

動的転がり接触解析による車輪・レール間の力学挙動

鉄道力学研究部 計算力学研究室

副主任研究員 坂井 宏隆

1. はじめに

鉄道車輪の転動時に車輪・レール間で発生する衝撃荷重は、レールから軌道パッドやまくらぎを介してバラスト層にまで伝わり、車輪やレールの損傷（例えば車輪の多角形摩耗やフラット、レールの波状摩耗やきしみ割れ、シェリングなど）のみならず、バラスト劣化や軌道破壊を引き起こす要因となる。一方で、これらの損傷現象の発生・進展メカニズムには未解明な点も多くあり、劣化現象の解明が切望されている。

車輪・レール間の接触部（コンタクトパッチ）の面積は十数ミリ程度と非常に小さく、実験や現地試験等による観測が難しい。数値解析においても、接触部の挙動を詳細に評価するためには非常に細かいメッシュ分割を必要とする。また、過渡（時刻歴）応答解析は計算コストが非常に大きいため、従来は、接触部付近のメッシュサイズのみ細かくするようなメッシュ分割や、車輪の並進位置を変位制御によって計算ステップごとに増加させる方法で準静的な接触解析を実施することにより、計算の精緻化と計算コストの低減のバランスが図られていた。しかしながら、動的な現象を解明するためにはメッシュの細かい精緻なモデルを用いた過渡応答の計算が重要となる。

そこで、車輪・レール間で生じる劣化現象の解明のため、精緻なメッシュ分割と過渡応答解析の両立を実現する解析ツールとして、東京大学奥田教授の開発した3次元大規模並列計算に対応した構造解析ソフトウェア「FrontISTR」を機能拡充し、車輪がレール上を転動する際の接触挙動を解析可能なツールを構築した。ここでは、プログラムの妥当性検証のための取り組みと解析の途中経過を報告し、今後の展望について述べる。

2. 解析ツールの特徴

本プログラムは、弾塑性を考慮した車輪・レール間の接触解析を実施する。計算結果の精緻化と計算速度の向上を両立するため、トルクの付加による車輪の加減速状態の再現、次項で示すキャタピラメッシュの導入、並列計算時にファイルの入出力を不要とする計算領域の再分割機能、計算途中からのレールの不整（継ぎ目落ちや波状摩耗）や構造物の付加機能などを有している。これらの機能のうち、キャタピラメッシュ機能および計算途中からのレール不整や構造物の付加機能について紹介する。その他の詳細については既刊の鉄道総研報告¹⁾を参照されたい。

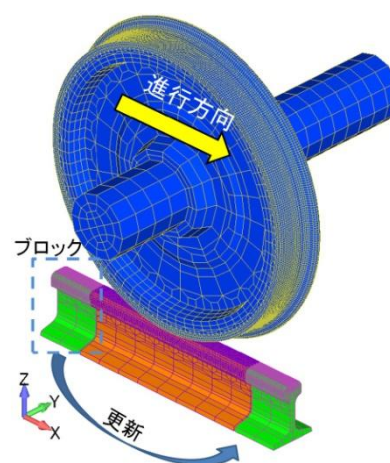


図 1 キャタピラメッシュ

2.1. キャタピラメッシュ機能

本ソフトウェアにおいては、車輪を速度ゼロの状態から、トルクの付加によって目的の並進速度まで短時間で加速させるための「助走区間」と、所定の速度に到達後、構造物等を付加したより詳細なモデルを用いて計算するための「評価区間」に分割した解析が可能となっている。助走区間においては計算の高速化を図るため、レールを長手(縦)方向に複数ブロックに分割し、車輪が通り過ぎた後のレールブロックを最前部に移動させることで全体のレール長を抑える工夫を施しており、これをキャタピラメッシュと呼んでいる(図1)。

