

# 実軌道の不整を考慮する 車輪・レール転がり接触解析手法の開発



**坂井 宏隆**  
Hiroataka Sakai  
鉄道力学研究部  
計算力学研究室  
主任研究員



**齋藤 理沙**  
Risa Saito  
鉄道力学研究部  
計算力学研究室  
研究員



**高垣 昌和**  
Masakazu Takagaki  
鉄道力学研究部  
計算力学研究室  
上席研究員

## はじめに

鉄道において、車輪とレール間の接触は境界問題の代表的な事例の一つです。車輪とレールはともに硬い金属でできていることからほとんど変形しないため、一般的な接触面積は1円玉のサイズ程度です。その小さな接触面で数トンもの重量を支えるため、車輪とレールの接触部には大きな負荷がかかります(図1)。

車両の加減速によって、その小さな接触面に

おいて車輪とレールに摩擦力が生じますが、雨や雪の日などは車輪が空回りする可能性もあり、作用する力は一定ではありません。また、急曲線を走行する際は**車輪のフランジ**面とレールの側面が接触するなど、接触の仕方も様々です。一方、車輪とレールとの接触状態(接触位置や接触部に作用する力)を詳細に把握することができれば、車輪とレールの接触にともなう生じる傷の発生や発達の予測・対策方法の提案などに役立ちます。そこで、本稿では車輪の転がり接触問題を取り扱えるシミュレーション手法の開発と工夫、およびシミュレーション事例についてご紹介します。

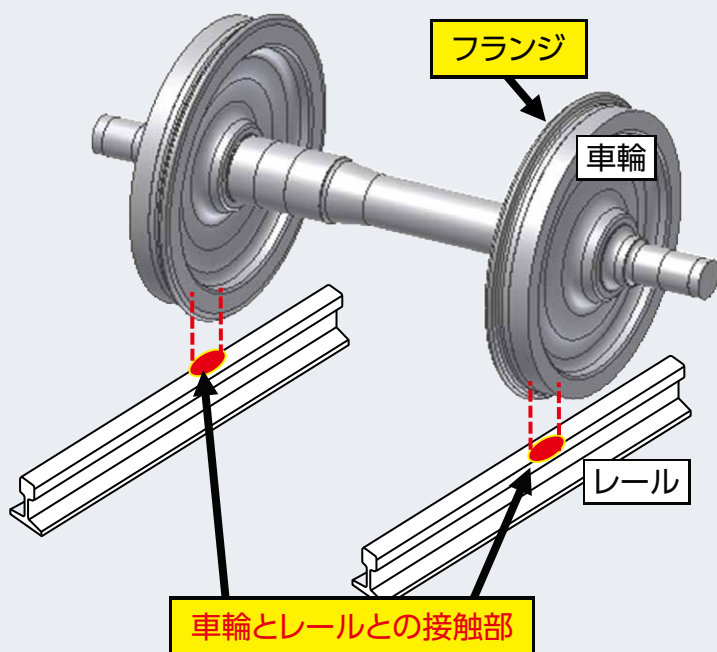
## 車輪とレール間の接触状態を把握する 上での課題と数値シミュレーション

実際の車輪とレールとの接触状態は、上述したように車両の走行状態や軌道の形状によって異なります。また、実際の線路は車両の通過によって少しずつゆがんでいく(軌道変位)ほか、車輪やレールは、使用とともに摩耗などでその形状が変化してい

### 車輪のフランジ

車輪がレール上を回転しながら進む際、脱輪しないように誘導するため、車輪の外周に連続して設けられた突起部分のことです。

図1 車輪とレールの接触



きます (図2)。そのため実際の車両において、車輪とレールの接触状態を観察・特定することは難しく、数値シミュレーションによって接触状態を予測する方法が有効な手段となります。そこで、著者らは車輪の転がり接触解析ツール「車輪・レール転がり接触シミュレータ (以下、本ツールと呼びます)」を開発しています<sup>1)2)</sup>。

