

従来のシミュレーション限界を超えて 地震時の走行安全性評価への活用を目指す



葛田 理仁
Masahito Kuzuta
鉄道力学研究部
車両力学研究室
主任研究員



飯田 浩平
Kohei Iida
鉄道力学研究部
車両力学研究室長

はじめに

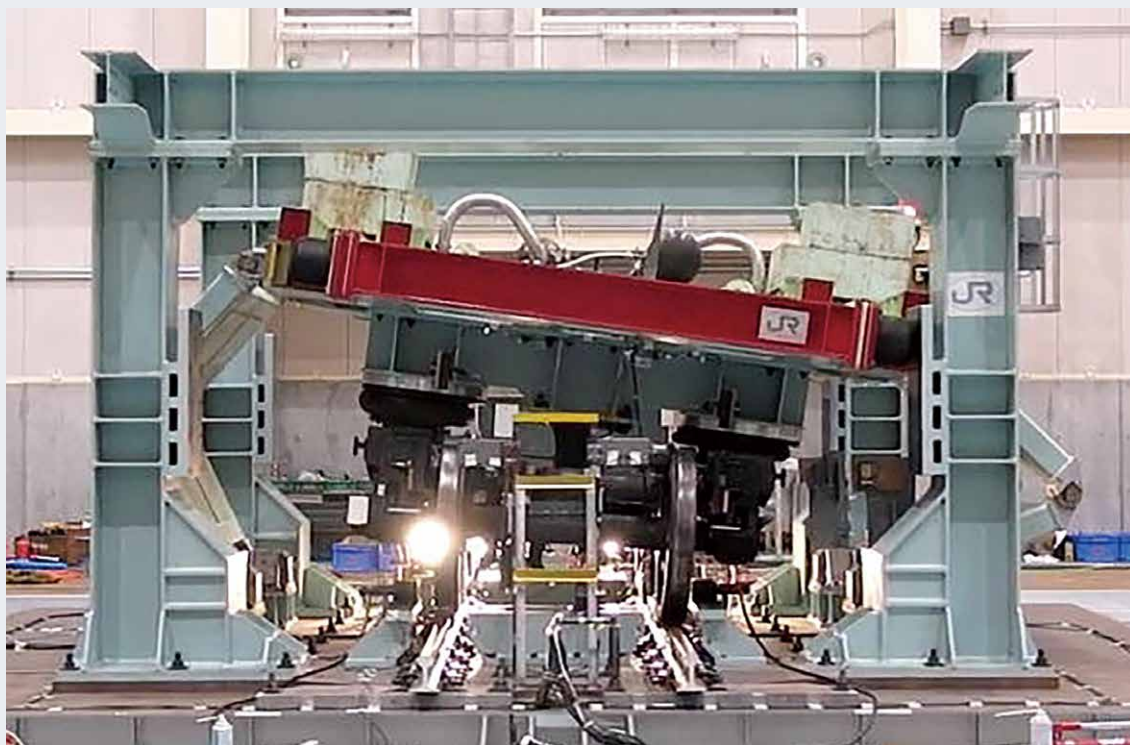
日本は世界でも有数の地震大国です。地震により鉄道車両が脱線・転覆する事例は数少ないものの生じており、直近では2022年3月に福島県沖で発生した地震において営業中の新幹線電車が脱線しています¹⁾。これまでも鉄道の各分野においてさまざまな地震時の安全対策が進められていますが、引き続き安全性向上に向けた取り組みが重要であるといえます。

鉄道総研では地震時の車両挙動に関して、こ

れまで主に、実験的な手法としては鉄道総研所有の大型振動試験装置を用いて実台車を加振する試験²⁾([図1](#))を、解析的な手法としては[マルチボディダイナミクスTM](#)に基づいた車両運動シミュレーションVehicle Dynamics Simulator³⁾(VDS)の両者を柱として研究を進めてきました。

