

曲線通過性能を向上するボギー角操舵システムの開発

小島 崇* 梅原 康宏* 鴨下 庄吾** 本堂 貴敏***

Development of Active Bogie-Steering System to Improve Curving Performance

Takashi KOJIMA Yasuhiro UMEHARA Shogo KAMOSHITA Takatoshi HONDO

This paper presents an active steering system to ensure both the curving performance and the high-speed running stability of the vehicle. The proposed system is so configured as to detect the curves by the gyroscopes mounted on the vehicle and to generate a yaw moment between the carbody and the bogie with the hydraulic actuators to replace the existing yaw dampers. This configuration enables the reduction of the wheel/rail lateral force with a small additional mounting space without requiring complicated mechanical links in the bogies. The actuators also work as passive yaw dampers during the high-speed running to ensure the running stability. A test vehicle equipped with the developed steering system was made to run on a test track. The result shows that the active steering reduced the lateral force of the outer wheel of the front axle in the circular curve by about 60% on average as compared with the inactive steering.

キーワード：台車，操舵制御，曲線通過性能，横圧，電動油圧アクチュエータ

1. はじめに

鉄道車両の台車には、基本的な運動性能として走行安定性と曲線通過性能が求められる。台車旋回抵抗および軸箱支持剛性を大きく、軸距を長く、踏面勾配を小さくすることで走行安定性は向上するが、曲線通過性能は低下する。一般には運転速度や走行線区に合わせてこれらの諸元が選定されるが、高速走行区間と急曲線区間の両方を走行する車両の場合、上記性能の両立が課題となる。特に、新幹線と在来線の直通運転を行う新在直通車両では大きな課題となり、新幹線区間の運転速度を向上させるほど、諸元を一意に決定して対応することはより困難になる。そこで、急曲線区間において車体と台車枠の間に操舵モーメントを加えることにより曲線通過性能を向上させ、高速走行区間ではヨーダンパとして機能することにより走行安定性を確保するボギー角操舵システムを開発している。本稿では、ボギー角操舵システムの試作、試験線走行による操舵性能評価、車両試験装置による走行安定性評価の結果について述べる。

2. 操舵システムの構成検討

2.1 操舵機構

鉄道車両の操舵については、車輪とレールの相対ヨー角であるアタック角を零に近づけることで横圧を低減す

る「輪軸操舵方式」の操舵台車について、これまで多くの研究が行われ、ボギー角連動操舵台車¹⁾²⁾が国内で実用化されている。台車枠に対して輪軸を操舵する輪軸操舵方式は、リンク等の特別な機構を軸箱支持装置に設けることで実現される。一方、松本らが提案する「ボギー角アクティブ操舵方式³⁾」は、車体に対して台車枠を操舵するものであり、一般の台車と同じ軸箱支持装置を構成することができる。本開発では、新幹線における高速走行時の信頼性確保に有利と考えられるボギー角アクティブ操舵方式を採用し、さらに、次節で述べるように、高速走行時に操舵アクチュエータをヨーダンパとして機能させる操舵システムを検討した。

2.2 操舵モーメント発生機構

本開発では、1台車の片側に2本のヨーダンパを並列に装備する台車をベースとして操舵システムを検討することとした。

操舵装置を新たに台車に搭載するためには、その搭載スペースが必要になるが、台車周辺に確保できるスペースは限られている。また、本システムでは車体・台車間に操舵力を作用させて台車を旋回させるが、この操舵力を作用させる位置が台車中心から遠いほど、必要な力が小さくなるため有利である。

これらのことから、すでに台車に装備されているヨーダンパをアクチュエータに置き換えて制御することにより操舵モーメントを発生し、非制御時には通常のヨーダンパとして機能する構成について検討した。

