

論文 車両と軌道の相互作用に基づく 軌道状態劣化メカニズムの考察と対策

伊地知 卓也¹・三輪 昌弘²

¹正会員 東海旅客鉄道株式会社 技術開発部 (〒485-0801 愛知県小牧市大山 1545-33)

E-mail: takuya.ijichi@jr-central.co.jp

²正会員 東海旅客鉄道株式会社 技術開発部 (〒485-0801 愛知県小牧市大山 1545-33)

E-mail: m.miwa@jr-central.co.jp (Corresponding Author)

東海道新幹線は、0系車両での最高速度 210km/h 運転で 1964 年に開業した。その後、1992 年に 300 系車両の導入で 270km/h への大幅な速度向上がなされ、現在は N700 系車両 (N700A, N700S を含む) での最高速度 285km/h 運転を行っている。この速度向上を可能とするために、車両は大幅な軽量化が行われた。一方、車両に比べると、軌道構造は開業当時からの変化は小さい。近年の軌道狂いに着目すると、波長 5m 程度の高低狂いの発生が顕著になっている。本論文では、この軌道状態の劣化を生じさせている複数の要因を、車両の軽量化と運転速度向上を着眼点として、車両と軌道の相互作用に基づいて推察する。そして、この波長域の軌道整備が本質的に必要であることと、その理由を論ずる。さらに、当該軌道狂いを抑制する軌道整備手法や、軌道構造の改善等による対策について述べる。

Key Words: track deterioration, short wave length, vehicle/track dynamic interaction

1. はじめに

東海道新幹線は 0 系、100 系車両が最高速度 210～220km/h で運転されていた時代から、300 系車両での速度 270km/h 運転への変革を経て、現在の N700 系車両での速度 285km/h 運転に至っている。この速度向上を可能とするために、ばね間やばね下質量を含めて車両は大幅に軽量化された。速度向上によって増加するバラスト軌道の破壊量 (軌道沈下量) を低減するには、これらの軽量化が有効とされている¹⁾。

筆者らはこれまでに、輪重変動に対して、車両のばね上、ばね間、ばね下質量の、それぞれの軽量化や速度向上との関係を考察した²⁾。また、輪重変動と高低狂いの波長との関係において、実務で最も一般的に用いられている 10m 弦正矢法による軌道管理ではなく、波長 5m 程度の軌道狂いの改善特性が良い管理手法への移行の必要性を論じた。その中で、5m 程度の波長域の高低狂いが卓越的に発生、成長する原因やメカニズムを解明し、これを抑制する軌道整備手法や軌道構造の改善等による対策の確立を、今後の研究課題の 1 つとしていた³⁾。ここでは、軌道と車両の相互作用の観点において、この研究課題について論考する。

新幹線での波長 5m 程度の高低狂いの保守管理に関して、上述以外にも比較的多くの研究や報告がなされている。例えば、須永ら^{4~6)}は輪重変動や著大輪重との関係や検出方法を論じているが、これらによる軌道への影響や応答については具体的に述べられていない。他には、10m 弦正矢狂いを従来と同じ本質的な管理指標とし、この狂いが急進する予兆を把握する補助手段として 5m 弦正矢狂いをを用いる手法の報告がなされている^{7~10)}。

本論文では、開業当時と比較して高速・軽量化された新幹線車両から軌道に作用する荷重特性と、これと軌道との相互作用によって生ずる挙動について論じ、波長 5m 程度の高低狂いを保守管理すべき理由をより明確に示す。そして、当該波長域の高低狂いを抑制する軌道整備手法や、軌道構造改善による対策について述べる。

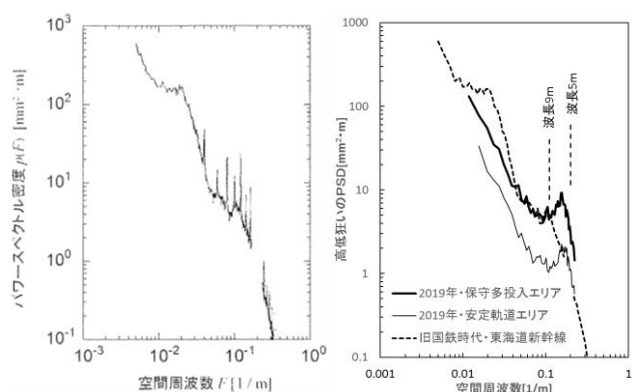
2. 過去と近年の高低狂いの卓越波長

旧国鉄時代¹¹⁾と 2019 年における、東海道新幹線の高低狂いの空間周波数に対するパワースペクトル密度 (以下、PSD) を図-1 に示す。旧国鉄時代の PSD (図 1(a)および図 1(b)中の破線) は、いつ、どの区間で測定されたものか、明らかにされていない。また、図 1(b)中の破線

