

車上からレール波状摩耗をとらえる

田中 博文
軌道技術研究部
(軌道管理 研究員)

芳賀 昭弘
車両構造技術研究部
(車両運動 主任研究員)



たなか ひろふみ はが あきひろ

はじめに～波状摩耗は何故悪い？～

レールは、列車の走行に伴って少なからず摩耗したり損傷したりします。軌道の大部分においては、レールは一律に摩耗するので通常の摩耗管理を実施すればよいのですが、一部において線路長手方向に周期的な摩耗が発生し、凹凸を形成することがあります。これは、レールの「波状摩耗」と呼ばれており、主に急曲線の内側のレール(内軌)の頭頂面に発生します。それ以外にも、曲線の外側のレール(外軌)や直線部でも発生することが確認されています。

一般的なレール波状摩耗の波高は0.5mm以下ですが、その上を列車が走行すると大きな騒音や振動が発生するので、特に都市部の鉄道や地下鉄においてその適切な管理が求められています。また、車輪からレールに伝わる荷重の変動が増加し、道床バラストを緩めて軌道変位進みを助長したり、軌道部材そのものの劣化を促進したりすることからも、管理が必要とされています。図1に、波状摩耗の有無と軌道変位進みの関係の例を示します。横軸は通トン、縦軸は高低変位の標準偏差です。波状摩耗が発生している区間では、マルチプルタイタンパ(MTT)を投入して軌道状態を良好させても、高低変位進みを抑制することができず、すぐに軌道状態が悪化することがわかります。

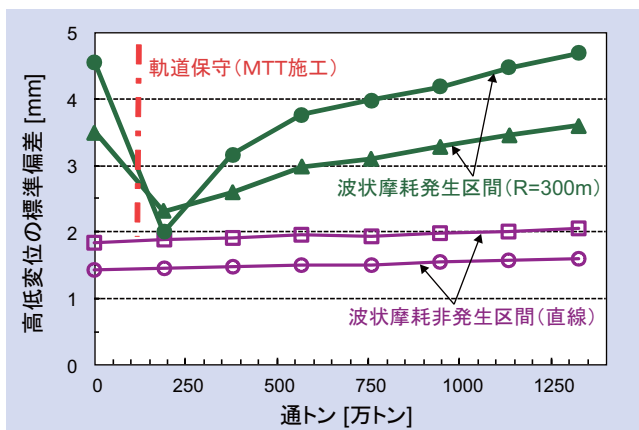


図1 波状摩耗の有無と軌道変位進みの関係の例

このレール波状摩耗に対しては、発生メカニズムについて様々な研究が行われており、その研究成果を踏まえていくつかの対策が提案されています¹⁾。しかしながら、対策が施されている区間は限られているため、現状としては多くの波状摩耗が発生しており、レール削正やレール交換でレール凹凸を除去するという対処がなされています。ここでは、線区に点在する波状摩耗を効率的に検出し、適切なメンテナンスを行うために、車上から波状摩耗をモニタリングする手法について紹介します。

レール波状摩耗の実態

(1) 波状摩耗の分類

図2に示すように、レール波状摩耗にはいくつかの形態があります。表1に、波状摩耗の分類を示します。日本で最も発生例が多いのは、急曲線内軌の頭頂面に発生する波

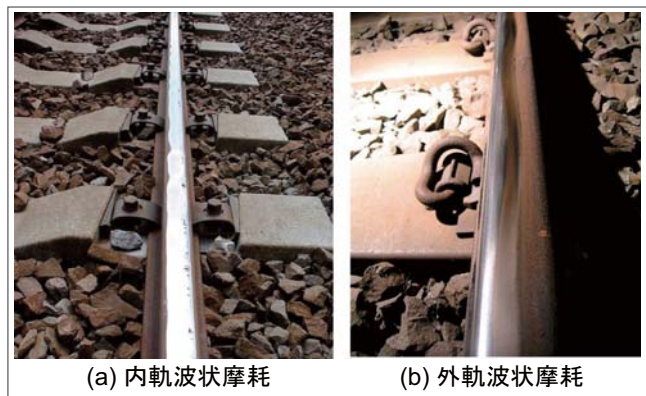


図2 波状摩耗の例

表1 波状摩耗の分類

形態	発生する線形	発生位置	一般的な波長
内軌波状摩耗	急曲線	内軌頭頂面	80～150mm
外軌波状摩耗	曲線	外軌ゲージコーナー	250～500mm
直線波状摩耗	直線	左右レールの頭頂面	250～500mm
		左右レールの頭頂面	20～80mm

