

車輪／レール間の接触メカニズムを 把握して車両開発を加速する



山本 大輔
Daisuke Yamamoto
鉄道力学研究部
計算力学研究室
主任研究員

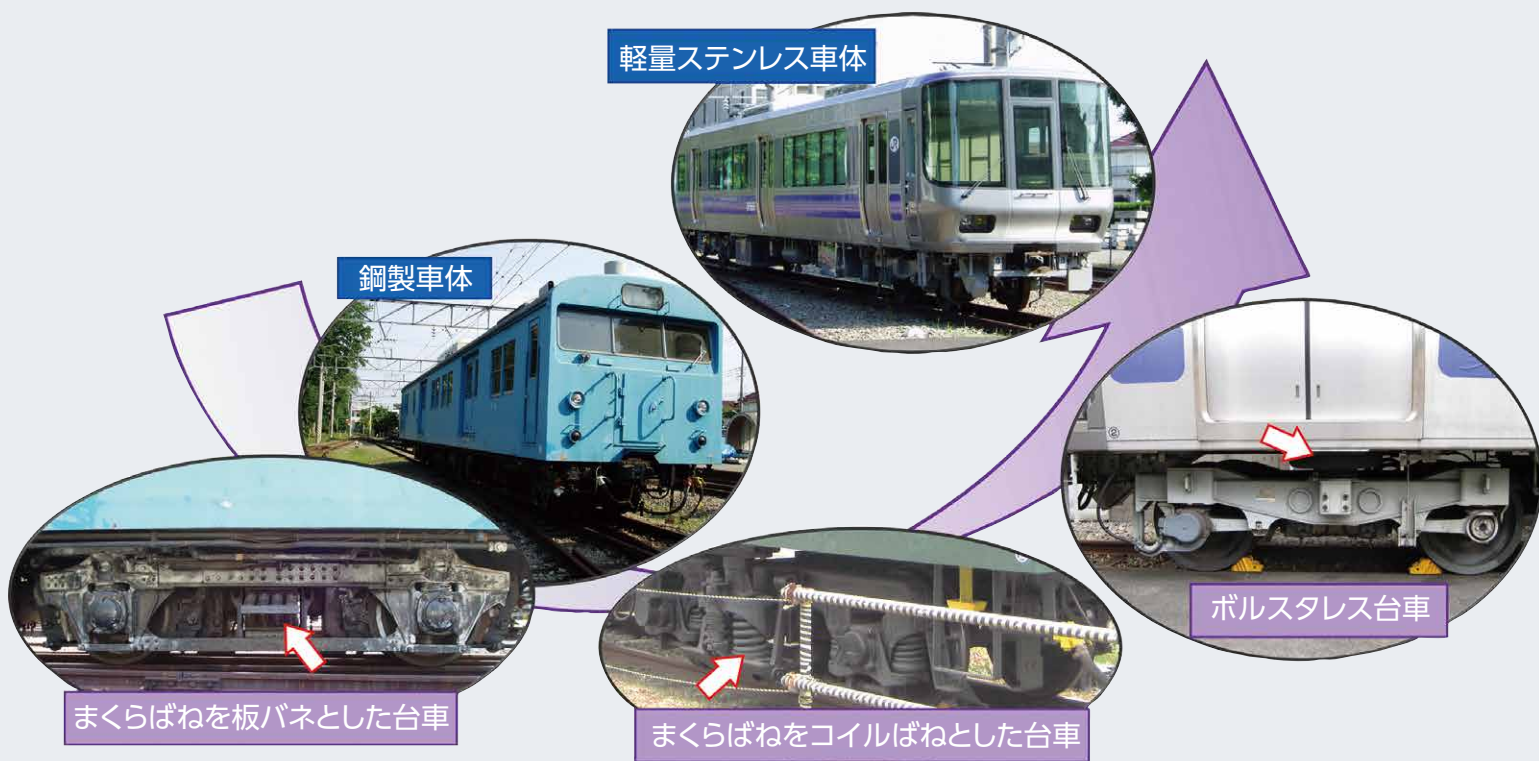
はじめに

これまで日本では、車両の高速化および保守の省力化のため、車両の軽量化、簡素化などの技術開発が積極的に行われてきました¹⁾²⁾。車体は鋼からステンレス鋼やアルミ合金などの軽金属材料に、台車のまくらばねは板バネ、コイルばねから空気ばねを用いたボルスタレス台車へとそれぞれ進化を果たし(図1)、車両の高速

