

# 鉄道における接触問題に関わる研究動向

池田 充\*

The Recent Trend in Research on Contact Phenomena in the Railway System

Mitsuru IKEDA

Contact phenomenon is often the key to the solution of the various problems related to the railway system. Therefore, it has been one of the crucial issues to be clarified in order to improve quality of railway operation. This paper describes the recent trend of research on contact phenomena in the railway system such as rolling contact of wheels and rails, impact motion of vehicles and railway structures, sliding contact of overhead and pantographs and so on in a higher perspective.

キーワード：接触，鉄道力学，ダイナミクス，シミュレーション

## 1. はじめに

力学現象を工学的に取り扱うとき、しばしば問題となるのが接触の取扱いである。これは、接触は現象そのものが複雑であるうえ影響因子が多いため、その全貌を把握することが容易ではないためである。そのうえ、接触現象が系全体の挙動に大きな影響を与える場合が多いため、これをどのように取り扱うのかによって解析結果が大きく異なる場合もある。したがって、接触現象の定式化やモデル化には慎重さが求められる。これは、鉄道のダイナミクスに関わる研究においてもそのまま当てはまる。

一般的な鉄道では、車輪がレール上を転がり接触することによって車両を駆動する。車両の操舵（左右方向への案内）もまた、車輪とレールとの接触により実現している。バラスト軌道では、1両あたり数十トンにも及ぶ車両重量をバラスト碎石間の接触を介して路盤へと伝達することで、この質量を効率よく支持している。さらに、車両への電力供給も、車両に搭載した集電装置と電車線との間のしゅう動接触により行う方式が一般的である。これを逆に捉えれば、こうした接触部位で何らかの問題が生じると、それは車両運行の阻害要因となり得ることから、鉄道において接触問題は古くから重要な研究課題の一つであり、現在もなお多くの課題に取り組んでいる。本稿では、こうした鉄道における接触問題に対する鉄道総研の最近の取組みについて紹介する。

## 2. 車輪・レール間の転がり接触解析

車輪とレールのように2つの物体が接触する場合の工学的取扱いの基礎となるのは、ヘルツの接触理論である。この理論は曲面をなす2つの物体表面間の接触を対象と

\* 鉄道力学研究部 部長

しており、接触に伴う物体の変形は材料の弾性限度内で起こることを前提として、接触面の大きさやその応力分布を与える理論である。ただし、転がり接触の場合には、接触面の一部、あるいは全面にわたって2つの物体がすべる現象が発生し、これが車輪の粘着特性に大きな影響を及ぼしている<sup>1)</sup>。こうした状態の接触解析は、カルカーの厳密理論<sup>2)</sup>を用いて行われることが多い。しかしながら、一般的な車両では各車輪からレールに作用する平均輪重は50kN程度であるため、車輪が静止している場合であってもレールとの接触面に作用する応力は弾性限度を超える値となる。さらに、接触応力は非正常な挙動を示すが、塑性変形や非正常性を考慮した接触解析にはまだ課題が多い。

そこで鉄道総研では、何らかの仮定に基づく理論的取扱いが不要な、数値解析に基づく車輪・レール間転がり接触解析の確立を目指し、材料非線形性や幾何学的非線形などをより厳密に取り扱うことが可能で、しかも動的な転がり接触解析が可能な車輪・レール転がり接触シミュレータ<sup>3)</sup>の開発を、東京大学奥田教授との共同研究により進めている。本シミュレータは大規模並列有限要素法構造解析ソフトウェアFrontISTR<sup>4)</sup>をベースとして構築したものであり、車輪踏面ならびにレール頭頂面を一樣かつ細かいメッシュ（ファインメッシュ）に分割したことにより、接触面内の動的な応力分布を十分な解像度で解析できる。ただし、ファインメッシュを用いることから計算規模が非常に大きく、高性能計算（HPC）技術を高度に活用したうえでスパコンの利用が前提となる。車輪1輪の挙動のみを取り扱うことのできる1輪1軸モデルから開発をスタートし、2輪2軸モデルを経て、現在では1台車分の転がり接触挙動が評価可能な4輪2軸モデル<sup>5)</sup>を開発中である（図1）。2輪2軸モデルまではまくらぎ方向の運動が拘束されていたが、4輪2軸モデルではこの拘束が不要となったため、曲線区間を含む転

