

S8-2-2

レール波状摩耗の波長決定メカニズムについて

(いろいろな波長の波状摩耗に共通する特徴と車軸配置の関係)

[機] ○眞 鍋 克 士 ((財) 鉄道総合技術研究所)

Wavelength Fixing Mechanism of Rail Corrugation (Common Feature in Various Wavelengths and Its Relationship with Axle Arrangement) Katsushi Manabe, Member (Railway Technical Research Institute)

Rail corrugation shows diversified wavelengths depending on various conditions such as train velocity, track curvature, vibrating characteristics of rail and so on. The author already presented a hypothesis to explain the multifarious corrugations that showed qualitative agreement with some observed corrugations. The vertical acceleration of axle box was measured and analyzed in order to investigate the wavelengths of corrugation in various track sections. It was found that the characteristics of measured wavelengths showed good agreement with ones predicted by the theory.

キーワード： 波状摩耗，コルゲーション，レール振動，波動干渉，複数車輪

Keyword: Wavy wear, Corrugation, Rail Vibration, Wave interference, Plural Wheels

1. はじめに

レール波状摩耗は直線，曲線，列車速度，力行，惰行などの線路形状，運転条件によってその波長が多岐にわたることが指摘されている¹⁾²⁾。実際に波長が最大1m程度から最小0.02m程度までの波状摩耗が観測されており，最大/最小の比率は50倍にも達している。波状摩耗の原因として接触ばね・ばね下質量³⁾，レールの小返り⁴⁾，輪軸のねじり振動⁵⁾を対象にした研究がすでにあるが，いずれも1つの車輪の走行によって波長が決まることを主張している。一方，最近，波長が複数の車輪走行の相互作用によって定まるとする研究が行なわれている⁶⁾⁷⁾。著者は，複数の車輪によるレールの振動干渉が波長を決めているとする理論と急曲線内外軌の実測値が一致することを既に報告している⁸⁾。

本報告では在来線の曲線，直線区間や新幹線に生じている波状摩耗波長を軸箱加速度の測定によって調査し，それらが理論による予測結果と良く一致することを述べる。

2. 波状摩耗予測理論と波長決定メカニズム

2.1 モデルの概要

図1のように軌道を弾性支床上の無限長梁で，車輪を質点でモデル化し，レール表面に正弦波状凹凸がある場合，1台車2車輪の走行による接触力（輪重）振幅や接触力～凹凸の位相関係を計算する。計算する手法は既に報告している⁹⁾ので，ここでは計算結果の提示とその解釈を述べる。レール表面凹凸の波長は30～200mmとし，1車輪あるいは2車輪が一定速度で走行する場合を計算した。梁の単

