UDC 621-592.35

円板形直流励磁制動機

花房　実*　中村　末司**
Minoru Hanafusa　Sueji Nakamura

DC Disc Type Magnet Brake

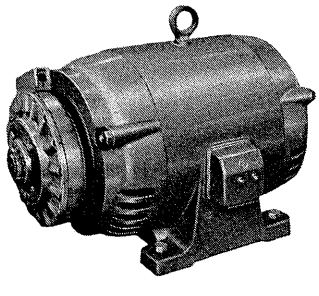
Synopsis

Recently, there are more severe requirements for the brake in modern industry, such as frequent operation. For this demand, we have completed the high efficiency brake, enduring frequent operation and with easy maintenance and long life.

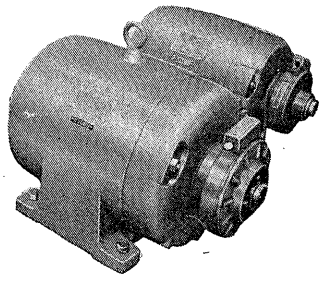
In this paper, I should like to introduce the main special feature, outline of specification and test results.

I. まえがき

機械の発生エネルギーを時間的，量的に自由に制御する技術はごく近年になって発達してきたものである．たとえばごく短時間に運動エネルギーを吸収して機械を停止させる目的の制動機においても，その進歩改良はむしろ今後の問題といってよいであろう．制動機は現在においては，運動エネルギーを摩擦熱エネルギーに変換する方式のものがほとんどであり，したがって材料と材料の体当たりによる発熱，摩耗がおこることは避けられない．これが他の機械類と全く趣を異にしている点であり，制動機は結局は消耗品であるという認識に立って出発することが製作者にとっても使用者にとっても必要なことである．したがって，制動機に要求される特長とは次のようなものとなるであろう。



第1図　RC 545-3形ブレーキ
Fig. 1. Brake, types RC 545-3



第2図　RC 545-2および1形ブレーキ
Fig. 2. Brake, types RC 545-2 and 1

1) 必要な制動性能が得られること
2) 寿命ができる限り長いこと
3) 保守および取り替え取り付けがきわめて容易なこと
4) 結局は消耗品であるからコストが安いこと

以上の各点を一応満足したと自負し得る直流励磁方式の円板形単板制動機を開発したもので，以下にその内容を述べる。

II. 仕様および特長

1. 仕　様

第1表　仕　様
Table 1. Specification

形　式	RC 545-1	RC 545-2	RC 545-3
使用電圧 (V)	40～80	40～80	40～80
電流 (A)	0.11～0.22	0.14～0.28	0.19～0.38
制動トルク(kg-m) (1,500rpm の時)	1.5～3	3～6	6～12
最低吸引電圧 (V)	25以下	25以下	25以下
吸引時間 (sec)	0.05～0.1	0.05～0.1	0.05～0.1
釈放時間 (sec)	0.2	0.2	0.2
GD^2 ($kg\text{-}m^2$)	0.017	0.028	0.055
回転部重量 (kg)	1.5	2.8	4.0
固定部重量 (kg)	2.5	3.7	4.0
合計重量 (kg)	4.0	6.5	8.0
許容最大仕事量 (kg-m)	1,100	1,500	2,500

