電磁力駆動の高速往復動テーブルの試作*

青木 勇** 海野浩一*** 大石友昭† 樋口俊郎††

Development of High-speed Reciprocating Table Driven by
Electromagnetic Force

Isamu AOKI, Kouichi UNNO, Tomoaki OHISHI and Toshiro HIGUCHI

This paper describes the results on the development of a high-speed reciprocating table driven by electromagnetic force. The table is driven for quick acceleration and quick deceleration by the repulsion force due to electromagnetic impulsive force. The force is produced between a coil and the conductive material facing the coil when a powerful current flows through the coil by sudden discharge. The computer-controlled stopping system which already suggested by the authors is applied in order to attain the quick stopping of the table. The table mainly consists of a mobile table, a pair of coils and electric circuits, and a control system for driving. The table is guided by linear bearings through linear shafts supported by stands on the left and right to ensure linear motion on a straight line. For the purpose of inducing an eddy current, two aluminum plates are attached to both table surfaces facing the coils. The motion of the table can be summarized as follows. The table is at first accelerated by the coil set at the stand on one side, and is run freely at a constant high speed. When the table accesses the other coil surface, the discharge current flows through the coil. Then the table stops quickly if the discharge timing is adequately controlled. The repeated motion mentioned above is the principle of the reciprocating table mechanism developed. As the result of the experiments, stable reciprocating motions were ascertained even with varied table speed. In the cutting tests of soft vinyl resin using the developed table, the cut surfaces became smooth with increasing cutting velocity.

Key words : reciprocating table, quick stopping, electromagnetic impulsive force, computer-control, cutting of resin

1. 緒 言

左右に並進運動する往復動テーブルは機械工学の様々な分野で広く用いられている。加工分野の例としては、平削盤、平面研削盤のような工作機械、あるいはスリッティング装置、スクライビング装置などが上げられる。これらの駆動源は、主に各種モータ、油圧、空圧である。そして、それらの実用的駆動速度は現在のところ、約1 m/sが上限と見てよいであろう。しかし、さらに高速化が望まれている分野¹⁾²⁾もある。

この理由を上記の加工機の例に求めれば、(1) 駆動速度を上げることで作業時間を短縮できることと、(2) 高速化によって加工力の低減及び製品品質の向上が期待できることが上げられる。最近では、樹脂表面の直線的軽切削も多く、良好な面の仕上がりが要求されることが多い。回転刃を用いない場合、これらの要求のある部分は高速度並進運動による切削で達成されることが考えられる。

並進運動機構において、既存の駆動方法では高速化することは必ずしも容易ではない。また往復動する機構は必ず左右両端での運動方向の反転を必要とし、この時の加減速にかなりの時間、距離を要する。従って、駆動の全域にわたり高速を得るのはなかなか困難である。特に駆動範囲が狭い場合、加減速に要する時間の占める割合は相対的に大きくなる。

著者らはこれまで、電磁力を利用した急停止機構を開発してきた³⁾⁴⁾。この手法によれば、数 m/s 程度の高速移動物体を、極めて短時間、短距離で急停止させ

* 原稿受付 平成2年4月3日。1990年度精密工学会春季大会学術講演会(平成2年3月29日)にて発表

** 正会員 神奈川大学工学部(横浜市神奈川区六角橋3-27-1)

*** 神奈川大学工学部(現、旭テック(株); 静岡県小笠郡菊川町堀之内547-1)

† 神奈川大学工学部(現、東京電気(株); 東京都千代田区内神田1-14-10)

†† 正会員 東京大学生産技術研究所(東京都港区六本木7-22-1)

Fig. 1 Producing mechanism of electromagnetic impulsive force

ることができ、上に述べた高速往復動テーブルの駆動技術として採用できる可能性がある。

機構上、加速後の物体は慣性走行になるので、位置制御の問題や、大きな負荷が加わる場合は移動体の速度低下が著しい等の問題がある。従って、用途としては、こうした点があり問題にならない分野に限定されよう。加工機として特徴を生かそうとすれば、非常に負荷が小さく、速度効果の大きい材料の加工等で、冒頭の(2)を主たる目的とすることになる。また、加工以外分野で、機構の高速化を図る目的で、用いられる場合もあらうと考えられる。

