

S8-1-5.

車両走行シミュレーションによる短波長軌道狂いを含んだ曲線横圧の推定

[土] ○小林 幹人 (東海旅客鉄道株式会社)

Estimation of lateral force in curving according to the simulation including short wavelength track irregularity
Mikihito Kobayashi, Member (Central Japan Railway Company)

In case of the estimating wheel load and lateral force by the simulation, the data restored from 10m chord track irregularity measured by the track measuring car is generally used as the input data. But the track irregularity measured by 10m chord does not include the short wavelength less than 5m, so the simulation has not been able to represent fluctuation of lateral force and wheel load influenced by the short wavelength irregularity. On the other hand, the new track measuring car for Tokaido Shinkansen adopts the measuring system of asymmetrical chord offset method, it can measure shorter wavelength than 10m chord. This paper reports the result of the lateral force in curving estimated by the simulation applying the data restored from the asymmetrical chord offset track irregularity in case of Shinkansen Train.

キーワード：車両走行シミュレーション、偏心矢軌道狂い、横圧、新幹線

Keywords: Simulation, asymmetrical chord offset track irregularity, lateral force, Shinkansen

1. はじめに

輪重・横圧などの車両走行特性値を車両条件や軌道条件から精度よく推定することは軌道に与える影響を予測したり、乗り心地・走行安全性の検証を行ううえで、意義が大きい。また、車両走行特性値を推定する手法として、近年力学モデルに基づく車両走行シミュレーションが広く活用され、多くの報告がなされている。車両走行シミュレーションの入力に用いる軌道狂いには通常、軌道検測車で得られた 10m 弦正矢による測定データからの復元波形が使用されるが、10m 弦正矢による測定では波長 5m で検測特性が 0 となるため、それより短い波長成分を考慮することができない。しかし、軌道狂いによる輪重・横圧の変動成分は、主に継目部や溶接部付近で発生する短波長の軌道狂いの影響が大きく、実測値を精度よく推定するためにはこれら短波長の軌道狂いを考慮する必要がある。一方、2001 年に東海道新幹線に導入された 923 形新幹線電気軌道総合試験車（以下、T 4 編成）は偏心矢測定による軌道検測を行っており、これまでの 10m 弦正矢で検測できなかった短波長の軌道狂いを捉えることができるようになった¹⁾。そこで、本論文では新幹線車両で曲線走行時に発生する横圧を対象に、短波長成分を含んだ軌道狂いを入力とした車両走行シミュレーションを行った結果について述べる。また、曲線区間継目部の左右方向の動的挙動を調べる目的で、列車通過時のレール左右変位の測定を行った結果についても併せて報告する。

2. T 4 編成の偏心矢測定による軌道検測特性

T 4 編成の偏心矢測定による検測特性と 10m 弦正矢の検測特性を図-1 に示す。図からわかるように 10m 弦正矢では波長 5m (空間周波数 0.2 (1/m)) で検測利得が 0 となるが、偏心矢測定では波長 5m 未満の短い波長域でも検測利得があり、高低狂いは 2.5m まで、通り狂いは全ての波長で利得が 0 とならないため、理論上、全ての波長域で検測が可能となっている。しかし、波長 2~100m で復元逆フィルタによる復元処理を行った通り狂いのパワースペクトル（新横浜～名古屋間）をみると（図-2）、2.5m~4m 付近の波長成分が大きく表れる結果になっている。これはその付近の波長が高速走行時には通り狂いを測定するセンサの取付部の固有振動数に近くなるため測定誤差が生じやすくなっていることと、測定弦長付近では検測利得が下がることから復元逆

