

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

# レール波状摩耗の発生メカニズムを解明する

レール波状摩耗は、規則的な間隔でレール表面が波状に摩耗する現象であり、その発生機構の解明は長年の課題でした。鉄道総研では、これまで、理論解析やシミュレーション解析により波状摩耗の成長機構と進展過程を示すとともに、営業線でのレール凹凸の精密な計測結果をもとにこれらの検証を続けてきました。ここでは、これまでの研究によって明らかになったレール波状摩耗の発生メカニズムをわかりやすく紹介します。



網干 光雄  
Mitsuo Aboshi  
研究開発推進部  
主管研究員



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



梶原 和博  
Kazuhiro Kajihara  
軌道技術研究部  
軌道管理研究室  
研究員

## レール波状摩耗とは

レール波状摩耗は、車両の走行にともなって、図1に示すように、規則的な間隔でレール表面が波状に摩耗して凹凸が生じる現象で、軌道のさまざまな箇所が発生します。レール波状摩耗は、車両走行中の振動や騒音の発生原因となり、また、軌道部材の劣化要因にもなることから、対策が求められています。

レール波状摩耗は、国内だけでなく世界各国で見られ、その発生メカニズムの解明は鉄道分野での長年の課題の一つでした<sup>1)</sup>。また、波状摩耗は、パンタグラフがしゅう動接触する架線にも発生しますが<sup>2)3)</sup>、いずれの場合も、接触走行にともなって形成される鉄道固有の境界問題ともいえます。

## レール凹凸の精密計測

レール波状摩耗の発生メカニズムを解明するためには、まずは現場で発生している波状摩耗を正確に把握することが必要です。そのため、レール凹凸を精密に計測できる装置<sup>4)</sup>を開発しています。この計測装置は、非接触のレーザー変位センサーを複数配置すること

で、レール凹凸を連続的にかつ精密に計測することができます。図2に示すように、この装置をレールに載線して、人力で移動させながらレール凹凸を計測します。

## レール波状摩耗の特徴

これらの計測結果からわかったことは、波状摩耗の波長は、3cm程度の短いものから、1m近い長いものまでさまざまであること、凹凸振幅(参照)は、目に見えないほどの小さなものから、0.5mm程度の大きな凹凸まで見られることなどです。波長の長い波状摩耗ほど、その凹凸が大きい傾向があります。

また、波状摩耗は、曲線区間の内側のレールに発生する例が比較的多いですが、曲線区間の外側のレールや直線区間のレールにも見られます。

### 凹凸振幅

凹凸の大きさを表します。ここでは、波状摩耗の谷部と山部の高低差のことをいいます。



図1 レール波状摩耗の例



図2 レール凹凸連続測定装置

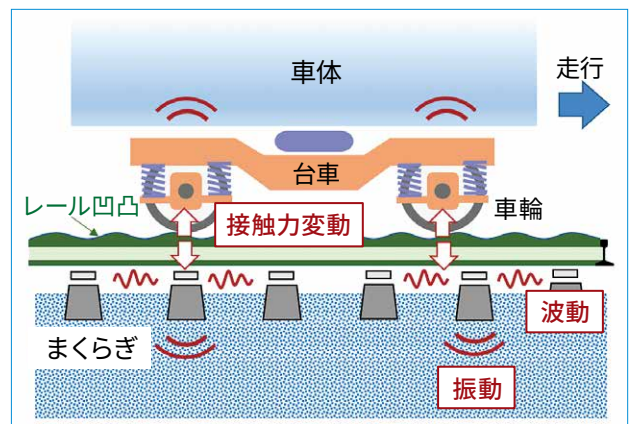


図3 レールに凹凸がある場合の軌道と車両の振動

### レール波状摩耗の成長機構

1両の車両が通過する際のレールの摩耗量はわずかですが、多数の車両が繰り返し通過すると、いずれ人の目でも規則的な間隔の波状摩耗が判別できるようになります。このことは、車両が通過するごとに特定波長のレール凹凸が増幅するなんらかの成長機構が、波状摩耗には備わっていると考えた方が自然です。

