

電気車における推定接線力，すべり速度情報を活用した再粘着制御

原崇文*，槻木澤佑公，古関隆章（東京大学），村端章浩，岡山秀夫（三菱電機）

Re-adhesion control on electric railways that uses information of adhesive force and slip velocity

Takafumi Hara*, Yutaka Tsukinokizawa, Takafumi Koseki (The University of Tokyo)

Akihiro Murahashi, Hideo Okayama (Mitsubishi Electric Corporation)

Abstract

Suppression of a slip and reduction of a friction between rail and wheel is important for railway systems. Conventional re-adhesion control has been considered using adhesion characteristics. On the other hand, the control with consideration of friction information has never been proposed. In this paper, the authors have proposed a new re-adhesion control that uses information of adhesive force and slip velocity. Furthermore, the system have evaluated and the friction have saved 17%.

キーワード：空転 すべり速度 接線力 電気鉄道 粘着制御
(slip slip velocity tractive force electric railway adhesion control)

1. はじめに

近年，走行時の抵抗が小さく，エネルギー効率が良い電気鉄道に注目が集まっている．しかし，電気鉄道は走行抵抗が非常に小さいため，加速を行うときに伝えられる力である接線力が小さい．そのため，雨が降っている場合や枯れ葉がレールの上に落ちている場合などには線路と車輪との間の摩擦力が減少し，空転と呼ばれる，車輪が一周分回転しても車体が一周分進まない現象が起きる．一旦空転が生じると，エネルギー散逸や乗り心地の悪化，線路に大きな負担が発生する．そのため，車輪と線路が粘着していない空転状態を再び車輪と線路が粘着している粘着状態に戻し，加速を可能にする空転再粘着制御が必要である．空転再粘着制御には，これまで様々な手法が考案されている．それらは，接線力の推定情報，すべり速度の情報の2つの情報をそれぞれあるいは両方使用しているかどうかで大きく3つに分類できる⁽¹⁾．

接線力の情報に加えてすべり速度の情報も用いる，「接線力推定情報使用」，「すべり速度情報使用」の再粘着制御は，他の再粘着制御と比較してより良い制御を実現できると考えられる．

そこで，本研究では「接線力推定情報使用」，「すべり速度情報使用」の再粘着制御を用いた先行研究⁽²⁾に基づき，実車を想定した数値解析を行った．また，解析結果に見られるこの方法の問題点を探った．それをもとに挙げられた問題点を解消する，新しい空転再粘着制御を提案した．

2. 粘着性能の評価

2.1 良い粘着制御とは 鉄道車両において，接線力が大きいと言うことは車輪とレールでのエネルギー伝達がうまくいき，粘着性能が高いということである．しかし，空転をした状態で大きい接線力を持っていても，レールや車輪の磨耗と言う観点から好ましくない．そこで，次節ではこれを評価する方法について述べる．

2.2 従来の粘着性能の評価 従来の粘着性能の評

価方法は，粘着の利用率による評価と車体前後方向加速度による評価の二つに分けられる．粘着の利用率による評価には，同じ速度帯での加速性能およびトルク電流の絞込み頻度という二つの指標を比較する方法⁽³⁾と，粘着の利用率の時間的平均値を評価する方法⁽⁴⁾の二つがある．また，車体前後方向加速度による評価も，実験による被験者の評価を用いて，重回帰分析によって乗り心地を評価する方法⁽⁵⁾とジャークの平均値，分散，標準偏差を用いて乗り心地を評価する方法⁽³⁾の二つがある．

しかし，従来の評価方法ではレールや車輪の磨耗を評価する指標は無かった．そこで，今回動輪周損失仕事摩擦仕事率という評価量を定義し後述する粘着利用率を併用することによって，2.1に示した良い制御方法に近づけるようにした．粘着利用率において接線力係数の最大値 μ_{max} というのは計測することができず，動輪周損失仕事摩擦率では実際の車両では測定困難なすべり速度を用いている．そのため，実際の車両に適用した場合，これら二つの測定指標を使用することは困難である．しかし，今回数値計算に特化したものであり，充分線路の磨耗を調べたり，粘着性能の評価を行うことができる．

2.2.1 粘着利用率 参考文献⁽⁶⁾より，接線力係数が最大のものである μ_{max} のうちどれくらい使われているかを見るために，ある時間の平均値を評価に用いる．粘着利用率の算出においては各々の時間の粘着利用率の瞬時値 $\mu_{ur}(t)$ を式(1)を用いる．

$$\mu_{ur}(t) = \frac{\mu(t)}{\mu_{max}} \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

