

新潟県中越沖地震時に脱線した車両の挙動解析

宮本 岳史* 石田 弘明 室野 剛隆 (鉄道総研)
飯島 仁 加藤 正道 (JR 東日本)

Dynamics Analysis for Derailment of Vehicle due to the Niigataken Chuetsuoki Earthquake
Takefumi Miyamoto*, Hiroaki Ishida, Yoshitaka Murono (Railway Technical Research Institute)
Hitoshi Iijima, Masamichi Katou, (East Japan Railway Company)

In July 2007 the Niigata-ken Chuetsuoki earthquake (magnitude $M=6.8$ on the Richter scale) hit Kashiwazaki city, a train derailed at stopped in Kashiwazaki station. We already developed vehicle dynamics simulation program(VDS) for vehicle behavior analysis in seismic motion. In this study, computer simulation was used to the observed seismic ground motion near the site of the derailment, the dynamic behavior of the vehicles. This paper shows investigation result that analyze vehicle motion during the earthquake.

キーワード：地震，脱線，転覆，鉄道，事故，シミュレーション，調査，車両，安全

(Keywords, earthquake, derailment, over turning, railway, accident, investigation, vehicle, safety)

1. はじめに

2007年7月16日10時13分頃に発生した新潟県中越沖地震($M=6.8$ 、震源深さ17km)により、JR 東日本越後線柏崎駅構内で停車中の車両が脱線した⁽¹⁾。著者らは、これまでに地震時の車両運動シミュレーションプログラム⁽²⁾を開発し、実台車加振実験⁽³⁾などを通して地震時の車両挙動に関する研究を継続的に実施している。2004年の新潟県中越地震時の新幹線脱線に際し、このときの車両挙動解析を行い、結果を報告している⁽⁴⁾。これらの技術を活用して、今回、新潟県柏崎駅構内で観測された地震波形をもとに、地震時の車両運動シミュレーション解析を行い、脱線に至る車両挙動を調査した。



図1 中越沖地震により柏崎駅構内での脱線(文献(1)より)

2. 地震と脱線の概要

〈2・1〉地震動 本地震の震源は脱線現場である柏崎駅から北北東へ約22kmで、柏崎市では震度6強を記録し、人的被害(死者13人、重軽傷1664人)、住家被害(全壊1049件、半壊4372件、一部損壊22052件)の被害があっ

た⁽⁵⁾。柏崎駅構内にはJR 東日本の地震計が設置されており、脱線現場からおおよそ50m離れた位置での地震動が記録された。これほどに脱線現場至近で解析に利用可能な地震動が記録されたのは、とても稀な事例である。地震動の加速度波計を図2に、加速度を積分して得た変位波形をリサーチで図3に示す。最大加速度300gal強、最大変位300mm超、ピーク周波数0.37Hzで、低い周波数の大きな変位の地震動であった。本解析では、地震動観測位置と脱線現場では同一の地震動であり、車両は全軸直下で同じ地震動を受けたものと考えて、解析を進める。

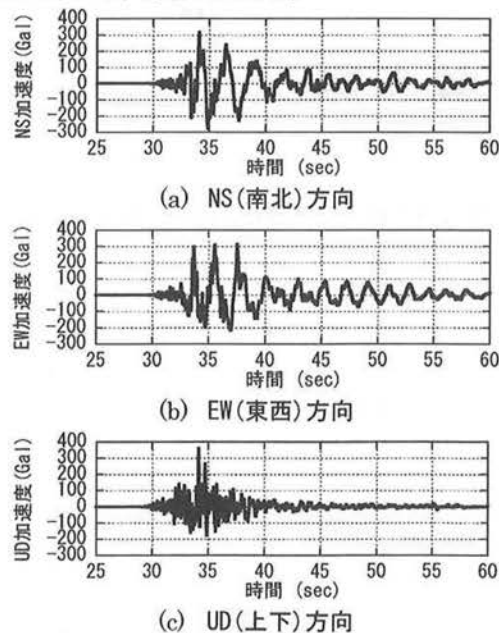
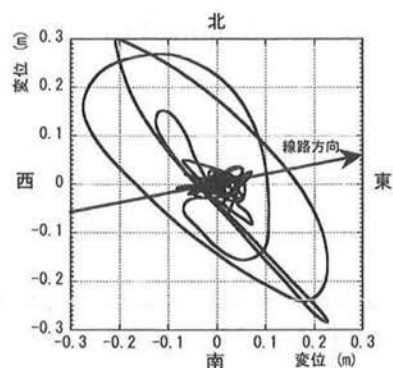
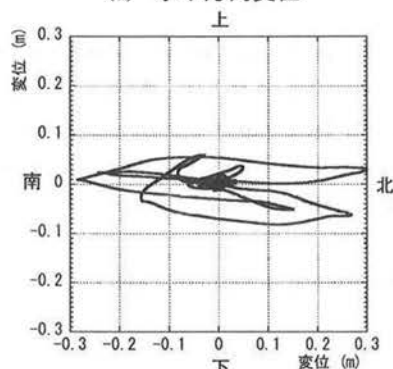


