

車 輛 用 主 電 動 機 の 進 歩

Development of Main Motors for Rolling Stock

北 野 豊* 平 楽 太 郎*
Yutaka Kitano Taro Tairaku

内 容 梗 概

わが国における車輛用主電動機は、車輛技術全般の進歩とあいまつて、ここ数年間に長足の進歩をとげた。すなわち電車では従来の釣掛式に代つて台車装架の高速主電動機が採用されるようになり、機関車では国鉄の交流電化計画に伴い、水銀整流器式の主電動機や、わが国で初めての単相商用周波数の交流整流子機電動機が製作され、さらにディーゼル電気機関車も開発されて、ほかの電気車輛に例のない高範囲の界磁制御を行う電動機が製作されている。

これらの新しい主電動機では、軽量小型化に関する電機設計、絶縁法、整流および熱容量と高い回転数における機械的強度などが問題となるので、本文にその概要を述べる。

〔I〕 緒 言

従来の主電動機は、ほとんど 500~1,000 rpm の釣掛式直流直巻電動機であつて、過速度についても、定格回転数の 2 倍程度まで考慮しておけば十分であつた。しかるに最近の台車装架式では、定格回転数も一躍 1,000~2,000 rpm となつた。弱界磁制御の採用によつて、最高速度が電車の場合には定格速度の 2~3 倍程度、ディーゼル機関車の場合には 5~7 倍にも達するものがある。したがつて、電機子特に整流子の機械的強度や整流などについて特に考慮を払つて設計製作する必要がある。

日立製作所では 30 kW, 1,600 rpm (名古屋市交通局および大阪市交通局納), 40 kW, 1,700 rpm (名古屋地下鉄納), 55 kW, 1,600 rpm (相模鉄道納), 75 kW, 1,600 rpm (相模鉄道納), 100 kW, 1,700 rpm (東京都トロリバス納) など多数の直角カルダン方式による高速主電動機を量産納入し、好評を得ており、また平行カルダン方式による 100 kW, 2,000 rpm (京王帝都納), 100 kW, 1,800 rpm (国鉄納) などを量産中である。

ディーゼル機関車では、戦後いち早く 35 t ディーゼル電気機関車用 37 kW, 1,250 rpm 主電動機(富士製鉄納)を製作し、最近わが国最大の国鉄納 DF-90 形 1,900 HP ディーゼル電気機関車用として、連続 165 kW, 740 rpm 主電動機を完成した。交流電気機関車用としては連続 375 kW, 1,070 rpm 水銀整流器式の主電動機、および 300 kW, 1,070 rpm 単相 50~ 交流整流子機電動機を製作した。

これらの新しい主電動機はいずれも、外国における車輛技術の躍進に刺戟されて、戦後にわが国で開発されてきたものであつて、車輛用主電動機の技術的レベルが急速に進歩してきたことは、まことに喜ばしい限りである。

〔II〕 主電動機の軽量化と問題点

最近の主電動機は軽量小形化に一段と躍進した。電車では台車装架の駆動方式の進歩により、歯車比を高くとることができたため、主電動機の定格回転数を上げることが可能になつたことと、絶縁材料の進歩により高温にたえ、かつ冷却効果を改善できたために、主電動機の 1 kW あたりの重量は、在来の 12~20 kg に比べて 5~12 kg に減少した。電車用主電動機ばかりでなく、機関車用主電動機でもますます軽量化されている。

(1) 直流電動機の電気設計

直流電動機の基本的寸法である電機子外径 D (cm) と鉄心積厚 L (cm) との積すなわち D^2L と出力との関係は e : 誘起起電力 (V), I : 電流 (A), N : 回転数 (rpm), AC : アンペア導体 (A/cm), α : 空隙磁束の通る全断面積/ $\pi D L$, Bg : 平均空隙磁束密度 (Gauss) とすれば

$$D^2L = \frac{60}{\pi^2} \left(\frac{1}{\alpha} \frac{1}{Bg} \frac{1}{AC} \right) \frac{eI}{N} \times 10^8 \dots (1)$$

式 (1) よりわかるように、電氣的出力が同じでも、 $(\alpha Bg AC) \times N$ を大きくするほど、 D^2L が小となる。駆動方式を改善して N を高くとり、冷却効果をあげたり、コイルの許容温度を高くして $\alpha Bg AC$ の値を大きくして、しかも整流と温度上昇の条件を満足させることが、軽量小形化の電気設計技術の問題点である。

ここで注意せねばならないことは、上記のように回転数をあげれば、主電動機の重量は減少するが、その反面減速装置を含む駆動装置の重量が増加するので駆動装置を含めた主電動機の全重量で比較するのが本当である⁽¹⁾。

(2) 温度上昇限度と絶縁

高温に耐える絶縁物が発達してきたために、コイルの温度上昇限度を高めることができて、主電動機の小形軽量化に大きな役割を果している。JEC では A 種および B 種の 2 種類しか規定されていないが、F 種および H 種

* 日立製作所日立工場

が採用されていることは周知の通りである。F種絶縁は特B種などとも呼ばれ、JPRS-1で規定された「B種以上の優秀な絶縁」やAIEE, BSSなどで特に車輜用として規定されているB種に相当する絶縁であつて、ガラス、マイカ、アスベストなどの無機絶縁材料を主体としたものであるが、具体的には、従来のB種絶縁物より、紙、布などのA種材料を駆逐し、ワニスも従来のB種より高温に耐えるものを使用しているため、B種絶縁の主電動機と比較して約10%出力を増加して約20度温度を高くしても同一寿命を保つことができる。したがって10度則に従えば、従来のB種と同一条件で使用する時、寿命が4倍にのびることになる。最近の主電動機は、従来のB種絶縁からF種絶縁に変わりつつある。

H種絶縁はシリコンワニスの出現により可能となつたもので、180°Cの温度上昇限度まで温度をあげるとすればB種より約20~30%の出力増大となり、重量でいえば、約10~20%の軽減となる。日立製作所では昭和28年に製作したH種絶縁による30kW主電動機をはじめ、40kW（名古屋地下鉄納）、75kW（近鉄納）、100kW（京王納）、165kW（国鉄納DF-90形用）、375kW（国鉄納交流電気機関車用）など多数のH種絶縁主電動機を製作した。

最近の有機合成化学はまさに日進月歩で、絶縁材料としてもつぎつぎと新しい材料が発表されている。これらの材料を用いた絶縁や、あるいはほかの絶縁材料と組合せて、その長所を生かした絶縁法も、すでに実用の域に達しつつある。

（3）整 流

機械を小形軽量にするため回転数をあげたり、温度上昇を高くしたりすれば、整流は格段と困難になつてくる。また電気ブレーキを常用する場合、高速過電圧において良好な整流を得ることが要求されてきた。ディーゼル電気機関車主電動機のように極端な弱界磁を行つたものでは、特に整流を良好にする設計が必要である。

（A）従来の電機子巻線はすべて波巻であつたが、これを重ね巻にすると、一つのコイルの巻回数が1である場合整流子片数は4極機において、波巻の2倍にできるため片間電圧を下げることができ、また必要に応じてトレッペン巻として各コイルのリアクタンス電圧を均一にすることができる。整流子片の幅はあまり小さく製作できないため、この方法にも限度はあるが、電車用で75kW 375V程度以上の主電動機では重ね巻が採用される。75kW 375V（相模鉄道納）、100kW、375V（京王帝都納）などはいずれも、電動機を4個永久直列に接続し、電動機の端子電圧を375Vに選び、重ね巻を採用している。

