

ボギー角操舵システムの実用化に向けた走行シミュレーション

佐藤 康頼* 梅原 康宏** 鴨下 庄吾* 根岸 久子***

Running Simulation for Practical Application of the Active Steering Bogie System

Yasuyori SATO Yasuhiro UMEHARA Shogo KAMOSHITA Hisako NEGISHI

Active steering bogie systems have been developed to ensure both the running stability and curving performance of railway vehicles. A numerical simulation is performed to clarify the relationship among the steering moment or the bogie angle and the lateral force reduction effect. The simulation has shown that the best control method for the overall vehicle system is to steer both front and rear bogies in the same direction of the curve so that both bogie angles get close to the geometrically ideal bogie angle in the circular curve section. We will continue to conduct research while verifying it in a running test to put the steering system into practical application.

キーワード：走行安定性，曲線通過性能，操舵制御，操舵アクチュエータ，ボギー角，横圧低減

1. はじめに

市街地や山間部を走行する在来線は曲線が多く，曲線通過時に増大する横圧¹⁾によって車輪やレールに負荷がかかり，鉄道事業者における車両や線路のメンテナンスの労力と費用の負担を増大させる。そこで，曲線通過時の横圧低減技術として，操舵台車が開発された²⁾。

これまでに開発された操舵台車を大別すると三方式ある。一つ目は「自己操舵台車」と呼ばれ，軸箱の前後支持剛性を柔らかくする，または車輪の踏面勾配を大きくして，曲線への追従性を向上させた台車である。二つ目は「強制操舵台車」と呼ばれ，油圧などの外部エネルギーにより輪軸または台車の姿勢を制御する台車である。三つ目は「半強制操舵台車」と呼ばれ，外部からのエネルギー供給がなく，車体と台車のボギー角から機械的に操舵機構を動作させる台車である^{2) 3) 4)}。

新幹線区間と在来線区間の両方を走行する新在直通新幹線は，在来線区間では横圧低減のために車体と台車間の旋回抵抗を小さくする必要がある一方，新幹線区間では高速での走行安定性を確保するため，車体と台車間の旋回抵抗を大きくする必要がある。そこで，新在直通新幹線の車両では，ヨーダンパの減衰係数を切り替えることで，この両立を実現している。今後想定される新幹線のさらなる高速化においては，在来線区間での曲線通過性能と新幹線区間での高速走行安定性の両立がさらに困難となる。そこで，在来線区間ではアクチュエータにより旋回抵抗を軽減する力を発生させ，車体に対して台車を旋回させる操舵制御を行うことにより横圧を低減し，新幹線

区間ではヨーダンパとして動作することで高速走行安定性を両立できる，ボギー角操舵システムを開発している⁵⁾。

ボギー角操舵システムの研究開発としては，基礎実験による横圧低減効果の確認⁶⁾，曲線位置情報を利用した最適制御のシミュレーション⁷⁾，フェール時のシミュレーション⁸⁾，営業線での走行試験などが行われているが実用化には至っていない。また，前後台車の操舵モーメントやボギー角と横圧低減効果の関係について，明らかになっていないことも多い。そこで本研究では，開発中のボギー角操舵システムの実用化に向けて，曲線位置情報に依存せず，車体のヨー角速度と走行速度情報による両台車及び片台車での操舵制御シミュレーションを行い，これらの関係を明らかにして，横圧低減効果の確認と横圧低減メカニズムを考察した。

2. 操舵システム構成

2.1 開発しているボギー角操舵システム

本システムは，操舵アクチュエータ，ヨー角速度を検出するジャイロセンサ，ヨー角速度から曲線を検出し操舵制御する操舵制御装置，ボギー角を機械的に検出し逆操舵及び直線区間での操舵を防止する機構から構成される。開発している操舵システムを図1に示す⁵⁾。操舵アクチュエータは高速走行安定性を保つためのヨーダンパとしても機能し，減衰係数の切り替えが可能である。

2.2 適用検討台車

本操舵システムで適用対象として検討している車両は，ヨーダンパを並列に片側2本装備し，一方を減衰力切替式ダンパとして，新幹線区間では減衰力を大きくすることで走行安定性を確保し，在来線区間では減衰力

