

1404 電気機関車の空転頻度低減制御

正 [電] ○山下 道寛 (財)鉄道総合技術研究所)

添田 正 (日本貨物鉄道(株))

New Slip/Slide Control Method of Electric Locomotives

Michihiro YAMASHITA, Railway Technical Research Institute.

2-8-38, Hikari-cho 3, Kokubunji-shi, Tokyo

Tadashi SOEDA, Japan Freight Railway Company.

3-13-1, Iidabashi, Chiyoda-ku, Tokyo

When a wheel slip occurs on a certain axle or when re-adhesion control is executed, the tractive force of the wheel-slip axle changes and a rotating moment acts, which causes pitching of the bogie and the carbody that receives the tractive force. As a result, a change occurs in the weight acting on other axles in adhesion status, and wheel slips are likely to be induced. If re-adhesion control can be conducted in consideration of changes in the weight acting on other axles as a result of axle-weight transfer from the wheel-slip axle, the use of adhesive force can be optimized.

We developed a control system designed to reduce the induction of wheel slip in consideration of axle-weight changes caused by other wheel slips. Specifically, the torque of other axles is increased or decreased based on the acceleration of the wheel-slip axle to suppress the induction of wheel slip. The control method was applied to an EH200-type DC electric locomotive, constituting a re-adhesion control system that suppress the induction of wheel slip.

To verify the effectiveness of the control method, we conducted a water spring wheel-slip test. We obtained the results that the number of wheel slips decreases by about 20% on average, and that the average tractive effort increases by 4%.

Keywords: Electric Locomotive, Slip, Re-adhesion control, Axle weight transfer compensation, Freight train

1. はじめに

電気車の駆動時には、各車輪路面に引張力が生じ、台車枠や台車牽引装置、車体、連結器へ伝わる。この時、けん引反力によって台車中心や車体中心に回転モーメントが生じ、各軸に軸重移動が生じる。けん引力が大きな電気機関車では、軸重移動量が大きくなる傾向がある。そのため、各軸の滑りやすさにアンバランスが生じ、粘着力を有効に利用できなくなる。特に、電気機関車のような少ない駆動軸数で大きなけん引力を必要とする場合には、粘着力の利用状況が貨物牽引トン数やダイヤに影響を及ぼすため、軸重移動に対し適切な補償を行う必要がある¹⁾。

軸重移動を補償するための方法としては、機械的補償と電氣的補償が知られている。機械的軸重移動補償は、次に述べる三つの方法が知られている。一つ目は、台車けん引装置を極力レール面に近づける方法、二つ目は、台車内の回転モーメントを打ち消すように機械的なリンク機構を構成する方法(例えば、ジャックマン軸方式)、また、台車間の回転モーメントを生じさせないように、台車けん引装置と連結器高さを一致させる構成(台車間と連結器間を棒連結とする方式)がある。三つ目は、1 台車内に 1 台の電動機を装荷して、2 軸を連結駆動する方式がある。これにより、台車内の軸重移動が補償できる。これらの機械的方法は、メンテナンスが増加する傾向にある。次に、電氣的軸重移動補償であるが、各軸の軸重移動量に合わせて各軸の引張力(電動機トルク)を調整する。軸重が減少する軸の引張力を若干低めに設定し、軸重が増加する軸の引張力を若干高めに設定することで、できるだけ各軸の滑りやすさを均等化させる。各軸個別電動機制御方式で用いられている。

最近のインバータ制御電気機関車では、けん引装置をレール付近に近づける機械的補償法と、実用面から適切と考えられる範囲で、各軸の引張力を比例配分する電氣的補償法を採用している。

一方、空転時及び再粘着制御時には、台車内のある軸が空転すると、空転していない他の軸の空転を誘発し、粘着力を有効に利用できない場合があることが指摘されている²⁾。この空転誘発現象については考慮が求められている。この現象が多発すると、貨物牽引トン数等に影響を及ぼす。そのため、様々な試みや検討がなされている³⁻⁶⁾。

本論文では、上述した課題に対応するため、電氣的軸重移動補償方法に加え、空転誘発を抑制する制御を含めた再粘着制御系を提案した。そして、EH200 形式電気機関車を用いて走行試験を実施し、その効果を確認したので報告する。

