

## 操舵機能を持つ新方式独立回転車輪台車の可能性

○ [機] 須田 義大 [機] 王 文軍 (東京大学)

[機] 道辻 洋平 (東京農工大学) [機] 仁科 穰 (東京大学)

The Possibility of a New Concept of Self-steering Truck  
with Independently Rotating Wheels○ Yoshihiro Suda, Wenjun Wang, (The University of Tokyo)  
Yohei Michitsuji, (Tokyo University of Agriculture and Technology)  
Minoru Nishina, (The University of Tokyo)

It can be said that the performance demanded for the railway vehicle has changed significantly compared to the age when the wheelset appeared. In recent years, high speed trains are required over 350 km/h service operation, whereas LRV should have smooth curving ability in intersections. Considering such the situation, it is profitable to review the structure of the wheelset again based on the principles. In this paper, based on the examination of self-steering trucks with independently rotating wheels (IRW) which the authors have conducted, a new concept of self-steering truck with IRW is proposed. Through theoretical analysis, numerical simulations and experiments with a scale model vehicle, the high curving performance of the proposed truck with IRW is confirmed.

キーワード：独立回転車輪，自己操舵機能，急曲線通過性能

Key Words：Independently rotating wheels, Self-steering ability, Tight curving performance

## 1. 緒言

鉄道車両に用いられる輪軸は、踏面勾配のついた二つの車輪を軸で剛結合した構造を有し、鉄道黎明期から現代まで基本的な構造を変えていない。ダイナミクスの観点から輪軸の機能をみると、曲線走行時の自己操舵性能という大きなメリットがある一方、蛇行動という弊害も持っている。そのため、鉄道台車の開発の歴史は、輪軸の持つ自己操舵性を活用し、かつ蛇行動を克服するための技術開発の歴史と関連が深い。実際、鉄道の高速度が進むにつれ、軸箱支持剛性の最適化手法や、軸箱支持装置を工夫した自己操舵台車の開発が行われてきた<sup>1)</sup>。

このように高速化や急曲線での性能向上のために台車が工夫されてきた一方、輪軸が登場した黎明期と現代では鉄道車両に要求される性能は著しく変化したといえる。例えば、高速鉄道では世界的にみて 350km/h という高速走行性能が必要とされ、また、LRT であれば、低床化を実現しつつ、半径 10m といった超急曲線をスムーズに旋回する性能が望まれる。このような状況を鑑み、原理原則に基づき、あらためて輪軸の構造を見直すことは有益である。

車輪構造の抜本的な見直しという観点から、Frederich

は重力復元力に着目することで、自己操舵性能を有する二方式の独立回転車輪台車 (EEF 台車, EDF 台車) を提案した<sup>2)</sup>。また、著者らは、Frederich の EEF 台車の問題を明らかにし、自己操舵機能と制御機能を組み合わせたパワーステアリング台車という新たなコンセプトを提案し、シミュレーションと実験でその有効性を確認している<sup>3)</sup>。さらに、駆動台車への展開として 3 軸方式<sup>4)</sup>やリンク系の最適化手法を考案し有効性を実証してきた。これら、提案してきた技術により、曲線通過時のアタック角ゼロ化、横圧ゼロ化も原理的に可能であり、ダイナミクスという観点での理想的な車輪構造体系は完成の域に近づいている。

一方、現代の鉄道ではダイナミクスの性能の優劣だけでなく、メンテナンス性も重要な要素である。そこで本稿では、これまで著者らが行ってきた自己操舵性独立回転車輪台車の検討をふまえ、高性能かつ、構造がシンプルな新しいタイプの自己操舵性独立回転車輪台車を提案する。提案する新方式独立回転車輪台車は、踏面内側の車輪半径より、踏面外側の車輪半径が大きくなるように設計された独立回転車輪を有する台車である。本稿では、提案する新方式独立回転車輪台車に使用されている輪軸を逆勾配踏面独

立回転軸と呼ぶ。逆勾配踏面独立回転軸は、運動性能とメンテナンス性を最適化することを目的に、台車構造、車輪構造、さらにレール構造まで含めて原理原則にしたがって輪軸を再考したものである。本稿ではそのダイナミクスについて述べ、走行性能を 1/10 スケール模型およびシミュレーションにより確認したので、その内容を報告する。

