

# 機能性材料の作製とその特性評価

～ 実験実習: 「圧電素子の作製と評価」 ～

## 3. 圧電素子の特性評価 編

平成 16 年 4 月 16 日 奈良先端科学技術大学院大学

物質創成科学研究科 演算・記憶素子科学講座

### 本編の目的

1. 機能性(圧電)材料の機能を確認・体験する
2. 材料の測定手法の概要を知る
3. 各種の電子計測器(測定装置)の取り扱い方法を知る

### 3.1 圧電素子の例

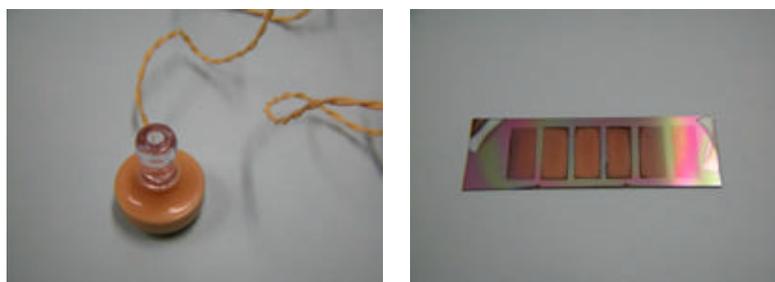
実際の圧電素子には図.3.1 のようなものがありますが、ここでは主に図 2.1(c)の圧電ブザー(圧電サウンダ)を使って実験します。非常に単純な構造の部品で軽量・安価・省電力の特徴があります。(図.3.2)



(a) 水晶振動子

(b) ランジバン型振動子

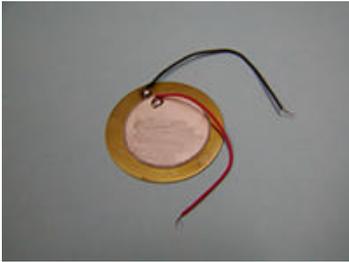
(c) 圧電ブザー



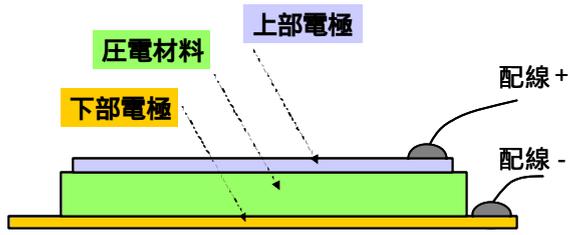
(d) クリスタルイヤホン

(e) 薄膜圧電素子

図.3.1 各種の圧電素子



(a) 外見



(b) 断面図

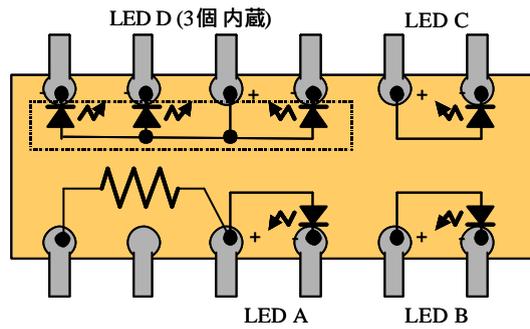
図.3.2 圧電ブザーの構造

### 3.2 圧電効果の確認(1) ~ 圧電効果による力学-電圧エネルギー変換 ~

圧電素子に応力を加えると電荷が発生します。(圧電効果) これは発電に使えるはずですが、発生するエネルギーはわずかですので、消費電力の低い LED(発光ダイオード)で確かめます。用意した LED を取り付けた基板(図.3.3)をご覧ください。

