スタータダイナモの仕様の決定と装荷の配分について

How to Decide the Specifications of Starter-Dynamo, and How to Design Its Electric and Magnetic Loading

> 夫* Hiroo Tsuchimoto

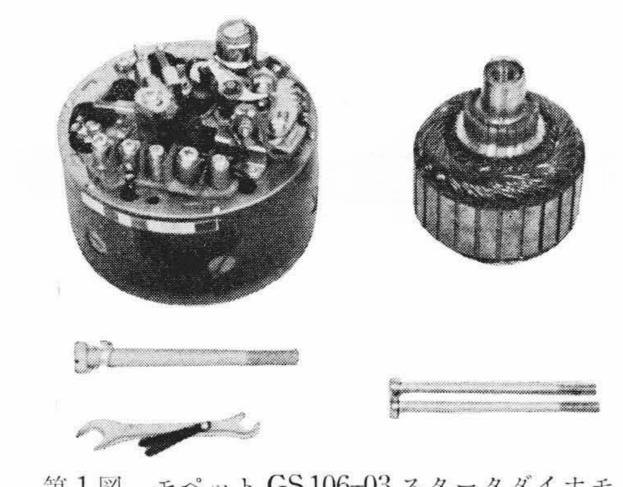
最近自動車用小形エンジンに広く用いられているスタータダイナモは、始動と充電の二つの作用を一個の電 機子で行なうために多くの問題点を有している。小形2サイクルエンジンではスタータの特性を決定するもの は乗越トルクであることを明らかにし、また充電開始回転数が発電機の性能を決定するものであることを述べ、 電機子の磁気回路と電気回路の割振を変化することによりスタータとダイナモの性能がどのような影響を受け るかについて述べた。

言 1. 緒

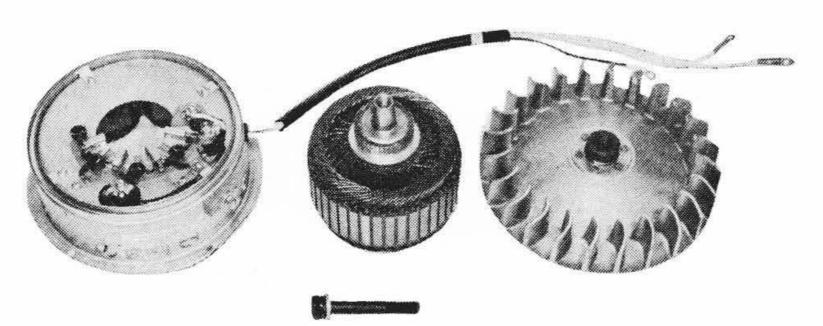
最近二輪車,軽三輪車,軽四輪車などの排気容量の小さいガソリ ンエンジンの始動および充電用にスタータダイナモが多く用いられ るようになった。スタータダイナモはスタータとダイナモを一個の 回転機にまとめ直結式としてあるので、両者を分離したものと比べ 小形軽量となり, また一般のスタータに見られる複雑なかみ合機構 がなく機構も簡単であるが、反面両者の作用を一個の電機子に行わ せるために電機子の大きさの選定、装荷の配分などに多くの問題点 がある。また小形軽量にするためにスタータダイナモに最も適した 仕様の決定が必要である。本稿においては従来あまり明らかにされ ていなかった小形 2 サイサイクルエンジンの始動特性をとりあげ, スタータダイナモに適した仕様の決定方法と,装荷の配分に関する 基本的な問題について紹介する。

2. スタータダイナモの構造および機能

第1図および第2図は日立製作所で製作しているスタータダイナ モの外観図の一例で、第1図は継鉄の外径110 фでモペット用、第 2 図 はおなじく継鉄の外径 167 ∮ で軽四輪車用のものである。スタ ータダイナモは複巻式の直流機で, 直巻界磁と分巻界磁をもった継



