

## レールの信頼性向上を目的とした 研究開発について

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

小関 昌信／片岡 慶太



鉄道のレールは列車荷重を支持するとともに、自然環境の中で雨や温度変化等の厳しい条件にさらされています。レールにき裂など損傷が発生すると、冬季において温度下降に伴い引張応力が増大し、損傷が進行し破断に至ることがあり、夏季においては温度上昇に伴う軸圧縮力によりレールが座屈する恐れがあります。これらの設備故障を予防するために、保線技術センターではレールの検査や修繕を行っていますが、レールの信頼性を向上させるために、より確実な検査・管理方法やレールの品質向上などの研究開発が求められています。ここでは、現在行われている研究開発についてその概要を紹介します。

### 1. はじめに

鉄道のレールは走行する鉄道車両のガイドウェイとして案内する機能を有していますが、道路交通の道路と異なり、面的な広がり狭く、極めて局所的な接触点（1円硬貨程度の面積）で車両の荷重を支持する線状の走行路の特徴をもっており、冗長性に乏しく、非常に高い信頼性が求められる使命を背負った軌道部材と言えます。

レールは過酷な列車荷重の繰り返しにより、損傷、摩耗、疲労といった後天的な症状が進行し、使用に耐えられない状態に達すると、交換によりその使命を終えます。定期的な検査により、破断に至る前に予防保全されていますが、ごくまれに使用期間中に破断が発生し、列車走行できない状態に達して、安定輸送を脅かすことが、当社管内で年10件程度発生しています。レールにき裂が発生、進展し、破断して開口すると、レール中の信号電流が遮断されて閉そく信号機が停止現示となり、列車の運



図1 座屈したレール（再現試験）

転規制の手续がとられ、輸送の安定性が損なわれることとなります。過去の試験によるとレールの破断開口量が70mm程度までは列車脱線の危険性はありますが、管理基準上はより厳しい運転規制のルールを定め、安全性を確保しています。しかし、輸送安定性を脅かし、お客様にご迷惑をおかけすることとなります。

また、レールは極端な線状部材であるため、圧縮力により座屈しやすい宿命をもっており、真夏の温度上昇時にレールが座屈する恐れがあります（図1）。

特にロングレール（25mレールを溶接して200m以上に繋げたもの）ではレールの温度軸力と座屈強度を適正に管理する必要があり、その安全率は他の部材と比較して余裕が少ないという特徴があります。

以上のように、レールは適切な管理を前提とした厳しい環境で使用する軌道部材であり、当社では年間100億円以上のメンテナンスコストを必要としています。これは軌道のメンテナンスコストの1割強を占めるとともに、二酸化炭素に関わるライフサイクルアセスメント（LCA）上でも大きな地球環境負荷をかけ、線路保守部門の8割をレールが占めているという推定もあります。そこで、当社の軌道部門において、輸送安定性の更なる向上とメンテナンスコスト節減を目指して、レールの信頼性の向上、耐用期間の延伸を目的とした様々な研究開発を継続しているところであり、ここではその概要を紹介します。

## 2. レールに関わる背景

普通鉄道用レールは高炭素鋼に分類され炭素含有量は0.4-0.8%と高く、耐摩耗性、高強度を期待している反面、通常の軟鋼と比較してもろく、溶接性に劣ると言われています。数トンもの車輪荷重を1円硬貨程度の接触面積で支持し、その接触応力は1000MPaを超え、降伏応力以上となり局所的に塑性変形するなど荷重条件は過酷です。

形状面では、急曲線ではしかるべき曲率を設ける必要がありますが、変形しやすいと安全性や乗心地面で問題が生じるため、適度な断面積、重量が必要となります。しかし、過大になり過ぎると高価となり、メンテナンス上取り扱いが困難となります。そこで総合的に勘案したレール断面形状、断面積となっています。

