DMVの粘着性能に関する研究

中田　昌宏*　　柿沼　博彦　　難波　寿雄

永井　昭夫　　佐藤　肇　　遠藤　学（JR北海道）

Study on the adhesive performance of the DMV

Masahiro Nakata* , Hirohiko Kakinuma, Toshio Namba,
Akio Nagai, Hajime Sato, Manabu Endo (Hokkaido Railway Co.)

JR Hokkaido is developing the Dual Mode Vehicle (DMV) that can easily operate both roads and railway tracks. DMV runs with the front rubber tire and the driving rear tire on the road. On the other side, it runs on railway tracks with the driving rear rubber tire and the iron wheel installed before and behind the vehicle. The rear rubber tire touches the surface of the railway tracks, the DMV has many uncertain points of this adhesive performance. As the results of the experimentations, we found that the running method of the DMV had favorable performance on the adhesion.

キーワード：粘着係数，粘着力，スリップ率，推進軸トルク，テレメータ
(Keywords, adhesion coefficient, adhesive force, slip ratio, propeller shaft torque, telemeter)

1. はじめに

道路と軌道の両方を走行可能なデュアル・モード・ビークル（DMV）は，本格的な実用化に向けて開発中である。DMVとはDual Mode Vehicleの略で，マイクロバスをベースとした乗り物であり，道路と軌道両方を走行する後ゴムタイヤ駆動輪と，軌道で案内され走行する前後ガイド輪から構成されている。(1)

道路上では，一般のバス同様に前ゴムタイヤと後ゴムタイヤ駆動輪（内外輪）で走行し，軌道上では車体前後に装備したガイド輪と後ゴムタイヤ駆動輪（内輪）で走行する。しかし，軌道上のゴムタイヤとレールの粘着性能については過去に例がなく，不明な点が多い。また，運転保安上重要な要素である制動距離について，その制動試験結果を検証するためにも，ゴムタイヤと鉄のレールとの粘着について定量的に把握する必要がある。

そこで本研究では，様々なレール踏面状態での走行試験を実施し，得られた粘着性能測定結果について報告する。

2. 主要諸元

DMVの主要諸元を表1に示す。以下，DMV特有の駆動方法である後ゴムタイヤ駆動輪システム，及び軌道上の加速性能，減速性能に関して，これに関わる構造と過去の試験結果について述べる。

表1　主要諸元

Table 1.　The specification of DMV.

ベース車両 車名型式	トヨタ・コースター	
車両総重量　kg	DMV921	6535 （車両重量5060kg+乗車定員25名相当1375kg
	DMV922	7015 （車両重量5420kg+乗車定員29名相当1595kg）
エンジン	型式	N04C-TK 直噴ディーゼルターボ
	種類	直列4気筒
	総排気量　[L]	4.009
	圧縮比	18.0
	最高出力[kW(PS)/rpm]	110(150)/3000
	最大トルク[N·m(kgf·m)/rpm]	392(40.0)/1600
ミッション	型式	A860E（電子制御式6速オートマチック）
	変速比　1速	3.741
	変速比　2速	2.002
	変速比　3速	1.342
	変速比　4速	1.000
	変速比　5速	0.772
	変速比　6速	0.634
	変速比　後退	4.875
ブレーキ	前ゴムタイヤ	油圧真空倍力装置付 ベンチレーテッドディスク
	後ゴムタイヤ	油圧真空倍力装置付 デュオ2リーディング
	前ガイド輪	ディスク
走行装置	道路走行時	前ゴムタイヤ
		後ゴムタイヤ駆動輪
	軌道走行時	前ガイド輪
		後ゴムタイヤ駆動輪
		後ガイド輪
ゴムタイヤ	タイヤの呼び（サイズ）	235/70R 17.5 127/125J
	接地幅	道路上：180mm 軌道上：65mm（レール幅）
	空気圧 [kpa]	750
	品名（メーカ）	W970（ブリヂストン）
ガイド輪	車輪径	φ502
	リム幅	150mm
	フランジ角度	87°
	材質	車輪鋼（SSW-Q1S）