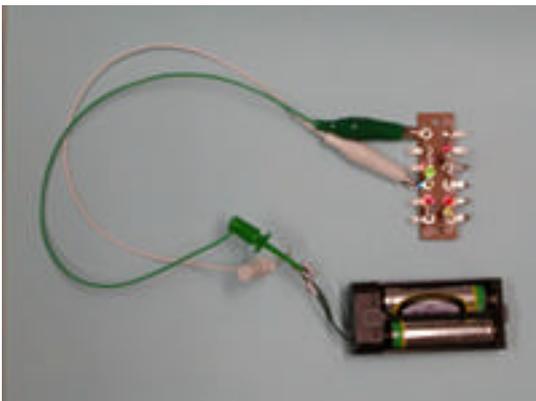


(a) 写真

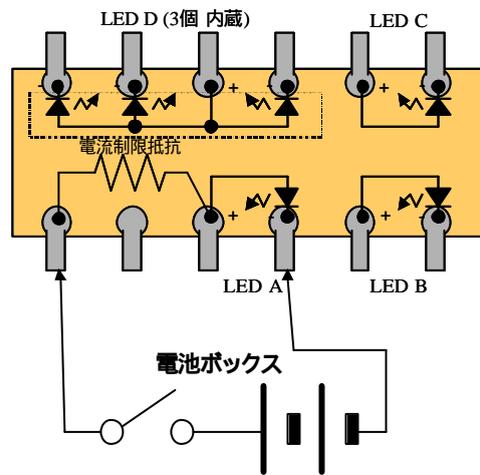


(b) 接続図

図.3.3 発光ダイオード基板



(a) 実験図



b) 接続図

図.3.4 LED の発光

最初に、念のため電池を接続して発光ダイオードが光るのを確かめてください。試験は電流制限抵抗のついている発光ダイオード A にて「慎重に」行ってください。(その他に接続すると故障するかも)。電池ボックスに電池を入れ、スイッチを入れてください。接続にはプラス/マイナスがあります。光らない場合は接続をチェックしてください。

では、圧電効果により電荷発生を確認します。図.3.5 のように接続してください。

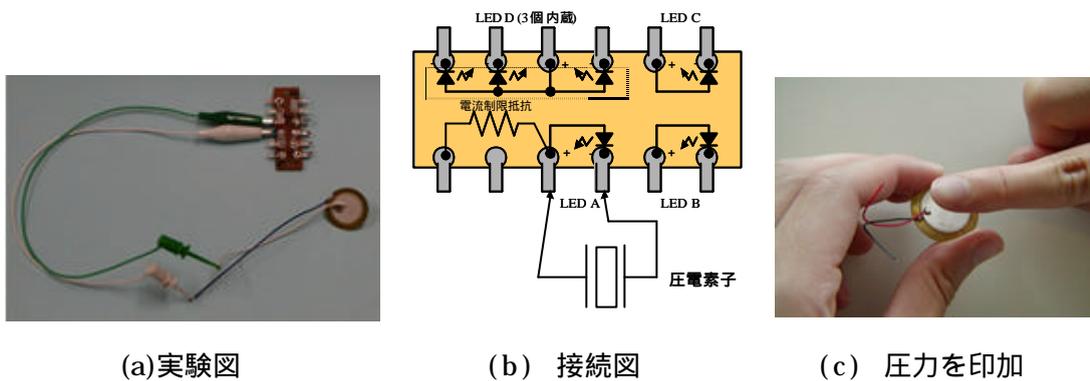


図.3.5 圧電効果の確認

図(c) のようにして、圧電素子の中央部を指で軽くたたいてみてください。光りましたか? このとき、以下のことを確かめてください。

(1) 圧電素子と LED の+/- 接続を入れ替えた場合でも同じように光りますか?

(2) 各 LED (A から D) で確かめてみてください。ただし、D は 3 つのダイオードが内蔵されているタイプです。各端子で調べてみてください。

LED A (      色)、LED B (      色)、LED C (      色)  
LED D -1 端子 (      色)、LED D -2 端子 (      色)、LED D -3 端子 (      色)、

### 3.3 圧電効果の確認(2) ~ 圧電点火素子の実験 ~



(a) 圧電点火素子      (b) 放電(電気火花)の確認      (c) 発光ダイオードでは?

図.3.6 圧電点火素子を使った実験 (感電しないように注意!!)

電子ライターの中には、図.3.6(a)のような圧電効果を応用した点火器(電気火花を発生させる)が入っています。そこで、図.3.6(b)のように点火器をゴム板の上において、電極間を1cm程度の距離にして、ボタンを押してください。カチッという音とともに、火花が飛ぶと思います。ちなみに、空気の絶縁破壊電圧は1cmあたり3万ボルトといわれていますので、かなりの電圧が発生していることがわかります。

