

講演 7. 営業列車を用いた車輪／レール接触力の モニタリング技術の活用に関する検討

交通システム研究部 ※一柳 洋輔 佐藤 安弘 緒方 正剛 大野 寛之
茨城大学 道辻 洋平 日本大学 松本 陽 メトロ車両 谷本 益久
東京地下鉄 伊藤 淳矢 日本製鉄 品川 大輔

1. はじめに

鉄道車両の乗り上がり脱線（車輪が回転しながらレールに乗り上がって脱線するもの）に対する走行安全性に直結する車輪／レール間の接触力を営業列車で常時観測することが可能となったり。これらのデータをもとにして車輪／レール間潤滑状態の時間変化等も捉えられるようになることから、適切な潤滑の管理を可能とするツールの開発に取り組んできた。乗り上がり脱線に対する走行安全性には車輪／レール接触力のほかに、摩耗進展に伴い変化する車輪／レール形状と、潤滑条件に伴い変化する車輪／レール間の摩擦係数とが関係することから、営業列車による車輪／レール接触力のモニタリングデータを活用し、摩耗進展に注視が必要な曲線区間を把握する方法について検討したので報告する。

2. 車輪／レール接触力と潤滑状態の関係

図 1 左部は急曲線走行時の台車の上面図を示す。図 1 右上部は台車の前軸外軌側（曲線外側）の車輪とレールの断面図であり、前軸外軌側車輪はフランジ部でレールと接触し、接触面は水平に対し角度 α_{1out} を有している。車輪とレールの接触点では接触

面に垂直に法線力 N_{1out} 、接触面に平行に接線力が作用する。接線力の横方向成分を横クリープ力 T_{y1out} （図 1 右上部）、接線力の前後方向成分を縦クリープ力 T_{x1out} （前後接線力、図 1 左部）と呼ぶ。横クリープ力は主にアタック角（図 1 左上部）によって生じ、前後接線力は主に左右の車輪の回転半径差によって生じる。なお本報告では記号の添字“1”、“2”はそれぞれ台車の前軸と後軸、“out”と“in”はそれぞれ外軌側と内軌側（曲線内側）を意味する。

図 1 右上部において T_{y1out} と N_{1out} の合力を水平、鉛直方向に分解したものが横圧 Q_{1out} 、輪重 P_{1out} である。車輪フランジ部でレールと接触する台車前軸外軌側の横圧輪重比 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に関する指標として用いられる。脱線係数は軌道変位（レールのゆがみ）やレールの支持状態、車輪／レール間の潤滑状態などの影響を受けて変化する。

一方、図 1 右下部のように前軸内軌側車輪は踏面部でレールと接触しており、車輪とレールの接触角 α_{1in} は前軸外軌側に比べ小さい。前軸内軌側における横圧輪重比 Q_{1in}/P_{1in} を κ と呼ぶ。急曲線においてアタック角が大きい前軸では、横方向のすべりが大きいいため、 κ は前軸内軌側の車輪／レール間の摩擦係数に近い値を示す。前軸内軌側の摩擦係数が大きいと、横クリープ力 T_{y1in} が増加する。 T_{y1in} の増加は車軸を通じ前軸外軌側の車輪フランジ部をレールに押し付ける方向に作用し、 N_{1out} および Q_{1out} が増加する、また車輪がレールを乗り上がる方向の力である T_{y1out} も増大する。以上のように前軸内軌側摩擦係数の増加は脱線係数増大の要因となる。

前後接線力 T_x は左右の車輪で同程度の大きさの反対方向の力が発生する。後軸では左右変位が小さく、内外軌間で車輪回転半径差が十分にとれず、前後方向のすべりによる前後接線力 T_{x2in} 、 T_{x2out} が大きくなる。急曲線において後軸で発生する T_{x2in} 、 T_{x2out} は台車の前軸を外軌側に押しつける方向のモ

