

## 29. トンネル工専用高速電気機関車

トモエ電機工業(株)：守田 信稔

### 1. はじめに(概要)

従来、トンネル工専用バッテリー式電気機関車は、直流直巻式モータを搭載し、鋳鋼製の車輪を装着していた。本機関車は、従来の直流直巻モータに替り、DCブラシレスサーボモータを搭載し、鋳鋼製車輪の替りに、摩擦係数の大きい高粘着性車輪を装着したもので、負荷に影響されない定速度運行と、レールに対して高い滑り摩擦抵抗特性により、従来の機関車と比べて、著るしい制動距離の短縮がもたらされ、トンネル内の高速走行が可能となったトンネル工専用電気機関車である。

DCブラシレスサーボモータは、指令速度に応じたモータのトルク制御により、上り下りの勾配、牽引荷の大小に拘らず、常に機関車の定速度走行を可能とした。そのため、従来の経験と勘による熟練運転操作とは異なり、速度指令のみの容易な運転操作となった。

高粘着性の車輪は、車輪の外周、踏面部に、セラミック粒子分散強化アルミ基合金によるタイヤリングを装着することにより、レールとの摩擦係数を大きくしたものである。この車輪により、機関車の自重を増すことなくモータの出力アップのみで牽引力の増加が可能となった。また、複数個のDCブラシレスサーボモータの制御との相乗効果により、従来のトンネル内最高速度(8 km/h)に対し、2倍の速度(16 km/h)による高速走行時で、車両が急停車しても、従来の機関車と同じ制動距離(8 m以内)で停止することが出来るようになった。以上のことから、本機関車は、容易な運転操作性、高速走行、及び制動距離の短縮が可能となり、長距離輸送時における高速運搬や、安定した登降坂と牽引力の増加を可能とした。

### 2. 開発の趣旨

シールドトンネル工事において、ズリやセグメントなどの資機材の運搬に工専用電気機関車を使用されているが、近年、長距離化、急勾配区間の増加など、複雑な工事が多く、資機材の運搬も長時間を要するようになってきた。また、機関車の事故防止のため、制動能力の向上が大きな課題となっている。ここで、

- (1) 線路勾配や積載荷重などの負荷変動に対しても、常に一定速度で走行すること。
- (2) 突然の障害物にも即応し、事故を招くことなく停止すること。
- (3) 従来の倍の速度からでも、同じ制動距離内で停止すること。

を、開発のねらいとした。

### 3. 開発目標

8トンサーボロコの定格負荷牽引時(自重9.5 t、牽引荷重12.5 t)

