

主電動機トルク制御による電気機関車けん引力向上に関する基礎研究

山下 道寛* 坂本 裕一郎 (鉄道総合技術研究所)

Basic Research on Improvement of Tractive force of Electric Locomotive by Torque Control of Traction Motor.
 Michihiro Yamashita*, Yuichiro Sakamoto, (Railway Technical Research Institute)

Since rolling stock is propelled by the friction between wheels and rails, slip tends to occur during bad weather conditions, causing schedule delays or inability to start up on gradients. The authors have previously reported on the effects of the traction motor torque on the vehicle's front-back acceleration and coupler force. In the present study, to investigate the effect of torque control on traction performance, experiments on traction were conducted using a scaled model vehicle.

キーワード：トルク制御，電気機関車，けん引力，トラクション係数，再粘着制御，
 (torque control, electric locomotive, tractive force, traction coefficient, readhesion control)

1. はじめに

鉄道車両は、鉄車輪と鉄レール間の摩擦により推進力を得ているため、転がり摩擦が小さく輸送に係るエネルギー効率が高い。また、大量の貨物を輸送することができるため、トラック輸送から鉄道輸送へのモダリティシフトが期待されている。しかし、鉄車輪と鉄レールの摩擦係数はゴムタイヤに比べて小さく、悪天候時にレール車輪間の摩擦係数が低下すると、空転が発生してしまい、ダイヤ遅延の要因となる場合がある。また、勾配上で停止した場合には、最悪、起動不能になることもある。

機関車列車の速度-けん引力特性のイメージを図 1 に示す。急勾配上から起動するためには、けん引力は起動抵抗、勾配抵抗などの列車抵抗を上回る値を確保する必要がある。列車抵抗を下回ると起動できない。悪天候時においても機関車のけん引力を確保する方策として、主電動機トルクを操作する空転再粘着制御や、車輪レール間に散砂す

ることで摩擦係数を増加して空転を防止する機能などがある。

著者らは以前より主電動機トルクが車体前後加速度や自連力に及ぼす影響について報告⁽¹⁾⁽²⁾してきた。今回、空転再粘着制御によりけん引力を向上する手法を検討する前段として、トルク制御がけん引性能に及ぼす影響について把握するため、縮尺模型車両を用いてトラクションに関する実験を行った。具体的には、空転検知時のトルク引下げ量の違いと起動トルクの時定数の違いによるけん引力への影響を調査した。これらについて報告する。

2. 試験装置

今回の調査に用いた吊りかけ駆動方式の縮尺模型車両などの試験装置⁽²⁾⁽³⁾ (計測器は除く) を図 2 に示す。この装置を用いて、各軸の車輪周方向のレール・車輪間に働く前後力と各輪重、更に緩衝器の前後方向の力を測定する。主電動機は誘導電動機(IM)と永久磁石同期電動機(PM)である。

表 1 縮尺模型車両の主な仕様

Table 1 Main specifications of a scale model vehicle

| | | | |
|----------|-----------|--------|----------|
| 車両質量 | 118.06 kg | 連結器高さ | 0.105m |
| 車体質量 | 19.46 kg | 車輪径 | 0.133m |
| 台車質量(IM) | 30.95 kg | 歯車比 | 5.33 |
| 台車質量(PM) | 28.70 kg | 一次ばね剛性 | 28.4N/mm |
| 台車間距離 | 0.762m | 二次ばね剛性 | 16.8N/mm |
| 台車内軸距 | 0.298m | 緩衝器剛性 | 8.9N/mm |
| 牽引装置高さ | 0.026m | けん引装置 | Z リンク |