2.2. 計算途中からの構造物や不整の付加機能

助走区間においては、高速かつ安定して車輪の並進速度を上げることが第一であるが、評価区間においてはレール下に軌道パッドやまくらぎ、バラスト層などの軌道構造を有するモデルや、レールに継目落ちや波状摩耗などの不整を有するモデルを導入し、車輪・レール間の接触面の力学挙動への影響を評価する必要がある。そこで、助走区間において所定の速度まで計算した後、あらかじめレールに不整を与えたモデル(例えば図2)を含んだ評価区間を走行させることにより、様々な軌道構造(バラスト軌道、スラブ軌道など)や軌道状態(レール不整の有無など)においても検証計算を可能とした。

3. 車輪・レール間の動的転がり接触解析

3.1. 計算モデルと計算条件

2種類の計算モデルによる解析結果を紹介する。検証用モデル

(図3)は、理論解や他の数値解析²⁾との比較を行い、開発したプログラムの妥当性を確認するためのモデルである。一方、簡易形状モデルは、新幹線用の車輪とレールの材料定数を用いて様々

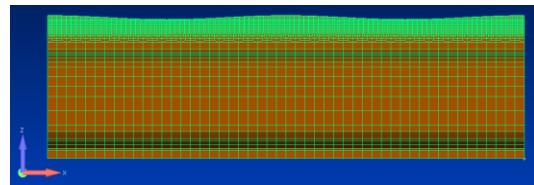


図2 波状摩耗のモデル化の例

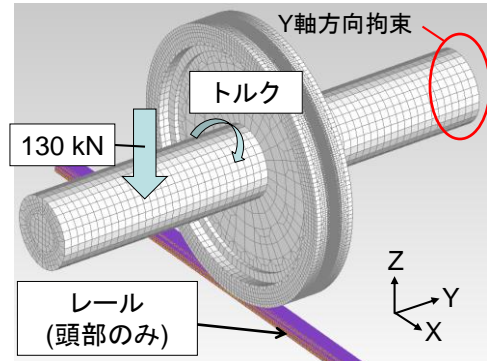


図3 検証用モデル

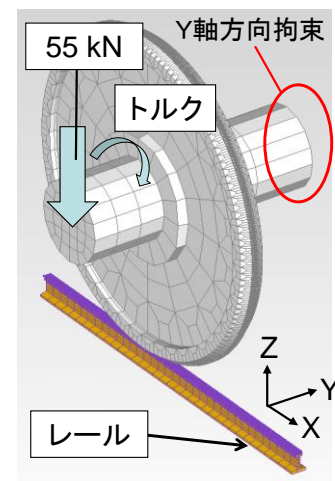


図4 簡易形状モデル

表1 モデルの概要

モデル	検証用モデル	簡易形状モデル
車輪形状	車軸を有する円筒形状	車軸を有する円筒形状
レール形状	UIC54 / 54E1 (頭部のみ)	頭頂面の曲率を新幹線用 レールと合わせたもの
接触面の最小メッシュサイズ	1.0 mm	1.0 mm
節点数	1,217,335	96,149
要素数	1,088,808	73,752
レール下面	完全固定	完全固定
弾性/弾塑性	弾性解析	弾塑性解析

な速度帯における評価を行うモデル（図 4）である。表 1 にモデルの概要を示す。検証用モデルでは、コンタクトパッチの力学挙動（ここでは応力分布）を把握するため、接触部の最小メッシュサイズを 1.0 mm としている。一方、簡易形状モデルにおいては高速域までの接触部の動的挙動を把握しつつ計算負荷を低減するため、接触面の最小メッシュサイズを 1.0 mm として、その他の部分の形状を簡易化している。

3.2. 計算結果

3.2.1. 検証用モデルによるプログラムの検証

図 5 に、速度 15 km/h での車輪加速時のコンタクトパッチの垂直応力分布を示す。図 6 は、図 5 の黒点線の断面における鉛直方向垂直応力の分布を参考文献の結果と重ねて表示したものである。本手法による結果は Hertz の理論解や Kalker の CONTACT, Zhao らの結果（凡例で FE と表記）と概ね一致する結果が得られている。

