

営業車両のブレーキ情報を用いた 編成粘着特性の把握手法

嗟峨 信一* 津留崎 淳*

The Analysis of the Adhesion Characteristics on Train Set
by Monitoring Data of the Service Train

Shin-ichi SAGA Atsushi TSURUSAKI

On recent commuter trains, on-board vehicle monitoring device performs the state monitoring of regenerative factor for energy-saving purpose. Such monitored data includes pertinent information on main power converter and brake control device upon applying powering and braking. Such a huge volume of information is effectively usable. In the conventional measurement technique of adhesion coefficient, it was hard to investigate the adhesion characteristic on the train set because it is capable of measuring at only a specific axle. Therefore, we have investigated the adhesion characteristic by on-board vehicle monitor data. Consequently, we have clarified the adhesion characteristic on the commercial train set. We have introduced these adhesion characteristics herein.

キーワード：粘着係数，滑走，車上モニタシステム，遅れ込め制御，営業車両

1. はじめに

省エネルギーの観点から鉄道と地上を走行するその他の輸送形態を比較してみると、鉄道には鉄のレールと鉄の車輪による転がり抵抗の少なさが長所として挙げられる反面、空転や滑走が発生しやすくなり、車両の加減速性能が制限されるといった短所も併せ持っている。なお、この加減速時に生じるレールと車輪の間の転がり摩擦力を一般的に粘着力と呼び、空転や滑走が発生する瞬間の粘着力を輪重で除した値が粘着係数と定義されている。従来からその特性把握やより高い粘着係数を得るための研究¹⁾がなされてきた。

これまでの、ブレーキ時の粘着係数の測定は、予め歪ゲージを貼り付けておいた基礎ブレーキ装置に静的な荷重を与え、発生する歪量と静的荷重の関係を把握し、次に、走行試験において編成全体（空車）を惰行状態で走行させながら特定の車軸にブレーキを作用させ、滑走した瞬間のブレーキ力を歪量から算出し、静止輪重で除して求める手法がとられてきた。

この手法は簡易であるが、較正作業が煩雑であることや、編成中の測定軸を増やすことが困難であるために粘着特性の把握が測定軸のみに限られ、編成中の軸位によって異なると言われる粘着係数を把握するにはデータが少ないといった問題があった。また、雨天時の湿潤条件を模擬し、人為的に滑走を発生させるために車輪と

レール間に散水を行っているが、レール上の水の量等、完全に雨天時を再現しているものではなかった。さらに、車両の積空条件や電空協調等、実車とは異なっているため、編成全体における粘着特性の把握には適していなかった。

著者はこれまでに従来手法で得られた粘着係数データを用いて、1ブレーキあたりの滑走発生確率と粘着特性曲線に対する比の関係から、編成各車のブレーキ負担率決定といった車両設計への活用²⁾について試みてきたが、限られた測定軸のみの適用に留まっている。

一方、最近の一部の通勤電車では回生ブレーキの性能について、車上モニタシステム³⁾による“信頼性”と“可動率（アベイラビリティ）”の評価が行われている。このシステムは、営業車両の各種状態量を列車LANと携帯電話を用いて遠隔収集できるものであり、その情報には、時刻や走行キロ程及び駅情報の他に、力行時及びブレーキ時における主回路装置や基礎ブレーキ装置等の状態量が含まれている。

そこで、本研究では、車上モニタシステムから得られる膨大なデータに含まれている滑走情報を用いて、編成粘着特性の把握を試みた。その手法及び得られた粘着係数の解析結果の一例を紹介する。

2. 従来の粘着係数の測定方法

図1に示すように、車輪踏面に制輪子を押し付けた場合あるいはモータによりブレーキを作用させた場合に

* 車両制御技術研究部（ブレーキ制御）

特集：鉄道車両技術

は、ブレーキ力 F_b が車輪に作用する。このとき、レールと車輪の間には接線力 F_t が作用し、これを静止輪重 W で除したものを接線力係数と呼んでいる。車輪の滑走は、ブレーキ力 F_b が接線力 F_t を超えたときに発生し、滑走した瞬間の最大接線力（粘着力）を $F_{t,max}$ とすると粘着係数 μ は式 (1) で表すことができる。

