

後輪に独立回転車輪を用いた急曲線通過台車に関する研究

Study on Steering Trucks for Rail Vehicles using Independently Rotating Wheelsets on the Trailing Axle

須田 義大*・西村 隆一*・松本 陽**・谷本 益久*

Yoshihiro SUDA, Ryuichi NISHIMURA, Akira MATSUMOTO and Masuhisa TANIMOTO

1. 緒 言

曲線区間の多い我が国の在来鉄道において、曲線をスムーズに旋回できる台車は、大変魅力的である。通常の2軸ボギー台車では、操舵性能と高速安定性の両立は難しく、操舵性能は犠牲となってきた。近年、高速安定性を確保した上で、操舵性能も重視した操舵台車が各種考案、実用化されてきた。そのうちの一つに、軸箱支持剛性を前後非対称に配置した自己操舵台車 [1] があるが、これをさらに発展させて、後輪軸のみに左右の車輪が独立に回転できる輪軸を用いた操舵台車（後輪独立回転輪軸式台車、以下提案台車）を提案し、フランジ非接触時の操舵性能の検討や、輪軸支持剛性を前後対称とした場合について通常台車との操舵性能の比較を行ってきた [2]。図1に提案台車の概念図を示す。

本報告では、輪軸支持剛性の前後非対称性を新たに考慮した場合について、フランジ接触時における提案台車の操舵性能や高速安定性について、通常台車と比較した理論解析と実験を行った。さらに操舵性能と高速安定性の両立を目標とした、台車諸元の最適化を検討した。なお本研究の数値シミュレーションでは、マルチボディダイナミクス・ソフトウェア A'GEM を改良して用いた。

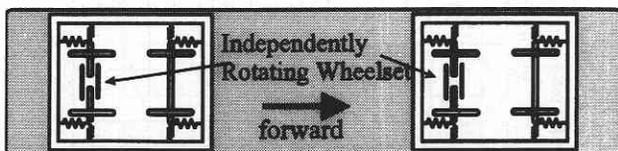


図1 提案する後輪独立回転輪軸式台車

2. 後輪独立回転輪軸式台車

本文中にて用いる記号の説明を以下に示す。

k_{xj} : 輪軸支持前後剛性 ($j = 1$: 前, $j = 2$: 後), k_y : 輪軸支持左右剛性, y_j : j 輪軸の左右変位, Ψ_j : j 輪軸のヨーイング角, a : 軸距の半分, b : 車輪とレールの接触点間距離の半分, b_x : 輪軸支持剛性左右間隔の半分, λ : 車輪踏面勾配, r : 車輪回転半径, R : 曲線半径, κ_{11} : 縦クリープ係数, κ_{22} : 横クリープ係数。

左右の車輪を剛に結合した輪軸は、自己操舵機能を持つ優れた工夫の産物である。しかし、この自己操舵機能を生み出す縦クリープ力が、蛇行動という不安定現象を引き起こす。独立回転輪軸では縦クリープ力が生じないので、走行安定性の向上が期待される。また曲線旋回時に、後輪軸の縦クリープ力が反操舵方向に働く場合には、独立回転輪軸を用いることにより、操舵性能の向上が期待できる [2]。

3. 提案台車の操舵性能に関する理論的解析

3.1 4自由度1台車モデル

軸箱支持剛性と車輪踏面形状が、提案台車の操舵性能に与える影響を理論検討し、通常台車の操舵性能と比較した。このための解析モデルは、前後輪軸の左右変位とヨーイング角を変数にとり、台車枠の質量を無視し定常状態を仮定した4自由度1台車モデルを用いた。操舵性能の指標は、車輪・レールの摩耗、騒音発生を引き起こす横圧に加えて、フランジ非接触時では輪軸の左右変位を用いた。

3.2 フランジ非接触の場合

緩曲線を対象としたモデルでは、クリープ特性を線形とした。解析の結果、踏面勾配を一定としたとき、提案台車が通常台車よりも操舵性能（前輪軸左右変位とヨーイング角）が向上する条件を、式 (1) のように求めた。

