

# 一本リンク牽引力を用いたブレーキ性能評価手法

嵯峨 信一\* 宮部 実\*\* 川村 淳也\*\*\*  
杉田 裕伸\*\*\* 竹間 克俊\*\*

An Evaluation Method of the Braking Performance Using Bogie Traction Force

Shin-ichi SAGA Minoru MIYABE Jyunya KAWAMURA  
Hironobu SUGITA Katsutoshi CHIKUMA

The adhesion coefficient between rails and wheels of the railway vehicle is reduced under rainy weather, so it is difficult to obtain high braking performance. In general, the braking performance of the train is evaluated to be based on the stopping distances and the deceleration which can be obtained by calculating the rotational velocity of the wheel. However, braking performance degradation is caused by the complex combination of the bad condition of the adhesion coefficient between rails and wheels, the friction coefficient of blending materials and the wheel slip control. In order to investigate the factor of the degradation of the braking performance in the high speed train or the shortening of the braking distance, it is desired to measure the variation of the braking force at each bogie. We have developed an evaluation method of measuring the braking force of the actual vehicle with the force acting on the single link. In this paper, the results of a running test by means of this evaluation method of the braking performance using bogie traction force are reported.

キーワード：牽引力，一本リンク，ブレーキ性能，粘着，滑走，すべり率

## 1. はじめに

一般に、鉄道車両のブレーキ性能は、車輪の回転速度を演算して得られる停止距離や減速度を基に評価される。しかし、雨天時のようなレール湿潤条件下においてブレーキ性能が低下する要因には、レール/車輪間の粘着係数の低下に加え、ブレーキ材の摩擦係数や滑走再粘着制御などが複雑に影響し、速度波形のみからその要因を特定することは困難な場合がある。

こうした場合に、軸毎または台車毎に得られているブレーキ力、すなわち、レール/車輪間の接線力を走行中に直接測ることが出来れば、レール/車輪間の粘着係数やその他の影響度合を定量的に把握することが出来る。

しかしながら、従来用いられてきた軸毎のブレーキ力測定手法は、仮設と較正に相当な手間と時間を要するため、実際の編成車両への適用範囲が限定されていた。一方で、今後のさらなる速度向上や地震時を想定したブレーキ力の向上、あるいは車両の短編成化などを鑑みると、より正確なブレーキ性能の評価手法が求められている。そこで、台車牽引装置のひとつである一本リンクに作用する力を用いて、台車毎のブレーキ力を精度良く測

定する手法を考案し、在来線車両及び新幹線車両を用いた走行試験により本評価手法の有効性を確認した。

## 2. 従来のブレーキ性能評価手法

### 2.1 ブレーキ力の測定方法

従来から実施されている手法は、あらかじめ定置にて基礎ブレーキ装置の腕部や制輪子吊りに歪ゲージを貼り付けておき（図1）、制輪子（ブレーキ有効半径位置）に垂直方向の静荷重を負荷した際に発生する歪量との関係を求めておく。次に走行試験においてブレーキ中の歪量を測定し、定置の結果からブレーキ力（摩擦力）を求めるものである。さらに、従来の粘着係数測定は、編成惰行中に測定対象軸のみにブレーキを掛けて強制的に滑走を発生させ、滑り始めのブレーキ力をこの手法を用いて求めている。この手法の長所は、1輪もしくは1軸でのブレーキ力が求まることである。

一方で、事前に基礎ブレーキ装置を台車から外して較正する必要があること、歪ゲージ施工量が多く、試験期間内での工程管理が難しいこと、空気ブレーキ時の測定に限られること、走行振動や押付力成分が外乱として不定に含まれること、さらに編成ブレーキや滑走再粘着制御を伴う連続的現象を扱えないことなどの短所がある。