では、次の2つの理由で、引用元にある多数の特徴的なピークの転写を省略している。①車両と軌道の相互作用と無関係か、寄与が小さいと推定されること。②グラフの重なりの影響で、後述する波長約9m付近のわずかな卓越の判読を妨げること。図1(b)中の太線で示したのは、高低狂いに対する保守多投入箇所を多く含む、延長約28kmの連続区間（以下、保守多投入エリア）、細線で示したのは、軌道状態が比較的良好な延長約34kmの連続区間（以下、安定軌道エリア）のPSDである。以下、空間周波数を速度270km/h走行時の波長に置き換えて記述する。また、特に断らない限り、長波長の帯域（概ね50m以上）については扱わない。

軌道狂いのPSDは、その空間周波数が高く（波長が短く）なるに従って単調に減少するのが一般的傾向といえる。旧国鉄時代のPSDは、波長約9m付近にわずかな卓越が生じている。一方、2019年の2つのエリアでのPSDでは、5mより若干長い波長で相似的な卓越が生じている。つまり、高低狂いの卓越波長が、短波長側に変化している。2001年から2005年のPSDを調べると、5mより若干長い波長の卓越が徐々に発達しており¹²⁾、これがさらに発達して、図-1に示した2019年の状態に至ったと推定できる。

この変化を生じさせた要因について、次章で考察する。



(a)国鉄時代のPSD¹¹⁾ (b)2019年におけるPSD

図-1 空間周波数に対する高低狂いのPSD

3. 卓越波長の変化を生じさせた要因推定

本章では、軌道と車両の相互作用が関係する現象を考察対象とし、前章で述べた高低狂いの特徴変化を生じさせた要因として3つを推定する。

(1) 台車と列車運転速度の変化

東海道新幹線は、ほぼ同形式の車両で編成された列車運行がなされている。上下方向の車両運動特性は、速度220km/h以下で運転されていた0系と100系は概ね同等であり、270km/h以上となった300系以降では700系、N700系（N700A、N700Sを含む）が概ね同等である。220km/hから270km/h以上に速度向上するために、車両は台車を含めて大幅に軽量化された。

第2章で述べた特徴変化に影響を及ぼしたと考えられる、台車特性と速度に関する事項を表-1に示す。ここで示した輪重変動を生じやすい波長の変化と、第2章で述べた高低狂いが卓越する波長の変化との関係が概ね一致する。

さらに、高低狂いに対する輪重変動の応答倍率をN700系で実測した結果を図-2に示す。保守多投入エリアと安定軌道エリアで求めた応答の卓越に、有意な差異はみられない。よって、ここで求めた14.6Hzの応答の卓越は、軌道や路盤等の地上設備側の条件ではなく、車

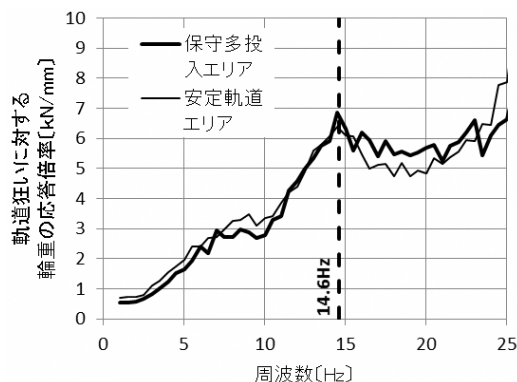


図-2 高低狂いに対する輪重の周波数応答倍率

表-1 台車・速度の変化と輪重変動を生じやすい波長の関係

	0, 100系の台車	300系（以降）の台車
外観（例）		
台車総質量	約9,900kg	約6,600kg
台車ピッチングの固有周波数	6.8Hz（0系） ¹³⁾	14.6Hz（N700系）
輪重変動を生じやすい波長	9.0m （@v=220km/h）	5.1m （@v=270km/h）

両の運動特性に起因するものと考えることができる。

一方で、過去に報告した台車ピッチング振動の理論解析結果¹⁴⁾では、過減衰となるので応答の卓越は生じない。実測と理論解析結果に差異が生じた要因の1つとして、次の推定ができる。すなわち、理論解析では軸ばねダンパーの減衰係数に公称値（設計値）を用いたが、実台車の当該周波数域におけるダンパーの実効的な減衰係数は、公称値よりも小さいことによる。

上述のように、台車の軽量化によるピッチング振動の変化と、列車運転速度の向上が、波長約 5m 程度の高低狂いが発生しやすくなった要因の1つであると推察できる。高速化による地盤振動や軌道・土木構造物への影響を減らすために、台車を含む車両全体の軽量化は必要不可欠であった。車両の軽量化は重要なことである一方、輪重変動を生じやすい周波数が変化するという面もある。

(2) 軌きょうが“あおり”やすい条件への台車条件の接近

続いて、表-1 に示したそれぞれの周波数や波長と、軌道の振動特性との関係を考察する。まくらぎ浮き状態などになった軌きょうが、列車通過時に大きく上下に振動する挙動を、保線実務の分野で“あおり”と呼ぶ。