- (1) 直線平坦路において、速度16 km/hで走行した時の通常ブレーキによる制動距離を8 m以下とする。

(2) 50/1000の下り勾配において、速度 8 km/hで走行した時の通常ブレーキによる制動距離を 4 m 以下とする。

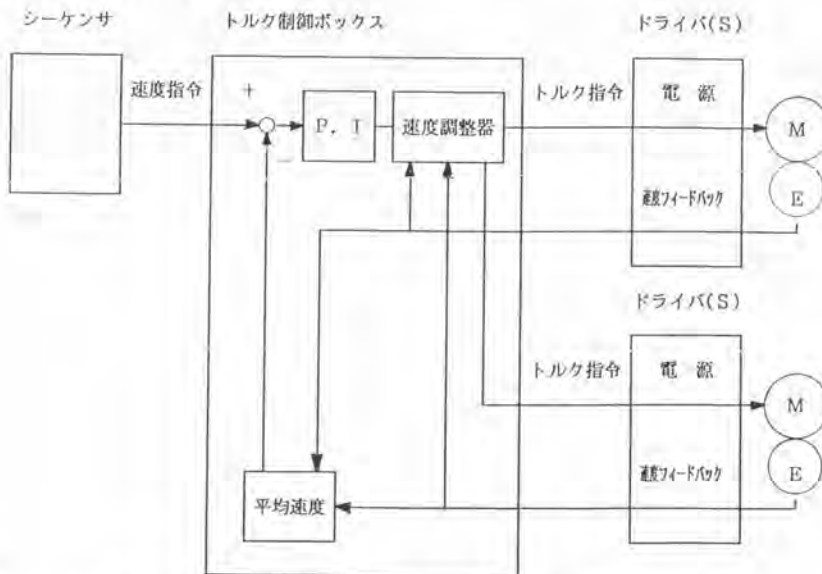
#### 4. DCブラシレスサーボモータとその制御

今回、開発採用したDCブラシレスサーボモータは、従来の整流子、ブラシによる整流機構から、回転子に永久磁石を用い、整流機構を半導体電力スイッチング回路に置き換え、同時に、モータの回転数や出力トルクをフィードバックすることにより、指令値に対して、常に追従するものである。

このDCブラシレスサーボモータを搭載することで図1に示す高速対応性のあるトルク制御が可能となり、前後2台（又は複数台）のモータに対して、常に一定速度走行となるよう演算処理がなされ、補正される。即ち、車輪のトルク変動を制御することで、スリップやロックといった異常現象を防ぎ、最適な駆動力を発揮する。

#### サーボモータのトルク制御 (2個のモータ制御の例) (最大6軸まで制御可能)

##### トルク制御ボックスのブロック図



P, I : 速度補正器 : 指令速度とフィードバック速度を比較補正する。

P : Proportional Gain (比例ゲイン)

I : Integral Gain (積分ゲイン)

速度調整器 : トルク分配器 : 補正量を演算処理して、各モータにトルク分配、指令を行う。

M : DCブラシレスサーボモータ

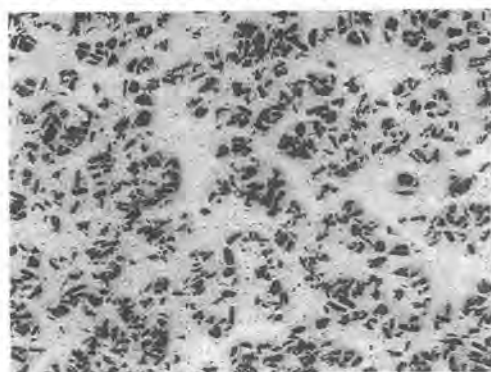
E : 速度検知用エンコーダ

(図1)

## 5. 高粘着性の車輪

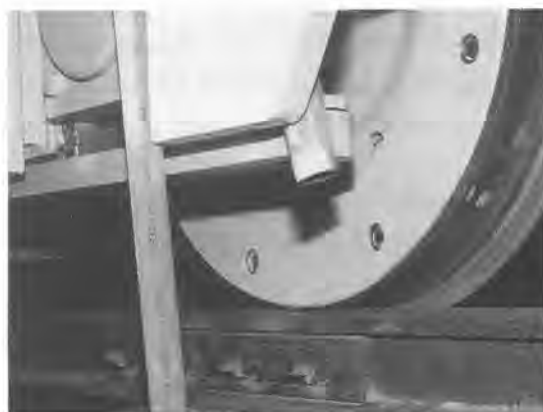
車輪とレール間の摩擦係数を高めて、機関車の牽引力を増加させ、制動距離を短くするために高粘着性の新材料を採用した。

この材料はセラミック粒子分散強化アルミ基複合材で、セラミック粒子の1つである酸化アルミニウム ( $Al_2O_3$ ) が、アルミニウム合金のマトリックス素地に含まれた複合材 (コンポジット) (写真1) になるよう、溶湯アルミニウムの中に、適切な技術で混合させて製造した、カナダのアルキャン社の開発商品である。この材料を、ロール製造及び熱処理を加え、性能を強化して、タイヤリングとして、機関車の車輪に装着したものである。(写真2)



100倍

(写真1)



(写真2)

