

マイクロ・モータの振動によるトルク測定法

(第1報：ひずみゲージによる振動とトルクの相関性)

長 谷 川 博 一*

村 井 国 昭**

Micro-motor Torque Measurement Method by Vibration.

Hirokazu HASEGAWA

Kuniaki MURAI

要 旨

マイクロ・モータのトルク測定方法の一つとして振動によるトルク計が考えられる。そこで、モータ振動とトルク量の関係を実験をおこない検討をした。

1. 結 言

マイクロ・モータ(界磁に永久磁石を使用した超小形精密直流電動機)の制御技術の高度化は、宇宙・軍事および航空の分野では、目ざましいものがある。又、通商産業においても、計測機器、コンピュータ周辺端末部、事務機器および情報機器に多数のマイクロ・モータは、活躍している。この技術も家庭用電気機器に広く取り入れられている。すでに我が国の一家庭当りの小形モータの使用数は、4.50 台に達している。しかしながらこのマイクロ・モータのトルク測定は、はなはだ厄介である。その第1の原因は、モータの出力トルクが、せいぜい0～50(g·cm)という非常に弱い力のためである。そのためモータ軸にトルク計を接続するだけでもモータにとっては大きな負荷と成る場合がある。そこで我々は、モータ本体にひずみゲージを張り振動ひずみとトルク量に相関性が有るか否か実験をおこない考察した。

2. 従来使用されているマイクロ・モータ用トルク計

トルク測定の方法には、主として

- (1)糸と重りによる方法
- (2)うず電流ブレーキと電気天秤による方法
- (3)ヒステリシスブレーキと重力ばねによる方法
- (4)ヒステリシスブレーキと弾性ばねによる方法
- (5)モータブレーキと弾性ばねによる方法

がある。マイクロ・モータ用トルク計は、図-1のように左右のプーリーを介して板ばねの先端で左右の糸を固定する。ただし右側のプーリーは、左右に動くことができ糸の張りを可変できるようにになっている。今、回転プーリーがフリーの状態で右側の可動プーリーを一定の力で引っ張ると板ばねは、左右に $W_1(g)$ と $W_2(g)$ の力で引っ張られる。

$$W_1(g) = W_2(g) \quad \dots\dots(1)$$

となり、板ばねは、左右に同じ力で引っ張られるので、実質的には力を受けない。次に回転プーリーを回転させるとプーリーと糸の間に摩擦力 $W_3(g)$ が生じ、板ばねの両端の方は、 $W_1(g)$ と $W_2(g)$ になり、つり合がとれる。

$$W_3(g) = W_1(g) - W_2(g) \quad \dots\dots(2)$$

となり、板ばねに実質的に加わった力は、板ばね

* 助 手 電気工学科

** 助教授 電気工学科

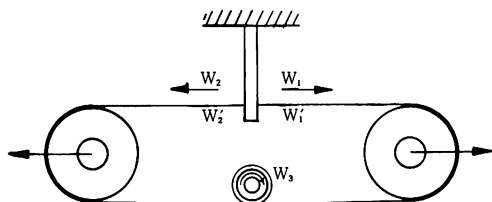


図-1 糸掛け式の原理

の両端の力の差である $W_3(g)$ が加わる。板ばねに加わった力は、制動力に等しいことになる。今、プーリーの半径を 1 cm とすれば、その時の制動トルク $T(\text{g}\cdot\text{cm})$ は、

$$T = (W_1' - W_2')(g) \times 1(\text{cm}) = W_3(g\cdot\text{cm}) \dots\dots(3)$$

となり、板ばねの受けた力を測定すれば、その値がトルク値となる。ただしこの方法では、 $0 \sim 10(\text{g}\cdot\text{cm})$ のトルク値の範囲では、摩擦力の変動が激しくトルクを求めにくい。又実際の負荷を直結した場合トルクを測定することができないという欠点がある。

