

新幹線車両の冬季における滑走現象の現状把握

北村 賢一* (東日本旅客鉄道)、中澤 伸一 (鉄道総合技術研究所)

Understanding of wheel sliding phenomenon of Shinkansen high speed trains in winter

Kenichi Kitamura*, (East Japan Railway Company)

Shinichi Nakazawa, (Railway Technical Research Institute)

The wheel sliding phenomenon of railway vehicles is generally understood by the brake test in the low-adhesion conditions with artificial water sprinkling. On the other hand, Shinkansen high speed trains, which run in low-temperature and snowy truck condition in winter, have not only water but also snow and ice on the contact surfaces of the wheels and rails, so the sliding phenomenon may be different from that of artificial low-adhesion conditions. We will report the analysis results focusing on the sliding frequency, adhesion coefficient, etc., based on data of brake control unit collected during service operation in winter.

キーワード：低粘着，冬季走行，新幹線，滑走，粘着係数，接線力係数

(Low-adhesion, winter running, Shinkansen, wheel slide, adhesion coefficient, tangential force coefficient)

1. はじめに

鉄道車両の滑走現象の把握は、従来は人為的な散水による低粘着状態でのブレーキ試験における把握が一般的であった。一方で、冬季に低温積雪地域を走行する新幹線車両では、車輪・レールの接触面に水だけでなく雪や氷、もしくはその複合状態や遷移状態のものが介在している可能性があり、滑走現象が人為的な低粘着状態のものとは異なる可能性がある。

そこで本研究では、冬季間の営業走行時に収集したブレーキ動作記録をもとに、滑走頻度、粘着係数などに着目して、冬季の滑走現象に見られる傾向を報告する。

2. 冬季における滑走現象の把握

2014 年 12 月中旬から 2015 年 3 月上旬にかけての冬季間に、東北新幹線を走行する新幹線車両のブレーキ制御装置(以下、BCU: Brake Control Unit)の動作記録から滑走現象の把握を行った。

(2.1) 取得情報 対象とした車両では 1 両につき 1 台の BCU が搭載されている。BCU では、ブレーキノッチ信号などの編成で共通する一部の情報を除き、基本的には自車の情報のみを扱っている。滑走現象の把握のために、BCU の動作記録から表 1 に示す情報を抽出した。

なお、この動作記録は BCU に常設される機能ではなく、対象車両の BCU に専用の記録装置を仮設して集録した。対象として 10 両編成、7 両編成の車種からそれぞれ 3 編成を選択し、編成ごとに 10 両編成車両の 1、2、4、7、9、

10 号車に、7 両編成車両の 1、2、4、6、7 号車に記録装置を設置した。運用上、これらの編成車両は互いに併結して 17 両編成で走行する場合がある(図 1)が、記録装置は、10 両編成のみ、7 両編成のみ、両編成ともの場合が有りうる。

集録時間は編成ごとに異なるが、集録されたデータ数は延べ約 9.0×10^8 点(約 2.5 万時間分。ただし停車中のデータも含む)である。

表 1 集録した BCU 動作記録

Table 1. Recorded data of BCU operation.

情報の種別	情報の特徴
時刻	サンプリング周期 0.1s
ブレーキノッチ	常用(1~7 ノッチ)、非常
各軸速度(v_w)	車輪周速度(各車両 4 軸)
編成速度(v_t)	編成内の最も高い車輪周速度
BC 圧(p)	BCU 出口での検出圧力
必要ブレーキ力(F_d)	各車 BCU によって演算されるブレーキ力の目標値。
空制減算指令(F_r)	回生ブレーキ力の寄与により必要ブレーキ力から減算される空気ブレーキ力。
実空制ブレーキ力(F_p)	BC 圧に基づく空気ブレーキ力の推定値。
制御減速度(β)	ブレーキノッチに対応して設定される減速度。
滑走検知状態	滑走制御機能が滑走を検知しているかの情報。
進行方向条件	進行方向先頭側識別情報

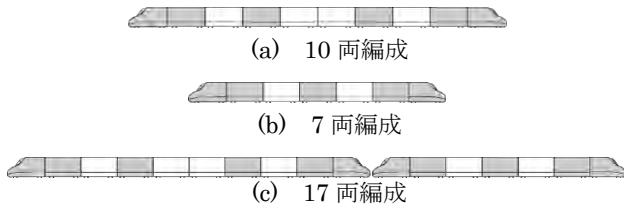


図 1 BCU 動作記録装置の設置箇所(網掛けの車両)
Fig.1 Installed position of BCU operation recording devices (Shaded car).

