

大規模並列計算によるレール・車輪間の 転がり接触解析手法の構築

プロジェクト責任者

石田 弘明 公益財団法人鉄道総合技術研究所

著者

石田 弘明^{*1}、高垣 昌和^{*1}、奥田 洋司^{*2}、殷 峻^{*3}、相川 明^{*1}、坂井 隆宏^{*1}、廣川 雄一^{*4}

*1 公益財団法人鉄道総合技術研究所

*2 国立大学法人東京大学

*3 株式会社先端力学シミュレーション研究所

*4 独立行政法人海洋研究開発機構

利用施設： 独立行政法人海洋研究開発機構 地球シミュレータ

利用期間： 平成 23 年 10 月 4 日～平成 24 年 3 月 31 日

アブストラクト

鉄道車両が走行するとレール・車輪間には振動や衝撃力と共にすべりが生じることにより摩耗やき裂などの劣化現象が起きる。これらの現象は、kHz オーダーの高周波領域の負荷応答がひとつの要因と考えられているため、高周波領域の評価が行える動的解析によるレール・車輪間の力学的挙動を十分な精度で評価する必要がある。

本プロジェクトでは、レール・車輪間の動的応答を解析により求めて劣化現象の原因解明を行うため、転がり接触を考慮した 3 次元大規模並列有限要素解析を実施することを目的とする。精密な大規模モデルによる解析では、地球シミュレータを用いて並列計算することによる計算速度の大幅な高速化が必要である。解析で得られた動的応答をもとに実現象の評価を目指す。

キーワード： 大規模シミュレーション、有限要素法、転がり接触、動的応答、鉄道

1. はじめに

鉄道のレール・車輪間で発生する劣化現象としてレールでは波状摩耗やシェリング、車輪ではフラットと呼ばれる偏摩耗や多角形摩耗などがあるが、これらの劣化による不整状態は、車両走行時に異常振動が発生して車両や路盤に影響を与え、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、レール・車輪間に生じる劣化は、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おり¹⁾、これらの現象を実験的に解明することは非常に困難であることから、解析により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⁾。

本プロジェクトでは、地球シミュレータ上で、有限要素法プログラム FrontISTR を用いてレールと車輪間の動的転がり接触解析を実施することで、レール・車輪間の力学的挙動を精度よく評価することにより劣化現象の解明を目指す。これらの劣化現象を抑制することが出来たならば、列車走行時の振動や騒音の低減、安全性向上に繋がり、鉄道沿線の環境改善にも役立つものと考えている。

2. レール・車輪間の転がり接触解析

2.1 解析プログラム

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、地球シミュレータ環境での実行実績のある有限要素法プログラム FrontISTR を用いてレール・車輪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 MUMPS⁴⁾ を新たに組み込んでいる。また、車輪を加速させるために必要なレールは、距離が非常に長く、そのままモデルを作成することは非現実的である。そこで、図1に示すような一部領域を繰り返し用いる方法を導入した。さらに、レールを伝わる弾性波がモデルの端面で反射しないように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(図2)。

一方、大規模モデルにおける並列化率向上のため、メッシュモデルの領域分割において、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。また、車輪が転動するため、ある間隔で領域分割を実行する必要があるが、I/O の発生を抑えるため、領域分割をオンメモリで行えるようにして、計算速度の高速化を図る。現在、これらのプログラムを地球シミュレータ上で実行するため実装作業を行っている。