これらの観点から、実車両の粘着特性に関する研究事

\* 車両制御技術研究部 ブレーキ制御研究室

\*\* 西日本旅客鉄道株式会社（車両部）

\*\*\* 西日本旅客鉄道株式会社（技術開発部）

特集：車両技術

例<sup>1)</sup>は少なく、編成内の特性については不明な点が多い。

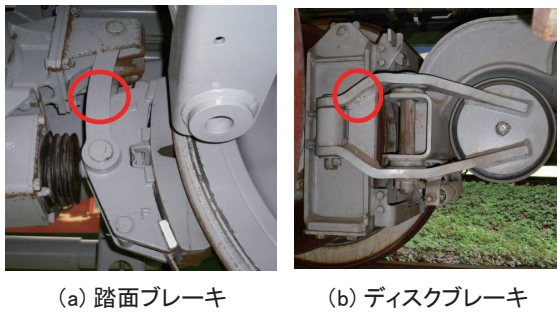


図1 歪ゲージの施工箇所例

2.2 粘着係数の測定例

レール/車輪間の粘着係数 $\mu$ は、式(1)に示すように車輪が滑走した際の最大接線力 $F_{max}$ を静止輪重 $W$ で除して得られる。ブレーキ力が最大接線力以下の場合、粘着状態にあるが、上回ると滑走が発生する。一方、力行時の牽引力が上回ると空転が発生する。すなわち、粘着係数はすべり易さの目安であり、計画式が存在する。

湿潤条件の計画粘着係数 $\mu_w$ は、速度 $V$  (km/h)として式(2)で表せ、乾燥条件はこの倍の値とされる<sup>2)</sup>。この時に得られる減速度 $\beta$  (km/h/s)は、重力加速度 $g$ と粘着係数 $\mu$ を用いて式(3)により求められる。なお、省令で定める新幹線の減速度は非常ブレーキの値を表し、雨天時を含め安定的に得られる値として規定されたものである。

$$\mu = F_{max} / W \quad (1)$$

$$\mu_w = 13.6 / (V + 85) \quad (2)$$

$$\beta = 3.6g\mu \quad (3)$$

ここで、従来のブレーキ力測定方法により得られた200系新幹線電車のレール湿潤条件における粘着係数の結果<sup>3)</sup>を図2に示す。測定値は、乾燥と湿潤の計画粘着係数の中間に分布し、先頭車は中間3両目よりも粘着係数が低下している。このことから、先頭車ほどレール面上の水分による影響を受けやすいことが推測される。

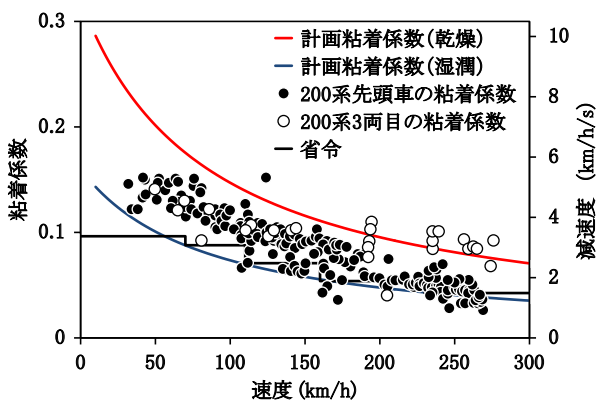


図2 レール湿潤条件の粘着係数

3. 新たなブレーキ性能評価手法

3.1 一本リンク牽引力

近年の鉄道車両は軽量化により、空気バネ式ボルスタレス台車が主流である。これは、車体と台車枠の間を許容変位の大きな空気バネで直結し、駆動力及び制動力を牽引装置で伝達する方式で、そのひとつに一本リンク方式がある。一本リンクは単純形状であり、加減速時の力の計測が比較的容易になる利点がある。

そこで、従来手法による短所の解決策として、一本リンクに作用する牽引力によって生じる歪量からブレーキ力を測定する新たな手法を考案した(図3)。本手法は在姿状態での仮設が容易で、編成ブレーキ中の各台車に働くブレーキ力について、電気ブレーキ、空気ブレーキともに精度の高い測定が可能となる特長を持つ。

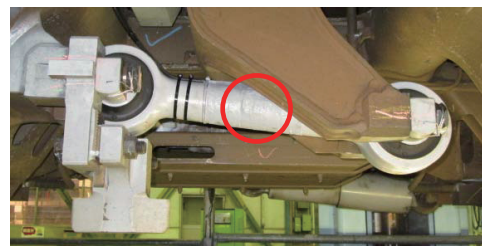


図3 歪ゲージの施工箇所(一本リンク)

一本リンクの幹部に作用する引張・圧縮荷重の歪測定には、4アクティブゲージ法(直交配置法)を適用した。これは1ゲージ法に比べ、曲げ成分の消去、歪の感度向上、温度補償機能などの利点を得られる。このため、ダンパの減衰力測定、モノリンクの操舵力測定などに用いられ、他産業でも実績のある一般的な計測手法である。

