

車輪／レール接触問題の最前線

石田 誠
軌道技術研究部(部長)



いしだ まこと

はじめに

車輪とレールを基本とする鉄道システムにおいて、車輪／レールの接触問題^{1),2)}は、未解明な点が残されているいわゆる鉄道固有の問題の一つです。

車輪がレールの上を転がる時、それぞれの上下方向、前後方向および左右方向の弾性変形(塑性変形も生じる場合がある)によって伝達力が生じます。鉄道では、これら上下方向の伝達力を「輪重」、前後方向を「縦クリープ力」、左右方向を「横クリープ力」と呼びます。また、「クリープ力」のことを「粘着力」(トライボロジーの分野では、一般的に「接線力」あるいは「トラクション」とも呼びます。これらの伝達力のうち、特に縦クリープ力は駆動力やブレーキ力に関わる重要な伝達力で、一般的に図1のような特性を示し、これを「クリープ力特性」あるいは「粘着力特性」と呼びます。図において、縦軸は接線力と垂直荷重である輪重との比である「接線力係数」あるいは「トラクション係数」、横軸は車輪の周速度と車輪の移動速度(車両のレールに対する速度)の差のそれらの平均速度との比である「すべり率」が一般的に用いられます。また、この接線力と輪重の比の最大値を「粘着係数」(トライボロジーの分野では「最大トラクション係数」と呼び、車両の加速あるいは減速の性能、乗り上がり脱線等の現象を理解する上で重要です。なお、この粘着係数を与えるすべり率より小さいすべり率の領域を「微小すべり領域」あるいは「クリープ領

域」、それより大きい領域を「巨視すべり領域」と呼びます。

また、このような車輪／レール間の伝達力により発生する応力、あるいはその応力により生じる塑性変形を理解することは、曲線部のレールゲージコーナ部の摩耗(以下、「側摩耗」と称する)、車輪フランジ直立摩耗、レール頭頂面シェリング(以下、「シェリング」と略称する)に代表される転がり接触疲労等を検討する上で重要です。

本稿では、このような車輪とレールの転がり接触に関する最近の話題について紹介します。

摩擦・粘着

車両の走行特性にとって重要である摩擦と粘着に関して、半径の小さい曲線(一般的に「急曲線」と呼ぶことが多い)における低速走行時の乗り上がり脱線と湿潤状態における高速走行時の粘着係数低下による滑走・空転が重要な問題です。

クリープ力特性

乗り上がり脱線に関して、急曲線走行時のクリープ力特性と粘着係数(低速時においては「動摩擦係数」とほぼ等しいと考えられる)を理解するために、車輪とレール間の潤滑効果に着目した車両走行シミュレーション結果を紹介します。なお、シミュレーション結果は、走行試験によりその妥当性が確認されています。

無潤滑、車輪踏面と曲線内側レール(以下、「内軌」と称する)頭頂面間の潤滑と車輪フランジと曲線外側レール(以下、「外

軌」と称する)ゲージコーナ間の潤滑時に作用する縦および横クリープ力等を図2に示します。図より、内軌側の車輪踏面／レール頭頂面間を潤滑し摩擦係数を低減することが、内軌側のみならず外軌側の車輪／レール間に発生する横圧(前軸外軌側で車輪フランジとレールゲージコーナが接触する場合はその接触部で生じるフランジ反力と呼ば

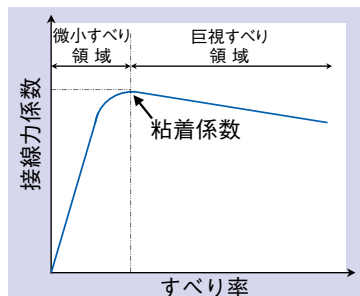


図1 一般的な車輪／レール間の粘着力特性

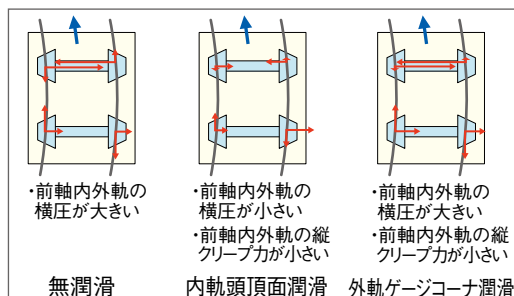


図2 各潤滑条件下における曲線走行時に生じるクリープ力(一部フランジ反力含む)

