

- 鉄道一般
- 車両
- 施設
- 電気
- 運転・輸送
- 防災
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

レール表面の 細かな凹凸を診る

線路を毎日列車が走行すると、レールには摩耗や変形が生じます。そして、一部の区間ではレールの長手方向に周期的な摩耗が発生し、レールの表面に細かな凹凸を形成することがあります。この凹凸は、「レール波状摩耗」とよばれており、その程度によっては大きな騒音や振動を引き起こすことがあるため、その状態を適切に把握し、管理することが重要です。そこで、車内で聞こえる音によってレール凹凸を検知するモニタリング装置と、地上で直接かつ高精度にレール凹凸を測定する装置を開発しましたので紹介します。



田中 博文
Hirofumi Tanaka
軌道技術研究部
軌道管理研究室
主任研究員
[専門分野] レール凹凸管理、軌道変位管理、軌道状態評価、信号処理



梶原 和博
Kazuhiro Kajihara
軌道技術研究部
軌道管理研究室
研究員
[専門分野] 軌道管理、軌道状態評価



清水 惇
Atsushi Shimizu
軌道技術研究部
軌道管理研究室
副主任研究員
[専門分野] 軌道管理、軌道状態評価、動揺管理

はじめに

日々の列車走行により、車輪と接触するレールの表面には摩耗や変形が生じます。レールの表面が一様に摩耗すれば凹凸は生じませんが、不均一に摩耗が発生すると凹凸が形成されます。鉄道では、急曲線などの一部区間において、**図1**に示すようにレールが周期的に摩耗することがあります。この現象は、その見た目から、「レール波状摩耗」とよばれています。現状でレール波状摩耗の詳細な発生メカニズムは解明されていませんが、列車の走行に伴ってレール・車輪間で発生する周期的な荷重変動がその原因と考えられています。レール波状摩耗の凹凸の波長（**参照**）は一般的に、数cm～数

十cm程度であり、その振幅（**参照**）は1mm程度以下と微細です。そのため、レール波状摩耗が列車の走行安全性に直接的に影響することはありません。ただし、レール波状摩耗が発生すると、列車走行時に騒音や振動を発生させたり、その振動によってまくらぎを支えるバラストの劣化などを引き起こしたりすることがあるため、レール凹凸の状態に応じて適切にメンテナンスを実施する必要があります。通常、レール波状摩耗のメンテナンスに

（レール凹凸の）波長と振幅

レール波状摩耗のように周期的な凹凸がある場合、凹凸の山（凹凸の高いところ）と山の間隔を「波長」、山と谷（凹凸の低いところ）の高さの差を「振幅」といいます。

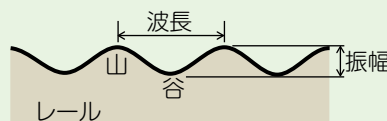


図1 レール波状摩耗の例



図2 専用の車両（レール削正車）による凹凸除去の状況



図3 専用の装置（レール削正装置）による凹凸除去の状況

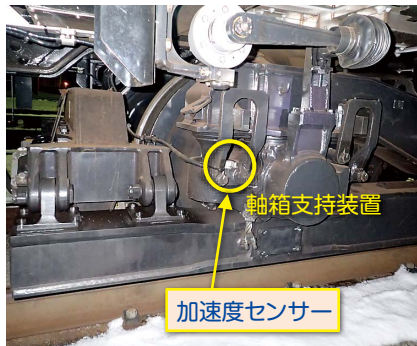


図4 軌道検測車の軸箱支持装置に取り付けられている加速度センサーの例



図5 レール波状摩耗モニタリング装置の外観

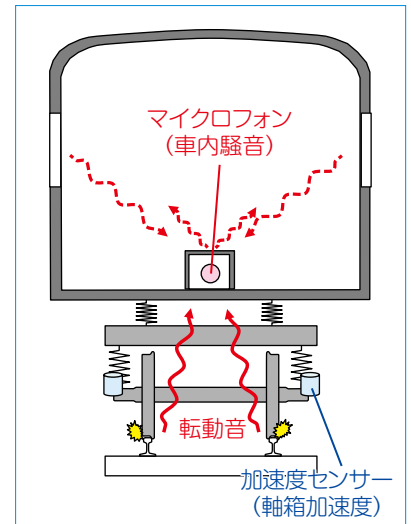


図6 レール波状摩耗の音によるモニタリング手法の概念図

は、凹凸の発生したレールを交換するか、**図2**や**図3**に示すように専用の車両や装置を用いて凹凸を削り取る作業（レール削正作業）が行われます。しかし、これらの車両や装置は高価で台数が限られているため、レール波状摩耗の発生位置と程度を適切に把握し、効率的にメンテナンスを実施する必要があります。