化、保守の改善、乗り心地改善を実現しました。そして、この実現は計算機技術の飛躍的な進歩の歴史でもあり、昭和32年に高速度アナログ計算機が旧国鉄の車両運動解析に採用されてからデジタル計算機が用いられるようになった現在に至るまで、計算機の高性能化は車両開発に大きく貢献しています。

そのような車両運動解析では、車両の運動特

図1 鉄道車両の車体・台車の進化の歴史



性に大きな影響を及ぼす物性値として、車輪とレール間の物性値を入力する必要がありますが、これについては今でも変わらず乾燥時の値が使われています。この理由の一つは、車両の走行安全性を評価するときには乾燥時の値を用いた方が厳しい結果となるためですが、実態に沿った形でより現実的な評価を行う場合にはこの値だけでは不足することとなります。一方、車両のブレーキ性能や力行性能を評価するときには雨天時の値を用いた方が厳しい結果となりますが、雨天時には大雨もあれば小雨もあり環境条件はさまざまです。このような環境条件を定量化するとともに、車両の「止まる」「曲がる」「走る」の運動性能と深い関係にある車輪／レール間の接触メカニズムに盛り込んだ物性値を車両運動解析に組み込むことで、より現実的な条件で評価することができ技術開発が進展する可能性があります。

ここでは、車輪／レール間の接触メカニズムに関する基礎研究の取り組みと、これらを用いた車輪滑走時の車両運動解析による車両の保守低減に向けた車両開発について展望します。

走行時における 車輪／レール接触状態の可視化³⁾

従来の研究では、走行中の車輪／レール間の接触位置を把握することはできませんでした。そこで、走行中の車輪／レール間の接触状態をリアルタイムに評価するための可視化技術を開発しました。図2(a)は、走行中の車輪／レール

間の接触位置と著大な横圧¹⁾の発生位置を特定するための、サーモグラフィカメラ²⁾を用いた走行実験の写真です。2両目の客車の先頭輪軸には、走行中の輪重と横圧を測定するため、輪重横圧測定用輪軸(通称、PQ輪軸)を組み込んでいます。そして、前側台車の下部にはサーモグラフィカメラを設置し、PQ輪軸の車輪／レール間で生じる摩擦熱の残像(閃光温度)を熱画像³⁾として撮影しています。

図2(b)では、輪軸が分岐器で左右方向に大きく変位したことで生じた車輪／レール間の閃光温度をサーモグラフィカメラが捉えて、車輪／レール間の接触位置の特定ができています。左側車輪の背面ではガードレールとの接触も確認できます。曲線でも同様に接触位置を特定することができました。そして、PQ輪軸で計測した横圧とサーモグラフィカメラで撮影した閃光温度の波形を比較すると、分岐器と曲線では、両者のピーク位置が良好に一致することもわかります(図2(c))。この結果は、レールに作用する著大な横圧の大きさをサーモグラフィカメラで定性的に評価できることを示しています。この技術は、日常的には著大な横圧で生じた軌道不整の場所を簡易に見つける点検ツールとして活用することが期待できます。特に、営業車両に簡単に設置できる点は大きなメリットです。留意点としては、サーモグラフィカメラは太陽光による影響を受けやすい弱点があるため、夜間に使用するなどの使用時のひと工夫が必要となることです。

1) 横圧

車輪／レール間に作用する力のうち、レールを押し倒す方向に作用する力のことです。横圧が大きいと脱線、軌道不整、車輪とレールの摩耗の原因となるため、これを小さくするさまざまな対策が行われています。