### シミュレーション手法の概要と計算時間の短縮方法

本ツールは「有限要素法」と呼ばれる数値解析手法を用いています。これは、計算対象とする物体を4面体や6面体などの小さな要素 (メッシュ) に分割し、要素に生じる力や変形量などを求める方法です。メッシュサイズは対象物への力のかかり方を想定したうえで、局所的に大きな力が生じるような場所では十分な計算精度が得られるよう、より小さなサイズの要素に分割する必要があります。車輪とレールの接触部は小さな面積に大きな力が作用することから、メッシュのサイズも1~数ミリ、もしくはそれ以下の非常に小さなオーダーとなります (図3)。車輪が転がることで車輪とレールの接触位置が変わるので、接触が想定

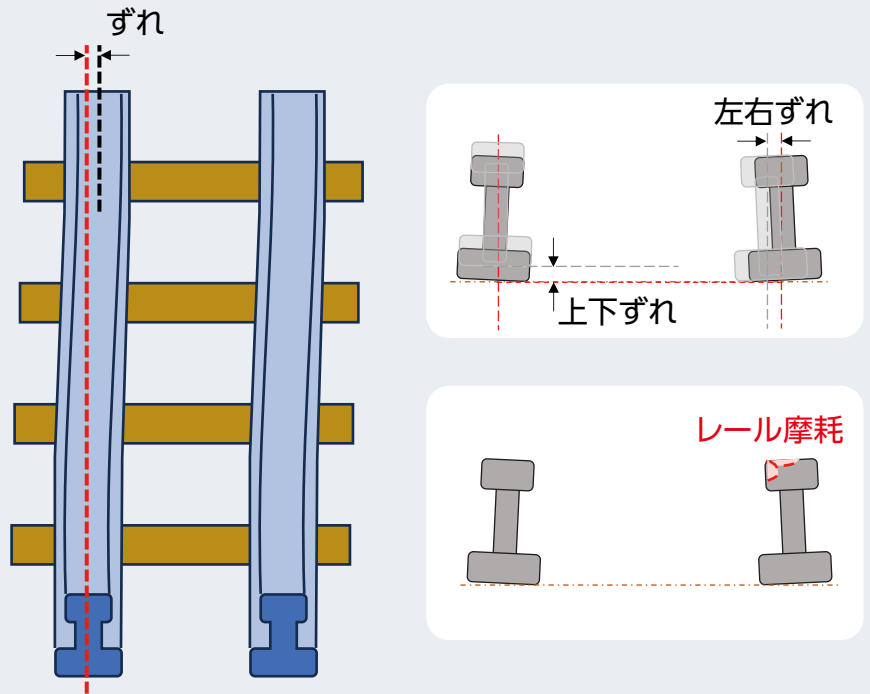


図2 軌道変位やレール摩耗のイメージ

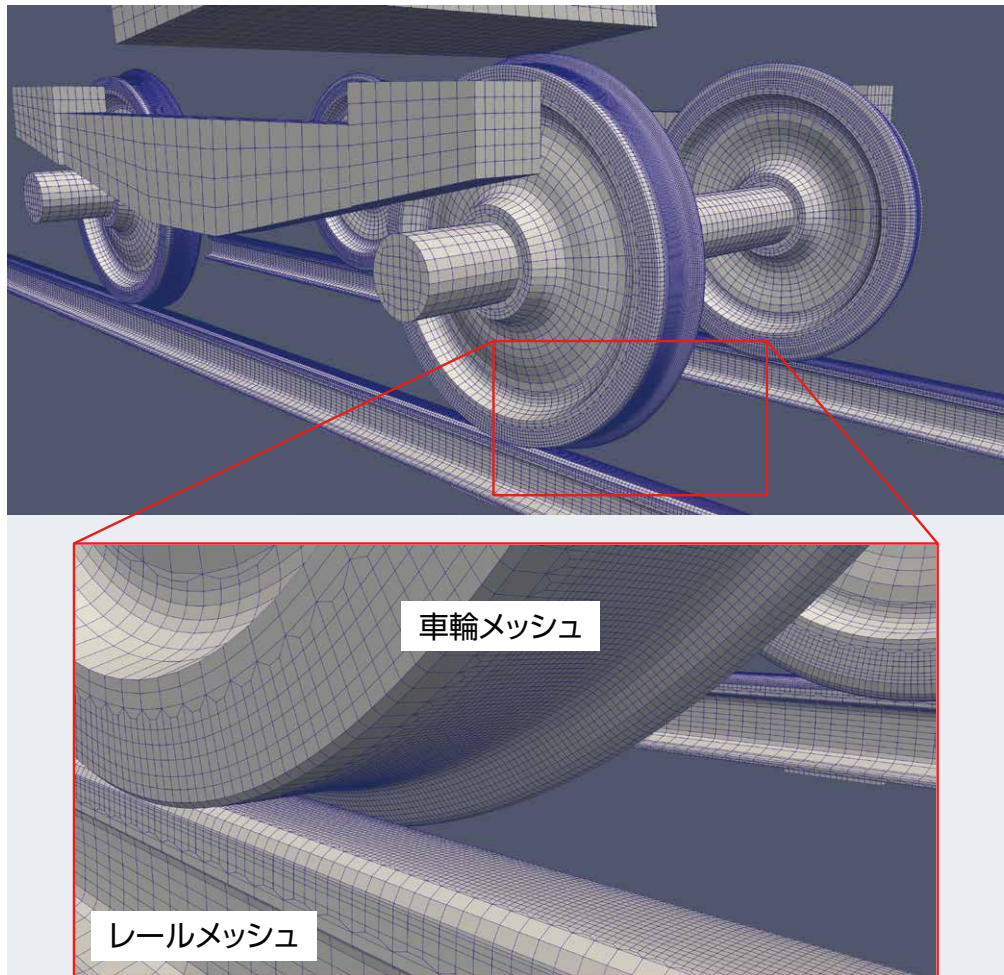


図3 車輪とレールのメッシュの例

色分けしたブロックメッシュ：ここではまくらぎ 1 本分が 1 ブロック  