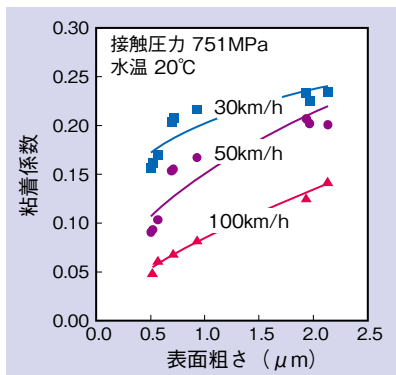


図3 表面粗さの粘着係数に与える影響

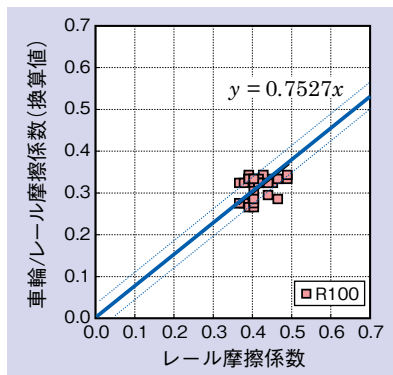


図4 レール摩擦係数(トリボメータ)と車輪/レール間摩擦係数の関係

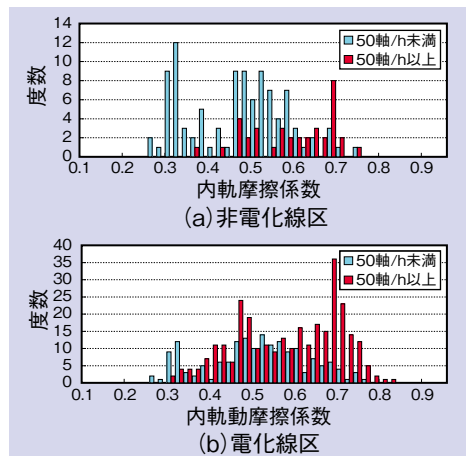


図5 レール摩擦係数(トリボメータ)の通過軸数別頻度分布

れる作用力と横クリープ力との横方向の合力)を大幅に低減することが理解できます。また、外軌側の車輪フランジ/レールゲージコーナ間の潤滑は、無潤滑時より特に外軌側の横圧が増加するという興味深い結果が得られました。これは、外軌側の車輪フランジとレールゲージコーナ間に発生する縦クリープ力が減少し、操舵し難くなったことでアタック角(輪軸と曲線の半径方向とのなす角:操舵性の目安となるパラメータ)が増加し横圧が増加したことが考えられます。

以上のように内軌側のレール頭頂面と車輪踏面間の潤滑は内軌側と外軌側双方の横圧を大幅に低減する効果があることから、後に紹介する急曲線内軌波状摩耗を抑制するあるいは内軌側のきしり音を抑制するために、この内軌潤滑を応用発展させた車輪/レール摩擦緩和手法が開発されています。

粘着係数

次に、高速走行や滑走・空転に関して、湿潤状態下の粘着係数に対する表面粗さや水温等の影響が2円筒転がり接触試験機を用いた試験と弾性流体潤滑(Elasto-Hydrodynamic Lubrication)理論に基づく解析により明らかにされてきました。図3に表面粗さの粘着係数に与える効果を示します。図において、湿潤状態において、走行速度が大きいほど車輪/レール間の水膜が厚くなり、粘着係数は低下し、表面粗さが大きいほど水膜厚さに対して表面粗さ突起部の固体接触部分が増加し、粘着係数は上昇します。また、表面粗さが同じ場合、水温が高いほど水の粘度が小さいため車輪/レール間の水膜が薄くなり、表面粗さ突起部の固体接触部分が増加し、粘着係数が上昇すると考えられています。したがって、特に高速走行時で水温が低い場合に粘着係数の低下を抑制するためには、車輪/レール間の表面粗さを適当な大きさ以上に確保することが有効です。ちなみに、車輪踏面の表面粗さを改善する方法として、既に増粘着研磨子が開発されています。また、滑走・空転を抑制するために車輪とレール間にセラミックス(アルミナ)粒子を車輪とレール間に噴射するセラジェットが開発されています。

