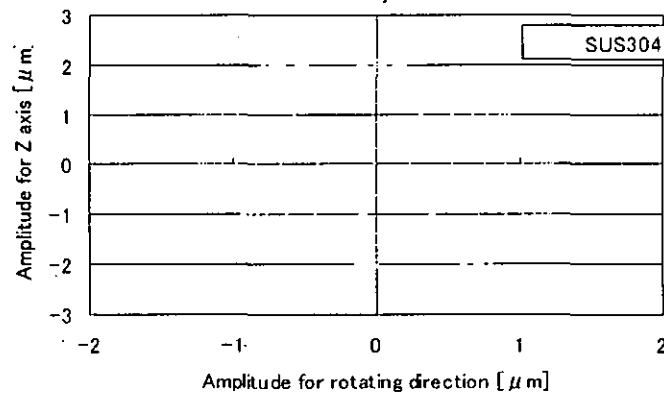
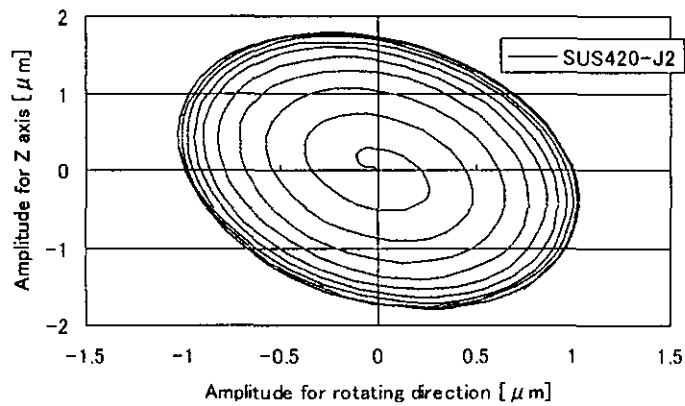


(c) TP340



(d) SUS304



(e) SUS420-J2

図 4.23 外周部一点における振動変位 (ステータ直径)

2.7.3 ステータ材質評価

ステータにリード線を配し，インピーダンスアナライザを使用して共振周波数の測定及び超音波モータを基本等価回路に変換することで等価コンデンサ容量，等価インダクタンス，内部抵抗，制止コンデンサ容量を測定する．これらの測定値から理論上の Q 値（共振の鋭さ）を算出する．超音波モータを効率良く駆動させるためには図 4.12 に示した基本等価回路の C_m と L_m の共振周波数で電力を供給する必要がある．このとき，共振の鋭さを表す量として Q 値を扱う．Q 値は(4-5)式によって表せる．

$$Q = \frac{\omega_0 m}{r_0} \quad (4-5)$$

ω_0 は共振角周波数であり，

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{C_m L_m}} = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (4-6)$$

と示すことが出来る．K 及び m は(4-7)式の力係数で表すことが出来る．

$$A = b d_{31} Y_{11} \quad (4-7)$$

$$C_m = \frac{A^2}{K} \quad (4-8)$$

$$L_m = \frac{m}{A^2} \quad (4-9)$$

ここで，等価コンデンサ容量，等価インダクタンス，内部抵抗，等価質量，制止コンデンサ容量，スプリング定数，力係数，圧電素子幅，せん断方向の圧電定数をそれぞれ C_m ， L_m ， r_0 ， m ， C_d ， K ， A ， b ，

d_{31} とする。

各ステータの図 4.24 に示す各要素をインピーダンスアナライザによって測定した。その結果を表 4.5 に示す。測定した後、各ステータのトルク試験を行った。トルク試験において、交流電圧を印加した際にステンレス鋼 SUS420-J2 は回転したが、アルミ合金 A6061、バネ用リン青銅 C5210、ステンレス鋼 SUS304、チタン材料 TP340 は、直ぐに高温となり押し付け荷重を変化させても回転することは無かった。ここで、表 4.5 に示したインピーダンスアナライザによる材料の内部抵抗 r_0 に注目する。超音波モータのアース部は、ステータを介しているため必然的に材料の電気抵抗は熱などの損失として失われる。アルミ合金 A6061、バネ用リン青銅 C5210、ステンレス鋼 SUS304、チタン材料 TP340 の内部抵抗値は、ステンレス鋼 SUS420-J2 に比べて約 10 倍以上であった。この事によってステータが高温になってしまい、ロータが回転しなかったと考えられる。インピーダンスアナライザによって得られた各要素から算出した各ステータの Q 値を表 4.6 に示す。このことからステンレス鋼 SUS420-J2 の Q 値が最も大きい結果となった。Q 値が分かることによって Q 値の逆数である機械的損失の度合いを表していることになる。その機械的損失は振動エネルギーの失われる割合を示している。このため、Q 値が高い場合、エネルギー損失が少なく、共振周波数が安定すると言える。この事から、今回はステータ材料にステンレス鋼 SUS420-J2 を採用した。

表 4.5 インピーダンスアナライザ測定結果

材質名	共振周波数 [kHz]		r_0 [k Ω]	L_m [mH]	C_m [pF]	C_d [nF]
	A 相	B 相				
A6061	48.689	48.749	1.29908	283.179	37.2407	3.31326
C5210	35.111	35.051	112.409	2872.2	3.96746	0.314612
TP340	46.862	46.645	1.13952	253.872	42.9198	3.70593
SUS304	46.339	46.338	1.66723	345.907	34.4654	3.50984
SUS420-J2	48.5	48.5	0.181892	487.989	22.2795	3.25114

