

## サーボ用直流プリントモータ

KK安川電機製作所\*

## 1. まえがき

プリント巻線モータは、5年前にフランスで発明された。その後、このモータの構造や性能について数多くの文献、紹介記事が発表されている。

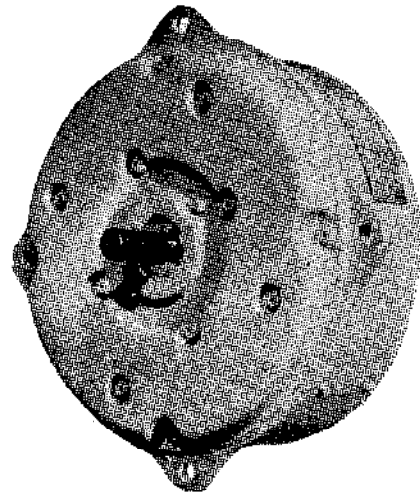
当社は、このモータのサーボモータとしての画期的な性能に着目し、フランスSEA社よりこの製造技術を導入し、約1年半前から国産化に努力してきた。そして各機種にわたり、100台近くの試作を行ない、当社独自の加工、材料、設計面の改良を加え、特性、耐久度の点で自信をもって市場に出せるモータシリーズを完成した。

ここでは、まず現在仕込みに入つた当社製プリントモータの構造と特長および特性を紹介し、つぎはこの特長をいかした応用分野につき一般的説明を行なうことにする。なお、プリント巻線を使つた応用製品は、いろいろあるがここではサーボ用直流プリントモータに焦点を絞つて説明する。

## 2. サーボモータとは

SERVOの語源は、SERVANT(召使)とか、SLAVE(奴隷)であるという。おそらく牛馬のような動力用家畜に対してSLAVEはもつと高級な、巧みさを必要とする仕事をまかせられていたからであろう。このようないきさつのあるせいか、サーボモータとサーバントの間には多くの共通点がある。主人が用事をいつけたら、すぐに仕事をやつてくれる、のみ込みの速い、腰の怪しい、しかも力持ちのサーバントは有能なサーバントといえる。またサーバントの行なう仕事は、物をとつてくるとか戸を締めるとかの多種類、軽労働で、実際の仕事より、自分自身をそこまで動かすために力や時間を要するものが多い。したがつてサーバントの能力は当然動力用家畜の能力(馬力)とは全く違つた尺度で測られなくてはならない。これと全く同様に、サーボモータの性能も連続運転用モータの性能(kW)では表わせない。身体が大きくて、いくら力持ちであつても、室内の掃除をさせたら、駒ねずみのように動きまわられる小柄な小間使にはかなわないであろう。

このサーバントの能力を力学的に考えてみよう。仕事



第1図 プリントモータ外観

とはある一定量のエネルギーである。今考えているこの量は総計ではたいして大きな量ではない、しかしこの仕事を短時間でかたずけるには、その短時間に相当大きなパワーを出せないと不可能である。このパワーは、力と速度をかけたものである。力を出すのに時間がかかつたり、力が出たが、自分自身が重たいためになかなか速度が出ないようではパワーが出ないことになる。

