

# 地震時や強風時の 車両の大きな動きをとらえる

植木 健司  
鉄道力学研究部  
(主任研究員)

葛田 理仁  
同  
(車両力学研究室 研究員)



うえき けんじ



くずた まさひと

## はじめに

2004年の新潟県中越地震で、高速走行中の新幹線列車が脱線しました。幸いけがをされた乗客はいませんでした。新幹線が高速走行中に脱線したのは初めての事であったため、その後脱線を防止するための対策が急がれました。一方、大きな地震時に車両がどのような挙動をしながら脱線したのか、また脱線したあとどのように走行するのかといった、地震時の脱線現象および脱線後の車両の運動を解明することは、安全性を一層高める上で役立ちます。これまで鉄道総研では、実物の新幹線台車を用いた地震時の車両挙動の解明に取り組んできました(図1)。この実台車加振実験は実物大の半車両モデル(台車が1つ、その上に車体の半分に相当するウエイトを載せた装置)を大型振動試験装置の振動テーブル上に設置して実施しました。これにより地震を受けた状態での車両の動的な挙動などを調べてきました。しかし、大きさや重量の制約などにより、実際の車両(長さ25m)を用いた実験や走行中の加振実験は困難です。そこで地震時や脱線した後の車両挙動に関する研究の一つとして模型車両を用いた実験に取り組んでいます。

## 模型車両を用いた実験

鉄道総研の所有する大型振動試験装置の振動テーブル(5m×7m)に実際の車両を乗せることは困難です。また

軌道に対し揺れを与え、走行中に脱線する実物車両の挙動を調べることはできません。これらの問題を取り扱うために、1/10縮尺の新幹線模型車両を製作しました(図2)。この模型の長さは2.45mで大型振動試験装置に充分設置できる大きさです。また、大きさを1/10にただけではなく、実物と模型の加速度が同一になるように、ばね要素(軸ばね、まくらばね)や減衰要素(軸ダンパ、左右動ダンパ、ヨーダンパ)、質量を選定し、表1に示す相似比に近づけました。ただし、車輪/レール間の接触力は相似則を満たすことができないことがわかっています。この模型車両は鉄道総研の設計・試作グループが設計、製作指導したものです。

## 脱線後の車両の挙動を調べる

走行中の車両が地震により万が一脱線した場合、その後停車に至るまでどのような挙動を示すのでしょうか。脱線した車両は、線路沿いの構造物や反対側の線路を走行する車両と支障することなく安全に停車することが望まれます。脱線した車輪はレール頭頂部から落ちた後、レールを支えるスラブ板やまくらぎの上を車輪フランジが衝突や接触あるいはジャンプを繰り返しながら走行します。この時レール

表1 実物車両と模型車両の相似比

	相似比
縮尺	1/10
時間	$1/\sqrt{10}$
加速度	1
ばね定数	1/100
減衰定数	$1/100\sqrt{10}$
質量	1/1000

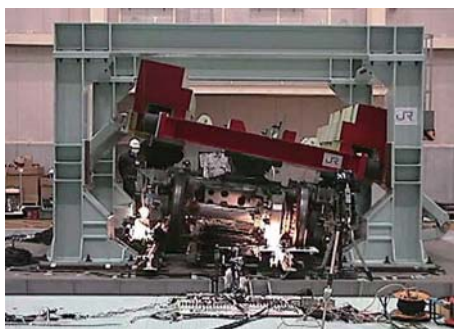


図1 実物大台車を用いた加振試験

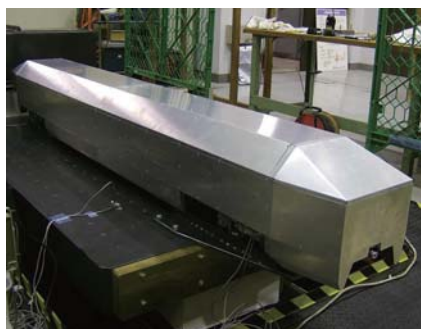
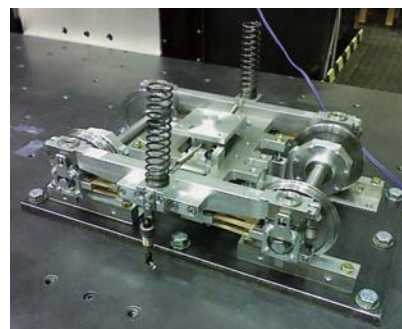