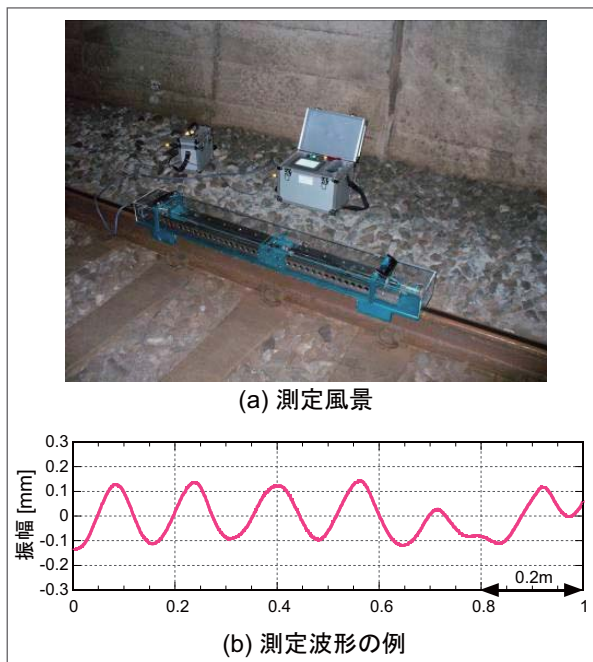


図3 固定式凹凸測定器(1mデジタル式)

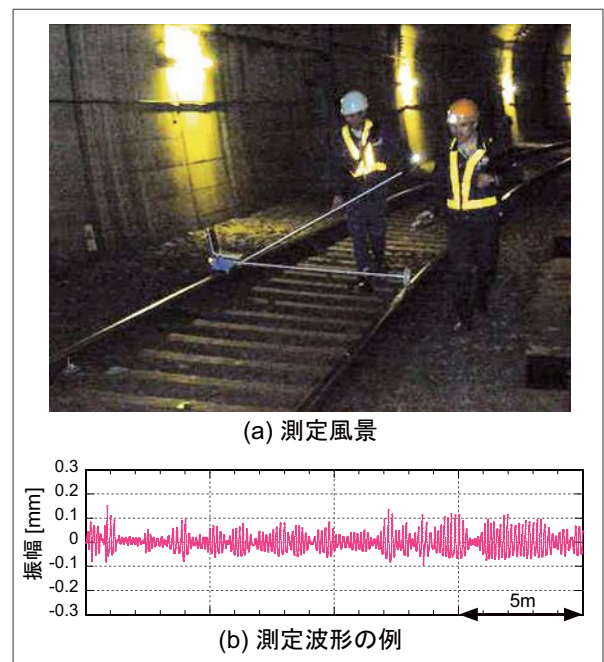


図4 連続凹凸測定器(CAT)

状摩耗です。その他にも、曲線外軌のゲージコーナー部に発生するものや、直線部の頭頂面に発生するものがあります。

(2) 波状摩耗の凹凸

これまで、現場における波状摩耗の管理は、多くの場合目視や曲線中の任意の数点での凹凸測定によって行われてきました。図3に、レールに装置を固定して凹凸を測定する凹凸測定器と、これによる波状摩耗の測定結果の例を示します。このタイプの測定器には、デジタル式と感熱紙式のものがあります。また、50cm、1m、2mと測定弦長にもいくつかのタイプがあります。

ここで、最近我々の研究グループでは、波状摩耗を点で測定するのではなく、連続的に測定する試みを始めています。図4に、CAT²⁾と呼ばれる測定器と、これを用いて曲線中の波状摩耗の凹凸を連続的に測定した結果を示します。なお、CATとは、Corrugation Analysis Trolleyの頭文字をとったものです。この装置は、線路上を徒歩で推進移動させながら、線路長手方向のレール凹凸を連続的に測定することが可能です。この図より、波状摩耗の波高は、同じ曲線中であっても一様ではなく、数m周期で波高に変化が生じていることがわかります。このことから、地上の数点での測定では、波状摩耗の波高を過小評価してしまう可能性があることがわかります。

