鉄道車両の耐震脱線防止システムの研究

A study on a quakeproof derailment prevention system of a railroad carriage

河合紘幸・早稲田大学(院)
Hiroyuki Kawai, Waseda University

石川星児・早稲田大学(院)
Seiji Isikawa, Waseda University

今村友厚・早稲田大学(学)
Tomoatu Imamura, Waseda University

稲宮健一・シニア鉄道安全研究会
Kenichi Inamiya, Senior Railway Study Group

田隆吉・シニア鉄道安全研究会
Takayoshi Den, Senior Railway Study Group

山川宏・早稲田大学
Hiroshi Yamakawa, Waseda University

It is said that Japan is a land of earthquakes and to prevent a run risk of train from earthquakes is of significance for the safety of running trains. An alarm system, called "YUREDASU" was developed and utilized for prevention of derailments. This system can provide an alarm to running trains and stop the operation just after detection of the primary wave of an earthquake before coming the following secondary wave. However, it is known that in an earthquake which occurs at shallow focal center or at short a distance from focal center, the duration between the P-wave and S-wave becomes shorter and it is desirable to equip an auxiliary system to prevent the running trains from derailment till the trains have stopped completely. Thus in the previous study a new concept of such an auxiliary system was proposed and an equipment to prevent derailments was developed. Then an excitation test was done using a scaled model of the system to examine the feasibility of the proposed system.

To examine the effectiveness of the proposed system a further excitation test was carried out using the same scaled model of the system and the corresponding computer simulation was held in this study. The experimental and the simulation results were discussed from many points of view and the effectiveness of the proposed system was observed.

[Keywords]
Railway trains, Prevention of derailment, Earthquake, Auxiliary system:

論文要旨

走行中の列車に対する地震の防災措置はＰ波検出後，直ちに停車させる対策が現在講じられている．しかし，直下型の地震，あるいは震源が近くで，20km 以下の浅い場合、Ｐ波検出後，2，3 秒後にＳ波が到達して停止の対策も有効ではない．このような場合でも何らかのシステムが作動して，脱線を免れて停車できれば乗客の安全性が確保され，列車そのものの被害や脱線して対向してくる列車との衝突によるニ次的な被害を避けることができる．車輪はフランジ角を持つので，外力の条件に応じて，乗り上がり等の脱線を引き起こしやすい．そこで筆者らは近郊を走行する列車を対象として台車の前後に取り付ける装置でフランジ角を持たない補助輪をＰ波検出後，鉛直下降方向に展伸させる耐震脱線防止システムの構想を先の研究では提案し，１/８の縮尺モデルを使って振動実験を行い，そのシステムの構築の可能性を確認した．

本研究ではさらに同じ１/８縮尺モデルによる実験と対応するシミュレーションによって提案した耐震脱線防止システムの脱線防止効果を種々の観点から検討し，耐震脱線防止システムの有効性を示すいくつかの結果を得た．

1. 緒言

現在，我国では地震時に走行する列車を脱線等の危険から回避するために地震の発生を即時に検知し，列車を停止するシステム（Ｐ波警報システム：ユレダス）が実用化に供され，災害防止に有効な手段となっている．(1)

しかしながらこのシステムは地震波の先に伝わるＰ波を検知し，それに続くＳ波の到来前に列車を停止させるシステムで，直下型地震のようなＰ波とＳ波の到来間隔が短いような地震では列車が十分に停止する以前にＳ波が到来する可能性が大となって危険性が増大し，災害防止の面で何らかの付加的な方策が必要である．

そこで先の研究では，走行している列車が地震に遭遇したときに既存の防止システムがＰ波を検出後，列車停止に至るまでの間の脱線を防止する補助輪装置を考案し，１/８縮尺モデルを試作して振動実験を行い，システム構築の可能性を確認した．(2) 具体的には地震発生後のＰ波の検知を受けて補助輪をレールに押し付けることによって既存の危険防止システムが列車を停止させるまでの間の脱線を防止する補助装置の概念設計と初期設計を解析結果に基づいて行い，その1/8縮尺モデルを製作して２次元振動台上で地震波等による模擬的な加振実験を行い，その実現の可能性を検討した．

本研究では、提案した耐震脱線防止システムの効果をさらに検討するために先の研究でも使用した１/８の縮尺モデルによる加振実験を更に行い，並行してコンピューターによるシミュレーションも行った．その結果を種々の観点から検討したところ，耐震脱線防止システムの有効性を示すいくつかの結果が得られた．