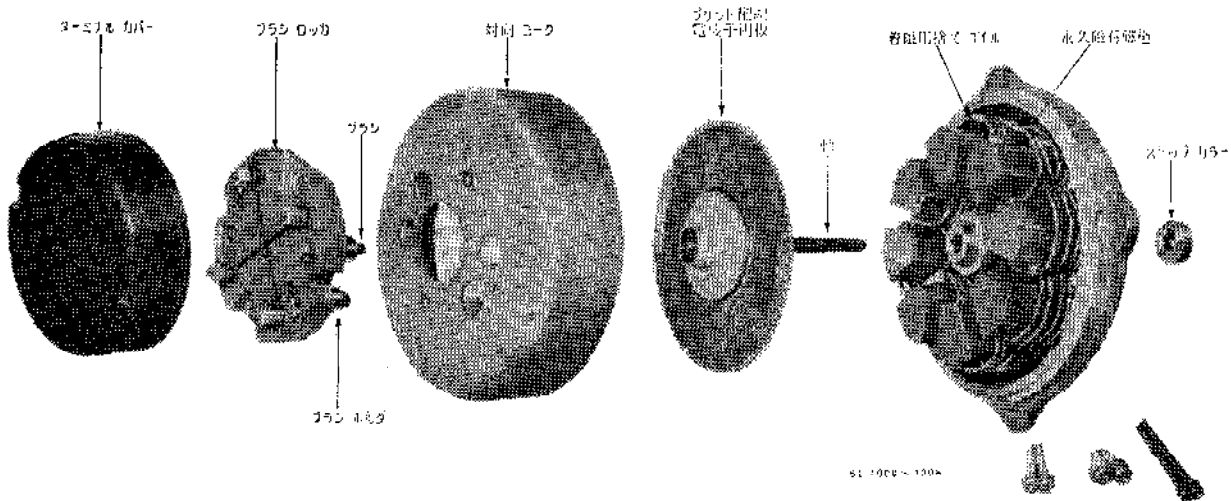
この考え方をサーボ電動機にあてはめると、力を出す速さは電流のふえる速さであり、したがつて電気回路の時定数が小さいほど速い。速度を出す速さは、自分自身を加速する加速度であり、したがつて最大速度が定められているなら加速の時定数が小さいほど速い。すなわち、最大駆動トルク×駆動回転速度=駆動パワーの応動速度  $\text{Max. Output Power/Time Constant (W/sec)}$  をもつてサーボモータの性能値と考えることができる。逆に、サーボモータとは、以上の考察より、マシンサイズに比べ、最大出力パワーの応動速度が特別大きくなるように考慮されたモータであると定義することができる。

プリントモータは、エレクトロニクスの時代の要求になつて、全く新しいアイデアで登場してきたサーボモータである。(第1図参照)

## 3. プリントモーターの構造と特長

戦後大きく発展をとげたプリント配線技術は、ラジオ、テレビをはじめ、弱電部門でエレクトロニクス製品の複雑な造は、この平面、円板状のプリント回路電機子に

\* 八幡市大字藤田2346



第2図 プリントモーター分解図

マッチするように他のすべてのピースが作られ組み立てられている。したがって固定子と回転子（電機子）の間の遊びが回転子軸方向と直交する平面状の広がりをもつたアキシヤルギャップモータとなる。アキシヤルギャップのため、モータは径方向に大きく軸方向に短いパンケーキ型となり、特性的には大トルク、低速度モータとなる。以下、各部の構造と特長につき説明する。

### 3・1 プリント回路電機子

プリントモータの電機子は、第2図に示すように、絶縁基板（ガラス基材，エポキシ樹脂積層板）の両面に、平たいリボン状の銅箔半コイルをプリント回路により形成し、表裏の半コイルをメッキ通しの導通穴により順次にシリーズに接続し、波巻電機子巻線としたものである。このコイル導体の厚みは0.1~0.3mmであるが、常識以上の電流を流せる。プリント回路導体は、厚みは薄いが生面積が広いので冷却が良く電流密度は非常に高くとれる。

部品間の配線を一挙に行なつてしまい、大量生産を可能にするモーメントを作つた。この技術は、その後配線のみにとどまらず、電気部品までプリント回路で製作するという方向にも進み、プリントコイル、コンデンサ、抵抗、切り替えスイッチなどが作られている。そしてついに強電の分野にもこの波が押し寄せ、モータ巻線をプリント回路で形成する試みがフランスではじめて行われた。ここで扱う電流は、ミリアンペアではなく数アンペアから数十アンペアとなるので、プリント基盤の熱応力による変形、回路による遠心力、振動、トルク切線力などに対する強度、耐久度の問題が生じた。これらが、構造、材料、加工面の改良により逐次解決され、はじめてプリントモータが誕生した。プリント回路がすべてそう

