

レール削正が低速時車輪乗り上がりを与える影響評価

土井 久代* 宮本 岳史*
古川 敦** 穴見 徹広***

Running Safety Assessment for Flange Climbing at Low Speeds Related to Rail Grinding Profile

Hisayo DOI Takefumi MIYAMOTO
Atushi FURUKAWA Tetsuhiro ANAMI

Rail grinding has been implemented as a part of maintenance of railway track for the purpose of reducing damage on rails and environmental noise etc. When executing grinding to remove head checks at rail gauge corner in curves, the grinding-rail profile and grinding range should be carefully considered so as not to induce flange climb derailment. Based on numerical simulation, a new indicator is proposed to evaluate security of safety against flange climb derailment. The indicator and the further consideration of the rail profile derive a condition of the grinding range of the rail profile and the minimum curve radius in tracks allowable for securing safety.

キーワード：走行安全性評価，レール削正，乗り上がり脱線，車両運動シミュレーション

1. はじめに

鉄道の軌道保守におけるレール削正（研削）は、騒音の抑制や、著大輪重・金属疲労層の進展による軌道破壊の抑制などを目的として実施されている。曲線部のレールゲージコーナに注目した場合、そこで発生するきしみ割れ等の損傷を適切な研削により除去することで、レール折損に至る可能性を未然に排除できると考えられる。

ここで、特に急曲線における外軌ゲージコーナ部の研削では、車輪フランジ乗り上がりを生じさせないように留意する必要がある。外軌ゲージコーナ部を緩やかな角度で研削した場合、車輪フランジが乗り上がりを開始してからレール頭頂面に乗り上がるまでの余裕が少なくなると考えられるからである。そこで、急曲線のレール研削形状や研削範囲の基準が、急曲線における低速走行時の脱線防止対策の一環として、国土交通省鉄道局より各鉄道事業者へ通達¹⁾されている。この通達では外軌の研削に関して、新品断面形状に復すること、それが困難な場合は、レール頭頂面から5mm以下の部分は研削しないこと、やむを得ずレールゲージコーナ部を研削する場合は車輪フランジ角度よりも緩やかな角度では研削しないこと、としている。ただしこの通達では、様々な

車両の走行を想定しているため、急曲線を定義する具体的な曲線半径の値が示されていない。一方、保守の現場では、レール折損を予防する目的でレールゲージコーナ部に発生したきしみ割れの研削が行われているものの、レール研削装置の砥石の形状寸法や研削角度の限界により、レール頭部形状の研削による新品断面形状への復元は困難であり、また、レール頭頂面から5mm以内の研削範囲ではきしみ割れの除去には不十分である²⁾、という現状がある。したがって、特にレールゲージコーナ部にきしみ割れの発生しやすい半径の大きな曲線区間において、車輪フランジ乗り上げりに支障しない範囲での適切な外軌ゲージコーナ部の研削が望まれている。

以上のような背景から、本研究では曲線半径および車両の左右の静止輪重のアンバランスをパラメータに、研削後のレール形状の一例を用いた一車両の曲線通過シミュレーションを実施し、狭軌在来線の曲線外軌のゲージコーナ部の研削が、低速走行時の車両の車輪乗り上げりに与える影響について調べた。そして、この際の走行安全性を評価するには従来の脱線係数や輪重減少率といった指標では不十分であることから、新たな評価指標を提案・導入し、修正円弧踏面車輪を装架した車両を対象に、車輪乗り上げりに支障しない外軌ゲージコーナ部の研削範囲と曲線半径について考察した。

* 鉄道力学研究部 車両力学研究室

** 軌道技術研究部

*** 東日本旅客鉄道株式会社

2. 一車両の走行シミュレーションによる検討

2.1 走行試験シミュレーションプログラム

本走行シミュレーションは、公益財団法人鉄道総合技術研究所（以下、「鉄道総研」という）が開発したマルチボディダイナミクスシミュレータ Vehicle Dynamics Simulator (VDS)³⁾を用いて実施した。VDSは脱線・転覆といった、車両が大変位するときの挙動解析が可能な点に特徴があり、車輪がレールからとび上がり再びレール上に戻る、車輪フランジがレール上に乗り上がる、あるいは車両が転倒する、などの車両運動解析を行うことができる。

