

機械式空気圧操舵システムの開発

車両構造技術研究部 車両振動研究室
主任研究員 (上級) 鴨下 庄吾

1. はじめに

鉄道車両の曲線通過速度向上は、目的地までの到達時間短縮に非常に効果大きい。ただし、速度向上に伴い車輪-レール間に作用する横圧の増加に対処することが必要である。このような横圧低減策として、様々な形式の操舵台車について研究・開発が進められてきたが、能動的な操舵動作を行うアクティブ操舵方式は国内では実用化に至っていない。この一因は、操舵制御系に不具合が発生し、逆操舵を起こした場合には却って横圧を上昇させる可能性があるためである。

ボルスタレス台車の台車枠-軸箱間に操舵アクチュエータを取り付け、曲線区間で輪軸の操舵動作を行うアシスト操舵台車は、輪軸の自己操舵性能を維持しつつ外力の補助により横圧を能動的に低減する操舵システムである (図1)¹⁾。本システムでは当初操舵制御手法としてセンサ信号の電気的処理によって指令生成することを想定していたが、電気的コントローラを用いて完全な信頼性を保証することは非常に困難であるため、純機械的なリンク機構と空気圧制御弁を直結し、曲線区間走行中の台車-車体間の相対運動に応じて操舵制御を行うシステム (機械式空気圧操舵システム) を考案した²⁾。本報では所内走行試験から得られた定量的な横圧低減効果、逆操舵防止機構の有効性、およびきしり音の抑制効果、また、数値解析による走行抵抗の低減効果、車輪摩耗の抑制効果など機械式空気圧操舵システムの総合的な性能評価結果について報告する。

2. 機械式空気圧操舵システムの構成

機械式空気圧操舵システムは、台車の曲線区間走行時の幾何学的な相対変位からボギー角成分を抽出し、検出したボギー角に応じて空気圧制御バルブを開閉し、操舵アクチュエータを動作させる。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3つの要素から構成される。

ボギー角を機械的に検出するためには、台車-車体間の6自由度相対変位のうち、ヨー方向回転を正確に伝達する機構が必要である。ただし、ボルスタレス台車では台車旋回中心が機構的に固定されておらず、単純にボギー角を抽出することが困難である。そこで、図2に示す2つのユニバーサルジョイントの間に、回転自由度を持たない伸縮可能なロッドを挟んだ構造の角度検出機構を考案した。機構の上端を車体底面に固定し、下端を台車枠と接合する。この機構によりボギー角のみを正確に伝達し、かつその他の方向の運動を拘束しない。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が検出できることが特徴である。

検出したボギー角に応じて、圧縮空気を給排気する空気圧制御バルブは微小ボギー角への応答性から、中間的な圧力制御は考慮せず、圧縮空気のON-OFF制御で操舵アクチュエータを動作させることとした。制御バルブの内部構造を図3に示す。