図2 柏崎駅構内での観測地震動加速度



(a) 水平方向変位



(b) 南北・上下方向変位

図3 観測地震動変位波形 (リサーチ)

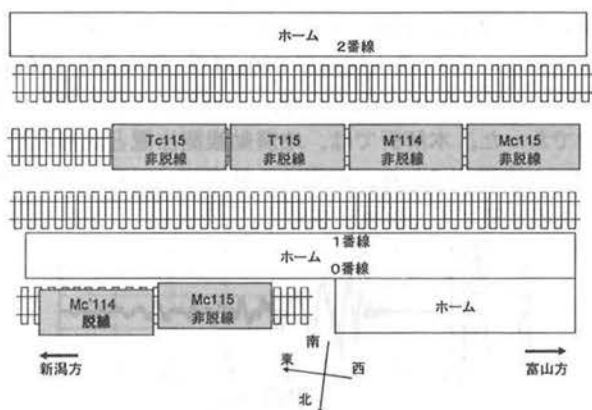


図4 地震時の柏崎駅構内の車両の位置

〈2・2〉脱線被害 地震発生時に柏崎駅構内には 115系電車の2編成6両(2両編成、留置4両編成)が停止していたが、脱線に至ったのは図4に示すように0番線ホーム停車中のうちの1両のみであった。乗員・乗客10名に負傷者はなかった。0番線プラットホーム縁端に車体との接触痕が見られたことから、地震動で揺れる車体はホームに接触したものと考えられる。地震後の車両は、図1の写真に見られるように転覆直前の状態で静止した。このとき片側の台車と下揺れまくらが車両全体を支えるようにして静止していた。以上のような事象から、車両が脱線するか、否かの応答振動を引き起こす性質を持った、きわどい地震動であったと考えられる。

3. シミュレーション概要

〈3・1〉シミュレーション(VDS) 地震時に大きく変位する車両の挙動を解析することを目的に開発した車両運動シミュレーションプログラム(VDS)を用いた。

〈3・2〉車両モデル 115系電車の車両モデルは、図5に示すように剛体として車体1個、上揺れまくら2個、下揺れまくら2個、台車枠2個、輪軸4本を各6自由度で定義し、これらの各剛体間をばねやダンパの結合要素で連結した。8個の各車輪を支えているレールを左右と上下方向の2自由度を加え、車両モデルの自由度は合計82自由度である。車体と上揺れ枕間については心皿中心位置におけるz軸周りのピン拘束、台車枠と下揺れまくら間については吊りリンクによる下揺れまくらのx軸周りの回転拘束を伴ったモデルとした。心皿と側受けについては摩擦モデルを、他の結合要素はばね・ダンパについては、ばねとダンパの並列・直列モデルあるいは、線形・非線形(折れ線)特性の結合力モデルなどで構成している。なお、脱線した車両(Mc114と記す)及び脱線しなかった車両(Mc115と記す)のモデルでは、車体質量がそれぞれ30.5t、27.4tと異なり、それぞれ独立の一車両モデルで解析を行い、連結状態は考慮していない。

