

S8-2-4 レール頭部断面形状の調査結果と車両の走行安定性との関係

[土] ○ 三輪昌弘 (東海旅客鉄道㈱) [土] 小林幹人 (東海旅客鉄道㈱)

Actual conditions of rail head shape and effect of them on hunting stability

Masahiro Miwa, Member (Central Japan Railway Company)
Mikihito Kobayashi, Member (Central Japan Railway Company)

After rail renewal work, riding comfort of lateral direction can deteriorate significantly in the post-maintenance section. We have actually surveyed the rail head shape before/after the rail renewal work to identify the cause of unusual lateral vibration of car body. It has been found that the crown arc radius of actual rail has been much larger than that of the designed value. Characteristics of the lateral vibration of car body for each rail condition have been recreated by numerical analysis of vehicle dynamics with the surveyed rail shapes as the input data. We estimate the cause of those phenomena with the viewpoint of a wheel/rail contact problem.

Also, we have measured a lot of brand-new rail shapes to contribute to enhance the hunting stability and the riding comfort. Manufacturing variations of rails are brought out in this paper and finally, the direction of the measures for this problem is discussed.

キーワード：レール頭部形状、実態調査、走行安定性、車輪／レール接触

Keyword : Rail head shape, Actual condition survey, Hunting stability, Wheel/Rail contact

1. はじめに

新幹線ではロングレール更换後に、その工事施工区間で車両の左右方向の乗り心地が著しく悪化することがある。この原因を特定するため、ロングレール更换直前の状態でのレール頭部断面形状と、新品状態のそれとの実測を行なった。新品レールの頭部形状の特徴として、頭頂部の圆弧半径が設計値に比べて大きくなっていることが調査結果でわかった。これらの実測値をレール断面形状の入力条件として車両運動シミュレーションを行なった結果、それぞれのレール条件における実際の車体左右振動加速度の特徴が再現された。本稿では、レール頭部形状と車輪踏面形状との関係において、本現象の原因を推定する。

また、今後の対策を検討するため、新品レールの頭部形

状の実態を更に詳しく調べた。製鉄メーカーから納入されるレールを約半年間にわたって多数調査し、製造時の形状変化の様子を調べた結果も本稿で報告する。そして最後に、対策の進め方の概要を提案する。

2. ロングレール更换前後における車両運動の変化

2.1 営業車の車体左右振動加速度

300系新幹線電車の中間車の、後方車端部付近の床面で測定した左右振動加速度の一例を図-1に示す。線路線形は直線、列車速度はおよそ270km/hである。レール更换の施工は、この測定の数日前に行われている。

