

直流逆作用形電磁ブレーキについて

The Negative Operation Type Magnetic Brake

藤 沢 奎 二*
Keiji Fujisawa

内 容 梗 概

近代産業の発達とともに生産技術の向上は著しく、これにしたがい生産設備、工作機械の発達にはめざましいものがある。最近ある種の工作機械用としては、オーバハング形の直流逆作用形（励磁制動形）ブレーキが注目され、その需要も高まってきている。これらの需要に応じるため独特な自動間げき調整装置を取り付けた直流逆作用形電磁ブレーキを開発した。本ブレーキは電磁コイルを電磁石継鉄中に埋め込み、モールドで固めたもので、電磁石継鉄を直接摩擦面とし、レバーリンク機構がなく、したがって部品点数も少ないうえ、取扱いが非常に簡単なものである。本文ではこのブレーキの構造、制動特性について述べてある。

1. 緒 言

従来の電磁ブレーキは、回転体の急速な停止とともに停電、すなわち無電圧になったときの安全性を考え、大部分のものは無励磁制動、励磁解放という形をとっている。しかし工作機械用としては今までもこの種のブレーキとは逆の動作をする励磁制動、無励磁解放形のブレーキを要求する用途があり、すでにいろいろ製作されている。この逆作用形のブレーキは電動機を停止させるときだけ通電させればよいので、ある種の工作機械用などとしては従来のブレーキにはみられない特長をもっている。

すなわち逆作用形のブレーキでは電磁石の最終衝程における大きな磁引力がそのまま制動力として利用できるもので、従来のブレーキに比べ非常に小形、軽量となること、およびこの制動力は電圧を変えることにより容易にしかも広範囲に変えられること、さらに簡単な自動間げき調整装置の取り付けが可能であり、これにより摩擦面が摩耗しても間げきの調整を必要とせず従来のブレーキにみられたような、ライニングの摩耗による手入れがほとんど不用となるということである。

日立製作所ではさきに、汎用電動機に取り付く新形電磁ブレーキとして円すい形ブレーキ（形式 MS-SYV）を発表したが、今回主として工作機械用として、独特な自動間げき調整装置を備え、しかも電動機への取り付けが非常に簡単な逆作用形直流電磁ブレーキを開発し、すでに多数納入している。以下本ブレーキ（わく番 ND 3015）の構造、理論、特性について述べる。

2. 構造および動作

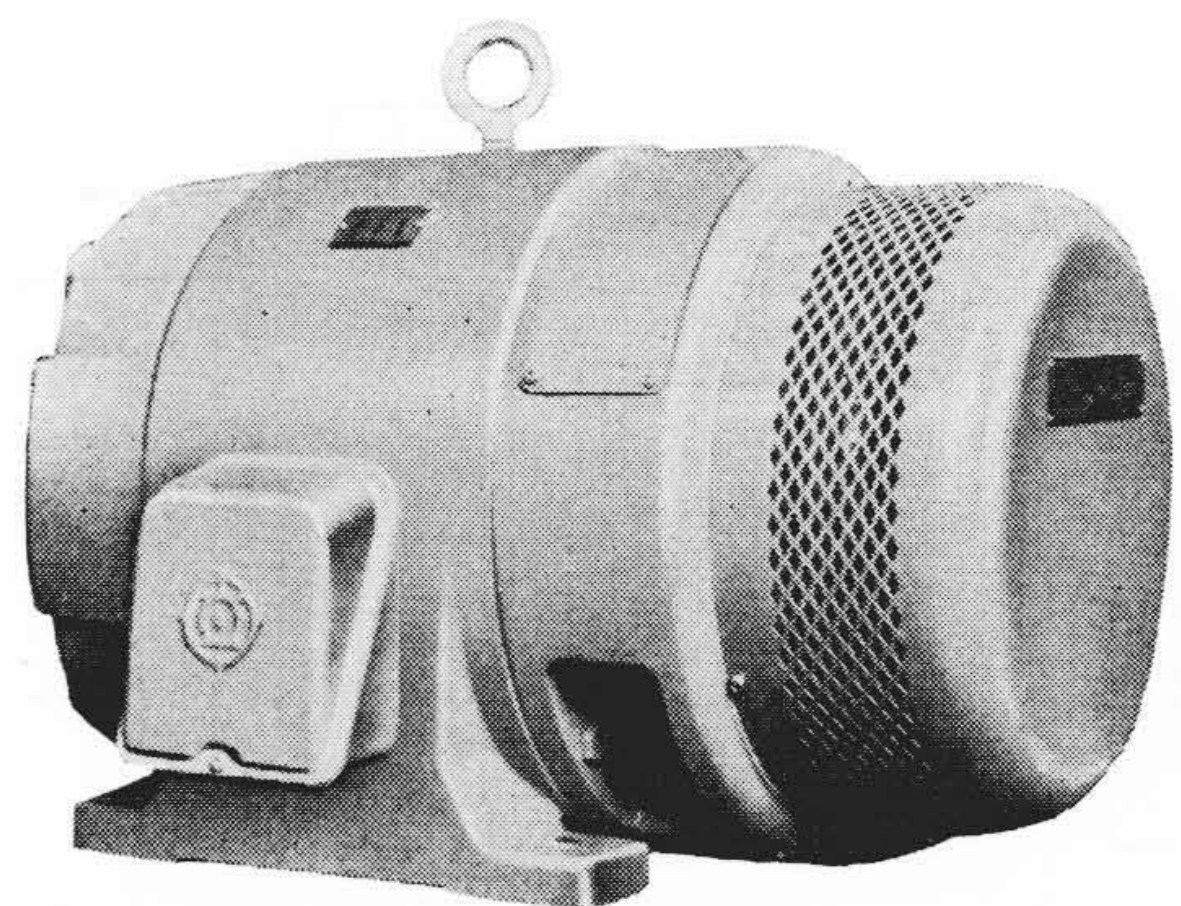
2.1 構 造

本ブレーキを電動機に取り付けた外観を第1図に、そのカバーをはずしたところを第2図に示す。このブレーキの構造は第3図に示すように非常に簡単であり、大別して固定部と回転部とから成っている。