特集：鉄道力学

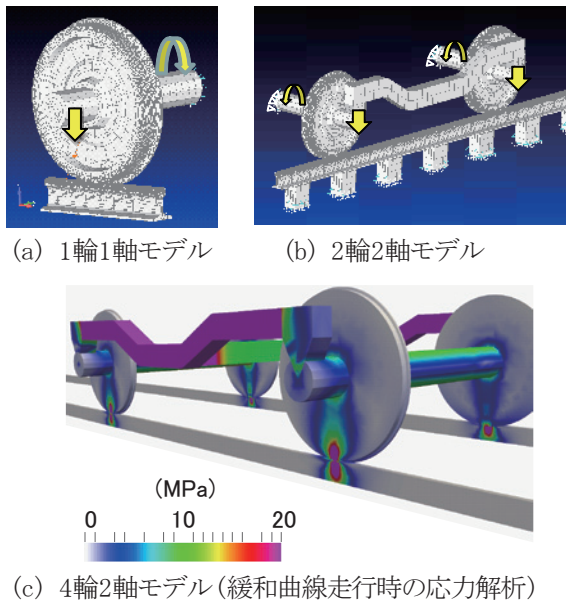


図1 車輪・レール転がり接触シミュレータ

がり接触挙動の解析が可能となった(図1(c))。車輪・レール間の転がり接触に起因して生じるレールの長期劣化現象の多くは曲線区間で発生していることから、これまでもレールのき裂発生とその進展を解析するシミュレーションなどを開発してきた<sup>6)</sup>が、解析の前提となる車輪・レール間の接触面の応力分布の導出を準静的な解析により行っていた。車輪・レール転がり接触シミュレータにより曲線区間における接触挙動をより正確に解析できるようになってきたことから、こうしたレールの長期劣化の発生メカニズムやその発生条件の解明に本シミュレータを活用していく予定である。

ところで、レールは開放された空間に敷設されることから、その表面には様々な物質が存在する。これが車輪との接触面に介在すると、場合によっては車両の粘着性能を大きく低下させる原因となる。そのような介在物のひとつに落葉がある。秋季から初冬にかけて、山間線区ではレール上に落ちた落葉によって車輪の空転・滑走が発生し、列車の遅延や運休などを余儀なくされることがある(図2)。そこで、落葉に起因する粘着力低下メカニズムの解明とその対策法についての研究を実施している。

これまで、主として本州の山間線区を対象に継続的な現地調査を実施するとともに、鉄道総研の所内試験線における再現試験ならびに各種定置試験を実施し、基本的な粘着力低下メカニズムが明らかになってきた。その詳細は本誌の特集論文<sup>7)</sup>を参照頂くこととし、ここではその概要のみ紹介する。車輪とレールとの間に落葉が介在した状態で車輪が繰り返し通過すると、落葉はつぶされてレール表面に付着する。この付着物に含まれるタンニン気象条件(気温、湿度)下において鉄と反応してタンニン鉄を生成し、黒色皮膜へと変化する。さらに湿潤条件下で



(a) 春季(左)と秋季(右)のレール表面の違い



(b) 構内試験線における再現試験の様子

図2 落葉に起因する車輪空転・滑走メカニズムに関する研究

は黒色皮膜はペースト状となり、この状態で車輪が通過すると粘着力が著しく低下して空転・滑走を引き起こす。

こうしたメカニズムが明らかとなってきたことから、現在は空転・滑走に対する具体的対策法の開発に取り組んでいる。なお、国内外においてすでにレール表面の高圧洗浄や研磨などの対策が講じられているものの、上述の研究によって粘着力低下の主要因であることがわかったタンニン鉄は非水溶性であることから、洗浄による除去は困難であることが予測され、より効果的な対策法の確立にむけて研究を進めていく予定である。