2. けん引力による粘着への影響

2. 1 軸重移動について

軸重移動は台車内での軸重移動と台車間での軸重移動(以下、台車内軸重移動と台車間軸重移動とする)があり、伝達力がほぼ一定の場合、各軸の軸重移動量はこの二つの軸重移動量の和で求められる。台車内軸重移動は、台車内の車輪路面に働く伝達力の和とレール頭頂面から牽引装置までの高さ距離 h により、台車が回転モーメントを受けて発生する。台車間軸重移動は、全軸の伝達力が h とレール頭頂面から連結器までの高さ距離 H との差によって、車体が回転モーメントを受けることにより発生する。力行時の軸重の傾向は、第 1 軸、第 2 軸、第 3 軸、第 4 軸の順に軸重の値が大きくなる。

走行時(力行時)の各軸の軸重移動量 $\Delta W_1 \sim \Delta W_4$ は、図 1 に示した車両モデルより次式で記述される。また、軸重移動分を考慮した各軸の「引張力/軸重」は、 μ_n で求められる。なお、先頭軸は第 1 軸とした。

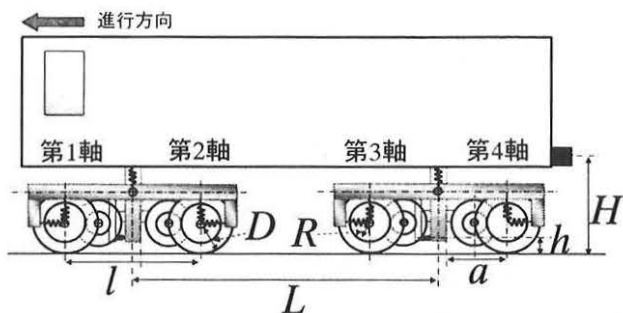


Fig. 1 A vehicle model of EH200-type DC

$$\Delta W_1 = -\frac{R}{l} F_{e1} - \frac{R}{l} F_{e2} + \frac{\frac{D}{2}-h}{l} F_{l1} + \frac{\frac{D}{2}-h}{l} F_{l2} - \frac{H-h}{2L} (F_{l1} + F_{l2} + F_{l3} + F_{l4}) \quad [N] \quad (1)$$

$$\Delta W_2 = +\frac{R}{l} F_{e1} + \frac{R}{l} F_{e2} - \frac{\frac{D}{2}-h}{l} F_{l1} - \frac{\frac{D}{2}-h}{l} F_{l2} - \frac{H-h}{2L} (F_{l1} + F_{l2} + F_{l3} + F_{l4}) \quad [N] \quad (2)$$

$$\Delta W_3 = -\frac{R}{l} F_{e3} - \frac{R}{l} F_{e4} + \frac{\frac{D}{2}-h}{l} F_{l3} + \frac{\frac{D}{2}-h}{l} F_{l4} + \frac{H-h}{2L} (F_{l1} + F_{l2} + F_{l3} + F_{l4}) \quad [N] \quad (3)$$

$$\Delta W_4 = +\frac{R}{l} F_{e3} + \frac{R}{l} F_{e4} - \frac{\frac{D}{2}-h}{l} F_{l3} - \frac{\frac{D}{2}-h}{l} F_{l4} + \frac{H-h}{2L} (F_{l1} + F_{l2} + F_{l3} + F_{l4}) \quad [N] \quad (4)$$

$$\mu_n = \frac{F_{ln}}{W_n + \Delta W_n} = \frac{F_{en} - m\alpha_n}{W_n + \Delta W_n} \quad (5)$$

$$F_{en} = \tau_{en} (GD/2), \quad n=1 \sim 4$$

ここで、 R : 大歯車半径 0.41[m]
 l : 台車内の車軸間距離 2.50[m]
 D : 車輪径 1.12[m]
 G : 歯車比 5.125
 L : 台車中心間距離 6.40[m]
 h : レール頭頂面から牽引装置までの高さ距離 0.22[m]
 H : レール頭頂面から連結器までの高さ距離 0.88 [m]
 F_{en} : 第 n 軸の動輪周引張力[N]
 F_{ln} : 第 n 軸の引張力[N]
 W_0 : 静止軸重 164[kN]
 ΔW_n : 第 n 軸軸重の変化分[N] (増加する場合を正)
 α_n : 第 n 軸加速度[m/s/s]
 m : 駆動系等価慣性質量 1946[kg]
 τ_{en} : 第 n 軸電動機トルク[Nm]

