

- 鉄道一般
- 車両
- 軌道
- 構造物
- 防災
- 電力
- 信号通信情報
- 材料
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

# 車輪とレールの接触機構を解明する

車輪がレール上を転がるとその接触面では複雑な力学的挙動を示しますが、走行の安全性や快適性、保全性などにも密接に関連することから、これらの現象解明に関してこれまで多くの研究が行われてきました。しかしながら、車輪やレールの劣化など未解明の現象も多く、今後、さらに研究を進める必要があります。そこで、車輪とレールを精緻な有限要素モデルで表現し、スーパーコンピュータによる大規模並列計算による解析を進めています。本稿では、車輪とレールの接触機構を解明するための研究内容を紹介します。



**高垣 昌和**  
Masakazu Takagaki  
鉄道力学研究部  
計算力学研究室  
室長  
【専門分野】 構造解析、  
損傷評価、車両の強度  
評価



**林 雅江**  
Masae Hayashi  
鉄道力学研究部  
計算力学研究室  
副主任研究員  
【専門分野】 大規模並列  
計算、方程式ソルバ



**坂井 宏隆**  
Hiroataka Sakai  
鉄道力学研究部  
計算力学研究室  
研究員  
【専門分野】 構造・流体  
解析、軌道の動的特性



**相川 明**  
Akira Aikawa  
鉄道力学研究部  
軌道力学研究室  
主任研究員  
【専門分野】 不連続体力  
学、粒状体解析、パラ  
スト、現場測定

## はじめに

車輪やレールは、走行時に衝撃力や振動荷重が加わり、コンタクトパッチと呼ばれる車輪とレールの接触面では厳しい負荷を受けます。これらの負荷が長期的に繰り返す作用すると特定箇所において特異な摩耗やき裂などの劣化が生じる場合があります。レールに摩耗やき裂があると列車走行時に異常振動が生じて、騒音や乗り心地が悪化し、時には安全性に影響を与えます。劣化現象の事例としては、波状摩耗やシェリング(☞参照)などさまざまあります(図1)。これらの発生原因は未解明な点が多くありますが、その要因としては接触面に生じる高周波域の衝撃力や相対すべりなどが考えられてい

ます<sup>1)</sup>。接触面内のこれらの挙動を実験的に明らかにすることは困難であるため、解析手法により精緻に評価することは、重要な課題のひとつとなっています。

これまで実験および解析により車輪とレールの劣化に影響を与える因子の推定や、具体的な対策法に関する研究が数多く行われてきましたが、詳細な現象解明までには至っていません。そこで、劣化現象を解明するとともに長期劣化の評価指標を構築するためのツールとして、車輪とレール間の動的転がり接触問題に対する大規模並列計算(☞参照)を適用した有限要素解析手法を開発しています<sup>2)</sup>。

