

# 高速度サイリスタとチョッパ制御

## High Speed Thyristor and Chopper Control

刈谷 志津郎\* 坪井 孝\*\*  
Shizuo Kariya Takashi Tsuboi

高橋 徹也\*\*\* 八尾 勉\*\*  
Tetsuya Takahashi Tsutomu Yatsuo

### 要 旨

サイリスタの高耐圧、大容量化が進むにつれ、大電力変換用、制御用の素子としてサイリスタが用いられることが多くなってきた。直流用としては、インバータとか、チョッパなどに用いられる例が多くなっている。このような直流回路に用いるサイリスタには、耐圧、容量の面の特性向上とともに、ターンオフタイムの短縮がのぞまれる。日立製作所ではこれらの要求を満足する電力用高速度サイリスタの標準素子を完成し、これを用いて帝都高速度交通営団 6000 系第二次試作電車用にチョッパ制御装置を完成納入した。本装置は高速度サイリスタの開発とその応用に関する総合的な技術成果として注目すべきものである。

### 1. 緒 言

サイリスタの進歩につれ、最近では、各種の電力変換、電動機応用などの電力制御用素子として、サイリスタを用いるのが常識化しつつあり、このような使用面で、じゅうぶんな信頼度をもって動作することも、実績として証明されつつある。

このようにサイリスタを電力制御用に用いるとき、交流電源における場合のように自然転流を期待しうる場合と異なり、直流電源においてサイリスタを用いる場合は、ターンオフタイムが特に問題となる。直流回路に用いられるサイリスタを消弧するためには、一般には転流回路を付加する必要があり、この回路の機器容量はターンオフタイムに対応する。したがって、安定な転流方式を見いだすことが、直流用にサイリスタを用いる前提として必要であるとともに、ターンオフタイムの短縮が、より直流回路におけるサイリスタ応用の実用性を高めるものといえることができる。

このように、特にチョッパなどの電力回路用として電力用高速度サイリスタ CH03V が開発された。本報はこの高速素子と、これを用いたチョッパの実施例について報告するものである。

### 2. サイリスタチョッパによる直流電力制御

#### 2.1 直流電力制御の基本回路

サイリスタチョッパを用いてチョッパ制御を行なうことにより、各種の直流電力制御が可能である。すなわち、負荷と直列に接続すれば降圧制御が、あるいは負荷と並列に接続すれば昇圧または分流制御が可能となる。これらの制御機能は直流電気車両の力行、回生ブレーキ、および発電ブレーキ制御などに応用されている。このような場合の動作を図 1 によって説明する。

図において電動機に印加される電圧の平均値はそれぞれ次式で表わされる。

$$\text{力 行 } V_M = \frac{T_1}{T} E_s \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{回生ブレーキ } V_M = \left(1 - \frac{T_1}{T}\right) E_s \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{発電ブレーキ } V_M = \left(1 - \frac{T_1}{T}\right) R I_M \dots\dots\dots (3)$$

	力行(降圧制御)	回生ブレーキ(昇圧制御)	発電ブレーキ(分流制御)
回路			
波形			
電圧	$V_M = \frac{T_1}{T} E_s$	$V_M = \left(1 - \frac{T_1}{T}\right) E_s$	$V_M = \left(1 - \frac{T_1}{T}\right) R I_M$
脈流	$\Delta I_M = \frac{E_s T}{L} \frac{T_1}{T} \left(1 - \frac{T_1}{T}\right)$	$\Delta I_M = \frac{E_s T}{L} \frac{T_1}{T} \left(1 - \frac{T_1}{T}\right)$	$\Delta I_M = \frac{R I_M T}{L} \frac{T_1}{T} \left(1 - \frac{T_1}{T}\right)$

Es: 直流電源 Lf: フィルタリアクトル Cf: フィルタコンデンサ  
CH: チョッパ L: 平滑リアクトル M: 電動機

図 1 サイリスタチョッパによる直流電力制御の基本回路

(1)~(3)式は通流率  $T_1/T$  ( $T$ : 周期,  $T_1$ : オン時間) を制御することにより電圧制御ないし抵抗制御が可能であることを示している。直流電流  $i_M$  に含まれる脈動分  $\Delta I_M$  はそれぞれ次式で表わされる。

$$\text{力行, 回生ブレーキ } \Delta I_M = \frac{E_s T}{L} \frac{T_1}{T} \left(1 - \frac{T_1}{T}\right) \dots\dots (4)$$

$$\text{発電ブレーキ } \Delta I_M = \frac{R I_M T}{L} \frac{T_1}{T} \left(1 - \frac{T_1}{T}\right) \dots (5)$$

(4)(5)式はチョッパの動作周期  $T$  を小さく (すなわち周波数を大きく), またリアクトルのインダクタンス  $L$  を大きく選べば脈流は小さくなることを示している。

#### 2.2 チョッパ周波数とフィルタの選定

チョッパの発生するパルス状の電流をそのまま直流電源から取ると、たとえば車両においては信号、通信機器などへ障害を及ぼすので、一般には電源にフィルタが設けられる。逆L形フィルタを用いた場合の波形は図 2 に示すとおりである。

