



超音波振動を利用した紙の分離・搬送機構に関する研究 (第1報)*

—開発理念と基礎的実験—

小田 高広** 神谷 好承*** 岡部 佐規一***

Study on the Sheet Escape and Feeding Mechanism using Ultrasonic Vibration (1st Report)
—Design Concept and its Experimental Investigation—

Takahiro ODA, Yoshitugu KAMIYA and Sakiichi OKABE

This study describes sheet feeding method and its design concept using ultrasonic vibration actuator. The ultrasonic vibration is generated by two sets of piezoelectric actuator. It is an elliptic vibration mode, which rotates two vibration modes in the γ - z and x - γ planes. This paper presents a direct drive method using vibratory rotor and an indirect drive method using idling rotor about sheet feeding mechanism, and proves theoretical relations between amplitude U_{z1} and sheet feeding speed v_H, v_H^* and feeding force F_H, F_H^* . As a result of fundamental experiments, it was proved that a sheet, such as paper and telephone card, could be fed easily using either of their methods, and high reliable and compact sheet feeding mechanism could be obtained.

Key words: sheet escape, sheet feeding, ultrasonic vibration, piezoelectric ceramics

1. 緒 言

プリンタやファクシミリの自動給紙機構は、電磁モータとローラを用いた原理のものが主流であるが¹⁾、最近の記録紙の多様化や機構の小型化のニーズから電磁モータに代わるアクチュエータとして、圧電素子あるいは電歪素子を利用した超音波モータによる方式がいくつか報告されている。これらには、超音波振動子の往復運動を直接利用する方式²⁾と、往復運動を回転運動に変換して利用する方式³⁾とがある。

一般に、自動給紙機構を設計する場合、記録紙の分離と搬送の両機能を考慮する必要があり、そのために分離で生じる重ね送り、搬送で生じる蛇行等の問題を解決しなければならない。現在のところ、先の2つの方式は機構の小型化の点で優れているが、電磁モータによる方法に代わって上記の問題を解決する方法とはなり得ず、いまだ実用化に至っていない。

しかしながら、超音波振動子によって変換される強

力な振動エネルギーと制御性のよい振動モードが紙の分離と搬送とに使用できれば、電磁モータより大幅に性能向上が期待できる。

本研究では、紙やカード等を分離・搬送する機構に超音波振動を応用することを目的とし、それに適した駆動機構を検討した。その結果、2つのアームが独立に楕円振動を行う超音波楕円振動子 (Ultrasonic Elliptic Vibrator, U.E.V.) を使用する方法を考案した。本報では主として、この方式の基本概念を述べるとともに、これを利用した分離・搬送のメカニズムについて、基本的な式を導き理論的に解明した。またこれらの式の妥当性を、振動子を試作し基礎的な実験を行うことで確認した。

2. 超音波楕円振動子による紙の分離と搬送

2.1 基本概念

図1および図2に、超音波楕円振動子を用いて紙を分離あるいは搬送するときの動作原理を示す。図において、紙の分離あるいは搬送方向をX方向、紙面の法線方向をZ方向、紙の幅方向をY方向とし、超音波楕円振動子をY方向に対称に2つ配置する。超音波楕円

* 原稿受付 平成3年6月3日

** 正会員 沖電気工業(株)(八王子市東浅川町550-5)

*** 正会員 金沢大学工学部(金沢市小立野2-40-20)

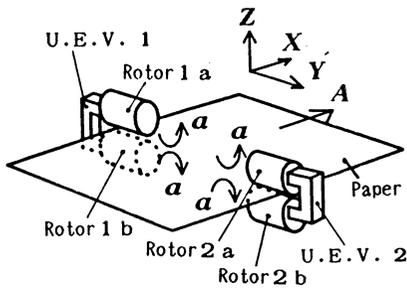


Fig.1 Driving mechanism of sheet feeding

振動子は、図1、2のZ方向にロータを2つ持ち、各ロータはX方向の振動とZ方向の振動を合成した楕円振動を行うものとする。なお、超音波楕円振動子において、2つのロータと弾性体（図3、4参照）を含むY-Z平面を基準面として、X方向の振動を面垂直振動、Z方向の振動を面内振動と称することにする。

