

MBD を用いた輪軸部材と軌道部材の簡易な接触解析手法

後藤 恵一* 曾我部 正道** 田辺 誠***
渡辺 勉* 徳永 宗正*

A Simple Analysis Model for Contact between Wheelset Members and Track Structures Using MBD

Keiichi GOTO Masamichi SOGABE Makoto TANABE
Tsutomu WATANABE Munemasa TOKUNAGA

In this study, we have constructed an efficient contact model between wheelset members and track structures to express collision phenomenon between them during an earthquake. Specifically, we set contact detection points on the multi-body vehicle model and the contact surfaces on the track structures modeled by FEM. The contact force between the contact detection points and the track structures is calculated by the penalty method. In addition, we have incorporated the model into the numerical analytical program DIASTARS III that is able to simulate the railway vehicle behavior before and after derailment. Finally, to validate the proposed model, we have conducted the analysis that the wheelset members contacted the track structures after derailment during the earthquake.

キーワード：接触モデル，動的相互作用，マルチボディーダイナミクス，有限要素法，地震，脱線

1. はじめに

大規模地震時の車両の走行安全性を確保するために、車両の脱線を防止する脱線防止ガード¹⁾や、万が一車両が脱線した場合でも脱線した車両を反対線や線路外部に逸脱することを防止する逸脱防止装置²⁾の開発が進められている。これら対策工の開発や導入にあたっては、地震時の車両挙動、対策工の具体的な構造、設計法、性能、費用対効果、あるいは設置の優先順位等を明確にしておく必要がある。この点に関して、地震時の脱線までの車両挙動や脱線防止ガードの性能については、既に、実物大車両模型を用いた振動台実験や数値解析により明らかにされている^{1) 3)}。また、脱線後の車両挙動については、実験による検討が困難であることから数値解析による検討が進められ、その基本的な挙動が明らかにされつつあるが⁴⁾、車両の各部位（例えば、輪軸部材や車体）が軌道や構造物等の地上設備（以下、線路構造物）に接触する影響については十分な検討が行われていない⁵⁾。また、車両側の対策工等⁶⁾、様々なタイプの逸脱防止装置が開発される中で、その効果を定量的に評価可能な柔軟な数値解析手法の確立が求められている。

以上から、本研究では、車両の各部位と線路構造物との接触を考慮した、脱線前～脱線後の一連の車両挙動を表現可能な数値解析手法の確立を目的として、輪軸部材

と軌道部材の接触を考慮した地震時車両挙動の解析手法を構築するとともに、本手法の実用性を検討した。

2. 解析手法

接触体の形状寸法や材料の非線形特性を考慮した精緻な接触評価を行う場合、FEM解析を用いるのが一般的である。しかしながら、本研究で対象とするのは複雑な多自由度系同士の接触問題であるため、シェル要素やソリッド要素を用いて接触解析を行うと、膨大な自由度が必要となる。特に、走行中の車両が地震動等の外力によって脱線し、線路構造物に接触するような数十秒単位の長時間の現象を評価する必要がある場合には、実用的な接触解析を行うためには何らかの工夫が必要となる。本研究において、車両と線路構造物間の接触解析を行うための基本コンセプトは以下の通りである。

- (1) 車両と線路構造物の接触問題を効率的に取り扱うため、弾塑性変形を伴う接触をマイクロに取り扱うのではなく、一定の解析精度を保ちつつもマクロに接触現象を表現する。
- (2) 接触力は線路直角方向、鉛直方向成分のみを考慮し、線路方向成分に関しては線路構造物側の反力のみ取り扱う。よって車両は等速運動するものとする。また、正面衝突問題や車両の減速現象は取り扱わない。
- (3) 接触計算はペナルティ法を用いて効率的に行うこととする。接触力計算は、車両側の接触検知点と線路構造物側の接触面とで行う。

