

台上試験における曲線走行時の車輪・レール接触力と 前軸外軌側の摩耗発生量との関係

一柳 洋輔* 佐藤 安弘 緒方 正剛 大野 寛之 (交通安全環境研究所)
道辻 洋平 (茨城大学) 松本 陽 (日本大学) 谷本 益久 (メトロ車両)
松田 卓也 伊藤 淳矢 (東京地下鉄) 品川 大輔 (日本製鉄)

Relation between wheel/rail contact forces and outer front wheel/roller wear during curving on roller-rig
Yosuke Ichiyangi*, Yasuhiro Sato, Seigo Ogata, Hiroyuki Ohno, (National Traffic Safety and Environment Laboratory)
Yohei Michitsuji, (Ibaraki University) Akira Matsumoto, (Nihon University)
Masuhisa Tanimoto, (Metro Sharyo, Co., Ltd.) Takuya Matsuda, Junya Ito, (Tokyo Metro Co., Ltd.)
Daisuke Shinagawa, (Nippon Steel Corporation)

In order to realize effective lubrication of wheel/rail contact, it is desired that curves where the wheel/rail wear may progress can be detected by using the monitoring bogie which can monitor the wheel/rail contact forces. Roller-rig test is carried out and the wheel/rail contact forces and the wear are measured. The results show that the ratio of the longitudinal force to the lateral force acting on the leading-inside wheel of bogie can be an effective index for evaluation of the wear of the leading-outside wheel flange.

キーワード：車輪・レール接触，車輪・レール摩耗，台上試験，摩擦係数，摩耗指数
(Wheel/rail contact, Wheel/rail wear, Roller-rig experiment, Friction coefficient, Wear index)

1. はじめに

鉄道の急曲線においては車輪やレールの摩耗，きしり音の発生，乗り上がり脱線に対する走行安全性の低下などが問題となる。摩耗やきしり音の防止を目的に地上や車上から車輪・レール接触位置にグリス等を供給し潤滑がおこなわれ，これは乗り上がり脱線の防止に対しても副次的に有効である。グリスの供給が不十分な曲線区間が存在すると車輪やレールの摩耗が急速に進展する可能性があるため，路線全体で効果的な塗油が実施されているかを把握できれば望ましい。本研究では営業運転中に車輪・レール接触力を常時測定可能なPQモニタリング台車⁽¹⁾を活用し，車輪やレールの摩耗について特に注視が必要な曲線を特定するための検討として，台上試験装置による曲線走行実験の結果をもとに車輪・レール接触力と摩耗発生量との関係を分析した。

2. 台車各輪の潤滑状態と接触力の関係

〈2・1〉 急曲線における車輪・レール接触力 急曲線走行時の台車各輪で発生する接触力の上下成分の輪重 P ，左右成分の横圧 Q ，前後成分の前後接線力 T_x を図 1 に示す。以降，下付き“1”，“2”は台車前軸と後軸，“out”と“in”は外軌側と内軌側を意味し，各力の符号は図 1 の通りとする。

車輪のフランジ部でレールと接触する前軸外軌側における横圧と輪重の比 Q_{1out}/P_{1out} は脱線係数と呼ばれ，乗り上がり脱線に対する走行安全性の指標として用いられる。一方で，車輪踏面部でレールと接触する前軸内軌側における横圧と輪重の比 Q_{1in}/P_{1in} は κ と呼ばれ，急曲線走行時には前軸内軌側の摩擦係数に近い値を示す。前後接線力 T_x は輪軸の左右変位により生じる左右車輪間の輪径差に起因して発生し，急曲線においては台車前軸の左右の車輪で発生する偶力が台車を操舵する方向のモーメントとして作用する。

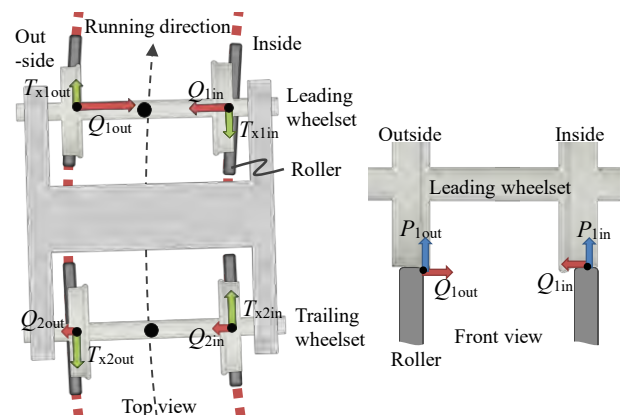


Fig. 1. Definition of contact forces in curving.