### 3. 接触ペアの探索が重要となる解析

すでに触れたように、バラスト軌道においてはレールが車両から受ける荷重はバラストを介して路盤に伝達される。この荷重の伝達過程において路盤に対する力の分散化が図られるなど、バラストは非常に合理的なまくらぎ支持構造である一方で、バラスト砕石の移動や磨滅によって道床沈下が生じるため、定期的な保守が必要となることが問題である。そこで鉄道総研では、バラスト相互の接触部の動的挙動を明らかにすることを通じて、保守の省力化を実現可能な新しいバラスト軌道の提案を行う研究を進めている<sup>8) 9)</sup>。また、近年の日本列島における地震活動の活発化を受け、巨大地震時を想定した車両脱線時の挙動予測の重要性が高くなっている。そこで鉄道総研では、大型振動試験装置を用いて実台車による脱線再現実験<sup>10)</sup>を実施するとともに、模型実験やシミュレーションにより脱線した車両の挙動評価<sup>11) 12)</sup>を行っている。

これらの解析において共通する工学的課題は、接触解析において重要な接触ペアの定義をどのように合理的に

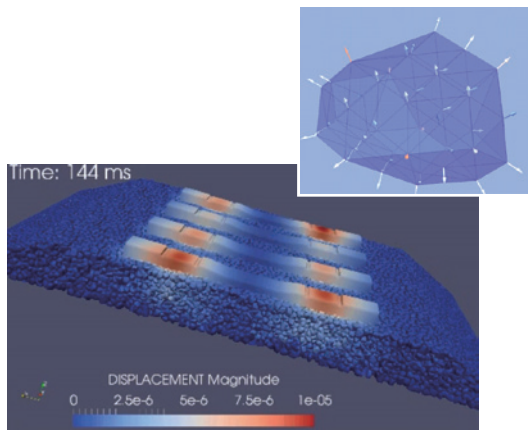


図3 バラスト軌道シミュレータのバラスト砕石モデルとバラスト軌道の変位分布解析例

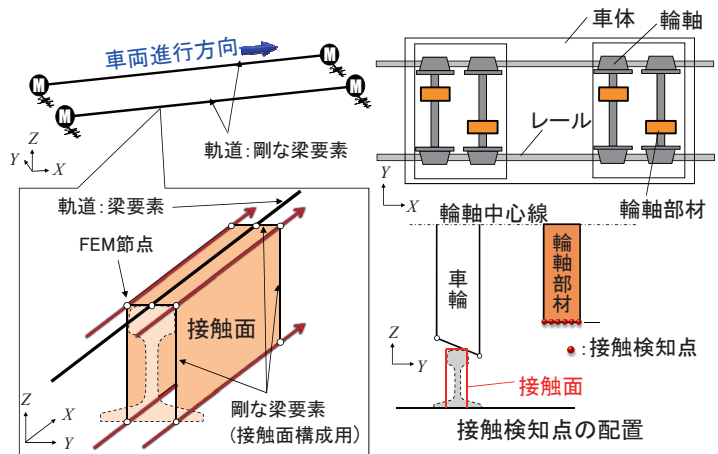


図4 脱線後の車両挙動解析に適用した輪軸部材と軌道部材との接触点探索手法

行うのか、という点にある。バラスト砕石の動的挙動に関しては、多数あるバラスト砕石のなかのどの組合せにおいて接触が生じるのか、これをあらかじめ指定することは難しい。また、脱線した車両の輪軸が軌道や構造物のどの部位を走行するのか、あるいは車両のどの部位が軌道や構造物と接触するのか、といったことについても、これをあらかじめ特定することは容易ではない。そのため、いわゆる接触ペアの探索が重要となる。

バラスト砕石は粒状体とみなせるため、その挙動シミュレーションには粒状体解析によく用いられる個別要素法を適用している。個別要素法とは、解析対象を自由に運動できる多角形要素あるいは球集合体要素としてモデル化し、各要素間の接触解析に基づいて各要素の動的挙動を決定する手法である。個別要素法にも様々な手法があり、それぞれ得失があることから、鉄道総研では2つの解析手法を使い分けて研究開発を行っている。ひとつは、筑波大学 松島教授との共同研究により開発した離散体バラスト軌道モデル DEMCS-track<sup>8)</sup>であり、バラスト砕石一つ一つを球形の剛体要素の組合せで表現することが特徴である。もうひとつは、海洋研究開発機構との共同研究において開発した、弾性体個別要素法 (QDEM) に基づくバラスト軌道シミュレータであり、バラストの粒状体としての解析が可能であると同時に、各バラスト砕石自体の粘弾性をも考慮可能であることが特徴である。前者は計算負荷が比較的軽いので、道床沈下に対する種々の対策工の事前評価に適している一方で、後者はバラスト砕石内部の応力分布 (図3) やバラスト砕石の弾塑性に起因する荷重伝播を解析可能であることから、高周波領域にまでわたるバラスト軌道の動的挙動評価に適しており、目的に応じて使い分けを行っている。いずれの解析においても、接触ペアの絞り込みのため、隣接する複数の要素間の距離計算が必要となり、場合によってはその組合せが膨大となるため計算に時間