レール更换施工区間では、その前後の区間に比べて加速度振幅が大きい傾向にあるだけでなく、明らかに周波数の高い振動が発生している。レール更换施工区間での車体振

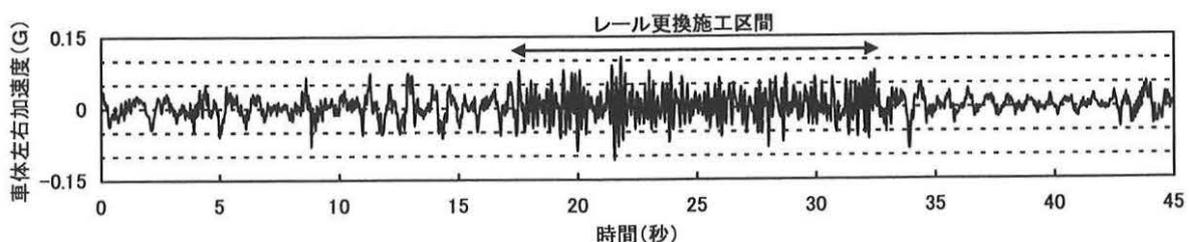


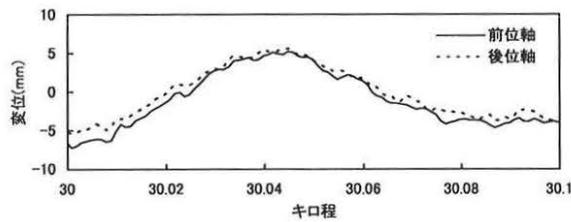
図-1 レール更换施工区間での車体左右振動加速度波形の例

動の卓越周波数を読取ると 6~8Hz 程度であるが、270km/h 走行時にこれに対応する波長 10m 前後の軌道狂いには、特に悪化傾向は認められなかった。

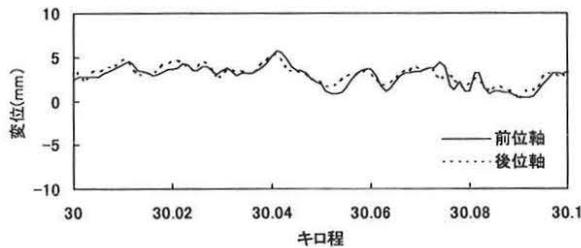
車体振動の卓越周波数より、台車が蛇行運動を生じていることが推定された。しかし、営業用編成での台車運動の調査には特別な測定準備が必要となるため、以下に述べる軌道検測車での調査を行なった。

2.2 軌道検測車による台車運動の調査

軌道検測車（東海道新幹線 923 型電車、T4 編成）の軌道検測用に装備されたセンサ出力を利用して、台車運動の調査を行なった。車輪レール間の左右変位を測定するための光学式変位計が台車 1 台あたり 4 個付いている。これらのデータを解析することで、レールを基準とした台車の運動を推定することができる。また、輪軸と車体間の左右変位を測定する変位計が 1 台の台車前後で 2 個付いている。これらを解析することで、車体を基準とした台車の運動を推定することができる。ただし、軌道検測車の台車のばね下部には検測用の装備が付加されて慣性質量が増加していること、これに伴う台車蛇行動を抑制するためにヨーダンパが強化されていることから、通常の営業車両の台車運動を直接定量的に推定することにはならない。ここでは、定性的な調査を目的としている。



(a) レール更换前



(b) レール更换後

図-2 軌道検測車のセンサデータによる台車運動の推定 [車輪レール間左右変位]

車輪レール間の左右変位について、レール更换前後の比較を行った例を図-2に示す。着目点は、前位軸（実線）と後位軸（破線）の値の相対的な大小関係である。レール更换後のグラフでは、これらの大小関係が 10m 程度の比

較的短い周期で逆転を繰返している様子が読み取れる。これは、1つの台車の前後の輪軸が、相対的に左右逆方向に変位していること、つまり、台車がレールに対してヨーイング運動を生じていることを表している。一方、レール更换前の変位波形は、両者の値が相対的に近づく傾向はあるものの、値が明確に逆転している様子はない。

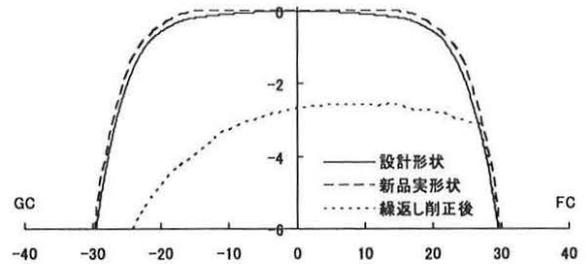
車体台車間の左右変位についても、台車の前側と後側とで図-2と似た現象が観測されたが、結果の図示は紙面の都合で省略する。

軌道検測車の台車の運動は、営業車両のものと同じとは言えないが、ここで示したデータにより、レール更换後の軌道の走行を走行したとき、台車が蛇行運動を生じていることが定性的に説明できたものと考えられる。