ロータによる分離力および搬送力は、超音波楕円振動子が励振する楕円振動のZ方向への押付け力から生じるX方向の摩擦力によって発生される。本方式は、この押付け力を調整することにより、紙の分離力および搬送力を制御することができる。また、超音波楕円振動子1、2をY方向に対称に配置していることからそれぞれの振幅比を制御することで紙のY方向への蛇行も補正することが可能となる。

次に、紙の搬送方法と分離方法について説明する。

図1は、超音波楕円振動子により構成された2つのロータの間に、1枚の紙が送り込まれてきた場合を示している。このとき2つのロータをX方向に同位相（図中の矢印a方向）に楕円あるいは回転運動させれば、紙は矢印A方向に搬送できる。図2は、2つのロータの間に、紙1、2が重なって送り込まれてきた場合を示している。このとき、2つのロータをX方向に逆位相（図中の矢印b、c方向）に楕円あるいは回転運動させれば、ロータ1 aと2 aに接触する紙1は矢印B方向へ、ロータ1 bと2 bに接触する紙2は矢印C方向へ分離できる。なお、3枚以上の重なりが生じる場合には、図2のX方向に配置する超音波楕円振動子の数を増やし、分離する区間を長くすれば、上記の原理から順に重なり枚数を減らして対応できる。また、図1、2で、超音波楕円振動子は、紙の大きさに応じてX方向に任意の数だけ並べることができる。

2.2 駆動方式

ロータとして、図3、4に示す2つの方式を開発した。図3は、振動ロータ（V.R.: Vibratory Rotor）を用いた直接駆動方式の構成を示し、図4は、アイド

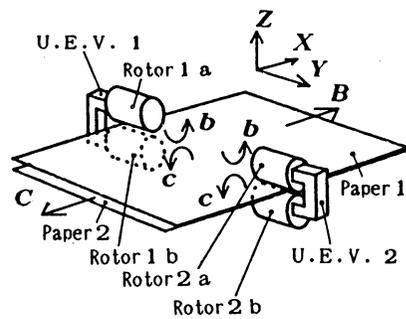


Fig.2 Driving mechanism for escaping two sheets of paper

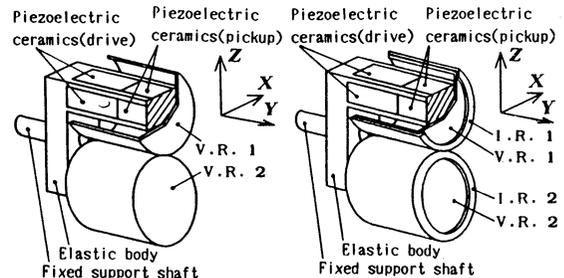


Fig.3 Construction of an ultrasonic elliptic vibrator using vibratoy rotor

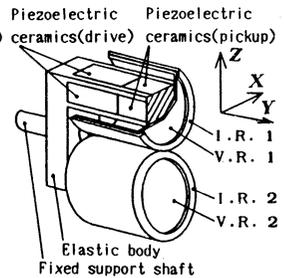


Fig.4 Construction of an ultrasonic elliptic vibrator using idling rotor

リングロータ（I.R.: Idling Rotor）を用いた間接駆動方式の構成を示している。振動ロータは、2つのアーム先端部（図3、4の斜線部）にそれぞれ接着固定され、弾性体の楕円振動と同期して振動する。アイドリングロータとは、振動ロータの外周面に設置された円筒形ロータのことで、振動ロータ表面に発生する楕円振動により回転運動を行うことができる。また、弾性体の表面には、図3、4に示すように、圧電素子がエポキシ系接着剤で固定され、その一方の圧電素子（drive）により楕円振動を励振し、他方の圧電素子（pickup）によりその励振された振幅を検出する。なお、この検出により楕円振動の状態を観察することができる。