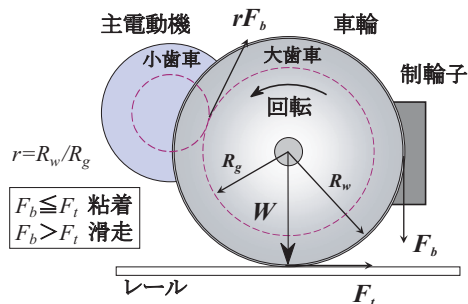


図1 ブレーキ時にレールと車輪の間に働く力

$$\mu = \frac{F_{t,max}}{W} \quad (1)$$

これまで、実車の粘着係数は $F_{t,max}$ と W の実測値から得ていたが、その $F_{t,max}$ の測定にあたっては、主に以下に示す二つの手法が用いられていた。

(1) 基礎ブレーキ装置の歪量測定方法

制輪子の押付装置の筐体に歪ゲージを接着し、制輪子と車輪の摩擦力からブレーキトルクを測定する方法である。同時に車輪速度を監視し、滑走した瞬間のトルクを既測定の前輪重（静止輪重）で除して粘着係数を算出する。測定精度は良くないが簡易な方法であるため、測定が比較的容易である。この方法によって求められた速度-粘着特性曲線が多い。

(2) 主電動機の電流値測定方法

電気ブレーキ時に回転子電流からブレーキトルクを測定する方法である。(1) の手法と同様に、滑走した瞬間のブレーキトルクから粘着係数を求めるものである。電流値はトルクを正確に表すため、微小な滑走時の接線力を精度良く求めることが可能であり、同様の方法で車輪空転時の粘着係数も測定可能である。

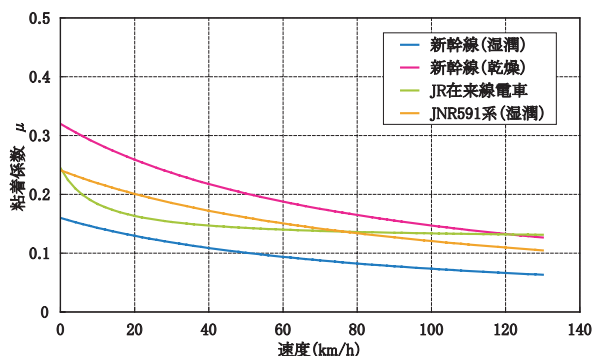


図2 粘着特性曲線の例

上記(1)の方法により算出された粘着係数を基にしてこれまで求められた粘着特性曲線を図2に示す。一般的に、これを用いて車両の引張力や設定減速度が設計されている。特に、滑走を考慮したブレーキ力で設計されている新幹線では、レール湿潤条件における粘着特性曲線で設定減速度を定めているなど、車両諸元と並ぶ重要な設計事項である。

3. 供試列車の諸元

本研究では、既に紹介した車上モニタシステムを搭載している特定の編成（西日本旅客鉄道(株)の223系2000番代）を対象に解析した。その組成（8両編成）を図3に示す。M車とT車によるユニット構成は、1及び2号車、3～5号車、6～8号車の3ユニットである。なお、8号車の第3軸はモータ非装備である。

表1に車両重量の諸元⁴⁾、表2に基礎ブレーキ装置の諸元をそれぞれ示す。各号車は自重が異なるため、空気バネ圧力（AS圧）の設定もそれぞれ異なっている。M車は踏面ブレーキのみであるが、T車は踏面ブレーキと軸ディスクブレーキの併用であり、制輪子の摩擦係数はブレーキ初速度と押付力に応じて変化する特性を持っている。