チョッパ周波数およびフィルタ定数の選定にあたっては、次のような点を考慮しなければならない。

- (1) コンデンサ電圧の脈動(チョッパの耐圧)
- (2) 特定周波数成分の抑制(信号系に対する障害)
- (3) 等価妨害電流の抑制(通信系に対する障害)
- (4) 直流電源電圧脈動による高周波電流
- (5) 直流電源フィルタとの関係

コンデンサの電圧脈動  $\Delta V_{Cf}$  は次式で示される。

\* 日立製作所水戸工場  
\*\* 日立製作所日立研究所  
\*\*\* 日立製作所日立工場



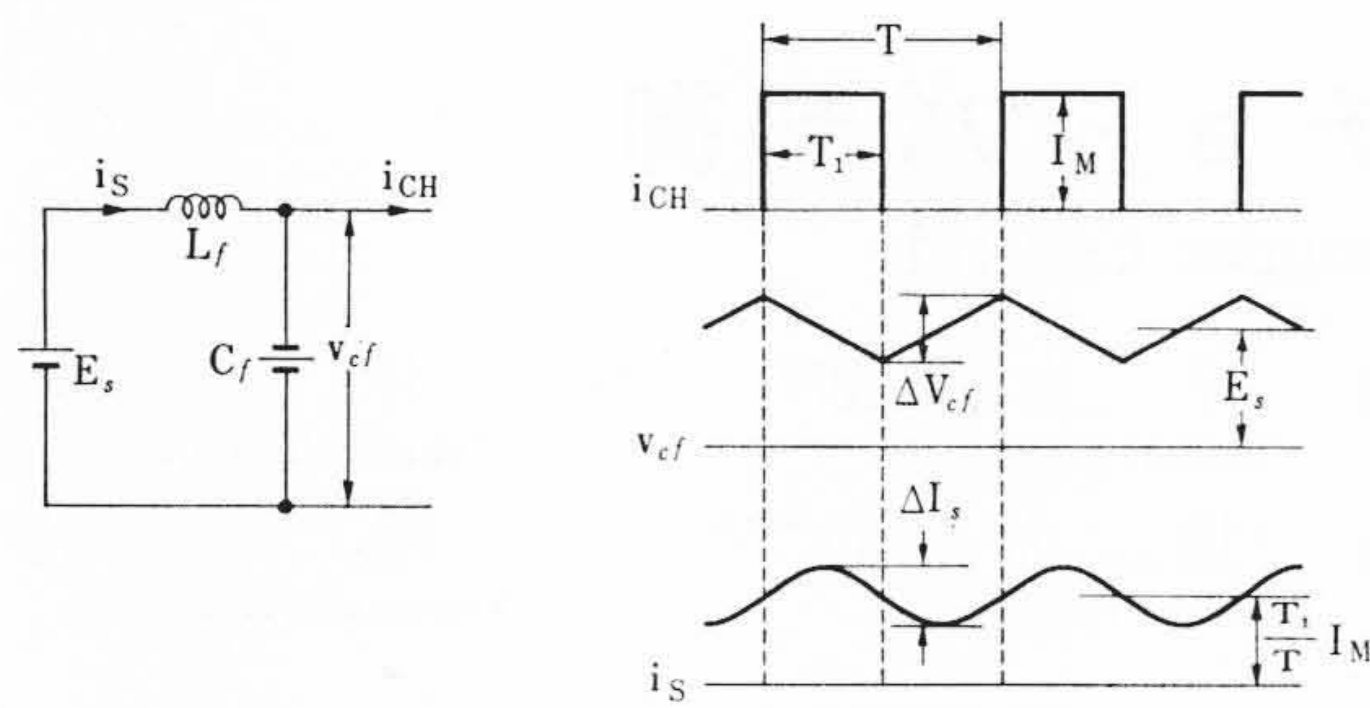
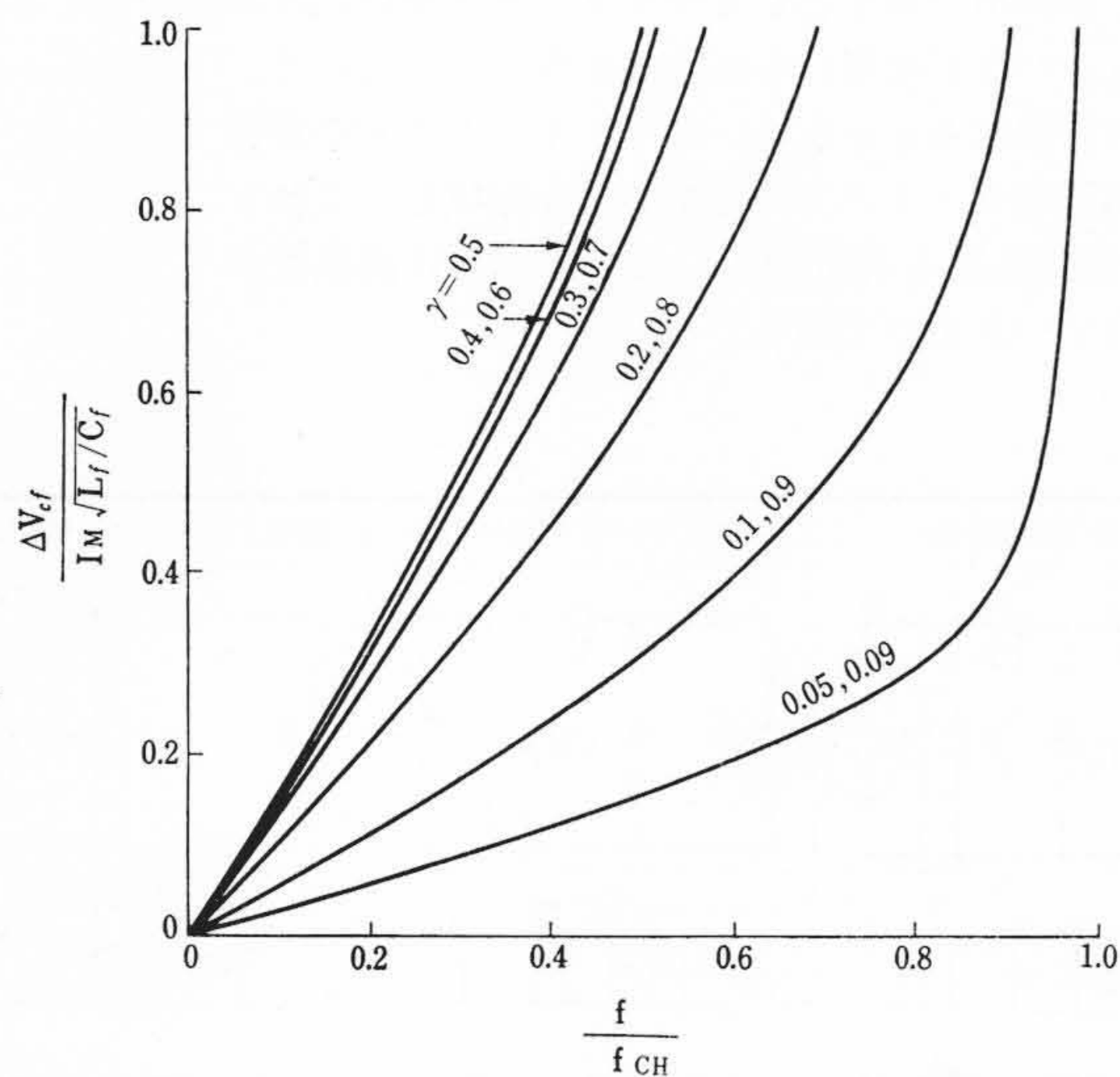


