

# 振動軌道上の車両の走行安全に関する研究

金沢工業大学 松浦章夫\*

本論文では、振動軌道上の車両の走行性に関する過去の研究と設計法を概観した上で、高速車両の脱輪現象をより忠実に再現する新しい解析法の概要を示す。これは、脱線係数などの従来の評価基準によるのではなく、車輪のレールに対する乗り上がりあるいは飛び上りの機構を直接に取り込み、振動する軌道上を走行する車両を非線形39自由度の車両／軌道連成モデルで構成した数値解析法である。この解析手法を用いて、大きな地震動に対する脱輪に着目した車両の挙動を、兵庫県南部地震の観測波形を実例として解析し、水平動と伴に上下動の存在も無視できないこと、脱線防止ガードは、車両のロックングが大きくなる場合では、常に有効に働くとは言えないこと等が分かった。

## 1. はしがき

振動軌道上の車両の走行性に関する研究は、本州四国連絡橋の計画・設計時に活発に行われ、その成果は本州四国連絡橋の鉄道構造物の設計に取り入れられている。今回、兵庫県南部地震に際して、軌道の揺れが直接の原因と考えられる車両の脱輪現象が幾つかの鉄道線路で見られ、この種の研究の必要性が再認識されるに至った。

本報告では、振動軌道上の車両の走行性に関する過去の研究と設計法を概観した上で、高速車両の脱輪現象をより忠実に再現する新しい解析法の概要を示す。これは、脱線係数など従来からの評価基準によらずに、車輪がレールに「乗り上がる」、あるいはレールから「浮き上がる」、という現象を直接に数値的に解析するものである。すなわち、振動する軌道上を走行する車両を非線形39自由度の車両／軌道連成モデルで構成した数値解析法である。この解析手法を用いて、大きな地震動に対する車両の挙動を兵庫県南部地震の観測波形を実例として解析し、二三の考察を行う。

## 2. 従来の研究と走行性評価法の概要

振動軌道上の車両走行性に関する研究は、本州四国連絡橋の計画・設計に際して行われた一連の「列車走行性に関する研究」<sup>1)</sup>において、多くの模型試験及び

理論解析が進められた。すなわち、横方向に振動する軌道上を走行する二軸貨車の積載状態や走行速度、車両特性値等によるローリングやロックング等を評価し、地震外力に対する橋梁上を走行する二軸貨車の応答を実験的・理論的に追究した八十島・松本・西岡・橋本・大島らの研究がある<sup>2)~4)</sup>。

また、左右に振動する軌道上の二軸貨車を2次元車両力学モデルで表し、数値シミュレーションを用いて走行安全性の判定を行う具体的な方法を提案した松井の研究がある<sup>5)</sup>。松井は、この2次元車両力学モデルによる方法を、二軸貨車から高速車両に使えるように拡張した。このシミュレーション手法は、その簡便さと明解さから、本州四国連絡橋の設計に際して、地震に対する列車の走行性の検証に用いられた。

これらの研究成果を受けて、鉄道構造物の耐震設計においては、構造物自体の耐震評価と共に、地震時に予想される軌道面の不同変位及び軌道面の振動について、車両の走行性の検討項目が導入された<sup>6)</sup>。すなわち、このような構造物の軌道直角方向の水平振動に対して、その卓越振動数が明らかな場合には、加振振動数と振幅との関係で示された走行性評価曲線（走行安全判定曲線）を用いて、それが不規則な場合には、車両・軌道・構造物の相互作用シミュレーションにより車輪・レール間に作用する横圧・輪重比等を求めて、車両の走行性を評価することとしている。

しかし、この走行性評価曲線は、高速車両の応答を前述の2次元車両力学モデルによる単純な解析で得た

キーワード： 走行安全，耐震設計，数値解析

\*金沢工業大学工学部，0762-94-6712

ものであり、この方法には未検討の点が少なからず残されている。一方、車両・軌道・構造物の相互作用シミュレーションに関しては、既開発のシステムもあるが<sup>7)</sup>、利用可能なレベルには至っていない。