* 車両構造技術研究部 車両振動研究室
** 車両構造技術研究部 走り装置研究室
*** 東日本旅客鉄道株式会社

を小さくすることで曲線通過性能を向上させる車両である。本システムは、この減衰力切替式ダンパをアクチュエータに置き換え、新幹線区間ではヨーダンパとして機能させ、在来線区間ではアクチュエータにより操舵モーメントを発生させて曲線通過性能を向上させる⁵⁾。

2.3 曲線検出及び操舵力算出

本システムでは、主に円曲線の曲線通過性能を向上させる制御を行うこととした。線路曲率（以下、曲率）はジャイロセンサで実測した車体のヨー角速度を走行速度で除することにより算出する。必要な操舵力は曲率に比例すると仮定し得られた曲率に比例定数を乗じた値を操舵力として算出する⁵⁾。算出した操舵力を図2に示すようアクチュエータに入力し、操舵モーメントを発生する。



図1 開発しているボギー角操舵システム

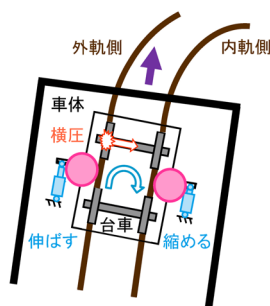


図2 アクチュエータへの操舵力入力（前台車）

3. シミュレーションモデル

3.1 車両モデル

マルチボディダイナミクス解析ソフトウェアを使用し、曲線通過時の走行シミュレーションを行った。車両モデルは新在直通新幹線車両の付随車とした。なお、車体・台車共に剛体とした。駆動は車輪に駆動力が加わらない牽引によるものとし、走行速度は一定とした。シミュレーションの出力は、車体ヨー角速度、走行速度、操舵力、横圧、ボギー角とした。

3.2 軌道モデル

基本特性を検証するため、軌道はカント及びスラックのない標準軌とした。また、軌道変位なしとして外乱の影響を排除し、操舵モーメントやボギー角と横圧低減

効果の関係が明確になるようにした。線形は、入口直線 30m、入口緩和曲線 30m、円曲線 60m、出口緩和曲線 30m、出口直線 60m の全長 210m の右曲線とした。

3.3 コントローラ

マルチボディダイナミクス解析ソフトウェアと連動する汎用数値計算ソフトウェアを使用してコントローラを作成した。操舵力は、車両モデルの車体ヨー角速度を走行速度で除することにより得た曲率に、本車両モデルに適した比例定数（固定値）と、任意の比例ゲイン（条件設定値）を乗じて算出した。なお、実際の車両で使用可能な操舵アクチュエータの最大推力を考慮し、車両モデルに与える操舵力には± 10kN のリミッタを設けた。コントローラのブロック図を図3に示す。

4. シミュレーション条件

4.1 比例ゲイン、曲線半径、走行速度

比例ゲインは、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 の5通り、曲線半径は、R300、R500、R600 の3通りとした。また、走行速度は、15km/h、30km/h で低速域のみとした。これは、本シミュレーションでは、カント及びスラックがない軌道モデルとしたため、速度によって増大する遠心力の影響を少なくするためである。

4.2 制御する台車部位と操舵モーメントの向き

操舵モーメントと横圧低減効果の関係を比較するため、以下の6通りの制御則を適用した。以降、曲線と同じ方向に旋回させる場合を「同相」、曲線と逆方向に旋回させる場合を「逆相」と呼ぶこととする。制御する台車部位と操舵モーメントの向きを図4に示す。

