

曲線旋回性能の向上と接触面圧低減を目的とした新踏面形状の
開発手法の構築とその適用について

○福島 知樹 谷本 益久 荻野 智久 中村 大樹（東京地下鉄）

The construction of development method for new wheel tread profile improving curving
performance and reducing contact pressure and its application

○Tomoki Fukushima, Masuhisa Tanimoto, Tomohisa Ogino,
Daiki Nakamura, (Tokyo Metro Co., Ltd.)

It has been found that the worn tread profile has following two effects from the past study. The first is outside rail lateral force and Q/P gradually decreasing after wheel turning, the other one is the tread flaking is suppressed. By clarifying the relationship between the progress of wheel tread wear and these two effects, authors constructed the development method of new wheel tread profile which aims to obtain these effects immediately after wheel turning. In this paper, the constructed design method is introduced and the validity of good performance of new tread profile designed by using this method is confirmed.

キーワード：踏面摩耗，脱線係数，輪径差，接触面圧，トレッドプロファイル

Key Words：Tread wear, Derailment coefficient, Wheel diameter difference, Contact pressure, Tread profile

1. はじめに

東京メトロでは PQ モニタリング台車や車両状態監視装置といった「営業車両のモニタリングツール」を導入しており，これらのツールを用いて取得したデータから車輪踏面の摩耗の進行に伴い，外軌・内軌ともに Q/P が低減することが確認されている．また，フィールド調査の結果からも，摩耗が進行することで車輪トレッド部の踏面剥離といった，望ましくない事象が抑制されていくことが確認されている．

このことから，摩耗進行後の特徴を新品時にフィードバックすることで，車輪削正直後からこれらの効果を獲得できるものと考えた．

【摩耗進行後に得られる効果】

効果①：内軌，外軌の Q/P（横圧）が低減

→PQ モニタリング台車，車両状態監視装置で確認

効果②：車輪踏面の踏面剥離の発生が抑制

→車輪トレッド面のフィールド調査で確認

そこで本研究では上記改善効果を確実に獲得する為の踏面形状の開発手法を検討するとともに，新たに導入しようとする踏面形状を営業線で安定的に立ち上げる為の導入手法の検討を行ってきた．

本報告では新踏面形状の開発に用いた検討プロセスを紹介するとともに，新踏面形状を営業線に投入した後の性能向上効果について報告する．

2. 新踏面形状の開発方針の検討

2.1 開発にあたっての前提条件

まずは新踏面形状の開発方針について述べていく．

車輪踏面形状を設計する際の留意点について，これまでの研究によって提唱されている内容¹⁾²⁾を踏まえ，今回実施する具体的な開発方針を改めて検討した．

【留意点】

①走行中極端に高い接触圧を発生する可能性が従来の車輪と比べてきわめて小さい．

②設計時に想定したヨーイング角の範囲内で輪軸が運動する限り，2点接触を起こさない．

③いくつかのパラメータを指定することで，車輪踏面およびレール頭頂面の形状を求めることができる．

特に③のパラメータの設定について，摩耗進行後の車輪踏面の形状変化と得られる効果の関係性を解明することが非常に重要なファクターとなってくることから，得られる効果との因果関係を確認しながら慎重に進めた．

2.2 開発方針の整理

新踏面形状の安定立ち上げに向け、展開までの開発フローを検討した（図1）。まずはStep1とStep2において、摩耗形状における性能確認と得られる効果の裏付けを行い設計パラメータの設定を行う。そして、Step3では新踏面形状の形状検討を行い、Step4とStep5において実車輪を用いて性能確認を行う設計スキームとした。