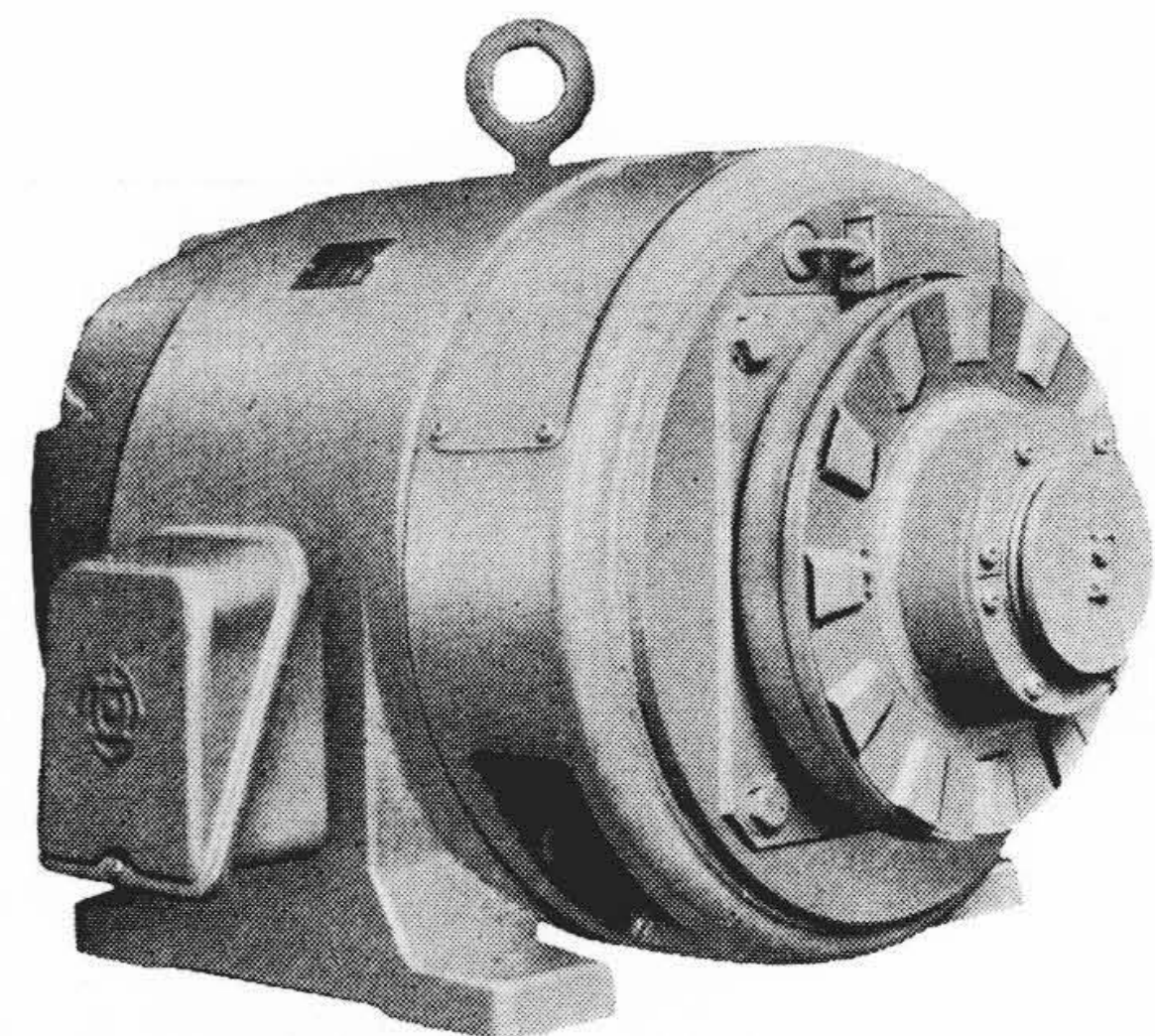
2.1.1 固 定 部

固定部は電磁石継鉄の中に成形したコイルを収納してモールドで固定し、制動板と摩擦する面にはブレーキライニングを埋め込み、接着した構造である。ブレーキライニングの表面は継鉄の接極面と同一面となっており、制動時には、継鉄とライニングの合成面が制動板と摩擦する。このように継鉄は電磁石の一部であると同時に摩擦部分ともなっていることを考慮に入れて、磁気的にも機械的にも十分吟味した材料を選定し

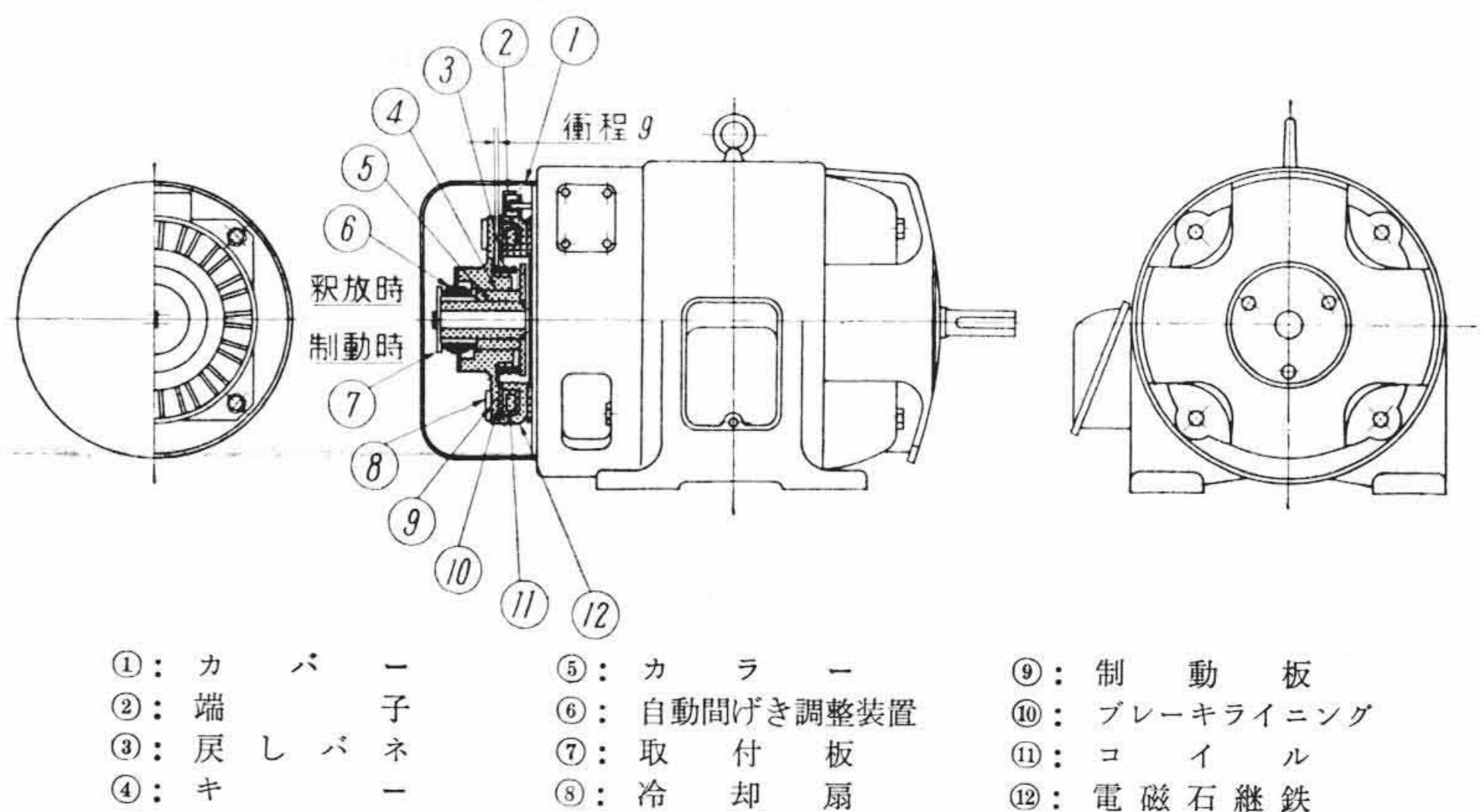
* 日立製作所 亀戸工場



第1図 直流逆作用形電磁ブレーキ付電動機外観（その1）
11kW 4P EFOV-KK 連続定格 MN-SD 付
（カバー付）（わく番 ND 3015）



第2図 直流逆作用形電磁ブレーキ付電動機外観（その2）
11kW 4P EFOV-KK 連続定格 MN-SD 付
（カバーなし）（わく番 ND 3015）



第3図 構 造 図

である。またコイル口出線および端子部分は特殊な構造とし、耐震耐熱などに十分な考慮を払い、ブレーキライニングとしては耐熱性、耐摩耗性の大きいものを使用し高ひん度の動作に耐えるようにしてある。

2.1.2 回 転 部

回転部は、固定部と摩擦して制動作用を行なう制動板、制動板に発生した制動力を回転軸に伝えると同時に、制動板にしゅう動面を提供するカラー、励磁を切ったときすみやかに制動板を固定部から引き離すための戻しバネ、および摩擦面間の距離を面の摩耗に関係なく常に一定に保っておくための自動間げき調整装置から成っている。

制動板は電磁石継鉄の一部であり、摩擦面でもあることから、材質的には固定部継鉄と同様の考慮が払われている。制動板のしゅう動はカラーで行なわれるが、キーを用いたシャフトスライド方式を採用しているので、組立調整は非常に簡単である。

2.2 動 作

2.2.1 制動および釈放

ブレーキに直流電圧を印加すれば、固定部継鉄は電磁石となり、制動板は吸引される。この吸引の応答速度はブレーキコイルの時定数と制御回路の条件などにより決まるが、特に問題とはならない。制動板が固定部に吸引されると、ブレーキライニングおよび継鉄の合成面と、制動板の間で摩擦が起こる。このときの制動力の大きさは接極時の磁引力と摩擦係数とにより求めることができる。この制動力と磁引力とはほぼ比例すると考えて良いから、印加電圧を変えれば、磁引力も変わり、制動力は一義的に決まる。この制動時、本ブレーキは直流操作であるので、交流ブレーキにみられるようななり現象は全くみられない。

電磁ブレーキの励磁をとけば、制動板は戻しバネの力によって元の位置に戻り、ブレーキは釈放される。このときの釈放死時間は制御回路によって非常に影響を受ける。

2.2.2 自動間げき調整装置（オートギャップ）

一般に電磁石の磁引力は空げきが小さいほど大きく、空げきが大きくなれば小さくなる傾向を示すが、本電磁ブレーキのように、平板形電磁石の場合には特にその傾向が著しい。このため摩擦面が摩耗し空げきが大きくなれば、起動電圧が大となるため制動がかからなくなる。自動間げき調整装置を取り付け、常に一定の小空げきを保てるようにすればこの起動電圧が大となるのを防ぎ、調整の手数が省けるとともに平板形の特長である接極時の大きな磁引力を利用できるので、消費電力は少なくすみ電磁石も小形にすることができる。しかもこの小空げきを常に一定に保て

るので、動作時のショックは従来のブレーキに比べて非常に小さい。本装置は第4図に示すようにツメと、ツメの厚さより摩擦面間の空げきの分だけ幅の広いみぞのある調整リングおよび調整リングを締め付ける二つのバネから成っている。