新在直通車両用台車⁴⁾では、片側にヨーダンパを並列に2本装備し、一方を通常のダンパ、もう一方を減衰

* 車両構造技術研究部 走り装置研究室
** 車両構造技術研究部 車両振動研究室
*** 鉄道力学研究部 車両力学研究室

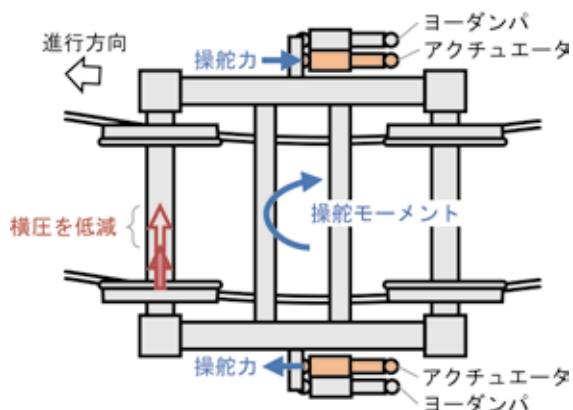


図1 ヨーダンバ位置での操舵力制御

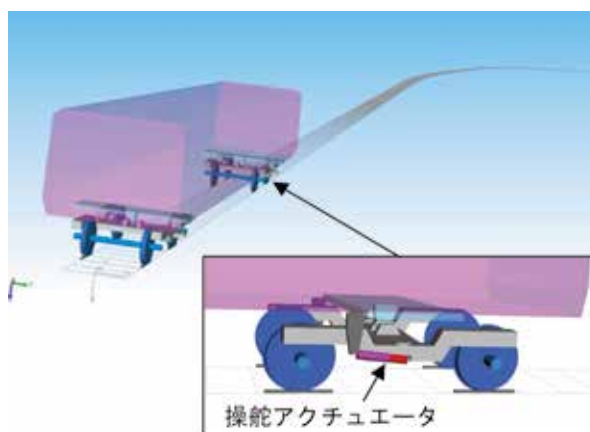


図2 シミュレーションモデル

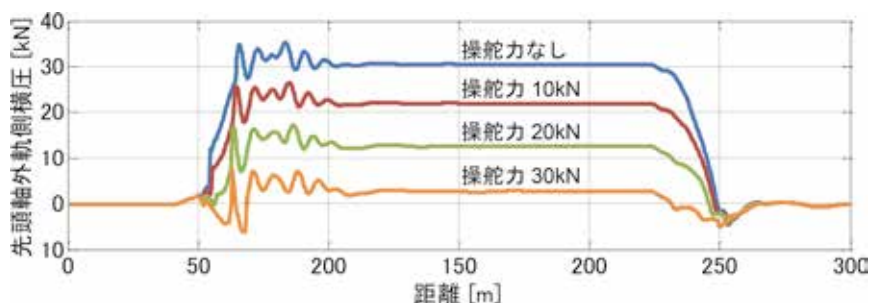


図3 曲線走行シミュレーション結果

力切替式ダンパとして、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を向上させている。本操舵システムは、図1に示すように、切替式ダンパをアクチュエータに置き換え、急曲線区間ではアクチュエータによる操舵制御を行い、高速走行区間ではアクチュエータをヨーダンパとして機能させる。

2.3 曲線検出方法

振り車両のように、走行線区の曲線と地点情報で構成されるデータベースを用いて予見制御を行うと、曲線出入口の緩和曲線に応じた操舵制御が可能などの特長があるが、データベースの保守が課題となる。一方、センサにより曲線を検出する方式は、曲線の認識に遅れを伴うため緩和曲線での操舵による横圧低減効果は減少するが、システム構成を簡単にできる特長がある。本システムでは、主に円曲線を対象に曲線通過性能を向上させることとし、センサ検出方式を採用した。

3. 走行シミュレーションによる仕様検討

操舵アクチュエータの必要操舵性能と横圧低減効果の基本的な関係を把握するため、マルチボディダイナミクス解析ソフトウェアを使用した数値シミュレーションを

実施した(図2)。ヨーダンバ位置に操舵アクチュエータを設け、走行する軌道の曲線形状に整合させて台形波として操舵力を作用させた。

曲線半径250m、走行速度80km/hにおける先頭軸外軌側の横圧を図3に示す。円曲線中の横圧減少量は、操舵力にほぼ比例していることがわかる。

以上のシミュレーション結果を踏まえて、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し、また実車への装着性も考慮した操舵アクチュエータを製作した。