VDSはさまざまな状況での鉄道車両の挙動を解析できる鉄道総研独自のシミュレーションプログラムであり、特に兵庫県南部地震を契機

図1 実台車加振試験



に地震時の車両挙動を解析できるように開発が進められ、著大地震における列車脱線のメカニズム解明などに活用されてきました⁴⁾。

これらの手法は現在も現象解明のために有効ですが、実台車を用いた加振試験では、安全面の配慮や試験体・装置の制約から輪重^④がゼロとなる、あるいは脱線直後までの再現が限界であり、車両転覆までの大変位を伴う挙動の再現は困難です。また、VDSでは当時の計算機の性能の制約などから「車輪・レールの相対左右変位」に着目し、その値が閾値に達した時点で「脱線」と判定し、そこでシミュレーションを終了することとしていました。

そのため、その時点よりも後の車両挙動を解明することが課題でした。そこで、本稿ではこれらの課題を克服し地震時走行安全性検討の未

来を拓く研究について紹介します。

車両運動シミュレーション プログラムの開発

車両運動シミュレーションにおいて脱線に対する鉄道車両の走行安全性はどのように表現できるでしょうか。VDSでは車輪とレールの相対左右変位に着目し、その値が±70mmに達した時点で「脱線」と判定しています。このとき、輪軸が左右方向にほぼ水平に脱線するような場合は、例えば図2に示すように輪軸がレールから外れる直前の状態となっています。また、車両が転覆に至るような場合は輪軸のロール角が著しく大きくなり、例えば図3に示すようにレールから浮き上がった側の車輪の左右変位が70mmを超える状況となります。いずれにせ

④ マルチボディダイナミクス

一般用語としてはさまざまな剛体や弾性体の運動や機構解析を実行する技術分野を指します。鉄道車両の場合、通常の走行で生じる微小変位の範囲を対象とした解析が古くから行われてきましたが、地震時のように大変位を伴う挙動の解析には不向きです。マルチボディダイナミクスでは微小近似を用いずに時系列解析を行えるため、大変位を伴う挙動などの解析に向いています。

④ 輪重

鉄道車両は車輪がレールと接触し回転しながら車両の重量を支えて走行します。すなわち、車輪にはレールから鉛直方向上向きの荷重が作用しており、これを輪重と呼びます。車輪がレールから浮き上がると輪重がゼロとなります。

図2 脱線判定基準に達した状況
(輪軸がほぼ水平に脱線する場合)

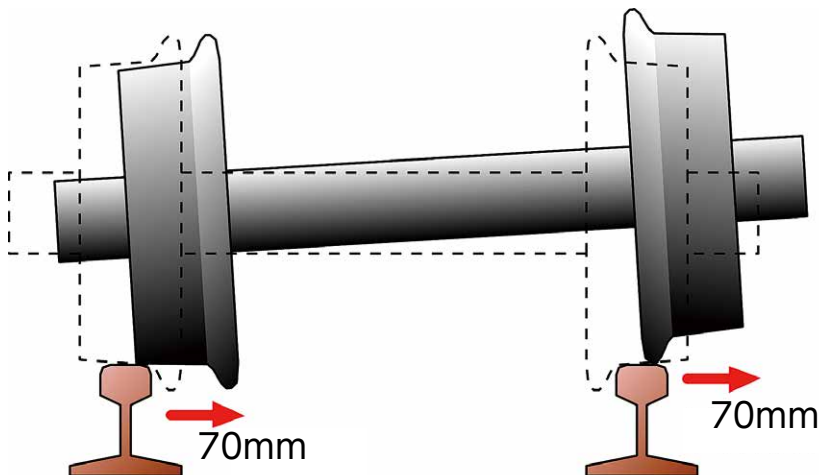
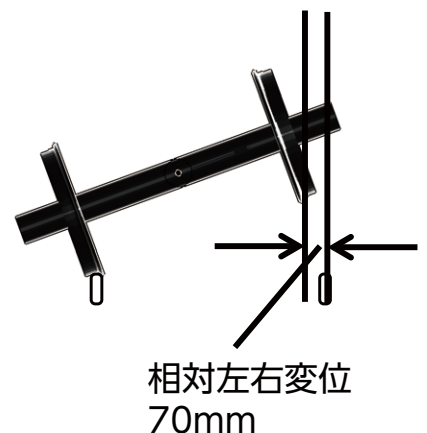


図3 脱線判定基準に達した状況
(車両が転覆しかけた場合)



