

1102 車輪接触と車両運動を考慮した新幹線のレール削正

正 [土] ○三輪 昌弘 (JR 東海)

飯田 研吾 (JR 東海)

勝浦 克仁 (JR 東海)

友善 守 (JR 東海)

Rail Grinding for Shinkansen in Consideration of Wheel Contact and Vehicle Dynamics

Masahiro MIWA, Central Japan Railway Co. 1545-33, Ohyama, Komaki, Aichi 485-0801

Kengo IIDA, Central Japan Railway Co.

Katsuhito KATSUURA, Central Japan Railway Co.

Mamoru TOMOYOSHI, Central Japan Railway Co.

Rail grinding works have become general in Japanese railways, aiming at (1) removing and preventing cracks and (2) reducing rolling noise and impact wheel load. We designed the target transverse profile for rail grinding, aiming at the third effect of (3) improving vehicle stability. Both new and worn wheel profiles are considered in the design process. Its effectiveness was demonstrated by trial operations.

Keywords : rail grinding, wheel-rail contact, target profile, running stability

1. はじめに

JIS60kg レールの頭部断面形状は、我国の新幹線開発当時、高速走行時の台車蛇行動防止を主眼として新幹線円錐踏面車輪との組合せを前提に、50T レールとして設計されたものをそのまま踏襲している。しかし、営業運転開始からしばらくすると車輪の偏摩耗が問題となり、これへの対策として新幹線円弧踏面車輪が開発され、採用されて現在に至っている。円弧踏面開発の際は、台車蛇行安定性が多少低下することを許容し、偏摩耗防止を優先した設計がなされた¹⁾。

しかしながら、レールや車輪には設計形状に対して製造誤差があり、また、使用に伴い両者とも摩耗等により形状が変化する。こうした使用状態、特に摩耗した車輪踏面形状において高速走行時に生じる様々な課題に対し、レール削正によって改善、維持できないかを検討する。

本報告では、レール削正によってその頭部断面形状を新品状態から意図的に変化させ、台車ヨー運動が関係する走行安定性や乗り心地向上を図った取組みについて述べる。レール削正の施工目的は、レール表面傷の除去や発生予防、転動音や輪重変動の低減が一般的であるが、ここでは施工価値をさらに高めることが狙いである。

2. 欧州の目標削正形状

レール削正形状に関し、海外の例では、欧州標準化委員会(CEN)で当該作業後の仕上がり基準が規格化されている²⁾。同規格では、削正形状に関してレール長手方向の頭頂面凹凸形状、および、頭頂部断面形状の2種類に関して規定している。前者の長手方向の凹凸に関しては、我国でも比較的多くの研究がなされている^{例えぼ3)}。

後者の頭頂部断面の目標形状決定に関しては、ドイツ鉄道(DBAG)と Speno International 社の共同研究による報告^{4, 5)}に詳しく述べられている。我々はこれを参考とした。欧州では、2000年10月に発生したイギリス Hatfield でのレール折損事故の後、レールのゲージコーナー(GC)

付近の頭部傷防止に効果的な、形状を含む削正方法の研究を行ってきた。

ドイツをはじめとする欧州主要国の鉄道は、上下分離がなされている。レールの保守管理を担う地上設備保有組織は、主にレールの摩耗断面形状を測定したデータを基に車輪との接触状態を推定し、目標削正形状を決定してきている。一方、同一事業者内で地上設備と車両の保守管理を実施している我々は、摩耗状態を含めた実際の車輪形状データを基にレールとの接触解析を行って目標断面を設計する、より直接的な手法を用いる。

3. 目標削正形状の設計

3.1 車輪形状

レールの目標断面形状は、新品車輪と摩耗車輪それぞれとの接触解析を行って設計した。削正直後を含む新品車輪は、設計形状との誤差が十分に小さいことを確認した。摩耗形状は、東海道・山陽新幹線を主に「のぞみ」運用で運転する車両において、概ね最も摩耗が進んだとみられる車輪の測定を行った。

レールとの接触解析に用いた、新品車輪および摩耗車輪の形状を図-1に示す。ここでの設計目的に対して、車輪の中立位置でのレールとの接触点からフランジのど部にかけて(図-1の横軸で概略-5mmから-25mmまでの範囲)の摩耗量が、他の部分に比べて相対的に少ない形状を代表データとして選定した。この理由は後述する。