第1図 モペット GS 106-03 スタータダイナモ

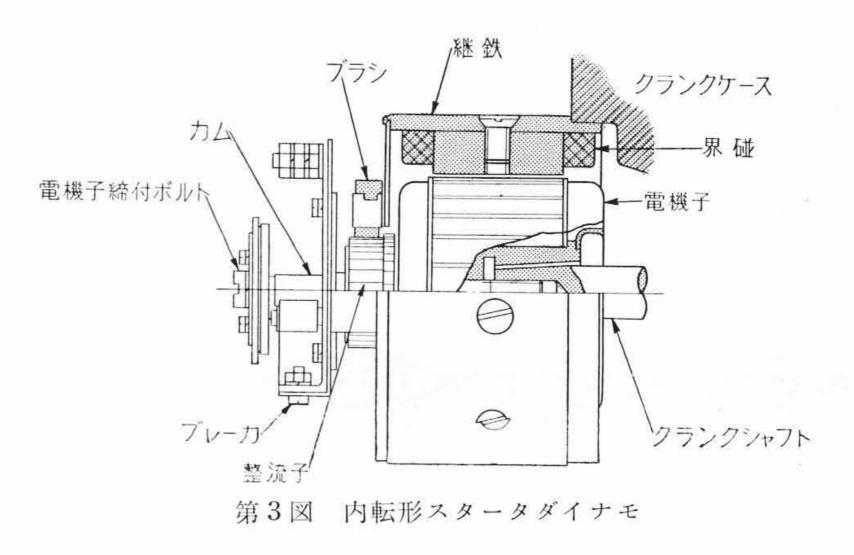


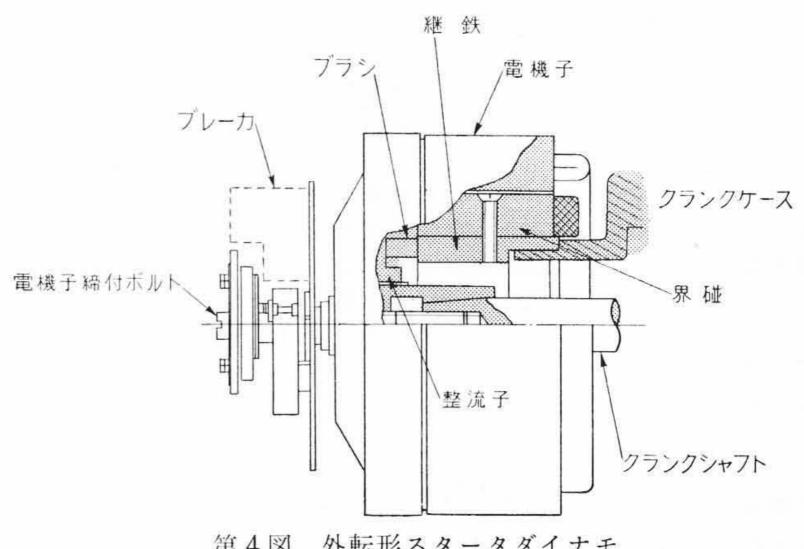
第2図 軽四輪車用 GS 027-01 スタータダイナモ

日立製作所多賀工場

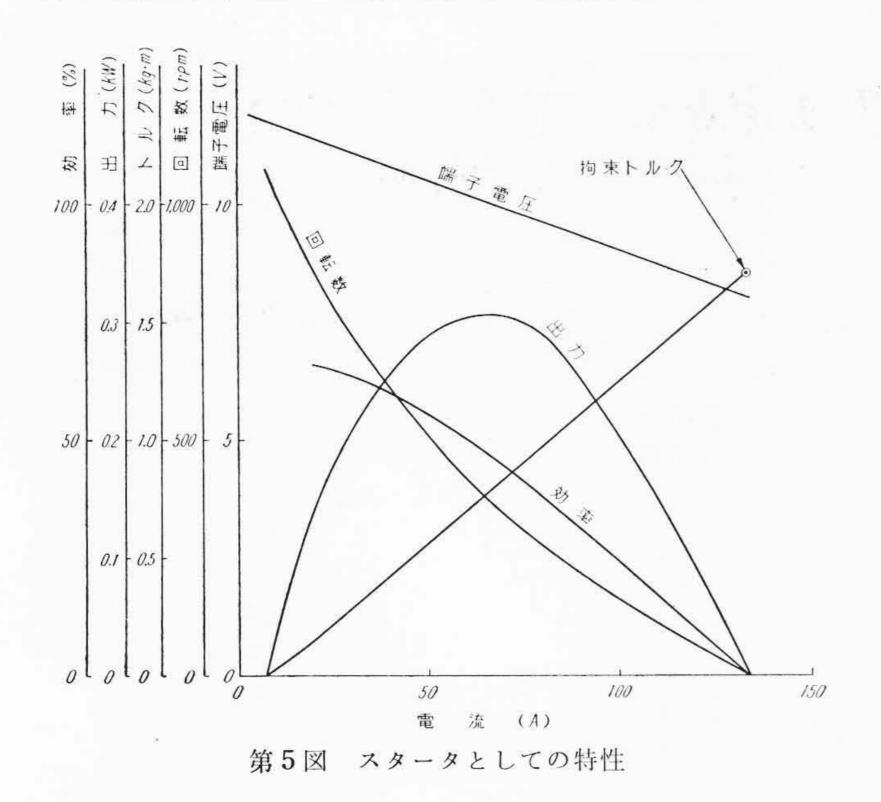
鉄と、電機子とから成立っており、第3図のように電機子が継鉄の 内側にあって回転するものを内転形と呼び,第4図のように外側に あって回転するものを外転形と呼んでいる。いずれの場合において も、継鉄はエンジンのクランクケースに固定され、電機子はクラン ク軸にテーパで直結され、エンジンと 1:1 の駆動比で回転する。 外転形は内転形に比べ電機子の慣性モーメントが大きく, したがっ てエンジンに対する勢車効果が大きいが、 整流子の構造が複雑にな り, またブラシの取扱にも難点があり, 特殊の場合をのぞいて一般 には内転形が用いられている。