4. 操舵システムの試作

前章のシミュレーション結果を反映して、図4に示すボギー角操舵システムを試作した。これは、高速走行安定性が要求される場合にダンパとして動作できる操舵アクチュエータ、ヨー角速度を検出するジャイロ、ヨー角速度から曲線を検出し操舵制御を行う操舵制御装置で構成される。また、ボギー角を機械的に検出し逆操舵および直線区間での操舵を防止する機構を構成することで、フェイルセーフ性の高いシステムとした。

4.1 操舵アクチュエータ

ボギー角操舵システムでは、減衰力切替式ダンパの機

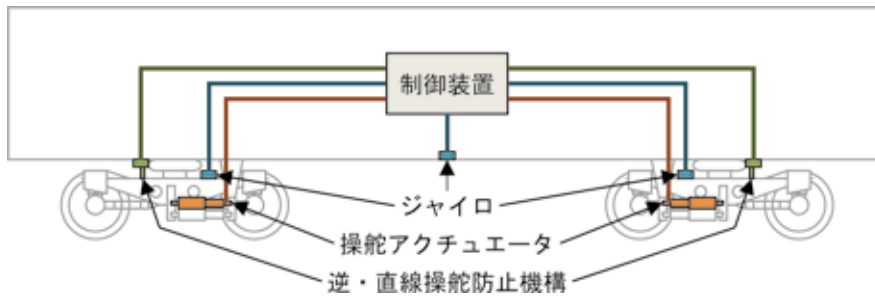


図4 ボギー角操舵システム概略図

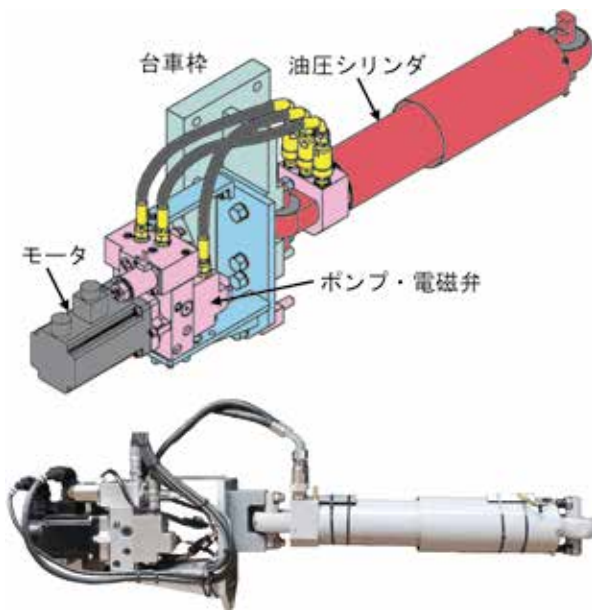


図5 操舵アクチュエータ

能に加え、操舵力を発生させるアクチュエータとしての機能が必要とされる。このため、図5に示す電動油圧式アクチュエータを試作した。

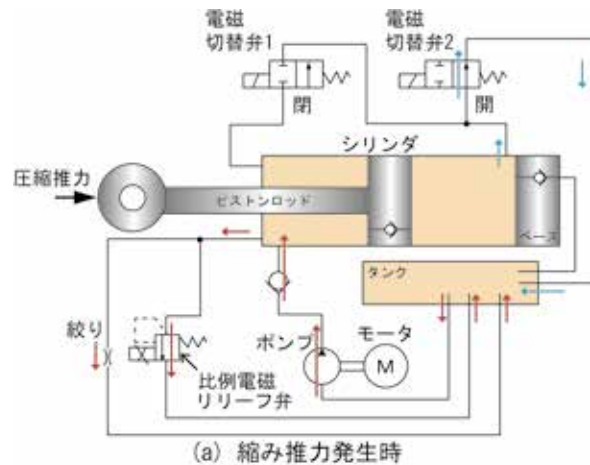
搭載スペースを考慮し、モータ・ポンプ・電磁弁ユニットと油圧シリンダを分離してホースで接続する構成とした。図6に示すように、モータ、2個の切替弁、パッシブ弁を備えた比例電磁リリーフ弁の動作により、以下の3つのモードを切り替える。