※IM：誘導電動機 PM：PM モーター

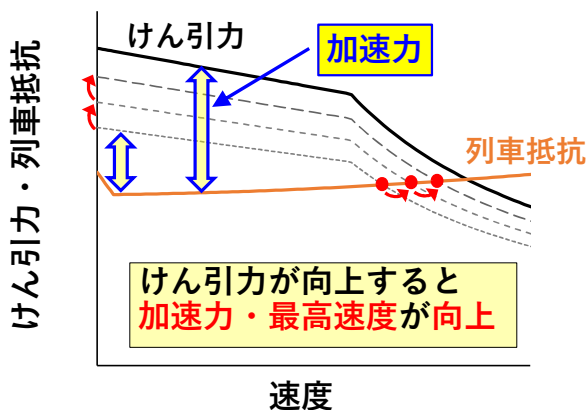


図 1 速度-けん引力特性のイメージ

Fig.1 Image of speed-tractive force characteristics

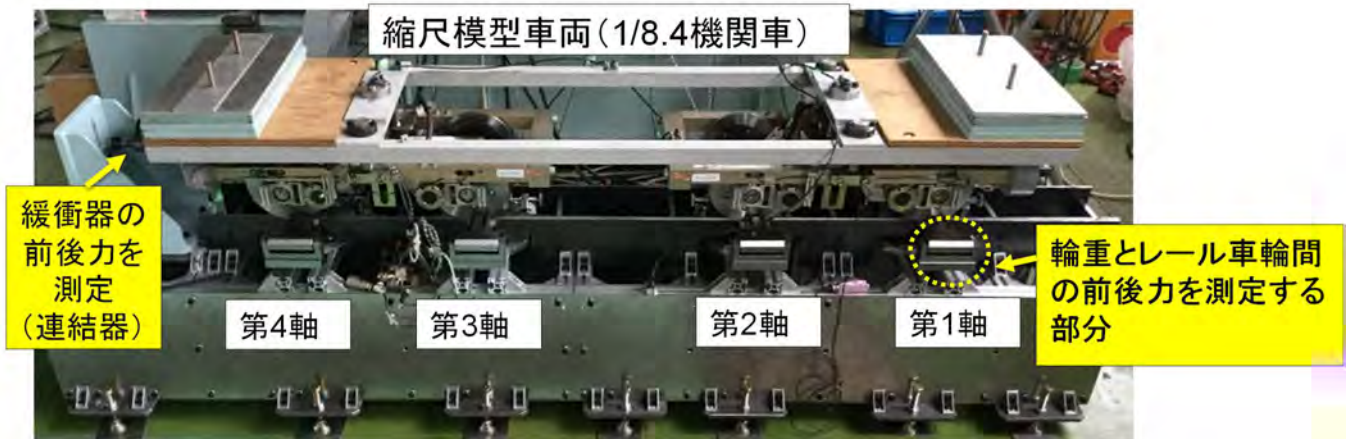


図 2 試験装置

Fig. 2 Entire test equipment

3. 試験結果

〈3・1〉 軸重移動再現試験 前節で説明した装置 (図 2) を用いて、起動時の軸重移動を再現させる試験を実施した。この試験では各軸のトルク調整が可能な PM モータが主電動機の電動台車を用いた。主電動機トルク指令は 0.78Nm とし、各軸のレール・車輪間の前後力と軸重移動量の測定値を図 3(a) と図 3(b) に示す。軸重移動量については計算値⁽⁴⁾ と測定値はよく一致することが確認できた。また、左右の輪重の和で求めた軸重に対するレール・車輪間の前後力の比 (車輪・レール間前後力/軸重) で算出したトラクション係数を図 3(c) に示す。

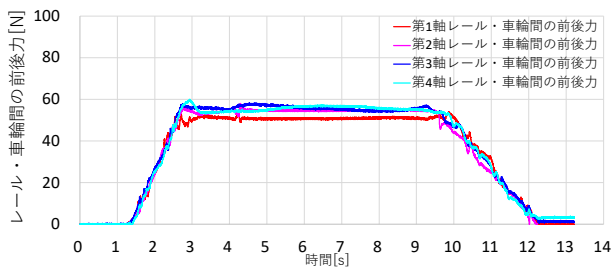


図 3(a) レール・車輪間に働く前後力

Fig.3(a) tractive force

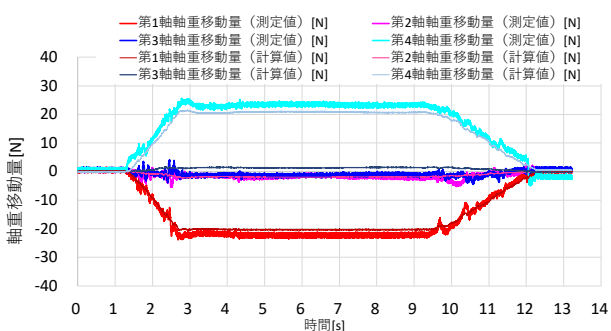


図 3(b) 軸重移動量

Fig.3(b) Value of axle transfer

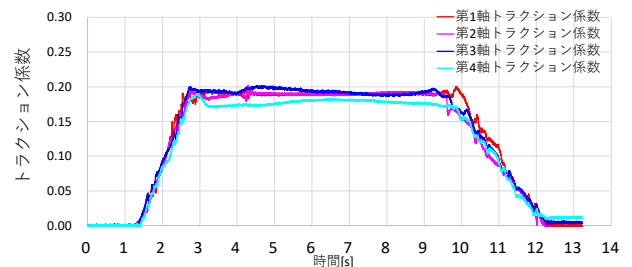


図 3(c) トラクション係数

Fig.3(c) Traction coefficient

〈3・2〉 空転再粘着制御試験 空転を検知すると再粘着制御により主電動機トルクを素早く引き下げることで空転を抑制する。ただし、トルクを大きく引き下げると、けん引力や車両振動により他軸に空転が誘発されることが知られており、過度な引下げを行わずに空転を防止することが望ましい^{(5) (6)}。

