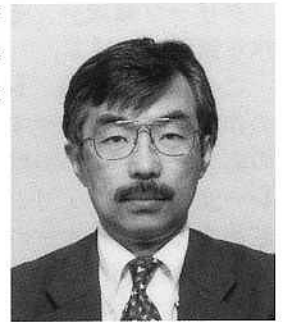


技術解説

財団法人 鉄道総合技術研究所
 鉄道力学研究部 軌道力学
 研究室長



車輪／レールの接触問題の現状と今後の取組み

石田 誠
 Makoto Ishida

Current Status and Future Study on the Theory and Practice of Wheel/Rail Contact

1 はじめに

図1に、車輪とレールの接触状態における各部および作用力等の名称を紹介する。図において、車輪の踏面およびフランジ、並びにレールの頭頂面およびゲージコーナ、さらに車輪の踏面勾配、レールの傾斜敷設角を示す。また、車輪とレール間の主な作用力として、車両走行に伴う上下方向の輪重および車両が曲線等を走行する際の左右方向の横圧（「圧力」ではなく「力」であり、鉄道の分野ではこのよ

うに呼ぶ）、さらに車両が走行するために必要な前後方向の駆動力あるいは制動力を示す。このうち、左右および前後方向の作用力に関して、鉄道では車輪がレールの上を転がる時、それぞれの弾性変形によって生ずる微小すべりによって車輪とレールの間で伝達される力を、「粘着力」あるいは「クリープ力」（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」と呼ぶ。このクリープ力は一般的に図2に示すような特性を示し、それを「粘着力特性」あるいは「クリープ力特性」と呼ぶ。また、この粘着力の最大値と輪重の比を「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を定める重要な要素である。なお、図において、縦軸はクリープ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

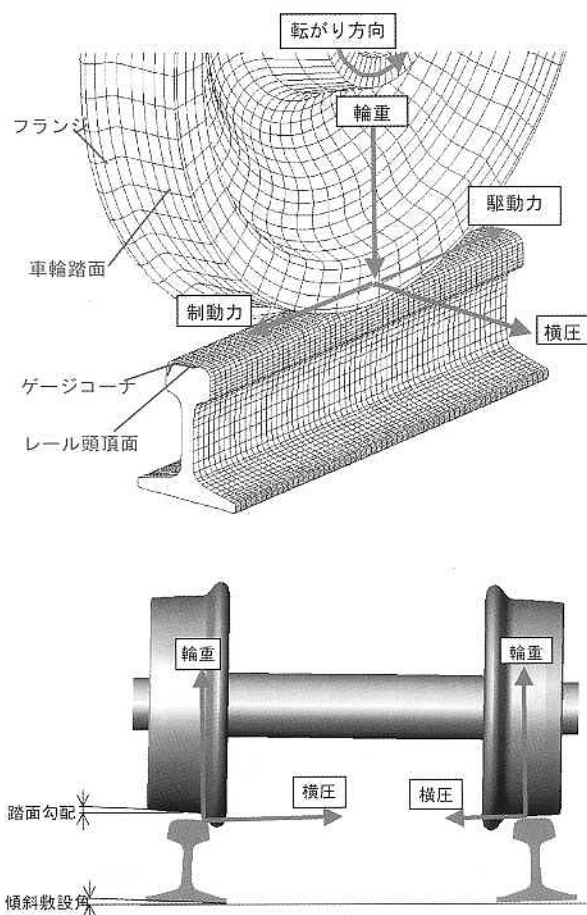


図1 車輪とレールの接触部と作用力の名称

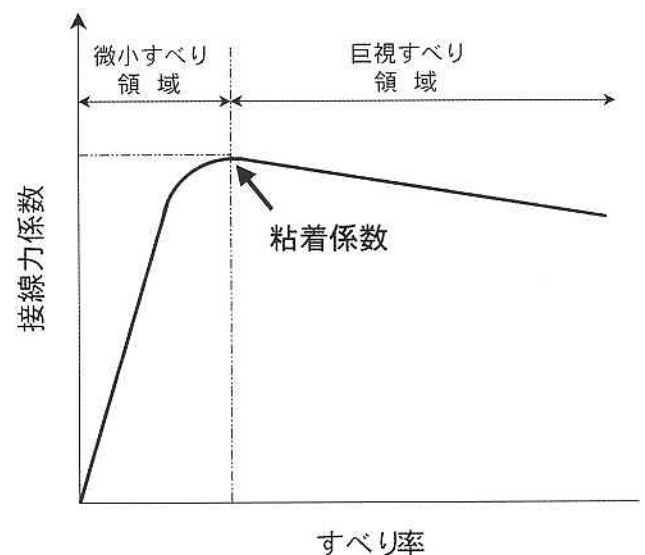


図2 一般的な車輪／レール間の粘着力特性

る。さらに、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」と呼ぶ。

このような車輪／レール間の作用力の特性と、その作用力により発生する応力の大きさ、あるいはその応力により生じる塑性変形の様子を知ることは、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、曲線部のレール側摩耗、車輪フランジ直立摩耗等を検討する上で重要であり、また、車輪／レール間の輪重変動に代表される作用力の動特性を知ることは、車両の走行安全性、車輪とレールの振動に起因する騒音等の保守上の問題を検討する上で重要である。本稿では、このような車輪／レールの接触問題に関して、これまでの理論の発展、現在の課題と実務そして今後の取り組みについて紹介する。

