

# クラッチモータルの性能について

## Clutch Motor

上 村 民 夫\* 増 田 英 昌\*  
 Tamio Uemura Hidemasa Masuda

### 内 容 梗 概

工業用マシンに使用されるクラッチモータルのクラッチ特性を中心に解析し、特に高ひん度の使用条件を満足する諸機能について検討し、その要点を明らかにした。引き続きこの基礎に立って設計された400W新形クラッチモータルについて紹介した。

### 1. 緒 言

近年の縫製工業の急速な発達と合理化に伴い、縫製作業の能率向上が重要視されるようになった。このため縫製工業に使用される工業用マシンは高速、高性能化の傾向にあり回転数が5,000 rpmに達するものも出現するようになった。工業用マシンの起動、停止のひん度は縫製物の種類によってさまざまであるが、マシンの高速化によりそのひん度はますます高まりつつある。最近の調査によれば3秒間に1度、1日に約1万回の起動、停止は普通と考えられ、多い場合には日に2万回にも達する。クラッチモータルはこうした高ひん度の使用に耐えるよう構造的に丈夫でなければならないとともに、作業能率の向上に必要なすぐれたクラッチ特性を要求される。本論文では主として後者の問題を解析し、クラッチモータルとしての主要点を明らかにしたものである。

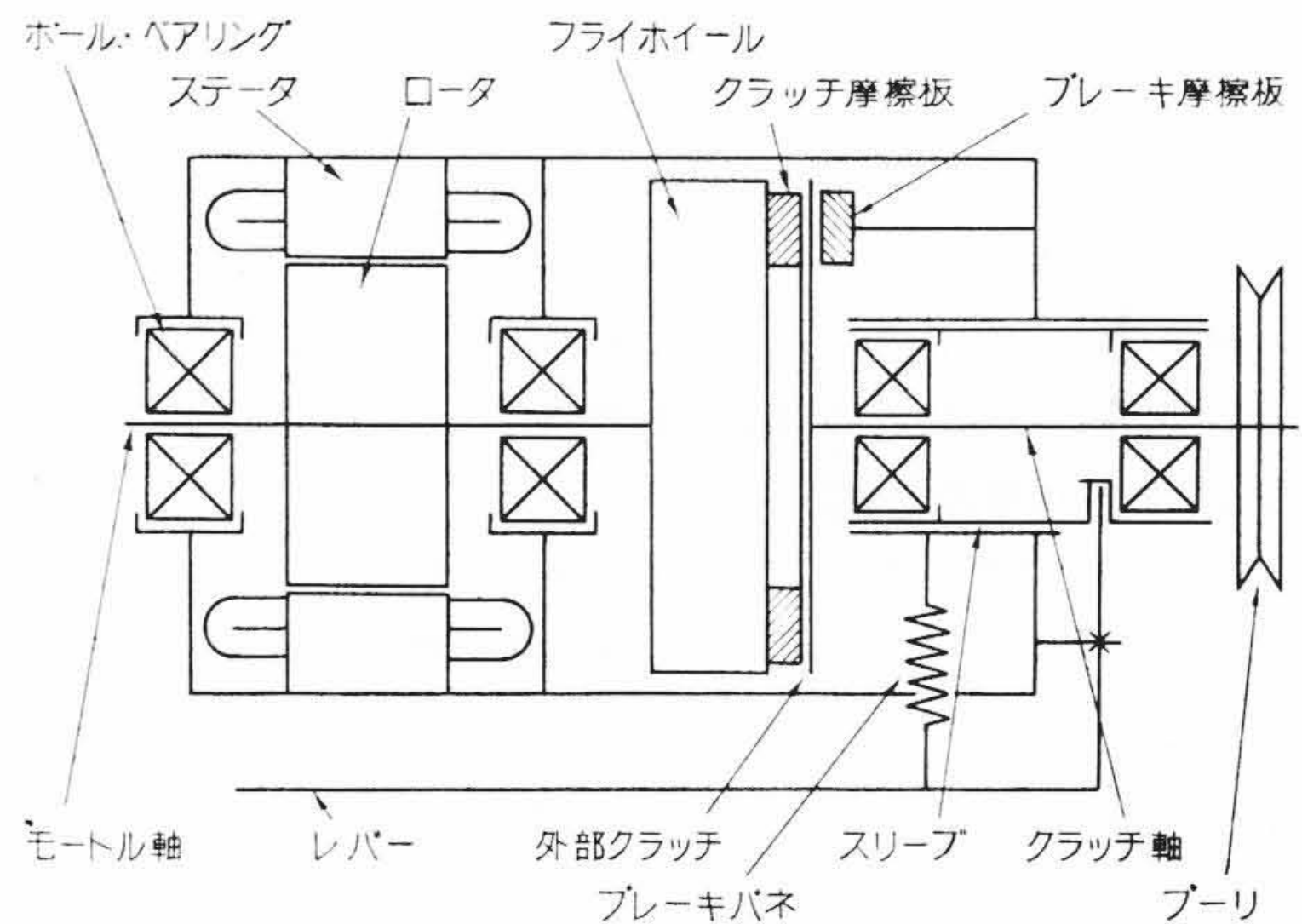
### 2. クラッチ特性の解析と設計例

#### 2.1 クラッチ特性の解析

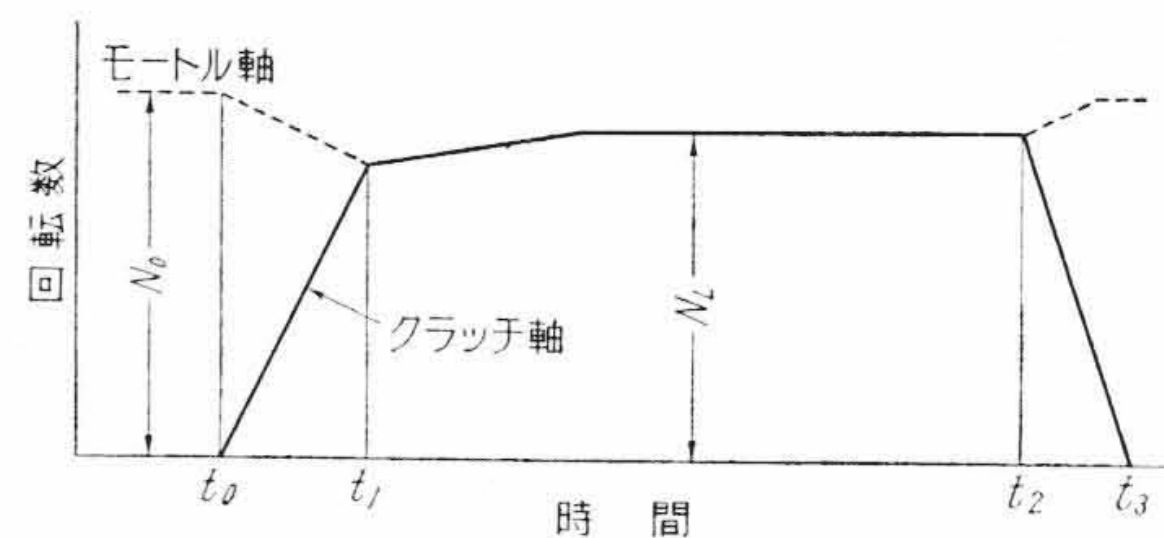
現在生産されているクラッチモータルの原理図を第1図に示す。図のようにモータル軸とクラッチ軸とは別個になっており、これらを一直線上に配置してモータル軸のクラッチ側端部に固定されたフライホイールにクラッチ摩擦板が取り付けられている。このクラッチ摩擦板とクラッチ軸のモータル側端部に固定された外部クラッチとが対抗して、単板式円板クラッチを形成している。外部クラッチのほかの面には約1/4円のブレーキ摩擦板があり、円板ブレーキとなっている。クラッチ軸を支持している2個のボールベアリングは軸方向にしゅう動できるスリーブ内に納められており、外部からレバーによってスリーブを操作できるようになっている。クラッチ軸の外端部にはVプーリが取り付けられてあり、負荷のプーリとVベルトで連結されている。クラッチモータルの動作を説明すれば下記のとおりである。

モータルはクラッチのはずれた無負荷の状態では起動しておく。マシンを駆動するときにはレバー端を足踏の力で引く。すなわち第1図においてレバーを下方に引けば、外部クラッチは左側に移動してクラッチ摩擦板に接触し、クラッチ軸したがってマシンは急速に起動して全速に達する。次にレバー端を釈放すれば、ブレーキバネの力で外部クラッチは右側に移動してブレーキ摩擦板に接触し、マシンは急停止する。この起動から停止するまでのモータル軸、およびクラッチ軸の速度変化の様子を定性的に考察すれば第2図のようになるであろう。すなわちモータル軸は当初無負荷回転数  $N_0$  で回転しており、外部クラッチとクラッチ摩擦板とが接触しはじめた瞬間  $t_0$  から過大なトルクを伝達するために、しだいに回転数が低下してくる。一方クラッチ軸は時間  $t_0$  の瞬間から摩擦トルクにより急速に速度上昇し、モータルおよびクラッチの両軸は時間  $t_1$  で同じ回転数

