

水晶モータに用いるX-Y-Z-cut水晶の厚み振動共振周波数の輪郭辺の長さ依存性

青木 孝志*, 堀内 道治*, 吉田 靖夫**

Dependence of Thickness Vibration Resonant Frequency of X-Y-Z-cut Quartz for a Quartz Motor on Contour Lengths

Takashi AOKI*, Michiharu HORIUCHI* and Yasuo YOSHIDA**

(Received June 8, 1998)

Resonant vibrations, mechanical rotations and frequency constants of X-Y-Z-cut crystals used for quartz motors were examined as a function of their contour lengths, where the lengths in the X, Y, and Z-axes directions were 7.070mm, 10.566-14.949mm, and 10.569-14.982mm, respectively. Although the ratio of the crystal's contour lengths used here did not produce high speed rotations, some of the crystals rotated when resonated at their resonant frequencies of the thickness vibrations in the X-axis direction. There appeared frequency deviation and frequency constant deviation from theoretical values. This suggests that the rotating crystals have complicated vibration modes with thickness vibrations connected with the contour vibrations.

Keywords : ultrasonic motor, crystalline quartz, resonant frequency

1. はじめに

最近, Aoki et alはX-Y-Z-cut crystal (X, Y, Z軸に垂直な面からなる水晶直方体)をX軸方向の厚み基本振動の共振周波数において振動させると, ある特定寸法のリング状スペーサを水晶片下部に用いるならば機械的な回転現象を引き起こす超音波モータになることを報告した¹⁻³⁾。このモータの構造は図1に示した。このような構造で, 何故, 回転が起こるかという回転メカニズムの解明はまだなされていない。

上記モータに用いる水晶の大きさはX, Y, Z方向の長さが数mm~約2cmのものである。このようなX-Y-Z-cut crystalの振動モードの解析に関する研究は殆どなされていない。これは, 結晶の寸法が極めて僅

か変化しただけで振動モードが大きく変動してしまうため, その解析に困難が伴うからである。また, 共振・回転・周波数定数等についても十分わかっていない。

本研究の目的は, ある特定寸法のX-Y-Z-cut crystalにおいて, そのX軸方向の長さ L_x を一定として, 輪郭辺の長さ, 即ちY軸方向の長さ L_y およびZ軸方向の長さ L_z を研磨により漸次減少させたときの, 共振・回転・周波数定数等の輪郭辺の長さ依存性に関する情報を得ることにある。

2. 実験方法

人工の右水晶を図1(b)に示すように, 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。直方体の各面は約 $1\mu\text{m}\phi$ のダイヤモンド・スラリーにより鏡面仕上げを施した。この水晶は, X方向の長さ $L_x=7.070\text{mm}$, Y方向の長さ $L_y=14.949\text{mm}$, Z方向の長

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

**機械工学科 (Department of Mechanical Engineering)

さ $L_z=14.982\text{mm}$ である。 L_x は一定値 7.070mm としたが、 Y 方向の長さ L_y はパラメータとし 14.949mm から 10.566mm まで研磨により変化させた。 Z 方向の長さ L_z もパラメータとし 14.982mm から 10.569mm まで研磨により変化させた。

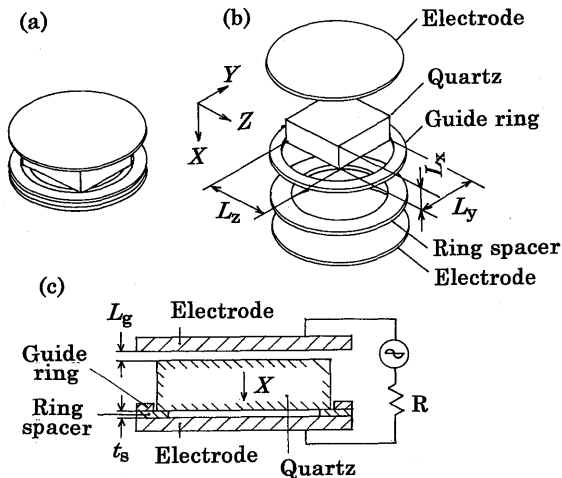


図1. 水晶モータ, (a)水晶モータの斜視図。(b)水晶モータの展開図。(c)水晶モータの縦断面図。 L_x , L_y および L_z はそれぞれ水晶の X , Y , Z 方向の長さである。 X , Y , Z は水晶の結晶軸方向を示す。