2 車輪とレールの接触に関する理論の発展

2.1 接触理論

車輪がレールの上を転がる現象を考える時、初めにその接触点にどのような応力（接触圧力）が発生するかが問題となる。この問題を解くための接触理論は、1882年にハインリッヒ・ヘルツによって書かれた「弾性体の接触に関して」と題する論文¹⁾に始まると言える。彼は、2枚のレンズを接触させた時の弾性変形が光の干渉縞にどのような影響を与えるかという疑問から出発して、いわゆるヘルツの接触圧力分布を求めた。ただし、ヘルツは理想的な平滑面を仮定している。

ヘルツ理論を用いて、JR在来線の円錐踏面車輪とJIS50Nレールのそれぞれ新品断面で設計輪重75kNの場合の最大接触圧力を求めると1100MPa程度になり、普通レール鋼の引張・圧縮降伏応力（通常、耐力として0.2%永久ひずみを生じる時の応力を用いる）の500~600MPaと比較すると非常に大きいことがわかる。さらに、動的に変動する輪重と駆動力等の付加を考慮すると、車輪とレールは厳しい応力状態に曝され、塑性変形の可能性が指摘できる。最近では、このような平滑面のみならず、車輪とレール表面の極微小な突起同士による極めて厳しい応力状態も評価できるようになってきている^{2),3)}。

2.2 転がり接触理論

ヘルツ理論は、接触面において摩擦のない弾性体の接触を扱うので、車輪がレールの上を転がる現象を十分に記述できない。ただし、クーロン摩擦を仮定すると、摩擦係数 $\mu=0$ の摩擦のない状態での転がり接触を表すものとも考えられる。しかしながら、車輪／レール間の実問題として μ は0ではなく、逆に μ は0ではないことにより駆動力あるいは制動力を

揮する。以後の転がり接触理論の発展は、このヘルツ理論の $\mu=0$ という制約をいかに取り除くかにかかっていたと言える。ここで、この理論の先駆的な役割を果たしたカーターが求めた2次元の接線応力分布⁴⁾と、現在のところ最も多くの場合に適用できるカルカーの転がり接触理論⁵⁾により求めた3次元の接線応力分布を図3および図4に紹介する。ただし、カーターやカルカーの転がり接触理論は弾性理論である。

図3(1)は、ヘルツの2次元接触圧力分布の原点近くの応力分布を等価長さという概念を導入して求めた2次元接触圧力分布を示し、図3(2)は、接触領域の車輪の進入側において車輪とレールの転がり方向の歪が等しくかつ一定である領域（「粘着領域」と呼ばれる）と、同去り側において接触圧力が歪を一定に保つには不十分になり、限界接線応力($f=\mu p$, f :接線応力, p :接触圧力)ですべる領域（「すべり領域」と呼ばれる）を示している。