多くの車両で使用されている典型的な一本リンク形状(外径70mm、内径40mm)における軸方向荷重 $P$  (kN)の理論値は歪量 $s$  ( $\mu\epsilon$ )を用いて式(4)で求められる。

$$P = 0.205s \quad (4)$$

単体荷重試験を行った図4の結果から、引張及び圧縮ともに実測値は理論値と良く一致することが認められる。

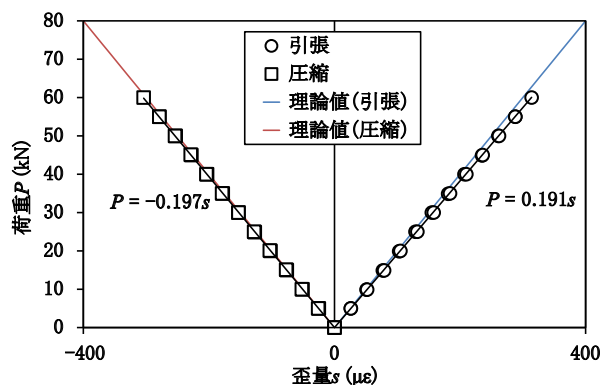


図4 一本リンクの単体荷重試験結果

### 3.2 回生ブレーキ力を用いた荷重較正

本手法を用いて、初速度 170km/h から常用最大 B7 ブレーキを掛けた際における新幹線電動車の実測例を図 5 に示す。ブレーキ制御装置や主変換装置から得られるブレーキ情報は、ノッチ、速度、BC 圧、回生ブレーキパターン電圧、回生フィードバック電圧、モータ電流、空制減算指令電圧などがある。このうち、回生フィードバック電圧と歪量は図 5 に示すように同じ傾向を示し、高い相関性がある。従って、歪量は回生フィードバック電圧から換算可能なブレーキ力（以下、電制力）で較正するのが妥当である。

較正係数の結果を図 6 に示す。進行方向に前位の No.2 台車には圧縮荷重が作用して負値、後位の No.1 台車には引張荷重が作用して正值になる。電制力に対して実際に得られる歪量は一本リンク単体での理論値よりも低く、その較正係数は理論値の 0.205 に対して約 0.3 であった。

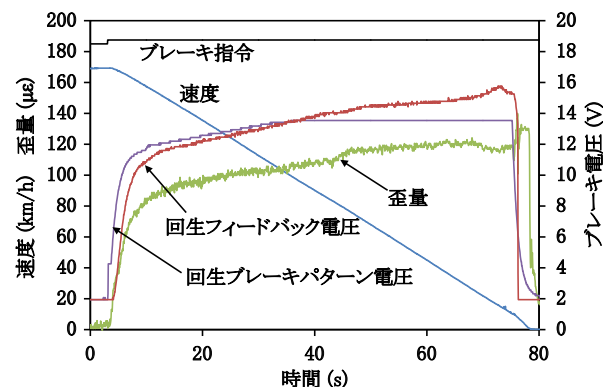


図 5 ブレーキ情報の実測例

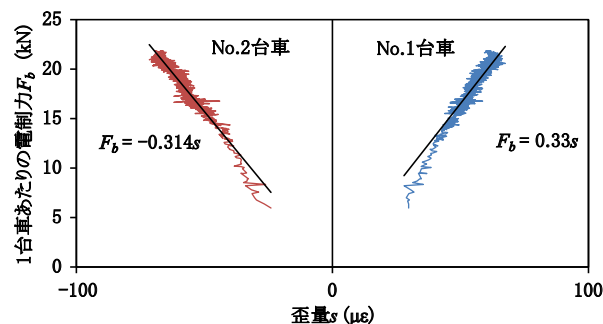


図 6 較正係数の算出例

この要因は、図 7 に示すような連結器、各ダンパ類、空気バネ等の前後支持剛性が影響していると考えられる。較正係数は他の車両でも 0.25 ~ 0.35 の値となることから、ブレーキ力の約 20 ~ 40% は一本リンク以外の支持系が負担していることになる。これは、前後支持剛性の異なる動台車と従台車とで較正係数が異なることとも符合する。

