

DMV の粘着性能に関する研究

(第 2 報 : レール面条件別のブレーキ試験結果)

○ [機] 中田 昌宏 [機] 柿沼 博彦 [機] 難波 寿雄

永井 昭夫 遠藤 学 佐藤 肇 穴田 健太郎 (JR 北海道)

[機] 永瀬 和彦 (金沢工業大学)

Study on the adhesive performance of the DMV (The 2nd Report)

○Masahiro Nakata, Hirohiko Kakinuma, Toshio Namba

Akio Nagai, Manabu Endo, Kentaro Anada (Hokkaido Railway Co.)

Kazuhiko Nagase (Kanazawa Institute of Technology)

JR Hokkaido has been developing the Dual Mode Vehicle (DMV) that can easily operate both roads and railway tracks. The DMV's rear rubber wheels drive the car both on road and on railway running. Then, it is vital to appropriately keep adhesion coefficient μ between the rubber tires and rails. In the first report, the authors investigated the μ under various weather and operational conditions, and found the μ kept appropriate numbers even though the conditions were not good. After that, the braking distances from high-speed ranges were investigated on steep gradients under various weather conditions. As the results, they found the braking performance was fairly good.

キーワード : 滑り率, 粘着係数, 積雪, ブレーキ力

Key Words : slip ratio, adhesion coefficient, snow depth, braking force

1. はじめに

道路と線路をシームレスに走行可能な DMV は、現在営業導入に向けて開発中である。DMV は、レールに案内され走行する車体前後に装備したガイド輪と後ゴムタイヤ駆動輪 (ダブルタイヤの内側) で線路上を走行する特殊性を備えることから、運転保安上重要な要素であるブレーキ性能の検証が必要である。そのため、線路走行時のゴムタイヤ駆動輪と鉄のレールとの粘着性能を、定量的に把握し、検証する必要がある。

第 1 報では、多様な天候の下で、多様な速度域から車輪を滑走状態として、多様なすべり率の下における粘着係数 μ を測定したその結果、悪天候の下で、かつ、滑り率が高い値を保った状態でも、 μ は適正な値を保つことを確認した。本報では、高速域からのブレーキ試験を実施し、考察した結果を報告する。

2. DMV のブレーキに関わる課題

2.1 ブレーキシステム

ベースのマイクロバスを DMV 化するに当たり、前ゴム

タイヤブレーキ (ディスク) のブレーキ管を前ガイド輪ブレーキ (ディスク) へ分岐し、分岐部分に切換弁を取り付けた。これにより線路走行において、前ガイド輪にもブレーキがかかる構造となり、ブレーキ力を確保している。

尚、ブレーキ操作は通常上の自動車と同様に、ブレーキペダルの足踏み操作となるため、連続的な踏み込み操作が可能であり、これにより細かなブレーキ力の調整を行うことができる。

2.2 後ゴムタイヤ駆動輪システム

図 1 に後ゴムタイヤ駆動輪システム断面を示す。当該ゴムタイヤの接地幅は 180mm であるため、レールと接触する割合は約 32% と少なく、駆動力の伝達効率もそれに従って低下する。

2.3 ブレーキ性能に関わる課題

線路走行中、車両後部荷重を後ゴムタイヤ駆動輪軸と後ガイド輪軸の 2 軸で支持する。道路走行時と比較して後ゴムタイヤ駆動輪軸重は、約 70% (満車時) となる。従って、後ゴムタイヤブレーキ (ドラム) を特別に改造していない現状においては、線路上では概して後ゴムタイヤブレーキ

