

# インバータ制御機関車の起動けん引力を向上する 空転再粘着制御方法

山下 道寛\* 添田 正\*\*

Anti-slip Readhesion Control Method to Increase Starting Tractive Effort of Electric Locomotive  
Fed by Inverter

Michihiro YAMASHITA Tadashi SOEDA

JR Freight company has developed a HD300-Type diesel hybrid shunting locomotive as a substitute for super-annuated DE10 type diesel shunting locomotives. In an early stage of development, it was found out that a stable tractive effort just after starting was difficult to ensure. Accordingly, we have improved the signal delay of wheel rotating acceleration used for determining a stop of torque reduction of an anti-slip readhesion control method and developed an anti-slip readhesion control method to reduce the amount of torque reduction and to increase the tractive effort on average. The developed method has increased the tractive effort by 5% on average compared with that before development, and been applied to mass produced HD300-Type diesel hybrid shunting locomotives.

キーワード：空転，機関車，けん引力，再粘着制御，インバータ制御，加速度

## 1. はじめに

機関車けん引方式では、限られた動軸数で列車をけん引する必要がある。悪天候等によりレールの転がり接触面が湿潤状態になると、レール・車輪間の摩擦力は乾燥状態のときと比べて低くなりけん引力は低下する。また、湿潤状態において勾配走行中の機関車が空転した場合には、列車速度が低下し最悪の場合は勾配途中で停車する。さらに、列車が発車するときなどの起動時に空転が発生した場合には列車加速の低下や、勾配上では列車が退行してしまう恐れもある。さらに、このような状態で空転を繰り返すと車輪やレールを損傷させてしまうこともあるため、動軸が空転した場合には、速やかに空転を抑制させる再粘着制御（トルク制御）を行う必要がある。鉄道総研では、これらに対応するため従前より電気車の再粘着制御の研究を実施してきた<sup>1)~4)</sup>。

日本貨物鉄道株式会社（以下、JR 貨物）は、駅構内で使用されているディーゼル式入換機関車 DE10 の老朽化に伴い、その代替機としてインバータ制御式のハイブリッド入換機関車 HD300 形式を開発した<sup>5)</sup>。入換機関車の一定加速域（定トルク域）は速度 10km/h 程度までであり、駅構内の勾配上からの引出しや、速度 40km/h 程度までの作業ダイヤを考慮すると、起動直後の安定したけん引力確保が大変重要である。開発当初は、本線用機関車の空転・再粘着制御アルゴリズムを用いていたが、

\* 車両制御技術研究部 駆動制御研究室

\*\* 日本貨物鉄道株式会社 現大宮車両所

軸重や車輪径、駆動系慣性質量等が本線用機関車とは異なり、起動直後に安定したけん引力を確保することが難しいことが判明した。

この対策として、空転発生時にトルクの余分な引下げを防止することに着目し、空転検知（トルク引下げ開始）に用いる加速度信号よりも遅れの小さな加速度信号を空転収束検知（トルク引下げ停止）に用いることで、トルク引下げ量を低減させ、平均トルク値の増加により平均けん引力を向上する再粘着制御方法を開発した<sup>6)</sup>。また、以前より新幹線電車において、トルク引下げ量を低減して主電動機電流値（トルク）を向上する取り組みを実施し、その効果を検証している<sup>2)</sup>。

開発した制御の有効性をシミュレーションと東京貨物ターミナルのコンテナホームにおける走行試験で検証したところ改善前に比べて平均けん引力が 5% 以上向上する結果を得た。

## 2. 再粘着制御方法

### 2.1 改善前の再粘着制御方法

今までに JR 貨物が開発した本線用のインバータ制御機関車は、最大けん引重量は 1,300t を想定し、勾配上における列車加速性能は 0.1km/h/s 以上としてきた。しかし、雨天等では空転が発生し、再粘着制御方法によっては、けん引力が低下して加速が困難になる場合もあった。