3. マイクロ・モータの振動

3-1 マイクロ・モータの振動源

マイクロ・モータは、小形であるため、振動も微小である。しかしその中には、複雑な振動が存在している。その主だった原因は、

- (イ) 軸と軸受の撓動
- (ロ) 刷子と整流子およびスリップリングの撓動
- (ハ) 回転子の電磁氣的偏心
- (ニ) 動的アンバランス
- (ホ) 負荷増加のための電機子反作用

などである。たとえば5極形モータでは、 36° 周期でトルク変動が起きる(詳しくは、本校紀要13号参照)。回転子が1回転する間に、10回の刷子と整流子との撓動振動が起きる。このことよりこの振動を測定することで回転数を求めることができる。ダイナミックバランスのとれていない回転子の場合、 $N(\text{rpm})/60\text{ Hz}$ の固有振動が起きる。電磁氣的偏心による振動は、コイル数に等しい回転数コッキングが起きる。その他これらの合成によってモータの振動が表わされる。これらの振動の周波数分析は、騒音の周波数分析と同じ傾向が表われる。

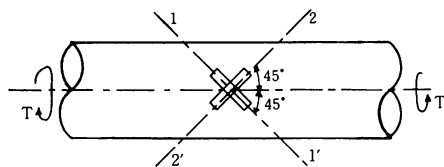


図-2 軸に張ったひずみゲージ

3-2 ひずみゲージによるトルク測定

ひずみゲージを使用する利点は、

- (イ) 小形軽量である。
- (ロ) 検出が簡単である。
- (ハ) 交換が簡単である。
- (ニ) 感度が良すぎない。

などが上げられる。たとえばゲージを図-2のように直径 d の中実丸軸に張る。トルク T を加えると、軸表面のせん断応力 τ は、次のように表わされる。

$$T = \frac{\pi d^3}{16} \tau \dots\dots(4)$$

軸方向と 45° をなす $1-1'$ 方向、 $2-2'$ 方向のひずみ量を ϵ_1 、 ϵ_2 又応力を σ_1 、 σ_2 とすると

$$|\sigma_1| = |\sigma_2| = |\tau| \dots\dots(5)$$

となる。又ひずみ量 ϵ_1 、 ϵ_2 は、次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_1 &= \frac{\tau}{E}(1+\nu) \\ \epsilon_2 &= -\frac{\tau}{E}(1+\nu) \end{aligned} \right\} \dots\dots(6)$$

$$\text{これより } \tau = \frac{\epsilon_1}{1+\nu} E \dots\dots(7)$$

ただし ν : 中実丸軸材料のポアソン比

E : 縦弾性係数

(4)式に(7)式を代入すると

$$T = \frac{\pi d^3}{16} \frac{E}{(1+\nu)} \epsilon_1 \dots\dots(8)$$

従ってひずみ量 ϵ_1 により T を求めることができる。

4. 実験装置および方法

4-1 実験装置

1. 使用モータ

本実験に使用したマイクロ・モータは、代表的な3極形、5極形である。いずれもコパル社のミニモータでその仕様は、表-1に示す。

表-1 使用モータの仕様

型 式	SS 227 (3 極)	C132B (5 極)
定 格 電 圧 (V)	6	4
定 格 電 流 (mA)	960	65
出力トルク (g-cm)	50	5
起動トルク (g-cm)	115	15
回 転 数 (rpm)	5500	2000

2. 使用ひずみゲージおよび増幅器

(1)ひずみゲージは、モータの本体材質により ss 227 は、共和電業 KFC-5-CI-11 普通鋼材用、C 132 B は、共和電業 KFC-5-CI-23 アルミ用を使用した。接着場所は、モータ軸方向に対して縦と横に各1枚ずつ張った。(2)ひずみ増幅器は、三栄測器 6M 52 形最大感度 10×10^{-6} ストレインで 0.5 v 以上、周波数特性 DC ~ 2 K Hz を用い 1 ゲージ法で測定した。

4-2 方法

測定回路は、図-3のブロック線図に示す。

(1)図-3のように結線後、各種測定器を調整し、モータ運転前のバックグラウンドの振動を測定する。

(2)無負荷における速度特性を測定する。回転は、零より定格回転数まで、

(3)回転数を一定(3極 5,000 rpm, 3,000 rpm, 1,500 rpm, 5極 2,000rpm, 1,000 rrm)としてトルク-振動振幅特性を測定する。