摩擦係数

一方、車輪/レール間の動摩擦係数(以下、本稿では「摩擦係数」と称する)は、地下鉄の乗り上がり脱線事故を契機に、その事故原因の一つとして挙げられたため、様々な状況におけるレールの摩擦係数の実態調査が行われました。その調査では、摩擦係数は測定器の特性に依存するため、測定はすべて鉄道総研で開発したレールトリボメータ(以下、「トリボメータ」と略称する)が用いられました。そして、トリボメータで測定された摩擦係数と実際の車輪/レール間の摩擦係数の関係に関しては、鉄道総研の所内試験線で実施された走行試験結果により求められました。求められた関係を図4に示します。図より、大まかにはトリボメータによる摩擦係数の約0.8倍が車輪/レール間の摩擦係数に相当するという結果が得られました。

図5に、電車と気動車の雰囲気(油環境)の違いと単位時間当たりの通過軸数を50軸以上と未満に着目し、トリボメータを用いて測定した摩擦係数を示します。図より、非電化線区と電化線区では全体として電化線区の摩擦係数の方が大きく、単位時間当たりの通過軸数が50軸以上の方が50軸未満より大きいことが理解できます。つまり、気動車が走行する非電化線区が電車が走行する電化線区よりレール周りがより油環境になるためと考えられます。また、車輪の転がり荷重がより頻繁に作用する方が、接触面の酸化膜あるいは酸化物の形成を抑制するため、摩擦係数が上昇すると考えられます。しかしながら、いずれにしても摩擦係数の影響因子として挙げられているパラメータは気象条件、運転条件や環境条件であり、接触面の酸化膜や酸化物等の表面性状を直接反映するものではありません。

そこで、塩水環境トンネルにおいて発生しているレール波状摩耗の発生メカニズムに関して、レールの表面酸化物を分析することにより摩擦係数を評価した例を紹介し、ここで対象とする波状摩耗は、車輪の溶接継目通過時に励

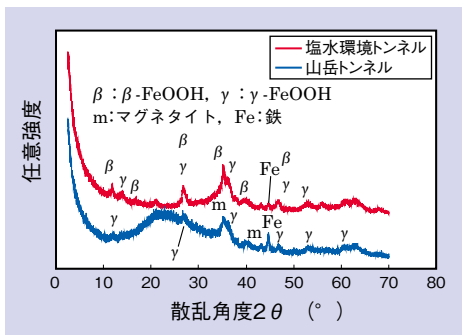


図6 X線によるレール表面物質の分析結果

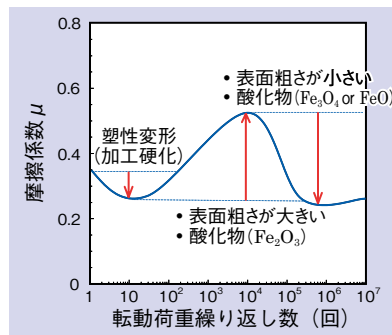


図7 転削後の転動荷重の繰返し数と摩擦係数の関係(室内試験)

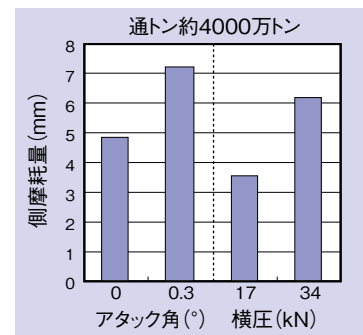


図8 外軌側摩耗へのアタック角と横圧の影響(室内試験)

起されたばね下質量の軌道支持ばね上の固有振動による輪重変動に応じた車輪のロール・スリップと呼ばれる縦すべり(巨視すべりを起こさない程度)の変動により発生すると考えられています。一方、同様な勾配を有し、車輪/レール間に同様な縦クリープ力が作用するにも関わらず波状摩耗が発生していない山岳トンネルがあります。そこで、波状摩耗の原因と考えられるロール・スリップは、山岳トンネルでは生成されずに塩水環境下でレール表面に生成される酸化物による摩擦係数の低下が原因ではないかと考えられたため、双方のレール表面から採取された被膜物がX線により分析されました。その分析結果を図6に示します。図より、塩水環境トンネルのレールからのみ、山岳トンネルのレールには検出されなかった特に水分がある場合に摩擦係数が低下するβ-水酸化鉄(FeOOH)が検出されました。また、レール表面の酸化の程度も塩水環境トンネルが山岳トンネルよりかなり激しく摩耗進みも大きいと考えられ、β-水酸化鉄(FeOOH)の検出は上記の波状摩耗発生メカニズムを検証する有力な手がかりであると考えられます。