3.2 車輪接触の幾何学的解析

幾つかのレール形状と図-1に示した車輪との接触位置を幾何学的に解析した結果を図-2に示す。「新品実断面」とは「JIS 設計形状」に対して製造時の誤差を含んだ実測レール形状の一例である。「繰返し削正形状」は、供用開始後約10年間に10回の削正作業を行った実測レール形状の一例である。図-2に示したレール頭部断面形状のうち、新品実断面とJIS設計形状とは、図示上はほぼ重

なりあっている。

摩耗と新品それぞれの車輪の接触について、横棒は左右車輪のフランジ接触直前までにレール頭部に接触する範囲を、●印は中立状態での接触位置を示す。摩耗車輪との接触において、新品実断面と JIS 設計形状のレールの場合、横棒が途中で途切れている。これは、この範囲に車輪が接触しないこと、つまり 2 点接触が生じていることを意味する。また、中立状態の接触位置は、2 点接触によって飛び移りが起きる位置と非常に近い。これらの状況では、台車のヨー運動がより発生しやすくなる。

一方、繰返し削正形状のレールでは、摩耗、新品いずれの車輪においても、レール頭部中心からフィールドコーナー (FC) 側に多少寄った範囲で接触している。この場合、円弧踏面車輪では踏面勾配が比較的小さい状態で接触するので、台車のヨー運動を抑えることができる。

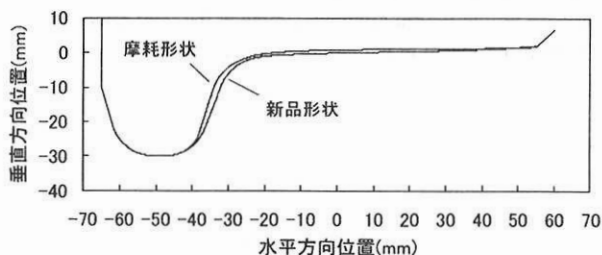


Fig.1 Design and Worn Wheel Profiles

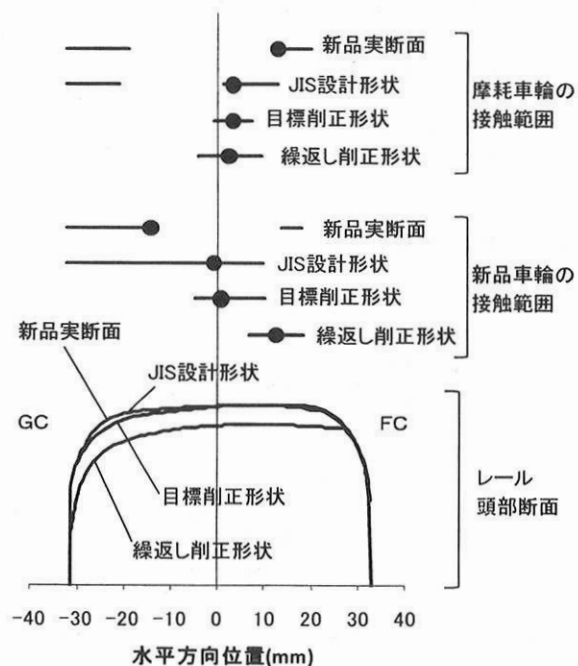


Fig.2 Wheel Contact Range on Design/Worn Rails

摩耗車輪と図-2 で検討に用いたレールとの組合せによる踏面勾配の解析結果を図-3 に示す。新品実断面の輪軸左右移動量 1.3mm 付近、および、JIS 設計形状の同 3.0mm 付近で踏面勾配が急激に変化している。ここでは、2 点接触による飛び移りの発生、つまり、不連続点になっている。また、特に新品実断面の場合は、踏面勾配が約 5.3 度になる区間が存在し、不安定な台車挙動発生の原因につながる可能性がある。