全体メッシュ：ブロックメッシュ 4 個分

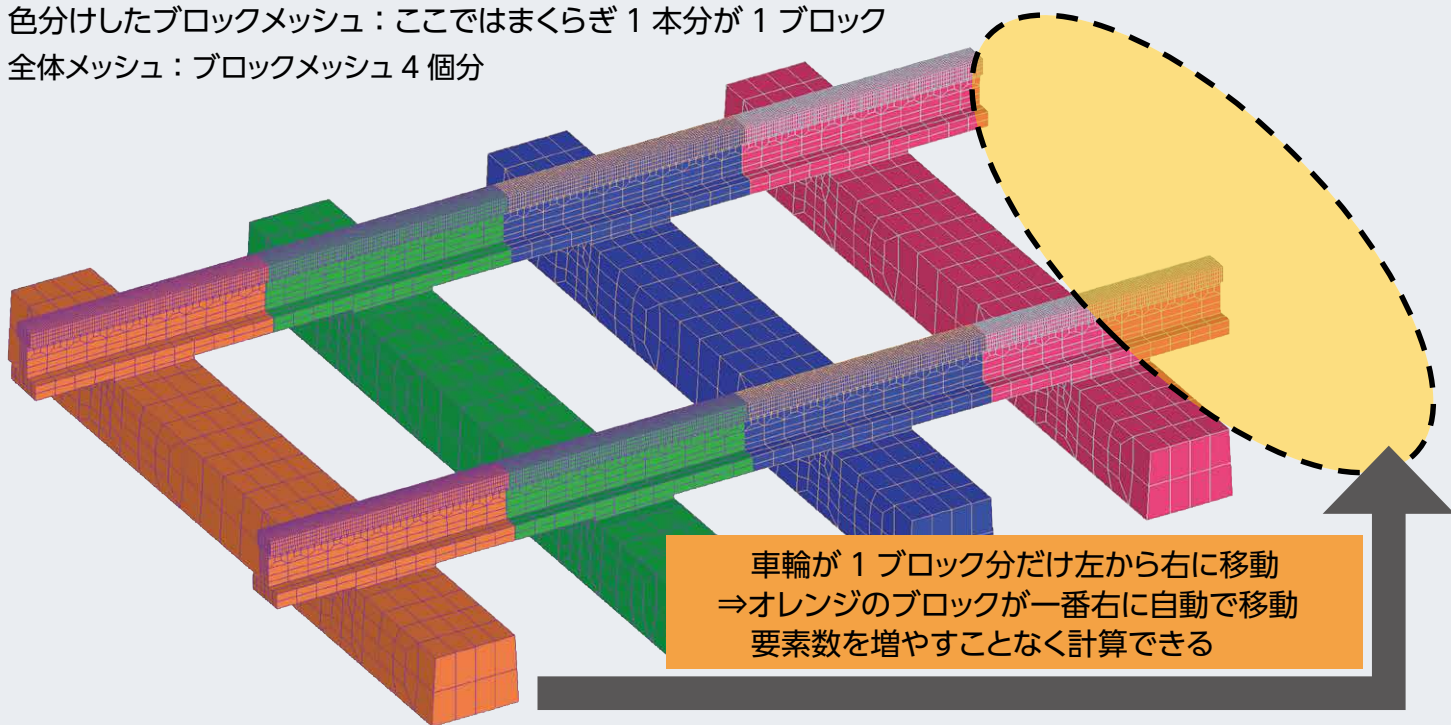


図4 助走区間におけるレールの全体メッシュとブロックメッシュの例

される場所は全て小さなメッシュにする必要があり、そのままでは全体の要素数が増えて現実的な時間での計算が困難です。

本ツールでは車輪を速度ゼロの状態から加速させますが、解析モデルを要素数の少ないなるべくシンプルな軌道で車輪の転動速度を上げる「助走区間」と、実際の軌道の状態を詳細に再現できるように要素数を十分多くした「評価区間」にわけ、所定の転動速度に到達後に評価区間を助走区間の後端に結合する仕組みとすることで、助走区間での計算時間を短縮する工夫をしています。さらに、助走区間ではレールの有限要素を任意長のブロック単位で分け、車輪が通り過ぎた後のレールブロックを車輪の前方に移動させる独自の方法を用いて、全体の要素数を増やすことなく、車輪の連続的な転動を計算できます (図4)。これにより計算時間の大幅な短縮効果が得られるほか、レール上を車輪がずっと走行し続けられるため、例えば、あらか