水晶は図1(c)に示すように上下二枚の円形の実鍍銀電極板(45mm ϕ)の間に挿入した。水晶の X 軸の方向は電極面に垂直になるようにした。同図に示す L_g は水晶の上表面と上部電極との間のギャップの長さを意味する。下部電極板の上に厚さ $t_s=0.11\text{mm}$ のプラスチック製のスペーサを接着した。水晶直方体の下部四隅がこのスペーサの上に乘っている。図1(c)に示したガイドリングは、モータとして回転させるときに使用するものであり、厚さ t_s のプラスチック製の板に水晶の回転半径より僅か大きい半径の円形の穴を開けたものである。しかし、共振特性を正確に測定するためには水晶を拘束して回転が起こらないようにする必要があるため、その場合は、ガイドリングの代わりに水晶より僅か大きい正方形の穴を開けたフレームを使用した。

本実験における測定系を図2に示した。フリケンシ・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。電極に印加した電圧は電子電圧計で測定した。共振電流 I は水晶共振子と直列に接続した低抵抗 R の両端の電圧を電子電圧計で測定することによって求めた。本実験では上

下の電極間に印加した電圧 V_a は 15V 一定とした。水晶近傍の温度 T は白金薄膜温度センサ(図2の T)により測定した。水晶共振子は恒温槽の中にいれ 24.0°C 一定にした。また、水晶共振子は大気中(約1気圧)のもとに置いた。

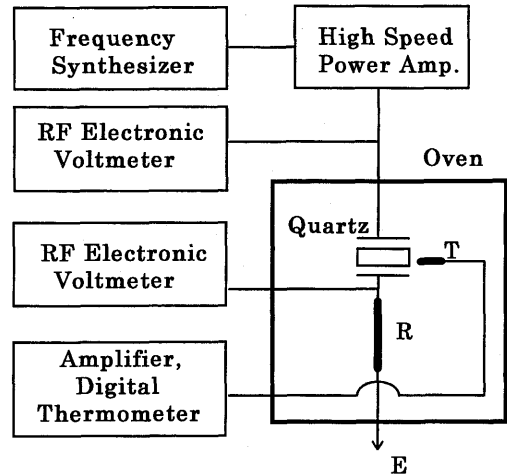


図2. 実験装置と測定系

3. 結果および考察

図3は水晶が初期寸法、即ち $L_x=7.070\text{mm}$, $L_y=14.949\text{mm}$, $L_z=14.982\text{mm}$ のときの X - Y - Z -cut水晶の共振周波数のスペクトルを示している。縦軸は印加電圧 $V_a=15\text{V}$ のときに水晶を流れる電流値を示している。

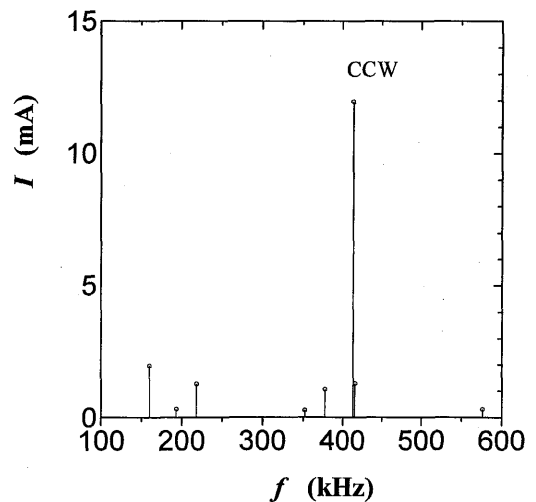


図3. $L_x=7.070$, $L_y=14.949$, $L_z=14.982\text{mm}$ の X - Y - Z -cut crystalの共振周波数スペクトル。縦軸は共振電流。印加電圧 V_a は 15V 。413.6354kHzにおいて上から見て反時計方向(CCW)の回転が起こる。