今回、以上の構想に基づく往復動テーブルの試作を行い、さらに加工機としての可能性についても若干の検討をした。その結果、実験段階ではあるが、ほぼ所期の目的を達成することができたので以下に結果を報告する。

2. 電磁力の発生機構及び加減速機構

図1は電磁力の発生機構である。コンデンサに蓄えた電荷を瞬間的にコイルに放電する。この時コイルに対向してアルミニウムや銅のような導体板を置くと、これに渦電流が誘導され、コイルを流れる電流との間に反発力“電磁力”が働く。コイルを固定して、これに導体板を密着しておけば、導体板は電磁力により加速される。逆にコイルに向かって運動する導体板に対しては、電磁力はこの速度を減少させることができる。

図2は加減速運動を実現する概念図である。コイルAに放電電流が流れ、導体板が加速され、一定速度を得る。慣性走行する導体板がコイルBに接近した時点で光学式位置検出センサがこれを検知し、適当な時期に放電電流を流すと導体板は急速に減速し、放電のタイミングが適切であれば、非接触で急停止する。

今、コイルA,Bの特性が等しく、それらの実効インダクタンス、実効抵抗をそれぞれ L, R 、導体板質

Fig. 2 Concept on quick acceleration and quick stopping mechanism developed

量を m 、回路の電流を $I(t)$ 、電磁力を $K(t)$ とする。コイルA表面からの導体板変位を X とすれば、加速時の時刻 t における加速度 a 、速度 V 、変位 X はそれぞれ、次のようになる。

$$K(t) = \frac{1}{2} \cdot I(t)^2 \frac{\partial L}{\partial x} \quad (1)$$

$$a = \frac{K(t)}{m}, \quad V = \int_0^t a \, dt, \quad X = \int_0^t V \, dt \quad (2)$$

L, R は変位と周波数 f の関数であるので、実測により次のように定式化できる。

$$L = L(X, f), \quad R = R(X, f) \quad (3)$$

(1)~(3)を連立して数値計算することでテーブルの運動が求まる。

減速時には、変位 X をコイルB表面からとることとする。この場合、導体板が初速度 V_0 で、放電後 V に変化したとすると、運動量と力積の関係より

$$m V_0 - m V = \int_0^t \left[\frac{1}{2} \cdot I(t)^2 \frac{\partial L}{\partial x} \right] dt \quad (4)$$

$$X = \int_0^t V \, dt + X_0 \quad (5)$$

但し、 X_0 は放電を開始した時刻における導体板の位置である。この場合も加速時と同様、(3)~(5)を連立して数値計算すれば、テーブルの運動が求められる。この解析の詳細については文献⁴⁾を参照されたい。以上の関係より、加速時、減速時いずれの場合も、コイルに流す電流の大きさと放電開始位置の適切な設定により導体板の運動を制御することができる。電流値は回路の特性、充電電圧、コンデンサ容量により容易に制御できる。また放電開始位置を変えると dL/dX 、 R が変化し(図5参照)、電流値が変化し、テーブルに作用する電磁力の大きさが変化することとなる。

なお、以上の説明では無視しているが、テーブルの速度が著しく低下し、零近くなった段階では直道案内部の若干の摩擦も停止に寄与する。

Fig. 3 Scheme of reciprocating table

Fig. 4 Overall view of table developed

3. 試作した実験装置及び駆動

3.1 実験装置

図3は試作した往復動テーブルの装置図、図4は外観写真である。左右の両スタンドで支えられた直道案内軸を、直道転がり案内支持の硬質塩化ビニル製テーブルが左右に移動するもので、コイルに面する両表面に板厚5mmのアルミニウム板が貼ってある。このテーブルが図2における導体板に相当する。図3でコイルAによりA側より打ち出され、一定速度を得たテーブルはB側で急停止する。これを左右に繰り返し、往復動をする。打ち出し時には電気エネルギーを有効に利用するため、電磁ソレノイドでテーブルをコイル表面に密着させている。光学式位置検出センサはテーブルの速度を測定し、停止コイルに放電電流を流すタイミングを決定するものである。

テーブルの実質移動距離は290mm、テーブル質量は540g、コイルは巻数170の空心コイルで、その実効インダクタンス及び実効抵抗はそれぞれ507 μH 、0.601 Ω である。このコイルの特性を図5に示す。駆動源のコンデンサは500 μF 、充電電圧は可変で最大1000Vとした。