*東京大学生産技術研究所 第2部

**運輸省交通安全公害研究所

研究速報

$$k_{x2} < \frac{2a\kappa_{22}}{b_x^2}, k_y > \frac{2bb_x^2\kappa_{11}\lambda k_{x1}}{ab_x^2rk_{x1} - 2a^2b\kappa_{11}\lambda} \dots\dots\dots (1)$$

3.3 フランジ接触の場合

3.3.1 クリープ特性

フランジ接触を伴う急曲線を通過する際、前輪軸のヨーイング角や左右変位が大きくなるため、クリープ特性を線形とすることは、現実的ではない。そこで前輪軸のクリープ特性について、滑りと力の関係を原点からオフセットした直線で近似した特性を用いた(図2)。

3.3.2 解析結果

解析の結果、提案台車の操舵性能は、フランジ非接触時には、踏面勾配や他の輪軸支持剛性に依らず、前輪軸の輪軸支持前後剛性のみによって決定される[2]のに対して、フランジ接触時には、前輪軸の輪軸支持前後剛性と踏面形状により決定することがわかった。

フランジ接触時に、通常台車の後輪軸左右変位が純粹転がり変位よりも内側の場合、後輪軸に独立回転式輪軸を用いれば、操舵性能が向上する。これは、後輪軸に反操舵方向に作用する縦クリープ力が、独立回転式輪軸では作用しないためである。実験やシミュレーションから、1/20円錐踏面をもつ車両の場合、曲線半径R500~600m付近で通常台車の後輪軸左右変位の正負が逆転する[2]。そこで、 $k_{x2} = 2.5 \times 10^7 \text{ N/m}$ の場合について、R550mでの通常台車の後輪軸左右変位を、図3に示した。通常台車の後輪軸左右変位は、 k_y に顕著に依存し、 k_y の値が小さいほど内(正)側に変位し、フランジ接触時に後輪軸に独立回転輪

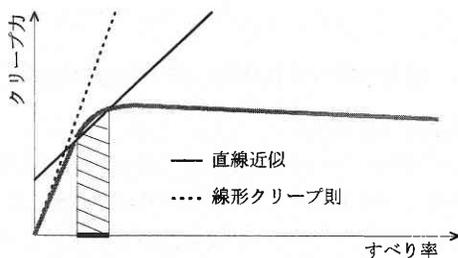


図2 クリープ特性

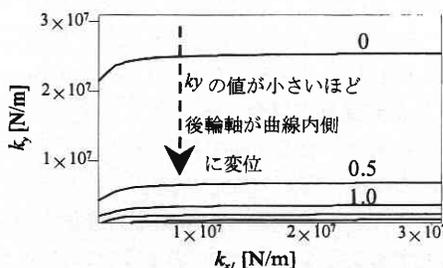


図3 通常台車の後輪軸左右変位 (R550 m)

軸を用いることにより、操舵性能が向上する曲線半径の範囲が大きくなるのがわかる。

4. 実験と数値計算による操舵性能の検討

4.1 はじめに

提案台車と通常台車について、数値計算と実験により操舵性能を検証した。実験は曲線走行が模擬できる運輸省交通安全公害研究所に設置された台車試験機(図4)を用い、実際の地下鉄に用いられているものと同じの台車を用いて行った。車輪踏面は、踏面勾配1/20の円錐踏面と、円弧踏面形状を用いた。等価踏面勾配は1/10であり、図5に形状と輪軸左右変位に対する車輪半径差の関係を示す[3]。