### 3. 振動軌道上の高速車両の力学モデル

高速車両の力学モデルの設定に当たって設けた主な仮定と特徴を以下に示し、その概要を図-1に示す。

- a) 解析の対象とするのは、高速車両の典型である2軸ボギー車1両で、3次元車両モデルと集中質量近似のレールモデルとが連成する39自由度系である。
- b) 車両は、車体、台車枠、車輪軸がストッパー付き非線形ばね及びダンパで結合されたものとし、レールは、長手方向の変形特性を無視した車輪接触位置における上下、左右の見かけのばね特性と左右水平方向の慣性力とを考慮したものとする。
- c) 車輪踏面及びレール頭面断面形状は任意であり、車輪軸とレールとの相対変位に伴う接触点の位置及び垂直・接線作用力の変動過程を考慮する。
- d) 車輪・レール間に作用するクリープ力は、摩擦力による飽和特性を考慮したChartet・Leviの方法<sup>8)</sup>に

より求めることとする。

- e) 所定の位置に設定された脱線防止ガードを考慮するが、これを単純な反発特性を有するばねでモデル化したものとする。

ここで、レールと車輪との間に作用する伝達力の概要を述べる。車輪踏面及びフランジに作用する法線力  $N$  は、横圧  $Q$  を仮定して、接触点での勾配  $\gamma$ 、輪重  $P$  により、

$$N = P \cos \gamma + Q \sin \gamma$$

と書ける。接線クリープ力  $T$  は、

$$T = \frac{1}{\{1/(\mu N)^a + 1/S^a\}^{1/a}}$$

ここに、  $S = EabN^{2/3} \beta / \cos \gamma$ 、

$$\beta = (\dot{y}_w + R \dot{\phi}_w - v \phi_w - (\dot{y}_r - \dot{y}_{a2})) / v$$

となり、新たに  $N$ 、及び  $Q$  が次のように定まる。

$$N = (P - T \sin \gamma) / \cos \gamma$$

$$Q = N \sin \gamma - T \cos \gamma$$

上式において、 $a$  は1~2の定数、 $\mu$  は摩擦係数、 $E$  は鋼材のヤング率、 $a$ 、 $b$  は単位法線力作用時に車輪・レール接触面に現れる接触楕円の長・短半径、 $\beta$  は水平横方向のすべり率である。また  $y_w$  は車輪の横変位、 $R$  は車輪半径、 $\phi_w$  は車輪のローリング角、 $\phi_w$  は車輪のヨーイング角、 $y_r$  はレール頭部の横変位、 $y_{a2}$  は軌道の通り狂い、 $v$  は車両の走行速度である。

さらに、前後クリープ力による縦力も、同様に縦方向のすべり率を用いて求められる。

以下において、高速車両及び軌道の標準的なパラメータを用い、実際の地震波形を軌道に与えた場合の解析結果について述べる。

### 4. 実地震動を軌道に与えた場合の車両の走行性

以下において、実地震動に対する走行性を調べる。使用する地震波形は、1995年1月17日の兵庫県南部地震の際に気象庁神戸観測所で観測された波形データ「気象庁87型電磁式強震計波形データ」である。本波形の最大加速度は南北(NS)成分818cm/s<sup>2</sup>、東西(EW)成分617cm/s<sup>2</sup>、上下(UD)成分332cm/s<sup>2</sup>である。図-2に観測加速度波形を、図-3には、この加速度波形を単純に積分して得られた波形を示す。これは、軌道に与える振動波形として以下の解析に用いられる。