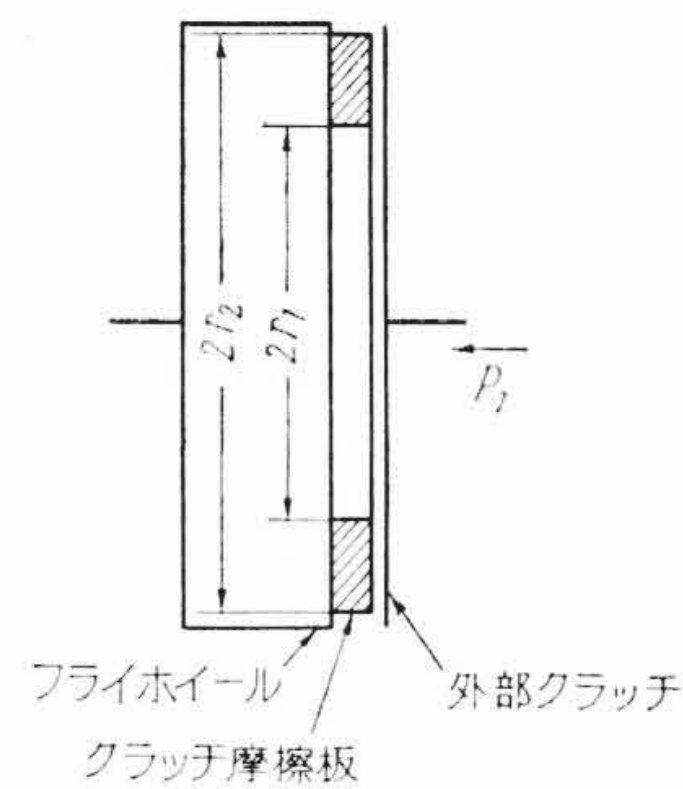
\* 日立製作所多賀工場



第1図 クラッチ、モータル原理図



第2図 モータル・クラッチ軸の速度変化



第3図 クラッチ部の寸法

になる。それ以後は両軸とも一体となって増大したモータルのトルクにより比較的緩慢に速度上昇し、ついには定常速度  $N_1$  に達する。時間  $t_2$  まで運転したあとでレバー端を釈放すれば外部クラッチはブレーキ摩擦板に接触して時間  $t_3$  で停止する。一方モータル軸は無負荷速度  $N_0$  に復する。

外部クラッチがクラッチ摩擦板に接触する瞬間  $t_0$  から、定常速度に達するまでのモータルおよびクラッチ軸の速度変化を起動特性、時間  $t_2$  から  $t_3$  までの減速の様子をブレーキ特性と呼ぶ。したがって起動特性はモータル軸とクラッチ軸とがずべている間(時間  $t_0$  から  $t_1$  まで)の速度変化と、両軸が一体化したのちの速度上昇との二



つに分けられる。前者を一次起動特性、後者を二次起動特性と呼ぶことにする。以下起動特性とブレーキ特性とを理論的に解析する。

(1) 一次起動特性 (モーター軸とクラッチ軸のすべっている間の速度変化)

一次起動特性について考察する。

第3図のように

- $2r_1$ : クラッチ摩擦板の内径 (m)
- $2r_2$ : クラッチ摩擦板の外径 (m)
- $P_1$ : レバー引張力による軸方向の力 (kg)

とすると、クラッチ伝達トルク  $T$  は(1)式で表わされる。

$$T = \frac{2}{3} \mu P_1 \frac{(r_2^3 - r_1^3)}{(r_2^2 - r_1^2)} \dots\dots\dots (1)$$

ここに  $T$ : クラッチの伝達トルク (kg・m)

$\mu$ : 接触面間の摩擦係数

また外部クラッチがクラッチ摩擦板に接触してから  $t$  秒後のクラッチ軸の回転数を求めると(2)式で表わされる。

$$N_c = \frac{30}{\pi} \left( \frac{T - T_L}{I_{LC} + I_P + I_{oc}} \right) t = \frac{30(T - T_L)}{\pi I_c} t \dots\dots\dots (2)$$

ここに  $N_c$ : クラッチ軸の回転数 (rpm)

$I_{LC}$ : クラッチ軸に換算した負荷の慣性能率 (kg・m・s<sup>2</sup>)

$I_P$ : プーリの慣性能率 (kg・m・s<sup>2</sup>)

$T_L$ : クラッチ軸に換算した負荷の摩擦トルク (kg・m)

$I_{oc}$ : 外部クラッチの慣性能率 (kg・m・s<sup>2</sup>)

$t$ : 外部クラッチとクラッチ摩擦板が接触しはじめた瞬間からの時間 (s)

$I_c$ : クラッチ軸にかかる全慣性能率 (kg・m・s<sup>2</sup>)

(1)式において  $\mu$  および  $P_1$  がほぼ一定とすれば、伝達トルク  $T$  は一定であり、また  $T_L$  が速度に関係なく一定と仮定すれば、(2)式よりクラッチ軸の速度  $N_c$  は直線的に増加する。

一方モーター軸には外部クラッチとクラッチ摩擦板が接触することにより負荷がかかり、モーター軸の速度は低下する。モーター軸の速度について次式が成立する。

$$I_m \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T$$

ここに  $\omega_m$ : モーター軸の角速度 (rad/s)

$I_m$ : モーター軸の慣性能率 (kg・m・s<sup>2</sup>)

$T_m$ : モーターのトルク (kg・m)

ここでモーターの速度-トルク特性曲線は一般的に第4図のとおりであるが、式を簡略にするため実用範囲を最大出力の点(モーターの出力はトルクと速度の積に比例し、第4図のような速度-トルク曲線の場合には最大トルクの点より多少無負荷速度に近い点にある)より無負荷速度の点までとし、これらの点を結んだ直線で近似させる。このときモーターのトルク  $T_m$  は次式で表わされるから、上式よりモーターの速度  $N_m$  は(3)式で表わされる。

$$T_m = \alpha(N_0 - N_m)$$

ここに  $N_0$ : モーターの無負荷速度 (rpm)

$$\therefore I_m \frac{d\omega_m}{dt} = \alpha(N_0 - N_m) - T$$

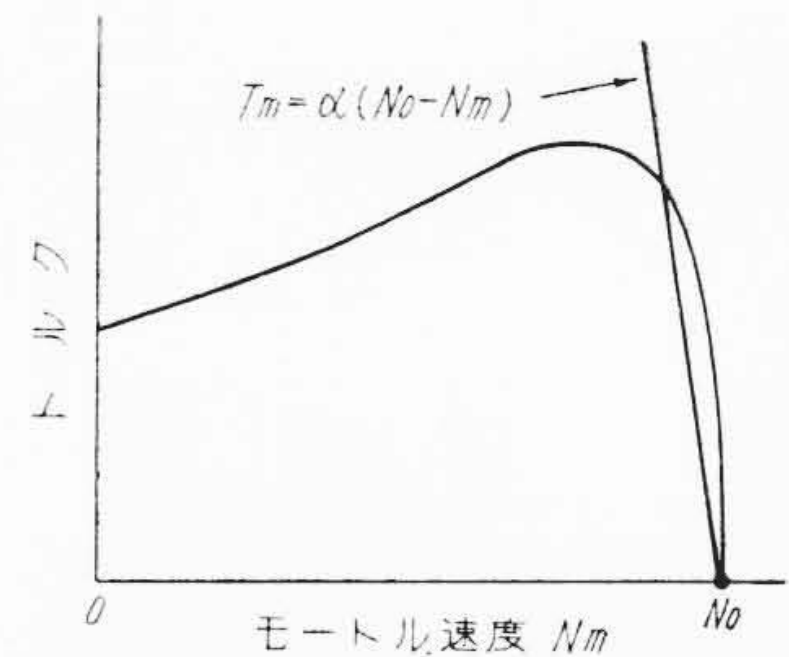
$$\frac{\pi}{30} \cdot \frac{dN_m}{dt} = \frac{\alpha}{I_m} N_0 - \frac{\alpha}{I_m} N_m - \frac{T}{I_m}$$

ここに  $N_m$ : モーターの速度 (rpm)