（B）ディーゼル電気機関車用主電動機のように、極端な弱界磁を行うものでは、電機子反作用を打消す

ために補償巻線を設けることがある。日立製作所で完成した1,900HPディーゼル電気機関車用165kW 500V主電動機は補償巻線を有し、最弱30%の弱界磁を得ている。

（C）空隙アンペアターンと電機子反作用のアンペアターンとの比が、最弱界磁においてもなお十分な値になるように、界磁アンペアターンを増しておけば、整流は良好になるとともに、電流の急変した場合の過渡状態における整流特性もよくなることはもちろんで、特に高速弱界磁運転のときに効果がある。

（D）電流が変化する場合の整流特性をよくするには、補極磁束はリアクタンス電圧の変化に追随して、これを打消すことが望まれる。補極鉄心が通常の直流機のように単一体であれば、電流が変化するとき生じる渦流損により補極磁束が遅れて、電機子電流に比例するリアクタンス電圧を補償できず、火花電圧が残る。水銀整流機式交流電気機関車用375kW、主電動機はいわゆる脈流電動機で、補極には積層式鉄心を用い、かつ補極アンペアターンを十分大きくとつて、補極と継鉄間に挿入した非磁性ライナー部と空隙部にほとんど全アンペアターンを消費させて、上記の補極磁束の遅れを少なくしている。

そのほか、刷子保持器および刷子については後述する。

（4）主電動機の熱容量

主電動機が小型軽量化されるに伴い、当然主電動機の熱時定数が小さくなる。従来の釣掛式主電動機においては、連続定格電流は1時間定格電流の65~70%であつたが、最近の新しい主電動機では、連続定格電流が85~95%になつている。これは主電動機の熱時定数が、従来の60~90分より20~40分となつたため、主電動機の定格出力をきめる場合には熱時定数を考慮に入れる必要がある。

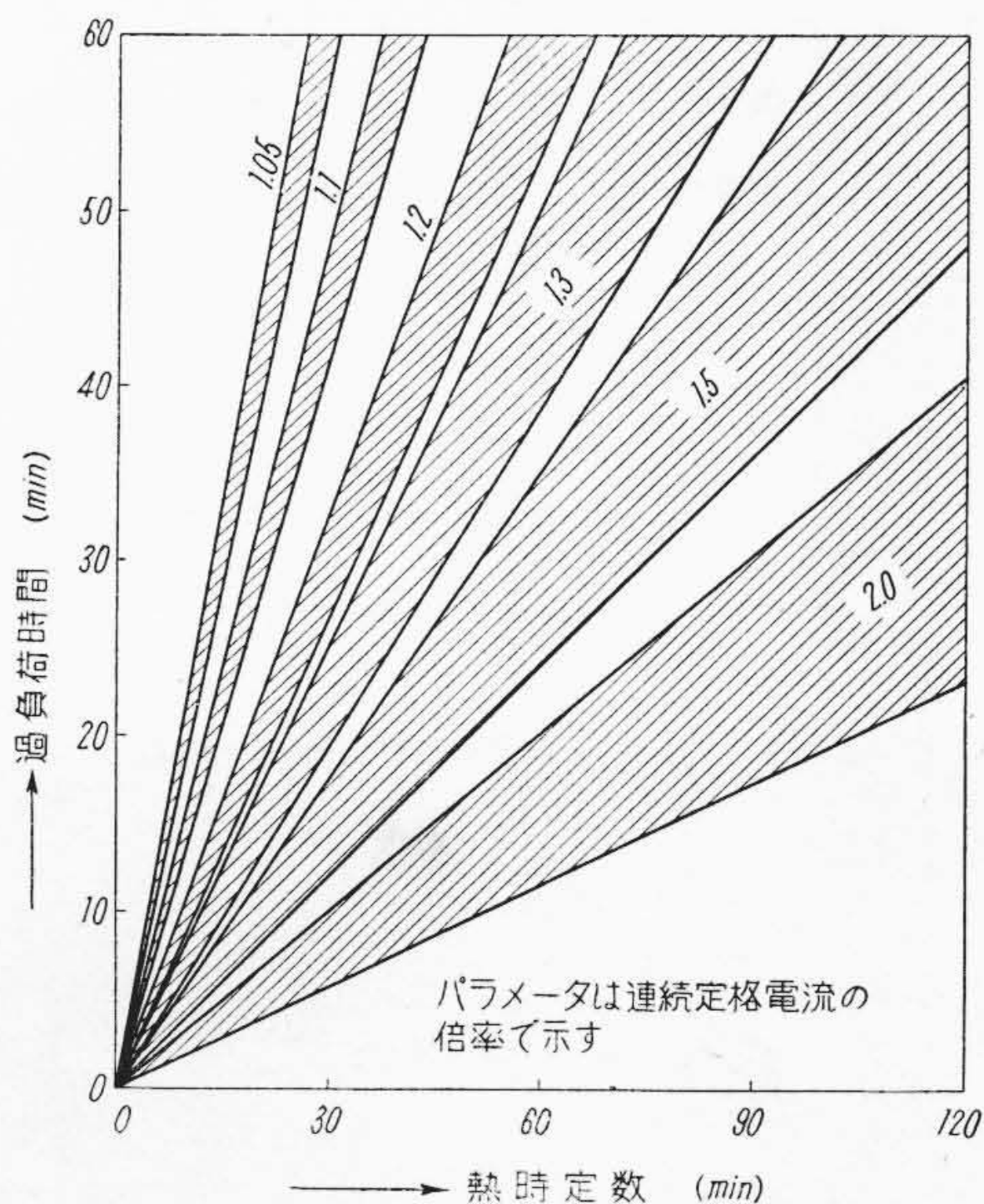
今一例として、ある負荷で長時間運転してきた主電動機が、勾配や積荷の関係で過負荷になる場合、過負荷に耐える程度は熱時定数によつて異なることを述べる。

機械の温度上昇が負荷電流の α 乗に比例する場合、一定負荷電流で t 時間運転した機械の温度上昇 θ は

$$\theta = kI^\alpha (1 - e^{-t/T}) + \theta_1 e^{-t/T} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに θ_1 : 最初の温度上昇, T : 熱時定数 (時間), k : 定数, 温度上昇 θ と負荷電流 I はそれぞれ定格値を単位にとつて示す。

ある負荷電流 I_0 で連続運転してきた主電動機の温度上昇が θ_0 になつてのちに、急に一定の過負荷電流 I_m が流れたとき、定格温度上昇($\theta=1$)に達するまでの過負荷時間 t_m は(2)式より



第1図 過負荷容量と熱時定数 (連続定格の場合)

$$t_m = T \log_e \{ (k I_m^\alpha - \theta_0) / (k I_m^\alpha - 1) \} \quad \dots\dots\dots (3)$$

(A) 連続定格の場合, $\theta_1=0$, $I=1$, $t=\infty$ のとき $\theta=1$ であるから (2) 式より

$$k=1 \quad \dots\dots\dots (4)$$

また $I=I_0$, $t=\infty$ のとき $\theta=\theta_0$ とすると

$$\theta_0 = k I_0^\alpha = I_0^\alpha \quad \dots\dots\dots (5)$$

(4), (5) 式より (3) 式の t_m を求めると

$$t_m = T \log_e \{ (I_m^\alpha - I_0^\alpha) / (I_m^\alpha - 1) \} \quad \dots\dots (6)$$