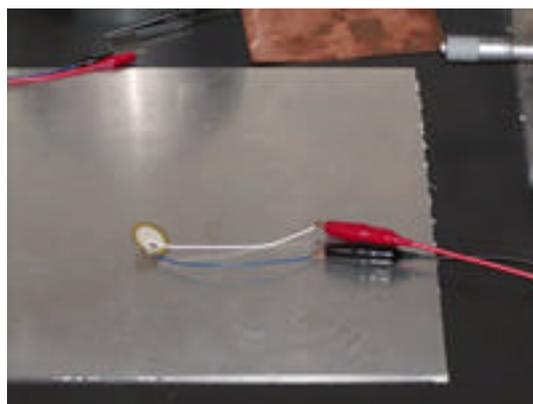
つぎに、少し怖い様ですが、この圧電点火素子を先のLEDに接続して、同様の実験をしてください。(図.3.6(c))高電圧でLEDは壊れることはありません。この素子ではあまり電流が取れないため、実際にLEDに加わる電圧は十分低いからです。

### 3.4 圧電効果の確認 (3) ~発振器による圧電素子駆動~

前節では圧電効果により応力を電気エネルギーに変換できることを確認しました。逆に電気エネルギーで応力を発生させることも可能です。これは前者と区別するために逆圧電効果といいます。では、圧電ブザーに発振器をつないで音を鳴らして見てください。電圧、周波数を変えて変化を聴いてみてください。(図.3.7)

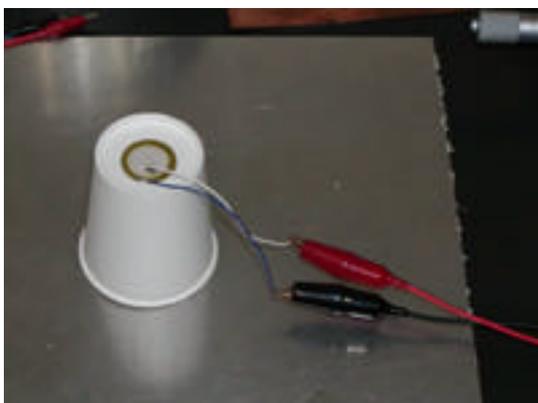


(a) 発振器



(b) 実験 (ケーブルの先に発振器を接続)

図.3.7 発振器を使って圧電ブザーを鳴らしてみよう



(a) 圧電スピーカ(?)



(b) CD プレイヤーを聴く

図.3.8 圧電スピーカの製作

上記の実験ですが、圧電ブザーではあまり大きな音は出なかったと思います。そこで、次に紙コップの裏に両面テープ(弱粘着テープ)を貼って、圧電ブザーをそこに貼りつけて、以下を試してみてください。(図.3.8(a))

- (1) 発振器で圧電ブザーを鳴らして、コップに貼り付ける前後の変化を見る。
- (2) 低周波数の信号ではどうですか？
- (3) このスピーカを CD プレイヤーにつないでみてください。(図.3.8(b))

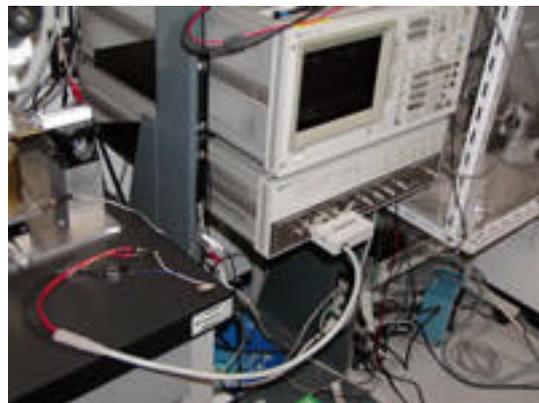
### 3.5 素子のインピーダンス特性の測定 ~インピーダンスメータによる周波数特性の測定~

電気配線の導通の確認や、電気抵抗を測定にはテスターを使いますが、研究やエンジニアリングでは正確に測定したいので、専用の測定装置を用います。それが、インピーダンスアナライザ(図.3.7(a))です。(なお、テスターは2~3千円くらい、インピーダンスアナライザは200~300万円くらいします。)

この装置を使うと「電気抵抗  $R(\Omega)$ 」だけではなくコンデンサの「静電容量  $C(F)$ 」、コイルの「インダクタンス  $L(H)$ 」も測定できます。これらはまとめてインピーダンス  $Z=R+jX(\Omega)$  として取り扱われています。 $Z$  は複素数です。簡単に説明すると、直流では電圧  $V$  と電流  $I$  の関係はオームの法則( $R=V/I$ )で表せますが、交流では電流と電圧に位相差が生じる場合があるので、これを複素数で表現します。ただし、このときの  $R$  は  $Z$  として  $Z=V/I$  とします。この  $Z$  をインピーダンスと呼びます。



