

車輪とまくらぎの衝突を伴う脱線走行車両の数値解析モデル

○ [機] 角南 浩靖 (東海旅客鉄道) [機] 曄道 佳明 (上智大学)

[機] 足立 昌仁 (東海旅客鉄道)

Simulation Model of a Derailed Vehicle Motion with Wheel-sleeper Impact

○Hironobu Sunami, (Central Japan Railway) Yoshiaki Terumichi, (Sophia University)

Masahito Adachi, (Central Japan Railway)

In order to enhance the safety of the Tokaido Shinkansen in the case of earthquakes, authors have developed a post derailment stopper to prevent a derailed vehicle from deviation. We conducted running tests under derailment conditions with real bogies and tracks. For discussing the motion of the derailed vehicle and the stopper, the impact between the wheels and the sleepers is one of the most important issues. We develop the simulation model to describe the derailed vehicle which includes wheel-sleeper impact.

キーワード：鉄道，車両運動，脱線，地震

Key Words : railway, vehicle dynamics, derailment, earthquake

1. 緒論

2004 年に発生した新潟県中越地震以降，東海道新幹線においては，脱線・逸脱防止対策として，脱線防止ガードおよび逸脱防止ストッパが開発された¹⁾。逸脱防止ストッパの開発においては，脱線時の車両の挙動を把握する必要があるため，東海道新幹線の実際の軌道および台車を用いた脱線走行試験を行った²⁾。また，逸脱防止ストッパの有効性を評価する上で，上下動の特性は最も重要であることから，筆者らは，逸脱防止ストッパ付台車枠の上下動に焦点をあてた数値解析モデルを開発し，その特性を明らかにした³⁾。一方，車輪・まくらぎの衝突は，脱線走行車両の運動を論じる上で最も重要な問題の一つである。そこで，筆者らは，実台車走行試験結果をもとに，車輪・まくらぎの衝突を含めた脱線走行車両の運動モデルを構築した。

本論文では，車輪・まくらぎの衝突モデルについて論じるとともに，実台車走行試験結果と比較し，モデルの妥当性を評価する。

2. 車輪・まくらぎ接触モデル

2.1 車輪とまくらぎの接触状態

実台車走行試験後の軌道の状況を図 1(a)に示す。車輪との衝突により，まくらぎが損傷していることがわかる。図 1(b)(c)はまくらぎの損傷例を示す。前後方向について，図 1(b)では，全体にわたって損傷しているが，図 1(c)では，

損傷は一部分のみであり，進行方向の終端側では，車輪はまくらぎ表面上を走行している。また，左右方向については，車輪が通過したところのみに損傷が見られた。実台車走行試験での最高速度は 60km/h 程度であるが，図 1(c)の状況は，概ね 30km/h 以下で走行した地点で観測された。試験結果を踏まえ，車輪とまくらぎの関係について，以下に示す 3 つの状態のモデル化に取り組む。

- (1) 車輪がまくらぎを損傷する場合 (図 1(b))
- (2) 車輪がまくらぎの表面を走行する場合 (図 1(c))
- (3) 車輪がまくらぎから跳躍する場合

2.2 まくらぎ損傷走行モデル

まくらぎが損傷しながら車輪と接触する場合のモデルを図 2 に示す。ここで，点 W は車輪中心を，点 S はまくらぎ重心を表し，車輪とまくらぎは，円弧 PQ で囲まれた領域で接触しているものとする。まくらぎの損傷は，前後方向は減衰要素にて(C_{swx})，上下方向は，ばね・減衰要素にて(K_{swz} , C_{swz})簡単に表現するものとし，車輪・まくらぎ間の接触力は，円弧 PQ の中点 R にて集中的に反力- F_{swx} , F_{swz} を受けるものとする。