2. 提案脱線防止システムの概要

2. 1 Ｐ波警報システム：ユレダスの課題

現行のユレダスは，遠地の大地震を対象にしており，Ｐ波検知から警報までに３秒程度要する．すなわちこのシステム

は、遠地からの地震の到来を対象としているためＰ波とＳ波がほとんど同時に到来するような直下型地震発生時に対応が遅れ，災害を防止できない可能性が高い．そこで直下型地震の際の付加的な脱線防止システムが必要と考えられ，先の研究では以下の補助輪を用いた脱線防止装置を提案した．[2]

2．2　提案した耐震脱線防止補助輪システム概要

先の研究では車両脱線を防止するために、線路に何らかの物体を押し付ける装置を車体に設けることを考えた．当然のことながら，その物体は列車の走行に障害になってはならない．そこで，物体が取り付けられる空間として，フランジが走行する線路の付近に着目した．他の空間は継ぎ目板，踏み切り付近の床面，ポイントなど多くの構築物が障害物として存在し，利用が難しい．

そこで、典型的な近郊を走行する列車を想定して，Ｐ波の検出後に補助輪を押し付けるような脱線防止システムの設計を行い，図１に示す１/８縮尺モデルを作成した．

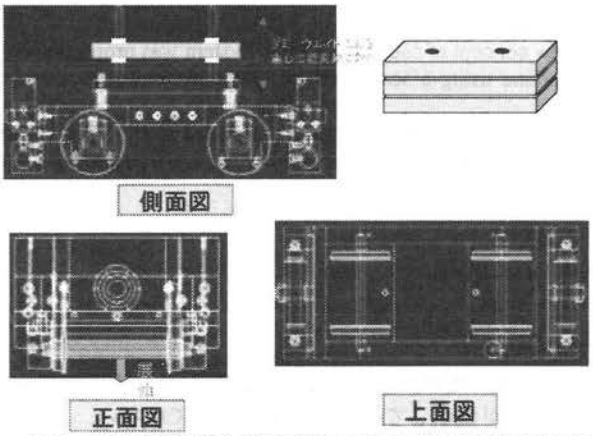


図１　耐震脱線防止補助輪システム（１/８縮尺モデル）

この装置の作成に際しては大地震によって車両が脱線・転覆するような大変位加振の状態を想定して，レールに当たるフランジの反力の影響がクリープ力に比べて大きいものと考え，主として下心のローリング運動を対象に考えた．

３．耐震脱線防止システムの有効性の検討方法

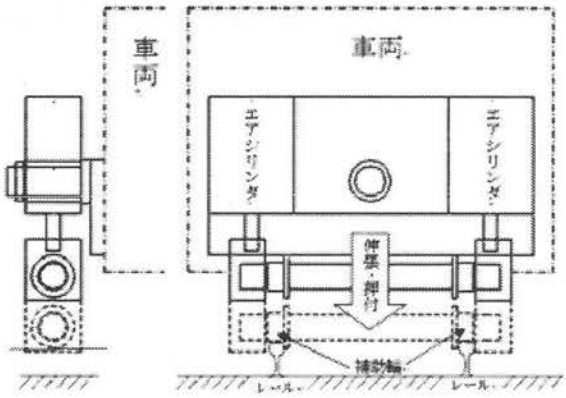
ここでは大地震によって大変位が生じて車両が脱線・転覆するような問題を想定する．この問題に対しては宮本らがHOゲージやスケールアップした１/８縮尺モデルを用いた加振実験やコンピューターシミュレーションによって脱線限界についてさまざまな検討を行っている．[3]～[5]

本研究ではこれらの研究を参考にして耐震脱線防止補助輪システムを作動させた場合と作動させない場合の脱線限界について１/８縮尺モデルの加振実験とコンピューターシミュレーションを行い，装置の有効性の検討を行った．

４．脱線防止補助輪システムの 1/8 縮尺モデルの加振実験

４・１　補助輪を利用した脱線防止システム

考案した補助輪を利用した脱線防止システムに対して製作した１/８縮尺モデルの構成略図を装置の概要を説明するために図２に示す．(a)は側面図で（b）は正面図である。通常走行時に補助輪はレールに接触しないが，Ｐ波受信と同時に伸張して，補助輪は線路上にエアシリンダーによりレールに