セットされた調整リングは固定部方向には進みやすく逆方向には戻りにくいようにしてある。摩擦面が摩耗すれば制動板に取り付けたツメに引張られて固定部方向に進み、その位置で落ちつく。ツメは調整リングのみぞの中で空げき分の動きしかできないので、摩擦面の空げきは常に一定に保たれる。

3. 磁引力および制動力

3.1 磁 引 力

直流電磁石においては、起磁力が一定で空げきの大きさによって磁束が増加し、飽和してくるので飽和範囲における鉄心の磁気抵抗は空げきのそれに比べて無視できなくなる。特に本ブレーキにみられるように部分的に継鉄の断面積が異なる場合にはこれを考慮する必要がある。以下本電磁ブレーキの磁引力について述べる。

一般に電磁石の磁引力は次式で示される。

$$F = \frac{1}{2\mu} Bg^2 S \dots\dots\dots (1)$$

ここに F : 電磁石の磁引力 (N)

μ : 空気の透磁率 (h/m)

Bg : 有効空げきの磁束密度 (Wb/m²)

S : 有効断面積 (m²)

しかるに電磁石は特殊な形をしており(第3図参照)電磁石継鉄の外側と内側とでは条件が異なるので、磁引力も均等とはならない。この場合には次のように磁引力をそれぞれの接極面に分けて考える。

$$F = \frac{1}{2\mu} (Bg_1^2 S_1 + Bg_2^2 S_2) \dots\dots\dots (2)$$

ここに Bg_1 : 外側継鉄の有効空げきの磁束密度 (Wb/m²)

Bg_2 : 内側継鉄の有効空げきの磁束密度 (Wb/m²)

S_1 : 外側継鉄の有効断面積 (m²)

S_2 : 内側継鉄の有効断面積 (m²)

磁束密度の低い範囲では継鉄部の磁気抵抗は空げき部のそれに比べて無視できるので、磁束 ϕ は次のようにおかれ、磁引力も簡単に求められる。

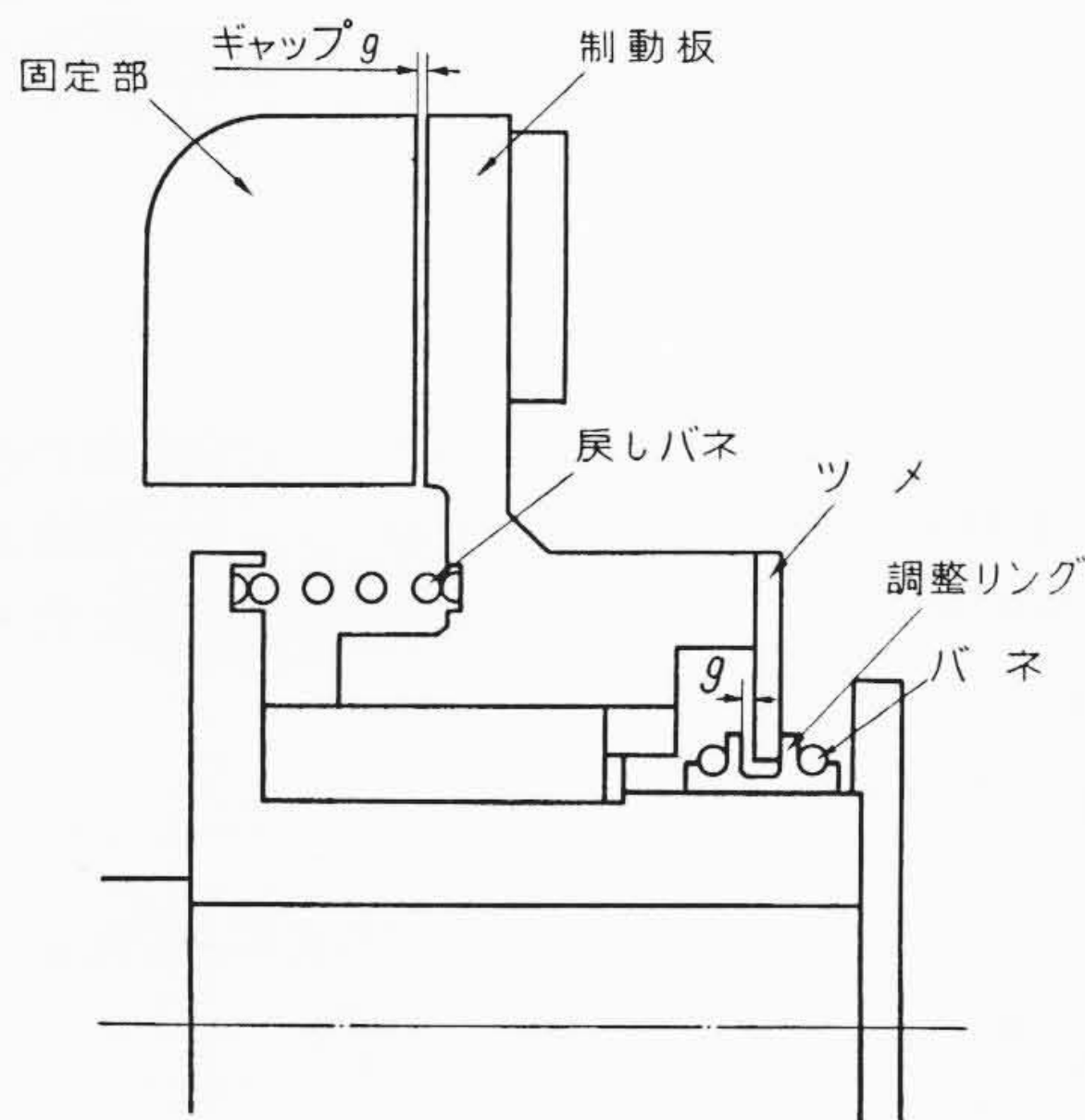
$$\phi = \frac{NI}{\frac{1}{P_I} + \frac{1}{P_{II}} + \frac{1}{P_{III}}} \dots\dots\dots (3)$$

$$Bg_1 = \frac{\phi}{S_1} \quad Bg_2 = \frac{\phi}{S_2} \dots\dots\dots (4)$$

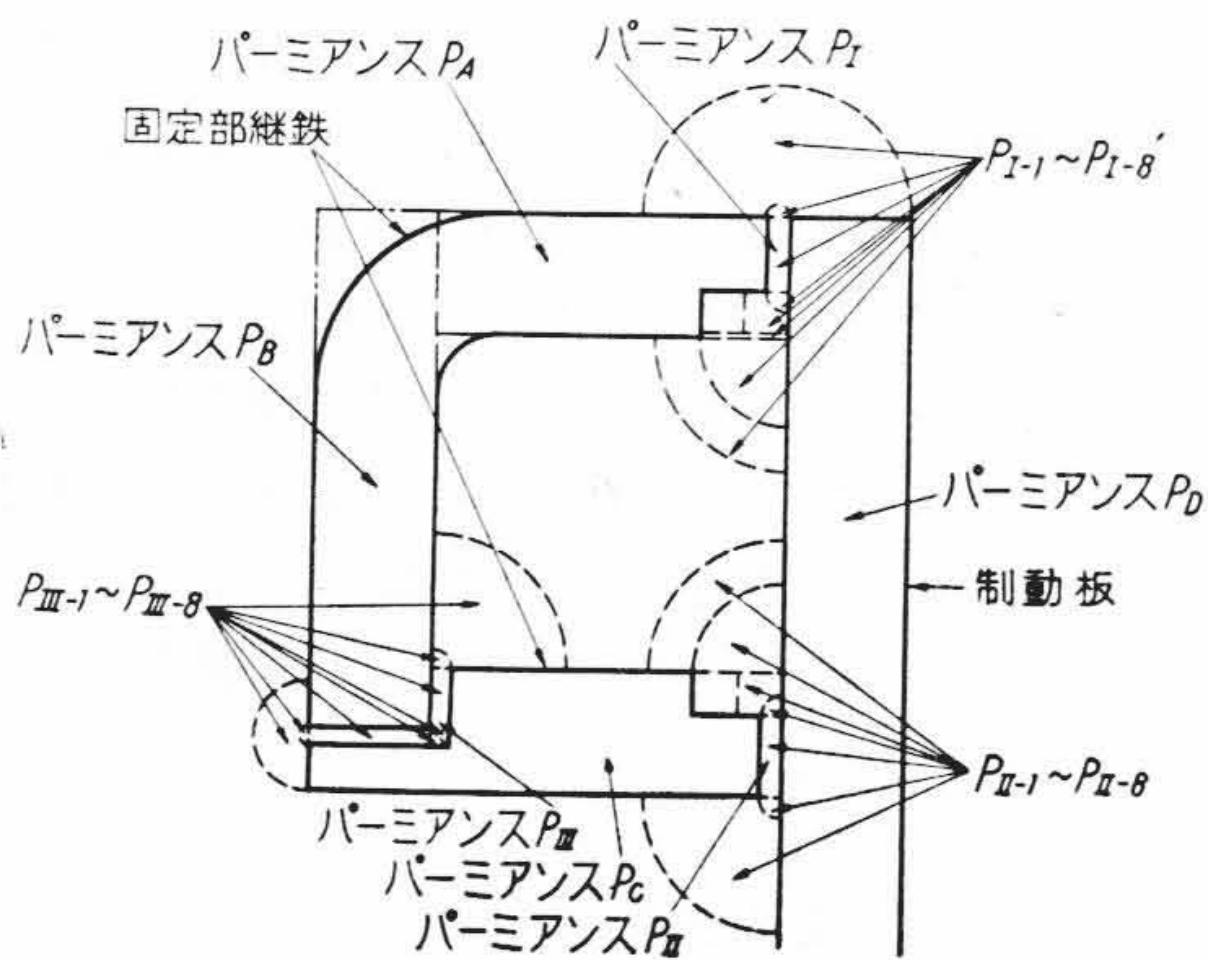
$$F = \frac{\phi^2}{2\mu} \left(\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} \right) \dots\dots\dots (5)$$