このことにより、車輪踏面形状変更という重要部の変更を安全確実に成し遂げることができる。

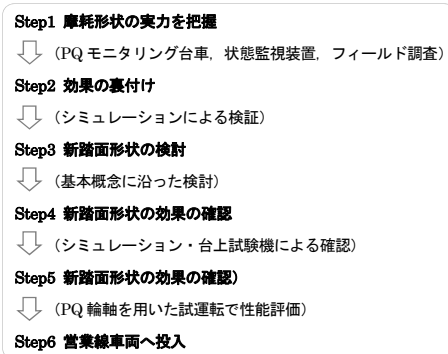


図1 新踏面形状の開発フロー

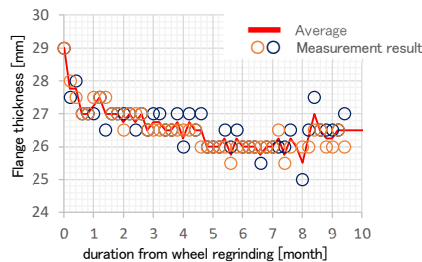
3. 摩耗形状の実力の把握と効果の裏付け

3.1 フランジ部の摩耗状況

車輪の摩耗状況について、その特徴から車輪のフランジ部とトレッド部で切り分けて確認を行った。

まずはフランジ部の摩耗の状況について紹介する。

フランジ部の摩耗は図2のグラフのように、削正から4ヶ月頃までの間「のど元部」を中心としてフランジ摩耗が最も進行する。その後摩耗の進行スピードは鈍化していくことが確認されている。



※車輪踏面の基準面より高さ13mmの位置のフランジ厚さを測定

図2 フランジ厚さの推移

これはレールとの接触状態の違いを図3に示すが、摩耗形状の車輪ではフランジ喉元部が摩耗することによって、フランジ形状がレールショルダー部の形状に近づいていることが分かる。この形状変化の影響によって、急曲線旋回中に接触するフランジ部の面積が増大し、フランジ摩耗の低減に繋がったものと考えられる。

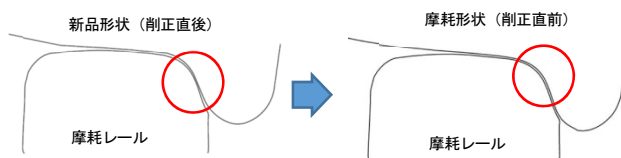


図3 フランジ部の摩耗状況

3.2 車輪トレッド部の摩耗状況

また、車輪トレッド部の摩耗の進行状況（形状変化）を把握する為、図4に示すような踏面勾配線図を作成した。

図4では車輪削正直前となる、約8ヶ月走行後の形状と新品形状の違いを比較した。従来形状では反フランジ側から約60mmの位置に勾配変化点があったが、直線走行時の接触位置（約62mm）から近いこともあり、摩耗によって当該位置はR350～R400の曲線で接続されるように変化していることが確認できる。

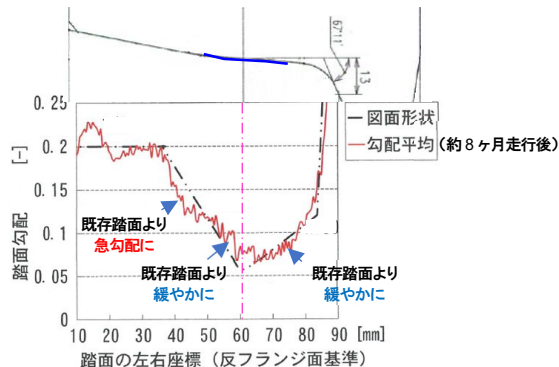


図4 車輪トレッド部の摩耗状況

4. 摩耗進行後に得られる効果について

4.1 脱線係数（外軌Q/P）の低減効果

脱線係数の低減効果については、営業運用中に輪重（P）横圧（Q）の計測を可能とした「PQモニタリング台車」を用いて外軌横圧の経時変化を確認した。

測定結果を図5に示すが、走行距離を重ねるごとに外軌横圧が低下していることが分かる。

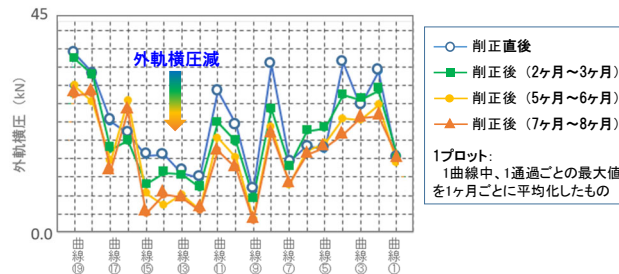


図5 外軌横圧の低減効果

4.2 踏面剥離の抑制効果

これまで一部の路線において、車輪トレッド部に剥離が確認されていたが（図6）、フィールド調査の結果から当該事象は車輪削正から約2,000km走行後に発生、その時期を越えると収束に向かうことが分かっている。

