

# レールの疲労

石田 誠

軌道技術研究部(部長)



いしだ まこと

## はじめに

レールは、車両を支え安全かつ滑らかに案内する重要な役割を担っています。したがって、従来から鉄道を構成する最も基本となる材料の一つであると言えます。そもそも英語では鉄道を Railway (英国)あるいは Railroad (米国)と呼び、レールは鉄道そのものを表しています。また、金属疲労の問題は、近代の産業革命における鉄道の誕生とともに生じたと考えられています。これに関しては、金属疲労を代表するS-N曲線(「ヴェーラーカーブ」とも呼ばれる)で有名なヴェーラーによる車軸折損の研究が金属疲労研究の嚆矢であると言われていています。また、航空機事故等のニュースにおいても、その原因である金属疲労の例として、レールの疲労が紹介されるなど、レールの疲労が代表的な金属疲労の一つであることは広く知られています。

一方、レールはその役割から極めて重要な材料であることから、十分な保安度が求められるとともに、その保守管理に要する経費を考えると、如何に効率よく経済的に保守管理するか、平たく言うと如何に手をかけずに長持ちさせるかが重要な課題です。そのレール保守管理の対象となる重要な現象は「摩耗」と「疲労」であり、その保守方策におけるキーワードは「潤滑」と「研削」です。

ここでは「レールの疲労」を主に衝撃的な輪重の繰り返しによる普通継目部の破端と溶接部の折損、車輪の転動荷

重の繰り返しによる主にレール頭頂面に生じるレールシェリング(以下、「シェリング」と略称する)とレールゲージコーナに生じるきしみ割れの4つの疲労損傷について、これまでに得られた知見を基に、その実態、発生メカニズムさらに対策の現状の面から紹介します。

## 継目部の破端

定尺レールの疲労損傷として、普通継目部の破端と呼ばれる損傷が最も代表的な損傷形態です。この破端は、かつては端面またはその周辺からの腹歩き裂が3割程度、継目部のボルト穴周辺からのき裂が5割程度を占めていました<sup>1)</sup>が、現在では図1に示す後者の場合がそのほとんどを占めています<sup>2)</sup>。これまでレールの疲労寿命として、旧国鉄時代のレール更換基準は、定尺レールの破端も含めて50Tレールのロングレールを対象に検討されました。その後、ロングレールの疲労寿命として、溶接部を対象にその周辺のレール凹凸に基づく動的輪重を試験と動的応答モデルにより評価し、溶接部の曲げ疲労試験により求めたS-N曲線を用いて、累積疲労被害則を適用して疲労寿命を算定する手法が構築されました。最近、普通継目部のボルト穴周辺のき裂を対象とする検討を可能にするために、上記の手法が拡張されました。具体的には、図2に示す継目板をレールとボルト締結する欠線部を有する継目部の構造を考