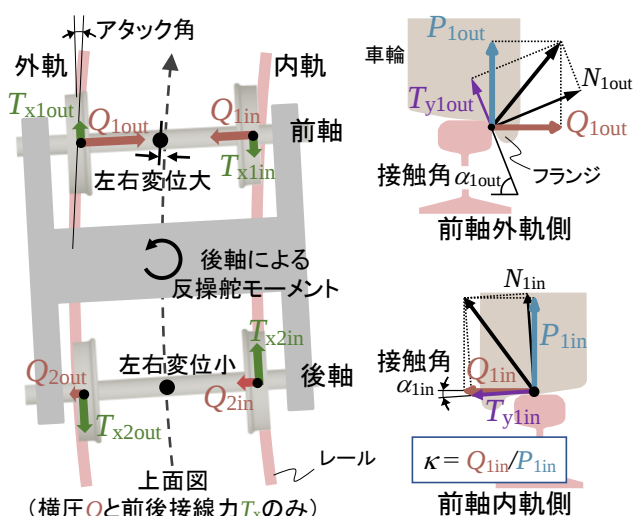


図 1 急曲線走行時の車輪／レール接触力

ーメントとして作用し脱線係数を増加させる。

以上の車輪／レール接触力の発生状況は車輪／レール間の摩擦係数に応じて大きく変化する。そこで、別途実施した車両運動シミュレーションの結果を参考に、以下の4つの潤滑条件について台車前軸の状況を図2で比較する。

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

条件1では前軸内軌側の摩擦係数が大きいため Q_{lin} と κ が大きい。これにより前述の通り前軸外軌側の横圧 Q_{lout} も大きくなる。また、前軸内・外軌とも摩擦係数が大きいため、前後接線力 T_{x1out} 、 T_{x1in} も大きくなる。

条件2も Q_{lin} および κ は大きい。しかし前軸外軌側フランジ部の潤滑によって前後接線力 T_{x1out} が減少し、 T_{x1in} もそれに釣り合いをとるように減少する。前軸の前後接線力の減少はアタック角を増加させ、 Q_{lin} と Q_{lout} は条件1に比べ大きくなる。

条件3では、前軸内軌側の潤滑によって Q_{lin} および κ は減少し、 Q_{lout} も減少する。前軸内軌側の潤滑によって T_{x1in} が減少し、 T_{x1out} もそれに釣り合いをとるように減少する。この状態から前軸外軌側も潤滑された条件4では、 T_{x1out} 、 T_{x1in} は最も小さい。

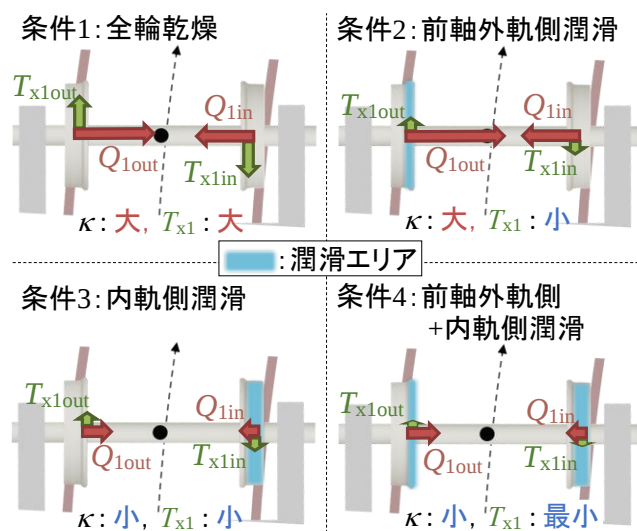


図2 潤滑と車輪／レール接触力の関係

3. 車輪／レール摩擦係数と車輪／レール形状

脱線に対する限界を示す脱線係数「限界脱線係数」は図3に示すとおり、車輪／レール間の摩擦係

数 μ_{lout} や車輪フランジ角 α_{lout} によって変化する。

車輪とレールは、繰り返し走行に伴い摩耗しその形状が変化する。図4には前軸外軌側における車輪／レール接触をシミュレーションした結果を示す。ここでは摩擦係数は同一の条件で車輪とレールがともに新品の状態と、双方がある程度摩耗した状態とを比較している。車輪とレールの摩耗によって接触位置や接触力の発生状況が変化することが分かる。またフランジ摩耗が進展しフランジ角が変化すれば、図3に示すように摩擦係数が同一条件下でも限界脱線係数は変化する。