表 4.6 Q 値計算結果

材質名	ω_0	圧電素子幅 [mm]	力係数	等価質量	Q 値
A6061	307936.068	5.0	0.0522	0.000772	0.182905
C5210	296235.009			0.007826	0.020625
TP340	302944.975			0.000692	0.183907
SUS304	289620.076			0.000943	0.163732
SUS420-J2	303278.947			0.00133	2.217072

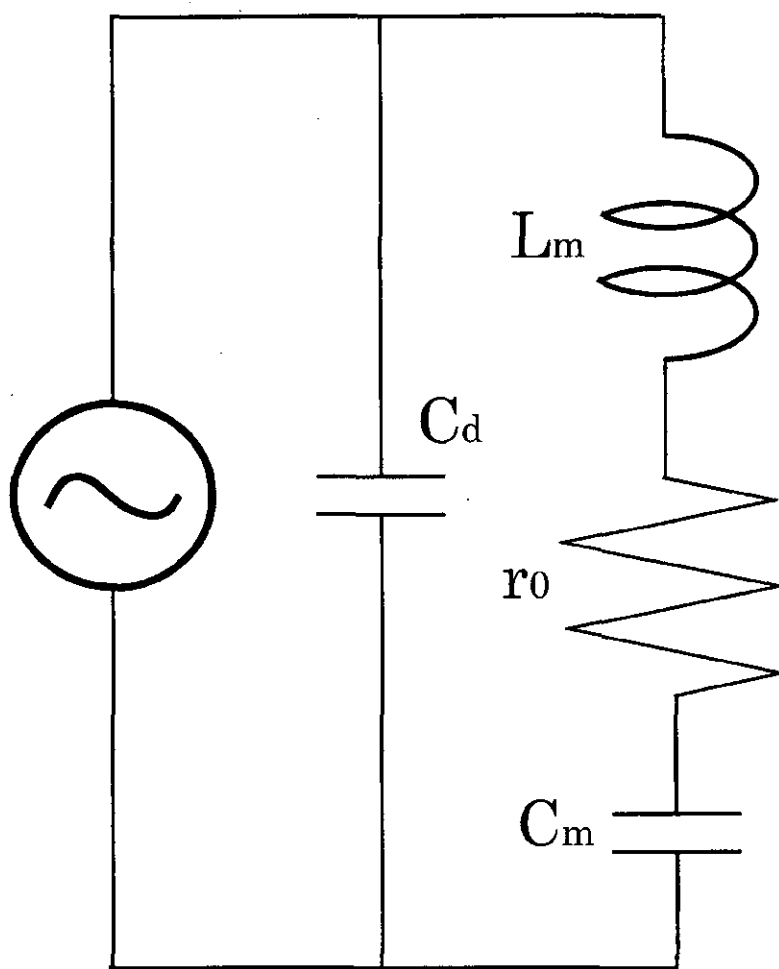


図 4.24 ステータ等価回路

2.7.4 軽量サンドイッチ型超音波モータ組み立て設計

ステータ材質を変更することで軽量化に繋がるが、更なる軽量化のためにステータの形状を検討した。ステータはステータ固定部、分離体、振動部からなる。そこで、ステータ固定部及分離体を出来るだけ少なくし、軽量化を図った。また、トルク向上のために振動振幅を大きくする必要がある。そこで、櫛歯数に注目し、櫛歯の数を変化させた時のステータ上面に励起される振動振幅について検討を行った。櫛歯の数が異なる2つのステータモデルを作成し、有限要素法解析ソフトウェア MSC/NASTRAN2001 を使用して解析を行った。まず、各モデルに対して、固有モード解析を行い、12波発生する振動モードが得られる共振周波数を求め、その共振周波数において過渡応答解析を行った。

解析モデルは、櫛歯が一波につき6個で計72個のステータと櫛歯が一波につき10個で計120個のステータについて行った。解析結果より得られた12波の共振モードを図4.25に示し、各ステータ外周部の任意の点における振動状態を図4.26に示す。この解析結果より櫛歯数120のステータが櫛歯数72のものに比べてZ軸方向では5%、円周方向では17.9%の振動振幅の増加が認められた。これは、櫛歯数を増やした結果、櫛歯部の剛性が下がり、振動振幅が大きくなったと考えられる。よって、櫛歯数120のステータの方が、圧電素子に交流電圧を印加した時に振動振幅が大きくなる見込みがあり、高トルク化への望みがあると推測される。以上のことを踏まえ、外径 $\phi 80\text{mm}$ 、櫛歯数120、ステータ上面に励起される波数12のステータを製作した。