* 鉄道力学研究部 構造力学研究室
** 前 鉄道力学研究部
*** 神奈川工科大学 機械工学科

特集：鉄道力学

- (4) 接触（ペナルティ）ばねは、接触検知点と接触面の相対変位（仮想食い込み量）と接触力の関係として定義し、マルチリニアモデルとして区分的に表す。この接触ばね特性については、要素実験または詳細なFEM解析により別途求める。
- (5) 各接触ばねは、接触検知点の配置位置や配置数、配置間隔に応じて個々に定義する。
- (6) 車両側の接触検知点は、接触検知点が属するマルチボディー（車体、台車または輪軸）の重心に対する相対位置で定義する。
- (7) 線路構造物側の接触面は、FEM節点情報を用いて定義する。

なお、車体と線路構造物間の接触解析手法については既に構築済みであり⁷⁾、本研究は輪軸部材（ギアケースやブレーキディスク、車両側逸脱防止装置等）とレール等の軌道部材との接触解析手法を構築するものである。

また、本提案手法は、脱線前後の車両挙動を解析可能な、新幹線車両と鉄道構造物との動的相互作用解析プログラム DIASTARS III⁴⁾を改良することで構築した。以下にその概要を述べる。

2.1 車両の力学モデル

図1に車両の力学モデルを示す。車両は、車体、台車、輪軸の各構成要素を剛体と仮定し、これら剛体をばね、ダンパで結合した三次元モデルとした。1車両当たりの自由度は31である。実車では各構成要素間に著大な相対変位を抑制できるストッパが設けられていることから、これを表現するために、ばねはバイリニア形非線形ばねとした。なお、力学モデルの妥当性については、実物大車両模型を用いた検証実験により確認されている³⁾。

車両系の運動方程式は、車両座標系において、車両の各構成要素間の非線形ばね項を右辺に移項し、式(1)のように表せる。

$$M^V \ddot{X}^V + C^V \dot{X}^V + K^V X^V = F_L^V + F_G^V(X^V, X^B) + F_N^V(X^V) \quad (1)$$

ここに、 X^V は車両の変位ベクトル、 X^B は構造物の変位ベクトル、 M^V 、 C^V 、 K^V はそれぞれ車両の質量、減衰、剛性マトリクス、 F_L^V は遠心力や風荷重等の車両への荷重ベクトル、 $F_G^V(X^V, X^B)$ は構造物との相互作用力、 $F_N^V(X^V)$ は外力扱いとした車両モデル内の非線形ばね力の荷重ベクトルである。

2.2 線路構造物の力学モデル

DIASTARS IIIでは、任意の構造形式を、様々な有限要素でモデル化することができる。線路構造物の詳細な力学モデルについては3章で述べるが、本研究では軌道部材についても同様に有限要素によりモデル化する。

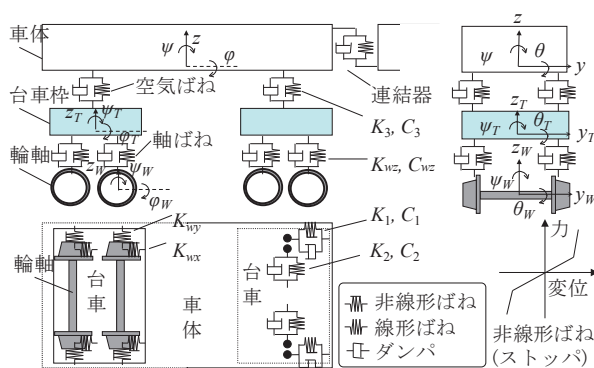


図1 車両の力学モデル

なお、線路構造物系の運動方程式は、線路構造物の非線形ばねの項を右辺に移項し、式(2)のように表せる。

$$M^B \ddot{X}^B + C^B \dot{X}^B + K^B X^B = F_L^B + F_G^B(X^V, X^B) + F_N^B(X^B) \quad (2)$$

ここに、 M^B 、 C^B 、 K^B はそれぞれ線路構造物の質量、減衰、剛性マトリクス、 F_L^B は主として地震や風荷重等の線路構造物に働く荷重ベクトル、 $F_G^B(X^V, X^B)$ は車両との相互作用力に関する節点荷重ベクトル、 $F_N^B(X^B)$ は外力扱いとした線路構造物モデル内の非線形ばね力の荷重ベクトルである。