まず、高低狂いの波長とまくらぎ浮きの生じやすさの関係について述べる。波長 9.0m で輪重変動を生じやすい台車が繰り返し走行すると、軌道には 9.0m 波長の高低狂いが生じやすい。この場合、レールの上下曲げ剛性と軌きょう質量の関係を用いて軌きょうの自重沈下量を FEM 解析で求めると、高低狂い (p-p) が 15mm 程度になるまで、まくらぎ浮きは生じない。FEM 解析の詳細については省略する。一方、波長 5.1m の場合は、わずか 2mm 程度の高低狂いで、まくらぎ浮きが生じ始める。つまり、現在の軌道は高低狂いの波長が短い側に变化したことで、過去よりも小さな狂い量でも軌きょうのあおりが生じるようになった。

さらに、台車からの加振特性と軌きょうの上下曲げ振

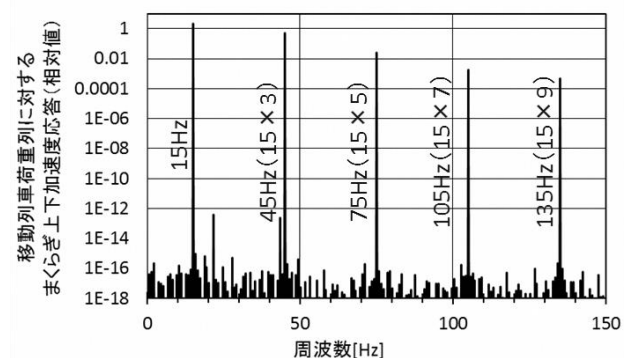


図-3 移動列車荷重列¹⁵⁾に対するまくらぎ上下加速度応答の周波数特性

動の特性について述べる。まくらぎ浮きの長さが 9m の場合、軌きょう上下曲げの固有周波数は 4~5Hz 程度になると推定される。0 系、100 系車両の台車ピッチングの固有周波数 6.8Hz に対して、軌きょうの固有周波数は比較的離れている。波長約 5m のまくらぎ浮きが発生している箇所を本線で実測した結果、軌きょう曲げ振動の固有周波数は図-3 に示すように 15Hz であった。300 系以降の車両の台車ピッチングの固有周波数 14.6Hz と極めて近く、ほぼ共振状態にあると考えられる。つまり、現在の軌道は過去よりも激しくあおられるようになったといえる。なお、図-3 で 15Hz の偶数倍の卓越が得られていないのは、加速度センサをまくらぎ浮きの中心付近に設置したからである。

以上をまとめる。高低狂いの卓越波長が 9.0m から 5.1m へと短波長側に変化したことで、① 小さな高低狂いでもまくらぎ浮きが発生するようになり、さらに、② 軌きょう上下曲げと台車ピッチングの固有周波数がほぼ一致したことで、軌道のあおりが発生しやすく、かつ、あおりが激しくなった。

(3) 車両軸配置と速度の関係における加振条件の変化

3 つめの要因として、車両軸配置とまくらぎの上下挙動について考察する。

まくらぎ浮きが 4mm 弱ある箇所で測定したまくらぎの上下加速度と変位を図-4 に示す。横軸は時間を示すが、車両軸配置との関係を理解するために、車体や車輪の位置関係を図に加えている。

車両の連結部付近に着目する。進行前側車両の後台車の通過直後、まくらぎはレールの曲げ剛性による復元力と慣性力で無荷重の位置よりも高くまで上昇する。その次の瞬間、後側車両の前台車によって、まくらぎは急激に下降させられている。このとき、まくらぎには大きな加速度が発生している。この加速度は、まくらぎがバラストに衝撃することで発生していると考えられる。

図-4 で示したように、車両の連結部には間隔が 5m となる軸配置が存在する。速度 270km/h で走行すると、この 5m 間隔での加振周波数は 15Hz に相当する。一方、まくらぎ浮き長さ 5m に対して曲げ振動する軌きょうの固有振動数は、図-3 で示したように 15Hz となる。この場合、軌道の応答は大きくなる。速度向上前の速度 220km/h で走行していれば、加振周波数は 12Hz に相当するので、軌道の応答は相対的に小さくなる。

このように、車両軸配置と速度の関係においても『5m と 15Hz の組み合わせ』が発生し、軌道のあおりを助長していると推察される。車両の連結部付近の通過タイミングで生じる軌道のあおりによって、まくらぎがバ

ラストに対して大きな衝撃力を繰り返し加えていると推定できる。

(4) 第3章のまとめ

旧国鉄時代に比べて高低狂いの卓越波長が短くなり、かつ、その狂いが大きくなった要因を、次の3つであると推察した。

- ① 台車の軽量化と運転速度の向上によって、周波数約15Hz、波長約5mでの輪重変動が発生しやすくなった。
- ② 波長約5mの高低狂いでは、小さな狂いでも浮きまくらぎが発生する。また、軌きょう上下曲げの固有振動数が約15Hzになる。これと台車から受ける約15Hzの加振とが一致し、波長約5mの軌道のおおりが発生しやすくなった。
- ③ 車両軸配置と速度の関係においても『15Hzと5mの組み合わせ』が発生して、軌道のおおりを助長するようになった。

上述のような変化が生じていたが、5m波長域の検出感度が低い10m弦正矢値を主な管理指標とした軌道保守を継続してきたため、波長5m程度の高低狂いが卓越的に発生・成長する状態に至った。