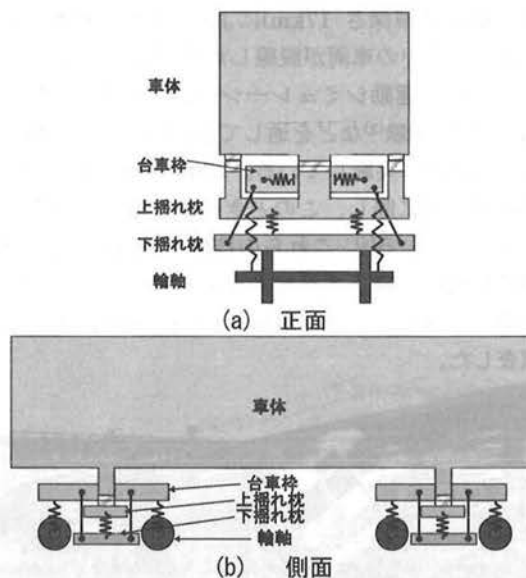
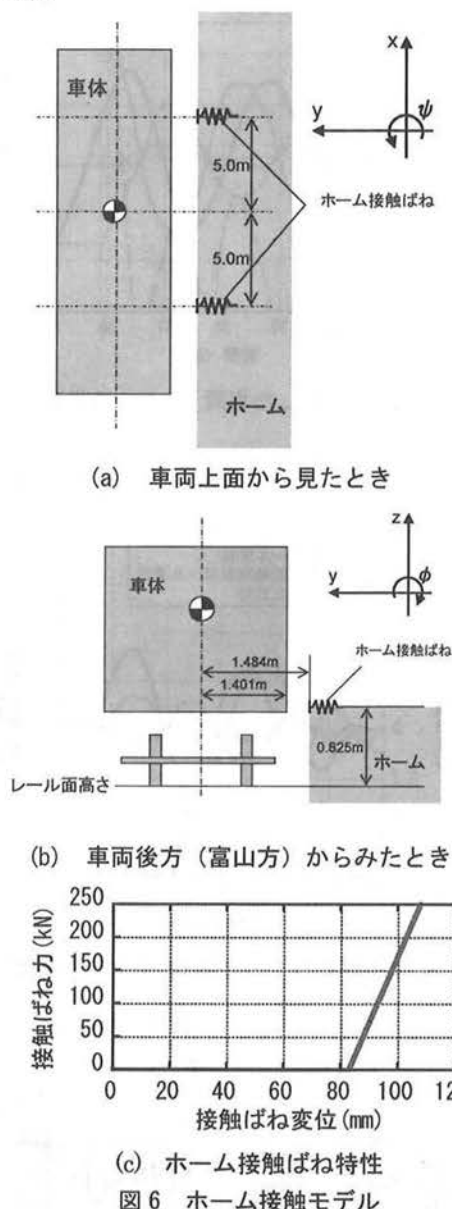


図5 115系電車シミュレーションモデル概念図

〈3・3〉ホーム接触モデル 車体側面とホーム角には接触痕が残されていた。地震の最中に、車体はホームに複数回接触し、この接触力が車両挙動に影響を及ぼした可能性がある。そこで、車体とホームとの接触状態を模擬するために、図6に示すようにホーム角と車体間にホーム接触ばねを車体の前後の側面に当たる位置に2つ配置した。ホーム角は地震変位に対し軌道と同じ動きをする。このホーム接触ばねは、車体側面とホーム間の間隔の遊間を持ち、水平方向変位に対し図6(c)内に示す1段折線特性で作用する接触ばねとした。実際の接触痕は、コンクリートのホーム角

と車体下部が接触しコンクリートが欠けて、車体の塗料が剥がれた程度で大きな凹みは見られなかった。コンクリートと車体の接触ばね定数は、単純に鉄同士の接触ばねと同じ値とした。



〈3・4〉解析条件と脱線の判定 115系電車モデルが勾配のない直線軌道上でホーム横に停止している際に、2.1節に示した実地震波の3方向変位をレール下に受けた場合についてシミュレーションを行った。

車輪とレールの相対左右変位が70mm以上になった場合（車輪左右変位70mm）に脱線と判定した。車輪左右変位70mmは車輪がレールから落ちる直前の位置を目安にし、完全に脱線する状態と考えられるが、この指標によれば車輪がレールから大きく跳び上がっても元に戻るような場合には脱線していないものと判定する。また、転覆に至るときに大きく車輪がレールから離れる挙動を確認することができる。

4. 脱線に至る車両挙動

実地震波を入力したときの115系車両の車両運動シミュレーション結果から車体一軌道相対左右変位（以下、車体相対左右変位と記す）、車体ロール変位、台車一輪軸相対ロール変位、1軸右車輪上昇量、ホーム接触力、地震左右変位についてM'e114の結果を図7に、Mc115の結果を図8に示した。左右の方向は、列車進行方向（新潟方）に向かったの左右を示す。ロール ϕ の方向は、図6(b)に示すように右回りが正を示す。