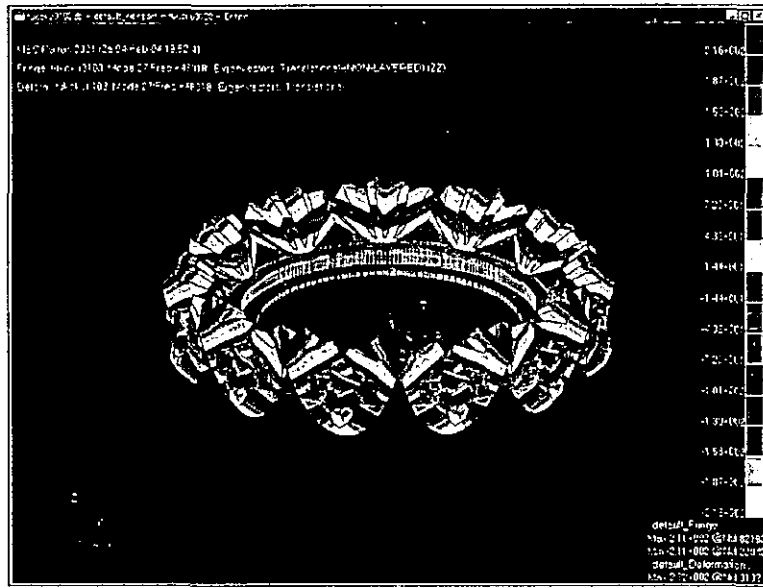


図 4.25 軽量サンドイッチ型超音波モータステータの振動モード

サポートタイプのパワーアシストスーツに装着することを考慮して、この軽量サンドイッチ型超音波モータは、出力軸を無い構造を採用した。超音波モータの構造を最大限に利用してモータ出力を出力軸から得るのではなくロータにパワーアシストスーツのフレームを直接取り付けることでモータ出力をフレームに伝達することで超音波モータ全体の軽量化を図った。図 4.27, 図 4.28 にそれぞれ製作したステータ、軽量サンドイッチ型超音波モータを示す。この軽量サンドイッチ型超音波モータは、皿バネ、ステータ 2 枚、ロータ 1 枚で構成されている。超音波モータは、押し付け力がトルクに大きく影響している。そこで、皿バネを使うことにより押し付け力調整ボルトで押し付け力を調整できるようにした。

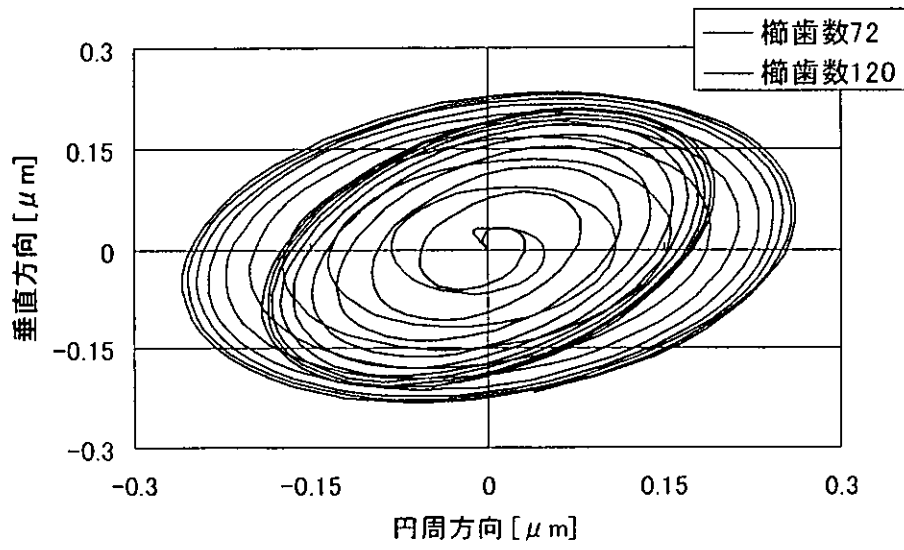


図 4.26 外周部一点における振動変位 (ステータ直径 $\phi 80\text{mm}$)

