

# 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<sup>\*1</sup>、高垣 昌和<sup>\*1</sup>、奥田 洋司<sup>\*2</sup>、殷峻<sup>\*3</sup>、相川 明<sup>\*1</sup>、林 雅江<sup>\*1</sup>、坂井 宏隆<sup>\*1</sup>、  
廣川 雄一<sup>\*4</sup>

\* 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 24 年 4 月 1 日～平成 25 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が生じ、接触面においては相対すべりが起きる。これらの力学的挙動が異常な摩耗やき裂など劣化の原因と考えられているため、接触領域の評価は、現象解明のために大変重要である。特に kHz オーダーの高周波振動が要因のひとつと考えられており、動的解析によりレール・車輪間の力学的挙動を高周波領域まで十分な精度で評価する必要がある。

これまでにレール・車輪間の動的転がり接触解析を実施するため、3次元大規模並列有限要素法による解析コードを開発してきたが、高精度な実形状モデルによる解析は、超高速な計算機環境が必要である。そこで、地球シミュレータにより解析が行えるように実行環境を構築している。現状、検証として実施可能な静的接触解析を大規模モデルにより実施した。

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・車輪間で摩耗やき裂などの劣化現象が生じると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が低下する。劣化現象としては、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。これらは、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手法を検討して、現象解明に向けて数多くの研究が行われてきた。特に、レール・車輪間に生じる劣化は、kHz オーダーの高周波振動の負荷が発生要因のひとつと考えられているが<sup>1)</sup>、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、解析による評価が必要とされている。これまでに解析的な評価が検討されているが、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<sup>2-3)</sup>。精緻なモデルにより動的転がり接触解析を実施して現象解明ができれば、劣化を抑制して、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する。

本プロジェクトでは、地球シミュレータにより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し、レール・車輪間の力学的挙動を精度よく評価することを目的としている。さらに、得られた結果より劣化現象の解明を目指す。平成 23 年度は、レール・車輪間の動的接触解析にむけて FrontISTR の機能拡張を行った。これを地球シミュレータへ実装するため、まずはオリジナル版の FrontISTR (MUMPS ソルバを含む) の解析環境の構築を行ったところ、1000 万自由度程度のモデル規模では計算途中でエラーが発生する不具合が生じていた。本年度は、まずこの不具合を解消するため、オリジナル版 FrontISTR により大規模モデルを用いて静的接触解析を行い、エラーの原因を明らかにするとともに計算環境を構築した。

## 2. レール・車輪間の転がり接触解析

### 2.1 解析プログラム

レール・車輪間の転がり接触解析を行うため、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開発された有限要素法プログラム FrontISTR を機能拡充した。昨年度、主に追加した機能は、連続的な走行を模擬できるレールモデル、レールを伝播する弾性波をモデル端部で減衰させる無反射境界、さらに有限要素法の連立方程式ソルバとして分散メモリ版非対称直接法ソルバ MUMPS<sup>4)</sup> である。本年度はさらに大規模モデルに対応するため、有限要素メッシュを領域分割する際に作成されるグラフ情報の保存・読込機能の付加を行った。

メッシュの細密化に伴い大規模化するモデルを用いた解析には並列計算が不可欠となる。領域分割による並列化を行うが、大規模なメッシュほどその領域分割にかかる処理時間も大幅に増加する。現在、300 万節点の解析モデルを 64 個の分散領域に分割する場合、鉄道総研のスパコン (Cray 製 XT4) で約 11 時間がかかっており、その大半が、図 1 の青枠で示すメッシュデータから節点ベースグラフ情報の作成に要している。

従来の処理では、車輪の回転にともない接触領域が変化するため領域分割を自動的に更新するがそのたびにグラフ情報を作り直す。しかし、このグラフ情報は解析中に変化しないため、予めグラフ情報を作成し、領域分割のたびに作成済みのグラフ情報を再利用することで領域分割にかかる時間の短縮を図った。

