

○齋藤 直大 (日工大) 正 [電] 上野 貴博 (日工大) 森田 登 (電動機・ブラシ技研)

Hauling force comparison with series / parallel connection of
main motors for 5 inches large-scale model locomotive

Naohiro Saito, Takahiro Ueno,

Nippon Institute of Technology 345-8501, Miyashiro-Machi, Minamisaitama-Gun, Saitama-Ken, Japan

Noboru Morita, Motor & Brush Lab

- This paper is in association with hauling force improvement for electric rolling stock. Main motors for the electric rolling stock are connected in parallel for recent electric cars, where the main motor current suddenly decrease resulting the hauling force decrease and driving track chassis pitching giving driving wheel load instable variations, when a driving wheel slip occurs in rainy day. Therefore, in this paper, the hauling forces in case of both parallel connection and series connection are compared experimentally in wet rail condition, using 5 inches gauge large size model electric locomotives, where the driving track structure and the motor drive system configuration are identical to the real ones, for both with re-adhesion control and without re-adhesion control. As a result of this comparison with statistical analysis, improvement of the hauling force is confirmed for the series connection cases, compared with the parallel connection cases.

Keywords : hauling force, electric motor parallel connection, traction pitching, adhesion coefficient, electro-mechanical coupled

1. はじめに

戦後から現代まで電気車の性能は目覚ましい向上を遂げてきた。また今日では地球環境への関心の高まりから貨物輸送を従来のトラック輸送から鉄道輸送へ転換するモーダルシフトの動きが広がりつつあり鉄道への期待は更に高まっている。

鉄道において、動力車の牽引力向上は永遠の命題であるが、現在主流のインバータ制御においても、かつての蒸気機関車の牽引力を超えていない。過去の事例 (Fig1.1) から牽引力の向上を妨げる原因としてボギー台車のピッチングが考えられている。過去の研究において電動機の直列接続が並列接続と比較して優れた牽引特性を発揮することを明らかにしたが、試験に用いるレールと車輪の組成が実機と異なり、実機との整合性を取ることが出来なかった。

そこで本研究では、新たにレールと車輪を実機と同様に緻密化した物を導入し過酷な牽引条件 (WET 条件) を想定した牽引力や軸重移動の研究および、空転再粘着制御を用い、車輪空転後の再粘着時における牽引力を電動機の並列・直列接続の観点から比較を行い、緻密化を行ったレール・車輪を導入した条件での並列接続・直列接続での試験においても直列接続の牽引特性が有効との結論が得られたので一例を紹介する。

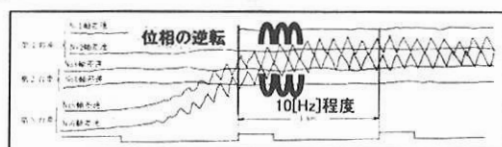


Fig1 Longitudinal Axis Alternate Slipping of EF80

2. 試験用モデル車両と緻密化レール・車輪

2.1 試験用モデル車両

本研究室で製作した5インチゲージ大形模型電気機関車の外観を Fig2.1 に示す。試験用モデル車両は2両編成となっており前部車両は台車に駆動用電動機を実装した動力車、後部車両は制御装置としてプログラマブル・ロジック・コントローラ (PLC) を実装した制御車となっている。動力車は前部台車2軸駆動で駆動台車の上部には軸重を可変的に調整できる機構が備わっている。台車は構造が簡素なボルスタレス台車を採用し枕バネには空気バネをモデルしたシリコンゴム、軸バネはスプリングバネを使用する。駆動車両、電動機、台車、制御車両の使用をそれぞれ Table2.1, Table2.2, Table2.3, Table2.4 に示す。

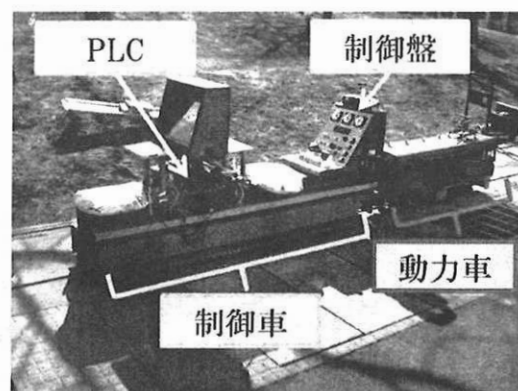


Fig2.1 5 inch test model of electric rolling stock

Table2.1 Technical data of driving rolling stock

車両質量	58.2kg
台車質量	13.0kg
車体支持方式	枕バネ支持(シリコンゴム)
レール・連結器高さ距離	80mm
両端台車中心間距離	630mm
車体寸法	1310mm-340mm-317mm

