

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 4 日現在

機関番号：12101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820070

研究課題名(和文) 走行安定性と曲線通過性能を両立する傾斜軸独立回転車輪台車の運動性能

研究課題名(英文) Running Performance of the railway steering bogie with inclined wheel axle

研究代表者

道辻 洋平 (Michitsuji, Yohei)

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号：90376856

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：鉄道車両用台車に関して、急曲線を通過する際の操舵性能の向上が課題である。従来の鉄道車両輪軸と比較し、急曲線で摩耗しにくく、かつ高速走行時の振動を低減できる傾斜軸独立回転車輪を提案し、数値解析およびスケールモデルの走行実験装置によって有効性を検証した。今回提案した傾斜軸独立回転車輪台車について、国内講演会や国際会議における学会発表を行い、研究成果を広くアピールした。

研究成果の概要(英文)：It is important for railway vehicles to get compatibility between curving performance and running stability. Utilizing independently rotating wheels may be an effective solution. In this research, an effective modification of the EEF bogie which solves the hunting motion is mentioned. The solution is to incline both wheel axles while adjusting tread gradient of each wheel. Since the newly proposed bogie has complicated structures, the precise modeling of the bogie is mentioned in detail. From the result of linear stability analysis, proposed bogie can dramatically improve the high speed stability as compared to the conventional EEF bogie. In addition, the proposed bogie has excellent curving performance in tight curved section equivalent to the conventional EEF bogie. As those results, it is possible to achieve both high speed stability and high curving performance utilizing the proposed bogie unit in the vehicle.

研究分野：車両動力学

キーワード：鉄道車両 独立回転車輪 自己操舵台車 シミュレーション MBD スケールモデル 蛇行動

1. 研究開始当初の背景

昨今、クリーンな交通モードとして世界的に電気鉄道が注目され、世界各国の鉄道車両メーカーが省エネ・高速・安全な鉄道車両の開発にしのぎを削っている。一方、都市を走行する鉄道や LRT(次世代路面電車)には急曲線が多数存在し、我が国に限ってみても依然として脱線事故が毎年のように発生している。鉄道車両台車の急曲線通過性能の改善には、車輪進行方向とレールのなす角度であるアタック角をできるだけゼロに近づけることが有効である。これを実現するためにさまざまな自己操舵台車、半強制操舵台車が提案されてきたがいずれも一長一短あり、あらゆる半径の曲線や分岐等に対しアタック角ゼロを実現する台車はこれまで実用化していない。また、リンク機構を使って輪軸を操舵する半強制操舵台車の実用例はいくつかあるが、従来台車より横圧の低減は可能であっても、急曲線になるほどその低減効果が弱くなる。これは、車輪のアタック角がわずかであっても、大きな横クリープ力が発生してしまうという鉄車輪・鉄レールの特性に起因している。また複雑なリンク機構によるメンテナンスコスト増大も課題であり、費用対効果の面から操舵台車の普及は必ずしも進んでいないのが現状である。アタック角のゼロ化という最大の効果を得るために、アクティブ制御を含めた操舵台車の研究が世界各国でおこなわれている。これまでさまざまな方式が提案されているが、制御系フェイルセーフや誤作動に対する安全性や、微小な通り変位等に対するセンシングが課題と考えられる。申請者は過去に、独立回転車輪パワーステアリング操舵台車を提案し、急曲線走行中のアタック角をゼロに近づけ、脱線係数にして従来台車の約 80%低減しつつも、車輪の自己操舵機能を最大化することで制御系への依存を抑えた操舵台車を提案した。この台車ではリンク機構が複雑となる欠点があったがそれを解消するため、東京大学須田教授らとともに、逆踏面勾配独立回転車輪を考案し、きわめて高い曲線通過性能を有していることを実験的に確認した。一方、さまざまなタイプの独立回転車輪台車の運動方程式を一般化し解析を進めた結果、重力復元力による自己操舵性能と独立回転車輪特有の蛇行動の関連性が明らかとなり、逆踏面勾配独立回転車輪における、自励振動(蛇行動)メカニズムという欠点も浮き彫りとなった。そこで筆者らは独立回転車輪の蛇行動発生メカニズムをさらに深く考察し、自励振動を安定化する新たなメカニズムとして、傾斜軸独立回転