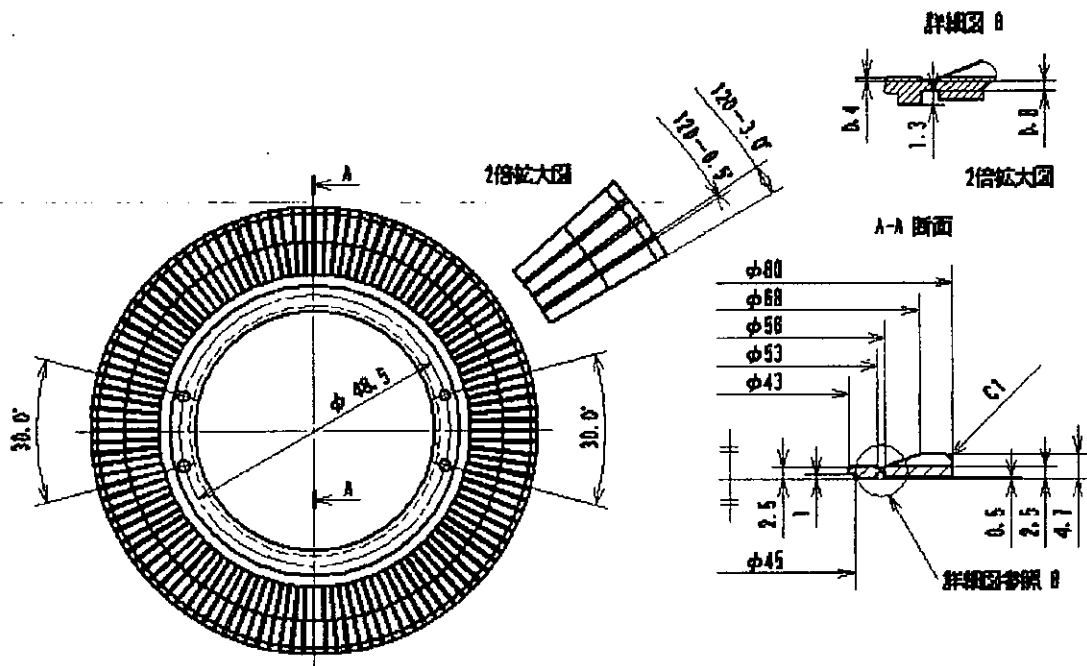


図 4.27 軽量サンドイッチ型超音波モータ用ステータ

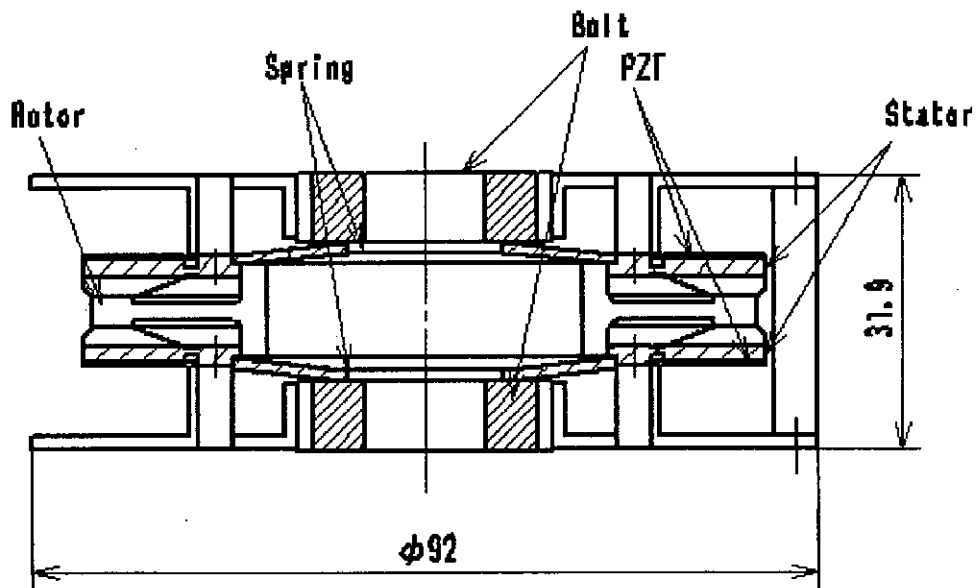


図 4.28 軽量サンドイッチ型超音波モータ

C. 研究結果

製作した各超音波モータの回転数及びトルク，超音波モータ重量を調べ，その超音波モータの特性を評価する．実験装置を表 4.7 に示す．

表 4.7 実験装置

	メーカー	型番
モータアナライザ	SUGAWARA	EMA-1S-U4T
標準電源	ONOSOKUKI	MT3110
回転計	MITUTOYO	DL1740
オシロスコープ	YOKOGAWA	D-Tash

3.1 $\phi 80$ 超音波モータ

$\phi 80$ 超音波モータは、サポートタイプのパワーアシストスーツに装備するために8個製作した。それぞれの超音波モータについて、トルクー回転数を測定した。図 4.29～4.36 にトルクー回転数線図を示す。図は CW（時計回り）、CCW（反時計回り）についてトルクを一定量変化させながら測定した。このときトルクは、超音波モータに印加する電圧の周波数により変化するように回路的に行った。