図2 模型車両および台車



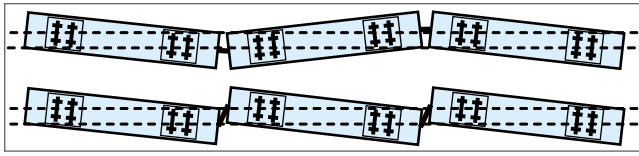
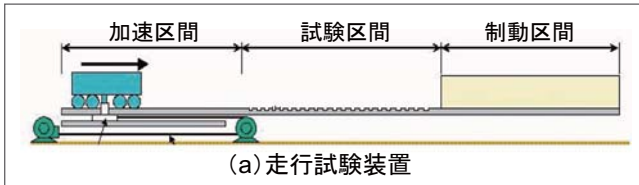


図3 編成車両の水平座屈



(a) 走行試験装置



(b) 試験区間を走行中の車両



(c) 幅の狭いまくらぎ

(d) 幅の広いまくらぎ

図4 試験装置および模型まくらぎ

ル上を走行する場合よりも局所的に大きな走行抵抗が加わるため、いくつかの車両からなる列車の編成全体で見ると、脱線した台車と脱線していない台車の中で前後力に差が生じ、図3に示すような編成車両の座屈現象により、車体が軌道から逸れる可能性が考えられます。このような挙動の検証に必要となる走行抵抗を測定するために、模型車両の走行実験を実施しました。

実験は図4に示す装置で行いました。模型車両は加速区間において予め巻き上げておいたゴムチューブにより引っ張られ、100km/h(実車換算で約320km/h)程度まで加速します。試験区間では、車両は有道床軌道のまくらぎを考慮して製作した鋼まくらぎの上を走行します。実軌道と車輪との接触状態の検討結果から、まくらぎ間にあるバラストと車輪フランジが接触する機会は少ないと考えられたので、模型軌道ではバラストは省略しました。試験区間の入口と出口における車両の走行速度を測定し、まくらぎ区間で減少した模型車両の運動エネルギーからまくらぎ上を走行する時の抵抗を求めます。試験区間のまくらぎ上を通過した時に減少するエネルギーは、模型車両の走行距離およ

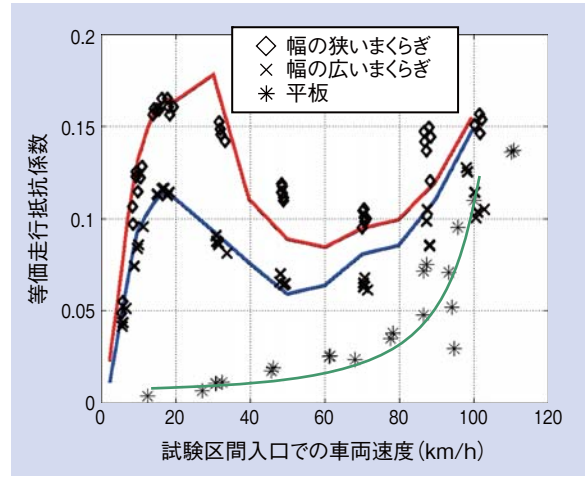


図5 等価走行抵抗係数

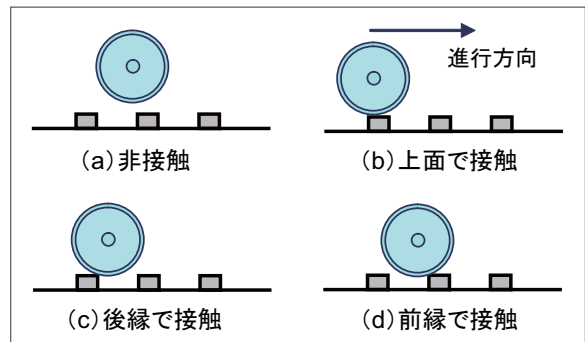


図6 車輪とまくらぎの接触状態の判別

び重力加速度で無次元化した等価走行抵抗係数により示します。まくらぎ間での車輪の落ち込みが抵抗に及ぼす影響を検証するために、図4に示す幅の狭いまくらぎと幅の広いまくらぎおよび平板の3種類について試験を行いました。