車輪操舵台車を着想するに至った。この提案台車の最大の特徴は、独立回転可能な車輪に対し、自動車のサスペンション機構におけるキャンバ角を付与した点にある。キャンバ角の付与に加え、円筒に近い形状の車輪を組み合わせることで、車輪の左右変位時に発生する瞬間的な縦クリープ力を抑制でき、自励振動が発生しにくいダイナミクスを実現できる。一方、キャンバ角によって接触角を形成することで自己操舵の鍵となる重力復元力を得ることができる。提案する輪軸は、輪軸単体でも蛇行動がおきにくいいため、ダンパを使った柔軟な輪軸支持でありながら、蛇行動が不安定化する臨界走行速度を飛躍的に向上できることを数値解析で示した。また、急曲線通過性能においては、定常曲線中のアタック角をゼロとする理想的な曲線通過を実現できることも数値解析で確認し、次世代路面電車を想定した車両運動シミュレーションにおいて、半径 10m 級の急曲線でも極めて優れた操舵性能を有することを確認している。

2. 研究の目的

以上のような研究進捗状況をふまえ、本申請研究では提案する傾斜軸独立回転車輪台車の、LRT 用台車への実用化を目指した次のステージへ研究フェーズを移行していく。具体的には、当研究室所有のスケールモデル軌条輪走行装置を改良し、走行実験によって提案する傾斜軸独立回転車輪の臨界走行速度を確認する。走行安定性の観点から理論と実験を比較した後、所定の臨界走行速度を満たしつつ、輪軸の自己操舵性能を最大化する車輪形状についても考察する。最後に、実車スケールのマルチボディ・ダイナミクスシミュレーションを実施し、営業速度において十分安定性を確保できる支持剛性を検討する。急曲線における脱線係数の観点から曲線通過性能を評価し、提案する車両システムの有効性を解析により検証する。

3. 研究の方法

本研究は平成 26, 27 年度の 2 ヶ年で遂行した。初年度は 1/10 スケールの傾斜軸独立回転車輪操舵台車ユニットの製作と基礎的な走行実験をおこなう。現有のスケールモデル軌条輪装置の高速化のため、モータおよび制御装置の改修をおこなう。提案する操舵台車の数値解析については実施済みであり、平成 26 年度内に実験を実施し、臨界走行速度と支持剛性の関連性を実験と解析の両面から明確にする。平成 27 年度は、車輪踏面形状のバリエーションを増やし、走行実験を実施しながら傾斜軸踏面形状の最適化につい

て研究をさらに深度化する。具体的には、所定の営業最高速度を設定し、その設定に対して十分な臨界走行安定性を得ながらも、輪軸の自己操舵機能を最大化する設計検討をおこなう。ここで得た知見に対して、実車スケールのマルチボディ・ダイナミクスシミュレーションを実施し、走行安定性と曲線通過性能の向上効果を定量的に明らかにする。

< 研究計画・方法（詳細） >

本申請研究は平成 26, 27 年度の 2 ヶ年で遂行する。大別して、以下に示す 3 つの研究課題

研究課題 1. 傾斜軸独立回転車輪台車の走行安定性

研究課題 2. 走行安定性と曲線通過性を両立する踏面の最適設計

研究課題 3. 実車スケールシミュレーションによる走行安定性と曲線通過性能の解析

を設定し、各項目の研究内容を遂行していく。以下に年度ごとの研究計画を示す。

< 平成 26 年度における計画 >

平成 26 年度の上半期において「研究課題 1. 傾斜軸独立回転車輪台車の走行安定性」に着手する。1/10 スケールの傾斜軸独立回転車輪ユニットの製作、および現有の軌条輪装置の高速化を実現するための改修を行う。傾斜軸独立回転車輪ユニットの設計仕様はすでに決定している。また、現有軌条輪試験装置の高速化対応については使用するモータおよびアンプと計測・制御装置を新調する。平成 26 年度下半期には、走行試験を実施し、提案する傾斜軸独立回転車輪台車の走行安定性と支持剛性の関連性を明らかにする。具体的には、様々な走行速度と支持剛性の組み合わせに対して、輪軸の左右変位にインパルス外乱を印可し、時刻歴波形から減衰比を抽出することで、高速走行安定性を評価する。

< 平成 27 年度における計画 >

平成 27 年度の上半期において「研究課題 2. 走行安定性と曲線通過性を両立する踏面の最適設計」に着手する。これまで提案した傾斜軸独立回転車輪は、円筒形状に近い車輪を提案している。しかしながら、輪軸のセルフセンタリング機能つまり軌道中心へ戻る力を発現するためには、円筒形状から非線形踏面にして左右車輪の重力復元力差を生成する必要がある。一方、セルフセンタリング機能を強くすることで、蛇行動作が発生する走行速度（臨界走行速度）の低下が

