

# 電子工学科 実験報告書

---

実験題目： 光情報通信に関する実験  
担当教員： 荻原昭文  
実験開始日： 令和 5 年 12 月 14 日  
実験終了日： 令和 5 年 12 月 21 日  
提出日： 令和 5 年 12 月 26 日  
再提出日：

学年： 5 年  
出席番号： 12  
実験班： B 班  
氏名： 河合将暉

共同実験者名： 岡田晃空

---

コメント欄

## 1 目的

LED, レーザ等による発光現象の測定やフォトダイオードによる光検出回路の作製実験を通じて光情報通信の原理を理解する.

## 2 解説

### 2.1 2分割フォトダイオード

### 2.2 圧電効果と逆圧電効果

圧電効果とは, [1] によると, 水晶や特定のセラミックなどに圧力を加えることで生じるひずみに応じて, 電圧が発生する現象である. これは, 固体結晶内部のイオン配置のずれが圧力を加えることで大きくなり, 結晶の一端がプラスの電荷を帯び, もう一方にはマイナスの電荷が発生する電気分極という現象によって電圧が発生している. 反対に, 水晶やセラミックなどに電圧を加えると結晶が変形することを逆圧電効果という.

### 2.3 圧電セラミック素子

圧電効果を利用して電気を取り出したり, 逆に電圧をかけることで振動を取り出す素子のことを圧電 (ピエゾ) 素子と呼ぶ. [1] より引用した圧電素子の構造を図1に示す.

圧電素子の構造



図 1: 圧電素子の構造図

構造が単純で、電圧を加えるだけで機械的な動作なしに微細な動きや振動が発生するため、丈夫で小型化も容易であり、精密機械の部品として優れている。クォーツ時計の水晶振動子や超音波診断装置、携帯電話用小型スピーカ、ハードディスク読み取り装置、水槽内に置いた振動子の超音波の高速な振動で細かな蒸気を発生する超音波加湿器など、さまざまな製品に圧電素子が使われている。

### 3 実験方法

#### 3.1 使用器具

本実験での使用器具を表 1 に示す.

表 1: 使用器具

No	機器名	企業名	型番	シリアル No	備考
1	DMM	sanwa	PC-5000		
2	オシロスコープ	Tektronix	TBS 1052B		
3	FG	A & D	AD-8623A		
4	オペアンプ		INA103		
5	圧電セラミック素子				
6	レーザダイオード				
7	2分割フォトダイオード				
8	各種回路素子				

#### 3.2 圧電セラミック素子への電圧印加による共振現象の測定

図 2 に LD と差分増幅回路を用いた圧電セラミック素子への電圧印加による測定システムを示す. PZT の厚さ  $d$  は電極板と PZT とを積層した厚さと電極板のみの厚さの差分から求められる.

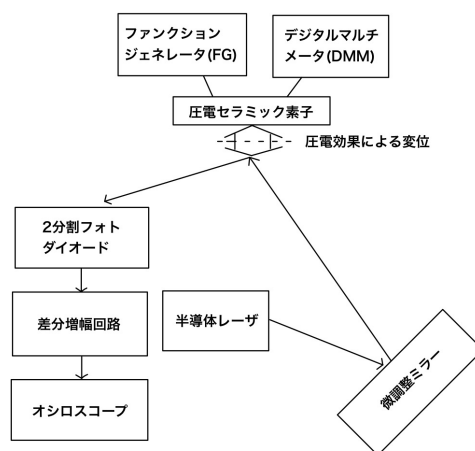


図 2: 圧電セラミック素子への電圧印加による共振現象の測定系ブロック図

##### 3.2.1 実験 1

圧電セラミック素子は、形状の異なる三種類 (a:大,b:中,c:小) を用いるが、はじめに、圧電セラミック素子 a を用いて行った。図 2 に示すように、測定システムを構成し、圧電セラミック素子の端子にファンクションジェネレータからの出力を接続した。また、電圧と周波数計測用にデジタルマルチメータの端子も接続する。正弦波信号を選択し、周波数は 2.0 kHz~4.0 kHz の範囲で 0.1 kHz 程度ごとに変化させた。この時の印加電圧値はデジタルマルチメータによって測定し、3.0 V に設定した。次項の実験 2, 実験 3 でも同様に 3.0 V を印加した。

レーザダイオード (LD) から射出したレーザービームを調整用のミラーの角度を変えながら、圧電セラミック素子の金属プレート表面に入射させ、この反射光を 2 分割フォトダイオードの A と B の 2 つの受光部の中央あたりに入射するように調整ミラー上の調整ネジを回して設定した。差分増幅回路のゲイン抵抗 ( $R_G$ ) は信号の検出がしやすようにゲインが大きくなる 100  $\Omega$ 200  $\Omega$  程度の抵抗値の抵抗値にした。実験 1~実験 3 において、同

じゲイン抵抗値を用いた。また、出力信号の振幅が最も大きく検出された周波数の波形を記録し、この時の周波数と振幅値の値を測定した。

### 3.2.2 実験 2

次に、圧電セラミック素子 b に素子を変更して実験を行ったが、正弦波信号の周波数は 4.0 kHz～6.0 kHz の範囲で 0.1 kHz 程度ごとに変化させた。この時の印加電圧値は、3.0 V にし、ゲイン抵抗は実験 1 と同様の値を用いた。また、出力信号の振幅が最も大きく検出された周波数の波形を記録し、この時の周波数と振幅値の値を測定した。

### 3.2.3 実験 3

最後に、圧電セラミック素子 c に素子を変更して同様の実験を行ったが、周波数は 6.0 kHz～9.0 kHz の範囲で 0.1 kHz 程度ごとに変化させた。この時の印加電圧値は、3.0 V にし、ゲイン抵抗は実験 1 と同様の値を用いた。また、出力信号の振幅が最も大きく検出された周波数の波形を記録し、この時の周波数と振幅値の値を測定した。

### 3.2.4 共振周波数とキャパシタンスの関係

3 種類の圧電セラミック素子の面積と膜厚を測定し、PZT のキャパシタンスを nF 単位で計算した。PZT の直径は定規で測定し、PZT の厚さは電極板と PZT とを積層した厚さをマイクロメータで測定し、積層した厚さから電極板のみの厚さの差分を取って計算した。PZT のキャパシタンスの比誘電率  $\epsilon_r$  は 1400 を用いてキャパシタンスの理論式に代入して計算した。3 種類の圧電セラミック素子の形状から求めたキャパシタンスとそれらの共振周波数を横軸:キャパシタンス-縦軸:周波数としてグラフ化した。

