

日本機械学会論文集 Transactions of the JSME (in Japanese)

地震時における鉄道車両の脱線可能性を地震波から推定する方法

飯田 浩平*1, 宮本 岳史*2, 川西 智浩*3

Method of estimating the probability of derailment during an earthquake using the seismic waveform

Kohei IIDA^{*1}, Takefumi MIYAMOTO^{*2} and Tomohiro KAWANISHI^{*3}

*1 Railway Dynamics Division, Railway Technical Research Institute 2-8-38 Hikari-cho, Kokubunji-shi, Tokyo 185-8540, Japan *2 Program in Mechanical Engineering, Meisei University

2-1-1 Hodokubo, Hino-shi, Tokyo 191-8506, Japan

*3 Center for Railway Earthquake Engineering Research, Railway Technical Research Institute

2-8-38 Hikari-cho, Kokubunji-shi, Tokyo 185-8540, Japan

Received: 25 August 2018; Revised: 7 February 2019; Accepted: 14 May 2019

Abstract

This paper describes a methodology for probability estimation of derailment occurrence due to an earthquake by the use of seismic waveforms. Under the method proposed, an index for probability estimation of derailment is calculated using the estimated or measured seismic waveform of a track and the three types of running safety limit of the target railway vehicle to sinusoidal vibrations of tracks. The index is calibrated using dynamic simulations of the vehicle behavior with various seismic vibrations in order to obtain the relation between the value of the index and the derailment probability. The dynamic simulations can be executed previously. Therefore, when the seismic vibration of the track is obtained, the time to estimate probability of derailment using the method proposed is much shorter than using dynamic simulation of vehicle behavior. In the case of the Sinkansen train dealt with in the design standard of railway structures, if the calculated index is equal to 10, it means that the probability of derailment occurrence is about 50 %. If the index is larger than 30, the train running on the seismically vibrating track certainly derails due to the earthquake. The method is applicable to the following cases; (a) Quick extraction of sections with high probability of derailment occurrence from the whole train line, and support for the restoration of derailments in the event of a large earthquake. (b) Quantitative check of the effect of seismic countermeasures taken of the railway vehicles, tracks and structures from the standpoint of derailment occurrence probability.

Keywords : Railway vehicle, Earthquake, Running safety, Seismic vibration of track, Probability of derailment, Evaluation of a whole rail line



1995年に発生した兵庫県南部地震の際,多数の鉄道車両が地震の揺れにより脱線したことを受け,地震時に振動する軌道上を走行する車両の挙動を解析するシミュレーションプログラム(VDS: Vehicle Dynamics Simulator, 以後 VDS と記す)が開発され(宮本他,1998),大型振動試験装置による実台車加振実験によりその妥当性が確認 されている(宮本他,2005). VDS を用いて正弦波状に振動する軌道上を走行する車両の挙動解析を実施し正弦波 加振に対する安全限界線図を求めることで,車両が有する基本的な地震時の脱線に対する耐性を把握することが でき,これまで地震時走行安全性向上に関わる研究開発に活用されてきた(宮本,石田,2007,鈴木他,2011).また,複数の地表面地震動に対して構造物(高架橋や橋梁等)の固有周期を広範に振って求めた構造物天端応答波 (ランダム波,以後地表面地震動も含めて軌道面振動と記す)を入力とした車両挙動解析結果は,鉄道構造物等

No.18-00339 [DOI:10.1299/transjsme.18-00339], J-STAGE Advance Publication date : 22 May, 2019

^{*1} 正員,鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部(〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

^{*2} 正員,明星大学 理工学部 (〒191-8506 東京都日野市程久保 2-1-1)

^{*3} 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター

E-mail of corresponding author: iida.kohei.89@rtri.or.jp

設計標準・同解説(変位制限)に活用されている(鉄道総研編,2006). さらに,2004年の新潟県中越地震,2011年の東北地方太平洋沖地震および2016年の熊本地震における新幹線脱線事故に対して,脱線メカニズム解明のための再現シミュレーションにも活用されている(航空・鉄道事故調査委員会,2007,運輸安全委員会,2013,2017). その際,精緻な車両挙動解析を行うために,地震時を想定した車体・台車間構成要素の特性同定法の開発(飯田他, 2011)や,地震時の実態に即した軌道面振動が入力できるような機能向上(飯田他,2014)が逐次実施されている.

このように VDS を用いた地震時車両挙動解析は主に以下の2つのことを目的として実施されている.

(a) 地震時の車両走行安全性評価

(b) 地震時脱線事故の再現シミュレーション

このうち(a)の走行安全性評価に関しては、VDS を用いた地震時車両挙動解析により求めた車輪・レールの 相対左右変位から「脱線・非脱線」を判定し、それを以て安全性を評価している.このため、例えばある路線に おける地震時走行安全性弱点箇所抽出など、異なる軌道面振動条件での安全性の比較に際しては、軌道面振動変 位に倍率をかけて車両挙動解析に入力し、脱線しない限界の倍率を求め余裕度で比較することや、補助的な指標 値として車輪上昇量(レール頭頂面に対する車輪踏面中心の相対的な上下変位)の最大値を比較することを実施 している.しかしながら、VDS は時刻歴解析であり、評価対象地震動の継続時間にもよるが1解析あたり数分~ 十数分の時間を要し、余裕度の比較については対象とする軌道面振動条件数が限られる.また、車輪上昇量最大 値の比較に関しては、軌道面振動の卓越周波数が低い場合には車輪上昇量が100mm を大きく超えないと脱線し ない場合がある.一方、卓越周波数が高い場合には車輪フランジ高さ(約30mm)をやや上回る程度の車輪上昇 量で脱線に至る場合がある.このように車輪上昇量最大値と脱線に対する安全性の余裕度に明確な相関が無いた め、あくまでも参考値としての扱いとしている.

一方,構造物側の視点から,評価対象路線を設定したときの地震時走行安全性弱点箇所抽出に対して,予め解 析的に求めておいた被害推定曲線(ノモグラム)を用いて簡易に脱線危険度を推定する方法が提案されている(室 野他,2010).この手法では,想定地震の地表面地震動の最大加速度・最大速度,構造物の降伏震度・降伏周期(原 点と降伏点を結ぶ割線剛性に対応した周期,等価固有周期ともいう),および脱線限界速度(車両が脱線する下限 の左右方向軌道面振動速度)のみを用い,構造物天端応答波が正弦波に近いと仮定した上で,概略的な脱線判定 を実施している.

