

ボルスタレス台車用 アシスト操舵システムの基礎試験

鴨下 庄吾* 石毛 真** 渡辺 信行**
梅原 康宏** 島田 憲司***

Fundamental Tests of Assist Steering System for Bolsterless Truck

Shogo KAMOSHITA Makoto ISHIGE Nobuyuki WATANABE
Yasuhiro UMEHARA Kenji HATAKEDA

In order to decrease the lateral force generated in the railway vehicles in the curve sections of the railway track, a simple steering system that was able to be applicable to the bolsterless bogie was developed. The mono-link with the actuator function is used, and an appropriate steering force is added to supplement self-steering characteristic of the wheel-sets. The authors have designated this system as an "assist steering system". In this paper, we report the result of fundamental running test in the test line on the Railway Technical Research Institute premises. As a result of the test, it is found out that the average lateral force of the vehicle in the circular curve section is decreased by about 30% compared with that under no assist steering control.

キーワード：操舵台車，アシスト操舵，横圧，ボルスタレス台車，空気圧アクチュエータ

1. はじめに

鉄道車両の曲線通過速度向上には、速度向上に伴って増加する横圧に配慮する必要がある¹⁾。過大な横圧の発生は車輪、レールの摩耗や脱線の危険性を伴うため、これまで様々な手法の横圧低減策が提案されてきた²⁾。曲線走行中に輪軸を操舵し、積極的に外軌側軸距を拡大し、同時に内軌軸距を縮小して車輪を曲線の接線方向に向け、横圧を低減させる台車が操舵台車である。

このような操舵台車技術は、自己操舵方式、半強制操舵方式、強制操舵方式の3方式に大別できる。自己操舵方式は、軸箱の前後支持剛性を適正化し、曲線通過性能と蛇行動安定性の両立を図る方式である³⁾。最も単純な構造で操舵台車を構成できる反面、その横圧低減効果には限界がある。強制操舵方式は輪軸をアクチュエータにより駆動して、アタック角を適切に制御する方式である。この方式は横圧低減の効果は最も高いものの、何らかの要因で制御装置がフェイルした場合に逆操舵動作をする可能性があり、フェイルセーフ性が重要視される国内の鉄道においてはこれまで実用化に至っていない。半

強制操舵方式は、曲線走行中に変化する台車-車体間の幾何学的な変位や、曲線通過中の超過遠心加速度等の物理量を利用して、機械的に輪軸操舵を行う方式である。特に、台車-車体間の相対的なボギー角変位を機械リンクで伝達して輪軸に操舵角を与える、ボギー角連動誘導操舵台車は既に実用化され、横圧低減に効果を挙げている⁴⁾。ただし、ボギー角連動誘導操舵台車は台車構造が複雑になり、台車製作コストやメンテナンスコスト、また台車重量が増加するデメリットがある。

このような背景を考慮し、台車構造を複雑にせず、同時にフェイルセーフ性に配慮した操舵システムの検討を行った。広範囲に採用されているボルスタレス台車に操舵機能を付加する方式で、輪軸自体の持つ自己操舵性能は維持しつつ、最大発生力を制限した操舵力を補完して曲線通過性能を向上させるシステムである。本方式をアシスト操舵システムと定義した。万一逆操舵した場合にも安全性が確保できる範囲に操舵力の上限を制限することで、操舵制御のフェイルセーフ性が担保できる。アシスト操舵システムの構成にあたり、台車の機械的な構造や制御機器類が複雑になることを避け、極力簡素な構成で操舵台車を構成することを主眼に据えて開発に取り組んだ。本報告では、アシスト操舵システムの機器構成と基礎的な構内走行試験結果について述べる。