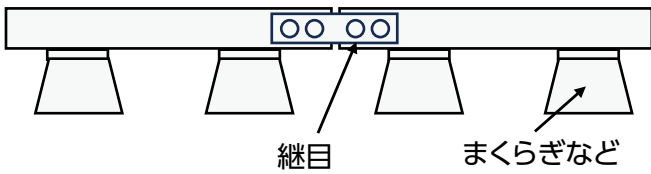
じめ傷のついた車輪を用意し、レール上を転がし続けることで、車輪の傷がレールとぶつかった際に生じる衝撃力を継続して観察することもできます<sup>3)</sup>。

### 軌道不整とシミュレーションにおける その導入方法

実際の軌道には図2に示した軌道変位や摩耗のような「軌道不整」が存在するため、シミュレーションで実際の状況を反映した計算結果を得るためには軌道不整を反映する必要があります。本ツールでは、助走後に評価区間を結合する際、図2の軌道不整を反映した形状を作り出すことができます。評価区間用モデルの作成においては、図5のように、はじめに軌道変位や摩耗がない、図面通りの初期形状や配置を有する評価区間のベースモデルと、それとは別に実際の軌道で測定した軌道変位のデータや、レールの摩耗データなどを用意します。これらをも

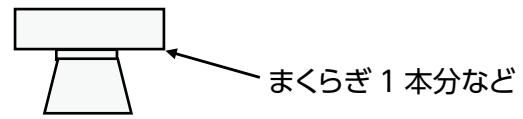
## 評価区間のベースモデル (図面通りの初期形状や配置を有する有限要素モデル)

