

# 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

公益財団法人 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部

## 研究の概要

列車の走行により繰り返し荷重を受けたレールや車輪の表面には、摩耗やき裂といった損傷が生じる可能性がある。こうした損傷は、騒音の発生、乗り心地の悪化や異常振動の発生、走行性能の悪化、走行安全性の低下につながるため、その発生メカニズムを解明することは鉄道システムの安心・安全性に直結した課題である。しかしながら、接触面の力学挙動を実験的に評価することは容易ではなく未解明な点も多い。

現象解明には、接触面における応力分布やすべり/固着状態の精緻な評価が必要であり、三次元有限要素法によるレール・車輪間の動的転がり接触解析手法を構築した。地球シミュレータの利用により、接触面を評価する上で必要な1mm四方の微細メッシュモデルを用いた大規模シミュレーションを行い、従来の計算機環境では難しかった接触面の形状や応力分布等が評価可能となった。

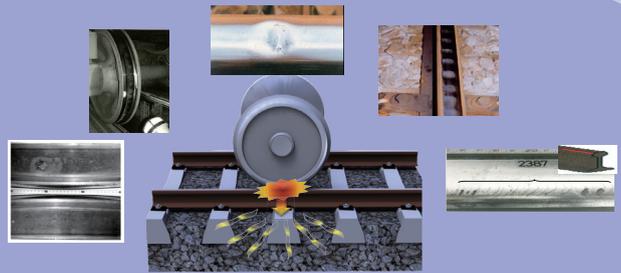


図1 車輪・レール表面の損傷事例

## 並列接触解析アルゴリズムにおける プロセス間の負荷の偏り

開発コードは、接触計算の効率化のため、接触領域を同一領域に集約するような領域分割がされていた。そのため、接触領域を受け持つプロセスの処理が他プロセスを律速していた。

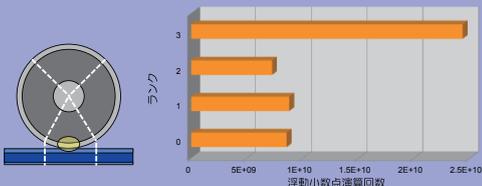


図2 接触領域を受け持つプロセスの負荷の偏り

## ES向け最適化と負荷バランスの改善

最内ループのインライン展開、キャッシュチューニング、多重ループ内の関数やサブルーチンのインライン展開により、接触領域が割り当てられたプロセスの処理時間を短縮したことにより、負荷バランスが改善し、全体として約2.4倍高速化した。

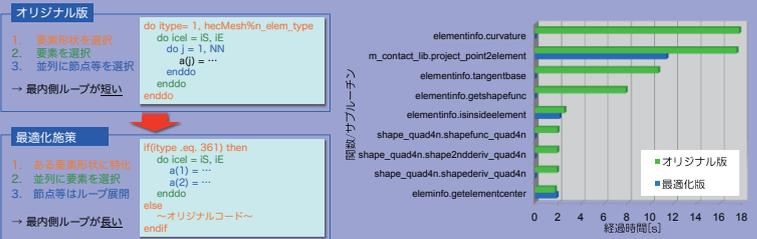


図3 接触探索処理における多重ループの最適化と処理時間の短縮効果

## 荷重載荷による押付け接触解析静解析

解析手法および解析モデルの検証のため、車輪・レール転がり接触解析プログラムのベースとなるFrontISTRの静的接触解析を以下の条件で実施した。

- ・モデル形状（一軸一輪、図4）  
新幹線で使用される実形状と同じ材料係数  
約300万節点（1,000万自由度）  
接触領域のメッシュサイズ：1mmx1mm
- ・計算条件  
輪重（50kN）を10 substepに分割して載荷  
レール底面完全拘束
- ・評価対象  
接触面の応力分布、接触面形状
- ・解析手法  
有限要素法、FrontISTR（公開版）  
接触解析：Lagrange未定乗数法  
線形方程式解法：MUMPS

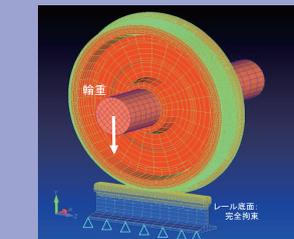


図4 一軸一輪静解析モデル

図5は50kNの輪重載荷時の応力分布図を示す。接触面形状や値から、理論解と比較し妥当であることを確認した。

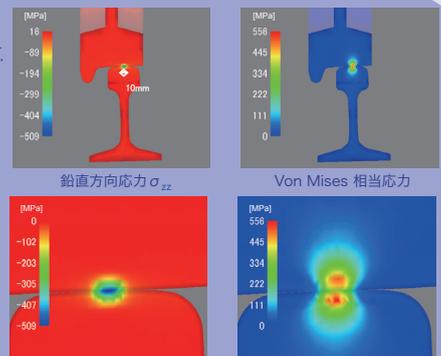


図5 接触領域近傍の応力分布図（圧縮を正）

## 車輪・レール 転がり接触解析

FrontISTRをベースに弾塑性を含む車輪・レール間の転がり接触解析プログラムを開発、ESへの移植を行った。

### <解析手法>

- ・離散化手法：Updated Lagrange法
- ・時間積分：Newmark β法 ( $\Delta t=2.5 \times 10^{-5}$  [s])
- ・接触問題の解法：Lagrange未定乗数法
- ・摩擦力の考慮（Coulomb摩擦則）

### <評価対象>

車輪・レール間接触面接触線、法線力、接触面形状、位置、すべり/固着

### <並列化>

- ・領域分割、8MPIプロセス、8ノード使用
- ・接触領域は同一領域に集約

MUMPSによる求解部分はベクトル化率も低く、ES上では輪重載荷までの計算でノード時間を消費した。反復解法の適用などが次年度以降の課題である。

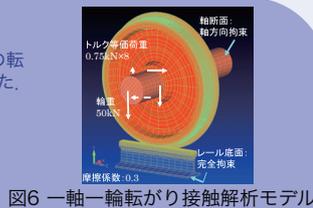


図6 一軸一輪転がり接触解析モデル

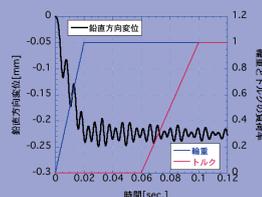


図7 輪重載荷とトルク負荷に対する車軸の鉛直方向変位

## まとめ

<レール・車輪間の転がり接触解析から>

1. 実験では評価が難しい接触面における応力分布を転がり接触解析によって再現することができた。
2. 計算結果の妥当性について、低速域での発生応力は概ね良好であるが、現地測定との比較には、高速域での計算結果が必要であり、計算効率の改善が不可欠である。

### <今後の計画>

1. 反復解法の適用による解法部分の高速化
2. 二軸二輪、台車といったより大規模モデルによる現実に近い走行状態の再現

## 謝辞

地球シミュレータへの開発コードの移植やベクトル化等の最適化におきまして、地球シミュレータセンター 廣川様、福井様より多くの貴重な助言いただきました。ここに厚く御礼申し上げます。



Railway Technical Research Institute

地球シミュレータ産業利用シンポジウム2014