

第110回

レール凹凸管理

はじめに

レールの上を車輪が滑らかに走行するためには、レールと車輪が接触する部分は平滑であることが理想的です。しかし、種々の要因でレールに凹凸が生じると、車輪とレールが振動し、たとえ凹凸の大きさがわずかであっても騒音・振動問題や線路の補修頻度の増加などを引き起こします。ここでは、レール凹凸について、凹凸の形成要因や管理・測定技術の変遷を紹介します。

レール凹凸の形成要因

一口にレール凹凸といっても、レールの製造時に生じる比較的波長の長い凹凸、レールの溶接箇所にもスポット的に生じる凹凸、車両の繰り返し走行で生じる規則的で多様な波長の凹凸に分類できます(図1)。凹凸が生じる箇所や凹凸の形状はそれぞれ異なるため、レール凹凸の管理にあたっては凹凸の形成要因を理解することが重要です。

以降では、形成要因ごとのレール凹凸の特徴や管理に関する基準値や規格、凹凸の測定技術の変遷を紹介します。

レールの製造時に生じる凹凸

図2に、国内のレール製造業者におけるレール製造過程の一例¹⁾を紹介します。2002年以前におけるレールの

主な製造過程は、熱した鋼塊を圧延する工程、圧延後のレールを切断し冷却する工程、前記の過程で生じたレールの曲がりを矯正する工程の順に構成されてきました。冷却後に生じたレールの曲がりの矯正には、複数のローラーを交互に配置した矯正機が使用されます。ここで、レールの端部は原理的に矯正できないため、曲がりが残ったままになることがあり、これは「端部曲がり」とよばれます。

レール端部の曲がりは、レール同士を溶接でつなぎ合わせる際に重要なレール端面の位置合わせ精度に影響します。そのため、許容されるレール

端部の曲がりが日本産業規格(JIS E1101 [普通レール])に定められています(表1)。2002年以降は、圧延後のレールを長さ150mのまま冷却・矯正・検査ができるように製造ラインが改造され、これによりローラーで矯正できない部分が大幅に減ったため、レールの品質が向上しました。

一方、ローラー矯正の過程で、ローラー1回転ごとにレールに加わる圧力が変動すると、レールに周期的な凹凸が形成されます。この凹凸は「波状曲がり」とよばれ、凹凸の波長は1m以上であることが多いです。国内で波状曲がりの問題が顕在化したのは、遅く

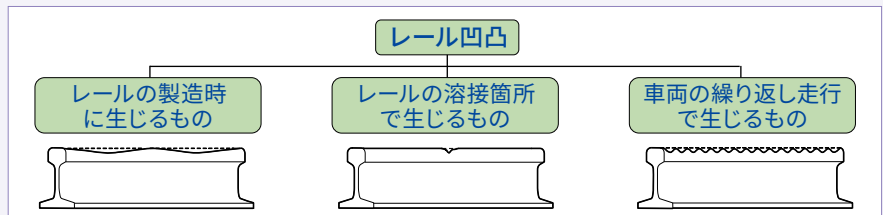


図1 レール凹凸の形成要因

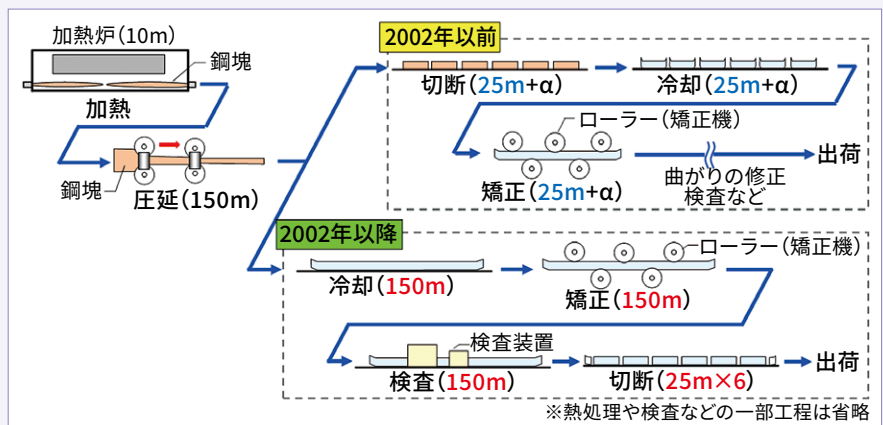


図2 レール製造過程の一例

出典：鉄道用軌条の歩みと今後の展望(2013)を基に作図

とも山陽新幹線の新大阪～岡山間開業にあたる1972年と考えられます²⁾。後に新幹線の高速化が進むにつれ、走行安定性の観点から波状曲がりの存在が一層問題視されるようになりました。