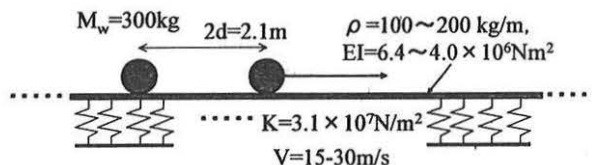


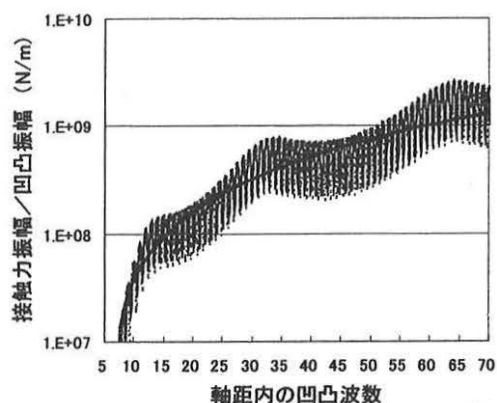
図1 波状摩耗予測のための車輪/軌道モデル

位長あたりの質量はレール質量に加えてまくらぎの質量の一部を含んだものと考えた。

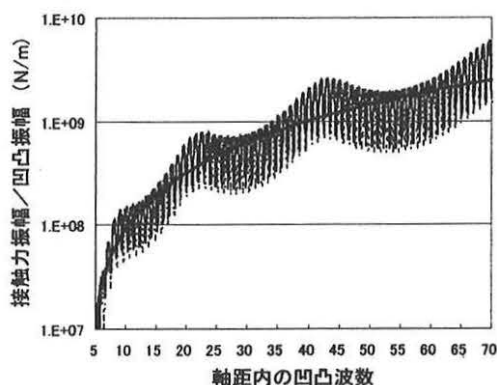
2.2 接触力変動，波状摩耗成長への複数車輪の影響

梁の単位長あたりの質量を170kg/m，曲げ剛性を50kgレールの上下剛性 $4 \times 10^6 \text{Nm}^2$ とした場合の計算結果を列車速度20，30m/sについて図2に示す。左側のグラフは接触力振幅と軸距内凹凸の波数（軸距/レール表面凹凸波長）の関係を示している。波状摩耗の成長は作用する接触力の大きさだけではなく，凹凸との位相差によっても影響される。そこで接触力変動のレール表面凹凸の位相に合致する成分を考え，これを波状摩耗促進力として定義した。すなわち，凹凸と同位相の力が働く場合摩耗促進力は正の値で，波状摩耗として成長し，凹凸と反位相の力が働く場合摩耗促進力は負になり，凹凸は減衰することを意味している。

右側のグラフは波状摩耗促進力と軸距内凹凸の波数の関係を示している。またそれぞれのグラフには1車輪が走行した場合の結果（ただし，波状摩耗促進力は2車輪走行との対等な比較のため2倍にして示してある）も併記してい



(a) 列車速度=20m/sの場合



(b) 列車速度=30m/sの場合

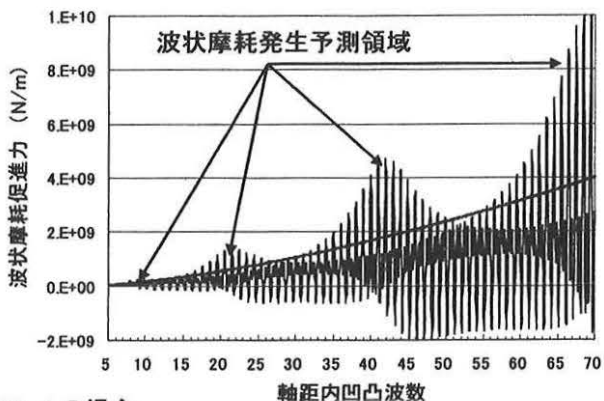
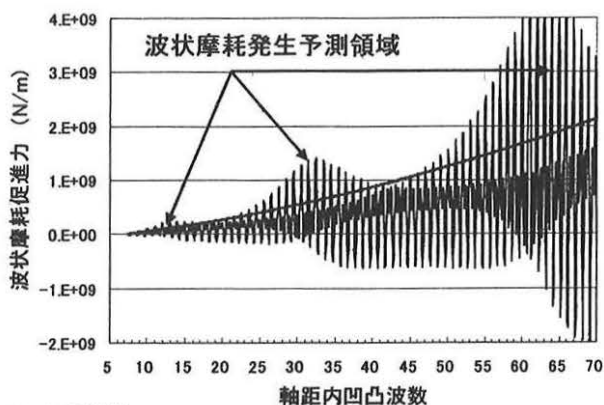


図2 接触力振幅、波状摩耗促進力と軸距内凹凸波数の関係

る。

図2より1車輪走行における接触力変動振幅は凹凸の波長が短くなるに従って全体的に増加する傾向を示している。一方、2車輪走行では軸距内の波数が1だけ変化する毎に接触力振幅が1車輪走行の値の周りで増減し、また、一般に前車輪と後車輪で異なることが分かる。

右側に示した波状摩耗促進力も1車輪走行では波長の減少に伴ってなめらかに増加しているが、2車輪走行では軸距内波数が1だけ変化する毎に増減を繰り返して示している。波状摩耗促進力が際立って大きい複数の波数領域は軸距長さで両端固定された軌道の固有振動数に相当し、波状摩耗の顕著な発生が予測される。さらに詳しく見ると、最も長い波長領域では軸距内波数が整数のとき、次の波長領域では整数+1/2のときというように、整数と整数+1/2とが交互にピークを示している。

3. 実際の波状摩耗波長

波状摩耗の生成原因を究明するには実際に生じている波状摩耗の実態を把握する必要がある。これまで①定規を用いて形状を正確に測定する¹⁰⁾、②目視で状況を記録する¹¹⁾などが行われてきたが、波長分布を正確に把握するには十分ではなかった。