(a) インピーダンスアナライザ



(b) 容量(Cp-D)測定

図.3.7 インピーダンスアナライザによる圧電素子の測定

#### (1) 抵抗、キャパシタ(コンデンサ)素子の測定

まず、既知の値の抵抗、コンデンサの測定をしてください。図 3.8 は試料と測定の接続を示します。モードはそれぞれ R-X, Cp-D ですが、周波数(1~101kHz)によらずほぼ一定の値が得られると思います。また、キャパシタについてはさらに広い周波数範囲(1kHz~3MHz)で測ってみてください。高周波では測定値が増加することを確認してください。測

定例を図 3.9 に示します。

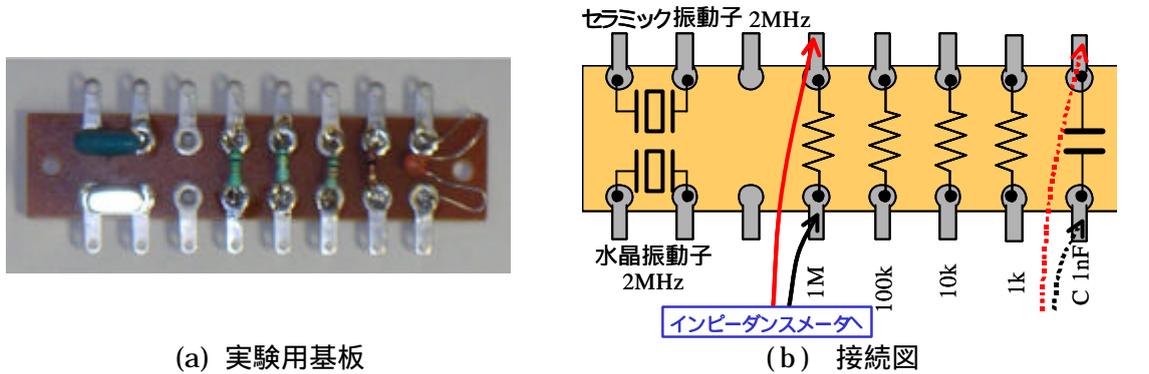
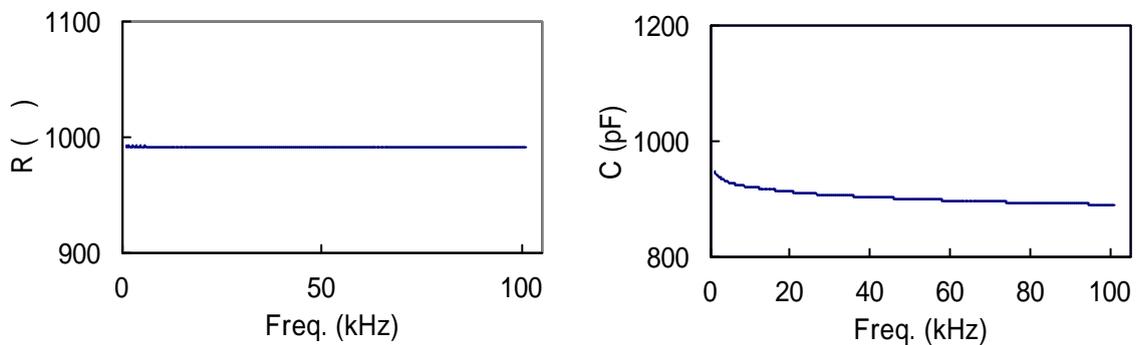
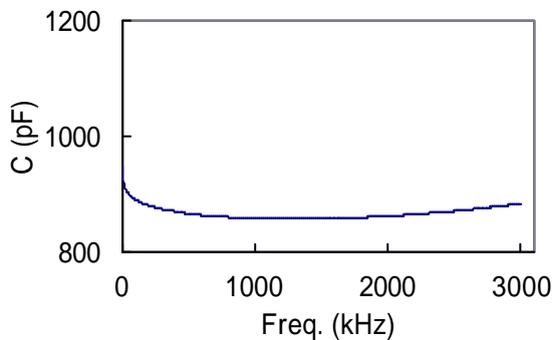


図 3.8 抵抗、コンデンサ素子の測定



(a) 抵抗測定(1k , R-X モード)

(b) コンデンサ測定(1nF, Cp-D モード)



(c) コンデンサ測定(3MHz まで)