次に，式(2)のように，ある時間内の粘着利用率の瞬時値の時間的平均値 $\bar{\mu}_{ur}$ を求める．

$$\bar{\mu}_{ur} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \mu_{ur}(t) dt \dots \dots \dots (2)$$

ただし，式(2)の $t = t_1$ は最初に空転を検知した時刻を示し， $t = t_2$ は安定状態に入っている時刻とする．今回， $t_1=6[s]$ ，

表 1 接線力係数 - すべり速度の特性変化の場合分け
Table 1. Situation division of characteristic change between tractive coefficient and slipping velocity

	Before 6[s]	After 6[s]	Method	Changed at 6[s]
Case A	(c)	(a)	Conventional	Worse
Case B	(c)	(b)	Conventional	Worse
Case C	(b)	(a)	Conventional	Worse
Case D	(a)	(c)	Conventional	Better
Case E	(b)	(c)	Conventional	Better
Case F	(b)	(a)	Conventional	Better
Case G	(c)	(a)	Proposed	Worse
Case H	(c)	(b)	Proposed	Worse
Case I	(b)	(a)	Proposed	Worse
Case J	(a)	(c)	Proposed	Better
Case K	(b)	(c)	Proposed	Better
Case L	(b)	(a)	Proposed	Better

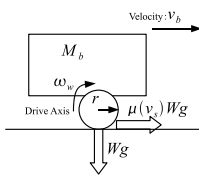


図 1 1 軸車両モデル構成
Fig. 1. Single axis bogie model

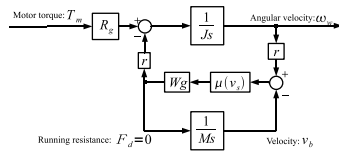


図 2 1 軸車両モデルブロック線図
Fig. 2. Block diagram of the single axis bogie model

$t_2 = 10[s]$ とし, μ_{max} を表 1 より定めた. この粘着利用率 $\bar{\mu}_{ur}$ の単位は [%] である.

2.3 動輪周損失仕事率 ここでは, 動輪周損失仕事率 P_{slip} を定義する. 線路と車輪に働く接線力 T_L が単位時間にする仕事 W_t は式 (3) で表される.

$$W_t = \mu(v_s)Wg \cdot v_s \quad (3)$$

W_t を時間積分し, 平均をとった仕事率は, 発熱を引き起こし, 線路の磨耗につながっていると考えられる. これを求めることは線路の磨耗を考える上で重要である. そのため, これを動輪周損失仕事率 P_{slip} とし, 式 (4) で定義する.

$$P_{slip} = \frac{1}{t_{finish} - t_{start}} \int_{t_{start}}^{t_{finish}} \mu(v_s)Wg \cdot v_s dt \quad (4)$$

今回, 初期状態から安定状態に入るまでの時間を考慮して, $t_{start} = 4[s]$ とした. また, t_{finish} を終了時間と同じく, $t_{finish} = 15[s]$ とした. 動輪周損失仕事率 P_{slip} の単位は [N·m/s] である.

3. 数値計算モデル構成

3.1 車体モデル 今回簡単化の為に 1 軸換算モデルを用いる. 図 1 にその構成を示し, 図 2 にブロック線図を示す. 車輪の回転方向の方程式を式 (5), 車両の運動方程式を式 (6), 車輪の回転速度と車両進行方向の速度の差であるすべり速度を定義する式を式 (7) に示す.

表 2 1 軸車両モデルに適用したパラメータ
Table 2. Parameters single axis bogie model

定数	値	備考	単位
J	159	動輪軸合成慣性性能率	[kg · m ²]
M_b	1.29×10^4	1M0.5T での一動軸あたりの車体質量	[kg]
W	1.02×10^4	一動軸における車体静荷重	[kg]
R_g	5.28	ギア比	-
g	9.81	重力加速度	[m/s ²]
r	0.415	動輪半径	[m]