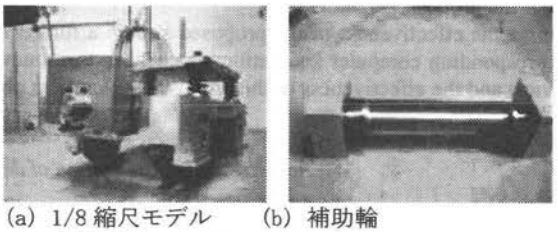


（a）側面図　　（b）正面図

図２　提案したシステムの概観（１/８縮尺モデル）

押し付けられる．補助輪が押し付けられることにより車輪の乗り上がりや飛び上がり脱線が防止できる．

図３（a)に実験で用いた１/８縮尺モデルの写真を，同図(b)に補助輪（φ31）の写真を示す．また図４に補助輪の寸法を示す．



（a）1/8 縮尺モデル　　（b）補助輪

使用材料：主に S45c，その他 17S, BS, SS

図３　試作台車と補助輪

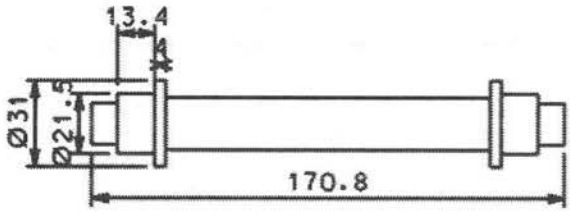


図４　補助輪寸法（φ31）

４・２　加振実験方法

図５に示すようにように1/8 縮尺のモデルを，２次元振動試験機上に設置したレールに乗せて１Ｈｚ～１２Ｈｚの正弦波の横方向と参考のために縦方向の振動を与え，加振振幅を５ｍｍ～８５ｍｍまで数段階に変化させることによって各振動数における脱線の発生する安定限界の振幅を実験的に求める。加振の際に補助輪装置を作動させた場合とさせない場合の二通りの実験を行うことによって耐震脱線防止システムの脱線防止効果を検討する．また実験ではフランジの長さの異なる２種類の補助輪（φ31，φ41）に対して行い，フラン時長さの効果も検討した．この供試モデルは図５の概略図に示すように台車と乗員を含めた上部質量を代表する重りも搭載可能である．