また、図-4~8において用いる記号に関し、Pa,

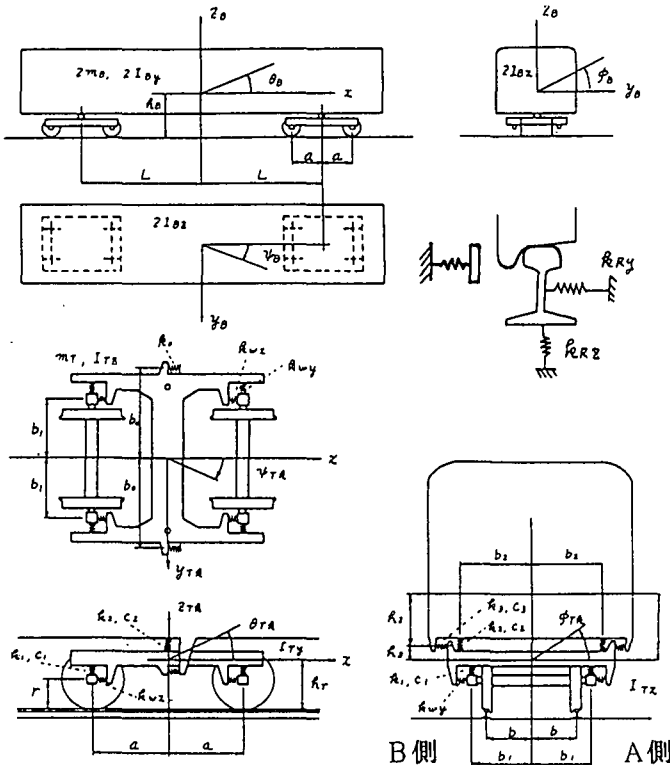


図-1 振動軌道上の車両の力学モデル

PbはA車輪, B車輪の輪重, Qa, QbはA車輪, B車輪の横圧を意味し, Ya, YbはA車輪, B車輪の基準点の無載荷時レール基準点からの水平変位, Za, ZbはA車輪, B車輪の基準点の無載荷時レール基準点からの鉛直変位を意味する。

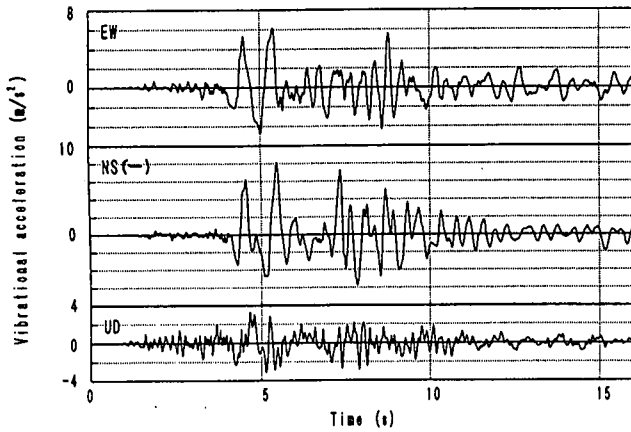


図-2 観測加速度波形

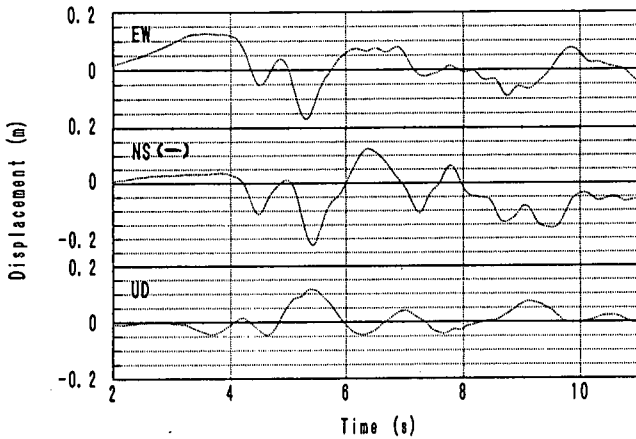


図-3 解析に用いる変位波形

(1) 東西動・上下動が同時に作用する場合

図-4には、東西動と上下動が同時に作用する場合の第1車輪軸の挙動を示す。主要動の開始後、2サイクル程度のロッキング現象が現れている。A車輪が浮き上がった状態の継続時間は約0.5秒間、その際の浮き上がり量は90mmになる。しかし、車輪の浮き上がり時には、その車輪フランジはすべて軌間内に止まっていて、落下後には車輪は車輪踏面でレール上を走行する通常の状態に復帰している。したがって、乗り上がりが見られる状態には達しない。この場合は、地震動の