2.3 車両と線路構造物の接触モデル

図2に車両と線路構造物間の接触モデルの概念図を示す。本接触モデルでは、車両と線路構造物間の複雑な接触現象を実用的なレベルで表現可能なものとするために、車両に定義した接触検知点と、線路構造物のFEMモデルの節点情報から構成した接触面とで接触評価を行う。

2.3.1 車両の接触検知点

線路構造物と接触する可能性のある車両の任意箇所接触検知点 C_i ($i=1, \dots, n$) を定義し、各接触検知点において線路構造物との接触判定や相互作用力を計算する。本手法により、車両の接触位置があらかじめ予想できる場合には、接触する可能性のある位置にのみ接触検知点を配置することで高速な接触計算を実現する。また、接触位置が予想できない場合には、接触検知点を密に配置することで接触位置を特定することも可能となる。

2.3.2 線路構造物上の接触面

図3に線路構造物上の接触面のモデル化を示す。接触面は、線路構造物FEM要素上に定義した線路方向の2本のラインにより挟まれる領域としてモデル化する。また、この接触面は、ラインL1及びL2が通過する要素境界上のE1～E4の4点で定義される双一次曲面の各Sectionにより区分的に表現する。接触面をSectionにより表現することで、接触検知点が存在するSectionのみを対象として接触計算を行えば良いため、高速な計算が可能となる。

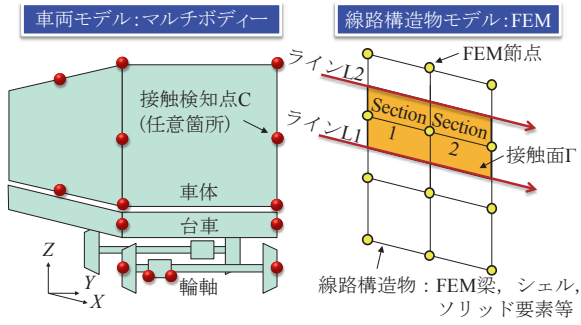


図2 車両と線路構造物の接触モデルの概念図

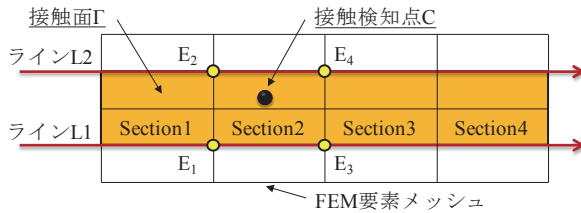


図3 線路構造物上の接触面のモデル化

2.3.3 接触検知点と接触面間の接触力

図4に示すように、車両上に定義した接触検知点Cと線路構造物上のある接触面との接触を考える。Sectionを構成する4点 E_i ($i=1 \sim 4$)の初期の全体座標系での位置を X_i とすると、接触面の局所座標系を定義する単位ベクトル $e_1 \sim e_3$ は、式(3)のように表すことができる。

$$\begin{aligned} e_1 &= (X_3 - X_1) / |X_3 - X_1| \\ e_2' &= (X_2 - X_1) / |X_2 - X_1| \\ e_3 &= e_1 \times e_2' / |e_1 - e_2'| \\ e_2 &= e_3 \times e_1 \end{aligned} \quad (3)$$

時刻 t における解が得られているとき、接触検知点Cの時刻 $t+\Delta t$ での全体座標系での位置を $X_{t+\Delta t}^C = (X_{t+\Delta t}^C, Y_{t+\Delta t}^C, Z_{t+\Delta t}^C)$ とすると、接触面局所座標系での位置 P^c は、式(4)のように表すことができる。

$$P^c = \begin{pmatrix} p^c \\ q^c \\ r^c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (X_{t+\Delta t}^C - X_1) \cdot e_1 \\ (X_{t+\Delta t}^C - X_1) \cdot e_2 \\ (X_{t+\Delta t}^C - X_1) \cdot e_3 \end{pmatrix} \quad (4)$$

