
鉄 道 車 両 特 集

電子計算機による交流機関車の粘着性能の解析.....	59
サイリスタ式ED93形交流電気機関車.....	64
車両用主電動機の進歩.....	70
車両用制御器の無接点化.....	76
列車運転の自動化に関する最近の成果.....	80
マラヤ鉄道納ステンレス製ディーゼル動車.....	85

電子計算機による交流機関車の粘着性能の解析

Adhesion Characteristics Analysis of AC Locomotives by Digital Computer

弘 津 哲 二* 油 井 兄 朝*
Tetsuji Hirotsu Shigetomo Yui

要 旨

交流群結線機関車の空転現象を電子計算機で厳密計算し、粘着性能を改善する方法を検討した。すなわち、力行時の空転現象について空転軸数と電源側電気抵抗の影響を調べ、空転誘発を防止し空転軸数のいかにかわらず再粘着させるには、日本国有鉄道のご指導により開発された AVR 制御方式が有効であることを計算ならびに実験により確かめた。また、この方式はインバータ回生制動時の滑走防止にも有効であることを明らかにした。

1. 緒 言

直流直巻電動機を駆動用の主電動機として使用し、これを並列接続して整流装置に接続し、主変圧器のタップ制御あるいは SCR の位相制御によって、主電動機の端子電圧を制御する単相整流器式交流機関車は、空転速度が微小値におさまる再粘着特性をもたせられることは、すでに二、三報告されている^{(1)~(3)}。しかし、それは系を線形で近似し、複数個の電動機がすべて同一の運動を行なうなどの仮定を設けて近似解析を行なったものであり、車輪、レール間の動摩擦係数や主電動機特性などの非直線性を無視し得ない場合、およびすべての電動機が同一の運動を行なうという仮定が成立しない場合には、実際の現象を十分正確に表わしているとは言えないことがその後の実測によりわかってきた。そこで、それらをすべて考慮した厳密計算を電子計算機で行なうことにした。その結果、さきの近似解析では説明できなかった空転誘発などの現象を定量的には握ることができ、空転誘発を防止し再粘着性をもたせるために、さきに日本国有鉄道のご指導により開発された AVR 制御の効果を明らかにすることができた。また、インバータ回生制動に同様の AVR 制御方式を採用した場合の滑走防止効果についても検討した。ここでは、これらを取りまとめ報告する。

2. 用語および記号の説明

(i) 用 語

空 転： 車輪周速度 V_w が列車速度 V_t よりも大きいとき
滑 走： 車輪周速度 V_w が列車速度 V_t よりも小さいとき
空転速度、滑走速度： 空転、滑走時の V_w と V_t の差 $V_w - V_t$
軸重移動： 軸重が静止状態の軸重から変化すること
粘着係数： 車輪・レール間の最大粘着力/軸重
再 粘 着： いったん空転あるいは滑走した後、再び空転あるいは滑走速度が零になること

(ii) 記 号

M ： 全 列 車 質 量 (回転質量を含む) ($\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}$)
 θ ： 動輪軸に換算した駆動系の極慣性モーメント ($\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$)
 V_t ： 列 車 速 度 (m/s)
 n ： 動輪回転角速度 (rad/s)
 W ： 動 軸 上 重 量 (kg)
 R_t ： 列 車 抵 抗
 T_m ： 動輪駆動トルク ($\text{kg} \cdot \text{m}$)
 f ： 動輪・レール間の粘着力 (kg)
 r ： 動 輪 半 径 (m)
 L ： 台 車 間 距 離 (m)

l ： 台車固定軸間距離 (m)
 H ： レール面から連結器までの高さ (m)
 h ： レール面から引張り着力点までの高さ (m)
 s ： 歯 車 比
 v_s ： 空 転 速 度 (m/s)
 μ_v ： 列車速度 v での粘着係数
 μ_s ： 動 摩 擦 係 数
 $\Delta\mu$ ： 空転開始時粘着係数の不連続的減少量
 $K\Phi$ ： 主電動機界磁磁束 (Web)
 I_m ： 全電流 (A)、添字付きのものは各電動機の電流 (A)
 E_r ： 電 源 電 圧 (無負荷整流器出力電圧) (V)
 E_m ： 主電動機誘起電圧 (V)
 R_r ： 電源側等価抵抗 (Ω)
 L_r ： 電源側インダクタンス (H)
 R_m ： 主電動機回路抵抗 (Ω)
 L_m ： 主電動機回路インダクタンス (H)
 γ_c ： 負 荷 補 償 率 (AVR 制御系の定数)
 G ： AVR 制御系の増幅度
 T ： AVR 制御系の時定数 (s)

3. 空 転 現 象

3.1 理 論 計 算 式

4 動軸各軸駆動整流器式交流群結線機関車を対象とする。列車の並進運動に対して次式が成立する。

$$M \cdot \dot{V}_t = \sum_a \frac{T_{mi}}{r} + \sum_s \mu_{si} \cdot W_i - R_t \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\sum_a$ は粘着軸に関する総和を、 $\sum_s$ は空転軸に関する総和を、添字 i は軸番号 (先頭から 1~4 とする) を表わす。

粘着している動軸の回転に対して

$$\dot{n}_i = \frac{V_t}{r} \dots\dots\dots (2)$$

空転している動軸の回転に対して

$$\theta \cdot \dot{n}_i = T_{mi} - \mu_{si} \cdot W_i \cdot r \dots\dots\dots (3)$$

再粘着したとき、摩擦係数が空転速度零において不連続になっていることを考慮する必要がある。すなわち、空転速度と摩擦係数の関係は図 1 のようになっているので、次の場合を生ずる。