(1)~(4)式の右辺第1~4項は、各電動台車により生じる軸重移動分を、第5項は台車間に生じる軸重移動分を表す。

ここで、起動直後における各軸引張力を 55,000[N]とした時の各軸軸重移動量を図2に示す。静止軸重約 164kN に対し、最大で約±13%の軸重移動が発生する。また、各軸の引張力に対する軸重の比を図3に示す。静止軸重に対する引張力の比は 0.334 であるが、軸重移動を考慮した場合には、各軸の値は 0.383~0.295 となり、軸毎に滑りやすさが大きく異なることが分かる。

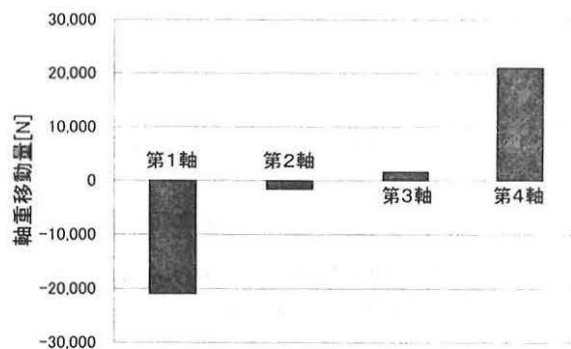


Fig. 2 Value of each axle-weight transfer

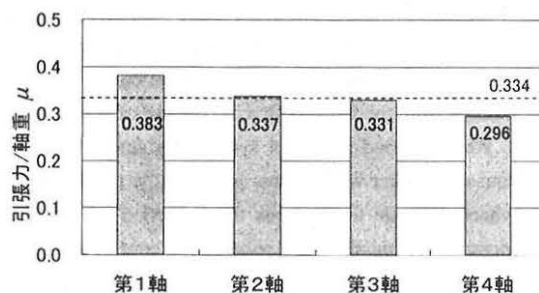


Fig. 3 Each [tractive effort/axle load] in starting

2. 2 空転誘発現象

ある軸の空転や再粘着制御により、他の軸の空転を誘発する場合がある。台車内の空転誘発現象を再現させた試験結果を図4に示す。第1軸が空転し再粘着制御が行われると、その直後に第2軸の空転が発生する。特に後軸の場合に誘発されやすい傾向がある。

第1軸が空転したとき、台車・車体に働く回転モーメントが変化し、台車と車体の振動を引き起こしやすくなるので、空転・再粘着を繰り返すと軸重の変動が大きくなる。このため、各軸の空転が誘発されやすくなる。この現象により、空転が多発すると牽引力が大きく低下する。

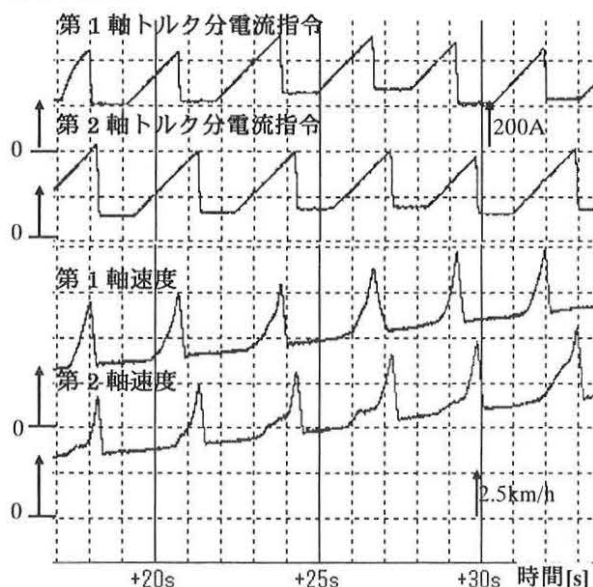


Fig. 4 Phenomenon of the wheel slip one after another

2. 3 空転誘発再現シミュレーション

空転誘発現象について、空転時の軸重移動の観点から再現シミュレーションを実施した。

台車内の軸重移動では、軸バネと歯車を介して軸重が変

化する。空転軸の再粘着制御により、電動機トルクが急変すると、台車枠の回転モーメントが急変する。そのため、他軸の軸バネを通して他軸の軸重に影響を与える。

以下では、シミュレーションの前提条件等を述べる。

粘着走行時は、車輪とレール間の「引張力/軸重」(μ)は、粘着係数 μ_s (最大引張力を与える「引張力/軸重」)よりも小さい。空転時には、すべり速度に比例して減少する接線力係数(μ)とする。本論文では、巨視すべり領域を対象とする接線力係数(μ)について、以下の式で記述されるモデルを用いた⁸⁾。その特性を図5に示す。

$$\mu = \mu_s - \Delta\mu - \rho V_s \quad (6)$$

ここで、 μ_s :空転前 ($V_s=0$) の粘着係数
 $\Delta\mu$:空転発生時の粘着係数低下分
 V_s :すべり速度[km/h]
 ρ :すべり速度負勾配[0.02/(km/h)]