さらに,推定された評価対象軌道面振動波形と予め求めておいた評価対象車両の正弦波加振に対する安全限界 線図から、その組み合わせにおける脱線に対する安全性を評価する指標値(以後、地震時走行安全性評価指標値 と記す)を得る方法が提案された(宮本他, 2007). この手法により, 1995 年兵庫県南部地震および 1993 年釧路沖 地震の観測地震動を用いて地震時走行安全性評価指標値と VDS による車両挙動解析結果との相関について調査 され、脱線・非脱線に関して、地震時走行安全性評価指標値が評価対象軌道面振動波形の最大加速度、最大速度 および最大変位よりも高い相関となることが確認された.また,2004 年新潟県中越地震における新幹線の脱線を 対象に妥当性の検証も行われた(宮本, 2009). この脱線可能性推定法は、地表面地震動から構造物の応答解析によ り得られた軌道面振動波形を用いることから、応答解析を実施しない前述のノモグラムを用いる推定法と、軌道 面振動波形を入力とした VDS による車両挙動解析を行う方法との中間に位置する推定法と考えることができる. ここでの構造物の応答解析は1自由度モデルにより簡易に行う方法であり,数十自由度モデルの車両挙動解析に 要する時間の方が構造物の応答解析に要する時間よりも長いため、軌道面振動波形と安全限界線図から脱線可能 性を推定する方法は、車両挙動解析を実施する方法に比べ大幅に短い時間で脱線可能性を推定することができる. なお,地震時走行安全性評価指標値は軌道面振動波形に応じて0以上の値を連続的に取ることから,脱線に対す る危険度を連続値で表しているといえる.しかしながら、この脱線可能性推定法については前述の3種の地震動 による軌道面振動に対して検討されたのみであり、あらゆる軌道面振動に対して汎用的に適用できるかの検討は 行われていない.

上記を鑑み,ここでは評価対象軌道面振動波形と評価対象車両の正弦波加振に対する安全限界線図から脱線可 能性を推定する指標値を得る方法に関して,より広範な地震動を用いて車両挙動解析結果との相関を調べるとと もに,指標値の算出法についても深度化した検討を行い,指標値と脱線発生確率との相関を高めることを目的と した.これにより,想定地震に対して路線全域の多地点における軌道面振動を推定し,脱線発生確率を評価する とともに,それに基づいた乗客避難・誘導計画の作成を支援することができる.また,地震発生時には路線上の 地点ごとに脱線可能性の高い箇所を抽出することで,列車乗務員と連絡が取れない状況に陥った列車に対して, 脱線可能性を早急に判断し,脱線復旧を支援することができる.さらに,車両,軌道および構造物への地震対策 施工に関しては,その効果を地震時の脱線発生確率の面から定量的に評価することができる.

本論文の構成は次のとおりである.2章「地震時走行安全性評価指標値算出法」では、地震時車両挙動解析に おける脱線判定基準および正弦波加振に対する安全限界線図について概説し、軌道面振動波形と評価対象車両の 正弦波加振に対する安全限界線図から脱線発生確率を推定する指標の基となる地震時走行安全性評価指標値の算 出法について述べる.3章「地震時走行安全性評価指標値と脱線発生との相関に関する考察」では、様々な地表 面地震動・構造物条件から算出された軌道面振動に対して、VDSによる車両挙動解析結果に基づき、複数の算出 法から得られた地震時走行安全性評価指標値との脱線発生との相関について考察する.4章「脱線可能性推定指 標値の提案」では、評価対象軌道面振動から実際に評価対象車両の脱線発生確率を求めることを想定し、複数の 地震時走行安全性評価指標値から地震時の脱線可能性を推定する指標値(以後、脱線可能性推定指標値と記す) を得る方法について考察する.5章「結言」では、得られた結論をまとめる.なお、VDSによる地震時の車両挙 動解析の詳細については既報(宮本他、1998)を参照されたい.

2. 地震時走行安全性の評価

2・1 地震時車両挙動解析における脱線判定基準

一般に鉄道車両の走行安全性の判定基準としては、脱線係数、輪重減少率、輪重、横圧などの車輪・レール間 作用力をもとにした指標値が用いられている(鉄道総研編, 1993).しかし、地震時に車両が脱線・転覆に至るよう な限界に近い状態では、車輪がレールから離れて、再びレール上に戻る場合もあるため、車輪・レール間作用力 を用いた従来の指標で走行安全限界を評価することは適当でない.そこで、地震時車両挙動解析においては、車 輪・レール相対左右変位(車輪踏面中心とレール頭頂面中心との左右方向の距離)により脱線の有無を判定する こととし、この変位が静止時の車輪の中正位置から±70 mm に達したときに脱線と判定し、以降の計算を打ち切 っている(宮本他, 1998).相対左右変位±70 mm のときの輪軸とレールの位置関係の概略図を図1に示す.図1 (a)は車輪フランジがレール頭頂面上に乗っており、車輪がレールから落下する直前の状態で、乗り上がり脱線 の際にも見られる位置関係である.一方、図1 (b)は片側の車輪を支点として、反対側の車輪が弧を描くように 上昇している状態で、横風による車両転覆の際にも見られる位置関係である.地震時では、比較的低い周波数(お よそ 0.8Hz 以下の周波数領域)で軌道が振動している時に図1 (b)の状態になる場合がある.これまで解析的に 得た知見によれば、図1 (b)の状態になった後、車両が転覆せずに正規の走行状態に復位することはまれである ため、車輪・レール相対左右変位±70 mm をしきい値としても実用上問題ない.なお、図1 (b)の状態における 上昇している車輪の踏面中心最下端のレール頭頂面からの上昇量は、狭軌(軌間 1067 mm)の場合はおよそ 330 mm、標準軌(軌間 1435mm)の場合はおよそ 390mm である.ここでは図1 (a)および図1 (b)に示した状態の



Fig. 1 The schematic drawing of the wheelset position on the track when the lateral displacement of the wheel reaches the threshold of derailment. The initial position of the wheelset is drawn by dashed lines. (a) Situation where the left and/or right wheel of the wheelset reaches the threshold in cases where the roll angle of the wheelset and the amount of the wheel lift are small. (b) Situation where the lifted wheel reaches the threshold in cases where the roll angle of the wheelset and the amount of the wheel lift are large, as is observed at the time of a rollover.

どちらも「脱線」と整理し、特に両者は区別しない.以後、特に断りなく「脱線」と記した場合は、上記の脱線 判定条件に達した状態を表す.

2・2 正弦波加振に対する安全限界線図

一般的な正弦波加振に対する安全限界線図は,軌道の加振周波数を横軸に,左右方向の加振振幅を縦軸にとり, 0.3 Hz から 3.0 Hz までの各加振周波数毎に,加振振幅を 5mm 単位で大きくしながら正弦波 5 波の加振に対する 直線区間を走行する1車両モデルの車両運動シミュレーションを繰り返し実行して,前節で示した脱線判定基準

「車輪・レール相対左右変位±70 mm」において脱線と判定を受ける直前の振動振幅をプロットしたものである. 正弦波加振に対する安全限界線図は、車両が有する地震時脱線に対する耐性の基本的な特性を示しており、線図 が上にある(安全限界振幅が大きい)ほど地震時脱線に対する耐性が高いことを意味する.また、線図の形状か ら脱線しやすい周波数帯域等を知ることができる.なお、加振波数を5波より増やしても線図への影響はほとん どないことを確認している(宮本他、1998).