この成長機構を調べるために、次のような解析を行いました。まず、軌道と車両の相互作用を組み込んだ動力学の理論解析モデル<sup>5)</sup>を用意します。これを用いて、ある波長の凹凸がレールにあると仮定して、そこを車両が走行する際に、軌道や車両にどのような振動や波動が発生して、レールと車輪

との間にどのような接触力(輪重)変動が周期的に発生するのかを調べます(図3)。次にその結果から、接触力に比例してレールが摩耗すると仮定して<sup>6)</sup>、車両が通過する前と後で凹凸振幅の大きさを比較します。もし、車両通過後の方が通過前に比べて凹凸振幅が増幅していれば、その波長の波状摩耗は成長するということになります。逆に、もし車両通過後に凹凸振幅が減少するのなら、その波長の凹凸はいずれ消滅することになります。

さまざまな軌道条件や車両条件、速度条件でこの凹凸の増幅率を調べてみると、凹凸が成長しやすい波長が複数存在することがわかりました。

詳しく解析すると、これらの波長では、図4に示すように、レール凹凸の

谷部で接触力が大きく、山部で小さいことがわかりました。したがって山部より谷部の摩耗が速く進むことから、車両が通過するごとに凹凸振幅が増幅することになります。これが波状摩耗の基本的な成長機構と考えられます。

### レール波状摩耗の成長要因

車両の通過による凹凸振幅の増幅率が大きいということは、凹凸振幅がそれだけ速く大きくなり、波状摩耗としてすぐに顕在化することを意味します。そこで、凹凸振幅の増幅率が大きくなる条件をもう少し詳しく分析すると、軌道や車両の振動特性に起因することがわかりました。

一般的に、ある振動系に周期的な作用力を加えたときに、加振力の周波数

によってその変位量は異なります。例えば、質点とばねで構成される振動系では、図5 (a) のように、周波数1では小さな力しか作用させていないのに大きく変位する場合もあれば、図5 (b) のように、周波数2では大きな力を作用させてもわずかしか変位しない場合があります。

理論モデルによる解析の結果、凹凸振幅の増幅率が大きくなるのは、軌道と車両を振動系と見たときに、図5 (b) のように、大きな力を作用させても変位しにくい（動きにくい）周波数に相当することがわかりました。言い換えれば、レール凹凸の振幅で軌道や車両を強制的に変位させるとき、それらが動きにくい周波数ほど大きな力が発生するという事です。レールと車輪間に大きな接触力が作用するということは、凹凸の谷部の摩耗がそれだけ速く進み、凹凸振幅が大きく増幅することになります。簡単にいえば、波状摩耗として成長しやすい波長は、軌道や車両が動きにくい周波数に相当するといえます。

さらに詳しく調べると、具体的な成長要因として、軌道や車両の振動特性に起因する4つの要因をあげることができます<sup>5)</sup>が、ここでは詳細は省きます。

### レール波状摩耗の波長

波状摩耗の波長は、上で述べた凹凸振幅が増幅しやすい波長に相当します。この波長は、軌道と車両の構造やそれらの振動特性、また、その箇所を走行する列車速度によって異なりますので、実際の条件によってさまざまな波長の波状摩耗が発生することになります。

