

1108 車輪およびレールの摩耗形状が急曲線通過性能に及ぼす影響

○ 矢田 元気 (東京理科大学) 中島 章寿 (東京理科大学) 正 [機] 杉山 博之 (東京理科大学)
栗原 純 (東京地下鉄) 大林 弘史 (東京地下鉄) 正 [機] 下川 嘉之 (新日鐵住金)
水野 将明 (新日鐵住金) 正 [機] 谷本 益久 (住友金属テクノロジー)

Effect of Wheel and Rail Wear on Curving Performance of Railroad Vehicles on Small Radius Curved Track

Motoki YADA, Akihisa NAKASHIMA, Hiroyuki SUGIYAMA, Tokyo University of Science, 1-14-6, Kudankita, Chiyoda-ku, Tokyo

Jun KURIHARA, Hiroshi OHBAYASHI, Tokyo Metro Co., Ltd., 3-19-6, Higashi-Ueno, Taito-ku, Tokyo

Yoshiyuki SHIMOKAWA, Masaaki MIZUNO, Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation, 5-1-109, Shimaya, Konohana-ku, Osaka

Masuhisa TANIMOTO, Sumitomo Metal Technology, 5-1-109, Shimaya, Konohana-ku, Osaka

In this investigation, effects of the wheel and rail wear on the curving performance of railroad vehicles are discussed. In order to account for the non-Hertzian contacts that appear for a pair of worn wheel and rail profiles, these contacts are modeled by multiple Hertzian contacts defined at the local maximum points associated with the normal contact pressure obtained by the finite element contact analysis. This contact model is integrated into the vehicle dynamics simulation and used for evaluating the effect of the wheel and rail wear on the derailment coefficient on the small radius curved track. It is shown by the numerical simulation results that the large rolling radii caused by the wear of flange wear leads to larger steering moment caused by the longitudinal creep forces at multiple contact points and, therefore, the derailment coefficients decrease as the flange wear progresses as observed in on-track measurement results.

Keywords : Wheel and rail wear, Non-Hertzian contact, Multi-Hertzian contact model, Curve negotiation, Multibody dynamics

1. 緒言

車輪とレールの摩耗が走行安定性および曲線通過性能に及ぼす影響については、これまで多く研究が行われてきた⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾。一般に、走行距離の増加により、車輪は踏面部に凹摩耗し、フランジ部で直立摩耗するため、等価踏面勾配、フランジ角および車輪半径差に代表される接触幾何特性が変化し、車両の走行安定性および曲線通過性能に影響を及ぼすことが知られている。また、摩耗が接触面圧に関係することから、摩耗した車輪およびレールの最大接触面圧から、摩耗進展過程を議論した研究も行われている⁽⁴⁾。

摩耗が進行すると、車輪とレールが同じ曲率を有する曲面間で接触するため(コンフォーマル接触)、接触面積が広がり、接触域の平均面圧が低下すると一般的には考えられる。一方、山本は、車輪踏面が摩耗や塑性流動によりうねりを持つ形状となり、複数の細長い接触領域が存在することを、実摩耗車輪形状に対する境界要素法を用いた接触解析により示している⁽⁵⁾。つまり、既存の運動解析では、剛接触を仮定した車輪およびレールに対する接触幾何解析データを用いて Hertz 接触による運動解析を実施することが一般的であるが、摩耗した車輪およびレールに対しては、コンフォーマル接触に代表される Non-Hertz 接触状態が発生し、踏面 1 点接触や踏面およびフランジの 2 点接触の仮定が適用できない。また、Hertz 接触が適用できない接触状態に対しては、複数個の等価な Hertz 接触を仮定することにより、その接触状態をモデル化する Multi-Hertz 接触法⁽⁶⁾など、Non-Hertz 接触に

対応した種々の解析法が提案されている⁽⁷⁾。そこで、本研究では、摩耗した車輪およびレールに対する有限要素法による接触解析を実施し、その結果を運動解析に反映することにより、車輪およびレールの摩耗形状が急曲線通過性能に及ぼす影響について検討を行う。