図1に示すように、本シミュレーションでは一車両を1車体、2台車、4輪軸の7つの質量要素について各6自由度、各車輪を支える8つの質量のないレールを上下、左右の各2自由度、合計58自由度としてモデル化を行った。レールは上下、左右ともにばね・ダンパで弾性的に支えられ、その上を剛体車輪軸が転がり、7つの質量要素間には各々ばね・ダンパで結合されている。

本稿の主題である研削後のレール形状の一例を用いた走行シミュレーションに先立ち、VDSによる計算の妥当性を検証するため、鉄道総研の構内試験線で実施した脱線走行試験^{4) 5)}との比較を行った。結果を図2に示す。図2は、静止輪重のアンバランスがある車両が、大きな平面性変位のある出口側緩和曲線部を通過する際、外軌側の車輪フランジがレール頭頂面に完全に乗り上がる様子を示している。曲線中には脱線防止ガードが敷設されているため車両は完全にはレールから逸脱せず、レールに乗り上がった状態でしばらく走行した後、再び車輪踏面部での走行に復位する。VDSによるシミュレーションは、車輪フランジの乗り上がりやその後の復位の様子、乗り上がり開始地点など、測定結果とよく一致している。

2.2 シミュレーション条件

本検討では、静止輪重のアンバランスや曲線半径の条件の下、レール断面形状の違いが車輪上昇量や車輪・レール間の接触角へ及

ぼす影響について特に着目した。

車両モデルの主な諸元を表1に示す。ここでは、通勤形電車相当のボルスタレス台車を装架した車両を計算対象とした。車輪踏面形状は、フランジの角度65度、高さ27mmの修正円弧踏面の設計（新品）形状である。摩耗車輪の場合、フランジ角度は設計形状より大きくなる傾向にあり、Nadalの式⁶⁾で算出される限界脱線係数も大きくなるため、乗り上がり脱線に関しては設計形状のフランジ角度での検討が安全に対して厳しい評価（安全側の評価）を与えると考えられる。車両モデルの静止軸重は57.6kN、走行速度は低速の10km/hである。車輪・レール間の摩擦係数は0.6とし、通常の評価に使われる0.3に対してこれも安全側の条件とした。

車両には、先頭第1軸の曲線外軌側輪重が小さくなるような静止輪重のアンバランスを0～60%の間で10%毎に設定した。ここで静止輪重のアンバランスは、30%までは対角の枕ばねの初期変位で、30%を超えるアンバランスは更に前台車の対角位置で軸ばねの初期荷重を

