

車輪とレールの動的転がり接触解析

鉄道力学研究部 計算力学研究室

室長 高垣 昌和

1. はじめに

鉄道の車輪／レール間で発生する劣化現象として、レールではシェリングや波状摩耗、車輪ではフラットと呼ばれる偏摩耗や多角形摩耗など（図 1, 2）があるが、これらの劣化による不整状態は、列車走行時に異常振動を発生させ車両や路盤に悪影響を与え、騒音の増大や走行安全性の低下の原因となる。これらの劣化現象には、未解明なところが多くあり、車輪がレール上を通過する際の力学的挙動を精緻に評価することが重要な課題となっている。特に、車輪／レール間に生じる劣化は、kHz オーダーの高周波領域の振動負荷が発生要因のひとつと考えられている¹⁾、これらの現象を実験的に解明することは困難であるため、解析によるさまざまな検討が必要とされている。しかしながら、実際の現象を模擬するためには計算規模が大きくなるため、限られた条件で解析が行われているのが現状である²⁻³⁾。

本研究では、文部科学省「イノベーション基盤シミュレーションソフトウェアの研究開発」プロジェクトにおいて東京大学が中心となり開発された大規模並列有限要素法プログラム FrontISTR をベースに機能拡張を行い、レールと車輪間の動的転がり接触解析を実施した⁴⁾。車輪／レール間の力学的挙動を解析するため大規模モデルを構築し、より高精度な評価することで劣化現象の解明を目指す。さらに、これらの劣化現象を抑制する手法を見出し、列車走行時の振動や騒音の低減、安全性向上に繋げることが本研究の目的である。

2. 車輪／レール間の転がり接触解析

2-1 解析プログラム

大規模並列有限要素法プログラム FrontISTR を用いて車輪／レール間の転がり接触解析を行う。有限要素法のソルバには、接触解析において剛性マトリクスが非対称となる上、反復法では安定した収束性が得られないため、分散メモリ版非対称直接法ソルバ MUMPS⁵⁾を新たに組み込んでいる。また、車輪の高速走行を模擬するためには長いレールモデルが必要であるが、これを全てモデル化することは非現実的である。そこで、図 3 に示すような車輪が通過した後の



図 1 レールの波状摩耗

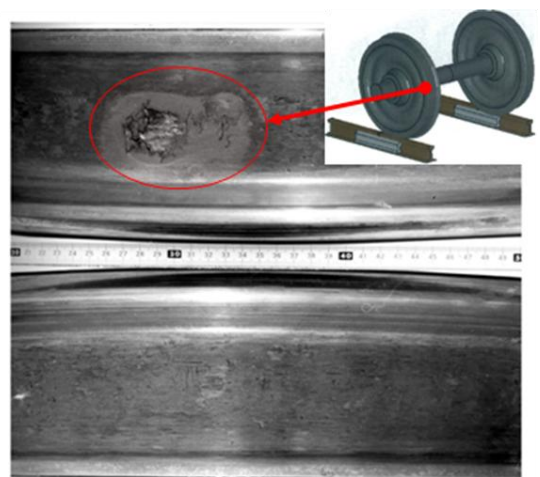


図 2 車輪のフラット剥離

一部領域を進行方向前方に座標移動させてメッシュモデルを繰り返し用いる方法を導入した。

さらに、レール長さが短い場合、車輪の転動により発生する弾性波がレールを伝わり、反射した弾性波が解析結果に影響すると考えられるため、図 4 に示すようなモデルの端面で反射しないようレーリー減衰を適用した要素を用いて無反射境界を設定した。