たとえば $I_0=0.6$ のとき過負荷電流 I_m をパラメータにとり, 過負荷時間 t_m と熱時定数 T の関係を示せば第1図のように直線となる。傾斜の急な直線は温度上昇が電流に比例する ($\alpha=1$) として求めたものであり, 傾斜のゆるやかな直線は電流の2乗に比例する ($\alpha=2$) として求めたもので, 実際は両直線にはさまれた斜線部内の値となる。

(B) 1時間定格の場合, $\theta_1=0$, $I=1$, $t=1$ のとき $\theta=1$ であるから (2) 式より

$$k = 1 / (1 - e^{-1/T}) \quad \dots\dots\dots (7)$$

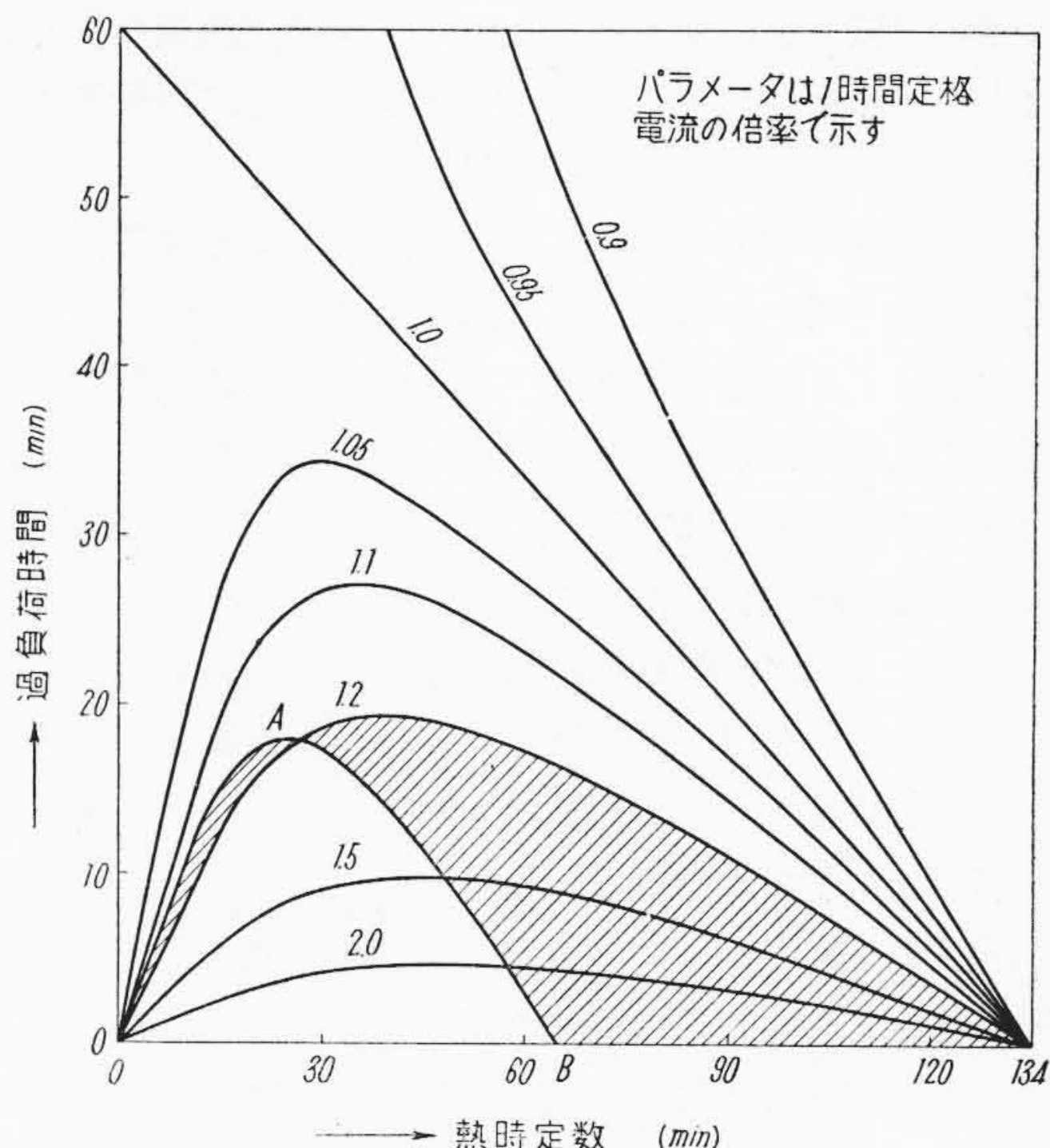
また $I=I_0$, $t=\infty$ のとき $\theta=\theta_0$ とすると

$$\theta_0 = k I_0^\alpha = I_0^\alpha / (1 - e^{-1/T}) \quad \dots\dots\dots (8)$$

(7), (8) 式より (3) 式の t_m を求めると

$$t_m = T \log_e \{ (I_m^\alpha - I_0^\alpha) / (I_m^\alpha - 1 + e^{-1/T}) \} \quad \dots\dots\dots (9)$$

連続定格のときと同様に $I_0=0.6$ の場合に, 過負荷時間と熱時定数の関係を(9)式より求めると第2図のようになる。曲線群は温度上昇が電流の2乗に比例する ($\alpha=2$) として求め, 120% 過負荷の場合の



第2図 過負荷容量と熱時定数 (1時間定格の場合)

み, 温度上昇が電流に比例する ($\alpha=1$) として求めた曲線 OAB も併記した。 $I_m=1$ の場合は直線となり $t_m=1$ 時間でたて軸と交っているが, $I_m=1$, $T=0$ の場合は瞬間的に定格温度上昇値に達し, 以後時間が無限大となつても温度は不変ゆえ, $I_m=1$ の過負荷時間 t_m はパラメータ 1.0 の直線とたて軸との二つの直線で示される。

図で明かなように, 1時間定格で論じる場合は, 与えられた条件で過負荷容量のもつとも大きくなる熱時定数のあることは注目すべきことである。軽負荷連続運転後の温度は熱時定数の大きい機械ほど大きいので過負荷直前の温度 θ_0 が大きく, 過負荷容量が小さい。逆に熱時定数の小さい機械は, θ_0 は小さいが, 過負荷になつたとき短時間に温度が上昇するので, やはり過負荷容量が小さいことを考えれば, 第2図が了解できる。

以上のように過負荷容量を考えると, 連続定格機と1時間定格機を区別して熱時定数を考慮する必要がある。

[III] 構 造

前節で機械の小型軽量化に付随する問題を述べたが, 以下においては, 特に進歩してきたと思われる主電動機の構造について述べる。

(1) コ イ ル

電機子コイルの配列の代表例を示せば, 第3図のとおりである。同図 (a) は従来主として用いられてきたものであるが, 最近 (b) や (c) のような配列にして