以上の結果より各特性曲線を求める。

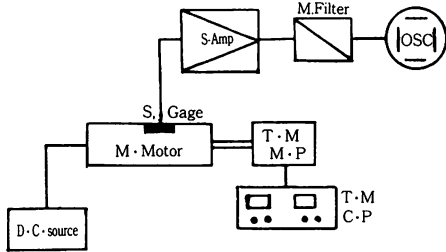


図-3 測定回路ブロック線図

表-2 無負荷速度特性

型 式	供給電圧 (V)	無負荷電流 (mA)	回 転 数 (rpm)	平均振動 (V)
SS 227 (3 極)	0.5	55	530	1.01×10^{-1}
	1.0	60	1240	1.09×10^{-1}
	1.5	74	2000	1.28×10^{-1}
	2.0	86	2680	1.48×10^{-1}
	2.5	100	3360	1.94×10^{-1}
	3.0	161	3970	3.24×10^{-1}
	3.5	181	4620	3.89×10^{-1}
	4.0	192	5210	4.56×10^{-1}
C132B (5 極)	0	0	0	2.86×10^{-2}
	0.5	21.5	0	2.74×10^{-2}
	1.0	18.0	470	3.17×10^{-2}
	1.5	18.5	890	3.77×10^{-2}
	2.0	20.0	1330	3.01×10^{-2}
	2.5	21.0	1720	3.50×10^{-2}
	3.0	22.5	2110	3.43×10^{-2}
	3.5	24.0	2340	4.08×10^{-2}
	4.0	24.0	2960	6.16×10^{-2}

表-3 無負荷振動平均振幅

3 極 形	回 転 数 (rpm)	平 均 振 幅 (V)
	5000	4.38×10^{-1}
5 極 形	3000	1.49×10^{-1}
	1500	1.13×10^{-1}
	2000	3.80×10^{-2}
5 極 形	1000	3.05×10^{-2}

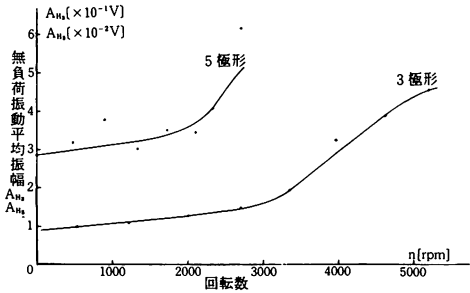


図-4 無負荷振動平均幅曲線

5. 実験結果および考察

5-1 実験結果

表-2は、3極形、5極形モータの無負荷における速度特性の測定結果である。図-4は、その測定値より求めた無負荷回転数-振動平均振幅特性曲線である。ただしひずみの振幅は、ひずみ

表－４ トルクー振動平均振幅（３極）

回 転 数 (rpm)	供 給 電 圧 (V)	負 荷 電 流 (mA)	ト ル ク (g - cm)	全平均振幅(V)	ト ル ク に 関する振幅(V)
5000	3.6	140	2.2	5.41×10^{-1}	1.63×10^{-1}
	3.8	180	4.0	6.38×10^{-1}	2.00×10^{-1}
	4.0	265	7.3	6.49×10^{-1}	2.11×10^{-1}
	4.0	250	9.0	6.27×10^{-1}	1.89×10^{-1}
	4.0	300	11.5	6.66×10^{-1}	2.28×10^{-1}
	4.2	360	15.0	6.81×10^{-1}	2.43×10^{-1}
	4.3	410	17.5	7.33×10^{-1}	2.95×10^{-1}
	4.4	450	20.0	8.15×10^{-1}	3.77×10^{-1}
	4.6	500	25.0	8.67×10^{-1}	4.29×10^{-1}
	5.0	650	31.0	9.48×10^{-1}	5.10×10^{-1}
3000	2.4	200	5.8	3.29×10^{-1}	1.80×10^{-1}
	2.5	220	7.0	3.67×10^{-1}	2.18×10^{-1}
	2.6	270	10.5	4.05×10^{-1}	2.56×10^{-1}
	2.7	360	15.0	4.19×10^{-1}	2.70×10^{-1}
	2.9	400	18.0	4.58×10^{-1}	3.09×10^{-1}
	3.2	540	27.0	5.32×10^{-1}	3.83×10^{-1}
	3.5	660	32.0	5.43×10^{-1}	3.94×10^{-1}
1500	1.4	200	3.4	2.07×10^{-1}	0.94×10^{-1}
	1.5	220	5.4	2.06×10^{-1}	0.93×10^{-1}
	1.6	260	7.6	2.54×10^{-1}	1.41×10^{-1}
	1.6	300	10.5	2.29×10^{-1}	1.16×10^{-1}
	1.8	350	13.5	2.34×10^{-1}	1.21×10^{-1}
	1.9	400	17.0	2.62×10^{-1}	1.49×10^{-1}
	2.0	430	18.5	2.87×10^{-1}	1.46×10^{-1}
	2.0	470	20.5	2.87×10^{-1}	1.74×10^{-1}
	2.3	560	26.0	3.02×10^{-1}	1.89×10^{-1}
	2.6	700	34.0	3.14×10^{-1}	2.01×10^{-1}