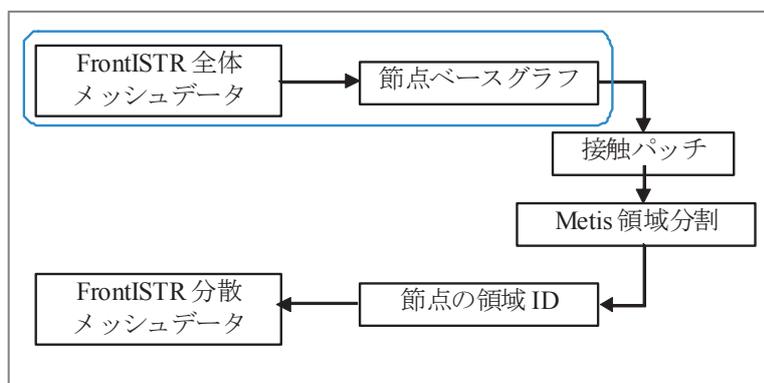


図 1 領域分割に関する前処理

## 2.2 レール・車輪モデルによる動的転がり接触解析

今年度までに開発したレール・車輪間の並列動的転がり接触解析機能を検証するため、地球シミュレータへの実装に先立ち、ワークステーションにより並列動的接触解析を実施した。図2に車輪・レールモデルの寸法と解析条件を示す。解析モデルは、六面体アイソパラメトリック要素を用いて、節点数16904、要素数10576のメッシュサイズの簡易形状を用いた。また、時間積分は、Newmark  $\beta$ 法 ( $\gamma = 0.53$ 、 $\beta = 0.265225$ ) を適用し、時間増分は、0.0005secとした。さらに、接触解析では、Lagrange乗数法を用い、摩擦係数1.0、接線ペナルティ  $1.0 \times 10^4$  として接触圧を評価している。材料定数は、表1に示す。並列計算における領域分割は、4分割とした。

試解析の結果、4.5秒までの解析で車輪は173.4mを走行して、最終速度は時速265kmに到達する。表2に各処理の計算時間と割合を示す。この中で線形ソルバMUMPSによる求解と剛性行列の作成に最も時間を必要とし、これら二つの処理の合計時間は総計算時間の93%となる。ただ、ノード内に多数のコアを有する計算機資源があれば、計算ノード内でのOpenMPスレッド並列化によって剛性行列の作成をより高速に行うことが可能となる。一方、分散領域更新において発生する領域分割の処理、データのマージ・再分配の処理、内部解析用データ（プログラム上では構造体）の作り直し処理などは全体の計算時間の0.1%程度であるが、これは規模の小さい簡易モデルのためであり、先述のように大規模モデルの領域分割は、全体を占める割合が非常に大きくなる。

収束回数については、解析中の時間増分（時間刻み幅）を0.0005sec（一定）と設定したため、車輪の速度が増加すると、1ステップの走行距離は徐々に増加する。それに伴って、Newton-Raphson法の計算が収束するまでの反復も増える。時速20～30kmの低速走行時では、不釣り合い状態における接触点数は十数