そこで、走行する列車の車内で測定した音によって、レール波状摩耗の発生状況を簡易に把握するモニタリング装置を開発しました。また、レール削正作業を効率的に行うために、地上で連続的かつ精密にレール凹凸を測定する装置を開発しましたので、以下に紹介します。

音による車上モニタリング

レール波状摩耗は、線区全体にわたって点在し、かつ発生区間の中でもその振幅が変化することがわかってい

ます。そのため、地上でそのすべてを測定し、その発生状況を把握することは作業性の観点から困難と考えられます。

そこで、線区全体を走行する列車を用いてレール波状摩耗の発生状況を管理できないか？という研究が行われてきました。たとえば、車上からレール凹凸を把握（モニタリング）する技術として、軸箱加速度の活用が提案されています。軸箱加速度とは、**図4**に示すような車軸を支える軸箱支持装置に取り付けた加速度センサーで測定した振動加速度のことです。この軸箱加速度は、レール凹凸との相関が高いことがわかっており、日本国内の多くの軌道検測車で測定されています。一方で、軌道検測車は、速度や停車駅などが営業車とは異なっており、また走行頻度が低いために、任意の時期に任意の線区

のデータを測定することは困難です。ここで、列車に乗られた際、ときおり曲線区間で「ゴー」といった音がす

ることに気付かれたことはないでしょうか？このような区間では、レールに波状摩耗が発生していることが多いです。このような音は、レール上を車輪が転がる際に発生する「転動音」とよばれており、

レールの凹凸や車輪の凹凸が大きいほど、転動音も大きくなることがわかっています。

そこで、鉄道総研では、このレール波状摩耗が生じている区間で発生する転動音に着目し、音によるモニタリング手法を開発しました。**図5**に、開発した「レール波状摩耗モニタリング装置¹⁾」の外観を示します。本装置は、持ち運びが可能なため、任意の時期に任意の列車で測定できます。具体的には、車両床面にマイクロフォンを設置し、**図6**に示すような経路で、床面へ伝播してくる転動音を測定します。また、測定車両の速度と位置を把握するためのGPSレーザー、曲線を検知するためのジャイロ、任意の位置を記録するための手押しマーカーを有しています。さらに、加速度センサーも搭載しています。これによって、レール波状摩耗の管理と同時に、列車動揺（乗り心地）の管理も行うことができます。

図7は、本装置を用いて、ある線区で車内騒音を測定した一例です。なお、図の縦軸は、「空間重み付きレベル」という指標で表示しています。これは、車内で測定される転動音にはさまざまな音が含まれており、単純にレベル化処理をしただけではレール凹凸との関連を見いだすことは困難です。そこで、レール波状摩耗に起因する騒音成分のみを抽出し、さらに距離軸上でレベル化処理した指標です。ここで、波状摩耗の波長は発生する部位によって異なることがわかってきており、一般的に、内軌

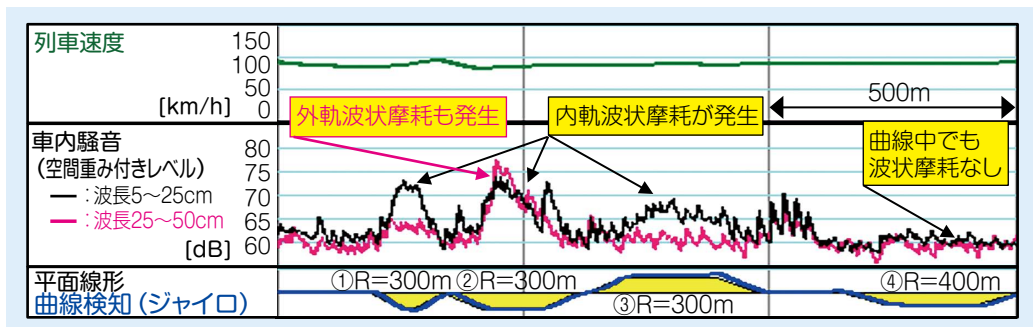


図7 車上モニタリングによるレール波状摩耗の検出例

に発生する波状摩耗よりも外軌(参照)に発生する波状摩耗の方が、波長が長いことがわかっています。図中の空間重み付きレベルの黒色は内軌に発生する波状摩耗の波長を、ピンク色は外軌に発生する波状摩耗の波長を抽出しています。同図より、曲線①および③では黒色の指標のみが大きくなっており、内軌のみに波状摩耗が発生していると考えられます。曲線②では黒色に加えてピンク色の指標も大きくなっており、内軌と外軌の両方に波状摩耗