を要する。したがって、接触ペアをいかに効率的に探索するのか、そのアルゴリズムにノウハウがある。

一方、脱線後の車両挙動解析の詳細については本誌の特集論文<sup>13)</sup>に詳しいため、ここでその詳細は述べないが、鉄道総研が開発した車両と構造物との動的相互作用解析プログラム DIASTARS III<sup>14)</sup>を改良し、脱線後の車両と軌道との接触部位、あるいは車両と構造物との接触部位の形状をある程度単純化するとともに、多数考えられる接触位置の候補を限られた数の接触検知点により表現する工夫を行い、さらに局所的な部材の変形特性を接触ばねの特性で代表させることにより、脱線後の車両挙動の解析を効率的に行う手法を開発した (図4)。本手法では接触解析に要する時間が短いため様々なケーススタディが可能であり、脱線に対する効果的な対策工の検討などに活用する予定である。

#### 4. 接触に伴う摩耗の解析

レールやトロリ線はそれぞれ車輪の転動やパンタグラフのしゅう動に伴って摩耗する。摩耗が進展して定められた値を超えると部材の交換が必要となるため、摩耗の評価は重要である。とはいえ、摩耗量を純粋に解析により求めることは難しいことから、各種摩耗試験により摩耗係数を求めた上で、適切な摩耗則 (例えば文献15など) を適用して摩耗量を評価する手法が従来から用いられてきた。しかしながら、レールやトロリ線の摩耗進展速度はレールの敷設状況、あるいはトロリ線の架設状況に大きく依存するとともに、通過列車の特性の影響も受けるうえ、摩耗進展による形状変化の影響も受けることから、摩耗試験結果だけで摩耗進展を定量的に予測することは難しい。

そこで鉄道総研では、レール摩耗を対象として、通過列車の動的挙動や摩耗に伴うレール頭頂面の形状変化を考慮したうえで、さまざまな状況下に敷設されたレールの摩耗進展予測手法の開発を上智大学 嘩道教授と共同で

特集：鉄道力学

進めている<sup>16) 17) 18)</sup>。本手法は、通過車両の各車輪の転動挙動をマルチボディダイナミクスにより解析し、これによって得られた接触力と、あらかじめ実験的に求めた摩耗係数を摩耗則に与え、レールの摩耗進展量を計算する。レール頭頂面の摩耗がある程度進展すると車輪との接触挙動が変化するため、各車輪の転動挙動をマルチボディダイナミクスにより再度解析する。これを繰り返すことにより、レールの摩耗進展を予測するものである(図5)。ただし、通過車両の詳細な条件(車輪摩耗形状、静止輪重、通過速度)のばらつきや、気象条件等による摩耗係数の違いなどがレールの摩耗進展に影響すると考えられることから、こうした影響を合理的かつ実用的に考慮する手法の確立が今後の課題である。なお、こうした考え方はトロッポ線の摩耗進展予測にも適用可能であり、海外において研究例がある<sup>19)</sup>が、パンタグラフの離線に伴うトロッポ線のアーク損耗を考慮しなくてはならない点が、レールの摩耗予測とは大きく異なる。

5. おわりに

本稿では、鉄道における接触問題に関する鉄道総研の最近の取組みについて紹介した。接触問題は複雑であり、なお克服すべき課題は多いが、鉄道の安全性、信頼性の向上に資するため、引き続き精力的に研究を進める所存である。

