

# ボギー角をアクティブに操舵する 急曲線向け台車の研究開発(第2報)

交通システム研究領域  
東京大学  
住友金属テクノロジー

大野寛之  
須田義大  
谷本益久

松本 陽  
道辻洋平

佐藤安弘 水間 毅

## 1. はじめに

近年、都市交通ネットワークの充実の観点から、近郊線区を走る高速車両が、曲線部の多い都心部の地下鉄路線へ乗り入れる例がますます増加しており、今後も増えて行くことが予想されている。しかし、鉄道の台車では高速安定性と曲線通過性能とは相反する関係にあり、直線区間における高速安定性を重視した車両を曲線の多い区間で使用すると、車輪やレールの摩耗の増加と言った好ましくない現象を引き起こすだけでなく、急曲線部では脱線の危険を増大させることになる。

高速安定性と曲線通過性能とを両立させるために、車輪踏面形状を変更したり、輪軸の支持方式を工夫するなどして、輪軸の操舵機能を向上させるなど様々な提案がなされてきている<sup>(1)</sup>。筆者らは曲線通過性能の向上を目的として、より大胆に、台車自体を車体に対してアクティブに操舵(ボギー)する台車システムの提案を行っている<sup>(2)</sup>。

ここでは、この「ボギー角アクティブ操舵台車」について第1報に続き、マルチボディ・ダイナミクス・プログラムによるシミュレーション結果と台車試験機を用いた台上試験結果とを比較し、本方式の有効性を検証した結果について述べる。

## 2. ボギー角アクティブ操舵台車の原理

### 2.1. 急曲線通過時の台車の挙動

曲線区間では内側と外側のレールの長さが異なるため、鉄道の車輪は踏面をテーパ状に加工することで、外軌側では半径の大きい部分、内軌側では半径の小さい部分がレールと接触することでレールの長さの違いを吸収している。しかし、曲線半径が小さい急曲線部においては、内外軌に乗った車輪の半径の差(輪径差)だけではレール長の違いを吸収できず、車

輪/レール間にすべりが発生し、台車は操舵不足の状態となる。

後輪軸では輪径差不足による前後方向のすべりが発生し、これによる縦クリープ力が台車の旋回を妨げる方向のモーメントを生み出す。

一方、前輪軸では操舵不足により車輪/レール間のアタック角がつくため横方向のすべりが生じ、これによる横クリープ力がやはり台車の旋回を妨げる方向に働く。その結果、前輪外軌側には著大な横圧が発生することになり、摩耗の増大や脱線の危険性をもたらすことになる(Fig.1)。

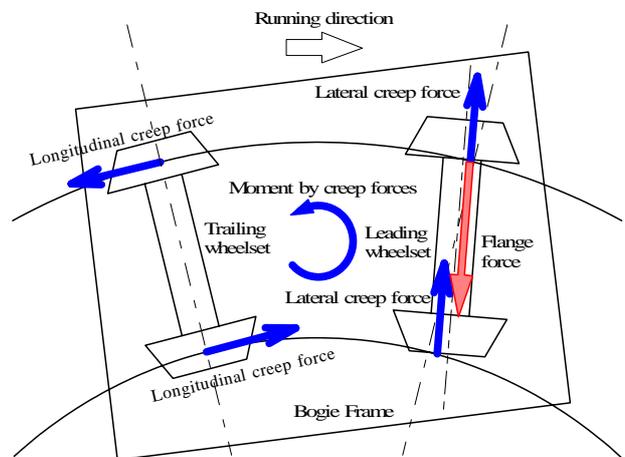


Fig.1 Attitude of truck running in sharp curve

### 2.2. ボギー角アクティブ操舵台車のコンセプト

ここで提案する「ボギー角アクティブ操舵台車(Active Bogie-Steering Truck: ABS台車)」は、車体/台車間にアクチュエータを装備して、曲線に応じた台車そのものをアクティブに操舵しようとするものである(Fig.2)。車軸に操舵機能を持たせるのではなく、台車そのものを旋回させることにより曲線通過性能の向上を図ろうとするものである。輪軸操舵方式と異なり、複雑なリンク機構等は必要とせず、車体/

