

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・レールの転がり接触による劣化を解明する

車輪がレール上を繰り返し転がることによって、車輪やレールは徐々に劣化していきます。劣化現象にもさまざまなものがありますが、それらの現象は、作用する力の大きさや方向に加え、材料の硬さや温度など、多くの要因と関係しています。そこで、劣化現象のメカニズム解明や対策法の提案を目的として、鉄道総研では車輪・レール間の転がり接触シミュレーション手法「車輪・レール転がり接触シミュレーター」を開発しています。ここでは、熱影響や摩耗などを取り扱うための改良を行い、劣化現象の一つである車輪の凹摩耗を対象とした数値シミュレーションを行った結果を紹介します。



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



高垣 昌和
Masakazu Takagaki
鉄道力学研究部
計算力学研究室長

はじめに

車輪がレール上を転がることによって、車輪やレールに生じる損傷現象(劣化)には、車輪のレールと接触する部分が偏摩耗する「車輪フラット」や、レールの上部が周期的に摩耗する「波状摩耗」など、さまざまなものがあります(図1)。また、劣化の要因も車輪やレールの材料特性や、車輪とレールとの間に作用する力の位置・大きさ・方向など、多くの因子が複雑に影響しあっており、その主要因を特定することは容易ではありません。さらに、一般に車輪とレールとの接触部の面積は1円玉

のサイズ以下と小さく、作用する力も大きいため、実験によって前記のような要因の影響を直接観察することは困難です。こうした理由から、数値シミュレーションを用いて車輪とレール間の接触現象を再現することが、劣化現象の解明や、劣化要因の推定を行うための有効な手段の一つとなります。そこで、車輪とレール間の力の釣り合いを解きながら、接触状態を連続的に再現可能なシミュレーション手法「車輪・レール転がり接触シミュレーター」の開発に取り組んでいます(図2)¹⁾。