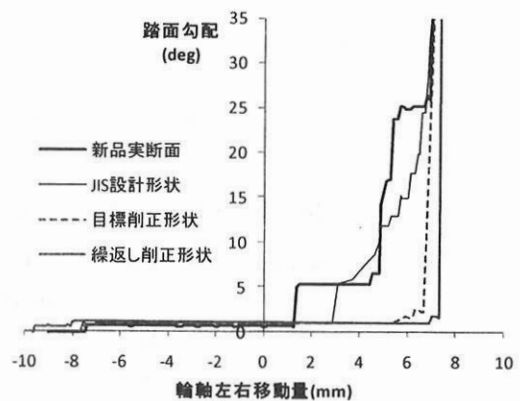


Fig.3 Conicity of Worn Wheel Profile

3.3 目標削正形状の設計

図-2 および図-3 から明らかなように、レール頭部中心より GC 側で、特に GC に近い部分での車輪接触があると、2 点接触や踏面勾配の高い状態が発生し、台車ヨー運動を誘発する。つまり、この部分に車輪を接触させない形状にレールを削正することで、走行安定性や乗り心地の改善を図ることができる。以下の考えに従って目標削正形状を設計した。

- 図-2 における横軸座標の概ね -30 ~ -10mm 付近において、車輪が中立位置から横移動したときに、この範囲でレールと接触しない程度までレール表面を削り取る。
- そして、車輪がレールにフランジ接触するときには、フランジ部と踏面部それぞれに完全に分離して 2 点接触させる。つまり、輪重は踏面、横圧はフランジで荷重を受けるよう、期待する役割を明確に分離する。
- 車輪とレールが中立位置の関係にあるときは、レール頭部中心より 5mm 程度 FC 側で相互が接触するようにする。これによって踏面勾配を小さくし、直線や緩曲線区間での台車の直進性を高め、台車ヨー運動を発生しにくくする。
- 車輪は新品だけでなく、図-1 に示した摩耗踏面に対しても、(a) から (c) の条件を極力同時に満たすようにする。
- CEN の規格では、最も厳しい高速走行線区で作業後の仕上がり寸法に $\pm 0.3\text{mm}$ の公差を認めており、同様の公差分の余裕を見込む。したがって、(a) から (d) で求めた寸法から、図-2 における横軸座標 -30 ~ -10mm 付近において、さらに 0.3mm を減じたものをレールの目標形状とする。

得られた目標削正形状と、これと車輪との接触位置を図-2 に示す。また、目標削正形状と摩耗車輪との組合せによる踏面勾配の変化を図-3 に示す。

3.4 本線調査データからのアプローチ

レール交換の前後、つまり、レール頭部形状が変化する (図-2 参照) ことで車両の左右方向運動特性が変化することを、本報告以前にも把握していた¹⁾。東海道新幹線内のレール頭部形状や車輪接触位置 (照り面) について、レール交換後からのレール削正の施工回数毎に、大量データの分析を行った。この結果、車両の左右振動加速度は施工回数 5 回程度までは施工回数に応じて低減傾向にあり、その後は顕著な変化が見られないことを確認

した⁶⁾。さらに、5 回施工箇所のレール形状と車輪接触位置は、前述の設計形状と概ね一致していた。

4. 事前確認・評価

4.1 車両運動シミュレーション

車両運動シミュレーション VAMPIRE を使用し、摩耗車輪と 4 種類のレール形状の組合せで、車体左右加速度を計算した結果を図-4 に示す。車両モデルは、セミアクティブ制振装置がなく、摩耗車輪とし、速度 270km/h で直線区間を走行させた。軌道狂いは、通り狂い（原波形）のみを与えた。

目標削正形状のレールの場合、新品実断面や JIS 設計形状と比較して、車体左右振動加速度が明確に低減している。繰返し削正形状とは 10 回の削正施工で形状変化した条件であるが、これと同程度である。前述の本線調査でわかった、目標削正形状と 5 回削正後の形状が概ね一致し、5 回削正後と 10 回削正後の形状では車体振動加速度の低下度合いに差異が見られないことは、シミュレーション結果とも定性的に符合する。

新品実断面レールでは、他と比較して高い周波数成分の加速度が目立つ。これは、図-3 に示したように小さな輪軸左右移動で 2 点接触による飛び移りが生じることに起因する。2mm 程度の通り狂いに対しても、台車が敏感に応答している。