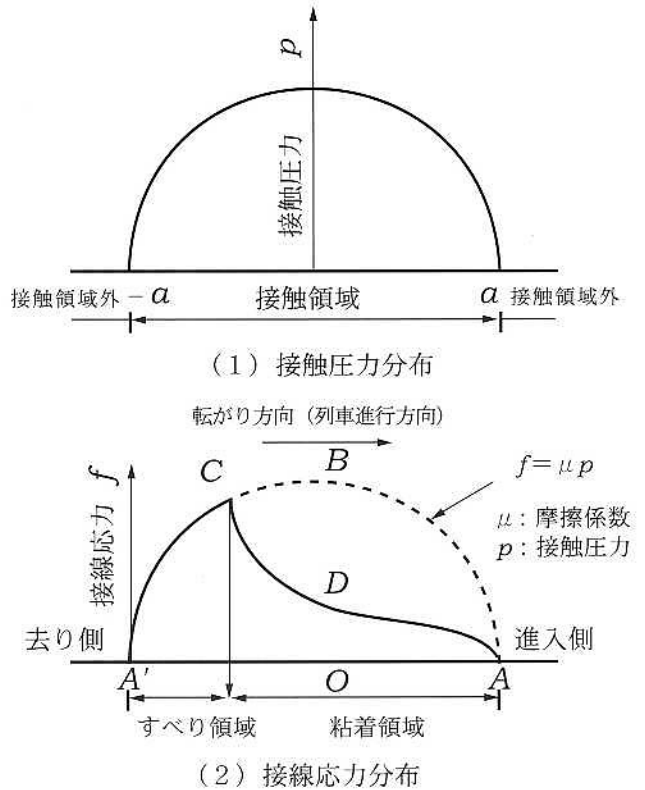


図3 カーターの2次元転がり接触理論

図4は、カルカーの厳密理論と呼ばれる理論に基づき開発されたプログラム“CONTACT”を利用して、新幹線の1/40の傾斜の円錐踏面車輪と60kgレールのそれぞれ新品断面で設計輪重85kN、横圧85kN×0.025および駆動力85kN×0.05が作用する場合の接線応力分布を示す。図より、車輪／レール間の接線応力の大きさとともに、図においては時計回りの応力を発生させる車輪踏面勾配によるスピンの影響をよく理解することができる。

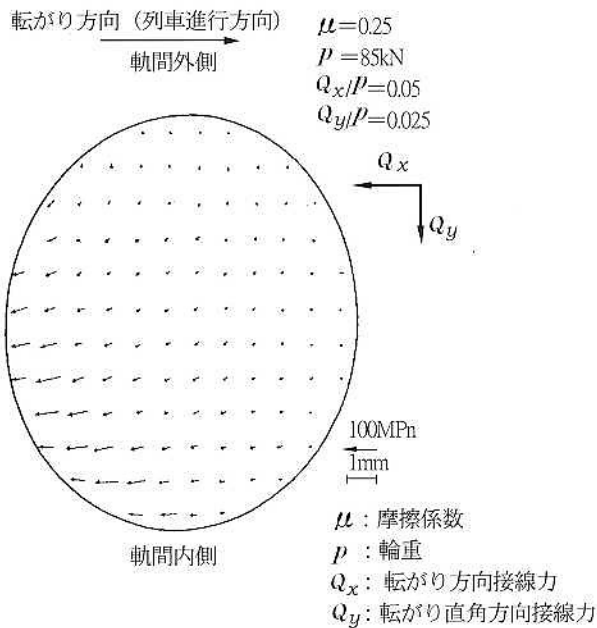


図4 新幹線の接線応力分布計算例

2.3 粘着理論

転がり接触理論は図2に示す粘着力特性のうち、主にクリープ領域のすべり率の範囲で、接線応力分布を求めるために発展してきた。一方、粘着係数を与えるすべり率より大きい巨視すべり領域のすべり率を含めて、車輪とレール間の主に転がり方向の伝達力特性を扱う分野を「粘着」と呼び、本稿ではその理論を「粘着理論」と呼ぶことにする。この理論は、乾燥状態で車輪／レール間に特に何も介在しない場合というより水あるいは油など（第3物質と呼ぶ）が介在する場合に、いわゆる粘着係数が下がるあるいはすべり率が大きくなるとともに車輪とレール間の伝達力が減少する現象（「ネガティブダンピング」と呼ぶ場合がある）を対象に発展してきた。

ジョンソンらは、潤滑状態の車輪／レール間の粘着力特性について、上記のネガティブダンピングを説明するパラメータを導入するなど、多くの優れた成果を挙げた^{6,7)}。

また、大山らは水潤滑状態の粘着力の挙動を大型転動試験装置を用いた系統的な実験により、粘着係数は走行速度が大きいほど、接触面の表面粗さが小さいほど低下することを明らかにし、EHL (Elasto-Hydrodynamic Lubrication: 弾性流体潤滑) 理論を車輪／レール間の水潤滑状態に適用し、高速域における水膜の形成が粘着係数に大きな影響を及ぼすことを明らかにした⁸⁾。陳らは、その研究をさらに進め、理論および実験の両面から走行速度と表面粗さ、さらに図5に示すような水温の影響を明らかにした⁹⁾。

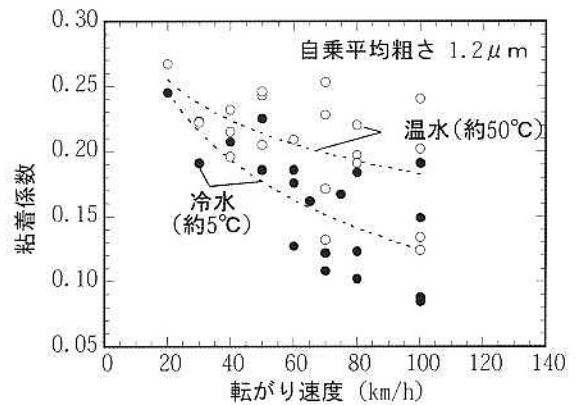


図5 水温の粘着係数に与える影響

2.4 塑性理論

平滑面を仮定したヘルツ理論により求めたJR在来線の接触条件で発生する車輪／レール間の最大接触圧力から、塑性変形の可能性を既に指摘した。しかし、仮に塑性変形が生じても、それが進まなければ直ちに破壊に至ることはなく、ジョンソンはこれを検討するために、シェイクダウン理論を車輪／レールの接触に適用した^{10,11)}。

