

都市鉄道における急曲線通過性能向上の取り組み

- ボギー角アクティブ操舵台車の研究開発 -

交通システム研究領域	大野 寛之	松本 陽	佐藤 安弘
東京大学	須田 義大		
東京農工大学	道辻 洋平		
住友金属テクノロジー	谷本 益久		
住友金属	佐藤 與志		

1. はじめに

急曲線が多数存在する都市鉄道においては、脱線事故やレール・車輪の異常摩耗を防止するなど、安全性、保守性の向上が重要な課題である。鉄道車両の台車において、直進安定性と曲線通過性能は一般的に相反する関係にあり、これまでは高速走行時の直進安定性の確保を、急曲線通過性能よりも優先する傾向がみられる。しかしながら、地下鉄のような多数の急曲線がある路線では曲線通過性能を向上させることにより、安全上・保守上のメリットがあるものと考えられる。筆者らは曲線通過性能の向上を目的として、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⁽¹⁾⁽²⁾を行ってきた。前報⁽¹⁾⁽²⁾では台上試験による定常曲線走行時において、本方式の基本的特性を把握し、有効性が確認されたことを述べた。本報告では、操舵用アクチュエータの摩擦などを考慮した制御性能の向上、さらに1台車単位での制御を2台車（=1車両）に拡張し、車両の前後台車を総合的に考慮して曲線通過時の安全性を向上させる方法について報告する。

2. ボギー角アクティブ操舵台車

2.1. ボギー角アクティブ操舵台車の概要

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、曲線に応じて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.1）。輪軸の操舵リンク等はいらず、従来のヨーダンパ位置にアクチュエータを付加すると

いう簡単な構造で曲線通過性能の向上をはかることができる。

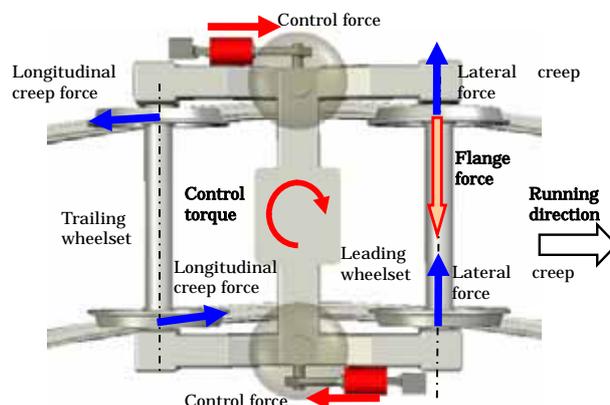


Fig.1 Mechanism of Active-Bogie-Steering truck

2.2. 操舵アクチュエータ

Fig.2 に今回使用した半車体台上実験装置と、ヨーダンパ取り付け位置に取り付けられた操舵アクチュエータを示す。操舵アクチュエータは1台車に対して左右2箇所点対象となるように取り付けられている。アクチュエータの発生力は片側最大 20kN 程度である。

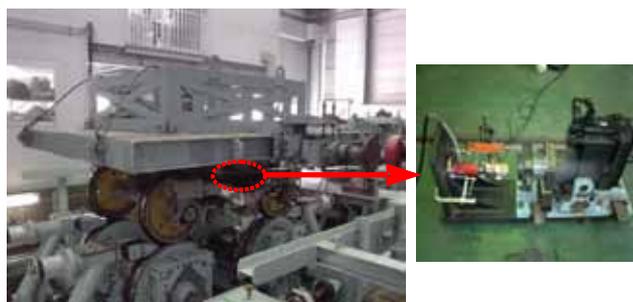


Fig 2 Test truck and steering actuator

3. 新しい制御方式の検討

3.1. 検討課題

これまでの研究では、定常曲線走行中に前軸外軌横圧の値を0とできることは確認していたが、緩和曲線中の曲率の変化状況に応じた適切な制御手法については課題となっていた。そのため、緩和曲線中においても著大な横圧が発生しないよう、曲率の変化に応じて操舵用のアクチュエータ力 F を制御するため、以下の式に示す新たな手法を開発することとした。

$$F = k(Rc) \cdot \rho \quad (1)$$

ここで Rc は定常曲線半径、 k は定常曲線半径に応じて変化するゲイン、 ρ は走行中の軌道の曲率である。

3.2. アクチュエータの特性

3.2.1. アクチュエータの動特性

操舵アクチュエータは、電圧指令値に比例したトルクを発生するACサーボモータの回転運動を直動シリンダ変位に変換する機構のため摩擦や内部慣性の影響を受ける。そのような要素のモデル化をおこなうにあたり以下の式を仮定する。

$$m\ddot{x} + f_c \cdot \text{sgn}(\dot{x}) = k_c \cdot v_c \quad (2)$$

ここで

x : アクチュエータ直動変位

m : 内部慣性質量

f_c : 乾性摩擦力

k_c : 指令電圧から発生力の校正係数

である。

台車の曲線通過を想定した場合、曲率が大きくなるにつれボギー角は増加する。同時にアクチュエータ変位と発生力は増大関係になる。このことを考慮し動作遅れに支配的な乾性摩擦を補償する指令電圧として以下の式を示す。

$$v_c = 1/k_c \{L_d + f_c \cdot \text{sgn}(\dot{L}_d) + k_p(L_d - L)\} \quad (3)$$