〈2・2〉 潤滑の影響 車輪・レール接触力の発生状況は車輪・レール間の潤滑状態に応じて大きく変化する。地下鉄一車両モデル⁽²⁾を用い、曲線半径 $R = 160$ m の急曲線において車輪・レール間の摩擦係数を変化させた (潤滑時は 0.1, 乾燥時は 0.5) 曲線通過シミュレーションを実施した。

- 条件①：全輪乾燥
- 条件②：前軸外軌側フランジ部潤滑
- 条件③：内軌側踏面潤滑
- 条件④：内軌側踏面, 前軸外軌側フランジ部潤滑

以上の4つの条件において、 κ と T_{x1}/P_{1in} を比較した結果を図2に示す。ここで、前軸の前後接線力については、左右の車輪における平均値 $T_{x1} = (T_{x1out} + T_{x1in})/2$ を求め、さらに乗車率の影響を考慮し内軌側の輪重 P_{1in} で除した値 T_{x1}/P_{1in} とし、これを前後接線力係数と呼ぶ。図2では前軸内軌側の摩擦係数の大小が κ の大小と対応している。また、前軸内・外軌いずれかの摩擦係数が減少すると T_{x1}/P_{1in} の値も減少し、内・外軌とも潤滑された場合は特に小さいことが分かる。

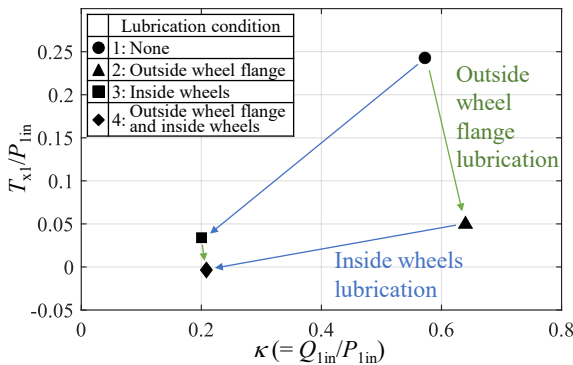


Fig. 2. Effect of friction condition on contact forces.

3. 車輪・レール接触力にもとづく潤滑状態推定

著者らはこれまでに内軌側横圧輪重比 κ と前軸の前後接線力係数 T_{x1}/P_{1in} にもとづき外軌側車輪フランジ・レール間の摩擦係数や摩耗進展状況を推定する手法を提案した^{(2),(3)}。

〈3・1〉 車輪フランジ部の摩擦係数推定⁽²⁾ 車両運動シミュレーションを様々な摩擦係数の条件で繰り返し実施した結果得られた κ と T_{x1}/P_{1in} , 及びその他の軌道条件等の定量的な関係を表すデータベースを構築した。その一例とし

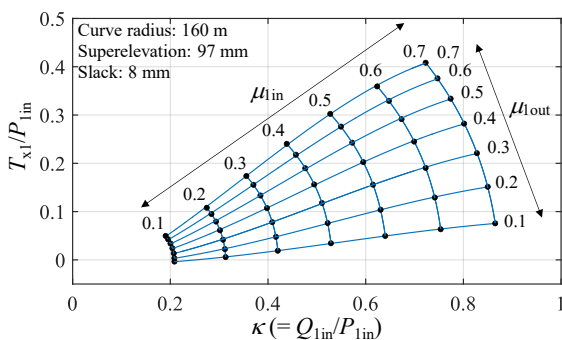


Fig. 3. $\kappa - T_{x1}/P_{1in}$ diagram (look-up table) which is created based on simulations.