図2 フィルタ回路の波形



$f$ : フィルタ共振周波数  $f_{CH}$ : チョップ周波数  $L_f$ : インダクタンス  
 $I_M$ : 電流  $C_f$ : キャパシタンス  $\Delta V_{cf}$ : 電圧脈動

図3 フィルタコンデンサの電圧脈動

$$\Delta V_{cf} = 2 I_M \sqrt{\frac{L_f}{C_f}} \frac{\sin \gamma \pi \frac{f}{f_{CH}} \cdot \sin (1-\gamma) \pi \frac{f}{f_{CH}}}{\sin \pi \frac{f}{f_{CH}}} \dots (6)$$

ここに、 $\gamma$ : 通流率  $T_1/T$

$f_{CH}$ : チョップ周波数  $1/T$

$f$ : フィルタ共振周波数  $1/2\pi\sqrt{L_f C_f}$

(6)式の関係を図示すれば図3のようになり、 $f_{CH}$ が $f$ に近づけば共振状態となるので、

$$f_{CH} > f \dots (7)$$

に選ぶ必要がある。チョップ周波数を高く選べばフィルタの共振周波数 $f$ も高くできフィルタが小形化される。

直流電源回路には図2に示すようにチョップ周波数成分を基本波とする高調波電流を含んだ電流 $i_s$ が流れる。その第 $n$ 次調波成分の実効値 $I_{sn}$ は、(7)式の条件が満足されるとき、近似的に次式で表わされる。

$$I_{sn} \cong \left(\frac{f}{n f_{CH}}\right)^2 \frac{\sqrt{2} I_M}{n \pi} |\sin n \pi \gamma| \dots (8)$$

