レール継目部における輪重変動評価のための軌道変位波形の検討

○［土］南木 聡明　［土］古川 敦（（財）鉄道総合技術研究所）

A study on track irregularity waveform at rail joints to estimate dynamic wheel load

Toshiaki Nanmoku　Atsushi Furukawa　(Railway Technical Research Institute)

When we evaluate dynamic wheel load or dynamic lateral force caused by track irregularities, it is general to input trigonometric function as track irregularity waveform. However, by using trigonometric function as track irregularity waveform, we can't express adequately dynamic wheel load or dynamic lateral force at local track irregularities such as joint depression or angular bent at joint. In this study, we examined an input track irregularity waveform suitable for the evaluation of dynamic wheel load at local track irregularities.

キーワード：軌道変位、レール継目部、輪重変動、車両運動シミュレーション
Key Words：Track irregularity、Rail joint、Dynamic wheel load、Vehicle dynamics simulation

1．はじめに

レール継目部は、列車の衝撃荷重により軌道の変形が促進されるため、曲線、分岐器と並び軌道の弱点箇所となっており、その走行安全性の確保や効果的な保守管理のためには、レール継目部に生じる荷重（輪重・横圧）を的確に把握することが必要となる。現在、その方法としては、実車での測定によるほか、シミュレーションによる予測が広く用いられている。シミュレーションは、様々な車両条件、軌道条件下での輪重・横圧変動を予測できるという利点があり、軌道変位の形状には、実軌道変位を入力する場合もあるが、汎用性、簡便性から一般的には正弦波などの三角関数が入力されている。

しかしながら、継目落ちや継目部角折れのような局所的な軌道変位は、短い区間で大きく変形していること、また輪重・横圧変動が衝撃的であることから、その形状を三角関数で近似すると、車両の応答を十分に表現できない可能性がある。一方、三角波のような不連続な波形では、不連続点で過大な輪重・横圧が発生するため、やはり車両の応答を十分に表現できない。このように、三角関数や三角波は、局所的な軌道変位の形状を十分に表現できないという問題がある。

そこで本報告では、局所的な軌道変位による輪重・横圧変動のうち、継目落ちによる輪重変動を表現するのに適した波形形状について検討した。具体的には、各種関数と実際の継目落ちの高低変位形状とを定量的に比較し、継目落ちの形状を表現するのに適した関数を導出したものである。また、導出された関数によるシミュレーションを行い、従来の三角関数による輪重変動との比較を行った。

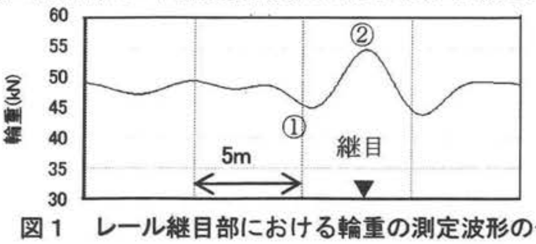


図1　レール継目部における輪重の測定波形の一例

2．レール継目部における輪重変動予測の課題

2．1 レール継目部における輪重の測定波形

図1は、ある在来線特急列車のレール継目部付近における輪重の測定結果の一例を示したものである。このように、レール継目部における輪重の変動は、継目の手前で一旦輪重が減少し（図中①）、その後レール継目部の落込みとレール遊間により緩やかに増加することがわかる。（図中②）

2．2 シミュレーションによる輪重変動予測

軌道変位として三角関数を入力したシミュレーションを行い、図1の輪重変動との比較を行った。

（1）シミュレーションモデル

シミュレーションモデルには、鉄道総研で開発した車両走行シミュレーション（Vehicle Dynamics Simulator）[1)]の1車両モデルを用いた。

（2）シミュレーション条件

継目落ちを模擬した高低変位として、三角関数を入力波形としたシミュレーションを行った。シミュレーション条件は以下のとおりである。

①線　　形…直線
②車　　両…在来線特急型電車、速度120km/h
③軌道変位…cos波1波、最大振幅－10mm

（3）シミュレーション結果と実測値との比較

入力した軌道変位波形の実振幅とシミュレーションによる輪重変動の予測結果とを図2に示す。前述の図1と比較すると、cos波によるシミュレーション結果は、軌道変位

始終端での輪重減少が急激であり、実際の挙動と合致していないことがわかる。（図中①）また、最大落込み位置での輪重増加は、実際の挙動と類似した波形を示しているが、入力波形の頂点が丸みを帯びた形状をしているためか、その増加は図1よりも緩やかである。（図中②）

