2104　縮尺模型輪軸による運動特性確認試験

正［機］○仁科　穣　(JR 東海)　　正［機］　角南　浩靖　(JR 東海)
清水　重邦　(JR 東海)　　正［機］　杉山　博之　(東京理科大)

Experiment of Dynamic Characteristic Using Scaled Wheelset

Minoru NISHINA, Central Japan Railway Company 1545-33, Ohyama, Komaki-shi, Aichi
Hironobu SUNAMI, Central Japan Railway Company
Shigekuni SHIMIZU, Central Japan Railway Company
Hiroyuki SUGIYAMA, Tokyo University of Science

There are several types of derailment of railway vehicles. Two of the most famous types of derailment are flange climb derailment and jump-up derailment. In addition, by recent studies, the derailment caused by rocking motion of a vehicle has been clarified. In order to understand the mechanism of derailment, both experimental and numerical approach are necessary. The authors have built experimental equipment using a scaled wheelset to simulate derailment phenomena easily and enhance the accuracy of numerical calculations. In this paper, we show the overview of the experimental equipment and some of the experimental results.

Keywords : scaled wheelset, derailment, experiment, flange climb, flange impact, wheel lift

1．緒言

鉄道車両の脱線には様々な形態があるが，従来からよく知られている脱線としては，乗り上がり脱線，飛び上がり脱線があげられる[1]．前者は，曲線通過時等において，車輪がレールに向かって進む（正のアタック角をもつ）場合に，車輪フランジ部とレールとの間に大きな横方向の力が作用することにより発生する．後者については，軌道不整を高速にて通過する場合等に想定され，車輪とレールが激しく衝突することにより発生すると考えられる．また，最近の研究では，これらの脱線の他にも，地震動により車両が大きく左右方向に揺すられる場合に生じるロッキング脱線と呼ばれる脱線形態も明らかになった[2]-[6]．

脱線およびそれに至る過程を把握するには，実験，数値シミュレーションの両面からのアプローチが不可欠である．ここで，実験に着目すると，実物スケールにて脱線を再現することは実験装置の規模を考えると必ずしも容易ではない．そこで，筆者らは，脱線現象を容易に再現でき，かつ，観測された現象を数値シミュレーションに反映することを目的に，一輪軸の模型試験装置を製作した．本報では，装置の概要および実験結果の一例を報告する．また，あわせて行っている数値シミュレーションによる解析については，次報にて報告する[7]．

2．実験装置の概要

2.1 実験目的

本装置は，脱線等に至る場合に，車輪とレール間に生じる現象の把握に特化するため，一輪軸状態による装置構成とした．また，脱線に至る現象として，車輪のフランジがレールに乗り上がる場合，輪軸がレールと激しく衝突する場合の二種類の現象を再現することを目的に，軌条輪，アクチュエータ等の周辺機器を構成した．以下，本報では，前者の現象の再現を目的とした実験を乗り上がり実験，後者の実験をフランジ衝突実験と称する．模型装置の縮尺については，取扱いの容易さを考慮すると，スケールを小さくする方が望ましい．一方，脱線に至るまでの車輪とレール間に生じる現象を把握するには，スケールは大きくする方が望ましく，両者のバランスを考慮して，1/3 スケールとした．

2.1 装置の構成

(1) 乗り上がり実験

模型輪軸試験装置の全体の構成を図 1 に示す．本装置は，模型輪軸，台枠，軌条輪，空圧アクチュエータ等で

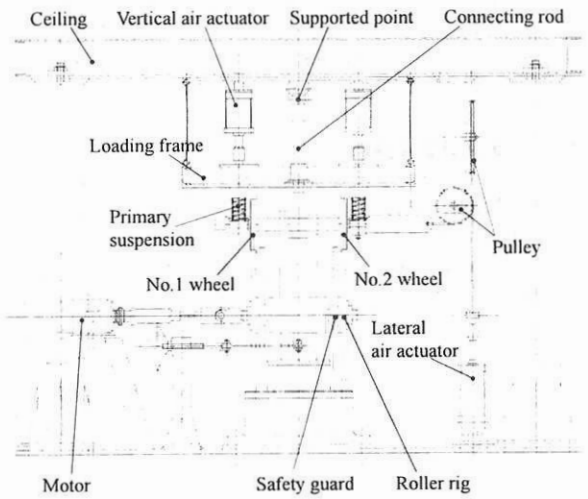

Fig.1 Front view of the experimental configuration (Flange climb experiment)

