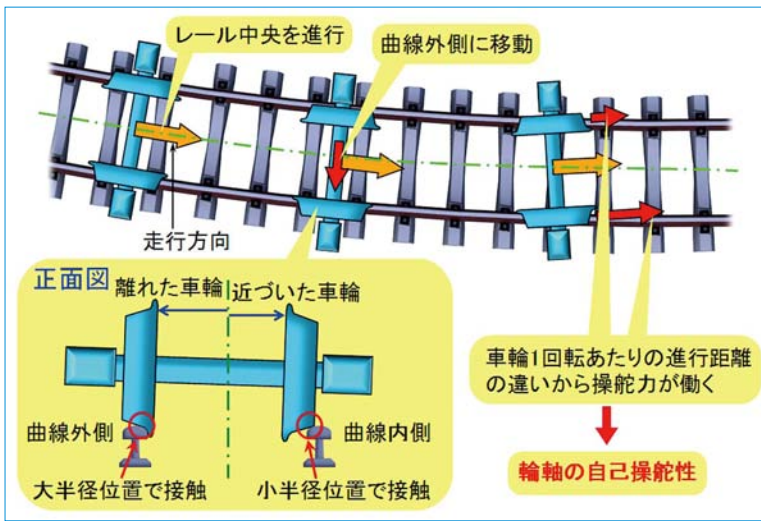


図1 鉄道車両の輪軸と蛇行動

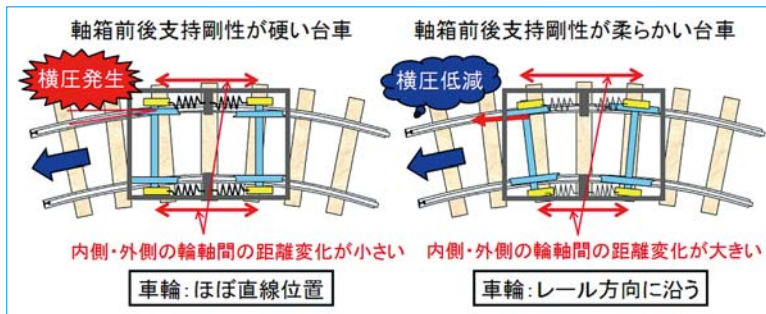


図2 軸箱前後支持剛性と横圧発生状況

どちらか一方に輪軸が寄った状態で回転すると、中心線から離れた側の車輪はより回転半径の大きな部分で軌道と接触し、中心線に近づいた車輪はより小さい半径の部分で軌道と接触することとなります(図1)。ここで、左右の車輪は同じ回転速度で回転していますから、1回転あたりに進行する距離は中心から外側に離れた車輪の方が大きくなります。したがって、横にずれた状態で回転する輪軸は自分で転がる向きを変え、軌道の中心へ復元しようとする力が働くこととなり、輪軸は曲線の半径方向を向きます。このような機能を輪軸の自己操舵性といいます。曲線区間を走行する際には、輪軸は曲線の外側に寄り、外側の車輪の方がより多く前に進むため、この自己操舵性によって曲線状の線路に沿って走行することができます。

ただし、横方向のずれが生じてから車輪が軌道の中心位置に復元するまで

には時間的な遅れが発生します。そのため輪軸は一旦中心位置を過ぎ過ぎてからまた進行方向を変え、中心線を行ったり来たりしながら軌道上を走行することとなります。このような動作を繰り返すことを輪軸の蛇行動と呼び、車両の高速化を阻む要因の一つです。

各輪軸は台車枠と呼ぶフレームにばねを介して取り付けられ、また、台車枠は車体に対し水平方向に旋回できる構造のものが広く使用されています。輪軸を支えているばねは軸箱(車軸を支持する軸受を入れた箱)で輪軸を前後・左右に抑えつけて蛇行動の発生を防いでいます。基本的にこのばねを硬くすると直線区間的高速走行時に蛇行動が起きにくくなりますが、曲線区間では輪軸が自己操舵しにくくなるため大きな横圧を発生させることにつながります(図2)。したがって、直線の走行安定性と曲線通過性能は相反する性能で、これらを両立させるためには、