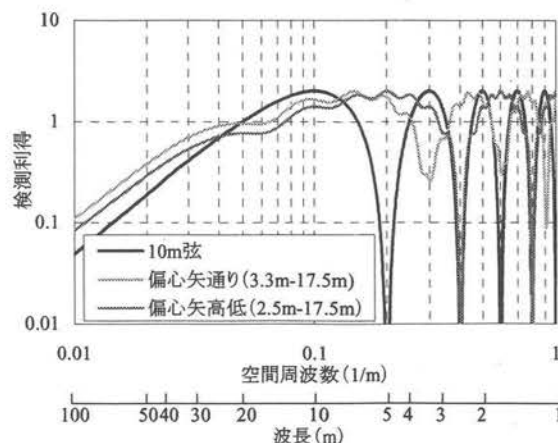


図-1 T 4 編成の偏心矢測定による検測特性

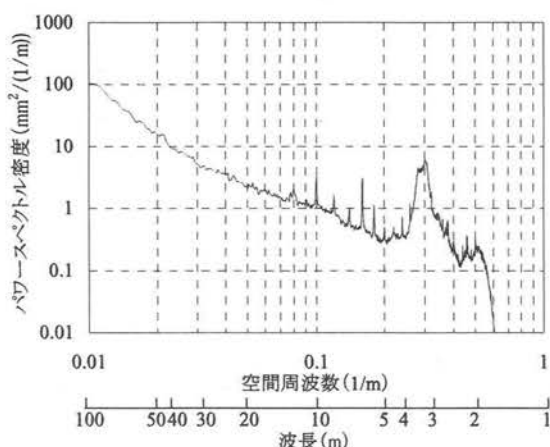


図-2 復元通り狂い (2~100m) のパワースペクトル
(新横浜～名古屋間)

フィルタではその部分の復元倍率が大きく設定されることになり、復元処理を行うとその部分の波長成分が誤差を含めて大きく復元されてしまうことによるものと考えられる。そこで、今回はT4編成の検測データからの復元が適切と考えられる波長域としては、高低狂い3m以上、通り狂い4m以上の波長成分を使用することとした。

3. 短波長復元軌道狂いの測定精度

T4編成の測定データで短波長軌道狂いが間違いなく捉えられていることを確認するため、まず短波長軌道狂いが顕著にみられる定尺レール区間で小型軌道検測装置ライトレック²⁾による測定データとの比較を行った。なお、ライトレックは測定弦長が2.5m正矢のため、理論上1.25mより長い波長での復元が可能である。ここでは高低狂い3~10m、通り狂い4~10mの波長域で復元した波形について両者を比較した。

結果を図-3に示す。また、ここでは10m弦正矢による

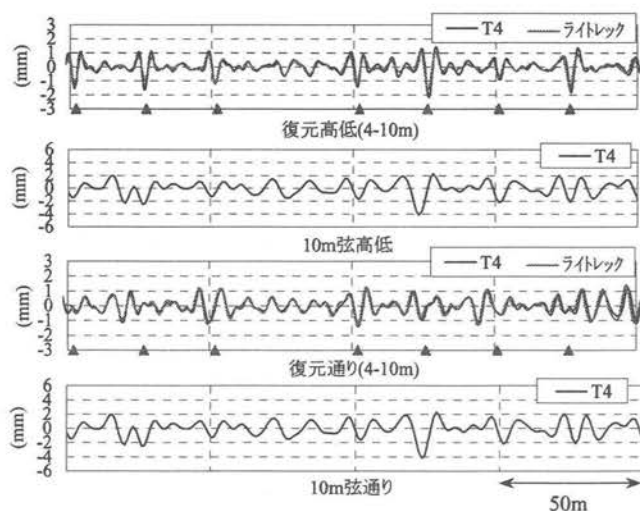


図-3 短波長復元波形の比較結果

測定結果もあわせて示す。ライトレックが静的検測、T4編成が動的検測という違いがあるため、図中▲で示した継目部で継目落ちによる差が表れており、絶対値の比較は難しいが、高低狂い、通り狂いともほぼ同じ波形となっており、T4編成の復元波形で短波長の軌道狂いを正確に捉えることができていることがわかる。また、短波長の復元波形は10m弦正矢と比較して継目部での軌道狂いをより明確に捉えることができている。

次に復元波形の測定精度を調べるため、短波長域から長波長域まで波長域を分けた復元処理を行い、各波長域について再現性精度の検証を行った。具体的には最も短い測定間隔(7日間)で得られたデータから3~10m(通り狂いは4~10m)、10m~20m、20m~40m、40m~80m、80m~120mの波長域でそれぞれ軌道狂いの復元処理を行い、得られた波形の差について標準偏差を求めた。なお、比較区間には動的変位の条件を等しくするため、走行速度の差が±5km/h以内の区間を選び、標準偏差は既往の評価方法³⁾にならない、1mサンプリングデータに対して500mロットの区間で算出した。

検証結果を図-4に示す。また、比較のため偏心矢から10m弦正矢に変換したデータの結果も併せて示す。なお、ここでは低速区間(80km/h~180km/h)と高速区間(260km/h~270km/h)に分けて結果を整理した。まず高低狂いについてみると、ほとんどのケースで誤差の標準偏差は0.1mmを下回っており、これは誤差の最大値を標準偏差の3倍(3σ)とした場合、最大誤差が0.3mm以内に収まっているということになり、非常に高い再現性精度であるといえる。ちなみに今回着目した3~10mの短い波長の軌道狂いについても同様の結果となっており、実用上問題のない精度であるといえる。なお、低速区間と高速区間を比較すると、低速区間で標準偏差が大きくなっているが、これは定尺区間での狂い進みの影響によるものと思われる。