2. 特　長

1) 単板式であり特に簡単な構造である
2) 直流励磁方式であるからきわめて小形である．また，うなりもなく異常な過熱もない

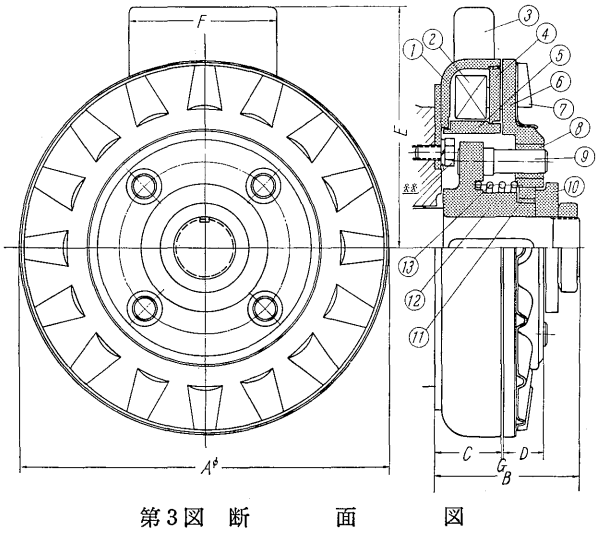
* 川崎工場設計部　** 開発部

3) 電圧を 40～80V に変えることにより1機種にて最大トルクの ½ まで調整可能，3機種にて制動トルク 1.5 kg-m～12 kg-m まで無段階に調整可能である
4) 自動ギャップ調整装置の作用によって，制動ライニングが完全に摩耗するまで，調整，手入れが不要である
5) 1時間 400 回の高ひん度の使用に耐え，コイルは連続通電して使用できる
6) 寿命は 70 万回の使用に耐える
7) 構造取付簡単で安価である

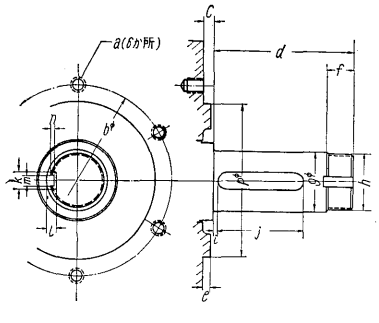
III. 構　　造

本制動機は大別して固定部と回転部から成り立っており，第3図のように固定部は電磁鉄心外輪①，電磁鉄心内輪⑤，その内部に樹脂で固めて埋込まれた励磁コイル②，樹脂で固着された制動ライニング④および端子箱③より構成され，これらは一体となって電動機の外わくに取り付けられる．回転部は制動板⑥，冷却フィン⑦およびブッシュ⑧と，ブッシュにはめ込まれた制動板を軸方向に案内するピン⑨，それを取り付けたセンタハブ⑫ならびに自動ギャップ調整装置より構成されている．制動板は釈放時にはばね⑬によりリング⑪を介して止め金具⑩側に押し付けられてエアギャップGを保っている．この状態では，回転部は電動機軸と一体に回転することが可能である．コイル②が励磁されると制動板は固定側に吸引されて制動力を発生する．この時ピンとブッシュが円滑にしゅう動するようブッシュ⑧には高性能の油が含浸されている．第3図および第4図は電動機外形および取付用図で第2表および第3表にその主要寸法が示してある。

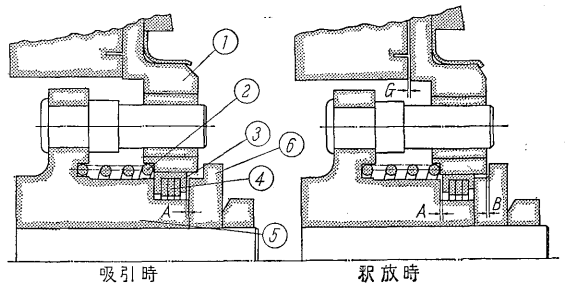
本制動機の特長である自動ギャップ調整装置の構造は第5図のとおりである．すなわち第5図において，①は



第3図　断　　面　　図
Fig. 3. Sectional view of brake



第4図　電　動　機　軸
Fig. 4. Outer view of motor shaft



第5図　自動ギャップ調整装置
Fig. 5. Auto gap regulator

第2表　外　形　寸　法
Table 2. Dimension

形　式	制動トルク (40～80V)	制動機外形寸法 A (φ)	B	C	D	E	F	G
RC 545-3	6～12 kg-m	217	84.5	39	24	120	77	0.7
RC 545-2	3～6 〃	170	76	37	23	97	77	0.5
RC 545-1	1.5～3 〃	146	68	35	20	85	77	0.5

第3表　取　付　用　寸　法
Table 3. Mounting dimension

形　式	a	b	c	d	e	f	g
RC 545-3	M8	108φ	5.5	79	3	15	40φ K6
RC 545-2	M8	70φ	4	72	3	14	30φ K6
RC 545-1	M6	62φ	4	64	2.5	13	25φ K6

形　式	h	i	j	k	l	m	n	p
RC 545-3	W40 12山	2	50	10	4.5	12.2	2.5	89φ h8
RC 545-2	W30 12山	2	40	7	4	8.2	2.5	50φ h8
RC 545-1	W25 14山	5	30	7	4	8.2	2.5	45φ h8

