

レールの長寿命化の研究開発

JR東日本研究開発センター テクニカルセンター 線路システムG
小野寺 孝行



レールは、列車荷重を直接支える部材であり、安全・安定輸送のためには、定期的にレールを交換する必要があります。このため、レール交換にかかる費用は、修繕費の中で最も大きな経費を占めています。そこで、レール交換の周期を延伸するために様々な研究開発に取り組んでいます。今年度までの研究により、レール溶接部の疲労寿命延伸とレール表面から発生する傷（シェリング）の抑制のためのレール削正手法が、実用化が可能なレベルとなりました。研究結果を受けて、2005年度から首都圏においてレール削正作業が始まる予定です。本稿ではその内容を報告します。

1 はじめに

レールは、ずっと使われ続けているように見えますが、列車が走行すると、車輪から様々なストレスを受けて、ついには、損傷したり摩耗したりしてレールとしての機能を失います。レールが敷設されてから、機能を失うまでの期間を「レールの寿命」と言います。レールは、列車荷重を直接支える部材であり、安全・安定輸送のためには、レールが寿命を迎える前に新しいレールに交換しておく必要があります。このため、整備にかかる費用は、関連する費用を含めると、1年間で約135億円となり、修繕費の中で最も大きな経費を占めています。仮に、レールに何らかの対策を施し、レールの寿命を延伸することができれば、大きなコストダウンとなります。それぞれのストレス毎に、レールが寿命を迎えるまでのメカニズムを解明し、効果的な対策を実施することができれば、レールの寿命を延伸することが出来ます。本稿では、レールの寿命の種類と、レール寿命の延伸に関する研究開発の状況について報告します。

2 レールの寿命

レールは鉄の塊であり、とても丈夫にできています。鉄の塊なので、月日を重ねると錆だらけになり表面が凸凹してきますが、設置環境が極端に悪い場所（漏水などにより一年中濡れていたり、海風により塩分が付着する場所等）を除いては、とても長持ちします。100年以上も前に製造されたレールが、現在もホームの上屋の柱として使用されていることや、ローカル線には、生産が中止されて40年以上経過している50PSレールや、1960年代に東海道新幹線に敷設され、1970年代の東海道新幹線の若返り工事（50Tから60kgレール化）により撤去され、中古レールとして敷設された50Tレールが多数存在します。

一方、レールは「金属」であることから、「金属疲労」による破壊が起こります。「金属疲労」とは、一回の力ではびくともしないような小さな力であっても、同じ力を多数回繰返して作用させると、ついには破壊することです。金属疲労は、運輸業界では

1985年のジャンボ機墜落、最近では、トレーラーのタイヤ本体と車軸を連結する「ハブ」という部品の折損事故でクローズアップされています。

列車が走行すると、レールには、様々な負荷が加わります。負荷には、圧縮、引張り、ねじれ、曲げ、せん断、そして、それらが複合したものも考えられます。また、負荷がかかると、弾性変形や塑性変形が起きます。ここでは、様々な負荷や変形をまとめて、「ストレス」と呼びます。余談ですが、「仕事のストレスが溜まる」、や「一杯やってストレス解消!」など医療・健康面で日常的に使われている「ストレス」の語源は、物理用語であると様々な書籍で紹介されています。よって、ここで呼ぶ「ストレス」とは、まさに語源に近い適用例であると言えます。

レールの寿命に影響するストレスを受ける箇所は、図1に示すように、①レール溶接部、②車輪とレールが接触する面、③曲線部の外軌レール、④曲線部の内軌レールの4箇所です。



図1：レールがストレスを受ける部分

それぞれの箇所のストレスは、短期間では、ほとんど負荷を感じない程度の小さなものですが、長期間にわたり繰返し作用すると、疲労が蓄積し様々な影響が現れます。以下に、それぞれの箇所におけるストレスの内容と、長時間にわたりストレスが作用した場合に現れる現象について説明します。

2.1 レール溶接部

レール溶接部の周辺には、溶接時の熱影響層あるいは、レ

ールと溶接金属の硬さの差があることから、車輪が溶接部を繰返し通過すると、車輪と接する面に凹凸が発生します。図2は、標準的な溶接部の外観です。凹凸が発生すると言っても、凹凸量は0.1ミリ単位であり、目視ではほとんど見分けがつきません。しかし、車輪がこの凹凸を通過すると、「コトン、コトン」と音がするので凹凸が生じていることがわかります。