2·3 地震時走行安全性評価指標値算出法

評価対象軌道面振動の波形と評価対象車両の正弦波加振に対する安全限界線図との比較から、その軌道面振動 と車両の組み合わせにおける地震時走行安全性評価指標値を算出するフローを図2に示す.図2に示すように、 評価対象車両の正弦波加振に対する安全限界線図の算出は、評価対象軌道面振動の推定および半波分解と独立に 実施することができる.図2中の各項目の詳細を以下に示す.なお、ここでは従来の算出法(宮本他、2007)に基 づき、それを深度化させ脱線発生確率との相関を高めるために検討する算出法について述べる.



Fig.2 Flowchart of the calculation method of the index for running safety during an earthquake.

2・3・1 評価対象車両の地震時走行安全性に関する3種の限界線図の算出

評価対象車両に対して,地震時走行安全性に関わる以下の3種の限界線図を求める.

(a) 正弦波 5 波を入力した際に脱線する限界線図

2.2 節で述べた一般的な正弦波加振に対する安全限界線図である.

(b) 正弦波1波を入力した際に脱線する限界線図

著大な1波による脱線を想定した安全限界線図である.

(c) 正弦波 5 波を入力した際に車輪上昇量最大値が 10 mm になる限界線図 脱線はしないものの車輪がレールから離れる、もしくは車輪フランジ直線部がレールゲージューナに接触 し乗り上がり開始状態となる限界線図である.

また,加振振幅の分解能を高めるため振幅の刻みは1mmとした.鉄道構造物等設計標準・同解説(変位制限) における地震時走行安全性解析で扱っている新幹線車両に対して求めた上記3つの安全限界線図を図3に示す.



Fig.3 The running safety limit of Shinkansen train to sinusoidal track oscillation. The calculation condition is as follows: (1) Running speed is 260 km/h. (2) The track is a straight line without irregularity.

2・3・2 評価対象軌道面振動の半波振動成分分解

評価対象軌道面振動の加速度時間波形に対し,遮断周波数 0.15Hz のハイパスフィルタで波形整形した後,積分により速度波形,変位波形を得る.波形整形された加速度波形,速度波形,変位波形において,図4に示すように,それぞれがゼロとなる時刻に着目し波形を半波に分解する.これらにより,以下の5種類の半波振動成分分解が考えられる.

(a) 加速度ゼロで分割し、加速度振幅 Aai、周期 Tai に着目する.

(b) 加速度ゼロで分割し、速度振幅 Aavi, 周期 Tai に着目する.

- (c) 速度ゼロで分割し, 速度振幅 Avi, 周期 Tvi に着目する.
- (d) 速度ゼロで分割し、変位振幅 Avdi, 周期 Tvj に着目する.
- (e) 変位ゼロで分割し,変位振幅 A_{dk},周期 T_{dk}に着目する.

ここで添え字の i, j, k は振動成分の番号を表す.また,従来の算出法(宮本他, 2007)では変位波形における極 大値および極小値で波形を分割して指標値を算出しており,上記(d)に相当する.

2・3・3 地震時走行安全性評価指標値の算出

2.3.2 項で得られた 5 種類の半波振動成分について, 2.3.2 項(e)のケースを例にとり,評価対象軌道面振動の k 番目の半波振動成分と評価対象車両の正弦波加振に対する限界線図から,半波振動成分ごとの脱線に対する危険度を示す値(以後,安全性評価因数と記す)を以下の手順で算出する.その他のケースも同様の手順で算出する.

(1) 周期 T_{dk}から半波振動成分の加振周波数 f_{dk}を求める

$$f_{\rm dk} = \frac{1}{T_{\rm dk}} \tag{1}$$

(2) 2.3.1 項で示した限界線図から加振周波数 fak における限界振幅を隣接周波数における限界振幅から線形補間で求める.

$$D_{d1w}(f_{dk}) = \frac{(f_{H} - f_{dk}) \cdot D_{d1w}(f_{L}) + (f_{dk} - f_{L}) \cdot D_{d1w}(f_{H})}{f_{H} - f_{L}}$$

[DOI: 10.1299/transjsme.18-00339]

(2)



Fig.4 The methodology for dividing the seismic waveform into half-waviness components. The red lines indicate the waviness components of acceleration and velocity divided at an interval of the wavelength of acceleration T_{ai} , whose amplitude are A_{ai} and A_{avi} , respectively. The green lines indicate the waviness components of velocity and displacement divided at an interval of the wavelength of velocity T_{vj} , whose amplitude are A_{vj} and A_{vdj} , respectively. The blue line indicates the waviness component of displacement divided at an interval of the wavelength of displacement T_{dk} , whose amplitude is A_{dk} . The subscript i, j and k indicate the numbers of the waviness components.

$$D_{d5w}(f_{dk}) = \frac{(f_{H} - f_{dk}) \cdot D_{d5w}(f_{L}) + (f_{dk} - f_{L}) \cdot D_{d5w}(f_{H})}{f_{H} - f_{L}}$$
(3)

$$D_{d10mm}(f_{dk}) = \frac{(f_{H} - f_{dk}) \cdot D_{d10mm}(f_{L}) + (f_{dk} - f_{L}) \cdot D_{d10mm}(f_{H})}{f_{H} - f_{L}}$$
(4)

ここで, D_{dlw} : 正弦波 1 波で脱線する限界の加振振幅, D_{dsw} : 正弦波 5 波で脱線する限界の加振振幅, D_{dl0mm} : 正弦波 5 波で車輪上昇量 10mm となる限界の加振振幅, f_{H} , f_{L} : 加振周波数 f_{dk} の直近高位・低位の限界振幅 データが得られている周波数である.