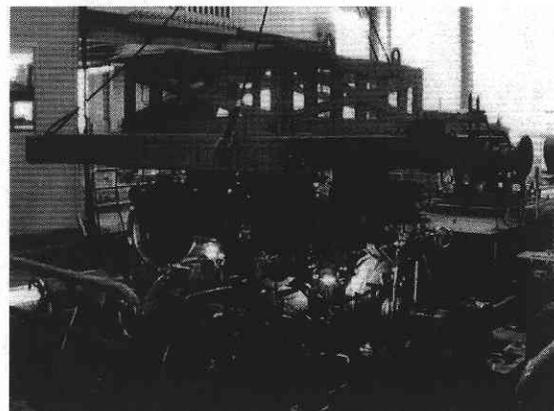


図4 台上試験機と試験台車

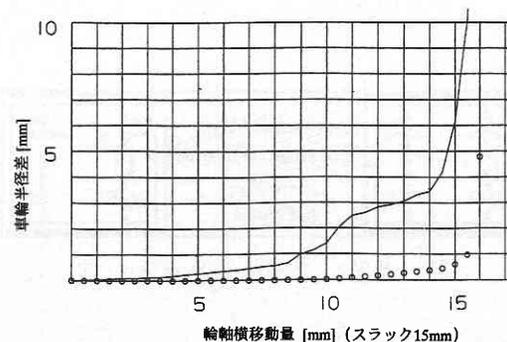
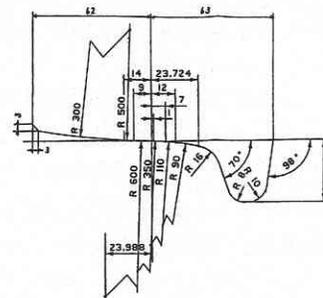


図5 円弧踏面形状

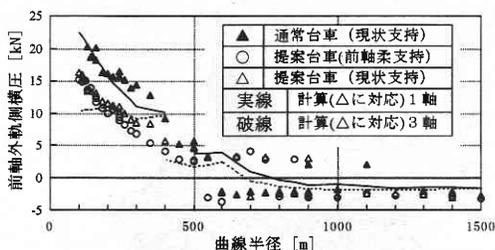


図6 実験と計算による前輪軸外軌側横圧 (提案台車と通常台車の比較, 支持剛性の影響)

4.2 提案台車と通常台車の比較

図6に, 円弧踏面形状を用いた場合について, 提案台車と通常台車における, 前輪軸の外軌側横圧の計算値と実験値を示す. 曲線半径を横軸に取ってある. 通常台車は, 前後輪軸ともに標準支持剛性 ($k_{x1} = k_{x2} = 2.45 \text{ N/m}$), 提案台車では, 標準支持剛性と前輪軸が柔支持 ($k_{x1} = 1.47 \text{ N/m}$) の結果を示した. 計算では, 1車両モデルを用いたため, 1,3軸 (前後台車の前輪軸) の外軌側横圧をプロットした.

支持剛性が同一条件で, 提案台車と通常台車を比較すると, 前輪軸の外軌側車輪がフランジ接触する (横圧が正となる) 曲線半径500 m以下の急曲線において, 提案台車の横圧が減少することが分かる. これは, 通常台車の後輪軸に作用する縦クリープ力が反操舵方向に働いたためである. また, 提案台車では, 前輪軸を柔支持にすると, 操舵性能が向上する.

なお, 1車両モデルによる計算では, 曲線通過時に車体・台車枠間の回転角 (ボギー角) により空気ばねの前後変形が生じるため, 前台車の横圧は大きく, 後台車の横圧は小さくなる. 一方, 実験では, この変形がないため, 両者の中間値をとり, 妥当な結果と考えられる.

4.3 踏面形状の比較

提案台車について, 1/20の勾配を持つ円錐踏面形状車輪と, 円弧踏面形状車輪の場合について比較した結果を図7に示す. ここでは, 軸箱支持前後剛性は, 標準支持剛性で, 前後軸で対称の場合を示した. 上の図は, 前輪軸外軌側に生じる横圧を示す. 下の図は, 同一の支持剛性を持つ通常台車における, 後輪軸の接線力である.