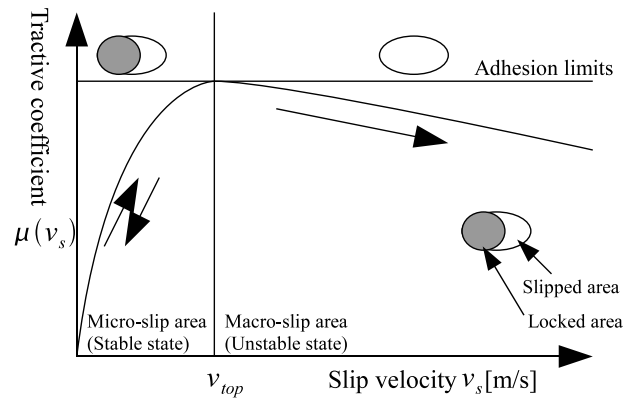


図 3 粘着係数とすべり速度の関係
Fig. 3. Relation between tractive coefficient and slip velocity

$$J \frac{d\omega_w}{dt} = T_m R_g - Wg \mu(v_s) \quad (5)$$

$$M_b \frac{dv_b}{dt} = Wg \mu(v_s) - F_d \quad (6)$$

$$v_s = r\omega_w - v_b \quad (7)$$

各定数の値を表 2 に示す. モータのトルク指令に対する出力トルク特性は, 現実的なベクトル制御の適用を前提とし時定数 $T_d = 5[ms]$ の一次遅れ系とした. T_m を電動機出力トルク [N·m], F_d を走行抵抗 [N], $\mu(v_s)$ を接線力係数 (無次元), v_s をすべり速度 [m/s], ω_w を動輪角速度 [rad/s], v_b を電気車車体速度 [m/s] とする.

3.2 粘着現象のモデル化 一般的な鉄道車両において, 車輪とレールは車重によりわずかに歪んで接触しており, 駆動もしくは制動のとき, 車輪とレールの間には推進方向に力が働く. レールに対して車輪が滑ることなく力が伝わっている場合は, 静止摩擦に近似される. この領域を微小すべり領域と言う. 逆に, レールに対して車輪が滑って力が伝わらない場合は, 動摩擦に近似される. この領域を巨視すべり領域と言う⁽¹⁾. これらの領域とすべり速度の関係は図 3 のように表される. 図 3 の v_{top} は接線力係数 - すべり速度の関係の頂点におけるすべり速度と定義する.

本研究では以下の接線力係数 - すべり速度の関係特性を設定し, パラメータを変化させることで路面状況を変化さ

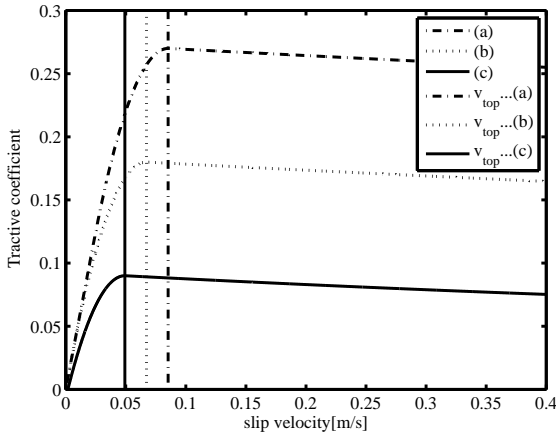


図4 接線力係数とすべり速度の関係の特性の変化
Fig.4. Characteristic change between tractive coefficient and slip velocity

せた．図3の接線力係数の最大値を μ_{max} とし，微視すべり領域を傾き $g_1 (> 0)$ の一次関数，巨視すべり領域を傾きの最小値 $-g_2 (> 0)$ とし，すべり速度が無限大で接線力係数が μ_{inf} に収束するような指数関数で近似した．この二つの関数を二次係数 C_{top} とした二次関数でつなく．これらの関数は連続でかつ微分可能である．その近似を式(8)に示す⁽⁷⁾．

$$\mu(v_s) = \begin{cases} g_1 v_s & (v_s \leq v_1) \\ \mu_{max} - C_{top}(v_s - v_{top})^2 & (v_1 < v_s < v_2) \\ \mu_{inf} + B \exp[-(v_2 - v_s) \frac{g_2}{B}] & (v_2 \leq v_s) \end{cases} \quad (8)$$

さらに，式(8)で用いられる補助パラメータ v_1, v_{top}, v_2, B を式(9)から式(12)に示す．

$$v_1 = \frac{\mu_{max}}{g_1} - \frac{g_1}{4C_{top}} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$v_{top} = \frac{\mu_{max}}{g_1} + \frac{g_1}{4C_{top}} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$v_2 = \frac{\mu_{max}}{g_1} + \frac{g_1}{4C_{top}} + \frac{g_2}{2C_{top}} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$B = \mu_{max} - C_{top} \left(\frac{g_2}{2C_{top}} \right)^2 - \mu_{inf} \quad \dots\dots\dots (12)$$