(3) 半波振動成分の加振振幅 Adk と限界振幅 Ddiw, Ddsw, Ddi0mm から次式により安全性評価因数Adk を求める.

$$A_{dk} \ge D_{d1w}(f_{dk}) \mathcal{O} \succeq \stackrel{*}{\ge} \lambda_{dk} = 5 \frac{A_{dk}}{D_{d1w}(f_{dk})}$$
(5)

 $D_{d1w}(f_{dk}) > A_{dk} \ge D_{d5w}(f_{dk}) \mathcal{O} \succeq \exists$

$$\lambda_{dk} = 1 + \frac{4}{D_{d1w}(f_{dk}) - D_{d5w}(f_{dk})} \left(A_{dk} - D_{d5w}(f_{dk}) \right)$$
(6)

 $D_{\rm d5w}(f_{\rm di}) > A_{\rm dk} \ge D_{\rm d10mm}(f_{\rm dk}) \mathcal{O} \succeq \mathring{t}$

$$\lambda_{dk} = \frac{A_{dk} - D_{d10mm}(f_{dk})}{D_{d5w}(f_{dk}) - D_{d10mm}(f_{dk})}$$
(7)

 $D_{d10mm}(f_{dk}) > A_{dk} \mathcal{O} \geq \delta$

$$\lambda_{\rm dk} = 0$$

る.

また、fak が安全限界線図を求めている加振周波数 0.3Hz~3.0Hz の範囲を逸脱している場合にはAak = 0 とす

(5) ~ (8) 式における係数は以下の観点で設定した.

- ・半波振動成分の振幅 Aak が、正弦波 5 波の加振で車輪上昇量 10mm に達する限界の振幅 Ddiomm よりも小さい 場合は、その波が5波連続しても非脱線であるため、安全性評価因数Aukは0とする.
- ・半波振動成分の振幅 Aak が、従来の正弦波加振に対する安全限界線図を求める条件である正弦波 5 波の加振 で脱線する限界の振幅 Ddsw と等しい場合を基準とし、安全性評価因数Aukを1とする.
- ・半波振動成分の振幅Aakが,正弦波1波の加振で脱線する限界の振幅Datwと等しい場合は,前項の振幅に対 し脱線に対する危険度が5倍であるとみなし、安全性評価因数2はを5とする.
- ・半波振動成分の振幅Aakが、上で示した振幅の間の値である場合は線形補間で安全性評価因数Aakを求め、正 弦波1波の加振で脱線する限界の振幅 Ddiwよりも大きい場合は、その振幅に対する比例倍で安全性評価因 数λωを求める.

2.3.1 項で示した限界線図は最大5波の正弦波加振に対する限界振幅を示していることから,評価対象の軌道面 振動において,次式に示すように連続する 10の半波振動成分に対する安全性評価因数Aukの和の最大値を求める ことで、変位ゼロで分割し変位振幅から求めた地震時走行安全性評価指標値Aaを得る.

$$\Lambda_{d} = \max_{1 \le k \le n-9} \sum_{i=k}^{k+9} \lambda_{di}$$
(9)

ここでnは評価対象軌道面振動における半波振動成分総数である.

同様にして、加速度ゼロで分割し加速度振幅から求めたAa,加速度ゼロで分割し速度振幅から求めたAay,速度 ゼロで分割し速度振幅から求めたA,,速度ゼロで分割し変位振幅から求めたA,dが得られる.なお,図3に示した 変位の振幅で整理した限界線図から縦軸を速度、加速度に換算した限界線図を図5に示す。半波ごとに上式で示 した安全性評価因数を算出しその和を求めることから、正弦波5波で脱線する限界の加振であった場合(図2お よび図 5 における黒線上の加振条件)は安全性評価因数 1 の半波振動成分が 10 あるため地震時走行安全性評価 指標値は1×10=10となる.一方,正弦波1波で脱線する限界の加振であった場合(図2および図5における赤



Fig.5 The running safety limit of Shinkansen trains to sinusoidal track oscillation, indicated by (a) velocity calculated from $2\pi f A_d$, and (b) acceleration calculated from $(2\pi f)^2 A_d$, where f is oscillation frequency and A_d is the limit oscillating amplitude shown in Fig.3.

7

(8)

線上の加振条件)は安全性評価因数5の半波振動成分が2あるため地震時走行安全性評価指標値は5×2=10となり,正弦波5波で脱線する限界の場合と同値となる.

地震時走行安全性評価指標値と脱線発生との相関に関する考察

本章では、様々な地表面地震動に対する広範にパラメータを振った構造物応答解析で得られた軌道面振動を入 力とした1車両モデルを用いた車両挙動解析結果を用いて、2章で述べた地震時走行安全性評価指標値と脱線発 生との相関について考察する.

3·1 解析条件

3・1・1 車両および軌道

2 章で示した正弦波加振に対する安全限界線図を求めた条件と同条件とした. すなわち,車両については鉄道 構造物等設計標準・同解説(変位制限)で扱っている新幹線車両(1車両モデル),走行速度 260km/h,定員乗車 条件とした.また,軌道については軌道変位(軌道不整)のない直線の直結系軌道とした.以後,特に断りがな れば車両および軌道についてはこの条件とする.

3・1・2 地震時走行安全性評価指標値と脱線発生との相関を求めるための軌道面振動

鉄道構造物等設計標準・同解説(変位制限)で用いられている地表面地震動11種(表1,一部は鉄道構造物等 設計標準・同解説(耐震設計)(鉄道総研編,2012)に基づき修正)を,最大加速度が1m/s²(=100 gal)になるよ うに振幅調整した上で,以下に示す構造物パラメータを振った線路直角方向の1自由度構造物応答解析の入力と し,得られた構造物天端の応答を軌道面振動とした.すなわち,軌道面振動は11×25=275種類となる.なお,本 論文では基本的に周波数を用いて記述するが,構造物の諸元表記については一般的に用いられている周期(周波 数の逆数)で記述する.

・構造物固有周期: 0.1~0.5 秒および 1.0~2.0 秒…0.1 秒刻み, 0.5~1.0 秒…0.05 秒刻み, 計 25 段階

構造物減衰:5%

さらに、上記 275 種類の軌道面振動を入力とした車両挙動解析を実施する際、軌道面振動振幅を 0.05 倍刻みで 調整し、車両が脱線する最小の振幅の軌道面振動とした. つまり、地震時走行安全性評価指標値と脱線発生との 相関を求めるための軌道面振動は地表面地震動において 0.05 m/s² (= 5 gal)刻みで車両が脱線する最小の振幅に 調整された軌道面振動であるといえる.

No.	Name of seismic waveform	Remarks (Name of earthquake etc.)				
1	Kushiro Local Meteorological Observatory NS	The Kushing Oly Earthquake 1002				
2	Kushiro Local Meteorological Observatory EW	The Kushiro-Oki Earinquake, 1995				
3	Urakawa Earthquake Observatory NS	The Heldreide Tehe Oki Farthewake 1004				
4	Urakawa Earthquake Observatory EW	The Hokkaldo-Tono-Oki Earinquake, 1994				
5	Kobe Marine Meteorological Observatory NS	The 1005 Southern Hyperso Disfecture Forthquake				
6	Kobe Marine Meteorological Observatory EW	The 1995 Soumern Hyogo Prefecture Earthquake				
7	Taichung TCU068 NS	The 1999 Chi-Chi Earthquake				
8	Level 1 earthquake ground motion (G3 ground)	Design Standard for Railway Structures (Seismic				
9	Level 1 earthquake ground motion (G5 ground)	Design) in 2012 (same as in 1999)				
10	Level 2 earthquake ground motion spectrum II (G3 ground)	Design Standard for Railway Structures (Seismic				
11	Level 2 earthquake ground motion spectrum II (G5 ground)	Design) in 2012				

Table 1 Seismic waveforms used for running safety analysis of railway vehicles during earthquakes.

