

## 圧電セラミックスの機械的品質係数、 $Q_m$

以下の文章は、元 防衛大学校教授 五十嵐秀二先生から頂いた原稿を元にしてしています。本文章が圧電セラミックス関係者の参考になれば幸いです。 by 楠本 慶二

### 1. 機械的品質係数

圧電セラミックスのカタログには機械的品質係数 ( $Q_m$ ) が必ず記載されている。しかし、圧電定数のように高めれば良いというものではない。用途によって高い方がいい場合もあれば低い方がいい場合もある。ユーザーが材料を選択できるように、情報提供しているわけです。

機械的品質係数 (mechanical quality factor) は、機械的  $Q$  (Mechanical  $Q$ ) または単に  $Q_m$  とも呼ばれる。振動による弾性損失を表す係数である。正確には弾性損失係数の逆数である。圧電素子に電気的入力または機械的入力があると弾性振動する。振動すると内部に損失が生じ熱に変換される。損失は機械的損失係数 (電気的な  $\tan \delta$  に相当) に比例する。機械的損失係数の逆数が機械的品質係数である。

$$\text{機械的損失係数} \quad \tan \delta_m$$

$$\text{機械的品質係数} \quad Q_m = \frac{1}{\tan \delta_m} \quad (1)$$

別の表記をすれば (弾性コンプライアンスを複素表示)

$$S = s^* T = (s' - js'') T$$

$$Q_m = \frac{s'}{s''} \quad (2)$$

となる。

振動子の電気的等価回路は図のようになる。

共振状態では、ほとんどの電流は動インピーダンス (LCR 直列回路) を流れる。 ( $I_m \gg I_d$ )

弾性損失は  $I_m^2 R$  となる。

$$\text{また、} Q_m = \frac{\omega L}{R} = \frac{1}{R\omega C} \quad (3)$$

である。

したがって、 $Q_m$  の大きさを電気的に測定すると、共振曲線の鋭さとして観察される。

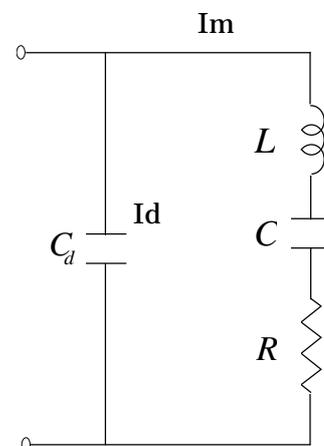


図1 振動子の等価回路

## 2. Qm の評価法

複素弾性コンプライアンスを直接測定することは困難である。したがって、Qm は電氣的に測定される。測定方法はいくつかある。

### (1) 回路定数から求める方法

前節で説明した通り、LCR がわかれば、(3)式から計算できる。インピーダンスメータなどで測定できる場合がある。(例えば、ゲインフェイズアナライザ、HP4194A など；現在製造中止？)