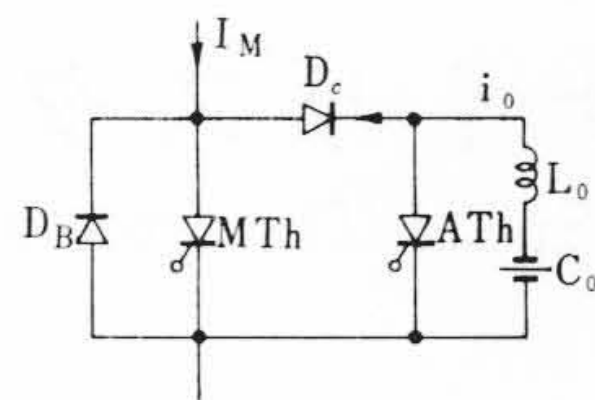
(8)式を利用して有害な周波数成分を所定値以下にするよう定数を選定すればよい。

電気鉄道における通信誘導障害の評価には、次のような等価妨害電流 $J_b$ が用いられている。

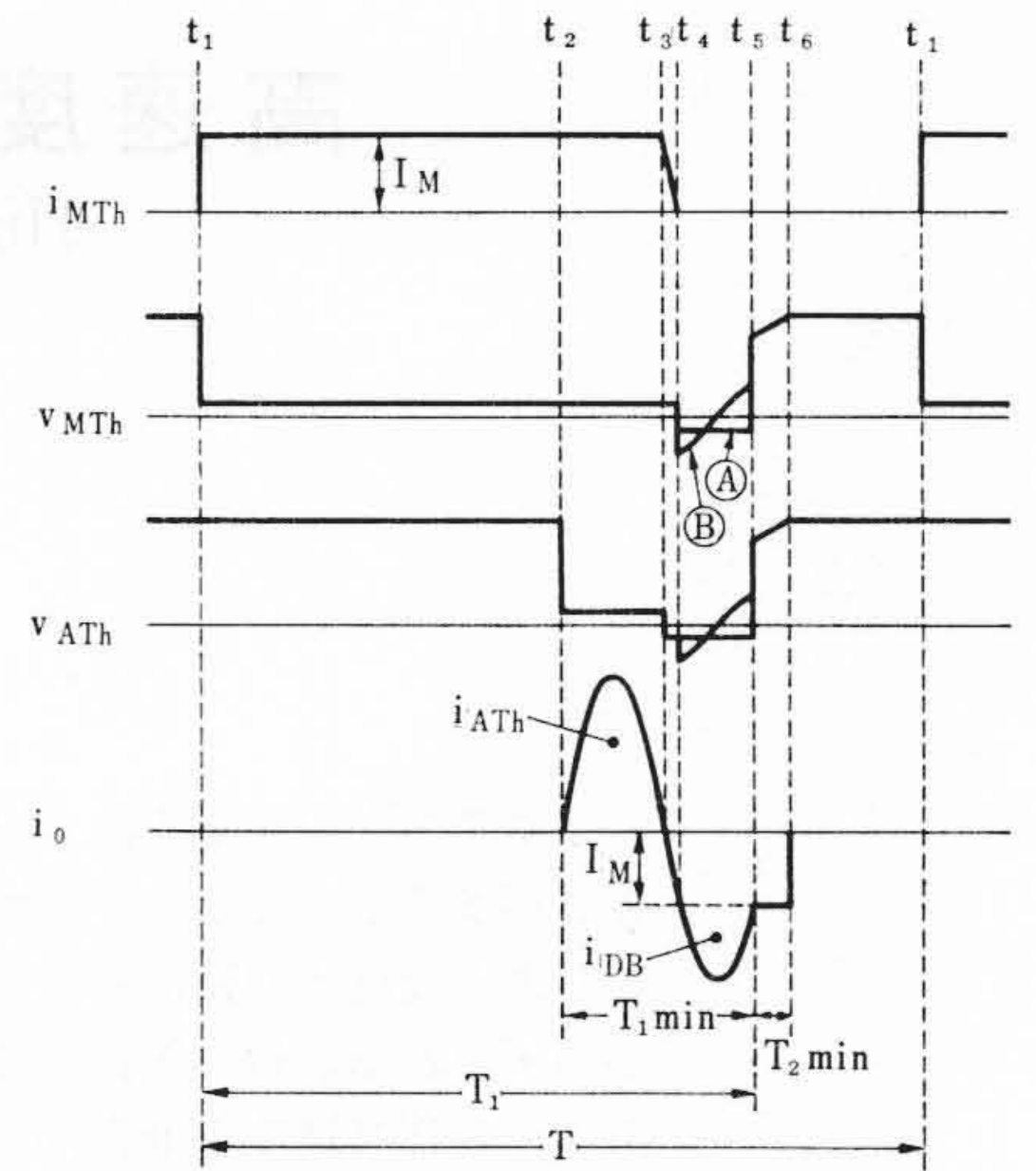
$$J_b = \sqrt{\sum (S_n I_{sn})^2} \dots (9)$$

ここに、 $S_n$ : 雑音評価係数

チョップ周波数 $f_{CH}$ に対する $J_b$ の特性は、 $f_{CH}$ が300 Hz近辺で最大となるので<sup>(1)</sup>、フィルタの小形化も考慮すれば、チョップ周波数はできるだけ高く選ぶほうが好ましい。



(a) 回路



(b) 動作波形

$MTh$ : 主サイリスタ  $Ath$ : 補助サイリスタ  $Dc$ : ストップダイオード  
 $Db$ : バイパスダイオード  $L_0$ : 転流リアクトル  $C_0$ : 転流コンデンサ

図4 反発パルス形チョップ回路とその動作波形

### 2.3 ターンオフタイムとチョップ周波数の関係

以上述べたようにチョップ周波数を高めることは装置の小形化に対して有効であるが、そのためにはターンオフタイムの小さい高速サイリスタが必要である。

図4は代表的なチョップ回路である反発パルス形の動作波形を示すもので、 $t_1$ で主サイリスタ $MTh$ を点弧したのち、 $t_2$ で補助サイリスタを点弧すると、転流コンデンサ $C_0$ の放電電流 $i_o$ はいったん $Ath$ を通して流れ、その反発振動電流により $Ath$ および $MTh$ を消弧する。主サイリスタ $MTh$ には、理想的には $t_4 \sim t_5$ の期間だけ図4(A)のような逆電圧が印加されるが、実際には特に素子を直並列にして使用する大容量チョップにおいては、 $MTh$ 、 $Ath$ 、 $Dc$ の回路にリアクトル要素が必要となり、そのため図4(B)のように逆電圧時間が短くなる。したがって実用的には