4. 10m弦正矢法での高低狂い管理に関する考察

(1) 新幹線開業当時における決定経緯

東海道新幹線の開業に先立ち、鴨宮モデル線で新幹線試作車両による走行試験が行われ、乗り心地上の整備目標値が決定された。高低狂いの整備目標値は10m弦正矢法で $\pm 7\text{mm}$ であり、現在の乗り心地管理目標値と同じである。この目標値は、高低狂いと車体上下振動加速度の関係性を求めた図-5に示す試験結果に基づいて決められた。そして、図-5について次のように解説されている。

『この図の×印がある幅をもって分布しているのは、上下動揺加速度の原因が10m弦の高低狂いばかりではなく、たとえばもっと長い波長の高低狂いとか、水準狂いとかいった他の弦にもある程度は影響されるためと思われる』¹⁶⁾。このように、10m弦正矢で『もっと長い波長』の高低狂いも含めて管理する考え方であることが示唆されている。

当時の試験での車体上下加速度の周波数特性を調べると、大きな加速度が発生しているのは、図-6に示すように周波数1~2Hz域である¹⁷⁾。車両が速度200km/hで走行するとき、この周波数の振動を励起させる軌道狂い波長は約28~56mとなる。この波長域に対する10m弦正矢法

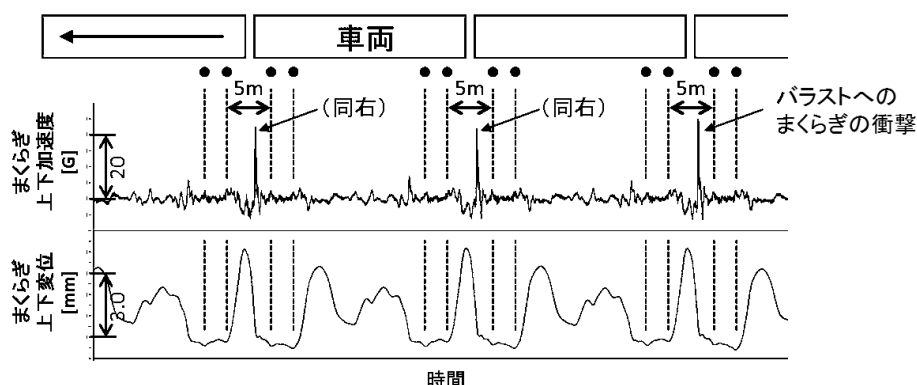


図-4 まくらぎの上下方向挙動と車両軸配置の関係

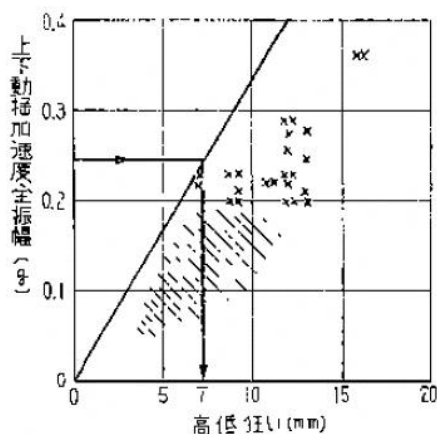


図-5 10m弦高低狂いと車体上下振動加速度の関係¹⁶⁾

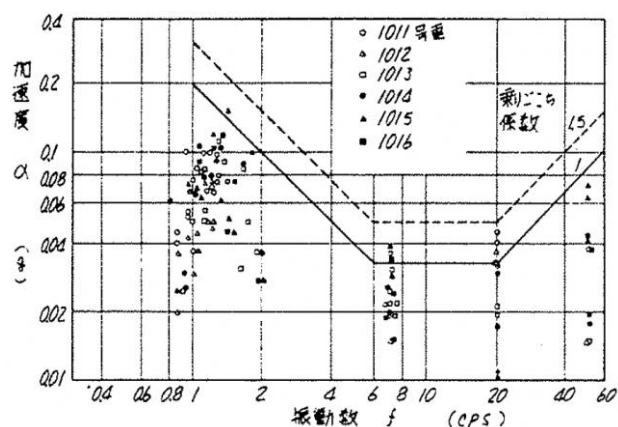


図-6 車体上下加速度の発生周波数 (CPSはHzと同じ)¹⁷⁾

での検測倍率は低く、管理指標として適していると言えない。

走行安全性に対する高低狂いの軌道整備値に関する文献調査を行ったが、定量的に述べたものは見当たらなかった（実用化に至っていないものや土木構造物の折れ角や目違いに対するものを除く）。定性的に述べられた文献¹⁹⁾では、次のように解説されている。『乗心地については前回述べた如く¹⁹⁾、新幹線では同形式の電車ばかりであるためもあり、相当明確に管理することが可能である。しかし安全についてはそれほどはっきりした結びつきはない。《途中省略》安全上の目標値は非常に大きな安全率または余裕をとった値とすべきである。例えば支所長が自らの支所管内に、あったとしても1~2箇所となるように管理し、もし生じたら直ちに整正されるような目標値としては、高低狂い10mm、通り狂い5mm程度がよいと考えられる。』

