

- 鉄道一般
- 車両
- 施設
- 電気
- 運転・輸送
- 防災
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

車輪・レール間の接触挙動を再現する

車輪がレール上を転がると、その接触部では複雑に力が作用し、車輪やレールに摩耗やき裂などの損傷・劣化現象を生じさせ、走行の安全性や乗り心地の低下、保守作業の増加などの観点で大きな影響を与えます。したがって、これらの現象の解明に関して多くの研究が行われてきました。一方で、上記の現象の発生・発達要因には未解明な点もあります。そこで、数値解析技術によってこれらの現象を再現・予測することを目標に、スーパーコンピュータによる有限要素法を用いた大規模並列計算ツール「車輪・レール転がり接触シミュレータ」の開発に取り組んでいます。本稿では、これまでに開発したツールの機能を拡張することで損傷・劣化の発生頻度が高い曲線部の走行を再現可能としましたので、その内容と計算事例について紹介します。



坂井 宏隆
Hiroataka Sakai
鉄道力学研究部
計算力学研究室
副主任研究員
[専門分野] 構造解析、
粒子法、軌道の動的特性

はじめに

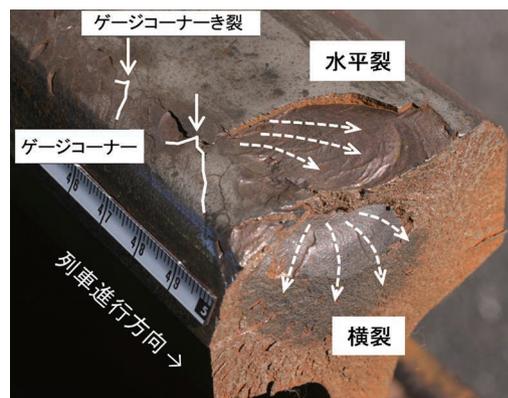
鉄道の車輪やレールは、コンタクトパッチとよばれる数十～100mm²程度のごく小さな領域で数トンの荷重を伝えているため、車輪とレールの接触面は厳しい負荷を受けます。車輪の転動によってこれらの負荷が繰り返して作用することで、車輪やレールに摩耗や

き裂などの損傷・劣化が生じる場合があります(図1)。これらの損傷は騒音や乗り心地の悪化を招いたり、時には安全性に影響を与えたりする場合があります。これらの損傷現象の発生・発達要因には未解明な点が残されているうえ、実験的にその様子を観察することは困難です。そのため、数値解析技術によって、これらの現象を再現・予測することは有効な手段となります。

このような背景を踏まえ、著者は大規模並列計算(☞参照)の技術とスーパーコンピュータを用い、有限要素法によって車輪に駆動トルクを与えて

☞ 大規模並列計算

計算機において一つの仕事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。



(a) レールに発生したき裂



(b) 波状摩耗

図1 レールの損傷事例

転動させながら、車輪やレールの接触面に働く力の方向や大きさを時刻歴で求めることができる解析ツール「車輪・レール転がり接触シミュレータ」を開発してきました。

これまでに車軸の半分と一つの車輪を有するもの（一軸一輪モデル）や、二車輪を前後に配置し簡易的に結合したもの（二軸二輪モデル：図2）での開発と検討を進めてきましたが、これらのモデルでは車軸の対称面の変位を拘束する必要があり、車輪の進行方向に対して左右の動きを再現することができませんでした。一方で、前述した車輪やレールの損傷現象は曲線区間で発生することも多く、曲線走行への対応が求められます。そのため、上記の計算モデルを二輪軸（二軸四輪：図3）に拡張し、曲線走行を可能とするため解析ツールに改良を行いました。

曲線走行を再現するための工夫 解決すべき課題

有限要素法では、計算を行うために必要な解析モデルの作成が計算精度や計算時間を左右する重要なポイントの一つとなります。計算負荷を抑えて計算時間を短縮するためには解析モデル全体の自由度数（※参照）をなるべく少なくすることが重要です。一方で、と

