

2111 操舵アクチュエータのパラメータ同定および ボギー角アクティブ操舵台車の急曲線通過性能の数値解析

学〔機〕 ○菅原 大輔 (茨城大学大学院) 正〔機〕 道辻 洋平 (茨城大学)
フェロー〔機〕 須田 義大 (東京大学生産技術研究所) 正〔土〕 佐藤 安弘 (交通安全環境研究所)
正〔機〕 大野 寛之 (交通安全環境研究所) 正〔機〕 森 裕貴 (交通安全環境研究所)
正〔機〕 谷本 益久 (住友金属テクノロジー) 水野 将明 (新日鐵住金)

Parameter Identification of Steering Actuator and Simulation for a Vehicle of Active Bogie Steering

○Daisuke SUGAWARA, (Ibaraki University), 4-12-1 Nakanarusawa-cho Hitachi-city Ibaraki

Yohei MICHITSUJI, (Ibaraki University)

Yoshihiro SUDA, (Institute of Industrial Science The University of Tokyo)

Yasuhiro SATO, Hiroyuki OHNO, Hirotaka MORI, (National Traffic Safety & Environment Laboratory)

Masuhisa TANIMOTO, (Sumitomo Metal Technology, Inc.)

Masaaki MIZUNO, (Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation)

In the design of railway bogie, the compatibility between high speed stability and curving ability on tight curve remains problem to be solved. In this paper, the ABS (Active-Bogie-Steering) bogie, which has possibility to realize smooth curving, is mentioned. In this paper, a newly developed steering actuator which is more practical light weight device is introduced. The characteristic of actuator is identified by experiment. The bogie control with identified actuator is evaluated with multi-body dynamics simulation.

キーワード: 車両ダイナミクス, ボギー角アクティブ操舵台車, アクティブ制御, 操舵台車, 曲線通過性能

Keywords: vehicle dynamics, ABS (active-bogie-steering) bogie, active control, steering bogie, curving performance

1. 緒言

鉄道車両用台車の設計において、高速走行安定性と曲線通過性能の両立は長年取り組まれてきた課題である。しかし、これら性能を両立する際には、1次ばねの前後・左右支持剛性や踏面勾配という限られた設計パラメータの最適化では、輪軸蛇行動特性と自己操舵特性を両立することが難しい。一方、最近では相互直通運転が積極的に実施され、特急電車が地下鉄路線を走行する相互直通運転が実現されるなど、高速走行安定性を重視した台車設計と同時に、都市部の地下鉄のように急曲線が多数ある路線において優れた曲線通過性能を有する設計も必要となっている。

急曲線を走行する台車には、先頭軸外軌側車輪に著大な横圧が発生し、フランジ摩耗、騒音、脱線係数の上昇といった課題がある。この課題を解決するため、多くのパッシブ方式の操舵台車が研究され、それらの一部は実用化され、営業路線で走行している^[1-2]。しかしながら、パッシブな操舵方式では性能向上に一定の限界があり、さらなる性能向上にはアクティブ方式を視野に入れた、操舵台車の研究開発を推進していくことも必要である。

本研究では、車体と台車枠間のヨーダンパ設置位置において、操舵用のアクチュエータで置き換えたアクティブ操舵台車を取り扱っている。この台車は、ボギー角アクティブ操舵(Active-Bogie-Steering:ABS)台車^[3]とよばれ、

従来の一般的な台車に比べ、急曲線走行中の脱線係数の減少が可能である。その効果はこれまでに、1車両シミュレーション・半車体の実験によって示されている^[4]。本報告では、新規に小型化設計をおこなった操舵アクチュエータについて述べ、その特性を同定した結果を報告する。また、同定したアクチュエータ特性を考慮した曲線通過シミュレーションを、マルチボディダイナミクス解析ツール SIMPACK を用いて実施する。実スケールの車両運動モデルを用いた曲線通過シミュレーションを実施し、新型操舵アクチュエータの特性が、台車の曲線通過性能に与える影響について検討したのでその内容について報告する。

2. ボギー角アクティブ操舵台車

急曲線通過中の鉄道車両台車は、内外車輪の輪径差を十分にとれず操舵不足となる。この状態では、後車輪は輪径差不足のために前後すべりが生じ、縦クリープ力が生じる。一方、前車輪はアタック角がつくため、横方向のすべりが生じ、横クリープ力が生じる。これらの車輪にかかるクリープ力により台車には反操舵モーメントが生じる。この反操舵モーメントに釣り合うよう、前輪軸外軌側車輪には車輪フランジとレール接触し著大なフランジ反力が生じる。したがって、前輪軸外軌側車輪には著大な横圧が発生することになる。このとき、車体-台車