よVDSで可能な計算範囲はこれらの時点までです。

さて、**図3**の状況に至った場合に車両はその後どのような挙動をとるのでしょうか。輪軸の挙動に注目してみると、そのまま転覆する場合、浮き上がった側の車輪が落下し脱線しない場合、浮き上がった側の車輪が落下する際に輪軸が滑って脱線する場合などが考えられます(**図4**)。近年の計算機能力の向上を背景に、通常の走行では生じないような車輪・レール接触の状態をシミュレーションで求められるように発展させることで、これらの状況を再現できる新しい車両運動シミュレーションプログラムの開発に現在取り組んでいます。これらの状況が解析できると、従来の「脱線」だけでなく「転覆」の判定なども行えるようになります。

1/10模型車両による加振試験

一方、実験的な手法については、大型振動試験装置の振動台の大きさは7m×5mであるため実物大の実験としては**図1**のような1台車(半車両)の試験が限界です。そこで、実車両を参考に寸法や力学的な特性を極力忠実にスケール

ダウンした模型車両(**図5**)を製作し、模型車両の加振試験を行って脱線後の車両挙動を実験的に把握する取り組みを進めています。**図5**の模型車両は在来線電車を参考とし、取り扱いや繰り返しの加振試験の容易さ、また実車を模擬した特性となるばね・ダンパー系を忠実に再現できることを考慮して1/10スケール(車体長2m)としています。模型車両であれば1車両での加振試験が可能です。

車両の脱線や転覆がどのような条件で生じるのか、基礎的な特性の把握を目的として、大型振動試験装置上で模型車両を軌道から正弦波で加振する加振試験を行いました。試験の一例として、走行する模型車両に対する加振周波数0.8~3Hzの加振試験結果の例について本稿では述べます。この周波数領域は実車換算では約0.3~1.0Hzに対応し、車両は**下心ロール**[®]モードで揺れやすく著大な加振を受けると転覆する可能性がある領域です。なお、この模型車両については下心ロール運動のピーク周波数は2Hz付近であることがわかっています。加振周波数と加振振幅を変化させながら加振試験を行い、各々の加振周波数において脱線あるいは