得られた較正係数を用いて歪量からブレーキ力を換算し、電制力と比較した時系列データを図 8 に示す。両者は精度良く一致しており、本手法の妥当性が認められる。

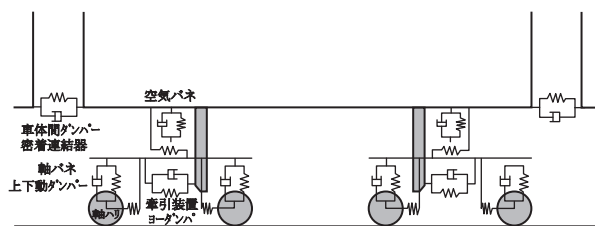


図 7 台車と車体のバネ系

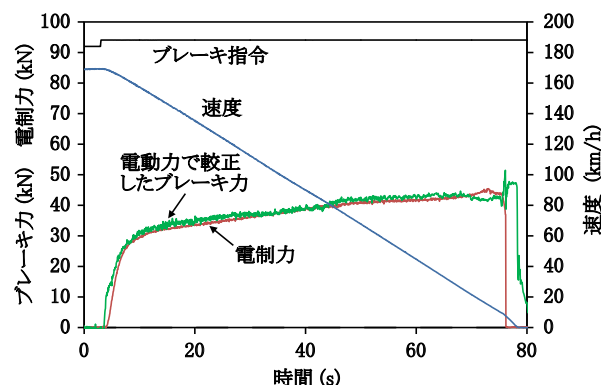


図 8 ブレーキ力の較正例

### 3.3 床上前後加速度を用いた荷重較正

次に、従台車（付随車）の場合について述べる。一般的に、従台車には空気ブレーキのみが作用し、摩擦力は空制減算指令で定める BC 圧に対して変動するため、電制力との比例関係を利用した動台車の手法は適用出来ない。そこで、従台車の較正は、一本リンクに発生する歪量と床上前後加速度が比例関係であることを利用する（図 9）。ただし、較正の対象とするデータはブレーキ負担率が自車 100% の設定時に限ること、較正の精度は動台車の手法に比べて劣る場合があるなどの制約がある。

以下に、具体的な較正方法について述べる。いま、各台車の較正係数がともに  $a$ 、No.1 台車の歪量を  $s_1$  ( $\mu\epsilon$ )、No.2 台車の歪量を  $s_2$  ( $\mu\epsilon$ )、床上前後加速度を  $\beta$  (km/h/s)、車両質量を  $M$  (ton)、慣性係数を  $k$  (電動車：1.1、付随車：1.05) とすると、較正係数  $a$  は式 (5) で与えられる。これを各ノッチ条件におけるブレーキの開始から停止までをサンプリング毎に算出し、係数  $a$  の値が安定する時刻範囲で平均化して求める。

$$a = Mk(\beta/3.6)/(|s_1| + |s_2|) \quad (5)$$

較正結果を図 10 に示す。電制力で較正した結果と床上前後加速度で較正した結果は良い一致を示している。また、この方法を用いれば、空気ブレーキ時における制輪子とライニングの摩擦係数（台車平均）の算出にも活用出来る。

