

S2-2-2. 走行安全性を考慮した連続軌道狂いの管理手法

〔土〕 〇元好 茂

〔土〕 古川 敦

神山 雅子

((財)鉄道総合技術研究所)

Criteria of continuous track irregularity for vehicle running safety

Shigeru Motoyoshi

Atsushi Furukawa

Masako Kamiyama

(Railway Technical Research Institute)

In the present criteria for track maintenance, we can not manage "continuous" track irregularity. First, the author predicts the dynamic wheel load with the track irregularity. Second, the author calculates the amplitude of the continuous irregularity when the decrease in wheel load reaches the safety criteria with changing the wavelength and the number of peaks of the irregularity. In this way, the author examines running safety of a vehicle on the continuous track irregularity.

キーワード：走行安全性、連続軌道狂い、波長、輪重減少、複合狂い

Keywords: Vehicle running safety, Continuous track irregularity, Wavelength, Decrease in wheel road, Compound track geometry

1. はじめに

鉄道車両の走行安全性や乗心地を確保するために、整備基準値・目標値を用いて軌道狂いの評価・判定が行われるが、これらの指標はあくまで点における軌道変位量であり、前後との連続性を考慮した指標ではない。例えば、同一波長の狂いが連続するような軌道狂いが存在し、その波長と走行速度に対応する周波数が、車両の固有振動数に一致すると、車両が共振を起こし乗り心地や走行安全性が低下することがあるが、点における管理指標ではこのような軌道狂いの連続性は考慮されない。

連続性を考慮しているものとしては、貨物列車走行線区で行われている通り狂いと水準狂いを組み合わせた複合狂い管理¹⁾があるが、これは 0.8~1.0Hz 付近にローリングの固有振動数を持つ 2 軸貨車の脱線防止を目的としたものであり、2 軸貨車が減少した現在、これに代わるより一般的な管理指標を検討する必要がある。

これらの背景に対し、本研究では連続的な軌道狂いが走行安全性に与える影響の把握を行うことにより、連続軌道狂いの限度値の試算を行う。具体的には、軌道狂いから輪重変動を予測する手法を用いて輪重減少率が目安値となる場合の軌道狂い量を算出し、連続軌道狂いの波長や波数が走行安全性にどのような影響を及ぼすのかを分析する。

なお、走行安全性の評価指標には脱線係数（横圧／輪重）があるが、これは輪重が小さくなれば僅かな横圧の変化でも容易に限度値に達することになる。また、脱線係数の大きさが同程度の大きさの場合、輪重減少が大きいほど乗り上がりやすきことが知られている。このことより、評価指標として脱線係数の他に輪重減少率が従来から用いられており²⁾、本研究でもこの輪重減少率により走行安全性

の評価を行う。尚、動的輪重減少率の目安値として一般的に 0.8 (80%) が用いられており、本稿でもこの値を用いる。

2. 軌道狂いによる輪重変動の予測手法

本稿では輪重減少率により走行安全性の検討を行うが、輪重を定期的に測定し、保守に活用することは非常に稀である。そこで、定期的に測定される軌道狂いから輪重変動を予測できれば、保守実務へのスムーズな適応が可能となると考え、輪重予測手法を考案した³⁾。本章ではその予測手法について述べる。尚、以下で実例として挙げているのは、在来線特急型列車、速度 110km/h のケースである。

2.1 3 入力 1 出力輪重変動予測モデル

輪重変動をもたらす軌道側の要因としては、高低・通り・水準狂いがあり、これらの軌道狂いから輪重変動を予測するモデルを作成した。この予測モデルは、3 入力（高低・通り・水準狂い）1 出力（輪重変動）の状態空間モデル（図 1）であり、パラメータ同定には軌道狂い・輪重の実測データを用いた。

尚、平面性狂いによるロール振動も輪重変動の主要因であるが、水準狂いと任意の間隔の平面性との関係は線形系で表せるため、このモデルは平面性の影響も取り入れていることになる。

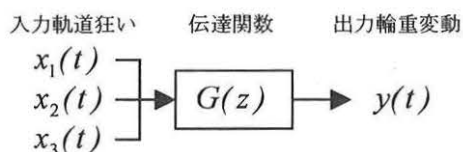


図 1 3 入力 1 出力の輪重変動予測モデルのシステム

輪重実測波形と、このモデルを用いた輪重予測波形との比較を図 2 に示す。実測波形は同定に用いた区間とは別の区間である。予測波形は実測値の変動を良く再現しており、この予測モデルの有効性を示している。