貨物駅構内において、営業運転で想定される勾配とけん引トン数を考慮した入換機関車の速度けん引力特性を

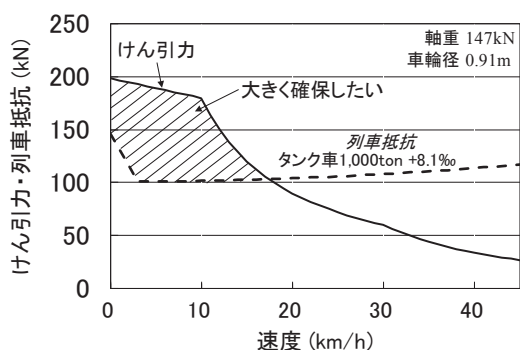


図1 HD300形式入換機関車の速度－けん引力特性

図1に示す。加速力を得るためには起動直後に想定される勾配抵抗を上回るけん引力が要求される。このため、速度0-10km/h域において100kNを大きく上回るけん引力を安定して確保する必要がある。

インバータ制御の電気機関車では、主電動機回転子の回転速度や加速度情報を用いて空転を検知してトルク制御する再粘着制御動作（図2）の概要を以下に述べる。

- ①回転速度や回転加速度が閾値を超過した時に空転と判断（空転検知）し、主電動機トルクを引下げる。
- ②速度差情報や加速度情報から空転が収束し始めたと判断（空転検知閾値以下）した場合、トルクの引下げを停止する。空転検知と空転収束検知の閾値に差（ヒステリシス）を設けて引下げ動作することや、空転検知時の速度差に応じて一定値のトルクを引下げる場合がある。
- ③トルク引下げ終了後に、トルクを一定時間保持し、その後、空転時に推定した粘着力相当値に復帰させる。

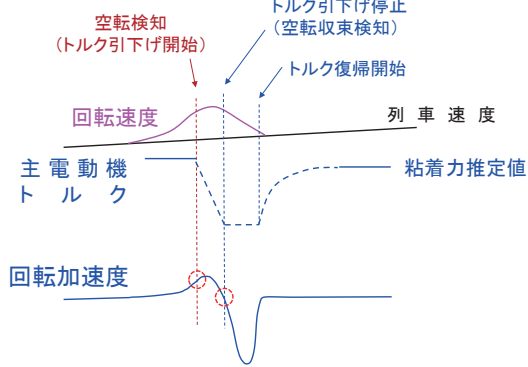


図2 空転時の主電動機トルク動作（再粘着制御）

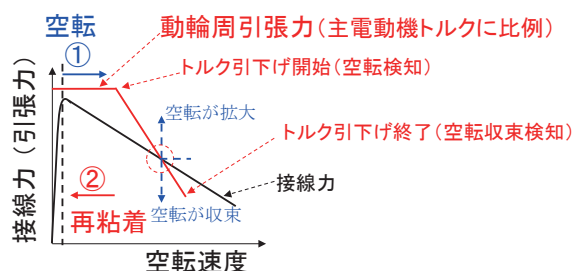


図3 接線力と動輪周引張力の関係

接線力と動輪周引張力（トルクに比例する力、以下、引張力）の関係を図3に示す。図中において、①で空転が発生すると、接線力の負勾配特性により、トルクが空転発生直前の値のままでは空転速度が増加していくため、空転を検知しトルクの引下げを行う必要がある。そして、トルク引下げ後、引張力が接線力を下回ると、空転加速度が減少し、②の向きに再粘着に向けて収束を開始する。

開発当初におこなった散水試験結果例を図4に示す。起動直後の時刻11秒付近で全軸に空転が発生し、各軸のトルクが大きく引き下げられ、自連力（図4下）の振動p.p値が70kN程度生じていることが確認できる。