(1) 両台車非制御 両台車共に操舵制御しない。

(2) 前台車のみ操舵制御（同相）

前台車のみ、曲線と同じ右方向に旋回する操舵モーメントを発生させる。略称：前台車（同相）

(3) 後台車のみ操舵制御（同相）

後台車のみ、曲線と同じ右方向に旋回する操舵モーメントを発生させる。略称：後台車（同相）

(4) 前台車（同相）後台車（同相）操舵制御

両台車を、前後共に曲線と同じ右方向に旋回する操舵モーメントを発生させる。略称：両台車（同相）

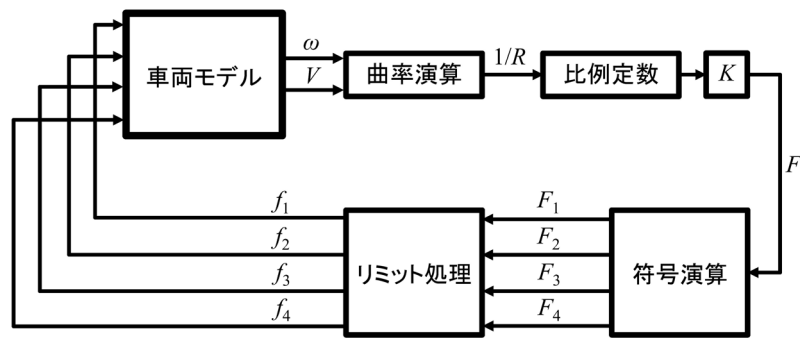
(5) 後台車のみ操舵制御（逆相）

後台車のみ、曲線と逆の左方向に旋回する操舵モーメントを発生させる。略称：後台車（逆相）

(6) 前台車（同相）後台車（逆相）操舵制御

前台車は曲線と同じ右方向に、後台車は曲線と逆の左方向に旋回する操舵モーメントを発生させる。

略称：両台車（逆相）



ω: 車体ヨー角速度 V: 走行速度 R: 曲線半径 K: ゲイン F, f: 操舵力
※ 操舵力の下付き添字は、操舵アクチュエータの部位を示す

図3 コントローラのブロック図

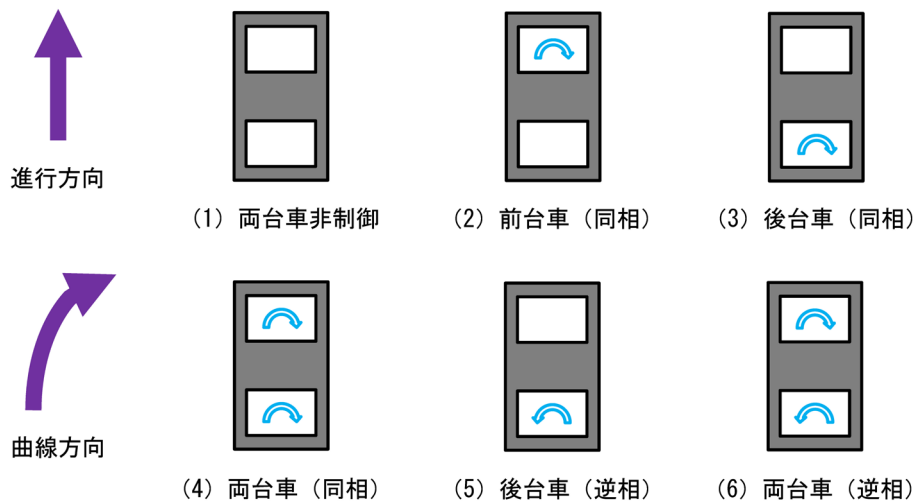


図4 各制御則での制御する台車部位及び操舵モーメントの向き

5. シミュレーション結果

5.1 比例ゲイン変化による比較

比例ゲインを変化させた場合の横圧の比較を図5に示す。図5の条件は曲線半径 R600、走行速度 30km/h、両台車（同相）の操舵制御の場合で、外軌側横圧の変化を示している。比例ゲインを 0.0（両台車非制御）から 5.0 に増大すると、前輪軸に発生する横圧が低減し、後輪軸の横圧負担が上昇している。図6に示すように、後台車では比例ゲインの増大と前後輪軸の横圧増減の関係は線形の傾向が見られたが、前台車ではこの関係はばらつきが大きかった。この要因は、レール・車輪間の摩擦力、空気ばね反力、台車間相互影響の非線形性が挙げられる。

5.2 曲線半径による影響

比例ゲイン 3.0、曲線半径 R300、走行速度 30km/h の条件で、前後台車の前輪軸の外軌側横圧の比較を図7に示す。前台車では両台車（逆相）の操舵制御で横圧低減効果が最も高く、後台車（同相）の操舵制御では横圧が