て図3には特定の急曲線区間において前軸外軌側フランジ部の摩擦係数 μ_{1out} と前軸内軌側の摩擦係数 μ_{1in} を変化させたときの κ と T_{x1}/P_{1in} の関係を示しており、これをロックアップテーブルとして用いることで、PQ モニタリング台車等で測定可能な車輪・レール接触力から μ_{1out} を回帰的に推定する。

〈3・2〉 摩擦状態図⁽³⁾ 台上試験の結果より内・外軌ともに乾燥状態において最もフランジ摩耗が発生したこと、またそのような条件では κ と T_{x1}/P_{1in} がともに大きいことから、図4を摩擦状態図と呼び、両軸の値がともに大きい領域を高摩擦状態と定義した。PQ モニタリング台車による観測値の中で高摩擦状態に該当するデータが占める割合にもとづいてフランジ・レール摩耗の推定を行う方法を提案した。

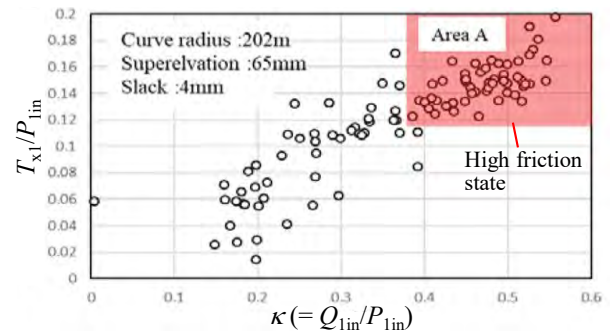


Fig. 4. Friction diagram with data collected with PQ monitoring bogie in service operations ($R = 202$ m)⁽³⁾.

4. 前軸内軌側の前後接線力・横圧比

〈4・1〉 新指標の提案 図5に前述の4つの潤滑条件における前軸内軌側の摩擦円のイメージを示す。本研究で対象とする地下鉄の急曲線では前軸内軌側車輪・レール接触面における接線力 T_{1in} は最大の摩擦力 (円の半径)に飽和している ($T_{1in} = \mu_{1in} P_{1in}$)。接線力の前後成分 T_{x1} 及び左右成分 Q_{1in} の分担状況も図示する。なお、前軸内軌側の接触角は小さいと仮定し横クリープ力を横圧で近似している。第3章で述べた前後接線力 T_{x1} の大きさにもとづく手法 (実用上輪重で正規化) では、内軌が乾燥状態のときは図5(a)と(b)の比較や図3の右部にみられるように前軸外軌側フランジ

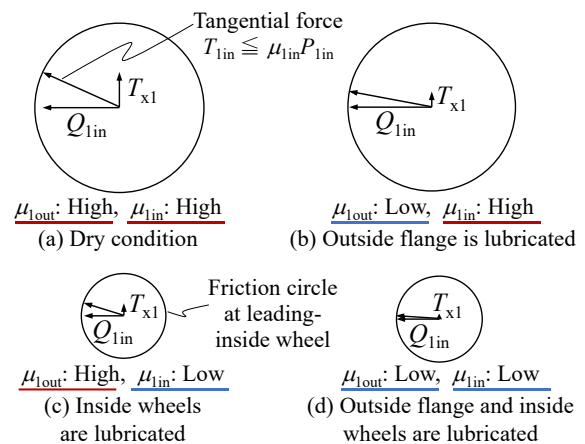


Fig. 5. Image of friction circle at leading-inside wheel.

部の摩擦係数差が T_{x1} の大小に影響しやすい。一方で内軌側が潤滑された条件では、図 5 の(c)と(d)を比較すると外軌側の状態によって T_{x1} の値が変化するものの、内軌側の摩擦係数が小さいため内軌側の摩擦円が小さく、 T_{x1} が常に小さい。そのため内軌側が乾燥した条件に比べると内軌側が潤滑された条件では前後接線力の値から外軌側フランジ部の潤滑状況を推定することは難しい。

接線力の左右成分にも着目すると、図 5 (d)では(c)に比べて前後成分が小さい分、わずかに左右成分が大きい。そこで本報では接線力の前後・左右成分のバランスにもとづいた指標値として、両者の比 T_{x1}/Q_{lin} を計算する。図 3 の縦軸を T_{x1}/Q_{lin} へ置き換えたものを図 6 に示す。図 3 に比べ、内軌側の摩擦係数が小さい条件でも外軌側車輪フランジ部の摩擦係数の変化が比較的大きく見え、内軌側湿潤時と乾燥時とが混在した観測データを同一のグラフ上で比較できる可能性がある。

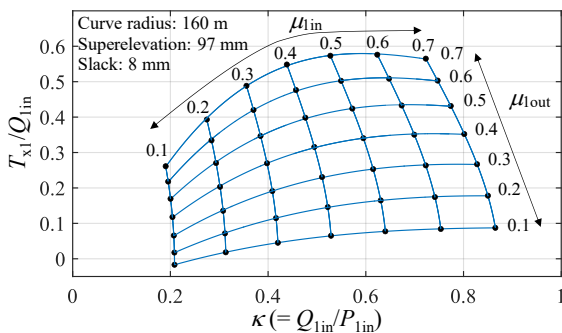


Fig. 6. $\kappa - T_{x1}/Q_{lin}$ diagram based on simulations.