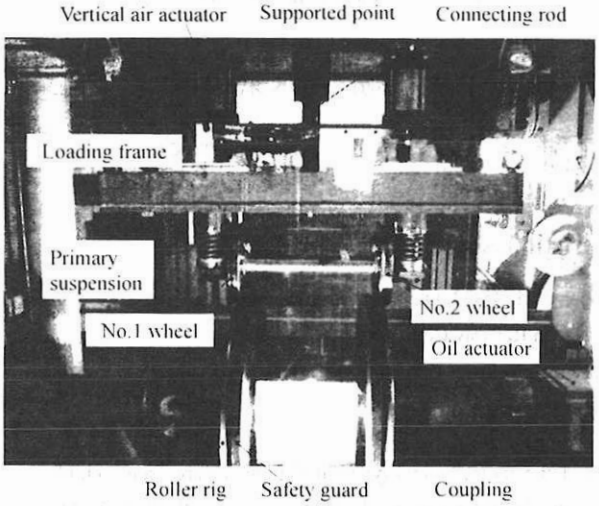

Fig.2 Front view of the experimental configuration (Flange impact experiment)

構成される．以下，本報では，左側車輪を No.1 車輪，右側車輪を No.2 車輪と称する．

模型輪軸の車輪踏面形状は，新幹線円弧踏面の 1/3 スケールとし，軸箱支持部は上下方向をコイルばねで支持し，左右および前後方向には適度な剛性を持たせるために積層ゴムを配置する．

台枠と実験装置の天井の間は，支持点，支持棒を介して接続する．支持点，支持棒によって，台枠の前後およびピッチング運動を拘束し，左右，上下，ローリング，ヨーイング運動のみを許容する．

軌条輪は，頭頂面形状を 60kg レールの頭頂面の 1/3 スケールとし，脱線後の輪軸の左右変位を拘束するため，軌条輪の内側には保護輪を設ける．また，乗り上がり実験においては，曲線通過を模擬するため，軌条輪をヨー方向に回転可能な構成としている．

図 1 に示すように，台枠と実験装置の天井の間には垂直荷重用の空圧アクチュエータを左右に 2 個配置し，荷重を増減させることにより輪重の増減が可能である．さらに，水平荷重用の空圧アクチュエータを別に設け，滑車を介して No.2 車輪側の軸箱と接続し，輪軸に左右荷重を付与することが可能である．

(2) フランジ衝突実験

図 2 に，フランジ衝突実験用の装置構成を示す．フランジ衝突実験においては，油圧アクチュエータにて軌条輪を No.2 車輪側から No.1 車輪側に強制変位させることにより，車輪フランジ部と軌条輪の衝突を再現する．図において，油圧アクチュエータ（非回転）と軌条輪（回転）間は着脱可能なカップリングにて接続する．また，軌条輪は回転運動と左右方向のスライドを同時に許容可能な軸受により支持されており，本実験を行う際には，乗り上がり実験用軌条輪から交換する．なお，本実験用軌条輪はヨー変位を許容しない．また，本実験時は，乗り上がり実験で用いる図 1 の水平荷重用の空圧アクチュエータと軸箱は切り離す．

3．乗り上がり実験

3.1 実験目的

出口緩和曲線通過時は，台車先頭軸の外軌側車輪では，比較的大きな横圧が作用した状態で，軌道の平面性変位に起因する輪重抜けが生じるため，乗り上がり脱線が生じやすい状況となる．このようなケースを再現することを目的に，乗り上がり実験を行う．

3.2 実験方法

実験方法を模式的に表したものを図 3 に示す．実験は以下の手順で行う．

- 急曲線の走行状態を模擬するため，軌条輪にヨー角を与える．
- 輪軸の進行方向が図 3 に示す向き（紙面手前方向）となるよう，軌条輪を回転させる．
- 平面性変位のある緩和曲線通過時の外軌車輪の輪重抜けを模擬するため， No.2 車輪の垂直荷重を減少させる．
- この状態で，No.1 車輪から No.2 車輪の方向に水平荷重を付与し，No.2 車輪の乗り上がりを発生させる．

図 3 の通り，本実験では，No.1 車輪が内軌側車輪に，No.2 車輪が外軌側車輪に相当する．また，No.2 車輪の垂直荷重の減少のみでは脱線には至らないため，輪軸に水平荷重を付与して乗り上がり脱線を発生させる．

3.3 測定項目

輪軸の上下，左右，前後，ローリング，ヨーイングの運動をレーザー変位計により測定する．その他，輪軸に作用する荷重に関係する項目として，空圧アクチュエータの内圧（垂直荷重用，水平荷重用），軸ばね上下変位，軸ばね内の積層ゴムの前後・左右力を測定し，サンプリング周波数は 100Hz とする．加えて，No.2 車輪の挙動については，ビデオカメラにて観測する．