Table2.2 Technical data of electric motor

駆動装置	つり掛け式支持装置
歯車比	1対4
主電動機	直流分巻電動機
定格	120W-24V-5A-2500rpm-3.2m/s
実車換算速度	100km/h

Table2.3 Technical data of driving traction

軸間距離	250mm
車輪径	102.4mm
牽引点伝達高さ (レール面間)	105mm
軸バネ定数	56.89N/mm

Table2.4 Technical data of control rolling stock

車両スケール	2000mm-529mm-407mm
車両質量	141.4kg
制御方式	PLCによる電流フィードバック制御

2.2 緻密化レール・車輪の導入

新たに導入した緻密化レール・車輪の外観写真を Fig2.2 に示す。また、緻密化レールの断面図を Fig2.3 に示す。レールは実機で広く用いられる 50kg-N レールを 5 インチスケールに縮小し組成も 5 インチモデルと同様に縮小することで試験モデルと実機との整合性を取ることが可能になった。試験用レール・車輪には SWRH-62A を採用し実機の 50kg-N レールと同等なものを採用している。Table2.5 に試験用レール材と実機用レール材の諸元を示す。

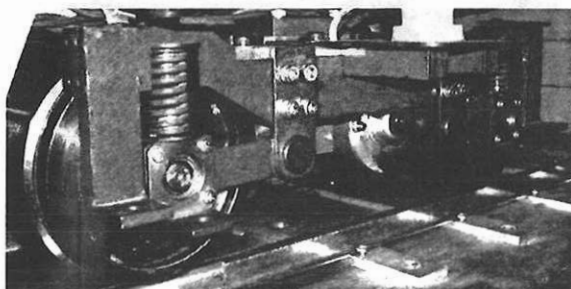


Fig2.2 Test model of steel rail and driving traction

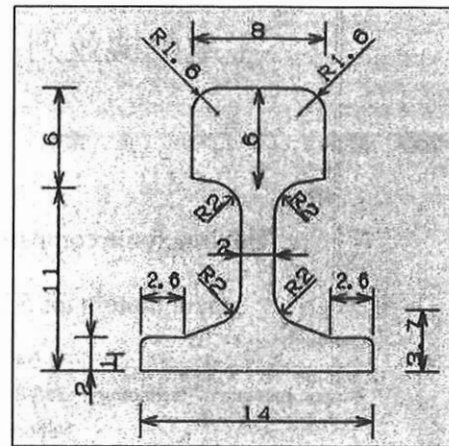
Fig2.3 Shape drawing of 50kg-N steel rail
by 1/8.4 scale

Table2.5 Specification table of steel rail

	試験用鉄レール材 (SWRH-62A)	実機用鉄レール材 (50kg-Nレール)
炭素 C	0.59~0.66%	0.60~0.75%
ケイ素 Si	0.15~0.35%	0.10~0.30%
マンガン Mn	0.30~0.60%	0.71~1.10%
リン P	0.04%以下	0.03%以下
硫黄 S	0.04%以下	0.04%以下

3. 試験方法と評価方法

3.1 試験方法

本実験は Fig3.1 に示すような試験回路で行われる。PLC による電流制御をランプ入力にて任意の設定時間で入力し、勾配条件なしで試験を行った。測定項目は電動機のトータル電流、フォースゲージによる牽引力、動ひずみゲージによる軸バネ変位の測定を行い、並列接続では電動機の電流分担を測定し、直列接続では電動機の間電圧を測定する。また、WET 条件での試験ではレールと車輪の接触面に水を散布し雨天時の過酷な牽引条件を模擬している。また空転再粘着制御を適用した実験では過去に本研究室で製作した「空転再粘着制御プログラム」を用い空転発生後の再粘着時における電動機並列・直列接続時での牽引力比較を行う。また空転再粘着制御を適用した試験では晴天時の牽引を想定した DRY 条件で試験を行う。Fig3.2 に空転再粘着制御プログラムの電流入力波形を示す。