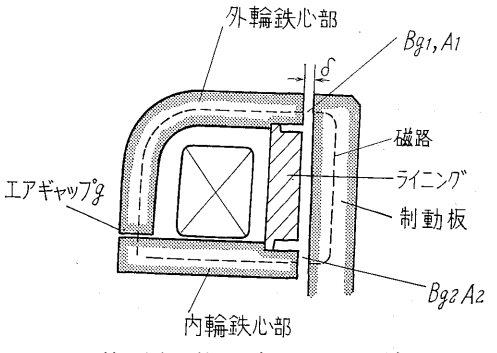
制動板，②は復帰ばね，⑤はセンタハブであり，①の内側円周面にはリング③を介してスナップリング④が数個取り付けられている．スナップリングが外側に開く力はリングを介して，そのまま①の内周面に圧着力として作用しており，ばね②の復帰力に対しては③および④はそのまま内周面に固定しておりたがいにしゅう動することはない．第5図の右側は釈放状態を示しリング③とセンタハブの側隙Aがすなわちエアギャップ G（第3図）に等しくなっている．この時リングの他の側面は取付金具⑥の側面に復帰ばね②のばね力によって押しつけられている．制動時には制動板①は固定側に吸引されて第5図左側の状態となりGは零になる．この際吸引力はリング③と制動板①の軸方向の摩擦力よりはるかに大であるから第5図右図のAが零になってもまだGが零にならない場合には，Gが零になるまで制動板は左方に移動する．この際リング③はセンタハブ⑤の溝の左側面に制限されているから，リング③は制動板①の内周面を右方にすべることになる．第5図A寸法はあらかじめ必要なエアギャップGの寸法と等しくしてあるから，以上の作用により制動面の摩耗に関係なく常に一定のエアギャップに保つことができる。

なお，輸送時の衝撃で①と③の間にしゅう動が生じ，G寸法が過大となることを防止するために止め金具の側面には一定寸法以下のエアギャップBを設けたストッパを設けている，したがってGの寸法は衝撃を受けた場合でも一定値以下に保たれるから，この場合には最大電圧80Vによって一度吸引すれば前述の作用により以後正常なエアギャップGに保たれることになる。

IV. 制 動 の 原 理

1. 吸　引　力

第6図に示すとおり外輪および内輪鉄心部，制動板ならびに外側と内側制動面エアギャップ部，エアギャップ g で磁気回路が構成される．コイルに電流を流すと，そのATが磁路に与えられ制動板と固定鉄心の間に次式によって与えられる磁気吸引力が働く。



第6図 磁　気　回　路

Fig. 6. Magnetic circuit

$$F=\frac{1}{2\mu}\left(Bg_1^2\ A_1+Bg_2^2\ A_2\right)\frac{1}{g}(\mathrm{kg})$$

g：重力の加速度

μ：空気の透磁率（$=4\pi\times10^{-7}$ H/m）

Bg_1：外輪部エアギャップ磁束密度（wb/m²）

Bg_2：内輪部エアギャップ磁束密度（wb/m²）

A_1：外輪部有効断面積（m²）

A_2：内輪部有効断面積（m²）

吸引されて制動中，第6図の δ は一応0になるが実験結果より逆算すると等価的には約0.1mmのエアギャップに相当し，この部分とエアギャップ g に全体の約60～70％のATが与えられるがともにきん少のエアギャップのため，形状に比して強大なる吸引力が得られる．エアギャップ g は釈放時間特性を良好にするために設けられたもので残留磁束の減少に役立っている．その他駆動軸部などを通る漏れ磁束も適切に磁気しゃ断しており釈放時間は非常に少ない。

