磁性流体を用いた進行波形シートキャリア*

田 中 皓 一^{*1}, 高 木 至 人^{*2}Sheet Carrying Mechanisms Using Progressive Waves
of a Membrane Sustained by Magnetic Fluids

Koichi TANAKA and Itaru TAKAGI

This paper reports the development of a sheet carrying mechanism by means of the progressive wavy motion of a thin elastic membrane which is sustained by magnetic fluid. The sheet carrier consists of a magnetic fluid layer in a shallow rectangular vessel, a thin elastic membrane covering the magnetic fluid, and digital electronic equipment to drive and control a series of magnetic coils. By applying the magnetic field in the form of sinusoidal waves, progressive wavy motions of the magnetic fluid and the elastic membrane are excited, and the sheets of paper or plastic film can be carried on the surface of the membrane. An interesting transportation behavior and its dependence on the wavelength and the frequency of the progressive waves are examined experimentally.

Key Words: Magnetic Fluid, Propulsion, Elastic Wave, Coupled Vibration, Peristaltic Motion, Surface Waves, Mechatronics, Sheet Carrier

1. 緒 言

著者らは、磁界中で特異な振舞いをする磁性流体を媒体として進行波状運動を行う弾性膜による流体輸送の可能性を試みてきた^{(1)~(3)}。本研究では、さらに流体以外の物質を輸送する装置の一つとして、プリンタや複写機または生産ラインに適用できるような薄いシート状物体の搬送装置の開発を目的として、その可否と基本的機構を調査する。現在、この種の搬送装置としてはフリクションローラ方式がほとんど唯一であることからして、本方式は新しい用途を生む可能性が予測できる。本報告では、予備的実験として記録用の普通紙とOHP用フィルムを例にとって定性的な搬送挙動を調べた結果について述べる。

2. 実 験 装 置

試作した実験装置の配置を図1に示す。後述するように、磁性流体とそれを被覆する弾性膜および一列に配置したコイルユニットからなる弾性膜駆動部、

PWM変調による多相進行波信号を作るとともにMOS-FETによるスイッチング増幅回路を制御するデジタル制御装置、および直流電源回路からなる。また弾性膜駆動部には補助的に紙送りガイドを設ける。

2・1 進行波磁界制御装置 進行波磁界制御装置としては既報⁽³⁾で詳述したマイクロコントローラを用いたSin-ROM読み込みΣ変換D/A(PWM変調方式)出力によるデジタル制御装置を利用する。動作原理の概略は以下のとおりである。正弦波1周期分を258×8bit分解能で記憶したROMを用意し、これを1語ずつ順に一定の速さで読み出してD/A変換すると正弦波が得られる。そこでROMを読み出す速さを

図1 実験装置の配置

* 平成3年12月10日 磁性流体連合講演会において講演、原稿受付 平成4年1月9日。

^{*1} 正員、名古屋工業大学 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)。

^{*2} 名古屋工業大学。

変えずに、一つずつ飛ばして読んだり、同じものを2回ずつ読んだりすると、正弦波の周期はそれぞれ2倍、1/2倍となる。このようにROMの読出し方で周期と位相の制御されたデジタル信号を用い、20チャンネルの電力用MOS-FETにより直流電源電流をスイッチングして以下に述べるコイルユニットで進行波磁界を生成する。

2・2 磁界発生コイルユニット 図2に示すように、けい素鋼板によるE形鉄心20個を、アルミニウム合金製のスペーサを介して一列に並べる(磁極間距離17mm)。一方、ペークライト製のコイルボビンに直径0.2mmの被覆銅線を1000回巻いてコイルとし、各鉄心に装着する。弾性膜駆動部本体をこのコイルユニットの上部に取付ける。なお、おのおののコイルのリアクタンスおよび直流抵抗の平均値は、それぞれ203mHと75.7Ωである。

2・3 弾性膜駆動部 アクリル製外枠内に軟質シリコンによるW形(磁性流体層の厚さが10mmの場合)、またはV形(磁性流体層の厚さが5mmの場合)の断面形状の弾性支持体を取付け、その上に薄い炭素繊維膜を接着する。そしてこの空洞内部に水ベースの

図2 磁界発生コイルユニット

図3 弾性膜駆動部

図4 紙送り駆動部およびガイド

磁性流体(フェリコロイドW50)を封入する(図3)。

2・4 紙送りガイド 後述するように、搬送する対象物体によっては、図4に示すように波動弾性膜上に置いた紙片を上部から押さえるためのガイドを用いた。弾性膜面とガイドとのすきまは任意に調節できるようにになっている。