3.2.2. 簡易形状モデルによる接触面の評価

図 7 および図 8 はそれぞれ、簡易形状モデルにおいて一定トルクの付加条件の下で、車輪の並進速度が図中の左から速度 5 km/h, 60 km/h および 100 km/h での、コンタクトパッチ内の鉛直方向法線力、および接線力の分布を示している。なお、全ての図において、車輪は図中の左から右に向かって回転している。図 7 から、法線力の分布はパッチの中心部が最も高く、速度に依らず概ね同様な傾向となる（ここではメッシュサイズが 1 mm であるため、応力に換算すると MPa と同等である）。また、接線力とすべり率の関係を考慮して図 8 をみると、車輪の進行方向後端側の接線力が大きく、速度の上昇に伴って大きな接線力を有する領域（すべり率の高い領域）が広がる傾向が見て取れる。一方、速度 100 km/h での分布のように、接線力の大きな領域の中に小さな領域が混在するような現象もみられる。これは図 9 に示す通り、接触面の内部では接触状態が逐一変化し、接線力が複雑に変動することを示している。以上のように、本ソフトウェアを用いることによって、接触面におけるミクロな力学挙動の把握が可能である。

なお、接触面の力学挙動の変化は各種の損傷現象に影響する可能性が高いものと考えられるため、このような挙動の変化が何に起因するものか、あるいは本ツールの使用目的に則した解析対象（例えば継目落ち等の不整通過時の衝撃力の評価）での動的応答に対して、相対的にどの程度

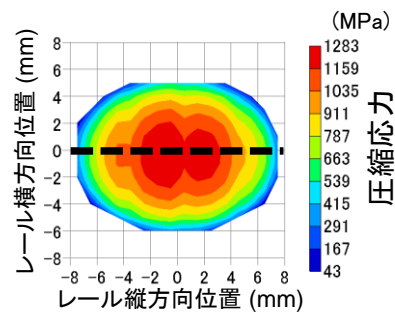


図 5 パッチ内の垂直応力分布
(速度 15 km/h, 加速時)