今回の数値計算は測定事例に基づき， $g_1 = 5[\text{s/m}]$ ， $C_{top} = 40[\text{s}^2/\text{m}^2]$ ， $g_2 = 0.05[\text{s/m}]$ に固定し， μ_{max} ， μ_{inf} を変動させる⁽²⁾．

3・3 数値計算の条件設定 数値計算の条件設定は以下の通りである．図4の曲線(a)は晴天時など粘着条件が良い条件，また，曲線(b)，(c)は雨天時や降雪時など粘着条件が悪い条件をあらわす． $t = 0[\text{s}]$ で加速し， $t = 6[\text{s}]$ で接線力係数の特性を変化させる． $t = 15[\text{s}]$ で終了する．特性の詳細について表3に示す初期条件は接線力係数 - すべり速度の関係の曲線の傾き $Q(k)$ を1とした．また，走行抵抗 F_d を0とした．計算環境はMATLAB/Simulinkを利用し，連続時間の数値解析のサンプル時間 T_1 は $T_1 = 50[\mu\text{s}]$ とした．また，離散時間の数値解析のサンプル時間 T_2 は

表3 設定した粘着係数

Table 3. Setting of tractive coefficient

	μ_{MAX}	μ_{inf}	v_{top}
(a)	0.27	0.12	0.0853
(b)	0.18	0.08	0.0673
(c)	0.09	0.04	0.0493

$T_2 = 500[\mu\text{s}]$ とした．

4. 粘着性能を維持しつつ，磨耗を軽減するための空転再粘着制御の提案と数値解析による粘着性能の評価

4・1 従来法の問題点 図5，6で見取れるように，従来の空転再粘着制御⁽²⁾の問題点として以下の3つが挙げられる．

- (1) 接線力係数 - すべり速度の特性曲線の傾きの推定である $Q(k)$ と真値である $\frac{d\mu}{dv_s}$ の偏差の存在
- (2) 接線力係数 - すべり速度の特性曲線の傾きの推定である $Q(k)$ と真値である $\frac{d\mu}{dv_s}$ の偏差の存在により， v_{top} が接線力係数の変化に追従できていないこと
- (3) $v_s > v_{top}$ というすべり速度が接線力係数 - すべり速度の関係の頂点におけるすべり速度より大きい状態が続くことで巨視すべり領域に留まってしまうこと．それにより，線路 - 車輪間の磨耗が増加すること．以上の(1)から(3)を解消する空転再粘着法を提案する．

4・2 提案空転再粘着制御の構成

4・2・1 接線力推定器の構成 本論分では，同一次元オブザーバを用いる．接線力トルク T_L がステップ状に変化すると仮定し，状態方程式を立てる．以下の式(13)に示す．

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega_w \\ T_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_w \\ T_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{R_g}{J} \\ 0 \end{bmatrix} T_m \quad \dots\dots (13)$$

車輪の回転数が推定できると仮定すると，出力方程式は次の式(14)のようになる．

$$\omega_w = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_w \\ T_L \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (14)$$

式(13)，式(14)は可観測であるので，式(15)で同一次元オブザーバを構成する．ただし，接線力トルクを T_L ，オブザーバのゲインをそれぞれ k_1, k_2 とする．

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\omega}_w \\ \hat{T}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega}_w \\ \hat{T}_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{R_g}{J} \\ 0 \end{bmatrix} T_m + \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} (\omega_w - \hat{\omega}_w) \quad \dots\dots (15)$$

\hat{T}_L の極配置は $s = -130 \pm 60j$ とし，これは後述するすべり速度指令器の極から2倍程度遠く配置する．極配置より， $k_1 = 2.60 \times 10^2 [1/\text{m}^2]$ ， $k_2 = -3.2580 \times 10^6 [1/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)]$ とする．また，式(16)のように接線力トルク推定値 \hat{T}_L から接線力係数 $\hat{\mu}$ を求める．