2) サーモグラフィカメラ

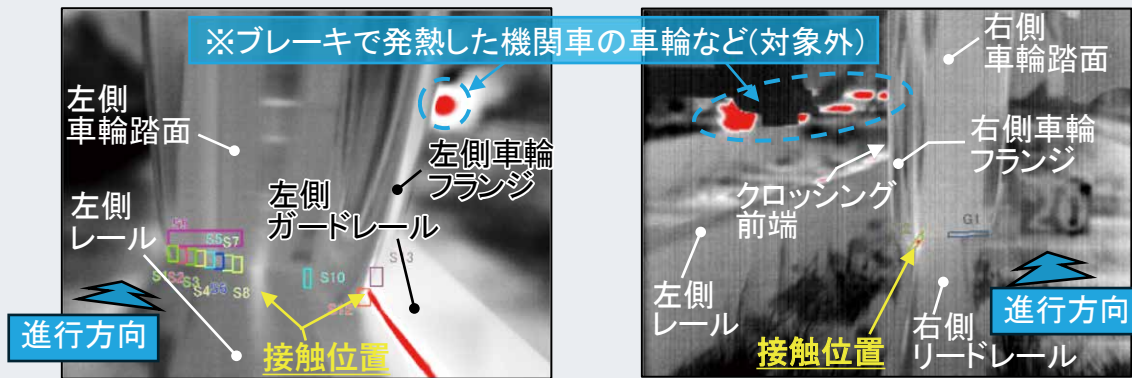
物体表面から放射される赤外線を検知するカメラのことです。検知した物体の表面温度の強弱を色の濃淡で色分けして表示することができます。