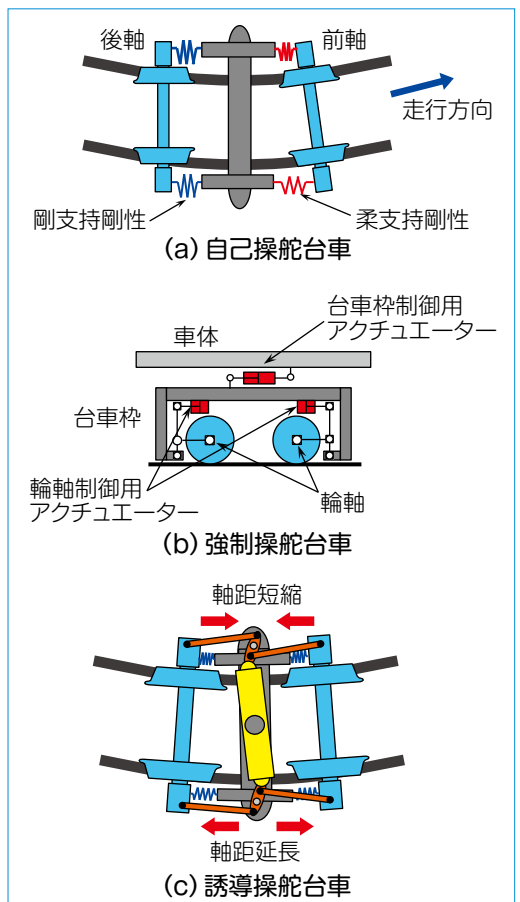


図3 操舵台車の方式

軸箱を適切な剛性のばねで支持する必要があります。とわかります。

操舵台車の方式

通常の2軸台車に対して、より曲線通過性能を向上させる工夫をした台車を操舵台車と呼びます。このような操舵台車は大きく次の3方式に分類することができます。

- 1) 自己操舵台車
- 2) 強制操舵台車
- 3) 誘導操舵台車

自己操舵台車とは輪軸が曲線の半径方向に向こうとする自己操舵性を積極的に活用することで曲線通過性能を向上させる技術です(図3(a))。その一例として、軸箱を支持する前後方向の剛性を台車の前後で変え、車両の進行方向に応じて先頭側のばね剛性を低くする台車が実用化されました。

強制操舵台車は、モーターや油圧、空気圧を利用して操舵力を与える装置

を外部に設け、その力を曲線の方向に合わせて適切に輪軸に与えることによって能動的に輪軸の舵を切る機能を持った台車です(図3(b))。

誘導操舵台車は曲線通過とともなって発生する車体や台車の動きに応じて操舵動作を行う機構を持たせた台車です(図3(c))。曲線区間を通過する時の車体に対して旋回した台車の角度(この角度をボギー角と呼びます)に合わせて輪軸を操舵する機能を持った台車が実用化しています。

このような3方式の操舵台車の中で最も曲線通過性能が向上する方式は強制操舵台車になりますが、これまで国内では実用化に至っていません。その理由の一つは万一何かの要因で制御装置に故障が発生した場合に逆方向に操舵動作をする危険性があるためです。そこで、操舵力を輪軸の自己操舵性を補助する程度に制限し、さらに操舵動作を行う方向は誘導操舵台車と同様に台車ボギー角に応じて制御する”アシスト操舵システム”を考案しました。

アシスト操舵システムの機器構成

アシスト操舵システムは曲線区間を走行した際に発生する車体と台車間のボギー角を機械的に検出し、その角度に応じて空気圧制御バルブを開閉して操舵アクチュエーター(※参照)を動作させるシステムです。ボギー角に応じて操舵制御を行うと、構造的に逆操舵動作を防止できます。本システムは、ボギー角検出機構・空気圧制御バルブ・操舵アクチュエーター3つの要素から