ここでは目標として発生するアクチュエータ発生力である。または目標発生力と実発生力の偏差に対するフィードバック係数であり実験により適当な値を見出すことができる。

3.2.2. アクチュエータ単体の応答特性

Fig.3 は、アクチュエータ単体の両端をジグで拘束した状態で、目標発生荷重 L_d に対する制御系ごとの追従特性を比較したものである。アクチュエータ端点にはロードセルが設置されており、発生力 L を観測できる。図示されるように式(3)の右辺第一項のみの制御

では、目標値に対し追従が遅れ、定常状態における偏差が確認できる。この偏差は $\pm 1.5\text{kN}$ 程度の幅で乾性摩擦が存在することに起因するものである。過渡的な目標値に対する追従の遅れは、同式の第2項の摩擦補償を付加することで改善している。さらに第3項のフィードバックを付加することにより、目標値に良好に追従する制御系となっていることが確認できる。

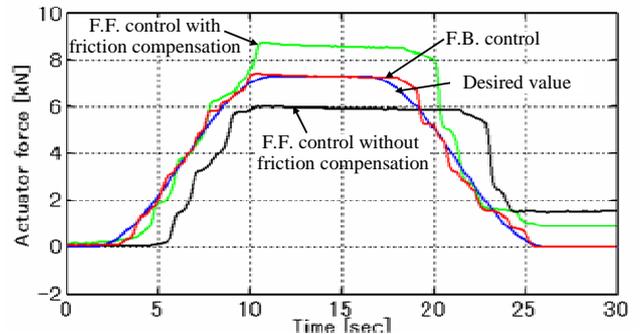


Fig.3 Time response of actuator force

3.2.3. 台車取付け時の応答

アクチュエータを実際に台車に取り付け、アクチュエータ目標発生力と実際の発生力の特性評価を台上走行実験によって検証した。

Fig.4、Fig.5 は軌条輪走行状態におけるアクチュエータ目標発生力と実際の発生力を表したものである。図示されるように目標発生力に対し遅れと定常偏差が生じている様子が見える。一方、Fig.5 に示す式(2)に基づくフィードバックを導入することで目標値によく一致した発生力となっている。

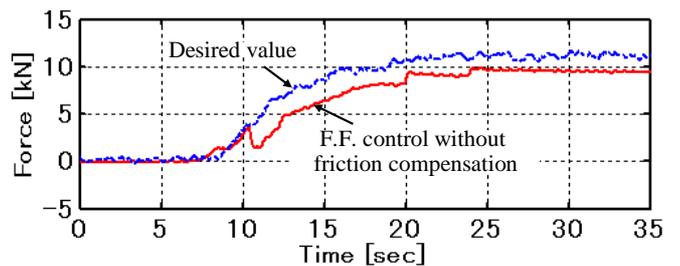


Fig.4 Control without feedback
($R=180\text{m}$, $V=25\text{km/h}$)

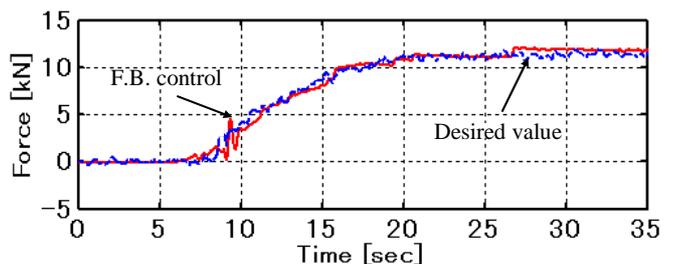


Fig.5 Control with feedback ($R=180\text{m}$, $V=25\text{km/h}$)

4. 新制御方式による走行試験結果

新しい制御方式による操舵台車の曲線通過性能を検証するため、1台車・半車体モデルにて、台車試験設備を用いた走行試験を行うとともに、マルチボディダイナミクスシミュレーションソフト“A’GEM”によるシミュレーションを行った。

Fig.6 に曲線半径と前軸外軌側横圧との関係を、操舵制御なし、ありの場合をまとめて示す。シミュレーション結果と台上試験の結果とは良く一致しており、操舵制御を行うことにより、いずれの曲線半径においても前軸外軌側横圧をほぼ0とすることに成功している。特に、制御がなければ著大な外軌横圧が生じる急曲線においても、制御によりこれをほぼ0に押さえられていることから、急曲線での曲線通過性能が大幅に向上していることが分かる。