レールは鋼であるため、線膨張係数が $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 程度あり、仮に1000mの長さのレールが自由伸縮すると、 $10^{\circ}\text{C}$ 上昇で10cm以上も伸びることになります。この伸びを拘束し動かないように継ぎ目を溶接してロングレール化すると乗心地やメンテナンスの面で有利となります。その反面、真夏のロングレールには60トン近くも軸圧縮力が蓄積することになります。

以上のように、普通鉄道用レールは厳しい環境の下で、実用的な形状、重量をもってぎりぎりのところで使用しています。他の軌道部材と比較して安全率の余裕が少なく、適切なメンテナンスを前提に安全、品質を確保していく必要があります。

## 3. レールの耐用期間の実態

レールの耐用期間を決定させる要因は複数あり、主なものとして、レール継ぎ目部（溶接部を含む）の繰り返し引張応力による「疲労」、車輪とのこすれ合いによる「摩耗」、後天的に発生する「損傷（ひび割れ）」、鉄が水、酸素や酸などの作用により酸化し錆が進展する「腐食」やレール中を流れている電流が大地に漏れることにより鉄が電子を失ってやせていく「電食」を理由にレール交換が行われます。

当社におけるレール交換数量の要因別比較によると、図2のようになっています。

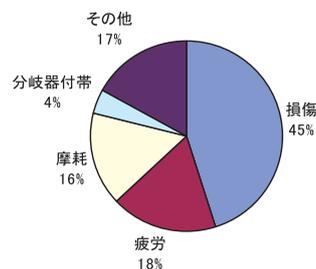


図2 レール交換の要因別比較

第一の交換理由の「損傷」については、かつてはレールが先天的に欠陥を持っていたことが原因となることがありましたが、最近はレール製造時の品質管理技術が向上したため、後天的な原因により損傷が発生、進展する場合はほとんどとなりました。日本ではこのうち、車輪からの転がり接触疲労損傷である「シェリング」が代表的です（図3）。

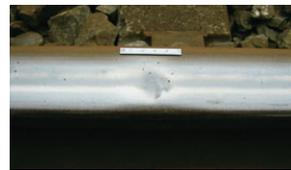


図3 レールシェリング

第二の交換理由の「疲労」は、「累積通過トン数」（以後、「通トン」と記す）というグロスの数値で表現され、レール種別、レール継ぎ目種別で疲労基準が定められています。国鉄末期に定められた基準によれば、50Nレールの普通継ぎ目では通トンで4億トン、溶接継ぎ目で6億トン、60kgレールでは、各々6、8億トンとなっており、例えば、山手線では20年程度となります。この通トン基準は継ぎ目部で衝撃荷重が作用したときのレール底部に発生する引張応力の繰り返し回数によるもので、レール鋼における金属疲労に関するS-N線図（応力振幅と荷重繰り返し回数との関係を示したグラフ）によって決定されます。

第三の交換理由の「摩耗」は車輪の踏面とフランジの遷移部であるゲージコーナーと呼ばれるレールの肩部の摩耗量と頭頂面の摩耗量による基準があり、前者は左右レール間隔を意味する軌間拡大による脱線を予防するため、後者はレール断面積の減少により、レール剛性の低下による応力拡大や変位拡大を予防するために規定されています。摩耗は特に曲線区間で卓越し、曲線半径の小さい急曲線区間では摩耗がレール耐用年数を決定する最大の要因となっています。また、分岐器内のトングレールや曲線部のレールは摩耗しやすく、これらのレールを交換する際に、新品レールと既敷設レールとのレール断

面形状の連続性を考慮して、段差ができないように、交換基準には達していない基本レール、リードレールや曲線に付帯するレールも同時に交換しますが、このような交換が第四の交換理由の「分岐器付帯」に含まれています。

#### 4. 最近の研究開発事例紹介

レールの耐用期間や現状について述べてきましたが、輸送安定性の更なる向上とメンテナンスコスト削減を目指して行われてきた研究開発事例をいくつか紹介します。

輸送安定性の向上については、レール損傷が進行してレールが破断し、列車が運転中止になってしまうことのないよう、確実に損傷を発見し、傷の種類や大きさに応じて適切に管理することが肝要です。それに加えて、図2にも示したように、レール交換要因の最も多くを占めているのが「損傷」であり、レール損傷の発生件数を抑える努力も必要です。