2. 基本コンセプト

2.1 通常の独立回転軸

図 1 に示すように、通常の独立回転軸では、車輪の踏面勾配により、輪軸に内向きの重力復元力が発生する。この内向きの力は、ヨー角が存在する際に、輪軸の回転中心に対してさらにヨー角が増大する方向にモーメントを生じさせる。このダイナミクスは倒立振子に相当し、通常の独立回転軸単体は静的に不安定な性質を有する。

2.2 従来の二輪一ユニット操舵台車

通常の独立回転軸の不安定なヨー運動を安定化させるため、従来提案されている二輪一ユニット操舵台車では、車輪のヨー方向回転中心を、車輪・レール接触点の外側に設置している。これにより図 2 に示すように、重力復元力を利用した振子のダイナミクスとなり、静的に安定な性質を有する。

2.3 逆勾配踏面独立回転軸

前節で述べたように、従来の二輪一ユニット操舵台車では、車輪のヨー方向回転中心を車輪・レール接触点の内側から外側に変えることにより、自己操舵機能が得られる。同様の効果を得るために、車輪のヨー方向回転中心を変えるのではなく、重力復元力を内向きから外向きに変えることによっても、図 3 に示すように自己操舵モーメントが得られると考えられる。

重力復元力の方向を変えるには、従来の車輪踏面形状とは逆に、踏面内側の車輪半径より、踏面外側の車輪半径が大きくなるように設計すればよい。また、保安装置としてのフランジは、図 3 に示すように従来と同じく内側に設置する方式や、図 4 に示すように外側に設置する設計も考えられる。低床 LRV 用には、図 5 に示す貫通軸を設けない方式もとりうる。なお、一体輪軸における外側フランジ方式は、特殊な例としてスイスの Pilatus のラック式急勾配登山鉄道で採用された実績がある<sup>5)</sup>。

3. 逆勾配踏面独立回転軸の自己操舵機能

3.1 運動方程式

前節で説明した逆勾配踏面独立回転軸のダイナミクスを運動方程式により考察する。まず、軸のある通常輪軸の運動方程式は、左右変位  $y$  とヨー角  $\psi$  として(1)式となる。

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} + \frac{1}{V} \begin{bmatrix} 2\kappa_{22} & 0 \\ 0 & 2b^2\kappa_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -2\kappa_{22} \\ 2b\gamma\kappa_{11} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \\ \tau \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、非線形性を持った車輪踏面により発生する一次の項まで線形近似した重力復元力



図 1 通常の独立回転軸

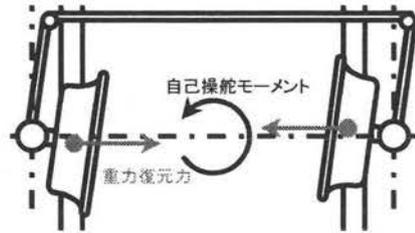


図 2 従来の二輪一ユニット操舵台車

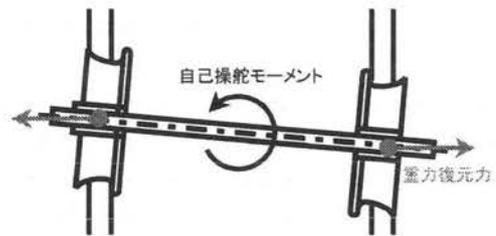


図 3 逆勾配踏面独立回転軸

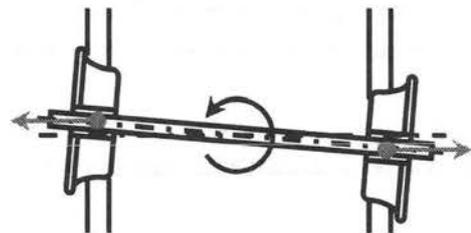


図 4 外側フランジ

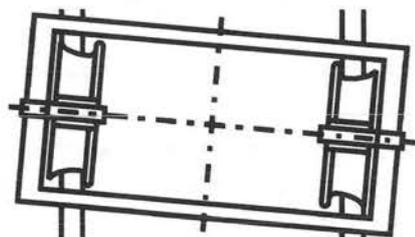


図 5 低床化車両対応タイプ

$$F_{gi} = P(\gamma_0 \mp \gamma_i y), \quad (i=r: \text{right wheel}, i=l: \text{left wheel}) \quad (2)$$

