

共振駆動型電磁マイクロモータ

Resonance-Drive Electromagnetic Micromotor

矢口 博之

東北学院大学工学部, 多賀城市中央1丁目13-1 (〒985-8537)

H. Yaguchi

Tohoku Gakuin University, 13-1 Tagajo, Miyagi

This paper proposes a new micromotor with a rotor rotated by the resonance energy of a one-degree-of-freedom system excited by electromagnetic force. The use of flexible material enables conversion of translational vibration to rotary movement in one direction. Basic characteristics of a 5-mm-diameter prototype micromotor, such as rotational speed, output torque, and efficiency, were determined experimentally. Results show that a maximum rotational speed of 9982 rpm was obtained without load. The prototype was changed to incorporate a permanent magnet with greater magnetic force in order to establish the rotation characteristics of the micromotor.

Key words: micromotor, electromagnetic force, frictional force, flexible material, resonance drive

1. はじめに

パソコン, 携帯電話, デジタルカメラ等の電化製品およびマイクロマシンの駆動源として高出力なマイクロモータの要求が高まってきている。一般的に電磁型モータは形状の小型化に伴い, 発生トルクの減少は著しいものがあり, またその小型化のための設計および製造の困難さも増しているようである。このため電界共役流体に電界を加え, 生じるジェット噴流を利用して回転力を得るマイクロモータ^{1), 2)}, 圧電素子の屈曲定在波振動を利用した超音波モータ³⁾ など新しいタイプのマイクロモータが提案されている。一方, 従来の電磁型モータにおいて, コイルおよびマグネットの配置構造を見直し, 超小型化を図った研究⁴⁾ も報告されている。しかしながら将来的にはますます小型化, 高出力化の要求が高まり, 現状のマイクロモータでは要求された性能を十分満たせないことが予想される。

本研究では電磁力加振により励起する1自由度系の共振エネルギーを動力源として, フレキシブルな材料によりロータを一方方向に摩擦駆動するマイクロモータを提案する。本

モータは指田⁵⁾により提案された定在波型超音波モータに類似するが, エネルギーの伝達手段にフレキシブルな材料を適用することにより, 摩擦駆動型としては異例の高速回転を可能にしている。またフレキシブル材料の剛性および形状の適切な選択により, 発生トルクあるいは回転性能を重視したモータを自由に設計できる特色も有し, 将来必要とされるであろう更なる超小型化, 高出力化への要求にも十分対応できる可能性を秘めていると考えられる。さらに構造も非常に簡単であることからマイクロ化にも適している。

実験においてはマイクロモータを試作して, 試作モータの基本および回転特性を調べた。さらに永久磁石の変更によるモータの更なる高出力化および高効率化についての検討を行った。

2. 共振駆動型電磁マイクロモータ

2. 1 モータの構造

Fig. 1 は本研究において最初に試作されたマイクロモータ (Type I) の構造を示したものである。1個の並進ばね, 永久磁石および励磁用電磁石と柔軟材により構成されるものである。用いた並進ばねは, 自由長さ 6.7mm, 外径 2.9mm, ばね定数 $K=2667\text{N/m}$ の圧縮コイルばねで, 永久磁石としては直径 3mm, 厚さ 1.5mm で表面磁束密度 300 mT の両面2極着磁 NdFeB 磁石を用いている。励磁用電磁石としては長さ 6mm, 直径 1.2mm の軟鋼材に直径 0.1mm の銅線を 75 回巻いたものである。この電磁石をばね-永久磁石により構成される1自由度モデル内に挿入し, さらに磁石上に縦弾性係数 $E=4.81 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ の柔軟な Si ゴムを固着している。Si ゴムと摩擦接触するロータには $\Phi 3\text{mm}$, 厚さ 3mm の黄銅材を, 出力軸には $\Phi 0.7\text{mm}$ の軟鋼材を用いた。なおモータ静止時, Si ゴムとロータ間には微小の隙間が設けてあり, 両者間には初期接触力が加わらないようにしてある。

さて Si ゴム材の剛性や寸法の適切な選択により, トルクあるいは回転特性を重視したモータが設計できる。本研究

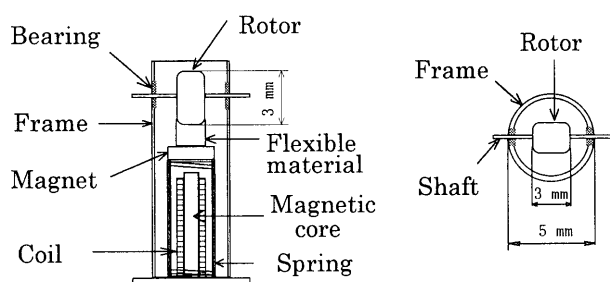


Fig. 1 Structure of micromotor.

