

1806 確認車の軸箱加速度を用いた軌道状態把握手法の開発

正 [土] ○下野 勇希

正 [土] 山口 義信 (JR 西日本)

The development of the track condition evaluation method using the axlebox acceleration of high speed confirmation car

Yuuki SHIMONO, Yoshinobu YAMAGUCHI, West Japan Railway Company 2-4-24, Shibata, Kita-ku, Osaka

At Sanyo-Shinkansen, the high speed track confirmation car confirms track conditions prior to the first train every morning. Authors examined the detection of gigantic track irregularity by adopting the inertial measuring method using axlebox acceleration of high speed track confirmation car. We confirmed that this method is accurate enough to detect the gigantic track irregularity compared to that obtained by track geometry car, though it is necessary to consider the gap of the location of measurement and the difference of the axle load between Shinkansen train and high speed track confirmation car. We also carried out the regression analysis, presumed the confidence interval, and obtained the prospects of setting the evaluation threshold.

Keywords: Shinkansen, high speed confirmation car, axlebox acceleration, inertial measuring method, axle load, track inspection car

1. 開発の目的

新幹線の保守作業後の更なる安全性向上を目指して、初列車走行前に全線の線路状態をパトロール走行する高速確認車(以下、「確認車」と称する)により著大な軌道狂いの有無を確認することを考えている。なお、対象とするものは、徐行値に相当するような著大な軌道狂いであり、リアルタイムで把握出来、極力簡便で低コストな方法によることを考えている。

実現する方法として、「加速度の2階積分すると変位になる」という物理の基本原則を利用して、軌道狂いを求める慣性測定法は既に、HISTIM¹⁾やTRASC²⁾、RAIDARSS³⁾でこれまでに実用化された事例がある。今回、この手法を活用し、確認車の軸箱に加速度計を取付け、そのデータを用いて軌道狂いを計算し、その精度及び実務上用いるための課題について検討を行った。

2. 慣性測定法

2-1. 慣性測定法の課題

慣性測定法では、慣性空間を基準として加速度から変位を求めることになるので車体動揺の影響を受けることがない。しかし、慣性測定法には、大きく3つの特性について考慮する必要がある。

- 1) 積分演算の際に、積分安定化のためのハイパス特性により波形歪みを生じる
- 2) 積分演算する際、走行速度域の変動が大きい場合には演算法を変える必要がある。

- 3) 走行速度が低速の場合では加速度計のスペックにより、誤差が増大する
以下、詳細について記す。

(1) 積分演算安定化のハイパス特性による波形歪みの課題
既往の知見³⁾によると、積分安定化のためにハイパスフィルタを用いるが、そのハイパスフィルタの特性により生じる波形の歪みは、軌道狂いの波長が10m付近では比較的小さく、10m弦正矢による検出特性では、波形歪みの影響は小さいと考えられる。なお、40m弦正矢などの長波長域も含めて精度良く捉えるためには、HISTIMやTRASCなどのように位相補償フィルタにより波形歪みを補正する必要がある。

(2) 走行速度に応じた積分演算の課題

10m弦正矢の検出特性は空間軸上で定義されるため、フィルタ特性を速度に応じて変化させる必要がある。そのため、速度を正確に検出する必要がある。

また、軌道に正弦波状の狂い絶対形状を仮定する場合、軌道狂いにより生じる加速度は、式(1)のように求められる。

$$a = \frac{d}{1000} \cdot (2\pi)^2 \cdot \left(\frac{v}{l}\right)^2 \quad (1)$$

a : 加速度 [m/s²], d : 軌道狂い [mm], v : 走行速度 [m/s], l : 軌道狂い波長 [m]

Fig. 1に、 $l=10\text{m}$ の場合の軌道狂いにより発生する加速度と走行速度の関係を示す。

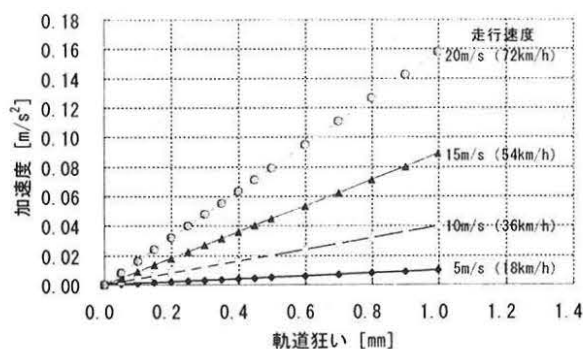


Fig.1 軌道狂いにより発生する加速度と走行速度

Fig.1 から、速度に応じて、軌道狂い（正弦波形状）により発生する加速度は変わるため、演算ロジックは、積分演算する加速度データのサンプル数を速度に応じて変更する等の対策が必要となる。