〈2・2〉 滑走発生時の時系列データ 滑走発生時の時系列データの代表的な例として、午前 6 時台の初列車における減速データを図 2 に示す。

各軸速度はブレーキ初速からおおよそ 100km/h 台までの間で、編成速度に対して乖離した状態が継続する傾向が先頭に近い車両で見受けられた。式(1)で定義される、編成速度に対する乖離割合を表すすべり率(η)は、各軸速度で乖離が発生した後に、一定水準を維持する傾向が見受けられた。先頭から離れた車両である 9 両目でも、程度としては小さいが同様の傾向が見られた。

$$\eta = \frac{v_t - v_w}{v_t} \times 100 \quad (1)$$

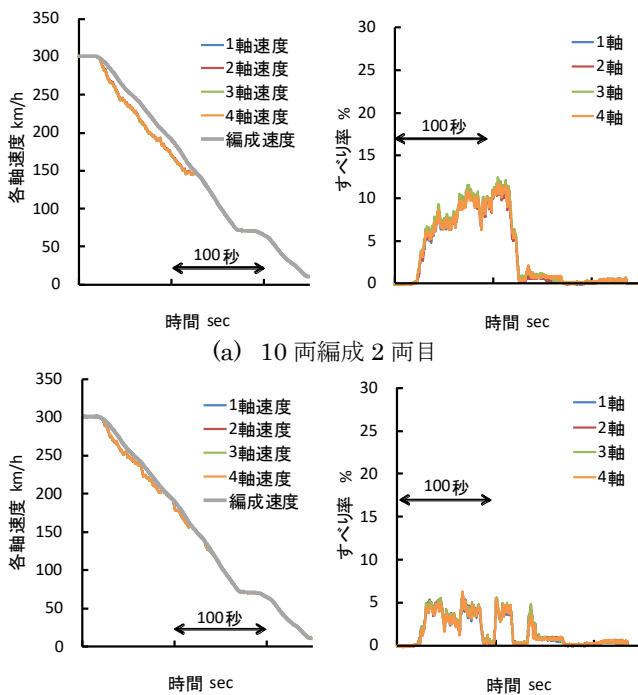


図 2 滑走発生時の時系列データ
Fig.2 Time series data during sliding occurs.

〈2・3〉 滑走発生頻度の分析 滑走発生頻度に差があると考えられた、速度域別、ブレーキノッチ別、時間帯別に傾向分析を行った。なお、滑走発生の定義は、編成速度と各軸速度の差が 5 km/h を超える状態を 2 秒以上継続した場合とした(図 3)。これは、車両の滑走制御機能で設定している滑走検知のしきい値よりも小さい値であり、車両として

は滑走と判定しない微小な滑走も抽出していることになるものである。

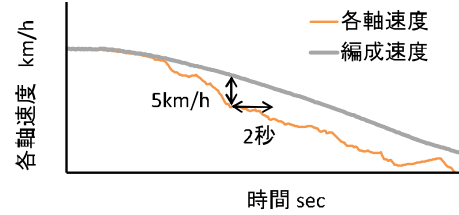
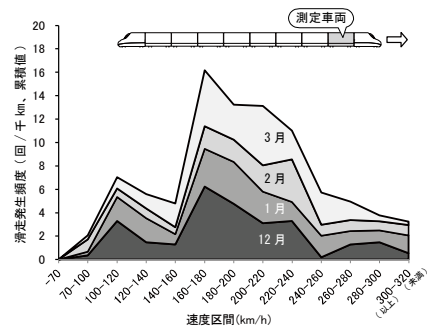
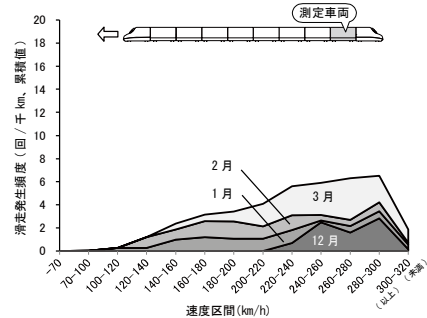


図 3 滑走の定義
Fig.3 Definition of wheel sliding.