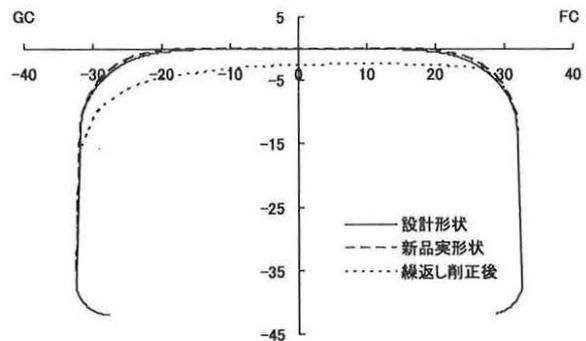
3. 振動増加原因の推定

3.1 レール頭部断面形状

前述の第 2.1 節の状況から、車体左右振動の増大は軌道狂いが主たる原因ではないと考え、レール頭部断面形状に着目することにした。レール更换前の状態に相当する敷設後約 10 年経過したレール（「繰返し削正後」と呼ぶ）と、製鉄会社から納入された時点（「新品実形状」）での頭部断面形状を測定した。それぞれの代表例を、「設計形状」と合わせて図-3に示す。図-3(a)は、上下方向の拡大倍率を高めた、頭部付近の形状を示したものである。



(a) 下図の頭頂部付近を上下方向に拡大



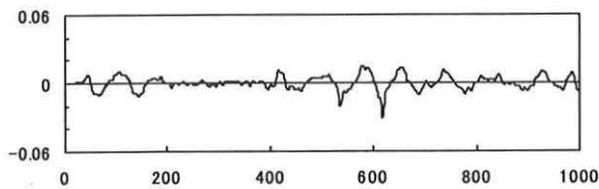
(b) 各形状の比較

図-3 レール頭部断面形状(目盛: mm)

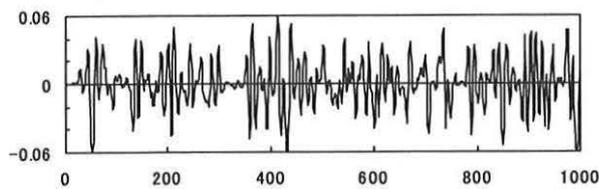
新品実形状の特徴は、設計形状での半径 600mm の円弧部分が直線に近い形状(この例では半径 4000mm 相当)となっていた。一方、繰返し削正後は該当する円弧の半径が小さくなっており、車輪との接触痕(照り面)付近で 300mm 前後となっていた。

3.2 車両運動シミュレーション

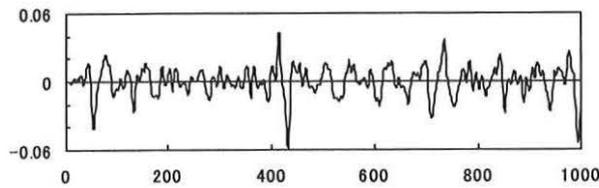
図-3 で示した 3 種類のレール断面形状(長手方向には一様)を入力条件として変化させ、車両運動シミュレーションにより車体左右振動加速度の予測を行った結果を図-4 に示す。図の上から 3 つの波形が、それぞれのレール断面に対する振動加速度の計算結果である。計算ソフトは VAMPIRE を使い、300 系 1 両の 3 次元モデルに対し、図の最下段(d)に示す通り狂い(図-1 とは別な区間)のみを与えた。車輪踏面形状は新幹線円弧踏面の設計値とし、速度は 270km/h とした。



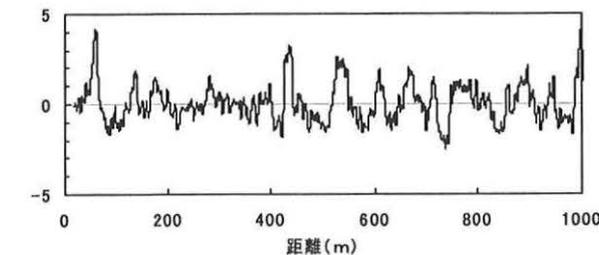
(a) 繰返し削正後 (縦軸単位: g)



(b) 新品実形状 (縦軸単位: g)