文献

- 1) 石田誠：トライボロジーからみた軌道技術の課題，鉄道総研報告，Vol.22，No.8，pp.1-4，2008
- 2) Kalker J.J., Three-dimensional elastic bodies in rolling contact, Kluwer academic publishers, 1990.
- 3) 林雅江，ほか5名：車輪・レール間の動的接触挙動評価，鉄道総研報告，Vol.28，No.12，pp.29-34，2014
- 4) Hashimoto G., Okuda H., “Large-scale one-way coupled analysis with open-source parallel FEM software FrontISTR”, NAFEMS European Conference on Multiphysics Simulation 2014, pp.31-33, 2014.
- 5) 林雅江，車輪・レール転がり接触シミュレータによる実用的な解析事例，第307回鉄道総研月例発表会，2017.2，[http://www.rtri.or.jp/events/getsurei/getsurei\\_J.html](http://www.rtri.or.jp/events/getsurei/getsurei_J.html)
- 6) 名村明，ほか3名：短いき裂の発生・進展と摩耗の競合を考慮したレール損傷評価，鉄道総研報告，Vol.30，No.2，pp.29-34，2016
- 7) 陳樺，ほか5名：粘着力に対する落ち葉の影響，鉄道総研報告，Vol.31，No.4，pp.29-34,2017
- 8) 河野昭子，松島亘志：離散体モデルを用いた道床バラスト層の変形挙動解析，鉄道総研報告，Vol.28，No.12，pp.41-46，2014
- 9) 相川明，ほか5名：バラスト軌道大規模モデルの構築，鉄

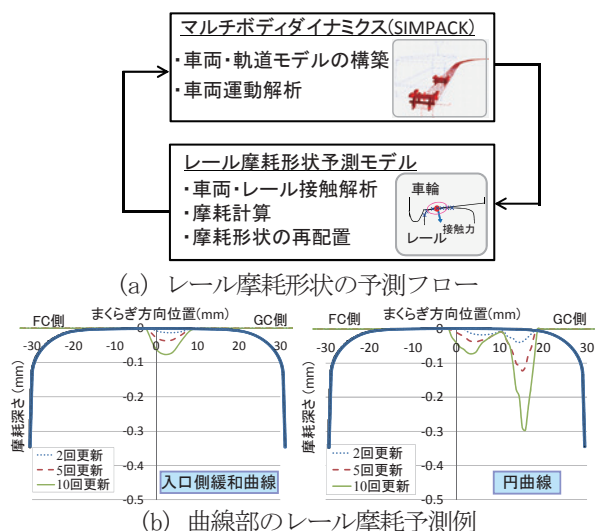


図5 マルチボディダイナミクスを援用したレール摩耗形状予測手法

道総研報告，Vol.30，No.2，pp.23-28，2016

- 10) 飯田浩平，ほか7名：大型振動試験装置を用いた実台車脱線実験，日本機械学会論文集（C編），Vol.77，No.781，pp.3223-3236，2011
- 11) 葛田理仁，ほか4名：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
- 12) 後藤恵一，ほか3名：MBDによる車体と軌道・構造物等の簡易な接触解析手法，鉄道総研報告，Vol.30，No.2，pp.35-40，2016
- 13) 後藤恵一，ほか4名：MBDを用いた輪軸部材と軌道部材の簡易な接触解析手法，鉄道総研報告，Vol.31，No.4，pp.41-46,2017
- 14) 田辺誠，ほか3名：MBDとFEMを併用した地震時における新幹線編成車両の線路構造上の高速走行シミュレーション，シミュレーション，Vol.29，No.3，pp.56-61，2010
- 15) Archard J.F., “Contact and rubbing of flat surface”, J. Applied Science, Vol.24, pp.981-988, 1953.
- 16) 辻江正裕，三苦雅史，曄道佳明：MBDソフトを援用したレール摩耗形状予測とその考察，日本機械学会論文集（C編），Vol.79，No.806，pp.3376-3388，2013
- 17) 辻江正裕，ほか3名：マルチボディダイナミクスを援用した車輪・レール摩耗形状予測モデルの構築と妥当性の検討（第1報），日本機械学会第25回交通物流部門大会，No.1104，2016
- 18) 吉岡亜陸，ほか3名：マルチボディダイナミクスを援用した車輪・レール摩耗形状予測モデルの構築と妥当性の検討（第2報），日本機械学会第25回交通物流部門大会，No.1105，2016
- 19) Bucca G., Collina A., “Electromechanical interaction between carbon-based pantograph strip and copper contact wire: A heuristic wear model”, Tribology International, Vol.92, pp.47-56, 2015.