$$\hat{\mu} = \frac{\hat{T}_L}{Wg} \quad \dots\dots\dots (16)$$

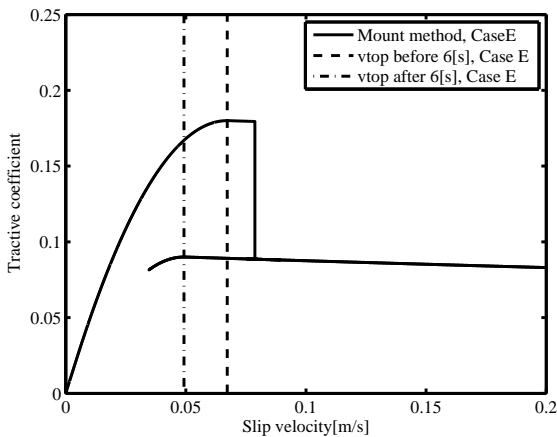


図5 接線力係数 - すべり速度の関係特性 (Case E)
Fig. 5. Characteristic change between tractive coefficient and slip velocity (CaseE)

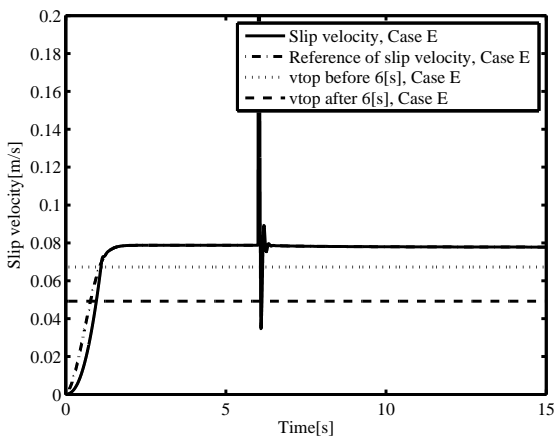


図6 すべり速度 (Case E)
Fig. 6. Slip velocity (Case E)

4.2.2 真鍋多項式を用いたすべり速度指令制御器の構成⁽⁸⁾ 図7より, 制御系の伝達関数 $G(s)$ は式(17)となる. この伝達関数の特性多項式 $P(s)$ は式(18)で表される. ただし, PI 制御の K_p, K_i をそれぞれ比例ゲイン, 積分ゲインと定義する.

$$G(s) = \frac{(K_i + K_p s)R_g}{T_d J s^3 + J s^2 + K_p R_g s + K_i R_g} \dots\dots\dots (17)$$

$$P(s) = T_d J s^3 + J s^2 + K_p R_g s + K_i R_g \dots\dots\dots (18)$$

真鍋の多項式を用いて, PI 制御の K_p, K_i を以下のように決定する⁽⁸⁾. 真鍋の多項式とは, 分母多項式を

$$P(s) = \sum_{i=0}^n a_i s^i \dots\dots\dots (19)$$

として, 次の式(20)で γ_i の定義を行う.

$$\gamma_i = \frac{a_i^2}{a_{i-1} a_{i+1}} \dots\dots\dots (20)$$

ここで, 真鍋多項式は式(21)で γ_i の値を決定する.

$$\gamma_1 = 2.5, \gamma_2 = \gamma_3 = \dots = 2 \dots\dots\dots (21)$$

をみたす多項式のことを言う. 式(18)の特性多項式より, a_0, a_1, a_2, a_3 を決め, これから K_p, K_i を定める.

今までの制御器では, 接線力係数 - すべり速度の特性の右側 ($Q(k) < 0$) から頂点を目指す場合, 左側 ($Q(k) > 0$) と同じ係数 α を用いていると, 左側から右側に戻ってくるのが遅れ, 左側に留まった時間が増え, 線路の磨耗が引き起こされる.

そのため, 接線力係数 - すべり速度の特性の左側から頂点を目指す場合, 式(22)のように接線力係数 - すべり速度の特性曲線の傾き $Q(k)$ の正負によって, α を非対称にした.

$$v_{s-ref}(k+1) = v_{s-ref}(k) + \alpha Q(k) \dots\dots\dots (22)$$

これより, すべり速度が接線力係数 - すべり速度の関係曲線において頂点におけるすべり速度 v_{top} より右側, つまり $v_s > v_{top}$ の巨視すべり領域にあるとき, すばやく $v_s < v_{top}$ の微視すべり領域に戻すようにした. 逆に頂点におけるすべり速度 v_{top} より左側, つまり $v_s < v_{top}$ の微視すべり領域にあるとき, このとき良い粘着条件にあるので, これを維持しつつ, $v_s > v_{top}$ の巨視すべり領域にあるときと比較してすべり速度 v_s をゆっくりと上昇させるようにした. これを式(23)に示す.