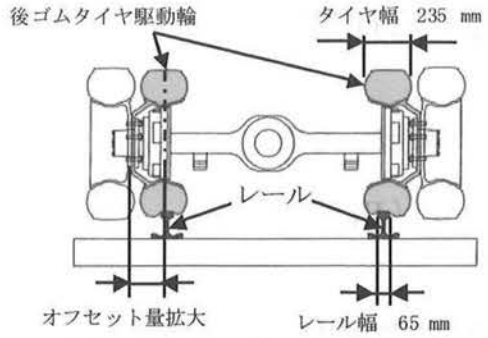


図1　後ゴムタイヤ駆動輪システム（軌道上）

Fig.1.　Driving Rear Tire System

〈2･1〉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。

DMVは，曲線半径100mにおいて後ゴムタイヤ駆動輪（内側）が，確実にレール上に位置するべく，通常のマイクロバスよりも幅広のゴムタイヤ（235/70R17.5 127/125J）を装着している。当該ゴムタイヤの接地幅は180mm（図2参照）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。また，後軸のドラムブレーキついては，当然のことながら自動車メーカは，道路上で走行することを想定し，そのブレーキ力を設定している。しかし，鉄のレール表面とアスファルト表面の表面粗さは，当然前者の方が小さく，また前述した通り，軌道走行中は車体後部荷重を後ゴムタイヤと後ガイド輪で支えるため，後ゴムタイヤ駆動輪軸重は，道路走行時と比較して約70%（満車時）となる。従って，軌道上では概して後ゴムタイヤブレーキ力は強いことになる。すなわち，道路上と同じ感覚でアクセル動作を行うと後ゴムタイヤは空転しやすく，また同様にブレーキ動作をすると後ゴムタイヤは滑走しやすいことになる。

〈2･2〉　加速性能

図3に平坦路において，レール状態が乾燥，また湿潤（左右前鉄車輪とレール間に散水、散水量は、「在来線運転速度向上試験マニュアル･解説」[2]に基づいた最大値 4.0ℓ /minであり，これは240mm/hなる猛烈な雨に相当）状態で加速試験を行った結果を示す。

加速度はレール乾燥時で約2.7km/h/s，レール湿潤時で約2.3km/h/sであり，鉄道車両と同等またそれ以上の加速度が

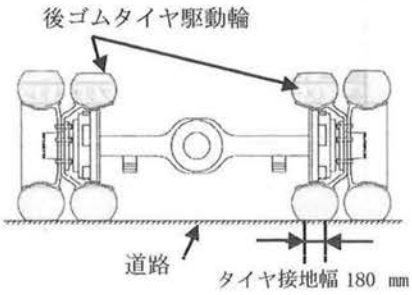


図2　後ゴムタイヤ駆動輪システム（道路上）

Fig.2.　Driving Rear Tire System

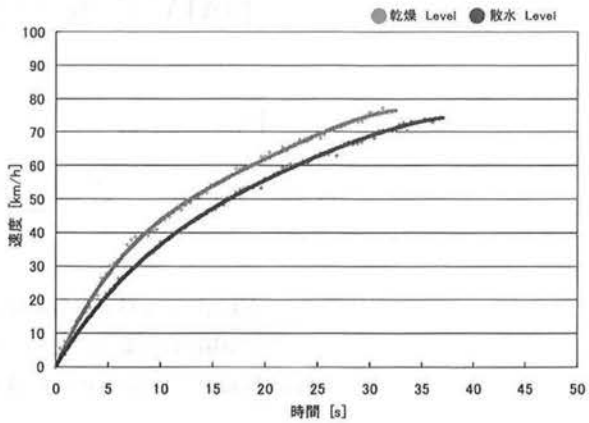


図3　加速性能

Fig.3.　Acceleration performance of DMV

得られることを確認したが，レール湿潤状態では，乾燥状態と比較して加速度が約15%低下する結果となった。

また厳冬期における走行試験において，軌道上（上り勾配+25‰）に積雪（レール踏面上75mm）がある状態で停止し，再起動したところ，後ゴムタイヤは大きく空転し，速度が 20km/h 以上とならない事象が発生した。これは，軌道踏面状態が乾燥，また湿潤では見られない事象である。