次に通り狂いでは、非接触測定という測定機構上の不利があるため、高低狂いと比較すると標準偏差の値が大きくなっているが、ほとんどの場合が0.2mm未満であり、実用

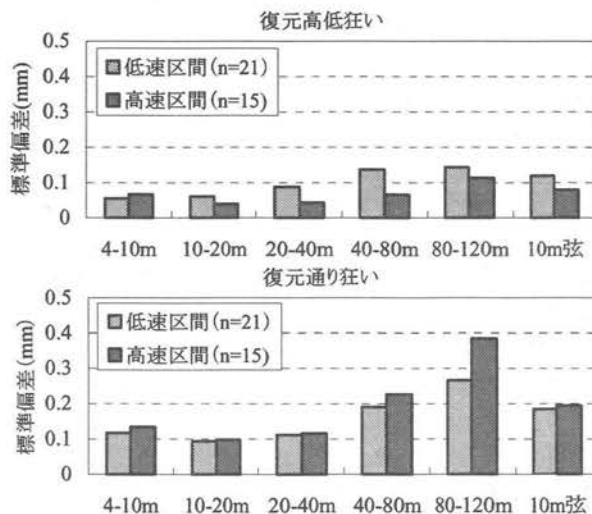


図-4 T4編成測定データからの復元波形の再現性精度

上問題のない精度と考えられる。4~10m の短波長域での標準偏差は 0.1mm 強であり、その波長域での測定範囲が概ね ± 2 mm 程度ということを見ると無視できる値とは言えないが、特徴的な狂いなどは問題なく捉えられる精度と考えられる。なお、低速区間と高速区間を比較すると、高速区間で標準偏差が大きくなっているが、これは通り狂いを測定しているセンサに加わる振動が高速域で大きくなる影響と考えられる。また、波長別の標準偏差をみると、10~20m の波長域の値が最も小さく、長波長域になるに従って値が大きくなっているが、これは図-1 で示した検出特性と逆の関係であり、長波長域で復元倍率が大きくなることで、値が大きくなったと考えられる。しかし、この場合でも標準偏差は最大で 0.4mm 弱であり、この波長域での測定範囲がそれよりも十分に大きいことを考えると、実用上問題のない範囲と考えられる。

4. 曲線区間における継目部の動的なレール左右変位

次に曲線区間における継目部の動的なレール左右変位の実態を把握するため、半径 400m の曲線区間の継目部を中心とした前後 5m 間で列車走行時のレール頭部左右変位を測定した。測定位置を図-4 に示す。なお、衝撃横圧が作用したときの動的変位を調べるため、測定箇所には T 4 編成の軸箱左右加速度が比較的大きい継目を選び、比較のため、同じ曲線区間の一般部（非継目部）でも同様の測定を行った。また、今回の測定は 300 系車両による車上 PQ 測定（間欠測定）に合わせて実施した。

PQ 測定車両が通過したときのレール左右変位の測定結果を図-5 に示す。継目部では大きな横圧が作用しているにも関わらず、継目板の剛性により一般部に比べてレール変位

