U. D. C. 621.335.1 : 62-592.652-52

空気ブレーキを用いた再粘着促進装置“HIRAD”の開発

Development of HITACHI Re-adhesion Device “HIRAD” for Electric Rolling Stock

油井兄朝* 弘津哲二*
Shigetomo Yui Tetsuji Hirotsu
園部久雄* 今泉藤麿**
Hisao Sonobe Fujimaro Imaizumi

要　　旨

直流電車や直流機関車の粘着性能を交流機関車なみに向上することを目的として，空気ブレーキを用いた再粘着促進装置“HIRAD”を開発した。本装置は空転の検知に各軸の速度差の微分値を用いて空転検知感度を向上し，またブレーキ力作動時定数を小さくするために大口径給気弁などを採用しているので，走行速度のいかんにかかわらず確実な再粘着性を得ることができた。

本装置をMT編成の直流電車に採用すると，3 km/h/s の高加速度が期待できること，および引張力で20～30％向上が期待しうることなどが明らかとなった。

1. 緒　　言

電気車の高速化および高出力化の傾向は最近ますます強まっており，そのため種々の新しい性能が要求されている。粘着性能の向上もその一つであり，これにより中高速域の力行および制動時の加減速度を向上して高速化に寄与したり，また動力車の集約化が可能となるなど多くの効果が期待できる。

さきにわれわれは交流機関車の粘着性能向上に関して研究を行ない[1][2]，日本国有鉄道に協力してAVR制御方式などを開発し，従来に比べて30～40％引張力を増大することに成功した。しかし直流電気車については特殊なもの[3]を除いてはいまだ的確な再粘着制御を得るに至っていない。また交流機関車でも中高速域における再粘着性は低速域に比べてかなり低下する。

そこで直流電気車を主体に，全速度域にわたって粘着性能を交流機の低速域と同程度に向上させる方式について検討を行なった。再粘着性を得るための基本条件は，空転速度の増大と同時に動輪周上引張力を適切な値に低下させることである[4]。この引張力の適切な制御状況を交流機車の実測結果や理論解析により求め，これと等価な引張力制御を空気ブレーキの作動によって行なう方式を検討し，空気ブレーキを用いた再粘着促進装置“HIRAD”（Hitachi Re-Adhesion Device）を開発した。

本報では“HIRAD”の構造および作動特性を紹介するとともに，実車試験における再粘着状況および向上しうる期待引張力の推定などについて言及する。

2. 粘着係数と期待引張力

2.1 粘着係数とその利用法

一般に動力車の期待引張力を推定するには，車輪とレール間の粘着係数の実用しうる範囲を実車測定より求め，実用上の引張力を推定している。車輪とレール間の粘着係数のような不確定な値を対象に引張力を推定するには，一般に駆動側動力の引張力と回転速度の関係が大きく影響を及ぼしてくる[4]。

いま車輪とレール間の粘着係数の変化を図1のようなものとする。このような線路区間で再粘着性を持たない車両を運転するには，粘着係数のばらつきの下限値すなわち図1の斜線部に見合う計画引張力を設定しなければならない。このような運行は利用できる粘着係数をむだにした効率の悪い計画である。そこで最も効果的に粘着

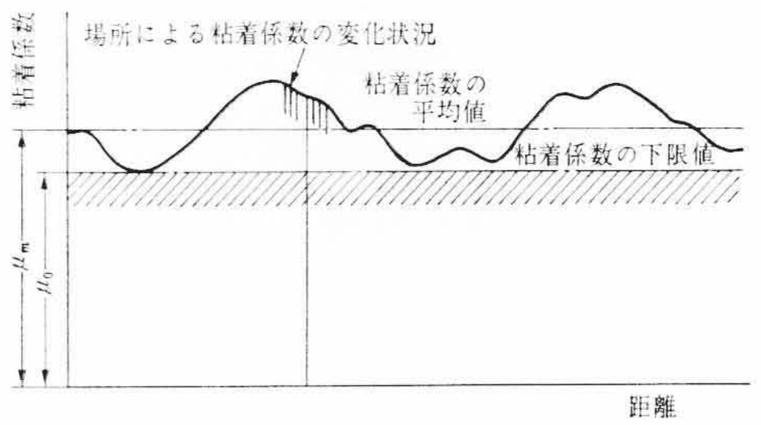


図1　場所による粘着係数の変化状況

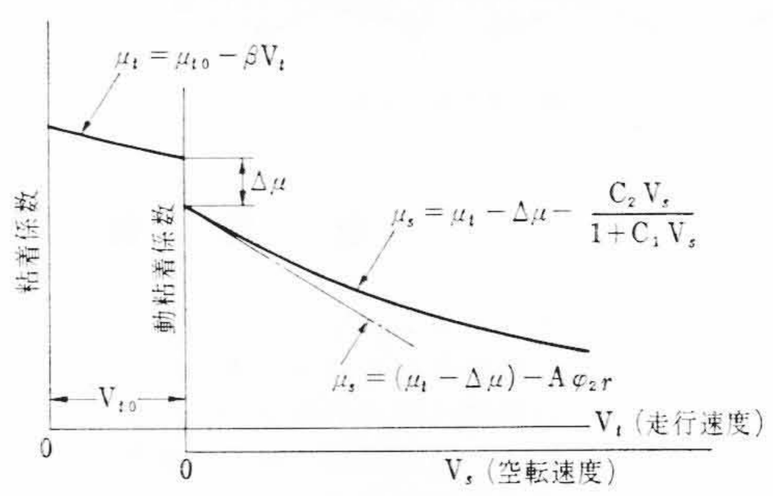


図2　粘着係数と空転速度の関係

係数を利用するには，図1の縦細線で示したようなその地点の持つ粘着限界に見合った引張力をその都度出すようにすることで，このときの期待引張力は粘着係数の平均値に相当する分まで引き上げて設定することができる。このように常に粘着係数の変化に追従した引張力制御を行なうには，空転してもきわめて短時間に再粘着するような駆動力特性を与えてやればよい。