そこで、1999年頃に鉄道事業者、レール製造業者、鉄道総研を中心とした「レール問題検討会」が発足し、2003年におもに新幹線で使用される60kgレールを対象に、波状曲がりに関する規格値(1m間で±0.2mm, 3m間で±0.3mm)が設けられました。レール製造業者による品質向上の取り組みもあり、2003年10月以降は、レール波状曲がりの規格に合致したレールが出荷されています。

レールの溶接部に生じる凹凸

レールの溶接部に生じる凹凸は、溶接施工時に生じるものと、その後の供用により生じるものがあります。

溶接施工時に生じる凹凸については、旧国鉄時代に溶接部の仕上がり精度が規定され、現在も多くの鉄道事業者がこの基準を踏襲しています(表2)。

また車輪の通過にともなって、溶接時の熱の影響を受けた部分あるいは溶接金属とレール本来の材料とでは硬さが異なることに起因して、レールの溶接部が次第に落ち込んでいきます。この落ち込みは「溶接落ち」とよばれ、車輪通過時にレール底部に発生する曲げの力を増加させるため、レールの寿命に影響します。そこで、鉄道事業者によっては、累積通過トン数(通過した車両の総重量)に基づいてレールの交換基準を設けています。

車両の繰り返し走行で生じる凹凸

レールの上を車輪が繰り返し通過す

表1 レールの曲がりに関するJIS規格値

レール種別		40kgN 50kgN	60kg
レール端部の 曲がり (1.5mあたり)	上方	1.0mm	0.7mm
	下方	0.3mm	0.0mm

表2 レール溶接部の仕上がり精度の例

項目	在来線	新幹線
レールの横方向 (通り) (1mあたり)	±0.5mm	±0.3mm
レールの高さ方向 (高低) (1mあたり)	+0.5mm -0.1mm	+0.3mm -0.1mm

※符号の+は上方(凸形状), -は下方(凹形状)を表す



図3 レール波状摩耗の発生状況

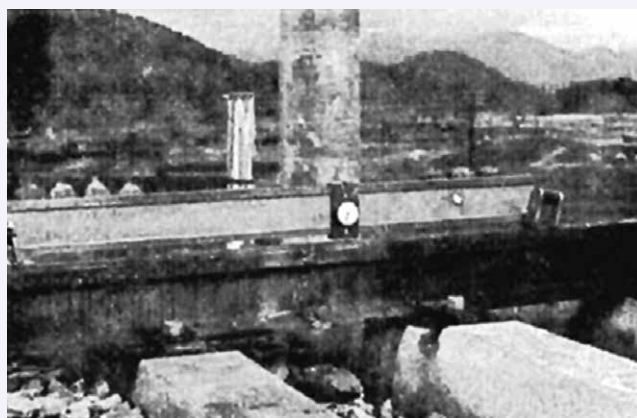


図4 レール凹凸の測定器具⁴⁾

ると、レールが規則的な間隔で摩耗あるいは塑性変形することがあります(図3)。この状態はレール波状摩耗とよばれ、凹凸の波長は数十～数百ミリ、振幅は1mm以下の場合が多いです。

レール波状摩耗の発生機構の解明は、100年以上も続く長年の課題です。これまで、レールやまくらぎの振動、レールの小返り振動(レールがまくらぎ方向に傾くように振動すること)、輪軸のねじり振動、車輪とレール間の摩擦現象をはじめ、さまざまな要因に着目した研究が行われてきましたが、凹凸の発生機構には未解明な部分も残されています。

一方、鉄道総研の最近の研究³⁾により、レール波状摩耗は軌道や車両の振動特性に起因した4つの成長要因で分類できることがわかりました。これにより、レール波状摩耗の根本的な対策の提案につながる事が期待されます。

レール波状摩耗の管理基準に関しては、旧国鉄時代に波高1.5mmに達した場合にレールを交換するよう定められ、現在も多くの鉄道事業者がこの基準を踏襲しています。しかし、鉄道の高速化にともなう沿線環境問題への対応、高品質の輸送サービスが求められる現在においては、レールの交換基準に達する前に後述するレール削正(レールの表面の凹凸を削り取る処置)を行うことが多いのが実態です。そのため、レールの凹凸状態を高精度かつ簡易に把握し、効率的に管理する手法が求められます。