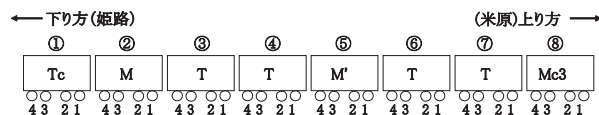


図3 編成の組成

表1 車両重量の諸元

項目	号車				
	1	2	3,4,6,7	5	8
空車重量 (kN)	317.5	377.3	286.2	356.7	387.1
満車重量 (kN)	386.1	453.7	360.6	433.2	457.7
No.1 台車重量 (kN)	54.9	62.7	52.9	64.7	64.7
No.2 台車重量 (kN)	52.9	62.7	52.9	64.7	62.7
空車 AS 圧 (kPa)	200	340	170	220	250
満車 AS 圧 (kPa)	360	390	320	370	400

表2 基礎ブレーキ装置の諸元

項目	号車	踏面ブレーキ		軸ディスクブレーキ 1,3,4,6,7
		ユニット ブレーキ 2,5,8	SJ シリンダ 1,3,4,6,7	
装備数/台車		4 個	4 個	4 個
シリンダ径 (m)		0.180	0.127	0.200
ブレーキ倍率		3.5	1.0	2.4
ブレーキ効率 (%)		89	95	90
摩擦係数		初速度と押付力に応じた特性の近似関数で扱う		

4. 車上モニタシステム

4.1 モニタ情報の内容

車上モニタシステム情報は、ユニット毎で纏められ図4に示すようなデータファイル構成で、1駅間分が1ファイルに保存されている。

データ項目

【共通】

時分秒, 停車駅, 絶対キロ程, 駅間キロ程, 速度等

【主回路及び電制関係 (M車のみ)】

力行ノッチ, 併結情報, 抑速, ブレーキノッチ, 増圧, 直通予備ブレーキ, 耐雪ブレーキ, 架線電圧, モータ電流パターン, モータ電流, MM周波数, 応荷重, モータ電制力, 滑走検知フラグ等

【空制関係及び速度 (M車, T車)】

AS圧, BC圧, CTR圧, BP圧, MR圧, EP弁電流, 滑走検知, 固着検知, 軸速度等

図4 主なモニタ情報

4.2 滑走情報の抽出例

滑走情報は、電気ブレーキ（以後、電制と呼ぶ）動作時及び空気ブレーキ（以後、空制と呼ぶ）動作時における滑走検知信号を抽出することで可能となる。抽出された滑走情報（約3年分）の例について、各軸位の滑走回数を図5、滑走開始速度と滑走回数の関係を図6、各ブレーキノッチと滑走回数の関係を図7にそれぞれ示す。

