

ブレーキ時に生成される車輪フラットの定量的な推定手法

山本 大輔* 坂井 宏隆*

A Quantitative Method for Predicting Wheel-flat Dimensions Generated during Braking

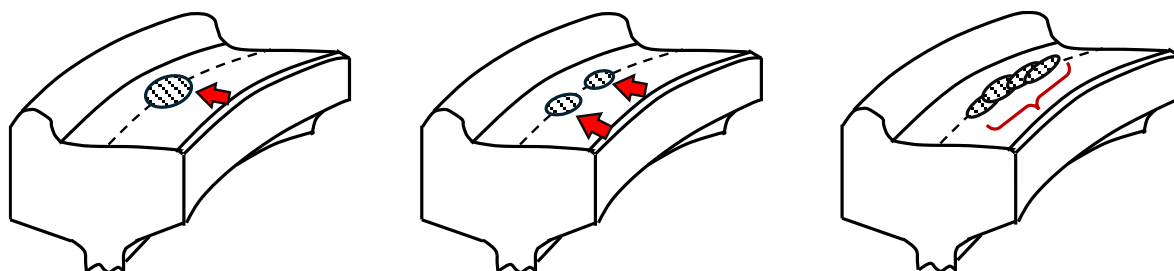
Daisuke YAMAMOTO Hirotaka SAKAI

Wheel flats generated during braking cause noise, vibration, and damage to track infrastructure. However, due to measurement difficulties under severe thermomechanical conditions, their formation and growth mechanisms remain insufficiently quantified. This study proposes a practical method for predicting wheel-flat dimensions based on a one-way coupled analysis that integrates vehicle dynamics and wheel-rail frictional heat analyses. By accounting for temperature-dependent material properties and contact ellipse growth, the proposed method quantitatively predicts wheel-flat dimensions. Validation against field measurements demonstrates good agreement, confirming the method's applicability for evaluating influential parameters governing wheel-flat development.

キーワード：車輪／レール，低粘着条件，踏面損傷，車輪フラット推定手法，片方向連成解析

1. はじめに

鉄道車両において、車輪を減速させる力（以下、制動力）が車輪／レール間の粘着力（接線方向の摩擦力で接線力とも呼ばれる）を超過すると、車輪は滑走状態に移行する。この滑走が進行すると、車輪の回転が停止したままレール上を滑る状態（以下、車輪固着）に至る場合がある。車輪固着が発生すると、車輪踏面のレール接触部に局所的な平坦部を有する擦傷痕が生成することがあり、これにより走行時に周期的な騒音が発生する。さらに、大きな振動加速度を誘起することで、車両の構成部品や軌道への損傷リスクを高める要因となる。このようにして形成された踏面の擦傷痕は「車輪フラット」と呼ばれ、多様な生成形態があることが知られている（図 1 参照）。これに対して、車両に搭載する実用的な再粘着制御装置が開発されたことで車輪フラット発生件数は大幅な減少に転じたが、再粘着制御装置の技術上の性能限界があるため、現在でも車両側と軌道側の双方において車輪フラット抑制に対する要望は少なくない。車輪フラット抑制のためには、その生成メカニズムに基づき対策法を検討することが有効となる。しかし、車輪フラットは偶発的に生じる性質があるため、本線上を走行する営業車両に計測器などを搭載して長期間にわたり



(a) 単一の車輪フラット (b) 斑点状に生成した車輪フラット (c) 細長く生成した車輪フラット

図 1 車輪踏面に生成した多様な車輪フラットの形態（一例）

* 鉄道力学研究部 計算力学研究室

調査することが現実的でない。また、車輪／レール間の接触面には最大で 1.0GPa を超過する高い接触面圧が作用し、さらに高温時の摩擦現象が複合的に関与するため、現状の技術レベルではこれを正確に計測することが困難である。これらの理由から、車輪フラットの生成メカニズムは未だ十分に解明されていない。その一方で、車両および軌道条件から生成しうる車輪フラットの最大値を走行前に定量的に評価できれば、各種因子が車輪フラットの生成に及ぼす影響を体系的に分析できるようになる。その結果、評価結果に基づいた定量的な対策検討も可能になると考えられる。

そこで本研究では、車輪フラットの生成メカニズムの解明に資することを目的として、数値解析技術を採用することを考え、車両運動解析と車輪／レール間の摩擦熱解析の 2 つのシミュレータを連成させた車輪フラット推定手法を開発する。そして、車輪フラット推定手法の計算結果に基づき、車輪フラットの生成メカニズムとその成長因子について示す。

2. 実用的な車輪フラット推定手法の構築

2.1 計算コストを低減した実用的な片方向連成計算

有限要素法や粒子法を用いた金属摩耗評価に関する先行研究^{1) 2) 3)}がこれまで報告されている。しかし、これらの手法を車輪フラットの生成・成長解析に適用する場合、車輪／レール間のすべり率が最大 26%程度と車輪固着時の現象を十分に再現できないこと、さらに、解析モデルの自由度が膨大となり計算コスト（計算時間）が著しく増大することから、実走行条件下における車両挙動を考慮した現象の把握が困難であるといった課題がある。そこで、本研究では、実用的な車輪フラット推定手法を構築した（図 2）。