図4 脱線判定基準に達した後に想定される状況

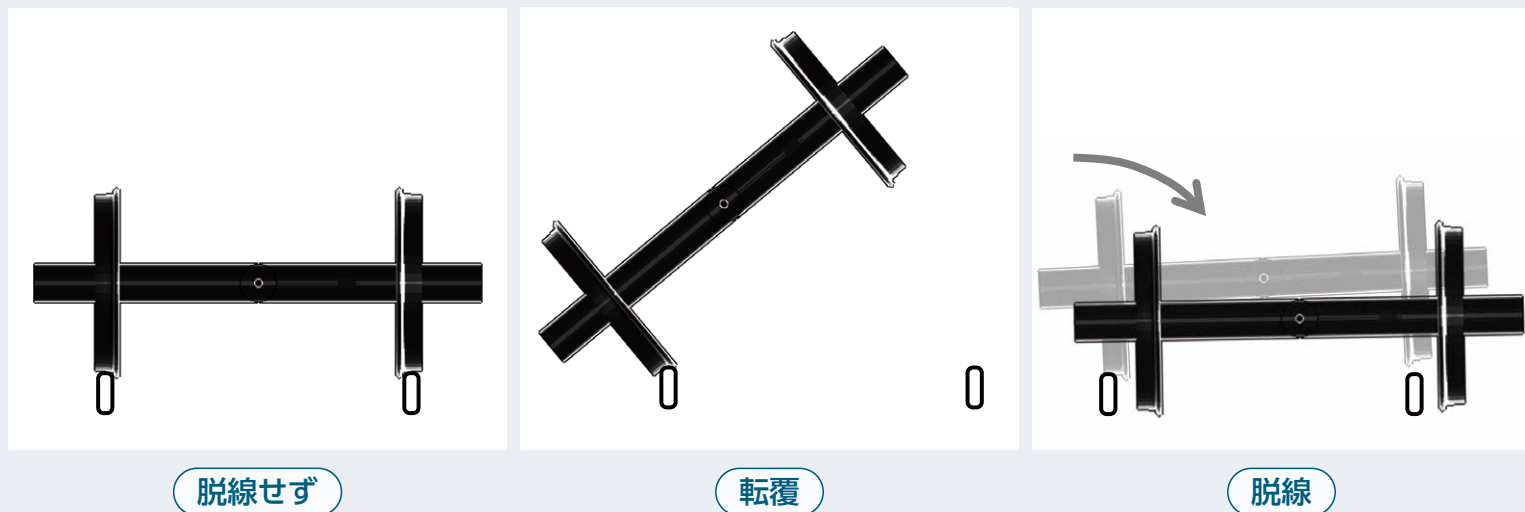




図5 1/10模型車両

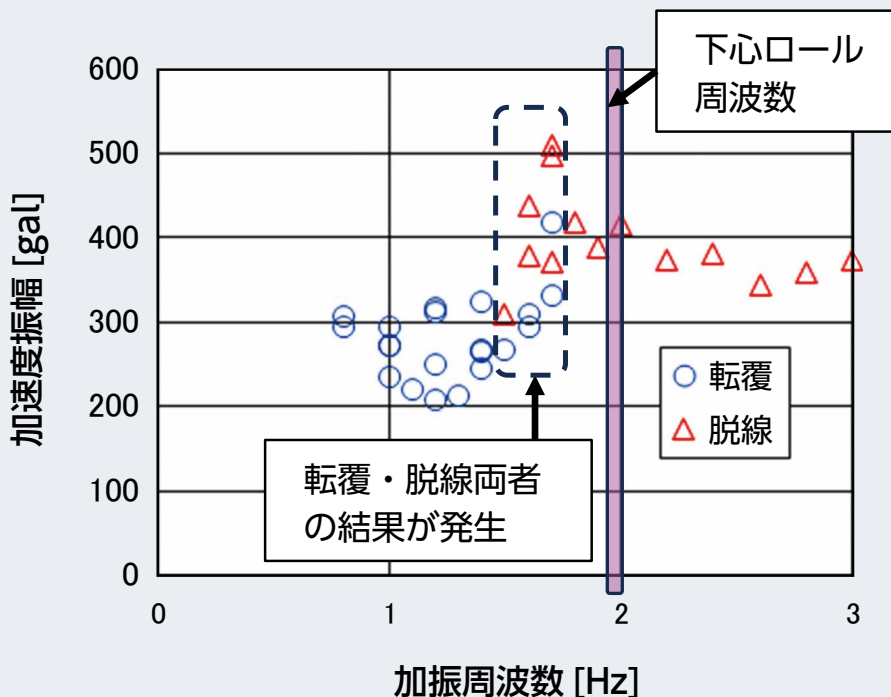
転覆に至った加振振幅を整理しました。その結果を図6に示します。図6からは車両転覆が発生するのは下心ロール運動のピーク周波数以下の周波数帯であること、一部の周波数帯では同

じ加振周波数でも加振振幅によっては転覆と脱線どちらの結果も起こり得ることなどがわかります。

下心ロール

鉄道車両の左右・ロール運動を考えた場合、車両が揺れやすい周波数帯が主に2つ存在します。周波数の低いほうの周波数帯での運動形態を下心ロール運動、周波数の高いほうの周波数帯での運動形態を上心ロール運動と呼びます。それぞれ車体の下部・上部に回転中心があるかのような挙動となります。

