

平成 21 年 4 月 6 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006 ～ 2008

課題番号：18560226

研究課題名（和文）曲線中で過度の遠心力を受ける鉄道車両の走行安全性

研究課題名（英文） Running Safety of Railway Vehicle Being Subjected to Excess Centrifugal Force on Curved Track

研究代表者

氏 名：谷藤 克也(TANIFUJI KATSUYA)

所 属：新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：30197529

研究成果の概要：

リニアモータ駆動の車体荷重左右搬送装置で模型車両の静止輪重比を動的に変えることを可能とした。次いで、台車転走装置の軌条輪にひずみゲージを貼付して、車輪横圧と輪重の測定を可能とするとともに、アクチュエータを利用して遠心力を模擬した横方向の外力を作用させるようにした。これらの装置改修の後、アタック角と輪重比を固定して横方向外力を単調に増加させる場合、アタック角と横方向外力を固定して輪重比を変動させる場合などについて車輪のフランジ乗り上がり脱線を再現し、脱線に至るまでのアタック角、輪重比および横方向外力の影響が把握された。その結果を利用して構築した一車輪軸の解析モデルによる数値シミュレーションでは、モデルとしては改善すべき点があるものの、車輪軸挙動の実験結果に対して理論的な考察が加えられた。

次に、片輪走行状態となる横方向の引張力を車体に作用させてフランジ乗り上がり脱線の実験を行い、片輪走行時の輪軸ロール角（片輪の浮き上がり角）、横方向力、および輪軸アタック角が及ぼす影響が把握され、輪軸ロール角とアタック角の増大が限界脱線係数を減少させることが確認された。そこでは、片輪走行を起こすだけの横方向力が作用し続ければ、いずれ転覆に至ること、転覆時に作用する横方向力で生ずる車輪横圧はフランジ乗り上がり要する横圧よりも小さく、過度の遠心力の作用下では脱線に至らずに転覆する可能性の高いことが示された。

最後に、マルチボディソフト SIMPACK を利用した一両モデルのシミュレーションにより振り子車両の走行安全性を評価した。振り子梁式車体傾斜車両の解析モデルを構築し、曲線通過シミュレーションを行ない、実用中、また実用が想定される振り子角 5° および 7° の車両では、曲線乗り心地から制限される限界速度まで速度を向上しても、安全走行のための輪重減少率の目安（静的 60%、動的 80%）を超えないことを示した。また、数値シミュレーションで車体傾斜係数を特定することにより、走行安全性評価に関する静的解析の精度向上を実現する方策を示した。これらにより、振り子車両が安全かつ効果的に曲線通過速度を向上するための基礎資料が得られた。

以上の検討により、脱線と転覆が複合するような条件下における鉄道車両の走行挙動を明らかにすることができた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,300,000	0	2,300,000
2007年度	500,000	150,000	650,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	360,000	3,860,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・ 機械力学・制御

キーワード：運動力学

1. 研究開始当初の背景

在来線鉄道の到達時間短縮のために、曲線でのスピードアップが進められてきた。曲線においては、乗り心地の面から通過速度が左右定常加速度により最も低く制限されるため、この制限速度以下であれば走行安全上の問題はないと考えられる。一方、この制限を緩和してスピードを上げるために振り子車両が用いられている。振り子による車体傾斜角度が大きいほど乗り心地による速度制限を越えて走行することが許されるものの、脱線や転覆という走行安全上の要因が新たな制限となる。

平成17年4月25日に発生したJR尼崎列車転覆脱線事故は非振り子車両によるものであったが、そこから例示されるように、制限速度を大幅に超過することにより脱線もしくは転覆の限界速度に達することが現実となった。また、事故発生地点の直前には数十メートルにわたって片輪で走行した痕跡も報道されており、事故発生のメカニズムにおいては脱線と転覆の両者の寄与が考えられる。しかし、「脱線」と「転覆」の現象は、これまでまったく別の観点から取り扱われており、その限界速度を予測するために両者を複合させることは行われてこなかった。

現在、振り子車両は車体傾斜制御の精度向上によって乗り心地の面ではさらなるスピードアップの可能性が期待されている。しかし、車体傾斜によって許される速度が非振り子車の制限速度を大きく越える場合、走行安全の面から厳しくチェックすることが望まれる。しかし、走行安全面で極限的な状況を現車で確認することは困難である。