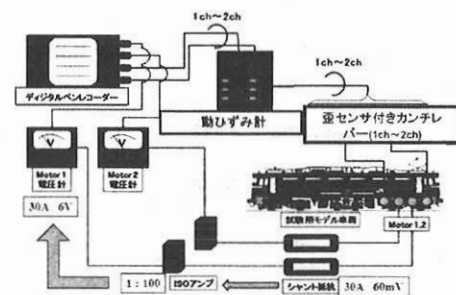


Fig3.1 Test component circuit

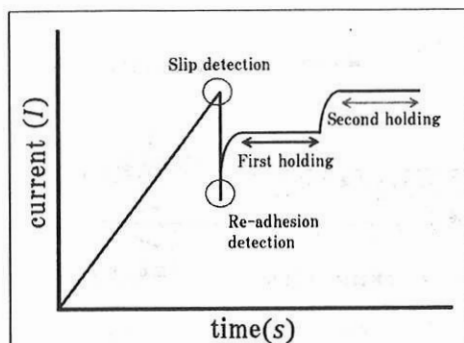


Fig3.2 Input current of slip re-adhesion control

3.2 統計的評価の導入

本研究での主電動機の各接続方式における牽引特性の評価として累積確率分布による統計的評価を導入した。Fig3.3 に示す計算式によって粘着係数を算出し、Fig3.4 に示す累積確率分布表に実験を行った回数分をプロットし近似直線を描き、直線の傾き具合から各接続方式での牽引特性の評価を行う。累積確率分布表でのプロットより求めた近似直線は傾きが急峻であるほど粘着係数のばらつきが少なく安定性が高いと評価でき、逆に傾きが緩やかである場合は粘着係数のばらつきが多く安定性が低いと評価できる。

$$\text{粘着係数}\mu[\%] = \frac{\text{引張力}F[\text{N}]}{\text{一軸動輪上重量}p[\text{kg}]}$$

Fig3.3 Calculating formula of adhesion coefficient

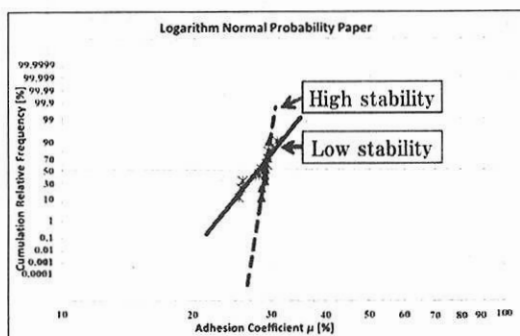


Fig3.4 Example of the accumulation probability distribution list

4. 試験結果

4.1 WET 条件での試験結果

試験条件は電動機の並列接続及び直列接続、軸重条件は実機 12ton 相当で各 10 回試験を行った。また試験結果は試験回数 10 回中で牽引力が最小であった結果を示す。

Fig4.1 に示す並列接続の最大牽引力は 82.64[N] となり、レールと車輪の接触面に生じる粘着係数は約 25.9% となった。Fig4.2 に示す直列接続での最大牽引力は 98.80[N] となり、粘着係数は約 30.0% の高い値となった。Fig4.3 に示す並列接続の振動変位波形では電流分担と軸バネの変位に逆位相が見られ、電流分担によるトルクアンバランスが生じ、動的な軸重移動が発生し牽引力が不安定になったと考えられる。対して Fig4.4 に示す直列接続の振動変位波形では電圧分担に逆位相がみられるものの軸バネ変位には同位相がみられることから、軸重移動が発生しにくく

くトルクが安定し高い牽引力が発揮できると考えられる。また、Fig4.5 に示す累積確率分布による比較では直列接続時のグラフの傾きが 31、並列接続時のグラフの傾きは 17 となり直列接続時でのグラフの傾きが約 2 倍急峻であることから電動機直列接続は雨天時の過酷な牽引条件において安定した牽引力を得ることが可能である。