3.4 実験結果

実験の一例として，軌条輪回転速度を 0.8m/s（実車換算で 5km/h），軌条輪に付与するヨー角を 2deg とし，空圧アクチュエータの荷重を図 4 に示すように時刻歴で変化させた場合について，輪軸の左右変位および No.2 車輪の上下変位を図 5 に示す．なお，図 5 において，輪軸左右変位は No.2 車輪側に変位する場合を正方向，No.2 車

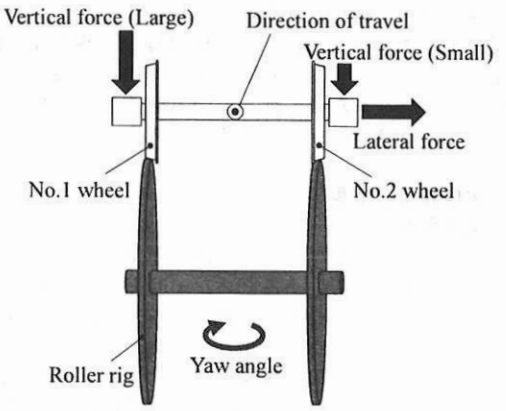

Fig.3 Experimental condition (Flange climb experiment)

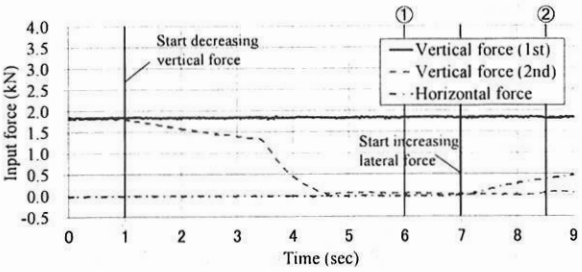

Fig.4 Input force

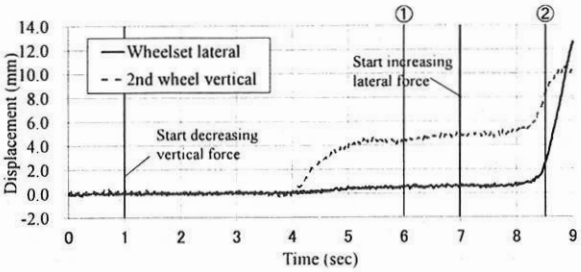

Fig.5 Experimental results

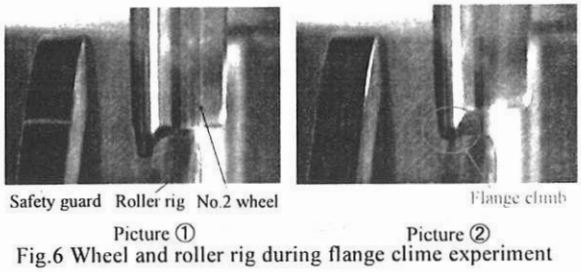

Fig.6 Wheel and roller rig during flange clime experiment

輪の上下変位は上昇する場合を正方向と定義する．また，図 6 にビデオカメラにて撮影した，実験中の No.2 車輪と軌条輪の状況を示す．図に示す写真①，②は，図 4,5 の①，②に対応する．

図 5 より，No.2 車輪側の垂直荷重の減少に伴い，4.0 秒付近から，No.2 車輪が上昇するとともに，輪軸が正方向に変位し，5.0 秒からしばらくの間，輪軸は概ね同じ姿勢を保持していることがわかる．このとき，図 6 より，フランジが軌条輪に乗り上がっていることが確認できる．軌条輪のヨー角により，もとより No.2 車輪は軌条輪に向かっていく方向にアタック角が付与されているが，これに起因するフランジ・軌条輪間の横荷重と，輪重が減少することにより脱線係数が上昇し，No.2 車輪が乗り上がったものと考えられる．次に，7.0 秒付近から水平荷重を付与し，水平荷重の増加に伴って，8.3 秒付近から No.2 車輪の上下変位，輪軸の左右変位は急激に増加し，写真②にみられるように乗り上がり脱線に至る．

一連の実験により，本装置にて乗り上がり脱線に至るまでの様子を再現することができた．

4．フランジ衝突実験

4.1 実験目的

車輪・レール間に衝撃的な横荷重が作用した場合の輪軸の挙動を確認するため，フランジ衝撃試験を行った．このように車輪がレールに対して衝突する場合の走行安全性は，衝撃荷重の作用時間を考慮した第 2 脱線係数と呼ばれる指標にて評価され，脱線係数の目安値を 1.0 とした場合には，横圧の作用時間が 0.05 秒未満の場合に適用される[8]．そこで，今回は，第 2 脱線係数が適用される条件にて車輪と軌条輪を衝突させることを目標に実験を行う．