(3) 低速域での誤差が増大する課題

Fig.1 より、低速では軌道狂いにより発生する加速度が小さくなることから、用いる加速度センサの性能に基づく検出下限速度も考慮する必要¹⁾がある。

これは、検出に必要な最小軌道狂いの振幅と加速度センサの性能により検出できる加速度の大きさから検出可能な走行速度は決まる。

検出に必要な最小軌道狂いの振幅を 0.5 mm とすると、軌道狂いの波長が 10m で走行速度が 10m/s の場合、式 (1) より 0.02m/s^2 程度の加速度を検出する必要がある。一方で、走行速度が 5m/s の場合、同様に計算すると 0.005m/s^2 の加速度を検出する必要があることになる。通常、軸箱加速度を測定する場合の加速度センサの測定レンジは 500m/s^2 であり、16bit で A/D 変換した場合、分解能は $2 \times 500 / (2^{16}) \approx 0.0152\text{m/s}^2$ であるから、走行速度が 10m/s の場合は検出に必要な最小軌道狂いを検出できるが、5m/s の場合は検出できない。このような理由から慣性測定法において検出下限速度があり、30km/h を目安としている²⁾。

2-2. 本件での課題に対する解決策

(1) ハイパス特性による波形歪みの課題

今回、対象としている著大軌道狂いの検出弦長は 10m を考えている。10m 弦の中には長波長成分もあるものの、波長 20m 程度の範囲を考えれば、影響は小さいと考えられることから、積分演算安定化のハイパス特性による波形歪みに対する対処は行わないこととする。

(2) 走行速度に応じた積分演算の課題及び低速域での誤差が増大する課題

どの程度の速度きざみで、積分演算するデータサンプル数、フィルタ特性等を変えるかは、今後の検討課題とした。

今回検証するデータは、90~110km/h により測定したデータを対象として分析を行うこととする。

3. 測定精度の検証

今回、この限定的に慣性測定法を用いる手法を「簡易慣性測定法」と定義する。確認車で取得したデータを用い、簡易慣性測定法により得られた 10m 弦高低狂い（以下、「確認車高低狂い」と称する）の測定精度を検証する方法として、電気・軌道総合試験車（以下、「試験車」と称する）で測定された 10m 弦高低狂い（以下、「試験車高低狂い」と称する）との比較を行うこととした。なお、比較は、算出波形を照合する方法と、あるロットの最大値・最小値で比較を行った。なお、ロット長は溶接部等の間隔を考慮して 50m とした。

3-1. 測定概要

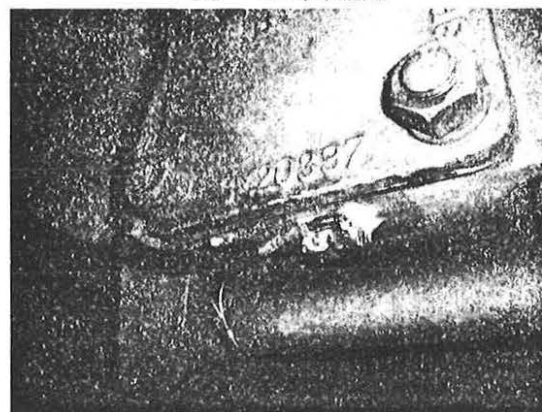
高速確認車による軸箱加速度測定の概要は以下のとおりである。

- 1) 測定延長：18km550m
- 2) 最高速度：110km/h
- 3) 軌道構造：有道床軌道 12km850m、スラブ軌道 5km700m

なお、加速度計は Fig.2 に示すように、軸箱本体の下部へ直付けすることとした。



(a) 取付位置前景



(b) 取付位置拡大

Fig.2 確認車軸箱への加速度センサ取付状況

また、軸箱加速度の測定のために設置した機器のスペックの概要は以下のとおりである。

- 1) 加速度センサ測定レンジ： 500m/s^2 (50G)
- 2) 加速度センサ応答周波数：0~1000Hz

3) サンプリング周波数：3000Hz

なお、確認車の最高速度と加速度センサの応答周波数から、サンプリング周波数は0.0155mより短くする必要があり、エイリアジングを起こさせないことを考慮して、データレコーダのサンプリング周波数は3000Hzと設定した。

3-2. 検知精度

Fig. 3 に試験車で測定した高低狂いと確認車軸箱加速度により算出した高低狂いの波形を、Fig. 4 に試験車高低狂いと確認車高低狂いの関係を、50m ロットの最小値・最大値を用いて示す。サンプル数は371である。回帰分析により求められた決定係数は最大値領域で0.76、最小値領域で0.73であり、確認車高低狂いによって、試験車高低狂いを高い精度で検知できることが確認できる。