以上の結果から、三角関数は、継目落ちの前後で発生する輪重減少を十分に表現できておらず、継目落ちのような局所的な高低変位を表現する波形として必ずしも適切とはいえないことがわかった。

3．レール継目部の輪重変動評価に適した軌道変位波形の検討

レール継目部の軌道変位形状を適切に表現するためには、実際の高低変位波形（継目落ち）により近似した波形（関数）を選定する必要がある。

そこで本章では、高低変位波形の候補として複数の関数を選定し、どの関数がレール継目部の高低変位波形に最も近似するかを定量的な手法により評価した。以下、検討内容およびその結果について説明する。

3．1 対象とする高低変位および関数

（1）高低変位

在来線定尺区間の代表的な高低変位波形として、在来線A、Bの2区間、合計58箇所の継目を選定した。波形例を図3(a)(b)に示す。なお今回は、レール継目部の局所的な軌道変位を表現することが目的であるため、高低変位としては、4m弦正矢を用いることとした。[2)]

（2）関数

（1）の高低変位波形から、定性的に近似する5つの関数を軌道変位波形の候補として選定した。式(1)〜(5)に各関数の式を示す。

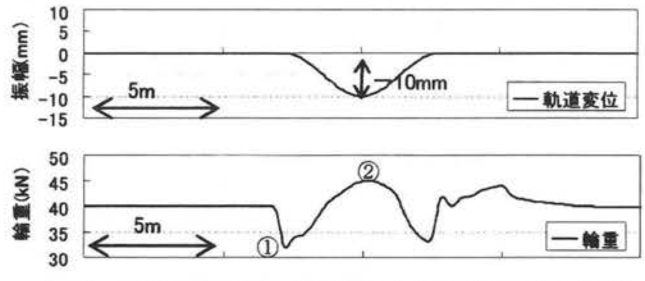
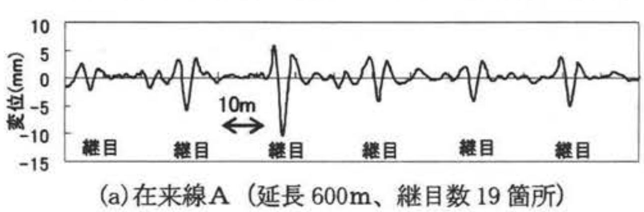
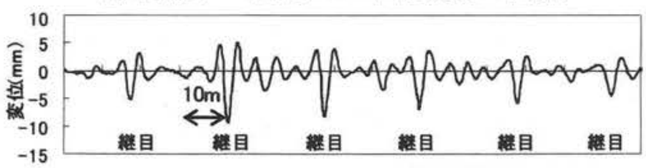


図2　軌道変位波形（実振幅）と輪重変動の予測結果



(a)在来線A（延長600m、継目数19箇所）



(b)在来線B（延長1000m、継目数39箇所）

図3　比較対象とする高低変位（4m弦正矢）

①〜⑤はいずれも2つの変数α、βにより決まる関数である。後述する波形形状に対する適合度の評価では、継目ごとに高低変位と関数との差の二乗和（式(6)）が最小となるようにα、βを求めることで、高低変位に最も近似する関数波形を導出した。なお、①〜⑤の「m」は継目中心位置であり、継目毎に決まる定数である。図4は、①、③、⑤について、実振幅の波形と4m弦正矢に換算した波形とを示したものである。ここで、各関数は実振幅の最小値を−5mm、4m弦正矢波形とy=0との交差をx=±1.5mとした場合の波形である。

①関数A
$$f(x)=\frac{\alpha}{\beta}\times\frac{\exp\{-(x-m)/\beta\}}{[1+\exp\{-(x-m)/\beta\}]^2} \tag{1}$$

②関数B
$$f(x)=\frac{\alpha}{\beta\sqrt{2\pi}}\times\exp\left\{-\frac{(x-m)^2}{2\beta^2}\right\} \tag{2}$$

③三角関数
$$f(x)=\frac{\alpha}{2}\times\left\{1+\cos\frac{\pi(x-m)}{\beta}\right\} \tag{3}$$

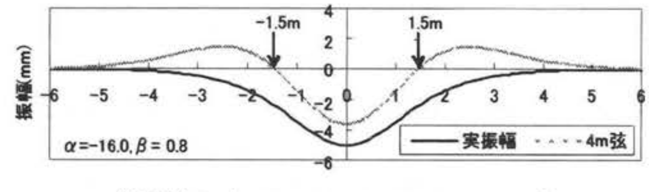
④6次関数
$$f(x)=\alpha\times(x-m-\beta)^3\times(x-m+\beta)^3 \tag{4}$$