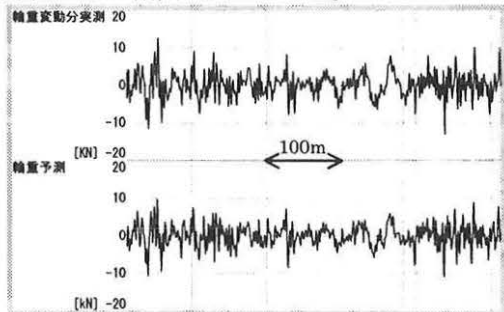


図 2 輪重変動の実測波形と予測波形

2.2 個々の軌道狂いと輪重との関係

個別の軌道狂いが輪重変動にどのような影響を及ぼしているのかを知るため、各種軌道狂いと輪重の実測値より求めたコヒーレンスを図 3 に、周波数応答関数を図 4 に示す。これらより、水準狂い・通り狂い・高低狂いのいずれも輪重変動に影響を及ぼしており、かつその度合いは周波数によって異なっていることがわかる。

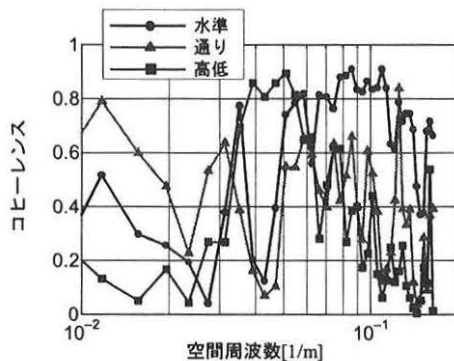


図 3 各種軌道狂い量と輪重とのコヒーレンス例

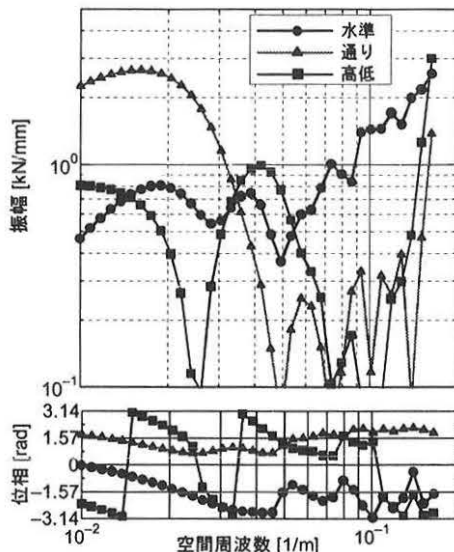


図 4 各種軌道狂いから輪重変動の周波数応答関数 (110km/h 走行時)

3. 連続軌道狂いの限度値の試算

前章で示した軌道狂いによる輪重変動の予測手法では、入力する軌道狂いは点での値ではなく連続した波形であるため、連続軌道狂いの走行安全性の評価が可能である。ここでは、この予測手法を用いて連続軌道狂いが輪重変動に及ぼす影響の解析を行った。

具体的には、波長・波数別に数パターンの正弦波状の軌道狂いを設定し、これによる輪重変動波形を予測手法により算出し、その絶対値最大箇所における輪重減少率を求めた。これを入力軌道狂いの振幅 (10m 弦正矢値) を独立に変化させながら行い、輪重減少率が 0.8 となる振幅量 (正弦波の片振幅) を限度値とした。

なお、軌道狂い波形の入力は水準狂い・通り狂い・高低狂いの 3 種が可能であるが、ここでは複合狂いでも対象となる水準狂いと通り狂いの複合時における影響を主な対象とするため、2 種の入力とした。また、予測モデルは断りの無い限り、在来線特急型電車、速度 110km/h のものを使用している。

入力軌道狂いのパターンは以下のとおりである。

- ・形状 正弦波
- ・波長 10, 20, 30, 40, 50m
- ・波数 単独 1 波, 連続 3 波, 連続 5 波 (同一波長)
- ・組み合わせ 同一波長の水準・通り狂いが逆位相で複合

以降では、条件別に考察を行う。

(1) 波長

算出した限度値を波長別にプロットしたものを図 5 に示す。なお、限度値は軌道狂い 1mm 単位で算出しているが、図では限度値の包絡線を直線で描いているため、直線または折線となっており、以降これを限度線と呼ぶ。この限度線の内側 (狂い量の小さい側) が安全側、外側が危険側ということになる。また、縦軸・横軸の切片は、1 種の軌道狂いが孤立して存在する場合の限度値となる。