(i) $T_m < \mu_v \cdot W \cdot r$ のとき

粘着を維持し動軸の回転は (2) 式で与えられる。

(ii) $T_m > \mu_v \cdot W \cdot r$ のとき

再空転し動軸の回転は (3) 式で与えられる。

T_m が負となり、絶対値が $\mu_v \cdot W \cdot r$ より大きくなることは実際上起こらないので、負方向の空転は考える必要がない。

* 日立製作所日立研究所

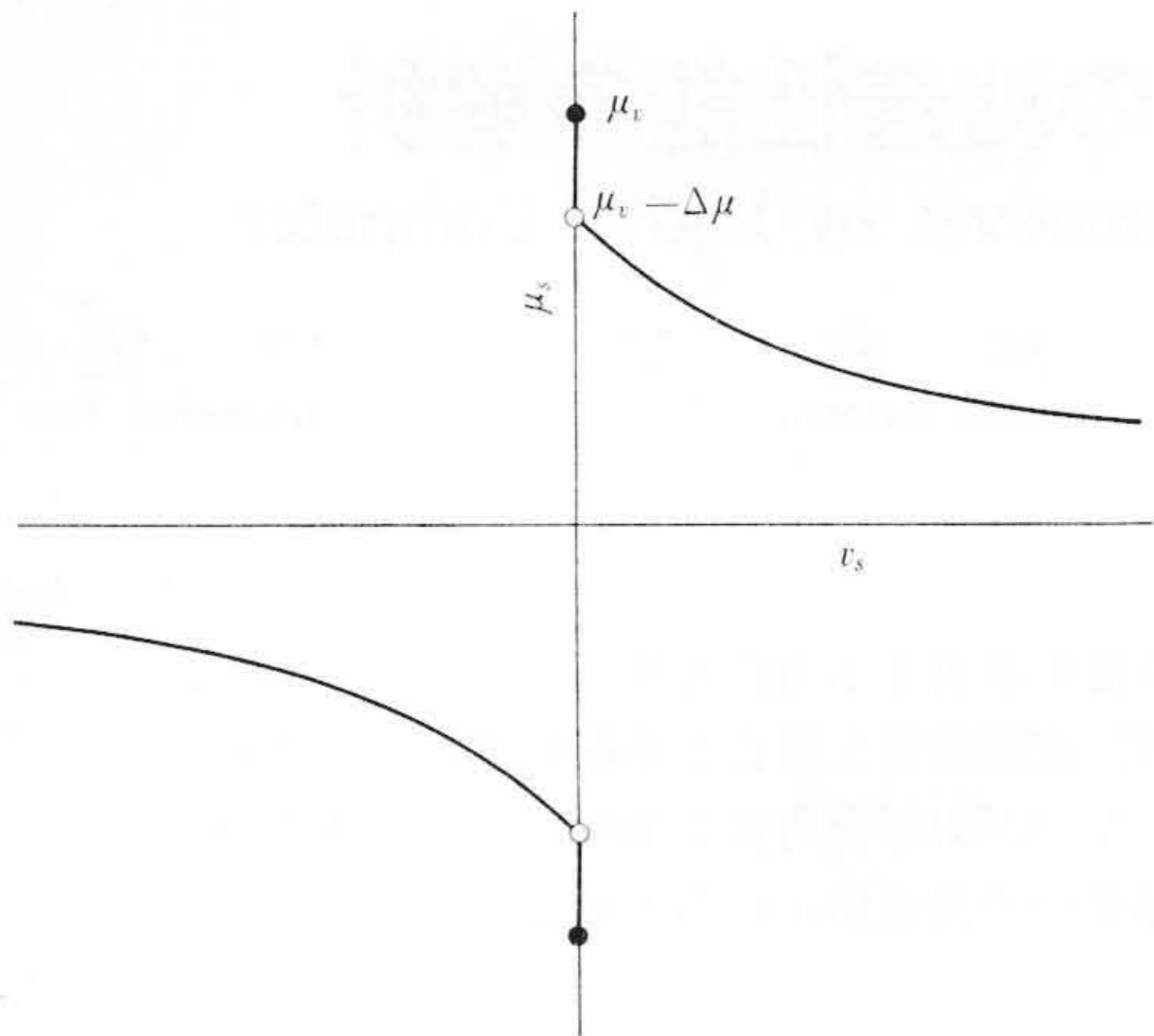


図1 空転速度 v_s と動摩擦係数 μ_s の関係

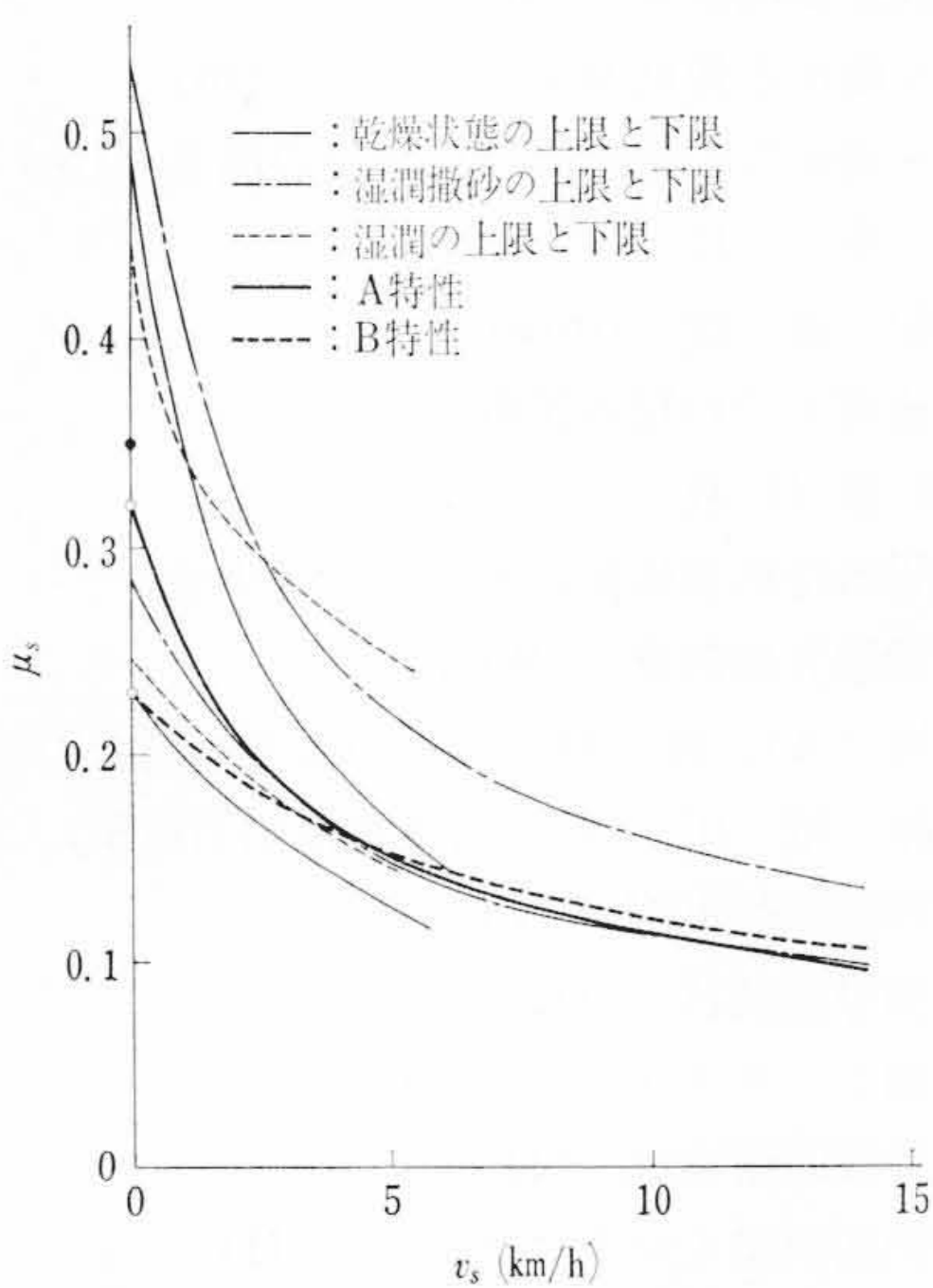


図2 動摩擦係数実測結果 (ED75形, 常磐線において)