図5に得られた等価走行抵抗係数と速度の関係を示します。この抵抗係数の値は幅の狭いまくらぎ(◇)がもっとも大きく、幅の広いまくらぎ(×)、平板(\*)の順で小さくなっており、車輪の落ち込みが多いほど抵抗は大きいことがわかりました。平板の値を差し引いた分が、車輪がまくらぎと衝突したことによる抵抗とみなすことができます。幅の狭いまくらぎまたは広いまくらぎ上を走行する場合には、抵抗係数は速度20km/h(実車換算で約60km/h)で一度極大となり、その後60km/h(実車換算で約190km/h)までゆるやかに減少し、それを超えると再度増加することがわかりました。平板上を走行する場合の抵抗係数は速度70km/h以上で急激に増加しますが、この領域では車体に作用する空気抵抗などの影響が考えられます。

ここに示した抵抗係数を計算機上で取り扱うために(1)車輪とまくらぎが接触している状態(図6)、(2)車輪とまくらぎの接触力、(3)車輪と凹凸のあるまくらぎの衝突による接触抵抗以外の車体に作用する空気抵抗などの影響を考慮した、まくらぎ上走行を模擬するための数値解析モデ



図7 振動台上に設置した軌道上を走行する模型車両

ルを作成しました。図5の赤線及び青線がこのモデルで求めた抵抗係数で、概ね実験結果と一致しました。今回検討した数値解析モデルを参考に車両運動シミュレーションの深度化を行い、編成車両の横方向への座屈現象の検討を進める予定です。

### 走行中の車両の地震時の動きを調べる

これまでの地震などにより加振される車両の実験では、半車両モデルを想定した供試体を大型振動試験装置に設置して行いました。この場合、供試体は走行を模擬することはできません。また車体を可動枠で支持するために車両が大きくロール回転（前後軸まわりの回転）できず、また加振中の台車のヨー運動（鉛直軸まわりの回転）を正確に模擬することができません。これらの影響を把握するために、模型車両を走行させた状態で軌道を加振する実験を行いました。大型振動試験装置のテーブル上に模型軌道およびスロープを設け（図7）、模型車両を1.0m/s（実車換算で約11km/h）の速度で平坦な試験区間に進入させると同時に正弦波加振を行って脱線限界（脱線したときの加振加速度）を調べ、停車中に正弦波加振した場合の脱線限界との比較を行っています。走行中は、縦クリープ力（車輪／レール間の前後方向接線力）が生じるために、横クリープ力（車輪／レール間の横方向接線力）が停車中と比べ小さくなります。そのため、同一の加振に対して踏ん張りが効かなくなるために、横方向に動きやすい状態が出やすくなり、脱線限界が少し下がるものと考えられます。現在これらのことを確認するための試験を継続しています。

### 車輪がレールから離れる前後の車両の安全性を調べる

地震により軌道が左右に振動すると、レールから車輪に横力が働いて最終的に車輪が上昇して車両が脱線や転覆に至る場合があります。この場合の走行安全性を評価する指標として、車輪とレールの相対左右変位（車輪踏面中心とレール中心との距離）があります。地震動による脱線の判定には静止時の車輪の位置から±70mmを越えたときに脱線と判定しています。この指標では、車輪とレールの相