レール凹凸の測定方法

1964年の東海道新幹線開業に向けた研究のために、レール溶接部の凹凸を測定するための器具(図4)が製作されました。この器具は、長さ1mの鋼

製の定規とダイヤルゲージ(変位計)で構成され、測定者が所定の間隔で読み取ったダイヤルゲージの値をもとに、凹凸の形状を書き起こして行っていました。その後、凹凸の形状を感圧紙に直接記録する固定式のレール凹凸測定装置(図5)が開発され、溶接部の凹凸などを評価するために現在でも広く使用されています。

1970年代に入ると、国内外において波状摩耗のようにある区間にわたって発生するレール凹凸を、連続的に測定する装置の開発が行われるようになります。これらの装置は、測定原理によっておもに3つの方式に分類できます。

1つ目の加速度測定方式(慣性法)は、測定部に設置された加速度センサーの出力を2回積分して、凹凸形状を算出

します。この方式の装置は1990年代に実用化されており、小型・軽量で可搬性に優れますが、測定中に停止できないといった制約があります。

2つ目の変位測定方式(差分法)は、変位センサーによって装置とレールとの距離を数点測定し、得られた測定値から演算によって凹凸形状を算出します。この方式の装置は、変位センサーの取り付け位置にゆがみが生じると測定精度に影響するため、変位センサーを取り付けるフレームには変形しにくい素材や構造が使用されます。その結果、装置の重量が比較的軽くなる傾向にあります。鉄道総研では、2015年に差分法を採用した可搬型のレール凹凸連続測定装置⁵⁾(図6)を実用化して

おり、現在複数の鉄道事業者でレール凹凸管理に活用されています。

3つ目の差分法と慣性法を組み合わせた方式の装置は、保守用車で牽引することを想定して1985年に提案され、一部の新幹線で導入されています。

以上で紹介した各種装置の開発によって、レールの凹凸状態を高精度に把握できるようになりました。しかしながら、線路全体に点在するレール凹凸を管理する場合、人力による現場での測定は非効率です。そこで、1990年代に入ると走行する車両から間接的に凹凸を測定する方法(車上測定)の検討が本格化しました。