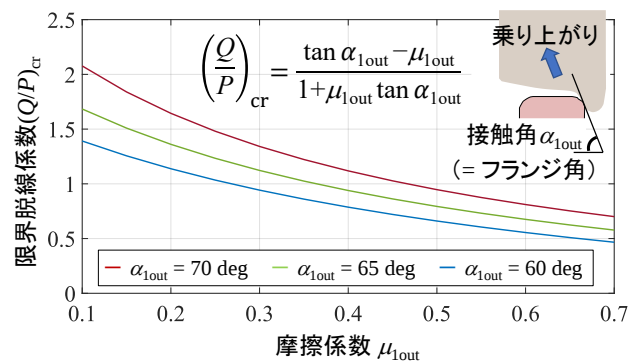


図3 限界脱線係数

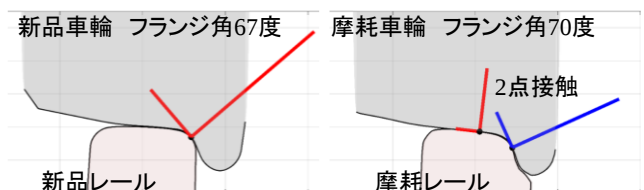


図4 車輪／レール摩耗による接触状態の変化
(接触点における法線力と横クリープ力を図示)

4. 車輪／レール接触力による潤滑状態推定

4. 1 車輪／レール潤滑状態の推定の必要性

輪重、横圧、前後接線力は後述のモニタリング台車で測定でき、脱線係数も把握できる。観測した脱線係数の値が同じでも、摩擦係数が大きいと限界脱線係数は小さくなることから、乗り上がり脱線に対する余裕度が小さくなる。また、摩擦係数は走行安全性のみならず、車輪やレールの急速な摩耗や騒音、振動の発生などに関係する。よって、急曲線においては、車輪とレール間にグリスなどの潤滑材を介在させることで摩耗防止を図る例も多い。しかしながら、過度の潤滑は空転・滑走の誘発や無駄な潤滑材の消費につながるため、潤滑の程度を適切に管

理する必要がある。一方で、潤滑の程度や天候の影響を受けて走行中に時々刻々と変化する摩擦係数は車上で連続的に把握することが困難であるため、一般的には摩擦係数を 0.3 として限界脱線係数を計算し、その限界脱線係数に安全率を見込んだ目安値を用いて走行安全性の評価が行われる。

走行安全性の評価をより精緻に行うためには、車輪／レール間の摩擦係数や車輪／レール形状の実態を脱線係数と併せて把握できることが望ましい。

4. 2 潤滑状態推定のための指標

前述の通り、前軸内軌側の潤滑状態は前軸内軌側の摩擦係数に相当する κ から判別できる。前軸外軌側の潤滑状態については、図2の条件1と2の比較から、前軸内軌側の摩擦係数が同程度であれば T_{x1out} および T_{x1in} の大小で区別できる。しかし条件3と4の比較にみるように、前軸内軌側の摩擦係数が小さいときは T_{x1out} および T_{x1in} は前軸外軌側の潤滑状態の影響を受けるものの、前軸内軌側の摩擦係数が小さいために常に小さい。そのため前後接線力の値単独で前軸外軌側の潤滑状況を推定することは難しい。しかし Q_{lin} にも着目すると、条件3と4では Q_{lin} の大きさに対する前後接線力の変化量が大きい。そこで本報告では前軸内軌側車輪における摩擦力の前後・横成分のバランスにもとづいた指標値として、両者の比 T_{x1in}/Q_{lin} を提案する。実用上、左右の前後接線力 T_{x1out} と T_{x1in} を平均化した T_{x1} を用い、さらに T_{x1} と Q_{lin} は摩擦係数のほか軌道の曲線半径に依ってもそのバランスが変化するため、軌道の曲線半径 R で除した値、 $T_{x1}/(RQ_{lin})$ を指標値として用いる。