今回、試験装置 (図 1) を用いてトルクの引下げ量の違いによる車両振動への影響を確認する試験を実施した。本試験の条件を以下に示す。

○空転再粘着制御の試験条件

- ・主電動機は誘導電動機(IM)を使用
- ・駆動軸は第 3 軸と第 4 軸
- ・起動時の第 3 軸のトルク分電流指令 3[A] (前後力約 75N)、第 4 軸のトルク分電流指令 2[A] (前後力約 50N) に設定
- ・速度はローター周波数で表示した。車輪周速度のスケール換算は、時速=0.594×ローター周波数 (電気角)
- ・ローター周波数情報を用いて、速度差検知 (閾値 0.8Hz) フラグと加速度検知 (閾値 4Hz/s) フラグの論理積で空転を検知する。なお、速度差は自軸速度

と最低速度軸との差で求めている。

- 空転検知すると、トルク分電流指令を 20A/s の傾きで引き下げる。そしてローター周波数変化率が 0 以下となると、空転の収束を検知（空転収束検知）して、引下げを停止する。そして、速度差が速度差検知以下になるか、トルク保持時間 0.5s を経過すると、トルク電流指令を 0.5A/s の傾きで増加させて空転検知前の値まで戻す（図 4）。
- 空転再粘着制御に用いるローター周波数変化率は、ノイズの影響を軽減するため、後退差分による近似微分を行っている。差分間隔は 50ms と 10ms の 2 種類を算出する。
- 空転検知に用いるローター周波数変化率には、差分間隔 50ms の近似微分を用いる。また、空転収束検知には、差分間隔 50ms（遅れ大）と 10ms（遅れ小）を用いる。差分間隔の違いにより、トルク分電流指令の引下げ量に差が生じる（図 4）。

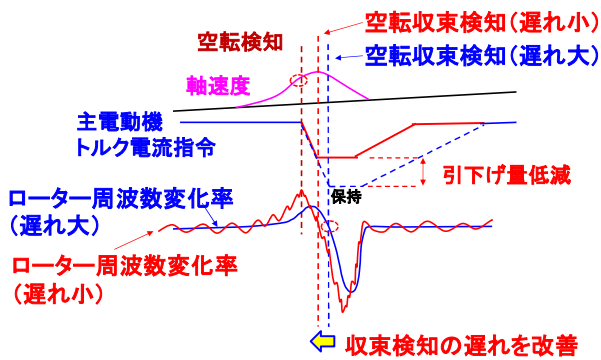


図 4 空転再粘着制御時のトルク波形
Fig.4 Torque control waveform in re-adhesion control

上記の試験条件で実施した空転再粘着制御の試験結果を図 5 に示す。

時刻 3s で第 3 軸と第 4 軸のトルク電流指令を時定数 1s の一次遅れの応答で立ち上げた。空転収束検知に用いるローター周波数変化率を算出する差分間隔は、時刻 0~25s までは 50ms の遅れの大きな信号を用いた。そして、時刻 25s~時刻 43s の間は差分間隔 10ms の遅れの小さな信号を差分間隔 10ms に切り替えた。時刻 43s 以降は、再度、差分間隔 50ms の信号を用いた。

ローター周波数変化率の遅れが小さい（時刻 25s~時刻 43s）期間では、トルク電流指令の引下げ量が小さく、軸重移動量の振動成分が小さくなることを確認できる。特に空転していない第 4 軸の軸重移動量の変動は、トラクション係数の変動となるため、変動が大きくなると空転を誘発しやすくなる。第 4 軸のローター周波数を確認すると、遅れ大の期間においては、空転の発生（時刻 10s~15s）や空転

には至らない程度の速度の上昇（変動）が確認できる。

緩衝器の前後力は、移動平均の値からは遅れ小の期間において向上している。これにより、けん引力が向上することが確認できた。

実車試験結果⁶⁾と同様に、空転再粘着制御のトルク分電流指令（トルク）の引下げ量を小さくすることで、縮尺模型実験においてもけん引力（緩衝器の前後力）の向上が確認できた。