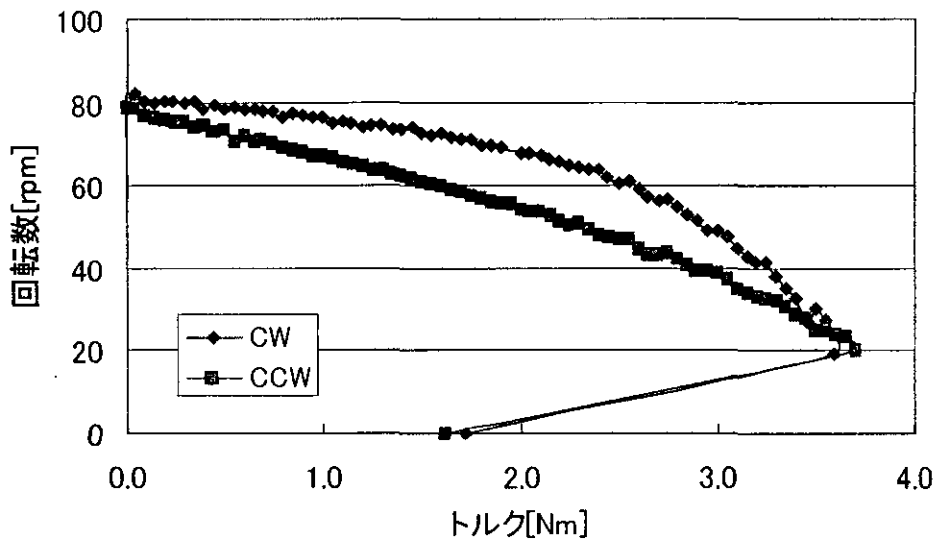


図 4.29 $\phi 80$ 超音波モータ No.1 トルクー回転数特性

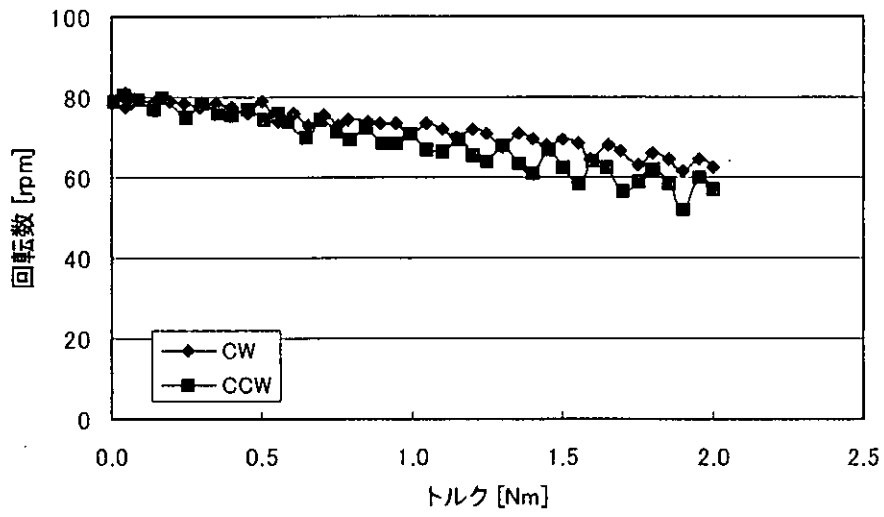


図 4.30 $\phi 80$ 超音波モータ No.2 トルク—回転数特性

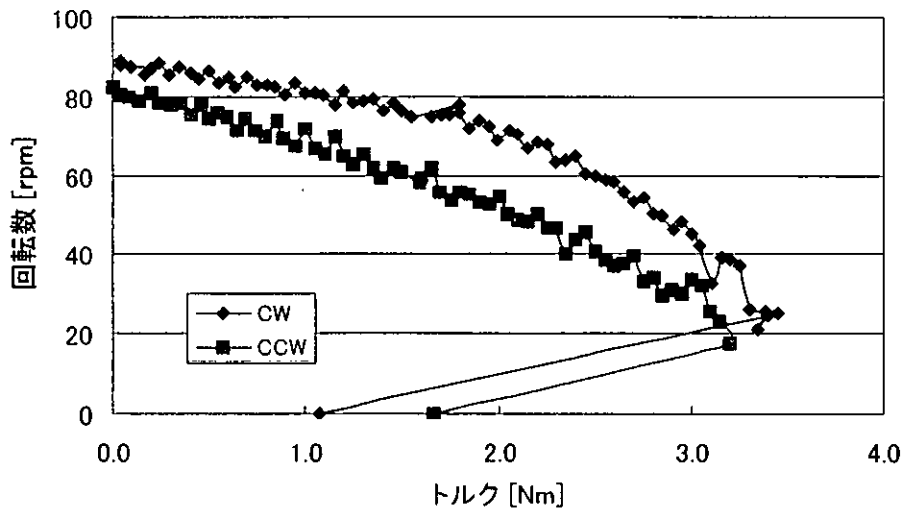


図 4.31 $\phi 80$ 超音波モータ No.3 トルク—回転数特性

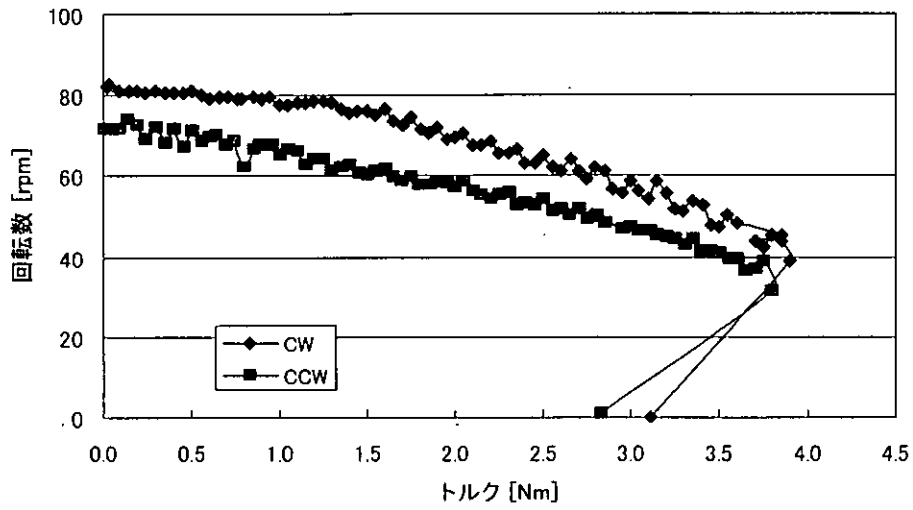


図 4.32 $\phi 80$ 超音波モータ No.4 トルク—回転数特性

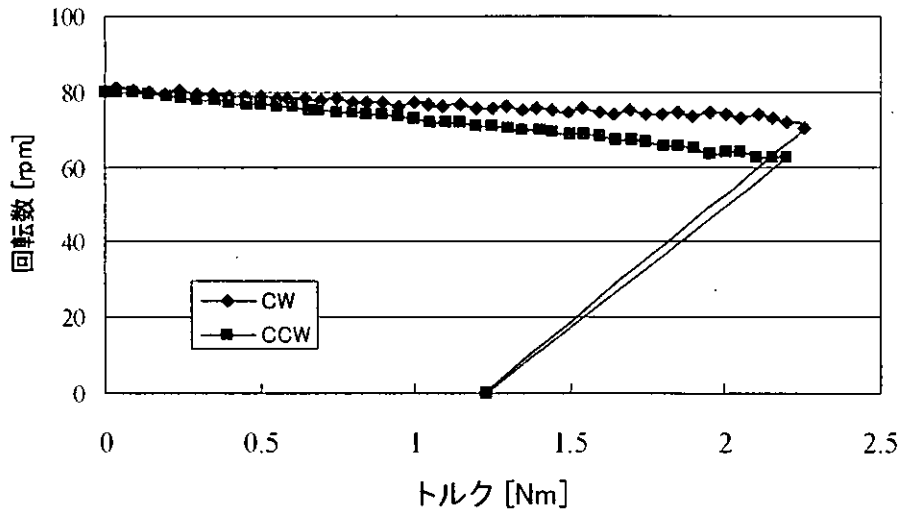


図 4.33 $\phi 80$ 超音波モータ No.5 トルク—回転数特性