(2) 乗り心地管理に関する考察

前述のように、50m程度の長波長域までを含めて10m弦正矢法で乗り心地管理を行うために、±7mmの目標値が当時定められた。

現在は、長波長域を含めた広い波長域に対して、車両運動特性や人間の体感補正を考慮した、推定乗り心地レベルでの乗り心地管理が定着している^{19,20)}。よって、10m弦正矢法での乗り心地管理は、その有効性や合理性が既に失われているといえる。

(3) 走行安全性管理に関する考察

開業当初から100系車両が廃止されるまでの期間は、図-1と表-1で示したように、波長9m程度の高低狂いに対する輪重変動の応答が高かった可能性がある。つまり、10m弦正矢法での管理には、一定の合理性があったとみなせる。

一方、300系車両投入以降から現在は、図-2と表-1で示したように、波長5m程度の高低狂いに対する輪重変動の応答が高い。現在、これに対しては、10m弦高低狂

いの急進を防ぐための手段として、5m弦正矢狂いでの管理が行われている^{7~10)}。この管理をさらに合理的に実施する手段として、次の第5章第2節で提案する手法の導入が、その選択肢の1つとなる。

5. 整備基準の見直しによる対策

(1) まくらぎの衝撃によるバラスト劣化や軌道沈下の抑制

第3章で述べたように、現在は、(i) 5m程度の高低狂いが発生しやすくなり、(ii) まくらぎ浮きによる軌道のあおりが生じやすくなって、(iii) まくらぎがバラストに繰り返し大きな衝撃力を加えている。この繰り返しの衝撃力は、さらに軌道を沈下させるとともに、道床バラストの劣化促進の要因となる。このような悪い循環を弱めるための軌道整備が重要となる。

高低狂いの波長が約5mで、5m弦正矢狂いが6.1mmの箇所所で測定したまくらぎ上下加速度を図-7に示す。図-7(a)は現地確認でまくらぎ浮き量が最も大きい地点、図-7(b)はその直近のまくらぎ浮きがない地点で測定した。それぞれ、16両編成の同一列車が速度約247km/hで通過したときの測定結果である。

まくらぎ浮き量が大きな地点では、車両の連結部付近が通過する際に、15G前後の加速度が15回発生している。マルチプルタイタンパーのタンピングツールが発生させている加速度が19G程度であることと比較すると、15G前後の加速度の衝撃が繰り返し作用することが、軌道の沈下やバラストの劣化に対して比較的大きな影響を与えていると推察できる。

約5m波長の高低狂いに対して10m弦正矢法の検測倍率は低い。よって、図-7(a)の地点では保守投入タイミングが遅くなり、大きな衝撃力の繰り返し作用が比較的長時間続くことがある。これによってバラストの劣化が進み、この地点では高低狂いを整正してもまくらぎが沈下しやすい状態になっていく。整正後のまくらぎが沈下して短い波長の高低狂いが再発すると、さらにバラストの

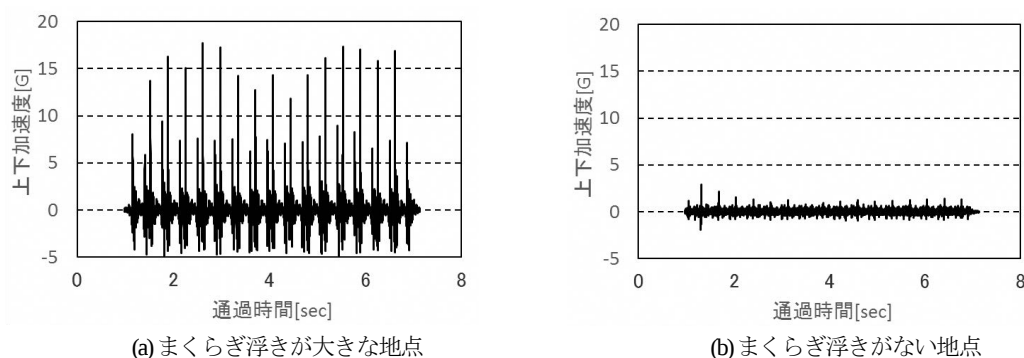


図-7 同一高低狂い箇所における隣接2地点でのまくらぎ上下加速度の比較

劣化が進む。この悪い循環が繰り返される。

一方、図-7(b)のまくらぎ浮きがない隣接地点では加速度が小さいので、図-7(a)の地点より相対的に軌道は沈下しにくく、バラストも劣化しにくい。

これらの状態が進行すると、短い波長の高低狂いを整正しても、同じ箇所がすぐに沈下して元の狂いに戻りやすくなる。現在、整正した高低狂いが短時間で元に戻る現象が、実際にみられる。このような箇所では、道床更換の後、たとえば次節で述べる管理指標によって、波長5m程度の高低狂いを適切なタイミングで整正し、道床状態を維持する必要がある。