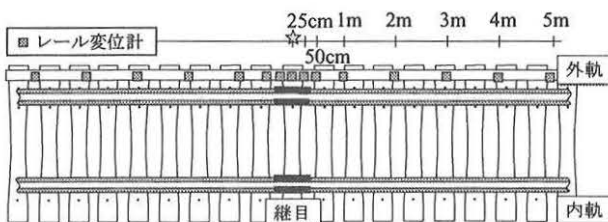


図-4 レール左右変位測定位置

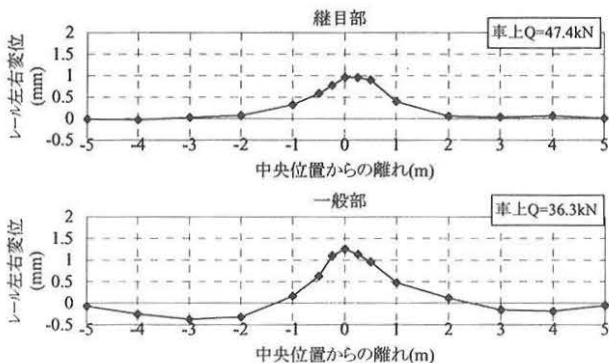


図-5 列車通過時のレール左右変位測定結果

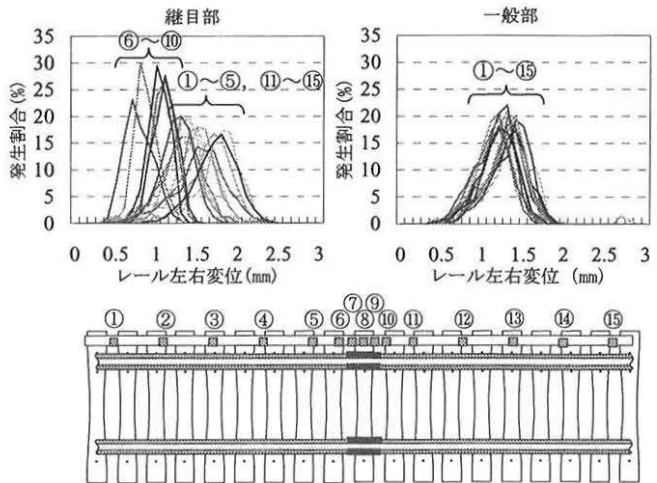


図-6 レール左右変位の発生頻度分布

は小さくなっている。また、継目部では継目板の部分が拘束された状態で変位している様子が伺える。

車両の先頭軸が通過したときの各測定点におけるレール左右変位の発生頻度分布（42 編成、672 軸分）を図-6 に示す。図より、継目部⑥~⑩の測定点では他の測定点に比べて変位が小さくなっており、この結果からも継目部は一般部より動的な変位が小さくなっていることが確認できる。また継目部は一般部に比べて変位の発生状況にばらつきがあるが、これは継目部付近の軌道狂いにより横圧の変動が発生していることや、継目部付近で左右方向の剛性が不連続になっていることなどが原因と考えられる。

以上の結果から、継目部での動的な左右変位は継目板の剛性のため一般部よりもむしろ小さくなっており、上下変位での継目落ちのように動的に大きな局所変位が発生していないことが確認できた。しかし、今回の測定は新幹線における比較的良好な継目状態での結果と考えられるため、より悪い継目状態の場合には異なる結果になることも十分に考えられる。

5. 短波長軌道狂いを含んだ車両走行シミュレーション

最後に車両走行シミュレーションソフト vampire を用いて短波長域を含んだ軌道狂いを入力とした曲線走行中の輪重・横圧を求め、実測値との比較を行った。車両モデルは 32 自由度の一車両モデルとし、車両諸元には輪重・横圧の測定が行われた 300 系車両の数値を用いた。ただし、軸重、走行速度、内外軌の摩擦係数の値については実測値から得られた値を使用した。また、短波長軌道狂いの有無による結果の差をみるため、比較的短波長軌道狂いが多い半径 550m の定尺レール区間を速度 105km/h で走行したケースを対象に比較を行った。

シミュレーション結果を図-7, 8 に示す。従来の 10m 弦正矢から復元可能な 6m 以上の復元波形によるシミュレーション結果では実測値の平均的な値を推定できているが、