ここでは、車輪フラットは騒音や振動加速度の原因となる踏面損傷であり、車両の運動性能そのものに

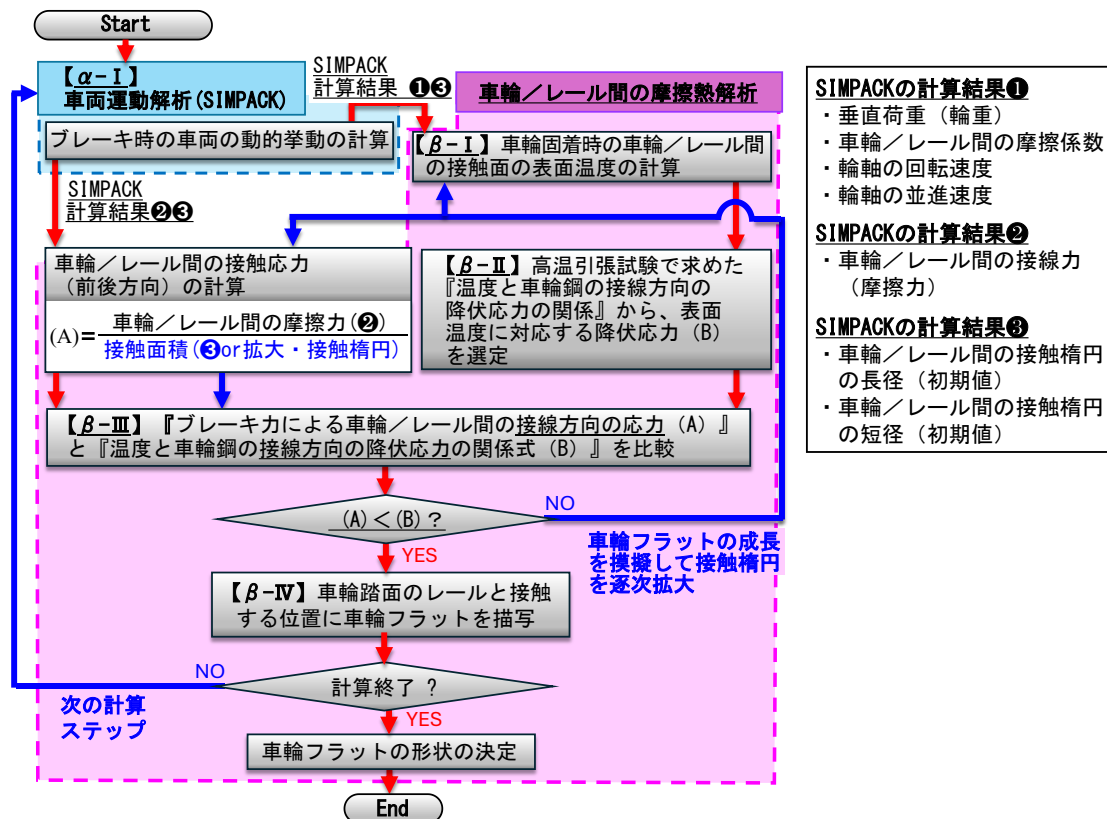


図 2 車輪フラット推定手法のフローチャート

大きな影響を与えないことに着目し、車両運動解析で得られた計算結果を車輪／レール摩擦熱解析に一方向に受け渡す“片方向連成解析”により車輪フラットを定量的に評価する実用的な解析手法とした。そして、車輪固着時に車輪／レール間の接触面に集中して入力される摩擦熱によって車輪鋼が軟化し、これが接線力により塑性流動することで接触面の損傷が進展するものと仮定した合理的なモデル化を行った。このような手法とした理由は、3章で後述する有限要素モデルで構築した車輪とレールの接触解析の検討結果などに拠る。車輪フラット推定手法の概要を以下に示す。なお、詳細な導出方法については、文献4を参照されたい。

2.1.1 ブレーキ時の車両挙動を再現する車両運動解析

車両運動解析には、マルチボディダイナミクス理論に基づく汎用ソフトウェア SIMPACK (ver.2019.1) を用い、JR の在来線を想定した1車両の数値解析モデルを構築した(図3)。車両モデルは質量要素ごとに6自由度を付与した剛体モデルとし、ブレーキ作用は全輪軸に対して同一のブレーキトルクを0.1秒間で一斉に印加・解除する条件として与えた。車輪踏面形状とレール断面形状はそれぞれ在来線の基本踏面形状と JIS50kgN レール⁵⁾を採用し、車輪／レール間の接触計算には接線力解析ソルバ“FASTSIM”を適用した。本解析により、①垂直荷重(以下、輪重と記す)、車輪／レール間の摩擦係数、輪軸の並進速度、輪軸の回転速度、②車輪／レール間の前後方向の接線力、③車輪／レール間の接触楕円の長径と短径の初期値(※①②③はそれぞれ図2の矢印で示す計算フローに対応する)を求め、これらを次節で述べる車輪／レール間の摩擦熱解析に一方向に入力する。

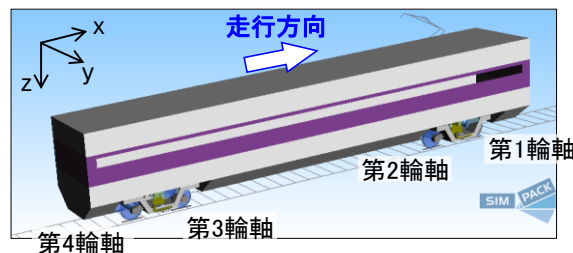


図3 車両運動解析のための数値解析モデル

2.1.2 車輪／レール摩擦熱解析

車輪／レール間の摩擦熱解析では、接触面温度の算定、温度依存性材料特性の導入、および接触面損傷の進展評価を統合的に取り扱う。これらの構成要素を以下に示す。

① 車輪／レール間の接触面温度の計算(図2の【β-I】)

車輪／レール間の接触面で生じる摩擦熱に起因する表面温度の上昇を計算により求める。ブレーキ作用により車輪／レール間の接触面で生じる摩擦エネルギーと、ここに生じる熱対流、熱伝導、熱放射の3つの伝熱過程における熱エネルギーが等価⁶⁾であると仮定し、接触面温度を未知数とする4次方程式を解くことで接触面の表面温度を求める。

② 車輪鋼の温度依存性を考慮した降伏応力の選定(図2の【β-II】)

車輪フラット生成時には、車輪／レール間の接触面の温度は瞬間的に高温(700℃以上)に達し、車輪鋼の降伏応力が低下することが知られている。このため、JIS G0567に準拠した高温引張試験(最高温度1100℃)により温度と降伏応力の関係を取得し、せん断ひずみエネルギー説に基づいて接線方向の力に変換した上で材料特性として実装した。高温引張試験とその試験結果に関する詳細は2.2節で述べる。