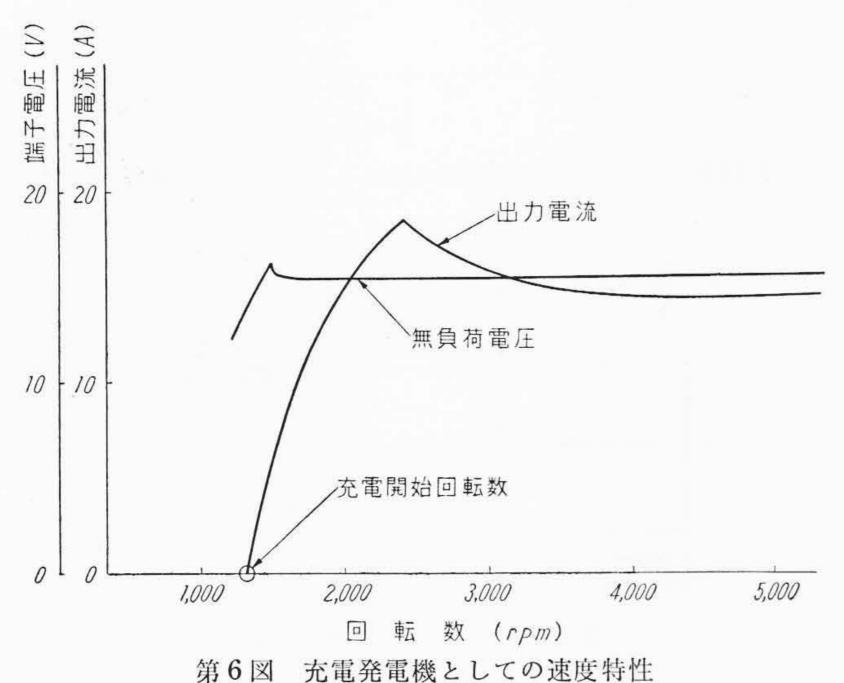
スタータダイナモは直流機の可逆性を利用して, スタータ (すな わち電動機)とダイナモ(充電発電機)の両方の作用を同一の電機 子に行なわせるものである。スタータとして作用するときの特性は 第5図のように直巻電動機に近く、ダイナモとしてはボルテージレ ギュレータと組合せて第6図のような特性を有している。第7図の 結線図において,メインスイッチを閉じてスタータボタンを押すと,