〈4・1〉脱線した車両 M'e114の車両運動シミュレーション結果（図7）から、地震波記録開始からの時間34～38秒にかけて、車体の右側がホームに2回接触した後、車体が左に傾き、右車輪が上昇して脱線したことが分かる。36秒台の2回目のホーム接触のあと、大きな負の車体ロール変位（ホームと反対の左側へ傾く）が発生し、そのとき台車と輪軸は一緒にロール（台車と輪軸の相対ロール変位がほぼ一定）して右車輪が上昇する。37秒以降、車体が左へロールし、右車輪が上昇している最中に地震変位が正（左）のピークに達して負（右）方向へ向かうため、さらに負の車体ロール変位が増大して輪軸を持ち上げ脱線した。なお、このときの脱線判定は右車輪が上昇することで、右車輪がレール相対左右変位70mmを超過した。このときの車両挙動を模式的に図9に示す。

〈4・2〉脱線しなかった車両との比較 図7と図8を比較すると、34.5秒付近の1回目のホーム接触ではMc115の方が負の車体相対左右変位が大きく、ホームに早く、かつ強く当たった。このときのホーム接触によりMc115の車体相対左右変位の負のピークと車体ロール変位の正の最大値はM'e114よりも小さくなり、タイミングの面でも車体相対左右変位と車体ロール変位は共にM'e114に比べて極大点を早く迎えて反転した。35～36秒にかけてはM'e114の方が車体ロール変位が大きく、車体と共に輪軸もロール変位して車輪上昇が大きくなり、その時間も長いる。そのため、M'e114の車体相対左右変位や車体ロール変位の地震動に対する応答倍率が大きくなっている。なお、最初にホームに当たるまでの挙動の違いは車体質量の差によるものと考えられる。

36秒台の2回目のホーム接触では、Mc115はM'e114に比べてホーム接触のタイミングが早いので、車体相対左右変位が抑えられ、車体相対左右変位と車体ロール変位の最大値がM'e114よりも小さくなったと考えられる。

M'e114の2回目のホーム接触では、36.5秒弱で地震動が負（右）の最大値にあるときにホームに当たりはじめ、車体相対左右変位とロール変位はMc115よりも大きく、ホーム接触力も大きくなった。このことでM'e114の場合には、37.0～37.5秒の車体相対左右変位が速く（勢いよく）正方向へ変化することとなり、37.5秒以降の負の車体ロール変位（左に傾き）を増大させたものと考えられる。また、37.6秒頃に車体ロール変位と共に車輪が上昇するとき、振動変

位が正 (左) から負方向 (右) へ反転するタイミングとなった。この振動変位反転のタイミングで、車体は慣性力によってさらに軌道に対して正方向 (左) へ相対変位しようとするため車体ロール変位は増大し、車輪が上昇し続けることで車輪/レール相対左右変位 70mm を超過した。

Mc115 の場合には Mc114 に比べて地震動変位に近い位相で車体相対左右変位が発生し、車体ロール変位は増大せずに、脱線には至らなかった。

〈4・3〉ホーム接触の影響 ホームが無い場合のシミュレーションを実行した結果は、Mc114 は脱線しないものの、Mc115 は脱線する結果となった。車両諸元中でいくつかの諸元については推定値を用いているが、軸箱守のすり板の摩擦によって生じる減衰力は不確実なもののひとつである。Mc115 について、軸ばね部の減衰係数を大きくしたときには、ホームが無い場合でも脱線しない結果となることが分かった。

ホーム接触の影響について見ると、Mc114 についてはホームに接触することによって車体のロール変位が大きくなり、脱線に至った。車体質量の違う Mc115 については、ホームに接触することによって脱線しなかった可能性が高いと考えられる。

5. まとめ

新潟県中越沖地震により越後線柏崎駅構内で脱線した車両と、そのホーム接触モデルを作成し、柏崎駅で観測された実地震波形を用いて、地震時の車両運動シミュレーションを実施した。その結果、当該列車は、地震計の記録開始からの時間 35 秒前後から周波数約 0.37Hz、最大変位 300mm の大きな左右振動を受け、ホームに 2 回接触したのち、ホーム側の車輪が大きく上昇し、車体が反対側へ傾いて脱線したものと考えられる。