国内の営業線において波状摩耗を実測した結果と、その箇所の軌道条件や車両条件、列車速度をもとに凹凸振幅の増幅率を理論計算した結果を比較す

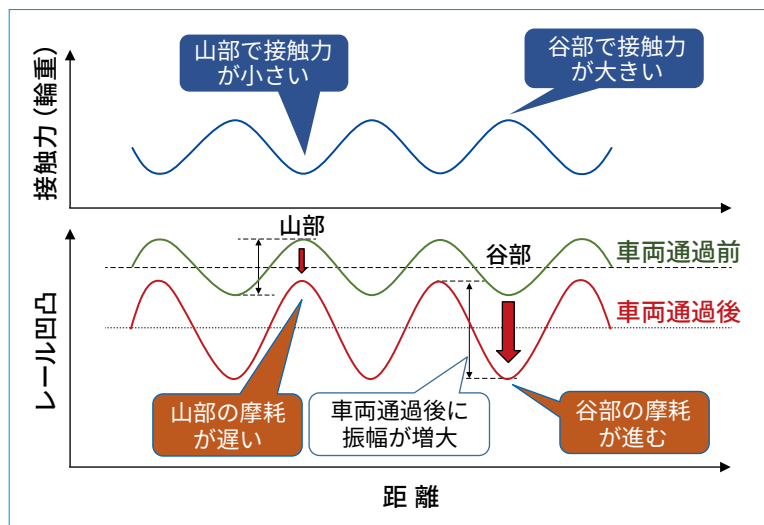


図4 レール波状摩耗の成長機構のイメージ

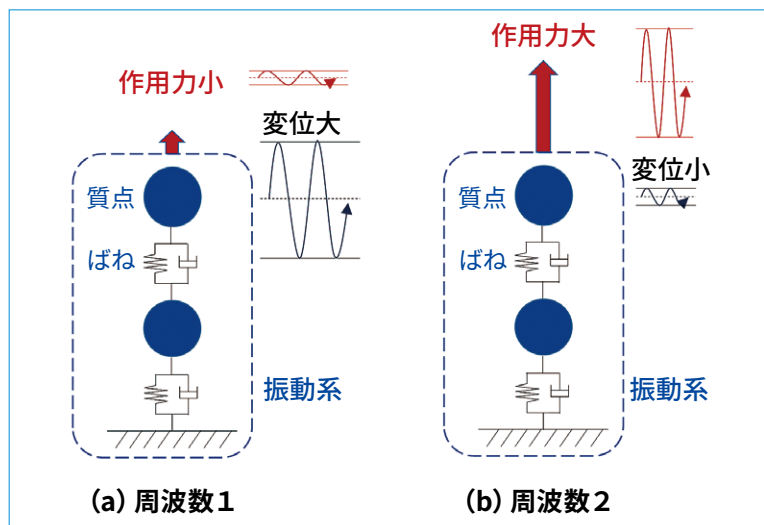


図5 振動系の作用力と応答変位

ると、波状摩耗の波長は理論値とほぼ合致することが確かめられています<sup>7)</sup>。

図6に、ある路線における波状摩耗の波長と列車速度との関係を示した一例を示します。この図は、実測したレール凹凸波形から列車速度ごとに波長と凹凸の大きさを表したもので、赤色ほど凹凸が大きく、青色ほど小さいことを示します。この路線においては、波状摩耗の波長が30～100mm程度の広範囲にわたっていることがわかりますが、列車速度が速いほど波長が長くなる傾向が見られます。一方、この路線

の条件をもとに理論計算から波状摩耗の波長を予測すると、図中に示したように実測結果とほぼ合致することを確認しました。

### レール凹凸振幅の飽和

これまで述べたように、波状摩耗は成長機構を備えています。どこまでも成長し続けるわけではありません。波状摩耗の成長の様子を数値シミュレーションで詳しく解析すると<sup>5)</sup>、凹凸振幅がある大きさにまで成長すると、その後の成長が抑制されて、凹凸振幅