2. 制　動　力

制動力は制動板対ライニングおよび外周内周鉄部の摩擦力の和によって与えられる．制動力は次式のとおりである。

$$T_b=\mu FR\ (\mathrm{kg\text{-}m})$$

μ：実効摩擦係数

F：磁気吸引力（kg）

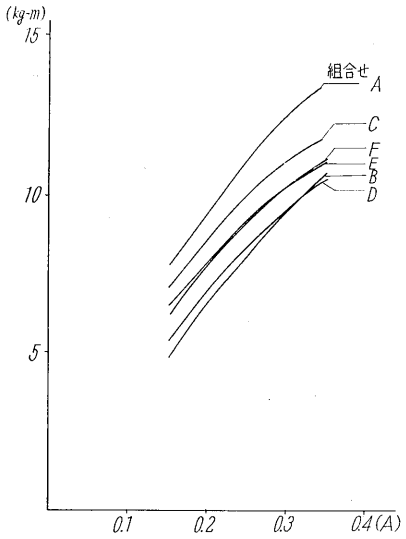
R：制動面平均半径（m）

摩擦力により摩耗が生じるが，構造上制動板とライニングの摩耗量の和は内輪ならびに外輪鉄部相互の摩耗量の和に等しい．ブレーキの寿命は制動板対ライニングの摩耗によって定まり，鉄部はその摩耗量に等しい部分が金属同志の高い摩擦力により削りとられる．したがって各単独に摩擦係数を分離して考えることは困難である．

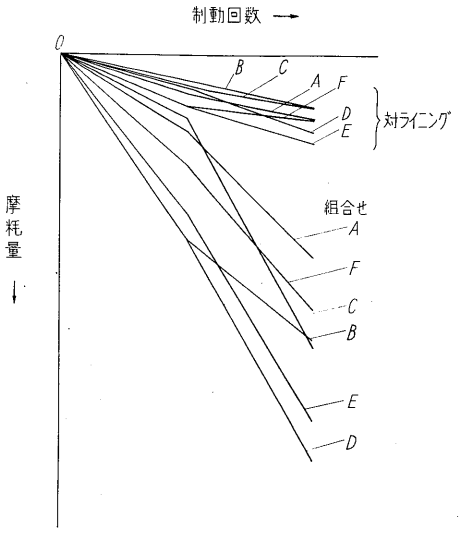
実効摩擦係数 μ はライニング対制動板摩擦係数にほぼ等しいと考えてよい。

V. 制動面材質の吟味

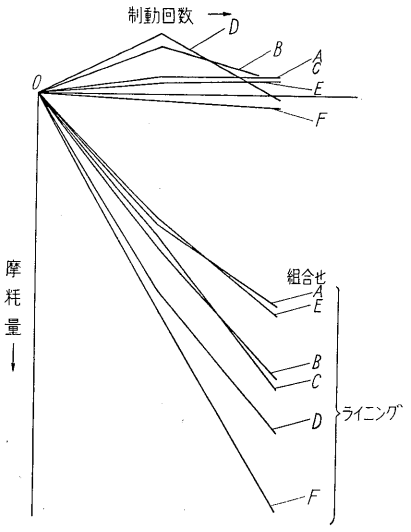
IV．の2.項で述べたような，制動機の寿命はライニング対制動板の摩耗量によってほぼ定まる．したがって制動板対ライニングに関しては摩耗量が少なく，摩擦係数が大なる組み合わせであること，鉄心部に関しては制動時に相互に異常摩耗，焼付などの異常現象は生ぜず，かつ磁気特性の良好な組み合わせであることが必要である。



第7図 制動トルク曲線
(0～4×10⁴までの平均値)
Fig. 7. Brake torque characteristics



第8図 (可動側) 摩耗試験結果
Fig. 8. Result of wear tests



第9図 (固定側) 摩耗試験結果
Fig. 9. Result of wear tests

予備テストの結果良好であった各種ライニングおよび各種鉄材の組み合わせA～Fについて制動力特性試験および摩耗特性試験を実施した結果を第7図，第8図，第9図に示す．この結果，ライニングにゴムモールドブレーキライニングの一種，制動板に磁気特性および摩耗特性の良好な軟鋼，固定鉄心に磁気特性の良好な鉄材を使用した組み合わせAが両特性とも非常に良好であることがわかる．金属同志の摩擦面も非常にスムーズにけずられており，異常な状態は全然認められなかった．なお，摩耗特性は 70 万回まで直線的に変化していく．本制動機は上記組み合わせを使用しているので，寿命が長く，また制動特性も良好である。