* 車両構造技術研究部（車両振動）
** 車両構造技術研究部（走り装置）
*** 前 車両構造技術研究部（走り装置）
（現 九州旅客鉄道株式会社）

特集：車両技術

2. システムの機器構成

2.1 試験台車

ボルスタレス台車に操舵旋回力を付与することを考える場合、車体-台車枠間にアクチュエータを取り付け、台車枠を旋回させる方向に操舵力を与える方法と、台車枠-軸箱間に輪軸操舵力を与え、輪軸を曲線の中心方向に動作させる方法の2つの方式が考えられる。本報告では、アクチュエータ構成が容易であることから、台車枠-軸箱間にアクチュエータを取り付け、アシスト操舵力を加える方式について検討を進めた。

近年の台車軸箱支持装置は、軸はり式、円錐積層ゴム式等の方式が採用される事例が多いが⁵⁾、ここでは試験台車としてモノリンク式の台車について検討した。モノリンク式の台車では、モノリンクにアクチュエータ機能を付与すれば、簡易に台車枠-軸箱間に操舵力を与えることができるため、少ない改造範囲でアシスト操舵台車を構成できる。また、軸はり式と比較してモノリンク式ではリンクが軸箱左右方向の支持力を負担しないため、アクチュエータで軸箱の左右変位に伴う曲げモーメントを負担する必要がなく、アシストアクチュエータを構成し易いこともメリットとなる。アシスト操舵試験に用いた台車の外観を図1に、円内にモノリンクの取り付け状態を示す。

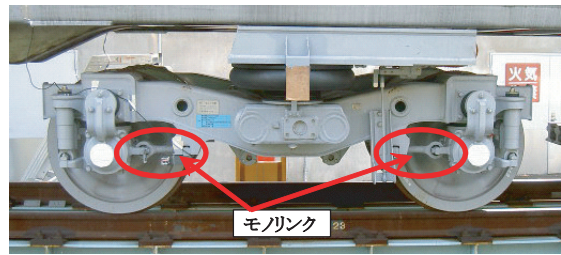


図1 試験台車の外観

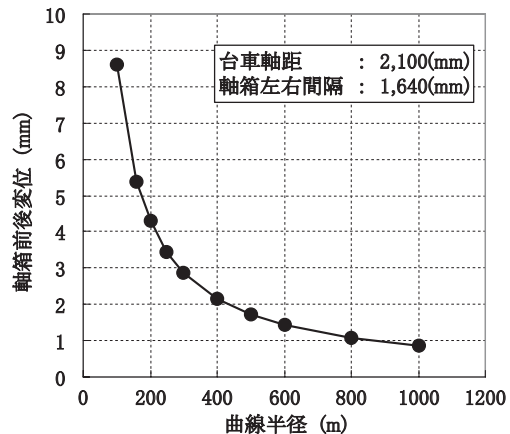


図2 曲線半径と軸箱前後変位の関係

2.2 曲線通過時の幾何学的検討

アシストアクチュエータの基本スペックを策定するため、通過曲線半径に対する軸箱の挙動を幾何学的に検討した。試験台車の軸距から、各曲線半径において車輪転動方向が曲線の接線方向を向くために必要な内外軌軸箱の前後変位を計算した。前提条件として内外軌軸箱が完全に逆相対動作し、推進力伝達等に伴うオフセット移動は生じないこととした。曲線半径と軸箱前後変位の関係を図2に示す。

アシスト操舵ではシステムの簡易な構成を重視し、別途実施したシミュレーションでの横圧低減効果との兼ね合いから、最大操舵ストロークをラジアル位置までの1/2に制限する設計とした。図2の軸箱前後変位は内外軌両側の軸箱が逆向きに動作する際の変位を示しており、片側の軸箱が表示したストロークで変位するとラジアル位置の1/2の操舵ストロークとなる。また、アシスト操舵システムは営業走行における急曲線での適用を想定しているため、曲線半径R300m～R400m程度の曲線を均衡速度以上で走行した場合の発生横圧の低減を主眼に開発している。以上より、片側アクチュエータストローク3mmを実現すれば、有効な操舵動作が可能と考えられる。ただし、今回走行試験を実施する構内試験線の線形から、曲線半径R100mにおいても横圧低減効果が確認できる仕