図6 加振試験結果の例（脱線・転覆が生じた加振条件を抽出）



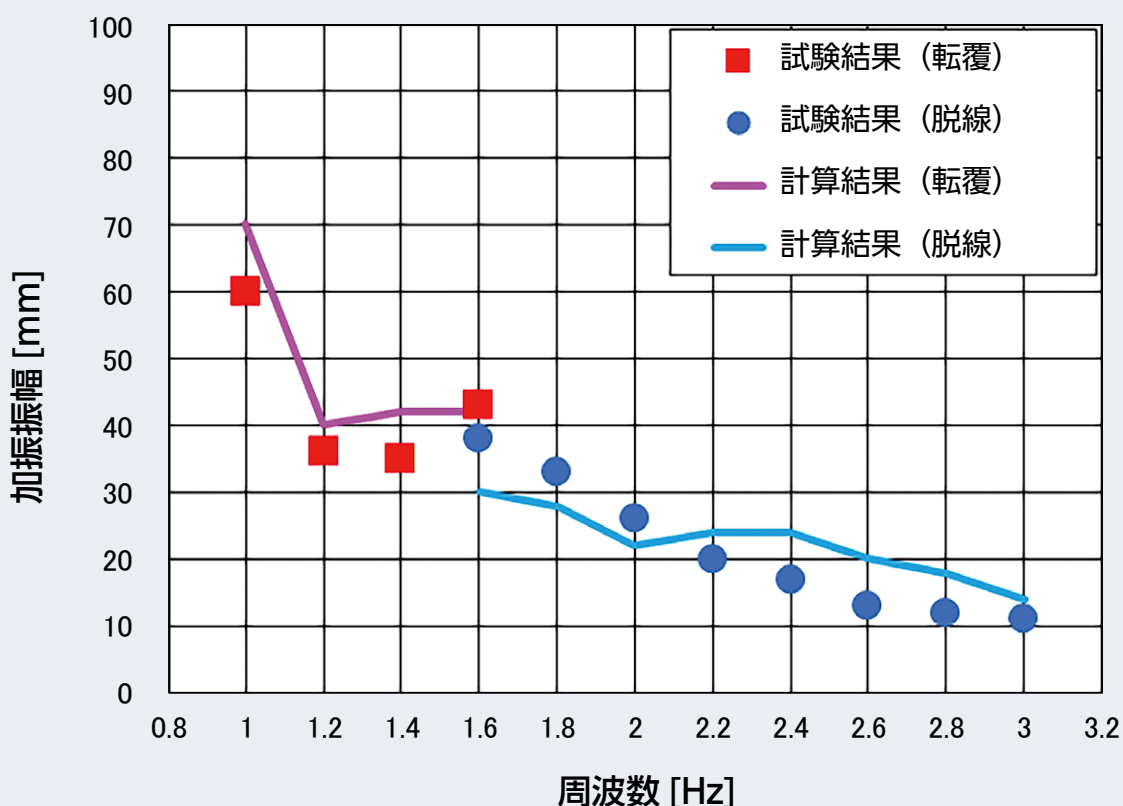
車両運動シミュレーションの 模型試験による検証

新しいシミュレーションプログラムを用いて、模型車両の試験に対応する解析を行い、模型試験と同様に各周波数において脱線や転覆が生じた加振振幅を求めてその結果を模型試験と比較しました。判定として、ここでは車輪の裏面がレール端から軌間外側にはみ出した場合を脱線、車体ロール角が60degを超えた場合を転覆としました。模型試験での脱線や転覆の判定に対応し、シミュレーション結果から転覆あるいは脱線となった場合の加振周波数と加振振幅を抽出して模型試験結果と比較した一例を図7に示します。図7より、脱線・転覆が生じた加振周波数と振幅について、シミュレーション結果は試験結果と概ね整合していることがわかります。仮にVDSによる検討を行った場合は車輪・レール

ル相対左右変位が実車の±70mmに対応して±7mmを超えるかどうかのみが判定され、その際の加振振幅以上の振幅における車両挙動は検討できないのに対し、図7では、脱線にとどまったのか転覆に至ったのかまで判定できていることがわかります。

また、模型車両の挙動をシミュレーションによって再現できるかどうか、シミュレーション結果を可視化したアニメーションを用いて確認しました。一例として、加振周波数1.0Hz、加振振幅約70mmの場合の結果を図8に示します。図8では加振が始まった時刻を0として両者のおおよその時間合わせを行い、左側に模型試験の結果を、右側にアニメーション結果を図示しています。本図から、シミュレーション結果は模型試験における車両挙動をよく再現できていることがわかります。

図7 模型試験結果とシミュレーション結果の比較（脱線あるいは転覆が生じた加振振幅の下限値の比較）



おわりに

本稿では鉄道車両の地震時の車両挙動の解明に取り組む研究について紹介しました。これらの実験・解析技術は、従来可能であった実験・解析の範囲を超えて、地震時などの異常時における鉄道車両の安全性を将来的に支えていく技術です。今後も、引き続き地震時の走行安全性向上や、走行時の編成車両を対象とした鉄道システム全体としての走行安全性評価の活用に資する現象解明を進めていく計画です。 **RRR**