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_c & (Q(k) \geq 0) \\ k_c \alpha_c & (Q(k) < 0) \end{cases} \dots\dots\dots (23)$$

この提案空転再粘着法のすべり速度指令器の概念を図8に示す.

4.3 数値解析による提案した制御法の粘着性能の評価
4.2.2 におけるすべり速度指令器の $\alpha_c = 8 \times 10^{-6}, k_c = 90$ としたときの数値解析による粘着性能の評価を実施した.

4.3.1 接線力係数を上昇させた場合 接線力係数を上昇させた場合, 特に, Case H における数値解析結果を図9, 図10に示す. 図9, 図10より, すべり速度, 同一次元オブザーバを用いた接線力係数の推定は変化に追従できている. 図10より, すべり速度が落ちるとき急峻に落ちるが, その後ゆっくりとすべり速度を大きくしていることがわかる.

4.3.2 接線力係数を下降させた場合 接線力係数を下降させた場合, 特に, Case K における数値解析結果を図11, 図12に示す. 図11, 図12より, すべり速度, 同一次元オブザーバを用いた接線力係数の推定は変化に追従することができている. 図13より, すべり速度が落ちるとき急峻に落ちるが, その後ゆっくりとすべり速度を大きくしていることがわかる. よって, Case E (図5, 6) と異なり, すべり速度 v_s が接線力係数 - すべり速度の関係曲線の頂点におけるすべり速度 v_{top} を超えた場合はすべり速度 v_s を引き下げ, $v_{top} > v_s$ を維持することが確認できた.

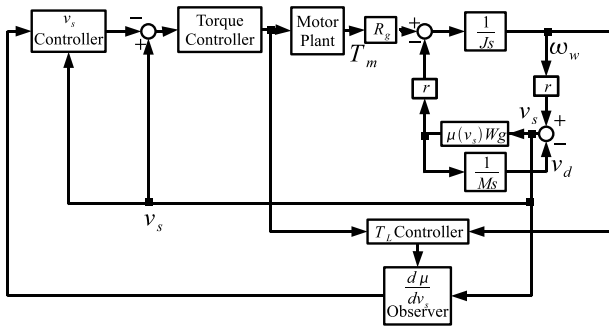


図7 提案空転再粘着制御のブロック線図

Fig. 7. Block diagram of re-adhesion control

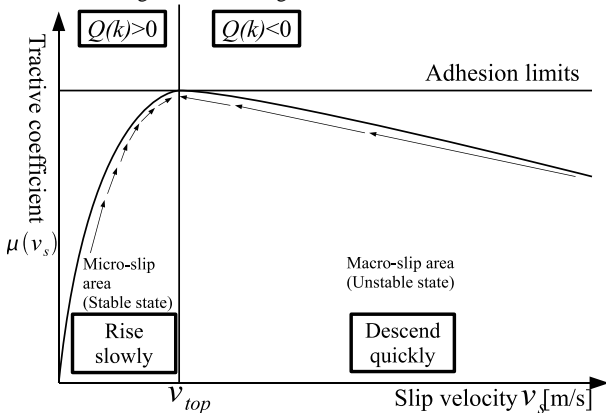


図8 提案空転再粘着法概念

Fig. 8. Concept of proposal re-adhesion control

4・3・3 粘着利用率と動輪周損失仕事率

粘着利用率と動輪周損失仕事率の計算結果を図14, 15に示す。提案再粘着制御の粘着利用率は、従来再粘着制御と比較して、平均0.57[%]の向上とそれほど大きく変わらない。これは、従来再粘着制御でも巨視すべり領域に突入しているものの、良好な粘着状態を維持しているためだと考えられる。

また、動輪周損失仕事率は提案空転再粘着制御により平均17[%]改善した。従来空転再粘着制御の場合、巨視すべり領域に突入していたが、提案空転再粘着制御の場合、巨視すべり領域に突入すると、すばやく微視すべり領域に引き下げている成果が出ていることが確認できた。