図 3.9 抵抗・コンデンサ測定の結果例

## (2) キャパシタ素子の誘電損失の測定

前節で測定した Cp-D の D はキャパシタンスの損失を評価する  $\tan \delta$  を表しています。これは誘電正接とかタンデルとか呼ばれています。それで、コンデンサと並列に抵抗を接続して測定してください。図 3.10 が接続図です。抵抗の値を変えたときの  $\tan \delta$  の変化を測定してください。重要なこととして、小さな抵抗、つまり、漏れ電流が大きくて損失が増えるほど  $\tan \delta$  が大きくなることを確認してください。即定例を図 3.11 に示します。また、かなり大きな抵抗(1M)でも  $\tan \delta$  は無視できないことがわかります。

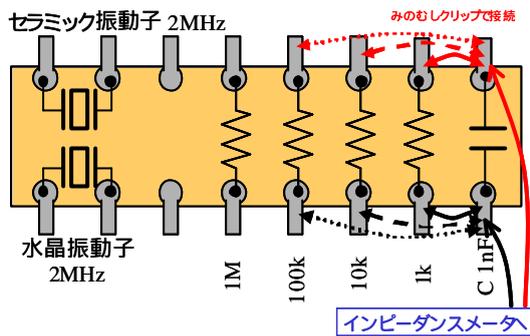


図 3.10 tan D 測定の接続図

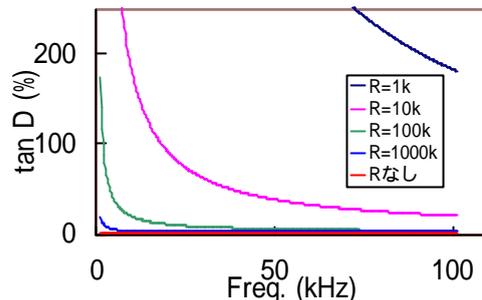


図 3.11 tan D 測定結果の例

### (3) 各種測定値の変換

インピーダンス測定では様々な測定モードがあります。キャパシタンス測定でよく用いるモードは Cp-D, G-B, Y- です。これらは測定の目的によってそれぞれ使い分けます。

Cp-D はコンデンサの容量や品質、材料の誘電率を評価するのに適しています。Y はアドミタンスとってインピーダンスの逆数です。つまり  $Y = \text{電流} / \text{電圧}$  です。Y- は共振現象を見るのに適しています。G-B は  $Y = G + jB$  と Y と同様な量で、共振をより詳細に調べるのに使います。

これらのそれぞれの値は容易に変換できます。詳しい解説は電気回路の教科書などに譲りますが、ここではそれを確かめます。

まず、前節で、コンデンサ Cp と抵抗 R を並列に接続した試料を用い、Cp-G モードで測定をしてください。なお、G は抵抗 R の逆数(1/R)で単位は(S)ジーメンズです。それで、ある周波数での Cp, G の値を下に記入してください。

用いた素子の値 Cp: \_\_\_\_\_ R: \_\_\_\_\_ (A)

測定値 f: \_\_\_\_\_ Cp': \_\_\_\_\_ G: \_\_\_\_\_ (B)

ここで、G から R を逆算してください。

計算  $R' = 1/G =$  \_\_\_\_\_ (C)

計算結果は(A)の既知の値とあいましたか? つぎに、 $\tan \delta = D, B, Y,$  の計算をします。

計算  $B' = 2 \pi f C p =$  \_\_\_\_\_ (D)

計算  $D' = G / B' =$  \_\_\_\_\_ (E)

計算  $Y' = \sqrt{G^2 + B'^2} =$  \_\_\_\_\_ (F)

計算  $\delta' = \tan^{-1}(B' / G) =$  \_\_\_\_\_ (G)

計算のあと、G-B, Cp-D, Y- の各モードで測定をしてください。

測定値 f: \_\_\_\_\_ G: \_\_\_\_\_ B: \_\_\_\_\_ (H)

測定値 f: \_\_\_\_\_ Cp: \_\_\_\_\_ D: \_\_\_\_\_ (I)

測定値 f: \_\_\_\_\_ Y: \_\_\_\_\_ : \_\_\_\_\_ (J)

上記の測定値は、計算値と一致しましたか?