道床更換費用と軌道整備費用の和を最小化するような整備基準の決定を、今後の研究課題とする。

(2) 輪重変動の抑制

第3章の図-2で示したように、現在の新幹線車両(N700系)は周波数14.6Hzの加振に対する輪重変動を生じやすい。速度270~285km/hでの走行を考慮すると、距離軸に対して5.1~5.4m周期の輪重変動が生じやすい。高低狂い波形の山や谷の位置と輪重増減の関係を調べると、谷底付近で著大輪重が発生し、山頂付近で輪重が減少する³⁾。したがって、当該波長の軌道狂い上を車両が繰り返し通過することで、山や谷の位置はあまり変化することなく、つまり、波長が明確に変化しない状態で、高低狂いが大きくなっていく。

また、輪重変動を抑制することは、軌道狂いの抑制と同時に、走行安全性を管理することになる。

この狂いを正矢法で管理するならば、5m弦が適していることになる。しかし、最高速度から比較的低い速度域までを1つの指標で管理することと、5m弦正矢法の検測倍率を考慮すると、最適とはいえない。図-2の関係から求めた、輪重減少率を80%に抑えるための高低狂い(p-p値)と波長の関係を図-8に示す。

東海道新幹線では、高速走行区間の定義を170km/hを超える場合としている。270km/hへの速度向上以前は、高速走行区間の速度範囲は170~220km/hまでの50km/h幅であった。現在は、170~285km/hまでの115km/h幅を高速走行区間として扱わなければならない。

仮に速度285km/hのみを対象に考えると、5m弦正矢狂い8mmでの管理は、適度な安全率を有した優れた指標になり得る。一方、計算上、速度170km/hでは波長3.2mの高低狂いを11.8mm以下で管理する必要がある。しかし、5m弦正矢狂い8mm管理では、これを満足できない。5m弦正矢値での管理基準を大幅に厳しくするか、あるいは、5mよりも短い弦長での管理を組み合わせる必要がある。前者の場合、過剰な安全率となる管理波長域が

生ずる。後者では、管理が煩雑になる。

そこで、図-8に示すような、遮断帯域に対して緩やかな減衰特性をもつバンドパスフィルタを通し、復元原波形を加工して用いる方法が考えられる。この方法は、欧州規格の軌道狂い整備基準(EN 13848-5:2017)に近い。ENでは、日本の復元原波形に相当する軌道狂いデータに対して、3つの波長帯に分離するバンドパスフィルタ処理を行い、それぞれの波長帯と走行速度帯に応じた整備基準を設けている。本方法と当該ENとの主な違いは、ENでは狂いを片振幅値で規定していることと、比較的急峻な遮断特性のフィルタを使用することである。基準値を片振幅のmm単位の整数値で規定すると、1mmの変化に対する輪重減少率の感度が高くなり、実務で使いづらくなる。具体的には、後述する3段階(保守計画、予防管理、徐行)の目標値を、全振幅なら2mmピッチで設定できるが、片振幅では1mmピッチで設定することになる。また、日本の保線従事者は、長年、正矢法に慣れ親しんできた。5m弦正矢狂いの値は、ここで述べる全振幅値と近い大きさの関数にあり、違和感は生じにくいであろう。

上述の、短波長域のバンドパスフィルタ処理をした高低狂いの全振幅値と、輪重減少の実測結果(減少率を算出する静止輪重も実測値)との関係を図-9に示す。実測時の速度は約270km/hで、ほぼ等速の条件である。

図示した斜めの2本の直線のうち下側の直線は、図-8に示した80%の輪重減少が高低11.8mmで発生するという検討結果を基に示したものである。図-9では、多くのプロットがこの直線より上にある。つまり、この直線は安全性を確保する基準として不十分である。こうなる理由は、この直線は波長概ね3m以上(周波数25Hz以下相当)の狂いデータを用いて輪重減少との関係を示したものであるのに対し、輪重減少のデータには、レール凹凸等の影響による25Hz以上の成分が含まれているからである。安全性の評価には作用時間15ms以上の現象を考

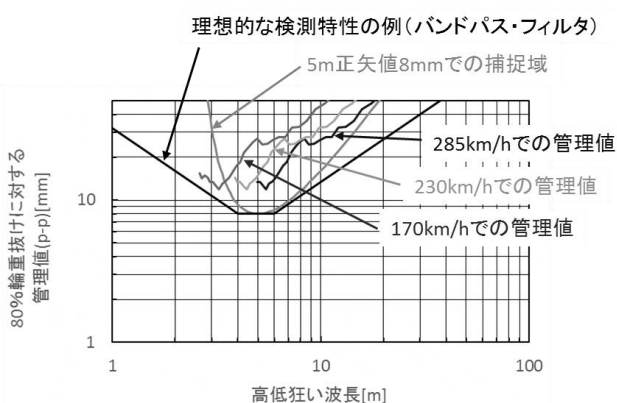


図-8 速度170~285km/h域に対する整備目標値

慮する必要がある²⁴⁾。図-9の輪重減少率のプロットは、この作用時間を考慮した値である。

図-9の下側の直線と同じ傾きで、プロットを100%捕捉できるように引いたのが上側の直線である。各目標値等をmm単位の整数に丸めると、たとえば、保守計画目標値7mm（輪重減少率60%以下）、予防管理目標値9mm（同80%以下）、230km/h徐行値11mm（同90%以下）とするような提案が考えられる。