一方、比較的簡単に計測できる軸箱上下加速度はレール

の波状摩耗を反映するので、軸箱加速度分析によって、振幅は正確には分からないものの、発生している波状摩耗波長を定量的に十分な精度で調べることができると考えられる。これまでも軸箱加速度の分析によって、波状摩耗を検知する試みは行われている¹²⁾が、その原因との関係について調査したものはない。ここでは在来線や新幹線の複数の区間で計測された軸箱加速度を分析することによって波状摩耗の特徴を整理し、モデルによる予測結果と比較する。

3. 1 用いた軸箱加速度データと分析方法

分析に用いたデータは在来線の急曲線部を含む5線区、合計約510km(単線換算)および新幹線の2線区約290km(単線換算)で計測された軸箱加速度である。まず、軸箱加速度の特徴を見るためその時系列を直接観察した。図3に在来線急曲線区間の一例を示す。この図には左車輪の輪重と左右の軸箱加速度波形が約60秒間、距離にして1500m分が示してある。左右の軸箱加速度には約1秒周期でパルス状の変動があるがこれはレール継ぎ目通過に伴う衝撃である。これに加えて曲線部では波形の中心線に沿って黒く塗りつぶされたように見える高周波成分が認められ、特に曲線内軌側で大きいことが分かる。この高周波成分はさらに拡大してみると、およそ百数十Hzの振動がうなりを伴っているものであることが観察される。そこでこの振動は曲

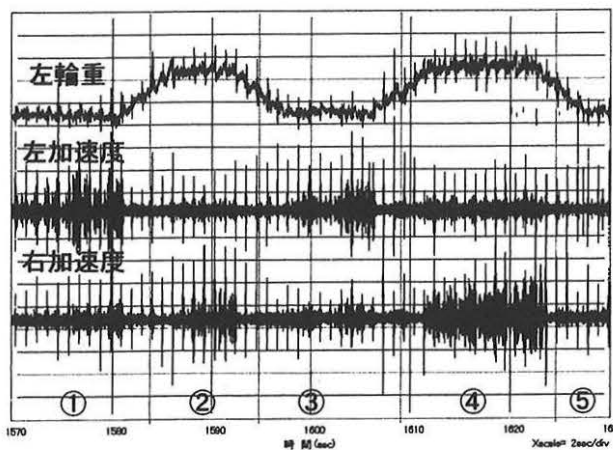
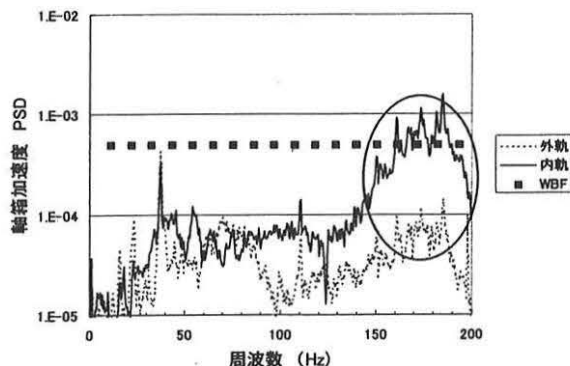


図3 連続曲線区間で計測された軸箱加速度波形

線内軌に強く発生する波状摩耗によるもので、走行速度で換算すると波長0.12~0.15m程度であることが分かる。外軌側の軸箱加速度にも、強度は弱いものの内軌側とほぼ同じ周波数の振動が共通して認められる。これは外軌にも同じ波長の波状摩耗があることを窺わせる。

波状摩耗波長の分布を調べるために、いろいろな条件毎に軸箱加速度のパワースペクトル密度 (PSD) を求めた。

(a) C7 右 R=300 V=22.5m/s



(b) N75上り 左 R=400 V=22.5m/s

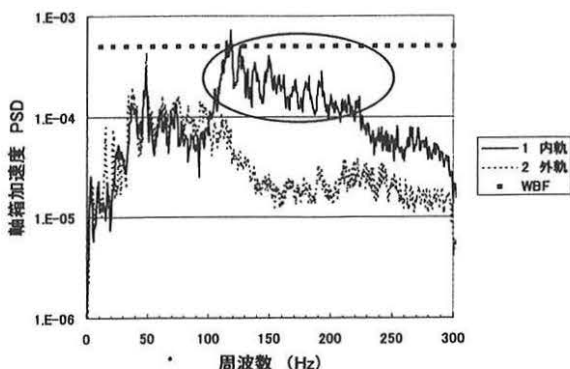


図4 軸箱加速度のパワースペクトルと軸距周波数
急曲線区間 内外軌

3. 2 区間毎のスペクトル例と特徴

在来線の急曲線区間、在来線の直線区間、新幹線の高速走行区間におけるスペクトルを求めた。図4、図5、図6にそれぞれの区間のスペクトル例を示す。

図の横軸は周波数、縦軸は軸箱加速度パワースペクトル密度 (PSD) であり、1つのグラフに左右の軸箱加速度PSDを示している。また、■印で軸距周波数を併記している。軸距周波数 (WBF) とは走行速度 (V) と軸距 (D) の整数 (N) 分の1で決まる周波数列であり、