2.2 再粘着性と期待引張力との関係

粘着係数と空転速度の一般的関係は図2に示すようで，走行速度0からV_{t0}まではころがり摩擦係数（粘着係数という）μ_tで表わされ，V_{t0}で空転をおこすところがり摩擦からすべり摩擦に移行し，急激に$\Delta\mu$だけ低下したあとμ_s（以後動摩擦係数という）のように変化する。このμ_t，μ_sと静的軸重Wとの積$\mu_t W$，$\mu_s W$が動輪周上限界引張力となる。

ここで空転後の状況のみ注目し，$\mu_s W$と駆動側の動輪周上引張力の変化につき調べてみると，一般的に図3の(A)(B)(C)3種の場合に分類して表わすことができる。まず図3(A)について考えると，空転を生ずると(A)-Iに示すように動輪周上引張力はF_{t1}の曲線に従って変化し，一方動粘着力は$\mu_s W$のように表わされる。これを引張力と空転速度の時間に対する変化で表わすと(A)-IIとなり，当初

* 日立製作所日立研究所
** 日立製作所水戸工場

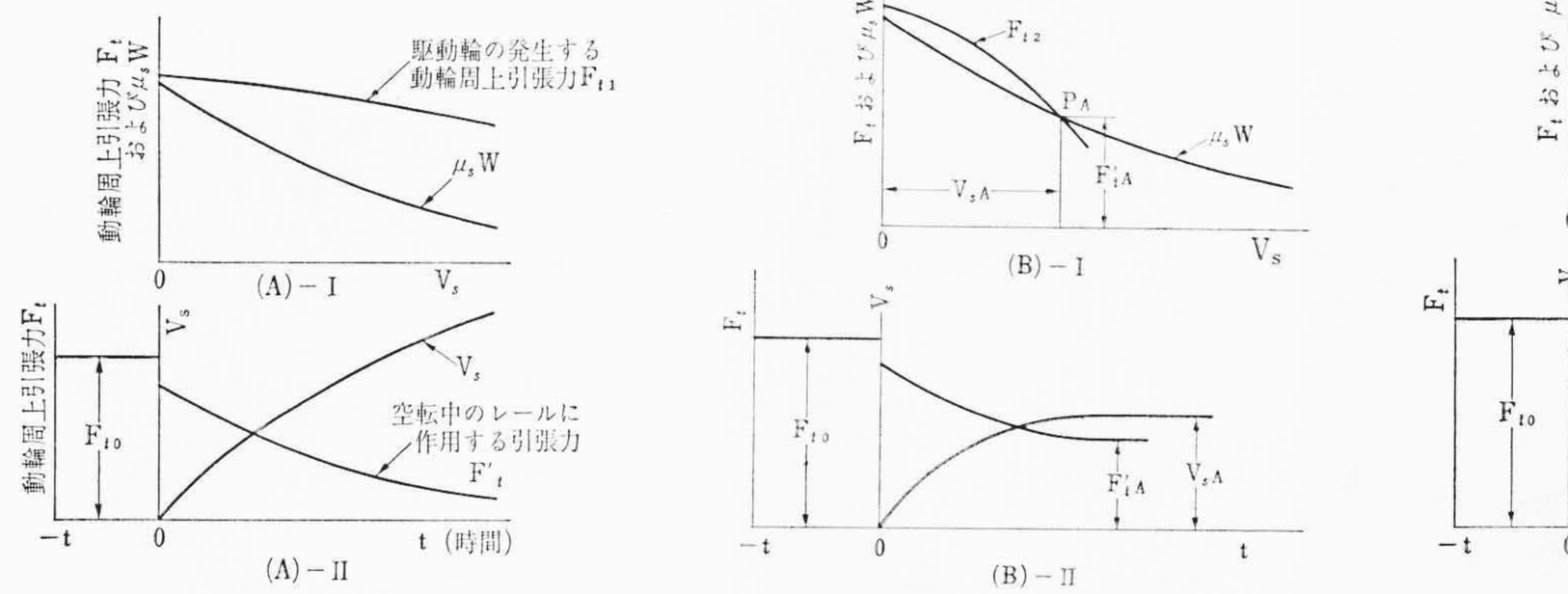


図3　空転中の引張力と空転速度の関係

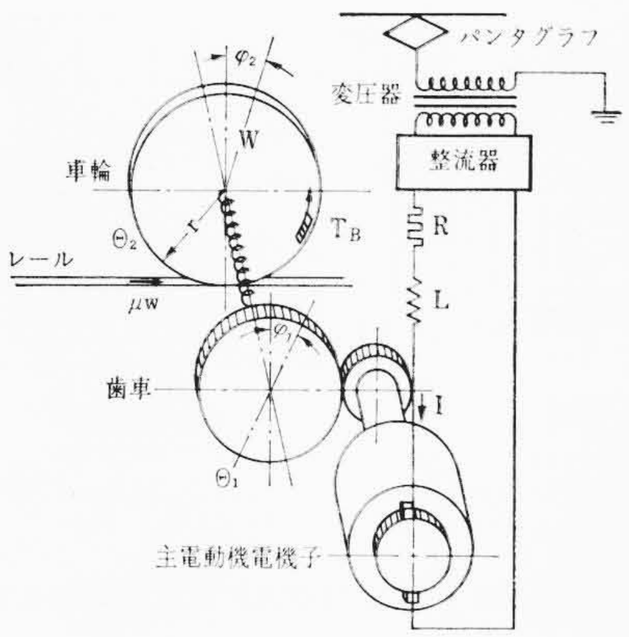


図4　駆動系の模形図示

動輪周上引張力 F_{t0} で加速力行していたものが $t=0$ で空転を発生すると，空転速度 V_s は図のように増大し，車輪からレールに作用する引張力は F_t' のように低下する。この場合注意すべきことは，空転中レールに作用する引張力は駆動輪の発生する引張力 F_{t1} ではなく，動粘着力 $\mu_s W$ によって規定された引張力 F_t' である。したがって $(F_{t1}-\mu_s W)$ の力は単に空転中の車輪や電機子を加速するだけに費やされ，車両全体の加速には役だたない。