一方、並列計算のため、解析モデルを領域分割するが、車輪とレールの接触面はモデルのサイズに比べ、ごく小さな領域である。そこで、解析モデルの領域分割において、車輪とレールの接触領域を一分割内に収めることにより接触解析に関するノード間通信を不要とした。ただし、車輪が転動するため、進行するに従って領域分割を再実行する必要があるが出てくる。通常は、前処理として領域分割を行ったメッシュデータをもとに並列計算が実行されるが、繰り返し再分割されるとハードディスクへの I/O が発生し、計算コストが増大する。そこで、領域分割を高速なオンメモリで実行できるようにした。これらのプログラム改良により大規模モデルにおける並列化率を上げ、計算速度の高速化を図っている。

2-2 車輪／レールモデルによる動的転がり接触解析

図 5 に示すような車輪／レールの簡易モデルを使用して FrontISTR による動的転がり接触解析を実施した。メッシュモデルは、六面体アイソパラメトリック要素を用いており、その要素数および節点数は、それぞれ 63398、83235 である。車両からの荷重（輪重）および駆動トルクは、集中荷重により車軸に負荷している。有限要素解析では、Update Lagrange 法を適用し、時間積分は、Newmark β 法により積分時間刻みを $5 \times 10^{-4} \text{sec.}$ として計算した。一方、接触解析は Lagrange 乗数法を用いて接触圧を求め、接線力はペナルティ法により評価している。解析で適用した材料定数を表 1 に示す。車輪の並進速度については、静止状態から時速 300km まで加速させる条件で解析を実施した。

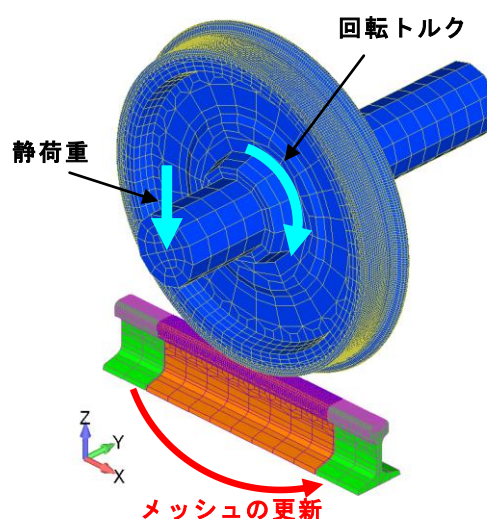


図 3 車輪／レールの FEM モデル

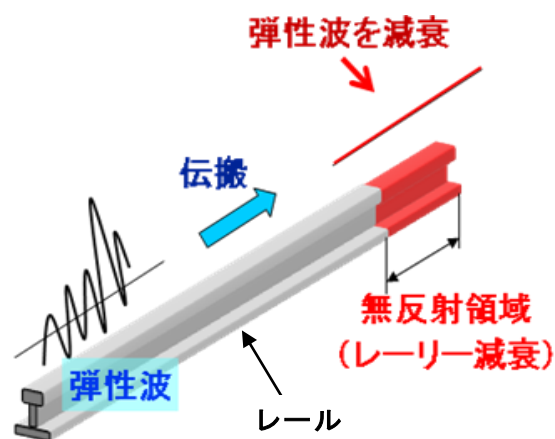


図 4 弾性波に対する無反射境界

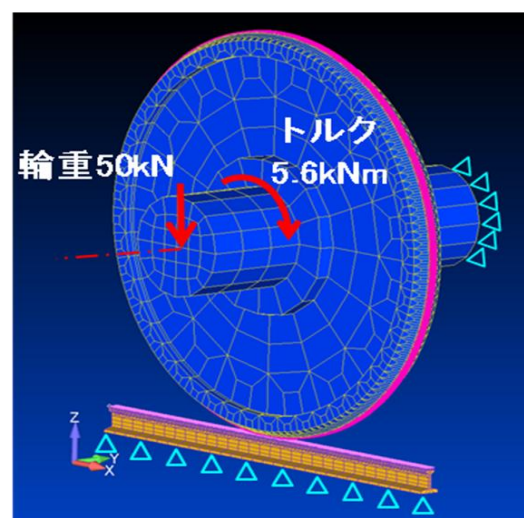


図 5 転がり接触解析モデル

表 1 車輪／レールの材料定数

	Wheel	レール
ヤング率 MPa	1.973×10^5	2.098×10^5
ポアソン比	0.3	0.29
密度 t/mm ³	7.81×10^{-9}	7.81×10^{-9}
最小メッシュサイズ mm	1.5×3.0	1.0×1.0