〈4・2〉 摩耗指数との関係について 車輪・レール間の摩耗進展および転がり接触疲労の予測モデルには、摩耗指数 $T\gamma$ にもとづくものがあり、これは縦クリープ力 T_x と横クリープ力 T_y 、スピンモーメント M_z と各方向のクリープ率 v_x, v_y, ϕ の積から次のように計算される⁽⁴⁾。

$$T\gamma = |T_x v_x| + |T_y v_y| + |M_z \phi| \quad \dots\dots\dots(1)$$

$R = 160 \text{ m}$ の曲線走行シミュレーションから得た T_{x1}/Q_{lin} と外軌側車輪フランジ部の摩耗指数 $(T\gamma)_{1out}$ の定常値を図 7 に示す。ここで摩擦係数は台車 4 輪の摩擦係数を 0.1, 0.2, ... 0.7 のように変化させ、計 2,401 通りの条件で計算を実施し

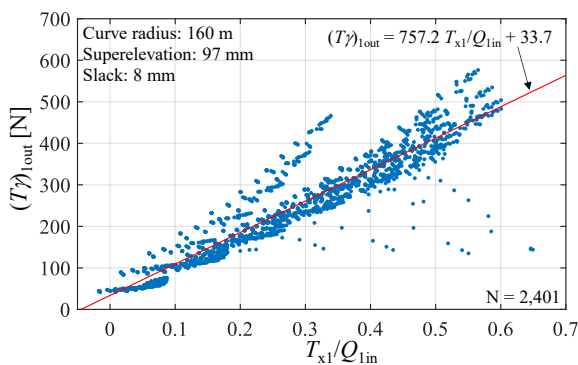


Fig. 7. Relation between T_{x1}/Q_{lin} and wear index $(T\gamma)_{1out}$ obtained from simulations ($R = 160 \text{ m}$).

た。なお、車輪・レール接触解析ソルバは FASTSIM を用いたため、式(1)の右辺第三項のスピンに係る項は零となる。図 7 より、摩耗指数と新指標との間にはやや強い相関がみられる(相関係数 0.93)。ただし、台車 4 輪の摩擦係数が特に小さい場合は前軸外軌側車輪における 2 点接触の影響などによって残差が大きい。摩耗指数 $T\gamma$ による摩耗進展予測のためには走行中の観測が容易でないクリープ率が必要となるが、 T_{x1}/Q_{lin} を用いれば PQ モニタリング台車等で観測可能な接触力の値にもとづいた $T\gamma$ に代わる摩耗進展の予測モデルを構築できる可能性がある。

5. 台上試験にもとづく検討

交通安全環境研究所の台上試験装置を用いた曲線走行実験⁽⁵⁾によってフランジ摩耗量と T_{x1}/Q_{lin} の関係を実験的に把握する。曲線半径の実験条件は $R = 130, 160, 180, 200, 250, 300, 350, 400, 800 \text{ m}$ である。当試験装置では軌道曲率に応じて前後の軌条輪にヨー角を付与するとともに左右の軌条輪の回転数差を設けることで曲線走行時の内外軌の行路差を模擬する。車輪は地下鉄急曲線走行用の銀丸円弧踏面形状、軌条輪は JIS 50kgN の形状に加工している。全ての条件で軌間と走行速度は一定とし、カントと超過遠心力は付与しない。各軌条輪にグリスを塗布することで、前述の 4 つの潤滑条件を実現する。PQ 輪軸を用いた輪重と横圧の測定に加え、モノリンクに作用する前後方向の力をひずみゲージで測定し、これを換算して車輪位置の前後接線力 T_x を求める。