列車の脱線事故もしくは転覆事故に関しては、それぞれに原因究明のために多くの研究がなされてきたが、事故の一次要因として両者を合わせて検討されたものはほとんど

存在しない。この理由として、転覆したとしてもそれが脱線した後であることが多いことと、制限速度以下で走行する場合、転覆の発生は強風によることがほとんどであったことを挙げることができる。すなわち、脱線の可能性については、車輪・レール間に作用する横方向力(横圧 Q)と上下方向力(輪重 P)の比で表される脱線係数 Q/P によって動的に評価される。曲線中で遠心力が作用する場合、遠心力による Q の増加は曲線外軌側の輪重 P の増加を伴うため、脱線係数としては大きく変わることがなく、脱線の面では走行安全上の問題はないとされる。その結果、軌道破壊につながる横圧 Q のみにより曲線通過特性が評価されることも多い。

これに対し、転覆可能性の評価には車体に作用する遠心力、横風、左右振動の慣性力などの総和によって生ずる転倒モーメントの大きさが用いられ、それによって曲線内軌側の輪重 P がどれだけ減少するかが静的に解析されてきた。

2. 研究の目的

本研究では、曲線通過に起因する走行安全の問題について、脱線と転覆の両方が複合するような条件の下で車輪・レール間の相互作用力と車輪軸の挙動を1/5模型車両の転走試験装置を用いて実験的に把握するとともに、脱線と転覆の極限までを模擬しうる解析モデルを構築し、数値シミュレーションで車両挙動を検討することが目的である。

高速で曲線を通る際の脱線と転覆のような極限状態を現車で実験することは困難であり、模型車両を使った転走試験台上の実験が適している。ここでは、高速曲線通過状況を模擬する転走試験台上で、脱線にいたるまでの車両挙動を車輪・レール間の作用力から実験的に把握するとともに、マルチボデ

ィソフトを利用した数値シミュレーションにより脱線・転覆にいたるまでの挙動を模擬する。これらの結果より、振り子車両によるスピードアップの可能性の限界を明確にし、効果的に曲線通過速度を向上させるための指針を提示する。

本研究では、転覆についても動的な解析を前提にしており、横風よりも曲線での大幅なスピードアップにより増加する遠心力の影響を主体として、フランジ乗り上がり脱線との相互的な関わりを検討する。合わせて、強風による徐行中に急曲線で脱線する可能性について調べる。

3. 研究の方法

- (1) 模型車両転走試験装置の改修と脱線実験
 - ・リニアモータ駆動による車体荷重左右移動装置を縮小模型車両へ付加する。
 - ・転走試験装置の軌条輪をひずみゲージ式の横圧・輪重測定用へ改修する。
 - ・アタック角と輪重比をパラメータとして遠心力を想定した横方向力を増加させながらフランジ乗り上がり脱線を再現し、輪重・横圧、脱線係数のデータを得る。
 - ・片輪走行状態となるように車体に引張力を作用させ、アタック角をパラメータとして横方向力を増加させながら脱線を再現し、輪重・横圧、脱線係数のデータを得る。
- (2) 1軸模型車両の脱線・転覆のための解析モデル構築とシミュレーション
 - ・数値解析ソフト MATLAB により、実験で使用した 1 軸模型車両の転走を模擬する解析モデルを構築し、実験データでモデルの検証と改善を行う。
 - ・構築した 1 軸車両モデルを用いて各種条件で脱線の数値シミュレーションを実行し、横方向力が作用する下でのフランジ乗り上がり挙動について考察する。
- (3) 振り子車両のモデル化と曲線通過シミュレーション
 - ・マルチボディソフト SIMPACK で振り子梁式の車体傾斜車両の 1 両モデルを構築する。
 - ・実物大車両のパラメータを用いて、振り子車両が基本速度を超えて曲線を通過するシミュレーションを実行し、脱線係数と輪重抜け割合を調査する。
- (4) 転覆の静的解析との比較
 - ・SIMPACK によるシミュレーション結果を従来から用いられてきた転覆の静的解析（国枝の式）の結果と比較することにより、走行安全に対する静的解析の精度向上を検討する。
- (5) 研究成果のとりまとめ
 - ・これまでの検討内容から、脱線と転覆が複合するような条件下での走行挙動について明らかにしたことを整理するとともに、