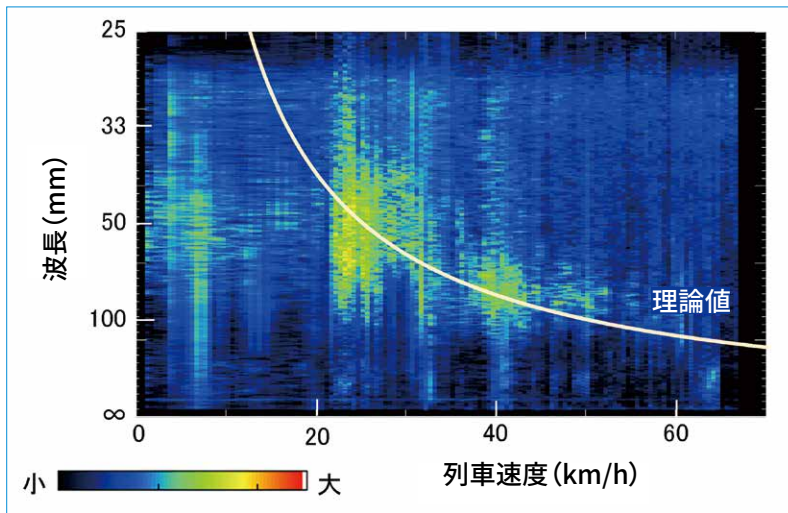


図6 レール波状摩耗の波長と列車速度との関係の一例

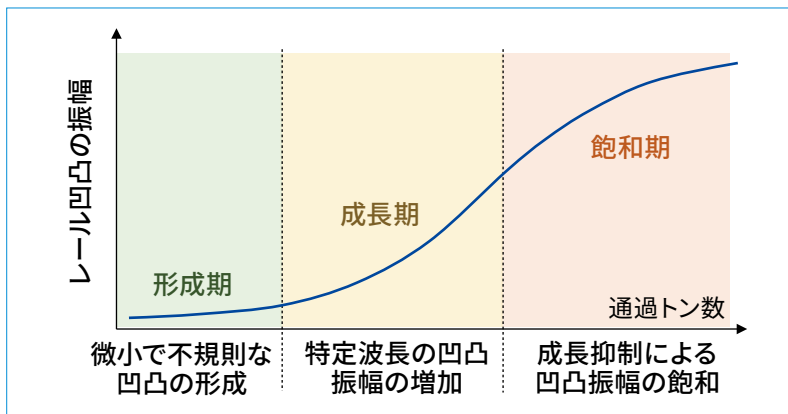


図7 レール波状摩耗の進展過程

が飽和する傾向が見られます。これは、波状摩耗が成長して凹凸振幅が大きくなると、いずれ車輪がレール凹凸に追従できなくなり、前に述べた成長機構が抑制されるためと考えられます。

凹凸振幅が飽和する傾向は、営業線において波状摩耗の経時変化を計測し

た結果でも確かめられています<sup>7)</sup>。

### レール凹凸の形成

波状摩耗は成長機構を備えているので、初期の段階において微小で不規則なレール凹凸や接触力（輪重）変動があれば、軌道のどこでも発生しようと

考えられます。ただし、その成長の進行度合いは、前で述べた凹凸振幅の増幅率の大きさやレールの摩耗しやすさのほか、レールの初期凹凸や接触力（輪重）変動の大小などによっても大きく異なると考えられます。

急曲線において波状摩耗が発生する事例が多いのは、レールと車輪間のすべりが大きいことなどが影響していると考えられますが、詳細な分析は今後の課題です。

### レール波状摩耗の進展過程

以上のことを総合して考えると、波状摩耗は、図7に示すような進展過程を経るものと考えられます<sup>5)</sup>。

形成期では、輪重変動などにより微小で不規則な凹凸が形成され、成長期では、これらの不規則な凹凸の中から特定の波長の凹凸振幅が増幅して波状摩耗として顕在化します。そして飽和期に入ると、成長機構が抑制され凹凸振幅は飽和に至ると考えられます。

### おわりに

従来から、波状摩耗対策としてレール削正や交換が行われてきましたが、その後も同じような波状摩耗が発生することが多いことから、メンテナンス上の課題となっています。今後、営業線の実測データによる検証を続けながら、波状摩耗の発生メカニズムに基づく具体的な対策案を提示したいと考えています。[RRR]

### 文献

- 1) 石田誠：車両とレールコルゲーション(その1～5), R&M, Vol.13, No.8～12, 2005
- 2) 網干光雄, 長沢広樹：トロッコ線波状摩耗対策の開発(在来線), 鉄道総研報告, Vol.6, No.7, pp.37-44, 1992
- 3) 藤井保和, 久須美俊一, 網干光雄, 真鍋克士：新幹線のトロッコ線波状摩耗, 鉄道総研報告, Vol.6, No.9, pp.5-12, 1992
- 4) 田中博文, 清水淳：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
- 5) 網干光雄, 田中博文：理論・数値解析に基づくレール波状摩耗の成長機構と進展過程, 鉄道総研報告, Vol.34, No.4, pp.11-16, 2020
- 6) 金鷹, 名村明, 石田誠：レール頭部の摩耗形状予測手法, 鉄道総研報告, Vol.23, No.2, pp.5-10, 2009
- 7) 田中博文, 梶原和博, 網干光雄：営業線におけるレール波状摩耗の成長機構と進展過程の検証, 鉄道総研報告, Vol.34, No.4, pp.17-22, 2020