また、時刻 $t+\Delta t$ において、ラインL1上で接触検知点Cが E_1 から d_1 の距離にあるものとし、 $E_1 \sim E_3$ 間の距離を d とすると、接触検知点Cの接触面上ラインL1方向の正規座標 α は式(5)のように書ける。

$$\alpha = d_1 / d \quad (5)$$

次に、時刻 $t+\Delta t$ での E_i の変位ベクトルを $u_{i,t+\Delta t}$ 、 E_i の全体座標系での初期位置($t=0$)を X_i とすると、時刻 $t+\Delta t$ での E_i の全体座標系での位置 $X_{i,t+\Delta t}$ は、式(6)で表される。

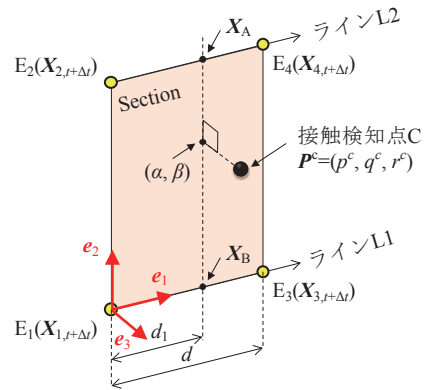


図4 接触検知点Cと接触面 (Section) との接触

$$X_{i,t+\Delta t} = X_i + u_{i,t+\Delta t} \quad (i=1 \sim 4) \quad (6)$$

時刻 $t+\Delta t$ におけるラインL1及びL2上の接触検知点Cに関わる点 X_A 、 X_B の全体座標系での位置は、 E_2 、 E_4 及び E_1 、 E_3 の時刻 $t+\Delta t$ の全体座標系での位置 $X_{i,t+\Delta t}$ と正規座標 α を用いて式(7)のように書ける。

$$\begin{aligned} X_A &= X_{2,t+\Delta t} + \alpha (X_{4,t+\Delta t} - X_{2,t+\Delta t}) \\ X_B &= X_{1,t+\Delta t} + \alpha (X_{3,t+\Delta t} - X_{1,t+\Delta t}) \end{aligned} \quad (7)$$

また、 X_A 、 X_B の接触面局所座標系での位置を P_A 、 P_B とし、その成分を式(8)と書くと、接触検知点Cの接触面上ライン直角(e_2)方向の正規座標 β は式(9)のように書ける。

$$P_A = \begin{pmatrix} p_A \\ q_A \\ r_A \end{pmatrix}, P_B = \begin{pmatrix} p_B \\ q_B \\ r_B \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\beta = (q^c - q_B) / (q_A - q_B) \quad (9)$$

ここで、 $0 \leq \beta \leq 1$ となるとき、接触検知点CはラインL1とL2の間にある、即ち、当該Section内にあることを意味する。また、接触面の正規座標 (α, β) の位置での接触検知点Cの e_3 方向の座標は、 β で補間し式(10)で求められる。

$$r = r_B + \beta (r_A - r_B) \quad (10)$$

よって、接触検知点Cと接触面間の相対変位(接触変位) δ_n は、式(11)となる。

$$\delta_n = r - r^c + \varepsilon (x_{t+\Delta t}^c) \quad (11)$$

ここに、 $\varepsilon (x_{t+\Delta t}^c)$ は接触面にあらかじめ設定された不整である。 $\delta_n < 0$ の時、接触検知点Cと接触面は非接触、 $\delta_n \geq 0$ の時、接触検知点Cと接触面は接触しているものと考え接触力 F_n を計算する。接触力 F_n は接触検知点Cと接触面間の相対変位 δ_n の関数として式(12)のように表す。