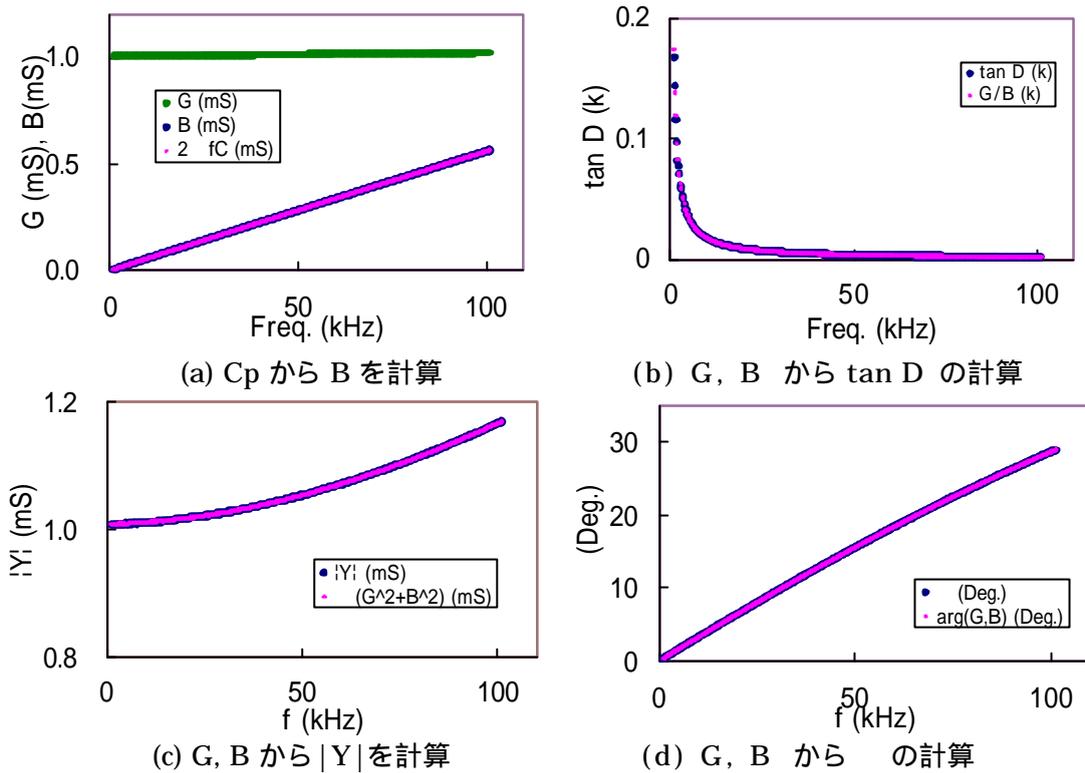


図 3.12 各種の測定値の変換

余裕がありましたら、表計算ソフト(エクセルなど)を用いて、測定した周波数範囲で変換を行い、グラフの作成を試み、周波数によらず一致するのを確かめてください。たとえば、図 3.12 のような結果になります。

#### (4) 共振現象の測定(1)

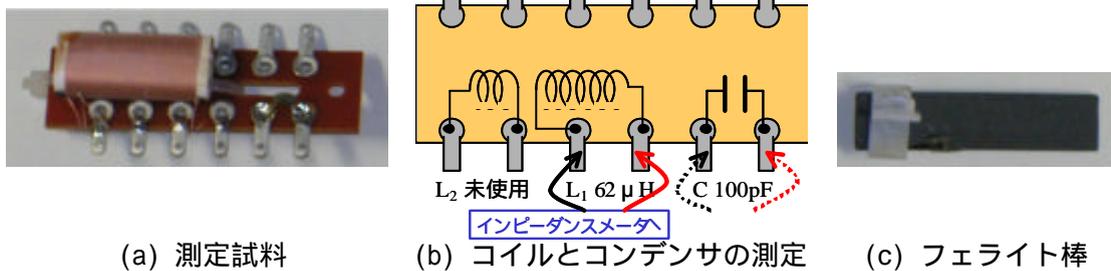


図 3.13 コイルとコンデンサの測定

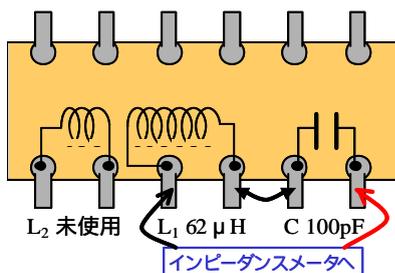


図 3.14 (LC 直列)共振現象の測定

キャパシタンスとインダクタンス(コイル)を接続すると共振回路となり、ラジオのチューナ部分に使われています。まず、図 3.13 のように接続して、用いるコンデンサとコイルの値を測定してください。