(1) 速度域別 上記で定義した滑走を集計し、走行距離 1000 km あたりの発生回数を「滑走発生頻度」として速度帯ごとの度数分布を求めた(図 4)。進行方向の前方側に位置する車両では幅広い速度域で滑走が発生し、特に 200 km/h 前後の速度域での発生頻度が高かった。進行方向の後方側に位置する車両では、前方車両で頻度が高かった 200 km/h 前後での値は低い、300 km/h 前後の速度域で滑走を記録しており、粘着が低いとされる高速域では後方車両でも滑走が発生しやすいことを示した。



(a) 進行方向前方側位置のとき



(b) 進行方向後方側位置のとき

図 4 速度域別の滑走発生頻度(走行距離 1000km あたりの滑走が発生した回数の月別累積)

Fig.4 Frequency of sliding occurs by running speed range.

(2) ブレーキノッチ別 滑走の開始点で使用されていたブレーキノッチを集計した。その結果、前方車両(2 両目)、後方車両(9 両目)ともに、ブレーキシステムで選択する常用ブレーキ(4N、6N)で滑走が多く発生していることを確認した(図 5)。

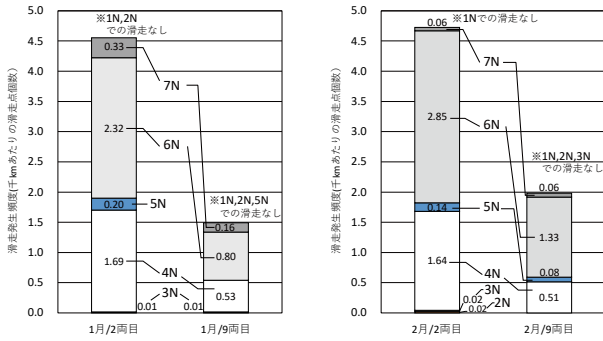


図 5 ブレーキノッチ別の滑走発生頻度 (走行距離 1000km あたりの滑走の回数)

Fig.5 Frequency of sliding occurs by brake notch settings.

(3) 時間帯別 時間帯ごとの滑走発生頻度を図 6 に示す(計測日数は月ごとに異なる)。運用により時間帯ごとの走行速度やブレーキ頻度が異なるものの、早朝時間帯(6~8 時台)、次いで夜間(18 時~23 時台)の滑走回数が多かった。

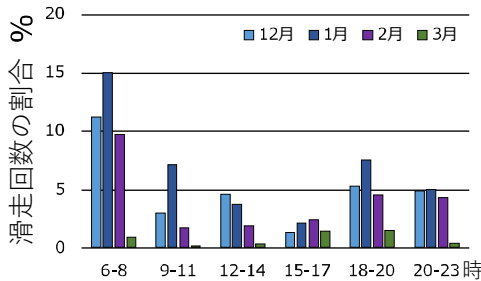


図 6 時間帯別の滑走発生頻度

Fig.6 Frequency of sliding occurs by time zone.

〈2.4〉粘着係数と接線力係数 新幹線のブレーキ力特性は粘着計画式を考慮して設計されているが、粘着計画式は、散水によってウェット状態を模擬した台上試験で取得したデータに基づく近似式であり、冬季の本線走行における粘着状態は粘着計画式とは異なるものである可能性がある。そこで、今回取得したデータをもとに、ブレーキ中の粘着係数および接線力係数の評価を行った。

(1) 粘着係数と接線力係数の定義 ブレーキ時の力の作用(図 7)を考えたとき、車輪・レール間に作用する力を単に接線力と呼ぶものとする。このとき車輪・レール間の接線力係数(μ)を、接線力(F_m)と接触面における垂直荷重(W)から式(2)で表す。

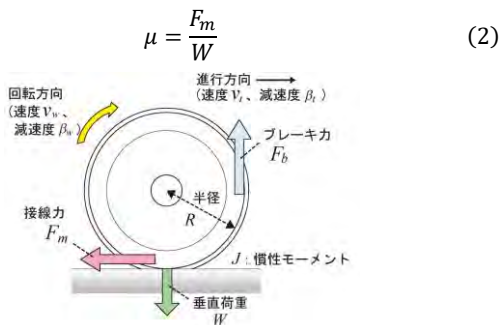


図 7 ブレーキ時の力の作用

Fig.7 Force action during braking.

$$\mu = \frac{F_m}{W} \quad (2)$$

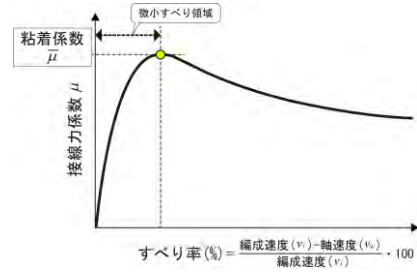


図 8 すべり率と接線力係数、粘着係数の概念

Fig.8 Concept of slip ratio, tangential force coefficient, and adhesion coefficient.