安全に曲線を走行しうる速度限界を取りまとめる。

4. 研究成果

- (1) リニアモータ駆動の車体荷重左右移動装置で模型車両の車体を移動させることにより、左右車輪の輪重比を動的に変えることを可能とした。また、転走装置の軌条輪にひずみゲージを貼付して、車輪横圧と輪重の測定を可能とした。合わせて、アクチュエータを利用して遠心力を模擬した横方向の外力を作用させるようにした（図 1）。車輪横圧と輪重の測定については、アタック角の存在下で輪重が横クリープ力の影響を受けるため、横圧（ Q ）をパラメータとする輪重の補正量（ ΔP ）を定めた（図 2）。
- (2) アタック角と輪重比を固定して横方向外力 Q_0 を単調に増加させる実験の結果、アタック角 ψ が大きいほど、また輪重比 r_p が低下するほど小さな（遠心力を想定した）横方向の外力でフランジ乗り上がり脱線を生ずることが示された（図 3）。

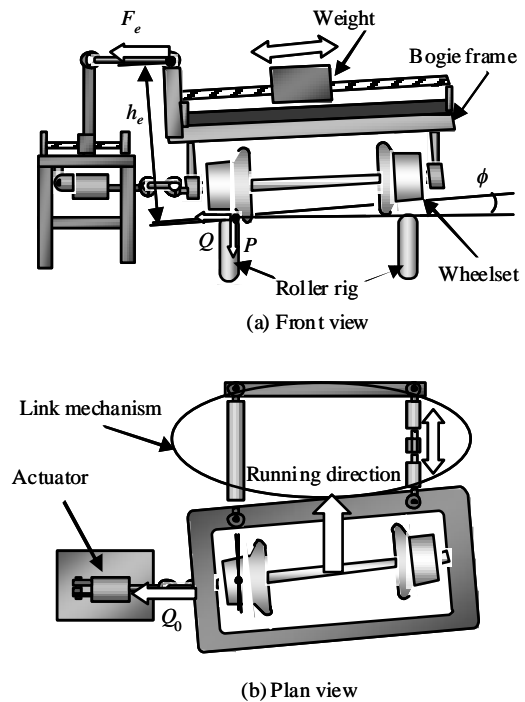


図 1 改修した実験装置の概要

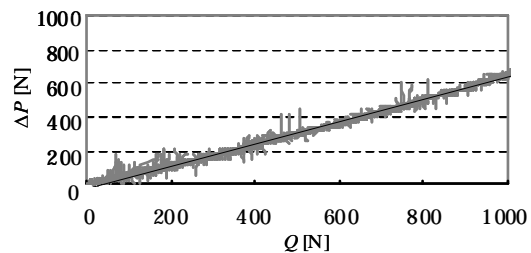


図 2 車輪横圧に依存した輪重の補正量

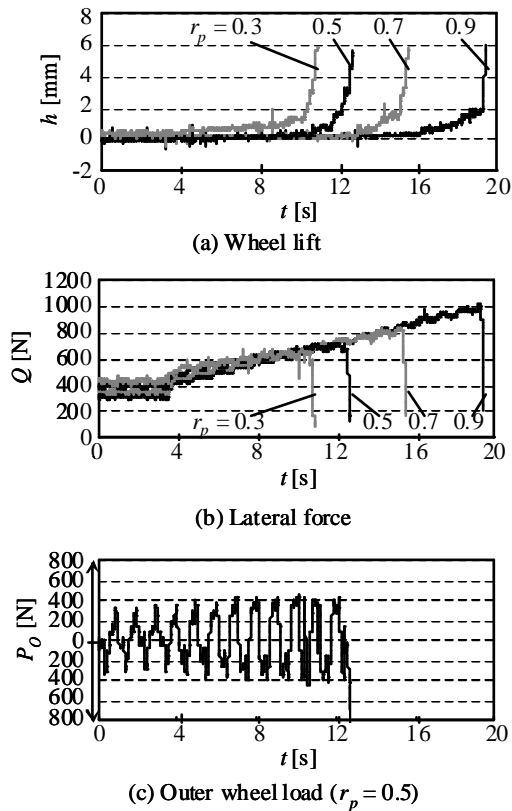


図3 実験の測定波形例: $\psi = 15$ mrad
(h は車輪上昇高さ: 6 mm で脱線)

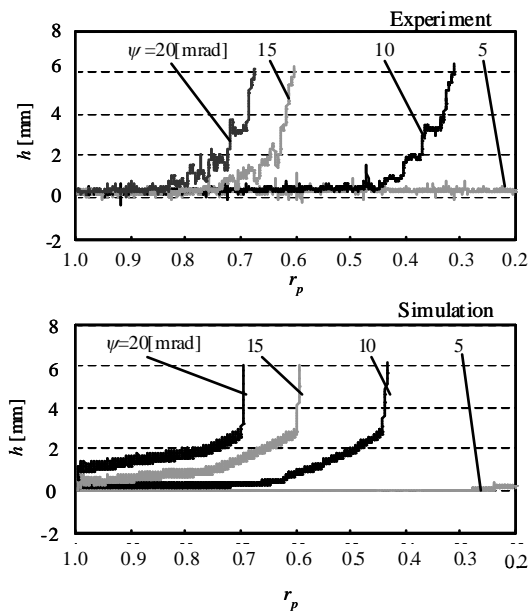


図4 実験の測定波形例: $Q_0 = 480$ [N]