図8 レール踏面測定器によるレール凹凸の測定状況



図9 レール凹凸連続測定装置によるレール凹凸の測定状況

が発生していると考えられます。一方で、曲線④では、両方の指標が小さく、曲線であっても波状摩耗が発生していないと考えられます。また、ジャイロによる曲線検知は、平面線形とよく一致しており、GPSレシーバーで測定した列車速度から、精度よく位置を把握できていることがわかります。このように、車内で測定した音によって、車上からレール波状摩耗の発生状況をモニタリング可能なことがわかります。

地上での精密測定

前述の手法を用いて、車上から検出されたレール波状摩耗を管理するためには、地上でレール波状摩耗の発生状況を精密に把握する必要があります。

ここで、地上でレール波状摩耗などのレール凹凸を把握するために、図8に示すような「レール踏面測定器(通称、1mストレッチ)」とよばれる装置をレールに固定して、固定された2点

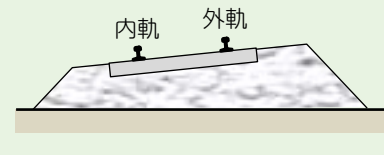
間の凹凸を測定する装置が、広く普及しています。この方法は、非常に簡単にレール凹凸を測定できる一方で、レール波状摩耗はある区間にわたって連続的に発生しているにもかかわらず、わずか1m区間での凹凸しか測定できません。

そこで、鉄道総研では、レール凹凸を地上で連続的かつ精密に測定するための装置を開発しました。図9に、開発した「レール凹凸連続測定装置¹⁾」によるレール凹凸の測定状況を示します。本装置は、組立式のトロリーであり、人が線路上で装置を押すことによって、装置の移動速度によらずレール凹凸を連続的に測定することができます。

図10は、本装置を用いて、レール波状摩耗が発生している曲線区間のレール凹凸を連続的に測定した例です。同図より、同じ曲線内であってもレール波状摩耗の振幅が変化しており、振