空転検知後に引張力を接線力よりも大きく余分に引下げた場合には、再粘着時に引張力と接線力の差が大きくなり、車体前後振動や自連力振動を引き起こす要因になり、全軸に空転を誘起し易くなると考えられるため、トルクを余分に引下げないことが重要である。

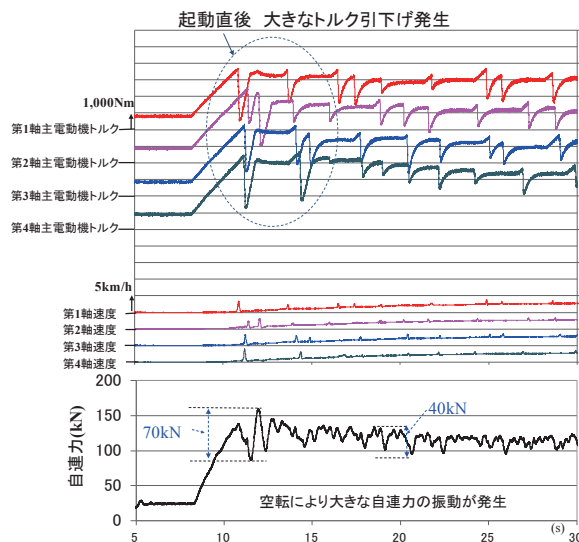


図4 起動直後の自連力波形の一例（改善前）

## 2.2 速度演算と加速度演算

本節では、主電動機の回転加速度の算出方法とその特性について述べる。

インバータ制御機関車では、主電動機端に設置されているPGセンサのパルス信号によって回転子の回転速度と回転加速度が演算され再粘着制御に用いられている。この信号には、台車振動や歯車同士のかみ合い振動等から生じる車輪の回転成分以外の振動成分（以下、ノイズ成分）が含まれる。

回転加速度のノイズ成分が大きい場合には空転誤検知しやすくなるため、平滑化してノイズ成分を減衰させて誤検知を防止する。本開発では平滑化手法として移動平均法を用いた。

### 2.2.1 速度演算

図5に示すように隣り合うPGパルスの立ち上がり時

間（パルス時間幅） $T_p$  をカウンタ周波数 1MHz 程度のカウンタで計測し、車輪径や歯車比を用いて速度算出する。このとき速度計数誤差は  $T_p$  の計数時間単位（ $1\mu\text{s}$ ）に依存する。

ここで、車輪径を  $D$  (m)、車輪 1 回転のパルス数を  $P$  とすると、PG パルスのカウント数から求められる速度  $V$  について式 (1) が成り立つ。今、 $D=0.91\text{m}$ 、 $P=80\text{G}$  (G: 歯車比 4.267) とすると、速度誤差は速度 10km/h で 0.1% 以下となり、計数時間単位による速度誤差は無視（極低速を除く）できる。

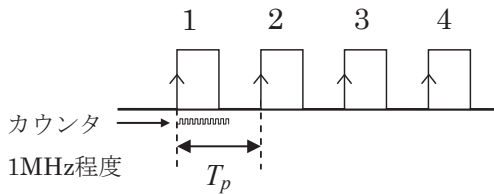


図5 パルス幅算出方式

$$V = \frac{3.6\pi D}{T_p} \cdot \frac{1}{P} \quad [\text{km/h}] \quad (1)$$

再粘着制御に用いる速度情報は、移動平均時間幅  $T_a$  における平均値として求められ、速度算出による遅れ時間はその半分の  $T_a/2$  となる。

### 2.2.2 加速度算出

回転加速度は、現在の移動平均速度  $V(T)$  と平滑化時間幅  $T_a$  だけ前に算出した速度  $V(T-T_a)$  から式 (2) により算出した (図 6)。