4.2 実験方法

実験方法を模式的に表したものを図 7 に示す．実験は以下の手順で行う．

- 車輪と軌条輪の衝突時の車輪浮き上がりを容易に発生させるため，垂直荷重用の空圧アクチュエータを調節し，乗り上がり実験時と同程度の輪重アンバランスを設ける．
- 輪軸の進行方向が図 7 に示す向き（紙面手前方向）となるよう，軌条輪を回転させる．
- 油圧アクチュエータによって軌条輪を図 7 の No.2 車輪側から No.1 車輪側に急速に変位させ，No.2 車輪と軌条輪を衝突させる．

なお，4.1 項に記したように，第 2 脱線係数が適用されるのは横圧の作用時間が 0.05 秒未満の場合であるが，本実験装置では，物理的相似則を考慮すると 0.03 秒（≒ $0.05/\sqrt{3}$）未満の場合となる．そこで，本実験では，横圧作用時間が 0.03 秒程度となるよう軌条輪の強制変位を設定する．

4.3 測定項目

油圧アクチュエータのピストンストローク，垂直荷重用の空圧アクチュエータの内圧をサンプリング周波数 1000Hz で測定する．また，輪軸の両輪の挙動は，同期させた 2 台の高速度カメラ（1 秒間に 250 フレームを撮影）の映像により把握する．

4.4 実験結果

輪軸の回転速度を 4.0m/s（実車換算で 25km/h）とし，図 8 に示す強制変位を軌条輪に与えた場合の両輪の状況を図 9 に示す．なお，図 9 の写真①～④は，それぞれ図 8 の①～④の時刻と対応する．

軌条輪に変位を与える前の状況を写真①に，0.11 秒付付近の No.2 車輪と軌条輪が衝突を開始した直後の状況を写真②にそれぞれ示す．ここで，No.2 車輪と軌条輪間の横圧作用時間は，高速度カメラの映像より，図 8 に示す 0.11 秒から 0.14 秒付近の間の 0.03 秒と推定され，目標に近い衝突現象が生じていることを確認した．

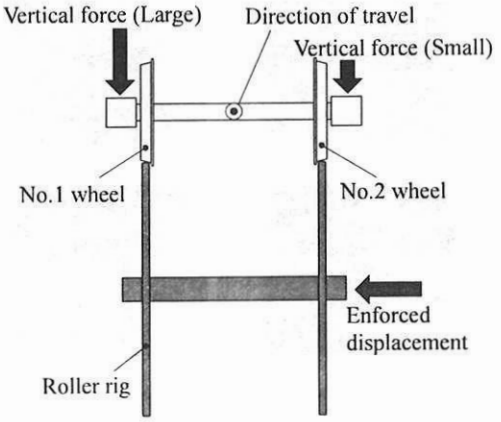

Fig.7 Experimental condition (Flange impact experiment)

写真③は 0.16 秒付近の状況を示しており，反対側の No.1 車輪と軌条輪が衝突していることが確認できる．これは，図 8 より，軌条輪が減速して左右方向の変位が終了することにより生じたものである．写真④は 0.20 秒付近の状況を示しており，高速度カメラの映像より，No.1 車輪のフランジ部が軌条輪と接触した状態を保持し，接触点を支点として輪軸がロール運動することにより，No.2 車輪が浮上していることを確認した．

以上の実験により，本装置にて，第 2 脱線係数が適用される短時間での車輪，軌条輪間の衝突現象を再現できることが確認された．なお，今回の実験条件では， No.2 車輪が浮上する状況であったが，実験条件によっては，最初の No.2 車輪と軌条輪との衝突により No.2 車輪が浮上する場合，あるいは，逆に No.1 車輪が浮上する場合等の現象が生じることも考えられる．輪重・横圧や輪軸の各変位などの測定項目の充実を含め，今後さらに分析を行う予定である．