次いでアタック角と横方向外力 Q_0 を固定して輪重比 r_p を変動させる場合について試験を行った。その結果、アタック角が大きいほど輪重比が 1 に近い(輪重減少が小さい)条件でも脱線に至ることが示された。また、一

車輪軸として構築された解析モデルによる数値シミュレーションを行い、その解析結果を用いて、車輪軸挙動の実験結果を理論的に考察することができるようになった(図4)。

次に、片輪走行状態となる引張力 F_e を車体に作用させた脱線実験では、輪軸のロール角(片輪の浮き上がり角) ϕ が大きいほど小さな横方向外力 Q_0 で脱線が生ずること、 ϕ とアタック角 ψ の増大は、それぞれ限界脱線係数 Q/P を減少させることが確認された(図5)。

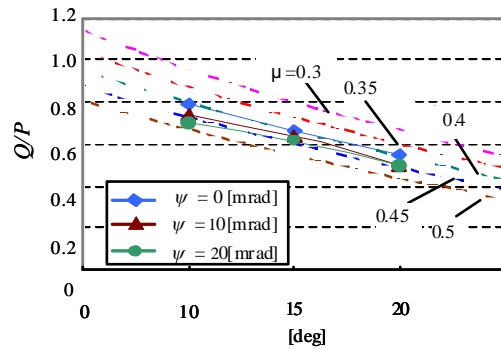


図5 輪軸ロール角がフランジ乗り上がりによる限界脱線係数に及ぼす影響

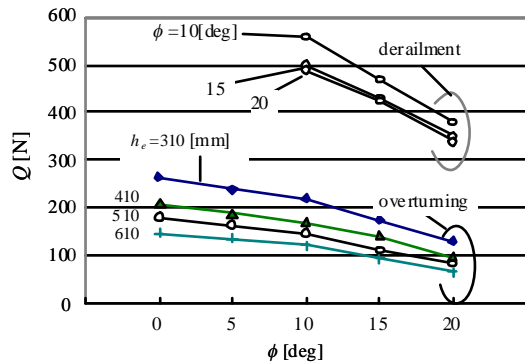


図6 脱線、転覆発生時の車輪横圧

また、転覆直前の横方向力(引張力 F_e) 作用下での車輪横圧 Q は、フランジ乗り上がり脱線が生ずる際のもよりも小さい、すなわち、車体に作用する遠心力で生ずる横圧がフランジ乗り上がりによする横圧に達する前に転覆が発生しうることが示された(図6)。

(3)SIMPACK の一両モデルによるシミュレーションにより、振り子梁式の車体傾斜車両の転覆安全性を検討した(図7)。

- ・ 振り子角が 5° および 7° の車両の場合、曲線乗り心地の目安内で走行可能な限界速度 V_{com} は現状の基本速度 V_T よりも $15 \sim 20$ km/h 高い(図8)。
- ・ 曲線乗り心地から制限される限界速度まで速度を向上しても、安全走行のための輪重減少率の目安(静的 60%, 動的 80%)を超えない。その際、軌道不整の影響により内