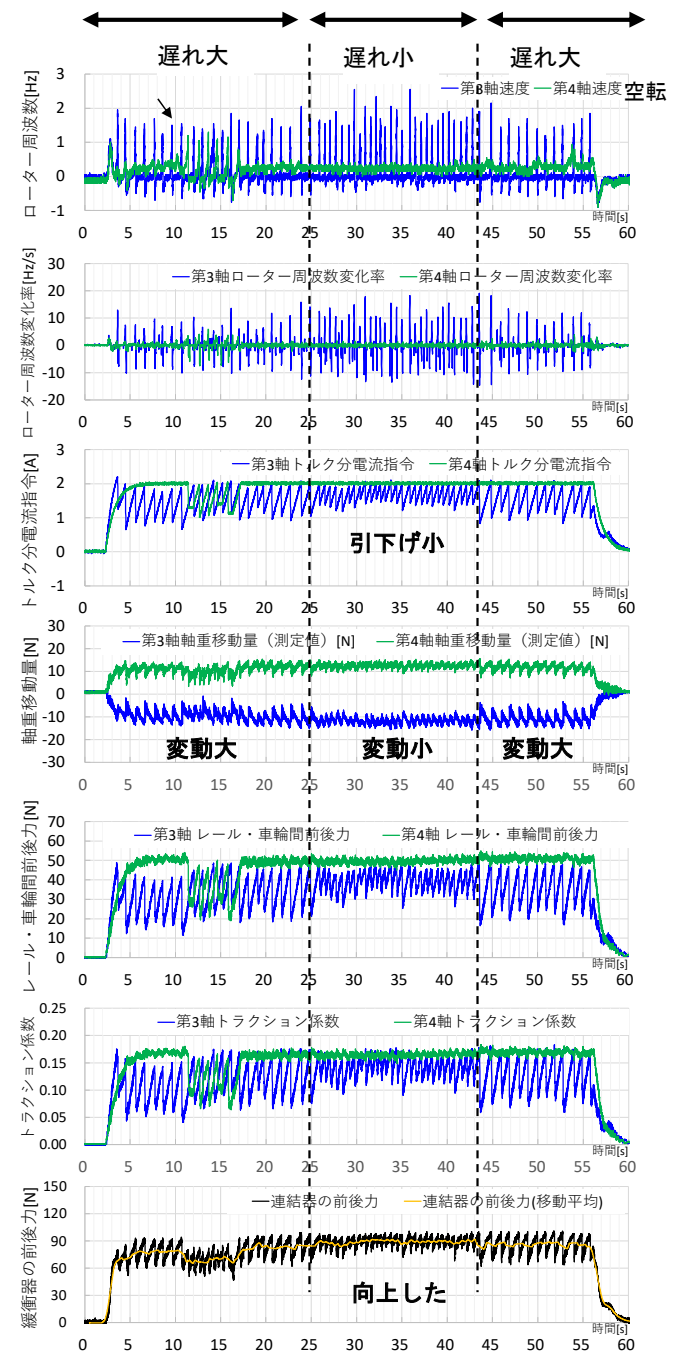


図 5 空転再粘着制御時の各波形
Fig. 5 Each waveform during slip readhesion control

〈3・3〉 起動時の緩衝器前後力測定試験 起動時にはノッチで設定されるトルク指令値まで、一次遅れ応答か、一定傾きでトルクを立ち上げている。勾配上からの起動の場合には、車両を確実に加速させるなど、素早くトルクを立ち上げることが要求される場合もある。本節では、トルク応答の違いによる緩衝器の前後力への影響を調査した結果について述べる。

○試験条件

- ・主電動機は誘導電動機(IM)を使用
- ・駆動軸は第3軸と第4軸
- ・起動時の第3軸と第4軸のトルク分電流指令をそれぞれ1.5[A]（前後力約35N）に設定
- ・起動時のトルク応答の一次遅れ時定数は T=2, 1, 0.5, 0.2, 0.1 の5パターン

一次遅れの時定数 T の5パターンについて起動試験を実施した結果について図6に示す。

時定数 T=2, 1, 0.5 についてはレール・車輪間に働く前後力がほぼ同じ応答波形となっているが、時定数 T=0.2 と 0.1 については、起動直後に整定値の約30%のオーバーシュートを確認した（図7）。これは主に緩衝器の剛性と車両質量による固有振動特性の影響が表れたものと考えられる。