通り狂いは、波長が長くなるに従って、限度値が厳しくなる傾向を示している。これは図 4 の振幅特性からも明らかであるが、通り狂いは局所的な狂いよりも、波長の長い狂いのほうが輪重減少を引き起こしやすいことがわかる。

水準狂いは、通りとは逆に波長が短くなるに従って、限度値が厳しくなる傾向にある。これは、波長が短いほど固定軸距や台車中心間距離の平面性狂いの影響が大きくなるために、輪重減少を起しやすくなっていると考えられる。尚、波長 20m のみその傾向から外れているが、これは図 4 において最も振幅特性が低くなる波長帯であるためである。

(2) 波数

波数別に限度値をプロットしたものを図 6 に示す。波数が増すことにより、限度線は厳しい側に動くが、波長が長くなるにつれてその差は小さくなる。波長 30m では通り狂い側の差が無くなり、波長 50m では全体で限度線がほぼ同じとなる。これより、通りは波長 30m、水準は波長 50m であれば、1 波で既に定常状態に近づいていると考えられる。

なお、連続 5 波については、いずれの波長の場合も連続 3 波とほぼ同じ限度線となったため図では省略したが、過去の軌道狂い設定試験⁴⁾より 3 波長あれば車両走行特性が定常状態に達することがわかっており、このことが改めて確認できた。よって、限度値としては、波長が 10m と短い場合でも連続 3 波までを考えればよいと言える。

(3)速度差

速度差による影響を調べるため、新たに速度 70km/h における予測モデルを作成して同じく限度値を試算し、110km/h の場合と比較した結果を図 7 に示す。

これによると、速度による差は通り狂い側の方が大きくなっており、通り狂いは速度が高くなると限度値は厳しくなっている。

一方、水準狂いには速度依存性があまり無い。これは、スペースの都合上載せていないが、速度が 70km/h³⁾と 110km/h の場合の周波数応答関数を比較すると、検討した波長帯では顕著な差は見られないことに関係する。また、水準狂いは固定軸距や台車中心間距離のように幾何学的に定まる距離の平面性狂いが主として影響するため、走行速度に関係無く輪重減少が生じていると考えられる。

(4)波長組み合わせ別

以上は、水準狂いと通り狂いが同一波長で複合している場合としたが、現実の軌道狂いには様々な波長が複合している。そこで、(1)の結果より輪重減少を起しやすい波長の組み合わせとして、水準は波長 10m、通りは波長 30m を選び、これらが複合している場合についての限度値を計算した結果を図 8 に示す。これによると、同一波長が複合する場合よりも厳しい限度線となっており、軌道狂い種別ごとにそれぞれ輪重減少を最も誘発しやすい波長が複合する場合に、特に注意が必要となる。

(5)位相差

ここまでは水準狂いと通り狂いが逆位相で複合する場合について検討を行ったが、ここではその他の位相差の影響度を知るため、位相を $\pi/2$ [rad]ずつ変化させた 4 パターンについて行った結果を図 9 に示す。

同図より、逆位相状態が最も危険となることがわかり、逆位相での限度線を用いることが妥当であることが確認できた。また、現在の複合狂いが「水準狂いと通り狂いが逆位相で連続している」場合に適応すべきことを裏付ける結果となった。これは、図 4 において水準と通りの位相特性が波長 30m では約 π [rad]ずれていることから判断できる。

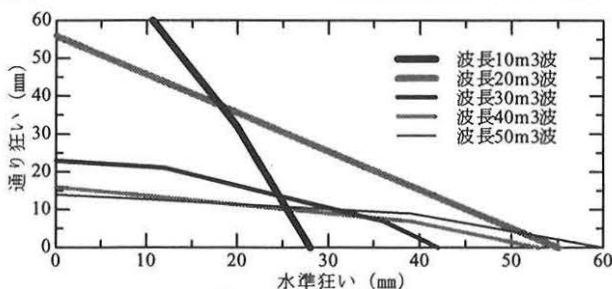


図 5 波長別の限度線

同位相の場合、例えば通り狂いが輪重増加、水準狂いが輪重減少を起して互いに打ち消し合うため、通り狂いが存在する場合には水準狂い量が多いほど安全という結果となっている。