であるように、プリントモータ電機子は、コイル、渡り線、接続などが一挙に製作されるが、それは平面状でないと作りにくい。このためプリントモータ電機子は平面状にできあがつた。プリントモータの構（たとえば厚み35ミクロンの銅箔では100A/mm<sup>2</sup>以上の電流密度で連続使用しても問題はない）。それに、この電機子には、スロットがないので導体の占積率は100%に近く、連続定格における電気比装荷（単位長さ当たりの電流導体数）は従来のスロットに納めた絶縁電線のモータと同じ程度にとれる。短時間のくり返しピーク電流に対しては、導体が裸で露出しているために熱が内部にこもらず放散しやすいから、冷却条件が非常に良い。電機子は、遠心力、熱応力、トルク切線力などに対し十分な強度をもつように、絶縁基板の厚みを選んである。したがってこれに軸を取り付け、回転子として使用する。回転子には鉄心がないから重量が軽く、慣性モーメントが非常に小さくできる。同様に鉄心、スロットがないのでコイルのインダクタンスは無視してよく、電機子回路の時定数は問題にならない。整流されるコイルも全く同じ条件であるから、リアクタンス電圧による整流制限は全くおこらず、整流が非常によい。

### 3・2 永久磁石による固定子磁極

固定子は、8極の永久磁石の磁極を鉄に接着し、対向鉄との遊び（1~3mm）に磁束密度5000ガウス以上の磁束を通して、永久磁石としてはアルニコV相当の強力なものを使用している。このように大きなギャップに比較的大きな磁束を通して、界磁は小形でコンパクトにまとめることができる。極数が8になつたのは、マシンサイズ一定で、出力トルク最大の条件に最も近くなるからである。

## 資料編

このように極数が多く、空けきも従来のモータに比べて大きいので、電機子反作用磁界は非常に弱く、定格の10倍の電機子電流を流してもこのための減磁は全く起らない。この空けきの大きなことは、電機子コイルのインダクタンスを小さくするためにも大いに役立つ。永久磁石のかわりに界磁巻線をもつた磁極を採用することもできる。この場合は、空けきに要する強大な起磁力をまかなうために、大きな界磁巻線スペースがいきり、励磁銅損、これによる温度上昇が問題になるから、とくに小形のものはずかしい。永久磁石はこの点、起磁力が大きく、コンパクトにまとまり、損失がないので有利である。また、永久磁石材料の性能は近時、なお飛躍的に発展しつつある。今後のプリントモータの性能向上のために心強いことである。

## 3・3 整流子およびブラシ

むき出しの電機子導体に直接ブラシを接触させて給電する構造なので、特別に整流子を設けていない。整流子数は導体数に等しく、導体数は非常に多いからこの点からも整流条件は非常に良い。このためブラシとしては、ブラシドロップの低い金属黒鉛質のブラシを使用できる。したがってブラシドロップによる応動性の悪化を最小に押えられる。

整流子数の多いことは、スロットのないこととあいまって回転角度による不整トルクを全く起さないようにしている。整流子として使用される部分の導体については、か酷な条件のもとで各種の耐久試験を行なったがその結果連続回転においても $10^9$ 回転の耐用度であるからサーボモータとしては十分の耐用度と考える。

## 3・4 軸受けおよび軸支持方式

第2図に当社製、片持支持プリントモータの分解図を示す。PM-9形以下の小形モータオイルレスメタル軸受けを使用し、スラストは軸に固定したストップカラーによつて受ける構造を採用した。軸受け摩擦トルク、軸の摩擦は非常に少なく、玉軸受けとの優位差はない。PM-12以上の大形モータは、密封式玉軸受けを使用している。いずれも軸の支持方式はSEA社オリジナルと違つて片持支持方式を採用した。これは電機子ロータが非常に軽いので、特別両端支持方式にせねばならない理由がなく、片持支持の方が組み立て作業、ギャップの調整が容易であるからである。

## 4. ダンパ付きプリントモータについて

ダンパ付きプリントモータは回転子を使用する、これ

は特別に絶縁部厚みを薄く作ったプリント回路電機子にアルミディスクを接着したもので、固定子はダンパなしと全く同じである。このアルミディスクは回転子の剛性を受け持つとともに、回転中この内部に生ずるうず電流により回転速度に比例したダンピングトルクを与えるので、これを制御系安定化のために利用するものである。