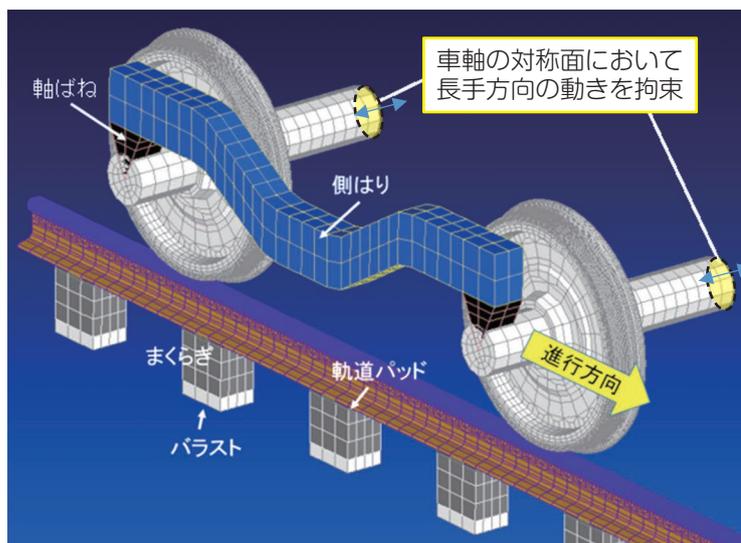


図2 二軸二輪モデル

くに応力集中部などではメッシュのサイズを小さくすることによって高い精度の計算結果を得ることができます。そのため、通常は詳細な解析結果を得たい部分（今回の場合は高い応力が生じるコンタクトパッチとその周辺部）については小さなメッシュサイズで分割を行い、それ以外の部分についてはメッシュサイズを粗くしたり、全体の自由度がより少なくなるよう、適切な要素の選定や境界条件の設定を行うことによって全体の解析モデルを作成します。ただし、車輪・レール転がり接触シミュレータでは車輪やレールの接触部だけでなく、各部材の内部に生じる応力や加速度などの値も、同時かつ高い精度で評価できるようにするため、全体を

ソリッド（六面体）要素（※参照）のみで構成しています。そのため、メッシュサイズを粗くするなど、上記のような方法で解析モデル全体の自由度数を抑えることには限界があります。加えて、一般的な曲線区間を設定する場合、直線→緩和曲線→円曲線の順にレールを用意する必要があり、レールの全長は数十～数百メートルとなり、解析モデル全体の節点数が増加します。また、カントの付加方法や緩和曲線にも種類があるため、軌道の条件に合わせた解析モデルの作成には労力を要します。

上記の課題を解決するため、車輪・レール転がり接触シミュレータが有する機能「効率的な解析モデルの開発¹⁾」をベースに、曲線走行用のレールの数値解析モデルを自動生成・更新する方法を提案しました。

曲線モデルの自動生成・更新方法

車輪・レール転がり接触シミュレータでは、車輪の転動を時刻歴で連続的に模擬するため、数～十数メートル程度の有限長のレールを長手方向に複数のブロックに分割し、車輪が通過した後のレールブロックを進行方向前方に座標移動させることで、レールの解析モデルを繰り返し用いる方法を導入しています。曲線走行の実現にあたっては、本機能を利用して曲線区間のレール

※ 自由度数

メッシュ（要素）を構成する「節点」の運動する方向のことで、一つの節点に対して並進3成分と回転3成分の合計6成分があります。有限要素法において、解析モデル全体の自由度数は計算時間を決定づける要因の一つです。一般に、自由度数の増加にともなって、計算時間は指数関数的に増加します。

※ ソリッド（六面体）要素

メッシュ分割の際に用いる要素には、「はり要素」や「板要素」「ソリッド要素」などの種類があり、「ソリッド要素」のなかにも「四面体」や「六面体」などの形状があります。このうち、ソリッド（六面体）要素は、大変形や接触などのさまざまな事象に対し、大きな制約を受けずに解析精度を保ちやすい要素種別として、一般的にもよく用いられています。一方で、車輪やレールなどの複雑な三次元形状を持つ場合、六面体のみによる分割は解析精度の維持や周囲のメッシュとの連続性からメッシュサイズを小さくせざるをえず、結果的に全体の自由度数が増加することがあります。