なお、滑走回数とは滑走検知信号が、非滑走を表す0から滑走を表す1に変化する度に数えるものとする。

滑走回数は、電制と空制を比較すると圧倒的に電制が多く、台車内における先頭軸に多い。これは、営業車両のブレーキがM車電制優先による遅れ込め制御を行って

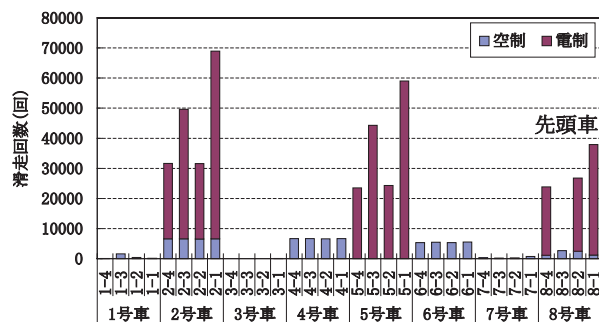


図5 各軸の滑走回数（上り）

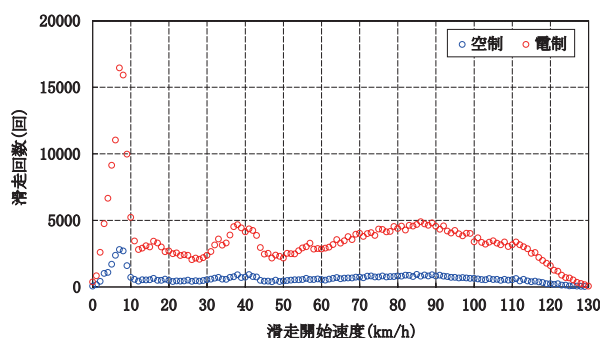


図6 滑走開始速度と滑走回数の関係（上り）

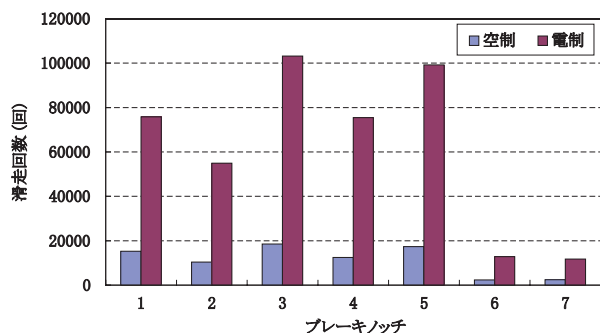


図7 ブレーキノッチと滑走回数の関係（上り）

おり、雨天時の実際の粘着力よりもブレーキ力が過大であることや走行時の雨風が先頭軸に入りやすいことを示している。また、滑走開始速度にはピーク（10, 40, 80km/h）があり、入駅時のブレーキ扱い（5ノッチ以下）や電空切替時に多発する傾向を示している。

5. 粘着係数の算出

5.1 動的輪重

表1の諸元に基づいて各軸重を算出する際には、図8に示すようなAS圧と車体重量の関係を用いた。これにより従来の計算手法（式(1)）では静止輪重を扱っていたが、軸重変動を考慮した動的輪重として扱うことが可能である。ここで、満車重量を m_f 、空車重量を m_0 、No.1台車重量を m_{b1} 、No.2台車重量を m_{b2} 、満車AS圧を AS_f 、空車AS圧を AS_0 として、それぞれ式(2)、式(3)及び式(4)を用いて係数 a 、 b_1 及び b_2 を求めた結果を表3に示す。

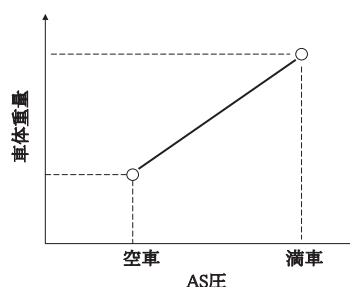


図8 AS圧と車体重量の関係

特集：鉄道車両技術

$$a = \frac{9.8}{4} \cdot \frac{(m_f - m_0)}{(AS_f - AS_0)} \quad (2)$$

$$b_1 = \frac{9.8}{4} \cdot (m_0 + mb_1 - mb_2) \quad (3)$$

$$b_2 = \frac{9.8}{4} \cdot (m_0 - mb_1 + mb_2) \quad (4)$$

これらの係数を用いると、各号車におけるNo.1台車及びNo.2台車の各動的軸重は、それぞれ式(5)、式(6)のように表せる。

表3 動的輪重の各係数

号車 係数	1	2	3,4,6,7	5	8
	Tc	M	T	M'	Mc3
a	0.107	0.127	0.127	0.127	0.117
b_1	79.8	94.3	71.1	89.2	97.1
b_2	79.0	94.3	71.1	89.2	96.4

$$P_1 = a \cdot (AS_1 - AS_0) + b_1 \quad (5)$$

$$P_2 = a \cdot (AS_2 - AS_0) + b_2 \quad (6)$$

5.2 ブレーキ力

供試列車の営業走行時におけるブレーキ制御は、M車電制優先による遅れ込め制御である。M車が負担するブレーキ力はT車負担分を含んだものとなっているため、レール湿潤時には実際の粘着係数が期待粘着係数を下回り、M車の滑走が多発することになる。このとき、編成としてはT車が惰行しながらも特定の軸(M車)のみにブレーキを作用させるため、従来の粘着測定があたかもM車で行われているものと考えられることができる。