アルミディスクの外径は、ディスク慣性モーメントに対するダンピングトルク定数の値を最大にするように選んである。ダンピングトルクの調整は、アルミディスクの厚みをかえて行なう。この厚みを大きく選べば、最大でモータ加速時定数をダンパなしの場合の1/6にまで減少できる。一定端子電圧における無負荷回転速度は、やはり同じ割合で減少するから、ダンパ付きはダンパなしに比べて使用回転速度が非常に低くなり、大形で100rpm、小形で500rpm程度になる。

ダンパ付きプリントモータの特長は、

- (1) 加速時定数が非常に小さい。5ミリ秒以下にできる。このため制御系が安定となり、乱調防止速度負帰還などの安定化要素をはぶくことができる。
- (2) 駆動電源、制御装置の出力電圧変動率や、内部抵抗が大きくても、これと組み合わせたときのサーボモータ応動性は悪化しない。すなわち簡単な制御装置で十分良い性能をだせる。
- (3) 速度変動率が非常に小さく、低速で安全な運転ができる。用途によつてはギヤレスにできるからギヤのガタ、イナーシャなどの影響をなくすることができる。
- (4) 電源を切ると自力停止するから、ブレーキを別に必要としない。

## 5. サーボモータとしてのプリントモータの特性と特長

以上述べてきたようにプリントモータは構造上の木質からしてサーボモータとしての必要な多くのすぐれた性能をもっている。これを要約すると、

- (1) トルクイナーシャレシオが大きく、モータ同二相サーボモータ応動性の分類

| 種 別 | 時 定 数         | m s |
|-----|---------------|-----|
| Q 形 | 15 未 満        |     |
| M 形 | 15 以 上 50 未 満 |     |
| S 形 | 50 以 上        |     |

二相サーボモータ規格  
JIS C 4907-1961 による

第1表 標準製品寸法表

| 形式            | 寸法 mm |     |                  |     |    |    |    |     |    |     |                |                |                |    |                 |    |    | 軸受け番号 |     | 重量 kg |       |              |              |      |
|---------------|-------|-----|------------------|-----|----|----|----|-----|----|-----|----------------|----------------|----------------|----|-----------------|----|----|-------|-----|-------|-------|--------------|--------------|------|
|               | L     | LA  | LB <sub>h7</sub> | LC  | LE | LF | LG | LL  | LN | LZ  | D <sub>1</sub> | D <sub>2</sub> | R <sub>1</sub> | 軸端 |                 |    |    |       | 連結側 |       | 連結反対側 |              |              |      |
|               |       |     |                  |     |    |    |    |     |    |     |                |                |                | LR | Sh <sub>6</sub> | Q  | QK | W     |     |       |       | U            | T            |      |
| PM-5<br>-5D   | 75    | 75  | 65               | 83  | 3  | 9  | 5  | 57  | 4  | 3.6 | 70             | 66             | 55             | 18 | 4               | 8  |    |       |     |       |       | オイルレス<br>メタル | オイルレス<br>メタル | 0.35 |
| PM-7<br>-7D   | 85    | 105 | 95               | 113 | 3  | 14 | 5  | 60  | 4  | 3.6 | 100            | 96             | 6              | 25 | 5               | 10 |    |       |     |       |       | "            | "            | 0.9  |
| PM-9<br>-9D   | 103   | 120 | 110              | 132 | 3  | 19 | 6  | 68  | 4  | 4.8 | 115            | 111            | 7              | 35 | 7               | 15 |    |       |     |       |       | "            | "            | 1.6  |
| PM-12<br>-12D | 120   | 165 | 150              | 180 | 4  | 18 | 8  | 80  | 4  | 5.8 | 155            | 152            | 9              | 40 | 10              | 20 |    |       |     |       |       | 6200<br>ZZA  | 6300<br>ZZA  | 3.8  |
| PM-16<br>-16D | 148   | 220 | 200              | 200 | 4  | 18 | 10 | 98  | 4  | 9   | 205            | 200            | 12             | 50 | 15              | 30 |    |       |     |       |       | 6202<br>ZZA  | 6302<br>ZZA  | 8    |
| PM-21<br>-21D | 165   | 280 | 255              | 305 | 5  | 22 | 12 | 105 | 4  | 11  | 260            | 255            | 14             | 60 | 17              | 35 | 25 | 5     | 3   | 5     |       | 6203<br>ZZA  | 6303<br>ZZA  | 14   |