シェイクダウン理論とは何かを簡単に説明する。材料は繰返し転がり荷重を受けている間、現在作用している荷重によって発生する応力と既に発生している残留応力の合応力に曝される。たとえ荷重の繰返しの初期の段階で塑性変形が発生したとしても、残留応力と荷重による応力の合応力が弾性限度を超えない範囲で一定になる場合があり、このことをシェイクダウンと呼ぶ。この理論は、荷重履歴には直接関係なく、定常な応力／歪の繰返し状態を記述できることと、弾塑性応力よりも比較的容易に求められる弾性応力の分布を用いて検討できる。

2.5 粗さ接触理論

これまでの弾性転がり接触理論とシェイクダウン理論の車輪／レール接触への適用に関しては、車輪もレールも平滑面を仮定しているが、転がり接触疲労あるいは摩耗等の検討にあたっては、車輪とレールの表面粗さ（微小突起）に着目する必要がある¹²⁾。そこで、2次元ではあるものの通常の平滑面同士と表面粗さを考慮した弾性理論で計算した接触圧力とフォン・ミーゼス応力（この値がせん断降伏応力を超えると降伏する：レール鋼の場合0.25GPa程度）で表現したレール表面下の応力状態を図6に示す。図より、粗さを考慮した場合の接触圧力は3.1GPa（3100MPa）に達し、平滑面同士のヘルツ最大接触圧力0.9GPa（900MPa）よりかなり大きな値であること、また、図のフォン・ミーゼス応力から、塑性変形を考慮しない弾性解析ではあるものの、表面および表面下近傍に大きなダメージを受ける可能性があることが理解できる¹³⁾。

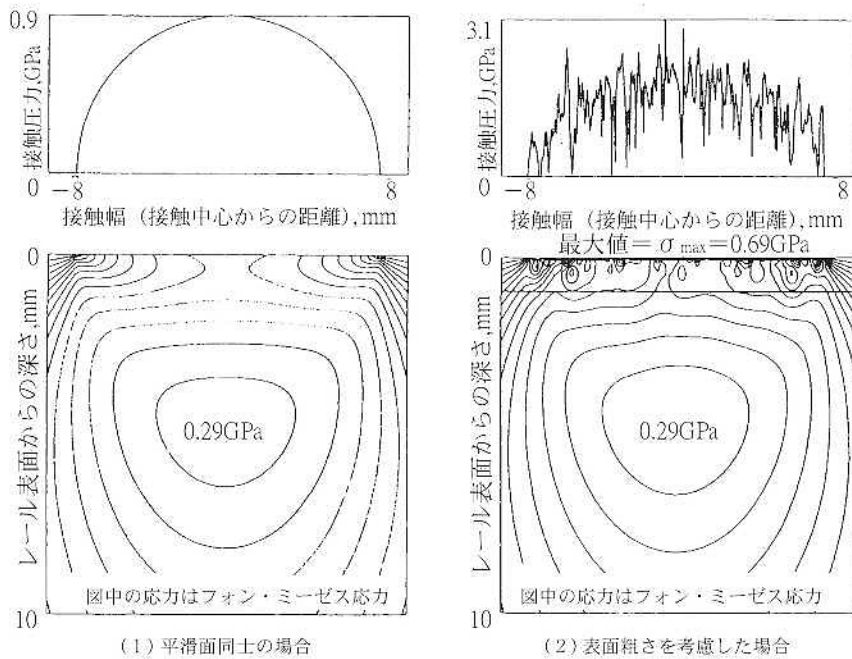


図6 車輪／レール接触における表面粗さの効果

次に、以上のような理論的な発展を踏まえ、現在直面している車輪とレールの具体的な課題について解説する。

3 摩耗と疲労

3.1 摩耗

初めに、図7および図8に示す車輪フランジの直立摩耗やレールゲージコーナの側摩耗、およびレール頭頂面の波状摩耗に関係する摩耗現象について簡単に説明する。摩耗とは、2つの物体の擦られた面から次々とそれぞれの物体のある部分がすり減ることを指す。摩耗のメカニズム（どのようにすり減るのか）に関しては、いくつかの形態に分類され整理されているが、実際の現象はその多様性と複雑さのために、様々な現象を呈し、まだ十分に理解できない

ことも多く残されている¹⁴⁾。

これまでに分類されている摩耗の形態において、車輪とレールの摩耗がどのようなものに当てはまるのかを紹介する。比摩耗量（摩耗した体積を摩擦面に加わった荷重とすべった距離で割った値）の面から、車輪とレールの摩耗は凝着摩耗¹⁵⁾に相当すると考えられる。もう少し詳しく述べると、直線あるいは曲線半径の大きい曲線でフランジ接触がなければ、レール頭頂面あるいは車輪踏面では転がり接触により、頭頂面の水平摩耗と呼ばれる軽い（マイルド）凝着摩耗、急曲線のレールゲージコーナと車輪フランジの接触面では激しいすべり接触により、レール側摩耗あるいはフランジ直立摩耗と呼ばれる厳しい（シビア）凝着摩耗が起きていると考えられる。