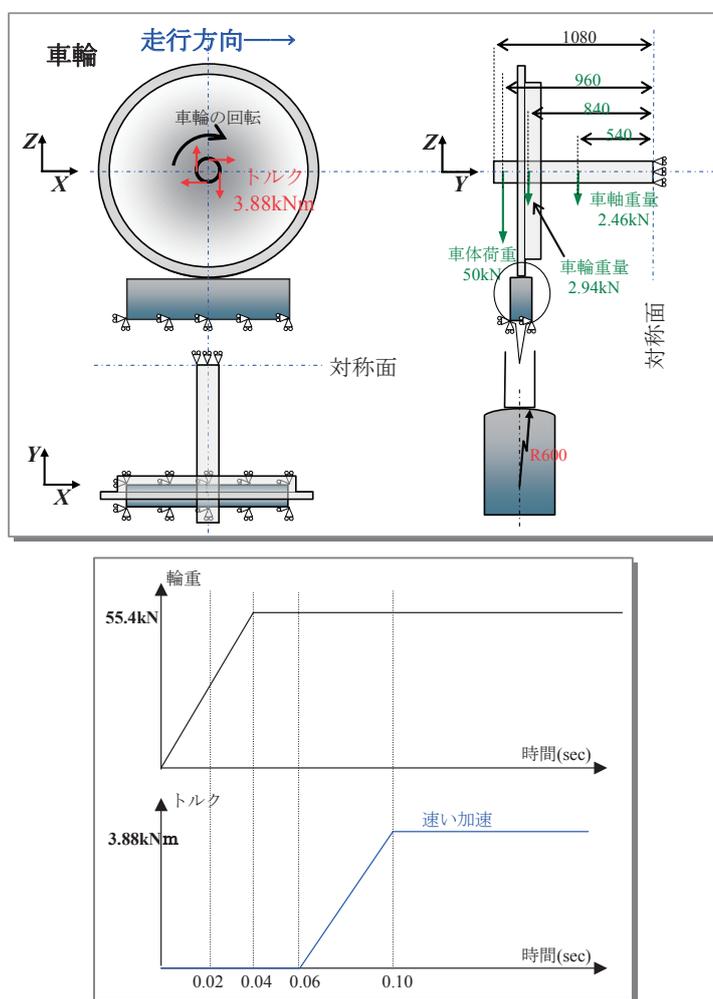


図2 レール・車輪簡易モデルの寸法・解析条件

表1 材料定数と接触面メッシュサイズ

	ヤング係数	ポアソン比	密度	メッシュサイズ (分割数)
ディスク	$1.973 \times 10^5$ MPa	0.3	$7.81 \times 10^9$ ton/mm <sup>3</sup>	4mm × 3.8mm (3分割)
レール	$2.0982 \times 10^5$ MPa	0.29	$7.81 \times 10^9$ ton/mm <sup>3</sup>	5mm × 7.5mm (6分割)

個であるが、収束した釣り合い状態における接触点数は5～8個である。この場合、Newton-Raphson法の反復計算は20～30回で収束する。一方、時速100km以上の高速走行時では、不釣り合い状態における接触点数が30～45個となるが、Newton-Raphson法の反復計算が収束するには最大250回の反復が必要となる。

図3は車輪軸中心の速度・変位の時間変化、図4は車輪軸中心のZ方向変位の時間変化を示す。車輪の速度が上がるほど、軸中心のZ方向変位は小さくなる傾向がある。また、局所的な振動も見えるが、

全体的に安定に解析結果が得られている。最後に、On-Memoryの自動領域分割による分散領域更新の直前および直後のメッシュ領域分布を図5に示す。レールと車輪の接触部が分割領域を跨ぐ前に再分割が行われている。この試解析によって、これまでに開発したOn-Memoryの自動領域分割による分散領域更新機能を確認できた。

表2 計算時間の割合

	解析時間 sec	割合 %
接触初期化	9347.33	1.18516%
接触探索	1146.22	0.14533%
剛性行列作成	317630.44	40.27272%
RHS 作成	27398.55	3.47389%
線形ソルバ MUMPS	415991.69	52.74405%
出力 (結果・リスタート)	504.15	0.06392%
データのマージ・再分配	41.17	0.00522%
更新による構造体の作成	83.68	0.01061%
領域分割更新	429.92	0.05451%
その他	16013.41	2.03036%
領域分割更新回数	323	
Newton 総収束回数	858278	
総計算時間	788698.82 (219 時間)	