導体の占積率を高めるとともに、導体の渦流損を少くしたものが採用されている。この方法はとくに電機子導体電流の周波数が高い場合に効果がある。

また高速の電機子コイルは磁気騒音を少くするため、斜溝が広く用いられている。第4図にその一例を示す。

界磁コイルは従来第5図(a)に示した鋳鋼製角形磁気枠に取付けた磁極に平巻に巻いたものが多かったが、最近では同図(b)に示したようにエッジワイズに巻き、鋼板製丸形磁気枠に沿って曲げ、しかも補極コイルとせり合うところは、機械的に削り落すことも行われる。また同図に示したように、コイルの中央部を露出して著しく冷却効果をあげているものもある。

(2) 刷子および刷子保持器

刷子で短絡されている電機子回路の抵抗を増せば、整流は改善されることは周知の事実で、そのためには刷子の固有抵抗および接触抵抗の高いことが望ましい。しかし一般に固有抵抗の高い刷子は機械的強度に欠け、両者の要求条件は相反する。

分割刷子は、刷子を分割して刷子の含む回路の抵抗を高め、かつ摺動特性をよくする狙いで生れた。第6図に代表的な刷子構造を示す。

5 kW 整流試験機を用いて無火花整流帯を求めた実験の一例では、単体刷子の無火花整流帯を100%とするとき、第6図(b)の2分割刷子では約110%、第6図(c)の3分割刷子では約150%の無火花整流帯が得られた。

分割刷子は一見すれば、従来の刷子より欠損が多いように見受けられるが、 $10 \times 20 \times 40 \text{ mm}$ 寸法の刷子について国鉄仕様書 S E-59 に定められた衝撃欠損試験の結果ではむしろ逆で、衝撃欠損耐力は

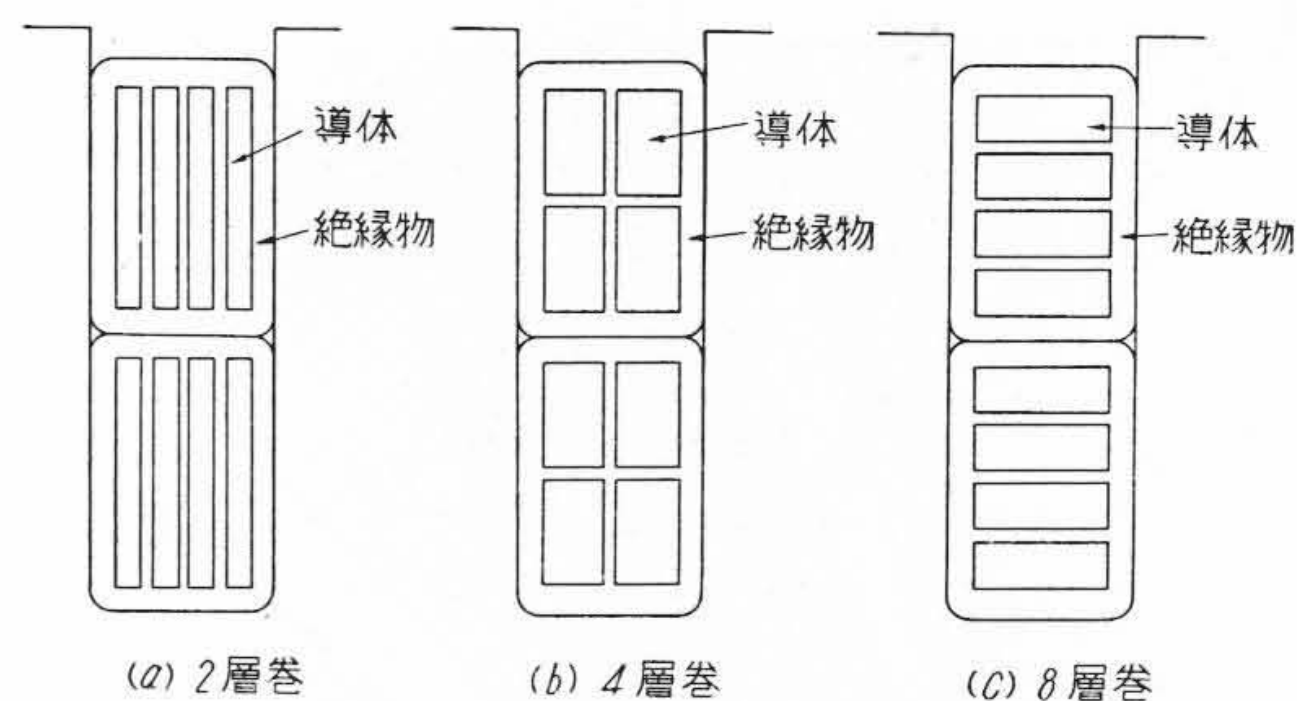
3分割 > 2分割 > 単体

の順であつた。これは各片の質量が小さいため摺動特性が向上して欠損耐力大となるためと考えられる。

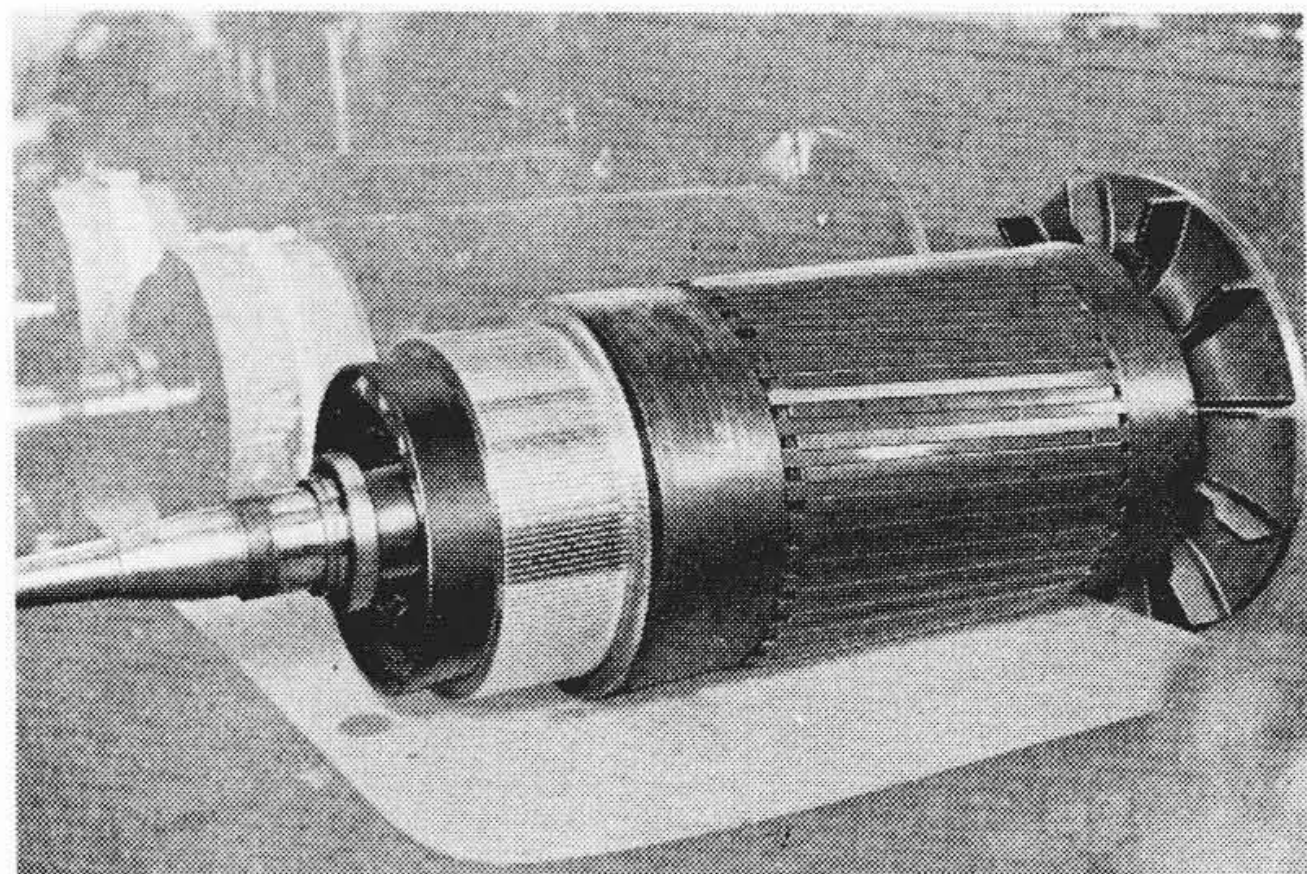
交流整流子機電動機では変圧器起電力による短絡電流を制限する目的で、分割刷子は特に効果があり、300 kW 50~交流整流子機(国鉄納)に採用されて好結果が得られたほか、整流困難な直流主電動機にも広く用いられている。