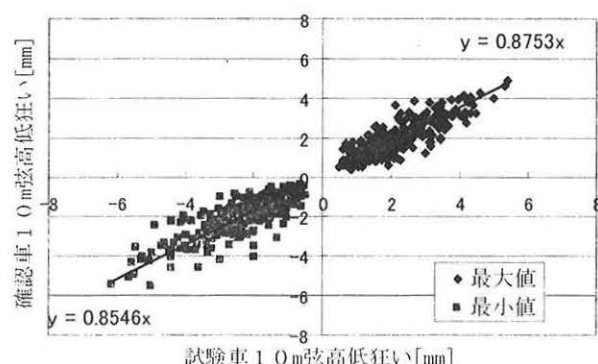


Fig.4 試験車高低狂いと確認車高低狂いの関係

なお、今回の検証に用いたデータでは、回帰直線の傾きにより、確認車軸箱高低狂いは試験車高低狂いよりも回帰線として、15%程度小さくなる傾向が確認できる。

また、Fig. 3 により、確認車高低狂いの位置ズレが確認できる。この原因は、位置情報の取得は、確認車に取り付いている、速度発電機から得られる、速発パルスにより5m走行毎に発生させるパルスにより位置情報を取得しており、車輪の空転・滑走や、距離送り化に正確性を欠いたことが原因と考えられる。

3-3. 車両の軸重の違いによる測定誤差

Fig. 4 より、試験車と確認車の関係を示す、回帰線の傾きは最大値領域で0.88、最小値領域で0.85であった。この原因として、車両の軸重の違いが影響しているものと考えられる。

試験車の軸重は約11t、確認車の軸重は約9tであり、レ

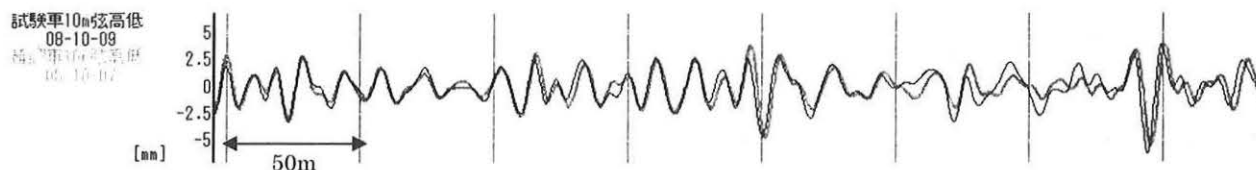


Fig.3 試験車高低狂いと確認車高低狂い

ールの沈下量を考慮すると、速度効果を無視した場合、この軸重の違いから、確認車での沈下量は試験車の約82%の沈下量となる。

構造物境を含むロットを除き、再度試験車と確認車の高低狂いの関係を求めるとFig. 5 のとおりとなる。回帰線の傾きは、最大値領域で0.88、最小値領域で0.85であることから、算定結果と回帰線の傾きがほぼ一致していることが判る。

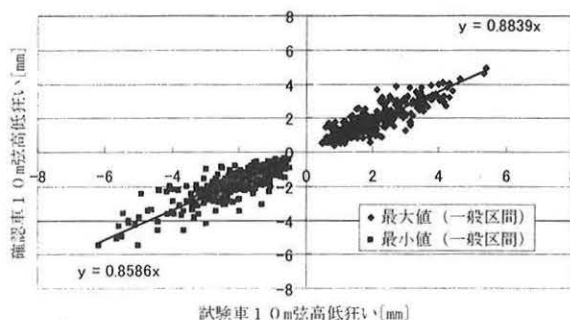


Fig.5 試験車高低狂いと確認車高低狂いの関係（一般区間）

次に、構造物境を有するロットでの区間統計量を算出すると、Fig. 6 のとおりとなる。浮きまくらぎ等により、輪重差による軌道沈下量が一般区間と異なることが懸念されたものの、回帰線の傾きは、最大値領域で0.75、最小値領域で0.80であり、しかも概ね回帰線上にあることから、一般区間と比較すると、その影響はやや大きくなる傾向にあった。

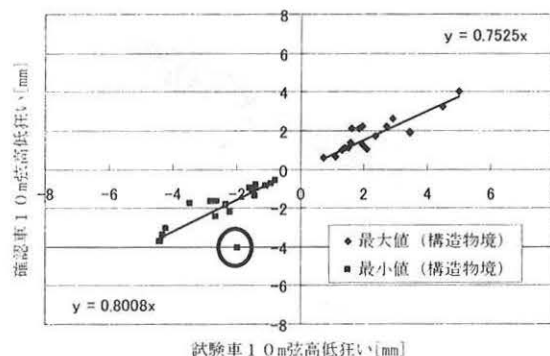


Fig.6 試験車高低狂いと確認車高低狂いの関係（構造物境）

また、Fig. 6 中において、回帰線が大きく逸脱（マル印）するものがあるが、この箇所については、ロット境界部における位置ズレが原因であることを確認している。

以上から、試験車と確認車の軸重の違いにより、算出される高低狂いに差があるものの、著大な高低狂いを検知するには十分な精度を有している可能性が考えられる。

4. 回帰分析における信頼区間の推定方法

回帰分析の信頼区間を推定する方法⁶⁾については、理論的手法と簡易的手法があるが、紙面の都合上、理論的手法の概要は省略することとし、本稿では簡易的手法の概要について述べる。