まず、粘着係数を得るために各車のブレーキ力を求める必要がある。営業走行時におけるブレーキのほとんどがM車電制であり、T車空制による分担は行われていないが、電空協調制御により、電制が働いている際に空制が補足されること、さらには低速時には空制に切り替わること等を考慮し、各軸位の全ブレーキ力を電制力と空制力の合力として算出した。

M車の電制力はモータ電流値がトルクに比例することから容易に求まるが、空制力は摩擦係数の速度依存性や湿潤条件等により変化するため、次のように求めた。ここで、踏面ブレーキ及び軸ディスクブレーキの台車あたりの空制力は、ブレーキシリンダ径を d 、ブレーキシリンダ数を n 、ブレーキ倍率を B 、ブレーキ効率を η 、摩擦係数を f 、BC圧を P_{BC} 、ブレーキ有効半径を D_d 、車輪径を D_w として、それぞれ式(7)、式(8)で表すことができる。

ただし、各制輪子の摩擦係数は、図9に示すようにブレーキ初速度及び押付力によって変化するため、これら

を踏まえて求めた近似式を用いた。また、車輪径の分布を調べたところ、中央値と平均値がほぼ820mmで一致したため、この値で代表した。ここで、ブレーキ初速度を V 、押付力を F として、近似式はM車制輪子が式(9)、T車制輪子が式(10)、軸ディスク用制輪子が式(11)である。

$$F_b = \frac{\pi d^2}{4} \cdot n \cdot B \cdot \eta \cdot f \cdot P_{BC} \quad (7)$$

$$F_b = \frac{\pi d^2}{4} \cdot n \cdot B \cdot \eta \cdot f \cdot P_{BC} \cdot \frac{D_d}{D_w} \quad (8)$$

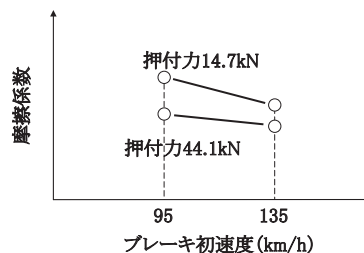


図9 初速度と押付力に対する摩擦係数の関係

$$f_U = -1.0 \times 10^{-3} \times V - 2.4 \times 10^{-3} \times F + 0.445 \quad (9)$$

$$f_S = -2.2 \times 10^{-4} \times V - 1.1 \times 10^{-2} \times F + 0.445 \quad (10)$$

$$f_T = -3.0 \times 10^{-4} \times V + 0.422 \quad (11)$$

5.3 粘着係数

駅間ファイル毎に各式を用いて処理を行い、さらに主回路装置における滑走フラグまたはブレーキ制御装置における滑走検知をトリガー条件として、滑走開始時の滑走軸速度及び粘着係数を軸ごとに算出した。

ある上り線区の1週間(2007年)における各号車先頭軸の粘着係数の例を図10に示す。「上り」の先頭車が8号車となることから、各号車の先頭軸となる第1軸を示した。前述の通り、T車の滑走回数はM車に比べて少ないが、4及び6号車には速度10km/h以下での発生が集中している。これは電空切替時に全ブレーキ力が過大になったためである。

一方、全ての速度域で滑走が多発しているM車では、いずれも同様に右肩下がりの分布形状であるが、先頭軸の8号車第1軸における粘着係数は、低粘着条件であるために比較的低い値となっている。また、粘着係数が0.1未満であるデータも多く含まれている。この要因としては、サンプリング時間が1秒であるために滑走を開始してからある程度の時間が経過してからの現象を記録していることによるものと考えられる。従来の測定手法では緩やかに増大する空制ブレーキを作用させるものであったが、電気ブレーキの応答速度は極めて速いため、こうしたサンプリング時間の影響を強く受けやすいといえる。