次に図3 (B)-I, IIについては動輪周上引張力が F_{t2} のような特性であると，動粘着力 $\mu_s W$ と点 P_A で交わり，空転速度は V_{sA}，レールに作用する引張力は F_{tA}' でつり合状態となり，このまま空転を継続する。また図3 (C)-Iでは引張力特性が F_{t3} のように変化すると，$\mu_s W$ との交点 P_A で空転速度は最大となり（V_{sA}），以後は $F_{t3}<\mu_s W$ となるため空転速度は減速しそのまま再粘着する。この場合空転中の引張力は F_{t3} に関係なく $\mu_s W$ のみに依存し，(C)-IIにみられるように最小引張力は F_{tA}' で，空転中に F_{t3} をいかに小さくしてもレールに作用する引張力を小さくすることにはならない。

このように大空転を防ぎ再粘着性を持たせるためには，図3 (C)-I点線で示す速度引張力特性 F_{t1} を矢印の方向へ引き込み，F_{t3} のように急激に引張力が低下する特性にすることが望ましい。結局空転中の駆動輪に発生する引張力 F_t を急に低下させることが，かえって空転中のレールに作用する引張力 F_t' を大きくし，全体の加速力を低下させずに再粘着させうることになる。

2.3　再粘着性を与えるいくつかの方法

図3 (C)に示す速度，引張力特性 F_{t3} を得るための具体的方法についてその大要を述べる。

いま図4に示す駆動系において，再粘着性に関する電機子回路振動についての方程式は次のようである[4][5]。

$$\Theta\ddot{\varphi}_s-A\dot{\varphi}_s-S\cdot\zeta\phi\cdot I=\Delta\mu W_r-T_B \quad \cdots\cdots(1)$$

$$L\dot{I}+RI+S\cdot\zeta\phi\cdot\dot{\varphi}_s=0 \quad \cdots\cdots(2)$$

上式において

$\zeta\phi$：主電動機の単位回転磁束

R：電機子回路の等価全抵抗

L：電機子回路の等価インダクタンス

I：電機子回路電流の空転による変動分

S：歯　車　比

Θ_1：電機子および大小歯車の極慣性モーメント

Θ_2：輪軸の極慣性モーメント

$\Theta=\Theta_1+\Theta_2$

r：車　輪　半　径

また $A=AWr^2$（図2の μ_s の直線近似式参照），φ_s は電機子と輪軸とが一体となって変動する場合の角変位を表わす。

ここでは“T_B”空転後空気ブレーキをかけて動輪に生じたトルクで実際には空転速度や作動時間とともに変化する値であるが，ここでは簡単のため定数として与える。

いま

$$\dot{\varphi}_s=V_s,\quad \alpha=\frac{1}{2}\left(\frac{R}{L}-\frac{A}{\Theta}\right),\quad n=\frac{(S\cdot\zeta\phi)^2-AR}{\Theta L},$$

$$F=\frac{R(\Delta\mu Wr-T_B)}{\Theta L}$$

とおくと

$$\dot{V}_s+2\alpha V_s+nV_s=F \quad \cdots\cdots(3)$$

(3)式の解は

(i)　$n-\alpha^2>0$ の範囲では $\sigma=\sqrt{n-\alpha^2}$ とおくと空転速度 V_s は

$$V_s=\frac{F}{n}\left\{1-e^{-\alpha t}\left(\cos\sigma t+\frac{\alpha}{\sigma}\sin\sigma t\right)\right\} \quad \cdots\cdots(4)$$

となり，平均値 F/n の上下に振動 σ の振動（電機子回路振動）を生ずる。

(ii)　$n-\alpha^2\leqq 0$ の範囲では V_s は振動的にならず，とくに $n\leqq 0$ および $\alpha>0$ のときは発散となる。また空転速度の収れん値 F/n は

$$\frac{F}{n}=\frac{R(\Delta\mu Wr-T_B)}{(S\cdot\zeta\phi)^2-RAWr^2} \quad \cdots\cdots(5)$$

にて表わされる。

ここで再粘着させるための条件は，(5)式で示される空転速度の収れん値をできるだけ小さくすることと，$\alpha<0$ すなわち

$$\frac{L}{R}>\frac{\Theta}{AWr^2} \quad \cdots\cdots(6)$$

として電機子回路振動を発散させればよい。

(5)(6)式を満足するには R を小さくすればよく，整流器式交流車両では主電動機を全並列接続ができるので等価的に R が小さくなり，図3 (C)-Iの特性に近づけることが容易である。しかし直流車両では起動時に全主電動機は直列接続され，かつ抵抗器が