1/20円錐踏面車輪では曲線半径およそ1400 mより小さい曲線半径にて, フランジ接触が生じる. さらに, 曲線半径550 m付近で, 通常台車における後輪軸に働く接線力の符号が入れ替わる. すなわち, 550 mより小さい曲線半径では, 提案台車の操舵性能が通常台車よりも改善される. これに対して, 円弧踏面形状車輪を用いた場合では, 曲線半径550 mより大きな緩曲線では, フランジ接触は生じな

踏面形状	実験値	計算値
1/20円錐	●	—
1/10新円弧	□	⋯

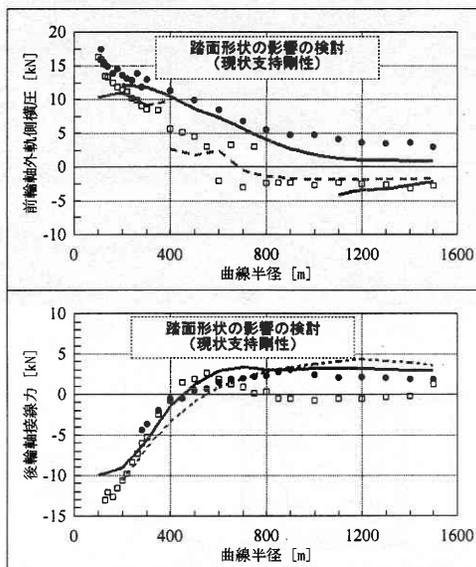


図7 実験と計算による前輪軸外軌側横圧と後輪軸接線力 (踏面形状の影響)

い. また, フランジ接触が生じる急曲線においては, 曲線半径400 m付近で提案台車の操舵性能が通常台車の操舵性能を上回る. つまり, 実験に用いた円弧踏面形状車輪の場合, 提案する台車の操舵性能は, ほぼ全領域の曲線半径で, 通常台車に比べて改善できることになる.

さらに, 円弧踏面形状ではフランジ接触が避け易くなること, 横圧自体の値も同一の曲線半径で比較すると減少することなど, 操舵性能向上の効果が大きいことが分かる.

5. 実験と数値計算による蛇行動安定性の検討

通常台車と提案台車について, 実験と数値計算により蛇行動安定性を調べた. 実験は, 住友金属工業株式会社に設置している後半車体を模擬した台車試験機を用いた (図8). 車輪踏面形状は, 踏面勾配1/20の円錐踏面である. また, 実験を模擬した後半車体モデル (図9) を用いて, 固有値解析により蛇行動の安定性の計算も行った.

左右方向の軸箱支持剛性は, $9.8 \times 10^7 \text{ N/m}$ に固定しおり, 前後方向の軸箱支持剛性を変化させた.

表1に, 実験と計算から得られた安定性の臨界速度, すなわち, 蛇行動の発生速度を比較して示す. ここで, Nは通常台車, Iは提案台車を表す. 括弧内の数字が実験値である. 計算値では, 不安定モードの減衰率が8.5%となる場合を臨界速度とみなした. これは, 支持剛性が前後とも $2.45 \times 10^7 \text{ N/m}$ における通常台車の実験結果と一致するよ

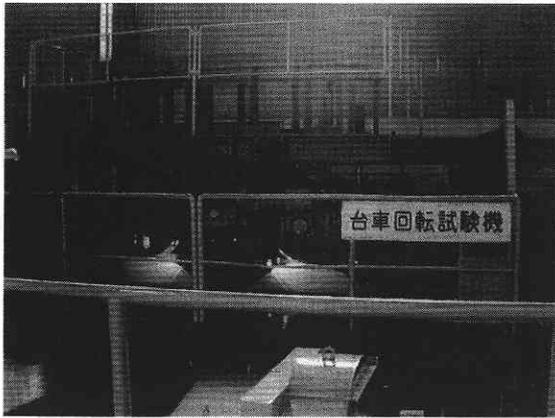
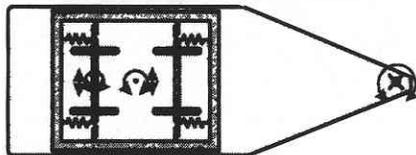