## 3.3 音源の周波数変化による振動状態の光測定

LD を用いた音源の振動状態の光測定システムのブロック図を図 3 に示す。

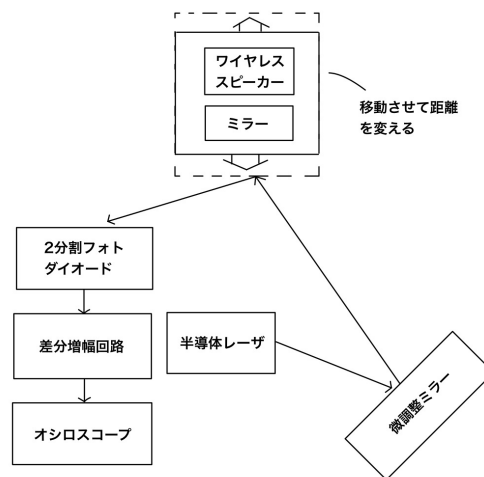


図 3: LD を用いた音源の振動状態の光測定系ブロック図

### 3.3.1 実験 1:ゲイン抵抗 ( $R_G$ ) を変化した場合の出力信号の測定実験

図に示すような差分増幅回路と光学系を構成し、半導体レーザーから出射したレーザービームを調整用ミラーの角度を変えながら、音源が入るプラスチック BOX(大) の入口に取り付けたミラーに照射した。このミラーから 2 分割フォトダイオードまでの距離は、15～30 cm に設定した。このミラーから反射されたレーザービームを 2 分割フォトダイオードの A と B の 2 つの受光部の中心あたりに入射させた。出力波形が明瞭に観察できる光照射位置に調整した。

差分増幅回路のゲイン抵抗 ( $R_G$ ) を調整し、オシロスコープ上に出力波形をモニターした。この時、差分増幅回路のゲイン抵抗値をいくつかの値に変化し、音源の周波数設定を変更しながら出力信号波形を検出しデータを

取得した。

音源としては、遠隔で操作できる Bluetooth 対応の小型スピーカーをプラスチック容器に封入し、入口にレーザ反射用のミラーを取り付ける。小型スピーカへの信号入力には PC 上にインストールされたフリーソフトの WabeGene により正弦波 (sin 波) を入力した。出力 (音の大きさ) は、PC の音声出力設定で行った。

- 1) ゲイン抵抗  $R_G$  は、オペアンプ (INA103) への電池を外した (電圧 OFF) 状態で、オペアンプの 6 番ピンと 13 番ピン間の抵抗値をデジタルマルチメータにより測定する。2 つの可変抵抗を調整して  $R_G$  の値を設定し、周波数を変化した場合の波形をオシロスコープ上で観察し、この波形のデータを USB に記録した。
- 2) 実験では、およそ  $R_G = 100 \Omega$ ,  $R_G = 500 \Omega$ ,  $R_G = 1 \text{ k}\Omega$  のように 3 段階に設定した。それぞれの  $R_G$  設定値において、周波数を PC 上で 100 Hz, 150 Hz, 300 Hz, 500 Hz, 1 kHz まで 5 段階に変化させた。これらの出力波形をオシロスコープ上で検出して波形データを取得した。
- 3) 3 つの  $R_G$  の値のそれぞれに対して取得した波形データから各測定周波数に対する振幅値の値を求める。各  $R_G$  の値において、横軸:周波数-縦軸:振幅としたグラフを作成し、各自で設定した  $R_G$  の測定値と出力電圧との関係性を評価した。

### 3.3.2 実験 2:材質の違いによる出力信号測定

図 3 に示す測定系において、音源のスピーカーを大小ペアの 2 つのプラスチック BOX の小さい容器に封入し、これを大きな方の BOX に閉じ込める。調整ミラーを用いてスピーカの入るプラスチック容器の表面にレーザビームを照射し、この反射光を 2 分割フォトダイオード上に入射した。

差分増幅回路のゲイン抵抗 ( $R_G$ ) は  $100 \Omega$  程度に調整し、周波数を PC 上で 100 Hz, 150 Hz, 300 Hz, 500 Hz, 1 kHz まで 5 段階に変化させた。これらの出力波形をオシロスコープ上で検出して波形データを取得した。

プラスチック材質からの反射光により求めた測定値を基に横軸:周波数-縦軸:振幅としたグラフを作成し、3.3.2 項の実験で作成したグラフを比較してプラスチック材質の違いによる出力信号の変化性を評価した。

### 3.3.3 実験 3:音源から検出器までの距離を変化させた場合の出力信号測定

- 1) 図 3 に示す測定系において、音源をプラスチック BOX(大) にスピーカーを入れたものに交換し、表面に反射ミラーを取り付ける。このミラーから 2 分割フォトダイオードまでの距離をおよそ 20 cm, 40 cm, 60 cm 程度の 3 段階に変化させた。この時、ゲイン抵抗は  $100 \Omega$  程度に設定した。
- 2) 各距離において、周波数を PC 上で 100 Hz, 150 Hz, 300 Hz, 500 Hz, 1 kHz まで 5 段階に変化させた。これらの出力波形をオシロスコープ上で検出して波形データを取得した。
- 3) 3 段階の距離変化において取得した波形データから各測定周波数に対する振幅値の値を求める。各距離において、横軸:周波数-縦軸:振幅としたグラフを作成し、距離と出力電圧との関係性を評価する。