また，鉄道車両の粘着係数は過去の研究[3]より明らかとされており，DMVの最高走行速度である70km/hにおいては，約0.13程度である。（図4参照）

〈2･3〉　減速性能

DMVは，道路走行中は前ゴムタイヤ軸キャリパブレーキと後ゴムタイヤ駆動輪軸ドラムブレーキで停止する。一方，軌道走行中は，前ガイド輪軸キャリパブレーキと後ゴムタイヤ駆動輪軸ドラムブレーキで停止する（表1参照）。この切り替えは運転席に取り付けた切り替え弁で行う。軌道走行中は，前ゴムタイヤ軸は使用しないため，そのブレーキ油回路を，前ガイド輪軸キャリパブレーキ側に切り替え，ブレーキ力を得ている（図5参照）。

制動時，後ゴムタイヤ駆動輪が滑走せず，安定的に制動させるためには，レール状態が乾燥よりも湿潤，また凍結，

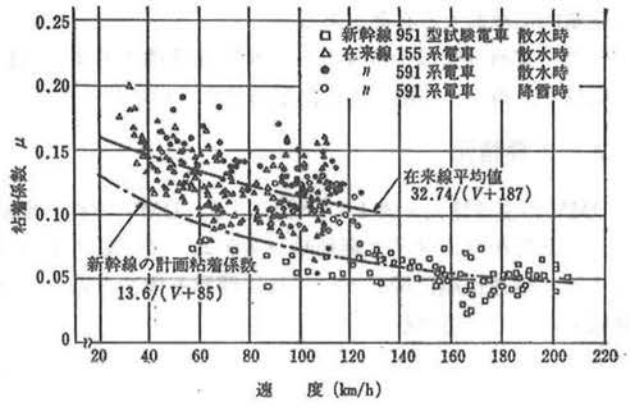


図4　現車における粘着係数の測定例[3]

Fig.4.　The adhesion coefficient of the rolling stock

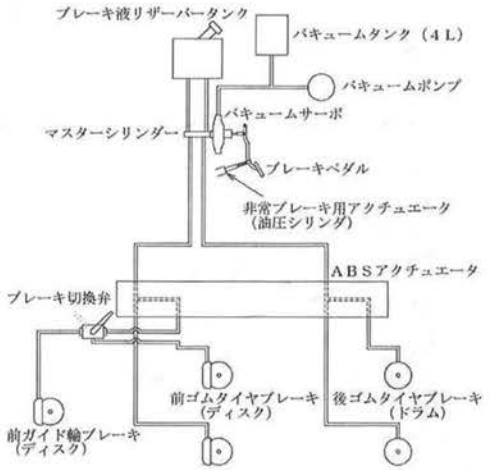


図 5　ブレーキシステム
Fig.5.　The brake system of DMV

積雪と条件が悪くなればなるほどブレーキペダルを強く踏み込むことができない。これに従いブレーキ力も低下し，結果制動距離が伸びることになる。

このように経験的にレール状態が乾燥よりも湿潤，凍結，積雪となるに従い，粘着性能が低下することはわかっていたが，ゴムタイヤとレールの粘着について，滑り率との関係で定量的に確認した実績・文献もなかった。そのため、走行試験を行い，DMV の粘着性能を検証することとした。