様とするため、アクチュエータ内部の構成変更によって、最大ストロークは10mmまで確保できる設計とした。

2.3 アシストアクチュエータの構成

アシストアクチュエータにはゴムベローズを空気圧アクチュエータとして応用し、伸張方向の一方向で操舵力を付加する方式を考案した。モノリンクの両端にはゴムブッシュが挿入されており、ゴムブッシュによる剛性と、軸ばねの前後方向剛性の和がモノリンク式台車の軸箱前後支持剛性となる。本システムでは、モノリンクに替えてアシストアクチュエータが軸箱の前後支持装置となるため、制御系のフェイルやゴムベローズの損傷の場合には軸箱前後支持剛性が担保できなくなり、台車の走行安定性に直結する障害となる。そこで、ゴムベローズと並列にスプリングを設け、スプリングに予圧縮をかけた状態でアクチュエータを構成する方法を考案した。

アクチュエータ内蔵モノリンクの内部構造を図3に示す。アクチュエータ非動作時および制御系フェイル時には、予圧縮を掛けたスプリングの作用により通常のモノリンクと同等の軸箱前後支持剛性となり、台車走行安定性に影響を与えない。つまり、通常走行時にモノリンクに負荷される前後力より大きい予圧縮力を与え、非制御時にアクチュエータが外力によって伸張されることを回避する。アクチュエータを動作させるときは、予圧縮をかけたスプリングをさらに圧縮して全長を伸張させる。予圧縮スプリングはアクチュエータ発生力の損失とはな

るものの、フェイルセーフの観点から適切な構成であると判断した。試作したアクチュエータの主要スペックを表1に示す。

このようなアシストアクチュエータをモノリンクに替えて各軸箱支持装置に取り付け、走行試験を実施した。円曲線走行中は外軌側の2つのアクチュエータを伸張させ、軸距を拡大して輪軸をハの字形に操舵する。内軌側アクチュエータは現状ストロークを維持し、リンク両端のゴムブッシュたわみによって自己操舵特性を確保している。アクチュエータの空気圧制御バルブとして、上位側から指示された目標内圧と実内圧との偏差を機械的に取って圧力制御を行う比例弁を使用した。

2.4 操舵制御コントローラ

アシスト操舵用コントローラとして、地上データを用いた予見制御方式および内界センサを使用した自立制御方式の2方式について検討し、それぞれ試験を実施した。

2.4.1 予見制御コントローラ

予見制御方式は制御付き振り車両で採用されている方式⁶⁾で、ATSのような絶対的な車両走行位置の参照ポイントから速度発電機パルスをカウントして進行距離の累算を行い、現在走行位置を検出する方式である。

この手法を操舵制御に応用し、現在の走行位置から曲線情報を先読みし、線形に整合した適切な操舵制御パターンを生成することを検討した。自立制御方式に比べて予見的な操舵制御が可能となり、アクチュエータ動作遅れ等に対応できるため制御上の自由度が高い。従って、操舵パターンの最適化により緩和曲線入口部での横圧低減効果も見込まれる。ただし、軌道データベースや走行位置の参照ポイントが必要で、長期的運用にはこれらのメンテナンスも要求される。また、走行位置検出に誤差を含む場合には、誤った操舵制御を行う可能性がある。実用にあたって、車両間通信機能が必要となり、システムが大規模化してコストも上昇する。

予見制御の絶対車両位置検出ポイントとして地上側に反射シートを設置し、車上の光電スイッチでシートを検出した地点を基準に操舵制御を行った。反射シートからの走行距離は、速度発電機パルスを分周した1mパルスを積算して計測した。操舵制御の目標値パターンは、事前に得た軌道情報から1m間隔で離散化した圧力制御パターンを決定し、操舵コントローラに搭載した。

予見制御方式のコントローラの構成および空気圧制御系の構成を図4に示す。コントローラとしてリアルタイムOSを搭載した工業用コンピュータ(AD-DA変換器およびデジタル入出力装置を含む)を使用し、コントローラの動作状況をLAN接続した他のコンピュータで監視した。操舵制御パターンとして空気アクチュエータの動作遅れを考慮し、指令の立ち上がり時に制御付き振