##### 4.1 レール損傷を見つける

レール損傷の探傷はレール探傷車（図4）により超音波を入射して検出しています。最近ではレール探傷車の探傷能力が向上し、検出安定性の向上、探傷領域の拡大、検出対象傷の拡大が図られてきました。しかし、現在においてもレール断面全てを探傷できるわけではありません。レール探傷における超音波はレール頭頂面から入射されますが、レールの断面形状上、レール底端部には超音波が達しないことから、レール底端部については探傷不能箇所となります。しかし、このような探傷不能箇所であるレール底端部に損傷が発生し、破断に至るといった事例が発生しています。



図4 レール探傷車

レール底端部に発生しやすいのは電食や腐食です（図5）。レール底端部はレールをまくらぎに固定するレール締結装置と接触していますが（碎石とも接触する場合があります）、トンネル内の漏水や、踏切内に溜まった水が原因となって、このような接触箇所を經由し電流が大地に漏れることにより、レールの鉄原子がイオン化し、やせていく

という現象が起こります。レールの全断面が露出している箇所では、徒歩巡視の際に目視により、電食・腐食の有無を確認することができますが、踏切内のように敷板等で覆われている箇所では、目視による確認が困難です。



図5 レール底端部での電食

このような探傷困難なレール底端部についても、「ガイド波」と呼ばれる低周波超音波を用いた探傷技術の研究開発を行っています。このガイド波は平板や配管のような断面形状が単純な長大構造物の高速非破壊評価を行う手段として近年注目を集めており、レールのように複雑な断面形状を持つ棒状材料にも適用可能かどうかを検証しています。

##### 4.2 レール損傷の進みを予測する

レール損傷の管理方法については、き裂が発生してから破断に至るまでの進展メカニズムは解明されておらず、従来からの経験則に基づく管理方法が基本となっています。しかし、損傷レール交換費用の削減、検査周期や判定基準等の見直しによる検査業務の適正化の観点からも、損傷の進展メカニズムの解明が必要となります。図2のレール交換要因のうち、最も大きな割合を占める損傷について、その内訳を示したものが図6です。このようにレール交換の多くがシェリングによるものとなっています。

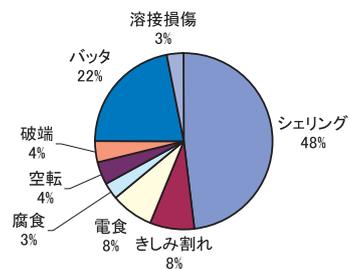


図6 交換要因における「損傷」の内訳

そのため、シェリングの進展予測を確実に行うことができれば、安全性の向上やレール管理の効率化につながります。シェリングについては図3に示した黒斑の下に水平裂が存在しています。この水平裂が時間の経過につれて、レールの内部へ向かうき裂に枝分かれすることがあります。このき裂を「横裂」と言います（図7）。横裂が進展するとレールの強度が低下し、破断に至る恐れがあります。

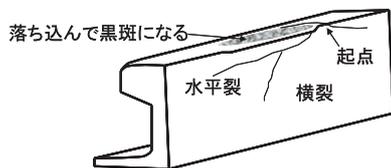


図7 シェリングの模式図

横裂の進展については実験室レベルではある程度予測が可能となってきました。しかし、実際の現場では様々な要因があることから、現場から交換された損傷レールのき裂進展試験を実施することにより、き裂進展解析の推定精度をさらに向上させることが必要です。