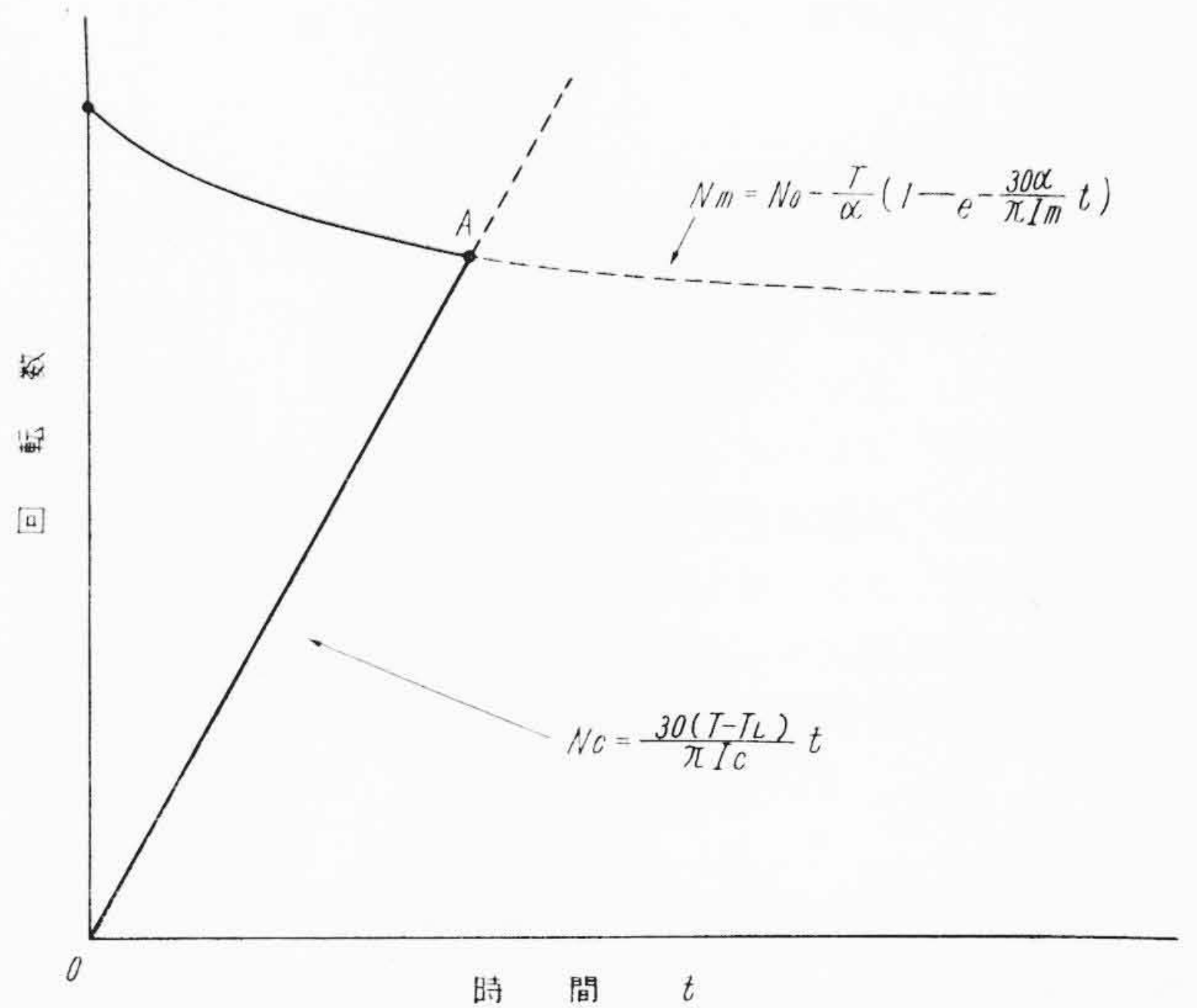
これを解いて

$$N_m = N_0 - \frac{T}{\alpha} (1 - e^{-\frac{30\alpha}{\pi I_m} t}) \dots\dots\dots (3)$$

(2)式と(3)式をグラフに表わすと第5図のようになる。



第4図 モーターの速度-トルク曲線



第5図 起動時におけるクラッチ軸とモーター軸の速度変化

(2) 二次起動特性 (モーター軸とクラッチ軸一体化後の速度上昇)

第5図に見るように、点Aでモーター軸とクラッチ軸とは同一速度になり、これよりのちは両軸が一体化して速度上昇する。この間の関係は(4)式で表わされる。

$$\frac{\pi I}{30} \cdot \frac{dN'_m}{dt} = \alpha(N_0 - N'_m) - T_L$$

ここに  $I$ : モーターおよびクラッチ軸の全慣性能率

(kg・m・s<sup>2</sup>)

$N'_m$ : モーター軸とクラッチ軸一体化後の両軸の速度

(rpm)

これを解いて

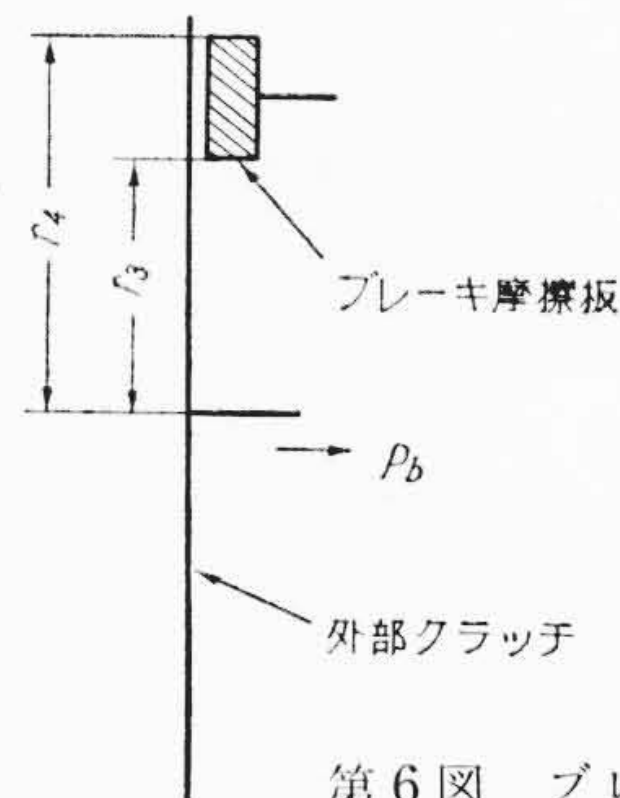
$$N'_m = N_0 - \frac{T_L + c}{\alpha} e^{-\frac{30\alpha}{\pi I} t} \dots\dots\dots (4)$$

ここに  $c$ : A点の位置により定まる定数

この式より明らかなように、モーター軸とクラッチ軸の一体化後の速度は一定値  $(N_0 - \frac{T_L}{\alpha})$  に限りなく近づく。

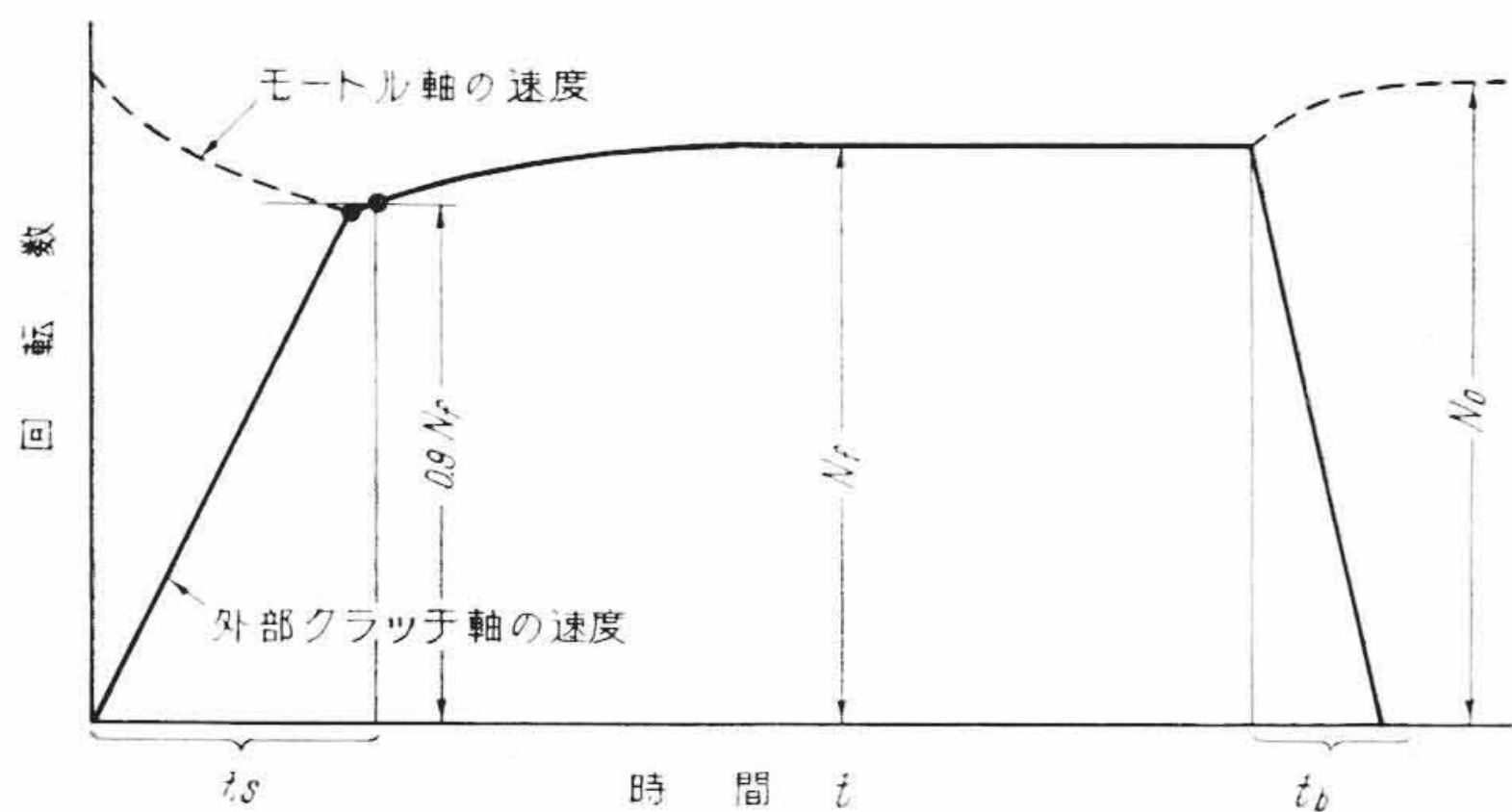
(3) ブレーキ特性

第6図に示すブレーキの摩擦トルクは次の式で表わされる。



第6図 ブレーキ部の寸法





第 7 図 クラッチ総合特性

$$T_b = \frac{2}{3} \mu_b P_b \frac{r_4^3 - r_3^3}{r_4^2 - r_3^2}$$

- ここに  $2r_3$ : ブレーキ摩擦板の内径 (m)
- $2r_4$ : ブレーキ摩擦板の外径 (m)
- $P_b$ : ブレーキバネによる軸方向圧力 (kg)
- $\mu_b$ : 外部クラッチとブレーキ摩擦板との間の摩擦係数
- $T_b$ : ブレーキトルク (kg・m)