の単位（ストレイン）に換算せず、増幅器振幅電圧をそのまま用いて表わす。これより、各モータの回転数に対する無負荷振動平均振幅を求め表－３に示す。

表－４は、３極形の回転数一定下における負荷特性の結果である。図－５は、その測定値より求めたトルクー振動平均振幅曲線である。同様に５極形の場合の各値を表－５、図－６に示す。ただし、振動データ処理は、統計的解析法を用いる。

$$A_H = \frac{1}{T} \int_0^T |F(t)| dt$$

F(t)：瞬時値の積算値

A_H：振動平均振幅

５－２ 考 察

図－４の無負荷振幅線より、３極形、５極形いずれの場合も同傾向の曲線となっている。ただし回転数零のときの振幅の大きさは、異なり又５極の方がばらつきが大きい。これより極数に無関係に回転数－平均振幅の特性が考えられる。

次に図－５の３極形の負荷特性において、トルクー振幅曲線に最小二乗法を用いてプロットすると図のような直線を描くことができる。（ $n=5000$ rpm のとき傾き $1.44 \times 10^{-1}(\text{v/g}\cdot\text{cm})$, $n=3000$ rpm のとき傾き $8.50 \times 10^{-2}(\text{v/g}\cdot\text{cm})$, $n=1500$ rpm のとき傾き $4.00 \times 10^{-2}(\text{v/g}\cdot\text{cm})$ ）

図－６の５極の場合直線化は、困難となった。これは、定格トルクが $5(\text{g}\cdot\text{cm})$ と非常に小さく、そのためトルク計で与えるトルクがすぐ過負荷

表-5 トルクー振動平均振幅(5極)

回転数 (rpm)	供給電圧(V)	負荷電流(mA)	トルク (g-cm)	平均振幅(V)	トルクに 関する振幅(V)
2000	3.0	37.0	0	6.11×10^{-2}	2.31×10^{-2}
	3.2	44.0	0.5	6.96×10^{-2}	3.16×10^{-2}
	3.3	47.5	1.0	7.94×10^{-2}	4.14×10^{-2}
	3.4	56.0	1.6	7.98×10^{-2}	4.18×10^{-2}
	3.5	58.0	2.1	8.89×10^{-2}	5.09×10^{-2}
	3.6	62.0	2.5	8.81×10^{-2}	5.01×10^{-2}
	3.9	64.0	3.8	9.41×10^{-2}	5.61×10^{-2}
	4.2	77.0	5.0	9.88×10^{-2}	6.08×10^{-2}
	4.4	96.0	6.2	10.04×10^{-2}	6.24×10^{-2}
	4.6	100.0	7.2	9.40×10^{-2}	5.60×10^{-2}
1000	2.6	64.0	0	4.65×10^{-2}	1.60×10^{-2}
	2.6	68.0	0.5	4.68×10^{-2}	1.63×10^{-2}
	2.8	72.0	1.0	4.87×10^{-2}	1.82×10^{-2}
	2.9	80.0	1.7	4.95×10^{-2}	1.90×10^{-2}
	3.2	95.0	3.2	4.92×10^{-2}	1.87×10^{-2}
	3.2	100.0	4.2	5.41×10^{-2}	2.36×10^{-2}
	3.6	113.0	5.3	5.23×10^{-2}	2.18×10^{-2}
	4.0	120.0	6.0	5.78×10^{-2}	2.73×10^{-2}
	4.1	130.0	7.1	6.09×10^{-2}	3.04×10^{-2}
	4.2	140.0	8.3	7.48×10^{-2}	4.43×10^{-2}

