

超音波水晶モータの極大回転速度の共振電流・印加電圧依存性

青木 孝志*, 梶田 邦孝**

Dependence of Maximum Rotational Speeds
of an Ultrasonic Quartz Motor on Resonance Currents
and Applied Voltages

Takashi AOKI* and Kunitaka KAJITA**

(Received April 11, 1995)

The Maximum rotation speeds of a small ultrasonic motor composed of a quartz rectangular parallelepiped resonating at its fundamental resonance frequency to the X axis direction were found to be proportional to $\log(I_r - k)$ (Here, I_r = resonance current, k = constant) when a gap L_g between an electrode and the quartz surface was changed (i.e. the equivalent circuit constants and the resonance frequency f_r were changed), under the constant applied voltage V_a . When V_a was changed under the constant L_g (i.e. the equivalent circuit constants and f_r are not changed), the maximum rotation speeds were found to be proportional to $\log(V_a - a)$, $\log(I_r - b)$ and $\log(E - c)$, where, a , b and c mean constants. E means an average electric field.

Keywords : quartz resonator, small motor, ultrasonic motor.

1. 緒言

筆者等は、 X , Y 及び Z 軸に垂直な面からなる水晶の直方体（即ち、 X - Y - Z -cut crystal）のうちのある特定の寸法のものに限って、水晶直方体の下部に図1に示すような特定の形状および寸法のリングスペーサを用いると、 X 軸方向のある特定の共振周波数およびその近傍の副振動周波数において励振させるとき、機械的な回転運動をひき起こすモータになることを報告した¹⁾。

通常の電磁モータは主に低い周波数の磁場により回転現象を引き起こしているが、本実験のモータはそれよりかなり高い周波数のピエゾ振動を用いて回転現象を引き起こしている。この振動は超音波の領域の振動であるの

で、一種の超音波モータといってよい。ただし、その周波数は従来型超音波モータの周波数より約一桁高い領域を用いていることと、小型化しやすいという点、および構造が図1に示すように、現在用いられている超音波モータに較べたら極めてシンプルである点が従来型超音波モータと異なる特徴である。このようなシンプルな構造であるにもかかわらず、何故回転現象が起こるのか、それはピエゾ電気による超音波振動が原因していることは間違いないのではあるが、その詳細な回転メカニズムに至っては、まだ解明されていない。

この水晶片の回転メカニズムを詳しく解明するために、まずは、この水晶片の回転に関する諸々の特性に関する情報を得ることが必要である。前論文¹⁾においては、本モータの回転特性と電極間隔、スペーサ幅、等価抵抗、acoustic streaming 等との関係について調査した。本

* 工業物理学科 (Department of Engineering Physics)

** 石井産業(株) (Ishii Sangyo Co. Ltd)

モータの回転の方向は acoustic streaming の反作用の方向とは必ずしも一致せず, acoustic streaming がなくても回転することから acoustic streaming は回転の原因ではないこと等を前回報告した¹⁾。本研究においては極大回転速度と共振電流・印加電圧との関連性について実験式を導出することが目的である。

2. 実験方法

2.1 試料

人工の右水晶を X , Y および Z に垂直な面からなる直方体の形に切断した。直方体の各面は粒子直径 $13\mu\text{m}\phi$ (#1,200) の研磨剤カーボランダムにより研磨し, X 軸に垂直な面は, さらに粒子直径 $1\mu\text{m}\phi$ の研磨剤アルミナを用いて鏡面研磨を施した。これは, この面を鏡面研磨しないと回転しにくいためである。従って Y および Z 軸方向は摺りガラス状で不透明であるが, X 軸方向は透明である。水晶片の大きさは, その X , Y および Z 軸方向の長さ L_x , L_y および L_z が, それぞれ 8.0mm, 30.0mm および 15.0mm である。