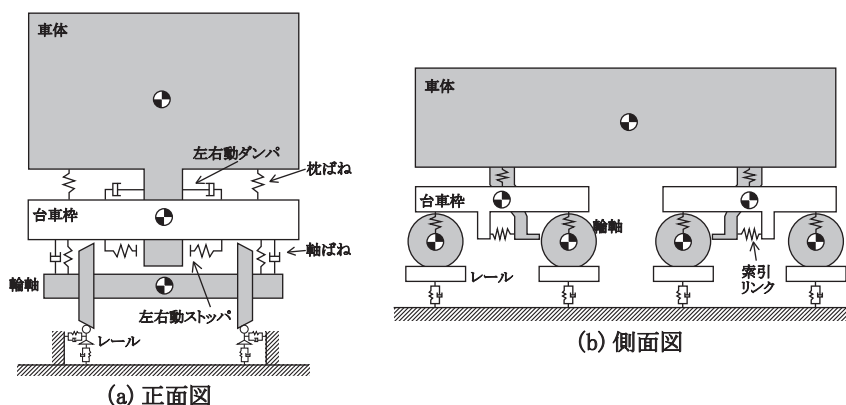


図1 車両モデル

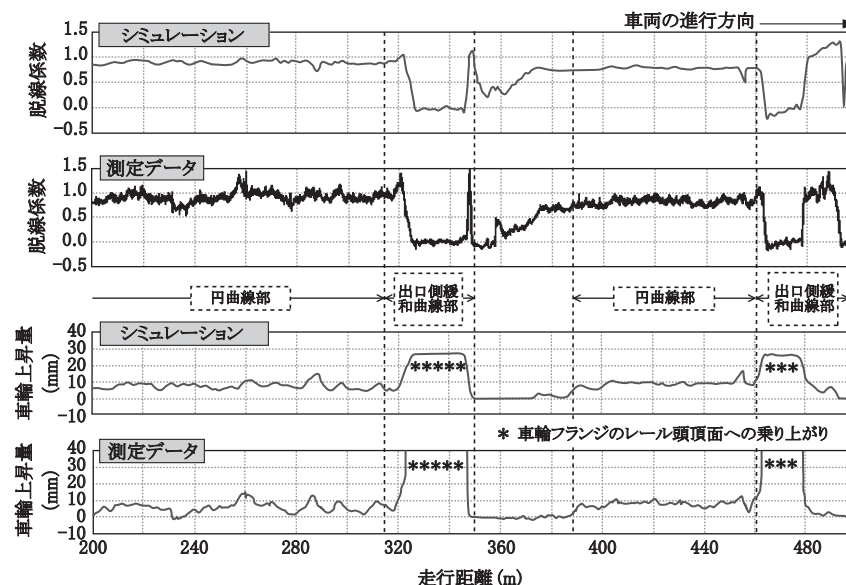


図2 VDSによる走行シミュレーションと走行試験の実測例の比較（先頭軸外軌側車輪）

表1 車両条件

質量	車体：15549 kg, 台車枠：1520 kg 輪軸：1225 kg
軸ばね剛性	前後：7.7 MN/m, 左右：5.6 MN/m 上下：1.5 MN/m
枕ばね剛性	前後・左右：110 kN/m 上下（空気ばねモデル）： 有効受圧面積 0.264 m ² 空気ばね内容積 0.0275 m ³ ゲージ圧 735 kPa
前・後位台車間距離	13.8 m
軸距, 車輪半径	2.1 m, 0.43 m
輪軸バック面間距離	0.99mm

表2 軌道条件

軌道線形（長さ）	直線（50m）
	→ 入口側緩和曲線（31.5m）
	→ 左円曲線（300m）
	→ 出口側緩和曲線（31.5m）
→ 直線	
曲線半径	200m, 300m, 400m, 600m
カント量	105mm
軌間	1067mm
最大平面性変位	27mm/5m（出口側緩和曲線部）

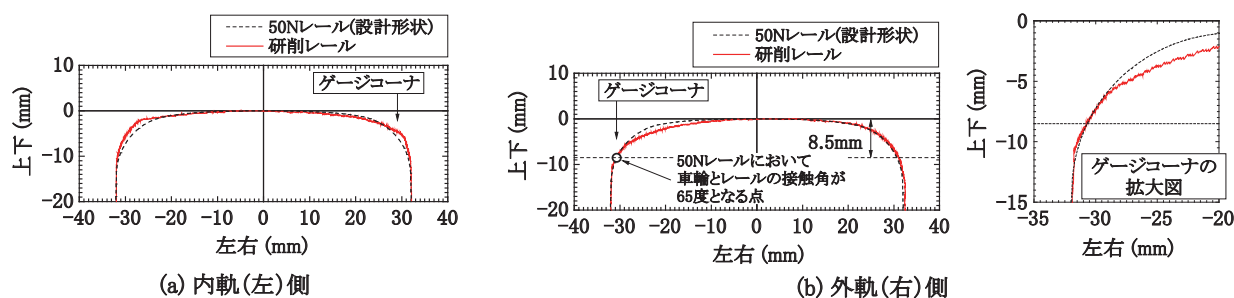


図3 レール頭頂面形状

増減させて設定した。アンバランス 30% 以上で空気ばねの初期変位をさらに増加しなかったのは、シミュレーション実行中に差圧弁が動作するためである。

軌道の条件を表2に示す。軌道変位を含む軌道線形の条件は、カント通減倍率 300 倍で出口側緩和曲線部の平面性変位を最大 27mm とし、実際の運用に対し安全側の評価となる大きな変位条件を設定した。