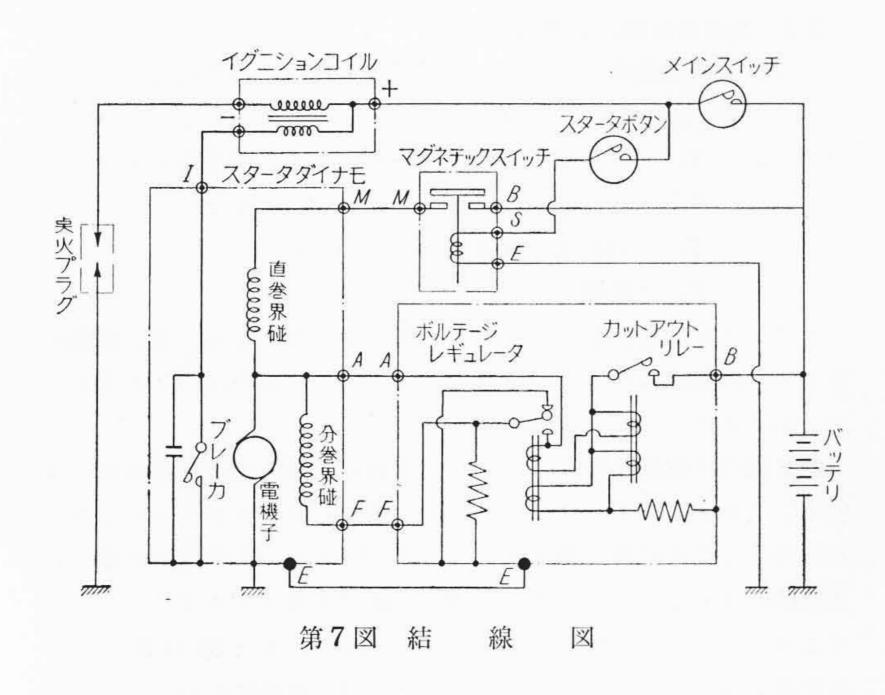




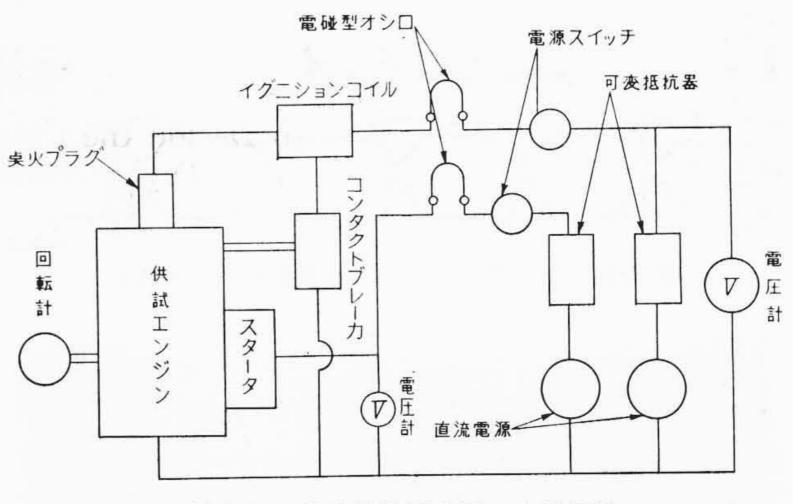
外転形スタータダイナモ 第4図



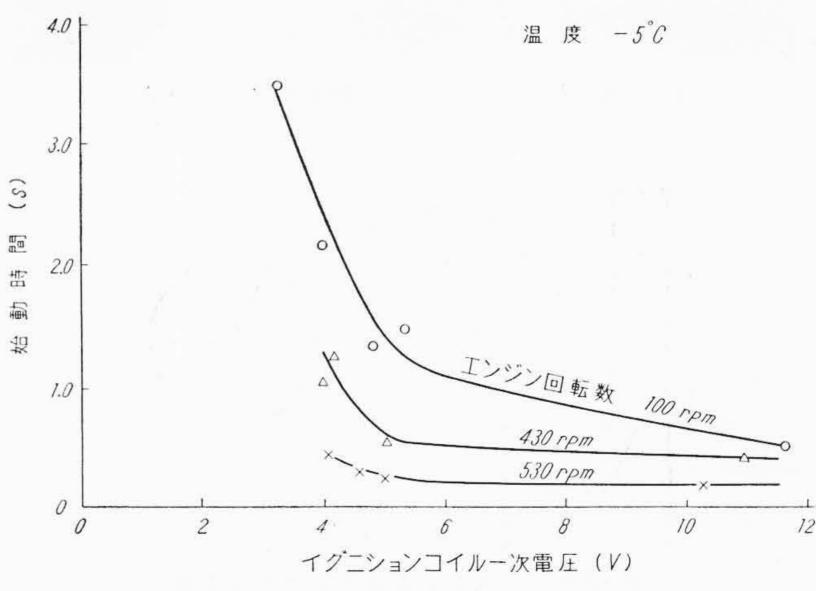




スタータダイナモはバッテリから電力の供給を受ける複巻電動機となりエンジンを駆動する。エンジン始動後スタータボタンを開けばスタータダイナモはエンジンより駆動される分巻発電機となり、エンジンの回転が上昇するに従いその発生電圧も上昇し、その値がバッテリの端子電圧よりも高くなるとカットアウトリレーが閉じ、逆にバッテリを充電する。発生電圧および出力電流はボルテージレギュレータにより分巻界磁の電流を増減して制御する。



第8図 始動特性測定用の実験回路



第 9 図 2 サイクル 2 気筒 250cc エンジンの 最小始動回転数

以上のようにスタータダイナモはスタータボタンの操作のみで簡単にスタータと充電発電機の作用を行なうことができる。

3. エンジンの始動に関する考察

ガソリンエンジンを始動する場合にスタータとして必要な条件は

- (1) 静止状態にあるエンジンの回転部にトルクを加え加速度を生ぜしめる。
- (2) シリンダ内の気体を圧縮しピストンの上死点を乗り越えて 回転を持続せしめる。
- (3) エンジンの爆発の持続に必要な回転数を与える。 ことである。以下これらの条件に関して考察を行なうのであるが、 それには次のように定義される乗越トルクおよび最小始動回転数を 考えると便利である。

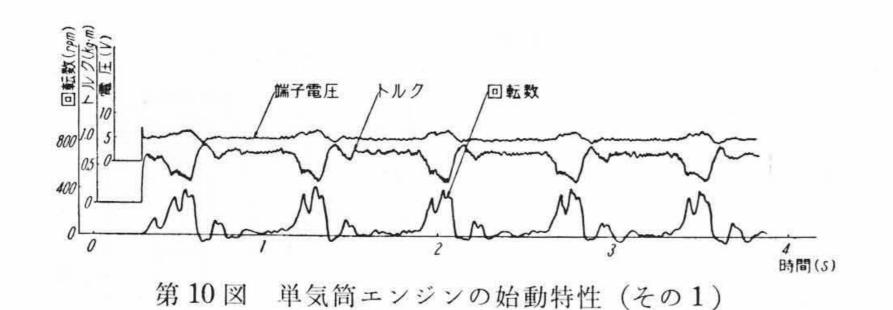
すなわち,条件(1)の静止状態より運動をはじめ,条件(2)の最初の圧縮行程を乗り越すために必要なトルクを乗越トルクと呼び,また条件(3)の爆発を持続せしめるために必要な回転数の最小限界を最小始動回転数と呼ぶことにする。

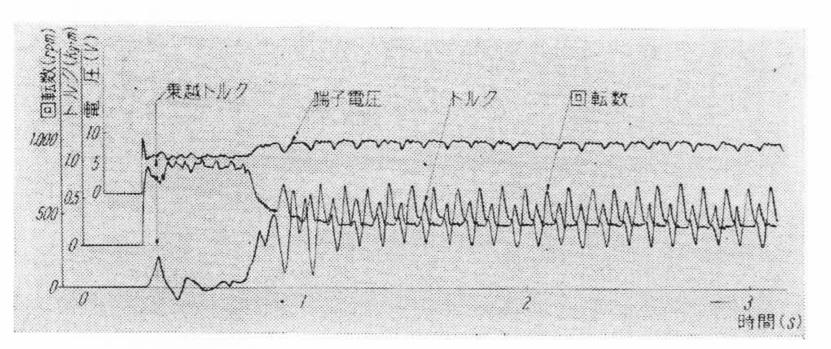
3.1 最小始動回転数と乗越トルク

第8図のような実験回路で、スタータによりエンジンを一定の回転数で回転しておき、イグニションコイルによって着火し、着火より始動するまでの時間をオシログラムで測定する方法により最小始動回転数を求めた結果、第9図のように単気筒あるいは2気筒の2サイクルエンジンでは、イグニションコイルの火花が正常であれば約100rpmの低い回転数でも非常に短い時間で容易に始動することが判明した。したがって最小始動回転数は100rpm以下であると考えてもよい。

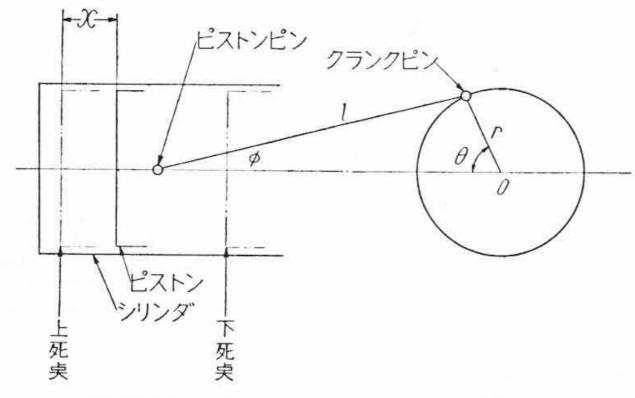
また第8図の回路でエンジンの着火は行なわず,スタータの印加

H





第11図 単気筒エンジンの始動特性 (その2)