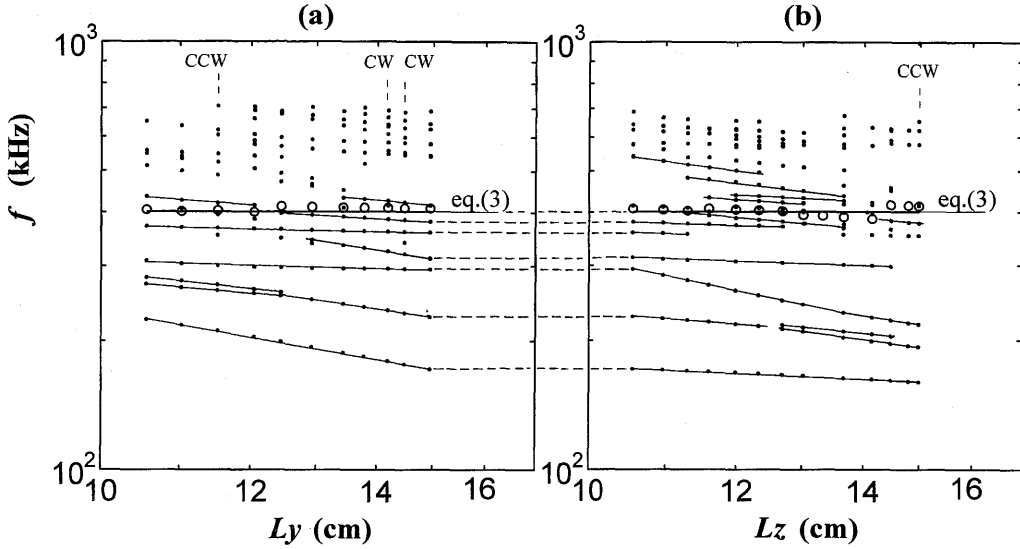


図4. (a)共振周波数の L_y 依存性。(b)共振周波数の L_z 依存性

初めに L_z を研磨により漸次減少させた。減少させる各研磨段階における共振周波数チャートを図4(b)に示した。 L_z の最終段階では $L_z=10.569\text{mm}$ である。その次に L_y を研磨により漸次減少させた。減少させる各研磨段階における共振周波数チャートを図4(a)に示した。 L_y の最終段階では $L_y=10.566\text{mm}$ である。即ち、図4(b)は L_x を 7.070mm 一定、 L_y を 14.949mm 一定とした条件下に、 L_z を 14.982mm から 10.569mm まで変化させたときのX-Y-Z-cut水晶の共振周波数チャートである。図4(a)は L_x を 7.070mm 一定、 L_z を 10.569mm 一定とした条件下に、 L_y を 14.949mm から 10.566mm まで変化させたときのX-Y-Z-cut水晶の共振周波数チャートである。

X方向の厚み振動と呼ばれる振動は、水晶の変位の方向と波の進行方向が一致しているモードであり、その周波数 f は、

$$f = \frac{q}{2L_x} \sqrt{\frac{c}{\rho}} \quad (1)$$

で与えられる^{4,5)}。ここで、 c は弾性定数であり、

$$c = c_{11} = 85.45 \times 10^{10} (\text{dynes/cm}^2) \quad (2)$$

である^{4,5)}。また、 ρ は水晶の密度($=2.64$)であり、 q は高調波次数である。従って、式(1)および(2)から、X方向の厚み基本振動($q=1$)の理論的周波数 $f(\text{kHz})$ は、

$$f = \frac{k_x}{L_x} = \frac{2,840}{L_x} \quad (3)$$

となる^{4,5)}。ここで $k_x(\text{kHz} \cdot \text{mm})$ は周波数定数と呼ばれるものであり、

$$k_x = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{c}{\rho}} = f \cdot L_x \quad (4)$$

である。

図3において、他のものに比べて格段に大きな電流値を示す共振周波数がある(CCWと記したもの)が、これはX方向の厚み基本振動の周波数である。図4において記号○で示したプロットは全て図3のように大きな電流値を示す共振周波数である。

本実験では、 L_x は一定値 7.070mm であるので、式(3)により計算される理論的な共振周波数 f_t は 401.697kHz となる。しかし、図3においてこの周波数の共振点は存在せず、電流が最大値を示すところの共振周波数は 413.6354kHz である。すなわち、式(3)で与えられる理論的周波数 $f_t(=401.697\text{kHz})$ とは少し異なっている。また、図4のどの○印プロットも $f_t(\text{eq. (3)})$ と記した実線から少しずれている。これは、他の振動モードの存在の影響によるものと考えられる^{4,5)}。実際、図4において eq. (3) と記した実線の周辺には他の振動モードが接近してきている現象が現れている。図4において、○印プロットで示す共振周波数 f の f_t からのずれ Δf は、最大 $+3.65\%$ 、最小 -3.85% である。ただし、 Δf は、