次に、滑走中全てのデータを抽出することで、接線力係数とすべり率の関係も調べることができる。滑走回数

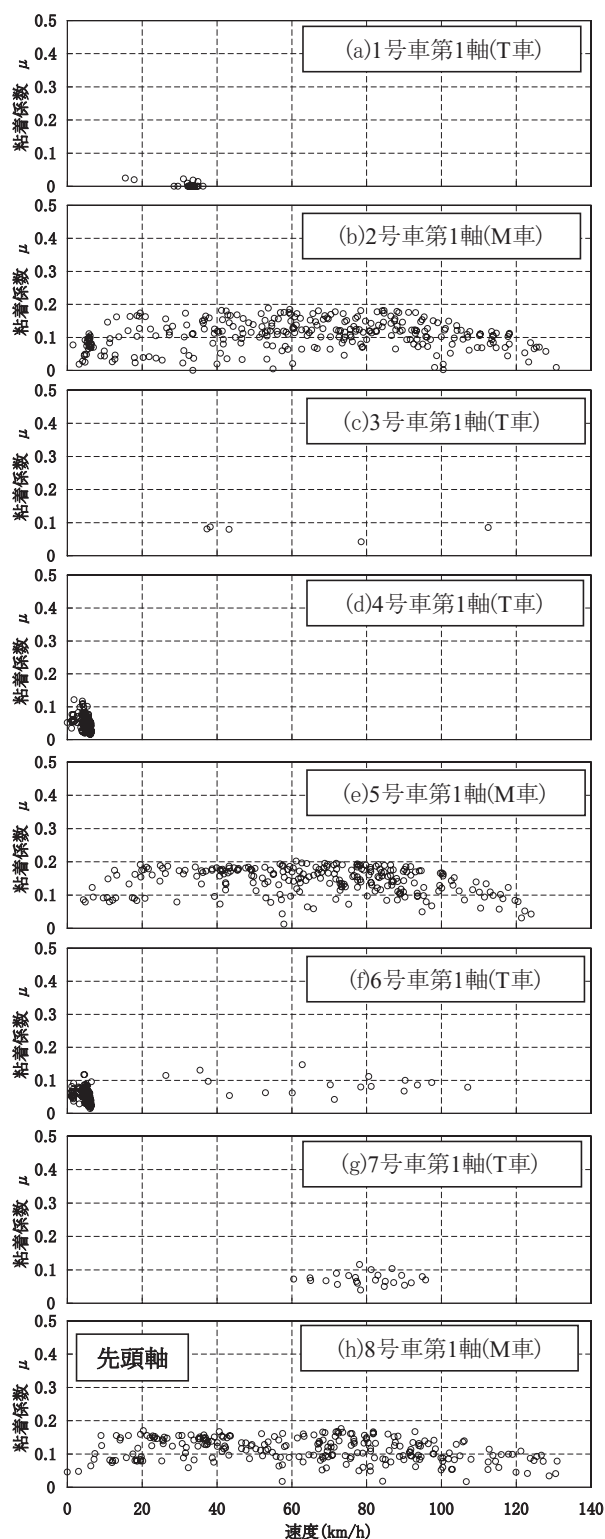


図10 粘着係数の例(上り)

の多いM車について、1週間分の結果(上り)を図11に示す。最大すべり率の範囲は、5号車の約7.5%に比べ、2号車及び8号車が約30~35%と大きい分布を示している。特に、先頭軸となる8号車第1軸では低粘着条件で