### 4.3 レール損傷の発生を予防する

レール交換要因の多くを占めるシェリングについては、発生件数を抑えるという努力も必要です。従来から、シェリング発生機構の解明に関する多くの研究が行われてきました。新幹線で使用されているレールについては、材料学的な見地からレール頭頂面下の金属組織を分析した結果、車輪の接触影響層が極めて浅いことから、接触影響の溜まっている層、つまりシェリングの核が生成される層を砥石により削る（以後、「削正」と記す）ことによって除去する措置が提言されていました。一方、在来線で使用されているレールの場合には、接触影響層が深いため、削正をしても予防は難しいと言われていました。

しかし、最近の研究により、レール頭頂面における車輪の接触影響層は、敷設状態が異なる場合においても、0.1mm程度の表層にあり、レール削正によりシェリングを予防できる可能性が示されています。また、在来線のシェリングは通トンにして5000万トン程度から発生し始めること、また実験的研究により5000万トン程度の周期で削正を実施することにより、シェリング抑制効果が期待できると推定されています。

上記の研究結果に基づき、2005年度から首都圏の通トン数の多い線区を対象に、シェリング抑制のためのレール削正を開始しています。削正については従来、主にレールの波状摩耗や溶接部の凹凸を削正し滑らかにするために投入していたレール削正車により実施しています。このレール削正車は、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（図8）。



図8 レール削正車によるレール削正の様子

レール表面の削正は、一度削正車が通過しただけで削正できるのではなく、砥石の角度を変え、複数回通過することにより正しい形状に仕上げる削正が可能となります。一回の削正車の通過のことを1パスといいます。限られた列車間合いの中で、いかに長い延長を効率的に削正できるかはこのパス数に左右されます。必要な削正量を確保した上で、いかにパス数を少なくして削正できるかが経済的な課題です。このパス数については削正車に装備されている砥石の数にもよりますが、試験削正を重ね、現在運用している基本的な16頭式（砥石が16個あるという意味）の削正車の場合、4パスで必要な削正量が得られることがわかりました。図9はレール削正前後の頭頂面の外観です。削正前に施したマーキングが4パス削正後に消えていることが確認できます。これによりレール頭頂面に砥石がまんべんなく当たっていることがわかります。現在は、削正面の仕上げを目的とした追加パスを組み合わせて削正を実施しています。シェリング抑制を目的としたレール削正は、開始してからまだ時間が経過していませんが、今後もシェリングの抑制が達成されたかを確認していく必要があります。



図9 レール削正前後の頭頂面

### 4.4 レールの材質を変える

シェリング抑制方法として、レール削正について説明しましたが、「レールの材質を変える」という観点からの研究も行われています。シェリングの発生を防止してレールの長寿命化を図るために、摩耗を適度に促進させて損傷起点となる接触影響層を自己除去するレールとして「ペイナイトレール」が開発されています。これは従来、レールの基本的な考え方とされていた「レールの高強度化」とは異なる考え方により開発されました。現在、このペイナイトレールを試験的に敷設して性能確認している最中です。

### 4.5 新しい損傷に挑む

前述してきたように、レールの管理方法を変える、あるいは材質を変えるなど、シェリングに対する研究は数多く行われています。図6に示した損傷の内訳のうち、シェリング、バツタに次いで多いもので、「きしみ割れ」が

あります。近年、緩曲線や直線と円曲線をつなげる緩和曲線区間の外側レールのゲージコーナー部（車輪が走行するレール頭部の角部）で、図10に示すようなきしみ割れからはく離に至る傷が首都圏エリアを中心に多く観察されるようになってきました。

きしみ割れは以前からレール管理の対象となっていました。しかし、はく離に至るような傷は、車両からレールに塗布している区間を除いてはほとんど観察されることはなく、きしみ割れのき裂長さの管理だけを行っていただければ十分でした。しかし、最近では曲線半径が比較的大きく摩耗進みの少ない曲線で、はく離を伴ったきしみ割れが観察されるようになり、レール破断につながるのではと懸念されます。