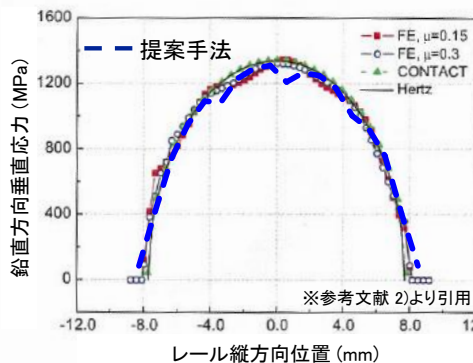


図 6 文献との比較（垂直応力）

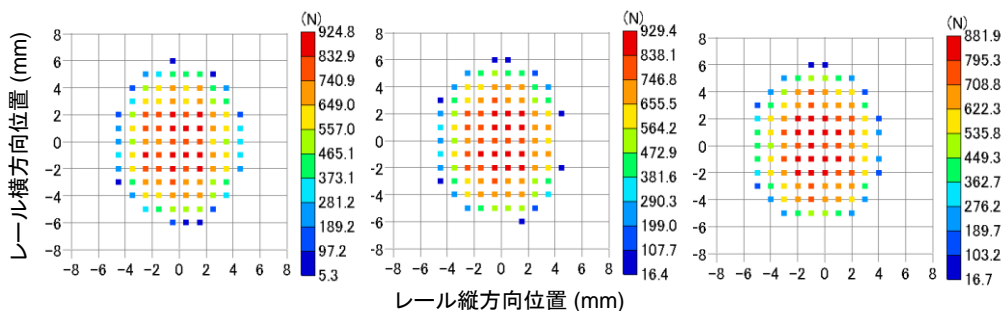


図 7 鉛直方向法線力分布（簡易形状モデル，左から時速 5 km, 60 km および 100 km）

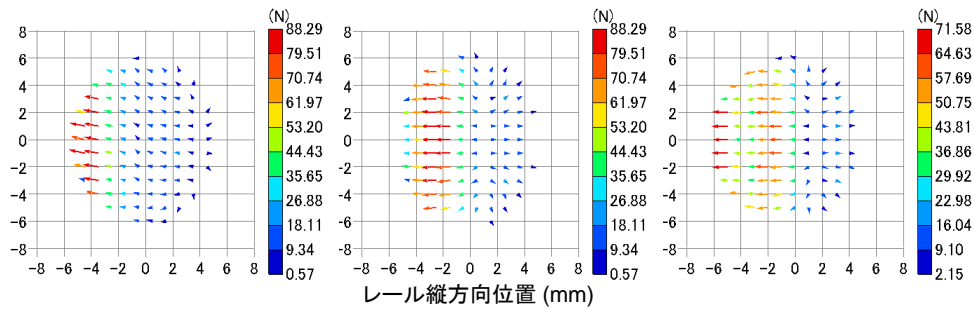


図 8 接線力分布 (簡易形状モデル, 左から速度 5 km/h, 60 km/h および 100 km/h)

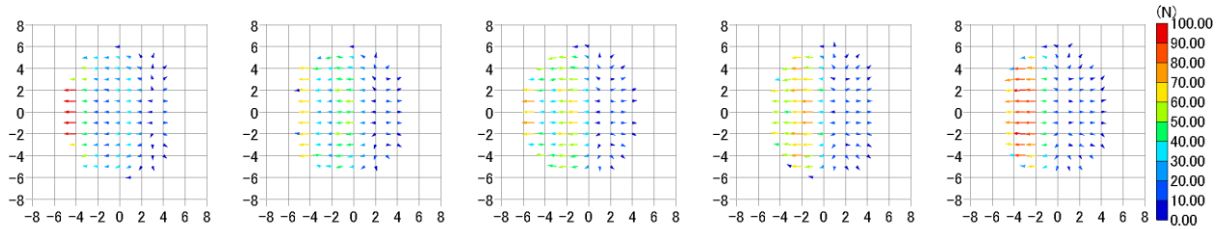


図 9 図 8 内の速度 100 km/h の結果の前後 2 ステップでのパッチ内接線力の変動の様子

のオーダーのものであるかどうかを慎重に検討する必要がある。また、現在は上述したような検討と並行して、実際の車輪・レール形状とし、接触部の最小メッシュサイズが 1.0 mm のモデル（節点数が約 90 万、要素数が約 80 万）を用いて、車輪・レールの接触部の力学挙動を調べている。ここでは、車輪・レール間に生じる優位な加振力として継目落ちや図 2 に示すような正弦波の波状摩耗等を通じた時の車輪・レール間の接触力を用いて軌道の動的特性を把握していく予定である。

4. おわりに

本稿では、3次元有限要素法を用いた構造解析ソフトウェア FrontISTR を用いた車輪・レール間の転がり接触解析について、現在の取り組みを報告した。ここでは既往文献との比較から、開発したソフトウェアにより得られる応力分布は定性的に一致することが示された。また、簡易モデルを用いて、様々な速度域におけるコンタクトパッチの力学挙動を調べた。今後は開発手法や使用モデルの妥当性を確認後、通常走行時と不整走行時での力学挙動を比較することにより、車輪・レールの種々の損傷問題に関係する因子を特定して、損傷メカニズムの解明を行うとともに、効率的な対策手法の提案につなげる所存である。

5. 付記

本研究は、東京大学の奥田洋司教授と株式会社先端力学シミュレーション研究所との共同研究により実施した。

(参考文献)

- 1) 坂井宏隆, 高垣昌和, 林雅江, 相川明, 奥田洋司, 殷峻: 大規模並列計算による車輪/レール間の転がり接触挙動の解析, 鉄道総研報告, Vol. 27, No. 10, pp. 29-34, 2013
- 2) Zhao, X. and Li, Z., "The solution of frictional wheel-rail rolling contact with a 3D transient finite element model: Validation and error analysis," *Wear*, Vol. 271, pp. 444-452, 2011.