## 車輪とレール間の挙動を評価するための工夫

### なぜ大規模並列計算が必要なのか

車輪とレールの接触面は、10mm～20mm程度のごく小さな領域のた

### ☞ 波状摩耗

レール上を車輪が繰り返し走行することにより一定間隔で凹凸になる摩耗のこと。複数の影響因子があり、発生原因は、諸説があるものの特定はされていません。

### ☞ シェリング

レール頭部に生じる転がり接触疲労損傷の一種。き裂は、表面あるいはごく表層を起点にレールの長手方向に進展します。

### ☞ 大規模並列計算

計算機において1つのタスクを複数のプロセッサにより分担して計算させる手法。大規模なデータを高速処理する場合に使われています。

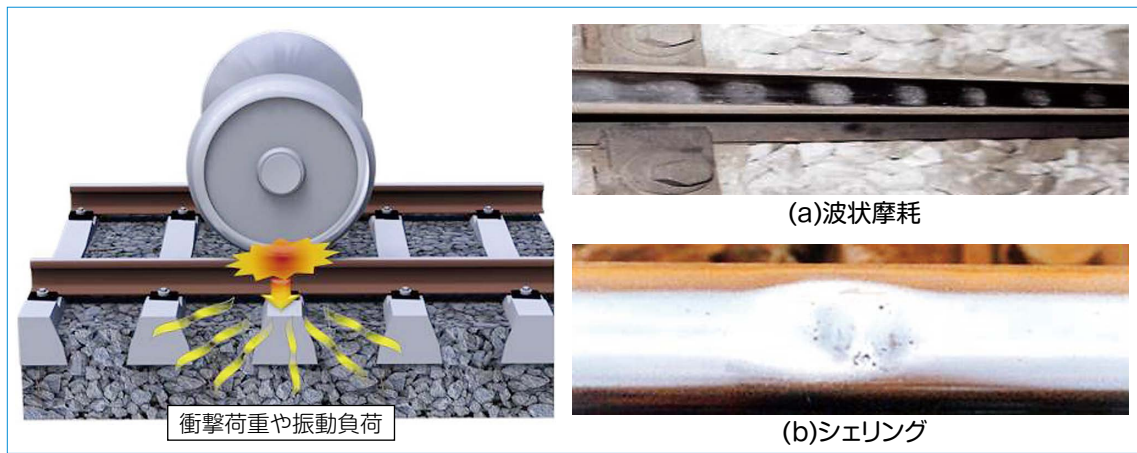


図1 レールの劣化事例

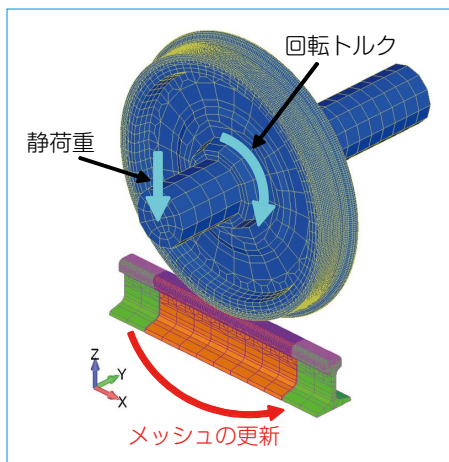


図2 車輪／レールの解析モデル

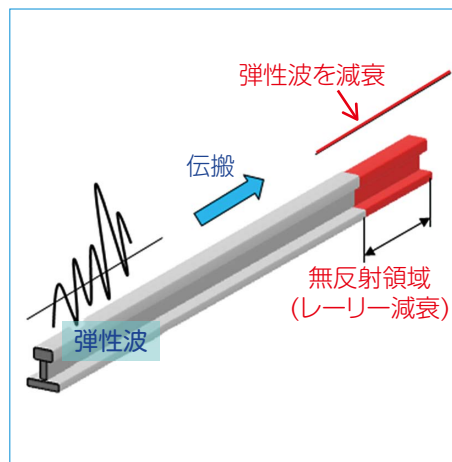


図3 車輪／レールの解析モデル

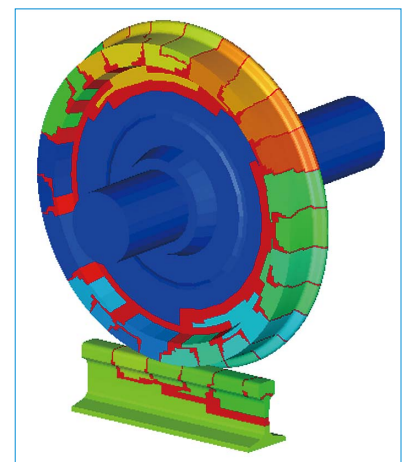


図4 解析モデルの領域分割

め、数値解析の知識がある方であれば、大規模なモデルは必要ないと思われるのではないのでしょうか。確かに定常状態を評価するのであれば、部分的な解析モデルで問題ありませんが、車輪を高速で転がし、高周波の振動を精度よく評価するためには車輪全体をモデル化して、コンタクトパッチを最低でも200分割程度の細密な解析モデルとする必要があります。さらに全周にわたり、このようなメッシュ分割とし、レール側も同様のサイズのモデル化をする必要があります。そうすると計算量が膨大となり通常の計算機では扱えない解析規模になり、スパコンを利用した大規模並列計算による解析を実施しなければなりません。