に取り付けた左右アクチュエータにより、台車枠にヨーモーメントを発生させ操舵することで、理想的な台車姿勢にし、フランジ反力を減少させる。結果、横圧を減少させ、スムーズな曲線通過を実現できる。以上がボギー角アクティブ操舵台車のコンセプトである。このメカニズムを図1に示す。提案されているアクティブ操舵台車^[5-8]は多々あり、輪軸を操舵する方式では操舵機構が複雑になりがちであるが、この台車のアクティブ操舵機構は、車体と台車枠間だけである。したがって、この台車は、とてもシンプルな構造であるため、従来型の台車に装着されているヨーダンパをアクチュエータに置き換えるといった、既存車両の簡単な改修で実現可能である。

以前に交通安全環境研究所所有の台車試験装置にて、実施された曲線走行試験が実施された。このとき、使用された電動アクチュエータは一般的な特性のもので、アクティブ操舵用に設計されたものではなかったため、重量が150kg程度と重く、特別なジグを必要とした。しかしながら、アクチュエータの操舵制御によって前輪軸外軌側車輪の横圧の減少が確認されている。

3. アクチュエータ特性の同定

3.1 操舵アクチュエータの概要

今回、ボギー角アクティブ操舵台車用に新設計されたアクチュエータが作成された。従来の操舵アクチュエータと比較し、小型・軽量である。このアクチュエータは、ACモータの回転運動をボールねじにより直動運動に変換する機構を持った直動の電動アクチュエータである。

3.2 操舵アクチュエータのパラメータ同定

ボギー角アクティブ操舵台車の曲線通過シミュレーション及び操舵アクチュエータの制御法を検討していくに当たり、その特性を把握する必要がある。そこで、アクチュエータ単体の特性試験を実施し、パラメータ同定を行った。特性実験時の操舵アクチュエータの概観と力学的モデルを図2に示す。特性実験では、複数の波形（正弦波、ステップ波、ランダム波）の指令信号をアクチュエータに入力し、その応答（シリンダ縦方向変位、発生力）を測定する。実験条件は、アクチュエータのシリンダをジグにより拘束した状態、シリンダ変位を許したフリー状態の2条件で実施した。操舵アクチュエータの運動方程式を(1)式に示す。

$$m\ddot{x} + f_c \text{sign}(\dot{x}) + k_b x = k_c v \quad (1)$$

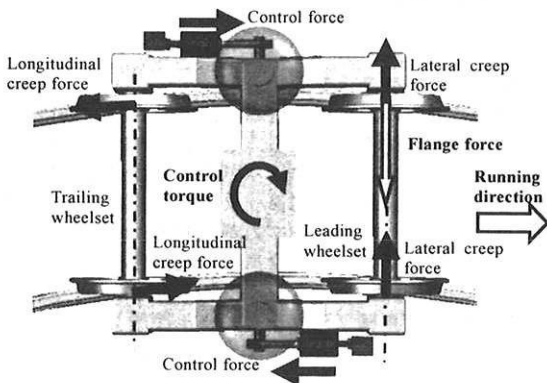


Fig.1 Control concept of ABS bogie during tight curving

等価慣性質量 m 、乾性摩擦 f_c 、ゴムブッシュ剛性係数 k_b 、目標制御入力 $k_c v$ から構成される。この制御入力は、校正係数 k_c と入力電圧 v からなる。粘性摩擦については、乾性摩擦に比べその影響が小さいと考えられるので考慮していない。図3にアクチュエータのブロック線図を示す。このブロック線図は、パラメータ同定の過程を端的に説明するものである。特性実験時のある指令信号の入力されたアクチュエータの応答 F_{exp} 、シミュレーションにおいて同じ指令信号をアクチュエータモデルに入力時の応答 F_{sim} の2つの応答の評価関数が最小になるようパラメータを定める。