3) 熱画像

サーモグラフィカメラで撮影した表面温度の分布画像のことです。温度分布を表す画像のため、表面温度が全く同じ複数の物体は、熱画像として区別することができません。



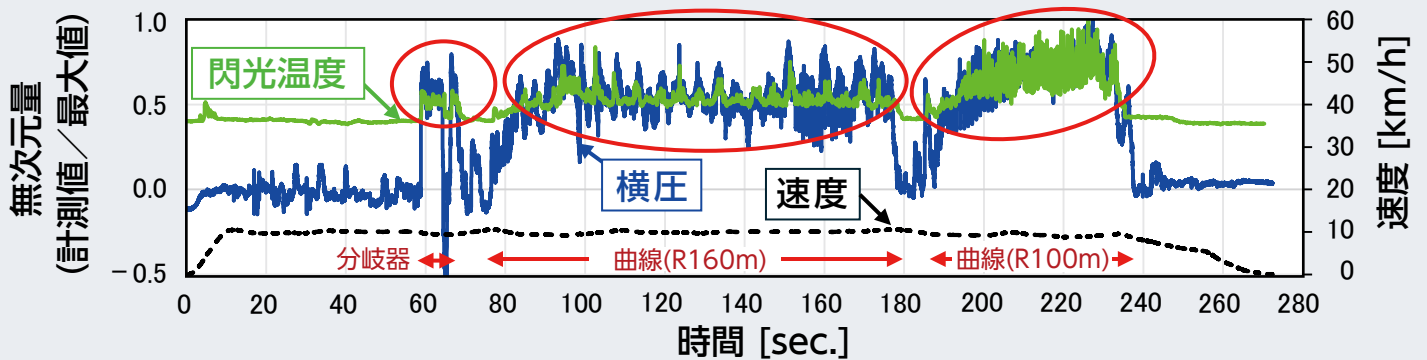
(a) 鉄道総研の構内試験線における走行実験



(i) 左側の車輪/レール

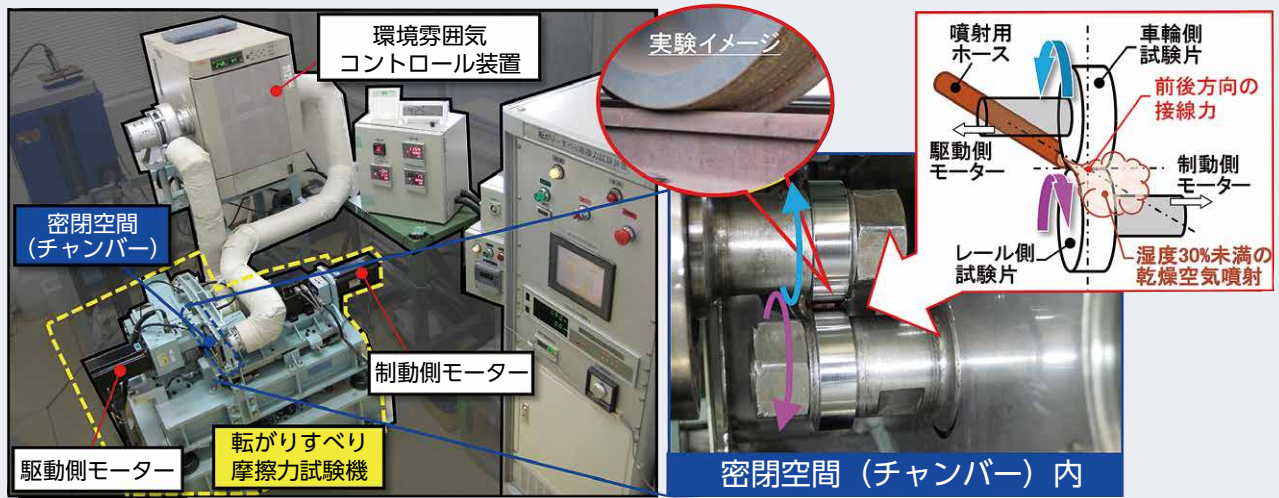
(ii) 右側の車輪/レール

(b) 分岐器付近を通過するときの車輪/レール間の接触位置

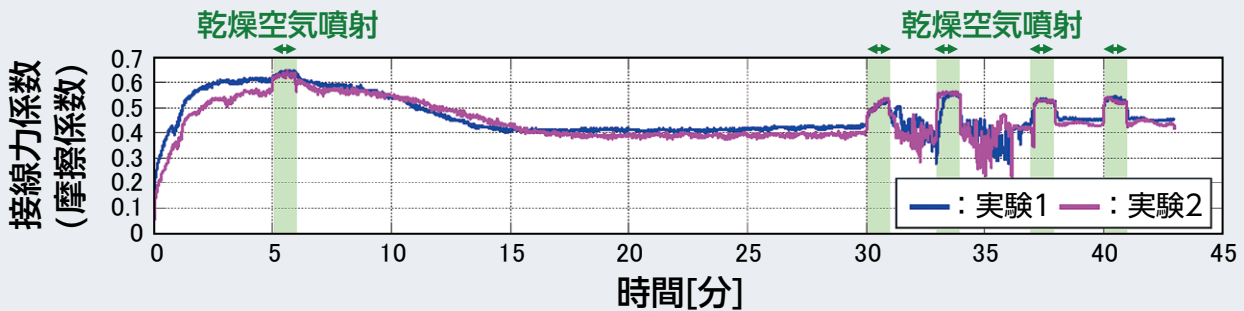


(c) 右側車輪/レール間の横圧と摩擦熱の残像(閃光温度)の比較

図2 サーマグラフィカメラを用いた走行時の車輪/レール接触状態の可視化



(a) 車輪／レール間の接触を模擬した室内実験



(b) 乾燥空気噴射による車輪／レール間の接線力係数向上効果

図3 車輪／レール間の摩擦係数向上手法の開発

室内実験による車輪／レール間の接線力の把握とその改善

車輪／レール間の接触面に作用する力を評価するため、統一した環境条件の下で室内実験を行いました。図3(a)は、大気湿度と車輪／レール間の接線力特性の関係を調査するために行った実験の写真です。実物車輪とレール間の接触面圧は最大1GPa程度以上とされ、自動車のタイヤ／路面間(300kPa程度⁴⁾)とは比較にならないほど大きな値になっています。このため実験では、車輪鋼とレール鋼から製作した直径30mmの車輪側試験輪とレール側試験輪をそれぞれ車輪とレールと見なし、実物車輪とレール間と同様の接触面圧となるように2つの試験

