

1403 営業車のモニタ情報を用いた編成粘着特性の把握

○嵯峨 信一 津留崎 淳 (鉄道総研)

石原 鋼 川村 淳也 (西日本旅客鉄道)

Analysis of the Adhesion Characteristic on Train Set by Monitoring Data of the Service Train

Shin-ichi SAGA, Atsushi TSURUSAKI, Railway Technical Research Institute.

Tsuyoshi ISHIHARA, Jyunya KAWAMURA, West Japan Railway Company.

On the recent commuter train, state monitor of the regenerative factor is performed by the in vehicle monitor device for reasons of the energy-saving. This monitor data are included various information of main power converter and brake control device at powering and braking. In the conventional measurement technique of adhesion coefficient, it was difficult to investigate into adhesion characteristic on the train set from the reason that it can measure at only a specific axle. Therefore, we have investigated into adhesion characteristic by in-vehicle monitor data. As a result, we have clarified the adhesion characteristic on the commercial train set. In this paper, introduce these adhesion characteristics.

Keywords: adhesion coefficient, monitor device, brake control

1. はじめに

近年の省エネルギー化に対する意識の高さから、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¹⁾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、力行時及び制動時における主変換装置や基礎ブレーキ装置等の状態量が含まれている。したがって、これらの膨大なデータを上記の評価項目に限らずに、広く有効活用することが望ましいものと考えられる。

その一つの例として、本研究では、これらのモニタ情報を用いて、営業走行時における編成全体の粘着特性の把握を試みることにした。その理由としては、従来の粘着測定手法では、編成全体を惰行状態で走行させながら、特定の車軸のみに空気ブレーキによる摩擦制動を行うもので、粘着特性の把握が測定軸のみに限られるといった欠点があったためである。

また、従来手法における較正作業が複雑であるため、編成中の測定軸を増やすことは困難であった。さらに、人為的に滑走を発生させるために、測定時には車輪とレール間に散水を行って、雨天時の湿潤条件を模擬しているが、実際の営業走行時における滑走状態や回生ブレーキによる制動などの条件が異なっているため、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。

そこで、本研究では、日々の営業車両データに含まれている自然降雨時における滑走情報を用いて、編成粘着特性の把握を試みた。その把握手法及び得られた粘着係数の結果の一例を紹介する。

2. 車上モニタ情報

本研究の対象車両は、西日本旅客鉄道(株)の 223 系 2000 番代とした。この組成を Fig.1 に示す。ユニット構成としては、1~2 号車、3~5 号車、6~8 号車となっている。この車両における車上モニタシステムの情報は以下の通りである。これらの情報は、ユニット毎で纏められ Fig.2 に示すような Excel ファイルに保存されている。

(1)共通

時刻、停車駅、走行キロ程、速度、編成状態、etc...

(2)主回路及び電制関係(M 車のみ)

力行ノッチ、併結情報、ブレーキノッチ、増圧、直予備、耐雪、架線電圧、電制力、滑走フラグ、etc...

(3)空制関係及び速度

AS 圧、BC 圧、CTR 圧、MR 圧、EP 弁電流、滑走検知、固着検知、軸速度、etc...

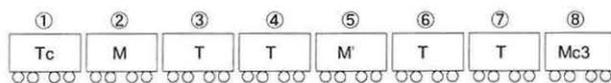


Fig.1 Composition of the Train Set

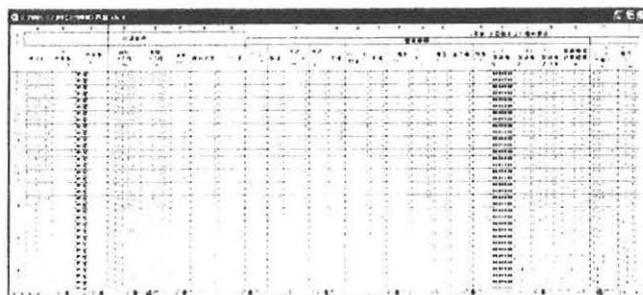


Fig.2 Example of Excel File

3. 対象車両諸元

Table1 に車両重量の諸元, Table2 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, 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る。摩擦係数は速度と押付力に応じて変化する特性を持っている。