### 効率的な解析モデルの開発

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となりますが、例えば、停止状態から時速300kmまで加速させるためには、数kmほどの長さが必要となるため、これを全てモデル化することは非現実的です。そこで、図2に示すように車輪が通過した後の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利用する方法を提案しました。ただし、レール長さが短くなると、車輪の回転により発生する弾性波がレール内を伝わり、レールモデルの端面で反射した後、減衰することなく接触領域に達して解析結果に影響を与えると考えられます。そこで、弾性波がモデル端面で反射し

ないようにレーリー減衰(参照)を適用した要素により無反射境界を設定できるようにしました(図3)。

### 並列計算のための領域分割

大規模な解析モデルを用いて並列計算を行うためには、モデルサイズをできるだけ均等に領域分割します(図4)。そうすることにより各計算機の負荷に

#### レーリー減衰

計算を安定化させるために考案された減衰であり、実際の現象を再現させるためのものではなく、仮想的な減衰です。定義は、次式のようになります。

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K]$$

[C]: 全体減衰マトリクス, [M]: 全体質量マトリクス, [K]: 全体剛性マトリクス,  $\alpha, \beta$ : 係数

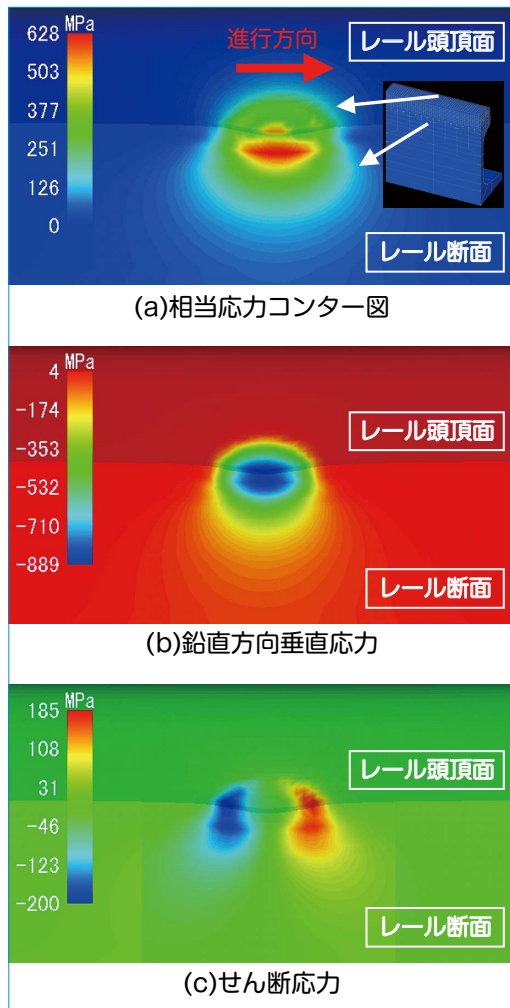


図5 応力コンター図(変位50倍)  
(図中のスケール最大・最小値は、  
表示範囲内での最大・最小値を示す)

バラツキがなく計算の効率も上がります。並列計算では、それぞれの領域の境界要素(図中:朱色)についてはデータを共有するため、ネットワークを介してデータの転送を行います。これにより解析モデルを分割して個別に計算しても、当然ですが正しい解が得られます。また、車輪とレールの接触面は全体のモデルに比べ、ごく小さな領域です。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ひとつの分割領域内に収めることにより、データ通信を少なくして接触解析の高速化を図っています。ところが、車