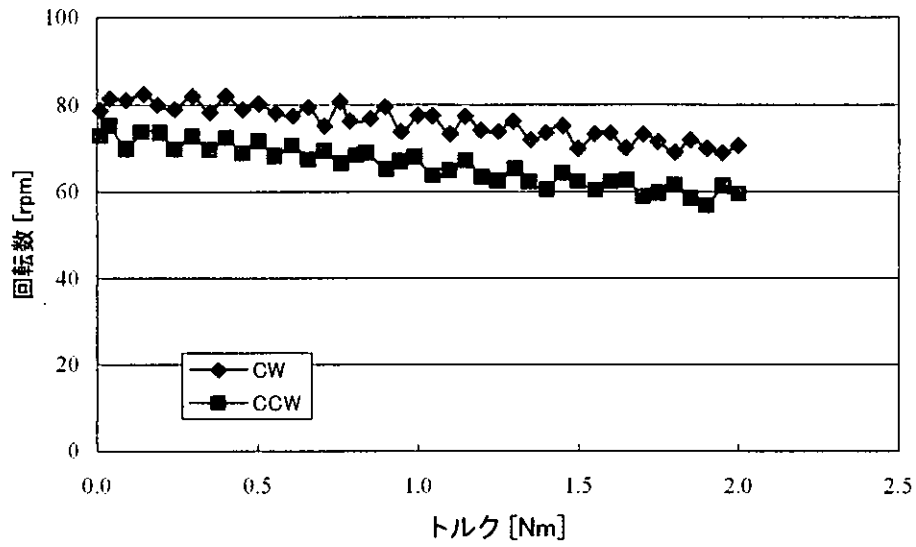


図 4.34 φ 80 超音波モータ No.6 トルク一回転数特性

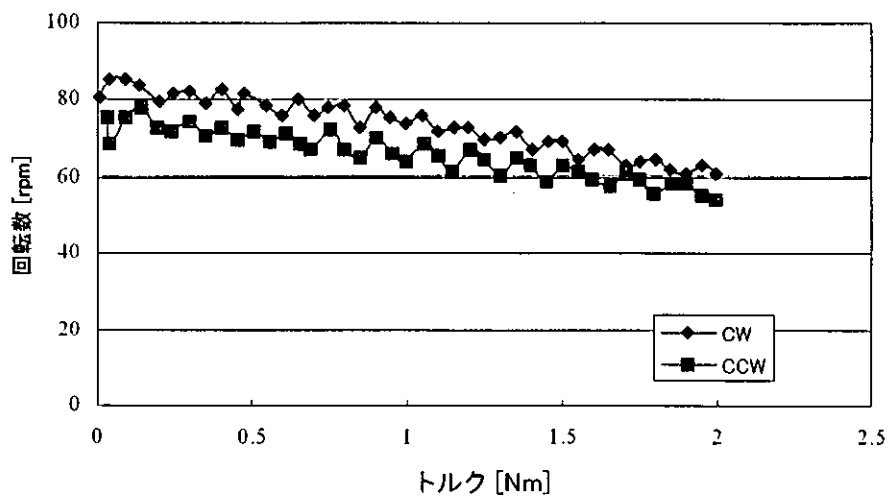


図 4.35 φ 80 超音波モータ No.7 トルク一回転数特性

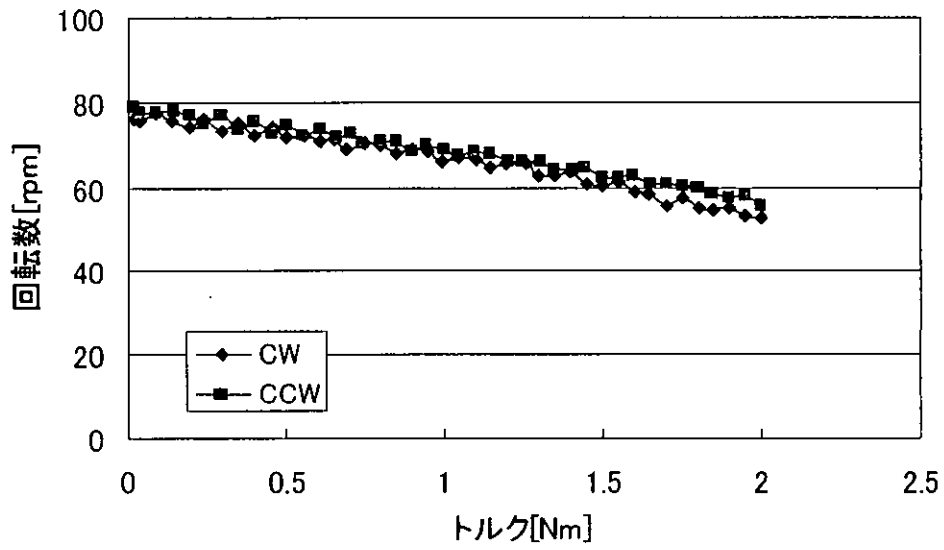


図 4.36 φ80 超音波モータ No.8 トルク—回転数特性

3.2 $\phi 100$ 超音波モータ

$\phi 100$ 超音波モータについて、トルク－回転数を測定した。図 4.37 にトルク－回転数線図を示す。図は CW（時計回り）、CCW（反時計回り）についてトルクを一定量変化させながら測定した。このときトルクは、超音波モータに印加する電圧の周波数により変化するよう回路的に行った。