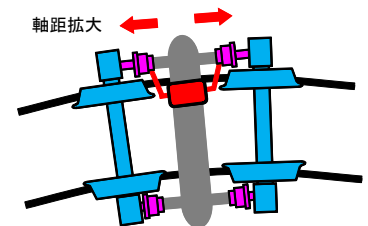


図1 曲線走行中の操舵台車

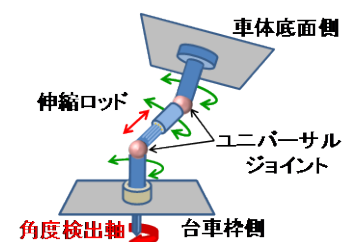


図2 ボギー角検出機構

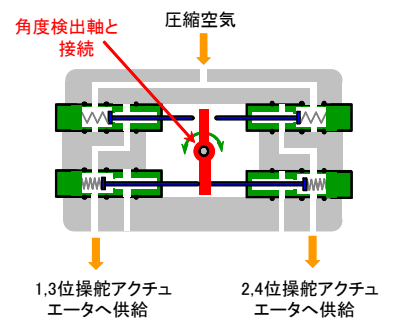


図3 空気圧制御バルブ

制御空気圧によって駆動される操舵アクチュエータは軸箱-台車枠間に取り付け、図1に示すように曲線外軌側の軸距を伸ばすように動作させる。操舵アクチュエータの内部構造を図4に示す。段付きピストンロッドと穴あき円型の遊動ピストンを組み合わせ、空気圧の伝達方向を制限した2段のタンデムシリンダを使用した。タンデムシリンダの片側内部には予圧縮ばねを取り付け、必要な前後支持剛性を与えるために適切な予圧縮力を負荷する。段付きピストンロッドによる作用力の伝達方向は、予圧縮ばねを取り付けた側のシリンダ（以降、ばね側シリンダ）でロッド縮め方向、もう一方のシリンダ（以降、本体側シリンダ）でロッド伸び方向となる。ばね側シリンダ（ポートA）への加圧では、予圧縮ばね力を相殺するが、伸び方向への能動的な操舵力は発生しない。一方、本体側シリンダでは能動的な操舵力はポートBへの加圧によって発生する。さらに、本体端部にポペット弁を設け、ポートBへの配管にこのポペット弁を介在させる。すなわち、ロッドが最も縮小した状態ではポペット弁の遮断動作によって能動的な制御力を防止する構造とする。このようなポペット弁を内蔵したタンデムシリンダによって、逆操舵動作の防止を実現している。以降に逆操舵防止の原理および動作状況を述べる。

曲線進入時にアクチュエータに対して制御空気圧が供給されると、ばね側ピストンでは予圧縮ばね力が相殺される（図5(a)）。本体側シリンダにはポペット弁の働きによって空気圧は供給されない。ここで、先頭軸内軌側車輪に生ずる縦クリープ力がアクチュエータの縮み方向である場合には、予圧縮ばね力が相殺された状態でもピストンロッドはストロークせず、ポペット弁は閉状態を維持する。従って、操舵制御指令が逆操舵方向であった場合には、能動的な操舵動作を起こさない。操舵方向が正常方向の場合には、外軌側車輪の縦クリープ力がアクチュエータ伸び方向に作用するためピストンロッドが外力で延伸され、ポペット弁が開動作する（図5(b)）。するとポペット弁が開いてアシスト力側ピストンに制御空気圧が供給され、能動的な操舵動作を行うことが可能となる（図5(c)）。以上のように、機械的な機器構成によってフェイルセーフ性を確保し、信頼性の高い操舵制御システムが構築できた。

3. 所内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システム一式を搭載し（図6）、牽引車による走行試験を実施した。試験線はほぼ連続する分岐器、R160の曲線、R100の曲線を通過する線路形状となっている。横軸に走行距離を取った先頭軸内外軌の横圧波形を図7に示す。同じ走行条件で供給空気圧によって操舵制御の有無を切り替え、横圧波形を比較した。操舵制御時は、レール継ぎ目

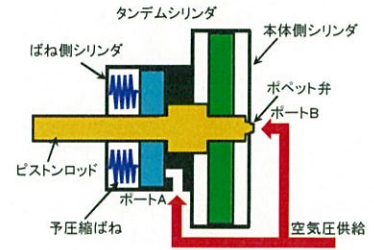


図4 操舵アクチュエータの構造

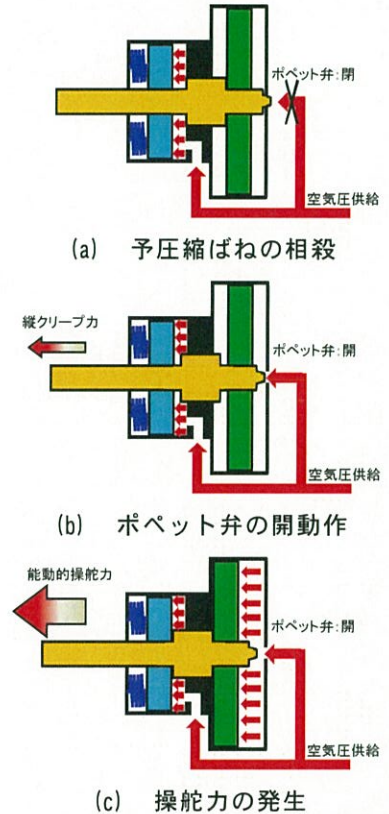


図5 操舵アクチュエータの動作原理



図6 機械式空気圧操舵システム搭載台車

等の角折れに伴う軌道の通り不整に起因する横圧のピークを除いて、轉向横圧はほぼ0まで低減している。なお、継ぎ目ごとに発生する横圧波形は、局所的な軌道変状に起因するもので、操舵により低減できるものではないと考えている。出入口緩和曲線・円曲線の区間別に求めた平均横圧を図8に示す。R160(m)円曲線区間では80%以上の平均横圧低減を達成した。ただし、走行試験を実施した試験線の形状が一般的な鉄道線区の状態に比べて急曲線でオーバークラントな状態であり、実運用環境との差異が大きいため、営業線向け装置に関してはシミュレーションなどによって詳細に解析し、適正なスペックを追究する予定である。