図2：レール溶接部の外観（横から）

図3は、凹凸が進行した溶接部を上から見た写真です。レールと車輪が接している面を良く見ると幅が少し広がっている箇所が2箇所あります。この箇所が凹んでいる箇所です。1000分の1mm（いわゆる1ミクロン）の凹凸まで測定可能な器具を使用して詳細に測定した凹凸形状を図4に示します。一見すると大した影響がないように感じますが、図4に示す程度の凹凸が生じていると、車輪通過した際にレールに作用する力は、凹凸がない箇所よりも3～4割大きな力が発生します。

この力により生じる応力は、レールの許容応力に比べると非常に小さな応力なので、短期的には全く問題ありません。しかしながら、車輪が通過する度に、ごく僅かながら疲労が蓄積していきます。長期にわたり疲労が蓄積すると、ついには金属疲労により折損します。1車輪が通過した際に蓄積する疲労は、作用する応力に対しての対数式となるので、凹凸により大きな力が作用するレール溶接部が、金属疲労によるレールの寿命を決める部分になります。別の見方をすれば、何らかの方法によりレール溶接部の凹凸を少なくすることができれば、レール溶接部の疲労寿命を延伸することが可能になります。



図3：レール溶接部の外観（上から）

なお、現在のレール溶接部の疲労寿命によるレール交換基準は、在来線の60kgレールの場合で、標準的な車両（総重量40t）で計算すると、約2000万両になります。列車本数が非常に多い山手線では、約20年です。

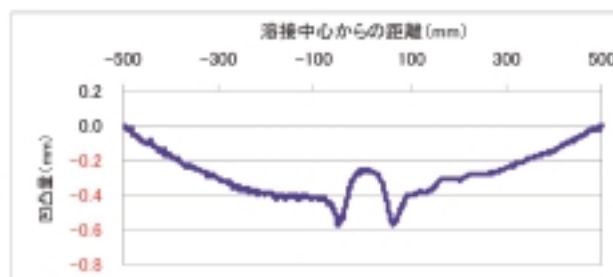


図4：レール溶接部の凹凸状態

2.2 車輪とレールが接触する面

車輪とレールが接触する面では、車輪が転がりながらレールに接触するストレスが加わります。転がり接触によるストレスは、レールの表面からごく浅い部分に大きく作用します。この力は、局所的に見ると非常に大きなものであり、その部分の金属の結晶組織を変形させます。この力は、繰返し、同じ向きに作用するので、レールの結晶組織は、強制的に一定の向きに揃ってしまいます。結晶組織が一定の向きに揃っていると、何らかのきっかけにより微小なき裂が発生します。微小なき裂が発生すると、そのき裂を起点に、き裂が進展していきます。き裂は、列車荷重により発生する応力やレール内部の残留応力、あるいは、温度応力等が複雑に作用して進展していきます。このため、一見すると同じような条件の場所であっても、き裂が発生するレールと発生しないレールがあります。このき裂の進展メカニズムは、現在の技術ではまだ解明されていませんが、大まかなき裂の進展は次のようになっています。

大部分のき裂は、レールの表面から数ミリの深さでレール表面に沿って水平に進展します。水平に進展したき裂を「水平裂」と呼びます。図5は水平裂が、ある程度進んだレールの外観です。レール頭頂面に丸く黒ずんだ部位があり、その周囲を囲むように光沢（照り面）のある部位ができます。レール長手方向

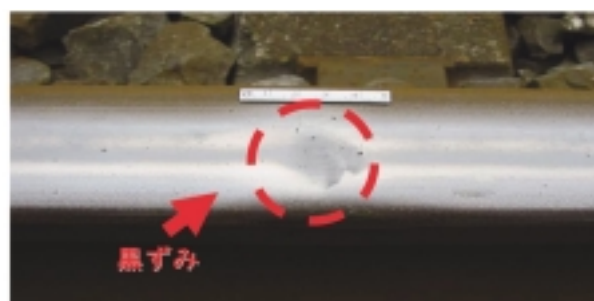


図5：傷の外観

でみると照り面幅が一部だけ広がっています。レール頭頂面が黒ずむのは、水平裂によってレールの表面が凹み、車輪と接触していないためです。黒ずんで落ち込んでいるので、見た目が悪いですが、水平裂は、レールの強度にほとんど影響を及ぼしません。

ところが、時間の経過とともに、水平裂が進んでいくと、何らかの要因で、水平裂のある部分からレール表面に水平でなくレールの内部へ向かうき裂が枝分かれすることがあります。図6は、レール内部に広がったき裂の写真です。このき裂を「横裂」と言います。横裂が進展すると、荷重を支える断面積が減少することから、レールの強度に直接影響します。レールの強度が著しく低下すると、レールが折損する恐れがあります。なお、き裂の面が貝殻模様であることから、このようなき裂を「シェリング」と呼んでいます。