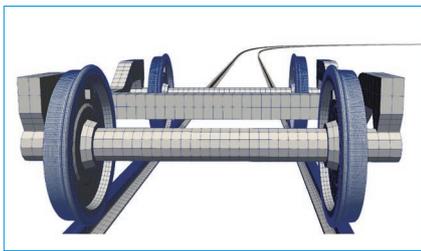


図3 解析メッシュモデル

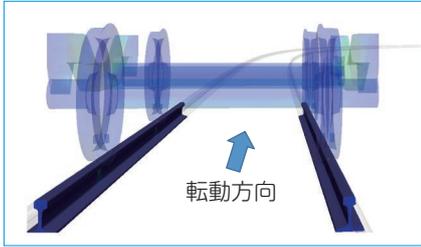


図4 計算領域
(車輪と距離がある灰色レール部分は計算に考慮されない)

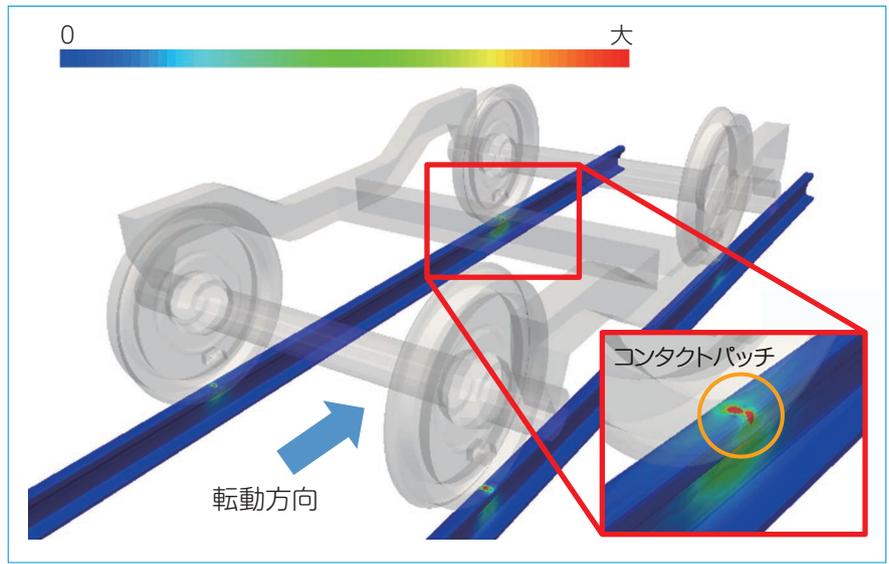


図5 フランジ接触の発生時の相当応力分布 (右カーブ走行時)