1 電動台車内で空転が発生した時の空転誘発現象を再現させた様子を図6に示す。各軸の引張力は55,000[N]とした。走行時の各軸の「引張力/軸重」は、 $\mu_1=0.379$, $\mu_2=0.332$ である。シミュレーション開始後、時刻1秒において、第1軸と第2軸の粘着係数を0.338と減少させた。第1軸は、空転を開始し、再粘着制御が働く。再粘着制御は、図4中に示されているトルク分電流の引下げに合わせて、第2軸の軸重が低下し、第2軸の μ_2 は0.338を上回った。このとき、第2軸の空転が開始されることになる。このことから、空転時の軸重移動が空転誘発の要因となることが確認できた⁷⁾。

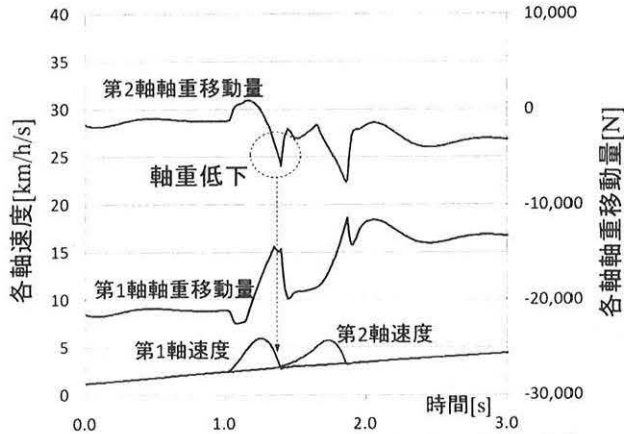


Fig. 6 The simulation result of the induction of wheel slip

3. 軸重移動を考慮した空転誘発抑制制御

本章では、新たに提案する軸重移動に起因する空転誘発を抑制するための制御系について述べる。

まず、通常走行時の各軸の滑りやすさを均等化するため、予め設定した各軸の「引張力/軸重」指令(μ^*)に従うように、各軸のトルク制御を行う方法について説明する。

(1)~(4)式を(5)式に代入して、 F_e について整理すると、(7)式(行列表現)が得られる。(7)式は、「引張力/軸重」(指令値) $\mu_1^* \sim \mu_4^*$ を成り立たせる各軸の電動機トルク指令 τ^* となる。この電動機トルク指令からトルク分電流指令が求められる。

$$\tau^* = \frac{2}{GD} F_e \quad (7)$$

ここで、 $F_e = (CI - A)^{-1}(maB + \mu^*W)$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \mu_1^*(-a+b-c) & -\mu_1^*c & -\mu_1^*c \\ \mu_2^*(a-b-c) & 0 & -\mu_2^*c & -\mu_2^*c \\ \mu_3^*c & \mu_3^*c & 0 & \mu_3^*(-a+b+c) \\ \mu_4^*c & \mu_4^*c & \mu_4^*(a-b+c) & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1-b+c & c-b & c & c \\ b+c & 1+b+c & c & c \\ -c & -c & 1-b-c & -b-c \\ -c & -c & -b-c & 1+b-c \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1-A_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1-A_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1-A_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1-A_4 \end{bmatrix}$$

$$W = \begin{bmatrix} W_0 \\ W_0 \\ W_0 \\ W_0 \end{bmatrix} \quad \tau = \begin{bmatrix} \tau_{e1-p} \\ \tau_{e2-p} \\ \tau_{e3-p} \\ \tau_{e4-p} \end{bmatrix} \quad F_w = \begin{bmatrix} F_{w1} \\ F_{w2} \\ F_{w3} \\ F_{w4} \end{bmatrix}$$

$$\alpha = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \end{bmatrix} \quad \mu = \begin{bmatrix} \mu_1^* \\ \mu_2^* \\ \mu_3^* \\ \mu_4^* \end{bmatrix} \quad a = \frac{D}{2l} \quad b = \frac{2-h}{l} \quad c = \frac{H-h}{2L}$$

$$A_1 = \mu_1^*(-a+b-c) \quad A_2 = \mu_2^*(a-b-c) \\ A_3 = \mu_3^*(-a+b+c) \quad A_4 = \mu_4^*(a-b+c)$$