3.　走行試験概要

〈3･1〉　測定項目

DMV の粘着性能を定量的に確認するため，測定項目は以下の 2 点とした。

（1）　推進軸のねじりによるひずみ

（2）　滑り率

以下，仮設した各装置，および測定方法について述べる。

〈3･2〉　測定装置および測定方法

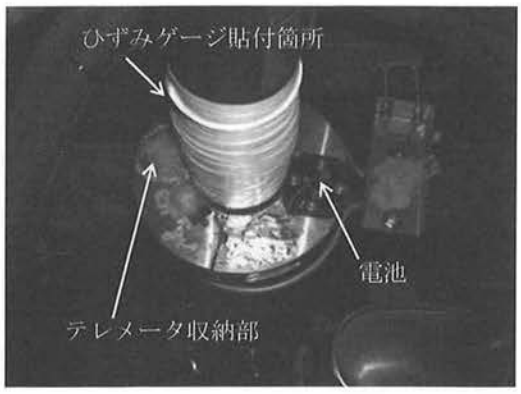
（1）　推進軸のねじりによるひずみ　　後ゴムタイヤ駆動輪の粘着力を把握するため，ねじりモーメントを受けて生ずる推進軸のひずみを測定した。仮設状況，および使用した機器を図 6，表 2 にそれぞれ示す。

ひずみゲージ仮設方法は 4 ゲージ法とし，この出力をテレメータ送信機で送信し，受信アンテナから車内の近接型テレメータ受信機を通し，サーマルレコーダに記録した。

テレメータの電源は，専用電池を使用し，当該電池と上記テレメータを図 6 の固定冶具に取り付け，固定した。

表 2　使用機器
Table 2.　The setting device

測定対象	品名	型番	メーカ
ひずみ	テレメータ送信機	MRT･300A	共和電業
	受信アンテナ	（自主製作）	
	近接型テレメータ受信機	MRT･301A	共和電業
	電源	MRT･210B(+2.6V)	共和電業
	サーマルレコーダ	WR300	グラフテック
滑り率	歯車	（歯数：102，モジュール：2）	
	磁気式ギア速度センサ	FDP16･A65	ココリサーチ



(a)　テレメータ仮設（車体後方より前方を臨む）

(b)　テレメータ仮設（車体前方より後方を臨む）

図 6　テレメータ仮設
Fig.6.　The setting of telemeter

推進軸のひずみから推進軸トルク，粘着力，および粘着係数を次式で求める。

①　推進軸トルク

$$T=\frac{\varepsilon_0 E Z_p}{1+\nu} \quad \cdots\cdots(1)$$

ε_0　：指示ひずみ　　E：縦弾性係数　N/m²

Zp　：極断面係数　m³　　ν：ポアソン比（0.3）

②　粘着力

$$F=\frac{T}{r}Re \quad \cdots\cdots(2)$$

F　：粘着力　N　　T：推進軸トルク　N･m

r　：後ゴムタイヤ駆動輪有効半径　m（r=0.365）

R　：ファイナルギア比（R=4.875）

e　：効率

（ファイナルギア効率 0.95（メーカ参考値），接地割合 0.32）

③　粘着係数

$$\mu=\frac{F}{Wg} \quad \cdots\cdots(3)$$

μ　：粘着係数

W　：後ゴムタイヤ軸重 kg（1160～1660kg）

（後部軸重配分制御[1]のため，速度，滑り率により変動）

g　：重力加速度　m/s²

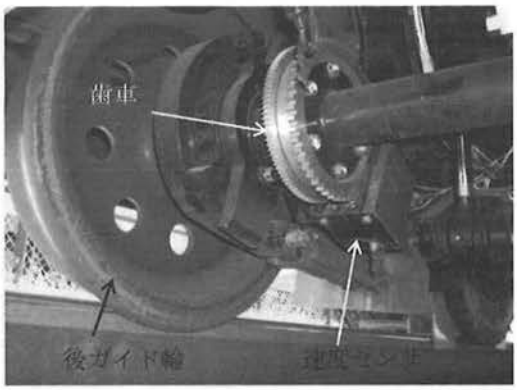


図７　後ガイド輪車速測定

Fig.7.　Speed sensor

（2）　滑り率　　算出式は以下のとおりである。

$$\text{滑り率} = \frac{\text{後ゴムタイヤ駆動輪車輪速} - \text{車速}}{\text{車速}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

式４の車速を測定するため，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で得られた車速パルスを車速に変換した（表２，図７参照）。

同様に後ゴムタイヤ駆動輪車輪速を測定するため，推進軸に上記歯車と磁気式ギア速度センサを取り付けた。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。