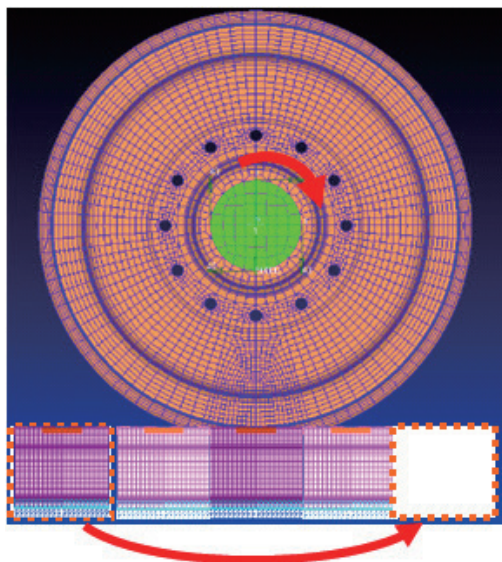


図1 キャタピラメッシュ

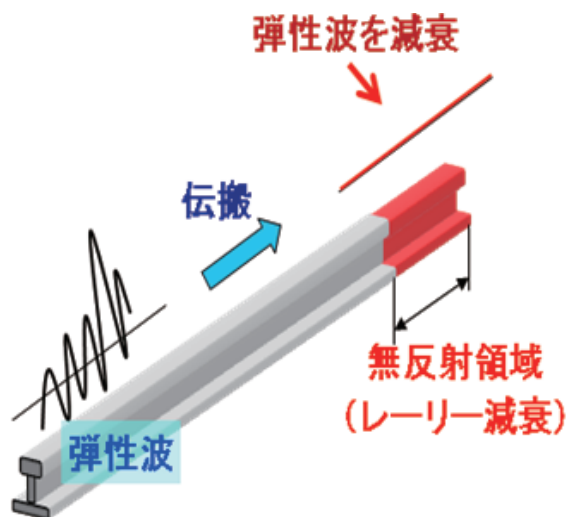


図2 無反射境界

2.2 レール・車輪モデルによる静的応力解析

地球シミュレータにおいて転がり接触解析を行うためのベースプログラムとなる FrontISTR の動作状況および実行性能を把握するため、静的応力解析を実施した。解析モデル、および解析条件は、図3に示す。また、材料定数は、表1に示す。解析に用いたメッシュモデルは、節点数 299773、要素数 269232 である。なお、車輪とレールの接触部(コンタクトパッチ)については、接触領域のノードを共有して解析を行った。本解析では、16 並列 (2 ノード、8CPU) および 32 並列 (4 ノード、8CPU) により実施した。

応力解析の結果、図4に示すように荷重に対して妥当な応力値が得られた。また、それぞれの並列計算で結果に差異がないことを確認した。ベクトル化率については、それぞれ、約 96% に留まっており、今後、処理速度を向上させるためプログラムのチューニングが必要になると考えられる。

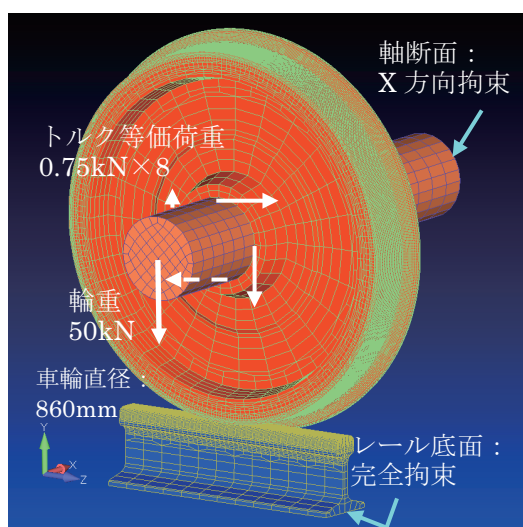


図3 解析モデル

表1 材料定数および最小メッシュサイズ

| | 車輪 | レール |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| ヤング係数 GPa | 197.3 | 209.8 |
| 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 |

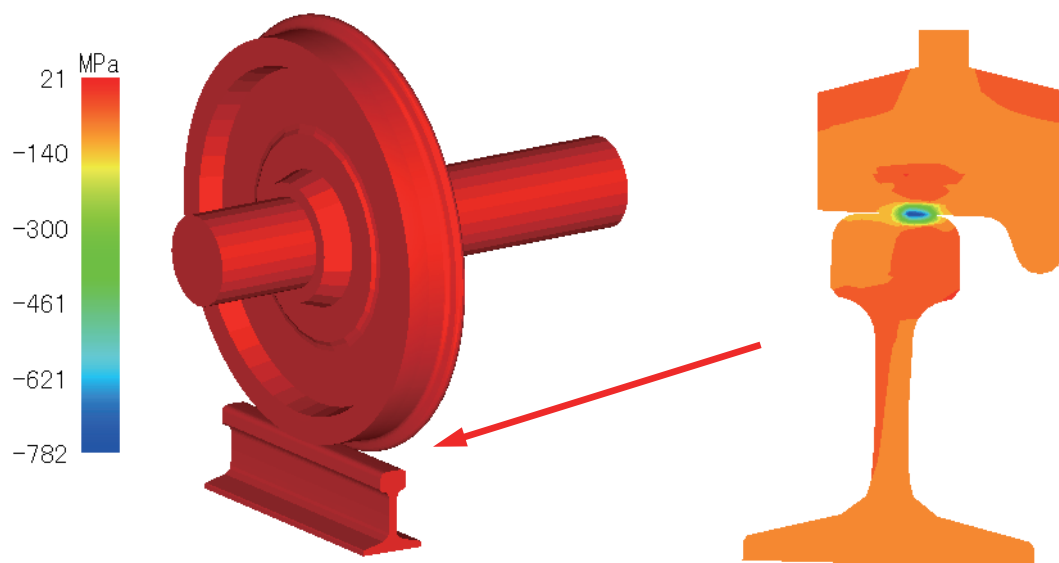


図4 Y方向応力分布

2.3 レール・車輪モデルによる動的転がり接触解析

地球シミュレータ上での FrontISTR による動的転がり接触解析を実施するため、プログラムの機能追加と移植、並列計算の性能向上のための領域分割方針の検討およびチューニングを行っている。これらの作業と合わせて、先に開発した SMP 版による解析プログラムを用いて PC 環境で動的転がり接触解析を実施した。計算機の性能による制約から図5に示すような簡易モデルを使用している。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。時間積分は、Newmark β 法を適用して、積分時間刻みを 5×10^{-4} 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評価している。解析で適用した材料定数は表1に示すとおりである。車輪の並進速度については、静止状態から時速 300km まで加速させた。