次に刷子保持器の問題は、刷子を常に整流子表面に安定に摺動させることである。刷子保持器の構造を簡単に例示すれば、第7図のとおりである。

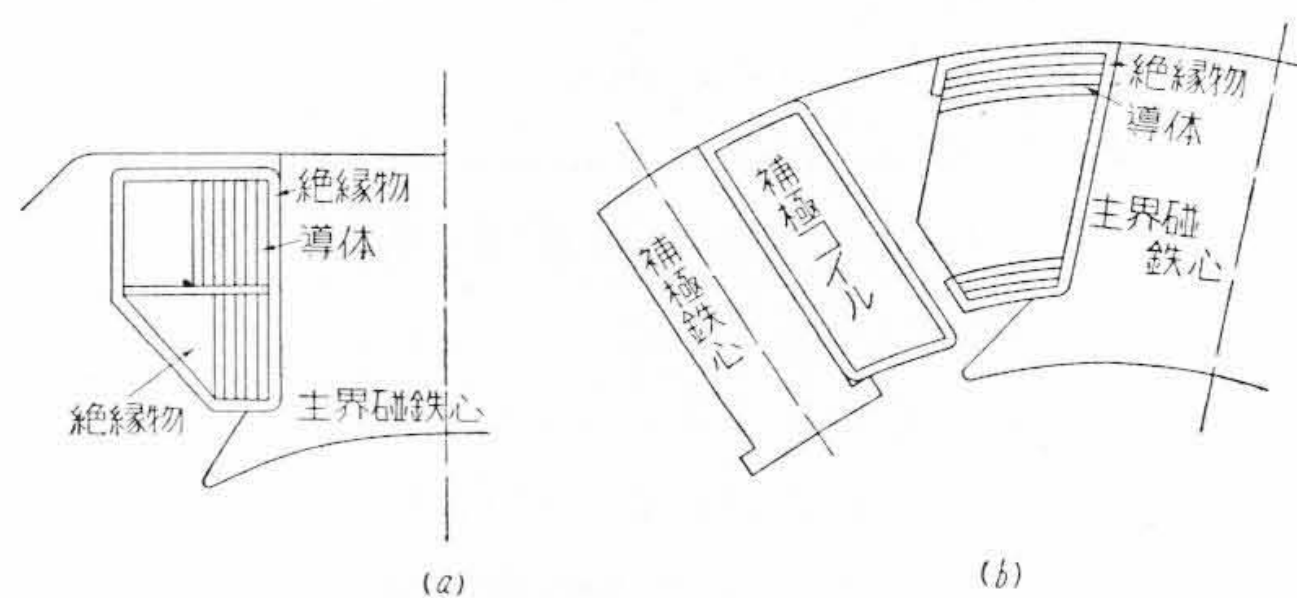
旧型刷子保持器ではバネが前後方向に振動すると、刷子を押す点がずれて、刷子が刷子保持器中で振動を惹起する原因となり、刷子頭および側面が磨耗し、ひいては欠損を起すおそれがある。そこで(b)図のようにバネは横振れ防止板に固