次に、転削直後あるいは転削後ある程度走行した後等転削に関係すると考えられる乗り上がり脱線に関して、転削が乗り上がり脱線にどのような影響を与えているのかを明らかにすることは重要な課題です。そこで、乗り上がりの推進力になる内軌側の横クリープ力に直接関係する摩擦係数と転削後の車輪踏面の表面性状に関して、車輪とレールから切り出した試験片を用いた室内試験が行われました。室内試験により得られた転削後の転動荷重の繰返し数と摩擦係数の関係を図7に示します³⁾。図において、転削直後は表面酸化物等が削り取られた直後であるため、摩擦係数は比較的大きく、その後摩擦係数は低下します。この摩擦係数の低下は、転動荷重の繰返しによりレール表面が加工硬化するためと考えられます。その後、転動荷重を $10^3 \sim 10^5$ 回受ける間に、 10^4 回付近をピークに摩擦係数が一度上昇しその後低下します。この試験結果は、転削直後ではなく数10km走行後にも摩擦係数が上昇し、脱線に対する余裕度が低下する可能性を示す大変興味深いものです。この摩擦

係数の変化は、表面酸化物の存在割合に着目すると、転動荷重の繰返し数 $10^3 \sim 10^5$ 回においては、摩擦係数が比較的大きいヘマタイト(Fe_2O_3)の割合が増加し、その後摩擦係数が比較的小さいマグネタイト(Fe_3O_4)の割合が増加する傾向と一致します。このことは、表面状態を直接検知できれば、摩擦係数を評価する上で極めて有効であることを示すものです。

したがって、直ちに容易ではありませんが、塩水環境トンネル内のレールや転削後の車輪の摩擦係数を評価するために行われた分析を現地あるいは在姿で表面酸化物等の調査・分析を可能とすることは転がり接触による伝達力をより深く理解するために重要であると考えます。

摩耗と疲労

ここでは、転がり接触により材料が摩耗あるいは疲労して生じる主な損傷とその対策について紹介します。

レール側摩耗

急曲線外軌に生じる側摩耗に関しては、それを抑制するために熱処理により硬くしたレールの採用や、外軌ゲージコーナと車輪フランジ間への塗油等が行われてきました。この外軌ゲージコーナ部への潤滑効果については、図2における台車前軸の外軌側車輪/レール間の縦クリープ力(摩耗を促進する摩擦力)が無潤滑時より大幅に小さくなっていることで容易に理解できます。また、内軌頭頂面と車輪踏面間の潤滑は、台車前軸の内外軌双方の横圧が大幅に減少するため、外軌側摩耗においても大幅な減少が期待できます。

そこで、外軌側摩耗進みは、一般的に摩擦係数、接触荷重、すべり速度等に比例すると考えられていますが、車両と軌道の相互作用に関するパラメータである横圧とアタック角に着目して実施された室内摩耗試験の結果を紹介します。試験結果を図8に示します。図より、接触荷重である横圧の影響とともにすべり速度あるいはすべり率に関係するアタック角の影響も顕著であることが理解できます。ちなみに、縦クリープ力は横圧と摩擦係数の双方に関係するパラメータです。