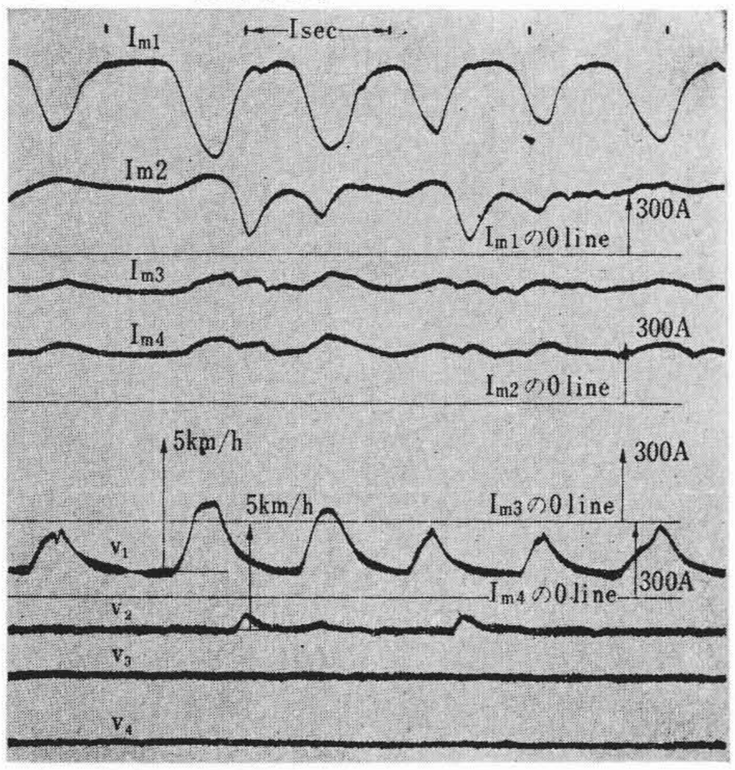


図5　ED 75形交流機関車の空転状況

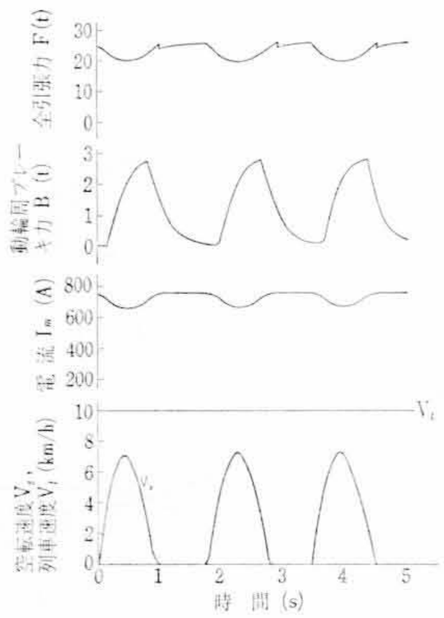


図6　空気ブレーキによる再粘着制御の場合の計算結果

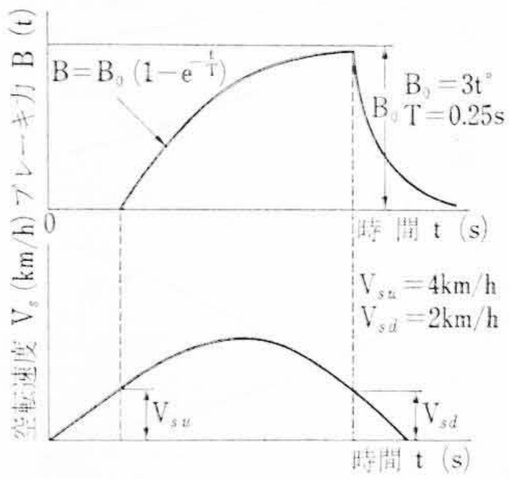


図7　空転検知感度と空気ブレーキ制動状況

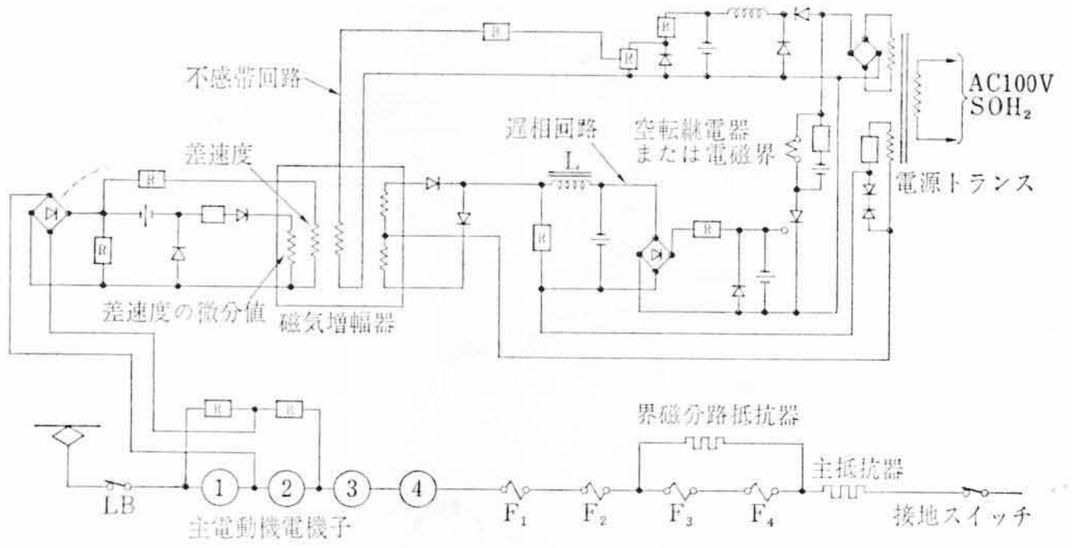


図8　西武鉄道801形電車HIRAD現車試験空転検知回路

直列にはいっているためRは大きく，図3 (A)-Iの特性に近く大空転に至りやすい。

その対策として従来直流機関車では，(1)式中の電流Iを電機子分路または界磁分路することにより減少させ再粘着させる方式が採用されている。しかしこれらの方法は速度によって分路する抵抗値を変えねばならないことや，再粘着後の引張力回復時の電流立上りが急で空転を再発しやすいなどの欠点が見られる。

今回開発した空気ブレーキを用いた再粘着促進装置“HIRAD”は，空転後のトルク低減を主回路電流を下げずに，空気ブレーキによりブレーキトルクT_Bを作用させて行なう方式である。すなわち(1)式右辺のT_Bが作用することにより(5)式分子にT_Bがはいり，T_Bを大きくすることは空転の収れん速度F/nを小さくするのにきわめて有効となる。図3 (C)-Iの点線で示される特性F_{t1}が，ブレーキ力の作動により矢印方向に下げられF_{t3}の特性に近づくようになる。

3. 空気ブレーキを用いた再粘着促進装置“HIRAD”の構造

3.1 適切な再粘着性を与えるための検討

空転をなんらかの手段で検知したあと，動輪に空気ブレーキを作動させる方式は従来より散見されているが，顕著な効果があったと報告された例は少ない。そのおもな原因は空転の検知がおそいことと比較的弱いブレーキ力を作動させている点にある。すなわち力行中にブレーキを作動させるという常識的な不自然さが，強いブレーキ力を作動させるまでの決断力を鈍らせ，弱いブレーキ力のままずるずると大空転に至らせたものと考えられる。これは図3 (C)-I, IIからも明らかなように，空転中はいかに強いブレーキ力をかけても，車両を加速させる引張力F_t'は$\mu_s W$（すべり摩擦力）のみによって決まり，作動させたブレーキ力が車両の加速力を減らすことにはならない。むしろ“空転を早期に検知し強いブレーキ力をかける”ほうが再粘着には効果的なのである。ただし再粘着後までも強いブレーキ力を作動させることは，明らかに引張力を低減させるので，早期にゆるめなければならない。