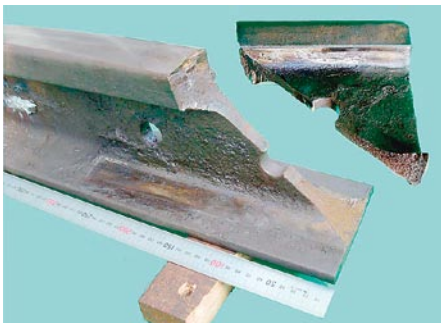


図1 レール破端の例

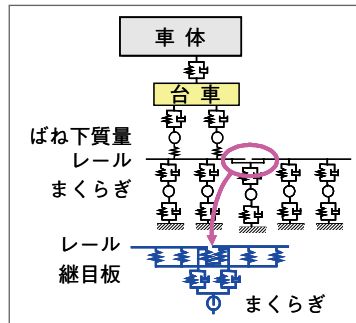


図2 普通継目部の動的応答モデル

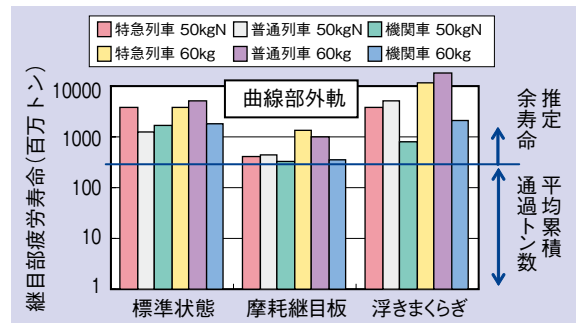


図3 経年レールの寿命推定結果例

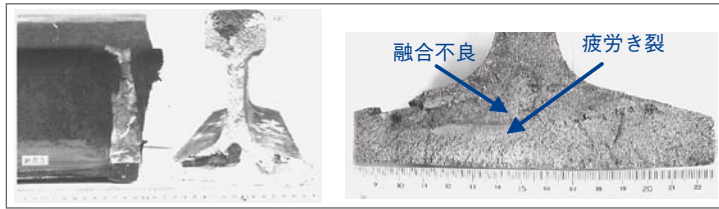


図4 溶接部損傷例(底部横裂)

慮した動的応答モデルを構築し、継目部のボルト穴周辺の応力に着目した疲労試験により求めたS-N曲線を用いて、経年レールの疲労寿命が評価されました<sup>2)</sup>。図3に、この手法による普通継目部の疲労寿命の推定例を示します。図より、摩耗継目板の場合に標準的な継目板の場合より余寿命が短いことがわかります。

### 溶接部の折損

溶接部の疲労損傷は、図4に示すような主に溶接時の欠陥を起点とするき裂が溶接部あるいはその付近のレール凹凸により励起された大きな動的輪重の繰り返しにより進展し、折損に至るものです。これに関しては、既に述べたように、ロングレールの寿命延伸に対する要請が強かったことと、溶接部の動的応答モデルが普通継目部のモデルより取り組みやすかったという面から、普通継目部に先行して疲労寿命推定システムが構築されました。図5に、疲労寿命推定システムのフローチャートを示します。図のフローチャートに従い、図6の軌道動的応答モデルとテルミット溶接部等のS-N曲線を用いて、溶接部の疲労寿命が評価されました。図7に、溶接部を含むその付近のレール凹凸を研削により平滑化し、動的荷重を抑制することにより溶接部の疲労寿命を延伸する効果を示します。図より、研削量が大きく凹凸をより平滑化する場合が溶接部の疲労寿命をより延伸できる可能性を示しています。