実用走行試験の結果、従来の鋳鋼製車輪と比較して機能的に遜色は見られず、摩擦係数は従来の 0.2程度から 0.4程度まで増加させることが出来た。

この結果、高粘着性車輪を装着することにより、著しい制動距離の短縮もたらされ、従来は、速度 8 km/h で 8 m 以内に停止していたが、10~16 km/h の高速走行時に於いても、従来と同じ制動距離 (8 m 以内) で停止することが、可能となった。一方、機関車の牽引力についても、車輪とレールとの摩擦係数が増加することで、自重を増すことなく、モータの出力アップのみで増加させることが出来た。

## 6. 高粘着性車輪材と従来の車輪材との特性比較

	J I S 記号	組 成	摩擦係数	耐摩耗性	機械的材質
高粘着性車輪材	6061に $Al_2O_3$ 10%	セラミックの コンポジット (セラミック 粒子混合物)	20kgレール材 車輪から抽出し T <sub>2</sub> テストピース 0.45程度	素地がアルミ合金 に硬いアルミ材が 混入している。 鋳鋼に比べてやや 劣るが大きな差は ない。	引張り強さ 340~360N/mm <sup>2</sup> 耐力 0.2% 316~338N/mm <sup>2</sup> 硬度 119~126HB 伸び 約 7% (以下T <sub>6</sub> 熱処理後)
鋳鋼車輪材	SCMn <sub>2</sub> (鋳製加工)	低マンガン鋼 (1.0~1.6%)	同じ条件で 0.2程度	優れている	引張り強さ 590N/mm <sup>2</sup> 降伏点 345N/mm <sup>2</sup> 硬度 163HB

7. 本機関車と、従来の機関車の特性比較

	定速度運転	加速減速	自動運転	重連運転	ブレーキ	急勾配運転	保守点検
サーボ機関車	指示通りの定速度走行	(無段階)定低速可	可	可	サーボブレーキによる定速度制御	技能不要	タイヤリングの摩耗
チョップ制御	負荷により変動	無段階切替負荷	難	難	ブレーキシュ	経験と技能	コンピュータカーボンブラシの点検
抵抗制御	負荷により変動	ノッチ切替負荷	難	難	ブレーキシュ	経験と技能	コンピュータカーボンブラシの点検