3. 分離と搬送のメカニズム

3.1 直接駆動方式

図2の分離動作について、図5のようなモデル化を行う。同図において、運動の原点を点O、紙1、2の分離および搬送方向をX方向、紙1、2の法線方向を

Z方向とし、振動ロータ1, 2をZ方向に紙1, 2を挟む状態で配置する。このとき、振動ロータ1, 2が励振する楕円振動の共振角振動数を ω とし、Z方向への押付け力が常に、同時に振動ロータ1, 2により紙1, 2に作用するものとすれば、図5に示す振動ロータ1, 2の頂点である点 Q_1, Q_2 の運動は、

$$x_1 = U_{x1} \sin \omega t \quad (1)$$

$$z_1 = -U_{z1} \sin(\omega t + \pi/2) + a \quad (2)$$

$$x_2 = U_{x2} \sin \omega t \quad (3)$$

$$z_2 = U_{z2} \sin(\omega t + \pi/2) - a \quad (4)$$

のように表わせる。ここで、 U_{z1}, U_{z2} は面内振動の振幅、 U_{x1}, U_{x2} は面垂直振動の振幅、 a は紙1, 2の厚みである。

なお、理論的に考察する場合、紙1, 2は図5に示すように、楕円振動する振動ロータ1, 2の頂点のみで接触し、その接触状態を滑り摩擦と考え、クーロンの法則よりZ方向への押付け力に比例した分離力あるいは搬送力が発生すると仮定する。また、一般に、摩擦係数は摩擦条件によって必ずしも一定値をとるとは限らないが⁷⁾、本報では、この値は一定であるとして解析を行うことにする。

いま図5において、Z方向への押付け力を F_N 、振動ロータと紙との間の滑り摩擦係数を μ 、紙1, 2間の滑り摩擦係数を μ_P とすると、分離力 F_B は、

$$F_B = (\mu - \mu_P) F_N \quad (5)$$

で表され、このときの紙1, 2を分離できる条件は、
 $\mu > \mu_P$ (6)

のように、摩擦係数の大きさのみに依存する。ここで振動ロータのZ方向の運動より、振動ロータが紙と接触するときと接触しないときが生じることになり、本報では、Z方向への押付け力 F_N を振動ロータの1周期について平均化し、

$$F_N = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} \frac{1}{2} (U_{z1} \sin \omega t + U_{z2} \sin \omega t) dt$$

$$= \frac{\kappa (U_{z1} + U_{z2})}{2\pi} \quad (7)$$

のように表すことにする。ここで、 κ は超音波楕円振動子1, 2のZ方向の剛性である。

一般に、移送アクチュエータを用いた媒体の送り特性は、その平均的な特性をもってマクロ的な送り速度を評価するため^{4) 5)}、本報では、図5の紙1, 2(質量は m_P)に関して、分離する距離を L_S 、そのときの所要時間を T_S とし、紙1, 2の平均分離速度を $v_B = L_S / T_S$ で定義する。このとき、紙1, 2の運動方程式は次式で表される。

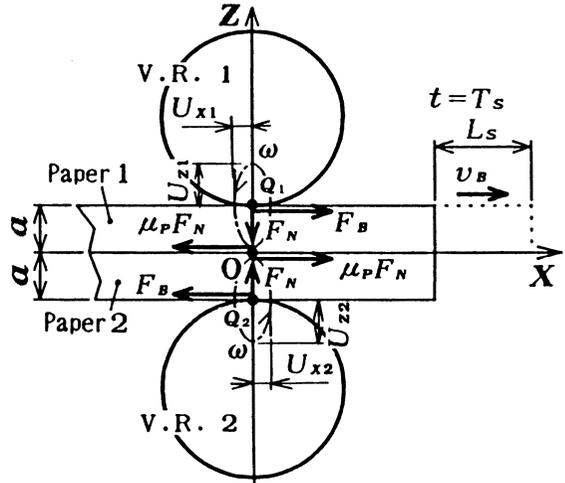


Fig.5 Illustration of sheet feeding mechanism for escaping two sheets of paper

$$m_P \frac{d^2 x_P}{dt^2} = (\mu - \mu_P) F_N \quad (8)$$

ここで、式(8)を解くことにより分離距離 L_S とその所要時間 T_S との間には、

$$L_S = \frac{1}{2m_P} (\mu - \mu_P) F_N T_S^2 \quad (9)$$

なる関係が成り立つため、先の定義式中の T_S を消去して、平均分離速度 v_B を求めることができる。また一般に、紙が2つのローラの間で挟まれて駆動される場合の紙送り速度は、紙の中心で計算されるため⁸⁾、平均分離速度 v_B は、振動ロータの外径を d_s とすると振動ロータの中心から紙の中心までの距離 $((d_s + a) / 2)$ と振動ロータの半径 $(d_s / 2)$ との比で補正され、

$$v_B = \left(\frac{d_s + a}{d_s} \right) \sqrt{\frac{L_S}{2m_P} (\mu - \mu_P) F_N} \quad (10)$$