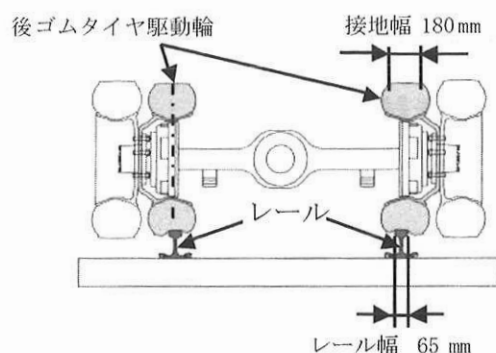


図1 後ゴムタイヤ駆動輪システム（軌道上）

力は強いことになる。

すなわち、道路上と同じ感覚でブレーキ動作をした場合、特に積雪時においては、後ゴムタイヤ駆動輪は滑走しやすいことになる。

3. 走行試験目的

DMV は軸重が鉄道車両と比べ軽いため、確実な踏切動作の確保や線路走行位置の特定など、従来の鉄道車両と同様の軌道短絡方式を現状通り使用するためには、解決しなくてはならない困難な課題がある。そこで現在、DMV の運転保安の考え方を関係箇所の協力を得てまとめ、これを踏まえて運転保安システムも車両と同様、現在営業導入に向けて開発中である。この運転保安の考え方を整理するには、DMV のブレーキ距離も合わせて重要な要素となる。

前述した通り、DMV の構造上の特徴を考慮すると、線路走行では安定して停止できないと想定され、ブレーキ距離のばらつきが DMV 運転保安の考え方に大きな影響を及ぼしかねない。

そこで、様々なレール状態でブレーキ試験を実施し、後ゴムタイヤ駆動輪が滑走したとしても、粘着性能から考慮した理論値から見て、ブレーキ試験結果が妥当であるかを考察することを目的とする。

4. 走行試験

そこで、以下に示す様々なレール状態でブレーキ試験を実施し、結果が粘着性能を考慮した理論値から見て妥当であるかを考察した。

4.1 測定項目

本ブレーキ試験において、測定項目は以下の3点とした。

- ・車速
- ・ブレーキ距離（後ガイド輪軸パルス）
- ・滑り率

以下、仮設した各装置、及び測定方法について述べる。

4.2 測定装置及び測定方法

（1）車速

後ガイド輪軸に取り付けた歯車と磁気式ギア速度センサを用いて車速を測定した。

（2）ブレーキ距離（後ガイド輪軸パルス）

ブレーキ距離を把握するため、前述の歯車と磁気式ギア速度センサを用いて得られた速度パルスを分周器に通し、10m 走行ごとに1パルスをサーマルレコーダに記載した。

（3）滑り率

第1報でゴムタイヤとレール間における滑り率と粘着係数の関係を報告した。今回ブレーキ試験時における粘着係数を求めるため、滑り率を第1報同様測定した。

今回試験に供した車両（DMV922）は、後ゴムタイヤ駆動輪車輪速を、自動車機器としてDMV化改造以前より取り付けられていた速度センサを用いて計測しているため、本試験においてもこれを流用した。尚、後ゴムタイヤ駆動輪（内側）は、軌道上では道路走行時よりもその変形が大きいため、満車且つ停止時の後ゴムタイヤ駆動輪（内側）のたわみ量を考慮し、有効半径とした。

4.3 試験条件

表1に試験条件（車両・地上）、表2に試験時の気象条件等を示す。地上に関する試験条件として、レール状態は3つの条件とし試験を実施した。尚、レール湿潤は、前ガイド輪直前に散水できるような試験仮設を行い、両輪に対する散水量を4.0ℓ/min（240mm/hの降水と同等、猛烈な雨に相当）とした²⁾。またレール積雪とは、試験中の降雪によって自然に積雪した場合、及び試験担当者が線路付近の積雪をレール上に盛った場合であり、レール面上3～25mm程度の積雪を意味する。尚、DMVの構造上、後ゴムタイヤ駆動輪の外側ゴムタイヤの下部はレール踏面よりも下となるため、レール踏面以外に積もった雪に若干触れていることを付記する。