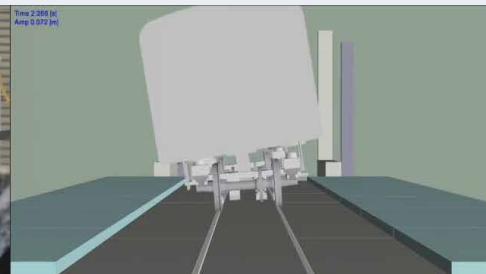
文献

- 1) 運輸安全委員会：東日本旅客鉄道株式会社 東北新幹線 福島駅～白石蔵王駅間 列車脱線事故，鉄道事故調査報告書，RA2024-1-1，2024
- 2) 例えば 飯田浩平，鈴木真，宮本岳史，西山幸夫，梶谷泰史，加藤博之，浅野浩二，名倉宏明：大型振動試験装置を用いた実台車脱線実験，日本機械学会論文集C編，Vol.77，No.781，pp.3223-3236，2011
- 3) 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，日本機械学会論文集C編，Vol.64，No.626，pp.3928-3935，1998
- 4) 例えば 鉄道総合技術研究所：東北地方太平洋沖地震における新幹線の脱線・非脱線シミュレーション解析，鉄道総研報告 特別第53号，2014

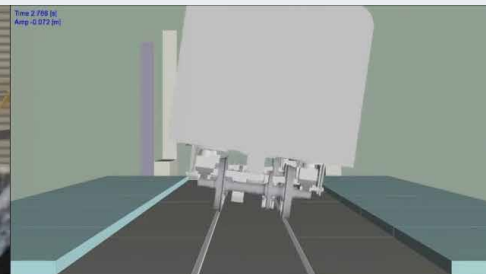
(1) 0s



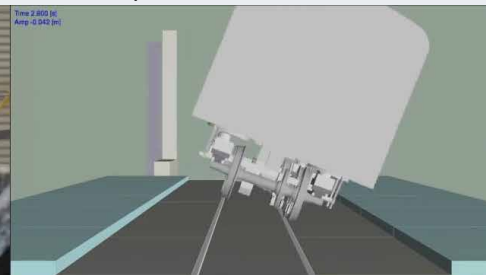
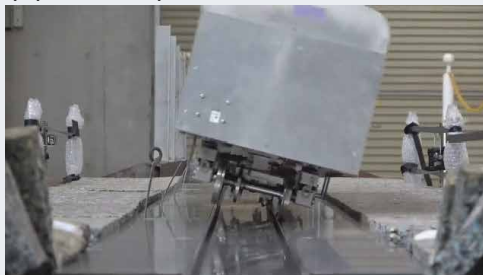
(2) 約 2.25s



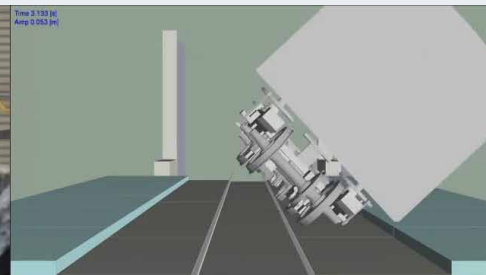
(3) 約 2.75s



(4) 約 2.9s(この付近で紙面右側に転覆し始める)



(5) 約 3.1s(車体下側角部が緩衝材と接触)



(6) 約 4.1s(車両がほぼ横倒しの状態)

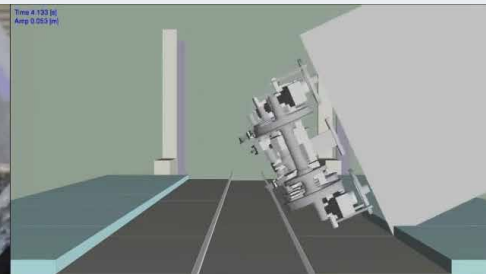


図8 車両挙動の比較(左側:模型試験, 右側:シミュレーション)