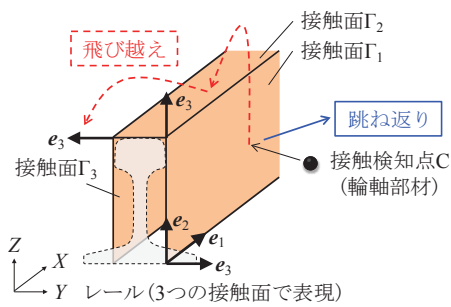


図5 レール接触面のモデル化

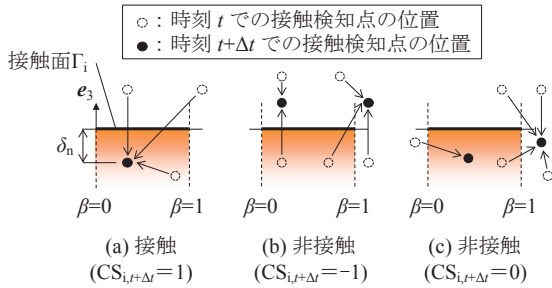


図6 接触状態の判定

$$F_n = K_n(\delta_n) \quad (12)$$

ここに、 K_n は接触検知点と接触面間の相対変位と接触力の関係式である。この K_n に関しては、接触材料間の弾塑性変形や局部座屈などの非線形挙動を表現するもので、静的載荷試験や詳細な FEM 解析により別途求める。

式 (12) より求められた接触力 F_n は、車両に対しては車体重心位置での作用力及びモーメント力に変換し、式 (1) の車両の運動方程式に付加する。また、線路構造物に対しては接触力 F_n を接触位置近傍の FEM 節点に分配し、節点力として式 (2) の運動方程式に付加する。

2.3.4 接触検知点と接触面間の接触力

本研究で対象とする輪軸部材とレール等の軌道部材の接触では、輪軸部材のレール側面への接触、レール上面への乗り上げ、乗り越え現象についても表現する必要がある。これらの現象を適切に表現するためには、レールを複数の接触面より構成するとともに、接触検知点と複数の接触面との接触アルゴリズムを構築する必要がある。

図 5 にレール接触面のモデルを示す。本研究ではレールを 3 つの接触面により表現することとした。図 6 に接触検知点と接触面の接触状態の判定を示す。接触検知点と複数の接触面との接触判定を行うために新たに 3 パターンの接触状態を定義した。ここで、図中の $CS_{i,t}$ ($i = 1, \dots, n$: 接触面の数) は時刻 t における接触検知点と接触面 Γ_i との接触状態を表し、 $CS_{i,t} = 1$ は接触検知点と接触面が接触状態にあることを、 $CS_{i,t} = -1$ は非接触状態にあることを表す。 $CS_{i,t} = 0$ は $CS_{i,t} = -1$ と同様に非接触状態を表すが、接触検知点の初期貫入や接触範囲外から接触範囲内への進入に対して非接触状態であることを表すものであ

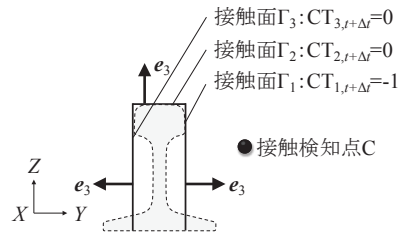


図7 接触状態の判定例

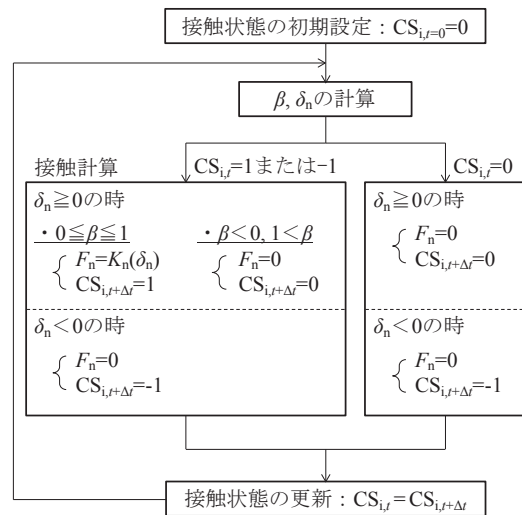


図8 複数接触面との接触計算フロー図

る。 $CS_{i,t} = 0$ を非接触状態として別途設定することで、例えば、図 7 に示すような接触検知点と接触面 Γ_3 の位置関係の場合において、接触検知点は接触面 Γ_3 に対しても非接触状態であると判定することができる。

図 8 に接触検知点と複数接触面との接触計算フロー図を示す。接触状態 $CS_{i,t}$ に基づいた接触計算により、接触検知点と複数接触面との効率的な接触計算が可能となる。