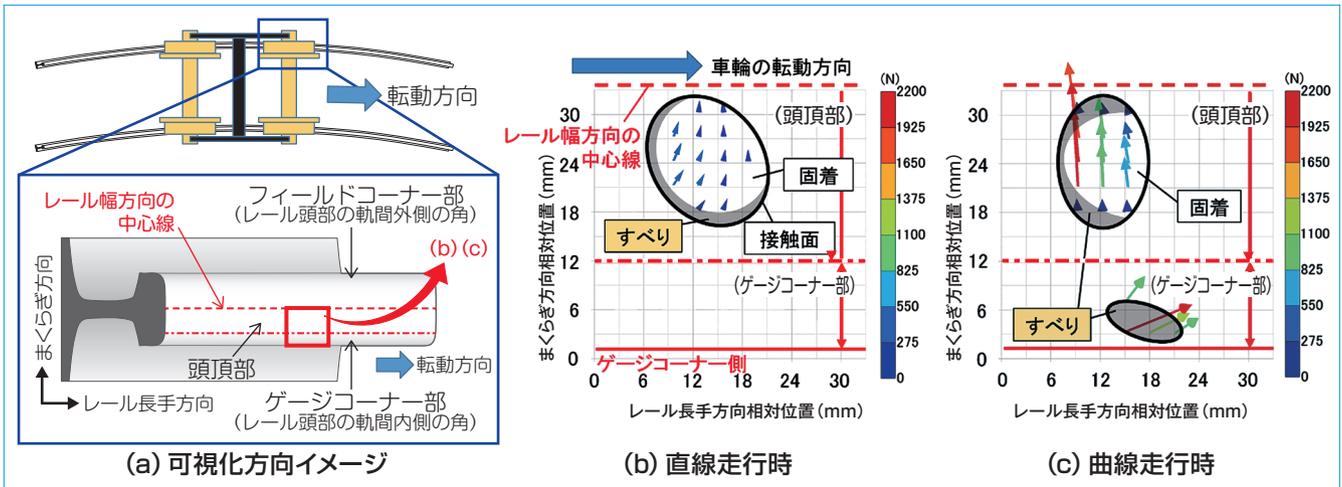


図6 車輪とレールの接触部に生じる接線力と固着／すべり領域 (車輪側に作用する力)

ルを自動生成・更新する方法を提案しました。

はじめに曲線の諸元を定義し、専用のプログラムで軌道線形に沿った軌道中心線のデータを生成します。そのデータを入力ファイルの一つとして車輪・レール転がり接触シミュレータによる計算を開始すると、曲線の全長の中で台車付近のレールのみが計算で考慮されます (図4)。車輪の転動にともなって、進行方向最後部のレールブロックが先頭に移動しますが、移動の際には軌道中心線に沿うようにブロックが配置されます。また、計算で考慮されるレールの領域は台車の進行にともなっ

て移動していきます。この機能によって、曲線部分のレールの有限要素モデル全体を手動で作成する労力を省くとともに、計算で考慮する領域をつねに台車とその周辺付近のレールに限定することができ、計算負荷を抑えることが可能です。

数値解析事例

ここでは、開発したアルゴリズムによって台車が走行する際の、車輪・レール間に生じる応力や力の計算結果の一例を示します。解析モデルは図3に示すような二本の輪軸と簡易な形状の台車枠を有する一台車 (二軸四輪) と、底

面を完全固定としたカントを有する二本のレールから成ります。なお、解析モデルの最小メッシュサイズは3mmとしました。図5は緩和曲線の走行中にレール側に作用する相当応力 (参照) の分布を示しています。車輪の転動方向に対し、前軸外軌側の車輪がフランジ接触を生じている様子がわかります。

次に、コンタクトパッチ内に作用

参照 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ものです。材料の強度や破壊を取り扱う場合に用いられる指標の一つです。

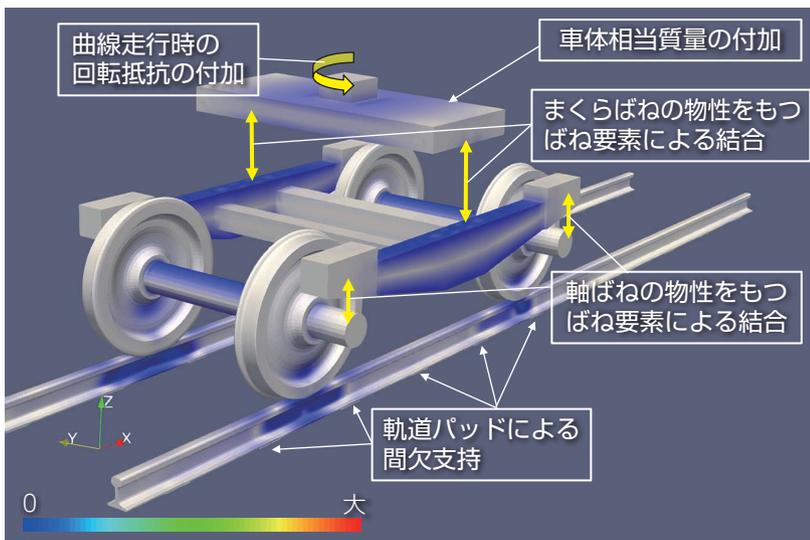


図7 詳細モデルの例 (相当応力分布を同時に表示)