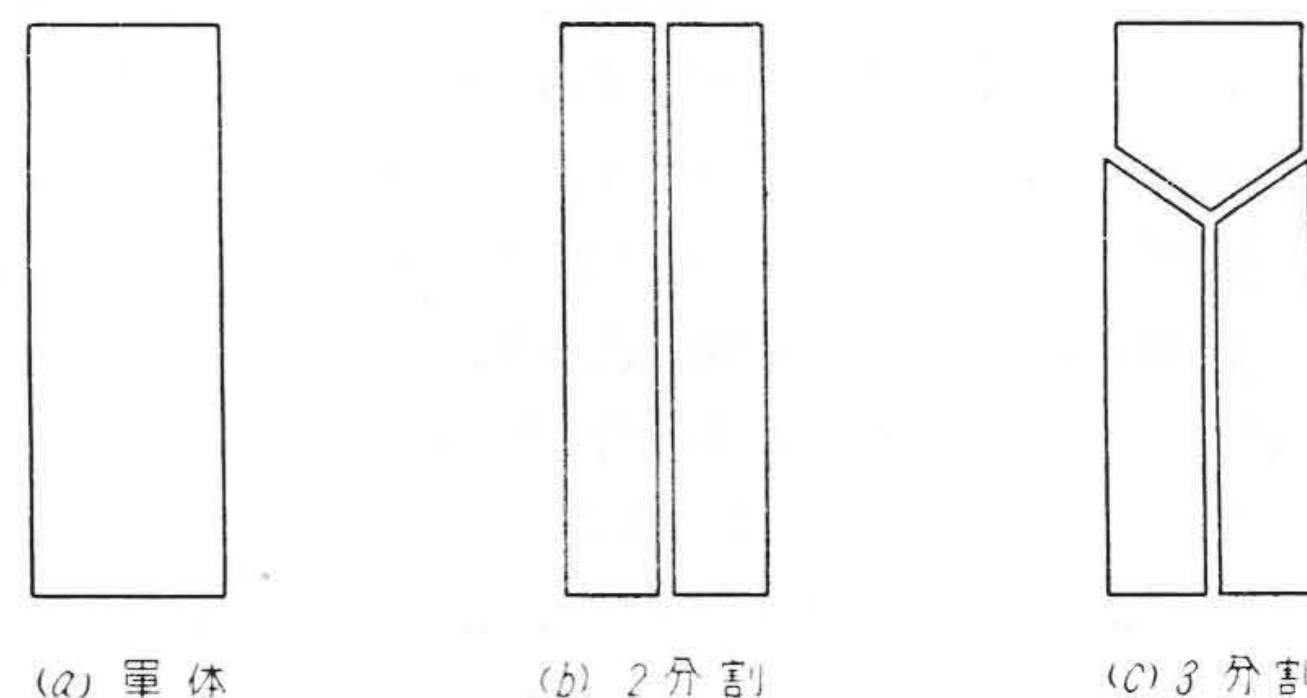
第3図 電機子導体の配列



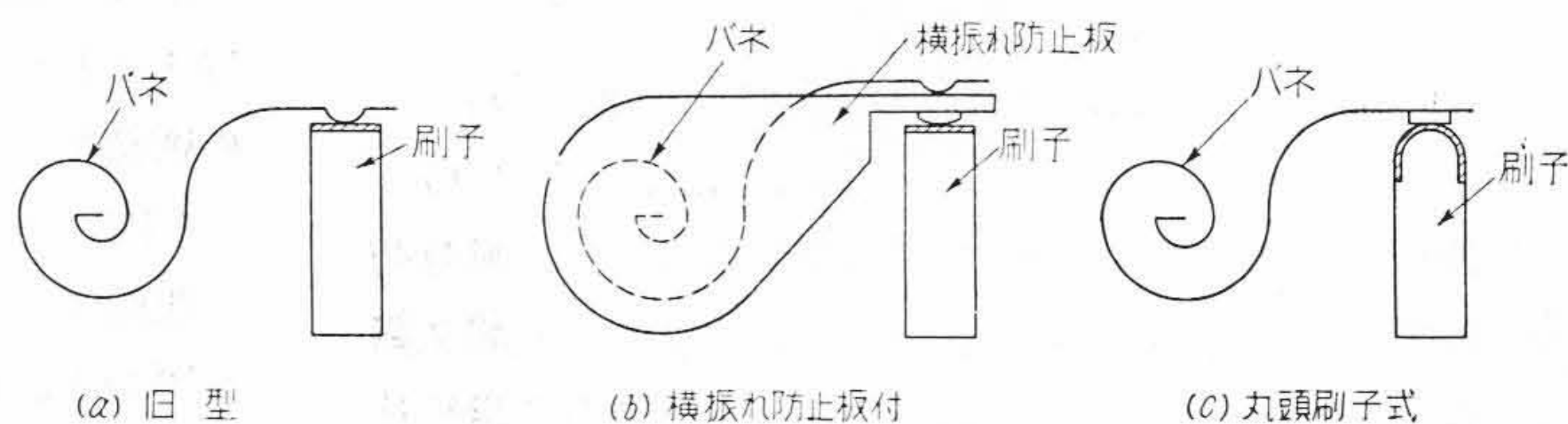
第4図 100kW 1,700 rpm 電機子



第5図 界磁線輪



第6図 刷子構造



第7図 刷子保持器

定されている刷子おさえ金具を加圧し、刷子おさえ金具が刷子を加圧するようにした（実用新案 372855）。この方式ではバネの前後方向の伸縮による影響が少く、刷子の欠損も少い⁽²⁾。

（b）とほぼ同様な効果をねらったものに（c）図のように丸頭刷子がある（特許申請中）。横振れ防止板と刷子保持器枠との間には摩擦は避けられず、塵埃などがつまつて円滑に動きにくい心配があるが、丸頭刷子式ではその心配がない。

第8図に東武鉄道納 142 kW 750 V 1,250/1,620 rpm に用いた丸頭三分割刷子を示す。

この刷子には刷子引上金具を設けてあり（実用新案 455595）、引上金具は丸頭金具を兼用している。

（3）整 流 子

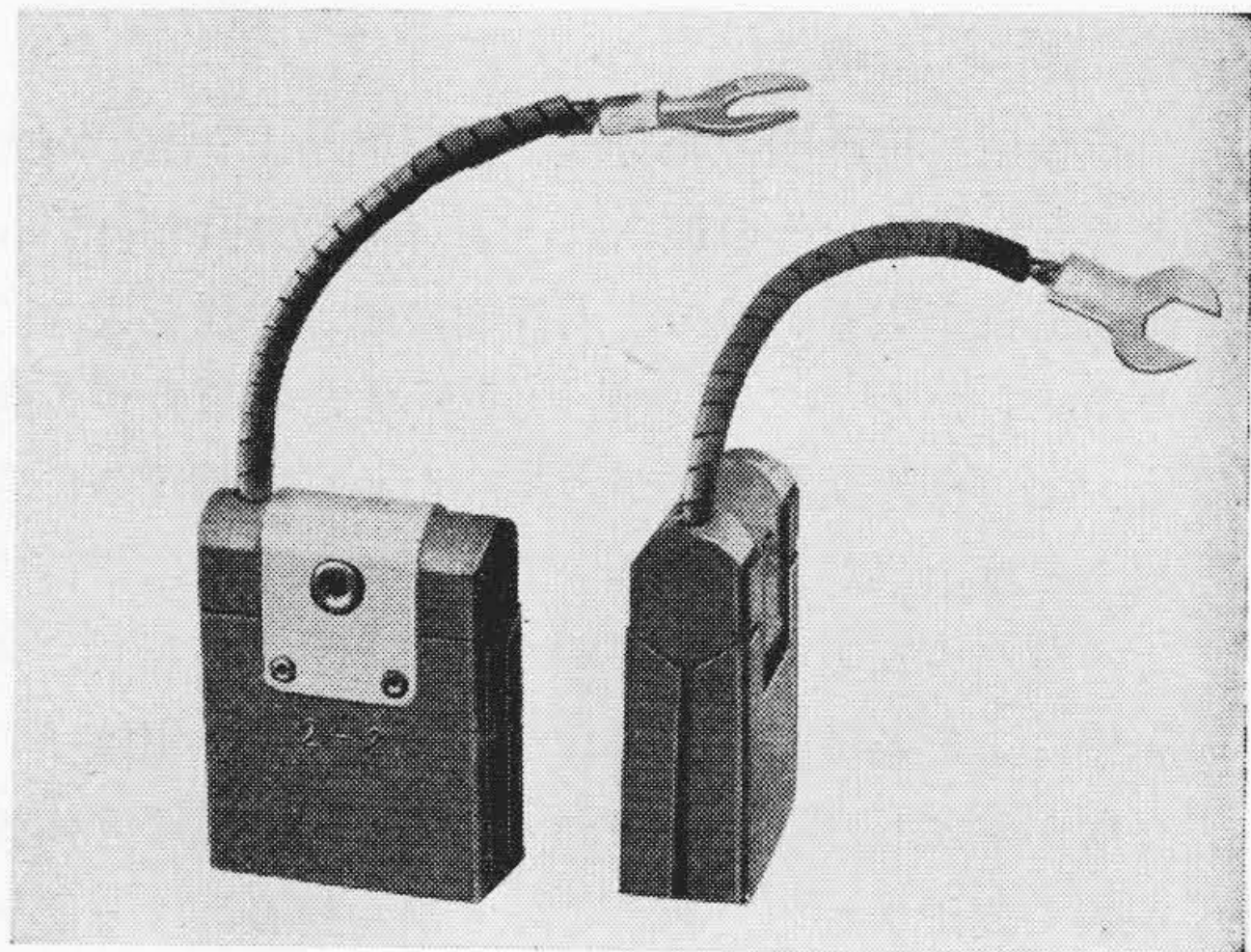
主電動機的高速化に関して問題となるのは回転子の機械的強度であるが、これは主として整流子の機械的強度によつて制約をうける。

一般直流機のように寸法的な制約の特にないものでは、焼嵌環構造を採用することによつて高速に対する機械的強度の確保は比較的容易であるが、車輛用主電動機にあつては、寸法の制約のため焼嵌環構造を採用することがきわめて困難であるため、整流子の構造はV型環締付方式によつてゐる。高速機の整流子はその使用材料、工作法に関して特に吟味する必要がある。