台車間にアクチュエータ（電動、油圧、空気圧等が考えられる）を装着するだけの、極めて単純な構成で曲線通過時の台車の旋回をアシストすることができる。

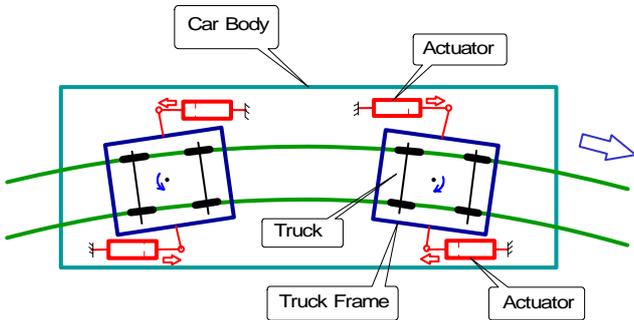


Fig.2 Mechanism of "Active-Bogie-Steering" truck

### 3. 台車試験機による走行実験

#### 3.1. 台車試験の概要

ABS 台車の曲線通過試験は、当研究所に設置されている台車試験設備を用いて行った。本試験設備は曲線半径に応じ軌条輪の角度を設定し、内外軌の軌条輪に速度差を付けることで曲線部の走行状態を再現することができる。

供試台車は営団地下鉄銀座線および丸の内線で使用されているものをベースにアクチュエータを装着したものである。車輪踏面形状も銀座線・丸の内線で使われているものを使用した。

試験設備は1台車・半車体モデルであり、曲線通過状態を正確に再現するためには車体に相当する荷重枠支持点を中心からオフセットする必要がある。しかしそのためには設備の大幅な改造が必要となるため、本試験では支持点のオフセットはない状態で実験を行った。

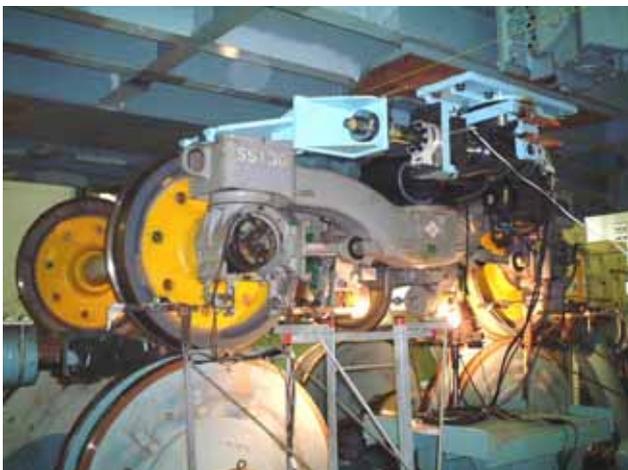


Fig. 3. Test truck on truck rolling test stand

実験は直線走行状態から曲線状態に移行し、定常円曲線走行状態となったところでアクチュエータを作用させ、作用力を徐々に増加させながら台車の状態を監視する方法で行った。実験を行った曲線半径はR400~180m程度の半径である。

#### 3.2. 実験結果の概要

本実験に用いた車輪踏面の輪径差獲得可能範囲は理論計算によれば R350~400m 程度であり、これより小さい半径の曲線では操舵不足となる。

Fig.4 にアクチュエータの作用力と前軸外軌に発生した横圧との関係を示す。両者の間にはほぼ直線の関係にあり、アクチュエータの作用力を増大させるに従い前軸外軌の横圧は低下し、横圧0からひいてはマイナスの範囲にまで到達可能である。曲線半径が小さくなる（カーブがきつくなる）に従い横圧0を実現させるために必要なアクチュエータの作用力は増大していくことが分かる。これを曲線半径と前軸外軌の横圧との関係でみると Fig.5 のようになる。曲線半径が小さくなると横圧は急激に増大して行くことが読みとれる。いずれの曲線半径においても、アクチュエータの動作により横圧をほぼ0にすることが可能である。横圧を0とするための作用力は R300m で 3kN、R180m で 9kN 程度である。