ここでは主に輪重減少に着目した、走行安全の管理について考察した。同様に、著大輪重と軌道狂い進みとの関係を分析し、経済性も考慮した整備基準の決定を今後の研究課題とする。

6. 軌道構造の改善による対策

軌道構造での対策で考えるべき点の1つは、その上下方向振動の固有周波数を15Hzから向上させることである。この手段として、軌きょう上下曲げ剛性の向上を検討する。

東海道新幹線では、沿線地盤振動への軌道での対策として、一般的な軌道よりも軌きょう剛性を向上させた「まくらぎ連結工」（図-10）が採用されている²⁵⁾。特別に設計された有道床弾性まくらぎの両端に、JIS60kgレールと同等の上下曲げ剛性を有する連結用鋼材を取り付けた軌道構造である。

地盤振動対策用のまくらぎ連結工は、約8Hz以上の周波数域で振動低減効果を得るために、高速移動荷重列との関係で長さ10mの連結鋼材を標準仕様として用いている。この長い連結用鋼材を要する軌道構造は、半径2,500m程度の曲線区間での施工性が良好ではない。軌道沈下対策用では、連結用鋼材の長さを5m（以上）に仕様変更し、施工性の向上を図る。

特別に設計された有道床まくらぎの両端には、連結用鋼材と接続するための、高い強度の鋼製のフランジが取り付けられている。このフランジの加工費が、まくらぎ価格の大きな割合を占めている。地盤振動対策用は、す

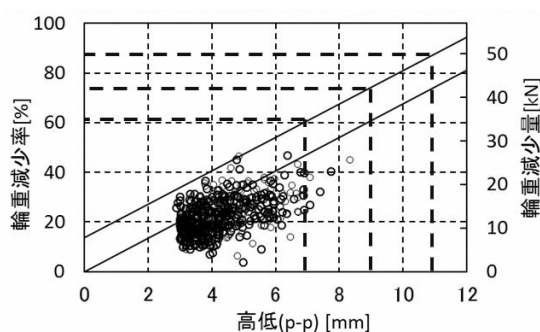


図-9 短波長域の復元原波形高低の全振幅値と輪重減少の関係

べてのまくらぎを連結する仕様であるが、沈下対策用は1本飛びにまくらぎを連結する仕様として、約半数のまくらぎのフランジを不要とし、低コスト化を図る。

これらの仕様変更を行っても、軌きょう上下曲げの固有周波数が変化しないことを、移動式載荷試験車の起振台車²⁹⁾でのランダム波加振試験で確認した。

この結果、連結長を10mから5mに短縮し、さらに、まくらぎの連結を全部から1本飛びに減じても、軌きょうの固有周波数は18~19Hzで変化なく、15Hzより上昇する結果が得られた（図-11）。

今後、本線への試験敷設を行い、軌道沈下や道床劣化に対する抑制効果を確認する。

7. まとめ

東海道新幹線の高低狂いは、旧国鉄時代には波長9m程度にわずかな卓越がみられる程度だったが、現在は5mより若干長い波長域で顕著に卓越している。この変化が生じた要因を、車両と軌道の相互作用に基づいて、次の3つであると推察した。

- ① 台車の軽量化と高速化によって、周波数約15Hz、波長約5mでの輪重変動が発生しやすくなった。
- ② 波長約5mの高低狂いでは、小さな狂いでも浮きまくらぎが発生する。また、軌きょう上下曲げの固有振動数が約15Hzになる。これと台車から受ける約15Hzの加振とが一致し、波長約5mの軌道のあおりが発生しやすくなった。
- ③ 車両軸配置と速度の関係においても『15Hzと5mの組



図-10 まくらぎ連結工（バラストがない仮組状態）

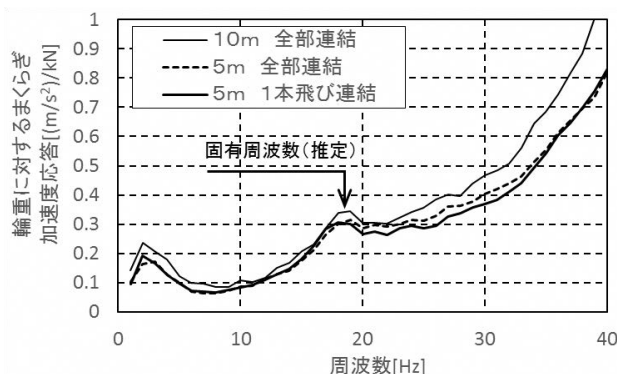


図-11 仕様変更による軌きょうの固有周波数への影響

み合わせ』が発生して、軌道のあおりを助長するようになった。

そして、この 5m 波長域の狂いに対する軌道保守管理を行うことが、軌道沈下や道床劣化を抑制するとともに、車両の走行安全性を確保するうえで本質的に重要であることを論じた。