空気圧制御バルブの動作帯域は高い応答性を確保するため余裕代の少ない設定としており、直線走行中などに誤動作する可能性が考えられ、その安全性を検証する必要がある。そこで、システムの配管を逆操舵方向の配管とし、曲線走行中に内軌側前後のアクチュエータを動作させて逆操舵発生時の挙動について調査した。逆操舵指令時の各区間の平均横圧を合わせて図8に示す。逆操舵指令時も横圧の上昇は確認できず、ポペット弁による逆操舵防止機能は想定通り作用していると判断できる。

操舵制御によって、車輪-レール間の幾何学的な配置が適正化されると、縦クリープ力の過大な発生を抑制することができ、フランジきしり音の低減が期待できる。そこで、走行試験できしり音を測定し、操舵制御の有無による発生音圧の評価を行った。走行試験で得られた曲線区間のC特性音圧レベルを図9に示す。きしり音の発生は温度・湿度等の外的要因やレール・車輪接触部分の状態に依存する要因が多く、操舵制御なしのデータのばらつきが大きい傾向が認められたが、制御なしの音圧レベルが高い状況では操舵制御によるきしり音の顕著な抑制効果が確認され、音圧レベルでは最大5(dB)程度の改善効果が得られた。

4. 数値解析による性能評価

操舵制御を行った場合には車輪の進行方向がレール接線方向に接近するため車両の走行抵抗を抑制する効果が期待できる。そこで、R100(m)曲線区間の走行に関し、操舵制御の有無による走行エネルギー変化を数値解析によって求めた。だ行状態で対象曲線に進入し、曲線退出時までの走行速度の変化からの消費エネルギーを比較した結果、1車両あたり123.5(kJ)程度のエネルギー消費改善を図れる可能性があることがわかった(図10)。曲線区間進入前の走行エネルギーに対して、操舵制御なしでは56%程度のエネルギー損失が発生しているが、操舵制御によってその損失をおよそ33%に抑制することができる。ここで、操舵制御に必要なエネルギーは車両の運動エネルギーに比較して微少である。