2.4 車輪とレール間の力学モデル

車輪とレール間の力学モデルは従来のモデルを使用した。詳細は参考文献⁴⁾に譲るが、脱線までは車輪とレールの精密な幾何学形状を考慮した接触モデルを、脱線後は車輪を円錐台形、レールを矩形断面とする簡易接触モデルとした。

2.5 数値解析法

DIASTARS III では、車両及び線路構造物に関する運動方程式を連立して解くことにより、複数の車両からなる列車と線路構造物との動的な連成解析を行う。その際、効率的な数値解析を行うために、車両及び線路構造物の運動方程式をモーダル変換する。得られる車両及び線路構造物のモーダル座標系上での運動方程式を、Newmark の平均加速度法により時間増分 Δt ごとに解く。ただし、運動方程式が非線形であることから、不釣合力が十分小さくなるまで Δt 内において反復計算を行う。

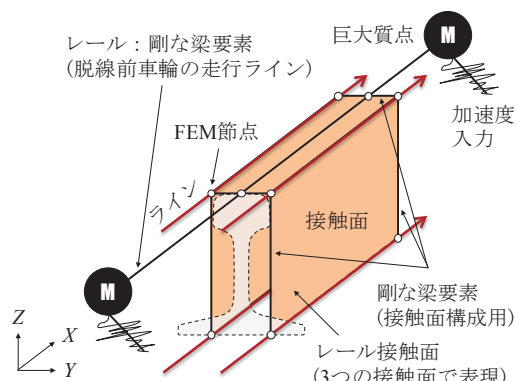


図9 線路構造物の解析モデル (片側レール分)

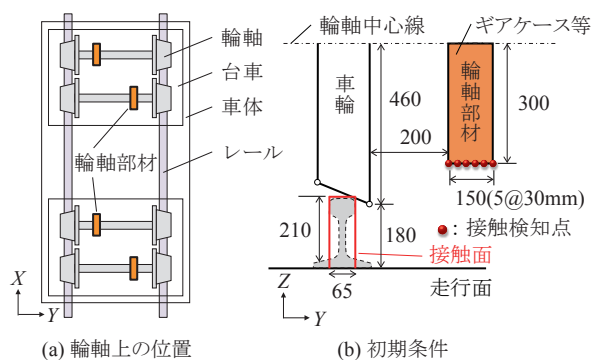


図10 接触検知点の配置 (単位: mm)

2.6 解析手法の妥当性

提案接触モデルを組み込んだ本解析手法の妥当性に関しては、実物大実験により検証を行うことが困難である。また、縮小模型実験では、接触部分の構成則を再現することが難しいため、マルチボディとしての挙動を検証するにとどまらざるを得ない。現状、本解析手法の妥当性については、下記の点から確保されていると判断する。

- (1) 脱線までの車両の非線形挙動は、実物大模型実験及び機構解析プログラムにより検証されている^{3) 8)}。
- (2) 輪軸部材と軌道部材間、車両と線路構造物間の接触ばねは、実物大部分模型実験や詳細な FEM 解析の結果を用いる。

3. 解析手法の実用性の検討

本章では、2章で述べた解析手法を用いて、脱線後の輪軸部材と軌道部材の接触に関する試計算を実施した。具体的には、ギアケースを想定した輪軸部材と軌道部材であるレールの接触に関する試計算を実施し、ギアケースのレールへの接触及び乗り越え現象を表現可能であることを検証した。

3.1 検討方法

図9に線路構造物の解析モデルを示す。レールは脱線前の車輪の走行ラインとしても取り扱う、十分に長い剛な梁要素でモデル化し、その両端に車両の約 10^7 倍の質量を有する加速度入力用の巨大質点を設けた。また、レール接触面に関しては、接触面構成用の剛な梁要素を配置し、この節点に対して接触面定義用のラインを設定することで、側面に2面、上面に1面の計3面の接触面を構成した。上記モデルを左右レールに対して用意した。

図10に輪軸部材の接触検知点の配置を示す。接触検知点はレールとの接触が想定される位置に配置した。具体的には、図10(a)に示すように4つの輪軸に千鳥に配置された各輪軸部材の下端に、図10(b)に示すように接触検知点を線路直角方向に30mm間隔で6点配置