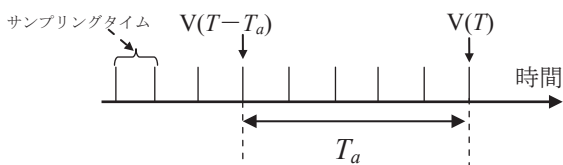


図6 加速度算出方法

$$\alpha = \{ V(T) - V(T - T_a) \} / T_a \quad (2)$$

加速度算出の時間幅は、速度の移動平均時間と同じ値で算出する。速度の移動平均時間幅を  $T$  とすると、その遅れ時間は  $T/2$  であるから、加速度検出遅れ  $\Delta T$  は式 (3) で表される。

$$\Delta T = (T + T_a) / 2 \quad (3)$$

加速度信号の遅れは移動平均時間幅と同じ  $T_a$  となる。以降では、「Xms 加速度」は Xms 移動平均速度から時間幅 Xms で算出された加速度を意味することとする。

### 2.2.3 加速度信号の周波数解析

機関車単機で走行したときの回転速度と回転加速度の各波形例を図 7 に示す。また、速度 10km/h 付近において、10ms 加速度と 40ms 加速度の周波数解析を行った。その結果を図 8 に示す。図 8 からは、約 62Hz にノイズ主成分が含まれていることが分かる。この周波数は、時速 10km/h での歯車のかみ合い周波数 (63Hz) にほぼ一致することから、歯車のかみ合い振動によるノイズ成分と考えられる。他の速度でも同様のノイズ成分が確認されている。

40ms 加速度を用いた同様の周波数解析では、10ms 加速度と比較するとノイズ成分は大きく減衰していることが確認できる。

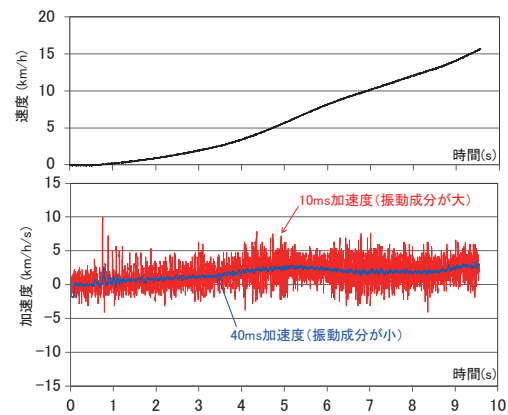


図7 10ms 加速度と 40ms 加速度の波形例

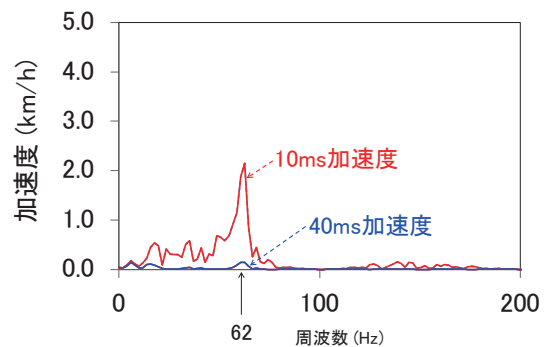


図8 加速度の周波数成分（速度 10km/h 付近）

### 2.2.4 加速度信号の周波数成分

空転検知の閾値は、誤検知の頻度を小さくする観点から列車加速度に対して 1.5 ~ 2.0km/h/s 上回る値を検知閾値とすることが一般的である。よって、空転検知に用いる加速度は、40 ms 加速度に含まれるノイズ成分 (0.5km/h/s 以下) 程度以下 (現行相当) であることが望ましい。