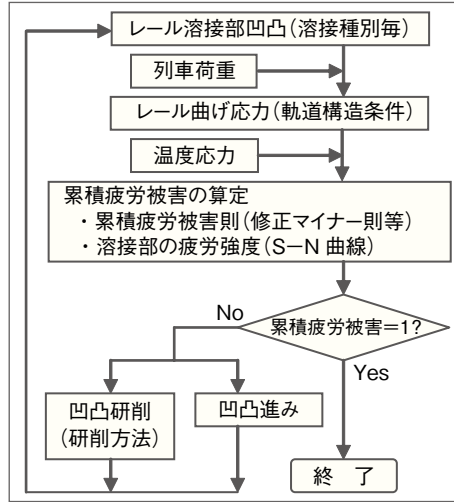


図5 溶接部寿命算定フローチャート

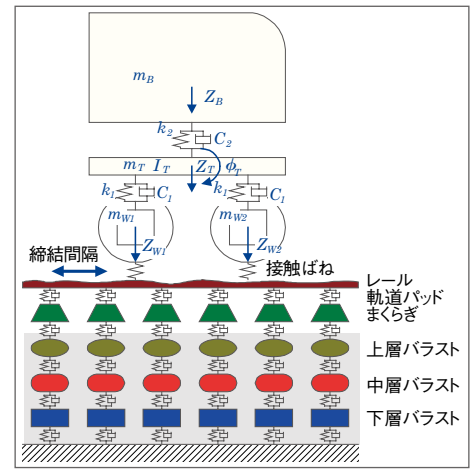


図6 車両/軌道動的応答モデル

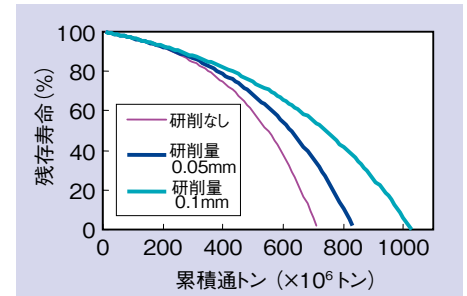


図7 レール凹凸研削による溶接部の寿命延伸効果

れていた蒸気機関車による散水が中止され、電化(蒸気機関車の廃止)が進められたことにより、黒裂の発生は減少し、大きな問題ではなくなりました。1964年10月に開業した東海道新幹線の、開業後約10年間におけるレール損傷は主として溶接部(50Tレールのテルミット溶接)を中心に発生しましたが、1973年頃から溶接部以外のレール中間部のいわゆる頭頂面シェリングの発生が顕著になりました。その後、1977年頃から始まった軌道保守量を低減するための50Tレールから60レールへの交換により、レール溶接部および中間部とも損傷部分が交換され、見かけ上問題が消滅しました。これは黒裂も同様ですが、原因究明に基づく対策が講じられたことによるものではないため、1972年10月に開業した山陽新幹線大阪・岡山間でも累積通過トン数(通過トン数:列車荷重による軌道へのダメージを評価する指数で「軸重×通過軸数」で表現する)1.5億

### レールシェリング

転がり接触疲労損傷の一つであるシェリングを図8に示します。シェリングは、古くは1951年頃の国鉄山陽本線の曲線においてきしみ割れと併発する疲労き裂として、黒裂(black spotと訳されることがある)と呼ばれ、その現象解明に向けた研究が進められてきました。しかし、十分な原因究明に至る前に、曲線レールの摩耗抑制のために行わ



図8 シェリングの外観と破断面の例

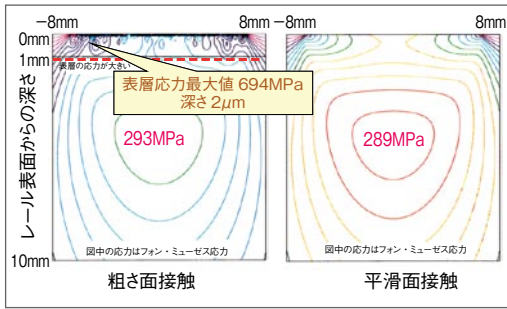


図9 車輪／レール接触(フォン・ミーゼス) 応力への表面粗さの影響

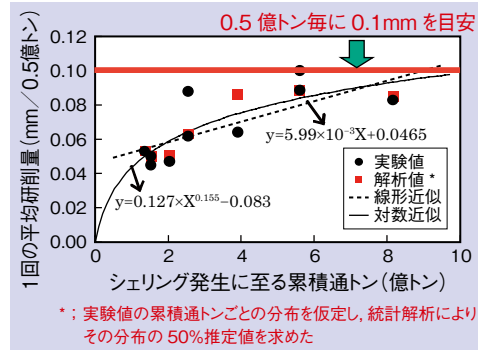


図10 予防研削によるシェリング抑制効果

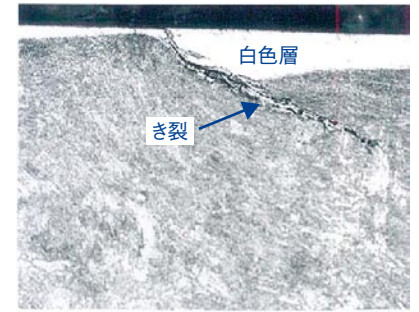


図11 白色層を起点とするき裂の例

トンを超える頃から、頭頂面シェリングが発生し始め、2億トンを超える1982年頃からその増加傾向が顕著になりました。一方、海外の鉄道においてもシェリングは問題であり、その発生機構の解明に向けた研究が行われてきました。ただし、特に英国ではわが国の名称とは異なるスクワット (squat) と呼んでいます。わが国の名称は、レール破断面の疲労パターンが貝殻状 (shell) に見えることに由来していますが、英国の名称は、き裂発生後にレール頭頂面が黒ずんで落ち込む形状に着目して、例えば熊がしりもちをついてできるようなくぼみ (squat) に由来しているとのことです。目の付けどころが異なるということでしょう。