Table1 Specifications of the Vehicle

項目	号車				
	1	2	3,4,6,7	5	8
空車重量(t)	32.4	38.5	29.2	36.4	39.5
満車重量(t)	39.4	46.3	36.8	44.2	46.7
No.1 台車重量(t)	5.6	6.4	5.4	6.6	6.6
No.2 台車重量(t)	5.4	6.4	5.4	6.6	6.4
空車 AS 圧(kPa)	200	340	170	220	250
満車 AS 圧(kPa)	360	390	320	370	400

Table2 Specifications of the Mechanical Brake

項目	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	4	4
シリンダ径(m)	0.18	0.127	0.2
ブレーキ倍率	3.5	1.0	2.4
ブレーキ効率	0.89	0.95	0.90
摩擦係数	速度と押付力に応じて変化		

4. 粘着係数の算出

4.1 軸重

Table1 の諸元に基づいて各軸重を算出する際には, Fig.3 に示すような AS 圧と車体重量の関係を用いて行った。従来の計算手法では静止輪重を扱っていたが, 軸重変動を考慮し, 動的輪重を扱うことにした。

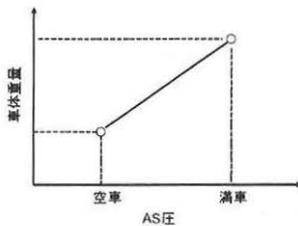


Fig.3 Relation of AS Pressure and Body Weight

いま, m_f : 満車重量, m_0 : 空車重量, mb_1 : No.1 台車重量, mb_2 : No.2 台車重量, AS_f : 満車 AS 圧, AS_0 : 空車 AS 圧として, それぞれ式(4.1), 式(4.2) 及び式(4.3)を用いて係数 a , b_1 及び b_2 を求めた結果を Table3 に示す。

$$a = \frac{9.8}{4} \cdot \frac{(m_f - m_0)}{(AS_f - AS_0)} \quad (4.1)$$

$$b_1 = \frac{9.8}{4} \cdot (m_0 + mb_1 - mb_2) \quad (4.2)$$

$$b_2 = \frac{9.8}{4} \cdot (m_0 - mb_1 + mb_2) \quad (4.3)$$

Table3 Coefficient of Axle Load

号車 項目	1	2	3,4,6,7	5	8
	Tc	M	T	M'	Mc3
a	0.107	0.1267	0.1267	0.1267	0.1168
b_1	79.75	94.33	71.05	89.18	97.14
b_2	79.01	94.33	71.05	89.18	96.41

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 台車の各軸重は, それぞれ式(4.4), 式(4.5)になる。

$$P_1 = a \cdot (AS_1 - AS_0) + b_1 \quad (4.4)$$

$$P_2 = a \cdot (AS_2 - AS_0) + b_2 \quad (4.5)$$

4.2 ブレーキ力

当該編成の通常運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。このときの M 車のブレーキ条件は, 従来の粘着測定手法と同様な条件が成立する。すなわち, 編成としては T 車が惰行しながらも特定の軸のみ(M 車)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ることができる。

通常運行時におけるブレーキのほとんどが電制であり, T 車空制による分担は行われていないため, 実際には T 車の滑走がほとんど発生していない。そこで, 各号車のブレーキ力を電制力と空制力の合力として算出し, M 車の滑走についてのみ取り扱うことにした。

ここで, 空気ブレーキについては, BC 圧力情報を用いて空気ブレーキ力を算出する必要がある。踏面ブレーキ及び軸ディスクブレーキのブレーキ力は, d : ブレーキシリンダ径, n : ブレーキシリンダ数, B : ブレーキ倍率, η : ブレーキ効率, f : 摩擦係数, P_{BC} : BC 圧, D_d : ブレーキ有効半径, D_w : 車輪径として, それぞれ式(4.6), 式(4.7)で求めることができる。

ただし, 各制輪子の摩擦係数は, Fig.4 に示すように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, 車輪径の分布を求めた結果, 中間値と平均値がほぼ一致したため, 820mm で代表することにした。近似式はそれぞれユニットブレーキ用制輪子が式(4.8), SJ シリンダ用制輪子が式(4.9), 軸ディスク用制輪子が式(4.10)である。ただし, V : 速度(km/h), P : 押付力(kN)である。

$$F_b = \frac{\pi d^2}{4} \cdot n \cdot B \cdot \eta \cdot f \cdot P_{BC} \quad (4.6)$$

$$F_b = \frac{\pi d^2}{2} \cdot n \cdot B \cdot \eta \cdot f \cdot P_{BC} \cdot \frac{D_d}{D_w} \quad (4.7)$$