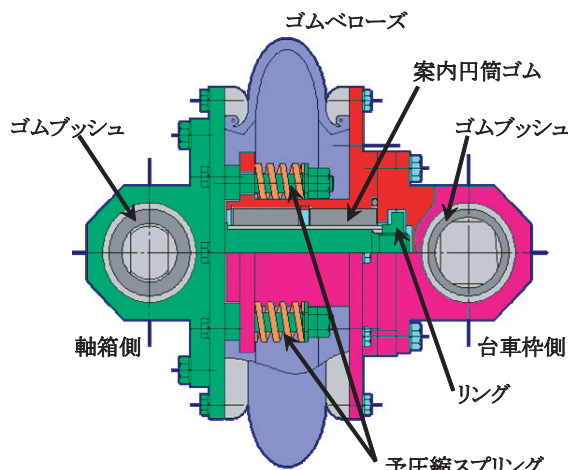


図3 アシストアクチュエータの内部構造

表1 アクチュエータの主要スペック

アクチュエータ最大ストローク		10 (mm)
ゴムベローズ	有効受圧面積	0.044 (m ²)
	最大発生力	30.8 (kN) 700kPa時
予圧縮スプリング	ばね定数	1.47 (kN/mm)
	予圧縮量	10 (mm)
	予圧縮力	14.7 (kN)
案内円筒ゴム	ばね剛性	0.82 (kN/mm)

子車両のアクチュエータ目標値生成と同様のステップゲイン⁷⁾を加えている。ステップゲインの適値は、走行試験において高さを変化させて試験し、実験的に策定することとした。

2.4.2 自立制御コントローラ

自立制御方式はヨーレートジャイロ、加速度センサ等、外界との機械的な接触を持たないセンサ類を使用し、センサ情報から操舵パターンを生成する方法である。原理的にフィードフォワード系のシステムが組みないため、信号検出後のデータ処理に伴う制御遅れが構造的に発生するが、センサ信号の構成方法により、比較的遅れの少ない制御動作が期待できる。センサ類は比較的安価であり、メンテナンスに必要な手間も少ない。また、予見制御方式は軌道データを持たない線区での操舵制御が不可能であるが、自立制御方式では走行する線区が限定されない特長がある。ただし、センサフェイル時には誤った制御指令を出力するため、センサ類の健全性および操舵制御の正常性を診断する機能が別途必要となる。

自立制御方式は車体ヨー角速度信号と走行速度からリアルタイムに車両走行位置の曲率を推定し、得られた曲率に対応して目標操舵制御圧力を逐次決定している。ただし、緩和曲線部のように走行位置変化に伴って曲率が増減している状態でのアクチュエータ動作遅れを補償するため、曲率の変化率に関しても一定の評価重みに基づいて制御圧力を調整できる構成とした。つまり、曲率および曲率の変化分に対してそれぞれ所定のゲインを掛け

特集：車両技術

た和を操舵制御目標値、すなわちアクチュエータ発生力として与える方式を考案した。このような自立制御方式のコントローラの構造および空気圧制御系のシステム構成を図5に示す。操舵コントローラのハードウェア構成は予見制御と基本的に同様であるが、速発処理装置から得る信号は車両の走行速度となる。

ボルスタレス台車のアシスト操舵制御は、基本的に円曲線での横圧低減効果を主目的とするため、緩和曲線進入後から円曲線到達までに適切な操舵動作を完了できれば横圧低減に寄与できる。従って、実用化を考慮した将来的なボルスタレス台車向けアシスト操舵システムでは、自立制御方式の採用が見込まれる。ただし、今回は適切な操舵制御目標値を評価するため、より制御目標の自由度が高い予見制御方式についても走行試験を行った。