$$V_{C_0} \sqrt{\frac{C_0}{L_0}} \geq 2 I_M \dots (10)$$

$$2 \pi \sqrt{L_0 C_0} \geq 6 t_{off} \dots (11)$$

ここに、 $V_{C_0}$ : 転流コンデンサ初期電圧

$t_{off}$ : サイリスタのターンオフタイム

ほかは図4参照

を満足するように転流回路定数を選ぶのが適当である。

図4から明らかなように $t_1$ が $t_2$ に一致したとき、チョップのオン時間 $T_1$ は最小となり、その値 $T_{1min}$ は $i_o$ の振動周期 $2\pi\sqrt{L_0 C_0}$ にほぼ等しい。またオフ時間の最小値 $T_{2min}$ は転流コンデンサの充電時間 $t_5 \sim t_6$ にほぼ等しい。チョップの通流率の可変範囲は $T_{1min}$ および $T_{2min}$ によって制限されるので、周波数を高く、かつ制御範囲を広くするためにはターンオフタイムの短いサイリスタ素子が必要となる。また、ターンオフタイムが短いほど転流装置が小形化できることは前に述べたとおりである。

### 3. チョップ用高速度サイリスタ

#### 3.1 チョップ用サイリスタの責務

前述のような電気車用チョップに使用される高速度サイリスタは次のような特性をもつものであることが望ましい。

- (i) 高耐圧大容量素子であること
- (ii) ターンオフ時間が短いこと
- (iii)  $dv/dt$ ,  $di/dt$  耐量が大きいこと
- (iv) 直並列接続しやすいこと



表1 日立 CH03V 形サイリスタの定格および特性

項目	形式	CH03VM
定格せん頭逆耐電圧 (V)		1,300
定格せん頭過渡逆耐電圧 (V)		1,450
定格せん頭順阻止電圧 (V)		1,300
定格平均順電流 (A)		400 (単相半波 180 度通流)
定格せん頭ゲート電圧 (V)		順方向:15, 逆方向:5
定格せん頭ゲート電流 (A)		2
定格せん頭ゲート入力 (W)		10
定格平均ゲート入力 (W)		2
瞬時過電流 1サイクル (A)		8,000
順電圧降下 (V)		1.8 (単相半波せん頭値 1,250A)
最小ゲートトリガ電流 (mA)		300 ( $T_j 25^\circ\text{C}$ , $V_{A-K} 6\text{V}$ 直流法)
最小ゲートトリガ電圧 (V)		3.5 ( $T_j 25^\circ\text{C}$ , $V_{A-K} 6\text{V}$ 直流法)
最大ゲート非トリガ電流 (mA)		1.5 ( $T_j 115^\circ\text{C}$ , $V_{A-K} 0.5$ 定格順阻止電圧)
最大ゲート非トリガ電圧 (V)		0.10 ( $T_j 115^\circ\text{C}$ , $V_{A-K} 0.5$ 定格順阻止電圧)
定格接合温度 ( $^\circ\text{C}$ )		-40~+115
接合-冷却体間熱抵抗 ( $^\circ\text{C}/\text{W}$ )		0.04
ターンオフタイム ( $\mu\text{s}$ )		50 ( $T_j 115^\circ\text{C}$ 標準測定法)
ターンオンタイム ( $\mu\text{s}$ )		6 ( $T_j 25^\circ\text{C}$ , $V_{A-K} 0.5 \times$ 定格阻止電圧)
最大順電圧上昇率 ( $\text{V}/\mu$ )		50 ( $T_j 115^\circ\text{C}$ , $V_{A-K} 0.5 \times$ 定格順阻止電圧)
最大順電圧上昇率 ( $\text{A}/\mu$ )		100 ( $T_j 115^\circ\text{C}$ , $V_{A-K} 0.5 \times$ 定格順阻止電圧)
加圧加重 (kg)		1,000