### 2.3 開発した再粘着制御方法<sup>6)</sup>

前節で述べた加速度信号の遅れを考慮して、再粘着制御時のトルクの余分な引下げを低減するため、空転収束

特集：車両技術

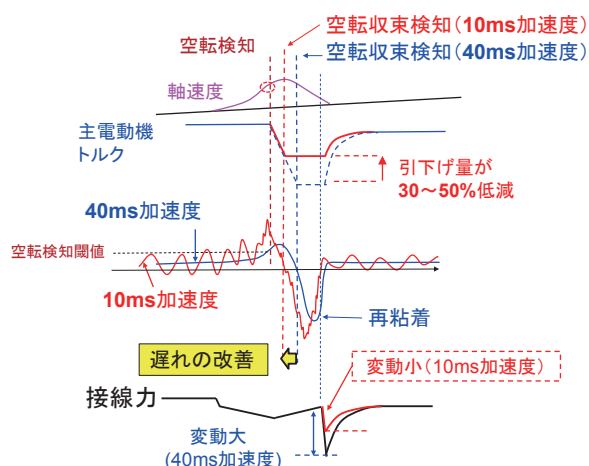


図9 再粘着制御の主電動機トルク動作

検知に使用する加速度信号に、空転検知に用いた40ms加速度よりも遅れの小さな10ms加速度を用いることを提案した(図9)。ここで、1,000ton程度のけん引列車では起動加速度は0.5km/h/s程度であるため、空転検知閾値は40ms加速度が3km/h/s以上、空転収束検知閾値は10ms加速度が0km/h/s以下とした。

加速度信号の遅れの観点から、余分なトルク引下げ量の目安を求めてみると、40ms加速度信号では実際の車輪の回転加速度よりも40ms遅れが生じるため、主電動機トルクの引下げ傾きを1秒当たり起動時最大トルク(約5,000Nm)の3~5倍としたとき、起動トルクの12~20%(600~1,000Nm)を、余分に引下げてしまうことになる。これに対し、10ms加速度を空転収束検知に使用することで、その値を3~5%(150~250Nm)程度に低減することが期待できると考えられる。ただし、トルク引下げ量の低下は、再空転が発生しやすくなる可能性がある。しかし、一時保持時間を変更する機能(一時保持動作中に速度差が0.3km/h以下となることで再粘着と判断するまで一時保持継続する機能)を併用することにより、再空転に至ることはほとんど生じないことを確認している。トルク保持動作終了後には、トルクを空転検知時に推定した粘着力相当値<sup>3)</sup>に復帰させ、再空転が生じなれば速度ノッチ特性により設定されているトルクパターン値へ復帰する。

3. シミュレーション

開発した再粘着制御方式の有用性を確認するため、雨天を模擬した走行シミュレーションを実施した。

3.1 シミュレーションモデル

シミュレーションに用いた車両モデルを図10に示す。車両モデルは、バネ上質量と前・後台車のばね間、ばね

下質量で構成される。駆動装置は吊り掛け駆動装置で構成した。また、各軸の主電動機トルクは個別に制御できる。さらに、空転時の車輪とレール間に働く引張力モデルとして、巨視すべり領域を対象とするトラクション係数 $\mu$ (引張力/軸重)に従うとした(図11)。

進行方向に対し先頭軸を第1軸とし、各軸の電動機トルクは、各軸のトラクション係数が0.31となるようにトルク目標値を設定した。トラクション係数 $\mu$ の各パラメータは、現車試験時の空転データを参考に $\Delta\mu=0.01$ 、 $\rho=0.03$ とした。