第12図 ピストンとクランクの関係図

電圧を変化してエンジンを回転するのに必要なトルクをオシログラムで測定すると、電圧が低くなるにしたがって圧縮行程を越しにくくなり、ついには 第10 図 のようにほとんど乗り切れなくなるが、それよりもわずか電圧の高いところでは 第11 図 の例のように第1回目の圧縮行程を越すのに比較的長い時間を要しても、これさえ乗り切れば慣性の影響を受けて急速に回転が上昇し、最小始動回転数以上に達するのが普通である。この場合の第1回目の圧縮行程におけるトルクが乗越トルクである。したがって単気筒あるいは2気筒の2サイクルガソリンエンジンに関しては一般に、乗越トルクよりも大きなトルクを有するスタータを使用すればエンジンを始動できると考えてもよい。以下この乗越トルクを計算する方法について考察を進める。

3.2 ピストンとクランクの関係

エンジン始動時におけるスタータの作用を明らかにするために、 シリンダ内におけるピストンの運動とクランクの運動の関係につい て考えてみる。 第12 図 においてピストンの上死点からの変位 x は クランクの回転角 θ の関数として式(1)のように表わされる。

$$x = r(1 - \cos \theta) + \lambda r \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2}}\right)....(1)$$

ここに r: クランク半径

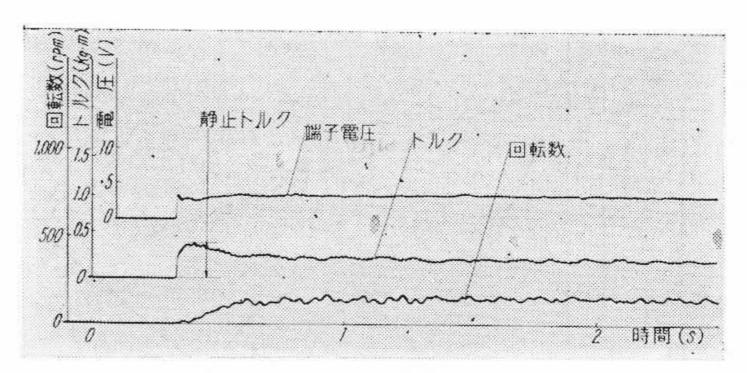
1: ロッドの長さ

$$\lambda = \frac{l}{r}$$

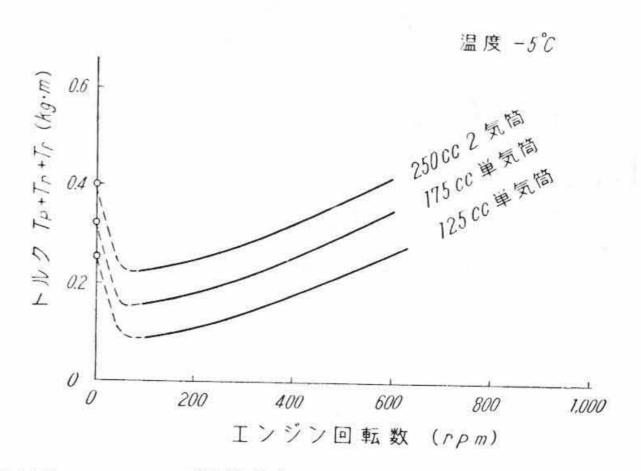
λはエンジンによって定まる常数で通常3~5の値をとる。 また式(1)を級数に展開し高次の項を省略すれば

$$x = r (1 - \cos \theta) + \frac{r}{4 \lambda} (1 - \cos 2 \theta) \dots (2)$$

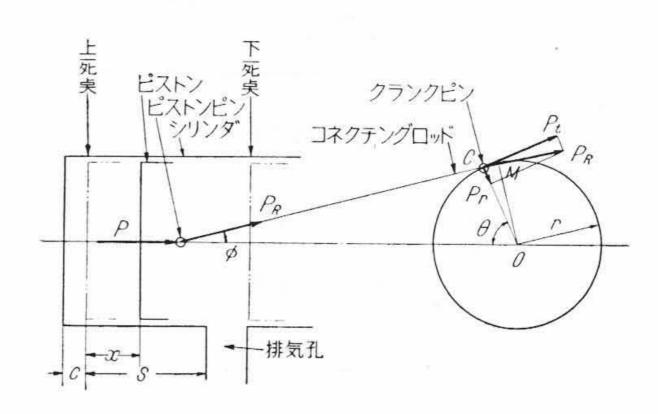
となる。



第13図 シリンダ開放状態におけるエンジンの 合成トルクのオシログラム



第 14 図 シリンダ開放状態におけるエンジンの合成トルク



第15図 クランクに働く諸力

3.3 気体の圧縮に必要なトルク

エンジンの起動時に必要なトルクTは式(3)で示される。

ここに T_c : シリンダ内の気体を圧縮するに要するトルク

 T_p : ピストンの慣性力に対応するトルク

Tr: 回転部を加速するためのトルク

 T_f : 摩擦力に打ちかつためのトルク

クランクが等速回転をしているときは $T_r=0$ となる。また始動の立上りの回転速度のおそい状態では式(3)の大部分は T_c と考えることができる。

第8図の実験回路で、シリンダを開放し圧縮圧力がかからない状態にしておき、スタータでエンジンを駆動しオシログラムによりトルクの立上りの状態を測定すれば、式(3)より T_c を除いた部分を実験的に求めることができる。第13図はそのオシログラムの一例であり、これから回転数とトルクの関係を求めると第14図のような結果となる。これによればエンジンの静止摩擦に打ちかって運動をはじめるために必要なトルクは250 cc 級のもので $0.4 \, \mathrm{kg \cdot m}$ ($-5^{\circ}\mathrm{C}$)程度であり、ひとたび運動をはじめるとトルクは急激に小さくなっている。