⑤4次関数
$$f(x)=\alpha\times(x-m-\beta)^2\times(x-m+\beta)^2 \tag{5}$$

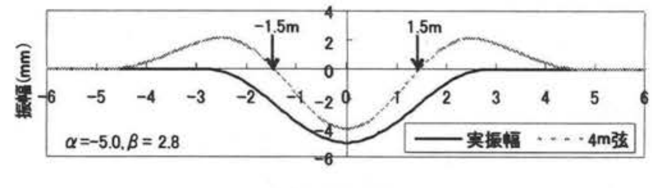
（ここでα、βは変数、mは継目中心位置）

3．2 関数と高低変位との適合度の評価

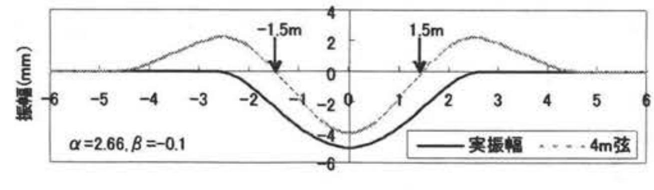
レール継目部の高低変位形状に最も近似する関数を、(1)レール継目部の波形形状との適合度、(2)レール継目部の最大落込み量との適合度の2つの観点により評価した。以下、それぞれの評価手法およびその結果について説明する。



(a)関数A（関数Bはほぼ同様の波形を示す）



(b)三角関数



(c)4次関数（6次関数はほぼ同様の波形を示す）

図4　各関数の実振幅波形と4m弦正矢換算波形

（1）レール継目部の波形形状の適合度

①評価の手法

レール継目部の高低変位の波形形状と関数との適合度を以下の手順により評価した。

1)継目ごとに関数値と高低変位値との差の二乗を評価範囲（継目中心前後 2.5m 間）のデータ数分合計し、その値が最小となるα、βを求める。（式(6)参照）

2)各継目の式(6)の最小値を全継目分合計し、これを関数の適合度とする。（式(7)参照）なお、このときの関数波形が高低変位波形に最も適合するものとなる。

3)各関数の適合度を比較し、その値が最も小さい関数を波形形状の適合度が最も高い関数とする。

なお、本報告では適合性の評価範囲を継目中心の前後 2.5m 間とした。これは、在来線 A の 4m 弦高低の波形について、全継目の継目落ちの頂点から両側の擬似波形の頂点までの距離の平均値が 2.5m であったため、その距離を評価範囲として採用したものである。

$$S = \sum_{i=j-n/2}^{j+n/2} \left(f(x_j) - m(x_j)\right)^2 \tag{6}$$

$$T = \sum_{k=1}^{N} S_{\min} \tag{7}$$

ここに、$f(x_j)$;関数値、$m(x_j)$;高低変位値、n;評価範囲（継目中心前後 2.5m）のデータ数、N;全継目数

②評価の結果

前述の評価手法により、各関数の波形形状の適合度を比較した。図5は、各関数について式(7)の値を線別に示したものである。この図から、在来線Aでは関数Bが、また在来線Bでは関数Aが最も値が小さく、波形形状の適合度が高いことがわかった。また、6 次関数、4 次関数はいずれの線区でも適合度が低く、レール継目部の波形形状を近似する関数としては適さない。なお、三角関数は、在来線Aでは関数A、関数Bと同程度の適合度を示している。このことから、対象とする波形形状によっては、三角関数が比較的良く適合する場合があることがわかった。

図6は、在来線Bについて、関数Aおよび三角関数の関数波形と高低変位波形とを重ね合わせて示したものである。このように、2 つの関数は、定性的にはどちらもほぼ同等に高低変位を表現していると評価できる。

（2）レール継目部の最大落込み量の適合度

①評価の手法

次に、レール継目部の継目中心位置での最大落込み量（最大振幅）と各関数との適合度を以下の手順により評価した。（図7参照）

1)前後の高低変位データから、頂点座標になるであろう位置を抽出する。

2)その座標に隣接する高低変位データを除いた前後4点の高低変位データによる直線回帰を行う。

3)2つの回帰直線の交点座標を求める。これを高低変位データの「みなしの頂点座標(X_i、Y_i)」とする。

4)みなしの頂点座標の x 座標での関数の y 座標を求め、これを「関数の頂点座標(X_i、y_i)」とする。

5)2つの y 座標 Y_i・y_i をそれぞれの最大落込み量とし、両者の値が近いほど適合度が高い関数とする。

ここで、高低変位に対して「みなしの頂点座標」を用いたのは、高低変位データが 0.25m ごとのサンプリング間隔であるため、その間に存在するであろう高低変位の厳密な最大落込み量を把握することが出来ないためである。