次に、シェリングの発生メカニズムですが、まだ未解明な部分が多く残されていますが、大まかにはある部分の塑性変形が材料の破壊限度を超えてき裂が発生し、そのき裂が応力の繰返しにより進展すると考えられています。ただし、材料強度と作用する動的荷重のばらつきのために、き裂の発生・成長を特定することは容易ではありません。例えば、車輪とレールの接触圧力は極めて大きく、平滑面を仮定するヘルツ理論においても輪重と横圧が作用する場合、接触部には塑性変形が生じることが考えられます。しかしながら、仮に塑性変形が生じて、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とレールの接触に適用しました<sup>3)</sup>。

そのシェイクダウン理論を平たく言うと、材料が繰返し転がり荷重を受ける場合、現在作用している荷重による応力とすでに生じている残留応力の合応力が弾性限度を超えない範囲に収まる場合、塑性変形が進まないというものです。この状態を(弾性)シェイクダウンと呼び、材料の塑性変形を検討できます。

さらに、車輪もレールもその接触面は平滑ではなく粗さ(微小突起)を有し、その粗さ突起部の接触による塑性変形は平滑面同士のものよりかなり大きく、接触面近傍の大きなダメージを評価できる可能性が考えられます。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250MPa程度)の分布を図9に示します。図より、平滑面接触においてはレール表面下数mmの位置で最大値が生じるのに対して、粗さ面接触においてはレール表層に最大値が生じることがわかります。したがって、表面粗さを有する車輪とレールでは、接触部の表面および表面下近傍に大きなダメージ(塑性変形)を受けることが理解できます。

このシェリング対策としては、昭和50年代から図9に示すようなレール表層のダメージを研削により除去し、シェリングの発生を予防する試みが行われてきました。特に、1980年から5年程度続けられた東海道新幹線米原地区における研削試験結果、材料あるいは金属の結晶学的な面から特定のすべり面の方向が揃う(塑性変形に対応)ことが明らかにされる<sup>4)</sup>等の研究成果を基に、いつ、どの程度研削するのが効果的であるのかが実験的に求められました。図10に、その予防研削の効果を示します。この図は、例えば研削周期を通トン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%)には累積通トンで8億トンを超えるまでシェリングの発生を抑制できることを示します。

一方、レール頭頂面には、車輪の空転・滑走等に伴う車輪／レール間の大きなすべりにより摩擦熱が発生し、この摩擦熱の作用により起因してレール表層に図11に示す白色層と呼ばれる熱変態組織(マルテンサイト)が形成され、その白色層を起点とするき裂によりレールが折損する場合があります。このき裂は、その発生に関しては通常の転がり接触疲労と異なるものの、その成長に関しては車輪からの転動荷重の繰返しによることから、わが国ではシェリングに分類しています。ただし、この白色層とき裂発生の関係は、これまでほとんど定量的な知見が得られていません。現在、白色層の厚さと硬さ、白色層とそれを含むレール表層の残留応力、塑性流動およびき裂の発生状況との関係等が検討されています。

さらに、摩耗による転がり接触疲労を防ぐというコンセ

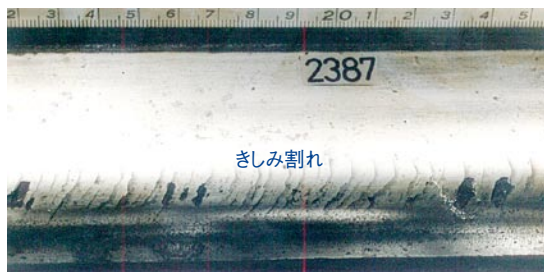


図12 きしみ割れの例

プトに基づき、従来のパーライト鋼組織ではなくベイナイト鋼組織のレールが考案され、現地敷設試験を経て本格投入に向けて検討が進められています。

### きしみ割れ

半径400m程度以下の急曲線の緩和曲線中あるいは半径がそれ以上の円曲線中の曲線外側レール（以下、「外軌」と称する）、さらには蛇行動が励起される直線の左右レールのゲージコーナにおいて、図12に示すような比較の間隔が狭いき裂が連続して発生する場合があります。このようなゲージコーナに連続して発生するき裂を「きしみ割れ」と呼び、その断面方向の長さを管理するとともに、その長さに応じて保守基準が定められています。このきしみ割れは、成長するとき裂とき裂の間の部分がはく離する 경우가多く観察されますが、連続するき裂のうちレール破断に至るまでに成長するものは、これまでにいくつか報告されている程度です。