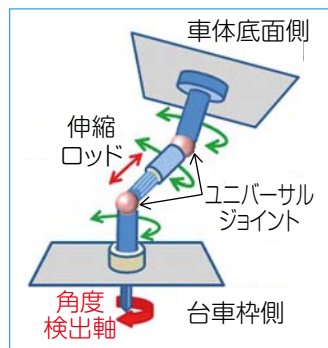


図4 ポギー角検出機構の構造

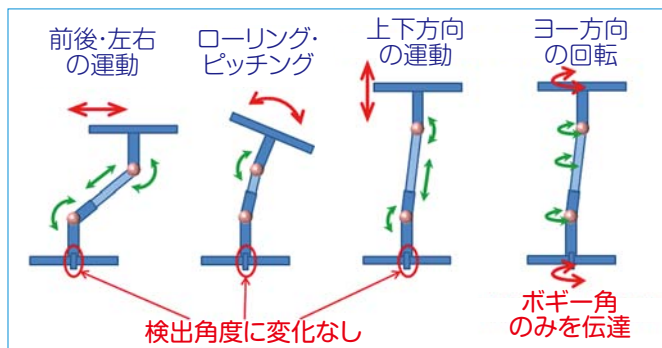


図5 車体-台車間の変位とボギー角検出機構の動作

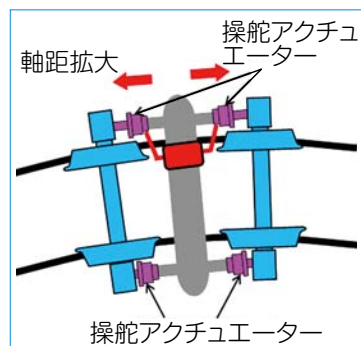


図6 曲線中のアシスト操舵の動作

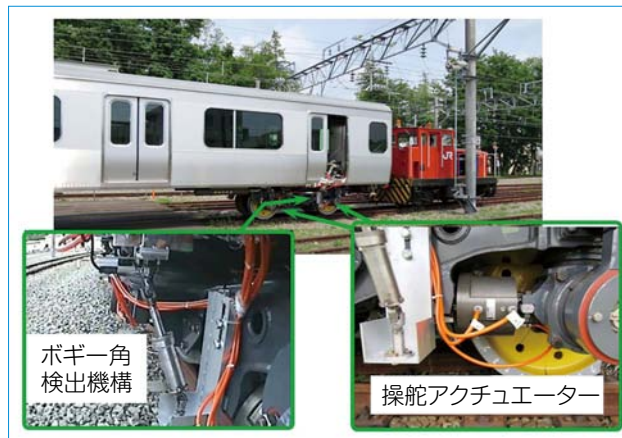


図7 試験車両の外観

構成されます。

車体-台車間は前後・左右・上下の変位に加えて、それぞれの軸周りの回転運動、ロール(進行方向に向かって、左右に傾く方向の回転)・ピッチ(同じく前後に傾く方向の回転)・ヨー(水平に左右に旋回する回転)の合計6つの方向に変位します。このうちヨー方向の回転角度がボギー角に相当するため、6方向の変位からヨー回転角度のみを抽出する機構が必要になります。そこで、図4に示す2つのユニバーサルジョイント(※参照)と伸縮するロッドを直列に組み合わせた機構(ボギー角検出機構)を考案しました。このような機構に6方向の変位が加わった状況を図5に示します。図のようにヨー方向の回転角度だけが出力軸に伝達され、そのほかの方向の動きは反対向きの回転と中央のロッドの伸縮で全てキャンセルされる構造になっています。この機構はヨー方向の台車回転中心からずれた位置に取り付けても問題

なくボギー角を検出できることが特徴であるため、車体-台車間の取り付けやすい位置に本機構を取り付けることでボギー角の検出が可能です。ボギー角検出機構を車体と台車の間に設置し、出力軸を空気圧制御バルブに直結します。空気圧制御バルブは検出されたボギー角に応じて空気の給排を行います。曲線中に生じるボギー角は急な曲線であっても2~3°程度ですが、このような小さな角度変化を検出して圧縮空気を曲線外側の操舵アクチュエーターに

※ アクチュエーター (空気圧)