する力の分布に着目します。図6は、図3の解析モデルを用いて台車を一定の速度で走行させたときの、直線走行時およびフランジ接触時における、前軸外軌側の車輪のコンタクトパッチ内の接線力(☞参照)の分布と、固着/すべり領域を示しています。図6(a)に示すように、レールを真上から見たときの様子です。図6(b)は直線を走行中のコンタクトパッチ内の接線力の分布を示していますが、その方向は主としてフィールドコーナー側を向くとともに、パッチ内の後方の節点では進行方向前側に向かうベクトル成分も見られます。前者は車輪の踏面やレールの頭頂面につけられた勾配に対して車輪をフィールドコーナー側へ押し戻そうとする力、後者は車輪を前に進めようとする力を意味しています。

図6(c)は緩和曲線を走行中に、車輪がフランジ接触を生じているときのコンタクトパッチ内の接線力の分布です。レールの頭頂部には車輪をフィールドコーナー側に動かそうとする大き

な力が働くとともに、ゲージコーナー部では車輪を前に進めようとする力が働いていることがわかります。また、レールのゲージコーナー部は全すべり状態となっており、大きな接線力の作用下ですべりが生じることによって、摩耗などの損傷現象が促進されることが示唆されます。

このように、車輪とレールの間に働く力の方向や大きさ、固着/すべりなどの状況を詳細に把握することで、き裂や摩耗の発生・発達要因の推定や、具体的な対策方法の提案のための手掛かりとなります。

実現象への活用を目指して

今回紹介した計算例では、台車側、レール側ともに簡易な解析モデルを用いたものでしたが、実際の鉄道において車輪・レール間に働く力は、台車や軌道の諸元や動的特性によって大きく異なります。そのため、現在は軸ばねやまくらばねを再現し、車体相当の質量を有する要素を付加した台車モデル

☞ 接線力

レールの表面を分割された各要素に対し、要素を構成する面に平行な方向に働く力のことで、コンタクトパッチ内に働く接線力は、一般にクリープ力ともよばれます。とくに、車輪の転動方向に働く接線力を縦クリープ力、転動に対して垂直な方向(車軸方向)に働く力を横クリープ力とよびます。

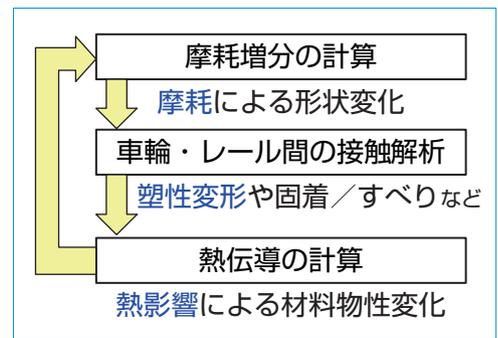


図8 車輪やレールの劣化(摩耗, 熱影響, 塑性変形)を考慮したアルゴリズム

と、軌道パッドの付加による間欠支持のレールモデルを組み合わせた計算を実施しています(図7)。

また、これまで開発を行ってきた車輪・レール転がり接触シミュレータが持つ構造解析機能に加えて、制動による発熱や車輪とレール間の摩擦によって生じる発熱などを考慮可能な熱伝導解析機能を追加し、構造解析との連成計算が可能となるように機能拡張も行っています²⁾。さらに、構造解析によって得られた車輪・レール間の接線力や応力の値を用いて、車輪やレールの摩耗量を同時に計算する機能も開発中です(図8)。本ツールを用いて、制動時の車輪損傷や車輪・レールの摩耗現象など、車輪やレールに生じる種々の損傷現象を再現するとともに、得られた知見をもとにした対策法の提案などへの活用を目指しています。

なお、ここで紹介した解析手法の開発は、国立大学法人東京大学および株式会社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) 高垣昌和, 林雅江, 坂井宏隆, 相川明: 車輪とレールの接触機構を解明する, RRR, Vol.70, No.9, pp.8-11, 2013
- 2) 坂井宏隆, 高垣昌和, 唐津卓哉, 奥田洋司, 林雅江, 殷峻: 大規模並列有限要素法による車輪/レール/制輪子間の熱・構造連成解析, 日本機械学会 第31回計算力学講演会 (CMD2018) 講演論文集, No.081, pp.1-4, 2018