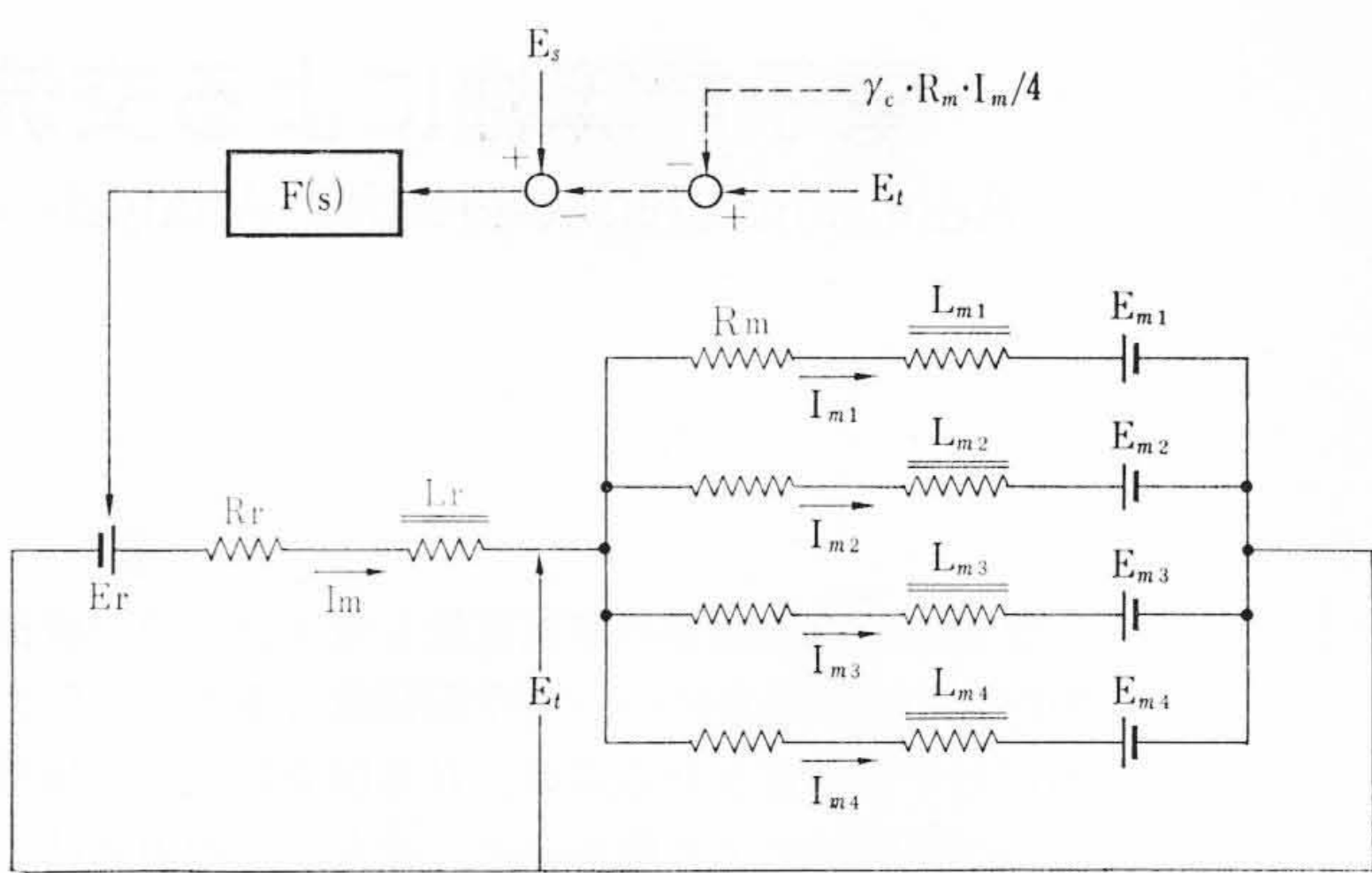
軸重 W_i は、引張力が加わると車体および台車わくが傾き軸重移動を生じ、近似的に次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} W_1 &= W_0 - a \sum_{i=1}^4 f_i - b \cdot (f_1 + f_2) \\ W_2 &= W_0 - a \sum_{i=1}^4 f_i + b \cdot (f_1 + f_2) \\ W_3 &= W_0 + a \sum_{i=1}^4 f_i - b \cdot (f_3 + f_4) \\ W_4 &= W_0 + a \sum_{i=1}^4 f_i + b \cdot (f_3 + f_4) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 W_0 は引張力零での軸重、 $a = (H - h) / 2L$ 、 $b = h / l$ である。粘着係数は実測によると列車速度が増すと非直線的に減少するが、直線からのずれは小さいので次式のように直線で表わす。

$$\mu_v = \mu_0 - 0.012 \cdot V_t \dots\dots\dots (5)$$

空転速度と動摩擦係数の関係は種々実測結果が報告されているが、ここでは対象としている機関車の代表例であるED75形機関車で測定した結果を使用する。図2に測定結果を示す。空転速度10 km/h以下ではばらつきが大きいが10 km/h以上ではばらつきは小さい。10 km/h以下では非直線性が大きく、これを直線で近似することは問題である。空転発生の原因は粘着係数が急に $\Delta\mu$ だけ減少することと、ノッチアップによって駆動トルクが限界粘着トルク以上になることが考えられるが、ここでは前者と仮定する。いま $\mu_v = 0.35$ から空転したとすると、 $\Delta\mu$ が比較的小さく μ_s の減少こう配が急しゅんなA特性と $\Delta\mu$ が大きく μ_s の減少こう配がゆるやかなB



E_r : 電源電圧(無負荷整流器出力電圧) E_t : 整流器出力電圧
 $F(s)$: 電圧制御系の伝達関数 E_{mi} : 主電動機逆起電力
 E_s : 指令電圧 γ_c : R_m 補償率

図3 主回路の等価回路

特性で動摩擦係数を代表させることができよう。 μ_s を数式で表わすと次式のようなになる。

$$\mu_s = \mu_v - \Delta\mu - \frac{c_2 v_s}{1 + c_1 v_s} \dots\dots\dots (6)$$

A特性の場合、 $\Delta\mu = 0.03$ 、 $c_1 = 1.25$ (s/m)、 $c_2 = 0.338$

B特性の場合、 $\Delta\mu = 0.12$ 、 $c_1 = 0.567$ (s/m)、 $c_2 = 0.102$

動輪駆動トルクは次式で与えられる。

$$T_{mi} = s \cdot \eta \cdot K\Phi_i \cdot I_{mi} / 9.8 \dots\dots\dots (7)$$

主回路を等価的に表わすと図3のようになる。図で破線で表わした部分は後述のAVR制御の場合であり、AVR制御を行なわない場合には、空転を検知したならばノッチを一定に保つので

$$E_r = E_{r0} = \text{一定} \dots\dots\dots (8)$$

主回路に対しては次の電圧方程式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} E_t &= E_{mi} + R_m \cdot I_{mi} + L_{mi} \cdot \dot{I}_{mi} \quad (i=1\sim4) \\ E_r - E_t &= R_r \cdot I_m + L_r \cdot \dot{I}_m \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

主電動機逆起電力は

$$E_{mi} = s \cdot K\Phi_i \cdot n_i \quad (i=1\sim4) \dots\dots\dots (10)$$

電動機回磁磁束は電流に対し飽和特性を有し、次のFrölichの式で表わされる。

$$K\Phi_i = \Phi_0 \frac{I_{mi}}{I_{mi} + \phi} \quad (i=1\sim4) \dots\dots\dots (11)$$

インダクタンスは脈流率を一定にするために電流にほぼ反比例するように設計されるので次式で表わされる。

$$L_{mi} = \frac{L_0}{I_{mi}} \quad (i=1\sim4) \dots\dots\dots (12)$$

以上の(1)～(12)式が空転現象の理論計算式である。これは連立非線形常微分方程式であるから、電子計算機による数値解析はルンゲクッタ法で行なえばよい。

初期値は軸重が最も軽い先頭軸が粘着限界に達した状態とする。

3.2 空転軸数および電源側抵抗の影響

一例として高圧タップ制御のEF70形交流機関車相当の4軸機関車について計算した結果を図4に示す。軸重移動のために軸重は、 $W_1 < W_3 < W_2 < W_4$ のようになっている。1軸が空転すると整流器出力電圧 E_t が増加して粘着している2, 3, 4軸の電流が一様に増加し、3軸が粘着限界に達し空転を始める。同様に2軸、4軸に空転が伝播している。このような現象を空転誘発と称することにする。空転誘発は空転軸数が多いほど起こしやすく、空転速度は空転軸数が多いほど大きくなっている。この現象は図3から略算することができる。すなわち、空転軸数を N 、粘着軸数を N' とすると、空転軸からみた等価全抵抗 R_e 、および空転軸の電動機誘起電圧が