### (1) 評価区間用メッシュ (一体型)



- 途中で軌道構造が変わる場合などに使用

### (2) 評価区間用メッシュ (単位長さ型)



- 同じ軌道構造が連続する場合に使用
- プログラム内部で指定回数だけ自動複製/結合
- メッシュ作成の手間が大幅に低減

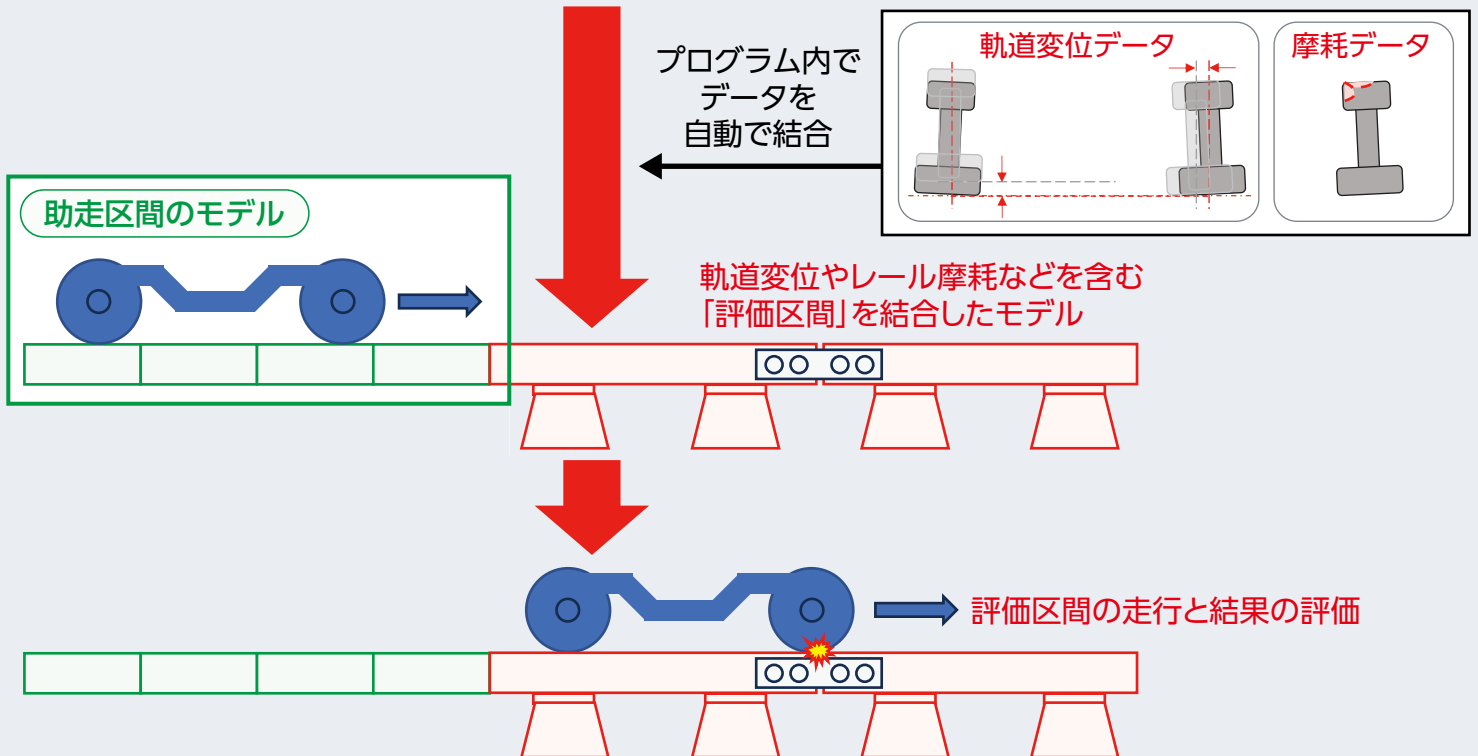


図5 評価区間の作成方法

とにして、開発したプログラム内で初期形状に軌道変位やレールの摩耗量が考慮された有限要素モデルを自動的に生成します。有限要素法では目的に応じたメッシュの準備に時間を要することが多いですが、まずは初期形状でメッシュを作成しておき、評価区間用の計算を行うタイミングで、プログラムを用いて必要な要素に軌道変位量や摩耗量に相当する位置の修正を施すことで、複雑な全体メッシュを簡単に作成することが可能です。また、同じ形状の軌道構造が連続して続く場合は、単位長さ分 (例えばまく

らぎ1本分) のメッシュを作成後、プログラム内で必要な分だけ自動で複製/結合する仕組みも備えています。

また、ここでは説明を省略しますが、このプログラムでは直線形状の単位長さメッシュを元にして、曲線形状の評価区間用メッシュを自動で生成することも可能です。曲線の場合は直線よりも構造が複雑ですが、曲線半径や緩和曲線の有無、カント量などの条件を設定すれば、プログラム内でそれらを考慮した軌道の形状を自動で作成することができます。