VI. 熱的問題

制動機が熱的に問題がないかどうかということは回転体のエネルギーを摩擦熱損失に変換する方式の制動機にとっては重要な問題である．これには1回の制動で，比較的 GD^2 の大きな場合制動面に異常損傷をきたさないかという問題と，連続的に制動釈放をくり返した場合の温度上昇限度の問題の2点がある．下記に述べる。

1. 許容最大仕事量

制動時，回転体が持っている運動のエネルギーは制動面において摩擦熱に変換される．この発生した熱量が許容最大エネルギー損以内にある必要がある。

t：制動時間 (sec)

T_B：制動トルク (kg-m)

T_L：負荷トルク (kg-m)

GD^2：フライホィール効果 (kg-m²)

N_0：制動開始時回転数 (rpm)

ω_0：制動開始時角速度 (rad/sec)

A：有効エネルギー損

とすると，制動時間は次式で表わされる。

$$t=\frac{GD^2}{T_B+T_L}\ \frac{N}{375}(\text{sec})$$

減速度は一定とする．1回の制動による有効エネルギー損は平均角速度が $\omega_0/2$ であるから次式のようになる。

$$A=T_B\cdot\frac{\omega_0}{2}\cdot t$$

$$=\frac{T_B}{T_B+T_L}\cdot GD^2\cdot\frac{N^2}{7160}\left(\frac{\text{m-kg}}{\text{SW}}\right)$$

負荷トルク T_L の存在は，熱的には安全側に働く．許容最大仕事量（第1表仕様参照）を A_0 とすると

$$A\leqq A_0$$

であることが必要である。

2. 温度上昇

1回の制動による最大仕事量が許容値以下であれば，次に連続使用した場合の温度上昇を検討する必要がある．この時発生熱源としては，制動摩擦熱と励磁コイルの銅損がある．この熱量が一部は蓄積されて各部をあたため一部は外部へ放散される．これを一般式で表すと次のようになる。

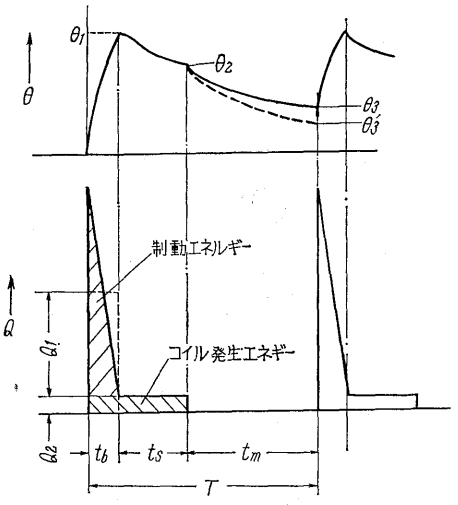
$$Q\,dt-Ah\theta\,dt=C\,d\theta$$

ただし Q：単位時間に発生する熱量 (W)

A：冷却面積 (m²)

h：発散係数 (W/℃ m²)

C：熱容量 (joul/℃)



第10図 T—θ, Q 曲線

Fig. 10. Between relation T vs. θ, Q

θ：温度上昇（℃）

いま，第 10 図のような制動—休止—運転を一定の周期で繰返した場合を考える。

t_b：制動時間（sec）

t_s：休止時間（sec）

t_m：運転時間（sec）

T：制動周期（$t_b+t_s+t_m$）（sec）

Q_1：制動による平均仕事（W）

Q_2：コイル銅損（W）

制動時の式

$$(Q_1+Q_2)\,dt-Ah\,\theta\,dt=C\,d\theta$$

休止時の式

$$Q_2\,dt-Ah\,\theta\,dt=C\,d\theta$$

回転中は固定鉄心と可動鉄心は熱的に絶縁されていると考え，また簡単のため，可動側，固定側の熱容量および放熱面積が等しいとして

可動側 $\frac{1}{2}A\,h\,\theta\,dt=\frac{1}{2}C\,d\theta$

固定側 $\frac{1}{2}Ah'\,\theta\,dt=\frac{1}{2}C\,d\theta$

h'：回転による冷却効果および冷却フィンによる流動作用を加味した発散係数（$h'=4\sim5\,h$）

上の各式を解いて第1回制動時温度上昇 θ_1 とすれば

$$\theta_1=\frac{Q_1+Q_2}{hA}\left(1-e^{-\frac{hA}{C}t_b}\right)$$

第1回目休止終了時温度上昇 θ_2 とすれば

$$\theta_2=\frac{Q_1}{hA}\left(1-e^{-\frac{hA}{C}t_b}\right)e^{-\frac{hA}{C}t_s}+\frac{Q_2}{hA}\left(1-e^{-\frac{hA}{C}(t_b+t_s)}\right)$$