各軸の静止軸重は147kN、負荷車両の質量は1,000tonとした。

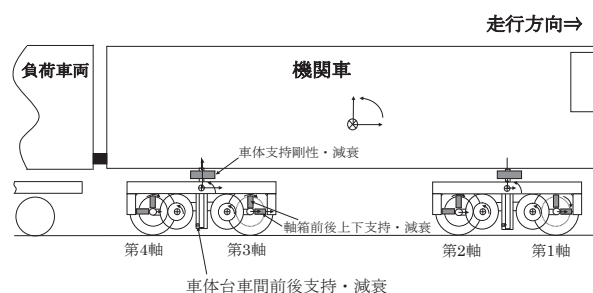


図10 吊りかけ駆動方式の電気機関車モデル

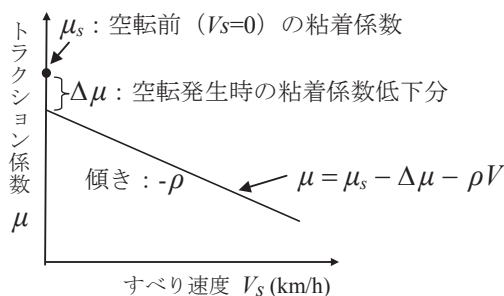


図11 すべり速度と接線力係数の関係

3.2 シミュレーション結果

空転検知用の40ms加速度を用いて空転収束検知を行った場合と、提案する収束検知用の10ms加速度を用いた場合についてシミュレーションを行った。この結果を図12と図13に示す。

シミュレーション開始後、時刻2秒までの粘着係数 $\mu_s$ は、各軸ともトラクション係数よりも高いものとした(空転は発生しない)。時刻2秒以降は、第1軸の粘着係数のみを0.28とした。これにより、時刻4秒付近から第1軸のトラクション係数が粘着係数0.28を上回り、空転が発生し再粘着制御が行われている(他軸は空転しない条件のため波形は表示していない)。シミュレーションでは、復帰値は起動時のトルク値とした。空転検知閾値は加速度3km/h/s以上、空転収束検知は加速度0km/h/s以下で検知するように設定した。

ここで、空転収束検知用の加速度には、歯車のかみ合い振動によるノイズ信号を模擬するため、振幅 2km/h/s で速度と共に周波数が増加する加速度信号を加えた。

シミュレーションの結果、空転検知用の 40ms 加速度を用いて空転収束検知した場合のトルク引き下げ量は約 1,000Nm であるのに対し、提案した 10ms 加速度を用いた場合は約 400 ~ 600Nm であった。そして、提案方式では速度 0-10km/h 間の第 1 軸分の平均トルク値は 5.9% 向上する結果が得られた。よって、再粘着制御の余分なトルク引き下げを防止することで、平均トルク値を向上することが確認できた。同様にけん引力の向上も期待できることが分かった。

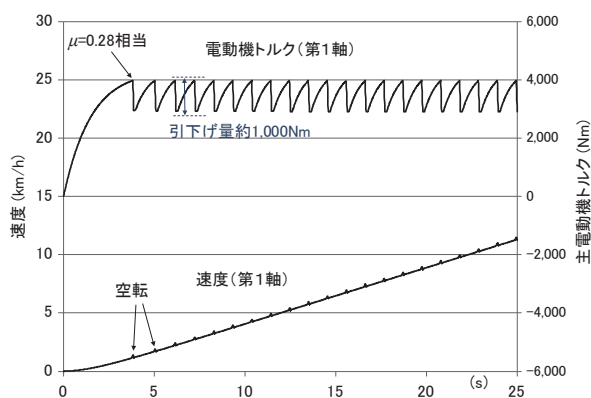


図 12 シミュレーション結果  
(空転収束検知に 40ms 加速度使用)

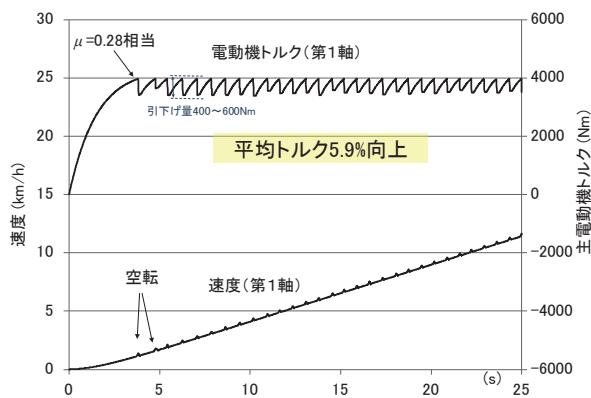


図 13 シミュレーション結果  
(空転収束検知に 10ms 加速度使用)