図 8 のように横軸をすべり率、縦軸を接線力係数としたとき、すべり率に対して接線力係数が単調増加する領域(微小すべり領域)の極大値を粘着係数($\bar{\mu}$)と呼ぶ。すべりが大きい領域(巨視すべり領域)の接線力係数是不安定とされるが、ブレーキ力(F_b)とすべり減速度(車輪の回転運動の減速度(β_w)と車両の並進運動の減速度(β_t)との差¹⁾から、接線力を式(3)で表す¹⁾。式中の J は回転運動における慣性モーメント、 R は車輪半径である。

$$F_m = F_b - \frac{J}{R^2} \cdot (\beta_w - \beta_t) \quad (3)$$

式(2)、式(3)から接線力係数は次式で表せる。

$$\mu = \frac{F_m}{W} = \frac{F_b - \frac{J}{R^2} \cdot (\beta_w - \beta_t)}{W} \quad (4)$$

表 1 に示した BCU の動作記録から接線力係数を求めるには、 β_w は各軸速度から、 β_t は編成速度からそれぞれ算出できる。また、ブレーキ力として、空制減算指令(F_r)および空制ブレーキ力(F_p)を利用できる。さらに、必要ブレーキ力(F_d)と制御減速度(β_c)から運動方程式の関係によって BCU が認識している車両重量(W_c 、BCU が必要ブレーキ力算出の根拠としている車両重量)が次式で求まる。

$$W_c = \frac{F_d}{\beta_c} \quad (5)$$

ここで、 F_r 、 F_p 、 F_d 、 W_c は BCU で扱う 1 両(4 軸)分の合計値なので、各軸に均等に作用するとみなす。さらに、式(4)の分子第 2 項が意味する車輪の回転運動に起因する抵抗成分(慣性重量などと呼ばれる)に、鉄道車両の運転性能計算における“慣性係数”の考え方²⁾を適用して、 J/R^2 を車両重量に対する比(κ)で与える。

以上を式(4)に適用して、本報で BCU の動作記録から求める各軸の推定接線力係数(μ_e)を次式とする。

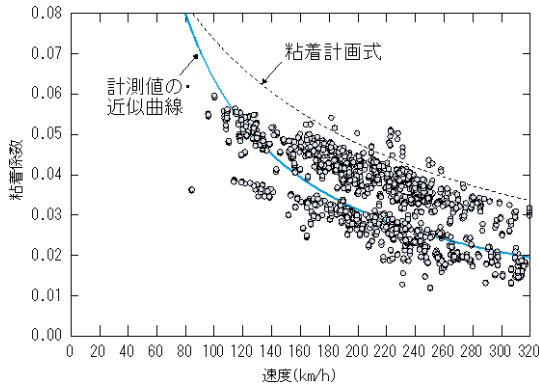
$$\mu_e = \frac{\frac{F_r + F_p}{4} - \frac{W_c \cdot \kappa \cdot (\beta_w - \beta_c)}{4}}{\frac{W_c}{4}} \quad (6)$$

以下に示す結果では、慣性係数 κ を新幹線電車の例より 5%²⁾として計算した。

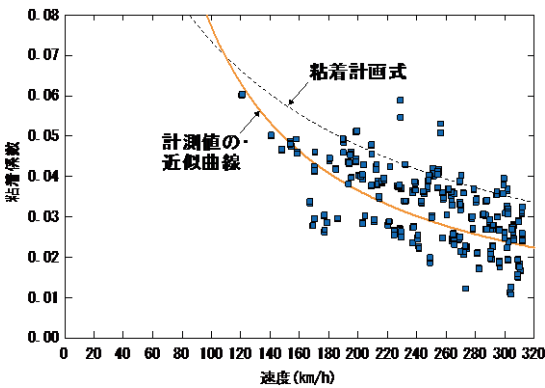
(2) 粘着係数の分布 編成速度に対する粘着係数の分

布として、10 両編成の 2 号車にあたる車両の BCU の動作記録から算出した粘着係数を図 9 に示す。当該の車両は、編成の組成と進行方向によって、もっとも前方では進行方向の 5~8 軸目、もっとも後方では 61~64 軸目(最大の 17 両編成で進行方向から 16 両目)に位置する場合がある。

図 9 に示すように、前方車両に位置する方が滑走回数も多く、進行方向の最後尾に近い 61~64 軸目でも前方車両より少ないものの滑走が発生していた。いずれも、粘着計画式を下回る領域に多く分布していた。



(a) 進行方向 5~8 軸目(2 両目)



(b) 進行方向 61~64 軸目(16 両目)

図 9 粘着係数分布

Fig.9 Adhesion coefficient distribution.