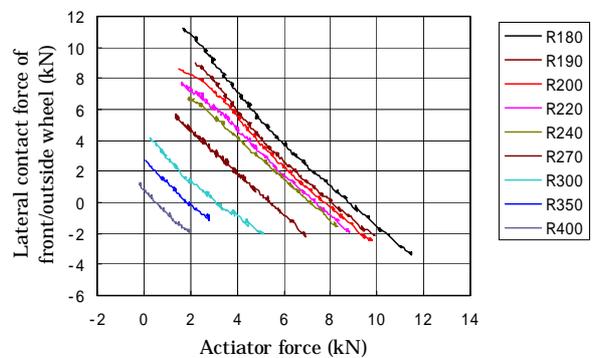


Fig.4 Reduction of lateral contact force by steering

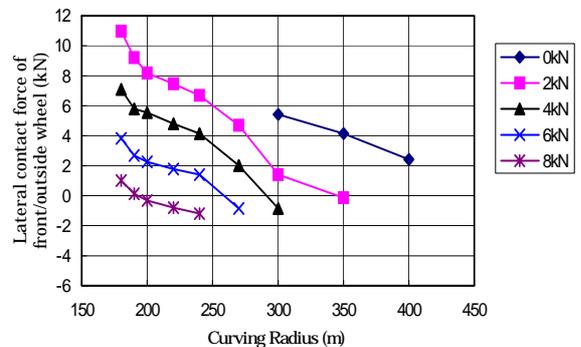


Fig.5 Lateral contact force of leading axle

Fig.6 にボギー角操舵による前輪アタック角の変化を示す。ボギー角操舵によりアタック角は僅かに減少してはいるが、横圧の低下ほど顕著なものとはなっていない。このことから輪径差が確保できないような急曲線では、ボギー角操舵により横圧を低下させることができてもアタック角自体は残ってしまっていることが分かる。

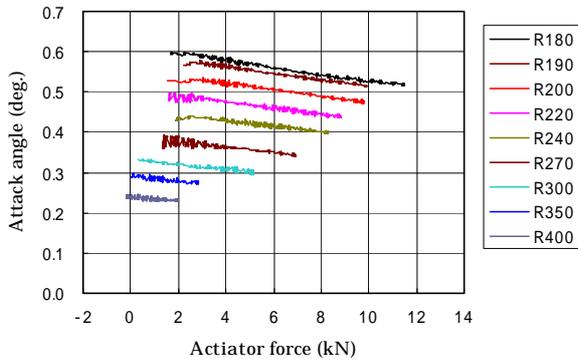


Fig.6 Reduction of attack angle by steering

レーション結果を示す。アクチュエータ作用力の増大とともにアタック角が減少する傾向にある点は実験結果と良く一致しているが、その減少の度合いは実験結果よりシミュレーション結果の方が大きくなっている。このような違いが生じた原因については現在考察中である。

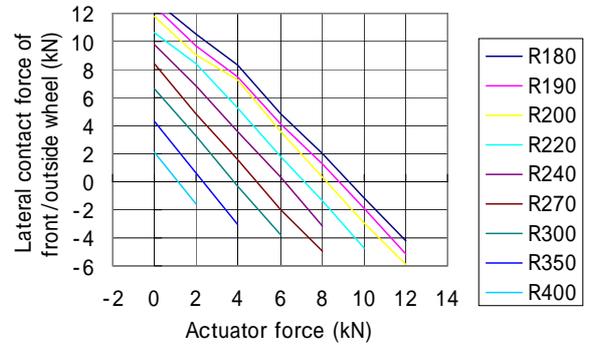


Fig.7 Reduction of lateral contact force by steering (Simulation)

#### 4. シミュレーションとの比較

##### 4.1. シミュレーションの概要

数値シミュレーションには、マルチボディーダイナミクス解析ソフト A'GEM を使用した。台上試験と同様、車体と台車の間にアクチュエータを備えた半車体モデルを用い、車輪踏面形状や軸箱支持剛性等の条件を一致させた。台上試験においては超過遠心力を負荷していないため、シミュレーションにおける曲線区間についても超過遠心力の影響が出ないように、走行条件に応じた均衡カントを設定している。