以上をまとめ、適切な較正方法を表 1 に示す。なお、適用にあたってはブレーキ制御方式、各ブレーキ情報などの特性を把握した上で選定するのが望ましい。

特集：車両技術

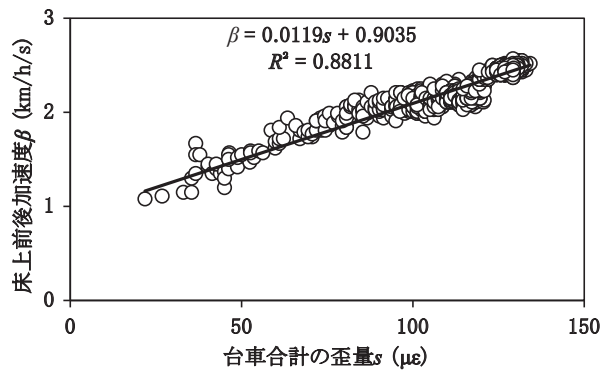


図9 歪量と床上前後加速度の関係

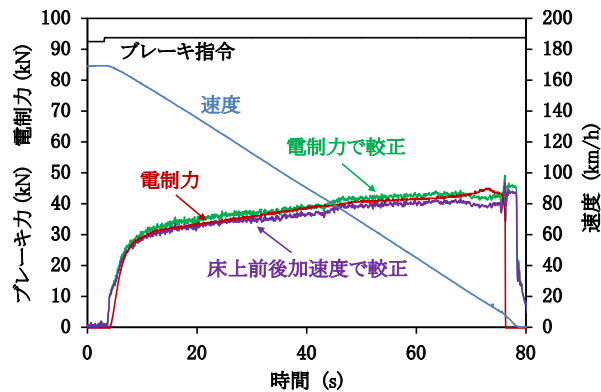


図10 床上前後加速度を用いた較正例

表1 適切な較正方法 (測定精度○ > △ > ×)

車両	台車	BP	FB	PF	MC	FG
在来線	動	×	○	△	○	○
	従	—	—	△	—	○
新幹線	動	○	○	△	○	○
	従	—	—	△	—	○

※ BP：回生ブレーキパターン電圧

FB：回生フィードバック電圧

PF：空制減算指令電圧，MC：モータ電流

FG：床上前後加速度

4. ブレーキ性能の評価例

4.1 在来線車両

図11に示す3両編成(1M2T)の在来線車両を供試編成とした走行試験において、本評価手法を適用した。

測定項目は、ノッチ、軸速度、BC圧、回生ブレーキパターン電圧、回生フィードバック電圧、空制減算指令電圧、一本リンク歪、床上前後加速度、滑走防止弁信号である。なお、ブレーキ制御はT車優先おくれ込め制御方式、滑走再粘着制御は各軸制御方式である。

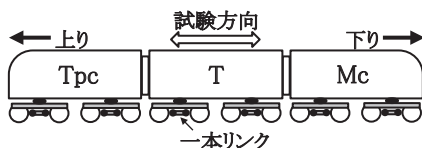


図11 供試編成(1M2T)

4.1.1 レール乾燥条件におけるブレーキ性能

電制常用3ノッチ(B3)の測定結果を図12に示す。B3は回生有効の場合にMc車で編成のブレーキ力を負担する設定である。各号車はブレーキ指令により空気ブレーキを立ち上げるが、Mc車の電制力の立ち上がりを受けて、T車及びTpc車はブレーキ力を抑えている。この際、編成合計のブレーキ力は必要ブレーキ力(100%)を満足しており、良好なおくれ込め制御が確認出来る。その後、Mc車は速度20km/hから回生ブレーキ力を絞り込むのに応じて、T車及びTpc車の空気ブレーキが補足し、ブレーキ力が立ち上がっている。

次に、空気ブレーキ時における制輪子の摩擦係数を算出した例を挙げる。T車及びTpc車は軸ディスクと踏面ブレーキの分担方式を採用しているため、各々の摩擦特性を分離出来ないが、踏面ブレーキのみ搭載しているMc車では台車毎の算出が可能である(図13)。得られた摩擦係数の傾向から、摩擦材のフェード現象等がブレーキ力の低下に与える影響を評価することが出来る。

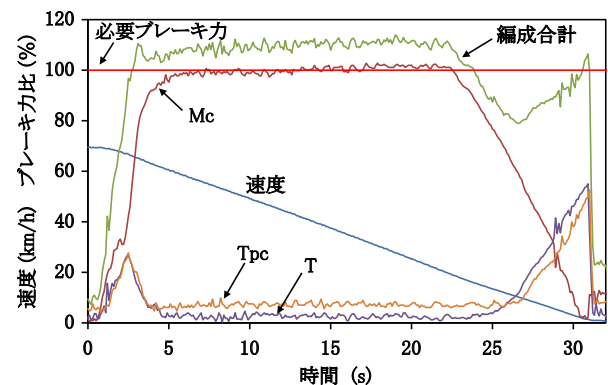


図12 ブレーキ力の測定結果(電制B3)

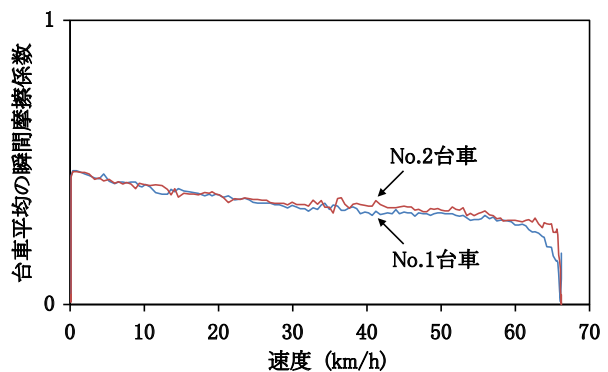


図13 台車平均の瞬間摩擦係数(Mc車, 空制B7)