したがって外部クラッチがブレーキ摩擦板に接触しはじめたときから  $t'$  秒後のクラッチ軸の速度は(5)式で表わされる。

$$N_c = N_0 - \frac{T_L}{\alpha} - \frac{30(T_b + T_L)}{\pi I_c} t' \dots\dots\dots (5)$$

すなわちブレーキ時にはクラッチ軸の速度は(5)式に従って直線的に減少し急停止する。

(4) 総合的クラッチ特性

前述の(2)~(5)式を取まとめて一つのグラフに表わすと、第7図のような総合的クラッチ特性が得られる。ミシンが定常回転数の90%以上に達すれば縫製物の縫目がほぼ一樣になるので、第7図に示すクラッチ軸が始動して定常回転数の90%に達するまでの時間  $t_s$  をもって起動時間と定める。またブレーキ時に外部クラッチがブレーキ摩擦板に接触した瞬間よりクラッチ軸が完全に停止するまでの時間  $t_b$  をブレーキ時間と定める。起動時間  $t_s$  とブレーキ時間  $t_b$  はクラッチモートルの性能を表わす重要な値である。特に工業用ミシンに用いる場合には、これらの時間の長短が作業能率のみならず縫目の仕上り具合にも大きな影響を及ぼす。

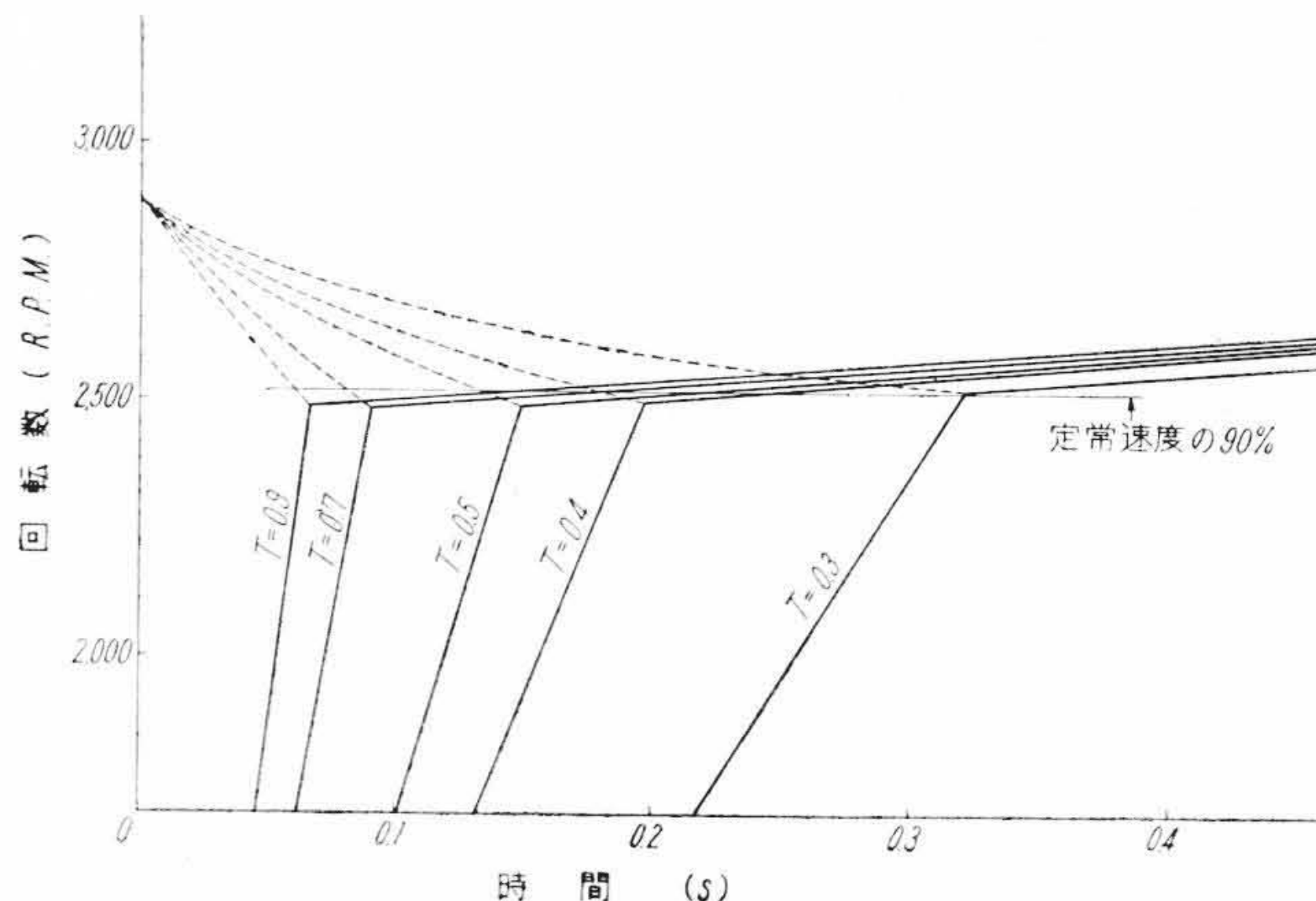
(5) クラッチ特性を左右する要素

前述の理論式よりクラッチ特性を左右する要素について考察してみる。クラッチモートルの負荷が工業用ミシンの場合には、次の主要特性が要求される。

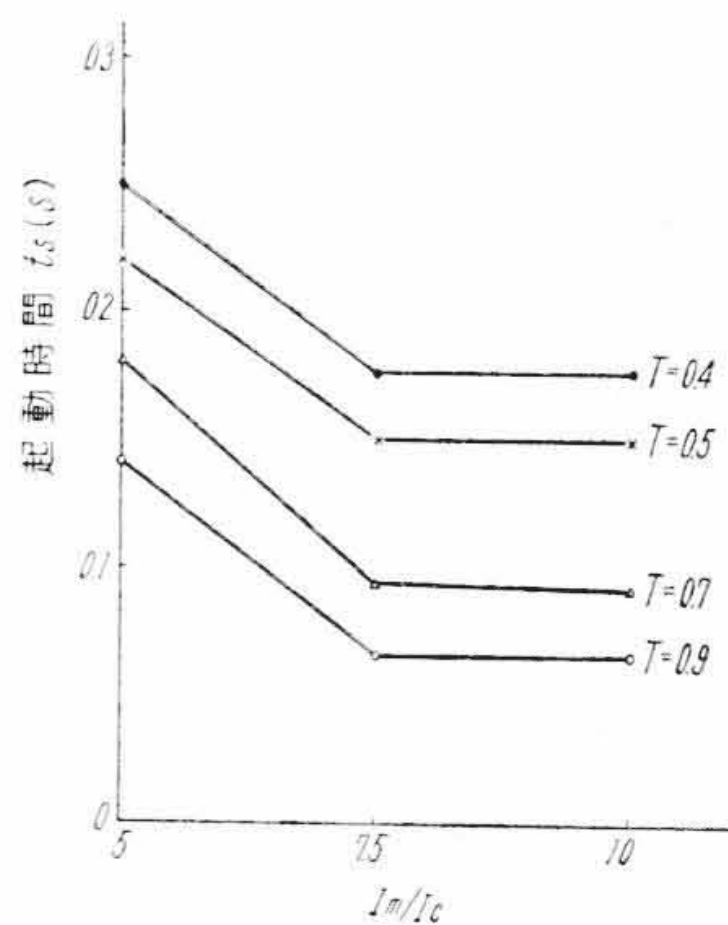
- (1) 起動, 停止……非常な高速起動, 急停止が要求され, 一般にはミシン針数5針程度(ミシン回転数を4,000 rpmとして起動時間が0.15秒くらい)で起動せねばならないと考えられる。
- (2) 踏 圧……作業者の疲労を少なくするために, 概略2~3 kg程度であること。
- (3) 連続使用による速度低下のないこと……非常な高ひん度で使用した場合にも, モートルの速度が十分に回復しないうちにクラッチがはいって, しだいにモートル速度の低下するようなことがない。

(2)~(4)式を考察すると, 上記の三つのクラッチ主要特性を支配するものとして, 次の四つの因子が考えられる。

- (1) クラッチ伝達トルク  $T$
- (2) クラッチ軸の全慣性能率  $I_c$



第 8 図 クラッチ起動特性の計算例



第 9 図 慣性能率比と起動時間の関係

第 1 表 起動特性

T (kg・m)	起動時間 $t_s$ (s)	起動時ミシン針数
0.4	0.206	約 6.2
0.5	0.15	約 4.6
0.7	0.095	約 2.9
0.9	0.068	約 2.1

ただしミシン回転数を4,000 rpmと仮定した。

- (3) モートル軸の全慣性能率  $I_m$
  - (4) モートルの速度-トルク特性 (特に最大出力  $P_m$ )
- ところが(2), (3)式から  $t$  を消去すると(8)式のようになる。

$$N_m = N_0 - \frac{T}{\alpha} + \frac{T}{\alpha} e^{-\frac{\alpha N_c}{T-T_L} \cdot \frac{I_c}{I_m}} \dots\dots\dots (8)$$

ここで  $N_m = N_c$  とおいて  $N_c$  について解けば,  $N_c$  はモートル軸とクラッチ軸との一体化回転数となる。(8)式においては上記の四つの因子のうち(2)項と(3)項は,  $I_c/I_m$  の比の形で取扱われているから, これらの二つの因子をいっしょにして考察できる。

結局クラッチ主要特性は  $I_m/I_c$  (一般には  $I_m > I_c$  で  $I_c/I_m$  は1以下になるので取扱いを簡便にするために, 逆数の  $I_m/I_c$  を用いることにした), および伝達トルク  $T$ , モートルの最大出力  $P_m$  の三つの要素で左右されると考えられる。