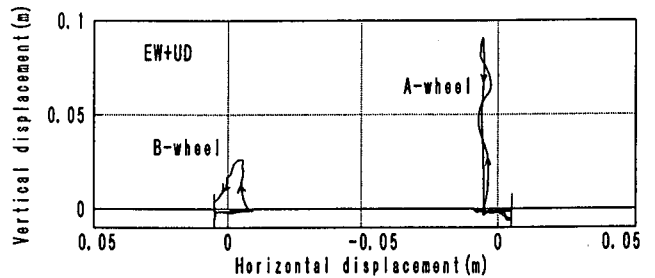
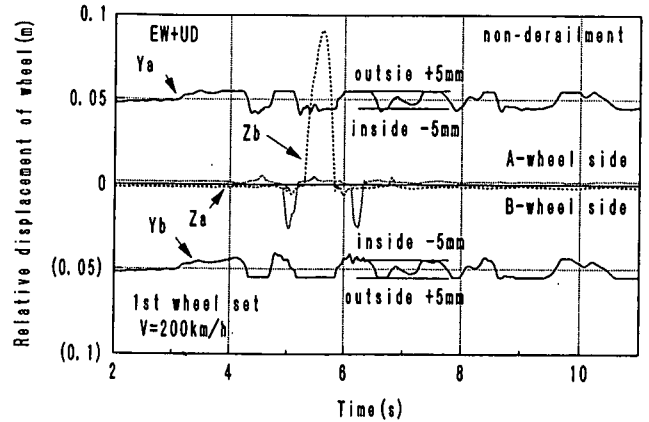
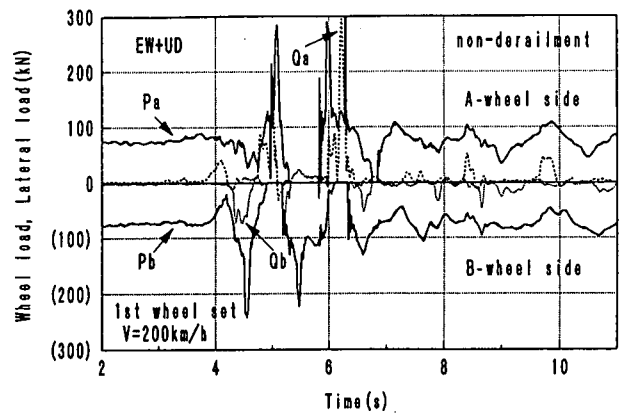


図-4 東西動・上下動が同時に作用する場合

継続中に脱輪等の現象は見られない。

(2) 南北動・上下動が同時に作用する場合

図-5には、南北動と上下動が同時に作用する場合の第1車輪軸の挙動を示す。主要動の開始後、B車輪は、輪重・横圧の極大値を取った後、浮き上がっている。この間に、A車輪は輪重・横圧の急増・急減を示すが、その直後に脱輪している。

B車輪が軌間内でレールから浮き上がった後、車輪フランジ先端がレール頭面に落下し、頭面上を走行しながら軌間外方に向かう。一方、反対側のレール上を走行していたA車輪が、このB車輪の外方移動に伴っ