空げきのパーミアンス P_I, P_{II}, P_{III} (h/m) は第5図のように磁束の漏えい状態を仮定することによって計算できる。各部のパーミアンス計算方法についてはこれまでに発表されているので省略する⁽¹⁾。また P_I, P_{II} についてみると第6図のように摩耗前と後で空げきの磁路に変化が生ずるが、これは全体からみれば無視できる程度のものであり、磁引力にはほとんど影響がない。

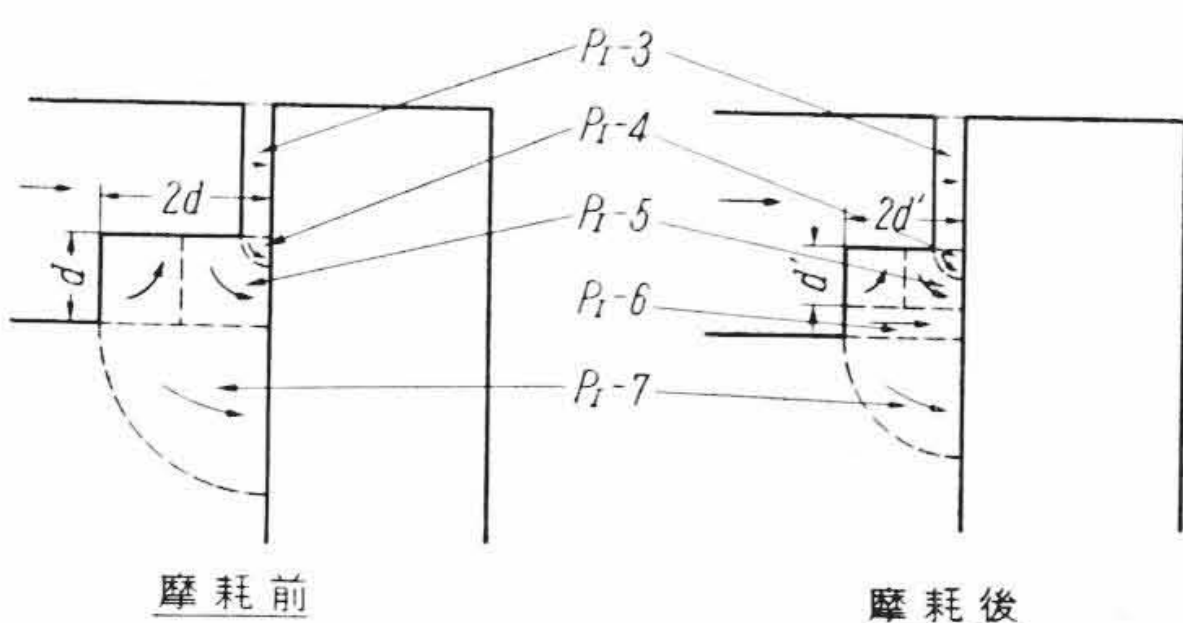
電磁石は継鉄の外側と内側で接極断面積が異なっているので磁束密度が高くなってくると、磁束が継鉄の外側で未飽和にもかかわらず、内側では飽和状態に移行しはじめる。この場合には空げきのパーミアンスに比べて内側継鉄のパーミアンスは無視できなくなるので、磁束は次のようになる。



第4図 自動間げき調整装置説明図



第 5 図 電磁石のパーミアンスの分割



第 6 図 パーミアンス分割の変化

$$\phi = \frac{NI}{\frac{1}{P_c} + \frac{1}{P_I} + \frac{1}{P_{II}} + \frac{1}{P_{III}}} \quad (6)$$

次に磁束が飽和してしまうと磁束は継鉄の材質によって決まる飽和磁束 ϕ_s (Wb) となるので磁引力は次式となる。

$$Bg_1 = \frac{\phi_s}{S_1} \quad Bg_2 = \frac{\phi_s}{S_2} \quad (7)$$

$$F = \frac{\phi_s^2}{2\mu} \left(\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} \right) \quad (8)$$

3.2 制 動 力

磁引力から制動力への換算は次式で求められる。

$$Tb = \mu r (F - F') \quad (9)$$

ここに Tb : ブレーキの制動力 (kg-m)

μ : 摩 擦 係 数

r : 摩擦面の平均半径 (m)

F : 磁 引 力 (kg)

F' : 戻しバネの荷重 (kg)

本ブレーキの摩擦面は継鉄とブレーキライニングの合成したものであるから磁引力を継鉄と、ブレーキライニングが単位面積あたり、平均に受けるものと仮定すれば、見掛上の μ は次式で示される。

$$\mu r F = \mu_1 r_1 \frac{S_1}{S_1 + S_2} F + \mu_2 r_2 \frac{S_2}{S_1 + S_2} F \quad (10)$$

$$\mu = \frac{\mu_1 r_1 S_1 + \mu_2 r_2 S_2}{r (S_1 + S_2)} \quad (11)$$

構造上

$$r = r_1 = r_2 \quad (12)$$

としてあるので、

$$\mu = \frac{\mu_1 S_1 + \mu_2 S_2}{S_1 + S_2} \quad (13)$$

第 1 表 制 動 特 性

励磁電流 (A)	ブレーキ 死 時 間 (s)	電 動 機		制 動 力	
		制動開始までの 死時間(s)	制動時間(s)	kg-m	%
0.064	0.12	0.16	2.06	3.60	49
0.097	0.07	0.11	1.13	6.67	90
0.145	0.05	0.11	0.77	10.20	138
0.197	0.04	0.10	0.60	13.50	182
*0.249	0.04	0.09	0.52	15.50	210

* このときの静止制動力は約 21 kg-m

電 動 機 EFOU-KK 11 kW 4 P 200 V 50 c/s

ブ レ ー キ MN-SD (おく番 ND 3015)

負 荷 GD² 電動機 GD² の約 2.8 倍

ここに μ_1 : 制動板対鉄の摩擦係数

μ_2 : 制動板対ライニングの摩擦係数

S_1 : 制動板対鉄のしゅう動面積 (m²)

S_2 : 制動板対ライニングのしゅう動面積 (m²)

r_1 : 制動板対鉄のしゅう動面の平均半径 (m)

r_2 : 制動板対ライニングのしゅう動面の平均半径 (m)

しゅう動時の磁引力は空けき 0 における磁引力のはずであるが実際には面がしゅう動していること、面の加工上の不整などの原因で空けき 0 ということは考えられない。このことからしゅう動時の磁引力の大きさはそのときの空けきが解ってはいじめて決定される性質のものである。静止時においてはしゅう動時に比べて実際の空けきは小さくなり、また摩擦係数についても若干の増加が考えられる。静止時の制動力を第 1 表に併記したがこれはこのフレームでは動制動力の約 135% となっている。

制動力を出すための摩擦面の面圧 P kg/cm² と、しゅう動速度 v m/s での積 $Pv \frac{\text{kg-m}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$ の値はブレーキの寿命や摩擦面の焼付に重大な影響をもたらす。この点から Pv 値の設定には十分留意してある。

3.3 温 度 上 昇

本電磁ブレーキにおいては、固定部分の温度上昇が問題となるが、次のことを仮定して計算を行なった。すなわち制動時には回転部も含めた全体としての熱容量および放熱係数を考え、釈放時には固定部だけについて考えた。これは今回の試験のように起動停止を高ひん度で、連続に行なった場合を考えたもので、低ひん度の場合は回転中に制動板が冷却するので、この計算で行なったものよりさらに温度上昇は低くなるものとする。