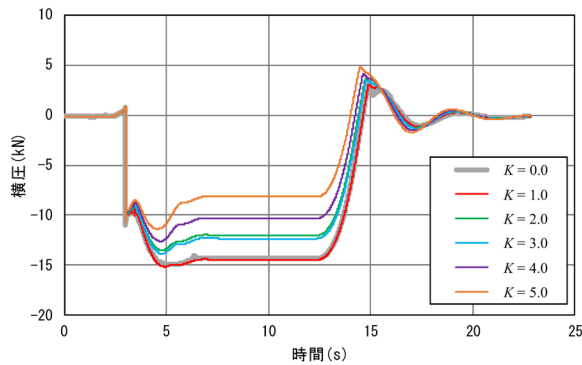
増大する結果となった。一方、後台車では両台車（同相）の操舵制御で横圧低減効果が最も高く、後台車（逆相）、及び両台車（逆相）の操舵制御で横圧が増大した。図7と同じ比例ゲインと同じ走行速度条件で、曲線半径毎に各制御則で発生する、円曲線における前後台車の前輪軸の外軌側最大横圧値を表1にまとめる。但し、緩和曲線から円曲線または直線に変わる際に車体と台車の相対運動が急峻だと、操舵力が著しく変化してスパイク上の横圧が発生することがあるため、操舵力が安定した後の円曲線上の最大横圧を整理した。曲線半径 R500 と R600 においても、前台車では両台車（逆相）の操舵制御で横圧低減効果が最も高く、後台車（同相）の操舵制御では横圧が増大する結果となった。一方、後台車では後台車（同相）の操舵制御で横圧低減効果が最も高く、後台車（逆相）、及び両台車（逆相）の操舵制御で横圧が増大した。

5.3 速度変化による影響

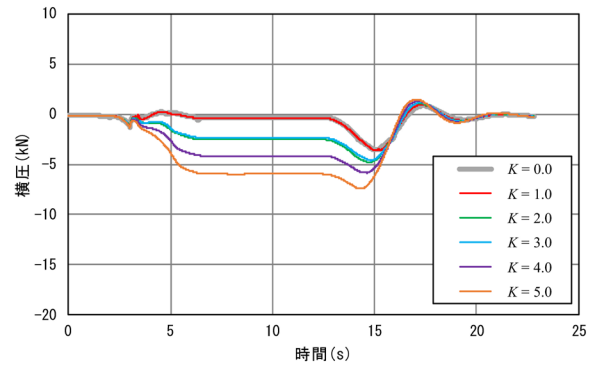
比例ゲイン 3.0、曲線半径 R300、走行速度 15km/h の条件で、前後台車の前輪軸の外軌側横圧の比較を図8に

示す。前台車では両台車（逆相）の操舵制御で横圧低減効果が最も高く、後台車（同相）の操舵制御で横圧が増大した。同じ条件で走行速度 30km/h の場合（図 7）と比較すると両台車制御の場合、逆相と同相の差は大きく減少し微小となった。一方、後台車では後台車（同相）

の操舵制御で横圧低減効果が最も高く、後台車（逆相）、及び両台車（逆相）の操舵制御で横圧が増大した。後台車では、走行速度 30km/h の場合と比較すると、制御方法により、横圧低減効果がばらつく結果となった。