2-3 動的転がり接触解析結果

車輪／レール間の動的転がり接触解析を実施し、車輪の並進速度を時速 300km まで加速させることができることを確認した。図 6 には車輪／レール間の接触面法線方向（Z 方向）の垂直応力分布を示す。接触面における最大の圧縮応力は、-849MPa となった。また、接触面の法線力、および接線力を求めて、負荷している輪重およびトルク荷重と比較することにより計算結果の妥当性を確認した。次に、車輪の並進速度の時刻歴を図 7 に示す。荷重条件として空転が発生しない最大のトルクを一定に負荷していることから、ほぼ一定の加速をして想定速度まで到達している。図 8 には車軸中心の Z 方向（上下）の変位に関する時刻歴を示す。初期段階でレール上に浮いた状態にある車輪がレールに接触するまで Z 方向変位が下がることから、0.03 秒まで輪重相当の荷重のみを加え、その後、トルク荷重を掛けている。また、離散化あるいは数値誤差による振動が生じており、数 kHz オーダーの挙動を評価するためには、これらの影響を除去する必要がある。しかしながら、車輪の転動としては、安定した解が得られているもの

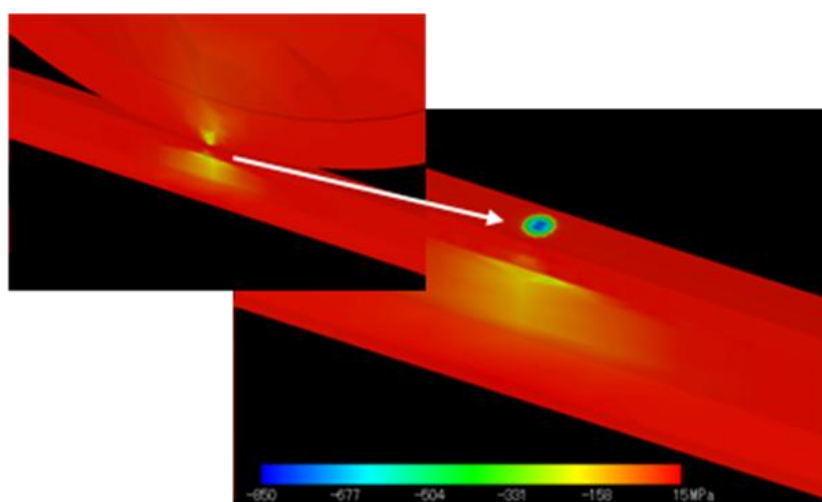


図 6 転がり接触解析モデル

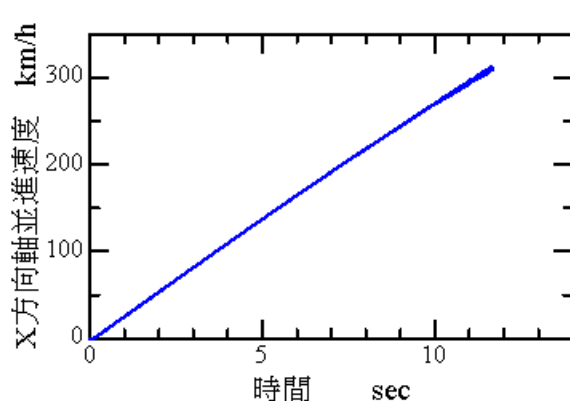


図 7 車輪の並進速度履歴

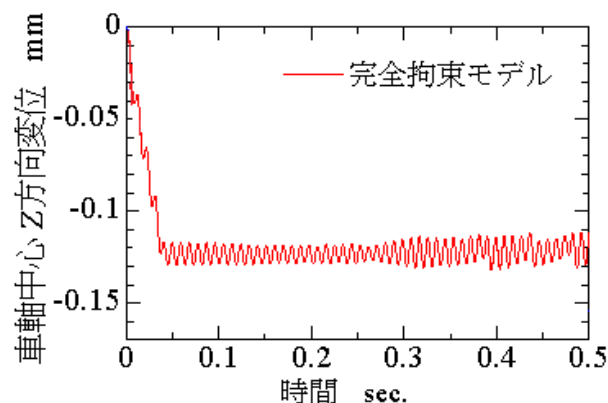


図 8 車軸中心の Z 方向変位履歴

と考える。最後に、接触面におけるすべり・粘着領域を ZX 成分のせん断応力とともに図 9 に示す。これらの分布より、すべりは、進行方向後端のせん断応力が高い領域で生じており、Kalker らによる検討結果と一致する⁶⁾。

3. まとめ

有限要素法プログラム FrontISTR をもとに車輪／レール間の動的転がり接触解析が実施できるよう機能の開発を行った。プログラムの検証のため、簡易モデルにより、車輪が時速 300km の高速で転動する接触解析を行い、計算結果からその定性的な妥当性について示した。今後は、より精細な評価を行い計算精度について検討する。さらに実形状モデル（数千万～数億自由度相当）を用いた動的解析を実施する。