

格子電極を用いた超音波水晶モータの回転特性

鈴木 利治*, 青木 孝志**

Rotational Characteristics of an Ultrasonic Quartz Motor with a Lattice Electrode

Toshiharu SUZUKI* and Takashi AOKI**

(Received April 11, 1995)

Previously, we reported that quartz rectangular parallelepipeds cut perpendicular to the X , Y and Z axes in certain sizes rotate when they are electrically resonating at frequencies corresponding to the X -axes directions. In this case, the rotation stopped at periodical lengths of a gap between the quartz and its plate electrode. In the present experiment, instead of using the plate electrode, a lattice electrode was used. This gave no periodical stop of the rotation, but gave a periodical dip of the rotation speed instead. This is ascribable to an influence by an acoustic energy reflected slightly from the lattice electrode. The rotation speed of the present motor with the lattice electrode was $1/3 \sim 1/4$ times as fast as that of the former motor. This is ascribable to the situation where reflected sound energy is not utilized enough. The rotation speed was found to be proportional to a velocity of an acoustic streaming speed in the X direction, although this acoustic streaming does not cause the rotation.

Keywords : small motor, ultrasonic motor, quartz resonator, quartz oscillator.

1. まえがき

X , Y , Z 軸に垂直な面からなる水晶直方体を図 1(a) に示すような構造に構成し, 水晶の X 軸方向の共振周波数およびその近傍の副振動の共振周波数において励振すると, 図 1(a) に示すようなリングスペーサを用いるならば機械的な回転現象を引き起こす小型モータとなることを前報告¹⁾において述べた(この斜視図, 平面図を含む詳細説明は前報告¹⁾参照)。この場合, 回転が起こるためには, 水晶と上部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)および(2)を満たしていなくてはならない¹⁾。

$$\lambda(n-1+\delta)/2 \leq L_g \leq \lambda(n-\delta)/2 \quad (1)$$

$$\lambda(n-1+\delta)/2 \leq t_s \leq \lambda(n-\delta)/2 \quad (2)$$

ここで λ は水晶の共振周波数 f_r の空気中における音波の波長であり, δ は印加電圧などの実験条件により決まる定数, そして $n=0, 1, 2, 3, \dots$ である¹⁾。

ただし, なぜ回転が起こるかそのメカニズムはまだ解明されていない。今までに判明したことは水晶の回転方向は, 水晶から横方向に吹く風 acoustic streaming による反作用の方向とは必ずしも一致しないということである¹⁾。即ち横方向の風の反作用は回転の主原因ではな

* 日本トーター(株) (Nippon Totor Co. Ltd)

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

い¹⁾。前報告¹⁾のモータは式(1)および(2)に示すように L_g および t_s のある値に対し周期的回転(言い換えれば周期的回転停止。図2参照)が起こる。今回、上部電極を前報告の平板状のものに代わって、図1(b)に示すように格子状のものにして、上部方向に吹く acoustic streaming を格子電極を通して逃がす構造にしたところ、周期的回転停止は起こらなくなった。そこで、本研究の目的は図1(b)のような格子電極を用いる構造にした場合、どのような特性が現れるかを調べ、前報告¹⁾の平板電極の場合と比較して検討することにある。

2. 実験方法

人工の右水晶を X , Y および Z 軸に垂直な面からなる直方体の形に切断した。直方体の各面はカーボラダム($\sim 13\mu\text{m}\phi$)により研磨し、更に X 軸に垂直な面はアルミナ(約 $1\mu\text{m}\phi$)により鏡面研磨を施した。これらの X , Y および Z 軸の方向の長さ L_x , L_y および L_z は、それぞれ $L_x=8.0\text{mm}$, $L_y=30.0\text{mm}$, $L_z=15.0\text{mm}$ である。

水晶片は図1(b)に示すように上下に二個の電極の間に挿入した。上部電極は直径 $0.2\text{mm}\phi$ の銅線を等間隔に張った格子であり、その格子間隔は 2mm である。下部電極板は直径 45mm の真鍮円盤であり、この表面にプラスチック製のリングスペーサ(厚さ $t_s=0.125\text{mm}$ 、外径 $45\text{mm}\phi$ 、内径 $31\text{mm}\phi$)を接着した。水晶の X 軸は電極に垂直にした。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。水晶の回転が