注 上表の形式欄中の付加記号Dは、ダンパ付きプリントモータを示す。

第2表 ダンパ付きプリントモータ特性表

| 特性値        | 形式<br>単位                           | PM-5D   | PM-7D | PM-9D | PM-12D | PM-16D | PM-21D |
|------------|------------------------------------|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
|            |                                    | 連続拘束トルク | kg-cm | 0.16  | 0.74   | 1.4    | 4.8    |
| 瞬時拘束トルク    | kg-cm                              | 0.94    | 4.1   | 7.9   | 25     | 71     | 170    |
| 制動係数       | gcm/rpm                            | 0.21    | 1.9   | 7.1   | 33     | 110    | 320    |
| 連続最高速度     | rpm                                | 1000    | 500   | 230   | 180    | 160    | 140    |
| 慣性モーメント    | kg-cm <sup>2</sup>                 | 0.018   | 0.10  | 0.28  | 1.1    | 4.5    | 14     |
| 加速時定数      | mS                                 | 9.2     | 5.6   | 4.2   | 3.6    | 4.4    | 4.7    |
| 連続電流       | A                                  | 6.0     | 6.5   | 7.0   | 9.0    | 12     | 15     |
| 瞬時電流       | A                                  | 30      | 33    | 35    | 45     | 60     | 75     |
| 電機子抵抗      | $\Omega$                           | 0.23    | 0.39  | 0.47  | 0.53   | 0.55   | 0.56   |
| 電機子インダクタンス | $\mu$ H                            | 2.2     | 8.6   | 15    | 31     | 64     | 105    |
| 最大角加速度     | 10 <sup>3</sup> rad/s <sup>2</sup> | 51      | 40    | 28    | 22     | 16     | 12     |
| 瞬時最大出力     | W                                  | 11      | 23    | 23    | 48     | 120    | 230    |

- 注 1. 瞬時は1秒以内のインパルス負荷とする。  
 2. 繰返しインパルス負荷のかかる場合は、この負荷電流の自乗平均値が連続電流を越えないよう duty cycle を選ぶこと。  
 3. 電流の瞬時値は連続値の5倍としている。連続最大出力は、瞬時最大出力の約 1/25 となる。  
 4. 特性値はすべて導体温度 75°C における値である。

有のダンピングが大きいので加速時定数が小さい。(トルクイナーシャレシオでいつて普通のDCサーボの2~3倍、二相サーボのQ形現状規格の最高位に相当する。)

(2) 電機子、インダクタンスが無視できるので、電機子回路時定数は問題にならない。

(3) 電機子反作用による界磁の減磁が起らず、ブラシドロップも低いので、トルク特性は直線である。

(4) 整流上の制限がないので、最大出力トルクを回転速度に無関係に大きく出せる。(定格の5倍で1秒)

(5) 整流子数が多く、スロットがないので不整トルクを生じない。

(6) アルミダンパディスクを電機子にはりつけることにより簡単に内部制動をかけられる。

以上のように、プリントモータの特長は、その平滑電機子構造(スロットのない電機子)に負うところが大きい。この点では、“Minertia” Motor と一脈あい通ずるところがある。しかし構造的には極端に違った形とな

り、したがって特性、制御性の上では一長一短があり実際の使用にあたっては、この点を考慮しておのおのの特長を生かした選択をすべきであろう。

第1表に現在仕込みに入ったプリントモータの寸法第2表にダンパ付きプリントモータの特性表を示す。また第3表にダンパなしプリントモータの特性表(設計値)を示す。

## 資料編

プリントモータで製作し得るモータ容量範囲は、今のところ電機子外径で50mmから300mm程度、連続トルクでいつて0.1~100 kg-cm (3000 rpmにて出力3 W~3 kW) 程度である。