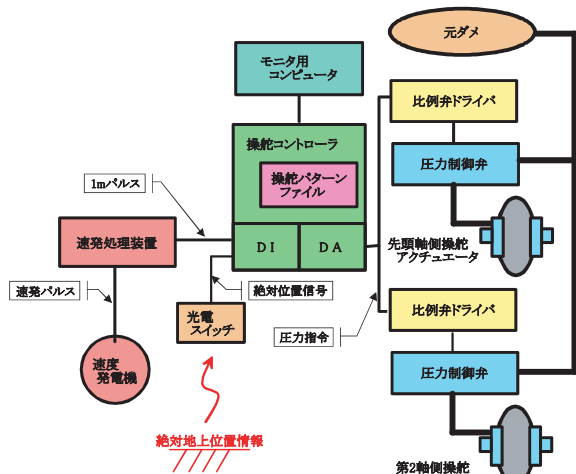


図4 予見制御コントローラ系の構成

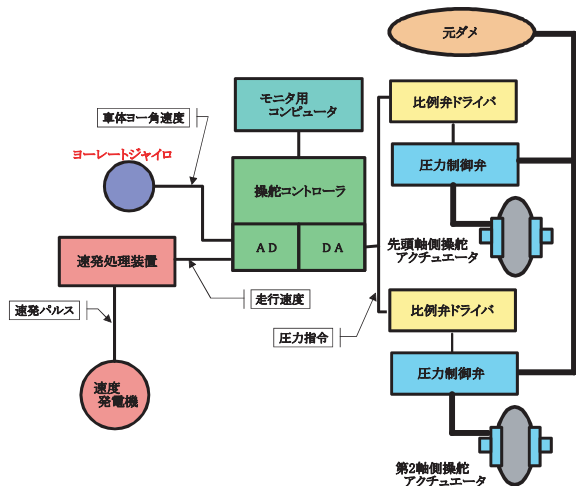


図5 自立制御コントローラ系の構成

3. シミュレーション結果

3.1 アシスト操舵シミュレーション

曲線半径R200m～R600mの円曲線通過時の横圧発生状況を数値シミュレーションによって求めた。シミュレーションは、外軌側軸箱のみ3mm強制的に変位させた状態で曲線通過した際

の状態での先頭軸外軌側発生横圧を計算し、円曲線相当部分での平均横圧を求めた。逆操舵では内軌側軸箱のみ強制的に変位させた。制御条件の違いによる平均横圧の変化を図6に示す。この結果から、アシスト操舵制御による横圧低減はいずれの曲線半径においても確認され、R300mにおいて30%程度の平均横圧低減が期待できることがわかった。また、制御フェイル等により逆操舵した場合の横圧上昇の割合は、通過曲線半径が大きいほど上昇する傾向があるが、最大操舵ストロークを制限すれば、台車の走行安全性に影響を及ぼすレベルには至らないと考えられる。

制御付き操舵台車の最悪フェイル条件は、逆操舵状態を維持して曲線あるいは分岐器を通過する状態であると考えられる。そこで、機械的なフェイルセーフ性を考慮して、操舵制御の効果を期待する曲線半径に応じてアシストアクチュエータの機械的可動ストロークを制限した設計が必要である。

3.2 アクチュエータストローク拡大の効果

構内試験線での走行試験を想定し、曲線半径R100m、アクチュエータ最大ストローク10mmとした場合のシミュレーションを行った。他のパラメータ等は前節と同様である。車両の走行速度は20km/hである。アシスト操舵による発生平均横圧の変化を図7に示す。曲線半径が小さくなるにつれ、同等の横圧低減効果が得られるアクチュエータの必要ストロークは拡大するが、R100mの