を考える。図 6 に示すように、左右変位  $y$  が発生した場合、

$$f = -2P\gamma_1 y \quad (3)$$

という復元力が発生する。一方、ヨー角  $\psi$  が発生した場合、

$$\tau = -2P\gamma_0 b \psi \quad (4)$$

という復元モーメントが発生する。これらを考慮し、左右の車輪が独立に回転するという条件  $\kappa_{11} = 0$  を考慮すると、逆勾配踏面独立回転軸の運動方程式は、(5)式となり EEF 台車の運動方程式<sup>3)</sup>と類似したものとなる。

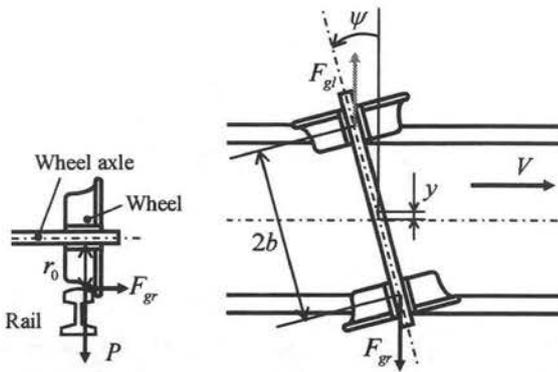


図 6 逆勾配踏面独立回転輪軸の 2 自由度モデル

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} + \frac{1}{V} \begin{bmatrix} 2\kappa_{22} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2P\gamma_1 & -2\kappa_{22} \\ 0 & 2P\gamma_0 b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

3.2 シミュレーションによる検証

運動方程式では、車輪ヨー角が振子のダイナミクスを持つことは明らかである。そこで、接触点の詳細なモデル化が可能な MBD 解析ソフト SIMPACK を利用し、図 7 に示すようなシミュレーションモデルを構築し、輪軸単体の安定性を検証する。

輪軸に初期左右変位 10mm と初期ヨー角 0.6 度を与え、直線走行シミュレーションを行った。図 8 に示すシミュレーション結果により、提案する逆勾配踏面独立回転輪軸は左右方向、ヨー方向ともに中立位置へ戻る復元力が得られ、安定な系となることが確認できる。

4. フルスケール車両シミュレーション

4.1 シミュレーションモデル

提案する逆勾配踏面独立回転輪軸の有効性を検討するために台車、車体まで含めた一車両モデルによる検討を行う。モデルは一軸台車を二つ有する車両とし、図 9 に示すフルスケール車両シミュレーションモデルを構築した。車両モデルは、車体一つ、台車枠二つ、逆勾配踏面独立回転輪軸二つによって構成されている。台車枠は車体に対するヨー方向回転自由度を持ち、心皿により車体に取り付けられる

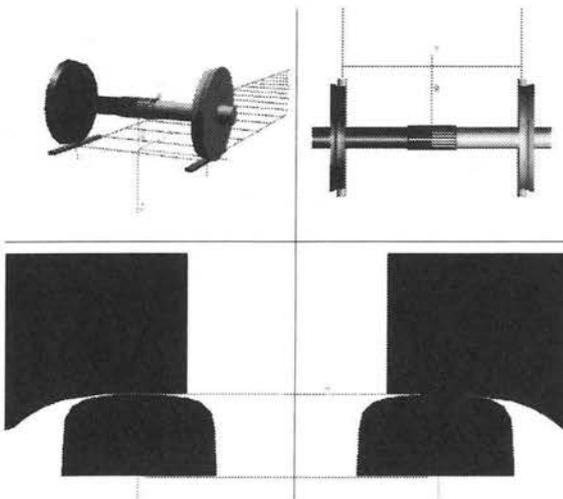
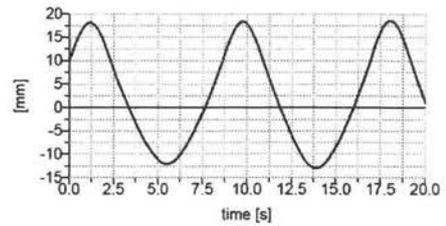
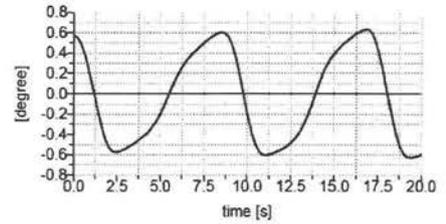