アクチュエータの制御則は、緩和曲線部では軌道曲率半径に比例し、定常曲線部では一定入力となるように力を加えている。

##### 4.2. シミュレーション結果と実験との比較

Fig.7 にアクチュエータの作用力と前軸外軌に発生した横圧との関係を示す。アクチュエータの作用力が増大するに従い、前軸外軌の横圧が直線的に低下していることが分かる。このシミュレーション結果は Fig.4 に示した実験結果と、いずれの曲線半径においても良く一致している。

Fig.8 にはシミュレーション結果から得られた曲線半径と前軸外軌横圧との関係を示す。これについても Fig.5 に示した実験結果と良く一致していることが見て取れる。

Fig.9 には曲線半径とアタック角についてのシミュ

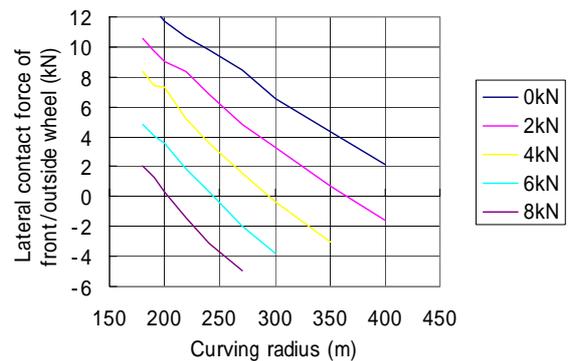


Fig.8 Lateral contact force of leading axle (Simulation)

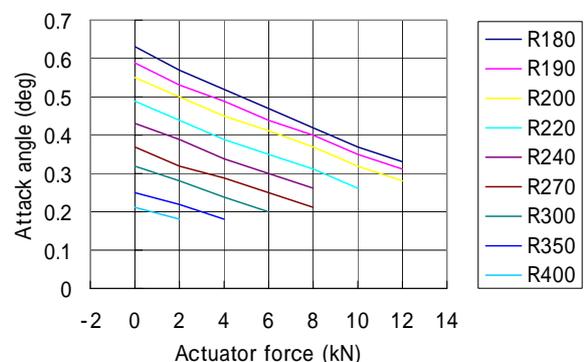


Fig.9 Reduction of attack angle by steering (Simulation)

## 5. まとめ

台上実験およびシミュレーションの結果から以下のことが明らかになった。

- 1) アクチュエータにより台車ボギー角を強制的に操舵することにより、台車はラジアル操舵状態に近付き、前軸外軌横圧を0にまですることが可能となる。
- 2) アクチュエータ作用力と横圧の減少は、ほぼ直線上の関係にあり、また、曲線が急になるに従い横圧を0にするために必要な力は増大する。
- 3) ボギー角操舵によりアタック角は減少するが、十分な輪径差が確保できないような急曲線では、横圧の減少ほど顕著な形では減少しない。
- 4) アクチュエータ作用力と横圧との関係は、実験結果とシミュレーション結果は良く一致したが、アタック角の変化については完全には一致しなかった。シミュレーション条件を見直し、実態に近付けることが必要である。

## 6. おわりに

本システムにより台車の曲線通過性能が向上することが明らかになった。今後の実用化に向けて以下のようなステップで開発を進めていく予定である。

### 1) アクチュエータの選定

現在電動アクチュエータで実験を進めているが、今後は油圧や空気圧等を用いた実験を行い、応答性やダンピングに与える影響等を考慮し、最適なものを選定する。

### 2) 制御則の確立

実路線での曲線進入から通過まで、曲率に応じて動的に制御するコントロールシステムの実現を目指す。車両の位置情報の検出方式と、それを基にして曲率に応じた作用力を制御するシステムを開発する。

### 3) 台車の最適設計

ボギー角アクティブ操舵システムに合わせた、踏面形状、支持剛性その他諸条件の最適化を図る。

## 参考文献

- (1) 松本陽, 「 “ビューティフル・カーヴィング” を目指して - 鉄道の曲線通過に関わる研究課題とその成果 - 」, 日本機械学会大9回交通物流部門大会講演論文集, 2000
- (2) 松本陽 他, 「ボギー角をアクティブに操舵する急曲線向け台車の研究開発(第1報)」, 第二回交通安全環境研究所研究発表会講演概要, 2002