最後に計算環境は、Xeon 3.3GHz のデュアル CPU 機で 8 コアを使用して解析を実行した。

2.4 動的転がり接触解析結果

レール・車輪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。計算時間は、約 4 週間を要している。図6にはレール・車輪間の接触面法線方向（Z 方向）の垂直応力分布を示す。また、図7にはレール踏面（上部表面）における接触面の Z 方向垂直応力分布を示す。さらに、接触面における法線力、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して、計算結果の妥当性を確認した。ただし、図7のレールの接触面の応力分布をみると最大応力の発生位置がレール長手方向に対して左右に生じている。これは、車輪の板厚方向のメッシュ分割が粗いために接触解析での解の精度が低下しているためと考えられる。

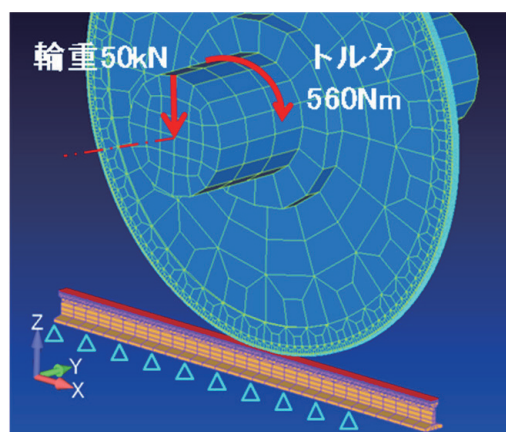


図5 解析モデルおよび境界条件

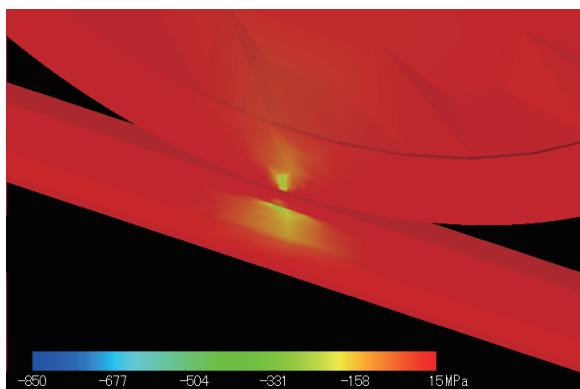


図6 レール・車輪間の接触面法線方向
垂直応力分布

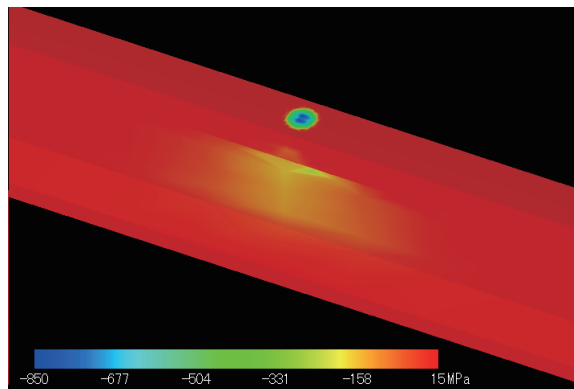


図7 レール踏面の垂直応力分布

3. 今後の予定

簡易モデルにより、車輪が高速で転動する接触解析について検証ができたことから、現在、実装作業を行っている分散メモリ版の解析プログラムにより実形状モデル（数千万～数億自由度相当）を用いて、動的解析を実施する。本解析は、キャタピラメッシュを用いて車輪の並進速度が時速 300km まで加速させる区間を助走区間として行い、それまでの状態変数等を保持して、波状摩耗などの不整を模擬したレール長さが 10 ～ 25m 程度のメッシュモデルによる評価区間に移行する。評価区間では、不整のあるレール上を車輪が通過する際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。

また、PC 環境での計算は、時速 300km まで加速されるのに簡易モデルでさえ約 4 週間に要していたが、このような計算時間では、実用的ではない。従って、実形状モデルにおいて計算時間が実用的なレベルになるように地球シミュレータによる並列計算のチューニングを実施して並列化率およびベクトル化率の向上を行う予定である。

4. まとめ

鉄道のレールや車輪に生じる劣化現象を解明するため、地球シミュレータによりレール・車輪間の動的転がり接触解析を実施して接触面の力学的挙動を評価することを目指している。現在開発を行っている有限要素法解析プログラムは、PC 環境では解析結果の定性的な妥当性は示されている。現在、大規模な実形状モデルによる解析を実施するため、平成 23 年度の検討結果を踏まえて、地球シミュレータへの解析プログラムの実装作業を行っている。平成 24 年度中には不整を模擬したレールの解析モデルを用いた転がり接触解析を実行してレール・車輪の接触面の力学的挙動を高周波領域まで評価する。

参考文献

- 1) H. Wakui, “Subjects for Wheel/Rail System Related to Wheel/Track Impact” , RTRI Report, Vol. 17, No. 9, 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) 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.