そこで空気ブレーキ力の制御の仕方について，整流器式交流機関車の代表的な再粘着状況を実車試験結果より求め，これに近い引張力低下を与えるよう計画した。図5はED 75形交流機関車の常磐線高萩付近(昭和39年11月)におけるこう配起動時に得られた測定結果で，空転開始から再粘着に要する時間は約1秒，再粘着に要する引張力（電流）の低下は空転直前の値の30～50%に達している。これに似た引張力変化を直流車両に与えるため，ブレーキ力の制御方法を理論解析により求めた。

図6はEF 81形3電流式機関車（主回路特性は直流機関車と同等）を対象に，引張力26 t (μ_t=0.26)で走行中空転を生じブレーキをかけた場合を想定し，ディジタル計算機によりシミュレーションを行なった結果である。空気ブレーキの作動状態は基礎実験より求めた定数を用いて図7に示すように与えた。ブレーキ力の最終値B_0=3 tは起動引張力の69%とかなり強い値に設定した。

図6は6軸中の先頭軸に空転が生じ，先頭軸のみにブレーキ力を作動させたもので，空転開始後1秒で再粘着し最大空転速度も7 km/hで，実際の場合もほとんどこの範囲内におさめうるものと考えられる。

3.2 HIRADの構造

3.2.1 空転検知装置

図6に示したシミュレーション特性を満足するにはまず空転を早期に検知しなければならない。そこで高感度の空転検知装置を得るため，空転時の加速度により検知する方法を考案した。この場合各軸単独の加速度を検知するのではなく，各軸の回転速度(電圧)差の微分値をとり出して検知することとした(特許申請中)。空転加速度は一般に5～20 km/h/sの範囲にあるので，速度差の微分値で2 km/h/s以上を検知するように設定すれば，誤動作なく高い検知感度を得ることができる。

図8は西武鉄道801形電車を対象に計画された空転検知回路を示すもので，1台車中の2軸の速度差をとり出して微分する回路と，万一微分値で検知できない場合には，速度差（10 km/h以上）で検知する回路を付加してある。なお微分値の検知感度は2 km/h/sである。

3.2.2 空気ブレーキ回路

空転検知したあと，早急に強力なブレーキ力を作動させる必要がある。図9はこの点を考慮した西武鉄道801形電車の現車試験

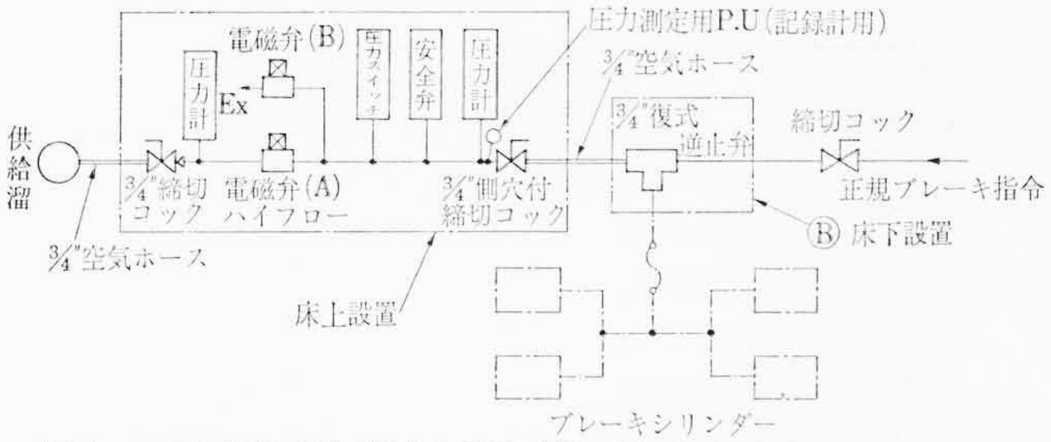
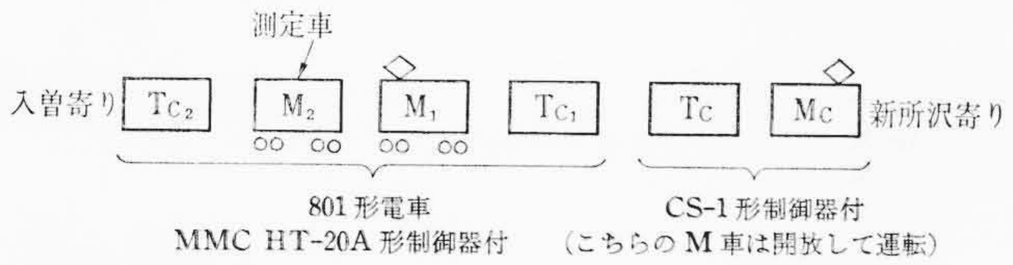


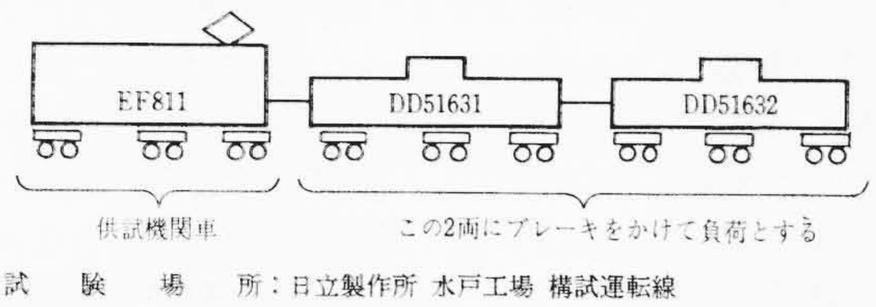
図9　西武鉄道801形電車HIRAD現車試験空気ブレーキ回路

表1　西武鉄道801形電車実車試験条件



試　験　日：昭和43年7月12日
試　験　区　間：新所沢←→入曽
試　験　条　件：散水装置により試験台車に撒水
空転検知感度：差速度の微分値　2 km/h/s
差速度　10 km/h
ブレーキシリンダ圧力：3.5 kg/cm²