これは切断調査の結果から、車輪トレッド部の表面内部に生じる「塑性流動」が要因と判明しており、摩耗が進むことで横圧低減に加え、接触面圧の低減といった性能向上効果が寄与し塑性流動の抑制され、車輪の踏面剥離の抑制に繋がったものと推定される。



図6 車輪の踏面剥離

5. 摩耗進行後の効果の裏づけ

5.1 接触解析シミュレーション

摩耗進行後に得られる効果の要因分析を行うにあたり、実際の車輪とレールのプロファイルを採取、これらの取得データを用いて SIMPACK シミュレーションを行った。

シミュレーションの解析条件を図 7 に示すが、解析では外軌横圧低減効果の確認を目的として輪径差や接触位置の比較を行い、また踏面剥離の抑制効果の確認を目的として接触面圧の違いを確認した。

●踏面形状(車両モデル:丸ノ内線 02 系ボルスタレス台車)
踏面形状①:新品形状
踏面形状②:摩耗形状 (削正直前の車輪から形状採取)
踏面条件③:摩耗形状(フランジ部を新品形状に補正)
※③の形状は、②摩耗形状の“もと元～フランジ部”を新品形状同様に補正。(フランジ厚さ①と同一)

●軌道条件
曲線①(R170):R172, C111, S13
曲線②(R400):R400, C50, S5
※測定器で実際のレール形状を採取し使用(ともに 50N レール)

図 7 SIMPACK シミュレーション解析条件

5.2 Q/P 低減効果について

踏面形状の違いによる輪径差と外軌横圧の関係を表 1 に示すが、車輪踏面が摩耗することによって輪径差が増大、外軌横圧が低減されていることが確認できる。

特に条件②と③の解析結果を比較することで、外軌横圧低減効果はフランジ摩耗の影響だけでなく、トレッド部の摩耗も横圧低減効果に作用していることが分かる。

横圧低減効果の寄与度は条件②約 25%、条件③約 5%となっており、フランジ摩耗成分の方が大きい。

表 1 輪径差と横圧の関係

輪径差[mm]	形状①	形状②	形状③
曲線半径 R170	2.71	4.47	3.16
曲線半径 R400	1.77	2.23	1.85

横圧[kN]	形状①	形状②	形状③
曲線半径 R170	33.6	29.4	31.7
曲線半径 R400	15.5	10.2	15.0

5.3 踏面剥離の抑制効果について

続いて、内軌側車輪における接触面圧の解析結果を表 2 に示すが、車輪トレッド部の摩耗により平均約 10%の接触面圧低減効果が得られることが分かった。

これは、図 4 におけるトレッド面の反フランジ側から 45 ～80mm の範囲の踏面勾配が、従来形状よりも「緩やか」となるよう変化しており、接触面積についても増大する傾向となっていた。この影響によって接触面圧の低減効果が獲得できたものと推定される。

表 2 接触面圧低減効果

接触面圧[GPa]	形状①	形状②	形状③
曲線半径 R170	1.48	1.39	1.41
曲線半径 R400	1.87	1.77	1.48

※曲線旋回中の内軌側車輪トレッド部に生じる最大接触面圧

5.4 摩耗進行後の効果のまとめ

シミュレーションによる解析によって、寄与度は異なるものの、摩耗による外軌横圧低減効果はフランジ部と車輪トレッド部の両者の形状変化が作用していることを確認することができた。また、摩耗によるトレッド部の形状変化は横圧低減と接触面圧低減に寄与しており、効率的に踏面剥離の抑制に作用していることが分かった。