(a) Effective inductance

(b) Effective resistance

Fig. 5 Variation of effective inductance and effective resistance as a function of distance between coil and conductive plate

テーブル変位の計測は渦電流式変位計（測定範囲12mm、分解能1 μm ）で、電流波形の計測はホール素子を用いたクランプ式電流計（測定範囲：1000A、応答周波数1kHz）で行った。

3.2 駆動手順

装置の駆動及び制御方法はすべてマイクロコンピュータによっており、すでに報告したもの³⁾と基本的に同じである。図6に駆動の手順を示す。(a)は繰返しの手順、(b)は急停止の制御方法を示す。装置は2つの光学式位置検出センサA、Bを備えており、テーブルがこれをよぎる間、内蔵の発信器のパルス数をカウントする。データはマイクロコンピュータに送られ、速度に見合った放電の開始時期を算出する。これは光学式位置検出センサB通過後のパルス数の形で出力される。一方、テーブルが光学式位置検出センサBを通過した瞬間から、再度パルス数のカウントが始まり、これが先の出力値と一致した時、停止コイルへの放電が始まる。従ってこの装置では、テーブルの速度が変化しても、これに対応して停止制御できるので、所定の範囲内であれば常に非接触で急停止できる。このため、テーブルに作用する負荷が一定でな

Fig. 6 Driving procedure of reciprocating table

く、速度変化を生じるような場合にも適用できる。

4. 試作機 の 特性

以下、テーブルを数回左右に往復動させた時の運動特性を示す。AからB、BからAへと運動するのであるが、両者の特性の差は小さいので、AからBへ運動する場合の例を示す。図7はテーブルの加速-減速特性の例である。この場合のコンデンサの充電電圧は、加速側・減速側共に700Vである。加速、減速に要した時間は合計3.77ms、距離にして5.4mmと極

Fig. 7 Example of velocity-displacement diagram of table ($E_0=700$ V) Fig. 8 Output data of computer for determining the discharge timing ($E_0=700$ V) Fig. 9 Displacement of table from coil when the discharge begins ($E_0=700$ V)

めて小さい。また、速度の低下は主に転がり案内部の摩擦と空気抵抗によると見られるが、その低下割合は比較的小さい。

図8～図10は、一定電圧で往復動させた場合の繰返し停止機構の回路の安定性と、停止の安定性を示すデータ例である。設定した電気的条件は図7の場合と同じであるが、停止制御に関しては、停止動作の確実性を考慮して、適正条件よりもテーブルが若干コイルに接近した時点で、放電が開始するようにした。このため、テーブルは放電開始時より幾分押し戻された位置で停止することになる。図8はテーブルが光学式位置検出センサBを通過した時点で、コンピュータが出力した停止カウントデータである。このカウント数

Fig. 10 Displacement of table from coil when it stopped ($E_0=700$ V)

に相当する時間の後、コイル B に放電電流が流れるので、テーブル速度が一定なら、このデータも一定となる。同図のように値は全く同じで回路の安定性並びに加速されたテーブル運動の安定性を示すと思われる。図 9 は図 8 のデータに基づいてコイル B に放電を開始した時点のテーブルの位置（コイル B 表面からの距離）を示す。この値もほとんど一定となっている。図 10 はテーブルが停止した位置（コイル B 表面からの距離）であり、これは若干ばらついている。急停止時には、テーブルは電磁力により大きな負の加速度を受けるので、転がり案内部に大きな負担がかかることになる。上のばらつきはこの時生じる転がり案内部のボールの運動不安定性に依存していると推定される。この点については機構の信頼性の点からも検討の余地がある。ただし繰返し運動する面での問題はない。逆方向に打ち出す場合、これら停止位置のばらつきがあっても電磁ソレノイドでテーブルをコイル面に密着できるからである。

なお、試作機による速度は、装置の都合上、現状では 2.8 m/s 、毎分の繰返し数を 10 回程度にとどめている。しかし、実際には速度 5 m/s 、毎分 60 回程度の運転が可能である。