2.2 クラッチ設計の一例

前項によりクラッチ特性を支配する三つの要素が明らかになったので, これら三つの要素の変化に対するクラッチ特性の変化を, 一例として日立400W三相クラッチモートルについて計算してみる。

(1)  $P_m$ 一定の場合の特性

$I_m/I_c = 5$ ,  $P_m = 200\%$ と仮定すれば, (2)~(4)式より一次起動および二次起動特性は次の(9)~(11)式で表わされる。

$$N_c = 4.92 \times 10^4 (T - 0.14)t \dots\dots\dots (9)$$

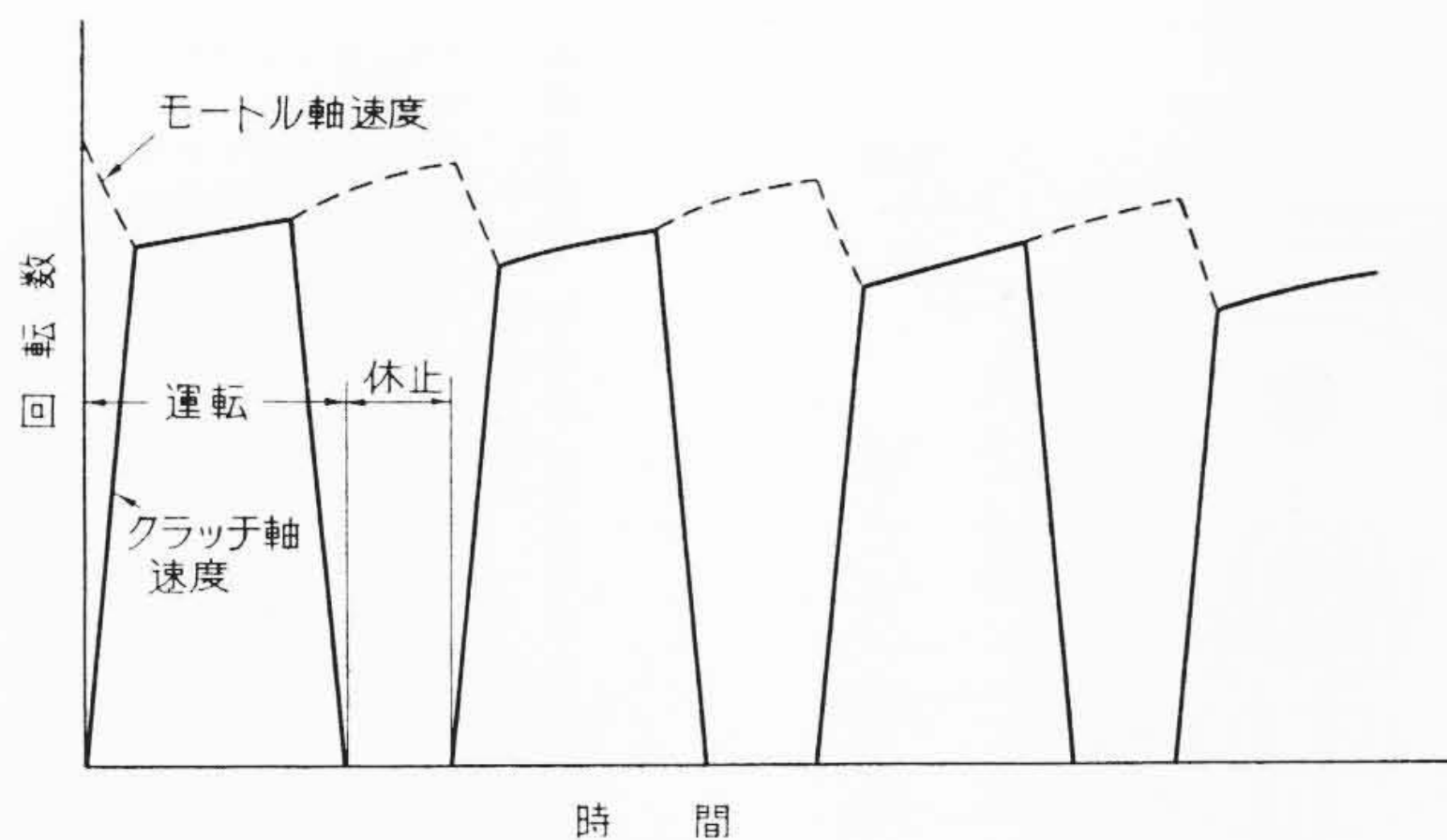
$$N_m = 2,940 - 1,540T + 1,540T e^{-6.4t} \dots\dots\dots (10)$$

$$N'_m = 2,680 + c e^{-5.58t} \dots\dots\dots (11)$$

$T = 0.3, 0.4, 0.5, 0.7, 0.9 \text{ kg}\cdot\text{m}$ の各場合について, (9)~(11)式よりグラフを描くと第8図のクラッチ起動特性が描かれる。

同様に  $I_m/I_c = 7.5, 10$ の各場合についてクラッチ起動特性図を描いて起動時間を求め図示すると第9図が得られる。同図に





第10図 繰返し起動停止によるモーター速度の低下

において、 $I_m/I_c=5$  のときの起動時間が急に長くなっているのは、モーター軸とクラッチ軸の一体化する点においてなお定常回転数の90%に達せず、一体化後の速度上昇が緩慢なためである。これより起動特性を良好ならしめるには、モーター軸とクラッチ軸が一体化したときすでに定常速度の90%に達していることが望ましいことがわかる。本例については、 $I_m/I_c \geq 7.5$  程度ならよいと思われる。

さらに  $I_m/I_c=7.5$  の場合において、 $T$  の変化による起動時間  $t_s$  およびこの起動時間中のミシン針数を求めて第1表に比較した。起動時ミシン針数は5針程度と称されているので、第1表から、 $T \geq 0.5 \text{ kg}\cdot\text{m}$  程度なら実用上十分であると思われる。 $T$  は(1)式で表わされるが、(1)式中  $\mu$  はクラッチ摩擦板と外部クラッチの材質で決まり、 $r_1, r_2$  は外形より定められるから、これらに実際の値を入れてレバー引張力による軸方向の力  $P_1$  を求めると、次のようになる。

$$T \geq 0.5 \text{ kg}\cdot\text{m} \text{ の場合 } P_1 \geq 15 \text{ kg}$$

さきに述べたようにレバー踏圧は2~3kgと考えると、ブレーキパネを考慮してレバー比  $R_l$  を求めると次のようになる。

$$R_l \doteq 8$$

(2)  $I_m/I_c$  が一定の場合の特性

モーターの最大出力  $P_m$  が不足で、かつクラッチの断続が非常にひん繁な場合には、モーターの速度が十分回復せぬうちに次のクラッチ起動が始まり、第10図のようにしだいに速度が低下して、モーターは過熱し使用に耐えなくなる。いまこの速度低下がある一定の速度で止まり定常状態に達したものととして、そのときの各回転数および時間を第11図のように定めて、繰返し動作の定常状態の解析を行なう。

一つの duty cycle におけるモーター軸の回転数変化を  $N_{m1}, N_{m2}, N_{m3}$  の三つに区分すれば、おのおのは次式にて表わされる。

$$N_{m1} = (N_{m1})_{t=0} - \frac{T}{\alpha} (1 - e^{-\frac{30\alpha}{\pi I_m} t}) = a_1 + b_1 e^{-kt}$$

$$\text{ここに } a_1 = (N_{m1})_{t=0} - \frac{T}{\alpha}, \quad b_1 = \frac{T}{\alpha}, \quad k = \frac{30\alpha}{\pi I_m}$$