台車前軸外軌側に相当する車輪/軌条輪間で発生する摩耗粉についても測定し、その様子を図 8 に示す。接触位置の

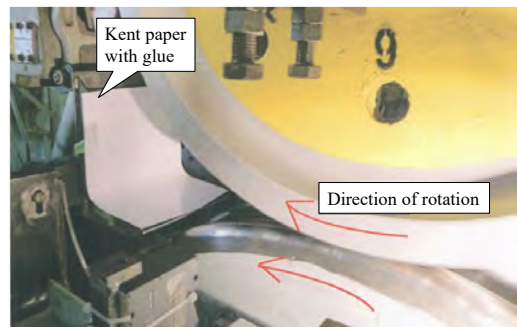


Fig. 8. Method for capturing wear debris⁽⁵⁾.

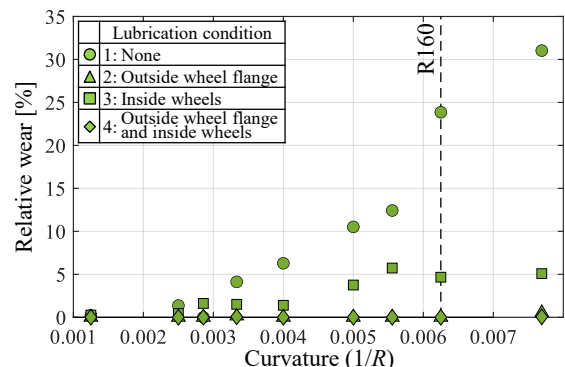


Fig. 9. Wear debris in roller-rig experiments.

進行方向後方側に粘着スプレアのりを付着させたケント紙を設置し、飛散する摩耗粉の付着量を顕微鏡で観測し、単位面積当たりの摩耗粉の面積占有率を測定する⁽⁵⁾。図 9 には台車前軸外軌側で発生した摩耗粉の面積占有率の計測結果を示す。前軸外軌側における摩耗量は、全輪乾燥の条件で最も顕著であり、内軌側のみ潤滑された条件 3 でも摩耗の発生が見られる。また全輪乾燥状態の条件 1 のデータのみに着目すると、軌道曲率が大きいほど摩耗の発生量が多い。

台上試験の結果から T_{x1}/Q_{1in} を計算し、各条件において前軸外軌側における摩耗量と比較した結果を図 10 に示す。一つの曲率のみに着目すれば、 T_{x1}/Q_{1in} が一定値を上回ると摩耗量が進展する関係が見られるが、曲率によってその閾値は異なる。そこで T_{x1}/Q_{1in} を軌道曲線半径 R で除した値

$$\frac{T_{x1}}{RQ_{1in}} \dots\dots\dots(2)$$

を定義し、その計算結果を図 11 に示す。車輪・レール形状が同一の条件下では、 $T_{x1}/(RQ_{1in})$ が小さい場合は摩耗は観測されず、 $T_{x1}/(RQ_{1in})$ がある一定の値を超過すると $T_{x1}/(RQ_{1in})$ の増加に従って摩耗量も増加する関係が見て取れる。営業路線の中から摩耗に注意が必要な曲線を効率的に把握するためには、様々な曲線半径の曲線を比較する必要があるが、 $T_{x1}/(RQ_{1in})$ を用いれば曲線半径を考慮しての比較ができる。

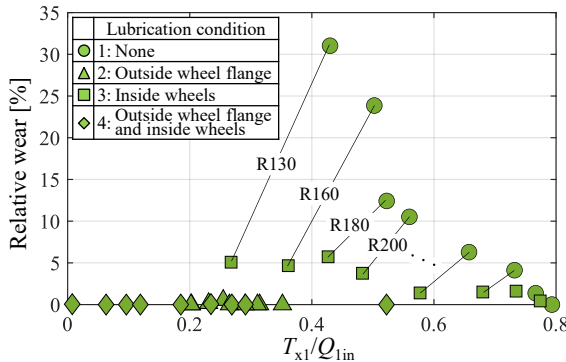


Fig. 10. Relation between flange wear and T_{x1}/Q_{1in} .