次に、空転誘発の要因として、再粘着制御による電動機トルク引下げにより、健全軸の軸重を低下させる場合がある(図6)。特に、後軸の軸重を低下させる。また、軸重低下量は、空転再粘着制御時のトルク引下げ量に比例する傾向にある。トルク引下げ量は、空転の度合いにほぼ比例すると考えることができる(空転発生時の動輪周引張力と接線力の差が、空転軸の加速度に比例するため)。そのため、空転軸の加速度に応じて、健全軸トルクを微減することで、空転時の軸重移動による影響をある程度補償でき、空転誘発抑制に効果があると考えられる。

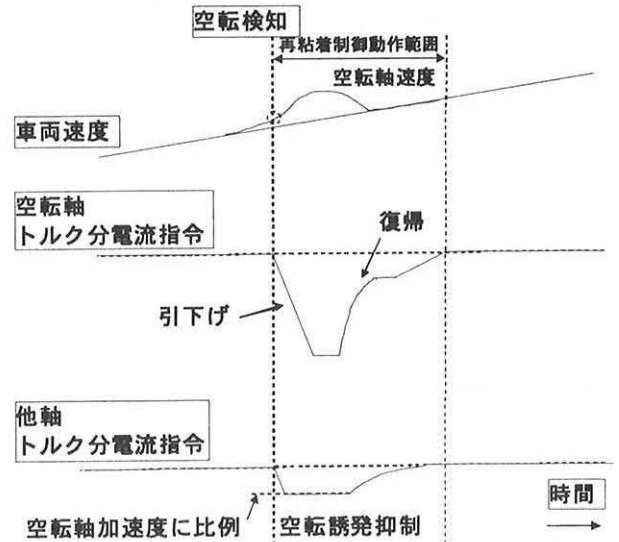


Fig.7 A example of each torque component current reference in slipping

図8は、本論文で提案する空転誘発を抑制するトルク制御系(再粘着制御系)を示す。ノッチ指令に応じて、各軸の「引張力/軸重」指令(μ^*)が出力(μ ボタン指令)される。

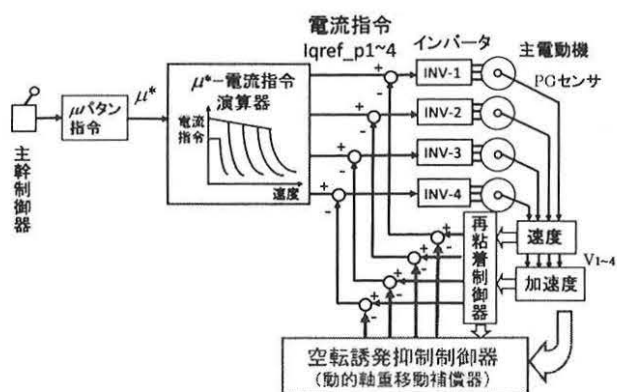


Fig. 8 Fabricated re-adhesion control system

(7)式にこの指令値を代入することで、各軸の電動機トルク分電流指令 $I_{qref_pn}(n=1\sim4)$ が決定される。速度情報として、各電動機の PG センサから各軸速度 $V_1\sim V_4$ を算出し、再粘着制御器に入力される。空転を検出した場合には、図 7 に示すような再粘着制御と空転誘発抑制制御が行われる。なお、図 8 の空転誘発抑制制御器からは、空転した軸の加速度に応じた引下げ値が出力される。なお、再粘着制御器の基本動作は、速度差検知フラグと加速度検知フラグの論理積により空転検知し、空転検知すると、トルク引き下げ、保持、トルク復帰を行う。

5. 実車試験⁹⁾

5. 1 走行試験概要

JR 貨物高崎操車場の着発線において走行試験を実施した。試験用車は EH200 形式直流電気機関車を用いた。なお、駆動軸は 4 軸分（前側半車体）とした。

図 9 は、構内走行時の試験編成車両を示す。試験走行時には、負荷となる貨車を模擬するため負荷用機関車 EF64 を 2 両連結した。そして負荷車に適当な踏面ブレーキでブレーキ力を与えて負荷（貨車 650ton 相当）を模擬した。また、雨天時を模擬するために、各駆動軸の前方に散水ノズルを仮設し、ノズルから散水（車両あたり毎分約 5 リットル）して路面を湿潤状態にした。

走行距離は約 400m であり、一部曲線（曲線半径 1200m）を含んでいる。また、走行方向に対し上り勾配 3.5‰ である。各軸の μ ボタン指令値は 0.32（けん引力 210kN 相当）とした。試験速度は 0~35km/h で実施した。