## 4 実験結果

### 4.1 圧電セラミック素子への電圧印加による共振現象の測定

実験 1～実験 3 で測定した各圧電セラミック素子ごとの出力波形を図 4～6 に示す。

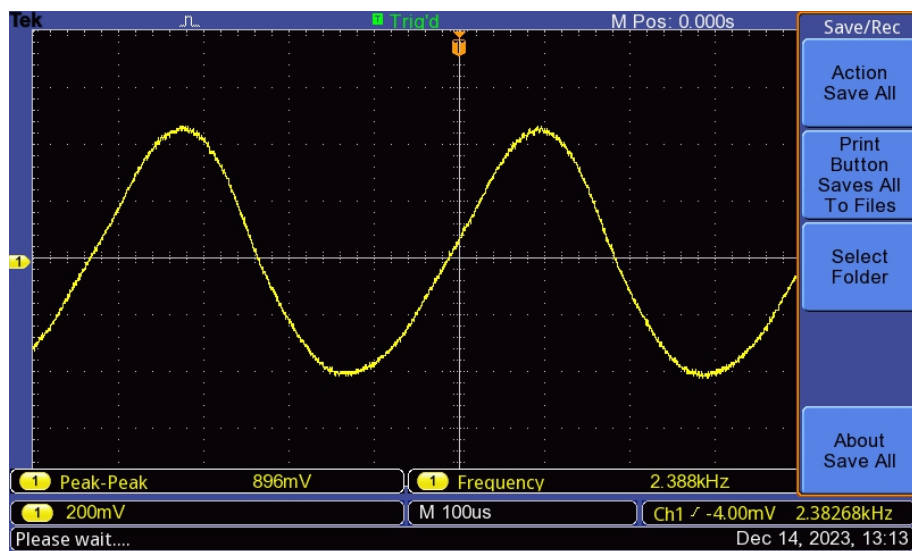


図 4: 圧電セラミック素子 a を用いた測定系の出力波形

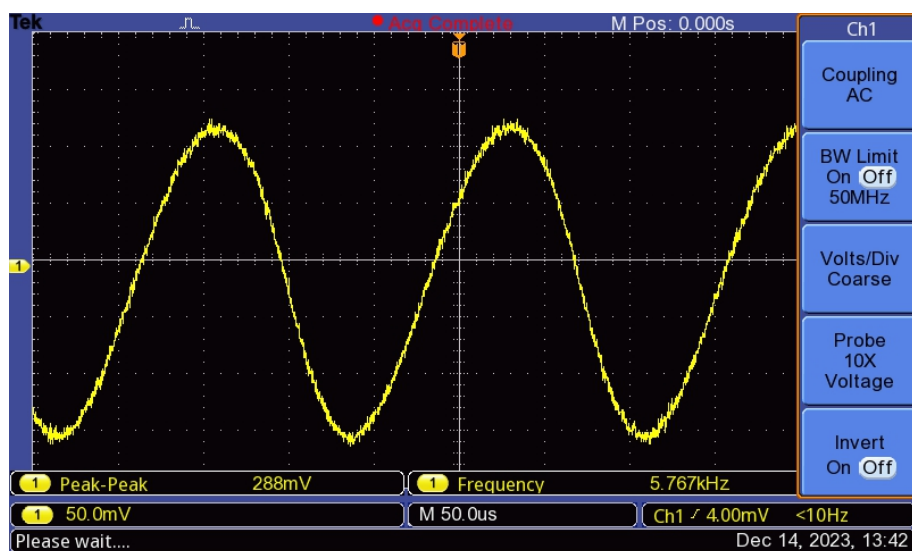


図 5: 圧電セラミック素子 b を用いた測定系の出力波形

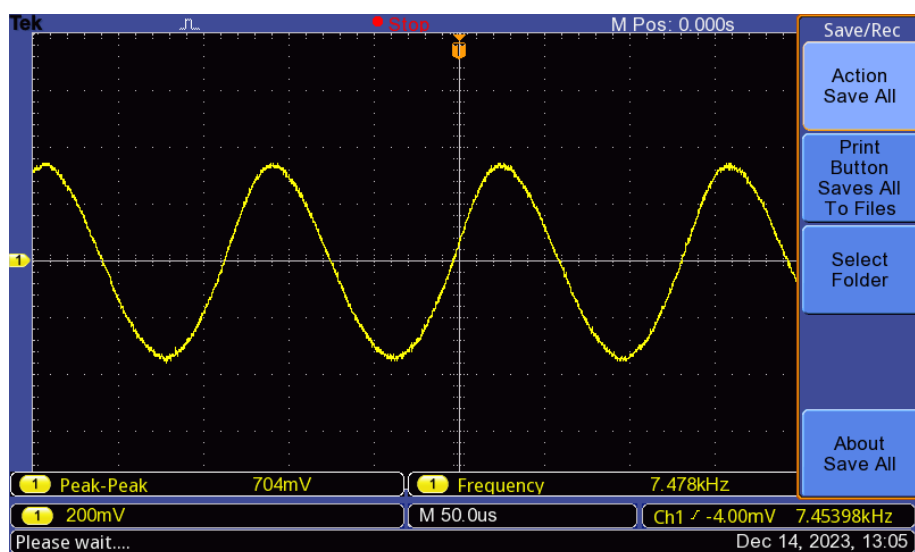


図 6: 圧電セラミック素子 c を用いた測定系の出力波形

圧電セラミック素子ごとの共振周波数と振幅の関係を表 2 に、共振周波数-振幅特性図を図 7 に示す。

表 2: 各圧電セラミック素子による共振周波数と振幅の関係表

圧電素子	周波数 [Hz]	振幅 [V]
a(大)	2382	0.896
b(中)	5767	0.288
c(小)	7478	0.704

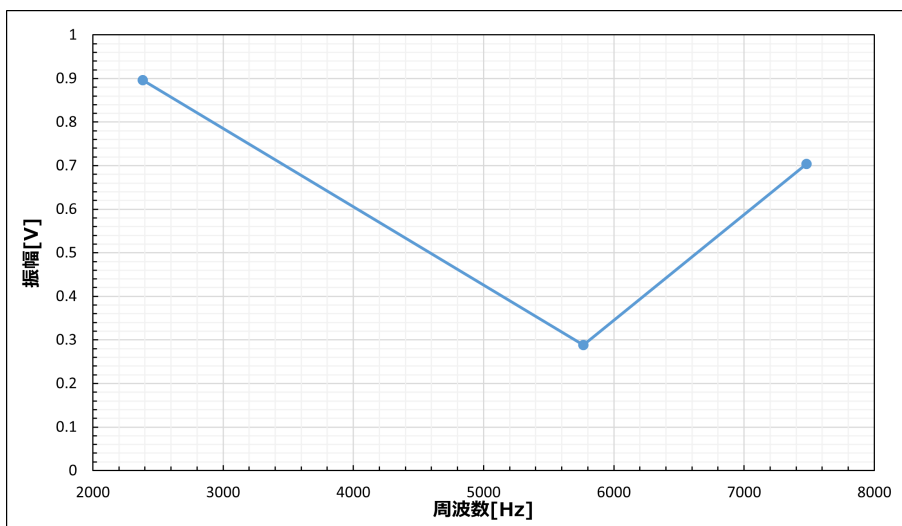


図 7: 各圧電セラミック素子による共振周波数-振幅特性

図 7 より、圧電素子のサイズが小さくなるにつれて、共振周波数は大きくなり、振幅は圧電素子  $a > c > b$  の順に大きくなっていることがわかる。圧電素子の形状と振幅についての関係性はわからなかった。

## 4.2 共振周波数とキャパシタンスの関係

キャパシタンス  $C$  は次式で与えられる。

$$C = \frac{\varepsilon \times A}{d} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \times \varepsilon_r \quad (2)$$

このとき、 $\varepsilon$ ：誘電率、 $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} [\text{F/m}]$ :真空の誘電率、 $\varepsilon_r$ ：比誘電率、 $A$ ：セラミック素子の面積、 $d$ :膜厚 となっている。上式について各値の測定値と静電容量の計算結果を表 3 に示す。

表 3: 各圧電セラミック素子の共振周波数とキャパシタンスの関係表

圧電素子	周波数 [Hz]	積層 T[ $\mu\text{m}$ ]	電極板厚 t[ $\mu\text{m}$ ]	PZT 膜厚 d[ $\mu\text{m}$ ]	直径 [cm]	静電容量 [nF]
a(大)	2382	567	293	274	3.5	43.5
b(中)	5767	569	301	268	2.7	26.5
c(小)	7478	545	208	337	2.0	11.5