シリンダーの内部に圧縮した空気を充填させてシリンダーを伸縮させる装置のことです。鉄道車両では、ドアの開閉やブレーキの動作などに広く使用されています。

※ ユニバーサルジョイント

回転運動を伝達するための継手機構で、回転を入力する軸と出力する軸を接合する角度が自由に变化させることのできる継手のことです。

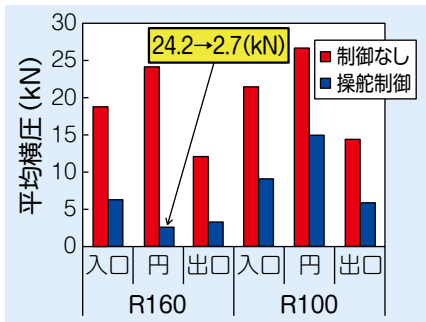


図8 各区間の平均横圧

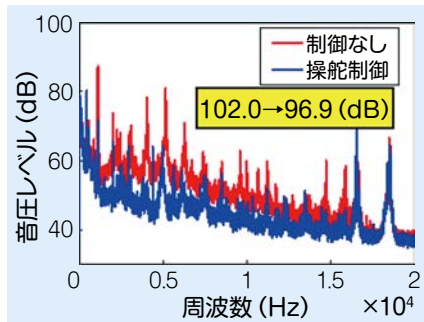


図9 きしり音の比較結果

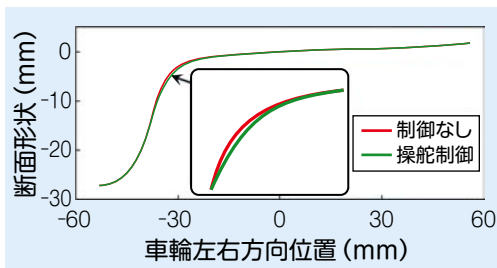


図10 車輪摩耗の進展状況

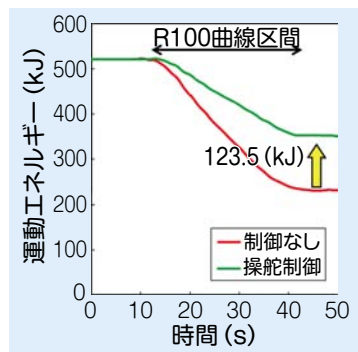


図11 運動エネルギーの変化

供給します。操舵制御は、曲線区間を検出するとアクチュエーターに空気を充填し、曲線区間を抜けると空気圧を排気するというシンプルな方法を採用しました。操舵アクチュエーターは、軸箱と台車枠間の4ヶ所に取り付け、図6に示すように曲線の外側の車輪前後間隔を伸ばすように2本のアクチュエーターを動作させ、車輪を軌道の方向に向ける動作をさせます。また、操舵アクチュエーターの内部には、あらかじめ圧縮方向の力を与えたばねを内蔵し、操舵制御動作を行わない際の前後支持剛性を確保しています。

走行試験による性能評価

鉄道総研構内の走行試験線において、試験車両にアシスト操舵システム一式を搭載し走行試験を実施しました(図7)。試験線はほぼ連続する曲線半径160mの左曲線と半径100mの左曲線が配置された形状となっています。操舵制御を行った場合の出入口緩和曲線(参照)と円曲線区間の平均横圧

を図8に示します。半径160mの円曲線区間では最大で80%以上の横圧低減効果があることを確認しました。また、曲線走行中のきしり音が操舵制御によってオーバーオール音圧レベルで最大5(dB)程度低減する効果が得られました(図9)。

さらに、走行試験で検証できないアシスト操舵制御の効果を検証するため、シミュレーションに基づいて、車輪の摩耗進展や、走行するために必要なエネルギーの変化(走行抵抗の変化)について評価しました。車輪摩耗の進展

は、走行条件や軌道の形状などによって大きく変化しますが、ここで想定したシミュレーション条件では、曲線通過中に車輪フランジ(参照)付近の接触が起こらなくなるためその部分の摩耗が低減していることがわかります(図10)。車両の運動エネルギー変化から換算した走行抵抗に関しても、半径100mの曲線通過にもなうエネルギー消費が20%程度改善する結果となりました(図11)。このように、横圧低減効果以外にも操舵制御を導入すると多くのメリットがあることを確認できました。同時に、操舵アクチュエーターを取り付けることによる直線区間の高速走行安定性の低下は認められないため²⁾、直線走行時の安定性と曲線通過性能を高い次元で両立させることが可能となりました。

まとめ

操舵台車開発の背景とアシスト操舵制御システムの基本的な考え方、走行試験結果について紹介しました。今回試験した内容は鉄道総研構内の走行試験線での走行試験結果にとどまっており、実際の営業車両が走行する線路の形状や走行速度とは異なった状況です。今後、より高速度での走行試験や営業線に適した操舵システムの仕様について検討を進め、実用化に向けた取り組みを進めていきたいと考えています。

RRR

緩和曲線

直線区間と円曲線区間の中間での軌道形状の急激な変化を抑えるため、両者の間には徐々に曲線半径が小さくなって行く区間を設けています。このように位置に応じて曲線半径が変化して行く区間を緩和曲線区間と呼んでいます。

車輪フランジ

脱線を防止するため、車輪の外周に連続して設けた突起(車輪の縁)のことです。

文献

- 1) 鴨下, 石毛, 渡辺, 梅原, 島田: ポルスタレス台車用アシスト操舵システムの基礎試験, 鉄道総研報告, Vol.22, No.9, pp.5-10, 2008
- 2) 梅原, 鴨下, 石毛, 小島: ポルスタレス台車用アシスト操舵システムの性能確認試験, 鉄道総研報告, Vol.26, No.3, pp.11-16, 2012