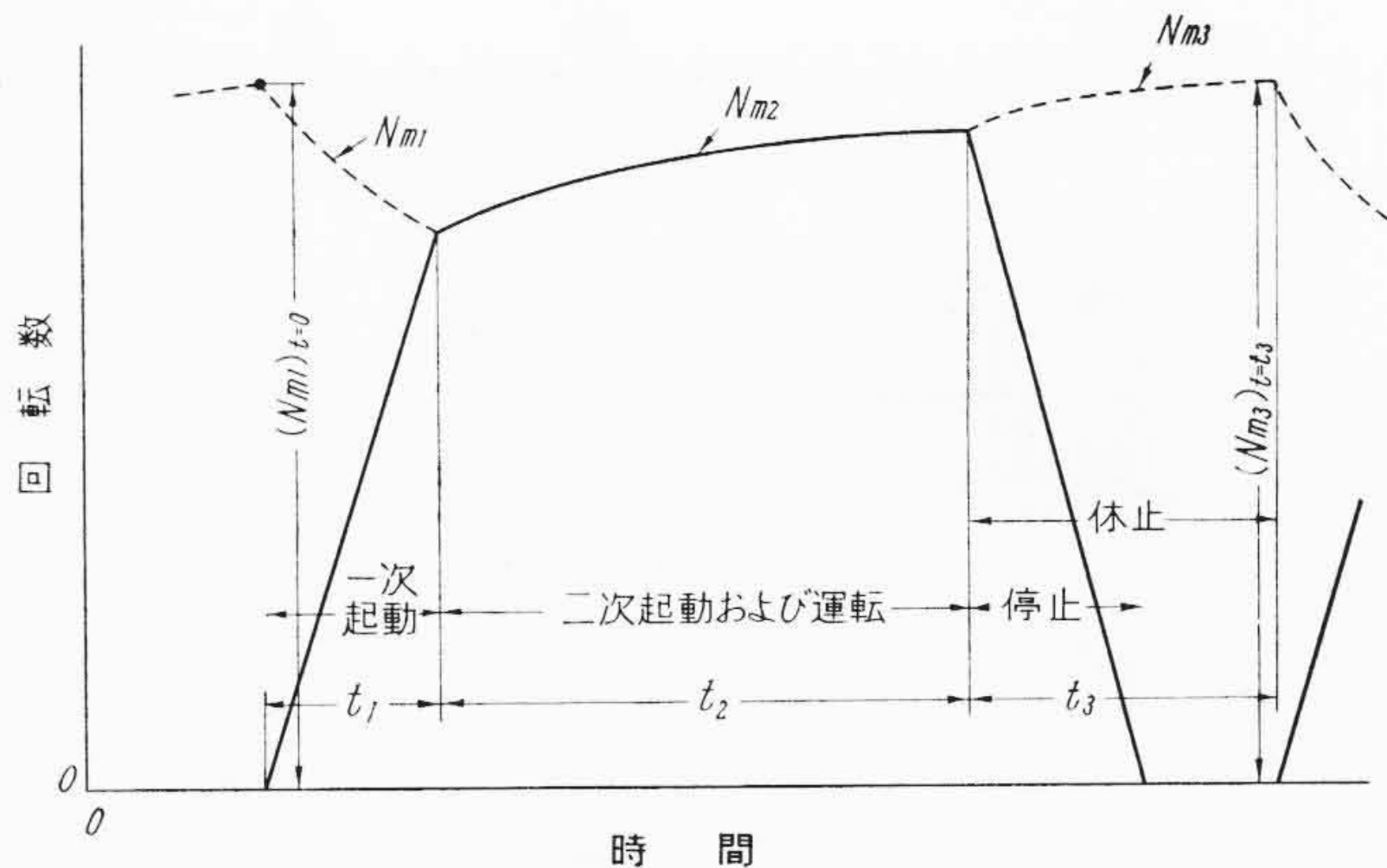
$$N_{m2} = N_0 - \frac{T_2}{\alpha} + c_1 e^{-\frac{30\alpha}{\pi I} t} = a_2 + c_1 e^{-ht}$$

$$\text{ここに } a_2 = N_0 - \frac{T_L}{\alpha}, \quad c_1 = \text{定数}, \quad h = \frac{30\alpha}{\pi I}$$

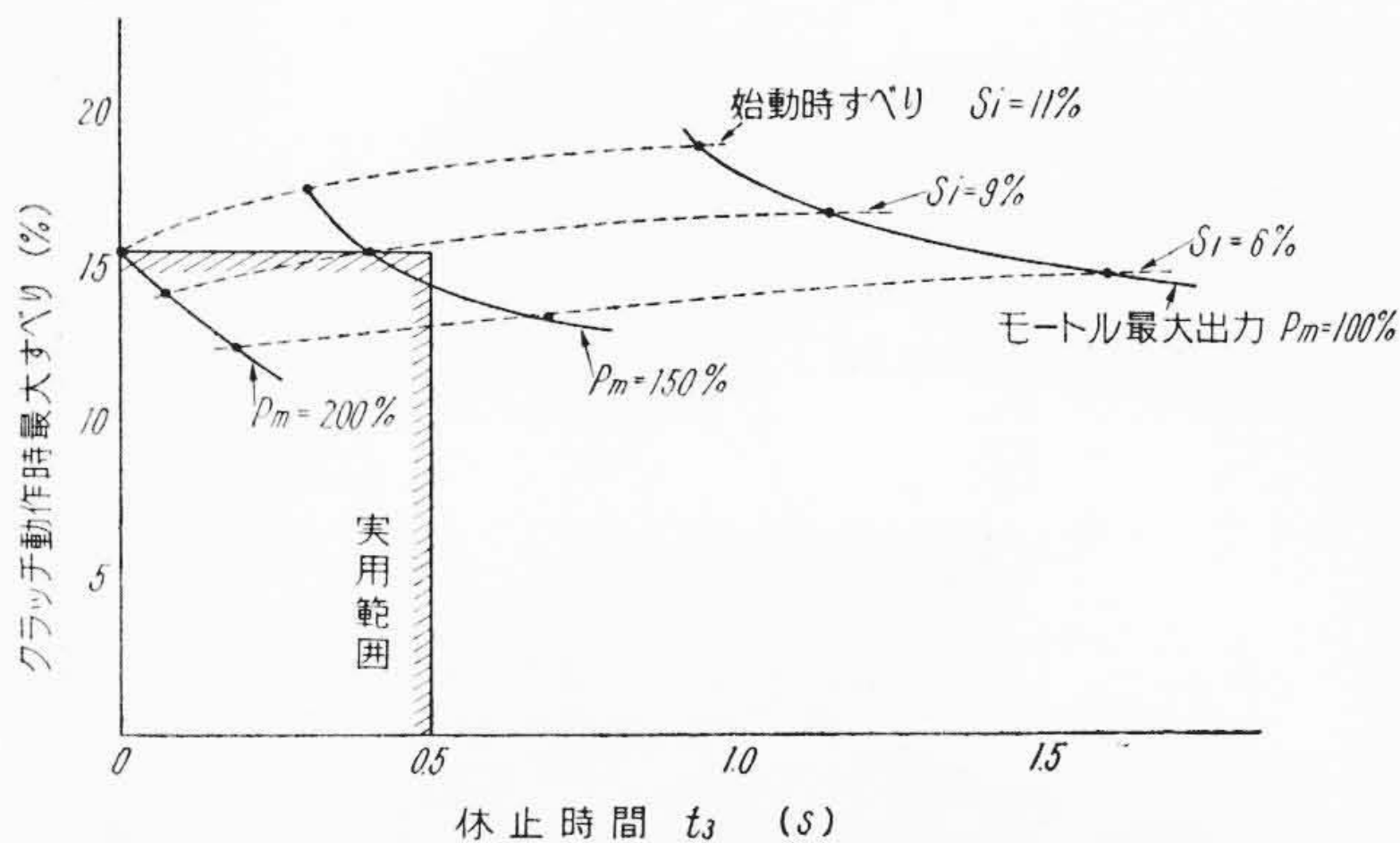
$$N_{m3} = N_0 + c_2 e^{-\frac{30\alpha}{\pi I_m} t} = N_0 + c_2 e^{-kt}$$

$$\text{ここに } c_2 = \text{定数}, \quad k = \frac{30\alpha}{\pi I_m}$$

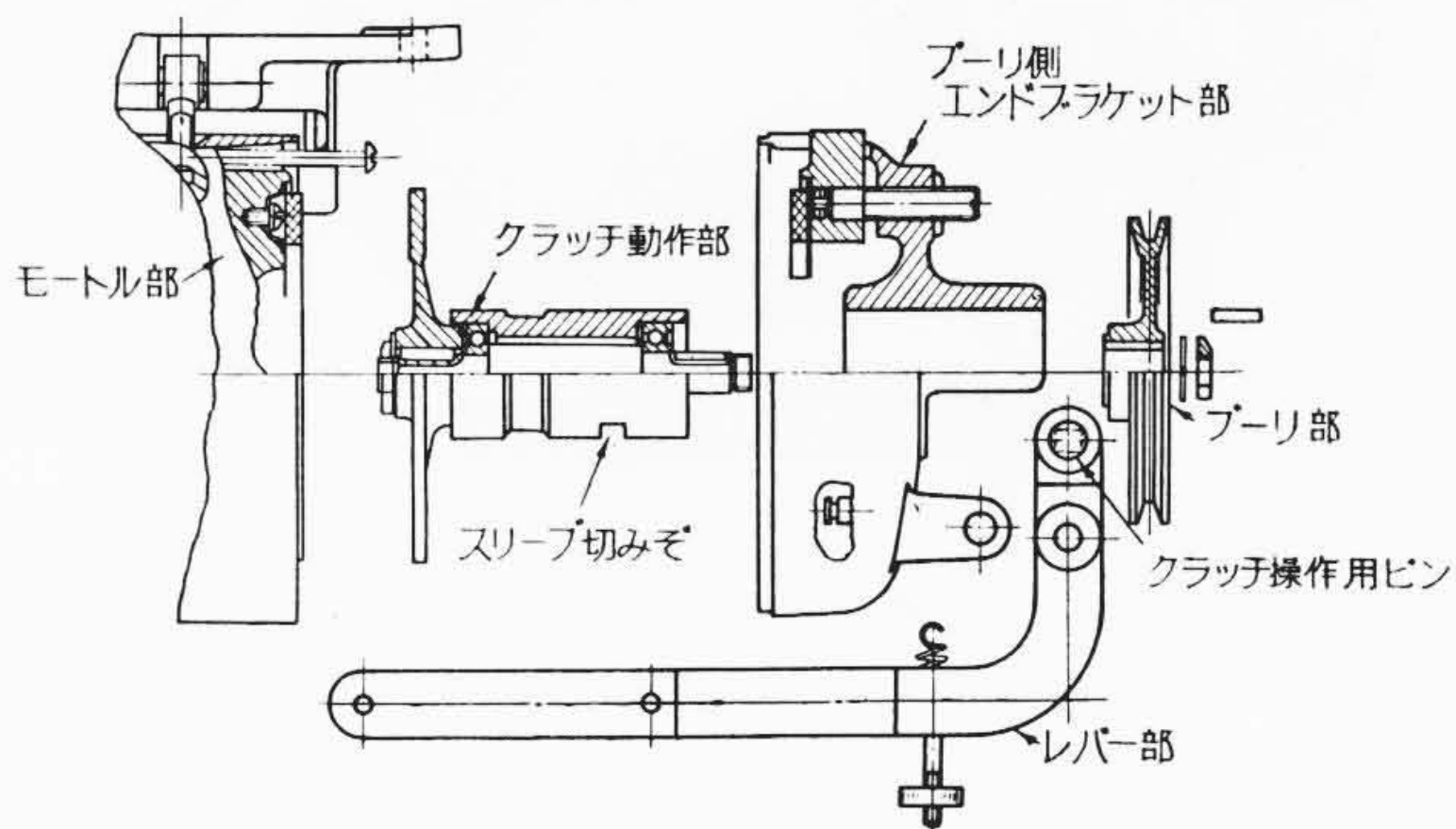
ここで運転時間すなわち  $t_1 + t_2 = 1$  秒と仮定して、初速  $(N_{m1})_{t=0}$  と終速  $(N_{m3})_{t=t_3}$  が等しくなる条件のもとで、休止時間  $t_3$  とモ-