振動時の台車の挙動をビデオ撮影し，さらに，振動の入力波形をデータとして取り込み，台車の振動の様子を見るためにレーザー変位計等を用いて各部計測を行う．

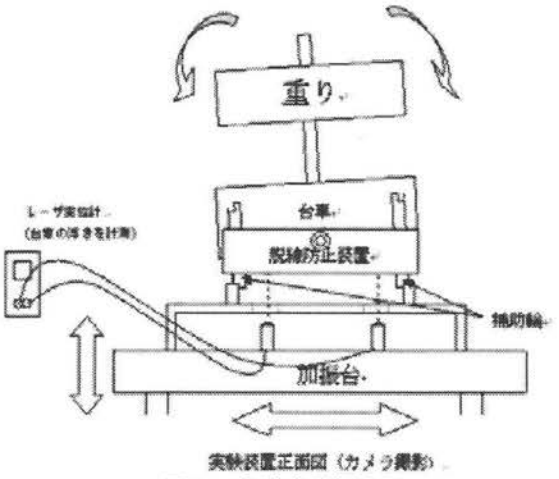


図5　実験装置概略図

5．脱線防止装置モデルの加振シミュレーション

図1に示した1/8縮尺モデルを機構解析ソフトであるADAMSを用いてコンピューターシミュレーションモデルを作成して実験に対応する加振シミュレーションを行った．

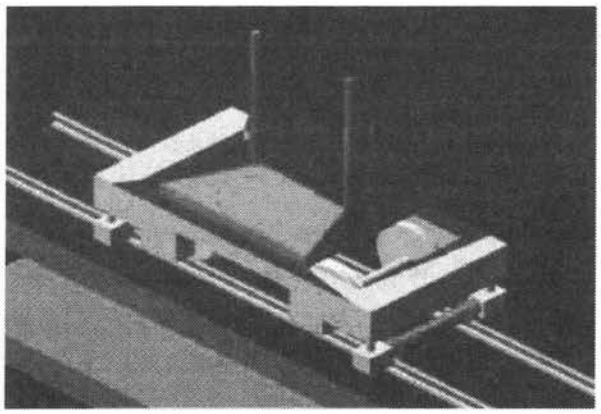


図6　シミュレーションモデル

5．1　シミュレーションモデル

図6に作成したシミュレーションモデルを示す．
またモデルの諸データを表1に，摩擦係数や反発係数を表2に示す．

5．2シミュレーション方法

前記の加振実験線に対応させて下記のシミュレーションを行い，モデルが脱線する安定限界振幅を求めた．

5．1．1脱線限界振幅

脱線限界振幅は、1Hz～12Hzの正弦波の振動を加え、加振動振幅を 0.5mm 刻みで増大させる条件の下で、初めて台車が脱線、転覆が起こる振幅とした．

5．1．2　脱線の判定

補助輪の左右どちらか一方でもレールと接していない時，台車は不安定になり脱線・転覆にいたる．言い換えると、左右どちらか一方の補助輪がレールからの接点力（輪軸やフランジ部にかかる抗力）を受けていないとき，台車は不安定な状態になる．このことから左右どちらか一方の補助輪が接点力の影響を受けなくなる状態である時、台車は脱線したと判定する．この時，シミュレーション上では力を可視化することによって補助輪にかかる接点力の有無を判定した．

Table.1 Parameters of each model

Parameter	Value	Unit
(1)台車総質量	22.3	(kg)
(2)車体・台車枠質量	9.62	(kg)
(3)車輪軸質量(1本)	2.28	(kg)
(4)補助輪軸質量(1本)	0.504	(kg)
(5)台車幅表	235	(mm)
(6)台車長	440	(mm)
(7)車輪径	107.5	(mm)
(8)補助輪径	21.5	(mm)
(9)台車枠ローリング慣性モーメント	0.0456	(kg・mm^2)
(10)車体ローリング慣性モーメント	0.0175	(kg・mm^2)
(11)車輪軸ローリング慣性モーメント	0.0114	(kg・mm^2)
(12)補助輪軸ローリング慣性モーメント	0.00117	(kg・mm^2)
(13)一次ばね定数	11.86	(N/mm)
(14)二次ばね定数	46.98	(N/mm)
(15)レール幅	8.13	(mm)
(16)レール高さ	21.8	(mm)

Table.2 Parameter of materials and a friction characteristic

Parameter	Value	Unit
車輪，レール間の摩擦係数	0.3	(-)
反発係数	0.3	(-)

6．実験結果とシミュレーション結果および考察

6．1　実験結果と考察

6．1．1　脱線限界

加振振動数，振幅を変化させたときに，模型が脱線する限界を求めたものを図7に示す．同図は補助輪のフランジ長さφ31(小)とφ41(大)の両方の場合の安定限界を示している．

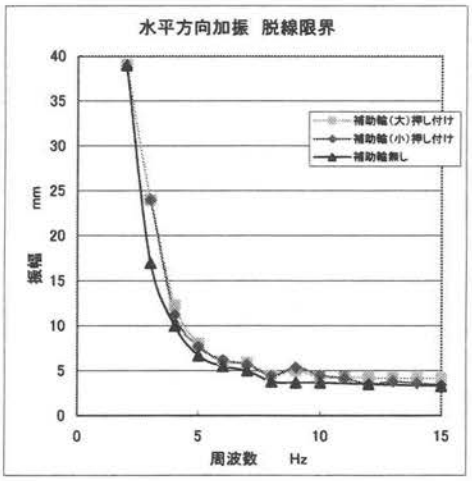


図7　　脱線限界図

6．1．2　考察

図7を見ると、補助輪によって振幅比が加振振動数全域にわたり効果的に向上していることがわかる．特に低周波数での脱線限界の向上は著しいことがわかる．また5Hz以上の振

動数でも約１０％限界値が上昇しており、補助輪の脱線防止効果を確認することができた．補助輪のフランジ長さ、すなわち軸径が大きくなると若干、安定限界は上昇するものの、著しい違いはみられない．