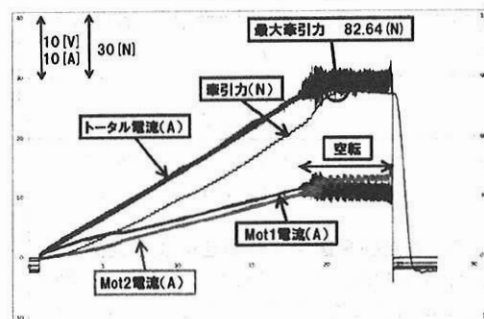


Fig4.1 Hauling force of parallel connection test result by WET condition

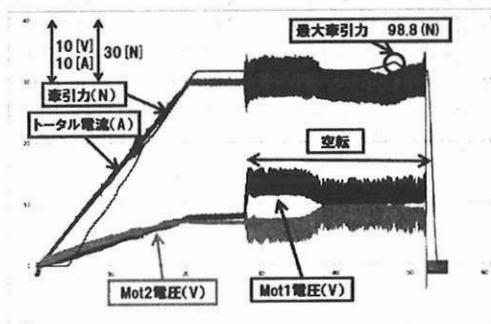


Fig4.2 Hauling force of series connection test result by WET condition

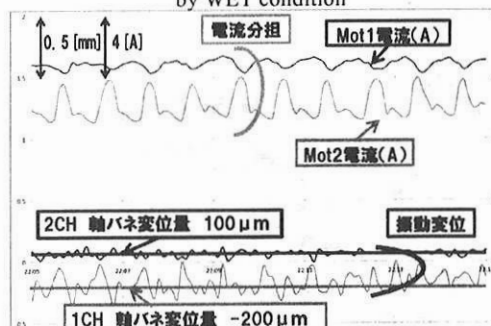


Fig4.3 phase of parallel connection by WET condition

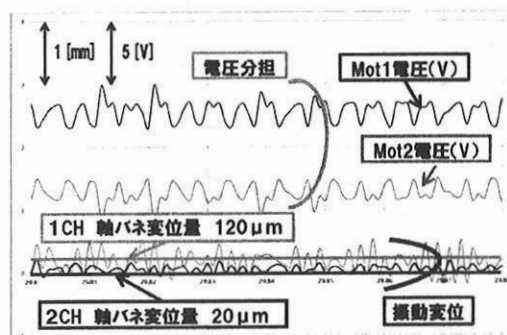


Fig4.4 phase of series connection by WET condition

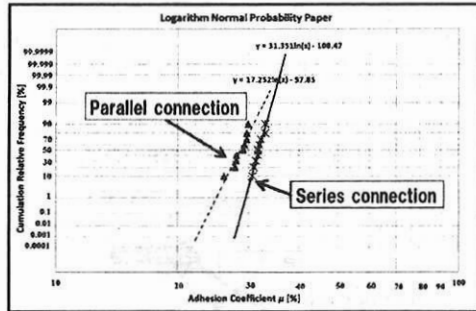


Fig.4.5 accumulation probability distribution list of WET condition

4.2 空転再粘着制御を適用した場合の試験結果

試験条件は電動機の並列接続及び直列接続、軸重条件は実機 9.3ton 相当で各 10 回試験を行った。また試験結果は WET 条件と同様に並列接続・直列接続共に試験回数 10 回中で牽引力は最小の場合を示す。

Fig.4.6 に示す並列接続の再粘着時における最大牽引力は 66.88[N] となり、粘着係数は約 28.4% となった。Fig.4.7 に示す直列接続での再粘着時における最大牽引力は 74.72[N] となり、粘着係数は約 30.0% の高い値が得られた。また、Fig.4.8 に示す並列接続の振動変位波形では電流分担と軸バネ変位に逆位相が見られトルクアンバランスとなり牽引力が不安定となるのに対し、Fig.4.9 に示す直列接続の振動変位波形では電流分担が発生せず軸バネ変位に同位相が見られることから再粘着時に安定した牽引力を得られると考えられる。また、Fig.4.10 に示す累積確率分布表による比較では直列接続時のグラフの傾きが 31、並列接続時のグラフの傾きが 8 となり直列接続は並列接続と比較して、グラフの傾きが約 4 倍急峻であることから電動機直列接続は空転再粘着制御を適用した場合でも安定した牽引力を得られることが確認された。