$$WBF = N \frac{V}{D} \quad (1)$$

で定義されるものである。

図4、5、6を観察すると、区間毎に異なる特徴と共通する性状が認められる。

図4の在来線急曲線の場合には

- (1) 軸箱加速度の周波数成分には比較的広い周波数範囲にわたるなだらかなピーク領域があり、300Hz以下には2つの領域があることが多い。そこである特定の曲線内の波状摩耗は複数の波長領域で発生し、それぞれの波長領域がある程度広い範囲にわたっていることが分かる。
- (2) なだらかなピークを形成している波長領域は周波数が等間隔の複数 (3~10) のピークから構成されており、その間隔は軸距周波数間隔にほぼ一致することが分かる。すなわち、波状摩耗は連続するいくつかの軸距周波数間隔で生じていると考えられる。
- (3) 一般的に内軌では比較的短波長の、外軌では長波長のピーク領域が顕著であるが、内軌、外軌で強度の違いはあるものの共通のピーク領域が認められる。言い換えると、大きさは違うが同じ波長の波状摩耗が内外軌にあると判断される。

のような特徴がある。

図5の在来線直線区間の場合には

(c) 5-1 直線 V=24.4m/s

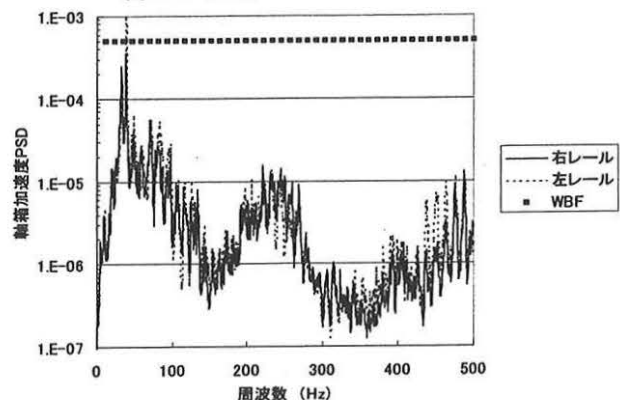


図5 軸箱加速度のパワースペクトルと軸距周波数
直線区間

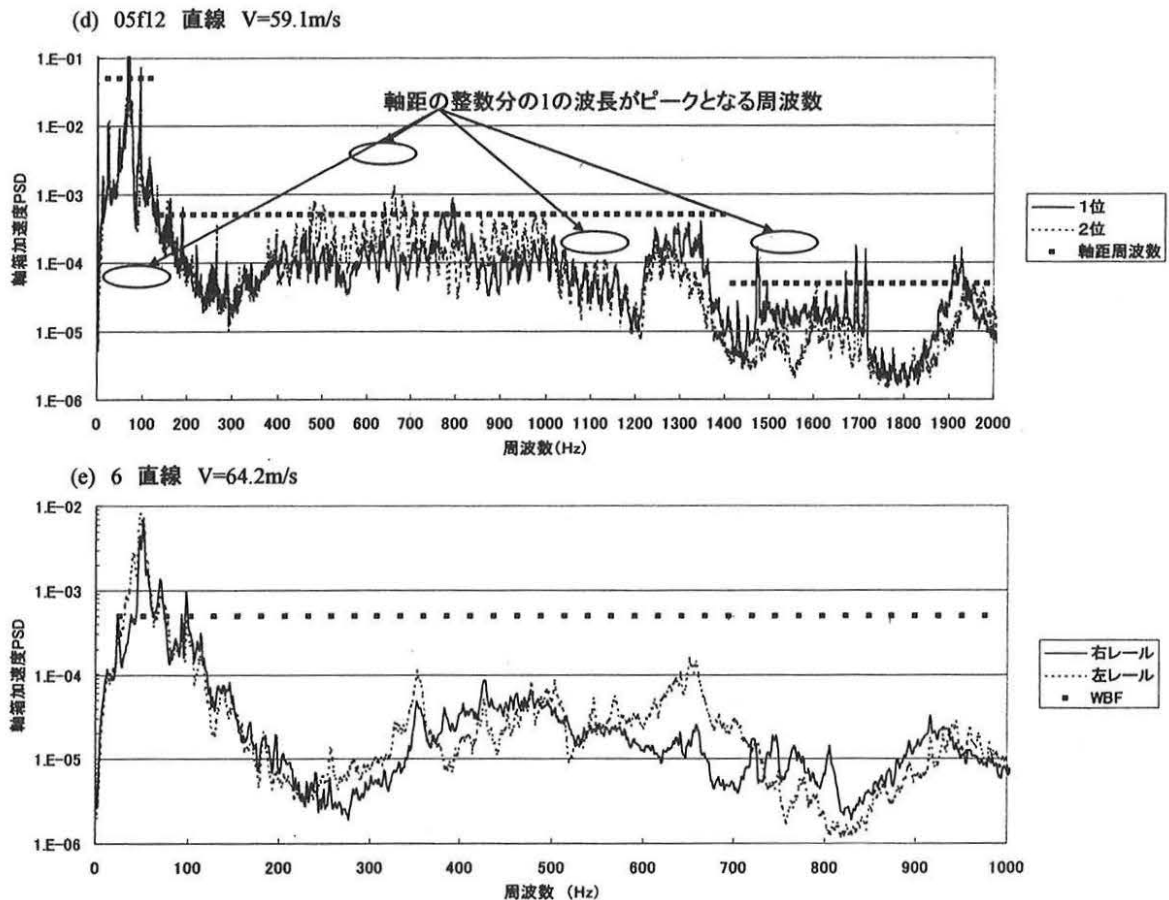


図6 軸箱加速度のパワースペクトルと軸距周波数 新幹線区間

- (4) 基本的には急曲線と同様な特徴を示しているが、左右両側で強度がほぼ等しいこと、軸距周波数間隔毎のピークが低周波 ($N=3$ 程度、波長 0.7m) から高周波 ($N=40$ 程度、波長 $=50\text{mm}$) にわたって顕著であることが目立っている。

図6の新幹線高速区間の場合には

- (5) 在来線直線区間と基本的には同じ特徴を示しているが、新幹線の場合は $N=2\sim 75$ 程度すなわち、波長で 1.2m から 30mm 程度の波長範囲で軸距周波数間隔毎の顕著なピークが認められる。