レールの頭頂面断面形状は、JIS50kgN レールの設計形状（以下、本文中では 50N レールと記す）と研削レール形状の2条件とした。ここで研削レール形状は、文献1) および文献7) の通達の端緒となった文献8) に示された研削レール形状を参考とした。これは、外軌ゲージコーナ部が約 45 度の角度で削られているものである。図3に 50N レール設計形状と研削レール形状の比較を示す。シミュレーションでは、図3の形状に更にタイプレート分の角度を与えた上で車輪・レールの接触位置の解析を行った。図3(b)の外軌側レール形状には、50N レール形状の接線の傾き（水平面となす角度）が修正円弧踏面の車輪フランジ角度と同じ 65 度になる位置を点で示す。このレール上の点は、レール頭頂面中心高さから 8.5mm 下方に位置する。車輪フランジとレールがこの点より下方で接触していれば、車輪・レールの接触角が車輪フランジ角度 65 度より小さくなることはない。

2.3 シミュレーション結果

シミュレーションでは、図2のような時系列波形が得られる。その波形から、先頭軸外軌側の車輪上昇量、脱線係数、輪重減少率の各最大値および横圧の円曲線部定常値を抽出または算出し、これらを指標として走行安全性の評価を行った。ここで車輪上昇量とは、車輪踏面中心のレールに対する上下方向の移動量であり、軌道変位がない直線区間で輪軸が中正位置にあるときの値を 0、上方への移動を正として表した。また、横圧の円曲線部定常値は走行距離 150 ~ 300m の間の平均値とした。静止輪重のアンバランスに対してこれらの評価指標をまとめた結果を、曲線半径ならびにレール形状の別に図4~図7に示す。なお、本稿における各図の凡例では、曲線半径の大きさを、例えば曲線半径が 200m の場合、「R200」のように示す。

図4~図6に示す先頭軸外軌側の車輪上昇量、脱線係数、輪重減少率において、研削レールと 50N レールの形状の違いによる差は顕著ではなかった。ただし研削レールの場合のみ、曲線半径が 200m で静止輪重のアンバランスが 60% になると、本検討条件では唯一の乗り上がり脱線が発生した（ここでの脱線は、車輪フランジ先端部がレール頭頂面に完全に乗り上がった状態を言う）。図7に示す外軌側横圧の円曲線部定常値は、同一の曲線半径において、静止輪重のアンバランスが小さいほど、研削レールと 50N レールとの差が大きく、50N レー