3.3.1 制動時 (励磁時) における温度

温度上昇の原因はコイルの消費電力と、摩擦面の摩擦熱である。そのエネルギーがブレーキの温度上昇と放熱の和になるのであるが、摩擦熱は制動時に一時的に発生するものであり、消費電力による熱の発生は時間に関係するから、次式が成り立つ。

$$Wdt = Cd\theta + \lambda S\theta dt \quad (14)$$

これを解くと

$$\theta = \frac{W}{\lambda S} + Ae^{-\frac{\lambda S}{C}t} \quad (15)$$

となる。 $t=0$ のとき、系の有するエネルギーは回転体の運動のエネルギー $4.9J\omega^2$ (joule) である。これはブレーキの温度上昇に換算すると $4.9J\omega^2/C$ (°C) となる。この条件を (15) 式に代入し A を求めると、

$$A = \frac{4.9J\omega^2}{C} - \frac{W}{\lambda S} \quad (16)$$

となり、これを (15) 式に代入すると、(17) 式がえられる。

$$\theta = \frac{W}{\lambda S} + \left(\frac{4.9J\omega^2}{C} - \frac{W}{\lambda S} \right) e^{-\frac{\lambda S}{C}t} \quad (17)$$

これは 1 回の制動時の温度上昇である。

ここに W : コイル消費電力 (W)
 C : ブレーキ全体の熱容量 (joul/°C)
 C' : ブレーキ固定部の熱容量 (joul/°C)
 λ : ブレーキ全体の熱放散係数 (W/m²・°C)
 S : ブレーキ全体の有効表面積 (m²)
 λ' : ブレーキ固定部の熱放散係数 (W/m²・°C)
 S' : ブレーキ固定部の有効表面積 (m²)
 J : 回転体の慣性モーメント (kg-m-s²)
 ω : 回転体の角速度 (s⁻¹)

3.3.2 回転時(無励磁時)における温度

固定部と回転部は空けきを隔てて離れているから、熱的に絶縁されていると考えると、固定部において次式が成り立つ。

$$C'd\theta + \lambda'S'\theta dt = 0 \quad \dots\dots\dots (18)$$

これを解くと、

$$\theta = Ae^{-\frac{\lambda'S'}{C'}t} \quad \dots\dots\dots (19)$$

となる。 $t=0$ のときの温度上昇を θ' とすると

$$\theta = \theta'e^{-\frac{\lambda'S'}{C'}t} \quad \dots\dots\dots (20)$$

となる。

3.3.3 最終温度上昇

制動、釈放の繰返しを行なうとすると、各サイクル後の温度上昇は、次のようになる。

1 サイクル後において

$$\theta_1 = \left\{ \frac{4.9J\omega^2}{C} e^{-\frac{\lambda S}{C}t_1} + \frac{W}{\lambda S} (1 - e^{-\frac{\lambda S}{C}t_1}) \right\} e^{-\frac{\lambda'S'}{C'}t} \quad \dots\dots\dots (21)$$

n サイクル後において

$$\theta_n = \left\{ \frac{4.9J\omega^2}{C} e^{-\frac{\lambda S}{C}t_1} + \frac{W}{\lambda S} (1 - e^{-\frac{\lambda S}{C}t_1}) \right\} \Sigma e^{-n\frac{\lambda'S'}{C'}t_2} \quad \dots\dots\dots (22)$$

ゆえに最終の温度上昇 θ_f は

$$\theta_f = \left\{ \frac{4.9J\omega^2}{C} e^{-\frac{\lambda S}{C}t_1} + \frac{W}{\lambda S} (1 - e^{-\frac{\lambda S}{C}t_1}) \right\} \frac{1}{1 - e^{-\frac{\lambda'S'}{C'}t_2}} \quad \dots\dots\dots (23)$$

となる。

ここに t_1 : 励磁時間 (s)
 t_2 : 釈放時間 (s)
 n : 起動(または制動)回数
 θ_f : 最終温度上昇 (°C)

4. 特性試験および結果

4.1 制御回路

本ブレーキの操作の方法を大別すると、電源の投入、遮断を直流側で行なう場合と交流側で行なう場合とがある。両者を比較した場合にそれぞれ得失はあるが、本ブレーキの操作は前者の方法で行なったので、その接続図の大略を第7図に示す。