2.2 構造

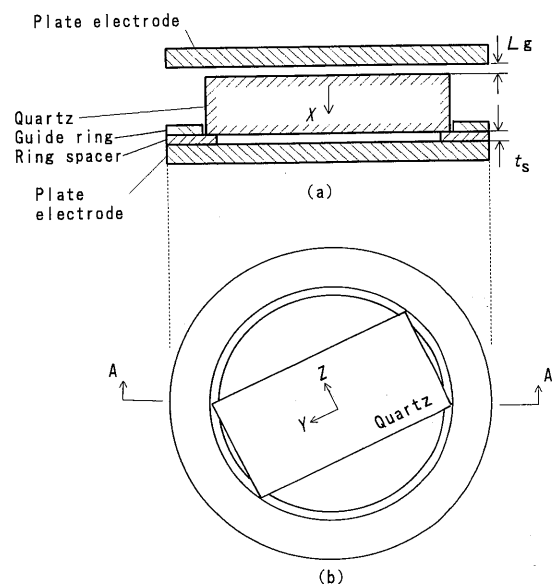


図1 本実験で用いた水晶モータの構造。(a)は(b)のAA断面図であるが, 上部電極を付け加えて示した。(b)は上部電極を取り除いて描いた平面図である。

水晶片は図1(a)に示すように上下二枚の円形(直径45mm)の金属製電極板(図1のPlate electrode)の間に挿入した。同図に示すように水晶の X 軸の方向が電極板面に垂直になるようにした。図1(a)は図1(b)の

AA断面図であるが, 上部電極を付け加えて示した。図1(b)は上部電極を取り除いて描いた平面図である。

下の電極板の上にプラスチック製のリングスペーサ(外径45mm ϕ , 内径31.0mm ϕ , 厚み $t_s=0.125\text{mm}$)を接着した。このリングスペーサの上に水晶片が自重による圧力を及ぼして乗っている。水晶片には回転軸をつけてない。従って, 水晶の回転が一定の場所で軸移動なく行われるようにするためにリングスペーサと同心円となる位置にガイドリングを設置した。

本回転機を実用に向かっての応用研究に入るときは, 回転軸をつけてトルクを測り効率も吟味する必要があるのは当然のことであるが, 軸を付けると水晶の共振モードが全く変わってしまうことが起こるため, まずは第1段階としての基礎的研究として, 軸がない状態での特性導出を行った。もちろん軸支しても回転する。

2.3 測定方法

図2に本実験における測定系の構成を示した。フリケンシ・シンセサイザの出力端からの信号を高速アンプにより増幅して水晶片の電極に供給した。このとき水晶に加える印加電圧 V_a は点Aにおいて高周波電子電圧計(図2のRF electronic voltmeter)で検出し, 水晶を流れる電流 I_r は水晶に直列に挿入した抵抗 R の両端の電圧をもう一つの高周波電子電圧計(図2のRF electronic voltmeter)で検出し, それぞれパーソナルコンピュータに取り込んだ。水晶の近傍の温度は白金薄膜温度センサー(図2のT)で検出し, デジタルサーモメータを通してパーソナルコンピュータで計測している。水晶片の回転速度は光センサ(図2のN)から回転に関する信号を周波数カウンタを介してパーソナルコンピュータにとりこんでいる。水晶およびそれに関した部分は恒温槽(図2のoven)の中に入れて実験を行った。