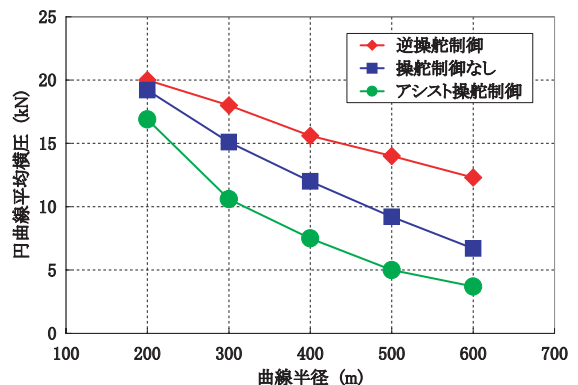


図6 アシスト操舵による横圧低減効果

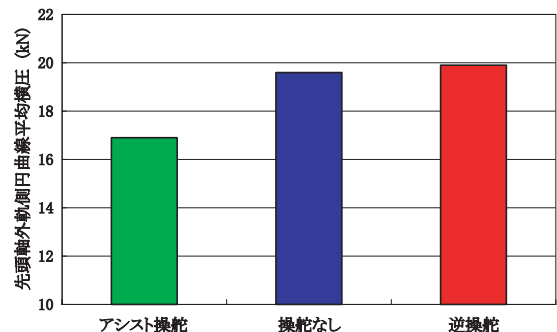


図7 R100mでのアシスト操舵の効果

円曲線においてもストローク10mmを確保すれば約14%の横圧を低減できることがわかった。逆操舵状態で横圧の上昇が少ないのは、レール-車輪間の横クリープ力が飽和状態に近いとみられる。

4. 構内走行試験結果

4.1 走行試験の概要

アシスト操舵台車を試験用構体に組み込んで、鉄道総研構内の試験線において走行試験を実施した。試験台車は動力を持たないため、牽引車によって推進・牽引運転を行った。試験車両の外観を図8に示す。台車枠-軸箱間に取り付けたアシストアクチュエータと試験台車の外観を図9に示す。試験台車の先頭側は新連続式のPQ測定輪軸⁸⁾で、これにより計測された曲線通過中の発生横圧によってアシスト操舵制御の効果を評価した。走行試験は軌道の整備状態が比較的良好な曲線半径R100mの曲線で実施した。走行条件として試験線走行での加速距離および牽引車性能の制約から、曲線進入時の走行速度は18km/h程度が限界であった。

4.2 予見制御によるアシスト操舵試験

予見制御によってアシスト操舵制御を行った場合と、パッシブ状態での横圧発生の状況を比較して図10に示す。横軸は基準位置からの走行距離である。操舵パターンは、緩和曲線入口で最大操舵力の60%をステップ状に付加し、緩和曲線全体にわたってランプ状に操舵力を上昇させ、円曲線中で最大操舵力を維持した後、円曲線終端で操舵力を低下させる。予見制御方式としてこのようなパターンが、入口緩和曲線および円曲線での横圧低減効果が大きいことがわかった。

アシスト操舵制御により、入口緩和曲線の平均横圧で37%、円曲線の平均横圧で24%の低減が達成された。特に緩和曲線入口部でのステップ状の操舵力付加が有効で、緩和曲線進入時の横圧抑制に効果がある。ただし、ステップ操舵量を過剰に付加すると内軌側横圧の発生方向が正方向に遷移し、オーバーステアとなる事象が確認された。ステップ操舵量60%においても、そのような傾向が認められる。

円曲線での外軌側横圧には数カ所にピークが生じており、その位置での横圧低減効果は明確ではない。試験で使用したアシストアクチュエータは、伸張時にアクチュエータの剛性が内部に込められた空気の高圧縮性のみで維持されるため、構造的にリンク剛性が極端に低下した状態となり、外乱を受け易くなる傾向があると考えられる。アクチュエータのストロークは前後軸箱でほぼ共通で、最大ストロークに近い9.5mm程度の動作が確認された。

4.3 自立制御によるアシスト操舵試験

自立制御によってアシスト操舵を行った場合とパッシブな状態での横圧発生の状況を比較して図11に示す。アシスト操舵力はほぼ想定通りに出力され、地上データや走行位置検出を用いない制御方式でアシスト操舵が実現できる可能性が示された。予見制御の結果に比べ、走行