しかしながら、2000年に英国ハットフィールドの曲線外軌の転がり疲労が原因と考えられるレール折損による脱線事故を契機に、きしみ割れを含む外軌ゲージコーナの転がり疲労傷に対する保守管理とともに、きしみ割れに起因するはく離等からの騒音を抑制する面からもきしみ割れの発生を抑制することが注目されています。

きしみ割れの保守管理に関しては、同様な転がり接触疲労き裂であるレール頭頂面に発生するレールシェリングと異なり、その発生位置がゲージコーナであるため、レール探傷車によるき裂の発見は容易ではないため、発見を可能にする研究開発が進められています。

きしみ割れは、従来の調査より、直線では分岐器あるいは伸縮継目部で励起された車両のだ行動により、その周波数に応じた左右レールのゲージコーナと、曲線半径の緩やかな曲線や急曲線に付帯する緩和曲線に発生しやすいことが一般的に知られています。したがって、きしみ割れの発生はき裂進みと摩耗進みのバランスにあると考えられ、き裂進みが優勢な場合にきしみ割れが顕在化するのではないかと考えられます。図13にきしみ割れの発生と摩耗進みを調査した結果を示します。図において、レール側摩耗進

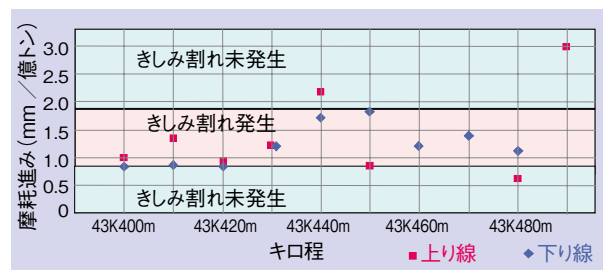


図13 きしみ割れの発生と摩耗進みの関係

みが0.9～1.8mm/億トン程度できしみ割れが発生しやすく、この範囲より摩耗進みが速く(>2.1mm/億トン程度)でも、また遅く(<0.7mm/億トン)でも、きしみ割れが発生していません。このことから、きしみ割れの発生は摩耗進みとのバランスが重要であることがわかります。このようなき裂進みと摩耗進みのバランスに着目すると、レール研削がきしみ割れの発生・成長を抑制するために有効であると考えられます。つまり、レール研削は人工的な摩耗であるため、きしみ割れが発生しやすい部分のダメージ層を直接除去し、あるいはまた断面形状を再形成することで車輪との接触状態を変え、大きな応力が発生する位置をずらしダメージの蓄積を緩和することが考えられます。ただし、レール研削作業の効率的な投入方法（研削周期と1回の研削量）に関しては、きしみ割れの発生・成長と摩耗進みのより精度の高い定量的な関係を得ることが重要です。

### おわりに

レールの疲労に関しては、車輪の衝撃荷重による普通継目および溶接継目の（曲げ）疲労損傷と車輪の転動荷重による頭頂面およびゲージコーナの転がり接触疲労損傷が問題です。これまでも多くの知見が得られていますが、まだ明らかでない点が多く残されています。一方、当面、対策として走行面を平滑化する（修繕）研削とレール表面のダメージ層を除去する予防研削が効果的であることが明らかにされています。現在、損傷メカニズムのより一層の理解と抜本対策の構築に向けて、大いに取り組んでいますが、鉄道事業者をはじめ関係者の方々のご協力を身が重要であると考えます。[RRR]

### 文献

- 1) 栗原利喜雄：レールの損傷に関する研究，鉄道技術研究報告，1188（施設編第517号），1981
- 2) 片岡宏夫ほか：レール継目部の応力解析と経年レールの寿命評価，RRR，61-12，pp.24-27，2004
- 3) Johnson, K. L. : Contact Mechanics, Cambridge University Press, 1985
- 4) 井上靖男：シェリング発生機構の解明，日本鉄道協会誌，pp.430-433，1994