表1 試験条件（車両・地上）

車両		DMV922	
試験条件	地上	レール状態	乾燥 湿潤 積雪
			散水量は4.0ℓ/min ※240mm/hの降水と同等 猛烈な雨に相当 自然及び人工積雪で レール面3～25mm程度の雪
		勾配	-25‰ -16.7‰
	車両	車両重量 kg	5,420
		車両総重量 kg	7,015
		試験時重量	
	ブレーキ	前ガイド輪	ディスク ブレーキパッド摩擦係数0.2 ディスク有効半径0.119
		後ゴムタイヤ駆動輪	油圧真空倍力装置付デュオ2リーディング

表 2 試験時の気象条件等

実施日	H22.9.28	H22.9.29	H22.10.4	H22.10.5	H23.2.24	H23.3.2	H23.3.4	H23.3.9	H23.3.10
天気	曇	晴	晴	曇のち雨	晴	雪	雪	雪	雪
気温 ℃	16	8	15	12	-1	-2	-6	-4	-7
湿度 %	43	33	44	25	90	87	81	43	23
レール状態	乾燥 湿潤	乾燥	乾燥 湿潤	湿潤	人工積雪 (10mm)	積雪 (3mm)	積雪 (8~25mm)	積雪 (10~20mm)	積雪 (5~10mm)
勾配 ‰	-25	-16.7	-25	-16.7	-25	-16.7	-16.7	-25	-25

5. 試験結果

試験結果の中で特筆すべき点を以下に示す。

- ・積雪時、後ゴムタイヤ駆動輪は試験開始から終了の間全て滑走した。
- ・ブレーキ試験結果は、レール状態乾燥、湿潤、積雪のいずれの場合も、試験結果の相関の度合いを示す決定係数はおおそ 0.95 以上となり、高い相関を示した。
- ・積雪時後ゴムタイヤ駆動輪を滑走させずに停止しようとした場合のブレーキ距離は、滑走させた場合のブレーキ距離よりも長くなった。

レール状態湿潤と積雪時におけるブレーキ踏力はほぼ同等として、勾配-25‰、及び-16.7‰で行ったブレーキ試験

結果をそれぞれ図 2、図 3 に示す。

勾配-25‰におけるブレーキ試験（レール状態：積雪）の結果は、初速 70km/h でのブレーキ距離 351m（近似値）であり、標準誤差 2σ を考慮すると 383m であった。レール状態が湿潤において、初速 70km/h でブレーキ距離は 250m（近似値）であり、標準誤差 2σ を考慮すると 283m であった。

一方、勾配-16.7‰においては、レール状態（積雪）、初速 70km/h で 327m（近似値）であり、標準誤差 2σ を考慮して 369m であった。レール状態（湿潤）では、他は同様の条件において、221m（近似値）、239m（標準誤差 2σ 考慮）であった。