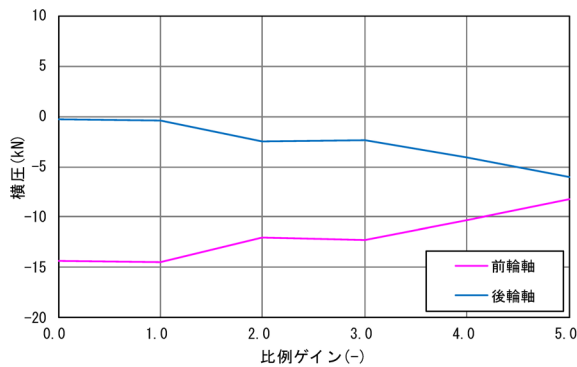


(a) 前台車前輪軸

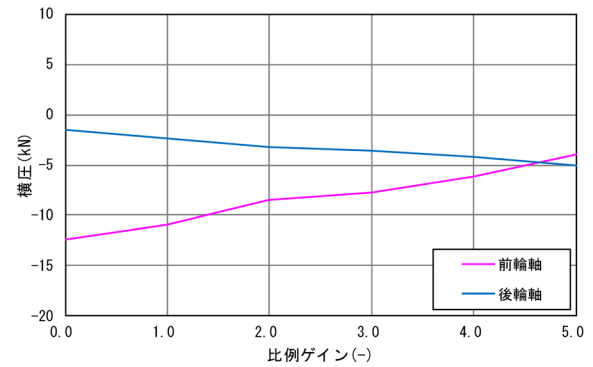


(b) 前台車後輪軸

図 5 外軌側横圧の比較（前後輪軸の比較）

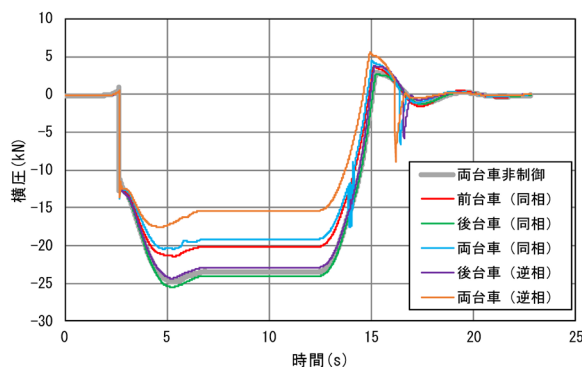


(a) 前台車

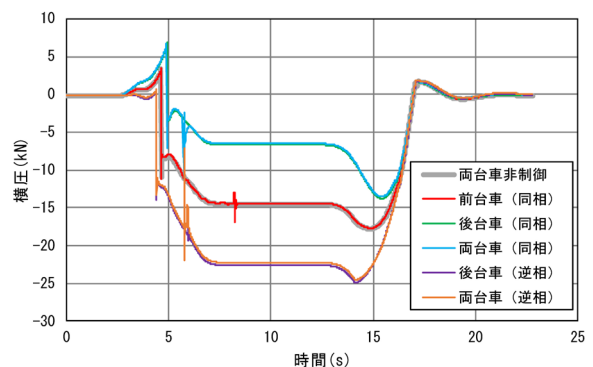


(b) 後台車

図 6 比例ゲインと外軌側横圧の関係（前後台車の比較）



(a) 前台車前輪軸



(b) 後台車前輪軸

図 7 外軌側横圧の比較（比例ゲイン 3.0, 曲線半径 R300, 走行速度 30km/h）

表 1 曲線半径毎の各制御則での最大外軌側横圧

(a) 前台車前輪軸

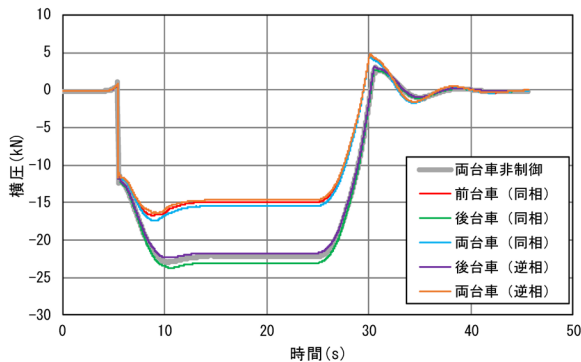
単位：kN

制御則	R300	R500	R600
両台車非制御	23.5	16.4	14.3
前台車（同相）	20.2	12.7	11.2
後台車（同相）	24.1	16.8	16.1
両台車（同相）	19.2	14.0	12.3
後台車（逆相）	22.9	16.1	14.1
両台車（逆相）	15.4	11.4	10.2