第1回目回転終了時

固定側 $\theta_3=\theta_2 e^{-\frac{hA}{C}t_m}$

可動側 $\theta'_3=\theta_2 e^{-\frac{h'A}{C}t_m}$

上記2温度は制動中に平均化され，平等に分布するとすればひんぱん動作の場合の最終温度上昇を求めると θ_∞ は次のようになる。

$$\theta_\infty \fallingdotseq \frac{\frac{1}{hA}\left[Q_1\left(1-e^{-\frac{hA}{C}t_b}\right)e^{-\frac{hA}{C}t_s}+Q_2\left(1-e^{-\frac{hA}{C}(t_s+t_b)}\right)\right]}{1-\frac{1}{2}\left[e^{-\frac{hA}{C}\cdot T}+e^{-\frac{A}{C}[h't_m+h(t_b+t_s)]}\right]}$$

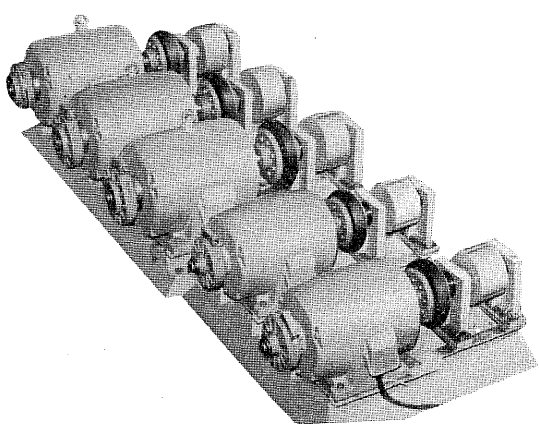
となる．ただし h は一定としたが温度とともに発散係数が変化し，絶縁物の熱伝導率も増加し，熱伝導および発散の状態は非常に複雑であって，上記の温度上昇の式は近似的な予測であるが，これによって許容限内に止めることは困難ではない。

VII. 特 性 試 験

1. 試 験 条 件

1) 操作ひん度 400 SW/hr 66.7% ED 6 sec 正転—3 sec 休止—6 sec 逆転—3 sec 休止とした。

2) 負荷 GD² として電動機自身の GD² に，さらにその約2倍の GD² を追加した．すなわち RC 545-3 形の全負荷 GD²（制動機自身の GD² だけを除いた値）は 1.06 kg-m²，RC 545-2 形の全負荷 GD² は 0.54 kg-m²，RC 545-1 形は 0.27 kg-m² である．また試験に使用した各電動機は，いずれも当社汎用製品でそれぞれ BRK 772-4（11 kW 4極），BRK 591-4（5 kW 4極），BRK 772-4（3 kW 4極）である。

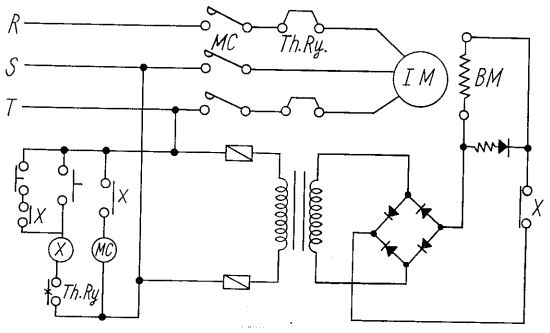


第11図 試験中の RC 545-2 形および RC 545-1 形

Fig. 11. Braking test of RC 545-2 and RC 545-1

3) 第 12 図は標準的操作回路である。

なお，上記条件は，工作機械における最も過酷な場合の実情に合わせたものである。



第12図　操　作　回　路

Fig. 12. Operating circuit

2. 特　　性

1) 電圧制動トルク特性

第13図にその特性を示す．RC 545-1 形の最大制動トルク（80V時）はRC 545-2形の最小制動トルク（40V時）に等しく，また RC 545-2 形の最大制動トルクは RC 545-3 形の最小制動トルクに等しくなっている。