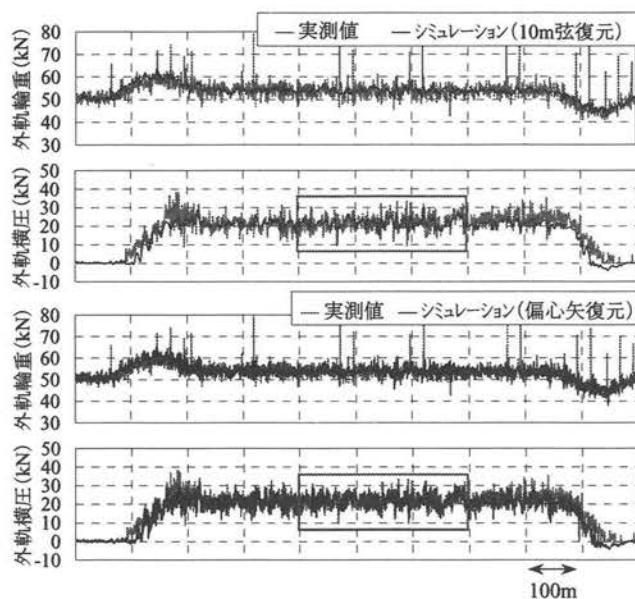


図-7 シミュレーションと実測値の比較結果

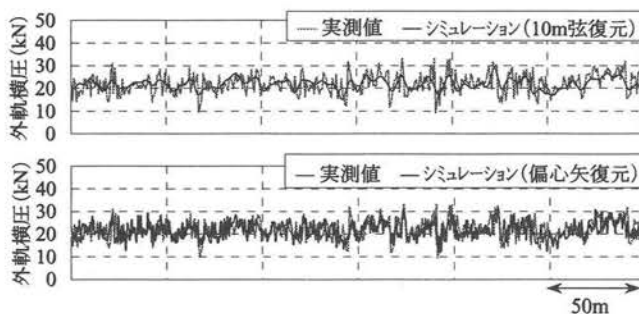


図-8 シミュレーションと実測値の比較結果
(曲線部外軌横圧)

より短い波長による変動分が表れていない。一方、より短い波長成分(高低狂い 3m 以上、通り狂い 4m 以上)を含んだ偏心矢測定データからの復元波形によるシミュレーション結果では、継目部での衝撃的な輪重変動を除き、短い波長の変動成分を含めて比較的精度のよい推定ができています。なお、継目部での衝撃的な輪重変動が表しきれていない理由には、継目部でのわずかな段違いなど偏心矢測定データからの復元狂いに含まれない更に短い波長成分の軌道狂いの影響や、シミュレーションで衝撃成分が完全に模擬できていないことなどが考えられる。一方、横圧については、前章で左右方向には動的な局部変位が発生していない結果が得られたことからわかるように、実測値で継目部での衝撃成分が輪重ほど顕著に表れていないため、比較的精度のよい結果となっている。

図-9 にシミュレーションによる推定値と実測値を曲線区間の外軌横圧の平均値と最大値で比較した結果を示す。平均値では両者とも精度の良い結果が得られているが、最大値では変動分の推定精度の違いにより、10m 弦測定からの復元波形で 5kN 程度、偏心矢測定からの復元波形で 1kN 程度の誤差となっており、偏心矢からの復元波形の方がより

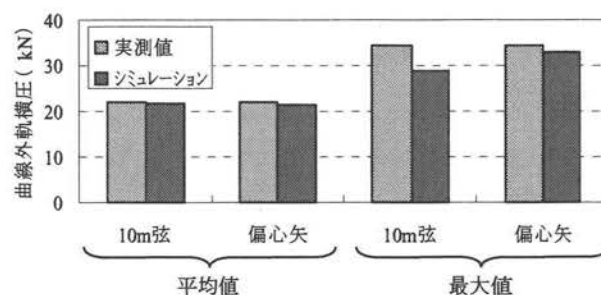


図-9 シミュレーションと実測値の誤差

高い精度となっている。それでも、シミュレーションによる最大値は実測値より若干小さい値となっており、更に短い波長の軌道狂いの影響など、シミュレーションで考慮されていない要素がまだ残っていると思われるが、この程度の誤差であれば実用上十分活用できる範囲と考えられる。

6. まとめ

今回の検討結果から、車両運動シミュレーションの入力に偏心矢測定データから復元した短波長域を含む軌道狂いを用いることで、従来の 10m 弦正矢からの復元波形に比べ、高い精度で曲線走行中の横圧を推定できることが確認できた。輪重、横圧の変動分は短波長の軌道狂いによる影響が大きいと、わずかな波長の違いでも、入力条件となる軌道狂いを含めることでシミュレーションの精度が大きく改善されることになる。逆に輪重、横圧の推定を精度よく行うためには、高い精度で測定された短波長の軌道狂いを入力に用いることが必要となるため、今後、より高い精度で短波長の軌道狂いを測定する方法についても検討が必要になると考える。一方、車両走行シミュレーションについても、衝撃分の推定を精度よく行うためには、高周波域での軌道・車両のばね特性など、より詳細な条件設定が必要になると考えられるため、多様な条件設定に対応できるシミュレーション方法を検討していくとともに、様々な条件での実測データの収集を通じて、検証を重ねていかなければならないと考える。

参考文献

- 1) 森本; 偏心矢測定による軌道状態の把握手法, 鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2002) 講演論文集, 2002. 12, pp. 417-420
- 2) 福島、永沼; 小型・軽量の軌道検測装置の開発, 鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2002) 講演論文集, 2002. 12, pp. 421-424
- 3) 中川、小林、森本、永沼; 東海道新幹線における 2 台車軌道検測車の開発, 鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2001) 講演論文集, 2002. 12, pp. 67-70