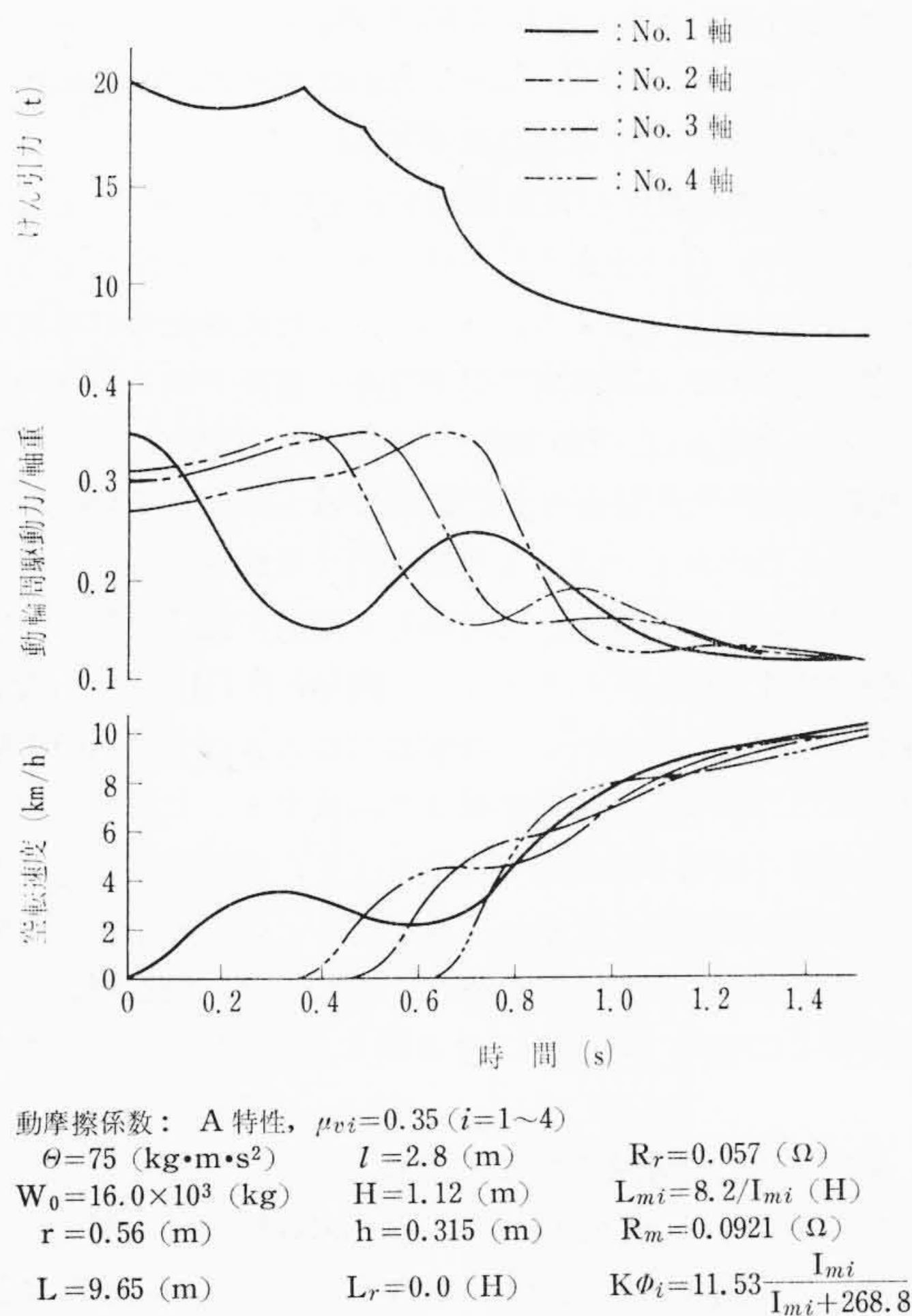


図4 空転現象の計算例 -1- (EP70形相当の場合)

ΔE_m (V) 階段状に増加したときの粘着軸の電流増加量 ΔI_m (収束値) は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} R_e &= R_m + \frac{N \cdot R_r \cdot R_m}{R_m + N' \cdot R_r} \\ \Delta I_m &= \Delta E_m \left(\frac{1}{R_m} - \frac{1}{R_e} \right) = \frac{N \cdot R_r \cdot R_m \cdot \Delta E_m}{R_e (R_m + N' \cdot R_r)} \end{aligned} \right\} \dots\dots (13)$$

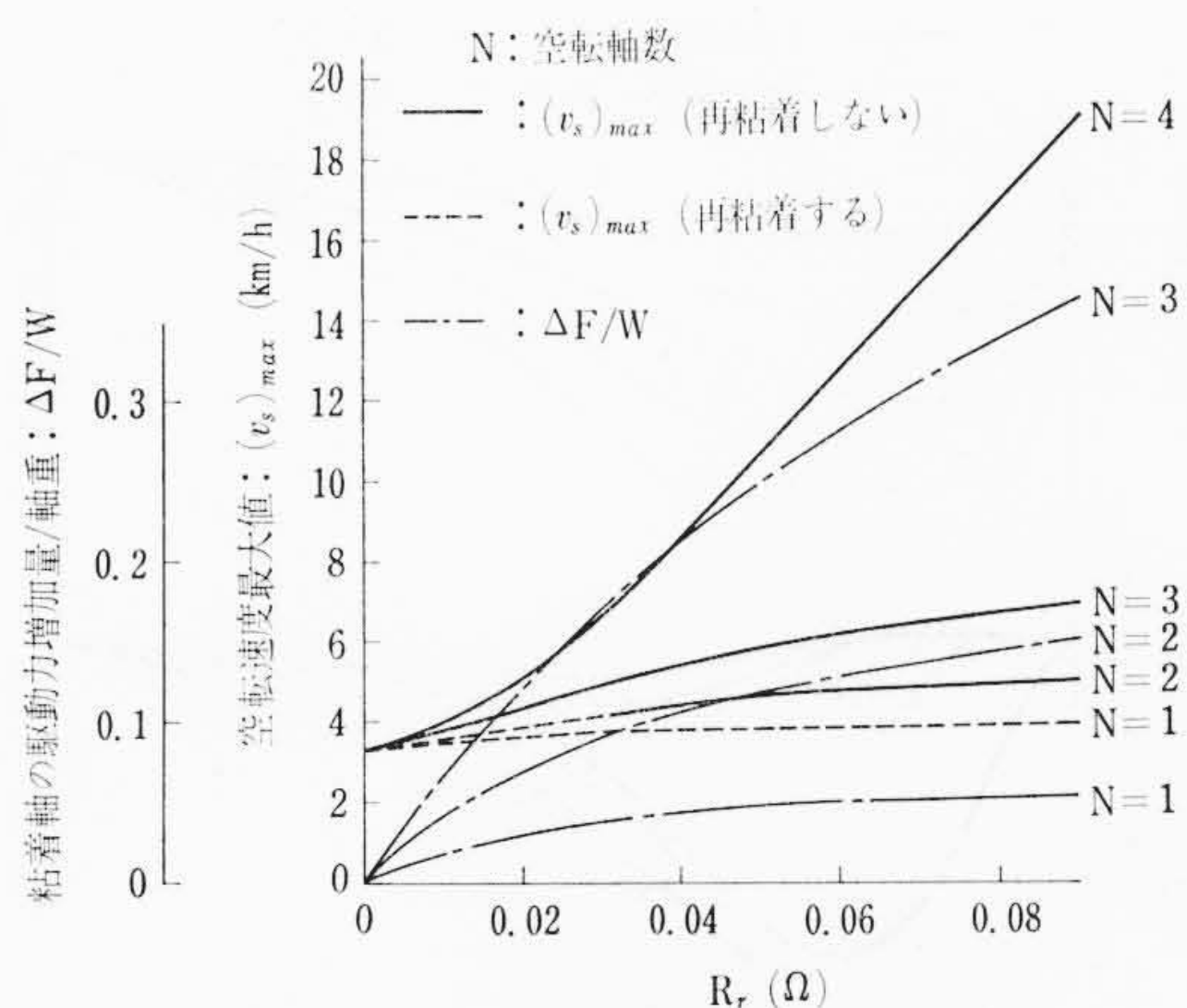
したがって、 R_m と R_r が一定のときは、 N が大きいほど R_e および ΔI_m が大きく、 R_m と N が一定のときは、 R_r が大きいほど R_e および ΔI_m が大きくなる。 R_e が大きいほど空転速度が大きくなることは、すでに報告されている近似解析で明らかである。