③ 車輪／レール接触楕円の拡大則(図2の【β-III】)

車輪踏面形状とレール断面形状はそれぞれ複数の円弧形状の組合せで構成していると考えることができ、

車輪／レール間の接触楕円が摩耗により変形するとき、円周方向と左右方向の曲率半径の違いにより、前後と左右方向に異なる比率で拡大する。本研究では、幾何学的関係に基づき接触楕円の拡大率を定式化し、制動力に起因する接触面に作用する前後方向の応力と温度依存性を有する車輪鋼の降伏応力が均衡するまで接触楕円を逐次拡大して更新する。接触楕円の拡大則の導出方法に関する詳細は2.3節で述べる。

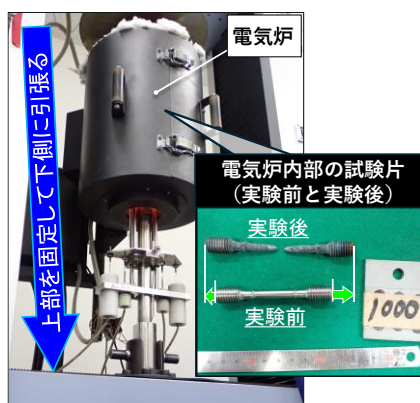
④ 車輪フラットの形状の決定（図2の【β-IV】）

車輪固着後に車輪／レール間の摩擦係数が変動すると、車輪が固着状態から少し回転して再び固着状態となる。このような場合に生成する車輪フラットの形状は、図1(c)のように車輪の円周方向に連なった形態になると推察される。このような多様な車輪フラットの生成形態を数値解析で再現できるようにするため、車輪踏面のレールと接触する位置に車輪フラットを連続的に描写するアルゴリズムを設けた。そして、最終的に求まる一つの楕円形状または円周方向に複数の楕円形状が連なった形態をした総体の外形形状を車輪フラットと定義した。

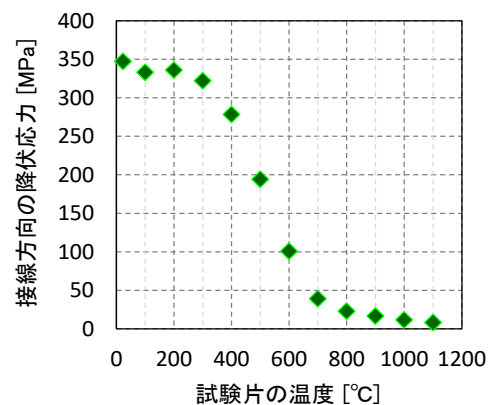
2.2 高温引張試験と高温時の車輪鋼の材料特性

高温引張試験の状況とその試験結果を図4に示す。高温引張試験（図4(a)）では、車輪鋼から切り出した試験片を電気炉内に装着し、炉内を所定の温度まで加熱した。温度が安定した後、試験機の上部に固定した試験片を下方向に引っ張り、破断に至るまでの過程における応力とひずみの関係を計測した。図4(b)の試験結果から、車輪鋼の降伏応力は、300℃未満の温度域においては顕著な差異は認められず、ほぼ一定の値を示している。一方、300℃を超えると降伏応力は急激に低下し、さらに温度上昇に伴い、800℃以上では下限値に漸近する特性を示すことが確認された。

なお、2章で用いた解析手法では、車輪鋼の弾性領域における変位を考慮する必要がないため、材料の硬さを表すヤング率は用いていない。



(a) 高温引張試験の状況



(b) 車輪鋼の接線方向の降伏応力に関する材料特性

図4 高温引張試験とその試験結果

2.3 車輪フラット生成時の車輪／レール接触楕円の拡大則

本計算では、制動力に起因する応力と車輪鋼の降伏応力が均衡するまで、接触楕円を前後と左右に異なる比率で拡大させる。このため、接触楕円の前後方向および左右方向の接触幅と車輪フラット深さの関係を、幾何学的および接触力学的観点から体系的に定式化することを考えた。まず、前後方向については、車輪とレールが接触する前後方向モデル（図5(a)）を考え、車輪半径と接触楕円の前後方向の接触幅に基づく幾何学的関係から“車輪フラットの深さと接触楕円の前後方向の接触幅”の関係式として求めた。な

お、実際には、レールに対して食い込んだ車輪の部分は押し潰されて接触面の形態となる。

次に、左右方向については、図 5 (b) のように、車輪／レール間の接触幾何解析⁷⁾と Hertz の接触理論に基づく解析⁸⁾の 2 つの解析結果を組み合わせることで“車輪フラットの深さと接触楕円の左右方向の接触幅”の関係式を求めた。まず、車輪／レール間の接触幾何解析により、車輪とレールの上下方向相対変位（青色実線）を求めた。そして、Hertz の接触理論に基づく解析では、在来線の基本踏面形状と JIS50kgN レールの組合せで静止輪重 35.56 kN の条件における接触楕円を計算し、その左右方向の接触幅は 7.7 mm となることから、上下方向相対変位と車輪フラット深さを示す赤色実線が交差する区間が 7.7mm となる上下方向の位置を車輪フラットの無いときの基準位置と定義した。これを基準として、車輪フラットの深さのそれぞれの値に対して、上下方向相対変位が交差する区間がそのフラット深さに対応する車輪フラットの左右方向の接触幅となることから、両者の関係を関係式として纏めた。