2. 摩耗と横圧の関係

はじめに、車輪摩耗と円曲線内における Q/P の関係を調査するために、曲線半径 164m および 250m の東京地下鉄営業線内の車両走行状態監視装置⁽⁸⁾設置位置における Q/P と走行距離の関係を図 1 に示す。ここで、Q/P の値は、同一車両の同一の外軌車輪に対してまとめており、また、曲線半径 164m のケースについて、車輪削正後約 2.5 万 km、8.5 万 km および 13 万 km 走行した後の車輪形状の計測結果を、新製形状と比較して図 2 に示す。図 2 より、約 8.5 万 km 走行時において、踏面およびフランジに顕著な摩耗が確認できる。なお、車輪は 70 度円錐踏面、レールは 60kg レールである。図 1 より、データにばらつきはあるものの、両小曲線において、走行距離が増加するに伴い、Q/P が減少する傾向が見て取れる。また、当該小曲線では、内軌レール頭頂面に塗油が行われている。走行距離の増加に伴う横圧の低下については、角井らによる、在来線の曲線半径 300m における地上 PQ 測定による横圧の変化と傾向が一致している⁽⁹⁾。この理由について、角井らは、摩耗によるフランジ遊間の増加による見かけ上のスラック増加、また、摩耗により接触点位置がフランジ側へ移動することにより車輪回転半径

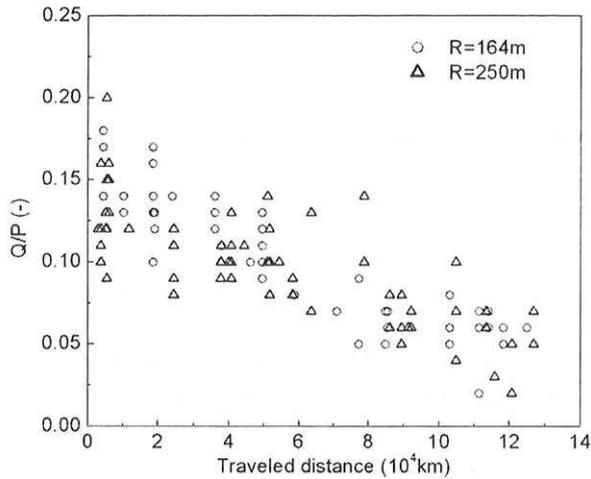


Fig.1 Derailment coefficient on a small radius curved track (R=164m, 250m)

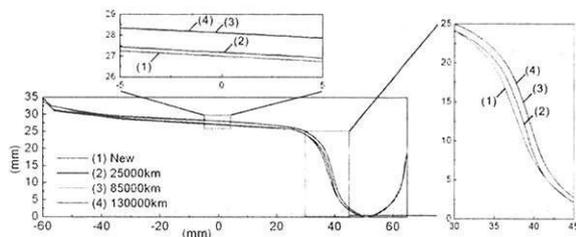


Fig.2 Worn wheel profiles

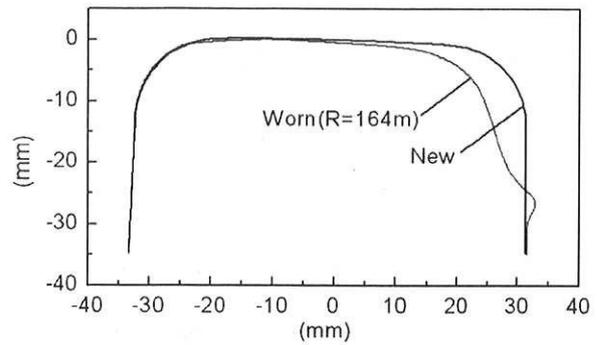


Fig.3 Worn rail profiles

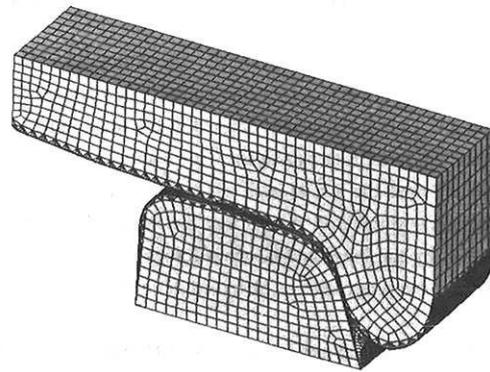


Fig.4 Finite element wheel/rail contact model

差が増加したことで、横圧が低下したと考察している⁽³⁾。しかしながら、摩耗した車輪およびレールに対する接触問題の取り扱いの困難さから、その定量的な検証は行われていない。そこで、小曲線における摩耗進展に伴う横圧の低下傾向を、摩耗した車輪とレール間のコンフォーマル接触問題として捉え、それらの影響を考慮した車両運動力学解析から、車輪およびレールの摩耗形状が急曲線通過性能に及ぼす影響について検討を行う。