## 4. 現車試験

### 4.1 現車試験条件

試験走行の条件を表 1 に示す。

HD300 形式ハイブリッド入換機関車を試験車両として、負荷用に EF65 形式機関車を 2 両連結して走行試験を実施した。負荷貨車 1,000ton 相当を模擬するために負荷用機関車にブレーキ力を与えた状態で、HD300 形

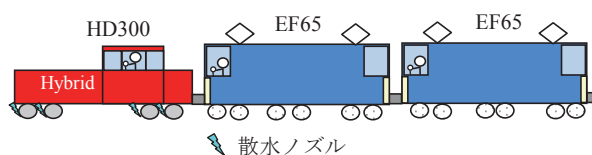


図 14 HD300 と負荷機関車 2 両

表 1 試験条件

試験場所	東京貨物ターミナル コンテナホーム
散水軸	全輪 進行方向の車輪前
散水量	一車輪あたり 0.5 l/min
最大けん引力	200 kN
負荷	1,000 ton 相当
試験速度	0 ~ 10 km/h



図 15 散水空転試験風景

式ハイブリッド機関車の各輪に散水したレール湿潤状態において、けん引性能を確認した (図 14, 図 15)。

走行試験では、シミュレーションと同様に、空転検知閾値は 40ms 加速度が 3km/h/s, 空転収束検知は 10ms 加速度が 0km/h/s 以下で検知する設定とした。

### 4.2 走行試験結果

開発した再粘着制御の走行試験結果を図 16 に示す。空転検知用と空転収束検知用に 40ms 加速度と 10ms 加速度を分けて使用した結果、空転収束検知の遅れが改善