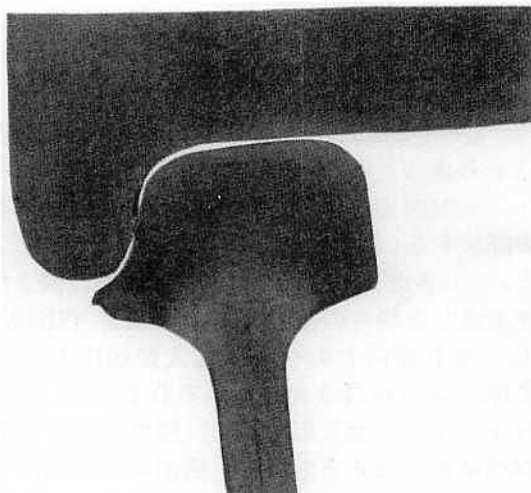


図7 車輪フランジ直立摩耗／レール側摩耗

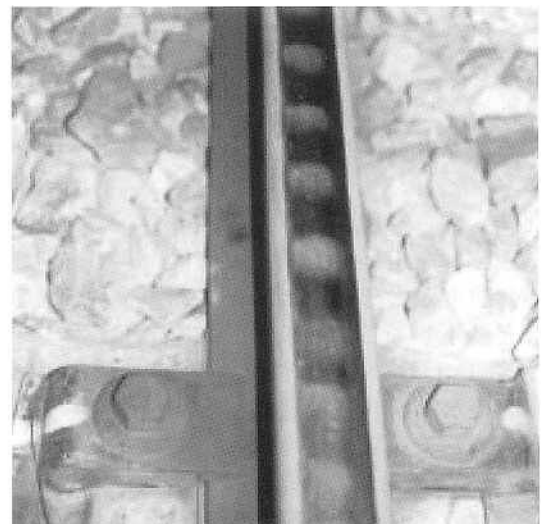


図8 急曲線内軌波状摩耗

3.2 疲労

次に、図9に示すシェリングと呼ばれる転がり接触疲労やロングレール（25mあるいは50mレールを200m以上に溶接したレールで、数kmに及ぶものもある）の溶接部の曲げ疲労に関する疲労現象について簡単に説明する。疲労とは、ある物体に変動荷重が作用し、巨視的降伏応力以下の応力の繰返しにより、き裂が発生するか破壊が生じることを指す。この疲労破壊に関しては、き裂の発生・成長（伝播）を解析することが重要であるが、き裂の長い場合は破壊力学が有効な手段の一つであるものの、微小き裂の場合には妥当な解析法はまだ確立されていない。

シェリングは、車輪との接触面の極表面層における疲労被害の蓄積（塑性変形あるいは結晶面のずれ等）により発生すると考えられるき裂と、滑走あるいは空転のような非常な転がりによる熱影響でマルテンサイトと呼ばれる少々脆い組織が形成され、その組織を起点とするき裂が観察されている。一方、溶接部の曲げ疲労は、レール底部の曲げ応力が最大になる位置が起点になる場合より、介在物を含めた溶接欠陥が起点になる場合が多い。特に、溶接部は車輪が走行する頭頂面に凹凸が形成され、高速走行時の動的荷重の増大が問題である。

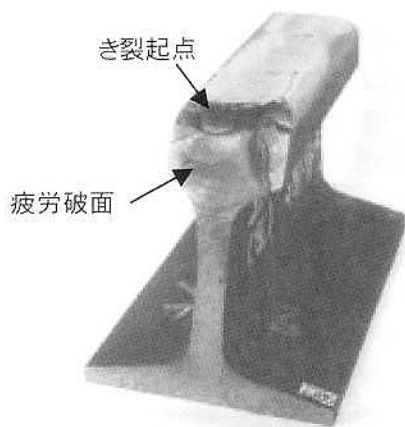


図9 シェリングによるレール破断面

3.3 潤滑と研削による摩耗と疲労の抑制

(1) 車輪を滑らかに転がす

車輪フランジの直立摩耗や曲線外側レール（以下、「外軌」と表記する）の側摩耗、さらには急曲線内側レール（以下、「内軌」と表記する）の波状摩耗を抑制するためには、図10に示す車両の曲線通過性能に応じて発生する横圧を可能な限り抑制し、車輪を滑らかに転がすことが重要である。

—レール側摩耗を抑制する

曲線外軌の側摩耗に関して、その抑制策としては熱処理により硬度を大きくしたレールの採用や、外軌のゲージコーナへの塗油が一般的である。この外軌ゲージコーナの潤滑の効果について、車輪とレール