測定値  $f$ : \_\_\_\_\_  $C_p$  \_\_\_\_\_  $L_s$ : \_\_\_\_\_ (K)

値から共振周波数  $f_s$  は簡単に計算できます

計算  $f_s' = 1 / (2 \sqrt{L_s C_p}) =$  \_\_\_\_\_ (L)

それでは、図 3.14 のように接続して Y- モードで共振ピークの測定をしてください。ダイヤルを回して、共振周波数を探してください。

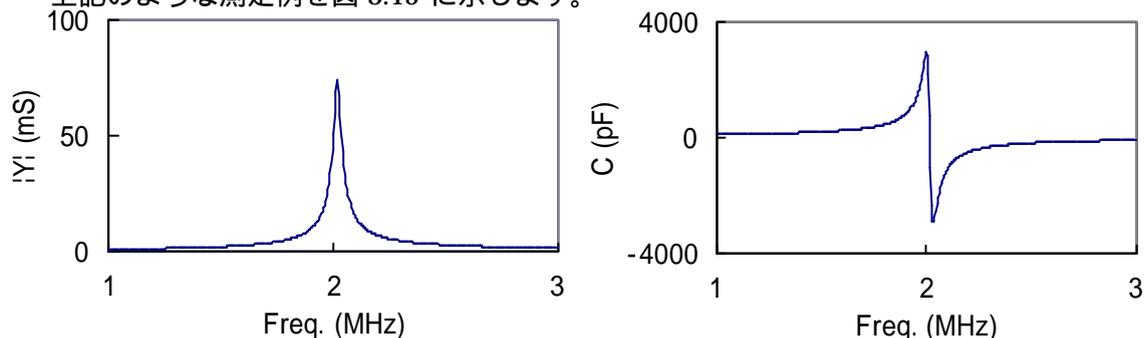
測定値  $f_s$ : \_\_\_\_\_ (M)

計算値と合いましたか?

また、コイルに、金属(図 3.13 (c))を近づけてください。ピーク位置が若干シフトします。

さらに、Cp-D モードでも測定してください。共振周波数に近づくと、C が急速に大きくなるのがわかります。これと、(1)でみたキャパシタンスの高周波での増大の関連性を検討してみてください。

上記のような測定例を図 3.15 に示します。

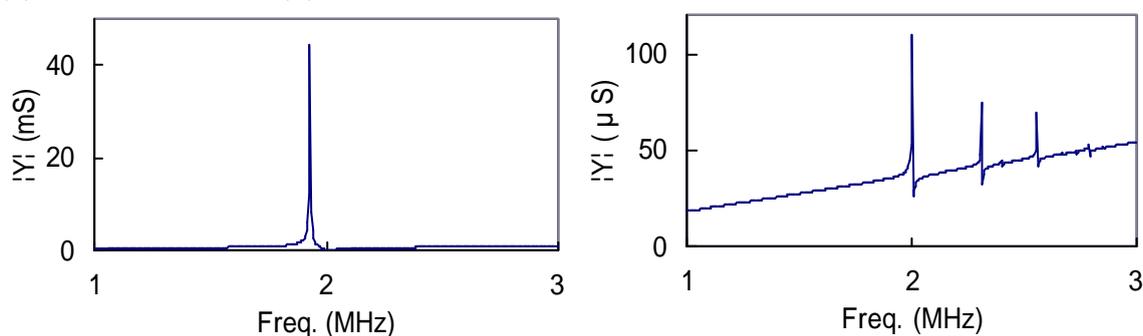


(a) Y- モードでの測定

(b) Cp-D モードでの測定

図 3.15 共振回路の測定結果

### (5) 共振現象の測定(2)



(a) セラミック振動子の測定

(b) 水晶振動子の測定

図 3.16 圧電振動子の測定結果

つぎに、圧電振動子の共振現象も Y- モードにて測定します。機械振動ですので、非常に

するどい共振ピークが得られることを確認できます。(図 3.16) また、金属片などを近づけてピークは変化しないはずで、余裕があったら、高次モード(3, 5 次)も確認してください。

### 3.6 圧電効果の確認 (4) ~ 作製した圧電素子の測定 ~

作製した圧電素子についても、圧電効果があることを確認しましょう。まず、インピーダンスメータに先の圧電プザーを接続して Cp-D モードにて測定をしてください。

**測定値 f: \_\_\_\_\_ Cp: \_\_\_\_\_ D: \_\_\_\_\_ (A)**

測定中にも音が聞こえると思います。

次に作製した圧電素子は引き出し線(リード線)が出ていませんので、専用の治具(プローバ 図 3.17)で接続します。

**測定値 f: \_\_\_\_\_ Cp: \_\_\_\_\_ D: \_\_\_\_\_ (B)**

先の圧電プザーと測定値を比較してください。D は若干大きめかもしれませんが、これについて考察してください。音は聞こえましたか?