さて、車輪の劣化現象の一つに「凹

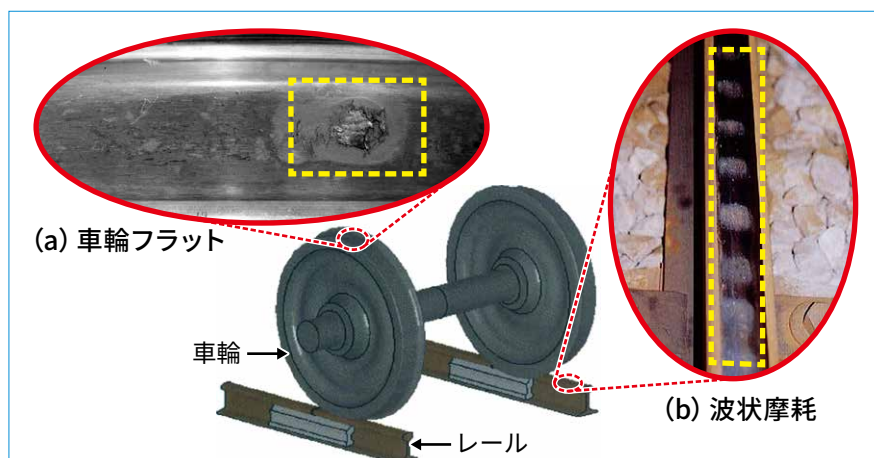


図1 車輪やレールに生じる損傷事例

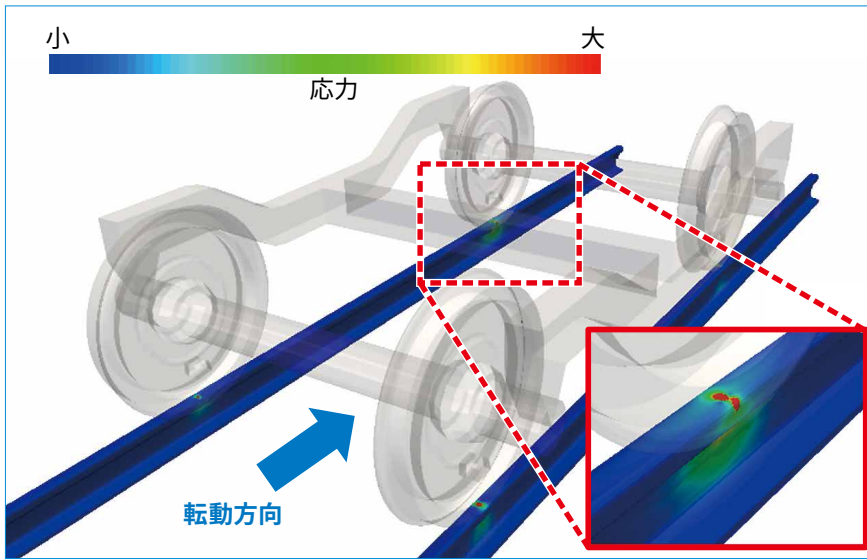


図2 車輪・レール転がり接触シミュレーターを用いた計算事例
(鉄道台車の曲線走行時における応力分布の可視化結果)

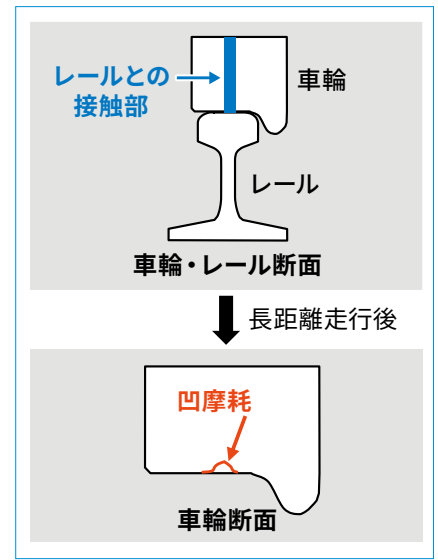


図3 凹摩耗のイメージ図

摩耗」があります。これは、車輪のレールと接触しうる部分が凹状に永久変形する現象のことをいいます(図3)。「摩耗」という名前がついていますが、鉄道総研で過去に実施された実験では、車輪の温度が高いほど、永久変形量が大きくなることがわかっています²⁾。ここから、凹摩耗はブレーキによって温度が上昇し、強度が低下した車輪がレールと接触することで、車輪が通常よりも大きな塑性変形(☞参照)を起こす現象であると考えられています(図4)。しかし、実験では熱膨張や、それによる強度低下をともなった塑性変形、摩耗などが同時に進むため、最終的な車輪の形状しかわからず、上記の要因のどれが永久変形の主要因であるかまでは区別ができません。

そこで、車輪・レール転がり接触シミュレーターに対し、熱影響や永久変

☞ 塑性変形

物体が力を受けて変形するとき、力がある限界量よりも小さい場合は力を抜くと元の形に戻ります(これを弾性変形といいます)。しかし、それ以上の力を加えると、力を抜いても元の形には戻らず、永久変形として残ってしまいます。この変形のことを塑性変形と呼びます。

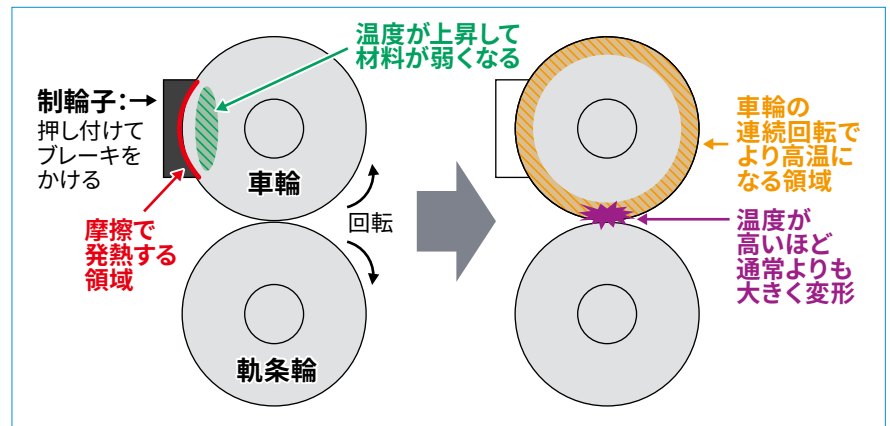


図4 凹摩耗形状の形成メカニズム(実験結果をもとにした推定)