2.3 まくらぎ表面走行モデル

車輪がまくらぎの表面を走行する場合のモデルを図 3 に示す。図において，車輪がまくらぎの端部に達した場合に

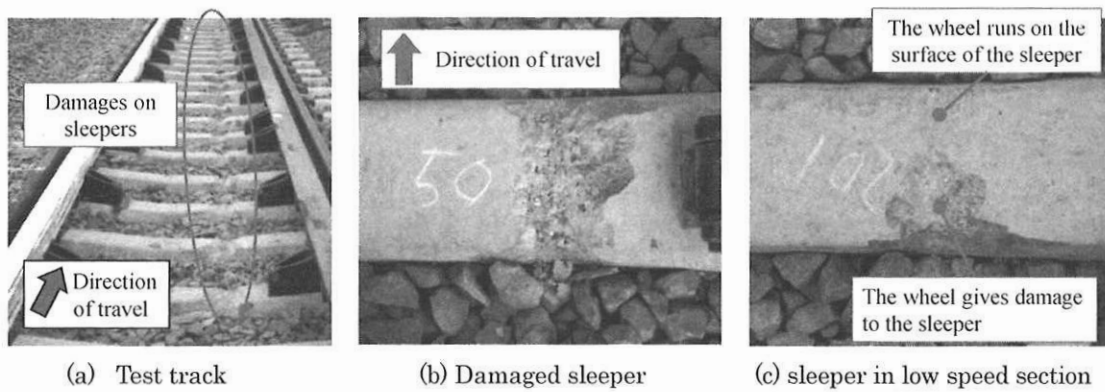


図 1 走行試験後の軌道・まくらぎの状態

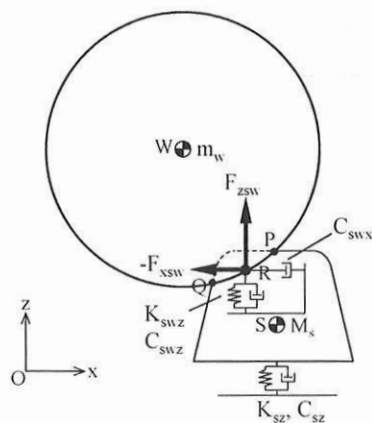


図 2 まくらぎ損傷走行モデル

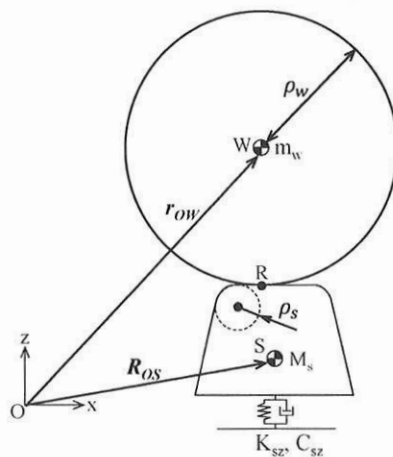


図 3 まくらぎ表面走行モデル

は、まくらぎの肩部（半径 ρ_s ）に沿って車輪は走行する。この場合、車輪とまくらぎは点 R にて剛体接触するものとして、ラグランジュの未定乗数を用い、拡大法による代数微分方程式にて運動を表現する。

2.4 まくらぎ損傷時の接触位置の同定方法

図 4 に車輪と損傷まくらぎの接触状態を示す。時刻 t_0 にて、車輪（中心 W_0 ）とまくらぎは図 4(a) に示す位置関係にあるものとする。このとき、円弧 P_0Q_0 にて車輪は接し、中点 R_0 にて集中的な接触力が生じるものとする。時刻 $t_1 = t_0 + \Delta t$ における車輪（中心 W_1 ）・まくらぎの位置関係として、

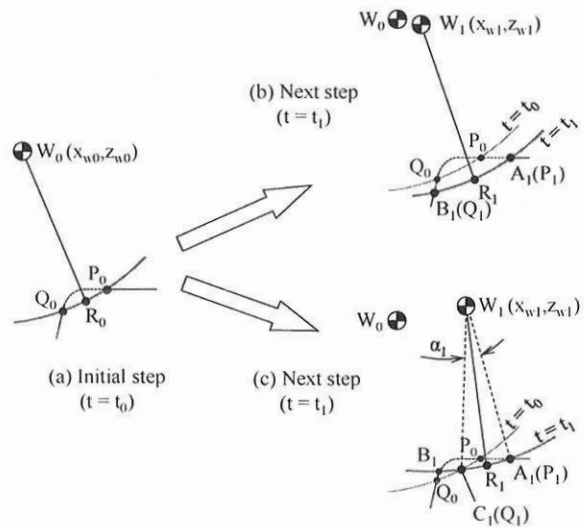


図 4 車輪と損傷まくらぎの接触状態

図 4(b)(c) の 2 つの状態を考える。ここで、車輪とまくらぎ外形との交点を A_1, B_1 と定義する。 A_1, B_1 の座標が以下の式を満足する場合、車輪とまくらぎは図 4(b) の位置関係にあるものとし、 A_1, B_1 を、時刻 t_1 における車輪・まくらぎの接触端 P_1, Q_1 として改めて定義する。