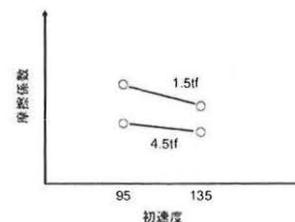


Fig.4 Relation of Initial Velocity and Friction coefficient

$$f_L = -1.0 \times 10^{-3} \times V - 2.4 \times 10^{-3} \times P + 0.445 \dots (4.8)$$

$$f_S = -2.2 \times 10^{-4} \times V - 1.1 \times 10^{-2} \times P + 0.445 \dots (4.9)$$

$$f_T = -3.0 \times 10^{-4} \times V + 0.422 \dots (4.10)$$

4.3 粘着係数

駅間ファイル毎に4.2項までの処理をExcelマクロで行い、さらに主変換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、そのときの滑走軸速度及び粘着係数を軸ごとに算出した。ある軸における粘着係数 μ_n は、 F_{Tn} ：各軸における全ブレーキ力($n=1, 2, 3, 4$)、 P_i ：軸重($i=1, 2$)として、式(4.11)で求められる。

$$\mu_n = \frac{F_{Tn}}{P_i} \dots (4.11)$$

算出された粘着係数について、ある線区の2号車における「上り」と「下り」の例をそれぞれFig.5、Fig.6に示す。ここで、「上り」は8号車、「下り」は1号車がそれぞれ先頭車となる。なお、参考として新幹線の粘着計画式を記載した。一般的に、実験データの集合は粘着計画式を上回ることが知られているが、算出されたデータの集合は各号車ともに、「上り」、「下り」のいずれの場合においても粘着計画式を下回っている場合がある。このようなデータ傾向となる要因としては、この線区におけるデータ母数が少ないことに加え、以下のような通常の粘着測定手法との違いも影響していると考えられる。

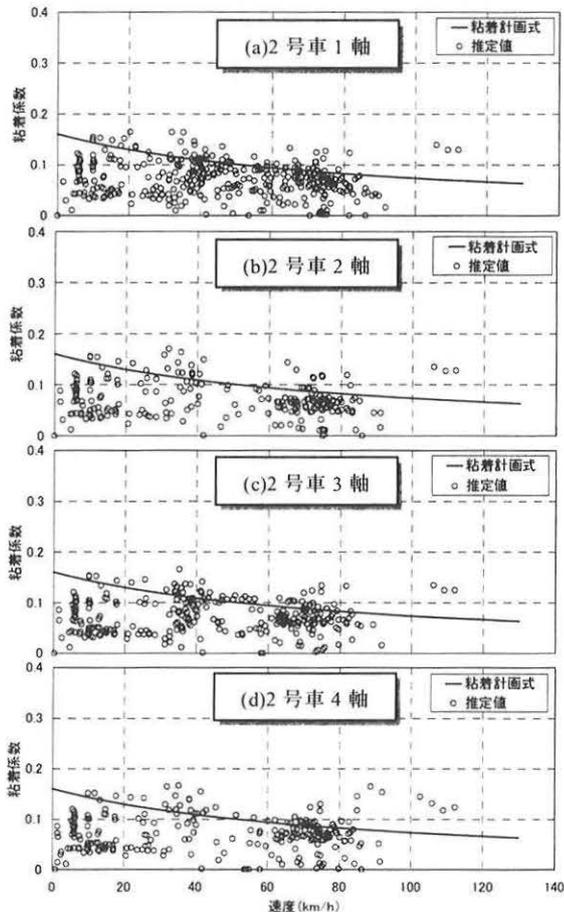


Fig.5 Adhesion Coeff. of Car No.2 in Certain Line (Up)

