

# 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)

交通システム部  
東京大学  
住友金属テクノロジー

松本 陽  
須田 義大  
谷本 益久

佐藤 安弘

大野 寛之

水間 毅

## 1. 研究の必要性和これまでの経過

鉄道車両の台車においては、直進安定性と曲線通過性能とは一般的にトレードオフの関係にあり、高速安定性のよい台車は急曲線を曲がりにくく、逆に曲線通過性能をよくすると直進安定性が悪化してスピードを出すと蛇行動を起こしやすくなる。このため、これまでは高速走行時の直進安定性の悪化を嫌って(恐れて)、曲線通過性能を犠牲にする傾向が見られた<sup>(1)</sup>。しかしながら、地下鉄のような急曲線の多数ある路線を、相互乗り入れ区間である近郊線区での高速走行を重視した曲線通過性能の劣る車両を走らせると、急曲線部において脱線を引き起こすというような最悪の事態を引き起こす可能性もある。

当研究グループの研究開発した「曲直両用新円弧踏面」<sup>(2)(3)</sup>は車輪のレールに接触する部分(踏面)の形状を最適化して、こうした問題を解決しようとしたもので、効果も実証され大江戸線をはじめとするリニアモータ地下鉄線区で実用化されているが、踏面形状の改革だけでは限界がある。

そこで、「前後軸剛性非対称支持」<sup>(4)</sup>や「後輪独立回転車輪」<sup>(5)</sup>などと組み合わせて台車構造を改革する研究を東京大学等と共同で進めてきた。これらの効果は、既に、シミュレーションや台上試験結果から、直進安定性と曲線通過性能が十分に両立し、急曲線通過時の脱線係数が半分以下となることが実証されている<sup>(6)(7)</sup>。ただし、この方式は前後進の切り替え機構を必要とする。

今回、提案するボギー角アクティブ操舵台車は、「車輪軸はひとまずおいて、台車枠そのものをアクティブに操舵してやろう」というもので、非常に簡単な構造で実現できる。以下、本方式台車の基本コンセプトと

基本的な特性を把握するために行った台車試験機による台上試験の概略について述べる。

## 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好ましくない現象<sup>(1)</sup>

曲線中では外側と内側のレールの長さが異なるが、この長さの差を鉄道の車輪は踏面(車輪のレールと接触する部分を指す)をテーパ状にし、外軌側の車輪では車輪の回転半径の大きい部分が、内軌側の車輪では半径の小さい部分が、レールに接触することでレールの長さの差を吸収している(この差分を輪径差と呼ぶ)。しかし、急な曲線では必要な量の輪径差がとれなくなるため、Fig.1に示すように車輪とレール間にすべりが発生し、その結果、台車は操舵不足状態となる。すなわち、後車軸には輪径差不足のために前後方向のすべりで発生し、これにより台車の旋回を妨げる方向のモーメントを生じる力(縦クリープ力)が働き、前車軸には車輪・レール間に角度(アタック角)が付くため、横方向のすべり及びそれによる横クリープ力

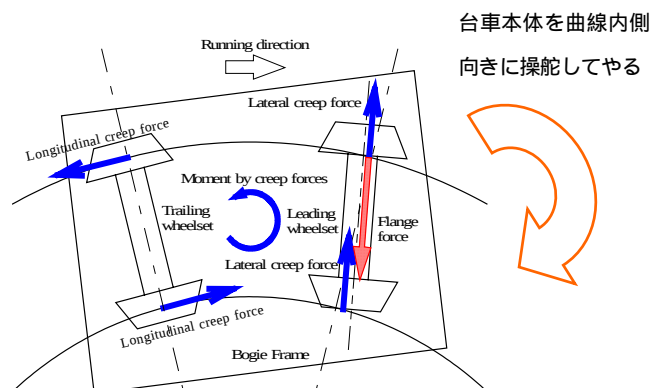


Fig.1 Bogie curving in sharp curve

が発生して、やはり台車の旋回を妨げる。これらの力のため、前車軸の外側の車輪には著大な横方向の力（横圧と呼ばれ、脱線や摩耗の主たる原因となる）が発生することになる。