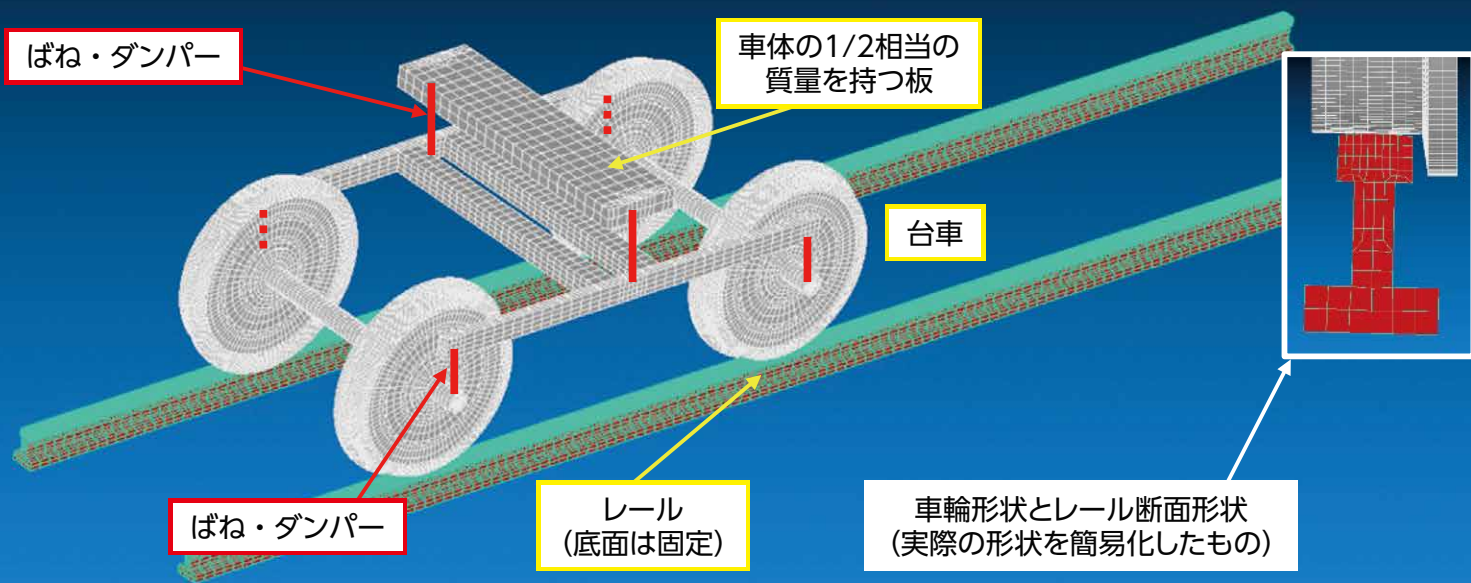


図6 助走区間の台車とレールのメッシュ

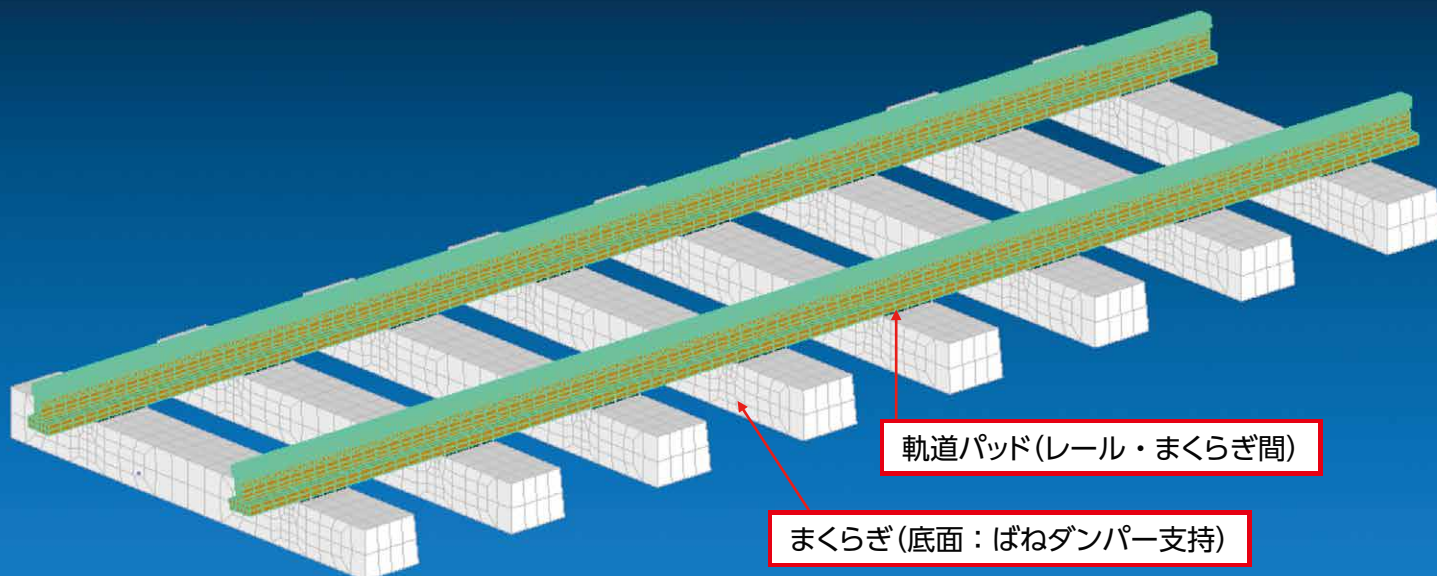
### 軌道不整を考慮したシミュレーション事例

図6のように、助走区間として直線区間でレールの下を完全に固定し、レールに不整を入れない状態で、簡易形状の台車がレール上を走行する計算結果をはじめに用意しました。評価区間としては、図7のようにレールの下をまくらぎなどで支持した、まくらぎ8本分の軌道の単位長さメッシュを用意し、プログラム内で単位長さメッシュを6個分、自動で複製しました。複製の際にはレールの全体に渡って、高さ方向

に対して±3mmの周期的な軌道変位と、レールの上面と側面（車輪と接触する部分）に摩耗を想定した形状変化を与えました。

図8上は、助走区間に評価区間を結合した軌道の全体モデルを上から見たものです。図8左のコンターは、各部材に生じる相当応力の計算結果と、車輪とレールの接触部分の拡大図を示しています。拡大図から、あらかじめ与えた摩耗の影響で、評価区間では接触位置が外側にずれていることが確認できます。図8右のグラ