8. 平坦路 走行テスト車

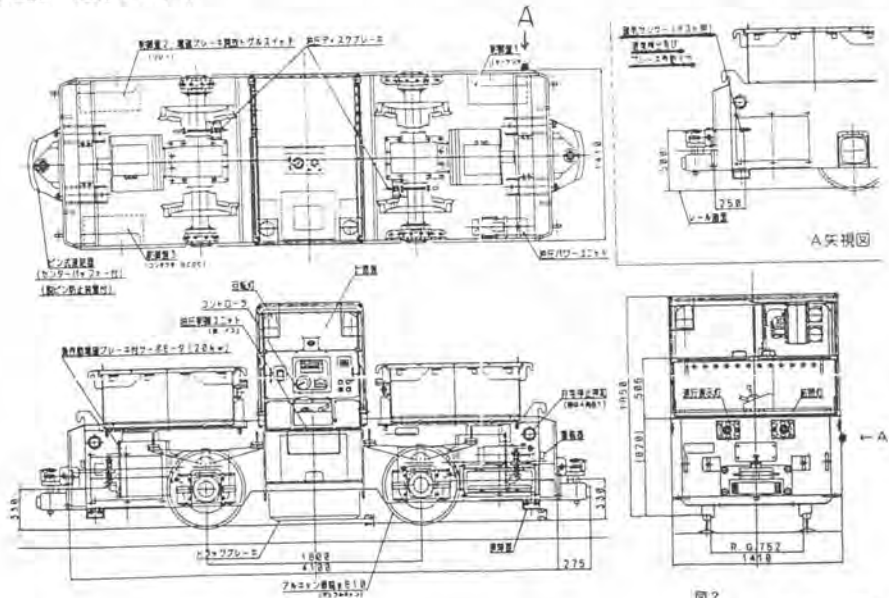


図2 Bionサーボロコ 一般図

9. サーボモータ搭載機関車の主なる仕様

項目	自重表示による車型	8トン	項目	自重表示による車型	1450
1	全長 (mm)	4355 (枕木間隔)	11	サーボモータ定格出力 (kw)	22
2	全巾 (mm)	1400	12	制御方式	パルス出力制御方式
3	レールゲージ (mm)	762/914	13	サーボモータ台数 (台)	2
4	全高 (mm) (屋根まで)	1860	14	定格回転数 (r.p.m)	2100
5	定格牽引力 (kgf)	1450	15	バッテリー (Ah/5HR)	210
6	最大牽引力 (kgf) (A=0.4)	3100	16	電圧 (DC.V)	140
7	定格速度 (km/h) (4段切替)	2.4 7.2 12.0 16.0	17	高川制動 (再生制動) 用停止用ノッチ	※7レ1
8	自重 (kg) (空車時)	約7200 (空車時)	18	制動方式	※7レ1 ※7レ1 ※7レ1
9	車輪径 (mm) (φ610 / φ660)		19	非常停止	※7レ1 ※7レ1 ※7レ1
10	ホイールベース (mm)	1750			

## 10. テストコース

### 10-1 平坦路テスト

性能確認試験の走行コースは、トモエ電機工業(株)小山事業所内に敷設される平坦路コースと50/1000勾配路コースとした。コースの詳細を以下に示す。

#### (1) 平坦路コース

平坦路コースを図3、写真3に示す。

- ① 全長 100m
- ② レールゲージ 762mm
- ③ 速度検知距離 17.78m



写真3 平坦路コース

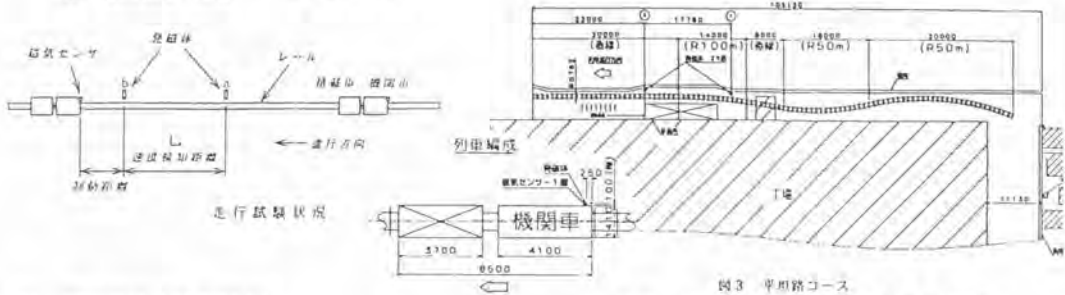


図3 平坦路コース

#### (2) 測定項目及び測定方法

測定項目及び測定方法を以下に示す。

また、図5に走行試験状況を示す。

##### ① 速度 (km/h)

性能確認試験時における走行速度は、レール側方に設置した2点の発磁体(a, b)を機関車に取り付けた磁気センサで通過受信し、その間の距離(L)と通過時間をシーケンサソフトから求めた。

計算式は以下の通りである。

$$\text{走行速度 (km/h)} = \frac{L}{\text{通過時間 (秒)}} \times \frac{60 \times 60}{1000}$$

L: 速度検知距離 (m)

平坦路 17.78m (許速 16km/h)

勾配路 (50/1000) 8.89m (許速 8km/h)