$$x_{P_0}^s < x_{A_1}^s \dots\dots\dots (1)$$

$$x_{Q_0}^s > x_{B_1}^s \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $x_{P_0}^s, x_{Q_0}^s$ は P_0, Q_0 における x 座標を、 $x_{A_1}^s, x_{B_1}^s$ は A_1, B_1 における x 座標を、まくらぎ座標系にて表現したものである。式(2)を満たさない場合、時刻 t_1 における位置関係として、図 4(c) の場合を考える。このとき、車輪 W_0 と W_1 の交点を C_1 とすると、円弧 A_1C_1 で囲まれた領域にて車輪とまくらぎは接触するものとみなし、点 A_1, C_1 を接触円弧端 P_1, Q_1 と定義する。以上の手順により、時刻 t_1 における接触円弧 P_1Q_1 および、その中点としての接触反力作用点 R_1 を同定する。

2.5 まくらぎ損傷走行とまくらぎ表面走行の判別方法

図 5 において、 L_{w1} を車輪中心から P_1, Q_1 を結ぶ弦までの距離と定義する。このとき、式(3)～(5)を満足する場合には、

まくらぎ損傷走行から表面走行に移行する。

$$\rho_w - L_{w1} < \delta \quad (3)$$

$$\dot{z}_w > 0 \quad (4)$$

$$\dot{z}_w - \dot{Z}_s > 0 \quad (5)$$

なお、式(3)に示す δ は、状態判別のためのしきい値である。

3. 車両および軌道モデル

3.1 車両モデル

図6に車輪・まくらぎの衝突を含めた台車モデルを示す。脱線走行時の基本的な現象を把握することを目的としているため、xz平面内の2車輪モデルとする。本モデルは半車体(m_b)、台車枠(m_t)および2車輪(m_w)により構成され、半車体は x_b, z_b の2自由度を、台車枠は x_t, z_t および θ_t の3自由度を有する。車輪は、前から順にNo.1, 2と定義し、滑らずに回転するものとする。車輪回転角は車輪の前後、上下変位の従属変数となるため、各車輪は2自由度(x_{w1}, z_{w1} および x_{w2}, z_{w2})を有する。

3.2 軌道モデル

図7に軌道モデルを示す。レールは曲げ剛性EIを有する連続的な梁要素により表現する。レールは質量 M_s を有するまくらぎと接続し、各まくらぎは独立したばね・ダンパ要素にて地面と接続される。本モデルは全26まくらぎを有しており、まくらぎ $S_{201} \sim S_{211}$ を含む評価区間($S_{200} \sim S_{212}$ 間)にて評価を行う。計算においては、車両はまくらぎ S_{101} の左側から走行を開始し、まくらぎ S_{307} の右側に達した時点で計算を終了する。まくらぎ間隔(L_1)、軸距($2a_1$)から、No.1車輪がまくらぎ S_{106} に達した時点で両車輪ともまくらぎ上を走行し、No.2車輪がまくらぎ S_{303} に達した時点でNo.1車輪はまくらぎ S_{307} の外方に出る。なお、No.2車輪は、実際にはNo.1車輪により損傷したまくらぎ上を走行するが、モデルの目的を考慮し、No.1車輪と同様、新品形状のまくらぎ上を走行するものとする。

3.3 計算諸元

表1に計算諸元を示す。車両諸元は試験車両の諸元を元に設定した。また、軌道の諸元については、時刻歴解析結果と走行試験結果を比較して同定した。

4. 計算結果

4.1 車輪上下変位

計算モデルの妥当性を評価するため、計算結果と実台車走行試験結果を比較する。比較評価においては、速度が異なる2つの区間を選定する。図8, 9にNo.1車輪の上下変位について、測定結果と計算結果を示す。ここで、測定結果は、軸箱振動加速度を積分して車輪位置に換算したもの