最後に、前後方向および左右方向の関係式は、ともに車輪フラット深さを媒介として表現されることから、両式を等置とすることで両方向の接触幅の関係式として導出した。

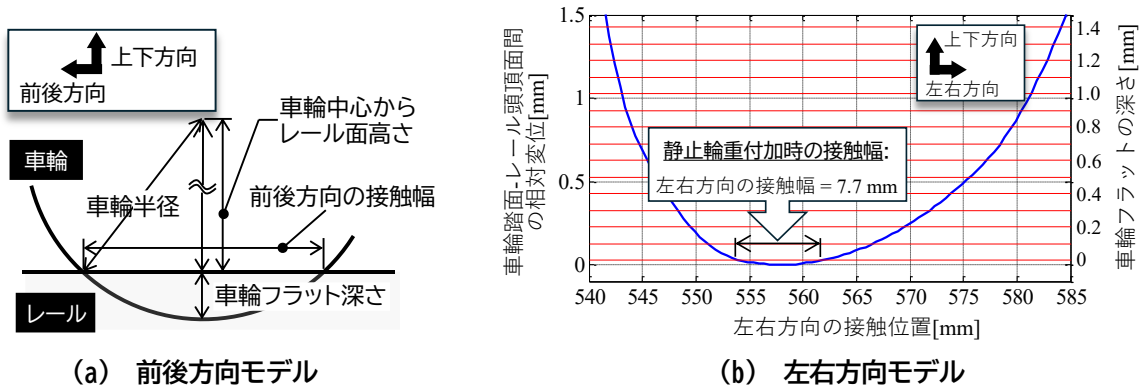


図 5 車輪フラット深さと接触楕円に関する前後・左右方向の接触幅の関係を表す数値解析モデル

3. 有限要素モデルを用いた車輪鋼の熱塑性流動に関する検討

3.1 数値解析モデルと解析条件

車輪フラット生成時に車輪鋼が熱塑性流動する可能性について、汎用ソフトウェア「ADINA (Version9.8.2)」を用いた検討を行った。数値解析モデルを図 6 に示す。車輪とレールの数値解析モデルは、在来線の基本踏面形状を有する車輪と JIS50kgN レールの頭頂面の一部の組合せとし、最小メッシュサイズは車輪を 0.5mm、レールを 2.0mm とした。それぞれ設計形状を対象にモデル化を行った。静解析の解析種別の下で、静止輪重に相当する荷重で車輪モデルをレールモデルに押し付け、その後、Contact-Slip Load 機能により所定の転動速度に相当する距離 (10mm) だけブレーキによるトルクに相当する接線力を車輪とレール間に作用させながら、車輪の回転を拘束した状態でレール上を滑らせる計算を行った。さらに、その計算により得られた接触面付近の応力分布を基に、車輪全体の初期温度と車輪踏面における塑性流動の有無との関係性を評価した。車輪鋼の設定初期温度を 100℃、200℃と 100℃刻みで最大 1100℃までの 11 通り設定し、これに常温 23℃の条件を加えた計 12 通りで評価した。ここでは車輪全体を解析対象とし、初期温度ごとに設定した材料定数（ヤング率と降伏応力）を用いて計算を行った。これらの材料定数は、2.2 節で示した実験結果に基づき同定したものである。なお、車輪／レール間の摩擦係数は、後述する 4.2 節の数値解析の条件にあわせて全ての条件で 0.04 とした。

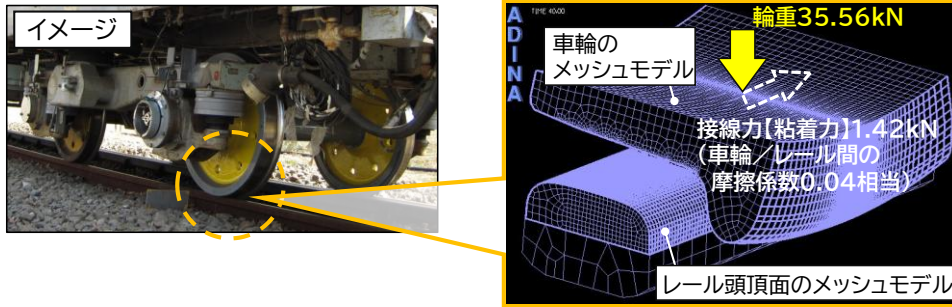


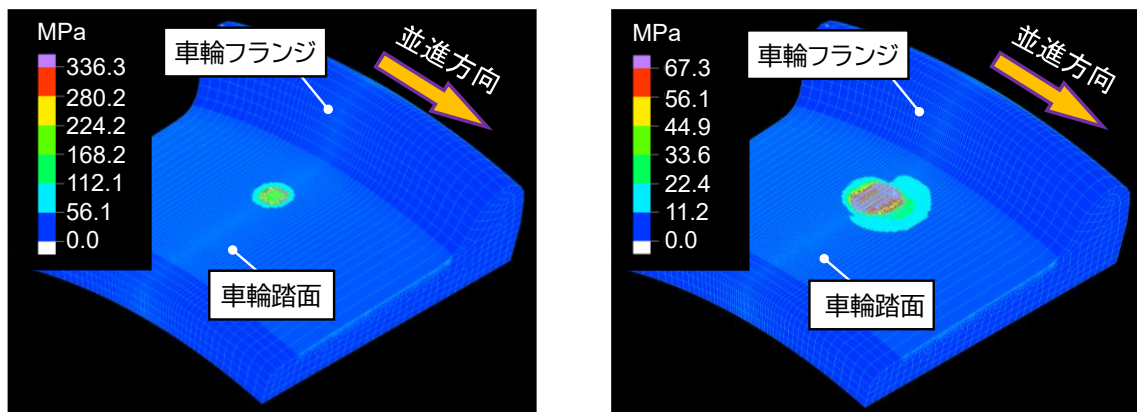
図6 車輪とレールの接触状態を模擬した有限要素モデル

3.2 数値解析結果

車輪が10mm 前後方向に移動した後の車輪踏面部に生じた相当応力分布を図7に示す。図7は車輪鋼の材料定数を500℃および700℃相当とした条件で求めた計算結果で、それぞれ温度条件ごとに車輪鋼の初期降伏応力の値をカラーコンターの赤色と紫色の境目に設定し、紫色の範囲を初期降伏応力の値を超えた“塑性領域”と評価した。