ここで、各パラメータの導出方法を見ていく。等価慣性質量 m は、ACサーボモータの仕様データ及び、ボールねじ機構の影響を考慮して算出できる。校正係数 k_c は、ステップ入力とその発生力の測定値から算出できる。ゴムブッシュ剛性係数は、フックの法則に倣い、発生力をシリンダ変位で除すことにより算出する。乾性摩擦 f_c については、様々な部位機構が影響するため、算出が困難である。したがって、複数の入力信号を用いた入出力関係からパラメータ同定を検討する。具体的には、(2)式に示す評価関数値 J が最小となる最適な f_c 値を探索する。

$$J = \int_0^T |F_{exp} - F_{sim}| \cdot dt \quad (2)$$

アクチュエータは低周波数領域で扱う為、正弦波入力は1, 3, 5[rad/s]の低周波数の物をパラメータ同定に用いた。図4に実験値とシミュレーションの応答比較の一例を示す。また、探索結果を図5に示す。同定した各種パラメータを表1に示す。

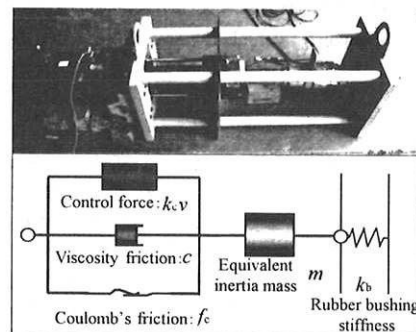


Fig.2 New-type light weight steering actuator with base-stand for parameter identification experiment

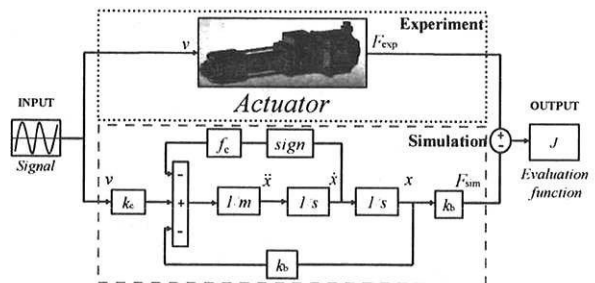


Fig.3 Block diagram for parameter identification

4. 1 車両モデル数値シミュレーション

4.1 シミュレーションの概要

ボギー角アクティブ操舵台車の曲線通過性能の評価を行うため、1 車両モデルの曲線通過シミュレーションを実施した。解析にはマルチボディダイナミクスシミュレーションソフト SIMPACK を用いる。前章で同定したアクチュエータ特性を考慮した 2 つの 2 軸台車を有した 1 車両モデルを作成し、曲線通過時の横圧、脱線係数等の数値から曲線通過性能の評価を行う。数値解析に用いる車両パラメータは表 2 に、軌道パラメータは表 3 にそれぞれ示す。シミュレーションに使用する線形は入口緩和曲線、定常曲線、出口緩和曲線からなる単曲線で、定常曲線区間で曲線半径 160[m] の急曲線である。軌道不整、スラックは考慮していない。想定している車両モデルは一般的な近郊型通勤電車を想定している。踏面形状は、曲直両用円弧踏面を用いている。

4.2 1 車両モデルの台車制御

このシミュレーションでは、急曲線走行中の車両にアクティブ操舵制御ありと制御なし状態の条件で行う。図 6 にアクチュエータの制御の流れを含んだシミュレーションの流れ図を示す。曲率テーブルから車両走行位置の曲率を読み出す。操舵アクチュエータはその軌道の曲率に比例した力を発生させる。これらアクチュエータの応答により台車枠と車体間にトルクを発生させ、台車を操舵させるといった流れになる。ただし、台車両端に取り付けられたアクチュエータの発生力は等しいものとする。

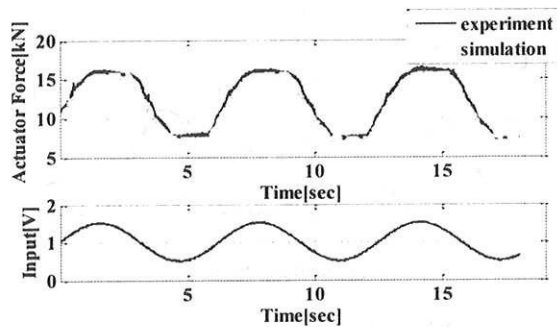


Fig.4 Comparison between numerical simulation and experiment regarding time series

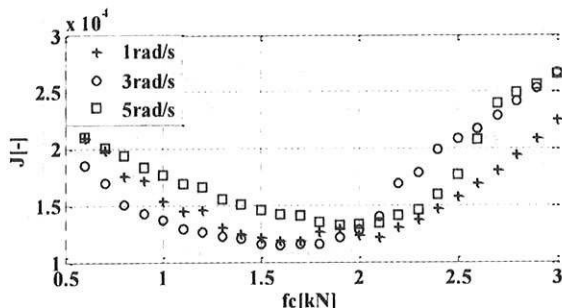


Fig.5 Experimental result of parameter identification regarding different input frequency