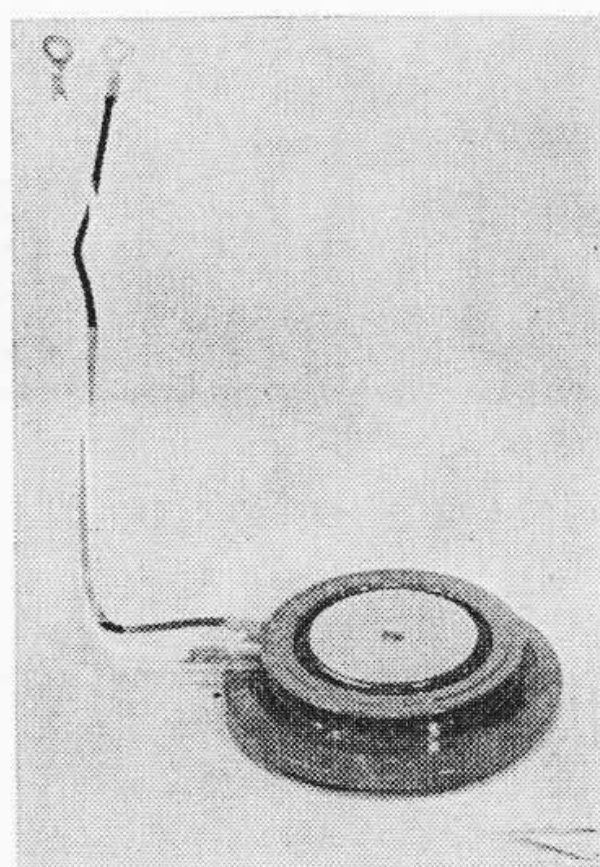


図5 CH03VM 形サイリスタ

(v) 間欠負荷に耐えること

現在の直流電気車用としては一般に素子は多数直並列接続して使用される。装置の小形化、軽量化、信頼性、経済性の向上からは素子の単位容量(耐圧、電流)を極力大きくすることが望まれる。一方前章において述べたようにチョップの周波数を高くすることにより制御性能の向上と関連機器の小形化を図るため、素子のターンオフ時間を短くすることが要求される。さらに現在一般に採用されている図4に示したような反発パルス形チョップでは、バイパスダイオードの逆方向回復と同時に、その時点における転流コンデンサ電圧が再印加順電圧として主および補助サイリスタにステップ状に印加されるため、きわめて高い  $dv/dt$  が素子に課せられる。一方、ターンオン時については主回路電流がフリーホイールダイオードから主サイリスタに転流されるときダイオードの逆回復期間、主電動機および主リアクトルが短絡されているので配線のインダクタンスのみにより制限された高い  $di/dt$  がフィルタコンデンサから主サイリスタに突入してくる。補助サイリスタについては素子のターンオフ条件とチョップ制御性能条件から定められた狭幅の大電流パルスが通電され、ターンオフ時間、 $di/dt$ 、 $dv/dt$  三者合わせた過酷な条件にさらされる。

以上述べたとおりチョップ回路に適用されるサイリスタは使用周波数が高くなるに従いターンオフ時間の短縮のみならず、これとほぼ逆比例して高い  $dv/dt$ 、 $di/dt$  が要求されることになるので素子と回路とのきわめて密接な協調設計が重要である。

3.2 高速度サイリスタの問題点

上に述べた回路側から与えられる責務に対して、素子側の問題点

およびその解決がいかになされたかについて日立製作所で既に42年末開発し量産しているCH03Vユニットセル形400A 1,300V高速度サイリスタを例として説明しよう。表1、図5は本サイリスタの定格特性および外観を示したものである。

サイリスタにおいては高電流高耐圧化ということとターンオフ時間を短くすることとは相反した要求を意味することになる。すなわち耐圧を上げるためには一般にベース層の比抵抗を大きくしベース幅を広くとるが、一方、ターンオフ時間を短くするためにはベース層に重金属をドーピングすることにより少数キャリアのライフタイムを殺すことが必要である。この重金属のドーピング量が多いほどターンオフ時間は短くなるけれども、阻止時の漏れ電流と通電時の順電圧降下が増大するので高電流高耐圧化が思うようにならなくなる。このためターンオフ時間と耐圧、順電圧降下三者の適切な協調を図って設計製作することが重要となる。CH03Vでは1,300V 400A定格に対してターンオフ時間50  $\mu\text{s}$  以下、順電流1,250Aにおける順電圧降下1.8V以下におさまり、すぐれた特性を示している。

高耐圧高速化に伴い順電圧降下の増大は上記のとおり避けがたく、大電流に伴う順損失の処理が問題となるが、これは図5に示すユニットセル構造による両面熱放散方式の採用により解決されている。

高  $di/dt$  の要求は、接合のターンオン過渡現象が接合横方向断面のゲートに近い局所で行なわれ、ローカルホットスポットを生じて素子を破壊するおそれがあるので、素子側ではFI構造を採用して素子自体による  $di/dt$  抑制効果と、アノード電流によるFI構造部における電圧降下によりカソードエミッタからの電子注入を促進し、ターンオン面積を可及的に広げスイッチングパワーを広い面積で処理することとしている。

高  $dv/dt$  の要求はサイリスタ中央接合の空乏層キャパシタンスCと協働して  $dv/dt$  印加時に  $C dv/dt$  なる変位電流を流し、トランジスタ作用により素子が自動的にスイッチングする問題を意味し、 $dv/dt$  が高くなるに従いブレークオーバー電圧が低下する。これに対しては素子側ではエミッタ層幅、ベース層幅、不純物濃度分布の設定とカソードエミッタ製作時の温度、時間の設定が重要である。なお一般には回路から要求される値が数倍以上高いので、回路側で陽極リアクトルおよびA-K間CRのそう入により素子耐量以下に抑制するよう協調が取られる。

信頼性については車両の間欠的な負荷条件に特に留意し、負荷変動に伴う接合温度変化による機械的なひずみなどに設計上の考慮をはらい、加速寿命試験によってじゅうぶんその信頼度が確認されている。

4. チョップ制御の車両への応用

4.1 チョップ制御の電気車両に対する適用例

補助電源装置用、あるいは補助機器用に用いられる場合を除き、電気車両の主回路にチョップ制御を適用する場合、主電動機電流そのものを制御する場合(以下主回路チョップ方式と略称)と、界磁回路のみを制御するように用いられる場合(以下界磁チョップ方式と略称)とがある。この両者の場合それぞれについて、車両制御上は、力行用、発電ブレーキ用、回生ブレーキ用といった用途があるわけである。

これらの応用例のうち、後述の力行一回生両用の主回路チョップ方式のほか、発電ブレーキ用の主回路チョップ方式は新幹線試験電車用に、複巻界磁制御回生ブレーキ用の界磁チョップ方式は、東京急行電鉄8000形電車用に実用化されている。