図6：レール内部へ進展したき裂

シェリングは、目視による外観検査で発見できることや、レール探傷車等で水平裂の大きさを測定することができるので、継続して監視できることから、レール折損を引き起こすような状態まで放置されることはありません。

しかしながら、シェリングの進展を止めたり抑制する手法は、き裂の進展のメカニズムが解明されていない現状では、開発の目処が立ちません。よって、シェリングが発生した場合には、横裂が進展する前に、レール交換を実施することになります。

2.3 曲線部の外軌レール

曲線の外軌では、車輪は、レールの側頭部にフランジを接触させた状態で走行しています。これは、曲線を通過する際の遠心力や台車が曲線に誘導される際に発生する反力が作用するからです。このために、図7に示すように、頭頂面のレールの側頭部では、レールと車輪のフランジ擦れ合いながら接触（滑り接触）するので、レールとフランジは摩耗します。この結果、レールの断面が急激に減少してしまい、寿命を迎えます。摩耗による寿命は、カーブがきつく列車が多く走行する場所では、わずか1～2年となることもあります。図8は摩耗の進んだレールの

写真です。

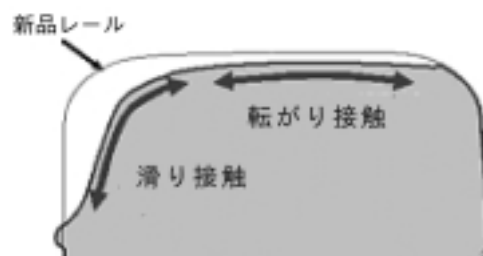


図7：外軌レールの接触状態



図8：摩耗が進行したレール

また、滑り接触によるストレスが、レールを摩耗させるほど大きくない場合には、このストレスの影響により、き裂が発生し進展します。このき裂を「きしみ割れ」と呼びます。きしみ割れは、レールの表面に留まることから、レールの強度にほとんど影響はしませんが、転動音が大きくなることや、前述したシェリングが競合して発生してしまうとシェリングの発見が遅れる場合があります。図9にきしみ割れの外観を示します。

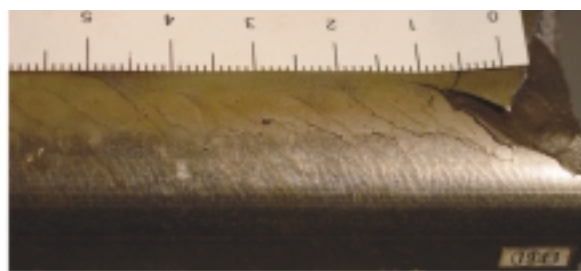


図9：きしみ割れの外観

2.4 曲線部の内軌レール

曲線部の内軌レールでは、図10に示すような、周期的な凹凸が発生する場合があります。これを「波状摩耗」と呼びます。波状摩耗が発生するメカニズムについては、様々な要因が競合することや、1つの車輪が通過した際に生じる現象が小さいために追跡調査も難しく、いまだに解明されていません。波状摩耗が進行すると騒音が大きくなることなどから、レール交換を行います。



図10：波状摩耗の発生状況

3 研究内容

テクニカルセンターでは、前述した4項目について、それぞれ技術開発を進めています。特に曲線部のレールの寿命延伸は、車輪とレールのバランスが重要であることから、車両関係の研究グループと合同で研究を進めています。

ここでは、レール溶接部の疲労寿命延伸とシェリング予防に関する研究内容を紹介します。

3.1 レール溶接部の疲労寿命

レール溶接部での疲労寿命は、レール溶接部に生じるストレスを少なくすることにより、延伸することが可能です。(財)鉄道総合技術研究所(以下、「鉄道総研」)でのこれまでの研究により、様々な条件におけるレール溶接部の疲労寿命を推定することが可能となり、新品レールの溶接部の曲げ疲労強度により疲労寿命を推定したところ、後述するレール削正を実施することによりレール溶接部の凹凸を滑らかにすれば、疲労寿命を延伸することが可能となりました。

しかしながら、曲げ疲労強度は、レール表面の微小な凹凸状態により影響を受けることから、現場に敷設され月日を重ねたレールと新品レールでは、溶接部の曲げ疲労強度が異なることが想定されました。また、疲労寿命の推定に使用したレール溶接部の凹凸量のデータもサンプル数が少なくデータの信頼性を上げるには、更なる調査が必要でした。