3·2 地震時走行安全性評価指標值算出結果

3.1 節で示した地震時走行安全性評価指標値と脱線発生との相関を求めるための軌道面振動の波形に対して, 2.3 節で示した方法で算出した地震時走行安全性評価指標値を図6に示す.図6に示したプロットは,各軌道面 振動について脱線が発生する最小の地震時走行安全性評価指標値を示しており,それ以下の地震時走行安全性評 価指標値では脱線は発生しない.図6より以下のことがいえる.

- (1)図6を概観すると、地震時走行安全性評価指標値は軌道面振動や評価指標値算出法によって異なり、概ね 0~20の間の値をとる.また、脱線・非脱線の境界となる地震時走行安全性評価指標値は一意に定まってい ない.この原因として、車輪・レール間の作用力が、車輪・レールの接触状態に依存する強い非線形系とな っており、車両姿勢と軌道変位の位相によって車両挙動が大きく異なることが考えられる.
- (2)図6の構造物固有周期0.5秒において、地震時走行安全性評価指標値が大きいプロットがある.これは入 力地震動および構造物固有周期から決まる軌道面振動波形と車両の動特性との組み合わせで脱線しにくい 状況となり、地震時走行安全性評価指標値が大きくなったと推定される.
- (3) 変位ゼロで波形分割し、変位振幅で評価し算出した地震時走行安全性評価指標値A_dは、構造物固有周期 1.5~2.0 秒において、他の4種の算出法による指標値に比べ値が小さくなっている.この原因は、変位ゼロ で分割した場合、図4に青い実線で示した分割例のように分割後の半波の中に高い周波数の波が重畳し、正 弦半波の形状から大きく異なり、主成分の周波数よりも低い周波数で限界線図と比較され、安全性評価因数 A_{dk} が小さくなる場合があるためと考えられる.
- (4) 構造物固有周期 0.5~1.0 秒の範囲では,他の固有周期帯に比べ脱線が発生する地震時走行安全性評価指標 値が小さい,この周波数領域は下心ロール振動と上心ロール振動の遷移領域を含んでおり(宮本,2012),正 弦波加振において,ある程度の車輪上昇が発生するとともに強い左右力が台車・車体間で生じる.このとき,



Fig. 6 Index for running safety during earthquakes calculated from the five cases of seismic wave division and index evaluation. Each plot indicates the minimum value of the index for the occurrence of derailment by the seismic waveform.

地震波のような乱れた波形で加振されると正弦波加振に比べ脱線しやすい傾向を示し,脱線可能性評価指標 値が小さくなったと推定される.

(5)変位ゼロで波形分割し、変位振幅で評価し算出した場合を除いた4種の算出法において、構造物固有周期 1.5~2.0秒(固有周波数0.5~0.67Hz)の地震時走行安全性評価指標値は概ね5以上となっている.加振周波 数が低い領域では車両は左右の車輪が交互に上昇する四股踏みのような挙動を示すが、正弦波加振に比べ、 地震波のようなランダム波では四股踏みの挙動が成長しにくい.一方、前項で示したような強い左右力も発 生しないため、脱線しにくくなり、結果として他の構造物固有周期に比べ脱線が発生する評価指標値が大き くなったと考えられる.

同じ軌道面振動に対して求めた5種の地震時走行安全性評価指標値の相関を調べるため、軌道面振動波形を速度ゼロで分割し、速度振幅で評価して算出された地震時走行安全性評価指標値A_vに対する、その他の分割・評価法で算出された地震時走行安全性評価指標値A_a、A_{av}、A_{vd}、A_dの相関を図7に示す. 図中、A_vと1:1の相関となる線を破線で示す. 図7より、各算出法で求められた地震時走行安全性評価指標値はそれぞれ1:1の相関に必ずしもなっていない. その理由として以下が挙げられる.

(1)変位波形の分割については前述したが、その他の波形についても同様に、値がゼロとなる時刻で波形を分割した場合、分割後の波形が正弦波半波の形状と大きく異なる場合がある.

(2) 極大値・極小値で分割した場合,半波形状が正弦波形状から大きく異なる可能性は低いが,図4の変位波形において緑実線で示した分割例のように,振動の中心がゼロからオフセットする場合がある.限界線図はオフセットのない正弦波加振から求めているため,オフセットは外乱として作用し,その分小さい加振振幅で脱線し,地震時走行安全性評価指標値が小さくなる.図7に示したAvdとAvとの相関(緑の+記号のプロット)はこの傾向を良く表しており,どちらも速度ゼロで分割しているため,半波成分の周波数は等しいが,



Fig.7 Relationship between the index for running safety during earthquakes Λ_a , Λ_{av} , Λ_{vd} , Λ_d and Λ_v . Λ_v is taken as the benchmark. If the value of the index is the same as Λ_v , the plot is on the broken line.

オフセットのある変位振幅での評価指標はオフセットのない速度振幅での評価指標に比べ小さい値となっている.

このように,波形分割法や評価に用いる振幅を変えることは,異なるフィルタを用いて評価値を算出している ことに相当し,評価値が異なると考えられる.

4. 脱線可能性推定指標値の提案

3 章では、多くの種類の軌道面振動を対象に、評価対象車両が脱線する最小の振幅における地震時走行安全性 評価指標値を算出した.本章では、これに基づき、想定した地震に対し、軌道面振動波形が推定されたときに、 評価対象車両が脱線する可能性を確率として推定するための指標値「脱線可能性推定指標値」を提案する.

4・1 前提条件と脱線可能性推定指標値提案の方針

地震時の脱線可能性を論じる際,以下の事項を前提とする.

- (1) 想定した地震は発生したものとする.(地震自体の発生確率はここでは考慮しない)
- (2) 軌道面振動波形形状に発生の偏りはないものとする.(前章で示した 275 種の軌道面振動の発生確率は均 一であるとする)
- (3) 軌道面振動波形を推定する地点に車両が存在していたとする. (車両の存在確率はここでは考慮しない)
- (4) 軌道面振動波形を推定する地点前後も同様の波形で振動したものとする.(隣接構造物間の動的な角折れ や目違いをここでは考慮しない)

防災の観点からは、空振り(「脱線」と推定しつつ、実際は「非脱線」)は許容しても、見逃し(「非脱線」と推定しつつ、実際は「脱線」)は許容すべきではない、一方、全く振動のない軌道上では脱線可能性推定指標値がゼロで脱線も発生しないことは自明であるため、脱線する波形に対して脱線可能性推定指標値がゼロとなる事象は 避ける必要がある.