3. 実験方法

シート搬送装置の基本的特性の把握を目的として、コイルの磁界発生特性、およびOHPシートまたは紙片の搬送状況に関する実験を次の方法により行った。

3・1 コイルの磁界発生特性 図5に示すように、X-Y-Z移動台に取付けたホール素子形の磁束密度測定プローブを用いて、コイルユニットの磁気特性を調べる。

(1) 電源電圧を一定(DC 20V)、プローブの高さを一定($Z=10$ mm)とし、スイッチング周波数を変化させたときにコイル中央部($X=0$ mm)に発生する交流磁束密度の実効値を計測し、コイル単体の周波数特性を調べる。

(2) 直流電流を印加した場合に、磁極からのプローブの高さを一定($Z=10$ mm)とし、電源電圧を変化させたときにコイルに発生する直流磁束密度の変化、および電圧を一定(DC 20V)としてプローブをX-Z面で走査してコイルに発生する直流磁束密度の分布を調べる。

3・2 搬送に関する実験 磁性流体層の厚さが5mmの場合には幅56mmのOHPフィルムを、磁性流体層の厚さが10mmの場合には幅56mmの紙片を主として用いて以下の実験を行った。その他、軟質または硬質の各種薄板状物体についても搬送挙動を観察した。なお、電源電圧はDC 30V一定とした。

(1) 磁性流体層の厚さが5mmの場合には、ガイ

図5 コイルユニットの磁界強度測定

ドを取り外した状態で、長さが40, 60, 80 mmの3種のOHPフィルムを弾性膜面上に置いて、コイルに印加する波長と周波数を変化させてフィルムの搬送挙動を観察する。

(2) 磁性流体層の厚さが10 mmの場合には、ガイドを取付けた状態で弾性膜面上に紙片を置き、コイルに印加する波長と周波数を変えるとともに、弾性膜面とガイドとの間隔を変えて紙片の搬送挙動を観察する。なお、紙片の長さを40, 50 mm, …と10 mm間隔で変化させ、長さの変化に伴う搬送挙動の違いを観察する。

4. 実験結果と考察

(1) 電源電圧をDC 20 V、プローブの高さを $Z=10$ mmとし、コイルに交流電流を印加した場合にコイルに発生する交流磁束密度の周波数特性を図6に示す(磁束密度の値は実効値である)。図6より、このコイルユニットの高域カットオフ周波数は約30 Hzであるが、低周波側でほぼ平坦な周波数特性を持つ。ま

図6 コイルに発生する磁界の周波数特性

図7 電圧に対するコイルの直流磁束密度変化

た、図6において周波数が2 Hz以下で磁束密度が減少するのは測定機のACカップリング入力に基づく低域カットオフ周波数による影響である。

(2) プローブの高さを $Z=10$ mmとし、直流電流を印加したときの電源電圧とコイルに発生する直流磁界の磁束密度との関係を図7に示し、電源電圧を20 V一定としプローブを走査して得られた直流磁束密度分布を図8に示す。また、図9は図8のデータを基にして等磁力線図を描いたものである。これらの図から、磁極のごく近傍ではコイル端部の影響によって二つのピークを持つが、磁性流体層の存在する $z=3$ mmから $z=13$ mmの領域ではほぼ平坦な磁束密度分布が得られている。

(3) 磁性流体層の厚さが5 mmでOHPフィルムを用いた場合の周波数および波長の変化に対するフィ

図8 磁極近傍の直流磁束密度分布(電圧20 V)

図9 コイルの等磁力線図(電圧20 V)

ルムの搬送状況を図10(長さ40 mm)と図11(長さ80 mm)に示す。なお、図10, 11中の V は平均最高搬送速度を示す。これより、進行波の周波数 f と波長 λ の積が一定となる条件の下で搬送が効率的に行われている。本実験では、 $1\text{ m/s} < f\lambda < 2\text{ m/s}$ が搬送可能領域となっている。しかし、搬送挙動を観察すると、本試作機の場合フィルムの動きは必ずしも一様ではなく、搬送速度も位置や波長、周波数とともに変化する。特に低周波域においては、フィルムはいくつかの点(以下、停留点と呼ぶ)を境にして移動方向が逆転するという興味ある現象が現れる。停留点は、弾性膜の長さが有限であることによる膜や容器の端部での反射波と強制波の干渉に基づくと思われるが、その発生状況は磁性流体層の厚さや磁気特性、弾性支持構造の剛性や形状に依存するので、今のところ定量的には明らかではない。しかし、周波数が増加するにつれて逆行や停止はなく、膜面上の比較的広い範囲にわたって搬送され