のように表わされる。

図1に示す紙の搬送動作については、その原理より搬送力 F_B が、振動ロータ1による分離力と振動ロータ2による分離力との合力となることから次式で表される。

$$F_B = 2\mu F_N \quad (11)$$

このときの平均搬送速度 v_B は、式(10)と同様にし、搬送距離を L_S 、搬送時間を T_S とおくことで求められ、次式で表される。

$$v_H = \left(\frac{d_s + a}{d_s} \right) \sqrt{\frac{\mu L_s}{m_P}} F_N \quad (12)$$

以上、式(5),(10),(11),(12)より、分離力 F_B 、搬送力 F_H 、平均分離速度 v_B および平均搬送速度 v_H はともに振幅 U_{z1} と振幅 U_{z2} の値に比例して大きくなることがわかる。

3.2 間接駆動方式

本研究では、アイドリングロータ表面をゴムでコーティングしてあるため、アイドリングロータと紙との間の摩擦係数が十分大きく、そのため、アイドリングロータと紙との滑り摩擦係数を μ_K 、アイドリングロータと振動ロータとの摩擦係数を μ_R とすると、

$$\mu_K > \mu_R \quad (13)$$

の関係が成り立つ。これより、アイドリングロータと紙とを一体と考え、図5に対応させると、紙1, 2には次式で示される分離力 F_B^* が発生する。

$$F_B^* = (\mu_R - \mu_P) F_N \quad (14)$$

よって、このときの紙1と紙2との分離条件は、次式で表される。

$$\mu_R > \mu_P \quad (15)$$

分離された紙1, 2の平均分離速度 v_B^* は、式(10)のときと同様に求められ、次式のように表される。

$$v_B^* = \left(\frac{d_s + a + d_1 - d_2}{d_s} \right) \sqrt{\frac{L_s}{2m_P}} (\mu_R - \mu_P) F_N \quad (16)$$

ここで、 d_1 はアイドリングロータの外径、 d_2 はその内径である。

次に、搬送動作については、直接駆動方式と同様に搬送力 F_H^* が分離力の合力となることから、次式で表される。

$$F_H^* = 2\mu_R F_N \quad (17)$$

平均搬送速度 v_H^* は、式(16)のときと同様に、搬送距離を L_s 、搬送時間を T_s として、次式で表される。

$$v_H^* = \left(\frac{d_s + a + d_1 - d_2}{d_s} \right) \sqrt{\frac{\mu_R L_s}{m_P}} F_N \quad (18)$$

以上、式(14),(16),(17),(18)より、間接駆動方式も直接駆動方式と同様に、分離力 F_B^* 、搬送力 F_H^* 、平均分離速度 v_B^* および平均搬送速度 v_H^* は、ともに振幅 U_{z1} と振幅 U_{z2} の値に比例して大きくなることがわかる。

ここで、2つの駆動方式を比較すると、分離力や搬送力の差に関しては、式(19)のように摩擦係数の比で表されるが、平均分離速度や平均搬送速度の差では式

(20), (21)のようにアイドリングロータの形状に関係した項を含んで表される。

$$\frac{F_B^*}{F_B} = \frac{F_H^*}{F_H} = \frac{\mu_R}{\mu} \quad (19)$$

$$\frac{v_B^*}{v_B} = \left(\frac{d_s + a + d_1 - d_2}{d_s + a} \right) \sqrt{\frac{\mu_R - \mu_P}{\mu - \mu_P}} \quad (20)$$

$$\frac{v_H^*}{v_H} = \left(\frac{d_s + a + d_1 - d_2}{d_s + a} \right) \sqrt{\frac{\mu_R}{\mu}} \quad (21)$$