の接触点の摩擦係数が乾燥時よりかなり小さくなるため、摩擦力が小さくなり摩耗もそれに依りて制御されることが期待できるが、最近の研究により、車両が曲線に沿って走行しようとする案内力が小さくなるとともに逆に横圧が大きくなり、摩擦係数が小さくなるほどに摩耗が抑制されないことがわかってきた¹⁶⁾。また、摩耗において接触点のすべりも重要な要素であり、すべりと直接関係するアタック角（図10参照）の影響も大きいことがわかってきた¹⁷⁾。

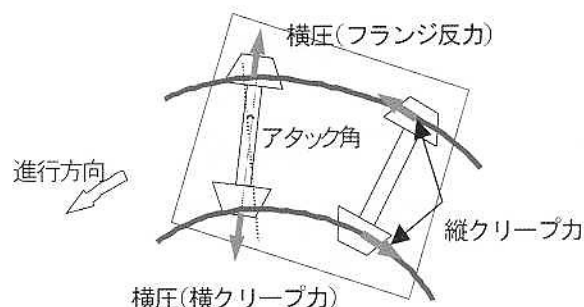


図10 曲線通過時の車輪からレールへの作用力

一方、急曲線内軌の波状摩耗の検討から、内軌頭頂面の潤滑により急曲線内軌の横圧を減少させると、同外軌の横圧も減少することから、結果的に外軌の側摩耗も抑制することが期待できることがわかってきた。このことは、営団地下鉄において、きしり音を抑制するために、内軌頭頂面に塗油を行ったところ、結果的に外軌側摩耗も抑制されたことが報告されている¹⁸⁾。

—波状摩耗を抑制する

地下鉄に多くみられる曲線半径が小さい急曲線において、波長50～150mmの波状摩耗が発生し、大きな問題になっている（図8参照）。我が国の波状摩耗としては、直線、急曲線外軌、そして急曲線内軌に発生するいくつかのタイプがあるが、特にJR発足以降、急曲線内軌に発生するタイプが多く報告されている¹⁹⁾。その急曲線内軌に発生する波状摩耗の原因（発生メカニズム）については、台車前軸の内軌側の車輪／レール間には操舵不足により発生するアタック角に起因する大きな横圧（レール頭頂面と車輪踏面のクリープ力であることから、「横クリープ力」と呼ばれる）と車輪がレール継目を通る際に輪重が変動し、スティック・スリップあるいはロール・スリップと呼ばれるレールの左右あるいは小返り振動と関係の強い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る¹⁹⁾。

このような発生メカニズムから、横圧（横クリープ力）を抑制し、レールの左右振動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る。ただし、内軌頭頂面を潤滑することは特に車輪の滑走に注意する必要がある。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車輪とレール間に作用する粘着力を小さく、制動状態ですべり率が大きい場合はその粘着力を大きくする潤滑手法が注目されている^{20),21)}。現在、総研で開発を進めている摩擦緩和材の試験結果を図11に示す。

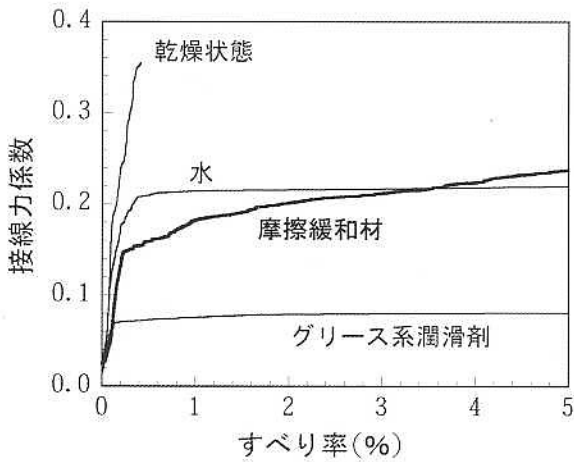
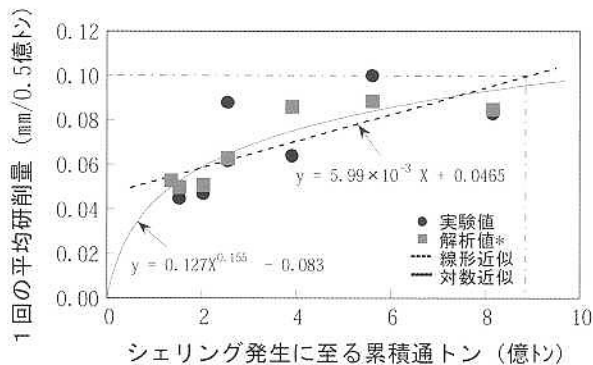