そこで乗越トルクの大部分を占める気体の圧縮に必要なトルク T_c について考えてみることにする。

第 15 図 において気体の圧縮によりピストンに P なる力が加わるものとすれば、ロッドに沿った分力 P_R はクランク軸O のまわりに

トルク Tc を生ずる。

$$T_c = P_R \cdot \overline{OM} = P \cdot \sec \phi \cdot \overline{OC} \sin(\theta + \phi)$$

 $= P \cdot r \left(\sin \theta + \frac{1}{2 \lambda} \sin 2 \theta \right) \dots (4)$

ここに φ: ロッドの傾き角

シリンダ内の気体の圧力を p (kg/cm²) とすれば

$$P = p \cdot \frac{\pi}{4} D^2 \dots (5)$$

ここに D: ピストンの直径

(5)を(4)に代入して

$$T_c = p \cdot \frac{\pi}{4} D^2 r \left(\sin \theta + \frac{1}{2 \lambda} \sin 2 \theta \right) \dots (6)$$

pはピストンの位置の関数となる。いま

po, vo: ピストンが排気孔をふさぐとき, すなわち s の位置に おける気体の圧力および体積

 p_x , v_x : ピストンが x の位置にあるときの気体の圧力および体積

とすれば

$$p_x = p_0 \left(\frac{V_0}{V_x}\right)^m = p_0 \left(\frac{s+c}{x+c}\right)^m \dots (7)$$

が成立する。m はポリトロープ指数で等温変化の場合には1となり,断熱変化の場合には γ となる。また一般にエンジンの運転状態で圧縮時には 1.3 とされているが,起動時のような回転のおそい状態については従来明らかにされていなかった。これに関して数種類の2サイクルエンジンについて実験を行なった結果によれば,気体の圧縮圧力はエンジンの回転数に対し 第16 図 のように2本の漸近線すなわち m=1 と $m=\gamma$ を有し,最初の圧縮行程のように回転数の低いところでは,m=1 すなわち等温変化とすべきことが判明した。したがって式(7)は

$$p_x = p_0 \left(\frac{s+c}{x+c} \right) \quad \dots \tag{8}$$

となる。また式(6)において

$$p = p_x - p_o = p_o \left\{ \left(\frac{s+c}{x+c} \right) - 1 \right\} \dots (9)$$

であるから式(6)は

$$T_{c} = p_{o} \left\{ \left(\frac{s+c}{x+c} \right) - 1 \right\} \frac{\pi}{4} D^{2} r \left(\sin \theta + \frac{1}{2 \lambda} \sin 2 \theta \right)$$

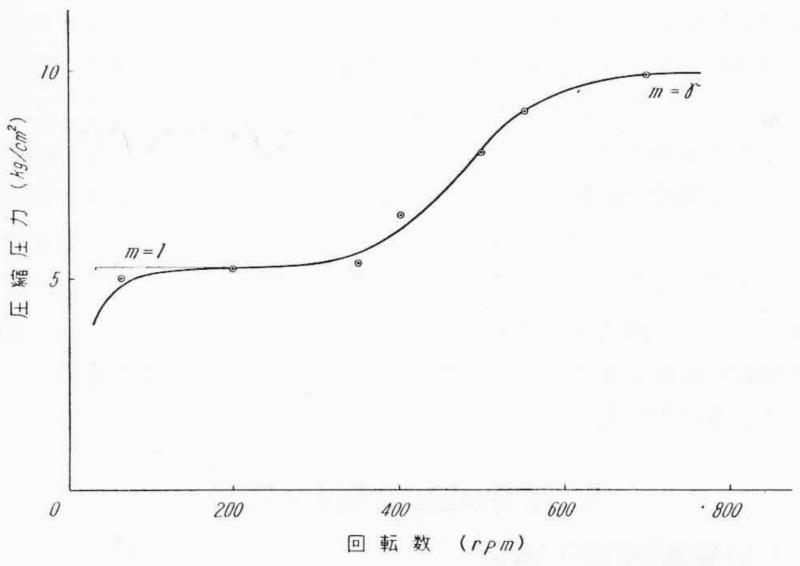
$$\tag{10}$$

となる。したがってシリンダ内の気体を圧縮するためには(10)に相当するトルクを外部より加えなければならない。175 cc のエンジンについて実際に計算した例を次に示す。このエンジンの常数は下記のとおりである。