なお、摩擦係数 μ_R は μ よりも大きくでき、しかも $(d_s + a + d_1 - d_2)/(d_s + a) > 1$ より、直接駆動方式よりも、間接駆動方式の方が性能向上が期待できる。

4. 超音波楕円振動子の試作と搬送実験

4.1 超音波楕円振動子

図3, 4に示される超音波楕円振動子は支持棒を中心に対称に形成されていることから、振動子として、振動ロータ1およびアイドリングロータ1の部分について試作と検討を行った。まず振動子の設計として、使用する振動数を高くすると、振動振幅が小さくなり加工精度が問題となる。また、楕円振動を励振する際振動子の効率の面から、面内振動と面垂直振動との共振周波数を一致させることが必要である。よって、本研究では、超音波楕円振動子の弾性体(材質は黄銅)の形状と寸法を図6とした。このとき、面内振動と面垂直振動との一致した共振周波数は24.8kHzであり、各振動モードは、図7に示すとおりである。ここで、面内振動は、アーム1のZ方向のたわみとアーム2の

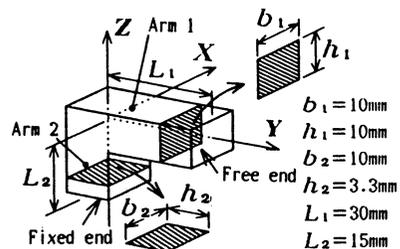


Fig.6 Structure and size of elastic body

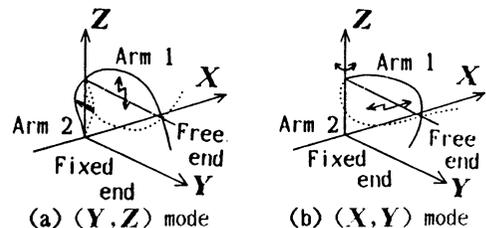


Fig.7 Resonant mode of the elastic body

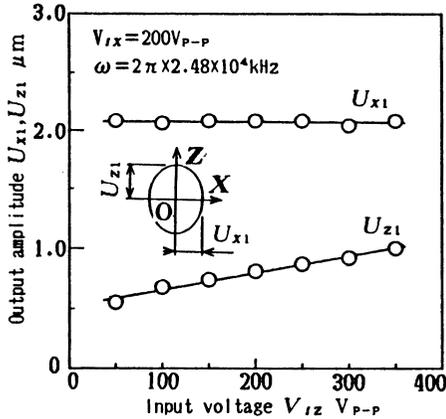


Fig.8 A relation between U_{x1}, U_{z1} and V_{iz}

Y方向のたわみを合成したモード（図7(a)）であり、面垂直振動は、アーム1のX方向のたわみとアーム2のZ軸回りのねじりを合成したモード（図7(b)）である。また、弾性体表面には、図3、4で示した位置に、2種類の圧電素子（drive/pickup）が接着固定されている。なお、圧電素子（drive）は分極方向が厚み方向で、厚さ1mm、幅10mm、長さ16mmのものを、圧電素子（pickup）は分極方向が厚み方向で、厚さ1mm、幅10mm、長さ12mmのものをそれぞれ使用した。また、振動ロータの材質は黄銅で、質量は 1.42×10^{-3} kg、外径 6.0×10^{-3} mとし、アイドリングロータの材質はアルミニウム合金（外周面に厚さ0.6mmのゴムをコーティング）で、質量は 4.1×10^{-3} kg、外径 2.2×10^{-2} m、内径 1.8×10^{-2} m、幅 1.2×10^{-2} mとした。

試作した振動ロータ1は、図3で示した弾性体のX-Y平面に取り付けられた圧電素子（drive、入力電圧 V_{iz} ）により振幅 U_{z1} の面内振動をし、Y-Z平面に取り付けられた圧電素子（drive、入力電圧 V_{ix} ）により振幅 U_{x1} の面垂直振動を行う。このときの楕円振動について、入力電圧 V_{ix} （ $=200$ V_{p-p}）を与え、もう一方の入力電圧 V_{iz} を変化させ、面内振動の振幅 U_{z1} と面垂直振動の振幅 U_{x1} との関係を光学式変位計で測定した。その測定結果を図8に示す。同図において、振幅 U_{z1} は入力電圧 V_{iz} に比例して増加するが、振幅 U_{x1} はほとんど変化しないことから、入力電圧 V_{iz} により独立に振幅 U_{z1} を制御できるといえる。ここで、入力電圧 V_{iz} が0のときの振幅と、入力電圧 V_{iz} に対する振幅 U_{z1} の変化率とから、振幅 U_{z1} が面垂直振動から影響を受けていることが確認でき、これは、2つの振動の共振周波数が一致していることから生じる連成効果によるものと考えられる。