波状摩耗を車上からモニタリングする

(1) 軸箱加速度によるモニタリング

波状摩耗は線区にわたって点在すること、および発生区間中でもその波高が変化することなどから、地上で測定して管理するよりも、車上からモニタリングする方が効率的であると考えられます。

これまで、車上から波状摩耗や溶接部の落ち込みなどのレール凹凸を検出・評価する手法として、軸箱加速度を用いる方法が研究されてきました³⁾。軸箱加速度とは、図5のような車軸を支える軸箱にとりつけた加速度センサ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います。また、レール凹凸以外にも、浮きまくらぎや墳泥などの道床劣化箇所の検出に関する研究も進められています。

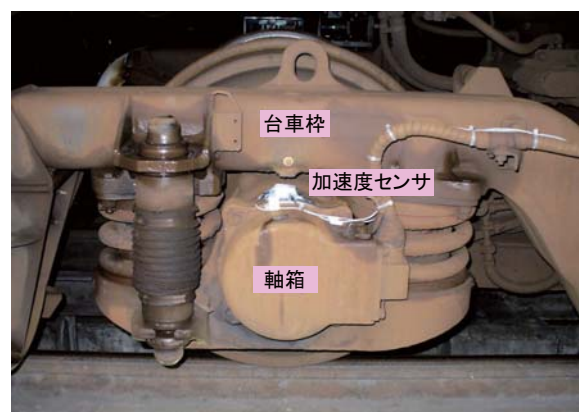


図5 営業車に取り付けた軸箱加速度センサの例

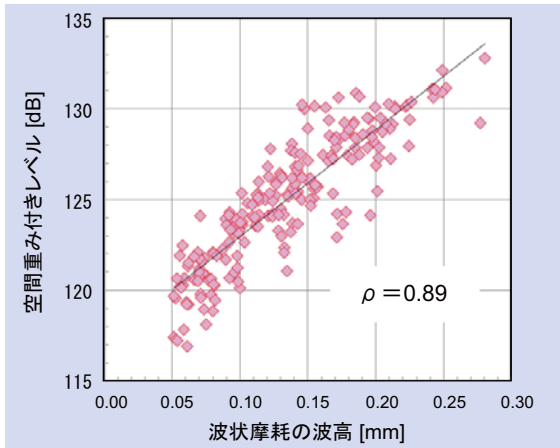


図6 軸箱加速度と波状摩耗の波高の関係の一例

軸箱に加速度センサを取り付ける車両としては、軌道検測車と営業車が考えられます。軌道検測車では、比較的容易にセンサを取り付けたり、車上の制御装置から必要な信号を分岐したりすることができますが、一方で、走行頻度が低く、曲線における走行速度にもばらつきがみられるところに難点があります。それに対して、営業車では、床下にセンサを取り付けたり、信号を分岐したりするには、難点がありますが、高い頻度で測定が可能であり、かつ走行速度も高いものを選んでデータ処理するなど、利点があります。

図6に、軸箱加速度と波状摩耗の波高の関係の一例を示します。縦軸は、軸箱加速度の測定データを我々が提案する「空間重み付きレベル」⁴⁾という指標に変換したものです。この図より、この値が大きいほど波状摩耗の波高が大きく、また両者は高い相関があることがわかります。なお、図中の ρ は相関係数といい、1に近いほど両者の関連性が高いことを示します。

(2) 可搬型モニタリング装置の開発

軸箱加速度は高い精度で波状摩耗を検出できることがわかりましたが、一方で、営業車にセンサを常設すると車両改造が必要となり、また車両運用の影響を受けるなど、測定に制約が生じます。そこで、我々は、営業車の車上で簡単に測定できることをコンセプトに、可搬型の波状摩耗モニタリング装置を開発しています。この装置は、車内のみセンサを設置し、また車両の制御装置から信号を分岐しないことに特徴があります。図7に、モニタリング装置の外観を示します。具体的には、車内騒音と車体の上下振動加速度（以下、車体加速度）で波状摩耗を検出し、GPSによる列車速度とジャイロによる曲線検知で、およそのキロ程を把握します。その後、車内騒音あるいは車体加速度からレール継目通過時の衝撃的な応答を抽出して、詳細な