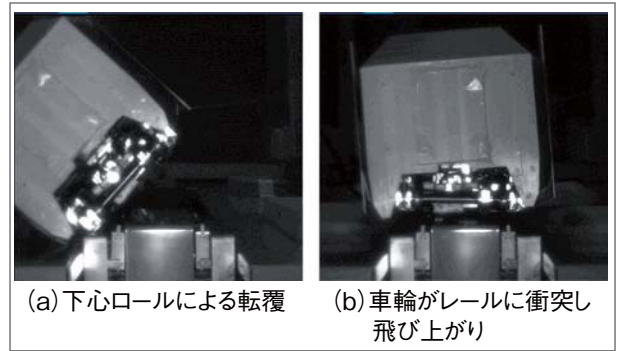


図8 加振時の脱線形態

対変位が70mm以内であれば、加振の衝撃によって車輪がレールと衝突して大きく飛び上がったとしても、横方向に大きく移動していなければ元に戻る可能性があるため、脱線していないものと評価しています。この車輪とレールの相対左右変位が、70mm以上となる時の加振加速度と加振振動数の関係を、地震時の走行安全限界線図と呼んでいます。安全限界の中でも車両が転覆する可能性があるのは、車体が下中心ロール振動（回転中心が車体の下部にある場合のロール振動）を起こす振動数で、安全限界より大きな加速度で加振を行った場合のみです。この時車両は、ロッキング振動（車体と一緒にあたかも四股を踏むがごとく車輪が左右交互にレールから離れては再びレール上に戻る状態を繰り返す振動）をして転覆に至ります（図8（a））。それ以外の加振条件では、車体の大きな左右振動は生じるものの転覆せず、加振された結果として車輪がレールから外れるような形態で脱線が生じます（図8（b））。

ところで、地震による車両脱線に関する問題と同様な車両の左右系の力学現象として、車両に横風が作用した場合の車両転覆があります。この現象では、風下側の車輪／レール接触点を中心に車両がロール回転し、風速を増すと風上