ここで、速度検知距離は設定された速度に対して4.0秒間で走行する距離として予め、上記の数値にセンサを設置した。

##### ② 制動距離 (m)

速度測定が発磁体(b)をブレーキセンサとして使用し、通過信号を検知後直ちにブレーキがかかる制御設定とした。制動距離の測定は、スケールにより読み取った。

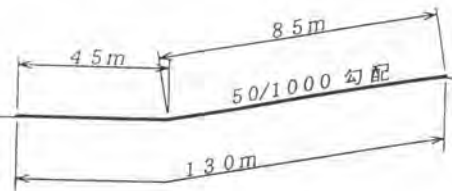


図4

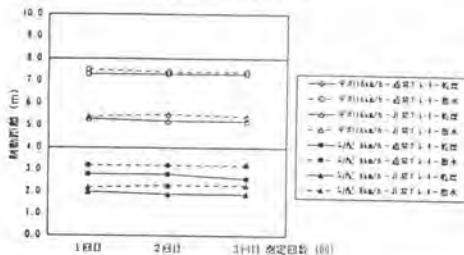
### 10-2 50/1000テストコース 勾配路コース

50/1000勾配路コースを図4、写真4に示す。

- ① 全長 100m
- ② 勾配 50/1000
- ③ レールゲージ 762mm
- ④ 速度検知距離 8.89m



写真4 50/1000勾配路コース



性能確認試験の結果一覧

		定格負荷 (自重9.5t, 牽引重量12.5t)						
走行試験コース		平坦路			50/1000勾配路			
走行速度		16 km/h			8 km/h			
測定項目		通過時間 (秒)	速度 (km/h)	制動距離 (m)	通過時間 (秒)	速度 (km/h)	制動距離 (m)	
		レールの状態	①	4.0	16.0	7.3	4.0	8.0
乾 燥	②	4.0	16.0	7.3	4.0	8.0	2.8	
	③	4.0	16.0	7.3	4.0	8.0	2.6	
	④	4.0	16.0	7.3	4.0	8.0	2.6	
通常ブレーキ	レールの状態	①	4.0	16.0	7.3	4.0	8.0	7.2
	②	4.0	16.0	7.4	4.0	8.0	5.2	
	③	4.0	16.0	7.4	4.0	8.0	3.2	
非正常ブレーキ	レールの状態	①	4.0	16.0	5.3	4.0	8.0	2.0
	②	4.0	16.0	5.2	4.0	8.0	1.9	
	③	4.0	16.0	5.2	4.0	8.0	1.9	
レールに水を散布	レールの状態	①	4.0	16.0	5.4	4.0	8.0	2.2
	②	4.0	16.0	5.5	4.0	8.0	2.2	
	③	4.0	16.0	5.4	4.0	8.0	2.2	

## 1.1 性能試験の結果

(1)平坦路(直線)に於いて、定格負荷(自重9.5t、牽引重量12.5t)を牽引して、走行速度16km/hで走行した場合、制動距離は「通常ブレーキの場合」7.3m以下となった。「非常ブレーキの場合」5.3m以下となった。但し、レール面に水を散布した場合の制動距離は、「通常ブレーキの場合」7.5m以下となった。「非常ブレーキの場合」5.5m以下となった。

(2)下り勾配(50/1000)に於いて、定格負荷(自重9.5t、牽引重量12.5t)を牽引して、走行速度8km/hで走行した場合、制動距離は、「通常ブレーキの場合」2.8m以下となった。「非常ブレーキの場合」2.0m以下となった。但し、レール面に水を散布した場合の制動距離は、「通常ブレーキの場合」3.2m以下となった。「非常ブレーキの場合」5.5m以下となった。

以上により、性能確認試験の結果は開発目標を満足していると言える。

## 1.2 まとめ

本機関車は、負荷の変動に拘らず、一定速度で、走行が出来、しかも、トンネル内での、従来の機関車の搬送走行速度の2倍の高速で走っても、ほぼ同じ制動距離で停止出来ることから、トンネル工事における長距離搬送では、輸送効率が著しく向上し、従来、2編成搬送を必要とした場合、1編成搬送が可能となった。