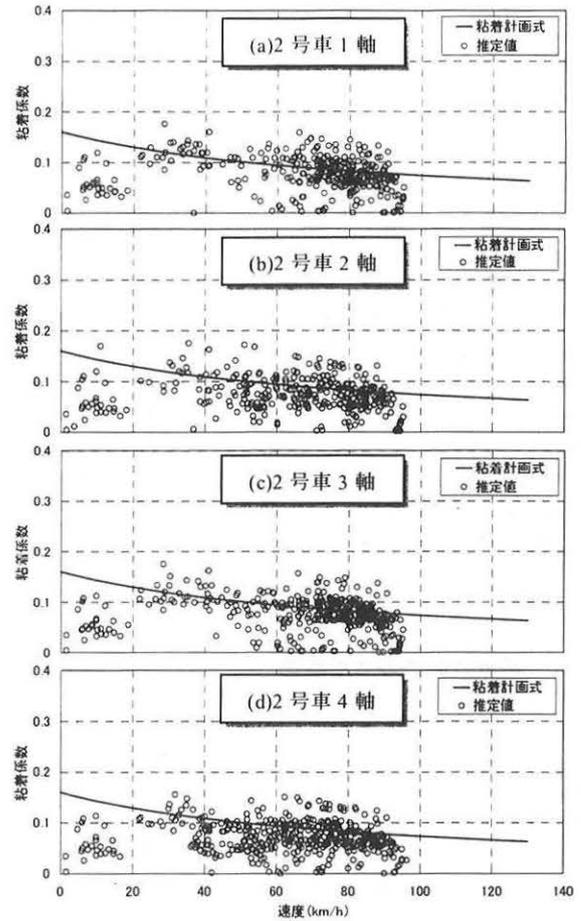


Fig.6 Adhesion Coeff. of Car No.2 in Certain Line (Down)

通常の粘着測定手法では、滑走し始めのブレーキ力を用いて粘着係数を求めているのに対し、本手法では、1秒毎に記録されるモニタ情報を用いていること、滑走し始めてから滑走を検知するまでに時間差が生じるといったサンプリングの問題に加え、滑走フラグ毎または滑走検知毎に粘着係数を順次算出しているため、Fig.7に示すような滑走制御中のブレーキ力低減時においても算出の対象となることから、粘着計画式より低い傾向になるものと考えられる。

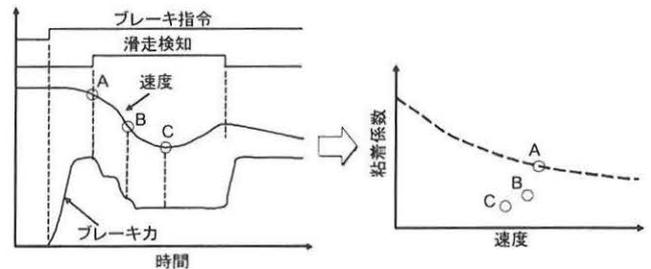


Fig.7 Schematic of Wheel Slide

4.4 粘着近似式

粘着計画式は滑走の抑制や粘着力の確保を目的としているため、データの下限值から求められているが、ここでは粘着係数の傾向把握を目的として、粘着近似式の推定を行う。その際には前項で述べたように滑走制御中のブレーキ力低減時におけるデータを除去する必要がある。そこで、通常の粘着測定が最大ブレーキ力を扱っていることから、データ集合の最大値を抽出することにより、

これらのデータ除去を可能とした。

その手法としては、まず、全データについて速度幅 5km/h の区間に分け、その両端速度の中間値を代表速度とし、各速度区間における粘着係数の最大値を抽出した。つぎに、これによって抽出された最大粘着係数のデータ集合に対して、任意の粘着近似式(4.12)との分散値を求める評価式を導入し、最小自乗法を用いてこの評価式が最小となる場合の係数 c_1 、 c_2 をそれぞれ決定することにより粘着近似曲線を求めた。この手法を 5.1 項で算出された 2 号車のデータ集合に適用し、得られた最大粘着係数と粘着近似曲線を Fig.8, Fig.9 にそれぞれ示す。

「上り」にはほぼ右肩下がりりで粘着計画式に類似した傾向、「下り」には直線の傾向であることが分かる。これらの傾向の差異は、2 号車が「上り」の場合には先頭から 2 両目、「下り」の場合には先頭から 7 両目に位置することの他に、線路曲線や勾配、遅れ込め制御、編成としてのブレーキなどが影響しているものと考えられる。

$$\mu = \frac{c_2}{V + c_1} \dots\dots\dots (4.12)$$

4. 5 粘着近似式の活用事例

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、実際には設定値を満足しないことが考えられる。そこで、粘着近似式の活用事例として、粘着近似式を速度積分(0→130km/h)し、雨天時における実質的なブレーキ負担率の傾向把握を試みたところ、同一ユニット構成である 8 号車よりも 5 号車が高い割合となった(Fig.10)。