本解析は、車輪の並進速度が時速 300km まで加速させるとともに、溶接継目での衝撃や波状摩耗などレールの不整を模擬したモデルによる解析により、不整のあるレール上を車輪が通過する際の数 kHz オーダーの高周波領域までの力学的挙動を評価して、求められた結果より不整の発生原因の解明を目指す。さらに、次の Phase では、2 輪 2 軸や 1 台車モデルにより車輪間の相互作用も考慮し、上述と同様の不整レール上の走行シミュレーションの実施を計画している。

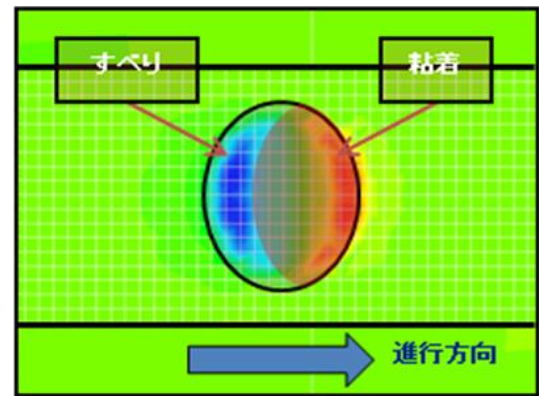


図 9 接触面のすべり／固着および ZX 面せん断応力

参考文献

- 1) 涌井一, “衝撃輪重に起因する車両/軌道構造系の課題”, 鉄道総研報告, 17 巻, 9 号, pp88-94, 2003.
- 2) J. Xiaoyu, J. Xuesong, “Numerical Simulation of wheel rolling over rail at high-speeds”, Wear, 262, pp666-671, 2007.
- 3) L. Baeza, P. Vila, A. Roda, J. Fayos, “Prediction of corrugation in rails using a non-stationary wheel-rail contact model”, Wear, 265, pp1156-1162, 2008.
- 4) 高垣昌和, 奥田洋司ら, “動的転がり接触解析による車輪・レール間の挙動評価”, 日本機械学会第 25 回計算力学講演会論文集, F-503, 2012.
- 5) P.R. Amestoy, I.S. Duff and J.-Y. L'Excellent, “Multifrontal parallel distributed symmetric and unsymmetric solvers”, Comput. Methods in Appl. Mech. Eng., 184, pp. 501-520, 2000.
- 6) J.J. Kalker, “Three-Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact”, KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 1990.