## 6. プリントモータの応用分野

今まで述べてきたように、プリントモーターは、先天的にサーボモータとしての性能が備わっているの、応用分野としては、サーボ機構の操作端高級位置決め動作の操作モータ、つかみおよび押し付け動作トルクモータなどにうつてつけである。このほかに小さなものは速度検出用タコゼネとして適しているし、電機子電圧を調整すれば速度制御は容易にできるから可変速度電動機として小は数ワットから大は数キロワットまでの負荷をまわすこともできる。ここではサーボ用に焦点をしぼつて説明する。

### 6・1 サーボ機構への応用

制御装置として、パワートランジスタ、コントロールシリコン、速応性磁気増幅器などを使い、プリントモータを制御すれば、すぐれた応動性のサーボ機構を組み立てることができる。プリントモータ固有の応動性としては10ミリ秒程度であるが、電機子抵抗は0.5Ω以下で非常に低いから、電源、制御装置の出力インピーダンスをこの程度に低い値に押えないと、総合した応動性を悪化させることになる。サーボモータの性能を完全にいかすには、これ以上の性能をもつた制御装置が必要となる。しかし一般には、インピーダンスマッチのみ考慮して制御装置固有のパワー応動速度を高めるのは費用がかさむので、総合した応動性を高める方法として、サーボモータ回転速度の負償還を併用する。

プリントモータは、ダンパ付きにすることによつて、制御装置を通さずに、直接的にダンピング（速度負償還）をかけるから、このようにした場合は、電源、制御装置は簡単なもので済み、非常に経済的となる。この場合は、電源制御装置の出力インピーダンスによつてサーボモータの応動性はほとんど影響されない。ダンパ付きは低速となりしかもトルクは変わらないから、ダンパなしより速度のへつた分だけ出力がでなくなる。したがつてダンパ付きを使用する場合はマシンサイズの大きな

第3表 ダンパなしプリントモータ特性表（設計値）

| 特性値               | 形式<br>単位 | PM-5    | PM-7   | PM-9   | PM-12 | PM-16 | PM-21 |
|-------------------|----------|---------|--------|--------|-------|-------|-------|
|                   |          | 連続定格トルク | kg cm  | 0.14   | 0.65  | 1.3   | 4.4   |
| 定格速度              | rpm      | 6000    | 5000   | 4000   | 3000  | 2500  | 2000  |
| 定格出力              | W        | 8.5     | 33     | 53     | 140   | 310   | 620   |
| 定格電圧              | V        | 3.3     | 9.1    | 13     | 22    | 37    | 55    |
| 定格電流              | A        | 6.0     | 6.5    | 7.0    | 9.0   | 12    | 15    |
| 最大速度              | rpm      | 20,000  | 13,000 | 10,000 | 7500  | 5500  | 4500  |
| 1000 rpm における誘起電圧 | V        | 0.32    | 1.3    | 2.3    | 5.7   | 12    | 23    |

- 注 1. 電機子抵抗、インダクタンス、慣性モーメント、瞬時最大トルクは、ダンパ付きと同じ。  
2. 最大速度は、この速度で回しても、機械的強度および整流上の問題は全く起こらないが連続で負荷はかけられない。

ものを使わなければならないのだろうか。いやそういうことはない。サーボモータの容量は理論的にいつてパワーで表わすべきものではなく最大パワー/時定数で表わすべきものである。このサーボモータの容量はダンパを付けることによつて変わらない。

サーボ機構としてプリントモータを応用できる用途の一例をあげれば、工作機ならいレース刃物送り用、布、紙、ゴムなどのエッジポジションコントロール、各種原動機のスピードレギュレータ操作用プロセス、コントロールのバルブあるいは、制御用抵抗器操作用、巻取機テンションコントロール用などの数百ワットから数十ワットの比較的大きなものから、小さなものは数ワット以下の各種平衡計器、調節計、やアナログコンピュータなどのポテンシオメータ駆動用がある。