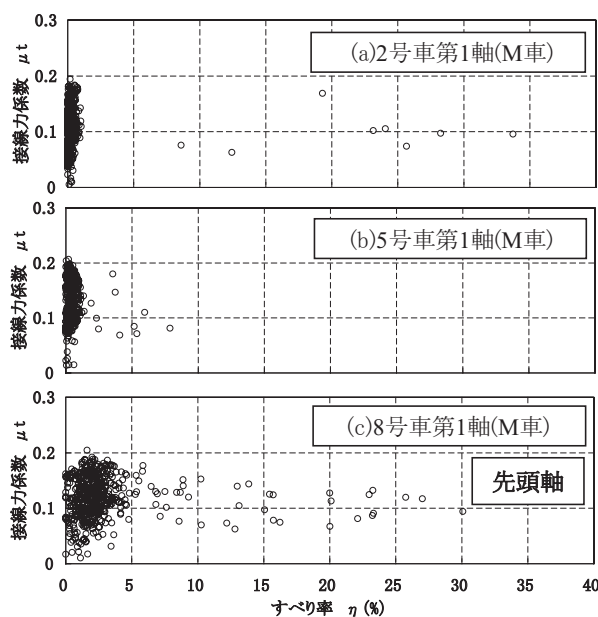


図11 接線力係数の例(上り)

あることから、接線力係数はすべり率が約2.5%で最大となり、その後すべり率の増加に伴って緩やかに減少していく傾向が顕著に現れている。

このような傾向は営業車両における回生ブレーキの制御設定を反映しているものであり、これらの結果を基にすれば、編成各号車における空転・滑走再粘着制御のすべり率の閾値策定などに役立つものと考えられる。さらに、制御設定値を調整することで、より大きなすべり率領域での挙動把握が可能になるものと考えられる。

6. 編成粘着特性

6.1 粘着特性曲線の導出

粘着特性曲線は、粘着力確保の目安としてデータ下限値から求めることが多いが、ここではサンプリングの遅れから滑走後のレールと車輪の間の接線力が小さくなった値も含むと考えられることから、各速度域における粘着係数の最大値から求めた。これは、予め全データを速度幅5km/hの区間に分けておき、各速度区間における最大値を抽出し、抽出された最大粘着係数のデータと任意の粘着特性曲線(式(12))を用いて最小自乗法により係数 c_1 及び c_2 を決定するものである。

$$\mu = \frac{c_2}{V + c_1} \quad (12)$$

これにより得られた最大値と粘着特性曲線(上り)を図12に示す。いずれのM車も同様な傾きの粘着特性曲線になっているが、係数 c_1 及び c_2 の値はそれぞれ異なっている。ただし、滑走頻度の少ないT車は除外した。

特集：鉄道車両技術

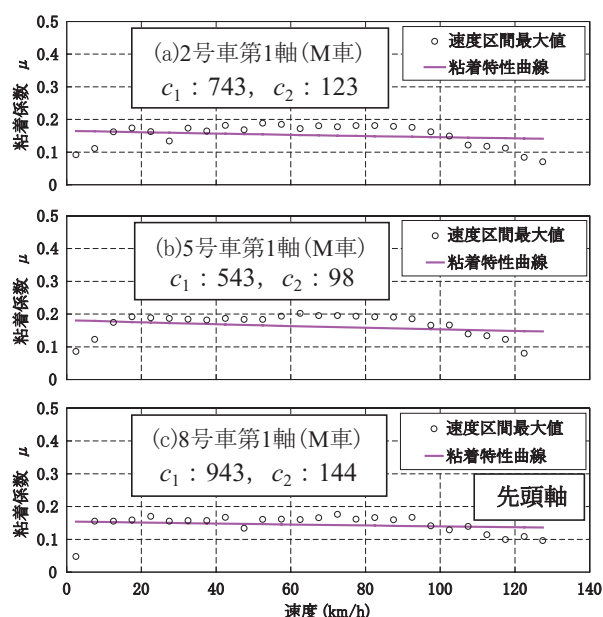


図12 最大値と粘着特性曲線（上り）

6.2 粘着特性曲線の活用例

遅れ込め制御では、M車が負担するT車の組成に応じて、レール乾燥条件を前提とした常用ブレーキ時の負担率が設定されているが、レール湿潤条件では滑走が多発するため、実際にはその設定値を満足していないことが考えられる。そこで、粘着力の大小は粘着特性曲線の大小であることから、式(13)に示すような速度積分値 S_{μ} を各軸位について求め、負担率の目安とした。