第11図 定常状態に達したときの回転数と時間の関係



第12図 繰返し起動停止における諸条件と実用範囲の関係



第13図 400 W クラッチモーターのクラッチ機構

トルの最大すべりの関係を計算し、これを図表化したものが第12図である。

一方高ひん度の使用条件では、実用上休止時間  $t_3 \leq 0.5$  を要求されるのでこの条件を織り込み、かつ最大すべり15%以下とにおいてその使用限界を図示すると斜線わく内ようになる。これからモーターに必要な最大出力は、定格電圧では  $P_m \geq 150\%$  の条件が得られる。実際には10%の電源電圧降下を考慮して  $P_m \geq 180\%$  くらい必要とする。

3. 日立400W クラッチモーターについて

3.1 仕様

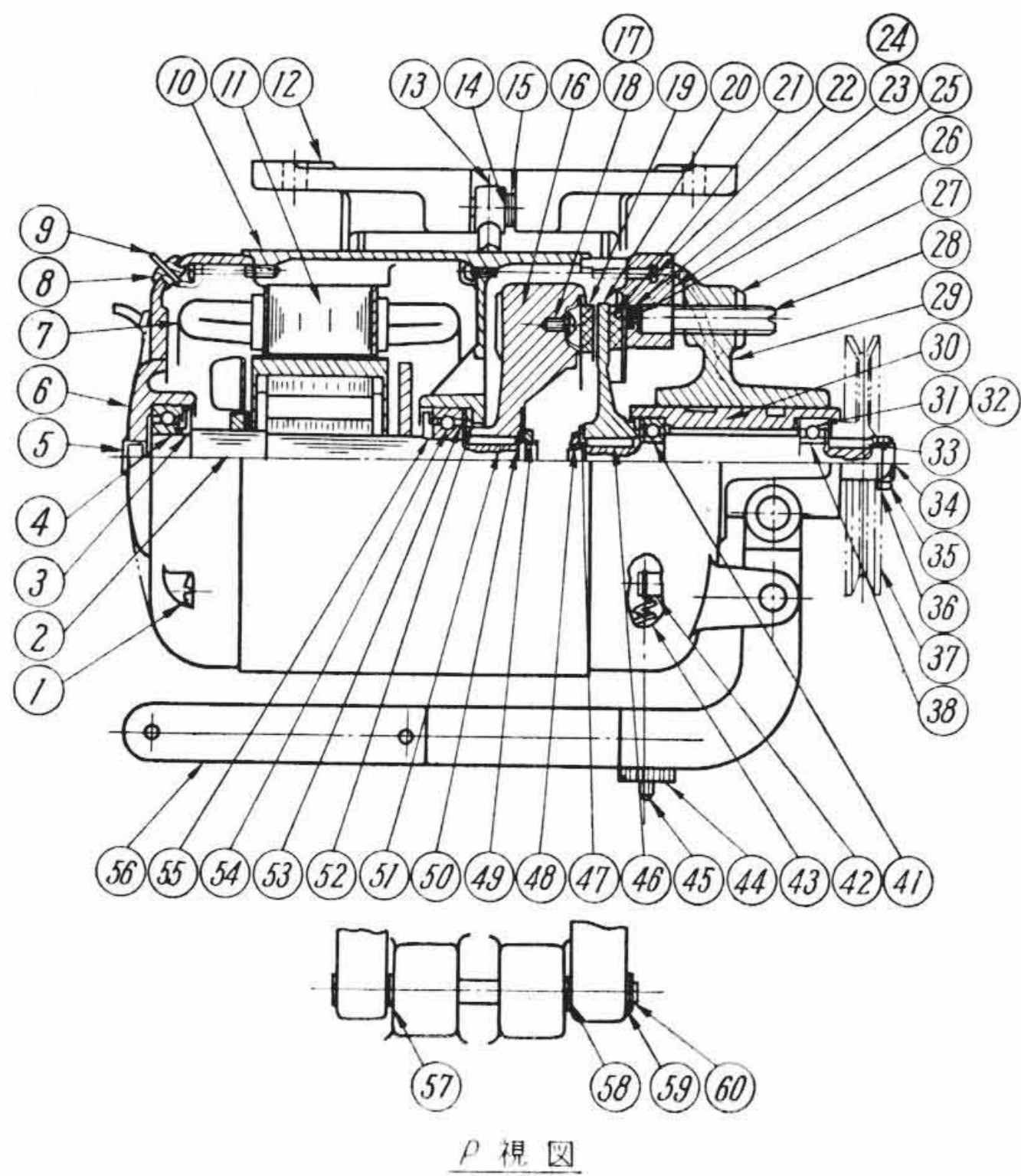
第2表に仕様を示す。

3.2 構造および外観

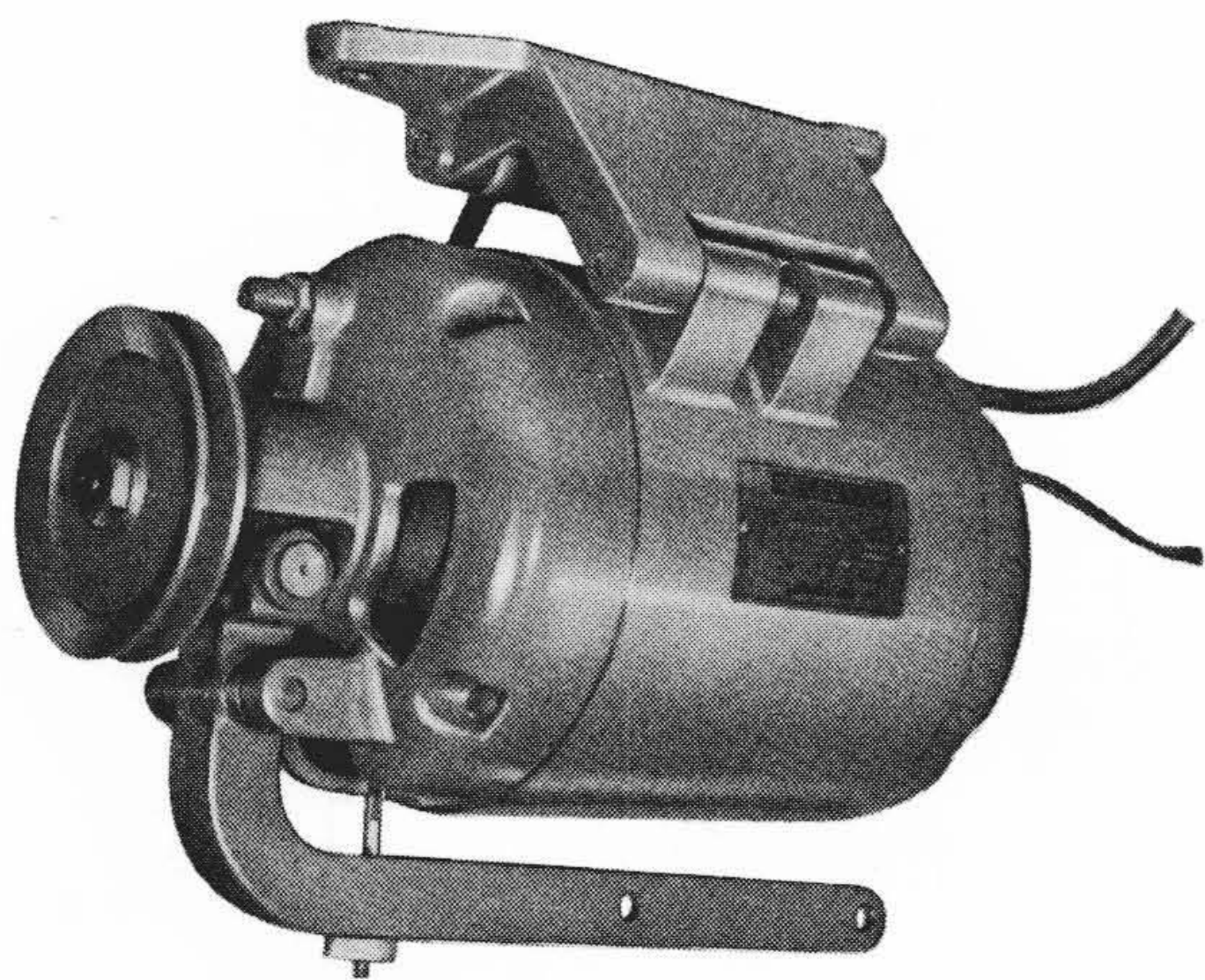
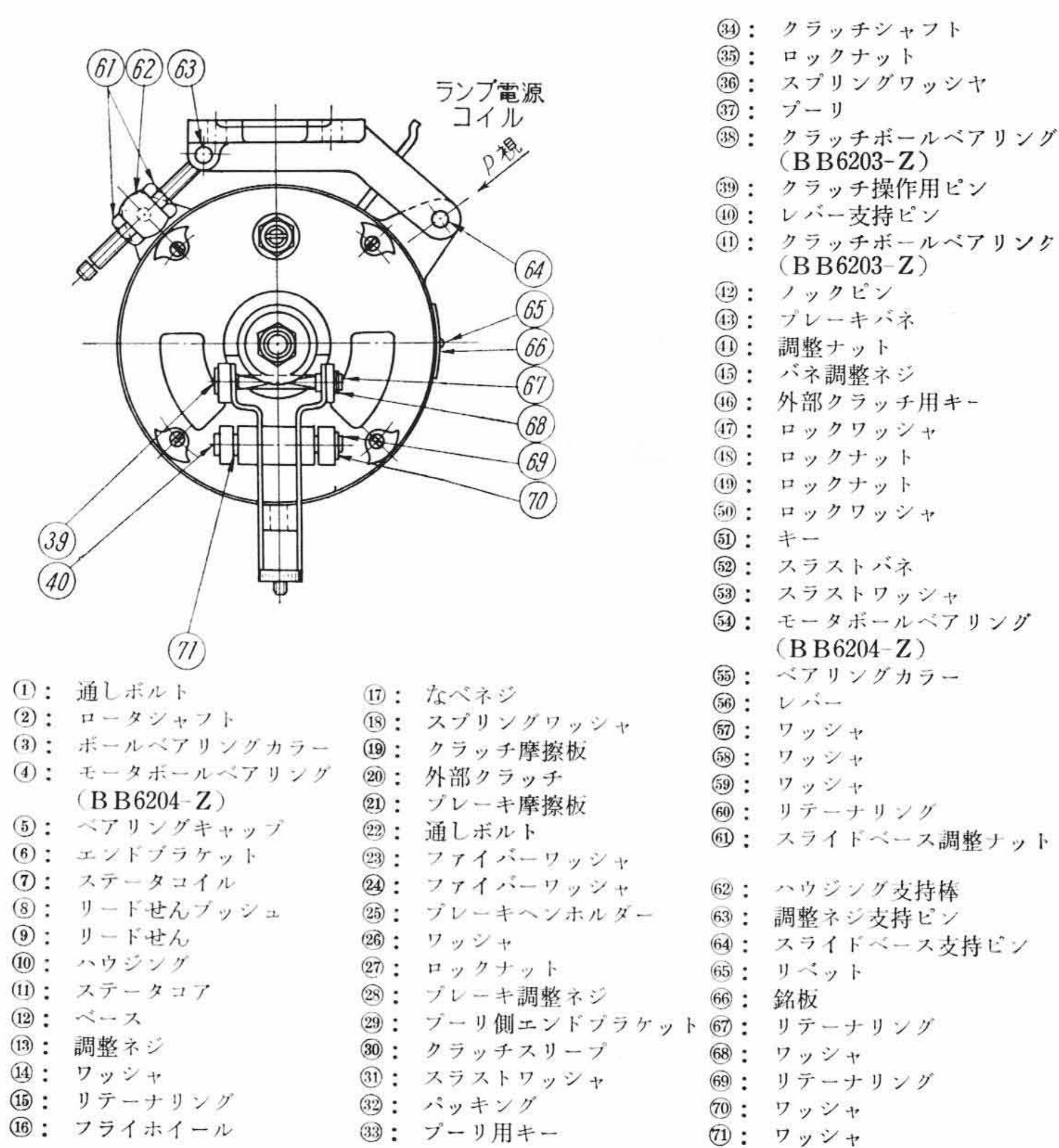
400W クラッチモーターでは、以上のような理論的考察から得られた結果を設計に適用した。その構造は第14図のとおりである。おもな点をあげれば次のとおりである。