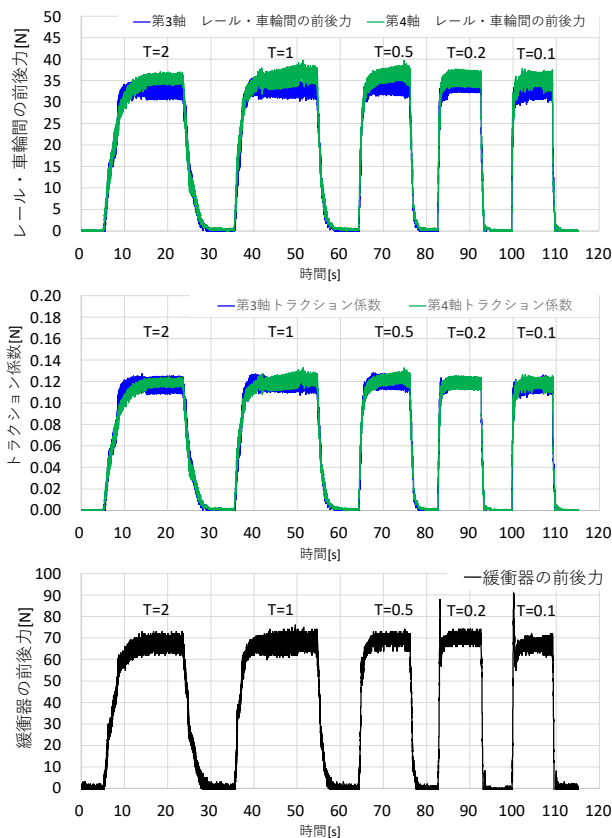


図6 レール・車輪間前後力と緩衝器前後力

Fig.6 Longitudinal force between rail and wheel and longitudinal Force of Coupler

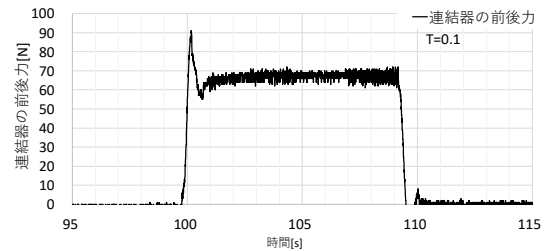


図7 緩衝器前後力の拡大波形(T=0.1)

Fig.7 Enlarged coupler longitudinal force waveform (T=0.1)

レール・車輪間の前後力とトラクション係数にオーバーシュートは現れていないが、緩衝器のオーバーシュートによる前後力変動は、隣接した車両に伝わるため、編成列車（貨車）全体にその変動が伝搬する可能性がある。時定数の小さなトルク起動は素早く起動するためには有効であると考えられるが、編成列車全体への振動の影響（荷崩れなど）は考慮する必要があることが分かった。

4. まとめ

縮尺模型装置を用いて試験した結果を以下にまとめる。

- ・空転再粘着制御のトルク引下げ量の違いによるけん引性能への影響を調査した。空転収束検知の遅れが小さくして、トルク引下げ量を小さくするとけん引力が向上することを確認した。
- ・起動時の一次遅れのトルク応答の違いによる緩衝器前後力への影響を調査した。一次遅れ時定数が小さくなると緩衝器の前後力にオーバーシュートが生じることが確認できた。

今回使用した縮尺模型試験装置では、トラクション係数（レール車輪間前後力/軸重）を求められるなど、けん引性能の向上を目的としたトルク制御方法を検討する上で、車両振動への影響を再現し、確認して進めることができる。今後、この装置を用いた基礎的な研究を継続する。

文 献

- (1) 坂本、山下：「編成電車の駆動力変動試験に基づく車体前後振動解析」、日本機械学会論文集, Vol. 87, No. 895 (2021)
- (2) 坂本、山下：「主電動機トルク変動による編成全体の軸重変動の研究」、D&D2019, 519 (2019)
- (3) 山下、寺田：「主電動機トルク変動時のレール・車輪間のトラクション係数測定に関する基礎実験」、D&D2020, 506
- (4) 福崎直治、沢野修一：「電車と機関車」、岩波書店, p.64 (1964)
- (5) 山下、添田：「インバータ制御機関車の起動けん引力を向上する空転再粘着制御手法」、鉄道総研報告, Vol. 30, No. 11 (2016)
- (6) M.Yamashita, T.Soeda: "Anti-slip re-adhesion control method for increasing the tractive force of locomotives through the early detection", EPE2015, 789