した。初期の車輪と輪軸部材の離隔は200mm、輪軸部材の高さは300mmと仮定した。ギアケースとレール間の接触ばねは、レール小返りばねのばね定数に相当する30kN/mmの線形モデルを仮定した。

巨大質点への入力波は前後に緩衝区間を設けた加振振動数0.5~2.0Hzの正弦波1波とした。また、その加振方向は線路直角方向とし、同位相加振とした。車両は1両編成とし、その走行速度は270km/hとした。

3.2 検討結果

図11、図12に時刻歴波形の例を示す。図11は加振振動数0.5Hz、加振振幅0.56mとした場合の結果で、脱線後に輪軸部材がレール側面に接触する場合の例である。図11(a)より、加振によって左右の車輪が交互に浮き上がり、約4.5秒で脱線して走行面に落下していることが分かる。図11(b)より、水平方向の変位に関しては、約4.7秒で輪軸部材とレールの接触が、約5.8秒で右車輪とレールの接触が発生することで、輪軸の水平変位が制限されていることが確認できる。即ち、輪軸部材と車輪間の隙間にレールが挟まることで逸脱防止装置として機能していることが分かる。図11(c)には輪軸部材とレール間の接触力波形を示す。最大で約480kNの著大な接触力が発生しているが、この値は車両の脱線モードや接触ばね特性、接触検知点の配置等に大きく依存すると推測されるため参考程度の値である。上記より、提案手法により輪軸部材と軌道部材(レール)との側面接触現象を表現可能であることが分かった。

図12は加振振動数1.0Hz、加振振幅0.20mとした場合の結果で、脱線後に輪軸部材がレール上面に接触し、そのまま乗り越える例である。図13に輪軸挙動の概念図を示す。図12(a)に示すように、約2.5秒で脱線し、約2.7秒で輪軸部材がレール上面に接触している。その際、図12(c)より210kN程度の鉛直方向の接触力が発生していること確認できる。その後、輪軸部材がレールを乗り越えるため、図12(b)に示すように輪軸の水平変位が増大し、約3.2秒で1・3軸目の輪軸部材がレール