表2　EF81形機関車粘着試験条件



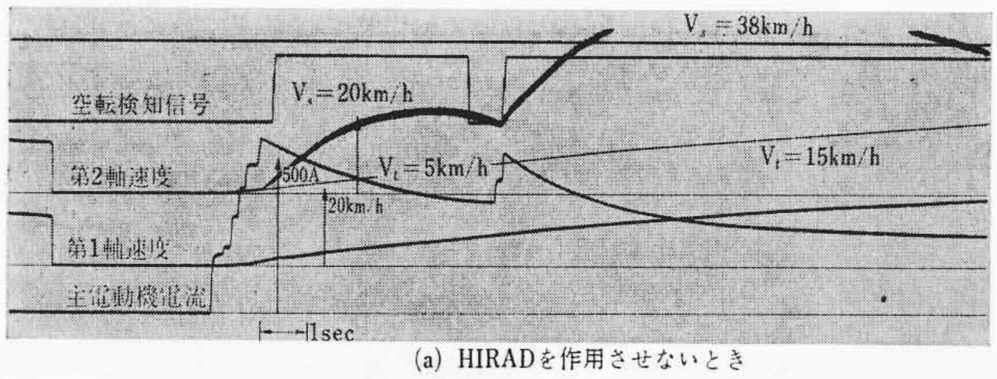
試　験　場　所：日立製作所 水戸工場 構試運転線
試　験　日：昭和43年11月23～24日
試　験　条　件：上記編成にて撒水
空転検知感度：差速度の微分値　2 km/h/s
差速度　10 km/h
ブレーキシリンダ圧力：3.5 kg/cm²

用ブレーキ回路を示したものである。図9について説明すると，ブレーキシリンダへは制動用の正規ブレーキ力以外に複式逆止弁を介して再粘着用ブレーキ回路が接続されている。すなわち左端の供給だめより給気弁，圧力スイッチ，安全弁，圧力計を経て複式逆止弁に至る。給気弁にはとくに大口径のものを用い，図7に示すブレーキ力作動時定数Tを満足するよう計画されている。なお，さらに時定数Tを小さくするには小形の空気だめを付加すると効果がある（EF 81形に適用）。

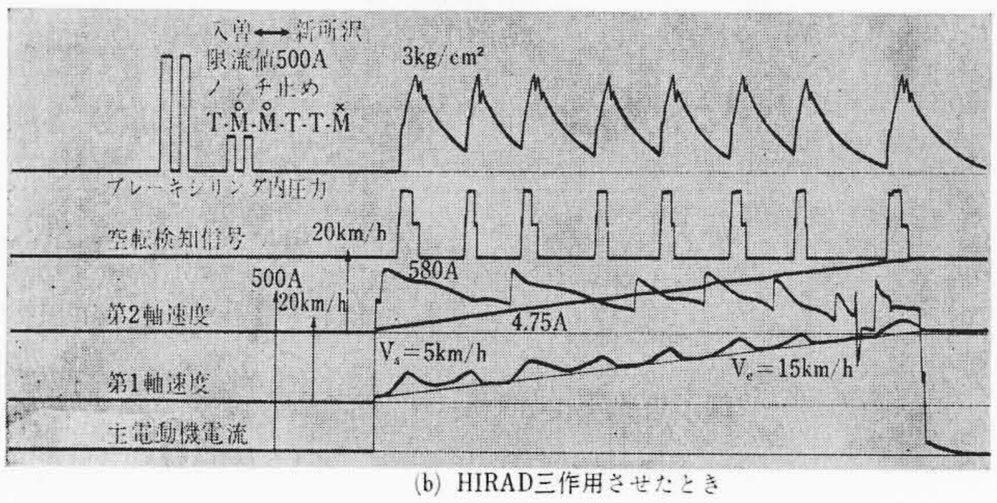
4. HIRADを実車に取り付けた場合の試験結果

HIRADを直流電車および3電流式機関車に適用し現車試験を行なった。まず西武鉄道801形電車に適用した場合の試験条件は表1に，測定結果は図10に示すとおりである。図10(a)はHIRADを作用させないときの空転状況を，(b)はHIRADを作用させたときの状況を示したものである。図は加速中の限流値500Aの場合であるが，HIRADはきわめて有効に作用し，何も作用させないときは起動直後より空転を起こし，最大空転速度はV_s=38 km/hに達している。HIRADを作用させると空転開始後ほぼ0.2秒以内に空転を検知し，強力にブレーキが作用して空転速度は5 km/h以内におさまり，かつすべて確実に再粘着している。

図11はこれらの測定結果より求めた動輪周上引張力F_tと空転速度V_sとの関係を示したもので，「ノッチ止め」の場合がちょうど図3(C)-Iの点線F_{t1}の特性に近く，「HIRAD付」の場合が同図の直線F_{t3}に相当し，粘着性能が著しく改善されている状況がよくわかる。