ここで、速度積分値 S_{μ} の号車単位の和を $S_{\mu v}$ 、編成単位の和を $S_{\mu tot}$ 、この和を全8両で平均した値（平均積分値）を $S_{\mu ave}$ とすると、平均積分値 $S_{\mu ave}$ に対する号車単位の和 $S_{\mu v}$ の割合 R_{μ} は式(14)で表すことができる。これを用いてM車の割合を求めた（図13）。

$$S_{\mu} = \int_0^{130} \mu dV = \int_0^{130} \frac{c_2}{V+c_1} dV = c_2 \cdot [\ln(V+c_1)]_0^{130} \quad (13)$$

$$R_{\mu} = \frac{S_{\mu v}}{S_{\mu ave}} = 8 \cdot \frac{\sum S_{\mu}}{S_{\mu tot}} = 8 \cdot \frac{\sum S_{\mu}}{\sum S_{\mu v}} \quad (14)$$

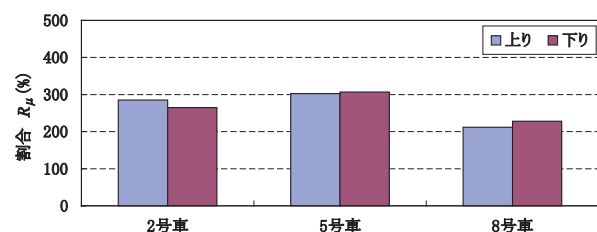


図13 各M車の平均積分値に対する割合

「上り」、「下り」ともに5号車に次いで2号車の順に大きく、8号車が最も小さい値であるが、これは8号車の第3軸にモータが非搭載であるため、その不足分が影響していることに起因している。従って、この第3軸が8

号車の第4軸と同等の粘着特性であると仮定した場合にはユニット構成が同様な5号車と同程度になる。

また、粘着特性曲線により任意の速度における粘着係数を算出した（図14）。この図より、粘着係数の速度に対する影響度合いを軸位別に比較することができる。先頭車である8号車は比較的粘着係数が低く、中間車の5号車が後尾車の2号車よりも高い値になっているが、今後、精度の高い測定により明確にしていきたい。

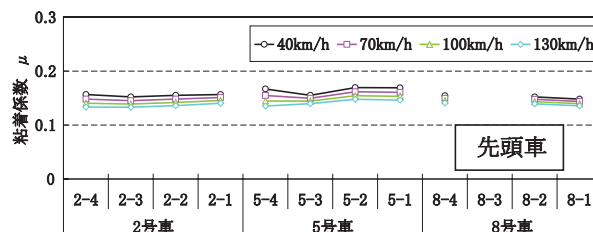


図14 各速度における粘着係数の比較（上り）

7. まとめ

本研究では、車上モニタシステムの情報を用いて、営業走行時における編成粘着特性の把握手法を見出し、各軸位の粘着係数の算出や粘着特性曲線の導出例を示した。これらの手法を用いることで、編成各車両の期待粘着係数の設定や空転・滑走再粘着制御への活用が考えられる。

今後は、線区や季節による粘着特性の差異について調べるとともに、最新車両に搭載されている高速サンプリングが可能なデジタル伝送装置を用いて、より精度の高い編成粘着特性の把握についても検討していく。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多大なる御協力を頂きました西日本旅客鉄道(株)の関係者各位に感謝の意を表します。

文献

- 1) 大山忠夫：高速鉄道車両の車輪とレール間の粘着力におよぼす接触条件の影響と粘着力向上に関する研究，鉄道総研報告，Vol.1，No.2，pp.1-77，1987
- 2) 南京政信，嵯峨信一：粘着係数の測定と車両設計への活用，日本機械学会 第17回交通・物流部門大会講演論文，pp.77-80，2008
- 3) 小笠正道：営業電車の回生ブレーキ信頼度調査，信学技報，R2003-40，pp.1-6，2003
- 4) 松岡成康，大森正樹：JR西日本223系2000番代電車，車両技術，No.218，pp.2-24，1999
- 5) 運転理論研究会：運転理論，日本鉄道運転協会，1992