では最大発生トルクと最高発生回転数とのバランスを考慮して、柔軟材の寸法を長さ $\ell=2\text{mm}$ 、幅 $b=1.5\text{mm}$ 、厚さ $h=0.5\text{mm}$ とした。この場合、片持 Si ゴムはりの曲げに対するばね定数 K は次のように表される。

$$K = 3EI/\ell^3, \quad I = bh^3/12 \quad (1)$$

式(1)を計算すると、本モデルのばね定数は $K=28.18\text{N/m}$ となる。柔軟材の物性および寸法を変化させ、上述のばね定数よりもばね剛性を高くすると、本試作モータよりも高トルク型に、低くすると高回転型に設計できる。ただし柔軟材の剛性および寸法と最大発生トルクとの関係は詳細に調べる必要があると考えている。試作したモータは直径 5mm 、全長 14mm 、質量 0.9g である。なお試作において使用した Si ゴム、永久磁石、圧縮コイルばねの物性をそれぞれ Table. 1 から Table. 3 に示す。

2. 2 動作原理

永久磁石一ばねの 1 自由度振動体に取り付けられたゴム材が

Table 1 Material Properties.

	Density (kg/m^3)	Young's modulus (N/m^2)
Si rubber	1197.8	4.812×10^6

Table 2 Magnetic Properties.

	Magnetic flux density (mT)	Dimensions (mm)
NdFeB	300	$\phi 3 \times 1.5$

Table 3 Properties of Spring.

	Spring constant (N/m)	Allowable load (N)
SUS304	2667	5.29

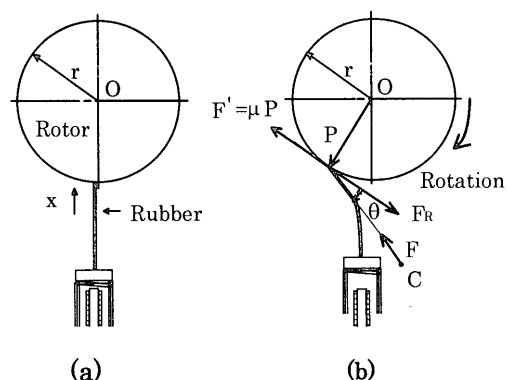


Fig. 2 Frictional force between rubber and rotor.

並進運動し、ロータと接触する状態を考える。ゴム材が座標 x と同方向に運動する時は、Fig. 2(a)に示すようにゴム先端部はロータに接触しロックする。さらにゴム自身の柔軟性から、ゴム先端部はロータにロックしたまま Fig. 2(b)のように変形することが予想される。ゴム材とロータとの間の静摩擦係数を μ 、ゴム材による押付反力を P として、点 C 回りのモーメントを考えると、ゴム先端部に作用する摩擦力は

$$F' = \mu P / (1 + \mu \tan \theta) \quad (2)$$

となる。いま次の変動摩擦係数 μ' を導入すると、式(2)は次のように表される。

$$F' = \mu' P, \quad \mu' = \mu / (1 + \mu \tan \theta) \quad (3)$$

ゴム先端部とロータとの接触点のつりあいより

$$F \cos \theta = \mu P, \quad F \sin \theta = P \quad (4)$$

が得られ、式(4)より

$$\tan \theta = 1 / \mu \quad (5)$$

となる。 $\theta \geq \tan^{-1}(1/\mu)$ の範囲を考えると、式(3)より変動摩擦係数は無限大となる。よってこの範囲ではゴム先端部はロータにロックしたまま、振動体の運動エネルギーをロータに伝達し、ロータは時計回りに回転する。しかしゴム材の曲げ変形が大となり、ゴム先端部の角度 θ が $\tan^{-1}(1/\mu)$ より小となると、ゴム先端部のロックは解除され、ゴム材はロータに対してすべり摩擦の抵抗力 F_R を与える。さらにゴム材がロータに接触しながら座標 x と反対方向に運動す