(c) 設計形状 (縦軸単位: g)



(d) 入力軌道通り狂い (復元元波形: mm)

図-4 レール断面形状の違いによる車体左右振動加速度の計算結果

新品実形状では、図-1 の実測例に似た高い周波数の振動が発生する結果が得られた。設計形状では、このような特徴的な振動は発生していない。繰返し削正後では、設計形状よりも全般的に振動が小さく、3 条件の中では最も乗り心地が良いことになる。このように、ロングレール交換前 ((a)繰返し削正後) から交換後 ((b)新品実形状) にレール頭部断面形状が変化することで、左右動揺に関する乗り心地が悪化する現象が、数値シミュレーションを用いて説明できた。

3.3 車輪・レールの接触状態

車輪踏面との関係で、3 種類のレール断面に対する踏面勾配を図-5 に、輪径差を図-6 に示す。輪軸の中立位置(輪軸左右変位量=0)付近では、新品実形状は設計形状と比較して 1.6 倍の踏面勾配となっているだけでなく、さらに輪軸左右変位量=1mm 付近で踏面部分での 2 点接触が生じて『飛び移り現象』も発生し、蛇行動が発生しやすい条件となっている。輪径差のグラフでも、新品実形状では車輪左右変位量=±1mm 付近で 2 点接触が生じており、不安定な運動を生じやすいことがわかる。

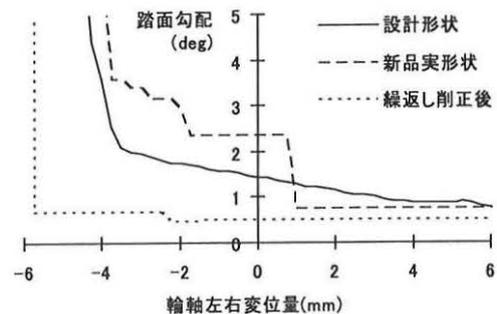


図-5 踏面勾配の比較

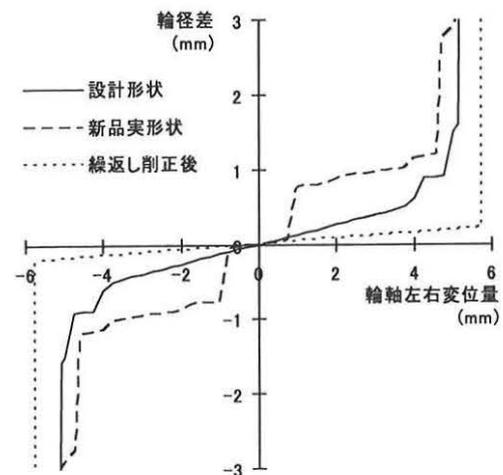


図-6 輪径差の比較

一方、繰返し削正後は、フランジ接触をするまでの全範

開で踏面勾配が非常に低くなっており、直進走行安定性が高いことを表している。

4. 対策方法の検討

4.1 新品レールの頭部断面形状の実態調査

これまでに述べたように、レール頭部断面形状に関する製造誤差が、車両の特異な左右振動の原因となっている可能性が高い。この項目については、製造公差とその測定方法、管理基準等が JIS 規格には定められていないようであり、仕様書等に加える必要がある。しかしながら、この場合、10 分の 1mm 単位の精度を要求することになる。これが可能かどうかを検討するため、新品レールの多数の形状データを一定期間にわたって取得し、製造誤差の分布範囲や変化を調べた。

60kg レールの設計値では、頭頂部中心から±15mm 範囲が R600mm の円弧、その両外側に R50mm、さらにその両外側に R13mm の円弧が接続する形となっている（図-7 参照）。しかし実際のレールは、設計上 R600mm であるべき円弧半径が、この値よりはるかに大きかった。新幹線円弧踏面では、中立位置でことと接する部分の円弧の半径は 1,000mm である。走行安定性の判断条件では、レール側の円弧の半径は車輪側よりも小さくしなければならない。本稿では、この条件を判定する方法として、図-7 に示す位置関係での d の値を調べることにした。