このような各種の実施例においてわれわれが期待しうるチョップ方式採用による効果は次のようなものである。



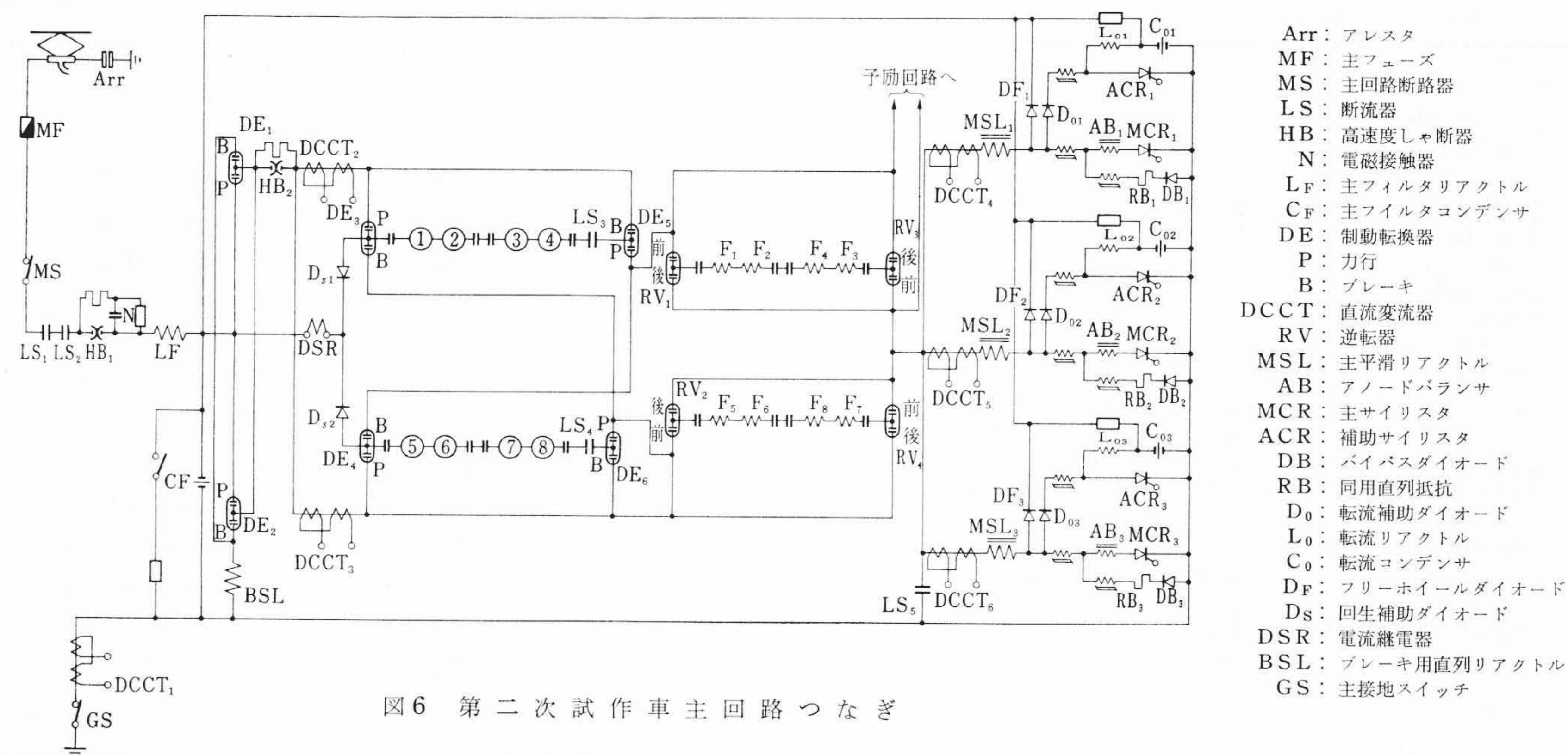


図6 第二次試作車主回路つなぎ

- Arr : アレスタ
- MF : 主フューズ
- MS : 主回路断路器
- LS : 断流器
- HB : 高速度しゃ断器
- N : 電磁接触器
- LF : 主フィルタリアクトル
- CF : 主フィルタコンデンサ
- DE : 制動転換器
- P : 力行
- B : ブレーキ
- DCCT : 直流変流器
- RV : 逆転器
- MSL : 主平滑リアクトル
- AB : アノードバランサ
- MCR : 主サイリスタ
- ACR : 補助サイリスタ
- DB : バイパスダイオード
- RB : 同用直列抵抗
- D<sub>0</sub> : 転流補助ダイオード
- L<sub>0</sub> : 転流リアクトル
- C<sub>0</sub> : 転流コンデンサ
- DF : フリーホイールダイオード
- D<sub>s</sub> : 回生補助ダイオード
- DSR : 電流継電器
- BSL : ブレーキ用直列リアクトル
- GS : 主接地スイッチ