(3) 接線力係数の分布 粘着係数は滑走の起点ともみなす極大値として、図 9 のように速度に対して 1 点に定まる。一方、図 8 のようなすべり率に対する接線力係数の分布は、減速しながら推移する点の集合である。そこで、BCU の動作記録(10 両編成の 3 編成分のデータのうち、1 月分)から特定の速度範囲を抽出し、その区間における接線力係数をすべり率に対する 2 次元頻度分布として求めた(図 10)。前方車両ほどすべり率が大きい滑走が発生していること、その一方で、すべり率 10%程度の範囲までは、滑走していても粘着計画式に基づく値程度の接線力係数が得られる頻度が高いことがわかった。

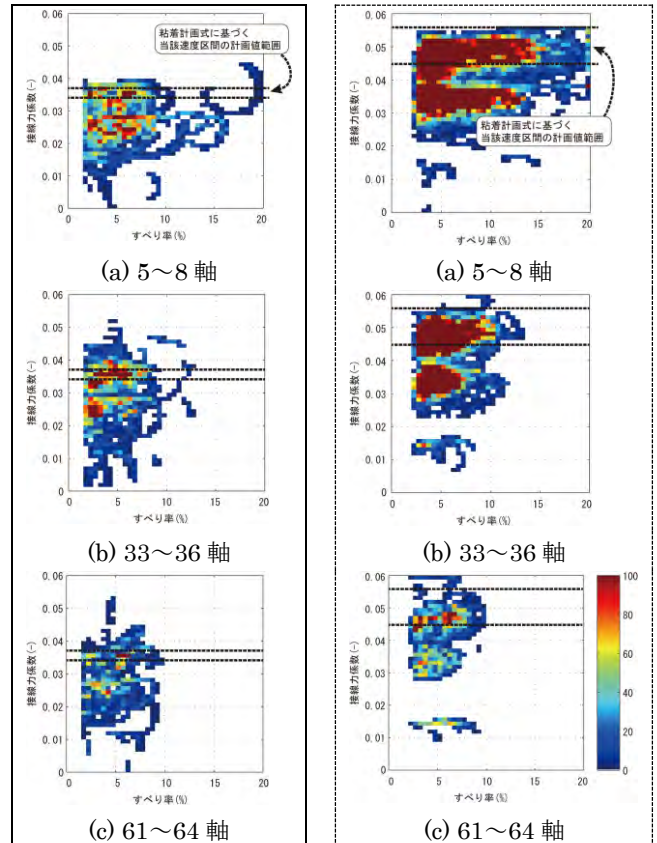


図 10 接線力係数の頻度分布

(実線枠: 320~280km/h、点線枠: 220~160km/h)

Fig.10 Distribution of tangential force coefficients.

3. まとめ

新幹線車両の BCU に動作記録装置を設置し、営業運用中における軸速度等のブレーキ関係データを取得して、自然環境下での低粘着状態における滑走挙動、滑走頻度、滑走中の巨視すべり領域における接線力係数の頻度分布等を求めた。

本研究では、人為的な散水による滑走ではなく、営業走行で想定される、自然環境下における低粘着状態での滑走に関する把握を行うことができた。一方で、粘着現象は一般的に変動しやすく再現性も低いことから、粘着状態を表す指標を予め統計的に分析しておくことが、粘着の評価に対して有効と考えられる。そのためには日常的なブレーキの動作状況を長期に集録できる環境の構築が望ましい。

文 献

- (1) 大山忠夫、内田清五：車輪/レール接触における巨視滑り領域までの粘着力の挙動（静・動荷重条件における水潤滑状態での実験結果）、日本機械学会論文集（C 編）、Vol.60、No.574、1994.6
- (2) 運転理論研究会：運転理論（再改訂版）、一般社団法人日本鉄道運転協会、2010