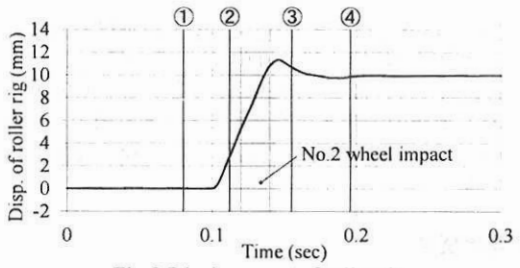

Fig.8 Displacement of roller rig

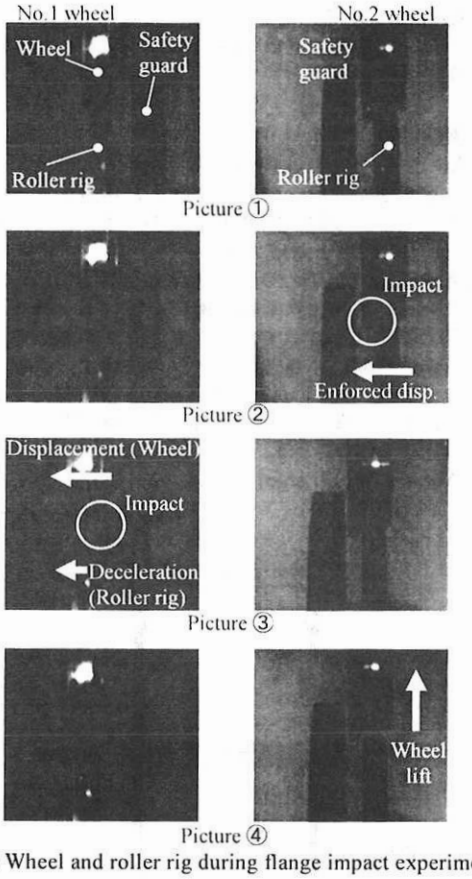

Fig.9 Wheel and roller rig during flange impact experiment

5．結言

鉄道車両が脱線に至る現象のうち，車輪のフランジがレールに乗り上がる現象，および，車輪とレールが激しく衝突する場合の現象を容易に再現することを目的に，1/3 スケールの模型輪軸試験装置を製作して運動特性確認試験を実施した．得られた知見を以下に示す．

・車輪フランジ部がレールに乗り上がる現象を再現するため，出口緩和曲線を通過する台車の先頭軸の運動を模擬した乗り上がり実験を行った．軌条輪に曲線を模擬するヨー角を設定し，外軌に相当する No.2 車輪について，軌道の平面性変位に起因する輪重減少を模擬すると輪軸は軌条輪にわずかに乗り上がり，さらに輪軸の外軌側に水平荷重を与えると輪軸は乗り上がり脱線に至ることを確認した．
・車輪とレールが衝突する場合の現象を再現するため，軌条輪を左右方向に強制的に変位させたフランジ衝撃実験を行った．輪重にアンバランスを設けた状態で横圧の作用時間が第 2 脱線係数の適用範囲である 0.03 秒（模型換算）程度となるように No.2 車輪と軌条輪を衝突させ，反動で No.1 車輪が反対側の軌条輪と衝突することにより No.2 車輪が浮上する現象が観測された．

参考文献

1) 宮本昌幸，須田義大：車両の運動力学入門，鉄道車両と技術，3 巻 3 号，pp.32-36，1997
2) 宮本岳史，石田弘明，松尾雅樹：地震時の鉄道車両の挙動解析（上下，左右に振動する軌道上の車両運動シミュレーション），日本機械学会論文集（C 編），64 巻 626 号，pp.3928-3935，1998
3) 西村和彦，畔道佳明，森村勉，深田淳司：振動軌条輪における模型鉄道車両の走行安全性に関する実験的研究，日本機械学会論文集（C 編），75 巻 749 号，pp.58-65，2009
4) 森村勉，関雅樹，石川栄，坂上啓，三輪昌弘，村松浩成，西村和彦，吉田幸司，足立昌仁，南善徳：実物台車振動実験による鉄道車両の地震時脱線メカニズムの検証，日本機械学会論文集（C 編），76 巻 764 号，pp.825-834，2010
5) 森村勉，西村和彦，畔道佳明，曽我部潔：地震時の脱線メカニズムおよび脱線防止ガード機能に関する解析，日本機械学会論文集（C 編），76 巻 770 号，pp.2447-2453，2010
6) 森村勉，足立昌仁，石川栄，深田淳司，畔道佳明：地震時の脱線メカニズムと脱線防止ガード機能に関する研究：1/5 模型加振試験，日本機械学会論文集（C 編），76 巻 770 号，pp.2454-2461，2010
7) 山本隼太，杉山博之，仁科穣，角南浩靖：縮尺模型輪軸の運動シミュレーション法に関する研究，J-RAIL2012，2012
8) 鉄道走行技術研究所：在来鉄道運転速度向上試験マニュアル・解説，研友社，1993