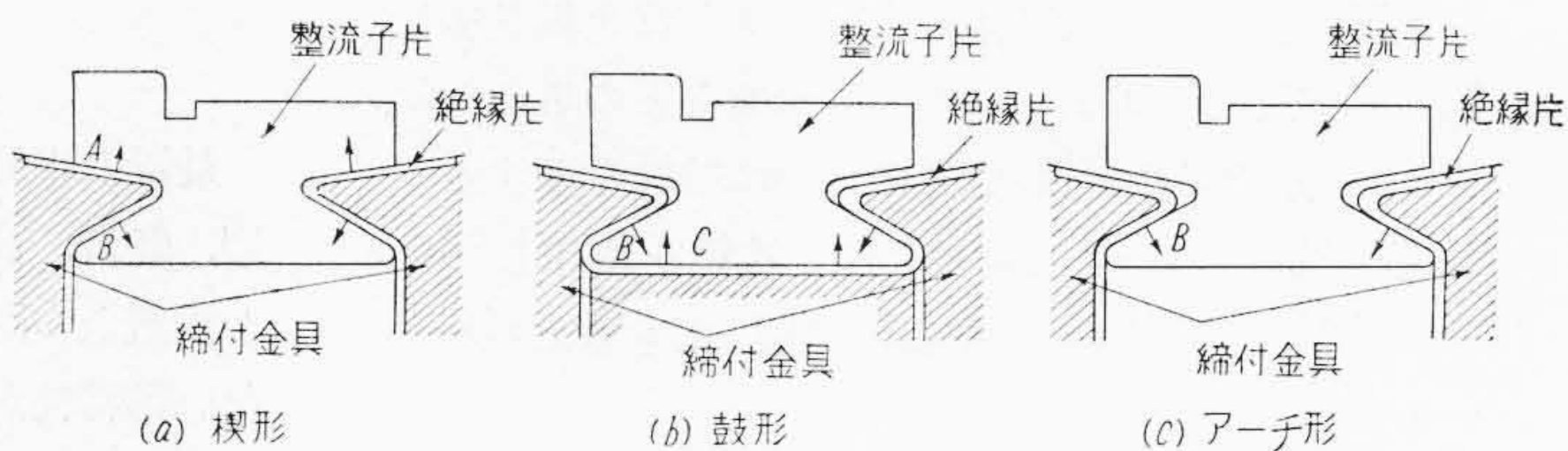
銅に少量の銀を添加することにより、その導電率をあまり低下させることなく、機械的強度が大きく耐熱性のすぐれた整流子片が得られる。たとえば 200 度における銀入整流子片は、同じ温度の硬銅の150%の抗張力を有し耐熱高抗張力整流子片に適した材料である。なお銀入銅は火花による減耗も少さく、また振動疲労強度も大きい。

整流子片の製作可能限界は、整流子片の寸法や締付方法などにより異なるが、従来用いられてきた硬銅では、その周辺速度が 50~60 m/s 程度である。しかるに銀入硬銅の採用により、60~70 m/s 程度のものが、製作できるようになり、交流整流子機主電動機や、台車装架の高速主電動機に採用されている。また銅に少量のクロームを添加したクローム入り整流片を採用すれば、さらに強度を増すことができる。日立製作所では耐熱高抗張力整流子を自家生産による一貫作業によつて、製作している。

次にV型環構造の整流子片の締付方式には第9図に示したような、楔形 (Nip bound)、鼓形 (Body bound)、アーチ形 (Arch bound) があり、おのおの利害得失がある。すなわち楔形構造は第9図 (a) のように、A、B 両面を接触させ整流子片の一枚一枚を楔形で固く保持する方法である。したがつて締付および熱膨脹による無理



第8図 丸 頭 分 割 刷 子



第9図 整 流 子 の 組 立 方 式

な力が比較的少くてすむという利点がある反面、A、B 両面を完全に一樣に接触させることは、工作上はなほだ困難で、所期の目的を達しにくい。鼓形構造は同(b)図のように楔形と類似しB、C面で整流子片を保持するもので、楔形と同じ欠点がある。アーチ形構造は同(c)図のようにV形リングでB面でのみ締付ける方式で、締付力の半径方向の分力が整流子片相互の圧縮力と釣合つて円形を保持する。整流子片相互の圧縮力が減少すると整流子片がガタになるおそれがあるが、B面で一樣な接触を得るための工作が容易であり、確実な締付ができる。最近高速、高温の整流子のもつとも安定した強固な締付方式としてアーチ形構造が、各方面でとりあげられているが、日立製作所では30年来この方式を採用しており、長年の経験と各種の実験によつて締付力の正確度、測定法の確立、シーズニング設備の改善、ハイパ、偏心など整流子表面の異状の検出方法の確立などによつて、十分信頼度における方法で製作されている。

（4）軸 受

戦前は平軸受とコロ、玉軸受の兩種を使用しており、コロ、玉軸受の場合はすべて外国製主として SKF の軸受を使用していたが、戦後国内メーカーの技術向上により、外国製品とほとんどそんじよくないものが作られるようになった。車輛用主電動機の軸受は、一般回転機の軸受より苛酷な条件で使用されるので、一般標準品とは多少相違する。

軸受の問題点を列記すれば次のとおりである。

(A) 遊 隙

車輛用主電動機の軸受は一般標準品より遊隙が大きくとられる。その理由は、① 荷重方向が変化し、衝撃荷重が大きいので、内外輪の嵌合締代を大きくとる。したがって組立後の遊隙減少の割合が大きい。② 衝撃変動荷重が大きいので、内輪は強圧されて温度上昇が高くなる一方、ブラケットは走行中よく空冷されるので内外輪の温度差が大となり、熱膨脹による遊隙減少の割合が大きい。③ 電機子の交換がしばしば行われるので軸受の内外輪の互換性が強く要求されるため、この互換を容易にする必要がある。

(B) 保 持 器

主電動機の高速度に伴い、コロまたは玉軸受保持器の異常磨耗、破損、リベット切断などの事故を防ぐため、保持器の材質、構造には特に吟味を要する。軸受保持器のリベットはすべて鉄製を使用している。なおリベットなし保持器の実用化も考えられている。

(C) 軸受装着構造

軸受の組合せは、一般に歯車側にNU型、整流子側にNH型を使用しているが、小型高速機では、歯車側にNU型、整流子側に玉軸受という組合せが採用されている。軸受装置の構造も、電動機の分解組立時にその都度軸受を着脱することなく、軸受ボックス全体を着脱できるような構造——カートリッジ型——に改良されてきた。

(D) 軸受の速度限界

速度限界を決定する要素には軸受の種類、型、潤

滑剤の質、量および潤滑法、保持器の材質および構造や軸受の回転精度など、種々の因子があり、明確にこれを決めることは困難であるが、従来の経験や実績によつて、 dn 値 (d は軸受内径 mm, n は毎分回転数) を考えその算定により一応の限界の目安がとられている。

今後ますます主電動機の高速度が進む傾向にあるので、軸受自身の改良はもちろん、グリースの性能向上によつて速度限界の値をあげることに努力が払われている。

なお油潤滑とすれば、グリースの場合より dn 値が上げられることは周知のとおりで、日立製作所では他社にさきがけて、京王納 100 kW, 2,000 rpm 主電動機に油潤滑が採用された。