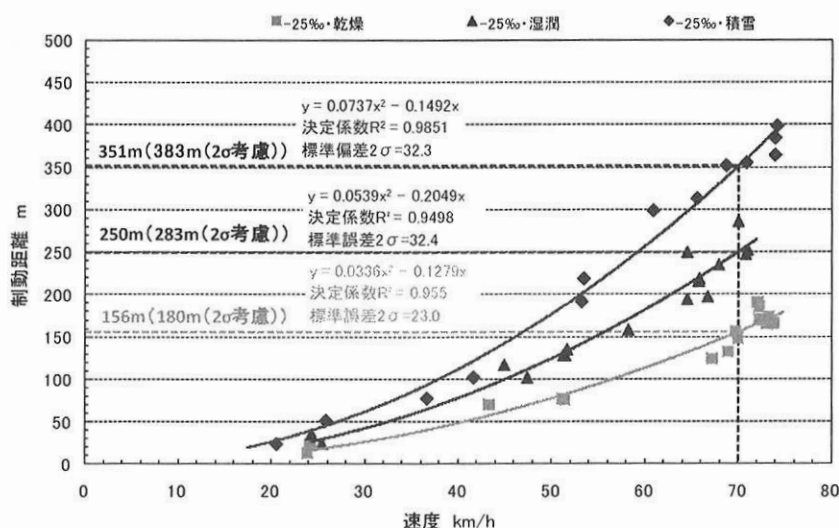


図 2 ブレーキ試験結果（勾配-25‰）

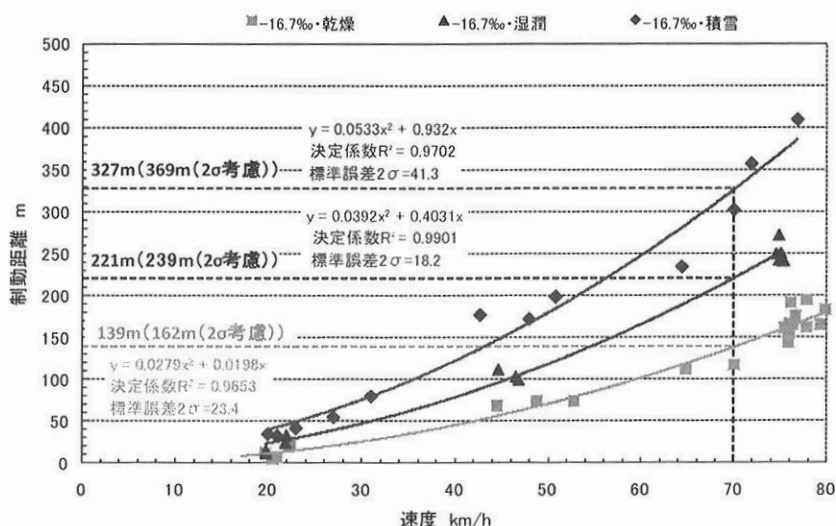


図 3 ブレーキ試験結果（勾配-16.7‰）

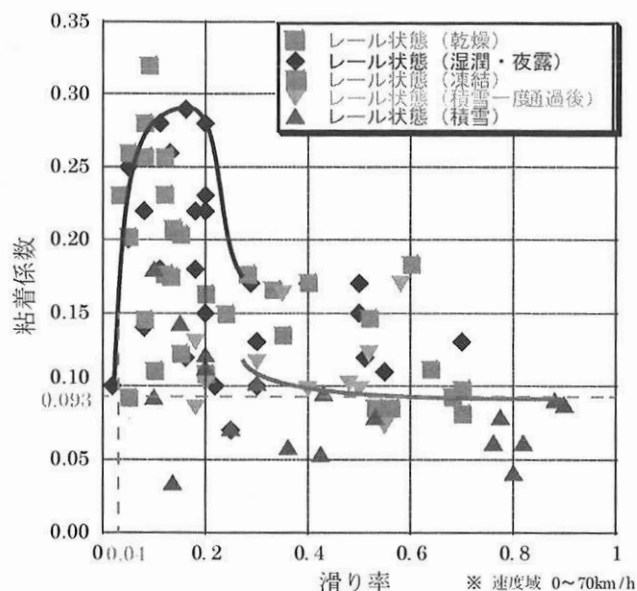


図4 滑り率と粘着係数の関係

$$M\alpha = \mu Mg \cos \theta - Mg \sin \theta \dots\dots\dots (1)$$

$$L_s = L_w \cdot R_{BF} + \frac{V_0^2}{2g(\mu \cos \theta - \sin \theta)} \dots\dots\dots (2)$$

前ガイド輪に因るブレーキ距離 後ゴムタイヤ駆動輪に因るブレーキ距離

M : 後ゴムタイヤ駆動輪軸重
 α : 減速度 m/s^2
 g : 重力加速度 $9.8m/s^2$
 L_s : 制動距離(理論値(積雪)) m
 L_w : 制動距離(実測値(湿潤)) m
 R_{BF} : 前ガイド輪のブレーキ力割合
 V_0 : 初速(70km/h)
 μ : 粘着係数
 θ : 勾配