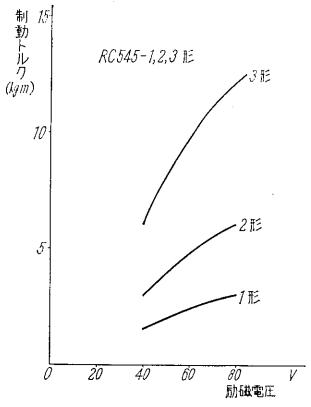
したがって1, 2および3形の3機種にて 1.5 kg-m～12 kg-m までの任意の制動トルクを得ることができる。

2) 吸引—釈放特性

第14図～第16図は制動機コイルを励磁してから制動板が吸引するまでの時間，およびコイルを消磁してから制動板が離れるまでの時間と電圧の関係を示している．これによれば電圧が 30V 近くまで下がっても動作時間が安定していることがわかる。

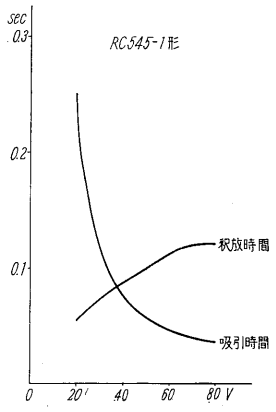
3) 測定オシログラム

特性試験の際の制動時および釈放時のオシログラムの代表的な一例（電圧 80V）を第17図に示す。



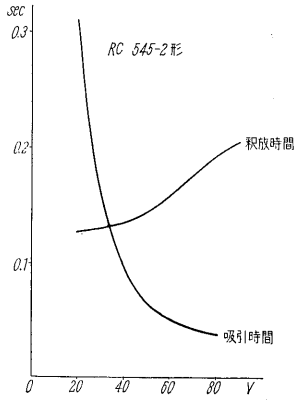
第13図　電圧—制動トルク特性

Fig. 13. Voltage-brake torque characteristics



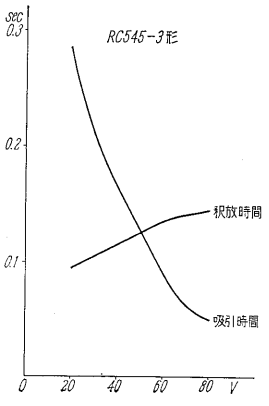
第14図　吸引釈放特性

Fig. 14. Releasing and attracting time characteristics



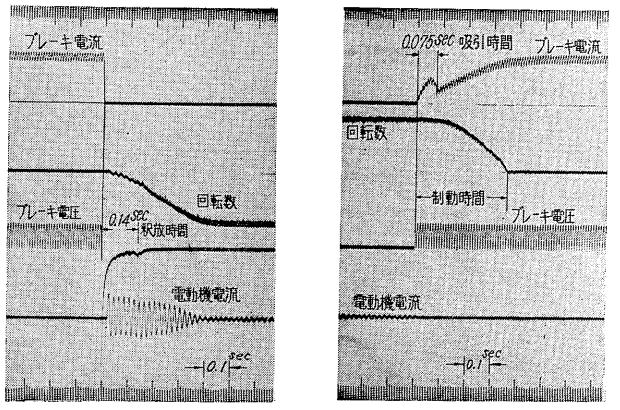
第15図　吸引釈放特性

Fig. 15. Releasing and attracting time characteristics

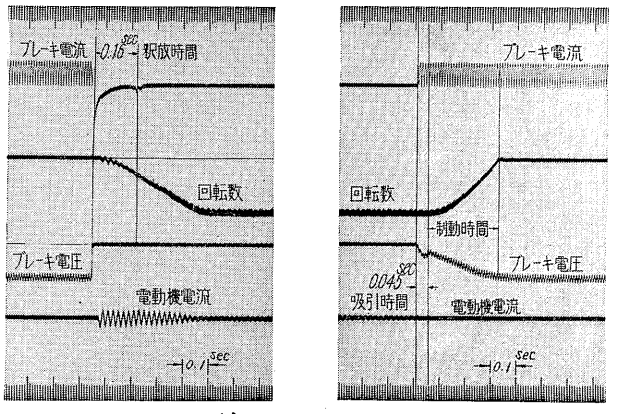


第16図　吸引釈放特性

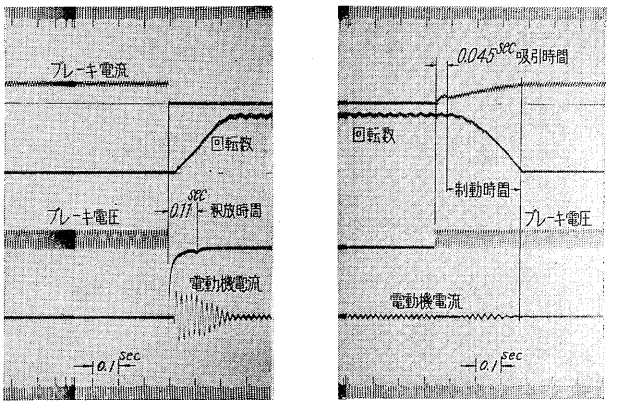
Fig. 16. Releasing and attracting time characteristics



(a) RC 545—3



(b) RC 545—2



(c) RC 545—1