そこで、現場に敷設された状態で、30年程度経過したレールの疲労強度の算出を鉄道総研に指定課題として依頼するとともに、レール溶接部の凹凸状態の実態を詳細に調査しました。

敷設レールの疲労限度は、当初の想定どおり、新品レールの溶接部よりも疲労強度は低下していました。また、レールの凹凸状態についてもこれまでの想定と若干異なる部分があることが判明しました。

敷設レールの疲労限度を使用して、今回のレール溶接部の凹凸調査結果により疲労寿命を計算したところ、一定の周期

で後述するレール削正を行なうことにより、現行の疲労寿命による交換基準を2億トン延伸できるとの結果が得られました。

3.2 シェリング予防

車輪とレールが接触する面の寿命を左右するシェリングの起点となる接触影響層は、レールの表面からごく浅い位置にあることから、後述するレール削正により、接触影響層を除去できる可能性があります。そのためには、接触影響層がレール表面からどれだけの深さまで、蓄積しているかを調査する必要があります。新幹線のレールでは、1990年代に鉄道総研の研究により定期的に接触影響層を除去することによるシェリング抑制効果が証明されていますが、在来線については調査が進んでいませんでした。

そこで、新品レールや累積通トンの異なるレールでの接触影響層の蓄積状況を調査するとともに、試験的にレール削正を行いレール削正直後からの接触影響層の蓄積状況についても調査を進めました。

接触影響層は、レールの内部に蓄積していることから、敷設状態では調査することはできませんので営業線から切り出して調査します。また、金属の結晶組織という非常にミクロなレベルで生じている現象であることから、目視では調査は出来ません。通常の顕微鏡でも観察は不可能です。そこで、鉄道総研と連携し、専門会社の試験設備を使用して調査を進めています。調査は、レールの表面から深さ方向にある一定の面を削り、この面にX線を照射し、X線が反射する度合を測定することにより行います。ストレスが蓄積すると結晶の向きが揃うことから、ある特定の角度から照射したX線の反射度合が大きくなる性質を利用しています。

これまでの研究により、在来線においても新幹線と同様にレール表面からごく浅い部分に接触影響層は存在し、レール削正により除去が可能であることが判明しました。

また、接触影響層は、ここを起点としてき裂が進展する前に除去する必要があります。そこで、き裂が進展するまでの期間を、当社内でのシェリングの発生状況を調査し推定したところ、鉄道総研での室内試験の結果と同様な結果が得られました。通トンが50百万程度の周期で接触影響層を除去すれば、シェリングを予防することができます。

3.5 効果的なレール削正手法の開発

前項の調査研究の進展により、レール削正車で、レール溶接部の凹凸やシェリングの起点となる接触影響層を除去することによりレール寿命の延伸が可能となることがわかりました。

ここで、「レール削正」という聞き慣れない言葉が出てきましたが、平たく言えば、レールの表面を研磨したり研削したりすることです。しかしながら、レール削正作業は、レール溶接部の凹凸やレール表面の接触影響層を削り取りますが、その時には、複雑な曲面を有するレールの頭頂面を効率よく、かつ車輪の接触状態を損なわないように削り取る必要があります。よって、削り取るだけでなくレール表面の形状を整える作業でもあることから、「研磨」や「研削」よりも「削正」の方が作業の内容を忠実に表現しています。

このため、レール削正を行うには、専用の機械や作業方法が必要になります。そこで、当社の新幹線でのレール削正でも導入され、国内外の鉄道にも広く導入されている欧州のSPENO社製のレール削正車（図11）と国内メーカーのレール削正車（図12）を使用したレール削正手法の開発を行なっています。



図11：SPENO社製レール削正車



図12：国内メーカーのレール削正車

今回、研究を進めているレール削正は、モータの駆動軸に直結した砥石を回転させることによりレールの表面を削ります。複雑な曲面を有するレールの表面を均一な厚さで削るには図13に示すようにレールにあてる砥石の角度を調整して削る必要があります。