(a) HIRADを作用させないとき



(b) HIRAD三作用させたとき

図10　西武鉄道801形電車の現車試験結果

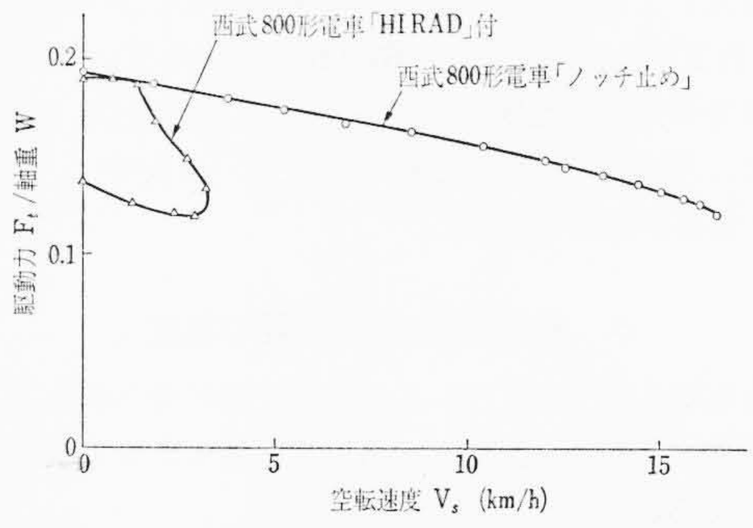
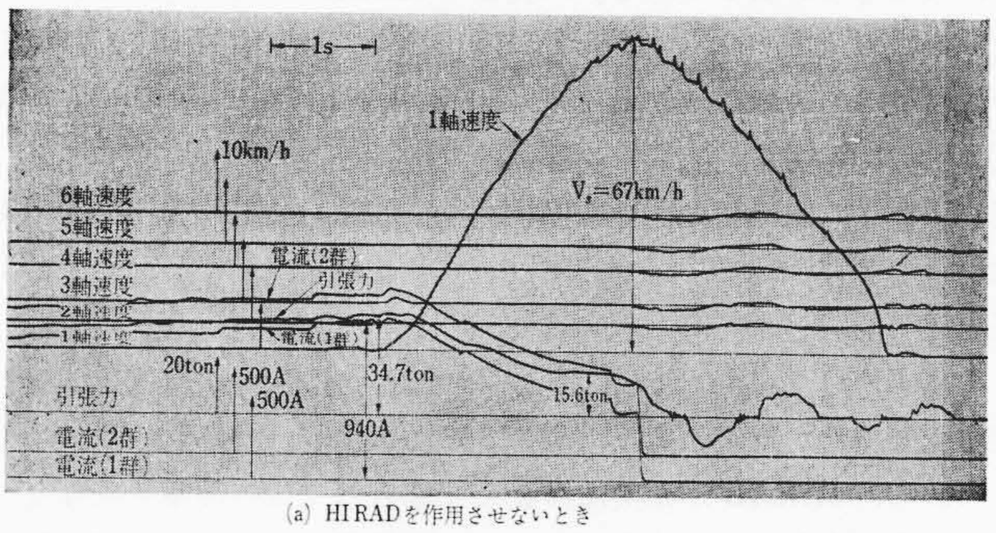
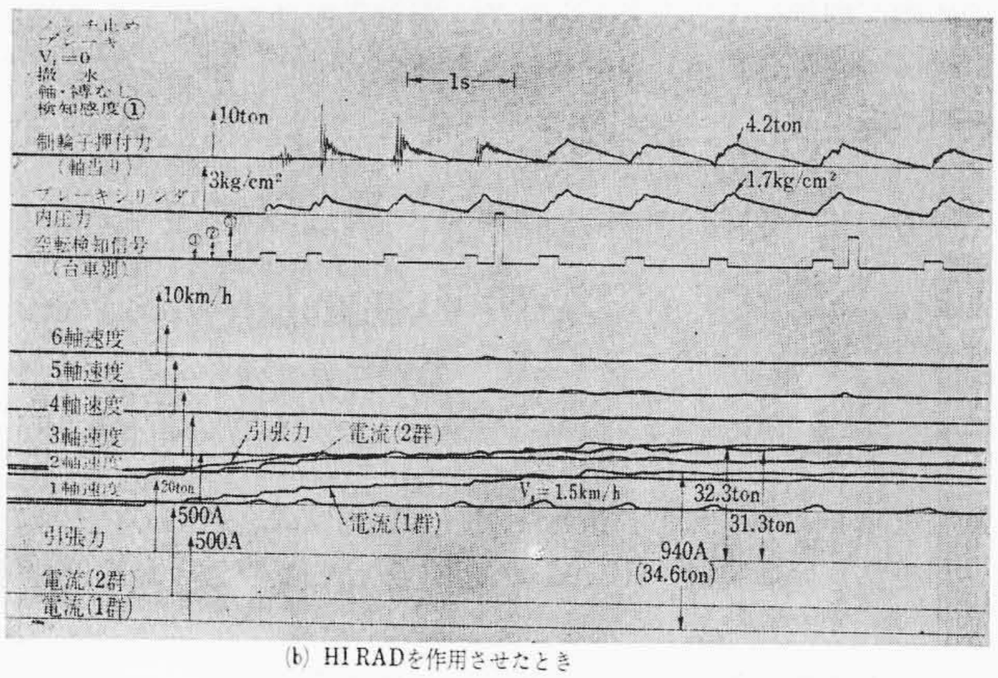


図11　空転速度と駆動力軸重の動特性



(a) HIRADを作用させないとき



(b) HIRADを作用させたとき

(日立製作所水戸工場構内)