5. 曲線走行実験による摩耗発生分析

図5に示す交通安全環境研究所の都市内鉄軌道用台車試験設備を用いた曲線走行実験の結果²⁾から、車輪／レール接触力と摩耗発生量の関係を分析した。実験条件は、曲線半径 $R=130, 160, 180, 200, 250, 300, 350, 400, 800$ mであり、全ての条件で走行速度は一定の 20 km/hとしている。車輪と軌条輪（レールを模擬した円盤）の形状も同一である。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した。

実験では各車輪の輪重と横圧、前後接線力を測定したため、その結果から指標値 $T_{x1}/(RQ_{lin})$ を計算する。また前軸外軌側に相当する車輪／軌条輪間における摩耗粉の発生状況も測定した（図5右部）。接触位置の進行方向後方側に粘着スプレのりを付着させたケント紙を設置し、一定時間走行の後にケント紙に付着した摩耗粉の単位面積当たりの面積占有率をもとに各条件の摩耗量を比較した。

指標値と前軸外軌側における摩耗量を比較した結果を図6に示す。前軸外軌側における摩耗量は、全輪乾燥の条件1で最も顕著であり、次いで内軌側のみ潤滑された条件3でも摩耗が多く確認できる。また、条件1のみに着目すると、急な曲線ほど摩耗の発生量が多い。

指標値と摩耗量の関係から、指標値が小さいときは摩耗は殆ど観測されず、指標値が一定の値を超えると指標値の増加に従って摩耗量も増加する関係を確認した。また別途実施した車両運動シミュレーションの結果から、前軸外軌側の摩擦係数が大きいほど指標値も大きい結果を得た。以上より、営業線で測定される車輪／レール接触力から指標値を計算し、指標値が大きい傾向にある曲線部では、摩擦係数が大きく摩耗進展に注意が必要といえる。

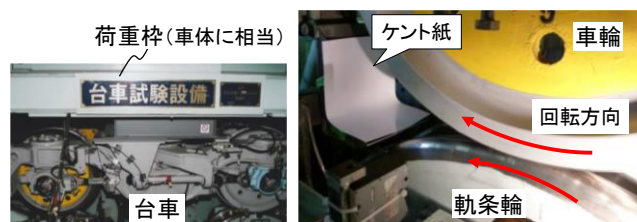


図5 曲線走行実験における摩耗発生量の測定²⁾

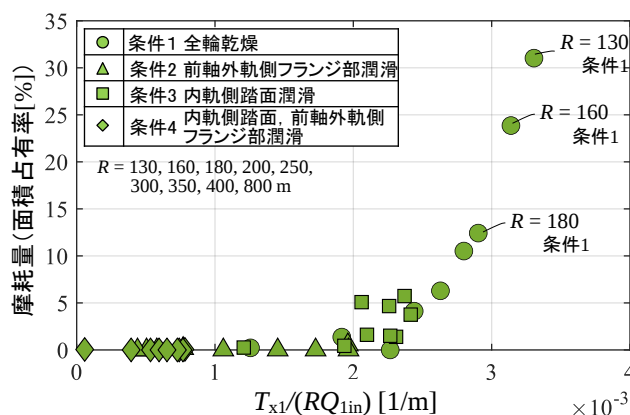


図6 台上試験における指標値と摩耗量の関係

6. 営業線における実測データへの適用

6. 1 脱線係数の常時モニタリング技術

車輪／レール接触力を営業列車で常時観測する目的で開発された台車「PQ モニタリング台車」(図7)により、車輪／レール間の接触力および脱線係数の継続的、長期的な収集が可能となった。

図8にはPQモニタリング台車が一つの曲線部を一日の間に複数回走行して得た脱線係数の波形を示す。同じ車両、同じ台車が同じ地点を同日に通過した場合でも、潤滑条件の変化によって脱線係数が走行毎に変動する様子が確認できる。