特集：鉄道力学

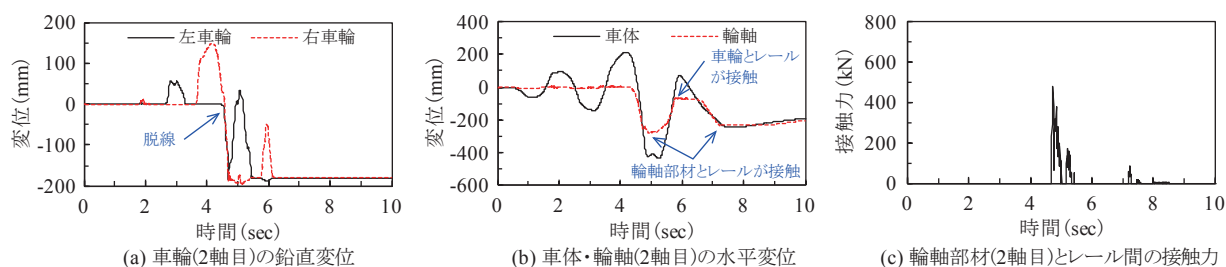


図 11 時刻歴波形の例（加振振動数：0.5Hz，加振振幅：0.56m）

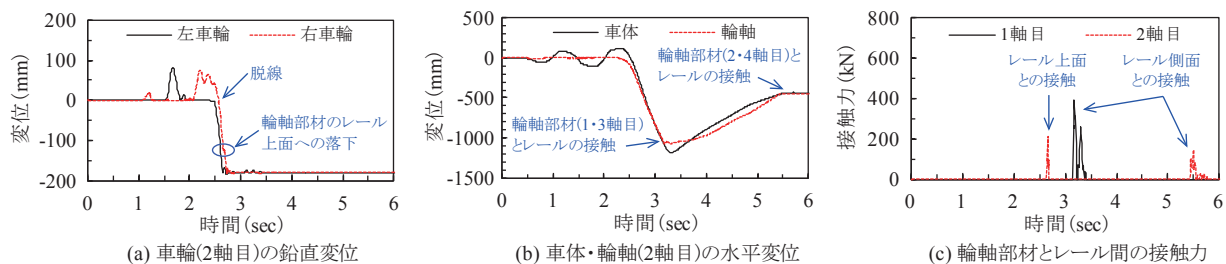


図 12 時刻歴波形の例（加振振動数：1.0Hz，加振振幅：0.20m）

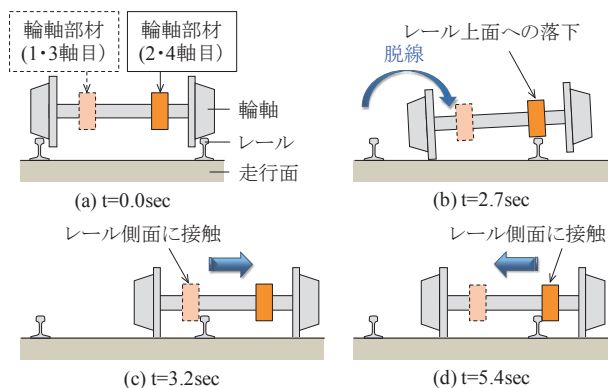


図 13 輪軸挙動の概念図

側面と接触することに水平変位が制限され（図 13 (c)），さらに約 5.4 秒で 2・4 軸目の輪軸部材がレール側面と接触することで同様に水平変位が制限されていることが確認できる。このように，輪軸部材のレール上面への接触，乗り越え，その後のレール側面への再接触という複雑な接触現象を本提案手法により表現できることが分かった。

4. まとめ

本研究では，輪軸部材と軌道部材の接触を効率的に表現可能な接触モデルを提案するとともに，提案手法を用いた試計算を実施した。以下に，本研究のまとめを示す。

- (1) マルチボディー車両モデルに配置した任意の接触検知点と，構造物を表現した FEM モデルを基に構成した接触面との間の動的な接触力を，ペナルティ法により計算する手法を提案し，輪軸部材上に配置した接触検知点と複数接触面との接触判定が可能な接触アルゴリズムを構築した。
- (2) 上記接触アルゴリズムを車両と構造物の動的相互作用解析プログラムに組み込むことで，輪軸部材と軌

道部材の接触を考慮した車両挙動を表現可能な解析ツールを構築した。

- (3) ギアケースを想定した輪軸部材とレールとの接触に関する試計算により，本解析手法がレールとの接触，乗り上げおよび乗り越えを表現可能であることを確認した。

文 献

- 1) 森村勉，西村和彦，曄道佳明，曾我部潔：地震時の脱線メカニズムおよび脱線防止ガード機能に関する解析，鉄道技術連合シンポジウム論文集，No.16，pp.561-564，2009
- 2) 浅沼潔，曾我部正道，渡辺勉，岡山準也，涌井一：逸脱防止機能を有するバラスト・ラダー軌道の開発，鉄道総研報告，Vol.23，No.2，2009
- 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，日本機械学会論文集（C編），Vol.72，No.706，pp.1849-1855，2005
- 4) 後藤恵一，曾我部正道，田辺誠，浅沼潔：脱線後の車輪と軌道の接触モデルに関する研究，鉄道力学論文集，No.15，pp.132-139，2011
- 5) 葛田理仁，児玉真一，金元啓幸，宇治田寧，西山幸夫：1/10 模型車両による側壁誘導試験と数値シミュレーション，鉄道総研報告，Vol.28，No.12，pp.23-28，2014
- 6) 梶谷泰史，加藤博之，浅野浩二：車両逸脱防止 L 型ガイドの開発，JR EAST Technical Review，No.29，pp.27-30，2009
- 7) 後藤恵一，曾我部正道，渡辺勉，徳永宗正：MBD による車体と軌道，構造物等の簡易な接触解析法，鉄道総研報告，Vol.30，No.2，pp.35-40，2016
- 8) 曾我部正道，浅沼潔，涌井一：地震時列車逸脱防止ガードの性能評価法の開発，鉄道力学論文集，No.11，pp.69-74，2007