〈3･3〉　試験条件（レール踏面状態）

乾燥，湿潤・夜露，凍結，積雪，積雪一度通過後の５条件である。尚，湿潤・夜露とはレール踏面が夜露で濡れている状態（散水なし）、積雪一度通過後とは，レール踏面上20mm の積雪上を一度通過後で，一部圧雪状態を意味する。

4.　試験結果と考察

〈4･1〉 駆動力係数

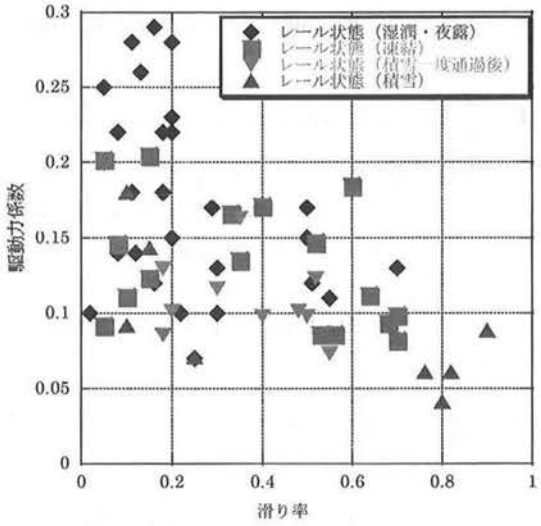


図８　スリップ率と駆動力係数の関係

Fig.8.　Relation between slip ratio and driving power coefficient

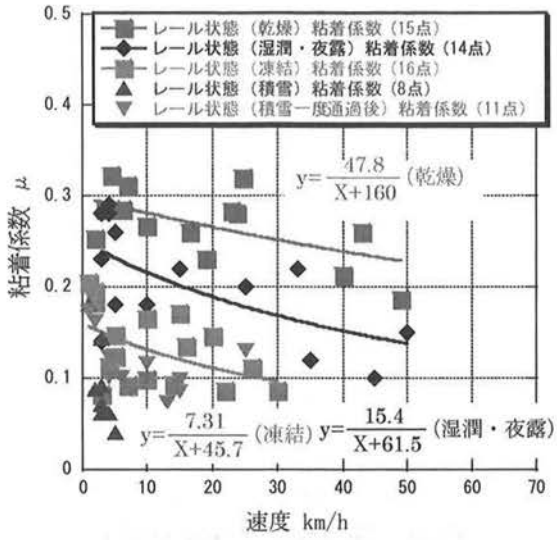


図９　速度と粘着係数の関係

Fig.9. Relation between velocity and adhesion coefficient

〈4･2〉 速度と粘着係数の関係

図８より，滑り率が 0.15 から 0.2 程度のときの推進軸トルクを用いて，粘着係数を求めた（図９参照）。

従来，鉄道車両で把握されていた粘着性能（速度と粘着係数との関係）を滑り率との関係で示し，仮に後ゴムタイヤ駆動輪が大きな空転を起こしたとしても，鉄道車両のような，急激な粘着性能低下は発生しないことを確認した。

5.　結論

（1）　後ゴムタイヤとレールとの粘着性能について，鉄道車両では示されていない滑り率との関係をまとめ，おおよそ駆動力係数は，0.1 以上となることを確認した。これにより，大きく空転したとしても粘着性能について問題ないことを確認した。

（2）　レール踏面上 75mm の積雪という条件で，粘着係数が 0.1 以下となり，勾配起動した場合には、走行速度 20km/h 程度しか上昇しないことを確認した。

（3）　ブレーキ性能について，大きな滑りが発生しても以上の結果より，問題のないことが検証できた。

6.謝辞

本研究に際し，試験方法等について DMV 技術評価委員会永瀬委員長並びに委員各位，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。

文　　献

（1）　社団法人日本機械学会：第 16 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, DMV の走行安全性に関する研究（第１報），pp.671 (2009 年)

（2）　運輸省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所：在来鉄道運転速度向上試験マニュアル・解説，pp.164 (1993 年)

（3）　小野純郎：「鉄道のスピードアップ」，pp.40 (1987 年)