国内におけるレール凹凸の車上測定には、一部の営業車や多くの軌道検測車で測定されている軸箱加速度が一般



図5 固定式のレール凹凸測定装置

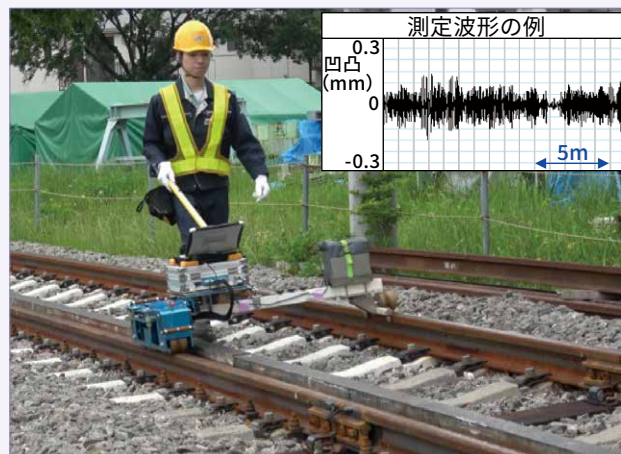


図6 レール凹凸連続測定装置

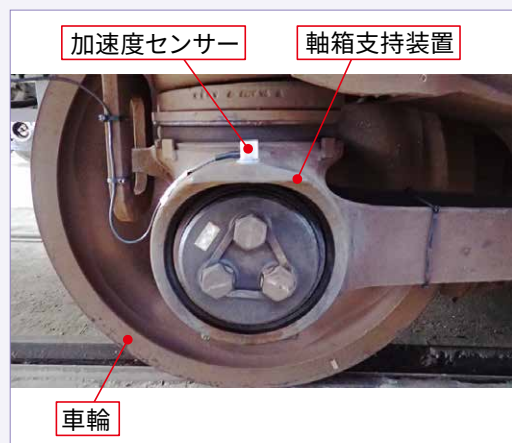


図7 軸箱加速度の測定状況の例

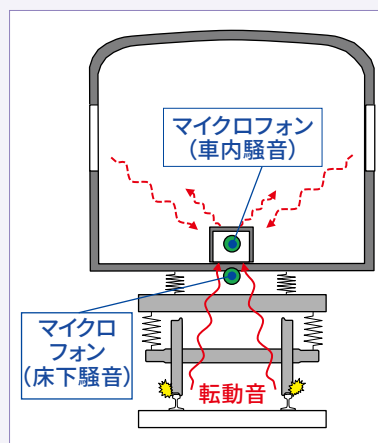


図8 床下騒音・車内騒音によるレール凹凸の間接測定概念図



図9 レール波状摩耗モニタリング装置の外観



図10 レール削正車



図11 レール削正装置

に用いられます。軸箱加速度は、輪軸を支える台車の軸箱支持装置(図7)で測定される振動加速度のことで、もともと車両の走行試験時に台車の挙動、レール継目の位置、著大な輪重などを確認するために測定されていましたが、1990年頃から新幹線のレール凹凸管理への適用検討が深度化し⁶⁾、適切なセンサーの設置位置やデータ処理方法などが検討されてきました。一方、多様な軌道状態における軸箱加速度の適用条件は十分に検討されておらず、今後は在来線における軸箱加速度の活用も期待されます。

そのほかに、新幹線の軌道検測車の床下に設置されているマイクロフォン(図8)を活用して、床下騒音からレール凹凸状態を評価する検討も行われています⁶⁾。しかし、床下騒音は空力音やブレーキの制動音などの影響を受けることが課題です。

2000年代に入ると、車内床面で測定した車内騒音(図8)を用いてレール波状摩耗の発生状況を推定する研究が進み、可搬式のレール波状摩耗モニタリング装置⁵⁾(図9)が開発されています。

凹凸が生じたレールの処置

凹凸が生じたレールの処置は、レール交換かレール削正に頼らざるを得ま

せん。一般に、ある程度連続した区間のレール削正には大型のレール削正車(図10)、溶接部などスポット的な削正にはレール削正装置(図11)が用いられます。近年は、両者の施工能力、導入費用の隙間を補完するような新しいレール削正装置も開発されています。

レール削正の方式には、回転する砥石やベルトをレールに押し付けて凹凸を除去するグライディング式と、超硬度合金のカッター刃でレールを研削するミリング式があります。国内におけるグライディング式レール削正車は、1974年に東海道新幹線で初めて導入されました。一方、ミリング式レール削正車の歴史は浅く、2011年にJR西日本に導入されたものが国内初です。

なおレール削正車は、レール凹凸除去のほかに、レール表面に生じた金属疲労の層を除去してレールを延命化する重要な役割を担うため、効率的な運用が欠かせません。

レール凹凸管理のこれから

レール凹凸に関する現象把握の深度化や測定技術の発展によって得られた数々の知見は、旧国鉄から踏襲した基準に基づく管理では、近年の沿線環境や輸送品質に対する要求に応えること

が難しく、レール凹凸の管理方法に改善の余地があることを示唆しています。

これからのレール凹凸管理には、レール凹凸状態を適切に検査し、状態に応じて適切な処置を行うメンテナンスサイクルの確立が必要と考えられます。鉄道総研では、メンテナンスサイクルの実現に向け、無線センサーを活用したレール波状摩耗の遠隔モニタリング技術の開発、レール削正車の運用計画システムの機能向上などに取り組んでおり、今後はレール凹凸の抑制策などの根本対策も検討していきたいと考えています。これらの技術が、鉄道のレール凹凸管理の一助になれば幸いです。

(梶原和博/軌道技術研究部
軌道管理研究室)

文献

- 1) 佐伯和彦, 岩野克也: 鉄道用軌条の歩みと今後の展望, 新日鉄住金技報, 第395号, pp.19-25, 2013
- 2) 宇塚範吉, 杉山享: レールの波状曲がり, 鉄道線路, Vol.21, No.3, pp.47-49, 1973
- 3) 網干光雄, 田中博文, 梶原和博: レール波状摩耗の発生メカニズムを解明する, RRR, Vol.78, No.2, pp.8-11, 2021
- 4) 鉄道技術研究所: 東海道新幹線に関する研究(第5冊), p.159, 1964
- 5) 田中博文, 梶原和博, 清水惇: レール表面の細かな凹凸を診る, RRR, Vol.76, No.2, pp.24-27, 2019
- 6) 須永陽一, 内田雅夫: 新幹線のレール凹凸管理, RRR, Vol.49, No.12, pp.17-22, 1992