## 2.2. 曲線通過性能を向上させる諸方策

台車の曲線通過性能を向上させるために、これまで研究開発されてきた主な方策としては以下のようなものがある。

### 曲直両用新円弧踏面<sup>(2)(3)</sup>

当研究所が開発した急曲線通過性能の向上と直進安定性の維持の両立を図った車輪踏面。直線と曲線で車輪・レールの接触点が異なる点に着目して、直線部で接触する部分の等価踏面勾配を小さくして蛇行動安定性を確保し、曲線部で接触する部分のそれを大きくし、できるだけ大きな輪径差を獲得することを目的としている。東京都大江戸線、神戸市海岸線などの地下鉄線で既に実用化されている。輪径差の獲得は曲線通過性能を向上させる必要条件であるが、車輪踏面の改良だけでは限界もある。

### 前後軸非対称剛性支持台車（前軸柔支持台車）<sup>(4)</sup>

東大須田教授が開発したもので、前車軸の前後方向ばねを柔らかくし後車軸のそれを硬くして、曲線通過性能の向上を図る。JR東海の特急車両で実用化されている。やと組み合わせることにより曲線通過性能の飛躍的向上が図れることが当研究所との共同研究による台上試験及びシミュレーションにより実証されている<sup>(6)(7)</sup>。ポルスタレス台車以外の台車では進行方向切替が必要。

### 後輪独立回転車輪台車<sup>(5)</sup>

東大須田教授が考案したもので、前輪軸は通常の一体輪軸とし、後の輪軸のみ左右車輪が独立して回転する機構とするものである。この構造をとると前輪軸の自己操舵性を活用しつつ、後輪軸を独立回転車輪とすることにより、台車の旋回を阻害する後輪軸の縦クリープ力を消滅させるとともに、蛇行動安定性の向上も図ることができる。これらにより曲線通過性能向上と直進安定性向上の両立を図れるが、進行方向の切替が必要である。

### ボギー角連動車軸操舵台車

車体・台車・車軸間をリンク機構で結び、台車がボギーする（車体に対して旋回する）角度に比例して、各車軸を操舵する方式の台車。JR北海道の特急車両などで実用化されている。一般に曲線通過性能の向上が図れるといわれているが、部品数が増え、機構がやや複雑となる。

なお、振り子式車両は曲線通過時の乗客の乗り心地を向上させることにより、曲線通過速度の向上を図るもので、車両の曲線通過性能の向上を直接図るものではない。

## 2.3. ボギー角アクティブ操舵台車

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、曲線に応じて台車枠自体を車体に対して、アクティブに操舵してやろうという方式で、輪軸の操舵リンク等は用いずアクチュエータの付加のみという簡単な構造で曲線通過性能の向上が図れる。

具体的には Fig.2 に示すように台車の左右に車体との間にアクチュエータ（電動、油圧、空気圧の各方式が考えられる）を挿入し、曲線通過中に台車の旋回をアシストする構造とする（たとえば、台車が操舵不足とならずに、接線方向に向くように操舵する）。

これまでの曲線通過性能の向上をねらった操舵台車は、「ボギー角連動車軸操舵方式」などが実用化されつつあるが、すべて 各車軸を操舵するもので、台車枠そのものを操舵する、構造が簡単な本方式が検討されなかったのは、いわば盲点とも言える。

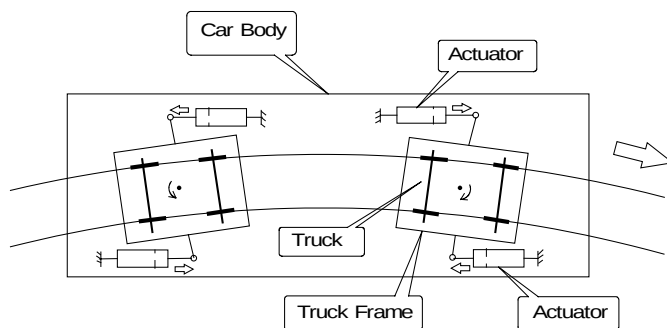


Fig.2 Concept of active bogie-steering (ABS) truck

### 3. 台車試験機による走行実験

#### 3.1. 実験の概要

##### (1) 試験機及び供試台車

実験に用いた台車試験機は、当研究所に設置されている都市内鉄軌道用台車試験設備で、半車体・一台車を軌条輪上に搭載し、軌条輪を回転させることにより実際の走行状態を再現するものである(Fig.4 参照)。本試験機は、軌条輪ベッドを旋回させることによりカーブの曲率を、左右の軌条輪に回転速度差をつけることにより、内外軌のレール長さの差を、横方向力を付加することによりカント過不足による左右遠心加速度を再現し、曲線通過状態を模擬するようになっている。