形、摩耗を考慮できる機能を付加し、実験における車輪の変形状態を数値シミュレーションで再現するを行いました。

熱の計算

熱の伝わり方には、主として熱伝導(物体内で熱が伝わる)、熱伝達(接触した物体間で熱が伝わる)、および輻射(電磁波による熱の移動)の三種がありますが、今回開発するシミュレーション手法においてはこれらのすべてを取り扱うことが可能です。また、物体同士の摩擦によって生じる発熱(摩擦熱)についても考慮できるようになっています。

これによって、車輪に制輪子を押し

付けた数値シミュレーションを行うことも可能です。ただし、高速回転する車輪に制輪子を押し付けるシミュレーションを行う場合、接触部の形状を詳細に入力する必要があるため、計算負荷や計算時間の増加が懸念されます。そこで、ここでは実際に制輪子を車輪に押し付けることはせず、車輪側で制輪子による押付領域を仮定します。領域内の車輪表面(図4の摩擦で発熱する領域)に対し、車輪の回転速度に応じた摩擦熱相当量を自動的に加える仕組み(入熱境界)を開発しました。これによって計算負荷を抑えつつ車輪の温度上昇を再現することが可能です。

また、車輪やレールに熱が加わると体積が膨張し、内部に力が発生します

(熱応力)。さらに、熱が加わることで材料の強度が低下し、塑性変形を起こしやすくなることも実験からわかっています。車輪・レール転がり接触シミュレーターでは、このような材料の変形と熱との間の関係を加味した数値シミュレーションを行うことができます。

熱の影響を考慮した計算事例

ここでは、数値シミュレーションと実験との比較結果について紹介します。

図5は鉄道総研が所有する車輪とレールを模した円盤形状の車輪(軌条輪)を用いた実験装置です。車輪を所定の回転速度まで加速させた後、制輪子を車輪踏面に押し付けることで、実際の鉄道車両のブレーキを模擬します。

実験では、時速130 kmから制輪子の押し付けによって車輪を減速させ、車輪の転動速度と車輪の内部に埋設されたセンサーにより温度を測定しています。開発した数値シミュレーション手法では、車輪が減速する様子や温度が上昇する様子が10%程度の誤差で再現されていることが確認できました。

また、数値シミュレーションでは、実験で測定することが難しい、車輪や軌条輪に作用する相当応力(☞参照)や、塑性変形の状態なども計算・可視化することができ、損傷現象のメカニズム解明に役立てることが出来ます(図6)。

摩耗の計算

摩耗の形態には複数の種類があり、それらの摩耗を再現するための式もいくつか提案されています。実験から得られた提案式であるアーチャード則(☞参照)もその一つです。鉄道分野において、車輪とレールとの間に生じる摩耗現象を数値シミュレーションにより再現するためにアーチャード則はしばしば用いられており、車輪・レール転がり接触シミュレーターにおいて



図5 ブレーキ試験装置

もアーチャード則をもとにした摩耗の計算方法を導入しています。ただし、アーチャード則は接触する二物体の硬さに大きな差がある場合にそのまま適用できるものですが、車輪とレールの硬さは比較的近い場合、アーチャード則をそのまま適用して計算を行うと、車輪とレールの摩耗量を過大に評価してしまう可能性があります。そこで、ここでは車輪とレールの硬さの比に応じて各々の摩耗量を分担する「摩耗分担率」という考え方を新たに提案・導入しました。この方法を用いることで、車輪とレールのどちらかが突出して硬い場合においてはアーチャード則を用いた場合と完全に一致する摩耗量が得られ、両者の硬さが近い場合においては、従来よりも摩耗量が少なく評価されるようになります。開発した手法による摩耗のシミュレーション結果は、鉄道総研内で実施された実験結果³⁾との比較によって、発生する摩耗量のオーダーがおおむね一致すること