図7(a)の500℃の条件では、車輪が滑った後の車輪／レール間の接触楕円の大きさは前後方向が9.27mm、左右方向が9.58mmで、車輪が滑る前にHertzの接触理論に基づく解析⁸⁾から求めた大きさ（前後方向×左右方向＝9.8mm×8.2mm）に対して両者は概ね一致している。さらに、温度400℃以下の応力分布では認められなかった塑性領域を表す紫色の範囲が僅かに認められる。その一方で、図7(b)の700℃の条件では、車輪の温度上昇により材料定数が低下したことでレールとの接触面積が拡大するとともに、車輪踏面の円周方向に紫色で示す塑性領域も拡大している。そして、ここでは図示しないが、車輪の温度が800℃以上と高温条件になると、その傾向はより顕著となった。

これらの解析結果から考察を行う。車輪踏面に実際にフラットが生成した部位を対象に金属分析を実施した結果⁹⁾によると、車輪鋼のA₁変態温度を超える高温状態となった後に急冷却した際に認められる金属組織が確認されていることから、車輪滑走から固着時に車輪鋼が700℃以上という高温状態になることは妥当と考える。そして、このような高温条件下では、2.2節で述べたように、高温状態となると車輪鋼は軟化する性質があるため、車輪／レール間の摩擦係数が小さい条件でもそのときの接線力（粘着力）の大きさによっては車輪踏面の接触面近傍が押し流される形態で塑性変形すると考えられる。これに対して、図7(b)では、車輪鋼が高温状態となりその材料定数が小さくなったことで接触面積が拡大しており、さ



(a)温度 500℃の場合

(b)温度 700℃の場合

図7 有限要素モデルを用いた解析結果

らに、車輪鋼が 700℃の時に対応する降伏応力を超過する紫色の範囲も前後方向が 18.19mm、左右方向が 18.67mm まで拡大している。この解析結果は、高温状態となり軟化した車輪鋼をレールとの間の接線力が押し流したことを定性的に示すものと考えられ、高温状態の金属の摩耗量はその温度が 200℃程度以下の場合のときと比べて極端に大きくなるとする知見¹⁰⁾とも合致している。

これらの計算結果から、車輪フラットが摩耗係数を適用して評価する一般的な摩耗現象ではなく、車輪のレールとの接触部で生じる熱影響に起因する塑性流動を伴う擦傷現象であることが分かった。そして、接触面温度に応じて車輪鋼の機械的特性を変化させながら車輪フラットの大きさを推定する本提案手法が妥当であることが分かった。

4. 車輪フラット推定手法の妥当性評価

車輪フラット推定手法の妥当性を検証するため、営業車両で計測された車輪フラット生成時の状況を数値解析上で再現し、その計測値と計算値の比較を行う。過去の調査結果によると、車輪フラットの大きさとこれが生成した時の走行距離、車輪部位などの情報を纏めた報告が多くある。しかし、車輪フラット推定手法の妥当性を検証するためには、車輪フラット生成時の車両の走行速度や減速度、軌道周辺の環境に関する情報が必要となるが、これらについて纏められたものは熊谷らの報告¹¹⁾以外には認められない。このため、文献 11 を数値解析上で再現することにより、車輪フラット推定手法の妥当性の検証を行った。

4.1 営業車両の計測値

文献 11 によると、在来線通勤形車両（車両自重 284.5kN）に仮設した簡易計測装置で計測した車輪フラット生成時の計測値は表 1 と記されている。なお、車輪フラットが生成した時の車輪／レール間の摩擦係数は記録されていないが、上記の記録日とは異なる日に、営業車両とは異なる試験車両を用いた追加調査を実施しており、車輪フラットが生成したときと同様の環境条件を模擬して車両からレール面上に散水を行いつつ計測した車輪／レール間の摩擦係数は平均 0.06 程度で、最小値は 0.04 であったと記されている。

表 1 簡易計測装置で計測した車輪フラット生成時の記録¹¹⁾

車輪フラットの大きさ	35mm(前後方向)×20mm(左右方向) ※第 4 輪軸のみに生成
車輪固着時の並進速度	51km/h から 25km/h で再粘着するまでの約 10 秒間
列車の減速度	0.76m/s ²

4.2 数値解析結果と計測値の比較による車輪フラット推定手法の妥当性の検証

営業車両の車輪フラット生成時の挙動を再現するため、静止輪重 35.56kN の在来線車両を対象に車両運動モデルを作成し、ブレーキ初速度 58km/h、ブレーキトルク 3000Nm（全軸同一）の設定条件で車両運動解析を行った。計算では、図 3 の輪軸配置においてブレーキ作用時に第 4 輪軸のみ滑走状態とするため、車輪／レール間の摩擦係数の設定値を第 4 輪軸のみ 0.04 一定とし、その他の輪軸は 0.09 一定とした。なお、車輪踏面形状とレール断面形状はそれぞれ設計形状の在来線基本踏面形状と JIS50kgN レールとし、軌道変位は考慮しない。車輪フラット推定手法により求めた車輪フラット生成前後の第 4 輪軸の計算結果を図 8 に示す。

図 8 (a) では、計算開始 2 秒後にブレーキトルク 3000Nm が輪軸に作用し、これにより、車輪／レール間の接触面で作用する接線力（車輪／レール間の摩擦係数と輪重の積で求まる値）より制動力の方が大き

い状態となったことで、輪軸の並進速度（青線）に対してその回転速度（緑線）が急激に小さくなる車輪滑走が生じている（図中の灰色網掛けの範囲）。そして、輪軸の並進速度が51.6km/hとなったときに輪軸の回転速度がゼロとなる車輪固着状態となり、これ以降は車輪の回転が停止した状態でレール上を滑っている。車輪が固着した瞬間から約10秒後（計算開始13.4秒付近）の輪軸の並進速度は24.2km/hで、車体の減速度は図8（b）より 0.76m/s^2 となることが分かる。これらは表1に示したとおり営業車両で得られた計測値と同等の値で、車両運動解析が適切に再現できていることを示している。なお、実際の走行時の記録では、計算開始13.4秒付近より後では車輪が再粘着して車輪が固着状態から回転状態に戻ったとなっているが、車両運動解析では車輪を固着状態のまま計算を継続している。