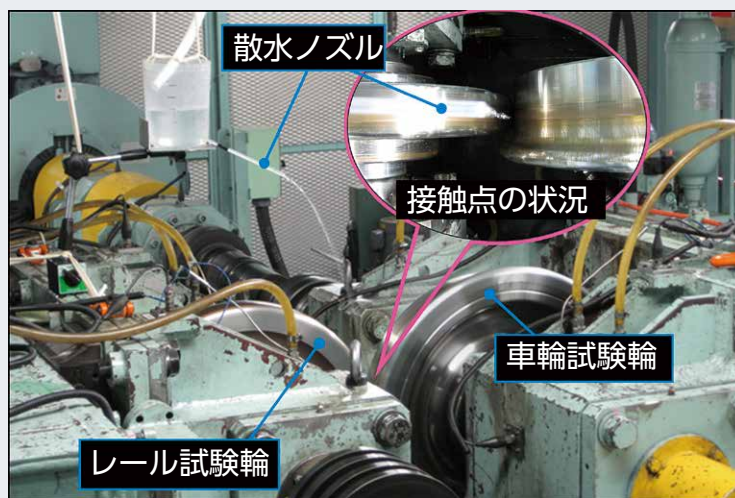
接線力

車輪／レール間の接触面で作用する接線方向の力です。車両の走行性能に影響する重要な力です。

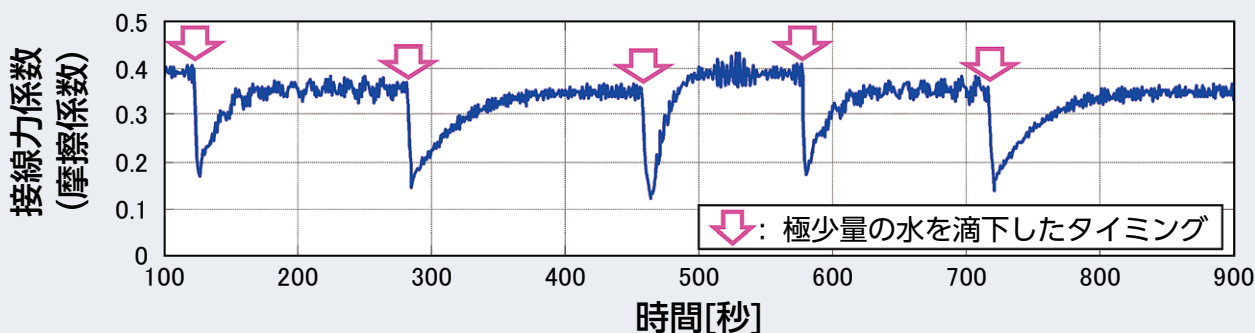
片を互いに押付けた状態で行います。一方の試験片を僅かに速く回転すると接触面には強制的にすべりが生じ、**接線力**^④が作用します。この力を計測することで特性が評価できます。

例えば、図3(b)では密封空間(チャンバー)内を湿度80%の空気で満たした状態で、試験片間の接触面に湿度30%未満の乾燥空気を噴射すると、緑色網掛部のように摩擦係数が一時的に大きくなることがわかりました。これは乾燥空気の噴射により接触面に付着した大気湿度による水分が除去されたことによるものと考えられますが、雨天時でなく乾燥時でも接線力係数の向上効果が得られることは興味深い結果です。この現象は、車両が高い加減速で走行した時に生じる空転・滑走の低減手法に応用できると考えています。

次に、図4(a)は、雨天走行時の車輪／レール



(a) 車輪／レール間を水潤滑状態としたときの接線力測定実験



(b) 極少量の水を滴下した時の実験結果 (速度 30km/h)

図4 雨天走行時の車輪／レール接線力特性の解明

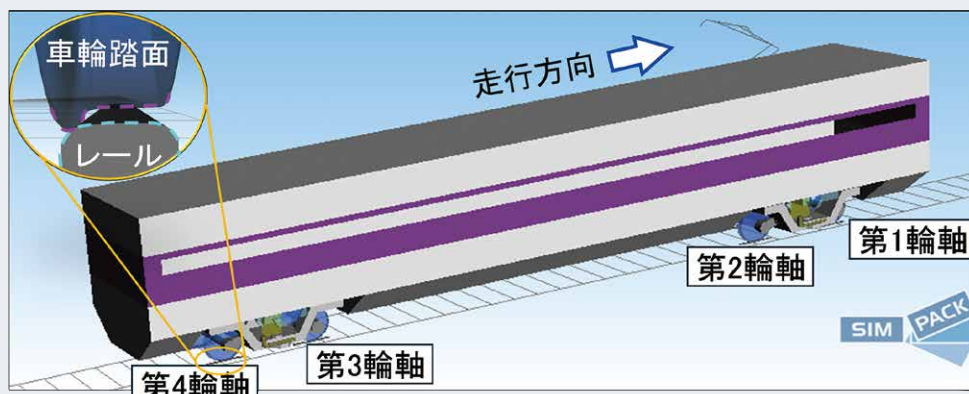
ル間の接線力特性を調査するため、接触面に水を供給しながら試験輪間の接触面で作用する接線力を測定する実験⁵⁾の写真です。水でぬれたレール面は乾燥時より滑りやすいことは感覚的にわかりますが、図4(b)の実験結果に示すように、ほんのわずかな水を接触面に滴下するだけで、接線力は乾燥条件のときの半分以下まで急激に小さくなるのが定量的にわかるようになりました。