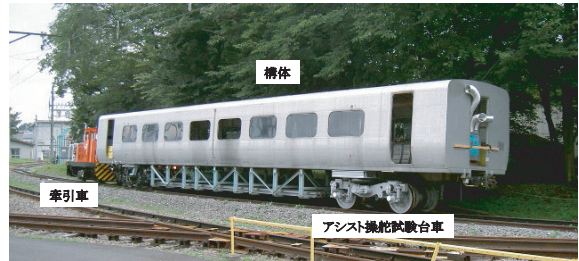


図8 構内走行試験車両

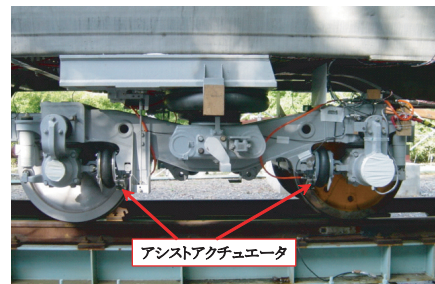


図9 アシスト操舵台車の外観

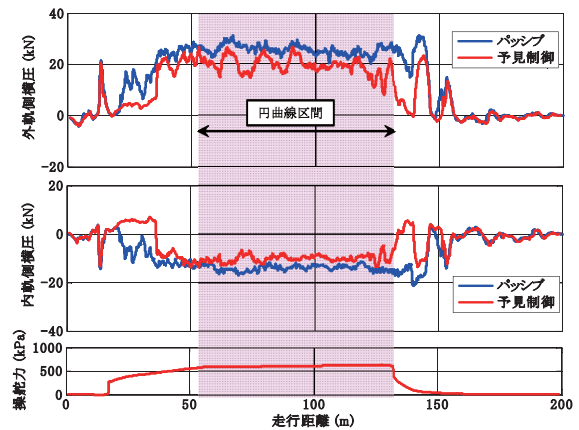


図10 予見制御によるアシスト操舵試験結果

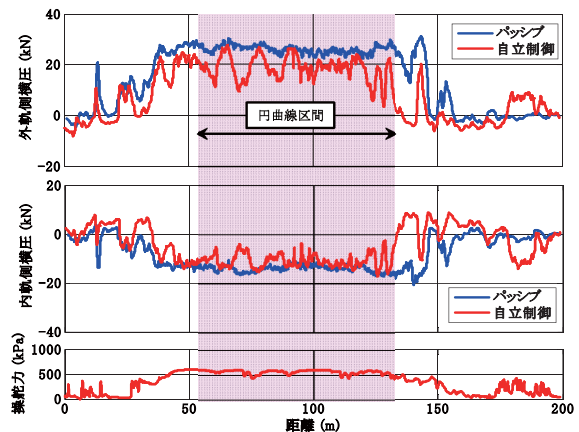


図11 自立制御によるアシスト操舵試験結果

特集：車両技術

距離 30m 付近の外軌側横圧に対する低減効果が見られないが、今後操舵コントローラの制御手法を改善すれば対処できる可能性が高いと考えられる。入口緩和曲線，円曲線における横圧低減率はそれぞれ37%，28%であり，予測制御による低減効果と遜色のないレベルにまで達成できた。

4.4 アシスト操舵制御効果の比較

システムのフェイルセーフ性を検証するため，逆操舵走行による試験を実施した。走行開始直後より内軌側アクチュエータに最大操舵力を与えて曲線全体を走行し，発生横圧を計測した。外軌側平均横圧の上昇幅は円曲線で1%の増加に留まったが，シミュレーションと同様に横クリープ力が飽和状態に近いとめと考えられる。

走行試験およびシミュレーションによって求めた円曲線における制御条件別平均横圧の比較を図12に示す。走行試験によるパッシブ走行での発生横圧にばらつきがあり，また，シミュレーションで求めた横圧絶対値に乖離が見られたため，パッシブの条件を100%とした場合の変化率で評価した。実計測とシミュレーションでの操舵制御の改善効果に差が見られるが，主にレール-車輪間の摩擦係数変化に起因すると考えられる。アシスト操舵制御によって30%程度の横圧低減効果があることが認められる。