表 3 をグラフ化したものを図 8 に示す。

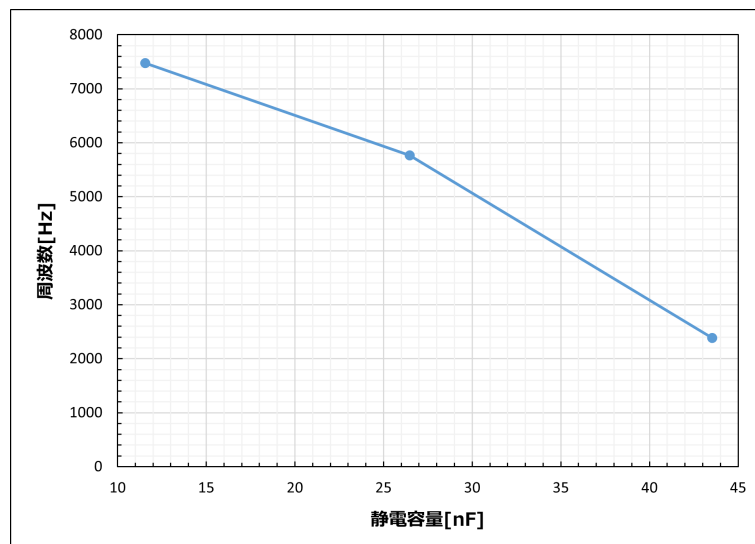


図 8: 各圧電セラミック素子の共振周波数-静電容量特性

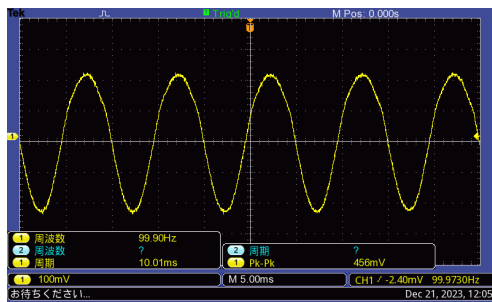
表 3 と図 8 より，圧電素子の大きさに比例して静電容量は大きくなっており，静電容量が大きくなるにつれ共振周波数が小さくなることがわかった。



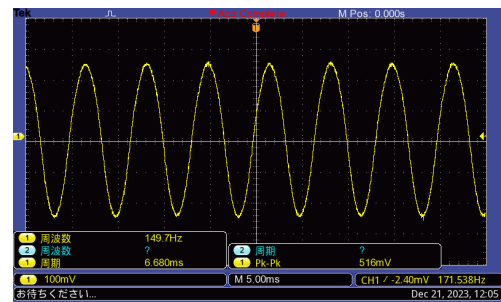
### 4.3 音源の周波数変化による振動状態の光測定

#### 4.3.1 差分増幅回路を用いた光信号検出

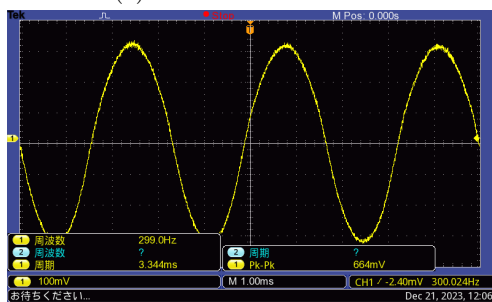
ゲイン抵抗  $100\ \Omega$  における各音源周波数の出力波形を図 9 に示す。



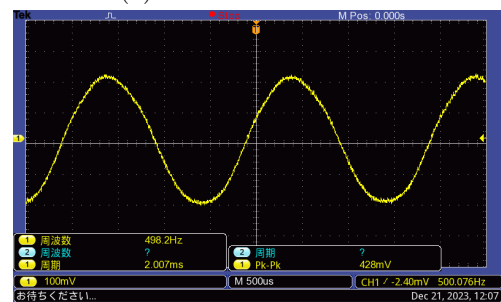
(a) 入力音源 100 Hz の波形



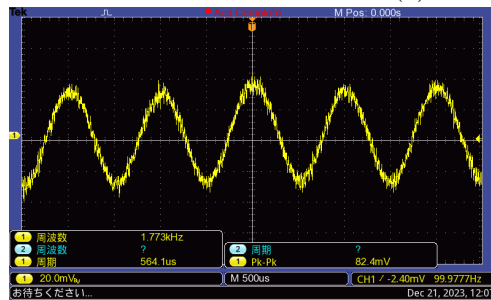
(b) 入力音源 150 Hz の波形



(c) 入力音源 300Hz の波形



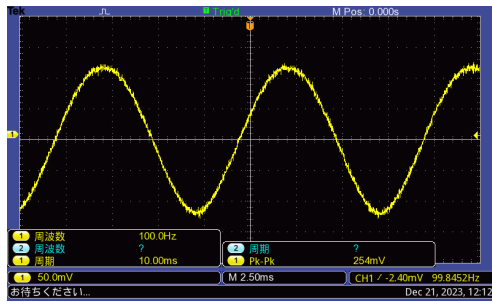
(d) 入力音源 500 Hz の波形



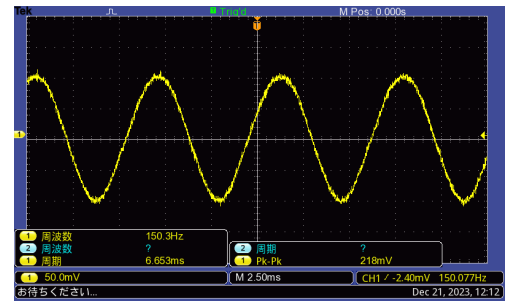
(e) 入力音源 1 kHz の波形

図 9:  $R_G = 100\ \Omega$  の出力波形

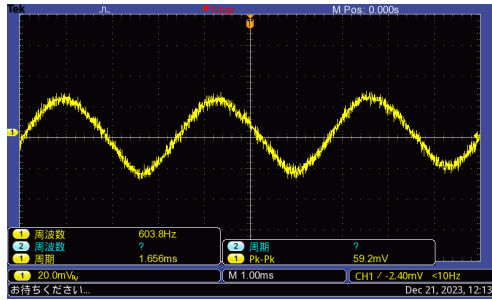
ゲイン抵抗  $500\ \Omega$  における各音源周波数の出力波形を図 10 に示す。