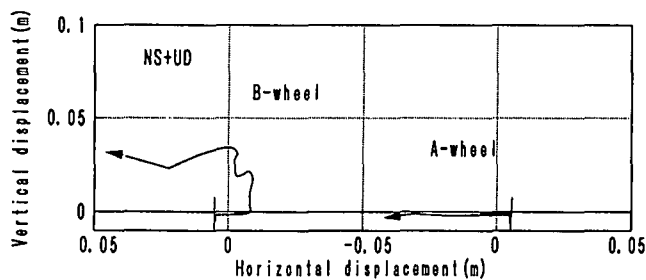
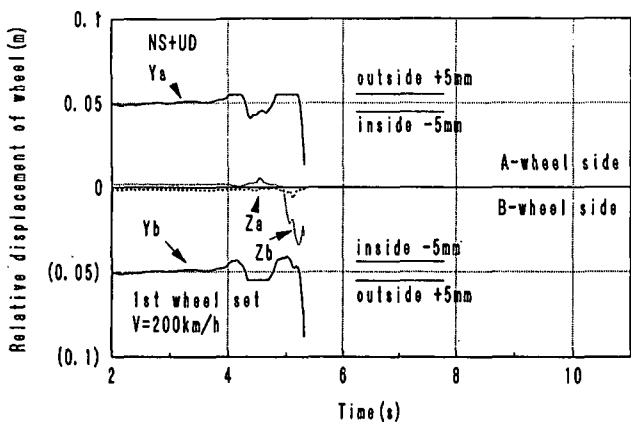
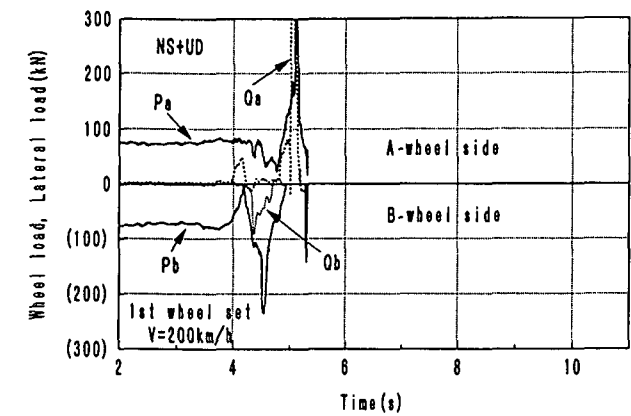


図-5 南北動と上下動が同時に作用する場合

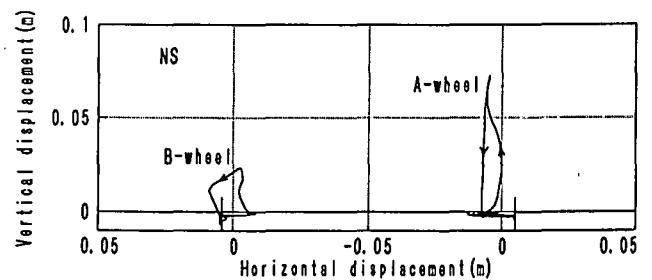
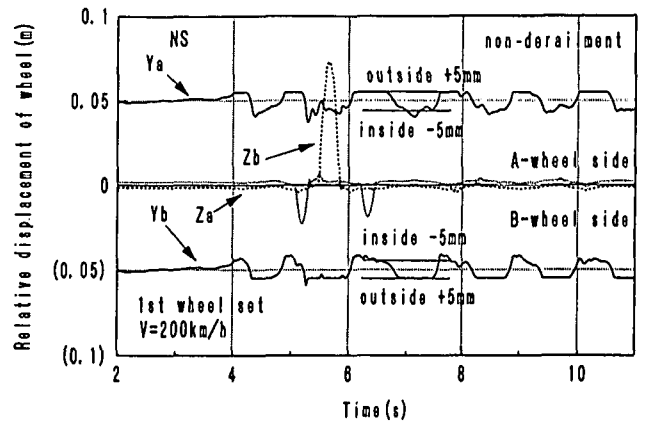
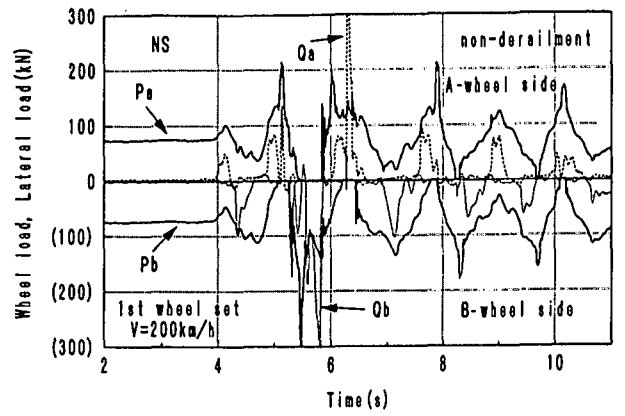