6. 新踏面形状の検討

6.1 設計パラメータの検討

摩耗した形状によって得られる良好な特徴を新たに吸収しつつ、これまでの車輪としての基本性能を確保した踏面形状について検討を行った。その際、2.1 項で述べた留意点を考慮し、フランジ部とトレッド部を切り分け検討した。

【設計パラメータ】

- フランジ部形状
 - ①フランジ厚さ、②フランジ角度、③喉元 R
 - 走行安全性能を向上させるよう検討
- 車輪トレッド部の形状
 - ①踏面勾配、②変曲点の位置
 - 接触面圧を極力下げよう検討

6.2 新形状の提案

設計パラメータの最適な組み合わせについて、「外軌横圧の低減効果」と「踏面剥離抑制効果（接触面圧低減効果）」を確実に獲得する為には、まずは摩耗した踏面形状を模倣することが確実であると考えた。

そこで新踏面の開発を進めるにあたり、フランジ部形状は摩耗の安定化後（約 4 ヶ月以降）を参照することとした。

また、車輪トレッド部形状については PQ モニタリング台車の解析結果を確認すると約 5 ヶ月経過後以降は Q/P の変動は収束する方向に向かっており、収束後の形状を参考に検討を行った。そして図 8 に示すように新形状を作成、機械加工上成立し得る形として新形状を形成した。

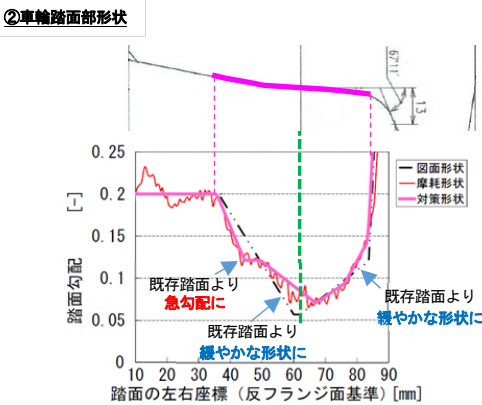
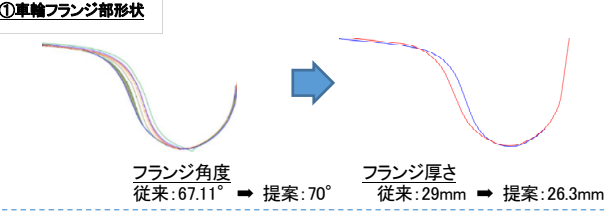


図 8 新踏面形状

7. 新踏面形状導入後の効果の確認

7.1 Q/Pの低減効果

新踏面形状の営業線投入後のQ/Pデータを図9に示す。評価対象範囲について、新踏面形状については削正直後（2～4週間後）のものとし、比較対象は同時期に走行した従来形状（削正時期間わず）のデータを選定した。

この結果から新踏面形状は台車形式を問わず、車輪削正直後から従来形状よりもQ/P性能向上効果が確保されていることが確認された。但し、シミュレーションでは約25%の横圧低減効果が確認されていたが、実際にはレールの摩耗状況や潤滑状態の影響を受けており、それらが結果に作用しているものと推定される。

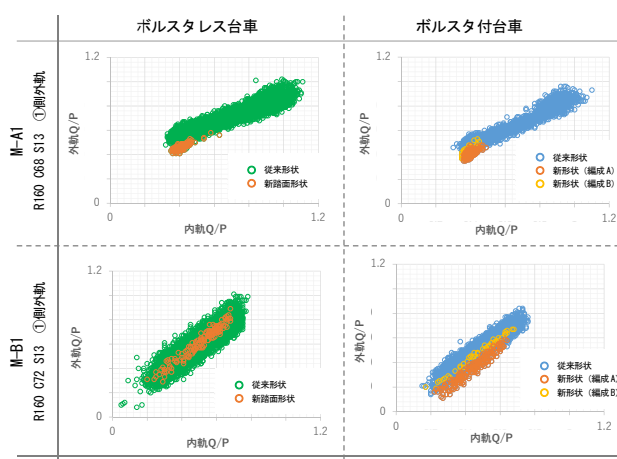


図9 営業線におけるQ/Pの状況

7.2 踏面剥離の抑制効果

踏面剥離の発生状況を確認する為、定期的にフィールド調査を行い、車輪トレッド部の状態を観察した。その結果、従来形状では車輪削正直後から2,000km程度走行した後にトレッド部の踏面剥離が発生することがあったが、新形状では約70,000km走行した状態であっても、その予兆も見られない状況となった（図10）。このことから、新踏面形状は対策として十分な性能を有することが確認された。