4.3 シミュレーション結果

1 車両モデルの時系列解析結果を示す。乾性摩擦の影響を調査するため、曲線通過性能を横圧と脱線係数を用いて評価した。シミュレーション中の実際のアクチュエータ発生力、目標制御力、乾性摩擦力を図 7 に示す。ただし、アクチュエータ発生力は制御力と乾性摩擦力を加えたものである。乾性摩擦を考慮したアクティブ制御、目標制御（乾性摩擦を考慮しない）、パッシブ（通常台車）の結果は図 8、9 に示す。図 8 は先頭軸外軌側車輪の横圧

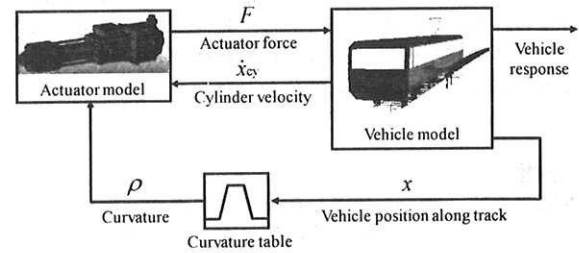


Fig.6 Diagram of multi-body dynamics simulation

Table.1 Parameters of actuator model

Equivalent inertia mass: m	10667 (kg)
Coulomb's friction: f_c	1.70 (kN)
Rubber bushing stiffness: k_b	8.32 (kN/m)
Scale factor: k_c	11.5 (kN/V)

Table.2 Parameters of vehicle

Body, bogie frame, wheel mass	20000, 3000, 1000 (kg)
Inertia radius of body, bogie frame, wheel	3.08, 0.637, 0.686 (m)
Primary spring stiffness longitudinal, lateral, vertical	5590, 5590, 1060 (N/mm)
Secondary spring stiffness lateral, vertical	131.3, 420.3 (N/mm)
Secondary damper damping coefficient. lateral, vertical	58.8, 4.38 (N/mm·s)
Longitudinal length between bogie centers	12.0 (m)
Length between wheelsets	1.90 (m)
Lateral length between bogie center and actuator attached point	1.50 (m)
Radius of wheel	0.43 (m)
Flange clearance (with slack)	11.0 (mm)
Coefficient of friction	0.40
Wheel back gauge	1.348 (m)
Running velocity	10.0 (m/s)

Table.3 Parameters of track

Curve radius	160 (m)
Length of constant curve	90 (m)
Length of transition curve	32 (m)
Rail gauge	1.435 (m)
Super-elevation	120 (mm)

の結果、図9は先頭軸外軌側車輪脱線係数の結果である。

図8より、入口緩和曲線区間において、乾性摩擦を考慮したアクティブ制御時の横圧値は、乾性摩擦を考慮していないものと比較し増加している。これは、アクチュエータの応答に乾性摩擦由来の反操舵モーメントが含まれていることが影響していると考えられる。したがって、乾性摩擦の影響は台車操舵動作に遅れを生じさせる。反対に、出口緩和曲線区間においては、乾性摩擦を考慮したアクティブ制御の横圧値は小さくなっている。これは、乾性摩擦の影響で台車がこの区間においても操舵力を発生し続けていることが要因である。

図9から、脱線係数においても横圧と同様の特徴・傾向がみられる。これらの結果から、乾性摩擦を考慮したアクティブ操舵制御は、出口緩和曲線区間においては特に有用な影響を与えることがわかった。

5. 結言

本研究では、新しく制作した操舵用アクチュエータのパラメータを同定し、マルチボディダイナミクスシミュレーションによりボギー角アクティブ操舵台車の曲線通過性能の評価を行った。その結果を以下にまとめる。

- (1) ボギー角アクティブ操舵台車用に従来型と比較し、小型・軽量の操舵アクチュエータが新設計された。このアクチュエータの単体特性実験を実施し、パラメータを同定した。
- (2) 同定したアクチュエータ特性を反映したボギー角アクティブ操舵台車から構成される1車両モデルを作製し、数値解析を実施した。新開発された操舵アクチュエータの摩擦特性に関する影響をSIMPACKを用いたマルチボディダイナミクスシミュレーションにより検証した。結果、乾性摩擦が出口緩和曲線区間における脱線係数ピークの低減に効果があることを確認できた。