輪が回転すると、車輪の進行とともに接触面が移動するため、領域分割を再実行しなければなりません。一般的な並列計算は、前処理として領域分割を一度だけ行ってメッシュデータを作成し、並列計算を実行することとなります。本解析では、再分割の度にハードディスクへの入出力が発生し、計算時間が増大します。そこで、領域分割を高速に処理できるメモリー上において実行するようにしました。これらのプログラム開発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ます。

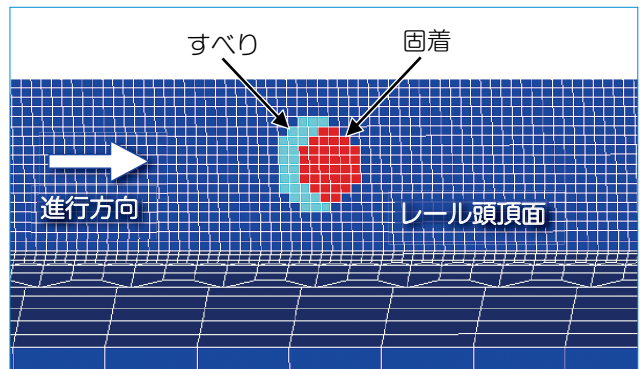


図6 固着/すべり領域分布

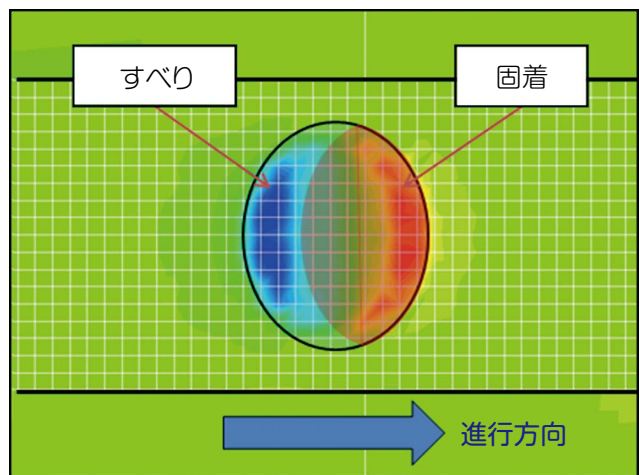


図7 固着/すべり領域分布とせん断応力分布の比較  
(色表示は、図5(c)のスケールと同じ)

### 車輪とレール間の接触面の解析的評価例

開発した大規模並列計算有限要素解析プログラムにより動的転がり接触解析を実施した事例として、図2のような車輪の1軸1輪と1本のレールを模擬したモデルによる例を紹介します。走行状態は、直線のレール上をモーターの駆動力が車軸に作用しているものとして、車輪が加速している状態を再現しています。実験では走行時の接触面やレール内部の応力状態を把握することは困難ですが、解析では、図5に示すとおりレール頭頂面やレール断面の応力分布を得ることが容易に可能です。これらの応力分布をみると、車輪が加速状態にあるため、接触面の中