4・2 脱線可能性推定指標値の検討

前節で述べた観点から,実際に脱線可能性を推定する時に適した脱線可能性推定指標値について検討する.3章 で示した地震時走行安全性評価指標値A_a, A_v, A_d, A_{av}, A_{vd}のうちの一つをそのまま脱線可能性推定指標値とすることに加え,複数の地震時走行安全性評価指標値のうちの大きいものを脱線可能性推定指標値とすることも検討した.複数の地震時走行安全性評価指標値の選択については,地震時の車両挙動は軌道面振動の加速度振幅よりも変位振幅もしくは速度振幅への依存性が強い傾向であるため,以下の4ケースとした.

- (1) A_v, A_dのうち大きい方
- (2) *A*a, *A*v, *A*dのうちの最大値
- (3) Λ_{a} , Λ_{v} , Λ_{d} , Λ_{vd} のうちの最大値
- (4) Aa, Av, Ad, Avd, Aav (全ての地震時走行安全性評価指標値)のうちの最大値

3.1 節で述べた解析条件において,各算出法で得られた脱線可能性推定指標値の最大値および最小値を表2に示す.表2より,単独の地震時走行安全性評価指標値を用いるなら,速度ゼロで波形を分割し,速度振幅から指

Table 2	The maximum	value and th	e minimum	value of	the ir	ıdex	for the	probabi	ility	prediction	of de	railment	occurrence.
---------	-------------	--------------	-----------	----------	--------	------	---------	---------	-------	------------	-------	----------	-------------

	Λ_{a}	$\Lambda_{ m v}$	$\Lambda_{\rm d}$		$\Lambda_{ m av}$	$\Lambda_{ m vd}$
Maximum value	34.49	34.69	35.05		33.99	33.27
Minimum value	0.00	0.80	0.00		0.00	0.12
	Max of Λ_v and Λ_v	\mathbf{M}_{d} Max of Λ_{a} , Λ_{a}	1_v and Λ_d	Max of Λ_{a} , Λ_{v} , Λ_{d} and Λ_{vd}		Max of all Λ
Maximum value 35.05						
Maximum value	35.05	35.0	5		35.05	35.05

標値を算出する Λ ,が他の地震時走行安全性評価指標値より最小値が大きく,適しているといえる.速度で評価することが良い理由の一つとして,図5(a)に示した速度振幅で整理した限界線図が他の2種に比べ周波数に対し比較的フラットな特性で広い周波数にわたって適度な感度で評価できていることが挙げられる.より安定した脱線可能性推定指標値を得るためには複数の地震時走行安全性評価指標値のうちの最大値を採用することが有効である.表2より,複数の地震時走行安全性評価指標値のうちの最大値を採用したケースは全て脱線可能性推定指標値の最大値と最小値が一致した.また,最小値は単独の地震時走行安全性評価指標値を用いる場合よりも大きくなった.これは Λ ,が0.80の軌道面振動に対し Λ_a が1.15であり,より厳しい評価をしているためである.ここで,紙面の都合上詳細については省略するが,検討の途上で Λ 、と Λ_a のうち大きい方を採用するよりも、 Λ_a 、 Λ_v 、 Λ_d のうちの最大値を採用した方が脱線可能性推定指標値が大きくなるケースが見られた.一方で, Λ_a 、 Λ_v 、 Λ_d のうちの最大値を採用することと,全ての最大値を採用することで値が異なるケースは見られなかった.このことから,オーソドックスな算出法で得られる Λ_a , Λ_v , Λ_d の3種の最大値を用いることが必要十分であると考えられる.そして,軌道面振動に依ってその変位振幅が厳しく脱線に至る場合,速度振幅が厳しく脱線に至る場合(表2には現れないことから割合としては小さいと考えられる)があるといえる.以上より,脱線可能性推定指標値 Ω として地震時走行安全性評価指標値 Λ_a , Λ_v , Λ_d の最大値を採用することを提案する.

$$\Omega = \max(\Lambda_{\rm a}, \Lambda_{\rm v}, \Lambda_{\rm d})$$

(10)

3.1 節で述べた解析条件で得られた脱線可能性推定指標値 Ω のヒストグラムを図8に示す. 3.2 節で述べたよう に、各地震時走行安全性評価指標値は概ね0~20の範囲の値をとっていることから、脱線可能性推定指標値も概 ね20以下の値となっている. 脱線可能性推定指標値 Ω の累積確率を図9に示す. 脱線可能性推定指標値は軌道 面振動の振幅が大きくなるに従い大きくなり、3.1.2 項で述べたように、ここで評価している軌道面振動は車両が 脱線する最小の振幅に調整されている. すなわち、評価対象軌道面振動中のある軌道面振動において、求めた脱 線可能性推定指標値以上の指標値になるよう振幅を大きくすれば、車両は脱線し、逆にそれ未満の指標値になる よう振幅を小さくすれば車両は脱線しないことを意味している. したがって、図9に示した累積確率は解析対象 としている 275 種類の軌道面振動における脱線発生確率と考えることができる. さらに、解析対象とした地表面 地震動および構造物の固有周期は鉄道構造物等設計標準・同解説(変位制限)で用いられているものを網羅して おり、軌道面振動に関しては得られた脱線可能性推定指標値 Ω と脱線発生確率との相関には一般性があるといえ る. また、4.1 節で示した前提条件により、軌道面地震動波形に発生の偏りがないと仮定していることから、想定 した地震時の軌道面振動に対して求めた脱線可能性推定指標値 Ω が10 であるとき、図9 の相関によれば、およ そ 50%の確率で脱線し、20 であればおよそ 95%、30 以上であればほぼ 100%脱線すると考えることができる.



Fig. 8 The histogram of the index for the probability estimation of derailment occurrence Ω .



Index for probability estimation of derailment occurrence Ω

Relationship between cumulative probability of derailment and the index for the probability estimation of derailment Fig. 9 occurrence Ω . For example, in the case where the derailment accident of Shinkansen train due to the Mid Niigata Prefecture Earthquake in 2004, the index Ω is calculated to be 5.82, which means that the probability of derailment occurrence is approximately 20 %.

4・3 地震時脱線確率の推定手順

これまで述べてきたことをまとめて、本論文で提案する想定地震における軌道面振動に対する評価対象車両の 脱線発生確率を推定する手順を以下に示す.