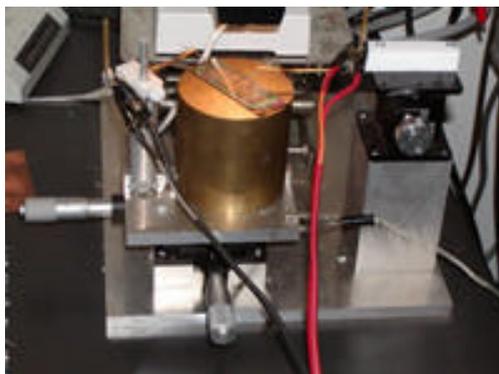


図.3.17 圧電薄膜の測定

### 3.7 おわりに ~ さらに興味がある人のために ~

面白かったこと、興味を持てるようなことはありましたか? 今回のような実験はけっこうあちこちでやられているようです。ですので、インターネットで検索すると色々見つかると思います。

あと、電子セラミクス関係のメーカーのホームページを訪問されることを是非お勧めします。具体的には「村田製作所」、「京セラ」、「TDK」、「富士セラミクス」あたりでしょうか。一般向けの解説ページもたくさんあります。

実際に行かれるとわかると思いますが、電子セラミクスは我が国が非常に強い分野です。材料の取り扱いや焼き加減などノウハウが非常に多く、よそでは簡単には真似ができません。その反面、研究の蓄積が重要になります。その一端でも、今回の実習を通してご理解いただければ幸いです。また、将来このような材料の分野に進まれることなどありましたら、非常にうれしく思います。

### 3.8 課題 ~レポートの課題にどうぞ~

実習の後のレポートですが、必須課題・提出期限などは担当のスタッフに問い合わせてください。しかし、自由課題で書く場合で、良い課題が思いつかないなどがありましたら、下記のような課題をご検討ください。最近はインターネット検索などもあるので、かなり調査も楽でしょう。端末は当講座の端末を使う、講座のメンバーに質問してみるなど、遠慮することはありません。

#### [A] 圧電材料・素子一般

- (1) 代表的な圧電材料一覧。材料名と諸特性、特徴。
- (2) 最近の研究論文(APL とか JJAP とかで検索)を読んで、解説を書いてください。
- (3) 各種、圧電素子メーカー(その他研究所、大学でも良い)のホームページを検索して、一覧表と、特に圧電材料の解説ページのリストを作成
- (4) 材料のシミュレーションの簡単な説明(リートベルト法、第一原理計算、有限要素法、弾性表面波計算など)

#### [B] 圧電材料作製関係

- (1) 各種の薄膜作製方法の解説と特徴
- (2) 圧電セラミクスもしくは単結晶の作製法をまとめてください。
- (3) スパッタ法にはさまざまな種類があります。解説してください。
- (4) ZnO 材料についてその特徴や特性、応用例についてまとめてください。
- (5) 音速のきわめて高いダイヤモンド薄膜を圧電素子に応用する研究があります。これを調査してください。(研究例、ダイヤモンドの作製方法などなんでもいいです。)

#### [C] 圧電測定関係

- (1) 図 3.12 の換算グラフの作成。エクセルの使い方の練習にもなります。
- (2) C-D, G-B, Y, Z, R-X, L-R などの定義、変換式をわかりやすくまとめてください。
- (3) インピーダンス測定の原理と精度の良い測定での注意点
- (4) 共振の G-B 軌跡を作製すると円になります。Y から G-B への変換と図の作成。さらに、G-B 軌跡が円になる証明
- (5) コンデンサ(誘電分極)の周波数特性について解説してください。電子分極、イオン分極、配向分極などのまとめ。
- (6) 圧電材料評価の各種の測定法が IEEE で標準化されています。これは英文です。これの和訳。(一部分でいいです。研究室メンバーから分けてもらってください。)