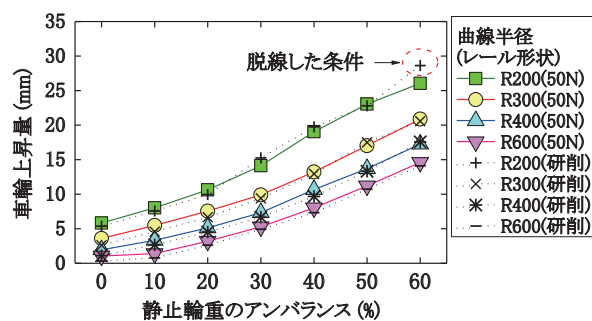


図4 先頭軸外軌側 車輪上昇量最大値

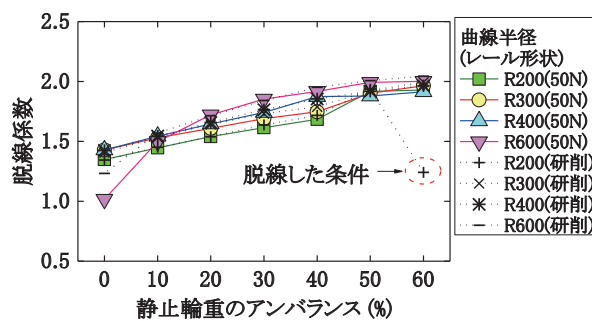


図5 先頭軸外軌側 脱線係数最大値

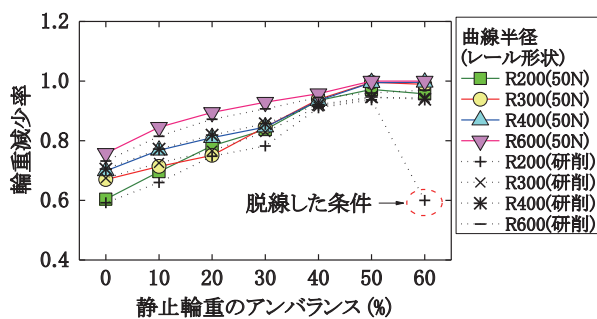


図6 先頭軸外軌側 輪重減少率最大値

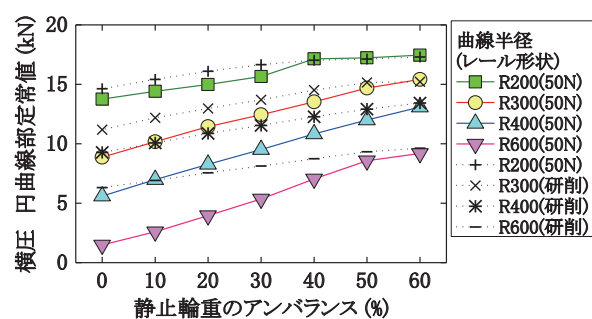


図7 先頭軸外軌側 横圧円曲線部定常値

ルの横圧の方がより小さくなった。また、同一の静止輪重のアンバランスでは、曲線半径が小さくなるほど、レール形状の違いによる横圧の差が小さくなった。この結果は、50N レール形状の方が車両の旋回に対して研削レールよりも優位であることを示しており、それは、車輪・レールの接触状態に依存していると考えられる。車両の曲線通過時、50N レール形状の場合には車輪とレールは全ての条件において1点で接触するが、研削レール形状の場合、曲線半径および静止輪重のアンバランスの条件によっては2点で接触しながら曲線を通過する状態となる。1点接触時は内外軌の回転半径差による、即ち、左右車輪に作用する縦クリープ力の差による輪軸の自己操舵機能が働くが、車輪フランジ部、踏面部の2点で接触する場合は、外軌側車輪のそれぞれの接触点における縦クリープ力の向きが異なる。したがって、左右車輪の縦クリープ力の差が1点接触時に比べて小さくなり、輪軸の旋回性能が劣るため、2点接触時の方が大きな横圧が発生すると考えられる。例えば曲線半径が200mのとき、静止輪重のアンバランスが30%以下では2点接触となり、30%を超えると1点接触となる。また、図3(b)に示したレール形状の比較では、ゲージコーナの下側部分で研削レールと50N レールの形状はほぼ一致しており、曲線半径が小さいと研削レール、50N レールともにほぼ同じ位置でレールと車輪は1点接触する。このため、曲線半径が小さくなるほど形状の違いによる横圧定常値の差が小さくなったと考えられる。

3. 形状の差違と乗り上がり脱線に対する余裕度の評価

3.1 車輪上昇量と接触角の変化

2.3節で記したように、修正円弧踏面の車輪を装架した通勤形電車相当の車両では、乗り上がり脱線した場合（研削レール形状、曲線半径200m、静止輪重のアンバランス60%の条件）や横圧の円曲線部定常値以外は、レール形状の違いによる顕著な差が見られなかった。そこで、乗り上がり状態を直接表す車輪上昇量について調べた。本シミュレーションでは車輪上昇量を、軌道変位がない直線区間で輪軸が中正位置にあるときを基準とした車輪踏面中心のレールに対する上下方向の移動量と定義している。したがって、研削レールと50N レールという異なる形状における車輪上昇量には中正位置での接触点の相違が含まれており、両者の数値をそのまま比較すると、脱線に対する安全余裕度に誤差を生じると考えられる。そこで、曲線半径200m、50N レール形状の場合に乗り上がり脱線が発生する静止輪重のアンバランスの条件を調べた。その結果をもとに、レール形状の違いによる車輪上昇量の変化を比較した。さらに、車輪上昇量と車輪・レール間の接触角の関係に注目した。