内軌と外軌

曲線区間のレールは、一般的に外側のレールが内側のレールよりも高くなっています。そして、内側のレールを「内軌」、外側のレールを「外軌」といいます。



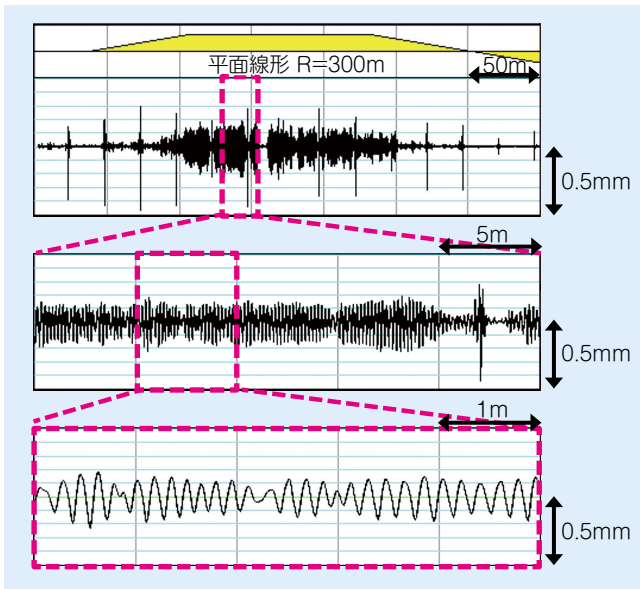


図10 レール凹凸の連続測定例

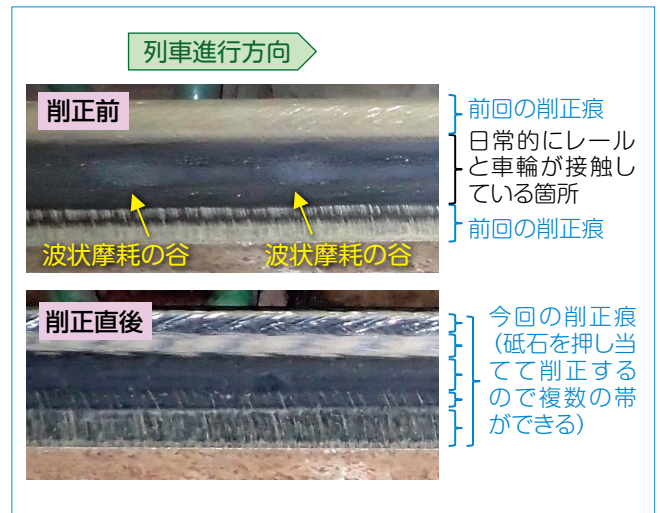


図11 レール削正前後のレール表面の写真の例

幅の大きな区間の波形を拡大すると、その区間で振幅が大きく変化していることがわかります。このことから、レール波状摩耗の発生状況を精密に把握するには、地上でのレール凹凸の連続測定が適していることがわかります。

レール削正作業の支援

図11は、レール削正前後のレール表面の写真です。削正前は目でも波状摩耗の発生状況を確認できますが、削正直後のレール表面は削正によって凹凸を取り除く際に生じた痕跡によって光沢を帯びており、その凹凸状態を目で確認することが困難となります。なお、削正直後のレール表面の微細な凹凸は「削正痕」とよばれており、レールに砥石を押し当てて削正するために生じるものですが、列車通過にともなって徐々に消えていきます。

そこで、活躍するのがここまで紹介してきたレール凹凸を診る技術です。図12は、波状摩耗発生区間のレール削正前後において、レール凹凸連続測定装置による地上測定とレール波状摩耗モニタリング装置による車上測定を行った事例です。同図より、この事例の場合、レール削正区間では、レール凹凸測定の結果を確認することによ

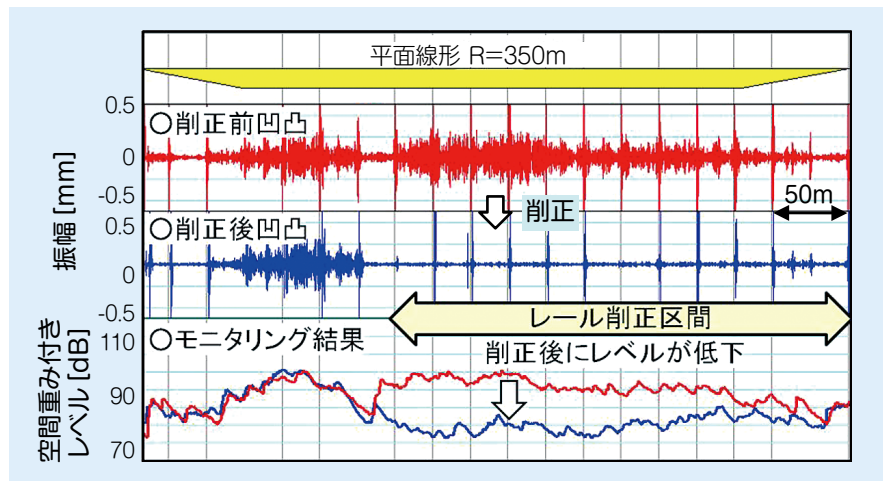


図12 レール削正前後の車上モニタリングとレール凹凸測定例

て、波状摩耗の凹凸がきれいに取り除かれていることがわかります。また、レール削正によってレール凹凸が取り除かれた区間では、車上モニタリングによる指標が大幅に低下しており、音によるレール凹凸のモニタリングでも、レール削正の効果を適切に把握できていることがわかります。

このように、レール凹凸を診る技術は、レール削正作業前後のレール凹凸状態を把握・管理し、その仕上り状態を確認するためにも活用が可能です。

おわりに

ここで紹介したレール波状摩耗モニ

タリング装置やレール凹凸連続測定装置は、一部の鉄道事業者において、すでに実用化済み、あるいは実用化されつつあります。ここで紹介した技術が、鉄道事業者のレール波状摩耗、さらにはレール凹凸管理の一助になることを期待します。[RRR]

文献

- 1) 田中博文, 芳賀昭弘: 車上からレール波状摩耗をとらえる, RRR, Vol.68, No.4, pp.10-13, 2011
- 2) 田中博文, 清水惇: 波状摩耗管理のための可搬型レール凹凸連続測定装置の実用化. 鉄道総研報告, Vol.29, No.8, pp.35-40, 2015