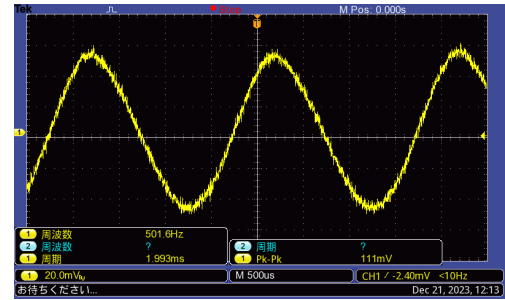
(a) 入力音源 100 Hz の波形



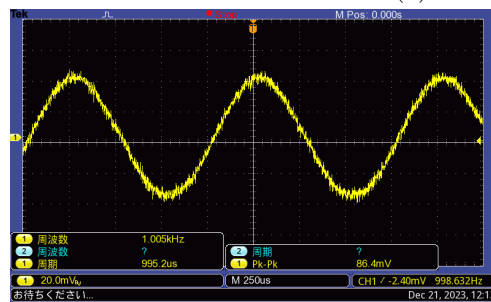
(b) 入力音源 150 Hz の波形



(c) 入力音源 300 Hz の波形



(d) 入力音源 500 Hz の波形



(e) 入力音源 1 kHz の波形

図 10:  $R_G = 500\ \Omega$  の出力波形

ゲイン抵抗  $1\text{ k}\Omega$ における各音源周波数の出力波形を図 11 に示す。

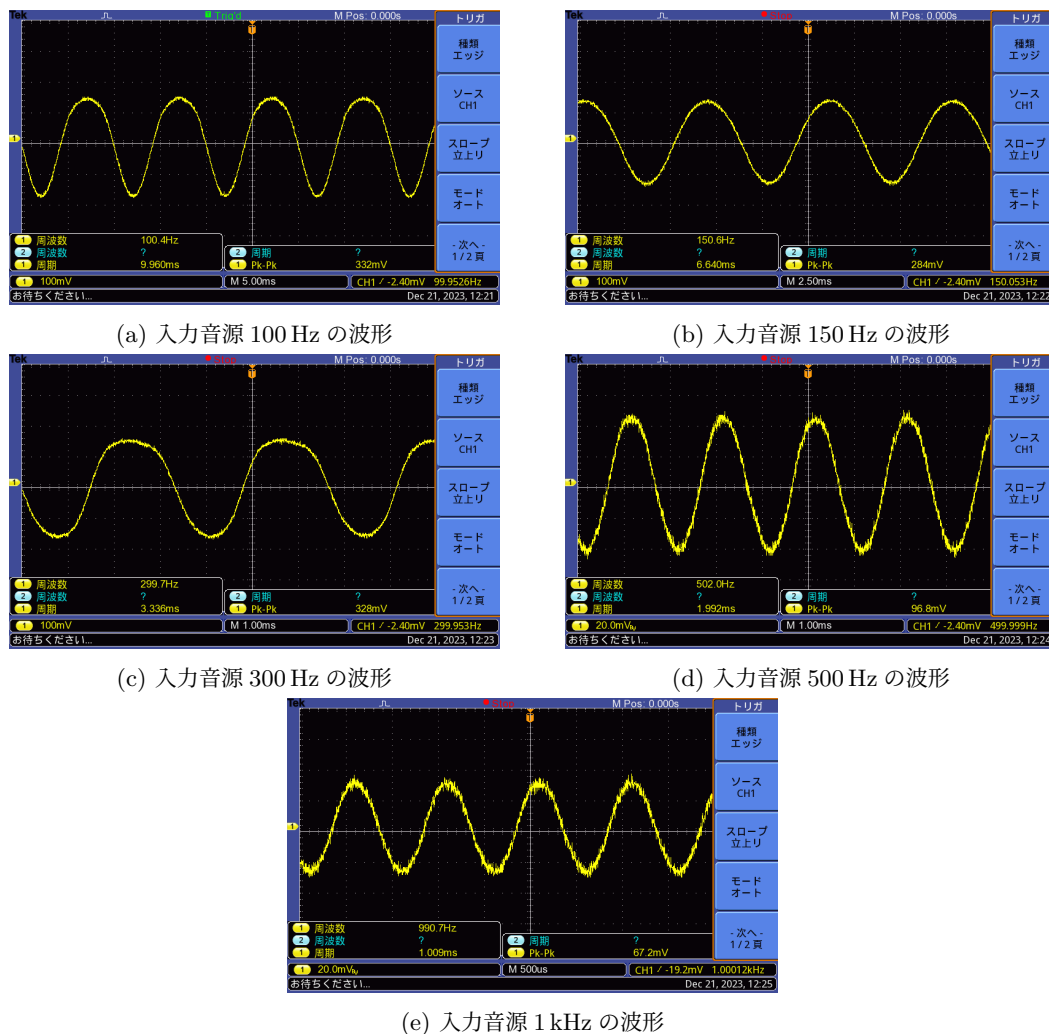


図 11:  $R_G = 1\text{ k}\Omega$ の出力波形

図 9～11 から各ゲイン抵抗, 各音源周波数の出力波形のピーク電圧を表 4 に示す。

表 4: 音源周波数変化による周波数-振幅特性表

周波数 [Hz]	ゲイン抵抗 $R_G$ [ $\Omega$ ]		
	100	500	1000
100	456	254	332
150	516	218	284
300	664	59.2	328
500	428	111	96.8
1000	82.4	86.4	67.2

表 4 をグラフ化したものを図 4 に示す.

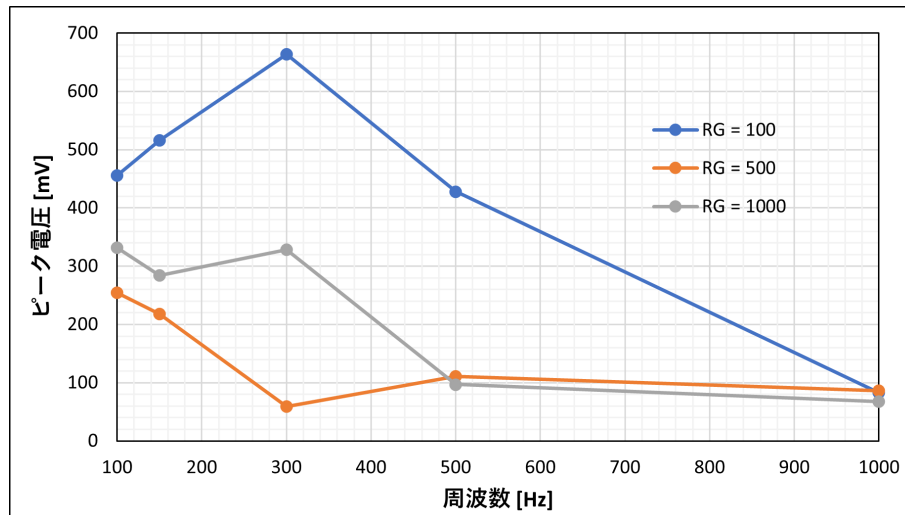
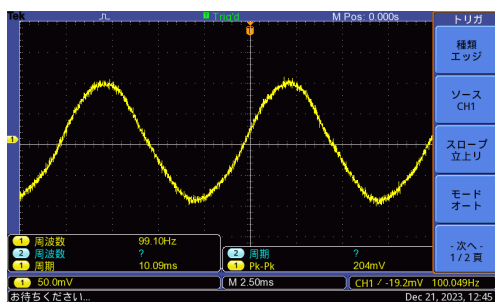