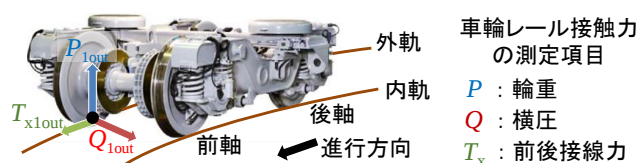


図7 PQ モニタリング台車

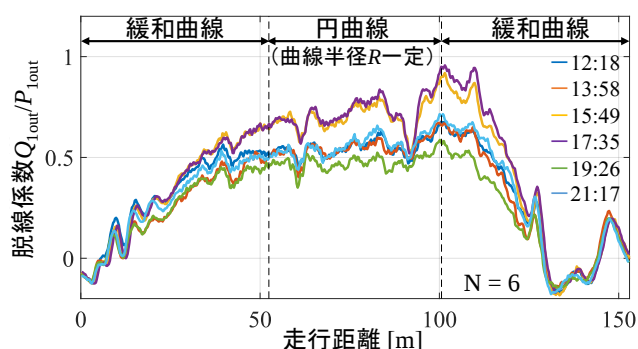


図8 脱線係数の測定例

6. 2 潤滑状態推定のための指標の検証

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指標値を計算した一例として、 $R = 160 \text{ m}$ の曲線部における約半月の間の観測データのうち κ の推移を図9に、指標値を計算した結果を図10にそれぞれ示す。各プロット点は当該円曲線部を一回通過する毎の平均値を示す。図9より、 κ が0.2~0.6程度の幅をもって変動しており、当該曲線部では前軸内軌側の潤滑状態が変化しやすいことが推定される。図10より7月10日を境に、それ以降は指標値 $T_{x1}/(RQ_{1in})$ が比較的大きい傾向にある。 κ が変動している一方で、 $T_{x1}/(RQ_{1in})$ は κ の影響を受けずに高い値を維持していることから、前軸外軌側の摩擦係数が大きいことが推定される。 κ が小さいときは前軸外軌の状態に関わらず前後接

線力 T_{x1} の値が小さくなるが、 T_{x1} と Q_{1in} の比をとることで前軸内軌側の影響を受けずに前軸外軌側の潤滑状態を評価できることを表している。

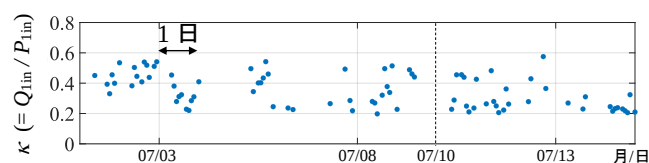


図9 前軸内軌側横圧輪重比 κ の時間変化

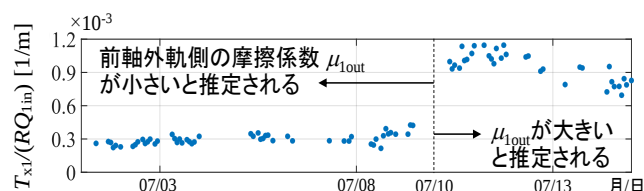


図10 提案指標値 $T_{x1}/(RQ_{1in})$ の時間変化

7. まとめ

営業列車による車輪／レール接触力のモニタリングデータを活用し、摩耗進展に注視が必要な曲線区間を把握する方法として、台車前軸内軌側の横圧と前後接線力の比をもとにした指標値を提案した。

手順としては、モニタリング台車で測定した前後接線力と横圧、および走行位置と軌道諸元についてのデータベースを照合して取得した軌道の曲率半径をもとに指標値を算出する。これが設定した閾値を超過する箇所、あるいは他曲線部に比べ大きい値が観測される箇所については、摩擦係数が大きく優先的に対策が必要な曲線部と判定する。摩擦係数が大きく走行安全性や摩耗進展に対し注意を要すると判定した場合に、当該曲線区間においてレールに潤滑材を供給するなど、優先的に保守管理を実施するという活用方法が考えられる。

第5章の内容は車輪／レール形状が一定の条件での考察であるため、今後は車輪とレールが摩耗した環境での指標値の扱い方を整理する予定である。

参考文献

- 1) 佐藤ほか, 交通研フォーラム 2009 講演概要, pp.85-88 (2009)
- 2) 齋藤ほか, “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)