図 7 シミュレーションモデル



(a) 左右変位



(b) ヨー角

図 8 シミュレーション結果

ことを想定している。台車枠と逆勾配踏面独立回転輪軸との間は、線形ばねでサスペンション機構をモデル化している。軸箱支持装置により、前後方向と左右方向は、従来の鉄道車両の一次サスペンションと同じばね定数を持ち、上下方向は従来の鉄道車両の二次サスペンションのような柔軟なばね定数を持つと仮定している。また、車体と台車枠との間にヨーダンパを取り付けている。

4.2 曲線通過シミュレーション

提案輪軸を有する車両の曲線旋回能力を確認するため、半径 10m という従来の方式では困難な急曲線通過シミュレーションを行った。ヨーダンパは曲線旋回を妨げることを考え、従来鉄道車両ヨーダンパの  $10^5$  [Ns/m] オーダーに対し、小さな減衰係数  $1 \times 10^3$  [Ns/m] とした。シミュレーションには、表 1 に示す軌道を用いた。

4.3 シミュレーション結果

図 10 に走行距離とアタック角の関係を示す。参考までに、自己操舵機能を持たない従来の踏面形状の車輪を使用した場合のアタック角を破線で示す。図からわかるように、提案する逆勾配踏面独立回転輪軸を有する車両のアタック角は、従来のものと比べて、大幅に小さくなった。シミュレーションでは、緩和曲線通過後にアタック角が収束するまでの応答の遅れがあるものの、定常状態においては曲線通過の理想であるアタック角ゼロ化をほぼ実現できる。

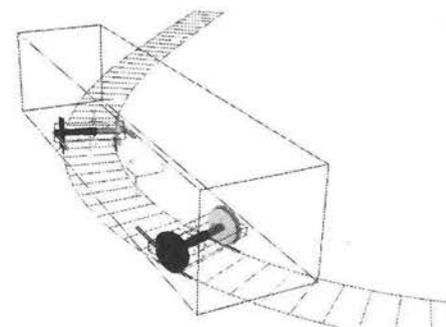


図 9 フルスケール車両シミュレーションモデル

表 1 曲線軌道

直線長 (先頭軸から) [m]	20
入口緩和曲線長 [m]	15
円曲線長 [m]	30
出口緩和曲線 [m]	15
カント [mm]	60
円曲線半径 [m]	10

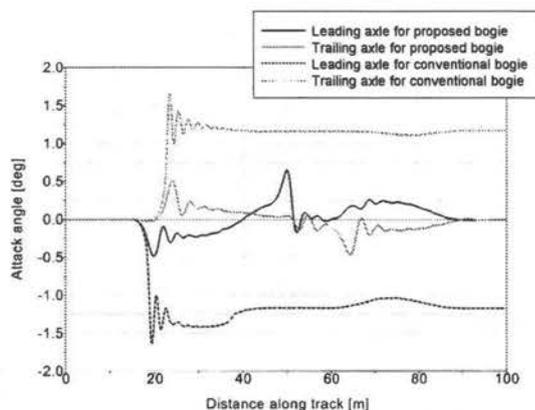


図 10 アタック角

### 5. 1/10 スケール車両による走行実験

前章より、逆勾配踏面独立回転輪軸を有する車両の曲線通過性能が優れていることが明らかとなった。そこで、図 12 に示すように、著者らが提案する一軸操舵台車の 1/10 スケール模型車両<sup>9)</sup>の輪軸を、提案する逆勾配踏面独立回転輪軸に置き換えて、走行試験を行った。この一軸操舵台車の構造は、車体とボルスタ間を心皿で結合したインダイレクト・マウント方式である。既存の車両にはないボルスタ・ヨーダンパ併合型の台車構造となっている点が特徴である。ボルスタ自体の回転抵抗の小ささに着目し、ヨーダンパと組み合わせることによって、理想的なボギー角を生成する操舵台車となっている。なお、図 12 の試作例は外フランジであるが、フランジは内外どちらにも取り付けられる構造となっている。走行試験からも、逆勾配踏面独立回転輪軸を有する車両の走行性能の高さが確認できた。