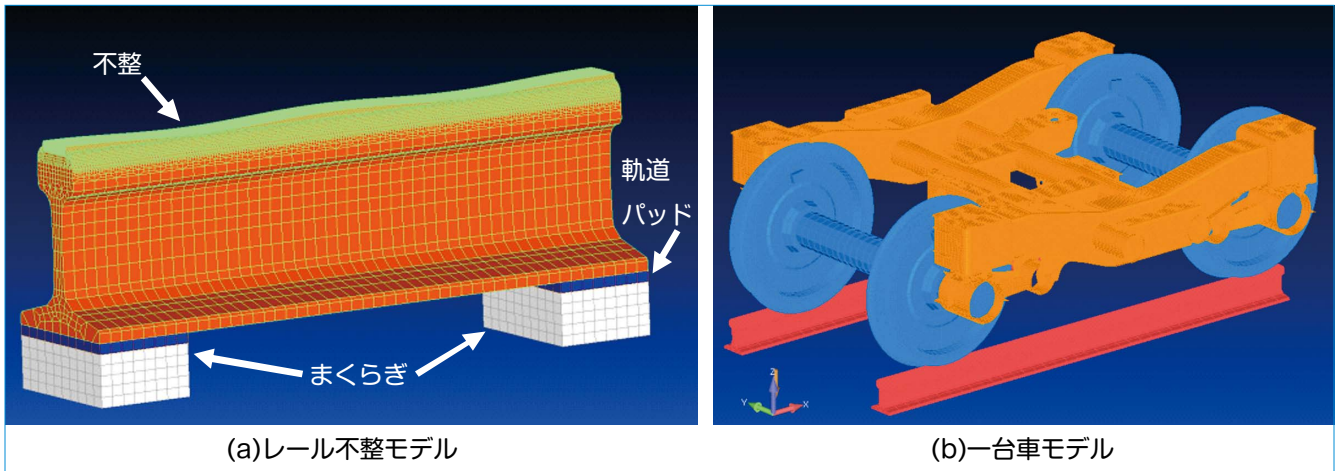


図8 解析モデルの事例

心より進行方向後方の領域の応力が高くなっています。また、この例は弾性計算で実施していますが、相当応力(☞参照)の最大値をみると降伏応力に近い値となっているため、さらに高い負荷を与える場合には弾塑性状態を考慮する必要があります。

また、車輪が転動すると接触面内の進行方向後方域では車輪とレール間にすべりが生じます。これらを定量的に評価できるようになれば、摩耗などの現象解明に繋がるものと期待されます。ただし、これらの挙動を実験的に評価することが困難であるため、これまでに解析的な検討が数多く行われていました。本研究では、より精緻な評価を行うため、車輪に作用する負荷やレールおよびまくらぎの支持などの境界条件を走行試験や実験から得られたデータを用いることで、よりリアルに走行状態を模擬して、現象解明を目指しています。

図6には、接触解析により固着／すべり状態を評価した結果を示しています。さらに、図7にはすべり／固着領

#### ☞ 相当応力

複雑な多軸応力状態の応力成分を単軸引張状態の応力に換算した値が相当応力となります。

域とせん断応力分布を比較したものを示しています。この結果より、せん断応力は、摩耗の進展に対する評価指標として適用できる可能性があると考えられます。

### 実現象の解明を目指したシミュレーション

これまでに車輪／レール間の動的転がり接触解析を実施するため、シミュレーション手法の開発を行い、健全状態の車輪とレールの大規模モデルを用いて高速走行のシミュレーションを行いました。今後、さらに細密なモデルを用いた計算が可能となるようにプログラムの高速化を行うとともに、劣化現象の原因解明にむけて波状摩耗などの劣化を模擬したレールモデルを構築します(図8a)。この解析では、軌道パッドやまくらぎも含めたモデル化を行います。さらにバラストや高架橋などの構造物も車輪とレールの動的な接触挙動評価に影響があると考えられるため、さらに大規模な計算となりますが、これらを考慮した解析の実施を検討中です。一方、車輪の並進速度については300km/hまで加速させます。上記のような解析が可能となれば、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、得られた結果より波状摩耗やき裂の発生原因の解明に繋がることを期待しています。また、車輪間の相互作用を考慮するため、車輪を前後方向に配置した2輪2軸の解析モデルを用いた解析の実施を予定しています。

さらに、次のフェーズでは一台車モデル(図8b)を構築して、上記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ます。この一台車モデルでは、曲線走行や蛇行動などといったより現実的な走行状態のシミュレーションも検討しています。

なお、ここで紹介した解析手法の開発は、東京大学および(株)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ています。[RRR]

#### 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，Vol.17, No.9, pp.88-94, 2003
- 2) 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