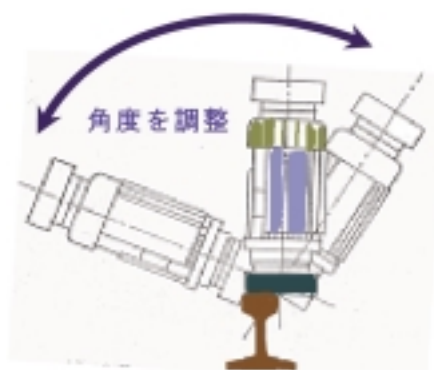


図13：レールと砥石の角度

わかり易く例えれば、ピーラー（皮むき器）でジャガイモの皮をとるにはジャガイモを少しずつ回転させるようなものです。もちろん、レールを回転するのは無理なので、砥石の角度を少しずつ変えながらレールを削ります。なお、実際の削正車は、図14に示すように複数の砥石を有しており、一回の作業で複数の角度を削正することができます。

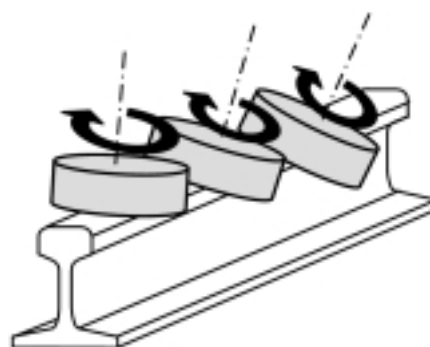


図14：レール削正車の砥石の配置

図15は、レール表面がどのように削正されていくかを現した写真です。1回目の削正では、複数の角度で砥石が接触しているものの当たっているもののレールの上面の4分の1程度しか削正されていません。2回目の削正は、1回目と異なる角度で砥石を当てたことから1回目とは異なる部分が削正されています。

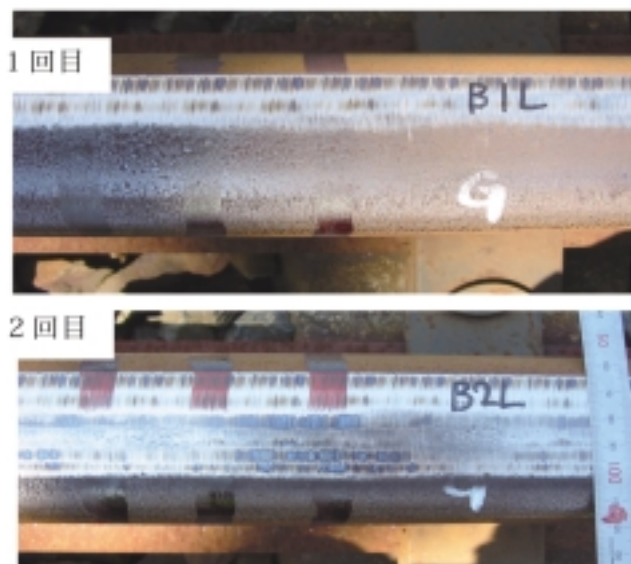


図15：レール削正の様子

よって、効率的にレール削正を行なうには、砥石の角度や削正する回数が重要になります。また、レール削正を行なう線区の重要度、作業条件（保守間合いの長短、機械の移動や回送やロス、作業周期等）と初期投資額（機械の購入費用等）などのコスト面からの検討も重要です。レール交換のコストダウン額よりもレール削正の経費が大きくなってしまえば、レール削正を行なう意味がなくなってしまいます。

これまでの現場削正試験の結果により、SPENO社製16頭式削正車を使用する場合には、最小の回数（4回）でシェリングの起点となる接触影響層の除去とレール溶接部の寿命延伸のための凹凸量の低減の両方の目的を達成できる砥石の角度の組み合わせを決定することができました。また、国産の6頭式レール削正車の場合には、機械の性能面から、シェリングの起点となる接触影響層の除去はコスト面で課題があるものの、レール溶接部付近のみを削正することにより、ローコストでレール溶接部の疲労寿命を延伸することが可能との結論を得ました。

なお、レール削正によるレールの寿命延伸は、世界各地で注目されていることから、海外特に欧州や米国では、様々な方式のレール削正車が開発されつつあります。

そこで、2004年8月に現地調査や、開発メーカーの技術者との意見交換（図16）を行いました。その結果、これらの新型のレール削正車は、試作車段階のスペック上は、飛躍的な効果が期待できるものの、長期的な使用を考えると、未知な部分が多いことがわかりました。今後も、開発の状況については、興味を持って注目しています。



図16：欧州メーカーの技術者との意見交換風景

4 今後の取り組み

今年度までの研究成果により、レール溶接部の寿命延伸とシェリングの抑制のためのレール削正手法は、実用化が可能なレベルとなったことから、2005年度から首都圏においてレール削正作業を着手する予定です。

引き続き、曲線部でのレールの寿命延伸の研究に重点を置いて、きしみ割れや波状摩耗の研究を進めていきます。