4.1.2 レール湿潤条件におけるブレーキ性能

雨天時にレール/車輪間の粘着係数が低下してMc車が滑走した電制常用3ノッチ(B3)の測定結果を図14に示す。Mc車は滑走を検知して電制力を絞り込むと同時に、空制減算指令をT車及びTpc車のブレーキ制御装置へ送る。これを受けてT車及びTpc車は直ちに空気ブレーキを立ち上げてMc車のブレーキ力不足分を補

う制御を行っている。編成のブレーキ力は、Mc車の滑走発生とその制御により低下し、必要ブレーキ力に対して増減を繰り返すが、ブレーキ距離の延伸率は約10%に抑えられており、編成としてのブレーキ性能に問題はない。

次に、従台車の2軸が同時に滑走した事例について述べる(図15)。各軸のBC圧は滑走再粘着制御によりユルメ、保ちの各動作を行い、再粘着を検知してから速やかに所定のBC圧まで込めているのが確認出来る。ここで、滑走の収束から再粘着に至る際のブレーキ力に着目する。両軸が滑走中で、かつBC圧が所定の値に達していないにも関わらずブレーキ力が急増して極大値が存在している。大山ら<sup>4)</sup>によると、この現象は巨視すべり領域における粘着力の増大であることが報告されている。

巨視すべり領域における最大粘着力 $F_m$  (N)は、車輪踏面上の接線力を $F_b$  (N)、車輪の慣性モーメントを $I$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )、車輪径を $R_w$  (m)、編成の減速度を $\beta$  (km/h/s)、車輪の減速度を $\beta_w$  (km/h/s)とし、式(6)で与えられる。

$$F_m = F_b - \left\{ \left( I / R_w^2 \right) (-\beta - \beta_w) \right\} \quad (6)$$

図から、推定した最大粘着力とブレーキ力は同様の傾向を示し、滑走中におけるブレーキ力の詳細な挙動も把握出来ることを確認した。ただし、増大したブレーキ力の値には、滑走時の台車前後動による荷重分担の変化が影響していると考えられ、今後詳細に調べる必要がある。

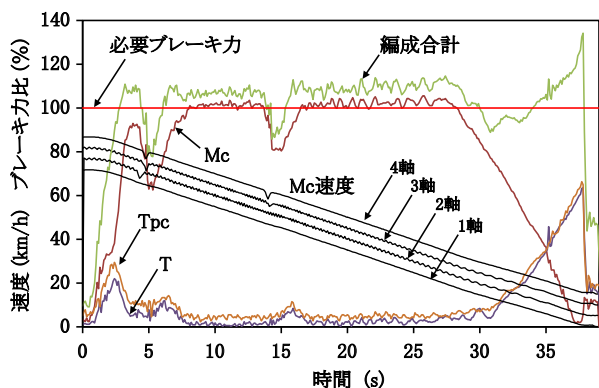


図14 ブレーキ力の測定結果(電制B3)

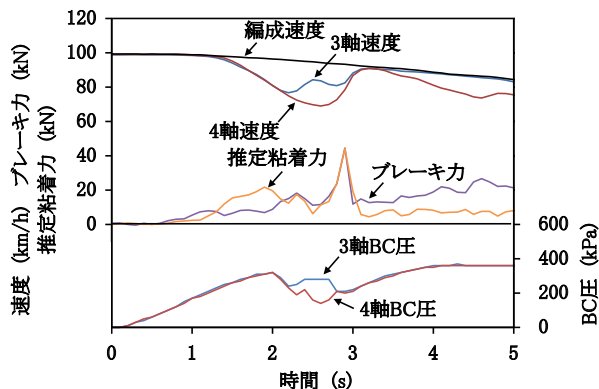


図15 滑走中における粘着力の推定

#### 4.1.3 粘着係数と接線力係数

前項と異なる編成(1M2T)について、Mc車の先頭軸及び第3軸に散水(毎分5L/輪)を行い、編成ブレーキを掛けて人為的に大きな滑走を生じさせた際の事例を挙げる。図16に示す粘着係数は、台車の片軸が滑り始める瞬間までブレーキ力は均等分担されているものと仮定して求めたもので、湿潤条件の粘着計画式に沿った測定結果が得られている。また、図17は、滑走中におけるすべり率を台車平均し、接線力係数との関係を求めたもので、すべり率の増大に従い接線力係数は低下した。特に、最大で30%のすべり率に達したNo.2台車では、その傾向が顕著であるなど、過去の諸研究で得られた知見と一致する結果であり、本手法の有効性の高さが示された。