3. 有限要素法による摩耗車輪とレールの接触解析

3.1 モデリング

新製車輪形状および実測した車輪削正後約 2.5 万 km, 8.5 万 km, 13 万 km 走行後の車輪形状 (計 4 つの車輪形状) を用いて、有限要素法による接触解析を実施し、種々の摩耗形態が車輪とレール間の接触に及ぼす影響について検討を行う。また、レール形状は、敷設後の累積通過トン数が約 66,727,000 トンの車両走行状態監視装置設置位置におけるレール形状を摩耗レール形状として、図 3 に示し、接触解析に用いる。本摩耗レールではゲージコーナー部において、著しく摩耗していることが分かる。

図 4 に商用の有限要素解析コードの ANSYS™ を用いて作成した解析モデルを示す。MiniProf™ で実測した車輪およびレールの断面形状データの計測ノイズを予め除去し、車輪の周方向に ±2 度の形状を考慮して有限要素モデルを作成した。また、車輪とレールが接触する曲面部は 0.5mm のソリッド要素によって要素分割した。アタック角については、0 度、0.5 度および 1.0 度とし、レール

には 1/20 のタイプレート角を考慮している。また、外軌一車輪に対する解析を行っているため、輪軸のロール角については、輪軸モデルによって踏面とフランジの 3 次元 2 点接触状態を考慮可能な接触幾何解析コード⁽⁹⁾により、フランジ接触時の車輪の位置および姿勢を求め、その結果を有限要素モデルに反映した。境界条件は、車輪上面を前後方向拘束、レール底面を完全拘束とした。また、車輪に与える荷重条件は、各車輪形状に対応する実測 Q/P の平均値から、その Q/P に最も近い値を取る輪重および横圧の実測データを用いることとした。それらを、車輪の垂直荷重および水平荷重として車輪上面および側面にそれぞれ与えることで、接触面圧分布を求めた。

3.2 接触解析結果

図 5 に摩耗車輪断面と摩耗レールを用いて計算した接触面圧分布の解析結果を示す。ここで、アタック角をゼロとしている。また、新製車輪形状に対する接触解析結果も同図に示す。本図より以下のことが分かる。

1. 新製車輪と 2.5 万 km 走行後の車輪では、踏面部に 2 つの楕円形状の接触域が存在し、フランジ接触域は 1 つの細長い楕円形状となる。
2. 8.5 万 km および 13 万 km 走行後の車輪では、摩耗量の増加により、踏面部の接触が 1 つの楕円接触ではなく、複数の接触楕円が重畳したような接触域形状となる。
3. 8.5 万 km および 13 万 km 走行後の車輪では、フランジ部において、2 つの細長い接触域が見れる。
4. 摩耗が進行するにつれ、踏面部の接触域はフランジ