ブレーキトルクの作用時には車体が前傾するため、ボギー構造を有する鉄道車両では、図3の輪軸配置において輪重は大きい順に第1輪軸、第3輪軸、第2輪軸、第4輪軸となる。このため図8（c）では、ブレーキトルクの作用とともに輪重が定常的に減少していることが分かる。図8（d）では、ブレーキトルクにより作用する車輪／レール間の制動力に抗するため、車輪／レール間の摩擦係数0.04に応じた1.42kN程度の前後方向の接線力が作用していることが分かる。なお、図8（c）と図8（d）の2.5秒付近などの衝撃的な波形は、車輪フランジがレールと衝突した時に生じた波形である。車輪が滑走から固着状態となると左右方向のクリープ力がゼロとなり、輪軸は左右変位に対する復元力を失う。同時に、同一台車内の前後輪軸に作用する左右クリープ力の差異が輪重変動により大きくなるため、台車にヨーイング方向のモーメントが作用する状態となる。特に、前後台車のそれぞれ後位輪軸が車輪滑走・固着状態となると、図8（e）のように輪軸は左右方向に大きく変位する挙動を示すことがあり、車輪フランジがレールと衝突することで衝撃的な横圧が生じる。横圧は輪重にも影響を及ぼすため、図8（c）のように同時に輪重にも衝撃的な変動が生じ、これにより車輪／レール間の接触面形状も瞬間的に大きさが変化するので接線力にも衝撃的な波形が表れている。

次に、車両運動解析の計算結果を車輪／レール間の摩擦熱解析に受け渡すことで、ブレーキ時の車両挙動を評価し車輪フラットの大きさを推定する。

図8（f）から、ブレーキトルクの作用により車輪が滑走すると、車輪／レール間の表面温度は初期値 25°C から 1000°C 以上まで急激に上昇することが分かる。車輪滑走中には車輪は回転を継続しているので、車輪のレールとの接触位置は円周方向に時々刻々と変化する。すなわち、灰色網掛け範囲では車輪とレールが接触している時にはその接触面は瞬間的に高温状態となり、これらが離れるとその温度は急激に低下する。また、車輪滑走中には車輪の回転によりレールとの接触時間は極短時間となり熱量は小さいため、車輪踏面にフラットは生成しないと考えられる。過去の現車試験の経験からもこの仮説は妥当と考えられる。その一方で、灰色網掛け範囲より後方の範囲では、車輪が固着状態となり、車輪の回転が停止した状態でレール上を滑るため、摩擦エネルギーが車輪踏面の一箇所に集中的に輸入される状況に変化する。このとき、図8（f）から車輪とレールの接触部では最高温度 1454°C の状態が継続する状態となるが、図4（b）で示したように、車輪鋼は 300°C 以上で降伏応力が急激に低下すること、さらに、ブレーキトルクの作用により車輪／レール間の接触面では接線方向の応力が作用しているので、後者が大きい場合には、車輪／レール間の前後方向の接線力によりその間の接触面の表面が押し流される熱塑性流動の形態で車輪／レール間の接触楕円が拡大すると考えられる。すなわち車輪フラットが生成することを意味する。この過程を表す結果が図8（g）と図8（h）となる。車輪固着時の車輪フラットの接触幅（前後方向×左右方向）は左車輪が $33.3\text{mm} \times 20.1\text{mm}$ 、右車輪が $31.6\text{mm} \times 20\text{mm}$ と、左車輪の方が若干大きいほぼ同等の大きさとなっている。左車輪の車輪フラットの方が大きい理由は、第4輪軸が9mm付近まで左右変位しておおむね定常状態となったことで、左車輪の輪重が右車輪の輪重と比べて大きくなったためである。そして、営業車両で