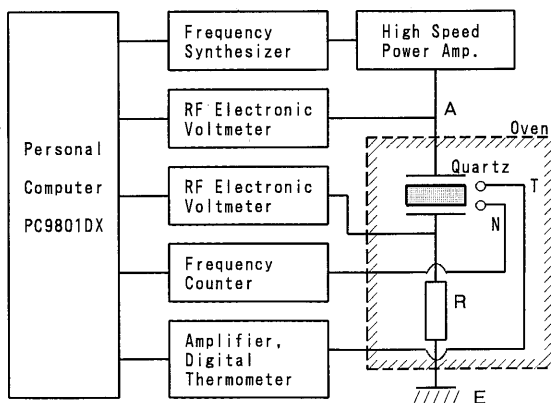


図2 測定系の構成。

3. 結果および考察

共振している水晶を L , C , R の等価回路定数に置き換えるとき、水晶と電極との間の距離を変えると、等価回路定数が変化する。例えば、上部電極と水晶の上部表面の間隙を大きくすると、等価回路定数の変化により、共振周波数 f_r が増加し、共振電流 I_r が減少 (R の増加による) する。従って本モータに流れる電流は、(1) 電極間の距離を変え等価回路定数を変えたとき、(2) 電極間距離を一定にして等価回路定数を変えないで印加電圧 V_a を変えたときの二種類の方法によって変化することになる。以下この二種類の方法 (1) および (2) により共振電流を変えて吟味する。本実験では (1) の場合は水晶の下部電極との間の距離 (= リングスペーサの厚み t_s) は一定にして、上部電極と水晶の上部表面の間隙 L_g を変えて行うことにした。

水晶と上下電極との間隙の長さ L_g とリングスペーサの厚み t_s が次式 (1), (2) で表される値 $L_{nr}(1)$ あるいは $L_{nr}(n)$ のときの回転が起きないことを前に報告した¹⁾。即ち、

$$L_{nr}(1) = 0 \sim \lambda \delta / 2 \quad (1)$$

ここで $L_{nr}(1)$ は第 1 番目の非回転領域を意味する¹⁾。また、第 n 番目の非回転領域 $L_{nr}(n)$ は

$$L_{nr}(n) = \lambda (n-1-\delta) / 2 \sim \lambda (n-1+\delta) / 2 \quad (2)$$

と表される¹⁾。ここで、 λ は空気中における音波の波長、 δ は印加電圧 etc により決まる定数 (本実験の場合は $\delta=0.14$)、 $n=2, 3, 4, \dots$ である¹⁾。式 (1) (2) に示すように $L_{nr}(1)$ および $L_{nr}(n)$ で回転停止が起る原因は、水晶から発生した超音波が電極で反射するとき L_g および t_s が $L_{nr}(1)$ または $L_{nr}(n)$ で定常波とならず、共振電流が減少するためであることは既に報告した¹⁾。

このモータは L_g および t_s が次式 (3) (4) で与えられる $L_r(1)$ および $L_r(m)$ のとき回転する¹⁾。すなわち、

$$L_r(1) = \lambda \delta / 2 \sim \lambda (1-\delta) / 2 \quad (3)$$

この式の $L_r(1)$ は第 1 番目の回転領域であることを示している¹⁾。

第 m 番目の回転可能領域 $L_r(m)$ は、

$$L_r(m) = \lambda (m-1+\delta/2) \sim \lambda (m-\delta)/2 \quad (4)$$

と表せる¹⁾。ここで $m=1, 2, 3, \dots$ である。 $m=1$ のとき式 (3) が得られる。前に報告したように、この $L_r(m)$ は

N を縦軸にとり L_g (または t_s) を横軸にとったグラフにおいて N の第 m 番目のピークが起る L_g (または t_s) の値の領域である¹⁾。

図 3 に示す水晶片の場合、 $f_r=355\text{kHz}$ (24°C) であるから、 v を音速とすると、 $\lambda/2=v/2f_r=346/(2 \times 355 \times 10^3)=0.49\text{mm}$ となる。この値と δ の実験値 0.14 を式 (3) に代入して

$$L_r(1)=0.068\text{mm} \sim 0.42\text{mm} \quad (5)$$

となる。図 3 の場合、 $L_g=0.14\text{mm}$, $t_s=0.125\text{mm}$ であるが、これは (5) 式の回転可能範囲内に入っているのて回転することになる。