50N レール形状・曲線半径200mの条件でシミュレーションを実施した結果、静止輪重のアンバランスが70%の場合に、車輪はレール頭頂面に完全に乗り上がるのが分かった。研削レール形状（静止輪重のアンバランス60%）、50N レール形状（静止輪重のアンバランス

70%) それぞれの場合に、外軌側の車輪フランジがレール頭頂面に乗り上がるまでの車輪上昇量 zU と、それともなう車輪・レールの接触角の変化を図8に示す。図8では、走行距離が366m付近までは、接触角は車輪フランジ角度とほぼ同等の65度程度の値で一定に推移する。車両の進行にともない車輪は上昇し始め、フランジ直線部よりもフランジ先端部寄りレールと接触するようになり、接触角も減少し始める。この時点で車輪フランジは脱線防止機能を失い始め、最終的に車輪フランジはレール頭頂面に乗り上がる。

3.2 接触角減少点超過量

図8に示したように、乗り上がり脱線に至る過程では接触角の変化をとともなうため、接触角が減少に転じる境界が乗り上がり脱線に至るか否かに対する指標になると考えられる。そこで、接触角が一定の値から減少に転じる直前の車輪上昇量を zU_0 (これを、「接触角減少境界車輪上昇点」と呼ぶ) とし、各条件下における車輪上昇量最大値を接触角減少境界車輪上昇点と比べることで、乗り上がり脱線に対する余裕量の比較および評価を試みた。この接触角減少境界車輪上昇点は、車輪とレールの形状の組み合わせによって異なる値をとる。50N レール形状、研削レール形状それぞれに対する zU_0 は図8に示すとおりである。また、乗り上がり脱線に対する余裕量を表す指標を車輪上昇量最大値 zU_{max} と接触角減少境界車輪上昇点 zU_0 の差 (即ち、 $zU_{max} - zU_0$) により定義し、これを「接触角減少点超過量」と呼ぶことにする。

接触角減少点超過量を図9に、車輪上昇量最大値が発生した時点に対応する接触角を図10に示す。接触角減少点超過量が負の値をとるとき、走行状態は乗り上がり脱線に対して安全側にあり、ゼロに近づくと安全に対する余裕量が小さくなることを示す。接触角減少点超過量が正の場合、車輪・レールの接触角が車輪フランジ角度より小さくなる。

図9より、曲線半径が200mの場合、静止輪重のアンバランスが20%を超過すると乗り上がり脱線に対する危険性が高まり、特に20%を超過した領域においては、50N レール形状に比べ研削レール形状の方がより危険性が増すことがわかる。曲線半径300m以上ではレール形状の違いによる差は顕著ではないが、図10の車輪上昇量最大値に対応する接触角を見ると、研削レールと50N レールで接触角の減少の傾向が異なり、50N レール形状の接触角の方がより緩やかに減少する。例えば曲線半径200mの場合、図9の結果と同様に、静止輪重のアンバランス20%を境として接触角が減少し始め、乗り上がり脱線に対して危険な状態となってくるが、車輪フランジが完全にレール頭頂面に乗り上がって接触角がゼロになるまでの余裕量は、50N レール形状に比べて研削レ