(1) アクチュエータモード

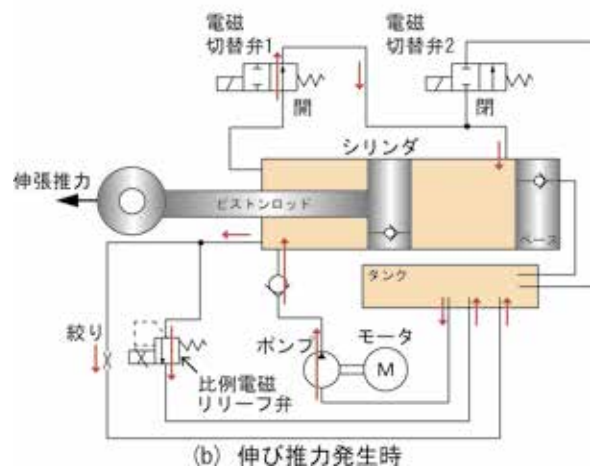
モータを動作させ、切替弁1を閉じ、切替弁2を開けば、シリンダのロッド側が高圧になり、縮む力が発生する(図6(a))。切替弁1を開き、切替弁2を閉じれば、両室が高圧になり、受圧面積差により伸びる力が発生する(図6(b))。力の大きさは、比例電磁リリーフ弁によって制御する。

(2) 減衰大モード

モータを停止し、比例電磁リリーフ弁を閉じ、切替弁1、2をともに閉じる。これによって通常のダンパと同様の油圧回路となり、伸縮時に押し出される油の流れを絞りとりリーフ弁により制限することで減衰力を発生さ



(a) 縮み推力発生時



(b) 伸び推力発生時

図6 操舵アクチュエータ油圧回路

せる。

(3) 減衰小モード

モータを停止し、比例電磁リリーフ弁を閉じ、切替弁1、2をともに開く。シリンダの両室とタンクが連通することで、発生する減衰力が小さくなる。

4.2 操舵制御方法

本システムでは、地上データベースなどを使用しない操舵制御方法として、ヨー角速度および走行速度のみを参照するシンプルな操舵制御アルゴリズムを検討した。

4.2.1 操舵アクチュエータのモード切替

走行速度に応じて、アクチュエータの3つのモードを切り替える。高速走行時（例えば130km/h以上）は、減衰大モードとし、操舵アクチュエータおよび並列に設けるヨーダンパの両方で減衰力を発生させ、走行安定性を確保する。それ以下の速度において、アクチュエータモードとして曲線で操舵制御を行う。ただし極低速時は、算出される曲率の精度が低下するため、操舵制御を行わず、減衰小モードとする。アクチュエータモードおよび減衰小モードにおける減衰力は主にヨーダンパにより発生する。

4.2.2 曲線の曲率算出

曲線の曲率は、ヨー角速度を走行速度で除し、振動成分を除去するためローパスフィルタに通すことにより算出する。設定したしきい値より曲率が大きい（曲線半径が小さい）場合に操舵制御を行う。安全性を考慮し、車体、前台車、後台車それぞれ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にのみ制御する。

4.2.3 操舵力算出

必要な操舵力は曲率に比例すると仮定し、上記で算出した曲率に比例させた操舵力とする。比例定数は、実験的に求めることとする。アクチュエータのモータの連続定格に応じて設定した最大操舵力を上限として、操舵力指令を出力する。

4.2.4 ジャイロの健全性判定

車体および各台車のジャイロから出力されるヨー角速度の低周波数成分は、車体ヨー角速度 \div (前台車ヨー角速度+後台車ヨー角速度) \div 2の関係が成り立つ。そこで、この式の両辺の差が大きい場合に異常と判断する。

4.3 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逆操舵および直線区間での操舵を防止する、逆・直線操舵防止機構を設けた。

ボギー角を機械的に検出するためには、台車・車体間に発生する6自由度の相対変位のうち、ヨー角のみ正確に抽出する機構が必要である。そこで、回転自由度を持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⁵⁾を適用した。本機構は、図7に示すように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。これにより、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ることが特徴である。

得られたボギー角を操舵制御のパラメータとして使用する方法も考えられるが、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により、曲線方向の判別のみを使用した。