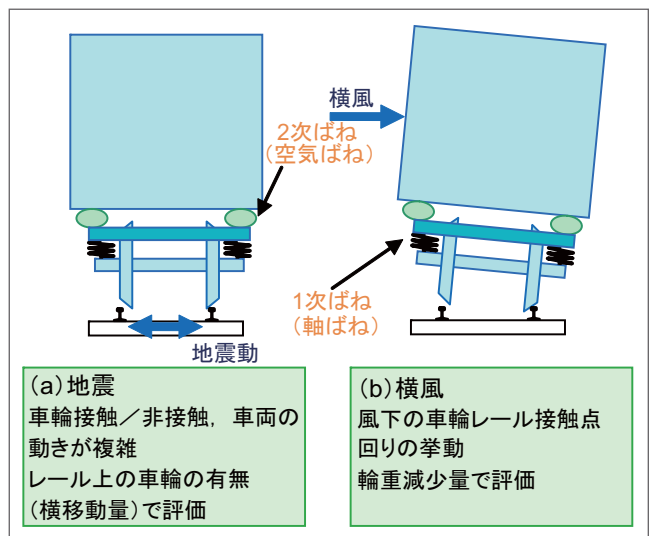


図9 地震と横風に関する車両の走行安全性評価

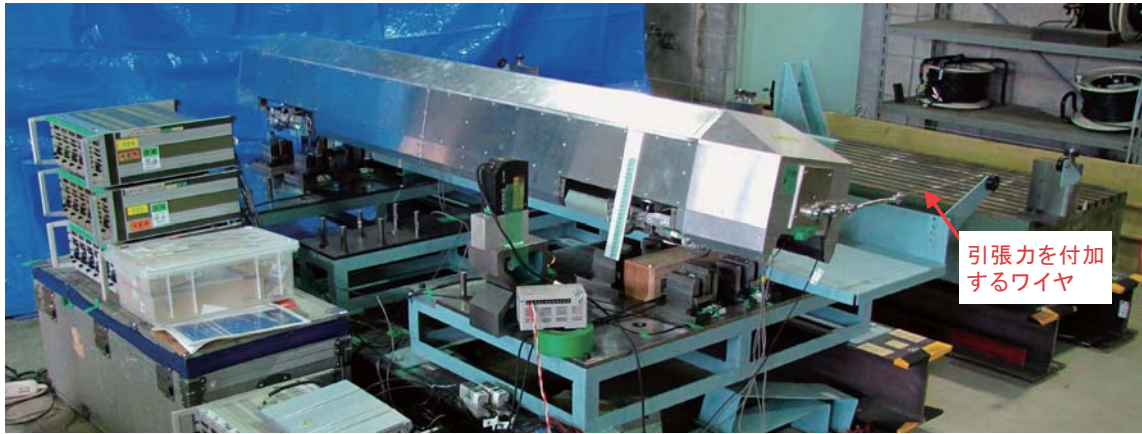


図10 模型車両転覆実験装置

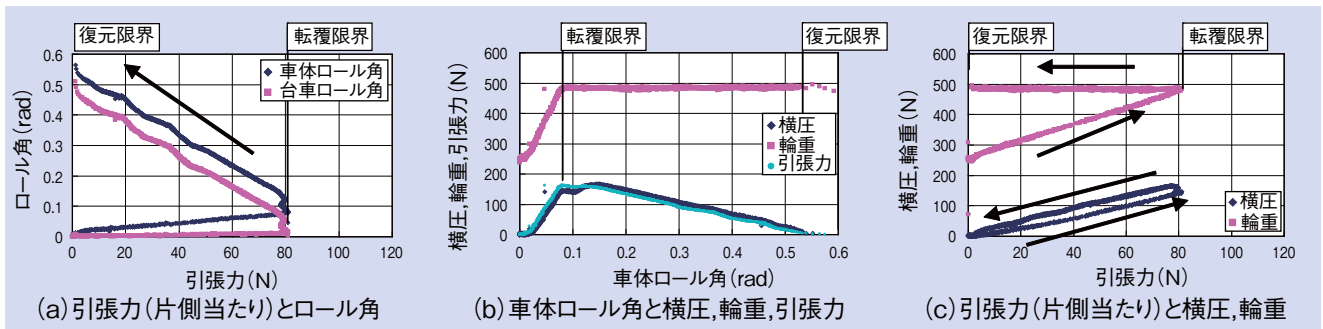


図11 静的転覆試験結果

側の輪重が徐々に減少し、その後車輪がレールから離れ、最後に車両は転覆に至ります。この場合の安全性は風上の輪重減少量を指標とし、輪重が0のときに転覆すると評価しています(図9)。地震と横風は異なる現象であり、地震では車輪の横移動量、横風では輪重減少量と、評価指標も異なりますが、左右力による車両の脱線現象とみれば車輪がレールから離れることを同じように扱えると考えられます。これら指標の限度値と実際に車両が脱線、転覆する瞬間までの間の差すなわち安全限度の余裕度を把握しておくことは、安全性を検討する上で有益です。

そこで、ここでは動的な検討を行う前段階として、車体に静的な横引張力を徐々に作用させ、引張力と姿勢の関係を調べることにしました。図10に転覆試験装置を示します。装置には模型車両を設置できるようにレールが設けられ、その下部にロードセルを埋め込み輪重横圧を測定できます。その他車体と台車のロール角および車体傾斜に必要な引張力を測定し、車両が転覆するまでの動きを調べました。

図11に示すように、車体を横に引っ張るにつれて車体は緩やかにロール回転し始めますが、台車はほとんどロール回転しません。ここからさらにワイヤを巻き上げていくと、引張力が徐々に小さくなり、車体ロール角も徐々に増加していきます。このとき台車および輪軸のロール角も同じだけ増加していくので、車輪は上昇し、台車および輪軸

は車体と相対変位することなく同じ姿勢を保ちながらロール回転していきます。車輪が上昇し始めるところが、輪重減少によって評価していた従来の意味での転覆限界になります。ロール回転が進むにつれて引張力は小さくなっていきますが、力を緩めると、まだ車体はレール上へ元の姿勢に戻ろうとします。引張力がほぼ無くなり車両が実際に自重だけにより転覆にいたる瞬間をここでは復元限界と言うことにします。

(c) では引張力と車体を引っ張る側の輪重、横圧(片側4車輪の合計値)の関係を示します。転覆限界では車輪に全ての自重が加わり、その後片側の車輪は浮くため、車体ロール角の変化に対応した変化が無くなります。車輪上昇後、横圧は引張力に対応して減少し、復元限界では引張力およびこれに見合う横圧が無くなり車両が転倒します。

## おわりに

地震のときに鉄道車両がどう動くかに迫るための模型車両を使用した取り組みを紹介しました。実物では充分に設定することのできない極端な条件についても、模型を用いれば具体的に現象を捉えることができます。引き続き模型実験や力学モデルによるシミュレーションなどを通じて、地震時の脱線や脱線後の車両挙動解明に取り組んでいきたいと思ひます。RRR