図7 可搬型波状摩耗モニタリング装置の外観

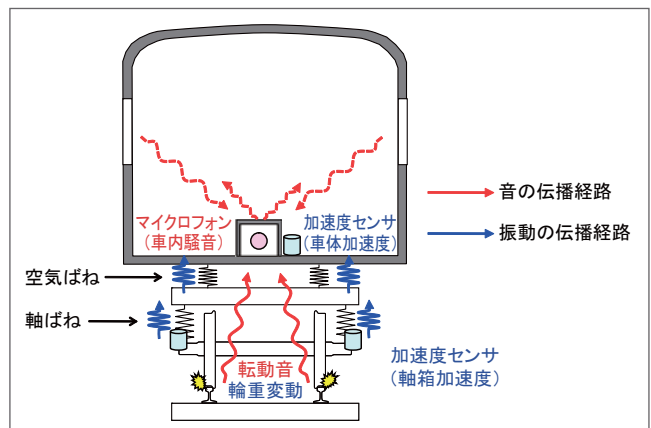


図8 波状摩耗検出の概念図

位置合わせを行います。なお、波状摩耗検出部と継目検出部は同じセンサを用いています。また、車体加速度では、波状摩耗の検出以外にも、通常の乗り心地管理も行うことが可能です。

図8に示すように、車内騒音では、波状摩耗上を列車が走行した際の転動音を検出します。一方、車体加速度では、同じく波状摩耗上を列車が走行した際の、車体床面の振動加速度を検出します。日常、列車に乗っている際に、急曲線部では車内の騒音が大きくなったり、足元からびりびりとした振動が伝わってきたりすることがありますが、これを車内で検出するわけです。ここで、内軌波状摩耗は曲線の向きによって、左右、どちらかのレールに発生しますが、台車直上にマイクロフォンを1つ設置すれば、左右どちらのレールに発生した波状摩耗も十分に検出できることがわかっています。

実際にはこれらの測定データには、様々な成分が含まれていますが、適切なデータ処理を行うことによって、波状摩耗に起因する成分のみを抽出することが可能です。図9は、波状摩耗を検出した例です。これは、波状摩耗はレール上に生じる一定波長の凹凸であることを利用し、その波