5. 結論と今後の課題

粘着制御とは高い粘着性能があるのを見る粘着利用率⁽⁴⁾などによる評価が一般的である。しかし、滑った状態のまま高い粘着性能を持っていたとしても、線路や車輪にとっては大きな負担となるだけである。そのため、本研究では摩擦を考慮した動輪周損失摩擦仕事率という評価方法を新しく定めた。粘着利用率と動輪周損失摩擦仕事率という相反する2つの判断基準について相互の妥協点を探る制御を良い制御と考え、この制御を目指し、数値解析を行った。先行研究⁽²⁾では高い粘着性能を持ったまま、滑っていた。これを改善するべく、安定状態と非安定状態と異なるすべり速度指令器を使用することで、定常状態で安定領域にいる

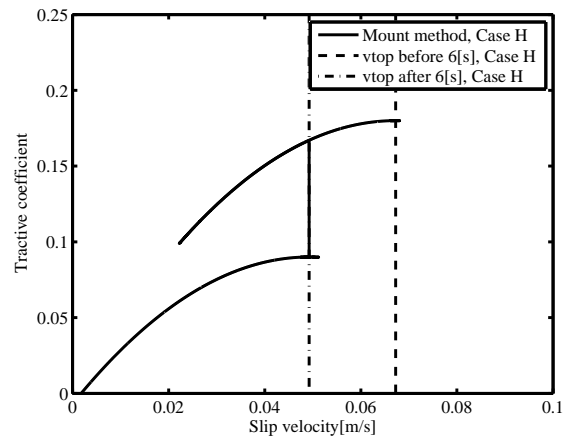


図9 接線力係数 - すべり速度の関係特性 (Case H)

Fig. 9. Characteristic change between tractive coefficient and slip velocity (Case H)

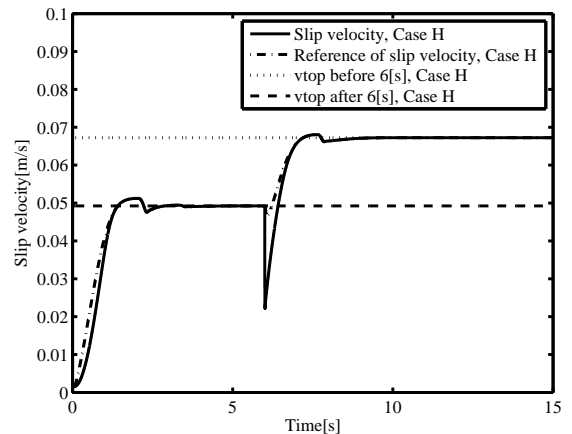


図10 すべり速度 (Case H)

Fig. 10. Slip velocity (Case H)

ような制御方法を提案した。そして、どれくらい粘着状態が良いかを示す粘着利用率と線路にどれくらいの負担があるのかを示す動輪周損失摩擦仕事率を用いてこの制御方法を評価した。その結果、粘着利用率は先行研究における方法とほとんど変わらず、良好な粘着状態を維持したまま、動輪周損失摩擦仕事率を平均17[%]改良できた。

今回提案した制御方法はすべり速度の情報を用いている。しかし、今後はすべり速度の情報を使わなくても定常状態で安定領域にいるような制御ができるよう検討を進める予定である。

参考文献

- (1) 鉄道システムにおける粘着制御技術調査専門委員会：“鉄道車両における粘着制御技術”，電気学会技術報告，No. 673 (1998)
- (2) 大下穂高，河村篤男：“粘着試験装置を用いた加速から減速へ連続した接線力係数の測定と最大接線力制御”，IIC-07-80

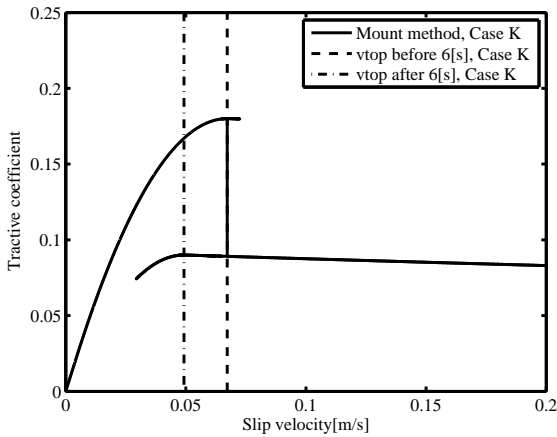


図 11 接線力係数 - すべり速度の関係特性 (Case K)
Fig. 11. Characteristic change between tractive coefficient and slip velocity (Case K)