本事例では、至近距離で地震波が計測されていたことから、精度の高い実地震波形の 3 方向加振による車両挙動シミュレーション解析を行うことが出来た。ここでは、脱線した車両と脱線しなかった同形式の車両が存在したため、これら車両挙動の差異が確認できるように解析結果に対して非常に高い精度を要求された。本検討を通じて、地震時の車両挙動シミュレーション解析と走行安全性評価に関する貴重な知見を得ることができた。

文 献

- (1) 航空・鉄道調査委員会：「東日本旅客鉄道株式会社越後線柏崎駅構内列車脱線事故」，鉄道事故調査報告書，RA2008-6 (2008 年)
- (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」，機論 C，Vol.64，No.626 pp.3928-3935 (1998)
- (3) 宮本岳史・松本信之・曾我部正道・下村隆行・西山幸夫・松尾雅樹：「大変位軌道振動による実物大鉄道車両の加振実験」，機論 C，Vol.71，No.706，pp.1849-1855 (2005)
- (4) 「新潟県中越地震新幹線脱線シミュレーション解析」，鉄道総研報告，特別第 52 号，(2008)
- (5) 平成 19 年(2007 年)新潟県中越沖地震(第 47 報)，消防庁，2007.11.27 発表

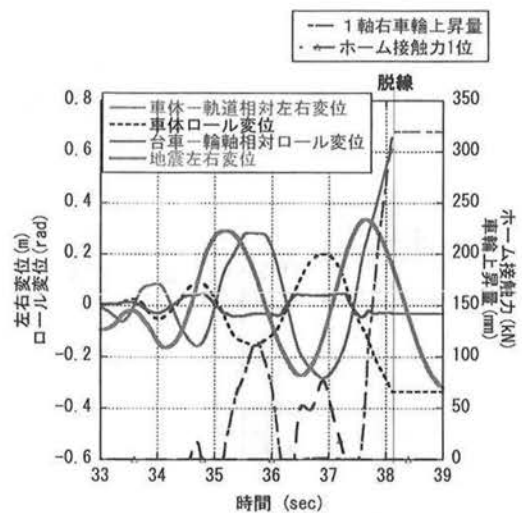


図 7 脱線した車両 Mc114 の挙動

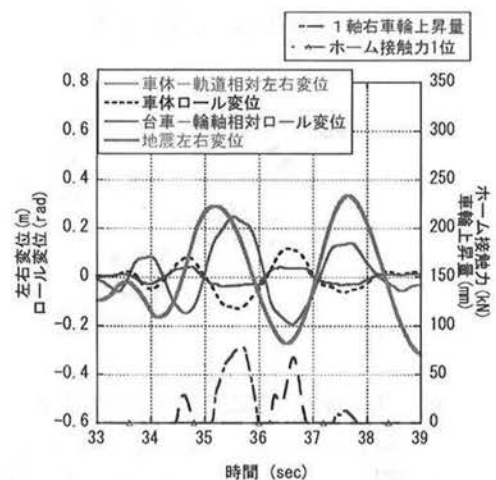


図 8 脱線しなかった車両 Mc115 の挙動

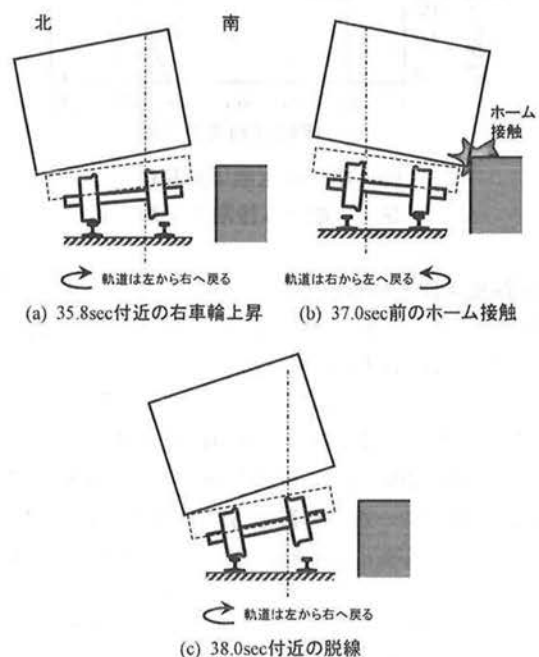


図 9 脱線する際の車両挙動(2 回目のホーム接触時前後)