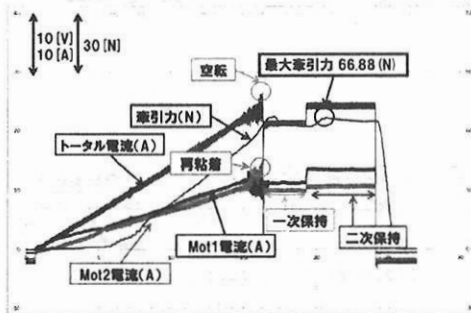


Fig.4.6 Hauling force of parallel connection test result by slip re-adhesion control

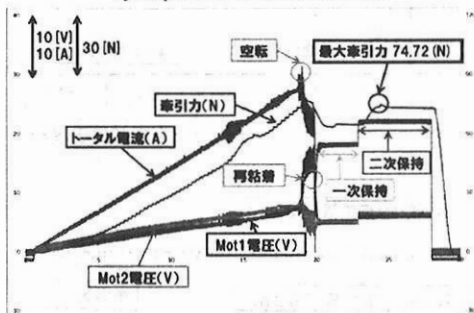


Fig.4.7 Hauling force of series connection test result by slip re-adhesion control

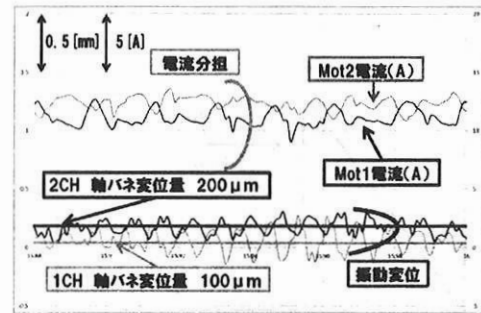


Fig.4.8 phase of parallel connection

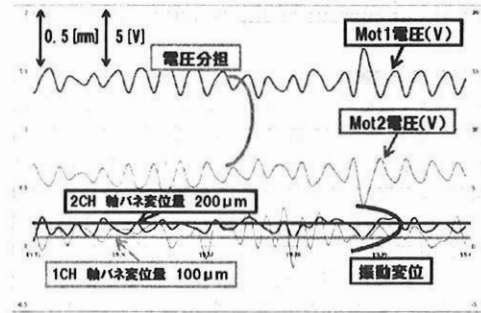


Fig.4.9 phase of series connection

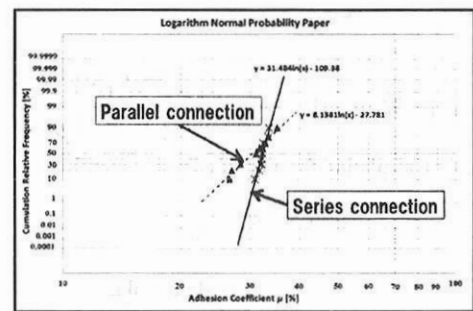


Fig.4.10 accumulation probability distribution list of slip re-adhesion control

5. おわりに

今回、新たに導入した緻密化レール・車輪による牽引力試験での粘着係数の基礎的な比較において直列接続の方が並列接続より WET 条件では約 2 割、空転再粘着制御を適用した場合では約 1 割粘着係数が高いことが確認された。また振動変位波形による比較では WET 条件と空転再粘着制御を適用した場合に並列接続では電流分担によるトルクアンバランスより軸重移動が発生しているのに対し、直列接続では電流分担によるトルクアンバランスが発生せず軸重移動が起こりにくいことが確認された。累積確率分布による統計的比較では WET 条件、空転再粘着制御を適用した場合の双方において直列接続が並列接続より安定した牽引力を発揮できることが確認された。

以上より電動機直列接続は WET 条件の過酷な牽引条件や再粘着制御適用時においても動的な軸重移動が並列接続と比較して牽引特性が良好であり、また実機相当のレール・車輪を導入した場合でも良好な結果が得られたことから本研究として電動機直列接続を推奨する。

参考文献

- (1) 電気学会 電気学会技術報告 第 673 号
- (2) 高根沢 真, 森田 登, 他 鉄道技術連合シンポジウム 2009「鉄道台車ピッチングと電動機直列・並列接続に着眼した電気車の牽引力向上の研究 第 2 報」