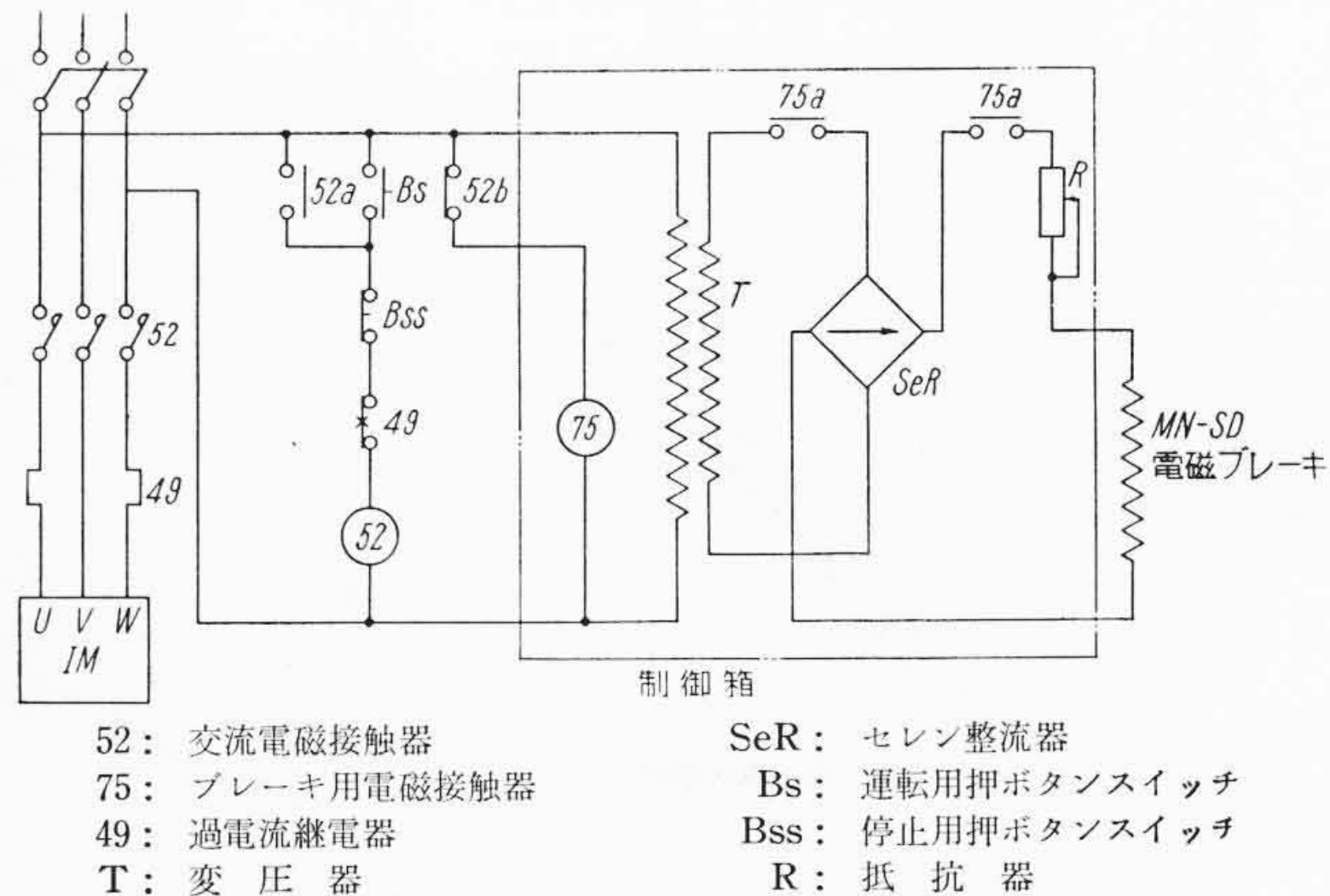
4.2 磁引力特性

電磁石の磁引力の測定は各空けきについて行ない、第8図の結果を得たが、これは3.1項の計算結果とほぼ一致している。

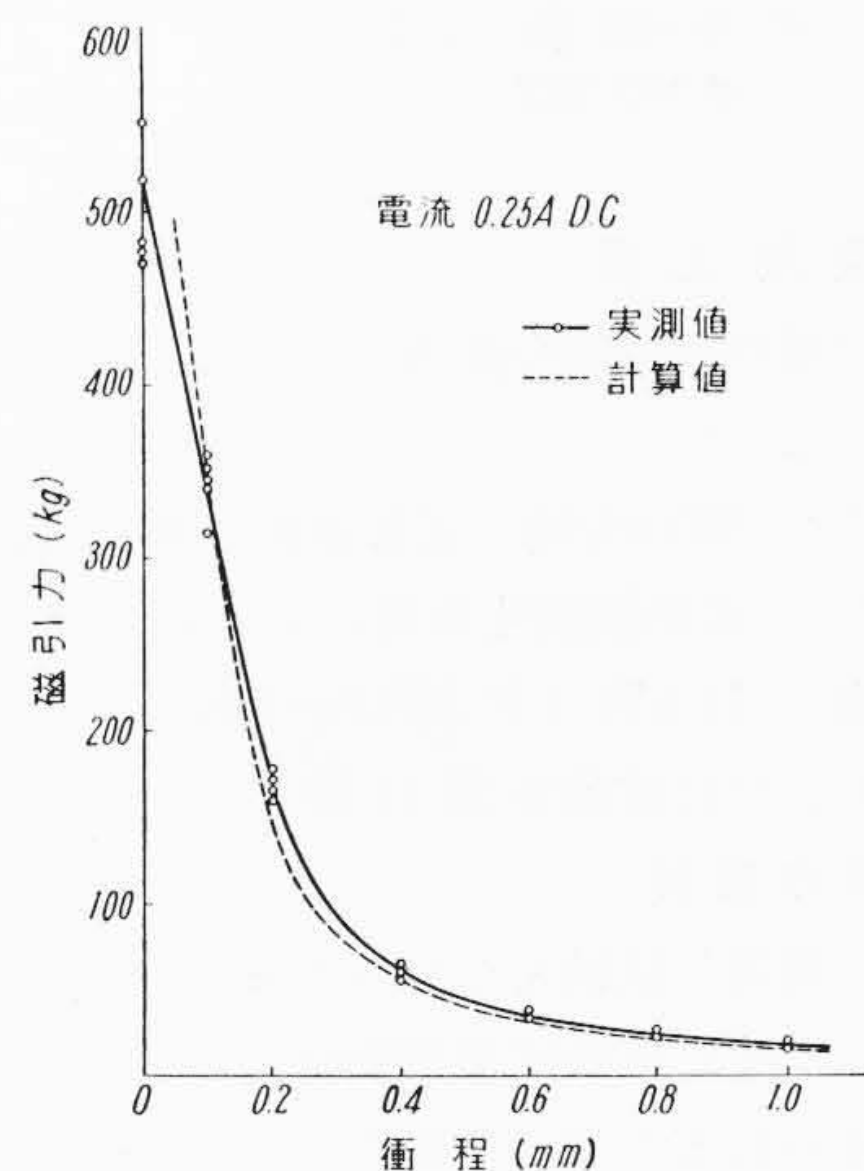
4.3 制動特性

本ブレーキを電動機にオーバハングし、慣性負荷を直結して制動をかけたときのオシロ写真を第9図に示す。これをまとめると第1表のようになる。

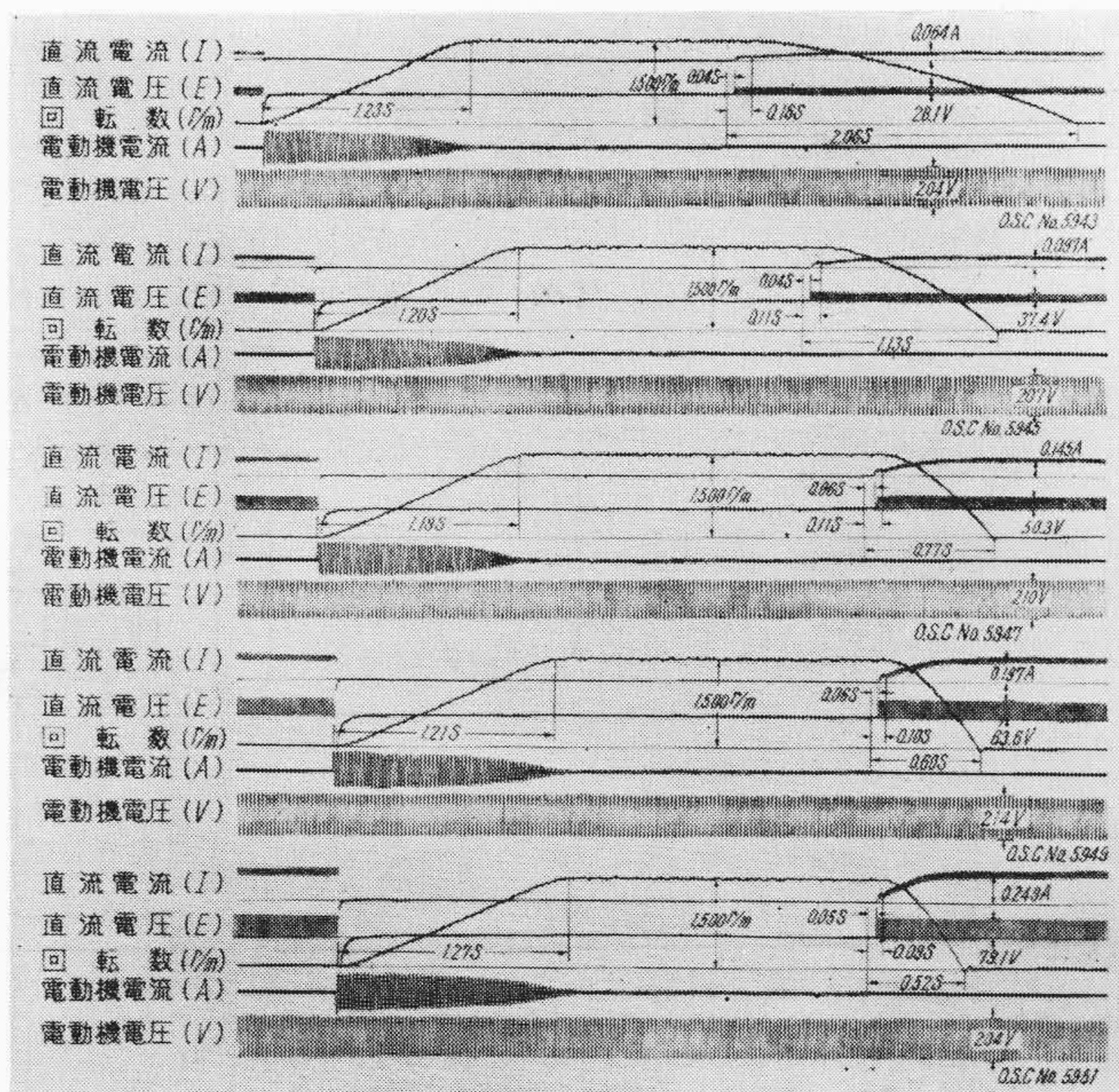
なお励磁電圧(電流)による制動力の変化は多少のばらつきはあるが、まとめると第10図のようになる。



第7図 制 御 回 路



第8図 電 磁 石 の 磁 引 力
(わく番 ND 3015)