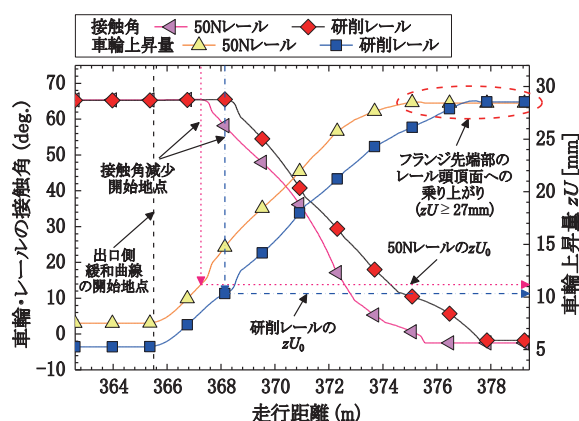


図8 車輪フランジが乗り上がる場合の先頭軸外軌側の接触角と車輪上昇量の推移 (曲線半径：200m, 静止輪重のアンバランス：50N レールの場合70%, 研削レールの場合60%)

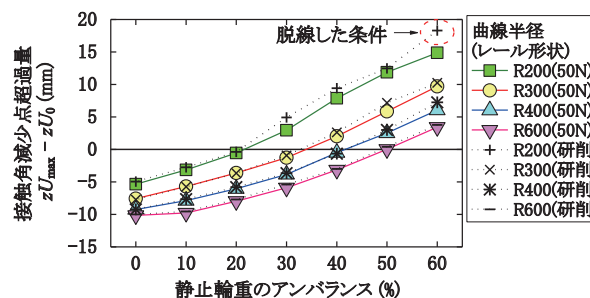


図9 乗り上がり脱線に対する余裕量を示す接触角減少点超過量 (車輪上昇量最大値 zU_{max} と接触角減少境界車輪上昇点 zU_0 の差)

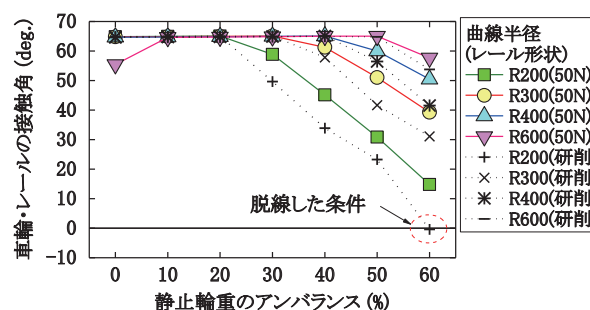


図10 車輪上昇量最大値に対応する接触角

ル形状の方が少ないことが図10からも確認できる。

図3 (b)より、研削レールと50N レール形状のゲージコーナ部を比較すると、研削レールはゲージコーナ部の角度が大きい範囲が短い。したがって、研削レールの場合、車輪フランジが乗り上がり始めると50N レールに比べてレール頭頂面への乗り上がりまでの余裕量が少なくなるものと考えられる。

なお、図10において、50N レール・曲線半径600m・静止輪重のアンバランス0%の条件で接触角が65度よりも小さいのは、車輪フランジのど部付近で接触してい

特集：鉄道力学

ることを示しており、フランジ直線部がレールと接触する乗り上がり開始状態に達する前の、より安全な状態で走行していることを示す。

4. レールゲージコーナ部の研削範囲

現在の旅客車両の静止輪重管理では、静止輪重比の管理値 10% 以内を努力目標とし、20% 以内を限度として車両形式毎に定めること、とされている¹⁾。静止輪重のアンバランス管理の限度値 20% に対して更に 20% の安全度を見込むと、図 9 より、接触角減少点超過量がほぼ 0 となる曲線半径 400m が車輪・レールの接触角 65 度を確保できる曲線半径の境界となると考えられる。また、車輪上昇量が接触角減少境界車輪上昇点 zU_0 を超えると、車輪フランジの先端部がレール断面の接線の傾きが 65 度の位置 (図 3 (b)) より上方で接触し始める。したがって、研削範囲が図 3 (b) に示すレール断面の接線の傾き 65 度の位置 (レール頭頂面中心高さから 8.5mm の位置) よりも上方であれば、接触角が 65 度となる位置を確保できると考えられる。以上より、修正円弧踏面の車輪を装架したボルスタレス台車の旅客車両が走行する曲線外軌のゲージコーナ部の研削について、半径 400m 以上の曲線区間では研削範囲がレール頭頂面中心高さから 8.5mm の位置よりも上方であれば、低速時の車輪フランジ乗り上がり脱線に対する問題は特にないと推察される。