第17図　オシログラム

Fig. 17. Oscillograms

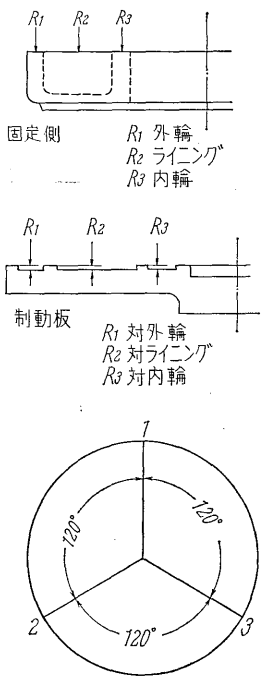
4) 温 度 上 昇

80V にて 400 SW/hr, 66.7%ED 運転にて飽和後の温度上昇を第4表に示す．これは θ_∞ に相当するもので計算値に良く一致している．コイルはA種絶縁であるから充分余裕のあることがわかる。

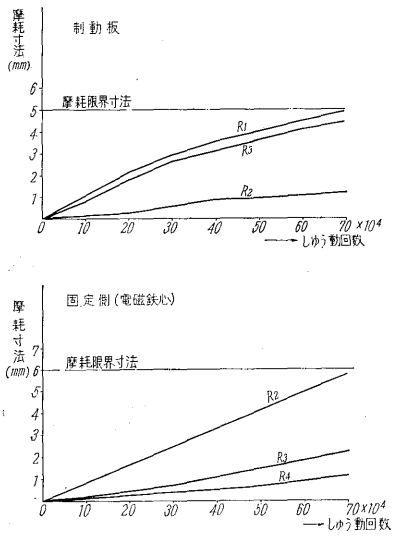
第4表 各部の温度上昇
Table 4. Result of temperature rise test

(単位 ℃)

	コイル (抵抗法)	制動板 (温度計法)	固定側外周面 (温度計法)	GD² (kg-m²)
RC 545-1	41	44	34	0.27
RC 545-2	46	44	34	0.54
RC 545-3	48	49	46	1.06



第18図 摩耗量測定個所
Fig. 18. Measuring point of wear



第19図 摩耗試験結果
Fig. 19. Result of wearing test

5) 寿 命 試 験

80Vにて寿命試験を行ない，しゅう動面の摩耗を測定した．本制動機は，主なる制動面，すなわち制動板対ライニング面以外に磁石の吸着面もしゅう動する構造であるので，第 18 図のような固定側の各面および制動板の各面をそれぞれ3点ずつ測定しその平均摩耗寸法を第19図に示してある．これによるとライニングが完全に摩耗するまで使用に耐えることがわかる。

VIII. む す び

本制動機は以上のようにすぐれた性能，特性を有しているが，さらに消費電力がきわめて少なく，制動時の衝撃が小さいことなどの特長を有し，工作機械用としてのみならず，広く各方面の需要が期待される。

e-Front runners

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。