今後、操舵制御に関して、曲率比例のフィードフォワード制御でなく車両状態量を活用したフィードバック制御による、新たな操舵制御を検討している。同時に軌道不整を加えた条件や変則的な曲線においても有効な制御則の検討に取り組みたいと考えている。

参考文献

- 1) Suda Y.: Improvement of High Speed Stability and Curving Performance by Parameter Control of Bogies for Railway Vehicles Considering Independently Rotating Wheelsets and Unsymmetric Structure, JSME International Journal, Series III 1990, 33-2, pp.176-182.
- 2) Bruni, S et al.: Active control of the running behavior of a railway vehicle, ERRI interactive conference for trains, 2002, pp.1-9.
- 3) 松本 他, ボギー角アクティブ操舵台車の研究開発 (第2報), JRAIL2003, pp37-38, 2006.
- 4) ボギー角アクティブ操舵台車の研究開発 (第4報), 鉄道技術連合シンポジウム(J-Rail)講演論文集2006(13), pp159-162, 2006.
- 5) T.X.MEI and R. M. GOODALL: Wheelset Control Strategies for a Tow-axle Railway Vehicle, Vehicle

Systems Dynamics Supplement 33 (1999), pp.653-664.

- 6) 鴨下庄悟, 石毛真, 渡辺信行, 梅原康宏, 畠田憲司, ボルスタレス台車用 アシスト操舵システムの基礎試験, 鉄道総研報告, vol.22 No 9, pp.5-10, 2008.
- 7) 谷藤克也, 森山淳, 渡辺直行, アクティブ操舵による鉄道車両の曲線通過に関する基礎的検討, 日本機械学会論文集 (C 編) 66(642), 600-607, 2000-02-25.
- 8) 谷藤克也, 石坂直弘, 相馬仁, マルチボディソフトを用いたアクティブ操舵車両の曲線通過シミュレーション, 日本機械学会論文 (C 編) 69(686), 2003-10-25.

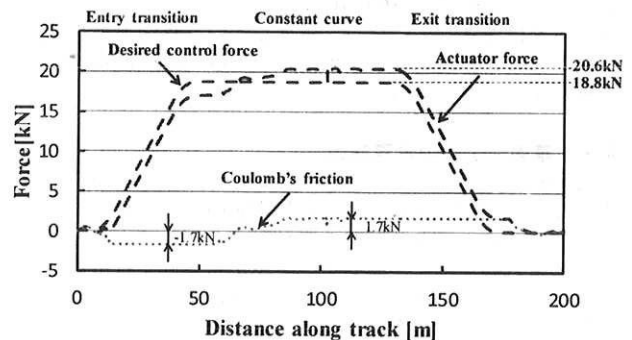


Fig.7 Actuator force of considering the dry friction

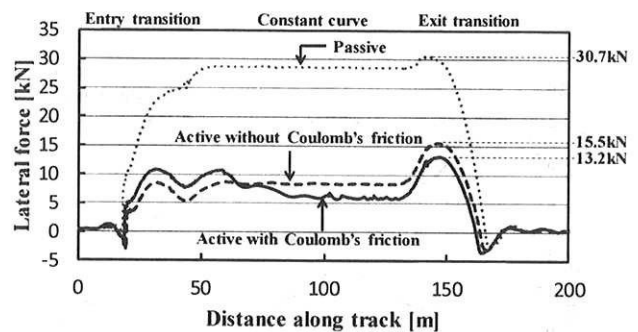


Fig.8 Lateral contact force of leading axle

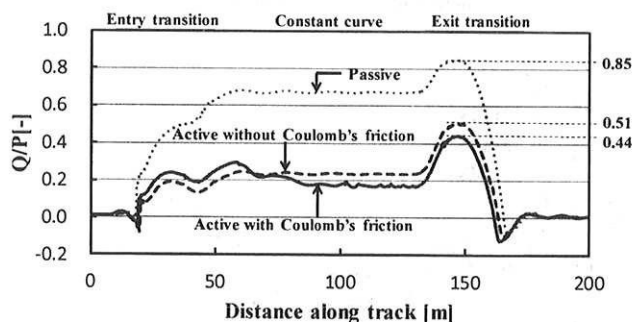


Fig.9 Q/P (Derailment coefficient) of leading axle