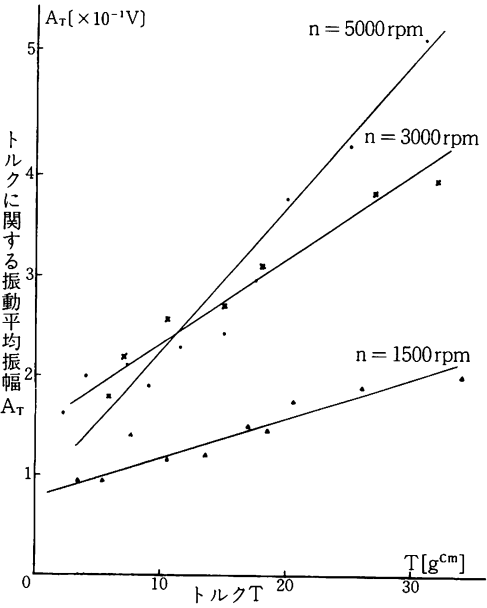


図-5 トルクー振動振曲線(3極形)

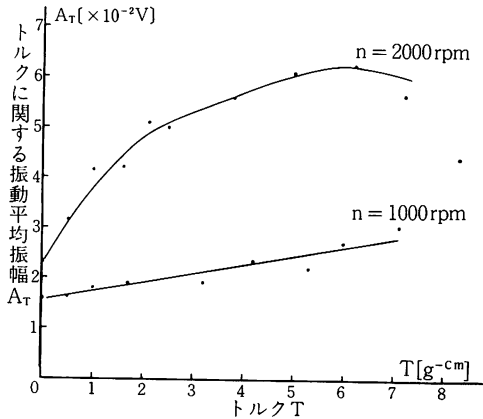


図-6 トルクー振動振曲線(5極形)

となる。このため測定値が不安定となったと考えられる。これらの結果より、トルクと振動との間には、相関性が有り直線に近い形で表わされると考えられる。

結 言

トルクと振動との間に、一様相関関係が有るといふ結果ができた。しかし、まだ多くの問題が山積みされている。モータ本体の固有振動と負荷による強制振動との関係、微小トルクを正確にモータに加える装置、測定機器の強化（スペクトル解析機等による振動の各周波数成分ごとの変動量解析）、振動検出器の適正選択（ひずみゲージより正確、小形化の素子の有無）など上げて行けば、きりが無い。この研究の第1歩を踏み出したところである。今後これらの問題点を1つずつ解決し、軸と非接触形のトルク計を開発したい。最後に、本研究において、ひずみゲージの使用法を御指導してくれました本校機械工学科岩瀬谷技官にお礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 山田博：精密小形モータの基礎と応用，工学図書
- (2) 金子弘：マイクロモータの設計と応用，日刊工業新聞社
- (3) 機械の研究編集部：機械の振動，養賢堂
- (4) 渡辺理：ひずみゲージとその応用，日匠工業新聞社
- (5) T. ポトマ：ひずみゲージ，共立出版
- (6) 伊達，長谷川，図所：電気4学会道支部連大会（昭和51）
- (7) 長谷川，伊達：苫小牧高専紀要第13号（昭和53）
- (8) 長谷川，村井，伊達：苫小牧高専紀要第14号（昭和54）
- (9) 江川，松田，伊藤：ステップモータの振動現象とその対策：自動化技術

（昭和54年11月20日受理）