実験に用いた台車は、営団地下鉄銀座線・丸の内線で用いられているものと類似の台車を基本とし、ボギー角操舵を行う電動式アクチュエータを付加したものである。また、この台車の車輪踏面は銀座・丸の内線で使用中のものと同一形式の円弧踏面で、曲線において輪径差獲得可能範囲は、理論接触計算によれば 350 ~ 400m 程度である ( Fig.3 参照 )。

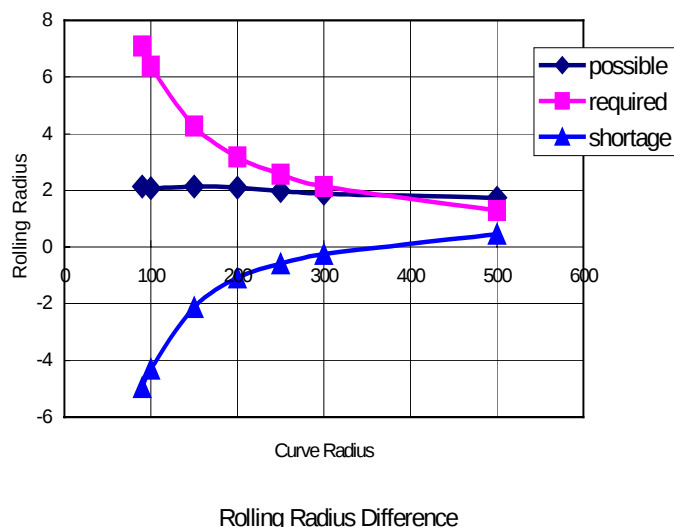


Fig.3 Rolling radius difference of test truck

##### (2) 実験方法

曲線通過状態を再現するためには、半車体モデルでは車体相当部分 (以下、荷重枠と呼ぶ) の支持点をオフセットする必要があるが、このためには試験機のかなり大がかりな改造を必要とするため、本実験では荷重枠を正対状態 (支持点をオフセットしない) にして



Fig.4 Test truck on rolling test stand

実験を行った。この状態でも、曲線中における車体とレール接線方向との幾何学的相対角度を補正してやることにより、曲線中の台車の挙動特性を把握できると考えたからである。

実験は、直線走行状態から曲線部に進入し、定常円曲線走行状態とした後、ボギー角操舵用アクチュエータを作用させ、作用力を徐々に増加していった台車の挙動の変化を調べる (ボギー角、左右変位、輪重、横圧、アタック角等を計測) 方法で行った。実験を行った曲線半径は、半径 400m ~ 180m 程度の範囲である。実験状況を Fig.4 に示す。

#### 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、前述の理論計算によれば 350 ~ 400m 程度であり、それより曲線半径の小さな曲線では、Fig.1 に示したような操舵不足状態となり、前軸外軌側車輪には大きな横圧が発生することになる。しかしながら、この状態でボギー角操舵用アクチュエータに力を付加していけば、ボギー角の操舵不足分が徐々に解消して、横圧も低下していくはずである。なお、本実験では、荷重枠を正対状態にセットしてあるので、試験機上でボギー角 0 のときが、曲線での台車の理想操舵状態 (台車が曲線の接線方向を向く、いわゆるラジアル操舵状態) に相当する。

Fig.5 は、アクチュエータのシリンダに付加した作用力とそのときのボギー角の関係を、曲線半径をパラメータとして表したものである。ボギー角は、アクチュエータの作用力の増加に対して、ほぼ直線的に減少