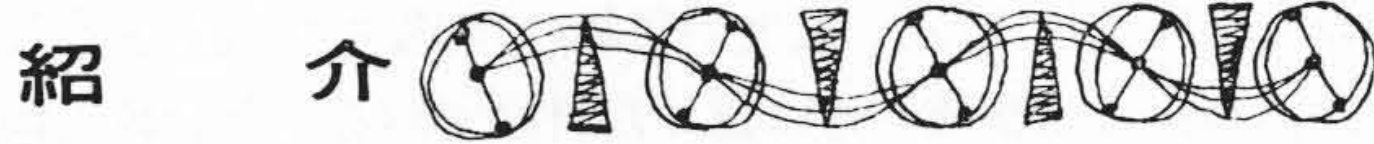
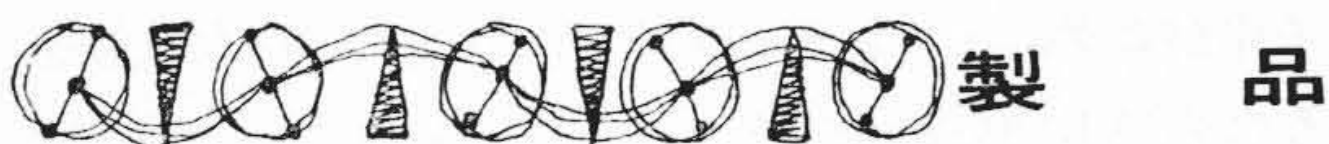
[IV] 結 言

最近の車輛用主電動機の傾向および進歩に関して、小型、軽量、高速化を中心にした電機設計上問題となる点と構造上の問題点を述べた。また主電動機の小型化に伴ない熱特性が変化してきたので、過負荷容量を考えると、連続定格と1時間定格を区別して、熱時定数の意味をとる必要があることにもふれた。

最近の技術的進歩はまさに日進月歩というべきで、われわれはすぐれた製品を生むために、つねに努力を重ねているのであるが、諸賢の御支援にまっところが多大である。ここに車輛用主電動機について諸賢の御参考に供した次第である。

参 考 文 献

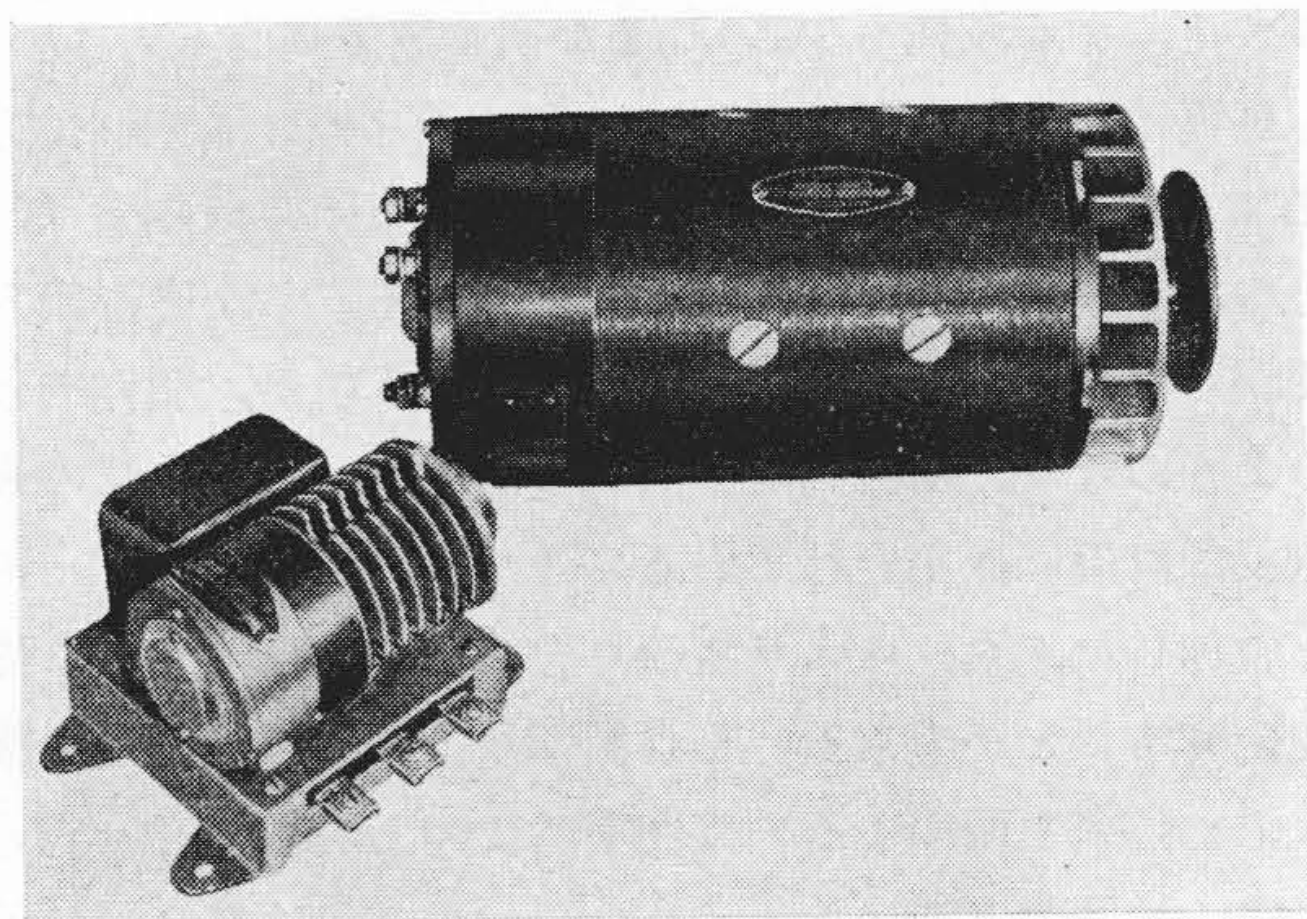
- (1) 牧野田：電学誌 76, 1343 (昭 31)
- (2) 佐々木、武政：日立評論 38, 313 (昭 31)



日立カーボンパイル式自動電圧調整器

日立製作所では昭和23年より自動車の充電発電機用として、カーボンパイル式自動電圧調整器を量産している。本器の電圧は塔載蓄電池の関係上 6 V, 12 V, 24 V に分かれ、現在2輪車の小型車よりディーゼル車の大型に至るまで各車種とも好評を博している。

周知のようにカーボンパイル式は振動接点式と異り、界磁電流を断続しないから、大きな界磁電流を制御するものに適している。図に示したものは 24 V 750 W の発電機とカーボンパイル式自動電圧調整器で大型ディーゼルバスに使用されるものの一例である。これは2台並列にして小型ディーゼルカーやガソリンカーに使用できる。この自動電圧調整器は一般列車点灯用のものに比べてきわめて小型に製作されている。なお負荷に対しても定電圧特性を要求される場合は別に電流制限器をつける



第1図 24V 750W カーボンパイル式自動電圧調整器付充電発電機

こともできる。ただしこの場合はベースの寸法はさらに大きくなる。この種の自動電圧調整器を東京都のトロリーバスに装着して好結果を得ることができた。