図7 逆・直線操舵防止機構



図8 試験線による操舵性能評価試験

5. 試験線走行による操舵性能評価

試作したボギー角操舵システムの操舵性能を評価するため、鉄道総研の在来線試験車両に本システムを搭載し、所内の狭軌試験線にて走行試験を実施した。

5.1 試験方法

図8に示すように、操舵制御対象は1台車とし、操舵アクチュエータおよび逆・直線操舵防止機構を1台車に搭載した。操舵アクチュエータと並列に設けるヨーダ

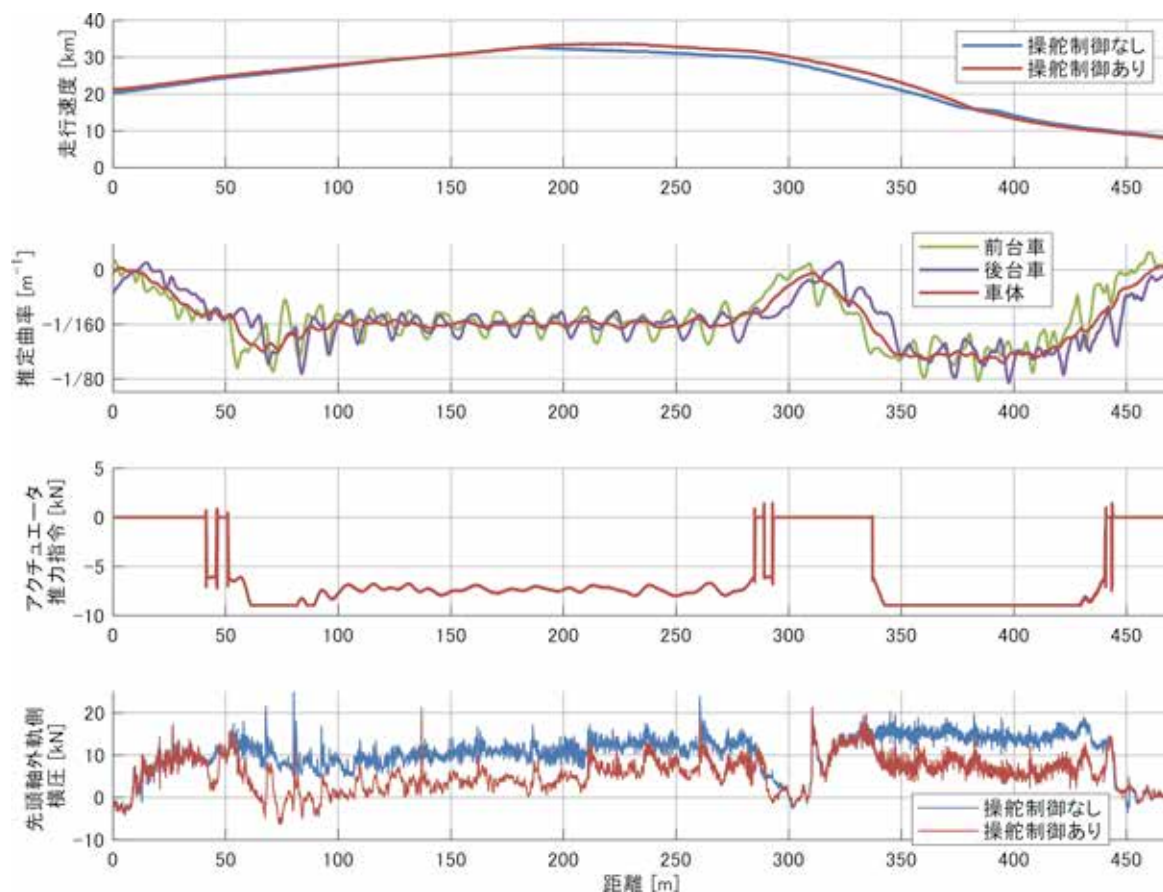


図9 試験線走行結果

ンパは、本試験では低速であるため省略した。空気ばね左右間隔は1,980mm、操舵アクチュエータ左右間隔は2,520mmである。制御対象台車が先頭となる方向に試験線を走行した際に発生する横圧を評価した。