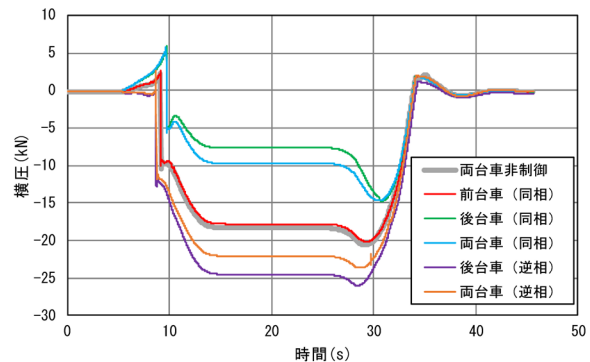
(b) 後台車前輪軸

単位：kN

制御則	R300	R500	R600
両台車非制御	14.6	14.2	12.4
前台車（同相）	14.5	13.9	12.2
後台車（同相）	6.7	6.8	6.1
両台車（同相）	6.6	8.7	7.7
後台車（逆相）	22.7	17.8	16.6
両台車（逆相）	22.3	19.0	16.4



(a) 前台車前輪軸



(b) 後台車前輪軸

図 8 外軌側横圧の比較（比例ゲイン 3.0，曲線半径 R300，走行速度 15km/h）

6. 考察

操舵制御する台車と操舵モーメントの向きにより、横圧が低減する場合と増大する場合があることが判明したが、このメカニズムについて考察した。比例ゲイン 3.0、曲線半径 R300、走行速度 30km/h の条件で、各制御則で発生する円曲線における最大ボギー角の絶対値を表 2(a) にまとめる。但し、前台車のボギー角を θ_f 、後台車のボギー角を θ_r とする。幾何学的に最も台車と軌道の向きが一致するボギー角 θ_i は図 9 より式 (1) で表される。

$$|\theta_i| = \sin^{-1} \frac{D}{2R} \quad (1)$$

ここで、 D は台車中心間距離、 R は曲線半径である。式 (1) で、 D を 14.15m、 R を 300m とすると、 $|\theta_i|$ は 1.35deg となる。両台車（同相）の操舵制御が、前後台車双方の外軌側横圧を低減できる理由は、同相で操舵制御することにより、各台車に発生するボギー角が幾何学的に理想のボギー角に各々近づくためと考察できる。

同じ比例ゲインと同じ走行速度条件で、各制御則で発

生する円曲線での最大ボギー角の絶対値について、曲線半径 R500 を表 2(b)、曲線半径 R600 を表 2(c) にまとめる。幾何学的に理想のボギー角は、曲線半径 R500 で 0.81deg、曲線半径 R600 で 0.68deg となることから、両台車（同相）の操舵制御では、急な曲線から緩い曲線まで式 (1) に近いボギー角が幅広い線形で得られ、前後台車双方の外軌側横圧を低減できるといえる。

また、片台車に横圧低減効果があっても、一方の台車の横圧が増大する場合があることから、表 2 に示すように、前後台車双方の外軌側横圧を低減するには、前後台車のボギー角の総和が $2\theta_i$ となるようにし、かつ、前台車のボギー角と後台車のボギー角の差が最小となるようにすればよいと考察できる。これを最も実現する制御則が両台車（同相）の操舵制御であり、この制御則を適用して操舵モーメントを前後台車に与えることにより、各台車のボギー角を幾何学的理想ボギー角に近づけられる。各台車の進行方向が曲線の接線方向により近づいた状態で曲線を走行する、すなわち、パーフェクトステアリング状態に近づくことが横圧低減のメカニズムと考察できる。

表2 曲線半径毎の各制御則での最大ボギー角

(a) R300 単位: deg

制御則	θ_f	θ_r	$\theta_f + \theta_r$	$ \theta_f - \theta_r $
両台車非制御	1.20	1.46	2.66	0.26
前台車 (同相)	1.24	1.44	2.68	0.20
後台車 (同相)	1.24	1.38	2.62	0.14
両台車 (同相)	1.31	1.35	2.66	0.04
後台車 (逆相)	1.15	1.54	2.69	0.39
両台車 (逆相)	1.25	1.51	2.76	0.26
理想	1.35	1.35	2.70	0