4.2 搬送装置と実験方法

前節の弾性体と振動ロータおよびアイドリングロータを図3、4のように構成し、直接駆動方式と間接駆動方式の両方式について、搬送装置を試作した。実験としては、超音波楕円振動子の面垂直振動への入力電圧 V_{ix} を200 V_{p-p}とし、一方の面内振動への入力電圧 V_{iz} を変化させて、先の2つの方式について、上質紙やテレホンカードを搬送させたときの搬送力および平均搬送速度を測定した。このとき、搬送速度は、X方向に距離 L_s （ $=0.086$ m）だけ搬送させたときの時間 T_s をストップウォッチで測定して求め、また、搬送力は、上質紙やテレホンカードの搬送速度が0となるときX方向の力をフォースゲージで測定した。

また、本装置による搬送力と平均搬送速度には、3章で導いた理論の式(11)、(12)、(17)、(18)と図8の入力電圧振幅特性とが適用できるため、搬送力では F_H （ F_H^* ） $\propto V_{iz}$ の関係が、平均搬送速度では v_H （ v_H^* ） $\propto V_{iz}^{1/2}$ の関係がそれぞれ成り立つことになる。なお、上質紙は、質量 1.3×10^{-4} kg、厚さ 1.0×10^{-4} m、幅 1.0×10^{-3} m、長さ0.086 mのものを、テレホンカードは、質量 3.8×10^{-4} kg、厚さ 2.8×10^{-4} m、幅 1.0×10^{-3} m、長さ0.086 mのものをそれぞれ使用した。また、実験に使用する材質の摩擦特性としては、傾斜法を用いて平均的な滑り摩擦係数を測定した⁷⁾。その結果、振動ロータと上質紙とでは $\mu=0.10\sim0.15$ 、振動ロータとテレホンカードとでは $\mu=0.20\sim0.25$ 、アイドリングロータと上質紙とでは $\mu=1.5\sim2.0$ 、アイドリングロータとテレホンカードとでは $\mu=2.0\sim2.5$ 、振動ロータとアイドリングロータとでは $\mu_R=0.40\sim0.45$ であった。次に、式(7)で示した剛性 κ については、先の2つの方式により異なり、しかも計算で求めることは困難であるため、ここでは各駆動方式のZ方向への振幅負荷特性を測定して実験的に求めた。その結果、振動ロータでは $\kappa=3.2 \times 10^6$ N/m、アイドリングロータでは $\kappa=3.8 \times 10^6$ N/mであった。

4.3 実験結果及び考察

搬送力の測定結果を図9に、平均搬送速度の測定結果を図10に示す。両図において、記号は測定値を表し、実線は式(11)、(12)、(17)、(18)に実験での具体的な数値を代入して算出した計算値を表している。ここで、図9の計算値は、あらかじめ傾斜法で近似した摩擦係数の値を式(11)、(17)に代入した値であるが、図10の計算値は、その摩擦係数の値よりもかなり小さい値を式(12)、(18)に代入した値である。これは、図9の場合、被搬送物の搬送速度が0のときに測定を行っているため、振動ロータあるいはアイドリングロー

5. 結 言

本研究では、電磁モータとローラによる自動給紙装置に代わる方式として超音波楕円振動子による分離と搬送の方法を考案し、そのメカニズムに関する基礎的実験を行った。主な結果は以下のとおりである。