る場合も、ゴム材はロータに対してすべり摩擦の抵抗力 F_R を与えるが、これらの摩擦抵抗力と運動エネルギーによる伝達力の差がトルクをもたらすものと考えられる。ただし本モータは構造上、ロータの回転は一方方向に限定されることになる。

3. 実験および検討

Fig. 3 は実験装置の概略を示したものである。実験においては信号発生器により発生する正弦波をアンプにより増幅して、電磁石に電力を供給し、系を共振させる。その共振振動数は 714Hz である。また入力電圧および電流は標準抵抗器を用いて、FFT アナライザにより計測した。

まず最初に本試作モータの基本特性を調べることを目的として、負荷トルクを $19.6 \mu\text{Nm}$ に固定して、入力に対するモータの出力回転数を調べた。得られた結果を Fig. 4 と Fig. 5 に示す。Fig. 4 は試作モータへの入力電圧と軸出力回転数との関係を示したものである。本モータは入力電圧

の増加に伴い、出力回転数は直線的に増加し、DC モータと同じ特性を示すことが分る。Fig. 5 は永久磁石の振動振幅と軸出力回転数との関係を示したものである。振動振幅と発生回転数はおおむね比例関係にあることから、入力電圧の増加がそのまま振動振幅の増加につながり、結果として出力回転数がほぼ直線的に増加することになる。ただし試作モータの最高出力は、永久磁石と電磁石用鉄心のクリアランスにより制限を受けることになる。

次に本モータのトルクー回転数特性について検討する。本試作モータは発生トルクが小さいので、直接トルク計に取付けてトルクを測定することは困難である。本研究では市販されている $\Phi 6\text{mm}$ のマイクロモータを負荷として間接的に出力トルクを測定する。まず Fig. 6 に示すように市販のマイクロモータを負荷としてトルク計に取付け、マイクロモータへの入力電流と発生トルクとの関係を各々の回転数について詳細に測定しておく。次に試作した共振駆動モータの出力軸と負荷用市販マイクロモータの軸を連結し、負荷用モータへの入力電流を変化させて、試作モータの出

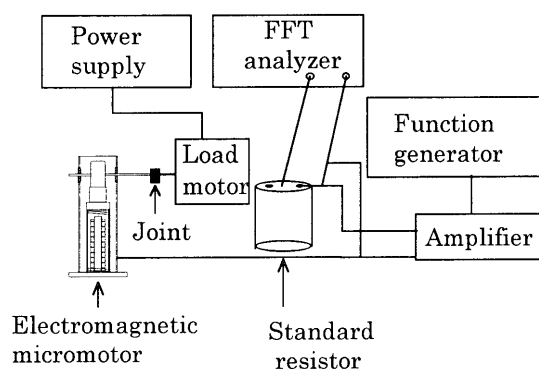


Fig. 3 Experimental apparatus.

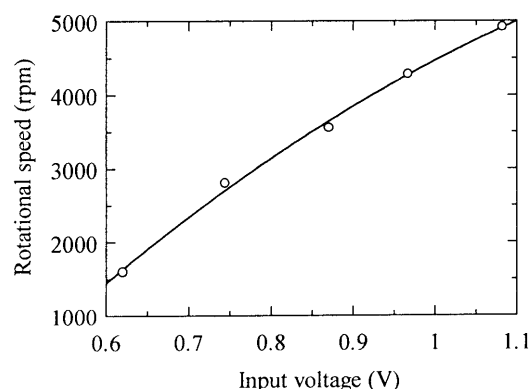


Fig. 4 Relationship between input voltage and rotational speed.

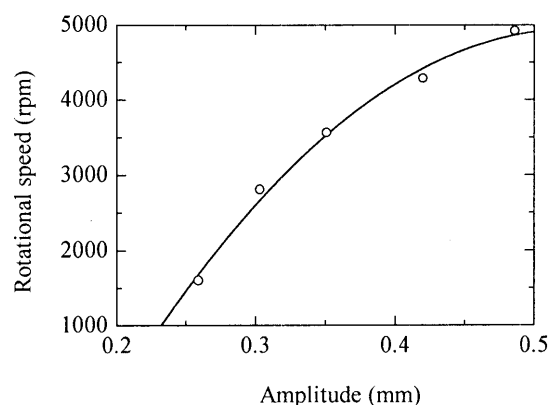


Fig. 5 Relationship between vibrational amplitude of magnet and rotational speed.