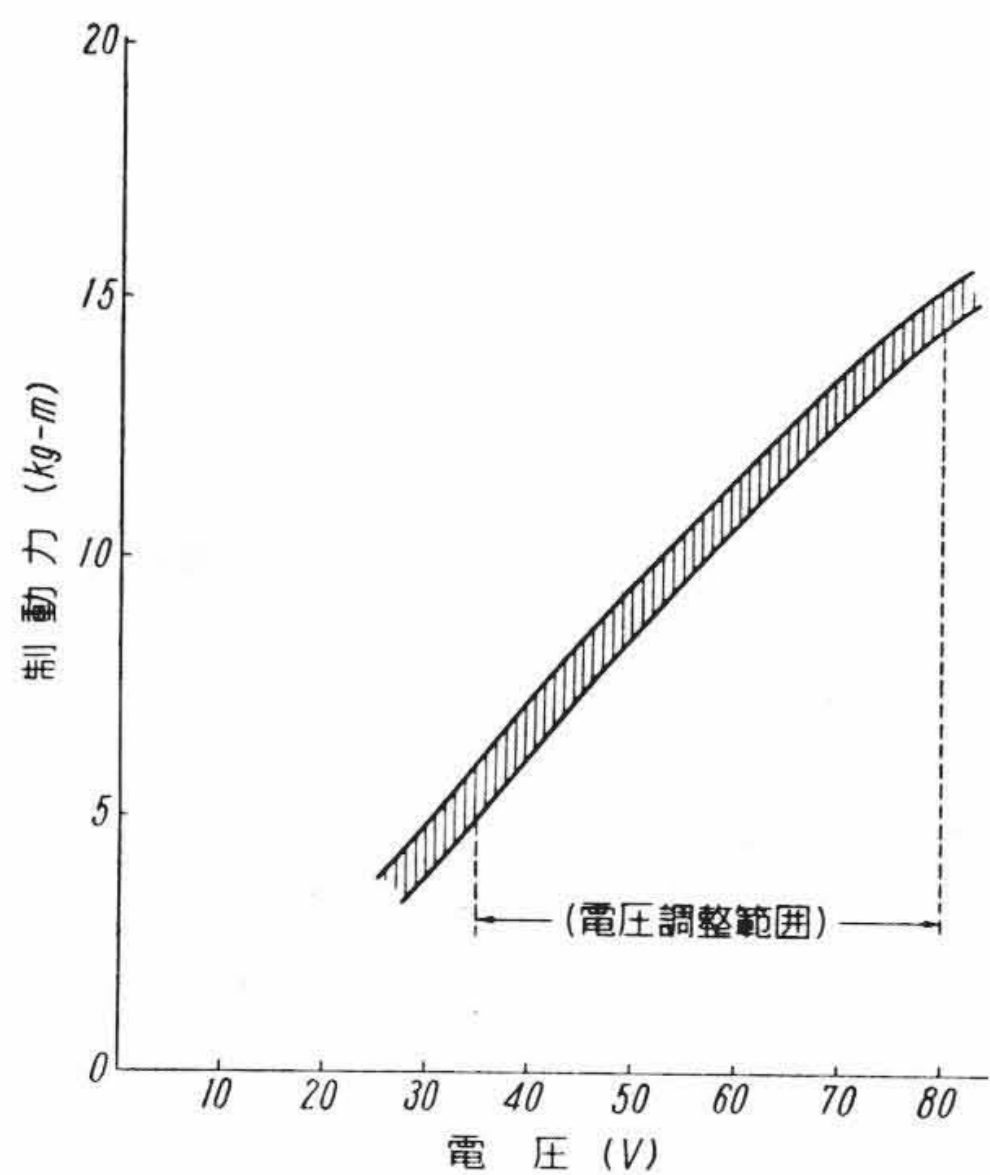
第9図 起 動 停 止 特 性

電 動 機: 11kW 4P EFOU-KK
 プ レ ー キ: MN-SD (わく番 ND 3015)
 負 荷 GD²: 電動機 GD²の2倍強を直結(約 1.1kg-cm²)

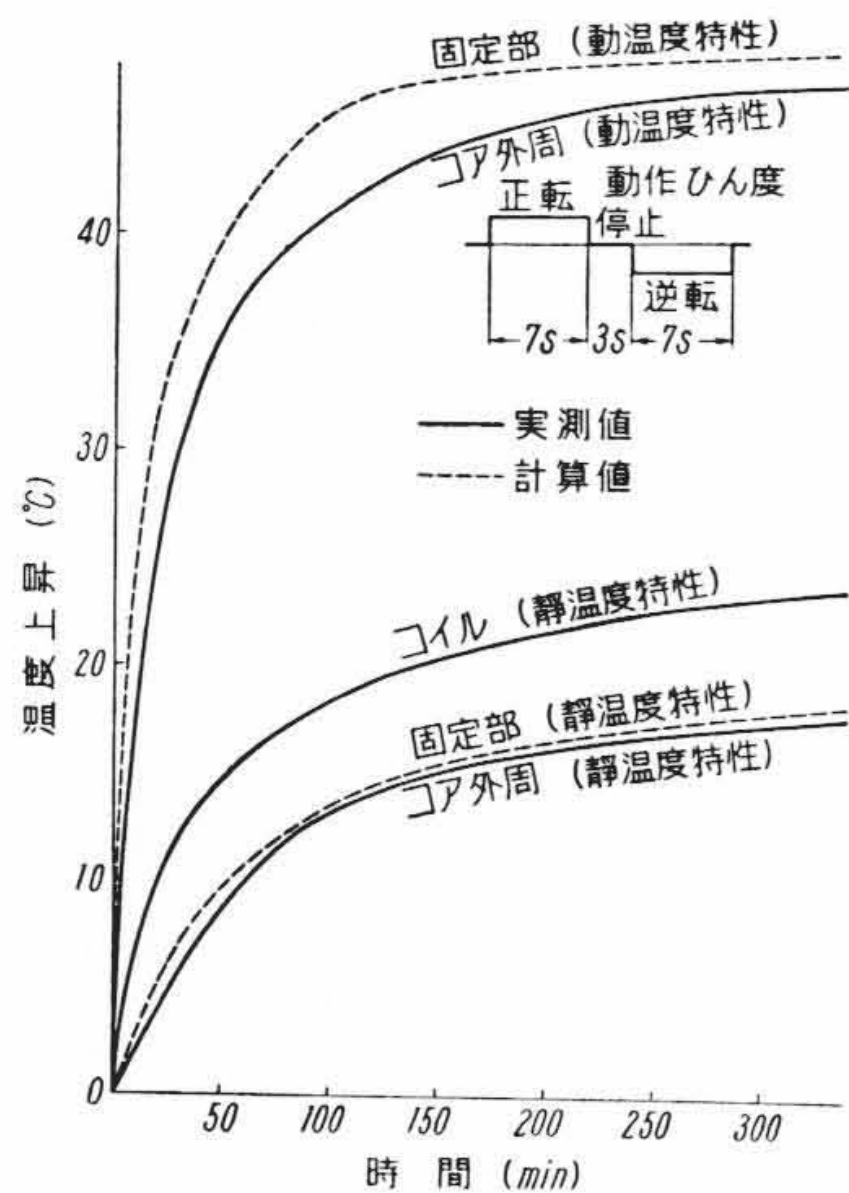
4.4 温度上昇特性

4.4.1 静 温 度 上 昇

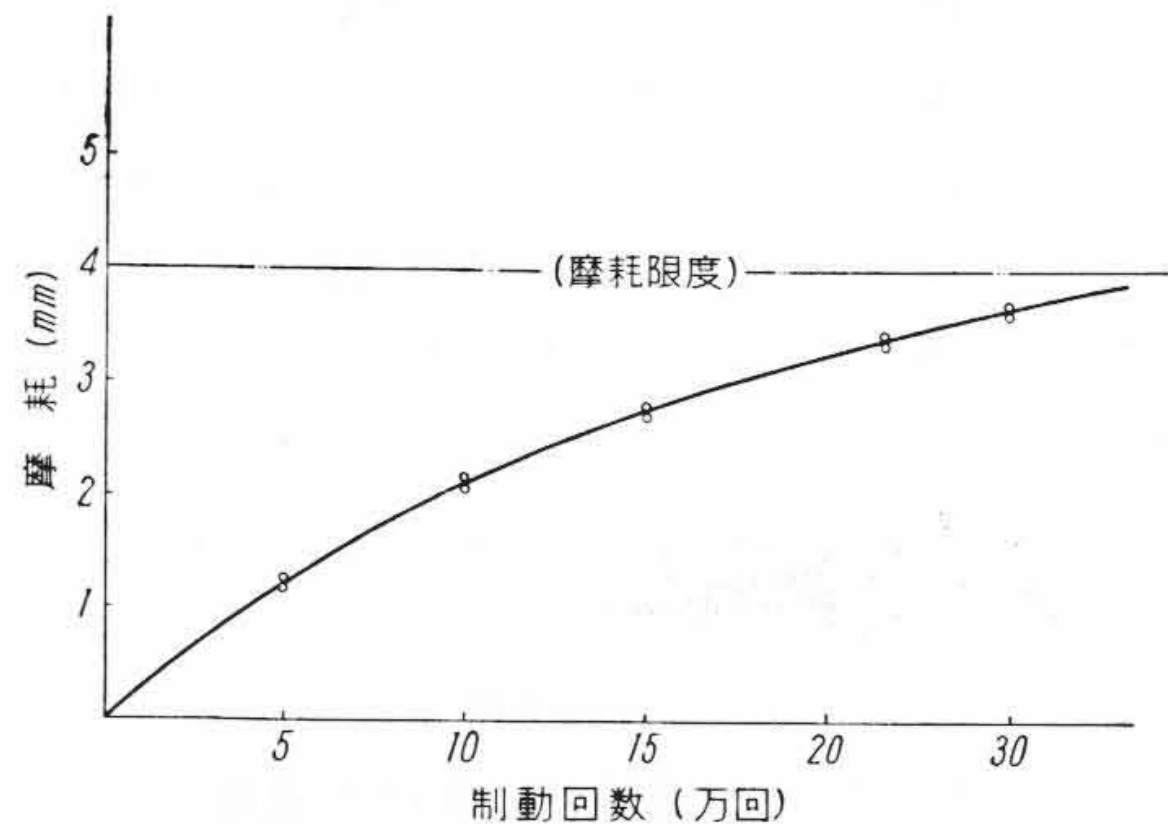
最大定格電圧直流 80 ボルトを通電したときの温度上昇を第11図に示す。ここに3.5項の計算中、摩擦による熱の発生を除いたものとして計算した結果も併せて示した。