高速化、及び連続繰返し動作を行う場合、考慮すべきいくつかの問題がある。一つはコイルの温度上昇である。停止制御の点では、コイルの抵抗やインダクタンスの変化をもたらすから、停止条件の設定について検討する必要がある。また、コイルは樹脂で固定しているので、繰返し使用に耐える強度が必要となる。加工機等への応用を考えると、装置の剛性や精度も問題で、これはエネルギー効率とも関連する。装置の剛性を高めようとするれば、案内部やテーブルの質量が増し、一般的に効率は低下する。装置を効率良く駆動させるためには、エネルギー効率を高める必要があり、テーブル速度とテーブル質量、案内方式など装置の設計が重要である。特に、効率の良いコイルの開発は大切で、この点に関しては、現在検討中であり、今後の

Fig. 11 Experimental procedure on cutting of soft vinyl resin

Fig. 12 Geometry of cutting tool used

継続課題としたい。

5. 切削加工への応用

この往復動テーブルの応用はいろいろあると思われる。ここでは切削加工への応用を試みた。通常の金属は在来の加工機で比較的問題なく加工できるが、高分子材料では、加工上問題となっているものもある。ここでは軟質塩化ビニル樹脂の切削加工を試みた。これは、材料が文字どおり軟質で加工がしにくいこと、また速度の影響も大きいと考えられるからである⁵⁾⁶⁾。切削試験片形状は、厚さ 6 mm 、長さ 30 mm 、幅（切削長さ） 6 mm の直方体である。図 11 は加工の状況を示す。試作機を平削盤に見立て、テーブルに被削材料を取り付け、本体に固定した切削工具で削るもので、一種の溝加工である。切削工具は図 12 のような高速度工具鋼製 (SKH 9) の剣バイトで先端角 30.5° 、すくい角 7° 、逃げ角 8° で先端に幅 0.54 mm の平坦部がある。刃先先端の丸み半径は約 $20 \mu\text{m}$ である。

図 13 は切込み量の増加に伴うテーブルの速度変化、及び速度変化に対応する放電開始位置（コイル B 表面からの距離）を示す。切込み量の増加につれ、当然速度の低下を生じる。そして、これに応じ、放電開始

Fig. 13 Variation of table position when discharge begins (x) and table velocity after cutting (V') with varied depth of cut

Fig. 14 Scanning electron micrographs of cut surface of soft vinyl resin (Depth of cut; 0.3 mm)

位置がコイル表面より遠方になり、適切に制御されていることがわかる。いずれの場合もテーブルは非接触で停止する。図14は切削面の写真で、切削速度を変化させ、そのときの溝の底部を観察したものである。速度の影響は明りで、低速度でむしろしたような面(a)が、高速になると極めて滑らかな面(b)となっている。なお、この場合の低速0.7 m/sは、機種や条

件にもよるが、通常の形削り盤ではかなりの高速度に相当する。旋削では容易に高速切削を実現できるが、固定刃による平面的な切削では必ずしも容易でない。本装置のラムは加速後は慣性走行となり、大きな負荷がかかる場合は問題であるが、条件を限定すればこの加工例のように実用に供することができよう。

6. 結 論

電磁力駆動の高速往復動テーブルの試作を試みた。その結果、

- (1) 電磁力による急加速、急停止機構を用い、左右に高速度で動く往復動テーブルを試作することができた。
- (2) 試作機の運動の繰返し安定性は、停止時の放電開始位置、停止位置の再現性から判定して、ほぼ良好といえる。
- (3) 試作機を用いた高分子材料の切削実験を行い、これより加工用機としての可能性が確認できた。

参 考 文 献

- 1) I. Inasaki: Speed-stroke grinding of Advanced Ceramics, Ann. CIRP, 37, 1, (1989) 299.
- 2) 横田悦二郎: 最新金型用研削加工技術と研削盤の動向, 型技術, 3, 13 (1988) 18.
- 3) 青木 勇, 樋口俊郎: 高速移動体の電磁力を利用した非接触急停止機構の開発(第1報)——停止装置の試作, 精密工学会誌, 55, 5 (1989) 939.
- 4) 青木 勇, 樋口俊郎, 小坂克信, 藤田耕一: 高速移動体の電磁力を利用した非接触急停止機構の開発(第2報)——停止機構の考察とマイクロコンピュータによる停止制御, 精密工学会誌, 55, 10 (1989) 1827.
- 5) 編集委員会編: プラスチック加工技術便覧, 日刊工業新聞社, (1989) 697.
- 6) 鴨川昭夫: プラスチックの切削加工, 日刊工業新聞社, (1989).