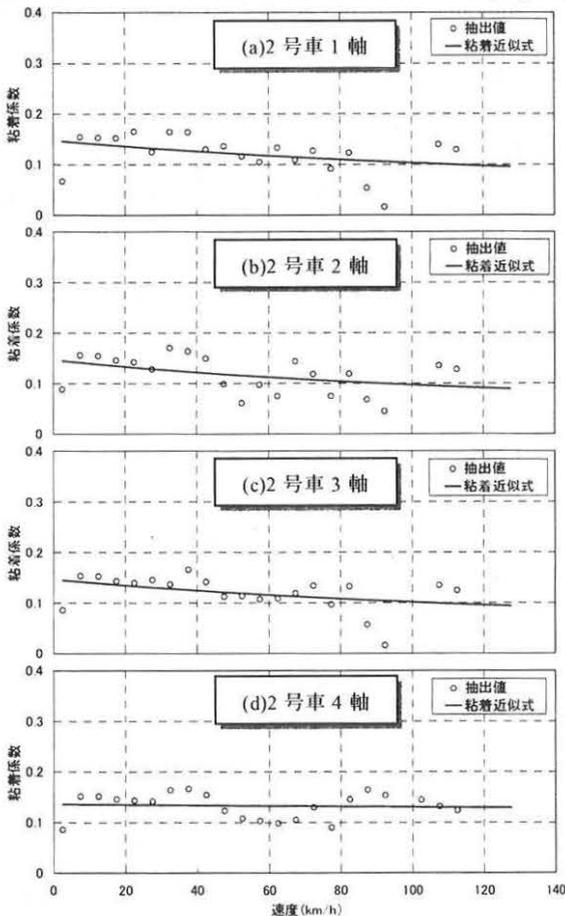


Fig.8 Adhesion Coeff. of Car No.2 in Certain Line (Up)

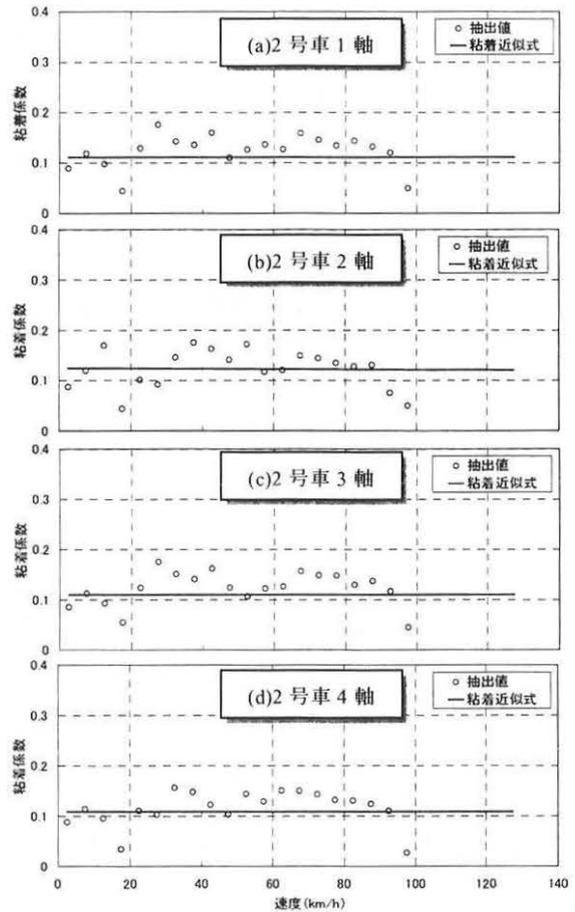


Fig.9 Adhesion Coeff. of Car No.2 in Certain Line (Down)

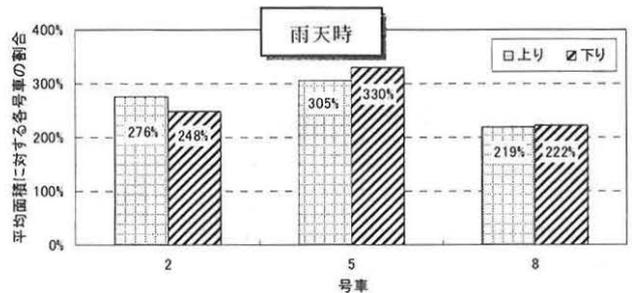


Fig.10 Area Comparison with Up and Down Line(Rainy)

5. おわりに

本研究では、営業走行時における編成粘着特性の把握を試行し、各号車の粘着特性を表す粘着近似式や実質的な負担率の把握手法について紹介した。今後は、線区や季節による粘着特性の差異などについて引き続き調査するとともに、自車負担 100%となる非常ブレーキ(空制)時における粘着特性なども調べていく予定である。

参考文献

- 1) 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、2003-10。
- 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、2008-12。
- 3) 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。