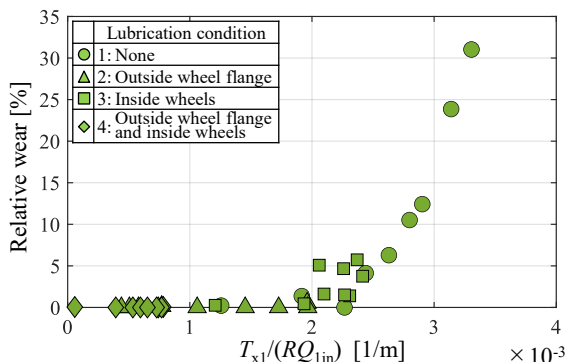


Fig. 11. Relation between flange wear and $T_{x1}/(RQ_{1in})$

6. PQ モニタリング台車への適用例

PQ モニタリング台車による車輪・レール接触力の観測データから T_{x1}/Q_{1in} を計算し、その有用性を確認する。図 12(a)

には一例として、 $R = 160m$ の曲線区間において約半月の間に PQ モニタリング台車で測定したデータを示す。データは当該曲線の円曲線を一回通過するごとの平均値である。当該期間中に外軌側フランジ部の摩擦状態が大きく変化し、二つの点群に分かれて分布する特徴がみられる。図 12(a)は従来の摩擦状態図であるが、点群の右上部の観測データについては、高摩擦状態ではないものの内外軌ともに摩擦係数が比較的大きいことが予想される。 κ が小さいときは二つの群の差が判別しにくい。一方、図 12(b)は縦軸を前軸内軌側 T_{x1}/Q_{1in} としたものであるが、 κ の小さい条件についても外軌側フランジ部の潤滑状態の差を明確に分離できる。 T_{x1}/Q_{1in} の値に一定の閾値を設ければ、測定した T_{x1}/Q_{1in} の値をもとに前軸外軌側車輪フランジ・レールの摩耗発生状況を評価できる可能性がある。

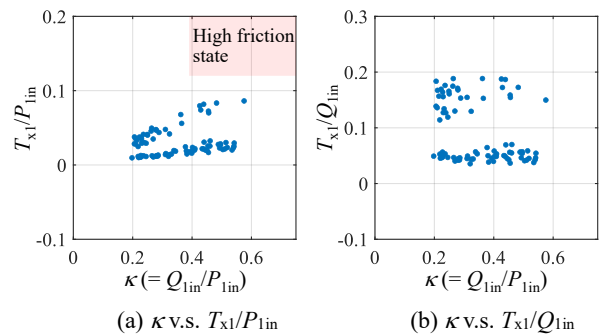


Fig. 12. Application to data from PQ monitoring bogie and comparison of T_{x1}/P_{1in} and T_{x1}/Q_{1in} .

7. 結言

PQ モニタリング台車で走行中に連続測定が可能な車輪・レール接触力にもとづき車輪・レール摩耗の発生状況を推定することを目的とし、台上試験と一車両の運動シミュレーションをもとに接触力と摩耗発生状況の関係を考察した。台車前軸内軌側の横圧と前後接線力の比を曲線半径で除した新指標値と台車前軸外軌側における摩耗量の関係を確認し、新指標をもとに摩耗発生状況を推定できる可能性を示した。今後は車輪とレールが摩耗形状の場合など、様々な車輪・レール形状の組み合わせに応じた評価方法を検討し、モニタリング台車で計測された新指標値と摩耗進展状況との比較から、提案した評価手法の妥当性を確認する。

文 献

- (1) 大野寛之ほか:「PQ 輪軸を用いない車輪/レール接触力の測定方法」日本機械学会論文集 C 編, Vol. 77, No. 774 (2011), pp.392-400.
- (2) 一柳洋輔ほか:「車輪・レール摩耗の影響を考慮した外軌側車輪フランジ部の摩擦係数の推定方法」, TRANLOG2019 (2019), No. 1104.
- (3) 松田卓也ほか:「PQ モニタリング台車を用いた各曲線で発生するフランジ摩耗量の推定について」, J-Rail 2019, No. JSCM-2-5 (2019).
- (4) O. Polach et al.: "Simulation of Railway Vehicle Dynamics", Handbook of railway vehicle dynamics second edition, ch17, CRC Press (2020), p.707.
- (5) 齋藤拓也ほか:「各種潤滑条件が車輪フランジ摩耗に与える影響に関する研究」, J-RAIL2011, No. S8-JSCM-4, pp. 391-394 (2011).