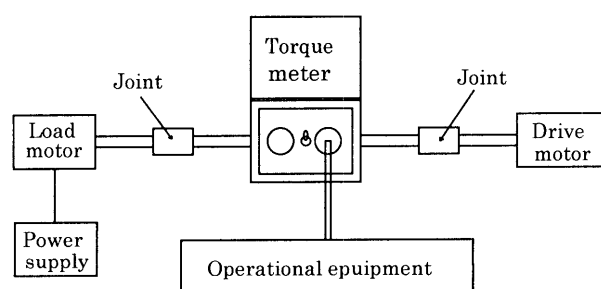


Fig. 6 Measurement of torque.

力を測定した。Fig. 7 および Fig. 8 は試作されたモータを共振駆動し、発生トルクと回転数および効率との関係を示したものである。図中 E および I はそれぞれモータへ入力された電圧実効値および電流実効値を示すもので、力率はすべての入力において 1 である。Fig. 7 より本モータは発生トルクが増加すると出力回転数はおおむね直線的に減少し、DC モータに類似した垂下特性を示した。電力 0.5W 入力時、無負荷回転数は 9982rpm であり、回転数 1098rpm において $34.3 \mu\text{Nm}$ のトルクを発生する。Fig. 8 よりすべての測定結果は極大値を示し、 $P=0.4\text{W}$ 入力時においてその最大効率率は約 2% である。これより本モータは入力に対する出力効率率はあまり高いことが分かる。

4. 高出力化および高効率化への検討

更なる高性能化を図る目的で、Fig. 1 と同一構造で永久

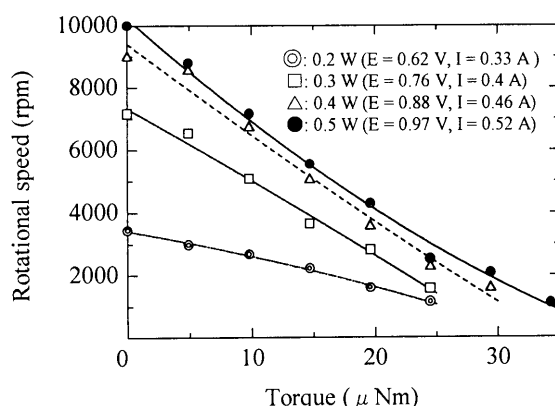


Fig. 7 Relationship between output torque and rotational speed.

磁石のみを直径 3mm、厚さ 3mm で表面磁束密度 350mT の両面 2 極着磁 NdFeB 磁石に変更したモータ (Type II) を作製した。これより本モータの形状は直径 5mm、全長は 15.5mm となる。Fig. 9 は Type II モータにおける発生トルクと出力回転数との関係を示したものである。電力 $P=0.5\text{W}$ 入力時、無負荷回転数は 9850rpm であり、回転数 1560rpm において出力トルク $44.1 \mu\text{Nm}$ が得られた。また永久磁石の変更による加振力の増大化により、低入力時における出力は大幅に増加する結果が得られた。さらに最大発生トルクは、すべての入力時において増加した。これは質量を増したことによる慣性力の増加も起因するものと思われる。しかしながら発生トルクが小の範囲で、入力を大とした場合、良好な結果は得られなかった。この原因としては Type I モータに比べ、本モータの駆動振動数が 524Hz と低いことが挙げられる。Fig. 10 は発生トルクと効率との関係を示したものである。0.2W 入力時、その最大効率率は約

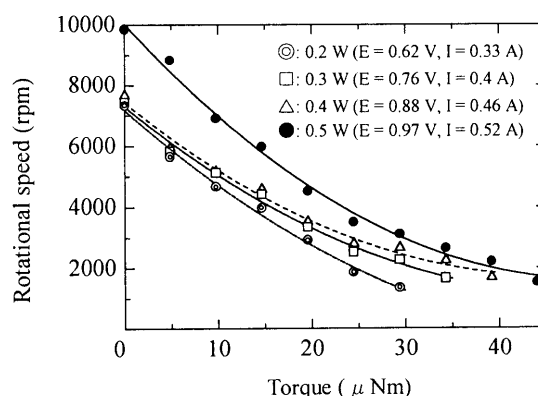


Fig. 9 Relationship between output torque and rotational speed.