を確認しています。

なお、車輪やレールに摩耗が生じると、それぞれの接触位置や、接触部に働く力の分布などにも変化が生じます。また、接触位置や力の分布が変化すれば摩耗する位置も変わります。車輪・レール転がり接触シミュレーターではこれらの要因を相互に考慮した転がり接触解析を行うことができます。

凹摩耗の計算事例

今回開発した車輪・レール転がり接触シミュレーターを用い、熱影響や塑性変形、摩耗を同時に考慮した数値シミュレーションを行いました。図7は、図6で用いた解析モデルと同じ形状のモデルを用い、車輪が回転した後の塑性・熱変形量と摩耗量を算出したときの車輪断面の変形図です。初期形状に対して、温度上昇による熱変形と、車輪・レール間の接触にともなう塑性変形量を1,000倍で表示し、摩耗による変形量を20,000倍で表示しています。

☞ 相当応力 (ミーゼス応力)

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。応力にはさまざまな種類や成分がありますが、相当応力は材料の強度評価などに用いられる指標の一つです。

☞ アーチャード則

2つの物体が接触する際に発生する摩耗体積が、物体間の「摩耗係数」と「荷重」、および「相対すべり量」に比例し、2つの物体のうち「軟らかい方の硬さ」に反比例するという法則です。

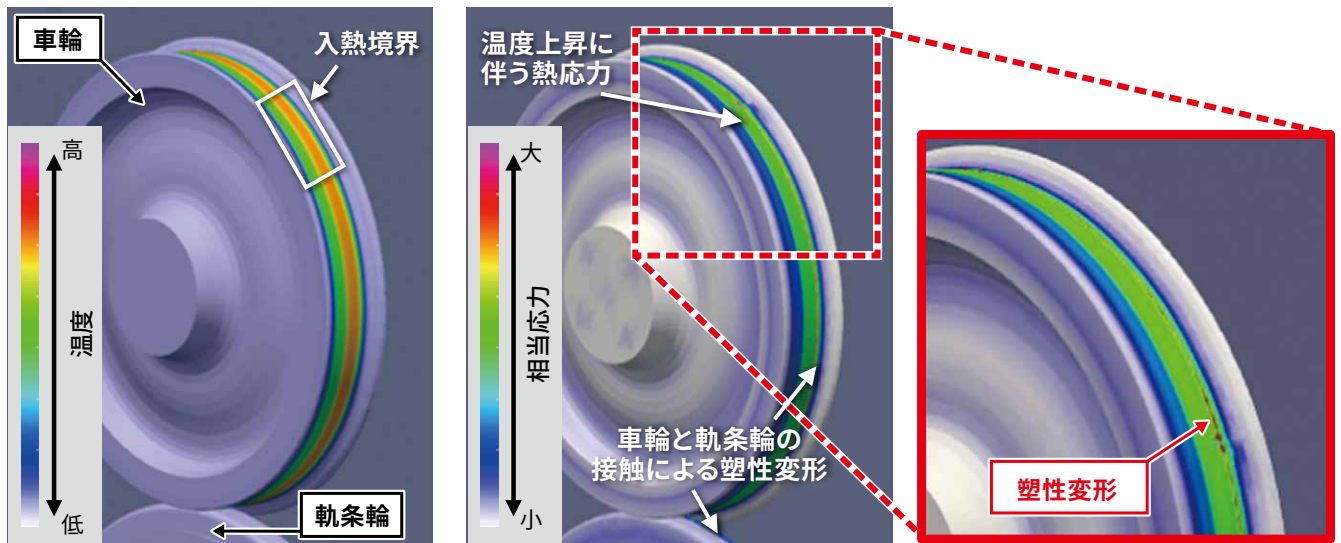


図6 熱影響を考慮した車輪の減速シミュレーション結果(車輪の温度分布および相当応力分布)