図 3 は各回転可能領域 (網掛けで示した領域) における最大の回転数 $N_{\max}$ を縦軸にとり、横軸に L_g をとって示したものである。この場合印加電圧 V_a は 35V 一定である。この図が示すように $N_{\max}$ は L_g が大きくなるにつれて徐々に小さくなる。この場合の $N_{\max}$ と対応する共振電流 I_r との関係は、図 4 に示した。この図から実験式 (実線) として本実験範囲内では、

$$N_{\max} \doteq k_0 \log(I_r - k_1) - k_2 \quad (6)$$

が得られる。図 4 の場合は $k_0=160$, $k_2=12$ である。この実験式 (6) は上述のように V_a が一定のもとに L_g を変化させたとき、すなわち等価回路定数および f_r を変化させたときに得られたものであることに留意する必要がある。

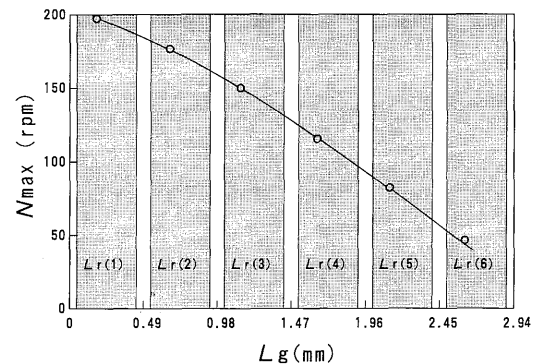


図 3 電極間隙 L_g に対する極大回転速度 $N_{\max}$ の変化。

$V_a=35\text{V}$, $f_r=353.8\text{kHz}$ 。回転しないところは $L_g=(0.49 \pm \Delta)\text{mm}$ の整数倍ごとに周期的に存在する。ここで $\Delta=0.04\text{mm}$ 。リングスペーサの厚みは t_s は 0.125mm である。回転可能領域は網掛けして示した。 $L_r(m)$ は第 m 番目の回転可能領域を意味している。

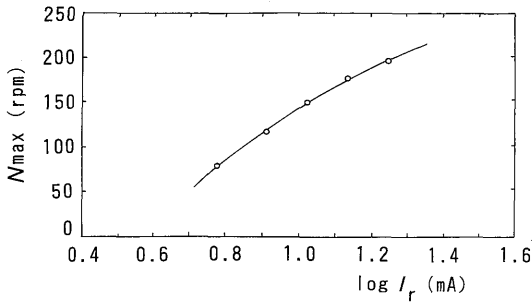


図4 共振電流 I_r に対する回転数の極大値 $N_{\max}$ の変化。
 $V_a = 35\text{V}$, $t_g = 0.125\text{mm}$ 。

図3および4は, L_g を約0.04mmから2.7mmまで増加させたとき, 共振電流 I_r は約19mAから8.5mAに減少したことを示している。このとき共振周波数 f_r は増加し, その増加率 $\Delta f_r / f_r = 6 \times 10^{-4}$ であった。

回転速度の印加電圧依存性は, 図3の左から第3の回転領域 $L_r(3)$ における $N_{\max}$ を例にとって図5に示した。ここで $L_g = 1.15\text{mm}$ である(図3に示すように $L_g = 1.15\text{mm}$ は $L_r(3)$ の中にある)。印加電圧 V_a を上げると共振電流 I_r が増加し回転速度 $N_{\max}$ も増加する。図5には第3の回転領域における $N_{\max}$ の値を, さらに印加電圧 V_a , 共振電流 I_r および平均電界 E に対しても示してある。ここで平均電界 E は, 簡単のために, $E = (\text{印加電圧 } V_a) / (\text{上下の電極の間隔})$ と定義している。ここで