表2 営団納試作車用チョップ制御装置の仕様

項目	第一次試作車	第二次試作車
1 編成	2MIT (8M2T 想定)	6M (6M4T 想定)
2 制御主電動機	95 kW×8台	145 kW×8台
3 主電動機定格	375 V, 285 A	375 V, 425 A
4 弱界磁	3段	なし
5 最大加速電流	470 A	765 A
6 チョップ相数	二相	三相
7 チョップ周波数	85 Hz×2=170 Hz または 120 Hz×2=240 Hz	220 Hz×3=660 Hz
8 使用サイリスタ	1,200 V, 400 A 平形	1,200 V, 400 A, 平形
9 チョップ回路方式	反発パルス方式	反発パルス方式
10 チョップ制御方式	T一定平均値制御方式	T一定平均値制御方式
11 起動方式	チョップ周波数制御	チョップ周波数制御
12 空転時再粘着対策	なし	2回路差電流検出後、チョップ絞
13 主回路濾波器定数	L <sub>f</sub> : 5 mH C <sub>f</sub> : 1,600 μF	L <sub>f</sub> : 8 mH C <sub>f</sub> : 3,200 μF

- (1) 無接点化による信頼性, 保守性の向上
- (2) 応答特性, 制御性の改善による, 乗りごこち, 利用粘着係数など電車性能の向上
- (3) 抵抗制御方式に比べ, 電力消費量が低減できること。特に, 有効な回生ブレーキをかけることが可能なので, 回生ブレーキを採用すれば電力消費量はさらに低減する。それゆえに, 地下路線においてはトンネル内温度上昇抑制に効果がある。

4.2 帝都高速度交通営団6000系第二次試作車用チョップ制御装置

帝都高速度交通営団では, かねてから地下路線内の電車用にチョップ方式を採用し, 電力消費量の低減とそれによるトンネル内の温度上昇抑制, 利用粘着率向上によるMT比の改善, 無接点化による保守の改善などを実現するため, 日立製作所製チョップをとう載した第一次試作車の製作<sup>(2)</sup>, 試験を行ってきたが, その成績が良好であったことから, さらに量産に近づいた第二次試作車6両1編成を製作し, 実績を積むことになった。本試作車にも日立製作所

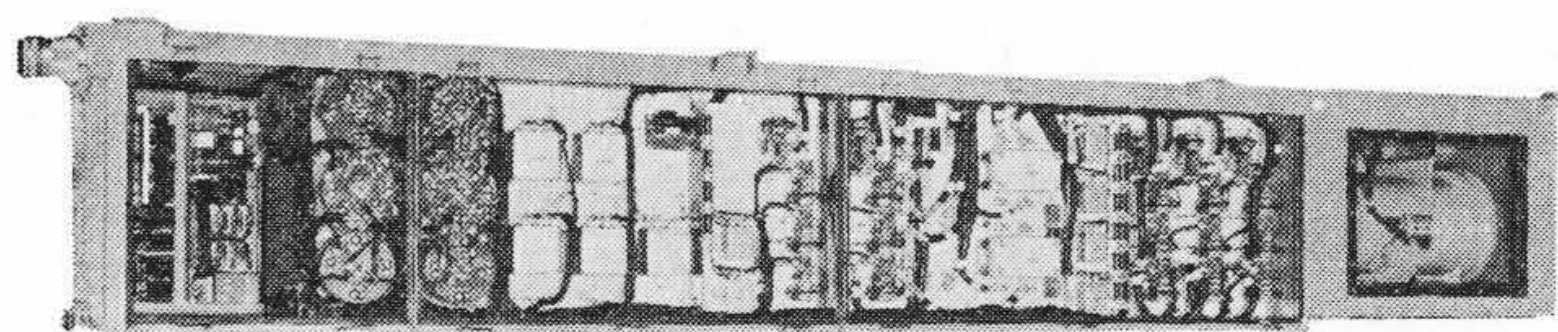


図7 チョップ装置

製のチョップ制御装置がとう載されたが参考のために第一次試作車の仕様と併記して, 本装置の仕様を表2に示した。図6は主回路つなぎを示したものである。

本装置は, 完成後, 帝都高速度交通営団東西線において, 各種の車両性能, 誘導障害に関する試験を実施し, 所期の結果を得ることができた。図7はチョップ装置本体外観である。

5. 結 言

従来, サイリスタの電力制御への応用は, 交流電力制御面におけるものが主流を占め, それによって多くの成果があげられてきたが, サイリスタのターンオフタイムの短縮などにより, 容易に直流回路に適用されるようになってきた。この技術的情勢に対応するため, 日立製作所では, 電力用高速度サイリスタの標準素子を開発し, 各種の応用に対処する態勢を整えている。

直流電気車用としてのチョップ制御装置も, このような背景のもとに実用を前提として製作, 試験され, 特に帝都高速度交通営団の試作電車に装備されたチョップ制御装置は, 各種の実車試験を通じ, きわめて良好な結果を示すことができた。この結果よりみて, チョップ電車が営業運転に多用される日も近いものと考えられる。

終わりにあたって, チョップ制御装置の製作, 試験について, 常に適切にご指導とご便宜を賜っている帝都高速度交通営団その他の関係各位に心からの謝意を申し上げる。

参 考 文 献

- (1) 立花, 坪井ほか: 日立評論 51, 758 (昭44-8)
- (2) 刈谷, 坪井ほか: 日立評論 48, 1229 (昭41-10)
- (3) 立花, 坪井ほか: 日立評論 50, 876 (昭43-10)
- (4) 刈谷, 坪井ほか: 日立評論 51, 515 (昭44-6)