していくのがわかる。すなわち、半径 350m の曲線では、アクチュエータ不動作時には  $0.26^\circ$  程度あったボギー角が、2kN のシリンダ荷重で  $0.19^\circ$  程度に、半径 180m の曲線では 2kN の荷重時に  $0.4^\circ$  程度あったボギー角が 11kN 程度の荷重をかけるとほぼ  $0^\circ$  になっている。

Fig.6 は、曲線半径とボギー角の関係をアクチュエータのシリンダ荷重をパラメータにして表したものである。同一アクチュエータ作用力では、急曲線になると急激にボギー角が大きくなっていくことがわかる。

ボギー角と前軸外軌側車輪に発生する横圧の間には Fig.7 に示すようにほぼ比例関係が成り立つため、アクチュエータ作用力と横圧の間には Fig.8 に示すような直線的関係があり、Fig.8 に示すようにアクチュエータ作用力を増加させると、横圧を減少できることがわかる。また、Fig.9 に示すように、曲線半径に対して横圧は急激に増大するが、ボギー操舵アクチュエータの作用力を増やしていくと急曲線でもほぼ 0 にすることができることがわかる。ちなみに横圧を 0 にするアクチュエータ作用力は、半径 300mR で 3kN、半径 240mR で 7kN、半径 180mR で 9kN 程度である。

Fig.10 は、ボギー角操舵によるアタック角の変化をまとめたものである。ボギー角操舵によりアタック角は減少しているが、横圧ほど目立って減少していない。すなわち、輪径差のとれないような急曲線では、ボギー角操舵によって横圧がほとんどなくなっても、アタック角自体は残っていることがわかる。本方式では輪軸を操舵していないので、アタック角を減らすには、踏面の改良（たとえば、曲直両用円弧踏面の採用）も併せて行うことが効果的であるといえる。