６．２　シミュレーション結果と考察

６．２．１　シミュレーション結果

実験に対応させて汎用ソフトＡＤＡＭＳによってシミュレーションした結果を図８に示す．

実験結果と異なり，補助輪のフランジの長さが長いほうが，脱線防止効果が比較的顕著に高くなる結果が得られた．

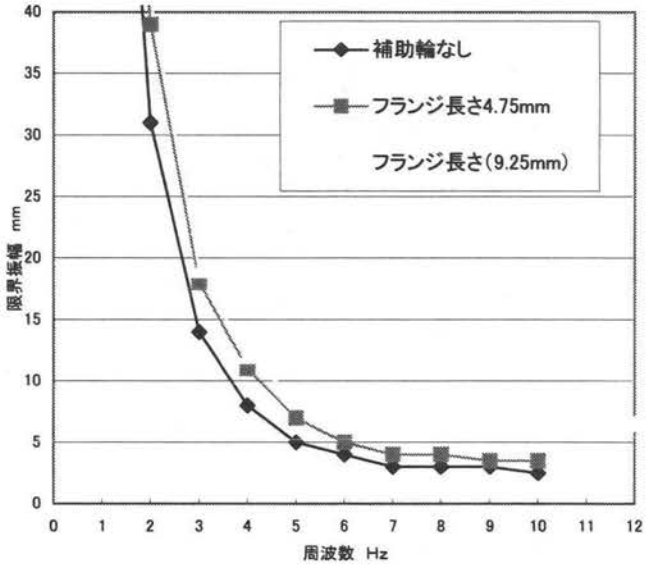


図8　ADAMSによるシミュレーション結果

６．２．２　考察

補助輪（φ31）において、実験とシミュレーションの結果を比較したものを、図９に示す。

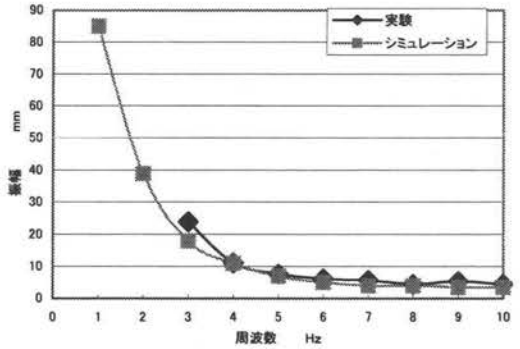


図9　水平方向加振　脱線限界
実験とシミュレーションの比較

数値計算結果と実験の結果は、ほぼ一致することがわかる．

ここで，シミュレーションと実験結果が一致するにも関わらず，図８と図９での補助輪のフランジ長さによる結果が異なる理由として例えば実験装置では車体本体と補助輪装置が固定されていないのに対して，シミュレーションでは固定されたものとして解析していることが上げられる．さらにシミュレーションで使用したデータや解析条件を実験モデルの諸定数や実験条件や実験で起きている現象と十分に検証する必要があるものと考えられる．

７．結言

直下型の地震のようにＰ波警報システムが作動した直後にＳ波が到来するような地震に対して列車を停止するまでの間に脱線を防ぐ、先の報告で提案した耐震脱線防止補助輪システムの有効性を1/8縮尺モデルによる実験とコンピューターによるシミュレーションによって検証した。この装置は脱線を防ぐためにＰ波を検知した直後に補助輪をレールに押し付ける機構を内在して装置である．実験やシミュレーションでは地震時の大振幅によって車両が脱線・転覆場合を想定した．

実験と解析の両結果から補助輪によって脱線を生ずる振幅比が加振振動数全域にわたり効果的に向上していることがわかった．特に低周波数での脱線限界の向上は著しいことがわかり，５Hz 以上の振動数でも約１０％位，限界値が上昇しており，補助輪の脱線防止効果を確認することができた．補助輪のフランジ長さ、すなわち軸径が大きくなる効果については解析結果では，比較的著しい効果は見られたものの，実験結果からは見られないこともわかり，種々の観点からさらに検討する必要があることがわかった。

参考文献

(1) 中村豊，世界初の実用Ｐ波警報システム「ユレダス」の現状と将来，第２回工木学会リアルタイム地震防災システム論文集　(2000) 107
(2) 大西達朗他５名，鉄道車両の脱線防止システムの一提案、第 13 回鉄道技術連合シンポジウム(J-Rail 2006)講演論文集
(3) 宮本昌幸他３名，鉄道車両の地震に対する走行安定性の実験的研究，機械学会　交通・物流部門大会講演論文集(2001)，359.
(4) 中村行秀他４名，鉄道車両の地震に対する走行安定性，機械学会　交通・物流部門大会講演論文集(2002)，331.
(5) 宮本昌幸，香山義人，鉄道車両の地震に対する走行安全性の研究、第 11 回鉄道技術連合シンポジウム(J-Rail 2004)講演論文集，535.