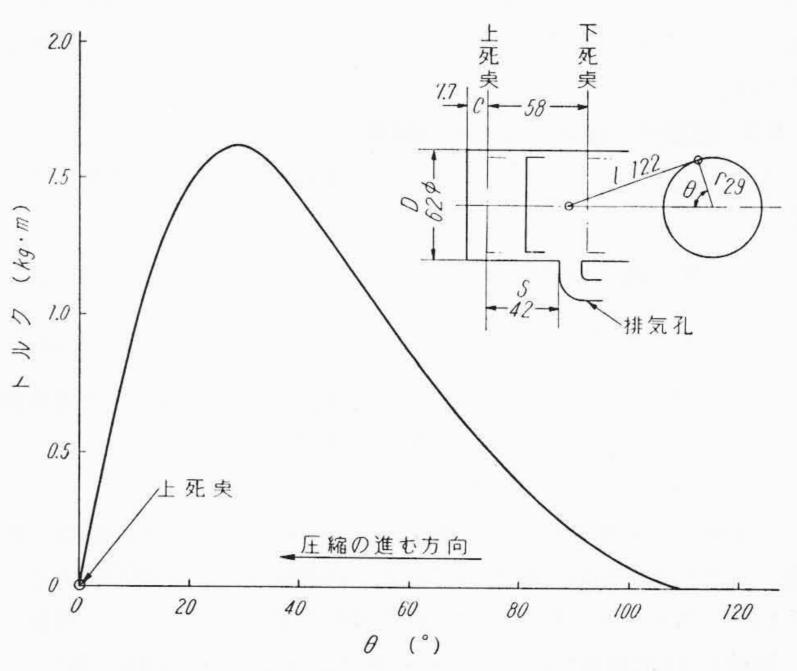
$$l = 122$$
 $r = 29$ 圧縮比 $(ε) = 6.5$ $s = 42$ $c = 7.7$ $D = 62 φ$

 $p_o=1$ atm $\Rightarrow 1$ kg/cm² として計算した結果は **第 17** 図 のとおりで上死点前 25~30° 付近で最大トルク 1.65 kg-m となる。 これに**第 14** 図で示した静止トルク 0.35 kg-m を加算した 2 kg-m が乗越トルクとなる。実測値は約 1.7 kg-m であるので比較的よく一致する。また実際には,気体の圧縮圧力が最大になる点では,静止摩擦と考えるのは妥当ではなく, p_o もクランク室内での圧縮,吸気の際の負圧の影響などを考えると必ずしも 1 atm ではないが近似的にはこれでさしつかえない。

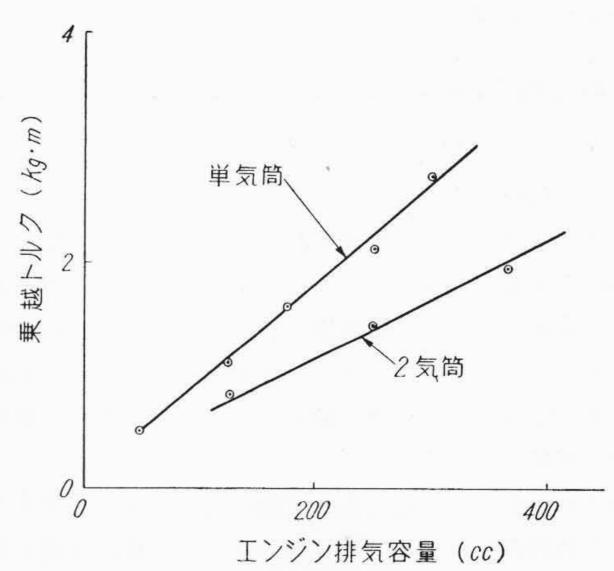
式(10)によれば T_c の最大値は $\frac{\pi}{4}$ D^2r すなわちエンジンの排気量にほぼ比例すると考えられ、また可動部の静止摩擦力に打ちかつためのトルクについてもほぼ排気量に比例すると考えられるので各種のエンジンについて、排気量と乗越トルクの大きさを実験的にし



第16図 エンジンの回転数と圧縮圧力の関係



第17図 乗越トルクの計算例



第18図 エンジン排気容量と乗越トルクの関係

らべてみると 第 18 図 のようになり、この推定が正しいことを示している。しかしこの結果は圧縮比が $6.2 \sim 6.5$ の場合であるので、特に圧縮比の高いものや、 $D \geq l \geq r$ の関係の特殊なものについては式(10)を考慮して、第 18 図 を修正して考える必要がある。

4. 発電機としての特性

発電機の端子電圧は回転数の増加とともに上昇するが、その値が バッテリの端子電圧よりも高くなると、カットアウトリレーがはた らいてバッテリに充電電流が流れはじめる。そのときの回転数を充 電開始回転数という。バッテリはスタータに電力を供給し、また充 H

電開始回転数以下の速度ではランプ、イグニションコイルなどに電力を供給し放電する。充電開始回転数を高くとれば発電機は小形となるが、バッテリの充電不足となり、低くとれば大形となる。したがって充電発電機としてはバッテリを充電不足とすることなく、しかも充電開始回転数をできるだけ高くとることが小形軽量化のために望ましい。その値は車種、バッテリ容量、走行条件により異なるので実際にはある走行条件を設定して車を走らせて決定するのが普通であるが、通常15~25km/hである。また設計にあたっては、充電開始回転数を基礎にして定格出力に達する最小回転数を定め、これによるのが便利である。

5. 装荷の配分に関する問題

5.1 電機子容量の決定

乗越トルクと定格出力に達する回転数が与えられれば、これに相当する拘束トルクと出力特性を有するスタータダイナモの設計が可能である。電機子の大きさは一般に行なわれている方法により決定すればよい。