4軸機関車の標準とされているED75形交流機関車について、 N と R_r の影響を電子計算機で計算した解の波形から求めると図5のようになる。高圧タップ制御方式は主変圧器と別にタップ制御用の単巻変圧器が一般に必要なから、それを要しない低圧タップ制御に比べて電源側等価抵抗が大きくなり、前者は $R_r=0.04\sim0.07\Omega$ 、後者は $R_r=0.015\sim0.03\Omega$ 程度となっている。ED75形は低圧タップ制御で粘着性能改善に留意して設計されたもので、 $R_r=0.018\Omega$ となっており、摩擦係数がA特性の場合には、2軸以下の空転のときは再粘着するが、3軸以上では再粘着しない。

$\Delta F/W$ は2軸以上空転した場合には、低圧制御でも空転誘発が当然予想される値である。空転誘発は軸重移動の補償が完全になるほど起こしやすく、いったん空転したならば全軸空転に発展し再粘着性を有しないので、このままでは軸重移動補償の効果はあまり期待できない。空転誘発を防止し、かつ、空転軸数のいかににかかわらず再粘着性をもたせ得れば、軸重移動補償が非常に有効となり粘着性能は理想的なものとなろう。そのためには、 ΔI_m を零にし、 R_e を適当に小さくすればよく、(13)式から主として R_r を小さくすればよいことが知られる。それは次に述べる制御方式によって可能となる。

3.3 空転防止用 AVR 制御方式

電源に固有の R_r を小さくすることは設計上限界があるが、整流器出力電圧 E_t が空転時一定になるように電源電圧 E_r を制御す



動摩擦係数: A 特性

$$\Theta=85$$
 ($\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2$)

$$W_0=16.8\times10^3$$
 (kg)

$$r=0.56$$
 (m)

$$L_r=0.0$$
 (H)

軸重移動は零とし、空転軸の μ_v のみ 0.35, 粘着軸の μ_v は空転誘発を生じない程度に大きいと仮定する。

$$L_m=\frac{10.2}{I_{mi}}$$
 (H)

$$R_m=0.0921$$
 (Ω)

$$K\phi_i=11.53\frac{I_{mi}}{I_{mi}+268.8}$$

(以上 ED75 形相当)

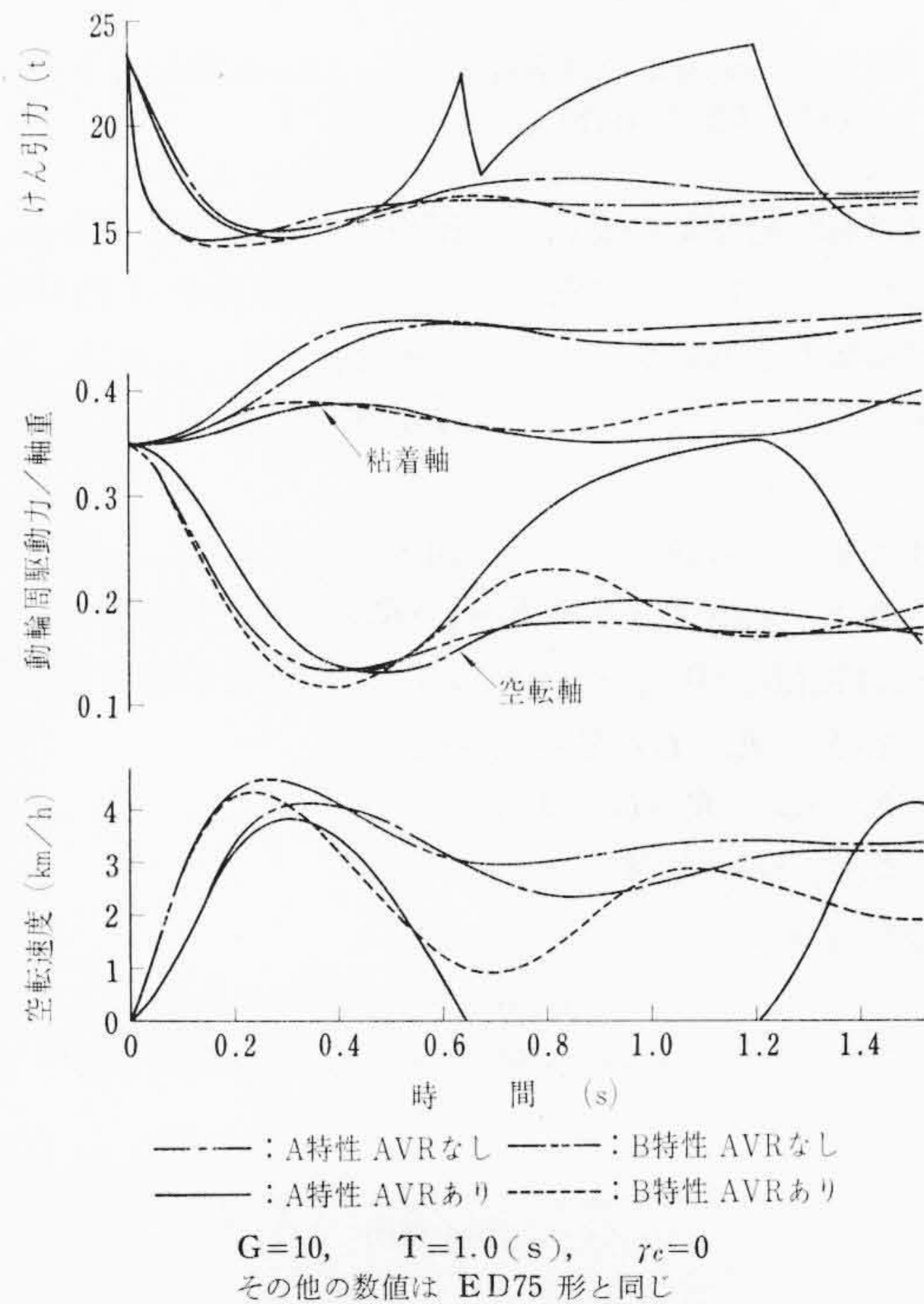
図5 空転軸数と電源側抵抗 R_r の影響

図6 空転現象の計算例 -2- (AVR 制御の効果)

ば、等価的に R_r は零となる。すなわち、 E_t を負帰還して指令電圧 E_s と比較して E_r を制御する閉ループを構成すればよい。このような制御方式を AVR 制御方式と称する。この制御系の伝達関数を $G/(1+TS)$ のように 1 次系で近似すると、等価抵抗 R_e および ΔI_m は、

$$\left. \begin{aligned} R_e &= R_m + \frac{N \cdot R_r \cdot R_m}{(1+G) \cdot R_m + N' \cdot R_r} \\ \Delta I_m &= \frac{N \cdot R_r \cdot R_m \cdot \Delta E_m}{R_m \cdot R_e \cdot \{(1+G) R_m + N' \cdot R_r\}} \end{aligned} \right\} \dots\dots (14)$$

となり、増幅度 G を大きくすれば所望の値まで ΔI_m および電源側等価抵抗を小さくすることができ、 $G \rightarrow \infty$ とすれば $\Delta I_m=0$, $R_e=R_m$ となる。