文献 2) に示されているとおり、近年、東日本旅客鉄道会社の首都圏管内では、曲線外軌のゲージコーナ部のきしみ割れを原因としたレール交換比率が増している。そのきしみ割れは曲線半径 400m 以上で多く発生しており、上記に挙げた半径 400m 以上はきしみ割れ対策における研削対象の曲線半径として、十分実用であると考えられる。また、きしみ割れの除去のためにはレール頭頂面から 5mm 以内の研削では不十分であるが、研削範囲をレール頭頂面から 8.0mm までとすることでレール断面内のきしみ割れのおよそ 95% を研削することが可能となる。

5. まとめ

曲線外軌のゲージコーナ部の研削が低速走行時の車両の車輪フランジ乗り上がりを与える影響について、研削後のレール断面形状の一例を用い、修正円弧踏面形状の車輪をもつボルスタレス台車の一車両の曲線通過シミュレーションを実施した。カント逓減倍率 300 倍、軌道の平面性変位が最大 27mm の軌道線形等の本検討条件下での結果は以下のとおりであった。

(1) 曲線半径が 200m の条件のみ、車輪フランジがレール

頭頂面に完全に乗り上がり脱線する場合が生じた。そのときの静止輪重のアンバランスは、研削レール形状の場合は 60%、50N レール設計形状の場合は 70% であった。

- (2) 半径 300m 以下の曲線部では、50N レール設計形状の方が研削レール形状よりも車輪フランジ乗り上がりに対する安全性が高いことを確認した。
- (3) 車輪がフランジ直線部で接触している状態から脱線する方向に乗り上がり接触角が減少する境界での車輪上昇量を用い、車輪フランジ乗り上がりに対する余裕度を表す新たな指標「接触角減少点超過量」を提案した。
- (4) 静止輪重のアンバランスの管理限度値に対し更に 20% の安全度を見込んだ場合、接触角減少点超過量がほぼ 0 となる半径 400m が車輪・レールの接触角 65 度を確保可能な境界と判断できる。したがって、半径 400m 以上の曲線では、レール頭頂面中心高さから 8.5mm 下までの位置であれば外軌側のゲージコーナ部を車輪フランジ角度よりも緩やかな角度で研削しても走行安全性が確保できると考えられる。

本研究によって得られた曲線外軌のゲージコーナ部の研削に関する条件は、軌道保守におけるレールのきしみ割れ除去に対して、曲線半径および研削範囲ともに十分実用的な条件であり、軌道の安全性向上と保守費用の削減に寄与し得ると期待される。

文献

- 1) 国土交通省鉄道局：通達 急曲線における低速走行時の脱線防止対策について、国鉄技第 41 号，2004
- 2) 元好茂，瀧川光伸，小林潤：レールきしみ割れ対策手法の開発，第 17 回鉄道技術連合シンポジウム J-RAIL2010 論文集，pp.553-554，2010
- 3) 宮本岳史，石田弘明，松尾雅樹：地震時の鉄道車両の挙動解析，日本機械学会論文集 C 編，Vol.64, No.626, pp.3928-3935，1998
- 4) 石田弘明，古川教，下沢一行，宮本岳史，藤本裕：急曲線部の低速脱線走行試験，鉄道連合シンポジウム J-Rail2002 講演論文集，pp.95-96，2002
- 5) 石田弘明：急曲線低速走行試験における安全性評価手法，鉄道総研報告，Vol.19, No.9, pp.5-10，2005
- 6) 鉄道総合技術研究所編：在来鉄道運転速度向上試験マニュアル・解説，財団法人鉄道総合技術研究所，p.80，1993
- 7) 国土交通省鉄道局：通達「急曲線における低速走行時の脱線防止対策」の追加対策等について，国鉄技第 42 号，2004
- 8) 事故調査検討会，帝都高速度交通営団 日比谷線中目黒駅構内列車脱線衝突事項に関する調査報告書，p.19，2000