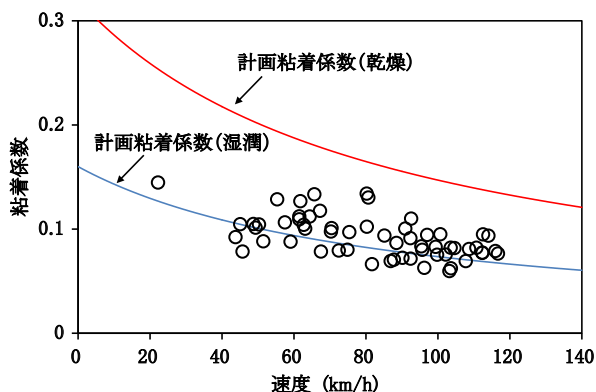


図16 粘着係数の測定結果

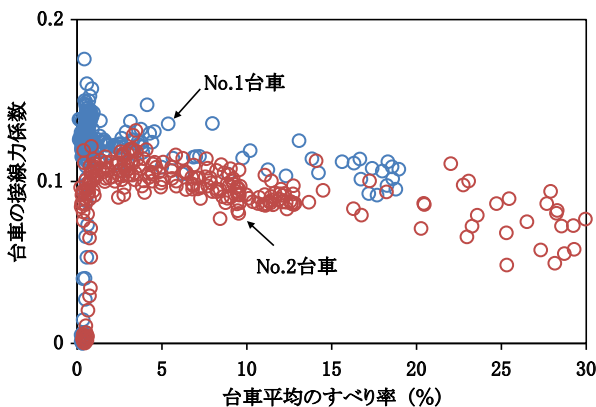


図17 すべり率と接線力の測定結果

#### 4.2 新幹線車両

8両編成(8M)の新幹線車両を供試編成とした走行試験において、本評価手法を適用した(図18)。測定対象は、従来から滑走回数が多いとされる先頭1号車から4号車とした。測定項目は、ノッチ、軸速度、BC圧、回生ブレーキパターン電圧、回生フィードバック電圧、一本リンク歪、床上前後加速度、滑走防止弁信号である。なお、滑走再粘着制御は先頭車が各軸制御方式、中間車は台車制御方式である。

ブレーキ条件は、初速度300km/hから120km/hまでの電制非常ブレーキ(EB)とした。非常ブレーキでは、

特集：車両技術

先頭軸に搭載しているセラミック噴射装置から増粘着用のアルミナ粒子が1分間噴射される仕組みとなっている。先頭から2軸目及び6軸目に散水ノズルを取り付け、1輪あたり毎分5.5Lの散水を行った。

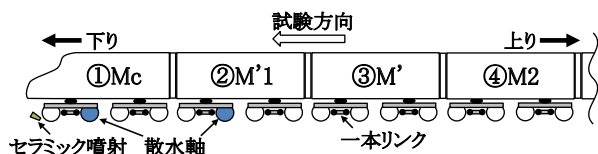


図18 供試編成(8M)

ブレーキ性能の評価にあたっては、各時刻のブレーキ力から各号車平均の接線力係数を求めることにより、粘着係数の計画値と比較した。

乾燥にセラミック噴射有の現行条件では、いずれの号車も非常ブレーキ(EB)に必要な粘着係数を満足している(図19)。湿潤にセラミック噴射無の条件では、1号車及び2号車に連続滑走が生じて湿潤の計画粘着係数付近まで低下することが示された(図20)。なお、こうした傾向にはレール/車輪間の低粘着状態に加えて滑走再粘着制御も影響しているが、編成としてのブレーキ距離の延伸率は約2%に抑えられ、ブレーキ性能に問題はない。