- (1) 評価対象車両について, 2.3.1 項で示した正弦波加振に対する3種の限界線図(周波数0.3 Hz~3 Hzの加 振に対する、5波で脱線する限界、1波で脱線する限界、および5波で車輪上昇量最大値が10mmとなる限 界の加振振幅線図)を求める.
- (2) 3.1.2 項で示した複数の地表面地震動に対して固有周期を広範に振って求めた構造物天端の応答波 (275 種 類の軌道面振動)を評価対象車両が脱線する最小の振幅に調整する.振幅調整された軌道面振動を地震時走 行安全性評価指標値と脱線発生との相関を求めるための軌道面振動とする.
- (3) (2) 項のそれぞれの軌道面振動について、加速度波形を加速度ゼロで半波分解し、半波毎に(1)項に示 した限界線図との比較により点数付けし、連続する 10 の半波の点数和の軌道面振動波形全域における最大 値を求める.
- (4) 速度波形および変位波形についても同様の処理を行う.
- (5) それぞれの軌道面振動について、(3)、(4) 項で得られた3つの値のうちの最大値を、地震時走行安全性 評価指標値と脱線発生との相関を求めるための軌道面振動から求められた脱線可能性推定指標値とし、その 累積確率線図を求める (図 9).
- (6) 評価対象地震(想定した地震)における評価対象地点の軌道面振動を推定する.
- (7) 推定された軌道面振動に対し、(3) ~ (5) 項と同様の手法により脱線可能性推定指標値を求め、(5) 項 で示した累積確率線図に照らし合わせることで評価対象車両の脱線発生確率を求める.

一例として,2004 年新潟県中越地震で脱線した 200 系新幹線について,十日町高架橋 R3 における軌道面振動 (航空・鉄道事故調査委員会, 2007)に本手法を適用した結果, 脱線可能性推定指標値が 5.82 となり, 図 9 に示す ように、脱線可能性推定指標値と脱線発生確率の関係に従えばおよそ 20%の脱線発生確率であったといえる.な お、ここでは1車両モデルを用いた解析結果に基づいて確率を求めており、1両あたりの脱線発生確率と捉える ことができる.複数車両からなる編成列車のうちの少なくとも1両が脱線する確率Pは,厳密には諸元の違いに より号車ごとに脱線発生確率が異なるが、仮に1両あたりの脱線発生確率をpとして次式のように1から全車両 が脱線しない確率を引くことで求められる.

 $P = 1 - (1 - p)^n$

(11)

ここで n は編成両数である.(11) 式から複数車両からなる編成のうち少なくとも 1 両が脱線する確率 P は 1 両あたりの脱線発生確率 p よりも大きくなる.前述の例では、当該新幹線は 10 両編成であることから、少なくと も 1 両が脱線する確率は 1-(1-0.2)¹⁰ で求めることができ、およそ 90%となる.本手法を用いれば地震時の 走行安全性に関して、車両運動シミュレーションによる「脱線・非脱線」の判定だけではなく、確率の概念を取 り入れた連続値として安全性を評価することができる.上記(1)~(5)項は評価対象地震とは無関係に評価対象車両が決まり次第実施することができ、評価対象地震に対しては(6),(7)項のみを実施すれば良く、それに 要する時間は車両挙動解析に要する時間よりも大幅に短縮することができる.本手法は以下に示す活用を考えて いる.

- (1) 想定地震に対する路線上多地点の安全性を評価するとともに、それに基づいた乗客避難・誘導計画の作成 を支援する.
- (2) 地震発生時,路線上の地点ごとに迅速に脱線発生確率の高い箇所を抽出するとともに、ダイヤグラムなど から列車位置を把握することで、列車乗務員と連絡が取れない状況に陥った列車に対して、脱線可能性を早 急に判断し、脱線復旧を支援する.
- (3) 車両, 軌道および構造物への地震対策施工に関して, その効果を地震時の脱線発生確率の面から定量的に 評価する.

なお,前述したように地震時走行安全性評価指標値と脱線発生との相関を求めるための軌道面振動を算出する ための地表面地震動および構造物の固有周期は鉄道構造物等設計標準・同解説(変位制限)で用いられているも のを網羅しており,軌道面振動に関しては得られた脱線可能性推定指標値と脱線発生確率との相関には一般性が あるといえる.一方,車両に関しては正弦波加振に対する安全限界線図で正規化を図っているが,検討車種数が まだ多くないため,車種が脱線可能性推定指標値と脱線発生確率との相関に及ぼす影響について,今後データを 蓄積していく計画である.

5. 結 言

車両運動シミュレーションを実施せずに地震時の軌道面振動波形から脱線可能性を推定することを目的として, 評価対象軌道面振動波形の半波成分分解と評価対象車両の正弦波加振に対する限界線図に基づいて脱線可能性を 推定する指標値の算出法について検討した.そして,評価対象軌道面振動の加速度波形,速度波形および変位波 形と評価対象車両の正弦波加振に対する5波で脱線する限界振幅,1波で脱線する限界振幅,10 mmの車輪上昇 が生じる限界振幅から,以下の手順で脱線可能性推定指標値を算出することを提案した.

(1) 加速度波形を加速度ゼロで半波分解し、半波毎に正弦波加振に対する限界線図との比較により点数付け

- し、連続する10の半波の点数和の軌道面振動波形全域における最大値を求める.
- (2) 速度波形,変位波形についても同様の処理を行う.
- (3)得られた3つの値の最大値を脱線可能性推定指標値とする.

そして、車両挙動解析に基づいて脱線する最小の振幅に調整された地震時走行安全性評価指標値と脱線発生と の相関を求めるための軌道面振動(複数の地震波を入力とした構造物天端応答)を対象に上記脱線可能性推定指 標値を算出し、次の関係を得た.

(4) 脱線可能性推定指標値が 10 であればおよそ 50%の確率で脱線し、20 であればおよそ 95%、30 以上であ ればほぼ 100%脱線する.この相関は1車両モデルの解析に基づいているため、複数車両からなる編成列車 のうちの少なくとも1両が脱線する確率はこの値よりも大きくなる.

本手法を用いれば地震時の走行安全性に関して、車両運動シミュレーションによる「脱線・非脱線」の判定だ けではなく、確率の概念を取り入れた連続値として安全性を評価することができる.本手法は以下に示す活用を 考えている.

(5) 想定地震に対する路線上多地点の安全性を評価するとともに、それに基づいた乗客避難・誘導計画の作成 を支援する.

- (6) 地震発生時,路線上の地点ごとに迅速に脱線発生確率の高い箇所を抽出するとともに、ダイヤグラムなど から列車位置を把握することで、列車乗務員と連絡が取れない状況に陥った列車に対して、脱線可能性を早 急に判断し、脱線復旧を支援する.
- (7) 車両, 軌道および構造物への地震対策施工に関して, その効果を地震時の脱線発生確率の面から定量的に 評価する.