図7から、塑性・熱変形の方が摩耗による形状変化よりも20倍ほど大きく、凹摩耗が「摩耗」ではなく「塑性変形」によって引き起こされる劣化現象である可能性が高いことが確かめられました。

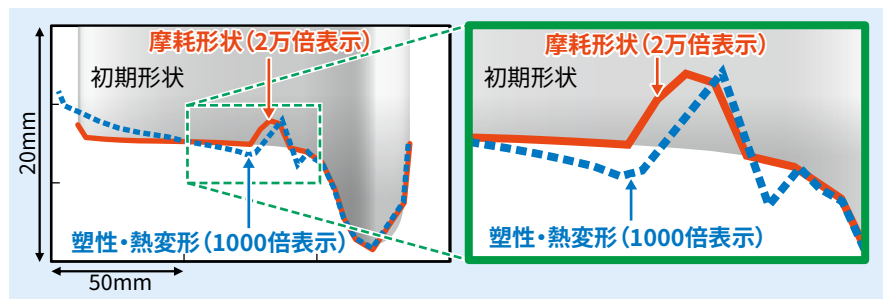


図7 凹摩耗のシミュレーション結果
(車輪断面の初期形状、塑性変形・熱変形、摩耗形状)

おわりに

車輪・レール転がり接触シミュレーターは、凹摩耗のシミュレーション事例のように、劣化現象の発生や成長といったプロセスに着目し、劣化現象のメカニズム解明に資することができます。一方で、図8に示すような、車輪やレールにあらかじめ損傷を与えた解析モデルを用いたシミュレーションを行うことで、車輪とレール間に発生した力の分布や、伝播した力の影響範囲などを把握するとともに、力の発生部位付近の状態を詳細に調べることで、車輪やレールの劣化現象が他の部材に与える影響の評価やメカニズム解明と、それらを踏まえた対策法の提案に活用することを目指しています。

なお、本研究の一部は国立大学法人東京大学との共同研究により実施されました。RRR

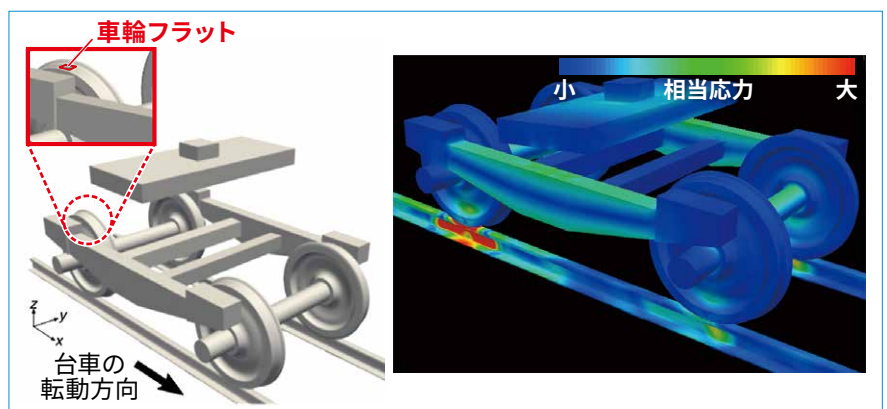


図8 踏面損傷(フラット)を有する車輪を用いた台車のシミュレーション事例
(解析モデル、およびフラット部とレールとの衝撃時の相当応力分布)

文献

- 1) 坂井宏隆：車輪・レール間の接触挙動を再現する, RRR, Vol.77, No.4, pp.24-27, 2020
- 2) 半田和行：車輪踏面が摩耗する原因を探る, RRR, Vol.75, No.5, pp.8-11, 2018
- 3) 辻江正裕, 古岡亜陸, 水谷祐貴, 暁道佳明：マルチボディダイナミクスによるレール摩耗形状予測モデルの構築と妥当性の検証, 日本機械学会論文集, Vol.83, No.854, pp.1-17, 2017