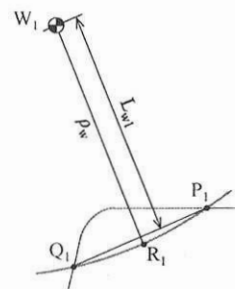


図5 L_{w1} と弦 P_1Q_1 の関係

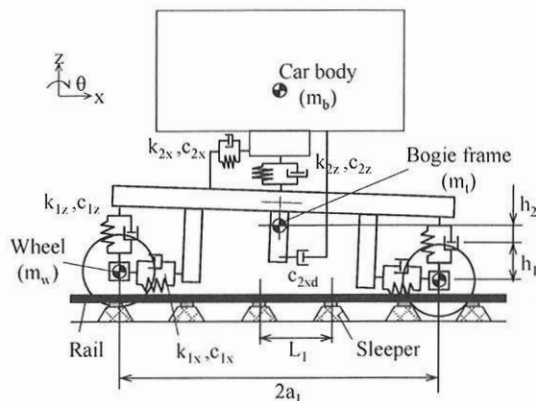


図6 二次元半車両モデル

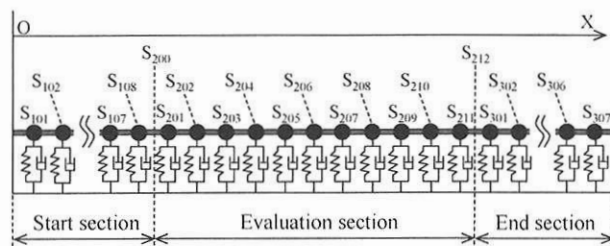


図7 軌道モデル

表1 計算諸元

Mass [kg]		Distance [m]		Stiffness [N/m]	
m_b	8000	a_1	1.25	k_{2x}	2×10^5
m_t	1500	h_1	0.06	k_{2z}	2×10^5
m_w	850	L_1	0.581	K_{swz}	1.5×10^7
Momentum radius [m]		Stiffness [N/m]		Damping ratio	
i_{ly}	0.6	k_{1x}	9×10^6	C_{swx}	3×10^3
i_{wy}	0.3	k_{1z}	1×10^6		

である。また、計算結果の上下変位は、車両がない状態でのまくらぎ表面高さを0とした場合の、車輪最下点の変位を表している。なお、測定結果より同定した車両速度を各図の(a)に示しているが、評価区間における平均速度は、それぞれ46km/h, 23km/hである。車輪がまくらぎ上に達した場合に車輪は上方に、まくらぎ間に位置する場合に下方に変位するが、グラフの形状および振幅より、車両速度に関わらず、測定結果と計算結果の傾向はよく一致している。

4.2 まくらぎ損傷状態

No.1車輪通過後のまくらぎの形状について、計算結果の代表例を図10に示す。図10(a)は図8に、図10(b)は図9に

おける計算結果である。また、図 10(a)の車両速度は図 1(b)とほぼ同様であり、図 10(b)は図 1(c)に対応する。図 10(b)では、まくらぎの半分は、車輪により損傷され、もう半分はまくらぎの表面を走行したことを示しているが、この結果は図 1(c)に示す結果とよく似たものとなっている。

以上に示す車輪上下変位およびまくらぎ損傷状態の比較により、今回提案する計算モデルは、車輪・まくらぎの衝突および脱線時の台車の運動について、その特徴を非常によくつかんだモデルであると判断できる。

4.3 車両速度と車輪上下変位の関係

本モデルを用いた解析の一例として、評価区間における平均速度を 116km/h とした場合の車輪上下変位計算結果を図 11 に示す。さらに、車両速度と車輪上下動の片振幅の関係を図 12 に示す。これらの図より、車両速度が高くなるに従い、車輪の上下動は小さくなる傾向にある。これは、図 10 の計算結果のように、速度が高い場合には、まくらぎは前後方向で全体的に損傷する一方、まくらぎ間への落ち込みが少なくなるため、損傷自体は浅くなることに起因すると考えられる。

5. 結論

脱線走行時の車両の挙動を把握するため、車輪・まくらぎの衝突を含めた運動解析モデルを開発した。

(1) 車輪の上下変位について、車両速度が異なる 2 つの場合について、計算結果と走行試験結果を比較した結果、車両速度に関わらず、両者の傾向はよく一致した。

(2) まくらぎ損傷形状について、計算結果と走行試験後の状況を比較した。計算結果は、走行試験時の損傷の特徴をよく捉えており、車輪上下変位を含め、今回提案したモデルは妥当であると判断できる。

(3) 実台車走行試験よりも高速で走行した場合のシミュレーションを行い、脱線走行時の車輪上下変位は車両速度が高くなるに従い減少することを明らかにした。

参 考 文 献

- 1) 森村勉, 関雅樹, 新潟県中越地震後の東海道新幹線の地震対策について, 第 16 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, No.09-65, pp545-548, 2009.12
- 2) 角南浩靖, 森村勉, 石川栄, 足立昌仁, 坂上啓, 南善徳, 渡邊康人, 曾田祥信, 脱線時の車両の逸脱防止に関する実台車走行試験, 日本機械学会論文集 C 編 Vol.76, No.770, pp2462-2471, 2010.10
- 3) 角南浩靖, 曄道佳明, 足立昌仁, 脱線走行時の車両の逸脱防止機能に関する理論解析, 日本機械学会論文集 C 編 Vol.77, No.781, pp3237-3251, 2011.9