このような制御方式の場合、電源電圧 E_r は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} T \cdot \dot{E}_r + E_r &= G(E_s - E_t) \\ E_t &= E_{m1} + R_m I_{m1} + L_{m1} \dot{I}_{m1} \end{aligned} \right\} \dots\dots (15)$$

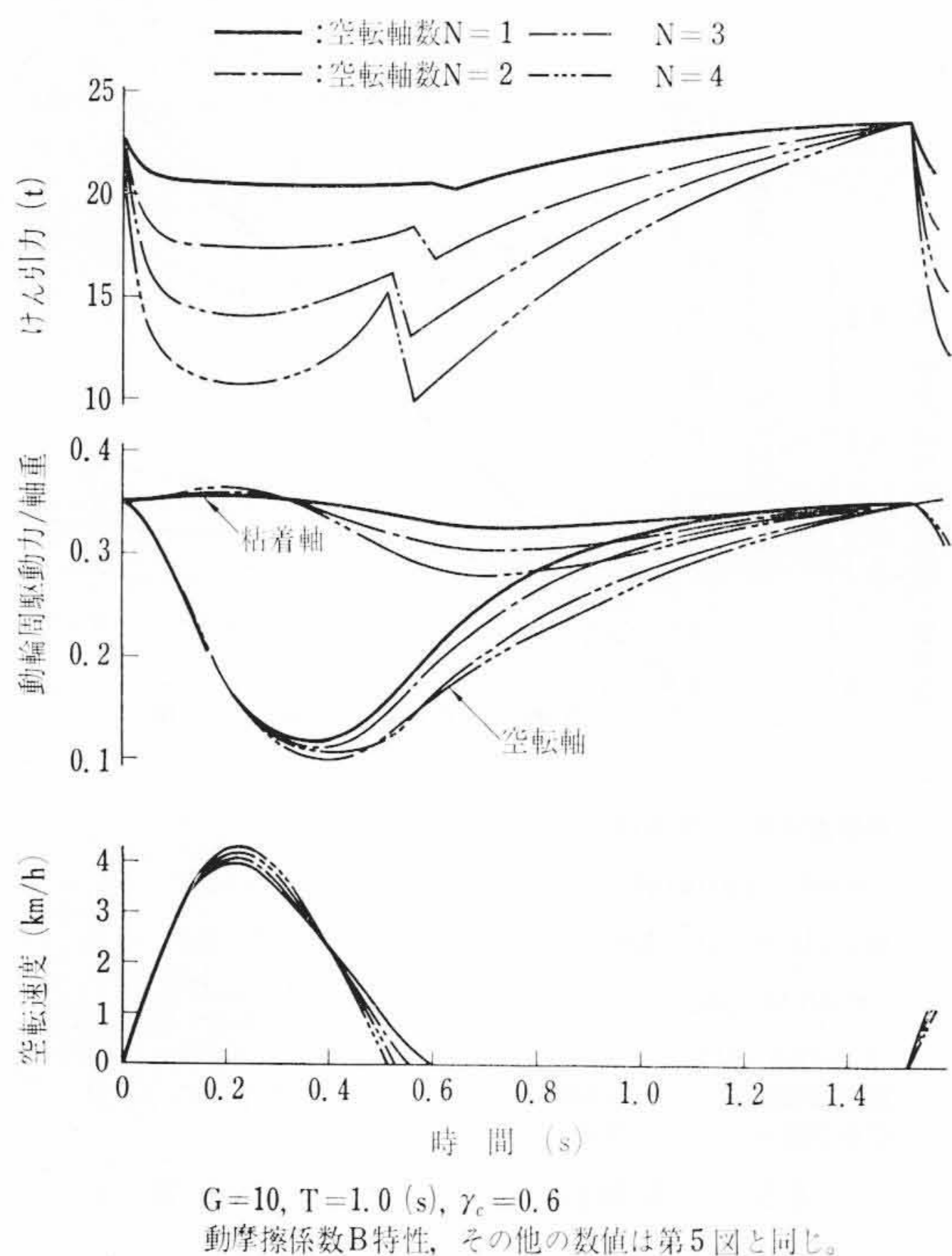


図7 空転現象の計算結果 -3- (R_m 保償を有する AVR 制御の場合)

図6は3軸同時空転の場合の空転現象の計算結果である。AVR 制御を行なうことによって粘着軸の駆動力増加量は約1/3に減少し、動摩擦係数がA特性の場合には再粘着する。しかし、B特性では再粘着するまでには至らない(G を無限大にしても再粘着しない)。

B特性でも再粘着させるには、図3破線のように、さらに R_m による電圧降下を補償するため $E_t - \gamma_c \cdot R_m \cdot I_m / 4$ を負帰還すればよい。ここに γ_c は補償率($0 < \gamma_c < 1$)である。この場合の電源電圧 E_r は、

$$\left. \begin{aligned} T \cdot \dot{E}_r + E_r &= G \cdot (E_s - E_t + E_l) \\ E_t &= E_{m1} + R_m \cdot I_{m1} + L_{m1} \cdot \dot{I}_{m1} \\ E_l &= \gamma_c \cdot R_m \cdot I_m / 4 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

等価全抵抗 R_e は、

$$R_e = R_m + \frac{N \cdot (R_r - G \cdot R_m \cdot \gamma_c / 4) \cdot R_m}{(1 + G) \cdot R_m + N' \cdot (R_r - G \cdot R_m \cdot \gamma_c / 4)} \dots (17)$$

となり、 G を適当に大きくすれば R_e を R_m より小さくすることができる。また、 $\Delta I_m = \Delta E_m \cdot (1/R_m - 1/R_e)$ は $R_e < R_m$ であるから負となり、一時的に粘着軸の電流は減少する。

ところで、粘着運転時の電流制御を安定にするためには、 $\gamma_c < 1$ でなければならない。また、 G は小さく、 T は大きいほうが安定となる。これは空転防止の目的と相反する。 G, T, γ_c は粘着運転時の電流制御が十分安定に行なわれる範囲内で粘着性能が最良となるよう決定する必要がある。たとえば、ED93形交流機関車の場合、基礎実験の結果、粘着運転時電流制御の安定範囲は $A \leq 15, T \geq 0.5$ (s), $\gamma_c \leq 0.75$ であることが知られている。この範囲内でB特性の場合にも再粘着するように G, T, γ_c を選定して計算した結果が図7である。空転速度最大値は約4 km/hにおさえられ、約0.6秒以内に再粘着している。電気系のおくれのために、再粘着したときは空転軸の駆動力は低い値にあり、徐々に空転前の値まで回復する。この程度のおくれは、粘着係数の回復の機会を与えることと、空転再粘着のサイクルが機械系の固有振動数と一致して共振することを防止するために好都合である。なお、再粘着後の駆動力の回復は、理論解析の結果つねに振動せずに指数関数状に元の値に回復することが知られている。

3.4 ED93形交流機関車による実験

以上述べたようなAVR制御方式がED93形交流機関車にはじめて採用された。図8は、制御系の定数をさきの計算(図7)に使用した値のように設定して、工場内試運転線において空転試験を行なった結果のオシログラムの一例である。空転誘発の原因となる粘着軸の電流増加量は僅少であり、空転軸数が増しても空転速度は増大せず、空転軸数のいかにかわらず再粘着している。これは、ほぼ同じ諸元を有しAVR制御を行っていないED75形交流機関車の場合⁽⁴⁾(計算結果は図5の $R_r = 0.0182 \Omega$ の場合、および図6のAVRなしの場合である)に比べて、粘着性能が一段と改善されたと言ってもよいであろう。