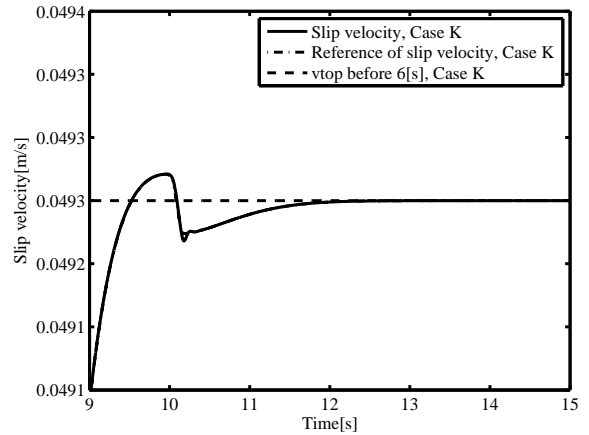


図 13 すべり速度 (Case K, $t=9-15[s]$)
Fig. 13. Slip velocity (Case K, $t=9-15[s]$)

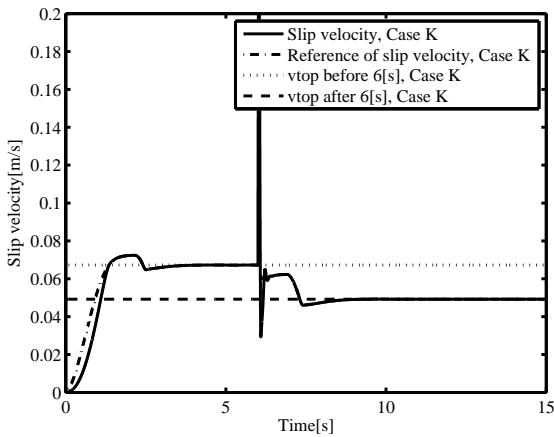


図 12 すべり速度 (Case K)
Fig. 12. Slip velocity (Case K)

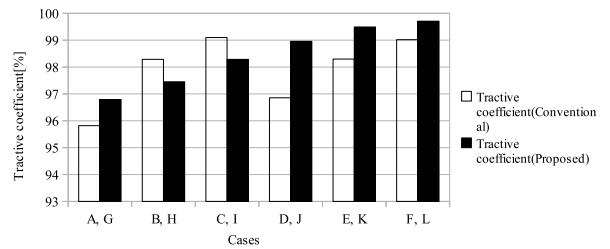


図 14 粘着利用率 (Case A-L)
Fig. 14. Tractive coefficient (Case A-L)

- (3) 戸田伸一, 逸見琢磨, 中沢洋介, 安岡育雄: "鉄道車両駆動用空転再粘着制御に関する一考察 - 粘着力とすべり速度の関係を基本にした空転防止制御 - ", 電気学会論文誌 D, Vol.121, No.9, PP923-932, 2001.
- (4) 清水陽介, 門脇悟志, 大石潔, 畑正, 佐野孝, 保川忍: "電気車の外乱オブザーバを用いた空転滑走再粘着制御の評価と考察", IEEE Trans. IA, Vol.127, No.8, 2007
- (5) 王峰, 佐川貢一, 石原正, 猪岡光: "乗り心地向上を目的とする自動車支援システム", 電気学会論文誌 D, Vol.122, No.7, PP730-735. 2002.
- (6) 門脇悟志, 大石潔, 宮下一郎, 保川忍: "外乱オブザーバと速度センサレスベクトル制御による電気車 (2MIC) の空転再粘着制御の一方式", IEEE Trans. IA, Vol.127, No.8, 2007
- (7) 槻木澤佑公, 古閑隆章, 根来秀人, 村端章浩: "電気車の再粘着制御時における接線力特性軌跡と再粘着可能性 - 一軸モデルに基づく計算 - ", TER-08-37
- (8) 堀洋一, 大西公平: "応用制御工学", 丸善, 平成 10 年

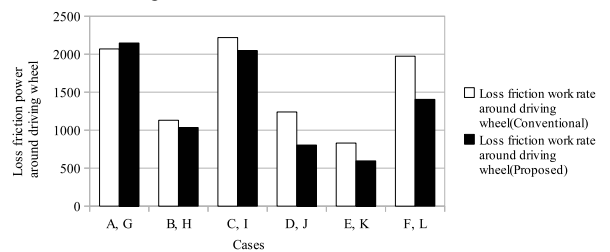


図 15 動輪周損失摩擦仕事率 (Case A-L)
Fig. 15. Loss friction work rate around driving wheel (Case A-L)