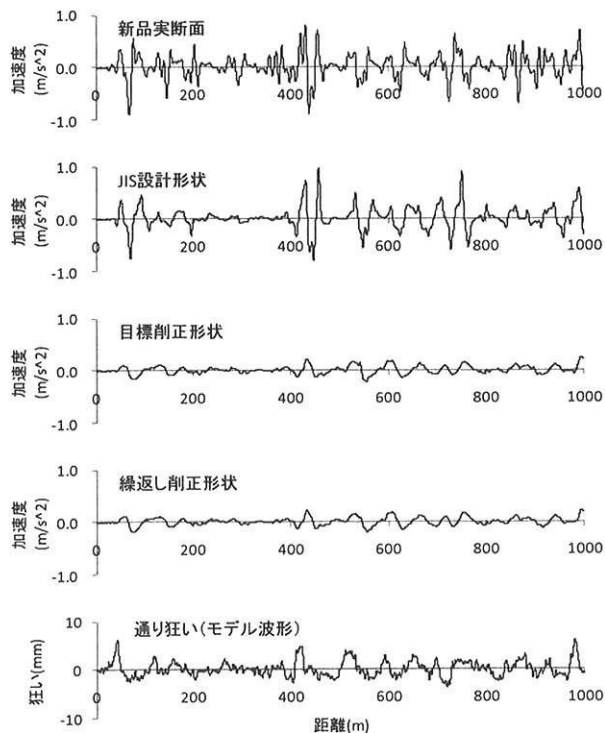


Fig.4 Estimated Lateral Acceleration of Vehicle Body

4.2 接触応力の検討

設計した目標削正形状のレールで車輪との接触応力が過大にならないことを、ABAQUS を使用した FEM 解析で推定した。解析モデルの一例を図-5 に示す。

しかしながら、FEM での接触応力解析の課題は文献 1)でも指摘されているが、接触部付近のメッシュ寸法やメッシュの切り方によって解析結果が大きく変動する。本報告では接触応力の具体値の記述を省略するが、図-2

に示した組合せ間での相対比較より、目標断面形状で接触応力が過大とならないことを確認した。

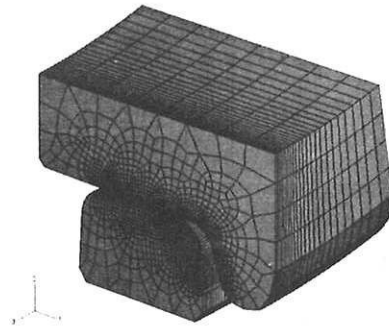


Fig.5 FEM Model for Wheel/Rail Contact Force

4.3 レール探傷検査との関係

東海道新幹線で使用しているレール探傷車の、探傷感度との関係を検討した。超音波探触子の特性とレールに対する設置位置の関係で、探傷感度はレール頭部中心を最良となり、ここから離れるにしたがって精度が低下する⁷⁾。つまり、レール頭部中心に比較的近い範囲で車輪を接触させることは、車輪の転動疲労によって発生するレール傷検査の上でも有利である。レール GC 付近への車輪接触頻度を低減すべきとする設計の考え方と適合する。

5. 削正パターン作成と保守基地内試験

過去の本線での削正前後のレール形状比較から、砥石角度毎等の削正量（形状変化の寸法）を算出し、これからの換算によって、新品レールから目標削正形状を形成する削正パターンを作成した。そして、保守基地内での試験施工によるパターン修正を経て、本線での試施工用パターンを設定した。なお、基地内試験の期間中に、砥石の仕様変更が生じたため、これへのパターン補正を同時に実施した。

基地内試験の結果、新たに作成した削正パターンの使用で、これまでと同様の 4 パス削正（48 頭式削正車）での 1 回施工によって、新品形状から目標削正形状を形成することができ、かつ、頭頂部の車輪接触部付近でも、レール傷の予防保全および転動音低減の目的に対し、十分な削正量を確保できることを確認した。

6. 本線試施工結果

レール交換から間もない区間を選んで試験施工を実施した。初回の試験施工では、頭部形状は概ね良好に形成できたが、車輪接触部付近の削正量が不十分であった。この原因として、保守基地内の新品レールと比較し、本線試施工箇所のレールは、通トンは比較的少ないものの車輪接触の繰返しによって表面硬度が向上したことが影響したと推定される。削正パターンのうち、当該接触部分の砥石角度に対応する部分には、削正圧（グラインダー電動機の電流値）設定に余裕があったので、これを上昇させるパターン修正を行った。