湿潤にセラミック噴射有の条件では、接線力係数が回復し、滑走の発生が抑制されていることが認められる(図21)。なお、2号車の接線力係数が依然として低いのは、散水位置の関係から2号車の車輪へ回り込む水分量が最も多い影響と考えられる。

5. おわりに

実車両を用いた走行試験により、一本リンク牽引力を用いたブレーキ性能評価手法の有効性を確認した。本手法は、測定に関わる準備作業量を軽減しながら、電制あるいは空制を問わず、高い精度でブレーキ力の測定及び評価が可能である。

これにより、速度やレール環境条件、制御特性などの影響を受けて複雑な現象となる粘着ブレーキ性能について、従来求められていた各軸の粘着係数測定作業を行わずに、現象の把握や性能評価、さらにはブレーキ負担率の適正化が図れると考えられる。

今後は、降雨や降積雪時におけるブレーキ力のデータを蓄積してより高精度化を図る。

謝辞

一本リンク製作ならびに単体較正試験等でご協力頂いた新日鐵住金株式会社の関係者各位に感謝申し上げます。

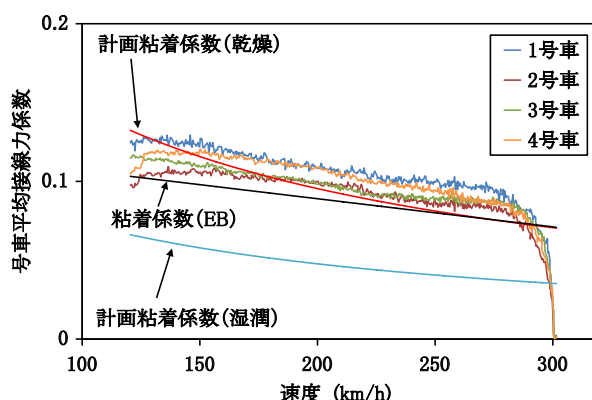


図19 号車平均接線力係数の測定結果(乾燥, セラ有)

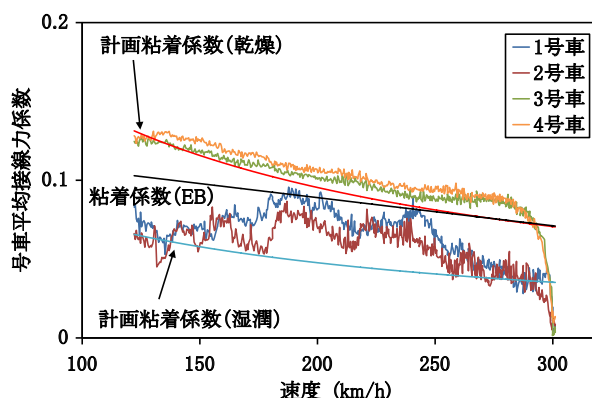


図20 号車平均接線力係数の測定結果(湿潤, セラ無)

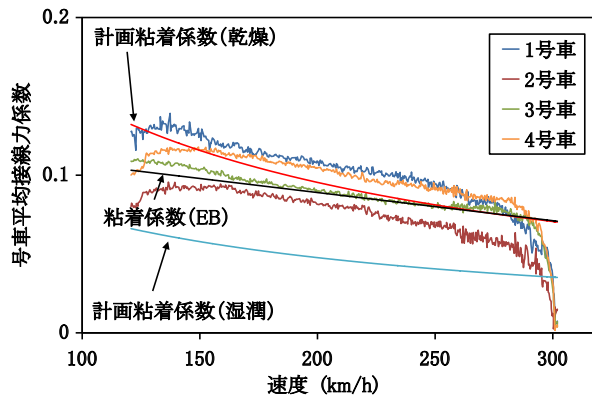


図21 号車平均接線力係数の測定結果(湿潤, セラ有)

文献

- 1) 新井浩, 菅野悟, 柳瀬直仁: 新幹線高速化のブレーキシステムについて, JR EAST Technical Review, pp.11-14, No.22, 2008
- 2) 鉄道技術研究所: 東海道新幹線に関する研究, 1960
- 3) 内田清五, 小原孝則: 粘着力有効利用による新幹線高速化のためのブレーキ制御, 鉄道総研報告, pp.41-48, Vol.7, No.3, 1993
- 4) 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, 日本機械学会論文集(C編), pp.2396-2401, Vol.60, No.574, 1994