予想される。そのため、踏面形状の設計では、臨界走行速度を所定の値に保ちながら、セルフセンタリング機能をできるだけ高めることとなる。ここで得られる踏面設計法は、傾斜角（キャンバ角）という鉄道車両では想定されてこなかったパラメータを有している。そのため、設計法から誘導される踏面形状は、これまでの踏面形状と大きく異なるものが予想される。

平成 27 年度の下半期にかけて「研究課題 3. 実車スケールシミュレーションによる走行安定性と曲線通過性能の解析」をおこなう。この研究課題では、スケールモデルによって得られた理論と実験の比較結果に対して、実車スケール数値解析により定量的に性能向上効果を明らかにする。実車スケールに展開することで、鉄道研究機関、鉄道事業者、鉄道車両メーカーに対して性能向上効果をわかりやすくアピールする狙いがある。具体的な実施項目として、従来の鉄道車両と新提案の操舵台車について、マルチボディ・ダイナミクスソフトウェア（SIMPACK）を活用した走行シミュレーションを実施し、臨界走行安定性と曲線通過時のアタック角および脱線係数によって曲線通過性能向上を定量化する。平成 27 年度の研究成果報告に関しては、日本機械学会論文集への投稿と鉄道車両力学に関する国際会議 STECH2015 にて学会発表をおこなう。申請最終年度として研究を総括し報告書の執筆にあたる。

4. 研究成果

得られた研究成果を以下に示す。

(1) 逆踏面式傾斜軸独立回転車輪の走行安定性の確認

逆踏面の車輪を用い、車軸を傾斜させた逆踏面式傾斜軸独立回転車輪の 1/10 スケール実験装置を開発し、軌条輪による走行安定性解析をおこなった。数値解析と実験の両面から、車軸を傾斜させることにより高い走行安定性を確保できることを確認した。

(2) 傾斜軸 EEF 台車の提案

これまで提案した逆踏面式傾斜軸独立回転車輪は、フランジの取り付け位置が通常の輪軸と逆であり、既存の軌道に適用できないというデメリットがあった。一方、曲線通過と走行安定性という両面で見ると優れたダイナミクスを有している。そこで、ダイナミクスが等価でありながら、従来の車輪と同じフランジ取り付け位置となるように構造を工夫した、傾斜軸 EEF 台車を新たに提案した。

(3) 傾斜軸 EEF 台車のモデル化

傾斜軸 EEF 台車は、車輪のヨー方向の支持

点を、軌道中心ではなく軸箱位置にとっている点が構造上の特徴である。また、車軸が傾斜角を持っていることから従来の台車に比べて構造が複雑である。その複雑な構造を考慮した上で、詳細な車両運動モデルの導出をおこなった。マルチボディ・ダイナミクスに基づく定式化によって厳密モデルを算出し、その近似として線形解析モデルを導出した。線形解析の結果、高い走行速度まで自励振動が発生しない、優れた走行安定性を有していることを解析により確認した。

(4) 走行安定性の検証実験

スケールモデルの軌条輪試験装置を改修し、提案する傾斜軸独立回転車輪を有する2つの輪軸（逆踏面タイプ、EEFタイプ）を製作した。EEFタイプは当初そのアイデアがなかったものの研究期間内に1/10スケール実験装置の製作が完了し、基礎的な走行試験において蛇行動が発生しないことを確認した。

今回新しく着想した傾斜軸 EEF 台車は、もともと研究計画の中にはなかったアイデアである。この台車の特徴は、車輪のフランジ取り付け位置が従来の輪軸と同じであり、実際の軌道へすぐに適用可能という点にある。一方で、蛇行動に対する安定性と自己操舵性に優れていることも解析により確認できた。以上のとおり、本研究課題の遂行により次に研究につながる大きな研究成果を得ることができたものと考えている。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計3件)

Kenji Ejiri, Yohei Michitsuji, Yoshihiro Suda, Lin Shihpin, Analysis on running ability of independently rotating wheel, Railways2016, 2016.4.6, Sardinia Italy.

Kenji Ejiri, Yohei Michitsuji, Yoshihiro Suda, Lin Shihpin, Proposition of oblique axle independently rotating wheelset for improvement in running stability, STECH2015, 2015.11.10, Makuhari Chiba. 志賀亮介, 道辻洋平, 『傾斜軸独立回転車輪を備えた二軸台車の走行安定性解析』, 日本機械学会第23回茨城講演会, 2015.8.28, 茨城大学工学部(茨城県・日立市)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.mech.ibaraki.ac.jp/~mitituji/lab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

道辻 洋平 (YOHEI MICHITSUJI)

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号: 90376856

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し

(4) 研究協力者

無し