4. 滑走現象

以上は力行中の空転の検討であるが、粘着ブレーキによる制動時には、制動力が粘着力以上になったとき、車輪の回転速度が列車速度より小さくなる、いわゆる滑走が生ずる。踏面ブレーキや発電ブレーキでは、いったん滑走を起こすと、急速に車輪の回転が止まってフラット部を生じたり、ブレーキ距離が長くなるなど空転以上に

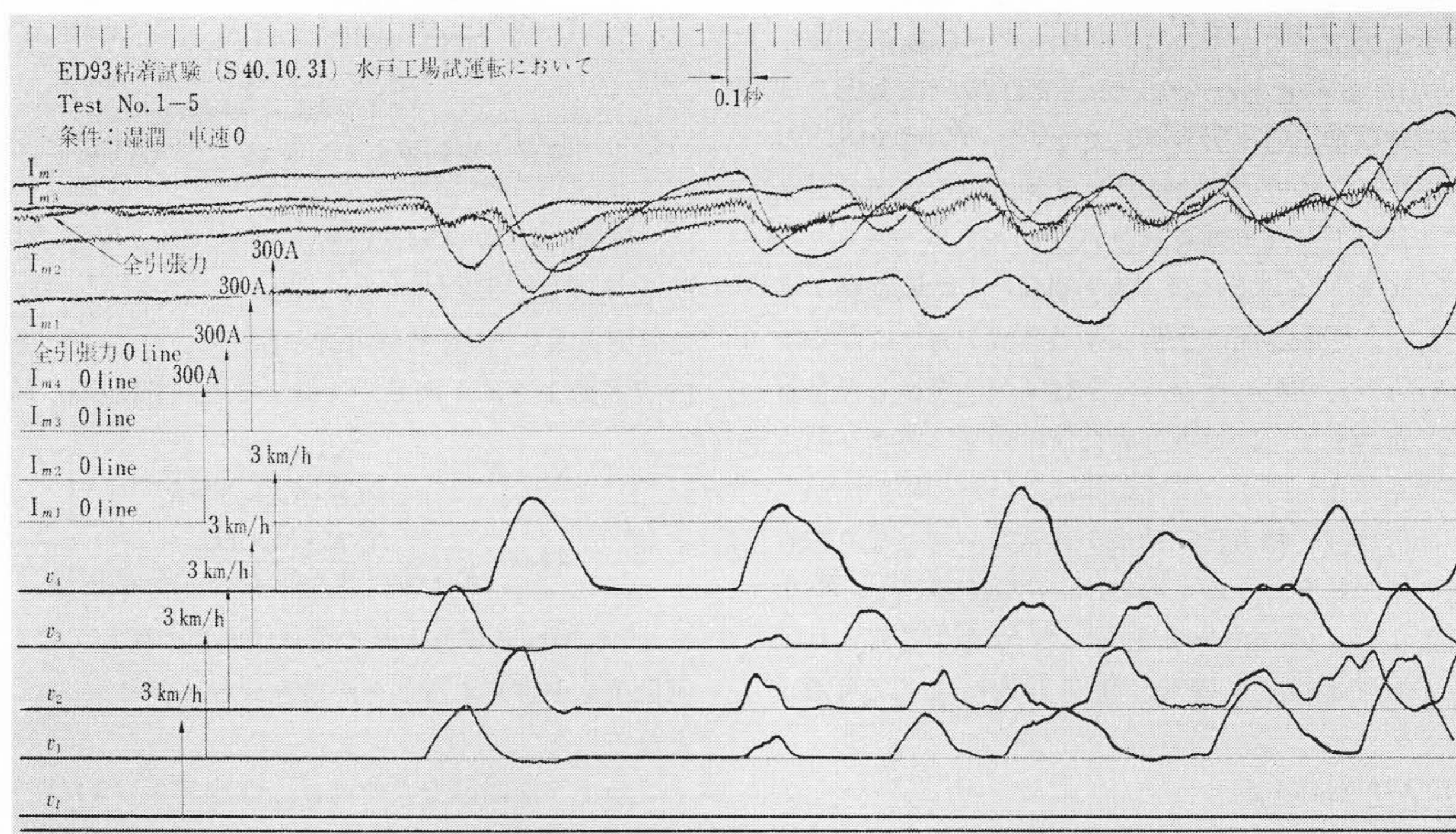


図8 ED93形交流機関車による実験結果

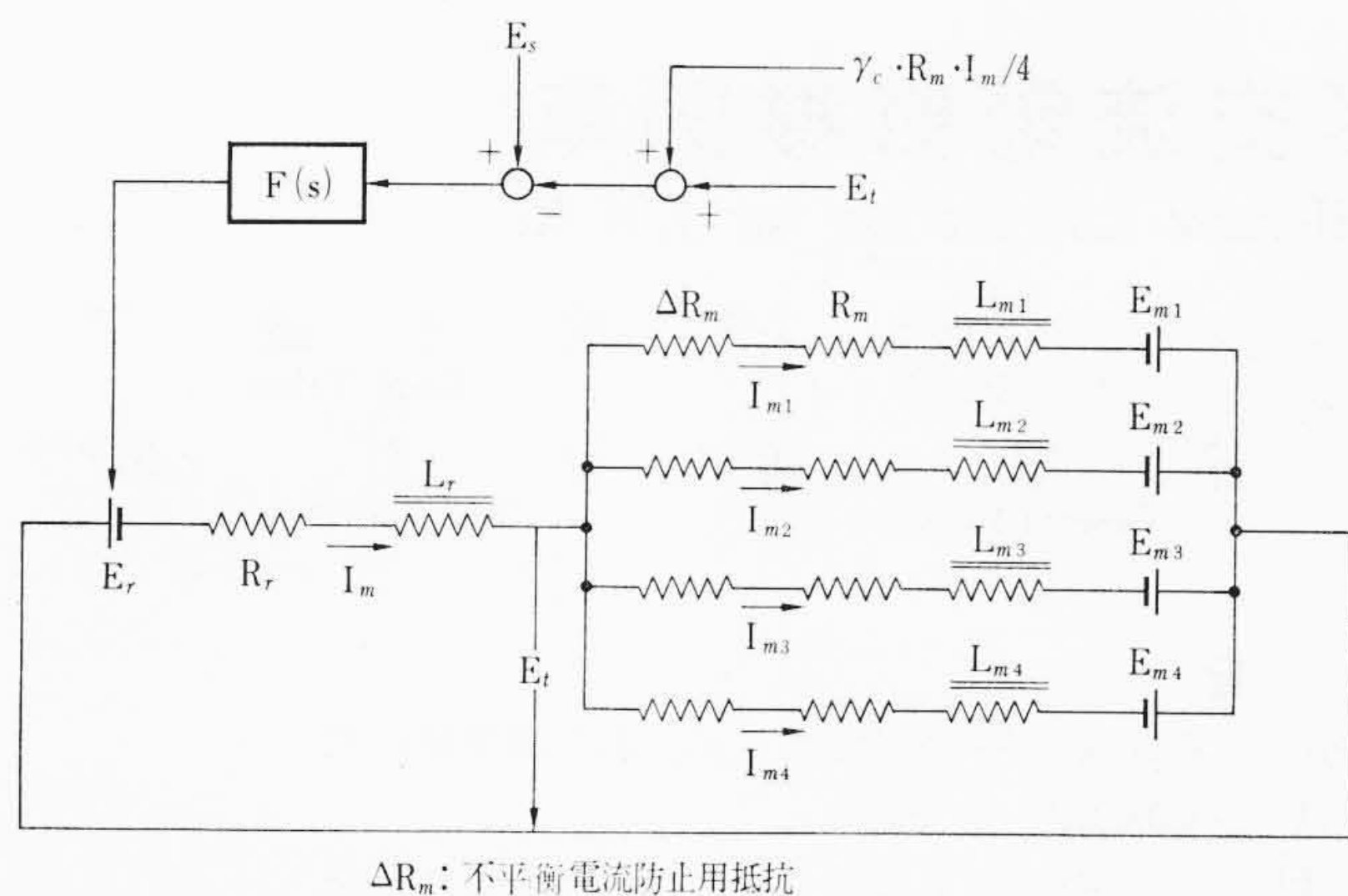


図9 AVR制御を行なったインバータ回生制動の主回路等価回路

危険な状態となるので、粘着係数は、ばらつきの下限に近い10~15%程度しか利用し得ない。それに対し、インバータ回生制動⁽⁵⁾では速度-制動力特性が急しゅんとなり滑走速度が微小値におさまるので制動に対する粘着性能は著しく改善される。発電ブレーキとインバータ回生制動の粘着性能の差は、だいたい空転に対する直流機関車と交流機関車の差に近いと考えられる。