図 12: 音源周波数変化による周波数-振幅特性図

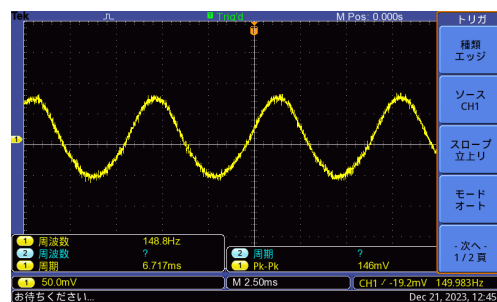
図 12 より, ゲイン抵抗が小さいほどピーク電圧は大きくなり, ゲイン抵抗が  $100\ \Omega$  と  $1\text{k}\Omega$  の場合は音源周波数が  $300\text{Hz}$  付近でピーク電圧が最大になり, 反対に,  $500\ \Omega$  の場合はピーク電圧が最小になっていることがわかる.

#### 4.3.2 材質の違いによる出力信号測定

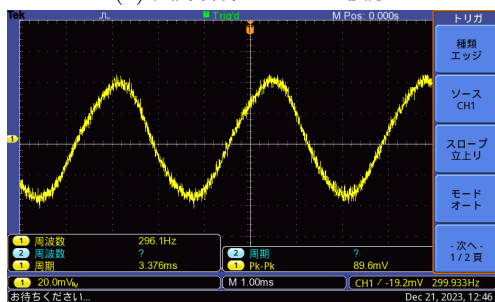
2 重プラスチック BOX 内のスピーカーによる音源周波数ごとの出力波形を図 13 に示す.



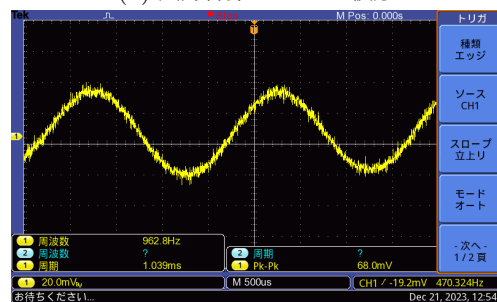
(a) 入力音源 100 Hz の波形



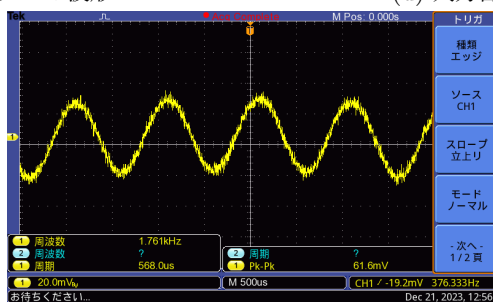
(b) 入力音源 150 Hz の波形



(c) 入力音源 300 Hz の波形



(d) 入力音源 500 Hz の波形



(e) 入力音源 1 kHz の波形

図 13: 2 重プラスチック BOX での  $R_G = 100\Omega$  の出力波形

各音源周波数におけるピーク電圧を表 5 に示す。

表 5: 2 重プラスチック BOX での周波数-振幅特性表

周波数 [Hz]	振幅 [mV]
100	204
150	146
300	89.6
500	68.0
1000	61.6

表 5 をグラフ化したものを図 14 に示す.

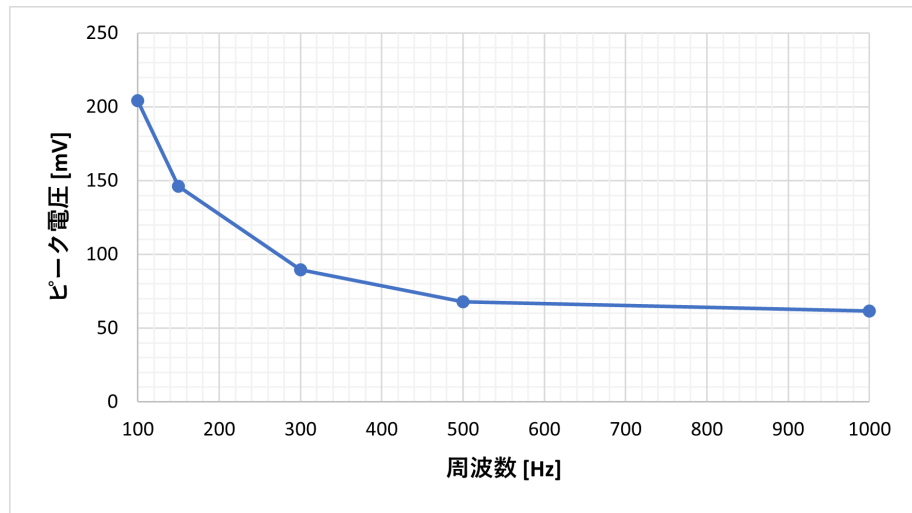
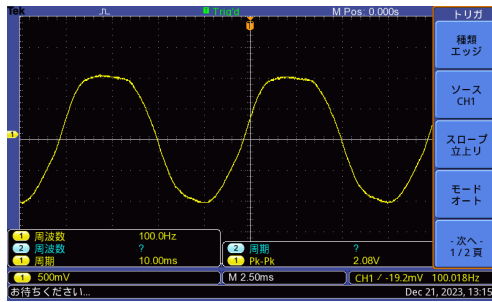


図 14: 2 重プラスチック BOX での周波数-振幅特性図

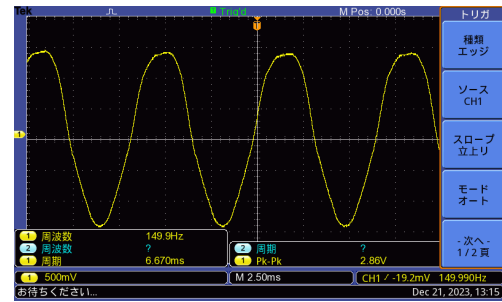
図 14 より, 周波数を大きくするほどピーク電圧が指数関数的に減衰していることがわかる.