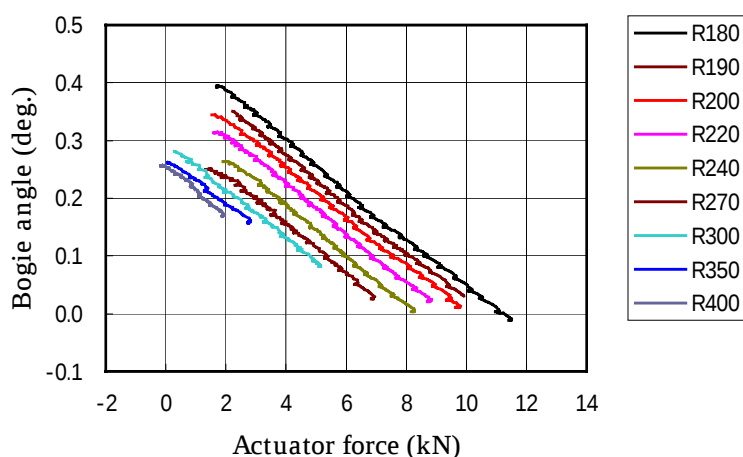


Fig.5 Reduction of bogie angle by actuator

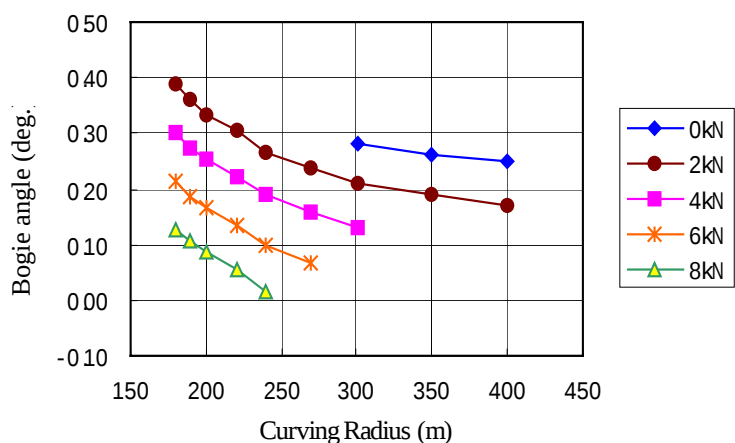


Fig.6 Bogie angle v.s curving radius

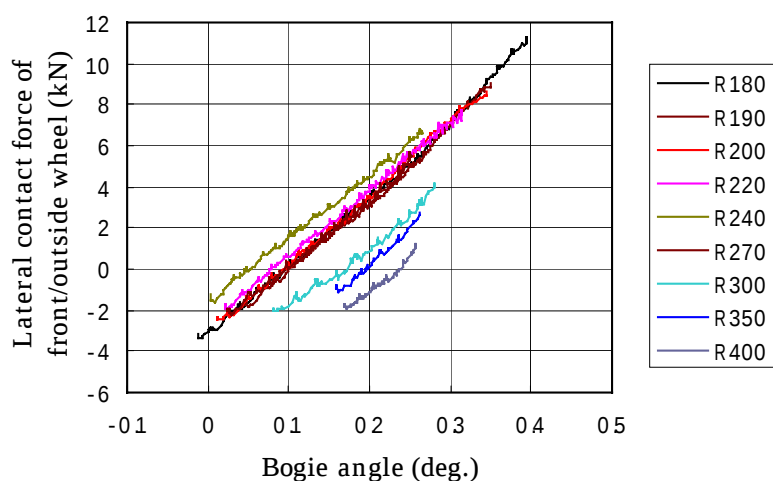


Fig.7 Lateral contact force v.s bogie angle

#### 4. まとめ

ボギー角をアクティブに操舵する方式の基本的な特性を検証するため、試験台車にボギー角操舵用電動アクチュエータを付加し、台車試験機により各種の曲線通過実験を行った結果、

- 1) ボギー角を操舵するためのアクチュエータの作動力に対して、ほぼ直線的に台車のボギー角は減少する(実曲線通過状態ではラジアル操舵に近づく)。
- 2) ボギー角と前軸外軌側車輪の横圧は、ほぼ比例関係にあるので、ボギー角を操舵すると横圧は直線的に減少し、急曲線でも0にすることが可能である。
- 3) アタック角については、ボギー角操舵によって減少するが、輪径差のとれないような急曲線では、横圧ほど顕著には減少しない。

という結果が得られた。

これにより、ボギー角をアクティブに操舵することにより、急曲線において横圧を顕著に減少させることが可能であることが検証された。

今後の課題としては、台上試験での次のステップとして、

- 1) 今回行ったのは定常的な力の付加による実験であるので、直線・曲線走行に動的に対応できるコントローラの実現
- 2) 電動、油圧、空気圧等、アクチュエータの選定
- 3) アタック角も同時に減少させるため、輪径差をとるための踏面形状との組み合わせ