### 6・2 サーボ的使用法

#### 6・2・1 位置決め動作

急速に移動して一定位置をとる動作は、移動速度が速くなり、一定位置の寸法精度を高く要求されると非常にむずかしい制御を必要とする。従来このような高級な位置決め動作を電動で行なうには、モータイナーシャをいかにして殺すかに苦心が払われた。クラッチを使つてモータイナーシャを切りはなしたり、2段速度のモータ、あるいはミッションを使つて止める近くにきたら低速に切りかえておいてブレーキをかけるとか、クラッチ、ブレーキ、ミッションなどの機械的メカニズムを使つて行なつたものが多い。しかしひん度が高くなると、これらのライニングの摩耗などのトラブル、保守のめんどうさなどが問題となり、純電氣的制御によつてこれが試みられた。

プレーナの刃物送りはこの一例である。この場合は、

加減速度を大きくとるために減速比を小さく選び、加減速の時定数を小さくして隋走を押えるために強度の電氣的ダンピングをきかせた直流モータを使用する。このためモータは低速で使うことになり、減速比が小さいから負荷トルクに打ち勝つためと、自分自身を加速するために大トルクを必要とし、直流モータのマシンサイズは非常に大きなものが使われた。したがって高価な装置となり、用途も広がらなかった。

プリントモータをこのような高級位置決め動作に使用すれば、本来トルクイナーシャレシオが大きく、時定数が小さいので、マシンサイズの小さなものを比較的高速で使い、減速比を大きくとつても加減速度は十分とれるので経済的な設計が可能となる。

プリントモータを応用できる位置決め動作の一例をあげると、板、布、紙、ゴムなどを定尺に切断するための送りモータ、木工機ではバンドソーの歩出し装置、工作機ではプレーナ刃物送り、横ぐり盤の位置決め、バルブポジション遠方操作などがある。

#### 6.2.2 つかみ、押し付け動作

一定の力で物を押しつける動作は、従来は油圧、気圧で行なわれたものが多い。これを電動で行なえば、昇圧装置、配管などの設備が不要となり経済的である。このようなモータの使い方は、モータの静的なトルクを利用するものであるから、ロック状態で使つてもやけないトルクモータを使用する。トルクモータは内部損失が大きく、冷却条件は悪いのでマシンサイズが大きく高価な装置になった。しかし電動押し付け装置がそれほど使われず、油圧、気圧にとつてかわれなかつた理由は、そのためだけでなく、モータイナーシャで締め込むトラブル

を防げなかつたからであるといえる。

プリントモータは、ロックして定格電流を流し、連続に放置しておいてもやけない。導体が裸でむき出しになっているから熱が導体の中にもならず、外被は全閉であるから冷却条件はロック時と回転中とあまり変わらないためである。界磁に永久磁石を用いているから損失は電機子銅損のみであることも有利に働らく。またトルクイナーシャレシオが大きいので、減速比を比較的大きくとつてもイナーシャで締め込む力も小さくできる。このようにプリントモータは直流トルクモータとして最適の性能をもっている。

プリントモータを応用できるつかみ、押し付け動作の一例としては、工作機ツールヘッド、コラムクランプ用ワークのチャック用、プレーナ刃物引き上げ用、エレベータ用ドアモータ、バルブ操作用、各種電動締め付け装置などがある。

## 7. むすび

以上述べてきたように、プリントモータは、従来のモータと違って、種々の特長をもっているから、まずこの特長を生かした使用法を各応用分野に開拓していかなければならないと思う。

また今後のプリントモータ開発方針としては、このモータの構造上の本質からして、やはりサーボ用、イナーシャが問題となるオペレーティング方面に主力をおき、設計、工作法、その他についての研究をさらに進めていくつもりである。またステップモータ、トランスデューサなどもプリント回路電機子の特長をいかせるので、この種の原理のもの開発も計りたいと考えている。