波状摩耗

我が国の鉄道で発生している主な波状摩耗としては、急



図9 急曲線内軌波状摩耗の例

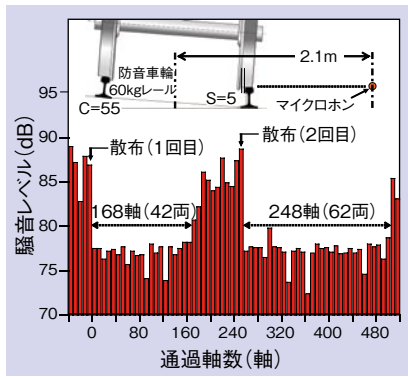


図10 車輪／レール摩擦緩和手法 (FRIMOS) によるきしり音低減効果



図11 レールシェリングの破断面の例



図12 きしみ割れの例

表層の疲労層を研削により除去する試み等が行われてきました。そのような研削手法に関する追跡調査等を踏まえ、予防研削の

曲線内軌、曲線外軌および直線に発生する比較的短い波長と長い波長の2形態の計4形態があります。特に都市鉄道等の急曲線内軌頭頂面に、図9に示すような波長50～150mmの波状摩耗が発生し、騒音・振動等の大きな問題になっています。この曲線内軌に発生する波状摩耗の原因については、台車前軸の内軌側の車輪／レール間には案内力不足により発生するアタック角に起因する大きな横クリープ力と車輪がレール継目等を通過する際に励起される車輪とレール間の上下方向の輪重変動により、レールの左右あるいは小返り振動と連成されたロール・スリップと呼ばれる摩擦振動が励起され、凹凸が波状に形成されると考えられています。

このような発生メカニズムから、横クリープ力(横圧)を抑制し、レールの左右あるいは小返り振動を励起させないために、内軌頭頂面を潤滑することが考えられます。その内軌頭頂面と車輪踏面間の潤滑効果は、図2に示すように、台車前軸の内軌外軌双方の横クリープ力を大幅に減少させます。ただし、車輪踏面と内軌頭頂面間の潤滑に関しては、車輪の滑走・空転に注意する必要があります。そのため、通常の走行状態ですべり率が比較的小さい場合はクリープ力を小さく、制動状態ですべり率が大きい場合にもそのクリープ力を維持するかあるいは上昇させ、図1に示す巨視すべり状態に直ちに移行しない潤滑手法が注目されています。このような潤滑手法として、鉄道総研では車輪／レール摩擦緩和手法 (FRIMOS: フリモス) を開発しました。フリモスにより横圧を低減し、波状摩耗の発生を抑制するとともにその横圧が原因となるきしり音の低減が期待できます。図10に、きしり音(近傍音)の低減効果を示します。

転がり接触疲労

車輪からの繰り返し転動荷重を受けて生じる疲労損傷の一つであるシェリングの発生により、多大な保守経費を要しています。図11に示すシェリングと同様の損傷は、古くは昭和30年代に山陽本線で「黒裂」と呼ばれ、大きな問題になりました。その後、東海道および山陽新幹線で再び大きな問題になり、その対策として昭和50年代には既にレール

シェリング抑制効果が実験的に求められました。それによると、例えば研削周期を通過トン数(列車荷重による軌道へのダメージ(負担力)を表現するパラメータ: 軸重×通過軸数)で0.5億トンとした場合、約0.1mmの研削深さで平均的(破壊確率50%)には累積通過トン数で8億トンを超える程度までシェリングの発生を抑制できることが示されました。

また、このような主に直線で発生するシェリングとは異なり、車両の曲線走行時の厳しい接触条件下で、外軌側摩耗とのバランスにおいて発生する図12に示すきしみ割れと呼ばれる転がり疲労損傷も大きな問題となっています。この疲労損傷は、2000年の英国・ハットフィールドの曲線で発生したレールの疲労折損を原因とする脱線事故を契機に、大いに着目されるようになりました。このきしみ割れの予防に関しては、摩耗と疲労のバランスに着目し、研削を含めた適度な摩耗量の制御で疲労損傷を防ぐことが考えられます。そこで、きしみ割れと摩耗進みに関する現地調査が行われ、熱処理レール(HH340)において、きしみ割れは通過トン数1億トン当たり1～2mmの側摩耗進みで発生しやすい傾向にあるという知見が得られています。

おわりに

以上、在来線における白色層(マルテンサイト)起点のシェリングや耐シェリング鋼レールのベイナイトレール、さらには軌道回路不短絡等、誌面の関係で紹介できなかった話題も多くありますが、車輪とレールの転がり接触に関する最近の話題として摩擦・粘着を中心に紹介しました。本稿が読者の方々の転がり接触に対する理解を深め、当面する課題の解決に向けてお役に立てれば幸いです。[RRR]

文献

- 1) 石田誠: 車輪とレールの転がり接触に関するこれまでの理論的發展と実務, RRR, 62-8, 2005, pp.14-17
- 2) 石田誠: 車輪／レール摩耗と転がり接触疲労に斬り込む, RRR, 63-4, 2006, pp.10-13
- 3) 梅原徳次, 他: レール鋼同士のすべり摩擦に及ぼす転動繰り返し数の影響, J-RAIL'04講演論文集, 2004, pp.435-436