脱線可能性推定指標値と脱線発生確率との相関の一般性について、車両に関しては正弦波加振に対する安全限 界線図で正規化を図っているが、検討車種数がまだ多くないため、車種が脱線可能性推定指標値と脱線発生確率 との相関に及ぼす影響について、今後データを蓄積していく計画である.

文 献

- 航空·鉄道事故調查委員会,東日本旅客鉄道株式会社上越新幹線浦佐駅~長岡駅間列車脱線事故, RA2007-8-I (2007), pp.22-23.
- 飯田浩平, 坂井公俊, 宮本岳史, 左右およびロール振動する軌道を走行する車両挙動解析, 鉄道総研報告, Vol.28, No.12 (2014), pp.17–22.
- 飯田浩平, 鈴木貢, 宮本岳史, 遠竹隆行, 植木健司, 車両 2 次サスペンションの大変位時における特性, 鉄道総研 報告, Vol.25, No.6 (2011), pp.23–28.
- 運輸安全委員会, 東日本旅客鉄道株式会社 東北新幹線 仙台駅構内列車脱線事故, RA2013-1-I (2013), pp.16-20.
- 運輸安全委員会,九州旅客鉄道株式会社 九州新幹線 熊本駅~熊本総合車両所間列車脱線事故, RA-2017-8-II (2017), pp.29–34.
- 宮本岳史, 地震動波形の脱線危険性の分析法, 第 16 回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2009) 講演論文集 (2009), pp.523–524.
- 宮本岳史, 地震時の車両脱線防止に向けた取り組み, RRR, Vol.69, No.3 (2012), pp.14-17.
- 宮本岳史,石田弘明,台車改良による地震時走行安全性の向上に関する解析,鉄道総研報告, Vol.21, No.12 (2007), pp.35-40.
- 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, Vol.64, No.626 (1998), pp.3928–3935.
- 宮本岳史,松本信之,曽我部正道,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,日本機械学会論文集 C 編, Vol.71, No.706 (2005), pp.1849–1855.
- 宮本岳史,野上雄太,室野剛隆,地震時の車両挙動の解明と地震防災への適用(その3)~地震波から脱線可能性 を推定する方法,第14回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2007)講演論文集 (2007), pp.221–224.
- 室野剛隆,野上雄太,宮本岳史,簡易な指標を用いた構造物および走行車両の地震被害予測法の提案,土木学会論 文集 A, Vol.66, No.3 (2010), pp.535–546.
- 鉄道総合技術研究所編, 在来鉄道運転速度向上試験マニュアル・解説 (1993), pp.23-31.
- 鉄道総合技術研究所編,鉄道構造物等設計標準・同解説 変位制限 (2006), pp.129–135.
- 鉄道総合技術研究所編,鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計 (2012), pp.271-273.
- 鈴木貢,飯田浩平,宮本岳史,中嶋大智,遠竹隆行,梶谷泰史,鉄道車両の地震対策用左右動ダンパの開発,鉄道 総研報告, Vol.25, No.6 (2011), pp.17–22.

References

- Aircraft and Railway Accidents Investigation Commission, Train derailment accident between Urasa station and Nagaoka station on Joetsu Shinkansen of East Japan Railway Company, RA2007-8-I (2007), pp.22–23 (in Japanese).
- Iida, K., Sakai, K. and Miyamoto, T., Dynamic simulations of railway vehicles running on tracks with lateral and roll vibrations, RTRI Report, Vol.28, No.12 (2014), pp.17–22 (in Japanese).
- Iida, K., Suzuki, M., Miyamoto, T., Tohtake, T. and Ueki, K., Characteristics of secondary suspension of vehicle under large displacement condition, RTRI Report, Vol.25, No.6 (2011), pp.23–28 (in Japanese).
- Japan Transport Safety Board, Train derailment accident in Sendai station on Tohoku Shinkansen of East Japan Railway Company, RA2013-1-I (2013), pp.16–20 (in Japanese).
- Japan Transport Safety Board, Train derailment accident between Kumamoto station and Kumamoto maintenance depot on

Kyushu Shinkansen of Kyushu Railway Company, RA-2017-8-II (2017), pp.29-34 (in Japanese).

- Miyamoto, T., Analysis of seismic wave form for risk assessment of derailment, Proceedings of the 16th Jointed Railway Technology Symposium (J-RAIL2009) (2009), pp.523–524 (in Japanese).
- Miyamoto, T., The effort for prevention of railway vehicle derailment during an earthquake, RRR, Vol.69, No.3 (2012), pp.14–17 (in Japanese).
- Miyamoto, T. and Ishida, H., Numerical simulation study on how to improve bogie for raising running safety during seismic vibration, RTRI Report, Vol.21, No.12 (2007), pp.35–40 (in Japanese).
- Miyamoto, T., Ishida, H. and Matsuo, M., The dynamic behavior of railway vehicle during earthquake (Vehicle dynamics simulation on track vibrating in lateral & vertical directions), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.64, No.626 (1998), pp.3928–3935 (in Japanese).
- Miyamoto, T., Matsumoto, N., Sogabe, M., Shimomura, T., Nishiyama, Y. and Matsuo, M., Full-scale experiment on dynamic behavior of railway vehicle against heavy track vibration, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.71, No.706 (2005), pp.1849–1855 (in Japanese).
- Miyamoto, T., Nogami, Y. and Murono, Y., Clarification of seismic behavior of railway vehicle on viaduct and its application to earthquake disaster prevention an estimating method of possibility for derailment due to seismic vibration, Proceedings of the 14th Jointed Railway Technology Symposium (J-RAIL2007) (2007), pp.221–224 (in Japanese).
- Murono, Y., Nogami, Y. and Miyamoto, T., Simple method to predict outline of seismic damages of railway structures and running vehicles, Doboku Gakkai Ronbunshuu A, Vol.66, No.3 (2010), pp.535–546 (in Japanese).
- Railway Technical Research Institute ed., Manual of on-track testing for running speed improvement of conventional railway and commentary (1993), pp.23–31 (in Japanese).
- Railway Technical Research Institute ed., Design standard for railway structures and commentary (Displacement limits) (2006), pp.129–135 (in Japanese).
- Railway Technical Research Institute ed., Design standard for railway structures and commentary (Seismic design) (2012), pp.271–273 (in Japanese).
- Suzuki, M., Iida, K., Miyamoto, T., Nakajima, D., Tohtake, T. and Kajitani, Y., Development of lateral damper for improvement of running safety of railway vehicles in case of occurrence of an earthquake, RTRI Report, Vol.25, No.6 (2011), pp.17–22 (in Japanese).