などが必要である。

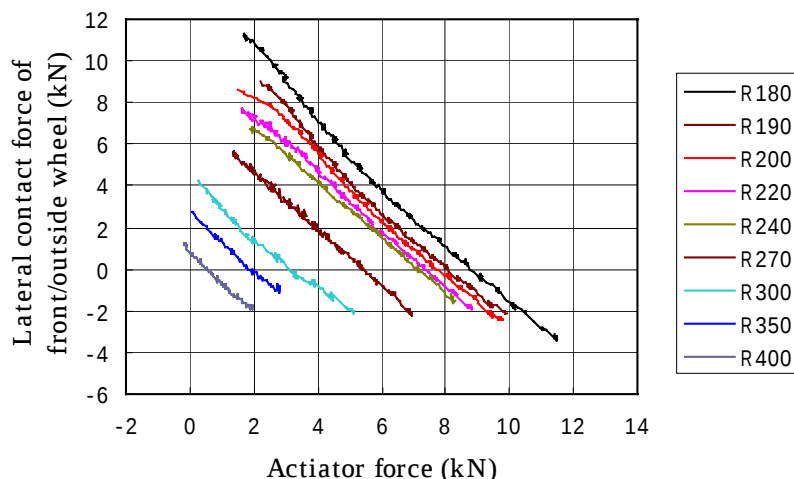


Fig.8 Reduction of lateral force by bogie-steer

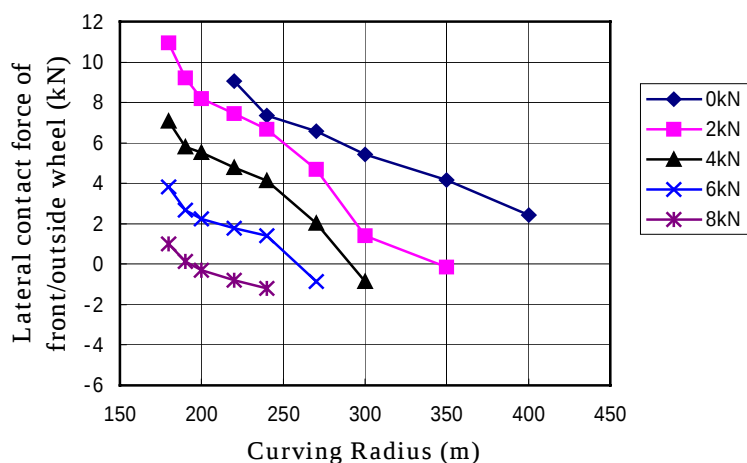


Fig.9 Lateral force v.s curving radius

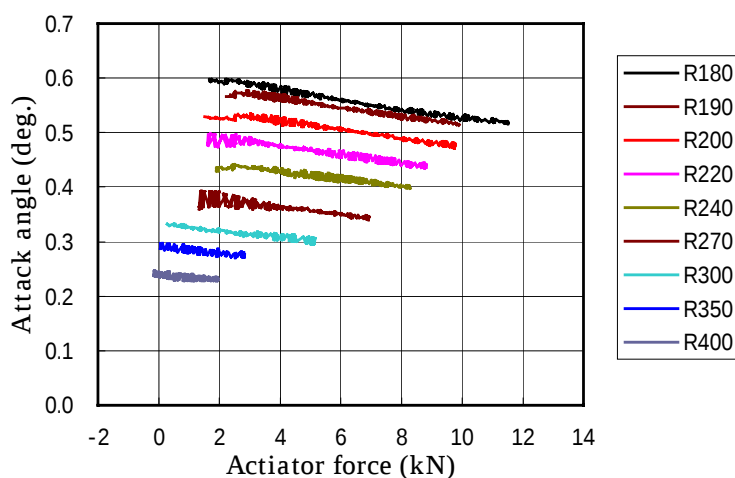


Fig.10 Change of attack angle by bogie-steer

## 5 . あとがき

今回行ったのは、もっとも基本的な特性試験であるが、「ボギー角アクティブ操舵方式」の有効性が十分確認できたと考える。今後、実用化に向けて、台上試験の深度化のみならず、実車に装架した走行試験も行いたいと考えている。

本研究の実施に当たっては、(財)地下鉄互助会の公益基金による研究費補助を頂いた。ここに謝意を表する。

## 参考文献

- (1) 松本、 “ビューティフル・カーヴィング”をめざして— 鉄道の曲線通過に関わる研究課題とその成果—、機械学会第9回交通・物流部門大会、2000
- (2) Matsumoto, and et. al : Experimental and Theoretical Study on the Dynamic Performance of Steering Bogie in Sharp Curve, Vehicle System Dynamics, vol.29, supplement, 1998, p559
- (3) 松本、佐藤、大野、谷本、陸、宮内、急曲線台車の研究開発(第1報) - 曲・直両用新踏面形状の設計法と性能評価 - 、第27回交通安全公害研究所発表会、1997
- (4) Suda, Y. and Anderson, R. J.: Improvement of Dynamic Performance of Trucks with Longitudinally Unsymmetric Structures by Semi-Active Control for Rail Vehicles, JSME International Journal, Series C, 37-3, 1994, p542
- (5) Suda, Y.: Improvement of High Speed Stability and Curving Performance by Parameter Control of Trucks for Railway Vehicles Considering Independently Rotating Wheelsets and Unsymmetric Structure, JSME International Journal, Series III, 1990, 33-2, p176
- (6) Matsumoto, A. and et. al : Compatibility of curving performance and hunting stability of railway bogie, 16<sup>th</sup> IAVSD symposium, 1999
- (7) 松本、佐藤、大野、須田、谷本、陸、宮内、鉄道

台車における曲線通過性能と直進安定性の両立、  
第29回交通安全公害研究所発表会、1999