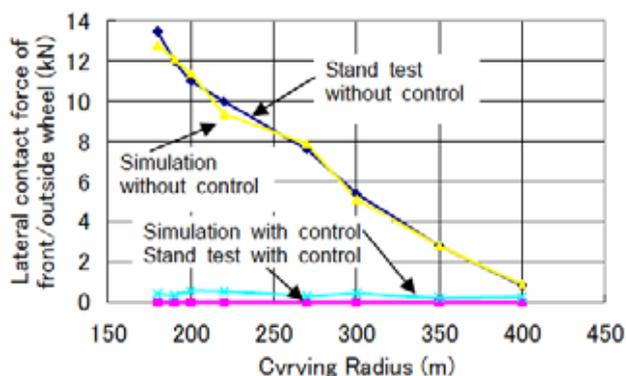


Fig.6 Lateral contact force of front-outside wheel

Fig.7 には曲線通過時に要求されるアクチュエータ力を示す。これについてもシミュレーション結果と台上試験の結果は良く一致しており、シミュレーションの有効性を物語っている。グラフから、定常曲線の曲線半径が小さくなるに従い、前軸外軌横圧を0にするために要求されるアクチュエータ力が増大していく様子を読み取ることができる。

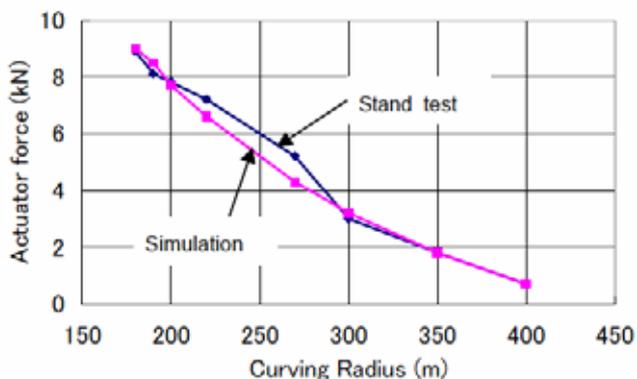


Fig.7 Comparison of required actuator force

5. 1車両モデルの検討

5.1. 検討課題

交通安全環境研究所の備える台車試験設備は、曲線通過状況を作り出すことができる我が国唯一の試験設備であるが、1台車半車体モデルの走行試験しか実施することができない。操舵台車の実用化に当たっては、1車両全体で曲線通過性能の向上を検証することが必要であるが、設備の制約によりこれができないため、シミュレーションによる検討を行った。

前節でも紹介したとおり、マルチボディダイナミクスシミュレーションソフト“A’GEM”を用いたシミュレーション結果は台上試験結果と良く一致しており、シミュレーションモデルを1車両モデルに拡張することも可能である。

Fig.8 に制御方式も含めたシミュレーションの概念図を示す。

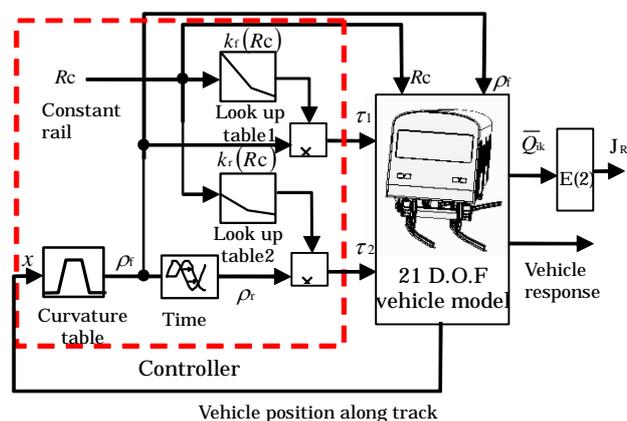


Fig.8 Multibody simulation diagram

1車両モデルでは前後それぞれの台車についてアクチュエータ力を制御する必要がある。前後それぞれの台車の操舵モーメント τ_j (添字 $j=f,r$ は、それぞれ前、後台車を表す) は以下の式で表される。

$$\tau_j = 2l_{ba} \cdot k_j(Rc) \cdot \rho_j(t) \quad (5)$$

ここで l_{ba} は台車中心からのアクチュエータ取り付け位置までの左右距離、 k_j は定常曲線半径に応じて変化するゲインである。

1車両モデルでの曲線通過性能の評価を行うにあたり、車両モデルの曲線通過性能の良否を表す評価関数を考える必要がある。そこで曲線通過性能を考える上で、これまでの台上試験同様に各台車の先頭外軌車輪の定常曲線中の平均横圧を評価指標として使用することとした。