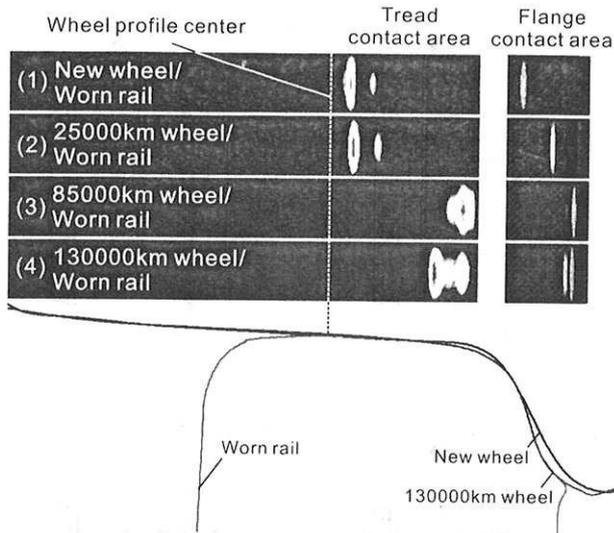


Fig.5 Contact pressure distribution

側へ移動し、フランジ部の接触域はフランジ先端へ移動する。

つぎに、アタック角の影響について考察する。図6に13万 km 走行後の車輪形状に対して、アタック角0度、0.5度および1.0度とした際の接触面圧の様子を示す。本図より、アタック角が大きくなるにつれ、フランジ接触域が車輪前方へ移動し、踏面接触域も僅かにフランジ側へ移動することが分かる。

また、本解析では、車輪回転の影響を考慮していないため、接線力分布の評価はできないが、図5および6に示す接触形態から、接触面圧については、その接触圧力が極大を取る点（面圧中心）を接触点位置と仮定した複数の Hertz 接触として、接触状態をモデル化できると考えられる。

4. 摩耗車輪/摩耗レール接触を考慮した車両運動解析

4.1 複数の Hertz 接触を仮定した車両運動解析法

有限要素法の接触解析により求めた接触域の面圧中心を接触点として、その接触位置情報を接触テーブルに読み込み、複数の Hertz 接触によって接触状態をモデル化した車両運動解析法を構築する。一方、既存の車両運動解析では、1点または2点の剛接触を仮定した接触幾何解析結果を用いて接触点を求めているが⁽¹⁰⁾、本研究では、有限要素解析の結果を接触位置情報として利用し、それぞれの接触点における曲率や接平面の傾きなどの幾何情報は、実測の摩耗データから3層スムージングスプラインにより求めた微分情報を用いて計算される。また、本研究は、円曲線内における定常横圧に着目しているため、計算コスト低減のため、フランジ部で接触するまでは、実測の摩耗断面データを用いて、剛接触を仮定した既存の接触幾何解析による接触テーブルから接触点位置を求めることとした。一方、フランジ接触が発生した場合には、有限要素法による多点接触テーブルに切り換える。また、車両運動解析では、車輪とレール間の各接触点に Hertz ばねを定義することで法線接触力をモデル化し、クリープ力には、Kalker の単純化非線形クリープ力モデル FASTSIM を用いた。なお、フランジ接触時のアタック角は最大で1度まで考慮している。

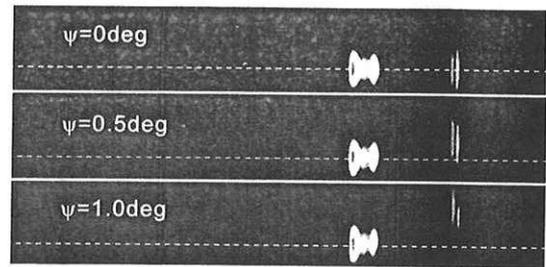


Fig.6 Contact pressure distribution
(130,000km wheel and attack angle of 0.0 to 1.0 deg.)

4.2 曲線通過解析結果

摩耗した車輪およびレールに対する接触状態を複数の Hertz 接触によってモデル化した車両運動解析法を用いて、車両状態監視装置設置曲線に対する車両運動解析を行った。台車モデルを用い、曲線半径 164m、スラック 8mm の小曲線を時速 35km/h で走行した際の前軸外軌車輪の Q/P の結果を図7に示す。また、レール乾燥状態を想定し、内外軌の摩擦係数を 0.55 とした。本図より、シミュレーションにおいて、新製レールから摩耗が進行するにつれ、Q/P が明らかに低下していることが確認できる。この傾向は、図1に示す車両走行状態監視装置により得られた Q/P の低下傾向と一致する。

そこで、本現象をさらに検討するため、車両運動解析により求めた、円曲線内における外軌車輪の各接触点における縦クリープ力を図8にまとめる。ここで、接触点位置は、図5および6に示す有限要素法による解析に基づいて求めているため、新製および2.5万 km 走行した車輪では、踏面部に2点、フランジ部に1点の接触が発生する。一方、8.5万 km および13万 km 走行した車輪では、踏面部に3点、フランジ部に2点の接触が発生している。また、アタック角による接触点移動も考慮して解析している。本図より、車輪摩耗が進むにつれて、踏面の接触域はフランジ側へ移動し、フランジの接触域はフランジ先端へ移動している様子が分かる。また、踏面部では、反操舵方向、フランジ部では操舵方向に縦クリープ力が発生していることが分かる。