軌側輪重が瞬間的に大きく減少することがあるものの、車輪の浮き上がりは発生しない(図9)。

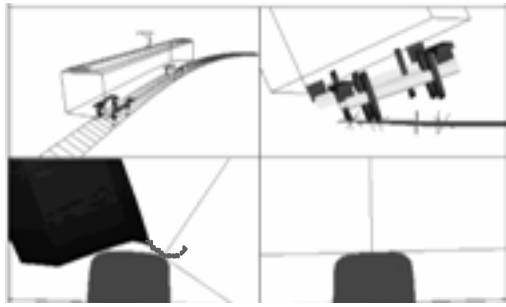


図7 SIMPACKによる曲線高速通過による転覆シミュレーションの一例

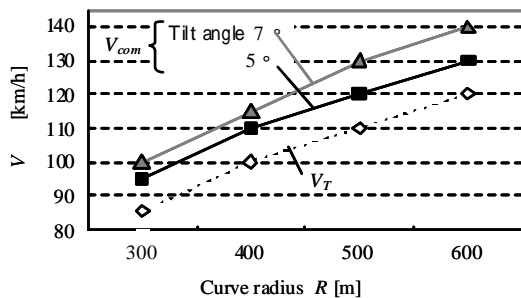


図8 乗り心地で許容される限界速度

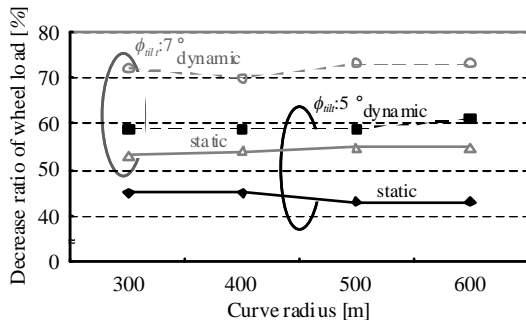


図9 曲線乗り心地の限界速度(図8)で走行した場合の輪重減少率

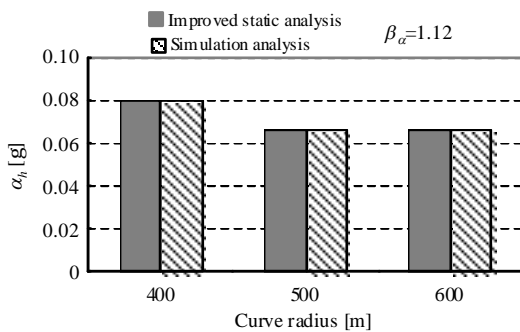


図10 車体傾斜係数 β_α を使った静的解析とシミュレーション解析の比較

(4) 数値シミュレーションで得られた結果を静的解析での比較をすることにより車体傾斜係 β_α が特定されれば、静的解析による走行安全性評価の精度向上を実現することができる。ひとつの曲線条件で求めた車体傾斜係数 β_α は他の曲線条件にも利用可能であり、曲線通過解析の効率化が期待できる(図10)。

(5) 以上の検討内容から、脱線と転覆が複合するような条件下での走行挙動について明らかにしたことを整理し、安全に曲線を走行しうる速度限界を取りまとめた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計7件)

Yosuke Nagumo, Katsuya Tanifuji, Junichi Imai, Basic Experiment of Wheel Flange Climbing Using Scaled Single Axle Truck, Proceedings of STECH'06, 2006, pp.72-77, 査読無

南雲洋介, 谷藤克也, 今井純一, 模型輪軸を用いた車輪フランジ乗り上がりの基礎的検討, 日本機械学会論文集(C編), 74巻738号, pp. 242-249, 2008, 査読有。

石井清貴, 谷藤克也, 転覆安全性と乗り心地を考慮した振り子車両による曲線高速化, 土木学会 第15回鉄道技術・政策連合シンポジウム 講演論文集, pp.59-62, 2008, 査読無。

八重樫直樹, 谷藤克也, 相馬 仁, 側受方式車両のリンク式強制操舵による急曲線通過性能向上の可能性, 日本機械学会論文集(C編), 75巻750号, pp. 420-428, 2009, 査読有。

[学会発表](計9件)

南雲洋介, 谷藤克也, 今井純一, 一軸台車を用いたフランジ乗り上がりの基礎実験(輪重と横圧の測定), 日本機械学会 第15回交通・物流部門大会, 2006.12.13-15, 川崎。

八重樫直樹, 谷藤克也, 急曲線区間における側受方式台車の強制操舵による横圧低減の可能性(SIMPACKによるシミュレーション解析) 日本機械学会 第3回埼玉ブロック大会, 2007.9.21-22, さいたま。

近藤慎也, 谷藤克也, 今井純一, 模型台車による片輪走行後の走行安定性に関する実験的検討, 日本機械学会 北陸信越支部 第45期総会講演会, 2008.3.8, 福井。

島田晃一, 谷藤克也, 空気力係数の違いを考慮した鉄道車両の転覆限界風速(マルチボディソフトを使った評価), 日本機械学会 北陸信越支部 第45期総会講演会, 2008.3.8,

福井 .

細井隆太, 谷藤克也, 横風による列車の転覆に及ぼす連結の影響 (MBS によるシミュレーション) 日本機械学会 北陸信越学生会 第38回学生員卒業研究発表講演会 2009.3.6, 富山 .

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

谷藤 克也 (TANIFUJI KATSUYA)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号 : 3 0 1 9 7 5 2 9

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者