さらにインバータ回生制動にAVR制御を採用すれば、空転に対すると同様に滑走に対しても再粘着特性をもたせうることが考えられる。SCRを使用した交流群結線機関車のインバータ回生制動の主回路の等価回路は図9ようになる。主電動機は他励直流発電機化され、主回路の電流の方向を力行時と同方向にするため、主電動機誘起電圧および電源電圧は逆方向の極性とされる。主電動機誘起電圧の不平衡による電流の抑制などの目的で、抵抗 ΔR_m がそう入される。整流器出力電圧 E_t は主電動機誘起電圧から抵抗 $R_m + \Delta R_m$ による電圧降下分を差し引いたものであるから、AVR制御系は図示のように、 $E_t + \gamma_c \cdot (R_m + \Delta R_m) \cdot I_m / 4$ を負帰還し E_s と比較して電源電圧 E_r を制御するように構成される。

滑走現象は動輪に対する駆動力と反抗力の関係が空転現象の反対となるのみで、本質的には空転現象と同じであるから、先の空転現象と同様の考え方で解析することができる。図10は、一定速度で抑速運転中に滑走を生じたときのAVR制御系の滑走防止作用を示したものである。本図においては、粘着係数 μ_v は0.2、 $\Delta \mu$ は0.05、動摩擦係数の滑走速度による変化はB特性を平行移動したものとしてある。追加抵抗 ΔR_m のため滑走軸数のいかににかかわらず再粘着させることは困難であるが、滑走軸数が多いほどAVR制御の効果が大きくなり、全軸滑走の場合には再粘着している。空転軸数3軸以下では全ブレーキ力の減少量も小さいので、全軸滑走の場合に再粘着すれば実用上十分と考えられる。このようなAVR制御を行なうことにより、AVR制御を行わない低圧制御交流機関車の力行

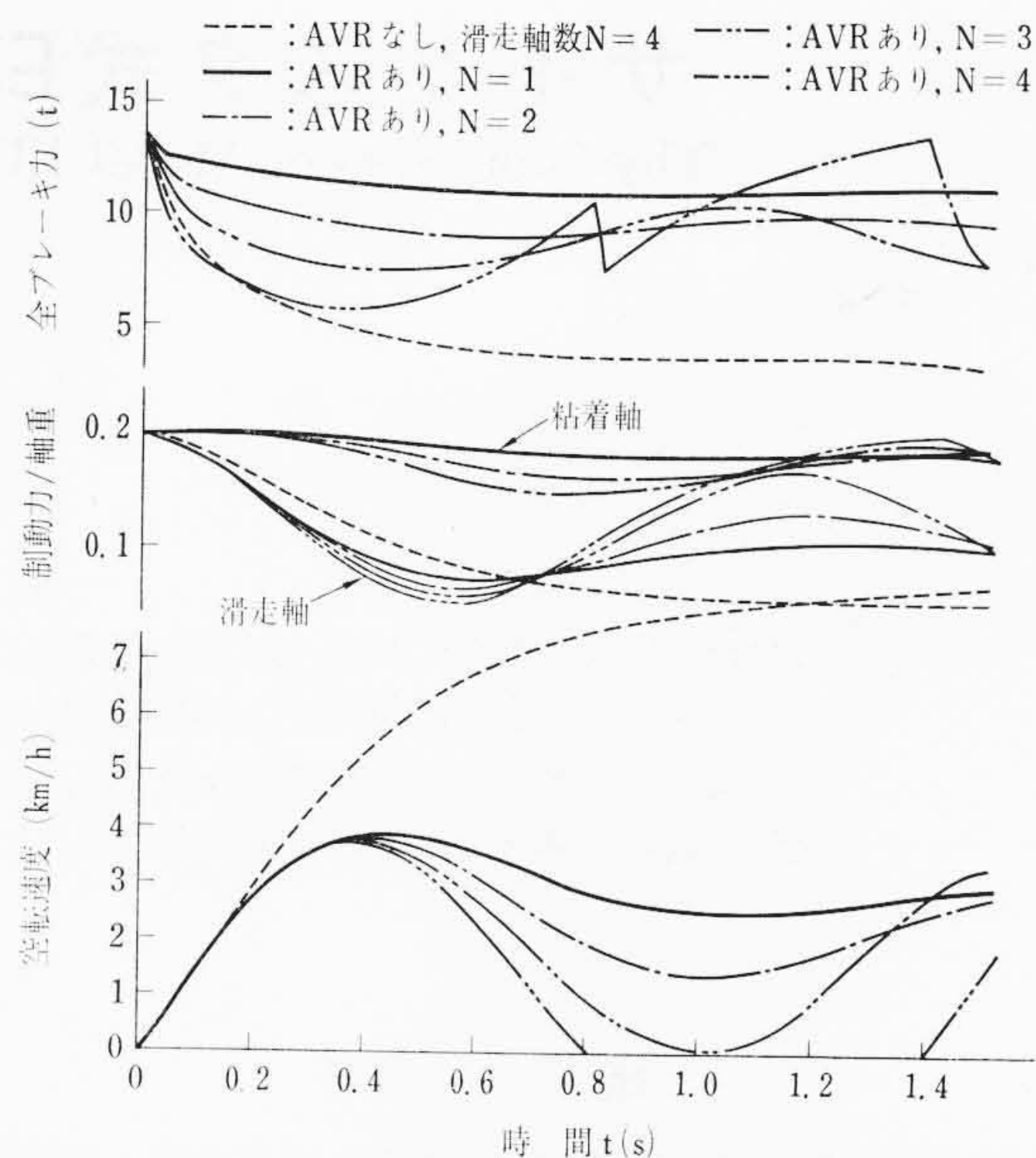


図10 滑走現象の計算例 (AVR制御の滑走防止効果)

に対すると同程度の粘着係数を回生制動に対しても期待しうると考えられる。

5. 結 言

以上、交流機関車の粘着性能を電子計算機で解析し検討した結果を述べた。すなわち、まず力行時の空転現象について空転軸数と電源側抵抗の影響を調べ、空転誘発を防止し空転軸数のいかににかかわらず再粘着させるには、さきに日本国有鉄道のご指導により開発されたAVR制御方式が有効であることを計算ならびに実験により確認した。つづいて、インバータ回生制動時の滑走防止にもこのAVR制御方式は有効であることを明らかにした。

終わりに、本研究に当たりご指導ご援助いただいた日本国有鉄道の各位、日立製作所水戸工場、日立研究所の関係各位に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 関、関川、古河：電学誌 80, 606 (昭 35-5)
- (2) 小野田、弘津、坪井：機論集 31, 221 (昭 40-1)
- (3) Hirotsu, Onoda: Proc. 13th Japan Nat. Congr. Appl. Mech., (1963) p. IV-10.
- (4) 入江、木村、弘津、油井：機械学会前刷集 No. 145, p. 89
- (5) 小野田：日立評論 43, 749 (昭 36-6)