る。本試作機では、最高搬送速度は 110 mm/min 程度が得られる。フィルムの長さの変化に対しては、長さが40 mmの場合には搬送が若干不安定であるが、60, 80 mmと長くなるにつれて安定となる。また、磁界の進行方向に向かって膜面の振動振幅がしだいに大きくなる現象が現れるが、この現象は周波数が低いほど強く、周波数の増加とともに減少していく。これは封入された磁性流体が進行磁界により進行方向に輸送されて層の厚さに偏りができるためで、低周波数での搬送が不安定となる原因の一つと考えられる。また、OHPフィルムの代わりに種々の材質の薄板を用いても搬送は可能であるが、今の所搬送速度も遅く、運動も一様ではない。

(4) 磁性流体層の厚さが10 mmの場合には、幅56 mm, 長さ60 mmの記録用普通紙紙片を用いて実験を行った。ガイドを用いない場合、波長と周波数を変化させても紙片は搬送できなかったが、ガイドを取付けることにより、周波数が22~27 Hzで波長が110~130 mmの範囲、および周波数が10 Hzで波長が160 mmにおいて比較的速い紙の動きが得られ、平均最高搬送速度は約 14 mm/min であった。この場合にも紙片の搬送には非一様性がみられる。停留点の発生は先の場合よりも多く、3箇所または4箇所存在し、その位置や個数は周波数、波長により変化する。周波数が22~27 Hzの場合においては、周波数が高いほうが紙片の動きが速い。しかし、本試作装置の場合、コイルの周波数特性から30 Hz以上では膜面の振幅が減少するために、高周波領域での輸送は困難である。また、ガイドと膜面の間隔や紙質によっても紙片の速さは変化し、ガイドの調節が微妙である。周波数を26 Hz, 波長を120 mmとし、紙片の長さを40 mmから10 mmずつ増加させその動きを観察した場合、約80 mmを超えたあたりから紙片の動きは遅くなり、100 mm以上では動きがみられなかった。

進行波動膜によって紙片が搬送される原理は図12に示すようなものと考えられる。すなわち、ある時刻 $t=t$ で実線の位置にあった膜面は、進行波運動により微小時刻後の $t=t'$ では破線の位置に変位する。ただし、膜面は進行波の伝ば方向に対して直交する曲げ変

図10 周波数、波長の変化に対する搬送状況
(長さ40 mm, V : 平均最高搬送速度)

図11 周波数、波長の変化に対する搬送状況
(長さ80 mm, V : 平均最高搬送速度)

図12 紙片搬送の原理図

位のみを行い、伝ば方向へは移動しない。このとき、実線の山頂の右側では圧力が高くなって紙片を右上に押す力を発生し、同時に左側では圧力が低くなって紙片を右下に引き込む力を発生することにより、全体として紙片は右側に搬近される。もし反射波が同じ点に到着すると紙片は逆向きの力を受けるし、ちょうど停留点が発生するとこれらの力は打ち消し合って搬送ができなくなる。また、紙片の剛性が不足すると、この合力は紙片のたわみ変形だけを引き起こして定常的な搬送に寄与しなくなると考えられる。これらのことが、本実験で逆送が生じたり、紙片の搬送の場合にガイド（紙押さえ）を必要とした理由と考えられる。したがって、磁性流体層の厚さを薄くしたり磁界強度を高くして弾性膜面の駆動力を高めることや、何らかの反射波の消波装置を設置することが、ガイドなしでの搬送や停留点の発生を抑制するために有効であるといえる。また、周波数を高くし、波長を短くすることが高速で安定な搬送に有効であると推定できる。

5. 結 言

磁性流体を駆動媒体として進行波運動を行う弾性膜による紙送り機構を試作し基本的搬送挙動を調査した。その結果興味ある搬送過程がみられ、実用化への指針を得たが、紙送り装置としての安定した機能を実現させるためには、さらに停留点の除去、周波数と波長の変化に対する膜面および紙片の挙動の定量的な分析など、進行波による紙の搬送機構の解明と改良などの課題が残されている。

最後に、本研究の一部に対して平成3年度文部省科学研究費（一般研究C、03650145）の補助を受けたことを記して謝意を表する。また、本実験に際してタイホー工業株式会社のご協力を得たことに感謝する。

文 献

- (1) 田中, 昭和63年度科学研究費補助金研究成果報告書, No. 62550128 (1988).
- (2) 田中・村島, 機論, 56-523, B (1990), 660.
- (3) 田中・村島, 第2回電磁力関連のダイナミックス講演論文集, (1990), 377.