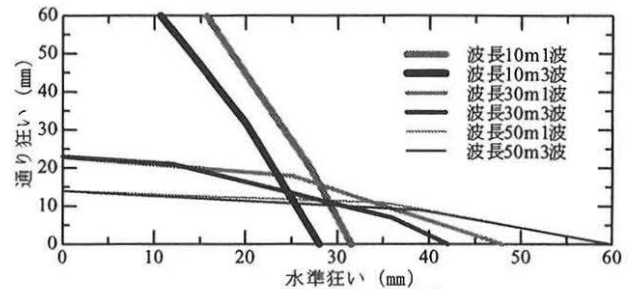


図 6 波数別の限度線

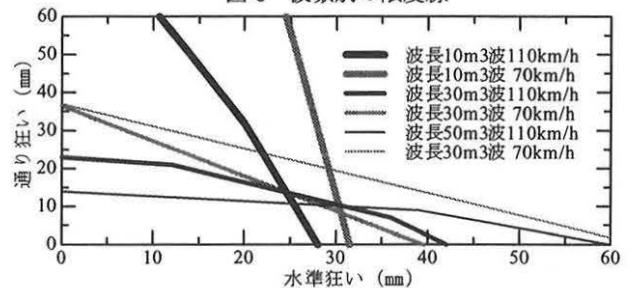


図 7 速度別の限度線

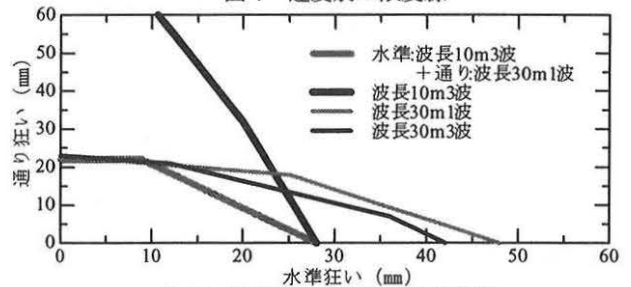


図 8 波長組み合わせ別の限度線

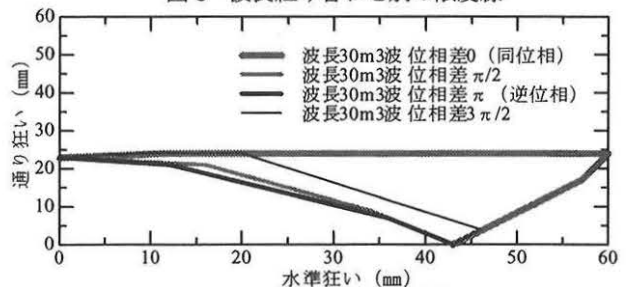


図 9 位相差別の限度線

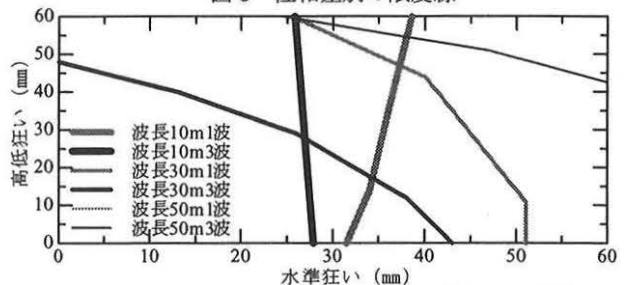


図 10 水準狂いと高低狂いの組み合わせ限度線

(6) 水準狂いと高低狂い

水準狂いと高低狂いが逆位相で複合する場合について、同様に限度線を求めた結果を図 10 に示す。尚、波長 50m3 波は波長 50m1 波と全く同一線となった。

これより、波長 10m、50m では限度線が垂直や水平に近くなっており、複合による走行安全性への影響は少ない。これは、図 3 によると波長 10m では水準のみコヒーレンスが高く、波長 50m では双方ともにコヒーレンスが低くなっていることによる。逆に、波長 30m では双方のコヒーレンスが 0.6 程度であり、限度線が斜めとなって複合状態が走行安全性に影響する結果となっているが、振幅量は水準と通りの場合と比べて約 2 倍大きい。

4. 周期的な軌道狂いの検出方法

連続的な軌道狂いを管理するには、軌道狂い波形の中から管理対象とすべき連続軌道狂い箇所を的確に抽出する必要がある。そのため、時系列解析の手法を用いることにより、検出アルゴリズムの開発を行った⁹⁾。尚、共振を起しやすい、同一波長が連続する場合の軌道狂いを主な対象としているため、ここではこのような狂いを周期的な軌道狂いと呼ぶ。