図12　EF 81現車試験結果

次に日本国有鉄道EF 81形3電流式機関車の実測結果について述べる。表2は試験条件を示したものである。図12(a)はHIRAD

表3　西武鉄道801形電車の空転制御の方法と加速度の関係

項番	MMCHT-20A 限流値 (A)	空転制御方法	加速度 実平均 km/h/s	加速度 計算上の km/h/s	加速度 実平均/計算上の	編成	TMMT 4R 編成のみの走行で限流値に対して得られる加速度 (km/h/s)	TMMT編成で期待できる加速度 (km/h/s)
1	400	"HIRAD" 有, ノッチどめなし	1.41	1.43	0.985	$T\overset{\circ}{M}\overset{\times}{M}T$-$T\overset{\circ}{M}$	2.37	2.34
2	400	"HIRAD" 有, ノッチどめあり	1.36	1.42	0.95	$T\overset{\circ}{M}\overset{\times}{M}T$-$T\overset{\circ}{M}$	2.37	2.25
3	450	"HIRAD" 有, ノッチどめあり	1.6	1.85	0.865	$T\overset{\circ}{M}\overset{\circ}{M}T$-$T\overset{\times}{M}$	2.86	2.48
4	500	"HIRAD" 有, ノッチどめあり	1.85	2.17	0.853	$T\overset{\circ}{M}\overset{\circ}{M}T$-$T\overset{\times}{M}$	3.37	2.88
5	500	"HIRAD" 有, ノッチどめあり ノッチどめ復帰 1s の時限有	1.6	1.78	0.90	$T\overset{\circ}{M}\overset{\times}{M}T$-$T\overset{\circ}{M}$	3.37	3.04
6	500	ノッチどめのみ	1.33	2.17	0.615	$T\overset{\circ}{M}\overset{\circ}{M}T$-$T\overset{\times}{M}$	3.37	2.08
7	500	主回路 OFF	1.17	2.17	0.540	$T\overset{\circ}{M}\overset{\circ}{M}T$-$T\overset{\times}{M}$	3.37	1.84

(1)　加速度計算条件

(i)　自重　Tc_1 — M_1 — M_2 — Tc_2 — Tc — Mc

26.9 t　35.6 t　34.5 t　26.9 t　27 t　40 t　合計 190,9 t

(ii)　けん引力　MMC HT-20A　限流値　400A—1,270 kg/M (950 kg/M)
450A—1,510 kg/M (1,170 kg/M)
500A—1,750 kg/M (1,400 kg/M)
} ( ) 内は No. 3, 4 Motor で 50% 界磁のもの

CS—1形CTR　1,175 kg/M

(2)　記号の説明　$\overset{\circ}{M}$：主電動機が動作しているM車
$\overset{\times}{M}$：主電動機を cut out したM車
T：付　随　車

を作用させないときを示し，主電動機電流 940A (μ_i=0.347) で空転を開始し，約2,3秒で空転速度は 67 km/h に達している。図12(b)はHIRADを作用させた場合で，空転速度はいずれも 2 km/h 以下におさまり，引張力も 31～32 t (μ≒0.32) が安定して出ておりHIRADの効果が認められる。

5. 粘着性能向上効果の推定

HIRADを取り付けることにより再粘着性が得られることが知られたが，同時に期待引張力がどの程度向上するかを定量的に求めておく必要がある。

まず西武鉄道801形電車の実測結果を整理して力行中の加速度を比較したものが表3である。本表よりHIRADを取り付けていない状態では限流値400A，加速度 2.3 km/h/s 程度であるが，HIRADを取り付けることにより限流値を500Aまで上げることができ，加速度 3 km/h/s 程度が期待できることがわかる。また引張力の向上は，同表下欄より限流値400Aで平均引張力1,270kgが限流値500Aで平均引張力 1,750 kg に向上するので，空転ひん度が増すことによる引張力低下を見込んでも 20～30% の向上を期待しうることがわかる。

次に EF 81 形の解析結果(図6)および現車試験結果(図12)より期待引張特性を推定すると，ED 75 形の再粘着状況(図5)に近いところから，HIRADが確実に作動した場合は交流機関車と同程度の粘着性能が期待しうると考えられる。なお現在日本国有鉄道で使用されている直流機関車と交流機関車の運転計画時に用いられる粘着係数[6][7]は次のようである。

直流，交直流機関車　$\mu=0.265\dfrac{1+0.403V_t}{1+0.522V_t}$

交流機関車　$\mu=0.326\dfrac{1+0.279V_t}{1+0.522V_t}$

6. 結　　言

直流電車および機関車の粘着性能向上を目標に，空気ブレーキを用いた再粘着促進装置"HIRAD"を開発し，次のような結果を得た。

(1)　交流機関車の空転時における電流変化を求め，これに似たトルク変化を空気ブレーキで与えれば，直流電気車においても交流機関車なみにじゅうぶんな再粘着性が得られることがわかった。

(2)　HIRADは空転検知回路とブレーキ付加装置とからなるが，おのおのは次のような性能をもっている。

(a)　空転検知は各軸の速度差の微分値を用いることにより，空転加速度の検知感度を 2 km/h/s に高めることができた。

(b)　空気ブレーキの作動時定数Tを小さくするため大口径給気弁と小形空気だめを採用し，$T\leqq0.25$ 秒を得ることができた。

(3)　HIRADを直流電車に取り付けて実車試験を行なった結果，再粘着性はきわめて良好で，MT編成で3 km/h/s の高加速度が期待できることがわかった。

(4)　HIRADを直流機関車に取り付けて構内試験した結果は，じゅうぶんな再粘着性が得られ，空気ブレーキが確実に作動したときは交流機関車と同程度の引張特性が期待されるものと推定される。

(5)　従来の直流電気車にHIRADを取り付けた場合の効果は，引張力で約20～30%の向上が期待できよう。

なお今後の問題として，重荷重けん引時に複数軸が同時空転をした場合も考えられるが，かかる場合でもじゅうぶんな検知感度が得られるようさらに検討を続けてゆきたい。

終わりに臨み本研究に対し，終始ご指導いただいた日本国有鉄道苗穂工場石田次長（前車両設計事務所主任技師）はじめ車両設計事務所の担当各位，また貴重な現車試験の機会を与えてくださった西武鉄道株式会社加藤車両部長はじめ関係各位に対し厚く御礼申し上げる。

参　考　文　献

(1)　小野田ほか：機械学会論文集 Vol. 31, No. 221 (昭40-1)
(2)　弘津，油井：日立評論 48, 515 (昭41-4)
(3)　島：機械学会誌 Vol. 69, No. 565, p. 15 (昭41-2)
(4)　関ほか：電気学会雑誌 Vol. 80, No. 860 (昭35-5)
(5)　油井：機械の研究 Vol. 19, No. 1, p. 255 (昭42-1)
(6)　松井，曽小川：粘着力解明研究委員会資料 No. 14 の 1 (昭44-3)
(7)　松井，木村　：粘着力解明研究委員会資料 No. 14 の 2 (昭44-3)