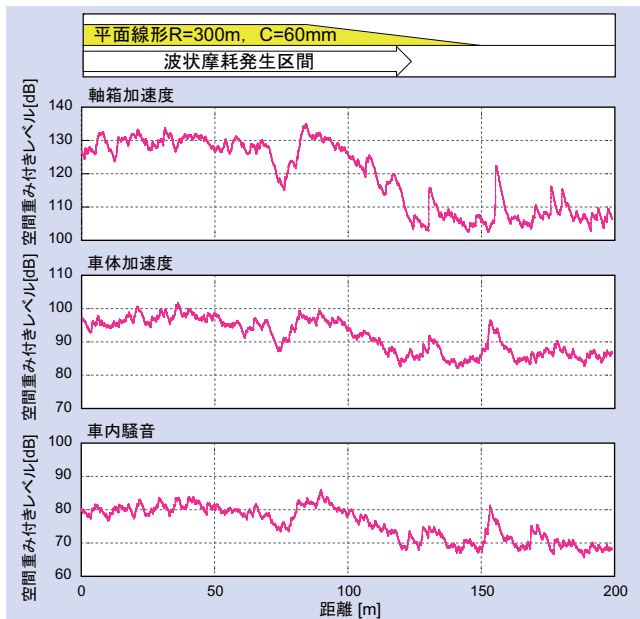


図9 波状摩耗発生区間の検出例

長の成分のみを抽出したものです。軸箱加速度と同様に、車体加速度や車内騒音でも波状摩耗の発生区間を捉えることができます。

(3) 地上測定結果との検証

可搬型のモニタリング装置で測定された結果と、実際にレールに発生している波状摩耗の大きさを比較しました。図10に、車内騒音と波状摩耗の波高の関係、同じく図11に、車体加速度と波状摩耗の波高の関係の一例を示します。縦軸は、図6の軸箱加速度と同時に測定した車内騒音および車体加速度を用いて、軸箱加速度と同じ処理をしています。これらの図より、軸箱加速度よりも多少相関は低いものの、車内騒音と波状摩耗の波高には相関があること、また、これよりも精度は劣るものの、車体加速度と波状摩耗の波高にも相関があることがわかります。ここで、車体加速度よりも車内騒音の方が相関が高いのは、車体加速度は軸ばねと空気ばねを介しての振動であるのに対し、車内騒音は空気中を直接伝播してくる音あるいは車体を伝播してくる固体音であるためと考えています。

おわりに

以上、線路上に点在するレール波状摩耗を、車上から効率的にモニタリングする手法についてご紹介しました。日本の鉄道は、山河が多いために山裾や海岸に沿って急曲線が連続する線形が多くなっています。また、都市部の地下鉄などでも、急曲線が多い線形となっています。したがって、必然的に波状摩耗が多く発生するのですが、このように線区にわたって同じ尺度で波状摩耗を管理することがで

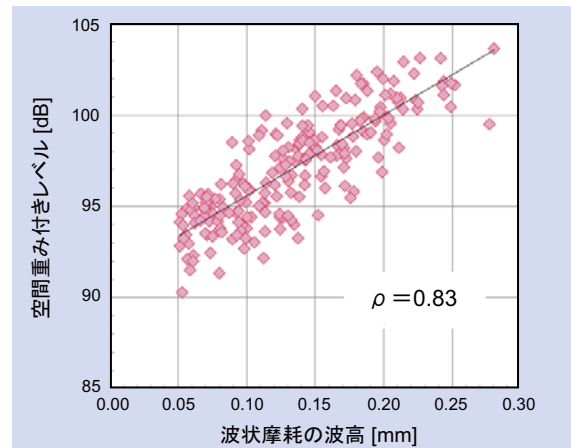


図10 車内騒音と波状摩耗の波高の関係の一例

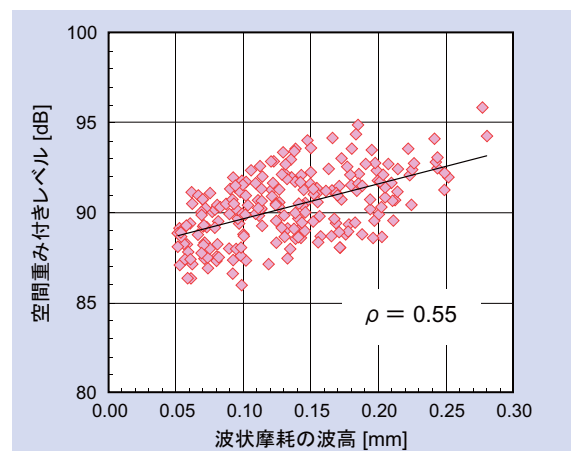


図11 車体加速度と波状摩耗の波高の関係の一例

ければ、レール削正やレール交換の優先順位を適切に検討することが可能となります。

一方、レールに波状摩耗そのものを発生しなくするような技術開発も必要であると感じております。モニタリング手法とともに、メンテナンスレスとできるような波状摩耗抑制手法についても、研究開発を行っていきたくと思っています。[RRR]

文献

- 1) 例えば、石田誠：車輪／レール間潤滑による保守低減効果，RRR, Vol.62, No.4, pp.26-29, 2005
- 2) S. L. Grassie：Rail corrugation：advances in measurement, understanding and treatment, Wear, No.258, pp.1224-1234, 2005
- 3) 須永陽一，成毛将利：在来線における転動音低減のためのレール凹凸管理手法，鉄道総研報告，Vol.16, No.4, pp.11-16, 2002
- 4) 田中博文，猿木雄三，清水惇，南木聡明：車上測定データを用いた内軌波状摩耗の検出手法，鉄道力学論文集，第14巻，pp.91-98, 2010