また、操舵制御によって発生横圧や車輪-レール間のすべりが低減すると、長期間の走行に伴

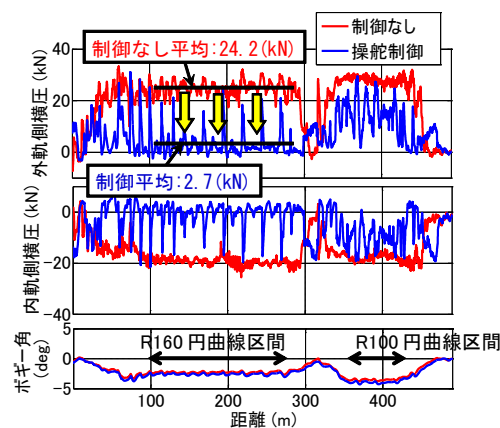


図7 所内走行試験結果

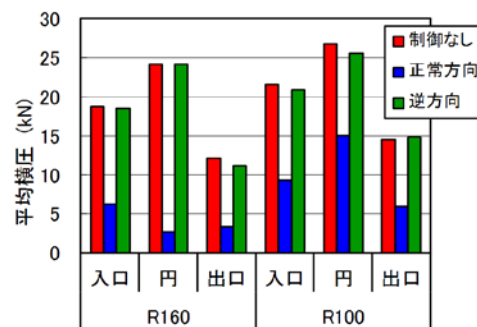


図8 区間別平均横圧

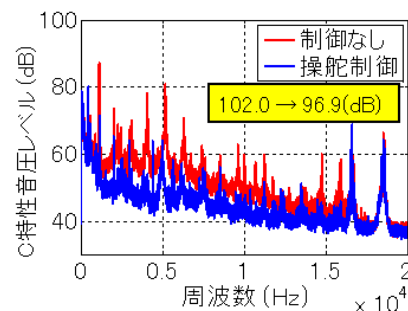


図9 フランジきしり音の抑制効果

う車輪摩耗を改善する効果が期待される。このような車輪摩耗に対する操舵制御の効果を数値解析によって求めた。軌道状態として摩耗の進展し易い R300(m)と R600(m)の2つのS字曲線を想定し、一定速度で曲線区間全体を通過する際の車輪側摩耗量を求める。1回の走行で進展する摩耗量は微少であるため、その摩耗量を定数倍して摩耗深さを求め、次の車輪-レール接触状態に反映させた。このような繰り返し計算から操舵制御の効果を評価した。車輪断面形状変化を図11に示す。数値解析に供した走行区間データは軌道不整を設定していない単純な台形状曲線の組み合わせであるため、レールと車輪踏面の接触位置が特定部分に集中する傾向があり、実車両の一般的な摩耗断面形状と摩耗の進展状況が異なっている。ただし、操舵制御によって車輪踏面とフランジ境界部分付近の接触が発生せず車輪踏面でレールと接触する傾向が強くなり、フランジ部の摩耗が大きく改善していることがわかる。定量的な摩耗評価はより厳密な数値解析が必要であるが、本条件での解析では、操舵制御によって車輪摩耗を抑制できる結果となった。

5. まとめ

所内走行試験の結果から機械式空気圧操舵システムによって、R160(m)の円曲線中で80%以上の定常横圧を低減する顕著な効果が得られた。操舵制御コントローラは純粋に機械的な変位で動作するため、構造的に逆操舵指令を生成する可能性は考えにくい。さらに、逆操舵指令が入力されたとしても逆操舵防止ポペット弁の働きによって逆操舵動作は起こらないことを確認した。本システムによって、現在実用化している機械リンク式のボギー角連動操舵台車³⁾と同等の機能を、空気圧系を使用して既存のボルスタレス台車に適用可能となる。また、急曲線通過中のフランジきしり音低減に効果があり、音圧レベルで最大5(dB)の騒音低減効果が得られた。一方、数値解析結果から曲線通過時の走行抵抗が軽減され、走行に必要なエネルギー消費を削減できることがわかった。また、外軌側車輪のフランジ接触が少なくなり、車輪摩耗量を低減する効果があり、車輪転削周期の延伸につながられる可能性を確認した。

今後、営業線区に近い実線路形状に適した機械式空気圧操舵システムのパラメータ最適化、耐久性確認試験などについて取り組んでいきたいと考えている。

参考文献

- 1) 鴨下庄吾, 石毛真, 渡辺信行, 梅原康宏: 鉄道車両用アシスト操舵システムの実験的検討, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.75, No.750, pp.270-278, 2009
- 2) 鴨下庄吾, 梅原康宏, 山長 雄亮, 石栗 航太郎: 機械式空気圧操舵システムによる曲線通過性能向上, 鉄道技術・政策連合シンポジウム(J-Rail2014), S1-2-2, 2014
- 3) 佐藤栄作, 小林秀之, 岡本勲, 手塚和彦, 柿沼博彦, 玉置俊治: リンク式ボギー角連動方式による特急気動車用操舵台車の曲線通過横圧, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.64, No.625, pp.315-322, 1998

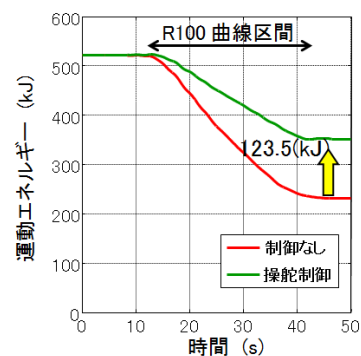


図10 運動エネルギー変化

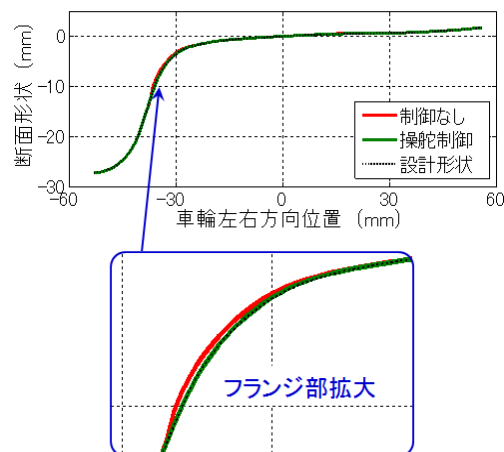


図11 車輪摩耗の変化