図-6 南北動のみが作用する場合

て軌間内に滑り落ちたのである。また、これは第4車輪軸において最初に現れるものであるが、その挙動は本図に示すものとはほぼ等しい。

(3) 南北動のみが作用する場合

図-6には、南北動のみが作用する場合の第1車輪軸の挙動を示す。主要動の開始後、最大浮き上がり量75mmで、1.5サイクルのロッキングが現れるが、すべて軌間内における現象であり、車輪フランジは軌間内に復帰している。このように、南北動に関しては、上下動を無視して計算すると、脱輪現象は最後まで現れない。

(4) 南北動・上下動が同時に作用する場合  
(脱線防止ガード設定時；ケース1)

図-7には、フランジ背面遊間45mmの脱線防止ガードを設定したとき、南北動と上下動が同時に作用する際の第1車輪軸の挙動を示す。このように、脱線防止ガードが無い場合と同様に、5秒をわずかに超えたところで脱輪している。B車輪が軌間内でレールから浮き上がった後、レール頭面に車輪フランジ先端が落下し、そこを走行しながら軌間外方に向かっている。一方、車輪踏面でレール上を走行しつつあるA車輪が、B車輪のこの外方移動に伴って、脱線防止ガードに衝突し、直後に滑り上がって脱線防止ガードからも離脱