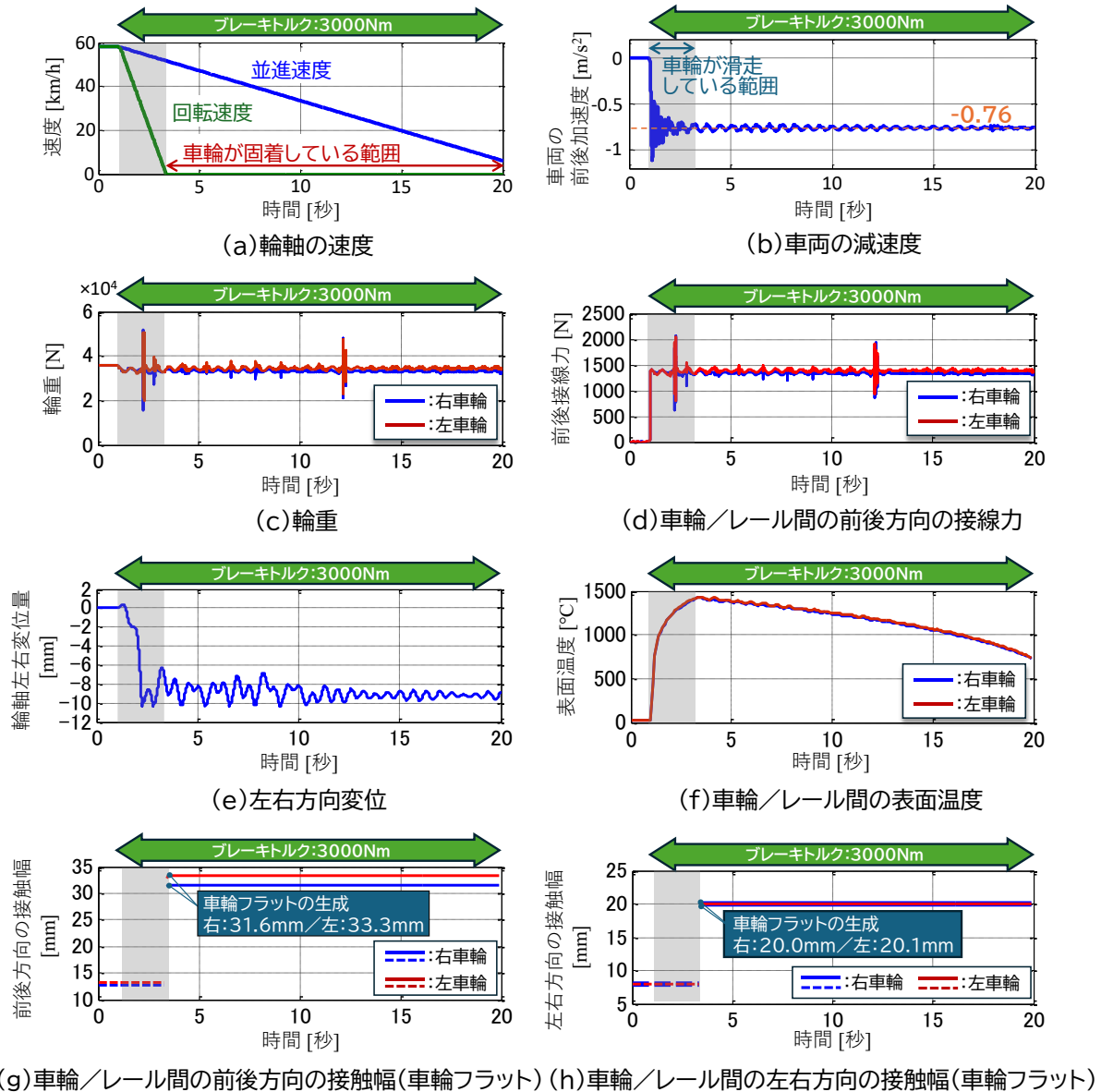


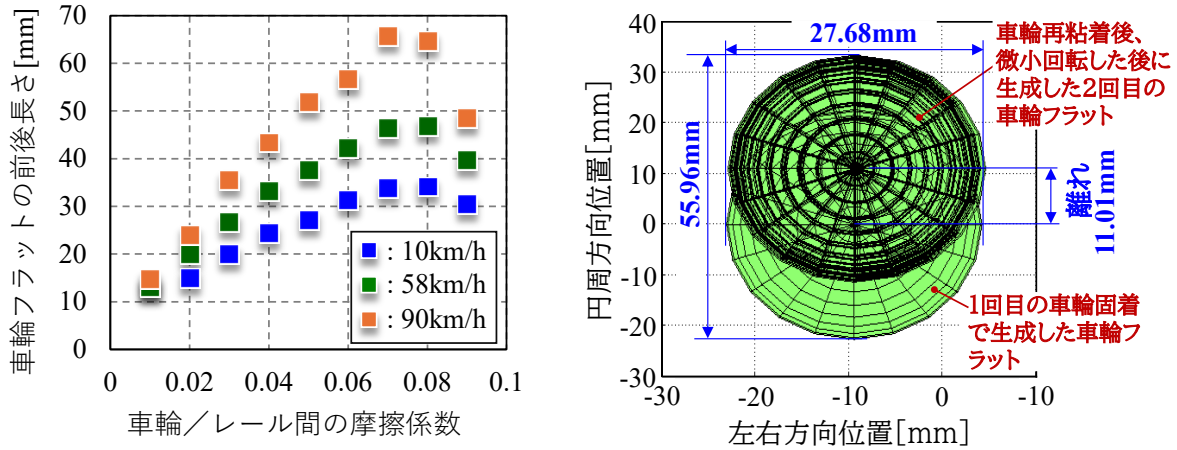
図8 車輪フラット生成時の第4輪軸の挙動(数値解析結果)

計測された車輪フラット形状(前後方向×左右方向で35mm×20mm)と比較すると、左車輪の推定値は面積比で約4.4%、長さ比で約4.9%の誤差で、本提案手法により車輪フラットの大きさを良好な計算精度で推定できている。

以上より、営業車両で車輪滑走時の状況を計算機上で再現することにより、本提案手法の妥当性を確認した。その結果、車両の速度と減速度を再現した車両運動解析では、ブレーキの作用による車両減速時の速度および車体の減速度が良好に一致することを確認した。そして、車両運動解析の一部の計算結果を用いて実行した車輪／レール間の摩擦熱解析では、営業車両で計測した車輪フラットの大きさに対して、面積比で約4.4%、長さ比で約4.9%の小さな誤差でその大きさを推定できることが分かった。

4.3 車輪フラットを拡大する影響因子

車輪フラットの大きさを定量的に評価することができる本手法により、ブレーキ初速度と車輪／レール間の摩擦係数の2つの影響因子が車輪フラットの前後長さに及ぼす影響について検討した。計算条件は前



(a) ブレーキ初速度と車輪フラットの前後長さの関係

(b) 前後方向に拡大した車輪フラット

図9 ブレーキ初速度と車輪／レール間の摩擦係数が車輪フラットの拡大に及ぼす影響（計算結果）

節と同様で、計算結果を図9(a)に示す。

図9(a)から、車輪／レール間の摩擦係数をパラメータとした場合、車輪フラットの前後長さが最大となる条件があることが分かる。特に、車輪フラットの前後長さは、ブレーキ初速度に拠らず車輪／レール間の摩擦係数が0.08付近で最大となり、これより大きくなると逆に小さくなっている。これは車輪／レール間の摩擦係数が大きくなると車両の減速性能が向上し、車輪固着時の車両の並進速度が低下するためである。また、ブレーキ初速度が90km/hでも生成する車輪フラットの最大長さは65.8mmで、一般的な保守の基準値である75mm未満の値となることが分かった。