$$\Delta f = (f - f_t) / f \quad (5)$$

である。

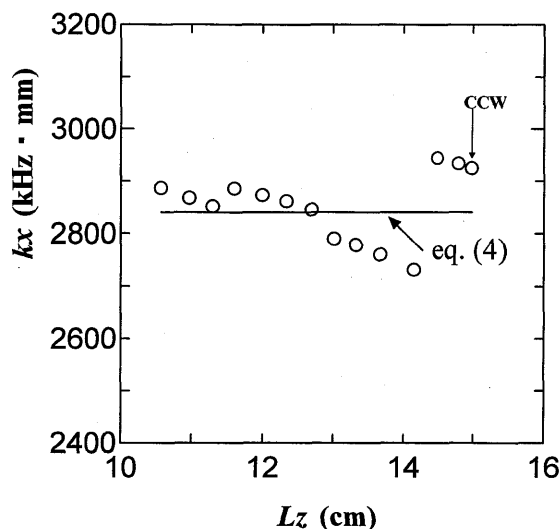
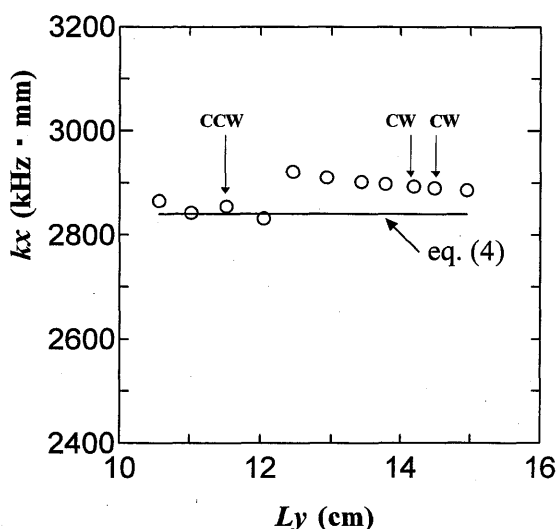
図5. k_x の L_z 依存性図6. k_x の L_y 依存性

図5は, k_x の L_z 依存性を示している。また, 図6は k_x の L_y 依存性を示している。図5および6で実線は式(4)で与えられる理論値である。 k_x の実線(K_t)からのずれ Δk_x の最大値は+3.65%, 最小値は-3.85%である。ただし, Δk_x は,

$$\Delta k_x = (k_x - k_t) / k_t \quad (6)$$

である。

図3~6に, CWあるいはCCWと記した L_y および L_z の値では○印プロットの周波数のところで, それぞれ上から見て時計方向および反時計方向に回転することを意味している。これらの回転数は, 共振電流が5mAのとき約50~200rpmのレベルであり, 前報告²⁾の約1,000rpmに対してかなり低いレベルである。また, CWあるいはCCWと記してないところでは回転が起こらない。従って, 本実験で調査した L_x , L_y および L_z の値のX-Y-Z-cut Quartzは, かなり回転し難い寸法または寸法比であるといえる。

本実験で用いたX-Y-Z-cut crystalで, 回転が起こる輪郭寸法のうちで, 式(5)および(6)で定義した Δf および Δk_x が大きいものは図4(b)および図5の中にCCWと記したもの($L_x = 7.07\text{mm}$, $L_y = 14.949\text{mm}$, $L_z = 14.982\text{mm}$)であり, この場合 $\Delta f = 2.97\%$, $\Delta k_x = 3.66\%$ となる。つまり, f および k_x に略3%程度のずれが起こっても回転することが分かる。また, このようなずれが生ずることから, この振動は厚み振動に輪郭振動が関与した複雑な振動と思われる。

4. おわりに

初期寸法 $L_x = 7.07$, $L_y = 14.949$, $L_z = 14.982\text{mm}$ のX-Y-Z-cut crystalにおいて, L_x は一定値7.07mmとし, L_y は14.949mmから10.566mmまで, L_z は14.982mmから10.569mmまで研磨により変化させたときの共振・回転・周波数定数等についての輪郭辺長さ依存性に関する調査を行った結果, 以下の情報が得られた。

本実験で調べた輪郭寸法(あるいは寸法比)のX-Y-Z-cut crystalは, 前報告のX-Y-Z-cut crystalのような高速の回転を惹き起こさないとはいえ, 幾つかの寸法のところで回転が起こった。

共振周波数 f および周波数定数 k_x に略3%程度の理論値からのずれが起こっている。このことは本実験において回転するX-Y-Z-cut crystalの振動は厚み振動に輪郭振動が関与した複雑な振動モードであることを示唆している。

参考文献

- 1) T. Aoki: Jpn. J. Applied Phys. 35, Part 1, No.3 (1996) pp.1814-1817.
- 2) T. Aoki and Y. Yoshida: Jpn. G. Applied Phys. 35, Part 2, No.6A, (1996) pp.L713-714.
- 3) T. Aoki and M. Horiuchi: Jpn. J. Applied Phys. 36, Part 2, No.11B (1997) pp.L1511-L1513.
- 4) 福与人八: 東京工業大学学報No.1, p.67 (1955).
- 5) 滝貞男: 人工水晶とその電気的応用, 日刊工業新聞社, p.50 (1974).