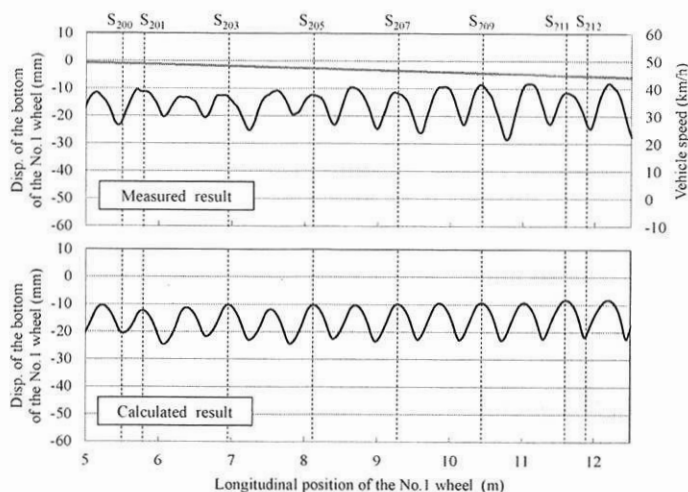


図 8 車輪上下変位比較 (平均速度 46km/h)

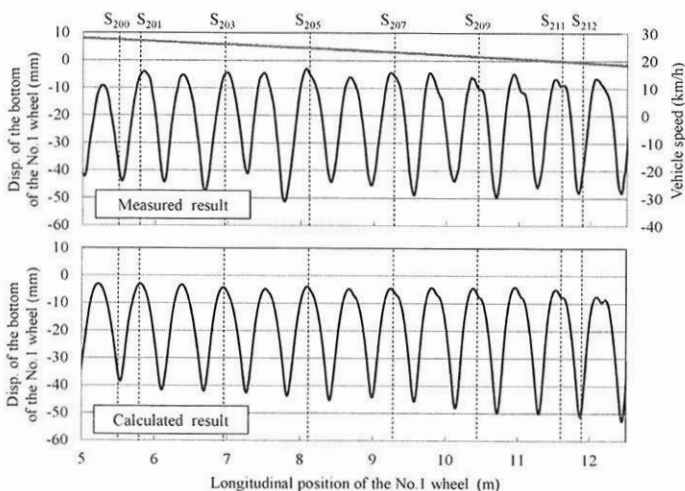


図 9 車輪上下変位比較 (平均速度 23km/h)

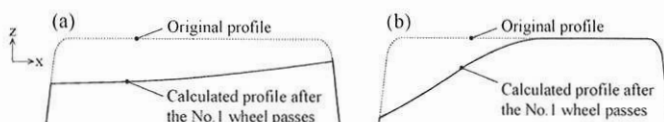


図 10 まくらぎ損傷形状計算結果

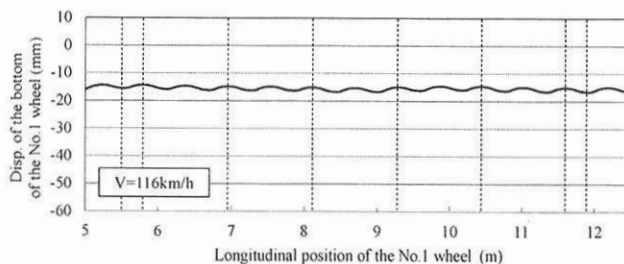


図 11 車輪上下変位計算結果 (平均速度 116km/h)

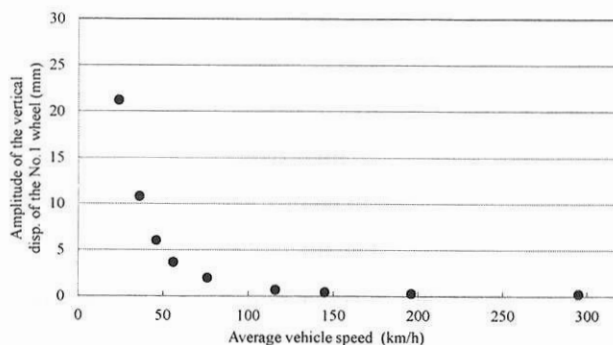


図 12 車両速度と車輪上下変位の関係 (計算結果)