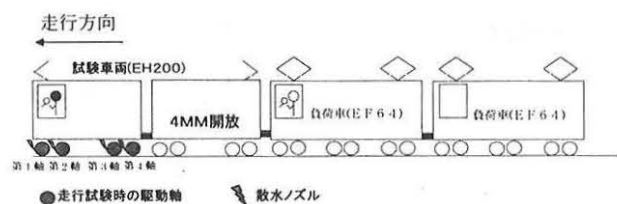


Fig. 9 Test Vehicle

5. 2 走行試験結果

図 10 は走行試験結果の一例である。図中には、第 1 軸~第 4 軸のトルク分電流と速度がそれぞれ示されている。トルク分電流に○を付けた個所は、再粘着制御によるトルク分電流が引き下げられたポイントを示す。他の軸の空転再粘着制御が働いていなければ、他の軸に空転誘発抑制が動作し、空転が収束する傾向となることが確認できる。

空転抑制制御の引下げトルクは、再粘着制御用の引下げ

トルク分電流に比べて小さく、小さなトルク引下げで空転誘発が抑えられていることが確認できる。一方、空転再粘着制御により健全軸が常に空転誘発されるとは限らない。健全軸に空転が起こらない場合にも抑制制御が働く状況が多発すると、けん引力の損失に繋がるので注意を要する。

今回の試験結果からは、空転誘発抑制制御を入れたほうが良好な結果が得られた。数回の試験結果を平均すると、空転再粘着制御の実施回数は約 20% 減少し、平均けん引力は約 4% 増大することを確認した。

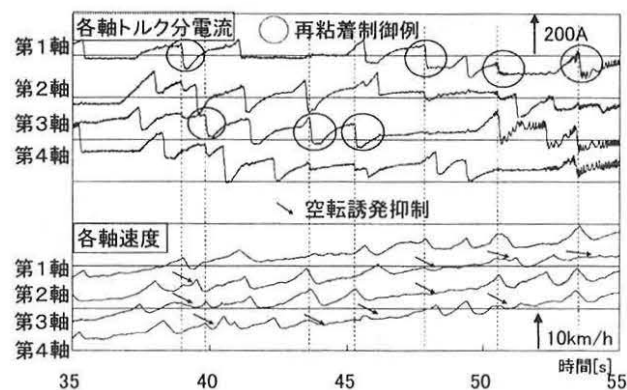


Fig. 10 A sample of results of the fabricated re-adhesion control

6. 終わりに

電気機関車の空転誘発抑制制御方法を提案した。その有効性については、EH200 形式直流電気機関車を用いた走行試験により実証され、平均空転回数（空転再粘着制御実施回数）は約 20% 低減、平均けん引力は約 4% 向上し、空転頻度が低減する効果が確認された。

今後、本方式を複数台駆動方式の電気機関車や電車駆動方式への適用について検討する予定である。

最後に、実車試験を行うに当たりご協力を頂いた日本貨物鉄道(株)、(財)鉄道総合技術研究所駆動制御研究室、(株)東芝府中事業所交通ドライブシステム部の関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 電気学会技術報告 673 号:「鉄道車両における粘着制御技術」
- 2) 大橋,勝又,安岡,山城,斉間:「個別分散 V V V F 制御方式による電気車の粘着性能向上について」電気学会交通電気鉄道研究会, TER-92-49, 1992
- 3) 渡邊,大江:「空転再粘着時の台車振動抑制策—状態推定によるアクティブ制振」平成 6,電気学会全国大会,8-149
- 4) 近藤,渡邊,大江:「空転再粘着制御時の動的軸重補償法の検討」電学産業応用部門大会 184, 平成 6 年
- 5) 山下,渡邊:「空転及び空転再粘着制御による他軸の空転現象」電気学会産業応用部門大会,Ⅲ-133,平成 17 年
- 6) 安岡,望月,戸田,中沢,他:「誘導電動機個別駆動方式電気機関車の再粘着制御に関する実験的考察」,電学論 D, 128 巻 1 号, 2008 年
- 7) 山下:「空転誘発を抑制する引張力制御」電気学会交通電気鉄道研究会,TER08-8, 2008
- 8) 渡邊,小笠:「すべり速度帰還トルク制御による電気車の再粘着性能改善」電学論 D, 114 巻 10 号, 平成 6 年
- 9) 山下,大江,添田:「空転誘発を抑制する電気機関車制御の現車試験結果」平成 21 年,電気学会全国大会