#### 4.3.3 音源から検出器までの距離を変化させた場合の出力信号測定

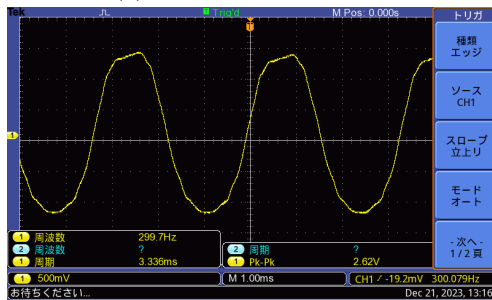
音源-検出器間の距離を 20 cm に設定した際の各音源周波数による出力波形を図 15 に示す。



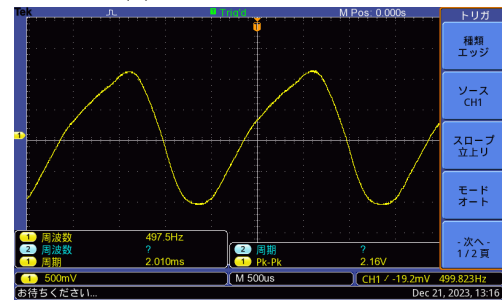
(a) 入力音源 100 Hz の波形



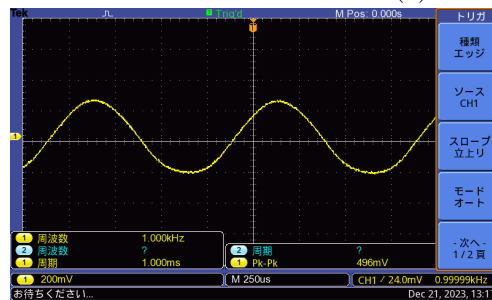
(b) 入力音源 150 Hz の波形



(c) 入力音源 300 Hz の波形



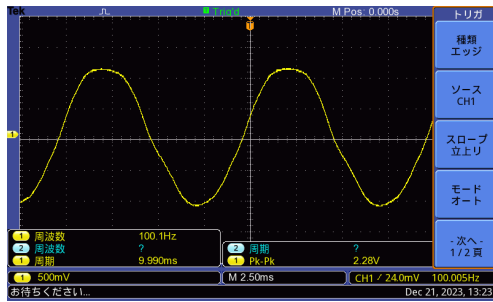
(d) 入力音源 500 Hz の波形



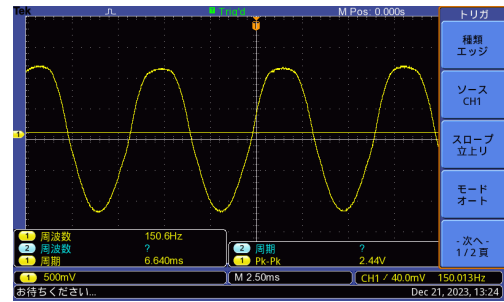
(e) 入力音源 1 kHz の波形

図 15: 音源-検出器間の距離が 20 cm の出力波形

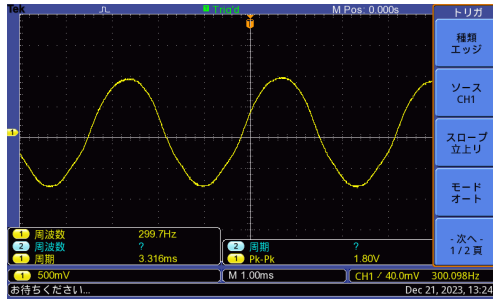
音源-検出器間の距離を 40 cm に設定した際の各音源周波数による出力波形を図 16 に示す。