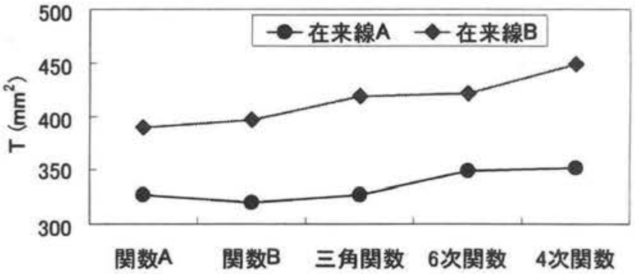


図5　関数ごとの波形形状の適合度の比較

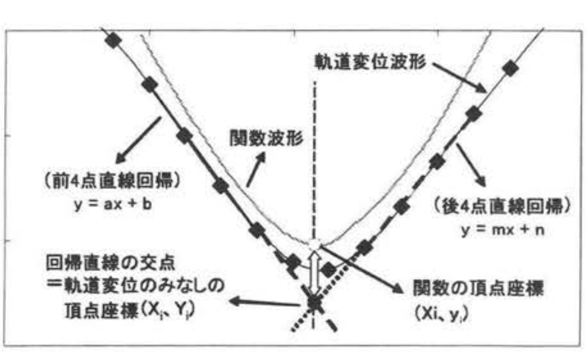


図7　関数と高低変位の最大落込み量の導出方法

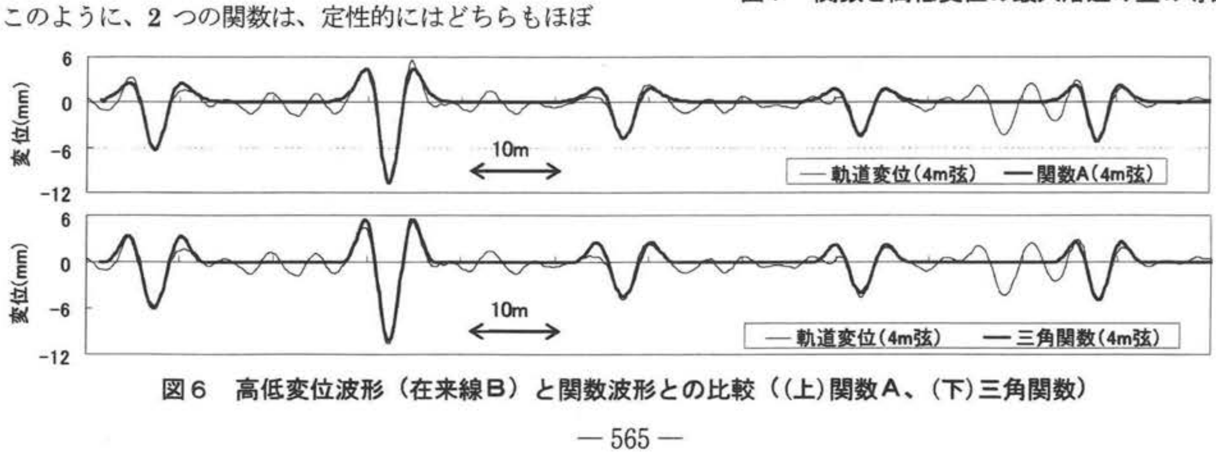
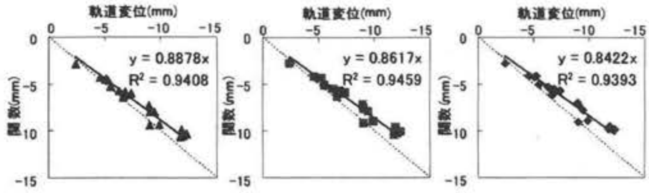
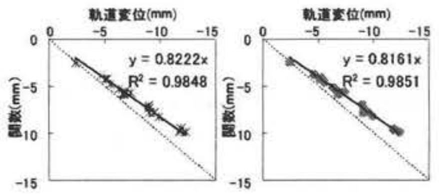