6. 考察

ブレーキ装置は前述の通り、前ガイド輪と後ゴムタイヤ駆動輪に設置され、車両全体のブレーキ力に対して各ブレーキ装置のブレーキ力が占める割合は、以下の通りとなる。

(前ガイド輪軸) : (後ゴムタイヤ駆動輪軸) = 36.7% : 63.3%
 ここで滑り率と粘着係数の関係を図4に示す。第1報にて本図を示したが、その後も走行試験を行っているためデータを更新した。本図より、後ゴムタイヤ駆動輪が滑走しているときの粘着係数を求めた。

そこで、滑走した後ゴムタイヤ駆動輪とレールの粘着係数から減速度を求め(式1参照)、ブレーキ距離に占める後ゴムタイヤ駆動輪に因る部分を求めた(式2参照)。尚、空走距離は空走時間が試験結果から0.2秒であったため、初速度70km/hにて約4mとした。

以上より、レール状態が積雪におけるブレーキ距離を理論的に求めた。(表3参照)

勾配・25‰における同結果は、ブレーキ距離380m(理論値)となり、標準偏差2 σ を考慮した制動距離383mの範囲内となった。従って、当該試験結果は妥当であり、理論的にブレーキ距離を計算できることを確認した。

同様に勾配・16.7‰については、ブレーキ距離369m(標準偏差2 σ 考慮)に対し、ブレーキ距離338m(理論値)と

表3 ブレーキ試験結果と理論値

勾配	レール状態	・25‰		・16.7‰	
		湿潤	積雪	湿潤	積雪
実測値	制動距離 m	250	351	221	327
	前ガイド輪に因る制動距離 m (ブレーキ割合より算出)	91.7	同左	81.1	同左
	滑り率	-0.04	-1.0	-0.04	-1.0
	粘着係数	(0.15)	0.093	(0.15)	0.093
	空走距離 m	4	4	4	4
理論値	後ゴムタイヤ駆動輪に因る制動距離 m	154.3	283.6	144.7	252.7
	制動距離 m	246	380	226	338
制動距離 m (標準偏差2 σ 考慮)		283	383	239	369

なり同じく範囲内の結果を得た。

またレール状態が湿潤において、ブレーキ試験時の滑り率より粘着係数は0.15であった。(図4, 表3参照)

この粘着係数、及び式2の第2項(μ を0.15に代入)を逆算し、レール状態(湿潤)におけるブレーキ距離(理論値)を求めた。その結果、勾配・25‰における同結果は、ブレーキ距離246m(理論値)となり、標準偏差2 σ を考慮した制動距離283mの範囲内となった。

勾配・16.7‰についても、標準偏差2 σ を考慮した制動距離の範囲内の結果を得た。

7. 結論

DMVの走行及びブレーキ性能を調べるために、営業線において、多様な気象条件の下でレール踏面及び走行速度を多様に変化させ、ブレーキ距離及びゴムタイヤとレールの粘着係数を調査した結果、以下のようなことがわかった

(1) 粘着係数は天候及びレール踏面の状態に応じ、多様に変化することを確認した

(2) DMVのブレーキ距離は、前記の条件の下で、鉄道車両のそれと同等又はそれよりも短いことを確認した。

(3) ブレーキ性能について、積雪によって後ゴムタイヤ駆動輪に大きな滑りが発生しても、以上の結果より問題ないことが検証できた。

8. 謝辞

本研究に際し、試験方法等についてDMV技術評価委員各位、アドバイザーまたDMV運転保安検討ワーキング主査、副主査並びに委員各位には多大なるご指導、ご鞭撻を頂戴しましたことを御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 中田昌宏, 柿沼博彦, 難波寿雄, 永井昭夫, 佐藤肇, 遠藤学: DMVの粘着性能に関する研究, 第17回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.115-118, 2010.
- 2) 運輸省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 在来鉄道運転速度向上マニュアル・解説, pp.163-165, 研友社, 1993.
- 3) 小野純朗: 鉄道のスピードアップ 速度向上の理論と実践, pp.38-44, 社団法人日本鉄道運転協会, 1987