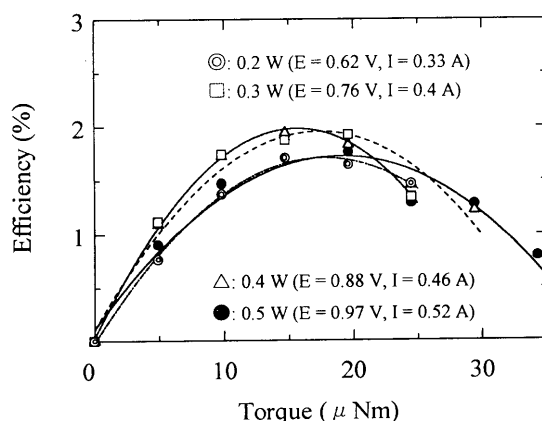


Fig. 8 Relationship between output torque and efficiency.

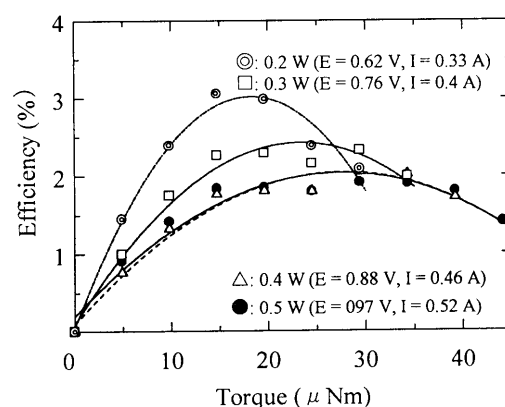


Fig. 10 Relationship between output torque and efficiency.

3%となり, Type I モータに比べ, 低入力時における効率は大幅に向上した.

5. まとめ

振動体の共振エネルギー源をフレキシブルな材料により直接摩擦駆動するマイクロモータを提案し, 試作モデルについての基本特性および回転特性を調べた.

本試作モータは電圧および振動振幅の増加に伴い, 出力回転数がほぼ直線的に増加する基本特性を有する. 発生トルクー出力回転数曲線はおおむね反比例関係にあり, DCモータに類似した回転特性を示すことが明らかにされた. また本モータは摩擦駆動型としては異例の 10000rpm を超えるような高速運転も可能であり, 発生トルクに関しても断面形状を考慮すれば十分高トルクであると思われる.

ただし本モータの効率は最大でも約 3%とあまり高いとはいえないので, 加振源の磁気回路の見直しが必要であると考えている. またフレキシブル材料とロータとの接触状態を詳細に調べ, モータの回転特性を極大化するフレキシブル材料の剛性および形状の最適化を図る必要がある.

最後に, 本マイクロモータは負荷トルクにより振動体の共振振動数が変化する特性を有する. 各々の負荷トルクについて最適な共振振動数で駆動するような設計を行うことにより, 本マイクロモータは回転特性を重視してその発生回転数が数万 rpm にもおよぶ高速回転型モータあるいは発生トルクが $100\mu\text{Nm}$ を優に超える高トルク型モータへの切替が, 駆動振動数の変化のみで対処することも可能であると考えている.

文献

- 1) S.Yokota, A.Sadamoto, Y.Kondo, Y.Otsubo, K.Edamura : *Trans.J.Soc.Mec.Eng.*, **66**, 642 (2000).
- 2) S.Yokota, T.Nemoto, Y.kondo, Y.Otsubo, K.Edamua : *Trans.J.Soc.Mec.Eng.*, **66**, 651 (2000).
- 3) M.Kasuga, A.Iino, K.Suzuki, M.Suzuki : *J.Jpn.Soc.Prec.Eng.*, **64**, 8 (1998).
- 4) T.Aoshima : *J.Jpn.Soc.Prec.Eng.*, **68**, 5 (2002).
- 5) 指田年生 : 応用物理, **51**, 6 (1982).

2002 年 10 月 4 日受理, 2003 年 1 月 17 日採録