レール損傷の代表的なものはシェリングであり、シェリングに関する様々な研究は行われてきました。しかし、きしみ割れについては、これまで破断に至る事例が少ないため、シェリングほどは研究されていませんでした。そこで過去の研究報告を参考にしながら、きしみ割れの発生とはく離傷に至る現象を分析し、きしみ割れの対策についても研究を行っています。



図10 はく離を伴ったレールきしみ割れ

はく離が激しくなったきしみ割れの内部は、きしみ割れの下にできた水平裂がレール長手方向につながっている状態であり、その水平裂のつながり方によっては、レール底部へ向かって進むようなき裂が発生する可能性があることが確認されました（図11）。



図11 レール底部へ向かって進むき裂

この形態は前述したシェリングと同じ様相です。また、レールのゲージコーナー部に発生するきしみ割れの下に水平裂が発生すると、レール頭部の反対側（フィールドコーナー側）に進展し、き裂が貫通してしまう場合があることも確認されました。このような場合、レール頭部全体がはく離してしまう可能性も想定しなければなりません。すなわち、レールきしみ割れもきしみのクラックであればレール破断に至る確率は非常に小さいですが、はく離が生じてそのはく離から水平裂が進展した場合は、レール

頭部表層全体の脱落やシェリングと同じように横裂によるレール破断に至る可能性のあることがわかりました。

最近のきしみ割れから発生するはく離傷は、速度向上、車両構造の変化、車輪踏面形状の変更等が影響していると考えられるため、現在レールと車輪間の疲労や摩耗に関する現象を評価するために製作された転動試験装置を使用して現象を解明するために各種実験を行っています。今後は、車輪とレールの摩耗形状に着目したきしみ割れ発生の要因分析を検討すると共に、レールの材質を変更した試験を行うことにより、きしみ割れ対策に有効なレール材質を見出していく予定です。

#### 4.6 レールの疲れを抑制する

図2にレール交換の要因を示しました通り、2番目に多いのが「疲労」です。これは、レールの溶接部の底部に発生する引張応力による疲労限度から交換基準が定められているものです。この引張応力の大部分は、列車が走行した際に発生する曲げ応力によるものであり、通トン数が基準となっていることから、通トン交換といえます。レールの溶接部は、溶接時の熱影響による軟化層や溶接金属の硬度差があるために、車輪が繰り返し通過すると、レール頭頂面に凹凸が発生し、進展します。レールの頭頂面に凹凸があると、より大きな応力が発生します。しかし、これまでの研究により、レール溶接部の凹凸量を適切に維持管理することにより、疲労寿命の延伸が可能であるということがわかりました。

具体的には、前述の16頭式レール削正車を使用した場合、敷設後の平均的な削正周期が5000万トンとなるように、4パス削正することにより、現行の通トン交換基準の2倍以上に延伸が可能であるとの結果が得られています。しかし、当面は2億トンだけ交換周期を延伸し、現場で検証しつつ本格的な周期を見直していきたいと考えています。また、既にある程度の通トンを受けている既設レールの場合、特に大きな凹凸がある場合を除き、削正開始時の累積通トンが50Nレールは5億トン以下、60kgレールは7億トン以下であれば、2億トンの延伸が可能であることがわかりました。疲労寿命の延伸を目的としたレール削正を実施することにより、レールの信頼性の向上だけでなく、通トンレール交換の削減、つまりコストダウンも可能となります。

#### 4.7 レールを摩耗しにくくする

列車が急曲線を走行する際にレールに対して横圧が発生しますが、これは乗り上がり脱線の主な要因の一つで

あるばかりでなく、レールの側摩耗や曲線内側レール頭頂面に発生する波状摩耗の主な原因ともなっています。摩耗については、図2にも示しました通り、レール交換の第三の交換要因になっています。レール摩耗の対策としては、摩耗抑制効果のある材質のレールを使用する、あるいは潤滑剤を使用する等の方法が研究されてきました。

以前より、耐摩耗性レールとして頭部全断面熱処理レール（HHレール）がありますが、近年はHEレール（過共析レール）という耐摩耗性、耐表面損傷性をより向上させた熱処理レールが開発商品化されています。