図11 摩擦緩和材の粘着力特性

(2) ダメージ層を削り取る—シェリングを抑制する
シェリングは、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り、同様の傷として古くは昭和30年代に山陽本線で「黒裂」と呼ばれ、大きな問題になった。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表面の疲労層を研削により除去しようとする試みが行われた。その後、いくつかの研削手法に関する追跡調査等からのそれまでに得られた知見を基に、室内試験機を試作し、いつ、どの程度研削するのが最も効果的であるのかが実験的に求められた。図12に、実験的に得られた予防研削の効果を示す。ここでは、実施した試験のうち荷重条件と研削周期を通過トン数（実験における荷重の繰り返し数に軸重17トンに乗じた値）にして5000万トン（繰り返し数 3×10^6 回に相当）と一定とした場合において、1回の削正量とシェリングが発生するまでの累積通過トン数の関係を示す^{22),23)}。この図に



* ; 実験値の累積通過トン数ごとの分布を仮定し、統計解析によりその分布の5.0%推定値を求めた

図12 レール予防研削によるシェリング抑制効果

において、例えば研削周期を通過トン5000万トンとした場合、約0.1mmの研削深さで平均的（破壊確率50%）には累積通過トンで8億トンを超えるまでレールシェリングの発生を抑制できることを示す。なお、これらの実験結果は図6に示す車輪/レールの接触面の表面粗さを考慮した応力解析により、極表面は応力が大きく塑性変形すること、また結晶学的なアプローチからも、特定のすべり面の方向が揃う（塑性変形に対応する）ことが明らかにされるなど、応力解析と同様に極表面のダメージが大きく、その部分を研削することの妥当性が指摘された。この予防研削に関しては、東海道新幹線の調査区間において、平成7年度からレール研削車2編成により、1年間（平均通過トン4000万トン）に全線（軌道延長約1000km）を約0.08mm研削する体制が整ってから、レールシェリングが急激に減少していることが報告され、予防研削が効果的であることが検証されている²⁴⁾。

(3) 車輪走行面を平滑にする—溶接部疲労を抑制する
シェリングの予防研削は、転がり接触による疲労層を直接除去するため、疲労を抑制する効果が直接的に反映しやすいが、レール溶接部の研削は、溶接部に生じるレール頭頂面の凹凸を平滑にして走行車両の輪重変動を抑制することにより、レール溶接部が受ける走行車輪からの疲労ダメージを抑制しようというものである。走行車両の輪重変動に関しては、図13に示す車両/軌道動的応答解析モデルにより、かなり良い精度で予測が可能である。

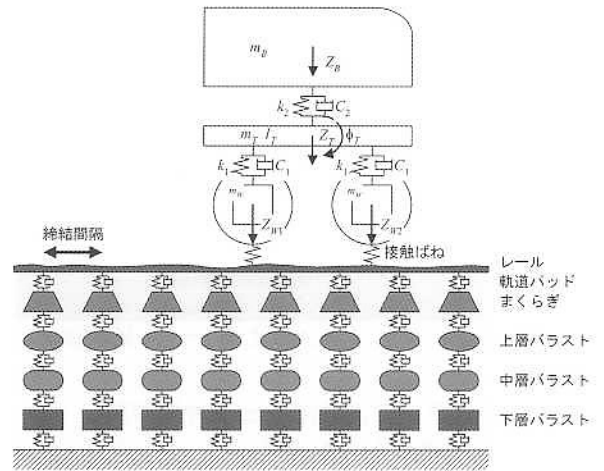


図13 車両/軌道動的応答モデル

ここでは、その溶接部の凹凸を平滑化し疲労寿命を延伸するレール研削効果を検討するために、道床バラスト軌道を新幹線車両が270km/hで走行した場合の60kgレールの溶接部の疲労寿命を算定した結果を図14に示す。図より、研削周期を一定とした場合、研削量が大きい方が疲労寿命（残存寿命がなくなる時点）をより延伸できることが理解できる²⁵⁾。なお、疲労寿命の算定において、車両通過による溶接部の凹凸進みは考慮されている。

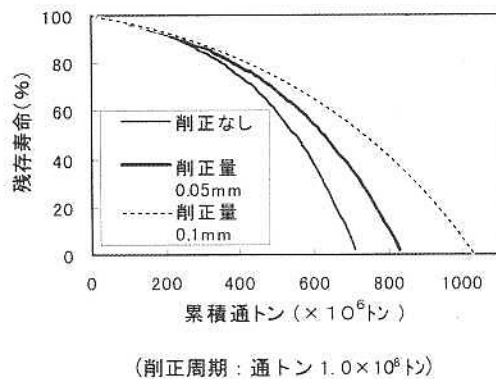


図 14 溶接部削正量の曲げ疲労寿命への影響

4 滑走・空転

図2の粘着力特性に関して、巨視すべり領域の現象を、駆動の場合を車輪の空転、制動の場合を車輪の滑走と呼ぶ。鉄道においては、古くから、この空転、滑走によって生じるレールの空転傷や車輪踏面の一部が偏平になるフラット等を防ぎ、またフラット等により生じる過大な衝撃荷重による騒音・振動ならびに材料劣化を抑制するために、空転、滑走を可能な限り防ぐとともに、より大きな駆動力あるいは制動力を得るための研究が行われてきた。特に、粘着係数が低下する降雨時の水潤滑状態、落ち葉あるいは油等による接触表面が汚染された状態における粘着現象の解明は、最も重要な課題の一つである。