第 10 図 電 圧-制 動 力 特 性
(わく番 ND 3015)



第 11 図 温 度 上 昇
(わく番 ND 3015)



第 12 図 摩 擦 面 の 摩 耗
(わく番 ND 3015)

4.4.2 動 温 度 上 昇

試験はこの種の電動機の使用される最も過酷な状態を考へて、次の条件で行なつた。

動作条件： 360 回/時 正転逆転（第 10 図参照）

負 荷： 電動機慣性負荷の 2 倍強を直結

使用電動機： 11 kW 4 P EFOU-KK

試験結果および計算値を第 11 図に併せて示した。

4.5 摩 擦 面 の 摩 耗

前項の条件で繰返し試験を行なつた場合の固定部摩擦面の摩耗状態を第 12 図に示す。摩耗は被制動体の回転エネルギーによつて決まるものと考えられるので、負荷の $J\omega^2$ (kg-m) によりほとんどブレーキの寿命は決められる。

本ブレーキを前項の条件で運転を行なつた場合には、約 30 万回となつた。

たが、本ブレーキの特長のおもなる点をあげると次のようになる。

- (1) 制動力が大きく、その調整を容易かつ広範囲に遠方操作で行なうことができる。
- (2) 独特な自動間引き調整装置により、保守、調整がほとんど不要である。
- (3) 構造簡単で取り扱いが非常に便利である。
- (4) 従来のブレーキに比べて小形、軽量である。
- (5) 消費電力が非常に少ない。
- (6) 直流ブレーキであるからうなりなどの現象がない。
- (7) 衝程が小さく、常に一定に保たれているので、動作時のショックが小さい。

なお付表に示すように、わく番 ND 2205 のブレーキもすでに完成し、電動機容量 11 kW 4 P までのシリーズが完成している。今後このブレーキは各種の用途に広く使用されるものと期待している。

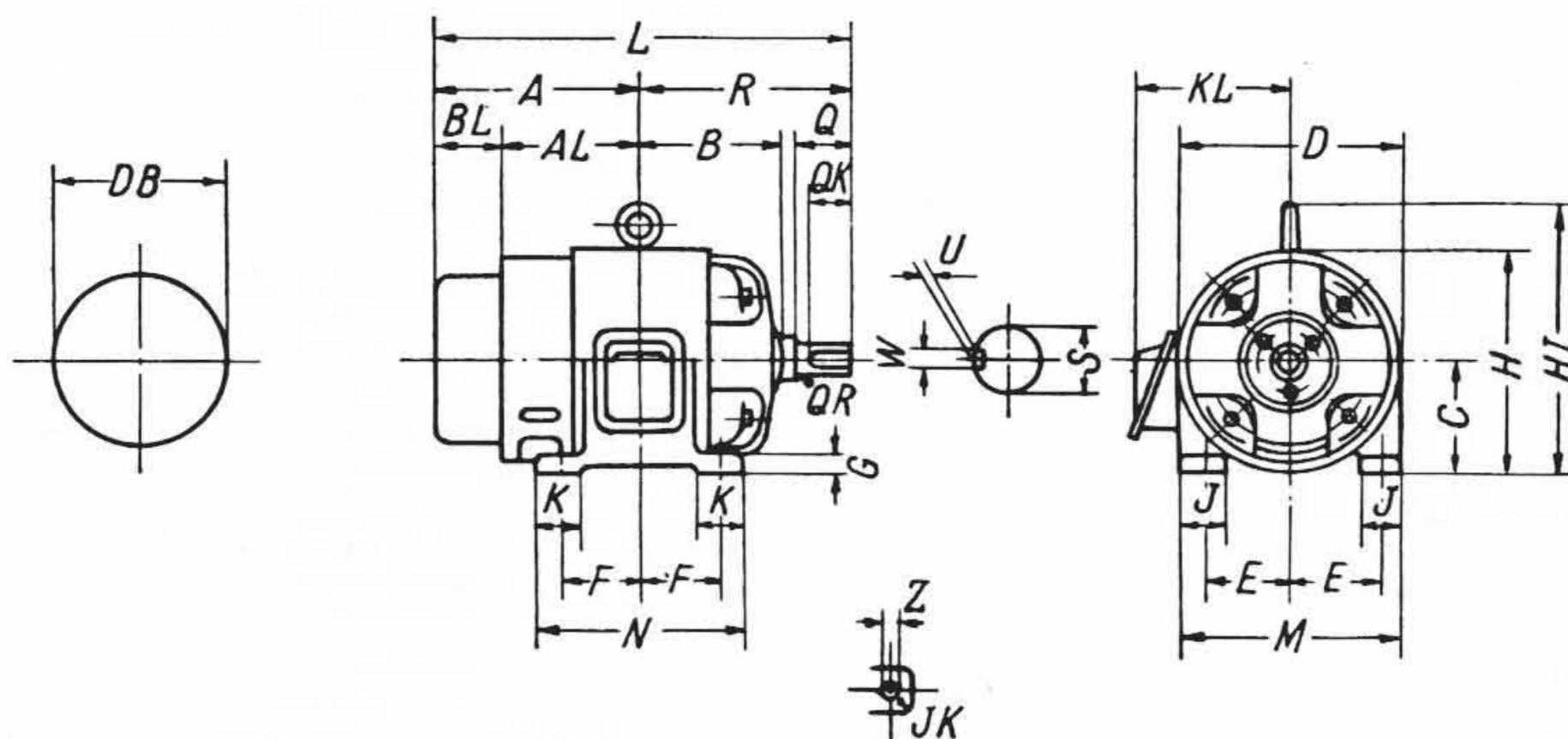
5. 結 言

以上直流逆作用形電磁ブレーキ（わく番 ND 3015）について述べ

参 考 文 献

- (1) H. C. Roters: Electromagnetic Device (1955)

付表 直流逆作用形電磁ブレーキ付開放形三相誘導電動機寸法表（連続定格）



わく番	出力						寸法 (mm)																				電磁ブレーキ											
	4 極		6 極		8 極		電 動 機														軸 端																	
	kW	HP	kW	HP	kW	HP	L	R	A	B	D	KL	K	J	HI	H	C	F	E	N	M	JK	G	Z	DB	AL	BL	S	W	U	Q	QR	QK	わく番	形式	電圧 (V)	制動力 (kg-m)	消費電力 (W)
ZEFO-1111	0.75	1	0.4	½	—	—	385	165	220	119	225	165	40	40	—	227.5	115 ⁰ _{0.5}	55	95	150	230	8	18	11	220	105	115	22	h 6	74	40	1	32	ND-2205	MN-S D	20~80	1~5	1.5~20
ZEFO-1114	1.5	2	0.75	1	0.4	½	425	190	235	134	225	165	50	40	—	227.5	115 ⁰ _{0.5}	70	95	180	230	8	18	11	220	120	115	22	h 6	74	50	1	42	ND-2205	MN-S D	20~80	1~5	1.5~20
ZEFO-1314	2.2	3	1.5	2	0.75	1	465	220	245	150	265	185	55	50	—	268	135 ⁰ _{0.5}	70	110	190	270	10	20	11	220	130	115	28	h 6	74	60	0.5	52	ND-2205	MN-S D	20~80	1~5	1.5~20
ZEFO-1318	3.7	5	2.2	3	1.5	2	505	240	265	170	265	185	55	50	—	268	135 ⁰ _{0.5}	90	110	230	270	12	20	11	220	150	115	28	h 6	74	60	0.5	52	ND-2205	MN-S D	20~80	1~5	1.5~20
ZEFO-1621	5.5	7.5	3.7	5	2.2	3	585	295	290	200	310	225	65	60	370	315	160 ⁰ _{0.5}	105	125	270	310	12	22	15	300	165	125	35	h 6	104	5.80	1.5	73	ND-3015	MN-S D	35~80	5~15	4~20
ZEFO-1625	7.5	10	5.5	7.5	3.7	5	625	315	310	220	310	225	70	60	370	315	160 ⁰ _{0.5}	125	125	310	310	12	22	15	300	185	125	35	h 6	104	5.80	1.5	73	ND-3015	MN-S D	35~80	5~15	4~20
ZEFO-1824	11	15	7.5	10	5.5	7.5	655	330	325	225	350	245	70	70	424	355	180 ⁰ _{0.5}	120	140	300	350	15	25	15	300	200	125	42	h 6	124	5.90	2.5	74	ND-3015	MN-S D	35~80	5~15	4~20