このように得た特性は、実際の現場で起きている現象解明に活かせるほか、数値解析に組み込み、現実的な条件で車両挙動を推定することにも活用できます⁶⁾。

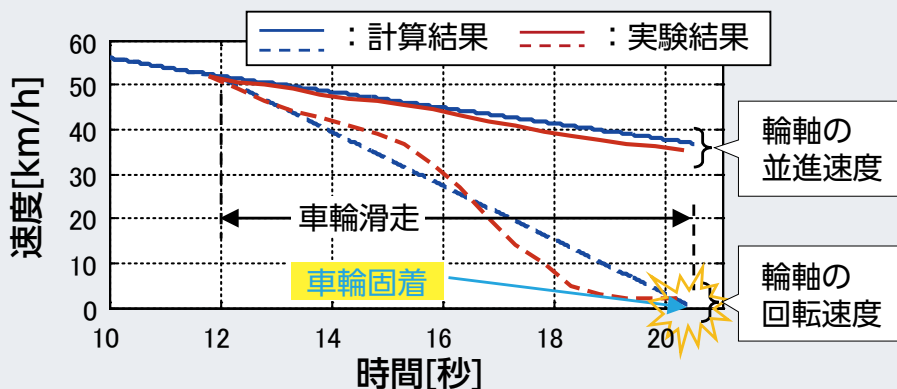
車両運動解析による車輪滑走時の 車両挙動の再現と保守低減への活用

最後に、ブレーキ時の車輪滑走を記録した実

車の走行実験の結果を再現するため、ブレーキ時を模擬した車両運動解析を行いました。車両モデルはMBD[®]ソフト(図5(a))を用い、車輪／レール間の接線力特性には雨天時を模擬した実験で得た知見を組み込みました。実車の走行実験と同じ条件で車両運動解析を行ったところ、ブレーキにより輪軸の回転速度が並進速度より急激に小さくなる結果が得られました(図5(b))。これは車輪が滑走しており、車輪は固着[®]状態となっています。実験結果と計算結果を比較すると両者の波形は良く一致しており、走行実験で計測した実車の計測値を車両運動解析により精度良く再現できることがわかりました。車輪が滑走して固着状態となると車輪踏面にはフラット[®]ができます。つまり、車両運動解析に開発品を組み込んで実行することで、車輪固着を低減する再粘着制御の開発を効率的



(a) MBD ソフト“SIMPACT”上に構築した車両運動解析モデル



(b) ブレーキによる車輪滑走シミュレーションの結果(第4輪軸)

図5 車両運動解析によるブレーキ時の車両の動的挙動の推定

に行うことができる可能性があります。

このように、車両運動解析に車輪／レール間の接触メカニズムを考慮した物性値を組み込むことで、これまで行われていない条件で車両の動的挙動が推定できるため、車両開発における新たな方向性を見出すことができると考えます。

MBD

(MBD: Multi Body Dynamics) 対象を支配的な動きをする構成要素や部品に分割して、剛体(Rigid body)とその結合で表す方法です。例えば、鉄道車両の場合は、車体、台車、輪軸を剛体の質点とし、それをばねやダンパーで結合して表します。

車輪固着

車輪の回転が停止した状態でレール上を滑る現象のことです。

フラット

車輪の円周上の一部が平坦に崩れる損傷で、そのまま走行すると騒音や振動が発生し、ほかの機器やレールにも悪影響を与えてしまいます。

おわりに

最後に、車輪／レールに関する基礎研究の一例を紹介し、車両の保守低減に向けた車両開発について展望しました。ここで紹介した基礎研究はほんの一例で、車輪フラット以外でも応用することができます。RRR

文献

- 1) JREA創立70周年企画委員会: JREA誌にみる鉄道技術(車両・機械)の変遷(昭和33年~昭和40年), JREA, Vol.60, No.10, pp.41678-41685, 2017
- 2) JREA創立70周年企画委員会: JREA誌にみる鉄道技術(車両・機械)の変遷(昭和41年~昭和62年)[その2], JREA, Vol.61, No.1, pp.41917-41922, 2018
- 3) 山本大輔: サーモグラフィカメラを用いた車輪とレールの接触位置の特定, 鉄道総研報告, Vol.32, No.6, 2018
- 4) 酒井秀男: タイヤ工学, グランプリ出版, 2004
- 5) 山本大輔: 車輪滑走を誘発する雨天時の車輪／レール接線力の実験的評価, JREA, Vol.66, No.10, pp.47338-47341, 2023
- 6) 山本大輔: 雨天時を模擬した車両運動解析における車輪／レール接線力モデル, 鉄道総研報告, Vol.38, No.8, pp.9-15, 2024