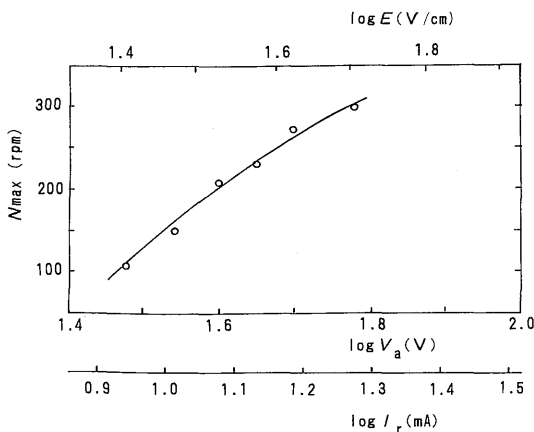


図5 印加電圧 V_a , 電圧 I_r および平均電界 E に対する第3回転可能領域 $L_r(3)$ における極大回転速度 $N_{\max}$ の変化。 $L_g = 1.15\text{mm}$ 。

印加電圧は電極間電圧である。このグラフより実験式,

$$N_{\max} \doteq a_0 \log(V_a - a_1) - a_2 \quad (7)$$

$$N_{\max} \doteq b_0 \log(I_r - b_1) - b_2 \quad (8)$$

$$N_{\max} \doteq c_0 \log(E - c_1) - c_2 \quad (9)$$

が得られる。図5の場合, $a_0 = 192$, $a_1 = 26.9$, $a_2 = 6.0$; $b_0 = 270$, $b_1 = 6.5$, $b_2 = 3.1$; $c_0 = 303$, $c_1 = 18,000$, $c_2 = 1,070$ である。上式の(7)~(9)は L_g と t_g を一定にして, 即ち等価回路定数と共振周波数 f_r を変化させない状態で V_a を変化させたときに得られた $N_{\max}$ と V_a , I_r および E の関係である。図6は図5に対応する回転中における共振電流・印加電圧特性である。図6に示すように共振電流・印加電圧特性は殆どリニアである。このことが式(7)と(8)が同じ形で表される原因である。

図5において共振電流のプロットの最小値は約6mA

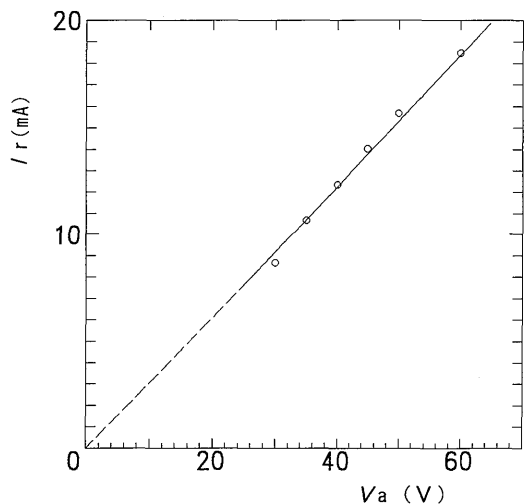


図6 水晶モータが回転しているときの第3回転可能領域 $L_r(3)$ における電流・電圧特性。 $L_g = 1.15\text{mm}$ 。

であるが, これ以下では回転がし難くなる。また最大の電流値のプロットが約18mAであるが, これ以上流さなかったのは, 水晶の破壊の危険を避けるための完全措置からである。

4. 結 言

本実験で用いた水晶モータは, その印加電圧 V_a を一定(35V)にして水晶と上部電極とのギャップ L_g を変化させた場合(水晶の等価回路定数および共振周波数 f_r は変化する), 本実験の共振電流範囲(約8.5mA~19mA)においては, その極大回転速度 $N_{\max}$ は $\log(I_r - k)$ に比例する。また L_g を一定にして電圧を変化させた場合(水晶の等価回路定数および共振周波数 f_r は変化しな

い), 本実験の共振電流範囲 (約 6~18mA) においては, 極大回転速度 $N_{\max}$ は $\log(V_a - a)$, $\log(I_r - b)$ および $\log(E - c)$ に比例する。ただし, ここで k, a, b, c は定数である。

参 考 文 献

- 1) T. Aoki and T. Suzuki : Jpn. J. Appl Phys. **33**, Part 1, No. 10 (1994) pp. 6025-6031.