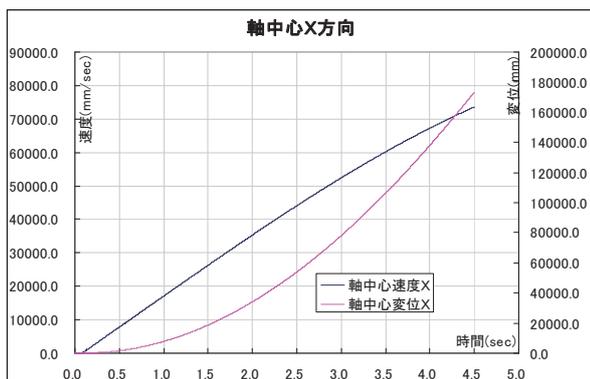


図3 車輪軸中心の速度・変位の時間暦

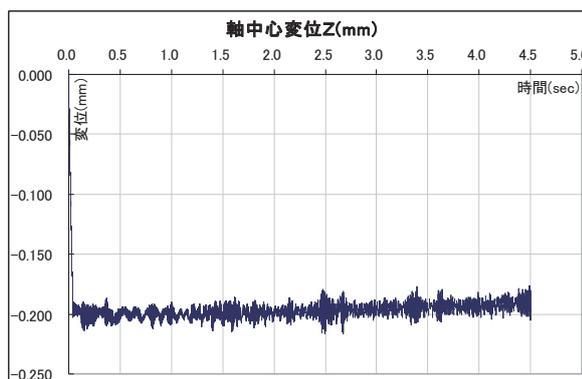


図4 車輪軸中心のZ方向変位の時間暦

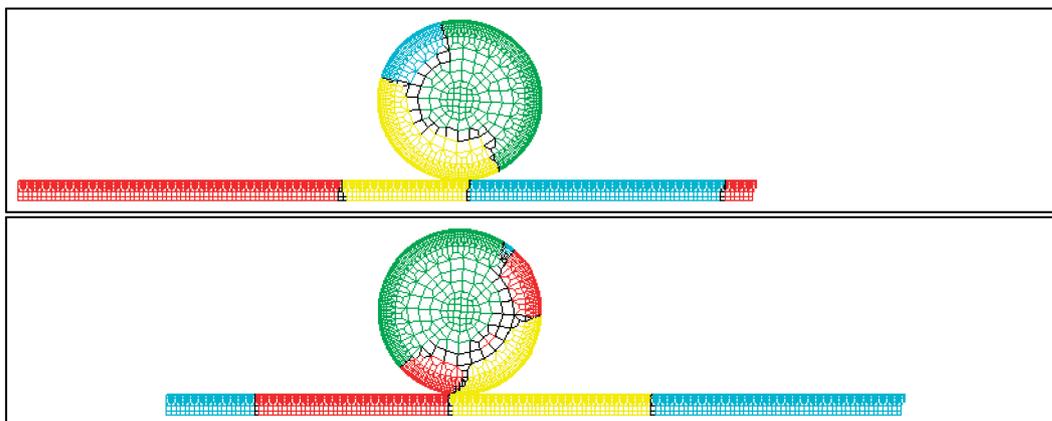


図5 On-Memoryの自動領域分割による分散領域の更新  
(上図：分散領域更新の直前、下図：分散領域更新の直後)

### 3. 地球シミュレータによる解析

#### 3.1 地球シミュレータへの実装

分散並列において開発した解析プログラムの検証を行い、安定した収束性のもと転がり接触解析が可能と認められたことから、地球シミュレータへの実装を行った。

はじめに MUMPS が組み込まれた FrontISTR による解析プログラムの実装が別のプロジェクトにより行われたため、これをもとに 1000 万自由度の大規模モデルを用いて計算を行ったところ、いくつかの不具合が生じた。モデルの大規模化やコンパイルの環境の違いからこれまでに顕在化しなかった問題として、一部変数の初期化もれ、64bit メモリ空間への対応、メモリリークなどがあり、さらに、レール・車輪の転がり接触解析を実施するプログラムコードの一部が Fortran2003 規格で書かれているが、地球シミュレータでは完全にこの規格に対応していない。これらの問題があったため、地球シミュレーションセンター殿および株式会社 NEC 殿のサポートのもとプログラムの修正、デバッグ等を行ったが、多くの時間を要したため、動的解析を実施する環境はまだ構築中の段階である。そこで、本年度は、参考用データとして、1000 万自由度の解析モデルによる静的接触解析を実施した。

#### 3.2 レール・車輪モデルによる静的接触解析

静的接触解析は、図 6 のような実形状を模擬した解析モデルを用いて実施した。要素は六面体アイソパラメトリック要素として節点数および要素数は、3327372/3090641 である。このモデルのレールと車輪の接触面における要素サイズは 1.0mm × 1.0mm である。また、材料定数は、前述の解析と同様とした。さらに、接触解析では、Lagrange 乗数法を用い、摩擦係数 0.3、接線ペナルティ  $1.0 \times 10^4$  として接触圧を評価している。並列計算における領域分割は、16 分割とした。