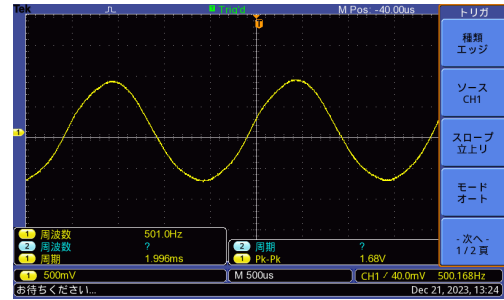
(a) 入力音源 100 Hz の波形



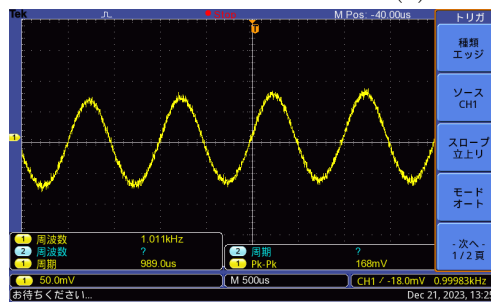
(b) 入力音源 150 Hz の波形



(c) 入力音源 300 Hz の波形



(d) 入力音源 500 Hz の波形



(e) 入力音源 1 kHz の波形

図 16: 音源-検出器間の距離が 40 cm の出力波形



音源-検出器間の距離を 60 cm に設定した際の各音源周波数による出力波形を図 17 に示す。

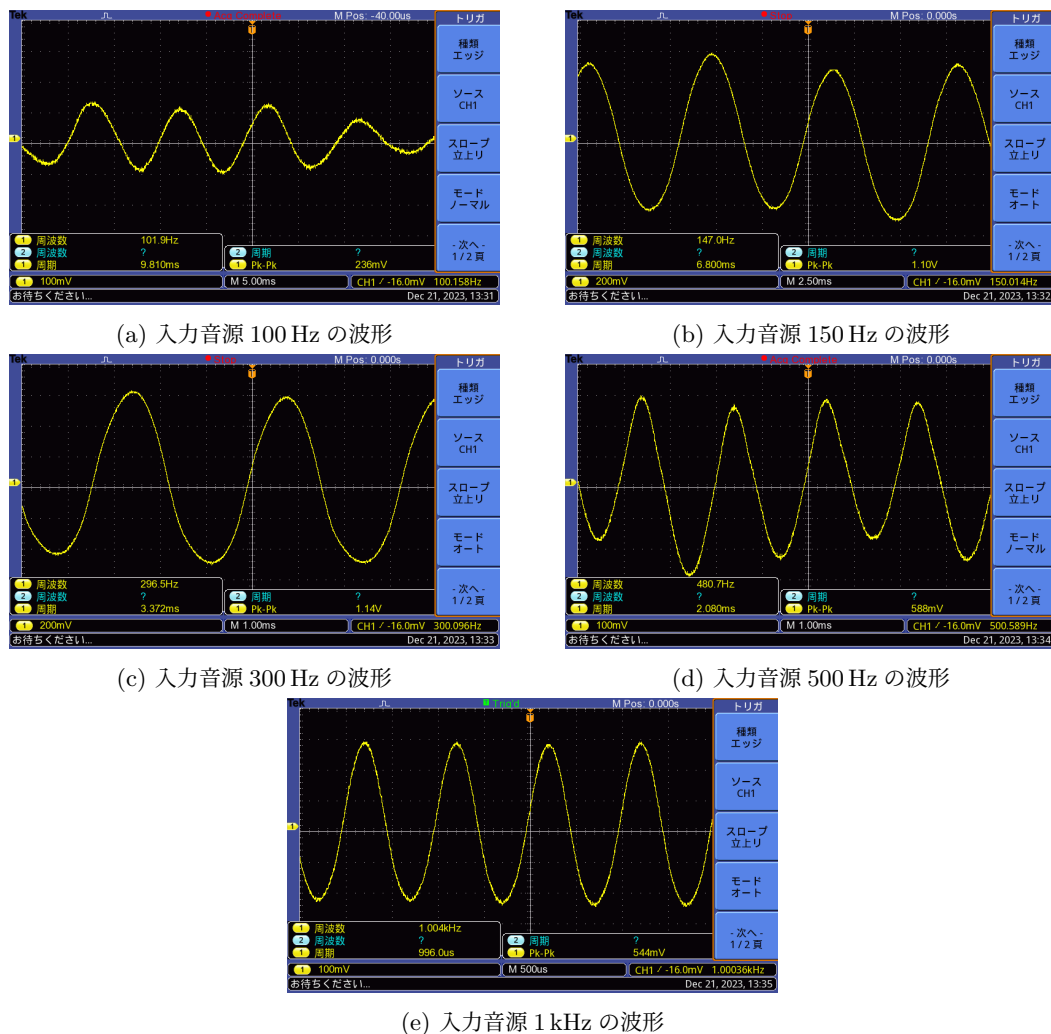


図 17: 音源-検出器間の距離が 60 cm の出力波形

各距離における音源周波数によるピーク電圧を表 6 に示す。

表 6: 音源と検出器までの距離による周波数-振幅特性表

周波数 [Hz]	振幅 [V]		
	ゲイン抵抗 $R_G$ [ $\Omega$ ]		
	20	40	60
100	2.08	2.28	0.236
150	2.86	2.44	1.1
300	2.62	1.80	1.14
500	2.16	1.68	0.588
1000	0.496	0.168	0.544

表 6 をグラフ化したものを図 18 に示す。

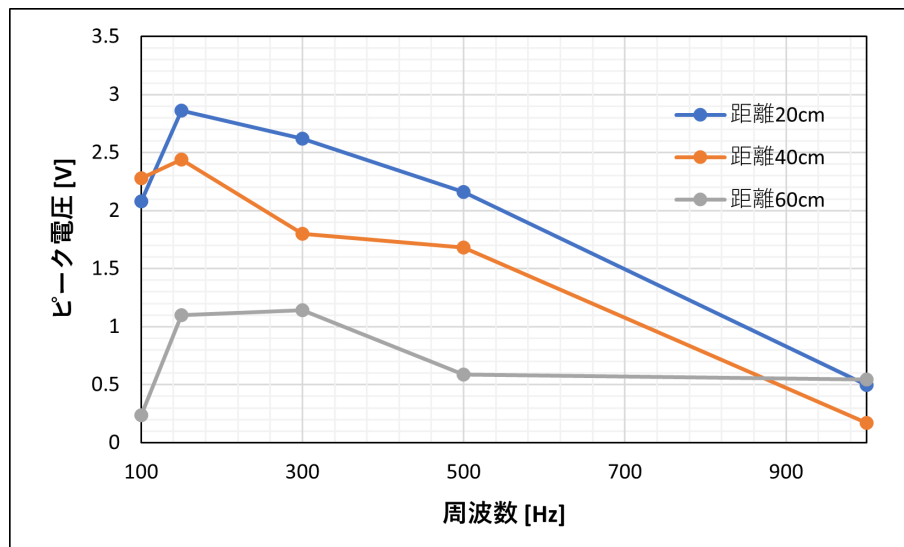


図 18: 音源-検出器間距離による周波数-振幅特性図

図 18 より、音源と検出器の距離が遠くなるにつれ、ほとんどの周波数においてピーク電圧が小さくなっていることがわかる。ただし、距離 60cm の周波数 1 kHz の測定の際、PC 側の音量レベルを上昇させ、振幅が距離と周波数以外の要因で変化してしまったため、正しいデータとは言えない。

## 5 考察

- 2 分割フォトダイオードからの出力信号波形を明瞭に得るには、受光部へのレーザビームの照射位置や面積をどのように調整する必要があるか説明する。  
光強度が外光よりも十分強くなるように受光部に対して、近距離・小面積で照射する方がレーザ光が散乱せず十分な強度を得ることができる。
- ゲイン抵抗の設定値と出力波形の振幅はどのような関係があるか説明する。  
同じ周波数において、ゲイン抵抗を小さくするほど出力信号の振幅は大きくなっている。これは、オペアンプを用いた差分増幅回路において、ゲイン抵抗が小さいほど増幅率(ゲイン)が大きくなるため、上述の関係があることがわかる。
- 音源が入る BOX 用の反射材としてミラー板と、プラスチック容器の 2 種類を比較した。これらの各反射材の厚さを調べ、物理的形狀の違いが出力波形にどのように影響しているか説明する。  
ミラー板の厚さは  $575 \mu\text{m}$ 、プラスチック容器の厚さ  $2014 \mu\text{m}$  であった。実験 1 と実験 2 のゲイン抵抗  $100 \Omega$  の場合の出力値を比較すると、ミラー板の方は  $100 \sim 300 \text{ Hz}$  までは周波数に比例して振幅値が上昇していることがわかる。次に、プラスチック容器の場合は周波数が増えるにつれ、指数関数的に減衰していることがわかる。また、周波数ごとの振幅を比較すると、測定した全ての周波数においてミラー板の方がプラスチック容器よりも振幅が大きくなっていることが読み取れる。したがって、反射材の厚さが厚くなるにつれ、振幅が減衰するように影響しているとわかる。
- 音源の振動測定において、音源から 2 分割フォトダイオードの受光部までの距離がどのように影響するか説明する。  
図 18 より、音源から受光部の距離が遠いほど振幅(ピーク電圧)が減少していることがわかる。これは単純に距離が伸びることに反射材から反射したレーザ光が減衰や拡散をすることで影響を受けている。また、図 15,16,17 を比較すると距離が伸びるほど外乱成分が増え、波形に切れ目のようなノイズが増えていると考えられる。
- 音源の周波数の設定値によっては出力波形に入力信号と異なる周波数が重畳したり、ひずみやノイズが生じたりする場合があるが、これらの現象にはどのような要因が影響していると考えられるか。  
出力波形の歪みについて、波形全体が  $60 \text{ Hz}$  程度で振動していた。これは、測定場所の照明が外乱として入力信号に加えられていると考えられる。特に、周波数が高くなると出力波形の線が太くなった(ノイズ

が発生した) ため, 同じ外乱成分でも周波数が高くなるにつれ, 振幅が低下して S/N 比が低くなってしまい, 外乱成分が出力波形に顕著に現れてしまうためだと考えられる。

## 参考文献

- [1] TDK「身の回りにある圧電効果」閲覧日 2023/12/26  
<https://www.tdk.com/ja/tech-mag/knowledge/089>