今後の予定として、車輪踏面形状の影響や二軸ボギー台車への逆勾配踏面独立回転輪軸の適用可能性を 1/10 スケール模型実験により行うことを検討している。さらには、東京大学生産技術研究所が所有する千葉試験線での、実物による試験も検討している。

### 6. 考察

逆勾配踏面独立回転輪軸の特徴は、構造がシンプルな点である。通常の独立回転輪軸の車輪踏面形状を変えるだけで自己操舵機能が与えられるというメリットは大きい。また、車軸付きで自己操舵機能が得られるため、車輪を両側から支持でき、剛性が従来の輪軸と変わらないのも注目すべきである。さらに、二軸ボギー台車の輪軸を逆勾配踏面独立回転輪軸に置き換えるだけで、走行性能が劇的に向上する可能性がある。通常の輪軸には左右の車輪が車軸により剛に結合されていることにより、旋回できる最小曲線半

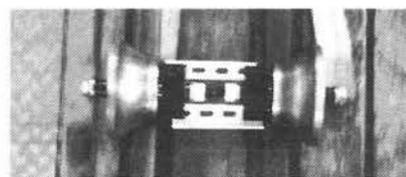


図 11 1/10 スケール模型 (輪軸)

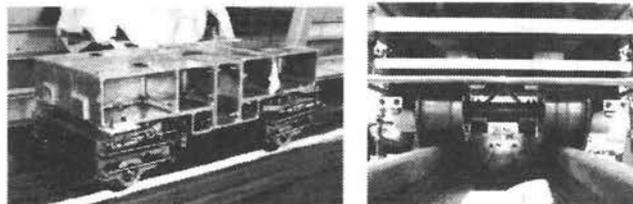


図 12 1/10 スケール模型車両

径が存在するが、本提案方式では独立に回転できるメリットがある。今後詳しく検討していく必要がある。

一方で、走行安定性、分岐器通過に対する安全性の問題、車輪/レールの接触幾何の最適設計手法や、輪軸ロールセンタの最適化、外側フランジ方式の場合における諸課題の解決など、検討すべき項目もまだ多数残っている。今後、これらについても慎重に検討を進める予定である。

### 7. 結言

本稿で得られた知見を以下に示す。

- 従来の二輪一ユニット操舵台車の自己操舵機能を整理し、同等のダイナミック性能を持ちながら、より構造が単純な逆勾配踏面独立回転輪軸を提案した。
- 逆勾配踏面独立回転輪軸を有する車両のシミュレーションモデルを構築し、急曲線通過シミュレーションを行った。数値解析結果より、逆勾配踏面独立回転輪軸を有する車両の優れた曲線通過性能を確認した。
- 逆勾配踏面独立回転輪軸を有する 1/10 スケール模型車両を試作し、基礎的な走行試験を行った。走行試験からも優れた曲線通過性能を確認できた。

### 参考文献

- 1) 須田, 和田: 前後非対称台車の走行安定性と操舵性能, 機械学会論文集(C), 57-540号, pp. 2633-2639, 1991.
- 2) Frederich, F.: Possibility as yet Unknown or Unused Regarding the Wheel/Rail Tracking Mechanism, Rail International, pp. 33-40, 1985.
- 3) 道辻, 須田: 鉄道車両二輪一ユニット操舵台車のダイナミクスと制御, 計測と制御, 45-9号, pp. 103-108, 2006.
- 4) 王, 他 2 名: 駆動・制動を考慮した独立回転車輪を用いる走行装置に関する研究, J-RAIL2007 講演論文集, pp. 651-654, 2007.
- 5) Historic Mechanical Landmark, Mount Pilatus, Switzerland, ASME, 2002.
- 6) 道辻, 他 3 名: 曲線通過性と走行安定性を両立する一軸操舵台車の運動特性, J-RAIL2003, pp. 107-110, 2003.