各接触位置における縦クリープ力の総和を各車輪について、同図中に示す。この結果から、摩耗が進行することにより、前軸の縦クリープ力による操舵モーメントが増加し、その増加傾向は、図7に示す Q/P の低下傾向に対応することが分かる。さらに、図9にシミュレーションにより求めた、前後軸の横圧と縦クリープの関係を示す。この結果からも、摩耗車輪に対する前軸の縦クリープ力の増加と、それに伴う操舵モーメントの増加による

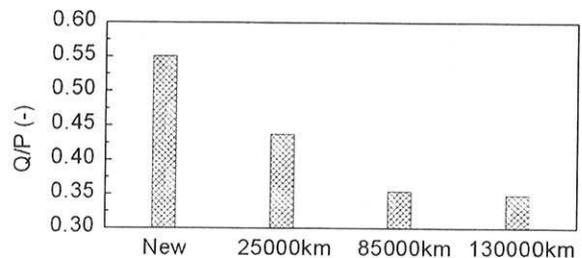


Fig.7 Derailment coefficients

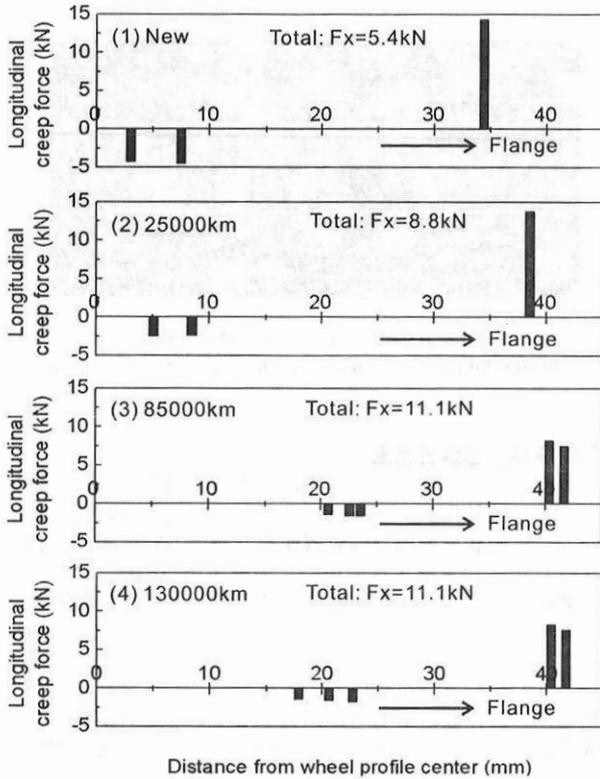


Fig.8 Longitudinal creep forces on the outer wheel

横圧の低下が確認できる。つまり、フランジ摩耗により、フランジ接点位置がフランジ先端へ移動することで、大きな車輪半径差を得ることができ、その結果、縦クリープ力による操舵モーメントの増加が、小曲線内でのQ/Pの低下に寄与したと考えることができる。以上から、摩耗した車輪およびレールに発生する Non-Hertz 接触問題を複数の Hertz 接触としてモデル化することで、摩耗が進行した車輪とレールに対する曲線通過シミュレーションが可能になり、曲線通過時の操舵モーメントと脱線係数との関係を定量的かつ見通し良く議論することが可能となった。

5. 結言

本研究では、摩耗した車輪およびレールに対する有限要素法による接触解析を実施し、その結果を車両運動解析に反映することにより、車輪およびレールの摩耗形態が急曲線通過性能に及ぼす影響について検討を行った。摩耗した車輪およびレールに対する有限要素接触解析により算出した Non-Hertz 接触を複数の Hertz 接触によってモデル化することにより車両運動解析を実施し、摩耗進展に伴う Q/P の低下傾向について考察を行った。本解析により、摩耗進展に伴い Q/P が低下することを示し、本傾向は、車両走行状態監視装置により得られた Q/P の低下傾向と一致することを示した。また、Non-Hertz 接触状態の各接触位置における縦クリープによる操舵モーメントを調べることで、フランジ摩耗による車輪半径差の増加に起因した、縦クリープ力による操舵モーメントの増加が小曲線内での Q/P の低下に寄与することを示した。