図7 評価区間の軌道メッシュ



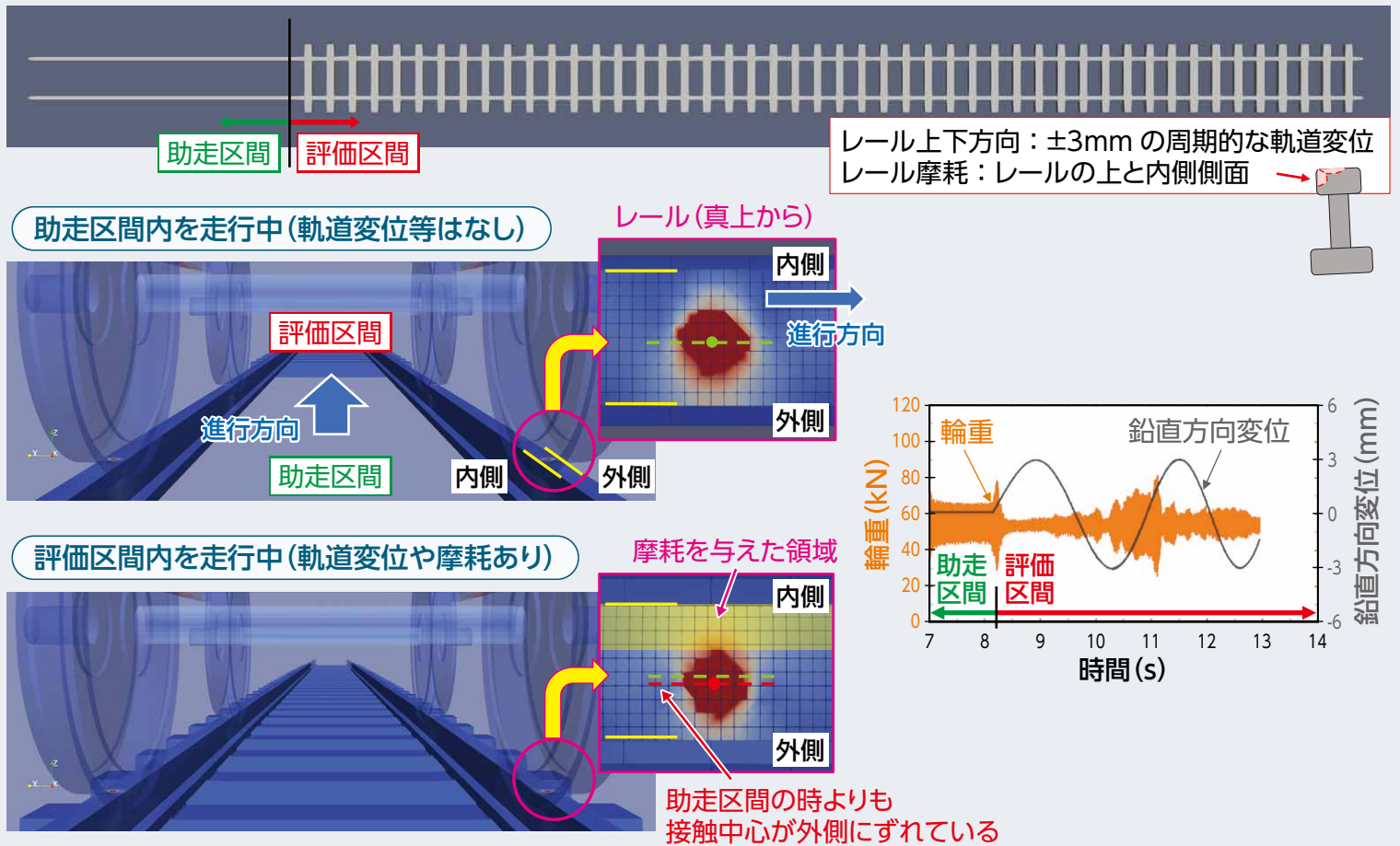


図8 計算結果の一例

フは、台車の進行方向右後輪の鉛直方向の動き(変位)と、車輪とレールの接触部に作用する鉛直方向の力の合計値(輪重)を示しています。与えた軌道変位量に沿って車輪が上下動を繰り返すとともに、摩耗の影響も相まって、その大きさには不規則な変化が生じていることがわかります。

このように車輪とレールの接触場所や力の大きさの分布を詳細に調べることで、車輪やレールに生じる傷の発生/発達の予測や対策法の提案などに役立てることができま

#### 相当応力

応力とは、物体の内部に生じる力の大きさや向きを表現するための物理量のことです。応力は荷重方向により6つの成分で表されますが、相当応力は、この6つの成分をもとに応力の大きさとして求めたもので、材料の強度評価などに用いられる指標の一つです。

#### おわりに

本稿では、車輪・レール転がり接触シミュレータにおいて、軌道不整を想定した計算を行うためのプログラムの概要と、軌道不整を模擬した台車走行の計算結果を紹介しました。今後は本ツールを用いて、軌道の構造上、車輪の通過時に大きな力が生じやすい継目や分岐器などの走行シミュレーションを実施し、車輪やレールの損傷現象の解明や対策法の提案につなげていきます。RRR

#### 文献

- 1) 坂井宏隆, 唐津卓哉: 大規模並列有限要素法による一台車モデルの曲線走行シミュレーション, 鉄道総研報告, Vol.34, No.8, pp.23-28, 2020
- 2) 坂井宏隆, 高垣昌和: 車輪・レールの転がり接触による劣化を解明する, RRR, Vol.79, No.1, pp.12-15, 2022
- 3) 齋藤理沙: 鉄道台車でのフラット損傷の影響を解明する走行シミュレーション, スーパーコンピュータが創る身近な暮らしと未来社会, 公益財団法人計算科学振興財団, Vol.14, pp.26-27, 2024