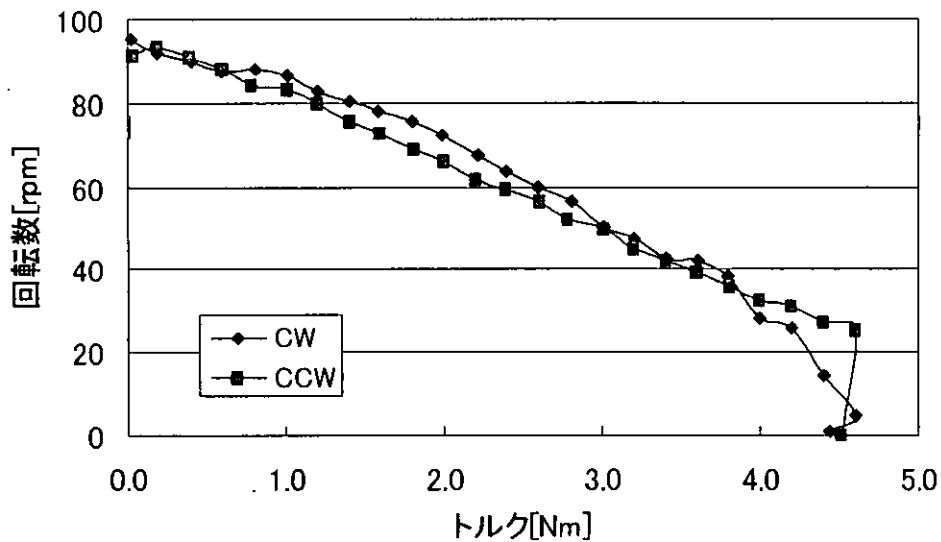


図 4.37 $\phi 100$ 超音波モータトルク－回転数特性

3.3 $\phi 120$ 超音波モータ

測定条件に関しては、 $\phi 100$ 超音波モータ等と同様であるが、今回使用した実験測定器では、最大トルク 5Nm までしか測定できない。そのため 5Nm 以上は、超音波モータの軸にアームを取り付け、ばね秤でトルク計測を行った。このときの測定はここまでに得られるトルク－回転数特性から算出できるトルクが出力可能かどうかの確認を行った。図 4.38、図 4.39 に圧電素子幅の異なる $\phi 120$ 超音波モータのトルク－回転数線図を示す。

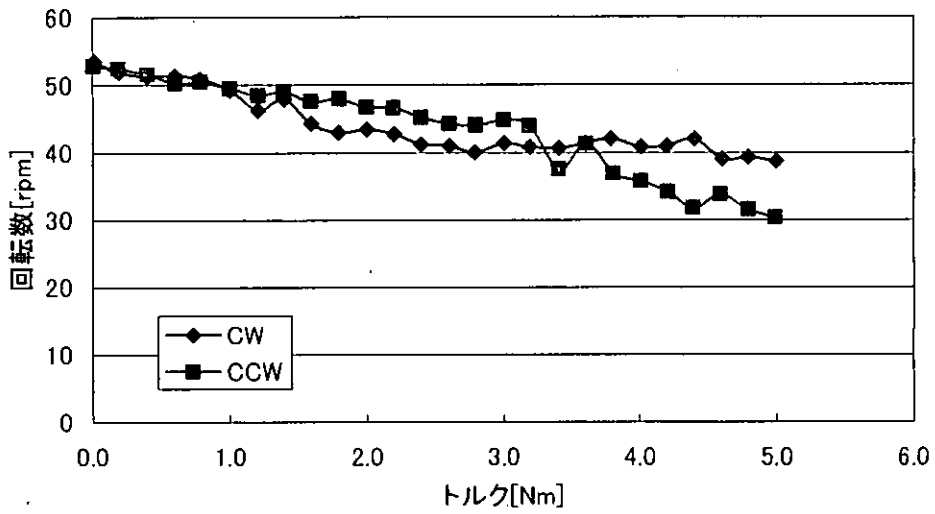


図 4.38 φ 120S 超音波モータトルク—回転数特性

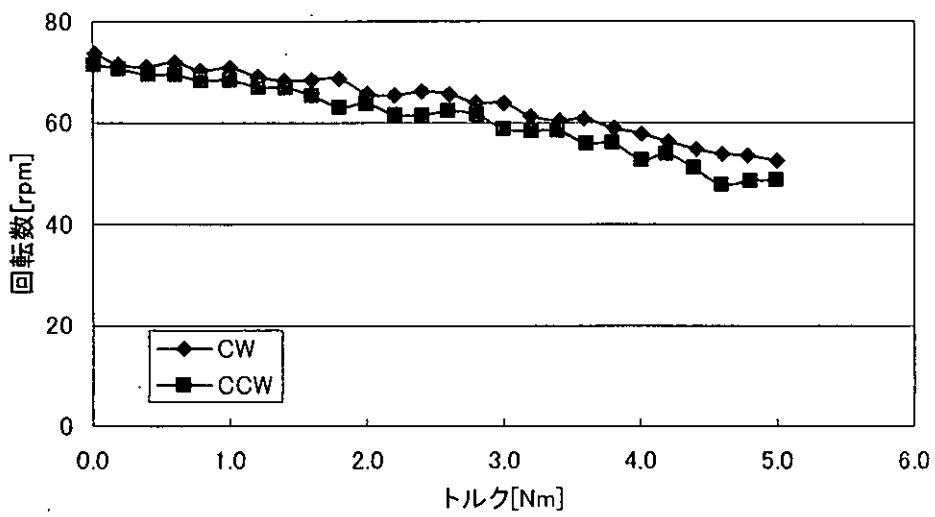


図 4.39 φ 120W 超音波モータトルク—回転数特性

3.4 $\phi 145$ 超音波モータ

測定条件等に関しては、 $\phi 120$ 超音波モータと同様である。図 4.40, 図 4.41 に圧電素子幅の異なる $\phi 145$ 超音波モータのトルク-回転数線図を示す。