4.1 局所定常 AR モデルの利用

周期的な軌道狂いが存在する箇所は、その区間の周波数特性が前後とくらべて顕著に変化していると考えられる。従って、周期的な軌道狂い箇所を検出するには、周波数特性が著しく変化する点を検出すればよいと考え、その方法として局所定常 AR モデルを用いることとした。

局所定常 AR モデルとは、軌道狂い波形のような非定常時系列を、適当な小区間に分割すれば一つ一つは定常とみなせる局所定常時系列と仮定し、定常とした各小区間を AR (自己回帰) モデルで表したものである (図 11)。この分割点▼が周波数特性が変化する点ということになる。

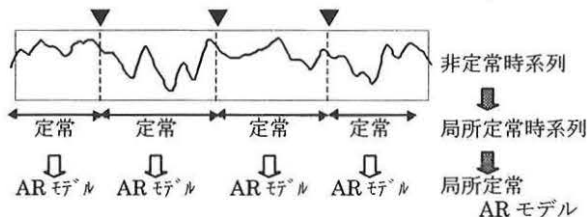


図 11 局所定常 AR モデル (▼分割点)

4.2 検出アルゴリズムの開発

局所定常 AR モデルを軌道狂い波形に適用する際、その特徴に併せてパラメータを設定した。そのうち AR モデルの最大次数は、波長 10～50m 程度の狂いが連続する場合を最も検出しやすい値となるように検討した結果、5 とした。完成した検出アルゴリズムを用いて、周期成分を検出した結果の一例とその区間のパワースペクトル密度を図 12 に示す。波長 30m の周波数特性が卓越する区間を的確に検出できていることがわかる。

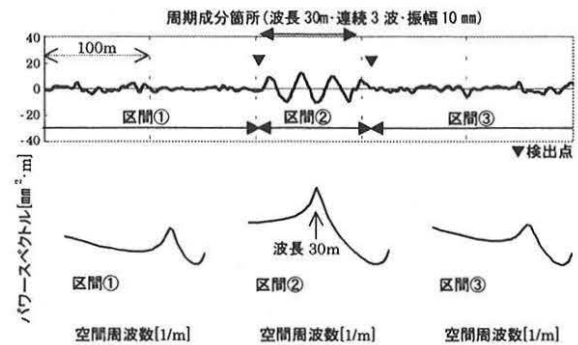


図 12 周期成分検出例と分割区間のパワースペクトル密度

5. まとめ

輪重予測手法を用いて連続軌道狂いの走行安全性を検討した結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 10～50m の波長帯では、通り狂いは波長が長いほど、水準狂いは波長が短いほど輪重減少を起しやすい。
- (2) 連続波数は、通り狂いでは波長 30m 以上、水準狂いは波長 50m では 1 波で定常状態に達する。またそれ未満の波長でも 3 波までに定常状態に達する。
- (3) 同じ通り狂い上では速度が高くなると走行安全性が低下する。一方、水準狂いは、固定軸距や台車中心間距離の平面性狂いが輪重変動の主要因であるため、速度依存性が小さい。
- (4) 軌道狂い種別ごとに輪重減少を起しやすい波長の組み合わせに、管理上留意する必要がある。
- (5) 通り狂いと水準狂いの複合では、逆位相状態が最も走行安全性が低下する。

6. おわりに

本稿での検討は、特定の車両形式・速度で行ったものであり、実際の運用にあたってはさまざまな車種・速度での検討が必要となる。今後は、車種・速度パターンを増やすとともに、輪重実測データが得られない車種では車両運動シミュレーション等を活用することで、汎用性のある限度線を見出し、実用に供する連続性を考慮した軌道管理手法に結びつけていきたい。

参考文献

- 1)池守昌幸：軌道狂いの波形の整備に関する研究,鉄道技術研究報告, No.1038, 1977.3
- 2)運輸省鉄道局監修：在来鉄道運転速度向上試験マニュアル・解説, 1993.5
- 3)古川敦：軌道狂いによる輪重変動の予測手法, 平成 14 年鉄道技術連合シンポジウム, S1-4-2, 2002.11
- 4)例えば、小山正直：軌道狂いに関する現車試験-橋場線における試験-, 鉄道線路, 14-5, 1966.5
- 5)元好, 古川, 神山：局所定常 AR モデルを用いた周期的な軌道狂いの検出, 土木学会第 59 回年次学術講演会, IV-021, 2004.9