これらの計算結果から、同一のブレーキ初速度でも車輪／レール間の摩擦係数が異なる場合には、車輪フラットの前後長さは異なる大きさとなることが分かった。なお、軌道不整の程度、車輪とレールの接触状態の違い、さらに、車輪フランジがレールと衝突した際に生じる著大輪重が大きい場合には、車輪／レール間の摩擦係数の変化に対して車輪フラットの大きさは非線形的に変化することがあり、このような場合には車輪フラットはさらに拡大することを付記する。

次に、車輪／レール間の摩擦係数が変動することで、車輪が固着状態から少し回転して再び固着状態となる。このような計算条件の場合について検討した結果を図9(b)に示す。車輪／レール間の摩擦係数は0.04を基準とし2秒間だけパルス状に0.22まで大きくした。緑色の範囲が車輪フラットの生成範囲を示しており、車輪固着時に生成した2つの車輪フラットの一部が車輪の円周方向で重なり、最終的には車輪の円周方向に長いフラットとなっている。このような車輪フラットの生成形態は図1(c)とも定性的に一致している。

このように、車輪フラット推定手法を用いることにより、ブレーキ初速度の違いにより生成する車輪フラットの大きさを定量的に評価できることを示した。さらに、実際の計測値が存在しないため定量的な比較はできないが、現実想定される程度の車輪／レール間の摩擦係数の変動により、鉄道現場で認められる多様な生成形態の車輪フラットを計算機上で再現できることが分かった。

5. まとめ

本稿では、車輪フラットの生成メカニズムの解明に資することを目的として、ブレーキトルク作用時の車両の動的挙動を把握する車両運動解析と、車輪／レール間の接触面表面の温度計算と車輪フラットの成

長を再現する車輪／レール間の摩擦熱解析をそれぞれ開発し、これら二つのシミュレータを連携した片方向連成解析により、ブレーキ時に車輪がレール上で固着したときに生成する車輪フラットの大きさを定量的に評価することができる解析手法を提案した。そして、本提案手法の妥当性を確認するため、営業車両の走行状態を計算機上で再現し、実測値と本提案手法による推定値を比較した。その結果、車輪／レール間の摩擦係数を実物車両の走行区間で計測された最小値 0.04 とした場合、実測した車輪フラットの大きさに対し、本提案手法により求めた車輪フラットの大きさは面積比で約 4.4%、長さ比で約 4.9% の良好な精度で推定できることが分かった。そして、車輪フラットの大きさを定量的に評価することができる本手法により、車輪フラットを拡大させる影響因子について検討した結果、ブレーキ初速度および制動力が同一であっても、車輪フラットの大きさは車輪／レール間の摩擦係数に依存して極大値を示すことが分かった。加えて、本手法により、実際に確認された多様な車輪フラットの生成形態を計算機上で再現できることを確認した。

最後に、本研究では、従来は偶発的と考えられてきた車輪フラットの生成メカニズムに対して、車輪フラット推定手法の開発により定量的・体系的に把握できるようになった点が大きな成果である。今後は、本手法を基盤として車輪フラットの生成メカニズムを深度化するとともに、車上から車輪／レール間の摩擦係数を把握する技術の検討を並行して進める計画である。これにより、制動力を維持しながら車輪フラットの生成を抑制するブレーキ制御システムの実現を目指す。一方、実用面では、現状、再粘着制御装置の導入可否に関する基準が明確でないという課題がある。これに対し、本手法を用いて走行試験前に再粘着制御装置による滑走抑制効果を定量的に評価することで、当該装置の導入判断に係る根拠を明確化できる。

文 献

- 1) Naeimi, M., Li, S., Li, Z., Wu, J., Petrov, R., Sietsma, J. and Dollevoet, R., "Thermomechanical analysis of the wheel-rail contact using a coupled modelling procedure", *Tribology International*, Vol.117, pp. 250-260, 2018.
- 2) Wang, X., Dong, W., He, Q., An, B., Ding, H., Wang, P., Wang, W., and Huang, J., "Nonlocal thermomechanical coupled analysis of wheel-rail contact using a peridynamic model", *Wear*, Vol.528-529, DOI: 10.1016/j.wear.2023.204954, 2023.
- 3) Asih, A. M. S., and Kapoor, K. D. A., "Modelling rail wear transition and mechanism due to frictional heating", *Wear*, Vol.284-285, pp.82-90, 2012.
- 4) 山本大輔: 鉄道車両の車輪フラット形状を推定する数値解析手法, 日本機械学会論文集, Vol.91, No.951, DOI: 10.1299/transjsme.25-00067, 2025
- 5) 日本機械学会編: 鉄道車両のダイナミクスー最新の台車テクノロジーー, 電気車研究会, pp.241-244, 1996
- 6) Lewis R, and Dwyer-Joyce RS. "Wear mechanisms and transitions in railway wheel steels," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, Vol.218, No.6, DOI: 10.1243/1350650042794815, 2004.
- 7) 例えば、谷藤克也: 新幹線電車の摩耗車輪とレールの接触 (幾何学的接触による車輪有効こう配の分析), 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.54, No.497, pp.305-311, 1988
- 8) Kalker, J.J.: *Three-dimensional elastic bodies in rolling contact*, KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 1990.
- 9) 木川武彦: 鉄道車両のフラットの生成ならびに剥離に関する研究, 鉄道総研報告, 特別号, No.1, pp.28-43, 1995
- 10) 川本信, 曽根匠, 岡林邦夫: 炭素鋼の摩耗特性と摩擦面温度の関係, 日本金属学会誌, Vol.37, No.3, pp.357-363, 1973
- 11) 熊谷則道, 長谷川泉, 川口清: 車輪滑走およびフラット発生メカニズムーフラット発生状態と粘着係数ー, 鉄道総研報告, Vol.5, No.7, pp.33-41, 1990