4-1. 95%信頼区間の推定方法

回帰線から外れる各々のデータのバラつきは、正規分布すると仮定すると、文献⁶⁾より、95%信頼区間は次のように求めることができる。

$$y = \hat{a}x + \hat{b} \pm 1.96 S.E.(Y_i) \quad (2)$$

S.E.(Y_i) : 標準誤差

4-2. 95%信頼区間の推定

Microsoft Excel の分析ツールを用いて計算すると、

$\hat{a}=0.865$, $\hat{b}=0.009$, 標準誤差=0.484 と求められるので、95%信頼区間は式(2)より、

$$y = 0.865x + 0.009 \pm 0.95$$

この手法により推定した95%信頼区間をFig.7に示す。

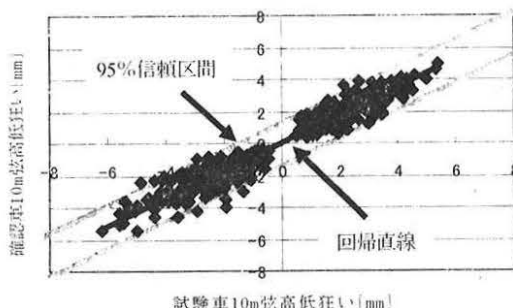


Fig.7 95%信頼区間

このことから、95%信頼区間は回帰線から ± 0.95 ($= 0.484 \times 1.96$) mmの領域であると推定できる。つまり、検知されたマヤ軸箱高低狂いに対して約1.00 mmの増分(安全側)を考慮すれば、試験車高低狂いは95%の確率でその誤差を考慮した値より小さいといえることになる。

5. 評価閾値の検討

今回の検証では、Fig.7から確認車高低狂いは試験車高低狂いよりも15%程度小さく、95%信頼区間を考慮した場合の誤差は(以下、「誤差」と称する)は、約1.0 mmであることが確認された。著大軌道狂いとして検知する基準値(以下、「基準値」と称する)から著大軌道狂い検知手法におけ

る目安値(以下、「目安値」と称する)は、

目安値 = 基準値 / [確認車軸箱高低狂い / 試験車高低狂い] - 誤差

で求めることができる。基準値10 mm、誤差1.0 mmの場合の計算例を下記に示す。

(例) 確認車軸箱高低狂い / 試験車高低狂いの比率 = 0.85 の場合

$$\text{目安値} : 10 / 0.85 - 1.0 \approx 10.8 \text{ mm} \rightarrow 10 \text{ mm}$$

ここでは、95%信頼区間を考慮した誤差により安全側に目安値を求めているので、実際には著大軌道狂いを発生しているものにも係わらず、目安値未満となる可能性は、著大軌道狂いの発生確率に5%を乗じた確率以下ということになる。

今後は、残りの5%に含まれる、極値を考慮した目安値の設定が必要となり、分析N数を増やし、分析の深度化を図っていきたい。

6. まとめ

今回の検証では、試験車と確認車の軸重の違いにより、確認車軸箱加速度から算出した高低狂いの誤差はあるものの、回帰分析における95%信頼区間を推定した結果、著大な軌道狂いを検知するための評価閾値を設定できる目処が立った。

今後の課題としては、

- 1) 走行速度を考慮し、リアルタイムで著大軌道狂いを算出できる演算ロジックの構築
- 2) 低速域(30km/h以上を想定)における演算精度
- 3) 正確な走行速度及び位置情報の取得
- 4) 車輪真円度等、車両の個体差による測定精度の違いの確認

以上の課題を解消し、実用に供する装置を開発していく所存である。

参考文献

- 1) 佐藤吉彦, 藤森聡二, 竹下邦夫, 服部登: HISTIMの開発と実用化, 鉄道技術研究報告, No1359 (施設編600号), 1987.3
- 2) 田中宏昌, 磯浦克敏: 東海道新幹線の保線, 日本鉄道施設協会, pp467-472.1998
- 3) 中川正樹, 三輪昌弘, 高見沢実: 営業列車を用いた軌道の状態監視, 土木学会第63回年次学術概要集, IV-040, 2008.9
- 4) 竹下邦夫: 軌道狂い検出手法に関する研究, 鉄道総研報告, 1988.10
- 5) 須永陽一: 車両軸箱の加速度で軌道の変化を測る, RRR, 2002.1
- 6) 小林龍一: 相関・回帰分析法入門, 日科技連, pp48-58, pp62-63, 1987