図10 車輪トレッド部の状況（約25,000km走行）

7.3 摩耗の抑制効果

●車輪トレッド部の摩耗状況について

新形状の摩耗による車輪トレッド部の形状変化の状況を図11に示す。この図より、反フランジ側から62mm近傍（直線走行時に接触する位置）では形状変化が生じているものの、曲線旋回中に接触する位置では形状変化は生じておらず、安定した形状を保っていることが分かる。また、従来踏面の摩耗形状と近い状態を保っていることも併せて確認できる。

●フランジ部の摩耗状況について

また、図12に示すフランジ摩耗量の推移を確認すると、従来形状のフランジ厚さを測定していた時期（8～11月）と新形状の測定を開始した時期（12～3月）を比較するとフランジ摩耗量は減少に転じていることが確認された。

このことから、新踏面形状はフランジ摩耗の低減に一定の効果があることが分かる。これは図13に示すように、新形状はフランジ先端がレールに接触し易くなることで、フランジ喉元部の負荷が軽減され、更に外軌側フランジ塗油の恩恵も受け易くなったことが要因と考えられる。

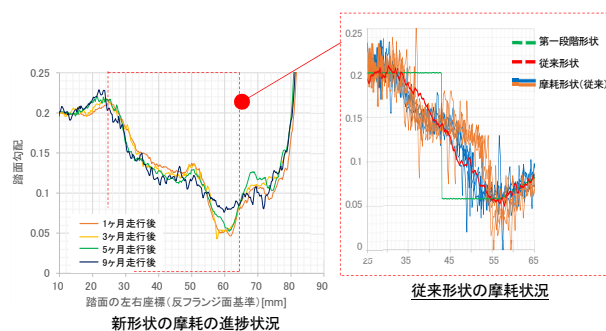


図11 車輪トレッド部の摩耗の変遷

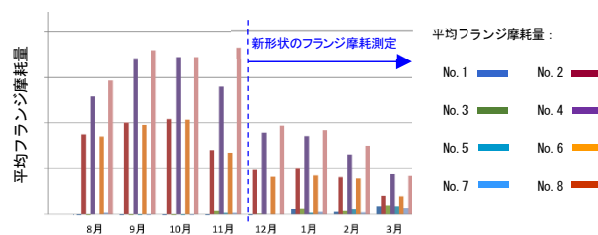


図12 フランジ摩耗の推移

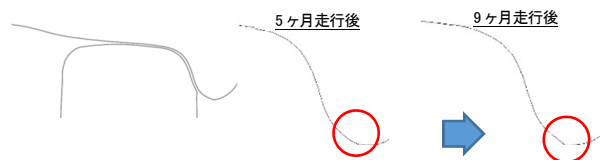


図13 フランジ部の形状変化（新踏面形状）

8. まとめ

以上のことから、新踏面形状は開発当初の目標である、「摩耗後の効果」を車輪削正直後から獲得できていることを確認した。また、車輪トレッド部とフランジ部を切り分け、パラメータ設計することでそれぞれ目標とする性能を明確に捉えることができるようになった。

参考文献

- 1) 日本機械学会：鉄道車両のダイナミクス，pp.49-54，電気車研究会，1994.
- 2) 藤岡健彦，井口雅一：車輪踏面形状の設計手法に関する研究，日本機械学会論文集，51巻466号，pp.1255-1263，1989.
- 3) 高速車両用輪軸研究委員会：鉄道輪軸，pp.53-88，丸善出版，2008.
- 4) 鉄道車両新指導書編集委員会：鉄道車両新指導書 台車・輪軸編，日本鉄道車両機械技術協会，pp.161-214，2006.