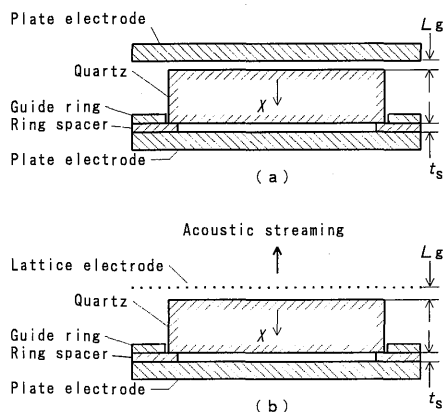


図1 水晶モータの構造。(a)前報告における水晶モータの構造¹⁾。上下二枚の電極は金属板である。(b)本実験における水晶モータの構造。上の電極は直径 $0.2\text{mm}\phi$ の銅線を等間隔に張った格子であり、その格子間隔は 2mm である。下部電極は金属平板。

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。

本実験における測定系に関する説明は前報告¹⁾に、図とともに詳細に報告したものと同一であるので、ここでは簡単に説明する。フリクエンシ・シンセサイザからの信号を高速アンプにより増幅して水晶片の上下に配置した電極に供給した。水晶の共振電流の測定は水晶モータと直列に接続した低抵抗の両端の電圧降下分を増幅してパーソナルコンピュータに取込み計算により求めた。この共振電流の情報から共振周波数 f_r をパーソナルコンピュータにより決定させ、フリクエンシ・シンセサイザを制御して、水晶片は常に共振状態にあるようにした。水晶片の回転速度センサからの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取込んだ。Acoustic streaming の速度は微小なセンサを有する風速計(AVM500, Prosser Scientific Instruments Ltd)で測定した。

なお、水晶片に回転軸をつけても、もちろん回転するが、回転軸により共振モードの変化が起こるため、先ずは回転軸で軸支しない状態での特性測定を本実験では行うことにした。

3. 結果および考察

図2は上下の電極に平板電極を用いた場合(格子電極は不使用、即ち図1(a)の場合)の、水晶の上の表面($Y-Z$ 面)と上の電極の表面との間隙の大きさ L_g に対する回転速度 N の変化を示している。図2から回転しないところの L_g の値は周期的に存在し、その周期 L_{nr} は、

$$L_{nr}=0.49\pm 0.068\text{mm} \quad (3)$$

である。本実験で用いた水晶片の場合、共振周波数 $f_r=355\text{kHz}$ (24°C)であるから、 v を音速とすると、 $\lambda/2=$

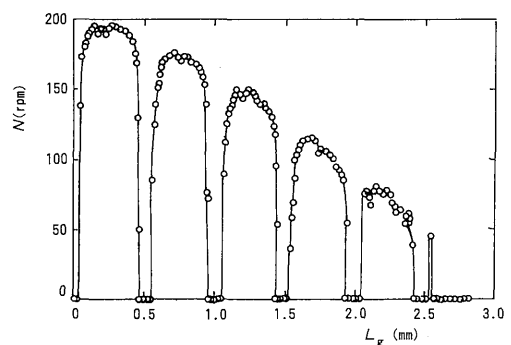


図2 上下ともに平板電極の場合の回転速度 N の電極間隙 L_g に対する依存性。

$v/2f_r = 346 / (2 \times 355 \times 10^3) = 0.49 \text{ mm}$ となる。この値は式(3)の値と等しい¹⁾。即ち $L_{nr} = \lambda/2$ となる。このように L_g が $\lambda/2$ 毎に回転停止の起こ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 が $\lambda/2$ 毎に定常波とならないためである。また、式(1)および(2)において $n=1$ のとき、 L_g および t_g の値に対する第1の回転可能範囲 $L_{rot}(1)$ が得られ、

$$L_{rot}(1) = \lambda\delta/2 \sim \lambda(1-\delta)/2 \quad (4)$$

となるが、この実際の数値は図2より

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

となる。なお本実験で用いたリングスペーサの厚み $t_s = 0.125 \text{ mm}$ は、(5)式の回転可能範囲内に入っているので回転することになる。

本実験における上部電極に格子電極を用いた図1(b)の場合、電極間隙 L_g に対する回転速度 N の変化を図3に示した。ここで L_g は図1(b)に示すように水晶の上表面と格子電極の表面との間の距離を意味する。ここで電極への印加電圧 V_a は 30 V である。図3から明らかに図2のような周期的回転停止（この周期は式(3)）は起こらなくなる。しかし図2と同様な周期 L_{nr} において N はすこし低下する現象が起こる。この原因は格子