### (2) 近似式による方法

$$Q_m = \frac{f_a^2}{2\pi f_r Z_r C_d (f_a^2 - f_r^2)} \quad (4)$$

ここで、 $f_r$  は共振周波数、 $f_a$  は反共振周波数、 $Z_r$  は共振抵抗、 $C_d$  は制動容量 (1 kHz で測定) である。

### (3) アドミッタンス円から求める方法

共振周波数近傍で周波数を変えながらアドミッタンスを測定すると、図2のような円になる

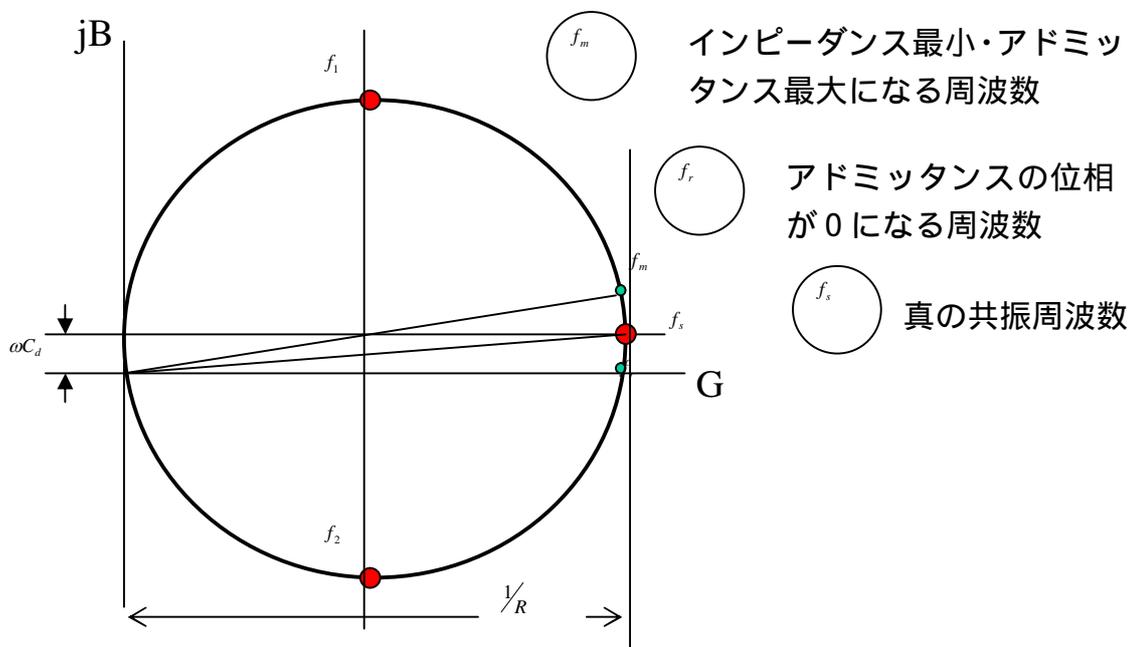


図2 アドミッタンスのベクトル軌跡

スムーズな円になるかどうかは測定周波数の刻み具合による。

$$Q_m = \frac{f_s}{f_2 - f_1} \quad (5)$$

これがもっとも正しいQmを与える。

#### (4) 共振曲線の先鋭度から求める方法

共振周波数のごく近傍で、電流またはインピーダンスを測定し、最大電流の $\sqrt{1/2}$ になる周波数( $f_1$ 、 $f_2$ )から求める。

$$Q_m = \frac{f_r}{f_2 - f_1} \quad (6)$$

理屈は(3)法と同じだが、測定は難しいかな・・・。

#### 3. $Q_m$ に影響を与える因子

材料の  $Q_m$  は、通常円板試料で測定されている。正式には日本電子材料工業会が定めた EMAS-6100 に準拠して測定する。 $Q_m$  の高い材料では ( $Q_m > 2,000$ )、試料の保持方法などの影響が大きいので再現性よく測定するのはなかなか難しい。たとえ上手に測定出来たとしても、その値は誘電損失の影響を受けているので、真の  $Q_m$  よりは低い。誘電損失係数の測定値も  $Q_m$  の影響を受けている。

$$\begin{aligned} \tan \delta_{e0} &= \frac{\tan \delta_e - k^2 \tan \delta_m}{1 + k^2} \\ \tan \delta_{m0} &= \frac{\tan \delta_m - k^2 \tan \delta_e}{1 + k^2} \end{aligned} \quad (7)$$

$\tan \delta_{m0}$  : 材料固有の  $\tan \delta_m$ 、 $\tan \delta_m$  :  $\tan \delta_m$  の測定値

しかし、実効的な値は測定値だから材料開発でもしないかぎり、測定値が有効である。

応用に際して重要なのは、 $Q_m$  に及ぼす材料以外の因子である。

$$\frac{1}{Q_m} (\text{measured}) = \frac{1}{Q_{m0}} + \frac{1}{Q_{\text{electrode}}} + \frac{1}{Q_{\text{holder}}} + \frac{1}{Q_{\text{lead-wire}}} + \frac{1}{Q_{\text{radiation}}} + \dots \quad (8)$$

材料素子の内部損失の他に、電極の電気抵抗によるジュール熱損、支持部からの振動漏洩、リード線からの振動漏洩、媒質中への振動放射などが重畳されて損失として測定される。特に、振動放射自体を目的とする素子の場合は、損失が大きいほど ( $Q_m$  が低いほど) 有効に放射することを示している。セラミックスの音速 (SS 材では 3000 m/sec) と媒質の音速が同じなら、音響インピーダンス整合\*に近い状態だから、効率的に超音波振動が伝わる。なお、振動の漏洩は少ないにこしたことはない。銀焼付け電極の抵抗は無視できるが、スパッターまたは蒸着による電極は抵抗損を招く恐れがある。

\* 音響インピーダンスと音速 :

$$\begin{aligned} Z &= \rho v \\ v_{33} &= 2N_{33} \end{aligned} \quad (9)$$

#### 4 . 高電力駆動時の $Q_m$

振動子を高電力駆動すると  $Q_m$  が低下するとの報告がある。振動子の駆動電圧を高くすると、共振周波数近傍で電流が不安定になり（電流のジャンプ現象）アドミタンス円は測定できなくなる。共振周波数も測定できない。したがって、 $Q_m$  も測定できない。これは振動の非線形効果によるものである。非線形効果、現象は筆者が理論的に解析し、実験的に明らかにした。

報告のケースは定電流駆動である。定電流なら電流ジャンプ現象は起きないが、高調波発生という非線形現象が生ずる。高調波は発熱を伴わない損失で、基本波だけを測定すると、 $Q_m$  が低下したように見える。これを  $Q_m$  の低下とするかどうかは見解の分かれるところかもしれないが、少なくともそのメカニズムは知っておく必要がある。

高電力駆動では温度上昇の影響も考慮しなければならない。温度上昇すると、素子自体の  $Q_m$  が低下する。 $Q_m$  が下がるとさらに発熱する。最終的には熱暴走に至る。パルス駆動なら、発熱・温度上昇は緩和される。

了