(b) R500 単位: deg

制御則	θ_f	θ_r	$\theta_f + \theta_r$	$ \theta_f - \theta_r $
両台車非制御	0.72	0.89	1.61	0.17
前台車 (同相)	0.77	0.87	1.64	0.10
後台車 (同相)	0.77	0.82	1.59	0.05
両台車 (同相)	0.79	0.82	1.61	0.03
後台車 (逆相)	0.69	0.93	1.62	0.24
両台車 (逆相)	0.74	0.92	1.66	0.18
理想	0.81	0.81	1.62	0

(c) R600 単位: deg

制御則	θ_f	θ_r	$\theta_f + \theta_r$	$ \theta_f - \theta_r $
両台車非制御	0.60	0.74	1.34	0.14
前台車 (同相)	0.64	0.72	1.36	0.08
後台車 (同相)	0.62	0.69	1.31	0.07
両台車 (同相)	0.66	0.68	1.34	0.02
後台車 (逆相)	0.57	0.79	1.36	0.22
両台車 (逆相)	0.62	0.76	1.38	0.14
理想	0.68	0.68	1.36	0

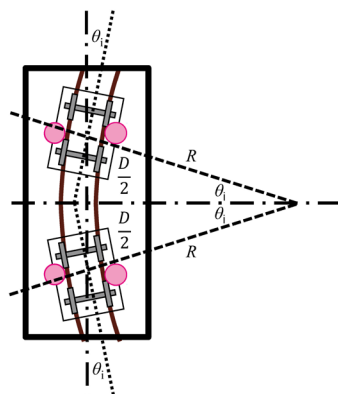


図9 幾何学的理想ボギー角

7. まとめ

操舵システムの操舵モーメントやボギー角と横圧低減効果の関係を明らかにするため、実用化に向けたシミュレーションを行った結果、両台車を同相に操舵制御すると、前後台車双方の円曲線中の外軌側横圧を低減できることが示された。その際のボギー角は、両台車共に幾何学的に理想のボギー角に近づいていることが分かり、パーフェクトステアリング状態に近づくことで横圧が低減されると考えられる。

本システムは、曲線位置情報に依存せず、実現可能な操舵力で横圧低減効果が認められたため、より高い走行速度、カントの有無、軌道変位が与える影響について引き続き研究していく。また、走行試験により、シミュレーションとの結果比較を行い、ボギー角操舵システムの実用化を図っていく。

文 献

- 1) 石田弘明：鉄道車両の走行安全性評価～輪重、横圧、脱線係数の計測～、計測と制御、第45巻、第9号、pp.808-809, 2006
- 2) 下川嘉之：曲線を円滑に通過するための操舵技術、計測と制御、第56巻、第2号、pp.87-88, 2017
- 3) 佐藤栄作：操舵台車、RRR, Vol.61, No.11, p.38, 2004
- 4) 日本機械学会編：鉄道車両のダイナミクス - 最新の台車テクノロジー -, 電気車研究会, pp.130-131, 1994
- 5) 小島崇, 梅原康宏, 鴨下庄吾, 本堂貴敏, 根岸久子：ヨーダンパのアクティブ制御によるボギー角操舵システムの開発、第25回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2018) 講演論文集, No.18-83, 2018
- 6) 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：ボギー角アクティブ操舵台車の研究開発 (第1報・基本コンセプトと基礎実験), 日本機械学会第11回交通・物流部門大会 (TRANSLOG2002) 講演論文集, No.02-50, pp.273-276, 2002
- 7) 小宮山誠, 道辻洋平, 須田義大, 松本陽, 佐藤安弘, 大野寛之, 谷本益久, 岸本康史, 佐藤興志, 中居拓自：ボギー角アクティブ操舵台車の一車両モデルにおける操舵モーメント配分手法, 日本機械学会2006年度年次大会 (MECJ-06) 講演論文集, No.06-1, pp.37-38, 2006
- 8) 根岸久子, 山田博之, 岩波健, 島宗亮平, 品川大輔, 三村学：ボギー角操舵台車の操舵機構および制御方法の開発, 第25回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2018) 講演論文集, No.18-83, 2018