#### 3.3 静的接触解析結果

直接法ソルバ MUMPS を適用して FrontISTR により静的接触解析を実施して、レール・車輪間の接

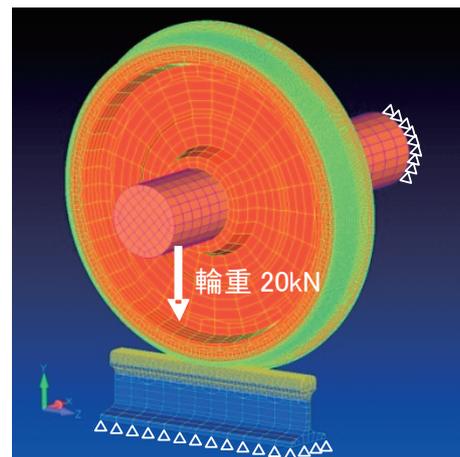


図 6 解析モデルおよび境界条件

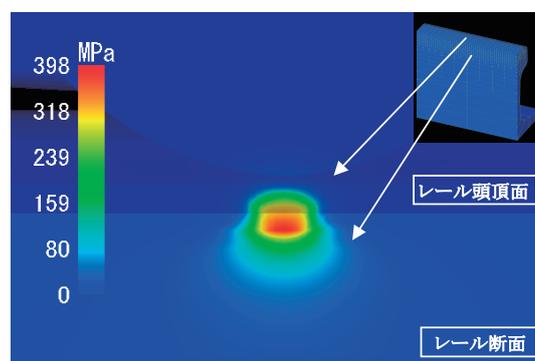


図 7 レール・車輪接触面応力分布 (von Mises 相当応力)

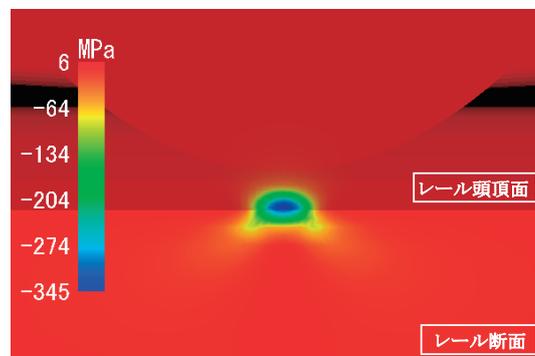


図 8 レール・車輪接触面応力分布 (鉛直方向垂直応力)

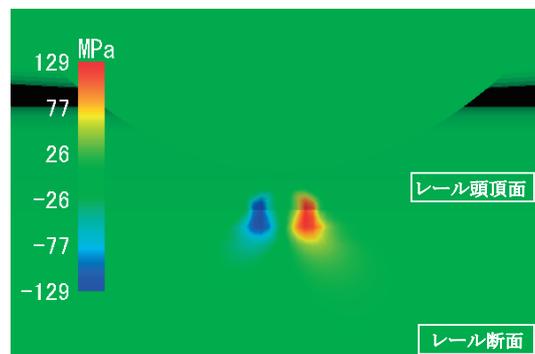


図 9 レール・車輪接触面応力分布 (せん断応力)

触面の応力分布を得た。現状、ベクトル化効率が低く、十分な計算速度ではないため、さらなるチューニングを検討中である。計算結果としては、図7はレールと車輪の接触部のレール頭頂面とレール断面のそれぞれの相当応力分布を示す。同様に図7, 8は、鉛直方向垂直応力とせん断応力の分布を示す。これらの結果は、Hertz理論などに基づいた理論解<sup>5)</sup>と比較して妥当であることが確認された。

#### 4. 今後の予定

来年度は、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、高速でレール上を車輪が通過する際の力学的挙動を評価して、接触面の精緻な評価を目指す。

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週間を要していたが、このような計算時間では、実用的ではない。従って、プログラムの実装作業とあわせ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。

#### 5. 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。開発された有限要素法解析プログラムは、PC環境において簡易モデルを用いた解析を実施して結果の定性的な妥当性を示した。現在、大規模な実形状モデルによる解析を実施するため、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。ただし、実装に関して環境依存の問題などがあったため、本報告では、レール・車輪の大規模モデルを用いた静的接触解析のみの結果を示した。

#### 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.
- 5) J.J. Kalker, "Three-Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact", KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 1990.