先頭外軌車輪の横圧 Q の低減を目標とした評価

関数 J_R を次式で定義する。

$$J_R = \frac{1}{2} \left(|\bar{Q}_{1r}(Rc)| + |\bar{Q}_{3r}(Rc)| \right) \quad (4)$$

添字 $i=1 \sim 4$; 車軸番号,

添字 $k=l,r$; 左右輪

この評価関数を最小化するゲイン $k_j(Rc)$ により、車両通過時の先頭軸外軌横圧が抑えられ、走行安全性の向上とフランジ反力の低減を期待できる

5.2. 解析結果

各曲線半径に対して評価関数を最小化する最適なゲインを数値解析により算出する。曲線条件 = 180, 200, 250, 300, 350, 400m それぞれで前・後台車の制御による操舵モーメントを変化させ、評価関数が最小となる前後モーメント配分が見つかり、各曲線半径において最適なゲインが求まる。線形近似補間をして求まったゲインを Fig.9 に示す。図示されるとおり、急曲線になるほど前後台車ともゲインが大きくなる傾向がある。また、前台車のゲインは後台車より大きく、ゲインの符号が等しいことから車体に対して台車ヨー角が同相となる操舵制御がよいことがわかる。

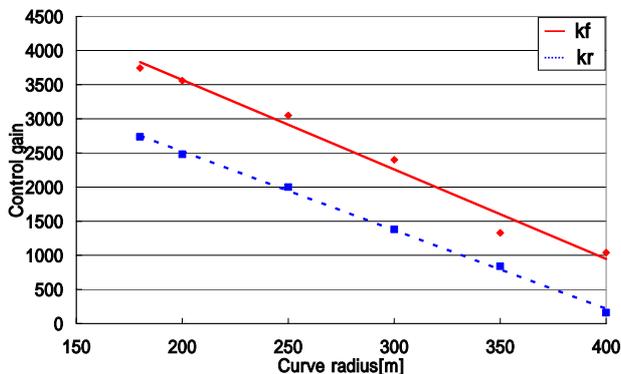


Fig.9 Obtained optimum gain

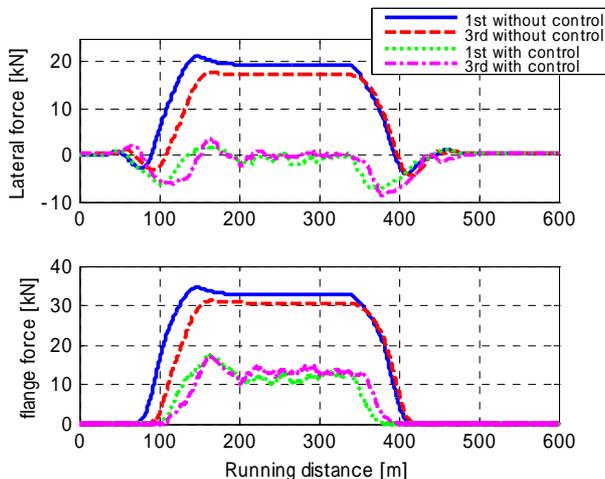


Fig.10 Running response for outside wheel

数値解析により探索した以外の曲線条件の例として半径 220m の曲線における制御効果を示す。Fig.9 により補間された前・後制御ゲインの値である 3300, 2290kN・m によって制御を行うと、Fig.10(a)に示すように曲線通過中の 1 軸および 3 軸の外軌横圧は零付近まで減少している。これは Fig.10(b)に示すように、1 軸と 3 軸の外軌側車輪のフランジ反力が半減した効果が大きい。また、評価関数 J_{220} の探索結果によると、最適値、補間値、非制御値はそれぞれ 0.0324、0.551、18.2 となり、補間値でも最適値と同等の制御効果が得られている。以上のことから、提案する操舵力配分制御により曲線通過性能が向上していることが確認できる。

6. おわりに

本報告ではボギー角アクティブ操舵台車の制御について以下のことを明らかにした。

1) アクチュエータの制御

アクチュエータの摩擦特性を考慮したフィードバック制御により、緩和曲線においても適切な操舵力を得ることができるようになった。

2) 曲線通過性能の向上

適切な操舵力を与えることにより、いずれの曲線半径においても前軸外軌車輪の横圧をほぼ 0 にすることが可能になった。

3) 1 車体モデルの検証

1 車体モデルについて新しい評価関数を導入して前後台車の最適操舵ゲインの検討を行った。その結果、前後の台車に適切な操舵力の配分を行うことで、車両全体の曲線通過性能が顕著に向上することが明らかとなった。

今後はこれらの結果を基に実車走行による検証を行うことが課題である。

本研究の実施にあたり(財)メトロ文化財団の公益基金による研究費補助を頂いたことに謝意を表す。

参考文献

- (1)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
- (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 2 報)」、第二回交通安全環境研究所研究発表会講演概要、2003