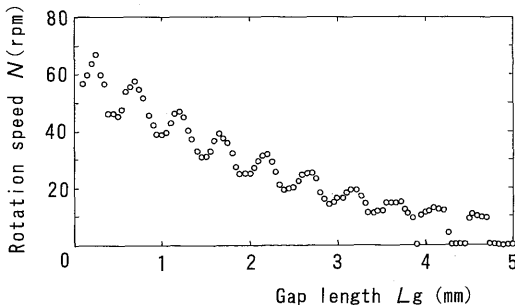


図3 格子電極の場合の回転速度 N の電極間隙 L_g に対する依存性。 $V_a = 30 \text{ V}$ 。

からの反射波がわずかに存在するためであると思われる。また格子電極を用いた場合（図1(b)）の極大回転速度は上下とも平板電極を用いた場合（図1(a)）の極大回転速度に較べて約 $1/3 \sim 1/4$ に低下する。この原因は水晶片から発生する音波が格子の外にぬけてしまい、反射波のエネルギーが利用できないこと、即ちエネルギー損失が起こるためと思われる。図4は格子を上方へ吹き抜ける風の速度 W の L_g に対する変化を示している。上方への

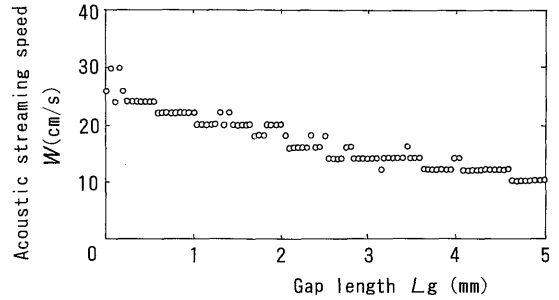


図4 Acoustic streaming の速度 W と電極間隙 L_g との関係。 $V_a = 30 \text{ V}$ 。格子電極使用。

風速 W は YZ 面内の方向のそれより10倍以上大きい。上方への風は回転の原因とはならないであろうが、回転速度 N と acoustic streaming の速度 W との関係を図5にプロットしてみた。図5においてほぼ $W \propto N$ なる関係があることが分かる。しかし、ここで注意しないことではないのは、acoustic streaming が回転の原因ではないのであるから、この $W \propto N$ なる比例関係は水

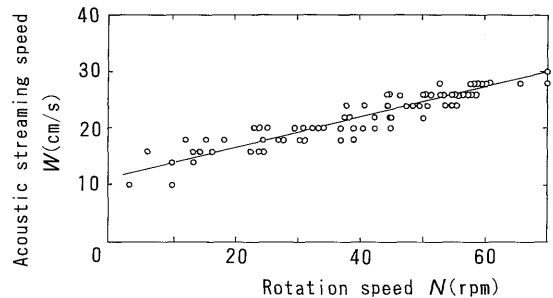


図5 Acoustic streaming の速度 W と回転速度 N との関係。ここで W は N の原因ではないことに注意（本文参照）。 $V_a = 30 \text{ V}$ 。格子電極使用。

晶のピエゾ振動の大きさが W に比例している現象なのであり、従って N がピエゾ振動の強度に比例している現象とみるべきことである。

4. むすび

上部電極に前回の報告で用いた平板電極に代わって格子電極を用いる実験を行った結果、下記のことが判明した。

- (1) 上部電極に平板状電極に代わって格子状の電極を用いると、反射波が弱くなるため、 L_{nr} を周期とする回転停止は起こらなくなるが、 L_{nr} を周期とする回転速度減少の現象が現れる。この原因は格子からの反射波がわずかに存在するためであると考えられる。

(2) 格子状電極に対する極大回転速度は平板電極に対する極大回転速度に較べて約 $1/3 \sim 1/4$ に低下する。この原因は水晶片から発生する音波が格子の外にぬけてしまい、反射波のエネルギーが十分利用できないこと、即ちエネルギー損失が起こるためと思われる。

(3) 回転速度 N と acoustic streaming の速度 W とはほぼ比例関係が成立するといえ、acoustic

streaming が回転の原因ではないので、この比例関係はピエゾ振動の強度が W に比例し、従って N がピエゾ振動の強度に比例していることが原因と見るべきである。

参 考 文 献

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