5.2 試験結果

先頭軸外軌側の横圧の測定結果を図9に示す。円曲線中の定常的な横圧が操舵制御により低減されていることが確認できる。これは曲線走行時の空気ばね前後変位により発生する反力を操舵アクチュエータにより相殺しているためと考えられる。半径160mの円曲線区間の平均横圧を図10に示す。本試験では、操舵制御により、非制御時と比較して平均横圧が約6割低減する結果が得られた。

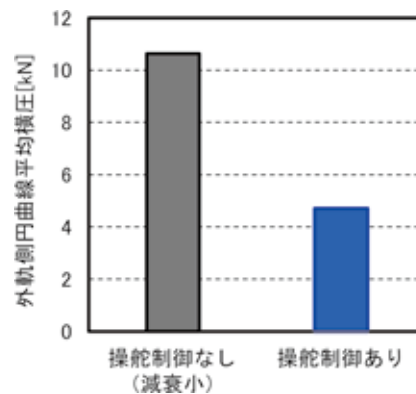


図10 半径160mの円曲線における先頭軸外軌側の平均横圧

6. 車両試験装置による走行安定性の評価

試作したボギー角操舵システムの走行安定性への影響を評価するため、車両試験装置を用いて蛇行動試験を実施した。

6.1 試験方法

図11に示すように、車両試験装置に新幹線台車1台車および車体相当の荷重枠を載せた。ばね上質量は、半車体相当の17tとした。ヨーダンパと並列に操舵アクチュエータを取り付けた構成(図1)と、新在直通車両と同様にヨーダンパと並列に切替式ヨーダンパを取り付けた構成を比較した。ただし、より厳しい条件での評価とするため、1本のヨーダンパがフェールした状態を想



図 11 車両試験装置による走行安定性評価試験

定し、ヨーダンパは台車に1本のみ（片側のみ）取り付けした。切替式ヨーダンパおよび操舵アクチュエータのモードは減衰小と減衰大の2条件とした。軌条輪の回転速度を段階的に上げながら、前軸および後軸の軌条輪を左右方向に正弦波（振幅±3mm、周波数1Hz、長さ3周期、前軸・後軸間逆相）で加振し、加振後に蛇行が発生した際の軌条輪周速度を蛇行限界速度とした。

6.2 試験結果

切替式ヨーダンパ取り付け時の減衰小、減衰大の各モードにおける蛇行限界速度を基準として、操舵アクチュエータ取り付け時の各モードでの正規化した蛇行限界速度は、減衰小モードでは1.02、減衰大モードでは1.03であった。この結果から、試作したボギー角操舵システムが走行安定性に影響しないことを確認した。

7. まとめ

ダンパとしても動作する操舵アクチュエータ、ヨー角速度を検出するジャイロ、ヨー角速度から曲線を検出し操舵制御を行う操舵制御装置、ボギー角を機械的に検出し逆操舵および直線区間での操舵を防止する機構から構成されるボギー角操舵システムを開発した。

試作した操舵システムを在来線試験車両に搭載し、鉄道総研内試験線を走行した。その結果、操舵制御により、半径160mの円曲線走行時の先頭軸外軌側の平均横圧が、非制御時に対して約6割低減され、本操舵システムの横圧低減効果を確認した。

また、車両試験装置において1台車の蛇行動試験を行った。操舵アクチュエータを取り付けた場合と、新在直通車両同様に切替式ヨーダンパを取り付けた場合で蛇行動限界速度を比較し、本ボギー角操舵システムが走行安定性に影響しないことを確認した。

謝 辞

操舵アクチュエータ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、この場を借りて深く感謝申し上げます。

文 献

- 1) 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.3563-3570, 1998
- 2) 荻野智久: リンク式片軸操舵台車の開発, 日本機械学会誌, Vol.117, No.1152, pp.724-727, 2014
- 3) 松本陽, 佐藤安弘, 大野寛之, 水間毅, 須田義大, 道辻洋平, 谷本益久, 中居拓自, 佐藤興志: ボギー角アクティブ操舵台車の研究開発 (第2報・シミュレーションと台上実験の結果), 第10回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.115-118, 2003
- 4) 梅田啓, 世古将之: JR 東日本 E6 系新幹線 (量産車), 車両技術, 245 号, pp.4-23, 2013
- 5) 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