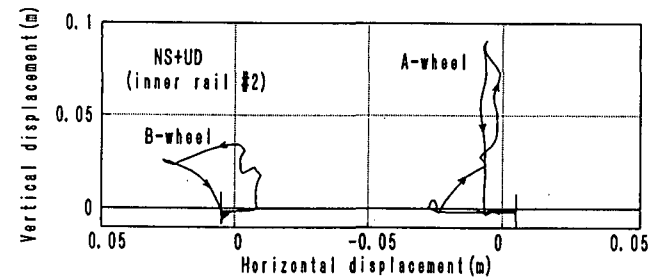
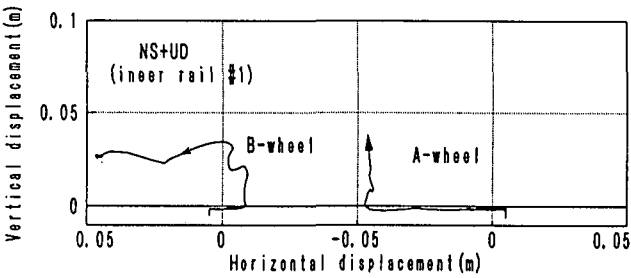
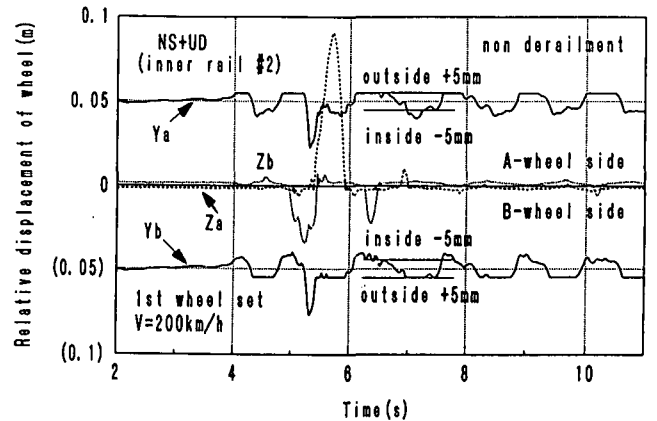
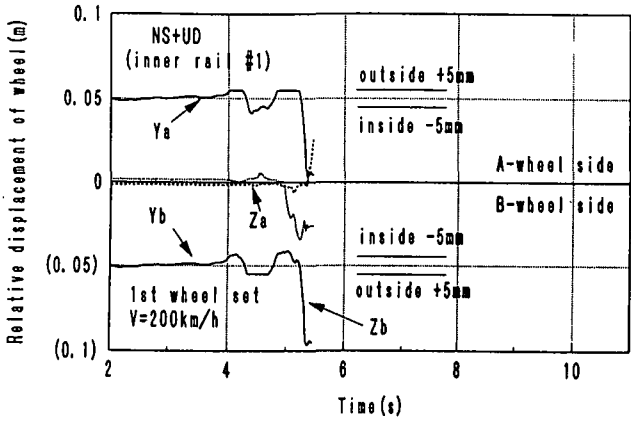
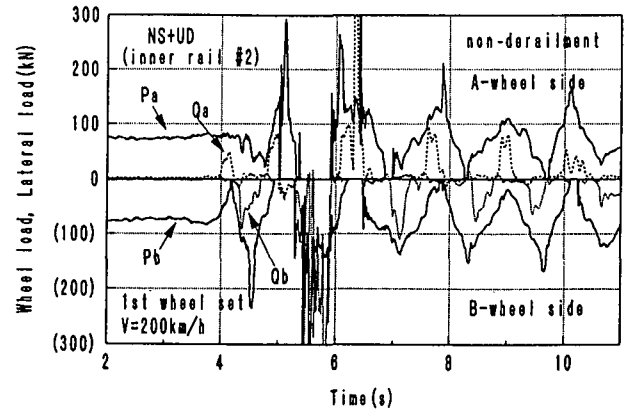
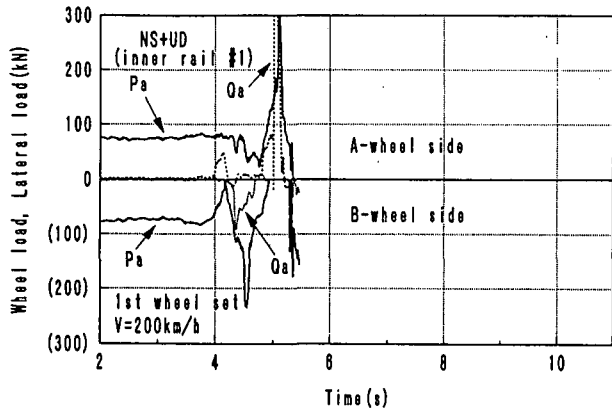


図-7 南北動と上下動が同時に作用する場合  
(脱線防止ガード設定時; ケース1)

図-8 南北動と上下動が同時に作用する場合  
(脱線防止ガード設定時; ケース2)

している。この場合、脱線防止ガードはA車輪の動きを阻止し得ていない。それは、A車輪が脱線防止ガードに接触している間に、A車輪の浮き上がる向きの大きなロッキング動が始まったためである。

(5) 南北動・上下動が同時に作用する場合  
(脱線防止ガード設定時; ケース2)

図-8には、フランジ背面遊間を25mmに縮小したとき、南北動と上下動が同時に作用する際の第1車輪軸の挙動を示す。この場合は、フランジ背面遊間45mmの場合と同様に、5秒をわずかに超えたところで、B車輪が軌間内でレールから浮き上がった後、レール頭面

に車輪フランジ先端が落下し、頭面上を走行しながら軌間外方に向かって走行している。同時に、通常の状態でレール上を走行しているA車輪の脱線防止ガードへの接触による反発力で、B車輪フランジが内軌側に復帰している。これに伴って、車輪軸全体がA車輪側に移動している。その後、A車輪には高さ90mmの浮き上がりが生じているが、およそ1サイクルのロッキングを経た後、安定な走行状態に復帰している。