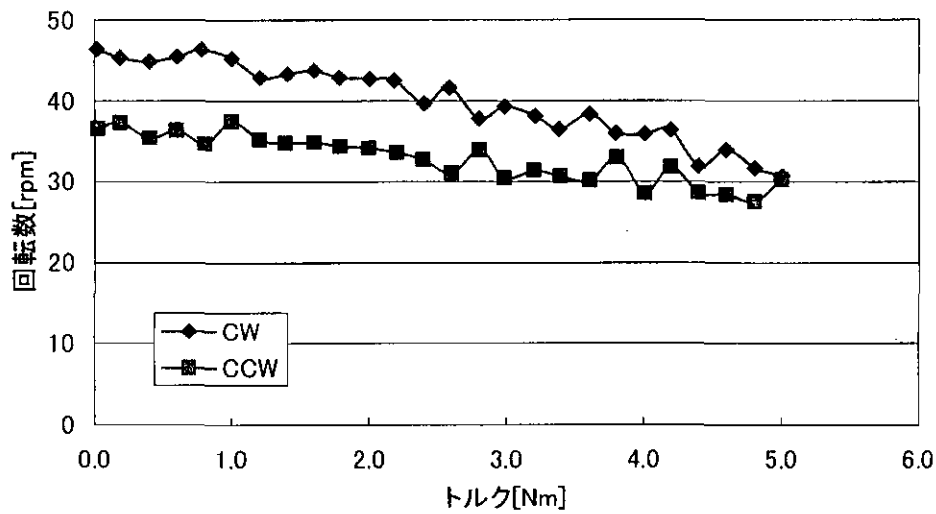


図 4.40 $\phi 145S$ 超音波モータトルク-回転数特性

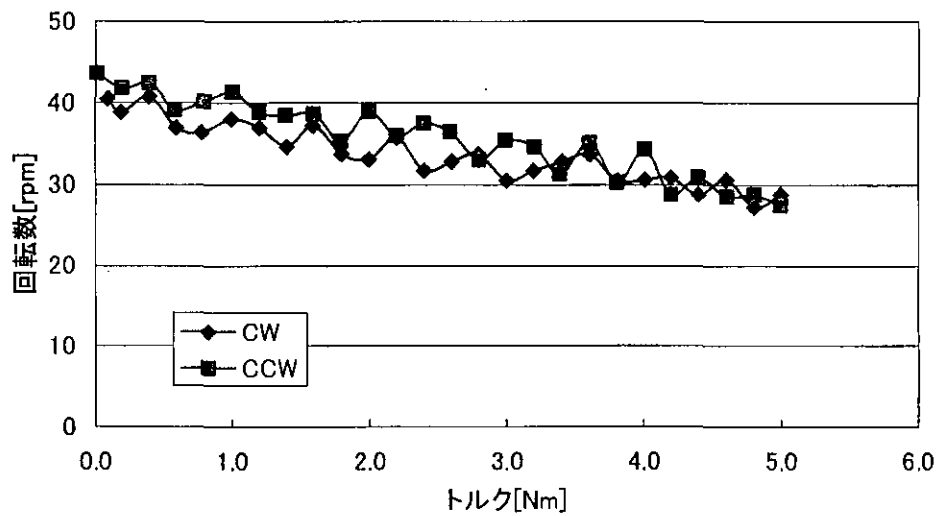


図 4.41 $\phi 145W$ 超音波モータトルク-回転数特性

3.5 $\phi 110$ ダブル型超音波モータ

測定条件等に関しては， $\phi 120$ 超音波モータと同様である．図 4.42 に $\phi 110$ ダブル型超音波モータのトルク－回転数線図を示す．

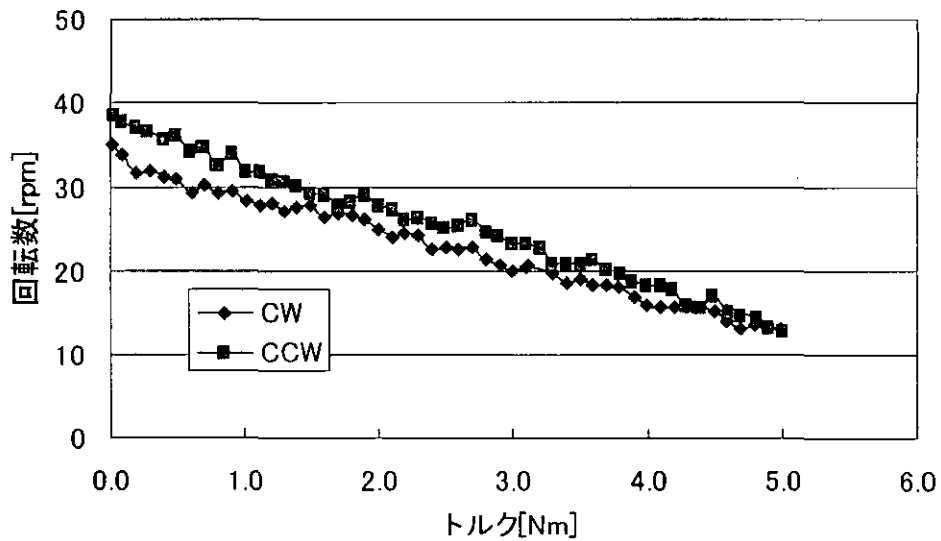


図 4.42 $\phi 110$ ダブル型超音波モータトルク－回転数特性