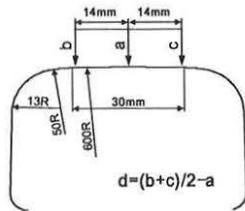


図-7 形状評価の指標 d(mm)の定義

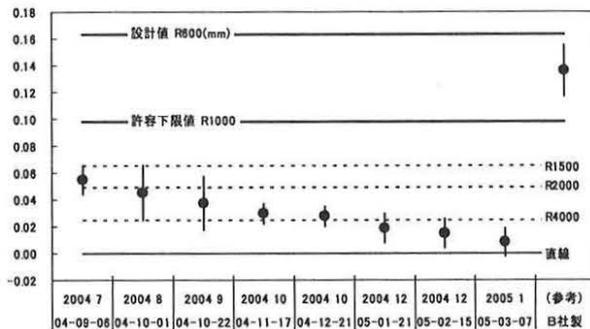


図-8 製造時期の違いによるレール頭部形状の変化
A社製、縦軸は図-7の指標 d(mm)、
横軸の上段の数字は製造年月、下段は調査年月日

調査は、半年間にわたり 8 回行なった。1 回あたりの取得データ数は 40 程度である。図-8 に調査結果を示す。

点は各回のデータの d の平均値、縦棒は標準偏差を表す。右端に B 社製として示したものの以外は、全て A 社製である。A 社製のもの、調査期間の全てにおいて d の値が設計値の半分未満であるばかりでなく、円弧踏面車輪との関係で定まる許容下限値をも下回っている。経時変化では、時間が経つに従って設計値との差が大きくなっている。この原因として圧延ローラーの劣化の進みが考えられるが、A 社ではおよそ半年毎に更新しているとの情報を得ている。

4.2 対策の方向性

(1) 60kg レールの現行設計断面を維持する場合

頭頂部の円弧形状に対する許容公差を規定する必要がある。圧延ローラーの劣化をある程度許容するには、R600mm よりも小さな半径側への偏差を大きめに取る公差の設定が有利となる。図-8 で示したように、製造ロット毎の誤差の分布範囲は小さいことから、製造上の対応も不可能ではないと考えられる。

(2) 設計断面の変更

現行の 60kg レールは、新幹線円錐踏面との組合せを前提に設計されている。円錐踏面との組合せでは、例えば図-7 の d の値に関して約 0.16mm の公差範囲が許容されていたことになるが、円弧踏面とでは約 0.06mm で半分未満と厳しくなってしまう。

変更案の 1 つに、頭部を 50kgN レールと同一とすることが考えられる。図-3 で示したように、削正を繰返したレールでは頭部円弧の半径は 300mm 程度（実測でこれ以下の事例も確認している）となっているが、現実のオペレーションで特に問題は生じていない。むしろ、走行安定性に対しては有利な方向であると考えられる（図-4 参照）。在来線の車輪との組合せを考えれば、需要面でも好都合な形状である。ただし、急曲線区間への適用については、さらに検討を要する。いずれにしても、今後、車輪踏面の摩擦実態も考慮した上で具体的な検討を行なっていきたい。

5. まとめ

ロングレール交換後に生ずることがある車両の特異な左右振動は、レール頭部形状の製造誤差が原因と推定される結果となった。設計形状に比べて頭頂部の円弧半径が著しく大きくなっており、現実には平坦に近い状態であった。当該部分に関するレール製造上の許容公差規定はないため、これを定める必要があり、その方向性を提案した。

さらに、既に指摘¹⁾があるが、60kg レールと新幹線円弧踏面との組合せについては再考の余地がある。これに関して重要なことは、相互で許容する製造公差や摩擦寸法を決め、設計形状の決定条件として含めることであると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会構造工学委員会鉄道力学小委員会：レール・車輪断面形状プロジェクト研究会報告書、2001年3月