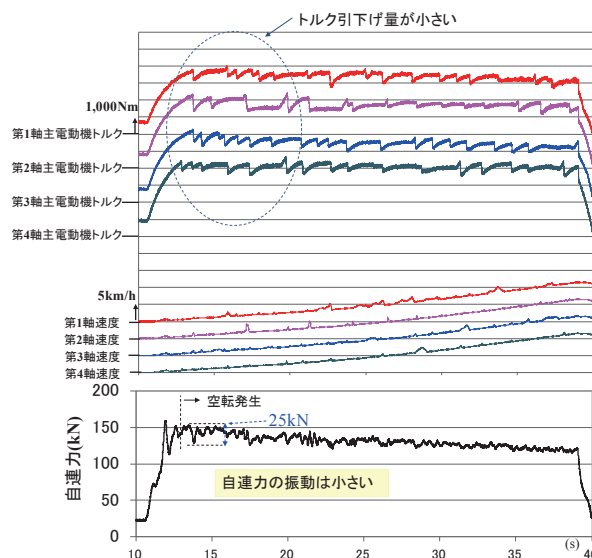


図 16 開発制御の走行試験結果

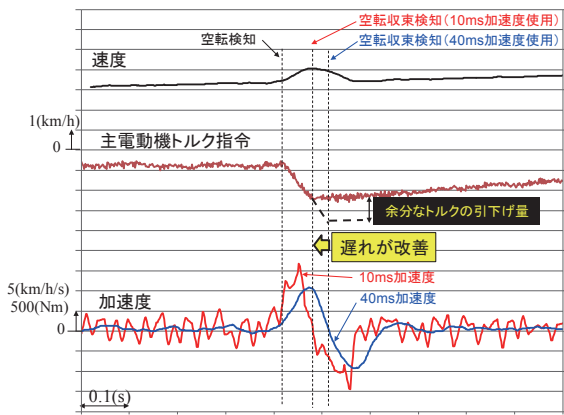


図 17 再粘着制御時の加速度とトルクの波形

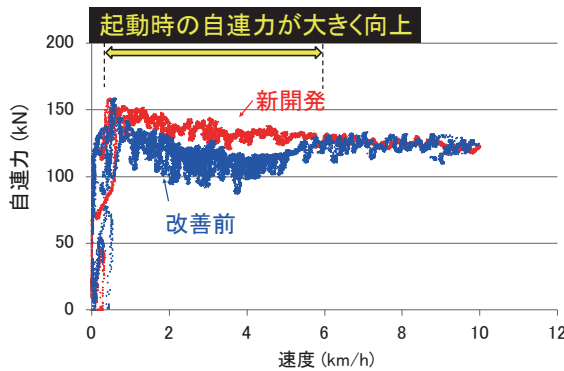


図 18 速度 - 自連力波形

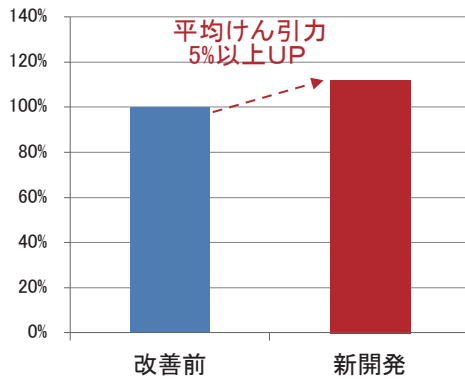


図 19 平均けん引力比較 (0-10km/h)

し、トルク引下げ量は低減することが図 17 より確認できる。また、自連力 (図 16 下) の変動幅 (p.p 値) も 25kN 程度となり、改善前 (図 4) に比べてその値が半減した。

開発した再粘着制御方法では、改善前に比べて速度 6km/h 付近までの自連力が大きく向上していることが確認できる (図 18)。また、起動直後から速度 10km/h ま

での平均けん引力は、シミュレーションと同様に 5% 以上向上する結果が得られることを確認した (図 19)。

## 5. おわりに

ハイブリッド入換機関車 HD300 形式の開発当初、JR 貨物駅構内で運用することを想定したとき、勾配上で停止してから起動する際、けん引力が不足する恐れがあることが分かり、けん引力の向上が望まれた。そこで、空転検知用に用いる加速度信号よりも遅れの小さな加速度信号を空転収束検知用に用いることで、再粘着制御時のトルク引下げ量を低減して、起動時のけん引力を向上する再粘着制御方法を提案した。散水走行試験の結果、開発当初よりもけん引力 (自連力) が大きく向上することが確認できた。

この結果を受けて、JR 貨物では、開発した再粘着制御方法をハイブリッド入換機関車 HD300 形式量産機に導入した。今回は入換機関車の低速域のけん引力向上取り組みが中心であったが、今後は、中高速域が対象となる新製機関車や編成電車への適用拡大を検討する予定である。

## 謝辞

最後に、現車試験に際し多大なるご協力を頂いた(株)東芝の関係各位に謝意を表す。

## 文献

- 1) 渡邊朝紀, 大江晋太郎, 小笠正道:「新幹線高速化のための PWM インバータによる空転滑走再粘着制御」, 鉄道総研報告, Vol.9, No.9, pp.25-30, 1995
- 2) 山中章広, 渡邊朝紀:「粘着力推定を行う空転再粘着制御法の開発」, 鉄道総研報告, Vol.12, No.5, pp.23-28, 1998
- 3) 山中章広, 渡邊朝紀:「通勤形電車の空転再粘着制御の開発」, 鉄道総研報告, Vol.12, No.5, pp.23-28, 1998
- 4) 道川友規, 渡邊朝紀, 山下道寛, 廿日出悟:「大軸重電気機関車の粘着現象の解析」, 鉄道総研報告, Vol.16, No.5, pp.41-46, 2002
- 5) 添田正:「JR 貨物 HD300-901 ハイブリッド機関車試作車の概要」, R&M 2010.8 pp. 10-14
- 6) 山下道寛, 添田正:「空転の収束を早期に検知する再粘着制御方法」, 電気学会 リニアドライブ/交通電気鉄道合同研究会, pp. 41-46, 2014/8/7