摩耗によるレール交換については、横圧による外軌レールの側摩耗が大きいことから、交換基準に基づいてレール交換を行うというのが主です（図12）。このため、急曲線部の外軌レールについては、HHレールを使用する、あるいはレール塗油器を設置する等の対策が行われてきました。



図12 摩耗交換したレール

潤滑剤による摩耗量の評価とメカニズムの検討が行われており、外軌側のゲージコーナー部を潤滑した場合には、摩擦係数が低下するため、摩擦力が減少して摩耗が抑えられますが、内外軌ともに横圧が増加することが確認されています。一方で内軌側を潤滑した場合、内外軌の横圧が低減するので、内軌頭頂面の課題である波状摩耗の抑制と、外軌側の車輪とレールの課題である車輪フランジ摩耗およびレール側摩耗の抑制が期待できることがわかっています。

また、潤滑剤の開発についても研究が行われています。既存の潤滑剤を内軌頭頂面に塗布した場合、空転・滑走を引き起こす可能性を高めるという課題があります。一般に、潤滑有効成分が鉱油の場合、摩擦係数は極端に低くなります。一方で、固体潤滑剤系の潤滑剤は適切な摩擦係数を示すことが確認されており、新しい潤滑剤（摩擦緩和剤）の材料として研究開発されています。

#### 4.8 レールの座屈を防ぐ

ここまで、レールに発生する傷や摩耗についてどのような対策が行われているかについて説明してきましたが、レールが材料的に良好な状態でも、事故が発生してしまう場合があります。このような事故の例として座屈があります。夏場のレール温度上昇に伴い、レール軸圧縮力が上昇して

いくと、座屈破壊を起こす危険性が増します。レールが座屈してしまうと、大きな軌道変位が発生してしまいます。この場合、レールの破断と異なり、信号機が停止現示とはならないため、列車がそのまま軌道変位の大きな箇所を通過し、脱線してしまう恐れがあります。このような事故を防止するためには、レールの軸力を適切に管理しなければなりません。現状の軸力の管理方法は、一定区間毎に設置された杭間におけるレールの伸縮量を、あらかじめレールに付けておいた目印を頼りに人間の手で測定するという昔ながらの方法で行っているのが実態です。

軌道変位検査が、手検測から高速軌道検測車による検測に進歩している状況と比較すると、ロングレール検査の場合は検査方法が進歩していない現状です。また、この方法の場合、測定誤差が含まれる余地があり、局所的な軸力の大きさを把握することができません。

ロングレールの軸力測定方法に関する研究は過去にも数多く行われていますが、今のところ実用的な方法は提案されていません。軸力測定の方法としては、レールにひずみゲージを直接貼り付ける方法、応力が発生すると磁気的性質が変化する点に着目した方法、応力に応じて超音波の伝播速度が変化することに着目した方法等が過去にありました。しかし、無応力状態での初期値の把握が必要であったり、レールの残留応力の影響を受ける等の課題があります。

しかし、最近の技術革新や情報処理技術の進歩は著しく、過去に中断してしまった研究の中にも現在再挑戦すれば、実現できるようなものがあるかもしれません。現在も、前述したガイド波を活用し、軸力に応じてレール中を伝播するガイド波速度が変化する性質を利用し、軸力を推定する方法に取り組んでいます。同時に過去の研究についても再検討を継続して行うことも重要と考えています。

## 5. 今後の研究開発について

ここまで、鉄道用レールをとりまく過酷な条件、それらを克服するためにどのような努力がなされているかについて説明してきました。鉄道用レールの材質については、「傷が入りにくい」、「傷が進みにくい」、「錆びない」、「伸びない」というのが理想です。しかし、価格、供給量の他、レールに求められる性能を満足できるかという面で、ハードルは非常に高いですが、いずれもレールを保守管理する技術者の夢であり、今後も継続的に挑戦を続ける予定です。