別の区間で初回と同様に、修正した削正パターンで 2 回目試験施工を行った結果、形状、削正量ともに満足することができた。施工前後の車体左右振動加速度のパワースペクトル密度を図-6 および図-7 に示す。従来パターンでの施工区間（図-7）では、施工前後で有意差はみ

られない。一方、新パターンの施工区間では、3Hz 付近のピークが著しく低下したほか、6Hz 付近までの加速度低減改善がみられる。加速度低減が顕著にみられた領域は、車両運動シミュレーションでのモード解析結果と対比すると、車両上心ローリングと台車ヨーイングが連成する振動モードの周波数領域に相当する。

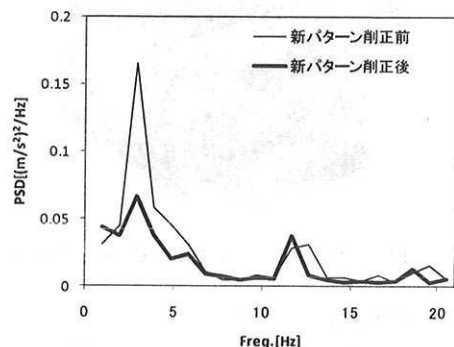


Fig.6 Measured Lateral Acceleration of Vehicle Body
[Newly Designed Rail Grinding Profile]

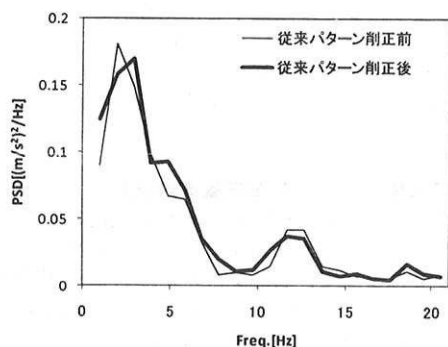


Fig.7 Measured Lateral Acceleration of Vehicle Body
[Conventional Rail Grinding Profile]

7. まとめと今後の計画

レールと車輪それぞれの製造誤差、および、これらの使用に伴う摩耗等による形状変化を踏まえ、高速走行時に生じる様々な課題の改善に有効なレール頭部形状を、レール削正により形成する方法を検討した。新品車輪と摩耗車輪の両方を考慮したレールとの接触解析等を行い、これまで明確ではなかった目標削正形状を定め、設計した。これによって、従来からのレール削正の施工目的である、レール傷の除去や発生予防、転動音や輪重変動の低減への効果を維持しつつ、車両の走行安定性や乗り心地改善の効果を加えた。

今回の削正パターンでは、レール交換後の初回削正で目標形状を形成する。2回目以降の定期的に行う施工においては、この形状を維持しつつ車輪接触範囲で必要削正量を確保することになる。この削正パターンも作成し、試験施工を実施しているところである。

謝辞：欧州のレール削正に関する技術情報の収集や現地調査など、W. Schoech 博士をはじめ Speno International 社と日本スぺノ社に協力と指導をいただいた。紙面を借りて感謝を申し上げる。

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，土木学会，2001.
- 2) CEN：EN 13231-3 Railway applications –Track– Acceptance of works – Part 3：Acceptance of rail grinding, milling and planning work in track, 2006.
- 3) 須永ほか：軸箱加速度を活用した短波長軌道狂いの管理手法，鉄道総研報告 vol.9, No.2, 1995.
- 4) Schoech, W. and Hyder, R.：Rail Surface Fatigue and Grinding, CM2003, pp. 133-138, 2003.
- 5) Schoech, W. and Grohmann, H.：Contact Geometry and Surface Fatigue – Guidelines for Appropriate Rail Maintenance, CM2006, pp.23-29, 2006.
- 6) 飯田：車輪との接触を考慮したレール削正形状の研究，日本鉄道施設協会誌，2012-1.
- 7) 勝浦ほか：レール探傷車の傷検知精度の更なる向上，新線路，2009-1.