(1) フライホイールの慣性能率を十分大きくし、 $I_m/I_c \doteq 7.5$  と





第 14 図 400 W クラッチモートル構造図



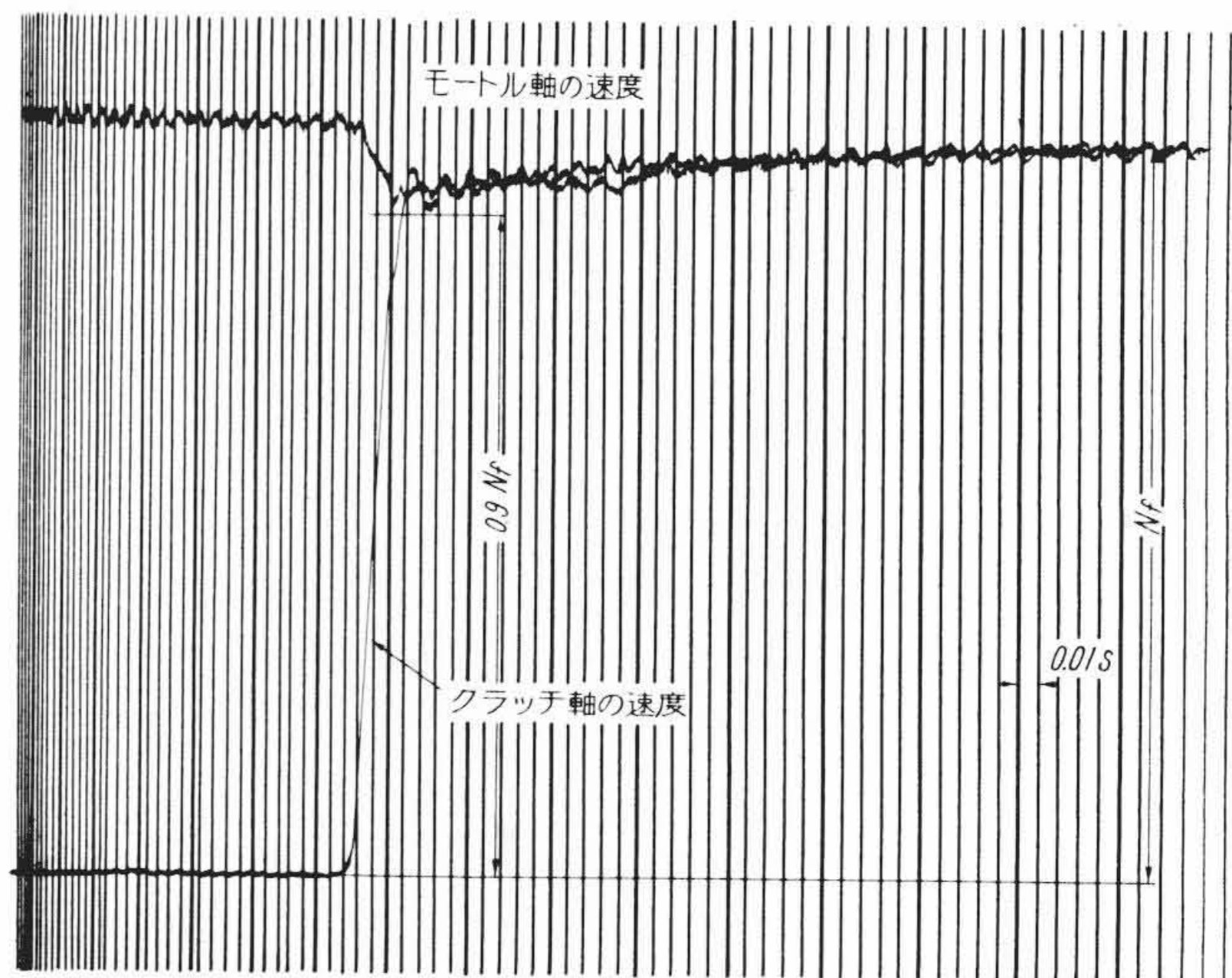
第 15 図 400 W クラッチモートル外観写真

第 2 表 400 W クラッチモートル仕様

出力	400 W	400 W
相数	三相	単相 (コンデンサラン)
形式	CLME-K	CLME-KP
定格	連続	連続
極数	2	2
電圧	200 V	100 V
周波数	50/60~	50/60~
回転数	2,840/3,400 rpm	—
コンデンサ	—	(別置)

第 3 表 ミシン負荷の高ひん度実負荷試験結果

起動ひん度	電源電圧	モートルの無負荷速度	30 秒後のモートル速度	1 分後のモートル速度
0.5 秒間運転	定格電圧	2,980 rpm	2,930 rpm	2,930 rpm
0.5 秒間休止	10%電圧降下	2,970 rpm	2,920 rpm	2,920 rpm



第 16 図 クラッチ特性試験結果

3.3 試験結果

起動特性の試験結果を電磁オシロで撮影したものが第 16 図である。起動時間 0.05 秒 (ミシン針数約 2 針) で実用上の要求を十分満足する。第 3 表に定格電圧の場合と、10%電圧降下した各場合についての繰返し試験結果を示す。定格電圧はもちろんのこと、電圧降下があっても、十分機能を満たすことが明らかである。

4. 結 言

本文では主として、クラッチモートルの最も重要な特性であるクラッチ特性の基本的な解析を行なって、性能を向上させるために肝要な点を解明し、は握した。なお本文では触れなかったが、別の主要な問題として高ひん度使用に耐えかつ寿命の長いことを必要とする構造および材料については機会をあらためて発表する予定である。

- した。
- (2) スリーブの運動を円滑にするために、レバーとスリーブの接合部に第 13 図のような新機構を採用した。
  - (3) モートルの最大出力は 200% 以上とした。
- 第 15 図はその外観写真である。