- (6) (a)に楕円で示したように軸距周波数間隔毎のピークが $N=\text{整数}$ あるいは $N=\text{整数}+1/2$ で交互にあらわれる様子が認められた。

のような特徴がある。

区間毎に内外軌による強度の違いや、発生する波長範囲の相違はあるが、波状摩耗の発生は共通して $2\times$ 軸距の整数分の1の波長で起きていることが確認された。

4. おわりに

3で述べた軸箱加速度から推定した波状摩耗波長の特徴は2に示した理論予測結果と良く一致し、いろいろな区間の波状摩耗が共通して複数車輪の走行による波動の干渉で

生じていることを裏付けることができたと考えている。

参考文献

- (1) S. L. Grassie & J. Kalousek: Proc. Instn Mech Engrs, 207(F1), 1993, pp57-68
- (2) D. R. Ahlbeck & L. E. Daniels: WEAR, 144(1991) pp197-210
- (3) 須田: 鉄道車両と技術, No95, pp28~33, 2004.4
- (4) 松本: 鉄道車両と技術, No95, pp41~51, 2004.4
- (5) 角, 松本ほか: 土木学会論文集, 425号, IV-14, 1991.1
- (6) A. Igeland: Proc. Instn Mech Engrs, Vol. 1, 210(F), 1996, pp11-20
- (7) K. Manabe: Proc. Instn Mech Engrs, Vol. 214(F), 2000, pp21-26
- (8) T. X. Wu & D. J. Thompson: 6th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2003), 2003
- (9) 眞鍋: 鉄道総研報告, Vol19, No2, 2005.2
- (10) 石田, 本: 日本鉄道施設協会誌, 5(1998), pp20-22
- (11) 池田・泉: 新線路, 平成6年5月, pp13-15
- (12) 西本: 新線路, 平成線7年5月, pp22-24