鉄道における車輪／レール間の粘着係数を材料的な手段によって増大させる手法として、古くは砂まきがあるが、大山、陳らの粘着係数への表面粗さおよび水温の影響に関する理論的な検討を踏まえ、表面粗さに着目した増粘着研摩子、さらに大野によりセラミックス（アルミナ）粒子を用いた増粘着法などが提案されている²⁶⁾。

5 今後の取り組み

以上、車輪／レールの接触問題に関して、これまでの理論の発展と実際に取り組んでいる課題を紹介した。今後は、現時点までの取り組みをさらに発展させ、より効果的な対策を確立することが重要である。以下に、今後の取り組みをまとめる。

(1)材料の摩耗と疲労に関しては、車輪とレール間の接触環境（接触応力、摩擦係数等）を十分に理解し、潤滑と摩耗あるいは研削を組み合わせて、疲労損傷を抑制し摩耗量とのバランスの下に、総合的にレールの使用期間を延伸する手法を検討する。また、レール頭頂面の潤滑については、滑走・空転を避けるために、すべり率の増大に応じて伝達する接線力もある程度まで増大する潤滑材の性能をさらに高める開発を進める。

(2)特に湿潤時の車輪とレール間の粘着現象の解明のために、車輪とレールの接触面の表面粗さの突起部同士の固体接触（真実接触）面積を精度良く測定

し、表面粗さとその接触部の境界摩擦係数の粘着力への役割を明らかにする。

6 おわりに

本稿では、車輪／レールの接触問題に関して、これまでの理論の発展、現在の課題と実務そして今後の取り組みについて紹介した。車輪とレールに関わる多くの問題は、摩擦・摩耗および疲労という極めて実務的で、理論的にも十分に解明されていない分野を含んでいる。したがって、現象解明としては飛躍的に進むことはなかったが、着実に進んでおり、今後も車輪とレールの接触に関わるメンテナンスコストの削減は鉄道運営にとって極めて重要な課題であるため、大いに発展が期待されている。本稿が車輪／レールの接触問題に関する理解に少しでもお役に立てれば幸いである。

参考文献

- 1) H. Hertz : J. reine und angewandte Mathematik, 92 (1882) 156
- 2) R. S. Sayles : Tribology International 29-8 (1996) 639
- 3) 野木 高, 加藤孝久 : トライボロジスト, 42-2 (1997) 158
- 4) F. W. Cater : Proc. Royal Society, A112 (1926) 151
- 5) J.J. Kalker : Three-Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact, KLUWER ACADEMIC PUBLISHER (1990)
- 6) K.L Johnson and R.Cameron : Proc. Inst. Mech. Eng., 182-14 (1967) 307.
- 7) K.L. Johnson and J.L. Tevaarwerk : Proc. Roy. Society, A356, 1685 (1977) 215
- 8) 大山忠夫, 他 : トライボロジスト, 49-4 (2004) 56
- 9) H. Chen, et.al. : Wear, 253 (2002) 75
- 10) K. L. Johnson : Contact Mechanics Cambridge University Press (1985)
- 11) K.L. Johnson : Eur. J. Mech., A/Solids 11 (Special issue) (1992) 155
- 12) A. Kapoor, et. al. : Wear, 253 (2002)257
- 13) 石田誠 : トライボロジスト, 45-7 (2003) 9
- 14) 木村好次, 岡部平八郎 : トライボロジー概論, 養賢堂, 1982
- 15) 笹田直 : 凝着と摩耗, 潤滑, 24-11 (1979) 700
- 16) 青木宣頼, 他 : 鉄道力学論文集, Vol.7 (2003) 55
- 17) 石田誠, 他 : 鉄道総研報告, 17-2 (2003) 47
- 18) 桜庭隆 : 新線路, 50-5 (1996) 16
- 19) 石田誠 : トライボロジスト, 48-1 (2003) 23
- 20) D.T. Eadie, et.al. : Wear, 253 (2002) 185
- 21) 伴巧, 他 : 鉄道総研報告, 15-12 (2001) 17
- 22) 石田 誠, 阿部則次 : 鉄道総研報告, 9-12 (1995) 19
- 23) M. Ishida, et.al. : Quart. Report of RTRI, 39-3 (1998) 136
- 24) 多田嘉典 : 新線路53-8 (1999) 4
- 25) 石田誠, 他 : 鉄道総研報告, 12-3 (1998) 47
- 26) 大野薫, 伴巧 : 電気車の科学, 47-3 (1994) 22