図6　高低変位波形（在来線B）と関数波形との比較（(上)関数A、(下)三角関数）



(a)関数A　(b)関数B　(c)三角関数



(d)6次関数　(e)4次関数

図８　関数と高低変位の最大落込み量の比較（在来線Ａ）

②評価の結果

図８は、在来線Ａについて、関数の頂点 y_i と高低変位のみなしの頂点 Y_i とを関数毎にプロットし、各データの回帰直線（切片＝0）を求めたものである。これらの図から、関数Ａの回帰直線の傾きが最も 1.0 に近いことがわかる。このことは、関数Ａの頂点が、軌道変位のみなしの頂点に最も近く、他の関数よりも最大落込み量の適合度が高いことを示している。なお、在来線Ｂも同様の結果を得た。

（３）結論

（１）（２）より、波形形状、最大落込み量ともに高低変位波形に最も適合する関数は、関数Ａである。

４．最適な関数による輪重変動のシミュレーション結果

本章では、関数Ａを入力波形としたシミュレーションを行い、輪重変動を確認し、その結果について考察した。

４．１　シミュレーション条件

関数Ａによる輪重変動の変化を確認するため、以下の条件によりシミュレーションを行った。なお、比較対象のため、三角関数についてもシミュレーションを行った。

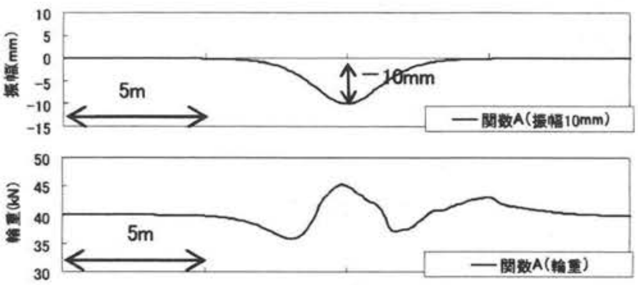
①線　　形…直線
②車　　両…在来線特急型電車、速度 120km/h
③軌道変位…（波形）関数Ａ、三角関数
　　　　　　（波数）１波（継目落ち１箇所）
　　　　　　（振幅）－5mm～－40mm（5mm ピッチ）

※軌道変位の波長は振幅によらず一定値とした。

４．２　シミュレーション結果および考察

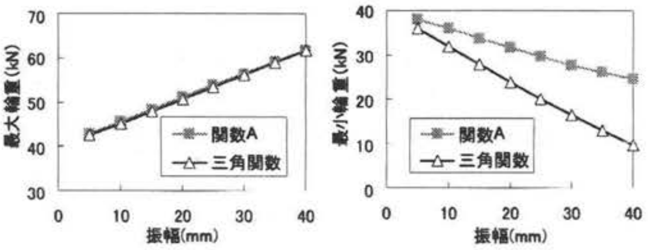
図９は、関数Ａ（振幅－10mm）を入力波形とした場合のシミュレーション結果を示したものである。この結果からわかることは次のとおりである。

・関数Ａの輪重と図１の輪重とを比較すると、両者の輪重変動は類似している。
・関数Ａの輪重と図２の三角関数の輪重とを比較すると、関数Ａは三角関数よりも輪重減少は緩やかで小さく、逆に輪重増加は急激で三角関数よりも凸な波形を示す。ただし、最大輪重には有意な差は見られない。



(上)入力軌道変位、(下)輪重

図９　入力波形および輪重変動の予測結果



(a)最大輪重　(b)最小輪重

図１０　振幅による最大輪重・最小輪重の変化

また、図１０は振幅別の最大輪重、最小輪重を纏めたものである。この結果からわかることは次のとおりである。

・最大輪重については、波形による差異は見られない。
・最小輪重については、三角関数の減少率が大きく、関数Ａの約２倍の減少率を示している。

以上より、関数Ａは三角関数よりも車上輪重の変動を的確に表現できることがわかった。また、入力波形の違いは、最大輪重には殆ど影響しないものの、輪重減少に大きく影響することがわかった。このことは、シミュレーションに三角関数を用いると、過度に輪重減少を評価する恐れがあることを示している。

５．まとめ

本報告から得られた結果は次のとおりである。

（１）継目落ちのような局所的な軌道変位波形に最も適合する関数は、関数Ａである。
（２）シミュレーションにより、継目落ちのような局所的な軌道変位による輪重変動を評価する場合、入力波形として関数Ａを用いることで、輪重変動をより的確に表現することができる。

参　考　文　献

1)　宮本岳史、石田弘明、松尾雅樹：地震時の鉄道車両の挙動解析（上下、左右に振動する軌道上の車両運動シミュレーション）、日本機械学会論文集（C編）、1997.12
2)　泉英治、米澤秀剛：偏心矢データを用いた短い波長の軌道変位管理手法、新線路、2008.04