- (1) 本方式は従来の自動給紙装置よりも薄型かつコンパクト化が可能で、しかも分離と搬送は対象物に応じて同一のアクチュエータで制御できる。
- (2) 本方式のメカニズムについてモデル化を行い、いくつかの基本的な運動の式を導き、振動ロータの楕円振動におけるZ方向の振幅と媒体の速度および力との関係を明らかにした。
- (3) 駆動方式として、振動ロータを直接搬送物に押し付ける直接駆動方式と、アイドルロータを介して押し付ける間接駆動方式を開発した。
- (4) 上記の2つの方式について、上質紙やテレホンカードを用いて搬送に関する基礎実験を行った結果、どちらも搬送可能であり、しかも理論特性と同傾向を示したことから、本方式の可能性を確認した。

最後に、本研究の実施に関し、機会と援助を与えて下さった沖電気工業の関係各位、および御示唆を賜った金沢大学工学部の青柳誠司助手と野村久直技官に心から感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 金子 環：給紙機構とその設計，日刊工業新聞社，(1990)。
- 2) 富川義朗ほか：縦 L_1 -屈曲 B_n 多重モード振動子を用いた平板状超音波モータの応用，日本音響学会講演論文集II，10 (1989) 945。
- 3) 吉田哲男：超音波モータのカード送り装置への応用，日本工業技術振興協会，固体アクチュエータ研究部会，10 (1989) 3。
- 4) 指田年生：超音波振動モータの試作，応用物理，51，6，(1982) 713。
- 5) 黒澤 実ほか：進行波型超音波モータの効率，日本音響学会誌，44，1，(1988) 40。
- 6) 熊田明生：超音波モータ，電子情報通信学会誌，72，4，(1989) 462。
- 7) 田中久一郎：摩擦のおはなし，日本規格協会，(1988) 46。
- 8) 中川邦彦ほか：映像・音響・OA機器のフリクションドライブ，精密工学会誌，56，9，(1990) 1607。
- 9) 横山恭男：摩擦の力学(2)，潤滑学会誌，18，2，(1973) 116。

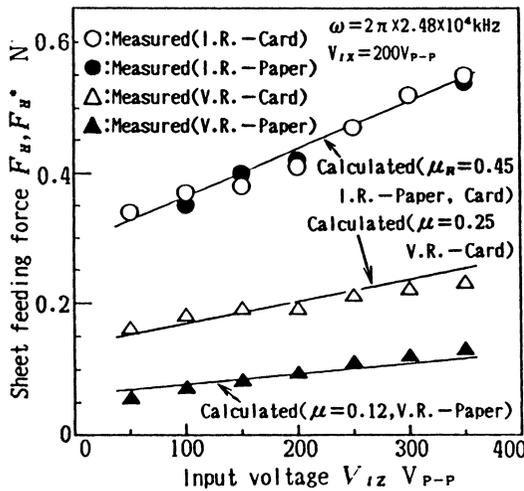


Fig.9 Sheet feeding force F_H, F_H^*

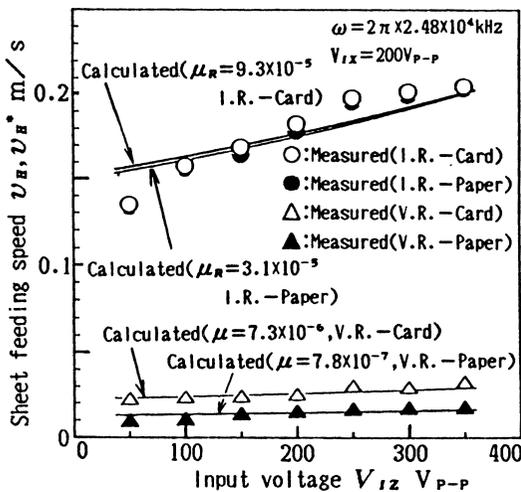


Fig.10 Sheet feeding speed v_H, v_H^*

タと被搬送物との接触面が一定となり、摩擦特性があまり変化しなかったのに対し、一方の図10の場合は被搬送物の移動に伴って接触状態が変わるため、摩擦特性が変化し、そのため、搬送力が小さくなり速度が低下したものと考えられる⁹⁾。また図9、10の各測定値における直接駆動方式と間接駆動方式との差は、式(19)、(21)に傾斜法で近似した摩擦係数の値を代入して求めた計算値とほぼ一致している。以上のことから、搬送力と平均搬送速度の測定値は、ともに理論特性と全体的な傾向がほぼ一致しているといえる。