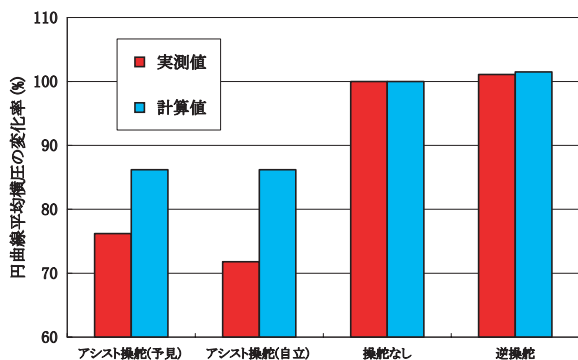


図12 円曲線の平均横圧比較

5. まとめ

モノリンク式のボルスタレス台車を対象として，大幅な改造を伴わずに構成可能なアシスト操舵システムについて検討し，次のような事柄を明らかにした。

- (1) モノリンクを，アクチュエータ機能を持つリンクに変更することによって，比較的簡易に操舵台車を構成できる。
- (2) 走行試験結果から，円曲線中では操舵なしの状態に比べ，23～28%程度の横圧低減効果が見込まれる。
- (3) 操舵制御コントローラは，地上データ等を使用せず，車両に搭載したセンサ出力を用いて構成できる可能性がある。
- (4) 操舵制御フェイル時の挙動として，アクチュエータ

の機械的な最大ストローク制限によって，横圧上昇を抑えることができる。

- (5) アシスト操舵システムの実用化開発により，低コストに円曲線の横圧低減を図ることができる。

今回実施した走行試験は構内試験線の線形および車両の性能に関する制約から，急曲線を低速で走行した場合の横圧低減効果の把握に留まっている。今後の実用化に向けて，営業車両に近い環境での走行試験が必須である。走行速度が上昇した場合，アクチュエータの動作遅れ，またはコントローラ演算時間の問題が顕著化し，緩和曲線部での横圧低減効果が低下する可能性がある。そこで，コントローラの制御手法をより深度化し，これらに対処することが要求される。また，逆操舵動作を起こした場合のフェイルセーフ性についても実態に近い状況で検証する必要がある。このような速度変化，あるいは車体重量のような車両パラメータが変化した場合でも適切な操舵制御を行うロバスト性の高いコントローラは，制御付き操舵台車の実用化にあたって重要な開発項目となる。また，本線走行が可能な形式のアシストアクチュエータ，空気圧制御バルブ等を構成するため，軸箱まわりの設計と合わせて，今後の検討が必要である。

文献

- 1) 佐藤栄作：操舵台車における横圧と最近の操舵台車の技術動向，鉄道車両と技術，No.7, pp.12-19, 1997
- 2) 谷藤克也，森山淳，渡辺直行：アクティブ操舵による鉄道車両の曲線通過に関する基礎的検討，日本機械学会論文集（C編），Vol.642, No.66, pp.600-607, 2000
- 3) 須田義大，和田昌己：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），Vol.540, No.57, pp.2633-2639, 1991
- 4) 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.625, No.64, pp.315-322, 1998
- 5) 小泉智志：軸箱支持装置の話，鉄道車両と技術，No.9, pp.16-23, 1996
- 6) 榎本衛，真木康隆，風戸昭人，梅原康宏：車体傾斜車両に対する適用技術の動向調査，鉄道総研報告，Vol.20, No.6, pp.41-46, 2006
- 7) 榎本衛，白戸宏明，佐々木君章，神山雅子：振り列車の乗り心地を改善する，RRR, Vol.62, No.1, pp.32-35, 2005
- 8) 石田弘明，松尾雅樹，手塚和彦，植木健司：鉄道車両の新しい輪重，横圧，脱線係数連続測定法（測定装置の開発），日本機械学会論文集（C編），Vol.614, No.63, pp.3417-3423, 1997