5.2 電機子の歯とスロットの関係

スタータのトルクおよびダイナモの誘起電圧は次式で表わされる。

$$T = K_0 I_a Z \Phi \dots (11)$$

$$e = K_1 N Z \Phi \dots (12)$$

ここに T: トルク e: 誘起電圧 K_0 , K_1 : 比例常数

 I_a : 電機子電流 N: 回転数

Z: 電機子導体数 Φ: 空げき磁束

いま同一の電機子において歯とスロットの割合を変えた場合に拘束トルクと充電開始回転数がどのように変化するかを調べてみる。

(1) スタータの拘束時には直巻界磁の電流(したがって界磁の起磁力)は電動機の最大効率時の数倍に達するので磁路が飽和し、したがって磁束も飽和した状態になる。この時の磁束を Φ_s とすれば拘束トルク T_L は式(11)より

$$T_L = K_0 I_{aL} Z \Phi_s \dots (13)$$

で示される。

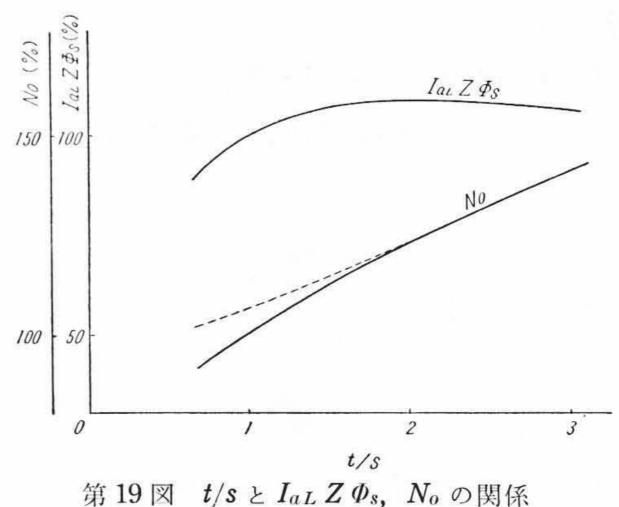
ただし I_{aL} : 拘束時の電機子電流

IaL はバッテリにより最適値がほぼ決定する。すなわちバッテリの特性上電流を大きくとったほうがスタータの入力が大きくなり有利であるが、一方放電容量および寿命の関係から最大値がおさえられる。そこでスタータダイナモの抵抗をバッテリにより決定される一定値にしておき、歯とスロットとの割合を変化した場合について考えてみる。

電機子の大きさが一定であれば歯の占める割合を大きくすればスロットの割合を小さくせねばならない。一般に電機子導体の断面積(すなわち太さ)をn倍にして、しかも電機子の抵抗をもとのままにするためには、導体の長さ(したがって導体数Z)をn倍にしなければならない。したがって電機子周辺で導体の占める面積(すなわちスロットの占める全面積)は n^2 倍になり、またアンペア導体数 I_aZ はn倍になる。

一方歯の面積をm倍にすれば Φ_s はm倍になると考えてもよい。以上のことから歯とスロットの面積の比t/s(ただしtは歯、sはスロットの面積を示す)を変化した場合に $I_{aL}Z\Phi_s$ の積の変化する状態をt/s=1の場合を100%として表わすと\$19図のようになる。

拘束トルクは式(13)に示すように $I_{aL} Z \Phi_s$ に比例するので第 19 図 はそのまま拘束トルクの変化と考えてもよい。



第13日 73 C 1aL 2 48, 110 の所

(2) 充電開始回転数 No は式(12)から

$$N_o = \frac{e}{K_1} \cdot \frac{1}{Z\Phi} \dots (14)$$

で示されるが、 e はバッテリにより定まるのでこれをさらに

$$N_o = K_2 \frac{1}{Z\Phi}$$
.....(15)
ここに $K_2 = \frac{e}{K_1}$: 常数
とすることができる。

発電機の充電開始のときには鉄の部分の飽和が進んでいないので磁気回路の大部分は空げきであると考えてもよい。したがって ϕ は界磁の起磁力により変化するが,界磁電流の大きさ(これはボルテージレギュレータの接点寿命によりおさえられる)と界磁の構造上起磁力が一定におさえられるものとすれば, N_o はZ のみの関数となり,したがってt/s と N_o の関係は $\mathbf{第}$ 19 図のようになる。実際には t/s が小さくなるにしたがって鉄の飽和が進み ϕ は減少するので点線のように修正する必要がある。

(3) 以上の関係から基本的には t/s を大きくとれば拘束トルク (すなわちスタータ) に有利となり、小さくとれば低速充電(すなわち発電機) に有利であることが判明する。

6. 結 言

以上述べたことを要約すれば

- (1) 車に適したスタータダイナモを設計するためには、エンジンの乗越トルクと充電開始回転数を明らかにすることが必要である。
- (2) 乗越トルクの大部分を占める気体の圧縮に必要なトルクは式(10)で示され、統計的には**第18**図のようになるので両者を考慮してスタータの拘束トルクを決定する。
- (3) 充電開始回転数は車種,バッテリ,走行条件などにより一定しないが,実車走行試験の結果を基礎にして決定する。
- (4) 電機子の大きさは拘束トルクと定格出力に達する回転数とから決定される。
- (5) 電機子の歯とスロットの割合 t/s(すなわち磁気回路と電気回路の割合)を大きくするとスタータ特性に有利となり、小さくとれば充電特性に有利となる。

などである。なお電機子反作用,整流,慣性モーメントなど重要な 問題が残されているが,これらに関しては今回は割愛する。

最後に本稿の執筆にあたり製作実験にご協力をいただいた関係各位に厚く感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) 中西不二夫,西脇仁一,梅津喜代治: 内燃機関工学 第2卷
 - (2) 隈部一雄: 内燃機関学
- (3) 富塚清: 航空発動機
- (4) 杉浦: 日立評論 47,506 (昭 29-2)
- (5) A. Gray: Electrical Machine Design