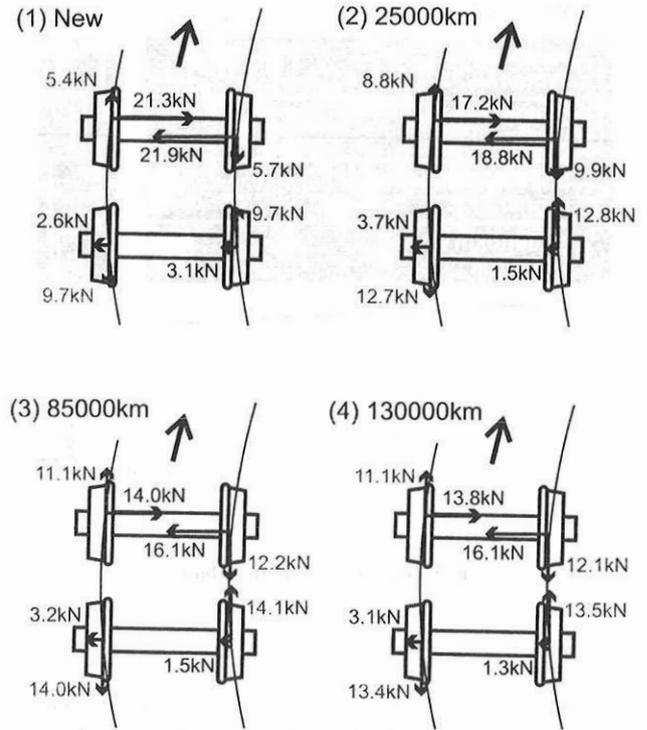


Fig.9 Longitudinal lateral contact forces on curve (New and worn wheel profiles)

参考文献

- 1) 谷藤, 新幹線電車の摩耗車輪とレールの接触(幾何学的接触による車輪有効こう配の分布), 日本機械学会論文集(C編), vol.25, pp.305-311, 1985.
- 2) 佐々木, 蔭山, 針山, 沼倉, 浅野, 奥村, 通勤線区に適した車輪踏面形状の開発, 鉄道技術連合シンポジウム, 2000.
- 3) 角井, 五十川, 真野, 在来線車輪踏面の摩耗傾向とレールとの接触状態調査結果, 鉄道技術連合シンポジウム, 2003.
- 4) 石田, 金, 青木, レール側摩耗に与える荷重と滑りの影響, vol.17, pp.47-52, 鉄道総研報告, 2003.
- 5) 山本, 車輪踏面の実測形状に基づく車輪/レール接触特性解析, vol.54, pp27-32, 鉄道総研報告, 2011.
- 6) Pascal, J.P., About Multi-Hertzian-Contact Hypothesis and Equivalent Conicity in the Case of S1002 and UIC60 Analytical Wheel/Rail Profile, vol.22, *Vehicle System Dynamics*, 1993.
- 7) Piotrowski, J. and Kik, W., A Simplified Model of Wheel/Rail Contact Mechanics for Non-Hertzian Problems and its Application in Rail Vehicle Dynamic Simulations, vol.46, *Vehicle System Dynamics*, 2008.
- 8) 齋藤, 中島, 中里, 清水, 鹿田, 佐藤, 下川, 谷本, 地上PQ測定による営業線データの解析結果報告, 鉄道技術連合シンポジウム, 2010.
- 9) Sugiyama, H. and Suda, Y., "Wheel/Rail Two-Point Contact Geometry with Back-of-Flange Contact", *ASME ASME J Comput Nonlin Dyn*, vol.4, pp. 011010, 2009.
- 10) Shabana, A. A., Zaazaa, K. E. and Sugiyama, H., *Railroad Vehicle Dynamics*, CRC Press, 2008.