5. 結論

振動軌道上を走行する高速車両の走行性を解析する運動方程式を誘導し、それを数値的に解く方法を開発

した。ここでは、実際の地震波形を用いて、この方法による走行性の試算を行った。その結果、以下の事柄が明らかになった。

- 1) 水平最大振動加速度617ガル、上下最大振動加速度332ガルの実地震動によって、走行車両には比較的大きなロッキングが現れたが、地震動の継続時間内において脱輪は認められなかった。
- 2) 水平最大振動加速度818ガル、上下最大振動加速度332ガルの実地震動によって、走行車両は主要動開始直後に脱輪した。なお、上下振動の影響を無視した場合には、脱輪現象は認められなかった。
- 3) 通常考えられる位置に設定した脱線防止ガードは、脱輪阻止の効果を発揮しなかった。一方、通常の設定位置よりも本レールに近づけて設定した場合の試算では効果を発揮した。

以上のように、地震動による振動軌道上の車両の脱輪に関しては、水平動と伴に上下動の存在も無視できないこと、脱線防止ガードは、車両のロッキングが大きい場合には常に有効であるとは言えないこと等が分かった。

## 6. あとがき

本研究では、比較的厳密な車両力学モデルを用いて、振動軌道上の車両の走行性の解析を行った。すなわち、高速鉄道車両の振動軌道上の応答を、従来考慮されていなかった諸要因を取り込み、その特性を検討し、実際の地震動による挙動を調べた。本報告の内容は、大きな課題のうちのごく一部を扱っているにすぎない。種々の地震波形に対する検討、車両・軌道のモデル化

や諸数値の設定などにも検討の余地が残っている。今後ともこの点に関する研究を深めていく予定である。

## 【参考文献】

- 1) 本州四国連絡橋の列車走行性に関する研究報告書、別冊1、走行分科会報告書、日本鉄道施設協会・本州四国連絡橋列車走行委員会・走行分科会、pp120～238、1982年3月。
- 2) 西岡隆：軌道の振動を考慮した車両運動に関する理論的研究、土木学会論文報告集 No. 172, pp43～57, 1969年12月。
- 3) 西岡隆・橋本渉一：水平地震動に対する橋梁上の2軸貨車の走行安定性、土木学会論文報告集 No. 296, pp61～72, 1980年4月。
- 4) 八十島義之助・松本嘉司・西岡隆・大島孝二：振動軌道上の鉄道貨車の走行安定性に関する研究、土木学会論文報告集 No. 313号, pp111～124, 1981年9月。
- 5) 松井哲：二軸貨車競合脱線に関する研究、鉄道技術研究報告 No. 827, 1973年1月。
- 6) 鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物、丸善株式会社 運輸省鉄道局監修 鉄道総合技術研究所編、1992年10月。
- 7) 涌井一・松本信之・松浦章夫・田辺誠：鉄道車両と線路構造物の連成応答解析法に関する研究、土木学会論文報告集 No. 513, 1995年4月。
- 8) 横瀬景司：車輪・レール間のクリープ力を考慮した車輪高周波振動の理論、鉄道技術研究報告 No. 1071, 1978年3月。

# Running safety of railway vehicle on oscillating track

Akio Matsuura

A simulation method which can solve the dynamic interaction between high speed railway vehicle and oscillating track was developed using a 3-dimensional non-linear, 39-degrees-of-freedom vehicle/track mechanical model. Some trial calculations for the running safety of vehicle on the oscillating track which is accelerated by the Hyogo-ken-nanbu earthquake are shown. As the results, the vertical ground motion as well as the horizontal can not be disregarded for derailment of the vehicle which is running on oscillating track, and the guard rails do not always have effect on anti-derailment of the vehicle which is rocking heavily on the oscillating track.