さらに、これへの軌道管理面での対策として、短波長域のバンドパスフィルタ処理をした復元原波形の全振幅値を用いる手法を提案した。また、軌道構造面での対策として、これまで地盤振動対策用として用いてきたまくらぎ連結工を改良し、軌きょう曲げの固有周波数を高める構造を開発した。

参考文献

- 1) 保線工学編集委員会：保線工学〈上〉，pp.216-234，鉄道現業社，2016.
- 2) 三輪昌弘，川崎祐征，中川正樹，吉村彰芳：新幹線軌道保守量の低減と車両の軽量化に関する一考察，鉄道力学論文集，No.12，pp.85-90，土木学会，2008.
- 3) 大竹敏雄，三輪昌弘，青木俊之，千田耕大，五十嵐稔：高速鉄道における輪重変動抑制を目的とした短波長軌道狂い管理手法の研究，土木学会論文集 F4，Vol.71，No.2，pp.83-94，2015.
- 4) 須永陽一，佐野功，井手寅三郎：高速鉄道における短波長軌道狂いの検出法，鉄道総研報告，Vol.13，No.5，1999.
- 5) 須永陽一，井手寅三郎，金尾稔：新幹線の高速化に対応した短波長軌道狂い管理手法，日本機械学会第3回交通・物流部門大会講演論文集（鉄道シンポジウム編），pp.91-96，1994.
- 6) 井手寅三郎，曾我寿孝，須永陽一：山陽新幹線の短波長軌道保守管理の取組み，新線路，第51巻，第7号，pp.7-9，1997.
- 7) 川嶋昭一，榎本祐介：東海道新幹線における短波長軌道狂い管理，新線路，第69巻，第12号，pp.12-14，2015.
- 8) 一井健輔，小林靖典，小村啓太，下野勇希：5m 弦管理基準の提案，土木学会第65回年次学術講演会，IV，pp.421-422，2010.
- 9) 木村寛淳：5m 弦正矢を用いた高低変位急進箇所の管理，新線路，第64巻，第4号，pp.33-35，2010.
- 10) 榎本祐介：短波長軌道狂いに着目した軌道管理手法の確立，新線路，第62巻，第1号，pp.41-44，2010.
- 11) 吉田秀久，石田弘明，鈴木昌弘，富岡隆弘，宮本岳史，道辻洋平：鉄道車両のダイナミクスとモデリング，p.178，日本機械学会，2017.
- 12) 小林幹人，三輪昌弘：東海道新幹線における短波長軌道狂いの実態と輪重変動・横圧に与える影響の試算，鉄道技術連合シンポジウム（J-RAIL2005），pp.89-92，2006.
- 13) 三芳功達，坂本政文，小池彰：新幹線第26次車両の性能試験，鉄道技術研究所報告，Vol.79，No.43，1976.
- 14) 川崎祐征，三輪昌弘：台車ピッチングを考慮した車両／軌道の動的相互作用の理論解析，鉄道工学シンポジウム論文集，No.16，pp.149-156，2012.
- 15) 吉岡修：新幹線鉄道振動の発生・伝達メカニズムとその防振対策への応用，鉄道総研報告，Special No.30，pp.105-109，1999.
- 16) 立松俊彦：新幹線保守の技術上のポイント(1)，鉄道線路，Vol.14，No.4，pp.123-130，1966.
- 17) 松井信夫，三芳功達：V 車両の運動 2.振動および乗り心地，高速鉄道の研究，pp.268-283，研友社，1967.
- 18) 立松俊彦：新幹線保守の技術上のポイント(2)，鉄道線路，Vol.14，No.5，pp.155-161，1966.
- 19) 永沼泰州，高井秀之：新幹線車両の動特性を考慮した軌道管理手法，鉄道総研報告，Vol.9，No.12，pp.37-42，1995.
- 20) 新原真一：東海道新幹線における乗り心地レベル向上に向けた取り組み，新線路，第60巻，第7号，pp.15-17，2006.
- 21) 石田弘明，手塚和彦，植木健司，深沢香敏，松尾雅樹：脱線に対する安全性評価指標の研究，鉄道総研報告，Vol.9，No.8，pp.49-54，1995.
- 22) 保線工学編集委員会：保線工学〈下〉，pp.346-348，鉄道現業社，2018.
- 23) 三輪昌弘，吉村彰芳：試験装置とコンピュータシミュレーションによる軌道と車両のダイナミクスに関する研究，第13回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，pp.135-138，2006.

(Received April 2, 2021)

(Accepted June 4, 2021)

COUNTERMEASURES AND MCHANISM OF TRACK DETERIORATION CONSIDERING VEHICLE/TRACK DYNAMIC INTERACTION

Takuya IJICHI and Masahiro MIWA

In recent years, tracks of the Tokaido Shinkansen deteriorate frequently in approximately 5 m wavelength. Three factors which cause those deteriorations are estimated and discussed in consideration of vehicle/track dynamic interactions. Track inspection and maintenance focusing on that wavelength are essentially important for suppressing wheel load variation, track settlement and ballast particle crushing. A new evaluation method of determination to maintain tracks is described as the substitution of 10 m chord versine method. And also, a new track having high bending rigidity is developed and tested.