図8 安定性試験に用いた台上試験機



Wheelset, Truck...Lateral, Yaw
Carbody...Yaw

図9 蛇行動計算モデル

表1 臨界速度(実験と数値計算, 単位はm/s)

k_{x1} \ k_{x2}	2.45×10^7 [N/m]	1.47×10^7 [N/m]	3.92×10^7 [N/m]
2.45×10^7 [N/m]	N=49(49) I=51(57)	N=43 I=45(49)	---
1.47×10^7 [N/m]	---	---	N=102 I=55(58)
3.92×10^7 [N/m]	---	N=35 I=45(50)	---

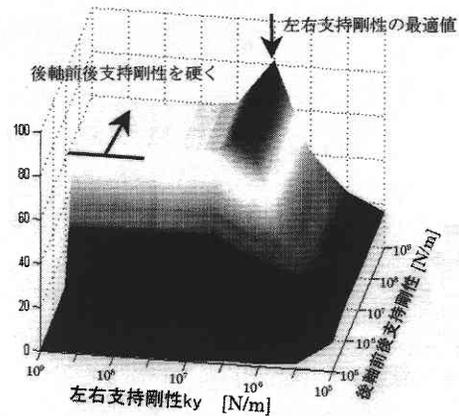
うに選定してある。

実験値と計算値を比較すると、臨界速度の値はほぼ一致しており、支持剛性の影響についても、傾向が一致している。また操舵性能が最も低い条件の場合を除いて、提案台車の方が通常台車よりも安定性が良いことが分かる。

6. 優れた走行性能を発揮する軸箱支持剛性

踏面形状を決めると、提案台車の操舵性能は、フランジ接触時、非接触時ともに、前輪軸前後支持剛性のみによって決定され、柔らかいほど、提案台車の操舵性能が向上する。そこで、操舵性能を重視して、軸箱支持剛性の値を決定する場合、前輪軸前後支持剛性 k_{x1} を小さな値に設定し、走行安定性を最適にするという方法が考えられる。

図10に、等価踏面勾配1/7の円弧形状を想定し、前輪



提案台車の臨界速度 V_{cr} [m/s]
(前軸前後支持剛性 7.45×10^6 [N/m])

図10 最適軸箱支持剛性の検討

の前後軸箱支持剛性を $k_{x1} = 7.448 \times 10^6$ N/m に選択した場合の臨界速度の計算値を示す。後軸前後支持剛性および左右支持剛性 k_{x2} , k_y をパラメータに取ってある。輪軸支持剛性を、 $k_{x2} \geq 3.0 \times 10^7$ N/m, $k_y = 3.0 \times 10^6$ N/m の条件に選択することによって、臨界速度が最大になることがわかる。

7. 結 言

後輪のみに独立回転車輪を用いた操舵台車を提案し、理論解析と実験により、操舵性能と蛇行動安定性を調べ、以下の結果が得られた。

- ・操舵性能、高速安定性の双方について、計算、実験により、提案台車が在来台車より性能が向上する。
- ・軸箱支持剛性の前後非対称性を考慮して、前軸を柔支持にすると、提案台車の操舵性能は、一層向上する。
- ・円弧踏面形状の採用によっても、提案台車の操舵性能をより向上させることができる。
- ・提案台車が操舵性能、高速安定性を両立させうる輪軸支持剛性の条件を得た。

本研究の実験等において、御協力を賜った運輸省交通安全公害研究所、住友金属工業株式会社、住友金属テクノロジー株式会社の各位に感謝の意を表します。

(1998年4月7日受理)

参 考 文 献

- 1) 須田, 生産研究, 46-4 (1994), 225-231.
- 2) 須田・前城・松本・佐藤・大野・谷本・宮内, 機講論, 97-13, (1997), 99-102.
- 3) 松本・佐藤・大野・谷本・陸・宮内, 交通安全公害研究所第27回研究発表会, (1997), 13-16.